

目 录

第二版序
第一版序
第二版编辑说明

第1篇 电工基础

常用符号表

第1章 电和磁的基本量和基本定律

| | |
|-----------------------------|------|
| 1 电和磁的基本物理量 | 1-5 |
| 1.1 电的基本物理量 | 1-5 |
| 1.2 磁的基本物理量 | 1-5 |
| 2 电路和电路元件的性质 | 1-7 |
| 2.1 电路和电路模型 | 1-7 |
| 2.2 无源元件 | 1-8 |
| 2.3 有源元件 | 1-14 |
| 3 电和磁的基本定律 | 1-16 |
| 3.1 安培(Ampere)定律——电磁力 | 1-16 |
| 3.2 电磁感应定律 | 1-16 |
| 3.3 全电流定律 | 1-17 |
| 3.4 焦耳(Joule)定律 | 1-18 |
| 3.5 欧姆(Ohm)定律 | 1-18 |
| 3.6 基尔霍夫(Kirchhoff)定律 | 1-18 |
| 3.7 特勒根(Tellegen)定理 | 1-19 |

第2章 直流电路分析的基本方法

| | |
|---------------------------|------|
| 1 支路电流法 | 1-20 |
| 2 回路电流法 | 1-20 |
| 3 节点电位法 | 1-21 |
| 4 线性电路的性质 | 1-22 |
| 4.1 齐次性 | 1-22 |
| 4.2 叠加性——叠加定理 | 1-22 |
| 5 等效电源定理 | 1-23 |
| 5.1 戴维南(Thevenin)定理 | 1-23 |
| 5.2 诺顿(Norton)定理 | 1-24 |
| 6 负载获得最大功率的条件 | 1-24 |

| | |
|-----------------------------|------|
| 7 星形网络和三角形网络的等效 互换 | 1-25 |
| 8 含受控源电路的分析 | 1-25 |
| 9 非线性电阻电路 | 1-26 |
| 9.1 非线性电阻的伏安特性 | 1-26 |
| 9.2 非线性电阻电路的计算方法 | 1-26 |

第3章 正弦电路稳态分析

| | |
|---------------------------|------|
| 1 正弦交流电 | 1-28 |
| 1.1 周期、频率和角频率 | 1-28 |
| 1.2 相位(相角)和相位差(相角差) | 1-28 |
| 1.3 有效值 | 1-28 |
| 1.4 平均值 | 1-29 |
| 2 正弦量的表示法 | 1-29 |
| 2.1 旋转矢量表示法 | 1-29 |
| 2.2 相量法 | 1-29 |
| 3 单一电路元件的交流电路 | 1-30 |
| 4 RLC 串联和并联的交流电路 | 1-31 |
| 5 功率和功率因数 | 1-32 |
| 6 网络理论在交流电路中的应用 | 1-33 |
| 7 双口网络 | 1-35 |
| 7.1 双口网络的参数方程 | 1-35 |
| 7.2 双口网络的等效电路 | 1-36 |
| 7.3 双口网络的串联、并联和级联 | 1-37 |
| 8 三相正弦电路 | 1-39 |
| 8.1 三相电源的联接 | 1-39 |
| 8.2 三相负载的联接 | 1-39 |

第4章 线性电路的时域分析

| | |
|--------------|------|
| 1 基本概念 | 1-42 |
|--------------|------|



| | |
|-----------------------------------|------|
| 1·1 稳态和暂态 | 1-42 |
| 1·2 阶跃信号和冲激信号 | 1-42 |
| 2 换路定律及电路初始值的确定 | 1-43 |
| 2·1 换路定律 | 1-43 |
| 2·2 电路中电压和电流初始值的确定 | 1-43 |
| 3 线性电路时域分析方法 | 1-44 |
| 3·1 经典法 | 1-44 |
| 3·2 一阶线性电路时域分析的三要素法 | 1-44 |
| 4 一阶 RC 电路在阶跃信号激励下的 响应 | 1-45 |
| 4·1 RC 电路的零状态响应 | 1-45 |
| 4·2 RC 电路的零输入响应 | 1-45 |
| 4·3 RC 电路的全响应 | 1-46 |
| 5 一阶 RL 电路在阶跃信号激励下的 响应 | 1-47 |
| 5·1 RL 电路的零状态响应 | 1-47 |
| 5·2 RL 电路的零输入响应 | 1-48 |
| 5·3 RL 电路的全响应 | 1-48 |
| 6 RC 电路和 RL 电路的冲激响应 | 1-48 |
| 6·1 RC 电路的冲激响应 | 1-48 |
| 6·2 RL 电路的冲激响应 | 1-50 |
| 7 RC 电路的正弦响应 | 1-50 |
| 8 RC 电路的周期性矩形脉冲信号 响应 | 1-51 |
| 8·1 RC 微分电路 | 1-51 |
| 8·2 RC 积分电路——卷积积分的应用 | 1-51 |
| 9 二阶 RLC 电路的零输入响应——振 荡放电 | 1-52 |

第 5 章 线性电路的频域分析

| | |
|----------------------------------------|------|
| 1 非正弦周期信号的傅里叶级数 | 1-54 |
| 2 非正弦周期信号的频谱 | 1-57 |
| 3 非正弦周期量的有效值、平均值及 表示波形特征的几个系数 | 1-59 |
| 4 非正弦周期电路中的功率 | 1-59 |
| 5 等效正弦波 | 1-60 |
| 6 非正弦周期信号激励下线性电路的 稳态分析 | 1-61 |
| 6·1 计算步骤 | 1-61 |
| 6·2 计算实例 | 1-61 |
| 7 电路的频率特性 | 1-62 |

| | |
|------------------------------------|------|
| 7·1 频域中网络函数的定义 | 1-62 |
| 7·2 频域中网络函数的类型 | 1-62 |
| 8 RLC 电路中的谐振 | 1-62 |
| 8·1 正弦信号激励下 RLC 串联电路中的 谐振 | 1-62 |
| 8·2 正弦信号激励下 RLC 并联电路中的 谐振 | 1-64 |
| 8·3 非正弦周期信号激励下电路的谐振 | 1-64 |
| 9 线性电路的滤波特性 | 1-65 |
| 9·1 理想滤波电路的频率特性 | 1-65 |
| 9·2 LC 滤波电路 | 1-67 |

第 6 章 线性电路的复频域分析

| | |
|----------------------------------|------|
| 1 拉普拉斯变换 | 1-69 |
| 1·1 拉普拉斯变换定义 | 1-69 |
| 1·2 拉普拉斯反变换 | 1-70 |
| 1·3 拉普拉斯变换的基本性质 | 1-72 |
| 2 电路基本定律的复频域形式 | 1-72 |
| 3 元件和 RLC 电路的运算形式 | 1-72 |
| 4 线性电路暂态过程的复频域分析 | 1-74 |
| 4·1 分析步骤 | 1-74 |
| 4·2 计算实例 | 1-74 |
| 5 网络函数 | 1-74 |
| 5·1 网络函数的定义 | 1-75 |
| 5·2 网络函数的类型 | 1-75 |
| 5·3 网络函数与单位冲激响应的关系 | 1-75 |
| 5·4 网络函数与任意波形激励下的零状态 响应 | 1-75 |
| 5·5 网络函数的零点与极点 | 1-76 |
| 6 网络函数的频率特性 | 1-79 |
| 6·1 网络函数的图解表示 | 1-79 |
| 6·2 一阶网络函数的频率特性 | 1-79 |
| 6·3 二阶谐振网络的频率特性 | 1-81 |

第 7 章 磁 路

| | |
|---------------------|------|
| 1 铁磁材料的基本磁特性 | 1-82 |
| 1·1 磁滞回线 | 1-82 |
| 1·2 基本磁化曲线 | 1-82 |
| 1·3 磁滞损耗与涡流损耗 | 1-82 |
| 2 常用的铁磁材料 | 1-84 |
| 3 磁路基本定律 | 1-85 |
| 3·1 磁路 | 1-85 |



| | | | |
|--------------------|------|-----------------------|------|
| 3.2 磁通连续性原理 | 1-85 | 6 交流磁路的计算 | 1-91 |
| 3.3 安培环路定律 | 1-86 | 6.1 交流磁路的特点 | 1-91 |
| 4 气隙磁导的计算 | 1-87 | 6.2 交流铁心线圈的电路模型 | 1-91 |
| 5 直流磁路的计算 | 1-88 | 6.3 交流磁路计算的方法 | 1-92 |
| 5.1 无分支磁路的计算 | 1-88 | 7 永久磁铁磁路的计算 | 1-94 |
| 5.2 有分支磁路的计算 | 1-90 | 参考文献 | 1-95 |

第2篇 电工设备

常用符号表

第1章 变 压 器

| | |
|-------------------------|------|
| 1 概述 | 2-5 |
| 1.1 变压器的用途和分类 | 2-5 |
| 1.2 变压器的主要结构部件 | 2-6 |
| 2 变压器的工作原理 | 2-7 |
| 2.1 变压器的空载运行 | 2-7 |
| 2.2 变压器的负载运行 | 2-8 |
| 3 变压器的运行特性 | 2-11 |
| 3.1 电压调整率(电压变化率) | 2-11 |
| 3.2 损耗和效率 | 2-11 |
| 3.3 电力变压器的经济运行 | 2-12 |
| 4 三相变压器的连接 | 2-12 |
| 5 变压器并联运行 | 2-13 |
| 5.1 理想并联运行的条件 | 2-13 |
| 5.2 变压器并联运行时的负载分配 | 2-14 |
| 6 其他类型的变压器 | 2-14 |
| 6.1 互感器 | 2-14 |
| 6.2 自耦变压器 | 2-15 |
| 6.3 稳压变压器 | 2-15 |
| 7 变压器的常见故障和处理方法 | 2-17 |
| 8 变压器的型号和额定数据 | 2-17 |
| 8.1 常用的变压器型号含义 | 2-17 |
| 8.2 铭牌上标出的额定数据 | 2-17 |

第2章 三相异步电动机

| | |
|--------------------------|------|
| 1 概述 | 2-18 |
| 1.1 三相异步电动机的用途和分类 | 2-18 |
| 1.2 三相异步电动机的主要结构部件 | 2-18 |
| 2 三相异步电动机的基本工作原理 | 2-18 |
| 3 三相异步电动机的等效电路和相 | |

| | |
|----------------------------|------|
| 量图 | 2-19 |
| 4 三相异步电动机的运行性能 | 2-20 |
| 4.1 三相异步电动机的损耗和效率 | 2-20 |
| 4.2 三相异步电动机的电磁转矩 | 2-21 |
| 4.3 三相异步电动机的机械特性 | 2-21 |
| 4.4 三相异步电动机的工作特性 | 2-23 |
| 5 三相异步电动机的节能 | 2-23 |
| 6 绕线转子三相异步电动机 | 2-24 |
| 6.1 绕线转子三相异步电动机的结构 | 2-24 |
| 6.2 绕线转子三相异步电动机的工作原理 | 2-24 |
| 7 电磁调速异步电动机 | 2-24 |
| 8 三相异步电动机常见故障及处理方法 | 2-25 |
| 9 三相异步电动机的型号和额定数据 | 2-26 |
| 9.1 常用的三相异步电动机的型号含义 | 2-26 |
| 9.2 铭牌上标出的额定数据 | 2-26 |

第3章 三相同步电机

| | |
|---------------------------|------|
| 1 概述 | 2-27 |
| 2 三相同步电机的基本结构 | 2-28 |
| 3 三相同步发电机的工作原理和运行特性 | 2-28 |
| 3.1 三相同步发电机的工作原理 | 2-28 |
| 3.2 三相同步发电机的运行特性 | 2-29 |
| 4 三相同步发电机的并联运行 | 2-29 |
| 4.1 三相同步发电机的并联运行条件 | 2-29 |
| 4.2 三相同步发电机的并联运行方法 | 2-30 |
| 5 三相同步电动机的工作原理和机械特性 | 2-30 |
| 5.1 三相同步电动机的工作原理 | 2-30 |



| | |
|------------------------|------|
| 5.2 三相同步电动机的机械特性 | 2-31 |
| 6 三相同步电动机的过励运行 | 2-31 |
| 7 三相同步电动机的起动 | 2-32 |
| 8 三相同步电机的常见故障和处理 | 2-32 |
| 9 三相同步电机的型号和额定数据 | 2-34 |

第4章 直流电机

| | |
|------------------------|------|
| 1 概述 | 2-35 |
| 2 直流电机的基本结构和分类 | 2-35 |
| 2.1 直流电机的基本结构 | 2-35 |
| 2.2 直流电机的分类 | 2-36 |
| 3 直流电机的工作原理 | 2-36 |
| 3.1 直流电动机的工作原理 | 2-36 |
| 3.2 直流发电机的工作原理 | 2-37 |
| 4 直流电机的电动势和电磁转矩 | 2-38 |
| 4.1 直流电机的电动势 | 2-38 |
| 4.2 直流电机的电磁转矩 | 2-38 |
| 5 直流发电机的空载特性和外特性 | 2-38 |
| 6 直流电动机的机械特性 | 2-39 |
| 7 直流电动机的使用 | 2-39 |
| 7.1 直流电动机的起动 | 2-39 |
| 7.2 直流电动机的调速 | 2-39 |
| 7.3 直流电动机的反转 | 2-41 |
| 7.4 直流电动机的电磁制动 | 2-41 |
| 8 直流电机的常见故障和处理 | 2-42 |
| 8.1 电枢绕组短路或断路和接地 | 2-42 |
| 8.2 直流电机的常见故障和处理 | 2-42 |
| 9 直流电机的额定数据和型号 | 2-44 |

第5章 驱动微电机

| | |
|------------------------|------|
| 1 概述 | 2-45 |
| 2 三相驱动微型异步电动机 | 2-46 |
| 3 单相电容式电动机 | 2-46 |
| 3.1 单相异步电动机的工作原理 | 2-46 |
| 3.2 单相异步电动机的转矩特性 | 2-47 |
| 3.3 单相电容式异步电动机 | 2-47 |
| 4 单相罩极式异步电动机 | 2-48 |
| 5 微型直流电动机 | 2-48 |
| 6 无刷直流电动机 | 2-48 |
| 7 通用微型电动机 | 2-52 |
| 8 驱动微电机的型号和用途 | 2-52 |

第6章 控制微电机

| | |
|----------------------------------------|------|
| 1 概述 | 2-53 |
| 2 伺服电动机 | 2-54 |
| 2.1 直流伺服电动机 | 2-54 |
| 2.2 交流伺服电动机 | 2-55 |
| 3 测速发电机 | 2-57 |
| 3.1 测速发电机的类型和用途 | 2-57 |
| 3.2 测速发电机的主要特点、额定数据和 使用注意事项 | 2-58 |
| 4 微型同步电动机 | 2-59 |
| 4.1 磁滞式同步电动机的基本结构和工作 原理 | 2-59 |
| 4.2 微型同步电动机的种类和用途 | 2-60 |
| 4.3 微型同步电动机的主要特点、额定数 据和使用注意事项 | 2-60 |
| 5 步进电动机 | 2-61 |
| 5.1 步进电动机的结构和工作原理 | 2-61 |
| 5.2 步进电动机的种类和用途 | 2-62 |
| 5.3 步进电动机的主要特点和使用注意 事项 | 2-63 |
| 6 自整角机 | 2-63 |
| 6.1 自整角机的结构、工作原理和应用 举例 | 2-63 |
| 6.2 自整角机的种类、型号、性能特点和 适用范围 | 2-64 |
| 6.3 自整角机的主要特点、额定数据和使 用注意事项 | 2-64 |
| 7 旋转变压器 | 2-66 |
| 7.1 旋转变压器的基本结构 | 2-66 |
| 7.2 旋转变压器的种类、特点和适用 范围 | 2-67 |
| 7.3 旋转变压器的主要参数和使用注意 事项 | 2-67 |

第7章 常用电磁铁器件

| | |
|------------------------------|------|
| 1 概述 | 2-68 |
| 2 直流电磁铁和交流电磁铁 | 2-69 |
| 2.1 直流电磁铁 | 2-69 |
| 2.2 交流电磁铁 | 2-70 |
| 3 电磁铁吸力的近似估算及其吸力 特性 | 2-70 |



| | | | |
|-----------------------------|------|------------------------------------|-------|
| 4 牵引电磁铁 | 2-72 | 7 电阻焊机 | 2-95 |
| 4.1 牵引电磁铁的主要结构 | 2-72 | 7.1 电阻焊机结构形式 | 2-95 |
| 4.2 牵引电磁铁的型号和特性 | 2-73 | 7.2 电阻焊电源 | 2-96 |
| 5 阀用电磁铁 | 2-73 | 7.3 电阻焊控制系统 | 2-97 |
| 5.1 阀用交流电磁铁的结构和性能 | 2-73 | | |
| 5.2 阀用直流电磁铁的结构和性能 | 2-73 | | |
| 5.3 电磁阀 | 2-74 | | |
| 6 制动电磁铁 | 2-74 | | |
| 6.1 制动电磁铁的工作原理 | 2-74 | | |
| 6.2 制动电磁铁的型号和性能 | 2-75 | | |
| 7 电磁离合器 | 2-75 | | |
| 8 电磁吸盘 | 2-76 | | |
| | | | |
| 第 8 章 工业用电炉和电焊机 | | | |
| 1 概述 | 2-77 | 1 概述 | 2-99 |
| 1.1 电炉 | 2-77 | 2 常用低压手动电器和熔断器 | 2-99 |
| 1.2 电焊机 | 2-77 | 2.1 主令电器 | 2-99 |
| 2 电阻炉 | 2-79 | 2.2 刀开关 | 2-99 |
| 2.1 电阻炉的分类和用途 | 2-79 | 2.3 转换开关 | 2-102 |
| 2.2 电阻炉的主要技术经济指标和发展趋势 | 2-80 | 2.4 熔断器与熔体 | 2-103 |
| 2.3 盐浴炉 | 2-80 | 3 常用低压自动电器 | 2-103 |
| 2.4 电阻炉的温度控制系统 | 2-81 | 3.1 自动开关 | 2-103 |
| 3 感应炉 | 2-81 | 3.2 接触器 | 2-106 |
| 3.1 感应炉的分类和用途 | 2-81 | 3.3 起动器 | 2-107 |
| 3.2 感应炉的主要技术经济指标和发展趋势 | 2-82 | 3.4 行程开关 | 2-114 |
| 3.3 感应炉的电源设备 | 2-82 | 4 控制继电器 | 2-117 |
| 3.4 感应炉的控制系统 | 2-82 | 4.1 继电器的种类和用途 | 2-117 |
| 4 电弧炉 | 2-83 | 4.2 电磁式继电器 | 2-117 |
| 4.1 电弧炉的分类和用途 | 2-83 | 4.3 时间继电器 | 2-118 |
| 4.2 电弧炉的主要技术经济指标和发展趋势 | 2-84 | 4.4 热继电器 | 2-120 |
| 4.3 电弧炉的电气设备 | 2-85 | 4.5 速度继电器 | 2-120 |
| 4.4 炼钢电弧炉的控制系统 | 2-85 | 4.6 液压继电器 | 2-121 |
| 5 其他工业用电炉 | 2-86 | 5 低压漏电保护器 | 2-122 |
| 6 电弧焊机 | 2-87 | 5.1 电压型漏电保护器 | 2-123 |
| 6.1 弧焊电源的特点和对它的一般要求 | 2-88 | 5.2 电流型漏电保护器 | 2-123 |
| 6.2 弧焊电源的分类和工作原理 | 2-89 | 5.3 漏电保护器的选用 | 2-123 |
| 6.3 电弧焊的控制系统 | 2-92 | 6 电压调整器 | 2-124 |
| | | 6.1 电压调整器的工作原理 | 2-124 |
| | | 6.2 晶闸管式电压调整器 | 2-124 |
| | | 7 电器的常见故障和处理 | 2-126 |
| | | 7.1 接触器、磁力起动器和电磁式继电器的常见故障和修理 | 2-126 |
| | | 7.2 半导体继电器的常见故障和处理 | 2-127 |
| | | 7.3 热继电器的常见故障及处理 | 2-128 |
| | | 7.4 自耦变压器起动器的常见故障和处理 | 2-128 |
| | | 7.5 漏电保护器的常见故障和处理 | 2-129 |
| | | 参考文献 | 2-130 |



第3篇 工业电子技术

常用符号表

常用缩写词表

第1章 常用电子器件

| | | | |
|---------------------------------------|------|---------------------------|------|
| 1 半导体二极管 | 3-5 | 6.5 逆导晶闸管 | 3-22 |
| 1.1 PN结 | 3-5 | 6.6 静电感应晶闸管(SITH) | 3-22 |
| 1.2 小信号二极管 | 3-5 | 6.7 MOS控制晶闸管(MCT) | 3-23 |
| 1.3 整流二极管 | 3-6 | 6.8 硅控制开关 | 3-23 |
| 1.4 开关二极管 | 3-7 | 6.9 晶闸管型号的命名法 | 3-24 |
| 1.5 稳压二极管 | 3-7 | 7 半导体光电器件 | 3-24 |
| 1.6 变容二极管 | 3-7 | 7.1 发光二极管 | 3-24 |
| 1.7 隧道二极管 | 3-7 | 7.2 光敏电阻 | 3-24 |
| 1.8 肖特基二极管 | 3-8 | 7.3 光电二极管 | 3-25 |
| 1.9 半导体分立器件型号命名法 | 3-8 | 7.4 光电三极管 | 3-25 |
| 2 双极型晶体管 | 3-8 | 7.5 光控晶闸管 | 3-25 |
| 2.1 双极型晶体管的结构和电流放大 作用 | 3-8 | 7.6 光耦合器 | 3-25 |
| 2.2 双极型晶体管的特性曲线 | 3-9 | 8 集成电路概述 | 3-26 |
| 2.3 双极型晶体管的主要参数 | 3-10 | 8.1 集成电路的分类 | 3-26 |
| 2.4 双极型晶体管的等效电路 | 3-10 | 8.2 半导体集成电路型号命名法 | 3-27 |
| 3 场效应晶体管 | 3-12 | 8.3 集成电路的使用 | 3-27 |
| 3.1 结型场效应晶体管 | 3-12 | 9 电子管 | 3-28 |
| 3.2 绝缘栅场效应晶体管 | 3-12 | 10 显示器件 | 3-30 |
| 3.3 场效应晶体管的主要参数 | 3-13 | 10.1 显示器的分类 | 3-30 |
| 4 功率晶体管 | 3-15 | 10.2 示波管 | 3-30 |
| 4.1 双极型功率晶体管 | 3-15 | 10.3 显象管 | 3-31 |
| 4.2 功率场效应晶体管 | 3-16 | 10.4 辉光数码管 | 3-31 |
| 4.3 静电感应晶体管(SIT) | 3-16 | 10.5 液晶显示 | 3-31 |
| 4.4 绝缘门极晶体管(IGBT) | 3-17 | 10.6 半导体显示器 | 3-32 |
| 5 单结晶体管 and 触发二极管 | 3-17 | 10.7 荧光数码管 | 3-32 |
| 5.1 单结晶体管 | 3-17 | 10.8 等离子体显示板 | 3-33 |
| 5.2 互补单结晶体管、程控单结晶体管和等 价单结晶体管 | 3-18 | 10.9 激光显示器 | 3-33 |
| 5.3 触发二极管 | 3-18 | 第2章 分立元件基本放大电路 | |
| 6 晶闸管 | 3-19 | 1 放大电路的主要性能指标 | 3-33 |
| 6.1 普通晶闸管 | 3-19 | 2 双极型晶体管单管放大电路 | 3-34 |
| 6.2 双向晶闸管 | 3-21 | 2.1 共发射极放大电路 | 3-34 |
| 6.3 可关断晶闸管 | 3-21 | 2.2 共集电极放大电路(射极输出器) | 3-37 |
| 6.4 快速晶闸管 | 3-21 | 2.3 共基极放大电路 | 3-38 |
| | | 3 场效应晶体管单管放大电路 | 3-39 |
| | | 3.1 共源极放大电路 | 3-39 |
| | | 3.2 共漏极放大电路(源极输出器) | 3-40 |
| | | 4 电子管放大电路 | 3-40 |
| | | 5 差分放大电路 | 3-41 |



| | | | |
|-----------------------------------|------|--------------------------------|------|
| 5.1 典型的差分放大电路 | 3-41 | 4.3 集成电压比较器的应用 | 3-61 |
| 5.2 具有恒流源的差分放大电路 | 3-42 | 5 集成模拟乘法器 | 3-62 |
| 5.3 差分放大电路的几种接法 | 3-42 | 5.1 集成模拟乘法器的功能和类型 | 3-62 |
| 6 选频放大电路 | 3-43 | 5.2 集成模拟乘法器的主要参数 | 3-62 |
| 6.1 LC 选频放大电路 | 3-43 | 5.3 集成模拟乘法器的应用 | 3-63 |
| 6.2 RC 选频放大电路 | 3-44 | 6 集成模拟开关 | 3-65 |
| 7 功率放大电路 | 3-44 | 6.1 集成模拟开关的功能和类型 | 3-65 |
| 7.1 互补对称式功率放大电路 | 3-44 | 6.2 集成模拟开关的主要参数 | 3-66 |
| 7.2 桥式功率放大电路 | 3-46 | 6.3 集成模拟开关的应用 | 3-66 |
| 7.3 变压器耦合推挽功率放大电路 | 3-46 | 7 集成锁相环 | 3-68 |
| 8 放大电路中的反馈 | 3-46 | 7.1 集成锁相环的基本组成 | 3-68 |
| 8.1 反馈的基本概念 | 3-46 | 7.2 集成锁相环的主要参数 | 3-70 |
| 8.2 负反馈的四种类型 | 3-47 | 7.3 集成锁相环的应用 | 3-70 |
| 8.3 负反馈对放大电路性能的影响 | 3-48 | 8 开关电容网络 | 3-71 |
| 8.4 负反馈放大电路的稳定问题 | 3-48 | 8.1 开关电容的基本电路 | 3-71 |
| 9 多级放大电路 | 3-48 | 8.2 开关电容的应用电路 | 3-73 |
| 9.1 多级放大电路的级间耦合方式 | 3-48 | | |
| 9.2 多级放大电路的电路安排原则 | 3-48 | | |
| 9.3 多级放大电路自激的产生和消除 | 3-49 | | |
| | | 第 4 章 模拟信号的运算与处理 | |
| 第 3 章 模拟集成电路 | | 1 运算电路 | 3-75 |
| 1 通用型集成运算放大器 | 3-50 | 1.1 比例运算电路 | 3-75 |
| 1.1 集成运算放大器的基本组成 | 3-50 | 1.2 加法和减法运算电路 | 3-75 |
| 1.2 集成运算放大器的主要参数 | 3-52 | 1.3 积分和微分运算电路 | 3-77 |
| 1.3 集成运算放大器的传输特性和基本工 作方式 | 3-53 | 1.4 对数和反对数运算电路 | 3-78 |
| 1.4 集成运算放大器应用中的几个问题 | 3-54 | 2 精密放大电路 | 3-79 |
| 2 专用型集成运算放大器 | 3-55 | 2.1 概述 | 3-79 |
| 2.1 高阻型集成运算放大器 | 3-55 | 2.2 高性能通用测量放大电路 | 3-79 |
| 2.2 高速型集成运算放大器 | 3-55 | 2.3 干扰和噪声的抑制措施 | 3-80 |
| 2.3 高精度集成运算放大器 | 3-56 | 3 有源滤波电路 | 3-82 |
| 2.4 低功耗集成运算放大器 | 3-56 | 3.1 滤波电路的种类 | 3-82 |
| 2.5 高压型集成运算放大器 | 3-56 | 3.2 RC 有源滤波电路 | 3-82 |
| 2.6 宽带集成运算放大器 | 3-56 | 3.3 开关电容滤波器 | 3-87 |
| 2.7 其他类型集成运算放大器 | 3-56 | | |
| 3 集成功率放大器 | 3-57 | 第 5 章 门电路和组合逻辑电路 | |
| 3.1 集成功率放大器的基本组成 | 3-57 | 1 逻辑代数 | 3-88 |
| 3.2 集成功率放大器的主要参数 | 3-58 | 1.1 基本逻辑运算 | 3-88 |
| 3.3 集成功率放大器的使用方法 | 3-59 | 1.2 逻辑代数的基本公式 | 3-88 |
| 4 集成电压比较器 | 3-59 | 2 门电路按逻辑功能分类 | 3-89 |
| 4.1 集成电压比较器的功能和类型 | 3-59 | 2.1 常用门电路的逻辑功能 | 3-89 |
| 4.2 集成电压比较器的主要参数 | 3-60 | 2.2 门电路的逻辑功能和正负逻辑的 关系 | 3-90 |
| | | 3 双极型集成电路 | 3-91 |
| | | 3.1 晶体管-晶体管逻辑(TTL) | |



| | | | |
|---------------------------------------|-------|--------------------------------|-------|
| 门电路 | 3-91 | 2-1 矩形波发生器 | 3-122 |
| 3-2 高阈值逻辑(HTL)门电路 | 3-94 | 2-2 三角波和锯齿波发生器 | 3-123 |
| 3-3 发射极耦合逻辑(ECL)门电路 | 3-95 | 3 集成函数发生器 | 3-123 |
| 3-4 集成注入逻辑(I ² L)门电路 | 3-96 | 4 施密特触发器 | 3-124 |
| 4 MOS 集成门电路 | 3-96 | 4-1 用门电路组成的施密特触发器 | 3-124 |
| 4-1 PMOS 门电路 | 3-96 | 4-2 集成施密特触发器 | 3-125 |
| 4-2 NMOS 门电路 | 3-97 | 4-3 施密特触发器的应用 | 3-126 |
| 4-3 CMOS 门电路 | 3-97 | 5 单稳态触发器 | 3-126 |
| 5 编码器和译码器 | 3-99 | 5-1 用电压比较器组成的单稳态触发器 | 3-126 |
| 5-1 编码器 | 3-99 | 5-2 用门电路组成的单稳态触发器 | 3-127 |
| 5-2 译码器 | 3-101 | 5-3 用施密特触发器组成的单稳态触 发器 | 3-127 |
| 6 数据选择器和数据分配器 | 3-102 | 5-4 集成单稳态触发器 | 3-128 |
| 6-1 数据选择器 | 3-102 | 5-5 单稳态触发器的应用 | 3-128 |
| 6-2 数据分配器 | 3-102 | 6 多谐振荡器 | 3-128 |
| 7 运算器 | 3-103 | 6-1 用门电路组成的多谐振荡器 | 3-128 |
| 7-1 加法器 | 3-103 | 6-2 用施密特触发器组成的多谐振荡器 | 3-128 |
| 7-2 算术逻辑单元(ALU) | 3-103 | 6-3 石英晶体多谐振荡器 | 3-129 |
| 7-3 数值比较器 | 3-104 | 7 555 定时器 | 3-130 |
| 8 电平转换电路 | 3-105 | 7-1 555 定时器的电路结构和基本功能 | 3-130 |
| 第 6 章 触发器和时序逻辑电路 | | 7-2 555 定时器的应用 | 3-131 |
| 1 触发器 | 3-106 | 8 削波器和钳位器 | 3-132 |
| 1-1 基本 RS 触发器 | 3-106 | 8-1 削波器 | 3-132 |
| 1-2 时钟触发器 | 3-107 | 8-2 钳位器 | 3-134 |
| 2 寄存器和移位寄存器 | 3-111 | 第 8 章 调制与解调 | |
| 2-1 寄存器 | 3-111 | 1 连续波模拟调制与解调 | 3-134 |
| 2-2 移位寄存器 | 3-111 | 1-1 幅度调制与解调 | 3-134 |
| 2-3 MOS 动态移位寄存器 | 3-113 | 1-2 角度调制与解调 | 3-136 |
| 3 计数器 | 3-113 | 2 脉冲调制与解调 | 3-137 |
| 3-1 概述 | 3-113 | 2-1 脉冲幅度调制 | 3-137 |
| 3-2 异步计数器 | 3-114 | 2-2 脉冲宽度调制 | 3-137 |
| 3-3 同步计数器 | 3-116 | 2-3 脉冲位置调制 | 3-138 |
| 4 顺序脉冲发生器 | 3-117 | 2-4 脉冲编码调制 | 3-138 |
| 第 7 章 波形的产生与整形电路 | | 2-5 脉冲解调 | 3-139 |
| 1 正弦波振荡器 | 3-118 | 3 数字调制与解调 | 3-139 |
| 1-1 正弦波振荡器的自激振荡条件 | 3-119 | 3-1 二进制数字调制 | 3-139 |
| 1-2 RC 正弦波振荡器 | 3-119 | 3-2 二进制数字解调 | 3-141 |
| 1-3 LC 正弦波振荡器 | 3-120 | 第 9 章 数字量和模拟量的相互转换 | |
| 1-4 石英晶体正弦波振荡器 | 3-121 | 1 D/A 转换器 | 3-141 |
| 2 用电压比较器组成的非正弦波发 生器 | 3-122 | 1-1 D/A 转换器的类型和工作原理 | 3-141 |



| | | | |
|-----------------------------|-------|--------------------------|-------|
| 1.2 D/A 转换器的主要参数 | 3-143 | 2.1 单相桥式可控整流电路 | 3-166 |
| 2 A/D 转换器 | 3-143 | 2.2 三相桥式可控整流电路 | 3-170 |
| 2.1 A/D 转换器的类型和工作原理 | 3-143 | 2.3 负载对可控整流电路的影响 | 3-170 |
| 2.2 A/D 转换器的主要参数 | 3-145 | 2.4 有源逆变电路 | 3-173 |
| 3 采样-保持电路 | 3-146 | 2.5 晶闸管可逆整流电路 | 3-175 |
| 3.1 采样-保持电路的工作原理 | 3-146 | 2.6 各种整流电路的比较和参数选择 | 3-175 |
| 3.2 采样-保持电路的主要参数 | 3-146 | 3 晶闸管触发电路 | 3-177 |
| 4 数据采集系统的组成 | 3-146 | 3.1 单相触发电路 | 3-177 |
| 第 10 章 半导体整流电路和集成稳压器 | | | |
| 1 整流电路 | 3-147 | 3.2 三相触发电路 | 3-178 |
| 1.1 整流电路的基本类型 | 3-147 | 3.3 集成触发电路 | 3-179 |
| 1.2 整流电路的主要电量关系 | 3-147 | 4 晶闸管变频器 | 3-183 |
| 1.3 几种整流电路的特点和应用场合 | 3-151 | 4.1 单相逆变器 | 3-184 |
| 2 滤波电路 | 3-151 | 4.2 三相桥式并联逆变器 | 3-184 |
| 3 稳压电路 | 3-152 | 4.3 交-直-交变频器 | 3-185 |
| 3.1 稳压电路的主要性能指标 | 3-152 | 4.4 交-交变频器 | 3-186 |
| 3.2 稳压管稳压电路 | 3-153 | 5 变流器的应用 | 3-186 |
| 4 串联型集成稳压器 | 3-153 | 5.1 直流电动机调速用变流器 | 3-186 |
| 4.1 串联型集成稳压器的基本组成 | 3-153 | 5.2 高压直流输电中用的变流器 | 3-187 |
| 4.2 串联型集成稳压器的主要参数 | 3-153 | 5.3 中频感应加热用变流器 | 3-188 |
| 4.3 三端式集成稳压器 | 3-154 | 5.4 交流调速用变频器 | 3-190 |
| 4.4 多端式集成稳压器 | 3-158 | 6 交流调压器和直流调压器 | 3-193 |
| 5 集成基准电压源 | 3-160 | 6.1 单相交流调压器 | 3-193 |
| 6 开关型稳压电路 | 3-161 | 6.2 三相交流调压器 | 3-193 |
| 6.1 脉宽调制开关型稳压电路 | 3-161 | 6.3 直流调压器 | 3-194 |
| 6.2 频率调制开关型稳压电路 | 3-163 | 7 无触点开关和直流斩波器 | 3-194 |
| 6.3 脉宽-频率调制开关型稳压电路 | 3-164 | 7.1 单相交流无触点开关 | 3-194 |
| 第 11 章 晶闸管变流技术 | | | |
| 1 概述 | 3-164 | 7.2 三相交流无触点开关 | 3-194 |
| 1.1 变流技术的发展 | 3-164 | 7.3 直流无触点开关 | 3-194 |
| 1.2 变流器的类型 | 3-165 | 7.4 直流斩波器 | 3-195 |
| 2 晶闸管整流电路和有源逆变电路 | 3-166 | 8 晶闸管的串并联和保护 | 3-195 |
| | | 8.1 晶闸管的串联和均压 | 3-195 |
| | | 8.2 晶闸管的并联和均流 | 3-196 |
| | | 8.3 晶闸管的过电流保护 | 3-196 |
| | | 8.4 晶闸管的过电压保护 | 3-196 |
| | | 参考文献 | 3-197 |

第 4 篇 电子计算机基础

第 1 章 概 论

| | | | |
|------------------|-----|----------------------|-----|
| 1 电子计算机的发展 | 4-3 | 2 电子计算机的分类及其应用 | 4-4 |
| | | 2.1 电子计算机的分类 | 4-4 |
| | | 2.2 电子计算机的应用 | 4-5 |



| | |
|--------------------|-----|
| 3 电子计算机的基本组成 | 4-6 |
| 3.1 电子计算机硬件 | 4-6 |
| 3.2 电子计算机软件 | 4-8 |
| 4 计算机的性能指标 | 4-8 |

第2章 数的表示和运算规则

| | |
|---------------------|------|
| 1 数和数制 | 4-9 |
| 2 数制间的转换 | 4-9 |
| 3 机器数和字长 | 4-10 |
| 4 机器数的原码和补码表示 | 4-11 |
| 5 二进制数的运算规则 | 4-11 |
| 6 数字编码与字符编码 | 4-11 |
| 7 汉字的表示方法 | 4-12 |
| 8 数据校验码 | 4-13 |

第3章 电子计算机的指令系统

| | |
|------------------|------|
| 1 概述 | 4-13 |
| 2 指令格式 | 4-14 |
| 3 寻址方式 | 4-15 |
| 4 指令分类及其功能 | 4-16 |

第4章 中央处理器(CPU)

| | |
|----------------------------|------|
| 1 CPU 概述 | 4-18 |
| 1.1 CPU 的功能 | 4-18 |
| 1.2 CPU 的组成 | 4-18 |
| 1.3 CPU 中的主要寄存器 | 4-19 |
| 1.4 操作控制器及时序产生器 | 4-20 |
| 2 控制方式 | 4-20 |
| 2.1 指令周期、节拍周期、CPU 周期 | 4-21 |
| 2.2 控制方式 | 4-21 |
| 3 微程序控制器 | 4-22 |
| 3.1 微程序控制的基本工作原理 | 4-22 |
| 3.2 微指令的结构和格式 | 4-22 |
| 3.3 微程序控制存储器 | 4-23 |
| 3.4 微程序设计语言及微程序应用 | 4-24 |
| 4 指令解释的控制方式 | 4-24 |
| 4.1 指令解释的三种控制方式 | 4-25 |
| 4.2 指令的顺序控制方式 | 4-25 |
| 4.3 指令的重叠控制方式 | 4-25 |
| 4.4 指令的流水控制方式 | 4-26 |
| 5 精简指令集计算机(RISC) | 4-27 |

| | |
|--------------------------|------|
| 5.1 RISC 技术的形成与发展 | 4-27 |
| 5.2 RISC 设计原则与技术措施 | 4-28 |

第5章 电子计算机的存储系统

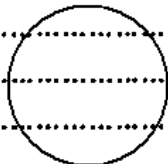
| | |
|----------------------------------------------|------|
| 1 概述 | 4-30 |
| 1.1 存储器的基本概念 | 4-30 |
| 1.2 存储器的作用 | 4-30 |
| 1.3 存储器的性能指标 | 4-30 |
| 1.4 存储器的分类 | 4-31 |
| 2 主存储器 | 4-32 |
| 2.1 只读存储器(ROM, Read Only Memory) | 4-32 |
| 2.2 随机存取存储器(RAM, Random Access Memory) | 4-33 |
| 2.3 高速缓冲存储器(Cache) | 4-33 |
| 2.4 虚拟存储器 | 4-33 |
| 3 外存储器 | 4-34 |
| 3.1 磁记录原理与记录方式 | 4-34 |
| 3.2 硬磁盘存储器 | 4-36 |
| 3.3 软磁盘存储器 | 4-39 |
| 3.4 磁带存储器 | 4-41 |
| 3.5 光盘存储器 | 4-42 |

第6章 电子计算机的输入输出系统

| | |
|----------------------------------------------|------|
| 1 概述 | 4-45 |
| 2 输入设备 | 4-45 |
| 2.1 键盘 | 4-45 |
| 2.2 鼠标 | 4-46 |
| 2.3 数字化仪 | 4-47 |
| 2.4 图象输入设备 | 4-48 |
| 3 输出设备 | 4-48 |
| 3.1 显示设备 | 4-48 |
| 3.2 打印设备 | 4-53 |
| 4 汉字处理设备 | 4-55 |
| 4.1 汉字输入设备 | 4-55 |
| 4.2 汉字输出设备 | 4-56 |
| 5 存储器直接输入输出(DMA, Direct Memory Access) | 4-57 |
| 6 通用接口标准 | 4-58 |

第7章 电子计算机软件

| | |
|--------------|------|
| 1 操作系统 | 4-61 |
|--------------|------|



| | | | |
|-------------------------|------|----------------------|-------|
| 1.1 操作系统的发展 | 4-61 | 2.6 数据交换技术 | 4-91 |
| 1.2 操作系统的功能 | 4-62 | 3 计算机联网 | 4-92 |
| 1.3 常用操作系统简介 | 4-67 | 3.1 计算机联网的分类 | 4-92 |
| 2 数据库系统 | 4-71 | 3.2 计算机互连的拓扑结构 | 4-92 |
| 2.1 数据库系统的发展 | 4-71 | 3.3 开放式系统互连 | 4-93 |
| 2.2 数据模型 | 4-71 | 4 局域网的组成与网络互连 | 4-94 |
| 2.3 数据库系统的体系结构 | 4-72 | 4.1 局域网的组成 | 4-94 |
| 2.4 数据库管理系统(DBMS) | 4-72 | 4.2 网络互连 | 4-96 |
| 2.5 常用数据库系统简介 | 4-76 | 5 几种常见局域网络系统 | 4-96 |
| 3 程序设计语言 | 4-79 | 5.1 Novell 网 | 4-96 |
| 3.1 机器语言 | 4-79 | 5.2 3+网 | 4-98 |
| 3.2 汇编语言 | 4-79 | 5.3 PC net 网 | 4-100 |
| 3.3 高级语言 | 4-80 | 6 计算机网络的应用 | 4-101 |
| 第 8 章 电子计算机网络系统 | | | |
| 1 概述 | 4-88 | 6.1 基本网络功能 | 4-101 |
| 1.1 计算机网络的发展 | 4-88 | 6.2 分布式处理 | 4-102 |
| 1.2 计算机网络的定义 | 4-88 | 第 9 章 电子计算机病毒 | |
| 1.3 计算机网络的特点和功能 | 4-88 | 1 计算机病毒的概念 | 4-102 |
| 2 数据通信 | 4-89 | 2 计算机病毒的结构 | 4-102 |
| 2.1 数据通信的概念 | 4-89 | 3 计算机病毒的分类 | 4-103 |
| 2.2 数据通信系统的组成 | 4-89 | 4 计算机病毒的防范 | 4-104 |
| 2.3 信息传输介质 | 4-89 | 5 反病毒工具 | 4-104 |
| 2.4 数据编码技术 | 4-90 | 参考文献 | 4-106 |
| 2.5 数据传输技术 | 4-90 | | |

第 5 篇 自动控制理论

常用符号表

第 1 章 概 论

| | |
|--------------------|-----|
| 1 控制系统的术语及定义 | 5-5 |
| 2 控制系统的组成及作用 | 5-5 |
| 3 控制系统的分类 | 5-6 |
| 4 控制系统的设计 | 5-6 |
| 4.1 设计大纲 | 5-6 |
| 4.2 设计步骤 | 5-6 |
| 5 控制理论的发展与应用 | 5-7 |

第 2 章 数学模型

| | |
|---------------------|-----|
| 1 控制系统的数学模型 | 5-8 |
| 1.1 传递函数、冲激响应 | 5-8 |

| | |
|--------------------------|------|
| 1.2 频率特性 | 5-10 |
| 1.3 控制系统的图形描述 | 5-10 |
| 1.4 多变量系统的数学描述 | 5-13 |
| 2 控制系统数学模型的建立 | 5-15 |
| 2.1 概述 | 5-15 |
| 2.2 机理建模 | 5-16 |
| 2.3 线性化 | 5-17 |
| 2.4 模型辨识 | 5-17 |
| 3 典型环节的数学模型 | 5-21 |
| 3.1 典型环节的频率特性 | 5-21 |
| 3.2 典型电气网络传递函数及伯德图 | 5-23 |

第 3 章 控制系统分析

| | |
|------------------|------|
| 1 控制系统的稳定性 | 5-27 |
|------------------|------|



| | | |
|-----|---------------------------------|------|
| 1.1 | 稳定性概念 | 5-27 |
| 1.2 | 劳思(Routh)和赫尔维茨(Hurwitz) 稳定判据 | 5-28 |
| 1.3 | 奈奎斯特稳定判据 | 5-29 |
| 1.4 | 稳定贮备 | 5-29 |
| 1.5 | 李雅普诺夫稳定性理论 | 5-30 |
| 2 | 控制系统动态特性分析 | 5-31 |
| 2.1 | 直接分析法 | 5-31 |
| 2.2 | 瞬态响应 | 5-32 |
| 2.3 | 二阶系统时域响应 | 5-33 |
| 2.4 | 稳态误差及误差系数 | 5-34 |
| 3 | 根轨迹法 | 5-35 |
| 3.1 | 根轨迹概念 | 5-35 |
| 3.2 | 绘制根轨迹的基本规则 | 5-35 |
| 3.3 | 根轨迹法的应用 | 5-36 |
| 4 | 频域法 | 5-36 |
| 4.1 | 奈奎斯特(奈氏)图 | 5-36 |
| 4.2 | 伯德图 | 5-37 |
| 4.3 | 系统频域性能指标与时域性能指标 关系 | 5-38 |
| 5 | 状态空间法 | 5-38 |
| 5.1 | 可控性 | 5-39 |
| 5.2 | 可观测性 | 5-39 |
| 5.3 | 可控规范型和可观测规范型 | 5-39 |
| 5.4 | 对偶原理 | 5-40 |
| 5.5 | 系统的实现 | 5-40 |
| 5.6 | 模态分析 | 5-41 |

第4章 系统设计

| | | |
|-----|-------------|------|
| 1 | 控制器与系统设计问题 | 5-42 |
| 2 | 控制器的频域设计 | 5-42 |
| 2.1 | 频域设计法 | 5-42 |
| 2.2 | 超前补偿 | 5-43 |
| 2.3 | 滞后补偿 | 5-45 |
| 2.4 | 滞后-超前补偿 | 5-46 |
| 2.5 | 串联补偿与并联补偿 | 5-47 |
| 3 | 控制器的时域设计 | 5-49 |
| 3.1 | PID控制器设计 | 5-49 |
| 3.2 | 状态反馈控制器设计 | 5-50 |
| 3.3 | 观测器设计 | 5-51 |
| 4 | 复合控制系统控制器设计 | 5-52 |

第5章 非线性系统

| | | |
|-----|--------------|------|
| 1 | 非线性系统的特点 | 5-53 |
| 2 | 典型非线性特性 | 5-54 |
| 3 | 相轨迹法 | 5-57 |
| 3.1 | 奇点 | 5-57 |
| 3.2 | 极限环 | 5-58 |
| 3.3 | 相轨迹绘制方法 | 5-59 |
| 3.4 | 相平面法的应用 | 5-60 |
| 4 | 描述函数法 | 5-61 |
| 4.1 | 典型非线性的描述函数 | 5-62 |
| 4.2 | 描述函数分析法 | 5-66 |
| 4.3 | 双描述函数及其应用 | 5-68 |
| 5 | 波波夫稳定判据 | 5-69 |
| 5.1 | 应用波波夫稳定判据的条件 | 5-70 |
| 5.2 | 波波夫稳定判据 | 5-70 |

第6章 离散控制系统

| | | |
|-----|----------------|------|
| 1 | 离散控制系统 | 5-73 |
| 2 | 采样过程 | 5-73 |
| 2.1 | 采样装置 | 5-73 |
| 2.2 | 采样定理 | 5-74 |
| 3 | Z变换 | 5-75 |
| 3.1 | 离散控制系统的数学描述 | 5-75 |
| 3.2 | Z变换定义 | 5-75 |
| 3.3 | Z变换公式 | 5-75 |
| 3.4 | Z反变换 | 5-76 |
| 4 | 离散控制系统Z传递函数 | 5-77 |
| 4.1 | 离散控制系统Z传递函数 | 5-77 |
| 4.2 | 开环离散控制系统Z传递函数 | 5-77 |
| 4.3 | 闭环离散控制系统的Z传递函数 | 5-77 |
| 5 | 离散控制系统的时间特性 | 5-79 |
| 5.1 | 冲激过渡函数 | 5-79 |
| 5.2 | 过渡函数 | 5-79 |
| 6 | 离散控制系统频率特性 | 5-79 |
| 7 | 离散控制系统稳定性 | 5-80 |
| 7.1 | 关于离散控制系统的稳定概念 | 5-80 |
| 7.2 | 离散控制系统稳定判据 | 5-80 |
| 8 | 离散控制系统的静差 | 5-81 |
| 9 | 离散控制系统的过渡过程 | 5-82 |
| 10 | 离散控制系统设计 | 5-82 |



| | | | |
|------------------------|------|-------------------------|-------|
| 10·1 离散控制系统的预期特性 | 5-82 | 4·2 超稳定理论 | 5-101 |
| 10·2 极点配置法 | 5-83 | 5 模型参考适应系统的数学描述 | 5-102 |
| 10·3 离散控制系统补偿装置 | 5-85 | 5·1 用状态方程描述的模型参考适应 | |
| 11 离散控制系统状态空间表达式 | 5-86 | 系统 | 5-102 |
| 11·1 离散控制系统的状态方程 | 5-86 | 5·2 用输入-输出方程描述的模型参考适应 | |
| 11·2 连续系统的离散化 | 5-87 | 系统 | 5-102 |
| 11·3 单输入单输出离散系统的状态空间表 | | 5·3 模型参考适应系统的误差方程 | 5-103 |
| 达式 | 5-87 | 6 模型参考适应系统局部参数优化 | |

第7章 最优控制

| | |
|-------------------------------------|-------|
| 1 概述 | 5-88 |
| 2 控制变量无约束的极大值原理 | 5-88 |
| 2·1 t_f 固定, $x(t_f)$ 无约束的情况 | 5-88 |
| 2·2 t_f 固定, $x(t_f)$ 受约束的情况 | 5-89 |
| 2·3 t_f 不固定的情况 | 5-89 |
| 3 控制变量受约束的极大值原理 | 5-89 |
| 4 离散极大值原理 | 5-89 |
| 5 动态规划 | 5-90 |
| 5·1 最优原理 | 5-90 |
| 5·2 多级决策过程 | 5-90 |
| 5·3 最优控制系统设计 | 5-92 |
| 6 时间最优控制 | 5-93 |
| 6·1 时间最优控制的必要条件 | 5-93 |
| 6·2 时间最优控制的切换曲面 | 5-94 |
| 6·3 次时间最优控制 | 5-94 |
| 7 线性最优调节器 | 5-95 |
| 7·1 有限时间最优调节器 | 5-95 |
| 7·2 无限时间最优调节器 | 5-96 |
| 7·3 最优调节器的性质 | 5-96 |
| 8 具有指定稳定度的最优调节器 | 5-97 |
| 9 有常值干扰作用的最优调节器 | 5-98 |
| 10 随机最优控制与卡尔曼滤波器 | 5-99 |
| 10·1 随机最优控制 | 5-99 |
| 10·2 卡尔曼滤波器 | 5-100 |

第8章 适应控制

| | |
|----------------------|-------|
| 1 概述 | 5-100 |
| 2 适应控制的定义 | 5-100 |
| 3 适应控制系统的类型 | 5-100 |
| 4 适应控制系统的稳定理论 | 5-101 |
| 4·1 正实函数的定义与性质 | 5-101 |

| | |
|-------------------------|-------|
| 设计法 | 5-104 |
| 7 模型参考适应系统李氏稳定理论设 | |
| 计法 | 5-104 |
| 7·1 用可调系统状态变量构成适应规律的 | |
| 设计方法 | 5-104 |
| 7·2 用被控对象的输入-输出构成适应规律 | |
| 的设计方法 | 5-105 |
| 8 模型参考适应系统的超稳定理论设 | |
| 计法 | 5-106 |
| 8·1 用状态变量构成适应规律的设计 | |
| 方法 | 5-106 |
| 8·2 用输入-输出构成适应规律的模型参考 | |
| 适应系统设计方法 | 5-107 |
| 9 随机适应控制系统 | 5-108 |
| 9·1 最优预报器和最小方差控制器 | 5-108 |
| 9·2 自校正调节器 | 5-109 |
| 9·3 零极点配置的自校正调节器 | 5-110 |
| 9·4 自校正控制器 | 5-111 |
| 10 适应式状态观测器 | 5-111 |

第9章 新型控制技术

| | |
|---------------------------|-------|
| 1 概述 | 5-112 |
| 2 鲁棒控制 | 5-112 |
| 2·1 控制系统灵敏度分析 | 5-112 |
| 2·2 参数不灵敏控制系统 | 5-113 |
| 2·3 H_∞ 优化理论 | 5-114 |
| 3 模糊控制 | 5-116 |
| 3·1 模糊集合及其运算 | 5-116 |
| 3·2 模糊矩阵与模糊关系 | 5-117 |
| 3·3 模糊逻辑与模糊语言 | 5-117 |
| 3·4 模糊控制原理及分析设计方法 | 5-118 |
| 3·5 模糊控制规则 | 5-120 |
| 3·6 模糊系统辨识 | 5-120 |
| 4 智能控制 | 5-121 |



| | | | |
|---------------------|-------|-----------------------|-------|
| 4.1 人工智能与自动控制 | 5-121 | 4.3 智能控制与智能控制系统 | 5-123 |
| 4.2 专家系统与知识工程 | 5-122 | 参考文献 | 5-123 |

第6篇 数控技术

第1章 概 论

| | |
|------------------------|-----|
| 1 基本概念 | 6-3 |
| 1.1 数控系统 | 6-3 |
| 1.2 数控设备的工作原理和分类 | 6-4 |
| 1.3 数控设备的检测装置 | 6-5 |
| 1.4 数控设备的辅助功能 | 6-5 |
| 1.5 数控系统的故障诊断 | 6-5 |
| 2 数控技术的发展和现状 | 6-5 |
| 2.1 数控技术的发展 | 6-5 |
| 2.2 数控技术的现状 | 6-6 |
| 3 数控技术的发展趋势 | 6-6 |

第2章 数控系统的点位和轨迹控制原理

| | |
|--------------------------|------|
| 1 点位控制 | 6-7 |
| 2 插补原理 | 6-8 |
| 2.1 数字脉冲乘法器 | 6-8 |
| 2.2 逐点比较法 | 6-9 |
| 2.3 数字积分法 | 6-12 |
| 2.4 时间分割法 | 6-14 |
| 3 刀具半径补偿原理 | 6-16 |
| 3.1 基本概念 | 6-16 |
| 3.2 硬件数控的刀具半径补偿方法 | 6-17 |
| 3.3 计算机数控的刀具半径补偿方法 | 6-19 |

第3章 数控程序编制

| | |
|-----------------------|------|
| 1 程序编制的目的和方法 | 6-23 |
| 1.1 程序编制的目的 | 6-23 |
| 1.2 程序编制的方法 | 6-23 |
| 2 数控机床程序编制的有关规定 | 6-23 |
| 2.1 数字控制的标准和代码 | 6-23 |
| 2.2 常用的程序编制指令 | 6-27 |
| 3 程序编制的步骤和实例 | 6-29 |
| 3.1 程序编制的步骤 | 6-29 |
| 3.2 数控车床的程序编制 | 6-29 |
| 3.3 数控铣床的程序编制 | 6-31 |
| 4 计算机数控自动程序编制系统 | 6-36 |

| | |
|---------------------------|------|
| 4.1 计算机自动编程的工作原理 | 6-36 |
| 4.2 数控语言 | 6-36 |
| 4.3 数控自动程序编制系统的程序设计 | 6-40 |

第4章 数控伺服系统

| | |
|-------------------------------------|------|
| 1 伺服系统的组成 | 6-42 |
| 2 开环伺服系统 | 6-42 |
| 2.1 步进电动机的主要技术数据和技术特性 | 6-43 |
| 2.2 步进电动机控制电路 | 6-45 |
| 2.3 用单片机控制步进电动机 | 6-47 |
| 2.4 开环系统的反馈补偿方法 | 6-48 |
| 3 闭环伺服系统 | 6-48 |
| 3.1 直流位置伺服驱动系统 | 6-49 |
| 3.2 交流位置伺服驱动系统 | 6-52 |
| 4 典型位置伺服驱动系统简介 | 6-57 |
| 4.1 AC-200 交流位置伺服驱动系统 | 6-57 |
| 4.2 FANUC-BESK 6ME 直流位置伺服驱动系统 | 6-59 |
| 5 伺服控制系统的设计方法 | 6-61 |
| 5.1 伺服控制系统的静态设计方法 | 6-61 |
| 5.2 伺服控制系统的动态设计方法 | 6-61 |

第5章 数控检测装置

| | |
|---------------------------|------|
| 1 概述 | 6-68 |
| 1.1 位置检测装置的分类 | 6-68 |
| 1.2 对位置检测装置的要求 | 6-68 |
| 2 光电盘和编码盘 | 6-68 |
| 2.1 光电盘 | 6-68 |
| 2.2 编码盘 | 6-70 |
| 3 感应同步器 | 6-70 |
| 3.1 感应同步器的工作原理和信号处理 | 6-71 |
| 3.2 感应同步器的分类和主要参数 | 6-72 |
| 3.3 感应同步器的特点 | 6-74 |
| 3.4 系统的构成和应用 | 6-74 |
| 4 旋转变压器 | 6-77 |
| 4.1 旋转变压器的基本原理 | 6-77 |

此是公可制作请尊重作者版权



| | | | |
|----------------------------|-------|--------------------------------------|-------|
| 4.2 旋转变压器的工作方式 | 6-77 | 2.1 联机自诊断 | 6-104 |
| 5 光栅 | 6-79 | 2.2 离机诊断 | 6-104 |
| 5.1 光栅的基本原理 | 6-79 | 2.3 故障的常规处理方法 | 6-104 |
| 5.2 光栅的分类 | 6-80 | 3 几种典型数控系统的故障诊断 | 6-105 |
| 5.3 光栅的测量装置 | 6-80 | 3.1 MC1 数控系统的常见故障 | 6-105 |
| 6 磁尺 | 6-82 | 3.2 FANUC 数控系统的常见故障 | 6-105 |
| | | 3.3 SINUMERIK 810 数控系统的常见故障 | 6-106 |
| 第 6 章 计算机数控系统 | | | |
| 1 计算机数控系统概述 | 6-84 | 4 数控系统的可靠性 | 6-106 |
| 1.1 计算机数控系统的定义 | 6-84 | 4.1 可靠性和可维修性的基本概念 | 6-106 |
| 1.2 计算机数控系统的组成 | 6-84 | 4.2 可靠性设计和可靠性技术 | 6-107 |
| 1.3 计算机数控系统的特点 | 6-85 | 第 8 章 数控技术的应用 | |
| 2 计算机数控和微机 | 6-85 | 1 数控机床 | 6-108 |
| 2.1 对微机的功能要求 | 6-85 | 1.1 数控机床的构成、功能和特点 | 6-108 |
| 2.2 典型系统中微机功能简介 | 6-86 | 1.2 国外典型的数控装置简介 | 6-109 |
| 3 计算机数控系统中的输入和显示 | 6-86 | 1.3 国内几家主要生产厂的数控装置 | 6-115 |
| 3.1 输入设备及其接口 | 6-87 | 2 自动绘图仪 | 6-116 |
| 3.2 显示设备及其接口 | 6-88 | 2.1 自动绘图仪的产生和发展 | 6-116 |
| 4 输出和可编程应用逻辑 | 6-91 | 2.2 自动绘图仪的组成 | 6-117 |
| 4.1 速度和逻辑功能输出 | 6-91 | 2.3 自动绘图仪的基本原理 | 6-117 |
| 4.2 可编程逻辑控制器及其应用 | 6-92 | 2.4 自动绘图仪的主要功能和技术指标 | 6-117 |
| 4.3 可编程应用逻辑(PAL) | 6-93 | 2.5 自动绘图仪的分类 | 6-118 |
| 5 计算机数控中的软件插补 | 6-95 | 2.6 DXY-800 和 DXY-101 平台式自动绘图仪 | 6-118 |
| 6 计算机数控系统软件 | 6-96 | 3 数控技术在纺织机械中的应用 | 6-119 |
| 6.1 插补和控制程序 | 6-96 | 3.1 应用概况 | 6-119 |
| 6.2 可编程应用逻辑程序 | 6-100 | 3.2 计算机绣花机 | 6-119 |
| 6.3 主程序 | 6-102 | 4 数控技术在计算机集成制造中的应用 | 6-120 |
| | | 4.1 数控技术和工厂自动化的关系 | 6-120 |
| 第 7 章 数控系统的故障诊断和可靠性 | | | |
| 1 故障诊断的基本概念 | 6-102 | 4.2 计算机集成制造技术为数控技术的发展提出了新的方向 | 6-121 |
| 1.1 故障的分类 | 6-102 | 参考文献 | 6-121 |
| 1.2 故障产生的规律 | 6-103 | | |
| 1.3 故障的判断和处理 | 6-103 | | |
| 2 CNC 系统的故障诊断 | 6-104 | | |

第 7 篇 电气传动控制系统

常用符号表

第 1 章 概 论

| | |
|------------------------|-----|
| 1 电气传动控制系统的组成与分类 | 7-5 |
|------------------------|-----|

| | |
|-----------------------|-----|
| 2 电气传动技术的发展 | 7-5 |
| 3 电气传动调速系统的主要指标 | 7-6 |
| 3.1 静态品质指标 | 7-6 |
| 3.2 动态品质指标 | 7-6 |



3·3 经济性 7-7

4 电气传动控制系统的可靠性 7-7

4·1 电气传动控制系统可靠性的特点 7-7

4·2 电气传动控制系统可靠性的考核 7-7

4·3 提高电气传动装置可靠性的措施 7-8

5 晶闸管传动设备中干扰及其抑制 7-8

5·1 晶闸管交流装置的下扰及其抑制 7-8

5·2 调节控制电路的干扰及其抑制 7-9

第2章 电动机的选择

1 电动机的类型与结构型式的选择 7-10

1·1 电动机的类型与机械特性 7-10

1·2 交流电动机的选择 7-11

1·3 直流电动机的选择 7-11

1·4 电动机结构型式的选择 7-11

2 电动机电压与转速的选择 7-12

2·1 电动机电压的选择 7-12

2·2 电动机转速的选择 7-12

3 常用电动机的性能与应用 7-13

3·1 电动机的机械特性与性能 7-13

3·2 常用电动机的性能与应用范围 7-15

4 电动机的功率计算与相关图表 7-18

5 连续工作制下电动机容量的选择 7-21

5·1 恒定负载连续工作制下电动机容量的计算 7-21

5·2 变动负载连续周期工作制下电动机容量的计算 7-21

6 短时工作制下电动机容量的选择 7-23

7 断续周期工作制下电动机容量的选择 7-23

8 对电动机的校验 7-24

8·1 发热校验 7-24

8·2 对电动机过载能力的校验 7-24

8·3 对电动机平均起动转矩的校验 7-25

8·4 其他校验 7-26

9 功率计算及校验举例 7-26

9·1 离心式风机的电动机功率计算 7-26

9·2 离心式泵的电动机功率计算 7-26

9·3 起重机的电动机功率计算 7-27

9·4 平稳负载长期工作制下电动机容量的校验 7-27

9·5 直流电动机短时工作的发热和过载

校验 7-28

9·6 直流电动机断续周期工作下的发热
校验 7-28

第3章 常用控制电路与电器选择

1 常用控制电路的基本环节 7-29

1·1 电动机起动控制 7-29

1·2 电动机制动控制 7-34

2 常用控制电路 7-37

2·1 电路设计的基本要求 7-37

2·2 常用控制电路 7-37

3 常用控制电器的选择 7-39

3·1 低压断路器的选择 7-39

3·2 熔断器的选择 7-39

3·3 交直流接触器的选择 7-39

3·4 热继电器的选择 7-40

3·5 保护继电器的选择 7-40

3·6 时间继电器的选择 7-40

4 可编程序控制器在控制系统中的应用 7-40

4·1 可编程序控制器的特点 7-41

4·2 可编程序控制器的应用 7-43

4·3 可编程序控制器选型简介 7-44

第4章 直流电动机调速系统

1 他励直流电动机调速系统 7-45

1·1 晶闸管变流器的选用 7-45

1·2 晶闸管变流器励磁的调速系统 7-48

1·3 晶闸管变流器供电的不可逆调速系统 7-48

1·4 晶闸管变流器供电的可逆调速系统 7-50

2 串励直流电动机调速系统 7-53

2·1 特点 7-53

2·2 电压调节 7-53

2·3 转速调节 7-54

3 数字式直流调速系统 7-54

3·1 特点 7-54

3·2 结构 7-54

第5章 交流电动机调速系统

1 绕线转子异步电动机串级调速系统 7-54



| | | | |
|--------------------------------|------|-----------------------------|-------|
| 1.1 概述 | 7-54 | 4 造纸机电气传动控制系统 | 7-89 |
| 1.2 次同步串级调速 | 7-55 | 5 电梯电气传动控制系统 | 7-91 |
| 1.3 超同步串级调速 | 7-56 | 5.1 交流传动系统 | 7-91 |
| 2 笼型异步电动机变频调速系统 | 7-57 | 5.2 直流传动系统 | 7-94 |
| 2.1 概述 | 7-57 | 5.3 电梯群控管理 | 7-95 |
| 2.2 交-直-交电压型变频调速 | 7-57 | 6 机床电气传动控制系统 | 7-95 |
| 2.3 交-直-交电流型变频调速 | 7-59 | 7 风机、水泵电气传动控制系统 | 7-97 |
| 2.4 交-交变频器 | 7-59 | 7.1 概述 | 7-97 |
| 2.5 由大功率晶体管构成的脉宽调制变频调速系统 | 7-60 | 7.2 风机的节能方法与调速控制 | 7-98 |
| 2.6 由可关断晶闸管构成的变频调速系统 | 7-63 | 7.3 水泵的节能方法与调速控制 | 7-98 |
| 2.7 由功率场效应晶体管构成的变频调速系统 | 7-63 | 7.4 应用实例 | 7-99 |
| 3 矢量控制系统 | 7-64 | 8 其他应用 | 7-101 |
| 3.1 矢量控制的基本原理 | 7-64 | 第7章 电气传动控制系统的调试 | |
| 3.2 异步电动机矢量控制系统 | 7-66 | 1 调试的基本原则与步骤 | 7-107 |
| 3.3 同步电动机矢量控制系统 | 7-68 | 2 调试前准备工作 | 7-107 |
| 4 无换向器电动机调速系统 | 7-69 | 2.1 设备清点与检查 | 7-107 |
| 4.1 无换向器电动机的组成 | 7-69 | 2.2 配线检查 | 7-108 |
| 4.2 无换向器电动机中逆变器的换相过程 | 7-70 | 2.3 绝缘检查 | 7-108 |
| 4.3 无换向器电动机的调速系统 | 7-70 | 3 操作联锁与保护回路的调试 | 7-109 |
| 5 其他类型的交流电动机调速系统 | 7-71 | 3.1 控制与辅助电源受电 | 7-109 |
| 5.1 异步电动机的定子调压调速 | 7-71 | 3.2 检查各种电源 | 7-109 |
| 5.2 转子回路中串电阻调速与转子电阻斩波器调速 | 7-71 | 3.3 操作回路的调试 | 7-109 |
| 5.3 电磁调速电动机调速 | 7-72 | 3.4 故障综合与显示回路的调试 | 7-109 |
| 5.4 异步电动机的变极对数调速 | 7-72 | 4 触发与调节回路的调试 | 7-110 |
| 第6章 电气传动系统的工业应用 | | 4.1 触发装置的调试 | 7-110 |
| 1 轧机电气传动控制系统 | 7-73 | 4.2 调节回路的调试要点 | 7-112 |
| 1.1 概述 | 7-73 | 5 磁场回路的调试 | 7-114 |
| 1.2 带钢冷连轧机电气传动控制系统 | 7-73 | 5.1 磁场回路的传递函数 | 7-114 |
| 1.3 粗轧机电气传动系统 | 7-79 | 5.2 不可逆励磁回路的调试 | 7-114 |
| 1.4 高速线材轧机计算机控制系统 | 7-81 | 5.3 可逆励磁回路的调试 | 7-116 |
| 2 矿井提升机电气传动控制系统 | 7-83 | 6 系统调试 | 7-116 |
| 2.1 直流电气传动控制系统 | 7-83 | 6.1 转速、电流双环不可逆调速系统的调试 | 7-116 |
| 2.2 交流传动控制系统 | 7-84 | 6.2 逻辑无环流可逆调速系统的调试 | 7-119 |
| 3 海洋石油钻机电气传动系统 | 7-87 | 6.3 有环流可逆调速系统的调试 | 7-119 |
| | | 6.4 非独立控制弱磁调速系统的调试 | 7-119 |
| | | 6.5 卷取机张力控制系统的调试 | 7-120 |
| | | 参考文献 | 7-120 |



第 8 篇 机械制造自动化系统

缩写词表

第 1 章 概 论

| | |
|--------------------------------------|------|
| 1 机械制造业自动化系统及其发展历史 | 8-7 |
| 1.1 不同类型制造业的特点 | 8-7 |
| 1.2 机械制造业自动化系统的发展历史 | 8-7 |
| 2 机械制造业自动化系统发展的主要趋势——计算机集成制造系统 | 8-8 |
| 2.1 计算机集成制造系统的由来和发展 | 8-8 |
| 2.2 计算机集成制造系统的效益 | 8-8 |
| 3 机械制造业自动化系统的主要内容 | 8-9 |
| 3.1 自动化子系统与计算机集成制造系统的联系和区别 | 8-9 |
| 3.2 工程设计自动化系统 | 8-9 |
| 3.3 企业管理信息系统 | 8-9 |
| 3.4 制造自动化系统 | 8-10 |
| 3.5 检测及质量系统 | 8-10 |
| 3.6 工厂自动化网络及数据库 | 8-10 |
| 4 发展机械制造业自动化系统的意义 | 8-11 |

第 2 章 机械制造业管理信息系统
与决策支持系统

| | |
|-----------------------|------|
| 1 基本概念 | 8-11 |
| 1.1 管理与决策的基本概念 | 8-11 |
| 1.2 系统与环境 | 8-12 |
| 1.3 数据、信息与知识 | 8-13 |
| 2 制造业管理模式 | 8-14 |
| 2.1 制造业概念模型 | 8-14 |
| 2.2 物料需求计划 | 8-15 |
| 2.3 制造资源计划 | 8-16 |
| 2.4 准时制生产管理模式 | 8-16 |
| 2.5 最优生产技术 | 8-17 |
| 2.6 先进管理模式与运行方式 | 8-17 |
| 3 制造业信息系统体系结构 | 8-18 |
| 3.1 基本概念 | 8-18 |
| 3.2 功能体系结构 | 8-19 |
| 3.3 信息体系结构 | 8-19 |

| | |
|-------------------------------------|------|
| 4 决策分析及决策支持系统 | 8-19 |
| 4.1 决策过程的西蒙模型 | 8-19 |
| 4.2 决策分析的递阶过程 | 8-20 |
| 4.3 面向计算机集成制造决策支持系统的基本框架 | 8-21 |
| 5 系统规划、分析、设计和实施方法的基础 | 8-21 |
| 5.1 两种不同语言、思维与工作习惯的世界和设计的生命周期 | 8-22 |
| 5.2 功能设计的递阶过程 | 8-22 |
| 5.3 设计过程的交叉学科与协同工作 | 8-23 |
| 5.4 问题求解的基本概念及系统分析设计框架 | 8-23 |

第 3 章 工程设计自动化系统

| | |
|---------------------------------------|------|
| 1 系统构成及其选型 | 8-24 |
| 1.1 典型工程设计自动化系统流程图 | 8-24 |
| 1.2 系统硬件 | 8-25 |
| 1.3 系统软件与支撑软件 | 8-25 |
| 1.4 软、硬件的选型 | 8-25 |
| 2 计算机图形系统 | 8-26 |
| 2.1 图形自动输入与存储系统 | 8-26 |
| 2.2 交互式图形系统 | 8-27 |
| 2.3 图形软件标准 | 8-28 |
| 3 工程分析与优化 | 8-29 |
| 3.1 有限元前、后置处理 | 8-29 |
| 3.2 有限元分析 | 8-30 |
| 3.3 机械系统动态分析 | 8-32 |
| 3.4 机械系统运动学分析 | 8-33 |
| 3.5 优化设计 | 8-33 |
| 4 计算机辅助设计 | 8-34 |
| 4.1 实体造型与参数化特征造型 | 8-34 |
| 4.2 计算机辅助几何设计 | 8-37 |
| 4.3 人工智能与专家系统技术的应用 | 8-38 |
| 4.4 面向对象的应用系统 | 8-38 |
| 5 计算机辅助工艺过程设计 | 8-40 |
| 5.1 计算机辅助设计、工艺过程设计和制造三者之间的关系和界面 | 8-40 |
| 5.2 计算机辅助成组技术 | 8-41 |



| | | |
|-----|-----------------------|------|
| 5.3 | 零件信息描述和转换 | 8-44 |
| 5.4 | 工艺过程设计中的决策方法 | 8-48 |
| 5.5 | 计算机辅助工艺过程设计的原理和方法 | 8-51 |
| 6 | 计算机辅助检测 | 8-52 |
| 6.1 | 离线与在线检测 | 8-52 |
| 6.2 | 坐标测量机 | 8-52 |
| 6.3 | 零件形状、尺寸、精度等与测量有关信息的输入 | 8-52 |
| 6.4 | 测量工艺规划的生成 | 8-53 |
| 6.5 | 测量规划的后置处理 | 8-53 |
| 6.6 | 测量机自动测量的计算机仿真 | 8-53 |
| 6.7 | 测量结果的处理和反馈 | 8-54 |
| 7 | 计算机辅助制造 | 8-54 |
| 7.1 | 计算机辅助制造的含义 | 8-54 |
| 7.2 | 计算机辅助数控加工程序编制 | 8-54 |
| 7.3 | 前置处理和后置处理 | 8-55 |
| 7.4 | 加工仿真 | 8-56 |
| 8 | 工程设计自动化系统集成的关键技术 | 8-57 |
| 8.1 | 工程数据库技术 | 8-57 |
| 8.2 | 图形数据与产品数据的交换标准 | 8-57 |

第4章 机械制造业自动化设备与系统

| | | |
|-----|---------------|------|
| 1 | 概述 | 8-60 |
| 2 | 自动化系统的通信 | 8-60 |
| 2.1 | 自动化系统通信的特点 | 8-60 |
| 2.2 | 通信的基本原理 | 8-60 |
| 2.3 | 通信的开放系统互连参考模型 | 8-61 |
| 2.4 | 通信标准化 | 8-62 |
| 2.5 | 通信结构、局域网、场地总线 | 8-63 |
| 2.6 | 点-点通信 | 8-64 |
| 3 | 可编程控制器 | 8-64 |
| 3.1 | 可编程控制器的诞生和命名 | 8-64 |
| 3.2 | 可编程控制器的发展 | 8-65 |
| 3.3 | 可编程控制器的控制结构 | 8-66 |
| 3.4 | 可编程控制器的系统结构 | 8-67 |
| 3.5 | 可编程控制器的编程语言 | 8-70 |
| 3.6 | 程序设计 | 8-74 |
| 3.7 | 可编程控制器的通信 | 8-75 |
| 3.8 | 可编程控制器标准化问题 | 8-77 |

| | | |
|-----|-----------------|------|
| 4 | 自动化制造系统的控制和管理 | 8-78 |
| 4.1 | 自动化制造系统的控制结构和功能 | 8-78 |
| 4.2 | 自动化制造系统计算机支撑环境 | 8-84 |
| 4.3 | 柔性制造系统的控制与管理 | 8-85 |
| 4.4 | 柔性制造系统仿真 | 8-86 |

第5章 质量控制中的检测与监测技术

| | | |
|-----|-----------------|-------|
| 1 | 概述 | 8-87 |
| 1.1 | 现代化加工中的质量控制 | 8-87 |
| 1.2 | 加工过程中质量控制的内容 | 8-87 |
| 1.3 | 影响质量的因素 | 8-88 |
| 1.4 | 加工过程质量控制手段 | 8-88 |
| 2 | 集成质量控制系统 | 8-88 |
| 3 | 质量检测技术 | 8-88 |
| 3.1 | 概述 | 8-88 |
| 3.2 | 过程中检测 | 8-89 |
| 3.3 | 在线检测 | 8-89 |
| 4 | 加工过程的监测技术 | 8-91 |
| 4.1 | 机床系统监测 | 8-91 |
| 4.2 | 刀具状态监测 | 8-92 |
| 4.3 | 传感技术 | 8-95 |
| 4.4 | 信号前置处理 | 8-98 |
| 4.5 | 计算机与过程监测 | 8-99 |
| 5 | 自动化制造系统中的质量故障诊断 | 8-101 |
| 5.1 | 故障诊断的层次结构 | 8-101 |
| 5.2 | 柔性制造系统故障树 | 8-101 |

第6章 工厂自动化中的网络及数据库技术

| | | |
|-----|---------------|-------|
| 1 | 计算机集成制造系统网络 | 8-103 |
| 1.1 | 网络特点 | 8-103 |
| 1.2 | 制造自动化协议 | 8-103 |
| 1.3 | 技术和办公自动化协议 | 8-104 |
| 1.4 | 场地总线 | 8-105 |
| 1.5 | 通信结构 | 8-105 |
| 1.6 | MAP/TOP 产品 | 8-107 |
| 2 | 工厂自动化网络的设计和实施 | 8-107 |
| 2.1 | 网络的需求分析 | 8-107 |
| 2.2 | 网络设计和选择 | 8-108 |
| 2.3 | 网络安装和管理 | 8-108 |



| | | | |
|------------------------------------------|-------|-----------------------------------|-------|
| 2.4 网络性能评价 | 8-108 | 1.1 计算机集成制造系统的主要活动 | 8-118 |
| 2.5 网络应用服务 | 8-109 | 1.2 计算机集成制造系统的组成 | 8-119 |
| 2.6 客户-服务器模式 | 8-109 | 1.3 计算机集成制造系统的递阶结构 | 8-119 |
| 3 工厂自动化中的信息管理 | 8-110 | 1.4 开放式结构 | 8-120 |
| 3.1 工厂自动化中信息类型和数据模型 要求 | 8-110 | 1.5 计算机集成制造系统原型实例 | 8-120 |
| 3.2 集成制造数据库管理系统结构 | 8-111 | 2 计算机集成制造系统建模 | 8-122 |
| 4 工厂自动化中的数据集成技术 | 8-112 | 2.1 建立功能模型的方法 | 8-122 |
| 4.1 工程数据库系统 | 8-112 | 2.2 建立信息模型的方法 | 8-122 |
| 4.2 多数据库系统和联邦式数据库系统 | 8-113 | 2.3 建立动态模型的方法 | 8-123 |
| 4.3 语义数据模型 | 8-114 | 3 计算机集成制造系统仿真 | 8-123 |
| 4.4 面向对象数据库系统 | 8-115 | 3.1 仿真在计算机集成制造系统中的作用 与地位 | 8-123 |
| 第7章 计算机集成制造系统的 体系结构、建模与仿真 | | 3.2 计算机集成制造系统仿真分类 | 8-124 |
| 1 计算机集成制造系统的体系结构 | 8-118 | 3.3 离散事件动态系统仿真 | 8-124 |
| | | 3.4 制造系统仿真软件 | 8-126 |
| | | 参考文献 | 8-128 |

第9篇 工业机器人

第1章 概 论

| | |
|------------------------|-----|
| 1 工业机器人的定义、构成和分类 | 9-3 |
| 1.1 工业机器人的定义 | 9-3 |
| 1.2 工业机器人的构成 | 9-3 |
| 1.3 工业机器人的分类 | 9-4 |
| 2 工业机器人的发展历史 | 9-5 |
| 3 工业机器人专用术语 | 9-5 |
| 3.1 有关机械结构和性能的术语 | 9-5 |
| 3.2 有关控制和安全的术语 | 9-6 |
| 4 国内外几种典型机器人性能参数 | 9-7 |
| 5 工业机器人性能规范和测试方法 | 9-9 |
| 5.1 工业机器人性能规范 | 9-9 |
| 5.2 工业机器人测试方法 | 9-9 |
| 6 机器人的效益 | 9-9 |

第2章 工业机器人操作机

| | |
|-------------------------------|------|
| 1 工业机器人操作机的自由度与坐标 型式 | 9-10 |
| 1.1 操作机的概念 | 9-10 |
| 1.2 自由度 | 9-10 |
| 1.3 工业机器人运动的坐标型式 | 9-10 |
| 2 操作机的不同结构及其特点 | 9-10 |

| | |
|-----------------------------------|------|
| 3 机器人操作机的运动学与动力学 | 9-11 |
| 3.1 基本定义 | 9-11 |
| 3.2 机器人运动学正问题 | 9-11 |
| 3.3 机器人运动学逆问题 | 9-11 |
| 3.4 微分关系式 | 9-12 |
| 3.5 雅可比(Jacobian)矩阵 | 9-12 |
| 3.6 机器人动力学问题的常用分析方法 | 9-12 |
| 4 工业机器人的工作空间及与结构尺 寸的相关性 | 9-13 |
| 4.1 工作空间 | 9-13 |
| 4.2 确定工作空间的几何法 | 9-14 |
| 4.3 包容正方体 | 9-14 |
| 4.4 工作空间与操作机结构尺寸的相关 性 | 9-14 |
| 5 操作机尺度规划中的优化设计及关 键尺寸的选定 | 9-14 |
| 5.1 位置结构的优化设计 | 9-14 |
| 5.2 尺度规划时关键尺寸的选定 | 9-15 |
| 6 操作机整机设计原则和设计方法 | 9-15 |
| 6.1 操作机整机设计原则 | 9-15 |
| 6.2 操作机的设计方法和步骤 | 9-15 |
| 7 操作机腰部、臂部和腕部结构 | 9-16 |
| 7.1 腰部结构 | 9-16 |



4.3 三维系统 9-56

第7章 几种典型工业机器人简介及其应用

1 喷涂机器人 9-58

1.1 喷涂机器人的结构 9-58

1.2 喷涂机器人控制系统 9-58

1.3 直接示教轻动化 9-60

1.4 应用实例 9-61

2 点焊机器人 9-61

2.1 点焊机器人操作机的结构 9-61

2.2 点焊机器人控制系统 9-63

2.3 点焊机器人应用实例 9-63

3 弧焊机器人 9-64

3.1 弧焊机器人的结构 9-64

3.2 弧焊机器人控制系统 9-66

3.3 弧焊机器人应用实例 9-66

4 搬运机器人 9-67

4.1 搬运机器人的结构 9-67

4.2 搬运机器人控制系统 9-69

4.3 搬运机器人应用实例 9-69

5 装配机器人 9-70

5.1 装配机器人操作机的结构 9-70

5.2 机器人控制系统 9-71

5.3 装配机器人应用实例 9-71

6 冲压机器人 9-72

6.1 冲压机器人的结构 9-72

6.2 冲压机器人控制系统 9-74

6.3 冲压机器人应用实例 9-74

7 压铸机器人 9-75

7.1 压铸机器人结构 9-75

7.2 压铸机器人控制系统 9-75

7.3 压铸机器人应用实例 9-76

8 其他机器人 9-76

第8章 机器人应用工程中的群控系统

1 群控系统的构成 9-79

2 群控系统的功能设置 9-79

2.1 工件识别 9-79

2.2 同步运行 9-79

2.3 全线自动起停和联锁 9-79

2.4 全线工况的实时动态模拟显示 9-79

2.5 统计功能 9-79

2.6 灵活的联机/离线切换功能 9-80

3 群控系统的信息交换 9-80

3.1 各单机向总控发出的信息 9-80

3.2 总控向单机发出的命令信息 9-80

4 通信系统 9-80

4.1 并行通信 9-81

4.2 独立通道的串行通信 9-81

4.3 串行总线和位总线(Bit Bus)通信系统 9-81

5 识别和排队 9-82

5.1 总控排队 9-83

5.2 单机排队 9-83

5.3 识别器排队 9-83

6 机器人与生产线的同步技术 9-84

7 实时控制系统的软件设计 9-84

7.1 软件结构 9-85

7.2 系统软件及开发工具 9-85

7.3 总控软件功能 9-85

第9章 机器人智能化

1 概述 9-88

1.1 感觉功能智能化 9-88

1.2 控制功能智能化 9-88

1.3 移动功能智能化 9-89

1.4 智能化与安全可靠性 9-89

2 机器人技术的发展动向 9-90

2.1 操作机构 9-90

2.2 移动行走机构 9-90

2.3 传感、检测技术 9-90

2.4 智能控制 9-90

2.5 人工智能 9-90

2.6 示教技术 9-91

3 智能机器人应用前景 9-91

参考文献 9-92

索 引



CONTENTS

Part 1 Fundamentals of Electrotechnics

Table of Symbols

Chapter 1 Basic Quantities and Laws of Electricity and Magnetism

| | | |
|-----|---------------------------------------------------------------------|------|
| 1 | Basic Physical Quantities of Electricity and Magnetism | 1-5 |
| 1.1 | Basic Physical Quantities of Electricity | 1-5 |
| 1.2 | Basic Physical Quantities of Magnetism | 1-5 |
| 2 | Electric Circuits and Properties of Electric Circuit Elements | 1-7 |
| 2.1 | Electric Circuits and Electric Circuit Models | 1-7 |
| 2.2 | Passive Elements | 1-8 |
| 2.3 | Active Elements | 1-14 |
| 3 | Fundamental Laws of Electricity and Magnetism | 1-16 |
| 3.1 | Ampere's Law—Electromagnetic Force | 1-16 |
| 3.2 | Law of Electromagnetic Induction | 1-16 |
| 3.3 | Law of Total Current | 1-17 |
| 3.4 | Joule's Law | 1-18 |
| 3.5 | Ohm's Law | 1-18 |
| 3.6 | Kirchhoff's Law | 1-18 |
| 3.7 | Tellegen's Theorem | 1-19 |

Chapter 2 Fundamental Methods of Direct Current (D. C.) Circuit Analysis

| | | |
|---|-----------------------------|------|
| 1 | Branch Current Method | 1-20 |
| 2 | Loop Current Method | 1-20 |
| 3 | Node Potential Method | 1-21 |

| | | |
|-----|----------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 4 | Characteristics of Linear Circuit | 1-22 |
| 4.1 | Homogeneity | 1-22 |
| 4.2 | Superpositionality—Superposition Theorem | 1-22 |
| 5 | Equivalent Source Theorem | 1-23 |
| 5.1 | Thevenin's Theorem | 1-23 |
| 5.2 | Norton's Theorem | 1-24 |
| 6 | Conditions of Load Obtaining Maximum Power | 1-24 |
| 7 | Equivalent Transformation of Y-connected Network and Δ -connected Network | 1-25 |
| 8 | Analysis of Containing Controlled - source Circuit | 1-25 |
| 9 | Nonlinear Resistance Circuit | 1-26 |
| 9.1 | Voltage-Current Characteristics of Nonlinear Resistance | 1-26 |
| 9.2 | Calculating Methods of Nonlinear Resistance Circuit | 1-26 |

Chapter 3 Steady State Analysis of Sinusoidal Circuit

| | | |
|-----|-------------------------------------------------------------------------|------|
| 1 | Sinusoid | 1-28 |
| 1.1 | Period, Frequency, and Angular Frequency | 1-28 |
| 1.2 | Phase (Phase Angle) and Phase Difference (Phase Angle Difference) | 1-28 |
| 1.3 | Effective Value | 1-28 |
| 1.4 | Average Value | 1-29 |
| 2 | Representation of Sinusoid | 1-29 |
| 2.1 | Representation of Rotating Vector | 1-29 |
| 2.2 | Phasor Method | 1-29 |
| 3 | A. C. Circuit of Single Element | 1-30 |

(11)



4 RLC Series and Parallel
 A. C. Circuit 1-31

5 Power and Power Factor 1-32

6 Application of Network Theory in
 A. C. Circuit 1-33

7 Two-port Network 1-35

7.1 Parameter Equations of Two-port
 Network 1-35

7.2 Equivalent Circuit of Two-port
 Network 1-36

7.3 Series, Parallel, and Stage Connections
 of Two-port Network 1-37

8 Three-phase Sinusoidal Circuit 1-39

8.1 Three-phase Source Connection 1-39

8.2 Three-phase Load Connection 1-39

**Chapter 4 Time Domain Analysis
 of Linear Circuit**

1 Fundamental Conception 1-42

1.1 Steady State and Transient State 1-42

1.2 Step Signal and Impulse Signal 1-42

2 Law of Switching and Determination
 of Initial Value of Circuit 1-43

2.1 Law of Switching 1-43

2.2 Determination of Initial Voltage and
 Initial Current in Circuit 1-43

3 Time Domain Analysis of Linear
 Circuit 1-44

3.1 Classical Method 1-44

3.2 Three-element Method of Time Domain
 Analysis of First-order Linear
 Circuit 1-44

4 Response of First-order RC Circuit
 under Step Signal Excitation 1-45

4.1 Zero-state Response of RC
 Circuit 1-45

4.2 Zero-input Response of RC
 Circuit 1-45

4.3 Complete Response of RC
 Circuit 1-46

5 Response of First-order RL Circuit

under Step Signal Excitation 1-47

5.1 Zero-state Response of RL
 Circuit 1-47

5.2 Zero-input Response of RL
 Circuit 1-48

5.3 Complete Response of RL
 Circuit 1-48

6 Impulse Response of RC Circuit and
 RL Circuit 1-48

6.1 Impulse Response of RC Circuit 1-48

6.2 Impulse Response of RL Circuit 1-50

7 Sine Response of RC Circuit 1-50

8 Recurrent Square Pulse Response of
 RC Circuit 1-51

8.1 RC Differentiating Circuit 1-51

8.2 RC Integrating Circuit—Application
 of Convolution Integration 1-51

9 Zero-input Response of Second-
 order RLC Circuit—Oscillatory
 Discharge 1-52

**Chapter 5 Frequency Domain Analysis
 of Linear Circuits**

1 Fourier Series of Nonsinusoidal
 Periodic Signal 1-54

2 Spectrum of Nonsinusoidal Periodic
 Signal 1-57

3 Effective Values and Average Values
 of Nonsinusoidal Periodic Quantities,
 and Some Coefficients for Representing
 Waveform Characteristics 1-59

4 Circuit Power under Nonsinusoidal
 Periodic Excitation 1-59

5 Equivalent Sinusoidal Waveform 1-60

6 Steady State Analysis for Linear
 Circuit under Nonsinusoidal Periodic
 Excitation 1-61

6.1 Calculation Method 1-61

6.2 An Illustrating Example 1-61

7 Frequency Characteristics of

此星公司制作 请尊重作者版权



Circuit 1-62

7.1 Definition of Network Function in
Frequency Domain 1-62

7.2 Classes of Network Functions in
Frequency Domain 1-62

8 Resonance in RLC Circuit 1-62

8.1 Resonance of RLC Series Circuit under
Sinusoidal Excitation 1-62

8.2 Resonance of RLC Parallel Circuit under
Sinusoidal Excitation 1-64

8.3 Resonance of Circuit under Nonsinusoidal
Periodic Excitation 1-64

9 Filter Characteristics of Linear
Circuits 1-65

9.1 Frequency Characteristics of Ideal Filter
Circuits 1-65

9.2 LC Filter Circuits 1-68

**Chapter 6 Complex Frequency Domain
Analysis of Linear Circuit**

1 Laplace Transform 1-69

1.1 Definition of Laplace Transform 1-69

1.2 Inverse Laplace Transform 1-70

1.3 Fundamental Properties of the Laplace
Transform 1-72

2 Complex Frequency Domain Form in
Fundamental Circuit Laws 1-72

3 Operation Forms in Elements and
RLC Circuits 1-72

4 Complex Frequency Domain Analysis
of Transient Process in Linear
Circuit 1-74

4.1 Analysis Steps 1-74

4.2 Calculating Example 1-74

5 Network Functions 1-74

5.1 Definition of Network Function 1-75

5.2 Types of Network Functions 1-75

5.3 Relationship between Network Function
and Unit Impulse Response 1-75

5.4 Network Function and Zero State
Response Under Arbitrary Waveform

Excitation 1-75

5.5 Zeros and Poles of Network
Function 1-76

6 Frequency Characteristics of
Network Function 1-79

6.1 Diagram Analysis of Network
Function 1-79

6.2 Frequency Characteristics of the
First-order Network Function 1-79

6.3 Frequency Characteristics of the
Second-order Resonance Network 1-81

Chapter 7 Magnetic Circuits

1 Fundamental Magnetic Properties of
Ferro - magnetic Materials 1-82

1.1 Hysteresis Loop 1-82

1.2 Fundamental Magnetization Curve 1-82

1.3 Hysteresis Loss and Eddy Current
Loss 1-82

2 Conventional Ferro-magnetic
Materials 1-84

3 Fundamental Laws of Magnetic
Circuit 1-85

3.1 Magnetic Circuit 1-85

3.2 Principle of Continuity of Magnetic
Flux 1-85

3.3 Ampere Circuit Law 1-86

4 Calculation of Air Gap Magnetic
Conductance 1-87

5 Calculation of Direct Current
Magnetic Circuits 1-88

5.1 Calculation of Nonbranch Magnetic
Circuit 1-88

5.2 Calculation of Branch Magnetic
Circuits 1-90

6 Calculation of Alternating Current
Magnetic Circuits 1-91

6.1 Characteristics of Alternating Current
Magnetic Circuits 1-91

6.2 Alternating Current Circuit Model of

此星公司制作 请尊重作者版权



| | | | |
|----------------------------------------------------------------------|------|-------------------------------------------------------------|------|
| Iron-core Coil | 1-91 | 7 Calculation of Magnetic Circuit of Permanent Magnet | 1-94 |
| 6•3 Calculation Method of Alternating Current Magnetic Circuit | 1-91 | References | 1-95 |

Part 2 Electrical Equipment

Table of Symbols

Chapter 1 Transformers

| | |
|--------------------------------------------------------------------|------|
| 1 Brief Introduction | 2-5 |
| 1•1 Applications and Classification of Transformers | 2-5 |
| 1•2 Main Construction Components of Transformer | 2-6 |
| 2 Operating Principles of Transformer | 2-7 |
| 2•1 No-load Operation of Transformer | 2-7 |
| 2•2 Load Operation of Transformer | 2-8 |
| 3 Operation Characteristics of Transformer | 2-11 |
| 3•1 Voltage Regulation (Rate of Change in Voltage) | 2-11 |
| 3•2 Loss and Efficiency | 2-11 |
| 3•3 Economical Operation of Power Transformer | 2-12 |
| 4 Connection of Three-phase Transformers | 2-12 |
| 5 Parallel Operation of Transformers | 2-13 |
| 5•1 Conditions of Ideal Parallel Operation | 2-13 |
| 5•2 Load Distribution of the Parallel Operation Transformers | 2-14 |
| 6 Other Types of Transformers | 2-14 |
| 6•1 Instrument Transformers | 2-14 |
| 6•2 Autotransformers | 2-15 |
| 6•3 Regulated Voltage Transformers | 2-15 |
| 7 Frequent Troubles in Transformers and Their Treatments | 2-17 |
| 8 Types and Rated Data of | |

| | |
|-------------------------------------------------------|------|
| Transformers | 2-17 |
| 8•1 Type Meanings of Commonly Used Transformers | 2-17 |
| 8•2 Rated Data Indicated on Markers | 2-17 |

Chapter 2 Three-phase Asynchronous Motors

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 1 Brief Introduction | 2-18 |
| 1•1 Applications and Classification | 2-18 |
| 1•2 Main Construction Components | 2-18 |
| 2 Fundamental Operating Principles of Three-phase Asynchronous Motor | 2-18 |
| 3 Equivalent Electric Circuit and Phasor Diagram of the Three-phase Asynchronous Motor | 2-19 |
| 4 Operation Performance of Three-phase Asynchronous Motor | 2-20 |
| 4•1 Loss and Efficiency of Three-phase Asynchronous Motor | 2-20 |
| 4•2 Electromagnetic Torque of Three-phase Asynchronous Motor | 2-21 |
| 4•3 Mechanical Characteristics of Three-phase Asynchronous Motor | 2-21 |
| 4•4 Operating Characteristics of Three-phase Asynchronous Motor | 2-23 |
| 5 Energy Conservation Operation in Three-phase Asynchronous Motors | 2-23 |
| 6 Three-phase Asynchronous Motors with Wound Rotor | 2-24 |
| 6•1 Construction of Three-phase Asynchronous Motors with Wound Rotor | 2-24 |
| 6•2 Operating Principles of Three-phase | |



Asynchronous Motors with Wound Rotor 2-24

7 Electromagnetic Asynchronous Motor with Variable Speed 2-24

8 Frequent Troubles in Three-phase Asynchronous Motors and Their Treatments 2-25

9 Types and Rated Data of Three-phase Asynchronous Motors 2-26

9·1 Type Meanings of Commonly Used Three-phase Asynchronous Motors ... 2-26

9·2 Rated Data Indicated on Markers 2-27

Chapter 3 Three-phase Synchronous Machines

1 Brief Introduction 2-27

2 Fundamental Construction of Three-phase Synchronous Machine 2-28

3 Operating Principles and Characteristics of Three-phase Synchronous Generator 2-28

3·1 Operating Principles of Three-phase Synchronous Generator 2-28

3·2 Operating Characteristics of Three-phase Synchronous Generator 2-29

4 Parallel Operation of Three-phase Synchronous Generators 2-29

4·1 Parallel Operation Conditions of Three-phase Synchronous Generators 2-29

4·2 Parallel Operation Methods of Three-phase Synchronous Generators 2-30

5 Operating Principles and Mechanical Characteristics of Three-phase Synchronous Motor 2-30

5·1 Operating Principles of Three-phase Synchronous Motor 2-30

5·2 Mechanical Characteristics of Three-phase Synchronous Motor 2-31

6 Overexciting Operation of Three-phase Synchronous Motor 2-31

7 Starting of Three-phase Synchronous Motor 2-32

8 Frequent Troubles and Their Treatments of Three-phase Synchronous Machines 2-32

9 Types and Rated Data of Three-phase Synchronous Machines 2-34

Chapter 4 D. C. Machines

1 Brief Introduction 2-35

2 Fundamental Construction and Classification of D. C. Machine 2-35

2·1 Fundamental Construction of D. C. Machine 2-35

2·2 Classification of D. C. Machine 2-36

3 Operating Principle of D. C. Machine 2-36

3·1 Operating Principle of D. C. Motor 2-36

3·2 Operating Principle of D. C. Generator 2-37

4 Electromotive Force (E. M. F.) and Electromagnetic Torque of D. C. Machine 2-38

4·1 Electromotive Force (E. M. F.) of D. C. Machine 2-38

4·2 Electromagnetic Torque of D. C. Machine 2-38

5 No-load Characteristics and External Characteristics of D. C. Generator 2-38

6 Mechanical Characteristics of D. C. Motor 2-39

7 Applications of D. C. Motor 2-39

7·1 Starting of D. C. Motor 2-39

7·2 Speed Regulation of D. C. Motor 2-39

7·3 Reverse Rotating of D. C. Motor 2-41

7·4 Electromagnetic Braking of D. C. Motor 2-41

8 Frequent Troubles and Their Treatments of D. C. Machines 2-42

此星公司制作 请尊重作者版权



8·1 Short Circuit or Open Circuit and Earthing of Armature Winding 2-42

8·2 Frequent Troubles and Their Treatments of D. C. Machines 2-42

9 Rated Data and Types of D. C. Machines 2-42

Chapter 5 Driving Micro-machines

1 Brief Introduction 2-45

2 Three-phase Driving Micro-asynchronous Motor 2-46

3 Single Phase Capacitor Motor 2-46

3·1 Operating Principle of Single Phase Asynchronous Motor 2-46

3·2 Torque Characteristics of Single Phase Asynchronous Motor 2-47

3·3 Single Phase Capacitor Asynchronous Motor 2-47

4 Single Phase Shaded-pole Asynchronous Motor 2-48

5 Micro D. C. Motor 2-48

6 Brushless D. C. Motor 2-48

7 Universal Micro Motor 2-52

8 Types and Applications of Driving Micro-machines 2-52

Chapter 6 Control Micro-machines

1 Brief Introduction 2-53

2 Servomotor 2-54

2·1 D. C. Servomotor 2-54

2·2 A. C. Servomotor 2-55

3 Tachogenerator 2-57

3·1 Types and Applications of Tachogenerator 2-57

3·2 Main Features, Rated Data, and Attention of Uses of Tachogenerators 2-58

4 Micro-synchronous Motor 2-59

4·1 Fundamental Construction and Operating Principle of Hysteresis Synchronous Motor 2-59

4·2 Classification and Applications of Micro-synchronous Motor 2-60

4·3 Main Features, Rated Data, and Attention of Uses of Micro-synchronous Motors 2-60

5 Stepmotor 2-61

5·1 Construction and Operating Principle of Stepmotor 2-61

5·2 Classification and Applications of Stepmotor 2-62

5·3 Main Features and Attention of Uses of Stepmotor 2-63

6 Selsyn 2-63

6·1 Construction and Operating Principle of Selsyn and Example for Application 2-63

6·2 Classification, Types, Characteristics, and Application Range of Selsyn 2-64

6·3 Main Features, Rated Data, and Attention of Uses of Selsyn 2-64

7 Rotary Transformer 2-66

7·1 Fundamental Construction of Rotary Transformer 2-66

7·2 Classification, Characteristics, and Application Range of Rotary Transformer 2-67

7·3 Main Parameters and Attention of Uses of Rotary Transformer 2-67

Chapter 7 Commonly Used Electromagnet Device

1 Brief Introduction 2-69

2 D. C. and A. C. Electromagnet 2-69

2·1 D. C. Electromagnet 2-69

2·2 A. C. Electromagnet 2-69

3 Approximate Calculation and Characteristics of Electromagnet Attractive Force 2-70

4 Traction Electromagnet 2-72

4·1 Fundamental Construction of Traction Electromagnet 2-72

4·2 Types and Characteristics of Traction Electromagnet 2-73



5 Valve Electromagnet 2-73

5.1 Construction and Performance of A. C. Valve Electromagnet 2-73

5.2 Construction and Performance of D. C. Valve Electromagnet 2-73

5.3 Magnet Valve 2-73

6 Braking Electromagnet 2-74

6.1 Operating Principle of Braking Electromagnet 2-74

6.2 Types and Properties of Braking Electromagnet 2-75

7 Magnetic Clutch 2-75

8 Magnetic Chuck 2-76

Chapter 8 Electric Furnaces and Welding Machines Used in Industry

1 Brief Introduction 2-77

1.1 Electric Furnace 2-77

1.2 Electric Welding Machine 2-77

2 Resistance Furnace 2-79

2.1 Classification and Application 2-79

2.2 Main Technical Economic Indexes and Developing Trend 2-79

2.3 Salt Bath Furnace 2-80

2.4 Temperature Control System Used in Resistance Furnace 2-81

3 Induction Furnace 2-81

3.1 Classification and Application 2-81

3.2 Main Technical Economic Indexes and Developing Trend 2-82

3.3 Power Equipment Used in Induction Furnace 2-82

3.4 Control System Used in Induction Furnace 2-82

4 Arc Furnace 2-83

4.1 Classification and Application 2-83

4.2 Main Technical Economic Indexes and Developing Trend 2-84

4.3 Electrical Apparatus Used in Arc Furnace 2-85

4.4 Control System Used in Steelmaking Arc Furnace 2-85

5 Other Electric Furnaces Used in Industry 2-86

6 Arc Welding Machine 2-87

6.1 Characteristics and General Requirements for Arc Welding Power Source 2-88

6.2 Classification and Operating Principle of Arc Welding Power Source 2-89

6.3 Control System Used in Arc Welding 2-92

7 Resistance Welding Machine 2-95

7.1 Constitution of Resistance Welding Machine 2-95

7.2 Resistance Welding Power Source 2-96

7.3 Control System Used in Resistance Welding 2-97

Chapter 9 Commonly Used Low-voltage Electric Apparatus

1 Brief Introduction 2-99

2 Commonly Used Low-voltage Hand Operated Electric Apparatus and Fuse 2-99

2.1 Master Switch 2-99

2.2 Knife Switch 2-99

2.3 Change-over Switch 2-102

2.4 Fuse and Fuse-element 2-103

3 Commonly Used Low-voltage Automatic Electric Apparatus 2-103

3.1 Automatic Switch 2-103

3.2 Contactor 2-106

3.3 Starter 2-107

3.4 Travel Switch 2-114

4 Control Relay 2-117

4.1 Classification and Application of Relay 2-117

4.2 Electromagnetic Relay 2-117

4.3 Time Delay Relay 2-118

4.4 Thermal Relay 2-120

4.5 Speed Relay 2-120

4.6 Hydraulic Relay 2-121

5 Low-voltage Current Leakage Protector 2-122



| | | | |
|------------------------------------------------------|-------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| 5·1 Voltage Type Current Leakage Protector | 2-123 | Apparatus | 2-125 |
| 5·2 Current Type Current Leakage Protector | 2-123 | 7·1 Frequent Troubles and Their Treatments of Contactor, Magnetic Starter, and Electromagnetic Relay | 2-125 |
| 5·3 Selection of Current Leakage Protector | 2-123 | 7·2 Frequent Troubles and Their Treatments of Semiconductor Relay | 2-127 |
| 6 Voltage Regulator | 2-124 | 7·3 Frequent Troubles and Their Treatments of Thermal Relay | 2-128 |
| 6·1 Operating Principle of Voltage Regulator | 2-124 | 7·4 Frequent Troubles and Their Treatments of Autotransformer Starter | 2-128 |
| 6·2 Thyristor Type Voltage Regulator | 2-124 | 7·5 Frequent Troubles and Their Treatments of Current Leakage Protector | 2-129 |
| 7 Frequent Troubles and Their Treatments of Electric | | References | 2-130 |

Part 3 Industrial Electronic Technology

Table of Symbols

Table of Abbreviations

Chapter 1 Commonly Used Electronic Devices

| | | | |
|----------------------------------------------------------------------------------|------|------------------------------------------------------------------------------|------|
| 1 Semiconductor Diodes | 3-5 | 3·1 Junction Field Effect Transistor | 3-12 |
| 1·1 PN Junction | 3-5 | 3·2 Insulated Gate Field Effect Transistor | 3-12 |
| 1·2 Small-signal Diode | 3-5 | 3·3 Main Parameters of Field Effect Transistors | 3-13 |
| 1·3 Rectifier Diode | 3-6 | 4 Power Transistors | 3-15 |
| 1·4 Switching Diode | 3-7 | 4·1 Bipolar Power Transistor | 3-15 |
| 1·5 Zener Diode | 3-7 | 4·2 Power Field Effect Transistor | 3-16 |
| 1·6 Varactor Diode | 3-7 | 4·3 Static Induction Transistor (SIT) | 3-16 |
| 1·7 Tunnel Diode | 3-7 | 4·4 Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT) | 3-17 |
| 1·8 Schottky Diode | 3-8 | 5 Unijunction Transistors and Trigger Diodes | 3-17 |
| 1·9 Rule of Type Designation for Discrete Semiconductor Devices | 3-8 | 5·1 Unijunction Transistor | 3-17 |
| 2 Bipolar Junction Transistors | 3-8 | 5·2 Complementary, Programmable and Equivalent Unijunction Transistors | 3-18 |
| 2·1 Construction and Current Amplification of Bipolar Junction Transistors | 3-8 | 5·3 Trigger Diodes | 3-18 |
| 2·2 Bipolar Junction Transistor Characteristics | 3-9 | 6 Thyristors | 3-19 |
| 2·3 Main Parameters of Bipolar Junction Transistors | 3-10 | 6·1 Conventional SCR | 3-19 |
| 2·4 Equivalent Circuits for Bipolar Junction Transistor | 3-10 | 6·2 Triac | 3-21 |
| 3 Field Effect Transistors | 3-12 | 6·3 Gate Turn-off Thyristor | 3-21 |
| | | 6·4 Fast-switching SCR | 3-21 |
| | | 6·5 Reverse-conducting Thyristor | 3-22 |
| | | 6·6 Static Induction Thyristor (SITH) | 3-22 |
| | | 6·7 MOS Controlled Thyristor (MCT) | 3-23 |
| | | 6·8 Silicon Controlled Switch | 3-23 |



6·9 Rule of Type Designation for Thyristors 3-24

7 Semiconductor Photoelectric Devices 3-24

7·1 Light Emitting Diode 3-24

7·2 Photoresistor 3-24

7·3 Photodiode 3-25

7·4 Phototransistor 3-25

7·5 Photo-thyristor 3-25

7·6 Optoelectronic Couplers 3-25

8 Brief Introduction to Integrated Circuits (IC) 3-26

8·1 Integrated Circuit Classification 3-26

8·2 Rule of Type Designation for Semiconductor Integrated Circuits 3-27

8·3 Applications of Integrated Circuits 3-27

9 Electron Tubes 3-28

10 Display Devices 3-30

10·1 Display Device Classification 3-30

10·2 Oscilloscope Tube 3-30

10·3 Picture Tube 3-31

10·4 Glow Character Indicator Tube 3-31

10·5 Liquid Crystal Display 3-31

10·6 Semiconductor Display 3-32

10·7 Fluorescent Character Display Tube 3-32

10·8 Plasma Display 3-33

10·9 Laser Display 3-33

Chapter 2 Basic Amplifiers Using Discrete Devices

1 Main Performance Indices of Amplifiers 3-33

2 Single Bipolar Junction Transistor Amplifiers 3-34

2·1 Common-emitter Amplifier 3-34

2·2 Common-collector Amplifier (Emitter Follower) 3-37

2·3 Common-base Amplifier 3-38

3 Single Field Effect Transistor Amplifiers 3-39

3·1 Common-source Amplifier 3-39

3·2 Common-drain Amplifier (Source Follower) 3-40

4 Electron Tube Amplifiers 3-40

5 Differential Amplifiers 3-41

5·1 Typical Differential Amplifier 3-41

5·2 Constant-current Source Differential Amplifier 3-42

5·3 Differential Amplifier Connections 3-43

6 Frequency-selective Amplifiers 3-43

6·1 LC Frequency-selective Amplifier 3-43

6·2 RC Frequency-selective Amplifier 3-44

7 Power Amplifiers 3-44

7·1 Complementary Symmetry Power Amplifier 3-44

7·2 Balanced Transformerless Power Amplifier 3-46

7·3 Transformer-coupled Push-pull Power Amplifier 3-46

8 Feedback in Amplifiers 3-46

8·1 Basic Concept of Feedback 3-46

8·2 Four Types of Negative Feedback 3-47

8·3 Effect of Negative Feedback on Amplifier Performance 3-48

8·4 Stability of Negative Feedback Amplifiers 3-48

9 Multistage Amplifiers 3-48

9·1 Interstage Coupling Modes for Multistage Amplifiers 3-48

9·2 Circuit Configuration of Multistage Amplifiers 3-48

9·3 Formation and Elimination of Self Excited Oscillation in Multistage Amplifiers 3-49

Chapter 3 Analog Integrated Circuits

1 General Purpose IC Operational Amplifiers (Op-Amp) 3-50

1·1 Fundamental Constitutions of IC Op-Amps 3-50

1·2 Main Parameters of IC Op-Amps 3-52



1.3 Transfer Characteristics and Fundamental Configuration of IC Op-Amps 3-53

1.4 Several Questions about IC Op-Amp Applications 3-54

2 Special Purpose IC Op-Amps 3-55

2.1 High Resistance IC Op-Amp 3-55

2.2 High Speed IC Op-Amp 3-55

2.3 High Precision IC Op-Amp 3-56

2.4 Low Power IC Op-Amp 3-56

2.5 High Voltage IC Op-Amp 3-56

2.6 Wide Band IC Op-Amp 3-56

2.7 Other IC Op-Amps 3-56

3 IC Power Amplifiers 3-57

3.1 Fundamental Constitution of IC Power Amplifiers 3-57

3.2 Main Parameters of IC Power Amplifiers 3-58

3.3 Applications of IC Power Amplifiers 3-59

4 IC Voltage Comparators 3-59

4.1 IC Voltage Comparator Functions and Types 3-59

4.2 Main Parameters of IC Voltage Comparators 3-60

4.3 Applications of IC Voltage Comparator 3-61

5 IC Analog Multipliers 3-62

5.1 IC Analog Multiplier Functions and Types 3-62

5.2 Main Parameters of IC Analog Multipliers 3-62

5.3 Applications of IC Analog Multiplier 3-63

6 IC Analog Switches 3-65

6.1 IC Analog Switch Functions and Types 3-65

6.2 Main Parameters of IC Analog Switches 3-66

6.3 Applications of IC Analog Switch 3-66

7 IC Phase Locked Loops (PLL) 3-68

7.1 Fundamental Constitutions of IC

PLLs 3-68

7.2 Main Parameters of IC PLLs 3-70

7.3 Applications of IC PLLs 3-70

8 Switched Capacitor Network (SCN) 3-71

8.1 Basic Circuits of SCN 3-71

8.2 Application Circuits of SCN 3-73

Chapter 4 Analog Signal Operation and Processing

1 Operation Circuits 3-75

1.1 Proportional Operation Circuits 3-75

1.2 Addition and Subtraction Circuits 3-75

1.3 Integration and Differentiation Circuits 3-77

1.4 Logarithmic and Antilogarithmic Circuits 3-78

2 Precision Amplifiers 3-79

2.1 Brief Introduction 3-79

2.2 General Purpose High Performance Instrument Amplifiers 3-79

2.3 Interference and Noise Rejection 3-80

3 Active Filters 3-82

3.1 Types of Filters 3-82

3.2 Active RC Filters 3-82

3.3 Switched Capacitor Filters 3-87

Chapter 5 Gate and Combinational Logic Circuits

1 Logic Algebra 3-88

1.1 Basic Logic Operations 3-88

1.2 Fundamental Formulas of Logic Algebra 3-88

2 Gate Circuit Classification in Logic Functions 3-89

2.1 Logic Function of Commonly-used Gate Circuits 3-89

2.2 Relationship Between Logic Functions of Gate Circuits and Positive-negative Logic 3-90

3 Bipolar Integrated Gate Circuits 3-91

3.1 Transistor-Transistor Logic (TTL)



| | | | |
|-------------------------------------------------------------------------|-------|--------------------------------------------------------------------|-------|
| Gate Circuits | 3-91 | Oscillators | 3-119 |
| 3.2 High Threshold Logic (HTL) Gate Circuit | 3-94 | 1.2 RC Sine Wave Oscillator | 3-119 |
| 3.3 Emitter Coupled Logic (ECL) Gate Circuit | 3-95 | 1.3 LC Sine Wave Oscillator | 3-120 |
| 3.4 Integrated Injection Logic (I ² L) Gate Circuit | 3-96 | 1.4 Quartz Crystal Sine Wave Oscillator | 3-121 |
| 4 MOS Integrated Gate Circuits | 3-96 | 2 Non-sine Wave Generators Made up of Voltage Comparator | 3-122 |
| 4.1 PMOS Gate Circuit | 3-96 | 2.1 Rectangular Wave Generator | 3-122 |
| 4.2 NMOS Gate Circuit | 3-97 | 2.2 Triangular and Sawtooth Wave Generators | 3-123 |
| 4.3 CMOS Gate Circuits | 3-97 | 3 IC Function Generators | 3-123 |
| 5 Encoder and Decoder | 3-99 | 4 Schmitt Triggers | 3-124 |
| 5.1 Encoder | 3-99 | 4.1 Schmitt Trigger Using Gate Circuits | 3-124 |
| 5.2 Decoder | 3-101 | 4.2 IC Schmitt Trigger | 3-125 |
| 6 Multiplexer and Demultiplexer | 3-102 | 4.3 Applications of Schmitt Trigger | 3-126 |
| 6.1 Multiplexer | 3-102 | 5 Monostable Multivibrators | 3-126 |
| 6.2 Demultiplexer | 3-102 | 5.1 Monostable Multivibrator Using Voltage Comparator | 3-126 |
| 7 Arithmetic Units | 3-103 | 5.2 Monostable Multivibrator Using Gate Circuits | 3-127 |
| 7.1 Adder | 3-103 | 5.3 Monostable Multivibrator Using Schmitt Trigger | 3-127 |
| 7.2 Arithmetic Logic Unit | 3-103 | 5.4 IC Monostable Multivibrator | 3-128 |
| 7.3 Data Comparator | 3-104 | 5.5 Applications of Monostable Multivibrators | 3-128 |
| 8 Level Converting Circuits | 3-105 | 6 Astable Multivibrators | 3-128 |
| Chapter 6 Flip-Flops and Sequential Logic Circuits | | | |
| 1 Flip-Flops | 3-106 | 6.1 Astable Multivibrator Using Gate Circuits | 3-128 |
| 1.1 Basic RS Flip-Flops | 3-106 | 6.2 Astable Multivibrator Using Schmitt Trigger | 3-128 |
| 1.2 Clocked Flip-Flops | 3-107 | 6.3 Quartz Crystal Astable Multivibrator | 3-129 |
| 2 Registers and Shift Registers | 3-111 | 7 555 Timer | 3-130 |
| 2.1 Registers | 3-111 | 7.1 Circuit Configuration and Basic Function of 555 Timer | 3-130 |
| 2.2 Shift Registers | 3-111 | 7.2 Applications of 555 Timer | 3-131 |
| 2.3 Dynamic MOS Shift Register | 3-113 | 8 Clipper and Clamper | 3-132 |
| 3 Counters | 3-113 | 8.1 Clipper | 3-132 |
| 3.1 Brief Introduction | 3-113 | 8.2 Clamper | 3-134 |
| 3.2 Asynchronous Counter | 3-114 | | |
| 3.3 Synchronous Counter | 3-116 | | |
| 4 Sequence Generators | 3-117 | | |
| Chapter 7 Waveform Generation and Shaping Circuits | | | |
| 1 Sine Wave Oscillators | 3-118 | | |
| 1.1 Oscillation Criteria for Sine Wave | | | |



Chapter 8 Modulation and Demodulation

1 Continuous Wave Analog Modulation and Demodulation 3-134

1.1 Amplitude Modulation and Demodulation 3-134

1.2 Angle Modulation and Demodulation 3-136

2 Pulse Modulation and Demodulation 3-137

2.1 Pulse Amplitude Modulation 3-137

2.2 Pulse Width Modulation 3-137

2.3 Pulse Position Modulation 3-138

2.4 Pulse Code Modulation 3-138

2.5 Pulse Demodulation 3-139

3 Digital Modulation and Demodulation 3-139

3.1 Binary Digital Modulation 3-139

3.2 Binary Digital Demodulation 3-141

Chapter 9 Digital-Analog Interconversion

1 D/A Converters 3-141

1.1 D/A Converter Types and Principles of Operation 3-141

1.2 Main Parameters of D/A Converters 3-143

2 A/D Converters 3-143

2.1 A/D Converter Types and Principles of Operation 3-143

2.2 Main Parameters of A/D Converters 3-145

3 Sample-and-Hold Circuit 3-146

3.1 Principles of Operation for Sample-and-Hold Circuit 3-146

3.2 Main Parameters of Sample-and-Hold Circuit 3-146

4 Constitution of Data Acquisition System 3-146

Chapter 10 Semiconductor Rectifier Circuits and Integrated Voltage Regulators

1 Rectifier Circuits 3-147

1.1 Basic Types of Rectifier Circuits 3-147

1.2 Main Parameter Relationships to Rectifier Circuits 3-147

1.3 Features and Applications of Several Rectifier Circuits 3-151

2 Filter Circuits 3-151

3 Voltage Regulator Circuit 3-152

3.1 Main Performance Indexes of Voltage Regulator Circuits 3-152

3.2 Zener Diode Regulator Circuit 3-153

4 Series IC Voltage Regulators 3-153

4.1 Fundamental Constitution of Series IC Voltage Regulators 3-153

4.2 Main Parameters of Series IC Voltage Regulators 3-153

4.3 Three-terminal IC Voltage Regulators 3-154

4.4 Multiterminal IC Voltage Regulators 3-158

5 IC Voltage References 3-160

6 Switching Voltage Regulator Circuits 3-161

6.1 Pulse-width Modulation Switching Voltage Regulator Circuit 3-161

6.2 Frequency Modulation Switching Voltage Regulator Circuit 3-163

6.3 Pulse-width and Frequency Modulation Switching Voltage Regulator Circuit 3-164

Chapter 11 Thyristor Converter Techniques

1 Brief Introduction 3-164

1.1 Development of Power Converter Techniques 3-164

1.2 Types of Power Converters 3-165

2 Thyristor Rectifier Circuits and

此星公司制作 请尊重作者版权



| | | | |
|----------------------------------------------------------------------------------------|-------|----------------------------------------------------------------------|-------|
| Active Inverter Circuits | 3-166 | Induction Heating | 3-188 |
| 2·1 Single-phase Bridge Controlled Rectifier Circuit | 3-166 | 5·4 Converter for A. C. Motor Speed Control | 3-190 |
| 2·2 Three-phase Bridge Controlled Rectifier Circuit | 3-170 | 6 A. C. Voltage Regulators and D. C. Voltage Regulators | 3-193 |
| 2·3 Influence of Load on Controlled Rectifier Circuits | 3-170 | 6·1 Single-phase A. C. Voltage Regulator | 3-193 |
| 2·4 Active Inverter Circuit | 3-173 | 6·2 Three-phase A. C. Voltage Regulator | 3-193 |
| 2·5 Thyristor Reversible Rectifier Circuit | 3-175 | 6·3 D. C. Voltage Regulator | 3-194 |
| 2·6 Comparison of All Sorts Rectifier Circuits and Selection of Parameters | 3-175 | 7 Non-contact Switches and D. C. Choppers | 3-194 |
| 3 Thyristor Trigger Circuits | 3-177 | 7·1 Single-phase A. C. Non-contact Switch | 3-194 |
| 3·1 Single-phase Trigger Circuit | 3-177 | 7·2 Three-phase A. C. Non-contact Switch | 3-194 |
| 3·2 Three-phase Trigger Circuit | 3-178 | 7·3 D. C. Non-contact Switch | 3-194 |
| 3·3 Integrated Trigger Circuit | 3-179 | 7·4 D. C. Chopper | 3-195 |
| 4 Thyristor Frequency Converters | 3-183 | 8 Series-parallel Connection of Thyristors and Protection | 3-195 |
| 4·1 Single-phase Inverter | 3-183 | 8·1 Series Connection of Thyristors and Balancing Voltage | 3-195 |
| 4·2 Three-phase Bridge Parallel Connection Inverter | 3-184 | 8·2 Parallel Connection of Thyristors and Balancing Current | 3-196 |
| 4·3 Indirect Frequency A. C. Converter | 3-185 | 8·3 Over Current Protection of Thyristor | 3-196 |
| 4·4 Direct Frequency A. C. Converter | 3-186 | 8·4 Over Voltage Protection of Thyristor | 3-197 |
| 5 Applications of Converters | 3-186 | References | 3-197 |
| 5·1 Converters for D. C. Motor Speed Control | 3-186 | | |
| 5·2 Converter for High Voltage Direct Current Transmission | 3-187 | | |
| 5·3 Converter for Medium Frequency | | | |

Part 4 Fundamentals of Electronic Computers

Chapter 1 Introduction

| | |
|---------------------------------------------------------|-----|
| 1 Development of Computers | 4-3 |
| 2 Classification and Applications of Computers | 4-4 |
| 2·1 Classification of Computers | 4-4 |
| 2·2 Applications of Computers | 4-5 |
| 3 Composition of Computers | 4-6 |
| 3·1 Computer Hardware | 4-6 |
| 3·2 Computer Software | 4-8 |

| | |
|------------------------------------------------|-----|
| 4 Performance Parameters of Computers | 4-9 |
|------------------------------------------------|-----|

Chapter 2 Numerical Representation and Operational Rules

| | |
|--------------------------------------------------|------|
| 1 Number and Number Systems | 4-9 |
| 2 Transformation between Number Systems | 4-9 |
| 3 Machine Number and Word Length | 4-11 |



4 Representation and Operation of True Code and Complementary Code of Machine Number 4-11

5 Operational Rules of Binary Number 4-11

6 Digital and Character Coding 4-11

7 Method of Processing Chinese Characters 4-12

8 Data Check Code 4-13

Chapter 3 Instruction Set of Computers

1 Brief Introduction 4-13

2 Instruction Format 4-14

3 Addressing Mode 4-15

4 Classification and Functions of Instructions 4-16

Chapter 4 Central Processing Unit (CPU)

1 Brief Introduction 4-18

1.1 Functions of CPU 4-18

1.2 Composition of CPU 4-18

1.3 Main Registers of CPU 4-19

1.4 Operation Control Unit and Time Sequence Generator 4-20

2 Control Mode 4-20

2.1 Instruction Cycle, Pulse Width Cycle and CPU Cycle 4-21

2.2 Control Mode 4-21

3 Microprogrammed Control Unit 4-22

3.1 Fundamental Operation Principles of Microprogrammed Control Unit 4-22

3.2 Structure and Format of Microinstruction 4-22

3.3 Microprogrammed Control Memory 4-23

3.4 Microprogramming Language and Microprogramming Application 4-24

4 Control Mode for Instructions Interpreting 4-24

4.1 Three Types of Control Mode 4-25

4.2 Sequence Control Mode 4-25

4.3 Overlap Control Mode 4-25

4.4 Pipeline Control Mode 4-26

5 Reduced Instruction Set Computer (RISC) 4-27

5.1 Emergence and Development of RISC Technique 4-27

5.2 RISC Design Principles and Technical Measures 4-28

Chapter 5 Memory System of Computers

1 Brief Introduction 4-30

1.1 Basic Concept of Memory 4-30

1.2 Functions of Memory 4-30

1.3 Performance Parameters of Memory 4-30

1.4 Classification of Memory 4-31

2 Main Memory 4-32

2.1 ROM 4-32

2.2 RAM 4-33

2.3 Cache 4-33

2.4 Virtual Memory 4-33

3 External Memory 4-34

3.1 Magnetic Recording Principles and Recording Mode 4-34

3.2 Hard Disc Memory 4-36

3.3 Floppy Disc Memory 4-39

3.4 Tape Memory 4-41

3.5 CD Memory 4-42

Chapter 6 Input/output System of Computers

1 Brief Introduction 4-45

2 Input Devices 4-45

2.1 Keyboard 4-45

2.2 Mouse 4-46

2.3 Digitalizer 4-47

2.4 Image Input Devices 4-48

3 Output Devices 4-48

3.1 Display Devices 4-48

3.2 Print Devices 4-53



4 Chinese Character Processing
 Devices 4-55
 4.1 Chinese Character Input Devices 4-55
 4.2 Chinese Character Output Devices 4-56
 5 Input/Output Mode of DMA 4-57
 6 General-purpose Interface
 Standard 4-58

Chapter 7 Electronic Computer Software

1 Operating System 4-61
 1.1 Development of Operating System 4-61
 1.2 Functions of Operating System 4-62
 1.3 Brief Introduction to Popular Operating Systems 4-67
 2 Data Base System 4-71
 2.1 Development of Data Base System 4-71
 2.2 Data Model 4-71
 2.3 Structure of Data Base System 4-72
 2.4 Data Base Management System (DBMS) 4-72
 2.5 Brief Introduction to Popular DBMS 4-76
 3 Programming Languages 4-79
 3.1 Machine Language 4-79
 3.2 Assembly Languages 4-79
 3.3 High-level Languages 4-80

Chapter 8 Electronic Computer Network

1 Brief Introduction 4-88
 1.1 Development of Computer Network ... 4-88
 1.2 Definition of Computer Network 4-88
 1.3 Characteristics and Functions of Computer Network 4-88

2 Data Communications 4-89
 2.1 Concept of Data Communications 4-89
 2.2 Composition of Data Communication System 4-89
 2.3 Media of Information Transfer 4-89
 2.4 Techniques of Data Encoding 4-90
 2.5 Techniques of Data Transfer 4-90
 2.6 Techniques of Data Exchange 4-91
 3 Computer Networking 4-92
 3.1 Classification of Computer Networking 4-92
 3.2 Topological Structure of Computer Interconnection 4-92
 3.3 Open System Interconnection 4-93
 4 Composition of LAN and Network Interconnection 4-94
 4.1 Composition of LAN 4-94
 4.2 Interconnection of Networks 4-96
 5 Popular LAN Systems 4-96
 5.1 Novell 4-96
 5.2 3+ Netware 4-98
 5.3 PC net 4-100
 6 Applications of Computer Network 4-101
 6.1 Basic Functions of Network 4-101
 6.2 Distributed Processing 4-102

Chapter 9 Electronic Computer Virus

1 Concept of Computer Virus 4-102
 2 Structure of Computer Virus 4-102
 3 Classification of Computer Virus ... 4-103
 4 Prevention of Computer Virus 4-104
 5 Anti-virus Tools 4-104
 References 4-106



Part 5 Automatic Control Theory

Table of Symbols

Chapter 1 Introduction

| | | |
|-----|------------------------------------------------------|-----|
| 1 | Terminology and Definition of Control System | 5-5 |
| 2 | Composition and Functions of Control Systems | 5-5 |
| 3 | Classification of Control Systems | 5-6 |
| 4 | Design of Control Systems | 5-6 |
| 4.1 | Design Outline | 5-6 |
| 4.2 | Design Procedure | 5-6 |
| 5 | Development and Applications of Control Theory | 5-7 |

Chapter 2 Mathematical Model

| | | |
|-----|-------------------------------------------------------------------------|------|
| 1 | Mathematical Model of Control Systems | 5-8 |
| 1.1 | Transfer Function, Impulse Response | 5-8 |
| 1.2 | Frequency Characteristics | 5-10 |
| 1.3 | Graphic Description of Control Systems | 5-10 |
| 1.4 | Mathematical Description of Multivariable Systems | 5-13 |
| 2 | Mathematical Modelling of Control Systems | 5-15 |
| 2.1 | Brief Introduction | 5-15 |
| 2.2 | Mechanism of Modelling | 5-16 |
| 2.3 | Linearization | 5-17 |
| 2.4 | Model Identification | 5-17 |
| 3 | Mathematical Model of Typical Elements | 5-21 |
| 3.1 | Frequency Characteristics of Typical Elements | 5-21 |
| 3.2 | Transfer Function and Bode Diagram of Typical Electrical Networks | 5-23 |

Chapter 3 Control System Analysis

| | | |
|---|-----------------------------------|------|
| 1 | Stability of Control System | 5-27 |
|---|-----------------------------------|------|

| | | |
|-----|---------------------------------|------|
| 1.1 | Concept of Stability | 5-27 |
| 1.2 | Routh-Hurwitz Criterion | 5-28 |
| 1.3 | Nyquist Criterion | 5-29 |
| 1.4 | Stability Margin | 5-29 |
| 1.5 | Lyapunov Stability Theory | 5-30 |

| | | |
|-----|-------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 2 | Dynamic Characteristic Analysis of Control Systems | 5-31 |
| 2.1 | Direct Analysis Technique | 5-32 |
| 2.2 | Transient Response | 5-32 |
| 2.3 | Time-domain Response of Second Order System | 5-33 |
| 2.4 | Steady Error and Error Coefficients | 5-34 |
| 3 | Root Locus Technique | 5-35 |
| 3.1 | Root Locus Concept | 5-35 |
| 3.2 | Fundamental Rules of Construction of Root Loci | 5-35 |
| 3.3 | Applications of Root Locus Technique | 5-36 |
| 4 | Frequency-domain Technique | 5-36 |
| 4.1 | Nyquist Diagram | 5-36 |
| 4.2 | Bode Diagram | 5-37 |
| 4.3 | Relationship between Time-domain and Frequency-domain Performance Indices of System | 5-38 |
| 5 | State Space Method | 5-38 |
| 5.1 | Controllability | 5-39 |
| 5.2 | Observability | 5-39 |
| 5.3 | Controllable Canonical Form and Observable Canonical Form | 5-39 |
| 5.4 | Dual Principle | 5-40 |
| 5.5 | System Realization | 5-40 |
| 5.6 | Modal Analysis | 5-41 |

Chapter 4 System Design

| | | |
|-----|-----------------------------------------------|------|
| 1 | Design Problem of Controller and System | 5-42 |
| 2 | Frequency-domain Design of Controller | 5-42 |
| 2.1 | Frequency-domain Technique | 5-42 |



| | | | | | |
|------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|------|------|------------------------------------------------------------------|------|
| 2·2 | Lead Compensation | 5-43 | 3·3 | Formulas of Z Transformation | 5-75 |
| 2·3 | Lag Compensation | 5-45 | 3·4 | Inverse Z Transformation | 5-76 |
| 2·4 | Lag-lead Compensation | 5-46 | 4 | Z Transfer Function of Discrete Control System | 5-77 |
| 2·5 | Cascade and Parallel Compensation ... | 5-47 | 4·1 | Z Transfer Function of Discrete Control System | 5-77 |
| 3 | Time-domain Design of Controller | 5-49 | 4·2 | Z Transfer Function of Open-loop Discrete Control System | 5-77 |
| 3·1 | PID Controller Design | 5-49 | 4·3 | Z Transfer Function of Closed-loop Discrete Control System | 5-77 |
| 3·2 | State Feedback Controller Design | 5-50 | 5 | Time Response of Discrete Control System | 5-79 |
| 3·3 | Observer Design | 5-51 | 5·1 | Impulse Transition Function | 5-79 |
| 4 | Controller Design of Compound Control Systems | 5-52 | 5·2 | Transition Function | 5-79 |
| Chapter 5 Nonlinear System | | | | | |
| 1 | Features of Nonlinear Systems | 5-53 | 6 | Frequency Response of Discrete Control System | 5-79 |
| 2 | Typical Nonlinear Characteristics ... | 5-54 | 7 | Stability of Discrete Control System | 5-80 |
| 3 | Phase Locus Technique | 5-57 | 7·1 | Stability Concept of Discrete Control System | 5-80 |
| 3·1 | Singular Point | 5-57 | 7·2 | Stability Criterion of Discrete Control System | 5-80 |
| 3·2 | Limit Cycle | 5-58 | 8 | Steady Error of Discrete Control System | 5-81 |
| 3·3 | Construction of Phase Locus | 5-59 | 9 | Transient Response of Discrete Control System | 5-82 |
| 3·4 | Application of Phase Locus Technique | 5-60 | 10 | Design of Discrete Control System | 5-82 |
| 4 | Describing Function Technique | 5-61 | 10·1 | Expected Characteristics of Discrete Control System | 5-82 |
| 4·1 | Describing Function of Typical Nonlinearity | 5-62 | 10·2 | Pole Assignment Technique | 5-83 |
| 4·2 | Describing Function Analysis Technique | 5-66 | 10·3 | Compensator of Discrete Control System | 5-85 |
| 4·3 | Dual Describing Function and Its Applications | 5-68 | 11 | State Space Representation of Discrete Control System | 5-86 |
| 5 | Popov Stability Criterion | 5-69 | 11·1 | State Equation of Discrete Control System | 5-86 |
| 5·1 | Conditions for Application of Popov Stability Criterion | 5-70 | 11·2 | Discretization of Continuous System | 5-87 |
| 5·2 | Popov Stability Criterion | 5-70 | 11·3 | State Space Representation of SISO Discrete Control System | 5-87 |
| Chapter 6 Discrete Control System | | | | | |
| 1 | Discrete Control System | 5-73 | | | |
| 2 | Sampling Process | 5-73 | | | |
| 2·1 | Sampling Element | 5-73 | | | |
| 2·2 | Sampling Theorem | 5-74 | | | |
| 3 | Z Transformation | 5-75 | | | |
| 3·1 | Mathematical Description of Discrete Control System | 5-75 | | | |
| 3·2 | Definition of Z Transformation | 5-75 | | | |



Chapter 7 Optimal Control

| | | |
|------|-----------------------------------------------------------------|-------|
| 1 | Brief Introduction | 5-88 |
| 2 | Maximum Principle with Control Variables Unconstrained | 5-88 |
| 2.1 | t_f Fixed, $x(t_f)$ Unconstrained Case ... | 5-88 |
| 2.2 | t_f Fixed, $x(t_f)$ Constrained Case | 5-89 |
| 2.3 | t_f Free Case | 5-89 |
| 3 | Maximum Principle with Control Variables Constrained | 5-89 |
| 4 | Discrete Maximum Principle | 5-89 |
| 5 | Dynamic Programming | 5-90 |
| 5.1 | Optimal Principle | 5-90 |
| 5.2 | Multi-decision Process | 5-90 |
| 5.3 | Design of Optimal Control System | 5-92 |
| 6 | Time Optimal Control | 5-93 |
| 6.1 | Necessary Conditions of Time Optimal Control | 5-93 |
| 6.2 | Switching Surface of Time Optimal Control | 5-94 |
| 6.3 | Time Suboptimal Control | 5-94 |
| 7 | Linear Optimal Regulator | 5-95 |
| 7.1 | Finite Time Optimal Regulator | 5-95 |
| 7.2 | Infinite Time Optimal Regulator | 5-96 |
| 7.3 | Characteristics of Optimal Regulator | 5-96 |
| 8 | Optimal Regulator with Given Stable Degree | 5-97 |
| 9 | Optimal Regulator with Constant Disturbance | 5-98 |
| 10 | Random Optimal Control and Kalman Filter | 5-99 |
| 10.1 | Random Optimal Control | 5-99 |
| 10.2 | Kalman Filter | 5-100 |

Chapter 8 Adaptive Control

| | | |
|---|-----------------------------------------------------|-------|
| 1 | Brief Introduction | 5-100 |
| 2 | Definition of Adaptive Control | 5-100 |
| 3 | Classification of Adaptive Control Systems | 5-100 |
| 4 | Stability Theory of Adaptive | |

| | | |
|-----|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| | Control System | 5-101 |
| 4.1 | Definition of Positive Real Function | 5-101 |
| 4.2 | Hyperstability Theory | 5-101 |
| 5 | Mathematical Description of Model Reference Adaptive System | 5-102 |
| 5.1 | State Equation Description of Model Reference Adaptive System | 5-102 |
| 5.2 | Input-output Equation Description of Model Reference Adaptive System ... | 5-102 |
| 5.3 | Error Equation of Model Reference Adaptive System | 5-103 |
| 6 | Part Parameters Optimal Design Method of Model Reference Adaptive System | 5-104 |
| 7 | Lyapunov Stability Theory Design Method of Model Reference Adaptive System | 5-104 |
| 7.1 | Adaptive Law Design Method Using Adjustable System State Variables ... | 5-104 |
| 7.2 | Adaptive Law Design Method Using Input and Output of Controlled Plant | 5-104 |
| 8 | Hyperstability Theory Design Method for Model Reference Adaptive System | 5-107 |
| 8.1 | Adaptive Law Design Method Using State Variables | 5-107 |
| 8.2 | Adaptive Law Design Method Using Input and Output for Model Reference Adaptive System | 5-107 |
| 9 | Random Adaptive Control System | 5-108 |
| 9.1 | Optimal Predictor and Minimum Variance Controller | 5-108 |
| 9.2 | Self Tuning Regulator | 5-109 |
| 9.3 | Pole-zero Assignment of Self Tuning Regulator | 5-110 |
| 9.4 | Self Tuning Controller | 5-111 |
| 10 | Adaptive State Observer | 5-111 |



Chapter 9 New Type Control Techniques

1 Brief Introduction 5-112

2 Robust Control 5-112

 2.1 Sensitivity Analysis of Control System 5-112

 2.2 Parameter Insensitive Control System 5-113

 2.3 H_∞ Optimization Theory 5-114

3 Fuzzy Control 5-116

 3.1 Fuzzy Set and Its Operations 5-116

 3.2 Fuzzy Matrix and Fuzzy Relationship 5-117

 3.3 Fuzzy Logic and Fuzzy Language 5-117

 3.4 Fuzzy Control Principle and Analysis-design Technique 5-118

 3.5 Rules of Fuzzy Control 5-120

 3.6 Identification of Fuzzy System 5-120

4 Intelligent Control 5-121

 4.1 Artificial Intelligence and Automatic Control 5-121

 4.2 Expert System and Knowledge Engineering 5-122

 4.3 Intelligent Control and Intelligent Control System 5-123

References 5-123

Part 6 Numerical Control Techniques

Chapter 1 Introduction

1 Basic Concepts 6-3

 1.1 Numerical Control System 6-3

 1.2 Principle and Classification of the Numerical Control Equipment 6-4

 1.3 Measuring Devices of Numerical Control Equipment 6-5

 1.4 Auxiliary Functions of Numerical Control Equipment 6-5

 1.5 Diagnosis of Numerical Control Systems 6-5

2 History and Present Situation of Numerical Control Techniques 6-5

 2.1 History of Numerical Control Techniques 6-5

 2.2 Present Situation of Numerical Control Techniques 6-6

3 Trends of Numerical Control Techniques 6-6

Chapter 2 Principles of Point to Point Control and Path Control in Numerical Control Systems

1 Point to Point Control 6-7

2 Interpolation Principle 6-8

 2.1 Digital Pulse Multiplier 6-8

 2.2 Point by Point Comparative Method 6-9

 2.3 Digital Integral Method 6-12

 2.4 Time Segment Method 6-14

3 Knife Radius Compensatory Principles 6-16

 3.1 Basic Concepts 6-16

 3.2 Knife Radius Compensatory Methods in Hardware Numerical Control System 6-17

 3.3 Knife Radius Compensatory Methods in Computer Numerical Control System 6-19

Chapter 3 NC Programming

1 Objective and Methods of Programming 6-23

 1.1 Objective of NC Programming 6-23

 1.2 Methods of NC Programming 6-23

2 Some Regulations about NC Programming 6-23

 2.1 Standards and Codes in Programming 6-23

此星公司制作 请尊重作者版权



| | | |
|-----|------------------------------------------|------|
| 2.2 | Common Instructions in Programming | 6-27 |
| 3 | Steps and Example of Programming | 6-29 |
| 3.1 | Programming Steps | 6-29 |
| 3.2 | NC Lathe Programming | 6-29 |
| 3.3 | NC Milling Programming | 6-31 |
| 4 | Computer Aided Programming System | 6-36 |
| 4.1 | Fundamentals of CAP | 6-36 |
| 4.2 | NC Programming Languages | 6-36 |
| 4.3 | Programming about CAP System | 6-40 |

Chapter 4 Servo Drive Systems of Numerical Control

| | | |
|-----|------------------------------------------------------------------|------|
| 1 | Composition of Servo Drive Systems | 6-42 |
| 2 | Open Loop Servo Drive Systems | 6-42 |
| 2.1 | Main Parameters and Characteristics of Stepping Motors | 6-43 |
| 2.2 | Control Circuits of Stepping Motors | 6-45 |
| 2.3 | Using Single Chip Computer Control of Stepping Motor | 6-47 |
| 2.4 | Feedback Compensation Method for Open Loop Systems | 6-48 |
| 3 | Closed Loop Servo Drive Systems | 6-48 |
| 3.1 | D. C. Position Servo Drive Systems | 6-49 |
| 3.2 | A. C. Position Servo Drive Systems | 6-52 |
| 4 | Brief Introduction to Typical Position Servo Drive Systems | 6-57 |
| 4.1 | AC-200 Type Position Servo Drive Systems | 6-57 |
| 4.2 | FANUC-BESK 6ME Type DC Position Servo Drive Systems | 6-59 |
| 5 | Design Methods of Servo Control Systems | 6-61 |
| 5.1 | Static Design Methods of Servo Control Systems | 6-61 |
| 5.2 | Dynamic Design Methods of Servo Control Systems | 6-61 |

Chapter 5 Measuring Devices in Numerical Control

| | | |
|-----|----------------------------------------------------|------|
| 1 | Brief Introduction | 6-68 |
| 1.1 | Classification of Position Measuring Devices | 6-68 |
| 1.2 | Requirements of Position Measuring Device | 6-68 |
| 2 | Photoelectric Disk and Coded Disk | 6-68 |
| 2.1 | Photoelectric Disk | 6-68 |
| 2.2 | Coded Disk | 6-70 |
| 3 | Induction Synchronizer | 6-70 |
| 3.1 | Principles and Signal Processing | 6-71 |
| 3.2 | Classification and Main Parameters | 6-72 |
| 3.3 | Features | 6-74 |
| 3.4 | System Construction and Applications | 6-74 |
| 4 | Rotating Transformer | 6-77 |
| 4.1 | Basic Principles | 6-77 |
| 4.2 | Performance Process | 6-77 |
| 5 | Raster | 6-79 |
| 5.1 | Basic Principles | 6-79 |
| 5.2 | Classifications | 6-80 |
| 5.3 | Measuring Devices | 6-80 |
| 6 | Magnetic Ruler | 6-82 |

Chapter 6 Computer Numerical Control System

| | | |
|-----|---------------------------------------------------------------|------|
| 1 | Brief Introduction to Computer Numerical Control System | 6-84 |
| 1.1 | Definition | 6-84 |
| 1.2 | Composition | 6-84 |
| 1.3 | Features | 6-85 |
| 2 | Computer Numerical Control and Microcomputer | 6-85 |
| 2.1 | Requirements of Microcomputer Functions | 6-85 |
| 2.2 | Functions of Microcomputer in Typical System | 6-86 |
| 3 | Input and Display in Computer Numerical Control Systems | 6-86 |



| | | | | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|-------|----------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|-------|
| 3·1 | Input Devices and Interfaces | 6-87 | 3·3 | General Trouble of SINUMERIK 810 Numerical Control Systems | 6-106 |
| 3·2 | Display Devices and Interfaces | 6-88 | 4 | Reliability of Numerical Control Systems | 6-106 |
| 4 | Output and Programmable Application Logic | 6-90 | 4·1 | Basic Concepts of Reliability and Maintainability | 6-106 |
| 4·1 | Output of Speed and Output of Logical Functions | 6-90 | 4·2 | Reliability Technique and Design | 6-107 |
| 4·2 | Programmable Logical Controller and Applications | 6-92 | Chapter 8 Applications of NC Techniques | | |
| 4·3 | Programmable Application Logic | 6-93 | 1 | NC Machine Tools | 6-108 |
| 5 | Software Interpolation | 6-95 | 1·1 | Composition Functions and Features of NC Machines | 6-108 |
| 6 | Softwares in Computer Numerical Control System | 6-96 | 1·2 | Brief Introduction about Overseas Typical CNC Systems | 6-109 |
| 6·1 | Interpolation and Control Programmes | 6-96 | 1·3 | Some Typical Domestic CNC Systems | 6-115 |
| 6·2 | Programmes of Programmable Application Logic | 6-100 | 2 | Automatic Plotters | 6-116 |
| 6·3 | Main Programme | 6-102 | 2·1 | Origin and Development of Plotters | 6-116 |
| Chapter 7 Trouble Diagnosis and Reliability of Numerical Control Systems | | | 2·2 | Composition of Plotters | 6-117 |
| 1 | Basic Concepts of Trouble Diagnosis | 6-102 | 2·3 | Fundamentals of Plotters | 6-117 |
| 1·1 | Classification of Trouble | 6-102 | 2·4 | Main Functions and Specifications of Plotters | 6-117 |
| 1·2 | Regular Pattern of Trouble Generation | 6-103 | 2·5 | Classification of Plotters | 6-118 |
| 1·3 | Trouble Diagnosis and Processing | 6-103 | 2·6 | DXY-800 and DXY-101 Flat Plotters | 6-118 |
| 2 | Trouble Diagnosis of Computer Numerical Control | 6-104 | 3 | Applications of NC Techniques in Textile Industry | 6-119 |
| 2·1 | On-line Self Diagnosis | 6-104 | 3·1 | Applications Summary | 6-119 |
| 2·2 | Off-line Diagnosis | 6-104 | 3·2 | Computer Controlled Embroidery | 6-119 |
| 2·3 | General Processing of Trouble | 6-104 | 4 | Applications of NC Techniques in CIMS | 6-120 |
| 3 | Trouble Diagnosis of Some Typical Numerical Control Systems | 6-105 | 4·1 | Relation of NC Techniques and Factory Automation | 6-120 |
| 3·1 | General Trouble of MC1 Numerical Control Systems | 6-105 | 4·2 | Trends of NC Techniques Raised by CIMS | 6-121 |
| 3·2 | General Trouble of FANUC Numerical Control Systems | 6-105 | References | 6-121 | |



Part 7 Electric Drive Control Systems

Table of Symbols

Chapter 1 Introduction

- 1 Constitution and Classification of Control Systems for Electric Drives 7-5
- 2 Development of Electric Drive Technology 7-5
- 3 Main Specifications of Variable-speed Systems for Electric Drives 7-6
 - 3-1 Static Quality Specifications 7-6
 - 3-2 Dynamic Quality Specifications 7-6
 - 3-3 Economy 7-7
- 4 Reliability of Control Systems for Electric Drives 7-7
 - 4-1 Features on Reliability of Control Systems for Electric Drives 7-7
 - 4-2 Examinations on Reliability of Control Systems for Electric Drives 7-7
 - 4-3 Methods to Increase Reliability of Electric Drive Units 7-8
- 5 Interference and Suppression in Thyristor Drivegear 7-8
 - 5-1 Interference and Suppression in Thyristor Converters 7-8
 - 5-2 Interference and Suppression in Control Circuits 7-9

Chapter 2 Selection of Motors

- 1 Types and Construction Selection of Motors 7-10
 - 1-1 Types and Mechanical Characteristics of Motors 7-10
 - 1-2 Selection of A. C. Motors 7-11
 - 1-3 Selection of D. C. Motors 7-11
 - 1-4 Selection of Construction Types of Motors 7-11
- 2 Selection of Voltage and Speed of

- Motors 7-12
 - 2-1 Voltage Selection of Motors 7-12
 - 2-2 Speed Selection of Motors 7-12
- 3 Characteristics and Applications of Conventional Motors 7-13
 - 3-1 Mechanical Characteristics of Motors 7-13
 - 3-2 Characteristics and Application Range of Conventional Motors 7-15
- 4 Power Computations of Motors and Related Figures and Tables 7-18
- 5 Capacity Selection of Motors in Continuous Duty 7-21
 - 5-1 Capacity Computations of Motors in Continuous Duty with Constant Load 7-21
 - 5-2 Capacity Computations of Motors in Continuous Periodical Duty with Variable Load 7-21
- 6 Capacity Selection of Motors in Short-time Duty 7-23
- 7 Capacity Selection of Motors with Intermittent Duty 7-23
- 8 Checks of Motors 7-24
 - 8-1 Thermal Check 7-24
 - 8-2 Check of Overload Capability for Motors 7-24
 - 8-3 Check of Mean Starting Torque 7-25
 - 8-4 Other Checks 7-26
- 9 Examples of Power Computations and Checks 7-26
 - 9-1 Power Computations of Motors for Centrifugal Fans 7-26
 - 9-2 Power Computations of Motors for Centrifugal Pumps 7-26
 - 9-3 Power Computations of Motors for Cranes 7-27
 - 9-4 Capacity Check of Motors with



Long-time Duty in Steady Load 7-27

9·5 Thermal and Overload Check of D. C. Motors with Short-time Duty 7-28

9·6 Thermal Check of D. C. Motors with Intermittent Duty 7-28

Chapter 3 Conventional Control Circuits and Selection of Apparatus

1 Basic Link of Conventional Control Circuits 7-29

1·1 Starting Control of Motors 7-29

1·2 Braking Control of Motors 7-34

2 Conventional Control Circuits 7-37

2·1 Basic Requirements of Circuit Design 7-37

2·2 Conventional Control Circuits 7-37

3 Selection of Conventional Control Apparatus 7-39

3·1 Selection of Low Voltage Circuit-breakers 7-39

3·2 Selection of Fuses 7-39

3·3 Selection of Alternating and Direct Contactors 7-39

3·4 Selection of Thermal Relays 7-40

3·5 Selection of Protection Relays 7-40

3·6 Selection of Time-delay Relays 7-40

4 Applications of Programmable Controllers in Control System 7-40

4·1 Features of Programmable Controllers 7-41

4·2 Applications of Programmable Controllers 7-43

4·3 Type Selections of Programmable Controllers 7-44

Chapter 4 Variable-speed Systems of D. C. Motors

1 Variable-speed Systems of Separated Exciting D. C. Motor 7-45

1·1 Selection of Thyristor Converters 7-45

1·2 Variable-speed Systems Excited

by Thyristor Converters 7-48

1·3 Non-reversible Variable-speed Systems Fed by Thyristor Converters 7-48

1·4 Reversible Variable-speed Systems Fed by Thyristor Converters 7-50

2 Variable-speed Systems of Series Exciting D. C. Motor 7-53

2·1 Features 7-53

2·2 Voltage Regulation 7-53

2·3 Speed Regulation 7-54

3 Digital D. C. Variable-speed System 7-54

3·1 Features 7-54

3·2 Construction 7-54

Chapter 5 Variable-speed Systems of A. C. Motors

1 Cascade Variable-speed System of Wound Rotor Asynchronous Motor 7-54

1·1 Brief Introduction 7-54

1·2 Subsynchronous Cascade Variable-speed 7-55

1·3 Supersynchronous Cascade Variable-speed 7-56

2 Variable Frequency Systems of Cage Asynchronous Motors 7-57

2·1 Brief Introduction 7-57

2·2 Voltage Source D. C. -link Converter and Variable Frequency Systems 7-57

2·3 Current Source D. C. -link Converter and Variable Frequency Systems 7-59

2·4 Cycloconverter 7-59

2·5 Variable Frequency Systems with PWM Converter Composed of Giant Transistors 7-60

2·6 Variable Frequency Systems with Converter Composed of Gate Turn-off Thyristors 7-63

2·7 Variable Frequency Systems with Converter Composed of MOSFETs 7-63

此星公司制作 请尊重作者版权

44

44



3 Vector Control Systems 7-64

3.1 Fundamental Principle of Vector Control 7-64

3.2 Vector Control System of Asynchronous Motor 7-66

3.3 Vector Control System of Synchronous Motor 7-68

4 Variable-speed System for Brushless Motor 7-69

4.1 Composition of Brushless Motor 7-69

4.2 Commutation Control of Inverter Used for Brushless Motor 7-70

4.3 Variable-speed System for Brushless Motor 7-70

5 Other Variable-speed Systems of A.C. Motors 7-71

5.1 Stator Variable-voltage and Variable-Speed System of Asynchronous Motor 7-71

5.2 Variable-speed Systems for Rotor with Series Resistor and Chopper 7-72

5.3 Electromagnetic Variable-speed Motor 7-72

5.4 Variable-speed System of Asynchronous Motor with Variable Poles 7-72

Chapter 6 Industry Applications of Electric Drive Systems

1 Control Systems of Electric Drives for Rolling Mills 7-73

1.1 Brief Introduction 7-73

1.2 Control Systems of Electric Drives for Tandem Cold Mills 7-73

1.3 Electric Drives for Roughing Mills 7-79

1.4 Computer Control System of High-speed Wire Mill 7-81

2 Control Systems of Electric Drives for Mining Hoists 7-83

2.1 D.C. Drive System 7-83

2.2 Control Systems of A.C. Drives 7-84

3 Electric Drive Systems for Offshore Oil Rigs 7-87

4 Control Systems of Electric Drives for Paper Machines 7-89

5 Control Systems of Electric Drives for Elevators 7-91

5.1 A.C. Drive Systems 7-91

5.2 D.C. Drive Systems 7-94

5.3 Grouping Control and Management for Elevators 7-95

6 Control Systems of Electric Drives for Machine Tools 7-95

7 Control Systems of Electric Drives for Fans and Pumps 7-97

7.1 Brief Introduction 7-97

7.2 Energy Saving Methods and Variable-speed Controls of Fans 7-98

7.3 Energy Saving Methods and Variable-speed Controls of Pumps 7-98

7.4 Application Examples 7-99

8 Other Industry Applications 7-101

Chapter 7 Commissioning of Control Systems for Electric Drives

1 Basic Rules and Steps for Commissioning 7-107

2 Preparations before Commissioning 7-107

2.1 Check of Equipment 7-107

2.2 Wiring Check 7-108

2.3 Insulation Check 7-108

3 Commissioning for Operational Interlock and Protective Circuits ... 7-109

3.1 Energization of Control and Auxiliary Supplies 7-109

3.2 Check of Various Power Supplies 7-109

3.3 Commissioning of Operational Circuits 7-109

3.4 Failure Combination Processing and Commissioning of Display Circuits ... 7-109

4 Commissioning of Trigger and Regulation Circuits 7-110

4.1 Commissioning of Trigger Units 7-110



| | | | | | |
|-----|---------------------------------------------------------------------------|-------|------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| 4.2 | Commissioning of Regulation Circuits | 7-112 | 6.2 | Commissioning of Reversible Variable-speed System with Logical Non-circulating Current | 7-119 |
| 5 | Commissioning of Field Circuits | 7-114 | 6.3 | Commissioning of Reversible Variable-speed System with Circulating Current | 7-119 |
| 5.1 | Transfer Functions of Field Circuits | 7-114 | 6.4 | Commissioning of Variable-speed System for Weakening Field with Non-independent Control | 7-119 |
| 5.2 | Commissioning of Non-reversible Field Circuits | 7-114 | 6.5 | Commissioning of Tension Control System for Coiler | 7-120 |
| 5.3 | Commissioning of Reversible Field Circuits | 7-116 | References | 7-120 | |
| 6 | Commissioning of Systems | 7-116 | | | |
| 6.1 | Commissioning of Non-reversible System with Speed and Current Loops | 7-116 | | | |

Part 8 Manufacturing Automation Systems for Machinery Industry

Table of Abbreviations

Chapter 1 Introduction

| | | |
|-----|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 1 | Manufacturing Automation Systems for Machinery Industry and Their History | 8-7 |
| 1.1 | Characteristics of Different Kinds of Manufacturing Industries | 8-7 |
| 1.2 | History of Manufacturing Automation Systems for Machinery Industry | 8-7 |
| 2 | Trends of Manufacturing Automation Systems—Computer Integrated Manufacturing Systems (CIMS) | 8-8 |
| 2.1 | Initiation and Developing of CIMS | 8-8 |
| 2.2 | Profits from CIMS | 8-8 |
| 3 | Main Contents of Machinery Manufacturing Automation | 8-9 |
| 3.1 | Relation and Difference between Subsystems of Manufacturing Automation and CIMS | 8-9 |
| 3.2 | Engineering Design Automation System | 8-9 |
| 3.3 | Management Information System for Manufacturing Industry | 8-9 |

| | | |
|-----|-----------------------------------------------------------------|------|
| 3.4 | Manufacturing Automation System | 8-10 |
| 3.5 | Inspection and Quality System | 8-10 |
| 3.6 | Factory Automation Network and Database System | 8-10 |
| 4 | Importance of Developing Manufacturing Automation Systems | 8-11 |

Chapter 2 Management Information Systems and Decision Support Systems for Mechanical Manufacturing Enterprise

| | | |
|-----|------------------------------------------------------|------|
| 1 | Fundamentals | 8-11 |
| 1.1 | Basic Concepts of Management and Decision | 8-11 |
| 1.2 | System and Environment | 8-12 |
| 1.3 | Data, Information, and Knowledge | 8-13 |
| 2 | Management Models for Manufacturing Enterprise | 8-14 |
| 2.1 | Conceptual Model for Manufacturing Enterprise | 8-14 |
| 2.2 | Material Requirement Planning | 8-15 |
| 2.3 | Manufacturing Resource Planning | 8-16 |
| 2.4 | Just-in-time | 8-16 |



| | | | | | |
|------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|-----------------------|---------------------------------------------------------------------------|------|
| 2.5 | Optimal Production Technology | 8-17 | Input and Store | 8-26 | |
| 2.6 | Advanced Management Approach and Operational Mode | 8-17 | 2.2 | Interactive Graphics System | 8-27 |
| 3 | Information System Architecture for Manufacturing Enterprise | 8-18 | 2.3 | Standard of Graphics Software | 8-28 |
| 3.1 | Basic concepts | 8-18 | 3 | Engineering Analysis and Optimization | 8-29 |
| 3.2 | Function Architecture | 8-19 | 3.1 | Preprocess and Postprocess of Finite Elements | 8-30 |
| 3.3 | Information Architecture | 8-19 | 3.2 | Finite Element Analysis | 8-31 |
| 4 | Decision Analysis and Decision Support System | 8-19 | 3.3 | Dynamic Analysis of Mechanical System | 8-32 |
| 4.1 | Simon Model for Decision Process | 8-19 | 3.4 | Kinematical Analysis of Mechanical System | 8-33 |
| 4.2 | Hierarchical Process for Decision Analysis | 8-20 | 3.5 | Optimum Design | 8-33 |
| 4.3 | Framework for CIM-oriented Decision Support System | 8-21 | 4 | Computer-aided Design | 8-34 |
| 5 | Fundamentals for System Planning, Analysis, Design, and Implementation | 8-21 | 4.1 | Solid Modeling and Parametric Feature Modeling | 8-34 |
| 5.1 | Two Different Kinds of Worlds in Language, Thinking Mode and Working Approach, and Life Cycle of Design | 8-22 | 4.2 | Computer-aided Geometric Design | 8-37 |
| 5.2 | Hierarchical Process in Function Design | 8-22 | 4.3 | Application of AI and Expert System Technology | 8-38 |
| 5.3 | Cross-discipline and Team Work in Design Process | 8-23 | 4.4 | Object-oriented Application System | 8-38 |
| 5.4 | Basic Concepts of Problem-solving and Framework for System Analysis and Design | 8-23 | 5 | Computer-aided Process Planning | 8-40 |
| Chapter 3 Engineering Design Automation Systems | | | 5.1 | Relationship and Interface among CAD, CAPP, and CAM | 8-40 |
| 1 | System Configuration and Selection | 8-24 | 5.2 | Computer-aided Group Technology ... | 8-41 |
| 1.1 | Flow Chart of Typical Engineering Design Automation Systems | 8-24 | 5.3 | Part Information Description and Transformation | 8-44 |
| 1.2 | System Hardware | 8-25 | 5.4 | Decision-making Methods in Process Planning | 8-48 |
| 1.3 | System Software and Supporting Software | 8-25 | 5.5 | Principles and Methods Used in CAPP | 8-51 |
| 1.4 | Selection of Hardware and Software ... | 8-25 | 6 | Computer-aided Inspection | 8-52 |
| 2 | Computer Graphics System | 8-26 | 6.1 | On-line/Off-line Inspection | 8-52 |
| 2.1 | System for Graphics Automatic | | 6.2 | Coordinate Measuring Machine | 8-52 |
| | | | 6.3 | Input for Measuring Information | 8-52 |
| | | | 6.4 | Generation of Measuring Planning | 8-53 |
| | | | 6.5 | Postprocess of Measuring Planning ... | 8-53 |
| | | | 6.6 | Computer Simulation for Automatic Measuring of Measuring Machine | 8-53 |
| | | | 6.7 | Processing and Feedback for | |



Measured Results 8-54

7 Computer-aided Manufacturing 8-54

7.1 Meaning for CAM 8-54

7.2 Programming of NC Machining 8-54

7.3 Pre and Post Process 8-55

7.4 Machining Simulation 8-56

8 Key Problems of Integration for Engineering Design Automation System 8-57

8.1 Engineering Database (EDB) Technology 8-57

8.2 Standard for Data Exchange to Graphics and Products 8-57

Chapter 4 Equipment and System for Mechanical Manufacturing Automation Systems

1 Brief Introduction 8-60

2 Communication in Automation System 8-60

2.1 Features of Automation System Communication 8-60

2.2 Fundamental Principles of Communication 8-60

2.3 OSI Model for Communication 8-61

2.4 Communication Standardization 8-62

2.5 Communication Structure, Local Area Networks, Field Bus 8-63

2.6 Point to Point Communication 8-64

3 Programming Controller 8-64

3.1 Beginning and Development of Programming Controller 8-64

3.2 History of PC Development 8-65

3.3 Control Structure of PC 8-66

3.4 PC System Structure 8-67

3.5 Programming Language for PC 8-70

3.6 Programming Design 8-74

3.7 PC Communication 8-75

3.8 Standardization of PC 8-77

4 Management and Control of Automation Manufacturing Systems 8-78

4.1 Structure and Function of Automation Manufacturing Systems 8-78

4.2 Computer Environment for Supporting Automation Manufacturing Systems 8-84

4.3 Management and Control of Flexible Manufacturing Systems 8-85

4.4 Simulation of FMS 8-86

Chapter 5 Inspection and Monitoring Technique for Quality Control in Manufacturing Process

1 Brief Introduction 8-87

1.1 Quality Control in Advanced Manufacturing 8-87

1.2 Process of Quality Control in Manufacturing 8-87

1.3 Factors of Influencing Quality 8-88

1.4 Methods of Quality Control in Manufacturing 8-88

2 Integrated Quality Control System 8-88

3 Quality Inspection Technique 8-88

3.1 Brief Introduction 8-88

3.2 In-process Inspection 8-89

3.3 On-line Inspection 8-89

4 Monitoring Technique in Manufacturing 8-91

4.1 Machine Tool System Monitoring 8-91

4.2 Cutting Tool Wear and Breakage Monitoring 8-92

4.3 Technique of Sensing 8-95

4.4 Signal Pre-processing 8-98

4.5 Computer and Process Monitoring 8-99

5 Quality Diagnosis in Automatic Manufacturing System 8-101

5.1 Architecture of Fault Diagnosis 8-101

5.2 Fault Tree of Flexible Manufacturing System 8-101

此星公司制作 请尊重作者版权



**Chapter 6 Network and Database
Technique for Factory
Automation**

1 Computer Integrated Manufacturing
System Networks 8-103

1.1 CIMS Network Characteristics 8-103

1.2 Manufacturing Automation
Protocol 8-103

1.3 Technical and Office Automation
Protocol 8-104

1.4 Field Bus 8-105

1.5 Communication Architecture 8-105

1.6 MAP/TOP Products 8-107

2 Manufacturing Automation Network
Design and Implementation 8-107

2.1 Needs for Networks 8-107

2.2 Network Design and Selection 8-108

2.3 Network Installation and
Management 8-108

2.4 Network Performance Evaluation 8-108

2.5 Network Application Services 8-109

2.6 Client-server Model 8-109

3 Information Management in
Factory Automation 8-110

3.1 Requirements for Information Type and
Data Model in Factory
Automation 8-110

3.2 Architecture of Integrated Manufacturing
Database Management System 8-111

4 Data Integration Technology in

Factory Automation 8-112

4.1 Engineering Database Management
System 8-112

4.2 Multiple Database System and
Federated Database System 8-113

4.3 Semantic Data Model 8-114

4.4 Object-oriented Database System 8-115

**Chapter 7 Architecture, Modeling
and Simulation for CIMS**

1 Architecture of CIMS 8-118

1.1 Basic Activities in CIMS 8-118

1.2 General Components of CIMS 8-119

1.3 Hierarchical Structure of CIMS 8-119

1.4 Open System Architecture 8-120

1.5 A Prototype Example of CIMS 8-120

2 Modeling of CIMS 8-122

2.1 Modeling Functional Model of
CIMS 8-122

2.2 Modeling Information Model of
CIMS 8-122

2.3 Modeling Behavioral Model of
CIMS 8-123

3 CIMS Simulation 8-123

3.1 Roles of CIMS Simulation 8-123

3.2 Classification of CIMS Simulation 8-124

3.3 Discrete Event Dynamic System
(DEDS) 8-124

3.4 Simulation Software Available for
Manufacturing System 8-126

References 8-128

Part 9 Industrial Robots (IR)

Chapter 1 Introduction

1 Definition, Components, and
Classification of IR 9-3

1.1 Definition of IR 9-3

1.2 Composition of IR 9-3

1.3 Classification of IR 9-4

2 Development History of IR 9-5

3 Special Terms of IR 9-5

3.1 Terms for Mechanical Structure and
Performance of IR 9-5

3.2 Terms for Control and Safety of IR 9-6

4 Performance Parameters of Some
Typical IRs of China and Overseas ... 9-7

5 Performance Criteria and Test
Methods for IR 9-9



5.1 Performance Criteria 9-9
 5.2 Test Methods 9-9
 6 Benefits of IR 9-9

Chapter 2 Manipulator of IR

1 Degree of Freedom and Coordinate
 Types for Manipulator of IR 9-10
 1.1 Concept of Manipulator 9-10
 1.2 Degree of Freedom 9-10
 1.3 Coordinate Types of IR Movement 9-10
 2 Different Structures and
 Characteristics of Manipulators 9-10
 3 Kinematics and Dynamics of IR
 Manipulator 9-11
 3.1 Basic Definitions 9-11
 3.2 Positive Questions of IR Kinematics ... 9-11
 3.3 Inverse Questions of IR Kinematics ... 9-11
 3.4 Differential Relational Expression 9-12
 3.5 Jacobi Matrix 9-12
 3.6 Common Analysis Methods for
 Dynamics Questions of IR 9-12
 4 Working Space of IR and Its
 Relationship with Structure Size 9-13
 4.1 Working Space 9-13
 4.2 Geometry Methods for Defining
 Working Space 9-14
 4.3 Envelope Cube 9-14
 4.4 Relationship between Working Space
 and Structure Size of Manipulator 9-14
 5 Optimum Design in Scale Planning
 and Selection of Key Size
 Manipulator 9-14
 5.1 Optimum Design of Position
 Structure 9-14
 5.2 Selection of Key Size in Scale
 Planning 9-15
 6 Design Principles and Methods of
 Whole Manipulator 9-15
 6.1 Design Principles of Whole
 Manipulator 9-15
 6.2 Design Methods and Steps for

Manipulator 9-15
 7 Structures of Waist, Arm, and Wrist
 of Manipulator 9-16
 7.1 Waist Structure 9-16
 7.2 Arm Structure 9-17
 7.3 Wrist Structure 9-17
 8 Calculation of Rigidity and Strength
 and Error Assignment 9-17
 8.1 Rigidity Calculation of
 Manipulator 9-17
 8.2 Strength Calculation of
 Manipulator 9-18
 8.3 Error Assignment of Link Parameters
 of Manipulator 9-18
 9 Calculation of Balance Mechanism ... 9-18
 9.1 Balancing Weight Mechanism 9-18
 9.2 Balancing Spring Mechanism 9-19
 9.3 Balancing Cylinder Mechanism 9-19
 10 Calculation of End-point
 Stiffness 9-19
 11 Calculation of Joint Driven
 Torque 9-19
 11.1 Traverse Joints Driven Torque 9-19
 11.2 Rotary Joints Driving Torque 9-19

Chapter 3 Actuating System of IR

1 Characteristics of IR Actuating
 System 9-20
 2 Selection Principles in Designing of
 IR Actuating System 9-20
 3 Electrohydraulic Servo Actuating
 System 9-21
 4 Pneumatic Actuating System 9-23
 5 Electric Actuating System 9-24
 5.1 D.C. Servo Motor Actuators 9-26
 5.2 Synchronous A.C. Servo Motor
 Actuators 9-27
 5.3 Stepping Motor Actuators 9-28
 5.4 Direct Drive (DD) 9-28

Chapter 4 Control System of IR

1 Functions, Components, and

此星公司制作 请尊重作者版权



Classification of IR Control System 9-32

1.1 General Requirements for IR Control System 9-32

1.2 Components of IR Control System 9-32

1.3 Classification of IR Control System ... 9-33

2 Design Methods of Whole Control System of IR 9-34

2.1 Structure of Control System 9-34

2.2 Design Principles of Control System ... 9-35

2.3 Selection Methods of Control System 9-35

2.4 Simulation of IR 9-36

3 Some Typical Control Methods 9-36

3.1 PID Control 9-36

3.2 Sliding Model Control 9-38

3.3 Adaptive Control 9-38

3.4 Fuzzy Control 9-38

4 Hardware Components of Control System 9-40

5 Software Components of Control System 9-42

5.1 Software Components 9-42

5.2 Software Functions 9-42

6 Robot Languages 9-44

6.1 Classification of Robot Languages 9-44

6.2 Architecture of Robot Programming Language 9-44

6.3 Sentence Operating of Robot Language 9-44

6.4 Messages for Robot Language 9-45

6.5 Necessity of Applying Robot Language 9-45

Chapter 5 Sensors for IR

1 Displacement Sensors 9-45

1.1 Potentiometers 9-45

1.2 Photoelectric Encoder 9-46

1.3 Rotary Transformer 9-46

2 Velocity Sensors 9-46

3 Acceleration Sensors 9-47

4 Tactile Sensors 9-47

4.1 Touch Sense 9-47

4.2 Proximity Sense 9-47

4.3 Slip Sense 9-48

5 Force Sensors 9-48

6 Distance Sensors 9-49

7 Information Fusion of Multisensors 9-49

Chapter 6 Robot Vision

1 Brief Introduction 9-50

2 Hardware System of Robot Vision 9-51

2.1 Illuminant 9-51

2.2 Lens and Vision Sensors 9-52

2.3 Digitized Interface 9-53

3 Image Processing of Robot Vision ... 9-53

3.1 General Image Processing 9-54

3.2 Grey-scale Images and Binary Processing 9-54

3.3 3-dimensional Vision 9-54

4 Examples of Robot Vision System 9-55

4.1 Binary System 9-55

4.2 Grey-scale System 9-56

4.3 3-dimensional System 9-56

Chapter 7 Synopsis of Some Typical IRs and Their Applications

1 Spray Painting Robots 9-58

1.1 Structures 9-58

1.2 Robot Control System 9-58

1.3 Lightening Movement of Direct Teaching 9-60

1.4 Application Examples 9-62

2 Spot Welding Robots 9-62

2.1 Structures 9-62

2.2 Robot Control System 9-63

2.3 Application Examples 9-63

3 Arc-welding Robots 9-64

3.1 Structures 9-64



3.2 Robot Control System 9-64

3.3 Application Examples 9-66

4 Handling Robots 9-67

4.1 Structures 9-67

4.2 Robot Control System 9-69

4.3 Application Examples 9-69

5 Assembly Robots 9-70

5.1 Structures 9-70

5.2 Robot Control System 9-71

5.3 Application Examples 9-71

6 Pressing Robots 9-72

6.1 Structures 9-72

6.2 Robot Control System 9-74

6.3 Application Examples 9-74

7 Die-casting Robots 9-75

7.1 Structures 9-75

7.2 Robot Control System 9-75

7.3 Application Examples 9-76

8 Other IRs 9-76

**Chapter 8 Group Control System
in Robot Application Engineering**

1 Architecture of Group Control
System 9-79

2 Function Set-up of Group Control
System 9-79

2.1 Workpieces Recognition 9-79

2.2 Synchronous Operation 9-79

2.3 Automatic Start and Stop and
Interlock for Whole Line 9-79

2.4 Real-time Display of Dynamic
Simulation for Whole Line
State-of-art 9-79

2.5 Statistical Functions 9-79

2.6 Agile On-line/Off-line Switching
Functions 9-80

3 Message Exchange of Group Control
System 9-80

3.1 Messages from Each Robot to Chief
Console 9-80

3.2 Command Messages from Chief Console

to Each Robot 9-80

4 Communication System 9-80

4.1 Parallel Communication 9-81

4.2 Serial Communication of Independent
Channel 9-81

4.3 Serial Bus and Bit Bus Communication
System 9-81

5 Recognition and Queueing 9-82

5.1 Chief Control Queueing 9-83

5.2 Single Robot Queueing 9-83

5.3 Recognizer Queueing 9-83

6 Synchronous Technique for Robot and
Production Line 9-84

7 Software Design for Real-time
Control System 9-84

7.1 Architecture of Software 9-85

7.2 System Softwares and Developing
Tools 9-85

7.3 Software Functions of Chief
Control 9-85

Chapter 9 Robot Intelligentization

1 Brief Introduction 9-88

1.1 Sensing Functions and
Intelligentization 9-88

1.2 Control Functions and
Intelligentization 9-88

1.3 Mobile Functions and
Intelligentization 9-89

1.4 Intelligentization, Safety, and
Reliability 9-89

2 Developing Trends of Robot
Technology 9-90

2.1 Manipulating Mechanisms 9-90

2.2 Mobile and Walking Mechanisms 9-90

2.3 Sensing and Testing Techniques 9-90

2.4 Intelligent Control 9-90

2.5 Artificial Intelligence 9-90

2.6 Teaching Technique 9-91

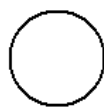
3 Application Prospect of Intelligent
Robots 9-91

References 9-92



第 1 篇

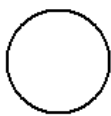
电 工 基 础



常用符号表

| | |
|---------------------------------------|---------------------------------------------|
| A ——传输参数 | T ——周期(s) |
| A_0 ——直流分量 | U ——电压(V) |
| A_m ——最大值 | U_{AV} ——电压平均值(V) |
| B ——磁感应强度(T 或 Wb/m^2) | U_l ——线电压(V) |
| B_r ——剩磁磁感应强度(T 或 Wb/m^2) | U_m ——电压最大值(V) |
| B_c ——容纳(S) | U_m ——磁压(A) |
| C ——电容(F) | U_o ——输出电压(V) |
| E ——电场强度(N/C 或 V/m) | U_p ——相电压(V) |
| 电动势(V) | $U_{-1}(t)$ ——单位阶跃函数 |
| E_m ——电动势最大值(V) | u ——瞬时电压(V) |
| e ——瞬时电动势(V) | V ——电位(V) |
| F_m ——磁动势(A) | W ——电功(J 或 $\text{kW} \cdot \text{h}$) |
| f ——频率(Hz) | X ——电抗(Ω) |
| f_0 ——谐振频率(Hz) | X_c ——容抗(Ω) |
| G ——电导(S) | X_L ——感抗(Ω) |
| G_m ——磁导(H) | Y ——导纳(S) |
| g ——转移电导(S) | Z ——阻抗(Ω) |
| H ——磁场强度(A/m) | α ——电阻温度系数($1/^\circ\text{C}$) |
| H_c ——矫顽力(A/m) | 相位系数 |
| I ——电流(A) | β ——衰减系数 |
| I_{AV} ——电流平均值(A) | γ ——电导率($1/\Omega \cdot \text{m}$) |
| I_l ——线电流(A) | δ ——气隙长度(m) |
| I_p ——相电流(A) | $\delta(t)$ ——单位冲激函数 |
| I_m ——电流最大值(A) | ϵ ——介电常数(F/m) |
| I_s ——电流源电流(A) | ϵ_0 ——真空介电常数(F/m) |
| i ——瞬时电流(A) | ϵ_r ——相对介电常数 |
| J ——电流密度(A/m^2) | μ ——磁导率(H/m) |
| L ——电感(H) | μ_0 ——真空磁导率(H/m) |
| M ——互感(H) | μ ——电压放大系数 |
| P ——功率(kW) | Λ ——磁导(H) |
| p ——瞬时功率(kW) | Λ_0 ——气隙磁导(H) |
| Q ——电荷量(C) | ρ ——电阻率($\Omega \cdot \text{m}$) |
| Q ——无功功率(kvar) | τ ——时间常数 |
| 品质因数 | Φ ——磁通(Wb) |
| R ——电阻(Ω) | φ ——相位差(相角差) |
| R_L ——负载电阻(Ω) | ψ ——初相角 |
| R_m ——磁阻(1/H) | Ψ_m ——磁链(Wb) |
| R_0 ——内电阻(Ω) | ω ——角频率(rad/s) |
| r ——动态电阻(Ω) | ω_0 ——谐振角频率(rad/s) |
| S ——视在功率(kVA) | |





第 1 章 电和磁的基本量和基本定律

电工基础是现代技术的基础之一，它根据物理学中电学和磁学所阐述的基本规律来进一步研究各种电工、电子装置中发生的电磁现象和电磁过程。

1 电和磁的基本物理量

1.1 电的基本物理量

电荷 Q 是最基本的物理量，称为电量，单位是库仑 (C)。

电荷周围存在着电场，电场是一种特殊形态的物

质。置于电场任一点的电荷将感受所在电场的作用力，称为电场力，其符号为 F ，单位是牛顿 (N)。电的其他基本物理量见表 1.1-1。

1.2 磁的基本物理量

运动电荷、载流导体或变化的电场的周围空间存在着一种特殊形态的物质，称为磁场。磁场具有能量。磁针在磁场内受到的作用力是肉眼能够辨识的。磁的基本物理量见表 1.1-2。

表 1.1-1 电的基本物理量

| 基本量名称 | 定 义 | 公 式 | 单 位 | 说 明 |
|-------|----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|--------------------------------------------------------------------------------|
| 电场强度 | 单位正电荷在电场中某点所受的电场力称为该点的电场强度，用 E 表示 | $E = \frac{F}{Q}$ | N/C 或 V/m | 电场强度是一个矢量，其方向是正电荷在该点受力的方向 F —力 (N) Q —电量 (Q) |
| 电 位 | 在电场中取任意点 P 作为参考点，单位正电荷在电场力作用下从电场中的 a 点移到参考点 P 时，电场力所作的功称为 a 点的电位 V_a 。 | $V_a = \int_a^P E dl$ | V | 电位是个标量，其数值随所选的电场参考点而异，但与电荷移动的路径无关 在电力线路中常取大地为参考点；在电子线路中常取公共点为参考点；参考点的电位规定为零 |
| 电 压 | 在电场中单位正电荷在电场力的作用下从 a 点移到 b 点，电场力所作的功称为 a 、 b 两点间的电压 | $\begin{aligned} U_{ab} &= \int_a^b E dl \\ &= \int_a^P E dl - \int_b^P E dl \\ &= V_a - V_b \end{aligned}$ | V | 也称 a 、 b 两点间的电位差 当电压随时间变化时，用 u 表示 |
| 电 动 势 | 电源中非静电力对电荷做功的能力，称为电动势，在数值上等于非静电力把单位正电荷从电源低电位端 b 经电源内部移到高电位端 a 所作的功 | $e_{ba} = \frac{\int_b^a F_0 dl}{Q}$ | V | 电动势是表示电源特征的一个物理量。恒定的电动势用 E 表示 F_0 —非静电力，也称电源力 (N) |



(续)

| 基本量名称 | 定 义 | 公 式 | 单 位 | 说 明 |
|-------|------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|---------------------------------------------------------------------------|
| 电流强度 | 单位时间内通过某导体截面的电量称为电流强度,简称电流 | $i = \frac{dQ}{dt}$ 对于恒定电流 $I = \frac{Q}{t}$ | A 或 C/m ² | t—时间 (s) I—电流 (A) |
| 电流密度 | 垂直于电流方向的单位面积中所通过的电流称为电流密度 | 当电流在截面积中均匀分布时, $J = \frac{I}{A}$ | A/m ² | A—截面积 (m ²) |
| 电 功 | 电量为 Q 的电荷在电场力的作用下从 a 点移到 b 点电场力所作的功,称为电功 | $w = uQ = \int uiddt$ 在电压和电流均为恒定情况下 $W = UQ = UI t$ 在电阻电路中 $W = I^2 R t = \frac{U^2}{R} t$ | J | U—a、b 两点间的电压 (V) R—电阻 (Ω) 1J = 1W·s = 277.810 ⁻⁹ kW·h |
| 电 功 率 | 单位时间内电场力所作的功,称为电功率 | $p = \frac{dw}{dt} = ui$ 对于恒定的直流电 $P = \frac{W}{t} = UI$ | W | |

表 1-1-2 磁的基本物理量

| 基本量名称 | 定 义 | 公 式 | 单 位 | 说 明 |
|--------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|-----------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| 磁感应强度 | 在磁场中,垂直于磁场方向的载流导体所受的作用力 F (N)与电流 I (A)和导线有效长度 l (m)的乘积之比,或单位面积 A 内通过的磁力线数 Φ,称为磁感应强度,也称磁通密度 | $B = \frac{F}{Il}$ 或 $B = \frac{\Phi}{A}$ | T 或 Wb/m ² | 磁感应强度是表征磁场中某给定点性质的一个物理量,其数值表示该点磁场的强弱,其方向就是该点的磁场方向。若磁场内各点的磁感应强度大小相同,方向一致,则称为均匀磁场 |
| 磁通量 (或磁通) | 磁感应强度与垂直于磁场方向面积元的乘积的总和称为通过该总面积的磁通,右式表示在均匀磁场中通过垂直于磁场面积 A 的磁通 | $\Phi = EA$ | Wb | 1Wb = 10 ⁸ Mx |
| 磁 链 | 与线圈相环链的磁通和线圈匝数的乘积,称为磁链 Ψ _m 。当 N 匝线圈都环链相同的磁通 Φ 时用右式表示 | $\Psi_m = N\Phi$ | Wb | |



(续)

| 基本量名称 | 定义 | 公式 | 单位 | 说明 |
|-------|------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|-----------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 磁导率 | 磁导率 μ 是表征物质的导电性能的一个物理量, 某一物质的磁导率 μ 与真空的磁导率 μ_0 之比, 称为该物质的相对磁导率 μ_r | $\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$ | | 真空磁导率 $\mu_0 = 4 \times 10^{-7} \text{ (H/m)}$, μ_r 是没有量纲的纯数 非磁性材料(如空气、木材、玻璃、铜、铝等)的磁导率与真空磁导率近似, 其相对磁导率 $\mu_r \approx 1$ 磁性材料的磁性能见本篇第7章 |
| 磁场强度 | 磁场强度的大小在数值上等于磁感应强度与磁导率之比。它表征在磁场中某点励磁作用的强弱和方向的物理量, 用来确定磁场和电流关系。由安培定律得右式 | $H = \frac{B}{\mu}$ $H = \frac{IN}{l}$ | A/m | 磁场内某点磁场强度只与电流大小 I , 线圈匝数 N 及该点的几何位置有关, 与磁场介质无关 $1 \text{ A/m} = 4\pi \times 10^{-3} \text{ Oe}$ |
| 磁动势 | 产生磁通的磁化力, 称为磁动势, 用 F_m 表示。磁化力就是励磁线圈的匝数 N 和流过线圈的电流 I 的乘积 | $F_m = NI$ | A | |
| 磁阻 | 表征物质对磁通具有的阻碍作用的物理量, 称为磁阻, 用 R_m 表示 | $R_m = \frac{l}{\mu A}$ | H^{-1} | 式中 μ —物质的磁导率(H/m) A —磁路的截面积(m^2) l —磁路的长度(m) 若磁路中各段的 μ 或 A 不同, 则应分别计算各段的磁阻。如果磁路含有铁磁物质, 由于 μ 不是常量, 故磁路的磁阻也不是常量 |
| 磁导 | 磁阻的倒数, 称为磁导, 用 Λ 表示 | $\Lambda = \frac{1}{R_m} = \frac{\mu A}{l}$ | H | |

2 电路和电路元件的性质

2.1 电路和电路模型

电路是提供电流流通的路径, 它由电工和电子器件所组成。最简单的实际电路由电源、负载和中间环节三部分组成, 见图 1-1-1a。

1. 电源 电源是供电设备, 它是将其它形式的能量转换成电能或把电能转换成另一形式的电能或信号的装置, 如电池、发电机和信号发生器等。

2. 负载 负载是用电设备, 它是将电能转换为其它形式的能量, 或是接收和传递信号的装置。实际用电设备有灯泡、电动机、电炉等。

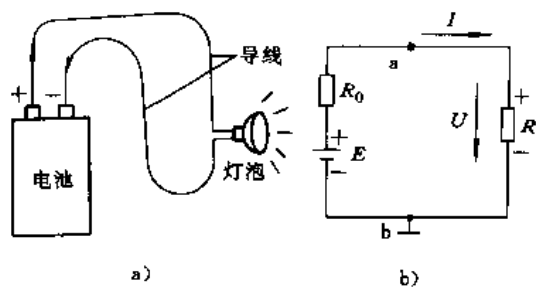


图 1-1-1 实际电路的电路模型

a) 实际电路 b) 电路模型

3. 中间环节 中间环节除了连接导线外, 还有开关、熔断器等多种设备。它们在电路中的作用是连接电源和负载, 控制电能或信号的传送和分配等。

此星公司制作 请尊重原作者版权



2.1.1 电路模型

为了便于对实际电路进行分析和数学描述,将电路中各种实际器件的电磁特性,用一些能反映其特性的理想元件或其组合来代替,称为模型。图 1-1-1a 是最简单的实际电路,其中电池作为电源可用一个电动势 E 和内电阻 R_0 相串联的电路模型来表征;灯泡作为负载,可用电阻 R 表征。略去连接导线的电阻,其电路模型如图 1-1-1b 所示。

2.1.2 电路中电压和电流的参考方向

在进行电路分析计算时,电路中的电压和电流方向可以任意假定,并用箭头标于电路图中,称为参考方向,或正方向。规定电路中电流和电压的参考方向,是为了正确地列写元件的伏安关系和建立电路方程,并且可从计算结果中揭示电路各处电压或电流的实际方向,如果计算结果为正值,则表示它们的实际方向(即电压降落的方向或正电流通过的方向)与参考方向一致;反之,则与该参考方向相反。为了方便,取每一元件的电压的参考方向与电流的参考方向相同,见图 1-1-1b。这种参考方向,称为关联方向。

2.2 无源元件

无源元件是指不具备输出净电磁能量的元件。电路无源元件有电阻、电感和电容元件等三种基本元件。

2.2.1 电阻元件

(1) 电阻元件 在电路中,电阻元件把电能转变

为热能。它是耗能元件,常用单一理想电阻元件的参数 R 表示其特性,单位为欧姆(Ω)。理想电阻元件的符号见图 1-1-2。

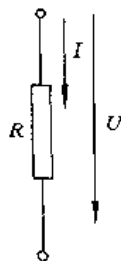


图 1-1-2 电阻元件符号

电阻元件上电压与电流之间的关系曲线称为伏安特性,见图 1-1-3。图中,特性曲线 1 为过坐标原点的直线,电压与电流成正比关系,称为线性电阻;曲线 2 是非线性的,这类电阻的电压与电流不成正比关系,称为非线性电阻。

(2) 线性电阻元件的常用计算公式见表 1-1-3。

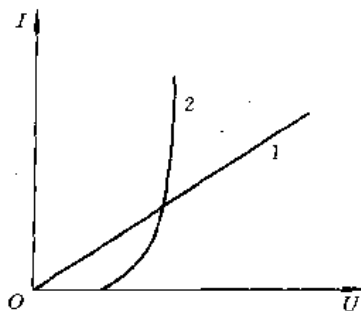


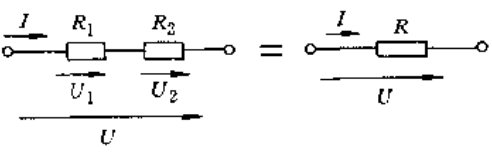
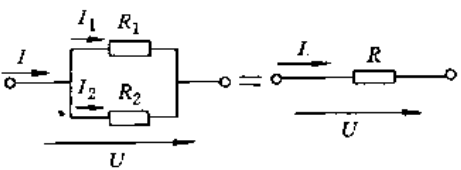
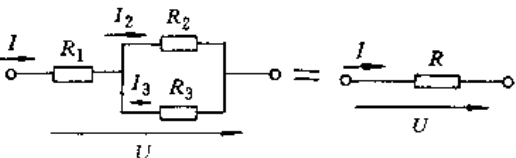
图 1-1-3 电阻元件的伏安特性曲线
1—线性电阻 2—非线性电阻

表 1-1-3 电阻电路的计算公式

| 名称 | 计算公式 | 说明 |
|----------------------|--------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| 电阻元件中电压、电流、电阻三者之间的关系 | $R = \frac{U}{I} \quad (\Omega)$ | U—电阻两端的电压(V) I—流过电阻的电流(A) |
| 电阻消耗的功率 | $P = UI = I^2 R = \frac{U^2}{R} \quad (W)$ | |
| 电阻与导体长度、横截面积及材料性质的关系 | $R = \rho \frac{l}{A} \quad (\Omega)$ | l—导体的长度(m) A—导体的横截面积(m ²) ρ—电阻率(Ω·m) |



(续)

| 名称 | 计算公式 | 说明 |
|----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 电阻与温度的关系 | $R_2 = R_1 + R_1 \alpha (t_2 - t_1)$ | <p>R_1—温度为 t_1 时导体电阻(Ω) R_2—温度为 t_2 时导体电阻(Ω) α—以温度 t_1 为基准时导体的电阻温度系数($1/^\circ\text{C}$)</p> <p>所有金属的电阻都随温度的增加而增大,所以 α 值是正的。而电解液、碳和半导体的电阻却随温度的增加而减小,所以它们的 α 值是负的</p> |
| 电导率 | $\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (\text{S/m})$ | 电导率 σ 是电阻率 ρ 的倒数 |
| 电阻串联 |  $R = R_1 + R_2 \quad (\Omega)$ $U = U_1 + U_2 \quad (\text{V})$ $U_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \times U \quad (\text{V})$ $U_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \times U \quad (\text{V})$ | |
| 电阻并联 |  $\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \text{ 或 } R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \quad (\Omega)$ $I = I_1 + I_2 \quad (\text{A})$ $I_1 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \times I \quad (\text{A})$ $I_2 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \times I \quad (\text{A})$ | |
| 电阻复联 |  | |

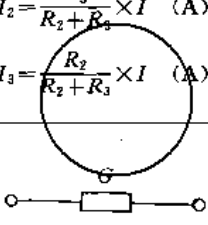
此星公司制作 请尊重作者版权

自动空刷卷

六



(续)

| 名称 | 计算公式 | 说明 |
|------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|
| 电阻复联 | $R = R_1 + \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3} \quad (\Omega)$ $I_2 = \frac{R_3}{R_2 + R_3} \times I \quad (\text{A})$ $I_3 = \frac{R_2}{R_2 + R_3} \times I \quad (\text{A})$ | |
| 电导 |  $G = \frac{1}{R} \quad (\text{S})$ | R—导体的电阻(Ω) G—导体的电导,单位为西门子(S) |

(3) 绝缘电阻。绝缘材料在电压作用下,有微小漏电流通过。外施电压与漏电流的比值,称为绝缘材料的绝缘电阻。通常用 $M\Omega$ 作为单位。

(2) 电感电路的常用计算公式见表 1-1-4。

(3) 几种典型结构的自感计算公式见表 1-1-5。

2-2-2 电感元件

(1) 电感元件。在电路中,电感元件把电能转变为磁场能量,或将所储存的磁能以电能的形式释放出来,它是储能元件。单一理想电感元件,用参数 L 表示其特性和储能的能力,单位为亨利(H)。电感元件的符号见图 1-1-4。电感包括自感和互感,有时自感也简称为电感。

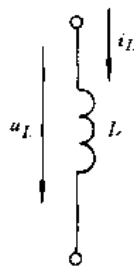
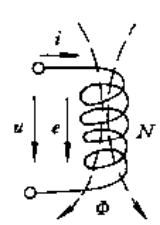
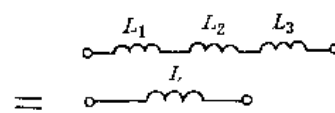


图 1-1-4 电感元件的符号

表 1-1-4 电感电路的计算公式

| 名称 | 计算公式 | 说明 |
|--------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 线圈的电感与流过线圈的电流和磁链关系 |  $\Psi_m = N\Phi_m \quad (\text{Wb})$ $L = \frac{\Psi_m}{i} \quad (\text{H})$ $e = -\frac{d\Psi_m}{dt} = -L \frac{di}{dt} \quad (\text{V})$ $u = -e = L \frac{di}{dt} \quad (\text{V})$ | N—线圈匝数 Φ_m —通过线圈的磁通(Wb) Ψ_m —线圈环链的磁链(Wb) L—线圈的电感(H) i—线圈中的电流(A) e—线圈中沿 i 方向感应的电动势(V) u—线圈中沿 i 方向的电压(V) |
| 电感储存能量 | $W_L = \frac{1}{2} LI^2 \quad (\text{J})$ | I—电感电流(A) L—电感(H) W_L —电感储存的能量(J) |
| 电感串联 |  $L = L_1 + L_2 + L_3 \quad (\text{H})$ | L_1, L_2, L_3 为无互感效应的各线圈电感(H); L 为等效总电感(H) |

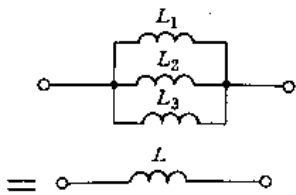
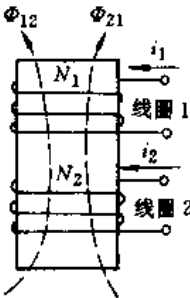
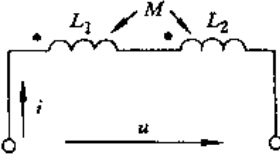
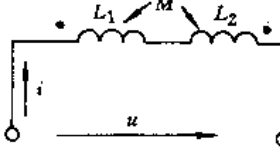
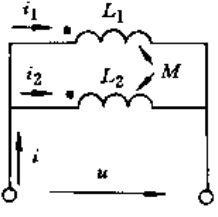
绝星公司制作 请尊重作者版权

08

www.it-ebooks.com



(续)

| 名称 | 计算公式 | 说明 |
|----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 电感并联 |  $\frac{1}{L} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \frac{1}{L_3}$ | |
| 线圈的互感 |  $M_{12} = \frac{\Psi_{12}}{i_2} = \frac{N_1 \Phi_{12}}{i_2} \text{ (H)}$ $M_{21} = \frac{\Psi_{21}}{i_1} = \frac{N_2 \Phi_{21}}{i_1} \text{ (H)}$ $M_{12} = M_{21} \text{ (H)}$ | <p>两个线圈之间存在电磁耦合时,任一线圈中电流变化会对另一线圈发生影响,影响程度决定于互感</p> <p>M_{12}—线圈 2 对线圈 1 的互感(H) M_{21}—线圈 1 对线圈 2 的互感(H)</p> |
| 含互感线圈的串联 |  <p>图中“·”表示两线圈的同名端</p> $L = L_1 + L_2 + 2M \text{ (H)}$ | <p>L_1, L_2—两个线圈的自感(H) M—两个线圈的互感(H) L—等效总电感(H)</p> <p>两个线圈的电流分别由某端点流入(或流出),它们所产生的磁通是相互助长的,则该两端称为同名端</p> |
| |  $L = L_1 + L_2 - 2M \text{ (H)}$ | <p>互感有正、负值,当两个电流从同名端流入时为正,当两个电流从异名端流入时为负</p> |
| 含互感线圈的并联 |  $L = \frac{L_1 L_2 - M^2}{L_1 + L_2 - 2M} \text{ (H)}$ | |

此星公司制作 请尊重作者版权



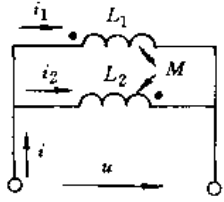
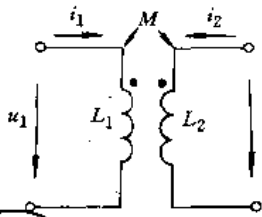
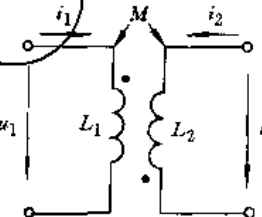
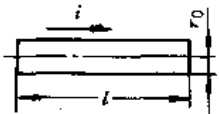
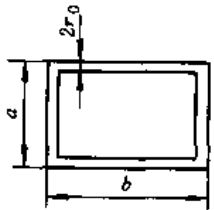
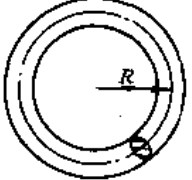
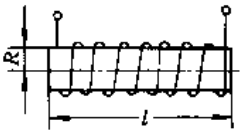
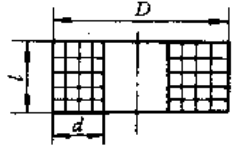
| 名称 | 计算公式 | 说明 |
|---------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|
| 含互感线圈的并联 |  $L = \frac{L_1 L_2 - M^2}{L_1 L_2 + 2M} \text{ (H)}$ | |
| 互感电路中的电压和电流关系 |  $u_1 = L_1 \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt} \text{ (V)}$ $u_2 = L_2 \frac{di_2}{dt} + M \frac{di_1}{dt} \text{ (V)}$ | L_1, L_2 —两个线圈的自感(H) M —两个线圈的互感(H) i_1, i_2 —两个线圈的电流(A) u_1, u_2 —两个线圈的电压(V) |
| |  $u_1 = L_1 \frac{di_1}{dt} - M \frac{di_2}{dt} \text{ (V)}$ $u_2 = L_2 \frac{di_2}{dt} - M \frac{di_1}{dt} \text{ (V)}$ | |

表 1-1-5 几种典型结构的自感计算公式

| 项目 | 图形 | 自感 (H) | 说明 |
|------------|-------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| 圆截面直导线段的自感 |  | $L = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left(\ln \frac{2l}{r_0} - 0.75 \right)$ | $r_0 \ll l$ |
| 矩形线圈的自感 |  | $L = \frac{\mu_0}{\pi} \left[a \ln \frac{2ab}{r_0(a+b)} + b \ln \frac{2ab}{r_0(a+b)} - 2(a+b-d) \right] + \frac{\mu_0}{\pi} \left(\frac{a+b}{4} \right)$ | r_0 —圆形导线半径 $d = \sqrt{a^2 + b^2}$ $r_0 \ll a$ $r_0 \ll b$ |
| 圆环的自感 |  | $L = \mu_0 R \left(\ln \frac{8R}{a} - 1.75 \right)$ | a —圆环截面的半径 $a \ll R$ |



(续)

| 项 目 | 图 形 | 自 感 (H) | 说 明 |
|----------|-----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|
| 长螺管线圈的自感 |  | $L \approx \frac{\mu_0 N^2 A}{l}$ | A—螺管线圈截面积 N—匝数 l/R > 40 |
| 短螺管线圈的自感 |  | $L \approx \frac{6.4 \mu_0 N^2 D^2}{3.5D + 8l} \cdot \frac{D - 2.25d}{D}$ | N—匝数 |

注:设导体与导体外面的空间都是非铁磁物质。

2.2.3 电容元件

(1) 电容元件 在电路中,电容元件把电能转变为电场能量,或将所储存的电场能量释放出来,它是另一种储能元件。单一理想电容元件,用参数 C 表示其特性和储能的能力。单位为法拉 (F),理想电容元件的符号见图 1.1-5。

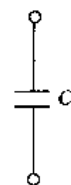
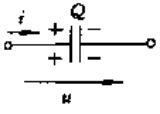
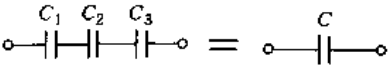
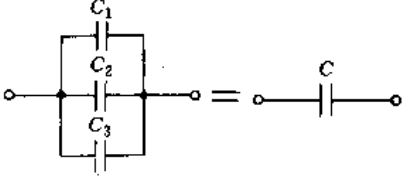


图 1.1-5 理想电容元件的符号

(2) 电容电路的常用计算公式见表 1.1-6。

表 1.1-6 电容电路的计算公式

| 名 称 | 计 算 公 式 | 说 明 |
|-------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| 电容与其两端电压及极板上电荷的关系 |  $C = \frac{Q}{U} \quad (F)$ $i = C \frac{du}{dt} \quad (A)$ $u = \frac{1}{C} \int idt \quad (V)$ | U —电容元件两端的电压 (V) Q —电容极板电荷 (C) C —电容元件的电容 (F) |
| 电容储存能量 | $W_C = \frac{1}{2} CU^2 \quad (J)$ | W_C —电容储存能量 (J) |
| 电容串联 |  $\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}$ | |
| 电容并联 |  $C = C_1 + C_2 + C_3$ | C —等效总电容 (F) |



由上可知,电容 C 说明电容元件容纳电荷,即储存电场能的能力,它的数值与导体的形状、大小、相互位置有关,也和两导体间绝缘材料的电性能有关。

表示绝缘材料电性能的物理量称为介电常数 ϵ , 单位是 F/m 。真空介电常数 $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} F/m$, 某一绝缘材料的介电常数 ϵ 与真空介电常数 ϵ_0 之比称为该材料的相对介电常数

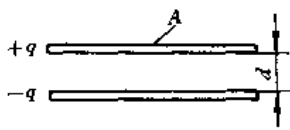
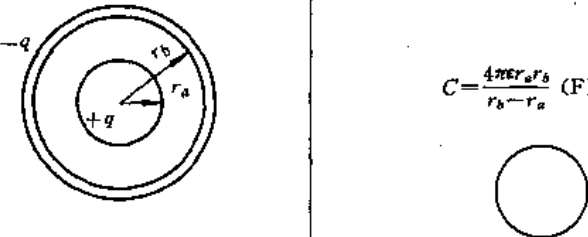
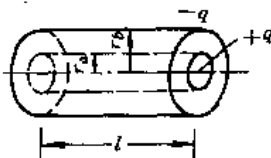
$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (1.1-1)$$

表 1.1-7 列出了几种绝缘材料的相对介电常数。
(3) 几种典型结构的电容计算公式, 见表 1.1-8。

表 1.1-7 几种绝缘材料的相对介电常数

| 材料名称 | ϵ_r |
|-------|--------------|
| 空气 | 1.0 |
| 电容器油 | 2.1~2.3 |
| 蓖麻油 | 4.2 |
| 白云母 | 5.4~8.7 |
| 聚丙烯薄膜 | 2.0~2.2 |

表 1.1-8 几种典型结构的电容计算公式

| 结构形式 | 电容值 (绝缘材料的介电常数为 ϵ) | 备注 |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>平板电容器</p>  | $C = \frac{\epsilon A}{d} \text{ (F)}$ | <p>A—极板面积 (m^2) d—极板间的距离 (m)</p> |
| <p>球形电容器</p>  | $C = \frac{4\pi\epsilon r_a r_b}{r_b - r_a} \text{ (F)}$ | <p>r_a—内球外表面的半径 (m) r_b—外球内表面的半径 (m) 若 $r_b \rightarrow \infty$, 则半径为 r_a 的孤立导体球的电容为 $C = 4\pi\epsilon r_a$ (F)</p> |
| <p>圆柱形电容器</p>  | $C = \frac{2\pi\epsilon l}{\ln r_b / r_a} \text{ (F)}$ | <p>l—圆柱形电容器的长度 (m) r_b—外柱内表面的半径 (m) r_a—内柱外表面的半径 (m)</p> |

2.3 有源元件

蓄电池、发电机等能给电路提供电能的电路元件称为有源元件。有源元件分为两大类:能独立地向电路提供电能的电源,称为独立电源;不能向电路提供净的电能,它的电流或电压依赖于电路某处的变量(电压或电流),这类电源称为非独立电源,也称受控源。

2.3.1 独立电源

独立电源可用电压源和电流源两类模型来模拟。

(1) 电压源模型 电压源是具有恒定的电动势

E_s , 能输出恒定的电压 U , 其端电压不随输出电流而变化的理想电源, 也称理想电压源。

理想电压源模型如图 1.1-6 所示。图 1.1-7a 中的水平虚线是理想电压源的伏安特性, 它说明电压源的特点是输出电流改变时, 输出电压保持恒定不变, 意味着一个能输出无穷大功率的电能源, 这当然是不可能的, 所以实际上理想电压源是不存在的。

一个实际的电压源, 可用一个电压源的电动势 E_s 和一个内电阻 R_0 相串联的电路表示其特性, 如图 1.1-7b 所示, 称为实际电源的电压源模型。由此模型可得其端电压



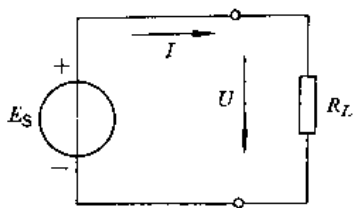


图 1-1-6 理想电压源模型

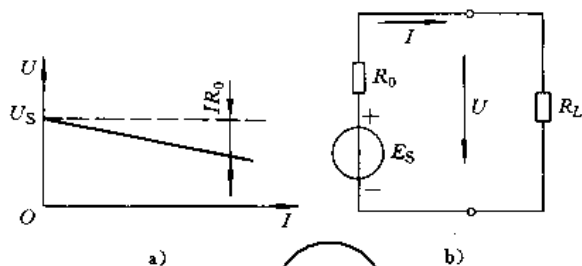


图 1-1-7 实际电源的电压源模型及其伏安特性

a) 电压源伏安特性 b) 电压源模型

$$U = E_S - IR_0 \quad (1-1-2)$$

其伏安特性见图 1-1-7a 的实线。此曲线说明实际电压源的特点是输出电压 U 随输出电流 I 的增大而下降。

(2) 电流源模型 电流源是具有恒定的电流 I_S ，能输出恒定的电流 I ，其电流不随输出电压的变化而变化的理想电源，也称为理想电流源。

理想电流源模型如图 1-1-8 所示。图 1-1-9a 中的垂直虚线是理想电流源的伏安特性，它说明电流源的特点是输出电流与接入的负载无关，是恒定不变的，但其端电压与接入的负载有关。负载电阻 R_L 越大，其端电压越大，输出功率也就越大，这是一个能输出无穷大功率的电能源。这当然是不可能的。因此实际中理想电流源也是不存在的。

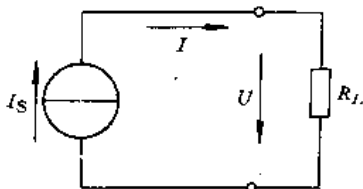


图 1-1-8 理想电流源模型

一个实际的电流源，可用一个电流源的恒定电流 I_S 和一个内电阻 R_0 并联的电路表示其特性，如图 1-1-9b 所示，称为实际电源的电流源模型。由此模型可得输出电流

$$I = I_S - \frac{U}{R_0} \quad (1-1-3)$$

其伏安特性见图 1-1-9a 实线。此曲线说明实际电流源的特点是输出电流 I 随负载电阻 R_L 增大而减小。

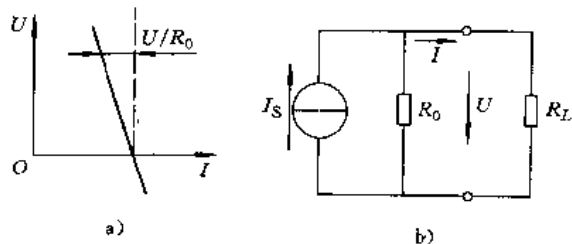


图 1-1-9 实际电源的电流源模型及其伏安特性

a) 电流源伏安特性 b) 电流源模型

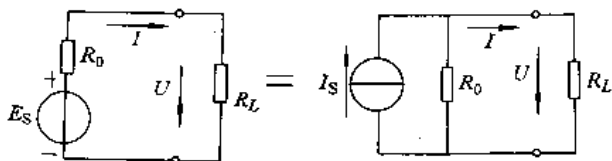


图 1-1-10 两种电源模型的等效变换

(3) 两种电源模型的等效变换 在保持端口上伏安特性相一致的条件下，电压源模型与电流源模型相互之间可以等效变换的，换言之，一个实际电源若可由一电压源模拟，则也可由一相应的电流源模拟，二者之间的等效互换应保证端口上伏安特性的一致性。图 1-1-10 列出了等效变换前后的两个电路图。等效变换的公式是

$$I_S = \frac{E_S}{R_0} \quad \text{或} \quad E_S = I_S R_0 \quad (1-1-4)$$

变换时 I_S 和 E_S 的方向应该是一致的，而内电阻 R_0 仅改变其接法，数值是不变的。

注意：理想电压源和理想电流源之间不存在等效变换的关系。因为，这两种电源模型的定义是不能兼容的。

2-3-2 受控电压源和受控电流源

前已述及，受控源的输出电流或输出电压依赖于电路其他处的电压或电流。后者称为控制量，前者称为受控量。受控源有四种基本型式，其模型如下：

(1) 电压控制电压源 (VCVS)。电路见图 1-1-11，其输出端的电动势 E_S 受输入端电压 u_i 控制，即 $E_S = \mu u_i$ 。式中 μ 称为电压放大系数，无量纲。

(2) 电压控制电流源 (VCCS)。电路见图 1-1-12，其输出端的电流源 I_S 受输入电压 u_i 控制，即 $I_S = g u_i$ 。g 称为转移电导，具有电导量纲。

(3) 电流控制电压源 (CCVS)。电路见图 1-1-13，

此星公司制作 请尊重重作 者版权



其输出端电动势受输入端电流 I_i 控制, 即 $E_s = rI_i$ 。 r 称为转移电阻, 具有电阻量纲。

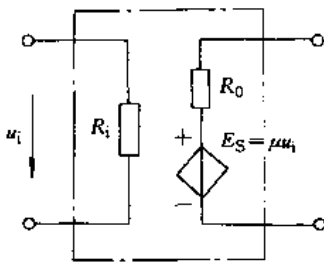


图 1-1-11 VCVS

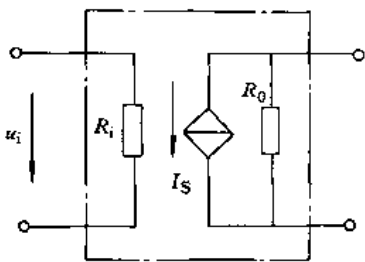


图 1-1-12 VCCS

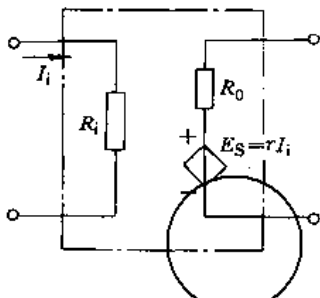


图 1-1-13 CCVS

(4) 电流控制电流源 (CCCS)。电路见图 1-1-14, 其输出端的电流源 I_s 受输入端电流 I_i 控制, 即 $I_s = \beta I_i$ 。 β 称为电流放大系数, 无量纲。

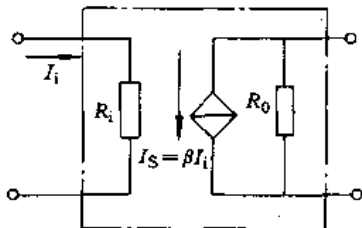


图 1-1-14 CCCS

除去上述诸受控源输出电路中的电阻 R_o , 就成为四种理想的受控源。

3 电和磁的基本定律

3.1 安培 (Ampere) 定律——电磁力

安培定律给出载流导线在磁场中所受的电磁力公式。电磁力是一个矢量, 当载流导线在磁场内与磁场方向垂直, 且沿导线长度上各点的 B 大小相同, 方向一致, 则导线所受电磁力 F 的大小与导线中电流 I 、导线在磁场内的有效长度 l 和导线所在处的磁感应强度 B 三者成正比, 即

$$F = BIl \quad (1.1-5)$$

式中 B ——磁感应强度 (T);

l ——导线的有效长度 (m);

I ——导线中的电流 (A)。

电磁力的方向用左手定则决定, 见图 1-1-15。

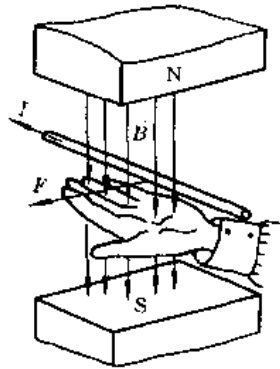


图 1-1-15 左手定则

3.2 电磁感应定律

3.2.1 右手螺旋定则

磁场的方向与产生该磁场的电流方向之间的关系, 可用右手螺旋定则决定, 图 1-1-16a 所示为载流直导线的情况, 图 1-1-16b 所示为载流螺旋线圈的情况。

3.2.2 回路的感应电动势——电磁感应定律

当与回路环链的磁通发生变化时, 回路内会产生感应电动势, 其大小与环链磁通的变化率成正比, 称为电磁感应定律。

感应电动势的方向由楞次定律决定, 即当与回路环链的磁通发生变化时, 该回路中所产生的感应电动势的方向, 总是企图使其感应电流所产生的磁通阻止原来磁通的变化。

如果规定感应电动势的参考方向与磁通参考方向



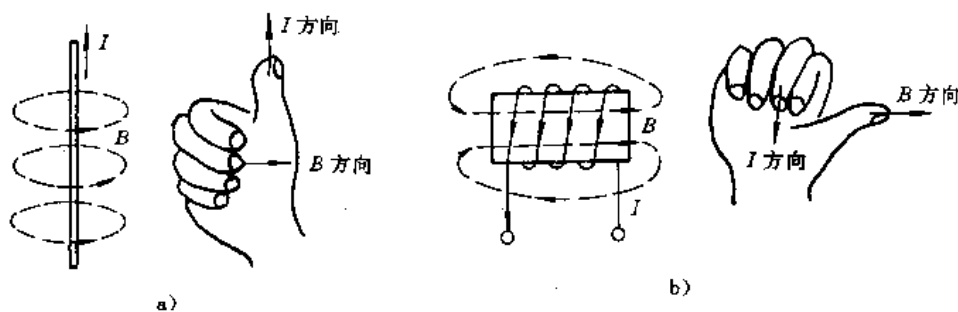


图 1-1-16 右手螺旋定则

a) 载流直导线 b) 载流螺旋线圈

之间符合右手螺旋定则(图 1-1-17a), 则感应电动势等于磁通变化率的负值, 即

$$e = -\frac{d\Phi}{dt} \quad (\text{V}) \quad (1-1-6)$$

例如, 当闭合回路内磁通增加时, $d\Phi/dt$ 为正, 根据式(1-1-6), e 为负值, 即 e 的实际方向与图 1-1-17a 中所示参考方向相反, 此时 e 和 Φ 的实际方向如图 1-1-17b 所示。而当磁通减少时, $\frac{d\Phi}{dt}$ 为负, 根据式(1-1-6), e 为正值, 即 e 的实际方向与图 1-1-17a 中所示参考方向相同。

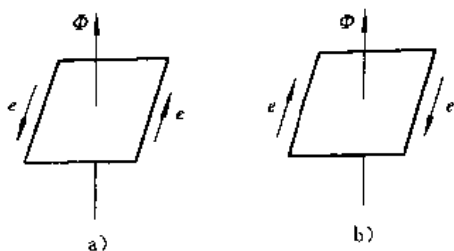


图 1-1-17 楞次定律

a) e 、 Φ 正方向的规定 b) 磁通增加时, e 的实际方向

3-2-3 直导线中的感应电动势

当导体与磁场作相对运动, 即导体切割磁力线时, 导体内会产生感应电动势。如果导体是直导线, 且导线、磁场和导线运动方向三者互相垂直, 并沿导线长度上各点的磁感应强度均相同, 其感应电动势为

$$e = Blv \quad (\text{V}) \quad (1-1-7)$$

式中 l ——导线在磁场中的有效长度 (m);

v ——导线运动的速度 (m/s)。

感应电动势的方向用右手定则决定, 见图 1-1-18。

3-2-4 自感电动势

若线圈中的电流发生变化, 则由这电流所产生的

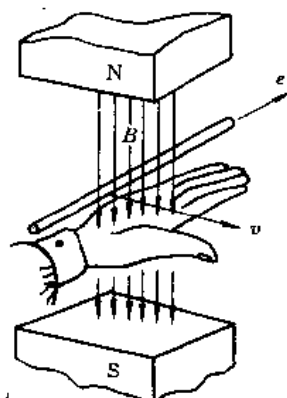


图 1-1-18 右手定则

环链线圈本身的磁通也将发生变化, 而使线圈中产生感应电动势。这种感应电动势称为自感电动势。自感电动势的大小与线圈中电流的变化率成正比。自感电动势的方向总是企图使其感应电流阻止线圈中电流的变化。如果规定电流 i 的参考方向与端电压 u_L 的参考方向一致, 自感电动势 e_L 的参考方向与 i 的参考方向一致(图 1-1-19), 则

$$e_L = -L \frac{di}{dt} \quad (\text{V})$$

$$u_L = -e_L = L \frac{di}{dt} \quad (\text{V})$$

式中 L ——线圈的自感系数 (H)。

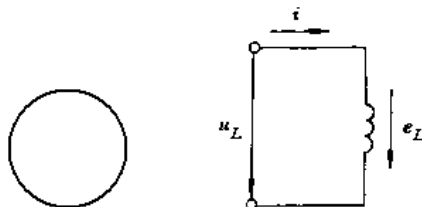


图 1-1-19 u_L 、 e_L 、 i 方向的规定

3-3 全电流定律

一闭合曲线把任意数目的载流导体围住(图 1-1-20), 则在闭合曲线上的合成磁场强度 H 沿整个回路 l 的线积分等于穿过此闭合曲线所形成的曲面 S 的导



体中电流的代数和,即

$$\oint H \cdot dl = \Sigma I \quad (1.1-8)$$

凡电流方向与回路 l 的循行方向合乎右手螺旋定则的电流为正,反之为负。

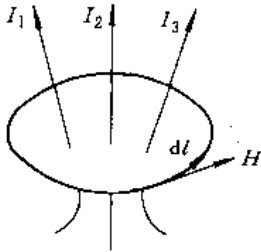


图 1.1-20 全电流定律

3.4 焦耳 (Joule) 定律

电流 I 通过电阻 R , 电阻吸收电能并转变为热能, 在时间 t 内, 电阻中总共产生的热量为

$$Q = 0.24 I^2 R t \quad (\text{J}) \quad (1.1-9)$$

式中 I —— 通过电阻的电流 (A);

R —— 电阻 (Ω);

t —— 电流通过电阻的时间 (s)。

3.5 欧姆 (Ohm) 定律

3.5.1 一段无源元件电路的欧姆定律

在一段无源元件电路中 (图 1.1-21), 通过的电流 i 与所加电压 u 成正比, 与电阻成反比, 即

$$i = \frac{u}{R} \quad (\text{A}) \quad (1.1-10)$$

在直流电路中,

$$I = \frac{U}{R} \quad (\text{A}) \quad (1.1-11)$$

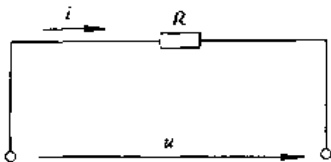


图 1.1-21 一段无源元件电路

3.5.2 一段有源元件电路的欧姆定律

在一段含有电动势的电路中, 通过的电流 I 不仅与所加电压有关, 而且也与电动势的作用有关 (表 1.1-9)。

表 1.1-9 一段含有电动势电路的欧姆定律

| 电 路 | 公 式 | 说 明 |
|-----|---------------------|------------------------------|
| | $I = \frac{U+E}{R}$ | 电压、电动势和电流的参考方向都一致 |
| | $I = \frac{U-E}{R}$ | 电压和电动势的参考方向相反, 电流和电压的参考方向一致 |
| | $I = \frac{E-U}{R}$ | 电压和电动势的参考方向相反, 电流和电动势的参考方向一致 |

3.6 基尔霍夫 (Kirchhoff) 定律

3.6.1 基尔霍夫第一定律

根据电流连续原理, 对任意节点 (三条或三条以上

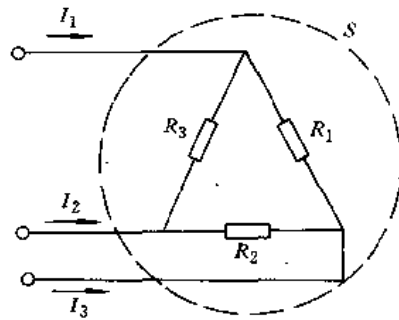


图 1.1-22 把电路的某一闭合面看成一节点

支路的连接点) 而言, 流入节点的电流总和必等于流出节点的电流总和, 即

$$\Sigma I_i = \Sigma I_o \quad (1.1-12a)$$

式中 I_i —— 流入节点的电流;

I_o —— 流出节点的电流。



如果将流入节点的电流规定为正, 流出节点的电流规定为负, 基尔霍夫第一定律可表示为

$$\sum I = 0 \quad (1.1-12b)$$

由节点推广到电路中任一闭合面, 也有上述关系, 例如在图 1.1-22 中

$$I_1 + I_2 + I_3 = 0$$

3.6.2 基尔霍夫第二定律

沿某一方向的任一闭合回路中, 各电动势的代数和必等于各段电压的代数和, 即

$$\sum E = \sum U \quad (1.1-13a)$$

式中 $\sum E$ ——回路内各段电动势的代数和, 如 E 的方向与回路循环方向相同, 则为正, 反之为负;

$\sum U$ ——回路内各段电压的代数和, 如 U 的方向与回路循环方向相同, 则 U 为正, 反之为负。

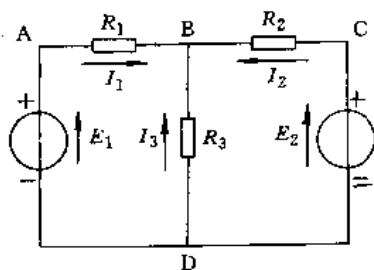


图 1.1-23 电路

如图 1.1-23 所示电路: 沿回路 ABCDA, 电压方程式为

$$E_1 - E_2 = I_1 R_1 - I_2 R_2$$

沿回路 ABDA, 电压方程式为

$$E_1 = I_1 R_1 - I_3 R_3$$

如果对电路中任一闭合回路取各段电压降的代数和, 则恒等于零。基尔霍夫第二定律可以表示为

$$\sum U = 0 \quad (1.1-13b)$$

在进行电路分析计算时, 通常需同时列出基尔霍夫定律的回路电压方程式及节点的电流方程式, 其具体运用见本篇第 2 章。

3.7 特勒根 (Tellegen) 定理

3.7.1 特勒根定理一

定理指出: 一个具有 n 个节点和 b 条支路的网络,

各支路电流、电压的参考方向一致, 则网络各支路电压与电流相乘之和等于零, 即

$$\sum_{k=1}^b u_k i_k = 0 \quad (1.1-14)$$

如果电压和电流均为时间 t 的函数, 则

$$\sum_{k=1}^b u_k(t) i_k(t) = 0$$

上式表明, 在任何瞬间, 一个网络全部支路吸收 (或发出) 的功率之和等于零, 这正是功率守恒的表现, 因此, 特勒根定理一又可称为特勒根功率定理。

3.7.2 特勒根定理二

图 1.1-24a 所示是一个由电阻、电感、电容以及电源等元件构成的网络, 共有 6 条支路、4 个节点, 各支路上箭头表示电压和电流的参考方向。不管支路元件的性质如何, 都用一线段代替, 同时, 用点 (·) 表示节点, 就可得到图 1.1-24b 所示图形, 称为原网络的线图或图。

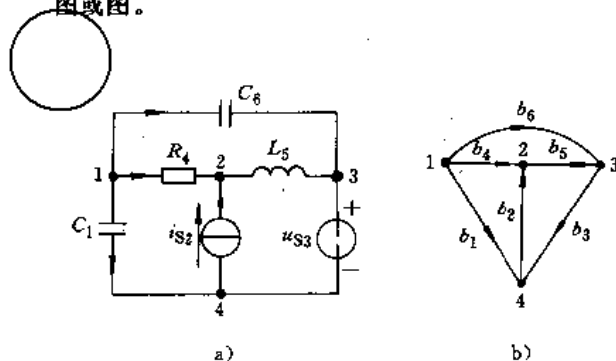


图 1.1-24 网络图

a) 原网络 b) 原网络的线图

该定理指出: 设二网络 N 和 \hat{N} 构成元件不同而线图相同, 则网络 N 各支路电压 (或电流) 与网络 \hat{N} 各对应支路电流 (或电压) 的乘积之和等于零, 即

$$\sum_{k=1}^b u_k \hat{i}_k = 0 \quad \sum_{k=1}^b \hat{u}_k i_k = 0 \quad (1.1-15)$$

在时域中, 则

$$\sum_{k=1}^b u_k(t) \hat{i}_k(t) = 0 \quad \sum_{k=1}^b \hat{u}_k(t) i_k(t) = 0$$

上式每一项均为电压与电流相乘, 具有功率的量纲, 但电压和电流不属于同一网络, 又非真实功率, 因此, 特勒根定理二又可称为特勒根似功率定理。

例如图 1.1-25a、b 所示的 N 和 \hat{N} 二网络, 二网络元件不同, 但线图相同, 如图 1.1-25c 所示。

从网络 N 求得其各支路电流, 见图 1.1-25a, 即 $i_1 = -3A$, $i_2 = 3A$, $i_3 = 2A$, $i_4 = 1A$; 从网络 \hat{N} 可求得

此星公司制作 请尊重作者版权



各支路电压, 见图 1-1-25b, 即 $\hat{u}_1=20\text{V}$, $\hat{u}_2=8\text{V}$, $\hat{u}_3=12\text{V}$, $\hat{u}_4=12\text{V}$ 。由此可得

$$\hat{u}_1 i_1 + \hat{u}_2 i_2 + \hat{u}_3 i_3 + \hat{u}_4 i_4 = -60 + 24 + 24 + 12 = 0$$

验证了特勒根定理二。

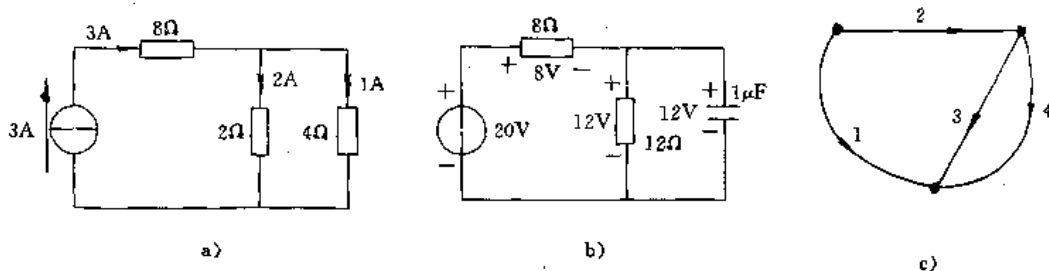


图 1-1-25 网络图

a) N网络 b) \hat{N} 网络 c) 线图

第2章 直流电路分析的基本方法

电路按其元件性质不同, 一般可分为线性电路和非线性电路。线性电路由线性元件构成(电源除外), 元件的伏安特性可表示为线性代数方程或线性微分方程。线性电路在电路理论研究中占有重要地位, 这是因为大多数实际电路常可按线性电路理论进行分析和研究, 甚至非线性电路在一定的条件下, 也可以作为线性电路处理。线性电路的特点是同时具有齐次性和叠加性(见本章4节)。

本章所述线性电路的基本分析和计算方法, 适用于线性直流电路, 也完全适用于稳态正弦电路, 只要将各直流量都换成相应的交流相量或复数量即可。关于非线性电路的计算, 常用的有试探法或图解法。

1 支路电流法

一个电路元件或几个电路元件串联成一段电路称为支路, 会聚三条或更多支路的点, 称为节点。沿电路的某些支路而构成的任何闭合路径, 称为回路。

把支路电流作为未知量, 联立基尔霍夫第一定律和第二定律的电流和电压方程求解, 这种方法称为支路电流法。

设电路共有 m 个支路。为了求得 m 个支路电流, 需要列出 m 个独立方程式。其中 n 个节点可应用基尔霍夫第一定律列出 $(n-1)$ 个独立方程式, 其余 $[m-(n-1)]$ 个独立方程式可应用基尔霍夫第二定律列出。

【例 1-2-1】 在图 1-2-1 所示电路中, $m=6$, $n=4$ 。按第一定律可列出 $4-1=3$ 个独立节点方程式; 按第二定律可列出 $6-(4-1)=3$ 个独立回路方程式。

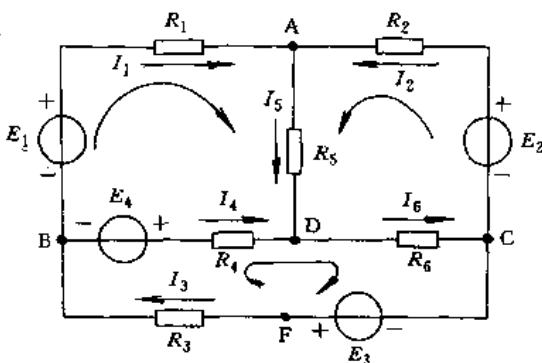


图 1-2-1 支路电流法

根据图 1-2-1 所假定的支路电流的参考方向,

对节点 A $I_1 + I_2 = I_5$

对节点 B $I_1 + I_4 = I_3$

对节点 C $I_2 + I_3 = I_6$

沿回路 BADB:

$$I_1 R_1 + I_5 R_5 - I_4 R_4 = E_1 - E_4$$

沿回路 ADCA:

$$I_2 R_2 + I_5 R_5 + I_6 R_6 = E_2$$

沿回路 BDCFB:

$$I_4 R_4 + I_6 R_6 + I_3 R_3 = E_3 + E_4$$

2 回路电流法

把回路电流当作未知量, 可以比支路电流法少列 $(n-1)$ 个独立方程。此时方程式应按基尔霍夫第二定律列出, 这种方法称为回路电流法。当电路中回路数少于节点数时, 采用回路电流法比较简便。



对于具有 l 回路的电路, 其回路电流方程的一般形式为

$$\left. \begin{aligned} \text{回路 1} \quad R_{11}I_1 + R_{12}I_2 + R_{13}I_3 + \cdots + R_{1l}I_l &= E_{11} \\ \text{回路 2} \quad R_{21}I_1 + R_{22}I_2 + R_{23}I_3 + \cdots + R_{2l}I_l &= E_{22} \\ \cdots \cdots \cdots \cdots \cdots \cdots \cdots \cdots \cdots \cdots \cdots \cdots \cdots \cdots \cdots \cdots \cdots \cdots \cdots \cdots \\ \text{回路 } l \quad R_{l1}I_1 + R_{l2}I_2 + R_{l3}I_3 + \cdots + R_{ll}I_l &= E_{ll} \end{aligned} \right\} (1.2-1)$$

式中有相同下标的电阻 $R_{11}, R_{22}, \cdots, R_{ll}$ 为各回路的自电阻 (本回路中各电阻的总和), 有不同下标的电阻 $R_{12}, R_{13}, R_{21}, R_{23}, \cdots$ 为相邻回路间的互电阻。本回路电流在自电阻上的电压参考方向总是与本回路电流的方向一致, 所以自电阻总是正的。由于各回路电流参考方向是事先任意假定的, 所以两个回路电流 I_1 和 I_1 在 R_{12} 上的参考方向不一定相同, 参考方向不相同则互电阻取负值, 相同时取正值。式中 $E_{11}, E_{22}, \cdots, E_{ll}$ 等为各回路电动势的代数和。回路中各支路电流是该支路上各回路电流的代数和。

例如, 在图 1.2-2 中选定 ADBA、DACD 和 BDCFB 三个回路, 假定三个回路电流 I_1, I_2, I_3 的参考方向如图 1.2-2 所示, 应用基尔霍夫第二定律可列出三个回路方程式为

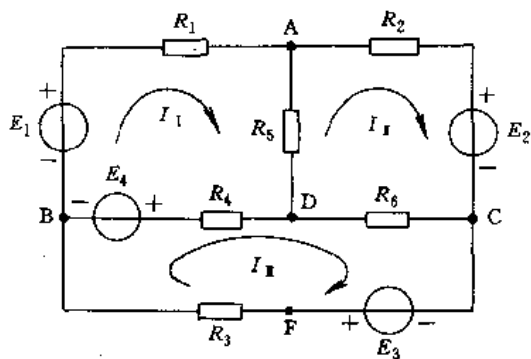


图 1.2-2 回路电流法

$$\begin{aligned} \text{回路 ADBA} \quad (R_1 + R_5 + R_4)I_1 - R_5I_2 - R_4I_3 &= E_1 - E_4 \\ \text{回路 DACD} \quad -R_5I_1 + (R_2 + R_5 + R_6)I_2 - R_6I_3 &= -E_2 \\ \text{回路 BDCFB} \quad -R_4I_1 - R_6I_2 + (R_3 + R_4 + R_6)I_3 &= E_3 + E_4 \end{aligned}$$

根据上列方程式解得回路电流 I_1, I_2, I_3 。然后从回路电流算出支路电流, 即支路 BA 中为 I_1 , 支路 AC 中为 I_1 , 支路 CFB 中为 I_3 , 支路 BD 中为 $(I_2 - I_1)$, 支路 AD 中为 $(I_1 - I_2)$, 支路 DC 中为 $(I_3 - I_2)$ 。

3 节点电位法

选定电路中任意一节点为参考点 (即令此节点电位为零), 把其余各节点的电位作为未知量, 按基尔霍夫第一定律列出方程式求解, 这便是节点电位法。在求出各节点的电位以后, 再求出各支路电流。求解节点数少于回路数的电路, 采用节点电位法比较简便。

对于具有 $(n-1)$ 个独立节点的电路, 按基尔霍夫第一定律, 其节点电位方程式为

$$\left. \begin{aligned} \text{节点 1} \quad G_{11}V_1 + G_{12}V_2 + G_{13}V_3 + \cdots + G_{1(n-1)}V_{(n-1)} &= I_{11} \\ \text{节点 2} \quad G_{21}V_1 + G_{22}V_2 + G_{23}V_3 + \cdots + G_{2(n-1)}V_{(n-1)} &= I_{22} \\ \cdots \cdots \cdots \cdots \cdots \cdots \cdots \cdots \cdots \cdots \cdots \cdots \cdots \cdots \cdots \cdots \cdots \cdots \cdots \cdots \\ \text{节点 } (n-1) \quad G_{(n-1)1}V_1 + G_{(n-1)2}V_2 + G_{(n-1)3}V_3 + \cdots + G_{(n-1)(n-1)}V_{(n-1)} &= I_{(n-1)(n-1)} \end{aligned} \right\} (1.2-2)$$

式中有相同下标的电导 $G_{11}, G_{22}, \cdots, G_{(n-1)(n-1)}$ 为各节点的自电导, 它是汇接到该点所有支路的电导之总和, 自电导始终为正值。有不同下标的电导 $G_{12}, G_{13}, G_{21}, \cdots$ 为该两节点之间的互电导, 它是直接连接两节点的所有支路的电导的总和, 互电导总是负值。 $V_1, V_2, V_3, \cdots, V_{(n-1)}$ 是各节点对参考点的电位。电流 $I_{11}, I_{22}, \cdots, I_{(n-1)(n-1)}$ 是直接与该节点相联的各有源支路的短路电流的代数和, 流向节点的取正值, 反之取负值。各短路电流的计算式为 $I_i = G_i E_i$, E_i 为各有源支路的电动势; G_i 为各相应支路的电导。

例如, 在图 1.2-3 中, 电阻 R_1, R_2, R_3, R_4, R_5 和电动势 E_1, E_4, E_5 为已知, 求支路电流 I_1 和 I_3 。

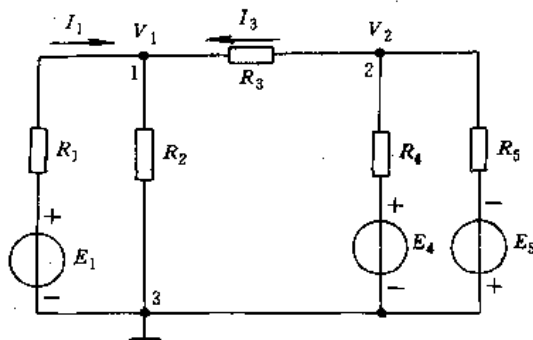


图 1.2-3 节点电位法

设节点 3 为参考点, 则

$$\begin{aligned} (G_1 + G_2 + G_3) V_1 - G_3 V_2 \\ = G_1 E_1 - G_3 V_1 + (G_3 + G_4 + G_5) V_2 = G_4 E_4 - G_5 E_5 \end{aligned}$$



从上式解得 V_1 、 V_2 ，则支路电流

$$I_1 = G_1 (E_1 - V_1) = \frac{E_1 - V_1}{R_1}$$

$$I_3 = G_3 (V_2 - V_1) = \frac{V_2 - V_1}{R_3}$$

例如，图 1-2-4 是两节点电路，设节点 b 为参考点，则

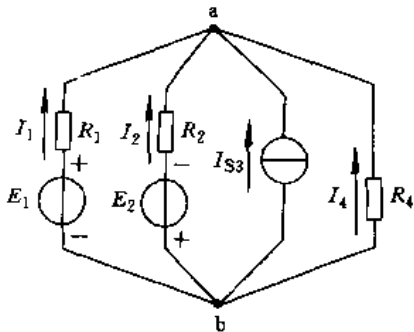


图 1-2-4 具有两节点的电路

$$(G_1 + G_2 + G_4) V_a = G_1 E_1 - G_2 E_2 + I_{S3} \quad (1.2-3)$$

所以从式 (1.2-3) 得 a 点电位为

$$V_a = \frac{G_1 E_1 - G_2 E_2 + I_{S3}}{G_1 + G_2 + G_4} \quad (1.2-4)$$

如果电路两个节点之间有 n 条支路，则式 (1.2-4) 可写成一般形式

$$V_a = \frac{G_1 E_1 + G_2 E_2 + \dots + G_n E_n + I_{S1} + I_{S2} + \dots + I_{Sn}}{G_1 + G_2 + \dots + G_n}$$

$$= \frac{\sum_{i=1}^n G_i E_i + \sum_{k=1}^m I_{Sk}}{G_{11}} \quad (1.2-5)$$

式 (1.2-5) 称为弥尔曼 (Millman) 定理。实际上这是节点电位法的一个特例。式中分母 G_{11} 是与节点 a 相连的各支路电导之和，分子是与节点相连的有源支路产生的电流的代数和。其正负号规定如下：当电动势的方向与节点电位的参考方向相反时，取“+”；相同时取“-”。求出节点电位后，就应用欧姆定律计算各支路电流。

4 线性电路的性质

线性电路是由线性无源元件和独立电源（它作为电路的输入）组成。齐次性和叠加性是线性电路的基本性质。

4.1 齐次性

当线性电路输入增加 K_1 倍时 (K_1 为任一常数)，相应的输出也增大 K_1 倍，这种性质称为线性电路的齐次性，也称为比例性，见图 1-2-5，设线性电路的输

入为 x_1 ，输出为 y ，且 $y = f(x_1)$ 。当输入为 $K_1 x_1$ 时，相应的输出为

$$y' = f(K_1 x_1) = K_1 f(x_1) = K_1 y$$

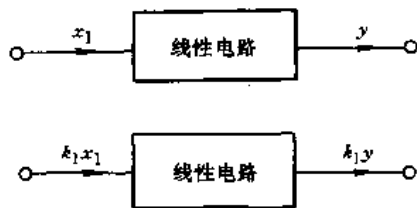


图 1-2-5 线性电路的齐次性

4.2 叠加性——叠加定理

在线性电路中，几个输入量同时输入时，则其输出为各个输入单独作用时的输出之代数和，这种性质称为线性电路的叠加性，见图 1-2-6，设在线性电路中，单独输入 x_1 时，输出为 y_1 ，单独输入 x_2 时，输出为 y_2 。若同时输入 $x_1 + x_2$ 时，相应的输出则为

$$y = f(x_1 + x_2) = f(x_1) + f(x_2) = y_1 + y_2$$

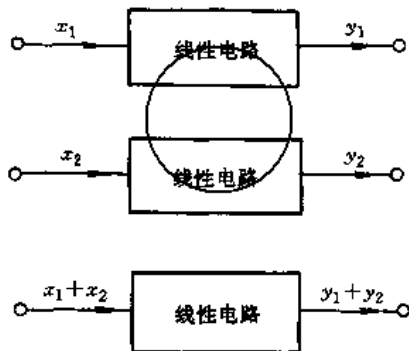


图 1-2-6 线性电路的叠加性

线性电路的叠加性是很有用的。在线性电路分析中，几个电源同时作用时，在某一支路中所产生的电流，等于各个电源单独作用时，在该支路中所产生的电流的代数和。这个关于电源作用的独立性原理称为叠加定理。

应用叠加定理必须注意，只允许电路中有一个电源起作用，而将其它电源撤出电路，即视电压源为短接，视电流源为开路，但它们的内阻应予保留。例如在图 1-2-7a 电路中，为求 R_2 支路电流 I_2 ，应用叠加定理可得

当 E 单独作用时，见图 1-2-7b，有

$$I_2' = \frac{E}{R_1 + R_2}$$

当 I_S 单独作用时，见图 1-2-7c，有



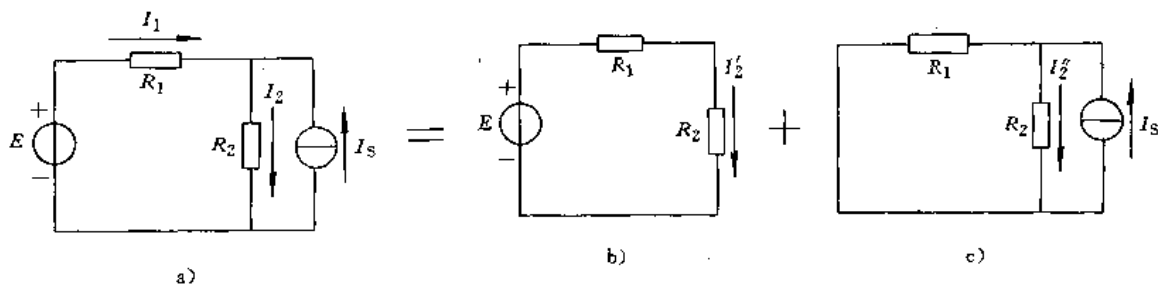


图 1-2-7 叠加定理的应用

a) 电路 b) E 单独作用 c) Is 单独作用

$$I''_2 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} I_s$$

所以通过 R_2 支路的电流

$$I_2 = I'_2 + I''_2 = \frac{E}{R_1 + R_2} + \frac{R_1}{R_1 + R_2} I_s$$

应当指出,叠加定理不适用于功率计算,因为在线性电路中,功率是电流或电压的二次方函数,不是成线性关系的。

5 等效电源定理

任意复杂的线性网络均可变换为等效的最简网络,这种方法为分析研究复杂网络中少数支路,尤其是单个支路提供方便。如图 1-2-8a 所示原网络,其左边点划线框内是一个有源两端网络,右边点划线框内是一个无源两端网络;它们分别用图 1-2-8b 的方框表示。

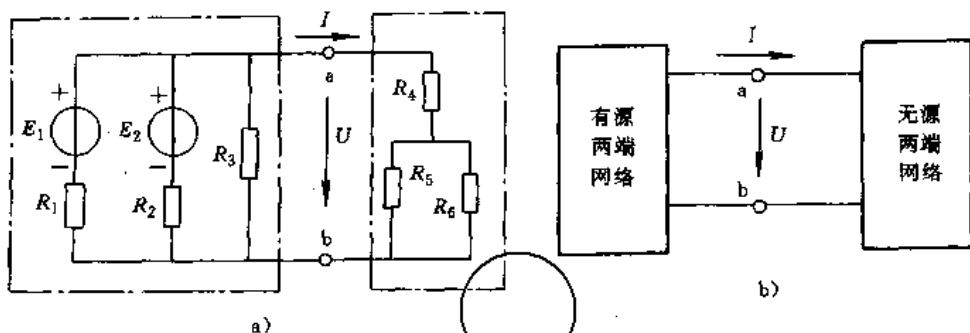


图 1-2-8 两端网络

a) 原网络 b) 有源两端网络和无源两端网络方框图

如果只对某一个支路的电流和电压进行分析计算,则可以将其余部分看作一个两端网络。一个无源两端网络可用电阻变换的方法把它简化成一个等效电阻。而含有一个或 n 个电源的有源两端网络可简化为一个等效电源,这种方法称为等效电源定理。任何有源两端网络都可以用等效电源代替,用等效电压源代替时称为戴维南定理;用等效电流源代替时称为诺顿定理。

5.1 戴维南 (Thevenin) 定理

戴维南定理是指一个有源两端网络(图 1-2-9)可以用一个电压源模型等效代替(图 1-2-10)。电路中恒压源 E 为有源两端网络的开路电压 $E = U_0$, 内电阻 R_0 为有源两端网络除源(即恒压源短接,恒流源开路)后,由网络两端看入的等效电阻。

对于图 1-2-9 中 ab 支路电流,可以通过图 1-2-10 求得:

$$I = \frac{E}{R_0 + R}$$

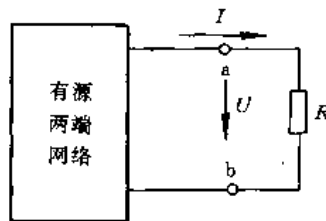


图 1-2-9 有源两端网络

图 1-2-11 是应用戴维南定理来计算负载电流的例子。显然,等效电压源的内电阻 $R_0 = R_1 // R_2 // R_3$ 。

再求恒压源 E , 把 E_1, R_1 和 E_2, R_2 二个电压源等效变换成电流源模型,见图 1-2-11b, 于是开路电压



$$E = U_0 = (I_{S1} + I_{S2})(R_1 // R_2 // R_3) = \left(\frac{E_1}{R_1} + \frac{E_2}{R_2} \right) R_0$$

从图 1-2-11c 得

$$I_L = \frac{E}{R_0 + R_L}$$

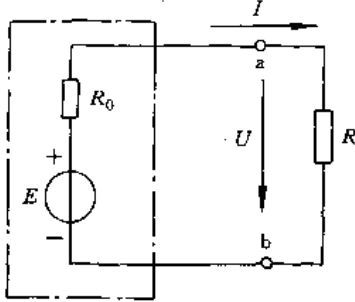
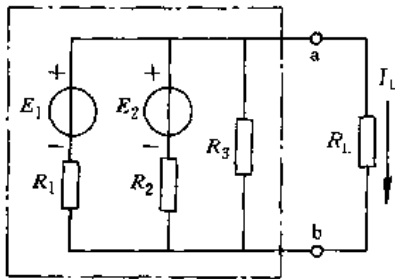
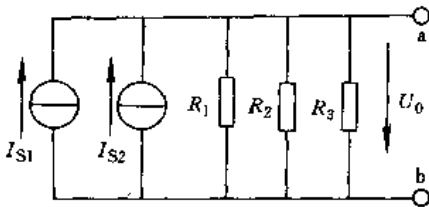


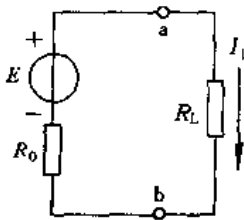
图 1-2-10 等效电压源



a)



b)



c)

图 1-2-11 应用戴维南定理计算负载电流

5.2 诺顿 (Norton) 定理

诺顿定理是指一个有源两端网络可以用一个电流源模型来等效代替(图 1-2-12)。其中恒流源 I_S 为有源两端网络的短路电流,内电阻 R_0 为有源两端网络除源

(即恒压源短接,恒流源开路)后,由网络两端看入的等效电阻。

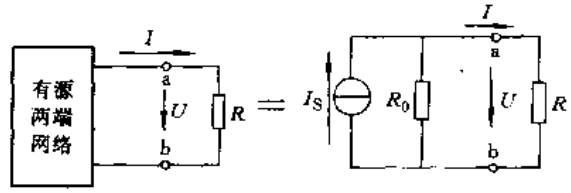


图 1-2-12 诺顿定理

现可求得 ab 支路中的电流为

$$I = \frac{R_0}{R_0 + R} I_S$$

若以诺顿定理求图 1-2-11 电路的负载电流,则等效电流源的内电阻 $R_0 = R_1 // R_2 // R_3$

等效电流源的电流 $I_S = I_{S1} + I_{S2} = \frac{E_1}{R_1} + \frac{E_2}{R_2}$

于是

$$I_L = \frac{R_0}{R_0 + R_L} I_S$$

6 负载获得最大功率的条件

对于图 1-2-13 所示电路,其中点划线框内部分也可以看作由戴维南定理变换所得的等效电压源模型,负载 R_L 的功率

$$P_L = \left(\frac{E}{R_0 + R_L} \right)^2 R_L \quad (1.2-6)$$

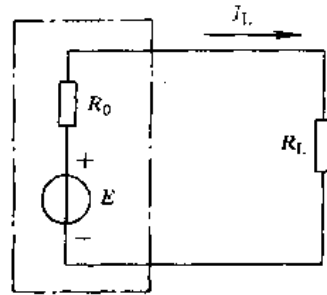


图 1-2-13 有源两端网络输出功率

负载获得的最大功率,可对式 (1.2-6) 求导解出

$$\frac{dP_L}{dR_L} = E^2 \frac{(R_0 + R_L)^2 - 2R_L(R_0 + R_L)}{(R_0 + R_L)^4}$$

令

$$\frac{dP_L}{dR_L} = 0$$

求出获得最大功率的条件是

$$R_L = R_0 \quad (1.2-7)$$

在电路中,当 $R_L = R_0$ 时称为电阻匹配,负载的最大功率



$$P_{1,max} = \left(\frac{E}{R_c + R_L} \right)^2 R_L = \frac{E^2}{4R_L} \quad (1.2-8)$$

在匹配条件下,负载获得的功率虽然最大,但输电效率却较低,只有50%。因此,匹配条件只适用于小功率信号传递电路(例如在电子电路中)。大功率电能输送的过程要尽可能提高效率。

7 星形网络和三角形网络的等效互换

星形网络和三角形网络可以等效互换,等效互换的条件是保持外部电路的电压和电流不变。其电路图和变换公式见表1.2-1。

表 1.2-1 星形网络与三角形网络的负载变换

| | | | | | | | | | |
|--------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|----------|--------------------------------------------|------------------------------------------------------|--------------------------------------------|------------------------------------------------------|--------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| 电路图 | | | | | | | | | |
| 变换公式 | <table border="1" style="width: 100%;"> <tr> <td style="text-align: center;">星形变换为三角形</td> <td style="text-align: center;">三角形变换为星形</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">$R_{ab} = R_a + R_b + \frac{R_a R_b}{R_c}$</td> <td style="text-align: center;">$R_a = \frac{R_{ab} R_{ca}}{R_{ab} R_{bc} + R_{ca}}$</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">$R_{bc} = R_b + R_c + \frac{R_b R_c}{R_a}$</td> <td style="text-align: center;">$R_b = \frac{R_{bc} R_{ab}}{R_{ab} R_{bc} + R_{ca}}$</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">$R_{ca} = R_c + R_a + \frac{R_c R_a}{R_b}$</td> <td style="text-align: center;">$R_c = \frac{R_{ca} R_{bc}}{R_{ab} R_{bc} + R_{ca}}$</td> </tr> </table> | 星形变换为三角形 | 三角形变换为星形 | $R_{ab} = R_a + R_b + \frac{R_a R_b}{R_c}$ | $R_a = \frac{R_{ab} R_{ca}}{R_{ab} R_{bc} + R_{ca}}$ | $R_{bc} = R_b + R_c + \frac{R_b R_c}{R_a}$ | $R_b = \frac{R_{bc} R_{ab}}{R_{ab} R_{bc} + R_{ca}}$ | $R_{ca} = R_c + R_a + \frac{R_c R_a}{R_b}$ | $R_c = \frac{R_{ca} R_{bc}}{R_{ab} R_{bc} + R_{ca}}$ |
| 星形变换为三角形 | 三角形变换为星形 | | | | | | | | |
| $R_{ab} = R_a + R_b + \frac{R_a R_b}{R_c}$ | $R_a = \frac{R_{ab} R_{ca}}{R_{ab} R_{bc} + R_{ca}}$ | | | | | | | | |
| $R_{bc} = R_b + R_c + \frac{R_b R_c}{R_a}$ | $R_b = \frac{R_{bc} R_{ab}}{R_{ab} R_{bc} + R_{ca}}$ | | | | | | | | |
| $R_{ca} = R_c + R_a + \frac{R_c R_a}{R_b}$ | $R_c = \frac{R_{ca} R_{bc}}{R_{ab} R_{bc} + R_{ca}}$ | | | | | | | | |

8 含受控源电路的分析

对含有受控源的电路进行分析计算,必须注意以下几点:

(1) 用基尔霍夫定律列电路方程式时,受控电源与独立电源同样对待,除列出必要的独立方程式之外,还应当列出受控电源与控制量的关系式。

(2) 应用叠加原理分析含受控源电路时,所有受控源均应保留,不能像独立电源那样作除源处理。

【例 1.2-2】 应用叠加原理求图 1.2-14a 所示电路中的电压 U 和电流 I_2 。

根据叠加原理,20V 电压源单独作用,如图 1.2-14b 所示;10A 电流源单独作用,如图 1.2-14c 所示。注意两个电路中均保留了受控电压源 $10I_1'$ 和 $10I_1''$,在图 1.2-14b 中:

$$I_1' = I_2' = \frac{20}{6+4} = 2A$$

$$U' = -10I_1' + 4I_2' = -12V$$

在图 1.2-14c 中:

$$I_1'' = \frac{4}{6+4} \times 10 = 4A$$

$$I_2'' = \frac{6}{6+4} \times 10 = 6A$$

$$U'' = 10I_1'' + 4I_2'' = 64V$$

$$\text{所以 } U = U' + U'' = -12 + 64 = 52V$$

$$I_2 = I_2' + I_2'' = 8A$$

注意:图 1.2-14c 中,由于 I_1'' 的参考方向改变,所以受控电压源的参考方向要相应改变。

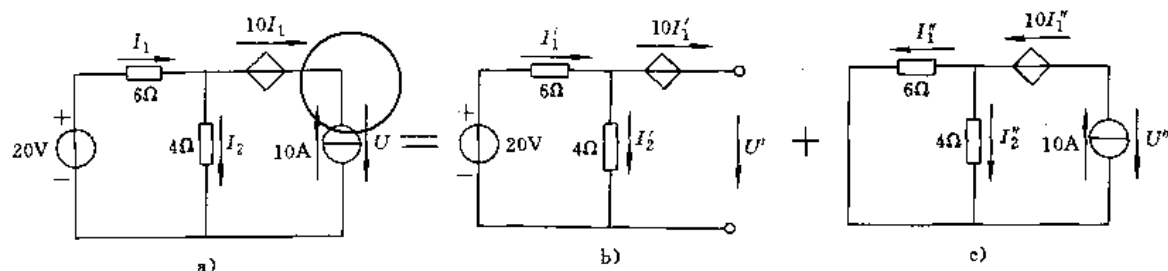


图 1.2-14 应用叠加原理分析含受控源电路

(3) 应用等效电源定理分析含受控源电路时,不能将受控源和它的控制量分割在两个网络中,即二者必须在同一个网络中。

用戴维南定理分析含受控源的有源二端网络,求开路电压(或短路电流)时应注意上面提出的问题。求等效电源的内电阻时,有源网络内的独立电源应当设置为零。但受控源不能随便设置为零,而是取决于控制量是否为零。这样,等效电源的内电阻便不能用电阻串并联的方法计算了。这时可以采用先求解有源网络的

开路电压 U_0 及短路电流 I_{s0} 的方法来求得它的内电阻 R_0 。

【例 1.2-3】 应用戴维南定理求图 1.2-14a 所示电路中的电流 I_2 。先移去 4Ω 电阻支路。

在图 1.2-15a 中求得

$$I_1' = -10A$$

于是开路电压

$$U_0 = 20 - 6I_1' = 20 + 60 = 80V$$

再由图 1.2-15b 求得短路电流

纯星公司制作 请尊重作者版权



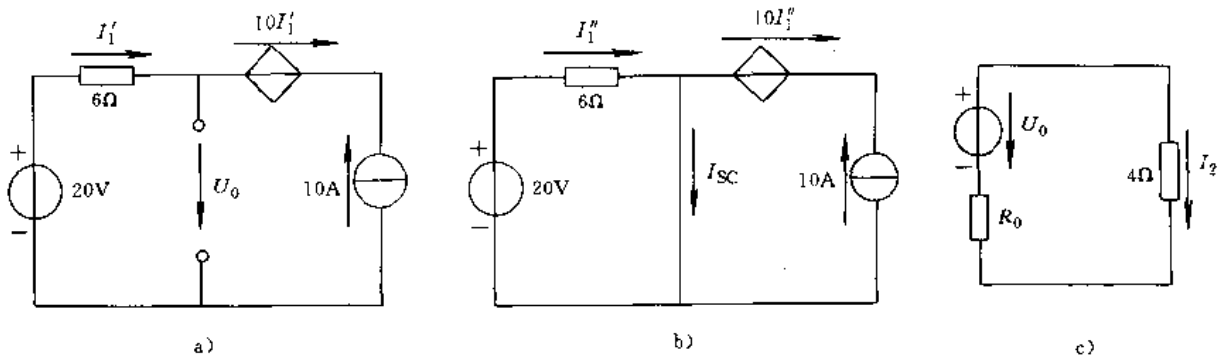


图 1-2-15 应用戴维南定理分析含受控源电路

$$I_{sc} = \frac{20}{6} + 10 = \frac{40}{3} \text{ A}$$

因此等效电源的内电阻

$$R_0 = \frac{U_0}{I_{sc}} = \frac{80}{\frac{40}{3}} = 6 \ \Omega$$

由图 1-2-15c 求得电流 I_2

$$I_2 = \frac{80}{6+4} = 8 \text{ A}$$

(4) 受控源同样可以进行电压源模型与电流源模型的等效变换。但是在变换过程中,不能把受控源的控制量变换掉。

9 非线性电阻电路

9.1 非线性电阻的伏安特性

非线性电阻的伏安特性是一条曲线,它的形状有对称的和不对称的两种。对称的伏安特性曲线对坐标原点对称,与电流电压的方向无关,如热电阻非线性元件。不对称的伏安特性曲线对坐标原点不对称,与电流电压的方向有关,如半导体元件。

图 1-2-16 是非线性伏安特性曲线举例。在非线性的伏安特性曲线上某一点,如图 1-2-16a 中 A 点的电压与电流的比值,称为该点的静态电阻,即

$$R = \frac{u_A}{i_A}$$

显然,在伏安特性曲线上不同的点,具有不同数值的静态电阻。在非线性的伏安特性上某一点的电压增量与电流增量的比值的极限称为在这一点上的动态电阻,即动态电阻 $r = \frac{du}{di}$ 。在非线性的伏安特性曲线的直线部分范围内,动态电阻等于电压的有限增量与电流的有限增量之比,即 $r = \frac{\Delta u}{\Delta i}$ 。

一般的非线性伏安特性曲线上,当电压增加时,电流也随之增加,即 $\frac{du}{di} > 0$,动态电阻是正值。但也有电

压增加时,电流反而减小,即 $\frac{du}{di} < 0$ (图 1-2-16c 的 PV 段),动态电阻是负值,称为负阻特性。

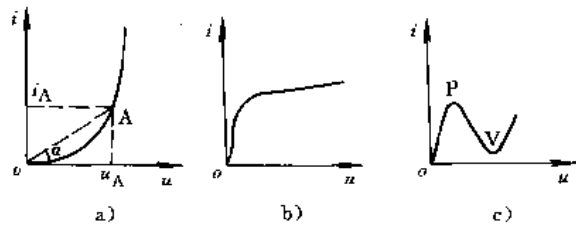


图 1-2-16 非线性伏安特性曲线实例

9.2 非线性电阻电路的计算方法

9.2.1 试探法

如图 1-2-17 所示,非线性电阻 R_1 (半导体二极管) 和线性电阻 R_2 相串联,电路的电压方程为

$$U = U_1 + U_2 = U_1 + IR_2 \quad (1-2-9)$$

为了求得 I 和 U_1 、 U_2 ,可以先假设一个电流 I ,算出 IR_2 ,并从非线性电阻 R_1 的伏安特性曲线上找出对应于 I 值的电压 U_1 ,如果 $U_1 + IR_2$ 正好等于 U ,则所假设的电流值是正确的。否则,再假设一个大于或小于第一次所假设的电流值,重复以上计算,直至求出正确的数值。

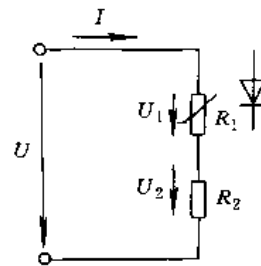


图 1-2-17 非线性电阻电路



9.2.2 图解法

图解法在非线性电阻电路的计算中用得比较普遍。图1.2-18所示的是两个非线性电阻串联电路的两种图解的方法。在图1.2-18a中,根据每个电阻的伏安特性曲线*i(u₁)*和*i(u₂)*作出总的伏安特性曲线*i(u)*,然后根据已知的电源电压值*U*,在*i(u)*曲线上找出相应的电流值*I*,再在*i(u₁)*和*i(u₂)*曲线上找出相应的电压值*U₁*和*U₂*。

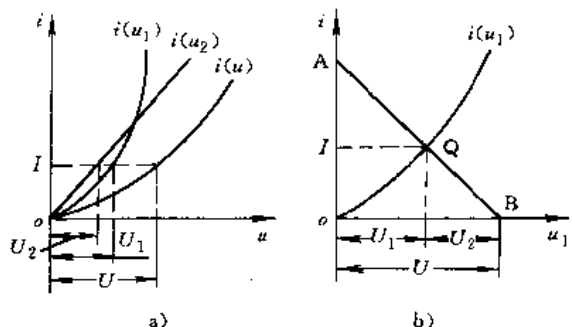


图1.2-18 非线性电阻电路的图解法

在图1.2-18b中,*i(u₁)*是非线性电阻的伏安特性曲线,AB是根据电路的电压方程式*u₁=U-iR₂*所作的一条直线(令*u₁=0*,则*i=U/R₂*,得A点;又令*i=0*,则*u₁=U*,得B点。联接A、B,即得该直线)。这一直线通常称为负载线(它的斜率及在二坐标轴上截距与*R₂*及*U*的大小有关)。负载线AB与曲线*i(u₁)*的交点Q既符合*R₁*上的电压与电流间关系,又符合电路中的电压平衡方程式,因此根据Q点即可确定电路中的电流*I*和电压*U₁*、*U₂*。Q点称为电路的工作点。

在电子电路中分析小信号问题时,常用微变等效电路分析非线性电路。在这类问题中通常是先给电路加一较大的直流电压,称为偏置电压,确定电路的工作点Q(或工作状态),见图1.2-18b。在此基础上研究当电路输入一小信号*ΔU*时,相应的输出电流*ΔI*,见图1.2-19a。因小信号*ΔU*较电压*U*小得多,将它叠加在*U*上时,仅是一个微变量,电路将工作在Q点附近。在Q点附近的小范围内,非线性电阻元件的特性曲线

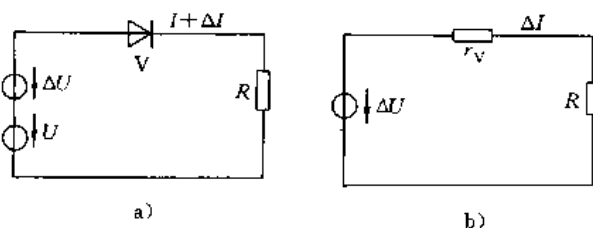


图1.2-19 二极管的非线性电路

近似为直线。因此可以利用二极管元件的动态电阻*r_v*的概念,应用微变等效电路见图1.2-19b分析*ΔU*与*ΔI*的关系,将非线性电路转化为线性电路。于是得

$$\Delta I = \frac{\Delta U}{R + r_v}$$

注意,动态电阻值随工作点而变化,因此应用微变等效电路分析小信号电路时,必须先确定工作点,选用相应工作点的动态电阻值。

9.2.3 解析法

如果非线性元件的伏安特性曲线,在工作范围的部分近于直线,则分析计算时,可用直线来代替,使它线性化。此时,非线性电阻可用一个恒定的电动势和一个等于其动态电阻的线性电阻相串联的电路来等效。

例如图1.2-20所示的非线性电阻1和非线性电阻2的伏安特性曲线,在a附近和b附近的近于直线范围内,其动态电阻分别为*r₁=Δu₁/Δi*,*r₂=Δu₂/Δi*,电压与电流的关系可分别表示为

$$\begin{cases} u_1 = U_{01} + i r_1 \\ u_2 = -U_{02} + i r_2 \end{cases} \quad (1.2-10)$$

其等效电路如图1.2-21所示。

非线性电阻线性化后,在其工作范围内便可按照线性电路的方法来进行电路的分析计算。

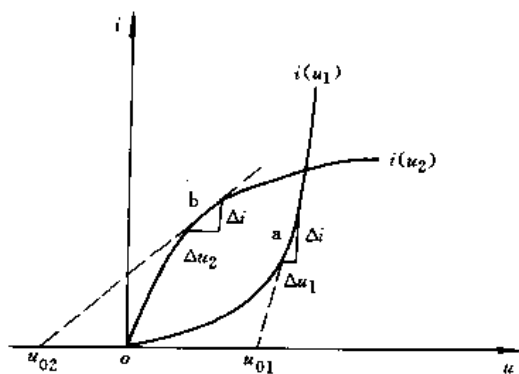


图1.2-20 非线性伏安特性曲线

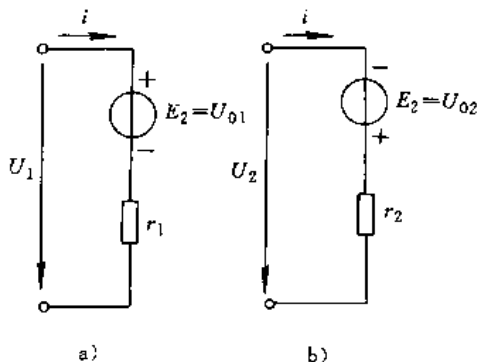


图1.2-21 非线性电阻的等效电路



第3章 正弦电路稳态分析

本章主要介绍正弦电的特征和基本表示方法——旋转矢量表示法和相量法；应用相量法来分析计算正弦电路。最后介绍三相电路的计算。

数值和方向随时间作正弦规律变化的电流、电压、电动势，统称为正弦交流电。同频率正弦量的和或差仍是该频率的正弦量，正弦量的导数和积分仍是同频率的正弦量。

在实践中，由几个频率相同，而相位不同的正弦电源常构成多相正弦电路。在电力工业上应用最广泛的是对称三相正弦电路。它是由三个频率相同、电压幅值相等、相位互差 120° 角的正弦电路组成。其中每一个电路，称为多相电路中的一相，常称单相正弦电路。三相正弦电路的优点是远距离输电比单相更为经济，而作为三相电路的主要负载——三相交流电动机，其造价比单相电动机更低，其性能更为优越。

1 正弦交流电

正弦交变的电动势、电压和电流的瞬时值表达式分别为

$$\left. \begin{aligned} e &= E_m \sin(\omega t + \psi_e) \\ u &= U_m \sin(\omega t + \psi_u) \\ i &= I_m \sin(\omega t + \psi_i) \end{aligned} \right\} \quad (1.3-1)$$

式中 E_m 、 U_m 、 I_m ——电动势、电压、电流的最大值（幅值）；

ω ——角频率（rad/s）；

t ——时间（s）；

ψ_e 、 ψ_u 、 ψ_i —— e 、 u 、 i 的初相位（初相角）（rad）。

最大值、角频率和初相位称为正弦量的三要素，用以表征正弦电量的特征。

1.1 周期、频率和角频率

1. 周期 交流电每重复变化一次所需要的时间，称为周期 T （图 1.3-1），单位是秒（s）。

2. 频率 交流电每秒钟内变化的周期数，称为频率 f 。 f 和 T 的关系是

$$f = \frac{1}{T} \quad (1.3-2)$$

频率的单位是赫兹（Hz），简称赫。1 赫 = 1 周/秒。我

国电力供电的标准频率为 50Hz。

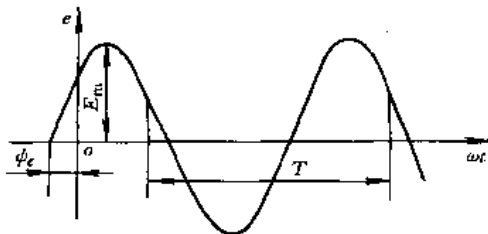


图 1.3-1 正弦交变电势

3. 角频率 正弦量在单位时间内所经历的电角度称为角频率 ω ，由于正弦电每变化一周，相应地变化 2π 弧度的电角度，所以单位时间内将变化 $2\pi f$ 弧度，即

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T} \quad (\text{rad/s}) \quad (1.3-3)$$

1.2 相位（相角）和相位差（相角差）

1. 相位（相角） 正弦交流电的瞬时值表达式 (1.3-1) 中的电角度 $(\omega t + \psi_e)$ 、 $(\omega t + \psi_u)$ 和 $(\omega t + \psi_i)$ ，称为正弦量的相位（相角）， $t=0$ 时的相位 ψ_e 、 ψ_u 和 ψ_i ，称为初相位（初相角）。

2. 相位差（相角差） 两个同频率的正弦交流电的相位之差，称为相位差（相角差） φ 。如图 1.3-2a 所示，当 $\psi_u = \psi_i$ 时， u 与 i 之间的相位差 $\varphi = \psi_u - \psi_i = 0$ ，称 u 与 i 同相；当 $\psi_u > \psi_i$ 时，称 u 比 i 超前 φ 角，或 i 比 u 滞后 φ 角，见图 1.3-2b。

1.3 有效值

用于反映交流电在电路中的热或机械等物理效应的强弱，常采用交流电的有效值来表示其大小。

设在同一电阻中依次通以直流电流与交流电流，通电的时间均为交流电一个周期，若它们在电阻上消耗的电能相等，则定义该直流电的大小为交流电的有效值 I ，即

$$I^2 RT = \int_0^T i^2 R dt \quad (1.3-4)$$

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt} \quad (1.3-5)$$

在正弦电的情况下，电流、电压和电动势的有效值为

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = 0.707 I_m \quad U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \quad E = \frac{E_m}{\sqrt{2}}$$



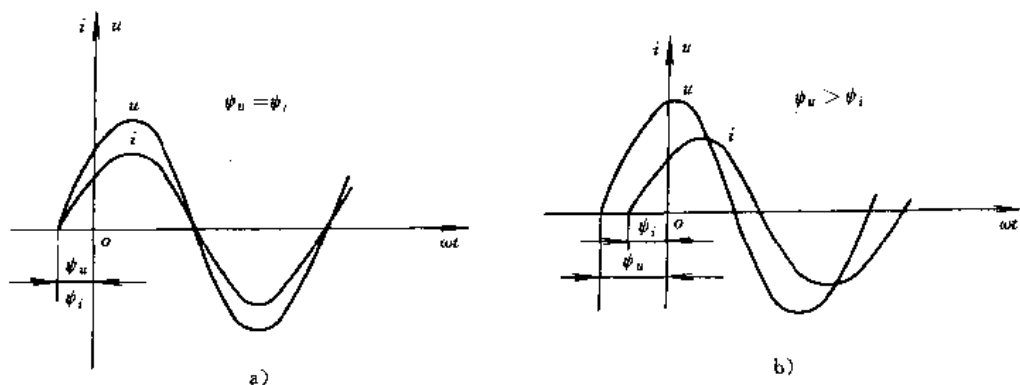


图 1-3-2 相位差

1.4 平均值

一般所说的正弦交流电的平均值,是指一个周期内绝对值的平均值,也就是正半周的平均值,即

$$I_{AV} = \frac{2}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} I_m \sin(\omega t + \phi_i) dt = \frac{2}{\pi} I_m \quad (1-3-6)$$

同样

$$U_{AV} = \frac{2}{\pi} U_m \quad (1-3-7)$$

$$E_{AV} = \frac{2}{\pi} E_m \quad (1-3-8)$$

2 正弦量的表示法

正弦量可以用三角函数式和波形图表示,但不便于分析运算。用旋转矢量表示法和相量法分析计算电路就方便得多。

2.1 旋转矢量表示法

正弦量可以用直角坐标中的旋转矢量表示。如果使一矢量的长度等于一正弦量的最大值,此矢量与横轴正方向所夹的角等于正弦量的初相位,它绕原点 o 按逆时针方向旋转的角速度等于正弦量的角频率 ω ,则此旋转矢量任何时刻在纵轴上的投影即等于该正弦量在该时刻的瞬时值(图 1-3-3)。

表示几个同频率正弦量的几个矢量的整体,称为矢量图。几个正弦量的频率相同时,各矢量之间的相对位置始终保持不变,故为分析计算正弦电路,画出任一瞬间的矢量图即可。通常画矢量图时以其有效值作为矢量的长度,第一个矢量的位置可根据计算或分析的方便而任意选择,其它矢量则根据它们之间的相位差

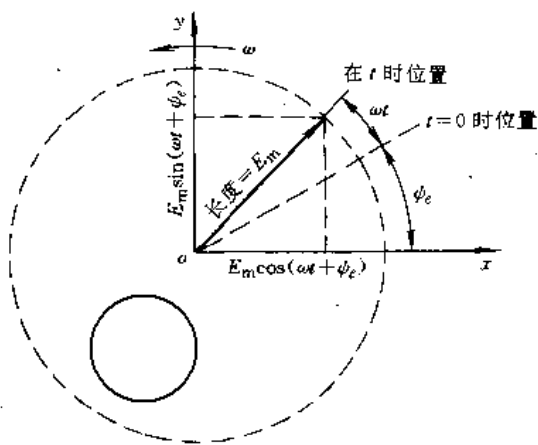


图 1-3-3 旋转矢量

画出。

对于同频率的正弦量和正弦量的加、减可方便地利用矢量图的几何关系。

2.2 相量法

为了便于正弦量的定量分析,代表正弦量的矢量可用复数表示(图 1-3-4)。我们把用复数表示的正弦量称为相量,并在大写字母上加“·”。以相量形式分析正弦电路的方法称为相量法,它是一种稳态交流电路重要的分析计算方法。

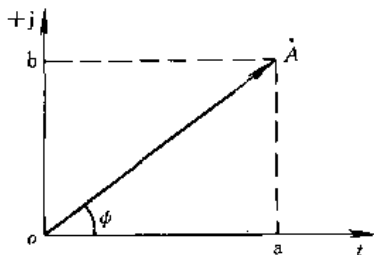


图 1-3-4 矢量的复数表示



复数可按需要采用两种坐标表示,两种坐标的互换方法见表1-3-1,以求能简便地进行四则运算(表1-3-2)。

表 1-3-1 复数的表示形式及其互换

| 坐标制 | 直角坐标形式 | 极坐标形式 |
|----------|------------------------------------|---------------------------------------------------|
| 表示式 | $a+jb$ | $r\angle$ 或 $re^{j\theta}$ |
| 图形表示法 | | |
| 两种坐标式的换算 | $a=r\cos\theta$ $b=r\sin\theta$ | $r=\sqrt{a^2+b^2}$ $\theta=\arctan\frac{b}{a}$ |

一个正弦量用相量表示时,正弦量的有效值或最大值就是相量的模,初相位就是相量的幅角。于是,正

弦电压 $u=U_m\sin(\omega t+\psi)$ 的相量可表示为

$$\dot{U}=U(\cos\psi+j\sin\psi)=Ue^{j\psi}=U/\psi \quad (1-3-9)$$

表 1-3-2 复数的运算方法

| 运算方式 | 运算方法 |
|------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 加、减 | $\dot{A}_1 \pm \dot{A}_2 = (a_1 + jb_1) \pm (a_2 + jb_2)$ $= (a_1 \pm a_2) + j(b_1 \pm b_2)$ |
| 乘 | $\dot{A}_1 \cdot \dot{A}_2 = A_1 \angle \varphi_1 \cdot A_2 \angle \varphi_2 = A_1 A_2 \angle (\varphi_1 + \varphi_2)$ $j A_1 = A_1 \angle \left(\varphi_1 + \frac{\pi}{2} \right)$ |
| 除 | $\dot{A}_1 / \dot{A}_2 = A_1 \angle \varphi_1 / A_2 \angle \varphi_2 = \frac{A_1}{A_2} \angle (\varphi_1 - \varphi_2)$ $\dot{A}_1 / j = -j \dot{A}_1 = -j A \angle \varphi_1 = A_1 \angle \left(\varphi_1 - \frac{\pi}{2} \right)$ |

3 单一电路元件的交流电路

在单一电路元件电阻 R 、电感 L 与电容 C 的交流电路中,电流与电压的关系、相量图、平均功率、无功功率及功率因数见表 1-3-3。

表 1-3-3 单一元件电阻 R 、电感 L 和电容 C 的交流电路

| 名称 | 纯电阻电路 | 纯电感电路 | 纯电容电路 |
|--------------------------------|---------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 电路图 | | | |
| 电压与电流的关系 | | $\dot{U}_L = j\omega L \dot{I} = jX_L \dot{I}$ $X_L = \omega L = 2\pi fL$ X_L —感抗(Ω) | $\dot{U}_C = -j \frac{1}{\omega C} \dot{I} = -jX_C \dot{I}$ $X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi fC}$ X_C —容抗(Ω) |
| 相量图 | \dot{U}_R 与 \dot{I} 同相, $\varphi=0$ | \dot{U}_L 超前 $\dot{I} 90^\circ, \varphi=90^\circ$ | \dot{U}_C 滞后 $\dot{I} 90^\circ, \varphi=-90^\circ$ |
| 平均功率(W) $P=UI\cos\varphi$ | $P_R=U_R I=RI^2$ | $P_L=0$ | $P_C=0$ |
| 无功功率(var) $Q=UI\sin\varphi$ | $Q_R=0$ | $Q_L=U_L I$ | $Q_C=U_C I$ |
| 功率因数 $\cos\varphi$ | $\cos\varphi=1$ | $\cos\varphi=0$ | $\cos\varphi=0$ |



4 RLC 串联和并联的交流电路

的关系、复数阻抗、复数导纳以及相量图等见表 1-3-4。

RLC 串联电路和 RLC 并联电路中的电流与电压

表 1-3-4 RLC 串联电路和 RLC 并联电路

| 名称 | RLC 串联电路 | RLC 并联电路 |
|--------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 电路图 | | |
| 电流与电压的相量关系 | $\begin{aligned} \dot{U} &= \dot{U}_R + \dot{U}_L + \dot{U}_C \\ &= R\dot{i} + j\omega L\dot{i} - j\frac{1}{\omega C}\dot{i} \\ &= \left(R + j\omega L - j\frac{1}{\omega C} \right) \dot{i} = Z\dot{i} \\ \dot{i} &= \frac{\dot{U}}{Z} \end{aligned}$ | $\begin{aligned} \dot{i} &= \dot{i}_R + \dot{i}_L + \dot{i}_C = \frac{\dot{U}}{R} + \frac{\dot{U}}{j\omega L} + \frac{\dot{U}}{-j\frac{1}{\omega C}} \\ &= \left(\frac{1}{R} - j\frac{1}{\omega L} + j\omega C \right) \dot{U} = Y\dot{U} \\ \dot{U} &= \frac{\dot{i}}{Y} \end{aligned}$ |
| 复数阻抗与复数导纳 | <p>复数阻抗 $Z = R + j(X_L - X_C) = R + jX$ $= Z \angle \varphi$</p> <p>阻抗 $Z = \sqrt{R^2 + X^2}$ (单位为 Ω)</p> <p>阻抗角 $\varphi = \arctan \frac{X}{R}$</p> <p>其中电抗 $X = X_L - X_C$</p> <p>复数导纳 $Y = \frac{1}{Z} = \frac{1}{R + jX}$ $= \frac{R}{R^2 + X^2} - j\frac{X}{R^2 + X^2}$</p> | <p>复数导纳 $Y = G - j(B_L - B_C)$ $= G - jB = Y \angle -\varphi$</p> <p>导纳 $Y = \sqrt{G^2 + B^2}$ 单位为(S)</p> <p>导纳角 $\varphi = \arctan \frac{B}{G}$</p> <p>其中电导 $G = \frac{1}{R}$, 电纳 $B = B_L - B_C$</p> <p>感纳 $B_L = \frac{1}{\omega L}$, 容纳 $B_C = \omega C$</p> <p>复数阻抗 $Z = \frac{1}{Y} = \frac{1}{G - jB}$ $= \frac{G}{G^2 + B^2} + j\frac{B}{G^2 + B^2}$</p> |
| 电流和电压的有效值关系 | $U = I Z = I\sqrt{R^2 + X^2}$ | $I = U Y = U\sqrt{G^2 + B^2}$ |
| 复数阻抗与复数导纳的互换 | $Z = \frac{1}{Y} = \frac{G}{G^2 + B^2} + j\frac{B}{G^2 + B^2}$ | $Y = \frac{1}{Z} = \frac{R}{R^2 + X^2} - j\frac{X}{R^2 + X^2}$ |
| 阻抗三角形或导纳三角形 | <p>阻抗三角形</p> | <p>导纳三角形</p> |



(续)

| 名称 | RLC 串联电路 | RLC 并联电路 |
|-----|--------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|
| 相量图 | <p>$X_L > X_C$ i 滞后于 \dot{U}</p> | <p>$B_L > B_C$ i 滞后于 \dot{U}</p> |
| | <p>$X_L = X_C$ i 与 \dot{U} 同相</p> | <p>$B_L = B_C$ i 与 \dot{U} 同相</p> |
| | <p>$X_L < X_C$ i 超前于 \dot{U}</p> | <p>$B_L < B_C$ i 超前于 \dot{U}</p> |
| | 以电流为参考相量 | 以电压为参考相量 |

5 功率和功率因数

则电路中的瞬时功率、有功功率、无功功率、视在功率和功率因数见表 1-3-5。

设电路中 $u = \sqrt{2} U \sin(\omega t + \varphi)$, $i = \sqrt{2} I \sin \omega t$,

表 1-3-5 单相正弦交流电的功率和功率因数

| 名称 | 表达式 | 说明 |
|----------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|
| 瞬时功率 $p(W)$ | $p = ui$ $= UI \cos \varphi (1 - 2 \cos 2\omega t) + UI \sin \varphi \sin 2\omega t$ $= UI \cos \varphi - UI \cos (2\omega t - \varphi)$ | 电路中任一瞬时的功率是由一个恒定分量和一个二倍频率分量两部分组成 |
| 有功功率(平均功率) $P(W)$ | $P = \frac{1}{T} \int_0^T p dt = UI \cos \varphi$ | 瞬时功率在一周期内的平均值 |

此星公司制作 请尊重作者版权



(续)

| 名称 | 表达式 | 说明 |
|----------------------|----------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| 无功功率 $Q(\text{var})$ | $Q=UI\sin\varphi$ | 其值等于电路中储能元件与外电路交换能量中吞吐的瞬时功率的最大值 |
| 视在功率 $S(\text{VA})$ | $S=UI=\sqrt{P^2+Q^2}$ | 其值等于电压和电流有效值的乘积。一般电源设备的容量都用视在功率表示 |
| 功率因数 $\cos\varphi$ | $\cos\varphi=\frac{P}{S}=\frac{P}{UI}$ | φ 角称为功率因数角,它是电流和电压的相位差,也就是阻抗角或导纳角。当 P, U 为一定时, $\cos\varphi$ 愈大, I 愈小 |

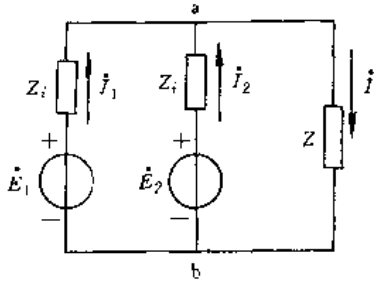
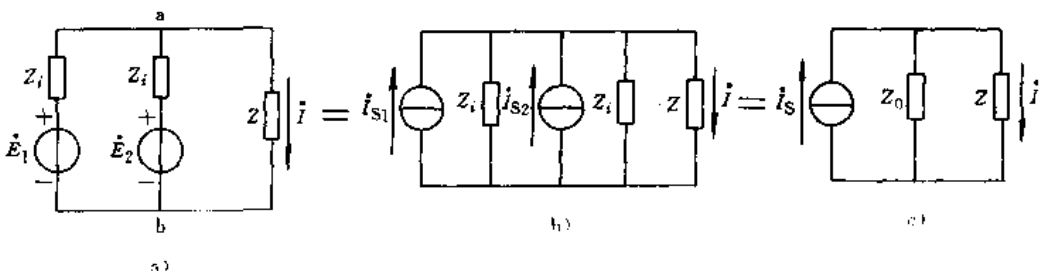
6 网络理论在交流电路中的应用

分析直流电路的网络理论,也可以引用来解决交流网络的各种问题。但是原公式中的电阻必须以复数阻抗代替,电导以复数导纳代替,而电压和电流等变量

以及电压源的电动势或电流源的电流都应该用相量表示。

表 1-3-6 举例说明直流电路中的支路电流法、节点电位法、两种电源模型等效互换法、叠加原理和戴维南定理等在正弦电路中的应用。

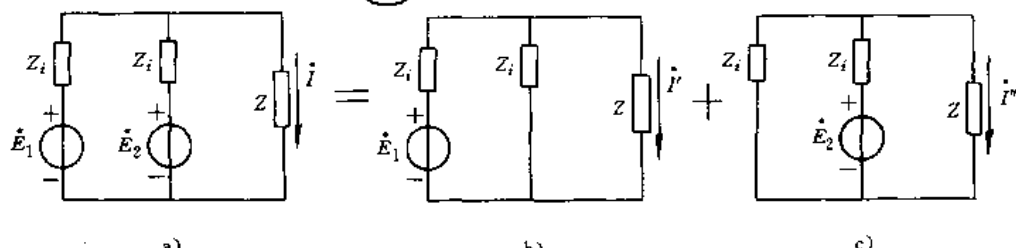
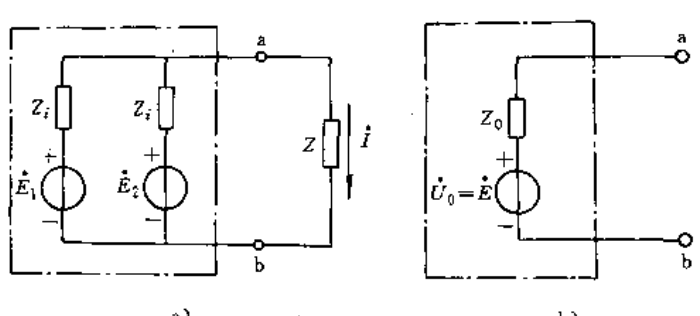
表 1-3-6 应用网络理论求交流电路中的电流 i
(设 $\dot{E}_1, \dot{E}_2, Z_1, Z_2, Z$ 为已知量)

| 方法 | 电路和计算公式 |
|--------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 支路电流法 |  <p>根据基尔霍夫第一和第二定律可得</p> $\begin{cases} i_1 + i_2 = i \\ i_1 Z_1 - i_2 Z_2 = \dot{E}_1 - \dot{E}_2 \\ i_2 Z_2 + i Z = \dot{E}_2 \end{cases}$ <p>解联立方程式可得:</p> $i = \frac{\dot{E}_1 + \dot{E}_2}{Z_1 + 2Z}$ |
| 节点电位法 | <p>由上面电路图取节点 b 为参考节点,则 a 点的电位:</p> $\dot{U}_a = \dot{U}_{ab} = \frac{\frac{\dot{E}_1}{Z_1} + \frac{\dot{E}_2}{Z_2}}{\frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z}} = \frac{Z}{Z_1 + 2Z} (\dot{E}_1 + \dot{E}_2)$ <p>由此得:</p> $i = \frac{\dot{U}_{ab}}{Z} = \frac{\dot{E}_1 + \dot{E}_2}{Z_1 + 2Z}$ |
| 两种电源模型的等效互换法 |  |

此星公司制作 请尊重作者版权



(续)

| 方法 | 电路和计算公式 |
|---------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>两种电源模型的等效互换法</p> | <p>将图 a 中两个电压源模型分别转换为电流源模型,如图 b 所示。然后将两个并联电流源组合为一个等效的电流源,如图 c 所示。图中等效电流源的电流</p> $I_s = \frac{\dot{E}_1}{Z_i} + \frac{\dot{E}_2}{Z_i}$ <p>等效内阻抗</p> $Z_0 = \frac{Z_i}{2}$ <p>因此</p> $i = \frac{Z_0}{Z_0 + Z} I_s = \frac{\dot{E}_1 + \dot{E}_2}{Z_i + 2Z}$ |
| <p>叠加原理</p> |  <p>图 b 所示, E_1 单独作用时产生的电流</p> $i' = \frac{\dot{E}_1}{Z_i + \frac{Z_i Z}{Z_i + Z}} \times \frac{Z_i}{Z_i + Z} = \frac{\dot{E}_1}{Z_i + 2Z}$ <p>图 c 所示, E_2 单独作用时产生的电流</p> $i'' = \frac{\dot{E}_2}{Z_i + \frac{Z_i Z}{Z_i + Z}} \times \frac{Z_i}{Z_i + Z} = \frac{\dot{E}_2}{Z_i + 2Z}$ <p>因此</p> $i = i' + i'' = \frac{\dot{E}_1 + \dot{E}_2}{Z_i + 2Z}$ |
| <p>戴维南定理</p> |  <p>图 a 所示, a, b 两端左边为有源两端网络,当网络开路时,可以用节点电位法求出 a, b 两端的开路电压</p> $\dot{U}_0 = \dot{E} = \frac{\frac{\dot{E}_1}{Z_i} + \frac{\dot{E}_2}{Z_i}}{\frac{1}{Z_i} + \frac{1}{Z_i}} = \frac{1}{2} (\dot{E}_1 + \dot{E}_2)$ <p>等效内阻抗</p> $Z_0 = \frac{Z_i}{2}$ <p>有源两端网络的等效电路,如图 b 所示,因此</p> $i = \frac{\dot{U}_0}{Z_0 + Z} = \frac{\dot{E}_1 + \dot{E}_2}{Z_i + 2Z}$ |
| <p>计算结果</p> | <p>以上几种方法求出的 i 的表示式完全相同</p> |

此星公司制作 请尊重作者版权

自 5 月 1 日起



7 双口网络

在工程实际中,常常要研究两对端子之间的关系,例如,对信号进行放大、滤波等,就要研究输入和输出之间的关系。在图 1-3-5 中,一对端子作为信号的输入端口,简称输入口;被处理后的信号取自网络的另一对端子,简称输出口。这种具有两个端口的网络称为双口网络(也称二端口网络)。相应的二端网络只有一个端口,称为单口网络。所谓端口是一对端子,流入其中一个端子的电流总是等于流出另一个端子的电流。这是它与四端网络的区别(四端网络的四个端子可以有各自的电流)。在以下讨论双口网络中,设每个端口的电压、电流参考方向一致,并假定双口网络是由线性元件构成,不含独立电源,但可以包含受控源。

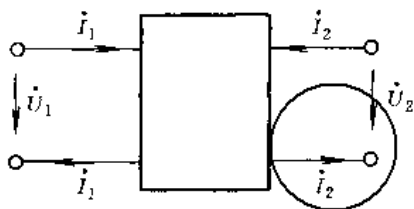


图 1-3-5 双口网络

7.1 双口网络的参数方程

在正弦稳态时,双口网络输入口电压 \dot{U}_1 和电流 \dot{I}_1 , 输出口电压 \dot{U}_2 和电流 \dot{I}_2 , 四个变量用相量表示, 设其中任意两个为自变量, 另两个为应变量。图 1-3-5 所示的双口网络, 可以根据不同的变量设置, 常用四组参数来描述。

1. Z 方程组和 Z 参数(阻抗参数) 以 \dot{I}_1 和 \dot{I}_2 为自变量, \dot{U}_1 和 \dot{U}_2 为应变量, 根据叠加原理, 可得

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = Z_{11}\dot{I}_1 + Z_{12}\dot{I}_2 \\ \dot{U}_2 = Z_{21}\dot{I}_1 + Z_{22}\dot{I}_2 \end{cases} \quad (1-3-10)$$

式中, Z_{11} 、 Z_{12} 、 Z_{21} 、 Z_{22} 称为双口网络的 Z 参数, 由上述方程可知 Z 参数的物理意义如下:

$$Z_{11} = \left. \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1} \right|_{\dot{I}_2=0} \quad \text{为输出端开路时的输入阻抗;}$$

$$Z_{12} = \left. \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_2} \right|_{\dot{I}_1=0} \quad \text{为输入端开路时的转移阻抗;}$$

$$Z_{21} = \left. \frac{\dot{U}_2}{\dot{I}_1} \right|_{\dot{I}_2=0} \quad \text{为输出端开路时的转移阻抗;}$$

$$Z_{22} = \left. \frac{\dot{U}_2}{\dot{I}_2} \right|_{\dot{I}_1=0} \quad \text{为输入端开路时的输出阻抗。}$$

不难看出, Z 参数是复数阻抗性质, 若内部不含受控源的双口网络, 则有 $Z_{12} = Z_{21}$, 当双口网络对称时, 尚有 $Z_{11} = Z_{22}$ 。

式(1-3-10)可由矩阵形式表示如下:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix} = Z \begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix} \quad (1-3-11)$$

式中 $Z = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix}$

式(1-3-11)称为双口网络的 Z 矩阵方程。

2. Y 方程组和 Y 参数(导纳参数) 如果以 \dot{U}_1 和 \dot{U}_2 为自变量, \dot{I}_1 和 \dot{I}_2 为应变量, 可得 Y 参数方程组:

$$\begin{cases} \dot{I}_1 = Y_{11}\dot{U}_1 + Y_{12}\dot{U}_2 \\ \dot{I}_2 = Y_{21}\dot{U}_1 + Y_{22}\dot{U}_2 \end{cases} \quad (1-3-12)$$

式中, Y_{11} 、 Y_{12} 、 Y_{21} 、 Y_{22} 称为双口网络的 Y 参数, Y 参数的物理意义如下:

$$Y_{11} = \left. \frac{\dot{I}_1}{\dot{U}_1} \right|_{\dot{U}_2=0} \quad \text{为输出端短路时的输入导纳;}$$

$$Y_{12} = \left. \frac{\dot{I}_1}{\dot{U}_2} \right|_{\dot{U}_1=0} \quad \text{为输入端短路时的反向转移导纳;}$$

纳;

$$Y_{21} = \left. \frac{\dot{I}_2}{\dot{U}_1} \right|_{\dot{U}_2=0} \quad \text{为输出端短路时的正向转移导纳;}$$

纳;

$$Y_{22} = \left. \frac{\dot{I}_2}{\dot{U}_2} \right|_{\dot{U}_1=0} \quad \text{为输入端短路时的输出导纳。}$$

Y 参数是复数导纳性质, 若内部不含受控源的双口网络, 则有 $Y_{12} = Y_{21}$ 。当双口网络结构对称时, 尚有 $Y_{11} = Y_{22}$ 。

式(1-3-12)可由矩阵形式表示如下:

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2 \end{bmatrix} = Y \begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2 \end{bmatrix} \quad (1-3-13)$$

式中 $Y = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix}$

式(1-3-13)称为双口网络的 Y 矩阵方程。

3. A 方程组和 A 参数(传输参数) 以 \dot{U}_2 和 \dot{I}_2 为自变量, \dot{U}_1 和 \dot{I}_1 为应变量(必须指出, 此时出口电流的参考方向习惯上常规定为与 \dot{I}_2 方向相反, 即 $\dot{I}'_2 = -\dot{I}_2$), 可得传输参数方程组

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = A_{11}\dot{U}_2 + A_{12}\dot{I}'_2 = A_{11}\dot{U}_2 - A_{12}\dot{I}_2 \\ \dot{I}_1 = A_{21}\dot{U}_2 + A_{22}\dot{I}'_2 = A_{21}\dot{U}_2 - A_{22}\dot{I}_2 \end{cases} \quad (1-3-14)$$



式中, A_{11} 、 A_{12} 、 A_{21} 、 A_{22} 称为双口网络的传输参数,其物理意义如下:

$$A_{11} = \left(\frac{\dot{U}_1}{\dot{U}_2} \right)_{i_2=0} \text{ 为输出端开路时 } \dot{U}_1 \text{ 与 } \dot{U}_2 \text{ 之比;}$$

$$A_{12} = \left(\frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_2} \right)_{\dot{U}_2=0} \text{ 为输出端短路时的正向转移阻抗;}$$

抗;

$$A_{21} = \left(\frac{\dot{I}_1}{\dot{U}_2} \right)_{i_2=0} \text{ 为输出端开路时的正向转移导纳;}$$

纳;

$$A_{22} = \left(\frac{\dot{I}_1}{\dot{I}_2} \right)_{\dot{U}_2=0} \text{ 为输出端短路时 } \dot{I}_1 \text{ 与 } \dot{I}_2 \text{ 之比。}$$

有时以上四个 A 参数分别用 A 、 B 、 C 、 D 表示。

式(1.3-14)可由矩阵形式表示如下:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{I}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_2 \\ -\dot{I}_2 \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} \dot{U}_2 \\ -\dot{I}_2 \end{bmatrix} \quad (1.3-15)$$

式中

$$T = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix}$$

式(1.3-15)称为双口网络的传输矩阵方程。

4. H 方程组和 H 参数(混合参数) 以 \dot{I}_1 、 \dot{U}_2 为自变量, \dot{U}_1 和 \dot{I}_2 为应变量, 可得 H 参数方程组

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = H_{11}\dot{I}_1 + H_{12}\dot{U}_2 \\ \dot{I}_2 = H_{21}\dot{I}_1 + H_{22}\dot{U}_2 \end{cases} \quad (1.3-16)$$

式中 H 参数的物理意义如下:

$$H_{11} = \left(\frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1} \right)_{\dot{U}_2=0} \text{ 为输出端短路的输入阻抗;}$$

$$H_{12} = \left(\frac{\dot{U}_1}{\dot{U}_2} \right)_{i_1=0} \text{ 为输入端开路时的反向电压传输系数;}$$

$$H_{21} = \left(\frac{\dot{I}_2}{\dot{I}_1} \right)_{\dot{U}_2=0} \text{ 为输出端短路时的正向电流传输系数;}$$

$$H_{22} = \left(\frac{\dot{I}_2}{\dot{U}_2} \right)_{i_1=0} \text{ 为输入端开路时的输出导纳。}$$

不难看出, H 是混合参数。

式(1.3-16)可由矩阵形式表示为

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} \\ H_{21} & H_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{U}_2 \end{bmatrix} = H \begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{U}_2 \end{bmatrix} \quad (1.3-17)$$

式中

$$H = \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} \\ H_{21} & H_{22} \end{bmatrix}$$

上述四组参数都可以描述双口网络。它们之间的互换关系见表 1.3-7。

表 1.3-7 双口网络参数互换关系

| 待求 \ 已知 | Z 参数 | Y 参数 | H 参数 | A 参数 |
|---------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Z 参数 | Z_{11} Z_{12} Z_{21} Z_{22} | $\frac{Y_{22}}{\Delta_Y}$ $-\frac{Y_{12}}{\Delta_Y}$ $-\frac{Y_{21}}{\Delta_Y}$ $\frac{Y_{11}}{\Delta_Y}$ | $\frac{\Delta_H}{H_{22}}$ $\frac{H_{12}}{H_{22}}$ $-\frac{H_{21}}{H_{22}}$ $\frac{1}{H_{22}}$ | $\frac{A_{11}}{A_{21}}$ $\frac{\Delta_A}{A_{21}}$ $\frac{1}{A_{21}}$ $\frac{A_{22}}{A_{21}}$ |
| Y 参数 | $\frac{Z_{22}}{\Delta_Z}$ $-\frac{Z_{12}}{\Delta_Z}$ $-\frac{Z_{21}}{\Delta_Z}$ $\frac{Z_{11}}{\Delta_Z}$ | Y_{11} Y_{12} Y_{21} Y_{22} | $\frac{1}{H_{11}}$ $-\frac{H_{12}}{H_{11}}$ $\frac{H_{21}}{H_{11}}$ $\frac{\Delta_H}{H_{11}}$ | $\frac{A_{22}}{A_{12}}$ $-\frac{\Delta_A}{A_{12}}$ $-\frac{1}{A_{12}}$ $\frac{A_{11}}{A_{12}}$ |
| H 参数 | $\frac{\Delta_Z}{Z_{22}}$ $\frac{Z_{12}}{Z_{22}}$ $-\frac{Z_{21}}{Z_{22}}$ $\frac{1}{Z_{22}}$ | $\frac{1}{Y_{11}}$ $-\frac{Y_{12}}{Y_{11}}$ $\frac{Y_{21}}{Y_{11}}$ $\frac{\Delta_Y}{Y_{11}}$ | H_{11} H_{12} H_{21} H_{22} | $\frac{A_{12}}{A_{22}}$ $\frac{\Delta_A}{A_{22}}$ $-\frac{1}{A_{22}}$ $\frac{A_{21}}{A_{22}}$ |
| A 参数 | $\frac{Z_{11}}{Z_{21}}$ $\frac{\Delta_Z}{Z_{21}}$ $\frac{1}{Z_{21}}$ $\frac{Z_{22}}{Z_{21}}$ | $-\frac{Y_{22}}{Y_{21}}$ $-\frac{1}{Y_{21}}$ $-\frac{\Delta_Y}{Y_{21}}$ $-\frac{Y_{11}}{Y_{21}}$ | $-\frac{\Delta_H}{H_{21}}$ $-\frac{H_{11}}{H_{21}}$ $-\frac{H_{22}}{H_{21}}$ $-\frac{1}{H_{21}}$ | A_{11} A_{12} A_{21} A_{22} |

表中 $\Delta_Z = \begin{vmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{vmatrix}$, $\Delta_Y = \begin{vmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{vmatrix}$, $\Delta_H = \begin{vmatrix} H_{11} & H_{12} \\ H_{21} & H_{22} \end{vmatrix}$, $\Delta_A = \begin{vmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{vmatrix}$.

7.2 双口网络的等效电路

根据双口网络方程组可以确定它的等效电路。在

实际中,应用较多的是 Z 参数, Y 参数和 H 参数三种等效电路。

1. 双口网络的 Z 参数等效电路 设双口网络的



Z 阻抗参数为已知,由此可得方程

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 &= Z_{11}\dot{I}_1 + Z_{12}\dot{I}_2 = (Z_{11} - Z_{12})\dot{I}_1 + Z_{12}(\dot{I}_1 + \dot{I}_2) \\ \dot{U}_2 &= Z_{21}\dot{I}_1 + Z_{22}\dot{I}_2 \\ &= (Z_{21} - Z_{12})\dot{I}_1 + (Z_{22} - Z_{12})\dot{I}_2 + Z_{12}(\dot{I}_1 + \dot{I}_2) \end{aligned} \right\} \quad (1.3-18)$$

由式(1.3-18)可得电路模型,见图 1.3-6。图中 $(Z_{21} - Z_{12})\dot{I}_1$ 是一受控电压源。由于该电路模型具有 T 形,所以称为 T 形等效电路。显然 $Z_{21} = Z_{12}$ 时,受控电压源元件将从等效电路中消失,此时,双口网络可由三个阻抗构成 T 形等效电路。若已知的不是 Z 参数,而是其它参数,可根据表 1.3-7 参数之间的互换关系,求得 Z 参数后,也可构成 T 形等效电路。

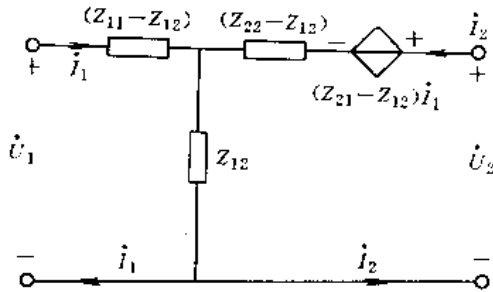


图 1.3-6 Z 参数的 T 形等效电路

2. 双口网络的 Y 参数等效电路 设双口网络的 Y 参数为已知,由此可得方程

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_1 &= Y_{11}\dot{U}_1 + Y_{12}\dot{U}_2 = (Y_{11} + Y_{12})\dot{U}_1 - Y_{12}(\dot{U}_1 - \dot{U}_2) \\ \dot{I}_2 &= Y_{21}\dot{U}_1 + Y_{22}\dot{U}_2 \\ &= -Y_{12}(\dot{U}_2 - \dot{U}_1) + (Y_{22} + Y_{12})\dot{U}_2 + (Y_{21} - Y_{12})\dot{U}_1 \end{aligned} \right\} \quad (1.3-19)$$

由式(1.3-19)可得电路模型,见图 1.3-7。图中 $(Y_{21} - Y_{12})\dot{U}_1$ 是一受控电流源。因电路模型具有 π 形,故称为双口网络的 π 形等效电路。若参数 $Y_{21} = Y_{12}$,则受控电流源从电路中消失,双口网络可由三个导纳构成 π 形等效电路。

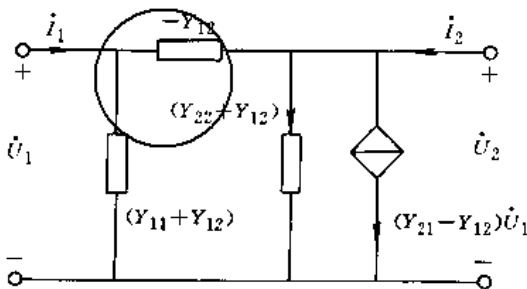


图 1.3-7 Y 参数的 π 形等效电路

3. 双口网络的 H 参数等效电路 设双口网络的 H 参数为已知,则有

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 &= H_{11}\dot{I}_1 + H_{12}\dot{U}_2 \\ \dot{I}_2 &= H_{21}\dot{I}_1 + H_{22}\dot{U}_2 \end{aligned} \right\} \quad (1.3-20)$$

由式(1.3-20)可得电路模型,见图 1.3-8。图中, H_{11} 为阻抗, H_{22} 为导纳, $H_{12}\dot{U}_2$ 和 $H_{21}\dot{I}_1$ 分别为受控电压源和受控电流源。此电路模型称为 H 参数等效电路。半导体管可以看成是双口元件,常用 H 参数等效电路表示它。

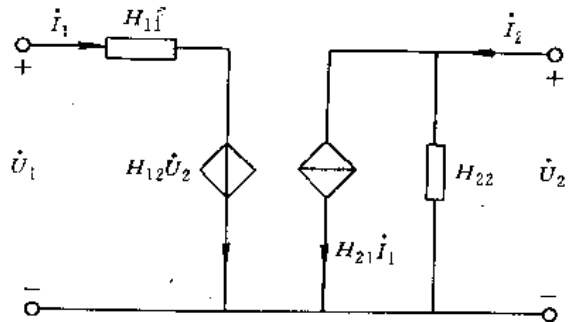


图 1.3-8 H 参数的等效电路

7.3 双口网络的串联、并联和级联

双口网络之间的相互联接,通常有串联、并联和级联三种方式。

1. 两个双口网络的串联 图 1.3-9 是两个双口网络 N_a 、 N_b , 分别把输入端口相串联, 输出端口相串联的连接方式称为双口网络的串联。其 Z 参数矩阵分别为 Z_a 和 Z_b , 设串联后该两网络仍能分别满足端口定义, 串联后形成的双口网络的 Z 参数矩阵为 Z , 则

$$Z = Z_a + Z_b \quad (1.3-21)$$

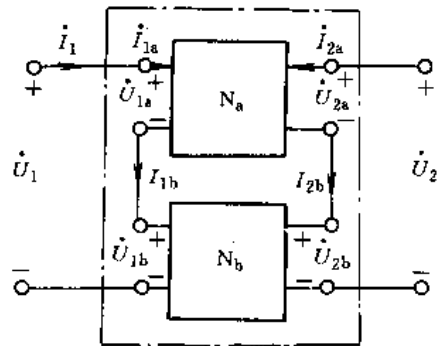


图 1.3-9 双口网络串联

在应用式(1.3-21)以前,必须先检查端口定义是否能满足。按图 1.3-10a 连接后,如端子 2'a 与 2b 之间的电



压 $\dot{U}=0$,则两对输入端口仍能分别满足端口定义。同样按图1-3-10b连接后,可以检查输出端口是否满足端口定义。

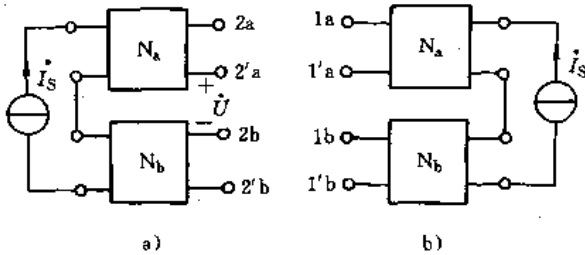


图1-3-10 双口网络串联时的端口检查

【例1-3-1】求图1-3-11a双口网络的Z参数。

解 把原双口网络看成是由图1-3-11b,c两个双口网络的串联,且串联后仍能满足端口定义。

对图1-3-11b双口网络,其Z参数矩阵为

$$\begin{bmatrix} 3 & 0 \\ K & 2 \end{bmatrix}$$

对图1-3-11c双口网络,其Z参数矩阵为

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$$

因此,图1-3-11a双口网络的Z参数矩阵为

$$Z = \begin{bmatrix} 4 & 1 \\ 1+K & 3 \end{bmatrix}$$

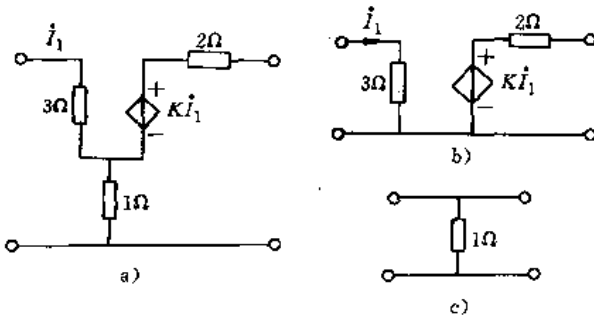


图1-3-11 例3-1的电路

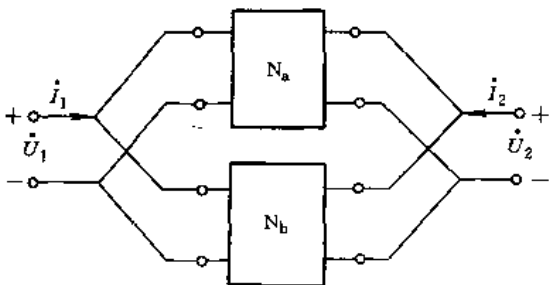


图1-3-12 双口网络并联

2. 两个双口网络并联 图1-3-12示出两个双口网络 N_a 、 N_b ,分别把输入端口并联、输出端口并联的连

接方式,称为双口网络的并联。其Y参数矩阵分别为 Y_a 和 Y_b ,设并联后该两个双口网络仍能分别满足端口定义 \ominus ,并联后形成的双口网络的Y参数矩阵为Y,则

$$Y = Y_a + Y_b \quad (1-3-22)$$

【例1-3-2】求图1-3-13a,双口网络的Y参数

解 把原双口网络看成是由图1-3-13b,c两个双口网络的并联,其双口网络的Y参数矩阵分别为

$$Y_a = \begin{bmatrix} \frac{1}{j\omega L} + j\omega C & -j\omega C \\ -j\omega C & \frac{1}{j\omega L} + j\omega C \end{bmatrix}$$

$$Y_b = \begin{bmatrix} G_1 + G_3 & -G_3 \\ -G_3 & G_2 + G_3 \end{bmatrix}$$

所以得

$$Y = Y_a + Y_b = \begin{bmatrix} \frac{1}{j\omega L} + j\omega C + G_1 + G_3 & -(j\omega C + G_3) \\ -(j\omega C + G_3) & \frac{1}{j\omega L} + j\omega C + G_2 + G_3 \end{bmatrix}$$

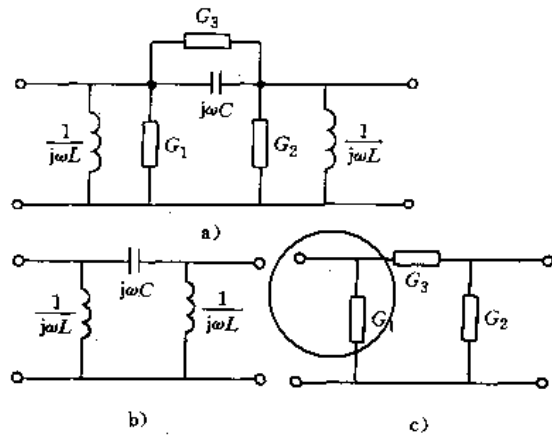


图1-3-13 例3-2的电路

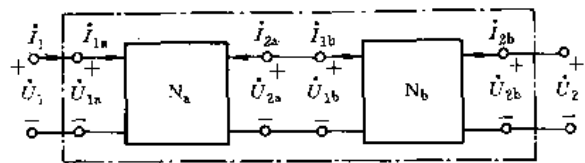


图1-3-14 双口网络的级联

3. 两个双口网络的级联 图1-3-14示出两个双口网络 N_a 、 N_b ,把一个双口网络 N_a 的输出端口与另一个双口网络 N_b 的输入端口相连接,这种方式称为双

\ominus N_a 与 N_b 的输入端并联后与电压源相联接, N_a 、 N_b 的输出端各自短接,如两短接点之间的电压为零,则输出端口并联后,输入端口仍能满足端口定义。用类似方法可检查输出端口是否满足端口定义。



口网络的级联。其传输矩阵分别为 T_1, T_2 ，设级联后形成的双口网络的传输矩阵为 T ，则

$$T = T_1 T_2 \quad (1.3-23)$$

【例 1-3-3】图 1-3-15 是两个相同放大器作为级联的模型电路，在下列两种情况：输出端开路时；输出端接有负载 R_L 时，求电压增益 \dot{U}_2/\dot{U}_1 。

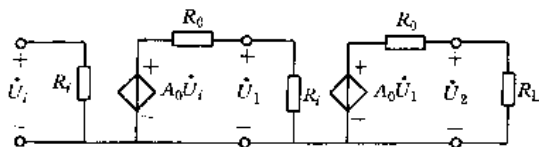


图 1-3-15 例 3-3 的电路

解 每个放大器模型的传输矩阵为

$$T_1 = \begin{bmatrix} \frac{1}{A_0} & R_o/A_0 \\ 1/A_0 R_i & R_o/A_0 R_i \end{bmatrix}$$

级联后双口网络的传输矩阵为

$$T = T_1 T_1 = \begin{bmatrix} \frac{1}{A_0^2} + \frac{R_o}{A_0^2 R_i} & \frac{R_o}{A_0^2} + \frac{R_o^2}{A_0^2 R_i} \\ \frac{1}{A_0^2 R_i} + \frac{R_o}{A_0^2 R_i^2} & \frac{R_o}{A_0^2 R_i} + \frac{R_o^2}{A_0^2 R_i^2} \end{bmatrix}$$

$$= \frac{1}{A_0^2 R_i^2} \begin{bmatrix} R_i(R_i + R_o) & R_i R_o(R_i + R_o) \\ R_i + R_o & R_o(R_i + R_o) \end{bmatrix}$$

(1) 当输出端开路时，由传输参数可知 $A_{11} = \left. \frac{\dot{U}_1}{\dot{U}_2} \right|_{i_2=0}$ ，

故知此时的电压增益为

$$\frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1} = \frac{1}{A_{11}} = \frac{R_i^2 A_0^2}{R_i(R_i + R_o)}$$

(2) 当输出端接有负载时， $\dot{U}_2 = -R_L \dot{I}_2$ ，由式(1.3-14)得

$$\dot{U}_1 = A_{11} \dot{U}_2 - A_{12} \dot{I}_2 = A_{11} \dot{U}_2 + A_{12} \frac{\dot{U}_2}{R_L}$$

解得
$$\frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1} = \frac{R_L}{A_{12} + A_{11} R_L}$$

于是

$$\frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1} = \frac{R_L R_i^2 A_0^2}{R_i R_o (R_i + R_o) + R_L R_i (R_i + R_o)} = \frac{R_L R_i^2 A_0^2}{(R_i + R_o)(R_o + R_L)}$$

8 三相正弦电路

8.1 三相电源的联接

三相交流发电机绕组所产生的三相电动势的幅值和波形均相同，仅在相位上彼此相差 $\frac{2}{3}\pi$ ，称为对称三相电动势。对称三相电动势的波形和相量图分别见图 1-3-16 和图 1-3-17。

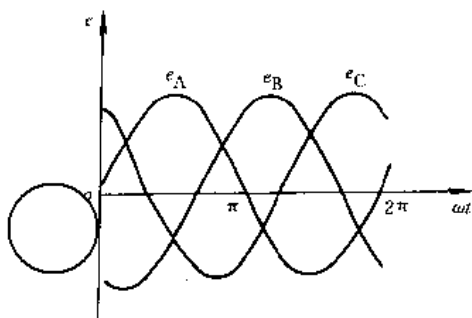


图 1-3-16 对称三相电动势的波形

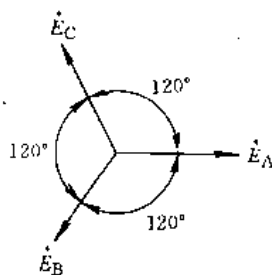


图 1-3-17 对称三相电动势的相量图

三相电动势中，各相电动势经过同一相应值时的先后次序称为三相电动势的相序。由图 1-3-17 可见，A 相超前 B 相，B 相又超前 C 相，其相序为 A-B-C，称为正序。如果 A 相滞后于 B 相，B 相又滞后于 C 相，则称这种相序为负序(逆序)。

对称的三相电动势构成对称三相电源，它有星形(丫形)和三角形(△形)两种联接方法。表 1-3-8 中所列的相电压是指每相绕组的始端与末端之间的电压，线电压是指三相绕组端线之间的电压。

8.2 三相负载的联接

三相负载也有星形(丫形)和三角形(△形)两种联接方法。如果每相负载的复数阻抗相同，则称为对称三相负载，否则称为不对称三相负载。

由对称三相电源和对称三相负载组成的电路称为对称三相电路；具有不对称三相负载的电路称为不对称三相电路。

表 1-3-9 列出了对称和不对称三相电路中的电流、电压、功率三者的关系。其中相电流是指每相负载中的电流，线电流是指端线中的电流，三相电源是指对称三相电源。

不对称三相负载中点 O' 与电源中点 O 断开(即中线断开)时，中点之间的电压 $\dot{U}_{O'O}$ 可用节点电位法求出



表 1-3-8 三相电源的星形联接和三角形联接

| 名称 | 星形联接 | 三角形联接 | |
|------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| 电路图 | | | |
| 供电方式 | 三相四线制 | 三相三线制 | |
| 相电压 | $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$ | $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$ | |
| 线电压 | $\dot{U}_{AB}, \dot{U}_{BC}, \dot{U}_{CA}$ | $\dot{U}_{AB}, \dot{U}_{BC}, \dot{U}_{CA}$ | |
| 线电压与相电压的关系 | $\dot{U}_{AB} = \dot{U}_A - \dot{U}_B$ $\dot{U}_{BC} = \dot{U}_B - \dot{U}_C$ $\dot{U}_{CA} = \dot{U}_C - \dot{U}_A$ | $\dot{U}_{AB} = \dot{U}_A$ $\dot{U}_{BC} = \dot{U}_B$ $\dot{U}_{CA} = \dot{U}_C$ | |
| 三相对称电压 | 线电压(U_l)与相电压(U_p)的数量关系 | $U_l = \sqrt{3} U_p$ | $U_l = U_p$ |
| | 相量图 | | |

表 1-3-9 三相负载的星形联接与三角形联接

| 名称 | 星形联接 | 三角形联接 |
|-----|-----------------|--------------------------|
| 电路图 | | |
| 相电流 | i_a, i_b, i_c | i_{ab}, i_{bc}, i_{ca} |
| 线电流 | I_A, I_B, I_C | I_A, I_B, I_C |



(续)

| 名称 | | 星形联接 | 三角形联接 |
|------------------|--------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| 线电流与相电流的关系 | | $i_A = i_a$ $i_B = i_b$ $i_C = i_c$ | $i_A = i_{ab} - i_{ca}$ $i_B = i_{bc} - i_{ab}$ $i_C = i_{ca} - i_{bc}$ |
| 对称三相负载 | 线电流(I_l)与相电流(I_p)的数值关系 | $I_l = I_p$ | $I_l = \sqrt{3} I_p$ |
| | 线电压(U_l)与相电压(U_p)的数值关系 | $U_l = \sqrt{3} U_p$ 当负载额定相电压等于电源线电压的 $\frac{1}{\sqrt{3}}$ 时采用星形联接 | $U_l = U_p$ 当负载额定相电压等于电源线电压时采用三角形联接 |
| 中线电流 | 对称三相负载 | $i_0 = i_A + i_B + i_C = 0$ ① | |
| | 不对称三相负载 | $i_0 = i_A + i_B + i_C$ $= \frac{\dot{E}_A}{Z_A} + \frac{\dot{E}_B}{Z_B} + \frac{\dot{E}_C}{Z_C}$ | |
| 对称三相负载的相量图(感性负载) | | | |
| 平均功率 P(W) | 对称三相负载 | $P = 3U_p I_p \cos\varphi = \sqrt{3} U_l I_l \cos\varphi$ | |
| | 不对称三相负载 | $P = P_A + P_B + P_C = U_p (I_a \cos\varphi_a + I_b \cos\varphi_b + I_c \cos\varphi_c)$ 式中 $\varphi_a, \varphi_b, \varphi_c$ 分别为 A 相、B 相、C 相的相电压与相电流之间的相位差 | |
| 无功功率 Q(var) | 对称三相负载 | $Q = 3U_p I_p \sin\varphi = \sqrt{3} U_l I_l \sin\varphi$ | |
| | 不对称三相负载 | $Q = Q_A + Q_B + Q_C = U_p (I_a \sin\varphi_a + I_b \sin\varphi_b + I_c \sin\varphi_c)$ | |
| 视在功率 S(V·A) | 对称三相负载 | $S = 3U_p I_p = \sqrt{3} U_l I_l$ | |
| | 不对称三相负载 | $S = S_A + S_B + S_C = U_p (I_a + I_b + I_c)$ | |

① 三相对称负载 $i_0 = 0$, 故中线可以省略, 其工作情况与有中线时一样。但三相不对称负载 $i_0 \neq 0$, 中线不可以省略, 否则要引起负载相电压不对称, 甚至于烧坏电气设备。不对称三相负载中点 O' 与电源中点 O 断开(即中线断开)时, 中点之间的电压 $\dot{U}_{O'O}$ 不用节点电位法求出。

各相负载相电压为

$$\dot{U}_{O'O} = \frac{\frac{\dot{E}_A}{Z_A} + \frac{\dot{E}_B}{Z_B} + \frac{\dot{E}_C}{Z_C}}{\frac{1}{Z_A} + \frac{1}{Z_B} + \frac{1}{Z_C}} \quad i_{O'O} = Z_{O'O} / Z_{O'O}$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_{AO'} &= \dot{U}_A - \dot{U}_{O'O} \\ \dot{U}_{BO'} &= \dot{U}_B - \dot{U}_{O'O} \\ \dot{U}_{CO'} &= \dot{U}_C - \dot{U}_{O'O} \end{aligned}$$

此星公司制作 请尊重原作者版权



第4章 线性电路的时域分析

分析计算含有储能元件的电路,可归结为求解电路的微分方程。根据激励的时间函数,通过求解电路的微分方程,以获得电路的响应的时间函数,这种分析称为电路的时域分析。

1 基本概念

1.1 稳态和暂态

不论是直流电路还是交流电路,在电路的连接方式和参数值不变的条件下,只要激励(即电源的输出)恒定或周期性变化时,电路中各部分的电压和电流也必将是恒定的或周期性变化的。此时,称电路处于稳定状态,简称稳态。

在含有储能元件 C 和 L 的电路中,当电路与激励信号的接通和断开,或电路的参数突然改变时,由于储能元件中电压或电流的建立或改变,必然伴随着电场能量或磁场能量的改变,而能量的变化是不能瞬间完成的,因为能量的突变意味着其功率为无限大,这对有限功率的实际激励信号源来说是无法提供的。因此,含有储能元件电路中的电压或电流一般只能渐变,从一个稳定状态变化到另一个稳定状态,一般需要有一个瞬变过程或称为暂态过程,简称暂态。在上一章中,对于正弦电路的分析与计算,实际上是在经历了激励信号的接入引起短暂的瞬变过程之后转入稳定状态下进行的。

同时暂态过程的分析还可以预见到产生过高电压或过大电流的可能性,以便采用适当措施,避免电路中的电气设备遭受不必要的损坏。

1.2 阶跃信号和冲激信号

在研究电路的时间响应时,常将实际信号分解为阶跃信号或冲激信号。因为根据线性电路的阶跃响应可引用叠加原理算出该电路对任意激励信号的响应;以及根据线性电路对冲激信号的响应,也可引用卷积积分算出该电路对任意激励信号的响应。

阶跃信号是在 $t=0$ 时,加在电路上的一个恒定电压或恒定电流,也就是直流源。阶跃电压

$$u_{-1}(t) = EU_{-1}(t) \quad (1.4-1)$$

式中, $U_{-1}(t)$ 为单位阶跃函数的表示符号;在 $t < 0$ 时,其值为零;在 $t > 0$ 时,其值为 E 。单位阶跃函数的表达式为

$$\begin{aligned} U_{-1}(t) &= 0 \quad (t < 0) \\ U_{-1}(t) &= 1 \quad (t > 0) \end{aligned} \quad (1.4-2)$$

这个函数的图形如图 1.4-1 所示。放大画出的单位阶跃函数,如图 1.4-2a 所示。时间为 0^- 时,函数值等于零;时间为 0^+ 时,函数值等于 1;在 0^- 和 0^+ 之间很短的时间间隔内,正好在 0 时函数值是不定的。

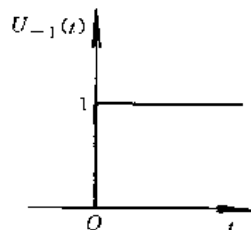


图 1.4-1 单位阶跃函数

冲激信号是在 $t=0$ 时,加在电路上一个振幅为无限大,持续时间为无限小,而振幅与持续时间的乘积,即冲激信号图形的面积为有限值的脉冲电压,或脉冲电流。这种有限脉冲称为冲激电压或冲激电流。冲激电压

$$u_i(t) = E\delta(t) \quad (1.4-3)$$

式中, $\delta(t)$ 为单位冲激函数;在 $t \neq 0$ 时 u_i 值为零;在 $t = 0$ 时其值为无限大,而它的面积为 E 。它是发生在 $t = 0$ 并具有单位面积的脉冲。

单位冲激函数常被看作单位阶跃函数的导数,即

$$\delta(t) = \frac{d}{dt} U_{-1}(t) \quad (1.4-4)$$

这一关系可以作如下的理解。图 1.4-2a 表示放大画出的单位阶跃函数。时间在 0^- 和 0^+ 的区间外面,其导数(图 1.4-2b)在各处均为零。若这个时间间隔为 δ ,则在这个时间间隔内的导数为 $1/\delta$ 。在 δ 趋向零的极限情况下,其导数 $1/\delta$ 将趋于无限大,而面积为 $1/\delta \cdot \delta = 1$,图 1.4-2c 单位冲激函数旁边括弧内的数字(1)就表示这个面积。单位冲激函数的数学表达式为



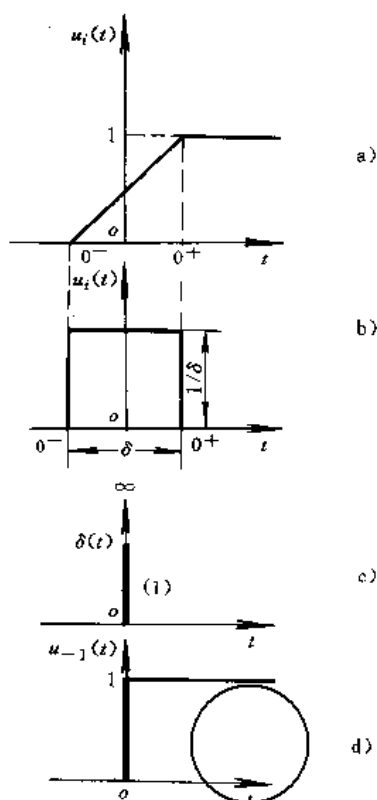


图 1-4-2 单位阶跃函数和冲激函数

a)近似的单位阶跃函数 b)导数曲线
c)单位冲激函数 d)单位阶跃函数

$$\left. \begin{aligned} \delta(t) &= 0 \quad (t \neq 0) \\ \delta(t) &= \infty \quad (t = 0) \\ \int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) dt &= 1 \quad (\text{或} \int_{0^-}^{0^+} \delta(t) dt = 1) \end{aligned} \right\} (1-4-5)$$

单位冲激函数是指在 $t=0$ 处出现的脉冲信号。如果,以任何有限正数代替 ∞ 作为式(1-4-5)积分的上限,则上面写的积分值也将等于 1。因此,对于所有 t 的正值

表 1-4-1 单一储能元件的初始状态和最终状态

| 初始条件 | 元 件 | 初 始 状 态 ($t=0^+$) | 最 终 状 态 ($t=\infty$) |
|-------------------------------------------------------------------|-----|------------------------|---------------------------|
| 零 初 始 条 件 (又称零状态) $t=0$ 时, L, C 上不 储有能量 | | | |

这里讨论的 R, L, C 都是理想化了的电路元件参数。实际上,任何电路都有周围的电磁场与之相联系,所以通过任何截面的电流及任何两点间的电压,严格地讲都不可以突变,只是当电路某些部分的电容或电感极为微小,以致这些部分的电流或电压的变化极其迅速,暂态过程极为短暂,因而实际上可以认为是突变的。

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) dt = 1$$

$$\int_{-\infty}^t \delta(t) dt = U_{-1}(t) \quad (1-4-6)$$

可见,单位冲激函数的积分就是单位阶跃函数。

2 换路定律及电路初始值的确定

2.1 换路定律

电路的暂态过程是由于电路的接通或断开,或电路参数的突然改变等原因产生的。引起电路暂态过程的这种电路变换,称为换路。在分析时,假设换路是瞬间完成的。

在含有储能元件的电路中,当激励源的功率为有限值换路时,能量是不能突变的,有如下几种情况:

1. 电容 C 的电压 u_C 不能突变 换路后一瞬间电容 C 上的电压 $u_C(0^+)$ 等于换路前的一瞬间电容 C 的电压 $u_C(0^-)$,即

$$u_C(0^+) = u_C(0^-) \quad (1-4-7)$$

2. 电感 L 中的电流 i_L 不能突变 换路后一瞬间电感 L 中的电流 $i_L(0^+)$ 等于换路前的一瞬间电感 L 中的电流 $i_L(0^-)$,即

$$i_L(0^+) = i_L(0^-) \quad (1-4-8)$$

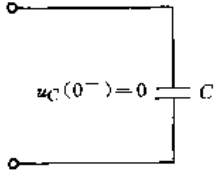
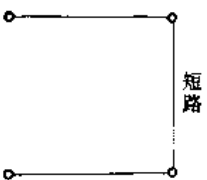
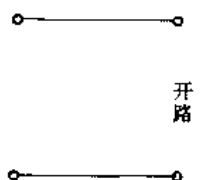
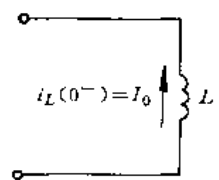
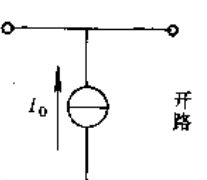
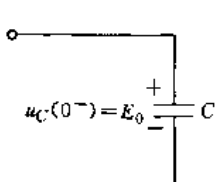
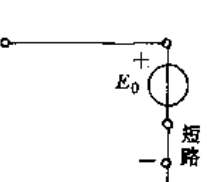
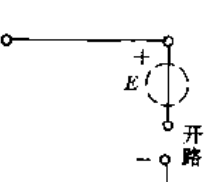
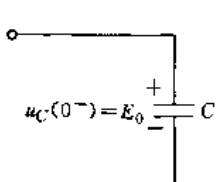
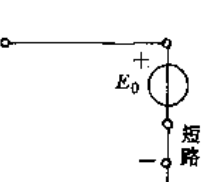
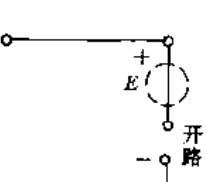
式(1-4-7)和式(1-4-8)称为换路定律。利用它们可定出方程中的积分常数。应该指出,由于电阻 R 并非储能元件,所以理论上不但其中的电流,而且它两端的电压都是可以突变的^①。

2.2 电路中电压和电流初始值的确定

换路后一瞬间($t=0^+$),电路中的电压 $u(0^+)$ 和电流 $i(0^+)$ 值,称其为初始值,它决定了暂态过程的初始



(续)

| 初始条件 | 元 件 | 初 始 状 态 ($t=0^+$) | 最 终 状 态 ($t=\infty$) |
|--------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 零 初 始 条 件 (又称零状态) | $t=0$ 时, L, C 上不 储有能量  | C 相当于短路  | C 相当于开路  |
| | $t=0$ 时, L, C 上储 有能量即 L 上有 I_0 C 上有 E_0 |  | L 相当于电流为 I_0 的恒流源  |
| 非 零 初 始 条 件 | $i_L(0^-) = I_0$  | C 相当于电压为 E_0 的恒压源  | C 相当于开路②  |
| | $u_C(0^-) = E_0$  |  |  |

① 一个只有电流 I 流过而无电压降的元件，相当于短路。

② 一个两端有电压 E 而无电流流过的元件，相当于开路。

条件,对分析电路的暂态过程是重要的。

根据换路定律,就可以得到电容上电压的初始值 $u_C(0^+) = u_C(0^-)$ 和电感中电流的初始值 $i_L(0^+) = i_L(0^-)$ 。然后将电容 C 和电感 L 分别用电压源 $u_C(0^+)$ 和电流源 $i_L(0^+)$ 来表征,并根据换路后,电路的初始状态和最终状态,画出它们的等效电路,见表 1·4-1。

3 线性电路时域分析方法

若要了解电路响应随时间变化的规律,就必须求解描述电路的微分方程。常系数线性微分方程的求解通常有两种方法:一种是经典法;另一种是运算法。这里先介绍经典法(运算法参见本篇第 6 章 4 节)。

3·1 经典法

所谓经典法,就是利用解微分方程的数学分析法。解微分方程的过程,就是分析电路的暂态过程。其步骤

如下:

(1) 按换路后的电路,根据基尔霍夫定律得到微分方程。

(2) 求微分方程的特解,即稳态分量。它等于换路后的电路在稳定状态时的电压或电流。

(3) 求微分方程的补函数,即暂态分量。

(4) 根据换路定律确定暂态过程的初始值,按换路后的电路求积分常数。

$$\text{微分方程的解} = \text{特解} + \text{补函数}$$

3·2 一阶线性电路时域分析的三要素法

RC 电路和 RL 电路中只有一个储能元件,这种电路的数学表示式为一阶线性微分方程

$$\frac{dy}{dt} + ay = f(t) \quad (1·4-9)$$

式中, a 为常数, $f(t)$ 为已知激励函数。



按经典法解此微分方程,即

$$y(t) = y(\infty) + [y(0^+) - y(\infty)]e^{-t/\tau} \quad (1.4-10)$$

式中, $y(t)$ 为电路中电压或电流响应函数; 等号右侧第一项 $y(\infty)$ 为稳态分量, 即 $y(\infty)$ 在 $t = \infty$ 时的 $y(t)$ 值; 等号右侧第二项表示电路的暂态分量, 其中 $y(0^+)$ 为 $t = 0^+$ 时 $y(t)$ 的值, $\tau = \frac{1}{a}$ 为时间常数。

因此, 只要将电路中所得到的初始值 $y(0^+)$ 、最终值 $y(\infty)$ 和时间常数 τ 这三个值代入式(1.4-10), 就可得到待求电路的响应。这种方法称为“三要素法”, 它在分析 RC 和 RL 一阶电路的暂态响应时, 可以不用微分方程的求解步骤而直接获得结果的表达式。

4 一阶 RC 电路在阶跃信号激励下的响应

4.1 RC 电路的零状态响应

电路没有初始储能, 仅由外界激励源作用时所产生的响应, 称为零状态响应。

在表 1.4-3A 所示电路中, 设电容 C 无初始储能, 即 $u_C(0^-) = 0$, 在 $t = 0$ 时闭合开关 S , 则 RC 电路将在阶跃信号源 $EU_{-1}(t)$ 激励下, 产生零状态响应。实际上这是电容 C 的充电过程。它在 $t > 0$ 时的微分方程为

$$RC \frac{du_C}{dt} + u_C = EU_{-1}(t) \quad (1.4-11)$$

解此微分方程, 由式(1.4-10)得该电路电容两端的电压响应方程式为

$$u_C(t) = u_C(\infty) + [u_C(0^+) - u_C(\infty)]e^{-t/\tau} \quad (1.4-12)$$

在零初始条件下, 在 $t = 0^+$ 时, 电容相当于短路, 根据换路定律 $u_C(0^+) = u_C(0^-) = 0$, 在 $t = \infty$ 时, 电容相当于开路, $u_C(\infty) = EU_{-1}(t)$; 而时间常数 $\tau = RC$ 。把它们代入式(1.4-12)得

$$u_C(t) = E(1 - e^{-t/RC})U_{-1}(t) \quad (1.4-13)$$

表 1.4-3 一阶 RC 电路的阶跃响应

| 编号 | 响应 | 原理电路图 及 $u_C(0^+)$ 、 $u_C(\infty)$ 、 τ 值 | 响应电压和电流表达式 ($t \geq 0$) | 响应曲线 |
|----|-----|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|------|
| A | 零状态 | <p>$u_C(0^+) = 0$ $\tau = RC$ $u_C(\infty) = EU_{-1}(t)$</p> | $u_C(t) = E(1 - e^{-t/\tau})U_{-1}(t)$ $i_C(t) = \frac{E}{R}e^{-t/\tau}U_{-1}(t)$ | |

根据基尔霍夫定律和欧姆定律, 求得

$$u_R(t) = u_i(t) - u_C(t) = Ee^{-t/RC}U_{-1}(t) \quad (1.4-14)$$

及

$$i_C(t) = \frac{u_R(t)}{R} = \frac{E}{R}e^{-t/RC}U_{-1}(t) \quad (1.4-15)$$

式(1.4-13)和式(1.4-15)说明, 电容充电时电压 u_C 的响应曲线是按指数函数上升的, 而电流 i 的响应曲线是按指数函数衰减的。在表 1.4-3A 的响应曲线上, 从起点 $[i_0(0) = \frac{E}{R}]$ 作一切线, 它与终值 $[i_0(t) = 0]$ 的交点之间所对应的时间就是时间常数 τ 。时间常数 τ 越大, 响应曲线按指数衰减越慢。 τ 越小, 响应曲线按指数衰减越快。表 1.4-2 列出了以 τ 为单位的充电时间 t 和 i_C 值的对应关系, 在 $t = 5\tau$ 时, i_C 接近终值, 可认为充电过程基本结束。

根据式(1.4-15), 当 $t = 0$ 时, $i = \frac{E}{R}$, 如果 R 很小, 则充电的初始电流将很大, 会产生过电流现象, 使电源过载。

表 1.4-2 以 τ 为单位的时间 t 与 i_C 的对应关系

| 时间 t | τ | 2τ | 3τ | 4τ | 5τ |
|----------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------------|
| 电流 i_C | $0.37 \frac{E}{R}$ | $0.14 \frac{E}{R}$ | $0.05 \frac{E}{R}$ | $0.02 \frac{E}{R}$ | $0.007 \frac{E}{R}$ |

4.2 RC 电路的零输入响应

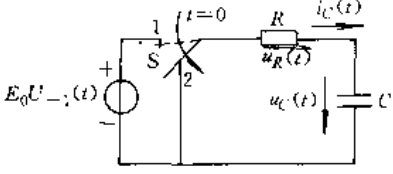
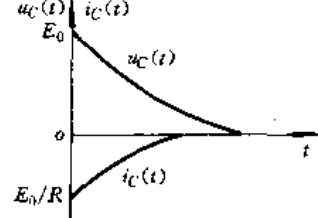
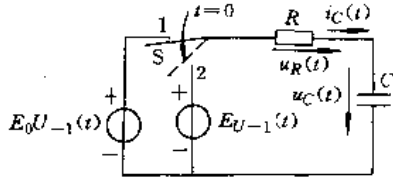
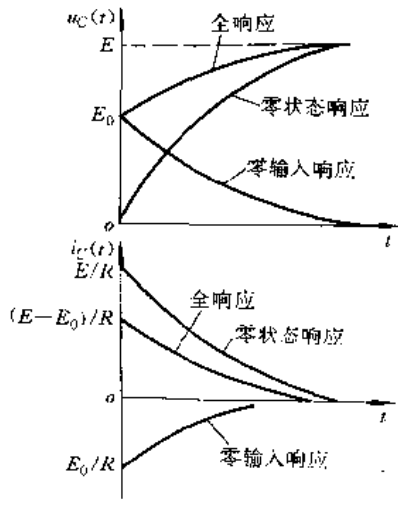
电路没有外加激励源, 只有内部储能激励时的响应, 称为零输入响应。

在表 1.4-3B 所示电路中, 设开关 S 原来接在位置“1”, 电容 C 上充有电压 $u_C(0^-) = E_0U_{-1}(t)$, 在 $t = 0$ 时将开关 S 突然换接到位置“2”, 此时电路没有外加激励源, 只有初始储能充当激励源而产生零输入响应。实际上, 这就是电容 C 向电阻 R 的放电过程。



此星公司制作 请尊重版权

(续)

| 编号 | 响应 | 原理电路图 及 $u_C(0^+)$ 、 $u_C(\infty)$ 、 τ 值 | 响应电压和电流表达式 ($t \geq 0$) | 响应曲线 |
|----|-----|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| B | 零输入 |  <p>$u_C(0^+) = E_0 U_{-1}(t)$ $u_C(\infty) = 0, \tau = RC$</p> | $u_C(t) = E_0 e^{-t/\tau} U_{-1}(t)$ $i_C(t) = -\frac{E_0}{R} e^{-t/\tau} U_{-1}(t)$ |  |
| C | 全响应 |  <p>$u_C(0^+) = u_C(0^-) = E_0 U_{-1}(t)$ $u_C(\infty) = E U_{-1}(t)$ $\tau = RC$ 设 $E > E_0$</p> | $u_C(t) = E(1 - e^{-t/\tau}) \times U_{-1}(t) + E_0 e^{-t/\tau} U_{-1}(t)$ $i_C(t) = \frac{E}{R} e^{-t/\tau} U_{-1}(t) - \frac{E_0}{R} e^{-t/\tau} U_{-1}(t)$ <p>全响应 = 零状态响应 + 零输入响应</p> |  |

根据换路定律, 电容 C 上的电压不能突变, 即

$$u_C(0^+) = u_C(0^-) = E_0 U_{-1}(t)$$

在 $t = \infty$ 时, 电容 C 放电结束, 全部储能已消耗在电阻 R 上, 所以,

$$u_C(\infty) = 0$$

将以上 $u_C(0^+)$ 、 $u_C(\infty)$ 和 $\tau = RC$ 值代入式(1.4-12), 可得

$$u_C(t) = E_0 e^{-t/RC} U_{-1}(t) \quad (1.4-16)$$

放电电流

$$i(t) = C \frac{du_C}{dt} = -\frac{E_0}{R} e^{-t/RC} U_{-1}(t) \quad (1.4-17)$$

式中负号表示放电电流的实际方向与图中参考方向相反, 也即与充电电流方向相反, 表 1.4-3B 中画出了电容放电电压 $u_C(t)$ 和放电电流 $i_C(t)$ 按指数函数衰减的曲线。

4.3 RC 电路的全响应

电路中既有外加激励源, 又有内部储能激励时的响应, 称为全响应。在线性电路中, 电路的全响应为零状态响应和零输入响应两者的叠加。

表 1.4-3C 所示电路, 换路前电路处于稳态, 电容 C 上的电压

$$u_C(0^-) = E_0 U_{-1}(t)$$

在 $t = 0$ 时开关 S 换接到位置“2”, 此时电路中电容 C 具有初始储能, 同时在外加激励源 $EU_{-1}(t)$ 作用下而产生全响应。

根据换路定律

$$u_C(0^+) = u_C(0^-) = E_0 U_{-1}(t)$$

在 $t = \infty$ 时, 电容 C 相当开路

$$u_C(\infty) = E U_{-1}(t)$$

换路后的时间常数 $\tau = RC$

此星公司制作 请尊重作者版权



将以上 $u_C(0^+)$, $u_C(\infty)$ 和 $\tau=RC$ 值代入式(1.4-12), 可得:

$$u_C(t) = E(1 - e^{-t/RC})U_{-1}(t) + E_0 e^{-t/RC}U_{-1}(t) \quad (1.4-18)$$

由 u_C 求出全响应电流

$$\begin{aligned} i_C(t) &= C \frac{du_C}{dt} = \frac{E - E_0}{R} e^{-t/RC} U_{-1}(t) \\ &= \frac{E}{R} e^{-t/RC} U_{-1}(t) - \frac{E_0}{R} e^{-t/RC} U_{-1}(t) \end{aligned} \quad (1.4-19)$$

在式(1.4-18)和式(1.4-19)中, 第一项是零状态响应(因不含 E_0), 第二项是零输入响应(因不含 E)。此两

式表明:

全响应 = 零状态响应 + 零输入响应

这种叠加关系如表 1.4-3C 所示。

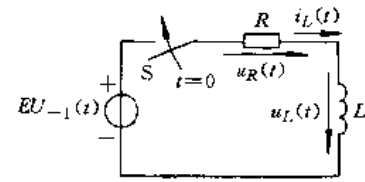
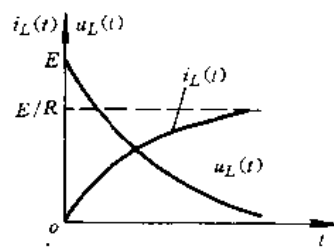
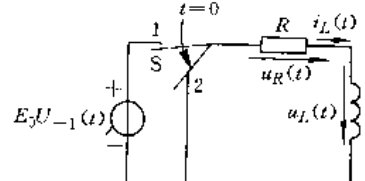
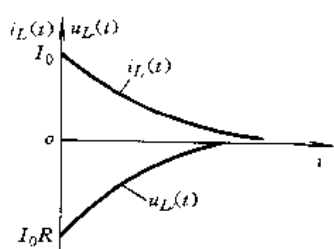
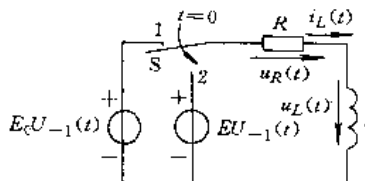
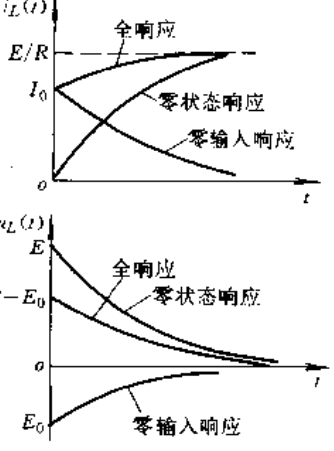
5 一阶 RL 电路在阶跃信号激励下的响应

在电子技术和自动控制系统中, 一阶 RL 电路也是一种常见的电路。一阶 RL 电路的阶跃响应的分析方法与一阶 RC 电路的相同, 可用三要素法进行分析。

5.1 RL 电路的零状态响应

表 1.4-4A 所示电路中, 设电感 L 无初始储能, 即 i_L

表 1.4-4 一阶 RL 电路的阶跃响应

| 编号 | 响应 | 原理电路图 及 $i_L(0^+)$, $i_L(\infty)$, τ 值 | 响应电流及电压表达式 ($t \geq 0$) | 响应曲线 |
|----|-----|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| A | 零状态 |  <p>$i_L(0^+) = 0$ $\tau = \frac{L}{R}$</p> <p>$i_L(\infty) = \frac{E}{R} U_{-1}(t)$</p> | $i_L(t) = \frac{E}{R} (1 - e^{-t/\tau}) U_{-1}(t)$ $u_L(t) = E e^{-t/\tau} U_{-1}(t)$ |  |
| B | 零输入 |  <p>$i_L(0^+) = I_0 = \frac{E_0}{R} U_{-1}(t)$</p> <p>$i_L(\infty) = 0$, $\tau = \frac{L}{R}$</p> | $i_L(t) = \frac{E_0}{R} e^{-t/\tau} U_{-1}(t)$ $= I_0 e^{-t/\tau} U_{-1}(t)$ $u_L(t) = -I_0 R e^{-t/\tau} U_{-1}(t)$ $= -E_0 e^{-t/\tau} U_{-1}(t)$ |  |
| C | 全响应 |  <p>$i_L(0^+) = I_0 = \frac{E_0}{R} U_{-1}(t)$</p> <p>$i_L(\infty) = \frac{E}{R} U_{-1}(t)$</p> <p>$\tau = \frac{L}{R}$ 设 $E > E_0$</p> | $i_L(t) = \frac{E}{R} (1 - e^{-t/\tau}) \times U_{-1}(t) + \frac{E_0}{R} e^{-t/\tau} U_{-1}(t)$ $u_L(t) = E e^{-t/\tau} U_{-1}(t) - E_0 e^{-t/\tau} U_{-1}(t)$ |  |



(0⁻)=0。在 t=0 时,将开关 S 闭合,则 RL 将在阶跃信号源 EU₋₁(t)激励下,产生零状态响应。它在 t≥0 时的微分方程为

$$L \frac{di}{dt} + Ri = EU_{-1}(t) \quad (1.4-20)$$

解此微分方程,由式(1.4-10)得该电路的电流响应方程式

$$i_L(t) = i_L(\infty) + [i_L(0^+) - i_L(\infty)]e^{-t/\tau} \quad (1.4-21)$$

由于,电感 L 没有初始储能,根据换路定律

$$i_L(0^+) = i_L(0^-) = 0$$

此时,电感相当于开路。

在 t=∞时,电感相当短路

$$i_L(\infty) = \frac{E}{R} U_{-1}(t)$$

而时间常数 $\tau = \frac{L}{R}$,把它代入式(1.4-21),得

$$i_L = \frac{E}{R} (1 - e^{-Rt/L}) U_{-1}(t) \quad (1.4-22)$$

$$u_L(t) = L \frac{di_L}{dt} = E e^{-t/(L/R)} U_{-1}(t) \quad (1.4-23)$$

其响应曲线如表 1.4-4A 所示,电流由初始值零,按指数规律上升到稳态值 E/R₀。表 1.4-5 列出了以 τ 为单位的时间 t 和 i_L 值的对应关系。

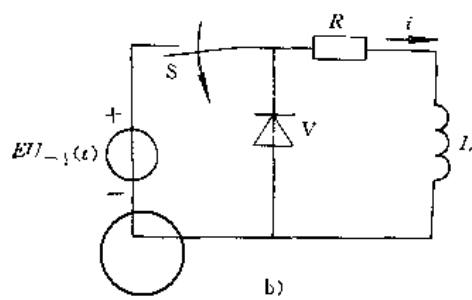
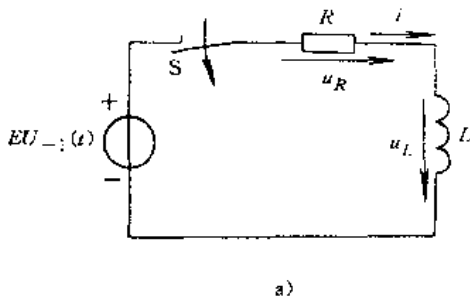


图 1.4-3 RL 电路与电源断开

6 RC 电路和 RL 电路的冲激响应

电路在冲激信号源激励下的零状态响应,称为冲激响应。

6.1 RC 电路的冲激响应

图 1.4-4a 所示为冲激电压激励的 RC 电路,它的微分方程为

$$RC \frac{du_c}{dt} + u_c = u_s(t) = E\delta(t) \quad (1.4-24)$$

表 1.4-5 以 τ 为单位的时间 t 和 i_L 的对应关系

| 时间 t | τ | 2τ | 3τ | 4τ | 5τ |
|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------------|
| 电流 i _L | 0.63 $\frac{E}{R}$ | 0.86 $\frac{E}{R}$ | 0.95 $\frac{E}{R}$ | 0.98 $\frac{E}{R}$ | 0.993 $\frac{E}{R}$ |

5.2 RL 电路的零输入响应

RL 电路的零输入响应见表 1.4-4B。

5.3 RL 电路的全响应

从表 1.4-4C 上可见,一阶 RL 电路的全响应也等于零状态响应和零输入响应两者的叠加。

在图 1.4-3a 中,RL 电路与电源是开断的,必须注意这种操作一般是不容许的,因为电感电流突变为零将导致

$$u_L(0^+) = L \left. \frac{di}{dt} \right|_{t=0^+} = \infty$$

即电感两端电压达∞,这将危及电感线圈的绝缘,并使开关 S 的刀与刀座间的空气击穿,转而形成火花或电弧(释放磁场能量)。特别当 L 越大,i_L 减小越快时,后果更加严重。因此在操作之前必须采取必要的保护措施。可如图 1.4-3b 所示,与 RL 电路并联二极管 V(极性不能接错),在正常工作时 V 截止;在 S 开断时,V 导通,电感 L 中的磁场能量通过 V 释放。

式中,u_c 为电容两端的电压。

解此微分方程,由式(1.4-10)得该电路电容两端的电压响应方程式

$$u_c(t) = u_c(\infty) + [u_c(0^+) - u_c(\infty)]e^{-t/\tau} \quad (1.4-25)$$

在零初始条件下,在 t=0 时,冲激电压突然加上的瞬间,电容的作用相当于短路,如图 1.4-4b 所示。在 t=0⁻ 之后冲激电压不起作用,零值电压源可用短路代替,而电容器两端已被充电。所以 t>0 时的电路如图



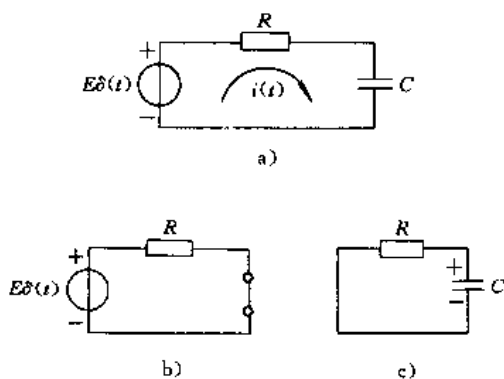


图1-4-4 冲激电压激励的RC串联电路
a)冲激电压激励的电路 b)在 $t=0$ 时的电路
c)在 $t>0$ 时的电路

1-4-4c所示,电路的工作情况相当于充电后的电容器的放电过程。在 $t=0$ 时,其电流为

$$i(0) = \frac{E}{R} \delta(t)$$

此电流流入电容而产生的电压为

$$u_C(0^+) = \frac{1}{C} \int_0^+ \frac{E}{R} \delta(t) dt = \frac{E}{RC} U_{-1}(t)$$

在 $t=\infty$ 时, $u_C(\infty)=0$,时间常数 $\tau=RC$,把它们代入式(1-4-25),得

$$u_C(t) = \frac{E}{RC} e^{-t/RC} U_{-1}(t) \quad (1-4-26)$$

根据基尔霍夫定律和欧姆定律,求得

$$u_R(t) = u_i(t) - u_C(t) = E\delta(t) - \frac{E}{RC} e^{-t/RC} U_{-1}(t) \quad (1-4-27)$$

所以

$$i_C(t) = \frac{u_R(t)}{R} = \frac{E}{R} \delta(t) - \frac{E}{R^2 C} e^{-t/RC} U_{-1}(t) \quad (1-4-28)$$

它包括一个正冲激电流和一个负指数函数,其变化曲线如表1-4-6A所示。

表1-4-6 RC电路和RL电路的冲激响应

| 编号 | 冲激激励 | RC或RL电路 | 输出响应函数 | 输出响应曲线 |
|----|------|---------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|
| A | | | $u_C(t) = \frac{E}{RC} e^{-t/RC} U_{-1}(t)$ $i_C(t) = \frac{E}{R} \delta(t) - \frac{E}{R^2 C} e^{-t/RC} U_{-1}(t)$ | |
| B | | | $i_L(t) = \frac{E}{L} e^{-Rt/L} U_{-1}(t)$ $u_L(t) = E\delta(t) - \frac{R}{L} E e^{-Rt/L} U_{-1}(t)$ | |



6.2 RL 电路的冲激响应

RL 电路的冲激响应见表 1-4-6B。

7 RC 电路的正弦响应

下面讨论电路在正弦信号源激励的零状态响应。

图 1-4-5 所示 RC 电路由正弦信号源激励, 电路的初始条件, $u_C(0^-) = 0$, 在 $t = 0$ 时, 将开关 S 闭合, 接通电压为 $U_m \sin(\omega t + \psi)$ 的正弦电源。电路的微分方程为

$$RC \frac{du_C}{dt} + u_C = U_m \sin(\omega t + \psi)$$

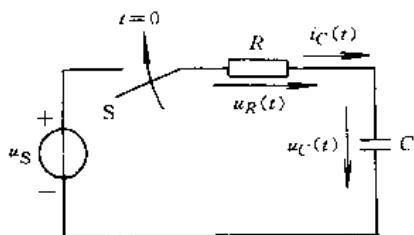


图 1-4-5 RC 电路正弦响应 $u_S = U_m \sin(\omega t + \psi)$

当正弦信号激励时, 求解一阶电路暂态响应的“三要素法”表示式与式(1-4-10)稍有不同。这时的表示式仍由稳态分量和暂态分量组成, 但由于其信号是正弦交流电, 其稳态分量也是时间的函数, 用 $u_{CS}(t)$ 或 $i_{CS}(t)$ 表示, 它可以用第 3 章交流电路的方法求出; 其暂态分量仍具有按指数规律衰减的形式, 令其幅度为 A 。于是电压的表示式为

$$u_C(t) = u_{CS}(t) + Ae^{-t/\tau}$$

式中, $\tau = RC$ 为时间常数, 与阶跃信号的情况相同。在换路的瞬间, 即 $t = 0^+$ 时, 上式为

$$u_C(0^+) = u_{CS}(0^+) + A$$

所以

$$A = u_C(0^+) - u_{CS}(0^+)$$

于是式(1-4-10)可以写为

$$u_C(t) = u_{CS}(t) + [u_C(0^+) - u_{CS}(0^+)]e^{-t/\tau} \quad (1-4-29)$$

式中, $u_C(0^+)$ 是电压的初始值, 它的求法与前面相同。根据换路定律得

$$u_C(0^+) = u_C(0^-) = 0 \quad (1-4-30)$$

应用第 3 章中的方法求出电容上电压响应的稳态分量

$$u_{CS}(t) = U_{Cm} \sin(\omega t + \psi')$$

式中

$$U_{Cm} = \frac{1}{\omega C} \times \frac{U_m}{|Z|}$$

$$|Z| = \sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}$$

$$\psi' = \psi - \arctan \frac{-1}{R\omega C} - \frac{\pi}{2}$$

令

$$\varphi = \tan \frac{-1}{R\omega C}$$

所以电路电容上电压响应的稳态分量为

$$u_{CS}(t) = U_{Cm} \sin\left(\omega t + \psi - \varphi - \frac{\pi}{2}\right) \quad (1-4-31)$$

在 $t = 0^+$ 时,

$$u_{CS}(0^+) = U_{Cm} \sin\left(\psi - \varphi - \frac{\pi}{2}\right) \quad (1-4-32)$$

把 $u_C(0^+)$ 、 $u_{CS}(t)$ 、 $u_{CS}(0^+)$ 和 τ 代入式(1-4-29), 得

$$\begin{aligned} u_C(t) &= U_{Cm} \sin\left(\omega t + \psi - \varphi - \frac{\pi}{2}\right) \\ &+ \left[0 - U_{Cm} \sin\left(\psi - \varphi - \frac{\pi}{2}\right)\right] e^{-t/\tau} \\ &= U_{Cm} \sin\left(\omega t + \psi - \varphi - \frac{\pi}{2}\right) \\ &- U_{Cm} \sin\left(\psi - \varphi - \frac{\pi}{2}\right) e^{-t/\tau} \end{aligned} \quad (1-4-33)$$

再由 $i_C = C \frac{du_C}{dt}$ 和 $\tau = RC$, 求出电流的正弦响应为

$$\begin{aligned} i_C(t) &= \frac{U_{Cm}}{X_C} \sin(\omega t + \psi - \varphi) \\ &+ \frac{U_{Cm}}{R} \sin\left(\psi - \varphi - \frac{\pi}{2}\right) e^{-t/\tau} \end{aligned} \quad (1-4-34)$$

RC 电路的正弦响应曲线见图 1-4-6 所示。

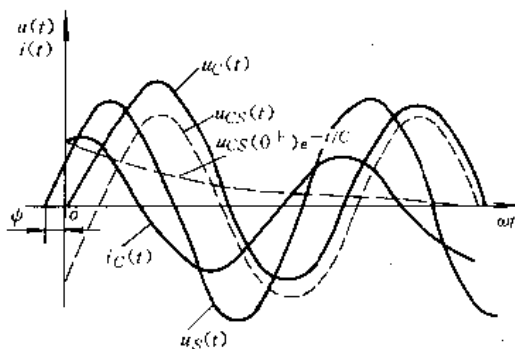


图 1-4-6 RC 电路的正弦响应曲线

说明:

(1) $u_C(t)$ 和 $i_C(t)$ 的暂态分量都是按同一指数规律衰减。

(2) 响应过程与激励的初相角 ψ 有关:

1) $\psi - \varphi = \frac{\pi}{2}$ 时, 暂态分量为零, 直接进入稳态;

2) $\psi - \varphi = 0$ 时, 暂态分量最大, u_C 在 $\frac{T}{2}$ 时出现接



近于稳态 U_{Cm} 二倍的过电压。电流的初始值 $|i_C(0^+)| = \frac{X_C U_m}{R |Z|}$, 当 $\frac{1}{\omega C} \gg R$ 时, 出现很大的冲击电流;

3) 一般情况, 介于上述 1) 与 2) 之间。

(3) 如果电路在非零状态的情况, 即 $t=0^+$ 时, $u_C(0^+) = u_C(0^-) = U_0$, 则电容电压的全响应就等于零状态响应与零输入响应之和, 即

$$u_C(t) = U_{Cm} \sin\left(\omega t + \psi - \varphi - \frac{\pi}{2}\right) - U_{Cm} \sin\left(\psi - \varphi - \frac{\pi}{2}\right) e^{-t/RC} + U_0 e^{-t/RC} \quad (1.4-35)$$

8 RC 电路的周期性矩形脉冲信号响应

8.1 RC 微分电路

图 1.4-7a 为 RC 微分电路, 电路的输出电压 $u_o(t)$ 与输入电压 $u_i(t)$ 之间在一定条件 ($RC \ll t_w$) 下成微分关系, 为

$$u_o(t) = RC \frac{du_C}{dt} \approx RC \frac{du_i(t)}{dt} \quad (1.4-36)$$

式中 u_C —— 电容两端的电压。

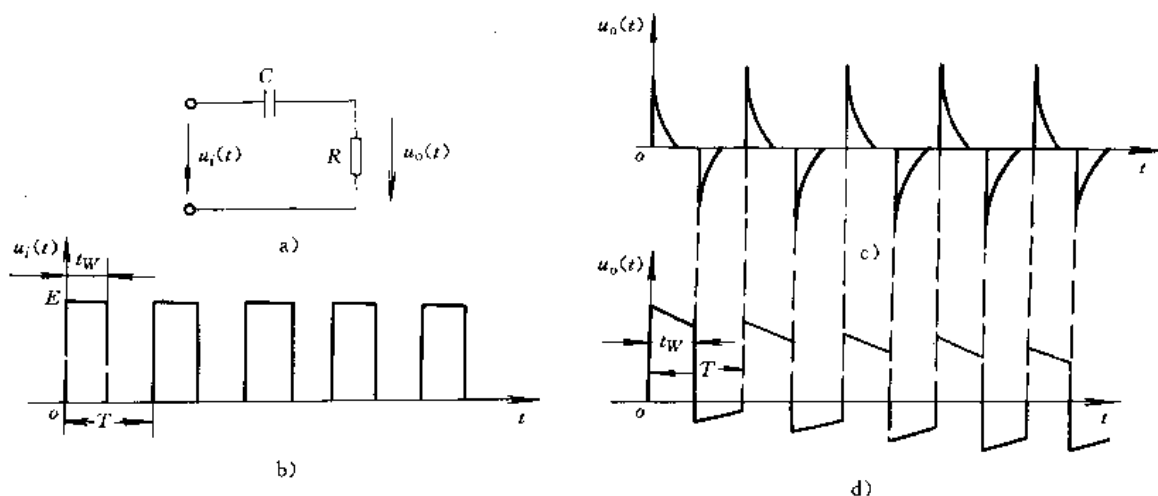


图 1.4-7 RC 微分电路输出电压波形

当输入激励信号是矩形脉冲列时, 见图 1.4-7b, 可直接根据阶跃电压响应式 (1.4-14) 和叠加原理算出它的输出电压响应

$$\begin{aligned} u_o(t) &= Ee^{-t/RC}U_{-1}(t) - Ee^{-(t-t_w)/RC}U_{-1}(t-t_w) \\ &\quad + Ee^{-(t-T)/RC}U_{-1}(t-T) \dots \\ &= E[e^{-t/RC}U_{-1}(t) - e^{-(t-t_w)/RC}U_{-1}(t-t_w) \\ &\quad + e^{-(t-T)/RC}U_{-1}(t-T) \\ &\quad - e^{-(t-T-t_w)/RC}U_{-1}(t-T-t_w) \dots] \end{aligned} \quad (1.4-37)$$

根据式 (1.4-37) 绘出输出电压响应的波形, 如图 1.4-7 所示。当 $RC \ll t_w$ (一般应小于 1/10 以上) 时, 输出响应由正负尖脉冲波组成, 如图 1.4-7c 所示。这种波形正是将矩形波微分的结果, 故称该电路 ($RC \ll t_w$) 为微分电路。

若 $RC \gg t_w$ 时, 则电路变成耦合电路, 它的作用是把输入信号近似不变地送到输出端, 而把信号中的平均分量 (直流分量) 隔掉, 故这种耦合电路又称隔直电

路。输出电压波形如图 1.4-7d 所示。

8.2 RC 积分电路——卷积积分的应用

图 1.4-8a 所示为 RC 积分电路, 电路的输出电压 $u_C(t)$ 与输入电压 $u_i(t)$ 之间在一定条件下 ($RC \gg t_w$) 成积分关系, 即

$$u_C(t) = \frac{1}{RC} \int u_i(t) dt \quad (1.4-38)$$

电路对矩形脉冲信号的输出电压响应可应用卷积积分法求得 (关于卷积积分见本手册基础理论卷第 2 篇)。因为一线性电路对任意激励函数的响应就等于该电路的单位冲激响应与激励函数的卷积积分。

设在电路上加一单位冲激信号, 由式 (1.4-26) 得该电路的单位冲激响应为

$$h_u(t) = u_C(t) = \frac{1}{RC} e^{-t/RC} U_{-1}(t) \quad (1.4-39)$$

当已知矩形脉冲的激励函数为



$$e(t) = E[U_{-1}(t) - U_{-1}(t-t_w) + U_{-1}(t-T) - U_{-1}(t-T-t_w) + \dots] \quad (1.4-40)$$

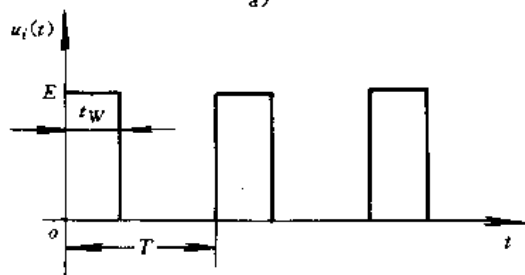
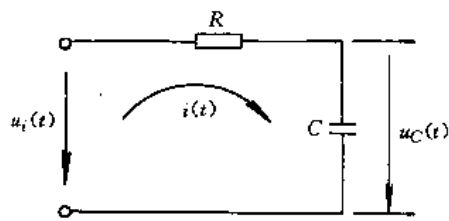


图 1.4-8 矩形脉冲列通过 RC 电路

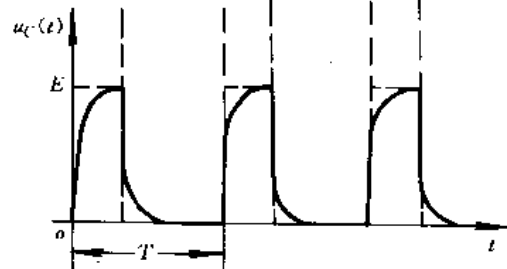
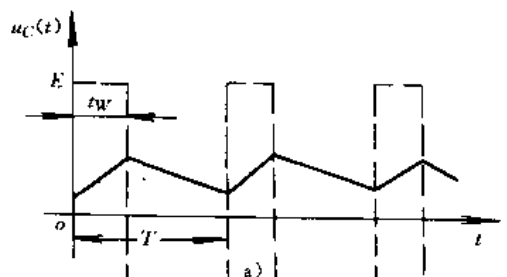


图 1.4-9 RC 积分电路的输出电压波形

a) $RC \gg t_w$ b) $RC \ll t_w$

引用卷积积分,得

$$\begin{aligned} u_C(t) &= \int_0^t e(t_1)h(t-t_1)dt_1 \\ &= \int_0^t E[U_{-1}(t_1) - U_{-1}(t_1-t_w) + U_{-1}(t_1-T) - U_{-1}(t_1-T-t_w) + \dots] \\ &\quad \frac{1}{RC}e^{-(t-t_1)/RC}U_{-1}(t-t_1)dt_1 \\ &= E[(1 - e^{-t/RC})U_{-1}(t) - (1 - e^{-(t-t_w)/RC})U_{-1}(t-t_w) + (1 - e^{-(t-T)/RC})U_{-1}(t-T) \end{aligned}$$

$$- (1 - e^{-(t-T-t_w)/RC})U_{-1}(t-T-t_w) + \dots] \quad (1.4-41)$$

式(1.4-41)包括暂态分量和稳态分量,其稳态输出电压波形如图 1.4-9 所示,从图 1.4-9a 中可以看出,当 $RC \gg t_w$ 时,则电路的响应变化迟缓,输出电压是一锯齿波形.这种锯齿波正是将矩形波积分的结果,故称该电路($RC \gg t_w$)为积分电路.反之,若 $RC \ll t_w$,则电路响应变化迅速,输出电压波形近于矩形脉冲,见图 1.4-9b.

9 二阶 RLC 电路的零输入响应——振荡放电

在图 1.4-10 所示电路中,先将开关 S 合向“1”端,使电容 C 充电至端电压 U_0 .然后在 $t=0$ 时将开关 S 合向“2”端,电容 C 便通过 R 和 L 放电.这时,由于电路无外加激励源,因此,这一放电过程就是 RLC 串联电路的零输入响应.

应用基尔霍夫电压定律,得

$$L \frac{di}{dt} + Ri + u_C = 0$$

或 $LC \frac{d^2 u_C}{dt^2} + RC \frac{du_C}{dt} + u_C = 0 \quad (1.4-42)$

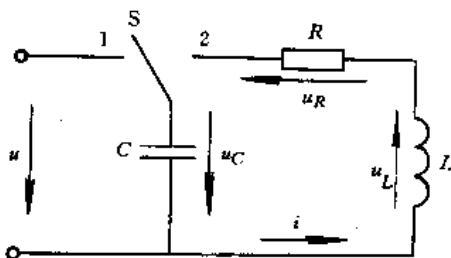


图 1.4-10 RLC 串联电路

这是二阶常系数齐次微分方程,所以它的稳态分量为零,其解仅有暂态分量,即 $u_C = u_C''$ 方程式(1.4-42)的解,决定于它的特征方程

$$LCS^2 + RCS + 1 = 0 \quad (1.4-43)$$

两个特征根分别为

$$\left. \begin{aligned} S_1 &= -\frac{R}{2L} + \sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC}} = -\gamma + \sqrt{\gamma^2 - \omega_0^2} \\ S_2 &= -\frac{R}{2L} - \sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC}} = -\gamma - \sqrt{\gamma^2 - \omega_0^2} \end{aligned} \right\} \quad (1.4-44)$$

式中, $\gamma = \frac{R}{2L}$, 为阻尼系数, $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$, 为固有角频率或谐振角频率.

方程式(1.4-42)的通解为



表 1-4-7 RLC 电路的零输入响应

| 响 应 | 过 阻 尼 响 应 | 临 界 阻 尼 响 应 | 欠 阻 尼 响 应 (减幅振荡响应) | 等 幅 振 荡 响 应 |
|-----------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 条 件 | $\gamma > \omega_0$ 或 $R > 2\sqrt{\frac{L}{C}}$ | $\gamma = \omega_0$ 或 $R = 2\sqrt{\frac{L}{C}}$ | $\gamma < \omega_0$ 或 $R < 2\sqrt{\frac{L}{C}}$ | $\gamma = 0$ 或 $R = 0$ |
| 特 征 方 程 解 的 形 式 | 为 $S_1 \neq S_2$ 的不同实根 | 为 $S_1 = S_2 = S = -\gamma$ 的相同实根 | $S_1 = -\gamma + j\sqrt{\omega_0^2 - \gamma^2}$ $S_2 = -\gamma - j\sqrt{\omega_0^2 - \gamma^2}$ } 为共扼复根 | $S_1 = j\omega_0$ $S_2 = -j\omega_0$ } 为正负两虚根 |
| 各 电 压、电 流 方 程 | $u_C(t) = \frac{U_0}{2\sqrt{\gamma^2 - \omega_0^2}} (S_1 e^{S_1 t} - S_2 e^{S_2 t})$ $i(t) = \frac{-U_0}{2L\sqrt{\gamma^2 - \omega_0^2}} (e^{S_1 t} - e^{S_2 t})$ $u_L(t) = \frac{U_0}{2\sqrt{\gamma^2 - \omega_0^2}} (S_2 e^{S_2 t} - S_1 e^{S_1 t})$ $u_R(t) = Ri(t)$ | $u_C(t) = U_0(\gamma t + 1)e^{-\gamma t}$ $i(t) = \frac{-U_0}{L} t e^{-\gamma t}$ $u_L(t) = U_0(\gamma t - 1)e^{-\gamma t}$ <p>($R = 2\sqrt{\frac{L}{C}}$ 为临界电阻)</p> | $u_C(t) = U_0 \frac{\omega_0}{\omega'} e^{-\gamma t} \sin\left(\omega' t + \arctan \frac{\omega'}{\gamma}\right)$ $i(t) = \frac{-U_0}{\omega' L} e^{-\gamma t} \sin \omega' t$ $u_L(t) = U_0 \frac{\omega_0}{\omega'} e^{-\gamma t} \sin\left(\omega' t - \arctan \frac{\omega'}{\gamma}\right)$ <p>(ω' 为自由振荡角频率)</p> | $u_C(t) = U_0 \sin\left(\omega_0 t + \frac{\pi}{2}\right)$ $i(t) = \frac{U_0}{\omega_0 L} \sin(\omega_0 t + \pi)$ $u_L(t) = U_0 \sin\left(\omega_0 t - \frac{\pi}{2}\right)$ |
| 电 压、电 流 曲 线 | | | | |
| 说 明 | <p>1. u_C 始终下降, 电容始终放电, 电流不改变方向</p> <p>2. 能量转换关系如下:</p> <p>$0 < t < t_m$ 时, 电容释放电场能量, 部分为电阻所消耗, 部分由电感储存为磁场能量</p> <p>$t > t_m$ 时, 电感与电容共同释放能量, 全部由电阻消耗</p> | <p>1. u_C, i, u_L 都处于减幅振荡状态, 称为阻尼振荡放电</p> <p>2. 能量转移关系如下:</p> <p>$0 < t < t_1$ 时, 电容释放电场能量, 其大部分为电感所储存, 小部分为电阻消耗</p> <p>$t_1 < t < t_2$ 时, 电容继续释放能量, 电感开始释放能量, 都为电阻消耗</p> <p>$t_2 < t < t_3$ 时, 电感继续释放能量, 小部分为电阻消耗, 大部分为电容充电如此反复, 直至能量耗尽</p> | <p>1. u_C, i, u_L 都是等幅振荡, 称为无阻尼振荡放电</p> <p>2. 因电路无耗能元件, 能量不会被消耗, 只在 C 与 L 之间反复交换</p> <p>3. 这种等幅振荡, 实际上是不存在的理想状态, 因为电阻 R 实际上不可能为零</p> | |

$$u_c = A_1 e^{S_1 t} + A_2 e^{S_2 t} \quad (1.4-45)$$

而电流则为

$$i = C \frac{du_c}{dt} = CA_1 S_1 e^{S_1 t} + CA_2 S_2 e^{S_2 t} \quad (1.4-46)$$

根据换路定律和电路的初始条件, 得出 RLC 串联电路的零输入响应中的电容电压和电流分别为

$$u_c = \frac{U_0}{S_2 - S_1} (S_2 e^{S_1 t} - S_1 e^{S_2 t})$$

$$i = \frac{CS_1 S_2 U_0}{S_2 - S_1} (e^{S_1 t} - e^{S_2 t}) = \frac{U_0}{L(S_2 - S_1)} (e^{S_1 t} - e^{S_2 t}) \quad (1.4-47)$$

由于电路参数的不同, 特征方程的解 S_1 、 S_2 具有不同形式, 反映在电路上也会有几种不同情况: 过阻尼响应、临界阻尼响应、欠阻尼响应和等幅振荡响应, 见表 1.4-7。

第5章 线性电路的频域分析

线性电路的频域分析是借助于傅里叶(Fourier)级数这一数学工具进行的。首先将非正弦激励源展开一系列频率不同的谐波分量(即频率不同的正弦量)的线性组合, 然后分别应用相量法计算线性电路在各次谐波分量单独激励下的稳态响应, 最后把这些响应进行叠加, 便得到总响应。由于在分析时, 激励和响应所用的自变量都是频率, 故称为频域分析。用频域中的网络函数来表明电路的频率特性。在特定的频率下, 线

性交流电路对外呈现电阻性质而发生谐振, 利用电路的频率特性可组成各种滤波电路。

1 非正弦周期信号的傅里叶级数

若周期为 T 的函数 $f(t)$ 满足狄里赫利(Dirichlet)条件^①(工程上所遇到的大部分电信号都能满足这些条件), 则该函数可以展开为如表 1.5-1 所列的几种形式的傅里叶级数。

表 1.5-1 非正弦周期信号几种形式的傅里叶级数

| 名称 | 级数展开式 | 系数计算公式 | 说明 |
|----------|--------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 三角函数形式之一 | $f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega_1 t + b_n \sin n\omega_1 t)$ | $a_0 = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) dt$ $a_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos n\omega_1 t dt$ $b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin n\omega_1 t dt$ | a_0, a_n, b_n —傅里叶级数系数 ω_1 —周期信号的角频率 (rad/s) |
| 三角函数形式之二 | $f(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_{nm} \sin(n\omega_1 t + \phi_n)$ | $A_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}$ $\phi_n = \arctan \frac{a_n}{b_n}$ $A_0 = \frac{a_0}{2}$ | A_0 —直流分量 $A_{1m} \sin(\omega_1 t + \phi_1)$ 频率与 $f(t)$ 相同, 称为基波, 或一次谐波分量 $A_{2m} \sin(2\omega_1 t + \phi_2)$ 其频率为 $f(t)$ 的二倍, 称为二次谐波分量, 余类推 $n \geq 2$ 的各次谐波总称为高次谐波分量 |
| 三角函数形式之三 | $f(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_{nm} \cos(n\omega_1 t + \theta_n)$ | $A_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}$ $\theta_n = \arctan \frac{-b_n}{a_n}$ | 与三角函数形式之二的说明相同 |

① 狄里赫利条件: 函数 $f(t)$ 在定义域内(1)除有限个第一类间断点外处处连续;(2)只有有限个最大值和最小值。

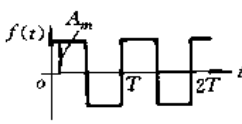
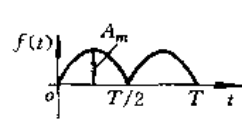
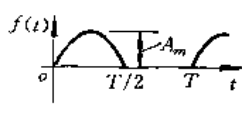
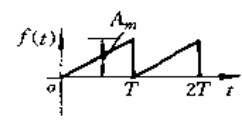


(续)

| 名称 | 级数展开式 | 系数计算公式 | 说明 |
|----------------|---------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 指数形式 (复数形式) | $f(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_n e^{jn\omega_1 t}$ | $C_n = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) e^{-jn\omega_1 t} dt$ $= \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) e^{-jn\omega_1 t} dt$ | <p>C_n 一般为复数,称为 n 次谐波相量。它与 a_n, b_n, A_{nm} 间的关系为</p> $C_n = \frac{1}{2}(a_n - jb_n) = C_n e^{j\varphi_n}$ $ C_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}; \varphi_n = \arctan \frac{b_n}{a_n}$ $C_{-n} = \frac{1}{2}(a_n + jb_n) = C_{-n} e^{-j\varphi_n}$ $ C_n = C_{-n} = \frac{1}{2} A_{nm}$ <p>只有同时取 $(-n\omega_1)$ 和 $(n\omega_1)$ 两项组合,才是 n 次谐波分量,即</p> $(e^{jn\omega_1 t} + e^{-jn\omega_1 t}) = 2\cos n\omega_1 t$ $C_n^* = C_{-n}$ |

几种常见信号的三角函数形式的傅里叶级数展开式见表 1-5-2。

表 1-5-2 几种常见信号的三角函数形式傅里叶级数展开式

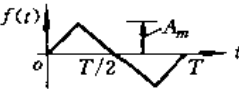
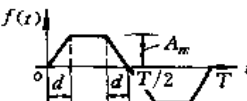
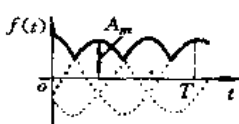
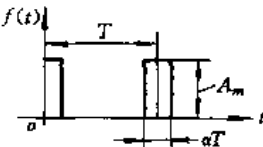
| $f(t)$ 的波形图 | $f(t)$ 分解为傅里叶级数 | 最大值 A_m | 直流分量 A_0 | 有效值 F | 绝对平均值 F_{avr} | 波形因数① K_f | 波顶因数① K_v |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|--------------------|------------------------|--------------------|----------------|----------------|
|  | $f(t) = \frac{4A_m}{\pi} \left(\sin\omega_1 t + \frac{1}{3}\sin 3\omega_1 t + \frac{1}{5}\sin 5\omega_1 t + \dots + \frac{1}{n}\sin n\omega_1 t + \dots \right)$ <p>(n 为奇数)</p> | A_m | 0 | A_m | A_m | 1.00 | 1.00 |
|  | $f(t) = \frac{4A_m}{\pi} \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{1 \times 3} \cos 2\omega_1 t - \frac{1}{3 \times 5} \cos 4\omega_1 t - \frac{1}{5 \times 7} \cos 6\omega_1 t + \dots \right)$ | A_m | $\frac{2A_m}{\pi}$ | $\frac{A_m}{\sqrt{2}}$ | $\frac{2A_m}{\pi}$ | 1.11 | 1.414 |
|  | $f(t) = \frac{A_m}{\pi} \left(1 + \frac{\pi}{2} \sin\omega_1 t - \frac{2}{3} \cos 2\omega_1 t - \frac{2}{15} \cos 4\omega_1 t + \dots \right)$ | A_m | $\frac{A_m}{\pi}$ | $\frac{A_m}{2}$ | $\frac{A_m}{\pi}$ | 1.571 | 2 |
|  | $f(t) = A_m \left[\frac{1}{2} - \frac{1}{\pi} \left(\sin\omega_1 t + \frac{1}{2}\sin 2\omega_1 t + \frac{1}{3}\sin 3\omega_1 t + \dots \right) \right]$ | A_m | $\frac{A_m}{2}$ | $\frac{A_m}{\sqrt{3}}$ | $\frac{A_m}{2}$ | 1.155 | 1.732 |

此星公司制作 请尊重原作者版权

40



(续)

| $f(t)$ 的波形图 | $f(t)$ 分解为傅里叶级数 | 最大值 A_m | 直流分量 A_0 | 有效值 F | 绝对平均值 F_{avr} | 波形因数① K_f | 波顶因数① K_c |
|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|------------------------------|---------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------|
|  | $f(t) = \frac{8A_m}{\pi^2} \left(\sin\omega_1 t - \frac{1}{9}\sin 3\omega_1 t + \frac{1}{25}\sin 5\omega_1 t - \dots + \frac{(-1)^{\frac{k-1}{2}}}{n^2} \times \sin n\omega_1 t + \dots \right)$ <p style="text-align: center;">(n 为奇数)</p> | A_m | 0 | $\frac{A_m}{\sqrt{3}}$ | $\frac{A_m}{\sqrt{2}}$ | 1.155 | 1.732 |
|  | $f(t) = \frac{4A_m}{a\pi} \left(\sin\alpha \sin\omega_1 t + \frac{1}{9}\sin 3\alpha \sin 3\omega_1 t + \frac{1}{25}\sin 5\alpha \sin 5\omega_1 t + \dots + \frac{1}{n^2}\sin n\alpha \sin n\omega_1 t + \dots \right)$ <p style="text-align: center;">(式中 $\alpha = \frac{2\pi a}{T} n$ 为奇数)</p> | A_m | 0 | $A_m \sqrt{1 - \frac{4}{3} \times \frac{a}{\pi}}$ | $A_m \left(1 - \frac{a}{\pi} \right) \sqrt{1 - \frac{4a}{3\pi}}$ | $\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{4a}{3\pi}}}$ | $\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{4a}{3\pi}}}$ |
|  | $f(t) = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} A_m \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2 \times 4} \cos 3\omega_1 t - \frac{1}{5 \times 7} \cos 6\omega_1 t + \frac{1}{8 \times 10} \cos 9\omega_1 t - \dots \right)$ | A_m | $\frac{3\sqrt{3} A_m}{2\pi}$ | $A_m \sqrt{\frac{1}{2} + \frac{3\sqrt{3}}{8\pi}}$ | $\frac{3\sqrt{3} A_m}{2\pi}$ | 1.017 | 1.190 |
|  | $f(t) = A_m \left[a + \frac{2}{\pi} (\sin \alpha \cos \omega_1 t + \frac{1}{2} \sin 2\alpha \cos 2\omega_1 t + \frac{1}{3} \sin 3\alpha \cos 3\omega_1 t + \dots) \right]$ | A_m | $a A_m$ | $\sqrt{2} A_m$ | $a A_m$ | $\frac{\sqrt{2}}{a}$ | 0.707 |

① 波形因数 K_f 和波顶因数 K_c 的定义见表 1-5-4。

有时可利用移动坐标零点的方法,使函数 $f(t)$ 图形具有某种对称性,根据函数的奇、偶性质(也即对称性质),其傅里叶级数中一些项的系数将不存在(例如,

表 1-5-2 中第 2 项余弦函数只有偶数项,比表 1-5-3 中第 1 项要简单些),从而简化了计算。

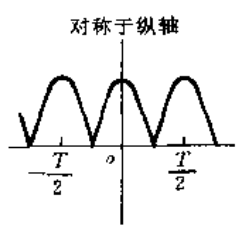
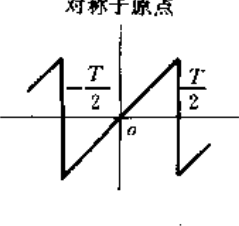
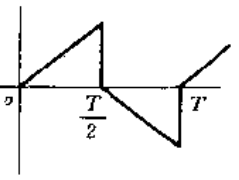
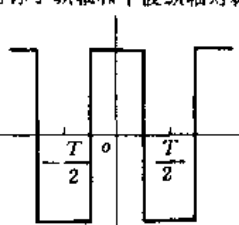
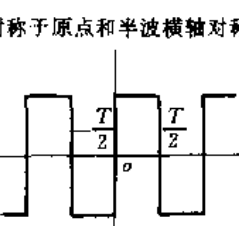
几种对称波形的傅里叶级数如表 1-5-3 所示。

此星公司制作 请尊重原作者版权

1-5-3 傅里叶级数



表 1-5-3 几种对称波形的傅里叶级数

| 对称性及其波形举例 | 函数特点 | 傅里叶级数 | 说 明 |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|
| <p>对称于纵轴</p>  | $f(t) = f(-t)$ | $\frac{a_n}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos n\omega_1 t$ | 只有直流项和系数为 a_n 的余弦项 |
| <p>对称于原点</p>  | $f(t) = -f(-t)$ | $\sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin n\omega_1 t$ | 只有系数为 b_n 的正弦项 |
| <p>移动半周期后与横轴对称</p>  | $f(t) = -f\left(t + \frac{T}{2}\right)$ | $\sum_{n=1}^{\infty} A_{nm} \sin(n\omega_1 t + \psi_n)$ $n = 1, 3, 5, \dots$ | 只有系数为 A_{nm} 的奇次正弦项 |
| <p>对称于纵轴和半波纵轴对称</p>  | $f(t) = f(-t)$ 及 $f(t) = -f\left(t + \frac{T}{2}\right)$ | $\sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos n\omega_1 t$ $n = 1, 3, 5, \dots$ | 只有系数为 a_n 的奇次余弦项 |
| <p>对称于原点和半波横轴对称</p>  | $f(t) = -f(-t)$ 及 $f(t) = -f\left(t + \frac{T}{2}\right)$ | $\sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin n\omega_1 t$ $n = 1, 3, 5, \dots$ | 只有系数为 b_n 的奇次正弦项 |

2 非正弦周期信号的频谱

各次谐波的振幅及初相位和频率之间关系的图示,称为频谱图,简称频谱。其中表示各次谐波振幅与频率关系的图形,称为振幅频谱;表示各次谐波初相位与频率关系的图形,称为初相频谱,习惯上称为相位频谱。

以笛卡儿直角坐标系的横轴表示角频率 ω ,同时以纵轴表示各次谐波的振幅,则对每项谐波的角频率和对应的振幅可画出一条垂线,这条垂线称为谱线。谱线按频率高低依次排列就构成了振幅频谱。同理,各次谐波初相位与 $n\omega_1$ 的函数关系按频率高低依次排列,就构成了相位频谱。例如,图 1-5-1a 周期性方波信号的傅里叶级数为



$$\begin{aligned}
 f(t) &= \frac{U_m}{2} + \frac{2U_m}{\pi} \left(\cos\omega_1 t - \frac{1}{3} \cos 3\omega_1 t \right. \\
 &\quad \left. + \frac{1}{5} \cos 5\omega_1 t - \frac{1}{7} \cos 7\omega_1 t + \dots \right) \\
 &= \frac{U_m}{2} + \frac{2U_m}{\pi} \left[\sin\left(\omega_1 t + \frac{\pi}{2}\right) + \frac{1}{3} \sin\left(3\omega_1 t + \frac{\pi}{2}\right) \right. \\
 &\quad \left. + \frac{1}{5} \sin\left(5\omega_1 t + \frac{\pi}{2}\right) + \frac{1}{7} \sin\left(7\omega_1 t - \frac{\pi}{2}\right) + \dots \right]
 \end{aligned}$$

其振幅频谱图和相位频谱图如图 1·5-1b 和 c 所示。频谱有如下特点：

(1) 频谱由不连续的线段组成，所以它是离散的。

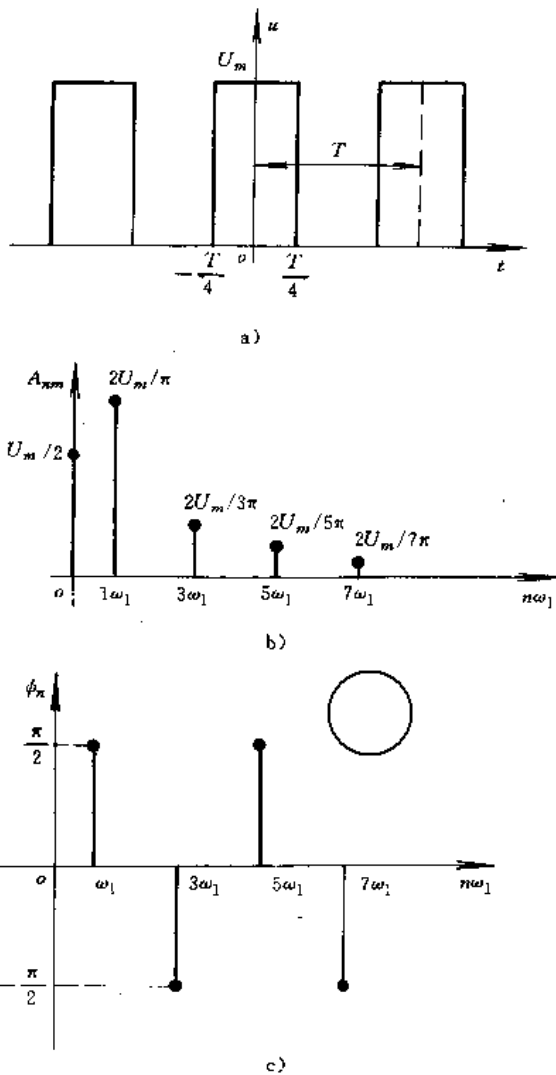


图 1·5-1 周期性矩形脉冲及其频谱

a) 周期性矩形脉冲 b) 振幅频谱
c) 相位频谱

(2) 谱线只在基波频率的整数倍上出现。

(3) 各谐波的幅值，随角频率增大而逐渐减少。这意味着周期信号中的谐波分量主要集中在低频分量上。

频谱的上述三个特点，分别称为频谱的离散性、谐波性和收敛性。

用傅里叶指数形式表示信号的频谱图时，由于指数级数中 n 取值是正、负整数，所以振幅谱线出现在正负频率对应的位置上，它们对称于纵轴，谱线的长度是傅里叶三角函数形式信号振幅的一半，即 $|C_n| = \frac{1}{2} \times A_{nm}$ 。第 n 次谐波分量的振幅等于位于正、负频率对应的两条谱线之矢量和。指数形式的振幅频谱图，同样具有离散性、谐波性和收敛性。例如，图 1·5-2a 为常见的典型周期性矩形脉冲，其指数形式的傅里叶级数为

$$f(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_n e^{jn\omega_1 t} \text{ 中第 } n \text{ 次谐波}$$

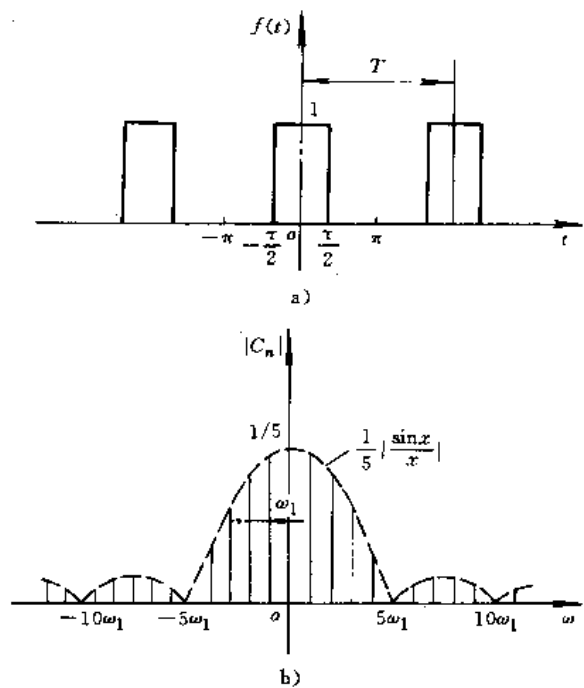


图 1·5-2 幅值为 1 的周期性矩形脉冲及其频谱

a) 周期性脉冲波 b) 频谱

$$\begin{aligned}
 C_n &= \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) e^{-jn\omega_1 t} dt = \frac{1}{T} \int_{-\frac{\tau}{2}}^{\frac{\tau}{2}} 1 \cdot e^{-jn\omega_1 t} dt \\
 &= \frac{\tau}{T} \frac{\sin\left(n \frac{\omega_1 \tau}{2}\right)}{n \frac{\omega_1 \tau}{2}}
 \end{aligned}$$

若令
则有

$$\frac{n\omega_1 \tau}{2} = x$$

$$C_n = \frac{\tau}{T} \frac{\sin x}{x} = \frac{\tau}{T} S_a(x)$$

式中 $S_a(x) = \frac{\sin x}{x}$ ，称为采样函数，于是

$$f(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{\tau}{T} \frac{\sin x}{x} e^{jn\omega_1 t}$$



当取 $\frac{\tau}{T} = \frac{1}{5}$ 时,其振幅频谱 $|C_n|$ 如图 1-5-2b 所示。频谱线的包络线受采样函数 $S_a(x) = \frac{\sin x}{x}$ 的约束。

3 非正弦周期量的有效值、平均值及表示波形特征的几个系数(表 1-5-4)

表 1-5-4 非正弦周期量的有效值、平均值及表示波形特征的几个系数

| 名称 | 定义与公式 | 说明 |
|---------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 有效值 (方均根值) | $F = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T f^2(t) dt}$ 式中 $f(t)$ —周期信号的瞬时值 T —周期信号的周期 F —周期信号的有效值 | 1. 设非正弦周期电流为 $i = I_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} I_n \sin(n\omega_1 t + \varphi_n)$ 则该电流的有效值为 $I = \sqrt{I_0^2 + I_1^2 + I_2^2 + \dots + I_n^2 + \dots}$ 式中 $I_0, I_1, I_2, \dots, I_n$ — i 的零次谐波及一次谐波、二次谐波、...、 n 次谐波的有效值 2. 有效值可用电磁系列或电动系列的仪表进行测量 |
| 平均值 | $F_{av} = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt$ 式中 F_{av} —周期信号 $f(t)$ 在一个周期 T 内的平均值 | 周期信号 $f(t)$ 在一个周期内的平均值就是它的直流分量,该分量可用磁电式仪表进行测量 |
| 绝对平均值 | $F_{avv} = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt$ 式中 F_{avv} —周期信号的绝对平均值 | 对于正弦电流 $i = I_m \sin(\omega_1 t + \varphi)$ 的绝对平均值 $I_{avv} = \frac{1}{T} \int_0^T I_m \sin(\omega_1 t + \varphi) dt = \frac{2I_m}{\pi}$ |
| 波形因数 | $K_f = \frac{\text{有效值}}{\text{绝对平均值}}$ | 对于正弦波, $K_f = 1.11$ |
| 波顶因数 | $K_c = \frac{\text{最大值}}{\text{有效值}}$ | 对于正弦波, $K_c = 1.414$ |
| 畸变因数 | $K_d = \frac{\text{基波有效值}}{\text{有效值}}$ | 是度量非正弦周期量波与正弦波差别的量。对于正弦波, $K_d = 1$ |

4 非正弦周期电路中的功率

由非正弦周期性电源激励的线性电路,称为非正弦周期电路。设图 1-5-3 二端网络的端口电压为

$$u(t) = U_0 + \sum_{n=1}^{\infty} U_{nm} \sin(n\omega_1 t + \psi_n)$$

端口电流为

$$i = I_0 + \sum_{n=1}^{\infty} I_{nm} \sin(n\omega_1 t + \theta_n)$$

则电路中的功率见表 1-5-5。

计算实例:

设图 1-5-3 二端网络 N 的端口上电压和电流有关联参考方向,其值分别为

$$u = 100 + 80 \sin(\omega_1 t + 30^\circ) + 60 \sin(3\omega_1 t + 60^\circ) + 40 \sin(5\omega_1 t - 160^\circ) \quad (\text{V})$$

$$i = 10 + 8 \sin(\omega_1 t - 30^\circ) + 4 \sin(5\omega_1 t - 40^\circ) \quad (\text{A})$$

由各次谐波形成的平均功率,对于直流分量有

$$P_0 = U_0 I_0 = 100 \times 10 = 1000 \text{W}$$

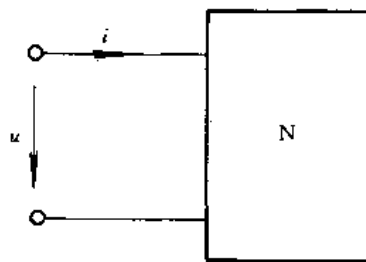


图 1-5-3 二端网络

对于一次谐波有

$$P_1 = U_1 I_1 \cos(\varphi_{u1} - \varphi_{i1}) = \frac{80}{\sqrt{2}} \frac{8}{\sqrt{2}} \cos(30^\circ + 30^\circ) = 160 \text{W}$$

对于三次谐波,因为电流为零,所以 $P_3 = 0$ 。对于五次谐波有

$$P_5 = U_5 I_5 \cos(\varphi_{u5} - \varphi_{i5}) = \frac{40}{\sqrt{2}} \frac{4}{\sqrt{2}} \cos(-160^\circ + 40^\circ) = -40 \text{W}$$

此星公司制作 请尊重原作者版权



表 1-5-5 非正弦周期电路中的功率

| 名称 | 定义及计算公式 | 说明 |
|----------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 瞬时功率 | $p = ui = U_0 I_0 + \sum_{n=1}^{\infty} U_{nm} \sin(n\omega_1 t + \phi_n) \times I_{nm} \sin(n\omega_1 t + \theta_n)$ $+ \sum_{n=1}^{\infty} I_0 U_{nm} \sin(n\omega_1 t + \phi_n) + \sum_{n=1}^{\infty} U_0 I_{nm} \sin(n\omega_1 t + \theta_n) + \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{\substack{R=1 \\ (n \neq R)}}^{\infty} U_{nm} \sin(n\omega_1 t + \phi_n) \sin(R\omega_1 t + \theta_R)$ | 电路中瞬时功率是同频率和不同频率的谐波电压、谐波电流形成的瞬时功率之和 |
| 平均功率 (有功功率) | $P = \frac{1}{T} \int_0^T p dt = U_0 I_0 + U_1 I_1 \cos \varphi_1 + U_2 I_2 \cos \varphi_2 + \dots + U_n I_n \cos \varphi_n + \dots$ $= \sum_{n=0}^{\infty} P_n \quad (\text{W})$ <p>式中 P_0—直流电压和直流电流形成的功率, $P_0 = U_0 I_0$ P_n—第 n 次谐波电压与谐波电流形成的平均功率, $P_n = U_n I_n \cos \varphi_n$</p> | <ol style="list-style-type: none"> 1. 电路中的平均功率, 等于各次谐波各自形成的平均(有功)功率之代数和 2. 不同频率的谐波电压与谐波电流不构成平均功率 |
| 无功功率 | $Q = U_1 I_1 \sin \varphi_1 + U_2 I_2 \sin \varphi_2 + \dots + U_n I_n \sin \varphi_n + \dots$ $= \sum_{n=1}^{\infty} Q_n \quad (\text{var})$ <p>式中 Q_n—第 n 次谐波形成的无功功率, $Q_n = U_n I_n \sin \varphi_n$</p> | <ol style="list-style-type: none"> 1. 电路中的无功功率是各次谐波各自形成的无功功率之代数和 2. 直流分量不形成无功功率 |
| 视在功率 | $S = UI = \sqrt{\sum_{n=0}^{\infty} U_n^2} \sqrt{\sum_{n=0}^{\infty} I_n^2} \quad (\text{VA})$ <p>式中 U_n, I_n—第 n 次谐波电压和谐波电流的有效值</p> | |
| 功率因数 | $\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{\sum_{n=0}^{\infty} P_n}{\sqrt{\sum_{n=0}^{\infty} U_n^2} \sqrt{\sum_{n=0}^{\infty} I_n^2}}$ | |
| 畸变功率 | $T = \sqrt{S^2 - (P^2 + Q^2)} \quad (\text{VA})$ | 畸变功率 T 的大小表征波形偏离正弦波的程度 |

二端网络 N 吸收的平均功率为

$$P = \sum_{n=0}^{\infty} P_n = 1000 + 160 - 40 = 1120 \text{ W}$$

用类似的方法可算得一次谐波和五次谐波的无功功率分别为 277 var 和 69.3 var。二端网络 N 吸收的无功功率为

$$Q = \sum_{n=0}^{\infty} Q_n = 277 + 69.3 = 346.3 \text{ var}$$

非正弦周期信号电压的有效值为

$$U = \sqrt{U_0^2 + U_1^2 + U_3^2 + U_5^2}$$

$$= \sqrt{100^2 + \left(\frac{80}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{60}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{40}{\sqrt{2}}\right)^2}$$

$$= 125.7 \text{ V}$$

电流有效值为

$$I = \sqrt{I_0^2 + I_1^2 + I_3^2}$$

$$= \sqrt{10^2 + \left(\frac{8}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{4}{\sqrt{2}}\right)^2} = 11.83 \text{ A}$$

视在功率为

$$S = UI = 125.7 \times 11.83 = 1487.93 \text{ VA}$$

功率因数

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{1120}{1487.93} = 0.753 \text{ (滞后)}$$

畸变功率

$$T = \sqrt{S^2 - (P^2 + Q^2)}$$

$$= \sqrt{1487.93^2 - (1120^2 + 346.3^2)} = 917 \text{ VA}$$

5 等效正弦波

为便于电路分析, 非正弦周期波形与正弦波形相



近时,可以用等效正弦波来代替。等效代替是指:等效正弦波的有效值等于非正弦波的有效值;等效正弦波的频率等于非正弦波的基波频率;等效正弦波激励时电路中产生的有功功率与代替前相同。

非正弦波用等效正弦波代替后,就可以用相量法来分析计算非正弦周期信号作用下的电路。

6 非正弦周期信号激励下线性电路的稳态分析

6.1 计算步骤

(1) 将激励分解为三角函数形式的傅里叶级数。

例如,设网络的激励为电压 u , 则傅里叶级数为

$$u = U_0 + \sum_{n=1}^{\infty} U_{nm} \sin(n\omega_1 t + \phi_n)$$

截取谐波的次数根据要求的计算精确度来确定。

(2) 应用相量法,逐一计算不同频率的谐波分量单独作用时的稳态响应相量。

(3) 上项所得的稳态响应在时域中进行叠加便得出所欲求的稳态响应。

需要说明的是:

1) 对不同频率的谐波,感抗和容抗有不同的数值。例如,直流电源激励时,电感 L 相当于短路,电容 C 相当于开路, n 次谐波激励时,感抗为 $X_{Ln} = n\omega_1 L$,容抗为 $X_{Cn} = 1/n\omega_1 C$ 。

2) 各次谐波形成的平均功率可以叠加。

3) 对应于不同频率的相量不能叠加,所以各谐波分量稳态响应相量形式要化为用正弦函数表示的时域形式再进行叠加。

6.2 计算实例

图 1.5-4a 所示为一整流滤波电路。图中 $L=5\text{H}$, $C=10\mu\text{F}$, 负载电阻 $R_L=2\text{k}\Omega$ 。设整流输出电压波形如图 1.5-4b 所示,其中 $U_m=157\text{V}$, $\omega_1=314\text{rad/s}$, 试求负载端电压 u_L 及其有效值 U_L 。

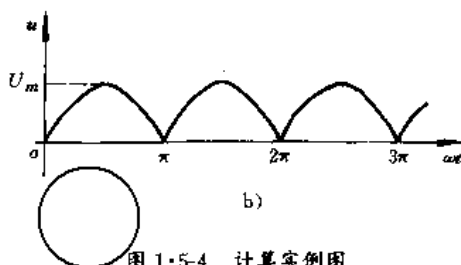
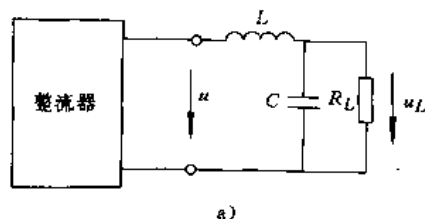


图 1.5-4 计算实例图

a) 整流滤波电路 b) 整流电路输出电压波形

解 (1) 查表 1.5-2, 得全波整流电压 u 的傅里叶级数(设只截取三项)为

$$u = \frac{4}{\pi} U_m \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{3} \cos 2\omega_1 t - \frac{1}{15} \cos 4\omega_1 t \right) = 100 - 66.7 \cos 2\omega_1 t - 13.3 \cos 4\omega_1 t \quad (\text{V})$$

(2) 逐一计算直流分量、二次谐波和四次谐波电压单独激励时的负载电压 u_L , 然后将 u_L 的各次谐波分量瞬时值叠加, 最后得其有效值 U_L 。计算结果如表 1.5-6 所示。

表 1.5-6 非正弦线性电路稳态分析实例

| 激励谐波 项目 | 零次谐波(直流分量) | 二次谐波 | 四次谐波 |
|-------------------------------------------|------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 等值频域电路 | | | |
| u 的各次谐波分量 (V) | $U_0=100$ | $u_2 = -66.7 \cos 2\omega_1 t$ | $u_4 = -13.3 \cos 4\omega_1 t$ |
| n 次谐波感抗 $X_{Ln} = n\omega_1 L (\Omega)$ | 0 | $2 \times 314 \times 5 = 3140$ | $4 \times 314 \times 5 = 6280$ |



(续)

| 激励谐波 项目 | 零次谐波(直流分量) | 二次谐波 | 四次谐波 |
|--------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| n 次谐波容抗 $X_{Cn} = \frac{1}{n\omega_1 C} (\Omega)$ | ∞ | $\frac{1}{2 \times 314 \times 10 \times 10^{-6}} = 159.2$ | $\frac{1}{4 \times 314 \times 10 \times 10^{-6}} = 79.6$ |
| n 次谐波输入阻抗 $Z_{in}(jn\omega_1) (\Omega)$ | 2000 | 2981 / 89.80 | 6200 / 90° |
| 负载电压 u_L 的各次谐波分量(V) | 100 | 35.5cos(628t - 175.2°) | 0.171cos(1256t - 177.73°) |
| 负载电压 u_L 及其有效值 U_L (V) | $u_L = 100 - 3.55\cos(628t - 175.2^\circ) - 0.171\cos(1256t - 177.73^\circ)$ $U_L = \sqrt{100^2 + \left(\frac{3.54}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{0.171}{\sqrt{2}}\right)^2} = 100.032$ | | |

7 电路的频率特性

7.1 频域中网络函数的定义

在单一激励源的线性网络中,响应相量与激励相量之比定义为频域中的网络函数,即

$$H(j\omega) = \frac{R(j\omega)}{E(j\omega)} = |H(j\omega)| \angle \psi(j\omega)$$

式中, $E(j\omega)$ 是激励相量; $R(j\omega)$ 是响应相量。网络函数可以在同一个网络口上或不同端口上定义。 $|H(j\omega)|$ 是网络函数的模,它表明了幅值与信号频率的关系,称为幅频特性(响应)。 $\psi(j\omega)$ 则表明响应与激励间相位差与信号频率的关系,称为相频特性(响应)。在第6章中将会看到, $H(j\omega)$ 是 $|H(s)|$ 的一个特例。

网络函数只与网络结构、元件参数和激励源的角频率有关,而与激励源的幅值、初相和波形无关。一旦电路被指定,即可列出其相应的网络函数,这用于计算一组激励的响应比采用一般基本分析电路方法进行计算要更方便和更节省时间。

7.2 频域中网络函数的类型

参见本篇第6章5.2节。在5.2节的表1.6-4中,令 $S = j\omega$ 就得到频域中的各种网络函数。

8 RLC 电路中的谐振

含有 L 和 C 的电路在某一特定频率时,电路中电抗(或电纳)等于零,从而使电路对外呈现电阻性,电路的这种工作状态称为谐振。这一特定频率称为谐振频率。发生谐振的电路称为谐振电路。谐振电路有很高的

电压或很大的电流,可能会损坏设备,因而在电力系统中要防止发生谐振。但在电子技术中谐振却有着广泛的应用,例如,采用谐振电路来完成滤波、选频、测量等功能。

8.1 正弦信号激励下 RLC 串联电路中的谐振

由电压源 \dot{U} 激励的 RLC 串联电路如图 1.5-5a 所示,当端电压 \dot{U} 与端电流 \dot{I} 呈现同相相位关系时,称此电路发生了串联谐振。谐振时电流、电压相量如图 1.5-5b 所示。发生谐振时的电源频率称为电路的谐振频率,其表达式为

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

或

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

谐振时电路的感抗与容抗称为特征阻抗 ρ ,其值为

$$\rho = \omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C} = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (\Omega)$$

电路的品质因数为

$$Q = \frac{\omega_0 L}{R} = \frac{1}{\omega_0 C R} = \frac{\sqrt{L/C}}{R}$$

谐振时,感抗等于容抗,因而电路中的电流达到最大值,为 $I_0 = U/R$ 。谐振时电感电压等于电容电压,且为电源电压 U 的 Q 倍,即

$$U_L = U_C = QU$$

电感电压与电容电压相量之和为零,所以串联谐振也



称为电压谐振。

在谐振时电源只向电路输送电阻元件所消耗的有功功率。电感中的无功功率等于电容中无功功率，但符号相反，两者之间周期性地等量能量交换，所以电路吸收的总无功功率为零；电感中磁场能量的最大值等于电容中电场能量的最大值，在任一时刻储能之代数和为常数，其值等于 LI_0^2 (I_0 是谐振时电路中电流)。

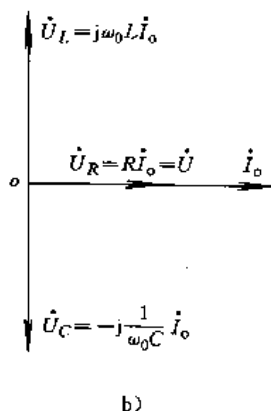
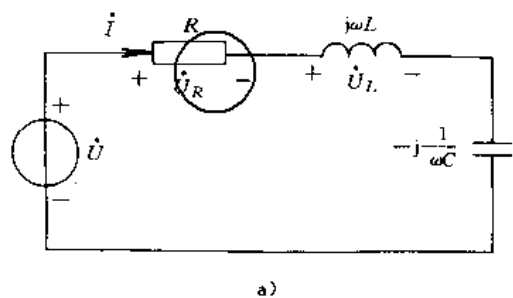


图 1·5-5 RLC 串联谐振电路及谐振时的电压、电流相量图

a) RLC 串联谐振电路

b) 谐振时电压、电流相量图

电流有效值 I 与谐振时电流 I_0 之比称为电流幅频响应，其值为

$$\frac{I}{I_0} = \frac{R}{|Z|} = \frac{1}{\sqrt{1 + Q^2 \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)^2}} \quad (1\cdot5-1)$$

取 I/I_0 为纵坐标，相对角频率 $\omega/\omega_0 = \eta$ 为横坐标， Q 为参变量，则式(1·5-1)可用图 1·5-6a 所示曲线来表示，此曲线称为归一化电流谐振曲线。由图可见，曲线形状与 Q 大小有关。 Q 小，则曲线钝， Q 大，则曲线尖；谐振时的电流最大，偏离谐振频率时的电流受到不同程度的削弱，这种特性称为选频特性，简称选择性。不难看出， Q 越大，曲线越尖，选择性越好。在图 1·5-6a

所示 $Q=20$ 的曲线上，当 $I/I_0 = 1/\sqrt{2}$ 时，两个相对频率为 η_1 与 η_2 ，电路处于这两个频率时的平均功率均为谐振时功率的一半，故称曲线上 1、2 点为半功率点。与该两点对应的频率 f_1 和 f_2 之间的频率范围，称为该 RLC 串联电路的通频带，即

$$BW = f_2 - f_1 = \frac{f_0}{Q}$$

通频带有时称为半功率点带宽，也称为 3dB[Ⓔ] 带宽。

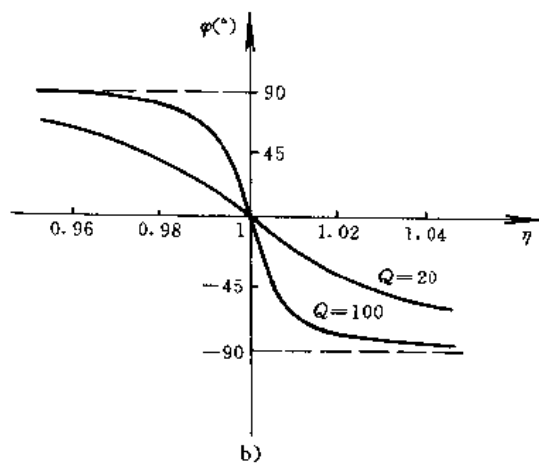
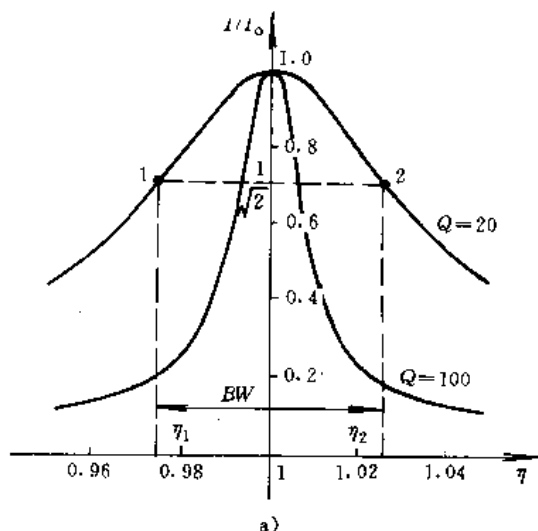


图 1·5-6 归一化电流频率响应
a) 谐振曲线 b) 相频响应

Ⓔ 功率传输常用分贝 (dB) 表示。设输入端功率为 P_1 ，输出端功率为 P_2 ，则用分贝表示的功率增益

$$K_{dB} = 10 \lg \frac{P_2}{P_1} \quad (\text{dB})$$

当 $P_2/P_1 = 1/2$ 时，其分贝数

$$K_{dB} = 10 \lg \frac{P_2}{P_1} = 10 \lg \frac{1}{2} \approx -3 \text{ dB}$$

所以半功率点之间的带宽也称为 3dB 带宽。



电流的相频响应为

$$\varphi = -\arctan Q \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)$$

若以 Q 为参变量, 则 φ 与 ω 关系特性曲线如图 1-5-6b 所示。

8.2 正弦信号激励下 RLC 并联电路中的谐振

由电流源激励的 RLC 并联电路如图 1-5-7 所示。该电路与图 1-5-5a RLC 串联电路是互为对偶的电路, 两者谐振定义相仿, 即 \dot{I} 与 \dot{U} 同相时, 电路中发生了谐振。谐振时的电流、电压相量如图 1-5-7b 所示。谐振角频率

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (\text{rad/s})$$

电路的品质因数为

$$Q_p = \frac{\omega_0 C}{G} = \frac{1}{G\omega_0 L} = \frac{\sqrt{C/L}}{G}$$

谐振时 L 与 C 中电流达到最大值, 是电路端电流 I_s 的

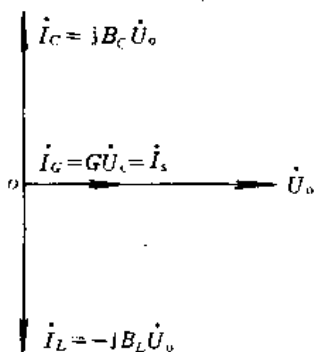
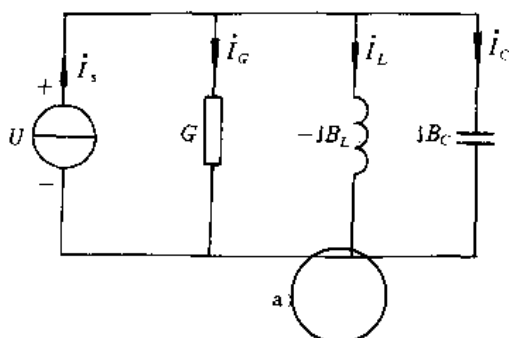


图 1-5-7 并联谐振电路及谐振时的电流、电压相量图
a) 并联谐振电路 b) 谐振时电流、电压相量图

Q_p 倍, 由于 $i_C + i_L = 0$, 所以并联谐振也称为电流谐振。

电路中的无功功率和 L 、 C 中储能情况与串联谐振电路中相似。

设谐振时电路端电压为 U_0 , 则端电压 \dot{U} 的频率响应归一化形式为

$$\frac{\dot{U}}{\dot{U}_0} = \frac{1}{\sqrt{1 + Q_p^2 \left(\eta - \frac{1}{\eta} \right)^2}} \angle -\arctan Q_p \left(\eta - \frac{1}{\eta} \right)$$

归一化电压谐振曲线, 用 U/U_0 取代 I/I_0 后, 与图 1-5-6a 相同, 电压的相频响应则与图 1-5-6b 相同。

并联谐振电路的 3dB 带宽为

$$BW = f_2 - f_1 = \frac{f_0}{Q_p}$$

工程上常采用电感线圈与电容并联来组成并联谐振电路, 如图 1-5-8a 所示。图中电感线圈用 RL 串联来模拟。电路的谐振频率为

$$\omega'_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \sqrt{1 - \frac{CR^2}{L}} = \omega_0 \sqrt{1 - \frac{CR^2}{L}} \quad (\text{rad/s})$$

式中 ω_0 —— 理想 RLC 并联电路的谐振频率 (rad/s)。

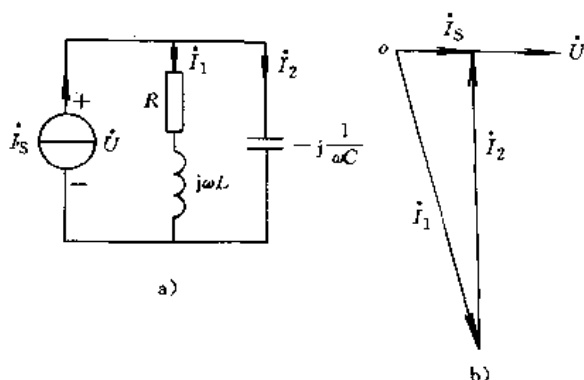


图 1-5-8 电感线圈与电容组成的并联电路及谐振时的电流、电压相量图
a) 电感线圈与电容组成的并联电路
b) 谐振时的电流、电压相量图

8.3 非正弦周期信号激励下电路的谐振

谐振电路是一种具有选频特性的电路。图 1-5-9a 所示为接有非正弦周期信号电压源 $u(t)$ 的电路。若 C 值可变, 则由电压中第 n 次谐波分量引起谐波电流的有效值为

$$I_n = \frac{U_n}{\sqrt{R^2 + \left(n\omega_1 L - \frac{1}{n\omega_1 C} \right)^2}}$$



若电路由第 n 次谐波引起谐振, 则相应的电容值为

$$C = C_n = \frac{1}{n^2 \omega_1^2 L}$$

该谐波的角频率为 $n\omega_1$, 电流为 $I_n = U_n/R$ 。图 1-5-9b 中虚线表示三个电流谐波分量的谐振曲线, 实线表示电流有效值 I 与 C 的关系曲线。

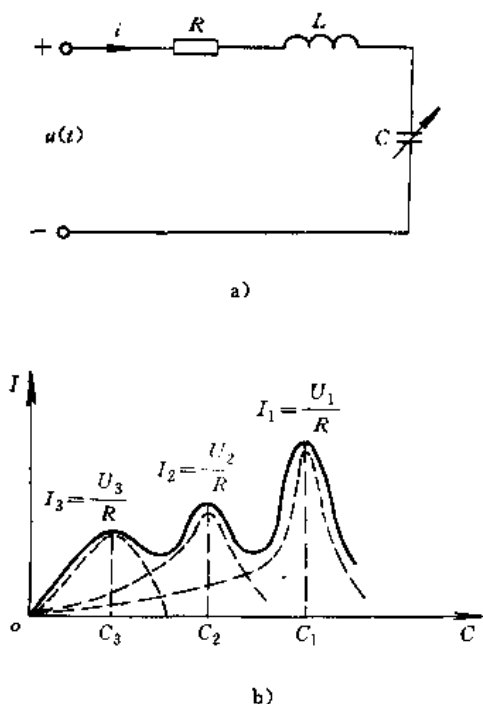


图 1-5-9 RLC 串联电路及电流与电容关系曲线

a) RLC 串联电路 b) 电流 I 与电容 C 的关系曲线

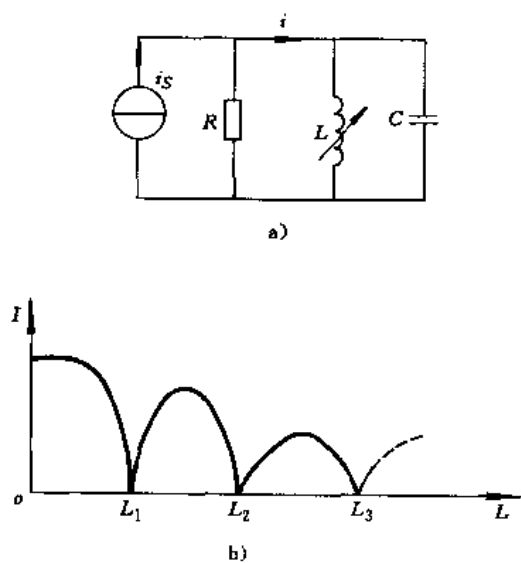


图 1-5-10 RLC 并联电路及电流与 L 的关系曲线

a) RLC 并联电路 b) 电流 I 与电感 L 的关系曲线

在图 1-5-10a 所示的并联电路中, 若 L 可变, 则电流有效值 I 与 L 的关系如图 1-5-10b 所示。

根据谐振电路的选频特性, 工程上常利用 LC 串联和 LC 并联电路的组合来实现非正弦周期信号的分解, 能将信号中各次谐波分离出来的网络称为谐波分析器。如图 1-5-11 所示电路是一个简单的谐波分析器。在电路中凡满足频率为

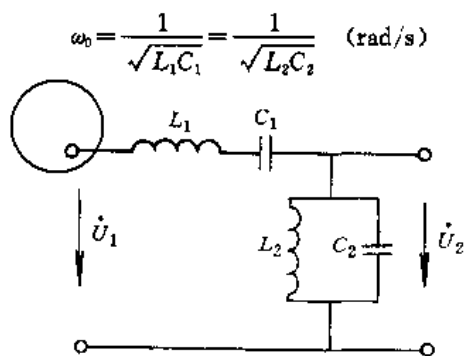


图 1-5-11 谐波滤波器

的谐波及通频带内的信号, 都能顺利通过, 而通频带以外的信号则均受阻。

9 线性电路的滤波特性

9.1 理想滤波电路的频率特性

滤波电路是一种双口网络, 它是利用电抗元件的电抗值随频率变化, 从而对不同频率的信号产生不同响应的特性, 容许某些频率范围内的信号顺利通过, 而使频带外的信号产生足够的衰减。衰减小的频率范围称为通带, 衰减大的频率范围称为阻带。按滤波电路通带和阻带所处的频率范围不同, 滤波电路可分为低通、高通、带通、带阻和全通等五类。这些滤波电路的幅频特性 $|H(j\omega)|$ 示意图及其主要用途见表 1-5-7。

线性对称双口滤波电路, 常用传输系数与特征阻抗来描述电路的频率特性。如图 1-5-12 所示双口网络, 设输入电压相量和电流相量分别为 \dot{U}_1 和 \dot{i}_1 , 输出电压相量和电流相量分别为 \dot{U}_2 和 \dot{i}_2 , 传输系数定义为

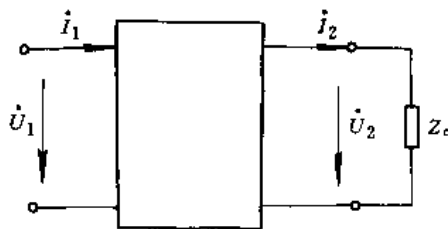


图 1-5-12 双口网络



表 1-5-7 滤波电路的种类、性能及主要用途

| 名称 | 幅频特性示意图 | 性能及主要用途 |
|--------|---------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 低通滤波电路 | | <ol style="list-style-type: none"> 1. 能让 $0 < \omega < \omega_c$ 频段内的信号顺利通过，而使频段外的信号受到抑止 2. 用于需要抑止高次谐波或频率较高的干扰和噪声等场合 |
| 高通滤波电路 | | <ol style="list-style-type: none"> 1. 能让 $\omega \geq \omega_c$ 频段的信号顺利通过，$\omega < \omega_c$ 频段的信号受到抑止 2. 用于需要高频而削弱低频的场合 |
| 带通滤波电路 | | <ol style="list-style-type: none"> 1. 能让 $\omega_{c1} \leq \omega \leq \omega_{c2}$ 频段内的信号顺利通过，而使频段外的信号受到抑止 2. 用于需要突出有用频段的信号，而抑止频段外无用信号(如干扰、噪声等)的场合 |
| 带阻滤波电路 | | <ol style="list-style-type: none"> 1. 抑止 $\omega_{c1} \leq \omega \leq \omega_{c2}$ 频段内的信号，而让频段外的信号顺利地通过 2. 用于抑止干扰的场合，如在通信中抑止交流电网的干扰 |
| 全通滤波电路 | | <ol style="list-style-type: none"> 1. 让 $\omega \geq 0$ 频段的信号通过，但输入与输出间的相移大小随频率变化 2. 用于输出与输入的幅值不变，而输出的相位随频率而变化的场合，如 RC 移相电路 |

注：图中 ω_c 为截止频率。

$$\gamma = \frac{1}{2} \ln \frac{\dot{U}_1 \dot{I}_1}{\dot{U}_2 \dot{I}_2}$$

在负载匹配的情况下，双口网络的输入阻抗等于输入端口的特征阻抗 Z_c ，其传输系数为

$$\gamma = \frac{1}{2} \ln \frac{\dot{U}_1}{\dot{U}_2} = \frac{1}{2} \ln \frac{\dot{I}_1}{\dot{I}_2}$$

具有对称性的双口滤波网络，其输入口和输出口的特征阻抗相等，因而传输系数为

$$\gamma = \beta + j\alpha = \ln \frac{U_1}{U_2} + j(\varphi_1 - \varphi_2)$$

或

$$\gamma = \ln \frac{I_1}{I_2} + j(\varphi_1 - \varphi_2)$$

$$\alpha = \varphi_1 - \varphi_2 \quad \beta = \ln U_1 / U_2$$

式中 β ——衰减系数，它反映了经网络传输后电压

衰减情况。在理想滤波电路的通频带内定义 $\beta = 0$ ；

φ_1, φ_2 —— \dot{U}_1 和 \dot{U}_2 的初相位(°)；

φ_1, φ_2 —— \dot{I}_1 和 \dot{I}_2 的初相位(°)；

α ——相位系数，它反映了电压经网络传输后相位的变化情况。

γ 及其 β 和 α 都是双口网络固有的参数。

在分析滤波器性能时常常用到参数 γ 和 Z_c 。在匹

⊖ 特征阻抗是双口网络的固有参数。对称双口网络的特征阻抗为

$$Z_c = \sqrt{Z_w Z_u} \quad (\Omega)$$

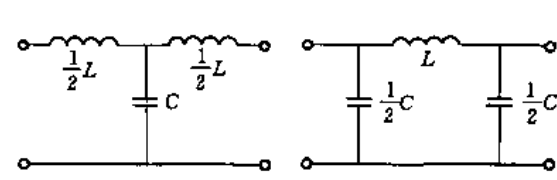
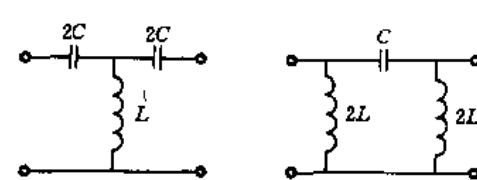
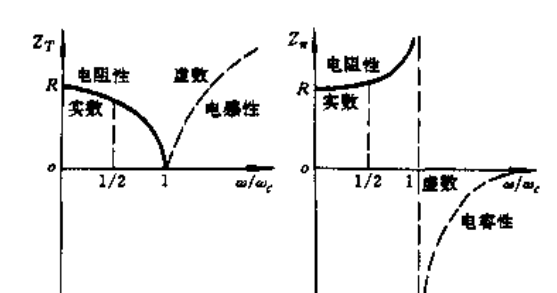
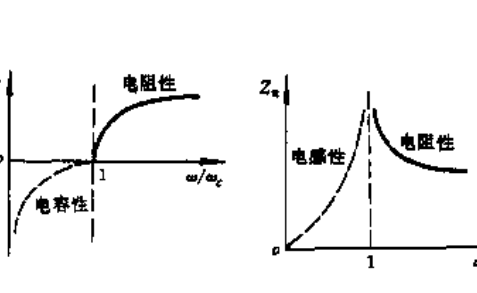
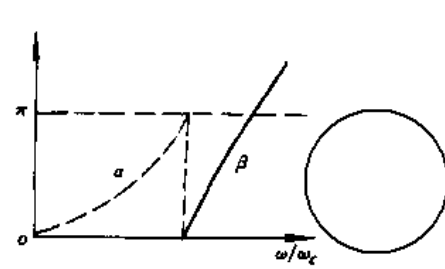
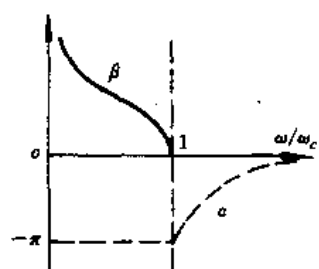
式中， Z_w 和 Z_u 为双口网络负载开路时的输入阻抗和双口网络负载短路时的输入阻抗。



表 1-5-8 与比值 $\frac{U_2}{U_1}$ 对应的分贝、奈培

| | | | | | | | | |
|----------------------|-----------|-----------|-----------|--------------|---|-----|--------|--------|
| U_2/U_1 | 10^{-3} | 10^{-2} | 10^{-1} | $1/\sqrt{2}$ | 1 | 10 | 10^2 | 10^3 |
| $20\lg U_2/U_1$ (dB) | -60 | -40 | -20 | -3 | 0 | 20 | 40 | 60 |
| $\ln U_2/U_1$ (Np) | -6.9 | -4.6 | -2.3 | -0.35 | 0 | 2.3 | 4.6 | 6.9 |

表 1-5-9 低通、高通、带通和带阻 LC 滤波电路的主要性能

| 滤波特点 | 低 通 | 高 通 |
|-------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| 电路形式 |  |  |
| 特征阻抗的频率响应曲线 |  |  |
| 传输系数的频率响应曲线 |  |  |
| 截止角频率 | $\frac{2}{\sqrt{LC}}$ | $\frac{1}{2\sqrt{LC}}$ |



(续)

| 滤波特点 | 带通 | 带阻 |
|-------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 电路形式 | | |
| 特征阻抗的频率响应曲线 | | |
| 传输系数的频率响应曲线 | | |
| 截止角频率 | <p>低 $\omega_{cl} = \sqrt{\omega_0^2 + \omega_{12}^2} - \omega_{12}$</p> <p>高 $\omega_{ch} = \sqrt{\omega_0^2 + \omega_{12}^2} + \omega_{12}$</p> <p>式中 $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}} = \frac{1}{\sqrt{L_2 C_2}}$</p> <p>$\omega_{12} = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_2}}$</p> | <p>低 $\omega_{cl} = \sqrt{\omega_0^2 + \omega_{21}^2} - \omega_{21}$</p> <p>高 $\omega_{ch} = \sqrt{\omega_0^2 + \omega_{21}^2} + \omega_{21}$</p> <p>式中 $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}} = \frac{1}{\sqrt{L_2 C_2}}$</p> <p>$\omega_{21} = \frac{1}{\sqrt{L_2 C_1}}$</p> |

注： Z_T —T型滤波电路的特征阻抗； Z_π — π 型滤波电路的特征阻抗； β —衰减系数； α —相位系数。

配条件下工作的滤波器，输入与输出的电压、电流、功率之比完全由 β 的大小所决定。衰减系数的单位是奈培(Np)，但在实用上的常用单位为分贝(dB)，两者互换关系为

$$1\text{Np} = 8.686\text{dB}$$

$$1\text{dB} = 0.1151\text{Np}$$

表 1·5-8 给出了电压比的分贝、奈培对应关系。

9·2 LC 滤波电路

由 LC 组成的低通、高通、带通和带阻滤波电路主要性能列于表 1·5-9 中。



第6章 线性电路的复频域分析

拉普拉斯(Laplace)变换(简称拉氏变换)是研究线性电路暂态过程的基本工具。在电工技术上借助拉氏变换这一数学工具,将描述电路暂态过程的微分方程式变换为复频域的代数方程,求得响应的复频域解 $X(s)$,再取 $X(s)$ 的拉氏反变换便可得到响应的时域解 $x(t)$ 。

1 拉普拉斯变换^①

1.1 拉普拉斯变换定义

在 $[0^-, \infty)$,即 $(0^- \leq t < \infty)$ 区间内的函数 $f(t)$,其拉普拉斯变换定义为

$$F(s) = \int_{0^-}^{\infty} f(t)e^{-st} dt \quad (1.6-1)$$

式中, $s = \sigma + j\omega$, σ 为使函数 $f(t)$ 在区间 $(0^-, \infty)$ 内积分收敛而选定的一个常数; ω 为角频率,是变量。

由于 s 中除虚部角频率 ω 外还有实部 σ ,故 s 又称为复频率。 s 可用复平面上的点表示,该复数平面称为 s 平面(实轴为 σ ,虚轴为 $j\omega$)。 $f(t)$ 代表时域信号,称为 $F(s)$ 的原函数; $F(s)$ 称为 $f(t)$ 的象函数,并代表 $f(t)$ 的复频域特性。

式(1.6-1)称为单边拉普拉斯正变换,简称为拉氏变换。为计及 $t=0$ 时 $f(t)$ 中可能存在冲激函数 $\delta(t)$ 及其导数,所以积分下限取 $t=0^-$ 。若积分下限取 $t=-\infty$,则该变换称为双边拉氏变换。

式(1.6-1)可简写成

$$F(s) = \mathcal{L}[f(t)]$$

拉氏反变换的定义为

$$f(t) = \frac{1}{2\pi j} \int_{\sigma-j\infty}^{\sigma+j\infty} F(s)e^{st} ds$$

上式变换可简写成

$$f(t) = \mathcal{L}^{-1}[F(s)]$$

拉氏变换与拉氏反变换构成拉氏变换对,可表示为

$$f(t) \longleftrightarrow F(s)$$

1.1.1 拉氏变换的收敛条件

原函数 $f(t)$ 对应的象函数 $F(s)$ 的收敛条件为

$$\int_0^{\infty} |f(t)e^{-\sigma t}| dt < \infty$$

式中, σ 是复频率 s 的实部。若 $f(t)$ 的上升速度不快于某个指数函数 $e^{a_0 t}$,即满足

$$|f(t)| \leq Me^{a_0 t}$$

或

$$\lim_{t \rightarrow \infty} f(t)e^{-\sigma t} = 0 \quad (\sigma > \sigma_0)$$

式中 M, σ_0 ——均为正实常数。

则原函数的拉氏变换存在。

σ_0 与函数性质有关,只有当 $\sigma > \sigma_0$ 时才能使 $f(t)$ 绝对可积,故 $\sigma > \sigma_0$ 是函数 $f(t)$ 的收敛条件。图1.6-1中 $\sigma = \sigma_0$ 的垂线称为收敛边界或收敛轴, $\sigma > \sigma_0$ 的区域,称为收敛域。例如,对指数 $f(t) = e^{at}$ 而言

$$\lim_{t \rightarrow \infty} [e^{at} \cdot e^{-\sigma t}] = \lim_{t \rightarrow \infty} [e^{(a-\sigma)t}] = 0$$

故收敛区为 $\sigma > a$ 。

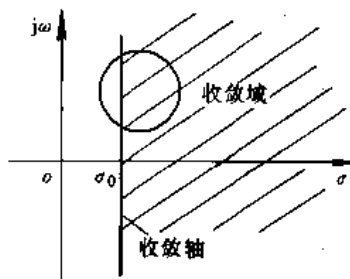


图1.6-1 拉氏变换的收敛域

1.1.2 一些常用函数的拉氏变换对

一些常用函数的变换对列于表1.6-1中。

表1.6-1 一些常用函数的拉普拉斯变换对

| 对 序号 | $f(t) \quad (t > 0)$ | $F(s) = \mathcal{L}[f(t)]$ |
|---------|----------------------|----------------------------|
| 1 | $\delta(t)$ | 1 |
| 2 | $\delta^n(t)$ | s^n |
| 3 | $U_{-1}(t)$ | $1/s$ |
| 4 | t | $1/s^2$ |

① 关于拉普拉斯变换较严格的数学叙述请参阅本手册第1卷第1篇第5章。



(续)

| 对 序号 | $f(t) (t>0)$ | $F(s)=\mathcal{L}[f(t)]$ |
|---------|------------------------------------|-------------------------------------------------|
| 5 | t^{n-1} | $(n-1)! / s^n$ |
| 6 | e^{-at} | $1/(s+a)$ |
| 7 | te^{-at} | $1/(s+a)^2$ |
| 8 | $t^{n-1}e^{-at}[1/(n-1)!]$ | $1/(s+a)^n$ |
| 9 | $(e^{-at}-e^{-bt})(1/b-a)$ | $1/(s+a)(s+b)$ |
| 10 | $\sin \omega t$ | $\omega/(s^2+\omega^2)$ |
| 11 | $\cos \omega t$ | $s/(s^2+\omega^2)$ |
| 12 | $e^{-at}\sin \omega t$ | $\omega/[(s+a)^2+\omega^2]$ |
| 13 | $e^{-at}\cos \omega t$ | $(s+a)/[(s+a)^2+\omega^2]$ |
| 14 | $\sin(\omega t+\theta)$ | $(s\sin\theta+\omega\cos\theta)/(s^2+\omega^2)$ |
| 15 | $\cos(\omega t+\theta)$ | $(s\cos\theta-\omega\sin\theta)/(s^2+\omega^2)$ |
| 16 | $\text{sh} \omega t$ | $\omega/(s^2-\omega^2)$ |
| 17 | $\text{ch} \omega t$ | $s/(s^2-\omega^2)$ |
| 18 | $t\sin \omega t$ | $2\omega s/(s^2+\omega^2)^2$ |
| 19 | $t\cos \omega t$ | $(s^2-\omega^2)/(s^2+\omega^2)^2$ |
| 20 | $\sin^2 \omega t$ | $2\omega^2/s[(s^2+4\omega^2)]$ |
| 21 | $\cos^2 \omega t$ | $(s^2+2\omega^2)/[s(s^2+4\omega^2)]$ |
| 22 | $\frac{1}{\omega t} \sin \omega t$ | $(1/\omega)\arctan \omega/s$ |

1.2 拉普拉斯反变换

1.2.1 部分分式法[亥维赛(Heaviside)展开定理]

在电路中,象函数 $F(s)$ 通常为两个 s 的多项式之比的有理函数,即

$$F(s) = \frac{Y_1(s)}{Y_2(s)} = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_1 s + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0} = H_0 \frac{(s-z_1)(s-z_2)\dots(s-z_m)}{(s-p_1)(s-p_2)\dots(s-p_n)} \quad (1.6-2)$$

式中 a_k, b_k —— 各项的系数,均为实常数;

m, n —— 均为正整数;

H_0 —— 系数,其值 $H_0 = b_m/a_n$;

p_1, p_2, \dots, p_n —— $Y_2(s)=0$ 时方程式的根,当 s 等于其中任一根时,有 $F(s)=\infty$,故称各 p 点为有理函数 $F(s)$ 的极点;

z_1, z_2, \dots, z_m —— $Y_1(s)=0$ 时方程式的根,当 s 等于其中任一根时,有 $F(s)=0$,故称各 z 点为 $F(s)$ 的零点。

若 $m < n$ (对于 $m \geq n$ 的情况,可用长除法将分子

中的高次项提出,以化成 $m < n$ 形式),根据极点情况,拉氏反变换可分为:

(1) $F(s)$ 中只有单极点 将式(1.6-2)展开成部分分式之和,即

$$F(s) = \frac{Y_1(s)}{Y_2(s)} = \frac{A_1}{s-p_1} + \frac{A_2}{s-p_2} + \dots + \frac{A_k}{s-p_k} + \dots + \frac{A_n}{s-p_n}$$

式中 $A_1, A_2, \dots, A_k, \dots, A_n$ —— 待定系数。

计算 A_k 的公式为

$$A_k = \left[(s-p_k) \frac{Y_1(s)}{Y_2(s)} \right]_{s=p_k} \quad (1.6-3)$$

或者用罗毕达(Hospital)法则来求取 A_k ,其计算公式为

$$A_k = \lim_{s \rightarrow p_k} \frac{Y_1(s)}{Y_2(s)} (s-p_k) = \left[\frac{Y_1(s)}{Y_2'(s)} \right]_{s=p_k} \quad (1.6-4)$$

系数 A_k 确定后,就可以逐项求取其拉氏反变换。由表 1.6-1 中第 6 项可得 $F(s)$ 的原函数为

$$f(t) = \mathcal{L}^{-1}[F(s)] = \sum_{k=1}^n A_k e^{p_k t}$$

当 $F(s)$ 的极点中出现共轭极点时,例如极点 p_k

与极点 p_{k-1} 共轭,即 $p_k = \bar{p}_{k-1}$,则其相应的系数 A_{k-1} 也与 A_k 共轭,即 $A_k = \bar{A}_{k-1}$ 。

(2) $F(s)$ 中有单极点,也有多重极点

设 $Y_2(s)=0$ 时有 α 个单根和在 $s=p_1$ 处有 γ 个重根,亦即有 α 个单极点和 γ 阶极点 p_1 。在展开式中所有单根项的系数仍可用式(1.6-3)或(1.6-4)求取,而重根项部分分式系数的一般算式为

$$A_{1(\gamma-k)} = \frac{1}{k!} \left[\frac{d^k}{ds^k} (s-p_1)^\gamma F(s) \right]_{s=p_1} \quad (1.6-5)$$

式中 k —— 正整数,即 $k=0, 1, 2, \dots, (\gamma-1)$ 。注意, $0! = 1, d^0/ds^0 = 1$ 。

1.2.2 用留数定理求拉普拉斯反变换

若 $t \geq 0$ 时 $f(t)$ 象函数 $F(s)$ 的所有极点 p_1, p_2, \dots, p_n 满足 $Re(p_i) < \sigma (i=1, 2, \dots, n)$, 且当 $s \rightarrow \infty$ 时 $F(s) \rightarrow 0$, 则根据复变函数理论中的留数定理[⊖], 其原函数为

$$f(t) = \frac{1}{2\pi j} \int_{\sigma-j\infty}^{\sigma+j\infty} F(s) e^{st} ds = \sum_{i=1}^n \text{Res}[F(s)e^{st}]_{s=p_i}$$

⊖ 参阅 M. A 拉甫捷夫等著, 施祥林译《复变函数论方法》下册, 人民教育出版社, 1962



式中 $\text{Res}[F(s)e^{st}]$ ——被积函数 $F(s)e^{st}$ 在极点 p_i ($i=1, 2, \dots, n$) 处的留数。

若 p_i 是 $F(s)$ 的一阶极点, 则其留数为

$$\text{Res}[F(s)e^{st}] = [(s - p_i)F(s)e^{st}]_{s=p_i} \quad (1.6-6)$$

若 p_i 是 $F(s)$ 的 γ 阶极点, 则其留数为

$$\text{Res}[F(s)e^{st}] = \frac{1}{(\gamma - 1)!} \left[\frac{d^{\gamma-1}}{ds^{\gamma-1}} (s - p_i)^\gamma F(s)e^{st} \right]_{s=p_i} \quad (1.6-7)$$

1.2.3 计算实例

(1) $F(s)$ 中只有单极点的计算实例
求

$$F(s) = \frac{4s^3 + 4s^2 - 7s + 1}{2s^3 + 2s^2 - 4s} \text{ 的原函数}$$

解 首先, 将 $F(s)$ 化为真分式

$$\begin{aligned} F(s) &= 2 + \frac{s+1}{2s^3 + 2s^2 - 4s} \\ &= 2 + \frac{s+1}{2s(s-1)(s+2)} \\ &= 2 + \frac{A_1}{s} + \frac{A_2}{s-1} + \frac{A_3}{s+2} \end{aligned} \quad (1.6-8)$$

下面用两种方法确定系数 A_1 、 A_2 和 A_3

1) 用式(1.6-3)确定系数:

$$\begin{aligned} A_1 &= s \frac{(s+1)/2}{s(s-1)(s+2)} \Big|_{s=0} = -\frac{1}{4} \\ A_2 &= (s-1) \frac{(s+1)/2}{s(s-1)(s+2)} \Big|_{s=1} = \frac{1}{3} \\ A_3 &= (s+2) \frac{(s+1)/2}{s(s-1)(s+2)} \Big|_{s=-2} = -\frac{1}{12} \end{aligned}$$

2) 用式(1.6-4)确定系数:

$$\begin{aligned} A_1 &= \frac{4s^3 + 4s^2 - 7s + 1}{(2s^3 + 2s^2 - 4s)'} \Big|_{s=0} = -\frac{1}{4} \\ A_2 &= \frac{4s^3 + 4s^2 - 7s + 1}{(2s^3 + 2s^2 - 4s)'} \Big|_{s=1} = \frac{1}{3} \\ A_3 &= \frac{4s^3 + 4s^2 - 7s + 1}{(2s^3 + 2s^2 - 4s)'} \Big|_{s=-2} = -\frac{1}{12} \end{aligned}$$

用 1)、2) 两种方法确定的系数自然都相同。将系数代入式(1.6-8)后, 得

$$F(s) = 2 - \frac{1}{4} \times \frac{1}{s} + \frac{1}{3} \times \frac{1}{s-1} - \frac{1}{12} \times \frac{1}{s+2}$$

由表 1.6-1 中第 1 项和第 6 项得到其原函数为

$$f(t) = 2\delta(t) - \frac{1}{4} + \frac{1}{3}e^t - \frac{1}{12}e^{-2t} \quad t \geq 0$$

(2) 有共轭复数极点的计算实例
求

$$F(s) = \frac{2}{s^2 + 2s + 5} \text{ 的原函数}$$

解 $F(s)$ 的极点为

$$p_{1,2} = \frac{-2 \pm \sqrt{2^2 - 20}}{2} = -1 \pm j2$$

即 $p_1 = -1 + j2$ 和 $p_2 = -1 - j2 = \dot{p}_1$, 这样有

$$\begin{aligned} F(s) &= \frac{2}{[s - (-1 + j2)][s - (-1 - j2)]} \\ &= \frac{A_1}{s - (-1 + j2)} + \frac{A_2}{s - (-1 - j2)} \end{aligned} \quad (1.6-9)$$

仍用公式(1.6-3)确定系数:

$$\begin{aligned} A_1 &= [s - (-1 + j2)] \\ &\times \left\{ \frac{2}{[s - (-1 + j2)][s - (-1 - j2)]} \right\}_{s=-1+j2} \\ &= -j \frac{1}{2} \\ A_2 &= [s - (-1 - j2)] \\ &\times \left\{ \frac{2}{[s - (-1 + j2)][s - (-1 - j2)]} \right\}_{s=-1-j2} \\ &= j \frac{1}{2} = \dot{A}_1 \end{aligned}$$

将 A_1 和 A_2 代入式(1.6-9), 得

$$F(s) = \frac{-j1/2}{s - (-1 + j2)} + \frac{j1/2}{s - (-1 - j2)}$$

由表 1.6-1 中第 6 项得其原函数为

$$\begin{aligned} f(t) &= \mathcal{L}^{-1}[F(s)] = -j \frac{1}{2} e^{(-1+j2)t} + j \frac{1}{2} e^{(-1-j2)t} \\ &= e^{-t} \sin 2t \quad t \geq 0 \end{aligned}$$

(3) $F(s)$ 中有单极点和多重极点的计算实例
求

$$F(s) = \frac{3s^2 + 11s + 11}{(s+2)(s+1)^2} \text{ 的原函数}$$

解 1) 用部分分式展开法求原函数

$$F(s) = \frac{A_1}{s+2} + \frac{A_{22}}{(s+1)^2} + \frac{A_{21}}{s+1} \quad (1.6-10)$$

单极点的系数为

$$A_1 = (s+2) \frac{3s^2 + 11s + 11}{(s+2)(s+1)^2} \Big|_{s=-2} = 1$$

重极点系数可用式(1.6-5)计算

$$A_{22} = (s+1)^2 \frac{3s^2 + 11s + 11}{(s+2)(s+1)^2} = 3$$

$$A_{21} = \left\{ \frac{d}{ds} \left[(s+1)^2 \frac{3s^2 + 11s + 11}{(s+2)(s+1)^2} \right] \right\}_{s=-1} = 2$$

将 A_1 、 A_{22} 和 A_{21} 代入式(1.6-10), 得

$$F(s) = \frac{1}{s+2} + \frac{3}{(s+1)^2} + \frac{2}{s+1}$$

由表 1.6-1 中第 6、8 项得其原函数为

$$f(t) = \mathcal{L}^{-1}[F(s)] = e^{-2t} + 3te^{-t} + 2e^{-t} \quad t \geq 0$$

2) 用留数定理求原函数



$F(s)$ 有一个单实数极点 $p_1 = -2$ 及一个二阶极点 $p_2 = -1$,按式(1.6-6)和式(1.6-7)得各极点上的留数为

$$\text{Res}_{s=-2}[F(s)e^{st}] = \left[(s+2) \frac{3s^2+11s+11}{(s+2)(s+1)^2} e^{st} \right]_{s=-2} = e^{-2t}$$

$$\text{Res}_{s=-1}[F(s)e^{st}] = \frac{1}{(2-1)!}$$

$$\times \left[\frac{d}{ds} (s+1)^2 \frac{3s^2+11s+11}{(s+2)(s+1)^2} e^{st} \right]_{s=-1}$$

$$= 3te^{-t} + 2e^{-t}$$

这样,由式(1.6-10)得其原函数为

$$f(t) = e^{-2t} + 3te^{-t} + 2e^{-t} \quad t \geq 0$$

所得结果与解法1)相同。

1.3 拉普拉斯变换的基本性质

表1.6-2列出了拉氏变换的一些基本性质。

表 1.6-2 拉普拉斯变换的基本性质

| 序号 | 性质 | 时域 $f(t), t \geq 0$ | 复频域 $F(s), \sigma > \sigma_0$ |
|----|-------|------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| 1 | 唯一性 | $f(t)$ | $F(s)$ |
| 2 | 线性 | $a_1 f_1(t) + a_2 f_2(t)$ | $a_1 F_1(s) + a_2 F_2(s)$ |
| 3 | 尺度变换 | $f(at) \quad a > 0$ | $F\left(\frac{s}{a}\right)$ |
| 4 | 时间平移 | $f(t-t_0) \varepsilon(t-t_0)$ | $F(s)e^{-st_0}$ |
| 5 | 频率平移 | $f(t)e^{-t_0 t}$ | $F(s-s_0)$ |
| 6 | 时域微分 | $\frac{df(t)}{dt}$ | $sF(s) - f(0^-)$ |
| 7 | 时域积分 | $\int_{-\infty}^t f(\tau) d\tau$ | $\frac{F(s)}{s} + \frac{\int_{-\infty}^0 f(\tau) d\tau}{s}$ |
| 8 | 复频域微分 | $tf(t)$ | $-\frac{dF(s)}{ds}$ |
| 9 | 复频域积分 | $\frac{f(t)}{t}$ | $\int_0^{\infty} F(s) ds$ |
| 10 | 参变量微分 | $\frac{\partial f(t,a)}{\partial a}$ | $\frac{\partial F(s,a)}{\partial a}$ |
| 11 | 参变量积分 | $\int_{a_1}^{a_2} f(t,a) da$ | $\int_{a_1}^{a_2} F(s,a) da$ |
| 12 | 时域卷积 | $f_1(t) * f_2(t)$ | $F_1(s)F_2(s)$ |
| 13 | 复频域卷积 | $f_1(t)f_2(t)$ | $\frac{1}{2\pi j} F_1(s) * F_2(s)$ |
| 14 | 初值 | $f(0^+) = \lim_{t \rightarrow 0^+} f(t) = \lim_{s \rightarrow \infty} sF(s)$ | |
| 15 | 终值 | $f(\infty) = \lim_{t \rightarrow \infty} f(t) = \lim_{s \rightarrow 0} F(s)$ | |

2 电路基本定律的复频域形式

设时域电流 $i(t)$ 、电压 $u(t)$ 的象函数为 $I(s)$ 、 $U(s)$,则欧姆定律的复频域形式为

$$U(s) = RI(s)$$

或 $I(s) = GU(s)$

基尔霍夫的复频域形式则为

$$\sum I(s) = 0 \quad (\text{对节点或割集})$$

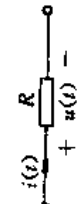

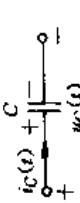
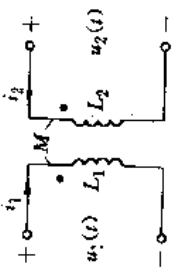
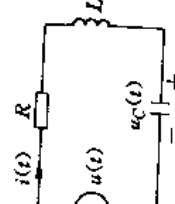
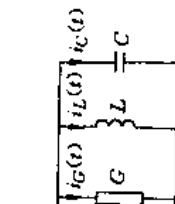

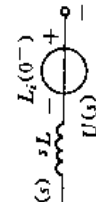
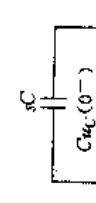
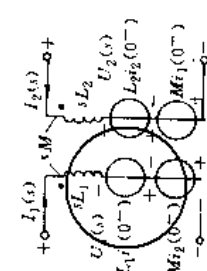
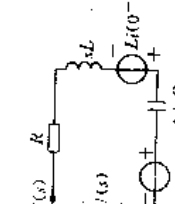
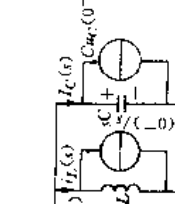
$$\sum U(s) = 0 \quad (\text{对网孔或回路})$$

3 元件和 RLC 电路的运算形式

表1.6-3列出了运算形式(亦称复频域形式)的元件和简单 RLC 电路。



表 1-6-3 元件和 RLC 电路的运算形式

| | | | | | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>时域形式及其伏安关系</p>  $u(t) = Ri(t)$ $i(t) = Gu(t)$ |  $L \frac{di_L(t)}{dt}$ $i_L(t) = i_L(0^-) + \frac{1}{L} \int_0^t u_L(t) dt$ |  $u_C(t) = u_C(0^-) + \frac{1}{C} \int_0^t i_C(t) dt$ $i(t) = C \frac{du_C(t)}{dt}$ |  $u_1(t) = L_1 \frac{di_1(t)}{dt} + M \frac{di_2(t)}{dt}$ $u_2(t) = L_2 \frac{di_2(t)}{dt} + M \frac{di_1(t)}{dt}$ |  $CL \frac{d^2 i_L(t)}{dt^2} + GL \frac{di_L(t)}{dt} + i_L(t) = i(t)$ |  $LC \frac{d^2 u_C(t)}{dt^2} + RC \frac{du_C(t)}{dt} + u_C(t) = u(t)$ |
| <p>复频域形式及其伏安关系</p>  $U(s) = RI(s)$ $I(s) = CU(s)$ |  $U(s) = sLI(s) - Li_L(0^-)$  $I(s) = sCU_C(s) - Cu_C(0^-)$ |  $U_1(s) = sL_1 I_1(s) - Li_{11}(0^-) + sMI_2(s) - MI_2(0^-)$ $U_2(s) = sL_2 I_2(s) - Li_{22}(0^-) + sMI_1(s) - MI_1(0^-)$ |  $\left(R + sL + \frac{1}{sC} \right) I(s) = U(s) + Li_L(0^-) - \frac{u_C(0^-)}{s}$ |  $\left(C + \frac{1}{sL} \right) U(s) = I(s) + \left[Cu_C(0^-) - \frac{i_L(0^-)}{s} \right]$ | |

图中: 附加电流源 $-\frac{i_L(0^-)}{s}$, $Cu_C(0^-)$; 初始电流 $-i_L(0^-)$, $i_L(0^-)$; 初始电压 $u_C(0^-)$; 附加电压源 $-Li_L(0^-)$, $\frac{u_C(0^-)}{s}$, $L_{11}i_1(0^-)$, $L_{22}i_2(0^-)$, $Mi_1(0^-)$, $Mi_2(0^-)$; 运算感抗 $-sL$; 运算互感抗 $-sM$; 运算容纳 $\frac{1}{sL}$; 运算感纳 $\frac{1}{sC}$; 运算容纳 $\frac{1}{sC}$; 运算阻抗 $-Z(s) = R + sL + \frac{1}{sC}$ 运算导纳 $-Y(s) = G + sC + \frac{1}{sL}$ 式中, G 为电导, $C = \frac{1}{R}$

说明

4 线性电路暂态过程的复频域分析

4.1 分析步骤

应用拉氏变换来分析线性电路的暂态过程,实质上是通过拉氏变换将时域中的微分方程转换为复频域(亦称 s 域)中的代数方程,经过代数运算后即可求得响应的复频域解,再经过反变换,则可得到响应的时域解,这种方法称为复频域分析法或 s 域分析法,也称运算法。复频域分析法的主要步骤是:

(1) 在 $t=0^-$ 等值电路中确定 $i_L(0^-)$ 和 $u_C(0^-)$ 值,从而确定反映电路中初始条件时的附加电源;

(2) 在换路后的电路中,将激励函数 $f(t)$ 变换为象函数 $F(s)$;

(3) 将 $t>0^-$ 时域电路中每个元件变换成相应的复频域形式(参见表1-6-3),从而建立换路后的复频域等效电路;

(4) 仿照正弦稳态分析的相量法,经过代数运算,求出响应的象函数;

(5) 对响应的象函数进行拉氏反变换,求出响应的原函数 $f(t)$,也即响应的时域解。

4.2 计算实例

在图1-6-2a所示电路中, $U_{s1}=10\text{V}$, $u_{s2}=5U_{-1}(t)$ V, $L=1/18\text{H}$, $C=1/2\text{F}$, $R=0.1\Omega$,试求 $t\geq 0$ 时的响应 $u_C(t)$ 。

解 (1) 确定 $i_L(0_-)$ 和 $u_C(0_-)$

根据题意, $t<0$ 时,直流电压源 U_{s1} 早已作用于电路, $t\geq 0$ 后再添加时变电压源 $u_{s2}(t)$ 的作用。 $t=0^-$ 时的等效电路如图1-6-2b所示。

图中,

$$i_L(0^-) = \frac{U_{s1}}{R} = \frac{10}{0.1} = 100(\text{A})$$

$$u_C(0^-) = U_{s1} = 10(\text{V})$$

(2) 在 $t\geq 0$ 后的电路中确定激励的象函数 $U_{s1}(s)$ 与 $U_{s2}(s)$

$$U_{s1}(s) = \frac{10}{s} \quad \text{与} \quad U_{s2}(s) = \frac{5}{s}$$

(3) 画出 $t\geq 0$ 后的复频域电路

在时域电路中各元件用各自的运算形式电路置换,便得到复频域等效电路,如图1-6-2c所示。

(4) 确定待求的响应象函数 $U_C(s)$

列出图C中节点A的电压方程

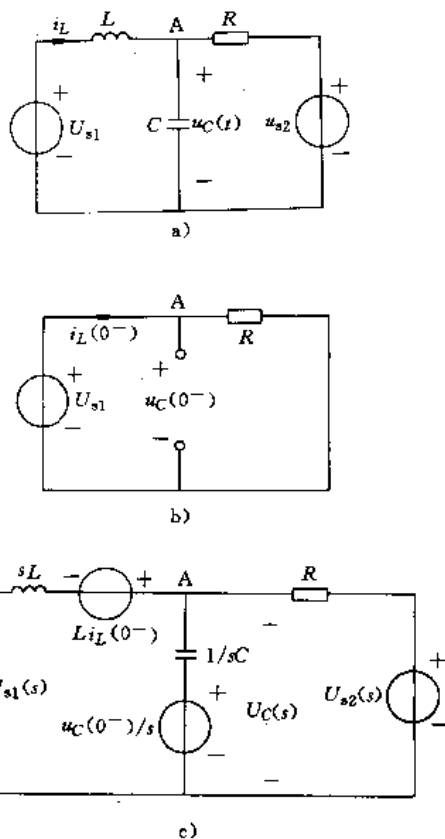


图1-6-2 计算实例图

a) 实例电路 b) $t=0^-$ 时的等效电路

c) 复频域等效电路

$$U_A(s) = \left[\frac{U_{s1}(s) + Li_L(0^-)}{sL} + Cu_C(0^-) + \frac{U_{s2}(s)}{R} \right] \times \frac{1}{\frac{1}{sL} + \frac{1}{C} + \frac{1}{R}}$$

代入数据后化简,并将其展开成部分分式,则有

$$U_C(s) = \frac{10s^2 + 300s + 360}{s(s^2 + 20s + 36)} = \frac{25}{s} + \frac{25}{s+2} + \frac{4}{s+18}$$

(5) 确定时域响应 $u_C(t)$

$$u_C(t) = \mathcal{L}^{-1}[U_C(s)] = 10 + \frac{25}{4}(e^{-2t} - e^{-18t}) \quad (\text{V}) \quad t \geq 0$$

5 网络函数

复频域中网络函数 $H(s)$ 描述了激励与响应之间的关系,它与冲激响应 $h(t)$ 构成了拉氏变换对,从而沟通了时域分析和复频域分析。利用 $H(s)$ 的零点和极点在 S 平面上分布情况以及激励变化情况可预见响应



的时域特性、稳定性和频率特性。

5.1 网络函数的定义

在仅有单一激励源的线性定常零状态网络中,激励 $e(t)$ 的象函数 $E(s)$ 与响应 $r(t)$ 的象函数 $R(s)$ 之比,称为网络函数,即

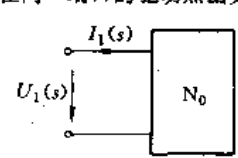
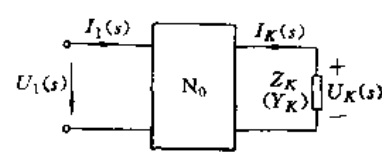
$$H(s) = \frac{R(s)}{E(s)} \quad (1.6-11)$$

网络函数也称为系统函数。它仅与网络结构、元件参数有关,而与激励函数的类型无关。

5.2 网络函数的类型

在式(1.6-11)中,如将变量 s 换成 $j\omega$,便可得到频域中的网络函数。根据激励与响应的位置不同,即可得到如表 1.6-4 所示的 6 种类型复频域网络函数。 $s = \sigma + j\omega$, $H(j\omega)$ 显然包含在 $H(s)$ 之中。

表 1.6-4 六种类型网络函数

| 函数位置 | 激励 | 响应 | 网络函数名称及表达式 |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|-------------|---------------------------------------------|
| 在同一端口的驱动点函数  | 电流 $I_1(s)$ | 电压 $U_1(s)$ | 驱动点阻抗函数 $Z_{11}(s) = \frac{U_1(s)}{I_1(s)}$ |
| | 电压 $U_1(s)$ | 电流 $I_1(s)$ | 驱动点导纳函数 $Y_{11}(s) = \frac{I_1(s)}{U_1(s)}$ |
| 不在同一端口 (转移函数或称传递函数)  | 电流 $I_1(s)$ | 电压 $U_K(s)$ | 转移阻抗函数 $Z_{K1}(s) = \frac{U_K(s)}{I_1(s)}$ |
| | 电压 $U_1(s)$ | 电流 $I_K(s)$ | 转移导纳函数 $Y_{K1}(s) = \frac{I_K(s)}{U_1(s)}$ |
| | 电压 $U_1(s)$ | 电压 $U_K(s)$ | 电压转移函数 $H_{K1}(s) = \frac{U_K(s)}{U_1(s)}$ |
| | 电流 $I_1(s)$ | 电流 $I_K(s)$ | 电流转移函数 $H_{K1}(s) = \frac{I_K(s)}{I_1(s)}$ |

注:图中 N_0 表示线性定常、无独立源的零状态网络。

5.3 网络函数与单位冲激响应的关系

在零状态的线性网络中,若以单位冲激函数 $f(t) = \delta(t)$ 为激励,则网络的响应为单位冲激响应,用 $h(t)$ 表示,由表 1.6-1 第 1 项得知象函数 $E(s) = \mathcal{L}[\delta(t)] = 1$,故由式(1.6-11)得

$$H(s) = \frac{R(s)}{E(s)} = \frac{\mathcal{L}[h(t)]}{\mathcal{L}[\delta(t)]} = \mathcal{L}[h(t)] \quad (1.6-12a)$$

或 $h(t) = \mathcal{L}^{-1}[H(s)]$ (1.6-12b)
上式表明,复频域中的网络函数等于单位冲激响应的象函数,或者说,网络函数的原函数即为网络的单位冲激响应。

5.4 网络函数与任意波形激励下的零状态响应

由式(1.6-11)得任意波形激励下的零状态响应的象函数为

$$R(s) = H(s)E(s) \quad (1.6-13a)$$

其原函数为

$$r(t) = \mathcal{L}^{-1}[R(s)]$$

$$= \mathcal{L}^{-1}[H(s)E(s)] \quad (1.6-13b)$$

【例 1.6-1】在图 1.6-3a 所示电路中, $R=1\Omega$, $C=0.1F$,若激励 $e(t)$ 分别为 $\delta(t)$ 、 $U_{-1}(t)$ 和 $e^{-2t}U_{-1}(t)$,试通过网络函数分别求零状态响应 $u_2(t)$ 。

解 图 1.6-3a 的复频域电路如图 1.6-3b 所示。首先,求

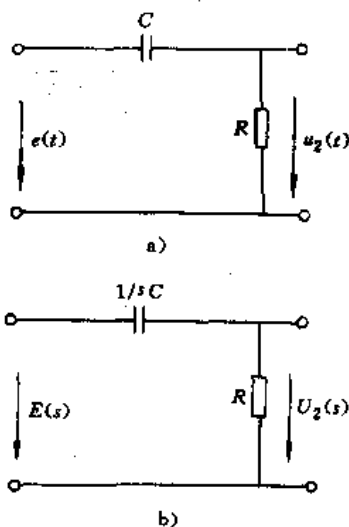


图 1.6-3 例题 1.6-1 的电路
a) 时域电路 b) 等效复频域电路

此星公司制作 请尊重著作权



电压传递型的网络函数

$$H(s) = \frac{U_2(s)}{E(s)} = \frac{s}{s + \frac{1}{RC}} = \frac{s}{s + 10}$$

(1) 若激励 $e(t) = \delta(t)$, 则由式(1.6-12b)得冲激响应

$$u_2(t) = h(t) = \mathcal{L}^{-1} \left[\frac{s}{s + 10} \right] = \mathcal{L}^{-1} \left[1 + \frac{-10}{s + 10} \right]$$

由表 1.6-1 中 1 和 6 项得

$$\begin{aligned} u_2(t) &= h(t) \\ &= \delta(t) - 10e^{-10t}U_{-1}(t) \end{aligned}$$

(2) 若激励 $e(t) = U_{-1}(t)$, 则

$$E(s) = \mathcal{L}[e(t)] = \frac{1}{s}$$

由表 1.6-1 第 6 项得单位阶跃响应

$$u_2(t) = \mathcal{L}^{-1} \left[\frac{1}{s + 10} \cdot \frac{1}{s} \right] = e^{-10t}U_{-1}(t)$$

(3) 若激励 $e(t) = e^{-2t}U_{-1}(t)$, 则它的象函数为

$$E(s) = \mathcal{L}[e^{-2t}U_{-1}(t)] = \frac{1}{s + 2}$$

由式(1.6-13b)得其零状态响应

$$\begin{aligned} u_2(t) &= \mathcal{L}^{-1}[H(s)E(s)] = \mathcal{L}^{-1} \left[\frac{s}{s + 10} \times \frac{1}{s + 2} \right] \\ &= \mathcal{L}^{-1} \left[\frac{5/4}{s + 10} + \frac{-1/4}{s + 2} \right] \\ &= \left[\frac{5}{4}e^{-10t} - \frac{1}{4}e^{-2t} \right] U_{-1}(t) \end{aligned}$$

5.5 网络函数的零点与极点

5.5.1 零点与极点的定义

式(1.6-2)可写成网络函数连乘形式

$$H(s) = H_0 \frac{\prod_{j=1}^m (s - z_j)}{\prod_{i=1}^n (s - p_i)} \quad (1.6-14)$$

式中 H_0 ——实系数, 称为标量因子。

z_1, z_2, \dots, z_m ——网络函数 $H(s)$ 的零点;

p_1, p_2, \dots, p_n ——网络函数 $H(s)$ 的极点。

若式(1.6-14)分子或分母中出现 $(s - z_k)^q$ 或 $(s - p_k)^r$ 因式时, 则称 z_k 为 q 阶零点, p_k 为 r 阶极点; 当 $q = 1$ 或 $r = 1$ 时, 则 $H(s)$ 有单阶零点或极点。

5.5.2 S 平面上零点和极点分布与单位冲激响应的关系

由于网络函数 $H(s)$ 与单位冲激响应是一对拉氏变换, 因此, 如果已知 $H(s)$ 零点和极点在 S 平面上分布情况, 便可决定该网络单位冲激响应 $h(t)$ 的波形特性。上述两者的相互关系可归纳为如下几种情况:

(1) 极点在 S 平面的原点时, $h(t)$ 为阶跃函数; 极点在负实轴上时, $h(t)$ 为指数衰减函数; 极点在正实轴上时, $h(t)$ 为指数增长函数。

(2) 极点是一对共轭虚数时, $h(t)$ 是等幅正弦函数; 极点是一对共轭复数, 实部为负时, $h(t)$ 是衰减振荡函数, 实部为正时, 则 $h(t)$ 为增幅振荡函数;

(3) $H(s)$ 有多重极点时, 对应的 $h(t)$ 是 t 与其它函数相乘积的形式, t 的幂次由极点阶次决定;

(4) 若 $H(s)$ 零点位置改变, 则只影响 $h(t)$ 的幅度和相位, 而不影响 $h(t)$ 的变化规律。

在表 1.6-5 中列出了几种常见网络函数零点、极点分布与相应单位冲激响应的波形。

5.5.3 应用零点和极点分布分析时域特性的实例

设图 1.6-4a 电路为零状态, 激励源为单位阶跃电压 $U_{-1}(t)$, 响应为电流 $i(t)$, 试用网络函数 $H(s) =$

表 1.6-5 几种常见网络函数零点、极点分布与相应单位冲激响应的波形

| 序号 | 网络函数 $H(s)$ | S 平面上的零极点 | $h(t)$ | $h(t) (t \geq 0)$ 函数式 |
|----|-----------------|-----------|--------|-----------------------|
| 1 | $\frac{1}{s}$ | | | $U_{-1}(t)$ 单位阶跃函数 |
| 2 | $\frac{1}{s+a}$ | | | e^{-at} 负指数函数 |



(续)

| 序号 | 网络函数 $H(s)$ | S 平面上的零极点 | $h(t)$ | $h(t) (t \geq 0)$ 函数式 |
|----|-----------------------------------------|-----------|--------|-------------------------------------|
| 3 | $\frac{1}{s-a}$ | | | e^{at} 正指数函数 |
| 4 | $\frac{\omega_1}{s + \omega_1}$ | | | $\sin \omega_1 t$ 等幅正弦函数 |
| 5 | $\frac{\omega_1}{(s+a)^2 + \omega_1^2}$ | | | $e^{-at} \sin \omega_1 t$ 衰减正弦函数 |
| 6 | $\frac{\omega_1}{(s-a)^2 + \omega_1^2}$ | | | $e^{at} \sin \omega_1 t$ 增幅正弦函数 |
| 7 | $\frac{1}{s^2}$ | | | t 斜坡函数 |
| 8 | $\frac{1}{(s+a)^2}$ | | | te^{-at} |



(续)

| 序号 | 网络函数 $H(s)$ | S平面上的零极点 | $A(t)$ | $A(t)(t \geq 0)$ 函数式 |
|----|----------------------------------------|----------|--------|---------------------------|
| 9 | $\frac{2\omega_1}{(s^2 + \omega^2)^2}$ | | | $t \sin \omega_1 t$ |
| 10 | $\frac{s+a}{(s+a)^2 + \omega^2}$ | | | $e^{-at} \cos \omega_1 t$ |
| 11 | $\frac{s-a}{(s-a)^2 + \omega^2}$ | | | $e^{at} \cos \omega_1 t$ |

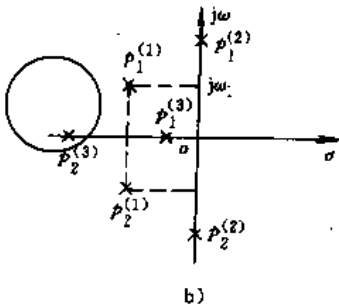
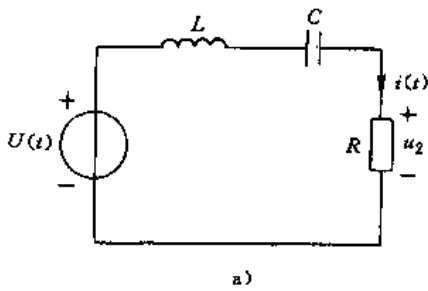


图 1-6-4 阶跃函数激励的 RLC 电路及其零、极点图

a) RLC 串联电路 b) 网络函数的零、极点图

注:图中 o—零点; x—极点。

$I(s)/U(s)$ 的极点分布分析 $i(t)$ 变化规律。

解 在图 1-6-4a 电路中联系响应与激励的网络函数 $H(s)$,即为 RLC 串联电路的输入导纳

$$H(s) = Y(s) = \frac{1}{sL + R + \frac{1}{sC}} = \frac{1}{L} \left[\frac{s}{s^2 + \frac{R}{L}s + \frac{1}{LC}} \right]$$

$$= \frac{1}{L} \frac{s}{(s-p_1)(s-p_2)}$$

$H(s)$ 有两个极点,即

$$p_{1,2} = -\frac{R}{2L} \pm \sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC}}$$

响应电流的象函数

$$I(s) = H(s)E(s)$$

$$= \frac{1}{L} \frac{1}{(s-p_1)(s-p_2)}$$

可见 $I(s)$ 与 $H(s)$ 有同样的极点。

下面分三种情况进行讨论:

(1) $R < 2\sqrt{\frac{L}{C}}$

这时 $p_{1,2} = -\delta \pm j\omega_0$



式中, $\delta = \frac{R}{2L}$ $\omega_n = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}$ $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$

$H(s)$ 是一对共轭极点, 位于 S 平面的左平面, 如图 1-6-4b 中 $p_1^{(1)}$ 和 $p_2^{(1)}$ 所示。由表 1-6-5 中第 5 项可知 $i(t)$ 是包络线为指数 $e^{-\delta t}$ 的正弦函数, 即暂态过程呈现衰减正弦振荡, 其振荡角频率为 ω_n 。

(2) $R=0$, 则 $\delta=0, \omega_n=\omega_0$, 故

$$p_{1,2}^{(2)} = \pm j\omega_0$$

即 $j\omega$ 轴上有两个极点, 如图 1-6-4b 中 $p_1^{(2)}$ 和 $p_2^{(2)}$ 所示。 $i(t)$ 是频率为 ω_0 的等幅正弦振荡 (表 1-6-5 中第 4 项)。

(3) $R > 2\sqrt{\frac{L}{C}}$, 即 $\delta > \omega_0$ 时, 有

$$p_{1,2}^{(3)} = -\frac{R}{2L} \pm \sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC}}$$

$H(s)$ 有位于负实轴上的两个极点, 如图 1-6-4b 中 $p_1^{(3)}$ 和 $p_2^{(3)}$ 所示。这时 $i(t)$ 为两个衰减不同的指数函数之叠加 (表 1-6-5 中第 8 项)。

6 网络函数的频率特性

在正弦稳态网络中, 网络函数的模与幅角随信号频率变化的情况, 称为网络函数的频率特性。

6.1 网络函数的图解表示

已知网络函数为

$$H(s) = H_0 \frac{\prod_{j=1}^m (s - z_j)}{\prod_{i=1}^n (s - p_i)}$$

$H(s)$ 的零极点 z_i 和 p_i 可能是实数、虚数或复数, 它们都可以在 s 平面上以矢量形式表示出来。 $H(s)$ 是在任意的 s 值下展开的。这样, 在某一指定的 s 值下, 网络函数分子和分母上的各个因子均可逐一画出, 运用矢量运算法则, $H(s)$ 便得以 (图解) 解出, 这是不同于直接求出反变换进行网络分析的另一种研究方法。较有实用意义的是使 $H(s)$ 在虚轴上展开, 也即令 $s = j\omega$ (矢量在虚轴上), 据此可以获得网络的正弦稳态响应及其频率特性。设使 $s = s_1 = j\omega_1$, 则 $(s - z_j) = N_j e^{j\phi_j}$, $(s - p_i) = (j\omega - p_i) = M_i e^{j\theta_i}$, 如图 1-6-5 所示。将式 (1-6-14) 中 s 换作 $j\omega$, 于是频域中的网络函数为

$$\begin{aligned} H(j\omega) &= H_0 \frac{\prod_{j=1}^m (j\omega - z_j)}{\prod_{i=1}^n (j\omega - p_i)} \\ &= H_0 \frac{\prod_{j=1}^m N_j}{\prod_{i=1}^n M_i} e^{j(\sum_{j=1}^m \phi_j - \sum_{i=1}^n \theta_i)} \\ &= |H(j\omega)| e^{j\varphi(\omega)} \end{aligned}$$

式中 $|H(j\omega)|$ —— 零点至 $j\omega$ 点的矢量幅值的积与极点至 $j\omega$ 点的矢量幅值的积之比;

$\varphi(\omega)$ —— 零点至 $j\omega$ 点的矢量辐角总和与极点至 $j\omega$ 点辐角总和之差。

通常称 $|H(j\omega)|$ 随 ω 变化的关系为幅频特性或幅频响应; 称 $\varphi(\omega)$ 随 ω 变化的关系为相频特性或相频响应。根据 $H(s)$ 零点和极点在 S 平面上的位置, 当 ω 从 $0 \rightarrow \infty$ 变化时, 运用作图法 (参见 6.2 节和 6.3 节) 定性地绘出 $|H(j\omega)|$ 和 $\varphi(\omega)$ 的曲线, 便可预见网络的频率特性。

6.2 一阶网络函数的频率特性

所谓一阶网络, 指的是网络中只含有一个独立的动态元件 (或经几个同类动态元件简化的一个等值动态元件), 其对应的数学模型为一阶微分方程。现以图 1-6-6a 的一阶 RC 串联电路为例, 借助于在 s 平面上作图的方法来定性分析其频率特性。设电路响应为 U_2 , 其网络函数为

$$H(s) = \frac{U_2(s)}{U_1(s)} = \frac{s}{s + \frac{1}{RC}}$$

零极点分布如图 1-6-6b 所示。当 $s = j\omega$ 时, 有

$$\begin{aligned} H(s)|_{s=j\omega} &= H(j\omega) = \frac{U_2}{U_1} \\ &= \frac{N e^{j\phi}}{M e^{j\theta}} = \frac{U_2}{U_1} e^{j(\phi - \theta)} \end{aligned}$$

式中

$$U_2/U_1 = N/M$$

$$\varphi(\omega) = \phi - \theta$$

在 $j\omega$ 轴上给出角频率 ω_1, ω_2 和 ω_3 , 自零点和极点指向相应频率处矢量的模分别为 N_1, N_2, N_3 和 M_1, M_2, M_3 , 其辐角分别为 $\phi_1 = \phi_2 = \phi_3 = 90^\circ$ 和 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$, 由此可定性绘出该电路 $(U_2/U_1) - \omega$ 的幅频响应曲线和

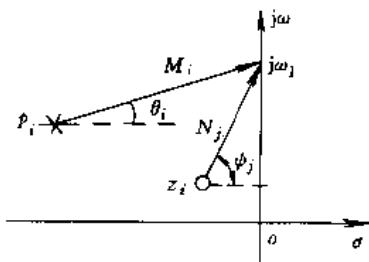


图 1-6-5 在 s 平面上因式 $(j\omega - z_i)$ 和 $(j\omega - p_i)$ 的矢量表示



$\varphi(\omega)$ - ω 相频响应曲线,如图 1·6-6c,d 所示。由图可见,这是一个高通滤波电路。

如果在图 1·6-6b 中取 $\omega = \omega_c = 1/RC$ 时,则 $N_c = 1/RC, M_c = \sqrt{2}/RC, \varphi_c = 45^\circ$, 这时 $\dot{U}_2/\dot{U}_1 = (1/$

$\sqrt{2})/45^\circ$,显然这是一个半功率点。 ω_c 被称为高通滤波电路的截止频率。

如果改取电容上电压为输出电压(图 1·6-7a),则以 $U_1(s)$ 为该电路响应的网络函数为

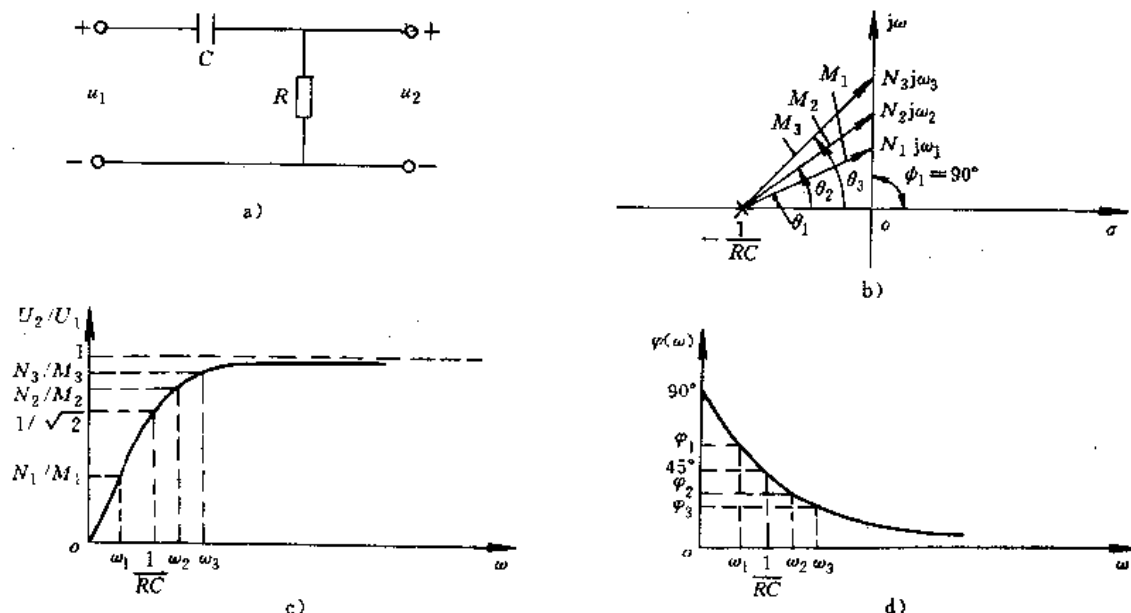


图 1·6-6 RC 高通电路及其频率特性
a) RC 串联电路 b) 零、极点分布图 c) 幅频响应曲线 d) 相频响应曲线

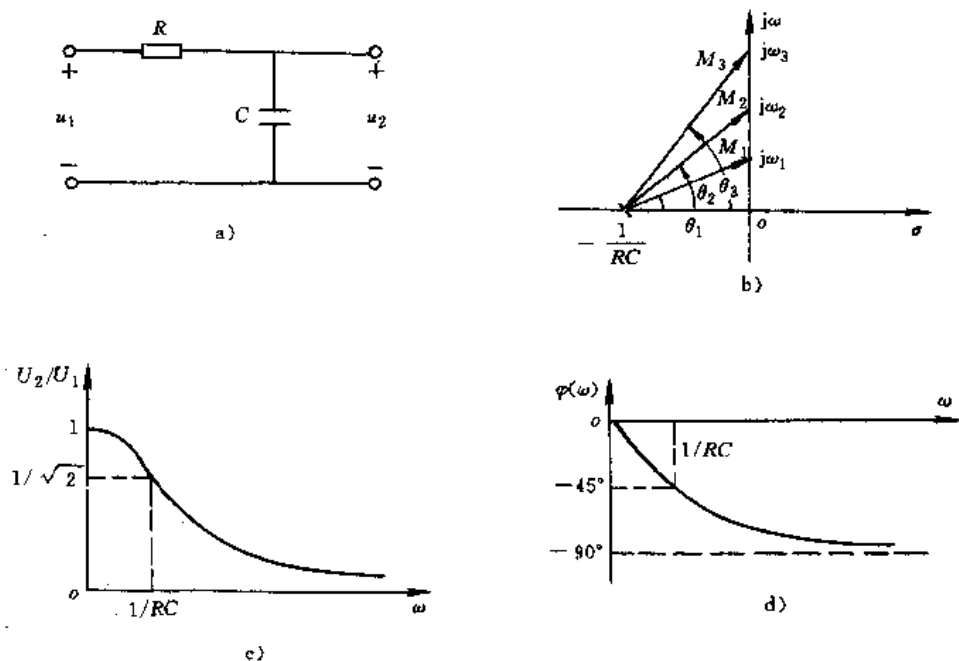


图 1·6-7 RC 低通电路及其频率特性
a) RC 串联电路 b) 极点分布 c) 幅频响应曲线 d) 相频响应曲线



$$H(s) = \frac{1/RC}{s+1/RC}$$

极点为 $p = -1/RC$, 无零点。仿照上述分析, 容易得到频率特性曲线如图 1-6-7 所示, 这是一个低通电路, 其截止频率在 $\omega = 1/RC$ 处。

6.3 二阶谐振网络的频率特性

二阶网络指含有两个同类或不同类动态元件的网络, 即含两个电感, 两个电容或一个电感与一个电容的电路, 其动态特性需要用二阶微分方程来描述。图 1-6-8 为 RLC 并联电路, 这是一个典型的二阶电路。当激励为 $I(s)$ 和响应为 $U_2(s)$ 时, 电路的网络函数为

$$\begin{aligned} H(s) &= \frac{U_2(s)}{I(s)} = \frac{1}{G+sC+\frac{1}{sL}} \\ &= \frac{1}{C} \frac{s}{s^2 + \frac{G}{C}s + \frac{1}{LC}} \end{aligned} \quad (1-6-15)$$

令

$$a = \frac{G}{2C} \quad \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad \omega_n = \sqrt{\omega_0^2 - a^2}$$

并设 $\omega_0 > a$, 将上述关系代入式 (1-6-15) 后, 该式成为

$$\begin{aligned} H(s) &= \frac{1}{C} \frac{s}{s^2 + 2as + \omega_0^2} \\ &= \frac{1}{C} \frac{s}{[s - (-a + j\omega_n)][s - (-a - j\omega_n)]} \end{aligned}$$

网络函数 $H(j\omega)$ 有一对共轭极点 $p_1 = -a + j\omega_n$ 及 $p_2 = -a - j\omega_n$ 和在 $\omega = 0$ 处的一个一阶零点, 其零、极点分布如图 1-6-9 所示。由该图可见, 极点至实轴与虚轴距离分别为 ω_n 与 a , 因而有关系 $\omega_0^2 = \omega_n^2 + a^2$, 这表明一对共轭极点落在以坐标原点为圆心, 以 ω_0 为半径的左半圆弧上。若取虚轴上任一点 ω_1 展开, 则极点、零点至 $j\omega_1$ 矢量的幅值为 M_1, M_2 和 N_1 , 辐角为 θ_1, θ_2 和 ψ_1 , 于是频域中的网络函数为

$$\begin{aligned} H(j\omega) &= \frac{1}{C} \frac{j\omega}{(j\omega - p_1)(j\omega - p_2)} = \frac{1}{C} \frac{N_1}{M_1 M_2} e^{j(\theta_1 - \theta_2 - \psi_1)} \\ &= |H(j\omega)| e^{j\varphi(\omega)} \end{aligned}$$

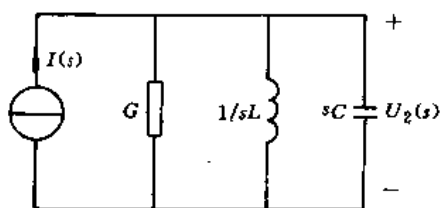


图 1-6-8 RLC 并联电路

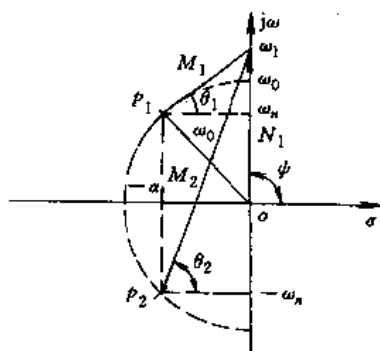


图 1-6-9 $H(s)$ 的零、极点分布

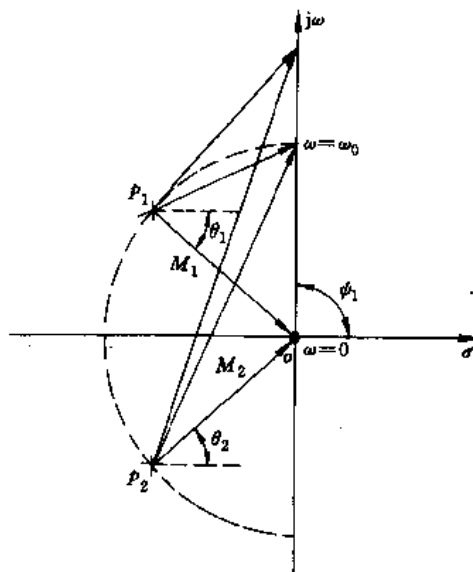


图 1-6-10 不同频率时矢量因子 $(j\omega - p_i)$ 变化图

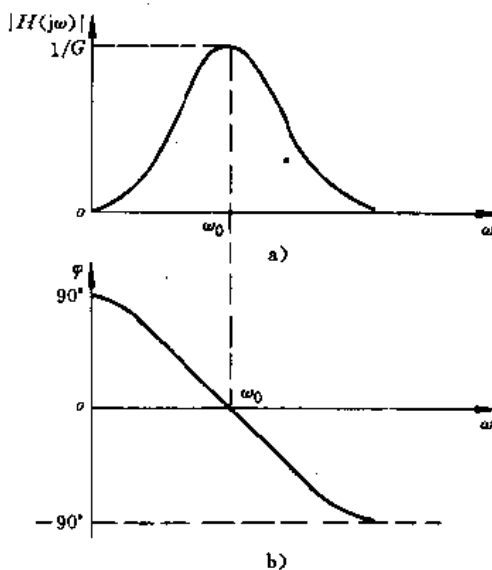


图 1-6-11 RLC 并联电路的频率特性
a) 幅频响应曲线 b) 相频响应曲线



当 ω 从 $0 \rightarrow \infty$ 时, 可借助图 1-6-9 来定性分析 $H(j\omega)$ 的频率特性。

(1) 当 $\omega=0$ 时, 有 $N_1=0, |H(0)|=0, \theta_1=-\theta_2, \psi_1=90, \varphi(0)=90^\circ$, 如图 1-6-10 中 $\omega=0$ 时所示情况。

(2) 当 ω 离原点沿 $j\omega$ 轴稍上移时, $|H_j(\omega)|$ 有较小值, 辐角 φ 从 90° 减小。

(3) 当 $\omega=\omega_0$ 时, 电路发生谐振。若 $\alpha \ll \omega_0$, 则 $M_1=\alpha, M_2 \approx 2N_1, |H(j\omega)|=N_1/CM, M_2 \approx 1/C2\alpha=1/G,$

$\varphi(\omega_0) \approx 0^\circ$, 如图 1-6-10 中 $\omega=\omega_0$ 所示情况。

(4) 当 $\omega \rightarrow \infty$ 时, M_1, M_2 和 N_1 都趋于 $\infty, |H(j\omega)| \rightarrow 0, \varphi(\omega) \rightarrow 90^\circ$ 。

根据以上分析, 可定性地绘出幅频响应曲线和相频响应曲线, 如图 1-6-11 所示。

用类似的分析方法, 可求得与之对偶的 RLC 串联电路的频率特性, 电路的幅频响应曲线和相频响应曲线参见图 1-5-6a、b。

第 7 章 磁 路

对电工设备进行分析和设计时, 都要涉及到磁路问题。铁磁材料的磁性能是非线性的, 由铁磁材料构成的磁路其计算方法与非线性电路计算方法相似。

1 铁磁材料的基本磁特性

与非磁性材料相比, 铁磁材料具有高导磁性、磁饱和性和磁滞性等特点。反映铁磁材料基本磁特性的是磁滞回线和基本磁化曲线。

1.1 磁滞回线

处于磁中性的铁磁材料, 以磁场强度 $\pm H_m$ 进行反复磁化, 便得到如图 1-7-1 所示的磁滞回线。图中 B_r, H_c 分别称为剩余磁感应强度 (简称剩磁) 和矫顽力; 当铁磁材料的 H 超过 H_m 后, 继续增大 H 时, B 增加得很少, 这种现象称为磁饱和。在反复磁化过程中, B 变化总是滞后于 H 变化的现象, 称为磁滞现象。

磁滞回线在第二象限内的一段, 也即图 1-7-1 中

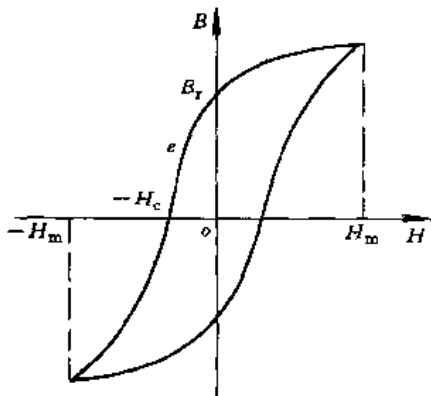


图 1-7-1 磁滞回线

B_r, H_c 段, 称为退磁曲线。在此曲线上任何点的 B 与 H 之乘积称为磁能积, 其最大值称为最大磁能积 $(BH)_{max}$ 。

1.2 基本磁化曲线

取不同的 H_m 值, 对材料进行反复磁化, 可得到图 1-7-2 所示一系列磁滞回线, 将各磁滞回线正顶点联成曲线 oab , 称为基本磁化曲线, 简称磁化曲线或 $B-H$ 线。

电工设备大多采用铁磁材料形成磁路, 图 1-7-3、图 1-7-4 和表 1-7-1 给出了一些常用铁磁材料的磁化曲线。

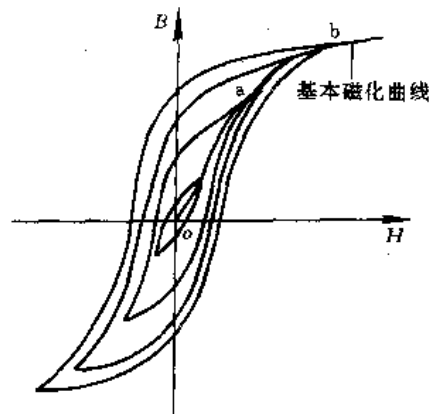


图 1-7-2 磁滞回线及基本磁化曲线

1.3 磁滞损耗与涡流损耗

铁磁材料在交变磁场的反复磁化过程中, 从交变磁场吸取一定的能量并转化为热能消耗掉, 这些能量损耗主要有磁滞损耗和涡流损耗, 它们的定义及计算公式见表 1-7-2。



磁滞损耗与涡流损耗之和统称为铁心损耗，或简称铁耗。铁耗的工程算法参见本章第6节。

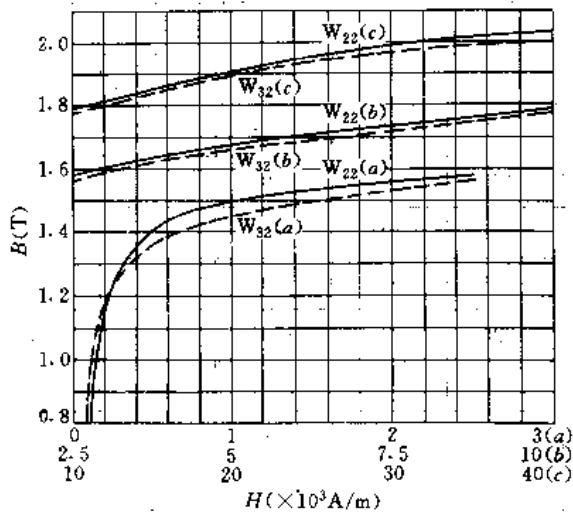


图 1-7-3 典型的 0.50mm 厚冷轧无取向硅钢片的直流磁化曲线 (任意取样, 剪断后经 800℃ 退火)
W₃₂、W₂₂—冷轧硅钢片代号

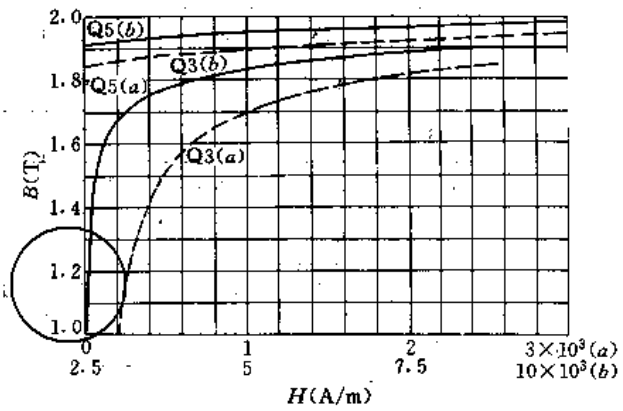


图 1-7-4 典型的 0.35mm 厚冷轧单取向硅钢片的直流磁化曲线 (沿轧向取样, 剪断后经 800℃ 退火)
Q₃、Q₅—冷轧硅钢片代号

表 1-7-1 常用铁磁性材料磁化数据表

| 一、铸钢(H 单位为 A/m) | | | | | | | | | | |
|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| B(T) | 0 | 0.01 | 0.02 | 0.03 | 0.04 | 0.05 | 0.06 | 0.07 | 0.08 | 0.09 |
| 0.4 | 320 | 328 | 336 | 344 | 352 | 360 | 368 | 376 | 384 | 392 |
| 0.5 | 400 | 408 | 415 | 426 | 434 | 443 | 452 | 461 | 470 | 479 |
| 0.6 | 488 | 497 | 506 | 516 | 525 | 535 | 544 | 554 | 564 | 574 |
| 0.7 | 584 | 593 | 603 | 613 | 623 | 632 | 642 | 652 | 662 | 672 |
| 0.8 | 682 | 693 | 703 | 724 | 734 | 745 | 755 | 766 | 776 | 787 |
| 0.9 | 798 | 810 | 823 | 835 | 848 | 860 | 873 | 885 | 898 | 911 |
| 1.0 | 924 | 938 | 953 | 969 | 986 | 1004 | 1022 | 1039 | 1056 | 1073 |
| 1.1 | 1090 | 1108 | 1127 | 1147 | 1167 | 1187 | 1207 | 1227 | 1248 | 1269 |
| 1.2 | 1290 | 1315 | 1340 | 1370 | 1400 | 1430 | 1460 | 1490 | 1520 | 1555 |
| 1.3 | 1590 | 1630 | 1670 | 1720 | 1760 | 1810 | 1860 | 1920 | 1970 | 2030 |
| 1.4 | 2090 | 2160 | 2230 | 2300 | 2370 | 2440 | 2530 | 2620 | 2710 | 2800 |
| 1.5 | 2890 | 2990 | 3100 | 3210 | 3320 | 3430 | 3560 | 3700 | 3830 | 3960 |
| 二、铸铁(H 单位为 A/m) | | | | | | | | | | |
| 0.5 | 2200 | 2260 | 2350 | 2400 | 2470 | 2550 | 2620 | 2700 | 2780 | 2860 |
| 0.6 | 2940 | 3030 | 3130 | 3220 | 3320 | 3420 | 3520 | 3620 | 3720 | 3820 |
| 0.7 | 3920 | 4050 | 4180 | 4320 | 4460 | 4600 | 4750 | 4910 | 5070 | 5230 |
| 0.8 | 5400 | 5570 | 5750 | 5930 | 6160 | 6300 | 6500 | 6710 | 6930 | 7140 |
| 0.9 | 7360 | 7500 | 7780 | 8000 | 8300 | 8600 | 8900 | 9200 | 9500 | 9800 |
| 1.0 | 10100 | 10500 | 10800 | 11200 | 11600 | 12000 | 12400 | 12800 | 13200 | 13600 |
| 1.1 | 14000 | 14400 | 14900 | 15400 | 15900 | 16500 | 17000 | 17500 | 18100 | 18600 |



(续)

三、D₂₃硅钢片(H单位为 A/m)

| | | | | | | | | | | |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| B(T) | 0 | 0.01 | 0.02 | 0.03 | 0.04 | 0.05 | 0.06 | 0.07 | 0.08 | 0.09 |
| 0.8 | 340 | 348 | 356 | 364 | 372 | 380 | 389 | 398 | 407 | 416 |
| 0.9 | 425 | 435 | 445 | 455 | 465 | 475 | 488 | 500 | 512 | 524 |
| 1.0 | 536 | 549 | 562 | 575 | 588 | 602 | 616 | 630 | 645 | 660 |
| 1.1 | 675 | 691 | 708 | 726 | 745 | 765 | 786 | 808 | 831 | 855 |
| 1.2 | 880 | 906 | 933 | 961 | 990 | 1020 | 1050 | 1090 | 1120 | 1160 |
| 1.3 | 1200 | 1250 | 1300 | 1350 | 1400 | 1450 | 1500 | 1560 | 1620 | 1680 |
| 1.4 | 1740 | 1820 | 1890 | 1980 | 2060 | 2160 | 2260 | 2380 | 2500 | 2640 |

四、D₂₃硅钢片(H单位为 A/m)

| | | | | | | | | | | |
|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 1.0 | 383 | 392 | 401 | 411 | 422 | 433 | 444 | 456 | 467 | 480 |
| 1.1 | 493 | 507 | 521 | 536 | 552 | 568 | 584 | 600 | 616 | 633 |
| 1.2 | 652 | 672 | 694 | 716 | 738 | 762 | 786 | 810 | 836 | 862 |
| 1.3 | 890 | 920 | 950 | 980 | 1010 | 1050 | 1090 | 1130 | 1170 | 1210 |
| 1.4 | 1260 | 1310 | 1360 | 1420 | 1480 | 1550 | 1630 | 1710 | 1810 | 1910 |

五、D₄₁硅钢片(H单位为 A/m)

| | | | | | | | | | | |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 1.0 | 161 | 165 | 169 | 172 | 176 | 180 | 184 | 189 | 194 | 199 |
| 1.1 | 203 | 209 | 215 | 223 | 231 | 240 | 249 | 257 | 266 | 275 |
| 1.2 | 285 | 296 | 307 | 317 | 328 | 338 | 351 | 363 | 377 | 393 |
| 1.3 | 409 | 426 | 444 | 463 | 485 | 507 | 533 | 560 | 585 | 612 |
| 1.4 | 636 | 665 | 695 | 725 | 760 | 790 | 828 | 865 | 903 | 946 |
| 1.5 | 996 | | | | | | | | | |

表 1-7-2 磁滞损耗和涡流损耗的定义及计算公式

| 项 目 | 磁 滞 损 耗 | 涡 流 损 耗 |
|------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|
| 定 义 | 铁磁材料由磁滞现象引起的能量损耗 | 铁磁材料在交变磁场磁化下,由于电磁感应而产生的涡流所引起的电阻损耗 |
| 计算公式 | $P_h = K_h f B_m^n V$ | $P_e = K_e f^2 B_m^2 V$ |
| 备 注 | K _h —取决于不同材料的系数 f—频率(Hz) B _m —最大磁通密度(T) n—与 B _m 有关的指数 V—铁磁材料的体积(m ³) K _e —与材料的截面积、形状和电阻率有关的系数 | |

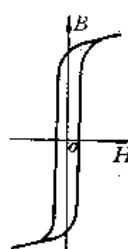
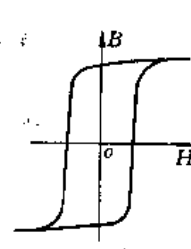
2 常用的铁磁材料

常用的铁磁材料主要包括铁、钴、镍及它们的合

金,它们有高导磁性能,被广泛用于电工设备和电子设备中,这些材料的特性及用途见表 1-7-3。



表 1-7-3 常用铁磁材料的特性和用途

| 名称 | 软磁材料 | 硬磁材料(永磁材料) |
|----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 磁滞回线 |  |  |
| 特性 | <ol style="list-style-type: none"> 1. 易磁化也易退磁 2. 磁滞回线狭窄,磁导率高,矫顽力和剩磁均较小 | <ol style="list-style-type: none"> 1. 一旦磁化后,磁性不易消失 2. 磁滞回线较宽,高矫顽力和高剩磁 3. 应用时,工作在第二象限退磁部分 |
| 主要品种及其用途 | <ol style="list-style-type: none"> 1. 硅钢:合金中含硅量一般不超过4.5%。硅钢片广泛用于制作电机、变压器、继电器以及高频电磁元件 2. 铁钴合金:合金中钴含量约50%,它具有较高的饱和磁通密度B_m、饱和磁伸缩系数和居里点。适合制作重量轻、体积小和工作温度高的电工设备 3. 铁铝合金:合金中铝含量6%~16%,适合制作微特电机、脉冲变压器等 4. 铁镍合金:是一种含镍量较高的合金。特点在弱磁场中具有较高的磁导率和低矫顽力的低频材料,一般用来制作高灵敏继电器、磁放大器 | <ol style="list-style-type: none"> 1. 铝镍钴材料,在铁中掺加铝、镍、钴,适于制作磁电系列仪表、微特电机、永磁电机和继电器等 2. 稀土钴永磁材料:主要成分有钴(Co)、铈(Ce)、镨(Pr)、镧(La)、钕(Nd)等稀土族元素,常用来制作低速电动机、力矩电动机、传感器 |

注:合金中各成分的含量皆为质量分数。

3 磁路基本定律

3.1 磁路

磁通所经过的路径,通称为磁路。磁路一般由励磁线圈、铁磁材料和空气隙组成。图 1-7-5 给出了几种典型结构的磁路。

由于铁磁材料的磁导率 μ 比空气的磁导率 μ_0 大得多,所以绝大部分磁通 Φ 经铁磁材料闭合,只有少量磁通 Φ 穿过铁磁材料经空气闭合,如图 1-7-5b 所示。通过铁磁材料的磁通 Φ 称为主磁通,少量通过铁磁材料经空气而闭合的磁通 Φ 称为漏磁通。工程上通常把主磁通 Φ 通过的路径称为磁路。下面所叙述的磁路定律只考虑主磁通。

3.2 磁通连续性原理

磁通连续性原理:在任一时刻,通过磁路任何闭合面上的磁通的代数和等于零,也即进入这个闭合面的

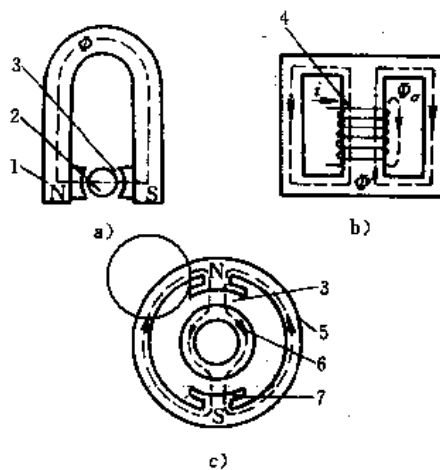


图 1-7-5 几种典型结构的磁路

a)磁电式仪表磁路 b)变压器磁路 c)电机磁路

1—永久磁铁 2—铁心 3—气隙 4—线圈

5—磁轭 6—电枢 7—磁极

磁通等于离开这个闭合面的磁通。



$$\Sigma\Phi=0 \quad (1.7-1) \text{ 或}$$

若离开闭合面的磁通取正号,则进入闭合面的磁通取负号,反之也可。

【例 1.7-1】 设流出节点的磁通为正,对于图 1.7-6 中的铁心在闭合面 S 上各支路磁通有

$$-\Phi_1 - \Phi_2 + \Phi_3 = 0$$

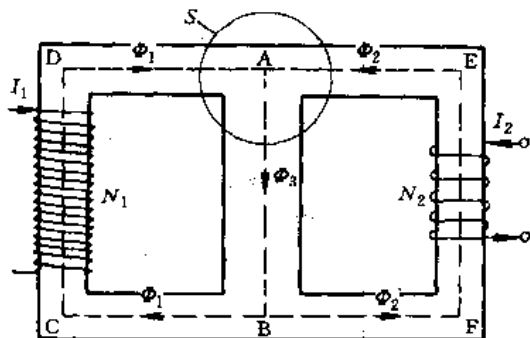


图 1.7-6 有分支的直流磁路

3.3 安培环路定律

安培环路定律:在任一磁路中,沿着选定的一条闭合路径绕行,各段磁压降 HI 之代数和等于该回路内磁动势 NI 之代数和,即

$$\sum_{i=1}^n HI_i = \sum_{j=1}^m (NI)_j \quad (1.7-2)$$

$$\sum_{k=1}^n \Phi_k R_{mk} = \sum_{j=1}^m (NI)_j \quad (1.7-3)$$

若磁路中有空气隙,则

$$\Sigma\Phi_s R_s + \Sigma HI = \Sigma NI \quad (1.7-4)$$

式中 Φ_s, R_s ——空气隙磁通(Wb),空气隙磁阻(H^{-1});

ΣHI ——除空气隙外,各段磁压降之代数和(A);

ΣNI ——磁路内磁动势之代数和(A)。

在式(1.7-2)、式(1.7-3)和式(1.7-4)中,凡 H 方向(也即 Φ 的方向)与闭合路径绕行方向一致时, HI 取正号,反之取负号; I 方向与绕行指向符合右螺旋法则时, NI 取正号,反之取负号。

磁路中各物理量及基本定律,在许多方面与电路中各物理量及基本定律有着对应的相似性,但是在物理概念上它们之间存在着许多差别,特别是铁磁材料的磁导率 μ 随 B (或 H) 而变化,即磁阻 R_m 是 B (或 H) 的函数,由于这一函数呈非线性,从而使得磁路计算比线性电路计算要复杂些。表 1.7-4 列出了电路与磁路的类比。

表 1.7-4 直流电路与直流磁路的类比

| 电 路 | | 磁 路 | |
|------------------------------------|------------------|-----------------------------------|----------|
| 基本物理量及基本定律 | 单 位 | 基本物理量及基本定律 | 单 位 |
| 电流 I | A | 磁 通 Φ | Wb |
| 电流密度 J | A/m ² | 磁感应强度(磁通密度) B | T |
| 电动势 E | V | 磁 动 势 F | A |
| 电压降 IR | V | 磁压降 $\Phi R_m = HI$ | A |
| 电 阻 $R = \rho \cdot l/S$ | Ω | 磁 阻 $R_m = l/(\mu \cdot S)$ | H^{-1} |
| 电 导 $G = 1/R$ | S | 磁 导 $\Lambda_m = 1/R_m$ | H |
| 欧姆定律 $I = E/R$ | | 欧姆定律 $\Phi = F/R_m = \Lambda_m F$ | |
| 基尔霍夫第一定律 $\Sigma I = 0$ | | 磁通连续性原理 $\Sigma \Phi = 0$ | |
| 基尔霍夫第二定律 $\Sigma E = \Sigma IR$ | | 安培环路定律 $\Sigma NI = \Sigma HI$ | |



表 1-7-4 示出的磁路欧姆定律为

$$\Phi = \frac{NI}{\sum_{k=1}^n R_{mk}} \quad (1-7-5)$$

式中 Φ ——磁通(Wb);

N ——线圈匝数;

I ——励磁电流(A), NI 为磁动势, 单位为 A;

R_{mk} ——全磁路磁阻(H^{-1}), 即

$$R_{mk} = \frac{l_k}{\mu_k A_k}$$

式中 l_k, A_k, μ_k ——磁路的平均长度(m)、截面积(m^2)、磁导率。

如果磁路中含有空气隙, 则气隙磁阻为

$$R_g = \frac{\delta}{\mu_0 A}$$

式中 δ ——气隙长度(m);

μ_0 ——真空磁导率, 为 $4\pi \times 10^{-7} H/m$ 。

必须指出, 由于铁磁材料的 μ 不是常数, 要用 $B-H$ 曲线来确定其值, 故磁阻不是常数。式(1-7-5)虽然与电路的欧姆定律有相似的形式, 但一般并不能直接用它来计算磁路问题。

【例 1-7-2】在图 1-7-6 所示磁路中, 取闭合回路的绕行方向为 DAEFBCD, 设各段长度 $DA=l_1, AE=l_2, EF=l_3, FB=l_4, BC=l_5, CD=l_6$, 其相应的磁场强度分别为 $H_1, H_2, H_3, \dots, H_6$, 则根据安培环路定律有

$$H_1 l_1 - H_2 l_2 - H_3 l_3 - H_4 l_4 + H_5 l_5 + H_6 l_6 = N_1 I_1 - N_2 I_2$$

4 气隙磁导的计算

由于气隙磁阻比导磁体的磁阻大得多, 致使磁路中磁动势大部分消耗在空气隙中, 因而气隙磁导计算的准确性对磁路计算结果影响较大, 常见的磁极形状气隙磁导公式列于表 1-7-5 中。

在空气隙里的磁通会向外扩散, 从而增大了空气

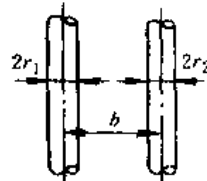
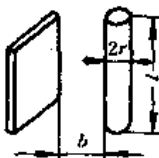
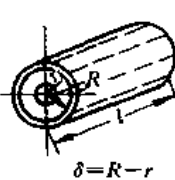
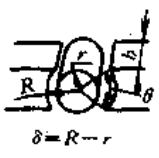
表 1-7-5 计算气隙磁导 Λ_g 的公式

| 序号 | 几何图形 | 磁极形状 | 磁导公式 | 备注 |
|----|------|-----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|
| 1 | | 矩形磁极 | 当 $\frac{\delta}{a} \leq 0.2$ 和 $\frac{\delta}{b} \leq 0.2$ 时 $\Lambda_g = \mu_0 \frac{ab}{\delta}$ | 适用于平行平面磁极, 且磁场均匀分布的部分 |
| | | | $\Lambda_g = \frac{\mu_0}{\delta} \left(a + \frac{0.307\delta}{\pi} \right) \left(b + \frac{0.307\delta}{\pi} \right)$ | 考虑了在 δ 较大时边缘磁通的扩散磁导 |
| 2 | | 圆柱磁极 | 当 $\delta < 0.2d$ 时 $\Lambda_g = \mu_0 \frac{\pi d^2}{4\delta}$ | 磁场分布较均匀 |
| | | | $\Lambda_g = \mu_0 \left(\frac{\pi d^2}{4\delta} + 0.58d \right)$ | δ 较大时考虑了边缘扩散磁导 |
| 3 | | 锥形磁极 | $\Lambda_g = \frac{\mu_0 \pi d}{2\delta \cos \alpha} \left(\delta \sin \alpha - \frac{d}{2 \cos \alpha} \right)$ | δ 较大时考虑了边缘扩散磁导 |
| 4 | | 圆柱铁心和平板衔铁 | $\Lambda_g = \mu_0 \frac{2\pi R}{\theta} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{r^2}{R^2}} \right)$ | 适用于气隙长比磁极尺寸甚小时, 且不计极靴厚度表面上的磁导和边缘突出磁导 |
| 5 | | 矩形铁心和平板衔铁 | $\Lambda_g = \mu_0 \frac{b}{\theta} \ln \frac{R_2}{R_1}$ | 适用于气隙长比磁极尺寸甚小时, 且不计极靴厚度表面上的磁导和边缘突出磁导 |

此星公司制作 请尊重版权



(续)

| 序号 | 几何图形 | 磁极形状 | 磁导公式 | 备注 |
|----|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|
| 6 |  | 两平行圆柱体无限长 | $\Lambda_s = \frac{\mu_0 2\pi l}{\ln(k + \sqrt{k^2 - 1})}$ 当 $r_1 \neq r_2$ 时 $k = \frac{b^2 - r_1^2 - r_2^2}{2r_1 r_2}$ 当 $r_1 = r_2 = r$ 时 $k = \frac{b^2 - 2r^2}{2r^2}$ 当 $b > 8r$ 时, 则 $\Lambda_s = \frac{\mu_0 \pi l}{\ln \frac{b}{r}}$ | 适用于铁心直径与铁心长之比甚小时 |
| 7 |  | 圆柱体与平行平面 | $\Lambda_s = \frac{2\mu_0 \pi d}{\ln \frac{b + \sqrt{b^2 - r^2}}{r}}$ 当 $b > 4r$ 时, 可简化为: $\Lambda_s = \frac{\mu_0 2\pi l}{\ln \frac{2b}{r}}$ | |
| 8 |  | 同心圆筒 | $\Lambda_s = \frac{\mu_0 2\pi l}{\ln \frac{R}{r}}$ 当 $r \gg \delta$ 时 $\Lambda_s = \mu_0 \frac{2\pi \left(r + \frac{\delta}{2}\right) l}{\delta}$ | 不计及端部边缘扩散磁导 |
| 9 |  | 具有 θ 角的两同心圆面 | $\Lambda_s = \frac{\mu_0 \theta b}{\ln \frac{R}{r}}$ 当 $r \gg \delta$ 时 $\Lambda_s = \mu_0 \frac{\left(r + \frac{\delta}{2}\right) b \theta}{2\delta}$ | 不计及端部边缘扩散磁导 |

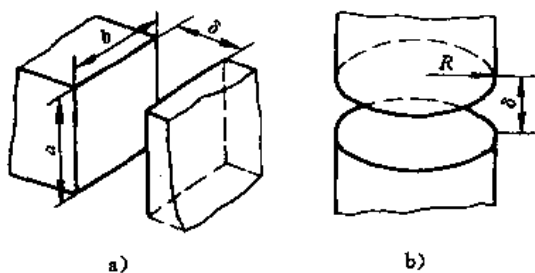


图 1-7-7 空气隙中磁通的边缘效应

a) 矩形截面的铁心 b) 圆形截面的铁心

隙的有效面积, 这种现象称为边缘效应。设气隙长度为 δ , 对于长宽为 $a \times b$ 的矩形截面的铁心(图 1-7-7a), 其有效面积

$$A_s = (a + \delta)(b + \delta) \approx ab + (a + b)\delta$$

对于半径为 r 的圆形铁心(图 1-7-7b), 其有效面积为

$$A_s = \pi(r + \delta)^2 \approx \pi r^2 + 2\pi r\delta$$

5 直流磁路的计算

励磁线圈通以直流电的磁路, 称为直流磁路。这种磁路中的磁动势是恒定的。磁路计算所依据的基本定律是磁通连续性原理和安培环路定律; 计算可归结为两种类型: 一类是已知磁通 Φ , 求所需的磁动势 $F(NI)$ 或励磁电流 I ; 另一类是已知磁动势 $F(NI)$, 求磁路中产生的磁通 Φ 。

磁路计算的近似条件为: 不计漏磁, 磁通在截面上均匀分布; 磁路长度取几何中心线。

5.1 无分支磁路的计算

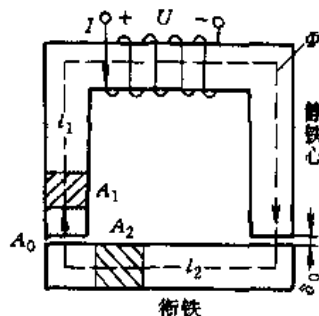
5.1.1 已知磁路内磁通求励磁电流

计算主要步骤见表 1-7-6。



表 1-7-6 已知磁通求励磁电流的计算步骤

| 项 目 | 分 段 | 铁 心 (硅钢片) | 衔 铁 (铸铁) | 气 隙 | 说 明 |
|------------------------------|-----------------------------------------------------|--------------------------|--------------------------|------------------------------------------------|-----------------------------|
| (1)已知 Φ (Wb) | | Φ | Φ | Φ | 给定磁通 |
| (2)各段中心线长度(m) | | l_1 | l_2 | δ | 根据给定磁路尺寸,按同材料 and 同截面,对磁路分段 |
| (3)算出各段截面(m ²) | | A_1 | A_2 | $A_0 = A_1$ | 式中, A_1, A_2, A_0 是有效面积 |
| (4)算出各段 $B = \frac{\Phi}{A}$ | | $B_1 = \frac{\Phi}{A_1}$ | $B_2 = \frac{\Phi}{A_2}$ | $B_0 = \frac{\Phi}{A_0}$ | 从各段材料的 $B-H$ 曲线查出 |
| (5)找出对应的 H (A/m) | | H_1 | H_2 | $H_0 = \frac{B_0}{\mu_0} = 0.8B_0 \times 10^6$ | 用各段磁路的磁场强度和平均长度进行计算 |
| (6)算出各段的磁压(A) | | $H_1 l_1$ | $H_2 l_2$ | $H_0 \delta$ | |
| (7)算出磁动势 F (A) | $F = NI = \sum HI = H_1 l_1 + H_2 l_2 + H_0 \delta$ | | | | |
| (8)算出励磁电流(A) | $I = F/N$ | | | | |



【例 1-7-3】 直流磁路的铁心由 D₂₃ 硅钢片叠成,其尺寸(单位为 mm)如图 1-7-8 所示。设铁心的堆叠系数 $K_c = 0.91$, 线圈匝数 $N = 1000$,若忽略空气隙的边缘效应,要求在铁心中建立 $\Phi = 4 \times 10^{-4}$ Wb 的磁通,试确定励磁电流(I)。

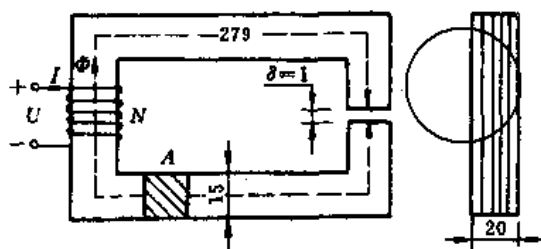


图 1-7-8 例 1-7-3 的铁心

解 铁心的有效截面积为

$$A = 15 \times 10^{-3} \times 20 \times 10^{-3} \times 0.91 = 2.73 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

铁心中的磁感应强度为

$$B = \frac{\Phi}{A} = \frac{4 \times 10^{-4}}{2.73 \times 10^{-4}} = 1.47 \text{ T}$$

由表 1-7-1 查得其对应的磁场强度 $H = 1710 \text{ A/m}$, 空气隙中的磁感应强度为

$$B_0 = \frac{\Phi}{A_0} = \frac{4 \times 10^{-4}}{15 \times 10^{-3} \times 20 \times 10^{-3}} = 1.33 \text{ T}$$

式中, A_0 表示忽略边缘效应时空气隙的截面积。气隙中的磁场强度为

$$H_0 = 0.8B_0 \times 10^6 = 0.8 \times 1.33 \times 10^6 = 1.06 \times 10^6 \text{ A/m}$$

铁心中的磁压降为

$$Hl = 1710(280 - 1) \times 10^{-3} = 477.1 \text{ A}$$

空气隙中的磁压降为

$$H_0 \delta = 1.06 \times 10^6 \times 1 \times 10^{-3} = 1060 \text{ A}$$

根据安培环路定律,得磁动势为

$$NI = H(l - \delta) + H_0 \delta = 477.1 + 1060 = 1537.1 \text{ A}$$

因此,需要在励磁线圈中通过的电流为

$$I = \frac{NI}{N} = \frac{1537.1}{1000} = 1.54 \text{ A}$$

从本例题分析可知,气隙仅是全磁路长度的 1/280,而其磁压降却占全磁路磁压降的 69%。由此可见,磁路中的磁压降绝大部分降落在气隙上。

5.1.2 已知磁动势求磁路内磁通

由于磁路的非线性关系,这类问题常用试探法(或称图解法)求解,即先假定可能产生的磁通 Φ_1 , 然后采

此星公司制作 请尊重作者版权



用5.1.1节所述步骤,求出对应的 NI_1 ,与已知的 NI 相比较,根据其差额可再假定 Φ_2 ,算出 NI_2 。如此经过几次反复,直到由假定的 Φ 算得的磁动势与已知的磁动势之差值达到所要求的精度为止。亦可将上述几次试探的结果绘成 $\Phi=f(NI)$ 曲线(如图1.7-9所示)。运

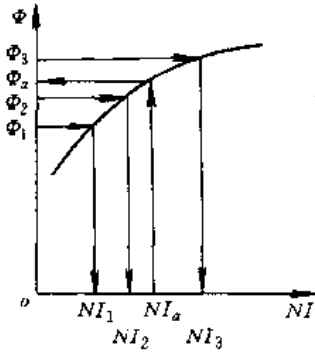


图 1.7-9 图解法

用内插法即可求出已知 NI 时的磁通 Φ 。

当磁路中含有空气隙时,大部分磁动势 NI 都降落在空气隙上,故可先假定已知 NI 全部作用于空气隙,并由空气的磁导率 μ_0 算出 Φ_0 (见例1.7-4),然后再假设一个小于 Φ_0 的磁通 Φ_1 作为第一次估算值。

【例1.7-4】若例1.7-3中已知励磁电流为1.4A,求磁路中的磁通 Φ 。

解 设 $NI=1400\text{At}$ 全部作用在空气隙上,根据安培环路定律,可得

$$NI = H_0 \delta = \frac{B}{\mu_0} \delta = \frac{\Phi_0}{\mu_0 A_0} \delta$$

所以空气隙中磁通为

$$\begin{aligned} \Phi_0 &= NI \frac{\mu_0 A_0}{\delta} = 1400 \frac{4\pi \times 10^{-7} \times 3 \times 10^{-4}}{10^{-3}} \\ &= 5.28 \times 10^{-4} \text{ Wb} \end{aligned}$$

此数值显然偏大,故试探时拟选取

$$\Phi = 3 \times 10^{-4} \text{ Wb}$$

因为各次试计算过程相同,现将计算公式及计算结果列于表1.7-7中。

表 1.7-7 解例 1.7-4 的计算公式及结果

| Φ $10^{-4}(\text{Wb})$ | $B=\Phi/A$ (T) | 查表 1.7-1 得 H (A/m) | $B_0=\Phi/A_0$ (T) | $H_0=B_0/\mu_0$ $=0.8B_0$ $10^5(\text{A/m})$ | $HI=279H$ (A) | $H_0\delta=0.1H_0$ (A) | $NI=HI+H_0\delta$ (A) | I (A) | 误差 |
|--------------------------------|-------------------|----------------------------|-----------------------|----------------------------------------------------|------------------|---------------------------|--------------------------|------------|----|
| 3 | 1.1 | 493 | 1 | 8 | 137.5 | 800 | 937.5 | 0.938 | - |
| 4 | 1.46 | 1630 | 1.33 | 10.6 | 455 | 1060 | 1515 | 1.515 | + |
| 3.85 | 1.41 | 1310 | 1.28 | 10.26 | 365.5 | 1026 | 1392 | 1.392 | - |

最后算得励磁电流为1.408A,与给定数值相比,只有

$$\frac{1.392-1.4}{1.4} \times 100\% = -0.57\%$$

的误差。

5.2 有分支磁路的计算

由于磁阻是非线性的,求解这类问题与非线性电阻电路的解法相似。但是,工程上常见电器(如变压器、电机等)的磁路大多存在着对称性,对于结构对称的有分支磁路计算是较方便的。

【例1.7-5】图1.7-10所示磁路由D23硅钢片叠成,图中铁心尺寸单位为mm,铁心堆叠系数 $K_c=0.91$ 。若要在铁心里产生 $\Phi=8.6 \times 10^{-4}\text{Wb}$ 的磁通,试求在 $N=2000$ 匝的线圈中需通过励磁电流 I 的大小。

解 由于结构对称,可将整个磁路分为三段,即中间支路 ab 及两旁支路 $befa$ 与 $bcda$ 。

在两旁支路中的磁通相等,即

$$\Phi_1 = \Phi_2$$

$$= \frac{1}{2} \Phi = \frac{8.6 \times 10^{-4}}{2} = 4.3 \times 10^{-4} \text{ Wb}$$

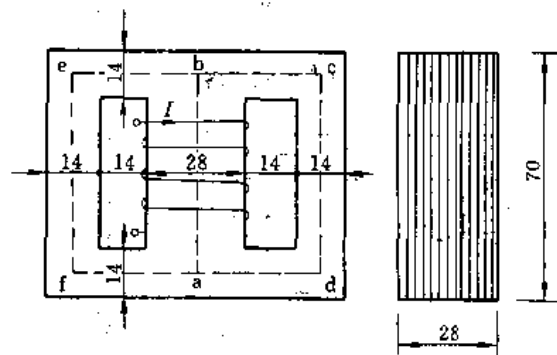


图 1.7-10 例 1.7-5 直流磁路

中间 ab 支路中的磁感应强度为

$$B = \frac{\Phi}{A} = \frac{8.6 \times 10^{-4}}{28 \times 10^{-3} \times 28 \times 10^{-3} \times 0.91} = 1.21 \text{ T}$$

在两旁分支路中的磁感应强度为

$$B_1 = B_2 = \frac{\Phi_1}{A_1} = \frac{4.3 \times 10^{-4}}{14 \times 10^{-3} \times 28 \times 10^{-3} \times 0.91} = 1.21 \text{ T}$$

由磁化数据表(表1.7-1)查得

$$H = H_1 = H_2 = 672 \text{ A/m}$$

对闭合回路 $abcda$ 应用安培环路定律,得

此是本书制作请尊重原作者版权



$$NI = Hl_{ab} + H_2 l_{bcd}$$

$$= 672 \{ [(70-14) \times 2 + (28+7) \times 2] \times 10^{-3} \}$$

$$= 122.3 \text{ At}$$

$$I = \frac{NI}{N} = \frac{122.3}{2000} = 0.061 \text{ A}$$

6 交流磁路的计算

励磁线圈通以交流电的磁路,称为交流磁路。交流磁路中的磁通和磁动势是交变的,磁路计算的基本公式仍然是磁通连续性原理和安培环路定律,不过需要用相量法来进行。此外,它还要受电磁感应定律约束。

6.1 交流磁路的特点

与直流磁路相比,交流磁路的特点是:

- (1) 交流磁路中的磁通、磁动势、磁感应强度及磁场强度都是交变的。
- (2) 在交变磁通作用下,铁磁材料内有涡流和磁滞损失,使得磁动势和磁通相位不同。
- (3) 在外施正弦电流的情况下,由于磁滞回线的饱和特性和不可逆性,导致励磁电流和磁通不能同时

为正弦波,有波形畸变。

(4) 交流磁路中的铁心常用许多薄硅钢片冲制叠铆而成,而直流磁路的铁心常是整块钢铁材料。

6.2 交流铁心线圈的电路模型

6.2.1 铁心线圈的电压、磁通和电流

将图 1.7-11a 所示的铁心线圈接在交流电源上,在不计线圈电阻与漏磁通时,设铁心中磁通为正弦,即 $\Phi = \Phi_m \sin \omega t$, 则线圈的端电压为

$$u = N \frac{d\Phi}{dt} = N \Phi_m \omega \sin(\omega t + 90^\circ)$$

上式表明感应电压也以正弦规律变化,且超前于磁通 90° , 感应电压的有效值为

$$U = 4.44 f \Phi_m N \quad (1.7-6)$$

式中 f ——正弦电压的频率 (Hz);

N ——铁心线圈的匝数;

Φ_m ——交变磁通的最大值 (Wb)。

由于铁磁材料的 Φ - i 关系受磁滞回线的约束,所

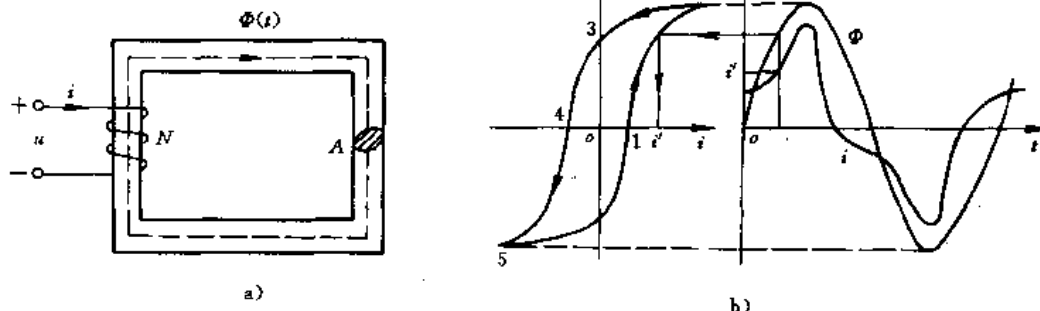


图 1.7-11 正弦电压作用下的电流和磁通波形

a) 铁心线圈 b) $\Phi(t)$ 为正弦波时 $i(t)$ 为非正弦波

以在磁通按正弦变化的情况下,线圈中电流 i 畸变为尖顶波,且 i 与 Φ 的零点不相重叠,如图 1.7-11b 所示;当电流按正弦变化时,则电压 u 与磁通 Φ 将畸变为非正弦波。

为简化分析计算,当铁心线圈的电路处于正弦稳态时,电压、电流和磁通非正弦量均用等效正弦量来替代(见本篇第 5 章 5 节),从而可以应用相量法来处理铁心,线圈电路。

6.2.2 忽略铁心线圈电阻、漏磁通时的相量图与电路模型

不计线圈电阻与漏磁通时,设铁心线圈中主磁通、

电压 U 和电流 I 均为正弦波,它们的相量图如图 1.7-12a 所示,图中以 Φ 为参考相量, \dot{U} 超前于 Φ 90° , \dot{I} 与 \dot{U} 同相, \dot{I}_1 为励磁电流 \dot{I} 的有功分量,也称为补偿铁耗电流;与 \dot{U} 正交的电流 \dot{I}_2 为励磁电流 \dot{I} 的无功分量,又称磁化电流。

与图 1.7-12a 相量图相对应的电路模型如图 1.7-13b 所示。电路中用电导 G_0 和感纳 B_0 分别体现铁心线圈的铁耗 P_{Fe} 与铁心的磁化,用来模拟与线圈端电压的伏安关系。电路模型参数为

$$G_0 = \frac{I_1}{U} = \frac{P_{Fe}}{U^2}$$

此星公司制作 请尊重作者版权



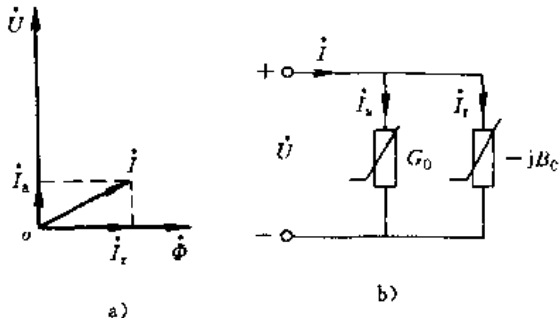


图 1-7-12 忽略线圈电阻和漏磁通时的相量图与电路模型
a) 相量图 b) 电路模型

$$B_0 = \frac{I_r}{U}$$

通常 G_0 与 B_0 都随 U 或 B_m 而变化, 因此图中用非线性

性元件来模拟。

6.2.3 计及铁心线圈电阻和漏磁通时的电路模型与相量图

如图 1-7-13a 所示为含铁心线圈的磁路, 设线圈电阻为 R , 漏磁通 Φ_l 所对应的漏电感为 L_l 及漏电抗为 X_l , 电压、电流和磁通等非正弦量用等效正弦波替代后, 则线圈端电压相量为

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= \dot{U}_R + \dot{U}_l + \dot{U} \\ &= R\dot{i} + jX_l\dot{i} + \dot{U} \end{aligned} \quad (1.7-7)$$

与式(1.7-6)相应的电路模型和相量图, 如图 1-7-13b、c 所示。

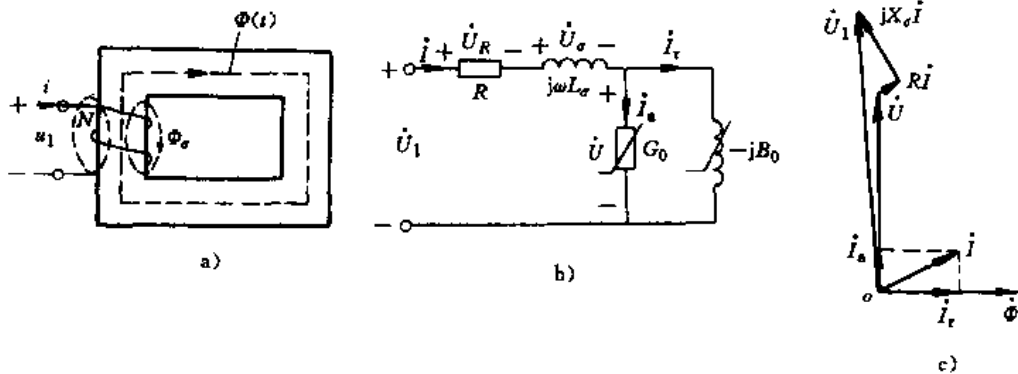


图 1-7-13 铁心线圈及其电路模型和相量图
a) 铁心线圈 b) 电路模型 c) 相量图

【例 1-7-6】 已知铁心线圈的电阻 $R=0.5\Omega$, 漏抗 $X_l=0.5\Omega$, 当该线圈接到 $U_1=220V$ 、 $50Hz$ 的正弦电源时, 测得其 $I=5A$, 有功功率 $P=125W$, 试求铁耗 P_{Fe} 、主磁通 Φ 所感应的电压 U 和磁化电流 I_r , 并作相量图。

解 线圈的铜耗

$$P_{Cu} = RI^2 = 0.5 \times 5^2 = 12.5W$$

题中给定的有功功率 P 是铜耗和铁耗之和, 故铁耗为

$$P_{Fe} = P - P_{Cu} = 125 - 12.5 = 112.5W$$

电源电压 \dot{U}_1 与电流 \dot{i} 的相位差为

$$\varphi = \arccos \frac{P}{U_1 I} = \arccos \frac{125}{220 \times 5} = 83.5^\circ$$

令 $\dot{i} = I \angle 0^\circ = 5 \angle 0^\circ A$, 则 $\dot{U}_1 = U_1 \angle \varphi = 220 \angle 83.5^\circ V$, 于是主磁通 Φ 所感应的电压为

$$\begin{aligned} \dot{U} &= \dot{U}_1 - (R + jX_l)\dot{i} \\ &= 220 \angle 83.5^\circ - (0.5 + j0.5)5 = 217.3 \angle 84.1^\circ V \end{aligned}$$

即感应电压的有效值为 $217.3V$ 。

磁化电流为

$$I_r = 5 \times \cos(90^\circ - 84.1^\circ) = 4.97A$$

以 \dot{i} 为相位参考, 按各量值的相位关系作出相量图, 如图 1-7-14 所示。

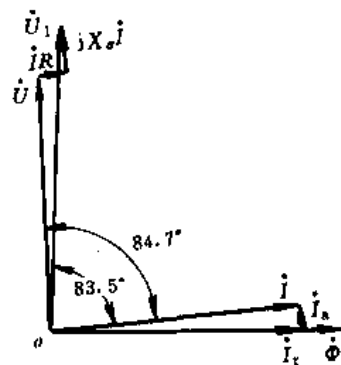


图 1-7-14 例 1-7-6 的相量图

6.3 交流磁路计算的方法

计算交流磁路需要计及磁滞、涡流和磁饱和等的影响, 所以其情况要比计算直流磁路复杂得多, 但当磁通、电压和电流等非正弦量均用等效正弦波替代后, 就可以用相量法来计算, 这样的计算方法称为等效正弦波法。



6.3.1 求励磁电流无功分量的等效正弦量

励磁线圈加以 50Hz 的正弦电压 U 时, 若忽略线圈电阻, 则铁心中磁通也是按正弦规律变化的, 但磁化电流 i , 畸变为尖峰波, 其有效值

$$I_i = \frac{I_m}{\xi \sqrt{2}}$$

式中 I_m ——线圈电流的最大值 (A);

ξ ——修正系数, 其值与铁心饱和程度有关, 可从 ξ - B_m 曲线查出。

图 1.7-15 为一般热轧硅钢片 ξ - B_m 曲线。

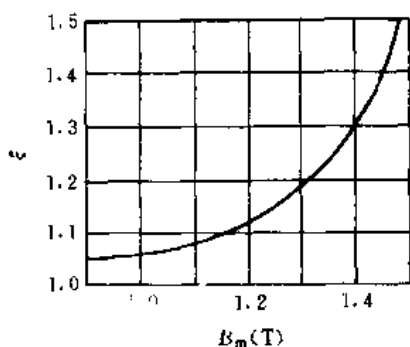


图 1.7-15 修正系数

6.3.2 求励磁电流的有功分量

整个磁路的铁心损耗

$$P_{Fe} = P_{Fe0}G$$

式中 P_{Fe0} ——比磁损耗, 即单位重量的铁心损耗 (W/

kg)。其值可从 P_{Fe0} - B_m 曲线中查出。

G ——铁磁材料的质量 (kg)。

图 1.7-16 为几种硅钢片的比磁损耗曲线。

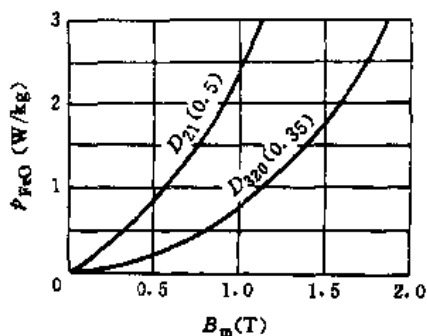


图 1.7-16 比磁损耗曲线

由铁心损耗引起的电流近似为正弦波, 所以励磁电流的有功分量为

$$I_a = \frac{P_{Fe}}{U}$$

式中 P_{Fe} ——铁心损耗 (W);

U ——励磁线圈端电压 (V)。

6.3.3 交流磁路计算的步骤

接于正弦电压为 U 的交流磁路, 设磁通 Φ 和励磁电流 I 同 U 都是正弦波, 由 I 激发的磁通最大值 $\Phi_m = U/4.44fN$, 而 $i = i_a + i_i$, 所以磁路计算的实质是: (1) 由铁心损耗求励磁电流的有功分量 I_a ; (2) 由磁通 Φ_m 求磁化电流 I_i 。

交流磁路的计算步骤见表 1.7-8。

表 1.7-8 已知磁通求励磁电流的计算步骤

| 交流磁路的计算图例 | | | | | |
|--------------------------------------|----|----------|----------|-------------|-------------------|
| 项 目 | 分段 | 铁 心 | 衔 铁 | 气 隙 | 说 明 |
| 1. 已知磁通 Φ_m (Wb) | | Φ_m | Φ_m | Φ_m | |
| 2. 各段中心线长度 (m) | | l_1 | l_2 | δ | 按同材料、同截面 对磁路分段 |
| 3. 各段截面积 (m ²) | | A_1 | A_2 | $A_0 = A_1$ | |
| 4. 算出各段 $B_m = \frac{\Phi_m}{A}$ (T) | | B_{m1} | B_{m2} | B_0 | A 为有效面积 |

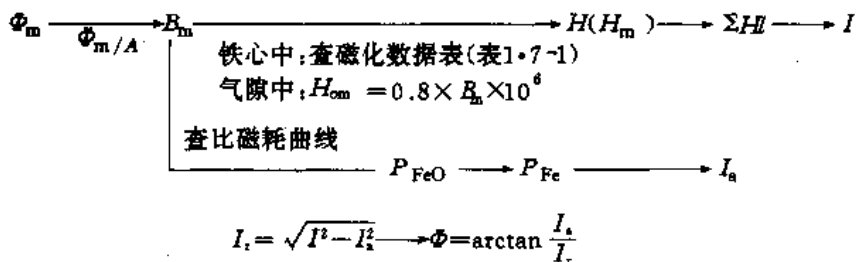


(续)

| 项 目 | 分 段 | 铁 心 | 衔 铁 | 气 隙 | 说 明 |
|--------------------------|-----|------------------------------------------------------|--------------------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|
| 5. 查出各段的 ϵ | | ϵ_1 | ϵ_2 | | 查 ϵ - B_m 曲线(图 1-7-15) |
| 6. 求各段的 H_m (A/m) | | H_{m1} | H_{m2} | $H_{0m} = 0.8B_m \times 10^6$ | 从各段的 B - H 曲线查出 |
| 7. 求出各段的 H (A/m) | | $\frac{H_{m1}}{\epsilon_1 \sqrt{2}} = H_1$ | $\frac{H_{m2}}{\epsilon_2 \sqrt{2}} = H_2$ | $\frac{H_{0m}}{\sqrt{2}} = H_0$ | |
| 8. 算出磁动势 F (A) | | $F = NI = H_1 l_1 + H_2 l_2 + H_0 \delta$ | | | |
| 9. 算出磁化电流 I_z (A) | | $I_z = F/N$ | | | |
| 10. 算出各段铁心重(kg) | | G_1 | G_2 | | |
| 11. 查相应的比磁损耗(W/kg) | | P_{Fe01} | P_{Fe02} | | |
| 12. 算出磁路铁耗(W) | | $P_{Fe} = P_{Fe01} \times G_1 + P_{Fe02} \times G_2$ | | | |
| 13. 算出励磁电流有功分量 I_a (A) | | $I_a = P_{Fe}/U$ | | | |
| 14. 算出励磁电流 I (A) | | $I = \sqrt{I_z^2 + I_a^2}$ | | | |
| 15. 算出励磁电流相位($^\circ$) | | $\Phi = \arctan I_a / I_z$ | | | |

以上计算中所用磁化曲线是不考虑铁心损耗的基本磁化曲线,如用测得的交流磁化曲线 \ominus 作为磁路材料的磁化特性(曲线计及了磁饱和性和铁心损耗对电

流的影响)来进行计算,则已知磁通求励磁电流的计算程序为:



7 永久磁铁磁路的计算

永久磁铁磁路一般由永久磁铁和空气隙组成,其磁路计算可分为两类问题:

(1) 已知空气隙磁通,求磁路各部分尺寸并选用永磁材料。

(2) 已知永磁材料的磁性能和磁路各部分尺寸,求空气隙中的磁通 Φ_0 。

永久磁铁磁路的计算方法原则上与直流磁路的计算方法相同,但永久磁铁是利用铁磁材料的剩磁工作的,所以磁路计算要用退磁曲线,而不用基本磁化曲线。

【例 1-7-6】 如图 1-7-17a 所示永久磁铁磁路,在忽略漏磁条件下:

(1) 已知磁路的截面积、空气隙长以及要求通过的磁通

分别为 A_0 、 δ 和 Φ ,磁路永久磁铁的退磁曲线如图 1-7-17b 所示。求磁路的最佳尺寸 A 与 l 。

(2) 已知磁路的尺寸 A 、 l 、 A_0 、 δ 以及退磁曲线,求空气隙中的磁通 Φ_0 。

解 (1) 设磁路中的磁感应强度和磁场强度为 B 和 H ,根据磁通连续性原理,铁心中的磁通为

$$\Phi = BA = B_0 A_0 = \Phi_0$$

因为 $B_0 = \mu_0 H_0$,所以

$$BA = \mu_0 H_0 A_0 = \Phi_0 \quad (1-7-8)$$

由于永久磁铁上没有励磁线圈,所以 $I = 0$,于是根据安培环路定律,有

$$Hl = -H_0 \delta \quad (1-7-9)$$

\ominus 交流磁化曲线是某铁磁材料在某一频率的正弦励磁下测得的以磁场强度有效值 H 为横坐标,以磁感应强度最大值 B_m 为纵坐标的磁化曲线。



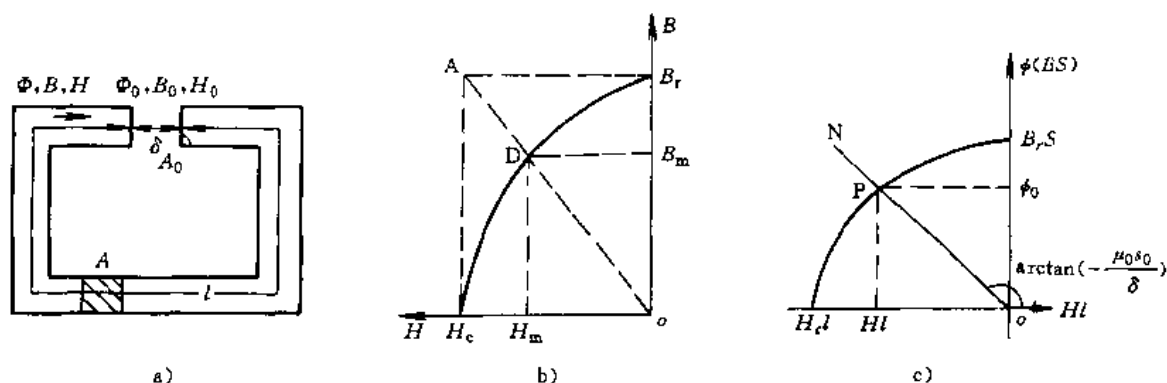


图 1-7-17 例 1-7-6 的永久磁铁磁路

a) 磁路结构 b) 退磁曲线 c) 图解法

根据式(1·7-8)和(1·7-9),取 $A=A_0$, 经整理, 永久磁铁的体积为

$$V = Al = \frac{|\Phi_0(\delta/\mu_0 A_0)|}{BH}$$

欲使体积 V 最小, 应使分母 BH 的数值最大, 即将工作点尽量靠近所选材料的最大磁能积点 $(BH)_{max}$, 使它在曲线下占有最大的截面积, 如图 1·7-17b 所示。设在最佳工作点处相应的磁感应强度和磁场强度分别为 B_m 和 H_m , 所以

$$A = \frac{\Phi}{B_m}$$

和

$$l = \frac{\Phi_0(\delta/\mu_0 A_0)}{H_m}$$

(2) 由式(1·7-8)和式(1·7-9)可得

$$\Phi_0 = \Phi = -\frac{\mu_0 A_0}{\delta} HI \quad (1·7-10)$$

将退磁曲线纵坐标乘以截面积 A , 横坐标乘以平均长度 l , 便得到如图 1·7-17c 所示的 $\Phi-HI$ 曲线。式(1·7-10)是直线方程, 其斜率角为

$$\theta = \arctan\left(-\frac{\mu_0 A_0}{\delta}\right)$$

由 θ 角作直线 ON 与 $\Phi-HI$ 曲线的交点 P 的纵坐标即为所求的磁通 Φ_0 。

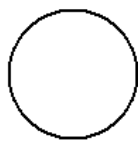
参考文献

[1] 罗守信主编. 电工学. 第二版. 北京: 高等教育出版社, 1985
 [2] 高维宏主编. 电路和电子技术. 北京: 高等教育出版社, 1989

出版社, 1989

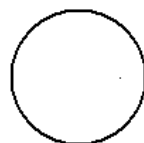
[3] (美)狄苏尔 CA, 葛守仁著. 电路基本理论. 林争辉主译. 北京: 人民教育出版社, 1979
 [4] 裴留庆编. 电路理论基础. 北京: 北京师范大学出版社, 1983
 [5] (日本)日本电气学会. 电工技术手册 第1卷: 基础部分(3). 北京: 机械工业出版社, 1984
 [6] 姚仲兴编著. 电路分析导论. 杭州: 浙江大学出版社, 1988
 [7] 邱关源主编. 电路. 北京: 高等教育出版社, 1990
 [8] 朱承高主编. 电工及电子技术手册. 北京: 高等教育出版社, 1990
 [9] 郑君里, 杨为理, 应启珩编. 信号与系统. 北京: 高等教育出版社, 1982
 [10] 管致中, 夏恭略编. 信号与线性系统. 北京: 高等教育出版社, 1979
 [11] 王楚, 余道衡编. 电子线路原理. 北京: 北京大学出版社, 1991
 [12] 王嵩主编. 基本电路理论. 上海: 上海交通大学出版社, 1986
 [13] Timothy N. Trick. Introduction to Circuit Analysis. John Wiley & Sons, 1977
 [14] Oppenheim AV, Willsky AS. Signal and System. U. S. A: Prentice-Hall, Inc., 1983





第 2 篇

电 工 设 备



主编单位 浙江大学

编写单位 浙江大学

主 编 罗守信

编写人 严克宽 罗守信 杜国华

主 审 孙文卿



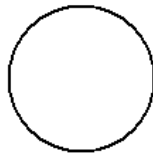
常用符号表

| | |
|--------------------------------|------------------------------------|
| A ——截面积(m^2) | P_1 ——输入功率(kW) |
| B ——磁感应强度(T 或 Wb/m^2) | P_2 ——输出功率(kW) |
| B_r ——剩磁磁感应强度(T 或 Wb/m^2) | P_n ——额定功率(kW) |
| E_1 ——一次电动势(V) | p ——磁极对数 |
| E_2 ——二次电动势(V) | p_{Cu} ——铜损耗功率(kW) |
| E_a ——电枢电动势(V) | p_{Fe} ——铁损耗功率(kW) |
| E_0 ——空载电动势(V) | p_a ——机械损耗功率(kW) |
| e ——瞬时电动势(V) | p_0 ——附加损耗功率(kW) |
| F ——每极吸力(N) | R_1 ——定子绕组电阻(Ω) |
| F_m ——磁动势(A) | R_a ——电枢绕组电阻(Ω) |
| F_m ——脉动磁场的磁动势幅值(A) | R_c ——电枢的串联电阻(Ω) |
| f ——频率(Hz) | R_f ——磁场绕组电路的电阻(Ω) |
| f_1 ——电源电流频率(Hz) | R_m ——等效励磁电阻(Ω) |
| G ——电导(S) | R_L ——负载电阻(Ω) |
| H ——磁场强度(A/m) | r ——动态电阻(Ω) |
| H_c ——矫顽力(A/m) | S ——视在功率(kVA) |
| H_m ——磁场强度最大值(A/m) | S_n ——额定容量(kVA) |
| I ——直流电流(A) | s ——转差率 |
| I ——交流电流有效值(A) | T ——电磁转矩($N \cdot m$) |
| I_1 ——一次电流(A) | T_L ——负载转矩($N \cdot m$) |
| I_2 ——二次电流(A) | T_{max} ——电磁转矩最大值($N \cdot m$) |
| I_f ——励磁电流(A) | T_n ——额定转矩($N \cdot m$) |
| I_{st} ——起动电流(A) | T_{st} ——起动转矩($N \cdot m$) |
| I_a ——电枢电流(A) | T ——周期(s) |
| I_{fn} ——额定励磁电流(A) | U ——直流电压(V) |
| I_n ——额定电流(A) | U ——交流电压有效值(V) |
| I_0 ——空载电流(A) | U_1 ——一次电压(V) |
| K ——变压比 | U_2 ——二次电压(V) |
| K_a ——绕组系数 | U_n ——额定电压(V) |
| L ——电感(H) | U_r ——基准电压(V) |
| N ——匝数 | u ——瞬时电压(V) |
| N_1 ——一次绕组匝数 | V ——电位(V) |
| N_2 ——二次绕组匝数 | W ——电功(J 或 $kW \cdot h$) |
| n ——转子转速(r/min) | x ——电抗(Ω) |
| n_1 ——同步转速(r/min) | x_1 ——定子绕组电抗(Ω) |
| n_n ——额定转速(r/min) | x_c ——容抗(Ω) |
| P ——功率(kW) | x_L ——感抗(Ω) |



x_m ——主磁通的励磁电抗 (Ω)
 Y ——导纳 (S)
 Z ——阻抗 (Ω)
 δ ——气隙长度 (m)
 铁损耗角
 η ——效率
 η_n ——额定效率
 θ_s ——步距角
 μ ——磁导率 (H/m)

μ_0 ——真空磁导率 (H/m)
 Λ_s ——空气隙磁导 (H)
 Φ ——主磁通 (Wb)
 Φ_m ——交变磁通最大值 (Wb)
 Φ_c ——漏磁通
 φ ——功率因数角
 ψ ——初相角
 ω ——角频率 (rad/s)



第 1 章 变 压 器

1 概述

1.1 变压器的用途和分类

变压器是利用电磁感应原理，以相同的频率从一个绕组向另一个绕组(或多个绕组)传输电能或电信号的一种静止电气设备。

图 2·1-1 是变压器示意图。图中，变压器的铁心是输入绕组和输出绕组之间的磁通的路径。若此磁路是非铁磁材料构成的，则此变压器称为空心变压器；若由铁磁材料构成，便称为铁心变压器。空心变压器主要用在无线电与测量领域中；铁心变压器则广泛地用在国民经济的各个领域。

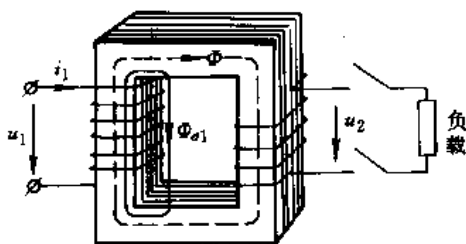


图 2·1-1 变压器示意图

u_1 —一次电压 u_2 —二次电压

Φ_{01} —漏磁通 Φ —主磁通

变压器能十分方便地改变交流电能的电压与电流，利用它的这一功能，在电子电路中可变换阻抗；在电力系统中则可实现电能的远距离输送和分配。此外，变压器还可以变换相位和变换相数。

变压器的品种、规格繁多，功能各异。表 2·1-1 列出了电力变压器的分类，表 2·1-2 列出了其他类型变压器的用途。

表 2·1-1 电力变压器的分类

| 分类方法 | 种 类 |
|------|---------------------------------------------------------------|
| 用途 | 升压变压器 降压变压器 配电变压器 联络变压器 厂用变压器 试验变压器 换流阀用变压器 |

(续)

| 分类方法 | 种 类 |
|-----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 相数 | 单相变压器 三相变压器 |
| 绕组数 | 双绕组变压器 多绕组变压器 自耦变压器 |
| 冷却方式和冷却介质 | 油浸自冷变压器 油浸风冷变压器 油浸水冷变压器 强迫油循环风冷变压器 强迫油循环水冷变压器 干式空气自冷变压器 干式浇铸绝缘变压器 合成非燃性油浸式变压器 SF ₆ 气体绝缘式变压器 蒸发冷却气体绝缘式变压器 |
| 绕组导线材料 | 铜线变压器 铝线变压器 |
| 调压方式 | 无励磁调压变压器① 有载调压变压器 |

① 在变压器一次侧和二次侧均与电力网断开的情况下，用分接头开关变换一次绕组或二次绕组的有效匝数进行分档调压。

表 2·1-2 其他类型变压器的用途

| 名 称 | 用 途 |
|----------|--------------------|
| 整流变压器 | 用作整流电源，变换相数 |
| 电炉变压器 | 用作工业电炉电源 |
| 矿用变压器 | 用于矿井场所 |
| 船用变压器 | 用于船舶上 |
| 中频变压器 | 供 1000~8000Hz 系统使用 |
| 大电流冲击变压器 | 供大电流试验用 |
| 脉冲变压器 | 供无线电、通信与自动控制领域里使用 |
| 电焊变压器 | 供电焊使用 |
| 试验变压器 | 用于各种试验设备 |



(续)

| 名称 | 用途 |
|------------|--------------------|
| 差动变压器 | 用于测量位移、压力、振动等非电量参数 |
| 电源变压器 | 用于各种电源设备 |
| 稳压变压器 | 用于电压经常波动的场所 |
| 耦合变压器 | 用于级间耦合 |
| 阻抗匹配变压器 | 用于需阻抗匹配的场合 |
| 仪用变压器 | 供测量和保护用 |
| 隔离变压器 | 用于需电隔离的场合 |
| 电气化铁路专用变压器 | 用于电气化铁路 |

1.2 变压器的主要结构部件

目前，电力变压器中应用最为广泛的是油浸式变压器，其外形如图 2-1-2 所示。变压器的主要结构部件有：

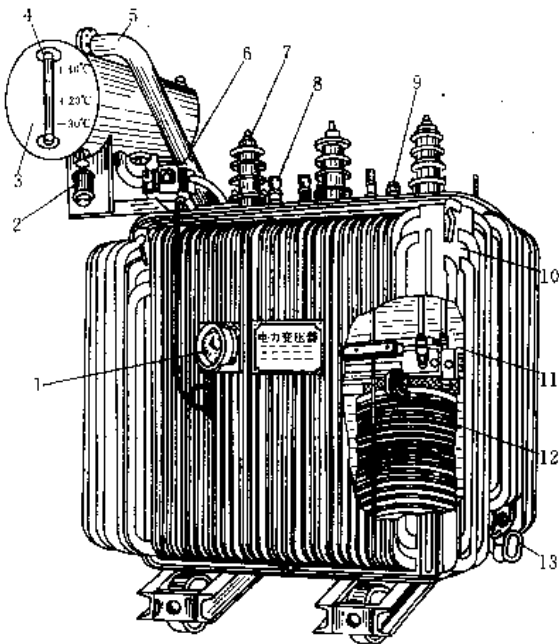


图 2-1-2 油浸式电力变压器

- 1—信号式温度计 2—吸湿器 3—贮油箱
- 4—油表 5—安全气道 6—气体继电器
- 7—高压套管 8—低压套管 9—分接头开关
- 10—油箱 11—铁心 12—线圈 13—放油阀门

1. 铁心 铁心构成了变压器的磁路。按铁心的构造，变压器可分为心式和壳式两种。图 2-1-3 是心式变压器，图 2-1-4 是壳式变压器。变压器铁心通常用两面涂有绝缘漆的硅钢片叠成或卷成。某些变压器要求

磁路有较高的磁导率，其铁心常用坡莫合金铁磁材料。近代电力变压器的铁心，大多已采用低损耗的冷轧硅钢片制成。

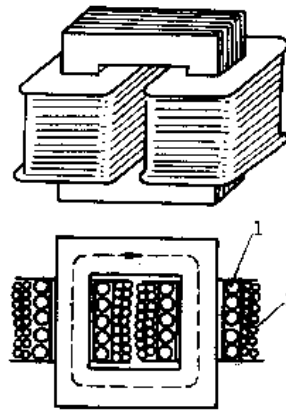


图 2-1-3 心式变压器

- 1—低压绕组 2—高压绕组

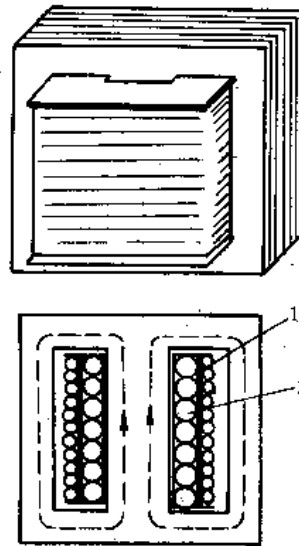


图 2-1-4 壳式变压器

- 1—高压绕组 2—低压绕组

2. 绕组 绕组是线匝的组合，它构成变压器的电路系统。与电源（或信号源）相联的绕组，称为一次绕组（或称原绕组、初级绕组）；与负载相联的绕组称为二次绕组（或称副绕组、次级绕组）。按照绕组在铁心上的排列方式，变压器可分为同心式和交叠式两种，如图 2-1-5 和图 2-1-6 所示。

3. 其他附件

a. 变压器油和油箱 为了增强绝缘，除小功率变压器外，变压器的铁心和绕组都浸入变压器油中。通过油受热后的对流作用，可以将绕组和铁心中的热量经箱壁散发到空气中去。为了增加散热面，在油箱壁上装



了散热管。油箱一般是椭圆形的,为了减少油与空气的接触面,油箱上还装了储油器(亦称膨胀器或油枕)。变压器的散热管和储油器外形见图 2-1-2。

b. 变压器的分接头及调压开关 为了变换一次、二次绕组的有效匝数比,容量较大的变压器一般在高压绕组上都有抽头,称为分接头。用装在油箱上的调压开关改变分接头,就可调节低压侧电压。

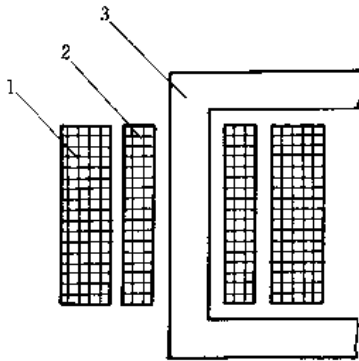


图 2-1-5 同心式绕组

1—高压绕组 2—低压绕组 3—铁心

c. 绝缘套管 变压器绕组的引出线必须穿过绝缘套管,使它与油箱绝缘。较低电压采用实心瓷套管,10kV 以上需采用空心充气或充油式瓷套管。

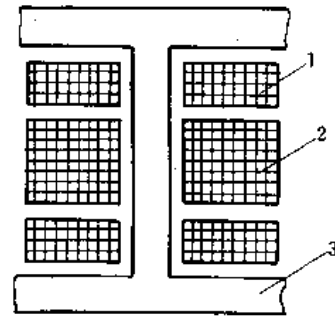


图 2-1-6 交叠式绕组

1—低压绕组 2—高压绕组 3—铁心

2 变压器的工作原理

2.1 变压器的空载运行

变压器的空载运行见表 2-1-3。

表 2-1-3 变压器的空载运行

| 项目 | 内容或数学表达式 | 备注 |
|---------|-----------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 定义 | 变压器的一个绕组接电源,另一个绕组开路 | |
| 示意图 | | u_1, \dot{U}_1 —外加正弦电压的瞬时值和相量(V) Φ, Φ_m —主磁通的瞬时值和最大值(Wb) $\Phi_{\sigma 1}$ —一次绕组漏磁通(Wb) i_1, \dot{I}_0 —空载电流的瞬时值和相量(A) \dot{I}_μ —磁化电流相量(A) \dot{I}_{Fe} —铁耗电流相量(A) N_1, N_2 —一次、二次绕组的匝数 e_1, E_1, \dot{E}_1 —一次电动势的瞬时值、有效值和相量(V) e_2, E_2, \dot{E}_2 —二次电动势的瞬时值、有效值和相量(V) $e_{\sigma 1}, \dot{E}_{\sigma 1}$ —一次漏磁电动势的瞬时值和相量(V) u_{20}, \dot{U}_{20} —二次空载电压的瞬时值和相量(V) r_1 —二次绕组电阻(Ω) r_m —励磁电阻(Ω) x_m —励磁电抗(Ω) $x_{\sigma 1}$ —一次绕组漏磁电抗(Ω) δ —铁耗角 φ_0 —空载运行的功率因数角 |
| 电磁关系方程式 | $E_1 = 4.44 f N_1 \Phi_m$ $E_2 = 4.44 f N_2 \Phi_m$ | |
| 基本方程式 | $\dot{U}_1 = \dot{I}_0 r_1 - \dot{E}_{\sigma 1} - \dot{E}_1$ $\dot{U}_{20} = \dot{E}_2$ | |
| 电压比 | $K = \frac{U_1}{U_{20}}$ | |



(续)

| 项目 | 内容或数学表达式 | 备注 |
|------|------------------------|----|
| 空载电流 | $I_0 = I_\mu + I_{Fe}$ | |
| 电路模型 | | |
| 相量图 | | |

2.2 变压器的负载运行

2.2.2 变压器负载运行时的主要参数及性能

2.2.1 变压器的负载运行

变压器的负载运行见表 2.1-4。

(1) 电流比 当变压器一次侧接电源,二次侧接负载后

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{K}$$

表 2.1-4 变压器的负载运行

| 项目 | 内容或数学表达式 | 备注 |
|-----|----------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 定义 | 变压器的一个绕组接电源,另一个绕组接负载 | \dot{U}_1 —外加正弦电压的相量(V) Φ_1, Φ_m —主磁通瞬时值和最大值相量(Wb) |
| 示意图 | | $\Phi_{\sigma 1}, \Phi_{\sigma 2}$ —一、二次侧漏磁通的相量(Wb) \dot{I}_1, \dot{E}_1 —一次侧电流和电动势的相量(V) \dot{I}_2, \dot{E}_2 —二次侧电流和电动势的相量(V) |



(续)

| 项目 | 内容或数学表达式 | 备注 |
|----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 基本方程式 | 电压平衡方程式 $\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1$ $U_2 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 Z_2$ | E_{20} —二次侧漏磁电动势的有效值 (V) |
| | 磁动势平衡方程式 $\dot{I}_1 N_1 + \dot{I}_2 N_2 = \dot{I}_0 N_1$ | \dot{I}_0 —励磁电流相量(A) |
| | 励磁支路平衡方程式 $-\dot{E}_1 = \dot{I}_0 Z_m$ | N_1, N_2 —一、二次绕组的匝数 |
| | 负载电路电压平衡方程式 $\dot{U}_2 = \dot{I}_2 Z_L$ | $Z_1 = r_1 + jx_1$ —一次绕组漏阻抗(Ω) $Z_2 = r_2 + jx_2$ —二次绕组漏阻抗(Ω) $Z_m = r_m + jx_m$ —励磁阻抗(Ω) $Z_L = r_L + jx_L$ —负载阻抗(Ω) |
| 目的 | 将二次侧的参数归算到一次侧,使工程计算大为简化 | 凡在所代表物理量的符号上加“'”后表示该物理量的归算值 |
| 变压器参数的归算 | 二次侧电流的归算值 $I_2 = I_2' \frac{1}{K}$ | |
| | 二次绕组电势、电压的归算值 $E'_{e2} = KE_{e2}$ $U_2 = KU_2'$ | |
| | 二次绕组电阻、漏电抗、阻抗归算值 $r_2' = K^2 r_2 \quad x_{e2}' = K^2 x_{e2}$ $Z_2 = r_2' + jx_2' = K^2 Z_2$ | |
| | 负载阻抗的归算值 $Z_L' = K^2 Z_L$ | |
| 电路模型 | “T”型 | |
| | 简化 | |

电力工业出版社 请尊重作者版权

电力工业出版社

111



(续)

| 项目 | 内容或数学表达式 | 备注 |
|----------------------------|----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>“T”型电路带感性负载</p> | | <p>K—变比</p> <p>$Z_k = r_k + jx_k$ $= Z_1 + Z_2$—短路阻抗 (Ω)</p> <p>$r_k = r_1 + r_2$—短路电阻 (Ω)</p> <p>$x_k = x_{01} + x'_{02}$—短路电抗 (Ω)</p> <p>φ_1—带感性负载时一次侧功率因数角 ($^\circ$)</p> |
| <p>相量图 “T”型电路带容性负载</p> | | <p>φ_2—带容性负载时一次侧功率因数角 ($^\circ$)</p> |
| <p>简化电路带感性负载</p> | | |

绝缘公司制作 请尊重原作者版权

1-25 绝缘公司



(续)

| 项目 | 内容或数学表达式 | 备注 |
|------------------|----------|----|
| 相量图 简化电路带容性负载 | | |

式中 N_1 、 I_1 ——一次线圈匝数、电流 (A)；
 N_2 、 I_2 ——二次线圈匝数、电流 (A)；
 K ——变压器的变压比。

K ——变压器变比，即一次、二次绕组的匝数比。

(2) 短路试验和阻抗电压 短路试验时，将变压器二次绕组短路，如图 2-1-7 所示。在一次绕组两端加低电压，使绕组中的电流达到额定值，此时一次绕组所加的低电压 $U_1 = U_{1n}$ ，称为阻抗电压（或称短路电压），通常以额定电压百分数表示，即

$$u_k = \frac{U_{1n}}{U_{1n}} \times 100\%$$

式中 U_{1n} ——二次绕组短路，一次绕组电流达到额定值时的电压 (V)；

U_{1n} ——一次绕组的额定电压 (V)。

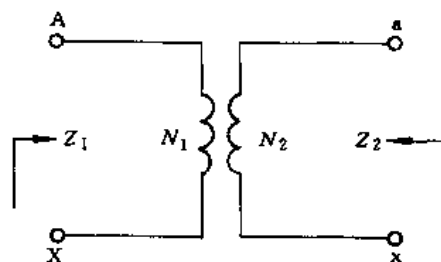


图 2-1-8 变压器的阻抗变换

在电子电路中，常利用变压器可以变换阻抗的方法来获得阻抗匹配。

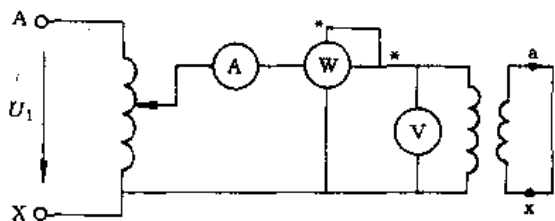


图 2-1-7 短路试验接线图

(3) 阻抗变换 图 2-1-8 所示变压器，如忽略变压器本身阻抗，则一次、二次绕组阻抗比

$$\frac{Z_1}{Z_2} = \frac{N_1^2}{N_2^2} = K^2$$

式中 Z_1 ——变压器的输入阻抗 (Ω)；

Z_2 ——变压器的负载阻抗 (Ω)；

N_1 、 N_2 ——变压器一次、二次绕组的匝数；

3 变压器的运行特性

3.1 电压调整率 (电压变化率)

设变压器外加电压为额定电压，其电压调整率

$$\Delta u = \frac{U_{20} - U_2}{U_{20}} \times 100\%$$

式中 U_{20} ——二次绕组开路时的端电压 (V)；

U_2 ——二次绕组带负载时的端电压 (V)。

3.2 损耗和效率

变压器效率

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100\%$$

式中 P_2 ——输出有功功率 (kW)；



P_1 ——输入有功功率 (kW)。

变压器负载运行时, 在 $U_2 = U_{2N}$ 的情况下, 其效率

$$\eta = \frac{\beta S_H \cos \varphi_2}{\beta S_H \cos \varphi_2 + \beta^2 p_{MH} + p_0} \times 100\%$$

式中 β ——负载系数, 其值 $\beta = I_2/I_{2N} = I_1/I_{1N}$, I_2 和 I_{2N} 是二次绕组的电流和额定电流; I_1 和 I_{1N} 为一次绕组的电流和额定电流;

$\cos \varphi_2$ ——负载功率因数;

S_H ——变压器额定容量 (kVA);

p_{MH} ——短路电流为额定电流时的短路损耗 (铜损耗) (kW);

p_0 ——空载电压为额定电压时的空载损耗 (铁损耗) (kW)。

对于给定变压器, 其 p_{MH} 和 p_0 可用短路和空载试验的办法获得。变压器的效率曲线如图 2-1-9 所示。当变压器的铁损耗等于铜损耗时, 效率达到最高, 变压器一般 $\beta = 0.5 \sim 0.6$ 时效率最高。对于中小型变压器, $\eta = 95\% \sim 98\%$, 大型变压器一般为 99% 以上。

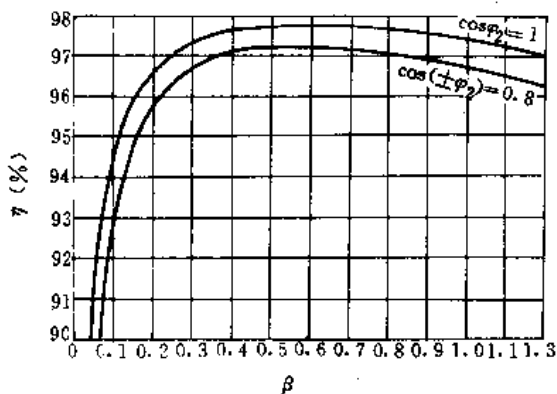


图 2-1-9 变压器的效率曲线
 η —效率 β —负载系数

3.3 电力变压器的经济运行

电力变压器经济运行的途径有如下三种:

(1) 掌握负载特性, 合理选择变压器的容量, 使一台变压器大部分时间的负载接近于最佳负载。变压器的最佳负载通常在半载左右。

(2) 合理选择变压器分接头。特别在农村电力网中, 轻载时适当提高变压器分接头电压可以降低线损和改善功率因数。

(3) 选择并联运行方案, 作出一台或数台并联运行时的损耗与容量之间的关系曲线, 如图 2-1-10 所示。根据负载变化情况便可及时调整并联运行台数。如图中 $S > S_2$ 后, 则采用二台并联运行。

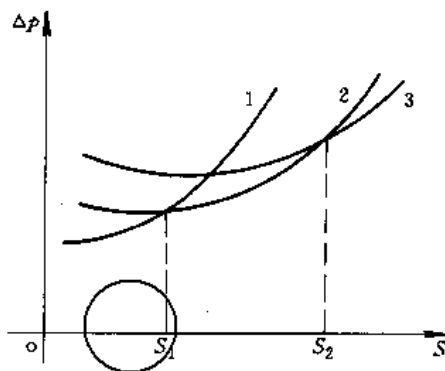


图 2-1-10 变压器并联运行时功率损耗 Δp 与容量 S 之间关系

曲线 1—变压器 I 单独运行

曲线 2—变压器 II 单独运行

曲线 3—变压器 I 和变压器 II 并联运行

但要注意, 投入并联运行的变压器容量尽可能接近, 最大容量与最小容量之比不宜超过 3:1。

4 三相变压器的连接

在三相变压器中, 字母 A、B、C 和 a、b、c 分别表示各相高压绕组和低压绕组的始端。三相电源连接成星形、三角形和曲折形时, 对高压绕组分别用字母 Y、D 或 Z 表示, 对低压或中压绕组分别用字母 y、d 或 z 表示。如果星形联结或曲折形联结有中性线时, 则分别用 YN 或 ZN 及 yn 或 zn 表示。三相变压器各相线圈的连接方式不同时, 高、低绕组间就有不同的相位差。为了形象地表示高、低压绕组间的相位差, 通常用所谓时钟表示法。此法把高压端子与中性点(真实的或虚设的)电压相量看成是时钟的长针(分针), 并把它固定指向 12, 低压端子与中性点(真实的或虚设的)电压相量看成是短针(时针), 这些相量之间的角度差异即为相位差, 其钟点就作为该变压器联结组标号。图 2-1-11a 是三相绕组连接成星形、三角形和曲折形时的 A 相电压相量 (图中虚线表示为虚设的电压相量), 图 2-1-11b 和 c 是三相变压器联结组标号为 (D, y5) 和 (D, z10), 高、低绕组间的相位差分别为 $5 \times 30^\circ = 150^\circ$ 和 $11 \times 30^\circ = 330^\circ$ 。

表 2-1-5 给出了常用的变压器联结法。



此星公司制作 请尊重原作者版权

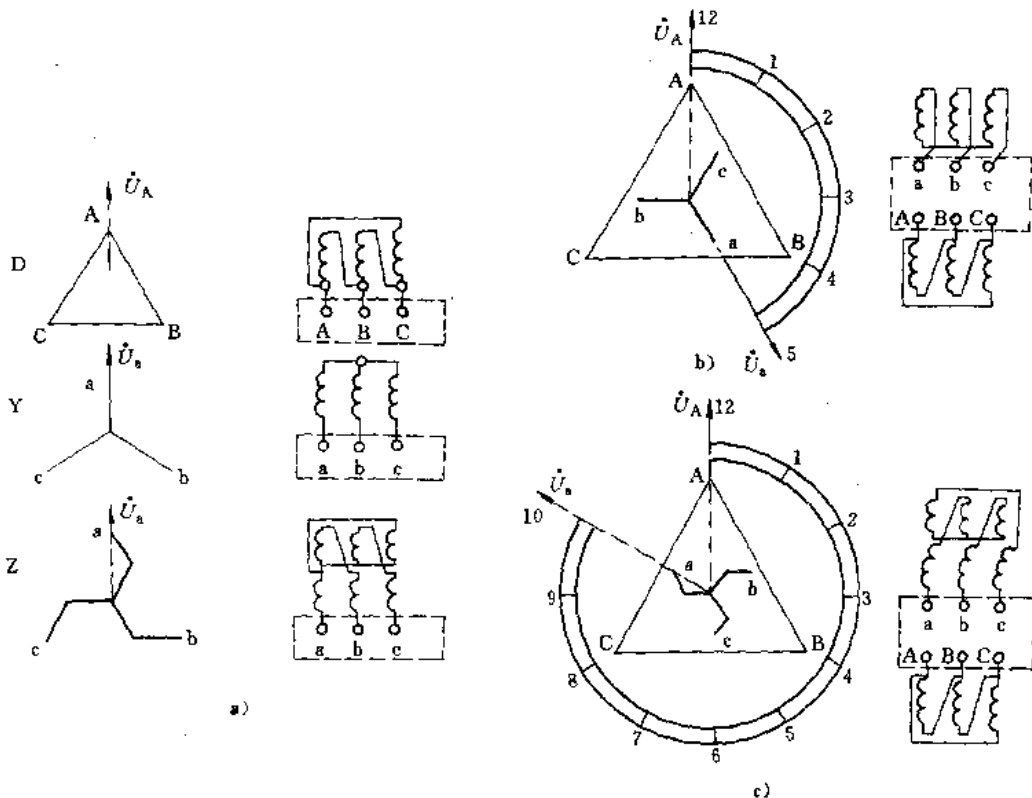


图 2-1-11 联结组标号说明图

a) 线圈连接成星形、三角形和曲折形时 A 相电压相量
 b) 联结组标号 (D, y3) c) 联结组标号 (D, z10)

表 2-1-5 常用的变压器联结法

| 序号 | 绕组连接图 | 相电压间相位差 | 联结组标号 | 序号 | 绕组连接图 | 相电压间相位差 | 联结组标号 |
|----|-------|---------|--------|--------------------|-------|---------|--------|
| 1 | | | Y, y0 | 4 | | | Y, z11 |
| 2 | | | Y, d11 | 注: 摘自 GB1094. 4-85 | | | |
| 3 | | | D, z0 | 5 变压器并联运行 | | | |

注: 摘自 GB1094. 4-85

5 变压器并联运行

两台或两台以上变压器其一次、二次绕组的同名端分别并联到一次和二次的公共母线上的运行方式, 称为并联运行, 如图 2-1-12 所示。

5-1 理想并联运行的条件

变压器理想并联运行情况, 空载时不产生环流应满足的条件如下:



- (1) 各变压器的变压比相同;
- (2) 各变压器的连接组别相同;
- (3) 各变压器用标么值[⊖]表示的短路阻抗相同,且短路电抗与短路电阻之比值相同。

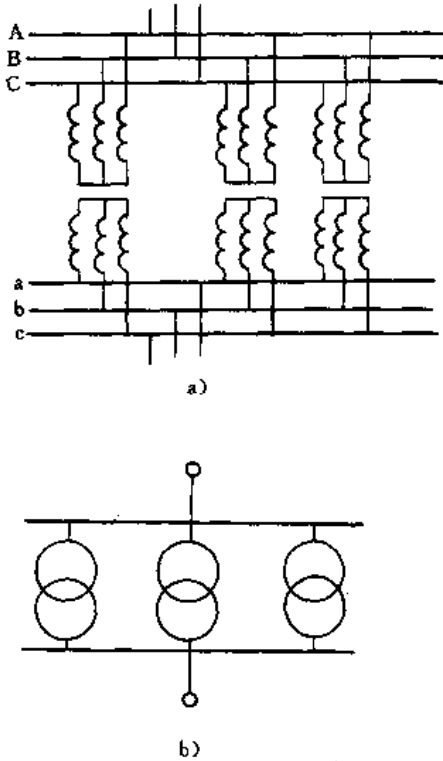


图 2-1-12 变压器的并联运行
a) 接线图 b) 简化图

上述条件 1 和 2 是保证空载时变压器间无环流, 条件 3 是保证各变压器的负载能合理分配。在实际运行中, 条件 2 必须严格遵守, 其它两条允许稍有出入。

5.2 变压器并联运行时的负载分配

当并联的各台变压器有相同的变比, 有不同的短路电压时, 各台变压器所承担的负载将和它们的额定容量成正比, 与短路电压成反比, 即

$$S_1 : S_2 : \dots : S_n = \frac{S_{N1}}{u_{k1}} : \frac{S_{N2}}{u_{k2}} : \dots : \frac{S_{Nr}}{u_{kr}}$$

式中 S_1, S_2, \dots, S_n —— 各台变压器所承担的容量 (kVA);

$S_{N1}, S_{N2}, \dots, S_{Nr}$ —— 各台变压器的额定容量 (kVA);

$u_{k1}, u_{k2}, \dots, u_{kr}$ —— 各台变压器的短路电压标么值 (即铭牌上短路电压百分数去掉 % 符号后再除以 100)。

若并联的各台变压器有相同的短路电压标么值, 则负载分配只与变压器的额定容量成正比, 即

$$S_1 : S_2 : \dots : S_n = S_{N1} : S_{N2} : S_{Nr}$$

6 其他类型的变压器

6.1 互感器

互感器是用于传递信息, 供测量、保护和自动控制之用的设备。它是利用变压器按比例变换电压和变换电流的特点而制成的, 其工作原理与变压器基本相同。采用互感器的目的有:

- (1) 使测量仪表或继电器与高压电路隔开, 以保证工作人员和设备的安全;
- (2) 扩大常规仪表的量程;
- (3) 直接带动继电器或为控制系统提供信号。

根据用途互感器可分为电压互感器和电流互感器两种。电压互感器二次侧额定电压都是 100V, 电流互感器二次侧额定电流都是 5 (或 1) A。

随着科技的发展, 互感器的品种增多, 准确度提高, 如高精度的电流比率器和电压比率器、电压和电流复合式互感器、电子线路补偿互感器等特种互感器。

6.1.1 电压互感器

图 2-1-13 是电压互感器外形和原理接线图。其铁心接地, 一次绕组接到被测的线路上, 二次绕组接入测量仪表或继电器的电压线圈, 由于它们的阻抗大, 所以电压互感器相当于空载运行的单相变压器。若忽略励磁电流和漏阻抗压降, 则一次、二次电压与一次绕组、二次绕组的匝数成正比, 即

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} = K$$

在联结方法正确时, U_1 和 U_2 相位差接近零。实际工作时, 互感器并不是空载, 因励磁电流和漏阻抗压降的影响, 使互感器存在着变比误差和相位误差。为了使测量结果或获取的信号接近理想情况, 接入二次侧的电压线圈应具有高阻抗, 而且其所需的功率不能超过电压互感器的额定功率。使用电压互感器时, 为了安全, 其二次绕组连同铁心必须可靠接地, 同时二次绕组不允许短路。

⊖ 某些物理量 (如电压、电流、阻抗、功率等) 与某一选定的同单位的基值之比, 称为标么值 (或相对值), 并在原物理量加以下标 “*”, 表示该物理量的标么值。为便于工程计算, 通常取各物理量的额定值作为基值。



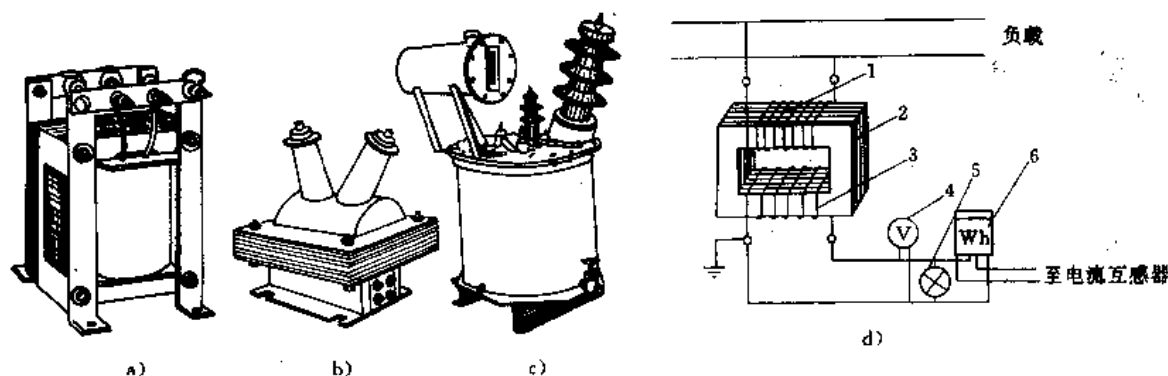


图 2-1-13 电压互感器外形和原理接线图

a)、b)、c) 外形 d) 原理接线图

1—一次绕组 2—铁心 3—二次绕组
4—电压表 5—指示灯 6—电度表

6-1-2 电流互感器

图 2-1-14 是电流互感器的外形结构和原理接线图。使用时，电流互感器的一次绕组串联在被测量的电路里，二次绕组接入电流表或其他测量仪表的电流线圈，由于它们的阻抗较小，所以电流互感器相当于短路运行。若在忽略励磁电流和漏磁阻抗的理想情况下，则二次电流

$$I_2 = I_1 \frac{N_1}{N_2}$$

式中 I_1 ——电流互感器的一次电流 (A)；

N_1 、 N_2 ——电流互感器的一次绕组、二次绕组匝数。

在联结方法正确时， I_1 与 I_2 相位差接近零。实际使用电流互感器因要计及励磁电流和漏磁阻抗的影响，因而它也有变比和相位两种误差。为使测量的结果接近理想状态，要求二次绕组所串联的电流线圈阻抗不能超过额定二次负荷阻抗值。此外，应特别注意，二次绕组不能开路，绕组的一端和铁壳都必须接地 (图 2-1-14d)。

6-2 自耦变压器

自耦变压器是将普通双绕组变压器的一次绕组和二次绕组串联成一个绕组作为高压绕组，而将此绕组的一部分作为低压绕组 (图 2-1-15)。自耦变压器的特点是高压绕组和低压绕组之间除了有磁的联系外，还有电的联系。

高压大容量的自耦变压器常用于电力系统中，低

压小容量自耦变压器也称小容量自耦调压器，其外形和原理电路如图 2-1-16 所示。在实验中它常用来调节实验用的电压。

自耦变压器的优点是结构简单、省材料、效率高，并可连续调节其电压比 (1.5~2)。其缺点是高低压绕组有电的联系，故它们的绝缘要采用同一等级。此外，“电气安全操作规程”规定，不允许将它作为安全变压器使用。

6-3 稳压变压器

稳压变压器又称恒压变压器，是一种输出电压维持恒定的特殊变压器。它具有结构简单、电压稳定度高、稳压范围宽、抗干扰性能好和有过载保护等优点，因而广泛应用于计算机、机床控制、通信和电视等电子设备电源中。稳压变压器的主要缺点是频率特性较差、负载调整能力差和温升高时噪声较大。

图 2-1-17 是稳压变压器外形、结构和电路示意图，它与普通变压器的主要区别在于：一次绕组与二次绕组之间被带空气隙的磁分路隔开，二次绕组是 N_3 和 N_2 串联而成，其中绕组 N_2 并联电容 C 。

变压器一次侧接到交流电源 U_1 后，一次侧仍与普通变压器一样，铁心工作在磁化曲线膝点以下的线性部分。由于变压器中存在带气隙的磁分路，使一次绕组的磁通不与二次绕组耦合而直接回到一次侧，二次绕组的磁通也不与一次绕组耦合而直接回到二次侧。当绕组 N_2 与电容 C 发生并联谐振后，其磁通远大于一次而使二次铁心进入饱和状态。由于铁心饱和，故二次侧每半个周期磁通变化量几乎为零，从而使输



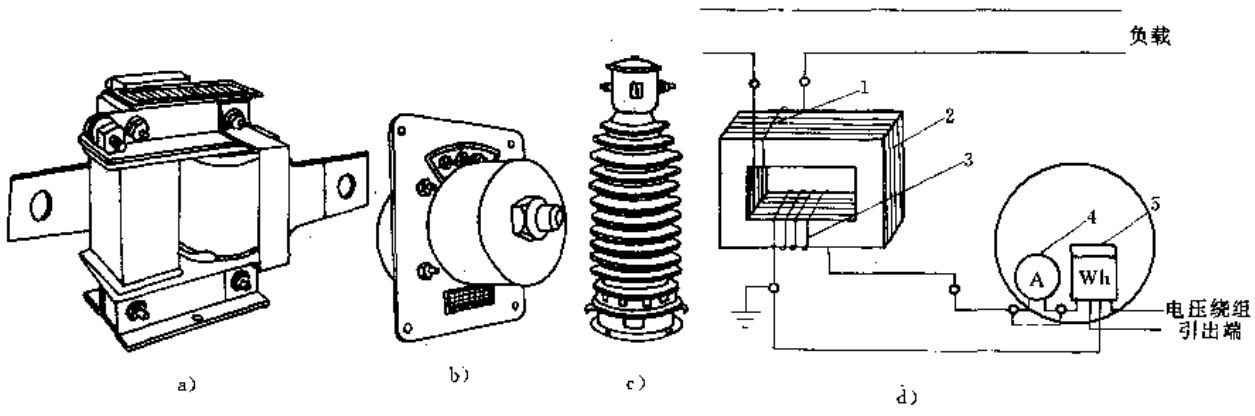


图 2-1-14 电流互感器的外形和原理接线图
 a)、b)、c) 外形 d) 原理接线图
 1—一次绕组 2—铁心 3—二次绕组
 4—电流表 5—电度表

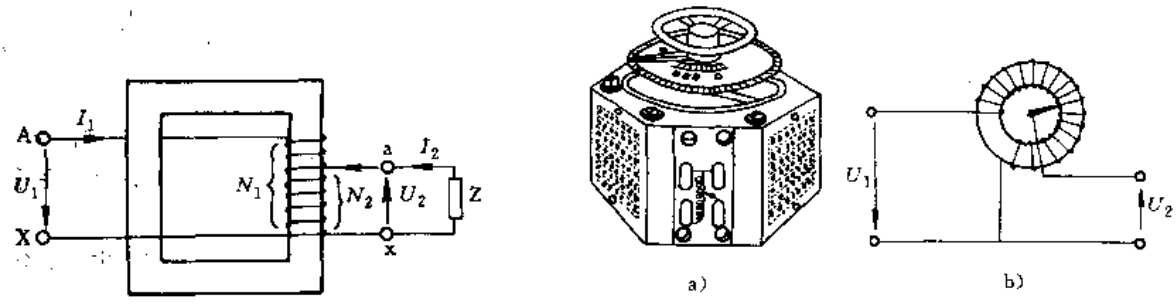


图 2-1-15 自耦变压器原理图

图 2-1-16 自耦调压器
 a) 外形 b) 原理电路

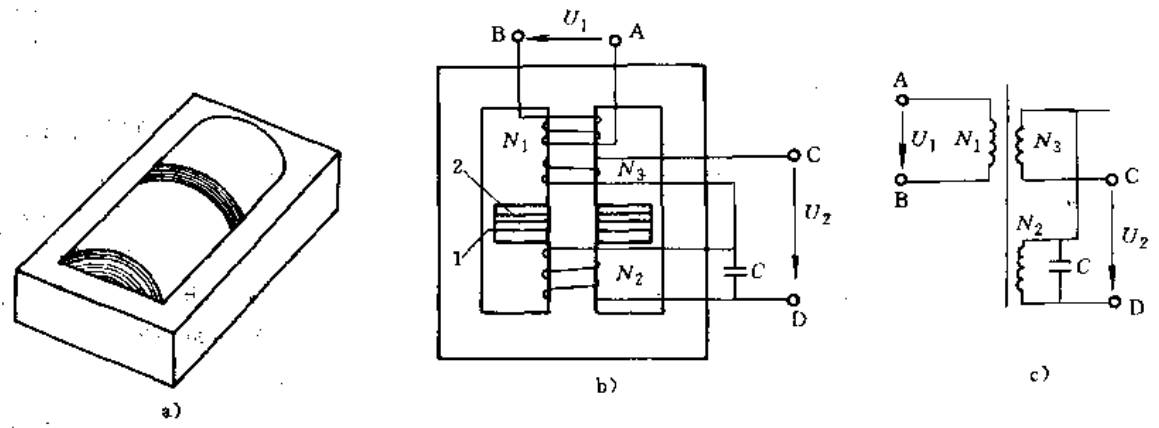


图 2-1-17 稳压变压器
 a) 外形 b) 结构 c) 电路
 1—空气隙 2—磁分路

出电压 U_2 恒定不变，起到了稳定电压的作用。此外，二次输出还跟一个与二次绕组极性相反的补偿线圈 N_3 相连接。它的作用是，当输入电压升高时，由于磁

化曲线饱和段不是水平线的缘故，使得输出电压也随之略有上升，但接了补偿线圈后，因其极性与二次绕组相反，抑止了输出电压上升的趋势，起到了补偿作用。



7 变压器的常见故障和解决方法

变压器局部或全部损坏,不具备预定的功能,需在短时期内退出运行状态,称为故障。产生故障的主要原因有:制造缺陷;非正常运行;雷电过电压;外部短路等。

变压器是一种可靠性较高的设备,一般很少发生故障。表 2-1-6 归纳了变压器常见的故障现象、产生的可能原因及处理方法。

表 2-1-6 变压器的常见故障及处理方法

| 故障现象 | 可能原因 | 处理方法 |
|-------------|--------------------------------------|------------------------------------------------|
| 声响异常 | 1. 外加电压过高 2. 紧固件松动 3. 套管表面有闪络 | 1. 降低外加电压 2. 减少负载或停电修理。加固松动部件 3. 擦洗或更换套管 |
| 声响特大或有爆裂声 | 1. 绝缘损坏 2. 硅钢片间绝缘损坏 | 1. 立即停下修理 2. 立即停下修理 |
| 油面上升 | 环境温度上升 | 适当放油 |
| 油面下降 | 1. 气候变冷或渗油 2. 严重漏油 | 1. 适当添油 2. 立即停下修理 |
| 油温过高 | 1. 温度表损坏 2. 变压器冷却系统不正常 3. 负载过大 | 1. 修理或调换温度计 2. 修理冷却系统 3. 降低负载 |
| 气体继电器内有气体聚集 | 变压器油已劣化 | 取出气样、油样进行气相色谱分析。若所得结果为油已劣化,则进行油处理 |

8 变压器的型号和额定数据

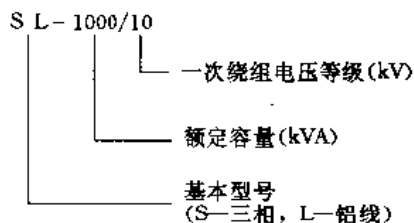
8.1 常用的变压器型号含义

根据电力变压器国家标准 GB1094—79,对变压器产品型号含义规定如表 2-1-7 所列。

表 2-1-7 变压器型号含义

| 分类项目 | 代表符号 | 分类项目 | 代表符号 |
|-------|------|---------|------|
| 单相变压器 | D | 强迫油导向循环 | D |
| 三相变压器 | S | 三绕组变压器 | S |
| 风冷式 | F | 自耦变压器 | O |
| 水冷式 | S | 有载调压 | Z |
| 强迫油循环 | P | 铝线变压器 | L |

【例 2-1-1】



8.2 铭牌上标出的额定数据

变压器铭牌上标出的额定数据有:

(1) 额定容量 S_n (kVA 或 VA) 在额定条件下使用时,输出视在功率的保证值等于变压器二次侧额定电压与额定电流的乘积。

单相变压器: 额定容量 = 额定电压 × 额定电流

三相变压器: 额定容量 = $\sqrt{3}$ × 额定电压 × 额定电流

(2) 额定线电压 U_{1n}/U_{2n} (V 或 kV) 一次绕组额定电压 U_{1n} 是指变压器在额定运行情况下,制造厂所规定的线电压值;二次额定电压 U_{2n} 是指变压器空载时分接头上的线电压保证值。

(3) 额定线电流 I_{1n}/I_{2n} (A) 变压器在额定运行情况下所规定的线电流值。

(4) 频率 f (Hz) 我国标准频率规定为 50Hz。

(5) 相数

(6) 接线图与连接组别

(7) 漏阻抗标么值或短路电压 $u_k\%$ 用额定电压的百分数表示的短路电压。

(8) 运行方式

(9) 冷却方式

此外,铭牌上还标出变压器的总重量、油的重量和器身的重量等。



第2章 三相异步电动机

1 概述

1.1 三相异步电动机的用途和分类

三相异步电动机能将电能转变为机械能，其转子转速低于旋转磁场的同步转速。这种电动机具有结构简单、制造方便、价格低廉、工作可靠和坚固耐用等优点，是各类机械中的主要动力设备，在工农业生产、国防及家电产品中都得到极为广泛的应用。这种电动机的主要缺点是调速比较困难和要吸收无功功率。

三相异步电动机的分类见表 2-2-1。

表 2-2-1 三相异步电动机的分类

| 分类方法 | 种类 |
|---------|-------------------------------|
| 转子绕组结构 | 笼型（单笼、双笼、深槽） 绕线式 |
| 机壳的防护形式 | 防护式 全封闭式 开启式 防爆式 |
| 机座大小 | 小型 中型 大型 |
| 调速 | 变频调速 减速 电磁调速 整流子异步变速 |
| 其他 | 高滑差 高起动转矩 力矩 |

1.2 三相异步电动机的主要结构部件

图 2-2-1 示出笼型异步电动机的结构。由图可见，它有两个基本部件：定子和转子。

1. 定子 电动机的定子是由机座、铁心和三相绕组组成。机座通常用铸铁或铸钢制成。定子铁心是电机主磁路的一部分，它由硅钢片叠成，硅钢片内圆上冲有齿和槽，槽中嵌放定子三相绕组。

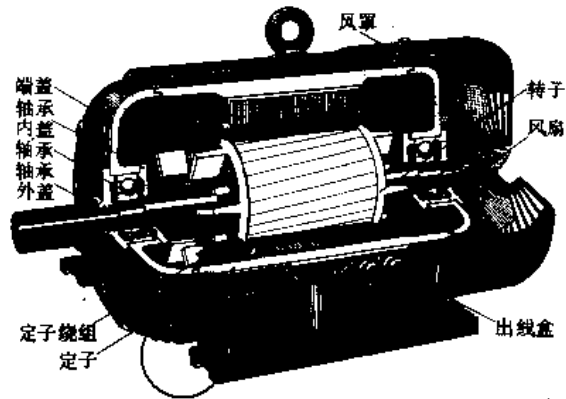


图 2-2-1 笼型异步电动机

2. 转子 电机的转子是由铁心、绕组和转轴组成的。转子铁心也是电机主磁路的一部分，它是由硅钢片叠压而成的圆柱体，直接套在转子轴上或转子支架上。转子铁心上冲有均匀分布的槽，槽内嵌放着导条，导条的两端用短路环焊接起来，整个转子绕组外形似“笼子”。为了改善电机的起动性能，有的笼型异步电动机转子采用深槽式或双笼型结构，如图 2-2-2 所示。

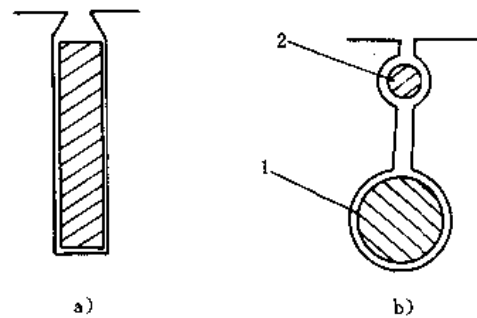


图 2-2-2 深槽式和双笼型转子

a) 深槽式转子 b) 双笼型转子

1—下笼 2—上笼

定子和转子之间有空气隙，气隙一般为 0.2 ~ 1mm。

2 三相异步电动机的基本工作原理

如图 2-2-3 所示，当定子绕组通以三相电流后，在空气隙中便产生一个旋转磁场，其转速



$$n_1 = \frac{60f_1}{p} \quad (\text{r/min})$$

式中 f_1 ——定子绕组中电流的频率 (Hz);
 p ——磁极对数。

旋转磁场的转速 n_1 又称为同步转速。旋转磁场切割导线而在导线内产生感应电流, 电流与旋转磁场相互作用产生电磁力 F , 作用于转子导体上的电磁力对转子的轴便形成转矩, 转矩方向与旋转磁场转向一致, 拖动转子顺旋转磁场方向旋转, 从而将电能转换为机械能。设转子的转速为 n , 只有 n_1 与 n 不相等时, 电磁转矩才不等于零。 n 恒低于 n_1 , 转差为 $(n_1 - n)$, 异步电动机转差率 (又称滑差率)

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1}$$

式中 n_1 ——同步转速 (r/min);
 n ——转子实际转速 (r/min)。当 $n < n_1$ 且异步电机作电动机运行时, 其转子转速 $0 < n < n_1$, s 便 > 0 , 也即 $1 > s > 0$ 。

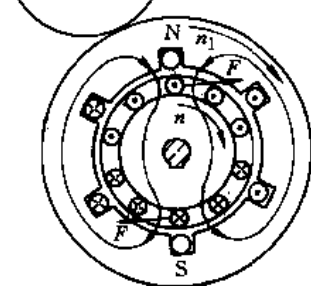


图 2-2-3 异步电动机的工作原理
 一般异步电动机的额定转差率
 $s_n = 0.01 \sim 0.05$

3 三相异步电动机的等效电路和相量图

异步电机的等效电路是表示电机中的基本电磁关

系。要将异步电机定子、转子之间存在着的磁耦合联系变换成电联系的等效电路时, 需要经过二次等效变换:

(1) 频率归算。其含义是用一个与定子电路有相同频率 f_1 的等效静止的转子电路来置换实际旋转的转子电路。

(2) 绕组归算。其含义是用一个等效绕组来代替与定子有相同相数 m_1 、相同匝数 N_1 和相同绕组系数 K_m 归算后的转子绕组。

总之, 等效变换的条件是归算前后电机内的电磁性能及功率平衡关系保持不变。

图 2-2-4a 是经频率归算和绕组归算^①后的异步电机一相的 T 形等效电路。图中符号含义如下:

- R_1, X_1 ——定子绕组的电阻 (Ω) 和漏抗 (Ω);
- R_2, X_2' ——归算后转子绕组的电阻 (Ω) 和漏抗 (Ω);
- R_m ——反映铁耗的等效励磁电阻 (Ω);
- X_m ——对应于主磁通的励磁电抗 (Ω);
- I_m ——励磁电流 (A);
- I_1 ——定子电流 (A);
- I_2' ——归算后转子电流 (A);

$(1-s) R_2/s$ ——以电功率损耗形式来模拟异步电机总机械功率的模拟电阻 (Ω)。

图 2-2-4 中, 图 b 是对应于图 a 电路的相量图。

【例 2-2-1】 一台三相 4 极异步电动机, 额定功率 $P_n = 10\text{kW}$, 额定电压 $U_{1n} = 380\text{V}$, 额定转速 $n_n = 1455\text{r/min}$, 额定频率 $f_n = 50\text{Hz}$, 定子为三角形接法, 定子每相电阻 $R_1 = 1.375\Omega$, 漏抗 $X_1 = 2.43\Omega$, 励磁电阻 $R_m = 8.34\Omega$, 电抗 $X_m = 82.6\Omega$, 转子电阻 $R_2 = 1.047\Omega$, 漏抗 $X_2 = 4.4\Omega$, 试求额定运行时的定子电流 I_1 , 转子电流 I_2' , 励磁电流 I_m , 功率因数 $\cos\varphi$, 输入功率 P_1 及效率 η 。

解 计算项目、计算公式及计算结果见表 2-2-2。

表 2-2-2 例 2-2-1 的计算项目、公式及结果

| 项目 | 计算公式 | 计算结果 |
|-------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 额定运行时转差率 | $s_n = \frac{n_1 - n_n}{n_1}$ | 0.03 |
| T 形等效电路的各参数 | $Z_1 = R_1 + jX_1$ $Z_m = R_m + jX_m$ $Z_2 = R_2/s_n + jX_2'$ $Z_B = Z_1 + (Z_2 // Z_m)$ | $2.79 / 60.5^\circ \Omega$ $83 / 84.2^\circ \Omega$ $35.18 / 7.2^\circ \Omega$ $32.4 / 30.49^\circ \Omega$ |

① 归算方法见参考文献[3]p161~167。



(续)

| 项 目 | 计 算 公 式 | 计 算 结 果 |
|--------|---------------------------------------|-----------------|
| 定子电流 | $i_1 = \frac{\dot{U}_1}{Z_{\Sigma}}$ | 11.7 / -30.49°A |
| 转子电流 | $i_2 = (-i_1) \frac{Z_m}{Z_2 + Z_m}$ | 9.99 / 170.12°A |
| 励磁电流 | $i_m = i_1 \frac{Z_2}{Z_2 + Z_m}$ | 4.23 / -85.89°A |
| 定子功率因数 | $\cos\varphi_1$ | 0.862(落后) |
| 输入功率 | $P_1 = 3U_1 I_1 \cos\varphi_1$ | 11.5kW |
| 效 率 | $\eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100\%$ | 87% |

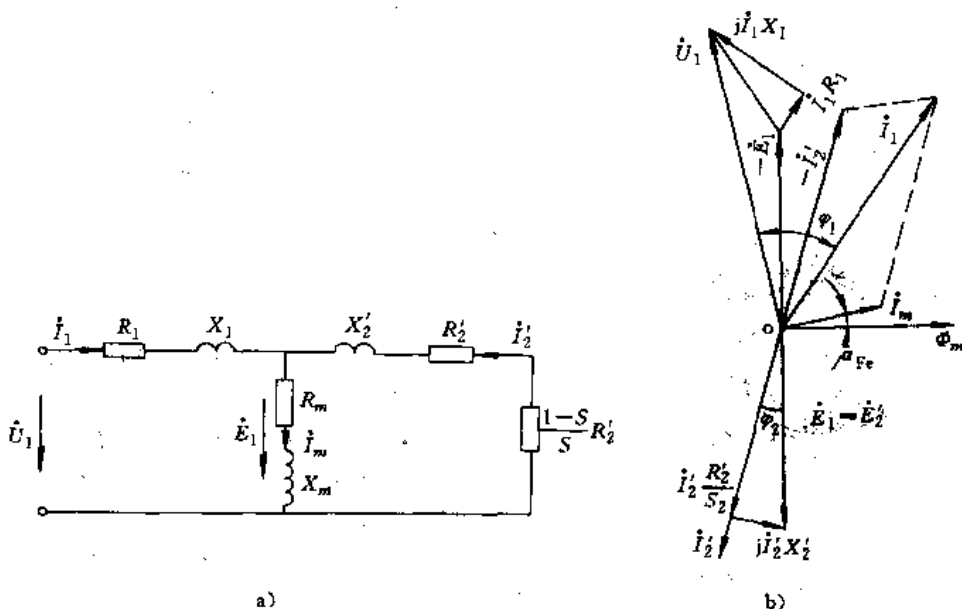


图 2-2-4 异步电机 T 形等效电路和相量图

a) T 形等效电路 b) 相量图

4 三相异步电动机的运行性能

异步电动机功率传递如图 2-2-5 所示。图中横向小箭头表示通过气隙磁场传递给转子的电磁功率 P_m 。

4.1 三相异步电动机的损耗和效率

由表 2-2-3 可得，异步电动机的功率平衡为

三相异步电动机的功率见表 2-2-3。

$$P_1 = P_2 + p_{Cu1} + p_{Fe} + p_{Cu2} + p_{\Omega} + p_a$$

$$= P_2 + \Sigma p$$

表 2-2-3 三相异步电动机的功率

| 名 称 | 内容或计算公式 | 说 明 | 备 注 |
|----------------|------------------------------------|---------------------|------------------------------------------------------|
| 输入功率 P_1 | $P_1 = 3U_1 I_1 \cos\varphi_1$ (W) | 由电网输入到电动机定子的功率 | U_1 —定子相电压(V) I_1 —定子相电流(A) |
| 定子铜耗 p_{Cu1} | $p_{Cu1} = 3I_1^2 R_1$ (W) | 定子电流在定子绕组电阻上的有功功率损耗 | $\cos\varphi_1$ —定子功率因数 R_1 —定子绕组电阻(Ω) |



(续)

| 名称 | 内容或计算公式 | 说明 | 备注 |
|------------------|---------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|
| 铁耗 p_{Fe} | $p_{Fe} = 3I_m^2 R_m (W)$ | 正常运转时转子频率只有 1~3Hz, 转子铁耗很小, 因此 p_{Fe} 实际上仅为定子铁损 | I_m —励磁电流(A) R_m —励磁电阻(Ω) |
| 电磁功率 P_{em} | $P_{em} = P_1 - p_{Cu1} - p_{Fe} (W)$ | 由等效电路(图 2-2-4)得 $P_{em} = 3I_2^2 \frac{R_2}{s}$ | I_2 —转子电流归算值 R_2 —转子电阻归算值 |
| 转子铜耗 p_{Cu2} | $p_{Cu2} = 3I_2^2 R_2 (W)$ | 转子电流在转子绕组电阻上的有功功率损耗。从上项可得 $p_{Cu2} = sP_{em}$ | s —转差率 P_n —异步电动机的额定功率(W) |
| 总机械功率 P_Ω | $P_\Omega = P_{em} - p_{Cu2} (W)$ | 电磁功率减去转子铜耗后传递给电动机轴上的功率 | |
| 机械损耗 p_Ω | 由轴承摩擦和风阻引起的损耗 | | |
| 附加损耗 p_a | 空间磁势中高次谐波磁通及漏磁通在定、转子铁心中感应电流所引起的损耗 | 大型电动机 $p_a \approx 0.5\% P_n$ 小型电动机 $p_a = (1 \sim 3)\% P_n$ | |
| 输出功率 P_2 | $P_2 = P_\Omega - p_\Omega - p_a (W)$ | 转子轴上输出的功率 | |

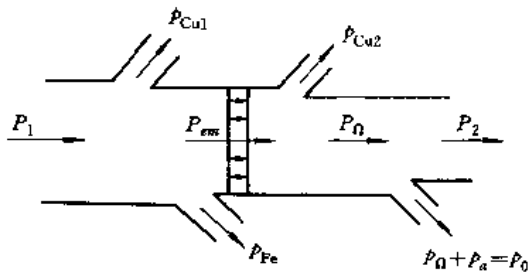


图 2-2-5 异步电动机的功率流程图

式中 Σp ——异步电动机在能量转换过程中的各部分损耗之和(W)。

三相异步电动机的效率

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100\% = \frac{P_1 - \Sigma p}{P_1} \times 100\%$$

4.2 三相异步电动机的电磁转矩

三相异步电动机的电磁转矩(简称转矩)见

表 2-2-4。

由表 2-2-4 得,三相异步电动机的转矩平衡方程式为

$$T = T_2 + T_0$$

【例 2-2-2】 一台三相 6 极异步电动机,额定电压 $U_n = 380V$,额定功率 $P_n = 75kW$,额定转速 $n_n = 950r/min$,在额定转速下运行时,摩擦机械损耗 $p_\Omega = 1kW$,忽略附加损耗,求额定运行时的额定转差率、电磁功率、电磁转矩、转子铜耗、额定输出转矩和空载转矩。

解 各项计算公式及计算结果见表 2-2-5。

4.3 三相异步电动机的机械特性

当三相异步电机外加电压及其频率固定时,电机的转速 n 与电磁转矩 T 的关系称为三相异步电机的机械特性。 T 随 s (或 n) 变化关系的曲线,称为机械特性曲线,简称 $T-s$ 曲线,如图 2-2-6 所示。图中表明:



表 2-2-4 三相异步电动机的转矩

| 名称 | 计算公式 | 说明 | 备注 |
|--------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 电磁转矩 T | $T = \frac{P_{em}}{\Omega_1} \text{ (N} \cdot \text{m)}$ | 由转子电流与主磁通相互作用的电磁力所产生的 | P_{em} —电磁功率 (W) p_n —机械损耗 (W) p_a —附加损耗 (W) P_2 —电动机轴上输出的功率 (W) |
| 空载制动转矩 T_0 | $T_0 = \frac{P_0}{\Omega}$ $\approx \frac{p_n + p_a}{\Omega} \text{ (N} \cdot \text{m)}$ | 由电机的机械损耗与附加损耗所引起的 | Ω_1 —旋转磁场的机械角速度, 称为同步角速度, 即 $\Omega_1 = \frac{2\pi n_1}{60} \text{ (rad/s)}$ 其中 n_1 为旋转磁场的转速 (r/min) |
| 负载制动转矩 T_2 | $T_2 = \frac{P_2}{\Omega} \text{ (N} \cdot \text{m)}$ | 电机所拖动的负载反作用于转子轴上的转矩 | Ω —电动机转子的机械角速度, 即 $\Omega = \frac{2\pi n}{60} \text{ (rad/s)}$ 其中 n 为转子转速 (r/min) |

表 2-2-5. 例 2-2-2 的计算项目、公式及结果

| 项目 | 计算公式 | 计算结果 |
|--------|--------------------------------------------------------|------------|
| 同步转速 | $n_1 = \frac{60f_1}{p}$ | 1000r/min |
| 额定转差率 | $s_n = \frac{n_1 - n_n}{n_1}$ | 0.05 |
| 电磁功率 | $P_{em} = \frac{P_n}{1-s_n} = \frac{P_2 + p_n}{1-s_n}$ | 80kW |
| 电磁转矩 | $T = \frac{P_{em}}{\Omega_1} = 9550 \frac{P_2}{n_1}$ | 764N · W |
| 转子铜耗 | $p_{Co2} = s_n P_{em}$ | 4kW |
| 额定输出转矩 | $T_2 = \frac{P_n}{\Omega_n} = 9550 \frac{P_n}{n_n}$ | 753.9N · W |
| 空载转矩 | $T_0 = \frac{P_0}{\Omega_n} = 9550 \frac{P_0}{n_n}$ | 10.1N · m |

(1) 在 $1 \geq s > 0$ 的范围内, 处于电动机运行状态。在 D 点时, $T=0, n=n_1 (s=0)$, 其转速 $n_1=60f/p$; 在 B 点时, $s=s_n$, 电磁转矩达到最大值 $T=T_{max}$, 称为最大转矩, 它与额定转矩之比称为异步电动机的过载系数, 即 $\lambda=T_{max}/T_n$; 在 A 点时, $s=1 (n=0)$ 为起

动点, 其对应的转矩称为起动转矩 T_s 。

对某种负载特性而言, 电动机在曲线 BCD 段能稳定运行, 在曲线 AB 段则不能稳定运行。

(2) 在 $s > 1 (n < 0), T > 0$ 电机运行于制动状态;



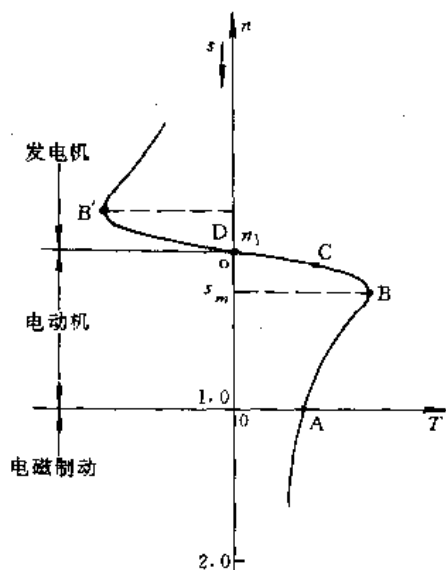


图 2-2-6 异步电机的机械特性曲线

(3) 在 $s < 0$ ($n > n_1$), $T < 0$ 电机处于发电机运行状态。

4.4 三相异步电动机的工作特性

异步电动机的工作特性是指在额定电压及额定频率下，其转子转速 n 、输出转矩 T_2 、定子电流 I_1 、定子功率因数 $\cos\varphi$ 、效率 η 等与输出功率 P_2 的关系。图 2-2-7 为异步电动机工作特性。由图可以看出：

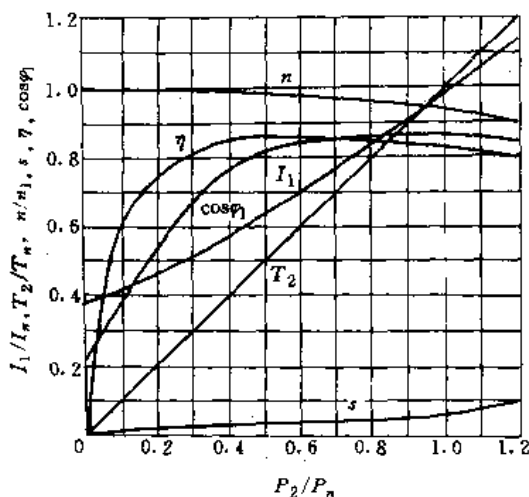


图 2-2-7 异步电动机的工作特性

- (1) 从空载运行到满载运行，转速 n 略有下降；
- (2) 电磁转矩 T_2 和定子电流 I_1 随输出功率 P_2 增大而增大；
- (3) 轻载运行时，功率因数 $\cos\varphi$ 和效率 η 都很低，当异步电动机 P_2/P_n 在 0.6~1.1 范围内， $\cos\varphi$ 及 η 都

比较高，而且变化不大。

关于三相异步电动机的启动、反转和制动，请参见本卷第 7 篇第 3、5 章。

5 三相异步电动机的节能

常用的节能技术有：

(1) 掌握负载特性，合理使用电动机，使其运行处于最佳方式。一般电动机的运行负载率[⊖]在 50% 处效率最高；

(2) 尽量选用国家推广的 Y 系列节能型电动机；

(3) 运行时三角形接法的电动机，当负载率 β 小于临界负载率 β_L [⊖] 时，为节能宜改接成星形运行。表 2-2-6 为各种极数的电动机的临界负载率。

表 2-2-6 电动机的临界负载率

| 极 数 | 2 | 4 | 6 | 8 |
|-----------|----|----|----|----|
| 临界负载率 (%) | 31 | 33 | 36 | 49 |

三角形-星形改接时应注意，对某种负载特性而言，在临界负载率以下应有稳定运行的工作状态，而大于临界负载区内，星形接法无稳定工作状态。

(4) 为了节能，电动机可采用由电力电子器件、微型计算机或单片机组合而成的控制设备，通过这些装置对电动机进行调速、调压来实现其节能运行方式。

(5) 对于容量较大的电动机，可采用单机电容补偿。为了防止补偿容量过大而使异步电动机产生自励磁而过电压，其补偿容量估算公式为

$$Q_c = \sqrt{2} U_n I_0$$

$$I_0 = I_n \left(\sin\varphi_n - \frac{\cos\varphi_n}{2\lambda} \right)$$

式中 Q_c ——补偿容量 (kvar)；

U_n ——电动机的额定电压 (V)；

I_0 ——电动机的空载电流 (A)；

I_n ——电动机的额定电流 (A)；

λ ——电动机的最大转矩倍数，其值可以从产品样本中查得；

$\cos\varphi_n$ ——电动机的额定功率因数。

⊖ 输出功率 P_2 与额定功率 P_n 之比称为负载率 β ，即 $\beta = P_2/P_n$ ，在运行中 β 值的测算方法见 [25] p174~178。

⊖ 电动机星形接法与三角形接法总损耗相等时的负载率，称为临界负载率。



6 绕线转子三相异步电动机

6.1 绕线转子三相异步电动机的结构

图 2·2-8 为绕线转子异步电动机的结构图。其定子与笼形异步电动机一样，但它的转子绕组与定子绕组一样，是对称三相绕组。如图 2·2-9 所示，转轴的一端有三个集电环，绕组的三相引线各自接到三个集电环上，安装在端盖上的电刷与集电环相接触，外电路通过电刷连到转子绕组中去。

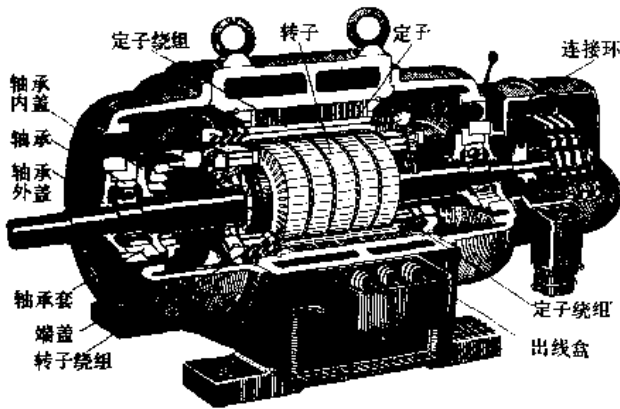


图 2·2-8 绕线转子三相异步电动机

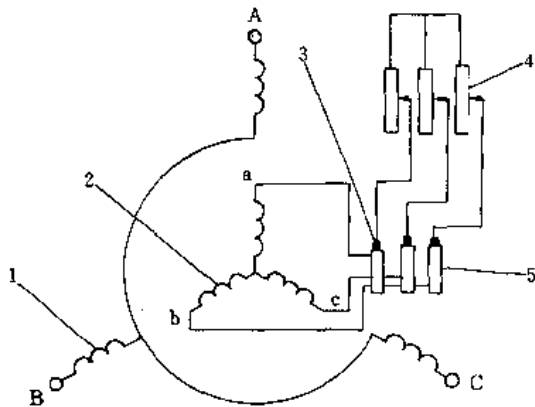


图 2·2-9 绕线转子三相异步电动机定、转子绕组接线方式

1—定子绕组 2—转子绕组 3—电刷
4—外加电阻器 5—集电环

6.2 绕线转子三相异步电动机的工作原理

6.2.1 转子回路串接电阻起动

起动时，串入转子回路的电阻达最大，起动转矩最大，如图 2·2-10 中曲线 1 所示。当电动机运转后，转

子绕组外接变阻器的电阻被分级自动切除，使 $T-s$ 曲线由曲线 1 转换到曲线 2、曲线 3，直到电阻全部被切除，沿曲线 3 到达稳定运行点 A，起动完毕后三个集电环被短接。

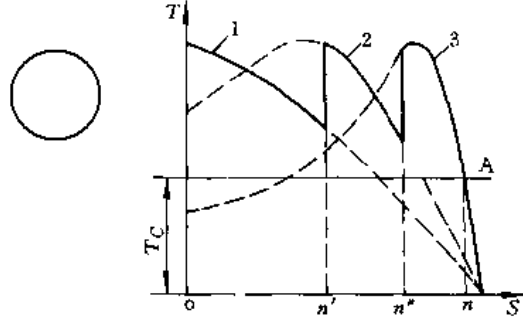


图 2·2-10 转子串接电阻起动过程

6.2.2 转子回路串接频敏变阻器起动

对于大、中容量的电动机常采用频敏变阻器（图 2·2-11）作为起动电阻。频敏变阻器的特点是它的阻抗随转速上升而逐渐减少。当转子的转速到达额定值时，频敏变阻器的阻抗减到很小数值。

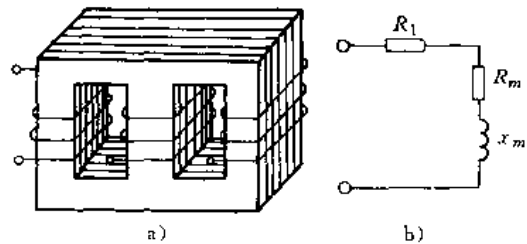


图 2·2-11 频敏变阻器

a) 频敏变阻器的结构
b) 频敏变阻器等效电路

起动时 $s=1$ ($n=0$)，转子电流频率 f_2 为电源频率 f_1 ，这时涡流较大，反映铁耗的等效电阻 R_m 较大（图 2·2-11b），从而限制了起动电流并提高了起动转矩；随着转速增高，转子电流的频率 ($f_2=sf_1$) 逐渐下降， R_m 也随之减小，所以这种电动机在起动过程中可以获得其转矩随转速变化很小的特性，而且无起动电流的冲击。

用绕线转子异步电动机拖动机械，可以获得较大的起动转矩和较小的起动电流，所以它适宜重载起动的场合。

7 电磁调速异步电动机

电磁调速异步电动机是由笼型异步电动机、电磁



滑差离合器以及控制电路三部分组成。这种电动机有两种结构形式,如图 2·2-12 和图 2·2-13 所示。图 2·2-14a 是电磁滑差离合器的结构示意图,它由电枢和磁极两部分组成,电枢与异步电动机转轴相联作为主动转子,磁极(由静止的励磁线圈和转动的爪极组成)中的爪极作为从动转子固定在转轴上,与生产机械转轴相连接。

n' 低于主动转子转速 n , 两者保持转差, 才能产生拖动转矩。

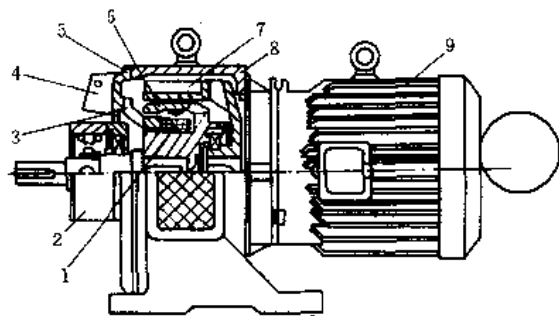


图 2-2-12 组合式结构的电磁调速异步电动机
1—励磁线圈 2—测速发电机 3—托架
4—出线盒 5—端盖 6—磁极 7—电枢
8—机座 9—异步电动机

当励磁线圈通入直流励磁电流 I_f , 在滑差离合器的磁极中便产生磁通, 如图 2·2-14a 中 5 所示。当异步电动机起动后拖动离合器的电枢转动时(转速为 n), 由于电枢切割气隙磁场, 在电枢里产生电流, 此电流与气隙合成磁场作用便产生电磁转矩, 使从动转子顺着电枢方向旋转, 其转速为 n' , 只有从动转子转速

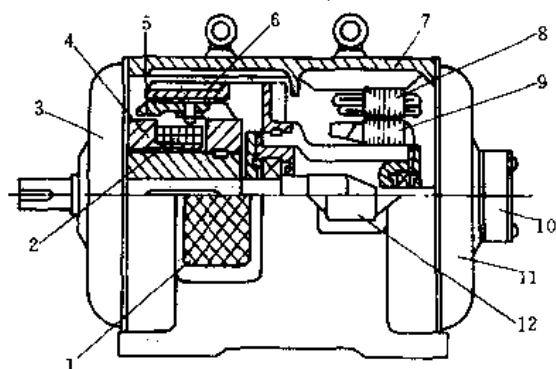


图 2-2-13 整体式结构的电磁调速异步电动机
1—出风口 2—励磁线圈 3—前端盖
4—托架 5—磁极 6—电枢 7—机座
8—异步电动机定子 9—异步电动机转子
10—测速发电机 11—后端盖 12—出线盒

由于滑差离合器的工作原理与异步电动机相似, 改变滑差离合器的励磁电流进行调速相当于异步电动机改变电源电压(即改变主磁通)进行调速, 两者的调速特性相似, 它的机械特性曲线如图 2·2-14b 所示, 能平滑调速的范围约 10:1。

这种电动机具有恒速及可实现广范围无级调速的特点, 因而广泛地被应用于纺织、造纸、化工和船舶等生产部门。

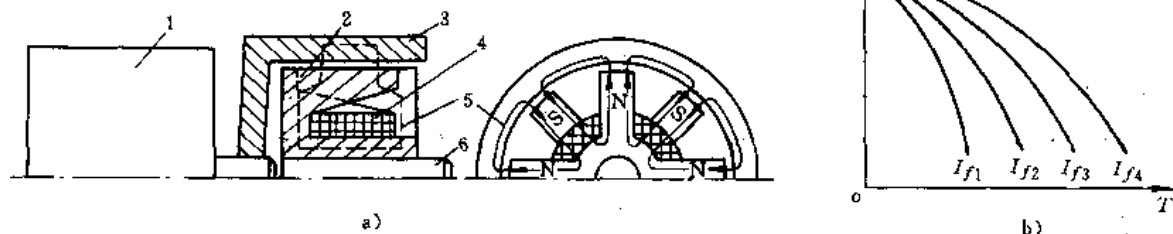


图 2-2-14 电磁滑差离合器结构示意图及其机械特性
a) 结构示意图 b) 机械特性曲线
1—异步电动机 2—磁极 3—电枢
4—励磁线圈 5—磁通 6—从动轴

8 三相异步电动机常见故障及处理方法

三相异步电动机在运行中常见故障及处理方法见表 2·2-7。



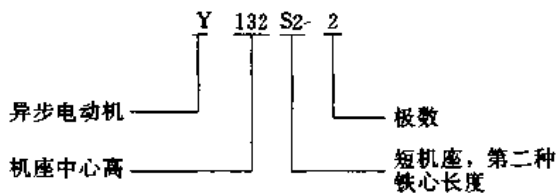
表 2-2-7 三相异步电动机常见故障及处理方法

| 故障现象 | 可能原因 | 处理方法 |
|-----------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 整体发热 | 1. 负载太大 2. 环境温度过高 3. 被拖动机械的故障(有摩擦或卡住现象) 4. 通风系统故障 5. 电源电压过低或过高 6. 定子绕组匝间或相间短路或接地 | 1. 减轻负载或改用容量较大的电动机 2. 采取降温措施 3. 排除被拖动机械的故障 4. 清扫通风系统 5. 检查输入端或绕组接地有否错误 6. 切除故障线圈或进行局部修理 |
| 不能起动 | 1. 没有输入电压或一相开路 2. 定子绕组或转子绕组开路 3. 定子绕组相间短路、接地或接地错误 4. 轴承损坏或轧住 5. 起动转矩不够 | 1. 检查开关、熔丝、触头及电源接线 2. 检查绕组有无开路 3. 检查绕组有无相间短路、接地和接线错误 4. 更换轴承 5. 若是笼形电动机,则更换电机;若是绕线电动机,则增加起动电阻 |
| 起动后转速低于额定值 | 1. 电源电压低 2. 负载过大 3. 铭牌规定定子绕组△形错接成Y形 4. 笼形转子导体部分断裂 | 1. 提高输入电压 2. 减轻负载或更换容量较大的电动机 3. 改正接线 4. 修理断条 |
| 电动机运行时振动过大或声音异常 | 1. 单相运行 2. 转子不平衡、偏心 3. 轴弯曲 4. 笼形导体有较多断裂或开裂 5. 轴承严重缺油 6. 轴承磨损、间隙超过允许值 | 1. 检查熔丝、触头及电源接线 2. 校正平衡 3. 更换轴承 4. 修理断条 5. 加油 6. 更换轴承 |
| 轴承过热或漏油 | 1. 轴承损坏 2. 轴瓦间隙太小,不形成油楔 3. 电动机轴向串动、滑动轴承的圆根被磨 4. 润滑油质不好或种类不合适 5. 密封圈不严密或失效 6. 滚动轴承公差配合太紧或太松 7. 电动机两侧端盖或轴承未装平 | 1. 检查或更换轴承 2. 重新装配 3. 重新装配 4. 更换润滑油 5. 更换密封圈 6. 适当重新配合 7. 重新装配 |

9 三相异步电动机的型号和额定数据

9.1 常用的三相异步电动机的型号含义(表 2-2-8)

【例 2-2-3】 Y132S2-2 含义



9.2 铭牌上标出的额定数据

(1) 额定功率 P_n (kW 或 W)。在额定运行时轴上输出的机械功率;

(2) 额定电压 U_n (V)。在额定运行时的线电压;

(3) 额定电流 I_n (A)。在额定运行时定子绕组的线电流;

(4) 额定频率 (Hz)。我国规定工业用电的频率为 50Hz;

(5) 额定转速 n_n (r/min)。在额定运行时的转速。此外,铭牌上一般还标明接线法、绝缘等级和重量等。



表 2-2-8 常用的三相异步电动机型号含义

| 名 称 | 代表符号 | 名 称 | 代表符号 |
|---------------|------|-----------------|------|
| 异步电动机 | Y | 高效率异步电动机 | YX |
| 户外异步电动机 | Y.W | 起重及冶金用笼形异步电动机 | YZ |
| 绕线转子异步电动机 | YR | 起重及冶金用绕线转子异步电动机 | YZR |
| 高起动转矩异步电动机 | YQ | 防爆型异步电动机 | YB |
| 多速异步电动机 | YD | 防爆安全型异步电动机 | YA |
| 精密机床用异步电动机 | YJ | 立式深井泵异步电动机 | YLB |
| 大型绕线转子高速异步电动机 | YRK | 低振动低噪声精密异步电动机 | YZC |
| 高滑差率异步电动机 | YH | 船用异步电动机 | Y-H |
| 齿轮减速异步电动机 | YCJ | 电磁铁制动电动机 | YEJ |
| 电磁调速异步电动机 | YCT | 旁磁制动电动机 | YEP |

第3章 三相同步电机

1 概述

三相同步发电机是交流发电机的主要型式。三相同步电动机多用于拖动容量在 50kW 以上的恒定转速的大型机械,如空气压缩机泵、连续传送带等。三相同步电动机运行时,稳定性较好,并且可在超前电流的情况下运行,从而提高电网总的功率因数。在电网或工厂中有时专备一台或几台不带机械负载的同步电动机,

用来提高电网功率因数。这种空载的同步电动机,称之为同步补偿机,又称同步调相机。

三相同步电机的主要类型有旋转电枢(磁极固定)和旋转磁场(电枢固定)两种结构形式。为易于引出电枢电流,一般都采用旋转磁场式;只有小型的或特殊用途的才采用旋转电枢式。

动力用同步电机按用途分类时有表 2-3-1 所列的几种。

表 2-3-1 动力用同步电机按用途分类

| 名 称 | 特 点 | 用 途 |
|-------|--------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|
| 汽轮发电机 | 1. 电枢长径比 $\frac{l}{D}$ 比较大,一般 $\frac{l}{D} > 1$ 2. 转子通常为隐极式 3. 卧式安装 | 火电站或核电站 |
| 水轮发电机 | 1. 电枢长径比 $\frac{l}{D}$ 比较小,一般 $\frac{l}{D} < 1$ 2. 转子通常为凸极式 3. 大容量多数为立式安装,小容量多数为卧式安装 | 水电站或抽水储能电站 |
| 柴油发电机 | 1. 转子一般为凸极式,小型也有隐极式 2. 卧式安装 | 工厂、矿山、船舶和农村自备电源或移动电源 |
| 同步调相机 | 1. 转子一般为凸极式 2. 可制成户内或户外安装,卧式 | 改善电网功率因数,调整电网电压;稳定接有波动负荷的供电母线电压 |



(续)

| 名称 | 特点 | 用途 |
|-------|---------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|
| 同步电动机 | 1. 二极的隐极式转子, 其余为凸极式转子 2. 除驱动立式轴流泵的为立式安装外, 一般为卧式安装 | 驱动不要求调速的机械 |
| 中频发电机 | 1. 频率范围 100~10000Hz 2. 500Hz 以下可以为凸极式或爪极式, 其余一般为感应子式 3. 一般与电动机配组并装在一个机壳内, 组成变频机 | 小功率的用作超高速电动机及雷达等的特种电源, 大功率的一般作为高频加热用电源 |

2 三相同步电机的基本结构

三相同步电机的定子和三相异步电机的定子完全一样。

三相同步电机的转子是一组直流电磁铁, 它的磁极对数必须和定子的磁极对数相同。在磁极铁心上装着直流励磁绕组。直流励磁绕组的两根引出线, 接到固定在转轴上相互绝缘的两个集电环上, 借集电环与电刷的滑动接触而与外加直流电源接通, 用以产生转子磁场。

三相同步电机的转子, 按照它的磁极结构特点, 又可分为凸极式和隐极式两种。凸极式转子有着明显凸出的磁极, 如图 2-3-1 所示; 隐极式转子没有明显凸出的磁极, 如图 2-3-2 所示。由于隐极式转子的励磁绕组分布在转子的槽内, 能承受较大的离心力, 故多用于高速 (3000r/min) 的汽轮发电机中。凸极式转子的结构和加工工艺比较简单, 而且在过载能力和运行的稳定性方面都比隐极式转子的要好, 所以除了高速的大容量同步电机采用隐极式外, 一般都采用凸极式。

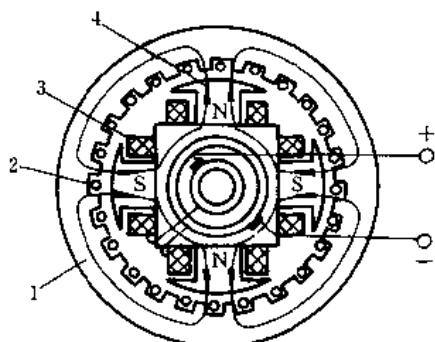


图 2-3-1 凸极式同步电机结构示意图

1—定子铁心 2—定子绕组
3—励磁绕组 4—磁极

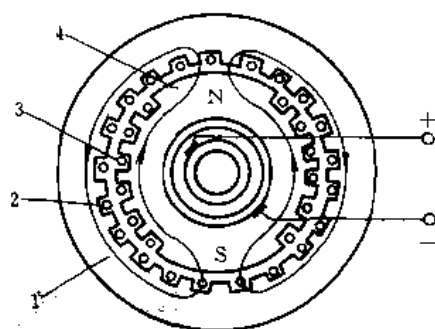


图 2-3-2 隐极式同步电机结构示意图

1—定子铁心 2—定子绕组
3—励磁绕组 4—磁极

用来供给励磁绕组电流的直流发电机, 称为励磁机。近年来, 由于半导体器件的发展, 利用半导体整流器供给直流励磁电流的方式, 在中小型同步电机中已得到广泛应用。

3 三相同步发电机的工作原理和运行特性

3.1 三相同步发电机的工作原理

同步发电机的转子由原动机拖动旋转。当励磁绕组中通以直流励磁电流 I_f 后, 如图 2-3-3 所示, 转子磁极便产生磁通 Φ_0 , 称为主磁通。磁极磁场的磁感应强度沿电机气隙按正弦分布。因主磁通 Φ_0 随转子一起在空间旋转, 于是在定子绕组中便产生三相对称电动势。每相电动势的有效值

$$E_0 = 4.44 K_f f N \Phi_0 \quad (2-3-1)$$

$$f = \frac{pn}{60} \quad (2-3-2)$$

式中 K_f ——定子绕组的绕组系数;

N ——定子绕组的每相绕组匝数;

Φ_0 ——转子每极的主磁通 (Wb);



f ——电动势的频率 (Hz);
 n ——转子转速 (r/min);
 p ——磁极对数。

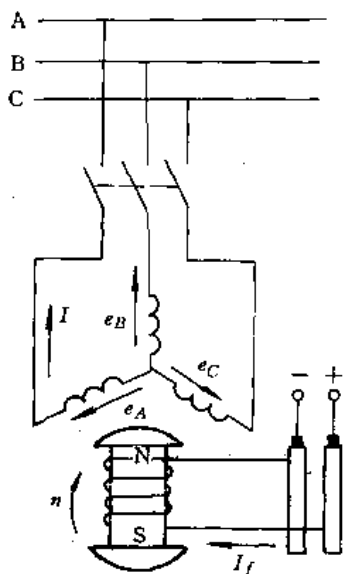


图 2-3-3 同步发电机的接线图

3.2 三相同步发电机的运行特性

当三相同步发电机作空载运行时，定子绕组中电流 I 等于零，三相相电压分别等于相应电动势，即

$$U_0 = E_0 = 4.44K_q f N \Phi_0 \quad (2.3-3)$$

式 (2.3-3) 说明：当频率 f 一定时（即转速 n 不变时），同步发电机的 U_0 或 E_0 决定于主磁通 Φ_0 ，而主磁通 Φ_0 随励磁电流 I_f 的大小而变化，因此可得 U_0 （或 E_0 ）= $f(I_f)$ 的关系曲线，称为同步发电机的空载特性曲线，见图 2-3-4。

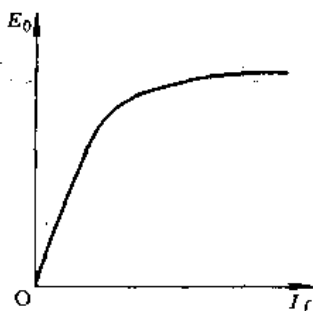


图 2-3-4 同步发电机的空载特性曲线

当同步发电机带负载运行时，三相定子电流产生的旋转磁场也要在每相定子绕组中产生感应电动势，加之电流在定子绕组电阻上的压降和漏磁通感应电动势，使发电机的输出电压（端电压）随负载电流大小及

负载性质而变化。在发电机转速 n ，励磁电流 I_f 均恒定和 $\cos\varphi$ 不变的条件下，其端电压 U 随负载电流 I 变化的曲线 $U=f(I)$ 称为外特性曲线，如图 2-3-5 所示。它们分别表示同步发电机接有电阻性负载、电感性负载和电容性负载时的外特性曲线。同步发电机的负载以电感性负载为多，其空载电压 U_0 与满载运行的额定电压 U_n 之差， $\Delta U=U_0-U_n$ 约为 U_n 的 20%~40%。为保证供电电压的稳定，必须随负载的变动调节励磁电流 I_f 的大小，使发电机的端电压基本不变。图 2-3-6 示出发电机在转速和端电压保持为额定值且负载的功率因数恒定的条件下，励磁电流 I_f 与负载电流 I 的关系 $I_f=f(I)$ ，称为发电机的调节特性。对于电阻性负载和电感性负载，励磁电流 I_f 随负载电流 I 增加而上升，而电容性负载，其励磁电流 I_f 则随负载电流 I 增加而减小。

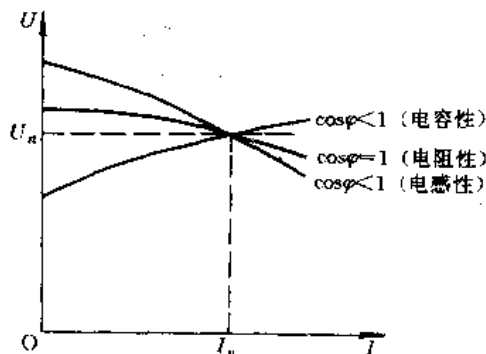


图 2-3-5 同步发电机的外特性曲线

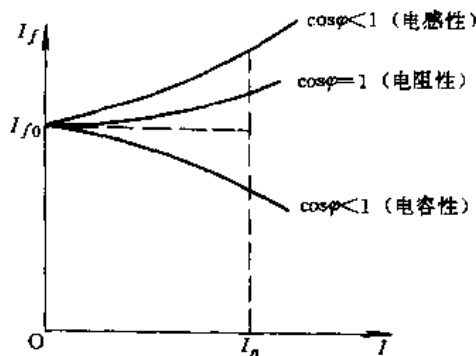


图 2-3-6 同步发电机的调节特性曲线

4 三相同步发电机的并联运行

4.1 三相同步发电机的并联运行条件

为了提高供电的可靠性和稳定性，通常是将多台发电机并联起来向负载供电。发电机并入电网（称为并



联运行时,为了避免在电网和发电机组成的闭合回路中产生强烈的冲击电流,并入电网的发电机必须满足下列条件:

- (1) 发电机端电压的有效值和电网电压有效值相等。
- (2) 相序与电网一致,且各对应相的电压相位一致。
- (3) 频率和电网相同。

4.2 三相同步发电机的并联运行方法

同步发电机并联运行时要满足上述三个条件,常采用同步指示器。最简单的方法是由灯泡构成的同步指示装置,其方法有灯光熄灭法和灯光旋转法两种:

1. 灯光熄灭法 图 2-3-7 表示发电机准备接入电网,图中用电压表来判断第一个条件,当两者电压不等时,则可调节发电机的励磁电流,使其满足电压有效值相等的条件。图中与三相开关并联一组同步指示灯 a、b、c,用以检查频率和相序。当发电机的相序与电网相序一致,而频率不等时,三个指示灯同时忽亮忽暗。亮暗交替速度愈快,表示两者频率之差愈大,此时可调整发电机的转速,当指示灯亮暗交替非常缓慢,三个指示灯同时熄灭时,便可把三相开关闭合,于是发电机并入电网,此法称为“灯光熄灭接入法”。如果两者的相序不一致,则三只指示灯会轮转交替亮暗,发生灯光旋转现象,此时三相开关绝对不能闭合。为了使发电机和电网不同相序变成相同,只要将发电机接到开关的任意两根导线对换一下位置即可。

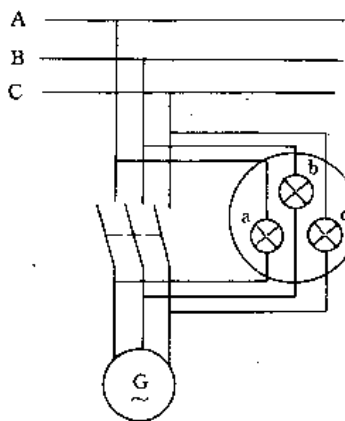


图 2-3-7 灯光熄灭法的接线图

2. 灯光旋转法 图 2-3-8 表示在同步指示灯的接法,在相序一致时,三只灯 a、b、c 的亮度都不一样,如果频率不等,则发生灯光旋转现象。此时可调整发电机的转速,使灯光旋转变慢,并在指示灯 a 熄灭时,把三相开关闭合,使发电机并入电网,此法称为“灯光旋

转法”。如果相序不一致,则三个指示灯同时忽亮忽暗,此时三相开关绝对不能闭合。

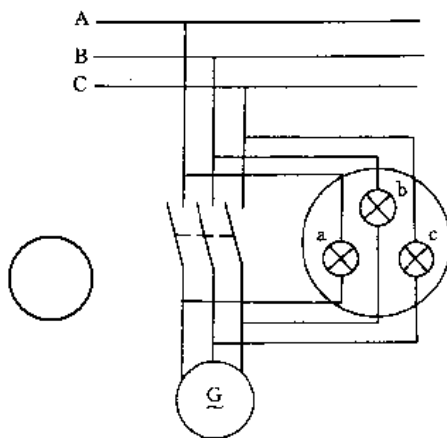


图 2-3-8 灯光旋转法的接线图

图 2-3-9 表示当相序相同时的电压相量及加于指示灯电压的示意图。图中, A_1 、 B_1 、 C_1 表示三相电网的电压相量, A_2 、 B_2 、 C_2 表示三相同步发电机的电压相量。图 a 为灯光熄灭接法时的情况,图 b 为灯光旋转接法时的情况。

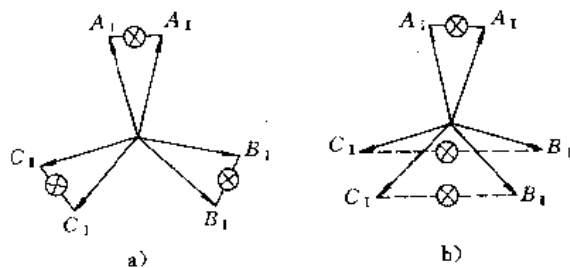


图 2-3-9 当相序相同时的电压相量和跨于指示灯电压的示意图

目前在大中型电厂中都采用自动同步指示器来了解同步发电机并联运行三个条件一致的同步状态。

5 三相同步电动机的工作原理和机械特性

5.1 三相同步电动机的工作原理

当同步电动机的三相定子绕组接上三相电源时,如图 2-3-10 所示,将通过三相对称电流而产生旋转磁场,其转速

$$n_1 = \frac{60f_1}{p} \quad (\text{r/min})$$

式中 p ——磁极对数;

f_1 ——电源频率 (Hz)。

转子励磁绕组中通过励磁电流 I_f 后,便产生转子磁场。当转子磁场与定子磁场的极性是异性相对时,根据



异性磁极相吸的原理，定子旋转磁场将拖着转子磁场一起旋转。因此，定子旋转磁场拖着转子连同它轴上的机械负载一起旋转（将电能转换为机械能输出），如图2-3-11所示。因为转子转速 n 与旋转磁场转速 n_1 相等，所以这种电动机称为同步电动机。其转速

$$n = n_1 = \frac{60f_1}{p} \quad (\text{r/min}) \quad (1-3-4)$$

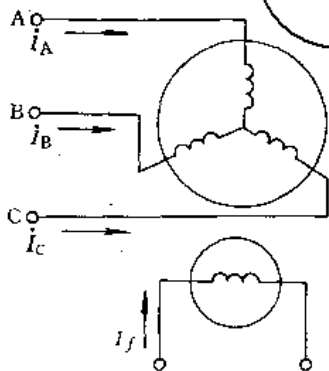


图 2-3-10 三相同步电动机的电路图

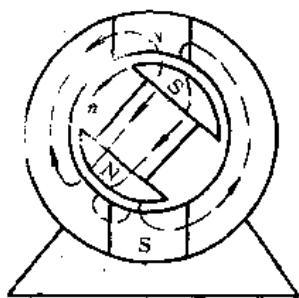


图 2-3-11 三相同步电动机的工作原理

三相同步电动机转子的转向，和三相异步电动机一样，决定于定子旋转磁场的方向，也就是决定于三相电流的相序。

5.2 三相同步电动机的机械特性

由于同步电动机的转速只决定于电源频率和电机本身的磁极对数，因而同步电动机的转速不随所带负载转矩 T 的大小而变化。由此可知，同步电动机的机械特性 $n = f(T)$ ，在 $n-T$ 坐标平面上是一条水平直线，如图2-3-12所示。它表明同步电动机具有绝对硬的机械特性。不过，它有一个极限转矩 T_{max} ，如果 $T > T_{max}$ ，其结果将使同步电动机停止转动，引起过电流，导致继电器动作断开电源。一般 $T_{max} = (2 \sim 3) T_n$ 。

6 三相同步电动机的过励运行

同步电动机转子的励磁绕组是一个独立的直流电路，由于转子与旋转磁场同步运行，故在励磁绕组中不

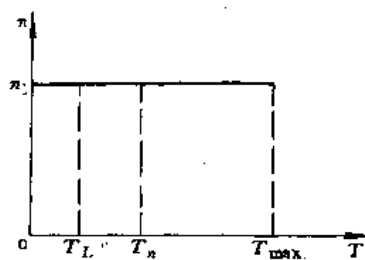


图 2-3-12 同步电动机的机械特性

可能产生感应电动势，而转子磁极的磁通 Φ_r 却要在各相定子绕组中产生感应电动势 E_0 。

当加于定子绕组的电压 U 及频率 f_1 恒定时，改变磁极磁通 Φ_0 的大小，而使定子绕组中的感应电动势 E_0 变化时，可引起定子电流的大小和相位的变化。因此，改变同步电动机励磁电流 I_f 的大小，可以改变同步电动机定子电流 I 与定子电压 U 之间的相位差 φ ，从而使其运行于电感性、电容性或电阻性状态。图2-3-13示出了在电源电压和频率不变条件下，保持电动机输出功率 P 恒定时 (P_1, P_2, \dots 均为定值)，定子绕组电流 I 的大小随励磁电流 I_f 变化的一组曲线，称为V形曲线。

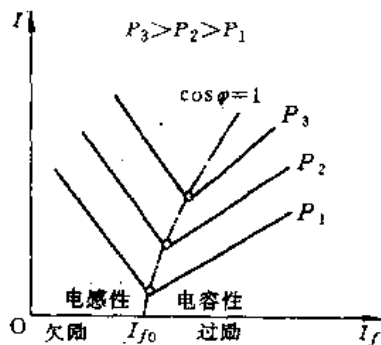


图 2-3-13 同步电动机的V形曲线

同步电动机的V形曲线表明：

(1) 当 $I_f = I_{f0}$ 时，同步电动机运行于电阻性状态，对应于任一值的输出功率 P ，V形曲线最低点时的定子电流 I 和电压 U 同相位， $\cos\varphi = 1$ ，在这一点励磁电流的运行情况，称为基准励磁状态。

(2) 当 $I_f > I_{f0}$ 时称为过励磁状态。同步电动机运行于电容性状态，定子电流 I 超前于定子电压 U 。

(3) 当 $I_f < I_{f0}$ 时称为欠励磁状态。同步电动机运行于电感性状态，定子电流 I 滞后于定子电压 U 。

同步电动机处于过励运行时，相当于在电网上接了一个电容性负载，因而可以改善电网的功率因数。厂矿中的同步电动机多半都运行于过励状态。



7 三相同步电动机的起动

三相同步电动机是没有起动转矩的。只有当转子的转速等于同步转速时才能产生平均转矩。如果起动时立即将定子绕组接入三相电源,便产生旋转磁场,以同步转速旋转,转子绕组通入励磁电流,转子磁场由于转子有惯性而暂时静止不动,此时所产生的电磁转矩的平均值等于零,故电动机无法自行起动。

为了解决同步电动机的起动问题,现在广泛采用“异步起动法”。这种方法就是在转子磁极面上,装上与异步电动机的笼型转子绕组相似的起动绕组,如图2-3-14所示,使同步电动机像异步电动机那样先起动起来(这时转子尚未励磁)。在起动时,由于定子旋转磁场以较高的速度切割匝数较多的励磁绕组,若此时绕组开路,则绕组内会产生很大的感应电动势,使绕组绝缘有被击穿的可能,而且对工作人员也有危险。所以在起动时,把励磁绕组两端接一个电阻 R 而自成闭合回路(见图2-3-15),使励磁绕组中产生的感应电流对旋转磁场产生去磁作用,以减小感应电动势。先将双刀开关合在1的位置上。当电动机的转速接近同步转速时,再将开关合在励磁机2的位置,使转子励磁。这时,定子旋转磁场就能将转子拖入同步运转。

为了减小同步电动机的起动电流,也可以采用和异步电动机起动时一样的各种降压起动法。

同步电动机起动时的操作步骤较复杂,目前对于大中型容量的同步电动机大都采用成套的起动设备,实现了操作自动化。

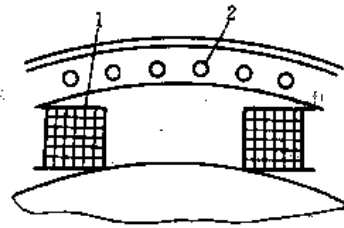


图 2-3-14 同步电动机起动绕组
1—励磁绕组 2—起动绕组

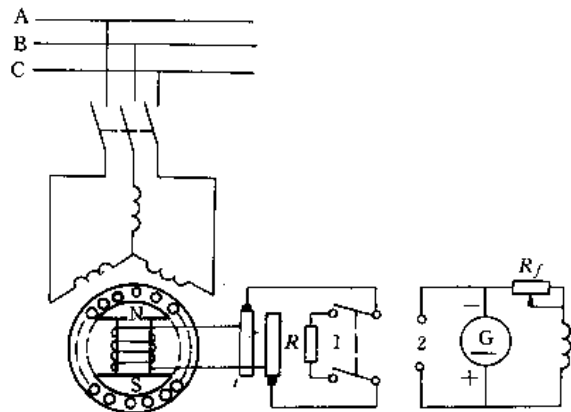


图 2-3-15 同步电动机的异步起动的接线图

8 三相同步电机的常见故障和处理

三相同步发电机的常见故障和处理,见表2-3-2。

三相同步电动机的常见故障和处理,见表2-3-3。

表 2-3-2 三相同步发电机的常见故障和处理

| 故障现象 | 产生原因 | 处理方法 |
|---------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 无电压或不发电 | 1. 接线错误; 2. 转速太低 3. 剩磁电压太低 4. 励磁绕组断路或接线不正确 5. 励磁绕组匝间局部短路 6. 电枢绕组短路、断路及接线错误(串联处误接成并联,星形接线误接成三角形等) | 1. 按接线图详细校对检查 2. 测量转速,使保持额定值 3. 用蓄电池充电,⊕接 L_1 、⊖接 L_2 4. 检查励磁电路,将断线重新焊牢,并包扎绝缘或使励磁绕组方向连接正确 5. 可对励磁绕组加交流电压,通过测量各匝间的电压,测定局部短路部位,该部位电压将低于正常部位的电压,可在短路部位垫入绝缘进行修补 6. 用电压表、电流表等仪表检查,指出其错误,加以修复 |



(续)

| 故障现象 | 产生原因 | 处理方法 |
|---------------|-----------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 无电压或不发电 | 7. 接线头松动或开关接触不良 8. 电刷和集电环接触不良或压力不够 | 7. 将接线头拧紧。检查开关接触部分, 用00号砂布擦净接触面 8. 清洁集电环表面, 磨电刷表面使之与集电环相吻合。调节电刷弹簧压力到29.4kPa左右 |
| 电机温升过高或冒烟 | 1. 过载 2. 定子绕组接地、匝间短路或相间短路 3. 定子和转子相擦 4. 通风不畅 | 1. 用钳形电流表测量定子电流, 发现过载时, 减轻负载 2. 检查找出短路和通地的部分, 进行修复 3. 检查轴承、轴承室及轴承有无松动, 定子和转子装配有无不良, 加以修复 4. 清除通风道污垢、灰尘及杂物, 使空气畅通 |
| 定子绕组绝缘电阻降低或烧坏 | 1. 由于定子绕组绝缘有可能吸入潮气, 使绝缘电阻降低 2. 由于过热, 绝缘老化或雷击等异常过电压的冲击引起绕组层间或对地绝缘损坏 | 1. 用兆欧表测量绕组的绝缘电阻, 若绝缘电阻降低, 在电机投入运行以前需进行干燥 2. 检查短路和通地的部分, 进行修复 当定子绕组一个绕组烧损时, 为使各相电压保持平衡, 有时可采取将非事故的各相线组也空出一个线圈再投入运转, 以应急需 |
| 轴承过热 | 1. 轴承损坏 2. 轴承润滑油过多、过少或有杂质 3. 轴承与轴配合过松或过紧 | 1. 更换轴承 2. 调整或更换润滑油 3. 过松时可将轴承颈喷涂金属; 过紧时重新加工 |
| 电机运转时振动过大 | 参阅表2-3-3 | 参阅表2-3-3 |
| 噪声增大 | 1. 由于振动过大, 引起振动噪声 2. 当定子铁心、齿部松动引起磁噪声增大 | 1. 参阅表2-3-3 2. 必须将铁心进一步扎紧, 或在松动部位插入金属片, 或绝缘垫片以消除松动 |

表2-3-3 三相同步电动机的常见故障和处理

| 故障现象 | 产生原因 | 处理方法 |
|------------------------------|------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| 同步电动机不能起动 | 1. 参阅表2-2-7 2. 转子的起动绕组断路或各铜条的连接点上接触不良 3. 电动机的起动转矩较小不足以起动所传动的机械设备 | 1. 参阅表2-2-7 2. 检查起动绕组的各连接点 3. 使电动机空载或轻载起动, 必要时换一台容量较大或起动转矩较大的电机 |
| 同步电动机起动, 并已加上励磁电流后, 但达不到同步转速 | 1. 转子上的励磁绕组有部分匝间短路 2. 励磁绕组经过重绕或修理后, 绕制的方向、匝数或接线法有错误 | 1. 可只在励磁电路中通入额定电流, 用直流电压表测量各励磁绕组的电压降 2. 检查各励磁绕组的绕制方向、匝数和接线法 |

此星公司制作 请尊重作者版权



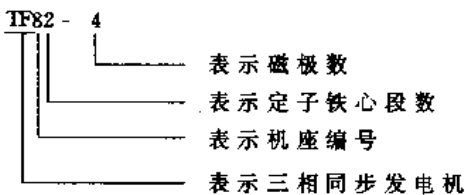
(续)

| 故障现象 | 产生原因 | 处理方法 |
|---------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 同步电动机在运转中振动过大 | 1. 励磁绕组松动或有位移 2. 励磁绕组有部分匝间短路, 绕制方向或接线不正确 3. 定子和转子之间的气隙不均匀 4. 转子不平衡 5. 转子轴所带的机械设备工作不正常 6. 底座固定情况不良或基础强度不够 7. 机座或轴承支座安装不良 | 1. 检查励磁绕组的固定情况 2. 检查励磁绕组有无匝间短路, 绕制方向或接线不正确 3. 调整定子或转子的安装位置 4. 将转子做静平衡或动平衡试验 5. 检查所传动的机械设备 6. 检查底座固定情况及基础是否振动 7. 检查机座或轴承支座的安装情况 |

9 三相同步电机的型号和额定数据

国产三相同步电机的主要系列及其用途, 见表2-3-4。

三相同步电机型号说明: 系列用拼音字母表示; 字母后面第一个数字代表机座编号(或定子铁心外径); 第二个数字代表定子铁心段数(或长度); 短划线后面的数字代表磁极数。型号说明举例:



在同步电机的铭牌和产品目录上, 给出的电机额定运行的数据如下:

(1) 额定容量。发电机系指额定视在功率 S_n , 以 kVA 为单位; 或为额定功率因数时的有功功率 P_n , 以 kW 为单位; 电动机系指轴上输出的额定机械功率 P_n , 以 kW 为单位; 补偿机系指电容性电流的无功功率 Q_n , 以 kvar 为单位;

(2) 额定电压 U_n (V)。在额定运行时的线电压;

(3) 额定电流 I_n (A)。在额定运行时的线电流;

(4) 额定频率 (Hz)。我国规定工业用电的频率为 50Hz;

(5) 额定功率因数。在额定运行时的功率因数;

表 2-3-4 国产三相同步电机的主要系列及其用途

| 系列 | 说明 | 用途 |
|----|-------|-------------------------------|
| TF | 同步发电机 | 可用电动机、水轮机、汽轮机等原动机来拖动, 作为交流电源 |
| TD | 同步电动机 | 拖动鼓风机、水泵、球磨机、电动发电机组, 以及其他通用机械 |
| TK | 同步电动机 | 供拖动往复式空气压缩机或矿山用 |
| TZ | 同步电动机 | 供拖动轧钢机、球磨机用 |
| TL | 同步电动机 | 用于驱动立式轴流泵或离心式水泵用 |

(6) 定子相数;

(7) 定子绕组的连接法(星形或三角形);

(8) 额定励磁电压 U_f (V)。在额定运行时的直流励磁电压;

(9) 额定励磁电流 I_f (A)。在额定运行时的直流励磁电流;

(10) 额定转速 n_n (r/min)。在额定运行时的转速。

此外, 铭牌上一般还标明额定效率、温升、绝缘等级和重量等。



第4章 直流电机

1 概述

直流电机是一种直流电能和机械能互相转换的机械,具有可逆性。作发电机使用时它将机械能转换为直流电能,供电镀和电解、直流电焊、汽车、拖拉机以及船舶上的用电等。

作电动机使用时,它将直流电能转换为机械能。直流电动机和交流电动机相比,虽然存在着结构复杂,维护要求高和价格贵等缺点,但是由于它具有平滑和宽广的调速性能和起动转矩较大等优点。因此,对调速要

求较高的生产机械(例如轧钢机、龙门刨床、镗床等)或者需要较大起动转矩的生产机械(例如起重设备、卷扬机和电动机车等)都采用直流电动机来驱动。

2 直流电机的基本结构和分类

2.1 直流电机的基本结构

直流电机也是由定子和转子以及其他零部件组成。图2·4-1所示为直流电机的结构,图2·4-2是两极电机剖面图和转子外形,图2·4-3是它的图形符号。

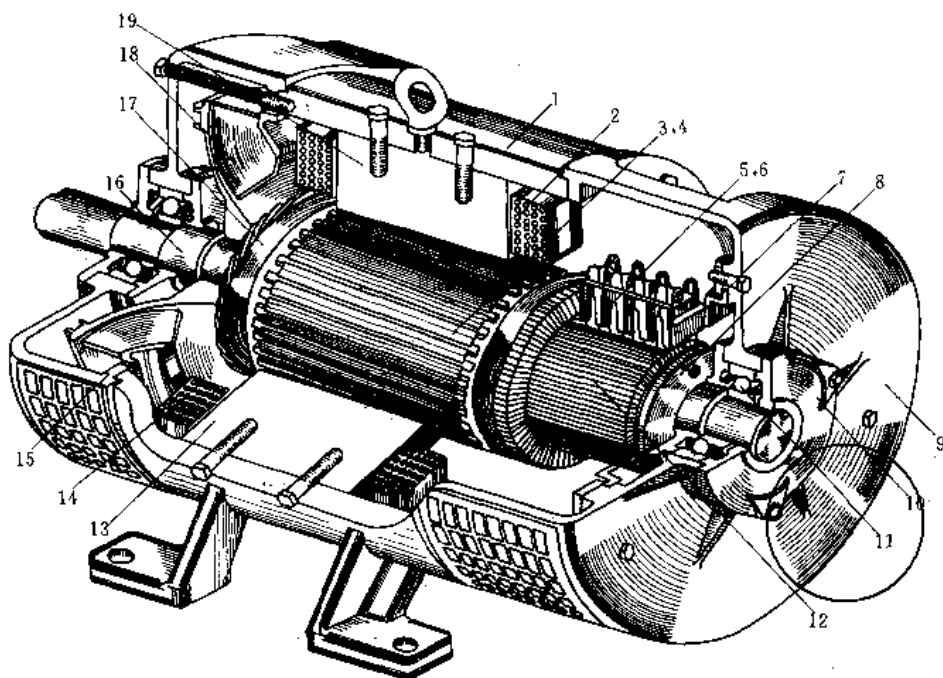


图2·4-1 直流电机的结构

- 1—机座 2—主极励磁绕组 3—电枢铁心 4—电枢绕组 5—刷握 6—电刷 7—刷杆 8—平衡环
9—后端盖 10—轴承盖 11—轴承 12—换向器 13—换向极铁心 14—换向极绕组 15—前端盖
16—轴 17—电枢绕组端部绑扎 18—风扇 19—主极铁心

1. 直流电机的定子 它是由主磁极、换向极、机座等主要部件组成。主磁极是由主磁极铁心和励磁绕组构成,它的作用是产生主磁场。换向磁极由换向极铁心和换向极绕组构成,装在相邻的两主磁极之间,用来

产生附加磁场,在符号图中一般不画出。在小功率的直流电机中,也有不装换向极的。机座除用来保护电机和固定主磁极、换向极外,还是电机磁路的一部分,故也称磁轭。它是由铸钢或钢板制成。



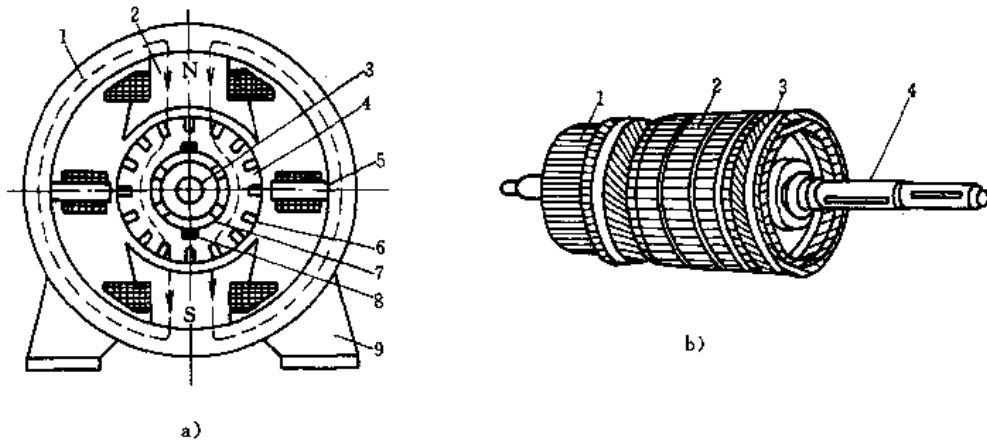


图 2-4-2 两极直流电机剖面图和转子外形

- a) 两极电机的剖面图
 1—机壳 2—主磁极 3—转轴
 4—电枢铁心 5—换向磁极 6—电枢绕组
 7—换向器 8—电刷 9—机座
- b) 转子外形
 1—换向器 2—铁心 3—绕组 4—轴

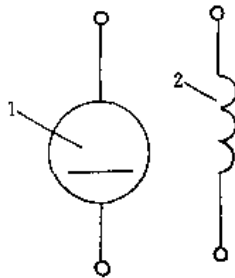


图 2-4-3 直流电机的图形符号

- 1—电枢 2—励磁绕组

2. 直流电机的转子 它是由电枢铁心、电枢绕组、换向器和转轴、风扇等主要部件组成。电枢铁心由硅钢片叠压成，它是电机磁路的一部分，在外圆上有均匀分布的槽，用来嵌放电枢绕组。电枢绕组由许多绕组元件构成，各绕组元件两端分别与相应的换向片连接，使绕组本身连成一个回路。换向器是由换向片（铜片）制成的圆柱体。图 2-4-2b 中 1 所示为常用套筒式换向器。目前应用的塑料换向器，可以节约大量铜材和云母，并且简便了加工工艺。

3. 其他部件 电刷装置主要由电刷和电刷架等零部件组成，利用弹簧把电刷压在换向器上，能使它与外电路相连。电刷数一般等于主磁极数，各同极性的电刷经软线汇在一起后，再引到出线盒内的接线板上，作为转子电枢绕组的引出端。出线盒内除了有电枢绕组引出线的接线端子外，还有励磁绕组引出线的端子。端盖除了固定电刷装置外，还有保护电机和支持轴承的

作用。

2.2 直流电机的分类

为了获得不同机械特性的电动机和不同外特性的发电机，直流电机按励磁方式分为他励、并励、串励和复励四种。电动机的四种励磁方式的接线见图 2-4-4。发电机的区别在于负载电流 I 和电枢电流 I_a 均与图中所示方向相反。

除上述四种励磁方式外，在微型直流电机中不用励磁绕组，而用永久磁铁做主磁极，称为永磁电机。

3 直流电机的工作原理

图 2-4-5 所示的两极直流电机模型可用来分析直流电机的工作原理，其中 $a-a'$ - $b-b'$ 为单匝电枢线圈，与两片换向片相连。图中还示出了两个固定的磁极 N 和 S。两个固定的电刷 A 和 B 分别与两个换向片作滑动接触。

3.1 直流电动机工作原理

当图 2-4-5a 所示直流电机的电刷 A 和 B 分别与直流电源的正极和负极接通后，处于 N 极下的电枢绕组元件的 aa' 边中，电流自电刷 A 流向 $a-a'$ ，而处于 S 极下的 bb' 边中，电流由 $b-b'$ 流向电刷 B。由左手定则可知，电枢绕组产生逆时针方向的电磁转矩而转动。借助于换向器的换向作用，使电枢绕组各边到达同一磁极下时具有相同的电流方向，从而使电动机产生固定



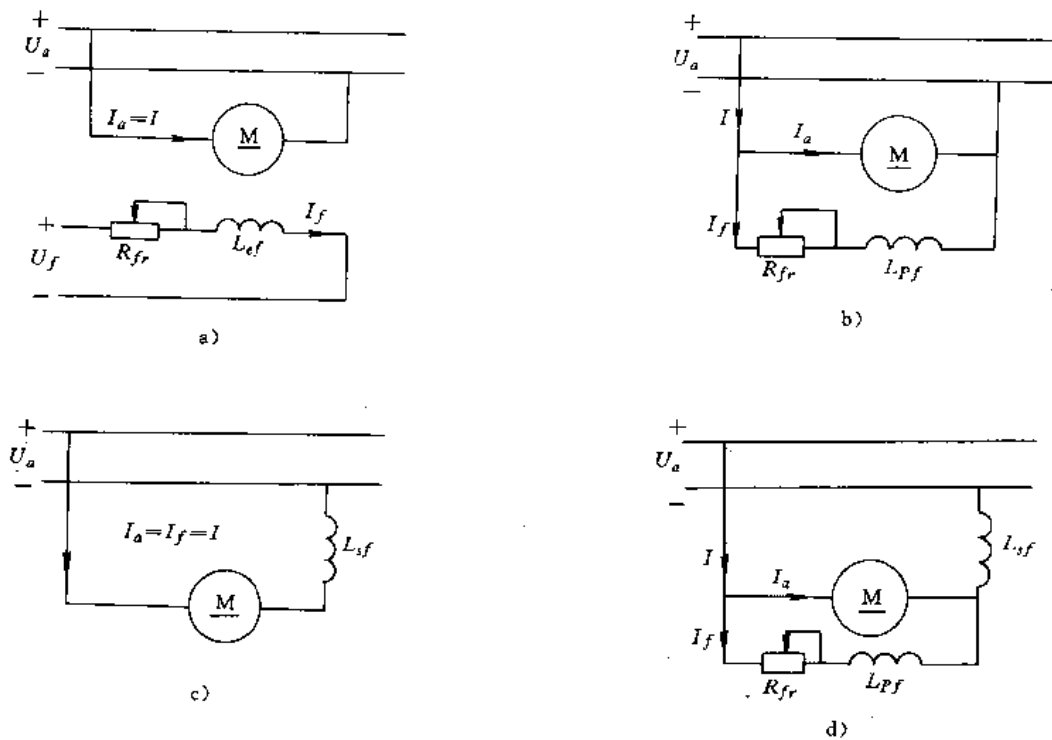


图 2-4-4 直流电机四种励磁方式的接线图

a) 他励 b) 并励 c) 串励 d) 复励

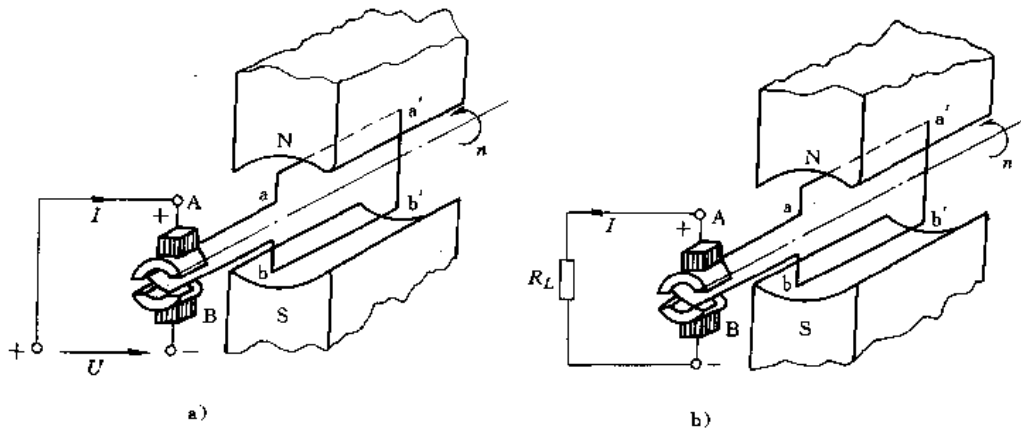


图 2-4-5 直流电机的工作原理

a) 直流电动机的工作原理 b) 直流发电机的工作原理

方向的电磁转矩，驱动机械负载持续运转。

3.2 直流发电机的工作原理

图 2-4-5b 所示直流电机的电枢在原动机驱动下，按逆时针方向转动，其绕组导体切割磁力线时，根据右手定则，在 N 极下，电枢绕组元件的 aa' 边的感应电动势方向为 $a-a'$ 指向电刷 A；而在 S 极下 bb' 边感应电动

势方向为 $b-b'$ ，由电刷 B 指向内部。显而易见，电刷的极性与图中的标记一致。当电枢转动时，通过换向器的换接作用，在 N 极和 S 极下电枢绕组元件各边感应电动势方向不改变，因此电刷的正负极性恒定不变。这样，在电刷 A, B 之间就出现一个极性不变的直流电动势。当电刷间接有负载时，在电动势作用下，负载中就有直流电流。



4 直流电机的电动势和电磁转矩

4.1 直流电机的电动势

直流电机电枢绕组中感应的电动势

$$E = C_E \Phi n \quad (\text{V}) \quad (2.4-1)$$

式中 Φ ——一个磁极的磁通 (Wb);
 n ——电枢转速 (r/min);
 C_E ——与电机结构有关的常数。

作直流发电机运行时,电动势的作用是产生电流,称为电源电动势,作直流电动机运行时,电动势总是与电枢电流或外加电压方向相反,故称为反电动势。

4.2 直流电机的电磁转矩

直流电机的电磁转矩

$$T = C_T \Phi I_a \quad (\text{N} \cdot \text{m}) \quad (2.4-2)$$

式中 Φ ——一个磁极的磁通 (Wb);
 I_a ——电枢电流 (A);
 C_T ——与电机结构有关的常数。

作直流发电机运行时,电磁转矩 T 的方向总是与电枢旋转方向相反,因此称为阻转矩;作直流电动机运行时,电磁转矩 T 驱动电枢旋转,其方向总是与电枢转向一致,因而称为驱动转矩。

5 直流发电机的空载特性和外特性

直流发电机通常是以恒定转速运行的。按其励磁方式,常用的可分为他励、并励和复励三种。后两种类型的励磁电流都是由发电机自身供给的,故又称自励。

直流发电机的空载特性和外特性见表 2.4-1。

表 2.4-1 直流发电机的空载特性和外特性

| 特性名称 | 他励 | 并励 | 复励 |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 特性类别 | | | |
| 空载特性 | <p>1. 空载特性曲线是表示电枢电动势 E_a 与励磁电流 I_f 之间关系的曲线,它反映了电机工作点的饱和程度,可由他励空载时测得</p> <p>2. 在 $I_f = 0$ 时,磁路中有剩磁能建立电压,称为剩磁电压 U_R,其值约为额定电压的 2%~5%</p> | | |
| 外特性 | <p>测空载特性时用他励</p> <p>R_f 是励磁回路的总电阻</p> | | <p>1. 剩磁电压 U_R 是自励发电机建立电压的必要条件。自励时剩磁电压产生的磁通必须与剩磁的极性方向一致</p> <p>2. 空载特性曲线过原点的切线称为励磁回路临界电阻线, $R_f < R_{cr} = \arctan \theta_{cr}$ 方能实现自励,并稳定运行</p> |
| | <p>外特性表示磁场一定时,端电压 U 随负载电流而变化的规律,由外特性可以确定不同负载的电压变化率</p> | | |
| <p>负载电流 I 增加时,电枢反应的去磁作用和电枢电阻压降增大,端电压 U 随负载电流 I 增加而降低</p> | | | |
| <p>由于 R_f 不变,励磁电流 I_f 将随 U 降低而减小,因此随着负载电流 I 的增加,其端电压 U 的降低较他励为大</p> | | | |
| <p>负载电流 I 增加时,其端电压的变化取决于串、并励绕组的接法和它们的安匝比。$U_n = U_0$ 为平复励; $U_n > U_0$ 为过复励;差复励时 U 随负载电流 I 增加而迅速下降</p> | | | |



6 直流电动机的机械特性

不同,可以分为他励、并励、串励和复励四种。这四种电动机在运行时的基本关系式及机械特性见表 2·4-2。

直流电动机按照励磁绕组与电枢绕组联接方式的

表 2·4-2 直流电动机的基本关系式和机械特性

| 名称 | 他励电动机 | 并励电动机 | 串励电动机 | 复励电动机 |
|------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 电路图 | | | | |
| 基本公式 | $I_f = \frac{U_f}{R_f}$ 电动机输入功率: $P_1 = U_a I_a + U_f I_f$ 电动机输出功率: $P_2 = \frac{2\pi n}{60} T_2$ $T_2 - \text{机械负载转矩}$ | $I = I_a + I_f \approx I_a$ $E = U - I_a R_a$ $I_f = \frac{U}{R_f}$ $P_1 = UI = U(I + I_f)$ $P_2 = \frac{2\pi n}{60} T_2$ | $I = I_a = I_f$ $I = \frac{U - E}{R_a + R_f}$ $P_1 = UI$ $P_2 = \frac{2\pi n}{60} T_2$ | $I = I_a + I_f \approx I_a$ $I_a \approx \frac{U - E}{R_a + R_{f1}}$ $P_1 = UI$ $P_2 = \frac{2\pi n}{60} T_2$ |
| 机械特性 | $n = \frac{U_a}{C_E \Phi} - \frac{R_a}{C_E C_T \Phi^2} T$ 式中 C_E —电动势常数 C_T —转矩常数 | $n = \frac{U}{C_E \Phi} - \frac{R_a}{C_E C_T \Phi^2} T$ | $n = \frac{U}{C_E \Phi} - \frac{R_a + R_f}{C_E C_T \Phi^2} T$ | $n = \frac{U - I_a (R_a + R_{f1})}{C_E (\Phi_m + \Phi_s)}$ $T = C_T I_a (\Phi_m + \Phi_s)$ |
| 适用场合 | 用于需要恒转矩调速及可逆运行的场合,如龙门刨床、镗床等 | 一般用于恒速负载 | 用于要求很大的起动转矩,转速允许有较大变化的负载,如蓄电池供电车、起货机、起锚机、电车、电力机车等 | 用于要求起动转矩较大,转速变化不大的负载,如冶金辅助传动机械以及需要恒功率调速的场合 |

7 直流电动机的使用

法起动,见表 2·4-3。

应用直流电动机时,经常遇到起动、调速、反转和制动等问题。现以他励电动机为例加以说明。

7·2 直流电动机调速

7·1 直流电动机的起动

直流电动机的转速

直流电动机的主要缺点是起动电流很大,易损坏换向器,以及其它危害。因此直流电动机一般用以下方

$$n = \frac{U - I_a (R_a + R_c)}{C_E \Phi}$$

式中 C_E —电动势常数;
 R_a —电枢电阻 (Ω);



R_c ——电枢的串联电阻 (Ω)。 在电枢电路内串联电阻 R_c 的方法进行调速，见由上式可知，可采用调节电枢电压，磁通 Φ 及 表 2·4-4。

表 2·4-3 他励电动机的起动方法

| 起动方法 | 电枢电路串联电阻 | 降低电枢电压 |
|------|-----------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| 电路图 | | |
| 说明 | 起动时， U_f 为额定值，并将 R_c 置于最大处，以限制起动电流为额定电流的 1.5~2.5 倍，然后逐步切除 R_c 。 | 起动时， U_f 保持不变，使直流电源电压从零逐步升高到额定电压。起动时，加速平稳，且起动电流小。 |

表 2·4-4 他励电动机调速方法

| 调速方法 | 调节电枢电路电阻 | 调节励磁电流 | 调节电枢电压 | 用晶闸管可控直流电源调压 |
|------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 电路图 | | | | |
| 机械特性 | | | | |
| 主要特点 | <ol style="list-style-type: none"> 保持 U 不变，Φ 不变，转速随 R_c 增加而降低 电机机械特性软 当电枢电流 I_a 不变时，可作恒转矩调速，但低速时，输出功率随 n 降低而减小，效率低，不经济 | <ol style="list-style-type: none"> 保持 U 不变，调节 R_f 使 Φ 减小，转速 n 上升 转速上升使换向困难，电枢反应去磁作用使机械特性稍软 调速经济性好 为恒功率调速 | <ol style="list-style-type: none"> 保持 Φ 不变 有较大调速范围 有较好的低速稳定性 功率随 U 下降而减小 | <ol style="list-style-type: none"> 用晶闸管可控电源代替直流发电机可降低投资成本，效率高 其他特点与调节电枢电压相同 |



(续)

| 调速方法 | 调节电枢电路电阻 | 调节励磁电流 | 调节电枢电压 | 用晶闸管可控直流电源调压 |
|------|--------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------------|--------------|
| 适用范围 | 这种调速方法只适用于额定转速以下,不需要经常调速;机械特性要求较软的调速 | 1. 适用于额定转速以上的调速 2. 恒功率调速 | 1. 适用于他励电动机 2. 适用于额定转速以下的恒转矩调速 | 与调节电枢电压相同 |

7.3 直流电动机的反转

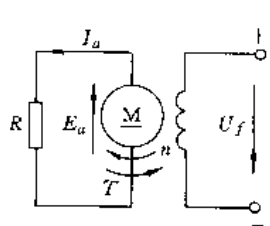
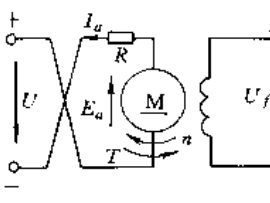
一般将电枢绕组接到电源的两根导线的位置互换,或将励磁绕组接到电源的两根导线对调,即可使电动机反转。但是,这两种方法不能同时使用,否则电动机不会改变转向。

7.4 直流电动机的电磁制动

很多生产机械要求能迅速停车,这就需要对电动机进行制动,强迫它立即停车。

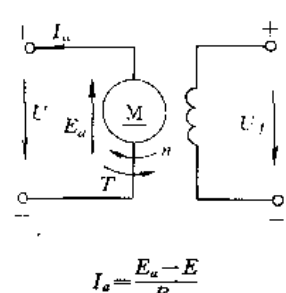
电动机的电磁制动就是在电动机停车的瞬间,使电动机所产生的电磁转矩与转子的旋转方向相反。直

表 2-4-5 直流电动机的三种电磁制动方式

| 制动方式 | 原理图 | 制动原理和过程 | 适用范围 |
|------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|
| 能耗制动 |  $I_a = \frac{E_a}{R_a + R}$ | <ol style="list-style-type: none"> 1. 保持励磁不变,电动机的电枢从电网断开后,立即接入电阻 R,电枢电流 I_a 反向,电磁转矩 T 与电动机的转向相反 2. 电机作发电机运行,能量消耗于电阻 R 中 3. 因发电机的电磁转矩 T 总是与转向相反,电机处于制动状态 | 用于电机停转 |
| 反接制动 |  $I_a = \frac{U + E_a}{R_a + R}$ | <ol style="list-style-type: none"> 1. 改变 I_a 或 I_f 的方向,产生与电机转向相反的转矩 T 2. 不能同时改变 I_a 和 I_f 的方向,否则不会制动 3. 制动时,在电枢电路串联电阻 R,以限制制动电流。在电机停转时,应及时切断电源,以防反向再启动 4. 复励电动机制动时,其并励、串励绕组中的电流方向保持不变 | 用于要求迅速制动停转并反转 |



(续)

| 制动方式 | 原理图 | 制动原理和过程 | 适用范围 |
|------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| 反馈制动 |  $I_a = \frac{E_a - E}{R_a}$ | <ol style="list-style-type: none"> 1. 保持励磁不变, 当转速 n 上升到 $U < E_a$ 时, 电流 I_a 反向, 电磁转矩 T 与转向相反 2. 制动时, 电机作发电机运行 3. 制动过程中, 向电网馈电 | 只能用于限制转速过分升高 |

流电动机的电磁制动有能耗制动、反接制动和反馈制动三种, 见表 2-4-5。

8 直流电机的常见故障和处理

8.1 电枢绕组短路或断路和接地

1. 电枢绕组短路或断路 电枢绕组短路、断路或开焊故障的检查, 通常采用测量换向片间的电压降的方法来确定故障的位置, 即在换向器相隔接近一个极距的两换向片上接入低压直流电源。用毫伏表测量两换向片间的电压, 如图 2-4-6 所示。当电枢绕组线圈匝间直接短路, 则片间电压降等于零或甚微。当电枢绕组线圈断路或焊接不良, 则在连接的换向片上测得的电压降将比平均值显著增大。

2. 电枢绕组接地 电枢绕组接地点故障的检查方法, 常用的有测量换向片的电压降, 测量换向片与轴间的电压降, 及试灯检查三种。

现以测量换向片和轴间电压降方法检查电枢绕组的接地来说明: 即将低压直流电源接到相隔接近一个极距的两换向片上, 测量换向片和轴间的电压降, 见图 2-4-7。接地点的电压降接近零。

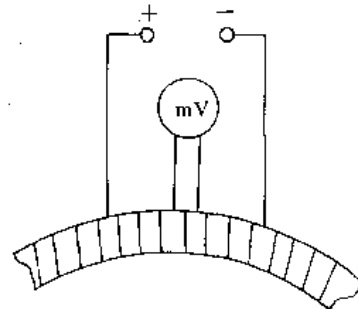


图 2-4-6 用测量换向片间电压降方法

8.2 直流电机的常见故障和处理

直流电机常见故障和处理见表 2-4-6。

表 2-4-6 直流电机常见故障和处理

| 故障 | 主要原因 | 处理方法 |
|-------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 绝缘电阻低 | <ol style="list-style-type: none"> 1. 电机绕组和导电部分有灰尘、金属屑、油污物 2. 绝缘受潮 3. 绝缘老化 | <ol style="list-style-type: none"> 1. 用压缩空气吹净 2. 油污物, 可用弱碱性洗涤剂清洗然后干燥 3. 烘干处理 4. 浸漆处理, 或更换绝缘 |
| 电枢绕组 | 接地 | <ol style="list-style-type: none"> 1. 用 220V 小试灯查出接地点, 排除异物 2. 用低压直流电源测量换向片间或与轴间电压降, 找出接地点, 更换故障线圈 |
| | 短路 | <ol style="list-style-type: none"> 1. 按正确方法连接电枢线圈 2. 用测量换向片间电压降的方法查出故障点, 清除故障物 3. 更换绝缘 |



(续)

| 故障 | | 主要原因 | 处理方法 |
|-----------------|-------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 电枢绕组 | 断路 | <ol style="list-style-type: none"> 1. 接线错误 2. 电枢线圈与换向片间开焊 | <ol style="list-style-type: none"> 1. 同短路处理方法 1 2. 补焊接 |
| | 接触电阻大 | <ol style="list-style-type: none"> 1. 电枢线圈与换向片间焊接不良 | <ol style="list-style-type: none"> 1. 同断路处理方法 2 |
| 发电机的电压建立不起来或电压低 | | <ol style="list-style-type: none"> 1. 电枢线圈匝间短路 2. 励磁绕组断路, 接错线 3. 剩磁消失 4. 电刷不在中性位置 5. 电机旋转方向不对或并励绕组与电枢绕组连接不对 6. 转速过低不到额定值 7. 励磁电流太弱 8. 部分励磁线圈发生短路 9. 电刷压力不足 10. 复励发电机的串励线圈与并励线圈磁场方向反相 | <ol style="list-style-type: none"> 1. 同短路处理方法 1、2、3 2. 查出原因, 纠正接线 3. 用外电源充磁 4. 调整电刷到中性位置 5. 改变旋转方向或改变并励绕组与电枢绕组之间的连接 6. 增加原动机转速 7. 增加励磁电流 8. 换新励磁线圈 9. 调整弹簧压力或更换弹簧 10. 改变串励线圈接线 |
| 电动机不能起动, 转速不正常 | | <ol style="list-style-type: none"> 1. 负载过重或熔丝熔断 2. 电源电路断开或开关未接触好 3. 励磁绕组断开, 短路、接错线 4. 电刷不在中性位置 5. 电刷与换向片未接触 6. 起动机接触不良 | <ol style="list-style-type: none"> 1. 减轻负载, 安装新的熔丝 2. 线接妥和修复开关 3. 更正励磁绕组的连接, 消除短路 4. 调整电刷到中性位置 5. 调整刷握装置 6. 更换或修复起动机 |
| 电刷与换向器上发生火花或环火 | | <ol style="list-style-type: none"> 1. 电刷位置不正 2. 换向极的极性错误 3. 电刷质地太软, 磨损的碳末在换向片间形成短路 4. 电刷接触圆弧不光滑或换向器表面粗糙 5. 换向器片间云母片凸出 6. 换向器片间有铜末破屑 7. 电枢线圈与换向片的连接断脱 8. 电枢绕组有短路或断开 9. 电机过载 | <ol style="list-style-type: none"> 1. 校正中性线位置, 并正确装置电刷 2. 更正换向极的接法 3. 更换质地较硬的电刷 4. 将换向器车平或用玻璃砂皮磨电刷, 使它 与换向器完全配合 5. 用刮刀刮低 6. 用刮刀刮清 7. 连接重焊 8. 更换绕组 9. 减轻负载 |
| 电机过热 | | <ol style="list-style-type: none"> 1. 负载过大 2. 电枢绕组短路 3. 主磁极线圈短路 4. 电枢铁心绝缘损坏 5. 冷却空气量不足, 环境温度高 | <ol style="list-style-type: none"> 1. 减轻负载 2. 同短路处理方法 1、2、3 3. 更换磁极线圈 4. 局部或全部进行绝缘处理 5. 清洁电机内部, 改善周围冷却条件 |
| 机械振动 | | 参阅第 2 篇第 3 章 (表 2·3-3) | |
| 轴承发热和噪声 | | 参阅第 2 篇第 3 章 (表 2·3-2) | |

机械工业出版社 请尊重作者版权



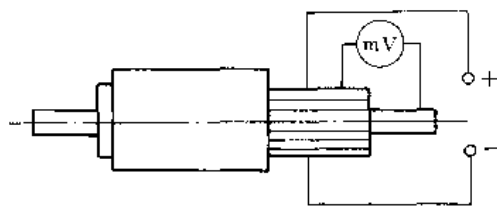


图 2-4-7 用测量换向片和轴间电压降方法
检查电枢绕组的接地

9 直流电机的额定数据和型号

(1) 额定电流 I_n 。对发电机是指供给负载的额定电流；对电动机是指从电源输入的额定电流。

(2) 额定电压 U_n 。对发电机是指在额定电流、额定转速时的端电压；对电动机是指应加电源电压。

(3) 额定功率 P_n 。对发电机是指输出的额定电功率；对电动机是指轴上输出的额定机械功率。

(4) 额定转速 n_n 。在额定电压和额定电流时电枢的转速。

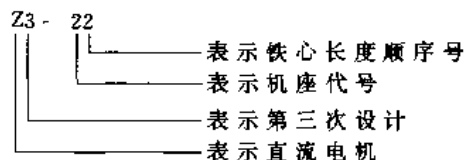
(5) 额定效率 η_n 。即满载时的效率。

(6) 额定转矩 T_n 。电动机在额定状态下轴上的输出转矩，单位为 $N \cdot m$ 。

此外，还有温升、绝缘等级和重量等额定数据。

直流电机的产品名称、型号和用途见表 2-4-7。

型号说明举例



随着电子技术的发展，利用整流器可以方便、经济地将交流电转换成直流。因此，直流发电机已逐渐被半导体整流电源所取代。

表 2-4-7 直流电机的产品名称、型号和用途

| 序号 | 产品名称 | 型号① | 主要用途 |
|----|--------------|-------------------------------|------------------------|
| 1 | 防护式直流电动机 | Z (ZD, ZJD) | 一般用途，作车床传动、调速用 |
| 2 | 防护式直流发电机 | ZF (Z, ZJF) | 一般用途，作电动机-发电机组中的发电机用 |
| 3 | 广调速直流电动机 | ZT | 用于恒功率调速范围较大的传动机械 |
| 4 | 冶金起重用直流发电机 | ZZJ (ZZK, ZZY) | 用于冶金辅助传动机械 |
| 5 | 直流牵引电动机 | ZQ | 用于电力传动机床、工矿电机车、蓄电池供电车等 |
| 6 | 精密机床用直流电动机 | ZJ (ZJQ) | 用于磨床、坐标镗床等精密机床 |
| 7 | 挖掘机用直流电动机 | ZKJ (ZKC) | 用于冶金、矿山挖掘机 |
| 8 | 船用直流电动机 | Z-H (ZH, ZQC) | 船舶上各种辅助机械用 |
| 9 | 船用起重直流电动机 | ZZJ-H (ZZ-H, ZZK-H, ZZY-H) | 各种船舶用辅助设备 |
| 10 | 船用直流发电机 | ZF-H (Z02C) | 作船舶电源用 |
| 11 | 龙门刨床用直流电动机 | ZU (ZBD) | 用于龙门刨床 |
| 12 | 防爆安全型直流电动机 | ZA (Z) | 用于矿井和有易爆气体的场所 |
| 13 | 汽车起动机 | ST | 用于汽车、拖拉机、内燃机等 |
| 14 | 直流测功机 | CZ (ZC) | 用于测定原动机效率和输出功率 |
| 15 | 力矩直流电动机 | ZLJ | 用于位置或速度伺服系统中作执行元件 |
| 16 | 永磁直流测速发电机 | ZYS | 测量转速或作速度反馈元件 |
| 17 | 大功率他励直流测速发电机 | ZCF | 作速度反馈元件 |
| 18 | 无槽直流电动机 | ZW (ZWC) | 快速动作伺服系统中用 |

① 带括号者是相应的旧型号。



第5章 驱动微电机

1 概述

驱动微电机是指转轴高度在90mm以下,电机外径在160mm以下,额定功率小于750W,用来驱动机械用的普通微型电机。

驱动微电机按工作原理可分为异步电动机、同步电动机(见本篇第6章4节)、直流电动机和交流换向器电动机四大类。各类电机的性能特点及其典型应用见表2-5-1。

表2-5-1 各类电机的性能特点及其典型应用

| 类别 | 性能特点 | 典型应用 | |
|--------------|------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|--------------------|
| 三相异步电动机 | 起动转矩大($T_s > 2.2T_n$),力能指标高,可逆转 | 适用于有三相电源的场合,例如小型机床、泵、手电钻 | |
| 高速异步电动机 | 转速高($n = 6000 \sim 300000 \text{r/min}$),温升低 | 适用于要求高速运行的场合,例如,磨床、铣床、钻床、砂轮机、医疗及纺织机械 | |
| 单相电阻起动电动机 | 中等起动转矩[($T_s = (1.1 \sim 1.6)T_n$),起动电流[($I_s = (6 \sim 9)I_n$),可逆转 | 适用于低惯量负载,不经常起动,负载可变而要求转速基本不变的场合,例如小型车床、鼓风机、医疗器械 | |
| 单相电容起动电动机 | 起动转矩大[($T_s = (2.5 \sim 2.8)T_n$),中等起动电流[($I_s = (4.5 \sim 6.5)I_n$),可逆转 | 适用于满载起动场合,例如空气压缩机、泵、电冰箱、循环泵 | |
| 单相电容运转电动机 | 起动转矩小[($T_s = (0.35 \sim 0.6)T_n$),振动噪声小,可逆转,可调速 | 适用于直接与负载连接并要求低噪声的场合,例如风扇、通风机、录音机 | |
| 单相电容起动和运转电动机 | 起动转矩大($T_s > 1.8T_n$),力能指标高,可调速 | 适用于带负载起动和低噪声的场合,例如小型机床、泵、家用电器 | |
| 单相罩极异步电动机 | 起动转矩小($T_s < 0.5T_n$),不能逆转,可调速 | 适用于对起动转矩要求不高,例如小风扇、电动模型、排气机 | |
| 磁滞同步电动机 | 转速恒定 | 适用于小容量转速恒定的场合,例如电钟、时间继电器、陀螺仪 | |
| 磁阻同步电动机 | 转速恒定,起动性能好 [($T_s = (2 \sim 3.5)T_n$)] | 适用于大容量转速恒定的场合,例如音响设备、摄影、记录、通信设备 | |
| 永磁同步电动机 | 起动性能差($T_s > 1.2T_n$),稳定性好 | 适用于恒转速场合,例如化纤纺织设备、自动化设备 | |
| 电磁式直流电动机 | 并(他)励直流电动机 | 机械特性硬,中等起动转矩,可调速,可逆转 | 适用于转速变化不大的场合 |
| | 串励直流电动机 | 机械特性软,过载能力高,起动转矩大,转速高,调速范围宽 | 适用于要求转速随负载大小而变化的场合 |
| | 复励直流电动机 | 起动转矩大,机械特性硬,可调速 | 适用于要求转速变化不大的场合 |



(续)

| 类别 | 性能特点 | 典型应用 |
|---------------|---------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|
| 永磁 直流电动机 | 机械特性硬,效率高,中等起动转矩 $[T_n=(2\sim 5)T_n]$,可调速,可逆转 | 适用于小容量,低电压,高转速以及转速变化不大的场合,例如计算机、录音机 |
| 印制绕组 直流电动机 | 其转矩正比于电枢电流,机电时间常数小,换向火花小,调速范围宽 | 适用于需要机电时间常数小的场合,例如记录仪、电视电影放映机、刮雨器、割草机、采茶机 |
| 无刷 直流电动机 | 噪声低,无换向火花,可调速 | 适用于要求低噪声和无换向火花的场合,例如摄影机、人造卫星 |
| 交流 换向器电动机 | 机械特性软,起动转矩大 $[T_n=(1.5\sim 6)\times T_n]$,过载能力高,转速高($n=4000\sim 12000r/min$),调速范围宽 | 适用于转速随负载大小而变化的场合,例如手电钻、吸尘器 |

2 三相驱动微型异步电动机

三相驱动微型异步电动机有微型三相异步电动机和高速异步电动机两种,它们的工作原理与一般三相异步电动机的工作原理相同,见本篇第2章。

高速异步电动机的高转速是靠提高供电频率来达到的,常用三相中频机组或晶闸管静止变频器(见本书第3篇)作为供电电源,其频率通常为 $100\sim 4000Hz$,转速范围一般为 $6000\sim 240000r/min$ 。

高速异步电动机的结构,工作特点和使用寿命都与支承或轴承的装配和润滑有关。图2-5-1为常用的油雾润滑水冷式高速异步电动机。其支承是向心推力球轴承,润滑脂是油雾。水冷式高速异步电动机都是封

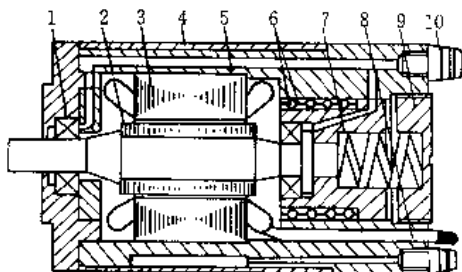


图 2-5-1 油雾润滑水冷式高速电动机
1—轴承 2—转子 3—定子 4—水套
5—机壳 6—滚珠导套 7—弹簧
8—电缆 9—调节螺母 10—油管

闭结构,电机产生的热量全部传到机壳被冷却水带走。

3 单相电容式电动机

3.1 单相异步电动机的工作原理

单相异步电动机的定子为单相绕组,转子为笼型绕组,如图2-5-2所示。

当单相交流电流通过定子绕组时,产生一个位置固定,大小随时间作正弦变化的脉动磁场。它在绕组轴线 yy 上的磁动势

$$f_1 = F_m \sin \omega t \quad (2.5-1)$$

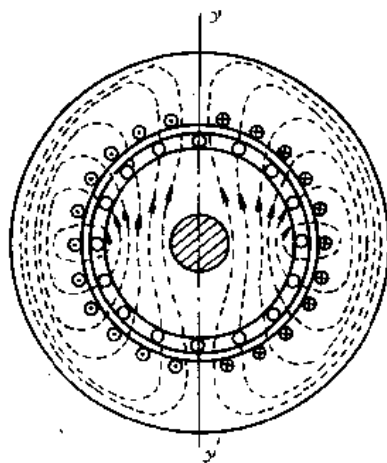


图 2-5-2 单相异步电动机



式中 F_m ——脉动磁场的磁动势幅值(A);
 ω ——角频率(rad/s)。

一个脉动磁场可以等效地看成是由两个大小相等,转动方向相反,角频率 ω 相同的旋转磁场合成的,其中一旋转磁场称为正向旋转磁场 F_1 ,另一个称为反向旋转磁场 F_2 。这两个旋转磁场具有相等的幅值,都为原脉动磁场的磁动势幅值的一半,即

$$F_{1m} = F_{2m} = \frac{1}{2} F_m \quad (2.5-2)$$

式中 F_{1m} ——正向旋转磁场的磁动势幅值(A);
 F_{2m} ——反向旋转磁场的磁动势幅值(A)。

图2.5-3所示为两个旋转方向相反的磁动势 F_1 和 F_2 ,它们的合成磁动势 f_t 是随时间变化的脉动磁场。

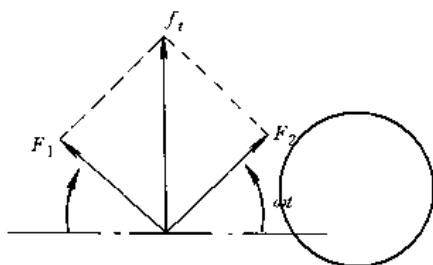


图2.5-3 两个旋转磁场合成为一个脉动磁场的示意图

3.2 单相异步电动机的转矩特性

从单相电动机的作用原理来看,这两个方向相反的旋转磁场与三相异步电动机的旋转磁场一样,它们

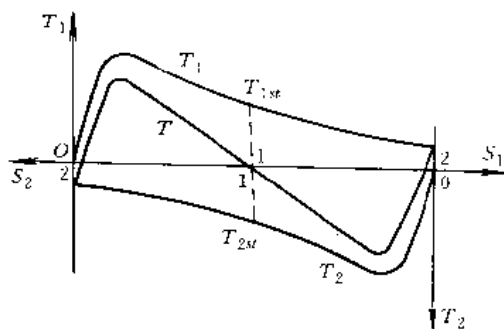


图2.5-4 单相异步电动机 $T-S$ 曲线
 T_1 —正向旋转磁场的电磁转矩
 T_2 —反向旋转磁场的电磁转矩
 T_{1st} —正向旋转磁场的起动转矩
 T_{2st} —反向旋转磁场的起动转矩
 T —合成电磁转矩 S —转差率

产生的电磁转矩 T_1 和 T_2 的方向是相反的。可将它们的转矩特性曲线 $T_1=f(S_1)$ 和 $T_2=f(S_2)$ 分别画在同一图上,如图2.5-4所示。图中并将这两条曲线分别扩展到各自的 $1 < S < 2$ 的范围内。它们的合成电磁转矩 $T=T_1-T_2$,就是单相异步电动机的电磁转矩, $T=f(S)$ 曲线见图2.5-4。

从单相异步电动机的 $T=f(S)$ 曲线可知,当起动时,转子的转速为零,转差率 $S_1=S_2=1$,产生大小相等方向相反的起动转矩 $T_{1st}=T_{2st}$,使单相电动机的合成起动转矩 $T_{st}=T_{1st}-T_{2st}=0$ 。所以不能自行起动。但是,只要 $S \neq 1$,它所产生的电磁转矩 $T \neq 0$,就能驱动转子达到稳定运行,所以可作为电动机运行。

3.3 单相电容式异步电动机

为了使单相异步电动机能自行起动,在单相电容起动或运转的异步电动机定子上,除了工作绕组 W 外,还有一个起动绕组 W_c ,这两个绕组在空间互差 90° 。起动绕组和电容 C 串联后,与工作绕组并联接入电源,见图2.5-5。电容 C 的作用是使起动绕组中电流 I_2 超前电源电压 U ,而工作绕组中的电流 I_1 滞后 U 。适当选择电容 C ,使 I_1 和 I_2 之间接近 90° 的相位差。当 90° 相位差的两个电流 I_1 和 I_2 通过两相绕组时,也能产生旋转磁场,见图2.5-6。

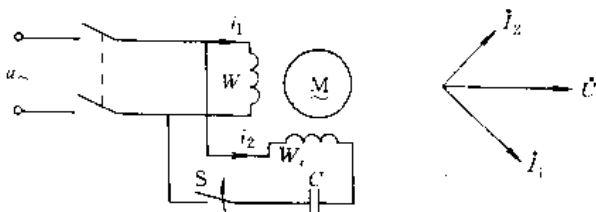


图2.5-5 单相电容起动异步电动机
 W —工作绕组 W_c —起动绕组 S —离心开关

在旋转磁场的作用下,笼型转子就产生起动转矩而自行起动。这种电动机称为单相电容运转电动机。若要它反转,只要换接任意一相绕组的电源接线端,电动机便会反转。

当电动机起动后,高速运转时,离心开关 S 在离心力的作用下自动断开,电动机就只有工作绕组继续运转。这种电动机称单相电容起动电动机。



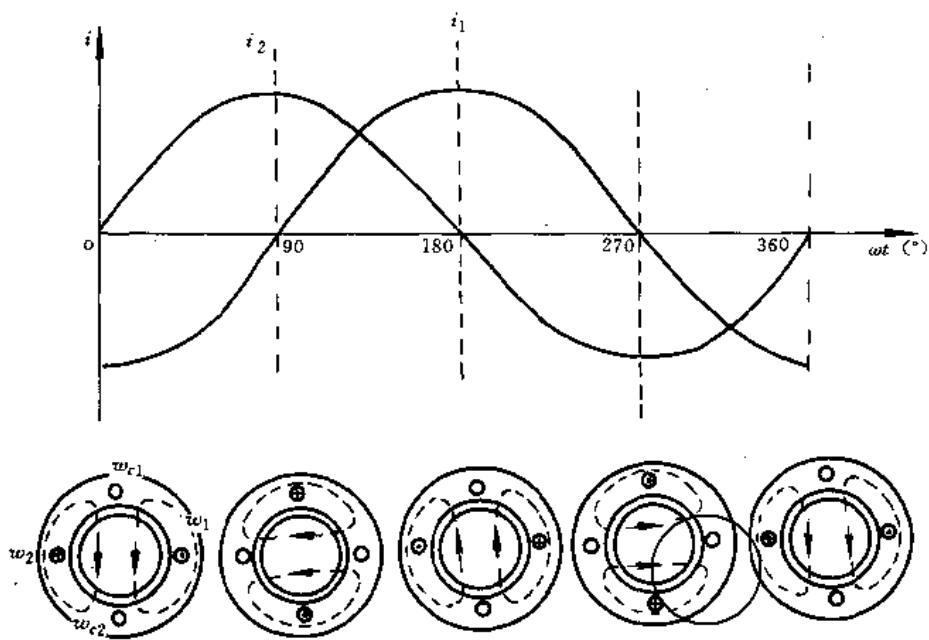


图 2-5-6 两相电流产生的旋转磁场

4 单相罩极式异步电动机

图 2-5-7 所示罩极式单相异步电动机,在它的定子上有凸出的磁极,定子绕组就套装在这个磁极上,并在每个磁极表面开有一个凹槽,将磁极表面分成大小两部分,在小的部分还套有一个短路铜环。当定子绕组通过交流电而产生脉动磁场时,由于短路铜环中感应电流的作用,使通过磁极表面的磁通分为两部分,这两部分磁通不但在数量上不相等,而且在相位上也不相同,被短路环罩着的部分磁通滞后于另一部分的磁通。

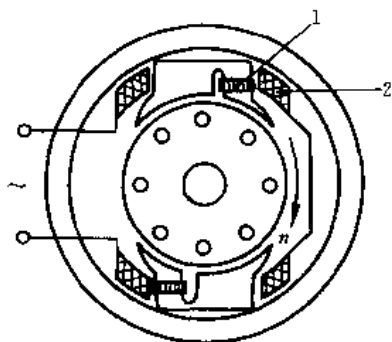


图 2-5-7 罩极式电动机的结构

1—短路铜环 2—定子绕组

这两个在空间位置上不同,在时间上又有相位差的磁通,相当于在电动机内形成一个旋转磁场。在这旋转磁场的作用下,笼型转子就产生起动转矩而自行起动,它的旋转方向是由未罩部分向被罩部分方向旋转,如图

2-5-6 中的箭头所示。

5 微型直流电动机

微型直流电动机按其励磁方式可分为电磁式和水磁式两类。其结构和工作原理与一般的电磁式或水磁式直流电动机基本相同。这两类微型直流电动机的具体分类、特点和适用范围分别见表 2-5-2 和表 2-5-3。

永磁直流电动机与电磁式直流电动机相比,具有体积小、重量轻(对功率为 150W 以下的电动机而言)、效率高、结构简单可靠,用铜量少等优点。永磁直流电动机的磁极结构型式与其永磁材料的性能直接有关,其机械特性与他励电磁式直流电动机相当;仅能通过改变电枢电压来调速。

6 无刷直流电动机

图 2-5-8 和图 2-5-9 分别为无刷直流电动机的原理及结构示意图。无刷直流电动机由电动机本体、位置传感器及电子换向开关电路三个基本部分组成。其中,位置传感器定子和电子换向开关电路相当于一个静止的换向器,位置传感器转子相当于旋转着的电刷,它们组成一个没有机械接触的电子换向装置。

电动机本体由一定磁极对数的永磁钢转子(也称主转子)和一个多相的电枢绕组定子(也称主定子)组成。转子磁钢有二极或多极的,见图 2-5-10。



表 2-5-2 微型电磁式直流电动机的特点和适用范围

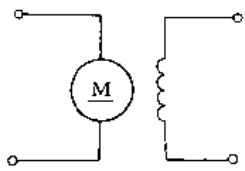
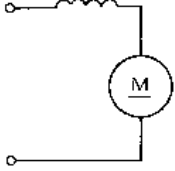
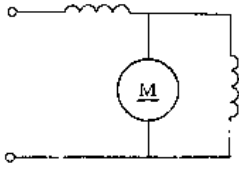
| 励磁方式 | 他(并) 励 | 串 励 | 复 励 |
|------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 连接方式 |  <p>他励—励磁绕组单独接另外电源 并励—励磁绕组与电枢绕组并联</p> |  <p>励磁绕组与电枢绕组串联接电源</p> |  <p>有两个励磁绕组,一个与电枢绕组并联,另一个与电枢绕组串联接电源</p> |
| 特点 | <p>在规定的负载范围内,当负载变化时,转速变化不大</p> | <p>当负载变化时,转速有显著的变动。轻载时转速高,重载时转速低。带负载启动时,启动电流较并励电动机小</p> | <p>综合了并励和串励的特点,并励绕组可限制空载时的最高转速,串励绕组使重载下转速降低</p> |
| 适用范围 | <p>驱动在不同负载下,要求转速变化不大的机械负载</p> | <p>驱动重载下经常启动或冲击性的机械负载</p> | <p>驱动轻载或重载下启动或冲击性的机械负载</p> |

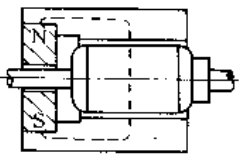
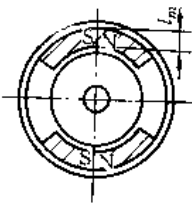
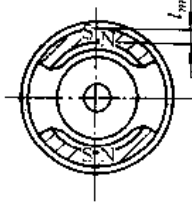
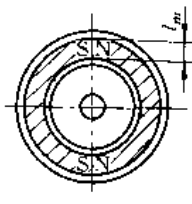
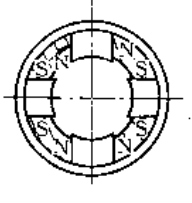
表 2-5-3 微型永磁直流电动机的特点和适用范围

| 永磁材料 | 定子结构特征 | 特点 | 适用范围 |
|--------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|--------------------------|
| 铝镍钴系磁钢 (外壳为铝合金) |  <p>圆筒式</p> | <p>结构简单,制造方便,外形尺寸小,有利于大批生产 抗去磁能力,换向及磁钢利用率较差</p> | <p>适用于功率为 50W 及以下的电机</p> |
| |  <p>改进的圆筒式</p> | <p>磁钢利用率较好,抗去磁能力有提高,对换向有利,便于安装 磁钢形状较复杂,加工要求较高</p> | <p>适用于功率 50W 及以下的电机</p> |
| |  <p>带软铁磁极式</p> | <p>抗去磁能力较强,不需磨磁钢的内外圆,加工容易,磁钢利用率高,有利于换向 结构较复杂</p> | <p>适用于功率为 20~80W 的电机</p> |

此星公司制作 请尊重作者版权



(续)

| 永磁材料 | 定子结构特征 | 特点 | 适用范围 |
|----------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-------------------|
| 铝镍钴系磁钢 (外壳为铝合金) |  <p style="text-align: center;">端面式</p> | 软铁极靴长,漏磁大,可用各向异性材料结构较圆筒形复杂 | 适用于功率为数十瓦的电机 |
| 铁氧体 (外壳为铁轭) |  <p style="text-align: center;">瓦块式</p> | 磁钢利用率高,适用于各向异性材料,结构简单,便于批量生产 气隙磁密较低 | 适用于功率为数十瓦的电机 |
| |  <p style="text-align: center;">瓦块式(带聚集形极靴)</p> | 聚集形极靴可以提高气隙磁密,克服铁氧体剩磁 B_r 低的缺点,适于用各向异性材料 结构较复杂 | 适用于功率为 40W 及以上的电机 |
| |  <p style="text-align: center;">圆筒式</p> | 结构简单,便于生产 材料利用率低,不利于换向,圆筒式磁钢较难形成各向异性磁钢,磁性能较低 | 适用于功率为 50W 及以下的电机 |
| 铝镍钴系磁钢 或铁氧体 (外壳为铝合金) |  <p style="text-align: center;">多极式</p> | 类似于瓦块式(带聚集形极靴)定子的特点 | 适用于功率为 100W 以上的电机 |



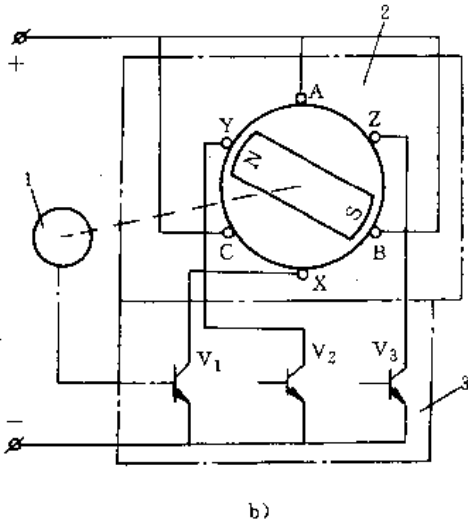
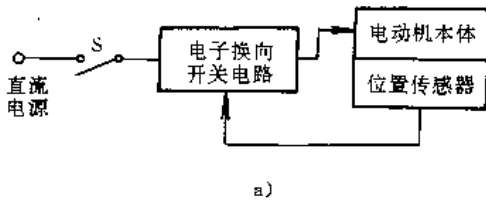


图 2-5-8 无刷直流电动机工作原理

a) 组成框图 b) 电路

1—位置传感器 2—电动机本体 3—电子开关线路

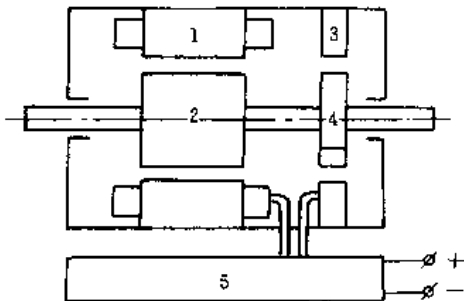


图 2-5-9 无刷直流电动机结构

1—主定子 2—主转子 3—传感器定子

4—传感器转子 5—电子换向开关电路

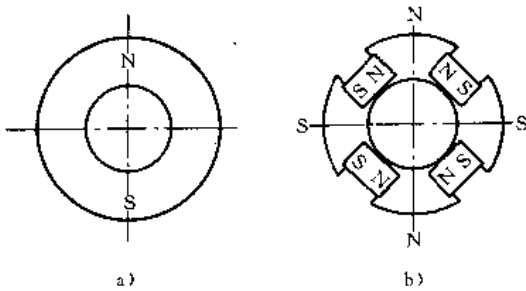


图 2-5-10 转子磁钢的结构

a) 圆柱形磁钢 b) 隐极多极磁钢

电枢绕组固定在定子铁心槽内,每相电枢绕组分别与相应的电子换向开关电路连接。为了保持电枢绕组电流与磁场极性相对关系不变,设有检测转子位置的位置传感器,使电枢绕组能随转子位置变化而依次通电。

图 2-5-11 和图 2-5-12 是由三相星形绕组、电磁式位置传感器及电子换向开关电路所组成的无刷直流电动机的位置示意图和电路原理。

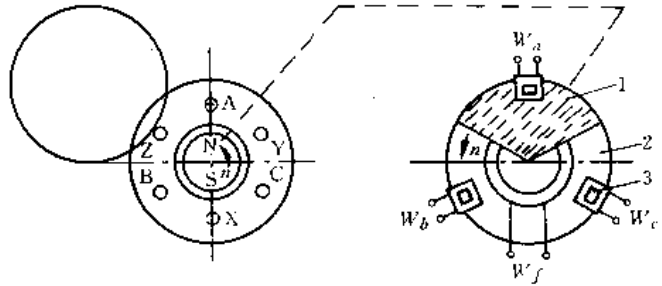


图 2-5-11 无刷直流电动机位置示意图

1—导磁片 2—磁心 3—磁心齿

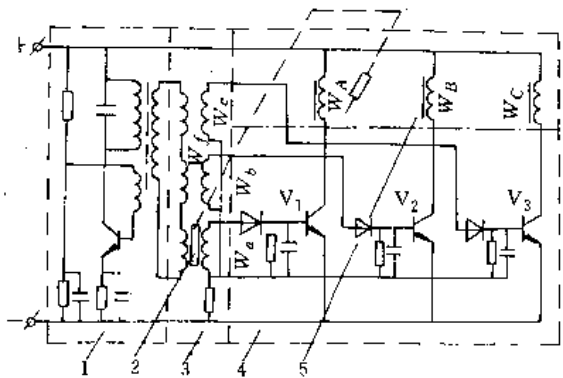


图 2-5-12 无刷直流电动机电路原理

1—振荡器 2—导磁片 3—传感器定子

4—开关电路 5—电动机本体

主定子的电枢绕组连接成三相星形,主转子是一对由永久磁钢制成的磁极,传感器转子是略大于 120° 的铁氧体扇形片,安放在非磁性材料的圆盘上,并与主转子装在同一轴上。传感器定子由铁氧体磁心和线圈组成,中间心柱的线圈为励磁线圈 W_f ,而外围相隔 120° 的三个磁心齿上绕有输出线圈 W_a, W_b 和 W_c 。传感器定子相当于三个共磁路的开口变压器^①。图 2-5-11 中示出了传感器转子扇形片中心线与主转子磁极轴重合时,传感器定子三个输出线圈在空间与主定

① 开口变压器即气隙可变的变压器



子绕组的相对关系。

励磁线圈 W_f 与电路中的振荡器相连。根据导磁片在转动时与三个磁心齿的相对位置,输出线圈 W_a 、 W_b 和 W_c 将依次输出信号,从而使主定子三相绕组轮流与电源接通,形成跳跃式旋转磁场。例如导磁片位于图 2-5-11 所示输出线圈 W_a 磁心齿位置时,导磁片与该磁心齿和中间心柱间构成一闭合磁路,因而在 W_a 中有感应电动势,它通过整流、整波后使晶体 V_1 导通,电流流过主定子绕组 W_A ,于是主转子磁钢就转动并力图占据该绕组磁动势轴线的位。随后导磁片移到具有输出线圈 W_b 的磁心齿位置, W_a 处磁心齿磁路开路, W_b 处磁心齿磁路闭合,从而 V_1 截止, V_2 导通,主定子绕组 W_B 中就有电流流过,此时主转子磁钢就力图占据 W_B 绕组磁动势的轴线位置。依次类推,主转子磁钢随着绕组导通的顺序而旋转。

7 通用微型电动机

通用微型电动机是交直流两用的电动机,实质上,它是一台直流串励电动机,由于要用于交流,在构造上,它的磁极与机座全部用硅钢片叠成,使得磁路中磁滞很小,磁极磁通的大小和方向能随励磁电流同时变化。在工作原理上,当交流电正半周时(如图 2-5-13a

所示),主磁通和电枢电流的方向,根据左手定则,电枢是逆时针方向旋转的。

当负半周时(如图 2-5-13b 所示),磁通和电枢电流同时改变方向,根据左手定则可知,电枢仍为逆时针方向旋转。因此,在交流电源极性反复变化时,电枢始终维持逆时针方向旋转。

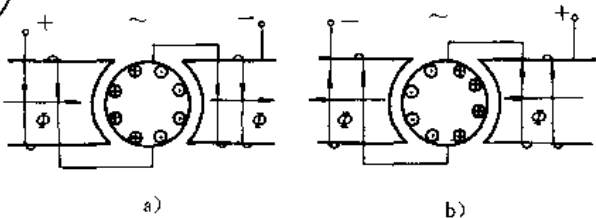


图 2-5-13 交直流两用电动机的工作原理
a) 正半周时 b) 负半周时

8 驱动微电机的型号和用途

驱动微电机的产品名称、型号和用途,见表 2-5-4。
型号说明举例:

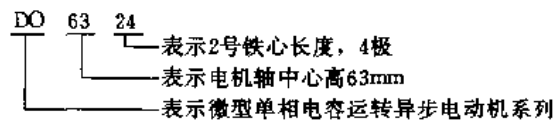


表 2-5-4 驱动微电机产品名称、型号和用途

| 产品名称 | 型号① | 适用场合 |
|-------------|--------------|------------------------------------------------|
| 三相异步电动机 | A、AO (JW) | 适用于有三相电源的场合,用于小型机床、手电钻 |
| 单相电阻起动电动机 | B、BO (JZ) | 适用于低惯量负载,不经常起动,负载可变而要求转速基本不变的场合。如小型车床、鼓风机、医疗器械 |
| 单相电容起动电动机 | C、CO (JY) | 适用于满载起动场合,如空气压缩机、泵、电冰箱、循环泵 |
| 单相电容运转电动机 | D、DO (JX) | 适用于直接与负载连接并要求低噪声的场合,如风扇、通风机、录音机 |
| 单相电容起动和运转电机 | E、EO | 适用于带负载起动和低噪声的场合,如小型机床、泵、家用电器 |
| 单相罩极异步电动机 | F | 适用于对起动转矩要求不高的场合,如小风扇、电动模型、排气机 |
| 串励直流电动机 | G | 适用于要求转速随负载大小而变化的场合 |
| 并(他)励直流电动机 | K | 适用于要求转速变化不大的场合 |
| 交直流两用电动机 | H | 适用于转速随负载大小而变化的场合,如手电钻、吸尘器 |
| 微型永磁直流电动机 | M | 适用于小容量、低电压、高转速及要求转速变化不大的场合,如计算机、摄影机、录音机 |

注:它们都适用于直接起动。

① 带括号者为相应旧型号。



第6章 控制微电机

1 概述

控制微电机是在自动控制系统中作为放大、执行和校正等元件使用的微电机，一般的输出功率从数毫瓦到数百瓦，重量从数十克到数千克，机壳外径为12.5~130mm之间。

控制微电机是一种特殊用途的电机，它的任务不

是转换能量，而是进行信号的转换和传递。例如，将角位移、转速等机械信号转换成电压信号，或者相反。对所有控制微电机的共同要求是高可靠性、高精度、高可控性和快速反应，这就决定了它们的结构和特性不同于一般电机。

各种常用的控制微电机的分类、特点和用途，见表

表2-6-1 各种常用控制微电机的分类、特点和用途

| 类别 | 序号 | 名称 | 特点 | 用途 |
|--------|----|-------|-------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|
| 功率放大元件 | 1 | 伺服电动机 | 转速与转向取决于控制电压的大小和极性（或相位），能对输入控制信号作快速反应，转速随转矩的增加而均匀下降 | 在控制系统中用作执行元件，通过齿轮等减速机构带动负载 |
| | 2 | 力矩电动机 | 能在长期堵转或低速运行时产生足够大的转矩，反应速度快，转矩和转速波动小，能在低速稳定运行，机械特性和调节特性线性度好 | 用于位置和低速伺服系统中，以及需要转矩调节、转矩反馈的场合。可不经减速机构而直接带动负载 |
| | 3 | 磁滞电动机 | 具有恒速特性，亦可在异步状态下运行 | 主要用于驱动功率较小的要求转速平稳和起动频繁的同步装置和低速伺服系统中 |
| | 4 | 步进电动机 | 由专门的电源供给脉冲信号电压，绕组中通电方式是脉冲式通电，给一个脉冲信号电动机转一个角度或前进一步，转速与输入脉冲频率成正比，能快速起动、停止、反转或变速 | 在数字控制系统中用作执行元件 |
| 信号测量元件 | 1 | 测速发电机 | 输出电压与转速成正比，精度高 | 在控制系统中用作检测转速、速度反馈和进行微分和积分计算的元件 |
| | 2 | 自整角机 | 发送机和接收机成对运行，输出电压是对接收元件角差的正弦函数，输出电压信号的属于信号元件，输出功率的属于功率元件 | 基本用途是角位移、变换和接收 |
| | 3 | 旋转变压器 | 输出电压是转子转角的正弦、余弦或其他函数 | 主要用作坐标变换、三角解算，也可用作角度数据传输和移相元件 |
| | 4 | 感应同步器 | 利用多极旋转变压器的原理，采用印刷绕组精密检测元件 | 用作直线位移和角位移的检测 |



2 伺服电动机

伺服电动机是自动装置中的执行元件，故又称执行电动机。它的最大特点是可控，只要输入控制信号电压它就转动，且转速与信号电压成正比，一旦除去控制信号电压，它就立即停转。伺服电动机有直流和交流两类。

2.1 直流伺服电动机

2.1.1 结构和工作原理

直流伺服电动机，按励磁方式又可分为电磁式和永磁式两种，其结构和工作原理与一般直流电动机一样，只是电枢细长，可以减少惯量。

不论电磁式或永磁式的，通常都采用电枢电压控制方式，其接线如图 2-6-1 所示。它有显著下斜的机械特性，当磁极磁通恒定，而加于电枢的控制电压 U_c 改变时，可得到一组平行的机械特性曲线，如图 2-6-2 所示。可见在输出转矩不变时，其转速 n 随控制电压 U_c 成正比变化。

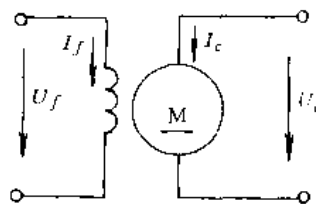


图 2-6-1 电枢控制式直流伺服电动机的电路

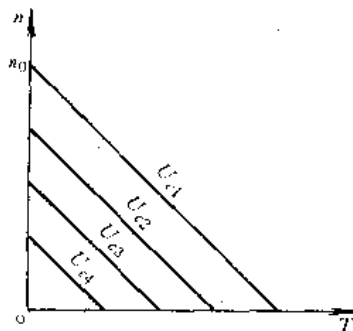


图 2-6-2 电枢控制式的机械特性

$$U_{c1} > U_{c2} > U_{c3} > U_{c4}$$

2.1.2 型号和用途

直流伺服电动机的型号、性能特点和适用范围见表 2-6-2。

表 2-6-2 直流伺服电动机的型号、性能特点和适用范围

| 名称 | 励磁方式 | 型号 | 结构特点 | 性能特点 | 适用范围 |
|---------------|-------|---------|---------------------------------------------|------------------------------------------|--------------------|
| 一般直流伺服电动机 | 电磁或永磁 | SZ 或 SY | 与普通直流电机相同，但电枢铁心长度与直径之比较大，气隙较小 | 具有下斜的机械特性和线性调节特性，对控制信号响应快 | 一般直流伺服系统 |
| 无槽电枢直流伺服电动机 | 电磁或永磁 | SWC | 电枢铁心为光滑圆柱体，电枢绕组用环氧树脂粘在电枢铁心表面，气隙较大 | 具有一般直流伺服电动机的特点，而且转动惯量和机电时间常数小，换向良好 | 需要快速动作，功率较大的直流伺服系统 |
| 空心杯形电枢直流伺服电动机 | 永磁 | SYK | 电枢绕组用环氧树脂浇注成杯形，置于内外定子之间，内、外定子分别用软磁材料和水磁材料做成 | 除具有一般直流伺服电动机的特点外，转动惯量和机电时间常数小，低速运转平滑，换向好 | 需要快速动作的直流伺服电动机系统 |
| 印刷绕组直流伺服电动机 | 永磁 | SN | 在圆盘形绝缘薄板上印制裸露的绕组构成电枢，磁极轴向安装 | 转动惯量小，机电时间常数小，低速运行性能好 | 低速和启动、反转频繁的控制系统 |



(续)

| 名称 | 励磁方式 | 型号 | 结构特点 | 性能特点 | 适用范围 |
|-----------|------|----|---------------------------------------------------|--------------------------------------------|-----------------------|
| 无刷直流伺服电动机 | 永磁 | SW | 由晶体管开关电路和位置传感器代替电刷和换向器, 转子用永久磁铁, 电枢绕组在定子上, 且组成多相式 | 既保持了一般直流伺服电动机的优点, 又克服了换向器和电刷带来的缺点。寿命长, 噪声低 | 要求噪声低, 对无线电不产生干扰的控制系統 |

2.1.3 主要特点、额定数据和使用注意事项

在自动控制系统中, 是否选用直流伺服电动机, 主要是根据系统对执行元件的具体要求和直流伺服电动机的特点决定的。

1. 主要特点 与交流伺服电动机比较, 直流伺服电动机的特点如下:

- (1) 电枢控制时, 机械特性的线性度比较好。
- (2) 调速范围较广, 不受磁极对数的限制, 从每分钟数十转到数千转。
- (3) 起动转矩大。
- (4) 功率损耗小, 输出功率达数千瓦时, 技术经济指标也不会下降。一般用于较大功率的控制系统中。

它的主要缺点是结构复杂, 换向产生的火花会给放大器、计算机及无线电通信造成干扰。为此, 目前制成了由电子换向装置代替机械换向装置的无刷直流伺服电动机, 但成本高, 体积也较大。

2. 主要额定数据 电磁式直流伺服电机的主要额定数据如下:

- (1) 额定功率。在规定工作方式下, 额定状态运行时, 电动机允许输出的最大机械功率, 一般在 1~600W, 但也有达数 kW 的。
- (2) 额定转矩。在额定状态下轴上所输出的转矩。
- (3) 额定电压。在额定状态下, 励磁绕组和电枢绕组应加的直流电压值。有 6、9、12、24、27、48、110 和 220V 几种。
- (4) 额定电流。在额定电压和额定输出功率时的电枢电流。
- (5) 额定转速。在额定状态运行时的转速。一般为数 kr/min。
- (6) 机电时间常数。在空载和额定励磁电压下, 加以阶跃的额定电枢电压时, 电动机从静止上升到空载转速的 63.2% 所需的时间。直流伺服电动机的机电时间常数一般不大于 0.03s。

其他还有励磁方式(电磁式或永磁式)和工作方式

(短时工作或连续工作)。

3. 使用注意事项

(1) 电磁式电枢控制的直流伺服电动机在使用时, 要先接通励磁电源, 然后再加上电枢电压。工作中, 一定要避免励磁绕组断电, 以免电枢电流过大而造成电机超速。

(2) 在自动控制系统中, 伺服电动机的控制电压通常是由放大器供给的。选用时, 应注意减小放大器的输出电阻, 以减小机电时间常数。

(3) 当用晶闸管整流电源时, 最好采用三相全波桥式电路; 在选用其它型式整流线路时, 应有适当的滤波装置。

2.2 交流伺服电动机

2.2.1 结构和工作原理

交流伺服电动机, 常用的为两相异步电动机, 在它的定子上嵌放励磁绕组 f 和控制绕组 c , 两绕组互差 90° , 其接线如图 2.6-3 所示。

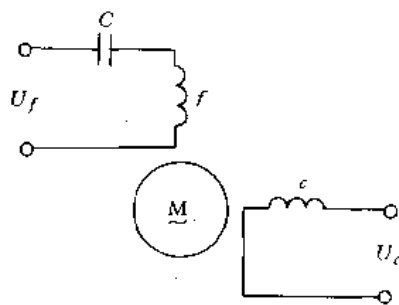


图 2.6-3 两相交流伺服电动机工作原理
 f —励磁绕组 c —控制绕组

转子有高电阻笼型和空心杯形两种。空心杯形转子电动机的结构如图 2.6-4 所示。定子分外定子和内定子两部分。外定子的结构与异步电动机的定子相同, 铁心槽内放有两相绕组 6, 内定子也由硅钢片叠成, 放在一个端盖上。转子由导电材料(例如铝)做成薄壁圆



筒形,放在内外定子之间。因而转动惯量小,动作快速灵敏。

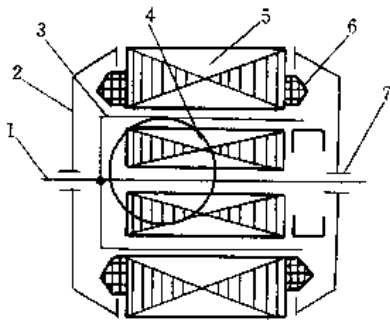


图 2-6-4 空心杯形转子电动机的结构

- 1—转轴 2—端盖 3—转子
- 4—内定子铁心 5—外定子铁心
- 6—两相绕组 7—轴承

由于交流伺服电动机的转子绕组采用电阻率较高的材料做成,它 also 具有显著下斜的机械特性,如图

2-6-5所示,当 U_f 恒定时,在同一负载转矩 T_L 下,电动机转速随控制电压 u_c 的减小而均匀下降,如果 u_c 反相,则 i_c 随之反相, i_c 与 i_f 的合成磁场反转,因而电动机随之反转。

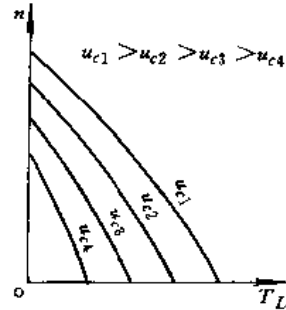


图 2-6-5 交流伺服电动机的机械特性曲线

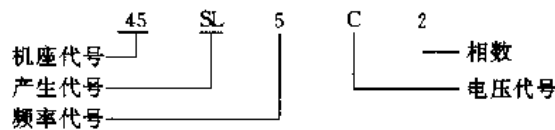
2-2-2 型号和用途

交流伺服电动机的型号、特点和适用范围见表 2-6-3。

表 2-6-3 交流伺服电动机的型号、特点和适用范围

| 名称 | 型号 | 结构特点 | 性能特点 | 适用范围 |
|--------|----|------------------------------------|----------------------------------------|-------------|
| 笼型转子 | SL | 与一般笼型电动机结构相同,但转子细而长,转子导体用高电阻率的材料制成 | 励磁电流较小,体积较小,机械强度高,但低速运行不够平稳,有时快时慢的抖动现象 | 小功率的自动控制系统 |
| 空心杯形转子 | SK | 转子做成薄壁圆筒形,放在内、外定子之间 | 转动惯量小,运行平滑,无抖动现象,但励磁电流较大,体积也较大 | 要求运行平滑的控制系统 |

注:型号说明举例



2-2-3 主要特点、额定数据和使用注意事项

1. 主要特点 与直流伺服电动机比较,交流伺服电动机有如下特点:

(1) 无电刷和换向器,因此避免了直流伺服电动机带来的缺点。

(2) 结构简单,运行可靠,维护方便。

它的主要缺点是机械特性不是线性的。并且与相同额定功率的直流伺服电动机相比,损耗大,效率低,体积也大,常用于小功率控制系统中。

2. 主要额定数据

(1) 额定频率 国产交流伺服电动机的额定频率主要有两种:低频为 50Hz,中频为 400Hz,两者不能换用。

(2) 额定电压 包括额定励磁电压和额定控制电压,国产交流伺服电动机的额定电压在电源频率为 50Hz 时,有 36、110、220 和 380V 等 4 种。电源频率为 400Hz 时,有 20、26、36 和 115V 等 4 种。

以下额定数据都是在两相绕组加额定电压时得到的。

(3) 额定功率和额定转矩 电动机允许输出的最大功率和最大转矩。



(4) 起动转矩和起动电流 电动机在转速为零时的转矩和两相绕组中的电流。

(5) 空载转速 电动机不带负载时的转速。

(6) 机电时间常数 电动机空载时, 转速由0升至空载转速的63.2%时所需的时间。

3. 使用注意事项

(1) 一般50Hz两相交流伺服电动机多制成2极或4极的; 400Hz的多制成4极、6极或8极的。

(2) 在电压一定时, 两相交流伺服电动机的输入阻抗随转速升高而增大, 功率因数则降低。额定电压越小, 额定功率越大的伺服电动机, 输入阻抗越小。

(3) 放大器的内阻越大, 放大器-电动机的机械特

性就变软, 线性度变差, 机电时间常数增加, 所以一般都用负反馈来降低放大器的内阻抗。

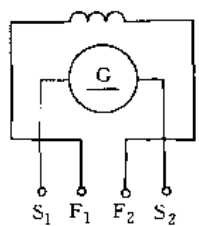
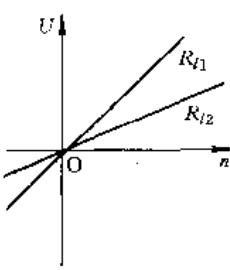
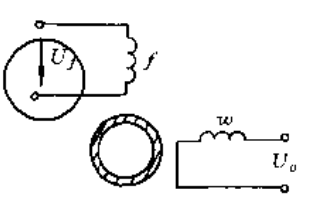
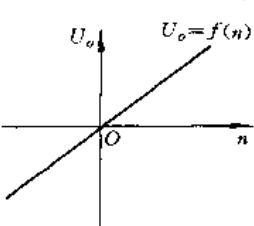
(4) 电压下降时, 起动转矩和允许的输出功率显著下降, 加速时间相应延长。

3 测速发电机

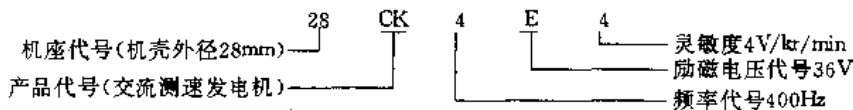
3.1 测速发电机的类型和用途

测速发电机是用于测量转速的发电机, 分为直流和交流两类。当励磁一定时, 输出电压与转速成正比, 在自动控制系统和计算装置中应用甚广。测速发电机的型号、特点和适用场合见表2-6-4。

表 2-6-4 直流测速发电机和交流测速发电机的型号、性能特点和适用场合

| 名称 | 型号 | 电路图 | 输出特性 | 性能特点 | 适用场合 |
|---------------|--------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|-----------------------------|
| 直流测速发电机 | ZCF |  <p>S₁、S₂—电枢绕组接线端 F₁、F₂—磁场绕组接线端</p> |  <p>$U_0 = E = C_E \phi n$ $R_{11} > R_{12}$ R_{11}、R_{12}—负载电阻</p> | 灵敏度高, 为交流测速发电机的20倍, 没有相位差, 正负极性反映转速的方向。但结构复杂, 成本高, 会产生无线电干扰等 | 使用较广, 在自控装置、解算装置中作为测速和反馈元件等 |
| 同步式 | | 为永磁转子的单相同步发电机 | | 由于输出电压的频率随转速而变化, 空载时输出电压正比于转速, 负载时输出电压, 不正比于转速 | 应用很少, 仅可作电气转速表用 |
| 交流测速电机 异步式 | AT或CK(空杯转子式) |  <p>f—磁场绕组 w—输出绕组 U_j—励磁电压 U_o—输出电压</p> |  <p>$U_o = Cn$ n—转速 (r/min) C—电机结构决定的常数</p> | 输出电压与转速成正比, 频率与电源频率一致, 与转速无关, 无滑动接触及无线电干扰。转子惯量小, 但尚有剩余电压 | 目前应用最广 |

注: 型号说明举例



3.2 测速发电机的主要特点、额定数据和使用的注意事项

发电机的特点比较,见表2-6-5。

他励式直流测速发电机与永磁式直流测速发电机的特点比较见表2-6-6。

1. 主要特点 交流异步测速发电机与直流测速

2. 主要额定数据 直流测速发电机的主要额定

表2-6-5 交流异步测速发电机与直流测速发电机的特点比较

| 交流异步测速发电机 | 直流测速发电机 |
|----------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|
| 1. 不用电刷和换向器,结构简单,维护容易,惯量小,无滑动接触 | 1. 直流测速发电机不存在相位移和剩余电压 |
| 2. 输出特性稳定,精度高,摩擦转矩小 | 2. 比电动势大,可达交流测速发电机的20倍,约10~20V/(r/min) |
| 3. 不产生无线电干扰,工作可靠,正、反向旋转时输出电压对称 | 3. 输出特性的斜率比异步测速发电机大 |
| 4. 存在剩余电压和相位误差,负载大小和性质会影响输出电压的幅值和相位 | 4. 具有电刷和换向器,结构复杂,维护不便,摩擦转矩大,有换向火花和产生干扰信号 |
| 5. 线性误差,比电动势小,只有0.5~5V/(r/min),因此灵敏度较低 | 5. 正、反向旋转时输出电压不对称 |
| 6. 笼型异步发电机,由于误差大,转子惯性大,一般只用于精度要求不高的系统中,杯形转子异步测速发电机转子惯量小,精度高,是目前应用最广泛的测速发电机 | |

表2-6-6 他励式直流测速发电机与永磁式测速发电机的特点比较

| 电 磁 式 | 永 磁 式 |
|--------------|------------------------------|
| 1. 有励磁损耗,效率低 | 1. 无励磁损耗,效率较高 |
| 2. 磁场不受振动影响 | 2. 磁场易受振动影响 |
| 3. 结构复杂,维护不便 | 3. 结构简单,低速精度高,小功率控制系统中应用非常广泛 |

数据如下:

(1) 励磁电流 是指他励式测速发电机的额定励磁电流。工作时其值应保持不变。

(2) 电枢电压 在额定励磁电流、最大线性工作转速和最小负载电阻时的电枢电压。

(3) 电枢电压之差 是指实际电枢电压与额定数据中所给的额定电压值之间可能存在的误差大小。

(4) 比电动势和比电动势误差 在1000r/min时,空载输出电压及实际值与额定值之间的误差。

(5) 转速 在保证输出线性,允许误差范围内的最大转速。

(6) 负载电阻 在保证输出线性,允许的线性误差范围内的最小负载电阻。

(7) 不对称度 输出特性不对称的程度,常用测速发电机在正、反转时,相同转速下,输出电压绝对值之差与两输出电压平均值之比的百分数表示,即

$$k = \frac{\Delta U}{U_m} \times 100\%$$

不对称度,一般为0.35%~2%。

交流测速发电机的主要额定数据,有的与直流测速发电机相同,不再赘述。比电动势、剩余电压、线性误差和相位误差都是在额定励磁电压和额定励磁频率条件下,电机空载时的数据。

3. 使用注意事项

(1) 在使用时,为保证其线性误差不超过规定,转速不应超过产品的最大线性工作转速,负载电阻不应小于规定的负载最小电阻。

(2) 为了减小温度变化所引起的输出电压误差,



可在电磁式直流测速发电机的励磁回路中，串联一个比励磁绕组电阻大几倍而温度系数小的电阻。

(3) 使用交流测速发电机时，应保证励磁电压大小和频率的稳定，否则会引起其输出电压的大小和相位的变化。

(4) 交流测速发电机的输入阻抗较小，所以励磁电源的内阻抗应尽量小一些。励磁电源与交流测速发电机的连接导线也应尽量短一些。

4 微型同步电动机

微型同步电动机是在电源电压波动或负载转矩变化时仍可保持转速恒定不变的电动机。在自动控制系统、测量记录仪器和其它工业中得到

广泛的应用。

微型同步电动机的定子与具有两相绕组或三相绕组的交流电动机的相同。单相微型同步电动机，按定子结构不同，又可分为电容式和罩极式两种。

微型同步电动机的转子，按其结构型式不同，可分为磁滞式、永磁式和反应式三种。

4.1 磁滞式同步电动机的基本结构和工作原理

4.1.1 磁滞式同步电动机的基本结构

磁滞式同步电动机的定子内放置二相或三相绕组，其接线见图 2.6-6。转子表面为硬磁材料环，其结构见图 2.6-7。

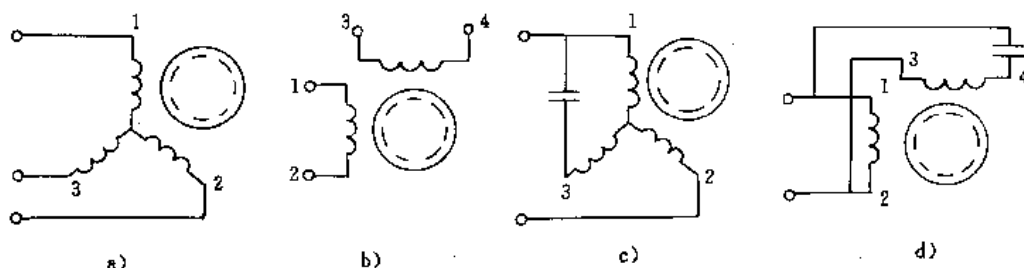


图 2.6-6 磁滞电动机的定子接线

a) 三相 b) 两相 c) 单相 d) 单相

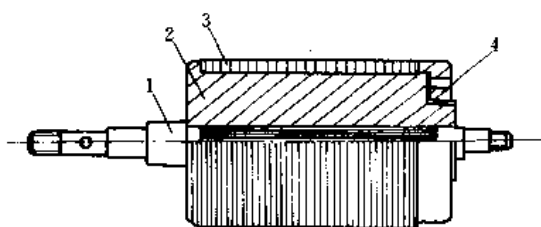


图 2.6-7 磁滞电动机的转子结构

1—转轴 2—黄铜衬套
3—转子有效层(硬磁材料) 4—螺母

4.1.2 磁滞同步电动机的工作原理

如图 2.6-8 所示，磁滞电动机的转子由硬磁材料制成，具有显著的磁滞特性。转子在定子旋转磁场的作用下被磁化后，由于磁滞的作用，当定子旋转磁场转过某一角 θ 时，在转子上被磁化的磁极的极性基本上仍保持原来的位置，因此定子磁场轴线与已磁化的转子轴线之间出现了空间位移。这时，定子磁场与转子磁场的相互作用，不仅产生径向力 F_r ，同时还产生切向力

F_t 和转矩，从而使转子起动并加速，直到同步转速为止。

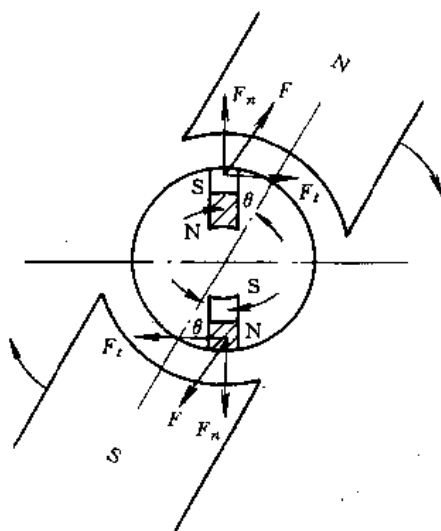


图 2.6-8 磁滞转矩的产生

小容量的磁滞电动机，其定子一般都为单相罩极式，转子由中间开槽的若干硬磁薄片叠成，见图 2.6-9。



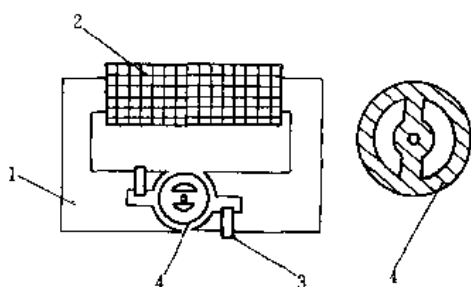


图 2·6-9 小容量磁滞电动机的结构

1—定子铜片 2—绕组
3—短路环 4—转子

4·2 微型同步电动机的种类和用途

微型同步电动机的种类、型号、特点和用途见表 2·6-7。

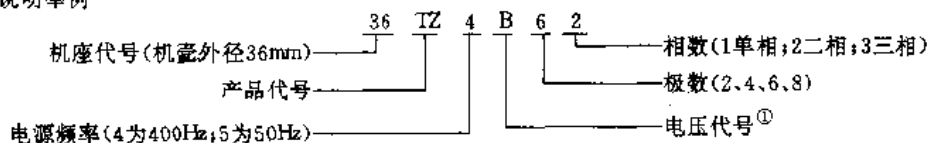
4·3 微型同步电动机的主要特点、额定数据和使用注意事项

1. 主要特点 微型同步电动机的共同特点是恒速运行特性，因此常用在要求恒速驱动的装置和系统中。微型同步电动机的特点比较见表 2·6-8。

表 2·6-7 微型同步电动机的种类、型号、特点和用途

| 名称 | 型号 | 转 子 | 特 点 | 用 途 |
|---------------|--------------|-----------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| 磁滞式同步电动机 | TZ 系列 | 见图 2·6-7 | 其磁滞层有整体和由片料制成两种，结构简单，转子上因磁化而形成的磁极对数与定子旋转磁场的磁极对数相同，可做成多速磁滞电动机，转速恒定 | 适用于小容量转速恒定的场合，常用作陀螺电动机、离心机等驱动机。在电钟、磁带录音、自动记录装置和仪表中应用也很广泛 |
| 永磁式同步电动机 | TYD 和 TYC 系列 | <p>a) 轴向转子 b) 径向转子 1—转轴 2—永磁钢 3—起动鼠笼</p> | 永磁电动机采用永磁材料作转子，定子为爪式凸极结构，通电后产生脉振磁场，对转子磁极产生的切向力，把电动机牵入同步，结构简单，加工方便，可做多极低速电机。转速恒定，能快速起动，瞬时停转 | 适用于驱动时钟机构、化纤纺织设备，在自动化仪表中应用广泛 |
| 反应式(磁阻式)同步电动机 | TX 系列 | <p>a) 外反应式 b) 内反应式 转子冲片形状 1—鼠笼槽 2—外反应槽 3—内反应槽</p> | 一种没有励磁的凸极转子电机，转子磁极是由定子磁场感应产生，并利用转子纵向及横向磁阻不同形成转矩。一般采用单相电容式运转线路 | 在自动和遥控装置、录音、传真和钟表工业中得到广泛应用 |

注：型号说明举例



① 无代号—380V；A—220V；B—115V；C—110V；D—48V；E—36V；F—24V；G—20V；H—12V；I—10V。

这是公司制作请尊重版权



表 2·6-8 几种微型同步电动机的特点比较

| 名 称 | 特 点 |
|----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 磁滞式同步电动机 | 1. 本身具有起动转矩, 能自行进入同步并稳定地同步运行 2. 起动电流与额定电流的比值小, 适于频繁起动 3. 结构简单, 运行可靠, 机械强度高, 适于高速运转 4. 效率和功率因数低, 与额定功率相同的比较, 其重量和体积均大, 磁滞材料成本高 |
| 永磁式同步电动机 | 1. 效率和功率因数都最高 2. 起动特性不好 3. 在额定功率相同时, 体积小 4. 结构简单, 但比反应式同步电动机结构复杂, 成本也高 |
| 反应式同步电动机 | 1. 结构简单, 价格便宜 2. 过载能力强, 不易失步 3. 效率和功率因数都比永磁式同步电动机低 |

2. 主要额定数据 其中额定电压、额定电流、额定转矩等与一般电动机的有关额定数据含义相同外, 还有两个额定数据不同, 现介绍如下:

(1) 牵入同步转矩 在额定电压起动时, 由异步运行进入同步运行瞬间的转矩。其值越大, 进入同步的能力越强。

(2) 最大同步转矩 在额定电压下能产生的最大转矩。其值越大, 电动机短时过载能力越强。

3. 使用注意事项

(1) 三相或单相电容移相式微型同步电动机改变转向的方法与三相异步电机或交流伺服电动机相同。单相罩极式同步电动机的旋转方向一般是不可改变的。

(2) 单相电容起动的电动机由于离心开关和起动电容的性能关系, 不宜作频繁起动。

(3) 单相电容移相式微型同步电动机接线, 要注意区别主、副绕组的首末端, 见表 2·6-9。一般绕组电阻值较大的为副绕组。

表 2·6-9 单相电容移相式微型同步电动机主、副绕组的首末端

| 绕组名称 | 首 端 | 末 端 |
|------|----------------|----------------|
| 主绕组 | D ₁ | D ₂ |
| 副绕组 | F ₁ | F ₂ |

5 步进电动机

5·1 步进电动机的结构和工作原理

步进电动机是一种把电脉冲信号变换成角位移

(或直线位移) 的执行元件。每输入一个脉冲, 就转动一个固定的角度, 又称脉冲电动机。图 2·6-10 是三相反应式步进电动机的结构示意图, 其定子和转子都是由硅钢片叠制而成。定子有六个极, 其上装有线圈, 相对两个极上的线圈串联起来组成一相控制绕组。通电时, 极性相反。转子上有四个极 (或称四个齿), 而无绕组。

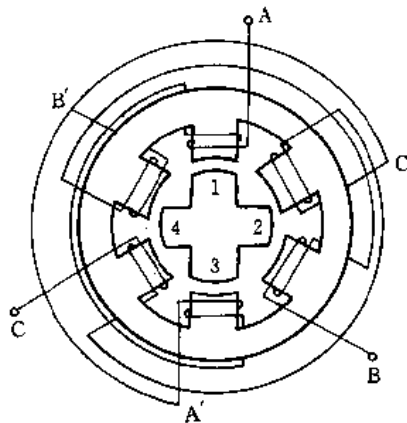


图 2·6-10 三相反应式步进电动机的结构示意图

步进电动机的工作原理是电磁铁的作用原理。在图 2·6-11a 中, 当 A 相绕组单独加以脉冲信号时, 定子 A 和 A' 磁极就成为电磁铁, 将转子的 1 和 3 两极吸住。当 A 相断电, 第二个脉冲信号加到 B 相绕组时, 则磁极 B 和 B' 将邻近的 4 和 2 极吸住, 如图 2·6-11b 所示。当 B 相断电, 第三个脉冲信号加到 C 相绕组时, 则磁极 C 和 C' 将邻近的 3 和 1 极吸住, 如图 2·6-11c 所示。如此按 A—B—C—A……方式不断给三相控制绕组轮流通电, 转子将按顺时针方向一步一步转动, 每转

此是公刊制作请尊重作版权



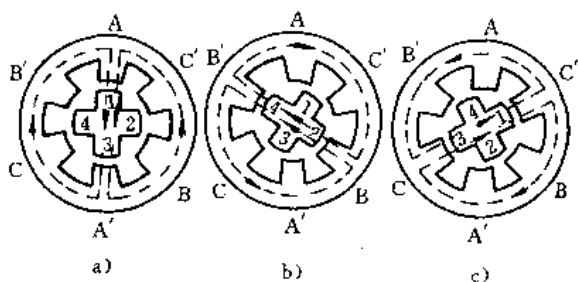


图 2-6-11 三相单拍式通电时转子的位置

动一步的角度等于 30° ，称为步距角。

如果三相绕组按 A—C—B—A…顺序通电，转子就按逆时针方向转动。这种运行方式称为三相单三拍式（还有三相双三拍式，三相六拍式）。无论采用何种运行方式，步距角

$$\theta_s = \frac{360}{zN} \quad (2-6-1)$$

式中 z ——转子齿数（或极数）；

N ——拍数。

若脉冲信号频率为 f ，则转子每分钟转速

$$n = \frac{60f}{zN} \quad (2-6-2)$$

图 2-6-10 所示的步进电动机，因步距角太大，不能适应一般用途。为了减小步距角，常采用多极式步进电动机，见图 2-6-12，转子做成多极的（图中为 40 个齿），定子每个极上也相应地增加几个齿（图中为 5 个

齿)。对于图 2-6-12 的步进电动机来说，由于 $z=40$ ，故在三相单拍式运行时，步距角

$$\theta_s = \frac{360}{zN} = \frac{360}{40 \times 3} = 3^\circ$$

在三相六拍式运行时，步距角

$$\theta_s = \frac{360}{zN} = \frac{360}{40 \times 6} = 1.5^\circ$$

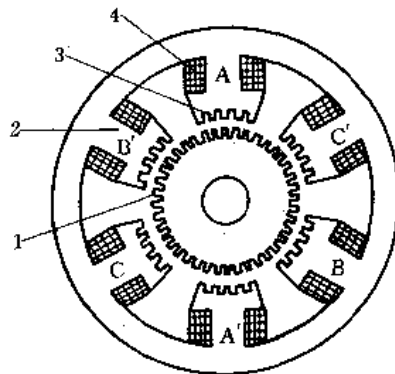


图 2-6-12 小步距角三相反应式步进电动机

结构示意图

- 1—转子齿 2—定子磁极
- 3—定子齿 4—定子绕组

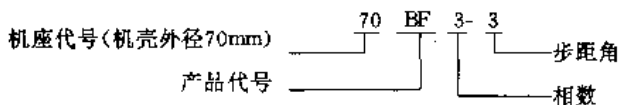
5.2 步进电动机的种类和用途

步进电动机的种类很多，几种常用步进电动机的结构、性能特点和适用范围见表 2-6-10。

表 2-6-10 几种常用步进电动机的结构、性能特点和适用范围

| 名称 | 型号 | 结构特点 | 性能特点 | 适用范围 |
|------------|-----|-----------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|------------------------------|
| 反应式步进电动机 | BF | 定子上有多相绕组，定子磁极和转子上可有小齿，定、转子铁心可做成单段式或多段式 | 步距角可以做得很小，起动和运行频率较高。断电时无定位转矩，需用带电定位，消耗功率较大 | 用在数控机床、自动记录仪、飞机的导航绘图机、计量和摄影等 |
| 永磁式步进电动机 | BY | 定子上有多相绕组，但定子磁极无小齿。转子用永久磁钢做成，转子极数与定子每相的极数相同 | 步距角较大，起动和运转频率较低，需供给正、负脉冲信号，断电时有定位转矩，消耗功率较小 | |
| 永磁感应式步进电动机 | BYG | 为永磁式和反应式的组合，定子结构与反应式相同，转子由位于中部的环形永久磁钢和位于两端无磁性铁心组成，环形磁钢轴向充磁，两端的铁心上开有小槽 | 步距角小，有较高的起动和运行频率，消耗功率小，有定位转矩，兼有以上两种步进电动机的优点，但需供给正负脉冲信号，结构复杂 | |

注：型号说明举例



5.3 步进电动机的主要特点和使用注意事项

2·6-11。

2. 使用注意事项

1. 主要特点 步进电动机的主要特点比较见表

(1) 对于大转动惯量的负载, 起动和停止频率不

表 2·6-11 步进电动机的主要特点比较

| 名称 | 主要特点 |
|------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 反应式步进电动机 | 1. 步距角小(例如 $1^\circ \sim 1.5^\circ$ 甚至更小) 2. 起动运行频率较高 3. 在一相长期通电状态下具有自锁能力 4. 断电无定位转矩, 消耗功率较大 5. 广泛应用于开环数字系统, 如计数器指示装置, 闸门控制, 数字机床等 |
| 永磁式步进电动机 | 1. 功率损耗比反应式小 2. 断电情况下有定位转矩 3. 步距角较大(例如 $15^\circ, 22.5^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 90^\circ$) 4. 需供给正、负脉冲, 起动和运行频率较低 5. 主要用于新型自动化仪表, 既可作驱动元件, 又可作执行元件 |
| 永磁感应式步进电动机 | 1. 功率损耗小 2. 步距角小, 有定位转矩 3. 需正负脉冲, 起动和运行频率较高 4. 用于计算机和反应式步进电动机相同的领域 |

宜选择过高。应考虑在低频下起动, 再升频到工作频率; 停止前应从工作频率下降到适当频率再停止。

(2) 应尽量使工作过程中负载均称, 避免由于负载突变而引起误差。

(3) 某些功率步进电动机是采用强迫冷却的, 使用时应注意冷却装置的正常运行。

6 自整角机

自整角机常用在随动系统中, 实现转角信号的变换、传输、接收和指示, 以及远距离同步随动控制。自整角机常成对使用, 一个称为发送机, 一个称为接收机。凡将机械轴上的转角变换为电信号的称为发送机, 而将电信号变换成指示轴上转角的称为接收机。

6.1 自整角机的结构、工作原理和应用举例

6.1.1 自整角机的结构

自整角机按结构型式可分为接触式和无接触式两大类。

自整角机的结构基本上与一般小型交流电机相

似。在定子铁心上嵌有三相星形联接的绕组, 各绕组的轴线在空间也互差 120° 。转子铁心上嵌单相励磁绕组, 它通过滑环与电刷间的接触和外电路接通, 称为接触式自整角机(自整角机也可用单相绕组作定子, 三相绕组作转子)。

无接触式自整角机单相和三相绕组都放在定子内, 转子为特殊磁路, 没有电刷滑环装置, 维护方便, 运行可靠, 但结构复杂, 制造困难。而接触式自整角机结构简单, 制造方便, 其比容量, 比力矩指标都比无接触式自整角优越。

6.1.2 自整角机的工作原理和应用举例

1. 传递转角或转速的自整角机系统 自整角机的工作原理是利用定子与转子间的电磁感应作用, 将机械轴的转角变换为与转角成一定函数关系的电压信号, 或是相反。图 2·6-13 是力矩式自整角机的原理接线图。两台相同的自整角机的单相励磁绕组都接到同一交流电源, 产生两个大小相同的脉动磁通, 在各自的定子三相绕组中产生频率和相位相同的感应电动势, 而三相绕组中感应电动势的有效值不相等, 感应电动势的大小与各相绕组轴线和励磁绕组轴线的夹角 θ_1 或 θ_2 有关。



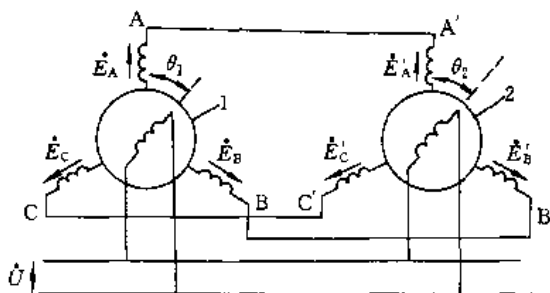


图 2-6-13 自整角机系统接线图

1—发送机 2—接收机

当发送机转子被强制转动 θ_1 角后,由于 $\theta_2 \neq \theta_1$,接收机和发送机定子对应各相绕组中感应电动势不能抵消而出现电流,接收机三相绕组中的电流共同产生一

个脉动磁场,使其转子绕组受到电磁转矩作用,迫使它循发送机转子转动方向旋转,直至失调角 $\delta = \theta_1 - \theta_2 = 0$,此时,定子对应各相的感应电动势的数值相等而方向相反,定子电流消失而停止转动,从而实现远距离的转角或转速的传送。

自整角机也可用单相绕组作定子,而以三相绕组作转子,工作原理与上相同。

2. 差动式自整角机系统 图 2-6-14 所示自整角机系统,能够传递两个转角或转速的和或差。其中二台作为发送机,一台作为接收机。接收机结构比较特殊,它在定子和转子上都装有星形联接的三相绕组,分别与两台发送机转子绕组对接,接收机转子的偏转角等于两台发送机转子偏转角的和或差。

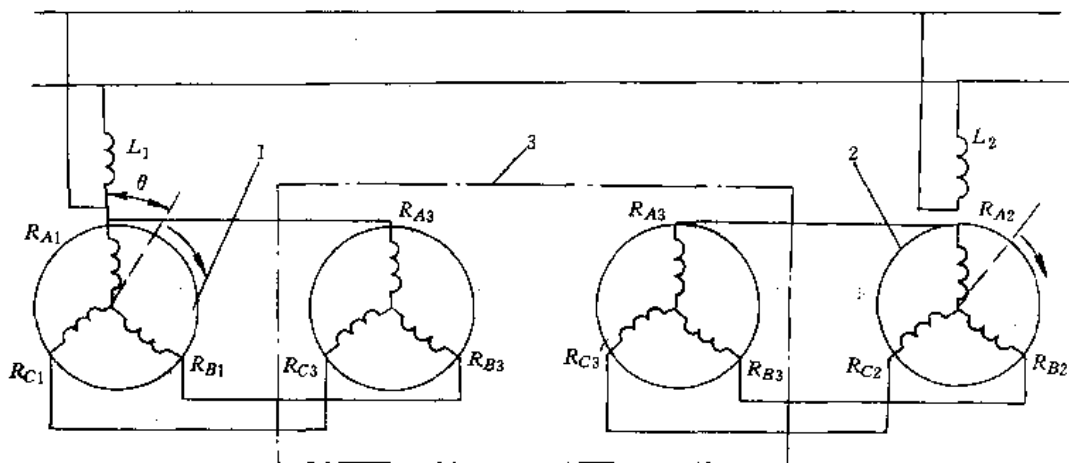


图 2-6-14 差动式自整角机系统

1、2—发送机 3—接收机

3. 自整角变压器系统 在图 2-6-15 所示自整角机系统中,接收机转子位置不变,其励磁绕组作为输出

绕组,可以将发送的转角或转速通过接收机变换为相应的输出电压信号。这种系统称为自整角变压器系统。

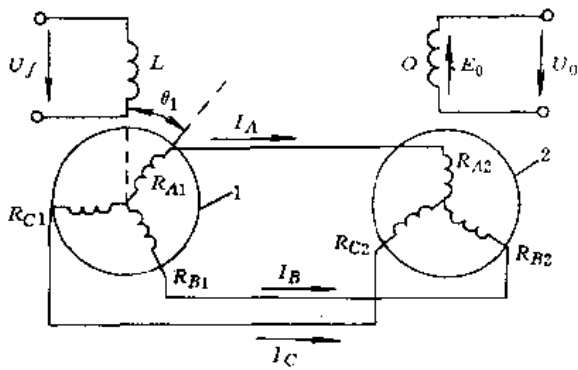


图 2-6-15 自整角变压器系统

1—发送机 2—接收机

6.2 自整角机的种类、型号、性能特点和适用范围(表 2-6-12)

6.3 自整角机的主要特点、额定数据和使用注意事项

1. 主要特点 力矩式和控制式自整角机的主要特点比较见表 2-6-13。

2. 主要额定数据 力矩式自整角机的主要额定数据如下:

(1) 比整步转矩 指失调角 1° 时发送机和接收机轴上的输出转矩。



表 2-6-12 自整角机的种类、型号、性能特点和适用范围

| 名称 | | 型号 (代号) | 性能特点 | 适用范围 |
|-----------------|----------|------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| 力矩式 自整角 机 | 力矩式发送机 | LF | 力矩式自整角机的比整步转矩小, 负载能力低, 而且只能组成开环的自整角系统, 系统的精度低, 但系统结构简单, 价格比较低廉 | 在自动控制中传递力矩及转角, 作指示用, 适用于对精度要求不高的小负载指示系统, 如带指针刻度盘之类的轻负载 |
| | 力矩式差动发送机 | LCF | | |
| | 力矩式接收机 | LJ | | |
| 控制式 自整角 机 | 控制式发送机 | KF | 控制式自整角机的负载能力取决于系统中的放大器和执行电动机的功率, 负载能力远较力矩式自整角机大。在闭环自整角系统中, 精确度也比力矩式自整角机高得多, 但系统结构复杂, 价格较贵 | 在自动控制系统中发出角度信号, 作检测元件用 一般用于精度较高或负载较大的系统中 |
| | 控制式差动发送机 | KCF | | |
| | 控制式变压器 | KB | | |

注: 型号说明举例

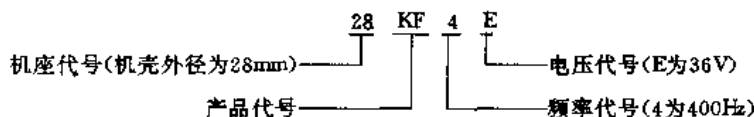


表 2-6-13 力矩式和控制式自整角机主要特点比较

| 项目 | 力矩式自整角机 | 控制式自整角机 |
|------|----------------------------------|--------------------------------------|
| 系统结构 | 较简单, 不需其它辅助元件 | 较复杂, 需伺服电动机、放大器、减速器等 |
| 系统造价 | 较低 | 较高 |
| 负载能力 | 接收机的负载能力受比整步转矩的限制, 只能带动指针、刻盘等轻负载 | 自整角变压器只输出信号, 负载能力取决于系统中的伺服电动机及放大器的功率 |
| 精度 | 较低 | 较高 |
| 适用范围 | 精度较低的指示系统 | 精度较高或负载较大的伺服系统 |

(2) 零位误差 力矩式自整角机, 当转子励磁后, 发送机转子从基准电气零位[⊖]开始, 每转过 0°、60°、120°、180°、240°, 定子三相绕组总会有一相绕组输出的空载电压等于零, 这几个位置称为理论电气零位, 实际的电气零位与理论电气零位之差称为力矩式自整角机的零位误差, 力矩自整角发送机和差动发送机按零位误差大小可分为三个精度等级, 见表 2-6-14。

(3) 静态误差 在静态空载运行, 力矩式自整角机达到协调位置时[⊖], 发送机转子转过的角度与接收

机转过的角度之差称为静态误差。力矩式自整角接收机按静态误差大小也分成三个精度等级, 参见表 2-6-14。

- ⊖ 自整角机的转子绕组与某相定子绕组的轴线一致时的位置, 称为自整角机的基准电气零位。
- ⊖ 发送机和接收机的定、转子之间的相对位置相同时, 它们的定子对应相绕组中的感应电动势的大小和相位相同, 定子电路内不会有电流, 转子不会自行转动, 这时, 称为发送机和接收机处于协调位置。

此星公司制作 请尊重原作者版权



表 2-6-14 自整角机的精度等级

| 自整角机种类 | 精度等级 | | |
|---------------------|--------|--------|-------|
| | 0级 | 1级 | 2级 |
| 力矩发送机和差动发动机 | 5(') | 10(') | 20(') |
| 力矩接收机 | 0.5(°) | 1.2(°) | 2(°) |
| 控制式发送机、差动发送机和控制式变压器 | 5(') | 10(') | 20(') |

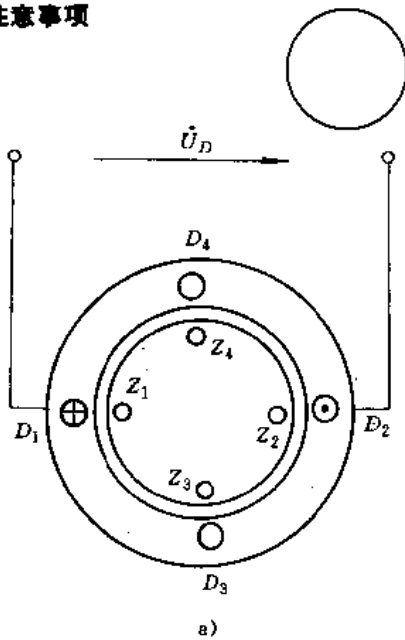
控制式自整角机的主要额定数据如下:

(1) 比电动势 指控制式自整角机在协调位置时,自整角变压器的空载输出电压。

(2) 剩余电压 控制式自整角机在协调位置时理论上其输出电压等于零,实际上总会残留一个微小的电压,称为剩余电压。

(3) 电气误差 在静态运行下,控制式自整角机到达新的协调位置(即输出电压等于剩余电压)时,发送机转过的角度与自整角变压器转子所转过的角度之差称为电气误差或静态误差。按电气误差的不同分成三个精度等级,见表 2-6-14。

3. 使用注意事项



(1) 自整角机的励磁电压和频率必须与电源相同,在电源可任意选择的情况下,以选用电压较高、频率为 400Hz 的自整角为好。

(2) 相互联接的自整角机,其对接绕组的额定电压和额定频率必须相同。

(3) 力矩式和控制式发送机对接收机来说,相当于一个等效电源,其内阻抗是发送机励磁电压为零,即转子绕组短路时,从定子绕组看进去的等效阻抗称为短路输出阻抗。其值越小,发送机带负载的能力越强。

(4) 自整角变压器和差动接收机对发送机来说相当于负载,其等效阻抗是将转子绕组开路时,从定子端看进去的阻抗称为开路输入阻抗。其值越大,发送机的负担越轻。

(5) 力矩自整角机的静态精度是指其负载很轻的指针的精度。若负载较大时,应根据所要求精度选用比整步转矩较大的自整角机。

7 旋转变压器

7.1 旋转变压器的基本结构

旋转变压器是一种将转子转角变换成与之呈某一函数关系的输出电压的元件。在结构上,它相当于二相绕组异步电动机,如图 2-6-16a 所示。定子和转子都是由硅钢片叠成。在定子与转子槽中,各嵌有两套互差 90°的绕组。转子绕组可由滑环和电刷引出。旋转变压器的电路如图 2-6-16b 所示。

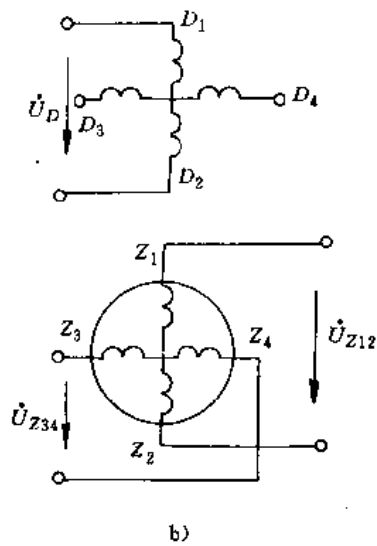


图 2-6-16 旋转变压器的结构示意图和图形符号



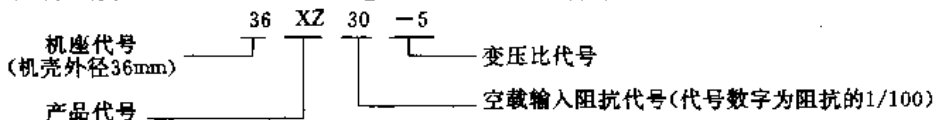
7.2 旋转变压器的种类、特点和适用范围(表 2.6-15) 7.3 旋转变压器的主要参数和使用注意事项

1. 主要参数

表 2.6-15 旋转变压器的种类、特点和适用范围

| 名称 | 型号(代号) | 电路图 | 输出电压与转角的关系 | 性能特点 | 适用范围 |
|------------|--------|-----|-----------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|
| 正弦、余弦旋转变压器 | XZ | | $U_{Z12} = kU_0 \cos \theta$ $U_{Z34} = kU_0 \sin \theta$ | 当励磁绕组 D_1, D_2 通入一定频率的交流电压时,其输出电压与转子转角成正弦或余弦关系 精确度比自整角机高,但结构和工艺都要求十分严格 | 一般用在精确度要求高的系统中,主要用作三角运算、坐标变换、移相器、角度数据传输等 |
| 线性旋转变压器 | XX | | $U_Z = \frac{k \sin \theta}{1 + k \cos \theta} U_0$ | 在一定的转角范围内,输出电压与转子转角成线性关系 精确度和结构要求同上 | 主要用作机械角与电信号之间的线性转换,可作加减运算和数模转换等 |
| 比例式旋转变压器 | XB | | $\frac{U_{Z12}}{U_0} = k \cos \theta$ $\frac{U_{Z34}}{U_0} = k \sin \theta$ | 在结构上,与正弦、余弦旋转变压器一样,仅在转子上增加一个转子定位的装置 用调节转子转角的方法,在一定范围内,可改变输入与输出的变压比 | 主要用作三角变换、电压调节和阻抗匹配等 |

注: XZ、XX、XB 系列旋转变压器均由 400Hz 的交流电压供电,其型号举例说明如下:



- (1) 额定电压 励磁绕组应加的电压值,有 12、16、26、36、60、90、110、115、220V 等几种。
- (2) 额定频率 励磁电压的频率,有 50Hz 和 400Hz 两种。
- (3) 变比 在规定的励磁一方的励磁绕组上加额定电压和额定频率时,与励磁绕组轴线一致,非励磁绕



组的开路输出电压与励磁电压的比值。有0.15、0.45、0.56、0.65、0.78、1和2等几种,分别用首位数字的10倍表示变比代号,即代号为1、4、5、6、7、10、20。

(4) 输出相位移 输出电压与输入电压的相位之差,一般为 $3^{\circ}\sim 12^{\circ}$ 左右,其值越小越好。

(5) 开路输入阻抗或空载输入阻抗 输出绕组开路时,从励磁绕组看进去的等效阻抗值。有200、400、600、1000、2000、3000、4000、6000和10000 Ω 等几种。

(6) 函数误差 旋转变压器在励磁绕组一相加上额定电压,另一相绕组短路时,在不同转子转角下 ΔU_{max} 与理论上的输出电压最大值 U_{max} 之比的百分数,即

$$\delta = \frac{\Delta U_{max}}{U_{max}} \times 100\%$$

根据函数误差不同分成四个精度等级,见表2-6-16。

(7) 零位误差 旋转变压器励磁绕组一相加额定电压,另一相绕组短路时,两个输出绕组的实际电气零位与理论电气零位之差,按零位误差不同也可分为四个精确度,见表2-6-16。

(8) 线性误差 旋转变压器在一定工作转角范围内(一般为 $\pm 60^{\circ}$),在采用线性旋转变压器方式接线时,转子实际转角与理想特性上所对应的转角的最大差值。按线性误差大小也分为四个精确等级,见表2-6-16。

表 2-6-16 旋转变压器的精确度等级

| 误差名称 | 精度等级 | | | |
|---------|------|-----|-----|------|
| | 0级 | I级 | II级 | III级 |
| 函数误差(%) | 0.05 | 0.1 | 0.2 | 0.3 |
| 零位误差(') | 3 | 6 | 12 | 18 |
| 线性误差(') | 2 | 4 | 8 | 18 |
| 电气误差(') | 5 | 10 | 20 | 30 |

(9) 电气误差 定义与控制式自整角机相同。其误差大小分为四个精确度等级,见表2-6-16。

2. 使用注意事项

(1) 使用时首先要准确地调准零位,否则会增大误差,降低精度。

(2) 旋转变压器要求在接近空载状态下工作。因此,负载阻抗越大,输出电压的畸变就越小。

(3) 励磁绕组,只用一相绕组时,另一相绕组短路或接一个与励磁电源内阻相等的阻抗。

(4) 两相绕组同时励磁时,即只能采用副绕组补偿方式时,两相输出绕组的负载阻抗应尽可能相等。

第7章 常用电磁铁器件

1 概述

电磁铁是利用铁磁物质的高磁导性能而工作的一类铁磁器件,励磁线圈通电后能对衔铁产生吸力,把电能转换为机械能。一般电磁铁是由线圈、铁心和衔铁三部分组成。电磁铁主要可以按以下三方面进行分类:

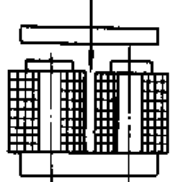
(1) 按动作方式分类 电磁铁按动作方式可分为两类:一类是衔铁产生运动,再把运动传送到负载。如牵

引电磁铁、阀用电磁铁、制动电磁铁和电磁离合器等;另一类是没有可动衔铁,工作磁通通过工件为回路,它的作用主要是固定工件。如起重电磁铁和电磁吸盘等。

(2) 按励磁电流分类 电磁铁按励磁绕组的激励电流不同,可分为直流电磁铁和交流电磁铁。另外还有永磁式电磁铁。

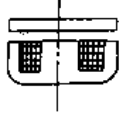
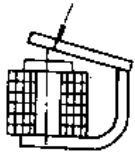
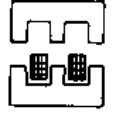
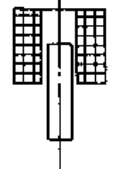
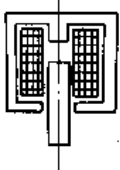
(3) 按铁心磁路结构形状分类 电磁铁按铁心磁路结构形状分类及其特点见表2-7-1。

表 2-7-1 电磁铁按铁心磁路结构分类和特点

| 序号 | 结构型式 | 磁路结构图 | 特 点 | 用 途 |
|----|--------|-------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|-------------------------------------------|
| 1 | 单U形直动式 |  | 平移式U形磁路无螺管力作用,漏磁较小,吸力较单E形直动式大。体积小,材料利用率高 | 在要求减小衔铁闭合速度或可动部分重量时,常采用此结构。交流和直流电磁铁中用得最广泛 |



(续)

| 序号 | 结构型式 | 磁路结构图 | 特点 | 用途 |
|----|-----------|-------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|-------------------------------|
| 2 | 单E形直动式或盘式 |  | 其特性与单U形直动式相似 | 同单U形直动式,常用作直流电磁铁 |
| 3 | 单U形拍合式 |  | 同单U形直动式,特性高于单E形直动式 | 常用于中大容量的单断点转动式接触器或双断点杠杆传动接触器中 |
| 4 | 双E形直动式 |  | 因有附加螺管力,所以在打开位置时吸力较单E形直动式大 | 适宜与初始反力大的特性配合,常用作交流电磁铁 |
| 5 | 空心螺管式 |  | 结构简单,但电能转换为机械能的效率较低 | |
| 6 | 装甲螺管式 |  | 电磁铁增加了磁轭,吸力较大,大大地提高了效率 | 在交流和直流电路上用得广泛 |

2 直流电磁铁和交流电磁铁

2.1 直流电磁铁

2.1.1 直流电磁铁的吸力计算

直流电磁铁由带励磁绕组的静铁心和动铁心(衔铁)组成(图2.7-1)。当励磁绕组通以直流电后,衔铁即被吸住,铁心的每极吸力可应用磁场能量的公式进行计算,每极吸力

$$F = \frac{AB^2}{2\mu_0} \quad (\text{N}) \quad (2.7-1)$$

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$$

式中 B ——磁感应强度(T);

A ——铁心截面积(m^2)。

上式称为麦克斯韦公式。在磁路不饱和或饱和的情况下,当气隙较小,磁通分布均匀时,通常用麦克斯韦公

式求电磁铁吸力。电磁铁吸力计算可归为两类:一类是已知吸力 F 求电磁铁所需要的安匝,这可由式(2.7-1)计算工作磁通,再用第1篇第7章磁路计算中由磁通求安匝的方法计算出所需安匝;另一类是已知电磁铁的安匝 IN 求电磁铁吸力,这可由磁路计算的反算法由 IN 求出工作磁通,再由式(2.7-1)算出吸力。



图2.7-1 直流电磁铁
1—动铁心(衔铁) 2—静铁心
 l_0 —空气隙长度(m)
 l_1 —静铁心中心线长度(m)
 l_2 —动铁心中心线长度(m)



2.1.2 直流电磁铁的特点

(1) 直流电磁铁的励磁电流, 决定于电源电压和励磁绕组电阻。当电源电压一定时, 若励磁绕组电阻不变, 则励磁电流是恒定的。

(2) 若要增加电磁铁吸力 F , 必须增加 B 或 A , 若 A 不变而增大 B 值, 则必须增大 NI , 但在增加线圈匝数的同时, 必须增大导线的截面, 以保持线圈电阻不变, 这样才能使 NI 得到增加, 达到增大 F 的目的。

(3) 当衔铁吸合后, 磁路中磁阻减小, 因此磁通增大, 吸力也就增大。

2.2 交流电磁铁

2.2.1 交流电磁铁的吸力计算

交流电磁铁(见图 2-7-2)由交流励磁, 其磁路内的磁感应强度是随时间变化的, 吸力也随时间变化, 每极吸力的平均值

$$F = \frac{B^2}{2\mu_0} A \quad (\text{N}) \quad (2.7-2)$$

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$$

式中 B ——磁感应强度的有效值(T);

A ——铁心截面积(m^2)。

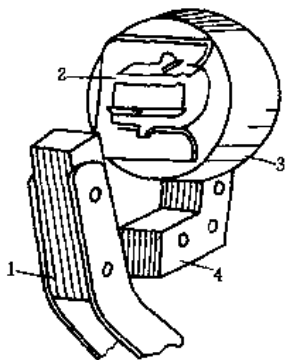


图 2-7-2 交流电磁铁

1—衔铁 2—短路环 3—线圈 4—铁心

2.2.2 电磁铁铁心截面的计算

如果电磁铁的吸力为已知值, 则磁感应强度 B 可先假定, 然后计算铁心有效截面(净截面) A 。交流电磁铁的铁心是用硅钢片叠成, 考虑到硅钢片的间隙系数 ($K=0.9$), 则铁心的实际截面 $A' = \frac{A}{K}$, 即

$$A' = \frac{2\mu_0 F}{KB^2} \quad (2.7-3)$$

2.2.3 电磁铁线圈匝数和励磁电流的计算

线圈的匝数^①

$$N = \frac{U}{4.44f\Phi_m} \quad (2.7-4)$$

式中 U ——电源电压(V);

f ——电源频率(Hz);

Φ_m ——交变磁通的最大值(Wb)。

根据磁路的基尔霍夫第二定律得其励磁电流的计算公式为

$$I = \frac{H_m l_m + H_0 l_0}{\sqrt{2} N} \quad (2.7-5)$$

式中 I ——励磁电流的有效值(A);

H_m ——铁心内的磁场强度的最大值(按照 B_m 值从磁化曲线中找出)(A/m);

H_0 ——空隙的磁场强度的最大值 $H_0 = \frac{B_m}{\mu_0}$ (A/m);

l_m ——静铁心和动铁心的平均磁路总长(气隙除外)(m);

l_0 ——铁心两端空气隙的总长度(m)。

2.2.4 交流电磁铁的特点

(1) 当线圈电压给定时, 励磁电流不仅与电阻有关, 而且与电抗的大小, 即磁路的状态有关。当动铁心吸合后, $H_0 l_0 = 0$, 而 l_m 和 H_m 不变, 所以励磁电流将自动减小, 若交流电磁铁由于某种原因, 发生故障, 致使衔铁不能立即吸合时, 将有较大的电流通过线圈, 如果时间过长, 会使线圈过度发热。

(2) 若要增大 F , 必须增大 B 或 A , 设 A 不变而增大 B 值, 但要增大 B 值必须减小线圈匝数 N , 而励磁电流将随之增大, 因此, 线圈的导线必须能承受较大的电流。

(3) 交流电磁铁的吸力是随时间变化的, 因此电磁铁在工作时要发生振动和噪声。为了消除这种现象, 在静铁心的端头嵌装一自成通路的铜环(图 2-7-2), 称为短路环。由于短路环内产生感应电流, 使环外和环内两部磁通不会同时经过零值, 这样就不会有吸力为零的时候, 从而减少了电磁铁的振动和噪声。

3 电磁铁吸力的近似估算及其吸力特性

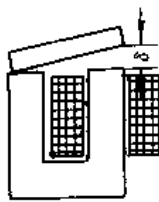
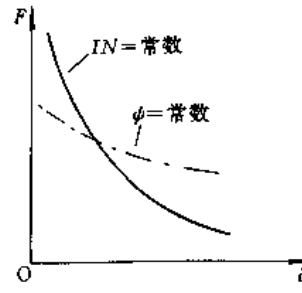
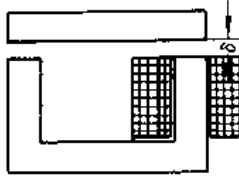
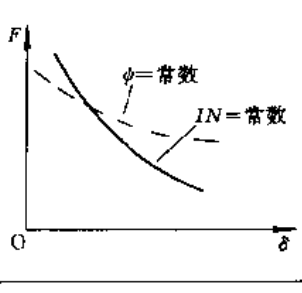
在工程上, 忽略电磁铁的铁心磁阻、铁损耗和边缘

① 见第 1 篇第 7 章 6 节式(1-7-6)。



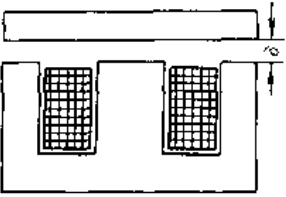
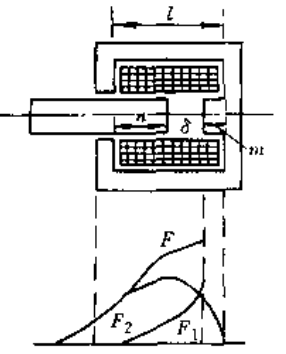
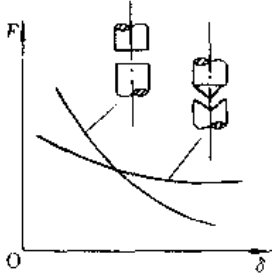
扩散作用后,从能量平衡关系得到电磁铁吸力的近似计算公式,并由此分析它的吸力特性 $F=f(\delta)$ 。几种典型磁路结构的电磁铁吸力近似计算公式和其吸力特性,见表 2-7-2。

表 2-7-2 几种典型磁路结构的电磁铁吸力近似计算公式和特性

| 名称 | 磁路结构 | 吸力特性 | 性能特点 |
|---------|-------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 拍合式电磁铁 |  |  | <p>当直流电励磁时,由于 I 不随 δ 变化, IN 为定值,当气隙 δ 大时,磁阻大,磁通就小,而吸力与磁通的平方成正比,吸力较小;当气隙 δ 减小时,则吸力增大,故吸力 F 与气隙 δ 的平方成反比,吸力特性近似于双曲线,如图中实线所示</p> <p>当交流电励磁时,由于总磁链不变,在 δ 减小时,吸力 F 增加不多,其吸力特性比较平坦</p> |
| | 近似计算公式 | <p>1. 直流恒磁动势的吸力(绝对值)</p> $F = \frac{1}{2} (IN)^2 \mu_0 \frac{A}{\delta^2} \quad (\text{N})$ $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ <p>式中 I——励磁电流的有效值(A) N——线圈匝数</p> <p>2. 交流恒磁链吸力的平均值</p> $F = \frac{U^2}{8\pi^2 f^2 N^2 \left(\frac{\mu_0 A}{\delta} + \frac{\Delta l}{3} \right)^2} \frac{\mu_0 A}{\delta^2} \quad (\text{N})$ <p>式中 δ——气隙长度(m) Δl——单位长度漏磁导Φ(H) l——磁路平均长度(m) U——交流电源电压(V)</p> | |
| U形磁路电磁铁 |  |  | <p>当直流电励磁时,U形磁路电磁铁总吸力为拍合式吸力的一半</p> <p>当交流电励磁时,由于恒磁链,在气隙减小时,U形磁路的气隙为两个,而 Φ 不变,故吸力约为拍合式的一倍</p> <p>U形磁路的直流和交流电磁铁的吸力特性和拍合式相似</p> |
| | 近似计算公式 | <p>1. 直流恒磁动势的吸力(绝对值)</p> $F = \frac{1}{4} (IN)^2 \mu_0 \frac{A}{\delta^2} \quad (\text{N})$ <p>2. 交流恒磁链,吸力的平均值</p> $F = \frac{U^2}{8\pi^2 f^2 N^2 \left(\frac{\mu_0 A}{2\delta} + \frac{2\Delta l}{3} \right)^2} \frac{\mu_0 A}{2\delta^2} \quad (\text{N})$ | |



(续)

| 名称 | 磁路结构 | 吸力特性 | 性能特点 |
|----------|------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| E形磁路电磁铁 |  | 吸力特性与U形电磁铁的一样 | |
| | 近似计算式 | 吸力公式和U形电磁铁的一样 | |
| 装甲螺管式电磁铁 |  |  | 装甲螺管式电磁铁吸力为螺管力 F_2 和表面力 F_1 之和 F_1 的吸力特性近似双曲线, 随 δ 增加, 吸力下降。 F_2 的吸力最大值产生在衔铁端面位于螺管的中间部分。当 δ 较大时吸力较大, 所以它可用于作长行程的电磁铁 衔铁有锥形端面的吸力特性, 比平面端面的吸力特性平坦 |
| | 近似计算式 | <p>1. 直流恒磁动势的吸力(绝对值)</p> $F = \frac{\mu_0}{2} (IN)^2 \left[\frac{A}{\delta^2} + \frac{A_2}{\mu_0} \left(\frac{n}{l} \right)^2 \right] \quad (\text{N})$ <p>表面力 $F_1 = \frac{\mu_0}{2} (IN)^2 \frac{A}{\delta^2}$</p> <p>螺管力 $F_2 = \frac{1}{2} (IN)^2 A_2 \left(\frac{n}{l} \right)^2$</p> <p>2. 交流恒磁链吸力的平均值</p> $F = \frac{\sqrt{2} U^2}{8\pi f^2 N^2 \left(\frac{\mu_0 A}{\delta} + \Lambda_2 \frac{m^3 + n^3}{3l^2} \right)} \left(\frac{\mu_0 A}{\delta^2} + \Lambda_2 \frac{n^2}{l^2} \right)$ | |

注:漏磁导 Λ_2 的计算公式,见第1篇第7章表1-7-4。

由上可见,交流励磁的电磁铁的吸力特性比直流励磁的电磁铁吸力特性平坦。交流电磁铁在吸合过程,其磁链变化很小。在吸合瞬时, δ 最大,其磁导最小,而线圈中的电流和磁导成反比,所以初始吸合时电流很大,往往达到额定吸合电流的十几倍,使线圈发热,故交流电磁铁不宜频繁通断。

在各种型式的磁路结构中,拍合式电磁铁多数应用在继电器接触器中;一般电磁铁中也常采用U形磁路,或E形磁路,但它的能量转换效率较低。以装甲螺管式电磁铁的吸力特性和能量转换效率为最好,所以,目前大多数电磁铁都采用装甲螺管式磁路结构。

4 牵引电磁铁

牵引电磁铁是一种自动化执行元件,它可在机械设备及自动化系统的各种操作机构中作为远距离控制之用。

4.1 牵引电磁铁的主要结构

图2-7-3示出单相交流牵引电磁铁的结构,它的磁路系统为装甲螺管式,主要由磁轭、衔铁和线圈等零件组成。衔铁极面为平头形的吸力小,可做成圆弧形以增大吸力。短路环一般放在静止的挡铁上,以消除衔铁



的振动,无挡铁的牵引电磁铁的短路环可放在衔铁上。
在线圈不通电时,由外部机械结构使衔铁复位。

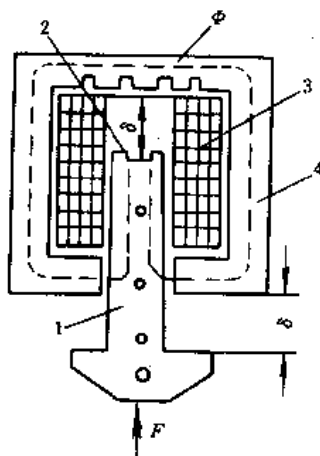


图 2-7-3 牵引电磁铁的结构

1—衔铁 2—短路环 3—线圈 4—磁轭

4.2 牵引电磁铁的型号和特性

牵引电磁铁的主要型号是MQ1系列单相交流牵引电磁铁,它的吸力为(15~245)N,额定行程为(20~50)mm。MQ1-5型牵引电磁铁的吸力特性 $F=f(\delta)$,见图 2-7-4。

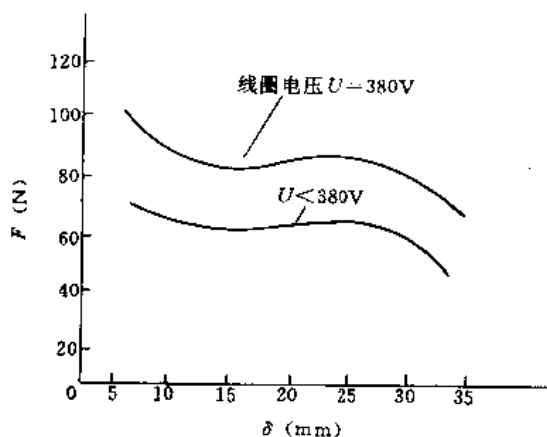


图 2-7-4 MQ1-5型牵引电磁铁的特性曲线

交流牵引电磁铁在运行时,必须注意衔铁不能有卡住现象,衔铁卡住不能吸合时,线圈将严重发热,甚至会损坏。采用直流牵引电磁铁和改进吸力特性是牵引电磁铁的新发展方向。

5 阀用电磁铁

阀用电磁铁和液压阀体相组合成为一个部件,称为电磁阀,用于控制管路的通断或换向。一般电磁阀的阀心是滑动阀心,所以又称为电磁滑阀。

5.1 阀用交流电磁铁的结构和性能

阀用交流电磁铁的型号有MFJ1系列,图 2-7-5 为其结构图。它是单相交流装甲螺管式电磁铁,其磁路结构与交流牵引电磁铁相似,衔铁 5、线圈 4 和磁轭都装在一个铝合金的外壳 1 内,电磁铁的推杆 2 和各种液压阀体及气阀配合使用,也可作为某些机械的牵引电磁铁。MFJ1 系列交流阀用电磁铁的额定吸力为 29.41N(3kgf)和 39.21N(4kgf)两种,额定行程分别为 7mm 和 8mm。

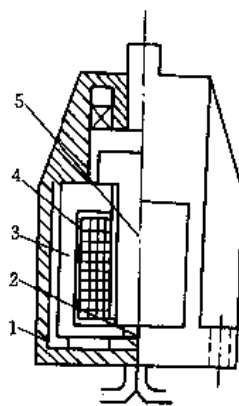


图 2-7-5 MFJ1 交流阀用电磁铁结构

1—外壳 2—推杆 3—外壳磁轭
4—线圈 5—衔铁

5.2 阀用直流电磁铁的结构和性能

直流阀用电磁铁的型号有MFZ1系列,图 2-7-6

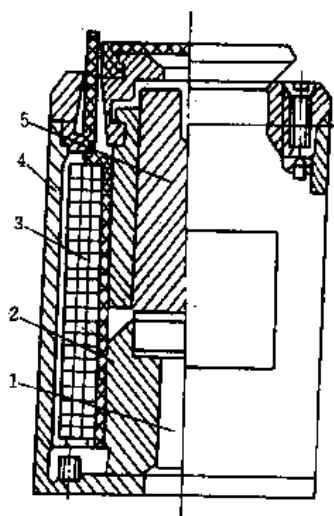


图 2-7-6 MFZ1 直流阀用电磁铁的结构

1—推杆 2—挡铁 3—线圈
4—外壳磁轭 5—衔铁



示出其结构。直流阀用电磁铁的磁路也是装甲螺管式。衔铁、线圈和磁轭的外壳都是圆柱形及圆筒形。衔铁极面为平头形，而挡铁为凹形。

MFZ1 系列阀用直流电磁铁的吸力特性 $F=f(\delta)$ 如图 2-7-7 所示，可见衔铁的起始吸力较大，超出额定行程时，电磁铁的吸力有明显下降，其额定吸力从 6.86 N (0.7kgf) 到 68.62N (7kgf)，额定行程 4mm 和 8mm。这种阀用直流电磁铁的优点是噪声小、结构简单、寿命长，适用于频繁操作的场合。

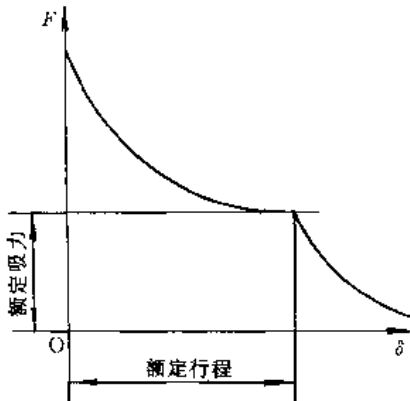


图 2-7-7 MFZ1 直流阀用电磁铁的吸力特性

近年来，新发展了一种湿式阀用电磁铁，线圈和内部部件浸于油中，对线圈的散热、元件的润滑都有利，并且衔铁运动时无噪声。

5.3 电磁阀

电磁阀又称电磁换向阀，在液压系统的控制装置中，换向阀是由阀芯和阀体间的相对运动来改变油流方向，接通或关断油路的。在电-液控制中，常用电磁铁推动换向阀芯来改变油流方向，所以电磁换向阀的结构是由电磁铁和换向阀组合而成的。

图 2-7-8a 为二位四通电磁阀的结构图。它有四个

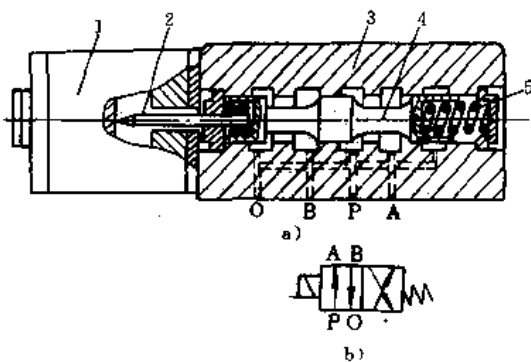


图 2-7-8 电磁换向阀

1—电磁铁 2—推杆 3—阀体 4—阀芯 5—弹簧

阀口，阀口 P 为进油口，O 为回油口，A 及 B 接液压缸左右两个腔。当电磁铁的线圈无电流时，阀芯在弹簧力作用下被推向左边，如图中所示位置，阀口 P 与 A 通，B 与 O 通。当电磁铁线圈通有电流时，阀芯被推向右边，P 与 B 通，A 与 O 通，改变了压力油进入油缸的方向。图 2-7-8b 为电磁换向阀的图形符号。控制线路只用它的电磁铁符号 YV 表示。

6 制动电磁铁

6.1 制动电磁铁的工作原理

制动电磁铁是利用电磁铁的衔铁运动操纵抱闸装置（又称制动器），由抱闸产生的制动力矩使生产机械迅速停止运动。常用在起重运输设备中。

图 2-7-9 是制动电磁铁的原理结构图，如卷扬机

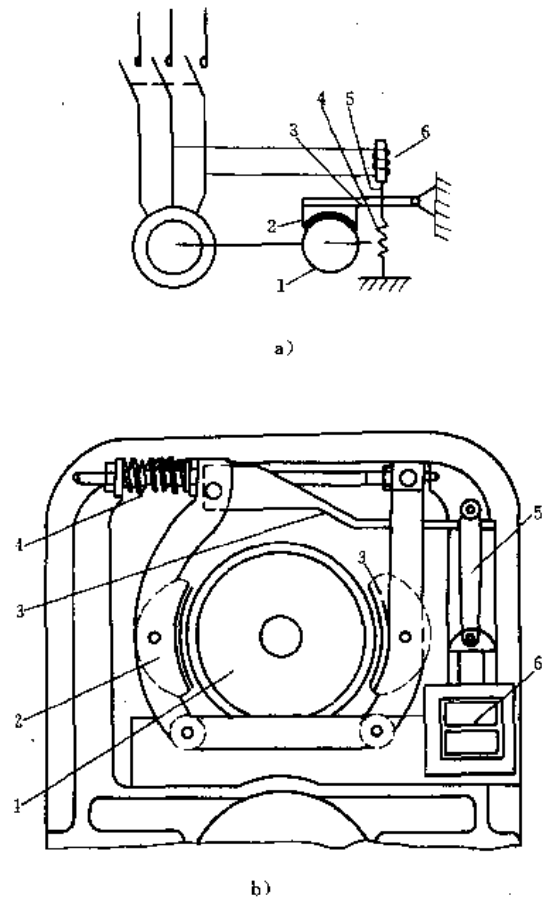


图 2-7-9 制动电磁铁的原理结构图

a) 工作原理 b) 结构

1—刹轮 2—刹瓦 3、5—连杆
4—弹簧 6—电磁铁



的电动机工作时，电磁铁 6 通电，衔铁吸合，带动连杆 3、5 使闸瓦 2 松开，电动机的刹轮 1 就可自由转动。卷扬机的电动机停止时，为了防止重物自由下降，在电动机切断电源的同时，也切断电磁铁的电源，电磁铁失电，衔铁释放，弹簧 4 使

抱闸的闸瓦压紧电动机的刹轮，于是重物不掉下来。

6.2 制动电磁铁的型号和性能

制动电磁铁的型号和性能见表 2-7-3。

表 2-7-3 制动电磁铁的型号和性能特点

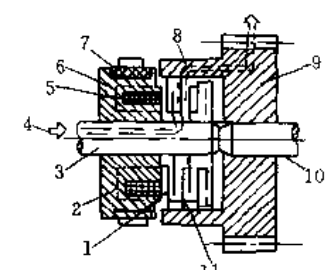
| 名称 | 型号 | 性能特点 |
|-----------|---------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 单相交流制动电磁铁 | MZD1 系列 | 为旋转式短行程制动电磁铁，磁路为拍合式结构，衔铁和铁心由硅钢片叠合而成，铁心上有短路环。额定回转角为 7.5 度到 5.5 度，制动杆位移为 3、3.8 和 4.4mm，要与 TJ2 型闸瓦式制动器配套使用 |
| 三相交流制动电磁铁 | MZS1 系列 | 为交流三相长行程制动电磁铁，磁路为 E 型结构，其铁心用硅钢片叠合而成，三个线圈可根据电源电压接成星形或三角形，每相额定电压为 220V。额定吸力 88.23N(9kgf)~1372.55N(140kgf)。额定行程 20~80mm。铁心上没有装短路环。要与 JW2 或 TJ2 型闸瓦式制动器配套使用 |
| 直流制动电磁铁 | MZZ2 系列 | 为直流长行程制动电磁铁。磁路为装甲螺管式结构，线圈、衔铁都装在圆柱形外壳中，外壳也作磁轭用。衔铁、极面为锥形。额定吸力 44.12N(4.5kgf)~705.88N(72kgf)。额定行程 30~120mm。电磁铁的线圈有并联放电电阻，要与 TJ2 型闸瓦式制动器配套使用 |

7 电磁离合器

装置，又称电磁联轴器。根据结构不同，可分为摩擦片式、牙嵌式、磁粉式和电磁转差式离合器等几种，见表 2-7-4。

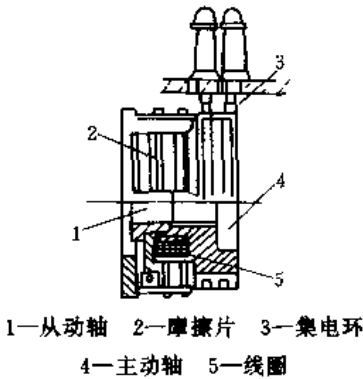
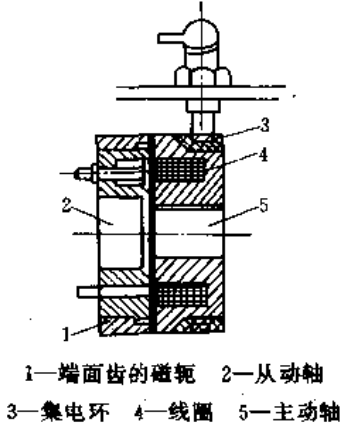
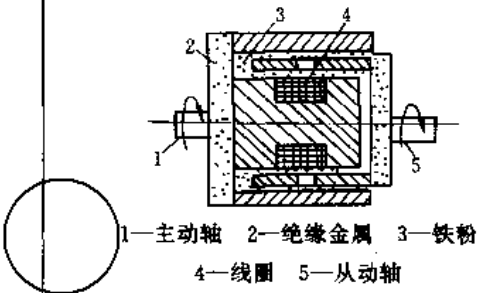
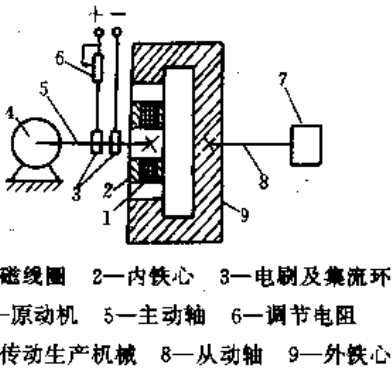
电磁离合器是传递两个转动体间转矩的电磁执行

表 2-7-4 电磁离合器的型号、结构和特点

| 名称 | 型号 | 结构图 | 特点 |
|-----------|---------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 湿式多片电磁离合器 | DLMO、DLM3 和 DLM5 系列 |  <p>1—内摩擦片 2—磁路 3—主动轴 4—力矩传递路线 5—线圈 6—磁轭 7—集电环 8—外侧传动件 9—衔铁 10—从动轴 11—外摩擦片</p> | <p>湿式多片电磁离合器是在润滑油冷却的状态下使用。它主要由励磁线圈、磁轭、衔铁、铜-钢摩擦片及联结件等组成。当励磁线圈通电时，主磁通产生吸力使衔铁轴向移动，将全部摩擦片压紧，使主动轴的驱动力矩经主动轴、摩擦片、外侧传动件传递到从动轴，使从动轴随主动轴转动。它用来控制机械的起动、制动、变速及进给等。额定动力矩 11.76~662N·m(1.2~68kgf·m)</p> |



(续)

| 名称 | 型号 | 结构图 | 特点 |
|------------|----------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 干式多片电磁离合器 | DLM2 和 DLM4 系列 |  <p>1—从动轴 2—摩擦片 3—集电环 4—主动轴 5—线圈</p> | <p>干式多片电磁离合器是在干式状态下使用。它主要是由励磁线圈、磁轭、铜-铜基粉末摩擦片、弹簧及联结件等组成。干式电磁离合器动作时间短，反应较灵敏。它可用于控制机械设备的启动、制动、换向、变速、进给及限踪等</p> <p>额定动力矩 24.50~391.15N·m(1.2~40kgf·m)</p> |
| 牙嵌式电磁离合器 | DLY0 系列 |  <p>1—端面齿的磁轭 2—从动轴 3—集电环 4—线圈 5—主动轴</p> | <p>牙嵌式电磁离合器主要是由励磁线圈、带有端面齿的磁轭和衔铁及联结件等组成，它适用于在静止或低速状态下结合的场所，可用于控制机械设备的启动、停车、进给和变速等。它的特点是体积小、传递扭矩大、发热少。</p> <p>额定静力矩 11.76~392.1N·m(1.2~40kgf·m)</p> |
| 铁磁粉末式电磁离合器 | |  <p>1—主动轴 2—绝缘金属 3—铁粉 4—线圈 5—从动轴</p> | <p>铁磁粉末式电磁离合器主要是由励磁线圈、铁磁粉末及联结件等组成。当励磁线圈通电时，被磁化的铁粉之间会产生相当大的摩擦力，主动轴就带动从动轴转动。粉末常和油混合使用，具有较高的磁导率和较小的矫顽力。它的优点是动作快，缺点是工作性能不够稳定，铁粉易于老化。另外油质的密封较困难</p> |
| 电磁转差式离合器 | |  <p>1—励磁线圈 2—内铁心 3—电刷及集流环 4—原动机 5—主动轴 6—调节电阻 7—被传动生产机械 8—从动轴 9—外铁心</p> | <p>它是由环形内铁心、励磁线圈、外铁心及联结件等组成。当励磁线圈通电时，原动机带动旋转的环形内铁心，产生旋转磁场。这时和从动轴相联的外铁心感应出涡流，涡流再和磁场作用就产生力矩，使从动轴旋转。从动轴转速低于主动轴的转速。改变直流励磁电流可以改变输出转矩，转速也随着改变，可以实现转速调节</p> |

8 电磁吸盘

图 2·7-10 是电磁吸盘的结构图。它常用作平面磨

床等的电磁工作台。工作台是由线圈通以直流电进行励磁的磁路，它被隔磁材料分成许多 N 极和 S 极，工件放在工作台上，磁力线经过两磁极穿过工件成闭合



回路, 依靠电磁吸力将工件固定夹紧。工件加工完毕,

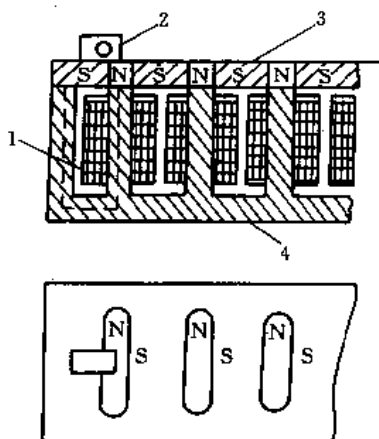


图 2·7-10 电磁工作台

1—线圈 2—工件 3—工作台 4—铁心

切断电源, 就可取下工件。

由于剩磁的存在, 有时使被加工零件继续吸合在吸盘上。这时, 要给线圈短时通入极性相反的小电流, 使其去磁。某些工件从工作台上取下后, 还要在去磁器中进行去磁(图 2·7-11), 工件穿过线圈, 受到交变磁场的作用, 便可消除剩磁。

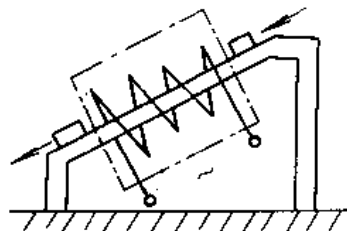


图 2·7-11 去磁器

第 8 章 工业用电炉和电焊机

1 概述

1.1 电炉

电炉是将电能转变为热能用于加热物体的设备。与一般燃料炉相比, 其主要特点有:

(1) 由电能转变成的热能使炉料内部直接生热, 因而炉料升温速度快、热效率高, 且可获得较高温度(如电弧炉、炉温可达 3000℃ 以上);

(2) 容易实现炉料的整体均匀加热、局部加热或表面加热, 且能方便地控制加热温度;

(3) 根据工艺要求, 可实现真空加热、控制气氛加热。加热过程中能保持炉料洁净, 且不污染环境。

表 2·8-1 电炉的类型

| 电 炉 | | | |
|---------|-------|--------|---------|
| 电阻炉 | 电弧炉 | 感应炉 | 其它电炉 |
| 普通电阻加热炉 | 直接加热炉 | 感应熔炼炉 | 电子束炉 |
| 控制气氛加热炉 | 间接加热炉 | 感应加热设备 | 红外线炉 |
| 真空电阻加热炉 | 矿热炉 | | 等离子炉 |
| 电热浴炉 | | | 电渣炉 |
| | | | 高频电场加热炉 |
| | | | 真空电炉 |

除炉体外, 电炉一般均具有控制设备和专用电源设备, 根据工艺要求不同, 还可配备控制气氛发生装置、炉外输送装置以及其它附属设备。电炉的主要类型

见表 2·8-1。

1.2 电焊机

电焊机能将电能转变为热能, 是用于焊接的设备。按焊接热源的不同, 可分为主要利用电弧热的电弧焊机, 和同时利用电阻热与加压的电阻焊机两大基本类型。此外尚有一些特种电焊机、专用电焊机和利用其它形式电能的电焊机。其中, 电弧焊机是目前应用最广的一种^①。

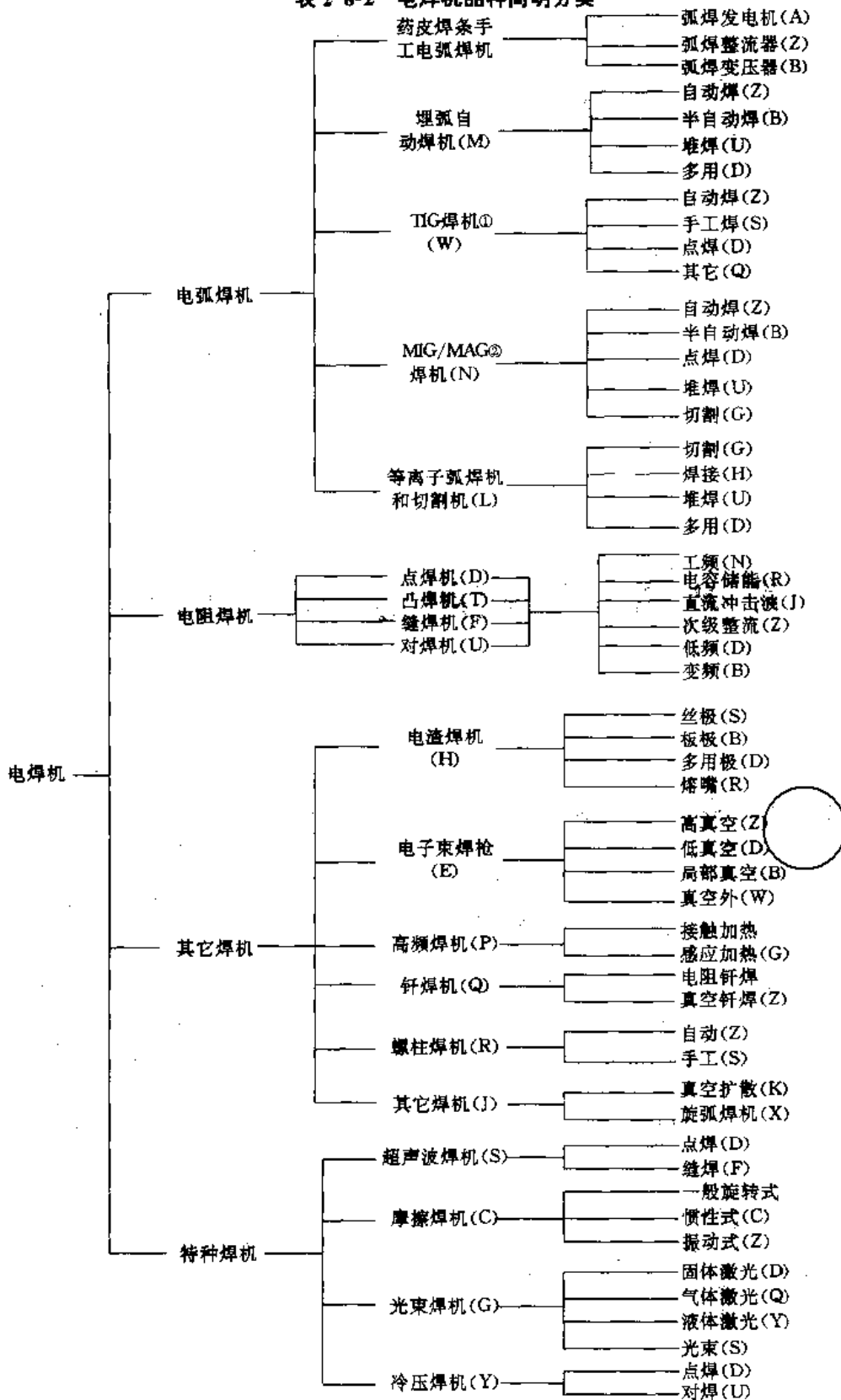
表 2·8-2 列出电焊机品种的简明分类。其中电弧焊机尚可按机体的结构形式而分为手工焊炬或焊钳式、半自动焊把或焊枪式; 自动焊车式、机床式、横臂式、焊头悬挂式或旋转式、台式、变位式、真空充气式等。此外, 尚有电弧点焊枪和弧焊机器人。电阻焊机通常可按用途和电源特性分类, 见表 2·8-2。

电焊机由机体、焊接电源和控制系统三部分组成。根据电焊机功能不同, 除焊机本体外, 电弧焊机尚可配备焊头、焊炬或焊枪、送丝机构、水冷系统、输气系统等装置。电阻焊机则应配备对焊件加压、夹紧或移动的机构。

① 根据 1988~1990 年我国原机电部焊机定点生产厂统计, 电阻焊机和电弧焊机的产量比, 分别为 1:15.1、12.7 和 1:11.6



表 2-8-2 电焊机品种简明分类



注：括弧内系电焊机型号代表字母，根据 GB10249-88《电焊机型号编制方法》，个别焊机未标字母，是因标准未作规定。

① TIG—“钨极惰性气体保护焊”一词的英语名称缩写，系国际通用名词。

② MIG、MAG—分别为“熔化极惰性气体保护焊”和“熔化极活性气体保护焊”的英语名称缩写，均系国际通用名词。



电焊机是电气化和机械化的有机结合,随着电力电子技术、微电子和自控技术等近代科学成就在电焊机领域的合理应用,使焊接机械化、自动化水平与日俱增,焊接控制更加得心应手,焊接质量与劳动生产率也得到不断提高。

2 电阻炉

将电流通入金属或非金属的电热元件,使其发出热量进行加热的电炉,称为电阻炉。

电阻炉结构简单,炉温容易控制,且能实现在控制气氛或真空中加热,因而在机械工业和冶金工业中得到广泛应用。

电热材料必须是导体,且具有较高的电阻率。常用的金属材料有铁铬铝合金、镍铬合金和铂等;非金属电热材料有碳化硅、二硫化钼、碳等。

金属电热材料最高工作温度可达 1400℃,非金属电热材料可达 1700℃。

电阻炉的炉衬由耐火层、中间层和隔热层构成。耐火砖常用轻质粘土砖或普通粘土砖,但炉温较高时应使用高铝砖或刚玉砖。

2.1 电阻炉的分类和用途

电阻炉分类和主要用途见表 2-8-3。

以井式电阻加热炉为例,低温井式电阻炉的结构如图 2-8-1 所示。

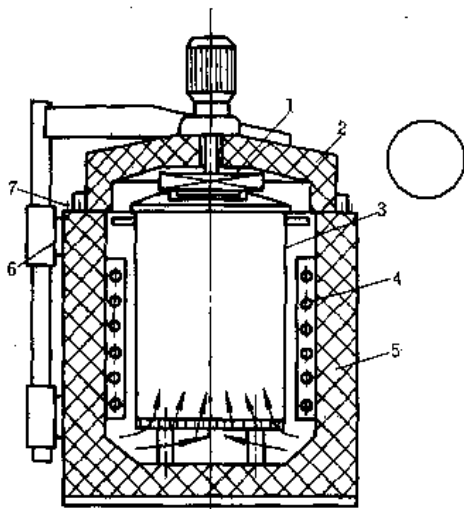


图 2-8-1 低温井式电阻炉

- 1—风扇 2—炉盖 3—装料筐
- 4—加热元件 5—炉衬
- 6—炉盖启闭机构 7—砂封

表 2-8-3 电阻炉的分类与主要用途

| 分类方法 | 类别名称 | 主要用途 |
|----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| 工作温度 | 高温炉 (>1000℃) 中温炉 (650~1000℃) 低温炉 (<650℃) | |
| 工艺用途 | 退火炉 正火炉 淬火炉 回火炉 渗碳炉 | 铸铁、铸钢和有色金属的熔炼 机械零件的热处理、化学处理、钎焊 制品或材料的烘烤、烤漆 粉末冶金的压制和制品烧结 |
| 基本结构和特点① | 罩式炉(RB) 传送带式炉(RC) 电烘箱(RD) 强迫对流井式炉(RF) 滚筒式炉(RG) 自然对流井式炉(RJ) 坑式炉(RK) 液态粒子炉(RL) 箱式淬火炉(即多用炉)(RM) 气体氮化炉(RN) 井式气体渗碳炉(RQ) 电阻熔炼炉(RR) 台车式炉(RT) 箱式炉(RX) 电浴炉(RY) 振底式炉(RZ) 真空淬火炉(ZC) 真空热处理和钎焊炉(ZR) 实验用坩埚炉(SG) 实验用管式炉(SK) 实验用箱式炉(SX) 实验用油浴炉(SY) | |
| 炉膛介质 | 空气介质炉 控制气氛炉 真空炉 液体介质(熔盐、油或铅)炉 | |
| 作业方式 | 直接加热式 间接加热式 连续作业式 间歇作业式 | |



(续)

表 2·8-4 盐浴炉的结构形式

| 分类方法 | 类别名称 | 主要用途 |
|------|---------------|------|
| 使用场所 | 工业用炉 实验室用炉 | |

① 摘自 GB10067.4-88。括号内字母是类别代号。

2·2 电阻炉的主要技术经济指标和发展趋势

电阻炉的主要技术经济指标如下：

(1) 空炉升温时间(h)。在额定电压下,把一台干燥的、未装炉料的电阻炉从 20℃ 加热到额定温度所需的时间。

(2) 额定功率(kW)。电炉电源为额定电压,且炉内温度等于额定温度时的输入功率。

(3) 空炉损耗率(kW)。未装炉料的电阻炉,在额定温度下处于热稳定状态时损失的功率。

(4) 生产率(kg/h)。所处理的炉料重量与处理该炉料重量所需的时间之比。

(5) 炉温控制精度。

(6) 最大一次装载量(一般适用于间歇作业式电阻炉)。

电阻炉的发展趋势如下：

(1) 发展新型电热元件,提高热效率及使用寿命；

(2) 采用计算机控制,提高电阻炉的自动化水平和技术经济指标；

(3) 发展可控气氛热处理技术,尤其是扩大保护气氛的应用范围。

2·3 盐浴炉

盐浴炉是利用熔盐作介质加热工件的一种热处理炉。其工作温度范围较宽(150~1400℃),可完成各种热处理工艺,尤宜于处理一些尺寸不大、形状复杂且表面质量要求高的工件。主要缺点是热效率低,劳动条件差等。

2·3·1 盐浴炉的结构形式

盐浴炉的结构形式如表 2·8-4 所示。

盐浴炉常用介质有氯化盐、硝酸盐及亚硝酸盐等,其使用温度为 140~1300℃。

| 型式 | 结构示意图 | 说明 |
|--------------|-------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 外热式盐浴炉 | | <ol style="list-style-type: none"> 1. 工作温度一般 < 900℃ 2. 不需要用变压器 3. 主要用于碳钢与合金钢热处理,尤宜于液体渗碳、氮化等化学热处理和低温预热 |
| 具有管状加热元件的盐浴炉 | | <ol style="list-style-type: none"> 1. 工作温度一般 < 600℃ 2. 结构简单 3. 热效率高于外热式,易于温控 |
| 内热式盐浴炉 | | <ol style="list-style-type: none"> 1. 可分为高温、中温、低温三种,工作温度 600~1300℃ 2. 可采用三相或单相电源 3. 高温盐浴炉可供高速钢或高碳钢工件淬火加热;中温盐浴炉可供碳钢与合金钢工件淬火加热;低温盐浴炉可供钢工件回火 |
| 埋入式电极盐浴炉 | | <ol style="list-style-type: none"> 1. 有单相与三相之分,电极埋入方式则有侧埋与顶埋之分。工作温度为 600~1300℃ 2. 炉温均匀,加热质量好,电极寿命长,且操作方便 3. 主要用途与插入式电极盐浴炉相似 |

注:图中 1—外部加热元件;2—盐槽; 3—管状电热元件; 4—电极;5—炉衬。



冶金工业出版社

2.3.2 盐浴炉变压器

盐浴炉变压器容量一般应为盐浴炉功率的 1.1~1.2 倍。与普通变压器相比，其特点有：

(1) 二次侧输出电压低、电流大，其绕组大都用裸铜线绕制，匝数较少；

(2) 容量在数百 kVA 以下的，大都用干式自冷（或风冷），一次电压高于 380V 时用油浸式；

(3) 采用空载换档，输出电压一般有 5~7 级可调。

2.4 电阻炉的温度控制系统

与其他自动控制系统一样，电阻炉炉温控制系统主要由测量、比较、放大和执行等环节组成。通常用热电偶检测温度，若被测温度超过 1000℃ 时常使用辐射温度计。

常用炉温控制方式见表 2.8-5。

表 2.8-5 常用炉温控制方式

| 控制方式 | | 温控精度 (°C) | 说明 |
|------|--------|-----------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| 位式 | 二位式 | 约±10 | 1. 按供给电炉功率方式可分为二位式、三位式和时间-比例式 2. 控制系统简单，价格较低，但温控精度差 3. 若执行元件用接触器，则对其动作可靠性要求较高 |
| | 三位式 | | |
| | 时间-比例式 | | |
| 连续式 | | 约±30 | 1. 连续地供给电炉功率，根据温控要求平滑地进行功率切换 2. 执行元件以饱和电抗器或磁性调压器为主 3. 用无触点控制方式 |
| 脉冲式 | | 约±3 | 1. 控制方式与连续式相似，但输送给电热元件的功率是以脉冲形式控制的 2. 用晶闸管作执行元件，通常以移相法和零位触发法控制电阻炉的输入功率 |
| 微机式 | | <1 | 1. 控制速度快、精度高、操作方便 2. 执行元件采用晶闸管 |

3 感应炉

3.1 感应炉的分类和用途



感应炉是利用电磁感应原理，使金属炉料在交变

电磁场中产生感应电流（涡流）所发生的热效应来加热、保温、浇注和熔化金属炉料的。按结构和用途可区分为有芯和无芯两类，如表 2.8-6 所列。

以卧式无心感应炉和卧式有心感应炉为例，其结构如图 2.8-2 所示。

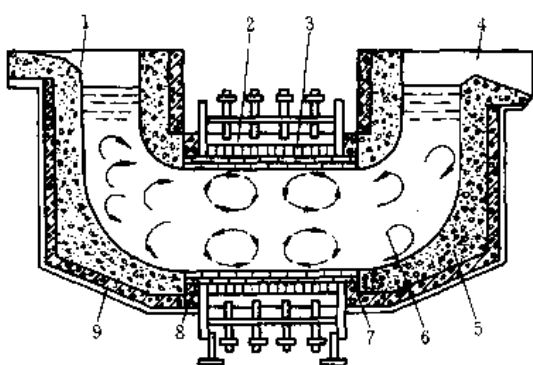
表 2.8-6 感应炉的分类和主要用途

| 类别 | 炉种 | 主要用途 |
|--------|----------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|
| 感应熔炼炉 | 无心①感应熔炼炉 (坩埚式感应炉) | 1. 一般坩埚熔化感应炉主要用于铸铁和有色金属的熔炼 2. 坩埚式短线圈感应炉主要用于保温 3. 卧式炉作连续熔化用 4. 真空感应炉用于熔炼耐热合金、电工材料等 |
| | 有心②感应熔炼炉 (沟槽式感应炉) | 铸铁、钢和有色金属及其合金的熔炼、保温和浇注 |
| 感应加热设备 | 感应透热设备 | 金属材料热加工前的加热；钢材的退火、正火和回火等 |
| | 感应淬火设备 | 机械零件的表面淬火 |
| | 真空感应烧结设备 | 在真空条件下，粉末冶金零件的烧结或加压成形 |

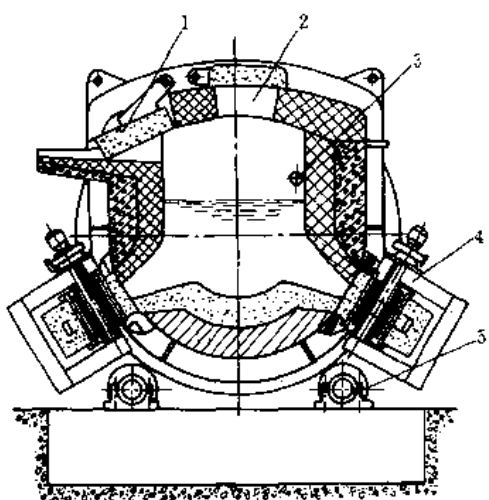
① 无心感应炉指炉体没有铁心，只包含一个感应器（感应线圈）和坩埚的熔炼电炉。这种电炉的感应器相当于变压器的一次绕组，而装在坩埚内的金属炉料就相当于变压器的二次绕组和负载。

② 有心感应炉指炉体中装有用硅钢片制成铁心的熔炼电炉。在交流电感应产生磁场时，铁心起着加强导磁的作用。





a)



b)

图2·8-2 感应熔炼炉结构简图

a) 卧式无心感应炉

- 1—加料扒渣口 2—导电体 3—感应器
- 4—出料口 5—耐火混凝土炉衬 6—铁水
- 7—耐火砖 8—保温砖 9—隔热层

b) 卧式有心感应炉

- 1—渣口盖 2—装料口 3—出料口
- 4—可拆换的感应体 5—回转支座

感应炉的频率 f 建议按如下情况进行选用：
熔炼黑色金属时

$$f \approx \frac{10^5}{d^2}$$

式中 d ——坩锅平均直径 (cm)。

淬火感应加热时

$$\frac{150}{x^2} \leq f \leq \frac{2500}{x^2}$$

式中 x ——淬火层深度 (指从表面到内部半马氏体区的深度) (cm)。

对于沟槽式感应炉, 大多使用工频进行熔炼。

3·2 感应炉的主要技术经济指标和发展趋势

感应炉的主要技术经济指标:

(1) 电源相数和电压 (V)。设计规定的使用的相数和电压。

(2) 电源频率 (Hz)。设计规定的使用频率。

(3) 保温功率 (适用于供保温用的感应熔炼炉) (kW)。在感应熔炼炉的装料量等于其额定容量 (或额定最小容量) 的情况下, 将液态炉料保持在炉料最终温度时感应炉设备所消耗的有功功率。

(4) 电耗 (kWh/kg 或 kWh/t)。炉料加热熔化或升温时, 输入感应炉设备的总能量与经处理的炉料总重量之比。

(5) 熔化率 (kg/h 或 t/h)。指达到最终温度的炉料重量与炉料加热、熔化或升温的时间之比。

感应炉的发展趋势如下:

(1) 应用范围逐步扩大。沟槽式感应炉从应用于铸铁保温扩大到铸铁熔化; 坩埚式的应用范围则扩大到铸铁保温领域; 感应炉透热设备或淬火设备已逐渐发展成为机械工业热处理的主要设备。

(2) 应用微机控制, 提高了感应炉的技术经济指标和设备的自动化水平。

3·3 感应炉的电源设备

感应炉的电源设备如表 2·8-7 所列。

3·4 感应炉的控制系统

坩埚式感应炉需控制的项目有:

(1) 功率因数。常用数字技术自动切换补偿电容容量来实现。

(2) 三相平衡。常采用电容-电抗、变压器的 V 形或 T 形接法来实现。

(3) 中频发电机励磁。控制晶闸管控制角 α 来自动调节发电机的励磁。

(4) 变压器电压。通过电动机或微机控制变压器的调压开关来调压。

(5) 烘炉温度顺序自动控制。使预先制定的随时间变化的烘炉温度作为给定值, 送入由电子电位差计和 PID 组成的温度调节器或微型计算机来实现。

⊙ 参见本卷第 3 篇第 11 章 3·1 节。

⊙ 参见本卷第 5 篇第 4 章 3·1 节。



表 2·8-7 感应炉的电源设备

| 名称 | 频率范围 (Hz) | 原理线路示例或结构简图 | 说 明 |
|-----------|------------------|-------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 中频发电机组 | 500~10000 | | <ol style="list-style-type: none"> 1. 由单相中频发电机和三相交流电动机组成 2. 输出频率不随负载而变；输出电流为正弦波；过载能力强 3. 运行时噪声大，效率为 74%~86% |
| 晶闸管中频电源装置 | 400~20000 | | <ol style="list-style-type: none"> 1. 装置由主电路和控制电路两部分组成。三相工频主电路经控制电路（整流器、滤波器、逆变触发器）变换为单相交流电，向由感应器和补偿电容组成的负载供电 2. 工作过程中三相始终平衡 3. 逆变触发器采用自励工作方式，其工作频率可自动跟踪负载频率的变化，因而工作稳定可靠，效率高、控制加热温度准确 |
| 工频①感应炉变压器 | 50 | | <ol style="list-style-type: none"> 1. 输出电压有多级可调 2. 用于大容量感应炉 3. 用于单相炉时要采用相平衡装置 |
| 三倍频变压器 | 150 或 180 | | <ol style="list-style-type: none"> 1. 工作可靠、维护方便、效率较高 2. 承受短路能力较强，电气系统可靠，不需三相平衡 3. 功率因数较低，所需补偿电容器较多 |
| 高频电源 | >10 ⁵ | | 应用电子管振荡器产生高频 |

① 美国、加拿大和古巴等国工频为 60Hz。

4 电弧炉

4.1 电弧炉的分类和用途

电弧炉是利用电弧能量来熔炼金属炉料的一种电

炉，其类型及主要用途见表 2·8-8。

其中炼钢电弧炉本体的基本组成部分有熔池、炉盖、电极及其升降装置和倾斜机构等，图 2·8-3 为其结构示意图。



表 2-8-8 电弧炉的类型及主要用途

| 种类 | 结构示意图 | 主要用途 |
|----------|-------|----------------------------------------------------------------------|
| 直接式 | | 1. 冶炼特种钢或普通优质钢 2. 熔炼铁、钴、钨、钼、钽、铌等活泼金属及其合金，也用于熔炼耐热钢、不锈钢和工具钢等 |
| | | |
| 矿热炉 | | 用于下列物料的冶炼： 1. 硅铁、碳素锰铁、碳素铬铁、硅锰合金、硅钙合金及钨铁 2. 生铁 3. 冰铜、电石、碳化硼等 |
| 间接加热式电弧炉 | | 用于铜等有色金属的冶炼。鉴于熔炼质量较差，现已被其它熔炼炉所代替 |

注：图中 1—电极；2—电弧；3—炉料 4—水冷铜坩埚。

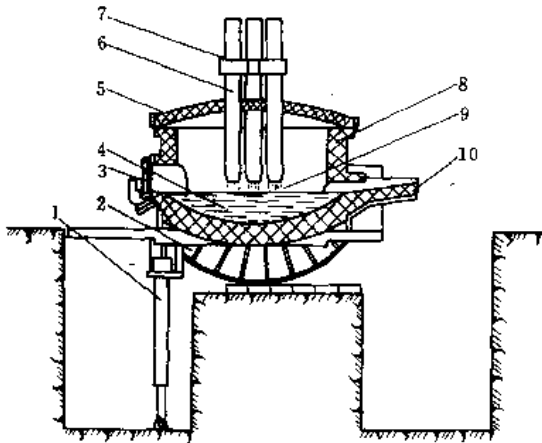


图 2-8-3 炼钢电弧炉结构示意图

- 1—倾炉用液压缸 2—倾炉摇架 3—炉门
- 4—熔池 5—炉盖 6—电极
- 7—电极夹持器（连电极升降装置）
- 8—炉体 9—电弧 10—出钢槽

4.2 电弧炉的主要技术经济指标和发展趋势

主要技术经济指标如下：

- (1) 净熔化时间(h)。指额定容量的炉料从冷态加热到全部熔化所需的时间。
- (2) 熔化电耗(kWh/t)。指生产1t合格钢所消耗的电能。
- (3) 熔化率(t/h)。额定条件下每小时所生产合格钢的数量。
- (4) 电极消耗量(kg)。炼1t钢所需消耗的电极重量。
- (5) 利用系数(t/(MVA·d))。一昼夜(24h)单位容量变压器所生产钢的数量。

炼钢电弧炉设备的发展趋势如下：

- (1) 提高电弧炉的单位功率，发展高功率和超高功率（其输入功率比普通电弧炉增加一倍以上）电弧炉；



(2) 采用计算机控制, 提高电弧炉炼钢过程自动化水平和技术经济指标;

(3) 发展感应搅拌、真空除气和电弧精炼三者结合的钢包精炼炉。

4.3 电弧炉的电气设备

炼钢电弧炉设备组成如图 2·8-4 所示, 其主要电气设备的名称及说明见表 2·8-9。

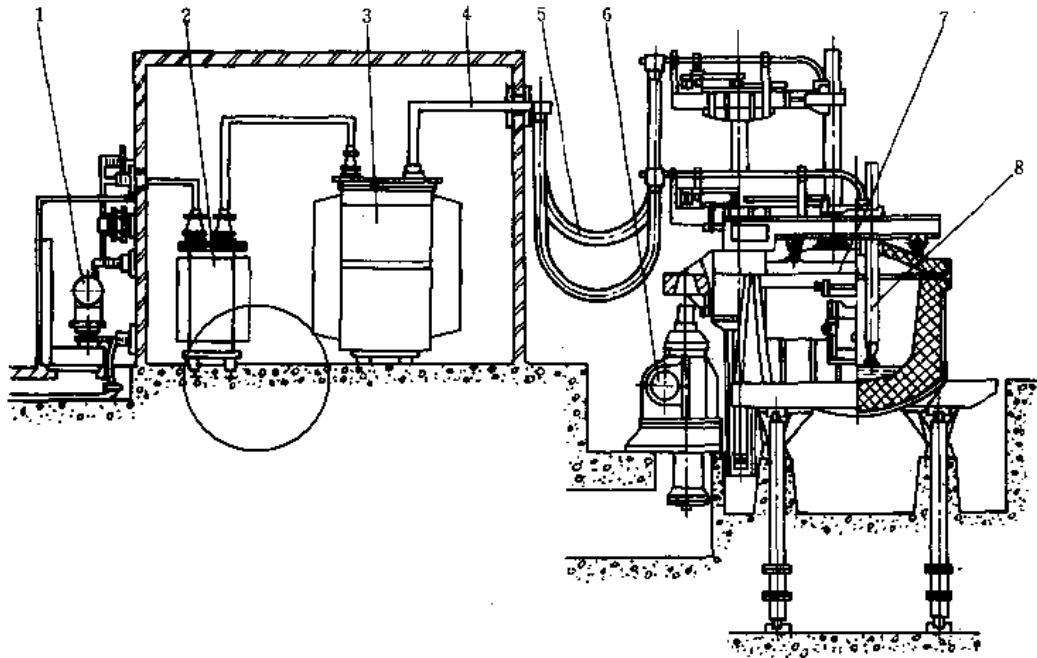


图 2·8-4 炼钢电弧炉设备组成

1—高压断路器 2—电抗器 3 电炉变压器 4—铜母线排 5—水冷电缆
6—炉盖旋开机构 7—电弧炉本体 8—电极

表 2·8-9 炼钢电弧炉的主要电气设备

| 名称 | 说明 |
|------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 短网 | 指从变压器低压侧的引线至电极(含电极)的一段线(参见图 2·8-4), 由铜母线排、水冷电缆及石墨电极等主要部分组成 |
| 变压器 | 与普通变压器相比, 具有下列特点: 1. 小容量者为单相, 大容量者为三相 2. 较大容量者, 一次侧电压较高, 二次侧电压较低, 且电流很大。在冶炼过程中要调压, 调压用的有载开关装设在一次侧 3. 绕组的机械结构和绑扎坚固, 能承受瞬时过载冲击 4. 是各种电炉变压器中发展最为迅速的 |
| 电抗器 | 用以限制短路电流和稳定电弧 |
| 断路器 | 带负载切换电路; 作继电保护执行元件之用 |
| 测量仪表 | 通常装有电压表、电流表、有功功率表、无功功率表和电度表 |
| 继电保护 | 通常装有过负荷保护、瓦斯保护和低压保护等 |

4.4 炼钢电弧炉的控制系统

炼钢过程中, 电极位置的变化对炼钢的质量影响甚大。应用电极自动调节器能使电极自动点弧, 能快速调节电极的位置, 从而使炉内维持最佳的用电规范。电

极自动调节装置的类型及特点见表 2·8-10。

容量较大的炼钢电弧炉往往采用液态金属的电磁搅拌代替人工搅拌。搅拌器通常使用大功率低频电源以保证足够的搅拌力, 例如大功率低频发电机或晶闸管变频电源。搅拌器位于电弧炉炉底下方, 如图 2·8-5



所示。在搅拌器的感应线圈中通以低频交流电，所产生的交变磁场使炉内液态金属产生涡流。在电磁力作用下，液态金属朝一定方向流动，从而起搅拌作用。电磁搅拌可以促进脱硫和去杂质，净化钢液的化学成分和改善温度的均匀性。

表 2-8-10 自动调节装置的类型及特点

| 类 型 | 特 点 |
|----------------------------|-----------------------------------------------------------|
| 晶闸管-转差 离合器式 | 反应灵敏，稳定性好，可靠性高， 操作方便，装置重量轻以及成本低 |
| 晶闸管-交流 力矩电机式 (KJD 型) | 惯性小，可靠性高，起动转矩大， 调速范围宽，调速特性好，特别适 宜于起动和制动频繁的自动调节 器 |
| 电气-液压式 | 调节精度高，灵敏度高，调节特 性较理想，但一次投资和运行维修 费大 |
| 微机控制式 | 反应迅速，精度高，稳定性好，节 能效果佳 |

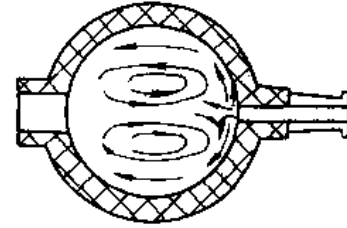
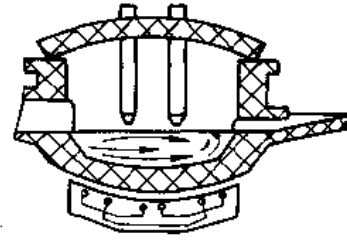


图 2-8-5 电弧炉的电磁搅拌

5 其他工业用电炉

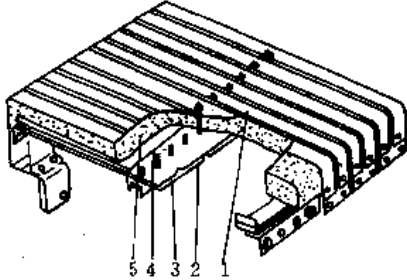
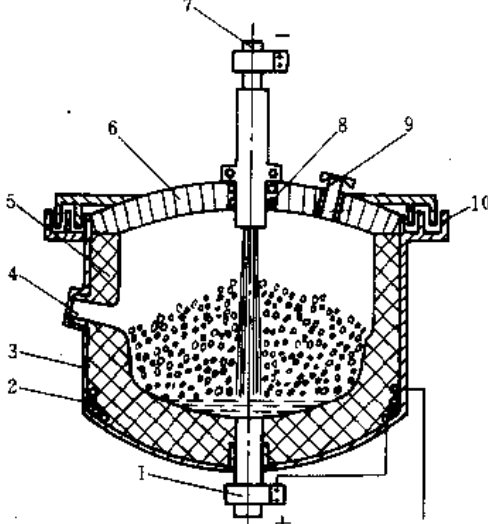
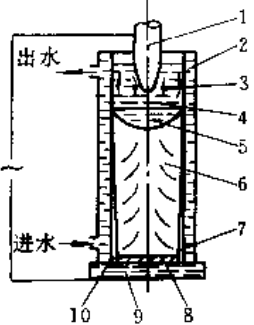
工业用电炉的加热方式有电阻加热、电弧加热、感应加热、介质加热、红外线加热、电子束加热、等离子加热等，对应于上述各种加热方式则有各自不同类型的电炉。除前面已介绍的三类电炉外，其他常见工业电炉的发热原理和主要用途见表 2-8-11。

表 2-8-11 其他工业用电炉的发热原理和主要用途

| 名 称 | 结构或电热元件示意图 | 发热原理 | 主要用途 |
|------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 电子束炉 | <p>1—油扩散泵 2—预真空机械泵 3—罗茨泵 4—车间地面 5—操作平台 6—装料阀门 7—料棒推送机构 8—料棒 9—电子束偏转系统 10—电子束发生器 11—真空接口 12—电子束 13—炉室 14—水冷结晶器 15—水冷锭模座 16—锭子车 17—抽锭机构 18—抽锭机构架</p> | <p>利用高速运动电子轰击炉料所产生的热能，进行加热或熔炼</p> | <ol style="list-style-type: none"> 1. 熔炼铌、钽、钨、钼等高熔点金属和精炼优质合金钢 2. 用于实验室熔炼硼化物、碳化物和氧化物等 3. 制取单晶等半导体材料 4. 电子束有极高的能量密度，在热处理时可使物体表面温度迅速上升，而内部仍处于冷态，故可进行自冷淬火 |



(续)

| 名称 | 结构或电热元件示意图 | 发热原理 | 主要用途 |
|------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 红外线炉 |  <p>1—加热元件 2—外壳 3—反射板 4—反射板 5—耐火纤维</p> | <p>利用红外线辐射能所发出的热量进行加热</p> | <p>广泛应用于机械、化工、纺织、食品等领域的加热、烘烤和干燥</p> |
| 等离子炉 |  <p>1—炉底电极 2—搅拌线圈 3—炉壳 4—出钢口 5—炉衬 6—炉盖 7—等离子枪 8—密封圈 9—观察窗 10—砂封</p> | <p>利用等离子体的能量进行熔炼或加热</p> | <ol style="list-style-type: none"> 1. 熔炼钨、钼、钽、铌、钛、锆等难熔金属和活泼金属 2. 熔炼合金钢、铸钢 |
| 电渣炉 |  <p>1—自耗电极 2—水冷结晶器 3—渣池 4—金属熔滴 5—金属熔池 6—旋子 7—收缩空隙 8—垫板 9—底水箱 10—渣壳</p> | <p>与电阻熔炼炉相同</p> | <ol style="list-style-type: none"> 1. 钢或某种合金钢再精炼 2. 生产用于航空或军事工业上的轴承钢、高温合金钢 |

6 电弧焊机

电弧焊机是利用电弧作为热源进行熔焊的电焊

机,按焊机运行方式,可分为手工、半自动和自动三种形式。其中,手工和半自动弧焊机的电弧运动是手工操作的,自动弧焊机的电弧运动以及自动、半自动弧焊机

冶金工业出版社重作版权

—1—



的焊丝输送则均由机械完成。电弧焊机由机体、弧焊电源和控制系统三部分组成：弧焊电源是电弧焊机的核心；控制系统用以控制电弧参数及焊机各机构的动作；机体是弧焊电源、控制系统和焊机各种机构的载体，可按需要设计成手工焊炬式、半自动焊把式或焊枪式、自动焊车式、横臂式或焊头

悬挂式等。

6.1 弧焊电源的特点和对它的一般要求

6.1.1 弧焊电源的特点

弧焊电源与普通电源不同之处见表2·8-12。

表 2·8-12 弧焊电源与普通电源的主要区别

| 项目 | 弧 焊 电 源 | 普 通 电 源 |
|------|----------------------------------------------------|--------------------------------------|
| 外特性 | 根据焊接方法不同，可分为下降特性、平特性或上升特性 | 一般为平特性 |
| 动特性 | 用于熔化极电弧焊的直流弧焊电源，对瞬时短路电流的峰值、短路电流上升速度和恢复电压的最低值都有特殊要求 | 在起动不频繁的情况下，一般仅对起动电流有所限制 |
| 调节特性 | 应具有在一定弧长范围内灵活调节焊接规范 (I_w, U_a) ①的能力 | 交流电源一般不要求对输出电压、电流进行无级调节，直流电源可调节其输出功率 |
| 空载电压 | 应符合焊接特定要求并兼顾安全性和经济性，一般不超过 100V | 一般不作特殊要求 |

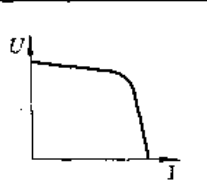
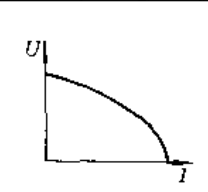
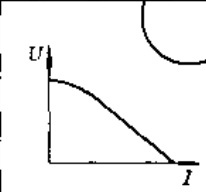
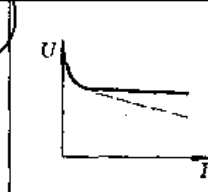
① I_w —焊接电流； U_a —电弧电压。

6.1.2 对弧焊电源的一般要求

为适应不同焊接方法的电弧特点，以保证电弧的引燃、稳弧和取得期望的焊接规范，对弧焊电源的外特性、动特性、调节特性和空载电压分别作了如下规定：

(1) 外特性。主要取决于焊接方法。外特性曲线形状应与电弧伏安特性曲线形状相配合，以得到在不同焊接规范下电弧稳定燃烧的工作点。表 2·8-13 列出各种外特性曲线形状及其适用范围。

表 2·8-13 各种外特性曲线的形状及其适用范围

| 外特性 | 下 降 特 性 | | | 平 特 性 | |
|--------|-------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| | 图形 |  |  |  |  |
| 特征 | 在运行范围内 $I \approx$ 常数 (又称陡降特性或恒流特性) | $U=f(I)$ 图形接近 1/4 椭圆 | 在运行范围内 $U=f(I)$ 图形接近一斜线 | 在运行范围内 $U \approx$ 常数 (又称恒压特性)。有时电压稍有下降 | 在运行范围内随电流增加电压稍有增高 (有时称上升特性) |
| 一般适用范围 | 1. 钨极氩弧焊 2. 等离子弧焊 | 1. 药皮焊条手工焊 2. 埋弧焊 | 1. 药皮焊条手工焊，特别适宜于立焊、仰焊 2. 粗丝 CO_2 弧焊 3. 埋弧焊 | 等速送丝的粗丝或细丝气体保护弧焊 | 等速送丝的细丝气体保护弧焊 |

注：摘自参考文献 [15] 35-7 页



(2) 动特性。熔化极电弧焊过程中负载状态不断发生从空载到短路和从负载到短路的突变, 弧焊电源应对这种负载状态的瞬变具有足够的适应能力。交流弧焊机因电磁惯性小, 一般只需考核电流过零后的电弧引燃能力。直流弧焊机则要求有足够大的瞬时短路电流峰值、短路电流上升速度(尤其是细丝熔化极气体保护焊)和恢复电压最低值。

(3) 空载电压 U_0 。除等离子弧焊机和切割机^①外, 一般不超过 100V。通常取 $U_0 \geq (1.5 \sim 2.4) U_w$ (U_w ——电弧工作电压)。

(4) 调节特性。由于电弧电压和焊接电流是由电弧伏安特性和电源外特性曲线相交的一个稳定工作点决定的, 为了能在一定范围内调节电流和电压, 电源应能通过简单调节获得一组可与电弧伏安特性相交的外特性曲线, 从而得到一系列稳定工作点。图 2-8-6 是几种焊接方法的调节特性示意图。

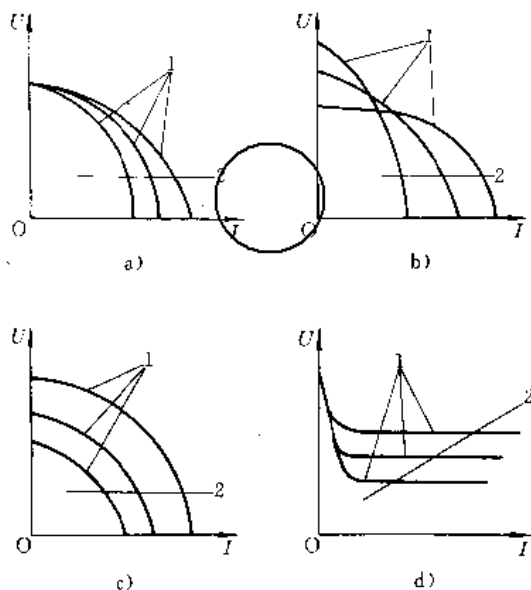


图 2-8-6 不同焊接方法所要求的调节特性示意图
a)、b) 手工电弧焊 c) 埋弧焊 d) 熔化极气体保护焊
1—电源外特性 2—电弧伏安特性

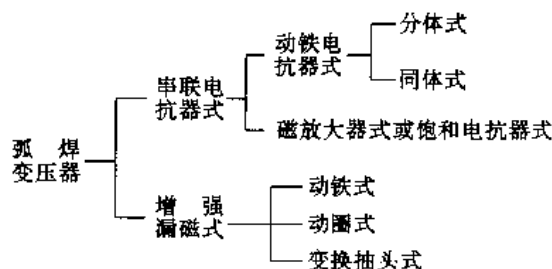
6·2 弧焊电源的分类和工作原理

弧焊电源是向电弧提供能量的电装置, 可分为变压器、整流器和发电机三种基本类型。

6·2·1 弧焊变压器的分类和工作原理

1. 弧焊变压器的分类 弧焊变压器一般按其结

表 2-8-14 弧焊变压器按结构形式分类



构形式分类, 如表 2-8-14 所示。

2. 弧焊变压器的工作原理 弧焊变压器是一种具有下降外特性并配有必要调节和指示焊接电流装置的特殊降压变压器。其下降外特性可通过增加变压器本身的漏磁(漏感)或在正常漏磁变压器的二次回路中串联电抗器来获得, 并分别称为增强漏磁式和串联电抗器式。变压器的输出电流(焊接电流)能通过感抗的变化进行均匀调节。此外, 对空载电压 U_0 与短路电流都有一定要求。一般 U_0 在 60~80V 之间^②, 短路电流 \leq 工作电流的 1.5 倍。图 2-8-7 为二种常用弧焊变压器的电气原理: 电流调节方式在图 a 中是通过改变动铁心的位置; 在图 b 中则是改变一、二次绕组间的相对位置。

6·2·2 弧焊发电机的分类和工作原理

1. 弧焊发电机的分类 弧焊电动机可以按发电机的外特性及获得相应外特性的方法, 分为平特性的积复励式, 下降特性的差复励式、裂极式和换向极去磁式等四种。

2. 弧焊发电机的工作原理 弧焊发电机是配有必要电流调节和指示装置以满足电弧焊相关要求(参见本章 6·1 节)的特殊直流发电机, 其与普通直流发电机(参见本篇第 4 章 2 节)的不同之处在于其下降外特性和输出电流的均匀可调。获得下降外特性的方法是对发电机的结构进行改造, 以便负载运行时能在其励磁磁路内产生一个随负载增加而增大的反向磁通, 从而使发电机的合成磁通随负载(焊接电流)的增大而减小。

① 使用 Ar+H₂ 作离子气的等离子弧焊机为 $U_0=110 \sim 120V$, 等离子切割机 U_0 可达 150~400V。

② 特殊设计的低空载弧焊变压器 U_0 可小于 55V, 高空载弧焊变压器 U_0 可大于 100V, 但应有防触电装置。



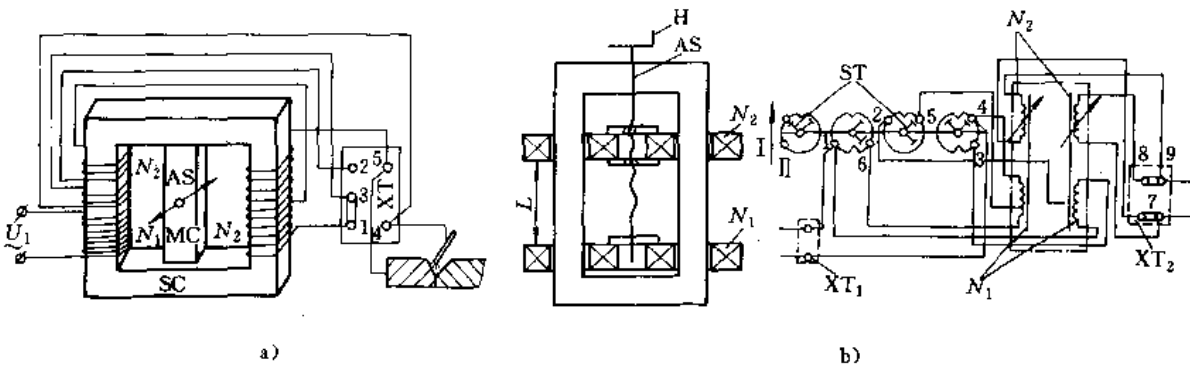


图 2-8-7 动铁式和动圈式交流弧焊机电气原理

a) 动铁式 BX1-330 型 b) 动圈式 BX3-300 型

N_1 —一次线圈 N_2 (N_{2-1} , N_{2-2} , N_{2-3})—二次线圈 $X_0 \sim X_9$ —接头编号 ST—电源转换开关

XT—端子板 MC—动铁心 SC—静铁心 AS—调节螺杆 H—手轮

注：摘自参考文献 [20] 116 页

电动弧焊发电机的电能利用很不经济，耗材多，维修成本高，国内外竞相以高性能的弧焊整流器取代之。

图 2-8-8 是最常用的裂极式直流弧焊发电机的结构和电气原理图。

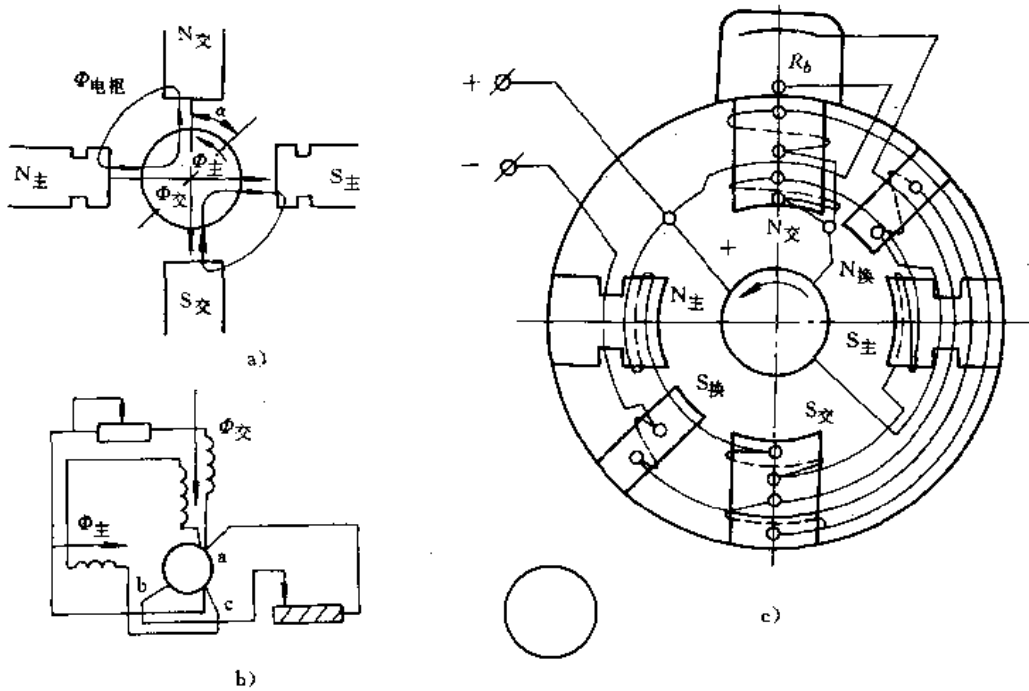


图 2-8-8 AX-320 型直流弧焊发电机

a) 结构 b) 原理 c) 内部接线

注：摘自参考文献 [20] 118 页

6-2-3 弧焊整流器的分类和工作原理

1. 弧焊整流器的分类 见表 2-8-15。

2. 弧焊整流器的工作原理 弧焊整流器由一、二次绕组相隔离的三相主变压器[⊖]、半导体整流元件组及外特性调节装置、指示装置等组成，是一种弧焊变压

器经二次侧整流后构成的直流弧焊电源。获得相应外特性的方式与其调节装置的特性相一致(其中动铁式、动圈式与弧焊变压器相同)，即分别通过磁放大器、变换抽头、晶闸管、晶体管等元件进行外特性调节。图

⊖ 早期的单相整流弧焊电源已经淘汰。



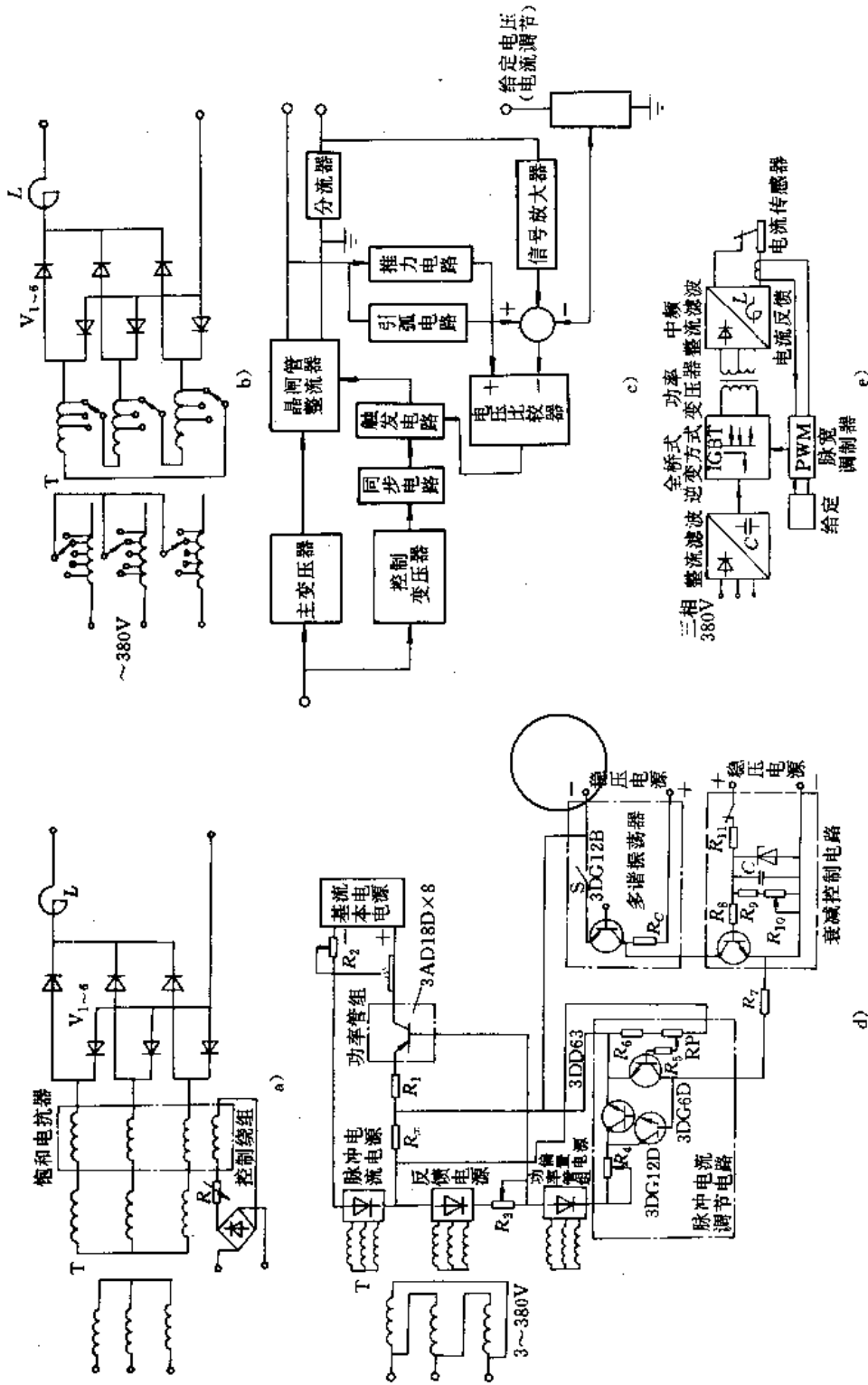


图 2-8-9 几种弧焊整流器的电气原理图

- a) 饱和电抗器式 b) 变换抽头式 c) 晶闸管式 d) 晶体管脉冲式
 - e) 绝热门极双极晶体管桥式整流器 T—主变压器 V—二极管、晶闸管、晶闸管
 - L—直流电感 IGBT—绝缘门极双极晶体管 R—电阻器、电位器 C—电容器 PWM—脉宽调制器
- 注：图 a、b、d 摘自参考文献 [10] 332、333、376 页，c 摘自参考文献 [21] 11 页



2·8-9是几种典型弧焊整流器的电气原理图,图中,晶闸管式弧焊整流器是代替旋转式直流弧焊机的较理想品种,属国家推广使用的节能产品,预计90年代中期后将左右国内外的弧焊电源市场。现将其工作原理予以简要说明:如图2·8-9c所示,经三相主变压器降压后的交流电由晶闸管整流器整流成直流电,并利用改变晶闸管触发角的相位来控制输出直流电压的大小。从直流输出端分流器上取出电流负反馈信号,此信号随输出电流的增加而增加,从而使晶闸管导通角减小,输出电压降低而得到下降外特性。此类电源尚具有推力和引弧两种附加电路。前者在输出端短路时可增加短路电流,形成外拖外特性,使焊条不易与工件粘住;后者可在引弧瞬间增加给定电压,使引弧电流增大,便于起弧。晶闸管弧焊整流器电路结构可具有多种形式,如主电路可设计成带平衡电抗器的双反星形电路、半控或全控桥式整流电路;触发电路可设计成切割式或积分式,并有二路、三路和六路触发之分,触发电路元件则有分立元件、集成电路和两者混合式等。

变频式(逆变式)弧焊整流器是最新一代弧焊电源,具有极大的推广价值和发展前景。工频交流电经二次侧整流后输入逆变器变频,频率可提高数千至数万赫,然后再经二次整流和滤波后输出。该类电源具有体积小、重量轻、动特性好以及晶体管控制快速灵敏等种种特点。

表 2·8-15 弧焊整流器的分类

| 按外特性 | 按整流元件 | 按调节装置的作用原理 |
|------|-----------|--------------|
| 下降特性 | 硅弧焊整流器 | 磁放大器式或饱和电抗器式 |
| 平特性 | 晶闸管弧焊整流器 | 动铁式 |
| 多特性 | 晶体管式弧焊整流器 | 动圈式 |
| | | 晶体管式 |
| | | 晶闸管式 |
| | | 变换抽头式 |
| | | 变频式(逆变式) |

6·3 电弧焊的控制系統

控制系统的作用是使电弧焊机按预定工作程序完成焊接操作。为此目的而设计的一系列单元电路与焊机的机械动作相配合,便能满意地完成期望的焊接程序。如图2·8-10所示是气体保护电弧焊机典型工作程序,纵坐标所列出的每一项都需要进行控制,才能得到高质量的焊缝。

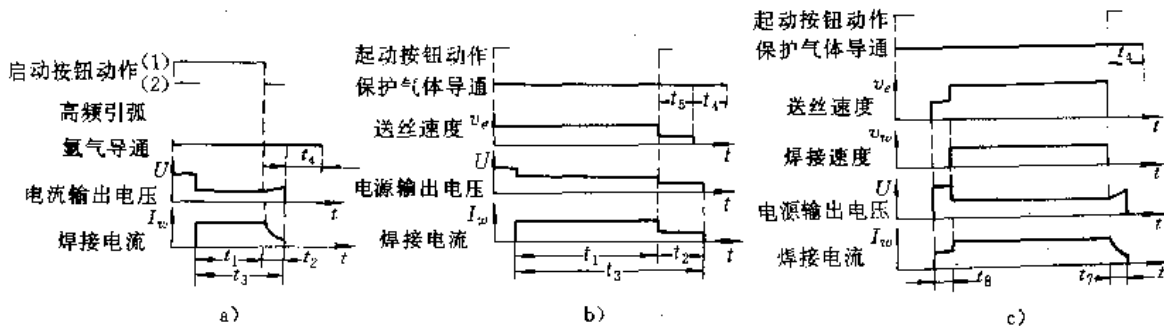


图 2·8-10 气体保护焊机典型工作程序

a) 手工钨极氩弧焊机工作程序

t_1 —焊接时间 t_2 —焊接电流衰减时间(可调) t_3 —电弧燃烧时间 t_4 —通气滞后时间(可调)

(1) —短焊(定位焊) (2) —长焊(连续焊接)

b) 半自动气体保护焊机工作程序

t_1 —焊接时间 t_2 —焊接电流或电源输出电压衰减时间(可调) t_3 —电弧燃烧时间 t_4 —通气滞后时间(可调)

t_5 —送丝速度衰减时间(可调) 当焊机没有电流、电压及送丝速度衰减装置时, t_2 及 t_5 等于零

c) 自动气体保护焊机工作程序

t_4 —通气滞后时间(可调) t_6 —缓慢送丝引弧时间 t_7 —停止送丝电弧送丝时间

6·3·1 引弧控制电路

电弧焊引弧方法分接触引弧与非接触引弧两类。前者又可区分为爆断、缓送与回抽三种方式;后者则有

高频与脉冲之分。除细丝爆断引弧与药皮焊条回抽引弧以外,都需要有专门设计的控制电路。图2·8-11是几种常用引弧电路的电气原理图。其中,图d是钨极氩弧焊使用的典型引弧电路。



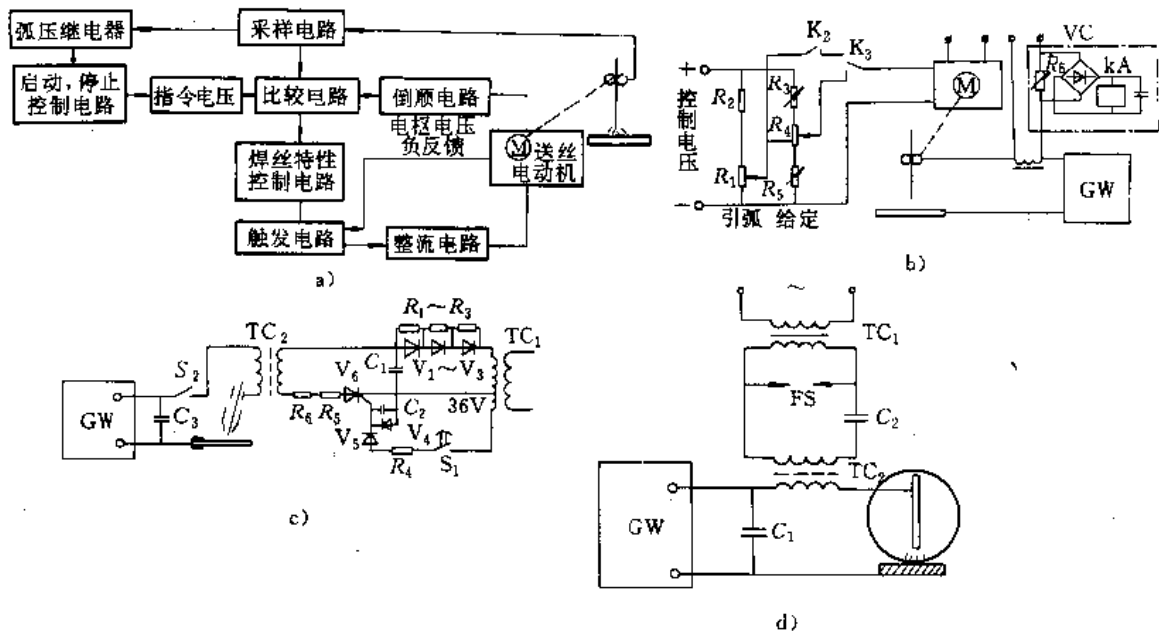


图 2-8-11 几种常用的引弧电路原理

a) 晶闸管式回抽引弧电路框图 b) 缓送引弧电路 c) 小功率脉冲引弧电路 d) 串联式高频引弧电路
 TC—控制变压器 C—电容器 VC—整流器 V—二极管、晶闸管 R—电阻器、电位器
 FS—放电器 M—电动机 GW—弧焊电源 KA—电弧继电器 K_2, K_3 —接触器触点 S—开关
 注：摘自参考文献 [15] 35~40、35~41，参考文献 [18] 243 页

6.3.2 稳弧控制电路

铝及其合金的交流电弧焊，当电流过零时必须施加必要的稳弧脉冲，通常使用高频稳弧与脉冲稳弧两种方式，而以后者为佳。图 2-8-12 所示为一种简单的脉冲稳弧器电路图，利用 C 的充放电使 V_3 导通或截止，从而达到电流过零时立即向电弧空间发送一个较高负脉冲电压，使电弧重复引燃的电压降低，起到稳弧的目的。

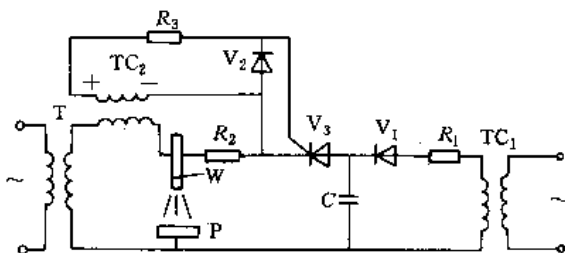


图 2-8-12 脉冲稳弧器电路原理

T—主变压器 P—工件 W—钨极 C—电容器
 TC₁—电源变压器 R_1, R_2, R_3 —电阻器
 V_1, V_2 —二极管 V_3 —晶闸管 TC₂—控制变压器
 注：摘自参考文献 [19] 74 页

6.3.3 衰减控制电路

焊接结束时，焊接电流以某种方式进行衰减可填满弧坑，防止产生焊接缺陷。现行衰减控制器有线性衰减、指数衰减和台式衰减等形式，各有利弊。图 2-8-13 为其中二种电路的实例。

6.3.4 拖动控制电路

用于自动和半自动焊机的焊丝输送、焊车（焊头）行走等动作的控制，包括作为执行机构的电动机及使电机按预定方式运转的控制器。一般采用具有平硬机械特性的他励电动机作为执行机构，以快速灵敏的晶闸管调速电路进行控制。图 2-8-14 示出晶闸管调速电路的实例。

6.3.5 电弧焊过程的数控与机器人化

数控电弧焊机是使电弧焊过程按预先编制的数码程序进行工作，并实行全过程控制的焊接设备。数控系统工作原理及其基本结构参见本卷第 6 篇。用于电弧焊的数控技术主要有点位控制和轮廓控制两种形式。前者指动作程序及相应焊接规范参数的控制；后者除上述要求外尚应能控制焊头的运动轨迹。图 2-8-15 示



出数控系统的实例。

微机全过程控制和各类传感器的大量应用，则是弧焊“机器”之有可能称为“人”的基础。其中，编程是弧焊机器人的控制关键，其方式有示教式和较为先进的自教式两类。进一步的发展是机器人的“智能化”，这也是控制技术的最高目标。图 2·8-16 和图 2·8-17 分别示出弧焊机器人的结构及其视觉跟踪系统框图举例。

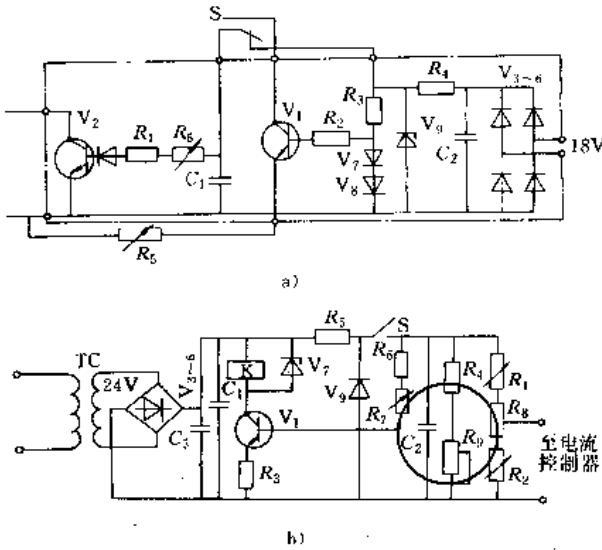


图 2·8-13 二种调速控制电路举例

a) 线性调速 b) 指数调速

V_{1-2} —晶体管 V_{3-9} —整流二极管

K—继电器 $C_1 \sim C_3$ —电容器 V_9 —稳压二极管

$R_1 \sim R_9$ —电阻器 TC—控制变压器 S—开关

注：摘自参考文献 [15] 35~43 页

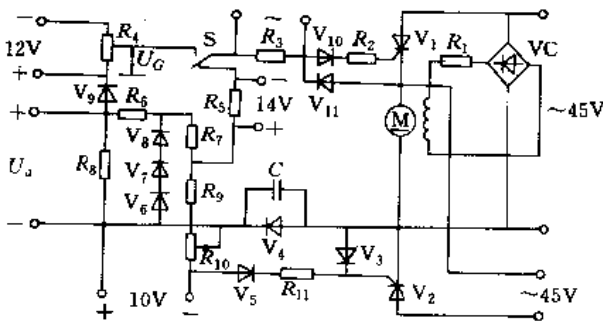


图 2·8-14 NZA19-500 型焊机的变速送丝电路

M—电动机 V_1, V_2 —晶闸管 V_{3-11} —二极管

VC—整流器 S—开关 C—电容器

R—电阻器、电位器、变阻器 U_G —电弧电压

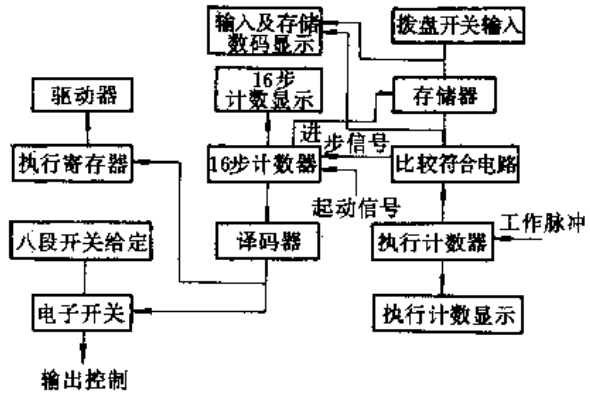


图 2·8-15 数控全位置焊机原理框图

注：摘自参考文献 [16] 173 页

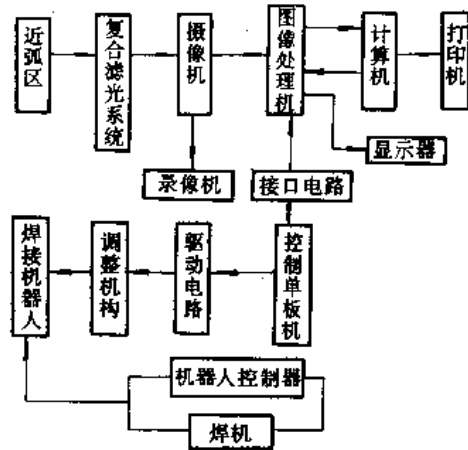


图 2·8-16 弧焊机器人的结构框图

注：摘自参考文献 [16] 175 页

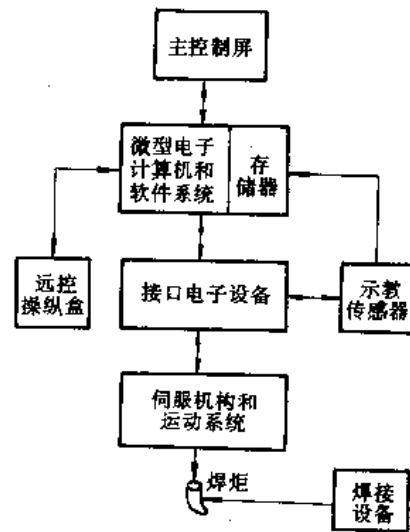


图 2·8-17 弧焊机器人视觉跟踪系统框图

注：摘自参考文献 [22] 7 页



冶金工业出版社 请尊重作者版权

6.3.6 其他控制元件

除上述主控制单元外，还需要配置一些辅助控制元件。常用辅助控制元件的功能和应用原理如表 2-8-16 所列。

为实现预定焊接顺序，提高系统反应能力，

表 2-8-16 常用辅助控制元件的功能及应用原理

| 名称 | 功能及类别 | 应用原理 |
|-------|----------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| 电弧继电器 | 自动、半自动焊接时指挥送丝机构及焊车(焊头)动作的一种继电器，分弧压控制与弧流控制二种形式 | 焊接回路中电弧一旦引燃，该继电器即能输出指示信号，使送丝机构及焊车(焊头)动作，从而使电弧与焊机机械系统之间建立有机联系 |
| 时间控制器 | 控制弧焊工作程序(如保护气体的提前或滞后送气，焊接电流的衰减时间等)的一种时间继电器，有阻容式、单结晶体管式、晶闸管式等品种 | 根据不同弧焊工艺方法的需要，焊机各单元电路的通断及元件的动作，都必须控制其时间程序。为此目的，可应用一些能进行时间调控的电子时间控制器或特殊设计的延时电路 |
| 水流开关 | 保证冷却水达到一定流量时方能接通焊接电流的保护装置，用以防止气体保护焊时喷嘴和导电嘴等元件的烧损 | 通常作成弹簧-膜片式结构，只有当流经开关的水流压力达到一定值时，方能顶开弹簧使开关动作，接通焊接电流，从而避免冷却水不通，突然供水中断或流量变小而引起事故 |
| 风压开关 | 保证风量达到一定值时方能接通焊接电流的保护装置，用以防止大功率整流元件因过热而损坏 | 弧焊整流器使用的大功率整流元件，如硅整流二极管、晶闸管等必须使用冷却风扇强迫降温，风压开关的应用可防止因风扇故障而引起整流元件的损坏 |
| 电磁气阀 | 根据预定焊接程序控制气体保护焊保护气体启闭的电磁开关 | 使交流电磁气阀与气体管路相连接，通电时衔铁在电磁力作用下顶起弹簧，使气体导通 |
| 气体配比器 | 用于二元或三元混合气体保护焊时不同气体成分的配比，可制成小型单工位、双工位或大型多工位储配装置 | 配比器由压力表、减压阀、流量调节器混合室等器件组成，可组配出不同比例的混合气体。由于各组分的比重差异，为了得到良好混合，混合室是关键 |

7 电阻焊机

电阻焊是使大电流短时通过被焊金属，利用电阻热和加压方式，将达到塑性或局部熔化状态的金属挤压焊合的一种焊接方法。电阻焊机是执行这种焊接方法的设备，其应用范围仅次于电弧焊，尤宜于薄壁构件的搭接和杆件、管件的对接。

电阻焊机的分类见表 2-8-2。

7.1 电阻焊机结构形式

一般由供给热能的变压器、二次侧调压机构、焊接回路、控制系统和机械系统等组成。表 2-8-17 列出常用电阻焊变压器的结构特点。

表 2-8-17 常用不同功率电阻焊变压器的结构特点

| 项目 | 小功率 | 中等功率 | 大功率 |
|------------|------------|------------|-------------|
| 功率范围 (kVA) | <25 | 25~150 | 150~400 |
| 二次电流 (A) | <8000 | 8000~20000 | 20000~40000 |
| 调节方式 | 一次线圈分级 | | |
| 调节级数 | 8 | 8 | 16 |
| 铁心型式 | 铁壳式或 C 形铁心 | | |
| 一次线圈 | 筒式 | 盘式 | 盘式 |
| 二次线圈 | 筒式、薄铜皮叠成 | 盘式、水冷铜板 | 盘式、水冷铜板 |

注：摘自参考文献 [15] 35~75 页

168 1. 电阻焊机



7.1.1 电阻焊机的焊接回路

焊接回路是阻焊机的重要组成部分。当变压器二次侧空载电压恒定时，焊接电流便取决于回路的阻抗。为保证回路的大电流输出，在规定使用条件下，应尽可能减小其回路的短路阻抗。

7.1.2 电阻焊机的机械系统

泛指点、凸、缝焊机的电极加压及运动机构，对焊机的工件夹紧、送料和顶锻机构。

1. 电极加压机构 由上下电极臂和压力传递机构组成，一般做成下臂固定，上臂可动式。加压方式可为机械传动、气压、液压或气液压。

2. 夹紧、送料与顶锻机构 用于工件的夹紧、给送及顶锻。夹紧机构同时起传导电流的作用，一般由结构相同的动静两部分夹具组成。夹具应有足够夹紧力和接触面积，以防止顶锻时工件的滑动。夹紧方式可为手动（小功率时）、气压或液压（中、大功率时）。送料与顶锻机构由动静夹具和加压机构组成，其形式则取决于采用的方法和自动化程度，常用的有弹簧顶锻、杠杆挤压、电动凸轮顶锻、气压、液压或气液压顶锻等。

7.2 电阻焊电源

阻焊电源的特点在于其低漏抗、低电压（二次侧空载电压 $<36V$ ）、大电流（可达 $10^3 \sim 10^5 A$ ）和以频繁的断续周期方式运行。此外，则是其二次侧电压的连续可调。

7.2.1 工频阻焊变压器工作原理

工频电阻焊变压器的外特性是指处于某一级工作时的二次侧电压与电流的关系，要求有下降特性，如图2-8-18所示。其功率调节是采用改变一次绕组匝数的办法来实现的。图2-8-19所示的DN2-200型点焊机就是以闸刀调整其八个一次绕组的串并联方式进行的。

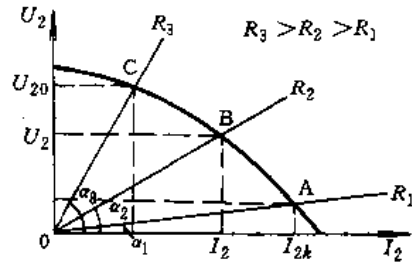


图2-8-18 点、缝焊机的外特性曲线

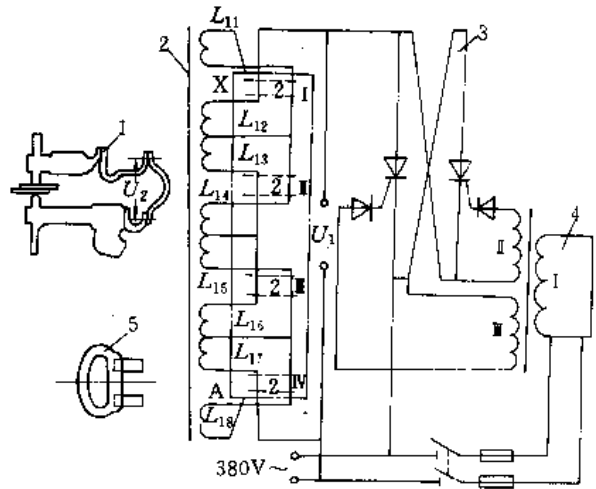


图2-8-19 DN2-200型点焊机变压器绕组接线原理

1—焊接回路 2—焊接变压器

3—晶闸管可控开关 4—同步控制器 5—闸刀

7.2.2 非工频阻焊电源的工作原理

通用工频阻焊电源难以满足各种特殊材料和工件的焊接要求，如厚板、不等厚或不等截面异种金属、细丝、镀锌板、铝及铝合金等。因此设计了多种形式的非工频阻焊电源，表2-8-18列出其中常用阻焊电源的工作原理。

表2-8-18 常用非工频阻焊电源工作原理

| 类别 | 工作原理 | 电气原理简图 |
|----------|--------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 电容储能阻焊电源 | 利用晶闸管控制的电容充放电特性，使工频交流电转换成低压脉冲电流。一次侧可并联阻尼二极管以消除振荡 | <p>T_1、T_2—变压器 R—电阻 C—极性电容器 V_1—阻尼二极管 V_2—放电晶闸管 V_3—充电晶闸管</p> |



(续)

| 类别 | 工作原理 | 电气原理简图 |
|------------|----------------------------------------------------------------------------------------|--------|
| 直流冲击波阻焊电源 | 利用低磁通密度铁心的阻焊变压器，使直流电输入一定时间，其二次侧就能感应出足够脉冲电流的原理。当脉冲电流足够大时，如立即切断电源，就会产生足够大的直流冲击波以完成一次焊接循环 | |
| 二次侧整流阻焊电源 | 采用单相全波、三相半波或三相全波整流电路使二次侧的交流电整为直流电以供焊接。一次侧以晶闸管开关电路控制其电流通断，并可利用移相作电网电压补偿与进行热量控制 | |
| 逆变(变频)阻焊电源 | 逆变频率低于弧焊逆变器，一般在400~1000Hz之间。由于阻焊要求大电流，故大容量晶闸管是关键，可采用多管并联方式或高耐压的模块。此类电源适宜于采用微机控制 | |

7.3 电阻焊控制系统

控制系统的控制对象主要是焊接电流 I 、电极间压力 p 和各环节时间 t ，称为阻焊三要素。

7.3.1 电阻焊控制方式

p 、 I 、 t 之间一般可建立起如图 2-8-20 和图 2-8-21 所示关系。图中虚线表示焊接结束时所增加的锻压力， S 为夹具位移。图 2-8-22 和图 2-8-23 分别表示带预热及回火电流脉冲的热循环方式和恒压调幅(电流)方式，分别适用于中厚低碳钢板、合金钢板及镀层钢板和一般热轧酸洗板的焊接。有色金属及其合金则可采用恒流(图 2-8-20)、马鞍形加压(图 2-8-23)方式。图 2-8-24~图 2-8-26 则系缝焊、连续闪光对焊和预热闪光对焊的基本循环方式。

7.3.2 点焊、缝焊控制器

在电压补偿型和恒流控制型中，已大量运用了微机技术。图 2-8-27 示出点焊(缝焊)控制器结构原理，图中虚线为电流反馈和电压补偿环节，电流调节是通过控制主回路晶闸管的导通角来实现的。

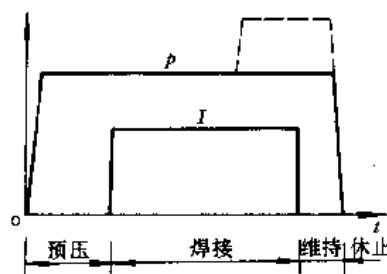


图 2-8-20 电阻点焊过程的 p 、 I 、 t 基本循环方式

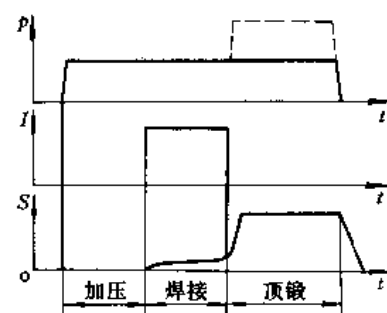


图 2-8-21 电阻对焊过程的 p 、 I 、 t 基本循环方式

注：摘自参考文献 [15] 35~96 页

(1) 电压补偿型控制器 分模拟式和数字式两种，后者可配用微机技术进行线性热量控制。

冶金工业出版社 请尊重作者版权



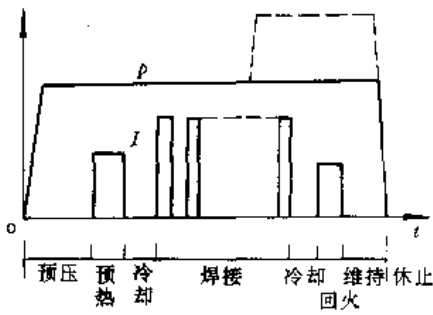


图 2-8-22 带预热及回火脉冲的热循环
注：摘自参考文献 [23] 2 页

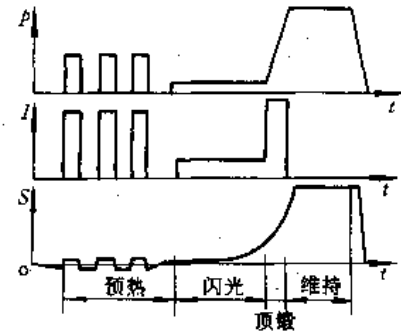


图 2-8-26 预热闪光对焊基本循环方式
注：摘自参考文献 [15] 35~96 页

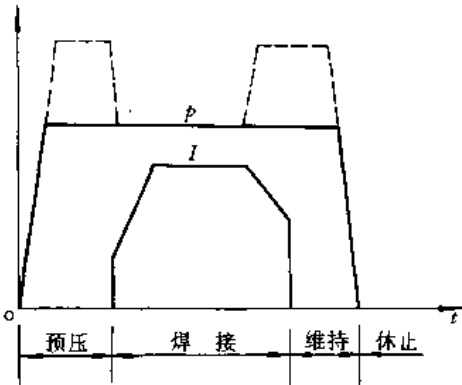


图 2-8-23 电流缓升缓降热循环

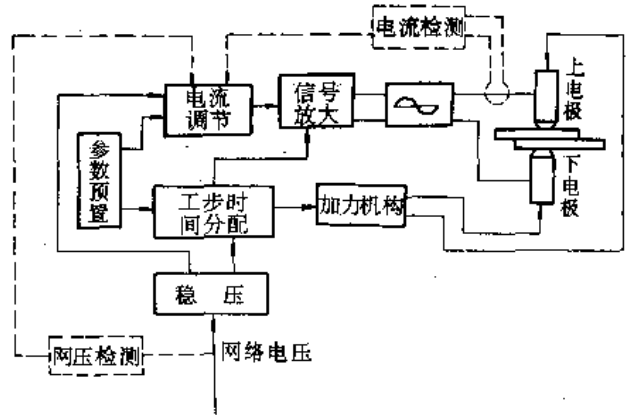


图 2-8-27 点焊控制器结构原理框图
注：摘自参考文献 [23] 3 页

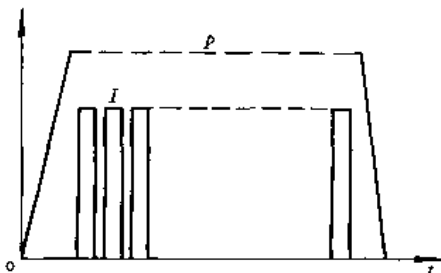


图 2-8-24 缝焊基本循环方式

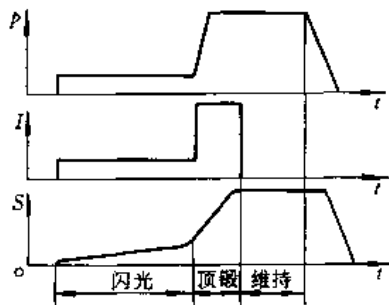


图 2-8-25 连续闪光对焊基本循环方式
注：摘自参考文献 [15] 35~96 页

(2) 恒流型控制器 适用于电网电压波动和回路阻抗变化较大的场合，但无法解决焊点间距较小时的分流问题。目前通用恒流型控制器几乎都使用了微机控制技术，具备线性热量控制功能。图 2-8-28 示出已

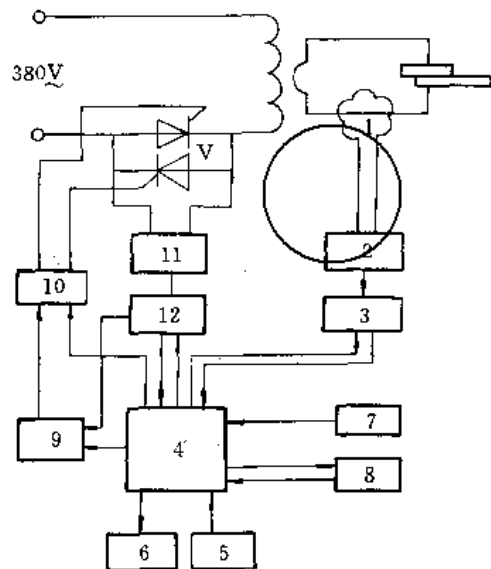


图 2-8-28 恒流点焊控制器原理框图
1—电流传感器 2—积分器 3—模数转换器
4—微处理器 5—键盘 6~8—存储器 9—定时器
10—触发电路 11—脉冲发生器 12—脉冲鉴别器
V—晶闸管

注：摘自参考文献 [23] 4 页
批量生产的恒流控制器原理框图。



第9章 常用低压电器

1 概述

低压电器一般是指电压500V以下,用来切换电路,以及控制、调节和保护用电设备的电器。按其动作方式,可分为手动电器和自动电器两类。按用途,又可分为控制电器和保护电器。实际上,不少电器既可作为控制电器,也可作为保护电器,没有明显的界限。

2 常用低压手动电器和熔断器

2.1 主令电器

主令电器又称主令开关,是专门发出动作指令的电器,用于切换控制电路中的电流,可以直接接通或断开控制电路,也可以通过中间继电器进行控制。常用的主令电器有按钮、主令控制器及行程开关(见本章3.4节)。

2.1.1 按钮

它是一种最简单的手动主令电器,操作人员通过按钮对控制电路直接发出指令。按钮的型号、结构和特点见表2-9-1。按钮的种类有积木式按钮和信号灯按钮,图2-9-1为双联按钮,图2-9-2为信号灯按钮。

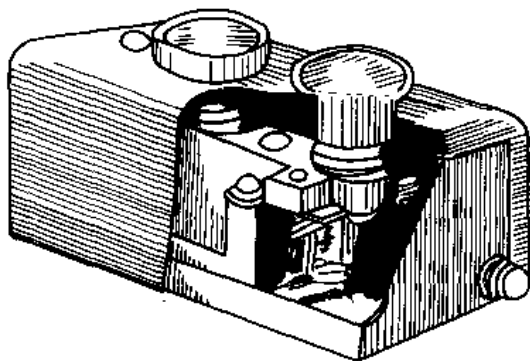


图 2-9-1 双联按钮

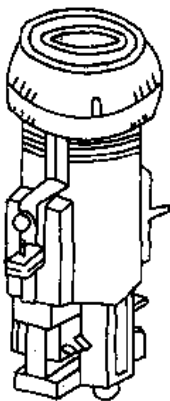


图 2-9-2 信号灯按钮

2.1.2 主令控制器

主令控制器是在控制电路中按预定程序切换电路的一种手动主令电器,分为不调整式和调整式两种。

图2-9-3a是不调整式主令控制器。凸轮片装在方轴上,转动方轴上的手柄,凸轮片也相应转动,凸角碰到动触点上的滑轮,在弹簧的作用下动触点与静触点迅速接通(或断开)。主令控制器有若干层凸轮片和动静触点对分别装于绝缘件内。由于凸轮形状不同或凸角位置不同,转动操作手柄的方轴使某些触点依次接通或断开,得到不同的触点状态。

调整式主令控制器可以按照需要来调整凸角和触点对的相对位置,使触点有不同分合状态。

主令控制器的符号见图2-9-3b。图中为触点分合情况,表示主令控制器向前(或向后)各有1、2、3、4、5五个操作位置,0表示手柄在中间位置(零位),黑点“·”表示手柄在此位置时触点接通。

常用主令控制器的型号有LK1、LK5等系列。

2.2 刀开关

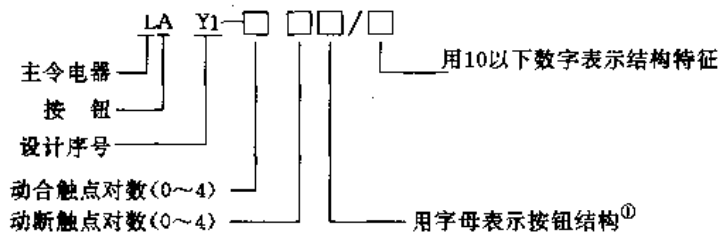
刀开关是最简单的一种手动控制电器。图2-9-4是胶盖瓷底刀开关的结构和它的符号。它的型号、结构特点和适用范围见表2-9-2。



表 2-9-1 按钮的型号、结构和特点

| 名称 | 型号 | 结构示意图及其符号 | 特 点 |
|------|---------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 控制按钮 | LA10 LA18 LA19 LA20 LAY1 等系列 | <p>a) 结构 b) 图形符号和文字符号</p> <p>1—动触点 2—静触点 3—复位弹簧 4—按钮帽</p> | <p>图 a 所示，它的动触头和静触点都是桥式双断点式，上面一对组成动断（常闭）触点，下面一对为动合（常开）触点。图 b 是它的图形符号和文字符号。手掀按钮帽时，动断触点断开，动合触点闭合。手松开按钮帽时，在复位弹簧作用下，使动触点复位</p> |
| 微动开关 | LXW 系列 | <p>a) 结构 b) 图形符号</p> <p>1—弹簧片 2—推杆 3—静触点 4—动触点</p> | <p>一般外形很小，推动杆行程很短，触点能够快速接通和断开，其结构和触点如右图 a、b 所示</p> |

注：按钮开关型号说明举例



① 结构型式用汉语拼音字母表示：K—开启式，H—保护式，S—防水式，F—防腐式 J—紧急式（即蘑菇头式），Y—钥匙式，X—旋钮式，D—带指示灯式。

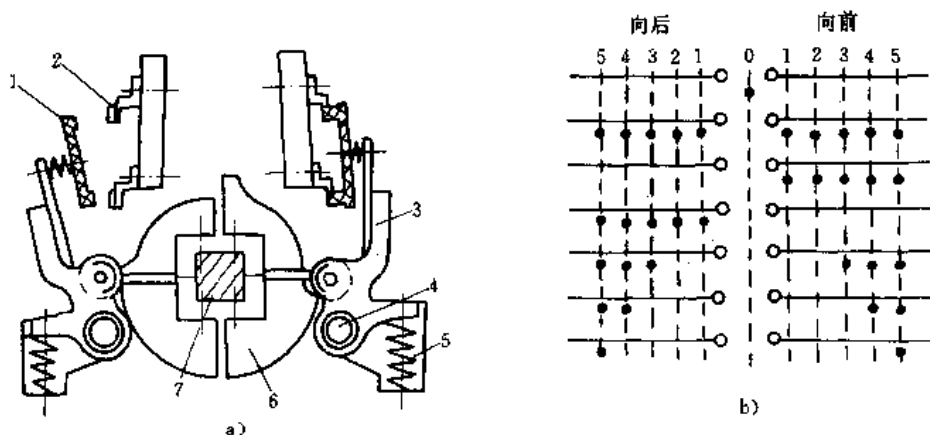


图 2-9-3 不调整式主令控制器
1—动触点 2—静触点 3—支架 4—支架轴 5—合闸弹簧 6—凸轮 7—方轴



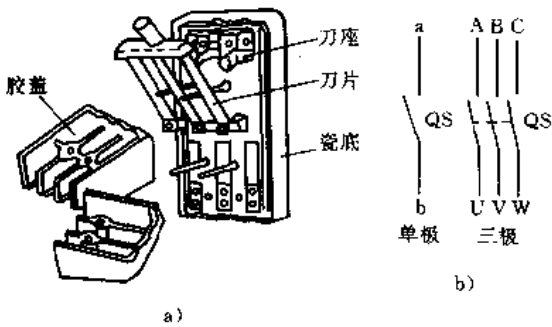


图 2-9-4 刀开关的结构和符号
a) 结构 b) 图形符号和文字符号

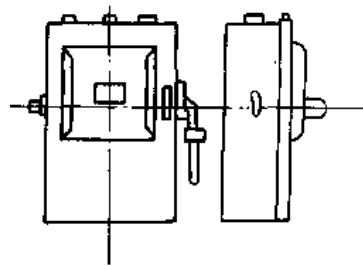
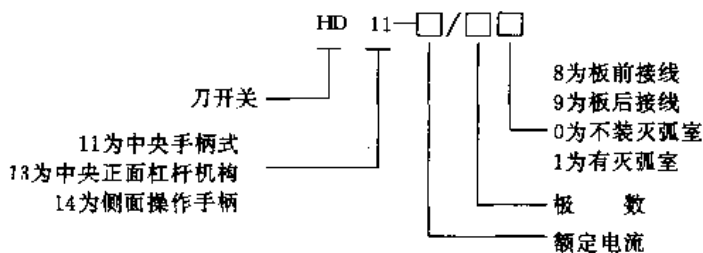


图 2-9-5 铁壳开关外形图

表 2-9-2 刀开关的型号、结构特点和适用范围

| 名称 | 型号 | 结构特点 | 适用范围 |
|---------|--------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|
| 胶盖瓷底刀开关 | HK 型系列 (包括 HK1 和 HK2) | 开关结构是由瓷底、刀座、刀板, (有单极、双极、三极几种) 及胶木罩盖组成, 在瓷底板接线座与接线片之间可用熔丝连接, 所以又称负荷开关。由于刀板与刀座分断速度慢, 灭弧困难, 适用于切断小电流。额定电流有 10、15、30、60A 等几级 | 适用于手动不频繁地接通或切断直流 (电压在 440V 以下) 或交流 (电压在 500V 以下) 的负载电路。主要用于工矿、企业、机关、学校的电气装置及农村电力灌溉和照明等各种电气设备中 |
| 铁壳开关 | HH 型系列 (包括 HH3 和 HH4) | 它是由刀开关、熔断器、速断弹簧等组成。装置在铁壳内, 外形图见图 2-9-5。速断弹簧用以提高刀片切断速度, 使电弧熄灭快, 从而延长了开关寿命。额定电流有 15、30、60、100 及 200A 等几级 | 适用于工矿企业、农村电力排灌和照明等电气设备, 也可作为交流异步电动机的不频繁地直接起动和切断电源用 |
| 开启式刀开关 | HD 型系列和 HS 型系列 | HD 型系列为不带熔断器的单投开关。HS 型系列为不带熔断器的双投开关。额定电流有 40、200、600、1000A 等几级 | 用于工矿企业配电设备中, 在交流 380V (50Hz), 直流 440V 的电路中, 作为不频繁接通和切断或隔离电源用 |
| 熔断器式刀开关 | HR 型系列 (包括 HR3 型系列) | HR 系列开关是带 RT0 填料熔断器和刀开关的组合电器, 具有 RT0 填料熔断器和刀开关的基本性能。额定电流有 100、200、400、600A 等几级 | 适用于工矿企业电网和电动机电路中, 作为电源开关和隔离开关, 并作为电缆导线及用电设备的过载和短路保护。适用于各种结构的开关板及电力箱 |

注: 型号说明举例:



2.3 转换开关

1. 组合开关 实际上也是一种刀开关,不过它的刀片是转动的,由数层动触片和静触片组装而成,其结

构如图 2·9-6a 所示。当手柄转动时,使转动轴上的一些动触片与静触片接通或断开,故组合开关可以同时切换多条电路。

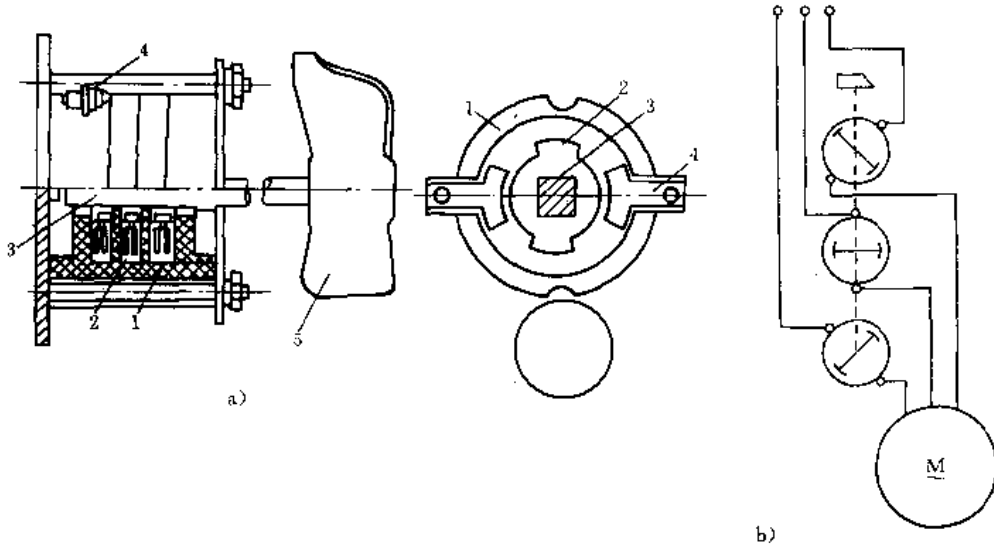


图 2-9-6 组合开关

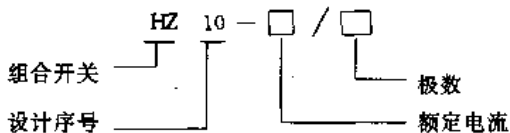
a) 结构 b) 转换开关起动电动机的接线图

1—绝缘盒 2—动触片 3—绝缘方轴 4—静触片 5—手柄

盒式转换开关还可作为 5kW 以下笼型电动机的直接起动开关,如图 2·9-3b 所示接线图。

常用型号有 HZ10 型系列

型号说明举例:



2. 万能转换开关 又称控制开关,主要用于控制高压油断路器、空气断路器等操作机构的合闸和跳闸,开关板中线路的换接和电流表、电压表的换相测量等,也可用于控制小容量电动机的起动、换接和调速。

图 2·9-7a 为万能转换开关的外形。它的正面为操作手柄,与手柄连接的转轴上装有数层接线盒,每层接线盒有四个静触点(或静触片)和一个动触点(或动触片)。静触点分布在接线盒的四角,盒外有接线用的四个引出端。根据动触点的凸轮与弹簧片的形状及在转轴上初始位置的不同,接线盒构成不同的形式,

图 2·9-7b 所示接线盒型式为 1a, 4, 6a, 40, 20, 20 型。接线盒 1a, 4, 6a 型动触点紧固在轴上,随轴一起转动,40 型动触点在轴上有 45°的自由行程(即动触点与轴有一定角度的相对运动),20 型动触点在轴上有 90°的自由行程。

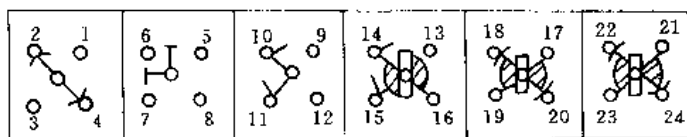
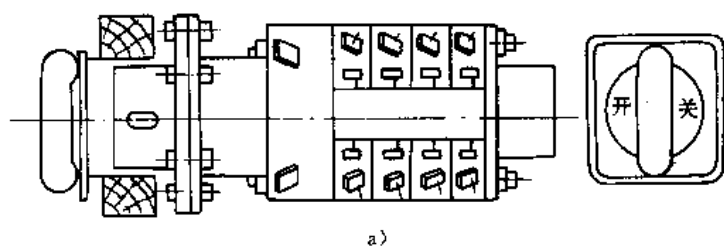
接线盒内触点的通断是随着操作手柄所处位置不同而改变的。例如电气设备的断路器,在手柄操作过程中其触点回路的接通和断开的状态见图 2·9-7c 所示。

图 2·9-7d 也表示各触点回路的通断情况,图上“o”代表静触点,每一条竖虚线表示手柄的位置。如手柄转在一个位置上,虚线位置的那个触点的下面“·”点,表示该回路接通。图中表示该开关有六个不同位置,14 对静触点,水平箭头指示该开关的复归位置。

万能转换开关有新型号 HZ5 系列,可替代旧型号 LW 系列。

○ 手柄操作过程有“跳闸后”,“预备合闸”,“合闸操作”,“合闸后”,“预备跳闸”,“跳闸操作”六种位置。





| 接线盒形式 | | | 1a | 4 | 6a | 40 | 20 | 20 | | | | | | | | |
|-------|-------|------|-----|-----|-----|-----|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 静触点号 | | | 1-3 | 2-4 | 5-8 | 6-7 | 9-10 | 10-12 | 10-11 | 13-14 | 14-15 | 13-16 | 17-19 | 18-20 | 21-23 | 22-24 |
| 回路标号 | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |
| SS 位置 | 位置符号 | 手柄位置 | | | | | | | | | | | | | | |
| 跳闸后 | | | - | × | - | - | - | - | × | - | × | - | - | × | - | × |
| 预备合闸 | H_1 | | × | - | - | - | × | - | - | × | - | - | - | - | - | - |
| 合闸操作 | H_2 | | - | - | × | - | - | × | - | - | - | × | × | - | × | - |
| 合闸后 | H | | × | - | - | - | × | - | - | - | - | × | × | - | × | - |
| 预备跳闸 | H_1 | | - | × | - | - | - | - | × | × | - | - | - | - | - | - |
| 跳闸操作 | H_2 | | - | - | - | × | - | - | × | - | × | - | - | × | - | × |

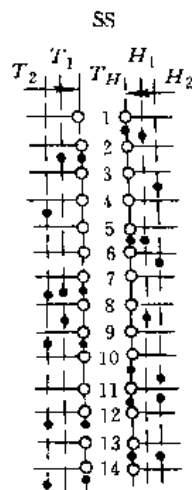


图 2-9-7 万能转换开关示意图

a) 结构 b) 接线盒层 (从正面看) c)、d) 各静触点的通断情况
“×” — 接通 “—” — 断开

2.4 熔断器与熔体

熔断器是电路中最常用的保护电器，它串接在被保护的电路中，当通过过载电流或电路发生短路故障时，便有很大的电流通过熔断器，熔断器中的熔体（熔丝或熔片）发热后自动熔断，把电路切断，起保护线路和电气设备的作用。

熔断器的种类型号、结构和熔体特性见表 2-9-3。

3 常用低压自动电器

3.1 自动开关

自动开关又称自动空气断路器，用于低压（500V

以下）的交流和直流供电线路中。当电路发生过载、短路及失压时，它能自动切断电路。

3.1.1 自动开关的工作原理

图 2-9-8 示出自动开关的外形和工作原理。如图 2-9-8b 所示，主触点 2 是由手动的操作机构（手柄）来闭合的。开关的脱扣机构是一套连杆装置 3。当主触点闭合后就被锁钩 4 锁住，若电路发生故障，脱扣机构就在有关脱扣器的作用下将锁钩脱开，于是主触点在释放弹簧 1 的作用下迅速分断。过流脱扣器 5 和欠压脱扣器 6 都是电磁铁，作为电路的严重过载或短路保护和失压保护之用。



表 2·9-3 熔断器的种类型号、结构和熔体特性

| 名称 | 型号 | 结构图 | 结构说明 | 熔体特性 |
|--------|---------------------|----------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 插入式熔断器 | RC1A型系列 | <p>a) 结构 b) 图形符号和文字符号 1—动触点 2—熔体 3—瓷插件 4—静触点 5—瓷底座</p> | 由瓷底座和瓷插件(其中有熔体)组成 | 熔体是用电阻率较高的易熔合金制成(如铝锡合金丝和青铝合金丝等)熔丝或熔片。熔体的熔断特性见下图 |
| 螺旋式熔断器 | RL1型系列 | <p>1—底座 2—熔断管 3—瓷帽</p> | 由瓷底座、瓷帽和熔断管组成。熔体装在熔断管内,当熔体断开后,熔断管有一红点自动跳出作为指示 | |
| 管式熔断器 | RM0型系列 | <p>1—熔断管 2—弹簧夹 3—底座</p> | 由底座和熔断管组成。熔体熔断时,纤维管内壁受热产生气体,使电弧很快熄灭 | 从熔断器的熔断特性可见,当通过的电流 $I/I_n \leq 1.25$ 时,熔体可长期工作;当 $I/I_n = 2$ 时约在 30~40s 后熔断;当 $I/I_n \geq 10$ 时,认为熔体瞬时熔断。所以电路发生短路时,短路电流使熔体瞬时熔断 |
| 填料式熔断器 | RT0型系列、RS型系列和RLS型系列 | <p>1—瓷底座 2—弹簧夹 3—管体 4—熔体</p> | RT0型系列管体装有石英砂,以增强灭弧能力,用于短路电流较大场合。RS和RLS型系列快速熔断器的熔断时间短,常保护过载能力小的晶闸管等半导体元件 | |



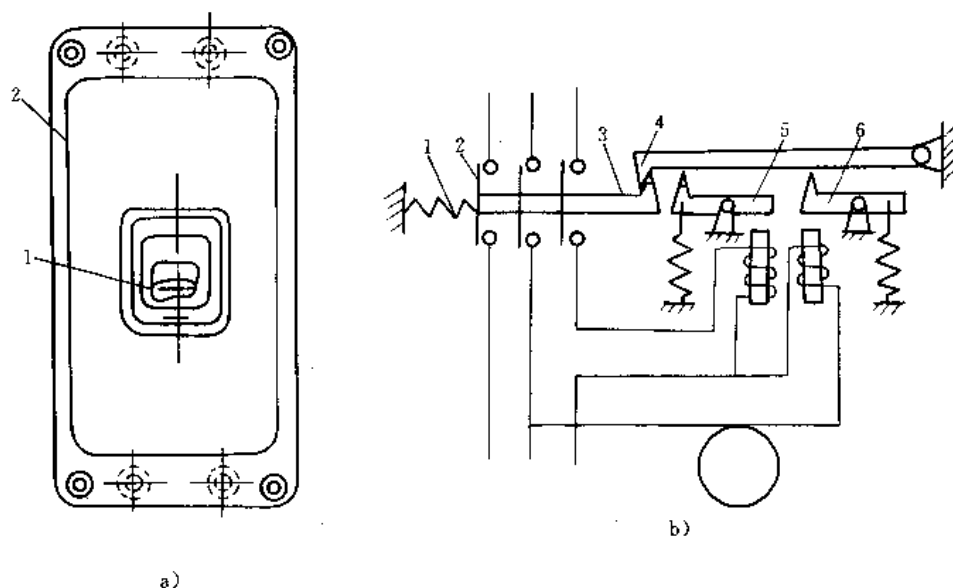


图 2-9-8 自动开关

a) 外形
1—手柄 2—外壳

b) 自动开关的工作原理
1—释放弹簧 2—主触点 3—连杆 4—锁钩
5—过流脱扣器 6—欠压脱扣器

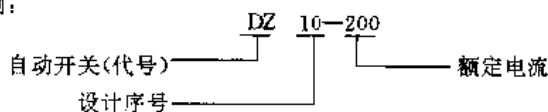
3-1-2 自动开关的种类和型号

自动开关的种类、型号和结构特点见表 2-9-4。

表 2-9-4 自动开关种类、型号和结构特点

| 名称 | 型号 | 结构特点 |
|-----------|-----------------|--------------------------------------------------------------------------|
| 塑料外壳自动开关 | DZ10 系列 | 它是全封闭的塑料外壳，主要由绝缘底座、盖、灭弧室、触点、操作机构和脱扣装置等部分组成 |
| 塑料外壳自动开关 | DZ5 系列 | 它有胶木外壳，50A 等级为手扳操作；20A 等级在外壳外有绿色合闸按钮和红色分闸按钮 |
| 漏电自动开关 | DZ15L 系列 | 主要由零序电流互感器、漏电脱扣器及带有过载和短路保护的自动开关组成，能起到漏电脱扣触电保护的作用 |
| 塑料壳自动开关 | DZ12 系列 | 分单极、二极、三极三种，体积小，结构新，主要用于照明配电装置中，作为照明线路过载保护、短路保护以及换接线路之用 |
| 塑料壳断路器 | H 系列 | 断路器的脱扣器是由瞬时动作的电磁脱扣器和延时动作的热脱扣器等组成，分别用作线路的短路和过载保护。250A 以上的断路器的电磁脱扣动作电流是可调的 |
| 框架式自动空气开关 | DW10 DW15 系列 | 有电动及手动二种操作方式，有过电流、失压及电磁脱扣装置。主电路有二极和三极两种结构，并带有数量较多的辅助触头，主要用于低压配电装置中 |

注：DZ 系列型号说明举例：



3.2 接触器

接触器是利用电磁吸力来操作的电磁开关。常用来直接控制主电路（主电路是指电气线路中强电流通过的部分，如电动机电路等）的接通或断开。

3.2.1 接触器的结构和工作原理

接触器主要是由电磁机构、触点系统和灭弧装置三部分组成，图2-9-9示出它的结构、图形符号和文字符号。

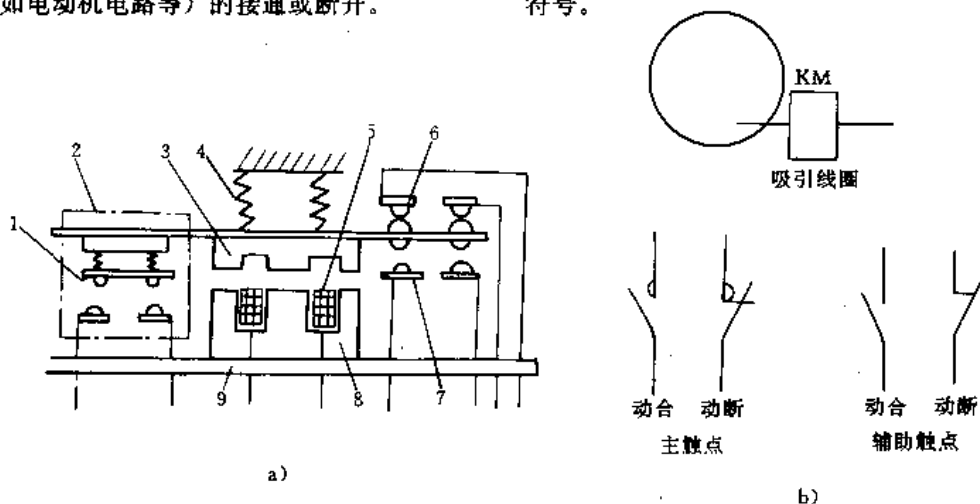


图2-9-9 接触器

a) 结构 b) 图形符号和文字符号

- 1—动合主触点 2—灭弧罩 3—衔铁 4—复位弹簧 5—吸引线圈
6—动断辅助触点 7—动合辅助触点 8—固定铁心 9—底板

接触器的工作原理：当电磁铁的线圈通电后，电磁吸力克服弹簧的阻力，吸引衔铁使磁路闭合。衔铁运动时，通过机械机构使动合（常开）触点（即线圈不通电时，这对触点是分开的）闭合，而动断（常闭）触点打开。电磁铁的线圈断电后，依靠弹簧的作用复位，使触点又恢复到通电前的状态。

接触器按电流种类分为交流接触器和直流接触器两类，交流接触器用于通断交流负载，直流接触器用于通断直流负载。这两类接触器由于电磁机构不同，特点也不一样（参见本篇第7章第2节交直流电磁铁）。

一般交流接触器的吸引线圈刚接入电源时，线圈的电流值是衔铁闭合后线圈电流值的10倍左右，所以不适用于频繁操作的控制电路（约每小时600次以下）。而直流接触器吸引线圈的工作电流是直流电，吸引线圈没有因起动电流而过热的问题，所以直流接触器适用于较频繁操作的控制电路。

此外，目前发展有半导体式接触器，它是用晶闸管的无触点开关（见本卷第3篇）。

3.2.2 接触器的型号和结构特点

接触器的型号、结构特点和适用范围见表2-9-5。

表2-9-5 接触器的型号、结构特点和适用范围

| 名称 | 型号 | 结构特点 | 适用范围 |
|-----------|-------------------|--------------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| 交流接触器 | CJ0、CJ10系列 | 其额定电压为交流380V，额定电流最大为150A。CJ0系列的体积、重量等大于CJ10系列 | 一般用途的交流接触器 |
| 直流操作交流接触器 | B型系列 (BE/BC系列) | 体积小，重量轻，能耗低，而且能安装多种附件，以扩大使用功能。额定电压为660V，额定电流370A | 新型交流接触器，可以取代CJ0、CJ10系列，可供远距离接通和断开电力线路或频繁操作交流电动机之用 |



(续)

| 名称 | 型号 | 结构特点 | 适用范围 |
|-------------|---------------|------------------------------------------------------|-----------------------------------------|
| 大电流交流接触器 | CJ20 型系列 | 体积小,重量轻,寿命长,能耗低,其额定电压 660V (派生产品可达 1140V),最大电流为 630A | 新型交流接触器,用来接通和断开大电流的交流负载电路 |
| 小容量、辅助交流接触器 | STB 和 STH 型系列 | 额定电流 9~32A。辅助接触器有较多数量的触点组,功能相当于中间继电器,但触点容量大于一般中间继电器 | 新型小容量接触器,适用于车床电气控制和控制小容量的交流电动机 |
| 交流可逆接触器 | NAR1 系列 | 由两个三极接触器组合而成,内部有可靠的机械联锁,不会出现同时吸合 | 适用于控制正、反转交流电动机 |
| 直流接触器 | CZ0 型系列 | 直流接触器的代表产品,额定电压 440V,额定电流 600A | 适用于远距离接通和断开直流电力电路,并适宜于频繁启动、停止和反转控制直流电动机 |

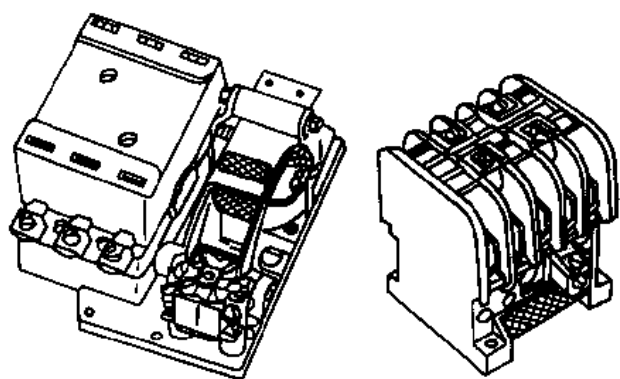
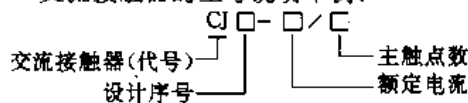


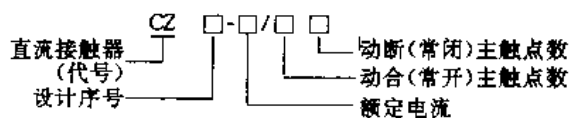
图 2·9-10 交流接触器的外形

交流接触器的外形见图 2·9-10。

交流接触器的型号说明举例:



直流接触器的型号说明举例:



3·3 起动器

3·3·1 起动器的种类和结构特点

起动器是对电动机作起动和停止用的一种控制电

器,并且具有过载保护。目前,国内生产有磁力起动器、星形(Y)-三角形(Δ)起动器、自耦减压起动器等几种,见表 2·9-6。

3·3·2 起动器电路

1. 磁力起动器电路 磁力起动器是将接触器和热继电器组装在一个壳内,可以用按钮遥控的一种成套电器,直接用来对电动机进行起动控制和正反转控制。

a. 点动和单向起动器电路 用一个交流接触器和一个热继电器组成的装置称为不可逆磁力起动器。

点动电路如图 2·9-11 所示。当闸刀开关 QS 合上,撤起动按钮 SS 时,接触器线圈 KM 得电,通过电磁铁的作用将主触点 KM-1 吸合,电动机获电而转动。松开起动按钮 SS 时,接触器的磁力消失,在弹簧力作用下将主触点 KM-1 断开,电动机就停止转动,这种电路称为“点动”电路,常用于快速行程、地面行车、机床调整和试车等场合。

如果需要电动机连续运转,只要将接触器的一个辅助触点 KM-2 并联在起动按钮 SS 的两端,如图 2·9-11 虚线所示。按起动按钮 SS 时,接触器线圈 KM 通电而吸合,它的三个主触点 KM-1 闭合,电动机就起动运转;同时,与 SS 并联的动合辅助触点 KM-2 也闭合,使 KM 自锁。这样,当松开 SS 时,接触器线圈 KM 仍能通电,使其触点保持闭合,而继续获得供电,电动机可处于连续运转状态。如果撤按钮 ST,接触器线圈就失电,动合触点断开,电动机停止运转。

此星公司制作 请尊重重作 者版权



表 2-9-6 起动器的种类、型号、结构特点和适用范围

| 名称 | 型号 | 结构特点 | 适用范围 |
|----------------------|--------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 磁力起动器 | QC10 QC12 系列 | 它是由交流接触器和热继电器组合而成的直接起动器，有失压和过载保护的作用 | 用于交流电压 500V 以下及额定电流 150A 以下的电力电路中，可直接控制三相异步电动机的起动、停止和可逆运转 |
| 综合磁力起动器 | QZ73 系列 | 它是由交流接触器、热继电器和熔断器等组成，具有短路保护、过载保护和欠压保护 | 用于交流电压 500V，额定电流 25A 以下的电力电路中，直接控制三相异步电动机的起动和停止 |
| 电磁起动器 | MSB 系列 | 它是由 B 系列交流接触器和 T 系列热继电器及有关附件组成。产品可以装配按钮，亦可不带热继电器。起动器分不可逆及可逆两种 | 用于交流电压 660V 以下及额定电流 475A 以下的电力电路中，可控制三相异步电动机的起动、停止和可逆运转 |
| 自动星形 (Y)-三角形 (Δ) 起动器 | QX3 | 每台起动器装有三个交流接触器，一个三相热继电器和一个时间继电器。在起动过程中，时间继电器能自动将电动机的定子绕组作 Y-Δ 换接起动 | 主要用于交流电压 500V、功率 30kW 以下的三相异步电动机，作 Y-Δ 换接起动和停止之用 |
| 低压起动控制箱 | XJ1 系列 | 它装有三个交流接触器和一个三相热继电器。45kW 以下的起动器为自动控制方式，55kW 以上的有手动和自动二种控制方式 | 用于交流电压 660V/380V (Y/Δ 接法)、功率为 11~190kW 三相异步电动机的减压起动。对一般电动机 (有六个出线头) 可作 Y-Δ 换接起动，若定子绕组有 9 个出线头 (有抽头)，可作延边三角形起动 |
| 自耦减压起动器 | QJ10 XJ01 系列 | 它装有短时运行的自耦变压器 (减压用) 及过载欠压保护装置。自耦变压器有 65% 和 80% 两档抽头，分别使电动机起动电流降低到直接起动时的 0.65 和 0.8，起动转矩也要下降到直接起动时的 0.42 和 0.64 倍 | 用于交流电压 380V、功率为 11~300kW 的三相笼型电动机的减压起动。一般用在因电压或负荷原因不适合 Y-Δ 换接起动的场合。XJ01 系列有手动 (75kW 以下) 和自动 (100kW 以上) 两种控制方式 |

作用。

b. 正反转起动器电路 用两个交流接触器和一个热继电器按图 2-9-12 组成的装置，称为可逆磁力起

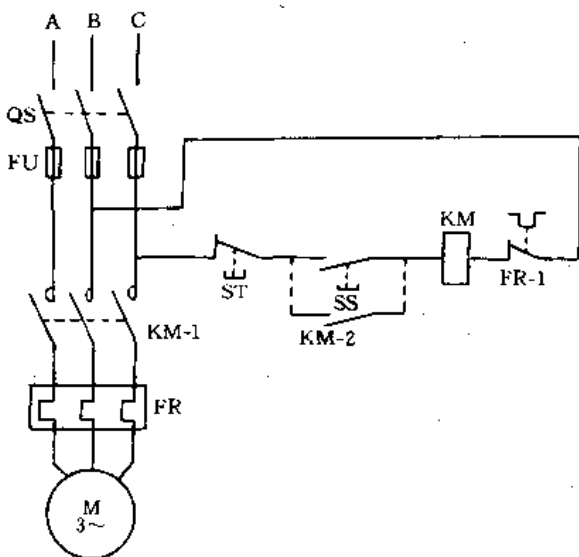


图 2-9-11 点动和单向起动电路

电路中熔断器 FU 起短路保护作用；热继电器 FR 起过载保护作用；接触器 KM 还可以起零 (欠) 压保护

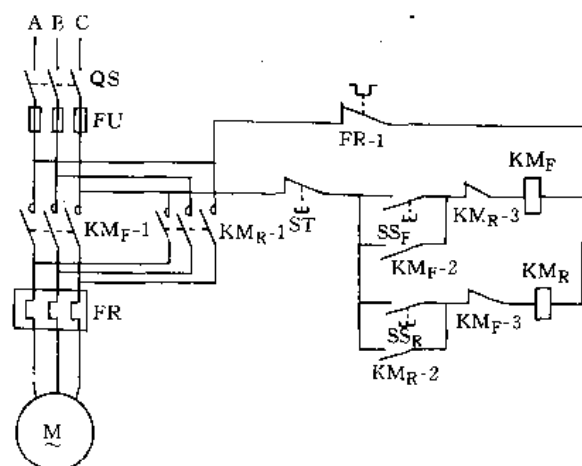


图 2-9-12 正反转起动器电路



动器。

它是利用两个接触器的动断辅助触点 KM_F-3 和 KM_R-3 作连锁保护的可逆起动电路。当 KM_F 动作后，将动断触点 KM_F-3 断开，这时如果按 SS_R ，则 KM_R 不能吸合；同理，如果 KM_R 动作， KM_F 也不会吸合。这样就能避免因 KM_F 、 KM_R 同时吸合所造成的电源线间短路。

可逆磁力起动器还可以利用复合按钮作连锁保护，见图 2·9-13。当 KM_F 起动后，如果再按 SS_R ， SS_R 必须先断开其动断触点，使 KM_F 失电而释放。这时 SS_R 的动合触点闭合， KM_R 吸合，电动机即向反方向运转。同时采用以上两种方法，则连锁效果更好，工作更可靠。

2. 星形(Υ)-三角形(Δ)起动器电路 星形(Υ)-三角形(Δ)起动器有三个交流接触器，一个三相热继电器，见图 2·9-14a、b，当撤下 SS_Y 时， KM 与 KM_Y 吸

合，电动机接成Υ形起动，待转速增加到一定程度，再撤下 SS_Δ ，此时 KM_Y 释放， KM_Δ 吸合，电动机绕组即由Υ形改接成Δ形，使电动机投入正常运转。图中 KM_Y 与 KM_Δ 不能同时吸合，必须在电路中采用连锁措施。

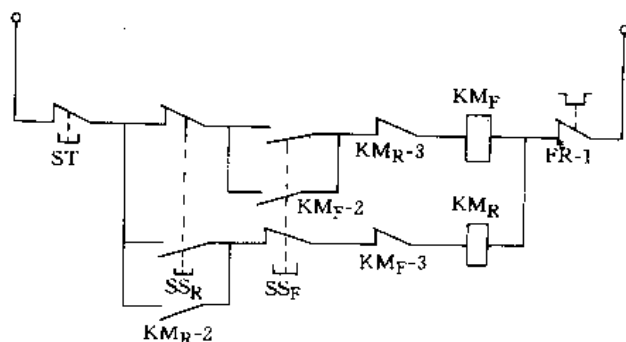


图 2·9-13 双重连锁的起动电路

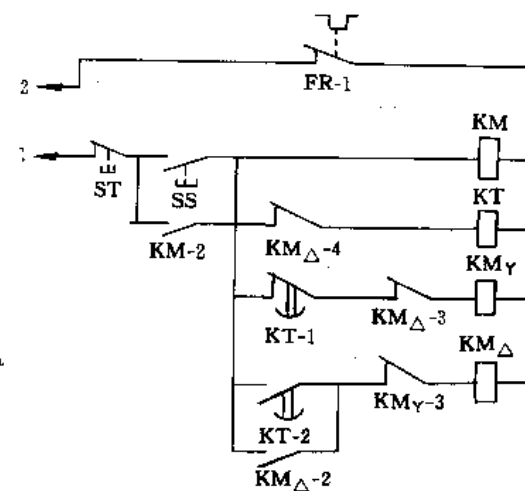
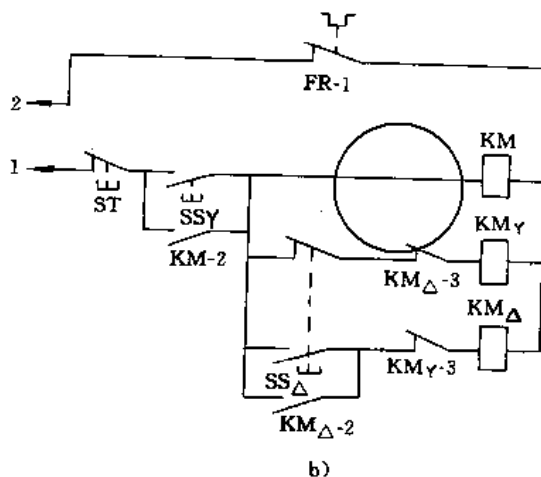
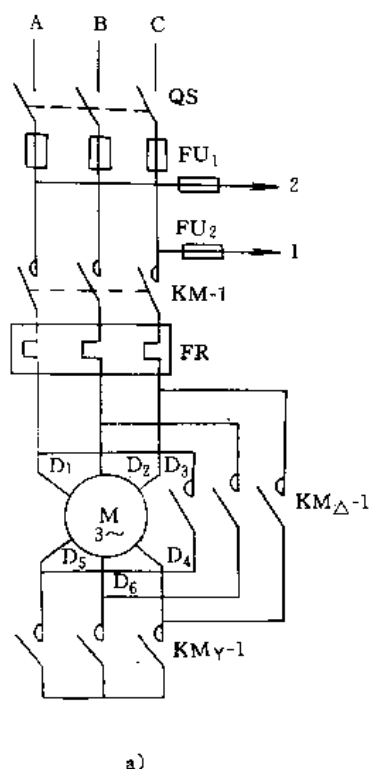


图 2·9-14 星形(Υ)-三角形(Δ)起动器电路 a) 主电路 b) 按钮操作 c) 时间继电器操作

图 2·9-14 星形(Υ)-三角形(Δ)起动器电路

a) 主电路 b) 按钮操作 c) 时间继电器操作



也有用时间继电器操作Y-△换接起动,见图2·9-14c。用时间继电器的延时触点KT-1代替SS_△按钮,使绕组由Y形自动改接成△形。时间继电器KT的动作时间可根据需要的起动时间来整定,它与电动机的容量及起动的负载情况有关。

3. 串联电阻或电抗器起动电路 当电动机额定电压为220/380V(△/Y)时,若电源电压为380V,电动机正常工作时为Y形接法,是不能用Y-△换接方法作降压起动的,这种电动机可用串联电阻或电抗器起动。

图2·9-15b为按钮操作,当KM₁动作时,电动机

串联电阻R接到电源上,因R上有起动电流压降,所以加到电动机上的电压及起动电流就降低了。待KM₂动作时,其触点将电阻R短接,使电源电压直接加到电动机上,于是电动机进入正常运行。

图2·9-15c为时间继电器操作,它是用时间继电器KT代替按钮SS₂。当按下按钮SS₁后,KM₁通电动机,KT也通电。经过事先整定的延时时间后KM₂通电,电动机投入正常运行。此时,KM₂有自锁触点维持通电,同时KM₂-3常闭触点断开,将KT与电源断开。

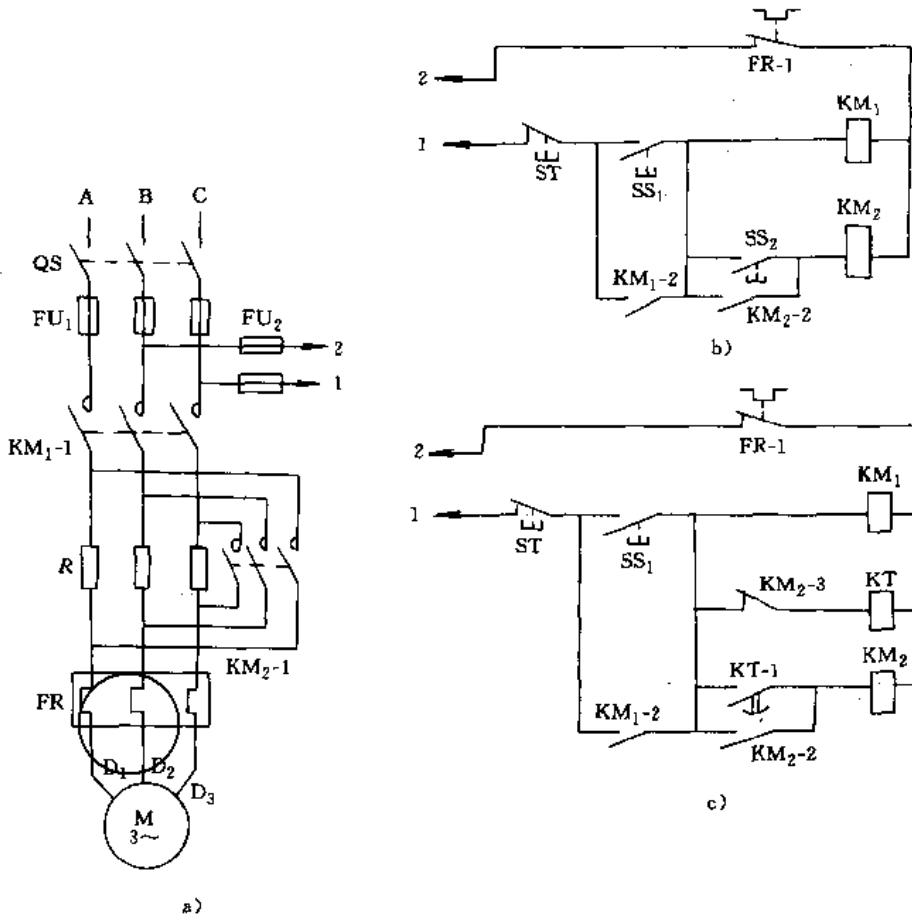


图2·9-15 串联电阻的起动器电路

用电阻作降压起动的缺点是减小了起动转矩,同时在电阻上功率损耗也较大。

4. 自耦减压起动器电路 在电源电压为380V时,对于220/380V较大容量的笼型电动机,不能用Y-△换接方法起动,如果采用串联电阻起动,则其体积大,又不经济,此时可采用自耦变压器(补偿起动器)降压起动,见图2·9-16a。

图2·9-16b是用按钮操作的,当按下SS₁时,接触

器KM₁通电,电动机在降低电压情况下起动。经过一定时间后,按下SS₂,使KM₁断电,而KM₂接通,电动机在全电压下运行。KM₁与KM₂不能同时吸合,必须相互联锁。

图2·9-16c是用时间继电器起动的,当按下SS时,KM₁通电,电动机降压起动,同时时间继电器KT动作,KT-1瞬时闭合。经过若干时间后,常闭延时触点KT-2断开,接触器KM₁断电,同时常开延时闭合



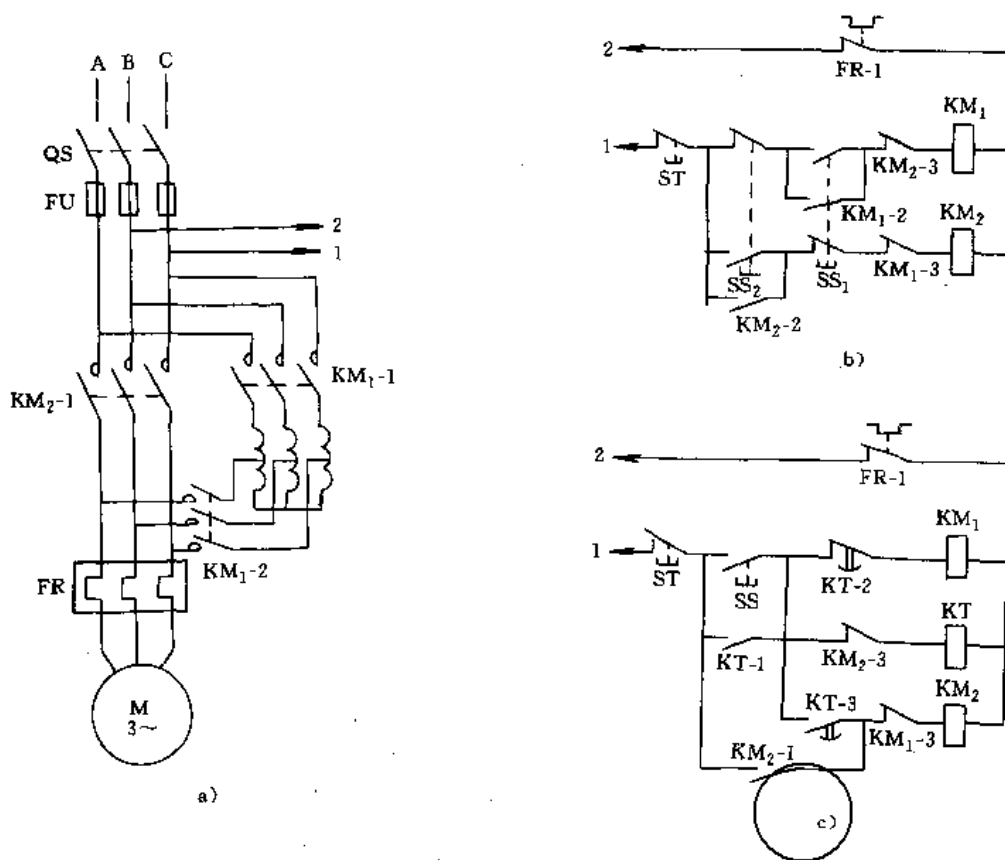


图 2-9-16 自耦变压器起动电路

触点 $KT-3$ 闭合,使 KM_2 接通,电动机在全压下运行。起动所需的延时时间可以由时间继电器 KT 本身调节。

5. 绕线转子异步电动机三级起动器电路 图 2-9-17 是绕线转子异步电动机用时间继电器的三级起动器电路,当合上电源闸刀 QS ,并按下起动按钮 SS 后,线路接触器 KM 动作,常闭触点 $KM-1$ 闭合,接通电动机三相电源,这时转子回路的电阻全部接进,电动机开始起动。同时常开辅助触点 $KM-3$ 闭合,接通时间继电器 KT_1 的电路,常开延时触点 KT_1-1 经过一定延时后闭合,接通接触器 KM_1 的电路,常开触点 KM_1-1 闭合,将起动电阻 $1R$ 短接,电动机转矩加大,转速加快上升。时间继电器 KT_2 和 KT_3 依次使接触器 KM_2 和 KM_3 动作,将起动电阻 $2R$ 和 $3R$ 全部短接,电动机进入正常工作状态。

在起动完毕后,除接触器 KM 和 KM_3 外,其它接触器和时间继电器都可以释放,所以接触器 KM_3 有一个常开辅助触点 KM_3-2 起自锁作用,还有一个常闭辅助触点 KM_3-3 ,在接触器 KM_3 工作后可以使 KT_1 、

KT_2 、 KT_3 、 KM_1 和 KM_2 全部释放,以节省电能消耗。

绕线转子异步电动机用转子电路串联电阻的方法起动,不仅提高了起动转矩,还可减小起动电流。也可用转子电路中串联电阻的方法进行调速。但由于起动电阻都是按照短时运行条件设计的,因此,绝不允许用它来代替调速电阻。

6. 频敏变阻器的起动器电路 频敏变阻器实质上是一台三相带铁心的电抗器,但它的铁心是不绝缘的铸铁或钢板叠成的(见图 2-9-18a),它相当于一个等值阻抗,且阻抗随频率而变化。在异步电动机起动过程中,由于等值阻抗随转子电流频率减小而下降,所以可达到自动变阻的目的。频敏变阻器的型号有 $BP1$ 、 $BP2$ 、 $BP4$ 等三个系列。

图 2-9-18b 示出频敏变阻器在绕线转子电动机电路中的接线位置。在刚起动时,转差率 $S=1$,转子电流频率 $f_2=f$ 最大,等值阻抗也最大,相当于转子串联了一个很大的起动电阻,使电动机产生较大的起动转矩。转子转动后, $S<1$,转子电流频率逐渐降低 $f_2=Sf$,等值阻抗减小,相当于起动电阻自动减小。所以在起



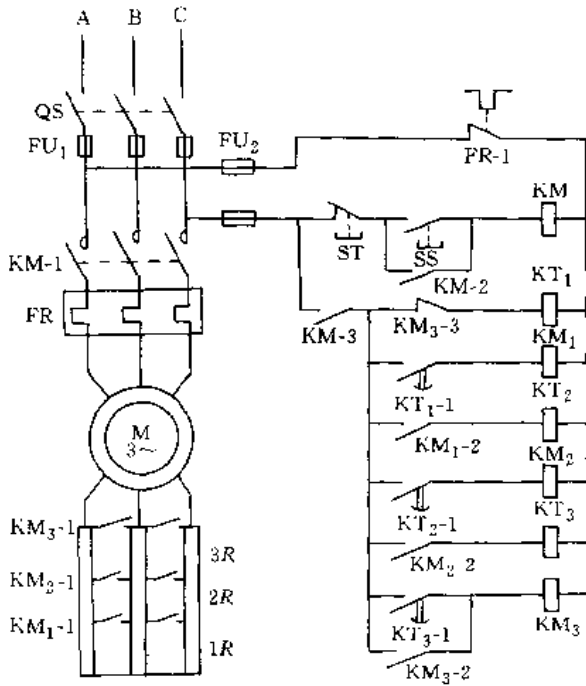


图 2·9-17 绕线式异步电动机三级起动器电路

动过程中,不必对频敏变阻器进行操作,只有当起动完毕后,才把它短接,从转子电路中切除。

频敏变阻器的短接控制方法很多,图 2·9-19a 是短接频敏变阻器的主电路;图 2·9-19b 示出用按钮、接触器来短接变阻器的线路;图 2·9-19c 是用时间继电器自动短接变阻器的线路。在图c中,起动时,按下

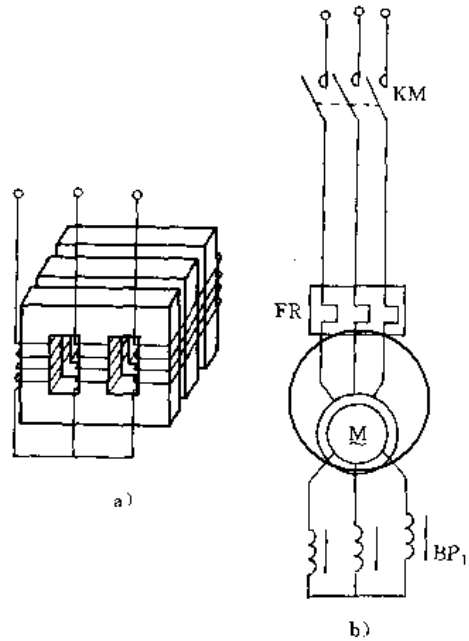


图 2·9-18 频敏变阻器

a) 结构 b) 接线图

起动按钮 SS_1 ,接触器线圈 KM_1 得电动作,将电动机接到电源上,并开始起动。同时,时间继电器 KT 线圈也得电动作,其延时闭合常开触点经过延时后闭合。于是,接触器 KM_2 动作,将频敏变阻短接,起动结束。

7. 直流电动机起动器电路 图 2·9-20 是直流电动机起动器电路。当电源合上未起动前,时间继电器

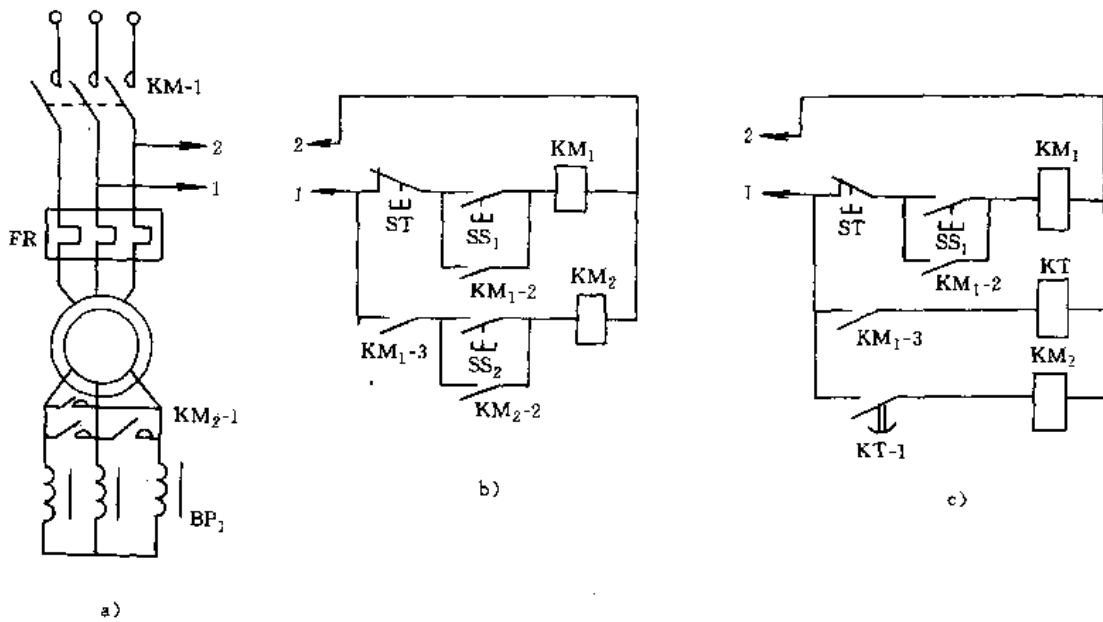


图 2·9-19 频敏变阻器的短接控制线路

a) 主电路 b) 按钮、接触器控制线路 c) 时间继电器自动控制线路



KT₁ 通电,其常闭延时闭合触点 KT₁-1 断开,切断接触器 KM₁ 和 KM₂ 线圈电路,同时电动机励磁绕组通电。

KT₁ 断电,其常闭延时闭合触点 KT₁-1 经若干时间后闭合,接通接触器 KM₁,其主触点 KM₁-1 闭合后,一方面短接电阻 R₁,同时 KT₂ 也被短接而失去电压。经一定时间后,常闭延时闭合触点 KT₂-1 闭合,接通接触器 KM₂,使主触点 KM₂-1 闭合,把电阻 R₂ 切除,电动机投入正常运转。

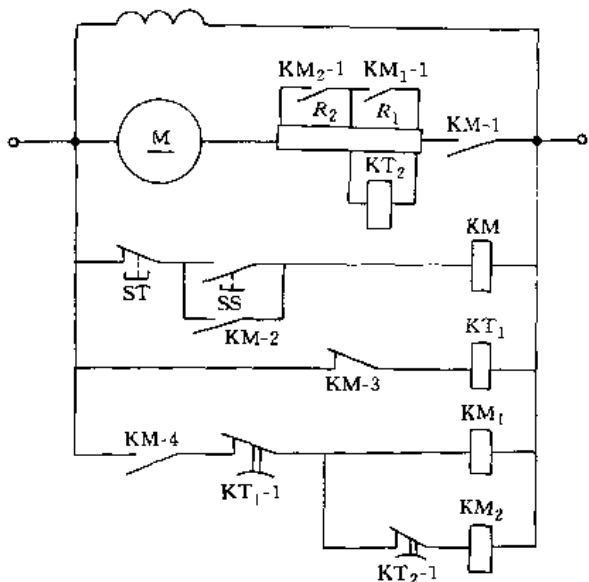


图 2·9-20 直流电动机起动器电路

按下起动按钮 SS,接触器 KM 通电,其常开主触点 KM-1 闭合,接通电枢电路,电动机起动。在电枢电路中因 R₁ 上有压降使时间继电器 KT₂ 动作,切断 KM₂ 线圈电路。这时常闭辅助触点 KM-3 断开,使

3·3·3 起动方式和起动器的选择

1. 起动方式的选择 一台电动机起动方式的选择见表 2·9-7。

表 2·9-7 起动方式的选择

| 电动机功率(kW) 电源变压器容量 (kVA) | <0.35 | 0.35~0.58 | >0.58 |
|-------------------------------|-------|-----------------------------|--------------|
| 起动方式 | 直接起动 | 用串联电阻、电抗的方式或用星形-三角形变换方式减压起动 | 用自耦变压器减压方式起动 |

2. 减压起动器的选择 现将几种常用的减压起动器的主要性能列于表 2·9-8,以供选择参考。

表 2·9-8 常用减压起动器的主要性能

| 起动器名称 | 型号 | 可控电动机功率(kW) | 起动时间 | 说明 |
|------------|---------------|-------------|----------------------------------|---------------------|
| 电阻减压起动器 | QJ7 | 20 | | 自动操作,有过载及失压保护 |
| 星形-三角形起动器 | QX1 | 13,30 | 13kW,<15s 30kW,<25s | 手动操作,无任何保护 |
| | QX3 | 13,30 | 最高操作频率为 30 次/h,并且两次操作间隔时间不少于 90s | 自动操作,有过载和失压保护 |
| 自耦变压器减压起动器 | QJ10 | 10~75 | <30~60s | 手动操作,有过载断相及失压保护 |
| | XJ01 | 14~300 | <120s | 自动操作,有过载及失压保护 |
| 频敏变阻器 | BP1, BP2, BP3 | 2.2~2240 | 允许连续起动 2~3 次,但总起动时间不得超过 120s | 自动操作,无任何保护,可兼作转差率调整 |



3.4 行程开关

3.4.1 行程开关的型号、结构和特点

行程开关,又称限位开关,而它所控制的是辅助电路,因此实质上也是一种继电器。行程开关的结构与按钮相似,其外形见图 2·9-21。

根据生产机械的行程信号进行动作的电器称为行程开关,其型号、结构和特点见表 2·9-9。

表 2·9-9 行程开关的型号、结构和特点

| 名称 | 型号 | 结构示意图 | 特点 |
|------|----------------------------|---------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| 行程开关 | LX4、LX19 和 LX19A 系列 | <p>a) 结构 b) 图形符号和文字符号 1—动触点 2—静触点 3—推杆 4—复位弹簧</p> | LX19 型系列是滑轮式行程开关,它广泛应用于各类机床、起重设备,作为电路的自动切换限位保护,行程控制等 |
| 接近开关 | LXU LXJ 3SG3231 3SG3275 系列 | <p>接近开关电路框图 1—铁磁体 2—感应头 3—振荡器 4—开关电路 5—输出器 6—稳压电源</p> | 左图中,当生产机械运动部件上的铁磁体 1 移动到靠近感应头 2 时,感应头的参数便发生变化,影响振荡器的工作,使晶体管开关电路导通(或断开),输出相应的信号切换电路 |

行程开关型号说明举例:

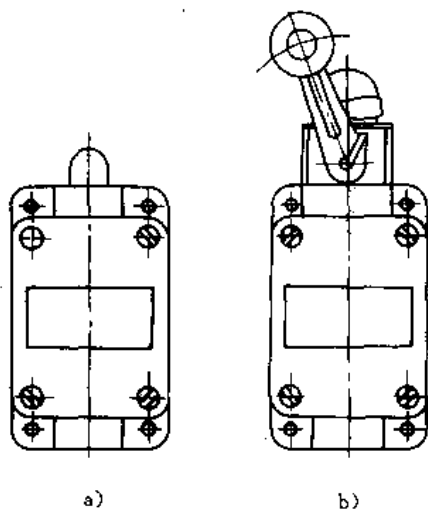
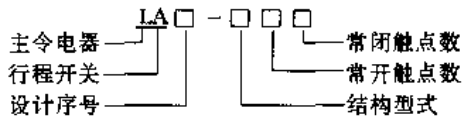


图 2·9-21 行程开关外形
a) 按钮式 b) 单滚轮式



3.4.2 晶体管接近开关

图 2·9-22a 示出由晶体管振荡器组成的接近开关的原理电路。振荡变压器的结构见图 2·9-22b。当金属片远离振荡线圈时,由 V_1 、 L_{1T} 、 C_1 和 L_{2T} 组成的变压器反馈振荡器自励起振,由输出线圈 L_{3T} 输出高频电压,此电压经 V_4 和 C_4 滤波后,加在 V_2 的基极上,使 V_2 饱和导通, V_3 截止,输出电压为零。 V_3 输出端接继电器 K , U_0 为零时,继电器线圈无电。当金属片移近振荡线圈,到一定位置时,由于金属片内涡流的去磁作用,使 L_{2T} 与 L_{1T} 之间的互感减小,破坏了振荡器的自励振荡



条件,因而振荡器停振。此时 V_2 截止, V_3 导通, 输出 $U_o \approx U_{cc}$, 继电器线圈有电, 从而实现了行程控制。晶体管接近开关使用寿命长, 操作频率高, 动作迅速可靠, 故得到广泛应用, 常用的型号有 WLX1、LXU1 等。

3.4.3 行程开关应用举例

1. 升降机的限位控制 图 2-9-23 是升降机的限位控制图。其工作过程如下:

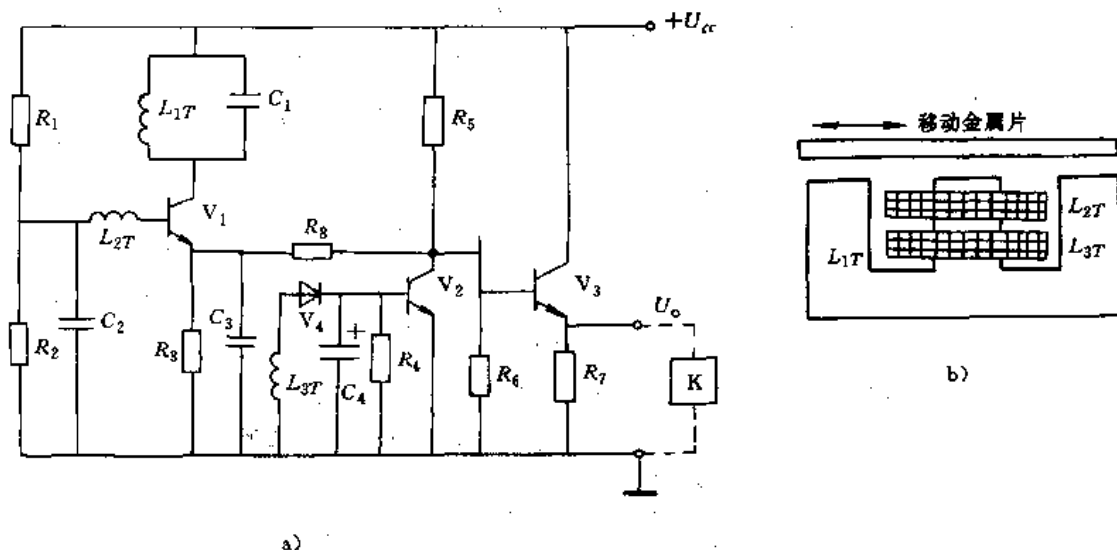


图 2-9-22 晶体管接近开关工作原理

a) 电路原理 b) 振荡变压器结构

L_{1T} 、 L_{2T} 、 L_{3T} —变压器绕组

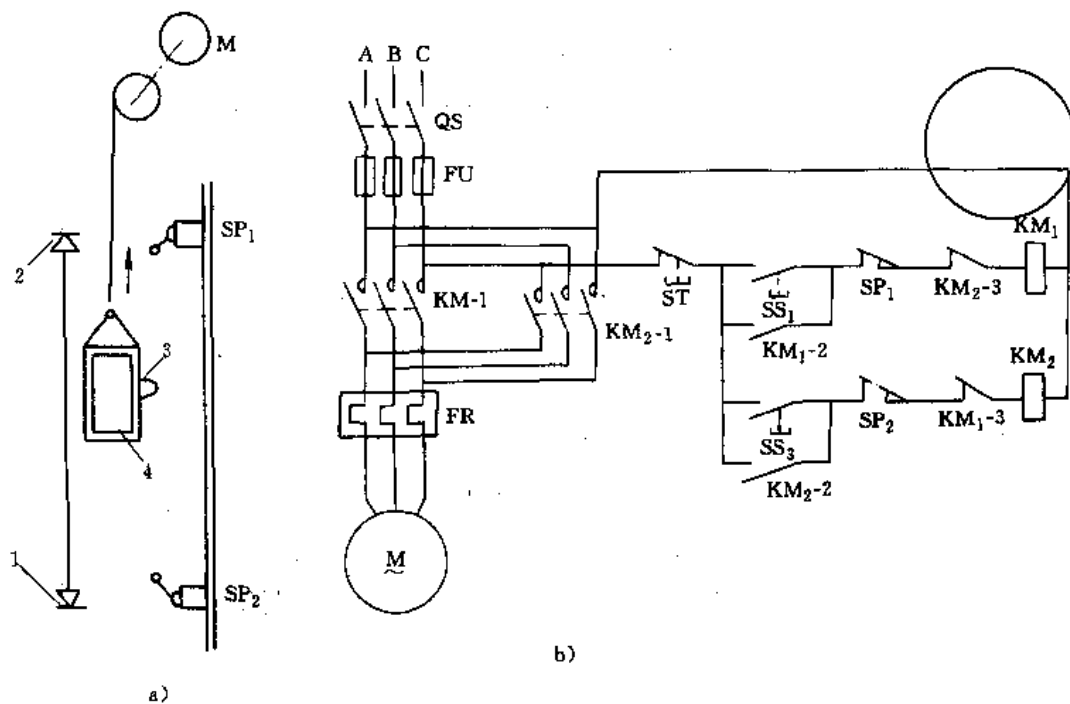
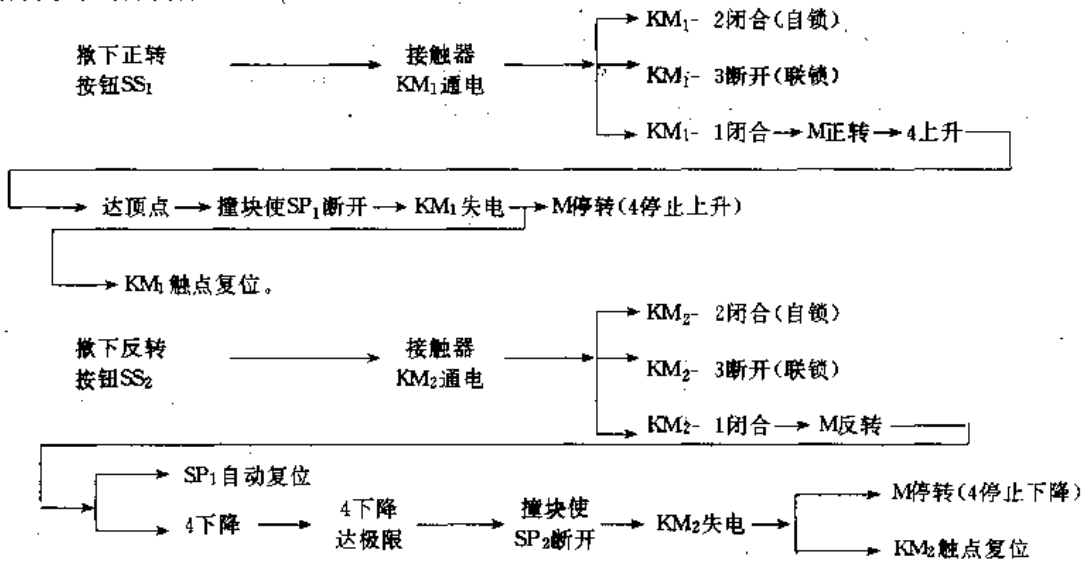


图 2-9-23 升降机的限位控制

1—下降(反转)极限位置 2—上升(正转)极限位置 3—撞块 4—升降机械



当开关 QS 合闸后;



如果再次上升,只能按下正转按钮 SS₁ 使电动机正转,并让 SP₂ 复位。
路见图 2-9-24,其工作过程如下:
当开关 QS 合闸,接通电源后:

2. 加热炉自动上料 加热炉自动上料的控制线

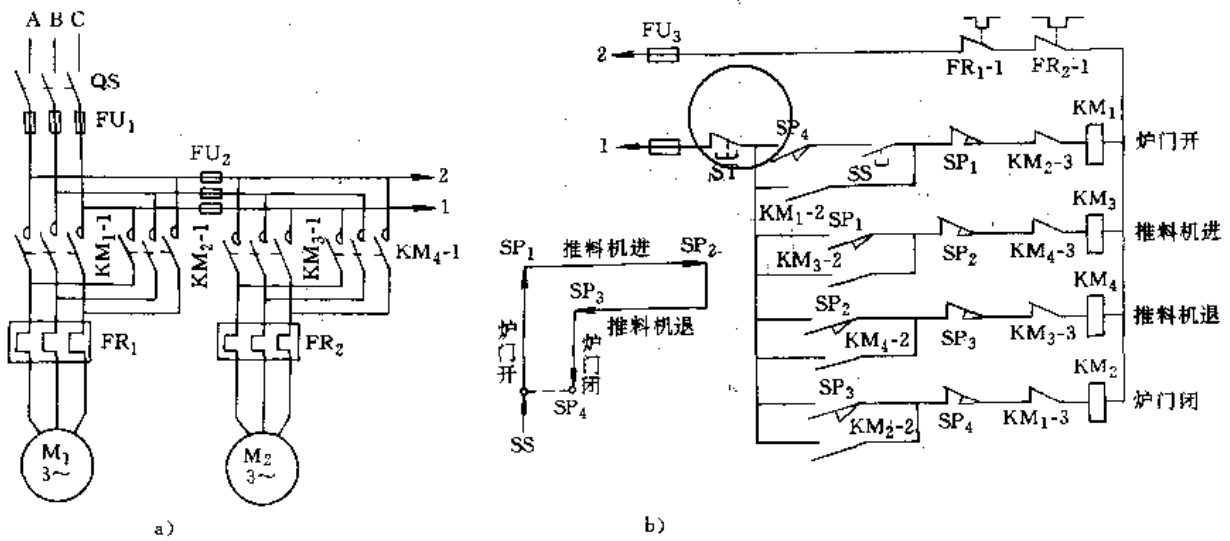
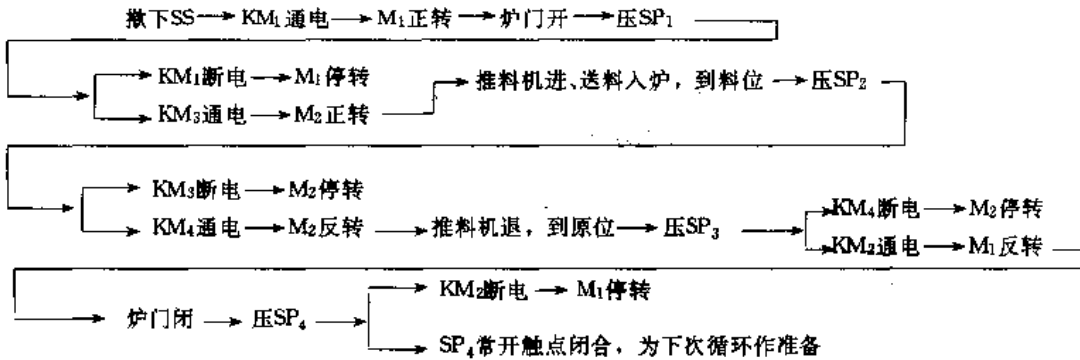


图 2-9-24 加热炉自动上料控制线路
a) 主电路 b) 加热炉自动上料线路



图中的常闭触点 KM_2-3 和 KM_1-3, KM_4-3 和 KM_3-3 是电动机正反转控制的联锁触点。

4 控制继电器

控制继电器是用来接通或断开控制电路的自动电器,当控制的物理量(如电压、电流、温度、转速、液压等)达到某一数值时,继电器触点就会闭合或断开,它的

控制电路就会通电或断电。继电器的触点容量较小,只能接在控制电路中,而不能接在电动机的主电路中。这是与接触器的主要区别。

4.1 继电器的种类和用途

继电器的种类繁多,按其动作原理分类,见表 2-9-10。

表 2-9-10 继电器的分类、动作特点和用途

| 名称 | 动作特点 | 主要用途 |
|-------|-----------------------------|--------------------------------------------------------|
| 电压继电器 | 当电路中线圈端电压达到规定值时动作 | 用于电动机失压或欠压保护,以及制动和反转控制等 |
| 电流继电器 | 当电路中通过的电流达到规定值时动作 | 用于电动机的过载及短路保护、直流电动机磁场控制回路或失磁保护 |
| 中间继电器 | 实质上属于电压继电器,当电路中端电压达到规定值时动作 | 触点数量较多,容量较大,通过它增加控制回路数,或增大触点容许的断开容量 |
| 时间继电器 | 自得到信号起至触点动作有一定延时 | 用于交流、直流电动机以时间原则起动机时切换电阻,笼型电动机的自动Y-△启动,能耗制动及控制各种生产工艺程序等 |
| 热继电器 | 由于过电流通过热元件,使双金属片弯曲,推动脱扣机构动作 | 用于一般交流电动机的过载、断相运转和电流不平衡保护 |
| 速度继电器 | 当转子速度高于某一值时,定子柄碰撞触点动作 | 用于交流电动机反接制动,直流电动机按速度原则启动 |
| 压力继电器 | 当达到整定压力值时使触点动作发出信号 | 用于液压控制系统 |

4.2 电磁式继电器

器的结构、图形符号和文字符号见图 2-9-26。

4.2.1 电磁式继电器的结构和工作原理

低压控制系统中采用的电磁式继电器的结构与接触器基本类同,其结构见图 2-9-25。它是由电磁机构与触点两个主要部分组成,包括铁心、衔铁、线圈、释放弹簧和触点等。电流继电器的线圈与负载串联以反映负载电流,其线圈匝数少而导线粗;电压继电器的线圈与负载并联以反映电压,其线圈匝数多而导线细。

电磁式继电器也有交直流之分,是指吸引线圈电压的种类,故在交流继电器的铁心端装有短路环。

4.2.2 电磁式继电器的种类和用途

电磁式继电器,按其用途,可分为电流、电压及中间继电器,其型号、特点和用途见表 2-9-11。中间继电器

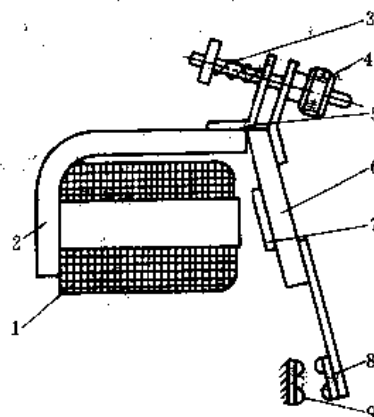


图 2-9-25 电磁式继电器的结构原理图
 1—线圈 2—铁心 3—释放弹簧
 4—调节螺母 5—旋转角 6—衔铁
 7—非磁性垫片 8—动触点 9—静触点



表 2-9-11 电磁式继电器的种类、型号、特点和用途

| 名称 | 型号 | 结构特点 | 用途 |
|------------|-------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| 直流电流、电压继电器 | JT3 JT3S | 电流继电器线圈匝数少而导线粗,电压继电器线圈匝数多而导线细。JT3S有一个吸引线圈和一个保持或释放线圈。保持线圈的作用是保持衔铁吸合,避免由于震动引起误动作。释放线圈作用是打开锁扣,使衔铁靠弹簧的作用释放复位。 | 可用不同的线圈组成,作为直流过电流(或过电压)继电器和欠电流(或欠电压)继电器 |
| 交流电流、电压继电器 | JT3J JT4 | 交流继电器的铁心端装有短路环,以消除震动和噪声。装上不同的线圈,可分别用作电压或电流继电器 | 可用作交流电压继电器和电流继电器 |
| 中间继电器 | JS7 JS8 | JS7为交流中间继电器,JS8为交直流中间继电器。实质上是电压继电器,但触点数量多,容量大 | 利用中间继电器的转换作用,可以加大控制容量和控制电路数。控制各种继电器线圈,将信号同时传递给数个控制元件 |

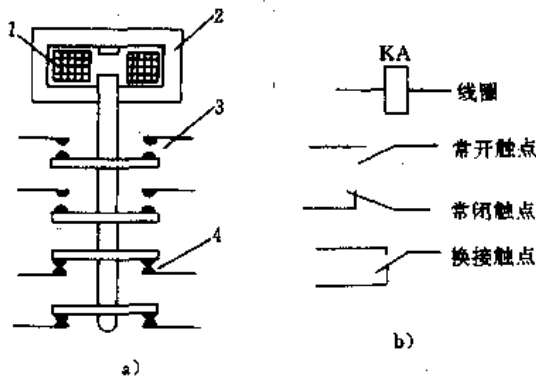
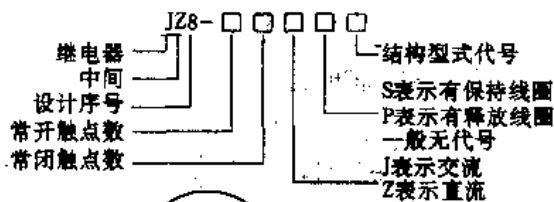


图 2-9-26 中间继电器的结构、图形符号和文字符号:
a) 结构 b) 图形符号和文字符号
1—线圈 2—铁心 3—常开触点 4—常闭触点
继电器型号说明举例:



4-3 时间继电器

在工业生产的自动控制中,往往要求继电器在接收信号后,执行元件(触点)不是瞬时动作,而是需要相隔一定的时间间隔后,其触点能够延时动作。按工作原理可分为空气式、直流电磁式、电动式、电子式等时间继电器。

4-3-1 空气式时间继电器

在交流控制线路中常用空气式时间继电器。它是利用空气阻尼作用而达到延时动作的。其结构原理如图 2-9-27 所示,它主要由电磁系统、工作触点、空气室

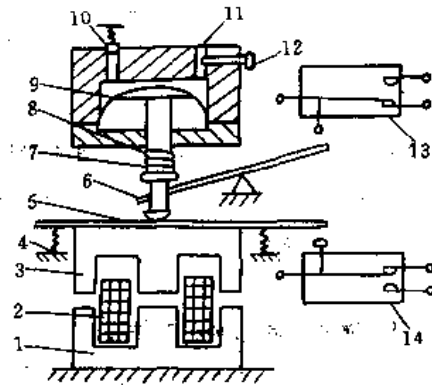


图 2-9-27 空气式时间继电器结构原理图
1—铁心 2—线圈 3—衔铁
4—恢复弹簧 5—托板 6—杠杆
7—活塞杆 8—释放弹簧 9—橡皮膜
10—排气孔 11—进气孔 12—调节螺钉
13—延时触点 14—微动开关

和传动机构等组成,当吸引线圈通电时,衔铁和托板被吸引下移,但活塞杆和杠杆不能跟着衔铁下落。这是由于活塞下移时,上面的橡皮膜使上气室和下气室间造成一气压压力差,活塞杆只能缓慢下降。活塞杆下移到位时,杠杆推动延时触点动作。从吸引线圈通电到触点动作之间一段时间的间隔,为时间继电器的延时时间。



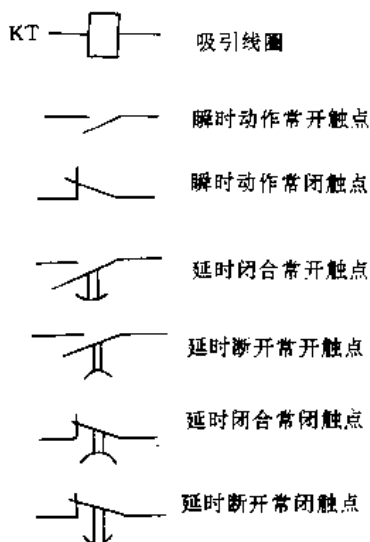


图 2-9-28 空气式时间继电器图形符号和文字符号

图 2-9-28 是时间继电器的图形符号和文字符号。

4.3.2 电子式时间继电器

图 2-9-29 示出电子式时间继电器的原理电路。当

有控制信号使 S 闭合时, R_3 与 R_4 分压使 $U_a > U_b$, 经电压比较器 CM, 其输出电压 U_d 为负, 三极管 V_2 截止, KA 的线圈中没有电流, 触点 KA-1 是断开的。此时, i_c 给电容器 C 充电使 U_b 逐渐上升, 经过时间 t 后达到 $U_b > U_a$, 于是 U_d 为正, 使 V_2 饱和导通, KA 动作, 触点 KA-1 闭合。从信号出现到触点动作, 这段时间的间隔 t 为延时动作的时间(调整 R_2 的大小可以调整动作延时的时间)。

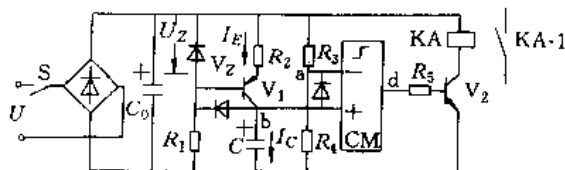


图 2-9-29 电子式时间继电器的原理电路

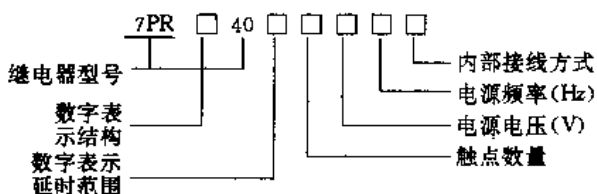
4.3.3 时间继电器的种类和特点

时间继电器的种类、型号和特点见表 2-9-12。

表 2-9-12 时间继电器的种类、型号和特点

| 名称 | 型号 | 特点 | 用途 |
|----------|--------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|
| 空气式时间继电器 | JS7 | 它是利用空气阻尼作用而达到延时动作的, 结构简单, 但准确度低, 延时范围有 0.4~60s 和 0.4~180s 两种 | 常用在机床电气自动控制中 |
| 电动式时间继电器 | 7PR, JS11 JS-10~JS-17 | 由同步电动机带动减速齿轮获得延时, 延时范围 0.15s~60h, 延时误差小, 体积小, 使用方便 | 用于各种自动控制系统, 要求延时长, 准确度高的场合 |
| 电子式时间继电器 | JS10 JS14 和 JSS-10 | JS10 和 JS14 是晶体管式时间继电器。JS14 采用印刷电路和插座式结构。JSS-10 是集成电路时间继电器。延时范围有 1~3600s 和 0.1s~16h 几种 | 广泛用于各种保护和自动控制电路的延时元件 |
| 电磁式时间继电器 | JS3 JT3 | 它的构造是在电磁式继电器铁心上加一阻尼铜套, 对原吸合磁通起了阻尼作用 | 它的延时准确度较低, 一般只用于要求不高的场合 |

7PR 型电动式时间继电器型号说明举例:



4.3.4 时间继电器的应用举例——顺序控制

所谓顺序控制, 就是按照一定顺序进行控制操作。例如矿山中两台皮带运输机串联运行, 其顺序控制原理见图 2-9-30。在起动时必须先起动按货流方向最前面的运输电动机 M_1 , 然后起动后面的运输电动机 M_2 , 而停车顺序则正好相反。其工作过程如下:

此星公司制作 请尊重版权



先将开关QS合闸。

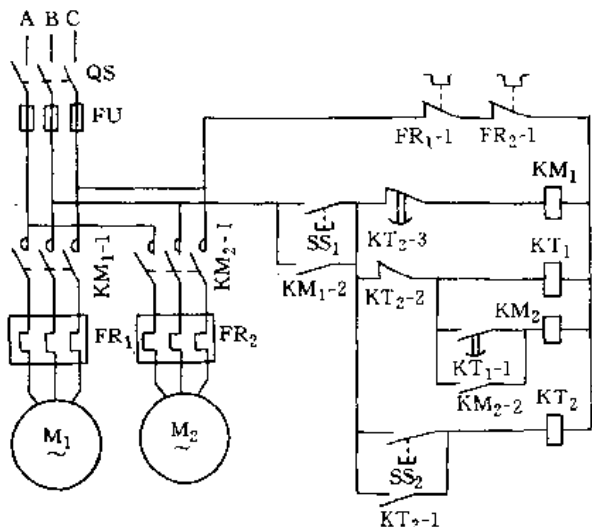
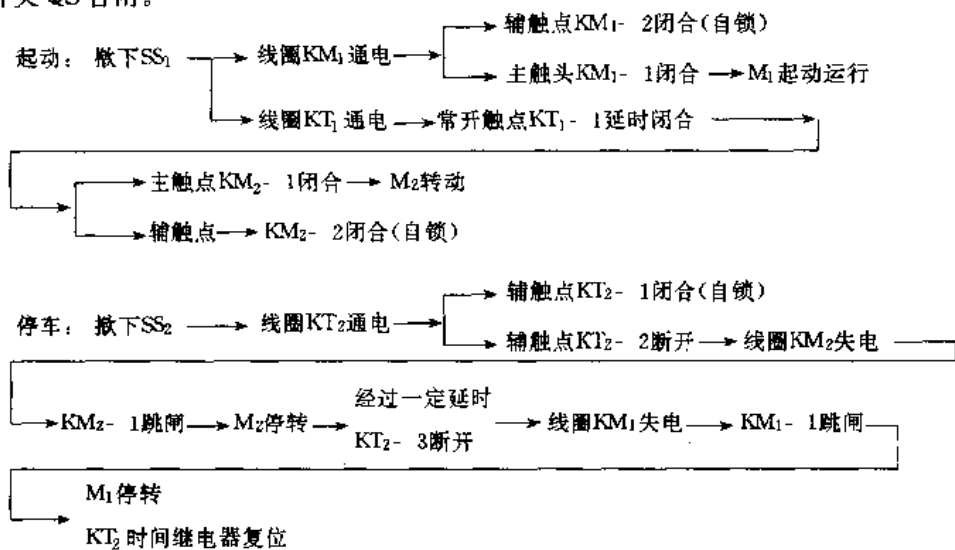


图 2-9-30 用时间继电器的顺序控制

4.4 热继电器

图 2-9-31 为热继电器工作原理图。它是利用感受到的热量而进行动作的继电器,常用作电动机的过载保护。

当主电路(电动机)过载,通过发热元件 3 的电流超过它的整定值时,发出大量的热量,使双金属片 4 弯曲超过正常范围,脱开扣杆 5,扣杆在弹簧 2 作用下使常闭触点 1 断开,接触器的吸引线圈断电,接触器主触点就在弹簧作用下断开,电动机脱离电源,达到过载保护的目的。

目前常用的热继电器型号有 JR0、JR5、JR15 和 JR16 等几种。

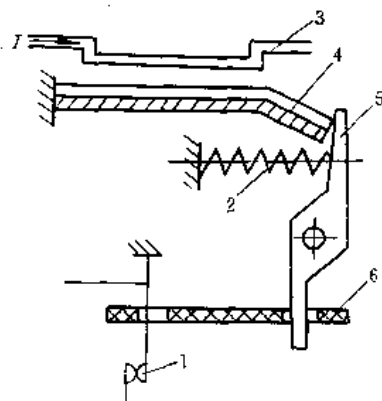
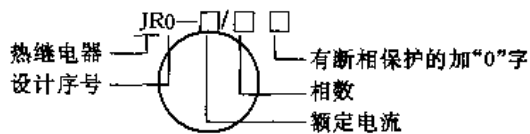


图 2-9-31 双金属片式热继电器的工作原理

1-触点 2-释放弹簧 3-发热元件

4-双金属片 5-扣杆 6-连杆

热继电器型号说明举例:



4.5 速度继电器

4.5.1 速度继电器的结构和工作原理

速度继电器的工作原理与感应电动机相似,其结构和符号如图 2-9-32 所示。它是由转子、定子和触点三部分组成。转子是圆柱形永久磁铁,它与机械轴(电动机轴)连结在一起。定子为空心圆铁心,内嵌铜条并用端部铜环短接,也可绕轴转动。当转子随着机械旋转时,定子的短路铜条产生感应电动势和电流,它与转子磁极相作用产生转矩,使定子转动。转子转速高,定子



转矩大。当转子速度高于某一值时,定子转矩克服弹簧反作用力的作用而转动,定子柄碰撞触点使其动作。当转子速度低于100r/min时,定子转矩小于弹簧力的作用,定子柄处于中间位置,触点恢复原位。

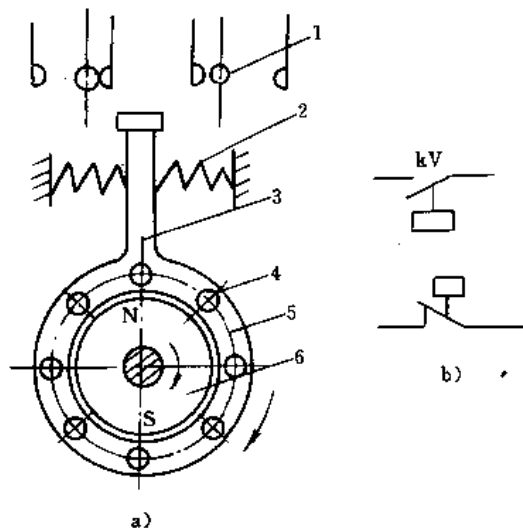


图 2·9-32 速度继电器的工作原理图
a) 结构 b) 图形符号
1—触点 2—弹簧 3—定子柄
4—定子鼠笼条 5—定子 6—转子

常用的速度继电器型号有 JFZ0 型。

4·5·2 速度继电器的应用举例

应用速度继电器的反接制动电路见图 2·9-33。其工作过程如下:

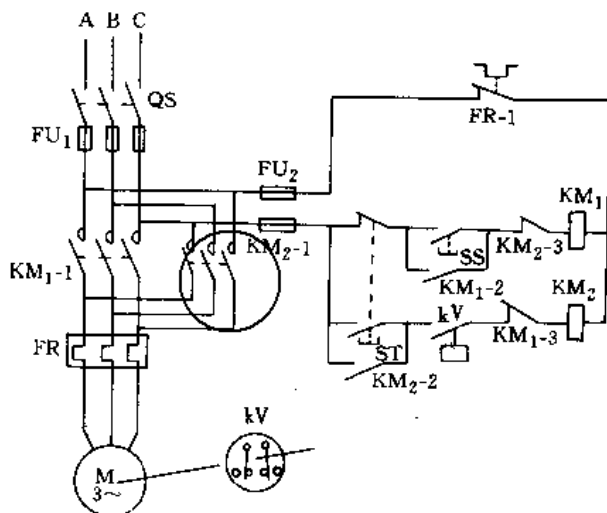
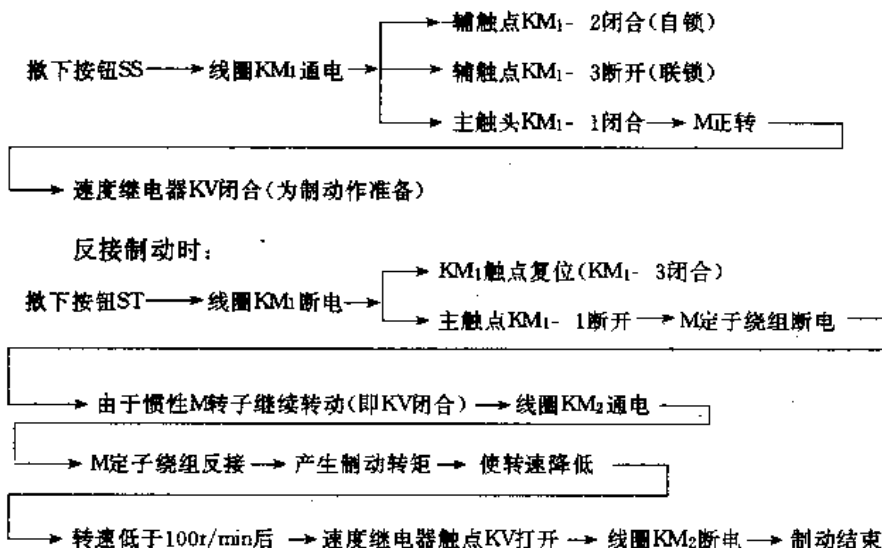


图 2·9-33 笼型电动机反接制动电路

当开关 QS 合闸,电动机工作时:



4·6 液压继电器

4·6·1 液压继电器的结构和作用原理

液压继电器是将液压信号转换为电信号的转换元件,常用在机床的自动控制系统中。

图 2·9-34a 示出液压继电器的结构。孔 8 与被测

油压的液路相连。当液压达到整定压力值时,薄膜 5 和柱塞 4 受液压作用,克服弹簧 2 的反作用力向上移动,推动钢球使杠杆 6 转动,撞动微动开关 7,使触点动作发出电信号。螺钉 1 是用来调节液压继电器动作值的。

液压继电器在液压系统中的图形符号如图 2·9-34b 所示,在控制线路图中其触点用图 2·9-34c 表示。

常用的液压继电器型号有 YJ 型。



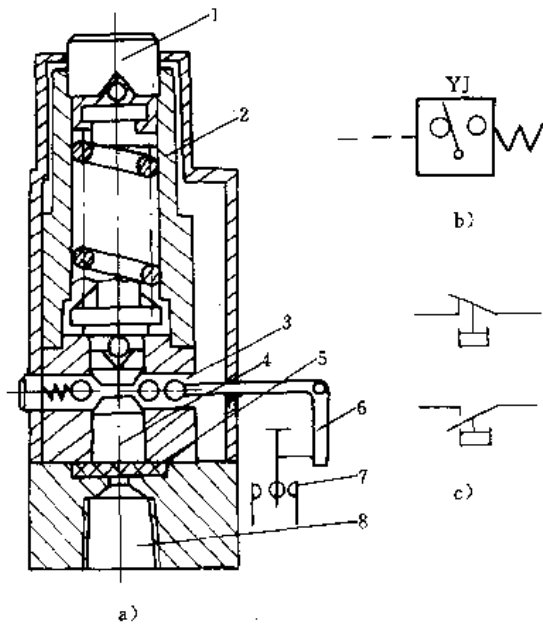


图 2-9-34 液压继电器

- 1 调节螺钉 2—弹簧 3—钢球 4—柱塞
- 5—薄膜 6—杠杆 7—微动开关 8—进油孔

4.6.2 液压继电器的应用举例

图 2-9-35a 为用液压继电器 YJ 的顺序控制液压传动系统图, 图 2-9-35b 示出其控制线路。根据工艺要求的动作顺序是: 将工件放到加工位置, 先将工件用液

压缸夹紧, 然后刀架进给, 进给到位后刀架自动退回到原位, 将工件放松取走, 结束一个循环, 以后重复此循环。

电液系统的工作过程是: 起动油泵电动机后, 循环动作开始时, 各电磁阀处于如图所示常态位置。

当工件放到加工位置时, 行程开关 SP_1 常开触点被压闭合, 继电器 KA_1 及三位四通 DCF_1 的电磁铁 DT_1 通电, DCF_1 右位通, 夹紧液压缸 YG_1 活塞下行, 将工件夹紧, 油缸上腔油压增大。当油压超过液压继电器 YJ 的动作压力值时, YJ 常开触点闭合, KA_3 有电, 将三位四通阀 DCF_2 的电磁铁 DT_3 接通, DCF_2 右位通, 压力油进入液压缸 YG_2 右腔, YG_2 左腔内的油经调速阀 T-F 回到油箱, YG_2 的活塞左行, 带动刀架以工作速度进给。进给到位时, SP_2 动作, SP_2 常闭触点断开, KA_3 失电, DT_3 失电。同时, SP_2 常开触点闭合, 接通快退继电器 KA_4 , KA_4 常开触点闭合, 将三位四通阀 DCF_2 的电磁铁 DT_1 接通, 又将二位二通阀 DCF_3 的电磁铁 DT_5 接通, DCF_3 左位通, 将调速阀旁路, 所以液压缸 YG_2 活塞快速右行。刀架快退到原位时, SP_3 动作, SP_3 常闭触点断开, DT_1 、 DT_5 失电, 快退停止。这时 SP_3 常开触点闭合, KA_2 接通, 三位四通阀 DCF_1 的电磁铁 DT_2 失电, DT_2 接通, DCF_1 左位通, YG_1 活塞上升, 放松工件。当工件取走后, SP_1 常开触点复位断开, 各阀回到常态, 一个工作循环结束。以后又按此顺序工作。

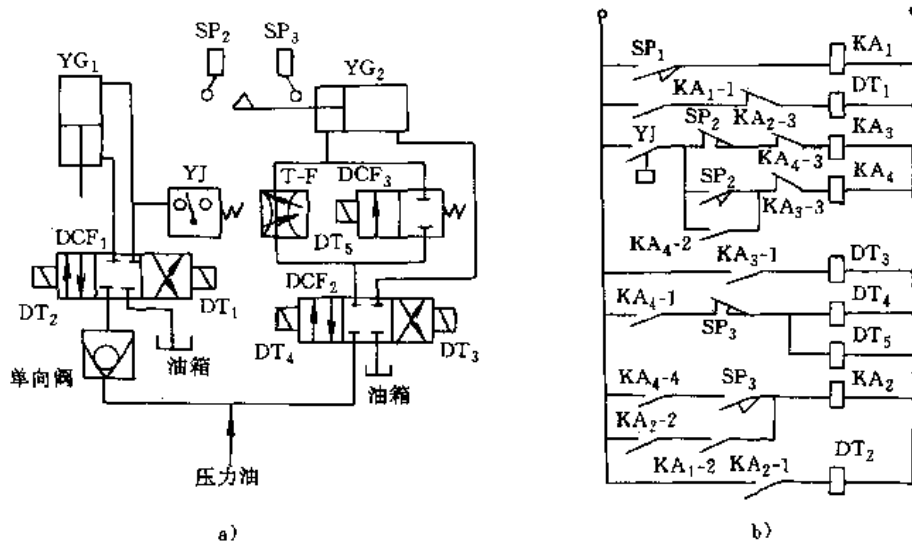


图 2-9-35 用液压继电器的液压控制系统

5 低压漏电保护器

低压漏电保护器是一种防止低压触电事故的安全

装置, 当发生人体触电或电气设备漏电时, 它能自动将电源切断, 起到保护人身安全和监视电气设备绝缘状况的作用。



漏电保护器可分为电流型和电压型两种。

5.1 电压型漏电保护器

电压型漏电保护器的工作原理见图 2·9-36。

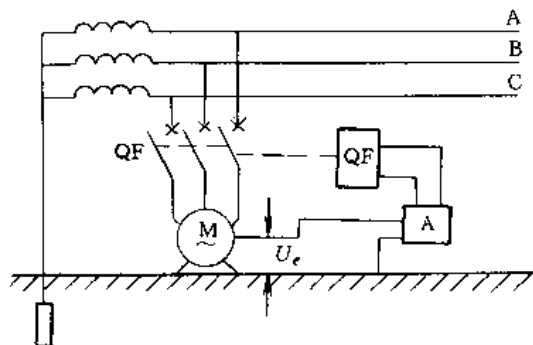


图 2·9-36 电压型漏电保护工作原理

工作过程如下：正常工作时低压自动开关 QF 闭合，电气设备外壳不带电（即 $U_e=0$ ）。一旦电气设备由于绝缘损坏等原因发生漏电时，则电气设备外壳和专用接地线之间有对地电压 U_e ，称为漏电电压，这个微弱的漏电电压 U_e 经过放大环节 A 放大，放大后的信号使自动开关 QF 的跳闸电磁铁线圈通电，通过执行机构将自动开关 QF 断开，切断电源，使故障部分脱离电源。

5.2 电流型漏电保护器

电流型漏电保护器的工作原理见图 2·9-37。

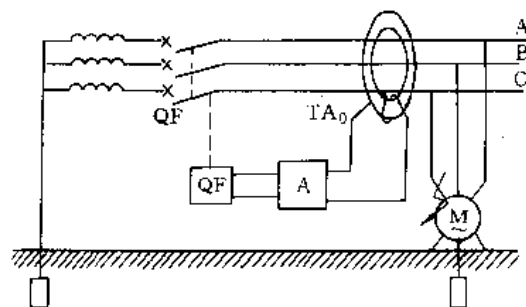


图 2·9-37 电流型漏电保护原理图

工作过程如下：正常工作时，主电路中三相电流的相量和为零，因此，电流互感器 TA_0 的二次线圈中无感应电动势产生，所以无电流输出。当电气设备发生漏电时，使三相电流的平衡遭到破坏，产生零序电流，所以 TA_0 的二次线圈感应出电动势。此电动势经过放大环节 A 放大，放大后的信号使自动开关 QF 的跳闸电磁铁的线圈通电，其执行机构切断电源，使故障部分与电源断开。

低压漏电保护装置的動作值，一般按通过人体的电流不超过 15mA 整定，動作时限在 0.1s 以内。

现我国已生产有 DZ/5L、DZL 型等漏电保护器。

5.3 漏电保护器的选用

按使用场所选用漏电保护器时可参阅表 2·9-13。

表 2·9-13 按使用场所选用漏电保护器

| 使用场所 | 选用类型 | 说明 |
|-------------------------------------------------------|------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| 1. 电动工具、机床、潜水泵等单独设备的保护 2. 分支回路保护 3. 小规模住宅主回路的保护 | 额定漏电动作电流在 30mA 以下，漏电动作时间小于 0.1s 的高灵敏度、高速型漏电保护器 | 1. 防止漏电引起的火灾 2. 防止电气设备漏电引起的触电事故 3. 在设备接地效果不太好处，防止触电事故 |
| 1. 分支回路保护 2. 需提高设备接地保护效果处 | 额定漏电动作电流为 50~500mA，动作时间小于 0.1s 的中灵敏度，高速型漏电保护器 | 1. 较大容量设备的回路的漏电保护 2. 在设备的电线穿管子，并以管子作接地极时，防止漏电引起的事故 3. 防止漏电引起的火灾 |
| 1. 干线的全面保护 2. 在分支回路中装有高灵敏度，高速型的漏电保护器以实现分级保护处 | 额定漏电动作电流为 50~500mA，漏电动作时间有延时的中灵敏度延时型漏电保护器 | 1. 设备回路的漏电保护 2. 用高速型漏电保护器，以形成对电网更加完善的保护 3. 防止漏电引起火灾 |



6 电压调整器

从图 2·9-38 交流同步发电机的外特性可知,发电机运行时,发电机的端电压 U 随负载电流 I 增加而下降(电感性负载)。

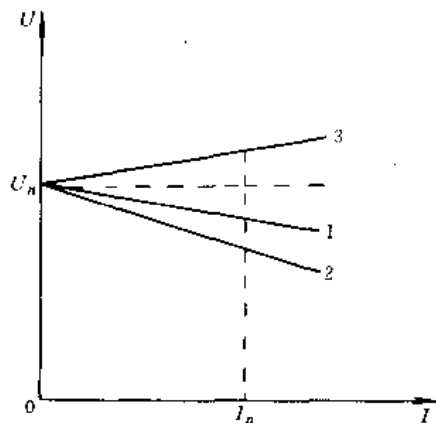


图 2·9-38 交流同步发电机的外特性

1—电阻性负载 2—电感性负载 3—电容性负载
 U_n —空载额定电压 I_n —输出额定电流

由于负载电流的变化影响了发电机的端电压,端电压变化过大将对电力系统和用电设备产生许多不利因素和问题,因此交流同步发电机的励磁电流必须适应端电压的变化,及时迅速而自动地调整,以保证电力系统的稳定,以及各种电力设备和电器的安全、经济运行。

6·1 电压调整器的工作原理

电压调整器的工作原理见图 2·9-39。交流同步发电机端电压的大小与其励磁电流 I_f 的大小有关。此电压经反馈电路将反馈电压送到电压调整器与给定基准电压进行比较,并按给定的规律对直流励磁发电机的励磁电流 I_f 进行调整,相应的直流励磁发电机电动势 E 和同步发电机的励磁电流 I_f 随之改变,进而使交流同步发电机的端电压自动调整。

6·2 晶闸管式电压调整器[⊙]

电压调整器的种类很多,有变阻式、电磁式、磁放大器式和晶闸管式等。下面简单介绍晶闸管式电压调整器的工作原理。

1. 基本原理 晶闸管式电压调整器的原理电路见图 2·9-40。它主要由主回路 1、量测回路 2、相位控制器 3 和分配器 4 等四部分组成。

由量测回路测得的电压经相位控制器变成一系列

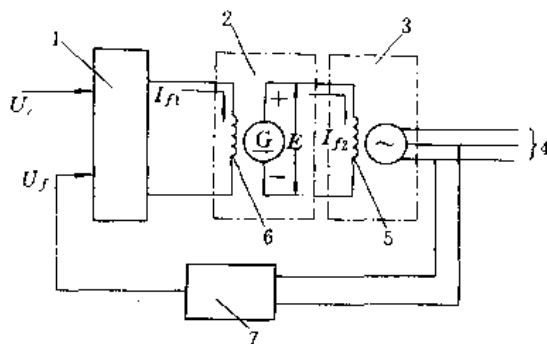


图 2·9-39 电压调整器的工作原理

U_r —给定基准电压 U_f —反馈电压

1—电压调整器 2—直流励磁发电机

3—交流同步发电机 4—输出至负载

5—同步发电机励磁绕组 6—直流励磁发电机

励磁绕组 7—反馈电路

的矩形脉冲,经分配器将这些矩形脉冲相同发给晶闸管 V_1 和 V_2 ,分别触发这两个晶闸管。当负载减小或因其它原因发电机端电压升高时,这些矩形脉冲的前沿将会后移,晶闸管 V_1 、 V_2 的触发推迟,导通时间缩短,由二极管 V_3 、 V_4 和晶闸管 V_1 、 V_2 组成的整流桥(主回路)输出电流减小,交流同步发电机的端电压迅速地被拉回,并保持在原来的额定电压附近。同理,由于负载增加或因其它原因发电机端电压降低时,也能将发电机端电压保持在额定电压附近。

2. 量测回路和相位控制器 发电机电压由变压器 TC_1 降压,二次绕组分成二组:第 1 组经二极管 V_{11} ~ V_{14} 整流, C_2 滤波后作为半导体三极管的工作电源;另一组经整流器 V_{15} ~ V_{18} 整流,输出经由 C_1 、 R_1 、 R_2 、 R_3 组成的充放电回路,产生锯齿波 u_1 (见图 2·9-41),当发电机端电压变化时,锯齿波也相应上下平移。这锯齿波电压经 R_1 分压加在硅稳压管 V_{10} 和电阻 R_5 的串联支路。当图 2·9-41 中 u_1 低于 V_{10} 的导通(击穿)电压 $U_{V_{10}}$ 时(即图 2·9-41 锯齿波 b、c 段), V_{10} 呈高阻截止状态, R_5 上也无电流通过,复合三极管 V_5 、 V_6 也无输入信号,故呈截止状态,在 R_3 上也无输出。当 u_1 高于 $U_{V_{10}}$ 时(即 a、b 段)硅稳压管 V_{10} 导通, R_5 上有压降,复合三极管有输入信号,突然导通, R_3 就有输出,形成 U_{R_3} 的脉冲波形,见图 2·9-41,半导体三极管 V_7 的输入信号取自 V_6 的管压降。当 V_6 导通时,管压降为零,

⊙ 半导体二极管、三极管、晶闸管式交流调压器和直流调压器,见本卷第 3 篇。



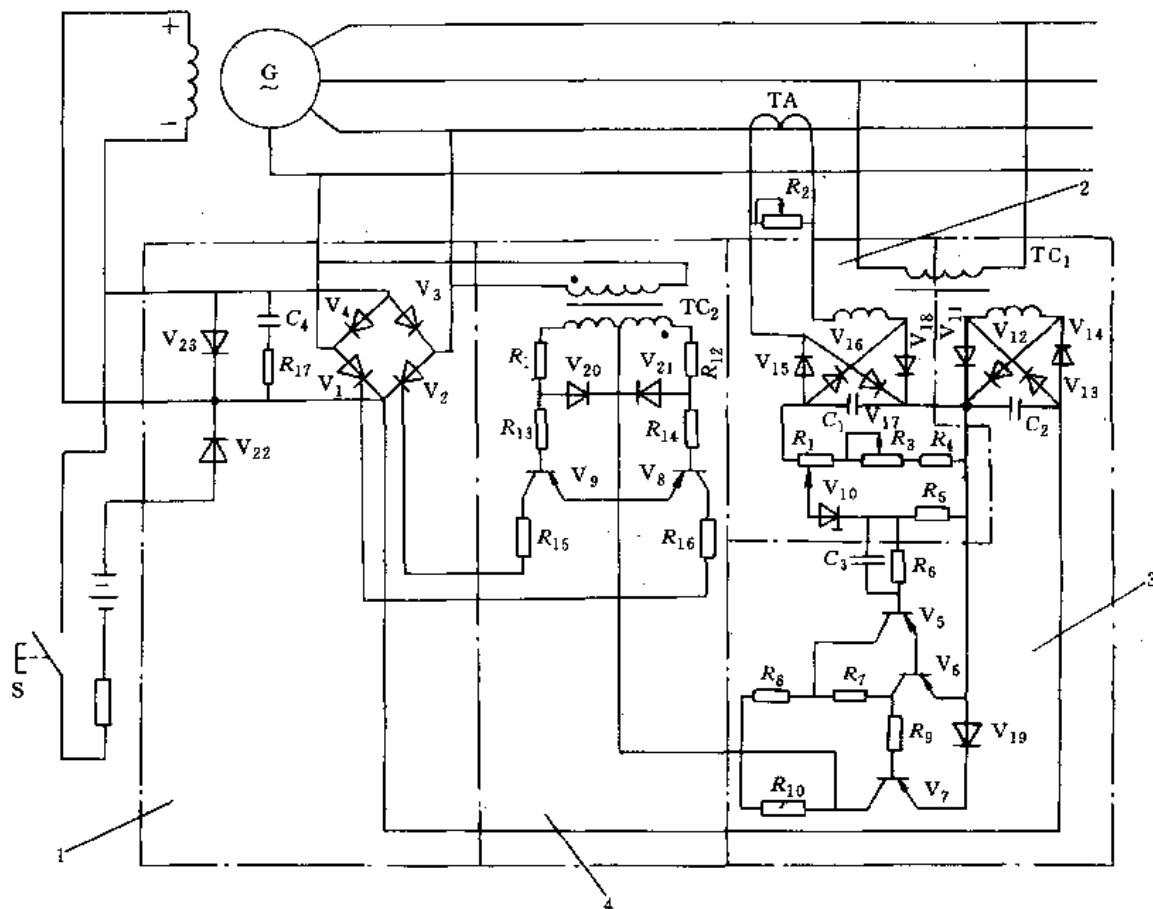


图 2-9-40 晶闸管式电压调整器

1—主回路 2—量测回路 3—相位控制器 4—分配器

R_1 —电压整定 R_2 —无功补偿 R_3 —灵敏度

故 V_7 截止。相反, V_6 截止时 V_7 导通, 见图 2-9-41 中 u_{R10} 的波形。

3. 分配器的翻转 图 2-9-40 中的交流电源如图 2-9-42 所示。变压器 TC_2 一、二次绕组右端为正时, 三极管 V_8 基极电位高于发射极时, V_8 截止, 相位控制器送来的脉冲信号不能发至 V_1 。但此时 V_9 基极电位低于发射极, V_9 导通, 来自相位控制器的脉冲就能通过 V_9 发至 V_2 。同理, 当交流电源另一半波变压器一、二次绕组右端为负时, 相位控制器的输出脉冲也只能发至 V_1 。 V_8 和 V_9 就这样按电源的频率交替翻转, 轮流导通, 把相位控制器的输出脉冲相间地送至晶闸管 V_1 和 V_2 。在 R_{15} 、 R_{16} 上的电压波形 u_{15} 、 u_{16} 参见图 2-9-41。

4. 主回路的触发 半导体二极管 V_3 、 V_4 与晶闸管 V_1 、 V_2 组成单相桥式整流回路, 由于分配器的翻

转, 只有当 V_1 、 V_2 工作在正半波, 且其控制极接收到来自分配器的脉冲时, 这两只晶闸管才触发导通(控制极无触发脉冲输入时, V_1 、 V_2 是将电流阻断的)。桥式整流回路经 C_1 、 R_{17} 组成的过电压保护回路和续流二极管 V_{22} 输出给发电机励磁绕组。

5. 动作过程 发电机的输出电压经量测回路、相位控制器、分配器和主回路, 输出至发电机的励磁绕组。利用分配器输出的触发脉冲的移动, 来控制主回路晶闸管的导通角。图 2-9-43a 为发电机的原来状态, 由于负载减小或其他原因发电机端电压升高时, 锯齿波电压 u_1 也同样上移, 见图 2-9-43b, U_{V10} 与 u_1 的交点 b 就向后移动, 晶闸管 V_1 、 V_2 推迟触发, 导通角也比原来减小, 输出的励磁电流也就减小, 交流同步发电机要升高的端电压由于励磁电流减小, 端电压被拉回到额定值左右, 保持恒定。



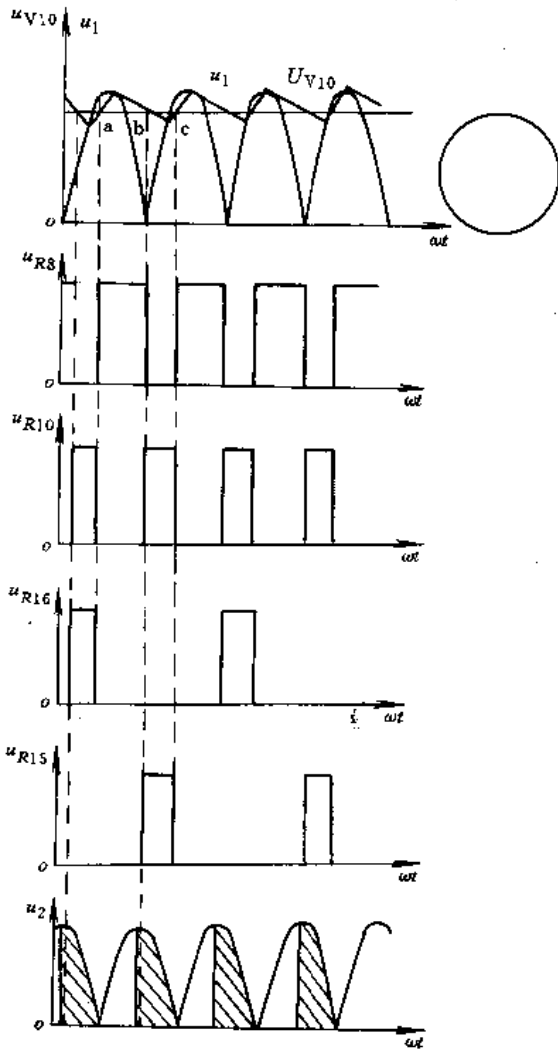


图 2-9-41 控制电路各部分波形

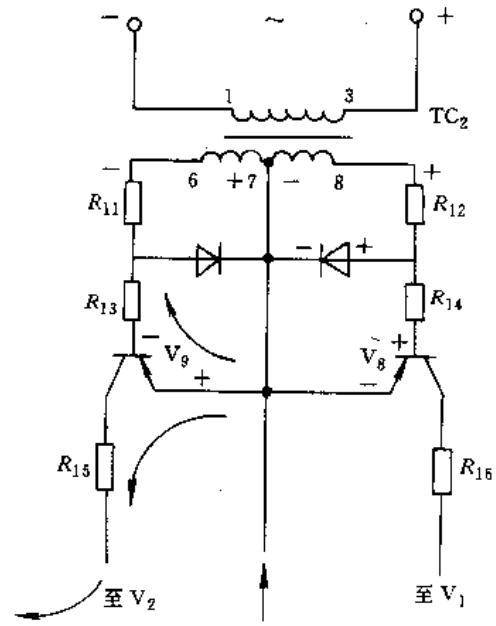


图 2-9-42 分配器电路

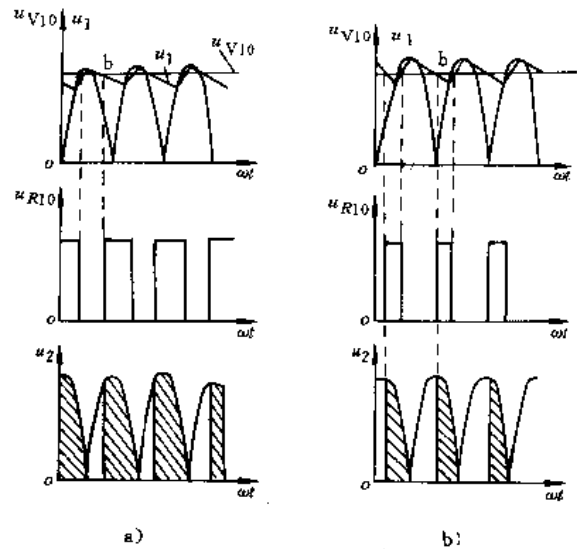


图 2-9-43 电压调整器的动作情况

7 电器的常见故障和处理

7.1 接触器、磁力起动器和电磁式继电器的常见故障和修理 (表 2-9-14)

表 2-9-14 接触器、磁力起动器和电磁式继电器的常见故障和修理

| 故障现象 | 原因 | 处理方法 |
|---------|----------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| 线圈过热或烧坏 | 1. 由于环境温度超出规定值、空气潮湿或含有腐蚀性气体 2. 弹簧反作用力过大 3. 由于机械擦伤使线圈绝缘损坏 | 1. 换用特种绝缘的线圈或选用特种电器 2. 调整弹簧压力 3. 更换线圈及其他损坏部件 |



(续)

| 故障现象 | 原因 | 处理方法 |
|----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 线圈过热或烧坏 | 4. 线圈电压超过110%额定值而导致发热或烧坏 5. 操作频率过高或交流线圈在其电压低于85%额定值时, 因衔铁不吸合导致线圈发热或损坏 6. 由于机械可动部件卡住, 衔铁不吸合造成线圈烧坏 | 4. 更换损坏部件, 调整电源电压 5. 选择特殊的电器, 调整电源电压, 换去损坏部件 6. 排除机械可动部件故障或更换部件 |
| 触点故障 | 1. 触点熔焊 2. 触点接触电阻变大或不稳定 3. 负载过大或触点容量过小等引起触点不分合电路 4. 触点弹簧压力太小 5. 因电压过高, 触点间隙变小, 出现触点间隙重复击穿现象 6. 操作频率过高, 触点间隙过大, 使触点不能分合电路 | 1. 调换触点组 2. 清理触点表面或更换触点组 3. 更换较大容量的电器 4. 调整弹簧压力 5. 更换电器或采用调整间隙等方法 6. 采用特殊的电器或调整触点间隙 |
| 电器有噪声 | 1. 弹簧反作用力过大 2. 极面有污垢 3. 极面磨损面不平 4. 磁系统歪斜 5. 短路环断裂(交流) 6. 衔铁与机械部分间的连接销松脱 | 1. 调整弹簧压力 2. 清除污垢 3. 修正极面 4. 调整机械部分 5. 重焊或更换短路一环 6. 装好连接销 |
| 衔铁吸不上 | 1. 线圈断线或烧坏 2. 衔铁或机械部分被卡住 3. 机械部分转轴生锈或歪斜 | 1. 修理或更换线圈 2. 排除机械可动部分故障或调换部件 3. 去锈, 上润滑油, 或调换配件 |
| 断电时衔铁不落下 | 1. 触点间弹簧压力过小 2. 衔铁或机械部分被卡住 3. 非磁性衬片被磨损或太薄(直流) 4. 触点熔焊在一起 5. 剩磁 | 1. 调整触点压力 2. 排除机械可动部分故障或调换部件 3. 更换或加厚垫片 4. 更换触点组并研究原因 5. 更换铁心或退磁 |

7.2 半导体继电器的常见故障和处理 (表 2-9-15)

表 2-9-15 半导体继电器的常见故障和处理

| 故障现象 | 原因 | 处理方法 |
|-----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 半导体电路部分故障 | 1. 晶体管元件失效, 如放大倍数下降, 晶体管 b-e 或 c-e 极间击穿, 开路等 2. 其他半导体器件、电容元件等损坏或失效 3. 虚焊 4. 电位器、开关、接插件等接触不良 | 通过测量继电器在正常及动作状态下晶体管元件的工作状态和有关测量点的参考电压(或波形), 查出故障部位及元件, 调整损坏元件 对电位器, 接插件等可进行清洗或调换处理 |

此星公司制作 请尊重作者版权

17R

17R



7.3 热继电器的常见故障及处理 (表 2·9-16)

表 2·9-16 热继电器的常见故障及修理

| 故障现象 | 原 因 | 处 理 方 法 |
|---------|---------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 热继电器误动作 | 1. 整定值偏低 2. 电动机起动时间过长 3. 反复短时工作, 操作频率过高 4. 强烈的冲击振动 5. 连接导线太细 | 1. 合理调整整定值, 或更换符合要求的继电器、电动机 2. 按起动时间要求选择合适的热继电器 3. 合理选用热继电器 4. 选用带防冲击振动装置的专用热继电器 5. 按技术条件规定选用标准导线 |
| 热继电器不动作 | 1. 整定值偏高 2. 触点接触不良 3. 热元件烧断或脱焊 4. 动作机构卡住 5. 导板脱出 6. 连接导线太粗 | 1. 调整整定值或换上合适的热继电器 2. 清洗触点或更换有关零件 3. 更换热继电器 4. 修理或调换继电器 5. 重新放入, 调整好 6. 按技术条件规定选用标准导线 |
| 热元件烧断 | 1. 负载侧短路, 电流过大 2. 反复短时工作, 操作频率过高 3. 机构故障 | 1. 检查电路, 排除故障或更换继电器 2. 合理选用继电器 3. 更换继电器 |

7.4 自耦变压器起动器的常见故障和处理 (表 2·9-17)

表 2·9-17 自耦变压器起动器的常见故障和处理

| 故障现象 | 原 因 | 处 理 方 法 |
|------------------|-----------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|
| 起动器能合上但不能起动 | 1. 起动电压太低, 转矩不够 2. 熔丝熔断 | 1. 测量电路电压, 将起动器抽头提高一级 2. 检查熔丝, 予以更换 |
| 电动机起动电流太大 | 1. 电动机起动电流太大, 原因如下: (1) 自耦变压器的抽头电压太高 (2) 自耦变压器中有线圈短路 2. 接线错误 | 1. (1) 调整抽头 (2) 检查自耦变压器中的短路线圈, 更换线圈或重绕 2. 检查电动机和起动器之间的接线 |
| 自耦变压器发出嗡嗡声 | 1. 变压器的铁片未夹紧 2. 变压器中有线圈接地 | 1. 夹紧变压器的铁片 2. 用兆欧表查出接地的线圈, 折开重绕 |
| 起动器油箱里发出吱吱声或爆炸声 | 1. 触点有火花 2. 开关的机械部分与导体间绝缘损坏或接地 | 1. 检查油高度, 使符合规定, 并整修或更换触点 2. 查出接地点予以排除 |
| 油箱发热 | 油里渗有水分 | 更换绝缘油 |
| 欠压脱扣机构停止工作 | 欠压线圈烧坏或未接牢 | 检查接线是否正确, 触点是否熔焊, 若线圈损坏应予更换 |
| 起动器的握柄不能在运行位置上停留 | 1. 欠压继电器吸不上, 或过载继电器的触点接触不良 2. 过载继电器整定值太低, 机械机构卡住, 或弹簧里的油太薄 | 1. 检查欠压继电器接线是否正确和有否卡住现象; 检查过载继电器触点, 予以整修 2. 调整继电器, 检查撞针, 使其灵活, 或把油加浓些 |
| 联锁机构不动作 | 锁片锈牢或磨损 | 用锉刀整修或局部调换 |



7.5 漏电保护器的常见故障和处理 (表 2-9-18)

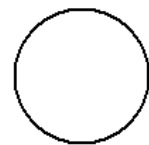
表 2-9-18 漏电保护器的常见故障和处理

| 故障现象 | 原因 | 处理方法 |
|------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 漏电保护器工作一段时间后自动断开 | <ol style="list-style-type: none"> 1. 过电流脱扣器延时整定值偏小 2. 整定电流值选择不当 3. 热元件或油阻尼脱扣元件变质 | <ol style="list-style-type: none"> 1. 重新调整 2. 重新调整整定电流值或更换 3. 将变质元件更换 |
| 漏电保护器不能闭合 | <ol style="list-style-type: none"> 1. 操作机构卡住 2. 漏电脱扣器未复位 3. 储能弹簧变形, 闭合力减小 4. 机构不能复位再扣 | <ol style="list-style-type: none"> 1. 重新调整操作机构 2. 调整漏电脱扣器 3. 更换储能弹簧 4. 调整脱扣面至规定值 |
| 漏电保护器不能带电投入 | <ol style="list-style-type: none"> 1. 漏电脱扣器不能复位 2. 过电流脱扣器未复位 3. 漏电脱扣器未复位 4. 漏电脱扣器吸合无法保持 | <ol style="list-style-type: none"> 1. 查明原因, 排除线路漏电故障 2. 等待过电流脱扣器自动复位 3. 按复位按钮, 手动复位脱扣器 4. 更换漏电脱扣器 |
| 操作试验按钮后漏电保护器不动作 | <ol style="list-style-type: none"> 1. 试验按钮接触不良 2. 操作机构卡住 3. 试验回路不通 4. 试验电阻烧坏 5. 漏电脱扣器不能使自动开关自由脱扣 6. 漏电脱扣器不能正常工作 | <ol style="list-style-type: none"> 1. 调整试验按钮 2. 调整操作机构 3. 检查该回路, 连接好导线 4. 更换试验电阻 5. 调整漏电脱扣器 6. 更换漏电脱扣器 |
| 漏电开关打不开 | <ol style="list-style-type: none"> 1. 触头发生熔焊 2. 操作机构卡住 | <ol style="list-style-type: none"> 1. 修理或更换触点, 并排除熔焊故障 2. 修理受损零件, 排除卡生现象 |
| 起动电动机时漏电开关立即断开 | <ol style="list-style-type: none"> 1. 过电流脱扣器瞬时整定值太小 2. 过电流脱扣器额定整定值选择不正确 3. 过电流脱扣器动作太快 | <ol style="list-style-type: none"> 1. 调整过电流脱扣器瞬时整定弹簧力 2. 重新选择 3. 适当调大整定电流值 |
| 触点过度磨损 | <ol style="list-style-type: none"> 1. 负载侧短路 2. 三相触点动作不同步 | <ol style="list-style-type: none"> 1. 排除短路故障, 更换触点 2. 调整到同步 |
| 一相触点不能闭合 | <ol style="list-style-type: none"> 1. 金属颗粒将触点与灭弧室卡住 2. 触点支架断开 | <ol style="list-style-type: none"> 1. 清除金属颗粒, 或更换灭弧室 2. 更换触点支架 |
| 相间短路 | <ol style="list-style-type: none"> 1. 外接线未接好 2. 尘埃堆积或粘有水气, 油污, 使绝缘劣化 3. 灭弧室损坏 | <ol style="list-style-type: none"> 1. 拧紧螺母, 保证外接线相同距离 2. 经常清理, 保持清洁 3. 更换灭弧室 |
| 过电流脱扣器烧坏 | <ol style="list-style-type: none"> 1. 短路时机构卡住, 开关无法及时断开 2. 过电流脱扣器不能正确地动作 | <ol style="list-style-type: none"> 1. 定期检查操作机构, 使之动作灵活 2. 更换过电流脱扣器 |
| 漏电开关温升过高 | <ol style="list-style-type: none"> 1. 触点表面磨损严重或损坏 2. 触点压力过小 3. 两导电零件连接处螺母松动 | <ol style="list-style-type: none"> 1. 清理接触面或更换触点 2. 调整触点压力或更换触点 3. 将螺母拧紧 |



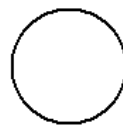
参考文献

- [1] 机械工程手册电机工程手册编辑委员会编. 电机工程手册 第4卷. 北京: 机械工业出版社, 1982
- [2] 罗守信主编. 电工学. 第二版. 北京: 高等教育出版社, 1985
- [3] 周鹤, 徐德淦, 濮开贵编. 电机学. 修订版. 北京: 水利电力出版社, 1988
- [4] 李发海, 陈汤铭, 郑逢时等编. 电机学. 第二版. 北京: 科学出版社, 1991
- [5] 吴大榕编. 电机学. 北京: 电力工业出版社, 1981
- [6] 中国大百科全书编辑部. 中国大百科全书 电工. 北京: 中国大百科全书出版社, 1992
- [7] (日)日本电气学会. 电工技术手册 第2卷, 设备部分(第16篇). 北京: 机械工业出版社, 1984
- [8] 唐介编. 控制微电机. 北京: 高等教育出版社, 1987
- [9] 朱承高主编. 电工及电子技术手册. 北京: 高等教育出版社, 1990
- [10] 沈阳变压器研究所编. 变压器. 北京: 机械工业出版社, 1988
- [11] 王毓东主编. 电机学. 杭州: 浙江大学出版社, 1990
- [12] 陈效杰主编. 工厂企业电工手册. 北京: 水利电力出版社, 1991
- [13] 黄国纬编. 三相异步电动机的故障和修理. 北京: 水利电力出版社, 1978
- [14] 高联辉编. 磁路和铁磁器件. 北京: 高等教育出版社, 1982
- [15] 机械工程手册电机工程手册编辑委员会编. 电机工程手册 第6卷, 工业电气设备. 北京: 机械工业出版社, 1982
- [16] 姜焕中编. 焊接方法及设备 第一分册, 电弧焊. 北京: 机械工业出版社, 1981
- [17] 牛济泰, 王式正编. 焊接基础. 哈尔滨: 黑龙江科学技术出版社, 1986
- [18] 王震激, 郝廷玺编. 气体保护焊工艺和设备. 北京: 国防工业出版社, 1982
- [19] 张修智等编. 气体保护焊. 北京: 电力工业出版社, 1982
- [20] 杜国华编. 手工电弧焊技术. 北京: 机械工业出版社, 1993
- [21] 伍月华等编. 绝缘门双极性晶体管(IGBT)在焊接逆变器中的应用. 电焊机, 1992(2): 11~15
- [22] 肖强编. 焊接机器人视觉系统. 焊接, 1992(4): 7~22
- [23] 鲍力立编. 点焊缝焊控制技术评述. 电焊机, 1991(6): 1~5
- [24] 朱正行等编. 微机控制的大容量晶体管逆变式电阻焊电源的研制. 焊接学报, 1991(3): 168~173
- [25] 许业清编. 实用节电技术. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1990
- [26] Armensky E V, Falk. G B Fractional-Horsepower Electrical Machines, Mir Publishers, 1978
- [27] Venall C G. Theory and Design of Small Induction Motors. McGraw-Hill, 1959



第 3 篇

工业电子技术



主编单位 浙江大学

编写单位 浙江大学

主 编 叶挺秀

编 写 人 张伯尧 叶挺秀 李家兴 罗守信

主 审 朱承高



常用符号表

- A ——放大倍数
 A_v ——电压放大倍数
 A_{vc} ——共模电压放大倍数
 A_{vd} ——差模电压放大倍数
 A_{vf} ——闭环电压放大倍数
 BW ——通带宽度 (Hz)
 F ——反馈系数的通用符号
 f ——频率的通用符号 (Hz)
 f_H ——上限频率 (Hz)
 f_L ——下限频率 (Hz)
 f_o ——振荡频率, 特征频率 (Hz)
 g_m ——场效应管和电子管跨导 (S)
 $h_{ie}, h_{re}, h_{fe}, h_{oe}$ ——晶体管共射 h 参数
 I, i ——电流的通用符号 (A)
 I_A ——晶闸管、电子管的阳极直流电流 (A)
 I_{AV} ——平均电流 (A)
 i_B ——基极电流总瞬时值 (I_B 为直流电流, i_b 为交流电流, I_b 为相量, 其他 i_c, i_D, i_E, i_i, i_o 等类似) (A)
 i_C ——集电极电流总瞬时值 (A)
 I_{CC} ——双极型管电路电源电流 (A)
 I_{CM} ——双极型管集电极最大电流 (A)
 I_{DD} ——场效应管电路电源电流 (A)
 i_E ——发射极电流总瞬时值 (A)
 I_F ——二极管、晶闸管正向电流 (A)
 I_G ——晶闸管门极电流 (A)
 i_i ——输入电流总瞬时值 (A)
 I_{IH} ——输入高电平电流 (mA)
 I_{IL} ——输入低电平电流 (mA)
 i_o ——输出电流总瞬时值
 I_{OH} ——输出高电平电流 (mA)
 I_{OL} ——输出低电平电流 (mA)
 I_Z ——稳压管稳定电流 (mA)
 K_{CMR} ——共模抑制比 (dB)
 P_{CM} ——晶体管集电极最大允许功耗 (W)
 P_{DM} ——场效应管漏极最大允许功耗 (W)
 P_o ——输出功率 (W)
 R, r ——电阻的通用符号 (Ω)
 r_{be} ——晶体管基-射动态电阻 (Ω)
 R_{GS} ——场效应管栅-源直流电阻 (Ω)
 R_i ——电路的输入电阻 (Ω)
 R_o ——电路的输出电阻 (Ω)
 T ——周期 (s)
 t_{off} ——关断时间 (ns)
 t_{on} ——开通时间 (ns)
 t_{pd} ——平均传输延迟时间 (ns)
 t_{rr} ——开关二极管反向恢复时间 (ns)
 t_W ——单稳态触发器输出脉冲宽度 (s)
 U, u ——电压的通用符号 (V)
 u_{AK} ——阳-阴极间电压的总瞬时值 (V)
 u_{BE} ——晶体管基极-发射极间电压的总瞬时值 (U_{BE} 为直流电压, u_{be} 为交流电压, 其他 $u_{CE}, u_{GS}, u_{DS}, u_i, u_o$ 等类似) (V)
 U_C, u_C ——电容器两端电压, 控制电压 (V)
 U_{CC} ——双极型管电路的电源电压 (V)
 u_{CE} ——集电极-发射极间电压的总瞬时值 (V)
 U_D ——二极管导通电压 (V)
 U_{DD} ——场效应管电路的电源电压 (V)
 U_F ——二极管、晶闸管的正向压降 (V)
 U_G ——晶闸管门极及场效应管、电子管栅极电压 (V)
 $U_{GS(TH)}$ ——场效应管栅-源开启电压 (V)
 $U_{GS(OFF)}$ ——场效应管栅-源夹断电压 (V)
 u_i ——输入电压的总瞬时值 (V)
 U_{ICM} ——运放最大共模输入电压 (V)
 U_{IDM} ——运放最大差模输入电压 (V)
 U_{IH} ——输入高电平 (V)
 U_{IL} ——输入低电平 (V)
 U_{NH} ——输入高电平噪声容限 (V)
 U_{NL} ——输入低电平噪声容限 (V)
 u_o ——输出电压的总瞬时值 (V)
 U_{OH} ——输出高电平 (V)
 U_{OL} ——输出低电平 (V)
 U_{ON} ——二极管、三极管的开通电压 (V)



U_{REF} ——参考电压、基准电压 (V)
 U_{T+} ——比较器、施密特触发器的上限阈值电压 (V)
 U_{T-} ——比较器、施密特触发器的下限阈值电压 (V)
 ΔU_T ——施密特触发器的回差 (V)
 U_{TH} ——门电路阈值电压 (V)
 U_z ——稳压管稳定电压 (V)

β ——晶体管共射交流电流放大系数
 $\bar{\beta}$ ——晶体管共射直流电流放大系数
 η ——效率 (%), 单结晶体管分压比
 φ ——相角的通用符号 (rad)
 ω ——角频率的通用符号 (rad/s)

常用缩写词表

| | | | |
|-----------------------------------------------|---------|-----------------------------------|------------|
| ADC (Analog-Digital Converter) | 模-数转换器 | LPF (Low-Pass Filter) | 低通滤波器 |
| ALU (Arithmetic Logic Unit) | 算术逻辑单元 | MCT (MOS Controlled Thyristor) | MOS 控制晶闸管 |
| BCD (Binary-Coded-Decimal) | 二-十进制编码 | MOS (Metal-Oxide-Semiconductor) | 金属-氧化物-半导体 |
| BEF (Band-Elimination Filter) | 带阻滤波器 | OC (Open Collector) | 集电极开路 |
| BPF (Bandpass Filter) | 带通滤波器 | OCL (Output Capacitorless) | 无输出电容器 |
| BTL (Balanced Transformerless) | 平衡式无变压器 | OTL (Output Transformerless) | 无输出变压器 |
| CMOS (Complementary MOS) | 互补 MOS | PAM (Pulse Amplitude Modulation) | 脉冲幅度调制 |
| CP (Clock Pulse) | 时钟脉冲 | PCM (Pulse Code Modulation) | 脉冲编码调制 |
| CRT (Cathode-Ray Tube) | 阴极射线管 | PLL (Phase-Locked Loop) | 锁相环 |
| DAC (Digital-Analog Converter) | 数-模转换器 | PPM (Pulse Position Modulation) | 脉冲位置调制 |
| ECL (Emitter-Coupled Logic) | 发射极耦合逻辑 | PWM (Pulse Width Modulation) | 脉冲宽度调制 |
| GTO (Gate Turn-Off Thyristor) | 可关断晶闸管 | SCF (Switched-Capacitor Filter) | 开关电容滤波器 |
| GTR (Giant Transistor) | 大功率晶体管 | SCN (Switched Capacitor Network) | 开关电容网络 |
| HPF (High-Pass Filter) | 高通滤波器 | SIT (Static Induction Transistor) | 静电感应晶体管 |
| HTL (High Threshold Logic) | 高阈值逻辑 | SITH (Static Induction Thyristor) | 静电感应晶闸管 |
| IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) | 绝缘门极晶体管 | TTL (Transistor-Transistor Logic) | 晶体管-晶体管逻辑 |
| I ² L (Integrated-Injection Logic) | 集成注入逻辑 | | |
| LED (Light Emitting Diode) | 发光二极管 | | |



第 1 章 常用电子器件

电子器件分为分立元件和集成电路两类，分立元件又分为半导体元件和电子管等。

1 半导体二极管

半导体二极管的结构有点接触型、面接触型、平面型等；所用材料有硅、锗、砷化镓等；其类别有小信号管、整流管、开关管、稳压管、变容管、发光管、光电管等。它们多由 PN 结构成。

1.1 PN 结

导电能力居导体与绝缘体之间的物质称为半导体。半导体中的载流子是带负电的电子和带正电的空穴。若电子浓度远大于空穴浓度，电子为多数载流子，空穴为少数载流子，则称为 N 型半导体；若空穴为多数载流子，电子为少数载流子，则称为 P 型半导体。

若通过掺入不同的杂质，使一块半导体的一边为 P 型，另一边为 N 型，则由于载流子的浓度差使 P 区的空穴向 N 区扩散，N 区的电子向 P 区扩散。空穴和电子相遇就复合而消失。因此在 P 区和 N 区的交界面附近形成了由不能移动的带电离子组成的空间电荷区，称为 PN 结（见图 3-1-1a）。P 区一侧的空间电荷是负离子，N 区一侧的空间电荷是正离子。正负离子形成一个由 N 区指向 P 区的内电场。随着扩散的进行，空间电荷区加宽，内电场加强。内电场一方面阻止多数载流子的扩散，另一方面使 P 区的少数载流子电子向 N 区漂移，N 区的少数载流子空穴向 P 区漂移，结果使空间电荷区变窄，内电场削弱。最终，扩散与漂移达到平衡，流过 PN 结的电流为零。

PN 结具有单向导电性。若 P 区接电源正极，N 区接电源负极（称为正向偏置），则空间电荷区变窄，电流可顺利地流过 PN 结；若 P 区接电源负极，N 区接电源正极（称为反向偏置），则空间电荷区变宽，反向电流很小。

对于图 3-1-1a 所示电压、电流参考方向，PN 结的电压-电流方程式为

$$I = I_S(e^{U/U_T} - 1) \quad (3 \cdot 1 - 1)$$

$$U_T = \frac{kT}{q}$$

式中 I ——流过 PN 结的电流 (A)；

I_S ——PN 结的反向饱和电流 (A)；

U ——加于 PN 结上的电压 (V)；

U_T ——温度电压当量 (V)；

k ——玻尔兹曼常数 ($1.38 \times 10^{-23} \text{J/K}$)；

T ——PN 结热力学温度 (K)；

q ——电子电荷量 ($1.60 \times 10^{-19} \text{C}$)。

在 25℃ 时， $T = 298 \text{K}$ ， $U_T \approx 26 \times 10^{-3} \text{V}$ 。当 U 和 U_T 的单位均用 mV 时，则

$$I = I_S(e^{U/26} - 1)$$

由式 (3-1-1) 可画出理想的 PN 结伏安特性曲线，见图 3-1-1b。

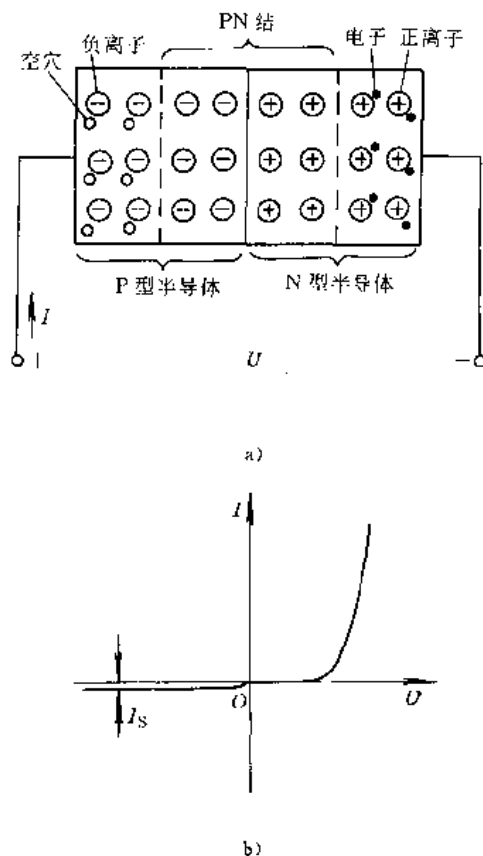


图 3-1-1 PN 结及其伏安特性

a) PN 结 b) PN 结的理想伏安特性

1.2 小信号二极管

由 PN 结加上引出线和管壳就构成二极管。从 P



区引出的电极称为阳极，N区引出的电极称为阴极。小信号二极管的图形符号和伏安特性曲线示例见图3-1-2。当反向电压过高时，PN结会反向击穿，使反向电流剧增。在反向击穿前，反向饱和电流 I_s 很小。当

正向电压较小时， $I \approx 0$ ，曲线中的这部分称为死区，硅管死区的阈值电压 U_{TH} （也称开启电压）为0.5V左右， I_s 为零点几至几微安；锗管的 U_{TH} 为0.2V左右， I_s 为几十至几百微安。

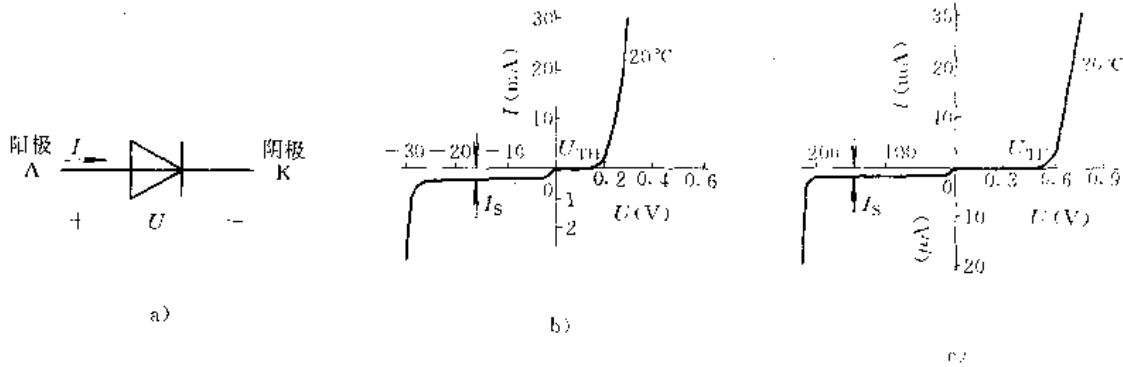


图3-1-2 小信号二极管的图形符号和伏安特性示例
a) 图形符号 b) 锗管的伏安特性 c) 硅管的伏安特性

有时用图3-1-3a所示的折线来近似表示二极管的正向特性，并由此得出图3-1-3b的在正向工作状态下的直流等效电路。图中 U_{ON} 为正向导通电压（通常硅管取0.7V，锗管取0.3V）； $r_D = \Delta U / \Delta I$ 为正向电阻，反映二极管两端的电压随电流变化的情况。

- (1) 额定正向平均电流 I_F 。允许长期通过的最大正向平均电流。
 - (2) 最大反向电压 U_{RM} 。即反向击穿电压。
 - (3) 最大反向工作电压 U_R 。使用时允许加的最大反向电压，常取 U_{RM} 的1/2~2/3。
 - (4) 反向电流 I_R 。所加反向电压等于 U_R 时的反向电流。
 - (5) 正向压降 U_F 。流过一定正向直流电流时，阳极与阴极之间的直流电压降。一般，锗管为0.3~0.5V；硅管为0.6~1V。
 - (6) 最高工作频率 f_M 。能正常工作的最高频率。
- 小信号二极管主要用于电流小于1A的场合作整流或检波。

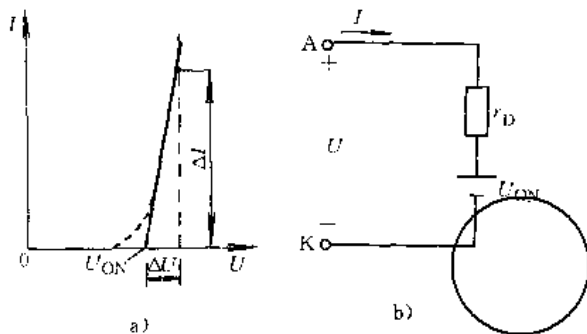


图3-1-3 二极管正向特性的折线近似和直流等效电路

a) 正向特性的折线近似 b) 直流等效电路

小信号二极管的主要参数有：

表3-1-1 整流二极管主要参数示例

| 型 号 | 2CZ54 | 2CZ58 | 2DZ15 | ZP500① |
|------------------|----------|------------|----------|----------|
| 正向平均电流 I_F (A) | 0.5 | 10 | 1 | 500 |
| 正向压降 U_F (V) | ≤ 1 | ≤ 0.8 | ≤ 1 | 0.5~0.75 |
| 反向工作电压 U_R (V) | 25~800 | 25~800 | 200~2000 | 100~1600 |

① 根据原第一机械工业部部标准JB2423-78命名，Z—整流管，P—普通管，500—额定电流系列数。

1.3 整流二极管

整流二极管多用硅半导体材料制成，采用面接触型结构，结面积较大，能承受较大的正向电流和反向电压，它的伏安特性与小信号二极管相同。表3-1-1是整流二极管主要参数示例。



1.4 开关二极管

二极管正向导通时相当于“开关接通”，反向截止时相当于“开关断开”，故二极管具有开关作用。二极管的开关时间包含开通时间和反向恢复时间。反向恢复时间指从加上反向电压时起，至反向电流减小为起始值的10%止所需的时间。因反向恢复时间远大于开通时间，故产品手册中常给出反向恢复时间 t_{rr} 。

2AK系列锗开关二极管的 t_{rr} 在几百纳秒以下，主要用于一般开关电路。2CK系列硅开关二极管的 t_{rr} 为几纳秒，主要用于各种高速开关和脉冲、自动控制等电路中。

1.5 稳压二极管

稳压二极管(简称稳压管)工作于PN结的反向击穿状态，当流过的电流改变时，两端的电压基本不变，具有稳压作用。稳压管有单向稳压和双向稳压两类，其图形符号和伏安特性见图3-1-4。

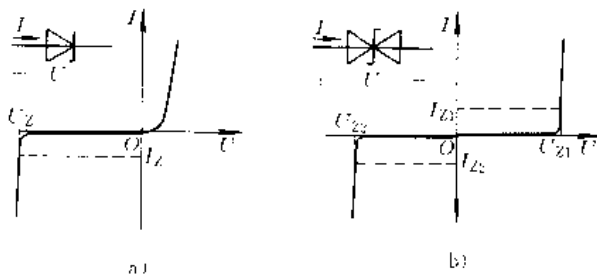


图3-1-4 稳压二极管符号和伏安特性
a) 单向稳压管 b) 双向稳压管

稳压二极管的主要参数有：

(1) 稳定电压 U_Z 。稳压管反向击穿后对应于规定电流(即稳定电流)时，稳压管两端的电压值。对于双向稳压管，即为 U_{Z1} 和 U_{Z2} 。

(2) 稳定电流 I_Z 。稳定电压 U_Z 所对应的电流。对于双向稳压管，即为 I_{Z1} 和 I_{Z2} 。

(3) 最大稳定电流 I_{ZM} 。稳压管能正常工作的最大反向电流。

(4) 耗散功率 P_Z 。由稳压管温升决定的允许功耗，其值为 U_Z 和 I_{ZM} 的乘积。

(5) 动态电阻 r_z 。在稳压状态下稳压管两端电压变化量与流过的电流变化量之比。工作电流值大， r_z 小，稳压性能好。

(6) 温度系数 α_{vZT} 。温度每升高 1°C 时 U_Z 增加的百分值。

1.6 变容二极管

变容二极管是利用PN结的空间电荷层具有电容特性的原理制成的，其结电容随管子两端的反向电压变化。反向电压愈小，结电容愈大。图3-1-5是它的图形符号及其等效电容 C_j 和反向电压的关系曲线示例。

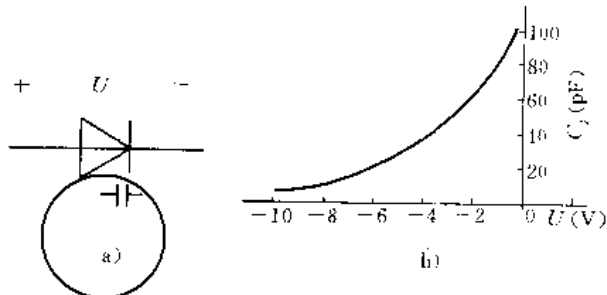


图3-1-5 变容二极管的图形符号
及 C_j-U 曲线示例
a) 图形符号 b) C_j-U 关系曲线示例

变容二极管具有可变电容器的功能，多用于电调谐电路和自动频率微调电路中。

1.7 隧道二极管

隧道二极管是利用隧道效应构成的特殊二极管，其半导体掺杂浓度远高于小信号二极管，PN结极薄。

隧道二极管的图形符号和伏安特性曲线见图3-1-6。图中P点称为峰点， U_P 称为峰值电压(约几十毫伏)， I_P 称为峰值电流(约几毫安)；V点称为谷点， U_V 称为谷值电压(约几百毫伏)， I_V 称为谷值电流(约几百微安)。它们是隧道二极管的主要参数。由于曲线P-V段呈负阻特性，因此，隧道二极管可用作负阻器件。它的工作频率可达几十万兆赫，多用于高频高速电路中。

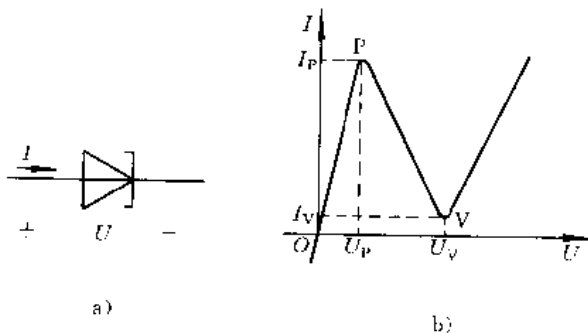


图3-1-6 隧道二极管的图形符号和伏安特性
a) 图形符号 b) 伏安特性



1.8 肖特基二极管

肖特基二极管 (Schottky Diode) 是由金属和低掺杂的 N 型半导体相接触而构成的二极管, 它依靠多数载流子工作, 其伏安特性和小信号二极管相似, 图形符号见图 3-1-7。

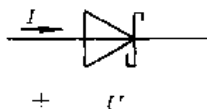


图 3-1-7 肖特基二极管的图形符号

肖特基二极管的主要特点是存储电荷少, 开关时间特别短; 开启电压比普通硅 PN 结低, 约为 0.3V。它的耗尽层薄, 反向击穿电压较低, 不能承受大的功率。肖特基二极管适用于高频高速电路。在数字集成电路中, 它常与晶体三极管做在一起, 形成肖特基晶体管, 以提高电路的开关速度。

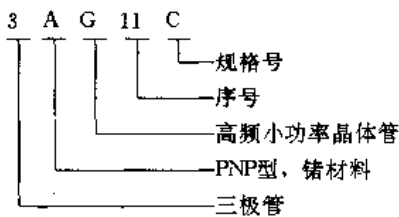
1.9 半导体分立器件型号命名法

国产半导体分立器件型号的命名方法见表 3-1-2。场效应晶体管、特殊晶体管、复合管、发光二极管、光耦合器、光敏晶体管等的型号无第一、二部分。

表 3-1-2 国产半导体分立器件型号命名法 (根据国家标准 GB249—89)

| 第一部分 | | 第二部分 | | 第三部分 | | 第四部分 | 第五部分 |
|--------------|-----|---------------|------------|------------|--------------------------------------|---------|----------|
| 用数字表示器件的电极数目 | | 用字母表示器件的材料和极性 | | 用字母表示器件的类别 | | 用数字表示序号 | 用字母表示规格号 |
| 符号 | 意义 | 符号 | 意义 | 符号 | 意义 | | |
| 2 | 二极管 | A | N 型, 锗材料 | P | 小信号管 | | |
| | | B | P 型, 锗材料 | V | 混频检波管 | | |
| | | C | N 型, 硅材料 | W | 电压调整管和电压基准管 | | |
| | | D | P 型, 硅材料 | C | 变容管 | | |
| 3 | 三极管 | A | PNP 型, 锗材料 | Z | 整流管 | | |
| | | B | NPN 型, 锗材料 | L | 整流堆 | | |
| | | C | PNP 型, 硅材料 | S | 隧道管 | | |
| | | D | NPN 型, 硅材料 | K | 开关管 | | |
| | | E | 化合物材料 | X | 低频小功率晶体管 (截止频率 < 3MHz, 耗散功率 < 1W) | | |
| | | | | G | 高频小功率晶体管 (截止频率 ≥ 3MHz, 耗散功率 < 1W) | | |
| | | | | D | 低频大功率晶体管 (截止频率 < 3MHz, 耗散功率 ≥ 1W) | | |
| | | | | A | 高频大功率晶体管 (截止频率 ≥ 3MHz, 耗散功率 ≥ 1W) | | |
| | | | | T | 闸流管 | | |
| | | | | SC | 场效应晶体管 | | |
| | | | | BT | 特殊晶体管 | | |
| | | | | FH | 复合管 | | |
| | | | | GF | 发光二极管 | | |
| | | | | GH | 光耦合器 | | |
| | | | | ⋮ | ⋮ | | |

示例:



2 双极型晶体管

2.1 双极型晶体管的结构和电流放大作用

双极型晶体管 (简称晶体管) 又称晶体三极管, 三

极管, 它由硅或锗等材料制成, 分为 NPN 型和 PNP 型两种。它们都有两个 PN 结 (发射结和集电结), 三个区 (基区、发射区和集电区), 三个电极 (基极 B、发射极 E 和集电极 C)。其基本结构示意图和图形符号见图 3-1-8。



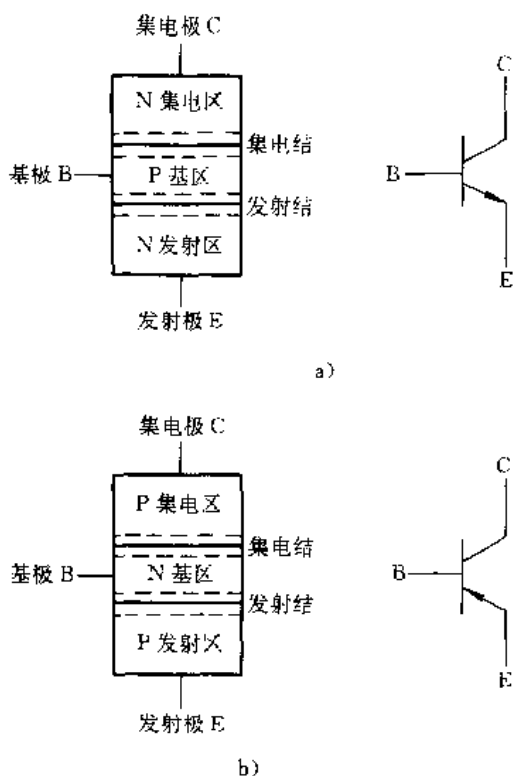


图 3-1-8 晶体管基本结构示意图和图形符号
a) NPN 型 b) PNP 型

若使晶体管的发射结正向偏置，集电结反向偏置（见图 3-1-9，图中为 NPN 管，对 PNP 管，电源极性相反），则电流关系为 $I_E = I_C + I_B$ ，且 $I_E \approx I_C \gg I_B$ ，其变化量 $\Delta I_E \approx \Delta I_C \gg \Delta I_B$ ，即基极电流 I_B 的微小变化会引起集电极电流 I_C 的较大变化，晶体管具有电流放大作用，属电流控制器件。晶体管工作时电子和空穴两种极性的载流子都参与导电。

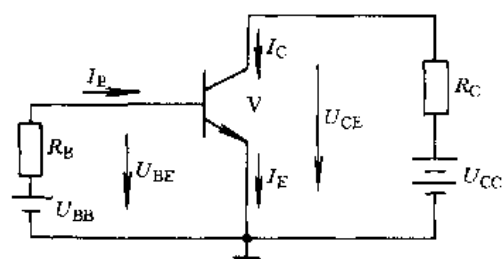


图 3-1-9 晶体管共发射极接法

在图 3-1-9 中，晶体管的发射极为公共接地点，这种接法称为共发射极接法。晶体管还有共集电极接法和共基极接法，在第 2 章介绍。

2.2 双极型晶体管的特性曲线

1. 共发射极输入特性曲线 表示 U_{CE} 为一定值时， I_B 和 U_{BE} 间的关系，即 $I_B = f(U_{BE}) |_{U_{CE}=\text{常数}}$ ，见图 3-1-10a。 $U_{CE} > 1V$ 时的输入特性曲线与 $U_{CE} = 1V$

时的输入特性曲线基本重合。

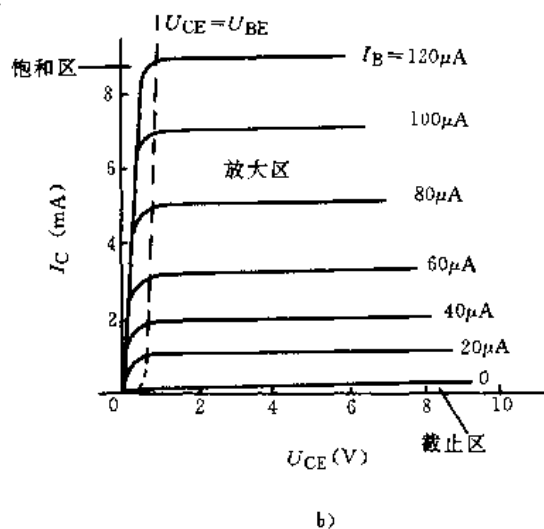
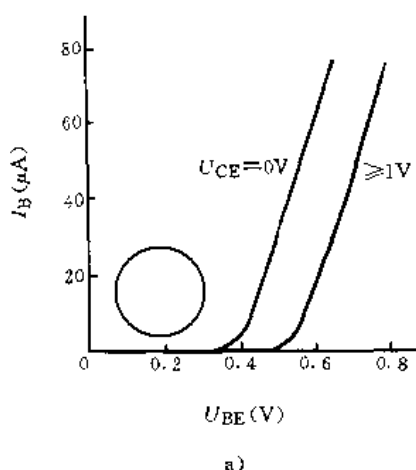


图 3-1-10 晶体管特性曲线示例
a) 输入特性 b) 输出特性

2. 共发射极输出特性曲线 表示 I_B 为一定值时， I_C 和 U_{CE} 间的关系，即 $I_C = f(U_{CE}) |_{I_B=\text{常数}}$ ，见图 3-1-10b。输出特性曲线可分为三个区：

a. 截止区 $I_E = 0$ 即 $I_C \leq I_{CBO}$ 的区域。有时把 $I_B = 0$ 时的输出特性曲线以下的区域称为截止区。晶体管截止时 C-E 间相当于一个断开的开关。

b. 饱和区 $U_{CE} < U_{BE}$ 的区域。此时 U_{CE} 很小（深度饱和时小于 0.3V），发射结、集电结均正偏，无放大作用，晶体管的 C-E 间相当于一个接通的开关。

c. 放大区 曲线水平部分的区域。此时发射结正偏，集电结反偏， I_C 与 U_{CE} 基本无关， $\Delta I_C \gg \Delta I_B$ ，有放大作用。

因此，晶体管具有放大作用和开关作用，分别应用于放大电路和开关电路。



2.3 双极型晶体管的主要参数

双极型晶体管的主要参数见表 3-1-3。

2.4 双极型晶体管的等效电路

晶体管工作于线性放大区时,可用等效电路表示,以便于放大电路的分析计算。

1. 直流等效电路 通常用折线来近似晶体管的

输入、输出特性曲线(见图 3-1-11a 和 b),由此可得图 3-1-11c 所示的直流等效电路。图中各电压、电流均为直流。 U_{ON} 表示发射结的导通电压,硅管为 0.7V 左右,锗管为 0.3V 左右; $r_{be} = \Delta U_{BE} / \Delta I_B$,反映 U_{BE} 随 I_B 变化的情况; βI_B 是电流控制电流源,表示 I_C 受 I_B 控制; $r_{ce} = \Delta U_{CE} / \Delta I_C$,反映 I_C 随 U_{CE} 变化的情况。在简化分析时,常采用简化的直流等效电路(认为 $r_{be} = 0, r_{ce} = \infty$)。

表 3-1-3 双极型晶体管的主要参数

| 类型 | 名称 | 符号 | 意义 | 参数值示例 | |
|------|---------------|----------------|----------------------------------------------------------------------------------------|------------------|------------------|
| | | | | 3DG100A | 3DK3A |
| 直流参数 | 共射直流电流放大系数 | $\bar{\beta}$ | $\bar{\beta} = (I_C - I_{CBO}) / I_B$ | | |
| | 共基直流电流放大系数 | $\bar{\alpha}$ | $\bar{\alpha} = (I_C - I_{CBO}) / I_E$ | | |
| | 集-基反向饱和电流 | I_{CBO} | 发射极开路时, C-B 间反向电流 | $\leq 0.1 \mu A$ | $\leq 0.1 \mu A$ |
| | 集-射穿透电流 | I_{CEO} | 基极开路时, C-E 间的电流 | $\leq 0.1 \mu A$ | $\leq 0.1 \mu A$ |
| 交流参数 | 共射交流电流放大系数 | β | $\beta = \Delta I_C / \Delta I_B$ | ≥ 30 | ≥ 10 |
| | 共基交流电流放大系数 | α | $\alpha = \Delta I_C / \Delta I_E$ | | |
| | | | $\left(\alpha = \frac{\beta}{1 + \beta}, \beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \right)$ | | |
| | β 截止频率 | f_{β} | β 下降至低频值的 $\frac{1}{\sqrt{2}}$ 倍时的频率 | | |
| | α 截止频率 | f_{α} | α 下降至低频值的 $\frac{1}{\sqrt{2}}$ 倍时的频率 | | |
| | 特征频率 | f_T | β 下降为 1 时的频率 (低频时, $\beta \approx \bar{\beta}, \alpha \approx \bar{\alpha}$) | $\geq 150 MHz$ | $\geq 200 MHz$ |
| 极限参数 | 集电极最大电流 | I_{CM} | 集电极最大允许直流电流值 | 20mA | 30mA |
| | 集电极最大允许功耗 | P_{CM} | 集电极允许耗散的最大功率 | 100mW | 100mW |
| | 集-射反向击穿电压 | $U_{(BR)CEO}$ | 基极开路时, C-E 间的击穿电压 | $\geq 20V$ | $\geq 6V$ |
| | 集-基反向击穿电压 | $U_{(BR)CBO}$ | 发射极开路时, C-B 间的击穿电压 | $\geq 30V$ | $\geq 10V$ |
| | 射-基反向击穿电压 | $U_{(BR)EBO}$ | 集电极开路时, E-B 间的击穿电压 | $\geq 4V$ | $\geq 4V$ |
| 开关参数 | 延迟时间 | t_d | | | |
| | 上升时间 | t_r | | 20ns | |
| | 存储时间 | t_s | | 20ns | |
| | 下降时间 | t_f | | 30ns | |
| | 开通时间 | t_{on} | | 30ns | |
| | 关断时间 | t_{off} | | 40ns | |
| | | | | | 60ns |

此星公司制作 请尊重原作者版权



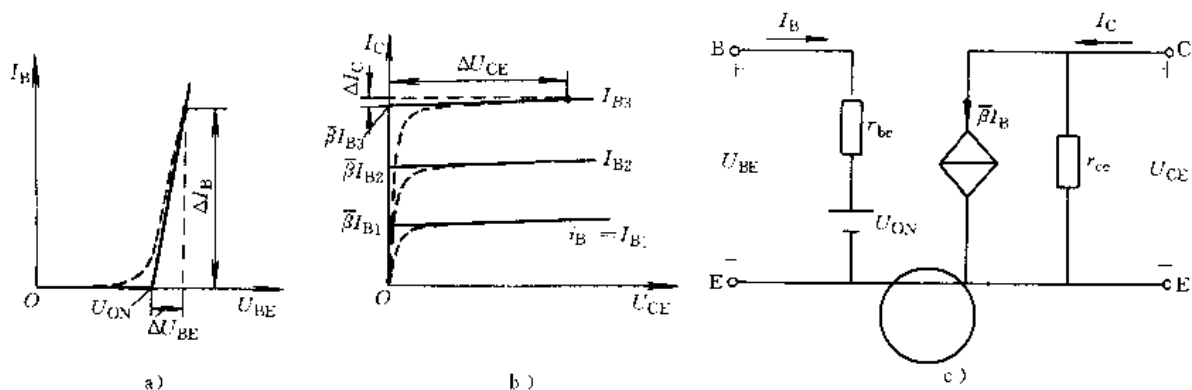


图 3-1-11 晶体管特性曲线的折线近似及直流等效电路 (NPN 型)

- a) 输入特性曲线的折线近似 b) 输出特性曲线的折线近似
c) 直流等效电路 ($U_{CE} \geq U_{BE} \geq U_{ON}$)

利用晶体管的直流等效电路，可方便地确定晶体管的静态工作点（参见本篇第2章2·1节）。

2. h 参数等效电路 共发射极接法的晶体管的输入、输出特性可表示为

$$u_{BE} = f_1(i_B, u_{CE})$$

$$i_C = f_2(i_B, u_{CE})$$

式中 i_B 、 i_C 、 u_{BE} 、 u_{CE} 均为总瞬时值。将上两式在静态工作点 (I_B , U_{CE}) 按泰勒公式展开，并取一阶近似可得

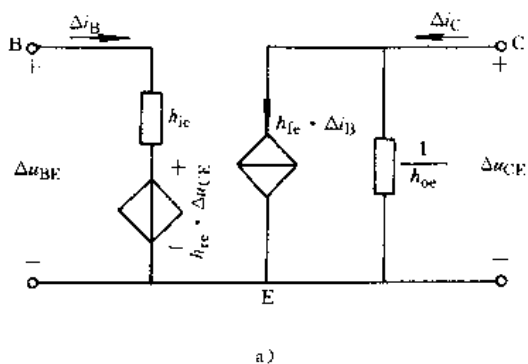
$$\Delta u_{BE} = \left. \frac{\partial u_{BE}}{\partial i_B} \right|_{U_{CE}} \cdot \Delta i_B + \left. \frac{\partial u_{BE}}{\partial u_{CE}} \right|_{I_B} \cdot \Delta u_{CE}$$

$$\Delta i_C = \left. \frac{\partial i_C}{\partial i_B} \right|_{U_{CE}} \cdot \Delta i_B + \left. \frac{\partial i_C}{\partial u_{CE}} \right|_{I_B} \cdot \Delta u_{CE}$$

式中 Δi_B 、 Δi_C 、 Δu_{BE} 、 Δu_{CE} 表示工作点附近的微变量。 h 参数定义如下：

$$h_{ie} = \left. \frac{\partial u_{BE}}{\partial i_B} \right|_{U_{CE}} \quad h_{re} = \left. \frac{\partial u_{BE}}{\partial u_{CE}} \right|_{I_B}$$

$$h_{ie} = \left. \frac{\partial i_C}{\partial i_B} \right|_{U_{CE}} \quad h_{oe} = \left. \frac{\partial i_C}{\partial u_{CE}} \right|_{I_B}$$



则

$$\Delta u_{BE} = h_{re} \Delta i_B + h_{re} \Delta u_{CE}$$

$$\Delta i_C = h_{ie} \Delta i_B + h_{oe} \Delta u_{CE}$$

对应的 h 参数等效电路见图 3-1-12a。其中 $h_{re} \cdot \Delta u_{CE}$ 反映输出对输入的反作用， h_{re} 一般很小； h_{oe} （电导量纲）反映输出特性曲线上翘的程度，曲线大多很平， h_{oe} 多小于 $10^{-5} S$ 。略去 h_{re} 和 h_{oe} 即得简化的 h 参数等效电路，见图 3-1-12b。

在静态工作点附近， $h_{ie} = \partial i_C / \partial i_B \approx \Delta i_C / \Delta i_B = \beta$ ； $h_{re} = \partial u_{BE} / \partial i_B \approx \Delta u_{BE} / \Delta i_B = r_{be}$ ，其值为

$$r_{be} \approx r_{bb'} + (1 + \beta) \frac{26}{I_E}$$

式中 r_{be} ——晶体管的输入电阻 (Ω)；
 $r_{bb'}$ ——基区体电阻 (几十欧到几百欧)；
 I_E ——发射极静态电流 (mA)。

晶体管的 h 参数为动态参数。利用 h 参数等效电路可方便地分析晶体管在低频小信号下的工作状态。

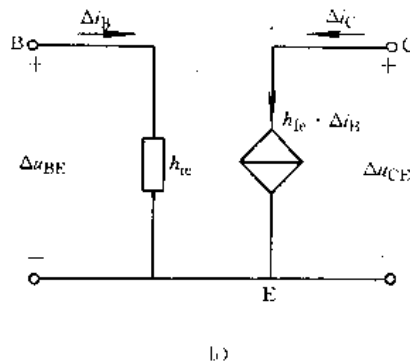


图 3-1-12 晶体管共射接法 h 参数等效电路
a) h 参数等效电路 b) 简化 h 参数等效电路

此星公司制作 请尊重原作者版权



3 场效应晶体管

场效应晶体管(简称场效应管)是利用电场效应来控制电流的单极型晶体管,它的主要特点是控制端基本上不需要电流(属电压控制器件),受温度、辐射等外界条件影响小,便于集成。

3.1 结型场效应晶体管

结型场效应管的导电沟道有N沟道和P沟道两种,图3.1-13是它们的结构原理图,三个电极分别为源极S、漏极D和栅极G。

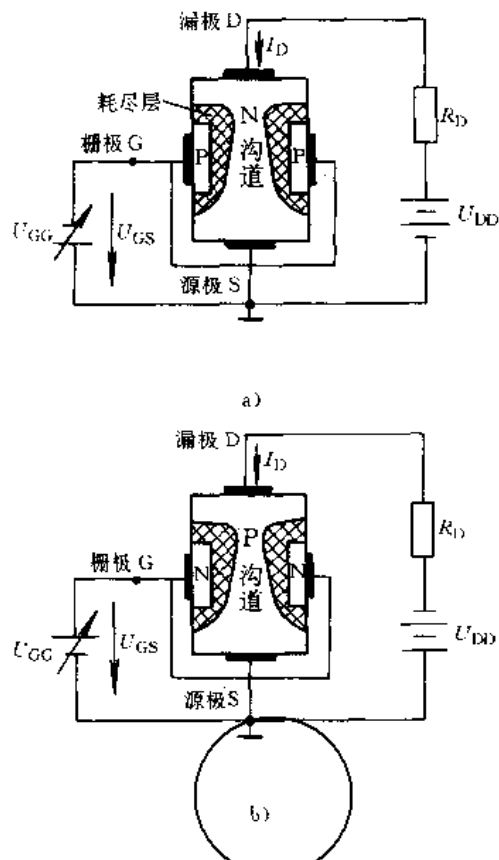


图 3.1-13 结型场效应管结构原理图
a) N沟道管 b) P沟道管

当栅源电压为零时,导电沟道最宽,在一定范围内改变栅源电压 U_{GS} ,可改变导电沟道的宽度,实现栅源电压对漏极电流 I_D 的控制。若N沟道管栅源间加正偏压或P沟道管栅源间加负偏压,就失去控制作用,并会产生较大的栅极电流。

场效应管的特性曲线有漏极和转移特性曲线 $I_D = f(U_{DS}) |_{U_{GS}=\text{常数}}$ 、 $I_D = f(U_{GS}) |_{U_{DS}=\text{常数}}$ 。图3.1-14是N沟道结型场效应管的特性曲线示例。漏极特性曲线可分为可变电阻区、恒流区和夹断区。场效应管工作

在可变电阻区时,可作为压控电阻使用。在恒流区, I_D 可近似地表示为

$$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{U_{GS}}{U_{GS(OFF)}} \right)^2 \quad (U_{GS} = 0 \sim U_{GS(OFF)})$$

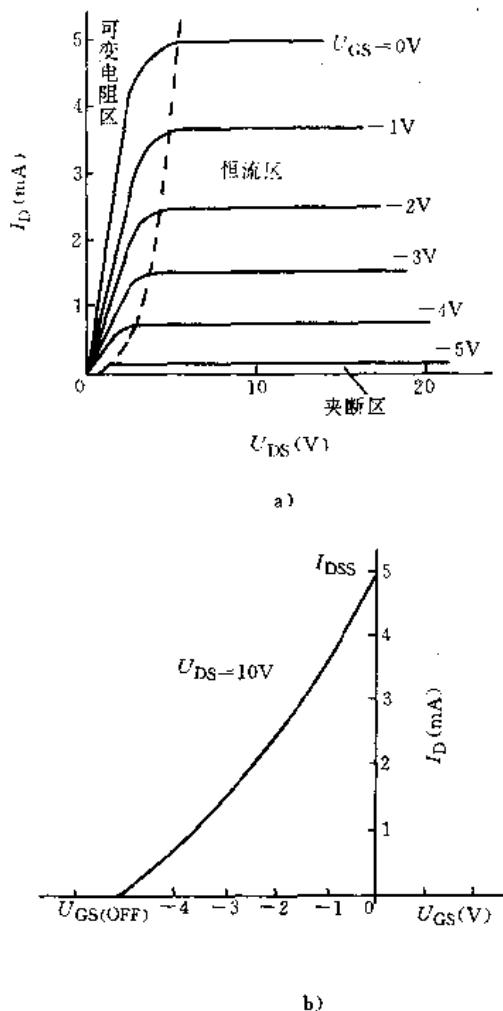


图 3.1-14 N沟道结型场效应管特性曲线示例
a) 漏极特性曲线 b) 转移特性曲线

3.2 绝缘栅场效应晶体管

绝缘栅场效应管目前常用的是以二氧化硅作为金属(铝)栅极和半导体之间的绝缘层,简称MOS(Metal-Oxide-Semiconductor)管。它有N沟道和P沟道两种,每一种又分为增强型($U_{GS}=0$ 时不存在导电沟道)和耗尽型($U_{GS}=0$ 时存在导电沟道)。图3.1-15是增强型MOS管的结构示意图。如果仅在漏源间加电压 U_{DS} ,管子不会导通。只有在栅源间再加一定的电压 U_{GS} 时(N沟道管加正电压,P沟道管加负电压),漏源间才形成导电沟道,产生漏极电流。改变 U_{GS} 就可控制



漏极电流的大小。

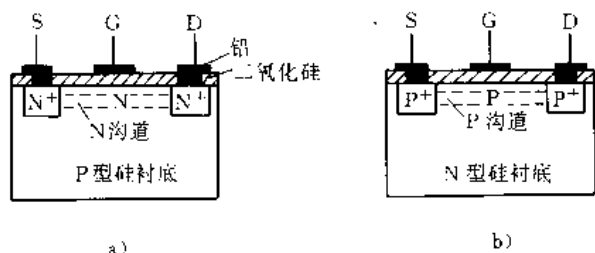
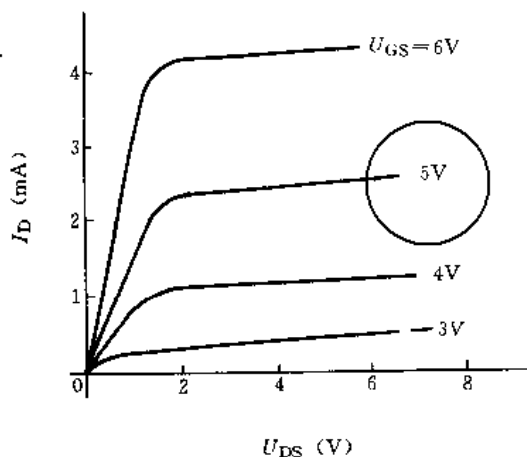


图 3-1-15 增强型 MOS 管结构示意图
a) N 沟道管 b) P 沟道管

图 3-1-16 为 N 沟道增强型 MOS 管的特性曲线



a)

示例, 当 $U_{GS} > U_{GS(TH)}$ 时才产生 I_D , 称 $U_{GS(TH)}$ 为开启电压。 I_D 和 U_{GS} 的近似关系式为

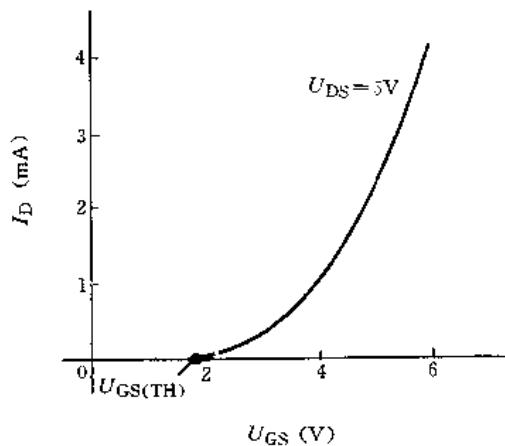
$$I_D = I_{D0} \left(\frac{U_{GS}}{U_{GS(TH)}} - 1 \right)^2 \quad (|U_{GS}| \geq U_{GS(TH)})$$

式中 I_{D0} 为 $U_{GS} = 2U_{GS(TH)}$ 时的 I_D 值。

场效应管类型较多, 它们的图形符号、电压极性和转移特性曲线见表 3-1-4。

3-3 场效应晶体管的主要参数

场效应管的主要参数见表 3-1-5。



b)

图 3-1-16 N 沟道增强型 MOS 管特性曲线示例

a) 漏极特性曲线 b) 转移特性曲线

表 3-1-4 场效应管的图形符号、电压极性和转移特性曲线

| 结构类型 | | 图形符号① | 电压极性 | | 转移特性曲线② |
|------|----------|-------|----------|----------|---------|
| | | | U_{GS} | U_{DS} | |
| 结型 | N 沟道 耗尽型 | | 负 | 正 | |
| | P 沟道 耗尽型 | | 正 | 负 | |



(续)

| 结构类型 | | 图形符号① | 电压极性 | | 转移特性曲线② |
|----------------|-----|-------|----------|----------|---------|
| | | | U_{GS} | U_{DS} | |
| 绝缘栅型 (MOS型) | N沟道 | | 负或正 | 正 | |
| | 增强型 | | 正 | 正 | |
| | P沟道 | | 正或负 | 负 | |
| | 增强型 | | 负 | 负 | |

① G—栅极，D—漏极，S—源极。

② I_D —漏极电流， U_{GS} —栅-源电压， I_{DSS} —饱和漏极电流， $U_{GS(OFF)}$ —夹断电压， $U_{GS(TH)}$ —开启电压。

表 3-1-5 场效应管的主要参数

| 名称 | 符号 | 意义 | 参数值示例 | |
|--------|---------------|-------------------------|--------------|-----------------|
| | | | CS110A | 3CO1A |
| 开启电压 | $U_{GS(TH)}$ | 增强型管参数，见表 3-1-4 的特性曲线 | — | -2 ~ -8V |
| 夹断电压 | $U_{GS(OFF)}$ | 耗尽型管参数，见表 3-1-4 的特性曲线 | -4V | — |
| 饱和漏极电流 | I_{DSS} | 耗尽型管参数，见表 3-1-4 的特性曲线 | 0.05 ~ 0.3mA | — |
| 直流输入电阻 | R_{GS} | $R_{GS} = U_{GS} / I_G$ | | $> 10^7 \Omega$ |



(续)

| 名称 | 符号 | 意义 | 参数值示例 | |
|--------|--------------|--------------------------------------------------------------------------|---------|----------|
| | | | CS110A | 3CO1A |
| 低频跨导 | g_m | $g_m = di_D / du_{GS} \approx \Delta i_D / \Delta u_{GS}$ (U_{DS} 不变) | 0.5mA/V | >0.5mA/V |
| 漏源电容 | C_{DS} | D-S极间电容 | | |
| 栅源电容 | C_{GS} | G-S极间电容 | 3pF | |
| 栅漏电容 | C_{GD} | G-D极间电容 | 1pF | |
| 最大漏极电流 | I_{DM} | 工作时允许的最大漏极电流 | 10mA | 15mA |
| 最大耗散功率 | P_{DM} | 漏极允许的最大功耗 | 100mW | 100mW |
| 漏源击穿电压 | $U_{(BR)DS}$ | 使 I_D 急剧增加的 U_{DS} 值 | 25V | -15V |
| 栅源击穿电压 | $U_{(BR)GS}$ | 结型管为PN结反向击穿电压, MOS管为绝缘击穿电压 | 25V | -20V |

4 功率晶体管

通常把最大允许功耗大于1W的晶体管称为功率晶体管。功率晶体管在高电压、大电流的情况下工作,主要用作功率开关(如大功率变流器、稳压电源、电机调速等),有时也用作功率放大。因此,它的结面积大,电流密度高,封装具有良好的散热性能,在结构和工艺方面有许多独特之处。功率晶体管包括双极型功率晶体管、功率场效应晶体管、静电感应晶体管、绝缘门极晶体管等。

4.1 双极型功率晶体管

1. 结构和特点 双极型功率晶体管有锗(PNP)合金型和硅($N^+PN^-N^+$)三重扩散平面型等类型,通常把大功率晶体管简称GTR(Giant Transistor)。双极型功率晶体管的结构示意图见图3-1-17。

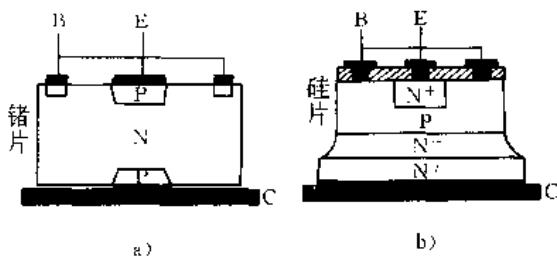


图3-1-17 双极型功率晶体管的结构示意图
a) 锗合金型 b) 硅三重扩散平面型

合金型管制作简单,饱和压降 U_{CES} 小,但容量小,效率低。平面型管采用三重扩散工艺,在高阻N型单

晶层上用扩散法形成集电区(低阻区域)和发射区,具有耐压高、工作电流大、安全工作区域宽和开关时间短等特点。目前使用三重扩散法已制出电流容量为几百安,耐压超过1000V,功率达几千瓦的器件。在频率要求更高时,常采用硅外延平面结构。

2. 散热问题 功率管的输出功率受允许功耗的限制。而功率管允许功耗与散热条件密切相关。表征功率管散热能力的重要参数是热阻,它表示每瓦集电极功耗使功率管温升的度数($^{\circ}C/W$)。热阻小,散热能力强,允许功耗就大。为减小热阻,功率管的集电极直接焊在底座上,外壳即为集电极。但功率管靠本身外壳散热的效果较差,因此实际应用中必须加散热器。这样,由集电极功耗产生的热量主要通过散热器传送至附近空间。

3. 二次击穿和安全工作区 本章2.3节给出的 $U_{(BR)CEO}$ 为基极开路时的一次击穿电压。发生一次击穿后, I_C 急剧增加,如果不加控制,则当 I_C 增加到某个值时, U_{CE} 突然降落,功率晶体管出现负阻区,在几微秒甚至更短时间内过渡到低压大电流状态,此现象称为二次击穿,见图3-1-18a。A点称为二次击穿临界点,对应的功率称为二次击穿临界功率 P_{SD} 。 P_{SD} 的大小与基极偏置情况有关,见图3-1-18b。

二次击穿将造成晶体管永久性损坏。考虑二次击穿后,功率晶体管的安全工作区为集电极最大允许电流 I_{CM} 、集电极最大反向电压 $U_{(BR)CEO}$ 、集电极最大允许功耗 P_{CM} 和二次击穿临界功率 P_{SD} 所组成的区域,见图3-1-18c。



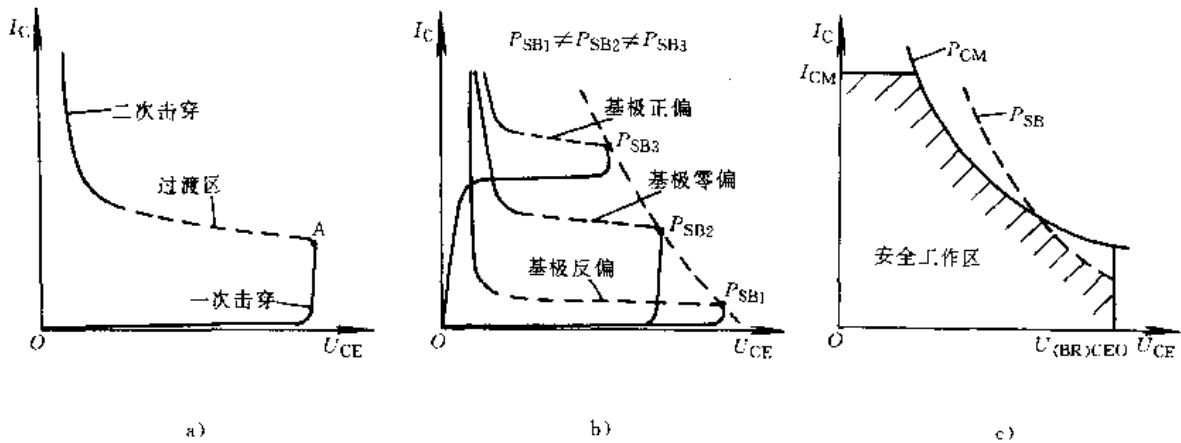


图 3-1-18 双极型功率晶体管的二次击穿和安全工作区
a) 二次击穿 b) 二次击穿临界功率 c) 安全工作区

4.2 功率场效应晶体管

功率场效应晶体管是利用半导体的场效应制作的功率晶体管。它大都采用垂直导电型 MOS 结构（即 VMOS），基本结构有 VVMOS（Vertical V-Groove MOS）和 VDMOS（Vertical Double-Diffused MOS）等。N 沟道增强型功率 VVMOS 和 VDMOS 场效应晶体管的结构见图 3-1-19。VVMOS 结构是利用 V 形槽实现垂直导电的，而 VDMOS 是利用二次扩散形成的 P 型区和 N⁺型区在硅表面处的结深之差形成沟道，电流在沟道内沿表面流动，然后垂直地流到漏极。

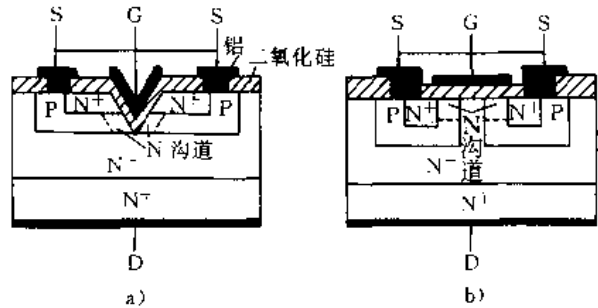


图 3-1-19 N 沟道增强型 VMOS 结构示意图
a) VVMOS 型 b) VDMOS 型

功率 MOS 场效应晶体管具有以下特点：能与集成电路直接相连；开关频率高（比 GTR 高 10 倍以上）；导通电阻具有正温度系数，电流自动调节能力较强，电流分布均匀，热稳定性好；通过器件的合理设计可避免产生二次击穿；输入阻抗高，驱动功率小等。但与 GTR 相比，它的导通电阻较大，容量不易提高（已制成 1000V/38A 的器件），制作也较困难。

功率场效应晶体管的特性曲线和主要参数与普通 MOS 管类似。

4.3 静电感应晶体管（SIT）

静电感应晶体管简称 SIT（Static Induction Transistor），是一种短沟道功率场效应晶体管，通常采用 N 沟道结型场效应结构。图 3-1-20a 是平面型 SIT

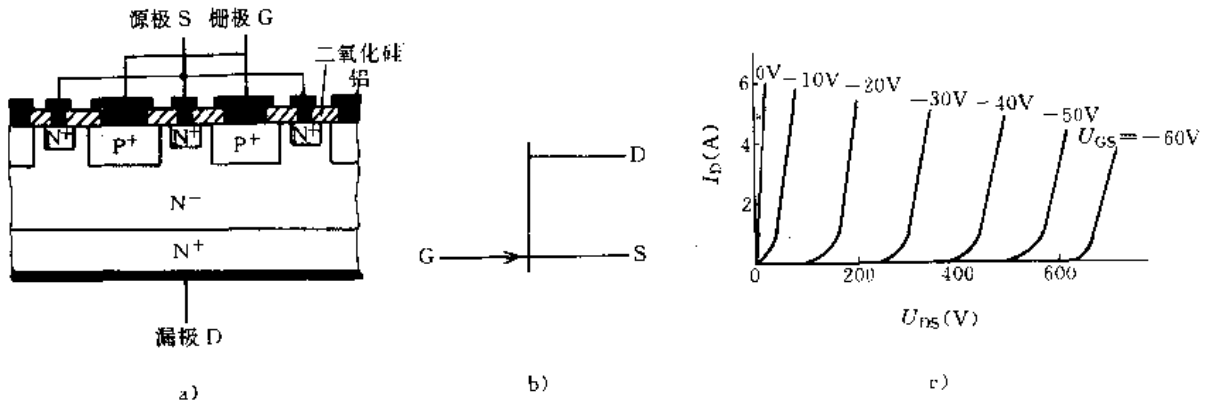


图 3-1-20 静电感应晶体管（SIT）
a) 平面型结构示意图 b) 图形符号 c) 输出特性示例



的结构示意图,其中源极的N型半导体被栅极的P型半导体所围,沟道窄小,改变栅源负偏压的大小,便可控制流过漏源极间的电流。SIT的图形符号和输出特性示例见图3·1-20b、c。

SIT是介于双极型功率晶体管(GTR)与功率MOS场效应晶体管之间的器件,其性能较接近后者。但工作电流密度要大于后者,制造工艺也比后者容易。SIT特别适合作高频大功率器件。目前已制成1500V/180A、600V/200A等器件。

若将SIT漏极的N型高掺杂半导体换成P型半导体,则变成静电感应晶闸管(参见本章6·6节)。

4·4 绝缘门极晶体管(IGBT)

绝缘门极晶体管也称隔离栅晶体管,简称IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor),是近几年发展起来的一种功率场效应晶体管与双极型功率晶体管的复合器件。它的结构示意图、等效电路和图形符号见图3·1-21。

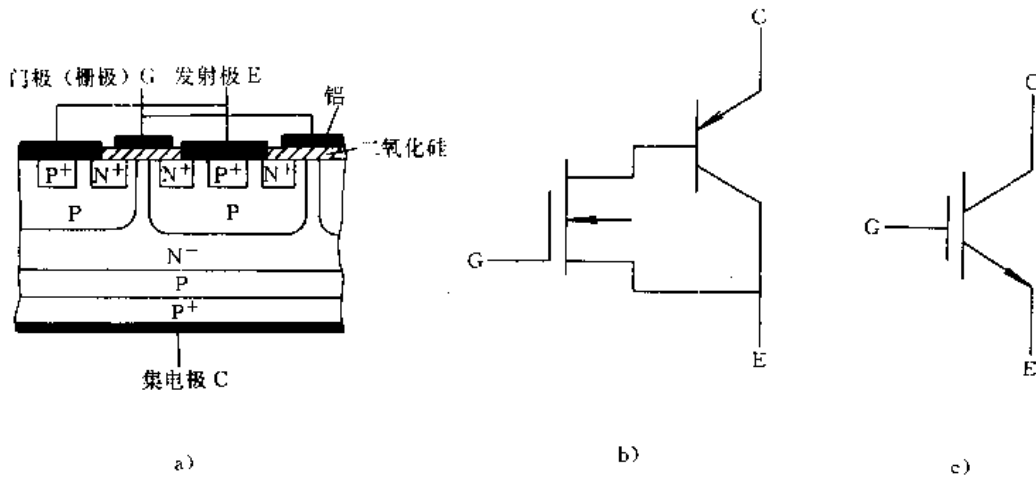


图3·1-21 绝缘门极晶体管(IGBT)
a) 结构示意图 b) 等效电路 c) 图形符号

IGBT的开关作用由门极施加电压来实现。当门极加一定值的正电压时,IGBT开通;当门极加负电压时,IGBT可靠关断。

IGBT结合了场效应管和双极型管两者的优点:用场效应管作为输入部分,使器件为电压控制型,驱动电路简单,输入阻抗高,开关速度易提高;用双极型管作为输出部分,器件的导通压降低,容量易提高(已制成1200V/400A、1800V/100A等器件)。因此,IGBT是一种性能较完善的功率开关器件。

5 单结晶体管和触发二极管

5·1 单结晶体管

单结晶体管简称UJT(Unijunction Transistor),它的结构示意图、图形符号和等效电路见图3·1-22,它只有一个PN结,但三个电极:发射极E、第一基极B₁和第二基极B₂,故又称双基极二极管。等效电路

中二极管V表示PN结,电阻R_{B1}、R_{B2}分别表示基极B₁、B₂与PN结间的电阻,R_{B1}+R_{B2}=R_B称为基极间电阻,比值R_{B1}/(R_{B1}+R_{B2})=η,称为分压比(一般为0.3~0.9)。

单结晶体管的发射极特性是指基极B₂与B₁间加一定正向电压U_{BB}时,发射极电流I_E与E-B₁间电压U_E的关系曲线(见图3·1-23)。图中P点称为峰点,I_P为峰点电流,U_P=U_A+U_D=ηU_{BB}+U_D称为峰点电压。V点称为谷点,I_V为谷点电流,U_V为谷点电压。

当U_E<U_P时,PN结反偏截止,I_E≈0,称P点以左为截止区。当U_E=U_P时,PN结导通,大量载流子(空穴)注入使R_{B1}大大减小,I_E增加U_E反而减小,称P-V间为负阻区。V点以右类似于普通二极管的正向特性,称饱和区。导通后,若使U_E<U_V,则重新截止。

单结晶体管是晶闸管触发电路中常用的触发器件之一,还可用于定时器等其它方面。



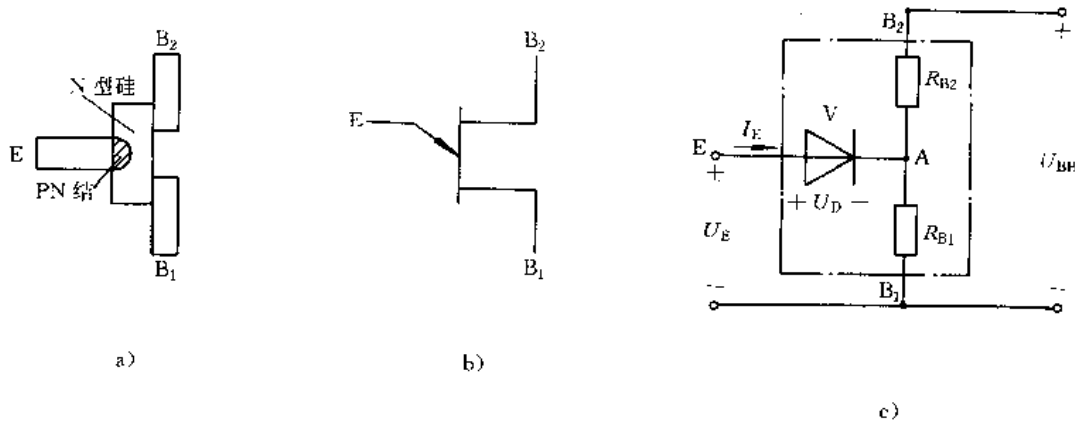


图 3-1-22 单结晶体管

a) 结构示意图 b) 图形符号 c) 等效电路

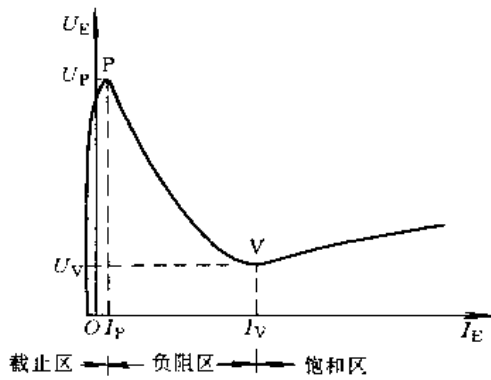


图 3-1-23 单结晶体管发射极特性

5.2 互补单结晶体管、程控单结晶体管和等价单结晶体管

互补单结晶体管、程控单结晶体管和等价单结晶体管是在单结晶体管的基础上发展的器件，可用于晶闸管的触发电路以及定时电路等其它方面。它们的图形符号、结构、电路图和主要特点见表 3-1-6。

5.3 触发二极管

触发二极管是一种两端器件，当外加电压达到其转折电压时，则由断态进入通态。几种触发二极管的图形符号、基本结构、伏安特性和主要用途见表 3-1-7。

表 3-1-6 互补单结晶体管、程控单结晶体管和等价单结晶体管

| 名称 | 图形符号① | 结构 | 电路图 | 主要特点 |
|----------------|-------|----|------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 互补单结晶体管 (CUJT) | | | (等效电路) | 电压极性与 UJT 相反(故称“互补”), 主要优点是温度稳定性好 |
| 程控单结晶体管 (PUT) | | | (基本电路) | 实质上为一个 N 门极晶闸管, 可作单结晶体管使用, 但其 R_{B1} 、 η 、 I_P 、 I_V 等参数可通过改变外接电阻 R_1 、 R_2 的大小而调节, 故称为“程控” |



(续)

| 名称 | 图形符号① | 结构 | 电路图 | 主要特点 |
|----------------|-------|--------|-----|-----------------------------------------------|
| 等价单结晶体管 (EUJT) | | 单片集成电路 | | 完全可以和 UJT “等价”使用,但开关速度比 UJT 高,谷值电压、峰值电流小于 UJT |

① E—发射极, B₁—第一基极, B₂—第二基极, A—阳极, K—阴极, G—门极(控制极)。

表 3-1-7 触发二极管①

| 名称 | 图形符号 | 基本结构 | 伏安特性 | 主要用途 |
|---------|------|------|------|-------------------------|
| 双向触发二极管 | | | | 晶闸管的触发电路、定时器、过电压保护开关 |
| 四层二极管① | | | | 晶闸管的触发电路、开关电路、脉冲电路、保护电路 |
| 五层二极管 | | | | 晶闸管的触发电路、功率控制电路 |

① 也称为肖克莱二极管, PNPN 二极管、转折二极管等。

6 晶闸管

晶闸管是一种电力半导体器件,它具有体积小、容量大、耐压高、损耗小、寿命长、无噪声、控制方便等特点,广泛用于大功率的电能转换和控制。晶闸管的种类较多,其特性和作用也有所不同。

6.1 普通晶闸管

普通晶闸管也称可控硅,简称 SCR (Silicon Controlled Rectifier),它的结构示意图、图形符号和伏安特性见图 3-1-24。

当阳极与阴极间所加反向电压小于反向击穿电压



U_{BR} 时, 反向电流很小, 晶闸管处于反向阻断状态。

若阳极与阴极间所加正向电压在一定范围内, 当门极电流 $I_G=0$ 时, 晶闸管处于正向阻断状态。若在门极与阴极间加上正向电压, 使门极流入一定的电流 I_G , 则晶闸管由正向阻断突变到导通(称触发导通)。

一旦导通, 门极即失去控制作用。只有阳极电流减小到一定值(维持电流 I_H) 以下或阳极与阴极间加上反向电压, 晶闸管才自行阻断。

普通晶闸管的主要参数见表 3-1-8。目前已制成 12000V/1000A、4000V/3000A 等器件。

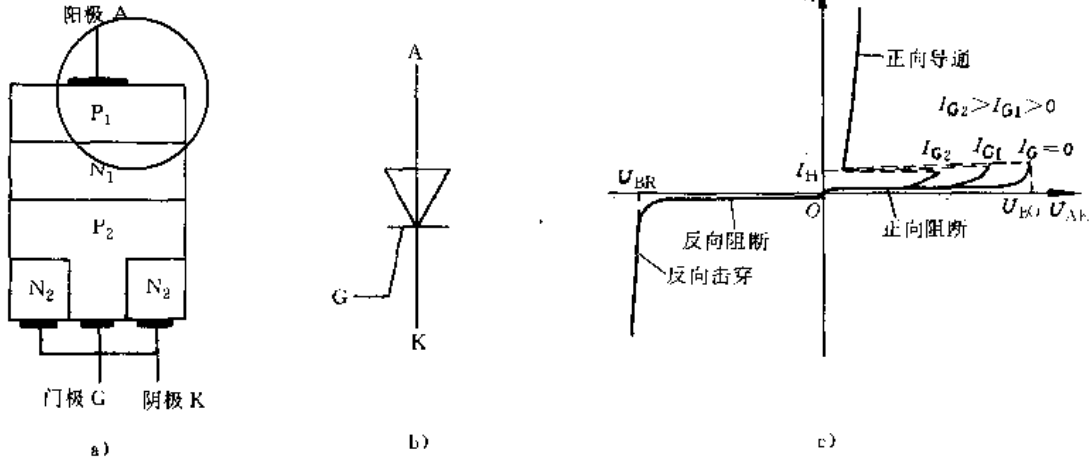


图 3-1-24 普通晶闸管 (SCR)
a) 结构示意图 b) 图形符号 c) 伏安特性

表 3-1-8 普通晶闸管的主要参数

| 名称 | 符号 | 意义① | 参数值示例 | |
|-----------|-----------|--------------------------------------|--------------|---------------|
| | | | KP10 | KP1000 |
| 正向阻断峰值电压 | U_{DRM} | 正向阻断时允许重复加入的正向电压峰值 | 50~2000V | 100~2000V |
| 反向阻断峰值电压 | U_{RRM} | 允许重复加入的反向电压峰值 | 50~2000V | 100~2000V |
| 正向平均压降 | U_F | 通过 I_F 时, 阳-阴极间的电压降平均值 | $\leq 1V$ | 0.8V |
| 额定正向平均电流 | I_F | 允许连续通过工频正弦半波电流的平均值 | 10A | 1000A |
| 维持电流 | I_H | 门极断开时, 维持导通所需的最小正向电流 | $< 30mA$ | |
| 门极触发电流 | I_G | 阳-阴极间加 6V 直流电压时, 使器件完全导通所必需的最小门极直流电流 | 5~100mA | 40~400mA |
| 门极触发电压 | U_G | 与 I_G 对应的门极直流电压 | $\leq 3.5V$ | $\leq 5V$ |
| 断态电压临界上升率 | du/dt | 不致从断态转换到通态的最大主电压上升率 | 30V/ μs | 100V/ μs |
| 通态电流临界上升率 | di/dt | 能承受的最大通态电流上升率 | 10A/ μs | 100A/ μs |
| 浪涌电流 | I_{FSM} | 允许短时过载的电流峰值 | | |
| 开通时间 | t_{on} | 门极受触发后, 从断态转入通态所需的时间 | | |
| 关断时间 | t_{off} | 从通态转入断态所需的时间 | | |

① 详细定义可参阅国家标准 GB2900.32-82。这些参数对其他类型晶闸管也适用。



6.2 双向晶闸管

双向晶闸管是两个方向都可触发导通的器件，其结构示意图、图形符号和伏安特性见图 3-1-25。当外加电压使主电极 T_2 相对于 T_1 为正时，工作于第 I 象限；相反，当外加电压使 T_2 相对于 T_1 为负时，工作于第 III 象限。不论何种工作象限，用不同极性的门极触

发信号（门极 G 相对于 T_1 可为正也可为负）均可使双向晶闸管触发导通。

双向晶闸管能在单门极控制下使两个方向均可开通，广泛用于交流电路的控制。例如作为电子开关控制电路的通断，组成零电压开关控制电路的功率，通过改变导通角来调节负载的电压等。也可用于直流可逆控制。

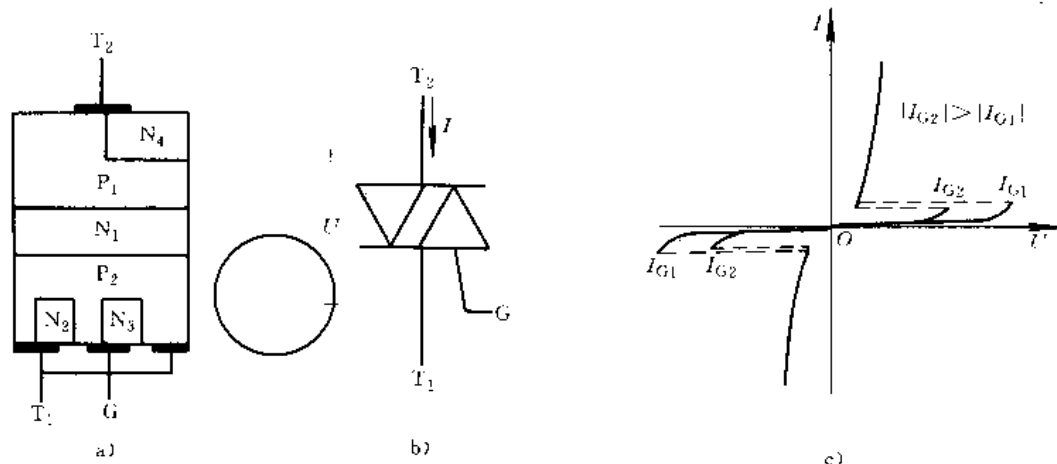


图 3-1-25 双向晶闸管

a) 结构示意图 b) 图形符号 c) 伏安特性

6.3 可关断晶闸管

可关断晶闸管简称 GTO (Gate Turn-Off Thyristor)，可用正门极信号触发导通，导通后，可用负门极信号将其关断。在规定条件下，可用门极电流关断的最大阳极电流值称最大可关断阳极电流 I_{AO} (几十至几千安)。从通态转为断态时需要的门极反向瞬时峰值电流的最小值称门极关断电流 I_{G2} 。关断增益 $\beta_{off} = I_{AO} / I_{G2}$ ，约为 3~5。可见 I_{G2} 较大，在使用中需要有不同形式和容量的产生门极关断电流的门极驱动电路。

GTO 的基本结构和普通晶闸管不同之处是门极区范围大大增加，使阴极区被门极区环抱，两个区交叉配置于管芯的一侧，形成多门极、多阴极的梳状结构。因此，大容量 GTO 可等效为几十乃至几百个单元 GTO 的并联组合。单元 GTO 的结构示意图和 GTO 的图形符号见图 3-1-26。

GTO 具有容量大(已制成 9000V/1000A、4500V/4500A 等器件)、开关速度快(如通态峰值电流为 2000A 的器件，关断时间为 30 μ s，开通时间为 5 μ s)、耐受浪涌电流的能力强等特点，且其可关断特性使换向电路得到简化，提高了装置的效率，因此在静止变频器、脉宽调制和逆变器等方面得到广泛应用。

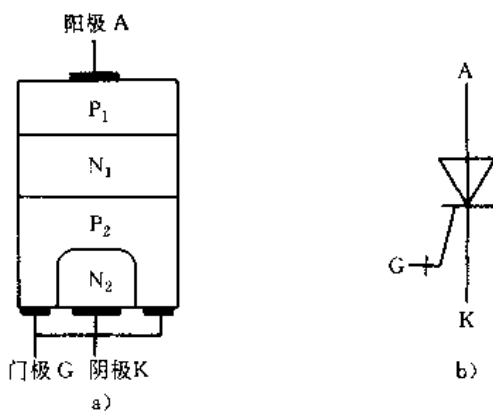


图 3-1-26 可关断晶闸管 (GTO)

a) 单元 GTO 的结构示意图 b) GTO 的图形符号

6.4 快速晶闸管

快速晶闸管的图形符号、工作原理与普通晶闸管相同，但其开关特性有明显改进。快速晶闸管通过门极-阴极图形及阴极短路点的合理设计，控制少数载流子寿命，选择合适的基片厚度等措施，减小了开通时间、开通损耗、关断时间、关断损耗，提高了通态电流上升率和断态电压上升率，故能以较高频率作通断转换，在直流开关、斩波器、逆变器和脉冲电源等方面得到广泛应用。



6.5 逆导晶闸管

逆导晶闸管简称 RCT (Reverse-Conducting Thyristor), 它的正向具有可控的闸流特性, 而反向呈低阻导通特性, 其结构示意图见图 3·1-27a, 工作原理可用图 3·1-27b 所示的普通晶闸管的阳阴极间反并联一只二极管的等效电路来理解。RCT 的图形符号和伏安特性见图 3·1-27c、d。

RCT 的高温特性好, 开关速度快, 通态压降较低, 容量已达 4500V/1000A。用它代替普通晶闸管与反并联二极管, 可缩小体积, 减小接线电感。因此在斩波器、逆变器、直流调压等方面得到广泛应用。

6.6 静电感应晶闸管 (SITH)

静电感应晶闸管简称 SITH (Static Induction Thyristor), 是 80 年代发展起来的一种利用电场效应来控制导电能力的新型电力半导体器件。SITH 有多种结构, 图 3·1-28a、b 是两种结构示意图, 区别在于

P 栅体的位置和形状。图 3·1-28c 是 SITH 的图形符号。

SITH 是采用结型场效应结构的场效应晶体管与晶闸管的复合器件。它的反向特性和普通晶闸管一样, 正向特性则不同。当阳极与阴极间加正向电压时, 若门极控制电压为零, 器件就正向导通; 若门阴极间加一定值的负偏压, 器件正向阻断。正向阻断特性与门极负偏压的关系见图 3·1-29a。正向阻断能力用正向阻断电压增益 μ 来表示:

$$\mu = - \left. \frac{dU_{AK}}{dU_{GK}} \right|_{i_A = \text{常数}}$$

一般, 平面型管的 μ 小于 10, 掩埋型为 20~40。

SITH 的另一重要参数是跨导 g_m 定义为

$$g_m = \left. \frac{di_A}{dU_{GK}} \right|_{U_{AK} = \text{常数}}$$

它反映阳极电压一定时, 阻断态下的阳极电流与门极负偏压的关系, 见图 3·1-29b (为便于描述, 采用半对数坐标)。

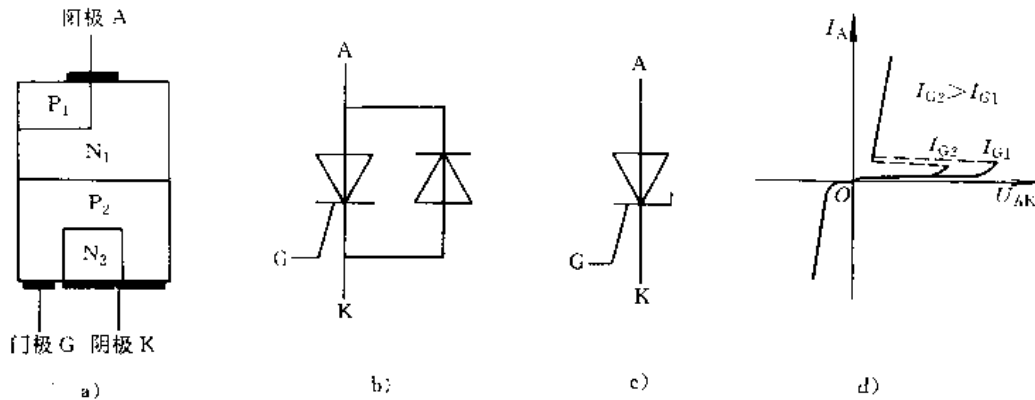


图 3·1-27 逆导晶闸管 (RCT)

a) 结构示意图 b) 等效电路 c) 图形符号 d) 伏安特性

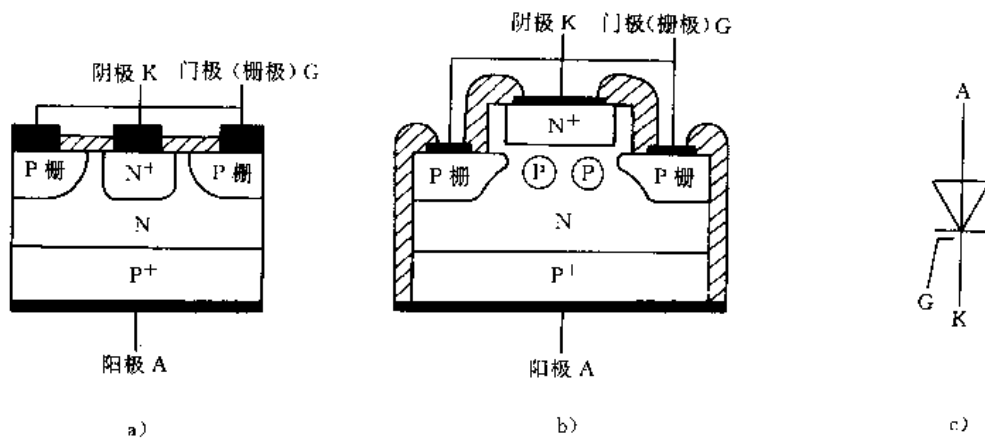


图 3·1-28 静电感应晶闸管 (SITH)

a) 平面型结构示意图 b) 掩埋型结构示意图 c) 图形符号



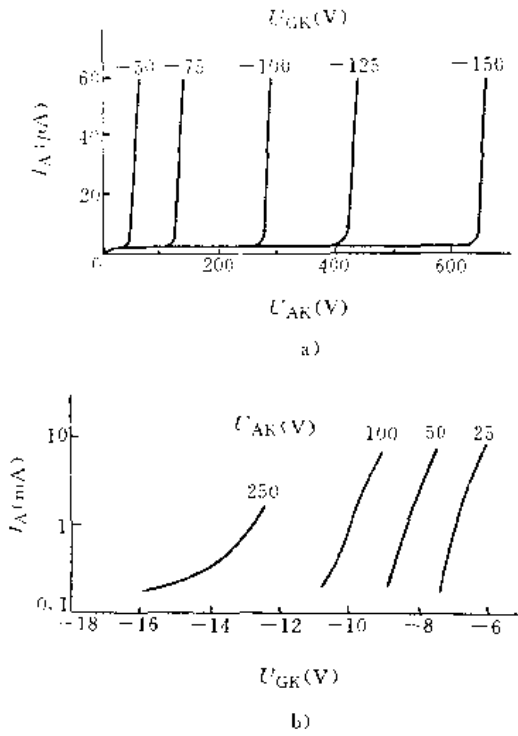


图 3-1-29 SITH 的特性示例

- a) 平面型管不同门极负偏压时的阻断特性
- b) 阳极电流与门极负偏压的关系

SITH 的工作结温一般为 175°C ；正向压降一般小于 1.5V ；电压在 $600\sim 4000\text{V}$ 、电流在 $20\sim 1000\text{A}$ 的 SITH，开通时间小于 $3\mu\text{s}$ ，关断时间小于 $5\mu\text{s}$ ；SITH 的 du/dt 和 di/dt 耐量也大。目前已制成容量为 $4500\text{V}/2500\text{A}$ 的器件。

SITH 可广泛用于高压直流输电、大电流开关设备、变频调速、开关电源等各个领域。

6.7 MOS 控制晶闸管 (MCT)

MOS 控制晶闸管简称 MCT (MOS Controlled Thyristor)，是 80 年代末开发出来的利用电场效应控制导电能力的新型电力半导体器件。MCT 有几种结构，图 3-1-30 是 MCT 的一种结构、等效电路和图形符号。

MCT 是 MOS 场效应晶体管与晶闸管的复合器件，门极与主通道隔离。对于图 3-1-30 所示结构，一般当门极相对于阳极加 $-5\sim -15\text{V}$ 脉冲电压时，MCT 导通，加 $+10\text{V}$ 脉冲电压时，MCT 可靠关断。

MCT 的容量已达 $1000\text{V}/100\text{A}$ ，额定电流下的通态压降小于 1.2V ，工作结温高于 200°C ，开关速度快， du/dt 和 di/dt 耐量大，是一种极有发展前途的器件，

在 600V 以上领域将得到广泛应用。

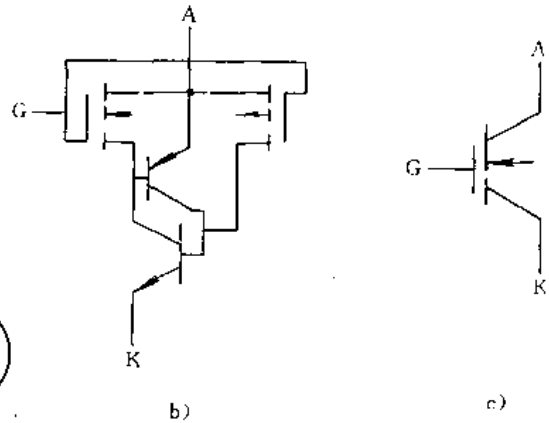
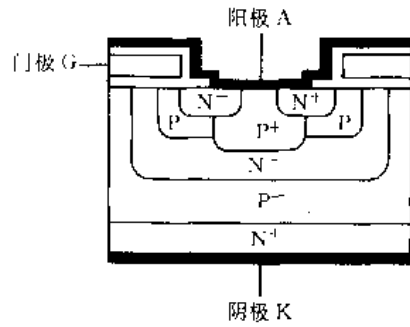


图 3-1-30 MOS 控制晶闸管 (MCT)

- a) 一种结构示意图 b) 等效电路 c) 图形符号

6.8 硅控制开关

硅控制开关简称 SCS (Silicon Controlled Switch)，是一种四端 PNP 器件，其结构示意图和图形符号见图 3-1-31。

SCS 的应用十分灵活，可起到多种器件的作用。如只使用 G_A (G_K 开路) 时，它就相当于一个程控单结晶体管 PUT，再外接两个分压电阻便起一个单结晶体管

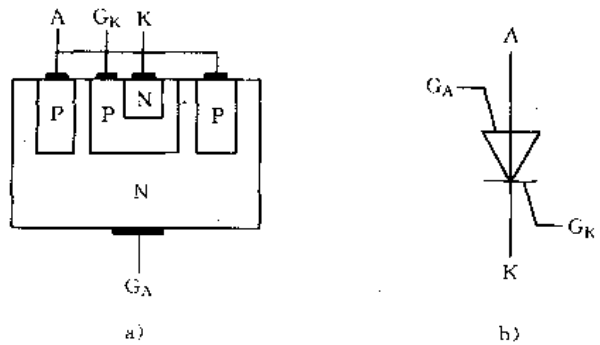


图 3-1-31 硅控制开关 (SCS)

- a) 结构示意图 b) 图形符号



UJT的作用：当 G_A 与A短接或 G_K 与K短接，便可用作NPN或PNP硅晶体管；当 G_A 与 G_K 均开路时，相当于一个四层二极管。因此，SCS除了可作为小功率晶闸管外，还可用于晶闸管触发电路、延时发生器、遥测振荡器、

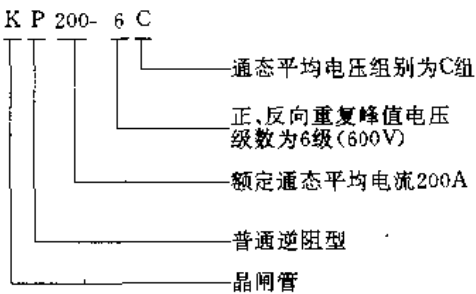
高灵敏度电平检测器和指示灯驱动器等装置中。

6.9 晶闸管型号的命名法

晶闸管型号的命名法见表3-1-9。

表3-1-9 晶闸管型号命名法（根据第一机械工业部标准JB2423-78）

| 第一部分 | | | | 第二部分 | | 第三部分 |
|------------|-----|-------------|-----|------------------|-----------------------|-------------------|
| 第一字母表示为晶闸管 | | 第二字母表示器件的类型 | | 第一数字表示器件额定电流的系列数 | 第二数字表示器件正、反向重复峰值电压的级别 | 用数字或字母表示器件的重要性能参数 |
| 符号 | 意义 | 符号 | 意义 | 示例： | | |
| K | 晶闸管 | P | 普通 | KP200-6C | 6 | C |
| | | S | 双向 | | | |
| | | K | 快速 | | | |
| | | T | 快开通 | | | |
| | | G | 可关断 | | | |
| | | N | 逆导 | | | |
| | | F | 场控 | | | |
| | | L | 光控 | | | |
| | | R | 热控 | | | |
| | | : | : | | | |



7 半导体光电器件

光电器件有两大类：把电转换成光的电致发光器件和把光转换成电或通过光信号控制电信号的光敏器件。

7.1 发光二极管

发光二极管简称LED (Light Emitting Diode)，它能把电能直接转换成光能，其基本结构和伏安特性与小信号二极管相似，但其正向压降较大。当加上正向电压，流过一定正向电流时，管子就发光。发光的颜色取决于所用的半导体材料，常见的有红外、红、橙、黄、绿等，还有颜色随通过的电流大小而变的变色发光管。发光二极管具有体积小、工作电压低(1.2~2.5V)、电流小(几至十几毫安)、耐震、寿命长等特点，广泛用作指示灯和快速光源，也用来显示数字和图形符号。

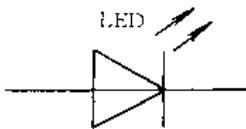


图3-1-32 发光二极管的图形符号

发光二极管的图形符号见图3-1-32。其参数除普

通二极管参数外，还有发光波长、发光强度、总光通量等光学参数。

7.2 光敏电阻

光敏电阻是利用光电导体受外界光照时电阻率会降低的光电导效应制成的半导体电阻器。按光谱特性和最佳工作波长范围划分，其类型有：对紫外光(0.3~0.4 μm)灵敏的(如CdS、CdSe、ZnO、ZnS等)、对可见光(0.4~0.76 μm)灵敏的(如CdS、CdSe、Se、BiS等)、对红外光(0.76~6 μm)灵敏的(如PbS、PbSe、PbTe、InSb等)。光敏电阻的图形符号见图3-1-33。

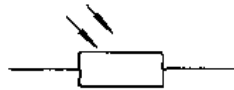


图3-1-33 光敏电阻的图形符号

光敏电阻的主要特性和参数如下：

(1) 光谱响应特性 表示光敏电阻对各种单色光能的敏感程度。对应于一定敏感程度的波长区间称光谱响应范围。对光谱响应最敏感的波长数值称峰值波长。

(2) 照度特性 描述一定外加电压下，光敏电阻的光电流(或光电阻)与照度间的关系。



(3) 暗电阻(或暗电流) 在黑暗时呈现的电阻值称暗电阻(约为几兆欧到几百兆欧)。在黑暗时器件两端加一定电压后产生的电流称暗电流。

(4) 响应时间 分上升时间 t_r 和衰减时间 t_f 。 t_r 为光照后光电流上升至饱和值的 63% 所需的时间; t_f 为光照停止后光电流下降至饱和值的 37% 所需的时间。

此外,还有温度系数、最高工作电压和允许耗散功率等。

光敏电阻作为光探测器件,广泛用于仪器仪表、自动报警和控制电路中。

7.3 光电二极管

光电二极管是一种能将光强变化转换为电流变化的光敏器件。当PN结加上反向电压,无光照时,反向电流(即暗电流)很小;有光照时,反向电流(即光电流)明显增大,且光电流的大小与照度成正比。光电二极管的图形符号和伏安特性见图 3-1-34。

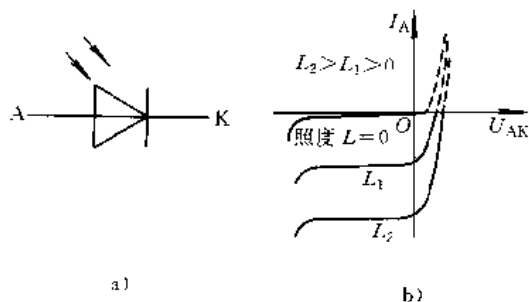


图 3-1-34 光电二极管
a) 图形符号 b) 伏安特性

光电二极管的基本类型有 PN 结型、PIN 结型、雪崩型和肖特基结型等。其特性和参数主要有暗电流、光电流、光谱响应峰值、光谱响应范围、响应时间、最高工作电压等。

光电二极管广泛用于要求响应速度较高的场合,如光信号的检测放大、光开关电路和转速测定电路等。

7.4 光电三极管

光电三极管是用锗或硅单晶制造的 NPN 或 PNP 型晶体管,它能将入射到基极表面的光信号变成基极电流,并放大 β 倍后输出光电流 I_c (一般为几到几十毫安)。无光照射时的暗电流很小(一般小于 $0.3\mu A$)。图 3-1-35 为 NPN 型光电三极管的图形符号和等效电路,使用时,其基极开路(多数光电三极管无基极引脚),集电结反偏。一般硅光电三极管 C-E 间允许的最大电压 U_{CE0} 在 50V 以下。

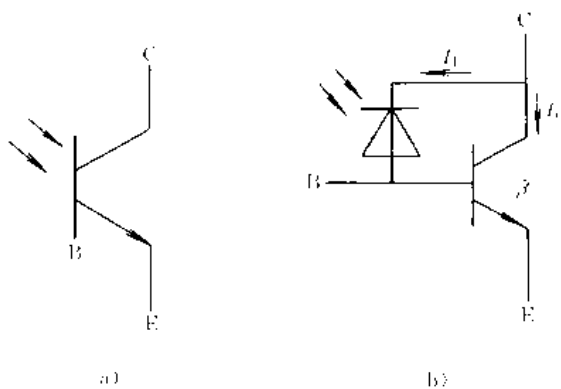


图 3-1-35 光电三极管
a) 图形符号 b) 等效电路

与光电二极管比较,光电三极管具有光电流大、灵敏度高等特点,但响应时间长,线性度较差。常用于频率较低的光控开关电路、光信号放大电路、光电逻辑电路等。

7.5 光控晶闸管

光控晶闸管是一种由一定波长的光触发导通的晶闸管,其门极电流由光照产生。小功率光控晶闸管一般无控制极引线。大功率光控晶闸管除有阳极和阴极引线外,还带有光缆(传递光信号,由光导纤维做成),光缆的一端装有作为触发光源的发光二极管或半导体激光器,光通过光缆传送到门极区,使其触发导通。图 3-1-36 是光控晶闸管的图形符号。

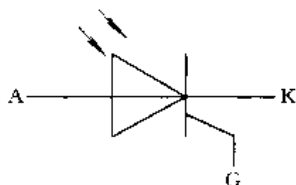


图 3-1-36 光控晶闸管的图形符号

光控晶闸管的伏安特性和主要参数与普通晶闸管不同之处是门极触发参数。触发参数主要有触发光功率(由阻断状态转变为导通状态所需的输入光功率,一般为几至几十毫瓦)和光谱响应范围(约 $0.4\sim 1.1\mu m$, 峰值波长约 $0.85\mu m$) 等。

在应用光控晶闸管的系统中,控制电路与主电路之间是电绝缘的,这是个突出的优点。

7.6 光耦合器

光耦合器是发光器件和光敏器件按适当方式组合,以光作媒介实现电-光-电信号变换的光电器件。光



耦合器既可传递模拟信号,也可用作开关器件,具有变压器和继电器等的功能。但光耦合器的体积小、质量小、寿命长、开关速度比继电器快、无触点、输入输出之间绝缘电阻高,并能实现信号的单方向传递。

光耦合器大致分为如下三类:一类是光隔离器,用以完成电信号的耦合和传递,图3-1-37是几种光隔离器的图形符号和结构原理;另一类是光传感器,用以检

测物体的有无、个数和位移等,其结构形式有遮光型和反光型两种,见图3-1-38;第三种是光敏元件集成功能块,它是把发光器件、光敏器件和双极型集成电路组合在一起构成的集成功能块。

光耦合器的特性主要有输入特性、输出特性和传输特性。输入特性由发光元件决定,输出特性决定于受光元件,传输特性参数主要有:

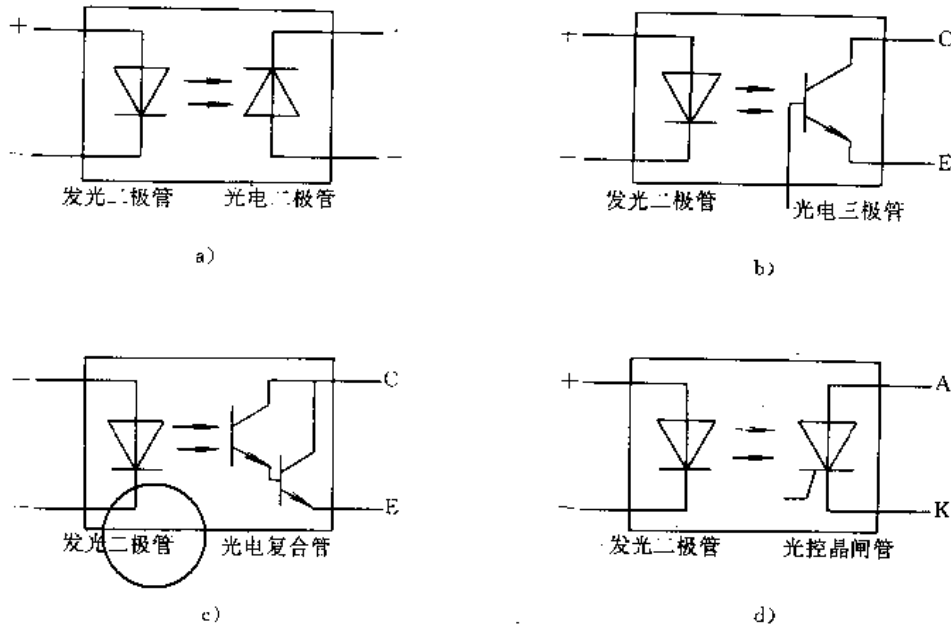


图3-1-37 光隔离器的几种类型

a) 光电二极管型 b) 光电三极管型 c) 光电复合管型 d) 光控晶闸管型

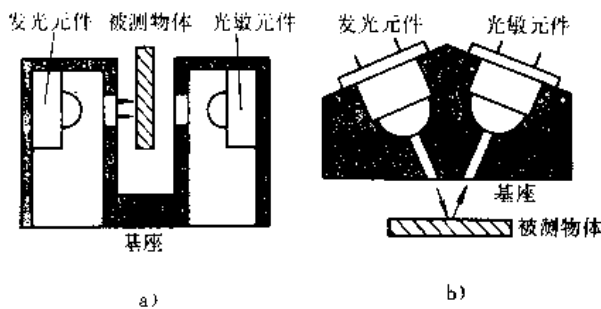


图3-1-38 光传感器的结构示意图

a) 遮光型 b) 反光型

(1) 电流传输比 β_1 。在直流工作状态下,光耦合器的输出电流与输入电流之比(也称转换效率)。

(2) 输入-输出间耐压 U_g 。输入端与输出端之间的绝缘耐压值。

(3) 隔离阻抗 R_g 。输入-输出间的绝缘电阻。 R_g 可达 $10^9 \sim 10^{13} \Omega$ 。

此外,还有输入-输出间电容、最高工作频率、响

应时间等。

8 集成电路概述

集成电路是60年代初发展起来的一种新型电子器件。它是利用半导体工艺和膜工艺将晶体管、二极管、电阻、电容等元件制作在同一基片上,并相互连接成为具有一定功能的电路,具有体积小、质量小、性能好、成本低等一系列优点。因而发展迅速,应用广阔。

8.1 集成电路的分类

集成电路按制作工艺的分类见表3-1-10。

半导体集成电路是集成电路中的一大类,其本身也常按表3-1-11来分类。

表3-1-10 集成电路按制作工艺分类

| 名称 | 说明 |
|---------|-------------------------------|
| 半导体集成电路 | 利用平面工艺(氧化、光刻、扩散、外延等)在半导体晶片上制成 |



(续)

| 名称 | 说明 |
|--------|------------------------------------------------|
| 薄膜集成电路 | 用薄膜工艺(真空蒸发、溅射等)将无源元件及连线制作在同一块绝缘衬底上,再焊接上微小晶体管构成 |
| 厚膜集成电路 | 与薄膜集成电路的不同之处是采用厚膜工艺(丝网印刷、烧结等) |
| 混合集成电路 | 半导体工艺和膜工艺的联合制品 |

表 3-1-11 半导体集成电路分类

| 分类方法 | 类型 |
|-------|--------------------------|
| 按集成度 | 小规模集成电路(SSD) |
| | 中规模集成电路(MSI) |
| | 大规模集成电路(LSI) |
| | 超大规模集成电路(VLSI) |
| 按有源器件 | 双极型集成电路(有源器件为双极型管) |
| | MOS集成电路(有源器件为MOS管) |
| | 双极型-MOS集成电路(双极型管和MOS管皆有) |
| 按功能 | 数字集成电路(处理数字信号的集成电路) |
| | 模拟集成电路(数字集成电路以外的集成电路) |
| 按应用 | 通用型集成电路(性能指标一般,适合于一般应用) |
| | 专用型集成电路(按专用要求设计,用于专门的场合) |

表 3-1-12 国产半导体集成电路型号命名法 (根据国家标准 GB3430—89)

| 第0部分 | | 第一部分 | | 第二部分 | 第三部分 | | 第四部分 | |
|---------------|--------|------------|---------|-----------------|----------------|----------|------------|----------|
| 用字母表示器件符合国家标准 | | 用字母表示器件的类型 | | 用数字表示器件的系列和品种代号 | 用字母表示器件的工作温度范围 | | 用字母表示器件的封装 | |
| 符号 | 意义 | 符号 | 意义 | | 符号 | 意义 | 符号 | 意义 |
| C | 符合国家标准 | T | TTL | | C | 0~70℃ | F | 多层陶瓷扁平 |
| | | H | HTL | | G | -25~70℃ | B | 塑料扁平 |
| | | E | ECL | | L | -25~85℃ | H | 黑瓷扁平 |
| | | C | CMOS | | E | -40~85℃ | D | 多层陶瓷双列直插 |
| | | M | 存储器 | | R | -55~85℃ | J | 黑瓷双列直插 |
| | | # | 微型机电路 | | M | -55~125℃ | P | 塑料双列直插 |
| | | F | 线性放大器 | | | | S | 塑料单列直插 |
| | | W | 稳压器 | | | | K | 金属菱形 |
| | | B | 非线性电路 | | | | T | 金属圆形 |
| | | J | 接口电路 | | | | C | 陶瓷片状载体 |
| | | AD | A/D转换器 | | | | E | 塑料片状载体 |
| | | DA | D/A转换器 | | | | G | 网格阵列 |
| | | D | 音响、电视电路 | | | | | |

8.2 半导体集成电路型号命名法

国产半导体集成电路型号的命名方法见表 3-1-12。但目前有些产品由生产厂家自己命名。

8.3 集成电路的使用

在使用集成电路时,要根据集成器件的型号查阅有关手册(或产品说明),了解器件的功能、引脚排列方法及如何和外部电路连接,了解器件的主要工作参数和极限参数,尤其要注意电源电压的极性和数值范围,确保器件处于正常工作状态。此外还应注意以下几点:

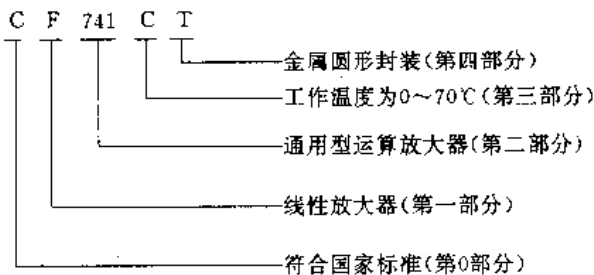
- (1)不同器件互连使用时,必须考虑各器件之间电压、电流的匹配问题(兼容性)。
- (2)输出端不能直接与电源或地相联接。
- (3)多余输入端不要悬空,以免影响电路正常工作,尤其是CMOS器件。
- (4)焊接时电烙铁的温度要适当,且电烙铁要良好接地。也可利用内热式电烙铁断电后的余热快速焊接。禁止器件通电情况下焊接。集成器件应在其它有关元件安装好后再插入插座。
- (5)不能带电将器件从插座中拔出或插入插座。
- (6)CMOS器件未接通电源时不允许加输入信号。当输入端连接线较长时,一般串联一个保护电阻(十几千欧)。



(续)

| 第0部分 | | 第一部分 | | 第二部分 | 第三部分 | | 第四部分 | |
|---------------|----|------------|--------|-----------------|----------------|----|------------|----|
| 用字母表示器件符合国家标准 | | 用字母表示器件的类型 | | 用数字表示器件的系列和品种代号 | 用字母表示器件的工作温度范围 | | 用字母表示器件的封装 | |
| 符号 | 意义 | 符号 | 意义 | | 符号 | 意义 | 符号 | 意义 |
| | | SC | 通讯专用电路 | | | | | |
| | | SS | 敏感电路 | | | | | |
| | | SW | 钟表电路 | | | | | |

示例:



9 电子管

电子管是本世纪初问世的一种利用电场(或磁场)控制电子运动的电真空器件。其主要类型有二极管、栅控管、微波管、电子束管、光电器件和离子管等。

表3-1-13列出了常用二极管和栅控管的图形符号、基本功能和主要用途。大功率的栅控管通常称为发射管,广泛应用于广播电视及通信发射机、工业加热高

频振荡器、雷达及高能物理等各个领域。工业加热振荡管多采用大功率三极管,有专门的产品系列。

几种微波管的主要用途见表3-1-14。

电子束管中的示波管和显象管在本章10-2和10-3节介绍。

目前,电子管在很多方面的应用已被半导体器件所取代,但在显示、高频、大功率等领域仍被广泛应用。

表3-1-13 常用二极管和栅控管

| 名称 | 图形符号 | 基本功能 | 主要用途 |
|-----|--------------------|-------------------------------------------------------------|-----------|
| 二极管 | <p>(直热式) (间热式)</p> | 阴极加热后产生热电子发射,在阳极A与阴极K间加正向电压,产生阳极电流;A-K间零电压或反偏,无阳极电流,具有单向导电性 | 整流电路、检波电路 |
| 三极管 | <p>(直热式) (间热式)</p> | 比二极管多一个栅极G,用栅极电压的变化控制阳极电流的大小,具有放大作用 | 低频电压放大电路 |

电子工业出版社



(续)

| 名称 | 图形符号 | 基本功能 | 主要用途 |
|--------|------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|----------|
| 直热式五极管 | | 用栅极 G_1 控制阳极电流, 屏栅极 G_2 用以减小阳极与控制极间的电容, 抑制栅极 G_3 可改善管子的特性 | 高频电压放大电路 |
| 束射四极管 | | 改五极管的 G_3 为一对与阴极相连的束射屏, 具有较大的电压、电流动态范围, 输出功率大 | 低频功率放大电路 |
| 多极管① | | 阳极电流受两个栅极 (G_1 、 G_3) 信号控制, 若两个控制信号的频率不同, 输出信号便产生新的频率成分。 G_2 和 G_4 为屏栅极, G_5 为抑制栅 | 变频和混频 |
| 复合管② | | 共用一个灯丝 F (或阴极), 相当于两个二极管 | 用作全波整流 |

① 五个电极以上称多极管, 有多种类型, 表中给出七极管。

② 复合管有多种, 如双三极管、二极-三极复合管、三极-七极复合管等, 表中给出双二极管。

表 3-1-14 几种微波管的主要用途

| 名称 | 主要种类 | 主要用途 |
|-----|---------------|-------------------------------------------------|
| 速调管 | 反射速调管 (单腔) | 无线电接收机和电子测量仪器中的本机振荡 |
| | 直射速调管 (双腔或多腔) | 超高频发射机中的放大器, 也用于倍频器 |
| 行波器 | 大功率行波管 | 雷达、通讯、遥测、电子对抗装置中的功率放大器、中频放大器、输入低噪声放大器和信号的产生、变换器 |
| | 中、小功率行波管 | |
| | 低噪声行波管 | |



(续)

| 名称 | 主要种类 | 主要用途 |
|--------|---------|---------------------------------------------------------|
| 磁控管 | 脉冲磁控管 | 微波雷达(如船舶雷达、瞄准雷达、飞机机载雷达、气象雷达等)和微波加热等 |
| | 连续振荡磁控管 | |
| 返波管 | O型返波管 | 雷达设备、无线电探测、无线电反干扰以及远距离通讯,O型用作本机振荡和小功率振荡器,M型用作大功率振荡器和放大器 |
| | M型返波管 | |
| 前向波放大管 | | 相控阵雷达、脉冲压缩雷达和脉冲多普勒雷达系统的发射机中 |

10 显示器件

显示器件的作用是把处理过的电信号转变成图象及字码等,其应用越来越广。

10.1 显示器的分类

显示器种类很多。常用显示器按工作原理的分类见表3-1-15。按显示器本身是否发光,可分为主动型

表 3-1-15 常用显示器件按工作原理分类

| 显示器件 | 基本工作原理 |
|---------------|--------------------------------|
| 示波管、显象管、荧光数码管 | 利用荧光物质在电子轰击下发光 |
| 辉光数码管、等离子体显示板 | 利用气体放电发光 |
| 半导体发光数码管 | 利用载流子注入PN结产生复合而发光 |
| 液晶显示器 | 利用液晶的电光效应进行显示 |
| 电致变色显示器 | 利用某些化合物的电致变色现象显示 |
| 电致发光显示器 | 利用电致发光粉施加电压后发光 |
| 电泳显示器 | 利用胶体中带电粒子在电场作用下附着在电极上的电泳现象进行显示 |
| 激光显示器 | 用激光作光源进行显示 |

(显示器本身发光)和被动型(显示器本身不发光,如液晶显示、电致变色显示)。

10.2 示波管

示波管是用来显示电信号波形的一种电子束显示器件,其应用十分广泛。

一般示波管的基本结构见图3-1-39,它由电子枪、偏转系统和荧光屏三个基本部分组成。从电子枪发射的高速电子束经偏转系统控制,可以打到荧光屏上的任何位置。当电子束按X、Y偏转板上的外加电压变化规律偏转时,荧光屏上就显示出一定的波形。

除一般示波管外,示波管还有其他一些类型,见表3-1-16。

表 3-1-16 其他几种示波管

| 名称 | 基本特点 |
|------------|----------------------------------------------|
| 后加速示波管 | 电子束聚焦后用较低的速度通过偏转板,然后加速,以做到既有较高的偏转灵敏度,又有足够的亮度 |
| 双束(或三束)示波管 | 有两个(或三个)电子枪及偏转系统,可同时显示两个(或三个)信号的波形 |
| 行波示波管 | 采用“行波式”偏转系统,可以显示高速(几千兆赫)信号 |

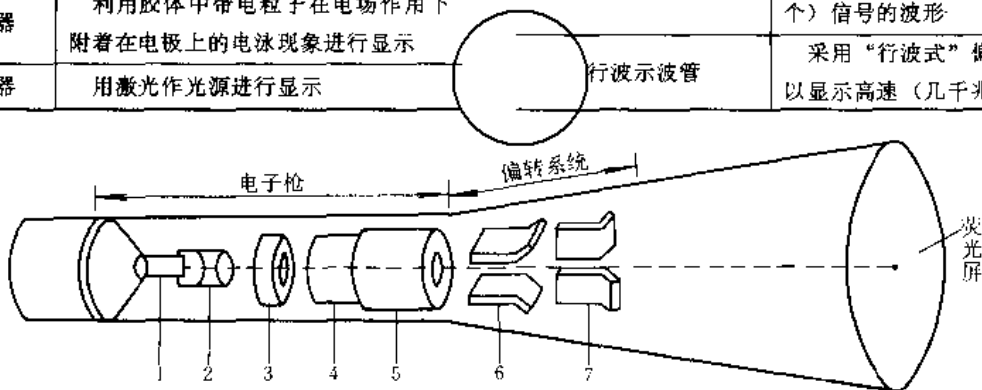


图 3-1-39 一般示波管的基本结构

1—灯丝 2—阴极 3—调制板 4—第一阳极 5—第二阳极 6—垂直偏转板 7—水平偏转板



10.3 显象管

显象管是电子束显示器件的一种，主要用于电视接收机的图象显示、计算机的屏幕显示和在控制系统中用作监视器。按显示的颜色可分为黑白显象管和彩色显象管两类。示波管和显象管都是阴极射线管，简称CRT (Cathode-Ray Tube)。

黑白显象管的基本组成与示波管类似，但显象管的屏幕大，显示的图象较亮。因此，电子束的功率较大，阳极电压可达一万伏以上，并采用磁偏转系统，以增大电子束的偏转角度。此外，黑白显象管常用硫化锌类发

白光的荧光粉。

彩色显象管是用三基色图象合成原理来显示彩色图象的，主要由电子枪、偏转线圈、荫罩板(影条板)和荧光屏等构成。图3-1-40是单枪三束管的电子枪结构示意图。荧光屏上涂敷了很多具有一定形状和按一定规律排列的能发红、绿、蓝光的荧光粉。三束受三基色信号控制的强度不同的电子束通过荫罩板小孔分别轰击红、绿、蓝荧光粉，使发出不同强度的三种颜色，以显示彩色图象。表3-1-17是几种彩色显象管的类型和结构特点。

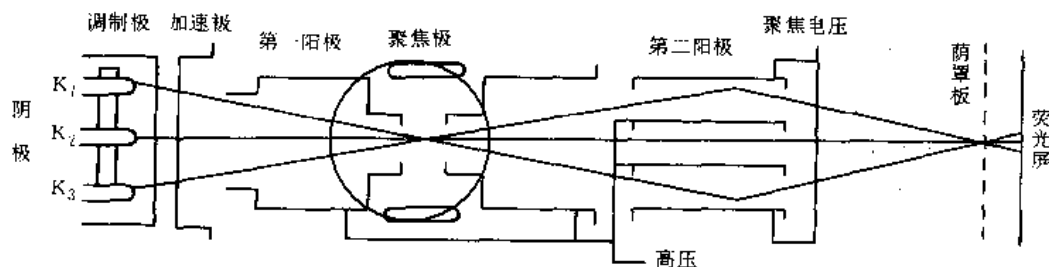


图3-1-40 单枪三束管的电子枪结构示意图

表3-1-17 几种彩色显象管的类型和结构特点

| 类型 | 屏外形 | 荧光粉排列 | 荫罩板结构 | 电子枪结构 |
|-------|-----|----------|------------|------------------------|
| 三枪三束管 | 球面 | 点状、等边三角形 | 圆形孔等边三角形排列 | 三个独立电子枪，呈等边三角形排列 |
| | | 条状、垂直 | 槽形垂直排列 | 三个独立电子枪，呈水平直线排列 |
| 单枪三束管 | 柱面 | 条状、垂直 | 垂直条状、呈网状 | 三个独立阴极和调制极，水平直线排列，公用枪体 |
| | 球面 | | 槽形垂直排列 | |
| 自会聚管 | 球面 | 条状、垂直 | 槽形垂直排列 | 类似单枪三束管，但更精密些 |

10.4 辉光数码管

辉光数码管内部有一个公共阳极和一些分别作成0、1、2、...、9等字形并相互绝缘、重叠放置的阴极。当阳极与某一阴极间的电压高于起辉电压时，阳阴极间便发生辉光放电，显示出该阴极的字形。

辉光数码管具有字形清晰，视距较远、工作可靠、驱动电流较小的优点。其缺点主要是工作电压比较高(通常在160V以上)。

图3-1-41是用晶体管作开关的辉光数码管驱动电路。

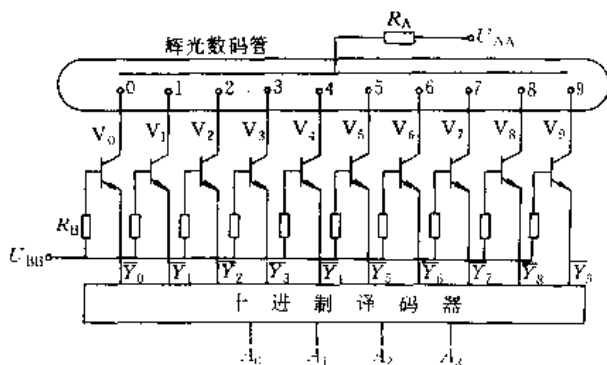


图3-1-41 辉光数码管驱动电路

10.5 液晶显示

液晶是液态晶体的简称，它具有液体的流动性和晶体的光学特性，其透明度和显示的颜色受外加电场控制。在无外加电场时，液晶为透明状态，显示器呈白色。在电极上加入电压后，液晶变为混浊状态，借助外界入射光的散射，使显示器呈暗灰色。有些液晶器件的颜色会随外加电压的变化而改变，因而可进行彩色显示。如果将液晶做成七段电极，并按一定方式排列，则只要选择不同的电极组合并加上电压，便能显示各种字形。



液晶显示器的最大优点是功耗小,工作电压低,在电子表及小型仪器、仪表中得到广泛的应用。矩阵式液晶显示板可用于平面电视和大型显示。由于它本身不发光,而靠反射光线显示字形,所以亮度较差。七段的液晶显示器通常用七段译码驱动器(参见本篇第5章5.2节)来驱动,工作时显示字段和公共电极间加上频率为几十至数百赫的正、负对称交流信号,使显示器有较长寿命。

10.6 半导体显示器

半导体显示器有发光二极管、发光数码管和 CL 组合电路等。把七个条状的发光二极管排列成七段组合字形并封装在一起,就构成发光数码管。半导体发光数码管的图形符号、字形结构和内部接法见图 3.1-42, a~g 是七个字段, h 是小数点。使用中,通过控制各个发光二极管阴极或阳极电平,便可显示 0~9 十个

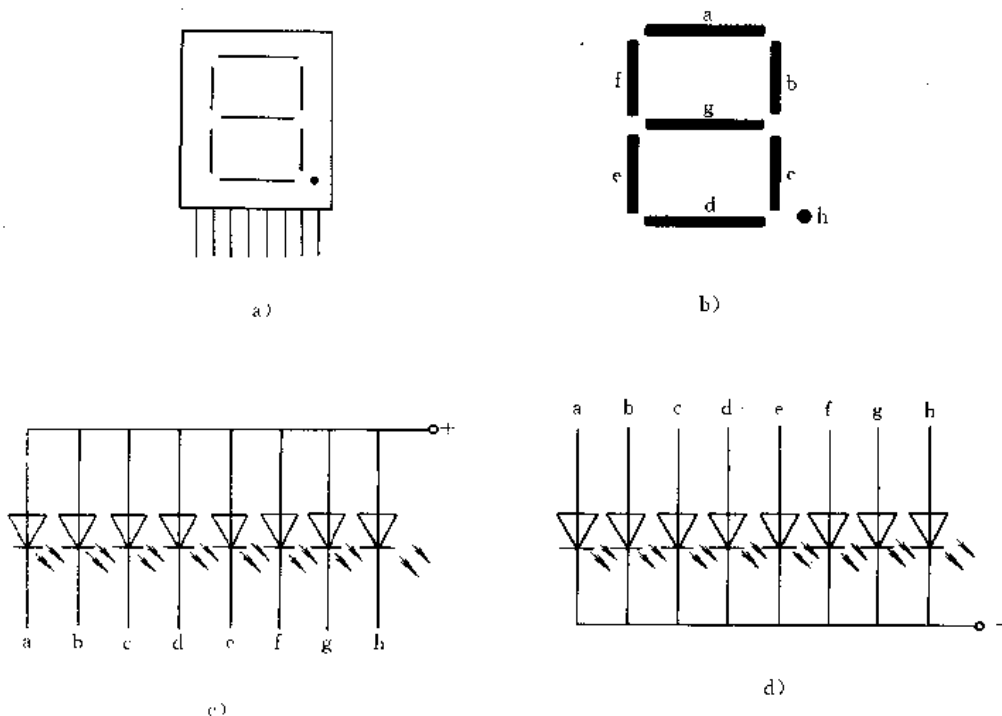


图 3.1-42 半导体数码管

a) 图形符号 b) 字形结构 c) 共阳极 d) 共阴极

数字或某些字符。它的特点是工作电压低、体积小、可靠性高、寿命长等,但工作电流较大。半导体发光数码管通常由七段译码驱动器来驱动。把很多发光二极管排列成方阵,则可显示文字和图象。

CL 组合电路(例如 CL102)是将 CMOS 集成电路和发光二极管(LED)组合在一起,具有计数、锁存、七段译码驱动和显示功能的器件,外形类似于发光数码管。其特点是功能强、显示清晰、使用方便。

10.7 荧光数码管

荧光数码管是一种真空电子管,内部主要由阴极(灯丝)、网状金属栅极和阳极(笔划电极)等构成,见图 3.1-43。阳极一般由七至九段组成,其上涂有荧光粉;栅极位于灯丝与阳极之间。

当荧光数码管加上灯丝电压和栅极正电压后,若

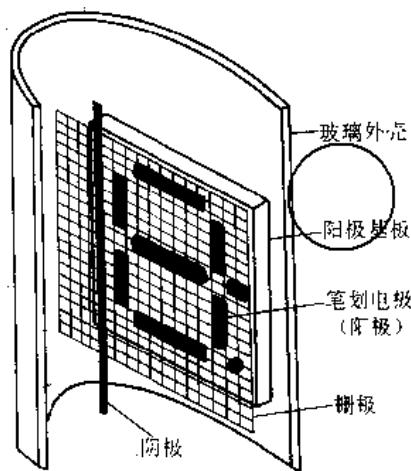


图 3.1-43 荧光数码管结构示意图

给某几段阳极加足够高(通常为 20V)的正电压,则大



部分电子将穿过栅极到达阳极，被加压的阳极字段受电子轰击而发出绿色的荧光。利用阳极字段的组合，便可显示0~9十个数字和某些字符。

荧光数码管的驱动电流小，字形清晰，工作电压低。但需加热灯丝，功耗较大。

10·8 等离子体显示板

等离子体显示板利用惰性气体放电发光显示数码或图象。按结构可分为交流型(采用交流放电显示)和直流型(用直流放电显示)。

交流等离子体显示板的结构示意图见图3·1-44，它是在两块玻璃基板上制作栅状电极并涂敷透明的玻璃绝缘层后相互正交放置而成。每两条电极的交叉点形成一个放电单元(内充惰性气体)，整块显示板就有许多按矩阵排列的放电单元。当外电路使某些放电单元放电发光时，便可显示一定的信息。

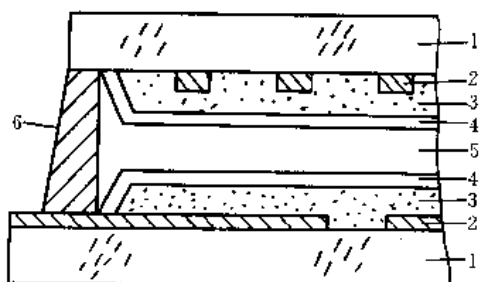


图3·1-44 交流等离子体显示板的结构
1—玻璃基板 2—笔划电极 3—绝缘层
4—保护层 5—放电间隙 6—封接边框

直流等离子体显示板的基本结构是电极装在两块玻璃基板的内侧和气体直接接触(无绝缘层)，故可直流放电显示。

等离子体显示板与CRT相比，其优点是平板结构，质量小，不需要特高电压，无失真，无闪烁等。但分辨力、颜色和亮度等较差。

10·9 激光显示器

激光显示器多用于大屏幕图象显示。图3·1-45是激光显示器的基本构成原理。激光器发出的激光束经光调制器使光强受图象信号的调制，再经光偏转器使激光束按一定规律在屏幕上扫描以显示图象。

激光显示的优点是色彩鲜艳、图象逼真、亮度高等，其缺点主要是激光器效率低以及使用期较短等。

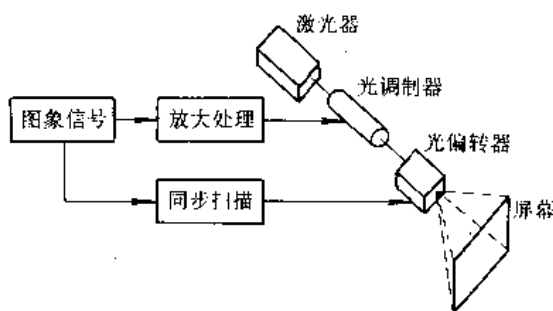


图3·1-45 激光显示器的基本构成

第2章 分立元件基本放大电路

放大电路的作用是通过电能转换把微弱的电信号增强到所要求的电压、电流或功率值。放大电路的分类方法较多，按工作频率范围可分为直流、低频、中频、高频和视频放大电路；按放大电量的不同可分为电压放大电路和功率（或电流）放大电路等。

1 放大电路的主要性能指标

放大电路的某些性能指标的含义可用图3·2-1来说明。

1. 放大倍数 也称增益，是衡量放大电路放大能力的指标。常用的有如下两种：

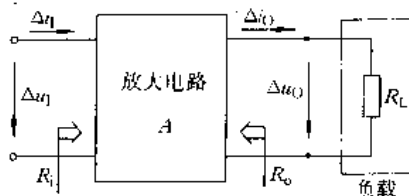


图3·2-1 放大电路框图

a. 电压放大倍数 A_u 即电压增益，指输出电压变化量 Δu_o 与输入电压变化量 Δu_i 之比，即

$$A_u = \frac{\Delta u_o}{\Delta u_i} \quad \text{或} \quad A_{u(dB)} = 20 \lg \frac{\Delta u_o}{\Delta u_i} \quad (\text{dB})$$



b. 电流放大倍数 A_i 即电流增益, 指输出电流变化量 Δi_o 与输入电流变化量 Δi_i 之比, 即

$$A_i = \frac{\Delta i_o}{\Delta i_i} \quad \text{或} \quad A_{i(dB)} = 20 \lg \frac{\Delta i_o}{\Delta i_i} \quad (\text{dB})$$

2. 输入电阻 R_i 从放大电路输入端看进去的等效电阻, 是衡量放大电路对信号源影响的指标。定义为输入电压变化量 Δu_i 与输入电流变化量 Δi_i 之比, 即

$$R_i = \frac{\Delta u_i}{\Delta i_i} \quad (\Omega)$$

3. 输出电阻 R_o 在输入信号为零时, 从放大电路输出端看进去的等效电阻。它反映放大电路的带负载能力。

4. 最大输出幅度 U_{om} (或 I_{om}) 输出波形的非线性失真系数不超过一定值时的最大输出电压 (或电流) 值。

5. 最大输出功率 P_{om} 和效率 η P_{om} 是在输出信号基本不失真的情况下能输出的最大功率, η 为 P_{om} 与直流电源提供的功率 P_s 之比, 即

$$\eta = \frac{P_{om}}{P_s} \times 100\%$$

6. 上限频率 f_H 、下限频率 f_L 和通频带 BW 是衡量放大电路对不同频率信号放大能力的指标。由于信号频率的升高或降低而使电压放大倍数下降为中频放大倍数 A_{om} 的 $\frac{1}{\sqrt{2}}$ 倍时所对应的频率分别是 f_H 和 f_L , BW 为两者之差 (见图 3-2-7a)。

7. 非线性失真系数 D 设放大电路输入某固定频率的正弦信号时, 输出波形中基波和各次谐波的幅值分别为 A_1 和 A_2 、 A_3 、 \dots , 则非线性失真系数

$$D = \frac{\sqrt{A_2^2 + A_3^2 + \dots}}{A_1} \times 100\%$$

此外, 对不同类型的放大电路, 还有一些其他的性能指标。

能指标。

2 双极型晶体管单管放大电路

单管放大电路有三种基本组态: 共发射极、共集电极和共基极。它们各有不同特点和不同应用场合 (见表 3-2-1)。

2.1 共发射极放大电路

2.1.1 电路组成

图 3-2-2 是共发射极基本放大电路, 用作交流电压放大。晶体管 V 作电流放大, 发射结正向偏置, 集电结反向偏置。电源电压 U_{CC} 为放大电路提供能量, 并作直流偏置电源。 R_B 为基极偏置电阻, R_C 把晶体管集电极电流的变化转换成集电极电压的变化。 C_1 和 C_2 分别为输入和输出耦合 (隔直) 电容, R_L 为负载电阻。输入信号 u_i 和输出信号 u_o 的公共极为发射极, 故称共发射极放大电路。

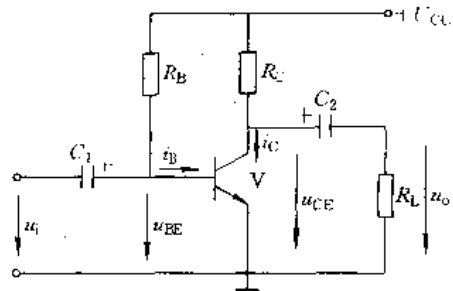


图 3-2-2 共发射极基本放大电路

2.1.2 图解分析法

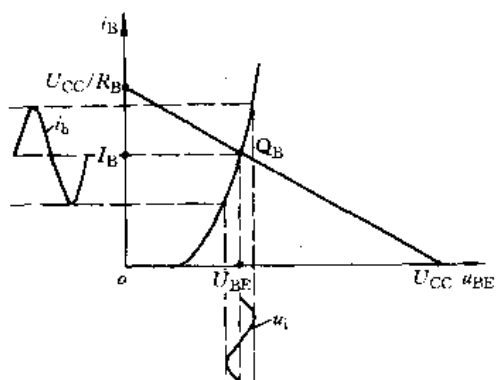
利用晶体管的输入、输出特性曲线, 通过图解的方法来分折放大电路。

表 3-2-1 双极型晶体管放大电路三种组态的基本特性和应用场合

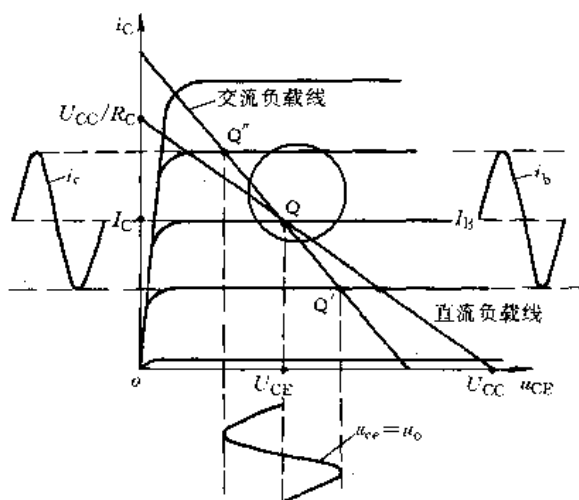
| 名称 | 共发射极放大电路 | 共集电极放大电路 | 共基极放大电路 |
|--------------|--------------|-----------------|---------------|
| 电压放大倍数 A_u | 大 (几十~几百倍) | 小于并接近于 1 | 大 (和共发射极电路相同) |
| 电流放大倍数 A_i | 近似为 β | 近似为 $(1+\beta)$ | 小于并接近于 1 |
| 输入电阻 R_i | 中 (几百欧~几千欧) | 大 (几十千欧以上) | 小 (几欧~几十欧) |
| 输出电阻 R_o | 中 (几千欧~几十千欧) | 小 (几欧~几十欧) | 大 (几十千欧~几百千欧) |
| 通频带 BW | 较窄 | 较宽 | 宽 |
| 应用场合 | 低频电压放大 | 放大器的输入级、输出级或缓冲级 | 高频或宽频带放大电路 |



1. 静态分析 ($u_i=0$ 时的工作情况) 利用晶体管的输入特性曲线 $i_B=f(u_{BE})$ 和根据电压方程式 $u_{BE}=U_{CC}-i_B R_B$ 所画出的直流负载线, 可确定输入回路的静态工作点 $Q_B (U_{BE}, I_B)$, 见图 3-2-3a。利用晶体管的输出特性曲线 $i_C=f(u_{CE})|_{i_B=I_B}$ 和根据电压方程式 $u_{CE}=U_{CC}-i_C R_C$ 所画出的直流负载线 (斜率为 $-1/R_C$), 可确定输出回路的静态工作点 $Q (U_{CE}, I_C)$, 见图 3-2-3b。静态电流 I_B, I_C 和电压 U_{BE}, U_{CE} 通常称为直流分量。



a)



b)

图 3-2-3 图解分析法

a) 输入回路图解 b) 输出回路图解

2. 动态分析 (加入 u_i 后的工作情况) 加入 u_i (设为正弦信号) 后, 基极电流和集电极电流的总瞬时值 i_B 和 i_C 中将出现交流分量 i_b 和 i_c 。在集电极回路中, 因交流分量 i_c 可通过电容 C_2 和直流电源 U_{CC} , 使晶体管集电极的交流等效电阻为 $R'_L=R_C R_L/(R_C+R_L)$, 故输

出回路交流负载线为经过 Q 点而斜率为 $-1/R'_L$ 的直线。此时工作点在 $Q' \sim Q''$ 之间往复变化, 晶体管集-射极之间产生交流电压分量 u_{ce} (见图 3-2-3b)。输出电压 $u_o=u_{ce}$ 。

3. 静态工作点与非线性失真 合适的静态工作点是保证放大电路正常工作和输出波形不失真所必需的。为获得最大的不失真输出电压, 静态工作点应选在接近交流负载线的中间。工作点选得太高, 输出波形易产生饱和失真, 工作点选得太低, 则产生截止失真 (见图 3-2-4)。

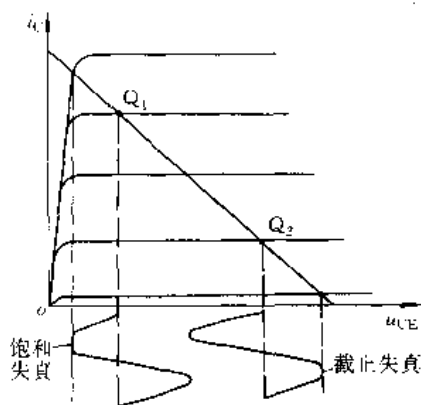


图 3-2-4 饱和失真和截止失真

2-1-3 等效电路分析法

利用等效电路来分析放大电路。

1. 静态分析 放大电路的交流输入信号 $u_i=0$ 时的电流通路称为直流通路。在图 3-2-2 中, 把电容 C_1, C_2 断开即得直流通路 (图 3-2-5a)。由直流通路和晶体管的简化直流等效电路可画出放大电路的直流等效电路 (图 3-2-5b)。从而求得静态工作点为

$$I_B = \frac{U_{CC} - U_{BE}}{R_B}$$

$$I_C = \beta I_B$$

$$U_{CE} = U_{CC} - I_C R_C$$

通常 U_{BE} 取 0.7V (硅管) 或 0.3V (锗管)。

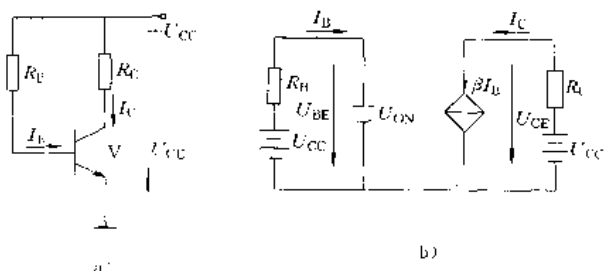


图 3-2-5 直流通路和直流等效电路

a) 直流通路 b) 直流等效电路



2. 动态分析 为分析电路在输入信号 u_i 作用下各处电压、电流的变化情况,可画出只考虑交流分量所形成的电流通路,称为交流通路(图 3·2-6a)。根据交流通路和晶体管简化 h 参数等效电路可得共射放大电路的简化微变等效电路(图 3·2-6b)。对于正弦输入信号,各电压、电流的交流分量也是正弦量,可用相量表示。因此,可求得电压放大倍数(复数形式)

$$A_u = \frac{U_o}{U_i} = - \frac{I_c R'_L}{I_b r_{be}} = - \beta \frac{R'_L}{r_{be}}$$

式中 $R'_L = R_C R_L / (R_C + R_L)$, 负号表示输出电压与输入电压反相。电路的输入电阻

$$R_i = \frac{U_i}{I_i} = \frac{R_B r_{be}}{R_B + r_{be}}$$

输出电阻

$$R_o = R_C$$

2·1·4 偏置电路和工作点稳定问题

偏置电路的作用是给放大电路提供静态工作点。

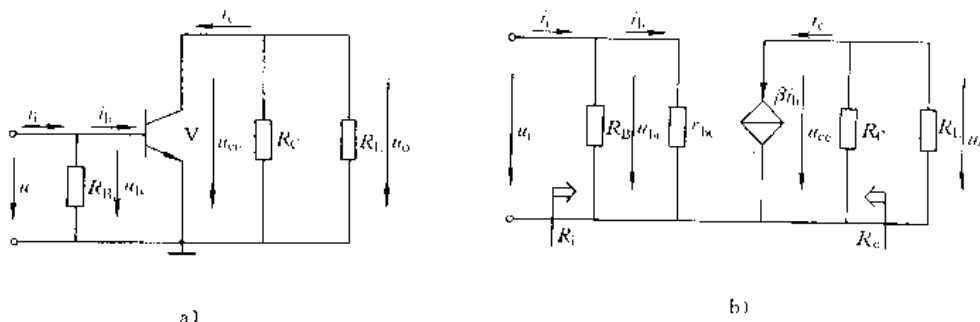


图 3·2-6 交流通路和微变等效电路

a) 交流通路 b) 微变等效电路

表 3·2-2 几种工作点稳定的偏置电路

| 名称 | 电 路 | 原理和特点 | 静态工作点的计算 |
|--------------|-----|----------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 分压式电流串联负反馈电路 | | 当 $I_1 \approx I_2 \gg I_B$ 和 $U_B \gg U_{BE}$ 时, U_B 稳定, 用 R_E 的直流负反馈稳定 I_C , R_E 大, 稳定性好 | $U_B \approx U_{CC} \frac{R_{B1}}{R_{B1} + R_{B2}}$ $I_C \approx I_E = \frac{U_B - U_{BE}}{R_E}$ $U_{CE} \approx U_{CC} - I_C (R_C + R_E)$ |

合适而稳定的静态工作点是保证放大电路正常工作所必需的。引起静态工作点不稳定的因素很多,但主要是晶体管的特性参数随温度变化。因此常采用负反馈或其它温度补偿措施,使静态工作点稳定。

图 3·2-2 为固定式偏置电路,电路简单,稳定性差。表 3·2-2 列出了其他几种工作点稳定的偏置电路。

2·1·5 频率特性

电压放大倍数 A_u 与信号频率 f 的关系称为幅频特性,输出、输入电压间的相位移 φ 与信号频率 f 的关系称为相频特性,两者总称频率特性。共发射极单管放大电路的频率特性见图 3·2-7。

高频时 A_u 降低的主要原因是晶体管的 β 值在高频时大大下降以及晶体管极间电容、电路分布电路的旁路作用。低频时 A_u 下降的主要原因是耦合电容和发射极旁路电容的容抗随频率的降低而增大,造成信号损失。另外,在高频与低频时,输入、输出信号间还要产生附加的相位移,形成图 3·2-7b 所示的相频特性。



此星公司制作 请尊重作者版权

(续)

| 名称 | 电 路 | 原理和特点 | 静态工作点的计算 |
|------------|-----|------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 集电极-基极偏置电路 | | 利用 U_{CE} 的变化控制 I_B , 进而抑制 I_C 的变化, R_C 大, R_B 小, 稳定性好 | $I_B = \frac{U_{CE} - U_{BE}}{R_B} = \frac{U_{CC} - U_{BE}}{R_B + (1 + \beta) R_C}$ $I_C = \beta I_B$ $U_{CE} \approx U_{CC} - I_C R_C$ |
| 温度补偿电路 | | 利用 R_t 随温度升高而减小, 使 U_B 减小, 抑制 I_C 随温度的升高而增加 | $U_B \approx U_{CC} \frac{R'_{B1}}{R'_{B1} + R_{B2}}$ $\left\{ R'_{B1} = \frac{R_{B1} R_t}{R_{B1} + R_t} \right\}$ $I_C \approx I_E = \frac{U_B - U_{BE}}{R_E}$ $U_{CE} \approx U_{CC} - I_C (R_C + R_E)$ |

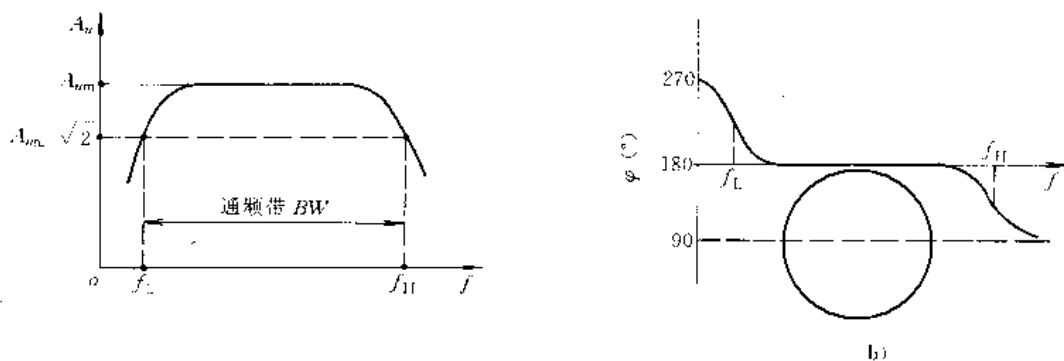


图 3·2-7 共发射极放大电路的频率特性

a) 幅频特性 b) 相频特性

2·2 共集电极放大电路 (射极输出器)

图 3·2-8 是共集电极放大电路的基本电路、交流通路和微变等效电路, 输入、输出的公共端是集电极, 信号从发射极输出。

静态工作点估算:

$$I_B = \frac{U_{CC} - U_{BE}}{R_B + (1 + \beta) R_E}$$

$$I_C = \beta I_B$$

$$U_{CE} \approx U_{CC} - I_C R_E$$

主要性能指标:

(1) 电压放大倍数

$$A_u = \frac{U_o}{U_i} = \frac{I_e R'_L}{I_b r_{be} + I_e R'_L} = \frac{(1 + \beta) R'_L}{r_{be} + (1 + \beta) R'_L}$$

$$R'_L = \frac{R_E R_L}{R_E + R_L}$$

可见, A_u 小于而接近 1, 输出电压与输入电压同相。故也称射极跟随器。

(2) 输入电阻

$$R_i = \frac{R_B [r_{be} + (1 + \beta) R'_L]}{R_B + [r_{be} + (1 + \beta) R'_L]}$$

(3) 输出电阻 R_o 可令图 3·2-8c 电路的 $u_s = 0$ 和



$R_L = \infty$ 后求得, 其值为

$$R_o = R_E // \frac{r_{be} + R'_s}{1 + \beta} = \frac{R_E \frac{r_{be} + R'_s}{1 + \beta}}{R_E + \frac{r_{be} + R'_s}{1 + \beta}}$$

$$R'_s = \frac{R_s R_B}{R_s + R_B}$$

2.3 共基极放大电路

图 3-2-9 是共基极放大电路的基本电路、交流通路和微变等效电路, 输入、输出的公共电极是基极。

静态工作点估算:

$$U_B \approx U_{CC} \frac{R_{B1}}{R_{B1} + R_{B2}} \quad (\text{当 } I_{R_{B1}} \approx I_{R_{B2}} \gg I_B)$$

$$I_C \approx I_E = \frac{U_B - U_{BE}}{R_E}$$

$$U_{CE} \approx U_{CC} - I_C (R_C + R_E)$$

主要性能指标:

(1) 电压放大倍数 A_u

$$A_u = \frac{U_o}{U_i} = \frac{-I_C R'_L}{-I_B r_{be}} = \beta \frac{R'_L}{r_{be}}$$

$$R'_L = \frac{R_C R_L}{R_C + R_L}$$

A_u 为正表示输出电压与输入电压同相。

(2) 输入电阻 R_i 为 R_E 与 $r_{be}/(1+\beta)$ 的并联,

即

$$R_i = \frac{R_E \frac{r_{be}}{1 + \beta}}{R_E + \frac{r_{be}}{1 + \beta}} \approx \frac{r_{be}}{1 + \beta} \quad (\text{当 } R_E \gg \frac{r_{be}}{1 + \beta})$$

(3) 输出电阻 R_o 接成共基极电路时, 晶体管的输出特性曲线很平, 晶体管的输出电阻 r_{be} 很大, 故

$$R_o \approx R_C$$

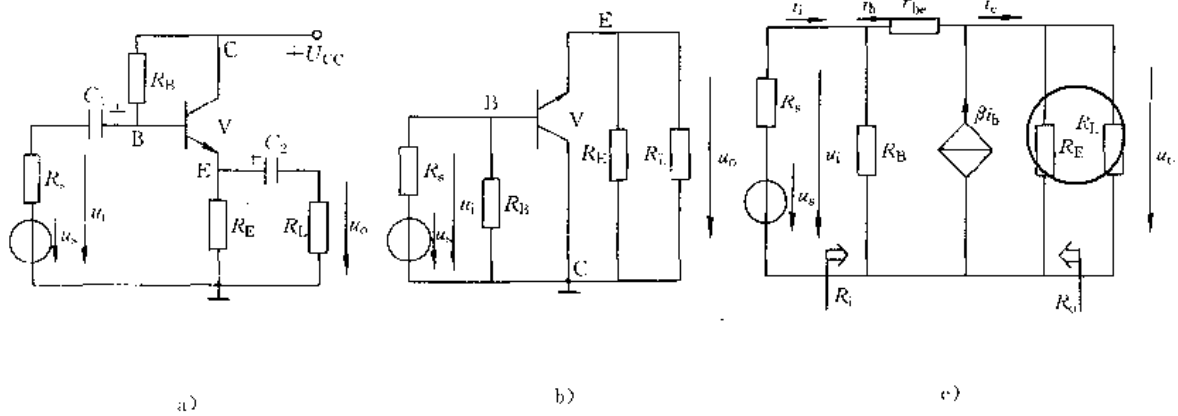


图 3-2-8 共集电极放大电路

a) 基本电路 b) 交流通路 c) 微变等效电路

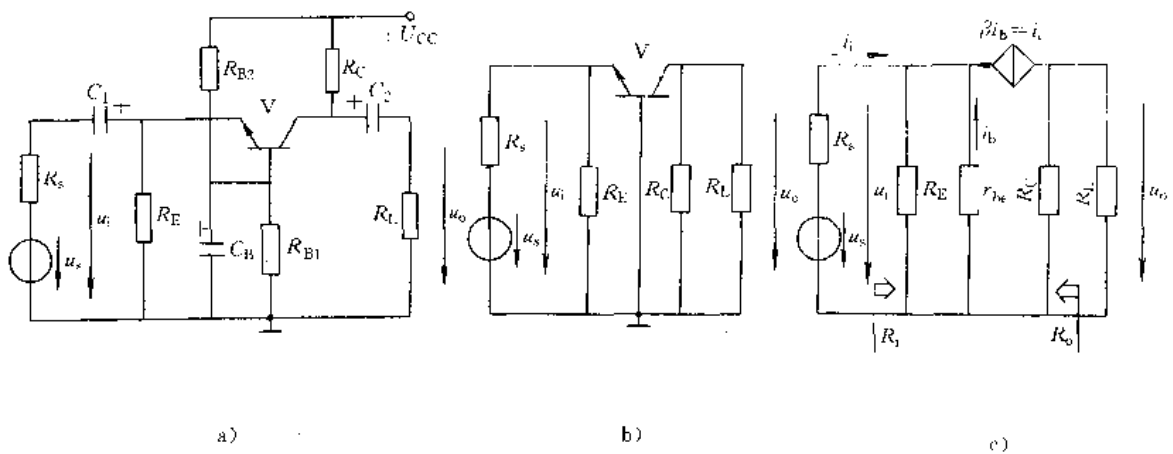


图 3-2-9 共基极放大电路

a) 基本电路 b) 交流通路 c) 微变等效电路



3 场效应晶体管单管放大电路

场效应管放大电路的最大特点是输入电阻很高，噪声低，常用作要求高输入电阻、低噪声的放大器的输入级。场效应管放大电路有共源极、共漏极和共栅极三种组态，但共栅组态不常用。分析方法也有图解法和等效电路分析法两种。

3.1 共源极放大电路

图 3·2-10 是由 NMOS 耗尽型场效应晶体管组成的共源极放大电路，图 3·2-10a 是采用自给式偏置的电路，电阻 R_G 的作用是保证栅极与地之间有直流通路，并泄放栅极上的感应电荷，避免因栅极上电荷积累产生高电位而损坏场效应管；图 3·2-10b 是采用分压式和自给式相结合的偏置电路。

正常情况下，场效应管的栅极电流近似为零，故对自给式偏置电路，静态工作点（栅极-源极电压 U_{GS} 、漏极电流 I_D ）由下列方程组确定：

$$\begin{cases} U_{GS} = U_G - U_S = -I_D R_S \\ I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{U_{GS}}{U_{GS(OFF)}} \right)^2 \end{cases}$$

式中 I_{DSS} 为饱和漏极电流； $U_{GS(OFF)}$ 为夹断电压。

对分压式和自给式相结合的偏置电路，静态工作点则由方程组

$$\begin{cases} U_{GS} = U_{DD} \frac{R_{G1}}{R_{G1} + R_{G2}} - I_D R_S \\ I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{U_{GS}}{U_{GS(OFF)}} \right)^2 \end{cases}$$

确定。此电路的 R_S 可取较大值，静态工作点的稳定性好。

由于 NMOS 增强型场效应管栅源间必须正偏才能工作在放大区，因此只能采用分压式和自给式相结合的偏置电路。

场效应管在低频小信号时可用图 3·2-11a 的简化模型来等效。由此可画出图 3·2-10b 共源极放大电路的微变等效电路如图 3·2-11b 所示。因此可求得放大

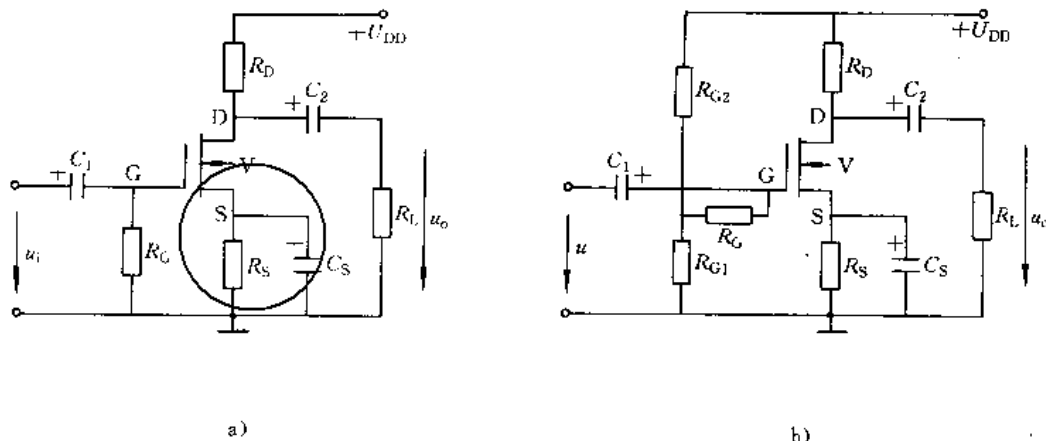


图 3·2-10 共源极放大电路
a) 自给式偏置 b) 分压、自给式相结合的偏置

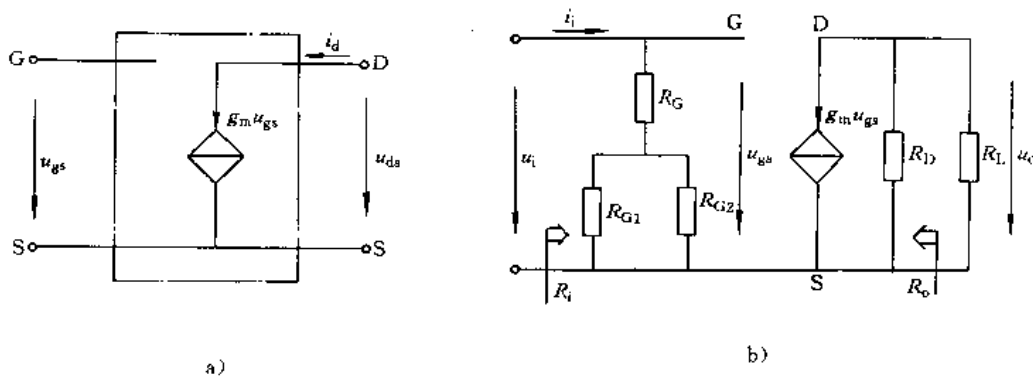


图 3·2-11 微变等效电路
a) 场效应管微变等效电路 b) 图 3·2-10b 电路的微变等效电路



电路的如下主要性能指标:

(1) 电压放大倍数

$$A_u = \frac{U_o}{U_i} = \frac{-g_m U_{gs} R'_L}{U_{gs}} = -g_m R'_L$$

$$R'_L = \frac{R_D R_L}{R_D + R_L}$$

式中 g_m ——场效应晶体管的跨导 (mA/V)。

(2) 输入电阻

$$R_i = \frac{U_i}{I_i} = R_G + \frac{R_{G1} R_{G2}}{R_{G1} + R_{G2}}$$

(3) 输出电阻

$$R_o = R_D$$

由 PMOS 管组成的放大电路除电源极性相反外, 上述分析均适用。

共源放大电路的电压放大倍数大, 主要用作电压放大。

3.2 共漏极放大电路 (源极输出器)

图 3-2-12 是共漏极放大电路的基本电路及其微变等效电路, 输入、输出的公共电极是漏极。

电路的静态工作点 (U_{GS} 、 I_D) 估算与图 3-2-10b 相同。其电压放大倍数

$$A_u = \frac{U_o}{U_i} = \frac{g_m U_{gs} R'_L}{U_{gs} + g_m U_{gs} R'_L} = \frac{g_m R'_L}{1 + g_m R'_L}$$

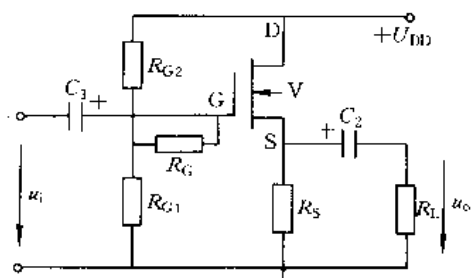
输入电阻

$$R_i = R_G + \frac{R_{G1} R_{G2}}{R_{G1} + R_{G2}}$$

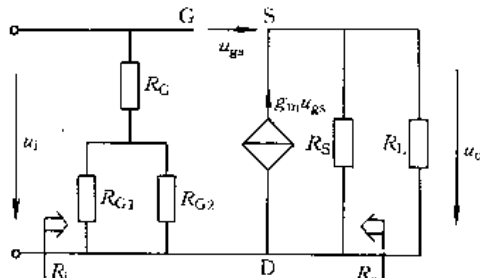
输出电阻 R_o 为 R_S 与 $1/g_m$ 的并联, 即

$$R_o = \frac{R_S \frac{1}{g_m}}{R_S + \frac{1}{g_m}} = \frac{R_S}{1 + g_m R_S}$$

式中 g_m ——场效应管的跨导 (mA/V)。



a)



b)

图 3-2-12 共漏极放大电路
a) 基本电路 b) 微变等效电路

共漏极放大电路的电压放大倍数小于 1 而接近 1, 输入、输出电压同相, 输入电阻大, 输出电阻小, 可用作阻抗变换器。

4 电子管放大电路

电子管和场效应晶体管都是电压控制型器件。类似于场效应管共源极和共漏极放大电路, 电子管有共阴极 (阳极输出) 放大电路和共阳极 (阴极输出) 放大电路。电子管放大电路的分析方法和场效应管放大电路相似。

电子管放大电路通常采用自给栅偏压的方式, 图 3-2-13a 是由三极管组成的基本电压放大电路。静态 ($u_i=0$) 时, 栅偏压 $U_{GK} = -I_A R_K$, C_1 、 C_2 为耦合电容, C_K 为阴极旁路电容, R_K 为阴极电阻, R_A 为阳极负载电阻, R_L 为输出负载电阻, R_G 为栅极提供直流通路, 使自给栅偏压加至栅极, 并泄漏栅极上积累的电荷。图 3-2-13b 是其中频区的简化微变等效电路, 图中 g_m 为电子管的跨导, 它表示栅极电压对阳极电流的控制能力, 由下式确定:

$$g_m = \left. \frac{di_A}{du_{GK}} \right|_{u_{AK}=\text{常数}}$$

小型电子管的 g_m 值约为 1~5mA/V, r_s 为电子管的微变电阻, 它表示阳极电压变化将引起阳极电流变化, 由下式确定:

$$r_s = \left. \frac{du_{AK}}{di_A} \right|_{u_{GK}=\text{常数}}$$

一般三极管的 r_s 值为几百欧至几十千欧。

由微变等效电路可得电压放大倍数为

$$A_u = \frac{U_o}{U_i} = -g_m U_{gs} \frac{r_s R'_L}{r_s + R'_L} / U_{gs} = -g_m \frac{r_s R'_L}{r_s + R'_L}$$

$$R'_L = \frac{R_A R_L}{R_A + R_L}$$



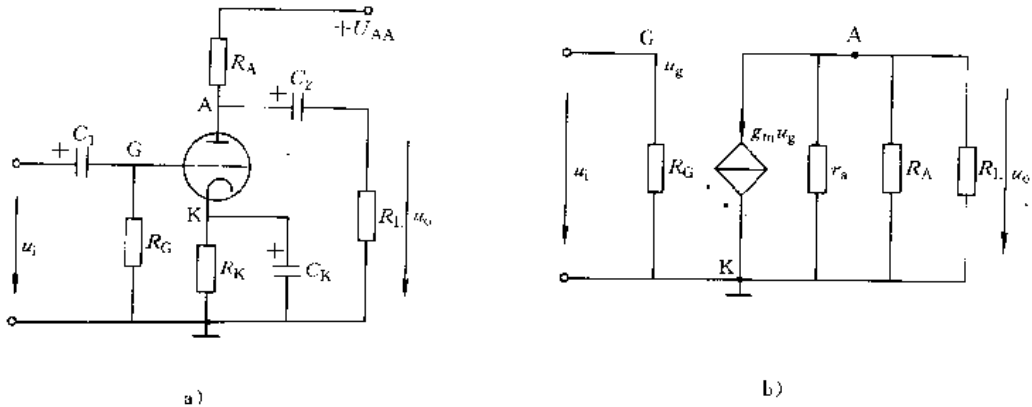


图 3-2-13 真空三极管电压放大电路

a) 基本电路 b) 简化微变等效电路

三极管放大电路具有电路简单、放大能力强的特点,但它的输入电容较大,适用于低频电压放大。当信号频率较高时,可采用五极管放大电路,其原理电路见图 3-2-14。图中电源通过 R_{G2} 为屏栅极 G_2 提供阳极电压的 $\frac{1}{2} \sim \frac{1}{3}$ 的直流电压。 C_G 为屏栅极 G_2 的旁路电容,使屏栅极对交流有屏蔽作用。

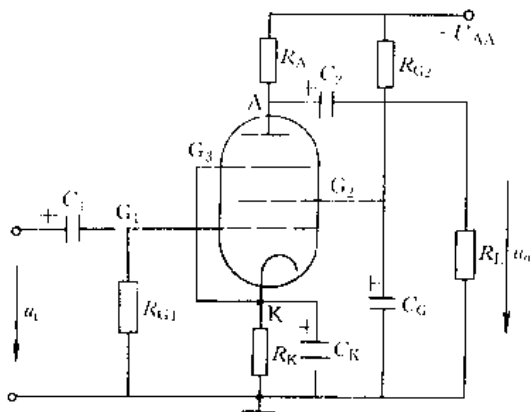


图 3-2-14 真空五极管放大电路

5 差分放大电路

5.1 典型的差分放大电路

其电路见图 3-2-15,它采用双电源,两边电路对称,因具有两个输入端,两个输出端,故称为双端输入双端输出电路。一般 R_{B1} 远小于 R_{B2} 。

1. 静态工作点 静态时两管的基极电位接近零,发射极电位 $U_E = -U_{BE}$,每管的发射极电流 I_E 为流过 R_E 电流的 $\frac{1}{2}$,故

$$I_C \approx I_E \approx \frac{1}{2} \frac{U_E + U_{EE}}{R_E} \approx \frac{1}{2} \frac{-U_{BE} + U_{EE}}{R_E}$$

$$U_{C1} = U_{C2} = U_{CC} - I_C R_C$$

$$U_O = U_{C1} - U_{C2} = 0$$

由于流过 R_E 的电流为 $2I_E$,故 R_E 对直流电流有强烈的负反馈,电路的静态工作点很稳定。

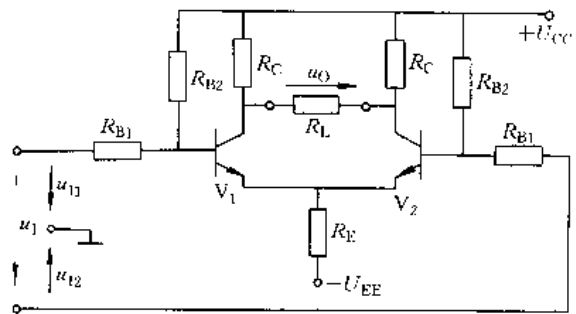


图 3-2-15 典型的差分放大电路

2. 差模信号输入 加入 u_i 后,两管的输入信号 u_{i1} 和 u_{i2} 大小相等,极性相反,称这种信号为差模信号。此时,一管电流增加,另一管电流减小,变化量相等,流过 R_E 的电流不变,故 R_E 对差模信号无负反馈作用。两管集电极电位的变化量 $\Delta u_{C1} = -\Delta u_{C2}$,故负载 R_L 的“中点”电位不变,每管所带负载为 $\frac{1}{2} R_L$,差模电压放大倍数等于单管的放大倍数,即

$$A_{ud} = -\beta \frac{R'_L}{R_{B1} + r_{be}} \quad (R_{B2} \gg R_{B1})$$

$$R'_L = \frac{R_L R_C}{\frac{1}{2} R_L + R_C}$$

3. 共模信号输入和共模抑制比 温度变化将引起晶体管工作点的漂移,由于两管漂移情况相同,因此可以看成是在两个输入端输入大小相等、极性相同的信号的结果。这种信号称为共模信号。此时若电路完全对称,则 $\Delta u_{C1} = \Delta u_{C2}$, $\Delta u_O = 0$,共模电压放大倍数 $A_{uc} = 0$ 。实际差分放大电路的 A_{uc} 很小。



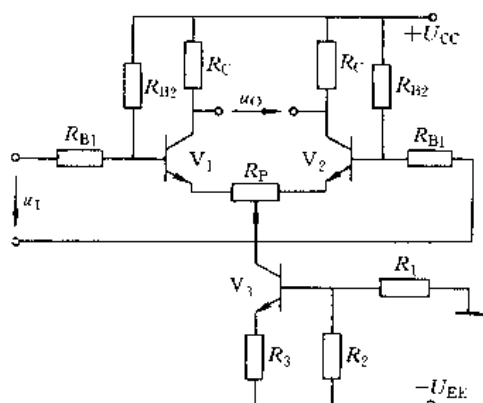
差分放大电路对共模信号的抑制能力常用共模抑制比 K_{CMR} 来表示, 它定义为

$$K_{CMR} = \frac{A_{od}}{A_{oc}} \quad \text{或} \quad K_{CMR(dB)} = 20 \lg \frac{A_{od}}{A_{oc}} \quad (\text{dB})$$

K_{CMR} 值越大, 表明抑制共模信号的能力越强。

5.2 具有恒流源的差分放大电路

用恒流源代替图 3.2-15 中的电阻 R_E , 可使共模抑制比更高。

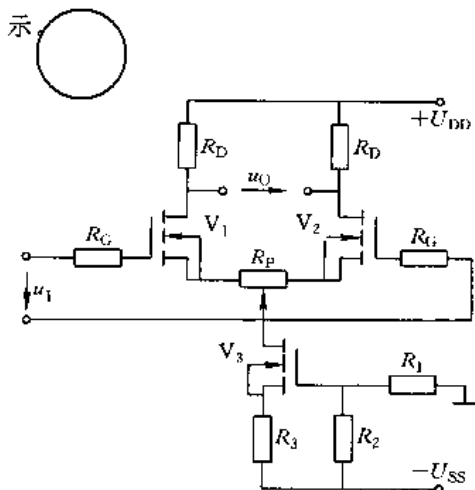


a)

图 3.2-16a 是由晶体管 V_3 和电阻 R_1, R_2, R_3 组成恒流源, 使 V_3 的集电极电流 I_{C3} 接近恒定, 因此 V_1, V_2 的集电极电流之和也基本恒定, 即 $I_{C1} + I_{C2} \approx I_{C3}$ 。图 3.2-16b 是采用场效应管的差分放大电路, 它具有输入电阻高、噪声小等特点。

5.3 差分放大电路的几种接法

见表 3.2-3, 其中恒流源电路用恒流源的符号表示。



b)

图 3.2-16 具有恒流源的差分放大电路

a) 晶体管电路 b) 场效应管电路

表 3.2-3 差分放大电路的四种接法

| 接法 | 基本电路 | 电压放大倍数 | 输入、输出电阻 | 特点和用途 |
|--------------|------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|--------------------------------|
| 双端输入 双端输出 | | $A_u = -\frac{\beta R'_L}{R_B + r_{be}}$ $R'_L = \frac{R_C R_L}{R_C + \frac{R_L}{2}}$ | $R_i = 2(R_B + r_{be})$ $R_o = 2R_C$ | 共模输入时, 输出为零。用于输入、输出信号不需一端接地的场合 |
| 单端输入 单端输出 | | $A_u \approx -\frac{1}{2} \frac{\beta R'_L}{R_B + r_{be}}$ $R'_L = \frac{R_C R_L}{R_C + R_L}$ | $R_i \approx 2(R_B + r_{be})$ $R_o = R_C$ | 用于输入、输出均需一端接地的场合 |



(续)

| 接法 | 基本电路 | 电压放大倍数 | 输入、输出电阻 | 特点和用途 |
|----------|------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|--------------|
| 双端输入单端输出 | | $A_u = -\frac{1}{2} \frac{\beta R'_L}{R_B + r_{be}}$ $R'_L = \frac{R_C R_L}{R_C + R_L}$ | $R_i = 2(R_B + r_{be})$ $R_o = R_C$ | 将双端输入转换为单端输出 |
| 单端输入双端输出 | | $A_u \approx -\frac{\beta R'_L}{R_B + r_{be}}$ $R'_L = \frac{R_C \frac{R_L}{2}}{R_C + \frac{R_L}{2}}$ | $R_i \approx 2(R_B + r_{be})$ $R_o = 2R_C$ | 将单端输入转换为双端输出 |

6 选频放大电路

选频放大电路能选择一定频率范围的信号加以放大,而对其他频率的信号具有较强的抑制能力。选频放大电路的主要性能指标有谐振频率 f_0 、通频带 BW 和选择性系数 K 等。 K 等于频率为 f_0 时的电压放大倍数 A_{u0} 与一定失谐量(偏离 f_0 一定值)时的放大倍数 A_u 之比,即 $K = A_{u0}/A_u$ 。 K 值越大,表示选频放大电路从不同频率的信号中选择有用信号的能力越强。

6.1 LC 选频放大电路

LC 选频放大电路主要用于高频和中频场合。它以 LC 谐振电路作为选频网络,分单调谐回路和双调

谐回路两种。单调谐回路的 LC 选频放大器的基本电路见图 3-2-17a, T 为耦合变压器,初次级匝数比为 n 。图 3-2-17b 是其交流通路, $R'_L = n^2 R_L$ 是负载电阻 R_L 折合成到变压器初级值的值。放大电路等效负载由 L 、 C 和 R'_L 确定。放大电路对频率等于 LC 并联谐振频率的信号具有最大的电压放大倍数,对其它频率的信号,电压放大倍数迅速下降。其幅频特性曲线见图 3-2-17c。

电路的谐振频率

$$f_0 \approx \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}}$$

幅频特性

$$A_u = \frac{A_{u0}}{\sqrt{1 + Q_{eq}^2 \left(\frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f} \right)^2}}$$

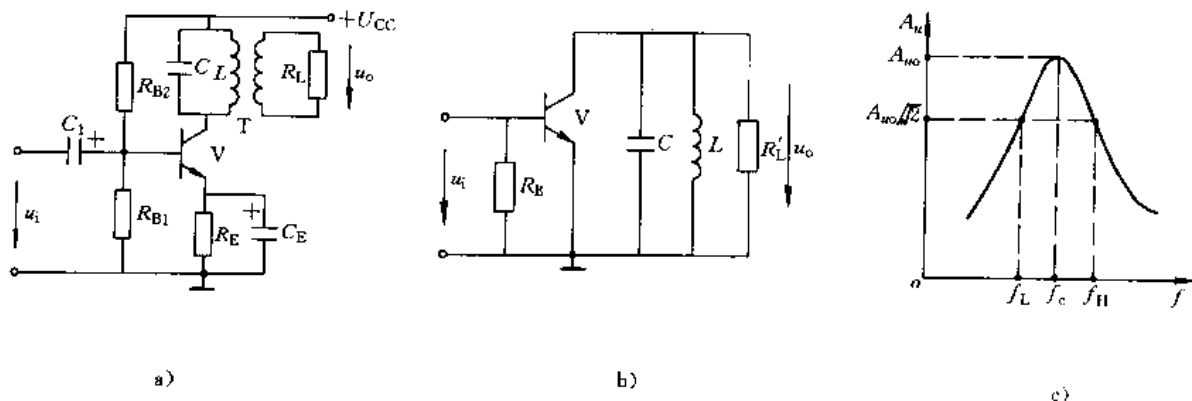


图 3-2-17 LC 选频放大电路

a) 基本电路 b) 交流通路 c) 幅频特性



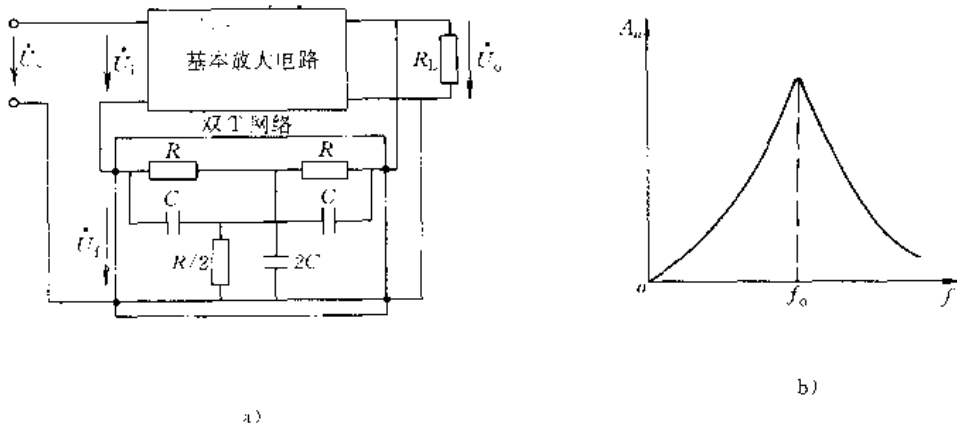


图 3-2-18 双 T 型 RC 选频放大电路

a) 电路结构框图 b) 幅频特性

式中 Q_{eq} — LC 谐振回路的有载品质因数。

通频带 $BW = f_H - f_L \approx \frac{f_0}{Q_{eq}}$

谐振时的电压放大倍数

$$A_{uv} \approx -\frac{\beta}{r_{be}} \sqrt{\frac{L}{C}} Q_{eq}$$

6.2 RC 选频放大电路

RC 选频放大电路适用于低频场合。它以 RC 电路作为选频网络，RC 选频网络的形式有串并联型、单 T 型和双 T 型等。图 3-2-18 是双 T 型 RC 选频放大电路的结构框图和幅频特性。

电路的谐振频率

$$f_0 \approx \frac{1}{2\pi RC}$$

7 功率放大电路

功率放大电路的主要作用是向负载提供功率。因此要求它能输出足够大的电压和足够大的电流，且效率高，失真小。功率放大电路通常在大信号状态下工

作，分析时采用图解法。电路中的晶体管工作状态往往接近于极限运用状态，所以应注意工作在安全区，并保证良好的散热和必要的保护措施。

功率放大电路按电路形式可分为无变压器式（又分 OCL、OTL 和 BTL）和变压器耦合两大类。按工作状态可分为甲类（晶体管在输入正弦信号的整个周期内都导通）、乙类（晶体管仅在半个周期内导通）和甲乙类（介于甲、乙类之间）。

7.1 互补对称式功率放大电路

图 3-2-19 是采用双电源、无输出耦合电容的互补对称式原理电路，常称 OCL (Output Capacitorless) 电路。在输入正弦电压的整个周期，晶体管 V_1 、 V_2 交替导通，负载 R_L 上得到一个完整的波形。

在理想情况下，忽略晶体管的饱和压降，则最大输出电压幅值为 U_{CC} ，最大输出功率

$$P_{om} = \frac{(U_{CC}/\sqrt{2})^2}{R_L} = \frac{1}{2} \frac{U_{CC}^2}{R_L}$$

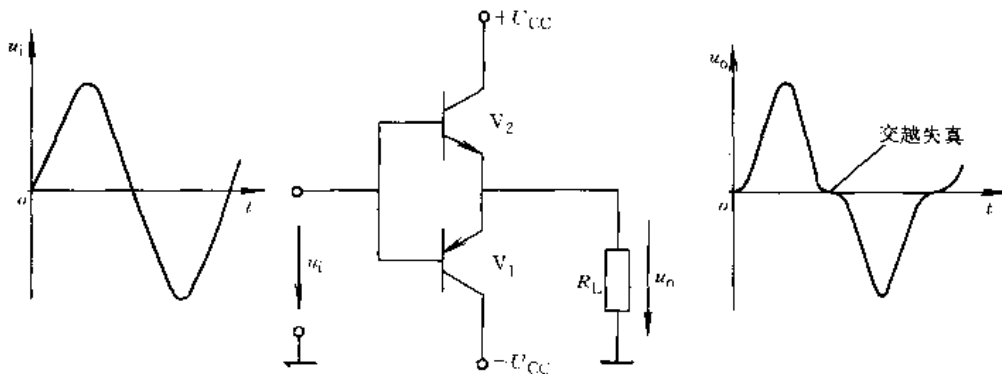


图 3-2-19 互补对称式原理电路



最大效率 $\eta_m = \frac{P_{om}}{P_s} \approx 78.5\%$

式中 P_s 为直流电源提供的功率。

每只晶体管集-射极间承受的最大电压为 $2U_{CC}$ ，最大集电极功耗为 $0.2P_{om}$ 。

由于晶体管输入特性存在死区，若不设置偏置电路，输出波形将产生如图 3·2-19 所示的交越失真。故通常设置偏置电路，提供一个较小的、能消除交越失真的基极电流。

为使功率晶体管容易配对，常采用复合管。复合管的接法见图 3·2-20。

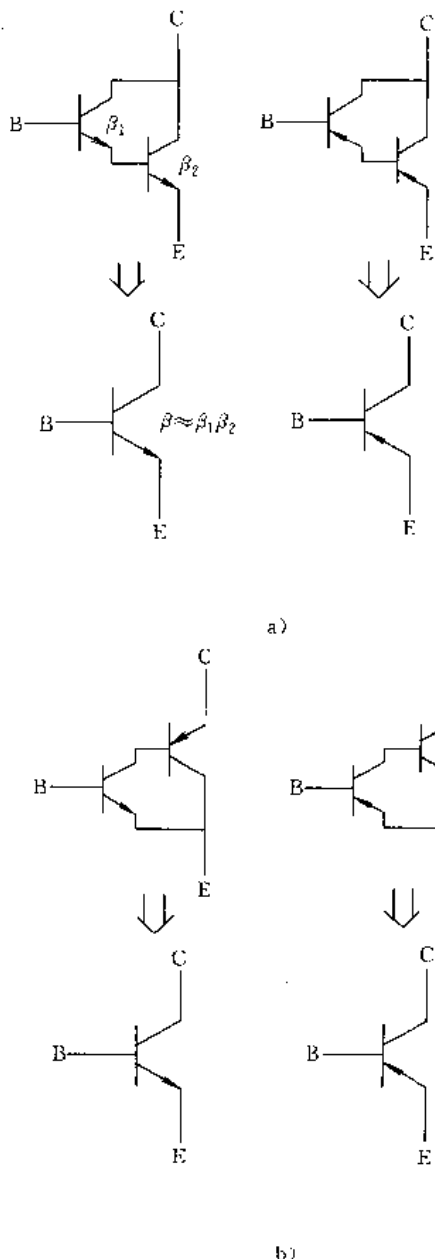


图 3·2-20 复合管的几种接法
a) 同类管复合 b) 不同类管复合

图 3·2-21 是复合互补对称式电路。图中 V_6, V_7 是功率晶体管， R_3, R_4 用以减小复合管的穿透电流，二极管 V_1, V_2, V_3 用以提供复合管的基极偏置电压。

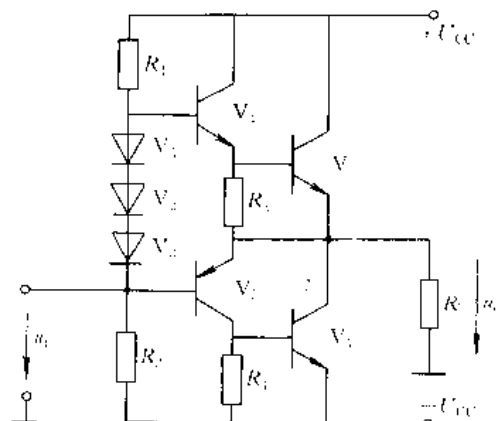


图 3·2-21 复合互补对称式电路

互补对称电路采用单电源时须接入输出耦合电容，原理电路见图 3·2-22，常称 OTL (Output Transformerless) 电路。电容 C 的容量要足够大，使工作时两端的电压维持在静态值 $U_{CC}/2$ 基本不变。在输入正弦电压的一个周期中，两管交替导通，电容交替进行充电与放电，负载上得到完整的波形。

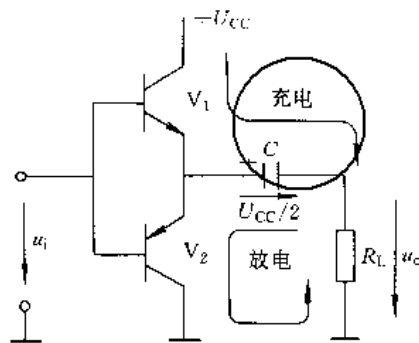


图 3·2-22 OTL 原理电路

在理想情况下，输出电压的幅值为 $U_{CC}/2$ ，最大输出功率

$$P_{om} = \left(\frac{U_{CC}/2}{\sqrt{2}} \right)^2 / R_L = \frac{1}{8} \frac{U_{CC}^2}{R_L}$$

最大效率为 78.5%。晶体管承受的最大电压为 U_{CC} 。

实用的 OTL 电路通常工作于甲乙类状态，并用复合管代替 V_1, V_2 。



7.2 桥式功率放大电路

桥式功率放大电路常称 BTL (Balanced Transformerless) 电路,其原理电路见图 3-2-23。晶体管 V_1 、 V_2 与 V_3 、 V_4 对称,在输入信号 u_i 作用下, V_1 、 V_4 和 V_2 、 V_3 各导通半个周期,故 u_o 是个完整的波形。

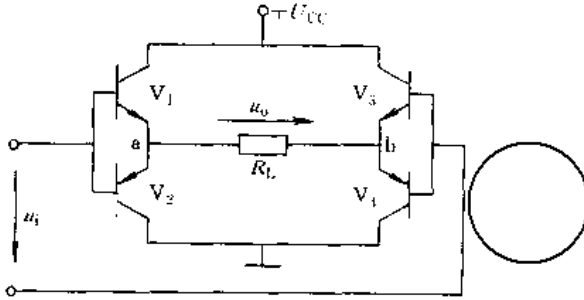


图 3-2-23 桥式功率放大电路原理图

理想情况下(略去晶体管的饱和压降 U_{CES}),输出电压 u_o 的幅值为 U_{CC} , 最大输出功率

$$P_{om} = \frac{1}{2} \frac{U_{CC}^2}{R_L}$$

最大效率为 78.5%, 晶体管承受的最大电压为 U_{CC} 。

桥式功率放大电路的特点是电源利用率高, 输出功率大(为 OTL 电路的 4 倍)。

7.3 变压器耦合推挽功率放大电路

基本电路见图 3-2-24。输入、输出分别由变压器 T_1 、 T_2 耦合; R_{B1} 、 R_{B2} 为偏置电阻, 使晶体管工作于甲乙类状态, R_E 为负反馈电阻。 R_{B1} 和 R_E 的阻值通常很小。

在输入正弦电压的正半周, V_1 导通、 V_2 截止; 在负半周, V_2 导通、 V_1 截止。晶体管集电极的等效负载为 $R'_L = (N_1/N_2)^2 R_L$, 式中 N_1 和 N_2 分别为变压器一次绕组和二次绕组的匝数。理想情况下, 忽略晶体管的饱和压降 U_{CES} 和 R_E 上的压降, 则最大输出功率

$$P_{om} = \frac{1}{2} \frac{U_{CC}^2}{R'_L}$$

变压器耦合推挽功率放大电路的主要优点是负载与放大电路之间容易做到阻抗匹配。但变压器有功率损耗, 电路效率比无变压器电路低; 变压器体积大, 重量大; 变压器不能集成; 变压器频率特性差, 波形易失真。因此, 功率放大电路以无变压器电路形式为主。目前多用集成功率放大器(参见本篇第 3 章 3 节)。

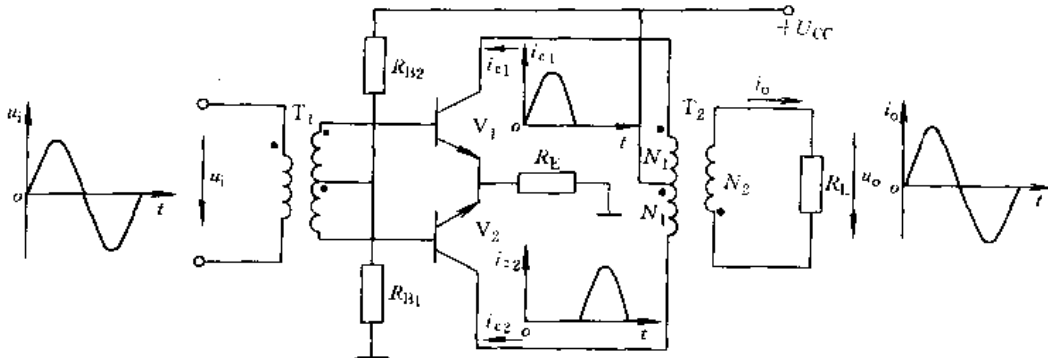


图 3-2-24 变压器耦合推挽功率放大电路

8 放大电路中的反馈

8.1 反馈的基本概念

将电子电路输出量(电压或电流)的一部分或全部, 经一定的电路回输到输入回路, 称为反馈。

在不考虑放大电路中有源器件内部反馈时, 信号只有从输入到输出一个通路的情况称为开环。通过外接电路元件构成反馈通路的情况称为闭环, 这种放大电路称为反馈放大电路。

图 3-2-25 是反馈放大电路的框图。图中: X_i 为输入量; X'_i 为净输入量; X_f 为反馈量; X_o 为输出量, 它们

可为电压或电流量。箭头表示信号的流向。定义开环放大倍数

$$A = \frac{X_o}{X'_i}$$

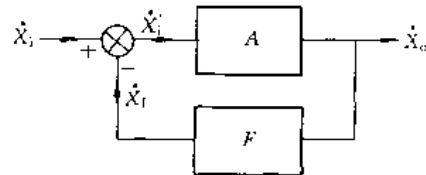


图 3-2-25 反馈放大电路方块图

反馈系数

$$F = \frac{X_f}{X_o}$$



闭环放大倍数

$$A_f = \frac{X_o}{X_i}$$

对于不同的组合, A 、 F 和 A_f 均有四种形式。

由于 $X'_i = X_i - X_f$, $X_f = FX_o = FAX'_i$, 故

$$A_f = \frac{A}{1 + FA}$$

常称 $|1 + FA|$ 为反馈深度^①。

通常从不同的角度对反馈进行分类, 如表 3·2-4 所示。

8·2 负反馈的四种类型

放大电路中通常引入负反馈, 共有四种类型。它们的电路框图和电量关系见表 3·2-5。

表 3·2-4 反馈的分类

| 分类方法 | 类型名称 | 说 明 |
|-------------------|-------|----------------------------------------------------------------------|
| 按反馈性质分类 | 正 反 馈 | $ 1 + FA < 1$, $ A_f > A $, 反馈使净输入增大 |
| | 负 反 馈 | $ 1 + FA > 1$, $ A_f < A $, 反馈使净输入减小 $ 1 + FA \gg 1$ 称深度负反馈 |
| 按反馈电量是交流还是直流分类 | 交流反馈 | 对交流量的反馈, 影响电路的交流性能 |
| | 直流反馈 | 对直流量的反馈, 影响电路的直流性能 |
| 按反馈采样方式分类 | 电压反馈 | 反馈量与输出电压成正比 |
| | 电流反馈 | 反馈量与输出电流成正比 |
| 按反馈网络与输入回路的连接方式分类 | 串联反馈 | 反馈量与输入量在输入回路中以电压相加减的形式出现 |
| | 并联反馈 | 反馈量与输入量在输入回路中以电流相加减的形式出现 |

表 3·2-5 四种类型的负反馈放大电路

| 类 型 | 电 压 串 联 | 电 流 串 联 | 电 压 并 联 | 电 流 并 联 |
|-----------------|--------------------------------|-----------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 电路框图 | | | | |
| 反馈取样信号 | 输出电压 U_o | 输出电流 I_o | 输出电压 U_o | 输出电流 I_o |
| 输入端信号关系 | $U'_i = U_i - U_f$ | $U'_i = U_i - U_f$ | $I'_i = I_i - I_f$ | $I'_i = I_i - I_f$ |
| 开环放大倍数 A | $A_{us} = \frac{U_o}{U'_i}$ | $A_{is} = \frac{I_o}{U'_i}$ | $A_{us} = \frac{U_o}{I'_i}$ | $A_{is} = \frac{I_o}{I'_i}$ |
| 反馈系数 F | $F_{us} = \frac{U_f}{U_o}$ | $F_{is} = \frac{U_f}{I_o}$ | $F_{is} = \frac{I_f}{U_o}$ | $F_{is} = \frac{I_f}{I_o}$ |
| 闭环输入电阻 R_{if} | $(1 + A_{us}F_{us}) R_i$ | $(1 + A_{is}F_{is}) R_i$ | $\frac{R_i}{1 + A_{us}F_{is}}$ | $\frac{R_i}{1 + A_{is}F_{is}}$ |
| 闭环输出电阻 R_{of} | $\frac{R_o}{1 + A_{us}F_{us}}$ | $(1 + A_{us}F_{us}) R_o$ | $\frac{R_o}{1 + A_{us}F_{is}}$ | $(1 + A_{is}F_{is}) R_o$ |
| 对信号源的要求 | 信号源内阻越小, 负反馈作用越强 | | 信号源内阻越大, 负反馈作用越强 | |

① 也有定义 $\frac{1}{|1 + FA|}$ 为反馈深度。

此星公司制作 请尊重原作者版权



8.3 负反馈对放大电路性能的影响

放大电路引入负反馈后,虽使放大倍数减小,但能改善放大电路的很多性能。

1. 提高放大倍数的稳定性 在深度负反馈时, $|1 + FA| \gg 1$, 则

$$A_f = \frac{A}{1 + FA} \approx \frac{1}{F}$$

说明闭环放大倍数只取决于反馈网络, 反馈网络多为无源线性网络, 若元件参数稳定, 则 A_f 就稳定。

对电阻性反馈网络和中频信号, 反馈系数和放大倍数均是实数。对 A_f 的表达式求微分后两边同除以 A_f 得

$$\frac{dA_f}{A_f} = \frac{1}{1 + FA} \frac{dA}{A}$$

上式表明, 引入负反馈后的放大倍数相对变化量 dA_f/A_f 小于无反馈时的放大倍数相对变化量 dA/A 。

2. 减小非线性失真 非线性失真是由放大元件的非线性引起的, 它与信号幅度有关, 幅度较大时, 失真较明显。减小非线性失真的原理可用图 3-2-26 来说明, 图中的 X 模拟放大电路 A_1 引起的失真信号。设 $A = A_1 A_2$, 则在无反馈时 (图 3-2-26a), 输出信号

$$X_o = A_1 A_2 X_i + A_2 X - A X_i + A_2 X$$

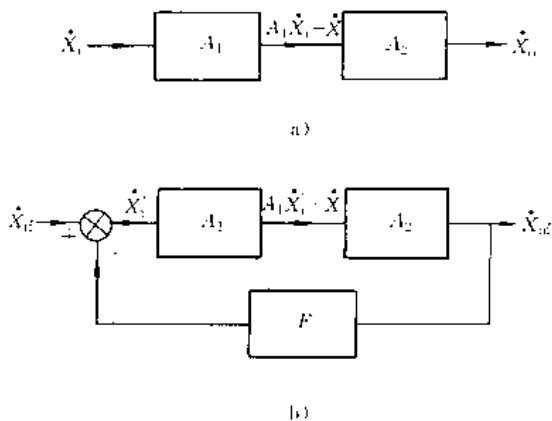


图 3-2-26 非线性失真分析
a) 不加负反馈 b) 加负反馈

加入反馈后 (图 3-2-26b), 输出信号

$$X_{of} = \frac{A}{1 + FA} X_{id} + \frac{A_2}{1 + FA} X$$

为作比较, 可增大 X_{id} 的幅度, 使两种情况下的输出幅度相同, 显然, 加入负反馈后使 X_{id} 中的失真成份减小为无反馈时的 $1/(1 + FA)$ 。

3. 抑制噪声 抑制噪声的原理与减小失真的原理相同。但噪声只局限于由系统内部产生的, 不是混在输入信号中的。因此, 加入负反馈后, 只要输入信号提高为原来的 $(1 + AF)$ 倍, 则在同样的输出信号下, 输出噪声就减小为原来的 $1/(1 + AF)$ 。

4. 扩展频带 因负反馈使放大倍数稳定, 因此当信号频率变化时, 放大倍数的变化要比无反馈时小。设无反馈时的中频放大倍数为 A , 上、下限频率分别为 f_H 和 f_L , 则加反馈后的上限频率

$$f_{HF} = (1 + FA)f_H$$

$$f_{LF} = \frac{f_L}{1 + FA}$$

显然, 负反馈使放大电路的通频带 $BW_F = f_{HF} - f_{LF}$ 得到展宽。

5. 对输入、输出电阻的影响 反馈放大电路的输入电阻取决于反馈网络与基本放大电路输入端的连接方式, 而与反馈取样信号 (是 \dot{U}_o 还是 I_o) 无关。对于串联负反馈, 因 \dot{U}_i 的减小使总输入电流 I_i 减小, 因此输入电阻 $R_{if} = \dot{U}_i / I_i$ 增大; 对于并联负反馈, 因 $I_i = I_o + I_f$ 增大, 故输入电阻减小。输出电阻取决于反馈网络与基本放大电路输出端的连接方式。电压负反馈可以稳定输出电压, 即使输出电阻 R_{o0} 减小; 电流负反馈可以稳定输出电流, 故使输出电阻增大。详见表 3-2-5。

8.4 负反馈放大电路的稳定问题

负反馈对放大电路性能的改善取决于反馈深度 $|1 + AF|$, 反馈深, 性能就好。但反馈太深, 会使多级放大电路产生自激振荡, 使放大电路不能稳定工作, 这将在本章 9.3 节介绍。

9 多级放大电路

9.1 多级放大电路的级间耦合方式

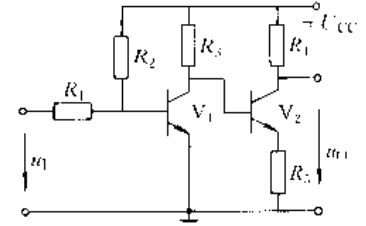
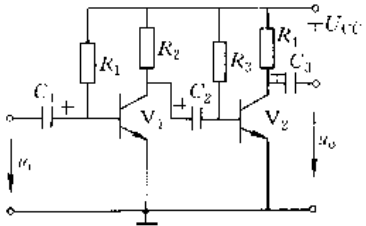
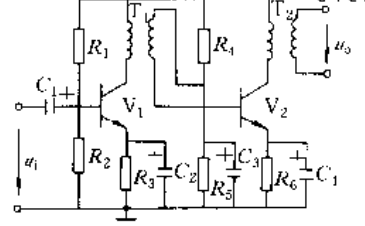
实际放大电路一般是几级基本电路或它们的改进电路组成的。放大电路级与级之间、与信号源及负载之间的连接方式称为耦合方式。多级放大电路常用的耦合方式及其特点见表 3-2-6。

9.2 多级放大电路的电路安排原则

多级放大电路大致由输入级、中间级、推动级和输出级四个部分组成, 见图 3-2-27。根据各级所处的位置和作用的不同, 对它们的要求也不同。



表 3-2-6 多级放大电路的耦合方式及其特点

| 耦合方式 | 直接耦合 | 阻容耦合 | 变压器耦合 |
|------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| 基本电路 |  |  |  |
| 主要特点 | 能放大直流信号, 传输效率高, 低频特性好, 便于集成。但各级静态工作点互相影响, 温漂①明显 | 各级静态工作点互不影响, 温漂小, 但只能放大一定频率的交流信号, 不易集成 | 各级静态工作点互不影响, 温漂小, 可实现阻抗匹配。但频率特性差, 效率低, 体积和重量大, 不易集成 |

① 环境温度的变化引起放大电路工作点的漂移称为温漂。

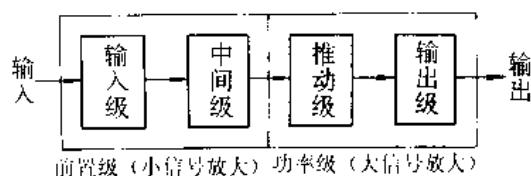


图 3-2-27 多级放大电路的组成

1. 输入级 输入级与信号源相接, 应根据信号源的特点选取输入级的电路形式。若信号源内阻较高或不允许取较大电流时, 应采用高输入电阻的电路, 如射极输出器或场效应管电路。输入级的噪声和干扰对整个电路的影响最大, 应尽量抑制。

2. 中间级 其主要作用是将输入的电压放大到足够的强度, 因此要求电路的电压放大倍数大。

3. 推动级 主要作用是推动输出级工作, 因此要求电路既有一定的电压放大作用, 又有足够的电流放大作用。

4. 输出级 主要作用是输出负载所需的功率。通

常要求电路的输出电压和输出电流均要大, 输出电阻要小, 带负载能力要强。

输入级和中间级有时统称为前置级, 工作在小信号状态下, 属于电压放大电路。推动级和输出级有时统称为功率级, 工作在大信号状态下, 属于功率放大电路。

9.3 多级放大电路自激的产生和消除

负反馈能改善放大电路的性能, 因此, 多级放大电路一般引入负反馈。但处理不当, 电路会产生自激振荡, 以致不能正常工作。

对于负反馈, 送回到输入端的反馈信号与输入信号的相位移为 180° 。若反馈网络由电阻组成, 不产生相位移, 则要求基本放大电路的相位移为 180° , 这是在中频段的情况。由于放大电路中耦合电容、旁路电容、晶体管极间电容和杂散电容等的影响, 各级放大电路在低频段和高频段会产生附加相位移, 当总附加相位移达到 $\pm 180^\circ$ 时, 反馈信号与输入信号同相, 电路就

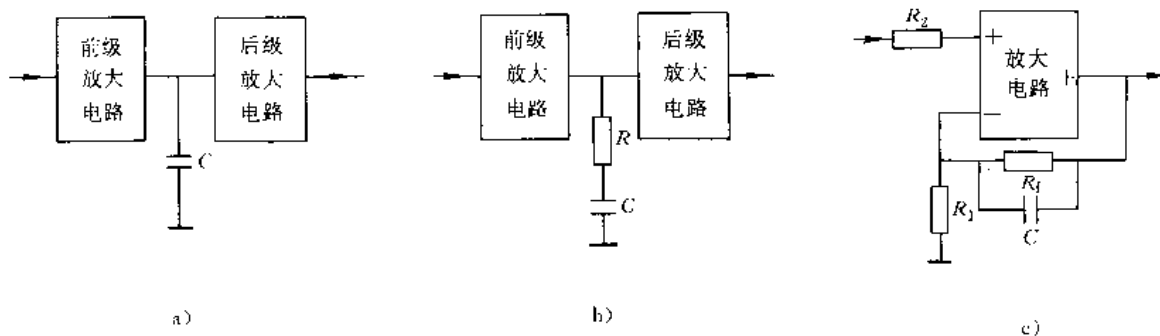


图 3-2-28 几种相位补偿方法

a) 滞后 (窄带) 补偿 b) 滞后 (宽带) 补偿 c) 超前补偿



由负反馈变成正反馈。如果这时正反馈足够强,使 $|FA|=1$,则反馈信号与输入信号的相位、幅度均相等,那么无需外加输入信号,放大电路就可自己维持输出,即产生了自激振荡。

消除自激振荡的常用办法是相位补偿,即通过增加一些元件改变电路参数而使频率特性发生变化,破坏自激振荡的条件。相位补偿的具体措施较多,图3-2-28是几种最简单的相位补偿方法。图3-2-28a是在基本放大电路中时间常数最大的回路里并联电容 C ,使它的时间常数更大,高频放大倍数下降,以致破坏自激振荡条件,消除高频自激。这种补偿方法简易,但使放大电路的频带变窄(属窄带补偿)。改进的办法是用 RC 串联电路代替 C (见图3-2-28b),这样可获得较宽

频带的补偿效果(属宽带补偿)。此外,还可在反馈网络中接入电容进行超前补偿(见图3-2-28c)。

多级放大电路有时会通过公用直流电源的内阻形成正反馈,产生低频自激振荡。为消除低频自激,应减小公用直流电源的内阻。此外,还常在各级放大电路的电源回路中接入 RC 退耦电路(见图3-2-29)。

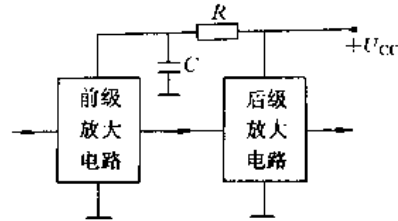


图 3-2-29 电源退耦电路示意

第3章 模拟集成电路

模拟集成电路是用来产生、放大和处理各种模拟信号的集成电路。模拟集成电路有线性和非线性之分。线性集成电路能对输入信号进行线性放大,它包括集成运算放大器、集成功率放大器、集成稳压器以及音频、视频、宽带放大器等。非线性集成电路包括集成电压比较器、集成乘法器、集成模拟开关、集成锁相环以及调制、混频、检波器等。

1 通用型集成运算放大器

集成运算放大器(简称集成运放)是一种集成化的高放大倍数、高输入电阻、低输出电阻的直接耦合多级放大电路。它是模拟集成电路中应用极为广泛的一种。集成运算放大器按其性能可分为通用型和专用型两大类,通用型的性能指标适中,适用于无特殊要求的场合。专用型的某些性能指标突出,可满足某些特殊应用的需要。按晶体管类型可分为双极型、场效应管型和双极-场效应管混合型。

从发展过程看,集成运算放大器一般分为四代,第一代集成运算放大器沿用数字集成电路的工艺和采用横向PNP晶体管结构,其性能可满足中等运算精度的要求。第二代集成运算放大器的主要特征是电路中采用了有源负载,性能有明显改善。随着超 β 晶体管的发展,出现了第三代集成运算放大器,其性能进一步提高。后又发展了斩波-自稳零的第四代集成运算放大器以及各种类型的专用集成运算放大器。

1.1 集成运算放大器的基本组成

集成运算放大器的产品型号较多,电路型式差别很大,但基本的电路结构大致类同。图3-3-1a是典型集成运算放大器的简化组成框图,主要由输入级、中间级、输出级和偏置电路四部分组成。此外,还有一些辅助电路,如调节各级电压配合的电平移动电路和防止输出短路时损坏晶体管的短路保护(或过流保护)电路等。

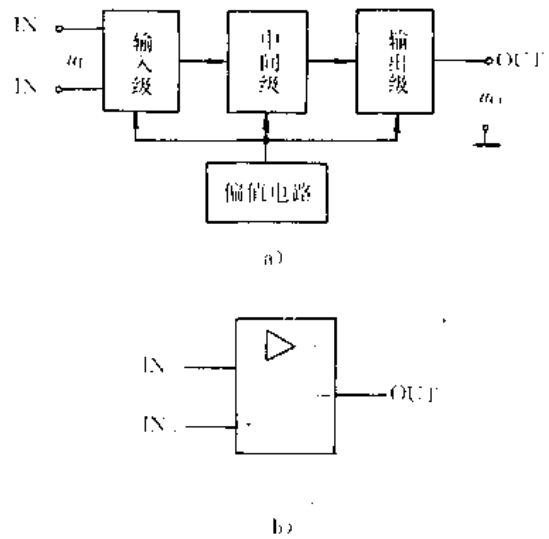


图 3-3-1 集成运算放大器的组成框图和图形符号
a) 组成框图 b) 图形符号



集成运算放大器的图形符号见图 3·3-1b。图中“IN₋”端称反相输入端，表示该端的输入信号与输出信号反相；“IN₊”端称同相输入端，表示输入、输出信号同相；“OUT”端为输出端。

图 3·3-2 是目前得到广泛使用的通用型集成运算放大器 CF741 的电路原理图，它由三级放大和偏置、保护等电路组成。

(1) 输入级。它由 V₁~V₇ 等组成，其中 V₁~V₄

组成共集-共基组态的差分放大电路，以满足输入电阻高的要求；V₅~V₇ 组成有源负载，以提高输入级的放大倍数、共模抑制比以及其它性能。输入级为双端(b₁、b₂)输入（以提供同相输入端和反相输入端）单端(c₄)输出形式。

(2) 中间级。主要提供较大的电压增益，由 V₁₄、V₁₅ 组成共集-共射放大电路，V₁₃ 为 V₁₅ 的集电极有源负载。

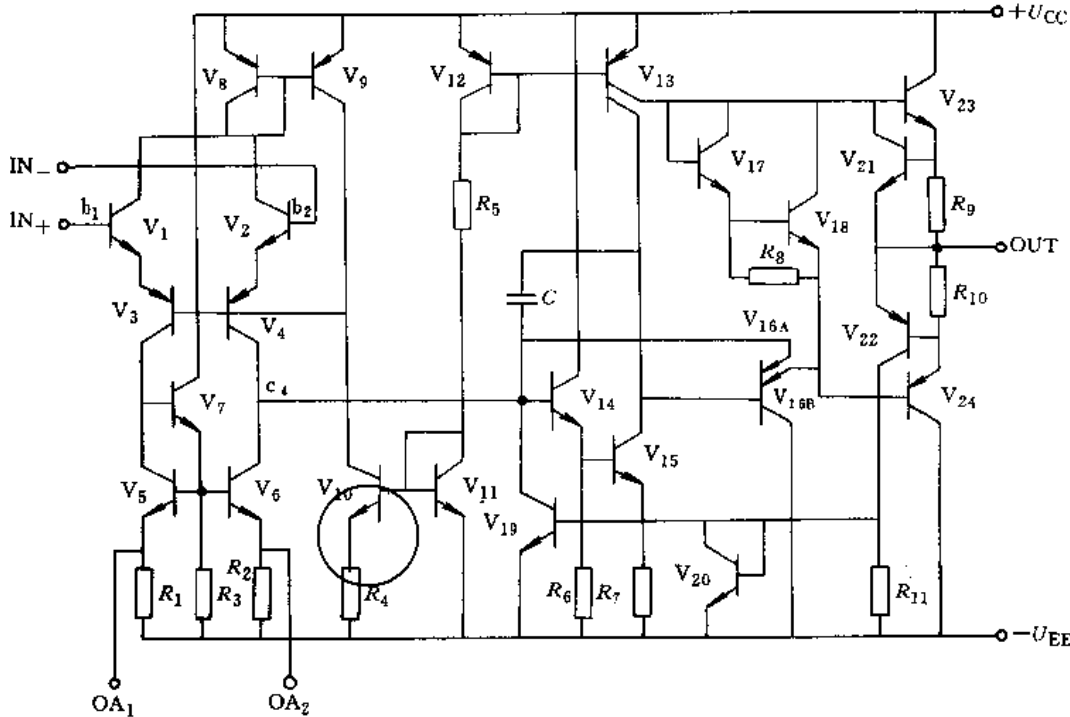


图 3·3-2 通用型集成运算放大器 (CF741) 的电路原理图

(3) 输出级。提供一定的输出电压和电流，采用由 V₂₃、V₂₄ 组成的互补对称式电路，输出电阻较小。V₁₇、V₁₈ 和 R₈ 提供偏置，使 V₂₃、V₂₄ 工作于甲乙类状态，以克服交越失真。V₂₁、V₂₂、R₉、R₁₀ 以及 V₁₉、V₂₀ 组成输出级的过流保护电路。

(4) 偏置电路。为各级提供合适而稳定的偏置电流，它由若干个恒流源组成。其中 V₁₁、V₁₂ 和 R₅ 是其核心，以提供参考电流；V₁₀、V₁₁ 和 R₄ 组成微电流源，与 V₉ 配合为 V₃、V₄ 提供偏流；由 V₈、V₉ 组成的镜象电流源还为 V₁、V₂ 提供集电极电流；由 V₁₂、V₁₃ 组成的镜象电流源为后两级提供偏流。

此外，V_{16A} 用于防止 V₁₄ 由于注入电流过大而损坏。V_{16B} 构成射极输出器，用于隔离中间级与输出级间的相互影响。电容 C 为补偿电容，以消除自激振荡。OA₁ 与 OA₂ 端之间外接调零电位器。

图 3·3-3 是 Bi-CMOS 集成运算放大器 (CF3130)

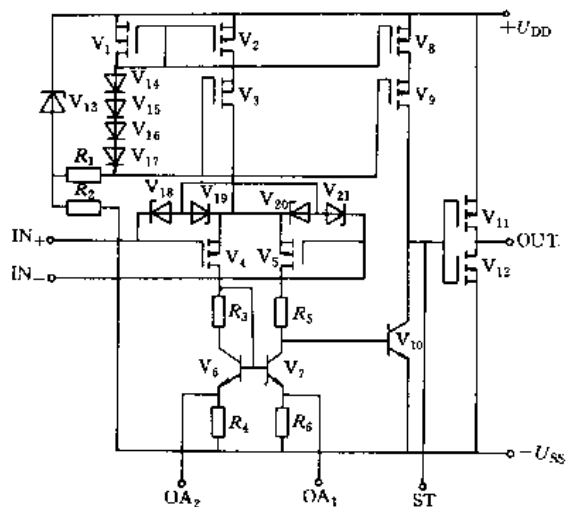


图 3·3-3 Bi-CMOS 集成运算放大器 (CF3130) 的电路原理图



的电路原理图。Bi-CMOS 集成运放是集双极型管和 CMOS 的优点于一体的器件，具有输入阻抗高、频带宽、增益高、输出电压范围大等优点。图中 $V_4 \sim V_7$ 组成恒流源差分放大输入级；信号从 V_7 集电极输出，传送到由 V_{10} 、 V_8 、 V_9 组成的中间级； V_{11} 、 V_{12} 组成 CMOS 输出级； V_1 、 $V_{13} \sim V_{17}$ 以及 R_1 组成恒流源偏置电路， V_2 、 V_3 为输入级提供电流； $V_{18} \sim V_{21}$ 组成输入级保护电路； OA_1 与 OA_2 端之间外接调零电位器；ST 为选通端，当它与 $-U_{SS}$ 端接通时，输出为高电平，集成运算放大器处于“禁止”状态，否则处于选通状态，ST 与 OA_1 端之间外接补偿电容。

1.2 集成运算放大器的主要参数

1. 开环差模电压增益 A_{ud} 集成运算放大器开环时的输出电压变化量 Δu_O 与差模输入电压变化量 Δu_1 之比，即

$$A_{ud} = \frac{\Delta u_O}{\Delta u_1} \quad \text{或} \quad A_{ud(dB)} = 20 \lg \frac{\Delta u_O}{\Delta u_1} \quad (\text{dB})$$

2. 共模抑制比 K_{CMR} 差模电压增益与共模电压增益之比，即

$$K_{CMR} = \frac{A_{ud}}{A_{uc}} \quad \text{或} \quad K_{CMR(dB)} = 20 \lg \frac{A_{ud}}{A_{uc}} \quad (\text{dB})$$

3. 开环差模输入电阻 r_{id} 开环时的差模输入电压变化量与输入电流变化量之比。

4. 开环输出电阻 r_o 开环时的输出电压变化量与输出电流变化量之比。

5. 输入失调电压 U_{IO} 在输入电压为零时，要使集成运放的输出电压为零而需在输入端加的补偿电压。

6. 输入失调电流 I_{IO} 集成运算放大器的静态输出电压为零时，两输入端的偏置电流之差。即

$$I_{IO} = |I_{B1} - I_{B2}|$$

7. 输入失调电压温漂 $\frac{dU_{IO}}{dT}$ 在一定的温度变化范围内，输入失调电压 U_{IO} 随温度 T 变化的平均变化率。

8. 输入失调电流温漂 $\frac{dI_{IO}}{dT}$ 在一定的温度变化范围内， I_{IO} 随温度 T 变化的平均变化率。

9. 输入偏置电流 I_{IB} 集成运算放大器两输入端差放管的静态基极（栅极）偏置电流平均值，即

$$I_{IB} = \frac{I_{B1} + I_{B2}}{2}$$

10. 静态功耗 P_D

11. 最大输出电压 U_{OM} 在额定电源电压和特定负载条件下能输出的最大电压幅度。

12. 最大输出电流 I_{OM} 在输出电压为 U_{OM} 的条件下能输出的最大电流。

13. 最大差模输入电压 U_{IDM} 集成运算放大器的两输入端之间所能承受的最大输入电压值。

14. 最大共模输入电压 U_{ICM} 集成运算放大器所能承受的最大共模输入电压。超过此值，共模抑制比将显著下降，器件不能正常工作。

15. 开环带宽 BW 开环差模电压增益随信号频率的增加而下降至直流增益的 $\frac{1}{\sqrt{2}}$ 倍（-3dB）时的信号频率范围。

16. 单位增益带宽 GB 开环差模电压增益随频率的增加而下降至 1 (0dB) 时的频带宽度。

17. 转换速率 SR 在额定的负载条件下，当输入阶跃大信号时，输出电压对时间的最大变化率，即

$$SR = \left| \frac{du_O}{dt} \right|_{\max} \quad (\text{V}/\mu\text{s})$$

它反映集成运算放大器的高频性能。只有当输入信号变化斜率的绝对值小于 SR 时，集成运算放大器的输出才能随输入作线性变化。

此外，还有输入偏置电流温漂、输入噪声电压、功率带宽、建立时间、输入电容、电源电压抑制比、电源电压范围等参数。

几种国产通用型集成运算放大器的参数见表 3-3-1。

表 3-3-1 几种国产通用型集成运算放大器的参数

| 参数名称和单位 | CF702M | CF709M | CF741 | CF4558C (双运放) | CF4156M (四运放) |
|-----------------|--------|--------|-------|------------------|------------------|
| 开环差模增益 A_{ud} | dB | 71 | 93 | 106 | 100 |
| 共模抑制比 K_{CMR} | dB | 100 | 90 | 90 | 80 |
| 差模输入电阻 r_{id} | MΩ | 0.04 | 0.4 | 2 | 0.5 |



(续)

| 参数名称和单位 | | CF702M | CF709M | CF741 | CF4558C (双运放) | CF4156M (四运放) |
|------------------------------------------------|------------------|---------------|----------|----------|------------------|--------------------------------------|
| 输入失调电压 U_{IO} | mV | 0.5 | 1 | 1 | 2 | 0.5 |
| 输入失调电流 I_{IO} | nA | 180 | 50 | 20 | 20 | 15 |
| 失调电压温漂 dU_{IO}/dT | $\mu V/^\circ C$ | 2 | 3 | | | 5 |
| 失调电流温漂 dI_{IO}/dT | nA/ $^\circ C$ | 3 | | | | |
| 输入偏置电流 I_{IB} | nA | 2000 | 200 | 80 | 80 | 60 |
| 静态功耗 P_D | mW | 90 | 80 | 50 | 70 | |
| 最大输出电压 U_{OM} | V | ± 5.3 | ± 14 | ± 14 | ± 14 | ± 14 ($R_L \geq 10k\Omega$) |
| 最大差模输入电压 U_{IDM} | V | ± 5 | ± 5 | ± 30 | ± 30 | ± 30 |
| 最大共模输入电压 U_{ICM} | V | $-6 \sim 1.5$ | ± 10 | ± 15 | ± 15 | ± 14 |
| 单位增益带宽 GB | MHz | | | | 2.8 | 3.5 |
| 转换速率 SR | V/ μs | | | 0.5 | 1.6 | 1.6 |
| 电源电压 $U_{CC} (U_{DD})$ $U_{EE} (U_{SS})$ | V | +12 -6 | ± 15 | ± 15 | ± 15 | ± 15 |

注：摘自标准集成电路数据手册“运算放大器”，电子工业出版社，1991年。

对于理想集成运算放大器，各项性能参数为理想值。其中主要有： A_{ud} 、 r_{id} 和 K_{CMR} 为无限大， r_o 、 U_{IO} 和 I_{IO} 为零。据此可得理想集成运算放大器的如下两个重要特性：

(1) 由于 $A_{ud} = \frac{u_o}{u_+ - u_-} \rightarrow \infty$ ，所以两输入端之间的电压差为零，即 $u_+ = u_-$ ；

(2) 由于 $r_{id} \rightarrow \infty$ ，所以流经两输入端的电流为零，即 $i_i = 0$ 。

利用理想集成运算放大器的特性，可使由集成运算放大器构成的电路的分析大大简化。

1.3 集成运算放大器的传输特性和基本工作方式

1.3.1 电压传输特性

集成运算放大器输出电压与输入电压的关系曲线称为电压传输特性，见图 3-3-4。它分为线性区和非线性区（正饱和、负饱和）。在线性区，输出电压 u_o 和两输入端电压之差 $(u_+ - u_-)$ 成正比，即

$$u_o = A_{ud} (u_+ - u_-)$$

在非线性区， u_o 接近正电源电压值（当 $u_+ > u_-$ 正饱和时）或负电源电压值（当 $u_+ < u_-$ 负饱和时）。

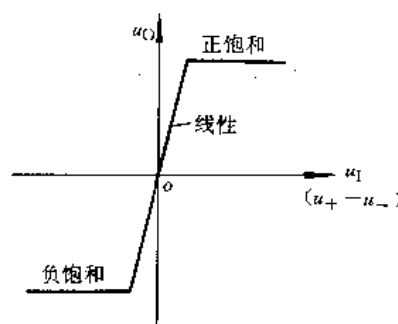


图 3-3-4 典型集成运算放大器的电压传输特性

集成运算放大器在开环或外加正反馈的闭环时，工作于非线性状态，当外加负反馈构成闭环时，工作于线性状态。实际应用中，常为闭环运行。

1.3.2 基本工作方式

集成运算放大器有三种基本输入方式，见图 3-3-5。

反相输入方式属于电压并联负反馈电路。由于同



相输入端经 R_2 接地, 根据理想集成运算放大器的概念, 反相输入端也接近地电位, 即 $u_- \approx 0$, 称反相端为“虚地”。反相输入方式的闭环输入电阻为 R_1 。

同相输入方式属于电压串联负反馈电路, 闭环输

入电阻很大, 但集成运算放大器承受的共模电压等于输入电压。

差分输入方式可对两输入信号的差值进行处理, 集成运算放大器承受的共模电压为 $u_{12}R_3 / (R_2 + R_3)$ 。

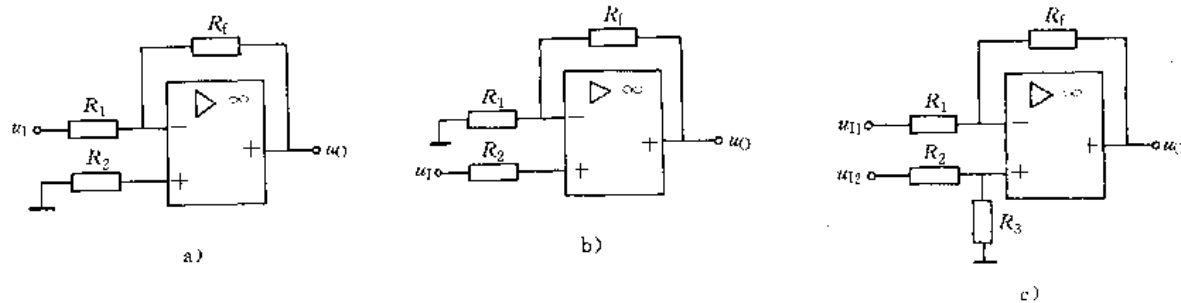


图 3-3-5 集成运算放大器的三种基本输入方式

a) 反相输入 b) 同相输入 c) 差分输入

1.4 集成运算放大器应用中的几个问题

1. 类型的选择 集成运算放大器按性能分为通用型和专用型; 按每片集成块所含集成运算放大器个数的不同, 又可分为单集成运算放大器、双集成运算放大器和四集成运算放大器等。其常见的封装形式有金属圆形和双列直插式塑料封装两种。金属圆形有 8、10、12 引线等种类。双列直插式有 8、10、12、14、16 引线等种类。

集成运算放大器的类型应根据应用电路的要求来选择。一般, 如电路无特殊要求, 则可选择通用型; 如电路对输入电阻、高频特性、噪声、功耗、精度等某指标有特殊要求, 则可选择相应的专用型集成运算放大器。对于微弱信号的多级测量放大电路, 第一级应选用高输入电阻、低失调电压及低温漂的高精度集成运算放大器。如果放大交流信号, 则可用电容耦合, 输入失调电压等因素就可不考虑。

此外, 还应根据具体情况, 考虑它的工作电压、输出电压、输出电流等指标。

2. 调零 可按规定加接调零电位器。调零的方法有两种: 一种是在无信号输入时, 将输入端接地, 然后调零, 称为静态调零; 另一种是加输入信号, 根据已知输入信号电压, 按理论方法计算应输出的电压, 然后将实际输出电压调整到理论值, 这种方法称为动态调零。静态调零方法简单, 但没有考虑信号源内阻影响, 动态调零精确度较高。有的集成运算放大器没有接调零电位器的外引线, 必要时, 可在输入端外接电位器调零。

3. 保护措施 为防止输入的差模或共模信号过大而造成输入级的损坏, 常采用二极管进行输入限幅

保护, 见图 3-3-6。

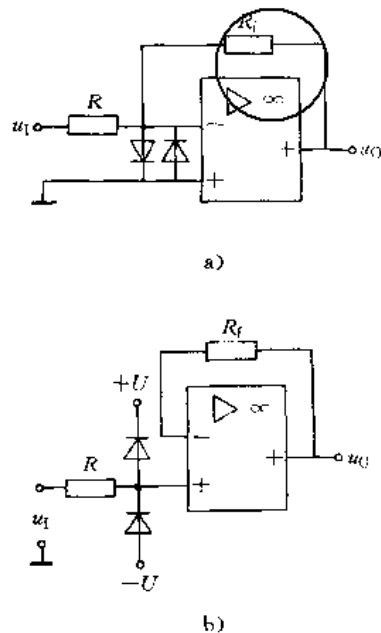


图 3-3-6 输入限幅保护

a) 反相输入 b) 同相输入

一般集成运算放大器内部设有限流保护电路以防止输出端短路时损坏晶体管。对于输出端可能误接外部电压而造成击穿或不允许输出电压过高时, 可采用稳压二极管保护, 见图 3-3-7。

为防止电源极性接反而损坏集成运算放大器, 可在正、负电源线中串联二极管加以保护, 见图 3-3-8。

4. 消除自激 对有补偿端的集成运算放大器, 按规定接入补偿元件, 以消除自激振荡。

5. 扩大输出电流 对单极性的输出, 可在输出端



加接射极跟随器以扩大输出电流。对双极性输出,可以采用互补式电路,见图 3-3-9。图中 V_1 、 V_2 可选用功率晶体管或复合管。

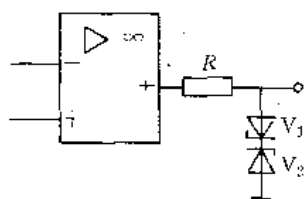


图 3-3-7 输出保护

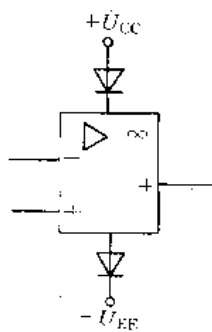


图 3-3-8 电源端保护

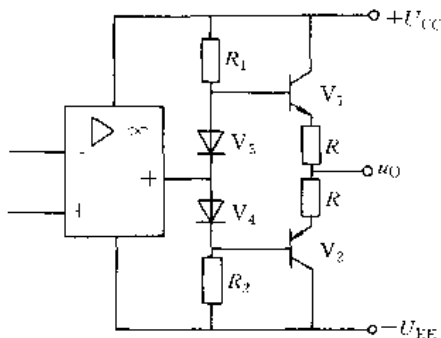


图 3-3-9 扩大输出电流的措施

6. 扩大输出电压 要扩大输出电压必须提高电源电压,而电源电压又不能超过集成运算放大器的工作电压。为此可采用图 3-3-10 所示电路。若集成运算放大器的电源电压为 $\pm 15V$,现电源电压为 $\pm 30V$,可取 $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$,则静态时 $U_{B1} = 15V, U_{B2} = -15V$,忽略两晶体管的 U_{BE} ,则集成运算放大器的电源端电压近似为 $\pm 15V$ 。

当有输出信号时

$$U_{B1} = \frac{1}{2}(U_{CC} - u_o) + u_o = \frac{1}{2}(U_{CC} + u_o)$$

$$U_{B2} = \frac{1}{2}(-U_{CC} - u_o) + u_o = \frac{1}{2}(-U_{CC} + u_o)$$

可见,集成运算放大器两电源端的电压差为 $U_{B1} - U_{B2}$

$= 30V$ 不变,而各电源端的电压随 u_o 的变化而浮动,因此输出电压变化范围扩大了。

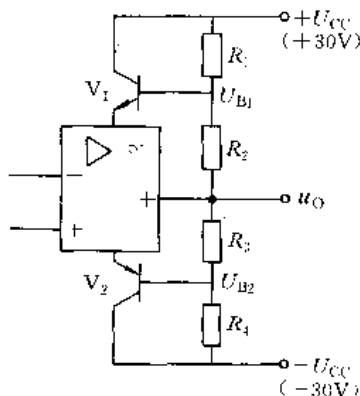


图 3-3-10 扩大输出电压的措施

2 专用型集成运算放大器

由于难以得到各项指标都很理想的集成运算放大器,所以除了通用型外,又设计制造出在某方面有更高性能指标的产品,即专用型(或称特殊类型)集成运算放大器,以满足不同场合的应用需要。

2.1 高阻型集成运算放大器

高输入电阻集成运算放大器具有很高的输入电阻和很小的输入电流,主要用于测量放大器、模拟调节器、采样-保持电路和有源滤波器等。

高输入电阻集成运算放大器通常用结型或 MOS 场效应管构成差分输入级,有采用结型场效应管-双极型管单片相容的工艺制作的集成运算放大器、采用 MOS 管-双极型管单片相容的工艺制作的集成运算放大器和全 MOS 集成运算放大器等品种,它们的共同特点是不仅具有很高的输入阻抗,同时兼有高速度和宽频带的优点,因此有时把这一类集成运算放大器称为优值型集成运算放大器。通常把输入电阻 $\geq 10M\Omega$ 称为高输入电阻,因此某些型号的其他专用型集成运算放大器也兼有高输入电阻的特点。

2.2 高速型集成运算放大器

高速集成运算放大器用于高转换速率或高频率的场合,例如快速 A/D 和 D/A 转换器、有源滤波器、高速采样-保持电路、锁相环、精密比较器和视频放大器等。为实现高速,在集成电路设计中采取一定的措施(如在信号通道中尽量采用 NPN 型管,改进横向 PNP 管的结构和制造工艺,减小输入级的跨导和工作电流



之比,采用场效应管和双极型管相兼容的电路或用全MOS结构等),以提高转换速率。

2.3 高精度集成运算放大器

高精度集成运算放大器的漂移和噪声非常低,并且有高增益、高共模抑制比、高输入阻抗的特性。低漂移是指输入失调电压和输入失调电流随温度、时间、电源电压变化而漂移很小。漂移对集成运算放大器构成直流输入误差信号,噪声对集成运放则构成交流输入误差信号。只有低漂移和低噪声,才能达到高精度的目的。高精度集成运算放大器一般用于微弱信号的精密检测、精密模拟计算及自动控制仪表中。实现高精度的措施是采用超 β 管和低噪声差分输入级及其他减小温漂的措施。近些年采用调制型的自动稳零电路,使温漂更低。

2.4 低功耗集成运算放大器

低功耗集成运算放大器的特点是静态功耗低(通常不超过毫瓦级,比通用型集成运算放大器低1~2个数量级),并能在低的电源电压下工作时保持良好的电气性能。低功耗集成运算放大器可用于对能源消耗有严格限制的遥测、遥感、生物医学、空间技术或其它领域。低功耗集成运算放大器在电路结构上设计了能降低偏置电流的偏置电路,并采用外接偏置电阻,和用有源负载代替高阻值的电阻,使它能在很宽的电源电压范围内良好地工作。使用时可通过改变外接电阻值来调整其偏置电流,使其工作于最佳状态。

2.5 高压型集成运算放大器

高压集成运算放大器用于需要获得较高的输出电压的场合。它的电源电压必然也高。在电路结构上利用晶体管的C-B结和横向PNP管的耐高压性能等,以提高耐压。如有的高压集成运算放大器的电源电压可达 $\pm 150\text{V}$,输出电压为 $\pm 140\text{V}$ ($R_1=2\text{k}\Omega$),共模输入电压范围也达 $\pm 140\text{V}$ 。

2.6 宽带集成运算放大器

宽带集成运算放大器具有良好的频率特性,其低频(包括直流)性能与通用型集成运算放大器相当,高频性能比高速集成运算放大器还要好,开环带宽可达100MHz以上。

2.7 其他类型集成运算放大器

2.7.1 跨导集成运算放大器

跨导集成运算放大器的输出电流与两输入端电压的差值成正比,其传输特性用跨导表示。跨导集成运算放大器可通过外加偏压控制其工作电流的大小,使跨导发生变化,从而使它的输出电流可在较大的范围内变化。跨导集成运算放大器可用于多路传输、采样-保持电路、乘法器和比较器等。

2.7.2 程控集成运算放大器

程控集成运算放大器内部的恒流源可由外接偏置电路进行控制。通过控制恒流源电路有无偏流注入,可决定集成运算放大器工作与否;通过控制注入恒流源电路偏流的大小,可改变集成运算放大器的参数指标。因此使用灵活,可用于测量、控制等方面。

2.7.3 电流型集成运算放大器

电流型集成运算放大器对电流进行放大,而通用型集成运算放大器是对电压进行放大。

2.7.4 集成电压跟随器

通用型集成运算放大器接成跟随器时,转换速率下降,频带变窄,有时其输入电阻也不够高,因此专门生产了集成电压跟随器,其性能比由通用型集成运算放大器接成的跟随器好得多。

表3-3-2列出了部分国产专用型集成运算放大器的参数。

表3-3-2 部分国产专用型集成运算放大器的参数

| 参数名称和单位 | 类型 | CF3140 | CF715 | CF7650 | CF3078C | CF143 | CF2620 | CF3080 | CF4250 |
|-----------------|----|--------|-------|--------|---------|-------|--------|-------------------------------------|--------|
| | | 高阻型 | 高速型 | 高精度型 | 低功耗型 | 高压型 | 宽带型 | 跨导型 | 程控型 |
| 开环差模增益 A_{od} | dB | 100 | 90 | 134 | 92 | 105 | 104 | 正向跨导 g_m 9600 μs | 100 |



(续)

| 参数名称和单位 | | 类型 | CF3140 高阻型 | CF715 高速型 | CF7650 高精度型 | CF3078C 低功耗型 | CF143 高压型 | CF2620 宽带型 | CF3080 跨导型 | CF4250 程控型 |
|-----------------------------------------------------|------------|----|--------------------|-----------------------|------------------------|-----------------|--------------|---------------|----------------|--------------------------------|
| 共模抑制比 K_{CMB} | dB | | 90 | 92 | 130 | 110 | 90 | 100 | | 70 |
| 差模输入电阻 r_{id} | MΩ | | 1.5×10^6 | 1 | 10^5 | | | 500 | 0.026 | |
| 输入失调电压 U_{IO} | mV | | 5 | 2 | $\pm 7 \times 10^{-4}$ | 1.3 | 2 | 0.5 | 0.4 | 3 |
| 输入失调电流 I_{IO} | nA | | 5×10^{-4} | 70 | 5×10^{-4} | 6 | 1 | 1 | 120 | 10 ($I_{IB} = 10 \mu A$) |
| 失调电压温漂 dU_{IO}/dT | $\mu V/C$ | | 8 | | 0.01 | | | | | |
| 输入偏置电流 I_{IB} | nA | | 10^{-2} | 400 | 1.5×10^{-3} | 60 | 8 | 1 | | 50 ($I_{IB} = 10 \mu A$) |
| 静态功耗 P_D | mW | | 120 | 165 | | 0.12 | | | 30 | 2.7 ($I_{IB} = 10 \mu A$) |
| 最大输出电压 U_{OM} | V | | +13 -14.4 | ± 13 | ± 4.8 | ± 5.3 | ± 25 | ± 12 | | ± 12 |
| 最大差模输入电压 U_{TDM} | V | | | ± 15 | | ± 6 | 80 | ± 12 | ± 5 | ± 30 |
| 最大共模输入电压 U_{ICM} | V | | +12.5 -15.5 | ± 12 | +2.6 -5.2 | +5.8 -5.5 | ± 26 | | +13.6 -14.6 | ± 13.5 |
| 单位增益带宽 GB | MHz | | 4.5 | | 2 | | 1 | 100 | | |
| 转换速率 SR | V/ μs | | 9 | 100 ($A_f = -1$) | 2.5 | | 2.5 | ± 35 | 50 | |
| 电源电压 U_{CC} (U_{DD}) U_{EE} (U_{SS}) | V | | ± 15 | ± 15 | ± 5 | ± 6 | ± 28 | ± 15 | ± 15 | ± 15 |

注：摘自标准集成电路数据手册“运算放大器”，电子工业出版社，1991年。

3 集成功率放大器

集成功率放大器(简称集成功放)是功率放大电路的集成化器件。它的种类很多,按应用场合来分有通用型和专用型等;按工作频率来分有低频(音频)、高频和宽带型等;按工艺结构分,有单片半导体集成功率放大器(可直接驱动负载)、混合集成功率放大器(半导体工艺与膜工艺相结合)和集成功率驱动器(输出功率管外接)等;按信号通道数分,有单通道和双通道等。

3.1 集成功率放大器的基本组成

不同种类集成功率放大器的内部电路差别较大。

目前,输出中、小功率的集成功率放大器大都采用单片集成,它是集成功率放大器的主流产品。

单片集成功率放大器一般由输入级、中间放大级、输出级、偏置电路和保护电路等组成。输入级多采用双端输入、单端输出差分放大电路,一输入端接输入信号,另一输入端接反馈电路。输出级均采用互补对称式电路。

图 3-3-11 是通用型集成功率放大器的电路原理图。它的前一部分电路(这里用集成运算放大器符号表示)与集成运算放大器 CF741 相同,因此它实际上可认为是输出功率较大的通用型集成运算放大器。图中 V_1 、 V_2 和 R_3 、 R_6 是输出过流保护,正常工作时不起作



用。V₃、V₄管接成互补共射的形式，同时具有电流放大和电压放大作用。R₁、R₂将集成运算放大器输出级的电流变化转换成变化的电压送到V₃、V₄管放大。R₃构成电压负反馈，使电路有较强的带负载能力。此电路的最大输出电流达1.2A，可用于直流伺服系统、录音机主动轮驱动、偏转线圈驱动等。

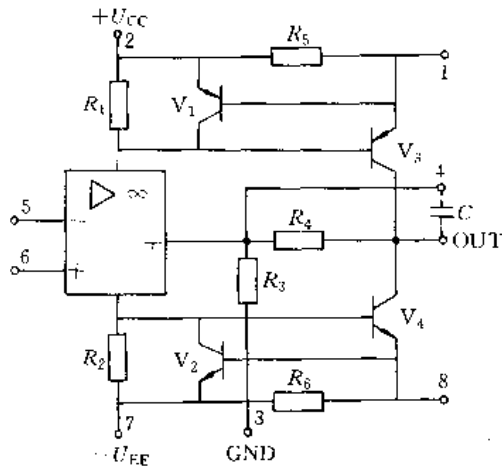


图 3-3-11 通用型集成功率放大器 (FX0021) 的电路原理图

图 3-3-12 是输出功率为 2W 左右的单声道单片集成音频功率放大器的电路原理图。它的输入级采用由 V₁ 和 V₂ 组成的差分放大电路。中间级是二级电压

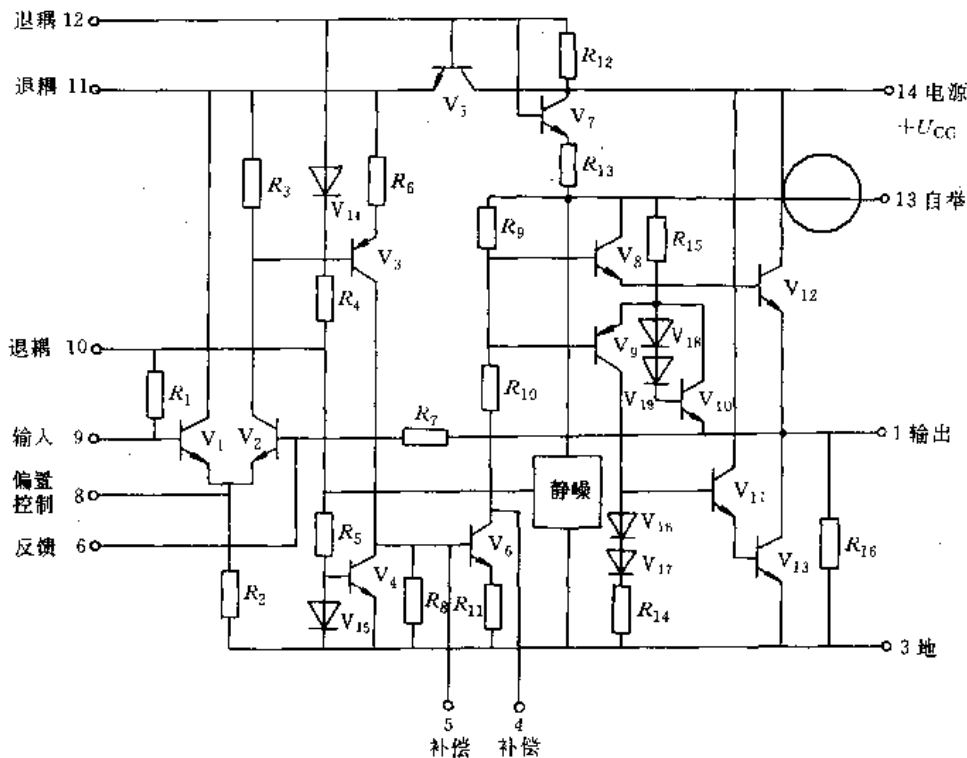


图 3-3-12 集成音频功率放大器 (CD4112) 的电路原理图

放大，一级以 V₃ 为放大元件，V₄ 作为其有源负载，另一级由 V₅ 等组成。二级电压放大具有很高的增益。输出功率放大级由 V₈~V₁₃ 等组成复合互补对称电路。二极管 V₁₄、V₁₅ 和电阻 R₄、R₅ 构成主偏置电路。V₁₆、V₁₇ 和 R₁₄ 是 V₁₁ 基极温度补偿电路。V₁₈、V₁₉ 和 R₁₅、R₁₆ 等为输出端建立 U_{CC}/2 的静态电位。

对于输出功率较大的集成功率放大器，内部设有较完整的保护电路。

3.2 集成功率放大器的主要参数

1. 输出功率 P_o 在一定的电源电压、负载电阻、信号频率和谐波失真条件下，能输出的最大功率。
2. 输入灵敏度 S 在一定的负载电阻和输出功率时，输入信号电压的数值。
3. 频率响应 BW 即 -3dB 频带宽度。
4. 全谐波失真 THD 在一定的负载电阻和输出功率范围内，输出波形中高次谐波分量总值对基波分量的百分值。
5. 输出噪声电压 U_{NO} 输入信号电压为零时，在输出端测得的交流电压有效值。要求 U_{NO} 尽可能小。
6. 开环电压增益 A_{vo}
7. 闭环电压增益 A_{vf} 由接入的反馈电路参数决定。



- 8. 输入电阻 r_i 。
- 9. 静态电源电流 I_{CC} 。
- 10. 最高电源电压 U_{CCM} 。
- 11. 最大允许功耗 P_{DM} 与散热条件有关。
- 12. 峰值输出电流 I_o 。

此外,还有信噪比、纹波抑制比、输入偏置电流、效率、工作环境温度、贮存温度等。

3.3 集成功率放大器的使用方法

集成功率放大器一般只需少量的外接元件就可构成应用电路,且性能优越、工作可靠、使用灵活、调试方便。

集成功率放大器使用时应根据负载等要求正确选型。必须了解所用器件的型号、参数和各引出脚的功能,并按产品要求装好散热器,再参照具体应用电路接入必要的外部元件稍作调试即可。使用时还应注意以

下几点:

- (1) 工作参数不允许超过极限参数;
- (2) 安装中避免器件引线间的短路;
- (3) 电路工作时需避免负载短路,尤其对内部无短路保护的器件则要绝对避免短路;
- (4) 印制电路板的排列和布线要合理。

现列举集成功率放大器的典型应用电路如下:图 3-3-13 是单通道集成功率放大器 (CD4112) 的典型应用电路。其中图 3-3-13a 是接成 OTL 输出电路,图中 C_1 、 C_9 为输入、输出耦合电容; C_2 和 R_f 与内部电阻 (图 3-3-12 中的 R_f) 构成电压串联负反馈,决定了电路的闭环电压增益; C_3 、 C_4 和 C_8 为滤波、退耦电容; C_5 、 C_6 和 C_{10} 为补偿电容,以消除自激振荡; C_7 称自举电容,用以提高输出正半周幅度。图 3-3-13b 是用两个 CD4112 接成的 BTL 输出电路,这种电路可获得较大的输出功率。

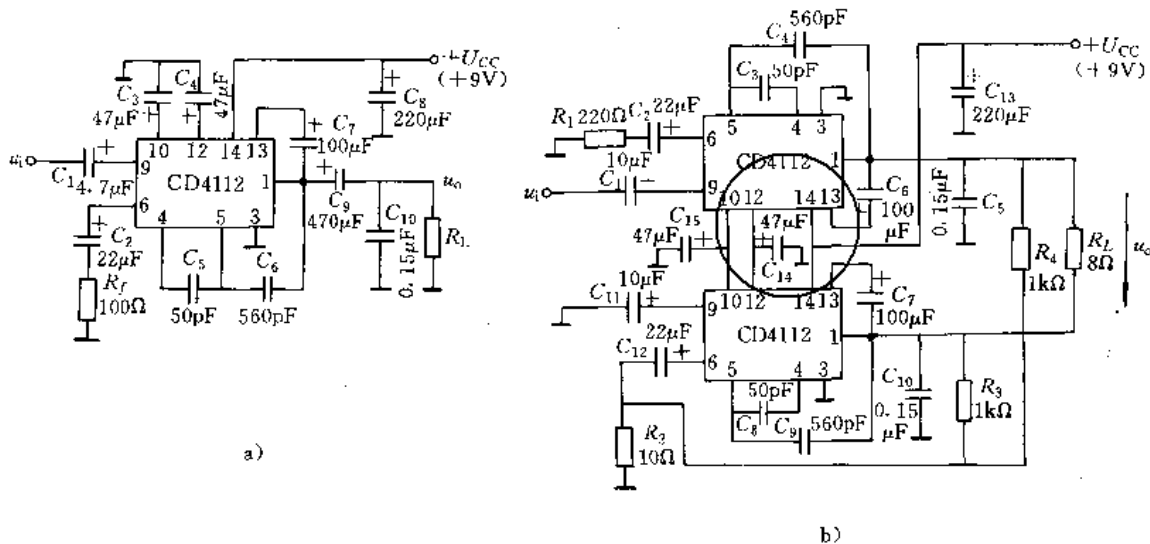


图 3-3-13 集成功率放大器 (CD4112) 的典型应用电路
a) OTL 输出电路 b) BTL 输出电路

4 集成电压比较器

4.1 集成电压比较器的功能和类型

集成电压比较器(简称比较器)是一种用来比较两个模拟电平、并给出比较结果(输出高电平或低电平)的非线性器件。电压比较器输入为模拟信号,输出为数字信号,可作为模拟电路与数字电路之间的接口电路。

集成电压比较器的典型电路结构框图和图形符号见图 3-3-14。其电路结构、工作原理、电压传输特性与集成运算放大器相似。但电压比较器工作在开环或

正反馈状态,它的输出是一个与后接数字集成电路兼容的逻辑电平。当加于电压比较器同相输入端的电压 u_+ 稍大于反相输入端的电压 u_- 时,电压比较器的输出为高电平;当 u_- 稍大于 u_+ 时,输出为低电平。

集成电压比较器的输出电平,有的只能和一种类型(例如 TTL 或 ECL)的数字集成电路相兼容,有的则能和二种或更多种类型的数字集成电路相兼容。有的集成电压比较器采用集电极开路输出,使用时要外接上拉电阻,使集电极和电源连通。

有些集成电压比较器设有选通端,当选通端加有选通信号(例如规定为高电平)时,集成电压比较器将



根据输入信号的大小随时输出比较结果。若无选通信号，则集成电压比较器的输出不受输入信号的影响。

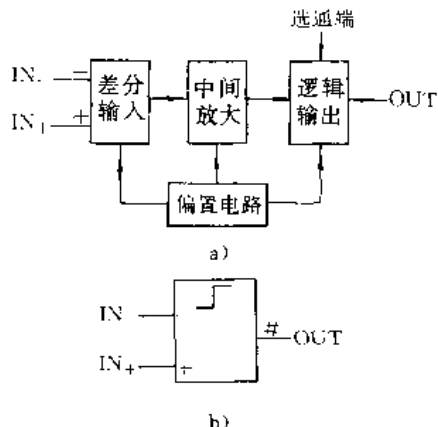


图 3-3-14 集成电压比较器的结构框图和图形符号
a) 结构框图 b) 图形符号

集成电压比较器按其性能,可分为通用型、低功耗型、高速型和精密型等。按一个封装内所含电压比较器的个数,可分为单集成电压比较器、双集成电压比较器和四集成电压比较器等。

虽然通用型集成运算放大器也可构成电压比较器,但其输出电压的数值往往和数字集成电路所要求的输入值相差较大。在同等价格时,集成运算放大器的响应速度也比不上集成电压比较器。但在响应速度要求低,精度要求高时,可选用高精度集成运算放大器构

成电压比较器。

4.2 集成电压比较器的主要参数

1. 输出高电平 U_{OH} 在给定的电源电压和负载下,电压比较器同相输入端的电压高于反相输入端的电压时,输出的电压值。
2. 输出低电平 U_{OL} 在给定的电源电压和负载下,反相输入端的电压高于同相输入端的电压时,输出的电压值。
3. 输出端吸入电流 I_L 输出为低电平时,流入输出端的电流。
4. 选通电流 I_{ST} 对具有选通功能的集成电压比较器,当选通端为低电平时,流出选通端的电流。
5. 响应时间 t_r 输入端加一个规定幅值的阶跃脉冲时,输出端从原来的逻辑电平上升(或下降)到阈值电平(参见本篇第5章3.1.2节)时所需要的时间。
6. 选通延迟时间 t_{DST} 对具有选通功能的集成电压比较器,从选通端加一阶跃选通信号起,至输出端达到阈值电平时所需要的时间。

开环电压增益、输入失调电压、输入失调电流、输入偏置电流、差模输入电压范围等参数的意义与集成运算放大器相同。

表 3-3-3 为集成电压比较器主要参数示例。

表 3-3-3 集成电压比较器主要参数示例

| 型 号 | | CJ0311① | CJ685 | CJ1414 | CJ14574② |
|-------------------------------|----|------------------------------|------------------------|------------------------|------------------------------------|
| 参数名称和单位 | | | | | |
| 电源电压 | V | 单电源 5~30 双电源 ±15 范围 | +6 和 -5.2 | +12 和 -6 | 5~15 |
| 开环电压增益 A_{o} | dB | 106 | 68 | 60 | 96 |
| 输入失调电压 U_{IO} | mV | 2 | 2 | 1 | 50 |
| 输入偏置电流 I_{IB} | nA | 100 | 10×10^3 | 25 | 1 |
| 响应时间 t_r | ns | 200 | 9.5 | 30 | 100 |
| 输出电平 U_{OHMIN} U_{OLM} | V | 随电源电压而异 | -0.96 -1.65 | 2.5 0 | 9.99 0.05 |
| 说 明 | | 双极型,单比较器,输出与 TTL、CMOS、HTL 兼容 | 双极型,单比较器,高速,输出与 ECL 兼容 | 双极型,双比较器,高速,输出与 TTL 兼容 | CMOS,四比较器,偏置可由外部控制,输出与 CMOS、TTL 兼容 |

① 所给参数是电源电压为 ±15V 时的数值。
② 所给参数是电源电压为 10V 时的数值。



4.3 集成电压比较器的应用

1. 电平比较器

a. 单限比较器 集成电压比较器的一个输入端置参考电平 U_{REF} ，另一输入端接比较信号 u_1 。当 $u_1 = U_{REF}$ 时，输出电平跳变，传输特性只有一个阈值电平（也称为门限电平），见图 3-3-15（设 $U_{REF} > 0$ ）。

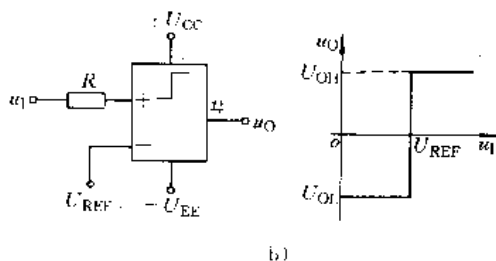
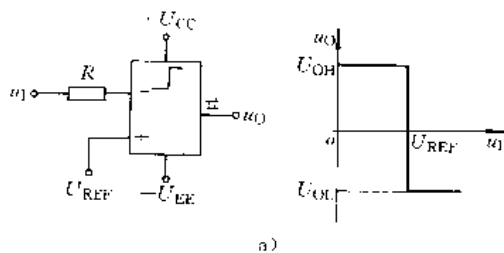


图 3-3-15 单限比较器

a) 反相输入 b) 同相输入

当 $U_{REF} = 0$ ，则输出电平在 $u_1 = 0$ 时跳变，称这种比较器为过零比较器。

b. 双限比较器 也称窗口比较器，具有两个阈值电平，可用二个单集成电压比较器（或一个双集成电压比较器）分别加不同的参考电平构成，见图 3-3-16a。图中 D 是与非门。当比较信号 u_1 满足 $U_{RL} < u_1 < U_{RH}$ 时，输出低电平，其余高电平。传输特性见图 3-3-16b。

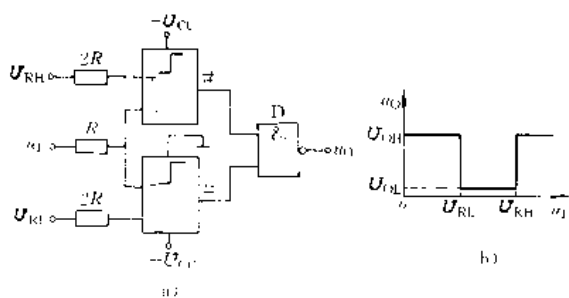


图 3-3-16 双限比较器

a) 电路原理图 b) 传输特性

c. 区域比较器 用一个四集成电压比较器（或四个单集成电压比较器）可构成能指示输入信号两个区间的区域比较器，其电路原理图见图 3-3-17a。当 $\frac{1}{2}$

$\times U_{REF} < u_1 < U_{REF}$ 时， u_{O1} 为低电平；当 $0 < u_1 < \frac{1}{2} U_{REF}$ 时， u_{O2} 为低电平。见图 3-3-17b。

同理，可构成多区域比较器。

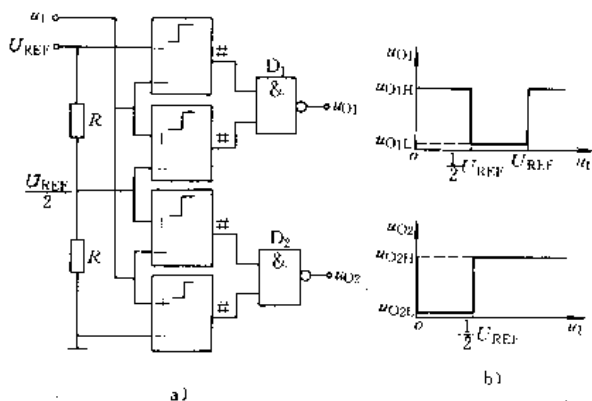


图 3-3-17 区域比较器

a) 电路原理图 b) 传输特性

d. 滞回比较器 上述比较器当输入接近门限电平时，遇有干扰会使输出不稳定。为提高抗干扰能力，可用滞回比较器。其电路原理图和 $U_{REF} = 0$ 时的传输特性见图 3-3-18。图中 U_{T+} 和 U_{T-} 分别称为上限阈值电平和下限阈值电平。对于反相输入滞回比较器，上、下限阈值电平分别为：

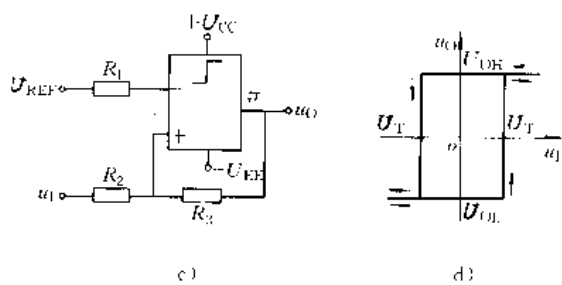
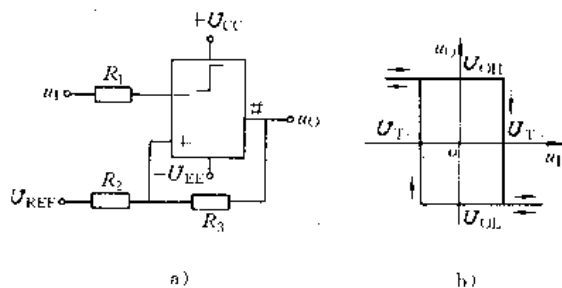


图 3-3-18 滞回比较器

a) 反相输入电路原理图 b) 反相输入传输特性
c) 同相输入电路原理图 d) 同相输入传输特性

$$U_{T-} = \frac{R_3}{R_2 + R_3} U_{REF} + \frac{R_2}{R_2 + R_3} U_{OH}$$

$$U_{T+} = \frac{R_3}{R_2 + R_3} U_{REF} + \frac{R_2}{R_2 + R_3} U_{OL}$$



对于同相输入滞回比较器，上、下限阈值电平分别为

$$U_{T+} = \frac{R_2 + R_3}{R_3} U_{REF} - \frac{R_2}{R_3} U_{OH}$$

$$U_{T-} = \frac{R_2 + R_3}{R_3} U_{REF} - \frac{R_2}{R_3} U_{OH}$$

U_{T+} 与 U_{T-} 之差称为回差（也称门限宽度）。只要干扰信号不超过门限宽度，输出就稳定。

集成电压比较器除了可构成电平比较器外，还可构成波形的产生和变换电路。例如用集成电压比较器可构成非正弦波发生器（在本篇第7章2节介绍），可构成单稳态触发器（在本篇第7章5.1节介绍）。当过零比较器输入正弦波时，输出即为方波，这就成为正弦波-方波转换器。

此外，用滞回比较器还可进行波形整形、幅度鉴别等。其它如电平移动、信号处理、定时和延时电路等方面，集成电压比较器也得到广泛应用

5 集成模拟乘法器

5.1 集成模拟乘法器的功能和类型

集成模拟乘法器是用来实现两个模拟量相乘的单片集成器件。其图形符号见图3-3-19， IN_X 和 IN_Y 为两个输入端， OUT 为输出端。输入与输出关系为

$$u_o = K u_x u_y$$

式中 K 称标度因子（或增益常数），量纲为 $1/V$ ，其数值与乘法器的参数和外部电路参数有关。

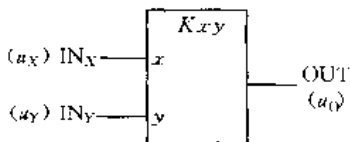


图3-3-19 集成模拟乘法器的图形符号

按 u_x 、 u_y 的极性，模拟乘法器可分为四象限乘法器（ u_x 、 u_y 均可为正或负值）、两象限乘法器（ u_x 、 u_y 只允许一个可正可负，另一个只能是单极性）和单象限乘法器（ u_x 、 u_y 均限定为一种极性）。

用电子电路来实现两个模拟信号相乘有多种方法，但易于用集成技术实现的是对数求和-反对数法以及可变跨导法。目前生产的单片集成模拟乘法器，绝大多数是基于可变跨导法的原理制成，它是利用差分放大电路的跨导随输入电压而变化的特性来实现乘法运算的。

单片集成可变跨导模拟乘法器有双平衡模拟乘法

器和线性化可变跨导模拟乘法器等类型。双平衡模拟乘法器工作频率高、温度稳定性好，主要用于处理交流小信号，如混频、变频、调制、解调、鉴频等。线性化可变跨导模拟乘法器增加了非线性补偿网络，以扩大线性范围，可用于大信号的处理，如模拟运算等。它在使用时要配置一些具有一定精度要求的外部元件。

图3-3-20是双平衡模拟乘法器的电路原理图，它是一个双差分电路，其输出电压

$$u_o = I_0 R_C \tanh \frac{u_x}{2U_T} \tanh \frac{u_y}{2U_T}$$

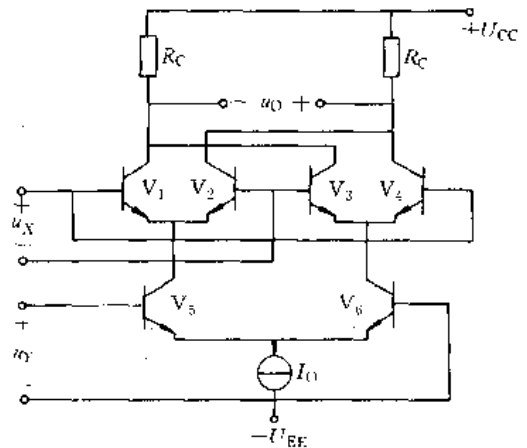


图3-3-20 双平衡模拟乘法器电路原理图

当 $|u_x| \ll 2U_T \approx 52\text{mV}$ 和 $|u_y| \ll 2U_T \approx 52\text{mV}$ 时，

$$\tanh \frac{u_x}{2U_T} \approx \frac{u_x}{2U_T}, \quad \tanh \frac{u_y}{2U_T} \approx \frac{u_y}{2U_T}, \quad \text{故}$$

$$u_o = \frac{I_0 R_C}{4U_T^2} u_x u_y = K u_x u_y$$

标度因子
$$K = \frac{I_0 R_C}{4U_T^2}$$

随着应用领域的开拓，集成模拟乘法器向着多功能、高集成度、高精度等方面发展。有的器件兼有乘法和除法两种功能，有的具有内部微调，还有可编程精密组合模块乘法器等。

5.2 集成模拟乘法器的主要参数

集成模拟乘法器有些参数的意义和集成运算放大器相同，下面仅介绍几个参数。

1. 输出线性精度 E_R 集成模拟乘法器的一端加满标度固定直流电压（例如 $\pm 10V$ ），另一端交替施加正负两种极性的电压（例如 $U_m = 10V$ 的正弦电压）时的实际输出值 U_O 与理想输出值 U_{OE} 之差对理想输出值的百分比。分 X 输出线性精度 E_{RX} 和 Y 输出线性精度 E_{RY} ，即



$$E_{RX} = \frac{U_o - U_{OE}}{U_{OE}} \times 100\% \Big|_{u_x = U_m \sin \omega t, u_y = \pm 10V}$$

$$E_{RY} = \frac{U_o - U_{OE}}{U_{OE}} \times 100\% \Big|_{u_y = U_m \sin \omega t, u_x = \pm 10V}$$

2. 输出失调电压 U_{OO} 指集成模拟乘法器输入电压 $u_x = u_y = 0$ 时的输出电压。

3. 馈通电压 U_V 集成模拟乘法器的一输入端接地，另一输入端接一定值的直流电压时的输出失调电压。分 X 输入馈通电压 U_{FX} 和 Y 输入馈通电压 U_{FY} ，即

$$U_{FX} = U_{OO} |_{u_x = U, u_y = 0}$$

$$U_{FY} = U_{OO} |_{u_y = U, u_x = 0}$$

4. 载漏抑制度 CFT 当 $u_y = 0$ ，X 输入端加一定幅度和频率的载波电压 U_c 时，测出载漏输出电压 U_{CO} ，则

$$CFT = 20 \lg \frac{U_c}{U_{CO}} \Big|_{u_y = 0}$$

5. 信漏抑制度 SFT 当 $u_x = 0$ ，Y 输入端加一定幅度和频率的信号电压 U_s 时，测出信漏输出电压 U_{SO} ，则

$$SFT = 20 \lg \frac{U_s}{U_{SO}} \Big|_{u_x = 0}$$

6. 平方误差 E_{SQ} 当 $u_x = u_y = U$ ，集成模拟乘法

器用作平方器时，输出电压 U_o 的相对误差，即

$$E_{SQ} = \frac{|U_o - U^2|_{max}}{U_o} \times 100\%$$

5.3 集成模拟乘法器的应用

集成模拟乘法器和集成运算放大器组合，并配以各种不同的外接电路，便能完成多种模拟运算。此外，在模拟测量、波形产生和变换、信号处理和控制在电视和通信系统中都得到广泛应用。

1. 模拟运算电路 表 3-3-4 是用集成模拟乘法器组成的一些模拟运算单元电路。如将这些单元电路和其它集成电路组合，则可构成综合模拟运算电路，求解比较复杂的方程。

2. 波形产生电路 用集成模拟乘法器可以构成产生正弦波、方波和三角波的电路。

图 3-3-21 是 RC 正交振荡器电路原理图。它由两个集成模拟乘法器、三个集成运算放大器和阻容元件构成，其中 U_y 为控制电压，调节 U_y 即可改变输出信号频率。振荡器的输出信号为

$$u_{O1} = U_m \sin \omega_0 t$$

$$u_{O2} = U_m \cos \omega_0 t$$

式中 $\omega_0 = KU_y/RC$ 。

表 3-3-4 用集成模拟乘法器组成的模拟运算单元电路

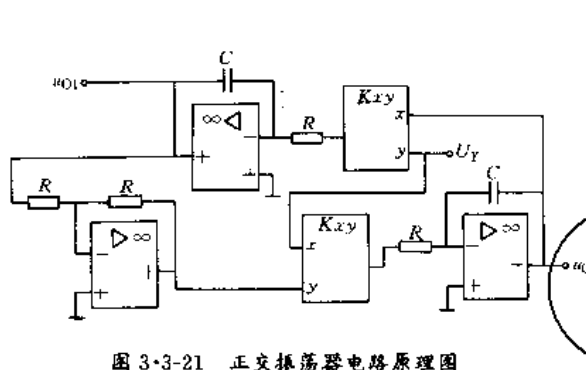
| 名称 | 电路图 | 表达式 | 备注 |
|-------|-----|-------------------------------|--------------|
| 平方运算 | | $u_0 = K u_1^2$ | 同理可构成 n 次方运算 |
| 三次方运算 | | $u_0 = K^2 u_1^3$ | |
| 开平方运算 | | $u_0 = \sqrt{-\frac{u_1}{K}}$ | 负数开平方 |



(续)

| 名称 | 电路图 | 表达式 | 备注 |
|-------|-----|--------------------------------------|----------------------------------------------------|
| 开平方运算 | | $u_O = \sqrt{\frac{R_2}{K R_1}} u_I$ | 正数开平方 |
| 开立方运算 | | $u_O = \sqrt[3]{-\frac{u_I}{K^2}}$ | 负数开立方 |
| 除法运算 | | $u_O = -\frac{u_I}{K u_V}$ | 必须 $u_V > 0$ 。 若 $u_V < 0$ ，应在 反馈支路串入 反相器 |
| 均方运算 | | $u_O = -\frac{1}{RC} \int K u f dt$ | 输出端再串 接开平方运算 电路便成为均 方根运算电路 |

此星公司制作 请尊重作者版权



$\times I \sin(\omega t - \varphi)$ ，则输出为
 $Y = M3UI \cos \varphi = MP$
可见 Y 与三相平均功率 P 成正比。

3. 测量电路 利用集成模拟乘法器可以构成多种测量电路。图 3-3-22 为三相平均功率测量电路，设相电压为 $u_p = \sqrt{2} U \sin \omega t$ ，相电流为 $i_p = \sqrt{2}$

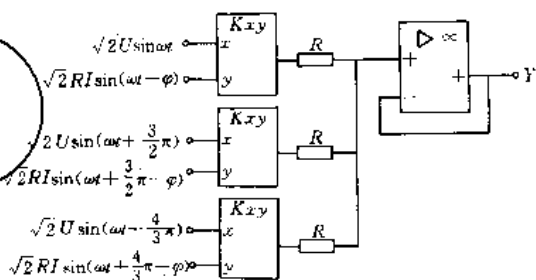


图 3-3-22 三相平均功率测量电路



4. 通信应用电路 在通信系统中,集成模拟乘法器可方便地构成调制电路和解调电路(参见本篇第8章1.1节)。

6 集成模拟开关

6.1 集成模拟开关的功能和类型

模拟开关是一种用来控制模拟信号传输的无触点电子开关,其“通”或“断”由数字信号来控制。

集成模拟开关大多采用双极-结型场效应管兼容工艺和CMOS工艺制作,尤其以CMOS为主,它具有双向性。按结构和功能分,有双向模拟开关(常用的是四双向模拟开关)和多路选择开关(常用的有2选1、

4选1、8选1和16选1多路选择开关)。

四双向模拟开关内部具有四个独立的单刀单掷双向开关,每个开关的通断分别受各自控制端控制。图3-3-23是CMOS四双向模拟开关的简化电路和图形符号,其中 I_1/O_1 和 $O_1/I_1 \sim I_4/O_4$ 和 O_4/I_4 分别为四个开关单元的输入、输出端(或输出、输入端), $C_1 \sim C_4$ 为各开关的控制端。图中NMOS管 V_1 和PMOS管 V_2 组成CMOS传输门,NMOS管 V_3 和PMOS管 V_4 组成CMOS反相器(参见本篇第5章4.3节)。其余三路的电路结构相同。当控制端为高电平时,开关接通;低电平时,开关断开。CMOS模拟开关具有功耗低、速度快、无机械触点、体积小和寿命长等特点,因而在许多场合取代了继电器。

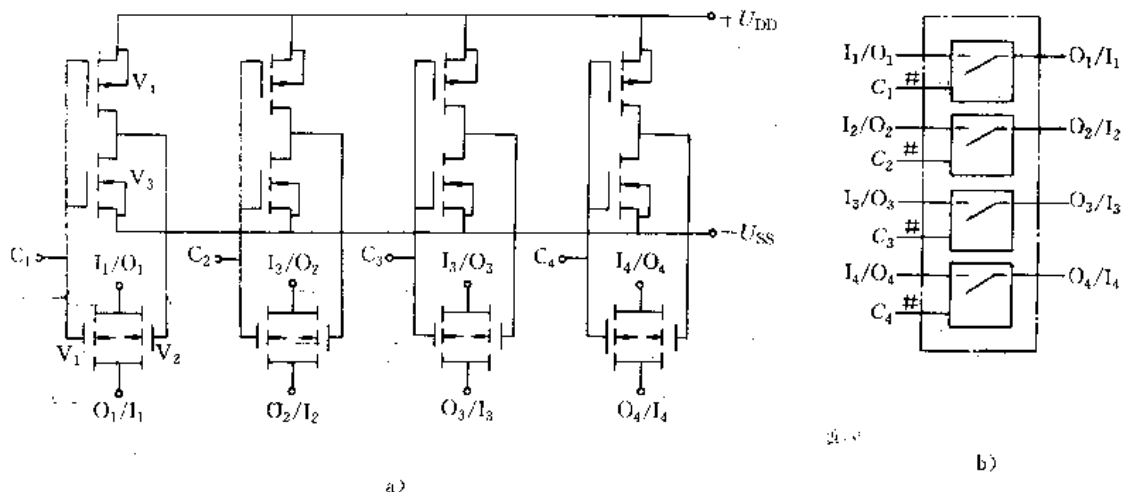


图 3-3-23 CMOS 四双向模拟开关 (CC4066)

a) 简化电路 b) 图形符号

图3-3-24是8选1多路选择开关的原理示意图。图中 $I_0 \sim I_7$ 为模拟信号输入端, O 为输出端, A_0, A_1, A_2 为开关通道选择输入端(也称地址输入端), INH 为禁止端。当 INH 为低电平时,3线-8线译码器(参见本篇第5章5.2节)的输出使模拟开关 $S_0 \sim S_7$ 均断

开。只有当 INH 为高电平时, $S_0 \sim S_7$ 才受 A_0, A_1, A_2 输入的数字信号控制,每次选择一个开关接通(见表3-3-5)。

有的集成电路的一个封装中含有两个或三个多路选择开关,如双8选1、双4选1、三2选1多路选择开关。

表 3-3-5 图 3-3-24 的 8 选 1 多路选择开关输入和通道的关系

| | | | | | | | | | | |
|--------|-------|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 输 入 | INH | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | |
| | A_2 | × | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | |
| | A_1 | × | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | |
| | A_0 | × | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | |
| 选择的通道① | | 无 | I_0 | I_1 | I_2 | I_3 | I_4 | I_5 | I_6 | I_7 |

注:表中1表示高电平,0表示低电平,×表示任意态(0或1均可)

① 表示各输入端所连接的通道,如 I_0 表示输入端 I_0 所连接的通道,余类推。



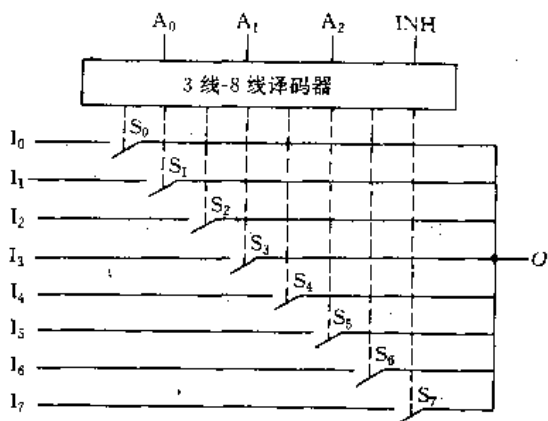


图 3-3-24 8选1多路选择开关 (BI1508) 的原理示意图

6.2 集成模拟开关的主要参数

1. 导通电阻 R_{ON} 也称通态电阻，是指模拟开关处于导通状态时，在规定的模拟电压输入范围内的最大电阻值。它是衡量模拟开关带负载能力的重要参数。与环境温度、电源电压和输入模拟电压大小有关。

2. 通道截止漏电流 $I_{L(OFF)}$ 指在所有通道截止（开关断开），各模拟输入端都加上规定的电压时，流过输出端的电流。 $I_{L(OFF)}$ 一般很小。

3. 主开关截止隔离度 $C_{SO(OFF)}$ 是指第 i 个通道截止时，该模拟开关输入电压 U_i 对输出的影响程度，或者输出端对该开关输入电压的抑制程度，定义为

$$C_{SO(OFF)} = 20 \lg \frac{U_o}{U_i} (\text{dB})$$

式中 U_o 为输出电压； U_i 为第 i 个通道的输入电压。

4. 导通电阻路间差 ΔR_{ON} 模拟开关任意两路的导通电阻之差。是衡量各路开关一致性的参数。

5. 开关通道转换时间 t_{TR} 指某路通道从建立地址时刻起，到输出电压达到模拟输入电压值的 10% 时所需的时间。

6. 通道转换开启时间 t_{ON} 从开关接通起到输出端的模拟电压达到稳定值的 90% 时所需的时间。

7. 通道转换关断时间 t_{OFF} 从开关关断起到输出电压回到零时所需的时间。

此外，还有输入高电平、输入低电平、低电平输入电流、禁止端低电平输入电流、电源电流、功耗、输入电容、输出电容等。

6.3 集成模拟开关的应用

集成模拟开关主要用于数字程控、数据采集、巡回检测、遥测和遥控以及取代小信号场合的机械触点开

关。下面列举几种电路：

1. 程控电阻网络和程控放大器 程控电阻网络可用数字信号控制其电阻值，用于需改变电阻值的场合。图 3-3-25 是两种程控电阻网络（所用模拟开关和电阻的个数可视要求而变）。对图 3-3-25a，若用 4 选 1 多路选择开关，可得四种不同的电阻值。图 3-3-25b 可用四双向模拟开关，当用 2 线-4 线译码器控制 $C_1 \sim C_4$ 时，可得 4 种不同的电阻值，当用四位二进制数作 $C_1 \sim C_4$ 的控制信号时，可得 16 种不同的电阻值。

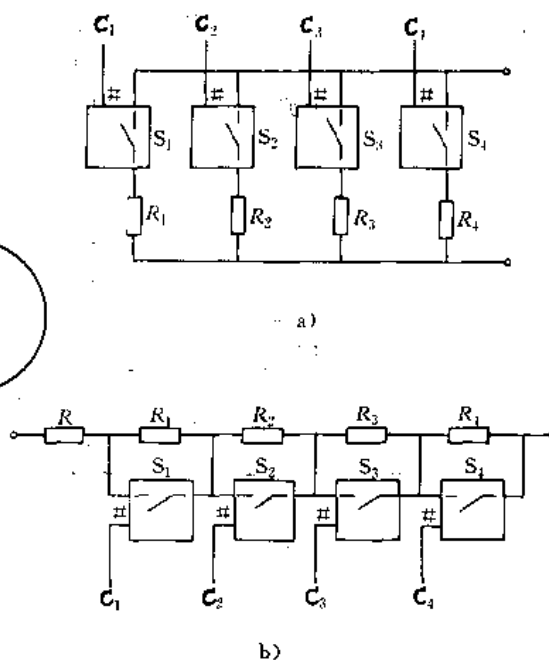


图 3-3-25 程控电阻网络

a) 开关与电阻串联 b) 开关与电阻并联

若把程控电阻网络用于放大电路，则可用数字信号来控制放大电路的增益。图 3-3-26 是程控差分放大电路（图中程控电阻网络用 R_C 表示），电路的闭环差模电压增益

$$A_{ud} = \frac{u_o}{u_{i2} - u_{i1}} = \frac{R_f}{R_C}$$

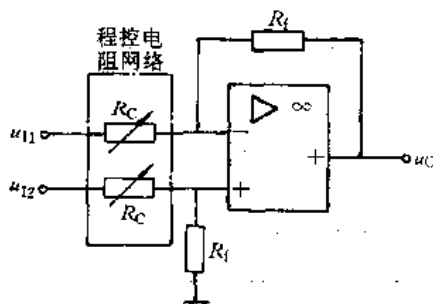


图 3-3-26 程控差分放大电路



图 3-3-27a 是四档自动量程转换电路的原理图。若使 $0 < U_{R1} < U_{R2} < U_{R3}$ ，则门电路和比较器的输出波形如图 3-3-27b，它们作为控制信号，分别控制 4 选 1 多路选择开关 $S_1 \sim S_4$ 的通断（高电平使对应开关接通）。适当选取 $U_{R1} \sim U_{R3}$ 和 $R_1 \sim R_4$ ($R_1 < R_2 < R_3 < R_4$)，可实现自动量程转换。

2. 程控衰减器 可用于自动量程控制、自动增益校正等场合。图 3-3-28 是一种可获得八种不同衰减量的程控衰减器原理图。在开关 $S_0 \sim S_2$ 分别接通时的衰减量分别为

$$K_0 = 20 \lg \frac{R_6}{R_5 + R_6} \quad (\text{dB})$$

$$K_1 = 20 \lg \frac{R_4}{R_3 + R_4} \quad (\text{dB})$$

$$K_2 = 20 \lg \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (\text{dB})$$

在 $A_2 A_1 A_0$ 八种组合代码 (000~111) 控制下，得到八种衰减：0~ ($K_0 + K_1 + K_2$)。

3. 程控电容网络和程控振荡器 将图 3-3-25a 所示程控电阻网络中的电阻换成电容，即成为输出电容量可用数字信号控制的程控电容网络，它可用于需改变电容量的场合。

图 3-3-29 是一种程控多谐振荡器的原理图，图中程控电容网络中的模拟开关可用图 3-3-24 所示 8 选 1 多路选择开关。电路的振荡频率

$$f_i \approx \frac{1}{2RC_i} \quad (i = 0, 1, 2, \dots, 7)$$

因此输出方波具有八种频率可调。

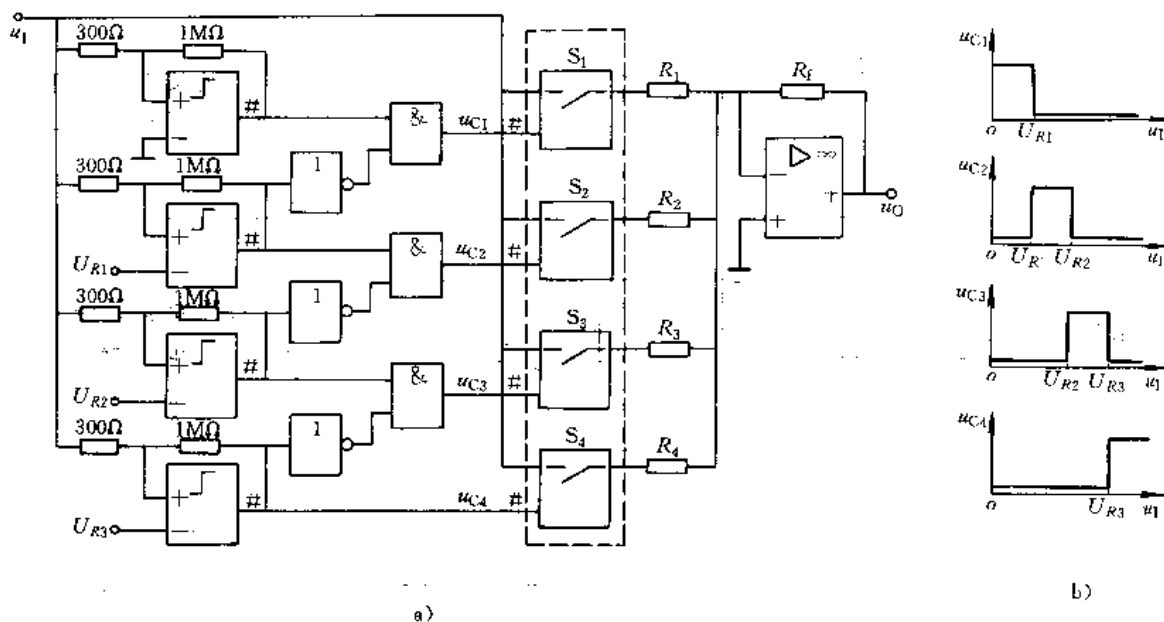


图 3-3-27 自动量程转换电路原理图和波形

a) 电路原理图 b) 波形

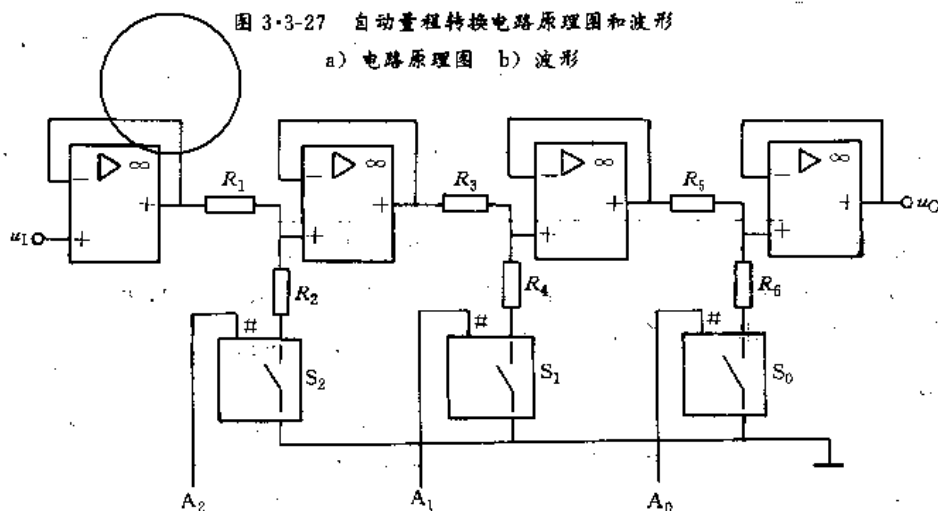


图 3-3-28 程控衰减器原理图



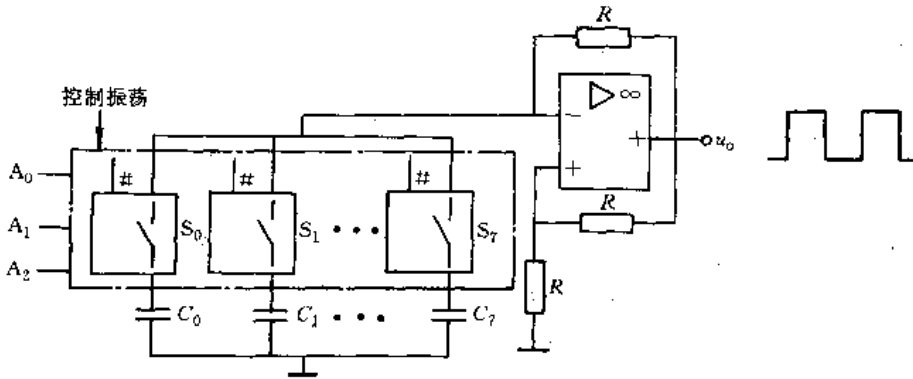


图 3-3-29 程控多谐振荡器原理图

表 3-3-6 用双向模拟开关组成的几种开关

| 名称 | 功能示意 | 电路图 | 说明 |
|--------|------|-----|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 单刀双掷开关 | | | <div style="border: 1px solid black; border-radius: 50%; width: 40px; height: 40px; margin: 0 auto;"></div> <p>C=1, S₁ 接通, S₂ 断开; C=0, S₁ 断开, S₂ 接通</p> |
| 双刀单掷开关 | | | <p>C=1, S₁ 和 S₂ 均接通; C=0, S₁ 和 S₂ 均断开</p> |
| 双刀双掷开关 | | | <p>C=1, S₁ 和 S₃ 接通, S₂ 和 S₄ 断开; C=0, S₂ 和 S₄ 接通, S₁ 和 S₃ 断开</p> |

4. 组成多种开关 见表 3-3-6。

模拟开关在 D/A 转换器、A/D 转换器、采样-保持电路和数据采集系统中的应用将在本篇第 9 章介绍。

7 集成锁相环

锁相就是相位同步的自动控制。集成锁相环是一种能完成两个电信号相位同步的自动控制器件。按其组成部件的电路形式分为模拟锁相环和数字锁相环两

大类;按应用场合分为通用锁相环和专用锁相环;按内部工艺分为双极型和 CMOS 型等。

7.1 集成锁相环的基本组成

锁相环简称 PLL (Phase-Locked Loop), 它有三个基本的组成部分: 鉴相器 (PD)、低通滤波器 (LPF) 和压控振荡器 (VCO)。它们构成一个闭环的相位反馈控制系统, 见图 3-3-30。



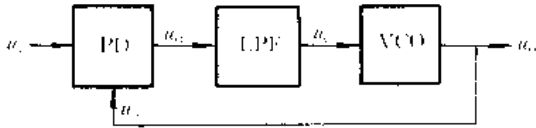


图 3-3-30 锁相环框图

1. 鉴相器 也称相位比较器, 它把输入信号 u_i 和压控振荡器输出信号 u_o 间的相位差变换为电压 u_d 输出。

鉴相器的电路形式有开关型鉴相器、数字式鉴相器、采样-保持鉴相器和用模拟乘法器构成的鉴相器等。在单片集成模拟锁相环中, 双极型的较多采用双平衡模拟乘法器作鉴相器, CMOS 型的通常采用数字式鉴相器。

2. 低通滤波器 也称环路滤波器, 其作用是滤除 u_d 中的高频分量和噪声, 得到控制电压 u_c , 控制压控振荡器, 同时滤除瞬变杂散干扰, 使环路工作稳定。锁相环中常用的几种低通滤波器见表 3-3-7。

对集成锁相环, 低通滤波器或其中的个别元件通

常采用外接。

3. 压控振荡器 压控振荡器是一个电压-频率(或相位)变换电路, 它的振荡频率 f 随控制电压 u_c 而变, 其相互关系表示为

$$f = f_0 + K_o u_c$$

式中 f_0 ——压控振荡器的自由振荡频率 (Hz);

K_o ——压控振荡器的控制灵敏度 (Hz/V)。

当锁相环处于稳定工作状态——锁定状态时, 压控振荡器的振荡频率 f 与锁相环的输入信号 u_i 的频率 f_i 相等。如果输入信号 u_i 的频率 f_i 在一定范围内发生变化, 鉴相器的输出电压 u_d 也产生变化, 此电压经滤波后加至压控振荡器, 使其振荡频率 f 向 f_i 靠拢, 直到 $f = f_i$ 而重新锁定。在模拟集成锁相环中, 压控振荡器的电路形式有积分-施密特触发多谐振荡器型、射极耦合多谐振荡器型、变容三极管调谐 LC 振荡器型和数字门电路型等。

图 3-3-31 是一个单片集成锁相环的框图, 图中还画出了需要外接的元件。

表 3-3-7 几种低通滤波器

| 名称 | 电路图 | 传递函数 |
|-----------|-----|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 无源 RC 积分型 | | $H(j\omega) = \frac{1}{1 + j\omega RC}$ |
| 无源比例积分型 | | $H(j\omega) = \frac{1 + j\omega R_2 C}{1 + j\omega(R_1 + R_2)C}$ $H(j\omega) \approx \frac{R_2}{R_1 + R_2}$ (当 ω 很高时) |
| 有源比例积分型 | | $H(j\omega) = - \frac{1 + j\omega R_2 C}{j\omega R_1 C}$ |



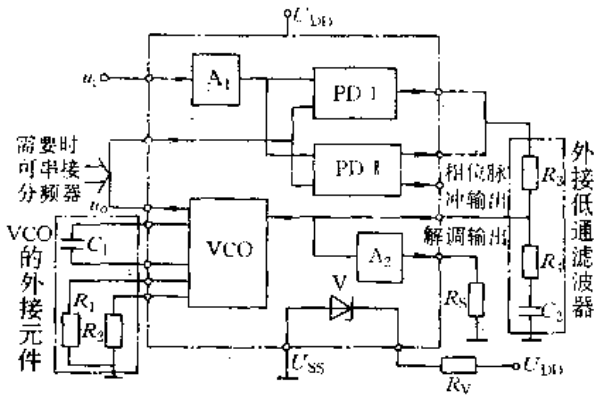


图 3-3-31 单片集成锁相环 (CC4046) 的方框图

VCO—压控振荡器 A_1 —输入信号放大和整形电路
 A_2 —源极跟随器 PD I—鉴相器 I } 可根据需要选用一个
 V —稳压二极管 PD II—鉴相器 II

7.2 集成锁相环的主要参数

集成锁相环的参数有系统参数和部件参数。除一般集成电路的常规参数如电源电压、功耗、温漂、信号范围、负载能力等以外，还有以下主要参数：

1. 捕捉范围 Δf_c 。指集成锁相环能从失锁状态进入锁定（同步）状态的输入信号频率范围 $\Delta f_c = f_{imax} - f_{imin}$ 。它说明，只要输入信号频率落在 $f_{imin} \leq f_i \leq f_{imax}$ 的范围内，系统就能进入锁定状态。 Δf_c 的大小与环路增益和滤波器带宽有关。

2. 捕捉时间 T_c 。指从捕捉起始时刻至进入锁定状态这一捕捉过程所需的时间。

3. 锁定范围 Δf_L 也称同步范围，指环路锁定后，当输入信号频率变化时，能保持锁定状态的最大频率范围。通常 $\Delta f_L > \Delta f_c$ 。

4. 压控振荡器自由振荡频率 f_0 。在无控制电压作用时，压控振荡器的固有振荡频率。

5. 压控振荡器的频率范围 Δf_0 。指在允许的控制电压最大范围内和确定的定时元件下，压控振荡器的最高工作频率 f_{0max} 与最低工作频率 f_{0min} 之差值，即 $\Delta f_0 = f_{0max} - f_{0min}$ 。

6. 压控振荡器增益系数 K 。即压控振荡器的控制灵敏度。

7. 鉴相器增益系数 K_d 。指单位弧度的相位差产生的输出电压，单位为 V/rad。

7.3 集成锁相环的应用

锁相环可以用于稳频、变频、倍频、调制、解调、同步、控制和测量等，主要应用在广播通信领域，在仪

器仪表、自动控制设备中也有广泛的应用。下面仅列举几种：

1. 频率变换 图 3-3-32 是由集成锁相环和两个分频比为 M 和 N 的分频器构成的频率变换原理图。在锁相环处于锁定状态时，鉴相器的两输入信号频率相等，即 $f_o = f_i = f_i/N$ ，故

$$f_o = M f_i = \frac{M}{N} f_i$$

当 $M=1$ 时为分频， $N=1$ 时为倍频。

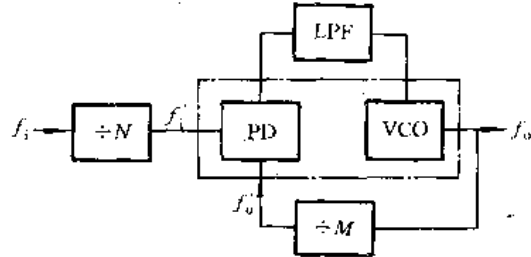


图 3-3-32 频率变换原理图

若图 3-3-32 中的分频器 M 采用程控分频器（可用外加信号控制分频比），且 $N=1$ ，则可实现频率合成（从一个给定的高稳定参考频率源产生出许多具有固定间隔的离散频率）。例如程控分频器的分频比为 $1 \sim 9$ ，则电路可输出相同间隔的 9 个频率。

2. 调幅解调 用集成锁相环和乘法器组成的调幅解调原理图见图 3-3-33。图中调幅信号的一路加到乘法器的一个输入端，另一路经 90° 移相加到 PLL 的输入端，使 PLL 锁定在调幅波的载频上。VCO 输出的载波信号和调幅波信号相乘后，经低通滤波器滤除高次载频谐波便还原出调制信号，实现调幅波解调。

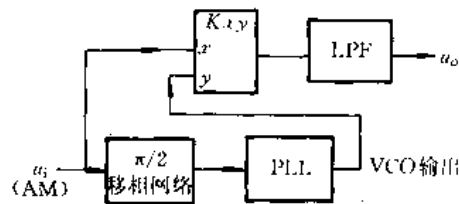


图 3-3-33 调幅解调原理图

3. 电机调速 图 3-3-34 是利用锁相环控制电机转速的原理图。图中程控分频器的分频比按电机转速要求确定。光电转换器将电机转速转换成电脉冲，它和

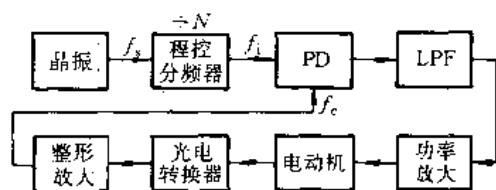


图 3-3-34 电机调速原理图



电机组合,具有压控振荡器的功能。反映电机转速的频率 $f_c = f_i = f_s/N$ 。因此,改变程控分频器的分频比,就可实现电机转速的调节。

8 开关电容网络

开关电容网络简称 SCN (Switched Capacitor Network),它由受时钟脉冲控制的开关、电容和运算放大器构成,是近些年迅速发展的一种以 MOS 大规模集成电路技术为基础的模拟集成电路。

8.1 开关电容的基本电路

1. 开关电容等效电阻电路 用开关和电容组成的电路可以取代电阻,表 3-3-8 为常用的开关电容 (SC) 等效电阻电路。现用图 3-3-35 来说明其原理。图 3-3-35a 是一个简单的 SC 电路, MOS 管 V_1 和 V_2 用作开关,分别由图 3-3-35b 所示两组同频而反相的脉冲驱动。在 $(nT-T) \sim (nT-T/2)$ 期间, V_1 导通, V_2 截止,电容 C 上的电荷为 Cu_1 ; 在 $(nT-T/2) \sim nT$ 内, V_2 导通, V_1 截止, C 上的电荷为 Cu_2 。因此在一个脉冲周期内,从 1 端传送到 2 端的电荷为

$$\Delta Q = C(u_1 - u_2)$$

平均电流为 $I_{AV} = \frac{C(u_1 - u_2)}{T}$

故两端点之间可等效为一个电阻,见图 3-3-35c,其阻值为

$$R = \frac{u_1 - u_2}{I_{AV}} = \frac{T}{C} = \frac{1}{Cf_c}$$

式中 f_c 为驱动脉冲频率,要求它远大于信号频率,使得在 T 内, u_1 和 u_2 基本不变。

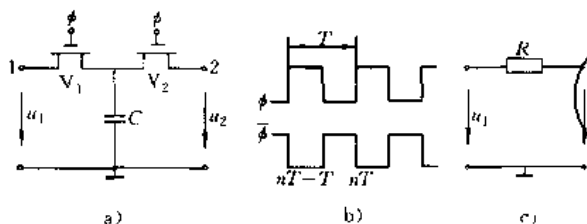


图 3-3-35 SC 等效电阻原理

a) 简单 SC 电路 b) 驱动脉冲 c) 等效电阻

在 MOS 电路中,采用 SC 电阻有许多优点。例如,整个电路可由 MOS 开关、MOS 电容和 MOS 集成运算放大器组成;电路的特性仅仅决定于电容比,而电容比的精度可做得很高(0.01%~0.1%),因此电路精度高;由于所需的 SC 等效电阻阻值越大,电容越小,所以可用小的芯片面积制作高阻值电阻。

表 3-3-8 几种常用的 SC 等效电阻电路

| SC 电路 | 传送的电荷量 ΔQ | 等效电阻 R |
|-------|----------------------------------|----------------------------|
| | $C(u_1 - u_2)$ | $\frac{1}{Cf_c}$ |
| | $C(u_1 - u_2)$ | $\frac{1}{Cf_c}$ |
| | $C(u_1 - u_2)$ | $\frac{1}{Cf_c}$ |
| | $2C(u_1 - u_2)$ | $\frac{1}{2Cf_c}$ |
| | $(C_1 + C_2) \times (u_1 - u_2)$ | $\frac{1}{(C_1 + C_2)f_c}$ |
| | $(C_1 + C_2) \times (u_1 - u_2)$ | $\frac{1}{(C_1 + C_2)f_c}$ |

2. 开关电容积分器 图 3-3-36a 为 RC 有源积分器。若用 SC 等效电阻取代 R ,就得到基本的 SC 积分器,见图 3-3-36b。其输入、输出关系为



$$u_0 = -\frac{1}{RC} \int u_1 dt = -\frac{f_c C_1}{C_2} \int u_1 dt$$

写成频域关系式则为

$$u_0 = -\frac{f_c}{j\omega} \frac{C_1}{C_2} u_1$$

式中 j ——虚数单位；

ω ——输入信号的频率 (rad/s)。

可见,在输入信号和驱动脉冲频率一定时,传递函数取决于电容比 C_1/C_2 , 精度很高。

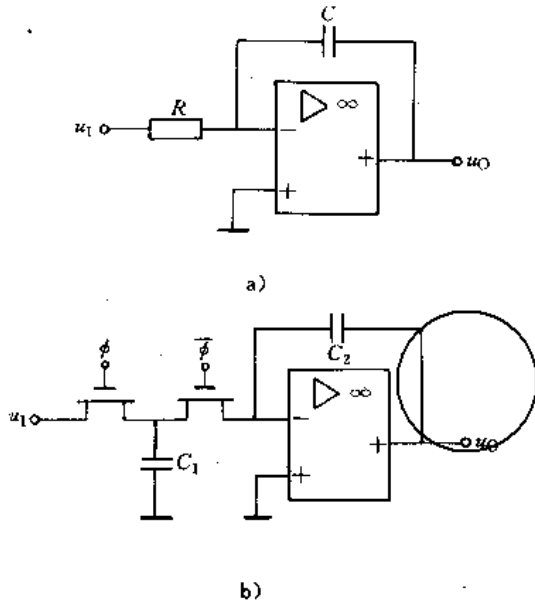


图 3-3-36 积分器

a) RC 有源积分器 b) SC 积分器

其他常用的几种 SC 积分器见表 3-3-9。

3. 开关电容比例器和延时器 图 3-3-37 是常用的 SC 比例器。当输入信号为采样-保持信号时,可直接采用图 3-3-37a 电路,当输入信号为连续信号时,常采用图 3-3-37b 电路。

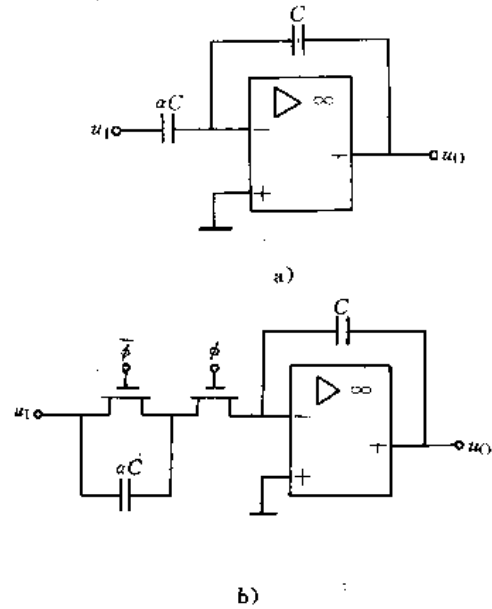


图 3-3-37 常用的 SC 比例器

a) SC 比例器之一 b) SC 比例器之二

图 3-3-38 为 SC 延时电路。其中图 3-3-38a 的电路延时为 $T/2$, 图 3-3-38b 的延时为 T 。

表 3-3-9 几种 SC 积分器

| 名称 | 电路图 | 输入、输出关系 |
|----------|-----|------------------------------------|
| SC 反相积分器 | | $u_0 = -\frac{f_c}{j\omega} a u_1$ |
| SC 同相积分器 | | $u_0 = \frac{f_c}{j\omega} a u_1$ |



(续)

| 名称 | 电路图 | 输入、输出关系 |
|----------|-----|------------------------------------------------------------------------------------------|
| SC 差压积分器 | | $u_O = -\frac{f_c}{j\omega} a(u_{11} - u_{12})$ |
| SC 有耗积分器 | | $u_O = -u_1 / \left(\frac{\alpha_2}{\alpha_1} + j\omega \frac{1}{\alpha_1 f_c} \right)$ |

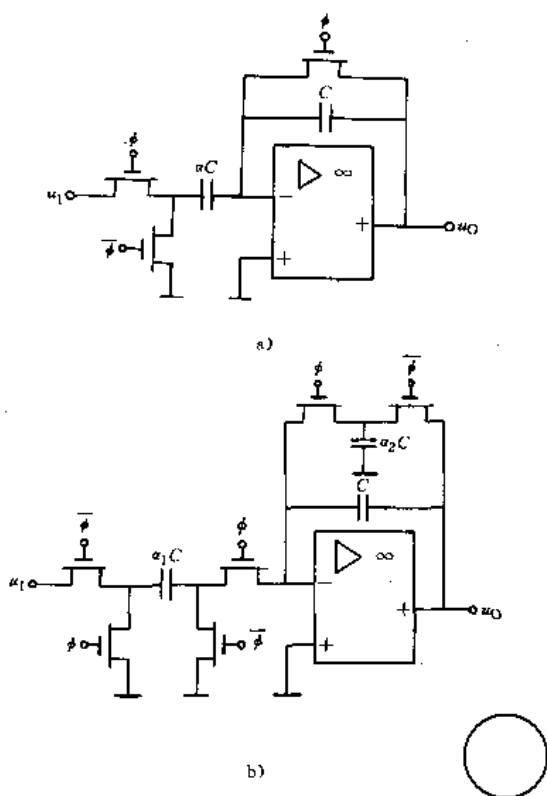


图 3-3-38 SC 延时电路

a) 延时 $T/2$ 的电路 b) 延时 T 的电路

8.2 开关电容的应用电路

1. SC 滤波器 参见本篇第 4 章 3.3 节。

2. SC 非滤波器应用 SCN 的非滤波器应用主要有放大器、振荡器、A/D 和 D/A 转换器、锁相环、平

衡调制器、峰值检波器、整流器等。下面列举几例：

a. SC 放大器 图 3-3-39 是具有输入失调电压补偿的 SC 放大器。设集成运算放大器的输入失调电压为 U_{10} ，当 $\phi_1 = 1, \phi_2 = 0$ 时，集成运算放大器构成跟随器， $u_O = U_{10}$ ， C 和 αC 上的电压均为 U_{10} 。当 $\phi_1 = 0, \phi_2 = 1$ 时， αC 上的电压为 $U_{10} - u_1$ ， C 上的电压为 $U_{10} - u_O$ 。在 nT 时刻的电荷守恒方程为

$$C[U_{10} - u_O(nT)] - CU_{10} + \alpha C[U_{10} - u_1(nT)] - \alpha CU_{10} = 0$$

则 $u_O(nT) = -\alpha u_1(nT)$

当 $\alpha > 1$ 时，电路具有放大功能，且输出中消除了 U_{10} 的影响。

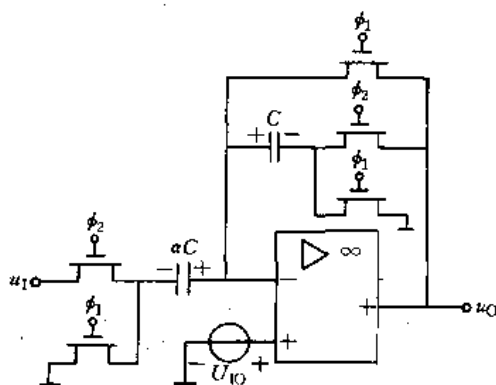


图 3-3-39 SC 放大器

b. SC 振荡器 图 3-3-40a 是一种 SC 振荡器的电路原理图，由积分器和比较器构成。图 3-3-40b 是其波形图。当 $\alpha_1 \ll \alpha_2$ 和电源电压 $U_{SS} = -U_{DD}$ 时，输出方波



频率为 $f_o = \frac{\alpha_2}{4\alpha_1} f_c$

c. SC 数-模转换器 图 3-3-41 是 SC 数-模转换器原理图，输出电压

$$u_o = U_{REF} \sum_{i=1}^n d_i 2^{-i} \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$

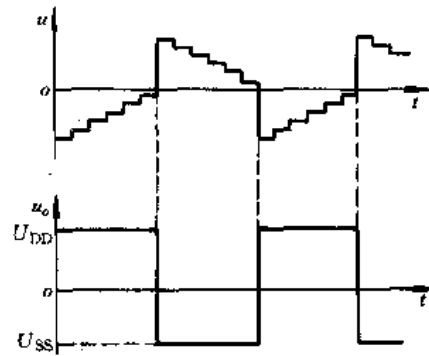
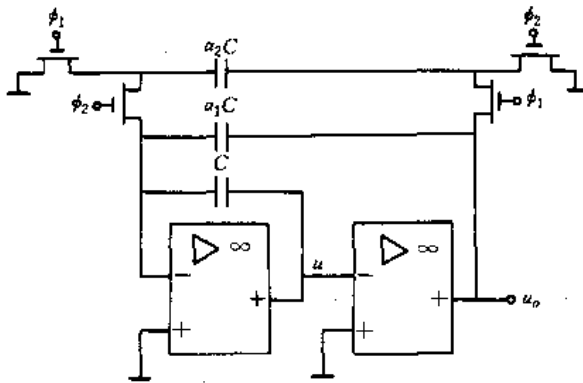


图 3-3-40 SC 采样器
a) 电路原理图 b) 波形图

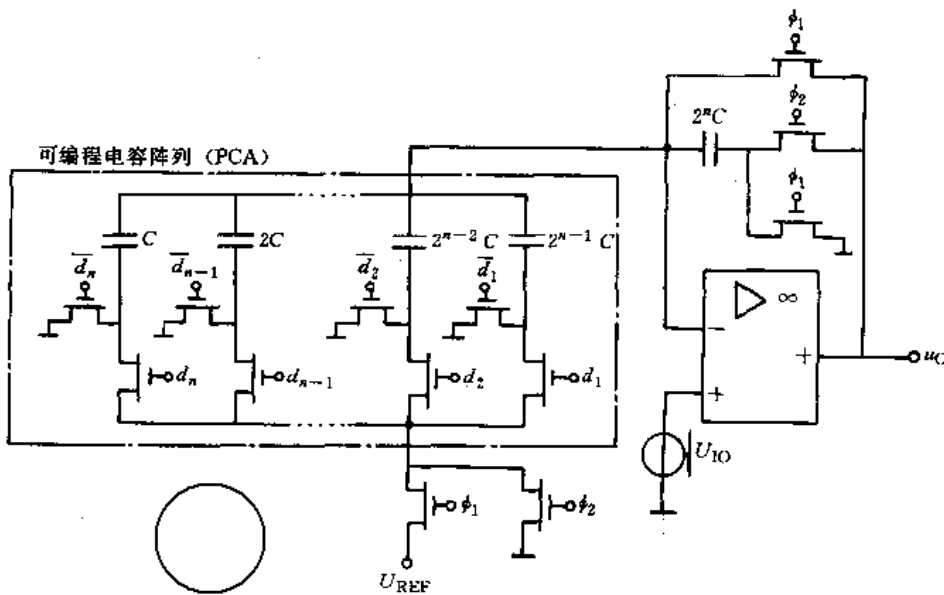


图 3-3-41 SC 数-模转换器原理图

d. SC 锁相环 简单的 SC 锁相环原理图见图 3-3-42，它适于正弦波和三角波。图中压控振荡器 VCO（也可用 SC 电路构成）的输出即为开关驱动脉冲。在环路锁定时，对输入信号 u_i 的采样时刻和采样值不变，因此 u_o 和 VCO 输出频率均不变。若 u_i 的频率有所增加，则采样值也增加，使 u_o 增加，VCO 输出频率也增加，以保证环路锁定。

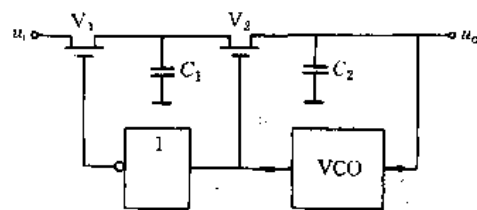


图 3-3-42 SC 锁相环原理图



第4章 模拟信号的运算与处理

1 运算电路

用集成运算放大器可构成各种模拟运算电路。集成运算放大器越接近理想型,运算精度就越高。运算电路的参数选择除满足运算要求外,还应使集成运算放大器的两输入端对地的等效电阻相等。本节主要介绍比例、加法、减法、积分、微分、对数和反对数运算电

路,而乘法和除法运算电路已在本篇第3章5节“集成模拟乘法器”中介绍。

1.1 比例运算电路 (表3.4-1)

1.2 加法和减法运算电路 (表3.4-2)

表3.4-1 比例运算电路

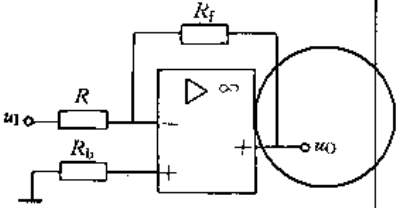
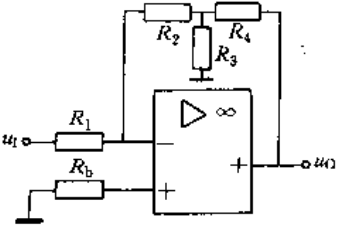
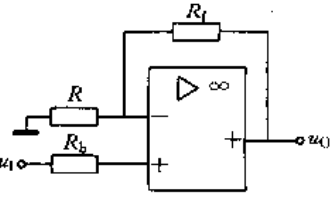
| 名称 | 原理电路 | 输入、输出关系 | 主要特点 |
|------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 反相比例 (基本电路) |  $R_b = RR_f / (R + R_f)$ | $u_o = -\frac{R_f}{R} u_1$ | $\left \frac{u_o}{u_1} \right $ 可 ≥ 1 , 也可 < 1 ; 当 $R_f = R$ 时, $u_o = -u_1$, 称反相器; 反相输入端为“虚地”; 输入电阻 $R_i \approx R$ |
| 反相比例 (T型反馈网络) |  $R_b = R_1 \left(R_2 + \frac{R_3 R_4}{R_3 + R_4} \right) / \left(R_1 + R_2 + \frac{R_3 R_4}{R_3 + R_4} \right)$ | $u_o = - \left(\frac{R_2 + R_4}{R_1} + \frac{R_2 R_4}{R_1 R_3} \right) u_1$ | 可用小的 R_2, R_3, R_4 得到大的等效电阻 R_f , 在高增益时, R_1 仍可取较大值, 提高了电路的输入电阻 |
| 同相比例 |  $R_b = RR_f / (R + R_f)$ | $u_o = \left(1 + \frac{R_f}{R} \right) u_1$ | 输入电阻很高; $\frac{u_o}{u_1} \geq 1$, 当 $R_f = 0, R = \infty$ 时, $u_o = u_1$, 称电压跟随器; 集成运算放大器的共模电压等于输入电压, 对共模抑制比要求较高 |



表 3-4-2 加法和减法运算电路

| 名称 | 原理电路 | 输入、输出关系 | 主要特点 |
|---------|------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| 反相加法 | | $u_o = -R_f \left(\frac{u_{i1}}{R_1} + \frac{u_{i2}}{R_2} + \dots + \frac{u_{iN}}{R_N} \right)$ | 改变 R_1, R_2, \dots, R_N 中的一个时, 只影响本项的比例系数, 调节方便 |
| 同相加法 | | $u_o = \left(1 + \frac{R_f}{R} \right) R_x \times \left(\frac{u_{i1}}{R_1} + \frac{u_{i2}}{R_2} + \dots + \frac{u_{iN}}{R_N} \right)$ $R_x = R_1 // R_2 // \dots // R_N$ | 改变 R_1, R_2, \dots, R_N 中的一个时, 会影响其它各项的比例系数, 调节不便 |
| 减法(单运放) | | $u_o = \frac{R_f}{R} (u_{i2} - u_{i1})$ | 也称基本差分放大电路。 $R_f = 2R$, 当要求增益较高时, 因 R_f 取值的限制, R 不可能太高 |
| 减法(双运放) | | $u_o = \left(1 + \frac{R_4}{R_3} \right) (u_{i2} - u_{i1})$ $\left(\text{当 } \frac{R_1}{R_2} = \frac{R_4}{R_3} \right)$ | 也称同相串联差分放大电路。输入电阻很高 |
| 减法(双运放) | | $u_o = \frac{R_1}{R_3} (u_{i2} - u_{i1})$ $\left(\text{当 } R_5 = R_3, R_1 = R_2 \right)$ | 也称反相串联差分放大电路。 u_{i1}, u_{i2} 均从反相端输入, 输入端不存在共模信号 |



(续)

| 名称 | 原理电路 | 输入、输出关系 | 主要特点 |
|--------|------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| 加 减 | | $u_o = \left(\frac{u_{11}}{R_1} + \frac{u_{12}}{R_2} - \frac{u_{13}}{R_5} \right) R_5$ <p>(当 $R_3 = R_4$)</p> | 由两级反相加法电路组成 |

1.3 积分和微分运算电路

积分电路的输出电压与输入电压的积分成比例。基本的积分电路是反相积分电路和同相积分电路。积分电路可将输入阶跃电压转换为随时间线性增加的输

出电压,或将输入方波转换为三角波输出,也可将输入正弦波移相 90°等。积分电路还有求和积分电路、差分积分电路和比例积分电路等。

微分电路的输出电压与输入电压的微分成比例。几种积分和微分运算电路见表 3-4-3。

表 3-4-3 积分和微分运算电路

| 名称 | 原理电路 | 输入、输出关系 |
|------|------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| 反相积分 | | $u_o = -\frac{1}{RC} \int u_i dt$ |
| 同相积分 | | $u_o = \frac{2}{RC} \int u_i dt$ |
| 求和积分 | | $u_o = -\frac{1}{C} \int \left(\frac{u_{11}}{R_1} + \frac{u_{12}}{R_2} \right) dt$ |
| 差分积分 | | $u_o = \frac{1}{RC} \int (u_{12} - u_{11}) dt$ |

此星公司制作 请尊重作者版权



(续)

| 名称 | 原理电路 | 输入、输出关系 |
|-----------------|------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 比例积分 | | $u_O = - \left(\frac{R_f}{R} u_1 + \frac{1}{RC} \int u_1 dt \right)$ |
| 微分 (基本电路) | | $u_O = - RC \frac{du_1}{dt}$ |
| 差分微分 | | $u_O = RC \frac{d(u_{12} - u_{11})}{dt}$ |
| 比例微分 | | $u_O = - \left(\frac{R_f}{R} u_1 + R_f C \frac{du_1}{dt} \right)$ |
| 比例积分微分 (PID) | | $u_O = - \left[\left(\frac{R_2 + R_3}{R_1} + \frac{R_3 C_2}{R_1 C_1} \right) u_1 + \frac{1}{R_1 C_1} \int u_1 dt + \frac{R_2 R_3 C_2}{R_1} \frac{du_1}{dt} \right]$ |

1.4 对数和反对数运算电路

对数和反对数运算电路分别对输入信号实现对数和指数运算。它们是根据二极管的PN结电压-电流方程〔见式(3·1-1)〕和三极管的集电极电流方程 $I_C \approx$

$I_S e^{U_{BE}/U_T}$ (I_S 为发射结反向饱和电流) 为其实现原理。基本电路见表 3·4-4。

集成化对数和反对数运算电路主要用于乘、除、开方和平方等运算,也可用来构成锯齿波、阶梯波产生电路。

电子工业出版社



表 3-4-4 基本的对数和反对数运算电路

| 名称 | 原理电路 | 输入、输出关系① |
|----|------|---------------------------------------------|
| 对 | | $u_0 \approx -U_T \ln \frac{u_1}{I_S R}$ |
| 数 | | $u_0 \approx -U_T \ln \frac{u_1}{I_S R}$ |
| 反 | | $u_0 = -I_S R e^{-u_1/U_T}$ |
| 数 | | $u_0 = I_S R e^{-u_1/U_T}$ ($u_1 < 0$) |

① U_T 和 I_S 参见式 (3-1-1)。

2 精密放大电路

2.1 概述

精密放大就是把较小的甚至是微弱的信号按一定的倍数精确地放大,要求放大电路误差小、稳定性好、抗干扰能力强、噪声小。

放大电路产生误差的主要原因有:

(1) 元器件性能不理想。如实际集成运算放大器并非理想型,其开环电压放大倍数、共模抑制比等并非为无穷大,失调电压、失调电流等也不等于零,且随温度而变,这些对放大电路的闭环电压放大倍数的精度都产生影响。电阻器的实际阻值与标称值之间存在误差,且随温度变化。有的电阻器存在电感效应和电容效应,在频率较高时也会影响精度。

(2) 电源电压的不稳定和信号源内阻大小的影响。

(3) 连接导线存在电阻,电路布线引起的线间电容效应和互感效应等。

(4) 工作环境条件(如环境温度)的变化。

(5) 干扰和噪声。

提高放大电路精度的一般方法是:

(1) 合理选择元器件。如选用低温漂、低噪声、高增益、高共模抑制比的高精度集成运算放大器和精密电阻器(如精密金属膜电阻、精密线绕电阻和精密合金箔电阻等)。

(2) 精心设计放大电路,充分发挥元器件的性能,并补偿某些性能的不足。精心安装和调试放大电路。

(3) 采用高稳定度的直流电源,改善放大电路的工作环境(如减小温度的变化等)。

(4) 抑制干扰和噪声。

2.2 高性能通用测量放大电路

测量放大器的作用是将各种传感器(如应变片、热电偶、光电器件等)的输出信号放大到所需的幅度。在测量某些非电量(如压力、温度、位移等)时,传感器的输出信号很微弱,内阻却较大,信号频率很低(甚至是直流),且传感器与放大器之间的连线一般较长。因此要求采用输入阻抗高、动态范围宽、共模抑制比高、性能稳定的高增益测量放大电路。

1. 精密差分放大电路 图 3-4-1 是常用的三集成运算放大器差分放大电路,电路采用平衡对称结构,差模电压增益

$$A_{ud} = \frac{u_0}{u_{11} - u_{12}} = - \left(1 + \frac{2R_1}{R_2} \right) \frac{R_6}{R_4}$$

实用中常取 $R_4 = R_6$, 此时 $A_{ud} = - (1 + 2R_1/R_2)$, 且 R_2 用可调电阻,使增益可调。

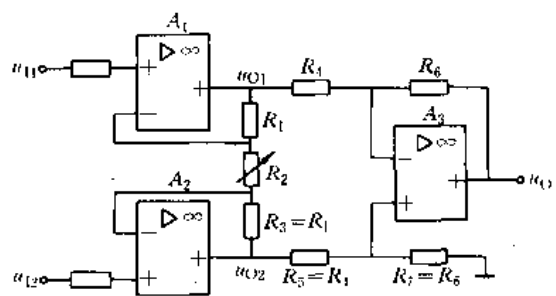


图 3-4-1 三集成运算放大器差分放大电路

上述电路能对两输入信号的差值进行放大,具有输入电阻大、增益调节方便、共模抑制比高、电路中的电阻无需精密匹配和通用性强等一系列特点。其输入可直接与测量电桥相连接。一些专用测量放大器或仪



用放大器集成组件就是以此电路原理设计的，其增益调节电阻 R_2 采用外接，使用十分方便。

2. 减小温漂的放大电路 在放大微弱（如微伏数量级）信号时，除要解决提高输入电阻和共模抑制比问题外，另一重要问题是如何抑制漂移。一般而言，除了选择漂移小，电源电压抑制比大的集成运算放大器和采用高稳定度直流电源以外，常采用阻容耦合放大电路、调制型放大电路和温度补偿措施等，以抑制温漂。

图 3-4-2 是阻容耦合放大电路，用于放大一定频率的交流信号。 C_1 和 C_2 的容量应足够大，漏电应尽量小，在给定频率的输入信号下，它们的容抗应分别远小于 R 和 R_L 的阻值。电路的交流电压增益

$$A_u = -\frac{R_f}{R}$$

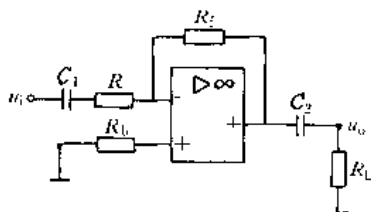


图 3-4-2 阻容耦合放大电路

若在图 3-4-1 电路的前置级 (A_1 和 A_2) 的输出端与输出级 (A_3) 的输入端之间接入耦合电容，便构成高输入电阻、高共模抑制比和低漂移的交流放大电路。

对缓慢变化的微弱信号可采用调制型直流放大电路，图 3-4-3 是其原理示意图。它由调制器、解调器

(调制和解调在本篇第 8 章介绍)、振荡器(用来产生方波脉冲)和交流放大电路等组成。调制器和解调器中的电子开关 S_1 和 S_2 受方波脉冲控制而同步通断。调制器将直流信号转换成交流信号，经交流放大电路放大后，再由解调器将放大的交流信号复原为直流信号。这样由于接入耦合电容，使漂移得到抑制。

采用温度补偿也是抑制温漂的一般方法。此外，若将精密放大电路放在恒温装置中可大大减小漂移。

2.3 干扰和噪声的抑制措施

干扰和噪声是一些杂乱无规则的无用信号。当需要放大的信号越微弱，所需放大电路的灵敏度就越高，干扰和噪声的影响就越大。当干扰和噪声的大小可与有用信号相比较时，输出有用信号将被淹没，或有用信号与干扰噪声难以分辨而影响有用信号的检测。因此抑制干扰和噪声成为高灵敏度放大电路的重要问题。

1. 干扰及其抑制措施 干扰是外界电磁场对放大电路的影响造成的，常见的干扰源有：

- (1) 由高压输电线、旋转电机、开关设备、电力机车、发动机点火装置、电焊机、荧光灯、霓虹灯和雷电等产生的放电现象(电晕、辉光、弧光和火花放电)所造成的干扰。
- (2) 工频输电线路和电源线产生的工频干扰。
- (3) 无线电设备辐射和电磁波造成干扰。
- (4) 大功率电子装置、脉冲电路、高频加热设备的高频振荡器等产生的电脉冲造成干扰。

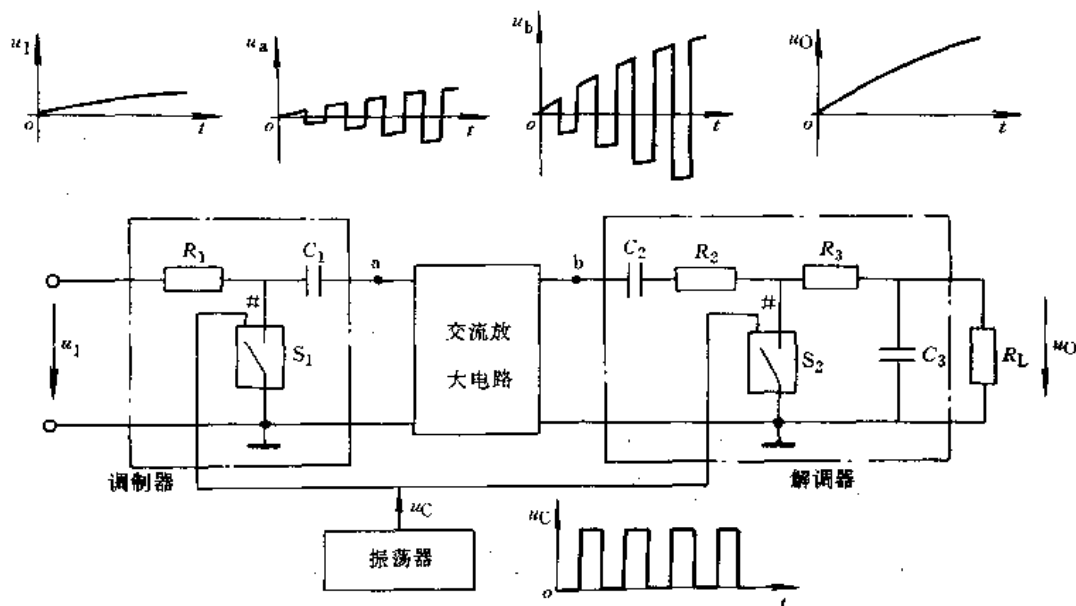


图 3-4-3 调制型直流放大电路原理示意图



干扰源产生的干扰波可通过空间辐射、静电电容耦合、互感耦合、共阻抗耦合和连接导线(主要是电源线及信号输入线)传播等方式,使电子设备受到干扰。

此外,电路的布局、安装不合理将引起不同信号的感应或耦合,也会造成干扰。

为抑制干扰,通常采用的措施如下:

(1) 用屏蔽。屏蔽就是用低电阻金属材料(如铜)或低磁阻金属材料(如软铁、铁镍合金)做成的屏蔽罩将被保护部分或干扰源罩起来,使干扰信号经接地的屏蔽罩直接入地,它是抑制电磁干扰的基本措施。屏蔽分静电屏蔽和磁场屏蔽两种。静电屏蔽采用导电性能好的材料作屏蔽罩(必须接地),能防止静电场的影响,消除两个电路之间由于分布电容的耦合而产生的干扰。磁场屏蔽能防止磁场干扰,对于高频,应采用导电性能好的材料,对于低频,则用导磁性能好的材料。若屏蔽罩由既是高导电率又是高导磁率的材料(例如铁)做成并接地,则能同时起到静电屏蔽和磁屏蔽两种作用。屏蔽的具体措施可视具体情况确定,例如电源变压器的一次与二次侧之间加屏蔽层,是消除从电源线进入的干扰的方法之一;信号输入线采用屏蔽线可防止输入线引入的干扰。

(2) 加滤波。滤波可有效地抑制通过放大电路输入线或电源线进入的干扰。对放大电路输入线引入的干扰,视信号频率情况,可加低通、高通或带通滤波器。对电源线进入的干扰,可在交流电源的进线与电源变压器之间加电源滤波器。直流电源电压波动引起的干扰也可用滤波方法加以抑制。

(3) 合理布局,正确安装。强电部分(如交流电源)与弱电部分要分开,输入线与输出线要分开,并相隔一定的距离,连接导线不能跨接在集成器件上面。此外,还必须正确安排接地点。

2. 噪声及其抑制措施 噪声是放大电路元器件内部所产生的一些不规则的无用信号。放大电路中的噪声表现为:在消除干扰和寄生振荡以及输入信号等于零时,输出端仍有不规则的信号。噪声的种类有:

(1) 热噪声(也称电阻噪声)。任何电阻即使不与电源相接,其两端也有一定的电压,称热噪声电压,这是由电阻中的电子热运动形成的。电阻的热噪声电压有效值

$$U_n = \sqrt{4kTR\Delta f}$$

式中 k ——波尔兹曼常数 (1.38×10^{-23} J/K);

T ——热力学温度 (K);

R ——电阻值 (Ω);

Δf ——频带宽度 (Hz)。

可见,放大电路中的电阻器、双极型晶体管(存在体电阻)、场效应晶体管(存在沟道电阻)等元件都会产生热噪声。

(2) 散粒噪声。它存在于电子管和半导体双极型管中(场效应管不产生散粒噪声)。在双极型晶体管中,散粒噪声是由内部载流子的随机运动以及电子-空穴对的随机产生及复合形成的。散粒噪声电流

$$I_{ns} = \sqrt{2qI_{AV}\Delta f}$$

式中 q ——电子电荷量 (1.60×10^{-19} C);

I_{AV} ——平均电流 (A);

Δf ——频带宽度 (Hz)。

(3) $\frac{1}{f}$ 噪声。它是一种随频率降低而增大的低频噪声,不仅存在于双极型晶体管、场效应晶体管中,也存在于电阻器、电子管等其它元器件中。在低频时,元器件的噪声主要是 $\frac{1}{f}$ 噪声。

放大电路中噪声的大小通常用噪声系数 N_F 来衡量,它定义为输入端信号噪声比与输出端信号噪声比之高,即

$$N_F = 10 \lg \frac{P_{si}/P_{oi}}{P_{so}/P_{oo}} \quad (\text{dB})$$

式中 P_{si} 和 P_{so} 分别表示输入端和输出端的信号功率; P_{oi} 表示信号源加到放大电路输入端的噪声功率; P_{oo} 表示输出端的噪声功率,它包括信号源带来的噪声和放大电路元器件产生的噪声。

若用输入、输出端的信号电压 U_{si} 、 U_{so} 和噪声电压 U_{oi} 、 U_{oo} 来表示,则

$$N_F = 20 \lg \frac{U_{si}/U_{oi}}{U_{so}/U_{oo}} \quad (\text{dB})$$

N_F 的数值越小,表示放大电路受噪声的影响越小。

抑制噪声的措施如下:

(1) 选用低噪声元器件。如选用精密线绕电阻器和低噪声集成运算放大器等。避免使用高阻值的电阻器。

(2) 加低噪声前置差分放大电路。如选用噪声极微的场效应对管或双极型超 β 对管组成前置差分放大电路。

(3) 加滤波。由于放大电路的频带越宽,噪声系数越大。而有用信号的频率通常在一定范围内,因此在保证有用信号所需频带宽度的条件下,加滤波(限制带宽)可减小噪声。

(4) 采用数据处理技术。利用微型计算机或单片机的存储和运算功能,编制适当的软件,对放大电路的输



出电压多次采样,再取平均值。这样可消除某些偶然噪声或干扰的影响,提高测量和控制系统的可靠性。

3 有源滤波电路

滤波电路的功能是让特定频段的信号顺利地通过,而使其它频段的信号受到抑制或衰减,通常用于信号处理、数据传送和抑制干扰等。

3.1 滤波电路的种类

滤波电路的种类较多,可按不同方法进行分类,见表 3-4-5。

3.2 RC 有源滤波电路

RC 有源滤波电路由电阻、电容和集成运放组成,是目前应用较多的滤波电路。与无源滤波电路(参见第一篇第 5 章 8 节)比较,RC 有源滤波电路具有以下主要优点:

- (1) 不用电感元件,体积小,质量小。

- (2) 输入阻抗高,输出阻抗小,几级串联时一般无需考虑级间阻抗匹配。

- (3) 可得到一定的增益,且增益容易调节。

它的主要缺点是:

- (1) 受集成运放带宽的限制,有源滤波电路通常不适用于高频范围。

- (2) 必须有直流电源提供能量。

- (3) 不适用于高压或大电流的场合。

3.2.1 低通滤波电路

低通滤波电路简称 LPF (Low-Pass Filter),用于信号为低频(或直流)、且需削弱高次谐波或高频干扰和噪声的场合(如电源滤波等)。

几种 LPF 的性能见表 3-4-6。

为使 LPF 的幅频特性更接近理想情况,可将多个二阶或一阶 LPF 级联起来构成高阶 LPF(例如将两个二阶 LPF 级联就是四阶 LPF)。高阶 LPF 也可直接用 RC 网络和集成运放构成。

表 3-4-5 滤波电路的分类

| 分类方法 | 类型名称 | 说明 |
|-----------|---------------------------|-----------------------------------------------|
| 按处理的信号分类 | 模拟滤波电路 | 处理模拟信号 |
| | 数字滤波电路 | 处理数字信号 |
| 按所用元件分类 | 无源滤波电路 | 由无源元件(R、L、C)组成 |
| | 有源滤波电路 | 由无源元件和有源元件组成 |
| 按传递函数形式分类 | 一阶滤波电路 | 传递函数中s的最高指数为1 |
| | 二阶滤波电路 | s的最高指数为2 |
| | 高阶滤波电路 | s的最高指数大于2 |
| 按特性曲线分类 | 巴特沃斯滤波电路 (Butterworth) | 也称最大平坦型滤波电路。幅频特性在通带内最平坦,但从通带到阻带过渡较慢 |
| | 切比雪夫滤波电路 (Chebyshev) | 也称纹波型滤波电路。通带内有一定纹波,但从通带到阻带过渡较快 |
| | 贝塞尔滤波电路 (Bessel) | 也称线性相位型滤波电路。相位移与频率基本成正比,且小于前两种,幅频特性无纹波,但平坦区较小 |
| 按滤波功能分类 | 低通滤波电路 | 允许低频(或直流)信号通过 |
| | 高通滤波电路 | 允许高频信号通过 |
| | 带通滤波电路 | 允许一定频段的信号通过 |
| | 带阻滤波电路 | 抑制一定频段的信号 |
| | 全通滤波电路 | 各种频率的信号均能通过,但相位移随频率而变 |



表 3·4-6 几种低通滤波电路

| 名称 | 一阶 LPF | 二阶 LPF | |
|----------|------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| | | 压控电压源型 | 无限增益多路反馈型 |
| 基本电路 | | | |
| 通带电压放大倍数 | $A_{up} = 1 + \frac{R_1}{R}$ | $A_{up} = 1 + \frac{R_1}{R_1}$ | $A_{up} = -\frac{R_1}{R_1}$ |
| 特征频率 | $\omega_0 = \frac{1}{RC}$ | $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{R_2 R_3 C_1 C_2}}$ | $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{R_2 R_1 C_1 C_2}}$ |
| 品质因数 | — | $Q = \frac{\sqrt{R_2 R_3 C_1 C_2}}{(R_2 + R_3)C_2 + R_2 C_1 (1 - A_{up})}$ | $Q = \frac{R_1 \sqrt{R_2 R_1 C_1}}{(R_2 R_1 + R_1 R_1 + R_1 R_2) \sqrt{C_2}}$ |
| 传递函数 | $A_u(s) = \frac{\omega_0 A_{up}}{s + \omega_0}$ | $A_u(s) = \frac{\omega_0^2 A_{up}}{s^2 + s \frac{\omega_0}{Q} + \omega_0^2}$ | |
| 频率特性表达式 | $A_u = \frac{A_{up}}{1 + j \frac{\omega}{\omega_0}}$ | $A_u = \frac{A_{up}}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2 + j \frac{\omega}{Q \omega_0}}$ | |
| 幅频特性曲线 | | | |
| 主要特点 | 电路简单, 但特性差, 在 $\omega \gg \omega_0$ 时衰减慢 (-20dB/十倍频) | 不同 Q 值有不同特性, 在 Q 值适当时, 通带内特性较接近理想特性; 在 $\omega \gg \omega_0$ 时, 衰减为 -40dB/十倍频 集成运放和电阻 R_1, R_1 组成电压控制电压源, 故得名。调 A_{up} 不影响 ω_0 , 若按比例改变 R_2, R_3 而调 ω_0 , 不影响 Q; 要求 $A_{up} < 3$, 否则自激 由 R_1 和 C_2 构成两个反馈支路, 集成运放视为无限增益(理想)的放大环节, 故得名。电路不会因 A_{up} 过大而自激, 调整较复杂 | |

电子工业出版社 请尊重作者版权



3.2.2 高通滤波电路

高通滤波电路简称HPF (High-Pass Filter), 用于信号为高频、且需削弱低频(或直流)的场合(如交流信号的耦合等)。

HPF 和 LPF 的幅频特性、电路结构具有对偶关系。将 LPF 中起滤波作用的电阻和电容的位置对调就构成相应的 HPF。几种 HPF 见表 3.4-7。

高阶 HPF 的构成方法与高阶 LPF 类似。

表 3.4-7 几种高通滤波电路

| 名称 | 一阶 HPF | 二阶 HPF | |
|----------|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| | | 压控电压源型 | 无限增益多路反馈型 |
| 基本电路 | | | |
| 通带电压放大倍数 | $A_{up} = 1 + \frac{R_f}{R_1}$ | $A_{up} = 1 + \frac{R_1}{R_1}$ | $A_{up} = -\frac{C_1}{C_3}$ |
| 特征频率 | $\omega_0 = \frac{1}{RC}$ | $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{R_2 R_3 C_1 C_2}}$ | $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{R_1 R_2 C_2 C_3}}$ |
| 品质因数 | — | $Q = \frac{\sqrt{R_2 R_3 C_1 C_2}}{R_1(C_1 + C_2) + R_3 C_2(1 - A_{up})}$ | $Q = \sqrt{\frac{R_2}{R_1} \frac{\sqrt{C_2 C_3}}{C_1 + C_2 + C_3}}$ |
| 传递函数 | $A_u(s) = \frac{sA_{up}}{s + \omega_0}$ | $A_u(s) = \frac{s^2 A_{up}}{s^2 + \frac{\omega_0}{Q}s + \omega_0^2}$ | |
| 频率特性表达式 | $A_u = \frac{A_{up}}{1 - j\frac{\omega_0}{\omega}}$ | $A_u = \frac{A_{up}}{1 - \left(\frac{\omega_0}{\omega}\right)^2 - j\frac{\omega_0}{Q\omega}}$ | |
| 幅频特性曲线 | | | |



(续)

| 名称 | 一阶 HPF | 二阶 HPF | |
|------|----------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| | | 压控电压源型 | 无限增益多路反馈型 |
| 主要特点 | 电路简单, 但特性差, 在 $\omega \ll \omega_0$ 时, 特性曲线的斜率为 20dB/十倍频 | 不同 Q 值有不同的特性; 在 Q 值适当时, 通带内特性较接近理想特性; 在 $\omega \ll \omega_0$ 时, 特性曲线斜率为 40dB/十倍频 | |
| | | A_{up} 和 ω_0 的调整互不影响, 若按比例改变 R_2, R_3 值来调整 ω_0 , 则不影响 Q 值, 因此调整方便。但要求 $A_{up} < 3$, 否则产生自激 | 可通过改变 C_1, C_3 调整 A_{up} ; 若按比例改变 R_1, R_2 调整 ω_0 , 则不影响 A_{up} 和 Q |

3.2.3 带通滤波电路

带通滤波电路简称 BPF (Bandpass Filter), 用于需突出有用频段的信号, 削弱其余频段的信号 (或干扰) 和噪声的场合 (如载波通信、信号的提取等)。

常用的 BPF 见表 3.4-8。

3.2.4 带阻滤波电路

带阻滤波电路简称 BEF (Band-Elimination Filter), 主要用来滤去某一频段的信号和抑制干扰等。

常用的 BEF 见表 3.4-9。

表 3.4-8 常用的带通滤波电路

| 名称 | 压控电压源 BPF | 无限增益多路反馈 BPF |
|-------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 基本电路 | | |
| 通带电压放大倍数 | $A_{up} = \frac{1 + \frac{R_4}{R_1}}{1 + \frac{2R_1}{R_3} - \frac{R_1 R_2}{R_2 R_4}}$ | $A_{up} = \frac{R_3 C_2}{R_1 (C_1 + C_2)}$ |
| 特征频率 (中心频率) | $\omega_0 = \sqrt{\frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2 R_3 C^2}}$ | $\omega_0 = \sqrt{\frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2 R_3 C_1 C_2}}$ |
| 品质因数 | $Q = \frac{\sqrt{R_1 R_2 R_3 (R_1 + R_2)}}{2R_1 R_2 + R_2 R_3 - \frac{R_1 R_3 R_1}{R_4}}$ | $Q = \frac{\sqrt{(R_1 + R_2) R_3}}{\sqrt{R_1 R_2} \left(\sqrt{\frac{C_1}{C_2}} + \sqrt{\frac{C_2}{C_1}} \right)}$ |
| 传递函数 | $A_u(s) = \frac{s \omega_0 A_{up}}{s^2 + s \frac{\omega_0}{Q} + \omega_0^2}$ | |
| 频率特性表达式 | $A_u = \frac{A_{up}}{1 + jQ \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)}$ | |



(续)

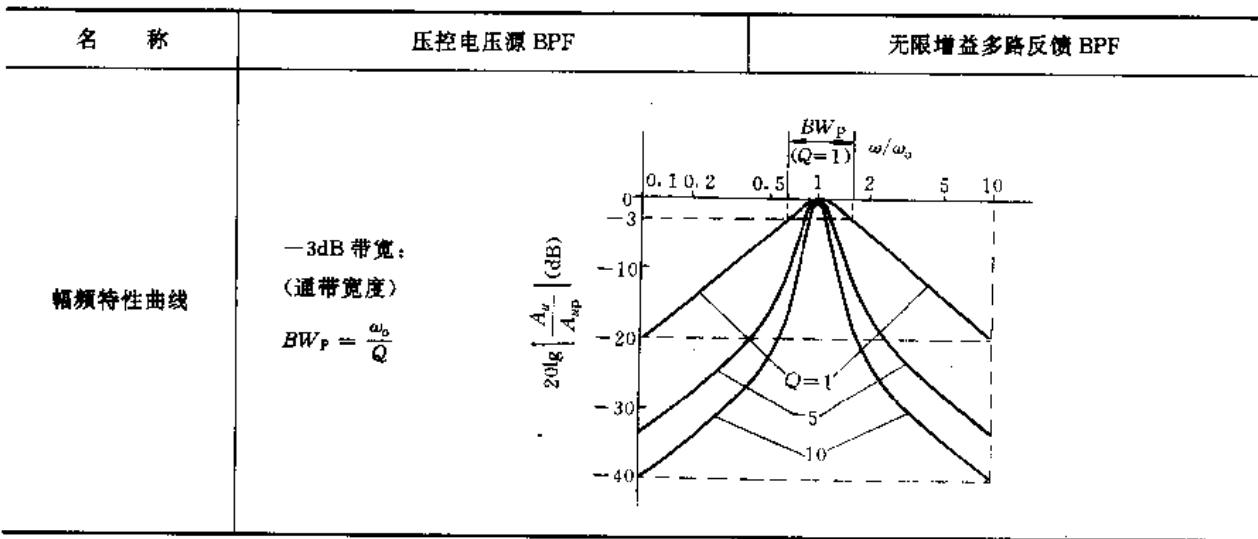
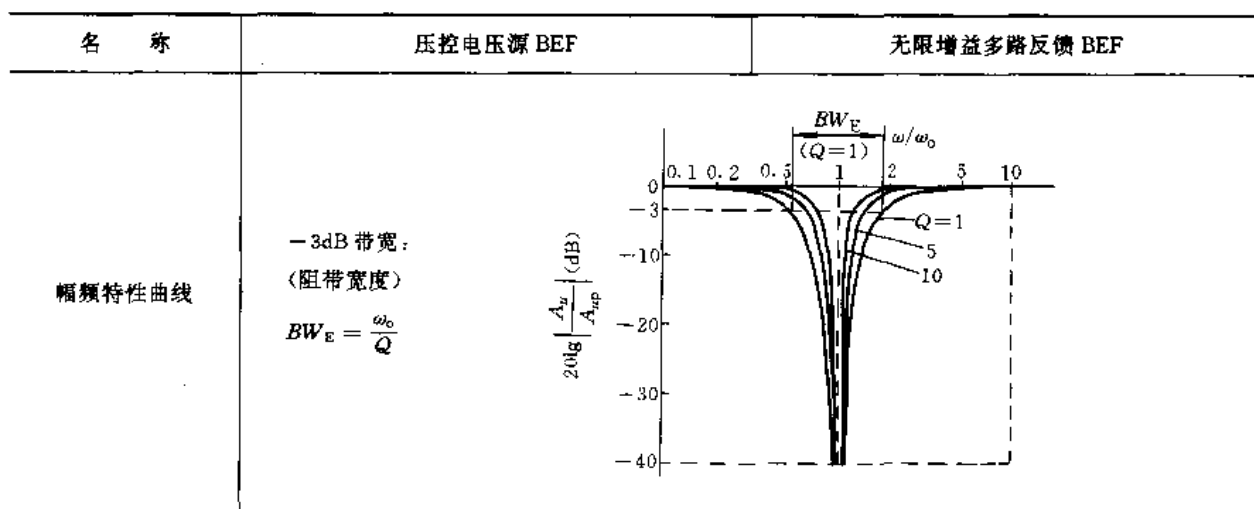


表 3-4-9 常用的带阻滤波电路

| 名称 | 压控电压源 BEF | 无限增益多路反馈 BEF |
|----------------|----------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|
| 基本电路 | | |
| 通带电压放大倍数 | $A_{sp} = 1 + \frac{R_1}{R_1}$ | $A_{sp} = -\frac{R_5}{R_4} = -\frac{R_3 R_5}{2R_1 R_6}$ |
| 特征频率 (中心频率) | $\omega_0 = \frac{1}{RC}$ | $\omega_0 = \frac{1}{C} \sqrt{\frac{1}{R_3} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)}$ |
| 品质因数 | $Q = \frac{1}{2(2 - A_{sp})}$ | $Q = \frac{1}{2} \sqrt{R_3 \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)}$ |
| 传递函数 | $A_u(s) = \frac{(s^2 + \omega_0^2) A_{sp}}{s^2 + s \frac{\omega_0}{Q} + \omega_0^2}$ | |
| 频率特性表达式 | $A_u = \frac{A_{sp}}{1 + j \frac{1}{Q} \frac{\omega \omega_0}{\omega_0^2 - \omega^2}}$ | |



(续)



3.3 开关电容滤波器

开关电容滤波器简称 SCF (Switched-Capacitor Filter)，它是开关电容网络最早的应用领域，并首先集成化、系列化、商品化。器件类型有低通、高通、带通、带阻和可编程滤波器等。但限于 MOS 运放的工作频率，SCF 主要应用在音频范围。

利用 SC 等效电阻取代 RC 滤波电路中的电阻，就可得到对应的 SCF。图 3.4-4a 是一阶 RC 低通网络，若用串联 SC 等效电阻取代电阻 R，便得对应的 SC 低通网络，见图 3.4-4b。对于图 3.4-4a，在很短的时间区间 $t_1 \sim t_2$ 内，通过电阻 R 传送的电荷量为

$$\Delta Q = \int_{t_1}^{t_2} i(t) dt \approx \frac{u_1(t_2) - u_0(t_1)}{R} (t_2 - t_1)$$

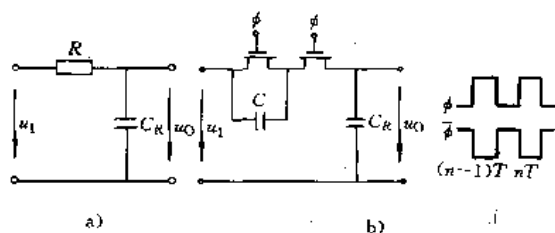


图 3.4-4 一阶 RC 低通网络和对应的 SC 电路

a) 一阶 RC 低通网络 b) 对应的 SC 电路

图 3.4-4b 电路在 $(n-1)T$ 到 nT 内传送的电荷量为

$$\Delta Q' = \frac{CC_R}{C + C_R} [u_1(nT) - u_0(nT - T)]$$

若使 $(n-1)T$ 和 nT 分别与 t_1 和 t_2 对应，且两电路传送的电荷量相等，则图 3.4-4b 所示 SC 网络的等效电阻为

$$R = T \left(\frac{1}{C} + \frac{1}{C_R} \right)$$

可见，它与本篇第 3 章 8.1 节所介绍的两端由电压源驱动时的等效电阻 T/C 有所不同，只有当 $C_R \gg C$ 时才相等。实际上，对并联和其他许多 SC 等效电阻都存在这个问题。因此对精度要求较高的滤波电路，要考虑等效的近似问题，对一般精度要求不高的 RC 有源滤波电路，可用 SC 等效电阻取代其中的电阻。

图 3.4-5 是简单的一阶 RC 有源低通滤波电路和对应的 SCF。

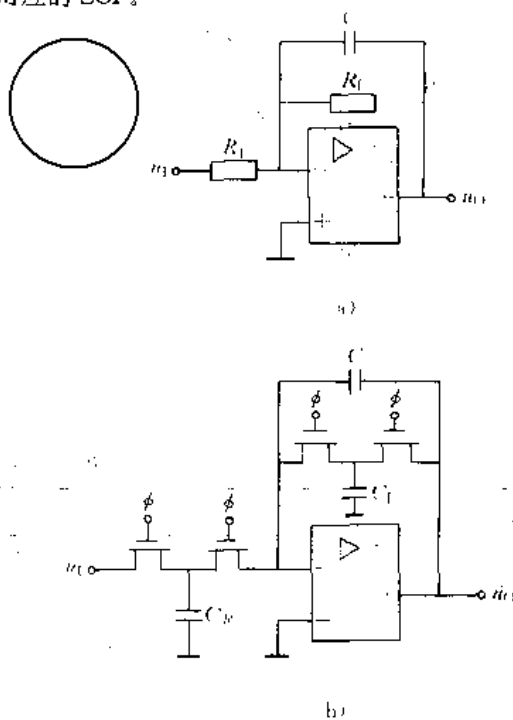


图 3.4-5 一阶 RC 有源 LPF 和对应的 SCF

a) 一阶 RC 有源 LPF b) 对应的 SCF

SCF 的构成方法很多，但大体上可分为两大类。



一类是以现有的模拟滤波器作为原型,经过适当的变换而得到 SCF。根据变换方法的不同,这类 SCF 有跳耦型、双线性变换型和 LDI(无损耗离散积分器)变换型等。另一类是根据滤波器的 Z 域传递函数直接设计

出 SCF。

图 3·4-6a 是一个 RC 有源二阶 BPF,若采用双线性开关电容结构直接取代电阻,则得对应的 SC 二阶 BPF,见图 3·4-6b。

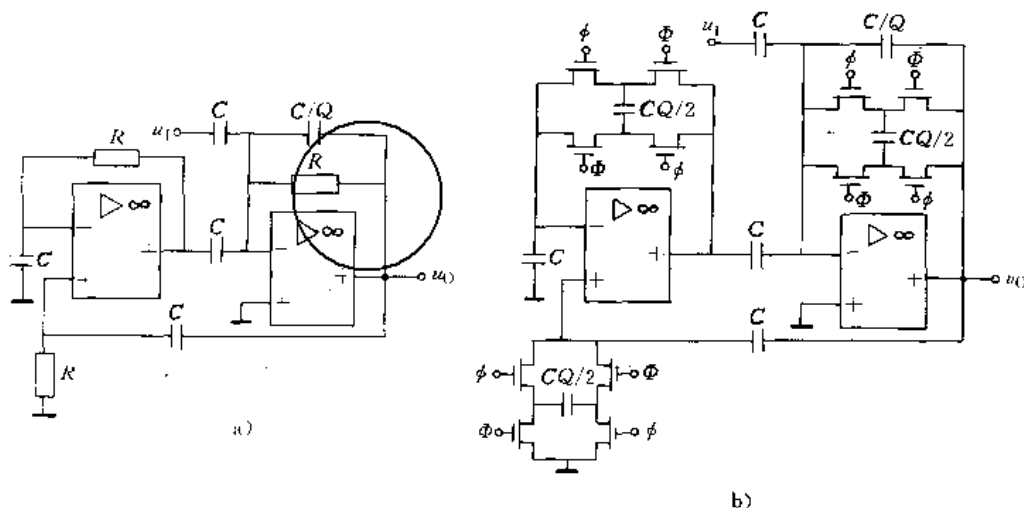


图 3·4-6 RC 有源二阶 BPF 和对应的 SC 二阶 BPF
a) RC 有源二阶 BPF b) 对应的 SC 二阶 BPF

第 5 章 门电路和组合逻辑电路

门电路是数字电子电路(简称数字电路)的基本逻辑单元。数字电路处理的是数字信号——在时间上和数值上都是离散的信号。数字电路通常分为组合逻辑电路和时序逻辑电路两大类。在组合逻辑电路中,任何时刻的输出信号仅取决于该时刻的输入信号,而与输入信号作用以前电路的原来状态无关。

1 逻辑代数

逻辑代数又称布尔(Boole)代数,它是按一定逻辑规律进行运算的代数,是研究逻辑电路的一种数学

工具。逻辑代数用字母表示变量(逻辑变量),变量只有两个值,即 0(逻辑零)和 1(逻辑壹),而没有中间值。0 和 1 表示两种对立的逻辑状态。

1.1 基本逻辑运算

逻辑代数中,有与、或、非三种基本逻辑运算,见表 3·5-1。

1.2 逻辑代数的基本公式

逻辑代数的基本公式见表 3·5-2。

表 3·5-1 基本逻辑运算

| 名称 | 逻辑表达式 | 变量取值后的运算结果 | 所表达的逻辑关系 |
|--------------|-------------------|--------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|
| 与运算 (逻辑乘) | $Y = A \cdot B$ ① | $0 \cdot 0 = 0$ $0 \cdot 1 = 0$ $1 \cdot 0 = 0$ $1 \cdot 1 = 1$ | 与逻辑:只有当一件事情的几个条件全部具备之后,这件事才发生 |
| 或运算 (逻辑加) | $Y = A + B$ ② | $0 + 0 = 0$ $0 + 1 = 1$ $1 + 0 = 1$ $1 + 1 = 1$ | 或逻辑:一件事情的几个条件中,只要有一个条件得到满足,这件事就会发生 |



(续)

| 名称 | 逻辑表达式 | 变量取值后的运算结果 | 所表达的逻辑关系 |
|--------------|---------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 非运算 (逻辑非) | $Y = \bar{A}$ | $\bar{0} = 1$ $\bar{1} = 0$ | 非逻辑：一件事情的发生以其相反的条件为依据，即结果和条件相反 |

① 多变量时 $Y = A \cdot B \cdot C \cdot \dots$

② 多变量时 $Y = A + B + C + \dots$

表 3-5-2 逻辑代数的基本公式

| 名称 | 公 式 | | |
|---------------|----------------------------------------------------------------------------------|---------------------|---------------------|
| 基本定律 | 逻辑加 | 逻辑乘 | 逻辑非 |
| | $A+0=A$ | $A \cdot 0=0$ | $A+\bar{A}=1$ |
| | $A+1=1$ | $A \cdot 1=A$ | $A \cdot \bar{A}=0$ |
| | $A+A=A$ | $A \cdot A=A$ | $\bar{\bar{A}}=A$ |
| | $A+\bar{A}=1$ | $A \cdot \bar{A}=0$ | |
| 结合律 | $(A+B)+C=A+(B+C)$ | $(AB)C=A(BC)$ | |
| 交换律 | $A+B=B+A$ | $AB=BA$ | |
| 分配律 | $A(B+C)=AB+AC$ | $A+BC=(A+B)(A+C)$ | |
| 反演律 (摩根定律) | $\overline{A \cdot B \cdot C \cdot \dots} = \bar{A} + \bar{B} + \bar{C} + \dots$ | | |
| | $\overline{A+B+C+\dots} = \bar{A} \cdot \bar{B} \cdot \bar{C} \cdot \dots$ | | |
| 吸收律 | $A+AB=A$ | $A(A+B)=A$ | |
| | $A+\bar{A}B=A+B$ | $A(\bar{A}+B)=AB$ | |

2 门电路按逻辑功能分类

用来实现与、或、非三种基本逻辑关系的电子电路分别称为与门、或门和非门电路。非门常称为反相器。由三种基本逻辑可组合成与非、或非、与或非、异或等逻辑关系，它们都可以用相应的门电路来实现。因此常用的门电路按逻辑功能可分为与门、或门、非门、与非门、或非门、与或非门和异或门等多种。门电路是数字电路的基本逻辑单元。门电路可以用分立元件组成，但目前广泛使用的是

集成门电路。

数字电路的输入信号和输出信号通常用电平的高、低来描述，用高、低电平来表示二值逻辑中的1和0。若以高电平来表示逻辑1，低电平表示逻辑0，则称为正逻辑。反之，以低电平表示逻辑1，高电平表示逻辑0，则称为负逻辑。本篇采用正逻辑。

2.1 常用门电路的逻辑功能

常用门电路的逻辑符号、逻辑表达式和逻辑状态表(也称真值表)分别见表3-5-3和表3-5-4。

表 3-5-3 常用门电路的逻辑符号和逻辑表达式

| 名称 | 逻辑符号 | | 逻辑表达式 | 逻辑功能说明 |
|-------------|-----------------|-----------------|---------------|-------------|
| | 新符号 (GB4728) | 旧符号 (GB3432) | | |
| 非门 (反相器) | | | $Y = \bar{A}$ | 输入和输出反相 |
| 与门 | | | $Y = AB$ | 输入全1, 输出才为1 |



(续)

| 名称 | 逻辑符号 | | 逻辑表达式 | 逻辑功能说明 |
|------|-----------------|-----------------|-------------------------------------------|-----------------------------------------|
| | 新符号 (GB4728) | 旧符号 (GB3432) | | |
| 或门 | | | $Y=A+B$ | 输入中只要有1个为1, 输出就为1 |
| 与非门 | | | $Y=\overline{AB}$ | 输入全1, 输出才为0 |
| 或非门 | | | $Y=\overline{A+B}$ | 输入中只要有1个为1, 输出就为0 |
| 与或非门 | | | $Y=\overline{A_1A_2+B_1B_2}$ | 输入中只要 A_1A_2 或 B_1B_2 中有一组为1, 输出就为0 |
| 异或门 | | | $Y=A\overline{B}+\overline{A}B=A\oplus B$ | 输入 A 和 B 不相同, 输出为1 |

注: 非门的输入端为1个, 异或门的输入端为2个, 与门、或门、与非门、或非门、与或非门的输入端可为多个。具有多个输入端的门电路, 其逻辑符号的输入端按实有个数画出。

表 3-5-4 常用门电路的逻辑状态表

| 输入 | | 输出 | | | | | |
|-----|-----|------------------|--------|---------|-------------------|--------------------|---------------|
| | | 非门 | 与门 | 或门 | 与非门 | 或非门 | 异或门 |
| A | B | $Y=\overline{A}$ | $Y=AB$ | $Y=A+B$ | $Y=\overline{AB}$ | $Y=\overline{A+B}$ | $Y=A\oplus B$ |
| 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 |
| 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |

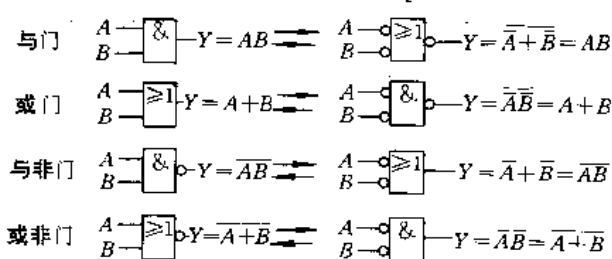


图 3-5-1 逻辑符号的等效变换

逻辑符号可以等效变换。图 3-5-1 示出了四种门电路的等效图形符号。例如与门的逻辑表达式为 $Y=$

AB , 可以变换成 $Y=\overline{\overline{AB}}=\overline{\overline{A}\overline{B}}$, 于是就相应地有图中的两种逻辑符号。至于在逻辑图中选用哪一个符号, 则取决于怎样才能更直观地表达该门电路在系统中的作用, 以利于对逻辑图的理解。

2.2 门电路的逻辑功能和正负逻辑的关系

对于同一个门电路, 根据所选正负逻辑的不同, 其逻辑功能是不相同的。表 3-5-5 列出了一个门电路的逻辑电平表和逻辑状态表, 在采用正逻辑时它是一个与门, 而在采用负逻辑时则是一个或门。由于正与门和



负或门对应于同一张逻辑电平表,故两者是等效的。同样,正或门和负与门、正与非门和负或非门、正或非门和负与非门也是相互等效的。

表 3-5-5 正负逻辑时门电路的不同功能

| 逻辑电平表 | | | 逻辑状态表 | | | | | |
|-------|---|---|---------------|---|---------------|---|---|---|
| | | | 采用正逻辑 (与门) | | 采用负逻辑 (或门) | | | |
| A | B | Y | A | B | Y | A | B | Y |
| L | L | L | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| L | H | L | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| H | L | L | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| H | H | H | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |

注:表中L表示低电平,H表示高电平。

3 双极型集成电路

以双极型晶体管为基本元件,集成在一块硅片上并具有一定逻辑功能的电路称为双极型数字集成电路。TTL、HTL、ECL、PL等集成电路均属于双极型电路。

3.1 晶体管-晶体管逻辑(TTL)门电路

3.1.1 概述

TTL(Transistor-Transistor Logic)电路是双极型数字集成电路中应用最广的电路。TTL电路有门电路、触发器和各种逻辑功能部件,类型很多。国产TTL电路的系列品种分为:CT54/74×××[⊙](标准TTL电路),CT54/74H×××(高速TTL电路),CT54/74L×××(低功耗TTL电路),CT54/74S×××(肖特基TTL电路),CT54/74LS×××(低功耗肖特基电路),CT54/74AS×××(先进肖特基TTL电路)和CT54/74ALS×××[⊙](先进低功耗肖特基TTL电路)等系列[⊙]。

TTL门电路属于TTL小规模集成电路,按功能,TTL门电路有与门、或门、非门(反相器)、与非门、或非门、与或非门和异或门等种类,还生产了具有强驱动能力的驱动器和缓冲器,具有扩展端的可扩展门电路以及和它相连接的扩展器。按输出方式,TTL门电路有图腾柱输出、集电极开路输出和三状态输出等类别。不同功能的TTL门电路品种,有的仅有一种输出方式(例如TTL或非门仅有图腾柱输出的产品),有的则具有二种或三种输出方式(例如TTL与非门就有三种输出方式的产品)。

TTL电路的工作环境温度,CT54系列为-55~+125℃,CT74系列为0~+70℃。TTL电路工作时电源电压的典型值为5V;电源电压的最小值CT54系列为4.5V,CT74系列为4.75V;电源电压的最大值CT54系列为5.5V,CT74系列为5.25V。CT54系列适用于工作环境恶劣、可靠性要求很高的场合,但器件的价格较高。

3.1.2 TTL与非门电路

1. 典型电路 图3-5-2a和b分别是CT54/74系列和CT54/74S系列2输入与非门的典型电路,它们都包含输入级、中间级和输出级三个部分。

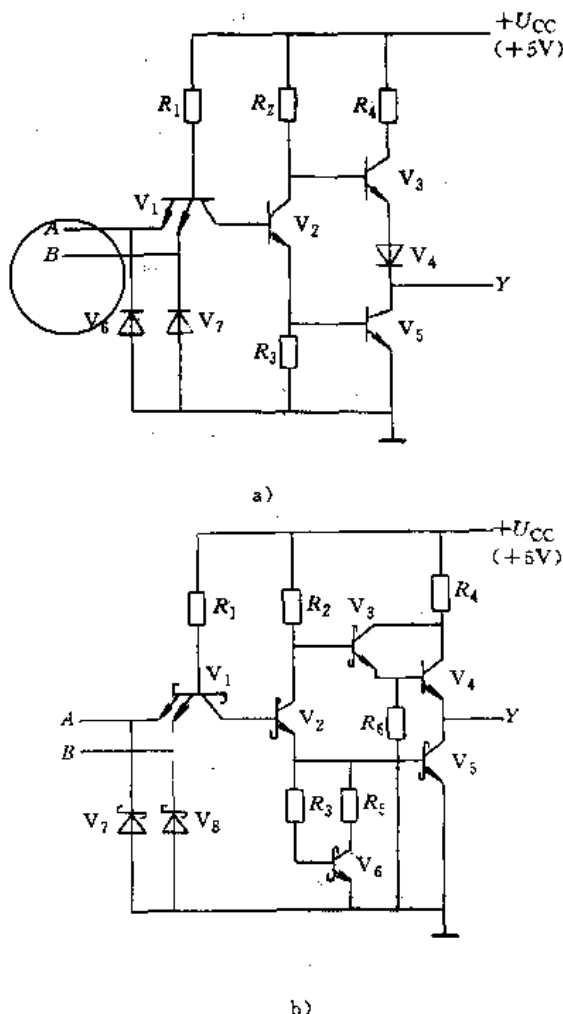


图 3-5-2 TTL与非门的典型电路
a) CT54/74系列 b) CT54/74S系列

⊙×××为阿拉伯数字,是器件的品种代号。
⊙ TTL电路以前分为CT1000、CT2000、CT3000和CT4000四个系列,它们分别和CT54/74、CT54/74H、CT54/74S和CT54/74LS相对应。



CT54/74 系列与非门电路中,多发射极晶体管 V_1 和电阻 R_1 组成与门输入级,晶体管 V_2 和电阻 R_2 、 R_3 组成中间级(也称倒相级),晶体管 V_3 、 V_5 、二极管 V_4 和电阻 R_4 组成图腾柱(AD)输出级(也称推拉式输出)。在该电路中,若输入端有一个为低电平(设 $U_{i1} = 0.3V$),对应于该输入端的发射结导通, V_1 的基极电位为 $1V$ 左右,故 V_2 和 V_5 截止, V_3 和 V_4 导通,输出端 Y 为高电平;若输入端全部为高电平(设 $U_{iH} = 3.2V$),这时 V_1 的发射结处于反向偏置,电源 U_{CC} 通过 R_1 和 V_1 的集电结使 V_2 和 V_5 的发射结均获得正向电压, V_2 和 V_5 饱和导通, V_3 截止,输出端 Y 为低电平。可见此电路具有与非逻辑关系。电路中 V_6 、 V_7 为输入端钳位二极管,它们能限制输入端出现的负极性干扰脉冲,保护多发射极晶体管。

CT54/74S 系列与非门电路中的 R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 的阻值比 CT54/74 系列降低近一半,晶体管 V_6 和电阻 R_3 、 R_5 构成有源泄放网络,晶体管 V_1 、 V_2 、 V_3 、 V_5 和 V_6 都采用肖特基晶体管(由肖特基二极管和普通的双极型晶体管组合而成,工作时这些晶体管都不会进入饱和区)。采取以上措施使电路的开关速度提高,改善了电路的特性,但功耗也增加了。CT54/74LS 系列是对 CT54/74S 的电路加以改进而形成的,它的速度基本上和 CT54/74 系列相同,但其功耗仅为 CT54/74 系列的五分之一。

2. 电压传输特性 门电路的输出电压 U_o 和输入电压 U_i 之间的关系,称为电压传输特性。CT54/74、CT54/74S、CT54/74LS 系列与非门的电压传输特性见图 3-5-3。通常把电压传输特性中 U_o 从高电平急剧下降为低电平的转折区中间对应的输入电压值称为阈值电压或阈值电平。

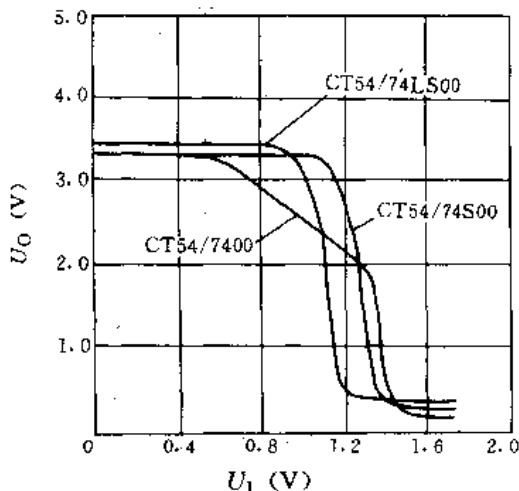


图 3-5-3 TTL 与非门的电压传输特性

3. 主要参数

(1) 输出高电平 U_{OH} 。指输入端有 1 个(或几个)为低电平时的输出电平。通常产品规定了 U_{OH} 的典型值和最小值(下限值)。

(2) 输出低电平 U_{OL} 。指输入端全部为高电平时的输出电平。通常产品规定了 U_{OL} 的典型值和最大值(上限值)。

(3) 输入高电平 U_{IH} 。指使与非门输出为低电平的输入电平。通常产品规定了 U_{IH} 的最小值,有时把该值称为开门电平 U_{ON} 。

(4) 输入低电平 U_{IL} 。指使与非门输出为高电平的输入电平。通常产品规定了 U_{IL} 的最大值,有时把该值称为关门电平 U_{OFF} 。

(5) 输入低电平电流 I_{IL} 。当某一输入端接低电平而其余输入端接高电平时流过这个输入端的电流。

(6) 输入高电平电流 I_{IH} 。当某一输入端接高电平而其余输入端接低电平时流过这个输入端的电流。

(7) 扇出数 N_O 。表示一个与非门能带同类与非门的数目。若与非门输出的低电平不超过低电平上限值时允许灌入的最大负载电流为 $I_{OL(max)}$,则输出低电平时的扇出数 $N_{OL} = I_{OL(max)} / I_{IL(max)}$ 。若与非门输出的高电平不低于高电平下限值时允许输出的最大负载电流为 $I_{OH(max)}$,则输出高电平时的扇出数 $N_{OH} = I_{OH(max)} / I_{IH(max)}$ 。各个系列 TTL 与非门的 N_{OL} 和 N_{OH} 均大于 8。

(8) 电源电流 I_{CCH} 和 I_{CCL} 。分别是输出为高电平和低电平时的电源电流。与非门空载时电源电流 I_{CC} 和电源电压 U_{CC} 的乘积称为空载功耗。

(9) 平均传输延迟时间 t_{pd} 。是 t_{PHL} 和 t_{PLH} 的平均值。 t_{PHL} 是输出从高电平变为低电平的传输延迟时间, t_{PLH} 是输出从低电平变为高电平的传输延迟时间,如图 3-5-4 所示。

表 3-5-6 是 TTL、HTL、CMOS 与非门主要参数

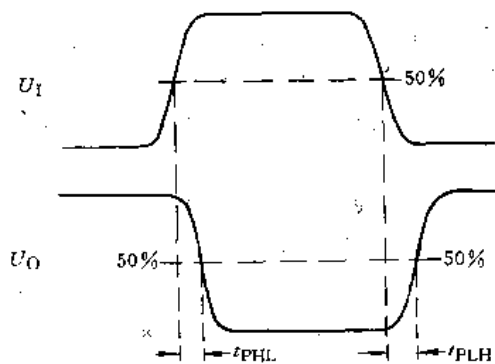


图 3-5-4 与非门的传输延迟时间



示例。

4. **噪声容限** 是衡量门电路抗干扰能力的指标,当噪声幅度超过规定的容许值时,会破坏电路正常输出的逻辑状态。噪声可分为直流噪声和交流噪声。

直流噪声表现为电路逻辑电平的固定偏移。直流噪声容限可用图 3-5-5 来示意。图中后级门电路的输入来自前级门电路的输出。 $U_{NH} = U_{OH(min)} - U_{IH(min)}$,称为输入高电平时的噪声容限。 $U_{NL} = U_{IL(max)} - U_{OL(max)}$,称为输入低电平时的噪声容限。可见 U_{NH} 、 U_{NL} 的大小和电路的输入、输出电平的极限值有关。

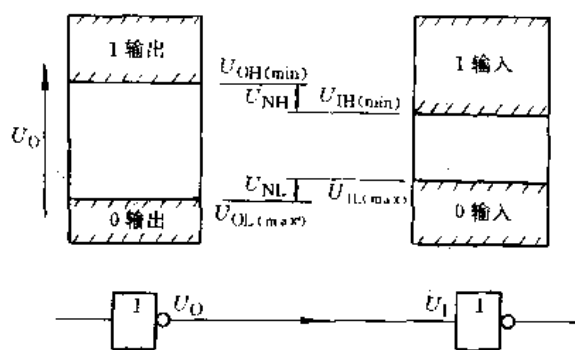


图 3-5-5 直流噪声容限示意图

交流噪声是无规律的窄脉冲或高频振荡波。交流噪声容限可分为正脉冲噪声容限和负脉冲噪声容限,它们的大小和干扰脉冲的宽度有关。在干扰脉冲的宽度接近于或小于门电路传输延迟时间的情况下,交流噪声容限远大于直流噪声容限。当干扰脉冲的宽度增加时,交流噪声容限下降,最后和直流噪声容限的大小相同。

3.1.3 集电极开路门电路和三态输出门电路

1. **集电极开路门电路** (Open Collector, 简称 OC 门) 图 3-5-6a 是 CT54/74 系列集电极开路与非门的典型电路,图 3-5-6b 是其逻辑符号。具有图腾柱输出结构的 TTL 门电路,其输出端不允许直接相互连接。而 OC 门的输出端可以直接相互连接。图 3-5-6c 中两个 OC 门的输出端接在一起,外加电阻 R_C 是它们的输出晶体管集电极的共同负载(称为上拉电阻),只有当两个 OC 门的输出 Y_1 、 Y_2 都为高电平时,输出 Y 才为高电平,因而实现了线与(依靠线的连接实现与逻辑功能)。此电路的逻辑表达式为

$$Y = Y_1 \cdot Y_2 = \overline{AB} \cdot \overline{CD} = \overline{AB + CD}$$

表 3-5-6 TTL、HTL、CMOS 与非门主要参数示例

| 参数名称 | 单位 | TTL | | | | HTL | CMOS | | |
|--------------------------|---------|--------|---------|---------|----------|--------|-----------------------|------|-------|
| | | CT7400 | CT74H00 | CT74S00 | CT74LS00 | CH2010 | CC4011 | | |
| 电源电压 U_{CC} 或 U_{DD} | V | 5 | 5 | 5 | 5 | 15 | 5 | 10 | 15 |
| $I_{CCL(max)}$ | mA | 22 | 40 | 35 | 4.4 | 22 | | | |
| 电源电流 $I_{CCH(max)}$ | mA | 8 | 16.8 | 16 | 1.6 | 6 | | | |
| $I_{DD(max)}$ | μA | | | | | | 0.25 | 0.5 | 1.0 |
| 输入高电平 $U_{IH(min)}$ | V | 2 | 2 | 2 | 2 | 9 | 3.5 | 7 | 11 |
| 输入低电平 $U_{IL(max)}$ | V | 0.8 | 0.8 | 0.8 | 0.8 | 6.5 | 1.5 | 3 | 4 |
| 输出高电平 $U_{OH(min)}$ | V | 2.4 | 2.4 | 2.7 | 2.7 | 11.5 | 4.95 | 9.95 | 14.95 |
| 输出低电平 $U_{OL(max)}$ | V | 0.4 | 0.4 | 0.5 | 0.5 | 1.5 | 0.05 | 0.05 | 0.05 |
| 输入高电平电流 $I_{IH(max)}$ | μA | 40 | 50 | 50 | 20 | 6 | 0.1 | | |
| 输入低电平电流 $I_{IL(max)}$ | mA | -1.6 | -2 | -2 | -0.4 | -1.4 | -0.1×10^{-3} | | |
| 输出高电平电流 $I_{OH(max)}$ | mA | 0.4 | 0.8 | 1.0 | 0.4 | 0.06 | 0.51 | 1.3 | 3.4 |
| 输出低电平电流 $I_{OL(max)}$ | mA | -1.6 | -16 | -20 | -8 | -14 | -0.51 | -1.3 | -3.4 |
| 传输延迟时间 t_{PLH} | ns | 22 | 10 | 4.5 | 15 | 220 | 250 | 120 | 90 |
| t_{PH} | ns | 15 | 10 | 5 | 15 | 110 | 250 | 120 | 90 |

注: 1. 表中未注明测试条件。

2. I_{IL} 的“-”号表示电流从器件的输入端流出, I_{OL} 的“-”号表示电流从器件的输出端灌入。



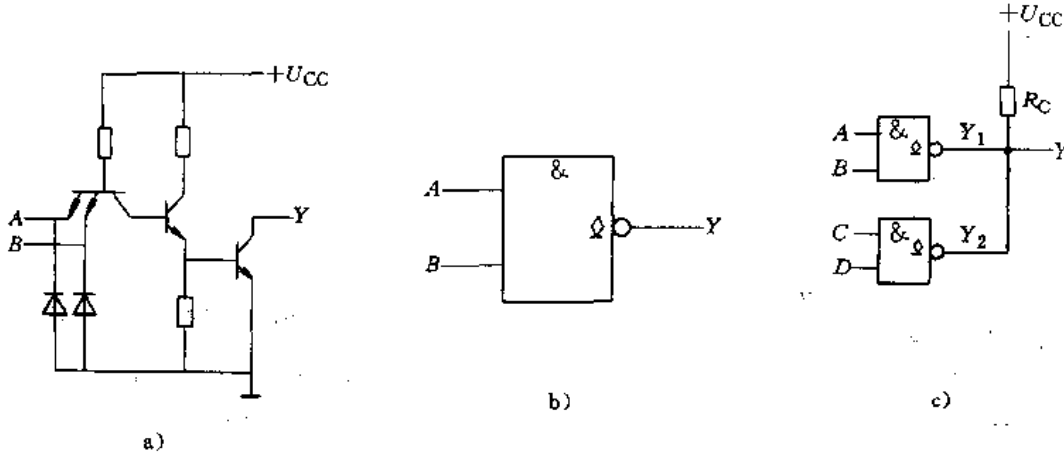


图 3-5-6 集电极开路与非门

a) 典型电路 b) 逻辑符号 c) 实现线与

OC 门外接电阻 R_c 的数值要选择适当^①，才能保证输出合适的高、低电平值。OC 门可直接带负载（作为 R_c ），还可用于电平转换（通过选择加于 R_c 的电源电压的大小来获得所需的输出电平）。

集电极开路结构不仅用于与非门，而且用于非门、与门及 TTL 的其它电路。有时还用于制作能输出大电流或高电压的电路，称为缓冲器或驱动器。

2. 三态输出门电路 三态输出门电路（简称三态门）是在普通门电路的基础上增加了控制端（也称使能端）和控制电路而构成的。三态门有三种输出状态：高电平状态、低电平状态和高阻状态（又称为禁止态）。出现高阻态时，门电路图腾柱输出级的上、下晶体管（例如图 3-5-2a 的晶体管 V_3 、 V_5 ）均截止，故输出端既不能和 $+U_{cc}$ 构成通路，也不能和地构成通路，相当于悬空。

图 3-5-7 是三态与非门的逻辑符号。图 3-5-7a 的符号表示当 $\overline{EN}=1$ 时三态门处于高阻状态；当 $\overline{EN}=0$ 时为工作状态，此时 $Y=\overline{AB}$ ，称为控制端低电平有效。图 3-5-7b 的符号表示当 $EN=0$ 时三态门处于高阻状态；当 $EN=1$ 时为工作状态，此时 $Y=\overline{AB}$ ，称为控制端高电平有效。

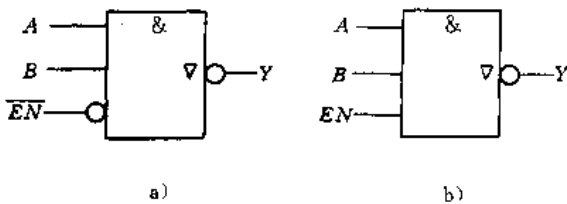


图 3-5-7 三态与非门的逻辑符号

a) 控制端低电平有效 b) 控制端高电平有效

三态门常做成单输入、单输出的总线驱动器；而且输入和输出有同相和反相两种类型。三态门的驱动能力强，开关速度也快。三态输出不仅用于门电路，而且用于 TTL 的其他电路。

三态门的输出端可以并联使用，因而能在同一条公共的传输线——总线上分时传递各个门电路的输出信号。

3.2 高阈值逻辑 (HTL) 门电路

HTL (High Threshold Logic) 电路的突出优点是具有高的抗干扰能力，故也称为“高抗干扰集成电路”。但它的功耗大，传输延迟时间 t_{pd} 也大（即工作速度慢），使用的环境温度为 $-20 \sim -70^\circ\text{C}$ ，故适用于对速度、功耗要求不高，但希望有很强抗干扰能力的工作环境。

HTL 电路有与非门、与非驱动器 (OC)、与门、非门、与或非门、与扩展器、异或门等。

图 3-5-8a 是 HTL 与非门的典型电路，采用的电源电压值是 15V。电路中稳压二极管 V_5 的击穿电压为 6V 左右，要使晶体管 V_6 饱和导通，晶体管 V_4 的基极电位需有 7.4V 左右，故 HTL 电路具有较高的阈值电压。图 3-5-8b 是其电压传输特性，它的输出高电平可达 14V，输出低电平为 1V 左右，噪声容限 U_{NL} 和 U_{NH} 值比 TTL 电路要高得多。

图 3-5-8a 的电路的输出级采用有源负载（由 V_7 、 V_8 和两只电阻构成），也称为标准 HTL 输出，其优点是电路的输出阻抗低。但有源输出的输出端不允许直

^① R_c 的选择方法可查阅参考文献 [21] 79~80 页。



接相互连接,因此有些品种的 HTL 门电路采用无源输出(把图 3-5-8a 中的 V_7 、 V_8 和 $1.5k\Omega$ 电阻去掉,保留 $15k\Omega$ 电阻)。无源输出的 HTL 门电路可以实现线与。

HTL 与非门的主要参数示例见表 3-5-6。

3.3 发射极耦合逻辑 (ECL) 门电路

ECL (Emitter-Coupled Logic) 电路是一种非饱和型数字集成电路,电路内部的晶体管不是工作在饱和区,而是工作在线性区或截止区。ECL 电路的主要优点是:速度快(是目前双极型电路中速度最高的);内部噪声低;输入阻抗高;输出阻抗很低,带负载能力强;

通常设有互补输出端,使用灵活、方便。ECL 电路主要应用在高速信息系统中。ECL 电路的主要缺点是功耗大,抗干扰能力较弱。

目前国产 ECL 的典型电路系列有: $t_{pd}=2ns$ 的 CE10K 系列, $t_{pd}=1ns$ 的 CE1600 系列, $t_{pd}=0.7ns$ 的 CE11C00 系列, $t_{pd}=0.75ns$ 的 CE100K 系列,以及 CE12K 高速锁相环集成电路和 CE8000 系列高速低功耗分频器。ECL 门电路的品种有或/或非门、或非门、与门、或门、或与门、或与/或非门、异或门、异或非门、异或/异或非门等。

图 3-5 9a 是 CE10K 系列或/或非门的典型电路。电路采用负电源, $-U_{EE}=-5.2V$ 。电路中晶体管 V_1

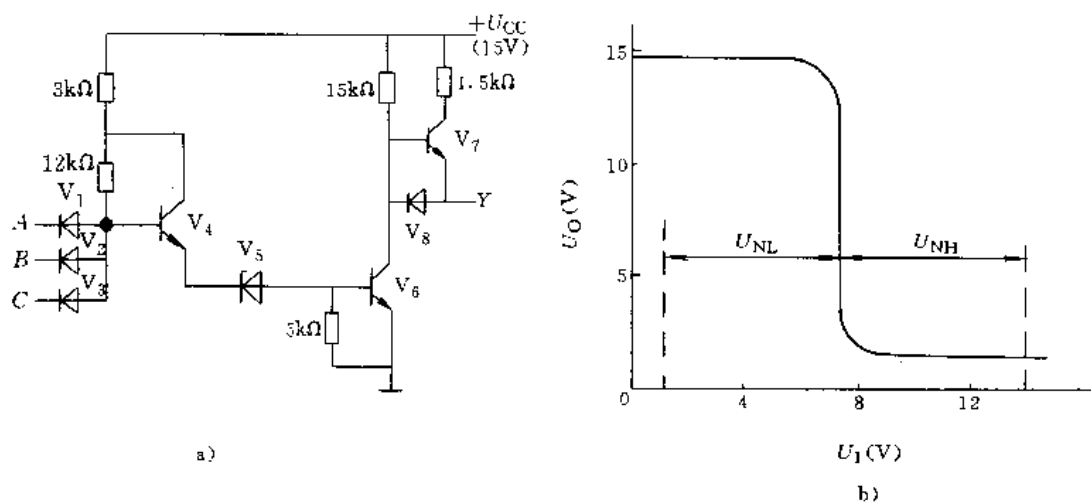


图 3-5-8 HTL 与非门电路
a) 典型电路 b) 电压传输特性

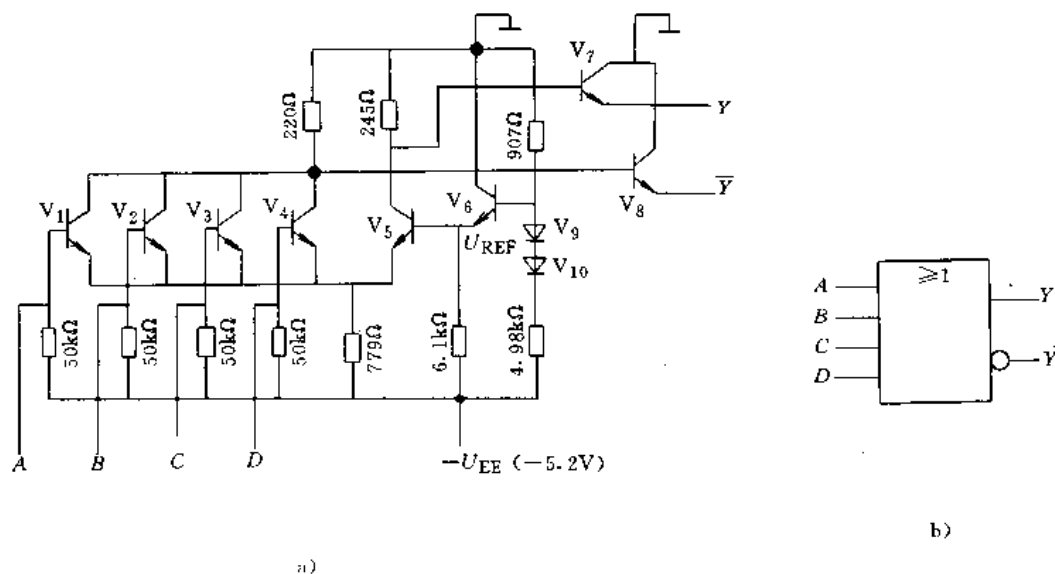


图 3-5-9 ECL 或/或非门电路
a) 典型电路 b) 逻辑符号



$\sim V_5$ 组成多端输入, 并和 V_5 组成发射极耦合电路 (779 Ω 是公共的发射极电阻)。 V_6, V_9, V_{10} 和三个电阻构成的电路为 V_5 的基极提供一个基准电压 $U_{REF} = -1.29V$ 。 V_7 和 V_8 是射极输出电路, 采用射极开路输出的形式, 使用时可根据实际要求灵活地选择负载电阻的大小。

该电路的工作原理为: 当输入端 A, B, C, D 都为低电平 ($U_{IL} = -1.75V$) 时, $V_1 \sim V_4$ 管截止, V_5 管导通, V_5 的集电极电位低于 $V_1 \sim V_4$ 的集电极电位, 故输出端 Y 为低电平 ($-1.75V$)、 \bar{Y} 为高电平 ($-0.9V$); 当 A, B, C, D 中有一个为高电平 ($U_{IH} = -0.9V$) 时, $V_1 \sim V_4$ 中相应的一只晶体管导通, V_5 管截止, 输出端 Y 为高电平 ($-0.9V$)、 \bar{Y} 为低电平 ($-1.75V$)。可见 $Y = A + B + C + D, \bar{Y} = \overline{A + B + C + D}$ 。即该电路同时具备或/或非输出, 称为互补逻辑输出。图 3-5-9b 是或/或非

门的逻辑符号。

3.4 集成注入逻辑(I²L)门电路

I²L(Integrated-Injection Logic)电路是 70 年代初发展起来的一种双极型集成电路。I²L 电路结构简单, 能在低电压、微电流下工作, 故其集成度高、功耗很低, 是一种特别适用于大规模集成的电路。I²L 电路的主要缺点是输出幅度较低、抗干扰能力差, 开关速度较慢。

图 3-5-10a 是 I²L 基本门, 它由一个 NPN 多集电极晶体管和 一个 PNP 管组成。PNP 管工作在恒流状态, 它的发射极接到固定的电源上, 由发射极注入电流 I_0 送至 NPN 管的基极, 故称为集成注入逻辑。在结构上, NPN 管和 PNP 管并合在一起形成一个特定的逻辑单元, 称为并合晶体管, 占用的空间很小。

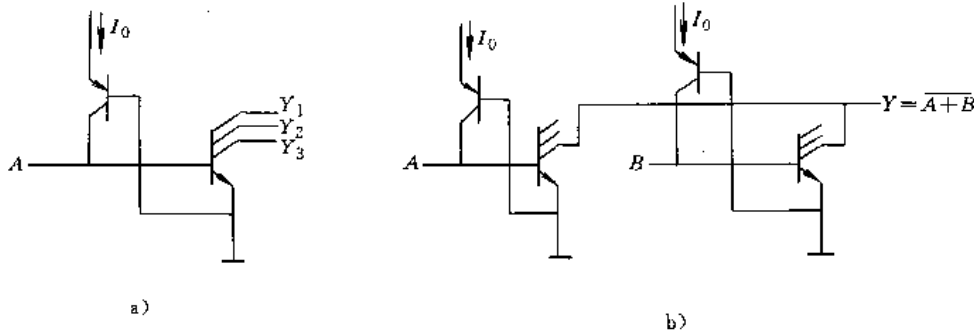


图 3-5-10 I²L 门电路

a) I²L 基本门 b) I²L 或非门

I²L 基本门是一个具有多输出端的非门。利用 I²L 基本门可组合成或门、或非门、与门、与非门等。图 3-5-10b 是将两个 I²L 基本门的输出端并联(即进行线与)组成或非门的电路, 它的输出为 $Y = \overline{A} \cdot \overline{B} = \overline{A + B}$ 。

4 MOS 集成门电路

MOS 电路具有电路结构简单、集成度高、功耗低等优点, 故被大量地应用于数字集成电路。全部使用 P 沟道 MOS 管的集成电路称为 PMOS 电路, 全部使用 N 沟道 MOS 管的集成电路称为 NMOS 电路, 由 P 沟道 MOS 管和 N 沟道 MOS 管构成的集成电路称为互补 MOS 即 CMOS(Complementary MOS) 电路。

4.1 PMOS 门电路

PMOS 电路制造工艺简单, 成品率高, 价格便宜,

是 MOS 集成电路中最早问世的产品。但 PMOS 器件的工作速度低、电源电压较高 ($-20V$ 或 $-24V$)。功耗大, 随着 NMOS 尤其是 CMOS 器件的发展, PMOS 电路的应用日益减少。

PMOS 门电路有反相器(非门)、与门、与非门、或

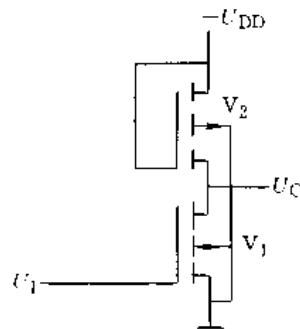


图 3-5-11 PMOS 反相器



门、或非门、与或非门等品种。图 3·5-11 是 PMOS 反相器,图中 V_1 、 V_2 均是增强型 PMOS 管, V_1 称为驱动管, V_2 称为负载管。电源采用负电源,电路中 V_2 管总是处于导通状态,当 $-U_{DD} = -24V$ 时,输出高电平约为 $-2V$,输出低电平约为 $-12V$ 。若输入为高电平 ($-2V$),则 V_1 管截止,输出为低电平。若输入为低电平 ($-12V$),则 V_1 管导通,因 V_1 管的导通电阻远小于 V_2 管,故输出为高电平。

4·2 NMOS 门电路

NMOS 电路比 PMOS 电路工作速度快,电源电压较低,加之 NMOS 工艺在不断改进,因此不少中、大规模集成电路采用 NMOS 工艺制造。

图 3·5-12 给出了 NMOS 反相器的两种常见形式,图 3·5-12a 中负载管 V_2 是增强型 NMOS 管,故称为增强型负载反相器。图 3·5-12b 中负载管 V_2 是耗尽型 NMOS 管,故称为耗尽型负载反相器。当 U_1 由高电平变为低电平, U_0 从低电平变为高电平时,耗尽型负载管能在 U_0 上升的大部分区间里一直向负载电容提供较大的充电电流,而增强型负载管的电流随 U_0 的上升迅速减小,所以耗尽型负载反相器的开关速度较快,在高速 MOS 电路中较多地被采用。

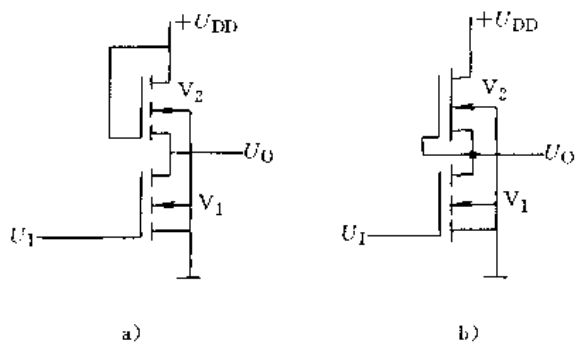


图 3·5-12 NMOS 反相器
a)增强型负载 b)耗尽型负载

以反相器为基础,采用驱动管并接、串接等方法可以组成其它门电路。图 3·5-13a 和 b 分别是 NMOS 或非门和与非门。对或非门,只要输入 A 、 B 中有一个为高电平, V_1 、 V_2 管中就有一个导通,输出 Y 为低电平。对与非门,只有当输入 A 、 B 都为高电平时, V_1 、 V_2 管同时导通,输出 Y 才是低电平。若串接的驱动管个数多,必导致与非门输出的低电平值抬高。而并接的驱动管个数增多,并不会引起输出低电平值抬高。因此 NMOS 电路常以或非门为基本单元。

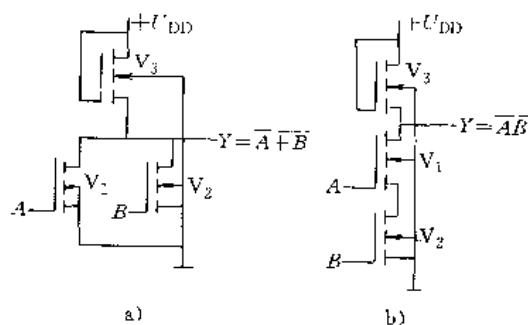


图 3·5-13 NMOS 或非门和与非门
a)或非门 b)与非门

4·3 CMOS 门电路

4·3·1 概述

CMOS 电路是当前应用较普遍的数字集成电路之一。它的主要优点是:静态功耗极小($U_{DD} = 5V$ 时,门电路的功耗小于 $5\mu W$);抗干扰能力强(噪声容限的保证值为电源电压的 30%);输出逻辑电平摆幅大(高电平和低电平之差近似等于电源电压);工作电源电压范围宽(3~18V 或 7~15V);输入阻抗高(通常大于 $10^9\Omega$,故驱动 CMOS 电路所需功耗甚微);扇出能力强(扇出数大于 50);温度稳定性好,抗辐射能力强;集成度高,成本低。在工作速度方面,CMOS 电路优于 PMOS 和 NMOS,低于 TTL 电路。但高速 CMOS(HCMOS)电路的工作速度和低功耗肖特基 TTL 电路相仿。

目前国产的 CMOS 电路有 CC4000 和 C000 两个系列。CC4000 系列工作电压范围为 3~18V,其性能及外引线排列和国外的 CD4000 系列相同。C000 系列工作电压范围分为 8~12V、7~15V 和 3~18V 三类。C000 系列的参数规范低于 CC4000 系列,其外引线排列大部分和 CC4000 系列的相应品种不同。

CMOS 门电路的品种较多,有反相器(非门)、与门、或门、与非门、或非门、与或非门、异或门,还有缓冲器(反相缓冲器、同相缓冲器、三态输出缓冲器、漏极开路缓冲器等)和可扩展门(与或非门、多功能门)。

4·3·2 CMOS 反相器和与非门

CMOS 反相器是 CMOS 集成电路最基本的逻辑组成单元之一。图 3·5-14a 是 CMOS 反相器的基本电路,图中驱动管 V_1 是增强型 NMOS 管,负载管 V_2 是



增强型 PMOS 管。当 U_I 为高电平时, V_1 管导通, V_2 管截止, U_O 为低电平。当 U_I 为低电平时, V_1 管截止, V_2 管导通, U_O 为高电平。

为了防止由于 MOS 管栅极出现瞬时高电压而击穿 SiO_2 绝缘层, 因此 CMOS 反相器及其他 CMOS 电路的输入端通常加有输入保护电路。图 3-5-14b 是输入端接入二极管-电阻双向保护电路的反相器, 这种保护电路是在生产过程中同时制作在同一块电路芯片上的。保护二极管的正向压降为 $0.5 \sim 0.7\text{V}$, 反向击穿电压为 30V 左右。为保证安全工作, 在使用这类 CMOS 器件时, 必需把通过保护二极管的电流限制在 10mA 以下, 输入端外加高电平不可大于 $(+U_{DD} + 0.5)\text{V}$, 外加低电平不可小于 -0.5V 。

设 U_{TP} 、 U_{TN} 分别为增强型 PMOS 管和增强型 NMOS 管的开启电压, 且 $|U_{TP}| = U_{TN}$, $U_{DD} > |U_{TP}| + U_{TN}$, 则 CMOS 反相器的电压传输特性如图 3-5-14c 所示。该特性在转折区变化率很大, 而且转折区的输入

电压(即阈值电压)为 $\frac{1}{2}U_{DD}$ 。这种形状的电压传输特性使 CMOS 门电路获得了最大限度的输入噪声容限, 且 $U_{NH} = U_{NL}$, U_{NH} 、 U_{NL} 随 U_{DD} 的增加而变大。

图 3-5-15a 是 CMOS 与非门的基本电路, 它由两个 CMOS 反相器的驱动管 V_1 和 V_3 串联、负载管 V_2 和 V_4 并联而构成。只有当输入 A 、 B 都为高电平时, V_1 和 V_3 管均导通, 输出 Y 才为低电平。这种电路结构的与非门, 其输入端的状态和个数会影响电压传输特性和输出电平的数值。因此 CC4000 系列的门电路在输入端和输出端都附加反相器作为缓冲级, 使门电路的输出驱动能力及电压传输特性和输入端的个数、状态无关, 具有对称的输出波形 ($t_{PHL} = t_{PLH}$), 具有对称的输出驱动能力 ($I_{OL} = I_{OH}$)。图 3-5-15b 是带缓冲级的与非门电路, 它是在或非门的输入和输出端都接入反相器来实现与非功能的 ($Y = \overline{A + B} = \overline{AB}$)。用类似的方法可获得各种功能的带缓冲级的门电路。

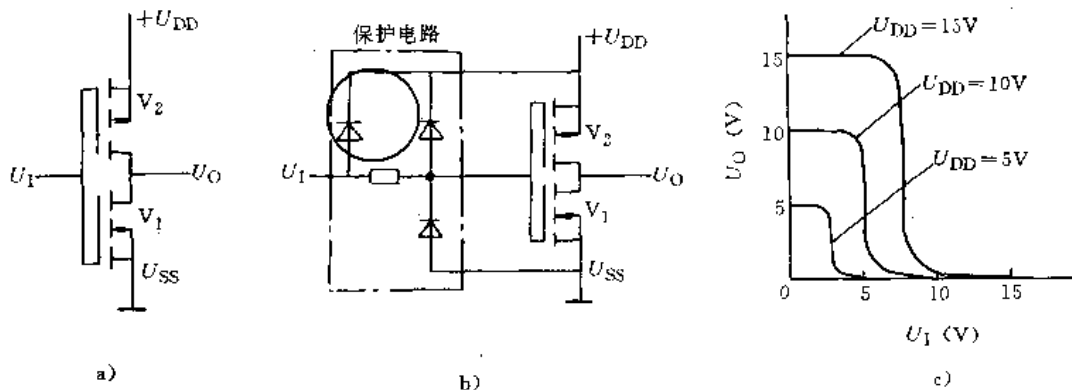


图 3-5-14 CMOS 反相器

a) 基本电路 b) 输入保护电路 c) 电压传输特性

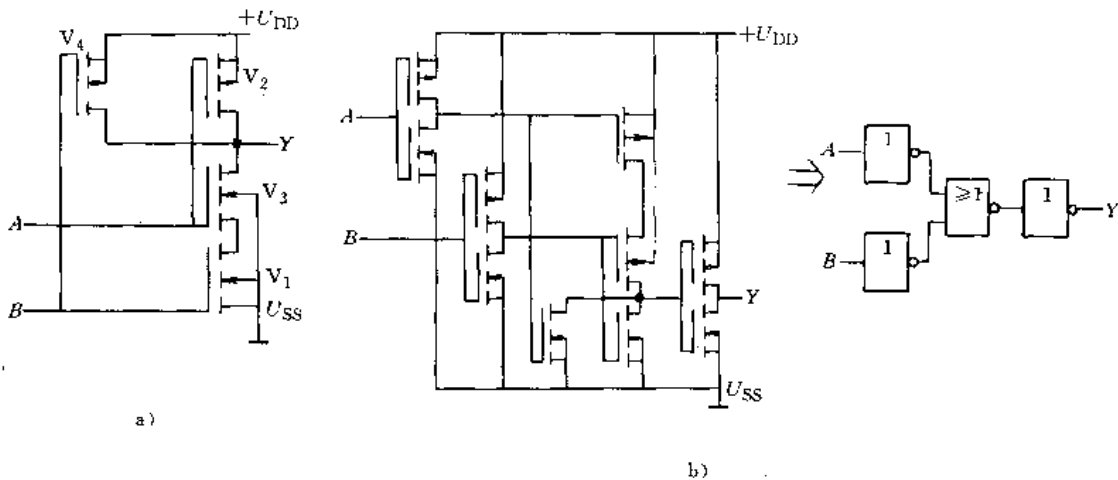


图 3-5-15 CMOS 与非门

a) 基本电路 b) 带缓冲级的电路



CMOS 与非门的主要参数示例见表 3-5-6。

4.3.3 CMOS 传输门

CMOS 传输门也是 CMOS 集成电路的基本单元，其功能是对所要传送的信号电平起允许通过或者禁止通过的作用，也可用来传递模拟信号。

图 3-5-16a 和 b 是 CMOS 传输门的基本电路和逻辑符号。该电路由增强型 NMOS 管 V_N 和增强型 PMOS 管 V_P 组成，两个栅极是一对控制端，分别接入控制信号 C 和 \bar{C} 。若控制信号的高、低电平分别为 U_{DD} 和 $0V$ ， U_I 在 $0 \sim U_{DD}$ 之间变化，则当 $C=0, \bar{C}=1$ 时， V_N 和 V_P 均截止，输入和输出之间呈高阻态，传输门截止；当 $C=1, \bar{C}=0$ 时， V_N 和 V_P 至少有一个是导通的，输入和输出之间呈低阻态，传输门导通。由于 MOS 管的结构是对称的，故传输门的输入端和输出端可以互换，只要选定其中的一端为输入、另一端就是输出。

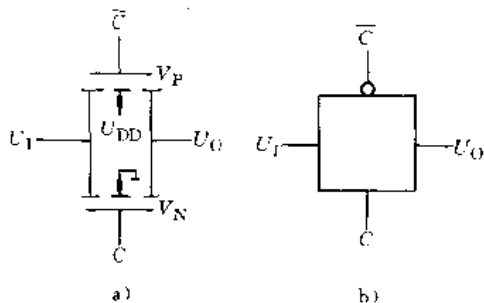


图 3-5-16 CMOS 传输门
a) 基本电路 b) 逻辑符号

利用 CMOS 传输门和反相器的各种组合可以构成多种逻辑电路。

4.3.4 HCMOS 门电路

HCMOS 电路是以多晶硅作为栅极，采用短沟道和硅栅自对准工艺制造的一种高速 CMOS 电路。HCMOS 电路的工作速度比普通的金属栅极 CMOS 电路快 8~10 倍，和 TTL 的 CT54/74LS 系列相仿。HCMOS 电路的静态功耗极低，即使是中规模集成电路，其功耗仍低于 $1\mu W$ 。

HCMOS 电路的产品为 CC54/74HC 系列，电源电压为 2~6V，其品种代号、逻辑功能及外引线排列和对应的 TTL 电路相同，故一个 TTL 系统可以全部用 HCMOS 器件来代替。但在 TTL 和 HCMOS 混合使用时，必须考虑二者的电平匹配和驱动能力。为了便于和 TTL 混合使用，专门制作了 CC54/74HCT 系列，电源

电压为 4.5~5.5V，其输入电平和 CC54/74HC 系列不同，而与 TTL 器件相同，从而使 HCMOS 和 TTL 之间的连接十分方便。CC54/74HCT 系列的器件可以直接替代 CT54/74LS 系列相同序号的器件。

HCMOS 门电路的品种有反相器、与门、或门、与非门、或非门、与或非门、异或门和三态总线驱动器等。

5 编码器和译码器

5.1 编码器

把二进制码按一定的规律编排，使每组代码具有—特定的含义(代表某个数或字母、符号等)称为编码。用四位二进制数来表示 0~9 十个数码称为二进制编码，简称 BCD(Binary Coded Decimal)码。BCD 码有多种，表 3-5-7 列出了几种常见的码。ISO(International Standardization Organization) 编码^①是国际标准化组织制定的一组八位二进制代码，主要用于信息传送。它包括 0~9 十个数字、26 个英文字母，以及 20 个其它符号，共有 56 个代码。ASCII(American Standard Code for Information Interchange)编码是美国信息交换标准代码的简称，在计算机和通讯设备中时常采用。它是一组八位二进制码，用七位表示信息，第八位作为奇偶校验位。

表 3-5-7 几种常见的 BCD 码

| 十进制数 | 8421 码 | 2421 码 | 5421 码 | 5211 码 | 余 3 码 |
|------|--------|--------|--------|--------|-------|
| 0 | 0000 | 0000 | 0000 | 0000 | 0011 |
| 1 | 0001 | 0001 | 0001 | 0001 | 0100 |
| 2 | 0010 | 0010 | 0010 | 0100 | 0101 |
| 3 | 0011 | 0011 | 0011 | 0101 | 0110 |
| 4 | 0100 | 0100 | 0100 | 0111 | 0111 |
| 5 | 0101 | 1011 | 1000 | 1000 | 1000 |
| 6 | 0110 | 1100 | 1001 | 1001 | 1001 |
| 7 | 0111 | 1101 | 1010 | 1100 | 1010 |
| 8 | 1000 | 1110 | 1011 | 1101 | 1011 |
| 9 | 1001 | 1111 | 1100 | 1111 | 1100 |

具有编码功能的电路称为编码器。根据不同的编码要求，就有不同形式的编码电路。把 0~9 十个十进制数分别编成十个 BCD 码的编码器称为二进制编

① ISO 编码表和 ASCII 编码表可查阅参考文献[21] 530~533 页

此星公司制作 请尊重版权



码器,它有10个输入端,4个输出端,也称为10线-4线编码器,通常采用8421码。把输入状态编成二进制代码的编码器称为二进制编码器。

图3-5-17是一个典型的二进制编码器,它有8个输入端,3个输出端,称为8线-3线优先编码器。表3-5-8是其逻辑状态表。当选通输入端 $\bar{S}=0$ 时,编码器进行编码;当 $\bar{S}=1$ 时,编码被禁止。输入端 $\bar{I}_0\sim\bar{I}_7$ 以低电平作为编码请求信号,当 $\bar{I}_7=0$ 时,不论 $\bar{I}_0\sim\bar{I}_6$

为何值(表中以 \times 表示),编码器只对 \bar{I}_7 进行编码,输出 $\bar{Y}_2\bar{Y}_1\bar{Y}_0=000$ 。当 $\bar{I}_7=1, \bar{I}_6=0$ 时,不论 $\bar{I}_0\sim\bar{I}_5$ 为何值,只对 \bar{I}_6 进行编码。因此输入信号中, \bar{I}_7 优先权最高, \bar{I}_6 次之, \bar{I}_0 最低。这种编码器能根据输入信号的优先权级别进行编码,故称为优先编码器。该编码器的 \bar{Y}_3 称为选通输出端, \bar{Y}_{EX} 称为扩展输出端,可用于扩展编码功能。

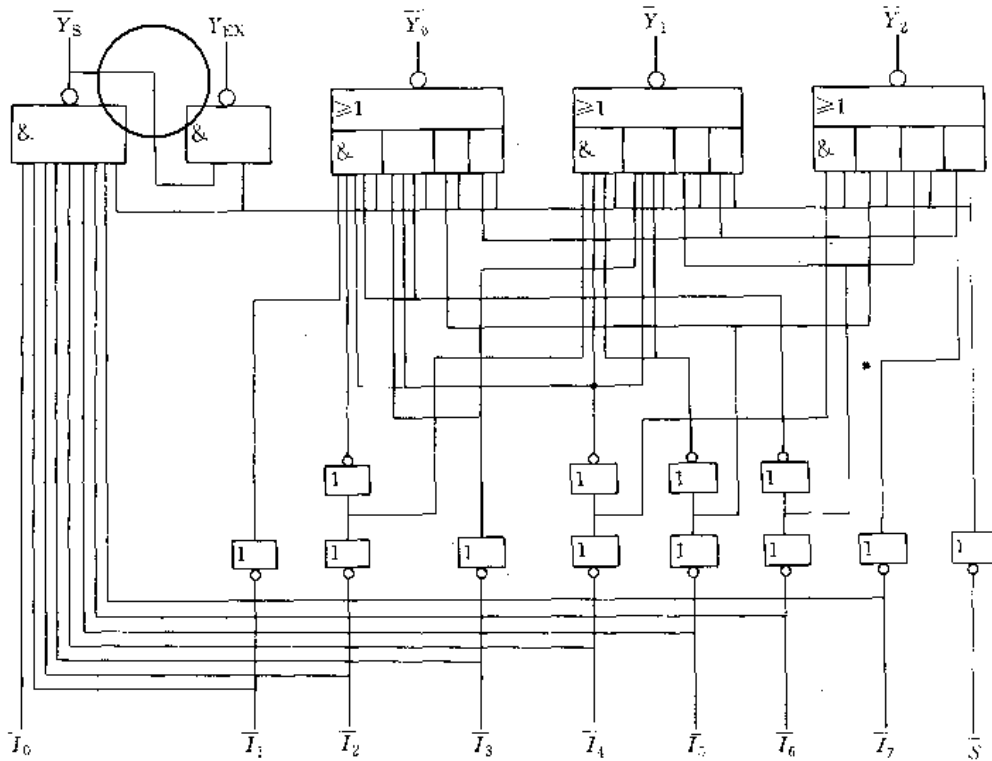


图3-5-17 8线-3线优先编码器(CT74LS148)

表3-5-8 8线-3线优先编码器的逻辑状态表

| 输 入 | | | | | | | | | 输 出 | | | | |
|-----------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|----------------|-------------|
| \bar{S} | \bar{I}_0 | \bar{I}_1 | \bar{I}_2 | \bar{I}_3 | \bar{I}_4 | \bar{I}_5 | \bar{I}_6 | \bar{I}_7 | \bar{Y}_2 | \bar{Y}_1 | \bar{Y}_0 | \bar{Y}_{EX} | \bar{Y}_3 |
| 1 | \times | \times | \times | \times | \times | \times | \times | \times | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| 0 | \times | \times | \times | \times | \times | \times | \times | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 0 | \times | \times | \times | \times | \times | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| 0 | \times | \times | \times | \times | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 |
| 0 | \times | \times | \times | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 0 | \times | \times | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 0 | \times | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 |



5.2 译码器

译码是编码的逆过程,即把二进制代码在编码时的原意“翻译”出来,给出对应的一系列输出信号。用输出状态来表示输入代码的逻辑组合的数字电路称为译码器。

1. 二进制译码器 二进制译码器输入 n 位二进制代码,有 2^n 种组合,输出线相应地有 2^n 根,故通常称为 n 线- 2^n 线译码器。常用的为 2 线-4 线、3 线-8 线、4 线-16 线译码器。

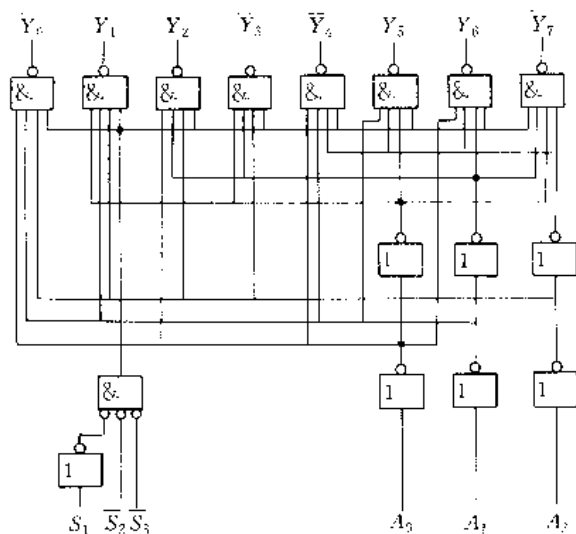


图 3-5-18 3 线-8 线译码器的逻辑图(CT74LS138)

图 3-5-18 是一个典型的 3 线-8 线译码器。图中 A_2 、 A_1 、 A_0 是三位二进制码的输入端,有时称为地址输入端。该译码器还设置了 S_1 、 S_2 、 S_3 三个控制输入端

(也称为使能输入端或“片选”端),由它们来决定译码器是进行译码还是禁止译码。表 3-5-9 是该译码器的逻辑状态表。

2. 二十进制译码器 二十进制译码器能将输入 BCD 码的十个代码译成十个输出状态。它有 4 个输入端,10 个输出端,故也称为 4 线-10 线译码器或 BCD-十进制译码器。图 3-5-19 是一个典型的 4 线-10 线译码器的逻辑图。当输入为 8421BCD 码的 0000~1001 时,输出端 $\bar{Y}_0 \sim \bar{Y}_9$ 中相应地有一个为低电平(其余九个为高电平)。而对于 8421BCD 码以外的 1010~1111,译码器则不译码, $\bar{Y}_0 \sim \bar{Y}_9$ 均无低电平信号产生。

3. 显示译码驱动器 通常把专门用于驱动数码显示器或显示灯的电路称为译码驱动器。由于显示器件的种类较多,故用于显示驱动的译码器有各种不同的规格品种。其中有用于辉光显示管的 BCD-十进制译码器,有用于显示七段字形的 BCD-七段译码器。七段显示器有液晶显示器、荧光数码管、半导体发光数码管(又有共阳极和共阴极之分)等多种,它们对驱动电压、驱动电流的要求是不同的。因此,集成七段译码驱动器的输出电流和输出电压有多种规格,输出驱动方式有电平驱动和低电平驱动两种,输出电路的结构也有多种形式。例如驱动液晶显示器的输出电路常由异或门构成,驱动共阴极半导体显示管的输出电路常采用集电极开路或发射极开路的输出方式。

图 3-5-20 是一个七段译码驱动器和共阴极半导体发光数码管的连接示意图。图中 $Y_a \sim Y_g$ 是七段译码驱动器的输出端,分别和半导体发光数码管的 a~g 段相连。 A_3 、 A_2 、 A_1 、 A_0 是七段译码驱动器的 BCD 码输入

表 3-5-9 3 线-8 线译码器的逻辑状态表

| 输 入 | | 输 出 | | | | | | | | | | |
|-------|-------------------------|-------|-------|-------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| S_1 | $\bar{S}_2 + \bar{S}_3$ | A_2 | A_1 | A_0 | \bar{Y}_0 | \bar{Y}_1 | \bar{Y}_2 | \bar{Y}_3 | \bar{Y}_4 | \bar{Y}_5 | \bar{Y}_6 | \bar{Y}_7 |
| × | 1 | × | × | × | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 0 | × | × | × | × | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 |
| 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 |
| 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 |



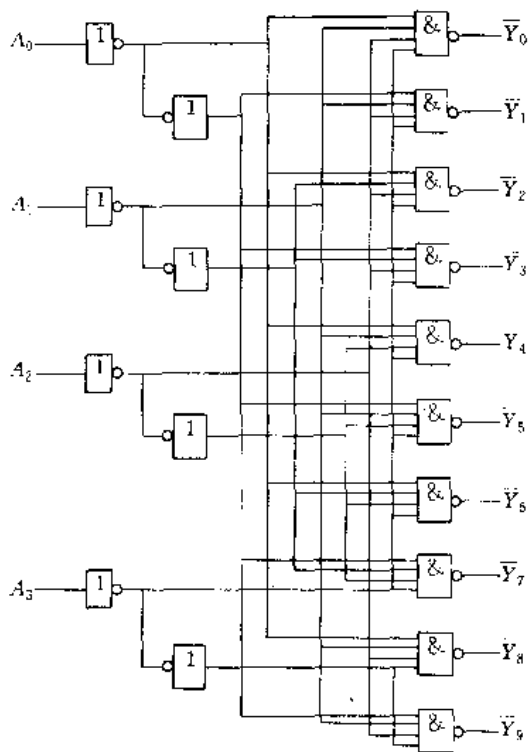


图 3-5-19 4线-10线译码器的逻辑图(CT74LS42)

端, \overline{BI} 是灭灯输入端。当 \overline{BI} 为低电平时, 不论 $A_3A_2A_1A_0$ 的状态如何, $Y_0 \sim Y_9$ 均为低电平, 数码管熄灭。当 \overline{BI} 为高电平时, 数码管根据输入的 BCD 码显示出相应的十进制数。例如 $A_3A_2A_1A_0 = 0000$, 则 $Y_0 \sim Y_9$ 为 1, Y_0 为 0, 显示出 0; $A_3A_2A_1A_0 = 0001$, 则 Y_0 和 Y_1 为 1, 其余 Y 端为 0, 显示出 1。

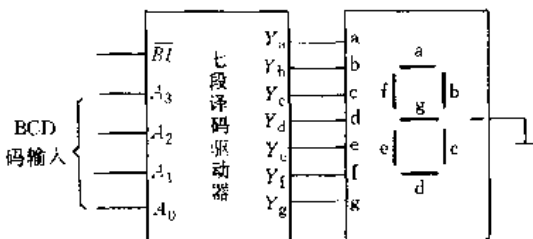


图 3-5-20 七段译码驱动器(74LS248)和共阴极半导体发光数码管连接示意图

6 数据选择器和数据分配器

6.1 数据选择器

数据选择器可以从输入的多个数字信号中选出其中的任何一个输出。常用的数据选择器有四 2 选 1 (在

一个芯片中含有四 2 选 1 数据选择器)、四 3 选 1、双 4 选 1、8 选 1 和 16 选 1 数据选择器等几种。它们分别具有 1 个、2 个、3 个或 4 个通道选择控制输入端。有的器件带有选通控制输入端, 有的则不带。有的器件为三态输出, 带有使能输入端。有的器件具有正、反码输出, 并带有正、反码输出控制端。

图 3-5-21 是一个典型的 4 选 1 数据选择器的逻辑图。图中 $D_0 \sim D_3$ 是数据输入端, A_1, A_0 是通道选择控制输入端, \overline{S} 是选通控制输入端。利用 \overline{S} 端既可控制电路的工作状态, 又可扩展功能。该数据选择器输出的逻辑表达式为

$$Y = (D_0\overline{A_1}\overline{A_0} + D_1A_1\overline{A_0} + D_2\overline{A_1}A_0 + D_3A_1A_0)\overline{S}$$

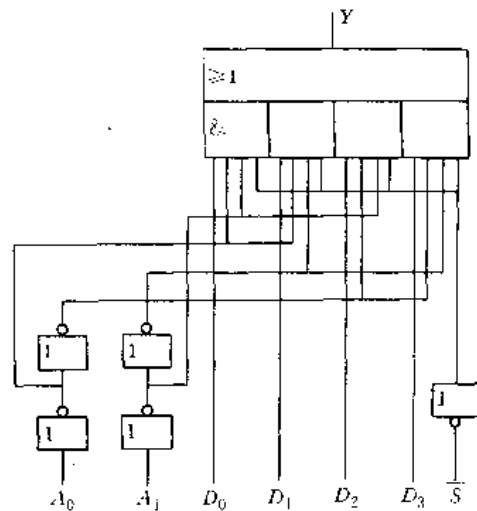


图 3-5-21 4选1数据选择器的逻辑图

$$\left(\frac{1}{2}\text{CT74LS153}\right)$$

当 $\overline{S} = 1$ 时, $Y = 0$; 当 $\overline{S} = 0$ 时, 则根据通道选择信号 A_1A_0 来决定输出数据(例如 $A_1A_0 = 00$ 时 $Y = D_0$, $A_1A_0 = 10$ 时 $Y = D_1$)。

6.2 数据分配器

数据分配器可以把输入的一个数字信号分配给多个输出端中的任何一个。图 3-5-22 是一个四路数据分配器的逻辑图。改变加于 A_0, A_1 端的通道选择信号, 就可将加于 D 端的输入数据分配给输出端 $Y_0 \sim Y_3$ 中的任何一个而输出。

带有控制输入端的译码器可作为数据分配器使用。此时把译码器的控制输入端作为数据输入端, 把地址输入端作为通道选择信号输入端。这样, 输入数据就可由通道选择信号所指定的一个输出端传出去。



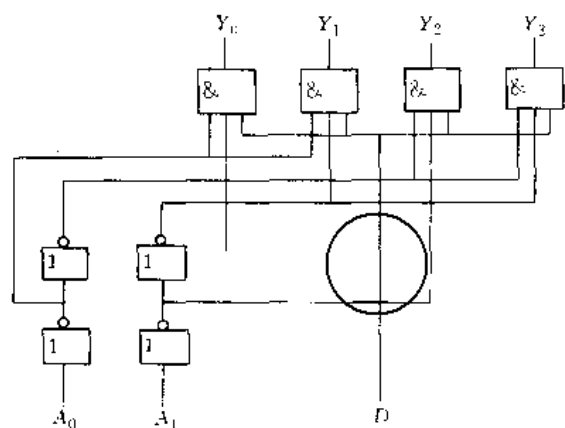


图 3-5-22 四路数据分配器的逻辑图

7 运算器

7.1 加法器

1. 半加器和全加器 半加器和全加器是算术运算电路的基本单元。半加器仅把两个一位二进制数相加,而不考虑从低位来的进位数。半加器可以用一个异或门和一个与门来实现。图 3-5-23 是半加器的逻辑图及符号。图中 A_i 和 B_i 分别为加数和被加数, S_i 为本位和数, C_i 是进位数。

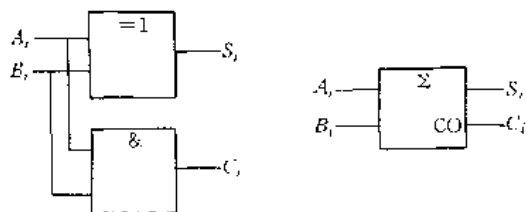


图 3-5-23 半加器的逻辑图及符号

能把两个一位二进制数及从低位来的进位数相加的运算电路称为全加器。表 3-5-10 是其逻辑状态表。表中 A_i 和 B_i 分别是加数和被加数, C_{i-1} 是相邻低位来的进位数, S_i 为本位和数, C_i 为向相邻高位的进位数。

表 3-5-10 全加器的逻辑状态表

| A_i | B_i | C_{i-1} | S_i | C_i |
|-------|-------|-----------|-------|-------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| 0 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| 0 | 1 | 1 | 0 | 1 |
| 1 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| 1 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 1 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |

图 3-5-24 是一种全加器的逻辑图和符号。由逻辑图可得出逻辑表达式为

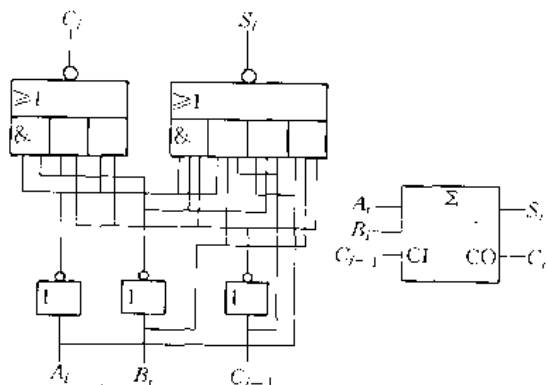


图 3-5-24 全加器的逻辑图及符号

$$\left(\frac{1}{2} \text{CT74LS183} \right)$$

$$S_i = \overline{A_i} \overline{B_i} C_{i-1} + \overline{A_i} B_i C_{i-1} + A_i \overline{B_i} C_{i-1} + A_i B_i C_{i-1}$$

$$= \overline{A_i} \overline{B_i} C_{i-1} + \overline{A_i} B_i C_{i-1} + A_i \overline{B_i} C_{i-1} + A_i B_i C_{i-1}$$

$$C_i = \overline{A_i} \overline{B_i} + \overline{A_i} B_i C_{i-1} + A_i \overline{B_i} C_{i-1} + A_i B_i C_{i-1}$$

$$= A_i B_i + B_i C_{i-1} + A_i C_{i-1}$$

2. 多位数加法器 两个多位二进制数相加可用多个全加器来实现。图 3-5-25 是四位并行相加串行进位加法器,它是依次将低位全加器的进位输出接到相邻高位全加器的进位输入而构成的。这种加法器电路结构比较简单,但因采用串行进位,任一位的加法运算必须在低一位的运算完成之后才能进行,因此运算速度慢,适用于对运算速度要求不高的场合。

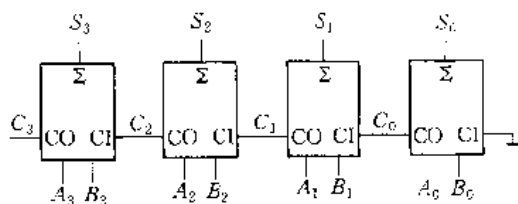


图 3-5-25 四位并行相加串行进位加法器

在要求运算速度较高的场合,可采用超前进位加法器(例如四位超前进位加法器)。这种加法器中每一位的进位数直接由加数 $A_{i-1}, A_{i-2}, \dots, A_0$ 和被加数 $B_{i-1}, B_{i-2}, \dots, B_0$ 确定,进位信号是并行产生的,无需从最低位开始逐位传递进位信号,故运算时间缩短了,但电路也较复杂。

7.2 算术逻辑单元(ALU)

算术逻辑单元(Arithmetic Logic Unit,简称 ALU)是一种能够完成多种算术运算和逻辑运算的多



功能运算电路,它能遵照控制信号的规定执行某一种算术运算或逻辑运算。

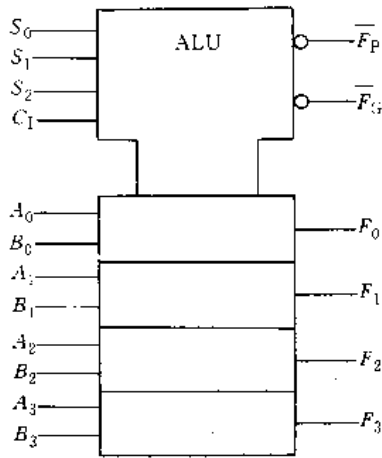


图 3·5-26 四位算术逻辑单元的符号(CT74S381)

集成算术逻辑单元有多种,它们具有不同的功能个数,例如 8 功能,32 功能。表 3·5-11 给出了一个四位算术逻辑单元的功能表。该 ALU 可以对两个四位数据 $A_3A_2A_1A_0$ 和 $B_3B_2B_1B_0$ (简称 A 和 B) 进行六种算术和逻辑运算(表中“加”“减”表示算术加、减,“+”表示逻辑加),并能清零(使各输出端为 0)和预置(使各输出端为 1),共有 8 个功能。功能的选择由加至控制

端 S_2, S_1, S_0 的输入信号决定。图 3·5-26 是该 ALU 的符号。图中 C_1 是加法运算时的进位输入端, $F_0 \sim F_3$ 为输出端, \bar{F}_p 和 \bar{F}_c 是进位传递输出端和进位产生输出端, \bar{F}_p, \bar{F}_c 可和同系列的超前进位产生器配合,构成超前进位的各种字长的加法器系统。

表 3·5-11 四位 ALU 功能表(CT74S381)

| 操作 选择 | | | 运算功能 |
|-------|-------|-------|--------------|
| S_2 | S_1 | S_0 | |
| 0 | 0 | 0 | 清零 |
| 0 | 0 | 1 | B 减 A |
| 0 | 1 | 0 | A 减 B |
| 0 | 1 | 1 | A 加 B |
| 1 | 0 | 0 | $A \oplus B$ |
| 1 | 0 | 1 | $A+B$ |
| 1 | 1 | 0 | $A \cdot B$ |
| 1 | 1 | 1 | 预置 |

7·3 数值比较器

数值比较器用来对两个数进行比较,以判断它们之间的大、小或相等。图 3·5-27 是一个典型的四位数值比较器的逻辑图。它能对两个四位二进制数 $A_3A_2A_1A_0$

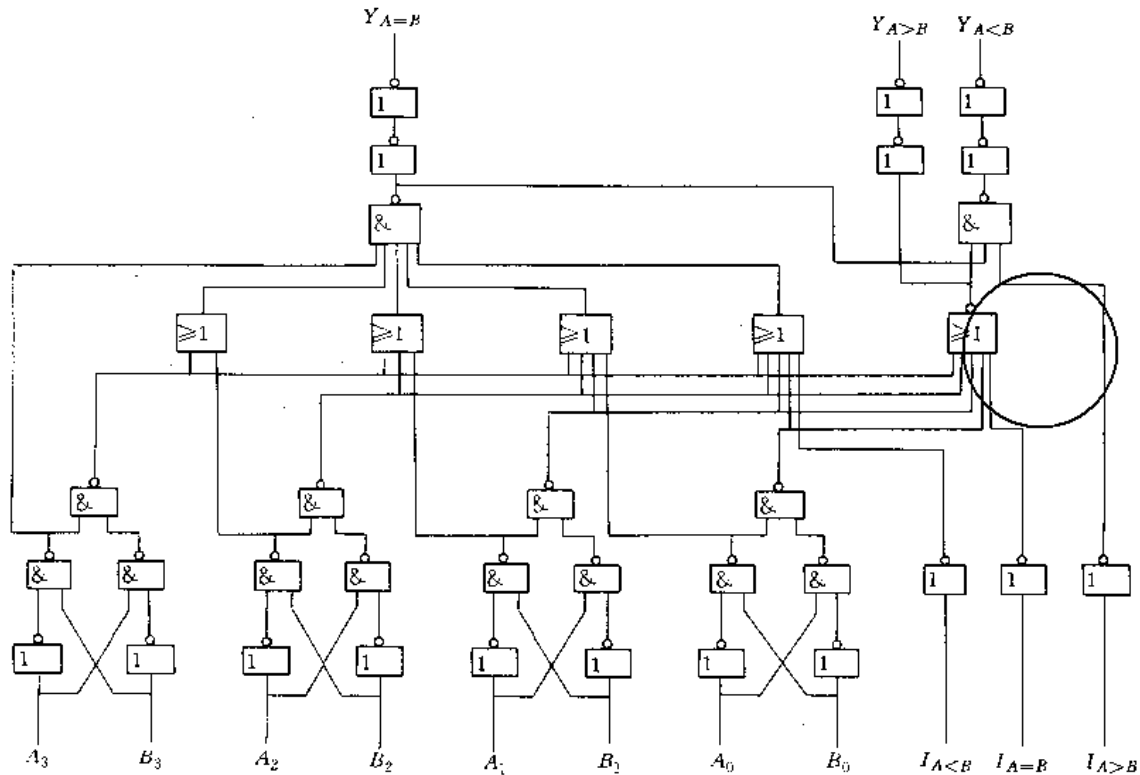


图 3·5-27 四位数值比较器的逻辑图(CC14585)



和 $B_3B_2B_1B_0$ 进行比较, 当 $A > B$ 、 $A < B$ 和 $A = B$ 时, $I_{(A>B)}$ 、 $I_{(A<B)}$ 和 $I_{(A=B)}$ 是级联输入端, 供多片比较器连接时用。表 3-5-12 是该数值比较器的功能表。

表 3-5-12 四位数值比较器的功能表

| 比较输入 | | | | 级联输入 | | | 输出 | | |
|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| $A_3 B_3$ | $A_2 B_2$ | $A_1 B_1$ | $A_0 B_0$ | $I_{(A<B)}$ | $I_{(A=B)}$ | $I_{(A>B)}$ | $Y_{(A<B)}$ | $Y_{(A=B)}$ | $Y_{(A>B)}$ |
| $A_3 > B_3$ | × | × | × | × | × | × | 0 | 0 | 1 |
| $A_3 = B_3$ | $A_2 > B_2$ | × | × | × | × | × | 0 | 0 | 1 |
| $A_3 = B_3$ | $A_2 = B_2$ | $A_1 > B_1$ | × | × | × | × | 0 | 0 | 1 |
| $A_3 = B_3$ | $A_2 = B_2$ | $A_1 = B_1$ | $A_0 > B_0$ | × | × | × | 0 | 0 | 1 |
| $A_3 = B_3$ | $A_2 = B_2$ | $A_1 = B_1$ | $A_0 = B_0$ | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| $A_3 = B_3$ | $A_2 = B_2$ | $A_1 = B_1$ | $A_0 = B_0$ | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| $A_3 = B_3$ | $A_2 = B_2$ | $A_1 = B_1$ | $A_0 < B_0$ | × | × | × | 1 | 0 | 0 |
| $A_3 = B_3$ | $A_2 = B_2$ | $A_1 < B_1$ | × | × | × | × | 1 | 0 | 0 |
| $A_3 = B_3$ | $A_2 < B_2$ | × | × | × | × | × | 1 | 0 | 0 |
| $A_3 < B_3$ | × | × | × | × | × | × | 1 | 0 | 0 |

8 电平转换电路

当一个数字系统中同时使用 TTL、CMOS、HTL、ECL 等不同类别的集成电路时, 由于它们的逻辑电平往往互不一致, 故一般不能直接相互连接使用, 必需通过电平转换电路来相互连接。

数字集成电路相互连接的原则是:

(1) 前级电路要能为后级电路提供合乎标准的高、低电平, 即前级电路的输出电平 U_{OH} 、 U_{OL} 和后级电路的输入电平 U_{IH} 、 U_{IL} 之间必须满足 $U_{OH(min)} \geq U_{IH(min)}$ 和 $U_{OL(max)} \leq U_{IL(max)}$ 的关系;

(2) 前级电路要能为后级电路提供足够的驱动电流, 即前级电路的输出电流 I_{OH} 、 I_{OL} 和后级电路的输入

电流 I_{IH} 、 I_{IL} 之间, 必须满足 $I_{OH(max)} \geq I_{IH(max)}$ 和 $I_{OL(max)} \geq I_{IL(max)}$ 的关系。

电平转换电路能接受来自某一种类型集成电路的输出信号而工作, 并输出另一种类型集成电路所需要的电压、电流信号。图 3-5-28 给出了用分立元件构成的电平转换电路的示例。

集成的电平转换电路有多种, 如 TTL-MOS, MOS-TTL, ECL-MOS, ECL-TTL, TTL-ECL, HTL-TTL 和 TTL-HTL 电平转换器等。使用这种电平转换器简单、方便, 有的电平转换器的电源电压允许在一定范围内调节, 以输出后级电路所需的合适电平。图 3-5-29 给出了集成电平转换器接法示例。

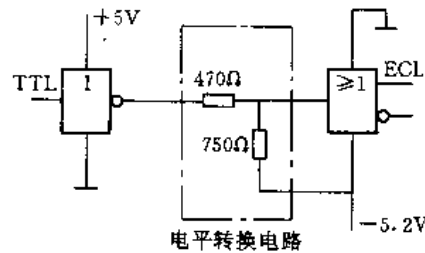
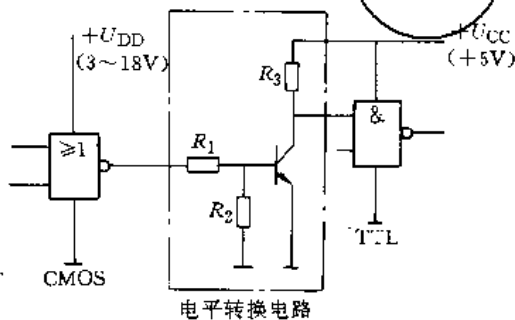


图 3-5-28 用分立元件构成的电平转换电路示例



(续)

| 组成方式 | 双与非门交叉直接耦合 | | | | | 双或非门交叉直接耦合 | | | | |
|---------|--------------------------------------------------------------|-----------|-------|-----------|------|-----------------------------------------------|-----|-------|-----------|------|
| | \bar{S} | \bar{R} | Q^n | Q^{n+1} | 功能说明 | S | R | Q^n | Q^{n+1} | 功能说明 |
| 逻辑状态转换表 | 0 | 0 | 0 | 不定① | | 1 | 1 | 1 | 不定② | |
| | 0 | 0 | 1 | | | 1 | 1 | 0 | | |
| | 0 | 1 | 0 | 1 | 置1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 置1 |
| | 0 | 1 | 1 | 1 | | 1 | 0 | 0 | 1 | |
| | 1 | 0 | 0 | 0 | 置0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 置0 |
| | 1 | 0 | 1 | 0 | | 0 | 1 | 0 | 0 | |
| 1 | 1 | 0 | 0 | 不变 | 0 | 0 | 1 | 1 | 不变 | |
| 1 | 1 | 1 | 1 | | 0 | 0 | 0 | 0 | | |
| 特性方程 | $Q^{n+1} = S + \bar{R}Q^n$ $\bar{S} + \bar{R} = 1$ (约束条件) | | | | | $Q^{n+1} = S + \bar{R}Q^n$ $SR = 0$ (约束条件) | | | | |

注:1. Q^n 表示原来状态,称为现态; Q^{n+1} 表示改变后的状态,称为次态。

2. \bar{R}, R 端称为置0端或复位端, \bar{S}, S 端称为置1端或置位端。但 \bar{R}, \bar{S} 端是加低电平使 Q 端置0、置1,而 R, S 端是加高电平使 Q 端置0、置1。

- ① 当 \bar{S}, \bar{R} 的0状态同时变为1状态后, Q 的状态不确定。因此不允许出现此种输入情况。
- ② 当 S, R 的1状态同时变为0状态后, Q 的状态不确定。因此不允许出现此种输入情况。

1.2 时钟触发器

基本RS触发器的动作特点是:输入的置0或置1信号一出现,输出状态就可能随之发生变化(严格地说还有传输延迟时间)。而在数字系统中往往要求触发器按一定的时间节拍动作,这就需要采用带有时钟脉冲输入端的触发器——时钟触发器。

时钟触发器的输出状态只有在时钟脉冲(Clock Pulse, 以下简称CP)到达时才按输入信号发生变化。

通常一个CP波形可分为CP=0(低电平期间)、CP上升沿、CP=1(高电平期间)、CP下降沿四个阶段。如果触发器在CP=1或CP=0期间能改变输出状态,则称为电平触发;如果在CP上升边沿或下降边沿触发器能触发翻转,就称为上升沿(正边沿)或下降沿(负边沿)触发。

表3-6-2列出了时钟控制的D、RS、JK、T触发器的逻辑符号和功能。

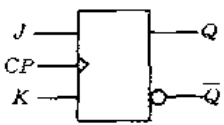
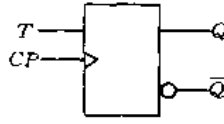
表3-6-2 各种触发器的逻辑符号和逻辑功能

| 类型 | 逻辑符号 | 逻辑状态转换表 | 特性方程 | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------|-----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|-----------|-----------|---|---|-------|---------------|---|---|---|---|---|---|---|----|-----------------------------------------------|
| D触发器 | | <table border="1"> <tr> <td>D</td> <td>Q^{n+1}</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>1</td> </tr> </table> | D | Q^{n+1} | 0 | 0 | 1 | 1 | $Q^{n+1} = D$ | | | | | | | | | |
| D | Q^{n+1} | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| RS触发器 | | <table border="1"> <tr> <td>R</td> <td>S</td> <td>Q^{n+1}</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>0</td> <td>Q^n</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>1</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>1</td> <td>不定</td> </tr> </table> | R | S | Q^{n+1} | 0 | 0 | Q^n | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 不定 | $Q^{n+1} = S + \bar{R}Q^n$ $SR = 0$ (约束条件) |
| R | S | Q^{n+1} | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0 | 0 | Q^n | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 0 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0 | 1 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 1 | 不定 | | | | | | | | | | | | | | | | |

此星公司制作 请尊重作者版权



(续)

| 类型 | 逻辑符号 | 逻辑状态转换表 | | 特性方程 | |
|--------|-----------------------------------------------------------------------------------|---------|-------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| JK 触发器 |  | J | K | Q^{n+1} | $Q^{n+1} = J\bar{Q}^n + \bar{K}Q^n$ |
| | | 0 | 0 | Q^n | |
| | | 0 | 1 | 0 | |
| | | 1 | 0 | 1 | |
| | | 1 | 1 | \bar{Q}^n | |
| T 触发器 |  | T | Q^{n+1} | $Q^{n+1} = T\bar{Q}^n + \bar{T}Q^n$ | |
| | | 0 | Q^n | | |
| | | 1 | \bar{Q}^n | | |

注:1. 由于输入端个数或有效电平的不同,一个类型的触发器可能有多种逻辑符号。表中给出的逻辑符号是 CP 上升沿触发的,且没有画出直接复位端和直接置位端。

2. 这里所列逻辑状态表是一种比较简单的表达形式,较详细的见表 3-6-3 至 3-6-6。表中 D、R、S、J、K、T 是 CP 来到之前的输入状态, Q^n 是 CP 来到之前的输出状态(现态), Q^{n+1} 是 CP 作用之后的输出状态(次态)。

1-2-1 D 锁存器和 D 触发器

1. D 锁存器 通常把电平触发的 D 触发器称为 D 锁存器。锁存器可把输入数据加以锁存,主要用于信息的暂时存放。图 3-6-1 是 D 锁存器一种典型的逻辑图及逻辑符号。图中 CP 端为时钟脉冲输入端, D 为数据输入端。在 CP=1 时 $Q^{n+1}=D$, D 端的输入数据被传送到 Q 端,在 CP=0 时数据被锁存在 Q 端。

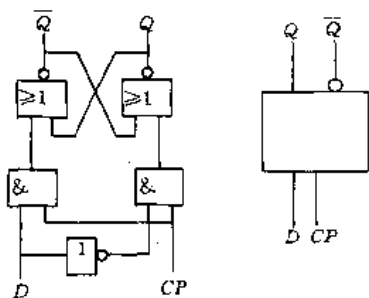


图 3-6-1 D 锁存器及其逻辑符号

在集成器件中,往往把多个 D 锁存器制作在一个芯片上,如四 D 锁存器、八 D 锁存器。各个 D 锁存器的时钟脉冲输入端连接在一起,对外引出一个 CP 端。有的产品还有一个公共的直接清零端 R_D ,以便于清零。如果 D 锁存器采用三态输出,则要在使能端 EN 施加所规定的电平才能在输出端获得数据。

2. D 触发器 维持阻塞 D 触发器是一种常用的 TTL 触发器,其逻辑图和逻辑符号如图 3-6-2 所示。图中 \bar{R}_D 为直接复位端, \bar{S}_D 为直接置位端。在 \bar{R}_D 和 \bar{S}_D 端加低电平可直接置 0 或置 1。由于存在①、②、③、④

四根连线,使该触发器的次态仅仅取决于 CP 上升沿到达时刻的输入状态,而与 CP=1 期间的输入情况无关。通常连线①、②、③、④分别称为置 1 阻塞线、置 0 维持线、置 1 维持线、置 0 阻塞线。表 3-6-3 是它的逻辑状态转换表。

维持阻塞 D 触发器的产品多数是双 D 触发器,即在一个封装中有 2 个 D 触发器。有的产品做成多个输

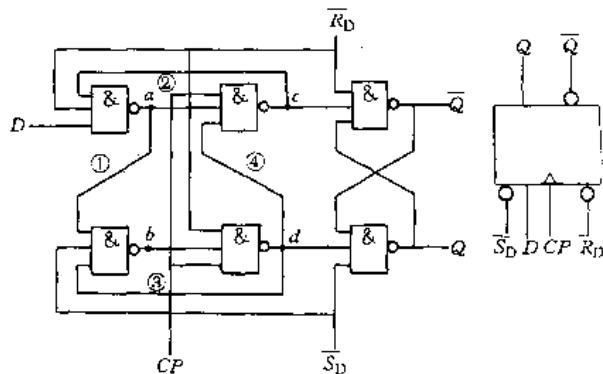


图 3-6-2 维持阻塞 D 触发器及其逻辑符号

表 3-6-3 维持阻塞 D 触发器逻辑状态转换表

| CP | \bar{S}_D | \bar{R}_D | D | Q^n | Q^{n+1} |
|----|-------------|-------------|---|-------|-----------|
| × | 1 | 0 | × | × | 0 |
| × | 0 | 1 | × | × | 1 |
| ↑ | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| ↑ | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| ↑ | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 |
| ↑ | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |

注:×表示任意状态,↑表示 CP 上升沿作用。



入端的形式,此时各个输入端构成与逻辑关系。例如输入端为 3 个,则 $D = D_1 D_2 D_3$ 。

CMOS D 触发器的逻辑图及其逻辑符号如图 3-6-3 所示。图中或非门 DG_1 、 DG_2 和传输门 TG_1 、 TG_2 构成主触发器,或非门 DG_3 、 DG_4 和传输门 TG_3 、 TG_4 构成从触发器。当 $CP=0, \overline{CP}=1$ 时, TG_1 、 TG_4 导通、 TG_2 、 TG_3 截止, D 端的输入信号送入主触发器,使 $Q' = D$, 而从触发器维持原状态不变。当 $CP=1, \overline{CP}=0$ 时, TG_1 、 TG_4 截止、 TG_2 、 TG_3 导通,主触发器中 Q' 的状态被保存并送入从触发器,使 $Q = Q' = D$ 。可见输出

状态的转换发生在 CP 上升沿。表 3-6-4 是它的逻辑状态转换表。该触发器的 R_D 或 S_D 端是加高电平来实现直接置 0 或置 1 的。

表 3-6-4 CMOS D 触发器逻辑状态转换表

| CP | S_D | R_D | D | Q^n | Q^{n+1} |
|------------|-------|-------|----------|----------|-----------|
| \times | 0 | 1 | \times | \times | 0 |
| \times | 1 | 0 | \times | \times | 1 |
| \uparrow | 0 | 0 | 0 | \times | 0 |
| \uparrow | 0 | 0 | 1 | \times | 1 |

注: \times 表示任意状态, \uparrow 表示 CP 上升沿作用。

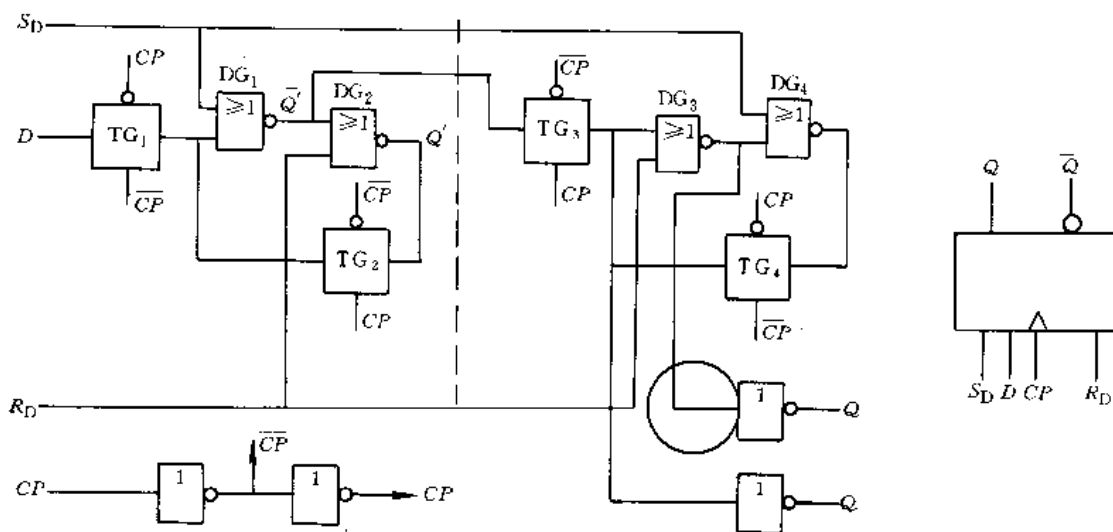


图 3-6-3 CMOS D 触发器及其逻辑符号

1-2-2 RS 触发器

图 3-6-4 是 TTL 主从 RS 触发器的逻辑原理图和逻辑符号。图中与非门 $DG_5 \sim DG_8$ 组成主触发器,与非门 $DG_1 \sim DG_4$ 组成从触发器。在 $CP=1$ 时,主触发器接受 R 、 S 的输入信号而动作,从触发器被封锁,保持

原来的状态不变。在 $CP=0$ 时,主触发器被封锁, Q' 的状态保持不变,而从触发器接受主触发器的输出信号而动作, $Q = Q'$ 。可见输出状态的转换发生在 CP 的下降沿。表 3-6-5 是它的逻辑状态转换表。若输入 $R=S=1$, 则当 CP 下降沿出现后, Q 端的状态不确定,故使用时应避免出现 $R=S=1$ 的情况。

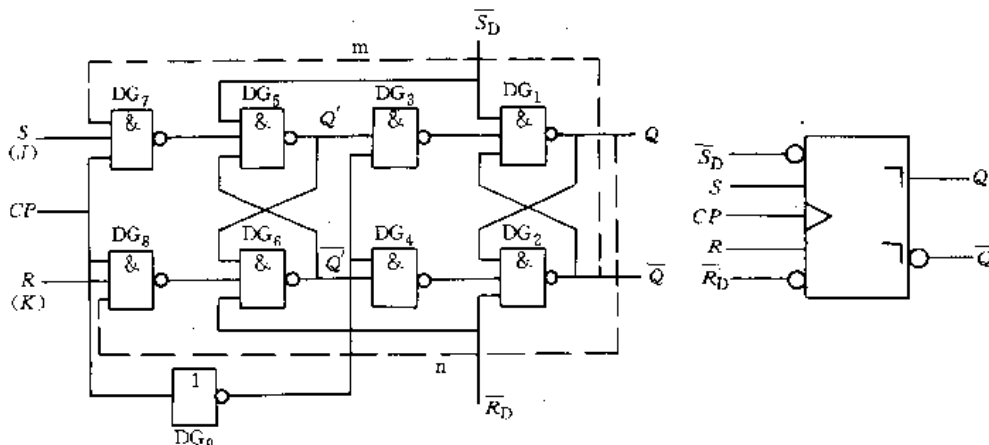


图 3-6-4 主从 RS 触发器及其逻辑符号



表 3-6-5 主从 RS 触发器逻辑状态转换表

| CP | \bar{S}_D | \bar{R}_D | S | R | Q^n | Q^{n+1} |
|----|-------------|-------------|---|---|-------|-----------|
| × | 1 | 0 | × | × | × | 0 |
| × | 0 | 1 | × | × | × | 1 |
| ↓ | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| ↓ | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| ↓ | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| ↓ | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| ↓ | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| ↓ | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 |
| ↓ | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 不定 |
| ↓ | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 不定 |

注：×表示任意状态，↓表示 CP 下降沿作用。

1.2.3 JK 触发器

TTL JK 触发器的电路结构有主从型和边沿型二种常见形式，且以边沿型居多。

主从 JK 触发器是在图 3-6-4 的主从 RS 触发器中，从 \bar{Q} 端引一反馈线 m 至 S 端输入的与非门，从 Q 端引一反馈线 n 至 R 端输入的与非门，并把 S 改为 J，R 改为 K 而成。

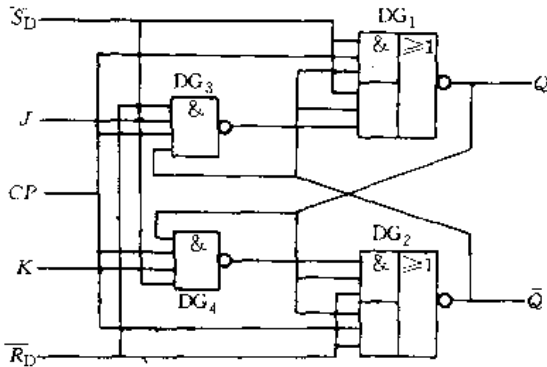


图 3-6-5 边沿 JK 触发器

边沿 JK 触发器的一种典型电路结构如图 3-6-5 所示。图中与非门 DG₁ 和 DG₂ 组成基本触发器，与非门 DG₃ 和 DG₄ 是输入控制门，而且 DG₃、DG₄ 的传输延迟时间大于基本触发器的翻转时间。这种边沿触发器就是利用传输延迟时间上存在的这个差异而实现边沿触发的。即在 CP 下降沿前接受 J、K 信息，在 CP 下降沿触发翻转。其逻辑状态转换表如表 3-6-6 所示。可见 JK 触发器在 J=K=1 时，CP 输入后触发器亦能翻转一次，克服了 RS 触发器在 R=S=1 时的不定状态，因此可用 JK 触发器方便地组成计数器。

TTL JK 触发器品种较多，图 3-6-6 示出了几种逻辑符号，图中 CP 引线根部有小圆圈者表示 CP 下降沿触发。无小圆圈则表示 CP 上升沿触发。

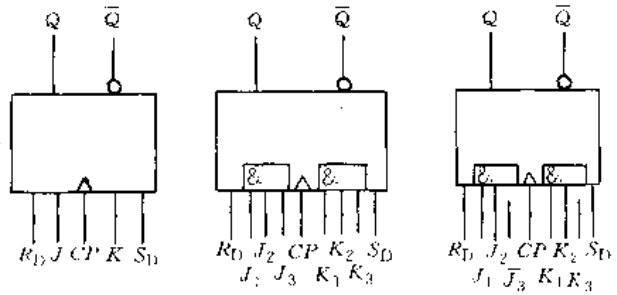


图 3-6-6 TTL 边沿 JK 触发器的逻辑符号

表 3-6-6 边沿 JK 触发器逻辑状态转换表

| CP | \bar{S}_D | \bar{R}_D | J | K | Q^n | Q^{n+1} |
|----|-------------|-------------|---|---|-------|-----------|
| × | 1 | 0 | × | × | × | 0 |
| × | 0 | 1 | × | × | × | 1 |
| ↓ | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| ↓ | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| ↓ | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| ↓ | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| ↓ | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| ↓ | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 |
| ↓ | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 |
| ↓ | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 |

注：×表示任意状态，↓表示 CP 下降沿作用。

CMOS JK 触发器是在图 3-6-3 CMOS D 触发器的基础上增加若干个门电路构成的，其逻辑原理图如图 3-6-7 所示。CMOS JK 触发器的 J、K 输入亦有几种不同的形式，图 3-6-8 是它们的逻辑符号。CMOS JK 触发器是 CP 上升沿触发，其直接置 0 或置 1 是在 RD 或 SD 端施加高电平来实现的。

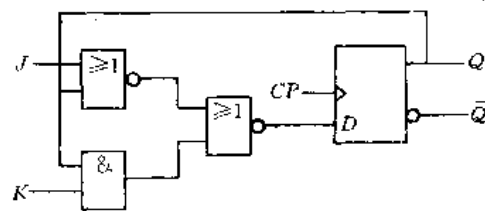


图 3-6-7 由 CMOS D 触发器构成的 JK 触发器

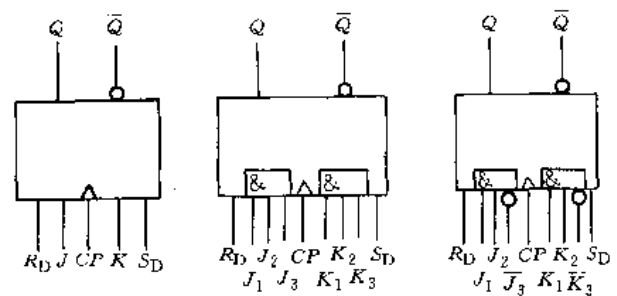


图 3-6-8 CMOS JK 触发器的逻辑符号



JK 触发器的逻辑功能完善,使用灵活,通用性强,是应用较广泛的一种触发器。

1.2.4 T 触发器

T 触发器可以方便地由 JK 或 D 触发器转换而

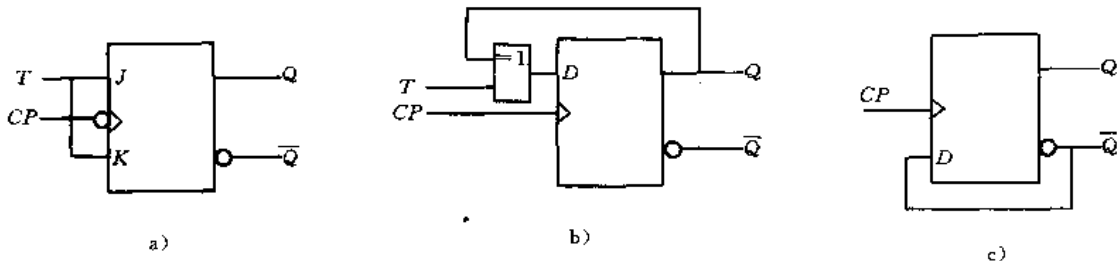


图 3-6-9 JK、D 触发器转换为 T 触发器
a) JK→T b) D→T c) D→T'

2 寄存器和移位寄存器

2.1 寄存器

寄存器能够接收、存放、传送数码,故也称为数码寄存器,它被广泛地应用于数字系统和数字计算机中。

寄存器是借助于时钟脉冲的作用而把数码存放在触发器中,数码的位数和所采用触发器的个数是相等的。寄存器可以用基本 RS 触发器、D 锁存器、D 触发器、JK 触发器来构成,较常用的位数是四位和八位。

图 3-6-10 是用四个 D 触发器组成的四位寄存器。图中 $\overline{C_r}$ 为异步清零端。当 $\overline{C_r}=0$ 时, $Q_0 \sim Q_3$ 均为 0; 当 $\overline{C_r}=1$ 时,在 CP 上升沿作用后就将 $D_0 \sim D_3$ 端的输入数码并行送入四个 D 触发器并予以保持,直至下一个 CP 上升沿作用时存入新的数码。

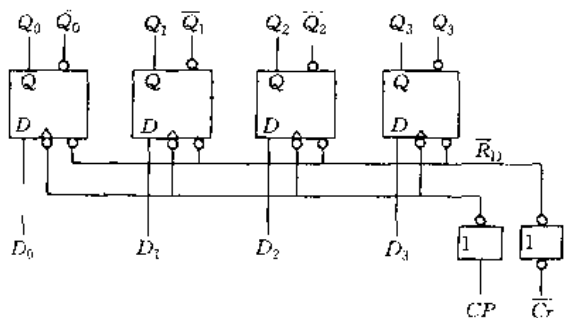


图 3-6-10 用 D 触发器组成的四位寄存器
(四上升沿 D 触发器 CT74LS175)

2.2 移位寄存器

移位寄存器除了具有寄存数码的功能外,还具有在移位脉冲作用下将所存放的数码向右或向左逐次移位的功能。

成,如图 3-6-9a 和 b 所示。T 触发器是具有计数功能(当 $T=1$ 时)和保持功能(当 $T=0$ 时)的触发器。若把 D 触发器的 D 端和 \overline{Q} 端直接相连,则 $Q^{n+1}=\overline{Q}^n$, 仅具有计数功能,称为 T' 触发器,如图 3-6-9c 所示。

移位寄存器的数码输入方式有并行(各位数码同时输入)和串行(数码一位一位依次输入)两种,输出方式也有并行和串行两种。因此输入、输出方式可分为串入-串出、串入-并出、并入-串出和并入-并出四种。按移位方向可分为单向和双向移位寄存器。按位数可分为四位、八位或其它位数的移位寄存器,还有可变长度移位寄存器。

1. 单向移位寄存器 图 3-6-11 是一个四位单向移位寄存器的逻辑图。它由四个 D 触发器依次首尾相连组成,电路中输入端和输出端都接有反相器,称为缓冲级。此电路具有串入-串出和串入-并出的功能,在 CP 上升沿作用下,能从 D_1 端输入数码并逐级向右移位。表 3-6-7 是它的逻辑状态转换表。

表 3-6-7 四位单向移位寄存器逻辑状态转换表

| CP | R_0 | D_1 | Q_0^{n+1} | Q_1^{n+1} | Q_2^{n+1} | Q_3^{n+1} |
|----|-------|-------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| × | 1 | × | 0 | 0 | 0 | 0 |
| ↑ | 0 | 0 | 0 | Q_0^n | Q_1^n | Q_2^n |
| ↑ | 0 | 1 | 1 | Q_0^n | Q_1^n | Q_2^n |

注: × 表示任意状态, ↑ 表示 CP 上升沿作用。

2. 双向移位寄存器 双向移位寄存器既能向左移位,又能向右移位。图 3-6-12 是一个典型的四位双向移位寄存器的逻辑图,它由四个 RS 触发器和相应的输入控制电路组成。图中 D_R 为数码右移输入端, D_L 为数码左移输入端, $D_0 \sim D_3$ 为数码并行输入端, $Q_0 \sim Q_3$ 为并行输出端(串行输出时以 Q_3 或 Q_0 为输出端), S_1 和 S_0 为控制端,由 S_1 、 S_0 的取值不同来决定移位寄存器处于何种工作状态。



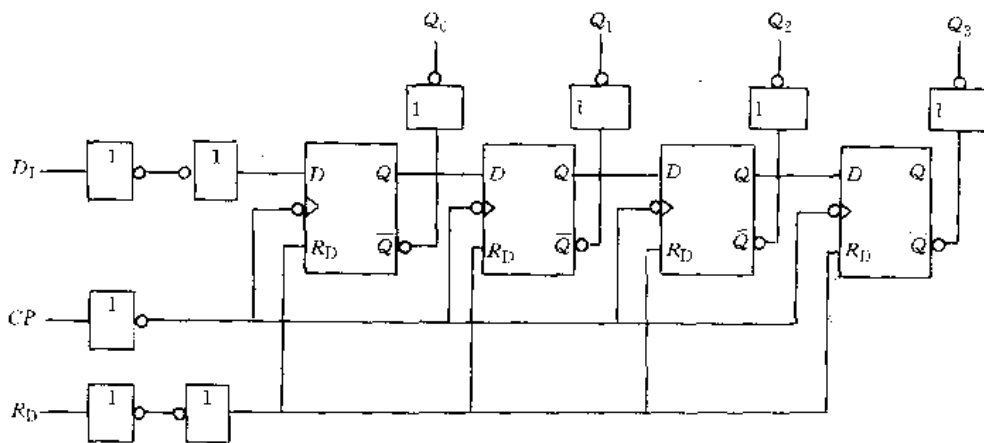


图 3-6-11 四位单向移位寄存器

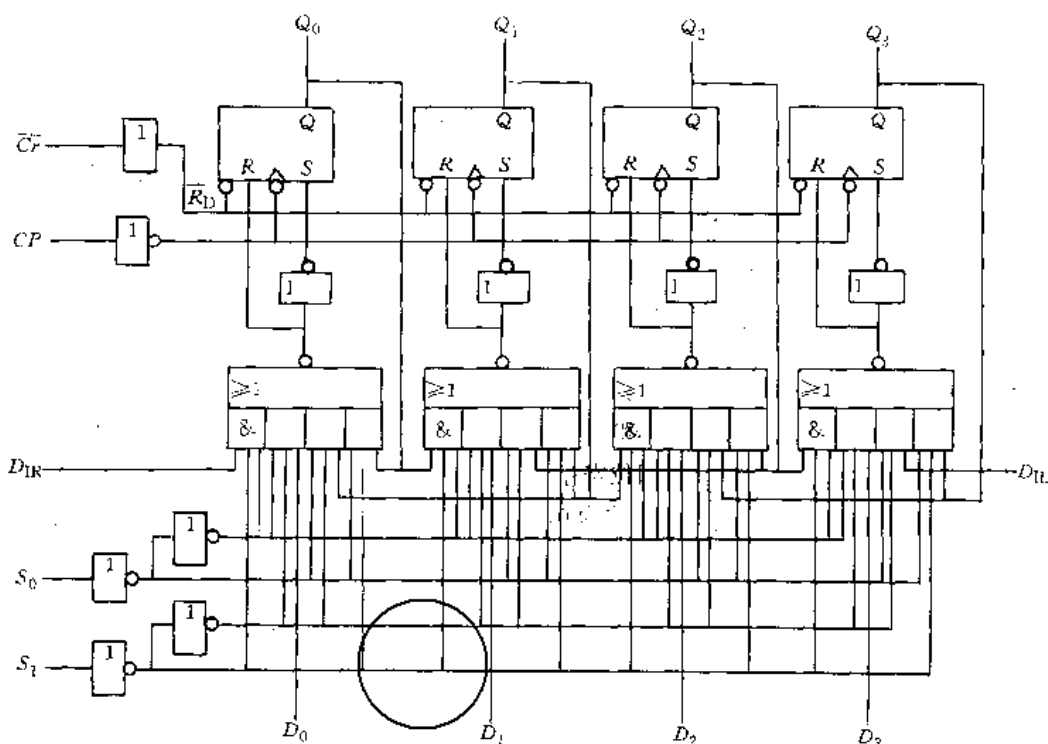


图 3-6-12 四位双向移位寄存器(CT74LS194)

当 $\overline{C_r} = 1$ 时, 电路的状态方程为

$$Q_0^{n+1} = \overline{S_1} S_0 D_{1R} + S_1 S_0 D_0 + S_1 \overline{S_0} Q_1^n + \overline{S_1} \overline{S_0} Q_0^n$$

$$Q_1^{n+1} = \overline{S_1} S_0 Q_0^n + S_1 S_0 D_1 + S_1 \overline{S_0} Q_2^n + \overline{S_1} \overline{S_0} Q_1^n$$

$$Q_2^{n+1} = \overline{S_1} S_0 Q_1^n + S_1 S_0 D_2 + S_1 \overline{S_0} Q_3^n + \overline{S_1} \overline{S_0} Q_2^n$$

$$Q_3^{n+1} = \overline{S_1} S_0 Q_2^n + S_1 S_0 D_3 + S_1 \overline{S_0} D_{3L} + \overline{S_1} \overline{S_0} Q_3^n$$

表 3-6-8 是该移位寄存器的逻辑状态转换表。双向移位寄存器功能全面, 是应用较多的一种逻辑器件。

表 3-6-8 四位双向移位寄存器的逻辑状态转换表

| 清零 $\overline{C_r}$ | 控制输入 $S_1 S_0$ | 时钟脉冲 CP | 串行输入 $D_{1R} D_{1L}$ | 并行输入 $D_0 D_1 D_2 D_3$ | 输出 $Q_0^{n+1} Q_1^{n+1} Q_2^{n+1} Q_3^{n+1}$ | 功能说明 |
|------------------------|-------------------|--------------|-------------------------|---------------------------|-------------------------------------------------|------|
| 0 | × × | × | × × | × × × × | 0 0 0 0 | 清零 |
| 1 | 1 1 | ↑ | × × | $D_0 D_1 D_2 D_3$ | $D_0 D_1 D_2 D_3$ | 并行输入 |



(续)

| 清零 $\overline{C_F}$ | 控制输入 $S_1 S_0$ | 时钟脉冲 CP | 串行输入 $D_{1R} D_{1L}$ | 并行输入 $D_0 D_1 D_2 D_3$ | 输出 $Q_0^{n+1} Q_1^{n+1} Q_2^{n+1} Q_3^{n+1}$ | 功能说明 |
|------------------------|-------------------|--------------|-------------------------|---------------------------|-------------------------------------------------|------|
| 1 | 0 1 | ↑ | 0 × | × × × × | 0 Q_0^n Q_1^n Q_2^n | 右移 |
| 1 | 0 1 | ↑ | 1 × | × × × × | 1 Q_0^n Q_1^n Q_2^n | |
| 1 | 1 0 | ↑ | × 0 | × × × × | Q_0^n Q_1^n Q_2^n 0 | 左移 |
| 1 | 1 0 | ↑ | × 1 | × × × × | Q_0^n Q_1^n Q_2^n 1 | |
| 1 | 0 0 | × | × × | × × × × | Q_0^n Q_1^n Q_2^n Q_3^n | 保持 |

注: ×表示任意状态; ↑表示 CP 上升沿作用。

2.3 MOS 动态移位寄存器

寄存器或移位寄存器有静态和动态两种类型, 本章 2.1 节和 2.2 节所介绍的是静态类型。目前国产 TTL 寄存器和移位寄存器都是静态类型, 而 MOS 移位寄存器既有静态类型, 也有动态类型。

MOS 静态移位寄存器可以在静止状态长久保持信息, 时钟电路简单, 使用方便, 但每个移位级的单元电路比较复杂, 不便于大规模集成。MOS 动态移位寄存器依靠 MOS 管的栅极电容存储信息, 它需要在时钟脉冲的不断作用下才能保持信息, 由于它的单元电路比较简单, 因此容易制成位数很多的移位寄存器。

图 3.6-13 是 CMOS 动态移位寄存单元(即动态

移位寄存器的一级)及其波形图。它由二个 CMOS 传输门 TG_1 、 TG_2 和二个 CMOS 反相器组成, 图中 C_1 、 C_2 分别为第一、二级反相器的输入电容。当 $CP_1=1$ 、 $CP_2=0$ 时, TG_1 导通, TG_2 截止, 输入信号存入 C_1 之中。 $CP_1=0$ 期间, 由于 C_1 的存储作用, M 、 N 的状态得以保持。当 $CP_2=1$ 、 $CP_1=0$ 时, N 端的状态被存入 C_2 , $Q = D_1$ 。 $CP_2=0$ 期间, 由于 C_2 的存储作用, Q 端状态得到保持。可见经过一个时钟周期, 数码就从输入端转移到输出端。

把很多动态移位寄存单元串接起来并设置输入逻辑电路和输出缓冲级则构成 CMOS 动态移位寄存器。例如一个 200 位的动态移位寄存器, 输入数码要经过 200 个时钟周期才移到输出端。

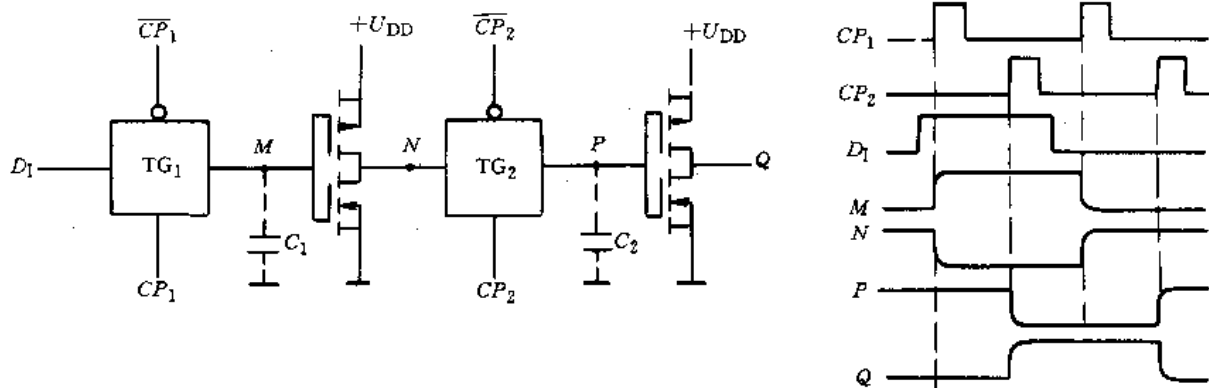


图 3.6-13 CMOS 动态移位寄存单元及波形图

3 计数器

3.1 概述

计数器是能对脉冲个数进行计数的逻辑电路。除了计数以外, 计数器还可用于分频、定时、产生节拍脉冲等。在数字电子计算机中取指令或进行数字运算等也要用到计数器。因此计数器是数字系统中使用最多

的一种器件。

计数器由若干个触发器和一些控制门组成, 其种类繁多, 具有多种分类方法。

按计数脉冲输入方式, 计数器可分为同步计数器和异步计数器。在同步计数器中, 计数脉冲加至所有触发器的 CP 端, 使应翻转的触发器同时翻转。而在异步计数器中, 计数脉冲并不引至所有触发器的 CP 端, 各触发器不是同时翻转的。异步计数器计数速度较慢, 但

此星公司制作 请尊重原作者版权



电路结构简单。

按计数的增减趋势,计数器可分为加法计数器(递增计数)、减法计数器(递减计数)和可逆计数器(既可加又可减)。

按计数进制,计数器可分为二进制计数器、十进制计数器和其他进制计数器。有时也按模数(计数器计数时所经历的独立状态总数)来区分计数器。若计数器由 N 级触发器组成,其输出的状态数目为 $M \leq 2^N$,就称为 M 进制计数器或模数为 M 的计数器。 M 有时也称为计数器的最大计数长度。

计数器通常都具有清零功能。若清零是随机的,与 CP 无关,称为异步清零或直接清零。若清零要等 CP 来到时才实现,则称为同步清零。

有些计数器还具有预置功能,即在某些控制信号的作用下,可将计数器预置成所需要的状态。这种计数器称为可预置的计数器。预置功能也有异步和同步之分。

3.2 异步计数器

1. 异步二进制计数器 图 3-6-14 是一个异步四位二进制加法计数器的逻辑图及波形图。图中各个触发器的 $J=K=1$ (即构成 T' 触发器)。 Cr 为清零端,当 $Cr=1$ 时, $Q_0 \sim Q_3$ 均为 0;当 $Cr=0$ 时可进行计数。计数脉冲(即 CP)输入后, Q_0, Q_1, Q_2, Q_3 的波形如图所示。其状态变化情况如表 3-6-9 所示。

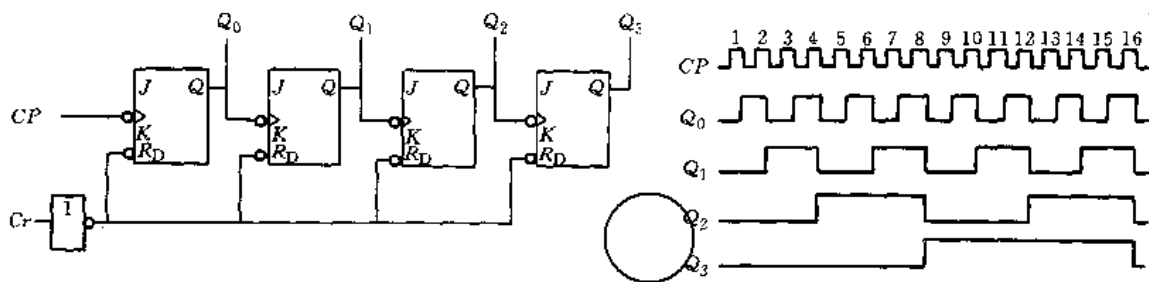


图 3-6-14 异步四位二进制加法计数器 ($\frac{1}{2}$ CT74LS393) 及其波形图

表 3-6-9 四位二进制计数器的状态变化情况

| CP | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 |
|-------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|
| Q_3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| Q_2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| Q_1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| Q_0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 |

由波形图可见,二进制计数器具有二分频的功能。对 N 位二进制计数器,第 N 个触发器输出脉冲的频率为计数器输入脉冲频率的 $\frac{1}{2^N}$ 。

若在图 3-6-14 的逻辑图中,后级触发器的 CP 端改为和前级触发器的 \bar{Q} 端相连接,则成为减法计数器。

2. 异步十进制计数器 图 3-6-15 是一个异步二-五-十进制计数器的逻辑图,图中触发器 DF_0 是一个模数为 2 的计数器,触发器 DF_1, DF_2 和 DF_3 组成模数为 5 的计数器,把这两部分组合起来,即把 CP_1 和 Q_0 相连接,就成为十进制计数器。此时计数脉冲从 CP_0 端输入,若计数器从 $Q_3Q_2Q_1Q_0=0000$ 开始计数,其波形图如图 3-6-15 所示。在第 10 个计数脉冲作用之前, Q_3, Q_2, Q_1, Q_0 的状态变化情况和二进制计数器相同。第 9 个计数脉冲输入以后, $Q_3Q_2Q_1Q_0=1001$ 。此时 DF_1 的 $J_1=\bar{Q}_3=0, K_1=1, DF_3$ 的 $J_3=Q_1Q_2=0, K_3=1$ 。故第 10 个计数脉冲输入后, $Q_3Q_2Q_1Q_0$ 回到 0000 状态。图 3-6-16 是该异步十进制计数器的状态转换图。由图可见,当出现 0000~1001 以外的某一个状态时,经过 1 个或 2 个时钟脉冲的作用后均会进入到 0000~1001 的状态循环中去(称为能实现自启动)。

图 3-6-15 的计数器具有置 0、置 9 的功能。当 $R_{01}=R_{02}=1, S_{01} \cdot S_{02}=0$ 时, $Q_3Q_2Q_1Q_0=0000$, 实现异步清零。当 $S_{01}=S_{02}=1, R_{01} \cdot R_{02}=0$ 时, $Q_3Q_2Q_1Q_0=1001$, 实现置 9。



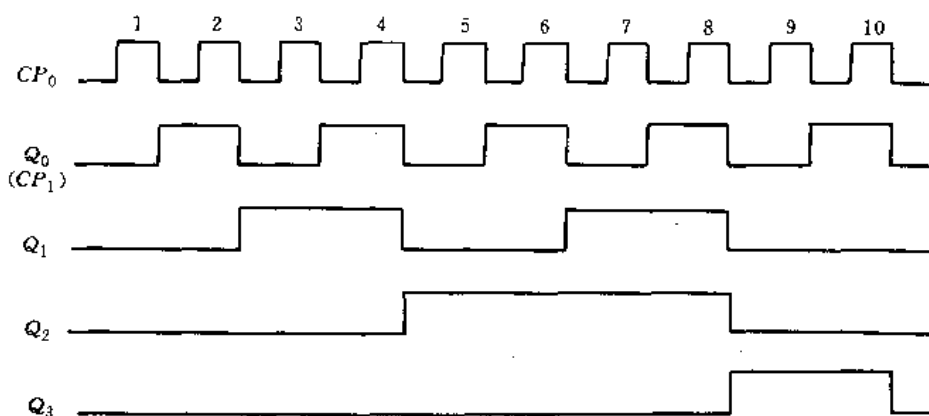
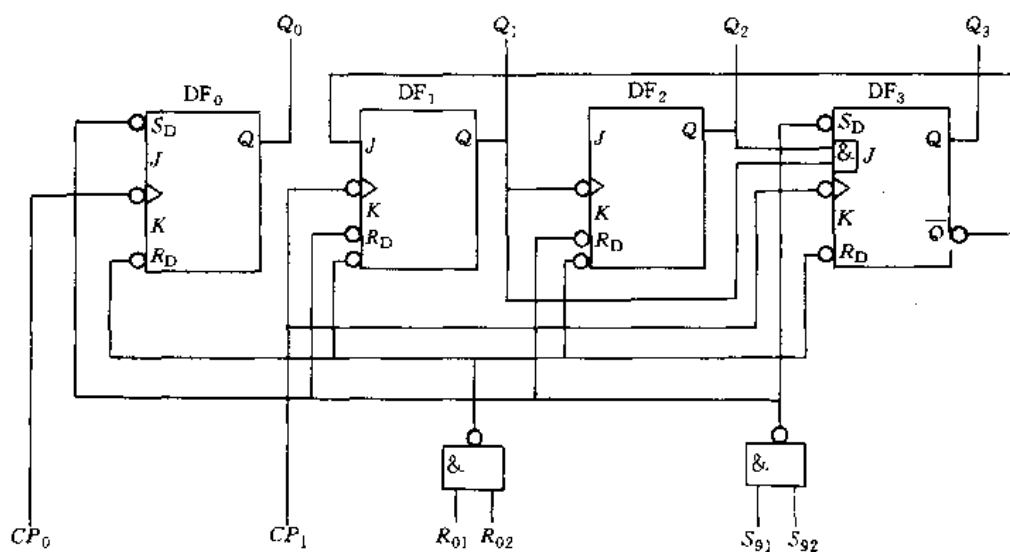


图 3-6-15 异步二-五-十进制计数器(CT74LS290)及其波形图

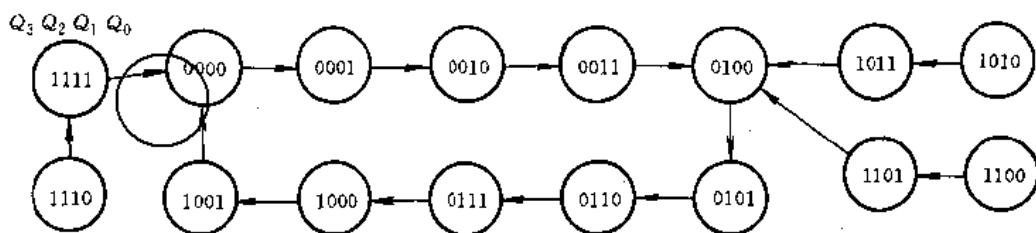


图 3-6-16 图 3-6-15 异步十进制计数器的状态转换图

3. 异步任意进制计数器 集成计数器的产品以十六进制(四位二进制)和十进制计数器居多。当需要其他进制计数器时,可采用如下方法:

(1)用已有的计数器产品经过外电路的适当连接得到。设已有 M 进制计数器,现需要 N 进制计数器,只要 $N < M$,就可以采用复位法或置位法,让 M 进制

计数器在计数过程中产生一个复位脉冲或置位脉冲,使计数器跳越 $(M-N)$ 个状态,从而获得 N 进制计数器。

(2)选用专门生产的二~十六任意进制计数器。这种计数器的进制是可变的,只要按给定的方法接线,就可获得二~十六之间任意进制的计数器,使用十分方



便。

3.3 同步计数器

1. 同步二进制计数器 图 3·6-17 是典型的同步四位二进制可逆计数器的逻辑图,它的功能如表 3·6-10 所示。图 3·6-17 中 Q_{CC}/Q_{CB} 是进位/借位输出端,在加法计数时输出进位信号,减法计数时输出借位信号。在 $Q_{CC}/Q_{CB}=1$ 时,从 \overline{Q}_{CR} 端可输出一个和 CP 同相的负脉冲。

表 3·6-10 图 3·6-17 计数器的功能

| 计数输入 CP | 预置控制 \overline{LD} | 使能输入 \overline{S} | 加减控制 M | 功能 |
|---------|----------------------|---------------------|--------|-------------------------------------------------------------------|
| ↑ | 1 | 0 | 0 | 二进制加法计数: 0000 → 0001 → ... → 1111 |
| ↑ | 1 | 0 | 1 | 二进制减法计数: 1111 → 1110 → ... → 0000 |
| × | 1 | 1 | × | 保持原来状态 |
| × | 0 | × | × | 数据预置: $Q_3Q_2Q_1Q_0 = D_3D_2D_1D_0$, 若 $D_0 \sim D_3$ 端均为 0, 则清零 |

注: × 表示任意状态; ↑ 表示 CP 上升沿作用。

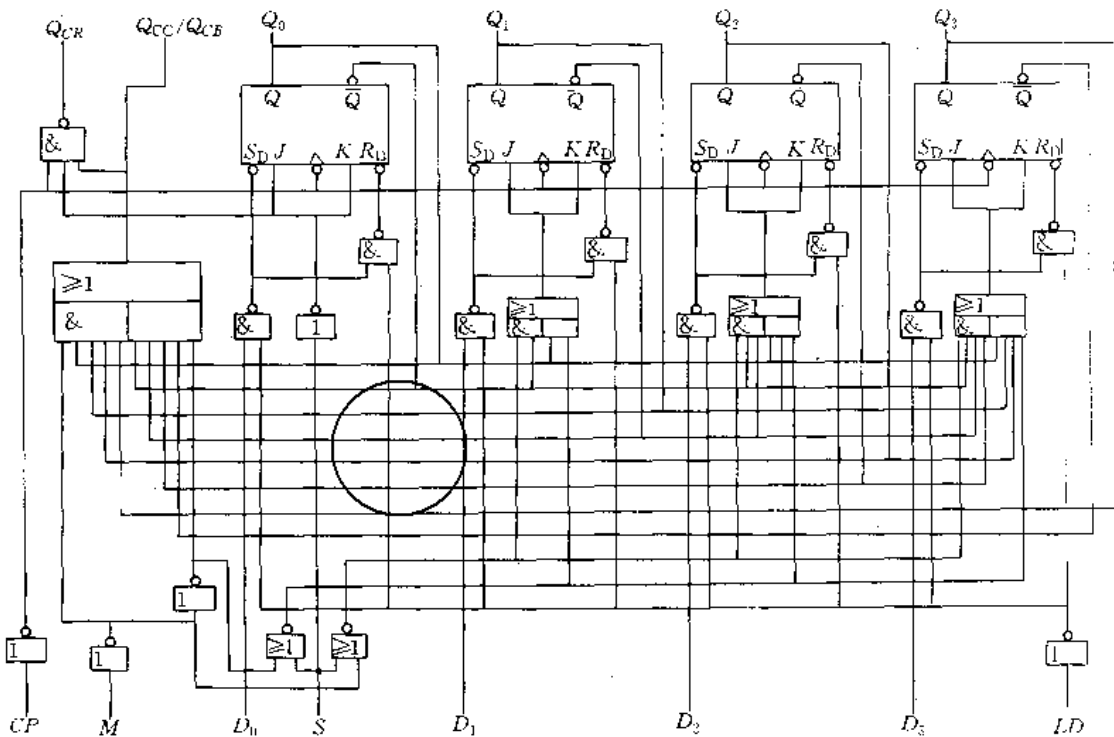


图 3·6-17 同步四位二进制可逆计数器(CT74LS191)

2. 同步十进制计数器 图 3·6-18 是一个一位同步十进制加法计数器的逻辑图,它的功能如表 3·6-11 所示。

表 3·6-11 图 3·6-18 计数器的功能

| \overline{Cr} | \overline{LD} | S_1 | S_2 | CP | 功能 |
|-----------------|-----------------|-------|-------|----|-------------------------------------|
| 0 | × | × | × | × | 异步清零 |
| 1 | 0 | × | × | ↑ | 同步置数: $Q_3Q_2Q_1Q_0 = D_3D_2D_1D_0$ |
| 1 | 1 | 1 | 1 | ↑ | 十进制计数 |
| 1 | 1 | 0 | × | × | 保持原来状态 |
| 1 | 1 | × | 0 | × | |

注: × 表示任意状态; ↑ 表示 CP 上升沿作用。

当电路处于计数状态时,各个触发器的 J、K 输入为 $J_0=K_0=1, J_1=K_1=Q_0\overline{Q}_1, J_2=K_2=Q_0\overline{Q}_1, J_3=K_3=Q_0\overline{Q}_1\overline{Q}_2+Q_0\overline{Q}_1$ 。电路的状态方程为

$$\begin{aligned}
 Q_0^{n+1} &= J\overline{Q}_0 + \overline{K}Q_0 = \overline{Q}_0 \\
 Q_1^{n+1} &= Q_0\overline{Q}_1\overline{Q}_2 + \overline{Q}_0\overline{Q}_1Q_1 \\
 Q_2^{n+1} &= Q_0\overline{Q}_1\overline{Q}_2 + \overline{Q}_0\overline{Q}_1Q_2 \\
 Q_3^{n+1} &= (Q_0\overline{Q}_1\overline{Q}_2 + Q_0\overline{Q}_1)\overline{Q}_3 \\
 &\quad + \overline{Q}_0\overline{Q}_1Q_2 + Q_0\overline{Q}_1 \cdot Q_3
 \end{aligned}$$

输出状态变化的顺序为 0000 → 0001 → 0010 → 0011 → 0100 → 0101 → 0110 → 0111 → 1000 → 1001 → 0000, 进位信号从 Q_{CC} 输出。



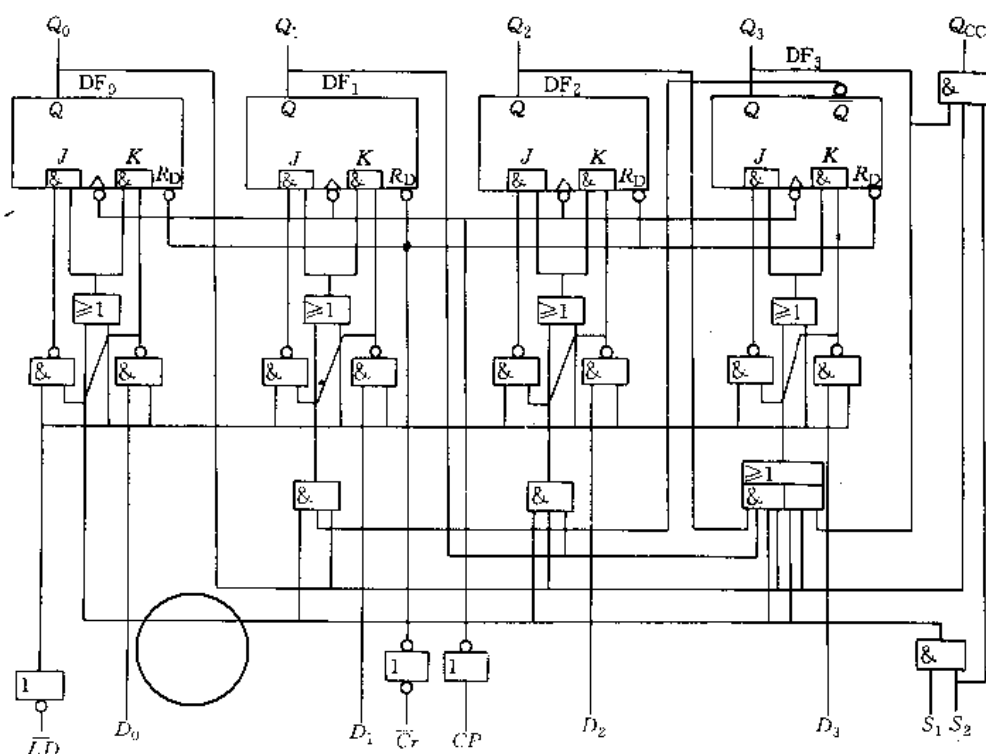


图 3-6-18 同步十进制计数器(CT74160)

把多个一位十进制计数器互相连接,就可构成多位十进制加法计数器。

3. 同步任意进制计数器 通常利用已有的集成计数器来构成,方法有复位法和置位法两类,与异步任意进制计数器相似。

4 顺序脉冲发生器

顺序脉冲发生器可以产生一组在时间上有先后顺序的脉冲,也称为节拍脉冲发生器。一些数字装置或控制设备在工作时都要用到顺序脉冲。

图 3-6-19 是用移位寄存器和反馈电路(3 输入与门)组成的顺序脉冲发生器及其波形图。该电路通常称

为环形计数器。设初始状态 $Q_3Q_2Q_1Q_0=0000$,因 $\bar{Q}_0 \cdot \bar{Q}_1 \cdot \bar{Q}_2=1$,故第 1 个 CP 上升沿来到时, $Q_3Q_2Q_1Q_0$ 变为 0001。以后各个 CP 上升沿作用后, $Q_3Q_2Q_1Q_0$ 依次为 0010→0100→1000→0001→…。因此在 $Q_0 \sim Q_3$ 端依次出现一个正脉冲。

一般情况下,顺序脉冲发生器可以由计数器和译码器两部分组成。图 3-6-20 是能产生八个顺序脉冲的一种逻辑图及其波形图。图中或非门 $DG_0 \sim DG_7$ 组成译码器,四个 D 触发器和或非门 DG_8, DG_9 组成八进制计数器。这种电路结构形式的计数器通常称为扭环形计数器。当 $Cr=1$ 时,计数器清零。当 $Cr=0, \bar{S}=0$ 时,在 CP 作用下就从 $Y_0 \sim Y_7$ 端依次输出脉冲。计数

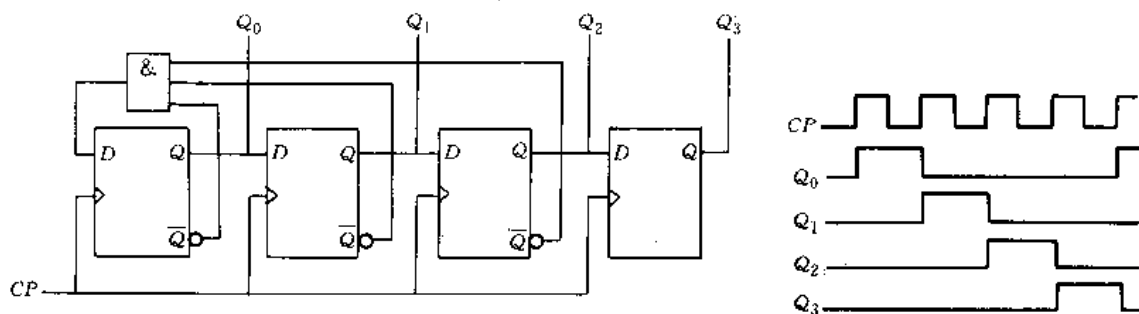


图 3-6-19 环形计数器作为顺序脉冲发生器及其波形图



器的状态方程为 $Q_0^{n+1} = \overline{Q_0^n}$, $Q_1^{n+1} = Q_0^n$, $Q_2^{n+1} = \overline{Q_1^n + Q_0^n + Q_2^n}$, $Q_3^{n+1} = \overline{Q_2^n + Q_1^n + Q_0^n}$ 。译码器的输出为 $Y_0 = \overline{Q_0 + Q_1}$, $Y_1 = \overline{Q_0 + Q_1}$, $Y_2 = \overline{Q_1 + Q_2}$, $Y_3 = \overline{Q_2 + Q_3}$, $Y_4 = \overline{Q_0 + Q_3}$,

$Y_5 = \overline{Q_0 + Q_1}$, $Y_6 = \overline{Q_1 + Q_2}$, $Y_7 = \overline{Q_2 + Q_3}$ 。电路的状态变化情况如表 3-6-12 所示。

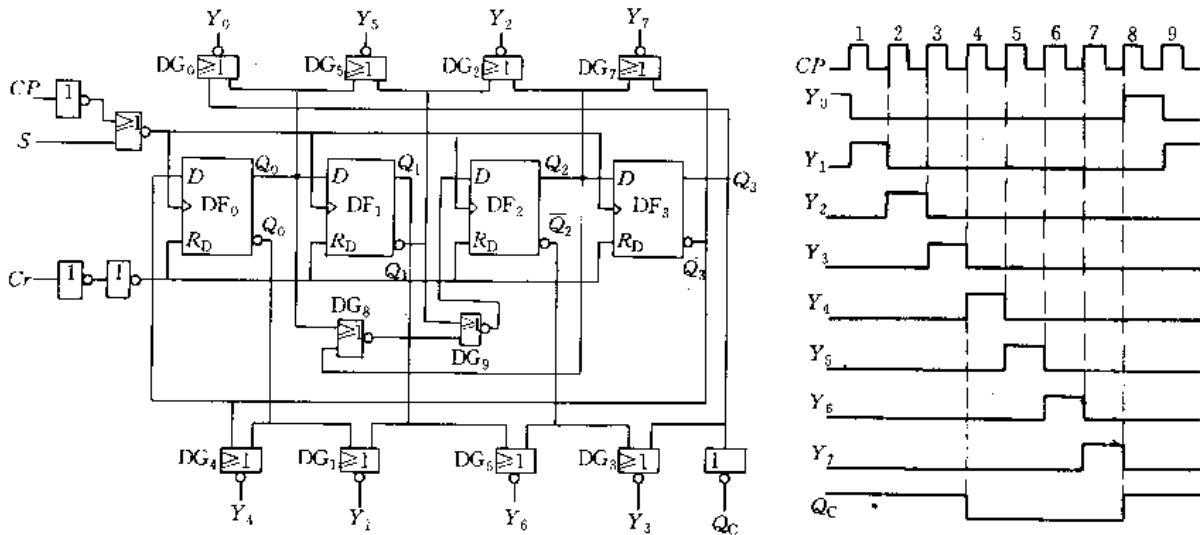


图 3-6-20 顺序脉冲发生器(八进制计数/译码器 CC4022)及其波形图

表 3-6-12 图 3-6-20 顺序脉冲发生器的状态变化情况

| CP | 计数器输出 | | | | | 译码器输出 | | | | | | | |
|----|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | Q ₃ | Q ₂ | Q ₁ | Q ₀ | Q _c | Y ₀ | Y ₁ | Y ₂ | Y ₃ | Y ₄ | Y ₅ | Y ₆ | Y ₇ |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 4 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 5 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 6 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| 7 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

第7章 波形的产生与整形电路

在电子电路中或某些其他应用场合,常常要用到各种频率的正弦波或非正弦波(矩形波、三角波、锯齿波等),或者需要将某种形状的输入波形变成另一种形状的波形输出,这可由波形产生电路或者整形电路来实现。

1 正弦波振荡器

正弦波振荡器能产生具有一定频率和一定幅度的正弦信号。常用的正弦波振荡器有 RC 振荡器、LC 振荡器和石英晶体振荡器三类。



电子工业出版社

1.1 正弦波振荡器的自激振荡条件

正弦波振荡器的框图如图3-7-1所示,它由放大电路和反馈电路组成。为了获得单一频率的正弦信号,在放大电路或反馈电路中必须含有选频电路。

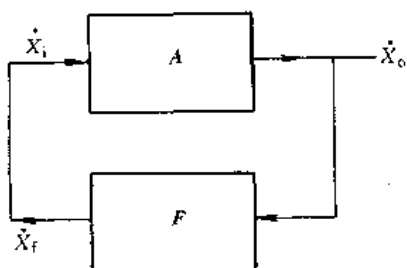


图 3-7-1 正弦波振荡器的框图

正弦波振荡器产生正弦振荡的条件是

$$AF=1$$

式中 A ——放大电路的放大倍数;

F ——反馈电路的反馈系数。

由于 $A=|A|/\varphi_A$, $F=|F|/\varphi_F$, 故振荡条件包含相位平衡条件和幅值平衡条件:

(1) 相位平衡条件。即必须是正反馈

$$\varphi_A + \varphi_F = 2n\pi$$

式中 φ_A ——放大电路的相位移;

φ_F ——反馈电路的相位移;

n ——整数。

(2) 幅值平衡条件。即必须有足够的反馈量

$$|AF|=1$$

这里所说的幅值平衡条件,是指正弦波已经产生且电路已进入稳定状态而言的。为了使振荡器能自己产生振荡,起振的幅值条件应为 $|AF|>1$ 。这样,在振荡器接通电源后,其输出信号将随时间逐渐增大,当信号的幅值增大到一定程度后,由于电路的非线性或稳幅环节的作用,使 $|AF|=1$, 输出幅度达到稳定。

通常要求振荡器具有稳定的振荡频率,即当温度、电源电压、负载等变化时对振荡频率的影响要小,频率稳定度通常用 $\Delta f/f_0$ 表示, f_0 为振荡频率标称值, Δf 为实际振荡频率与 f_0 的偏移。为提高频率的稳定度,应合理选择振荡器的电路形式,提高选频电路的品质因数(Q值),采用稳压电源和高质量的振荡管,采用温度补偿以及屏蔽、密封等方面的措施。有时在振荡器和负载之间接入射极输出器,以减小负载的影响。

1.2 RC 正弦波振荡器

RC 正弦波振荡器以 R 、 C 元件组成反馈电路,利用其选频或移相特性使振荡器在某频率上满足自激振荡条件,从而产生该频率的正弦振荡。RC 正弦波振荡器一般用来产生频率不超过 1MHz 的低频信号。常见的 RC 正弦波振荡器特性见表 3-7-1。

表 3-7-1 几种常见的 RC 正弦波振荡器

| 名称 | RC 串并网络振荡器 | RC 移相振荡器 | 双 T 选频网络振荡器 |
|--------|------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|
| 电路基本型式 | | | |
| 相位条件 | 当 $R = \frac{1}{2\pi f_0 C}$ 时, U_i 与 U_o 同相, 故采用同相比例放大电路能满足相位平衡条件 | 用三节 RC 超前移相网络获得 -180° 相位移, 故采用反相比例放大电路能满足相位平衡条件 | 双 T 网络在 $R' < \frac{R}{2}$ 时可获得 -180° 相位移, 故采用反相比例放大电路能满足相位平衡条件 |
| 振荡频率 | $f_0 = \frac{1}{2\pi RC}$ | $f_0 = \frac{1}{2\pi RC\sqrt{6}}$ | $f_0 \approx \frac{1}{5RC}$ |



(续)

| 名称 | RC 串并网络振荡器 | RC 移相振荡器 | 双 T 选频网络振荡器 |
|------|-------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|----------------------------------|
| 起振条件 | $(1 + \frac{R_2}{R_1}) > 3$ | $\frac{R_2}{R_1} > 29$ | $R' < \frac{R}{2}$ $ AF > 1$ |
| 主要特点 | 改变 R、C 值可连续地调节 f_0 的大小。常在负反馈电路中接入二极管、热敏电阻等元件来实现振荡幅度的稳定, 得到良好的波形 | 电路结构简单, 但选频特性较差, 频率调节不便, 适用于频率固定且对波形和稳定性要求不高的场合 | 选频特性好, 但频率调节比较困难, 适用于产生单一频率的场合 |

1.3 LC 正弦波振荡器

LC 正弦波振荡器常用于产生中、高频的正弦信号, 振荡频率可达 1000MHz 以上。

常用的 LC 正弦波振荡器有表 3.7-2 所示的三种基本形式, 它们都采用 LC 并联谐振电路作为选频电路, 区别在于反馈电路的不同。

对于电容三点式振荡器, 为减小晶体管极间电容的影响, 常采用图 3.7-2 的改进电路 (均为共基极电路)。图 3.7-2a 的电路当 $C_1 \gg C, C_2 \gg C$ 时, $f_0 \approx \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}}$ 。图 3.7-2b 的电路当 $C_1 \gg C', C_2 \gg C'$ 时, $f_0 \approx \frac{1}{2\pi \sqrt{L(C+C')}}$ 。由于 f_0 和 $C_1、C_2$ 几乎无关, 故 $C_1、C_2$ 可以较大, 晶体管参数对 f_0 的影响就小, 提高

了频率稳定度。

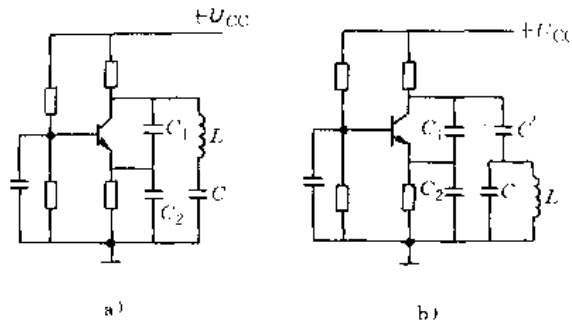


图 3.7-2 电容三点式振荡器的改进电路
a) 串联型电容三点式振荡器
b) 并联型电容三点式振荡器

表 3.7-2 LC 正弦波振荡器的基本形式

| 名称 | 变压器反馈式振荡器 | 电感三点式振荡器 | 电容三点式振荡器 |
|--------|---------------------------------------|------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|
| 电路基本形式 | | | |
| 相位条件 | 由变压器副绕组实现反馈, 但绕组的同极性端要如图所示才是正反馈 | 反馈信号取自 L_2 两端, 形成正反馈 | 反馈信号取自 C_2 两端, 形成正反馈 |
| 振荡频率 | $f_0 \approx \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ | $f_0 \approx \frac{1}{2\pi\sqrt{(L_1 + L_2 + 2M)C}}$ | $f_0 \approx \frac{1}{2\pi\sqrt{L \frac{C_1 C_2}{C_1 - C_2}}}$ |



(续)

| 名称 | 变压器反馈式振荡器 | 电感三点式振荡器 | 电容三点式振荡器 |
|------|-----------------------------------------|----------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| 起振条件 | $\beta > \frac{CR' r_{be}}{M}$ | $\beta > \frac{L_1 + M}{L_2 + M} \cdot \frac{r_{be}}{R}$ | $\beta > \frac{C_2}{C_1} \cdot \frac{r_{be}}{R'}$ |
| 主要特点 | 改变 C 可在较宽范围调节频率, 振荡频率一般在几十兆赫以下 | 容易起振, 但波形较差, 可改变 C 来调节频率, 振荡频率一般在几十兆赫以下 | 可改变 L 或在 L 两端并联可变电容 C 来调节频率, 但范围较小。输出波形较好, 振荡频率可达 100MHz 以上 |
| 备注 | R' —折合到 LC 电路中的等效串联电阻 | R' —折合到晶体管 C、E 间的等效并联电阻 | |
| | β —晶体管电流放大系数 r_{be} —晶体管输入电阻 | | |

1.4 石英晶体正弦波振荡器

石英晶体正弦波振荡器采用石英晶体谐振器作为选频元件, 具有很高的频率稳定性, 在要求频率稳定度高于 10^{-6} 以上的设备中得到广泛应用。

1. 石英晶体谐振器 从石英晶体上按一定方位角切下薄片 (称为晶片), 在它的两侧涂敷银层作为电极, 再焊出引线并加外壳封装, 就构成石英晶体谐振器, 简称为石英晶体。当外加交流电压的频率为某一特定值时, 石英晶体谐振器会产生压电谐振现象。图 3-7-3 是石英晶体谐振器的符号、等效电路和电抗频率特性曲线。图中 C_0 称为静态电容, L, C, R 分别为等

效电感、等效电容和等效电阻。 f_s 称为串联谐振频率, f_p 称为并联谐振频率, 它们的大小分别为

$$f_s = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}}$$

$$f_p \approx \frac{1}{2\pi \sqrt{L \frac{CC_0}{C+C_0}}} = f_s \sqrt{1 + \frac{C}{C_0}}$$

由于 $C \ll C_0$, 故 f_s 和 f_p 非常接近。由于 L 很大, C, R 都很小, 故石英晶体谐振器的品质因数 Q 极高 (约为 $10^4 \sim 10^6$), 谐振频率非常稳定。

2. 石英晶体振荡器的类型 石英晶体振荡器有串联型和并联型两种, 如表 3-7-3 所示。

表 3-7-3 石英晶体正弦波振荡器的两种类型

| 名称 | 并联型石英晶体振荡器 | 串联型石英晶体振荡器 |
|------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| 电路① | | |
| 工作原理 | 用石英晶体 J_T 作为电容三点式振荡器的电感性元件, 振荡频率 f_0 在石英晶体谐振器的串联谐振频率 f_s 和并联谐振频率 f_p 之间, $f_0 \approx f_s$ | 石英晶体 J_T 接于反馈支路中, 振荡频率 $f_0 = f_s$ 。调 R 可做到既能起振又能得到较好的波形 |

① 并联型和串联型石英晶体振荡器均有多种电路形式, 这里仅示出一种。



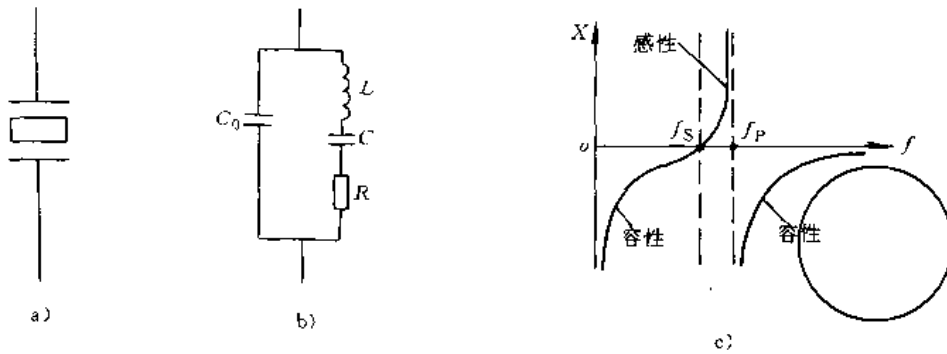


图 3-7-3 石英晶体谐振器的符号、等效电路和电抗频率特性

a) 符号 b) 等效电路 c) 电抗频率特性

2 用电压比较器组成的非正弦波发生器

2.1 矩形波发生器

通常把输出高、低电平的时间相等的矩形波称为方波。图 3-7-4 是用电压比较器组成的方波发生器及其波形图。图中电阻 R_1 、 R_2 和集成电压比较器构成滞回比较器， RC 串联电路是具有延迟作用的反馈电路。当电容 C 正向（或反向）充电使比较器反相输入端的电位略高于（或低于）同相输入端的电位时，输出电压

u_o 发生跳变。通过电阻 R_3 和两只反极性串联、稳压值相等的稳压管对输出限幅，其输出电压的正、负幅值分别为 $+U_Z$ 和 $-U_Z$ 。方波的周期

$$T = 2RC \ln \left(1 + \frac{2R_1}{R_2} \right)$$

图 3-7-5 是占空比可调的矩形波发生器及其输出波形图。它利用二极管 V_1 、 V_2 和电位器 R_p 来改变电容器充放电的时间常数，使输出矩形波中高电平时间 T_1 与周期 T 之比（即占空比）可调。设 r_{d1} 、 r_{d2} 分别为二极管 V_1 、 V_2 导通时的等效电阻，则占空比

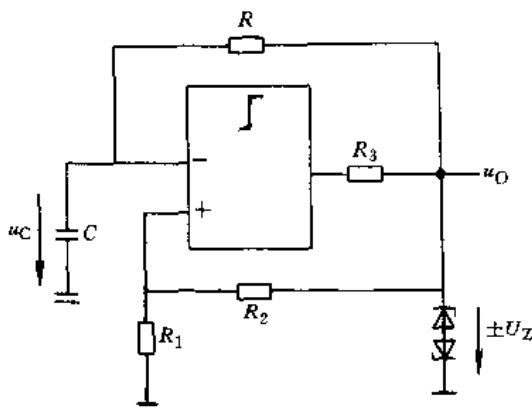


图 3-7-4 方波发生器及其波形图

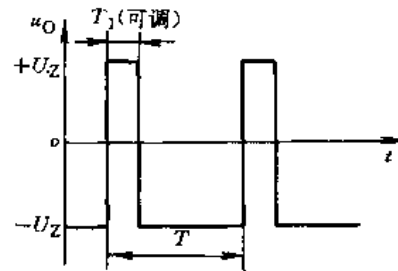
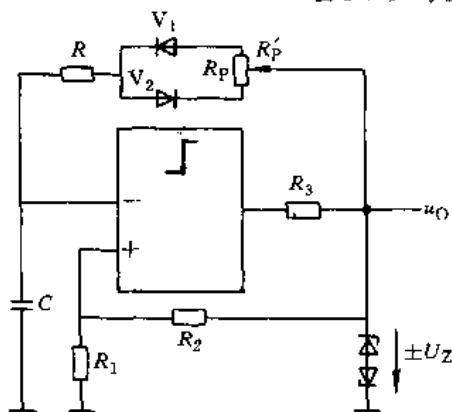
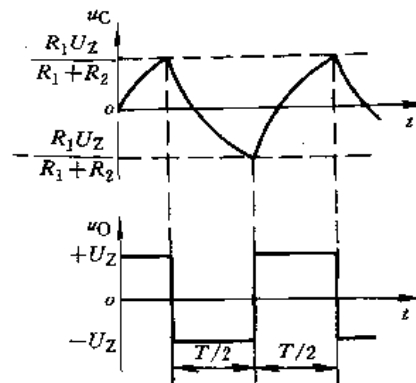


图 3-7-5 占空比可调的矩形波发生器及输出波形图



$$\frac{T_1}{T} = \frac{R'_P + r_{d1} + R}{R_P + r_{d1} + r_{d2} + 2R}$$

调节 R_P 可动端的位置可使 R'_P 在 $0 \sim R_P$ 的范围内变化。从而使占空比变化。输出波形的周期 T 为

$$T = (R_P + r_{d1} + r_{d2} + 2R) \text{Cln} \left(1 + \frac{2R_1}{R_2} \right)$$

T 的大小和 R_P 可动端的位置无关。

2.2 三角波和锯齿波发生器

图 3.7-4 中 u_c 的波形近似三角波, 但其线性度差。图 3.7-6 是一个线性度高的三角波发生器及其波形图。图中 R_1 、 R_2 和集成电压比较器 (或用集成运放)

组成滞回比较器, R_1 、 C 和集成运放组成积分电路。积分电路的输出 u_o 是幅值为 $U_Z R_1 / R_2$ 的三角波, 滞回比较器的输出 u_{O1} 是幅值为 U_Z 的方波。三角波和方波的周期相等, 大小为

$$T = 4 \frac{R_1}{R_2} R_4 C$$

如果利用二极管的单向导电性使积分电路在 u_o 上升阶段和下降阶段的时间常数不同, 即可产生锯齿波。其电路和波形图如图 3.7-7 所示。锯齿波下降时间与上升时间之比为 $(r_{d1} + R_{41}) / (r_{d2} + R_{42})$, 周期为

$$T = 2 \frac{R_1}{R_2} (r_{d1} + r_{d2} + R_{41} + R_{42}) C$$

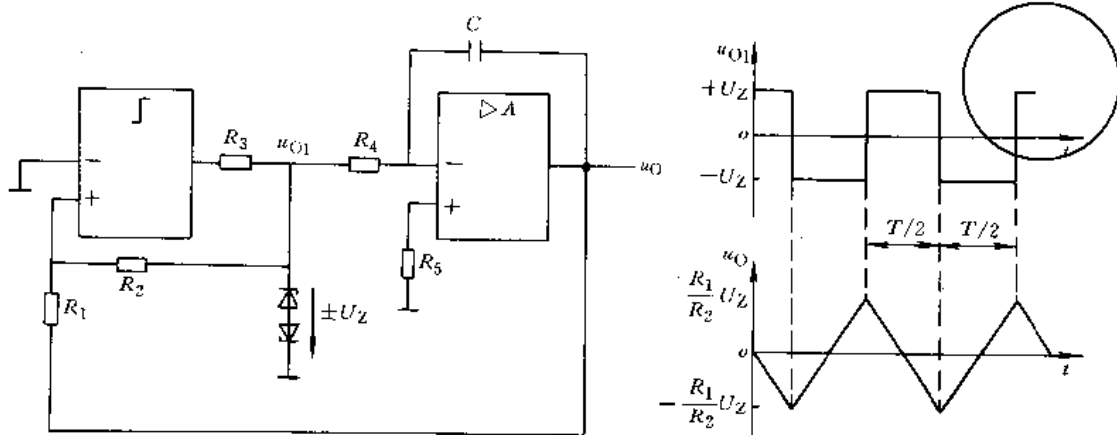


图 3-7-6 三角波发生器及其波形图

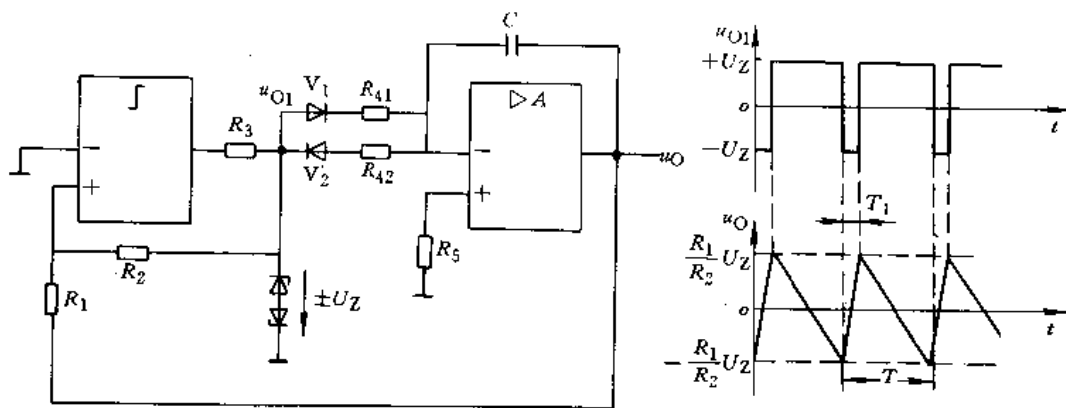


图 3-7-7 锯齿波发生器及其波形图

3 集成函数发生器

函数发生器是一种能产生与时间有关的多种信号的专用集成电路, 能输出方波、三角波和正弦波等信号。

图 3.7-8 是一个集成函数发生器的原理图。当 RS 触发器的输出 $Q=0$ 时, 模拟开关 S 断开, 电流源 I_{S1}

对电容 C 进行充电, u_c 线性增长。当 u_c 上升到 $\frac{2}{3}U_{CC}$ 时, 比较器 N_1 的输出由 0 变 1, 使触发器的输出 $Q=1$, 开关 S 闭合, 电容 C 通过电流源 I_{S2} 进行放电, u_c 线性下降。当 u_c 下降到 $\frac{1}{3}U_{CC}$ 时, 比较器 N_2 的输出发生跳变, 使触发器的 $Q=0$, S 又断开, C 再次充电……。

函数发生器内部的电流源 I_{S1} 和 I_{S2} 的大小及比值



可以通过外部电路来调节。若 $I_{S2} = 2I_{S1}$, 则 u_C 为三角波 (经电压跟随器对外输出), \bar{Q} 端经反相器 (作为缓冲级) 输出方波, 同时三角波又经三角波-正弦波变换电路转换为正弦波输出。改变电流源电流的大小, 可改变三角波、方波和正弦波的频率 (图 3·7-8 电路的最高频率为 100kHz)。改变 I_{S2} 和 I_{S1} 的比值, 可输出占空比

不同的矩形波, 并输出锯齿波 (但此时不能获得正弦信号)。

集成函数发生器应用时需接上少量的外接元件, 使用方便。除了构成固定频率的函数发生器外, 还可构成频率由外部电压控制的压控函数发生器和调频、扫频信号发生器。

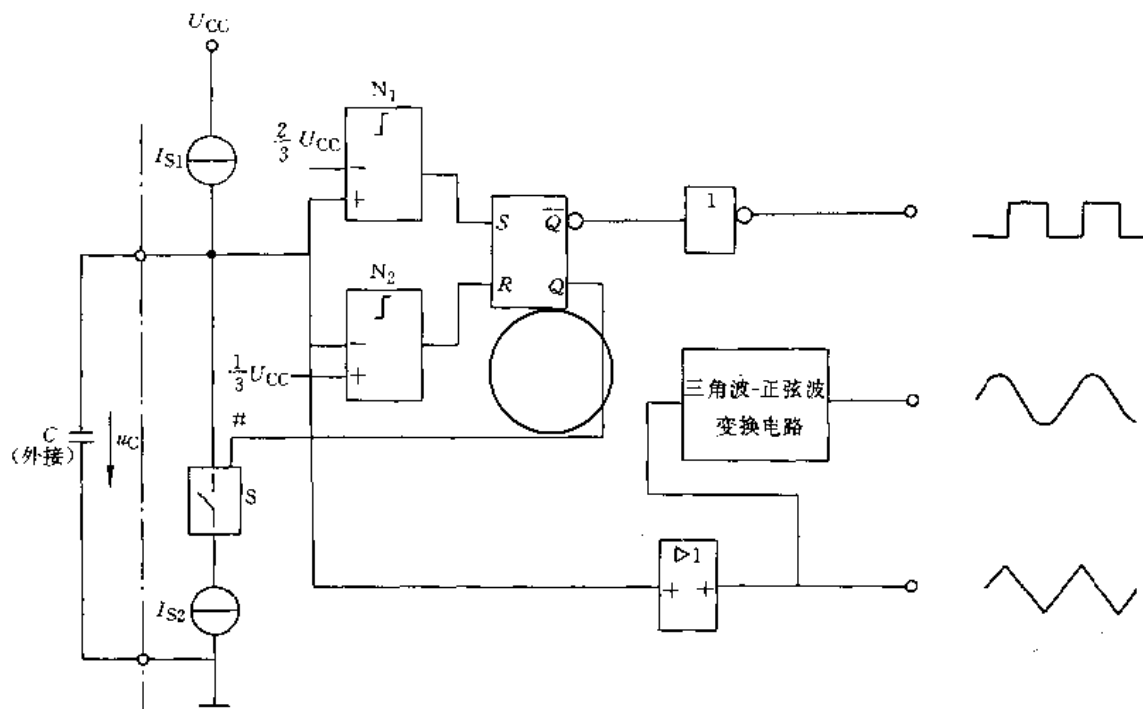


图 3·7-8 集成函数发生器原理图 (5G8038)

4 施密特触发器

施密特 (Shmitt) 触发器是用电平触发的触发器, 当输入信号达到某个电压值时输出电平会发生跳变。而且输入信号从低到高和从高到低变化时, 使输出电平发生跳变的输入电压不同而分别称为上限阈值电压和下限阈值电压, 两个阈值电压之差称为回差。施密特触发器的电压传输特性是具有回差的特性曲线, 这种

特性通常称为滞回特性。

4.1 用门电路组成的施密特触发器

用 CMOS 反相器或 TTL 与非门均可组成施密特触发器, 表 3·7-4 示出两种常用的电路。

施密特触发器也可以用电压比较器或 555 定时器组成, 它们分别在本篇第 3 章 4·3 节和本章 7·2 节介绍。

表 3·7-4 用门电路组成的施密特触发器

| 所用门电路种类 | CMOS 反相器 | TTL 与非门反相器 |
|---------|----------|------------|
| 电路图 | | |



(续)

| 所用门电路种类 | CMOS 反相器 | TTL 与非门反相器 |
|---------|---------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|
| 电压传输特性 | | |
| 上限阈值电压 | $U_{T+} \approx \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) U_{TH}$ | $U_{T+} = \frac{R_1 + R_2}{R_2} U_{TH} + U_D$ |
| 下限阈值电压 | $U_{T-} \approx \left(1 - \frac{R_1}{R_2}\right) U_{TH}$ | $U_{T-} = U_{TH}$ |
| 回差 | $\Delta U_T = U_{T+} - U_{T-} = 2 \frac{R_1}{R_2} U_{TH}$ | $\Delta U_T = U_{T+} - U_{T-} = \frac{R_1}{R_2} U_{TH} + U_D$ |
| 备注 | U_{TH} —反相器阈值电压 设 $U_{TH} \approx \frac{1}{2} U_{DD}$ $R_1 < R_2$ | U_{TH} —门电路阈值电压 U_D —二极管导通电压 对 CT74 系列门电路 R_2 应取 $1k\Omega$ 以下 |

4.2 集成施密特触发器

TTL 和 CMOS 都有施密特触发器，也称为施密特触发门电路。图 3-7-9 是施密特触发反相器和与非门的逻辑符号。图 3-7-10 是 TTL 施密特触发反相器的电路结构和电压传输特性。图中晶体管 V_1 、 V_2 和电阻 R_2 、 R_3 、 R_4 组成滞后特性形成级。当输入电压 u_i 小于上限阈值电压 U_{T+} 时， V_1 截止， V_2 饱和，因而使 V_7 、 V_3 、 V_5 截止， u_o 为高电平。当 $u_i \geq U_{T+}$ 时，电路变为

V_1 饱和、 V_2 截止， V_7 、 V_3 、 V_5 导通， u_o 为低电平。当 u_i 从高电平下降到下限阈值电压 U_{T-} 时，电路迅速返回 V_1 截止、 V_2 饱和的状态， u_o 为高电平。由于 $R_2 > R_3$ ，从而使 $U_{T+} > U_{T-}$ 。

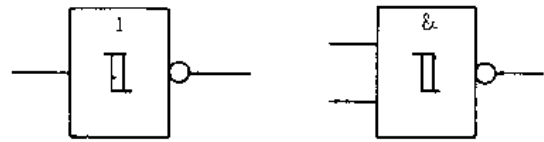
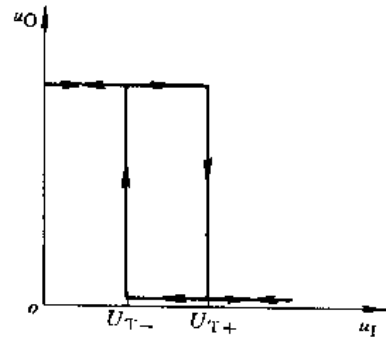
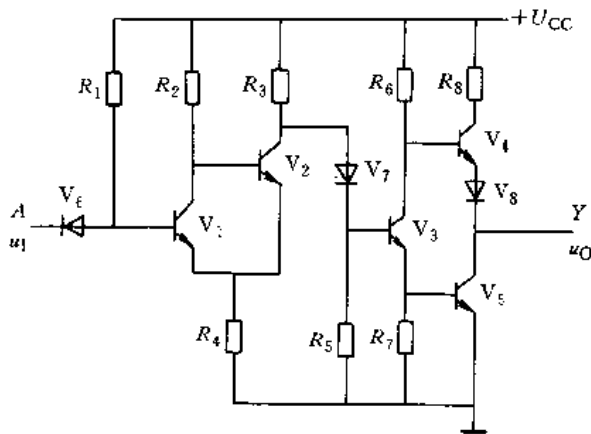


图 3-7-9 施密特触发反相器和与非门逻辑符号



a)

b)

图 3-7-10 TTL 施密特触发反相器

a) 电路结构 (1/6 CT7414) b) 电压传输特性



4.3 施密特触发器的应用

施密特触发器可用于波形的变换、整形和脉冲幅度的鉴别等，图 3·7-11 是几个应用实例。

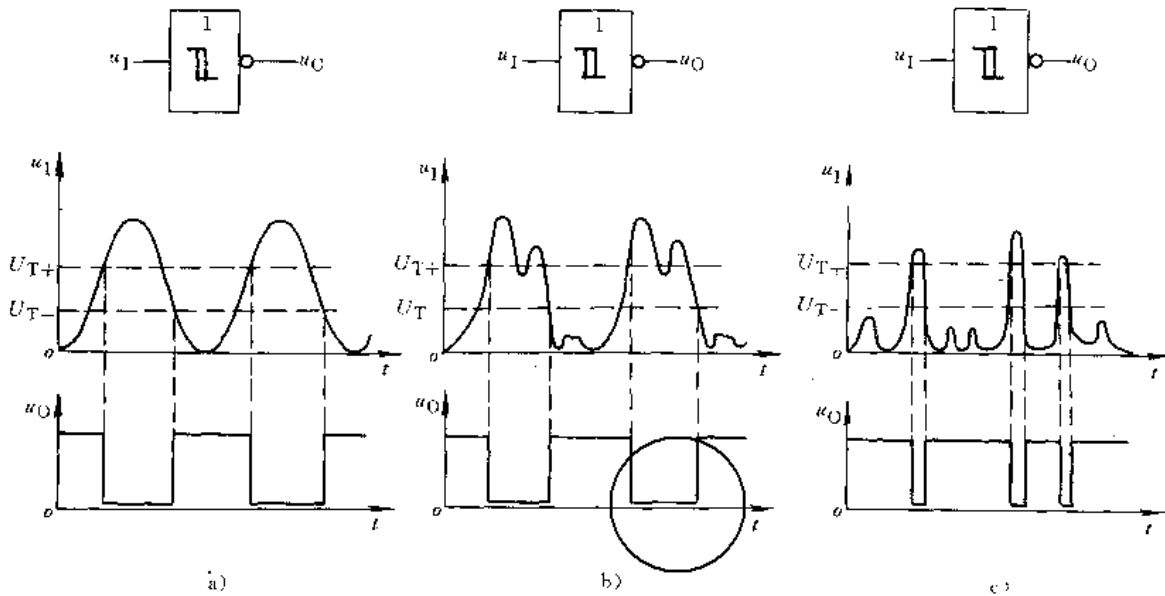


图 3·7-11 施密特触发器应用实例
a) 波形变换 b) 波形整形 c) 幅度鉴别

5 单稳态触发器

单稳态触发器只有一个稳定状态，它能在外部触发脉冲的作用下，从稳态翻转到暂稳状态，在暂稳态维持一段时间 t_w 后，再自动返回稳态。因此单稳态触发器每被触发一次，就输出一个幅度一定、宽度为 t_w 的脉冲。 t_w 的大小取决于电路本身的参数，和外加触发脉冲无关。

5.1 用电压比较器组成的单稳态触发器

图 3·7-12 是用电压比较器组成的单稳态触发器及波形图。当无外加触发脉冲 ($u_i = 0$) 时二极管 V 导通，比较器同相输入端的电位 $u_A > u_i$ ，比较器的输出 u_O 为高电平 U_{OH} ，此时电路处于稳定状态。若在 t_1 时刻出现触发脉冲使 $u_i > u_A$ ，则 u_O 变为低电平，此时二极管 V 处于反向偏置而截止， $+U_{CC}$ 通过 R 向 C 充电，

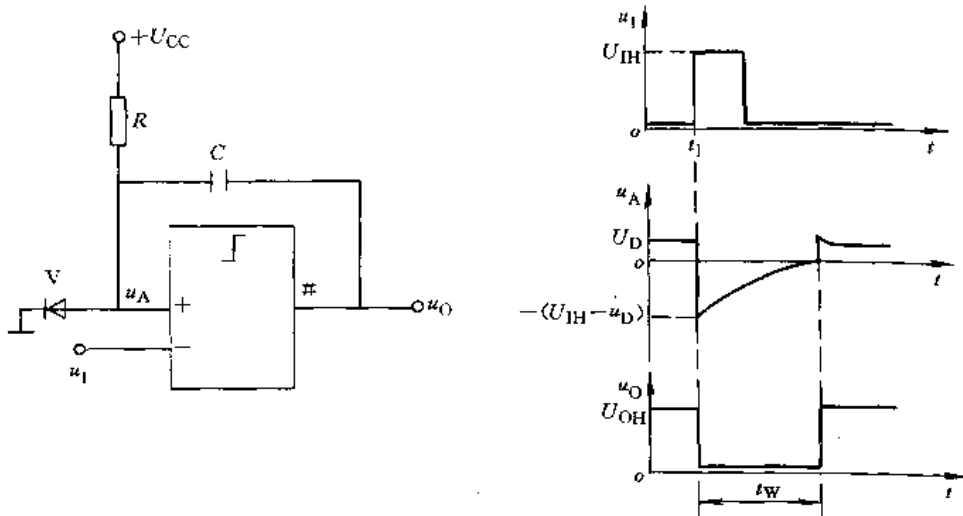


图 3·7-12 用电压比较器组成的单稳态触发器及波形图



电路处于暂稳状态。当C充电使 u_A 升高到稍大于 u_1 时， u_O 变为高电平，电路自动返回到原来的稳定状态。

设 $U_{CC}=5V$ ， $U_{TH}=U_{OH}=3V$ ， $U_D=0.7V$ ，则输出脉冲宽度 $t_w=0.38RC$ 。R、C分别称为定时电阻和定时电容。

5.2 用门电路组成的单稳态触发器

用集成与非门组成的单稳态触发器有多种电路形式，表3-7-5给出了用TTL与非门组成的微分型和积分型单稳态触发器。

表3-7-5 用TTL与非门组成的微分型和积分型单稳态触发器

| 名称 | 微分型单稳态触发器 | 积分型单稳态触发器 |
|------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| 基本电路 | | |
| 波形图 | | |
| 输出脉冲宽度 | $t_w = (R + R_{OH}) C \ln \frac{R + U_{OH}}{R + R_{OH} U_{TH}}$ | $t_w = (R + R_{OL}) C \ln \frac{U_{OL} - U_{OH}}{U_{OL} - U_{TH}}$ |
| 对R值的要求 | R值为几百欧，使稳定时 u_O 为高电平 | R值的大小要使 u_{O1} 为低电平时 u_A 可以降至 U_{TH} 以下 |
| 对输入脉冲宽度的要求 | $t_i < t_w$ | $t_i > t_w$ |
| 备注 | R_{OH} —门电路输出高电平时的内阻 R_{OL} —门电路输出低电平时的内阻 U_{OH} —门电路输出高电平 U_{OL} —门电路输出低电平 U_{TH} —门电路阈值电压 | |

5.3 用施密特触发器组成的单稳态触发器

$$t_w = RC \ln \frac{U_{DD}}{U_{T-}}$$

图3-7-13是用CMOS施密特触发器组成的单稳态触发器的电路图和波形图。输出脉冲宽度

用555定时器也可以组成单稳态触发器，它的电路在本章7.2节介绍。

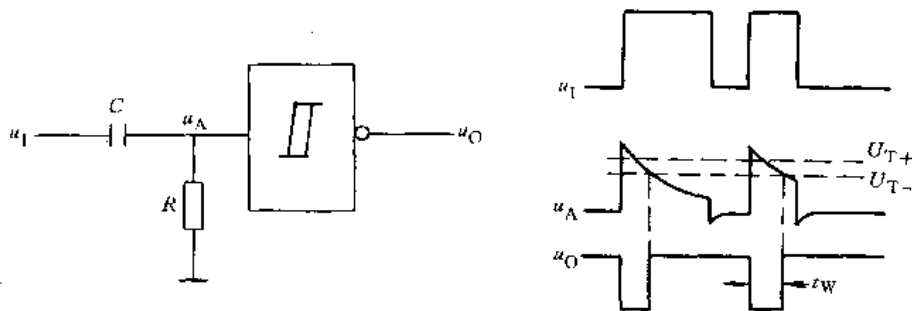


图3-7-13 用施密特触发器组成的单稳态触发器和波形图



5.4 集成单稳态触发器

TTL 和 CMOS 集成电路产品中都有单片集成的单稳态触发器。集成单稳态触发器稳定性较好,应用时只需外接很少的元件,而且又具有上升沿触发和下降沿触发的功能,使用灵活、方便。有的集成单稳态触发器采用施密特触发的输入结构,提高了抗干扰能力。有的在输出高电平期间可被输入脉冲重新触发,称为可重触发单稳态触发器。

图 3-7-14 给出了一个 TTL 集成单稳态触发器的逻辑图及逻辑符号,表 3-7-6 是它的功能表。图中 C_{ext} 和 R_{ext} 是外接电容和电阻, R_{ext} 取值范围为 $1.4 \sim 40k\Omega$, C_{ext} 最大容许值为 $1000\mu F$ 。输出脉冲宽度

$$t_w \approx 0.7R_{ext}C_{ext}$$

表 3-7-6 集成单稳态触发器功能表 (CT74121)

| A_1 | A_2 | B | Q | \bar{Q} |
|-------|-------|-----|-----|-----------|
| 0 | × | 1 | 0 | 1 |
| × | 0 | 1 | 0 | 1 |
| × | × | 0 | 0 | 1 |
| 1 | 1 | × | 0 | 1 |
| 1 | ↓ | 1 | PP | NP |
| ↓ | 1 | 1 | PP | NP |
| ↓ | ↓ | 1 | PP | NP |
| 0 | × | ↑ | PP | NP |
| × | 0 | ↑ | PP | NP |

注: × 表示任意状态, ↓ 表示下降沿触发, ↑ 表示上升沿触发, PP 表示输出正脉冲, NP 表示输出负脉冲。

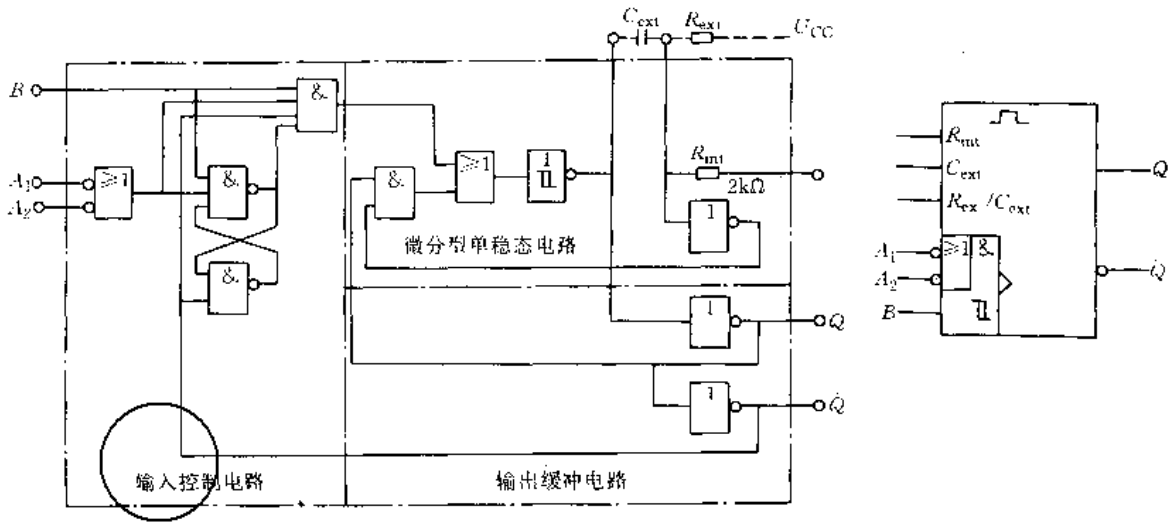


图 3-7-14 集成单稳态触发器的逻辑图和逻辑符号 (CT74121)

5.5 单稳态触发器的应用

单稳态触发器广泛应用于整形(把输入的不规则波形变为宽度和幅度一定的脉冲输出)、定时(暂稳态持续时间即为定时控制的时间)和延时(将输入脉冲延迟一定的时间输出)。

6 多谐振荡器

多谐振荡器是产生脉冲波形的电路,它能输出一定频率和幅度的矩形波或方波。由于输出的矩形脉冲中含有丰富的谐波,故称它为多谐振荡器。多谐振荡器可以用门电路、施密特触发器、555 定时器等组成。

6.1 用门电路组成的多谐振荡器

用门电路组成的多谐振荡器的基本原理是利用电

容器的反复充放电来控制门电路的输入电平,使电路的输出交替出现高电平和低电平。表 3-7-7 列出了较常见的几种电路。

6.2 用施密特触发器组成的多谐振荡器

图 3-7-15 是用施密特触发器组成的多谐振荡器及其波形图。它是利用电容 C 的不断充放电,使电容电压 u_C 在 U_{T+} 和 U_{T-} 之间往复变化,因而在输出端得到矩形波。若不考虑施密特触发器输入、输出电阻对 C 充放电的影响,并设触发器输出低电平 $U_{OL} \approx 0$, 输出高电平为 U_{OH} , 则振荡周期

$$T = t_1 + t_2 = RC \ln \frac{U_{OH} - U_{T-}}{U_{OH} - U_{T+}} + RC \ln \frac{U_{T+}}{U_{T-}}$$



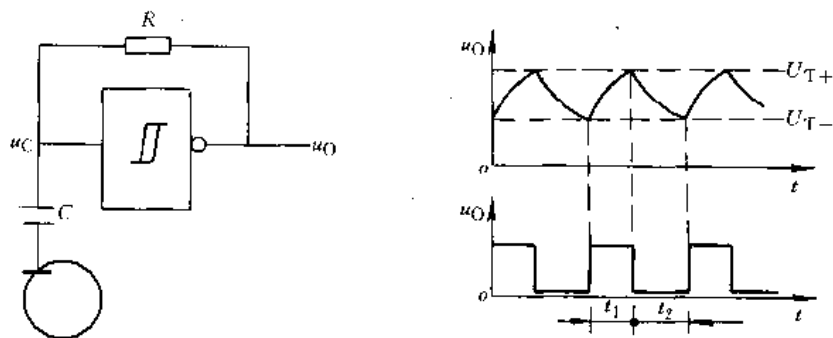


图 3-7-15 用施密特触发器组成的多谐振荡器及其波形图

表 3-7-7 用门电路组成的多谐振荡器

| 名称 | 对称式多谐振荡器 | 非对称式多谐振荡器 | RC 环形多谐振荡器 |
|----------|------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| 电路图 | | | |
| 波形图 | | | |
| 振荡周期估算公式 | 选用 CT74 系列的反相器时, R 取值 $0.5 \sim 2k\Omega$ $T \approx 1.4RC$ | 选用 CMOS 反相器时, 若 $R_s \gg R$ $T \approx 2.2RC$ 若 $R_s = 0$ $T = 1.4RC$ | 选用 TTL 反相器时, R_s 常取 100Ω 左右, R 在 $1k\Omega$ 以下, $T \approx 2.2RC$ |
| 备注 | T 的估算公式是在一定的假设条件下得出的, 加上元件参数的分散性, 故估算值和实测值往往有一定的偏差 | | |

6.3 石英晶体多谐振荡器

在很多应用场合下都要求多谐振荡器的振荡频率十分稳定, 因此常采用石英晶体多谐振荡器。图 3-7-

16 是两种较常见的电路。由图可见, 因石英晶体 J_T 处于正反馈支路中, 故只有频率和石英晶体串联谐振频率 f_s 相等的信号最容易反馈到输入端使电路自激振荡, 振荡频率为 f_s 。

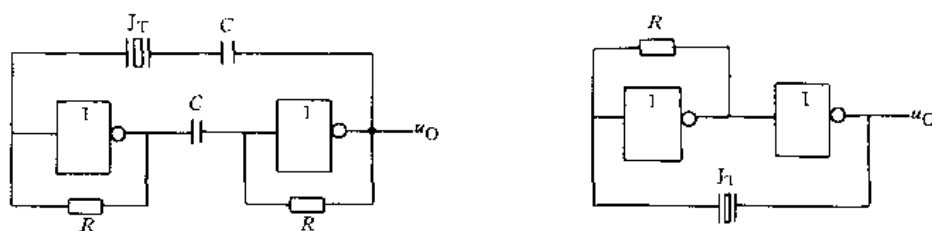


图 3-7-16 石英晶体多谐振荡器



7 555 定时器

555 定时器是一种多用途的单片集成电路，是一种通用的定时器，也称为时基电路。

7.1 555 定时器的电路结构和基本功能

555 定时器有双极型和 CMOS 型两类，每一类又可分为单定时器器和双定时器（在一个封装中含有两个定时器）两种。单定时器产品型号的三位数码或最后三个数码为 555，双定时器则为 556。

图 3-7-17 是双极型 555 定时器的原理电路图。它包含两个电压比较器，一个基本 RS 触发器（由双与非门组成），一个放电晶体管 and 三个 $5k\Omega$ 电阻组成的分压器。当 5 端（控制端）没有外加控制电压时，两个比较器的参考电压分别为 $\frac{1}{3}U_{CC}$ 和 $\frac{2}{3}U_{CC}$ 。输出电平的高低由加于 2 端（触发端）的输入电压和 6 端（阈值端）的输入电压大小决定，它们之间的关系如表 3-7-8 所示。当输出端为低电平时，放电晶体管导通，和 7 端（放电端）相连接的外部电容器可以通过它放电。在 4 端（复位端）加低电平可直接复位。若在 5 端施加一个控制电压（其值在 $0 \sim U_{CC}$ 之间），则比较器的参考电压由外加电压决定。此时定时器的触发电平、阈值电平的大小和外加电压有关。

表 3-7-8 555 定时器功能表

| 复位 | 触发输入 | 阈值输入 | 输出 |
|----|-----------------------|-----------------------|----|
| 0 | × | × | 0 |
| 1 | $< \frac{1}{3}U_{CC}$ | $< \frac{2}{3}U_{CC}$ | 1 |
| 1 | $> \frac{1}{3}U_{CC}$ | $> \frac{2}{3}U_{CC}$ | 0 |
| 1 | $> \frac{1}{3}U_{CC}$ | $< \frac{2}{3}U_{CC}$ | 不变 |

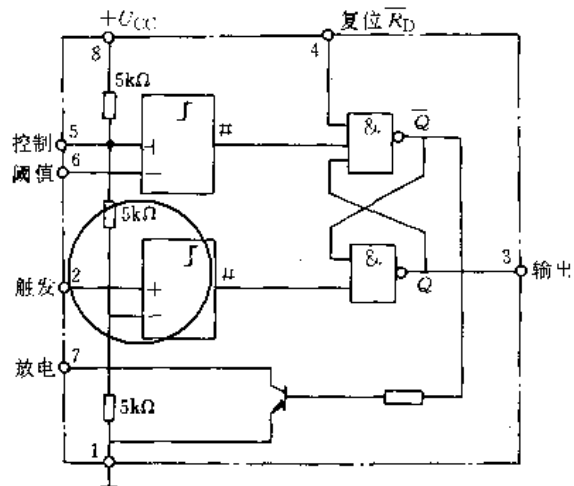


图 3-7-17 双极型 555 定时器的原理电路图

图 3-7-18 是 CMOS555 定时器的原理电路图，它的工作原理和双极型定时器相似，逻辑功能相同。

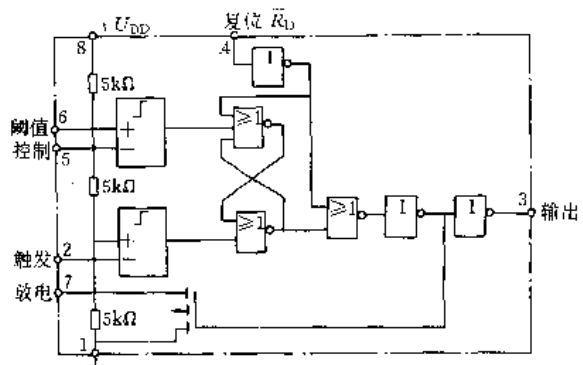


图 3-7-18 CMOS555 定时器的原理电路图

表 3-7-9 是 555 定时器部分参数示例，由表可见双极型定时器的驱动能力（输出电流）优于 CMOS 定时器，但 CMOS 定时器的静态电流、静态功耗比双极型定时器小。

表 3-7-9 555 定时器的部分性能参数示例

| 电路类型 | 双极型 CB555 定时器 | CMOS CB7555 定时器 |
|-------------|-------------------------------------|---------------------------------------|
| 工作电压范围 (V) | 5~16 | 3~18 |
| 静态电流 (mA) | 10 ($U_{CC}=15V$) | 120×10^{-3} ($U_{DD}=18V$) |
| 输出高电平 (V) | 12.5 ($U_{CC}=15V, I_{OH}=200mA$) | 14.8 ($U_{DD}=15V, I_{OH}=1mA$) |
| | 13.3 ($U_{CC}=15V, I_{OH}=100mA$) | |
| 输出低电平 (V) | 2.5 ($U_{CC}=15V, I_{OL}=200mA$) | 0.1 ($U_{DD}=15V, I_{OL}=3.2mA$) |
| | 0.4 ($U_{CC}=15V, I_{OL}=50mA$) | |
| 输出上升时间 (ns) | 100 | 40 |



此星公司制作 请尊重版权

7.2 555 定时器的应用

555 定时器使用范围广，利用它可方便地组成单稳态触发器、多谐振荡器和施密特触发器，因而在定时、检测、控制和报警等方面得到广泛的应用。

1. 用 555 定时器组成的单稳态触发器 见表 3·7-10。

2. 用 555 定时器组成的多谐振荡器 见表 3·7-11。

如果在表中电路的定时器的控制端(5 端)外加一个控制电压 U_{CO} ，则振荡周期不仅与 R_1 、 R_2 、 C 的大小有关，而且还与 U_{CO} 的大小有关。如果 U_{CO} 是一个低频正弦波或三角波，则多谐振荡器的振荡频率将随 U_{CO} 的变化而变化，得到调制波。

如果定时器的复位端(4 端)不接 $+U_{CC}$ ，而是施加一个低频方波，则在方波的低电平期间多谐振荡器停振，在方波的高电平期间多谐振荡器振荡，得到的一群一群的波形。

3. 用 555 定时器组成的施密特触发器 用 555 定时器组成的施密特触发器如图 3·7-19 所示。设 u_1 为一个三角形，则 u_0 为一矩形波。其上限阈值电压 $U_{T+} = \frac{2}{3} U_{CC}$ ，下限阈值电压 $U_{T-} = \frac{1}{3} U_{CC}$ ，回差 $\Delta U_T = \frac{1}{3} U_{CC}$ 。如果在定时器的 5 端外加一个控制电压 U_{CO} ，则可通过改变 U_{CO} 的大小来调节回差的大小。如果在定时器的放电端(7 端)通过一个电阻接至另一个电源 U_{CC2} ，则可从 7 端输出矩形波，实现电平转换。

表 3·7-10 用 555 定时器组成的单稳态触发器

| 名称 | 非重触发的单稳态触发器 | 可重触发的单稳态触发器 |
|--------|------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|
| 电路图 | | |
| 波形图 | | |
| 输出脉冲宽度 | $t_w = 1.1RC$ | $t_w = t_1 + t'_w = T_1 + t_{w1} + 1.1RC$ |
| 备注 | 接于 5 端的 $0.01\mu F$ 电容用来防止外部干扰对定时器内部参考电压的影响。CMOS 定时器可不用此电容 | |



表 3-7-11 用 555 定时器组成的多谐振荡器

| 名称 | 占空比固定的多谐振荡器 | 占空比可调的多谐振荡器 |
|---------|------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| 电路图 | | |
| 波形图 | | |
| 振荡周期和频率 | $T = t_H + t_L = 0.7(R_1 + R_2)C + 0.7R_2C$ $f = \frac{1.43}{(R_1 + 2R_2)C}$ | $T = t_H + t_L = 0.7R_1C + 0.7R_2C$ $f = \frac{1.43}{(R_1 + R_2)C}$ |
| 占空比 | $q = \frac{t_H}{T} = \frac{R_1 + R_2}{R_1 + 2R_2}$ | $q = \frac{R_1}{R_1 + R_2}$ |

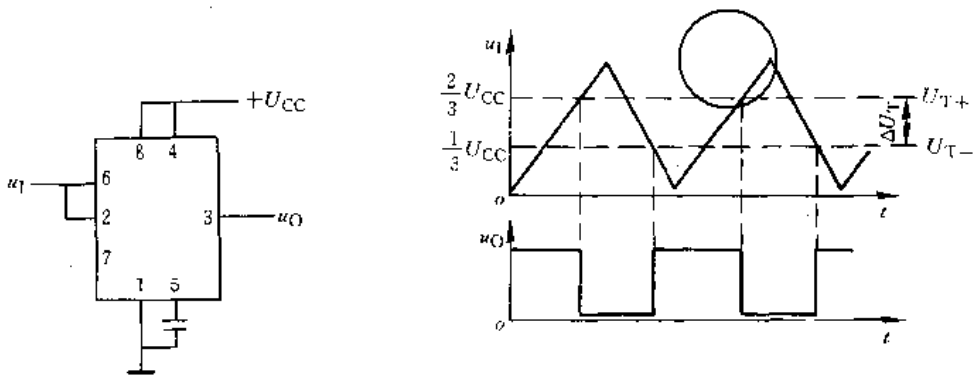


图 3-7-19 用 555 定时器组成的施密特触发器及其波形图

8 削波器和钳位器

8.1 削波器

削波器又称限幅器,是一种波形变换电路。它可将输入波形中的某一部分削去而保留另一部分。通常利

用二极管的单向导电性组成二极管削波器,表 3-7-12 给出了几种常见的电路。由表可见,输入波形中哪一部分被削去取决于二极管的接法和偏压源 E 的大小与极性。由于二极管的正向特性存在死区,故若输入信号较小(例如幅值小于 1V),则应先放大再削波或采用晶体管来实现削波。



表 3·7-12 二极管削波器

| | | 单 向 削 波 器 | | 双 向 削 波 器 | | |
|-------|-----------|-----------|---------|-----------|---|--|
| | | 下 削 波 器 | 上 削 波 器 | 双 向 削 波 器 | 器 | |
| 电 路 图 | 串 联 削 波 器 | | | | | |
| | 波 形 图 | | | | | |

() 面波形时假设二极管为理想元件，且输出端看作开路。

8·2 钳位器

钳位器用来将脉冲的顶部或底部钳制在某一个固定的电平上。表 3-7-13 给出了由 RC 耦合电路加接二极管 V 和偏压源 E 组成的钳位器。它是利用二极管的

单向导电性使 RC 电路的充电时间常数和放电时间常数有很大差异而实现钳位的，钳位的部位是顶部还是底部取决于二极管的接法，钳位电平的大小则由偏压源 E 来决定。

表 3-7-13 二极管钳位器

| 钳位部位 | 顶部钳位 | 底部钳位 |
|--------|-----------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|
| 电路图 | | |
| 波形图① | | |
| 电路时间常数 | C 充电时: $\tau_1 = R_0 C \ll t_1$ C 放电时: $\tau_2 = RC \gg t_2$ | C 充电时: $\tau_1 = RC \gg t_1$ C 放电时: $\tau_2 = R_0 C \ll t_2$ |
| 备注 | R_0 —二极管 V 的正向电阻 | |

① 这里画出的是电路处于稳定工作情况下的波形图。并假设二极管为理想元件，且输出端看作开路。

第 8 章 调制与解调

调制是用一种信号(称调制信号或基带信号)去改变另一种信号(称载波)的某些参数的过程。调制后的波形称已调波。将已调波恢复为原调制信号的过程称解调。

在广播、电视、通信等领域中，通过调制将要传送的低频信号(作调制信号)“装载”于频率更高的信号(载波)中，使低频信号有效地传送。在工业控制、仪器仪表等领域中，通过调制改变某信号的参数或波形，达到控制和信号有效处理的目的。

调制方式按调制信号的不同，分为模拟调制和数字调制。模拟调制又分为连续波(通常为正弦波)调制

和脉冲调制。不同的调制方式有相应的解调方法。

1 连续波模拟调制与解调

连续波模拟调制是指用模拟信号调制正弦载波的调制方式。它分为幅度调制、频率调制和相位调制。

1.1 幅度调制与解调

1. 幅度调制 幅度调制(简称调幅)使载波的幅度随调制信号的大小线性变化。幅度调制包括普通调幅、双边带调制、单边带调制和残留边带调制。普通调幅缩写为 AM(Amplitude Modulation)，是最基本



的一种。

设调制信号电压 $u_s = U_{sm} \times \cos \omega_s t$ ，载波电压 $u_c = U_{cm} \cos \omega_c t$ ，且 $U_{sm} < U_{cm}$ ，则实现普通调幅后的调幅波表示为

$$u_{AM} = U_{cm} \cos \omega_c t + \frac{m_a U_{cm}}{2} \times [\cos(\omega_c + \omega_s)t + \cos(\omega_c - \omega_s)t]$$

$$m_a = \frac{U_{sm}}{U_{cm}}$$

式中 m_a —— 调幅指数。

普通调幅波形见图 3-8-1。

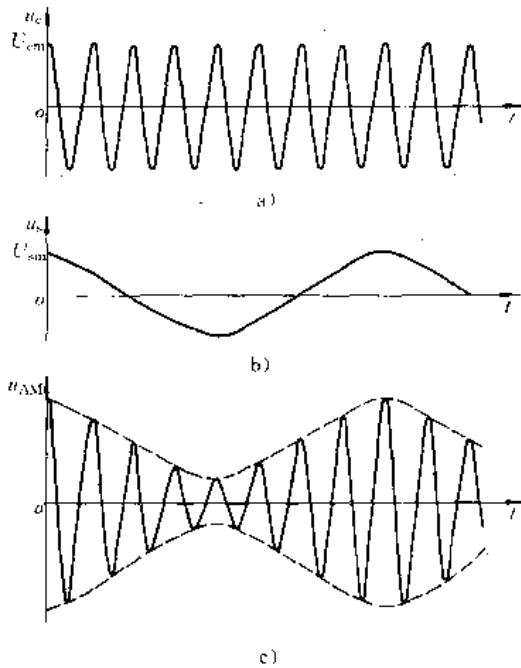


图 3-8-1 普通调幅波形

a) 载波 b) 调制信号 c) 调幅波

普通调幅波含有三个频率分量：载频 ω_c 、上边频 $(\omega_c + \omega_s)$ 、下边频 $(\omega_c - \omega_s)$ 。所传送的信号包含在边频中。在无线电广播中发射的边频功率最大值仅为总发射功率的 33%，因此调制效率较低。

为提高效率，可只发射边频，不发射载波，这就是双边带调制。若只发射一个边频分量，则称单边带调制。在实用中，常使被抑制的那个边带仍残留一小部分，便称残留边带调制。

普通调制电路可用晶体管构成，也可用集成模拟乘法器或专用平衡调制器来实现。后者电路简单、性能优越、调整方便。图 3-8-2 是用集成模拟乘法器实现普通调幅的示意图。低频调制信号 u_s 与直流电压 U 叠加后送入乘法器的 x 输入端，高频载波 u_c 送入乘法器的

y 输入端，设 $u_s = U_{sm} \cos \omega_s t$ ， $u_c = U_{cm} \cos \omega_c t$ ，则输出电压

$$u_o = K U U_{cm} \cos \omega_c t + \frac{K U_{cm} U_{sm}}{2} \times [\cos(\omega_c + \omega_s)t + \cos(\omega_c - \omega_s)t]$$

式中 K —— 集成模拟乘法器的标度因子 (1/V)

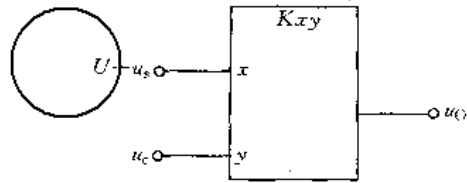
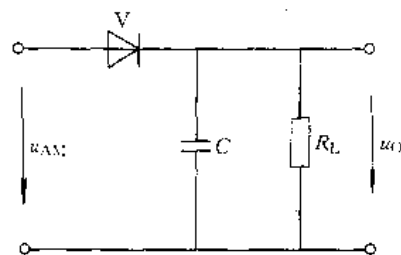


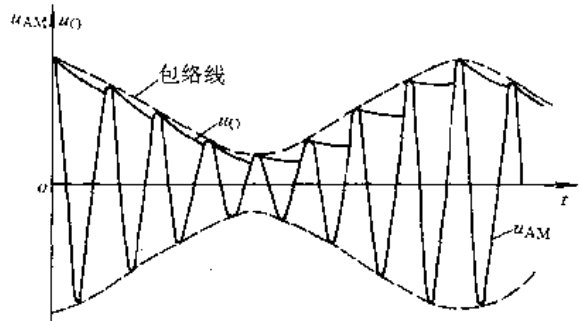
图 3-8-2 模拟乘法器普通调幅示意图

可见，输出是一普通调幅波。其调幅指数 (U_{sm}/U) 可方便地由外加直流电压 U 进行调节。若 $U=0$ ，则输出为抑制载波的双边带信号。

2. 调幅信号的解调 解调可分为相干解调和非相干解调两类。前者需要有与发送载波同频同相的同步载波，也称同步解调。后者不需要同步载波（例如包络检波、整流检波和平方律检波等）。图 3-8-3 是常用的二极管包络检波电路和波形，它是利用电容的充放



a)



b)

图 3-8-3 包络检波电路和波形

a) 电路 b) 波形



电使 u_0 接近于 AM 信号的包络线。若将 u_0 中的直流分量经电容隔离,就可得到接近于原调制信号的波形。包络检波适用于大信号检波。

图 3-8-4 是用模拟乘法器构成的普通调幅波同步解调的原理图。图中输入调幅波 u_{AM} 直接加到乘法器的 y 输入端,另一路经限幅放大后得到等幅的且与 u_{AM} 同频同相的同步信号 u_R 加于乘法器的 x 输入端,乘法器的输出电压 u_0' 经低通滤波器和隔直电容后便得反映原调制信号变化规律的输出电压 u_0 。

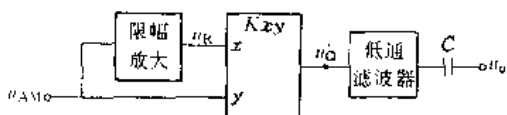


图 3-8-4 模拟乘法器构成的普通调幅波解调原理图

1.2 角度调制与解调

1. 角度调制 若载波的幅度不变,而其角度随调制信号的大小而变,这种调制方式称为角度调制。角度调制分频率调制和相位调制。

a. 频率调制 频率调制简称调频,缩写为 FM (Frequency Modulation),它使载波的频率随调制信号的幅度变化。设调制信号 $u_s = U_{sm} \cos \omega_s t$, 载波 $u_c = U_{cm} \times \cos \omega_c t$, 则调频波的角频率为

$$\omega_F = \omega_c + k_f U_{sm} \cos \omega_s t$$

任一时刻的相角为

$$\varphi_F = \int_0^t \omega_F dt = \omega_c t + m_f \sin \omega_s t$$

调频波表示为

$$u_{FM} = U_{cm} \cos (\omega_c t + m_f \sin \omega_s t)$$

$$m_f = \frac{k_f U_{sm}}{\omega_s}$$

式中 m_f ——调频指数 (rad);

k_f ——调频比例系数 (rad/sV)。

调频波形见图 3-8-5。

b. 相位调制 相位调制简称调相,缩写为 PM (Phase Modulation),它使载波的相角随调制信号的幅度变化。设调制信号 $u_s = U_{sm} \cos \omega_s t$, 载波 $u_c = U_{cm} \times \cos \omega_c t$, 则调相波的相角为

$$\varphi_P = \omega_c t + k_p U_{sm} \cos \omega_s t$$

调相波表示为

$$u_{PM} = U_{cm} \cos (\omega_c t + m_p \cos \omega_s t)$$

$$m_p = k_p U_{sm}$$

式中 m_p ——调相指数 (rad);
 k_p ——调相比例系数 (rad/V)。

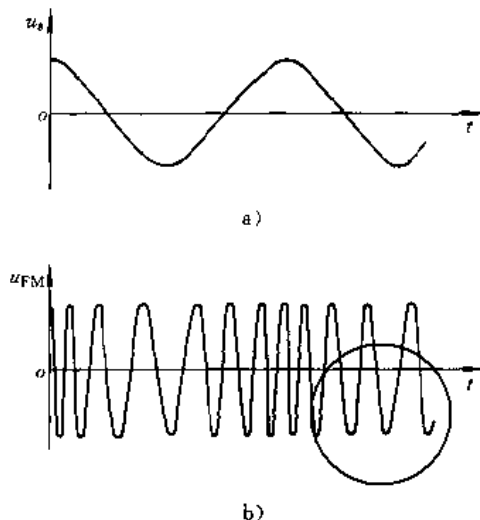


图 3-8-5 调频波形

a) 调制信号 b) 调频波形

调相波角频率的瞬时值

$$\omega_P = \frac{d\varphi_P}{dt} = \omega_c - k_p U_{sm} \omega_s \sin \omega_s t$$

综上所述,调频导致相角周期性变化,调相又使频率周期性变化,调频和调相总是相伴而生。

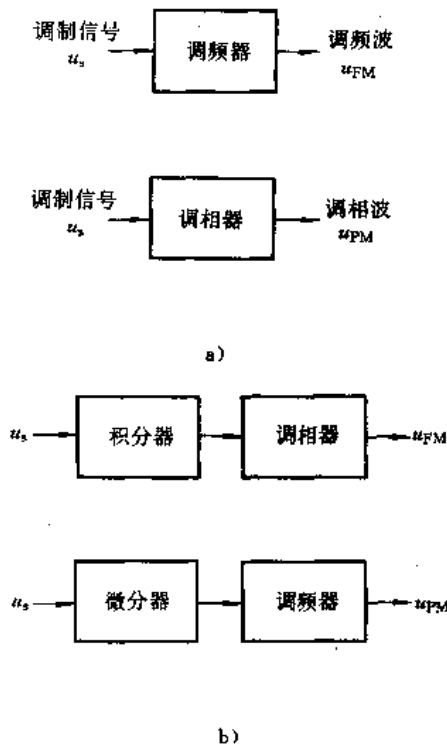


图 3-8-6 角度调制方法框图

a) 直接调制 b) 间接调制



实现角度调制的方法较多，一般将其分为直接调制和间接调制两类，见图 3-8-6。

图 3-8-7 是变容二极管直接调频原理图。图中变容二极管作为振荡器的振荡元件， C_c 为隔直电容， L_H 为高频扼流圈。处于反向偏置的变容二极管的结电容随外加调制信号电压 u_s 的大小变化，因此振荡频率就随 u_s 变化，实现了调频。

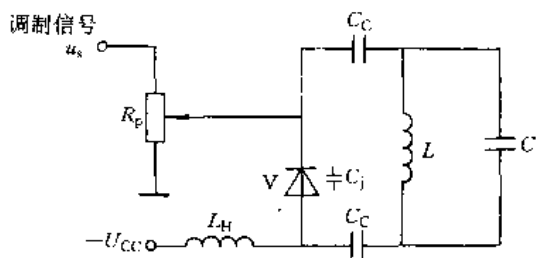


图 3-8-7 变容二极管直接调频原理图

2. 调角信号的解调 调角信号的解调常用鉴频器来实现。图 3-8-8 是鉴频器的一种结构框图。调频信号经微分后，变成幅度和相位都随调制信号变化的调幅调频波，其幅度的变化规律反映了调频波瞬时频率的变化规律，即反映了调制信号的变化规律。因此，再经包络检波后便得到调制信号。



图 3-8-8 鉴频器的一种结构框图

鉴频器也可用模拟乘法器构成。

2 脉冲调制与解调

脉冲调制是用脉冲波作为载波，使它的某些参数随调制信号（模拟信号）变化。脉冲调制分为脉冲幅度调制、脉冲宽度调制、脉冲位置调制和脉冲编码调制等。

2.1 脉冲幅度调制

脉冲幅度调制简称 PAM (Pulse Amplitude Modulation)，它是脉冲载波的幅度随调制信号大小而变的一种调制方式。这种调制方式实际上就是用脉冲序列对调制信号进行采样的过程，因此可用采样电路实现。

实际采样有自然采样和平顶采样（或称瞬时采样）两种方式，相应地有曲顶 PAM 和平顶 PAM 之分，波形见图 3-8-9。

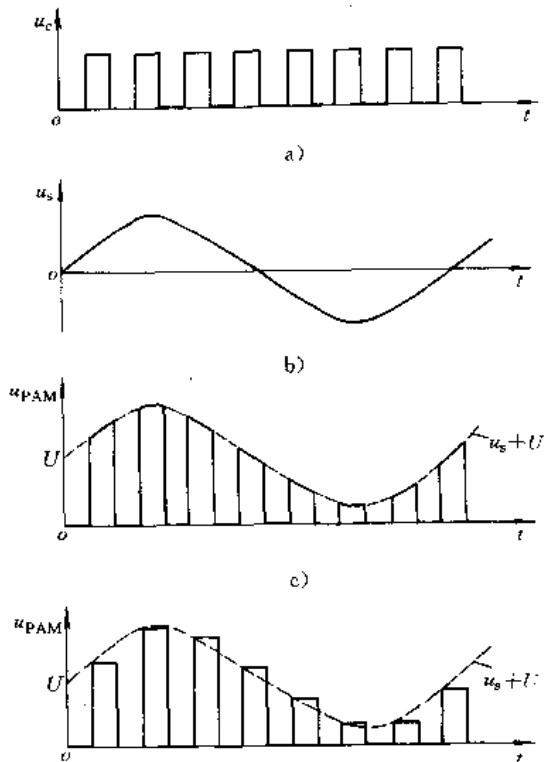


图 3-8-9 脉冲幅度调制波形

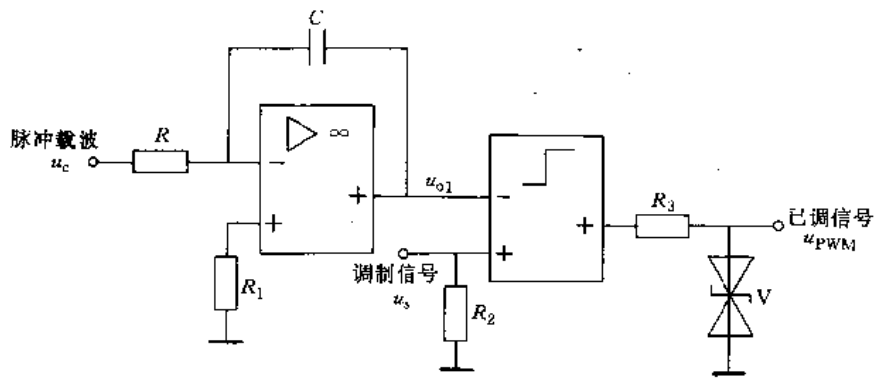
a) 载波 b) 调制信号
c) 曲顶 PAM 信号 d) 平顶 PAM 信号

2.2 脉冲宽度调制

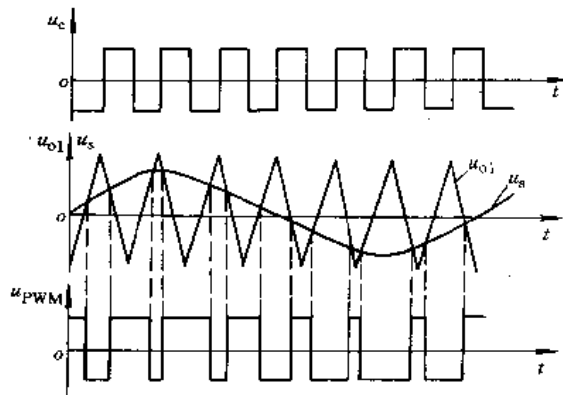
脉冲宽度调制也称脉冲持续时间调制，简称 PWM (Pulse Width Modulation) 或 PDM (Pulse Duration Modulation)，它是用连续变化的调制信号来改变脉冲载波宽度（持续时间），而脉冲幅度保持恒定的调制方式。图 3-8-10 是一种脉冲宽度调制的原理电路和波形图。

脉冲宽度调制技术已广泛应用于电机调速和开关电源。例如在直流电机调速装置中，可用频率固定而宽度可调的控制脉冲控制主回路中开关的通断时间，以改变加到电机的平均电压，达到调速目的。在脉宽调制开关型稳压电路中，将已调波用作开关调整管的驱动脉冲，以控制开关调整管的导通和截止时间，达到调压和稳压的目的。





a)



b)

图 3-8-10 脉冲宽度调制

a) 原理电路 b) 波形图

2.3 脉冲位置调制

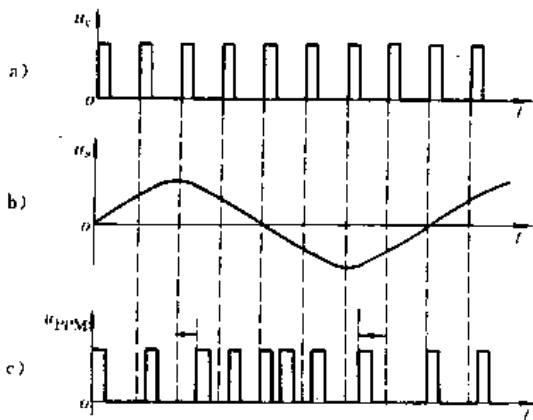


图 3-8-11 脉冲位置调制波形

a) 载波 b) 调制信号 c) 已调波

脉冲位置调制也称脉冲时间调制，简称 PPM (Pulse Position Modulation) 或 PTM (Pulse Time Modulation)，它使脉冲的位置（出现时间）随调制信号的大小变化。波形见图 3-8-11。

PPM 信号可通过对 PWM 信号的微分和整形后获得。

一般 PPM 信号的脉冲宽度很小，从通信角度看，所需发射功率小，效率高，但占用的频带很宽，系统复杂。

2.4 脉冲编码调制

脉冲编码调制简称 PCM (Pulse Code Modulation)，它是用脉冲码组代表模拟信号的采样值，把模拟信号转换为数字信号的调制方式。

PCM 系统（调制部分）的基本组成见图 3-8-12a。模拟调制信号 u_s 经采样转换为 PAM 信号 u_{PAM} （幅度



仍是模拟量), 对 PAM 信号 (u_s 的各采样值) 进行量化和编码, 便成为 PCM 信号。

图 3-8-12b 和 c 分别是采样信号采用八段均匀量化值的量化示意图和采用三位二进制码组组成的 PCM 信号示意图。

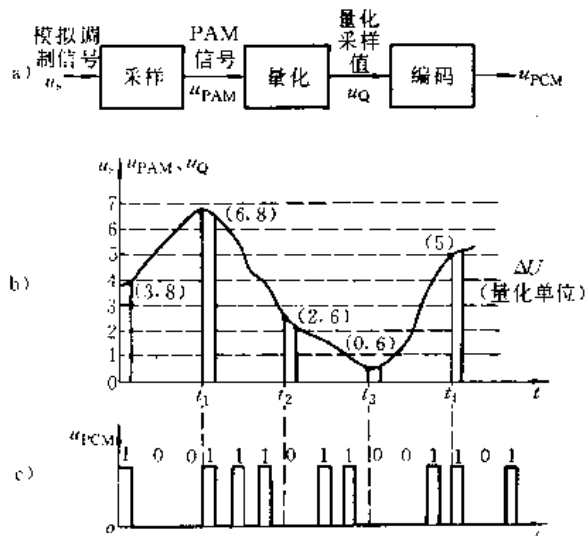


图 3-8-12 脉冲编码调制

a) 原理框图 b) 采样和量化 c) PCM 信号

2.5 脉冲解调

从已调脉冲串中复现原始调制信号的过程即为脉冲解调。几种脉冲解调的原理框图见图 3-8-13。

对于自然采样形成的曲顶 PAM 信号, 其频谱中含有调制信号的频谱, 可直接用理想低通滤波器解调。对于瞬时采样的平顶 PAM 信号, 则须加频率校正网络。一般, 为了提高输出解调信号幅度, 常在低通滤波器前加接采样保持电路, 并经频率校正, 得到解调输出信号。

对于 PWM 信号。一般可先经限幅电路消除噪声对 PWM 信号幅度的影响, 再通过低通滤波器解调。

对于 PPM 信号, 由于其频谱中不含有原调制信号的频谱, 故不能直接用低通滤波器解调。通常是把 PPM 信号转换成 PAM 信号, 再按 PAM 信号的解调方法实现解调。

PCM 信号的解调过程是, 先经转换器把脉冲码组 (即 PCM 信号) 转换成相应的量化采样值, 再经低通滤波器实现解调。在实用中, PCM 系统的发送端有定时电路, 接收端有同步电路。

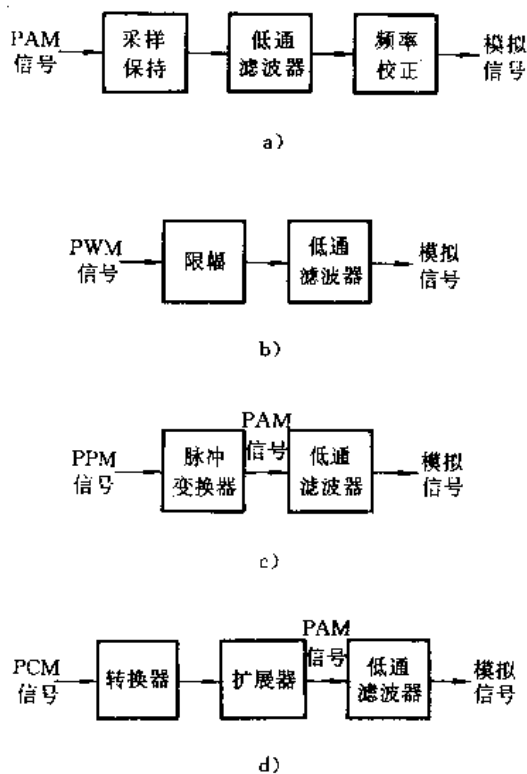


图 3-8-13 脉冲解调原理框图

a) PAM 信号解调 b) PWM 信号解调
c) PPM 信号解调 d) PCM 信号解调

3 数字调制与解调

3.1 二进制数字调制

用数字基带信号去调制连续载波的方法称为数字调制, 原理框图见图 3-8-14。数字信息常由二进制数 1 和 0 组成, 对应的数字基带信号为矩形脉冲波。

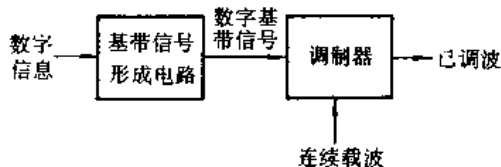


图 3-8-14 数字调制原理框图

数字调制技术有两种: 模拟调制法和键控法。模拟调制法使用较少, 本节只介绍键控法。键控法是利用数字信号去分别键控载波的幅度、频率、相位, 相应应有移幅键控 (ASK)、移频键控 (FSK) 和移相键控 (PSK) 三种调制方法。键控法一般由数字电路实现, 具有速度快、可靠性好和调试方便等特点, 在数字通信系统中得到广泛的作用。

此星公司制作 请尊重原作者版权



1. 移幅键控 移幅键控简称 ASK (Amplitude Shift Keying), 即数字调幅, 指载波的幅度受数字基带信号控制。图 3-8-15 为普通移幅键控的原理图和波形图。图中设二进制数字信息为 1011, 相应的数字基带信号波形 u_D 作为模拟开关的控制量, 其输出即为已调波。这种方法也称开关键控。

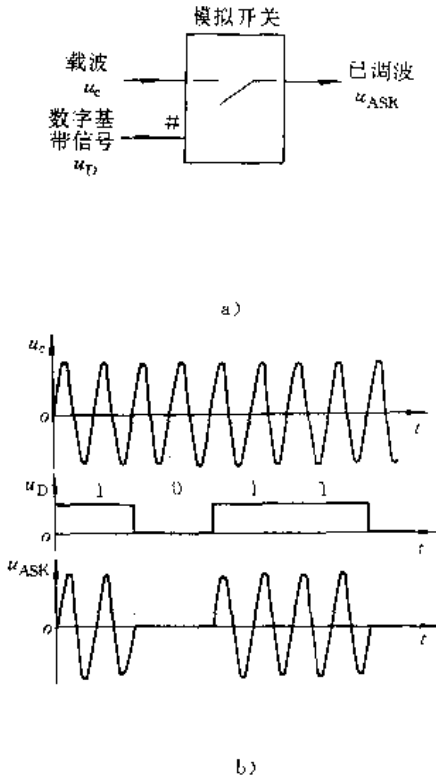


图 3-8-15 普通移幅键控
a) 原理图 b) 波形图

2. 移频键控 移频键控简称 FSK (Frequency Shift Keying), 它是用数字基带信号控制载波瞬时频率的调制方式, 即数字调频。FSK 信号可表示为

$$u_{FSK} = \begin{cases} U_{cm} \cos(\omega_1 t + \varphi_1) & (u_D = "1") \\ U_{cm} \cos(\omega_2 t + \varphi_2) & (u_D = "0") \end{cases}$$

$$\omega_1 = \omega_c - \Delta\omega, \omega_2 = \omega_c + \Delta\omega$$

式中 φ_1 和 φ_2 分别是 u_D 为 "1" 和 "0" 时载波的初相位。

按二进制码变换时已调波相位的不同, FSK 信号可分为相位连续和相位不连续两种, 见图 3-8-16。

FSK 信号的产生可用频率键控法和直接调频法。频率键控法是由数字基带信号控制一个单刀双掷开关, 使开关可分别接通两个独立的、频率不同的载波振荡器。直接调频法则是用数字基带信号控制一个开关的接通和断开, 以改变 LC 振荡器的振荡电容容量, 从

而改变振荡频率。前者产生相位不连续的 FSK 信号, 后者产生相位连续的 FSK 信号。

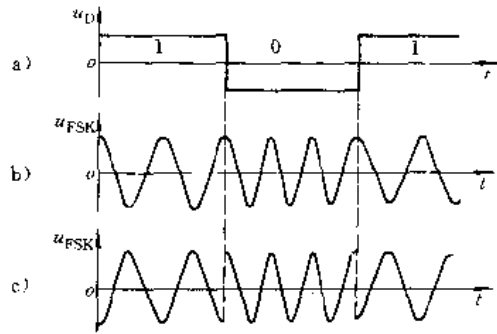


图 3-8-16 移频键控波形图

a) 数字基带信号 b) 相位连续的 FSK 信号
c) 相位不连续的 FSK 信号

3. 移相键控 移相键控简称 PSK (Phase-Shift Keying), 它是用数字基带信号控制载波相位的调制方式, 即数字调相。移相键控分为绝对移相键控和相对移相键控 (也称差分移相键控, 记为 DPSK) 两类。对于两相制 (0 相和 π 相) 调制, 前者以未调载波相位为基准, 在发 "1" 码时载波相位不变, 发 "0" 码时载波移相 180° ; 后者以相邻的前一个码元的已调波相位为基准, 发 "1" 码时移相 180° , 发 "0" 码时相位不变。波形见图 3-8-17。

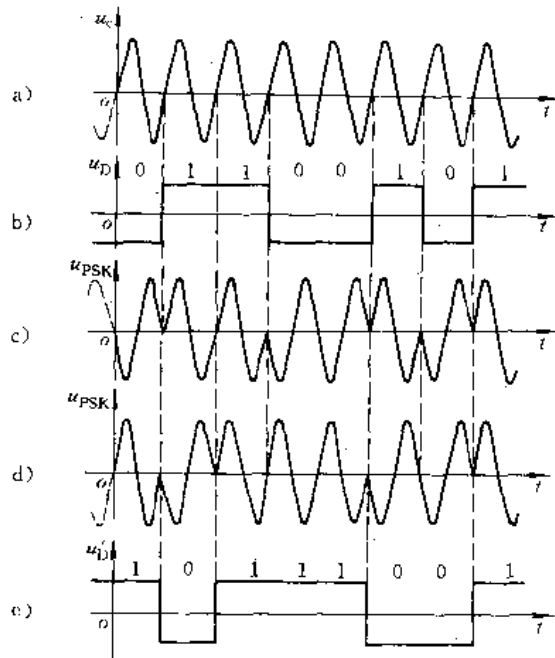


图 3-8-17 移相键控波形图

a) 载波 b) 数字基带信号 c) 绝对移相键控信号
d) 相对移相键控信号 e) 相对码波形



产生绝对移相键控信号的最简单的方法是用双极性数字基带信号控制一个单刀双掷开关，使其可分别接通相位差为 180° 的两振荡波形。相对移相键控信号常采用对原数字基带信号进行变换（例如在图 3-8-17 中，将 u_D 变换为相对码波形 u'_D ，即用 u'_D 中相邻码不变表示 u_D 中的“0”， u'_D 中相邻码改变表示 u_D 中的“1”），再根据变换后的信号（ u'_D ）进行绝对移相键控而获得。

3.2 二进制数字解调

1. ASK 信号的解调 ASK 信号的解调采用包络检波（非相干解调）和同步解调（相干解调）两种方法。

2. FSK 信号的解调 FSK 信号的解调常采用非相干解调方法，例如差分检波法、鉴频器、零交点鉴频和动态滤波最佳非相干解调等。图 3-8-18 是差分检波法解调的原理框图，其中的延迟电路要满足 $\omega_c \tau = \pi/2$ （ ω_c 为载波中心角频率， τ 为延迟电路延迟时间）。

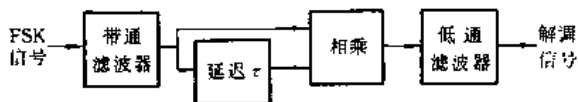


图 3-8-18 FSK 信号的差分检波法解调原理框图

3. PSK 信号的解调 PSK 信号的解调只能采用

相干解调法。对于两相绝对移相键控信号的解调，可用图 3-8-19a 所示的原理框图。图中带通滤波器可滤去 PSK 信号带外的噪声。解调器的工作原理可结合图 3-8-17 的波形说明。例如，将图 3-8-17a 和 c 的波形相乘后便是乘法电路的输出波形，见图 3-8-19b，此波形经低通滤波器和采样判决电路整形后，便可得到图 3-8-17b 所示的原数字基带信号。

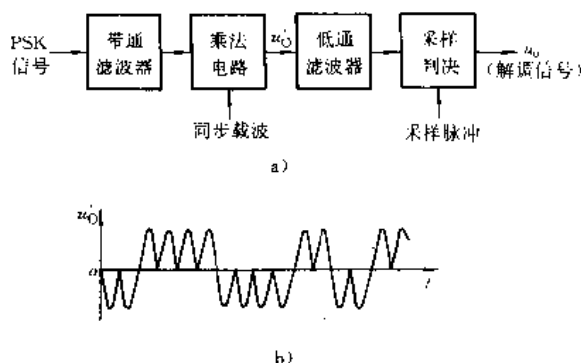


图 3-8-19 绝对移相键控信号的解调

a) 原理框图 b) 乘法电路的输出波形

对于相对移相键控信号的解调，可先按绝对移相键控信号的解调方法解调，然后再通过码变换器得到原数字基带信号。

第9章 数字量和模拟量的相互转换

从模拟量到数字量的转换称为模-数转换。能实现这种转换的电子器件称为 A/D 转换器，有时简称为 ADC (Analog-Digital Converter)。从数字量到模拟量的转换称为数-模转换。能实现这种转换的电子器件称为 D/A 转换器，有时简称为 DAC (Digital-Analog Converter)。A/D 和 D/A 转换器在自动检测与控制中有着广泛的应用。

1 D/A 转换器

1.1 D/A 转换器的类型和工作原理

D/A 转换器有多种类型，较常见的是权电阻网络型、倒 T 型电阻网络型和权电流型 D/A 转换器（见表 3-9-1）。它们都包含电阻网络（或电流源网络），模拟开关和求和放大器三个部分。模拟开关的接通位置受

输入数字量的控制。以权电阻网络为例，当输入数字量 $d_i = 1$ 时， d_i 所控制的模拟开关把相应的电阻接到参考电压（或称基准电压） U_{REF} 上；当 $d_i = 0$ 时开关则将相应的电阻接地。于是求和放大器的输出电压就和输入的数字量成正比。

CMOS 和双极型集成 D/A 转换器主要是倒 T 型电阻网络型和权电流型，其位数有 8 位、10 位、12 位等。集成 D/A 转换器多数是将数字量转换为电流输出，这类 D/A 转换器不含求和放大器，只包含电阻网络（或由电阻与恒流源组成的电路）和模拟开关，有的还含有基准电压源。电流输出的 D/A 转换器可外加运算放大器来获得电压输出。输出电压有单极性和双极性两种。单极性输出时，输入的数字量采用自然二进制码，输出电压范围从 0 到满度值（正值或负值）。双极性输出时，输入是带符号位的数字代码，其编码方式有多



种,输出电压范围从负满度值到正满度值(例如-5V~+5V)。图3-9-1是单极性电压输出的基本电路。

为了能与计算机交换数据或信息,不少集成D/A

转换器内含寄存器及相应的控制电路。这种D/A转换器具有保存输入数据的功能,其输入电平和计算机的输出电平相匹配,故称为与微机兼容的D/A转换器。

表 3-9-1 D/A 转换器的几种类型

| 名称 | 原理电路 | 输出电压 | 主要特点 |
|--------------------|------|----------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|
| 权电阻网络 D/A 转换器 | | $u_O = -\frac{U_{REF}}{2^4} (d_3 2^3 + d_2 2^2 + d_1 2^1 + d_0 2^0)$ | 电路简单、直观。各个电阻阻值相差太大,精度难以保证,不利于制作集成电路 |
| 倒T型电阻网络 D/A 转换器 | | $u_O = -\frac{U_{REF}}{2^4} (d_3 2^3 + d_2 2^2 + d_1 2^1 + d_0 2^0)$ | 只用R、2R两种阻值的电阻。输入数字量变化时,各支路电流不变。工作速度较快 |
| 权电流 D/A 转换器 | | $u_O = \frac{IR}{2^4} (d_3 2^3 + d_2 2^2 + d_1 2^1 + d_0 2^0)$ | 各支路电流恒定,不受模拟开关内阻影响,具有较高的转换精度 |

注: D/A 转换器一般为 n 位,表中以 4 位为例说明。 $d_3 d_2 d_1 d_0$ 为输入的 4 位二进制码, d_3 为最高位(写作 MSB), d_0 为最低位(写作 LSB)。



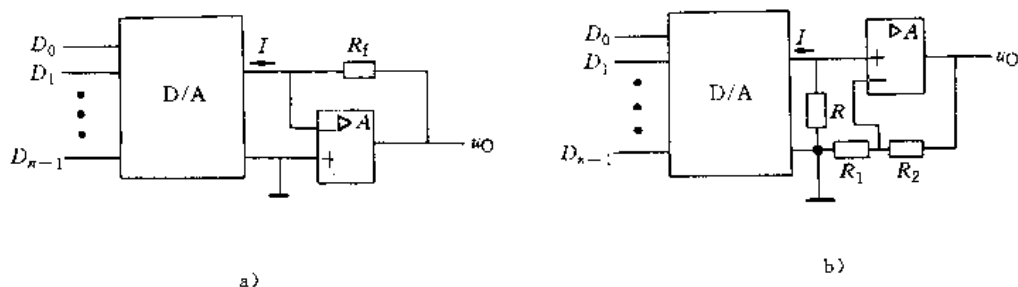


图 3-9-1 D/A 转换器的单极性电压输出电路

a) 反相输出 b) 同相输出

1.2 D/A 转换器的主要参数

不同制造厂家所给出的 D/A 转换器的技术参数及某些参数的定义有所不同,这里介绍几个主要参数。

1. 分辨率 是描述 D/A 转换器对输入量变化敏感程度的参数,通常用数字量的位数来表示。 n 位 D/A 转换器能输出 2^n 个不同等级的模拟电压。有时分辨力也用最小输出电压(此时输入数字量只有最低位为 1 其余均为 0)与最大输出电压(此时输入数字量各位均为 1)之比来表示。例如 10 位 D/A 转换器的分辨率为 $\frac{1}{2^{10}-1} \approx 0.001$ 。

2. 精度 指 D/A 转换器输出的模拟电压与预期值之间的偏差。通常用输出电压满刻度值的百分比或者用最低有效位 LSB 的几分之一来表示。对于一个具有 $\frac{1}{2}$ LSB 精度的 D/A 转换器,其最大误差等于输入

为 00...01 时输出电压的一半。

3. 线性度 当 D/A 转换器的输入是一个顺序变化的二进制码时,输出应当是间隔为 1LSB 的阶梯形电压,即理想的输入-输出增量特性是线性的。但实际上总存在着间隔的不均匀性。两个相邻数字量所对应的模拟量之差和 1LSB 相对偏差之最大绝对值称为线性微分误差,有时就用它来表征线性度。

4. 建立时间 是衡量 D/A 转换器转换速度的参数。一般是指从输入数字量的时刻开始,到输出模拟量(电流或电压)达到规定误差范围内的数值所需要的时间。

5. 温度系数 在规定的范围内,温度每变化 1°C 时,增益、线性度、零点等参数的变化量,分别称为增益温度系数、线性度温度系数、零点温度系数。

此外,还有数字输入电平、模拟输出电压范围、静态功耗等参数。表 3-9-2 是 D/A 转换器主要参数示例。

表 3-9-2 D/A 转换器主要参数示例

| 型 号 | 分 辨 力 (bit) | 精 度 | 建立时间 (ns) | 输入电平① | 备 注 |
|----------|----------------|-------|--------------|----------|----------------------|
| CDA 7524 | 8 | 0.1% | 100 | TTL/CMOS | CMOS 电路, 电流输出, 与微机兼容 |
| CDA 7520 | 10 | 0.05% | 200 | TTL/CMOS | CMOS 电路, 电流输出 |
| CDA 7541 | 12 | 0.01% | 1000 | TTL/CMOS | CMOS 电路, 电流输出 |
| CDA 0832 | 8 | 0.2% | 150 | TTL | 双极型电路, 电流输出, 与微机兼容 |

① 此栏表示该 D/A 转换器的输入电平可来自何种类型的数字集成电路。

2 A/D 转换器

2.1 A/D 转换器的类型和工作原理

A/D 转换器有多种类型,集成 A/D 转换器常采用并行比较型、逐次渐近型和双积分型等。

1. 并行比较型 A/D 转换器 图 3-9-2 是二位的

并行比较型 A/D 转换器的原理电路。图中 4 个电阻将参考电压 U_{REF} 分成 3 个等级,分别作为 3 个比较器的参考电压。输入模拟电压 u_i 的大小决定了各个比较器的输出状态。比较器的输出存入寄存器,再经代码转换电路转换成二进制代码输出。表 3-9-3 是电路的输入输出关系。 n 位的 A/D 转换器需要 2^n 个分压电阻和 $(2^n - 1)$ 个比较器,工作原理相同。



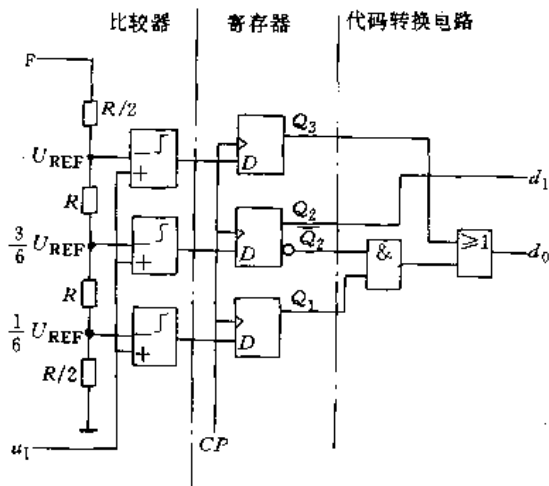


图 3-9-2 并行比较型 A/D 转换器原理电路图

表 3-9-3 二位并行比较型 A/D 转换器的输入输出关系

| 输入模拟电压 u_i | 寄存器输出 Q_3 Q_2 Q_1 | 输出数字量 d_1 d_0 |
|------------------------------------------|-------------------------|-------------------|
| $(0 \sim \frac{1}{6}) U_{REF}$ | 0 0 0 | 0 0 |
| $(\frac{1}{6} \sim \frac{3}{6}) U_{REF}$ | 0 0 1 | 0 1 |
| $(\frac{3}{6} \sim \frac{5}{6}) U_{REF}$ | 0 1 1 | 1 0 |
| $(\frac{5}{6} \sim 1) U_{REF}$ | 1 1 1 | 1 1 |

这种 A/D 转换器的突出优点是转换速度快，转换

时间可低于 20ns。常见的位数是四位、六位和八位。若位数太多，则所需比较器的数目非常之大，制作困难。

2. 逐次渐近型 A/D 转换器 图 3-9-3 是一个八位的逐次渐近型 A/D 转换器的结构示意图。当时钟脉冲及命令 A/D 转换器开始进行转换的控制信号加入后，在时序控制电路输出信号的作用下，八位移位寄存器就输出顺序脉冲给逐次渐近寄存器，使电路从最高位开始逐次进行比较。第一次比较时逐次渐近寄存器输出的最高位置 1，其余位为 0，D/A 转换器的输出为 u_D 。比较器把 u_i 和 u_D 加以比较：若 $u_D < u_i$ ，即把最高位的 1 保留；若 $u_D > u_i$ ，即把最高位由 1 变为 0。第二次比较是把逐次渐近寄存器输出的次高位置 1（最高位保留第一次比较的结果），并由 u_D 和 u_i 的大小来确定这一位的 1 是否保留。如此逐位比较下去，直到最低位为止。经过八次比较，就得到一个八位二进制数码存入三态输出锁存器，完成一次转换。

逐次渐近型是目前集成 A/D 转换器中用得最多的一种电路。 n 位逐次渐近型 A/D 转换器的转换时间为 $(n+2)$ 个时钟信号周期，转换速度较快。

3. 双积分型 A/D 转换器 图 3-9-4a 和 b 分别为双积分型 A/D 转换器的原理示意图和波形图。这种转换器每转换一次要进行两个阶段的积分。第一阶段是积分器在 $0 \sim t_1$ 的固定时间 T_1 对输入的模拟电压 u_i 进行采样积分（此时模拟开关 S_1 接通， S_2 断开），称为定时积分阶段或采样阶段。设 T_1 期间 u_i 的大小不变，则 $t = t_1$ 时积分器的输出电压。

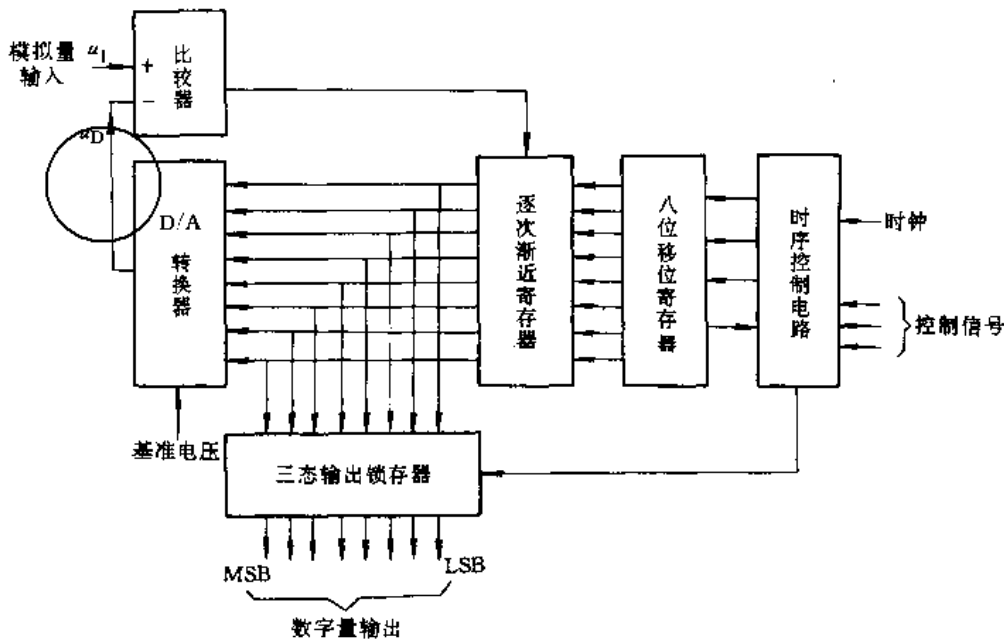


图 3-9-3 逐次渐近型 A/D 转换器的结构示意图



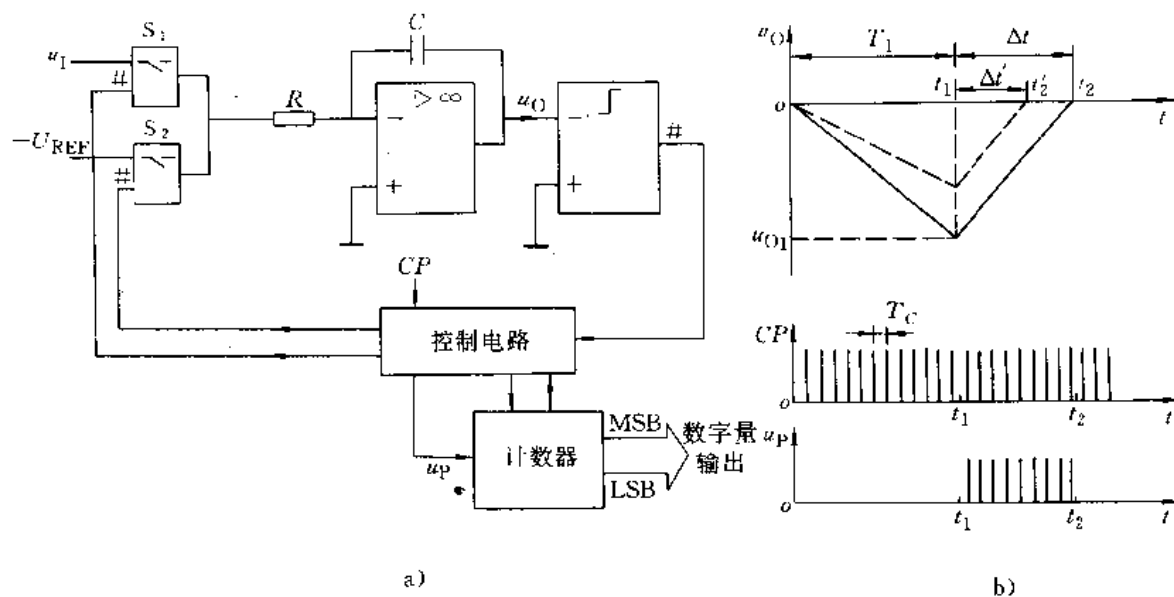


图 3-9-4 双积分型 A/D 转换器

a) 原理示意图 b) 波形图

T_1 —固定积分时间 Δt —反积分时间

$$u_{O1} = -\frac{1}{RC} \int_0^{T_1} u_1 dt = -\frac{T_1}{RC} u_1$$

即 u_{O1} 与 u_1 成正比。波形图中的虚线是表示 u_1 较小的情况。

第二阶段是在 $t_1 \sim t_2$ 期间积分器对参考电压 $-U_{REF}$ 进行相反方向的积分 (此时 S_1 断开, S_2 接通), 称为反积分阶段或比较阶段。 u_O 从 u_{O1} 下降到零的时间 $\Delta t = T_1 u_1 / U_{REF}$ 。在 Δt 期间, 控制电路使计数器对 CP 进行计数。若取固定积分时间 T_1 为 CP 周期 T_C 的整数倍, 即 $T_1 = NT_C$ 。在 Δt 期间计数器的计数值为

$$D = \frac{\Delta t}{T_C} = \frac{T_1 u_1}{T_C U_{REF}} = \frac{N}{U_{REF}} u_1$$

故计数值 D 表示了 u_1 的大小, 实现了模数转换。

双积分型 A/D 转换器的转换速度低, 转换时间为数十毫秒至几百毫秒。但由于它的转换结果不受 R 、 C 参数影响, 工作性能稳定, 而且抗干扰能力尤其是抗工频干扰的能力强, 故在各种低速测量和控制系统中得

到广泛的应用。

2.2 A/D 转换器的主要参数

1. 分辨率 是说明 A/D 转换器对输入信号分辨能力的参数, 通常用输出二进制或十进制数字的位数表示。有时也用一个码距即一个 LSB 来表示, 或用 LSB 相对于满刻度值 FSR 的百分比来表示。对一个 n 位二进制 A/D 转换器, $1\text{LSB} = \text{FSR}/2^n$ 。

2. 精度 用满刻度值的百分比或最低有效值 LSB 的倍数表示。它表示 A/D 转换器在输入范围内转换误差的大小。转换误差包括量化误差和由于转换器内部元器件及单元电路的参数偏差所引起的误差。

3. 转换时间 完成一次 A/D 转换所需要的时间。

此外还有输入电压、输入电阻、输出电平、温度系数等。

表 3-9-4 是 A/D 转换器主要参数示例。

表 3-9-4 A/D 转换器主要参数示例

| 型号 | 分辨率 (bit) | 精度 | 转换时间 (μs) | 输出电平 | 备注 |
|----------|-----------|------|------------------------|----------------------|------------------------|
| CAD 3300 | 6 | 1% | 75×10^{-3} | TTL② | 并行比较型, CMOS 电路, 二进制码输出 |
| CAD 0808 | 8 | 0.5% | 100 | $U_{SS} \sim U_{DD}$ | 逐次渐近型, CMOS 电路, 二进制码输出 |



(续)

| 型号 | 分辨率 (bit) | 精度 | 转换时间 (μs) | 输出电平 | 备注 |
|----------|------------------|-------|------------------------|-----------------|------------------------|
| CAD 1210 | 12 | 0.01% | 100 | TTL | 逐次渐近型, CMOS 电路, 二进制码输出 |
| CAD 7107 | $3\frac{1}{2}$ ① | 0.1% | 250×10^3 | $U_{SS}-U_{DD}$ | 双积分型, CMOS 电路, 七段译码输出 |

① CAD7107 输出为 $3\frac{1}{2}$ 位十进制, 个位、十位、百位的输出均为 0~9, 而千位的输出仅为 0 或 1, 故输出为 0~1999。 $3\frac{1}{2}$ 位十进制相当于 11 位二进制。

② 表示该 A/D 转换器的输出电平和 TTL 电路相同。

3 采样-保持电路

3.1 采样-保持电路的工作原理

A/D 转换通常是在一系列选定的瞬间对模拟信号 u_i 进行采样, 然后把这些采样值转换为数字量。根据采样定理, 采样频率 f_s 必须大于 u_i 最高频率分量 f_{max} 的 2 倍, 即 $f_s \geq 2f_{\text{max}}$ 。由于 A/D 转换需要一定的时间, 故采样值必须保持一段时间。因此 A/D 转换的输入电压是每次采样结束时的 u_i 值。

采样和保持通常利用同一个电路完成。图 3-9-5 中虚线框内是一个集成采样-保持电路的内部结构示意图。它由输入缓冲放大器、输出缓冲放大器、模拟开关 S 及其逻辑控制电路组成。图中保持电容 C_H 是外接的, 要选用介质损耗低、漏电阻大的优质电容器 (如聚苯乙烯或聚四氟乙烯电容器)。在图示的连接方式下, 当采样/保持控制端 \bar{S}/H 为低电平时, 模拟开关 S 闭合, 电容 C_H 被快速充电, $u_o = u_i$, 电路处于采样阶段。当 \bar{S}/H 端为高电平时, 模拟开关 S 断开, 因电容 C_H 放电回路的电阻很大, 其端电压几乎不变, 电路处于保持阶段。

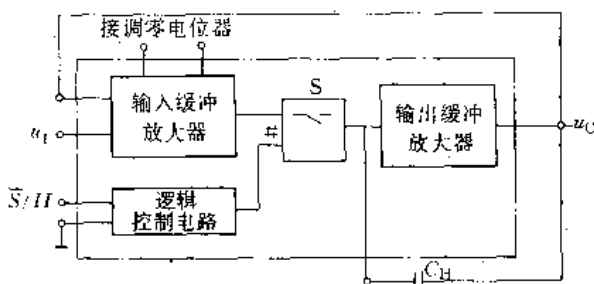


图 3-9-5 采样-保持电路的原理框图 (5G582)

其他形式的采样-保持电路, 其基本组成相似。但

有的电路的采样/保持控制端是高电平时采样, 低电平时保持; 保持电容 C_H 是接在输出缓冲放大器的输入端与地之间。

3.2 采样-保持电路的主要参数

1. 捕获时间 发出采样命令后, 采样-保持电路的输出电压从原来的保持值到达当前的输入信号值所需的时间。此时间的大小会影响采样频率的提高。

2. 孔径时间 从保持命令发出到模拟开关完全断开所需的时间。孔径时间的存在使采样的时间被延长了。

3. 孔径时间不定性 用孔径时间的变化范围表示。

4. 保持电压下降速率 在保持阶段, 保持电容 C_H 的漏电会使输出电压 u_o 有所下降。保持电压的下降速率

$$\frac{\Delta u_o}{\Delta t} = \frac{I}{C_H} \quad (\text{V/s})$$

式中 I ——漏电流 (pA);

C_H ——电容值 (pF)。

C_H 增大可使保持电压的下降速率减小, 但会使捕获时间增加。例如某电路的 C_H 从 100pF 增至 1000pF, 捕获时间从 $6\mu\text{s}$ 增至 $25\mu\text{s}$ 。

4 数据采集系统的组成

随着电子技术的发展, 以微型计算机为核心的数据采集系统在生产和科学研究中获得广泛的应用。在微型计算机控制下的数据采集系统能实现高精度的多路检测和高速的数据传送, 并由微型计算机对所采集的数据进行存储和处理。它既能在线处理, 也能离线处理。处理的结果可以显示、打印和绘图, 也可以通过 D/



电子工业出版社

A 转换器变为模拟量输出。

数据采集系统通常由以下几个部分组成：

(1) 传感器。用来把被检测的非电量(如温度、压力、推力、转速、流量等)转换成电信号。

(2) 放大器。把传感器输出的微弱信号加以放大,以便充分利用 A/D 转换器的满刻度分辨力。

(3) 多路模拟开关。在多参量的测量中,常用多路模拟开关进行切换,使各被测通道和公用的 A/D 转换器轮流接通。

(4) 采样-保持电路。

(5) A/D 转换器。

(6) 微型计算机。在程序控制下完成数据采集,并进行分析处理,得到关于被研究对象的各种动态信息。

图 3-9-6 是一种多通道数据采集系统的框图,图中采样-保持(S/H)电路和 A/D 转换器是各通道公用的。这种组成方式的优点是节省硬件,但因采用分时操作,故工作速度较慢。若需同时采集各个通道的数据,

则每个通道要有独立的采样-保持电路和 A/D 转换器,而不需要多路模拟开关。

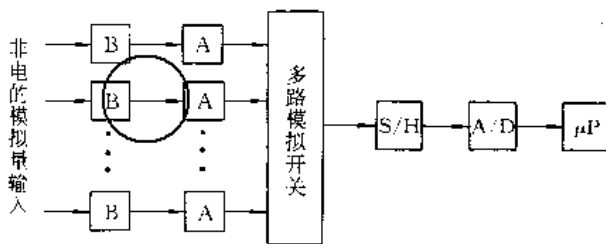


图 3-9-6 多通道数据采集系统的框图

B—传感器 A—放大器 μP—微型计算机

数据采集集成模块是将多路模拟开关、采样-保持电路、A/D 转换器以及所需的时序、控制电路全部制作在一起的集成电路。用户在使用这种模块时可根据自己的要求对电路的工作模式、工作速度、输出数字量的码制等进行选择,使用非常灵活、方便。

第 10 章 半导体整流电路和集成稳压器

由半导体器件构成的直流稳压电源是电子电路中电源的主要形式。这种直流稳压电源通常包括整流、滤波和稳压等部分。

1 整流电路

1.1 整流电路的基本类型

整流是将交流电转换成直流电的过程。整流电路有可控整流电路和不可控整流电路两大类。可控整流在本篇第 11 章叙述,本节只介绍不可控整流。不可控整流电路可分为单相和多相两类,它们均由整流二极管和整流变压器(或无变压器)构成。常见的单相和多相整流电路及其整流管的导通次序分别见图 3-10-1 和图 3-10-2 (设 u_2 及 u_{ω_0} 的初相位为零度)。

整流电路中整流变压器用以将交流电源电压变到所需的值。整流管利用其单向导电性将交流电转换成单向的脉动电压。确定整流管导通的原则是:阳极电位高于阴极电位时导通;阴极连在一起的整流管,阳极电位最高的整流管导通;阳极连在一起的整流管,阴极电

位最低的整流管导通。桥式整流电路有两个整流管串联导通。双反星形带平衡电抗器的整流电路由于平衡电抗器的作用,阳极电位最高和次高的两个整流管并联导通。

1.2 整流电路的主要电量关系

整流电路的主要电量关系见表 3-10-1 和表 3-10-2。表中,设整流变压器和整流管均为理想元件;变压器的各电压和电流为正弦有效值,变比 $K=U_1/U_2$, U_1 为一次电压; f 为交流电源频率;无穷大电感负载指滤波电感或负载电感量足够大,输出电流的交流分量可以略去不计的情况。部分电量的定义如下:

$$\text{脉动系数 } s = \frac{\text{整流输出电压的最低次谐波分量幅值}}{\text{整流输出电压的直流分量}}$$

$$\text{纹波系数 } \gamma = \frac{\text{整流输出电压的交流分量有效值}}{\text{整流输出电压的直流分量}}$$

$$\text{变压器利用率 } N_T = \frac{\text{整流输出直流功率}(U_O I_O)}{\text{变压器设计容量}}$$

脉动频率指整流输出电压的最低次谐波的频率。



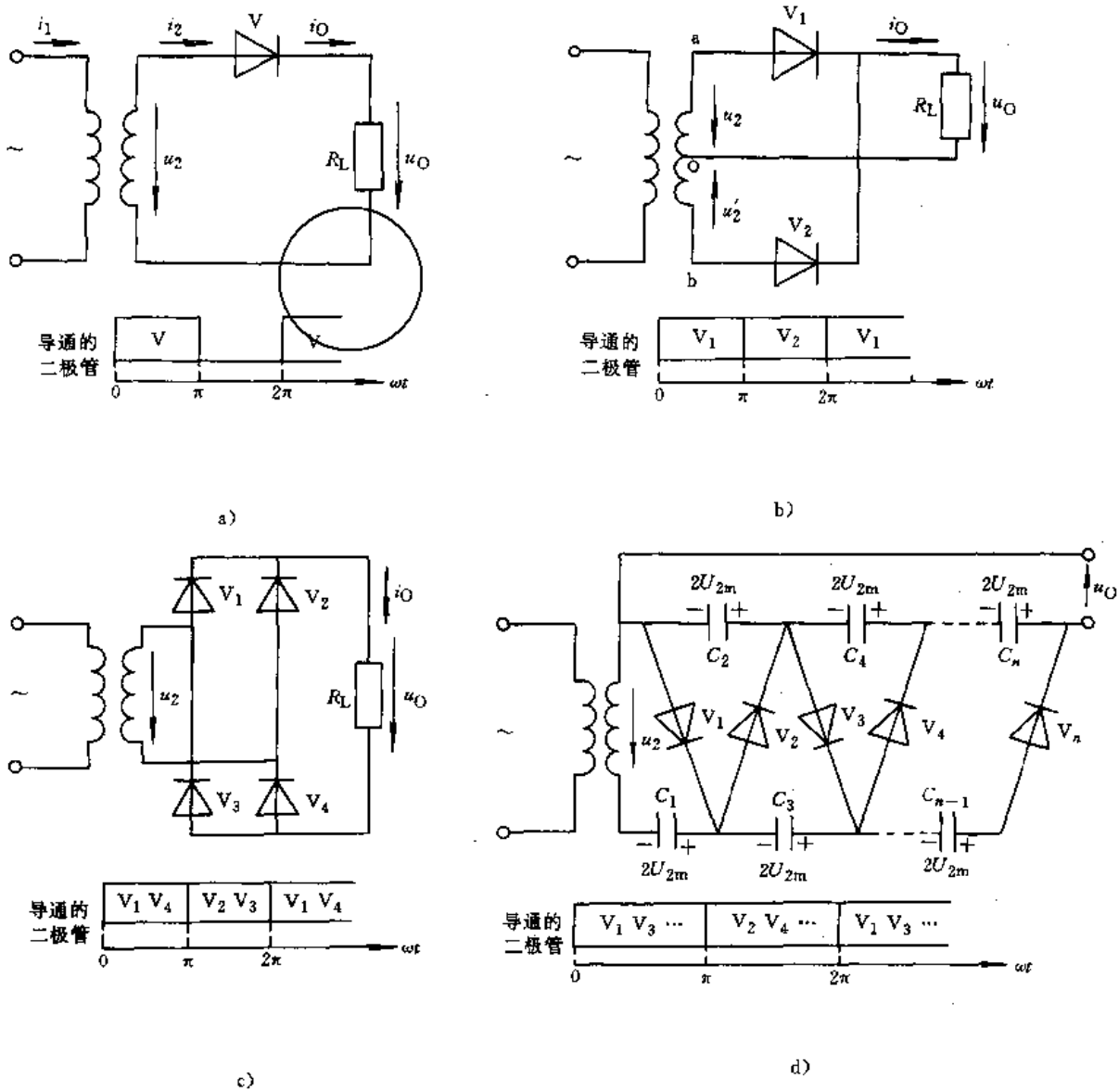


图 3-10-1 单相整流电路及整流管的导通次序
a) 半波 b) 全波 c) 桥式 d) 倍压

表 3-10-1 单相整流电路的主要电量关系

| 电量名称 | | 负载性质 | 电路名称 | | |
|------|--------------|---------|---------------|------------------|------------------|
| | | | 单相半波 | 单相全波 | 单相桥式 |
| 整流电压 | 输出直流电压 U_0 | 电阻或感性负载 | $0.45U_2$ | $0.9U_2$ | $0.9U_2$ |
| | | 有电容滤波 | 空载 | $1.414U_2$ | $1.414U_2$ |
| | 负载 | | $\approx U_2$ | $\approx 1.2U_2$ | $\approx 1.2U_2$ |
| | 脉动频率 f_m | | $1f$ | $2f$ | $3f$ |



(续)

| 电 量 名 称 | | 负 载 性 质 | | 电 路 名 称 | | |
|-----------------------|------------------|---------|-------------------|------------------------|----------------------------|----------------------------|
| | | | | 单 相 半 波 | 单 相 全 波 | 单 相 桥 式 |
| 整 流 电 压 | 脉动系数 s | 电阻负载 | | 1.57 | 0.667 | 0.667 |
| | 纹波系数 γ | 电阻负载 | | 1.21 | 0.483 | 0.483 |
| 整 流 管 | 数 目 | | | 1 | 2 | 4 |
| | 反向电压峰值 U_{RM} | 电阻或感性负载 | | $3.14U_0$ | $3.14U_0$ | $1.57U_0$ |
| | | 有电容滤波 | 空载 | $2U_0$ | $2U_0$ | U_0 |
| | 负载 | | $\approx 2.83U_0$ | $\approx 2.36U_0$ | $\approx 1.18U_0$ | |
| | 正向电流平均值 I_F | | | I_0 | $0.5I_0$ | $0.5I_0$ |
| | 正向电流最大值 I_{FM} | 电阻负载 | | $3.14I_0$ | $1.57I_0$ | $1.57I_0$ |
| | | 无穷大电感负载 | | I_0 | I_0 | I_0 |
| 导电角 θ (弧度) | 电阻或感性负载 | | π | π | π | |
| 整 流 变 压 器 | 二次电压 U_2 (有效值) | 电阻或感性负载 | | $2.22U_0$ | $1.11U_0$ | $1.11U_0$ |
| | | 有电容滤波 | 空载 | $0.707U_0$ | $0.707U_0$ | $0.707U_0$ |
| | | | 负载 | $\approx U_0$ | $\approx 0.833U_0$ | $\approx 0.833U_0$ |
| | 二次电流 I_2 (有效值) | 电阻负载 | | $1.57I_0$ | $0.785I_0$ | $1.11I_0$ |
| | | 无穷大电感负载 | | $0.707I_0$ | $0.707I_0$ | I_0 |
| | | 电容性负载 | | $\approx (2\sim 3)I_0$ | $\approx (1.2\sim 1.8)I_0$ | $\approx (1.7\sim 2.5)I_0$ |
| | 一次电流 I_1 (有效值) | 电阻负载 | | $1.21I_0/K$ | $1.11I_0/K$ | $1.11I_0/K$ |
| | | 无穷大电感负载 | | $0.5I_0/K$ | I_0/K | I_0/K |
| | 二次容量 S_2 | 电阻负载 | | $3.49U_0I_0$ | $1.74U_0I_0$ | $1.23U_0I_0$ |
| | | 无穷大电感负载 | | $1.57U_0I_0$ | $1.57U_0I_0$ | $1.11U_0I_0$ |
| 一次容量 S_1 | 电阻负载 | | $2.69U_0I_0$ | $1.23U_0I_0$ | $1.23U_0I_0$ | |
| | 无穷大电感负载 | | $1.11U_0I_0$ | $1.11U_0I_0$ | $1.11U_0I_0$ | |
| 设计容量 S_T | 电阻负载 | | $3.09U_0I_0$ | $1.49U_0I_0$ | $1.23U_0I_0$ | |
| | 无穷大电感负载 | | $1.34U_0I_0$ | $1.34U_0I_0$ | $1.11U_0I_0$ | |
| 利用率 N_T | 电阻负载 | | 0.324 | 0.671 | 0.811 | |
| | 无穷大电感负载 | | 0.746 | 0.746 | 0.9 | |

此星公司制作 请尊重作者版权

90 D



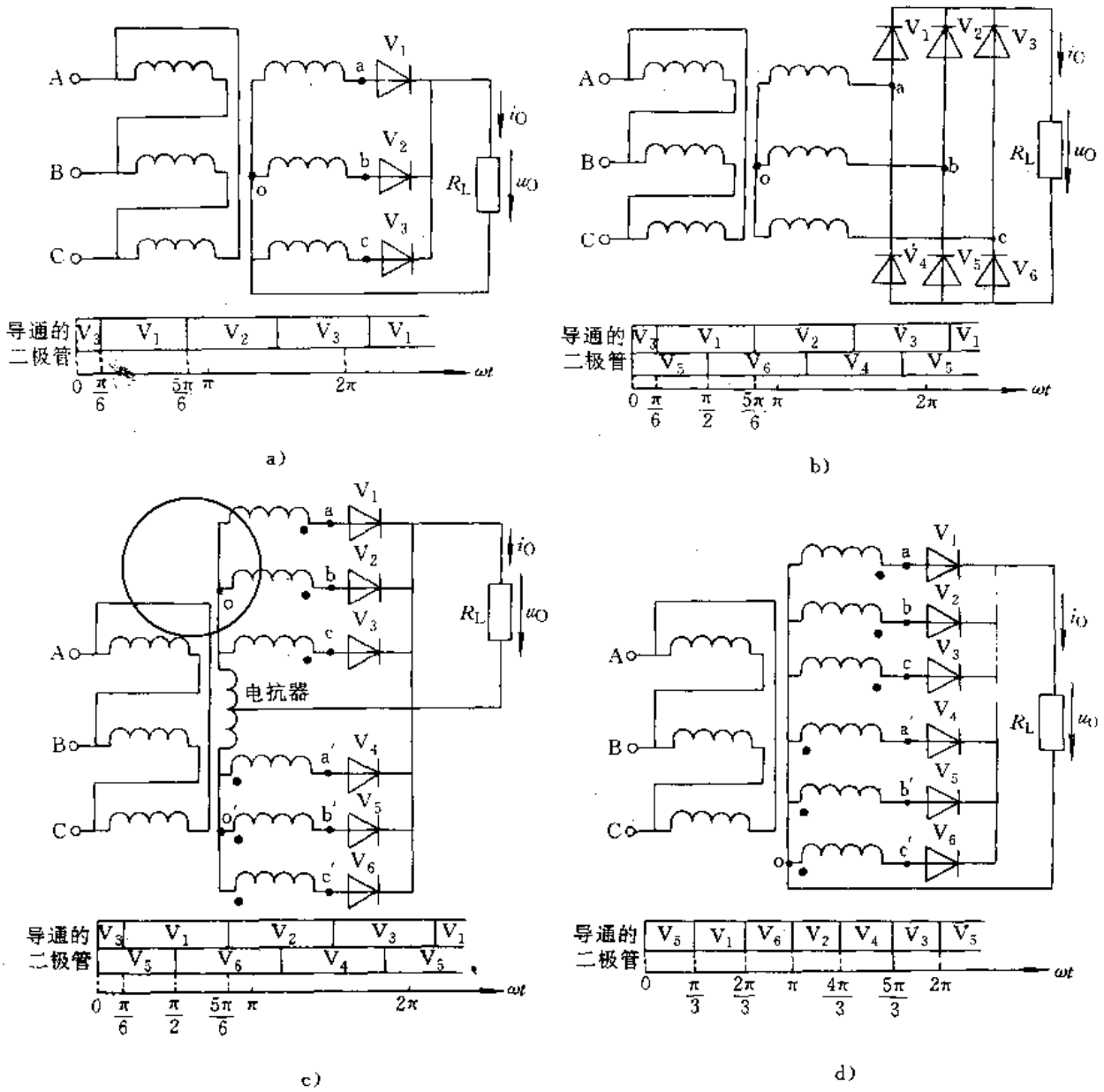


图 3-10-2 多相整流电路及整流管的导通次序
a) 三相半波 b) 三相桥式 c) 双反星形带平衡电抗器 d) 六相半波

表 3-10-2 多相整流电路的主要电量关系

| 电 量 名 称 | | 电 路 名 称 | | | |
|---------|---------------|-----------|-----------|------------|-----------|
| | | 三 相 半 波 | 三 相 桥 式 | 双反星形带平衡电抗器 | 六 相 半 波 |
| 整 流 电 压 | 输出直流电压 U_0 | $1.17U_2$ | $2.34U_2$ | $1.17U_2$ | $1.35U_2$ |
| | 脉动频率 f_m | $3f$ | $6f$ | $6f$ | $6f$ |
| | 脉动系数 s | 0.25 | 0.0571 | 0.0571 | 0.0571 |
| | 纹波系数 γ | 0.183 | 0.0418 | 0.0418 | 0.0418 |



(续)

| 电 量 名 称 | | 电 路 名 称 | | | |
|-----------------------|-------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| | | 三 相 半 波 | 三 相 桥 式 | 双反星形带平衡电抗器 | 六 相 半 波 |
| 整 流 管 | 数 目 | 3 | 6 | 6 | 6 |
| | 反向电压峰值 U_{RM} | $2.09U_0$ | $1.05U_0$ | $2.09U_0$ | $2.09U_0$ |
| | 正向电流平均值 I_F | $\frac{1}{3}I_0$ | $\frac{1}{3}I_0$ | $\frac{1}{6}I_0$ | $\frac{1}{6}I_0$ |
| | 选择时用的等效平均值 I'_p | $0.368I_0$ | $0.368I_0$ | $0.184I_0$ | $0.26I_0$ |
| | 正向电流最大值 I_{FM} | $1.21I_0$ | $1.05I_0$ | $0.605I_0$ | $1.05I_0$ |
| | 导电角 θ (弧度) | $\frac{2}{3}\pi$ | $\frac{2}{3}\pi$ | $\frac{2}{3}\pi$ | $\frac{1}{3}\pi$ |
| 整 流 变 压 器 | 二次相电压 U_2 | $0.855U_0$ | $0.428U_0$ | $0.855U_0$ | $0.74U_0$ |
| | 二次相电流 I_2 | $0.577I_0$ | $0.816I_0$ | $0.289I_0$ | $0.408I_0$ |
| | 一次相电流 I_1 | $0.272 \frac{I_0}{K}$ | $0.471 \frac{I_0}{K}$ | $0.235 \frac{I_0}{K}$ | $0.33 \frac{I_0}{K}$ |
| | 一次线电流 I_{1L} | $0.471 \frac{I_0}{K}$ | $0.816 \frac{I_0}{K}$ | $0.408 \frac{I_0}{K}$ | $0.471 \frac{I_0}{K}$ |
| | 二次容量 S_2 | $1.48U_0I_0$ | $1.05U_0I_0$ | $1.48U_0I_0$ | $1.81U_0I_0$ |
| | 一次容量 S_1 | $1.21U_0I_0$ | $1.05U_0I_0$ | $1.05U_0I_0$ | $1.28U_0I_0$ |
| | 设计容量 S_T | $1.35U_0I_0$ | $1.05U_0I_0$ | $1.26U_0I_0$ | $1.55U_0I_0$ |
| | 利用率 N_T | 0.743 | 0.955 | 0.791 | 0.646 |

注：1. f_m 、 s 、 γ 、 I_{fm} 为电阻负载时的数值，其余各量对于电阻负载和电感负载极为接近（表中为无穷大电感负载时的数值）；

2. 表中整流变压器采用 Δ/γ 接法。 K 为变压器一次线电压与二次线电压之比。

1.3 几种整流电路的特点和应用场合

单相半波整流电路简单，元件少，但 s 和 γ 大， U_0 和 N_T 低。单相全波整流和桥式整流电路的 s 和 γ 减小， U_0 和 N_T 提高。但单相全波整流的变压器需有中心抽头，反向电压峰值 U_{RM} 高；单相桥式整流的整流管数目较多，且有两个整流管与负载串联，整流电路内阻较大。单相整流电路多采用电容和 RC 滤波，通常用于小功率整流。

倍压整流可使低的交流电源电压变为高的直流输出电压，而整流管承受的反向电压并不高。但它的负载能力很弱，适用于高压微小电流的场合。

多相整流电路的 s 、 γ 和 I_F 小，对三相电源是平衡负载，但整流管数目多，电路复杂。常采用电感滤波，用于大功率整流。其中三相桥式性能较好，应用较广。双反星形带平衡电抗器的 N_T 较低，且多一平衡电抗器，但 I_F 为三相桥式的一半，多用于输出直流电流较大的场合。三相半波和六相半波性能较差，应用较少。

2 滤波电路

整流装置中的滤波电路(平滑滤波器)用来削弱整流输出中的脉动成份，获得较平滑的直流输出。常用的滤波电路及其主要特点和用途见表 3-10-3。



表 3-10-3 常用滤波电路及其特点和用途

| 名称 | 电路图 | 主要特点 | 用途 |
|--------|-----|------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|
| 电容滤波 | | 电路简单; 输出电压高; C 、 R_L 越大, 滤波效果越好; 负载能力较差; 整流电路承受较大的电容充电电流 | 用于负载电流较小的单相整流装置中 |
| 电感滤波 | | L 大、 R_L 小时滤波效果较好; 负载能力强; 通过整流电路的电流较平滑; 输出电压较低; 电感易感应较高电压、要求整流管有足够的耐压 | 用于负载电流较大且常变动的场合。多用于多相整流装置中 |
| RC 滤波 | | 滤波效果比电容滤波好 (RC 滤波更好); R 上有直流电压损失; 负载能力差, 输出电流较小 | 用于负载电流较小、滤波要求较高的单相整流装置中 |
| CRC 滤波 | | | |
| LC 滤波 | | 滤波效果好; 负载能力较强; 直流电压损失较小; 输出电压较低 | 适用于负载电流较大且变动大的单相整流装置中 |
| 有源滤波 | | 类似 RC 滤波, 但在相同的电压损失下, R 可提高到 β 倍, 在同样的滤波效果下, C 可减小到 $1/\beta$ 倍, 故可做到体积小、成本低、滤波效果好 | 适用于负载电流较小、滤波要求较高的整流装置中 |

3 稳压电路

3.1 稳压电路的主要性能指标

稳压电路的作用是在电网电压、负载和环境温度在一定范围内变化时, 使输出直流电压基本不变。衡量稳压电路性能的指标主要有:

1. 稳压系数 S_v 在负载电流 I_o 和环境温度 T 一

定时, 输出电压 U_o 的相对变化量与输入电压 U_1 的相对变化量之比, 即

$$S_v = \frac{\Delta U_o / U_o}{\Delta U_1 / U_1} \Big|_{\substack{I_o = \text{const} \\ \Delta T = 0}}$$

S_v 反映电网电压变化时 U_o 的影响。也用一定的输入电压变化量引起的输出电压相对变化量——电压调整率来表示。

2. 输出电阻 r_o



$$r_o = \left. \frac{\Delta U_o}{\Delta I_o} \right|_{\substack{\Delta U_i=0 \\ \Delta T=0}} \quad (\Omega)$$

r_o 反映 I_o 变化对 U_o 的影响。也用一定的输出电流变化量引起的输出电压相对变化量——电流调整率来表示。

3. **最大纹波电压** 输出电压中的 50Hz 或 100Hz 交流分量, 用有效值或幅值表示。

4. **温度系数 S_T**

$$S_T = \left. \frac{\Delta U_o}{\Delta T} \right|_{\substack{\Delta U_i=0 \\ \Delta I_o=0}} \quad (\text{mV}/^\circ\text{C})$$

上述指标的数值愈小, 稳压电路的输出电压愈稳定。

3.2 稳压管稳压电路

稳压管稳压电路见图 3·10-3, 它是最简单的并联型稳压电路(稳压管与负载并联)。图中 U_1 是整流、滤波后的电压; R 为限流电阻。

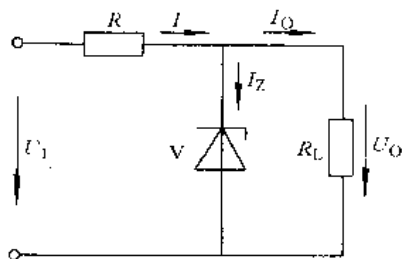


图 3·10-3 稳压管稳压电路

通常取 $U_1 = (2 \sim 3) U_o$, R 的取值范围为:

$$\frac{U_{1\max} - U_o}{I_{O\min} + I_{Z\max}} < R < \frac{U_{1\min} - U_o}{I_{O\max} + I_{Z\min}}$$

以保证稳压管在输入电压和负载电流变化时始终工作在稳压区 ($I_{Z\min} \leq I_Z \leq I_{Z\max}$)。

稳压管稳压电路的 U_o 不能调节, I_o 受 I_Z 的限制, 一般用于输出电流较小且变化不大的场合, 也用作其它电路的基准电压源。

4 串联型集成稳压器

稳压器根据所含调整电路的工作状态及与负载的连接方式, 可分为串联型、并联型和开关型三大类。串联型稳压器具有负载能力强、输出纹波小、电路结构简单、便于集成等特点, 是集成稳压器中最广泛采用的电路形式。

根据应用特点的不同, 串联型集成稳压器分为三端固定正输出、三端固定负输出、三端可调正输出、三

端可调负输出、多端可调正输出、多端可调负输出和多端正负对称输出等类型。

4.1 串联型集成稳压器的基本组成

串联型集成稳压器的典型组成框图见图 3·10-4。它的调整电路(调整管)与负载串联, 且工作于线性状态。

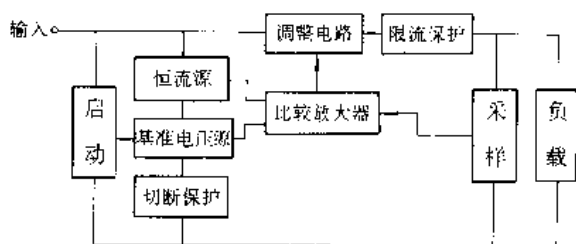


图 3·10-4 串联型集成稳压器的组成框图

1. **基准电压源** 常用的基准电压源有硅稳压管基准电压源和双极型带隙基准电压源。

2. **采样电路** 用来对输出电压进行采样, 通常由电阻网络构成。

3. **比较放大器** 它的作用是将采样电压与基准电压进行比较, 并把差值放大, 其输出控制调整电路。

4. **调整电路** 其作用是在比较放大器的输出信号控制下, 自动调整其两端的电压, 使输出电压稳定。调整电路一般采用复合管结构。

5. **恒流源** 为基准电压源和比较放大器提供稳定的工作电流。使基准电压源的电压稳定, 比较放大器获得较高的灵敏度, 从而保证集成稳压器具有良好的调整特性。

6. **启动电路** 启动电路使集成稳压器中各种恒流源(如偏置恒流源、负载恒流源等)投入工作。

7. **保护电路** 防止输出端短路、过载或过压时损坏器件。常用的保护电路有限流型、减流型、过热保护电路以及调整管功率限制和切断控制电路(使调整管截止)等。

4.2 串联型集成稳压器的主要参数

1. **输出电压 U_o** 对固定输出的集成稳压器, U_o 为给定值; 对可调输出的集成稳压器, U_o 为某个范围。

2. **最小输入-输出电压差 $U_{(i-o)\min}$** 集成稳压器正常工作时, 调整管承受一定的压降, 输入电压必须高于输出电压。 $U_{(i-o)\min}$ 表示输入电压与输出电压的最小差值。有时用最小输入电压表示。

3. **最大输入-输出电压差 $U_{(i-o)\max}$**



4. 最大输入电压 $U_{I\max}$ 。

5. 最大输出电流 $I_{O\max}$ 。

6. 最大耗散功率 P_{CM} 集成稳压器的功耗包括静态功耗和调整管送出负载电流时的功耗。其中主要是调整管的功耗 P_C ，其值表示为

$$P_C = (U_I - U_O)I_O$$

当忽略静态功耗后，工作时应使 $P_C < P_{CM}$ 。

7. 电压调整率 S_V 在负载和环境温度一定时，单位输入电压变化量引起的输出电压相对变化量的百分值，即

$$S_V = \frac{\Delta U_O / U_O}{\Delta U_I} \times 100\% \quad (\%/V)$$

也可用一定的 ΔU_I 所引起的 ΔU_O (mV) 表示。

8. 电流调整率 S_I 在输入电压和环境温度一定时，规定的输出电流变化量引起的输出电压相对变化量的百分值，即

$$S_I = \frac{\Delta U_O}{U_O} \times 100\% \quad \left. \begin{array}{l} \\ \Delta I_O = \text{常数} \end{array} \right\}$$

也可用一定的 ΔI_O 所引起的 ΔU_O (mV) 表示。

此外，还有纹波抑制比、输出电压温度系数、输出噪声电压、输出电阻、静态电流、最高结温、输出电压时漂、瞬态响应时间等。

4.3 三端式集成稳压器

三端式集成稳压器只有三个引出端。输出电压有

固定式和可调式两类。

4.3.1 三端固定输出集成稳压器

三端固定输出集成稳压器的三个引出端是输入端、输出端和公共（接地）端，其输出电压固定。它有 7800（输出正电压）和 7900（输出负电压）两个系列。具体型号的后两位数表示输出电压的绝对值，其等级有 5V、6V、8V（9V）、12V、15V、18V、24V 等（例如 7805 的 $U_O = +5V$ ，7915 的 $U_O = -15V$ ）。输出电流有 0.1A（如 CW78L00 和 CW79L00）、0.5A（如 CW78M00 和 CW79M00）、1.5A（如 CW7800 和 CW7900）等几档。表 3-10-4 是三端固定输出集成稳压器的主要参数示例。

图 3-10-5 是三端固定正输出集成稳压器的电路原理图。其中 V_{12} 、 V_{13} 、 V_{18} 和 $R_1 \sim R_7$ 构成启动电路； V_3 、 V_4 、 V_5 、 V_6 和 R_2 等构成基准电压源，其中 V_3 、 V_4 与 V_1 构成比较放大器； V_8 、 V_9 构成恒流源； V_{16} 、 V_{17} 组成的复合管是调整管； R_{19} 、 R_{20} 构成采样电路，采样信号通过 V_8 送到 V_3 的基极； V_{14} 和 R_6 、 R_7 构成过热保护， V_{15} 、 V_{19} 和 $R_{11} \sim R_{13}$ 构成限流和安全工作区保护。

三端集成稳压器使用方便，只要从产品手册中查到与该型号对应的有关参数和引脚排列，再配上少量元件和适当的散热器，就可组成多种应用电路。表 3-10-5 列出了三端固定输出集成稳压器的典型应用（引脚按塑料封装编号）。

表 3-10-4 三端固定输出集成稳压器的主要参数示例

| 参数名称 | 单位 | CW7800 | | | | | | | | CW7900 | | | | | | |
|----------------------------------------|----|-----------------------------------------------------|----|----|----|----|----|----|----|--------------------------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | | 5 | 6 | 8 | 12 | 15 | 18 | 24 | -5 | -6 | -8 | -12 | -15 | -18 | -24 | |
| 输出电压 U_O | V | | | | | | | | | | | | | | | |
| 输入电压 U_I | V | 10 | 11 | 14 | 19 | 23 | 27 | 33 | | -10 | -11 | -14 | -19 | -23 | -27 | -33 |
| 最大输入电压 $U_{I\max}$ | V | 35 ($U_O=5\sim 18$) 40 ($U_O=24$) | | | | | | | | -35 ($U_O=-5\sim -18$) -40 ($U_O=-24$) | | | | | | |
| 最小输入-输出压差 $U_{(I-O)\min}$ | V | 2 | | | | | | | | 1.1 | | | | | | |
| 输出电流 I_O | A | 1.5 | | | | | | | | 1.5 | | | | | | |
| $(\Delta U_O)_{\max}$ (U_I 变化引起) | mV | 100 ($U_O=5V, I_O=0.5A, 7V \leq U_I \leq 25V$) | | | | | | | | 100 ($U_O=-5V, I_O=0.5A, -7V \geq U_I \geq -25V$) | | | | | | |
| $(\Delta U_O)_{\max}$ I_O 变化引起 | mV | 100 ($U_O=5V, 5mA \leq I_O \leq 1.5A$) | | | | | | | | 100 ($U_O=-5V, 5mA \leq I_O \leq 1.5A$) | | | | | | |
| 最大功耗 P_{CM} (加足够的散热器) | W | 15 | | | | | | | | 15 | | | | | | |



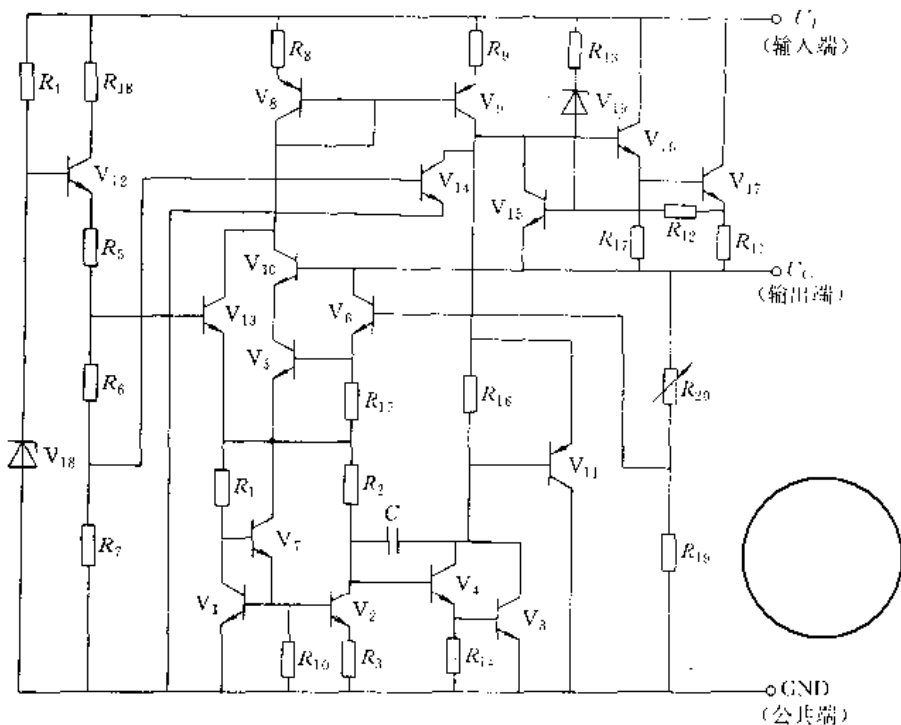


图 3·10-5 三端固定正输出集成稳压器的电路原理图 (CW7800)

表 3·10-5 三端固定输出集成稳压器的典型应用

| 应用类型 | 电 路 | 说 明 |
|------------------|------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 固 定 输 出 | <p>输出正电压</p> | <p>U_0 固定, 其值由所用器件确定。C_1 用来防止在输入线较长时, 因电感效应而产生自激振荡, 以改善纹波特性; C_2 用以改善负载的瞬间响应, 削弱电路的高频噪声; C_1 和 C_2 常用漏电流小的钽电容</p> |
| | <p>输出负电压</p> | |
| | <p>输出正、负对称电压</p> | |



(续)

| 应用类型 | 电 路 | 说 明 |
|--------|-----|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 扩大输出电压 | | 用稳压管 V_1 提高输出电压, $U_O = U_{Z2} + U_Z$, V_2 为输出保护二极管 |
| 扩大输出电压 | | 用电阻 R_2 提高输出电压, $U_O = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) U_{Z2} + I_Q R_2$. 由于 $I_2 = U_{Z2} / (R_1 + I_Q)$ 基本恒定, 故也可用作恒流源 |
| 扩大输出电流 | | 总输出电流为稳压器输出电流与功率管 V_1 输出电流之和。 V_2 和 R_2 组成限流保护电路, 当 I_C 过大时, V_2 导通, 以限制 I_C 值, 保护 V_1 |

4.3.2 三端可调输出集成稳压器

用三端固定输出集成稳压器可构成输出电压可调电路, 但性能不理想。三端可调输出集成稳压器的输出电压能在一定范围内连续可调, 其性能更好, 应用更为灵活。它的三个引出端为输入端、输出端和调整端, 没

有公共端。工作时, 输出端与调整端之间有 1.25V (典型值, 最小为 1.2V, 最大为 1.3V) 的基准电压。电压调整率的典型值为 0.01%/V, ($3V \leq (U_1 - U_O) \leq 40V$), 电流调整率的典型值为 0.1% ($|U_O| \geq 5V, 10mA \leq I_O \leq I_{OM}$)。表 3.10-6 是几种国产三端可调输出集成稳压器的主要参数。

表 3.10-6 几种三端可调输出集成稳压器的主要参数

| 型 号① | 输出电压范围 (V) | 输出电流 (A) | 最小输出电流② (mA) | 输入-输出电压差③ (V) | 调整端电流 (μA) |
|--------|------------|----------|--------------|---------------|-------------------|
| CW117 | 1.2~37 | 1.5 | 3.5 | ≤ 40 | 5 |
| CW117M | 1.2~37 | 0.5 | 3.5 | ≤ 40 | 50 |
| CW117L | 1.2~37 | 0.1 | 3.5 | ≤ 40 | 50 |
| CW137 | -1.2~-37 | 1.5 | 1.2 | ≤ 40 | 65 |
| CW137M | -1.2~-37 | 0.5 | 1.2 | ≤ 40 | 65 |
| CW137L | -1.2~-37 | 0.1 | 1.2 | ≤ 40 | 65 |

① 按工作结温的不同, 分为 117 和 137 系列 ($-55 \sim +150^\circ C$), 217 和 237 系列 ($-25 \sim +150^\circ C$), 317 和 337 系列 ($0 \sim +125^\circ C$)。
 ② 正输出器件为 $U_1 - U_O = 40V$ 时的典型值, 负输出器件为 $|U_1 - U_O| \leq 10V$ 时的典型值。此电流最大约为 5~10mA。
 ③ 具体数值与器件的允许功耗和实际输出电流有关。



图 3·10-6 是三端可调输出集成稳压器的电路原理图。其中 V_1 、 V_{27} 和 R_6 构成启动电路； $V_2 \sim V_5$ 等构成偏置电路； $V_{11} \sim V_{17}$ 等构成放大电路； V_{17} 、 V_{19} 和 R_{14} 、 R_{15} 组成基准电压源； V_{23} 、 V_{24} 等为助推级， V_{25} 、 V_{26} 是复合调整管； $V_6 \sim V_{10}$ 等组成过热保护， $V_{20} \sim V_{22}$ 和 R_{25} 等组成过流保护， $V_{28} \sim V_{29}$ 和 $R_{23} \sim R_{25}$ 组成安全区保护。

由于三端可调输出集成稳压器内部电路无公共接

地端，在使用时，为保证稳压器在空载时也能正常工作，要求在输出端与调整端之间接入阻值为 $120 \sim 240\Omega$ 的泄放电阻，以泄放电路的偏置电流（约 $5 \sim 10\text{mA}$ ）。此外，为提高纹波抑制能力和消除自激振荡，一般在输入端和输出端分别接入 $0.1\mu\text{F}$ 和 $1\mu\text{F}$ 的钽电容。若把调整端作为输入、输出的公共端而接地，则可获得固定低压（ 1.25V ）输出。表 3·10-7 列出了三端可调输出集成稳压器的典型应用。

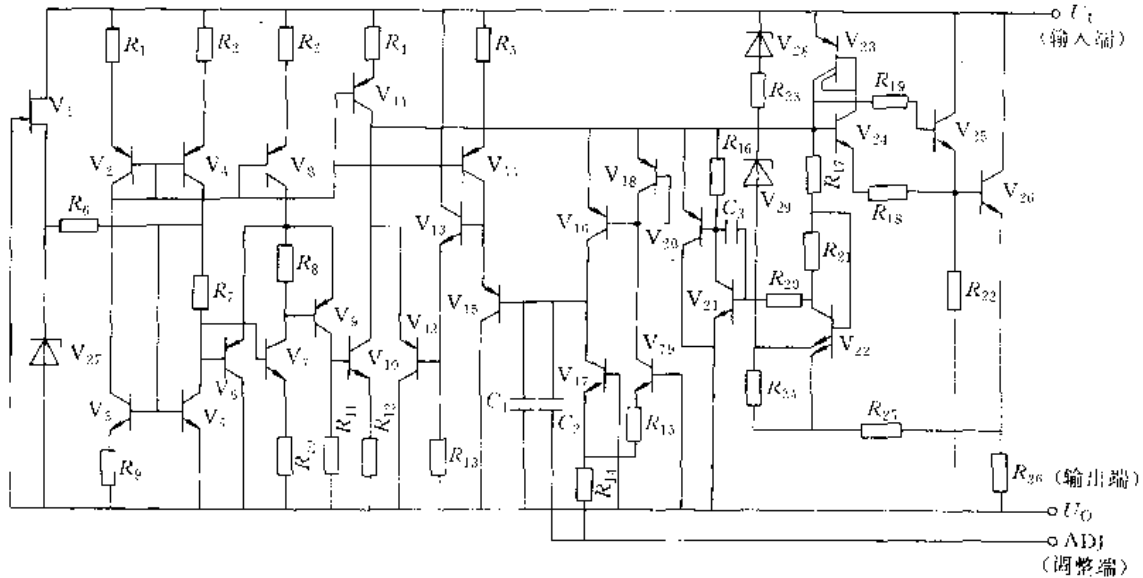


图 3·10-6 三端可调输出集成稳压器的电路原理图 (CW117)

表 3·10-7 三端可调输出集成稳压器的典型应用

| 应用类型 | 电 路 | 说 明 |
|--------|-----|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 一般可调输出 | | <p>R_1 为泄放电阻，与 R_2 组成可调输出电阻网络，输出电压</p> $U_O = 1.25 \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) + I_Q R_2$ $\approx 1.25 \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right)$ <p>($I_Q \approx 50\mu\text{A}$, 忽略)</p> |
| | | <p>R_1 选为 120Ω，泄放电流为 10mA，输出电压</p> $-U_O \approx -1.25 \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right)$ |



(续)

| 应用类型 | 电 路 | 说 明 |
|--------|-----|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 正负对称输出 | | <p>R_2 和 R_2' 用同轴电位器, 阻值相同, 则可得正、负对称输出电压。C 为调整端旁路电容</p> |
| 恒流源 | | <p>忽略 I_Q, 输出电流 $I_O \approx \frac{1.25}{R_1}$。调节 R_1, 可得到 10mA~1.5A 的输出电流。若 R_1 固定, 则 I_O 恒定</p> |
| 逻辑控制电源 | | <p>U_C 为高电平, V 饱和导通, $U_O \approx 1.55V$; U_C 为低电平, V 截止, $U_O \approx 1.25 \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) V$。若用程控电阻网络取代 R_2 和 V 等, 则构成程控电源</p> |

4.4 多端式集成稳压器

多端式集成稳压器品种较多。它可通过外接采样电阻的选择和调节, 得到范围较宽且稳定的输出电压。表 3-10-8 是几种多端式集成稳压器的主要参数。

图 3-10-7 是一种通用型多端式集成稳压器的电路原理图。图中 $V_1 \sim V_3$ 、 $V_7 \sim V_{10}$ 、 V_{13} 等组成恒流

源, 其中 V_9 、 V_{10} 、 V_{13} 等是比较放大器的偏置恒流源; 比较放大器由 V_8 、 $V_{11} \sim V_{13}$ 等组成, 它有两个输入端 (IN_+ 和 IN_-) 和一个输出端 (COMP); $V_4 \sim V_6$ 和 V_{12} 等构成基准电压源; V_{14} 、 V_{15} 是复合调整管; V_{15} 和外接限流电阻构成过流保护电路。图中引脚按 10 脚金属圆形封装编号 (括号内编号为 14 脚双列直插封装)。

表 3-10-8 几种多端式集成稳压器的主要参数

| 型 号 | 输出电压范围 (V) | 输出电流 (mA) | 输入电压 范 围 (V) | 输入-输出 电压差 (V) | 基准电压 U_{REF} (V) | 电压调整率 (%/V) | 电流调整率 (%) |
|--------|----------------------------------------|--------------|--------------------|---------------------|--------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| CW723 | 2~37 | 150 | 9.5~40 | 3~38 | 7.15 | 0.01 | 0.6 (最大值) |
| CW1511 | -2~-37 | 30 | $\leq -40 $ | ≥ 3 | -7.5 | 0.03 | 0.2 |
| CW1568 | $\pm 8 \sim \pm 20$ ± 15 (固定输出) | ± 100 | ± 30 (最大值) | ≥ 2 | | 10mV ($U_1=18 \sim 30V$) | 10mV ($I_O=1 \sim 50mA$) |



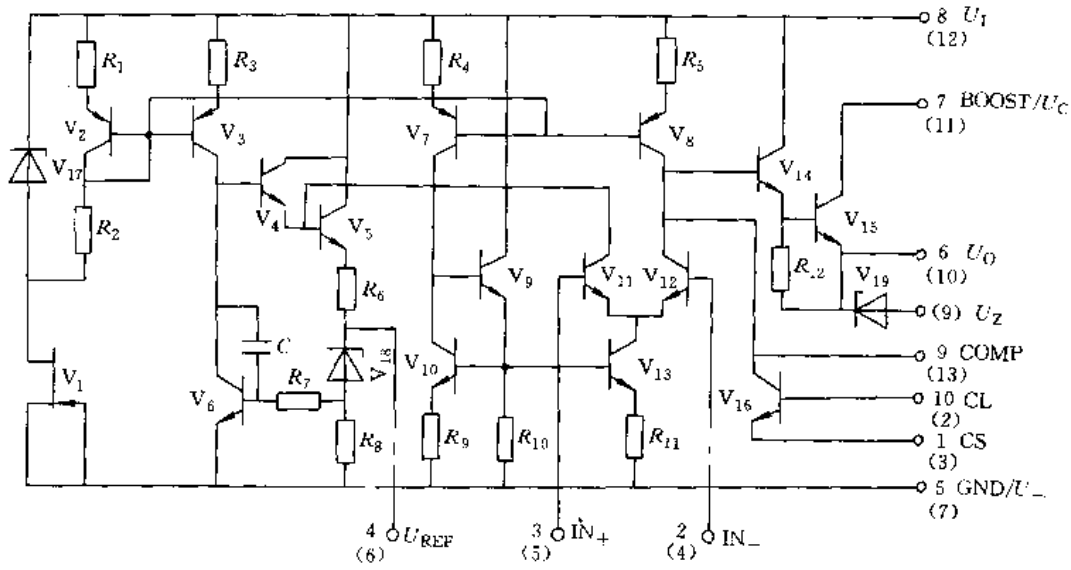


图 3-10-7 通用型多端式集成稳压器电路原理图 (CW723)

多端式集成稳压器的应用较灵活。几种多端式集成稳压器的基本应用见表 3-10-9。此外，还可接成输出电压扩展电路、输出电流扩展电路和其它稳压器。有些器件既可接成正电压输出，也可接成负电压输出。

表 3-10-9 几种多端式集成稳压器的基本应用

| 应用类型 | 电 路 | 说 明 |
|-----------------------|-----|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 正输出 2~7V | | $U_O = U_{REF} \frac{R_2}{R_1 + R_2}; U_1 \geq 9.5V; 10k\Omega < (R_1 + R_2) < 100k\Omega, R_3 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2};$ 限流保护电阻 $R_{sc} = \frac{0.6}{(1.2 \sim 1.4) I_O}$; C_1 为消振电容, C_2 用于减小基准电压的噪声, 引脚按金属圆形编号 |
| 正输出 7~37V | | $U_O = U_{REF} \frac{R_1 + R_2}{R_2};$ 通过 R_1, R_2 的泄放电流为 I_R (约 1mA), 故 $(R_1 + R_2) = \frac{U_O}{I_R}, R_3 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}, R_{sc}$ 与正输出 2~7V 的电路相同; U_1 值视 U_O 而定, 压差 $\geq 3V$ |
| 负输出 -2V~ U_{REF} | | $U_O = U_{REF} \frac{R_1}{R_1 + R_2}; R_1$ 为 20k Ω , R_2 由 U_O 确定, $R_3 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}, R_{sc} \approx \frac{0.6}{1.2 I_O}$; C_1 为消振电容, C_2 为输出滤波电容; 引脚按金属圆形编号 |



(续)

| 应用类型 | 电 路 | 说 明 |
|----------------------------|-----|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 负输出 $U_{REF} \sim -37V$ | | $U_O = U_{REF} \frac{R_1 + R_2}{R_1}$ R_1 选 $1k\Omega$, R_2 由 U_O 确定; R_{SC} 与负输出 ($-2V \sim U_{REF}$) 的电路相同 |
| 正、负对称输出 | | 可获得 $\pm 15V$ 的输出电压; C_1, C_2 为补偿电容, 限流电阻 R_{SC1} 和 R_{SC2} 的值约为 $\frac{0.6V}{1.2I_O}$; 引脚按双列直插编号 |

5 集成基准电压源

集成基准电压源具有稳压精度高、温漂和时漂小、噪声低等特点,但负载能力稍差。一般,电压较高的基准源,内部电路采用齐纳击穿结构,低压基准源采用带隙基准源结构。在工艺制作方面,采用激光修正技术、自动恒温设计和采用亚表面结构的齐纳二极管,以提高基准源的精度、改善温漂特性和降低齐纳击穿电压

的噪声。

集成基准电压源可按照它们所能提供的标准电压进行分类。表 3-10-10 是部分集成基准电压源的主要参数和特点。

集成基准电压源可用作低压稳压源、恒流源、放大电路的恒定偏置、A/D 和 D/A 转换器的基准源以及低功耗集成运算放大器的供电电源等。集成基准电压源应用举例见表 3-10-11。

表 3-10-10 部分集成基准电压源的主要参数和特点

| 标准电压 (V) | 型号 | 典型电压 (V) | 工作电流 (mA) | 电压温度系数 (%/°C) | 特 点 |
|----------|--------|----------|-----------|---------------|----------------------------------------------|
| 1.2 | CW185 | 1.235 | 0.01~20 | 0.002 | 均为二端器件,带隙基准源结构。CW185 为低功耗型; CW589 具有温度补偿 |
| | CW589 | 1.235 | 0.05~5 | 0.001 | |
| 2.5 | CW580 | 2.51 | 10 (最大值) | 0.001 | 均为三端器件,带隙基准源结构 |
| | CW1403 | 2.5 | 0~10 | 0.001 | |
| 7 | CW129 | 6.9 | 0.6~15 | 0.001 | 均为齐纳击穿结构。CW129 用温度补偿,为二端器件; CW199 是带恒温器的四端器件 |
| | CW199 | 6.95 | 0.5~10 | 0.0005 | |

表 3-10-11 集成基准电压源应用举例

| 应用类型 | 电 路 | 说 明 |
|------|-----|------------------------------|
| 固定输出 | | 是集成基准电压源的基本应用,输出电压等于基准源的基准电压 |

此星公司制作 请尊重原作者版权



(续)

| 应用类型 | 电 路 | 说 明 |
|--------|-----|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 可调输出 | | <p>输出电压可在零至基准电压之间调节, 可得到很低的稳定电压。但可调输出的负载能力很差</p> |
| 输出电压扩展 | | <p>$U_O \approx 1.235 \frac{R_1 + R_2}{R_2}$, 使输出电压得到扩展。如取 $R_1 = 3.5\text{M}\Omega$, $R_2 = 500\text{k}\Omega$, 则 $U_O \approx 10\text{V}$</p> |
| | | <p>$U_O \approx 2.5 \frac{R_1 + R_2}{R_1}$, 适当调整 R_1 和 R_2, 可使输出电压扩展到 6~12V</p> |

6 开关型稳压电路

开关型稳压电路的调整管工作于开关状态 (饱和导通和截止状态, 由脉冲控制)。这种稳压电路的优点是效率高、体积小和重量轻。主要缺点是输出电压纹波大、精度差, 电路较复杂。开关型稳压电路在各种自动化电子装置 (尤其是低电压、大电流的场合) 中获得广泛的应用。

开关型稳压电路多用串联型, 按开关调整管控制脉冲的形成方式分为自激式和他激式。常用的他激式具有专门的脉冲形成和控制电路, 其组成框图见图 3-10-8。

通常把基准单元、比较放大单元、开关控制单元和开关调整管等集成在一起, 称为集成开关电源控制器。由它与外接的滤波及其它有关电路构成各种开关型稳压电路。

按开关调整管控制方式, 开关型稳压电路可分为脉宽调制型、频率调制型和脉宽-频率调制型三类。

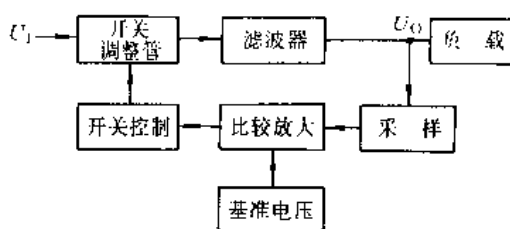


图 3-10-8 开关型稳压电路的组成框图

6.1 脉宽调制开关型稳压电路

脉宽调制开关型稳压电路是通过调节输出电压的采样来激励脉宽控制器, 从而改变加到开关调整管的脉冲的宽度, 即占空比 (频率不变), 以调节开关调整管的导通与截止的时间比, 进而调整输出电压。这种稳压电路由于在自动调整过程中脉冲频率固定, 滤波器容易设计, 是开关型稳压电路常用的一种。

图 3-10-9 是一种脉宽调制型集成开关电源控制



器的功能框图。它由比较放大器、振荡器、基准电压源、限流保护、脉宽调制器 PWM、T 触发器、两个输出晶体管 V_1 、 V_2 和关闭控制电路等组成。其中基准电压源向内部其它单元和外部(第 16 引脚)提供 +5V 的工作电压和基准电压。振荡器同时产生斜波和方波,其频率由外接元件 R_T 、 C_T 决定。

当采样电压和基准电压分别接入引脚 1、2 经比较放大后,输出控制电压 U_C 。PWM 将 U_C 与斜波电压比较后输出一个受 U_C 调制的方波脉冲,送到两个或非

门。同时,振荡器的方波经 T 触发器输出反相的两个方波脉冲至或非门,使两或非门的输出脉冲不重叠,保证两输出管不会都导通。因此,或非门的三个输入脉冲决定了输出脉冲的宽度,从而决定了输出管的导通时间。

当输出电流过载时,经引脚 4、5 采样,使“限流”输出为“0”,PWM 输出为“1”,两输出管截止。

当在引脚 10 上加一大于 0.7V 的电压时, V_3 饱和导通,电源关闭,无输出。

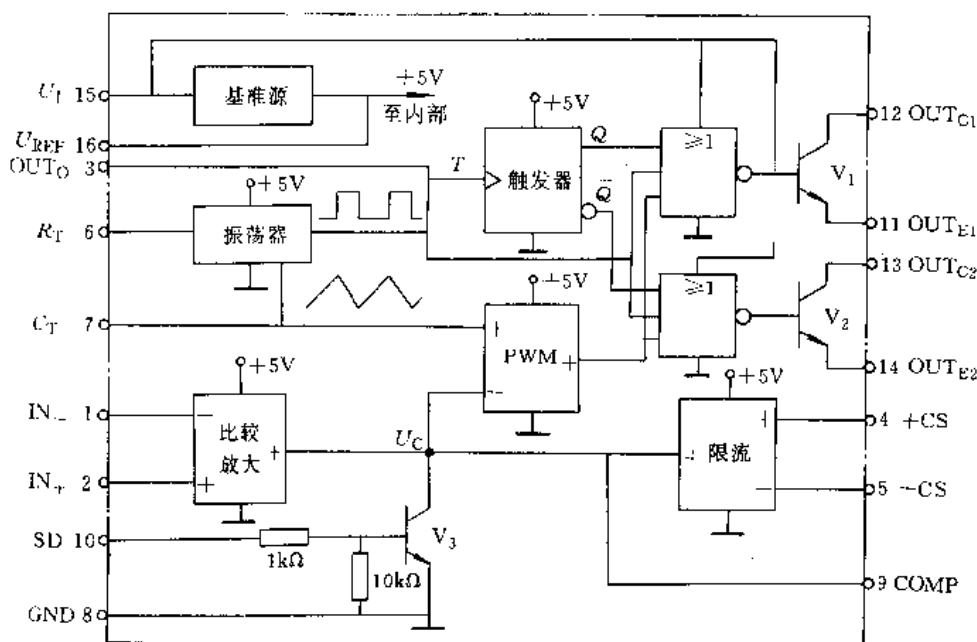


图 3-10-9 脉宽调制型集成开关电源控制器 (CW1524) 的功能框图

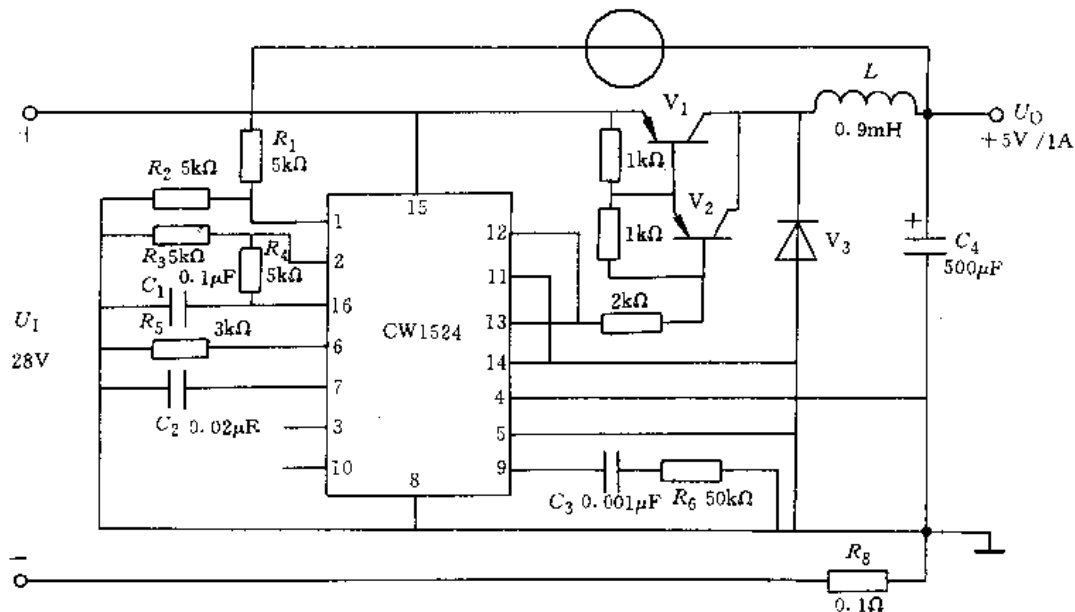


图 3-10-10 脉宽调制开关型稳压电路



图 3·10-10 是用脉宽调制型集成开关电源控制器构成开关型稳压电路的实例之一。图中将器件内部两输出管的输出接成或的形式，构成单端应用； V_1 、 V_2 为外接扩流开关管，和 L 、 C_4 、 V_3 一起构成输出电路； R_1 、 R_2 为采样电阻； R_3 、 R_4 提供基准电压； R_5 、 C_2 决定了开关频率； R_6 、 C_3 为补偿元件； R_8 为限流电阻，决定了稳压电路的最大输出电流。当此电路输入为 28V 时，可获得 +5V、1A 的输出。

6·2 频率调制开关型稳压电路

频率调制开关型稳压电路是通过频率控制器改变振荡脉冲频率来改变占空比(脉宽固定，即开关调整管的导通时间固定)，从而调节开关调整管的截止时间，以稳定输出电压。

图 3·10-11 是频率调制型集成开关电源控制器的功能框图，内部含有 1.2V 基准源、比较放大器、脉宽恒定的振荡器、过流检测器、开关二极管和输出开关调整管等。

电路在工作时，比较放大器将采样电压与基准电压进行比较放大后输出相应的电压，使脉宽恒定的振荡器频率发生变化，即输出脉冲的占空比变化(范围可从 0%~100%)，从而改变输出开关调整管的截止时

间，使输出电压稳定。当引脚 2 输入高电平时，电路关闭。该器件的最大输出电压为 35V，输出电流为 0.5A。

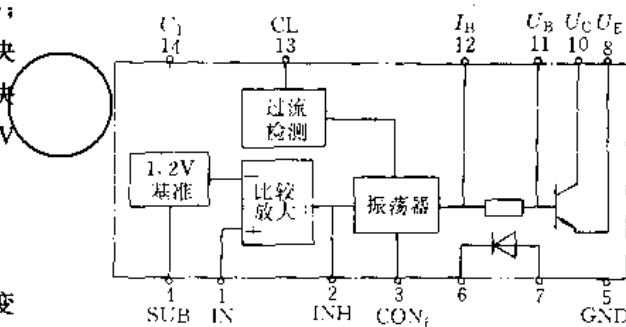


图 3·10-11 频率调制型集成开关电源控制器 (CW497A) 的功能框图

图 3·10-12 是用频率调制型集成开关电源控制器构成的开关型稳压电路。将滤波电感 L 接入不同的端子，可构成升压型或降压型电路。图 3·10-12a 电路为正电源升压接法，可使 $U_o > U_1$ 。图 3·10-12b 为正电源降压接法， $U_o < U_1$ 。图中 R_1 、 R_2 为采样电阻， R_{sc} 为限流保护电阻， C_T 决定了脉冲宽度(即开关调整管的导通时间)。图 3·10-12c 是输出负电压的接法。

CW497A 还可外接扩流开关管扩大输出电流。

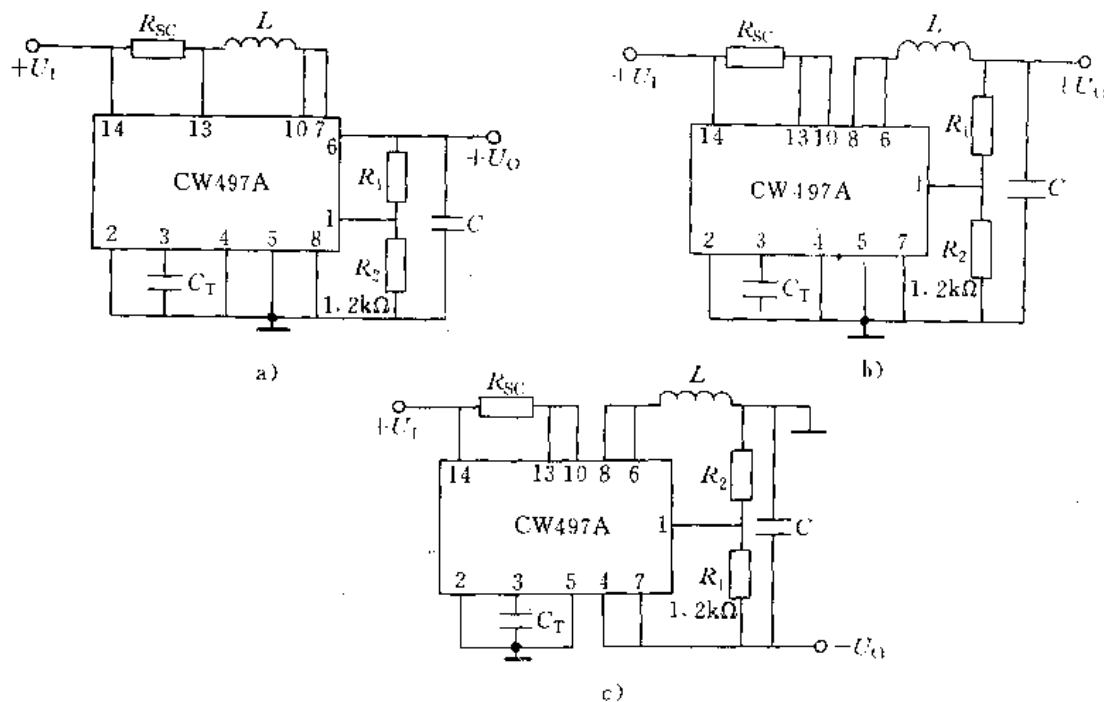


图 3·10-12 频率调制开关型稳压电路

a) 正电源升压电路 b) 正电源降压电路 c) 输出负电压电路



6.3 脉宽-频率调制开关型稳压电路

脉宽-频率调制开关型稳压电路是通过脉宽和频率同时调节来改变控制脉冲占空比,从而改变开关调整管的导通和截止时间,使输出电压稳定。

图 3-10-13 是脉宽-频率调制型集成开关电源控制器的功能框图。内部包含基准源、比较放大器、运算放大器、脉宽和频率可控振荡器、功率二极管和开关调整管等部分。

器件内部的开关频率由外接电容调节。比较放大器能改变关断时间,限流电路能改变导通时间。输入电压范围为 2.5~40V,输出电压可调范围为 1.3~40V。在不外接扩流管的情况下,峰值输出电流可达 1.5A。

图 3-10-14 是由 CW78S40 组成的脉宽-频率调制开关型稳压电路。其中图 3-10-14a 是降压接法, $U_o < U_i$;

图 3-10-14b 是升压接法, $U_o > U_i$ 。

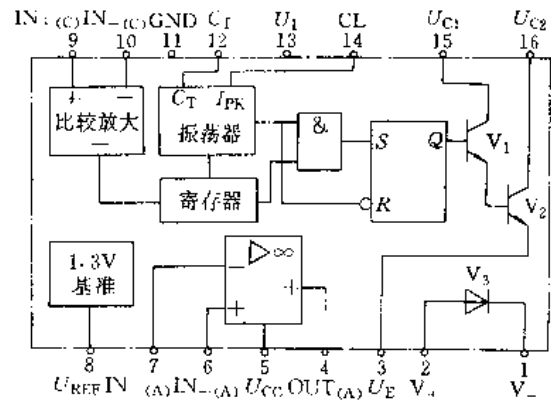


图 3-10-13 脉宽-频率调制型开关电源控制器 (CW78S40) 的功能框图

用 CW78S40 也可接成负电压输出,还可构成脉宽调制开关型稳压电路。

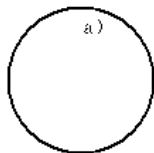
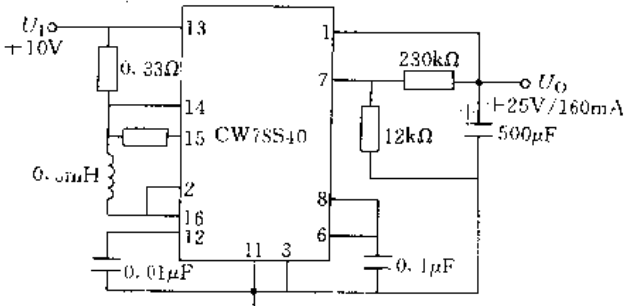
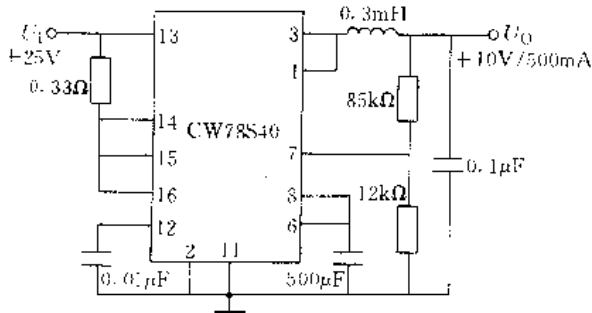


图 3-10-14 脉宽-频率调制开关型稳压电路
a) 降压接法 b) 升压接法

第 11 章 晶闸管变流技术

1 概述

利用电力电子器件所组成的电路可进行电能的变换和控制,使电能的一个或多个特性(例如电压、电流、波形、相数和频率,包括零频率)发生变化,称为变流。变流可分为如下四种类型:

- (1) 整流,由交流到直流的变流。
- (2) 逆变,由直流到交流的变流。
- (3) 交流变流,由交流到交流的变流。
- (4) 直流变流,由直流到直流的变流。

各种类型的交流可用相应类型的变流器来实现。变流器广泛应用于直流电动机的供电和调速、交流电动机的调速、同步电机的励磁以及电解、电镀、中频感应加热、不间断电源、直流输电等各个方面。

1.1 变流技术的发展

早期使用的电力变流器主要有电动发电机组、汞弧整流器和机械整流器。机械整流器的特点是损耗小,但对负载波动比较敏感,而且有旋转部分。电动发电机组也有机械旋转部分,其噪声高,效率低,投资大,维



护困难。汞弧整流器没有旋转部分，但其控制性能差，效率介于机械整流器和电动发电机组之间。

电力电子器件从 50 年代迄今已有很大的发展，他们所组成的变流器不但兼有汞弧整流和机械整流器两者的优点，而且由于采用了电子控制，具有较强的变换能力和控制能力，其技术经济指标更为优越，以前的各种变流器已经或正在被电力电子器件所组成的变流器取代。

1.2 变流器的类型

变流器按组成器件的不同，一般分为：不可控

变流器（由一般整流管组成）；半控型变流器（由可控型晶闸管组成）；全控型变流器（也由可控型晶闸管组成）。由于可控型晶闸管有许多优点，再加上各种性能优越的集成触发器，可控型变流器的应用远比普通整流管所组成的变流器来得广泛，使得各种类型的变频器、逆变器、斩波器、交流无触点开关和新型稳压电源等得到极大地发展，以致于早期出现的一些机械变流器、变频器等已经或正在被晶闸管变流器所取代。变流器的主要种类、特点和用途，见表 3·11-1。

表 3·11-1 变流器的主要种类、特点和用途

| 种 类 | 系列代号① | 性 能 特 点 | 主 要 用 途 |
|-----|---------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|------------------------------|
| 整流器 | GH ^S _F KGF ^S _F | 把交流电整流成电压固定或可调的直流电。容量大，负载平稳，有较高的效率和功率因数。每台容量：直流 36~1000V、800~50000A | 铝、镁等有色金属电解，水、食盐等化工电解，石墨化电炉加热 |
| | GQF KGQF | 大功率单相整流。每台容量：直流，2000~6000kW | 干线电力机车 |
| | GQ ^F _A | 负载变化大，一般采用整流管整流设备，每台容量：直流 275~1650V，100~2250A | 矿山牵引、城市无轨电车、地下铁道等变电站 |
| | KGL ^A _F | 能自动投励，强励及调节功率因数。每台容量：直流 50~170V，200~600A | 同步电动机的直流励磁 |
| | KGL ^A _F S | 强励时短时过载倍数较高，大型发电机励磁装置的可靠性要求高。每台容量：直流 1000V，1800A | 大型发电机，小型水力和柴油发电机的直流励磁 |
| | KGDS | 低电压、大电流、有防腐蚀要求。每台容量：直流 6~24V，50~5000A | 电镀电源 |
| | KGXS | 有稳压或稳流要求，其余同上。每台容量：直流 12~24V，500~10000A | 电解加工电源 |
| | KGCA | 负载为反电动势性质，较平稳。每台容量：直流 18~360V，15~300A | 蓄电池充电 |
| | KGV ^A _F (浮充电) | 对直流输出电压的纹波限制较严。每台容量：直流 36~330V，15~400A | |
| | KGKA | 短时冲击性负载。每台容量：直流 110、220V，100~300A | 电动操作机构电源，电磁吊车的电磁铁吸盘供电 |
| | KGS ^A _F (电流不可逆) | 负载较平稳，有一定的稳速要求。每台容量：直流 0.5~500kW | 造纸、印染等轻工业传动 |
| | GGA KGGA | 电压高，电流很小，对短路电流限制较严，每台容量：直流 40、60、80kV，100~1000mA | 静电除尘，原油脱水，静电喷涂等高压电源 |
| | — | 阀体工作电压高，必须多元件串联，每台容量：直流 100~1000kV，10~1000MW | 远距离超高压输电，跨海峡电缆输电等变流站 |

此星公司制作 请尊重原作者版权



(续)

| 种类 | 系列代号① | 性能特点 | 主要用途 |
|----------------|-----------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|
| 有源逆变器 | KGJ _F ^A (串级调速) | 直流电逆变为与电网同频率的交流电送回电网。用电网换相逆变器将电动机转差功率反馈到电网,能无级调速,效率较高,当调速比要求降低时,装置容量随之减小。每台容量:交流100~8000kW | 风机、泵、卷扬机、起重机、球磨机等及传送带等调速 |
| | KG _S ^A (电流可逆) | 负载急剧变化,要求频繁反向或快速制动,一般用双变流器供电。每台容量:5~5000kW | 可逆轧机、连轧机、卷扬机、龙门刨等 |
| 无源逆变器 (变频器) | KGM _F ^A (变频调速) | 直流电逆变为某一频率或可调频的交流电。由自换向逆变器或周波变换器供电。每台容量:交流0.5~1500kW | 超高速电动机速度控制多台设备的同步调速系统,高精度调速或稳速系统 |
| | KGP _S ^F | 能自动调整频率适应负载变化的需要。每台容量:交流400~8000Hz, 25~2000kW | 金属熔炼、热处理、热加工、焊接等加热电源 |
| | KGN _F ^A | 反应快,能无间断地自动投入运行,每台容量:交流1~1000kW | 通讯设备、电子计算机、电站照明的交流备用电源 |
| 无触点开关 | KGZ _F ^A | 晶闸管作为无触点开关,能适应每分钟数十次开关的要求,作为开关使用时要求过载能力较高,可用控制通断比方式自动调节负载功率。每台容量:交流380V, 100~600A | 交流电动机频繁操作,功率因数补偿电容器组的自动切换及电焊机、电炉等控制开关 |
| 斩波器 | KGZ _F ^A | 控制晶闸管的通断比和频率将直流电压变换为可调直流电压。每台容量:直流110~1650V, 40~400kW | 矿山和地下铁道直流电机车、蓄电池为动力的电动车辆的调速 |

① 变流装置的系列代号一般由四位汉语拼音字母组成:首位有K者表示晶闸管变流装置,无K者表示整流管整流装置;第2位G表示半导体元件用单晶硅材料制成;第3位是表示装置用途的代号;第4位代表装置的冷却方式(S—水冷,F—风冷,A—自冷)。

2 晶闸管整流电路和有源逆变电路

晶闸管整流电路的作用是将交流电变换为大小可调的直流电。这种可控整流的主电路根据生产的要求已发展了许多种各具特色的整流电路,常用的基本整流电路有单相半波、单相全波、单相桥式、三相半波、三相桥式半控和三相桥式全控等,表3-11-2所示为常用可控整流电路的基本电量关系。

除了基本整流电路以外,还有组合整流电路,根据不同的电路联接方式,可分为串并联可逆整流电路和反并联可逆整流电路。

2.1 单相桥式可控整流电路

图3-11-1为单相桥式半控整流电路。设变压器TC的次级电压为正弦波, R_L 为电阻性负载。在 $\omega t = 0 \sim \pi$,晶闸管 V_1 承受正向电压,此时加触发电压 u_{g1} ,则 V_1 导通,导通角为 θ ,导通后管压降很小,电源电压经 V_1 、 V_4 加在 R_L 上,这时 V_2 及 V_3 承受反向电压而截止。在 $\omega t = \pi \sim 2\pi$, V_2 承受正向电压,此时加触发电压 u_{g2} ,则 V_2 导通,而 V_1 及 V_4 处于反向截止状态。

控制角(又称移相角) α 表示触发电压加入时所对



表 3-11-2 常用的可控整流主电路的基本电量关系

| 可控整流电路名称 | | 单相半波 | 单相全波 | 单相桥式半控 |
|--------------------------------|--------------------------------------------------------|-----------------------------|----------------------------------------------------------|-----------------------------|
| 主电路接线方式 | | | | |
| 空载整流输出直流电压 (平均值) | 全导通 ($\alpha=0^\circ$) U_O | $0.45U_2$ | $0.9U_2$ | $0.9U_2$ |
| | $\alpha \neq 0^\circ$ 时 U_O (电阻负载或带续流二极管 V 的电感负载) | $\frac{1+\cos\alpha}{2}U_O$ | $\frac{1+\cos\alpha}{2}U_O$ | $\frac{1+\cos\alpha}{2}U_O$ |
| | $\alpha \neq 0^\circ$ 时 U_O (无 V 的电感负载电流连续的情况) | — | $\cos\alpha \cdot U_O$ | $\frac{1+\cos\alpha}{2}U_O$ |
| 输出电压最低脉动频率 | | f | $2f$ | $2f$ |
| $\alpha=0^\circ$ 时输出电压脉动系数 s | | 1.57 | 0.667 | 0.667 |
| 移相范围 | 电阻负载或带有 V 的电感负载 | $0^\circ \sim 180^\circ$ | $0^\circ \sim 180^\circ$ | $0^\circ \sim 180^\circ$ |
| | 无 V 时电感负载 (电流连续的情况) | — | $0^\circ \sim 90^\circ$ ($\alpha > 90^\circ$ 转入逆变状态) | $0^\circ \sim 180^\circ$ |
| 晶闸管最大导通角 | | 180° | 180° | 180° |
| 晶闸管工作正反向峰值电压 U_m | | $\sqrt{2}U_2$ | $2\sqrt{2}U_2$ | $\sqrt{2}U_2$ |
| 流过晶闸管的电流 | 电阻负载 ($\alpha=0^\circ$) | 平均值 $I_{V(av)}$ | I_O | $0.5I_O$ |
| | | 有效值 I_V | $1.57I_O$ | $0.785I_O$ |
| | 电感负载 ($\alpha=0^\circ$) | 平均值 $I_{V(av)}$ | $0.5I_O$ | $0.5I_O$ |
| | | 有效值 I_V | $0.707I_O$ | $0.707I_O$ |

注: 1. 表中数据是在下述简化条件下算出的:

(1) 电路换相电抗 $x_a=0$, 即重叠角影响忽略不计;

(2) 一切内部损耗略去不计。

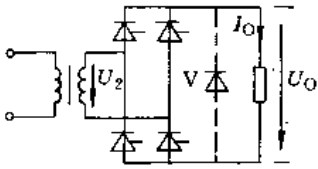
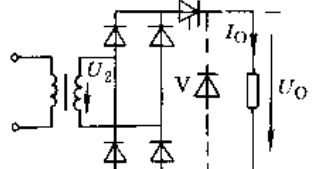
2. f 是交流电源频率 (Hz)。

3. I_O 是输出直流电流。

4. 脉动系数 $s = \frac{\text{整流输出电压的最低次频率谐波分量幅值}}{\text{整流输出电压的直流分量(即平均值)}}$ 。

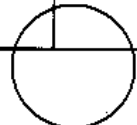
5. 三相桥式的整流变压器次级以常用的星形接法为例, 表中 U_2 指星形联接的相电压。若为三角形联接, U_2 应以 $0.578U_{2\Delta}$ 代入, $U_{2\Delta}$ 为次级线电压。



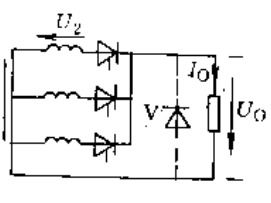
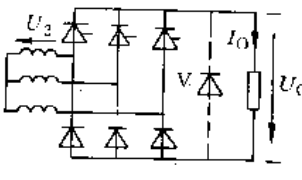
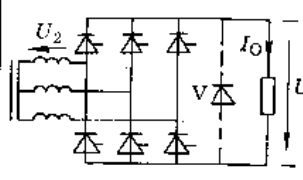
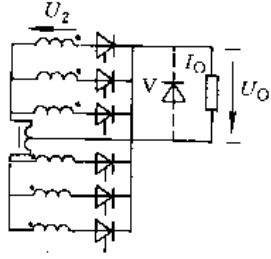
| 可控整流电路名称 | | 单相桥式全控 | 硅晶闸管作开关管的单相桥式 | |
|----------------------------|--------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 主电路接线方式 | |  |  | |
| 空载整流输出直流电压 (平均值) | 全导通 ($\alpha=0^\circ$) U_0 | $0.9U_2$ | $0.9U_2$ | |
| | $\alpha \neq 0^\circ$ 时 U_0 (电阻负载或带续流二极管 V 的电感负载) | $\frac{1+\cos\alpha}{2}U_0$ | $\frac{1+\cos\alpha}{2}U_0$ | |
| | $\alpha \neq 0^\circ$ 时 U_0 (无 V 的电感负载电流连续的情况) | $\cos\alpha \cdot U_0$ | — | |
| 输出电压最低脉动频率 | | $2f$ | $2f$ | |
| $\alpha=0^\circ$ 时输出电压脉动系数 | | 0.667 | 0.667 | |
| 移相范围 | 电阻负载或带有 V 的电感负载 | $0^\circ \sim 180^\circ$ | $0^\circ \sim 180^\circ$ | |
| | 无 V 时电感负载 (电流连续的情况) | $0^\circ \sim 90^\circ$ ($\alpha > 90^\circ$ 转入逆变状态) | — | |
| 晶闸管最大导通角 | | 180° | 180° | |
| 晶闸管工作正反向峰值电压 U_m | | $\sqrt{2}U_2$ | $\sqrt{2}U_2$ 硅晶闸管不受反向电压 | |
| 流过晶闸管的电流 | 电阻负载 ($\alpha=0^\circ$) | 平均值 $I_{V(av)}$ | $0.5I_0$ | I_0 |
| | | 有效值 I_V | $0.785I_0$ | $1.11I_0$ |
| | 电感负载 ($\alpha=0^\circ$) | 平均值 $I_{V(av)}$ | $0.5I_0$ | I_0 |
| | | 有效值 I_V | $0.707I_0$ | I_0 |

50B

自动控制卷



(续)

| 三相半波 | 三相桥式半控 | 三相桥式全控 | 双反星形带平衡电抗器 |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  |  |  |  |
| 1. $1U_2$ | 2. $34U_2$ | 2. $34U_2$ | 1. $17U_2$ |
| $\cos\alpha \cdot U_O$ ($0^\circ < \alpha \leq 30^\circ$) $0.577 [1 + \cos(\alpha + 30^\circ)] U_O$ ($30^\circ \leq \alpha \leq 150^\circ$) | $\frac{1 + \cos\alpha}{2} U_O$ | $\cos\alpha \cdot U_O$ ($0^\circ < \alpha \leq 60^\circ$) $[1 + \cos(\alpha + 60^\circ)] U_O$ ($60^\circ \leq \alpha \leq 120^\circ$) | $\cos\alpha \cdot U_O$ ($0^\circ < \alpha \leq 60^\circ$) $[1 + \cos(\alpha + 60^\circ)] U_O$ ($60^\circ \leq \alpha \leq 120^\circ$) |
| $\cos\alpha \cdot U_O$ | $\frac{1 + \cos\alpha}{2} U_O$ | $\cos\alpha \cdot U_O$ | $\cos\alpha \cdot U_O$ |
| 3f | 6f | 6f | 6f |
| 0.25 | 0.057 | 0.057 | 0.057 |
| $0^\circ \sim 150^\circ$ | $0^\circ \sim 180^\circ$ | $0^\circ \sim 120^\circ$ | $0^\circ \sim 120^\circ$ |
| $0^\circ \sim 90^\circ$ ($\alpha > 90^\circ$ 转入逆变状态) | $0^\circ \sim 180^\circ$ | $0^\circ \sim 90^\circ$ ($\alpha > 90^\circ$ 转入逆变状态) | $0^\circ \sim 90^\circ$ ($\alpha > 90^\circ$ 转入逆变状态) |
| 120° | 120° | 120° | 120° |
| $\sqrt{6} U_2$ | $\sqrt{6} U_2$ | $\sqrt{6} U_2$ | $\sqrt{6} U_2$ |
| 0.333 I_O | 0.333 I_O | 0.333 I_O | 0.167 I_O |
| 0.577 I_O | 0.577 I_O | 0.577 I_O | 0.289 I_O |
| 0.333 I_O | 0.333 I_O | 0.333 I_O | 0.167 I_O |
| 0.577 I_O | 0.577 I_O | 0.577 I_O | 0.289 I_O |

此星公司制作 请尊重作者版权



应的角度。在单相整流电路中，交流电压的过零点，如 $0, \pi, 2\pi$ 等称自然换流点，作为计算移相角的起点。改变触发电压的移相角 α ，在负载 R_L 上可得到大小可控的直流电压（图 3-11-1d）。单相桥式半控整流电路触

发信号的移相范围为 $0^\circ \sim 180^\circ$ 。当 $\alpha > 0^\circ$ 时，输出电压 u_O 是不连续的。为了保证每一周期内晶闸管能在同一相位时触发，触发电压的周期必须和电源电压的周期相配合（同步）。

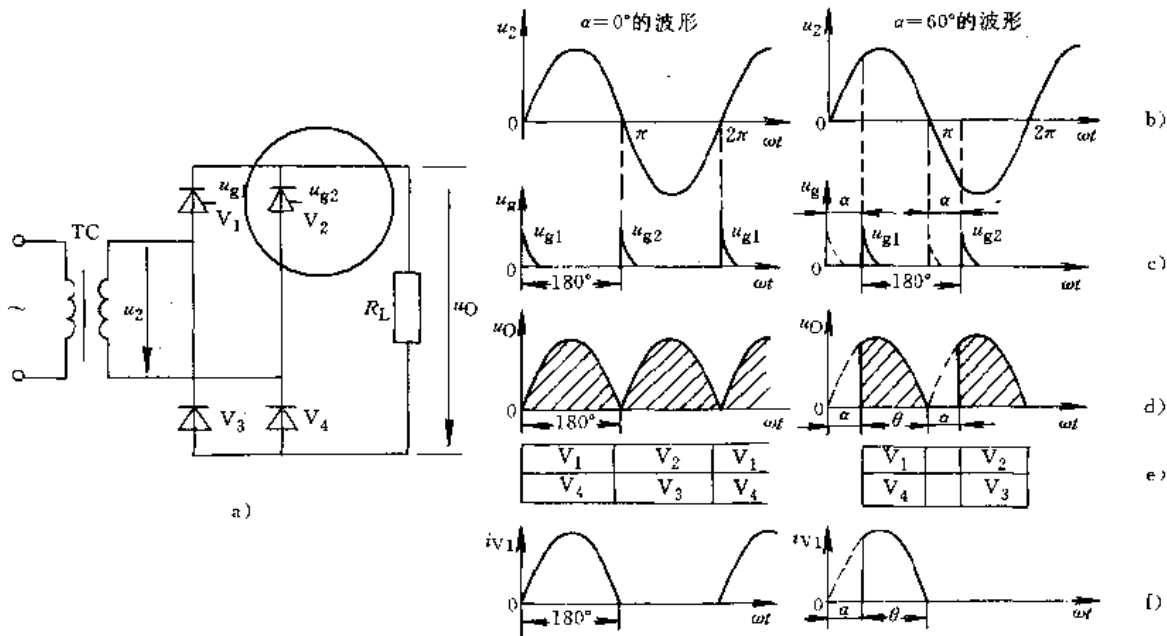


图 3-11-1 单相桥式半控整流电路和波形图

a) 电路 b) 整流变压器次级电压 c) 触发电压 d) 整流输出电压
e) 晶闸管导电次序 f) 流过晶闸管电流

2.2 三相桥式可控整流电路

图 3-11-2 所示电路是由六个晶闸管组成。设 R_L 为电阻性负载，图中 1、2、3、4、5、6 是三相桥式全控整流电路的自然换流点，作为触发信号移相角 α 的起点，它们分别落后于线电压 ($u_{ab}, u_{bc}, u_{ca}, \dots$) 60° 。触发电压有六组，分别加在相应的晶闸管上，其中 u_{g1}, u_{g3}, u_{g5} 相位差 120° ， u_{g2}, u_{g4}, u_{g6} 相位差 120° 。在一个周期内每隔 60° 依次触发各个晶闸管，顺序是 $V_1, V_2, V_3, V_4, V_5, V_6$ 。六组触发电压必须与主电路三相电源同步。为了满足触发后一个晶闸管，前一个晶闸管还能导通，因此触发电压采用宽脉冲触发，脉冲的宽度要大于 60° 或采用双脉冲触发，双脉冲间隔 60° 。每组触发电压移相范围 $0^\circ \sim 120^\circ$ （见波形阴影部分）。当 $\alpha < 60^\circ$ 时，输出电压 u_O 是连续的；当 $\alpha > 60^\circ$ 时，输出电压 u_O 是不连续的。

2.3 负载对可控整流电路的影响

可控整流的负载，大多数是电感性的，例如直流电

机的励磁线圈或可控整流后加滤波电抗器的负载等。电感性负载电路的工作情况与电阻性负载有很大不同。

2.3.1 电感性负载

电感性负载具有阻止电流变化的作用，因此整流电流 i_O 波形较为平直（图 3-11-3）。在电源负电压时，由于电感产生的感应电动势使 i_O 继续流通，晶闸管 V 关不断，导通角 θ 增大，负载上出现了电源的负电压，使整流输出直流平均电压减小。带电感性负载，有时会出现失控现象。以单相桥式半控整流电路为例（图 3-11-4），在 $\omega t = \alpha$ 时， V_1 触发导通，在 $\omega t = \pi$ 后，若不触发 V_2 ，输出应该为零，但由于电感的感应电动势作用， V_1 继续导通，同时由于 b 端较 a 端电位高，因此 V_3 导通， V_4 截止，其导电回路为： $V_1-L-R-V_3-V_1$ 。在 $\omega t = 2\pi$ 时，正向电源电压使 V_1 继续导通，形成半波全导通整流，出现失控现象。为了保证可控整流的正常工作，必须在输出端反向并联一只二极管，称为续流二



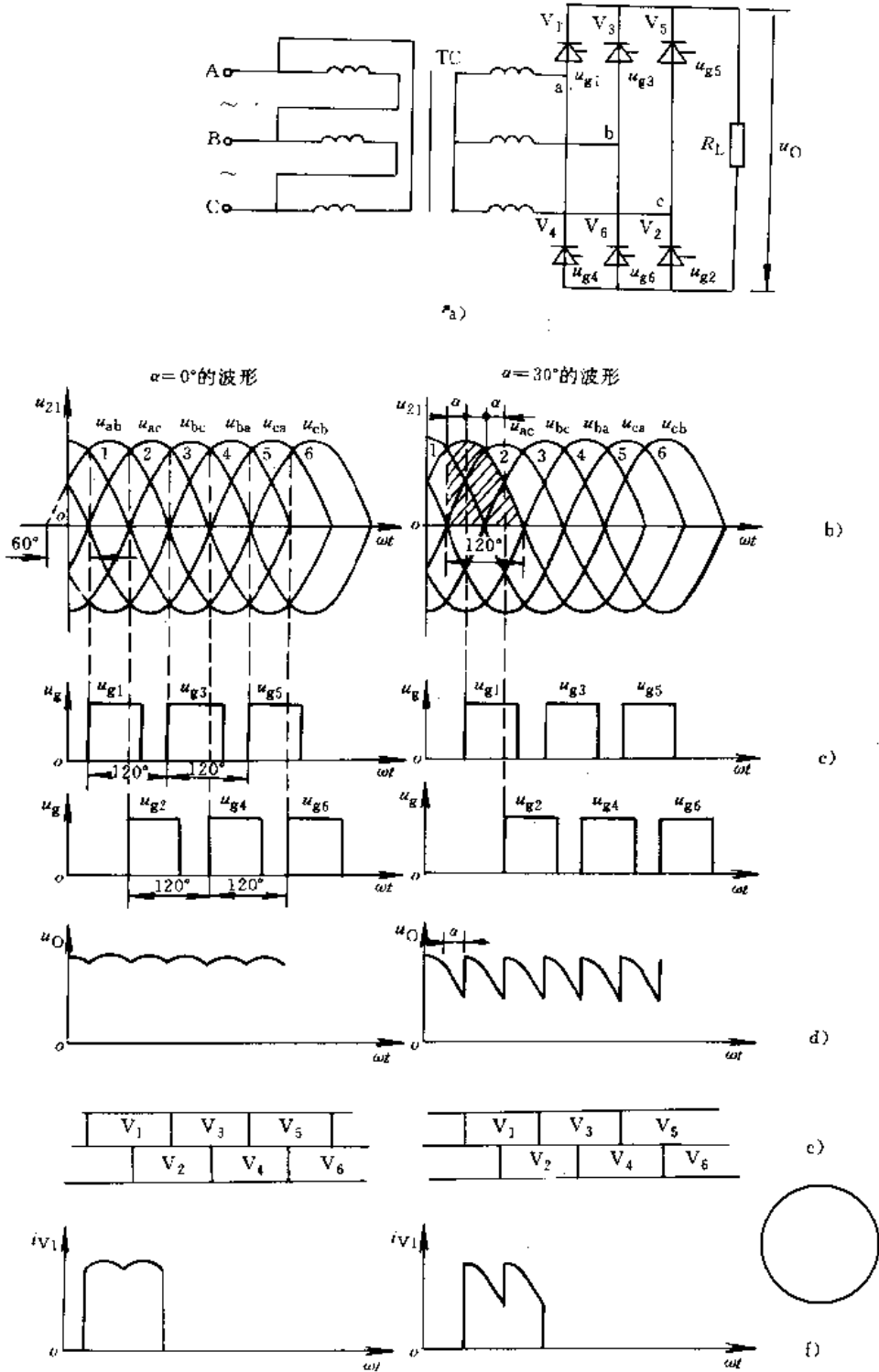


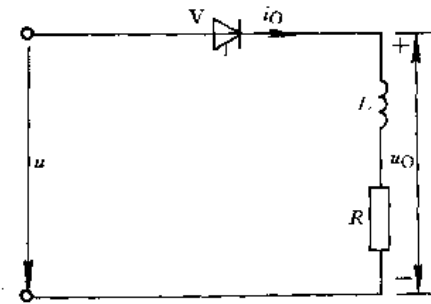
图 3-11-2 三相桥式全控整流电路和波形图

a) 电路 b) 整流变压器次级线电压 c) 触发电压

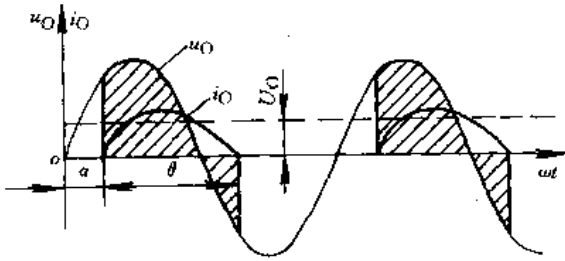
d) 整流输出电压 e) 晶闸管导电次序 f) 流过晶闸管电流 (纯电阻负载)



极管,使得感应电动势产生的电流经V流通(见图3-11-4a中虚线),则 V_1 中的电流过零自行关断。这时输出电压的波形和移相范围与电阻性负载相同。而电流波形较为平直。必须注意续流二极管的阳极接电源负端,阴极接正端。否则就会造成整流电源短路。



a)

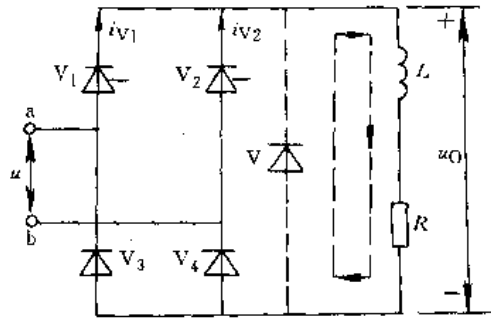


b)

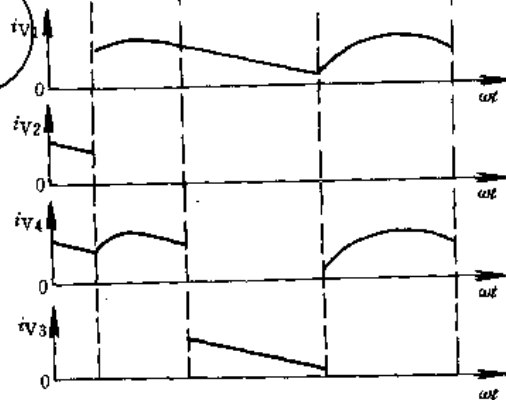
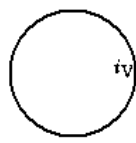
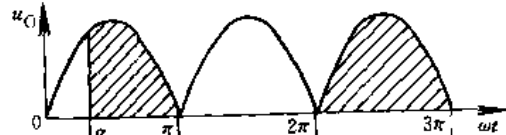
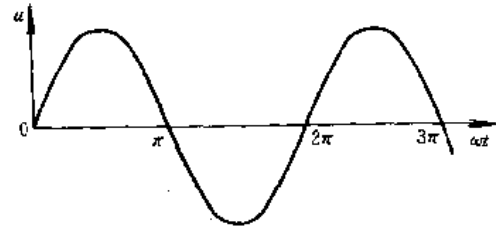
图3-11-3 单相半波可控整流
带电感性负载
a) 电路 b) 波形

2-3-2 变压器漏感

对于输出电流较大的可控整流装置,整流变压器的漏感影响必须考虑。如图3-11-5a由晶闸管 V_a 、 V_b 、 V_c 组成三相半波可控整流电路。 L_a 、 L_b 、 L_c 为变压器TC的漏感,由于漏感作用,使阳极电流从一相转换到另一相的换相过程不能突变,而有重叠角 γ (图3-11-5b)。在重叠角内,两管同时导电,此瞬间的输出电压是两相电压的平均值。因此重叠角的存在,减少了直流输出电压的平均值。



a)



b)

图3-11-4 单相桥式半控整流带电感性负载
a) 电路 b) 波形



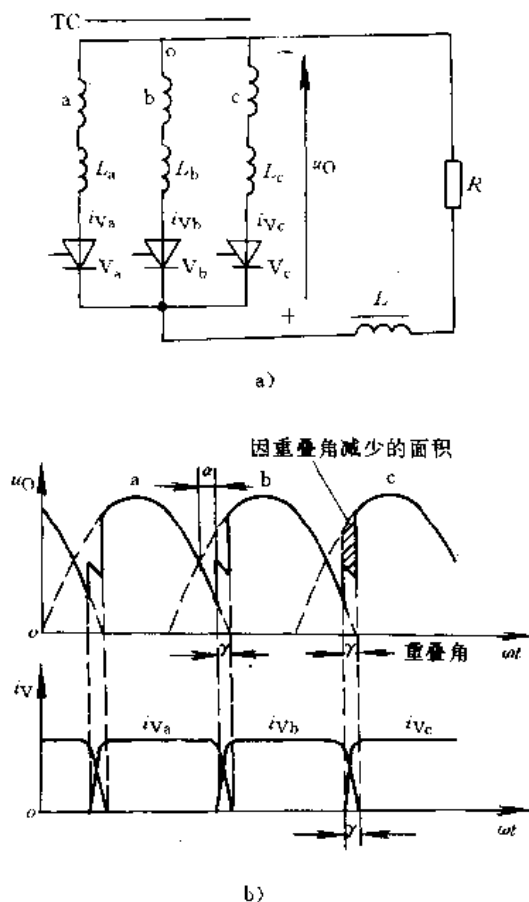


图 3-11-5 三相半波可控整流电路
a) 电路 b) 波形

2.3.3 反电动势负载

蓄电池、直流电机等类负载对整流电路是一种具有反电势的负载 (图 3-11-6a)。整流输出接有反电动势的负载时, 只有当交流电压正半周 $u > E$ 时, 晶闸管才能触发导通, 向负载提供能量, 由于导通时间短, 输出同样的平均电流时, 峰值电流较大, 功率因数也低。若交流电源的电压幅值为 $\sqrt{2}U$, 反电动势 E 已定, 则停止导电角 δ' 为

$$\delta' = \sin^{-1} \frac{E}{\sqrt{2}U} \quad (3.11-1)$$

回路电流的平均值 I_O 及有效值 I 为

$$I_O = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi-\delta'} \frac{\sqrt{2}U \sin \omega t - E}{R} d(\omega t) \quad (3.11-2)$$

$$I = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi-\delta'} \left(\frac{\sqrt{2}U \sin \omega t - E}{R} \right)^2 d(\omega t)} \quad (3.11-3)$$

式中, R 为电路总电阻, 移相角 $\alpha > \sin^{-1} \frac{E}{\sqrt{2}U}$ 。当 α 与 δ' 均较大时, 电流冲击很大, 为减小电流脉动, 可串入电抗器, 整流电路的工作情况就接近电感性负载。

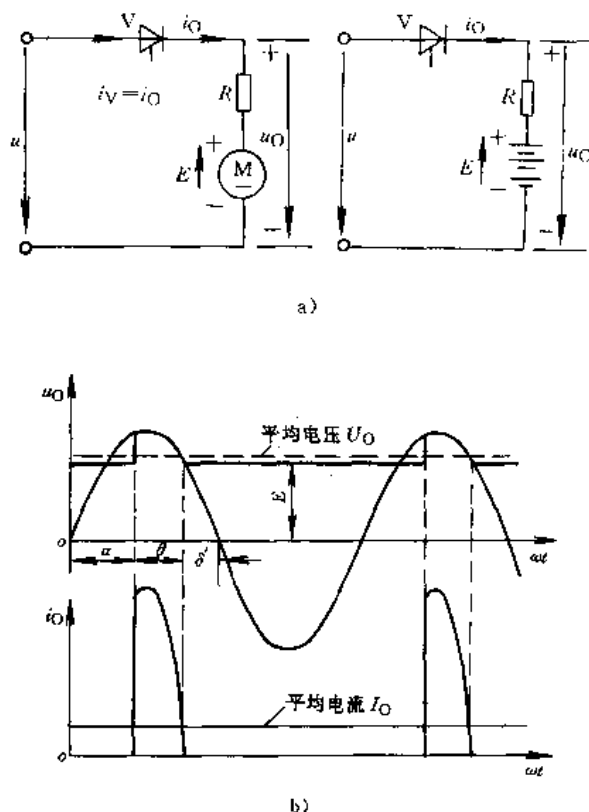


图 3-11-6 反电动势负载
a) 电路 b) 波形

2.4 有源逆变电路

有源逆变电路是指将直流电能转换成与电网同频率的交流电能反送到交流电网中去的电路, 它的转换过程与整流相反, 故称为逆变。

三相桥式逆变电路的接线和各点电压、电流的波形图, 见图 3-11-7。电路的基本结构与三相桥式整流电路相似, 所不同的是整流电路的脉冲控制角 $\alpha < \frac{\pi}{2}$ (rad), 而有源逆变电路的脉冲控制角 $\alpha > \frac{\pi}{2}$ (rad)。为便于分析有源逆变电路, 有时采用逆变角 β , β 和 α 的关系为 $\beta = \pi - \alpha$, β 以 $\alpha = \pi$ 为起点向左方计量。

图 3-11-7 中的波形图逆变时 $\alpha = \frac{5\pi}{6}$ (rad) 的典型工作状态。电网侧线电压的分布和元件门极脉冲分别



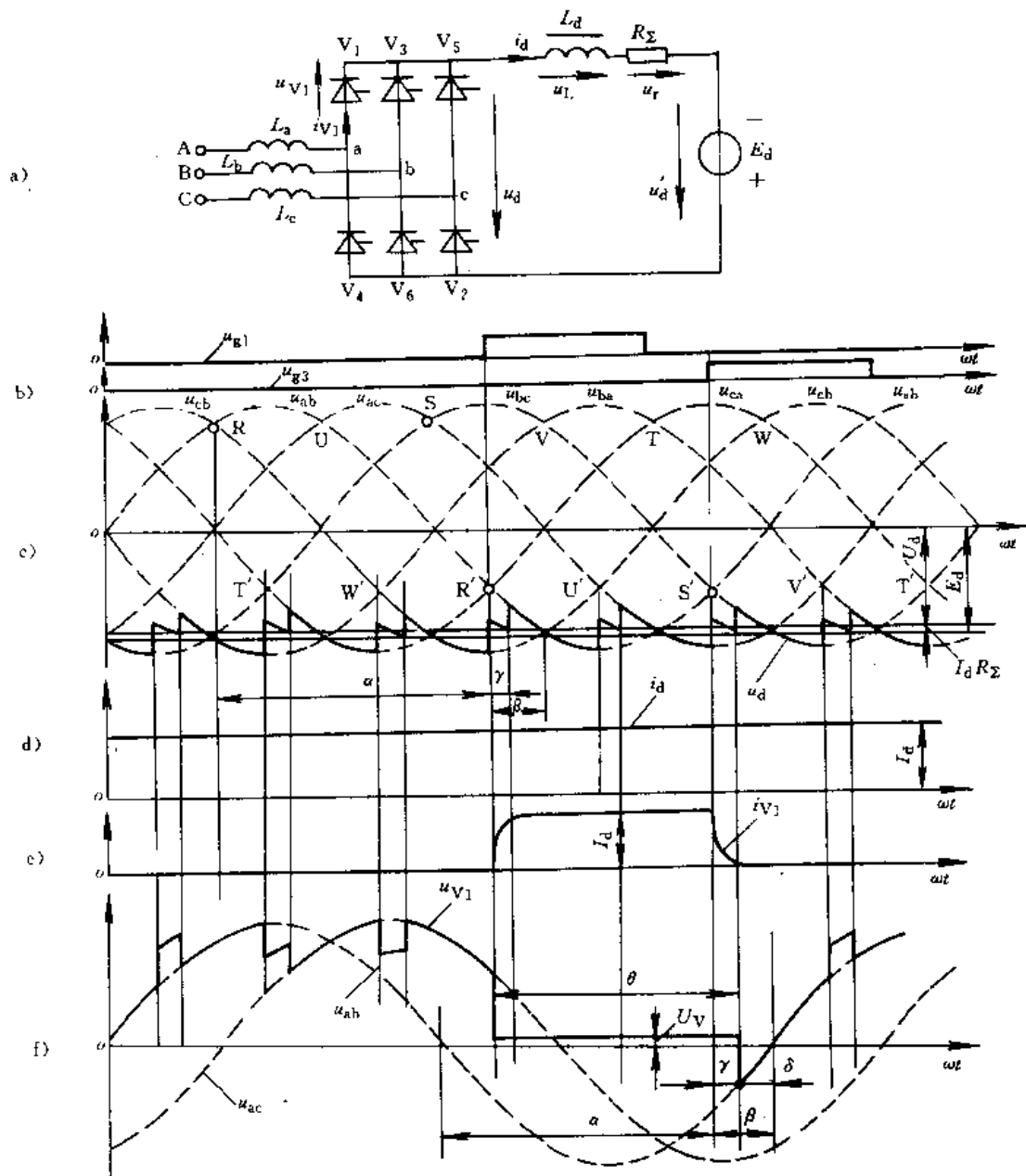


图 3-11-7 三相桥式有源逆变电路

- a) 主电路 b) 门极脉冲 u_{g1} 、 u_{g3} 波形 c) 电网侧线电压和直流侧电压 u_d 波形
 d) 直流侧电流 i_d 波形 e) 晶闸管 V_1 的电流 i_{V1} 波形 f) 晶闸管 V_1 端电压 u_{V1} 波形

如图 3-11-7c、b) 所示 (门极脉冲只画出 u_{g1} 和 u_{g3})，当 $u_{g1} > 0$ ， V_5 、 V_1 (原 V_5 导通) 导通，经重叠角 γ 之后，电路转换为 V_1 、 V_6 导通。在非重叠角时只有两个元件导通 (上、下组各一只)，在重叠角时有三个元件导通，每隔 $\pi/3$ (rad) 电路中出现一次转换，并按 $R'-U'-S'-V'-T'-W'-R'$ 的次序进行；每个元件导通角 $\theta = 2\pi/3$ (rad)。

有源逆变状态的工作规律基本与整流状态相同。当忽略换流过程时，直流侧电压平均值 u_d 为

$$u_d = 2.34U_2 \cos \alpha$$

式中 U_2 ——电网侧相电压有效值 (V)。

在逆变工作状态下，控制角 $\alpha > \frac{\pi}{2}$ (rad)， u_d 取负值，对图 3-11-7 中的直流分量而言可得

$$E_d = I_d R_\Sigma - u_d$$

$$\text{即 } I_d = \frac{E_d + u_d}{R_\Sigma} = \frac{E_d + 2.34U_2 \cos \alpha}{R_\Sigma} \quad (3-11-4)$$

$$R_\Sigma = R_t + R_d$$



式中 R_L ——电网侧包括电感绕组的等效电阻;
 R_d ——直流侧包括电动机电枢电阻在内的总电阻。

从式 (3·11-4) 得知, 由于 R_s 很小, E_d 仅略高于 u_d , 并且只有当 $\alpha > \frac{\pi}{2}$ (rad) 时才能保证 u_d 为负值, 否则主电路将过流。

2·5 晶闸管可逆整流电路

可逆整流电路为输出电压可以从正电压连续调至负电压的整流电路。常用的可逆整流电路有反并联连接和交叉联接两种电路, 见图 3·11-8。从图中看出, 在反并联连接的可逆整流电路中, 正、反两组整流桥是由同一交流电源供电, 而交叉连接的可逆整流电路中, 正、反组整流桥是分别由独立的交流电源(一台变压器的二组互相隔离的二次绕组) 供电。

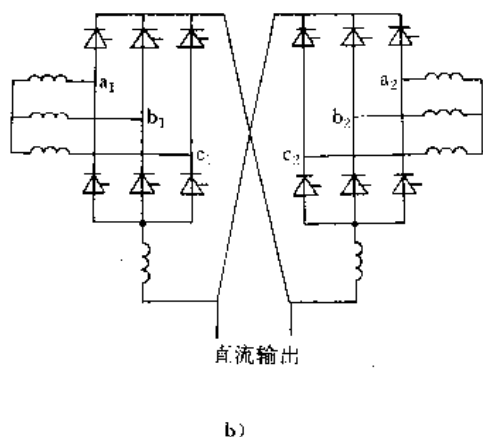
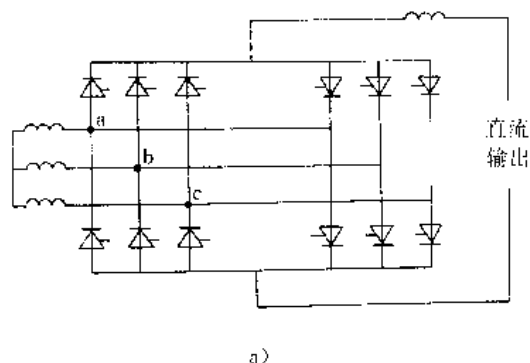


图 3·11-8 可逆整流电路
 a) 反并联连接可逆整流电路
 b) 交叉连接可逆整流电路

可逆整流电路两种连接形式的工作情况基本相同。其工作方式又可分为有环流系统和无环流系统两

种。以反并联连接方式为例, 在有环流系统中两组可以同时触发, 一组工作在整流状态下, 另一组工作在逆变状态下。整流组的控制角为 α , 逆变组的逆变角为 β 。为了减少环流, 在工作中一直保持 $\alpha = \beta$ 。当 $\alpha = \beta$ 时, 整流组的输出电压 u_d 和逆变组的反电动势 u'_d 相等, 故逆变器的电流为 0, 但由于 u_d 和 u'_d 的瞬时值不相等, 故会造成环流, 限制环流的办法可以采用均衡电抗器。在无环流系统中只能交替地触发两组装置, 并保证两组装置也交替地工作。

有环流系统的优点是在任一瞬间两组晶闸管装置同时工作, 因而加速了制动及反向等工作状态的转换。另外, 环流可以作为装置的基本负载, 可以防止晶闸管在电流断续状态下工作, 以保证整流特性和逆变特性间的线性过渡及避免由于断续而发生的转速陡增的现象。有环流系统的缺点是环流相当于给晶闸管增加了附加的负载, 使功率因数下降。另外环流系统需用均衡电流的大电抗器, 使得设备笨重。

无环流系统的优点是可省去笨重的均衡电流的大电抗器, 使两组装置的对应端可以直接反并联, 主电路结构大为简化。无环流系统的缺点是控制电路比较复杂, 需要逻辑地判断那一组触发脉冲在何时封锁或开放, 还需要检测出主电路电流过零的瞬间和负载端的电压极性, 并将检测信号输入到一套 10ms 时滞的逻辑单元, 再由逻辑单元作出判断以后确定两组触发装置之间的准确交替。

2·6 各种整流电路的比较和参数选择

表 3·11-3 是常用可控整流电路的比较表, 并对每个晶闸管所承受的电压和电流给出了相应的关系式, 但在实际应用中整流元件所承受的额定电压比表 3·11-3 所得到的晶闸管所承受的峰值电压要来得大。常用公式为

$$U_{nd} = (2 \sim 3) U_m \quad (3 \cdot 11 \cdot 5)$$

式中 U_{nd} ——选用整流元件应达到的额定电压;

U_m ——整流元件在电路中实际所承受的峰值电压, 对于不同型式电路的 U_m 可从表 3·11-2 中得到;

(2~3)——系数, 考虑到工作时过电压等因数的安全系数。

为了使整流元件不因电流流过过热而损坏, 实际选用整流元件的电流要考虑 1.5~2 倍的安全系数

$$I_{nd} = (1.5 \sim 2) KI_d \quad (3 \cdot 11 \cdot 6)$$

式中 I_{nd} ——选用整流元件应达到的额定电流;



表 3-11-3 常用可控整流电路比较表 ($\alpha=0^\circ$, 纯电阻负载)

| 整流电路 | 晶闸管数量 | 管子上承受峰压 $\frac{U_m}{U_0}$ | 管子上电流 $\frac{I_V}{I_0}$ | 输出电压脉动系数 s | 适用场合 |
|-------------|--------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|--------------------------|--------------------------------------------|
| 单相半波 | 1 | 3.14 | 1.57 | 1.57 | 对电压波形要求不高的低电压、小功率的负载 |
| 单相全波 | 2 | 3.14 | 0.785 | 0.667 | 与单相桥相比缺点多,而且必须用有中心抽头的变压器,因而使用较少 |
| 单相桥式半控 | 2 | 1.57 | 0.785 | 0.667 | 各项指标较好,适用于小功率负载 |
| 单相桥式全控 | 4 | 1.57 | 0.785 | 0.667 | 管子用得更多,因此主要用于小功率可控整流及需要逆变的电路 |
| 晶闸管作开关管的单相桥 | 1个晶闸管 四个二极管 | 1.57 | 1.11 | 0.667 | 仅用一个晶闸管,而指标较好,因此应用较多 |
| 三相半波 | 3 | 2.09 | 0.577 | 0.25 | 管子承受峰压比三相桥要大一倍,其他指标一般,故较少采用 |
| 三相桥式半控 | 3 | 1.05 | 0.577 | 0.057 | 各项指标较好,适用于较大功率、高电压的负载 |
| 三相桥式全控 | 6 | 1.05 | 0.577 | 0.057 | 管子多,触发系统复杂,因此,主要用于大功率可控整流及需要逆变的电路 |
| 双反星形带平衡电抗器 | 6 | 2.09 | 0.289 | 0.057 | 该电路选用的管子的电流等级最低,而且仅考虑一个管子的压降,特别适合于低电压大电流负载 |
| 说明 | 管子少好,相应的触发系统简单,因而设备投资少,调整、维护方便 | 输出同样整流电压,管子两端电压越小越好,就可选用电压等级较低的管子 | 输出同样整流电流,管子电流有效值越小,可选用电流等级较低的管子 | 脉动率越小,说明交流成分少,所需滤波器要求可以低 | |

K ——比例系数, $K=I_V/I_0$, 可以从表 3-11-3 中查得;

I_d ——负载额定电流。

【例 3-11-1】已知变压器的次级电压 $U_2=127V$, 采用三相桥式可控整流, 要求流过负载的电流为 214A, 试选择晶闸管元件的额定电压和额定电流。

解 对于三相桥式电路晶闸管元件所承受的最大峰值电

压从表 3-11-2 查到 $U_m = \sqrt{6} U_2 = \sqrt{6} \times 127 = 311V$, 再根据式 (3-11-5) 计算出晶闸管元件的额定电压:

$$U_{nd} = (2 \sim 3) U_m = (2 \sim 3) \times 311 = 622 \sim 933V$$

取 $U_{nd} = 800V$

再根据式 (3-11-6) 计算出晶闸管元件的额定电流:

$$I_{nd} = (1.5 \sim 2) K I_d$$

从表 3-11-3 查得比例系数 $K = 0.577$, 已知负载电流为



214A, 故

$$I_{ud} = (1.5 \sim 2) \times 0.577 \times 214 = 185 \sim 247A$$

取额定电流为 200A 的晶闸管元件。

3 晶闸管触发电路

晶闸管触发电路从元件的组成可分为分立式和集成式两大类。第一类电路(即采用相控式、分立式、模拟式和同步式触发器)是属于比较常用的传统电路。第二类电路是属于较先进的电路,精度较高,但技术复杂,因而较多地应用于高精度设备(如高精度调速系统和不停电电源等场合)。第一类触发电路精度较低,但技术简单,更多地应用于精度要求不高的场合。另外在集成电路触发器中以微处理机作为控制工具,由软件和硬件组成的混合式数字触发器将具有更强的技术优势。

为了保证晶闸管的可靠工作,对触发电路有如下要求:

- (1) 触发脉冲的幅值应足够高,具有一定的触发功率,以便可靠地触发晶闸管。
- (2) 触发脉冲的上升前沿要陡,不得超过 $10\mu s$,一般在 $(1 \sim 3)\mu s$,使触发的时间准确。
- (3) 触发脉冲必须有足够的宽度。例如在三相桥式电路中,为保证可靠工作,触发脉冲的宽度应大于 60° ,或采用相隔 60° 的双脉冲。
- (4) 在可控整流、有源逆变、交流调压等移相控制的触发电路中,触发脉冲应和主电路同步,输出脉冲的个数及移相范围应满足不同电路联接方式和调压范围的要求。

(5) 触发电路应保证各相之间移相角 α 一致,不致由于各相 α 的不相同而引起有害的附加谐波。

(6) 不触发时,触发电压应小于门极不触发电压 U_{gv} ,为了提高抗干扰能力,必要时可在门极加一定的负偏置。它能使晶闸管正向漏电流减小;正向阻断能力提高;误触发机会减少;改善晶闸管承受电压上升率的能力。

(7) 触发电路应不受电网电压波动和温度变化的影响。

3.1 单相触发电路

单相可控整流电路要求触发电路移相范围为 $0^\circ \sim 180^\circ$ 。脉冲宽度只要大于一定的宽度,普通负载为 $20 \sim 50\mu s$,电感性负载大于 $100\mu s$,即能保证可靠触发。

3.1.1 单结晶体管触发电路

图 3-11-9a、b 为单结晶体管触发电路和波形图。图 3-11-9a 的电路是由整流、削波、放大、RC 回路及脉冲形成输出环节组成。交流电压由同步变压器 TC 经全波整流、稳压管 V_8 削波成梯形电压作为触发电路的同步电压和电源,晶体管 V_6 作放大作用。 V_6 作可变电阻,与电容 C 组成充电回路。当晶体管 V_6 基极加入正信号电压 U_k 时,其集电极电压随 U_k 的增大而减小,晶体管 V_6 中流过的电流随 V_6 集电极电位的降低而增加,即相当于 V_6 的内阻减小,从而改变了电容 C 的充电时间常数,使单结晶体管 V_7 达到峰点电压 U_p 的时间改变,触发脉冲的移相角 α 随之而变。

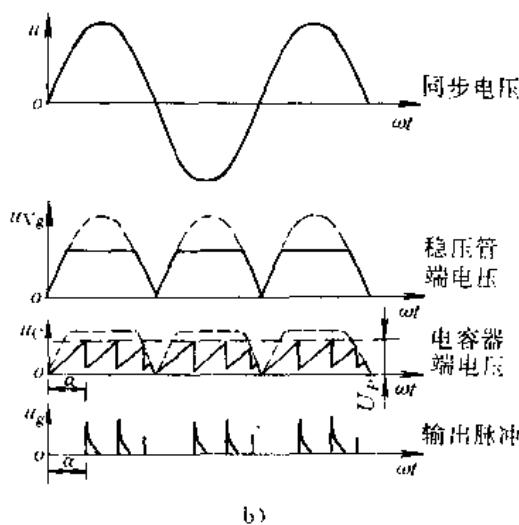
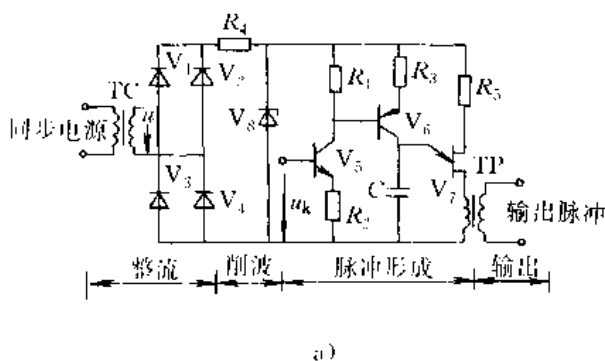


图 3-11-9 单结晶体管触发电路

a) 电路 b) 波形



单结晶体管触发电路的特点是：简单、经济、易调、功率损耗小，温度补偿性好，有一定抗干扰能力，但它的脉冲较窄，输出功率较小，可用移相范围小于 150° ，广泛适用于 $50A$ 以下的小功率可控整流电路。

3.1.2 锯齿波移相控制的触发电路

该触发脉冲的单相原理电路及组成环节见图 3-11-10。有关各点的波形图见图 3-11-11。

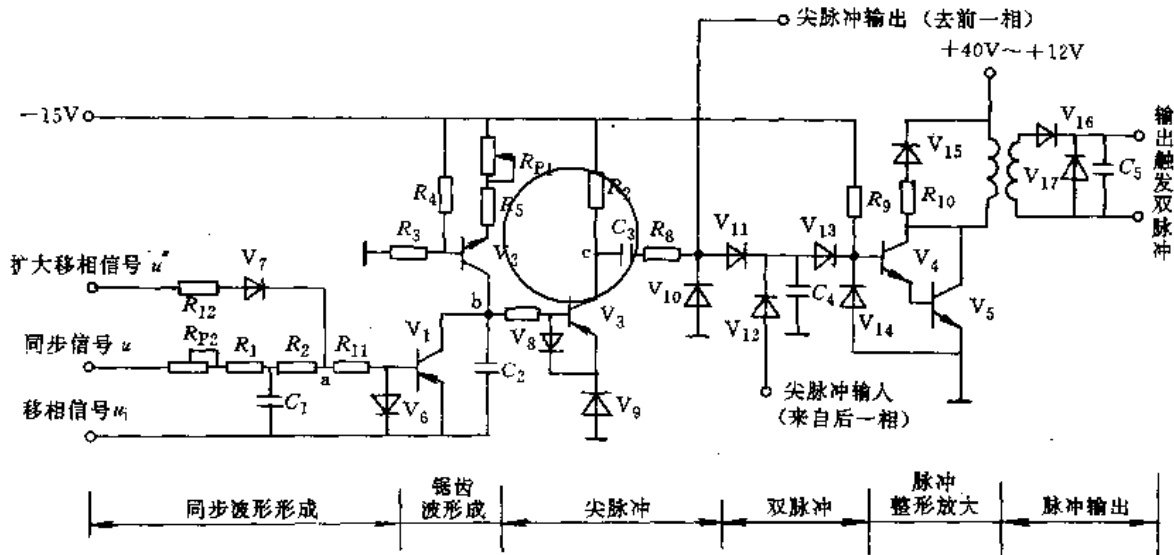


图 3-11-10 锯齿波移相控制的触发电路

其工作原理如下：

(1) 同步波形形成 带有高次谐波干扰的同步信号 u 经过 R_1 、 R_2 、 C_1 滤波后为 u' ，它后移一个角度，此角度可通过 R_2 作适当调整。为了扩大移相范围，加入一个扩大移相信号 u'' ，它滞后同步信号 u' 120° 。两个信号在 a 点的叠加波形见图 3-11-11b 中粗实线所示波形。这即为加到 V_1 基极的电压，此电压过零点。当 V_1 基极电压大于零时 V_1 截止，小于零时 V_1 导通，这样实现了触发装置与电网电压的同步。

(2) 锯齿波形成 当 V_1 导通时， C_2 被短路，移相信号 u_i 为正，使 V_3 截止， C_3 被充电，左边为 $-15V$ ，而右边为 $0V$ 。当 V_1 截止时， C_2 经 V_2 、 R_5 、 R_6 被充电，形成锯齿波 u_{c2} (图 3-11-11c)。改变移相信号 u_i 的大小，锯齿波的斜率不变，只改变锯齿电压与 $0V$ 相交的时间，这样就实现了移相。

(3) 尖脉冲的形成 当 u_{c2} 下降至 $0V$ 时， V_3 导通， C_3 左端电位立刻为零，有一正跳变。由于电容两端不能突变，所以电容右端也有一正跳变，电压立刻升为 $+15V$ 。此时 C_3 上升的电压经 V_{11} — V_{13} — V_4 — V_5 — V_9 — V_3 放电，形成了图 3-11-11e 中的尖脉冲 u_{t1} 。

(4) 双脉冲的形成 在尖脉冲输入端输入一个滞

后 60° 的尖脉冲，形成双脉冲的第二个脉冲 (图 3-11-11f)。由尖脉冲输出端送出一个尖脉冲到前一相的触发装置中去。

(5) 脉冲整形放大 V_4 、 V_5 将双脉冲整形放大，通过脉冲变压器 TP 输出 (图 3-11-11h、i)。

这种触发电路的锯齿波由稳压电源及恒流源供电，其波形不受电网波动的影响，移相范围可达 180° 电角度。适用在中小功率可控整流电路中。

3.2 三相触发电路

对于三相和单相触发电路的共同要求已如上述。三相零式整流电路要求三相晶闸管的触发脉冲相位依次相差 120° ，对电阻性负载要求移相范围 $0^\circ \sim 150^\circ$ ，对电感足够大，电流连续的负载，则要求移相范围 $0^\circ \sim 90^\circ$ ，对于既要整流，又要逆变的电动机负载，则要求脉冲移相范围 $0^\circ \sim 180^\circ$ 。对于三相桥式整流电路基本触发电路的要求是每隔 $\frac{T}{6}$ 就有一只晶闸管导通，为了保证晶闸管准确可靠地导通，就必须在每隔 $\frac{T}{6}$ 的时刻发出脉冲，因此两脉冲之间的相位差 $\frac{T}{6}$ (即 60° 的电角度)，为了保证触发的可靠性，一般要求宽脉冲触发或



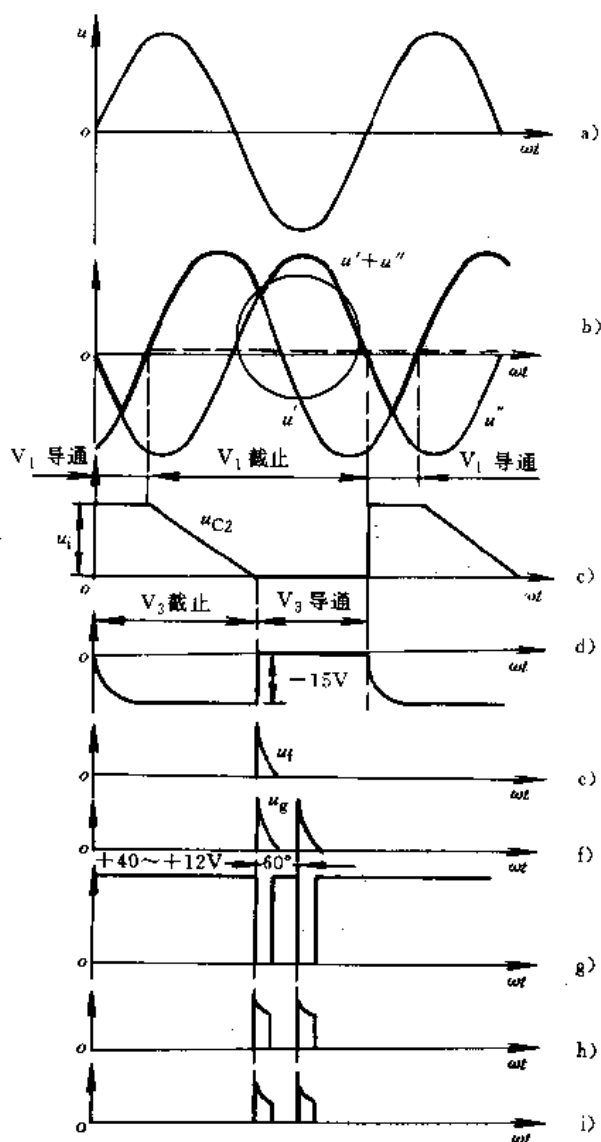


图 3-11-11 波形图

- a) 同步信号 u
- b) 同步信号 u' 和扩大移相信号 u''
- c) V_2 集电极 (锯齿波)
- d) V_1 集电极
- e) 尖脉冲
- f) 双脉冲
- g) V_3 集电极
- h) 脉冲变压器初级
- i) 脉冲变压器次级

双脉冲触发, 另外触发脉冲还必须具有一定的功率, 应根据具体使用的晶闸管查相应的手册。由于每只晶闸管的导通角为 120° , 故要求触发电路产生的脉冲能在 120° 的范围内可靠移相。

图 3-11-12 是三相桥式六路触发脉冲的波形。

图 3-11-13 是锯齿波同步移相控制电路。基本环节 (如同步信号、锯齿波形成等) 与单相的锯齿波触发电路是一致的。主要差别在于同步信号, 实际应用中的

同步信号是指不同的线电压, 产生相应的触发脉冲, 其间的关系是:

- 同步信号 U_{ca} 、 U_{cb} 触发正 A 相晶闸管;
- 同步信号 U_{ac} 、 U_{bc} 触发负 A 相晶闸管;
- 同步信号 U_{ab} 、 U_{ac} 触发正 B 相晶闸管;
- 同步信号 U_{ba} 、 U_{ca} 触发负 B 相晶闸管;
- 同步信号 U_{bc} 、 U_{ba} 触发正 C 相晶闸管;
- 同步信号 U_{cb} 、 U_{ab} 触发负 C 相晶闸管。

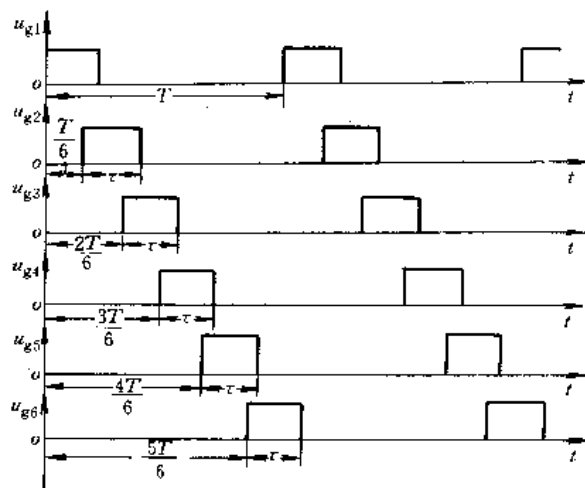


图 3-11-12 六路触发脉冲的波形

上述“正”是指共阴极组的晶闸管, “负”是指共阳极组的晶闸管。

图 3-11-14 为六路双脉冲的相位关系。所谓双脉冲触发电路, 就是当触发电路每次产生脉冲时输出两个脉冲, 一方面触发换流后需要导通的晶闸管, 同时对正在导通而不需要换流的晶闸管再触发一次。

图 3-11-15 为双脉冲触发电路, 图中 u_{α} 、 u'_{α} 是输入电压, 可以是正弦波、锯齿波或三角波等。所产生的双脉冲的脉冲宽度一般为 $10^\circ \sim 20^\circ$, 如要增加脉冲宽度可适当增加电容 C_1 或电阻 R_3 。

3.3 集成触发电路

集成式触发电路与分立式触发电路相比较有许多优点: 首先是可靠性好, 由于集成度高, 单元电路的体积很小, 整个触发电路 (除功放级外), 可集成在一块插件上, 大大减少了元件间的连线和接触不良的故障, 因而提高了工作可靠性; 其次是技术性能好, 当代的微电子集成技术已经发展到可以不必考虑线路的复杂性给工艺带来的麻烦, 因而电路可以设计得更加完善, 通用性更强, 可以达到更高的技术指标。



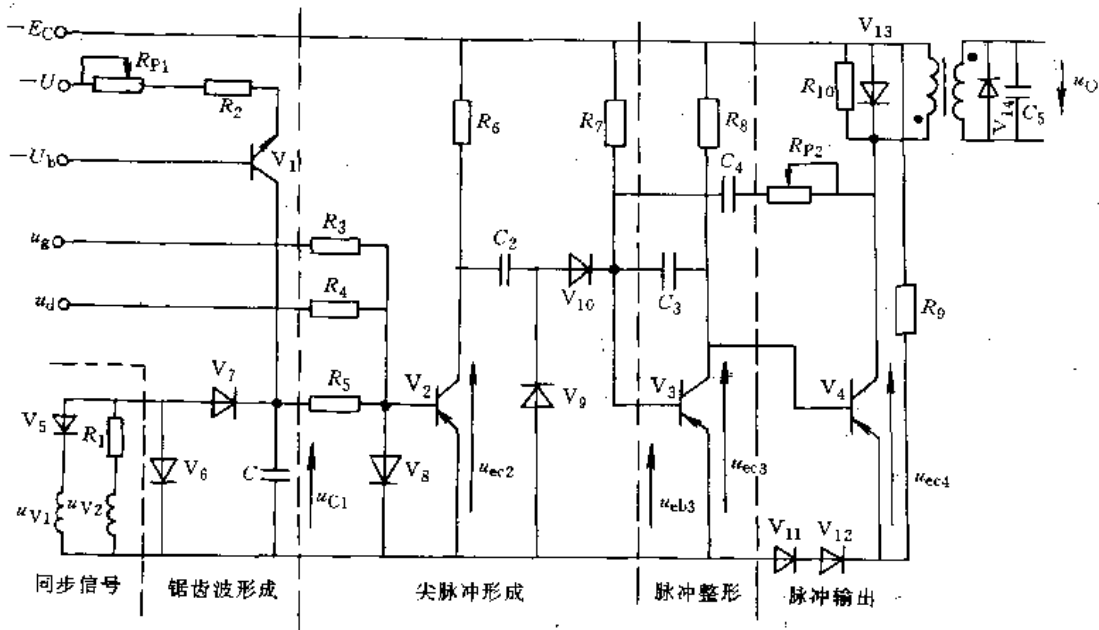


图 3-11-13 锯齿波同步移相控制电路

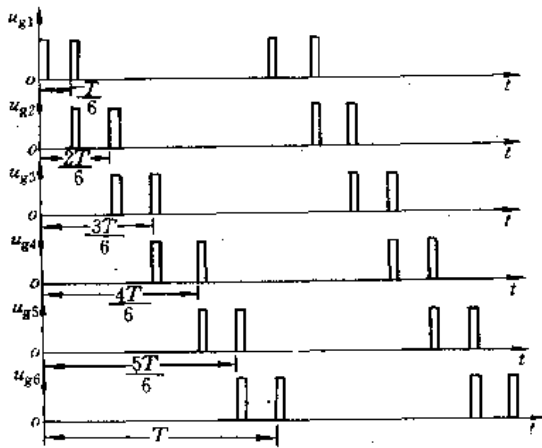


图 3-11-14 六路双脉冲的相位关系

正是由于上述优点，中大规模的专用集成触发电路正在逐步取代分立式电路。

图 3-11-16 是国产 KC04 型集成触发电路的基本结构框图，该结构框图采用了分相电路，故功放级以前的信号通道由六路减为三路，每一通道由一块固体组件实现（即方框中虚线以内的电路）。这样既简化了电路，又提高了可靠性。另外输出脉冲采用双窄脉冲，这样可以减小功放级直流电源的容量，而且还能提高脉冲前沿的陡度。

集成式触发电路 KC04 的内部电路见图 3-11-17。锯齿波发生电路的作用是将来自 RC 移相电路（移相角 $\frac{\pi}{6}$ (rad)）的正弦信号转换成同频率的锯齿波信号。实际上，它是由 V_5 构成的密勒积分电路和 V_1 、 V_2 、 V_3 、 V_4 的开关电路所组成，前者产生锯齿波，后者对锯齿波频率施加控制。当 V_4 截止时，电容 C_1 （外接元件）沿 R_6 、 R_{18} 和 R_{F1} 充电，随着 C_1 端电压增长， V_5 集电极电压 u_{v5} 也相应线性增长。当 V_4 导通时， C_1 将沿 V_4 和二极管 V_{18} 迅速放电，相应 u_{v5} 也迅速下降并形成锯齿波。其重复频率由 V_4 的开关控制。

V_4 的工作状态则由 V_1 和 V_3 控制，由图可见，只有当二极管 V_{16} 、 V_{17} 均处于截止状态， V_4 才处于导通状态，相反若 V_{16} 、 V_{17} 中任一处于通态， V_4 就必定截止。 V_{16} 、 V_{17} 的状态由 V_1 、 V_3 决定：在正弦信号 u_c 的正半波（高于死区电位 U_0 的部分） V_1 、 V_{16} 导通；在正弦信号 u_c 的负半波（低于死区电位 U_0 部分）， V_3 、 V_{17} 导通；在上述区间 V_4 处于截止状态，只有 u_c 邻近过零的死区中（即图 3-11-18a 中以 U_0 为高度的虚线内）， V_1 、 V_3 才处于截止，相应地 V_{16} 、 V_{17} 也反偏， V_4 才转为饱和导通。其集电极电压 u_{v4} （见图 3-11-18d），在 V_4 导通区间即相应于 C_1 放电和 u_{v5} 迅速下降的过程， u_{v5} 波形见图 3-11-18e（图中用输出电流 i_{b5} 表示）。由此可见， V_4 状态更迭频率（即 u_{v4} 基本重复频率）与



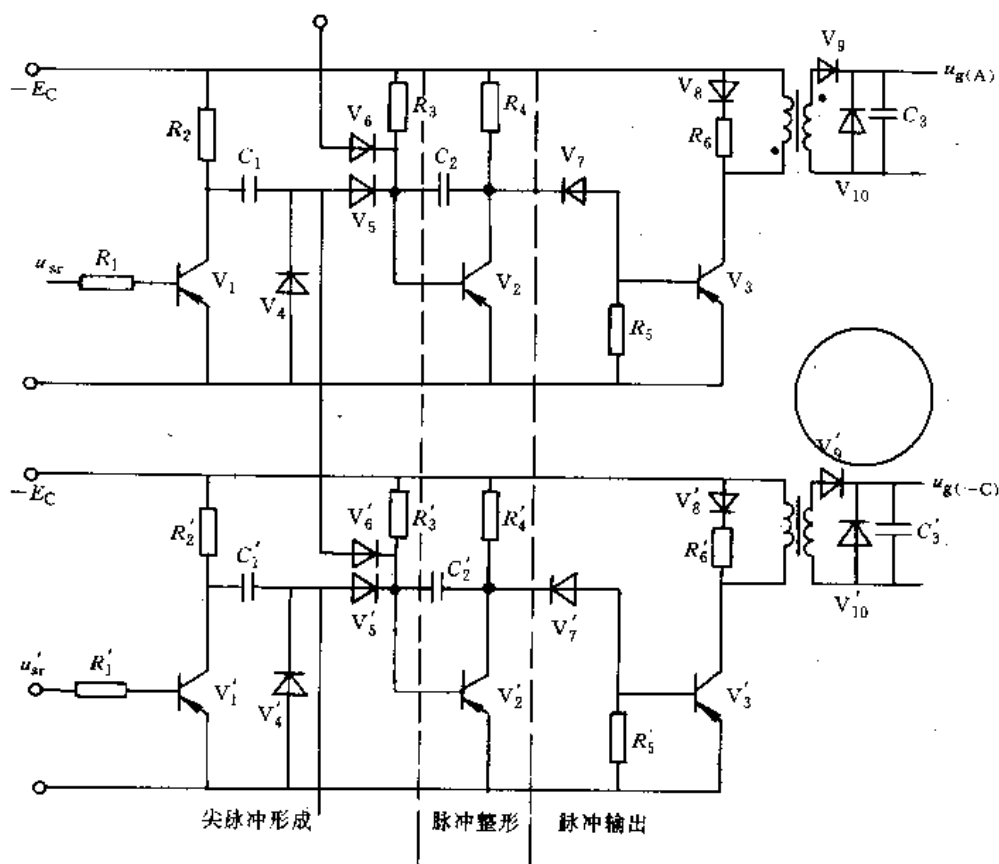


图 3-11-15 双脉冲触发电路

正弦波 u_c 严格同步。

移相控制电路的作用与分立式触发电路相同，是将来自锯齿波发生电路的同步电流信号 i_{b1} 与直流控制电流信号 i_{b2} 相比较（该两电流方向相反， i_{b2} 为负值），当合成电流为正时， V_6 导通， u_{V6} 突降为零，改变控制电流信号 i_{b2} 的幅值就可以移动 V_6 的导通始点。相当于移动控制角 α 。

V_6 端电压 u_{V6} 经微分电路（由 R_{15} 和 C_2 组成）转换成负向尖脉冲（见图 3-11-18g u_{b7} 波形）。适当选择 R_{15} 和 C_2 的数值即可获得合适的脉宽 θ_g ，其大小与控制角 α 无关。尖脉冲信号 u_{b7} 经 V_7 转换成方脉冲 u_{V7} （见图 3-11-18h）。脉宽仍保持为 θ_g ，重复频率为 $2f$ （ f 为电网频率）。

分相电路的功能是将重复频率为 $2f$ 的单列脉冲信号 u_{V7} 转换成重复频率为 f 的双列脉冲，各脉冲间隔为 π (rad)。

这一功能是由 V_8 和 V_{12} 所组成的选通门电路实

现。 V_8 、 V_{12} 的集电极均与 V_7 并联，显然任一元件的导通首先是以 V_7 截止为条件， V_8 、 V_{12} 的基极信号则分别来自 V_1 和 V_3 的集电极，因此任一元件的导通还须要 V_1 和 V_3 的截止为条件。换言之，只有当 V_1 和 V_7 同时处于截止， u_{V1} 和 u_{V7} 同时处于高电平时， V_8 才导通，同理只有 V_3 、 V_7 截止时， V_{12} 才导通，由于 V_1 、 V_3 和 V_7 没有同时处于截止的条件，即可断定 V_8 和 V_{12} 也没有同时导通的可能。当 V_8 导通时， V_9 截止， V_{10} 和 V_{11} 也相应处于截止，相应 $u_{O1} = 0$ ；于此同时， V_{12} 截止且 u_{V12} 处于高电位，稳压管 V_{23} 导通， V_{13} 导通，于是 V_{14} 和 V_{15} 获得基极电流而转为饱和导通， $u_{O2} = E_1$ 。同理，经过 π (rad) 之后有 V_{12} 导通， V_8 截止，输出电压转为 $u_{O2} = 0$ ； $u_{O1} = E_1$ 。于是 u_{V7} 的单列脉冲被转换为双列脉冲 u_{O1} 和 u_{O2} ，其间互隔 π (rad)，重复频率与电网频率同步。

输出末级采用射极输出方式是为了给外接的功放级提供足够的驱动功率。



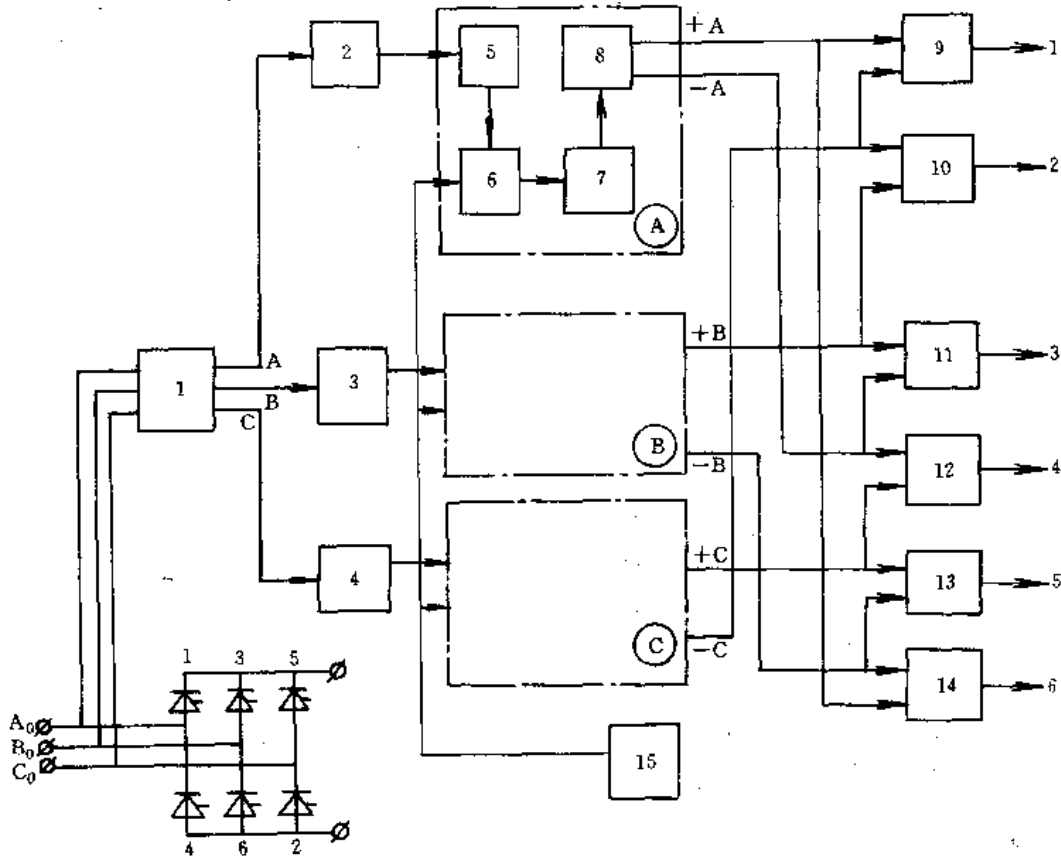


图 3-11-16 KC04 型集成式触发电路框图

1—同步信号电源变压器 2、3、4—RC 移相电路 5—锯齿波发生器
6—移相控制电路 7—分相电路 8—输出级 9~14—功放级

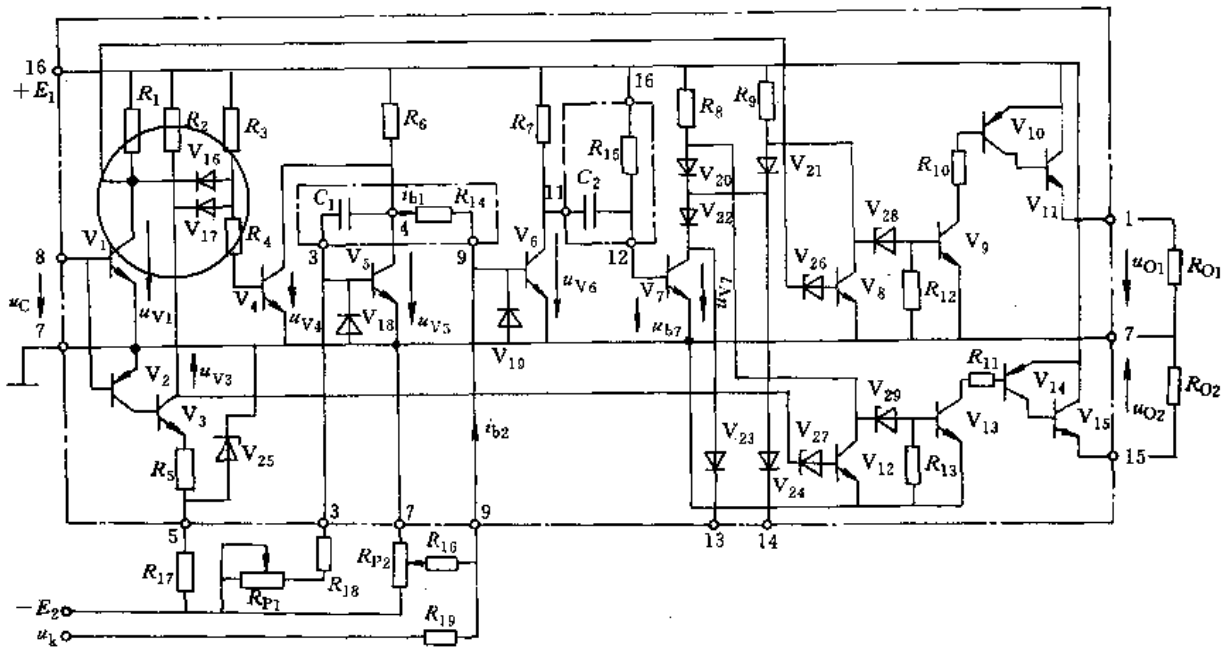


图 3-11-17 KC04 型集成式触发电路



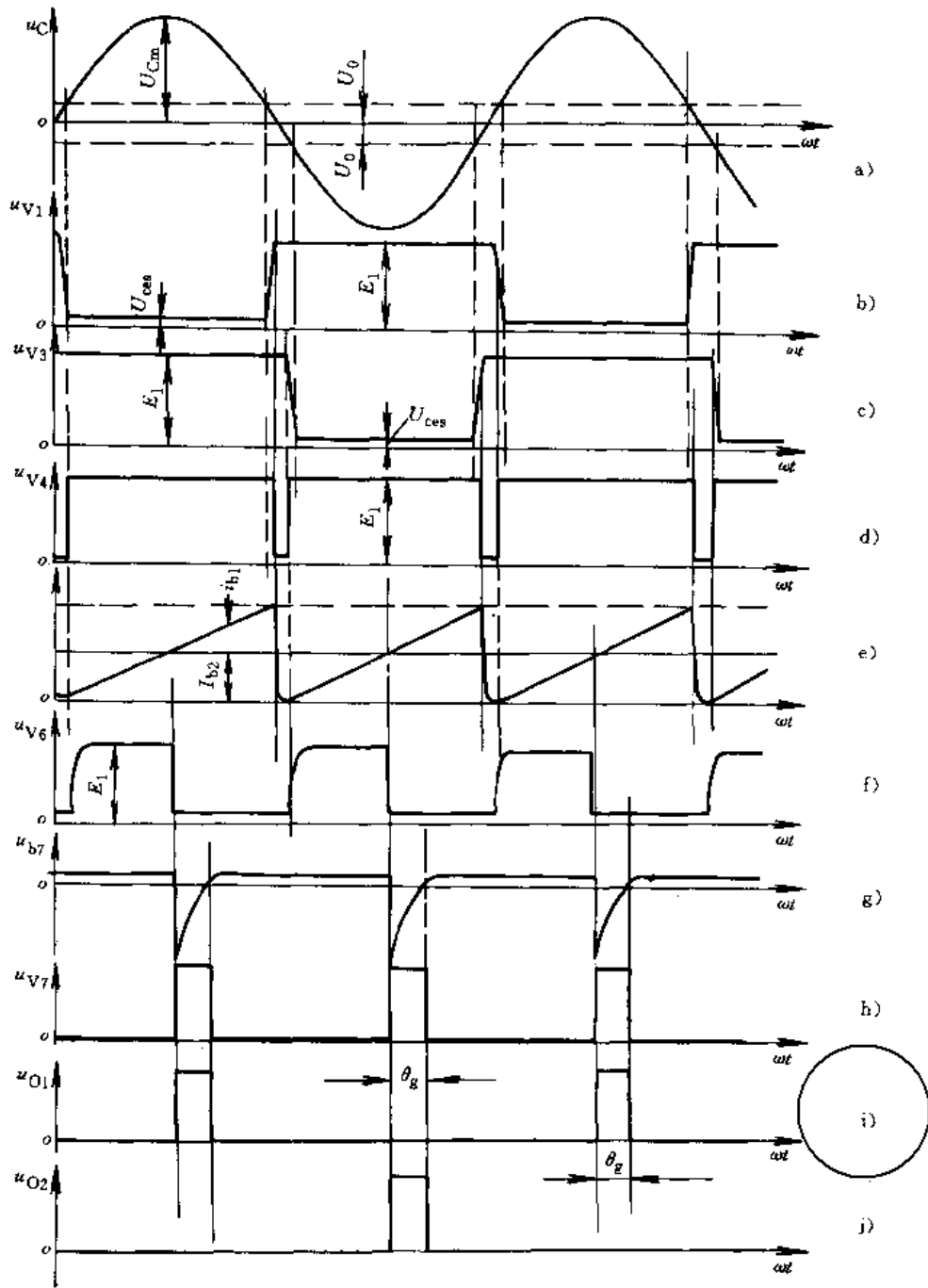


图 3-11-18 KC04 各点波形

4 晶闸管变频器

晶闸管变频电路是将一固定频率的交流电能转换为另一种频率或频率可变的交流电能的装置，前者主要用于中频感应加热等，后者主要用于交流电机的调速等。

晶闸管变频电路可以分为交-交变频器和交-直-

交变频器两大类。交-交变频器是将工频电源直接变成所需频率的交流电源，称为直接变频；交-直-交变频器通常是将工频电源经过整流以后转为直流电源，然后将直流电源转成所需频率的交流电源，称为间接变频，其中将直流电能转换为交流电能的电路称为逆变器。由于逆变后的交流电能是供给一个负载，故这里的逆变器是指无源逆变器。



4.1 单相逆变器

4.1.1 单相并联逆变器

图 3-11-19a 是最简单的单相并联逆变器。当 V_1 触发导通时，电源 E 加在变压器初级线圈“1”、“2”两端，在其上产生感应电动势，“1”端为正，“2”端为负，大小等于 E ，因而在次级线圈感应电动势供给负载。由于初级线圈互感作用，“1”、“3”两端也感应大小为 E 的电动势，“3”端为正，“1”端为负。这时换向电容 C 充电到电压为 $2E$ 。当 V_2 触发导通时，电容 C 经 V_2 向 V_1 放电， V_1 因受到 $2E$ 反向电压的作用立即关断。这时 C 向相反方向充电，为 V_1 再度导通和 V_2 关断作准备。 V_2 导通时，变压器初线圈产生的感应电动势在“1”端为正，“3”端为负，次级线圈感应电动势方向与前相反。如此反复进行，在次级感应出正负交替的交流电压。其频率由触发脉冲信号的频率决定。此电路特点是简单，但电容量大，效率低，如是电感性负载，则换向困难。管子承受电压为电源电压的两倍，故只适用于低压小功率的电阻性负载。

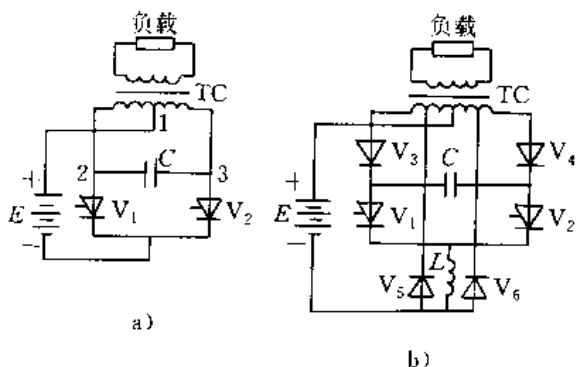


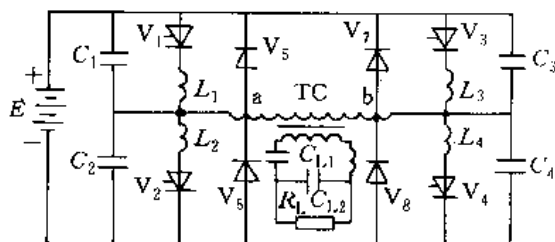
图 3-11-19 单相并联逆变器

图 3-11-19b 是改进型单相并联逆变器，增加电抗器 L 可使放电速度减慢，电容 C 可减小，损耗小。两臂上串联二极管 V_3 、 V_4 则能防止换向电容负载放电，使换向稳定。 V_5 、 V_6 称反馈二极管，可把电抗器 L 上储存的磁场能量反馈到电源中去，而且为电感性负载或电容性负载时提供了通路，使换向方便。因此，这种电路效率高，但这种并联逆变器要有中心抽头的变压器，初级的二只线圈，每只线圈仅工作半个周期，因而变压器利用率低，体积大。另外晶闸管承受电源电压的两倍，故只适用于低压、一般功率的场合。

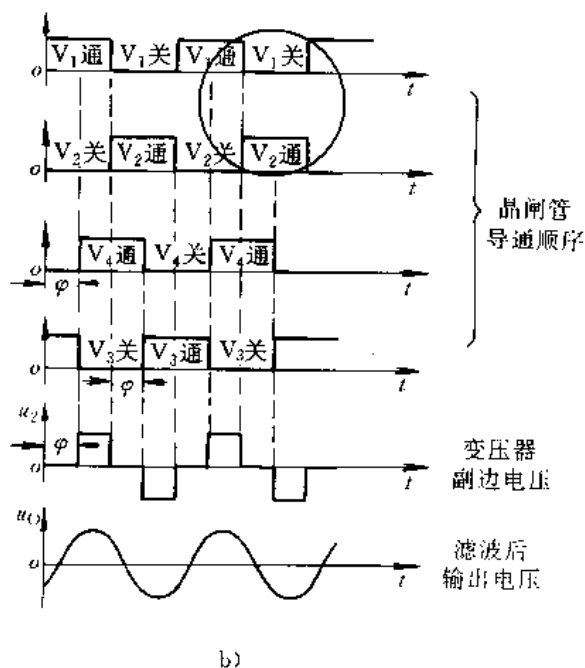
4.1.2 单相桥式并联逆变器

图 3-11-20a 电路中， $C_1 \sim C_4$ 为换向电容， $L_1 \sim L_4$

为电感线圈， $V_5 \sim V_8$ 为反馈二极管。此电路工作过程按图 3-11-21b 的开关顺序触发晶闸管，则在变压器初级为间断的方波。例如使 V_1 、 V_3 触发导通， V_2 、 V_4 关断，则变压器 a、b 两端同电位而输出为零。当 V_1 、 V_4 触发导通而 V_2 、 V_3 关断，则 a、b 两端承受电压 E ，余类推。这样在变压器次级可输出交变方波，经过滤波器 C_{L1} 、 C_{L2} 、 L_L 作用，可输出正弦波的交流电。改变触发信号时间，即改变 φ 的大小，使输出交流电可调。若输出电压能配合负载需要，则变压器可省，而且晶闸管承受电压比单相并联逆变器小一倍，故单相桥式并联逆变器适用于较高电压、较大功率的场合。



a)



b)

图 3-11-20 单相桥式并联逆变器

a) 电路 b) 开关顺序及输出电压波形

4.2 三相桥式并联逆变器

图 3-11-21 是串联二极管式三相桥式逆变器。 $C_{13} \sim C_{62}$ 为换向电容， L 为电感线圈， $V_7 \sim V_{12}$ 为串联二极管。它能防止换向电容上的充电电荷通过负载而放电，



所以不管负载情况如何, 总能正常进行换向。 $V_{13} \sim V_{18}$ 为反馈二极管, 其作用是当因电感负载能量变化使负载电压高于 E 时, 反馈二极管导通, 把能量反馈给电源。此电路是每隔 60° 依次送入触发脉冲使晶闸管按 $V_1, V_2, V_3, V_4, V_5, V_6$ 的顺序进行导通, 就可在负载上得到对称的三相电压。利用并联电容器充放电的方法, 在晶闸管 1-3、3-5、5-1、2-4、4-6、6-2 之间换向。每个晶闸管的导通时间是 120° 的电角度。

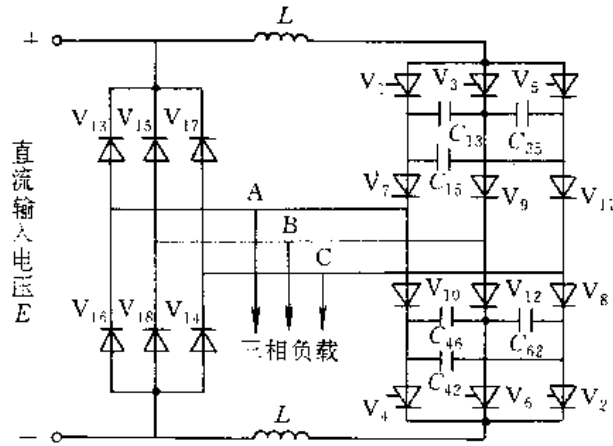


图 3-11-21 串联二极管式三相桥式逆变器

图 3-11-22 是串联电感式三相桥式逆变器。电容器 $C_1 \sim C_6$ 是换向电容, 二极管 $V_7 \sim V_{12}$ 是反馈二极管。同时, 这些二极管与电阻 $R_1 \sim R_3$ 一起使换向电感中电流起衰减作用。与晶闸管串联的是带有中间抽头的电感线圈 $L_1 \sim L_6$ 。晶闸管按 $V_1, V_2, V_3, V_4, V_5, V_6$ 的顺序每隔 60° 进行触发导通, 在负载上得到三相电压。换向是在晶闸管 1-4、3-6、5-2 之间利用电感反电动势方法进行换向。因此, 每个晶闸管导通 180° 。

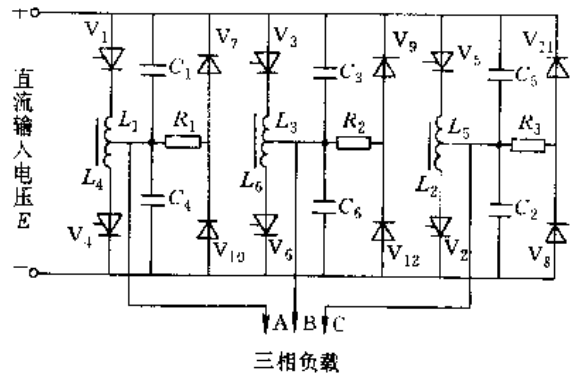


图 3-11-22 串联电感式三相桥式逆变器

以上两种逆变器优点是效率高, 电压波动小。

4.3 交-直-交变频器

交-直-交变频器也称间接变频器, 其电路结构图见图 3-11-23。这种交-直-交变频器不仅仅变换交流电源的频率, 同时也可以改变交流电压的大小和变换交流电源的相数。因为由晶闸管组成的可控整流器, 其输出的直流电压大小是可以调节的, 从而可以改变逆变器的输出电压。图 3-11-23 中的逆变器可以是单相逆变器, 也可以是三相逆变器, 故可以实现把单相工频交流电源经整流后逆变为单相或三交流电源。逆变器在 4.1 节和 4.2 节已作了介绍, 几种典型整流电路及其耦合方式和它们的特点见表 3-11-4。

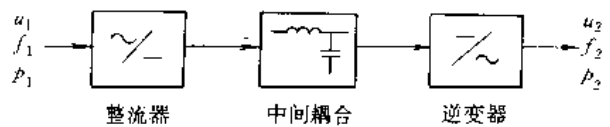


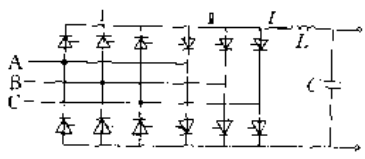
图 3-11-23 交-直-交变频器的结构框图

表 3-11-4 交-直-交变频器中的整流电路及耦合方式

| 整流电路及耦合方式 | 特点及功能 |
|-----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| | 整流装置是不可控整流器, 直流耦合电路是由电感和电容组成的滤波器, 它只能将交流电能传给直流侧, 再经过逆变器送给负载。反之逆变器无法将电能经耦合电路和整流器送到交流电源侧, 如果逆变器的负载是异步电动机, 只能运行在电动机状态, 不能运行在反馈制动状态 |
| | 整流装置是可控整流器, 输出的直流电压可以改变。整流器只能工作在整流状态, 不能工作在逆变状态, 如逆变器向直流侧回送电能时 u_c 增高, 当 u_c 高于一定值时触发晶闸管 V , 将回送的电能消耗在电阻 R 上, 从而避免了 u_c 值的进一步提高。这种线路可满足异步电动机运行在反馈制动状态, 但由于能量在 R 上消耗了故不经济, 但可适用于小容量或短时运行在反馈制动状态的电动机传动装置中 |



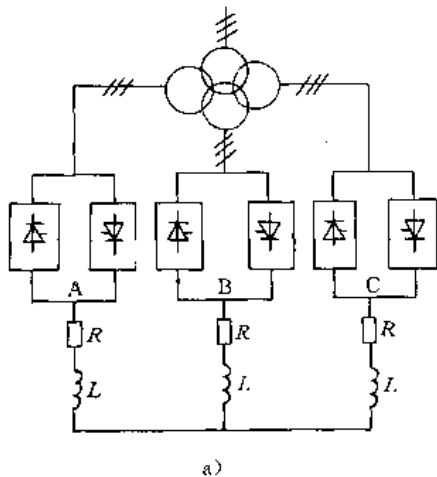
(续)

| 整流电路及耦合方式 | 特点及功能 |
|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  | <p>整流装置是由可控桥 I 和可控桥 II 组成, 桥 I 工作在整流状态, 输出的直流电压可调, 电压极性固定。当逆变器有能量通过直流侧向交流输入端回送入能量时, 桥 II 工作在有源逆变状态。它可以满足异步电动机长期运行在反馈制动状态, 运行时较为经济, 但线路较为复杂, 投资较大</p> |

4.4 交-交变频器

交-交变频器是将一种固定频率的交流电能直接变换为另一种频率和电压可调的交流电能。省掉了交-直-交变频器中的中间直流环节, 也称直接变频器, 线路结构较为简单。图 3-11-24a 是三相变频器电路, 变频器电路是由三组独立的反并联桥式电路组成, 每组反并联桥式电路见图 3-11-24b。每组反并联桥均有整流和逆变两种工作状态。当整流器 I 工作在整流状态, 而整流器 II 封锁时, 负载电压为上正下负; 反之使整流器 II 工作在整流状态, 而整流器 I 封锁时, 负载电压变为上负下正, 这样交替工作, 负载即可获得交流电压。若以一定的频率控制整流器 I 和整流器 II 交替工作, 则负载上交流电压的频率就等于这控制频率。这种变频器的主线路与可逆整流电路是基本一致的, 它们的区别主要是控制方式不同。

与间接变频器相比较, 直接变频器的优点是:



(1) 具有较高的转换效率。间接变频器必须经过 AC-DC 和 DC-AC 的两次转换, 而直接变频器却只需要 AC-AC 一次转换, 转换效率比较高。

(2) 换流方式简单。直接变频器采用电源换流方式, 比间接变频省去相应的附加换流电路。

(3) 低频运行稳定性好。间接变频器在工作频率低于 10Hz 时会引起电动机转速不稳定, 但直接变频器低频运行时输出波形反而有所改善。

(4) 具有四象限可逆运行的特性。在直接变频器中, 电能可在电源与负载间可以任一个方向输送, 因而对需要快速可逆运转的传动装置很有利。

直接变频器的缺点是上限频率低, 为了限制过大的谐波含量, 信号频率的上限为电网频率的 1/3~1/2。

一般来说, 直接变频器比较适合于需要低频大功率的场合, 而间接变频器则适用于输出频率较高的地方。

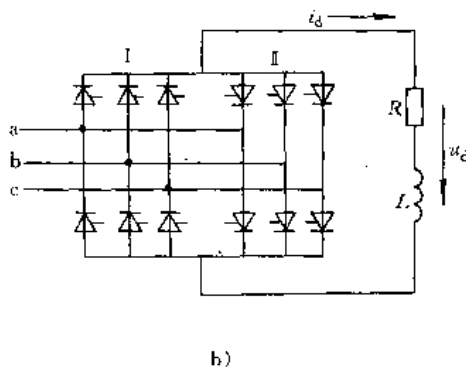


图 3-11-24 三相直接变频器

5 变流器的应用

5.1 直流电动机调速用变流器

直流电动机供电用的变流器可分为电流不可逆和电流可逆两种, 简称可逆和不可逆变流器。所谓不可逆

变流器系指能量只能由交流侧输送的变流器, 可逆变流器中能量既可由交流侧向直流侧输送, 也可以由直流侧向交流侧反馈。

5.1.1 电流不可逆变流器

图 3-11-25 是直流电动机电枢供电用的晶闸管变

此星公司制作 请尊重作者版权



流器电路(三相桥式)及电流、电压波形。当电动机的励磁电流不变时,其转速主要取决于变流器的输出电压,而转矩主要取决于输出的平均直流电流。

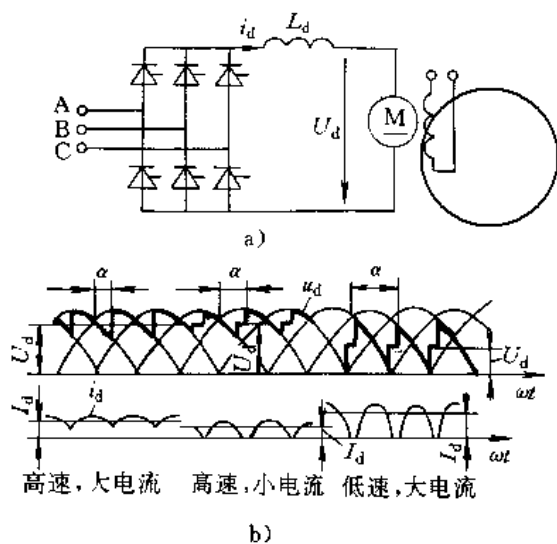


图 3-11-25 不可逆直流电动机柜供电用变流器
a) 电路 b) 波形

当直流电动机作低速运转时,由于晶闸管变流器在滞后角 α 很大的情况下工作,整流电流脉动率增大,当整流电流发生断续时,导电角相应减小,通流容量亦随之降低。另外,若门极触发脉冲较窄,还可能由于电流断续而触发失败,并且整流电流中的脉动分量使电动机无火花换向区变窄,增加轴向电压和铜耗,故必须用平波电抗器限制电流脉动率并使电流连续。

在直流连续的情况下,滞后角 $\alpha=90^\circ$ 时的整流电压为零,若滞后增大到大于 90° ,则变流器处于逆变工作状态,即直流电动机的机械惯性能量通过逆变转换成电能反馈到电网,形成反馈制动的工作状态。

5.1.2 电流可逆变流器

电流可逆的直流电动机调速变流器有交叉联结和

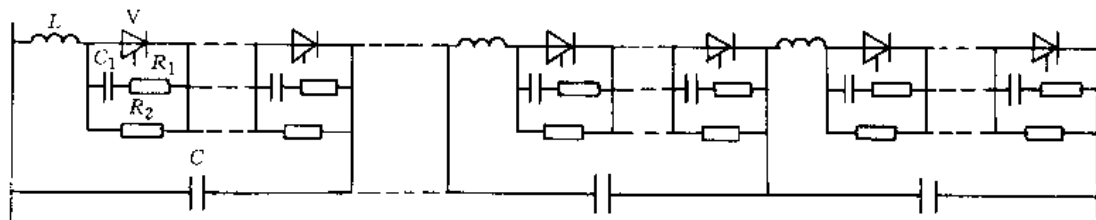


图 3-11-28 阀管中晶闸管串联方式

反并联联结两种线路见图 3-11-26。

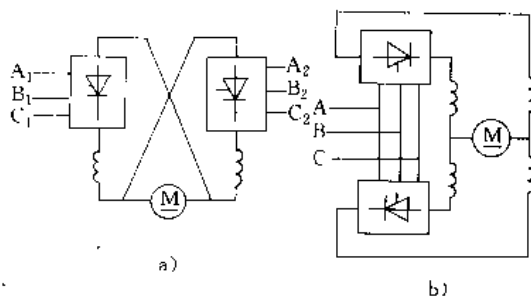


图 3-11-26 电流可逆的直流电动机调速变流器
a) 交叉联结的可逆变流器 b) 反并联联结的变流器

交叉联结的可逆变流器和反并联联结的变流器线路的工作原理已在本章 2·4 节中作过介绍。这种电流可逆双变流器适用于快速制动,反转和频繁可逆运转的场合。

5.2 高压直流输电中用的变流器

高压直流输电主要用于远距离大容量的电力传输,海底电缆送电,不同额定频率或相同额定频率非同步运行的交流系统之间的联络和用地下电缆向用电密度高的城市供电等。由于容量大所以高压整流和逆变器均采用三相桥式联结,见图 3-11-27。该图是用 $\pm 100\text{kV}$ 双极直流输电线路,也有的工程是采用单极直流输电线路等。但它们所承受的均是高压,为了提高每个臂的反向击穿电压,一般每个臂要用许多晶闸管串联而成,见图 3-11-28。由于许多晶闸管要同时触发,故必须具有很大功率的触发装置。

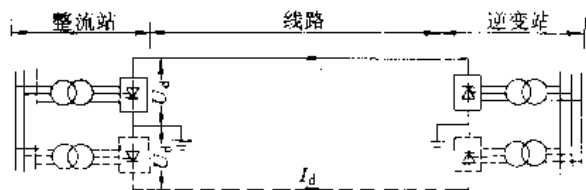


图 3-11-27 高压直流输电系统结构图



5.3 中频感应加热用变频器

用晶闸管变频装置作感应加热电源具有起动迅速,在加热过程中能自动调整负载的功率因数,效率比较高,噪声小,质量小和安装容易等优点。因此,晶闸管中频电源已广泛应用于金属的感应加热,如熔炼、透热、热处理、焊接等方面。

晶闸管中频电源装置的常见电路型式见图 3-11-29。

这些中频装置均由整流和逆变二个环节组成,整流环节大多采用三相桥式电路,逆变环节主要采用并联或串联两种基本逆变器。所谓并联逆变器系指在逆变侧功率因数补偿作用的电容与负载并联的逆变器而言,工作时电容使输出电流超前电压一个角度,以保证

逆变晶闸管有足够的关断时间。并联逆变器中的整流环节应采用电感输出式滤波电路。串联逆变器则将补偿功率因数的电容与负载串联,其整流环节应采用电容输出式滤波电路。串-并联式、倍频式和时间分割式的电路主要是为了改进电路性能及提高工作频率,基本上都属于并联式电路类型。并联逆变器和串联逆变器的基本特点的比较见表 3-11-5。一般情况下,接近恒压源特性的并联逆变器在性能上更适合于感应加热负载,因此,它也是比较常用的电路。

1. 并联逆变器 图 3-11-29a 是并联逆变器的原理图。图 3-11-30 是并联逆变晶闸管中的电流、电压波形图。表 3-11-6 列出常用的并联逆变器的基本计算公式。在图 3-11-29a 中,三相工频电源经桥式整流器和电感滤波后供给逆变桥,在晶闸管 V_1 和 V_3 触发时,

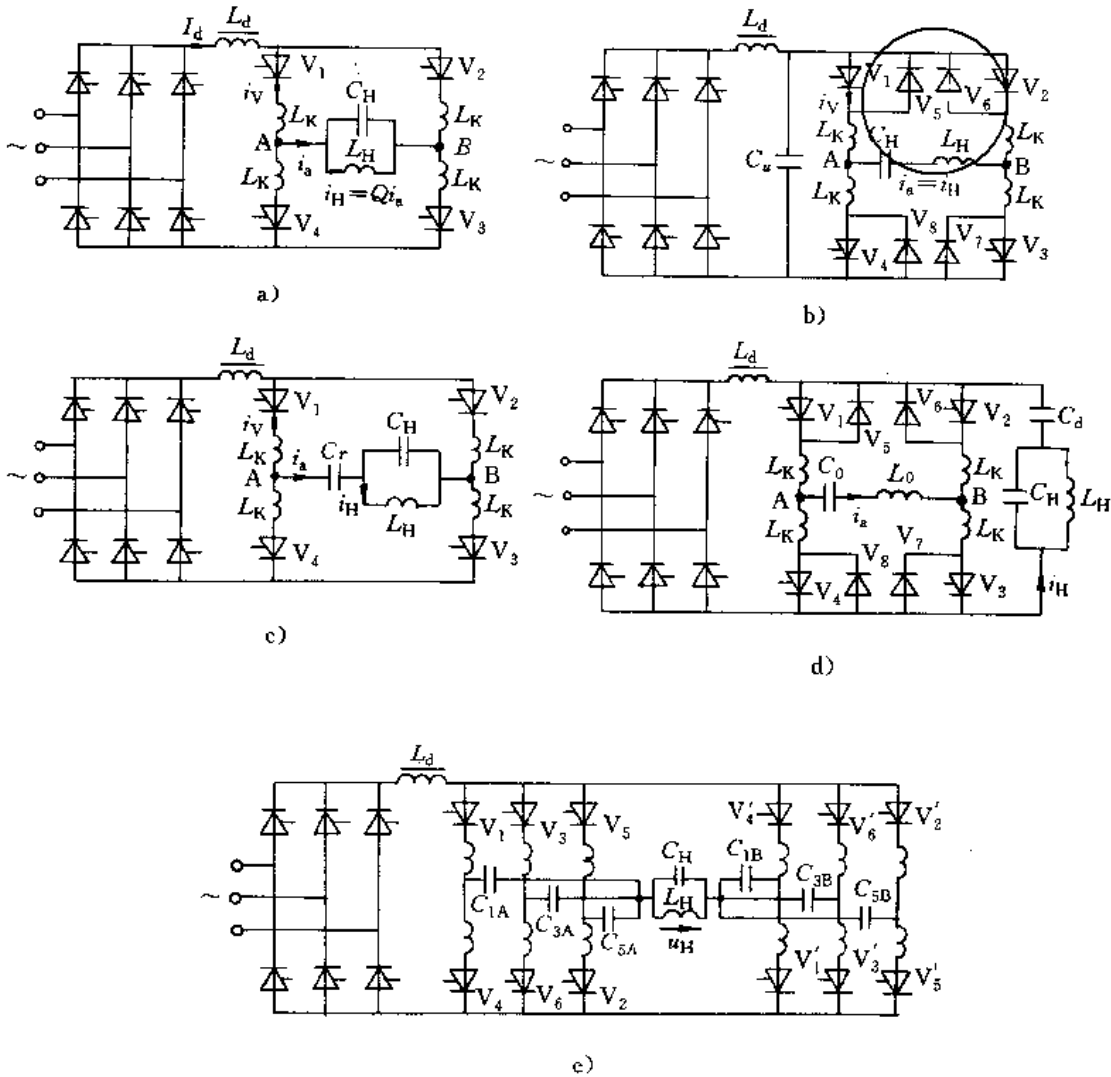


图 3-11-29 晶闸管中频电源装置原理图

a) 并联式 b) 串联式 c) 串并联式 d) 倍频式 e) 时间分割式



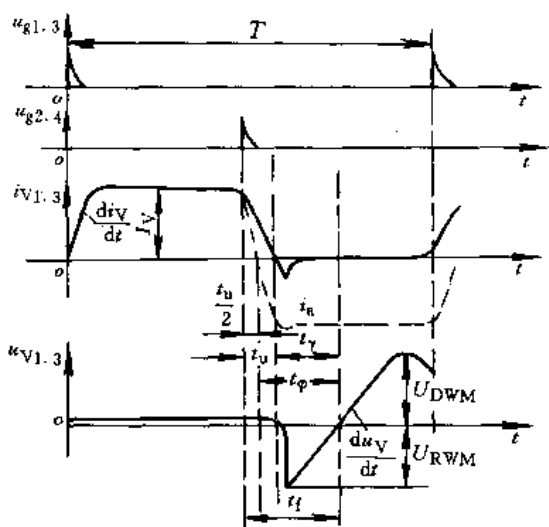


图 3-11-30 并联逆变器中逆变晶闸管的电流、电压波形图

直流电流 i_V 经 V_1 、 V_3 通过负载线圈 L_H 及并联补偿电容 C_H ；随后晶闸管 V_2 和 V_4 触发，此时由于负载补偿到超前的功率因数，因而电容 C_H 的电压经 V_2 和 V_4 分别以反电压方式加于 V_1 和 V_3 而使其关断，然后直流电流经 V_2 和 V_4 沿反方向流过负载回路，并由 V_1 和 V_3 的导通实现 V_2 、 V_4 的关断。如此周而复始得到中频交流电流。并联电路中提供逆变晶闸管的关断时间 t_r 近似等于由负载功率因数角所确定的时间 t_ϕ 减去换相重叠时间 t_u 的一半，即 $t_r \approx t_\phi - \frac{1}{2}t_u$ 。因为必须接入换相电感 L_K 以限制晶闸管的电流上升率。因此，在逆变器工作频率升高时，对晶闸管的电流上升率和关断时间要求提高。这就限制了并联逆变器的工作频

率。根据目前的晶闸管制造水平，其经济运用频率一般低于 4kHz。并联逆变器中负载感应线圈 L_H 中的电流 i_H 等于逆变器输出电流 i_a 的 Q 倍 (Q 为负载的品质因数)，但这一电流仅在感应线圈和补偿电容之间流通，并不经过逆变晶闸管。同时并联逆变器对负载变化的适应性较好，故在频率较低的装置中被广泛采用。

表 3-11-5 逆变器电路类型比较

| 比较项目 | 串联逆变器 | 并联 (包括串-并联) 逆变器 |
|------------------------|-------------------|--------------------------------|
| 整流器的滤波电路 | 电容输出 | 电感输出 |
| 输出电压波形 | 矩形波 | 正弦波 |
| 输出电流波形 | 正弦波 | 矩形波 |
| 负载线圈基波电压 | 逆变器输出基波电压的 Q ①倍 | 等于逆变器的输出电压 |
| 负载线圈基波电流 | 等于逆变器输出电流 | 逆变器输出电流的 Q ①倍 |
| 反并联整流管 | 必须用 | 不用 |
| 晶闸管承受的 $\frac{du}{dt}$ | 大 | 小 |
| 晶闸管承受的 $\frac{di}{dt}$ | 小 | 大 |
| 换相重叠角 | 可以很小 | 为限制 $\frac{di}{dt}$ ，必须有一定的重叠角 |
| 换相失败时的保护 | 比较困难 | 比较容易 |
| 对负载变化的适应性 | 差 | 较好 |

① Q 为负载线圈的品质因数。

表 3-11-6 并联逆变器的基本计算公式

| 计算项目 | 计算公式 | 说明 |
|--------------------------------------------|------------------------------------------------------|------------------------------|
| 中频输出电压 U_a (V) | $U_d/0.9\cos\phi$ | ϕ ——负载功率因数角 |
| 晶闸管断态工作电压 U_{DWM} (V) | $\sqrt{2} U_a$ | |
| 晶闸管反向工作电压 U_{RWM} (V) | $U_{DWM}\sin\left(\phi + \frac{t_u}{2\omega}\right)$ | ω ——中频输出电压角频率 |
| 晶闸管通态工作电流 I_V (峰值) (A) | I_d | I_d ——直流电流 (A) |
| 晶闸管的通态电流上升率 $\frac{di_V}{dt}$ (A/ μ s) | $U_{RWM}/2L_K$ | L_K ——逆变器每臂换相电感 (μ H) |
| 晶闸管的断态电压上升率 $\frac{du_V}{dt}$ (V/ μ s) | ωU_{DWM} | |
| 晶闸管的关断时间 t_r (μ s) | $\frac{\phi}{\omega} - \frac{t_u}{2}$ | |
| 晶闸管的导电时间 t_k (μ s) | $\frac{T}{2} + t_u$ | |
| 换相重叠时间 (μ s) | $I_d/\frac{di_V}{dt}$ | |

此星公司制作 请尊重原作者版权



2. 串联逆变器 图3·11-29b是串联逆变器的原理图。晶闸管 V_1 、 V_3 和 V_2 、 V_4 的交替触发可向负载输出中频交流电流。晶闸管的关断依靠与其反并联的二极管 V_5 、 V_7 和 V_6 、 V_8 中流过负载所需的无功电流而造成的通态压降来实现。因此,只要适当降低负载的功率因数,即可延长提供给逆变晶闸管的关断时间,并且串联逆变器中晶闸管的电流上升率较低,故串联逆变器可比并联逆变器在更高频率下工作。但串联逆变器存在负载不易匹配和逆变失败时保护比较困难等缺点。

3. 串-并联逆变器 图3·11-29c是串-并联逆变器的原理图。其基本原理与并联逆变器相同,但由于串联电容 C_s 的作用,能使串-并联逆变器的工作频率比并联逆变器高,起动也比较容易。串联电容 C_s 还可改善逆变器在重负载时的换相能力。但单一值的串联电容使电路工作频率的允许变动范围受到一定的限制,通常在100%~170%范围之内。

4. 倍频式逆变器 图3·11-29d是倍频式逆变器,其构成桥式电路的晶闸管边都有一反并联二极管。在桥式电路的对角线上接有专为换相而设置的串联振荡回路 L_0 、 C_0 ,在另一对角线上经隔直电容 C_d 接至负载感应线圈 L_H 及并联补偿电容 C_H 。因 C_d 比 C_0 大得多,故隔直电容在工作过程中使负载感应线圈中的电流不出现直流分量。 C_d 的充电电压(达到 U_d 值)波动不大。当晶闸管 V_1 和 V_3 触发时, C_d 经由 V_1 (V_5)、 V_3 (V_7)以及 L_0 、 C_0 和负载 L_H 、 C_H 构成的振荡电路产生振荡,其周期基本上由 L_0 、 C_0 决定,在振荡结束(或接近于结束)时, V_2 和 V_4 触发,即产生另一次振荡。因此,负载上得到的交流振荡电流的频率是晶闸管触发频率的两倍。而晶闸管获得的反向偏置时间接近于输出频率的半周期。因此,倍频式逆变器可以在较高频率下工作,一般可达4~10kHz左右,其缺点是电路较为复杂。

5. 时间分割式逆变器 图3·11-29e是三倍频原理电路图。其中,由若干个晶闸管逆变支路轮流给同一负载供电。在 n 倍频电路中,晶闸管的工作频率仅为逆变器输出频率 n 分之一。因此,倍频式逆变器可以在更高的频率下工作。

在中频感应加热的各种逆变器中,由于负载的电参数在加热过程中不断变化,因而控制电路一般须采用闭环系统(反馈控制),以保证逆变器在负载参数发生大幅度变化时,始终能可靠运行,并自动调整工作频率,使逆变器一直在最合理的匹配工作状态下运行。

5.4 交流调速用变频器

交流调速用变频器主要有间接变频和直接变频两大类。

间接变频就是交-直-交变频器,这种变频又分为电压型和电流型两大类。图3·11-31是电压变频器的逆变器部分主电路。该电路晶闸管的导通顺序是 $V_1 \rightarrow V_2 \rightarrow V_3 \rightarrow V_4 \rightarrow V_5 \rightarrow V_6 \rightarrow \dots$,各触发信号彼此相差 60° 电角度。但在逆变电路中一般必须采取强制换流方式。因此,触发信号都采用宽脉冲信号,三相桥式逆变电路有两种不同的工作方式,一种是 180° 导通的,另一种是 120° 导通的,图3·11-31是 180° 导通的电感型逆变器,在任意瞬间都有三个晶闸管同时导通,此时触发信号宽为 180° 电角度,每个晶闸管的导通角也为 180° ,前后两个脉冲间隔仍为 60° ,在一个周期内任何瞬间每相都有一个晶闸管导通。图3·11-32为电流型变频器的主电路,这种电流型主电路的特点是中间环节采用电感器滤波,因此电源阻抗很大,类似于电光源,逆变器输出电流比较平直,为矩形波。输出电压波形由电动机感应电动势决定,电压波形近似为正弦波。

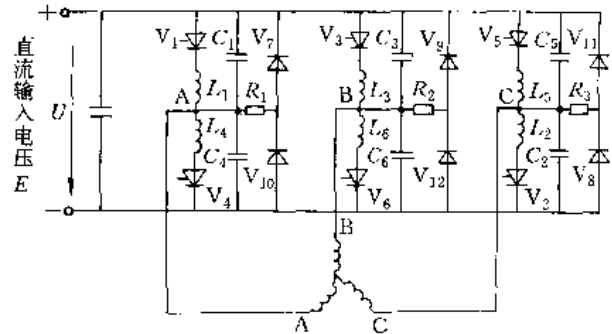


图3·11-31 串联电感式电压型变频器主电路

逆变器为 120° 通电型换流电路,任意瞬间只有两个晶闸管导通,电机轮流形成两相通电(换流过程有短时三相电)。电动机的转向由晶闸管的导通顺序决定,正转时触发顺序为 $V_1 \rightarrow V_2 \rightarrow V_3 \rightarrow V_4 \rightarrow V_5 \rightarrow V_6$,反转时触发顺序为 $V_6 \rightarrow V_5 \rightarrow V_4 \rightarrow V_3 \rightarrow V_2 \rightarrow V_1$ 。各触发脉冲间隔 60° 电角度,每个晶闸管导通 120° ,三相对称,各相互差 120° 。

在强迫换流电路中, $C_1 \sim C_6$ 为换向电容。它的作用是给欲关断的晶闸管施以反压,以使其强迫关断。 $V_7 \sim V_{12}$ 为隔离二极管,它的作用是防止充电电压经负载放掉,并把换流电路与负载隔离起来。由于隔离二极



管与主晶闸管相串，故称串联二极管式换流电路。
 这种系统中，当突然降低逆变器输出频率时，电机

可以从电动状态自动地进入反馈发电状态。不同工作
 状态时系统的工作情况可用图 3-11-33 来说明。

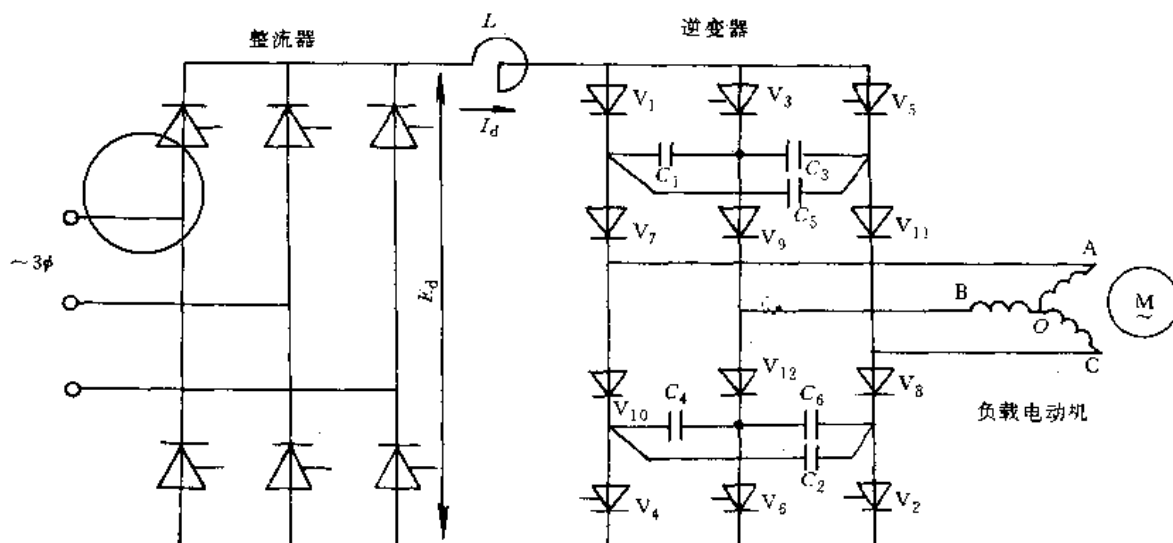


图 3-11-32 电流型变频器的主电路

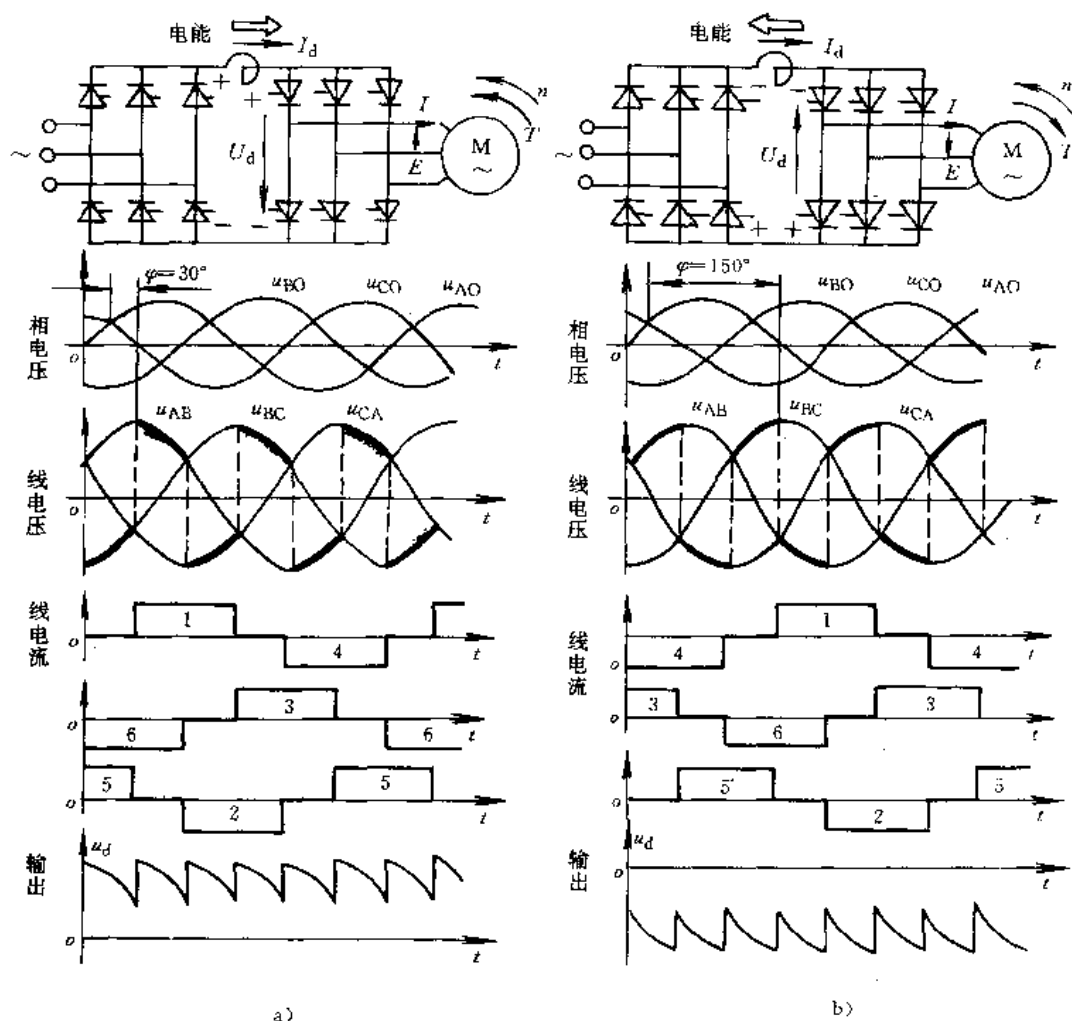


图 3-11-33 电流型变频调速系统的两种运转状态

a) 电动机状态 b) 发电机状态



在正常的电动机运转状态下,电动机定子电压频率即逆变器输出频率 f_1 大于异步电动机旋转频率 f_n ,转差率 s 的变化范围为 $0 < s < 1$,电动机转速落后于旋转磁场转速,电机的功率因数 $\cos\varphi > 0$,电动机运行电动状态,逆变器工作于逆变状态,整流器工作于整流状态,其电压及电流波形见图3-11-33a。

当定子频率突然降低时, $f_1 < f_n$ ($n_1 < n$),转差率 $s < 0$,旋转磁场转速小于电动机转速, $\cos\varphi < 0$, $\varphi > 90^\circ$,电机运行于反馈发电状态。由于电流不能反向而逆变器输出电压反向,因此逆变器工作于整流状态,整流器工作于逆变状态。系统把电动机的机械能转变成电能,反馈到交流电网,其电压及电流波形见图3-11-33b。

直接变频调速器也称为交-交变频调速器,其主电路又分为无环流和有环流两大类。无环流系统结构比较简单,不需要限流电抗器,但缺点是绝不允许两组整流器同时触发。有环流系统在两组整流器之间需串入限流电抗器,使功率因数降低。其优点是可以提高输出电压的频率,工作时让两组整流器之间存在一定的环流。这和直流电动机一样,采用有环流交叉联接去消除切换延时,提高系统的反应速度。

交-交变频器的控制方式也可以分为两大类,电流型和电压型。对于电压型的变频器,其控制波形又有矩形电压波、锯齿形电压波和正弦形电压波,无论哪一种控制方式其目的都是为了得到一个较好的输出正弦电压波形。

图3-11-34是由18个晶闸管组成的三相变三相有环流的交-交变频器电路图,它是由三组反并联的三相半波整流电路组成。每组均由三个共阴极的晶闸管组成正极组,三个共阳极的晶闸管组成负极组。当变频器的输出电流为正半周时,由正极组导通,负半周由负极组导通。输出电压的半波波形是输入电压的包络线(见图3-11-35),输出电压频率是由每个晶闸管导通时间所决定。同一整流器的晶闸管之间的换向与三相半波整流电路相同。在实际工作时,连在一起的反并联组例如图3-11-34①、④中两个晶闸管可能同时导通而造成短路。为了限制环流,采用了限流电感 L ,电感 L 也起到滤波的作用,从而改善了输出电压的波形。为了能得到较完整的正弦波,对触发脉冲采用余弦交叉控制法,余弦交叉法对脉冲发送互相之间的相位差要求比较严格,目前多由微处理机、单片机等作为控制器。按余弦规律进行控制的电压、电流波形见图3-11-36,晶闸管的正极组切换到负极组是在电流过零时进行,而不是电压过零时,因此当负载为非纯电阻性负载时,其有功功率是由处于整流状态的整流组提供,其无功功率是由处于逆变状态的整流组提供。为了获得整齐和对称的输出电压波形,输入电压的频率是输出电压频率的整数倍,其输出电压的调节可以用改变相位滞后的方法来实现。直接变频调速器常用在超低频电源供电的大型电机的低速传动装置中使用。

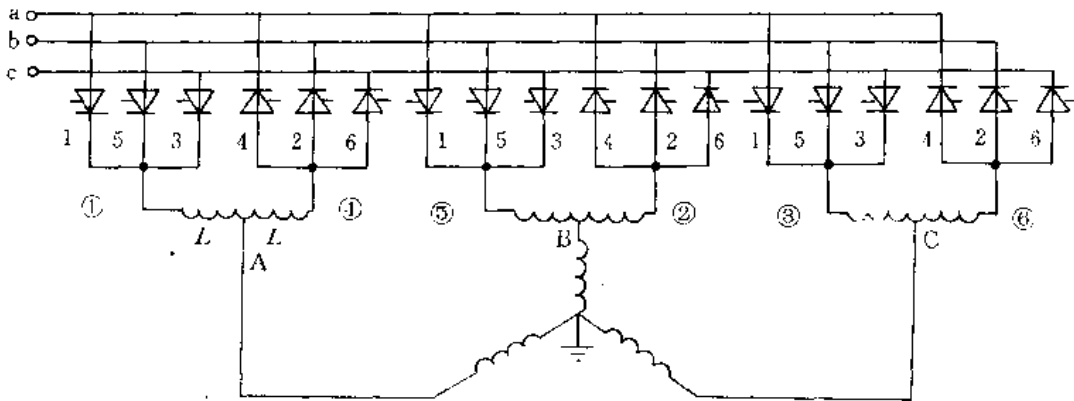


图3-11-34 三相18个晶闸管的交-交变频器

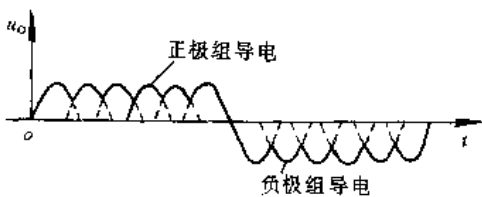


图3-11-35 电压波形

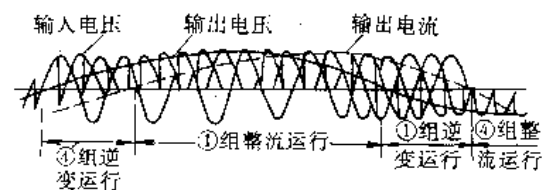


图3-11-36 直接三相变频变频器按余弦规律控制时的波形



6 交流调压器和直流调压器

在许多工业设备中，常需要改变交流电压和直流电压的大小，如交流电动机的调压调速系统，电炉的温度控制，电解槽的电压控制等。在实际生产过程中有相当一部分设备采用调压变压器，串联电阻或饱和电抗器等。这些方法的最大缺点是设备笨重，损耗较大，调节速度慢。用晶闸管组成的交流调压器具有体积小，损耗小，调节速度快等优点。晶闸管组成的交流调压器通常采用相位控制的方式，在电源电压交变的一个周期中，改变触发脉冲的相位，控制晶闸管的导通时刻，从而达到调压的目的。

6.1 单相交流调压器

图 3-11-37 是单相交流调压器的主电路及在电阻性负载和电感性负载的电压、电流波形。其中移相角 α 的调节与整流装置一样。在电源正半周，移相角为 α 时触发 V_1 导通，负载上得到电源电压的一部分。对电阻性负载，在电源电压过零时 V_1 自行关断。在负半周时，电源下端为正，并以相同移相角 α 触发 V_2 导通。如此不断重复。当 α 改变时，负载上即得可调的交流电压 u_L 。对电阻负载移相控制范围 α 是 180° 。

对电感性负载，当电源电压过零时，电流还不到零，晶闸管关不断，而是延迟关断。因此，在电感负载中，根据移相角 α 和负载的功率因数角 φ (φ 为非正弦电流 i 的基波分量与电压 u_L 之间的相位差) 之间的关系，电流可能连续和间断 (图 3-11-37c)。在电流连续的区间，整个电压加在负载上，就不可能调压，因此调压的条件是电流必须间断，即要求 $\alpha > \varphi$ ，导通角 $\theta < 180^\circ$ 。对电感负载需用宽脉冲触发，以免用窄脉冲触发时，由于电感作用而造成正负两个半周电流不相等，电路中电流出现直流分量，若用变压器输出，会出现直流过电流而烧坏熔断器或晶闸管的现象。

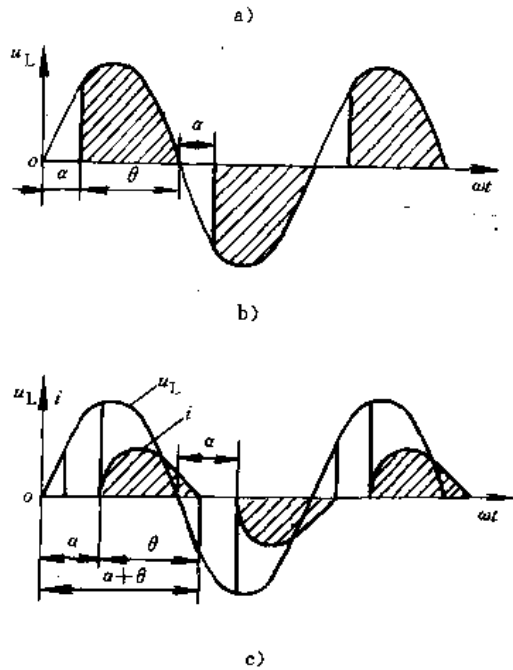
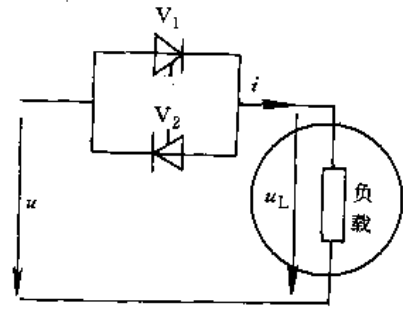


图 3-11-37 单相交流调压器
a) 电路 b) 电阻性负载电压波形
c) 电感性负载电压波形

6.2 三相交流调压器

在大功率中常采用三相交流调压器。其接线方式很多，常用的电路见表 3-11-7。

表 3-11-7 三相交流调压电路

| 主电路 | 图 1 | 图 2 | 图 3 | 图 4 | 图 5 |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | | | | | |



(续)

| | | | | | |
|------|-----------------------------------------------------------------------------|---------------------|------------------|--------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| 电路特点 | 1. 最经济, 只用三个晶闸管 2. 要求负载是接成中点而能分开的Y形 3. 三个晶闸管上电流只能一个方向流过, 但端线上电流没有直流分量 | 中线有三次谐波电流流过, 对滤波要求高 | 无三次谐波电流, 减轻对滤波要求 | 晶闸管承受电压比Y形接法高, 但电流比Y形接法小 | 1. 用三个晶闸管和三个二极管对接, 可节省晶闸管和触发电路 2. 端线上无直流分量电流 3. 电流谐波分量较大, 对通信干扰大, 增加滤波器负担 |
|------|-----------------------------------------------------------------------------|---------------------|------------------|--------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|

6.3 直流调压器

晶闸管直流调压器的工作原理常用直流斩波法, 见本章7.4节。

7 无触点开关和直流斩波器

有触点开关存在触头易磨、烧毁、咬死和工作频率低等缺点。用晶闸管组成功率无触点开关能克服上述缺点, 但它也有不足之处, 如过载能力差, 控制触发电路比较复杂、成本较高等。

7.1 单相交流无触点开关

图3-11-39a是采用两只晶闸管反并联组成的单相交流无触点开关。电源电压 u 正半周时触发 V_1 导通, 则交流电路闭合。在负半周时, V_1 因承受反向电压自行关断, 而对 V_2 触发导通, 这样, V_1 、 V_2 交替工作, 负载上得到一个交流电压, 相当于开关闭合状态。反之, 如不触发 V_1 和 V_2 , 都不导通, 负载得不到电压, 电路相当于断开状态。图3-11-38b是另一种单相交流开关, 它比上一种形式少用一个晶闸管, 但多用四个二极管, 在相同负载情况, 晶闸管容量要比上一种电路大。

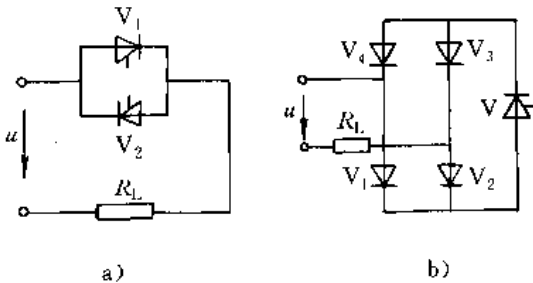


图 3-11-38 单相交流无触点开关

7.2 三相交流无触点开关

图3-11-39是三相交流无触点开关的主电路, 它

与三相交流调压器的主电路相同。作为开关, 当关断后不能让电流通过, 接通时保证可靠导通。因而它对触发电路要求就不需要像交流调压器那样要移相。

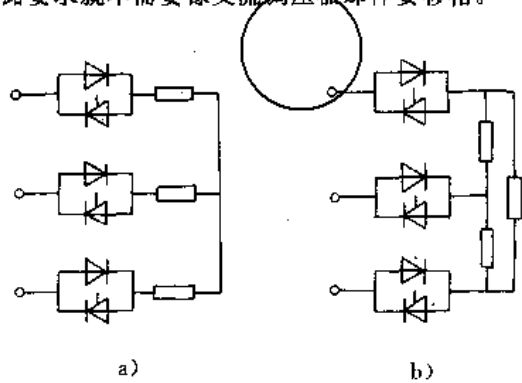


图 3-11-39 三相交流无触点开关

a) 星形负载 b) 三角形负载

7.3 直流无触点开关

直流电路中采用晶闸管作为无触点开关时, 导通很简单, 只须门极加一触发脉冲即可导通; 但关断须采用下面两种常用方法:

(1) 利用电容器充放电来关断晶闸管, 见图3-11-40。图中的 R 、 C 是用来关断晶闸管的。当 V_1 触发导通时, 负载电流 I 流经负载 R_L 和 V_1 。同时 E 通过 R 向电容 C 充电, 充电方向见图3-11-40。要使 V_1 关断, 只需要把 V_2 触发导通, 这时 C 上电压通过 V_2 放电而反向加在 V_1 上, 使之迅速关断。图中 R 应选得足够大, 使 $\frac{E}{R}$ 小于 V_2 的维持电流, 以保证在 V_1 关断后, V_2 能自动关断。

(2) 利用电感的反电动势来关断晶闸管, 见图3-11-41。在工作时, 晶闸管 V_1 导通, V_2 不导通, 负载电流 I 经 V_1 、电感 L_1 流入负载 R_L , 同时另一电流又对电容 C 充电, 充电的电压接近 E , 方向见图3-11-41。如要关断 V_1 , 只需将 V_2 导通, 电容 C 即对电感 L_2 经 V_2



放电(放电方向如图中虚线箭头所示),于是在 L 上产生一个与电源 E 方向相反,大小近似为 $2E$ 的感应电动势,迫使 V_1 关断。 V_1 关断后, V_2 也随之关断。

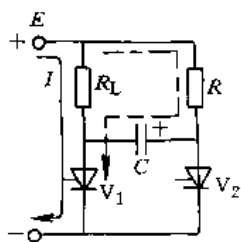


图 3-11-40 直流无触点开关

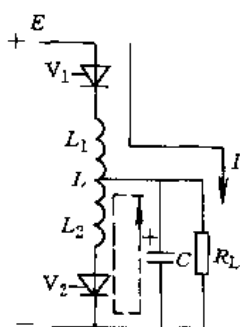


图 3-11-41 直流无触点开关

7.4 直流斩波器

直流斩波器实质上就是直流开关,它主要用于调节直流电压,又称直流调压器。它关断晶闸管是利用电容器放电的方法。图 3-11-42 是小功率直流电动机采用直流斩波器的调速电路。称 T 为斩波器的斩波周期, K ($0 < K < 1$) 为导通比,改变晶闸管 V_1 、 V_2 的导通时间比例,就可以改变电动机上的平均电压 U_0 ,从而改变了电动机转速。当负载回路电感较大时,须加续流二极管改善关断条件。这种直流斩波器的主要缺点是 R_b 要消耗能量,故只适用小功率调节直流电压场合。大功率可采用图 3-11-43 的直流斩波器。它的工作原理是:先触发 V_2 导通,电容 C 由电源经 V_2 与负载成回路充电,电流方向如实线所示,电容器上电压极性为上正下负。充电后,电流减小, V_2 自行关断。随后触发 V_1 导通,负载得到工作电流。同时, C 经 V_1 、 L_1 、 V_3 形成谐振放电,电流如虚线所示。由于谐振作用,电容被充成下正上负的电压极性,然而因二极管 V_3 阻挡,电容电压被保留。此后再触发 V_2 导通, C 经 V_2 逆向 V_1 放电,使 V_1 关断,电容电压又被充成上正下负,经一定时间间隔,再触发 V_1 ,重复上述过程。只要改变导通比 K ,负载上就得到间断时间不同的脉冲状直

流电压,即可获得可调的直流平均电压。

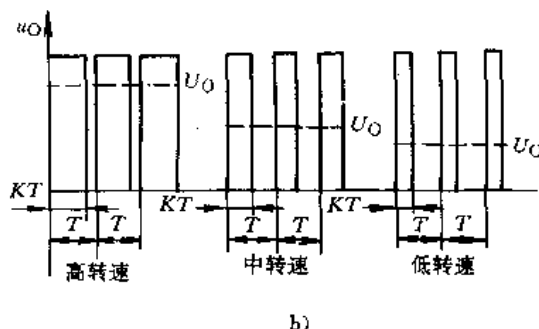
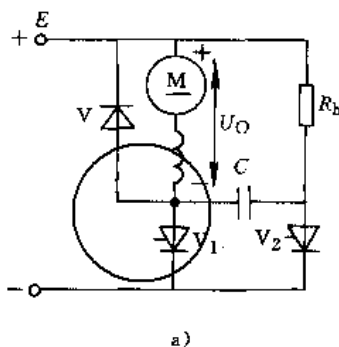


图 3-11-42 直流电动机调速用直流斩波器
a) 电路 b) 脉冲宽度与转速关系

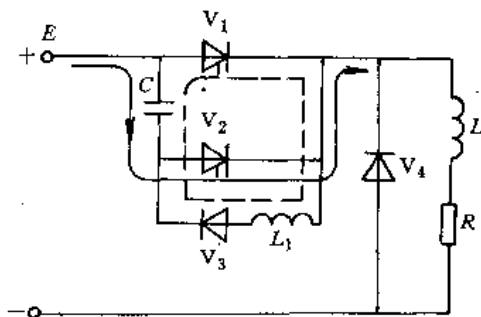


图 3-11-43 非对称式直流斩波器

8 晶闸管的串并联和保护

8.1 晶闸管的串联和均压

当晶闸管(以下简称元件)允许的断态重复峰值电压 U_{DRM} 和反向重复峰值电压 U_{RRM} 的数值小于实际需要时,可以采用元件串联(图 3-11-44)。由于各元件的反向漏电流、结电容、反向恢复时间以及正向压降等特性有差异,使串联元件承受电压分配不均。因而应该尽量选用特性相近的同一规格的元件串联,并采用并联电阻 R_F 来达到均压。均压电阻应慎重挑选,以免由于均压电阻损坏而击穿元件。

此星公司制作 请尊重作者版权



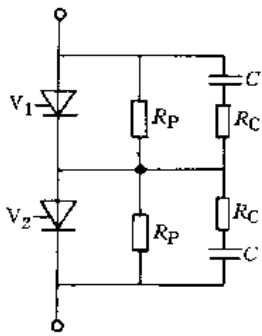


图 3-11-44 串联和均压

由于各元件的触发特性有差异而使导通时间有不同,各元件结内储藏载流子数目不等,而使关断时间不同引起换向过程瞬态电压分配不均匀,因此还须在元件两端并联 C 和 R_C 。利用电容器两端电压不能突变的特点获得瞬态电压均匀分配。

8.2 晶闸管的并联和均流

当元件的正向通态平均电流 $I_{V(AV)}$ 小于负载电流时,必须采用晶闸管的并联连接。但由于元件特性有差异,使并联的元件电流分配不一。因此,除了尽量采用同一规格的元件并联外,还须采用均流措施。均流方法一般有:

- (1) 采用串联电阻 R_S , 见图 3-11-45a。 R_S 愈大电流分配愈均匀,但电能损耗也增大。
- (2) 采用串联空心电抗器 L_S , 见图 3-11-45b, 也有良好的均流效果。

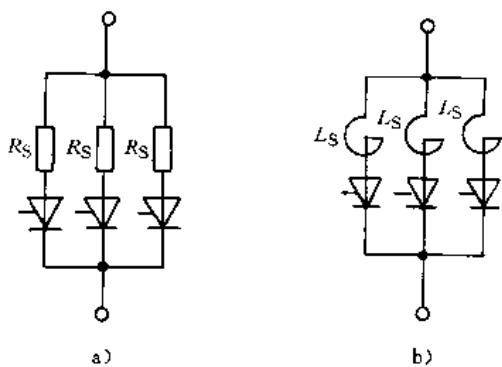


图 3-11-45 并联和均流

(3) 采用均流电抗器 L_b , 见图 3-11-46。电路中的电抗器使二个需平衡的电流在铁心中产生的磁动势方向相反。当电流不平衡时,其剩余磁动势的磁通在绕组中产生附加电动势,使电流分配趋于平衡。此均流作用较强,但当并联支路数很多时,线路配置复杂,因此多

半用在小容量的装置中。

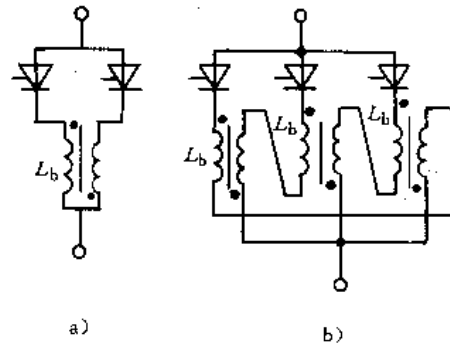


图 3-11-46 均流电抗器

8.3 晶闸管的过电流保护

发生过电流的原因,有负荷过载,整流装置直流侧短路,元件本身短路等。而晶闸管热容量低,过载能力差,当过载时其温度急剧增加,甚至导致 P-N 结层烧坏。为了使元件能长期可靠地运行,必须采用快速动作的保护电器。一般采用快速熔断器作短路保护,用快速过电流继电器和快速开关作过电流保护。

8.4 晶闸管的过电压保护

引起过电压的原因,主要是系统中感性负载电路开闭,快速熔断器熔断,电源电压的波动和闪电雷击等。保护元件免受过电压冲击,其实质就是减低加在元件上的电磁能量和降低能量消散的速度。过电压保护方法有多种。最常用的方法是阻容吸收装置或硒堆吸收装置。通常在整流变压器次级或直流输出端接这种保护装置。大容量整流器最好在整流变压器初级也接入阻容吸收装置,见图 3-11-47。阻容串联保护的原理是基于电容器两端电压不能突变,过电压时,必先对电容器充电,从而使过电压的能量被吸收。但由于电容器容量的限制,不能吸收象雷击而引起的过电压。对于雷击等过电压可采用硒堆吸收装置(把硒整流器对接),一般接在变压器次级(图 3-11-47 中 V_1 、 V_2)。它的保护原理是基于在过电压时,硒堆首先被击穿,抑制了过电压的冲击值,当过电压消失后,硒堆又恢复阻断状态。在直流侧接入硒堆保护时,为防止硒堆经常击穿损坏,以致可控整流器短路,可再加熔断器 FU,见图 3-11-47。

为了防止晶闸管在承受换向电压时产生过电压而损坏,一般在元件的阳极和阴极间并联电容电阻加以保护,见图 3-11-48。

在大功率有源逆变装置中,通常在每个桥臂中串



联一个约数十微亨的电抗器，可以有效地限制元件所承受的电压上升率和电流上升率。

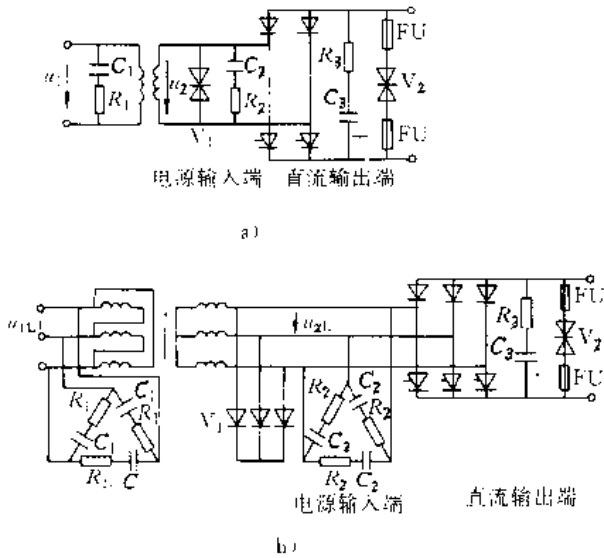


图 3-11-47 可控整流电路操作过电压保护装置

a) 单相 b) 三相

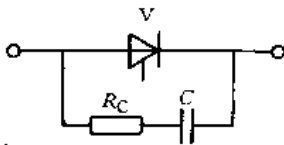


图 3-11-48 换向过电压保护

参考文献

[1] 清华大学电子学教研组编,童诗白主编.模拟电子技术基础:高等学校教材.第2版.北京:高等教育出版社,1988

[2] 华中工学院电子学教研室编,康华光主编.电子技术基础 模拟部分:高等学校教材.第3版.北京:高等教育出版社,1988

[3] 西安交通大学电子学教研室编,沈尚贤主编.电子技术导论 上册:高等学校教材.北京:高等教育出版社,1985

[4] 中国大百科全书总编辑委员会《电子学与计算机》编辑委员会.中国大百科全书 电子学与计算机 I, I.北京,上海:中国大百科全书出版社,1986

[5] 王文秀,龙开源编.电子元器件.北京:人民邮电出版社,1985

[6] 罗初东,凌耀基,谢国贤等编.现代实用电子技术

手册.广州:广东科技出版社,1990

[7] Charles Belove. Handbook of Modern Electronics and Electrical Engineering. New York: John Wiley & Sons, Inc, 1986

[8] 张为佐编著.新型电力半导体器件原理及应用.北京:机械工业出版社,1982

[9] 马鹤亭等编著.电力电子器件:高等学校教学用书.杭州:浙江大学出版社,1987

[10] 顾廉楚主编.电力半导体器件原理.北京:机械工业出版社,1988. 电力电子技术丛书

[11] 电力电子技术.机电部西安电力电子技术研究所,中国电工技术学会电力电子学会主办.西安:电力电子技术编辑部编辑出版,1990.1, 1990.4, 1992.4. 季刊

[12] 国外电力电子技术:机电部西安电力电子技术研究所主办.中国电工技术学会电力电子学会出版,1992.1~4. 季刊

[13] 中国大百科全书总编辑委员会,《电工》编辑委员会.中国大百科全书 电工.北京,上海:中国大百科全书出版社,1992

[14] David A. Bell. Electronic Devices and Circuits : Third Edition. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall, 1986

[15] R. J. Maddock & D. M. Calcutt. Electronics a Course for Engineers. New York: John Wiley & Sons, Inc, 1988. Beijing: World Publishing Corporation, 1989

[16] 潘天明编著.半导体光电器件及其应用.北京:冶金工业出版社,1985

[17] 李隆宝编.实用电子器件和电路简明手册.北京:电子工业出版社,1991

[18] 彭国贤编.数码显示.北京:电子工业出版社, 1987

[19] 彭国贤编著.显示技术与显示器件.北京:人民邮电出版社,1981. 电信技术普及丛书

[20] 余理富,孙茂印,陈楚材编著.计算机图形显示原理(硬件).长沙:国防科技大学出版社,1991

[21] 清华大学电子学教研组编,阎石主编.数字电子技术基础:高等学校教材.第3版.北京:高等教育出版社,1989

[22] F F Mazda. Electronics Engineer's Reference Book, Sixth Edition. Bishop's Stortford, 1989

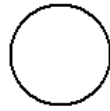
[23] M. S. Ghauri. Electronics Devices and Circuits

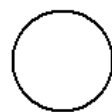


- Discrete and Integrated. Holt, Rinehat and Winston; CBS College Publishing, 1985
- [24] Bernard Grob. Electronic Circuits and Applications. New York; McGraw-Hill Book Company, 1982
- [25] 丁钟琦, 王照明. 低频电路与音响的原理和设计. 长沙: 湖南科学技术出版社, 1986
- [26] 中国集成电路大全编写委员会编, 赵保经主编. 集成运算放大器. 北京: 国防工业出版社, 1985
- [27] 电子工程手册编委会, 集成电路手册分编委会编. 标准集成电路数据手册 运算放大器. 北京: 电子工业出版社, 1991
- [28] 谈文心, 刘本鸿编. 运放及模拟集成电路. 北京: 国防工业出版社, 1986
- [29] 电子工程手册编委会, 集成电路手册分编委会编. 标准集成电路数据手册 音响电路. 北京: 电子工业出版社, 1991
- [30] 中国集成电路大全编写委员会编, 赵保经主编. 集成稳压器与非线性模拟集成电路. 北京: 国防工业出版社, 1989
- [31] Charles L. Alley, Kenneth W. Atwood. Microelectronics. New Jersey; Prentice-Hall, 1986
- [32] 张厥盛等编. 锁相技术: 高等学校教材. 西安: 西北电讯工程学院出版社, 1986
- [33] 睦法川编. 锁相与频率合成. 北京: 国防工业出版社, 1988
- [34] 陆跃编. 开关电容网络. 成都: 电子科技大学出版社, 1989
- [35] 李兰友编. 开关电容网络. 北京: 电子工业出版社, 1985
- [36] 孔有林编著. 集成运算放大器及其应用(修订本). 北京: 人民邮电出版社, 1988
- [37] Sidney Soclof. Applications of Analog Integrated Circuits. New Jersey; Prentice-Hall, Inc, 1985
- [38] [日]荒木庸夫著. 电磁干扰和防止措施. 宋水林译. 北京: 计量出版社, 1985
- [39] 陈秀中主编. 模拟集成电路的应用. 北京: 高等教育出版社, 1988
- [40] 西安交通大学电子学教研室编, 沈尚贤主编. 电子技术导论 下册: 高等学校教材. 北京: 高等教育出版社, 1986
- [41] Arthur H. Seidman. Integrated Circuits Applications Handbook. New York; John Wiley & Sons, Inc, 1983
- [42] 华中工学院电子学教研室编, 康华光主编. 电子技术基础 数字部分: 高等学校教材. 第3版. 北京: 高等教育出版社, 1988
- [43] 浙江大学电子学教研室编. 数字电子技术基本教程: 高等学校教学用书. 杭州: 浙江大学出版社, 1989
- [44] 朱承高主编. 电工及电子技术手册. 北京: 高等教育出版社, 1990
- [45] 沈雷主编. CMOS 集成电路原理及应用. 北京: 光明日报出版社, 1986
- [46] 中国集成电路大全编写委员会编, 赵保经主编. 中国集成电路大全 TTL 集成电路. 北京: 国防工业出版社, 1985
- [47] 中国集成电路大全编写委员会编, 赵保经主编. 中国集成电路大全 CMOS 集成电路. 北京: 国防工业出版社, 1985
- [48] 中国集成电路大全编写委员会编, 赵保经主编. 中国集成电路大全 HTL 集成电路. 北京: 国防工业出版社, 1987
- [49] 中国集成电路大全编写委员会编. 赵保经主编. 中国集成电路大全 ECL 集成电路. 北京: 国防工业出版社, 1986
- [50] 中国集成电路大全编写委员会编. 赵保经主编. 中国集成电路大全 接口集成电路. 北京: 国防工业出版社, 1986
- [51] 电子工程手册编委会, 集成电路手册分编委会编. 中外集成电路简明速查手册 TTL、CMOS 电路. 北京: 电子工业出版社, 1991
- [52] 杨福生主编. 电子技术: 高等学校试用教材. 北京: 高等教育出版社, 1990
- [53] 浙江大学电气技术和电工学教研室编, 高维宏主编. 电路和电子技术: 高等学校教材. 北京: 高等教育出版社, 1989
- [54] Jacob Millman, Arvin Grabel. Microelectronics; Second Edition. New York; McGraw-Hill Book Company, 1988
- [55] 黄胜华, 徐佩霞编著. 现代通信原理. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1989
- [56] 冯子裘主编. 通信原理: 高等学校教材. 西安: 西北工业大学出版社, 1990



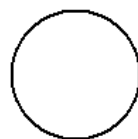
- [57] 张欲敏编. 通信电路. 北京:北京航空航天大学出版社,1990
- [58] 王秉钧,孙学军,沈保锁等编著. 现代通信系统原理. 天津:天津大学出版社,1991
- [59] 王秀玲,赵雁南,刘植楨编著. 微型计算机 A/D、D/A 转换接口技术及数据采集系统设计. 北京:清华大学出版社,1984
- [60] 张如洲编著. 微型计算机数据采集与处理. 北京:北京工业学院出版社,1987
- [61] 陈景银,徐家权编著. 集成稳压电源及其应用. 杭州:浙江大学出版社,1987
- [62] 林渭勋主编. 电力电子技术基础. 北京:机械工业出版社,1990
- [63] 林渭勋等编著. 电力电子电路. 杭州:浙江大
学出版社,1986
- [64] 赵殿甲主编. 可控硅电路. 北京:冶金工业出版社,1985
- [65] Guy Segquier. Power Electronic Converters, Technique et Documentation. Lavoisier, 1986
- [66] 唐嘉亨,龙佩芬编. 变流技术. 北京:人民交通出版社,1989
- [67] 黄俊主编. 半导体变流技术(修订本). 北京:机械工业出版社,1986
- [68] 机械工程手册电机工程手册编辑委员会编. 电机工程手册第 32 篇:电力半导体元件与变流器. 北京:机械工业出版社,1982
- [69] 张永生主编. 电力半导体电路原理. 北京:机械工业出版社,1986. 电力电子技术丛书





第4篇

电子计算机 基础



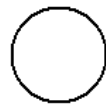
主编单位 机械工业部北京机械工业自动化研究所

编写单位 机械工业部北京机械工业自动化研究所

主 编 吴 齐

编 写 人 吴 齐 胡文琦 夏定法 来 珠
年付公 芮士滢 马秀彬 王 涛
陈传堂 陈宏亮

主 审 何志均



第 1 章 概 论^{[1][4]}

1 电子计算机的发展

电子计算机(简称计算机)的出现和发展是 20 世纪科学技术最卓越的成就之一。它是具有下列特点的一种特殊类型的计算装置:

(1) 电子的。计算机用电子脉冲的运动而不是靠内部部件的机械运动得到计算结果。电子计算机的运算速度取决于电子线路,其速度只受电的传播速度的限制。

(2) 内部存储。这是电子计算机与其他计算装置的一个重要区别。电子计算机以电子形式把数据和指令存放在记忆部件里,这就可使数据处理的速度加快并使存储控制成为可能。

(3) 程序控制操作过程。人们将需要做的工作写成一定形式的指令,为解决某一特定问题所要执行的指令序列构成一个程序。程序被放在计算机的存储器中。计算机解决不同问题的能力和效率是通过执行不同的程序来实现的。

(4) 自动的。在给出命令使计算机开始工作以后,计算机在没有人参与的情况下,其所存储的程序指挥计算机进行一系列操作。在这个意义上,计算机的工作是自动进行的。

因此,电子计算机是一个能高速进行操作,具有内部存储能力,由程序控制操作过程自动的电子计算装置。

从 1946 年美国研制出世界第一台电子计算机 ENIAC 迄今已历四代:

第一代:电子管计算机(1946~1958 年)

这一代计算机的主要特征是采用电子管组成基本逻辑电路,用磁鼓或延迟线作主存储器。结构上以中央处理器(CPU, Central Processing Unit)为中心。使用机器语言或汇编语言编制程序。主要用于科学运算。它的运算速度慢,成本高,功耗、体积大,可靠性及稳定性差。

第二代:晶体管计算机(1958~1964 年)

其主要特征是采用晶体管组成逻辑电路,以磁心存储器作为主存储器,结构上则从以 CPU 为中心改为以存储器为中心。在外部设备中开始使用磁盘。软件系

统出现了面向过程的程序设计语言如 ALGOL 语言、FORTRAN 语言和 COBOL 语言,同时在计算机上开始使用管理程序。第二代计算机体积已大大缩小,功耗降低,可靠性提高,运行速度已达到每秒几十万次至上百万次。应用范围由科学计算扩大到数据处理、自动控制、企业管理等方面。

第三代:集成电路计算机(1965~1972 年)

其主要特征是采用中小规模集成电路组成基本逻辑电路。主存储器仍以磁心存储器为主,结构上仍以存储器为中心。外部设备的种类逐步增加,各种终端迅速发展,开始与通信线路相结合。操作系统得到发展与普及,会话式语言如 BASIC 语言、APL 语言得到广泛的应用。计算机速度可以达到每秒几百万次,甚至千万次、上亿次。应用领域进一步扩大。

第四代:大规模和超大规模集成电路计算机(1972 年至今)

随着半导体技术和工艺的发展,70 年代初,集成度为几千~几万个器件,线条在 $1\mu\text{m}$ 以上的大规格集成电路(简称 LSI)用于计算机。80 年代初期又出现了超大规模集成电路(简称 VLSI)。VLSI 的集成度达到几十万到几百万个器件,线条在 $1\mu\text{m}$ 以下,它能把计算机的核心部件或整个计算机集成到一个硅片上。这一代计算机比前几代有了更快的发展,其趋势是向两端发展,即出现了运算速度超过了亿次的巨型计算机和极其灵活的微处理器及以微处理器为核心组装的微型计算机。

在这一代的硬件结构中,磁心存储器基本被淘汰,半导体存储系统普遍被使用。软件系统的飞速发展是这一代计算机的明显特征。对高级语言、操作系统、数据库、应用软件的研究越来越深入并形成了软件产业。硬件、软件很多已形成国际标准。应用软件不再依赖于硬件平台而只依赖于软件平台。全世界范围内的计算机大分化、大改组。那种一家计算机公司有自己“特色”的计算机产品的局面已不复存在。计算机和网络互连广泛被采用。集声、光、电为一体的多媒体技术已进入家庭。计算机发展的速度惊人地加快,基本上是每 2 年性能价格比增加一倍,产品的生命周期已缩短为 9~18 个月。



计算机系统每个发展阶段,都具有三个基本特征:一是达到更高的性能价格比;二是采用当前最新的工艺水平;三是为应用领域提供更有用的程序。

在向信息化社会发展的今天,计算机的高速信息处理智能化,成为当前计算机发展的目标。VLSI 微电子技术和计算机自动设计技术为新型计算机系统提供了基础。新一代计算机系统的特点是:硬件与软件,算法与结构更紧密的结合。从系统结构观点来看,当前新型系统结构发展大致有以下几个方面:

(1) 并行技术。这是提高系统性能的有效途径,但由于器件和成本的影响,并行性受到一定的限制。当前 VLSI 技术的发展,提供了由大量计算单元构成的一个系统,使实现高度并行操作成为可能。目前由几台或几十台微型机或小型机组成的分布式系统或多机系统完全可以提供到应用领域。

(2) RISC 技术。在传统的计算机指令系统中,选择使用最频繁(80%~90%)的少数几条简单指令,构成精简指令集计算机(RISC),使所有的简单指令在单周期内完成,用大量的寄存器、高速缓冲存储器,通过优化编译程序,提高处理速度。

(3) 网络化多机系统。把多台计算机彼此用传输介质互连起来,并遵守共同的协议相互进行通信就构成了网络化的多机系统。计算机网络是计算机和通信相结合的产物,它是在通信协议控制下,通过通信系统实现计算机连接的。有无协议是区别计算机网与一般计算机互联系统的标志。

网络化多机系统(从计算机网络来看)可以分为局域网(LAN)和广域网(WAN);从功能来看可以实现网络上计算机资源的共享,包括信息共享(数据、文字、图形)、设备共享、软件共享和分担负荷等。共享信息则是通过信息在网络上的传输来达到的,因此,传输速率与响应时间是网络化多机系统的重要技术指标。

(4) 多媒体计算机。多媒体计算机是一组硬件和软件设备,结合了各种视觉和听觉媒体,能够产生令人印象深刻的视听效果。在视觉上包括图形、动画、图象和文字等媒体,在听觉上则包括语言、立体音响和音乐等媒体。用户可以从多媒体计算机同时接触到各种多采多姿的媒体来源。

多媒体计算机的系统结构包括计算机软硬件系统及其外围设备,甚至其他可以通过计算机控制的视听器材皆可包括在内,其系统结构概括起来可分为八层:视频输入/输出器材、硬件与多媒体输入/输出控制板、

多媒体系统软件、多媒体构造软件、多媒体制造软件、多媒体编辑系统、多媒体播出系统和发行节目(多媒体节目的存储媒介)。一般通常讲的多媒体计算机成品是指最后两层,即播出系统和发行节目。

多媒体计算机的应用领域主要在商业简报方面如公司介绍、产品介绍、项目计划、预算说明等;教育训练方面如大中小学各科的教学、员工培训等;数据检索方面如公共数据的查询、新闻传播、电子会议;家用消费品方面如家庭医疗的查询、生活常识的获得及娱乐消遣等。

(5) 智能化技术。将知识作为处理的形式,具有问题求解和推理功能,建立各种专家系统和开发工具,生成知识库和推理机,以及具有识别自然语言、图形等形式的智能接口,构成完整的智能计算机。

(6) 神经网络技术。基于对人脑结构、智力活动控制的初步认识,用大量人工神经元为结点,按照任务需要组织起来,组成一个群体并行分布式网络系统,使其成为具有自适应、自学习、自组织、容错和自修复等特征的神经网络计算机。

2 电子计算机的分类及其应用

2.1 电子计算机的分类

1. 按计算机处理的类型分类

a. 数字计算机(Digital Computer) 数字计算机所处理的数据(以电信号表示)是离散的,称为数字量。如工厂中的生产、库存、财务等数字信息。处理之后仍以数字形式输出到打印纸上或显示在屏幕上。目前,常用的计算机大都是数字计算机。本篇所称的电子计算机(简称计算机)也是指数字计算机。

b. 模拟计算机(Analog Computer) 模拟计算机所处理的数据是连续的,称为模拟量。以电信号的幅值模拟其数值或某物理量的大小,如温度、压力、流量、液面等都是模拟量。能接受模拟数据,经处理后,仍以连续的数据输出,这种计算机称为模拟计算机。一般来说,模拟计算机不如数字计算机精确。模拟计算机常以绘图或量表的形式输出。

c. 混合计算机(Hybrid Computer) 这种计算机兼有数字和模拟两种计算机的功能。能接受如体温、血压等一类的模拟量,而输出有意义的(如能描述症状)数字量,这样的计算机就是混合计算机。

2. 按计算机的用途分类

a. 通用计算机(General Purpose Computer) 能



适用于一般科学运算、实时控制、数据处理等广泛用途的计算机。通常所说的计算机均是指通用计算机。本篇所称计算机也是指通用计算机。

b. 专用计算机 (Special Purpose Computer) 这是为适应某种特殊应用而专门设计的计算机, 其运行程序不变, 效率较高, 速度较快, 精度较好, 但不宜作它用。如飞机的自动控制、导航; 坦克上的火控系统用的计算机都是专用计算机。

3. 按计算机规模分类 这是最常用的分类方法。分类的依据主要是计算机的性能指标, 包括: 运算速度、存储容量 (内、外存容量)、用户数 (可同时使用计算机的人数)、字长、输入输出能力、价格和系统软件能力等。据此可分为巨型机、大型机、小型机、工作站和微型机。

a. 巨型机 是能力最强的计算机。其速度最快可达每秒几亿次, 字长最长, 存储容量巨大, 耗资亦巨大。这类计算机主要应用在气象、太空、能源、医药、军事等重要研究领域大型复杂的科学计算。如我国研制成功的运行速度达每秒 10 亿次的银河全数字巨型计算机。它标志着一个国家计算机科学的发展水平, 是国家实力的重要标志。

b. 大型机 有相当高的运算速度和大的内外存容量, 可以允许相当多的用户同时使用, 价格比巨型机便宜得多。应用范围包括科学计算、大型数据处理和大型计算机网络的主机。

c. 小型机 有高的运算速度, 比较大的内外存容量, 一般可供几十个至上百个用户同时使用, 有丰富的系统软件。应用范围更加广泛, 包括科学计算、数据处理、实时控制以及各种业务领域中的信息管理系统。

d. 工作站 工作站是以个人计算机环境和分布式网络环境为前提的高性能计算机。这就是说工作站为个人用户使用计算机创造了一个尽可能舒适的工作环境, 一般为单用户桌上台式。每台工作站具有一个节点号, 意味着它是分布式网络中的一个节点。工作站具有高性能的指标, 无论从字长、速度、处理能力、图形功能均比微型计算机高出至少一个数量级。其网络服务器可达到小型机的水平。从用途划分, 工作站可分为通用工作站、办公工作站、工程工作站和人工智能工作站。以工程工作站为例, 它一般具有高性能的处理器、高速浮点运算器、大容量主存、高分辨力显示器、高速图形板、专用输入/输出设备、通用操作系统、丰富的支撑软件。

e. 微型计算机 微型计算机也称个人计算机即

PC。它是以通用的、可以大规模生产的微处理器为核心组成的计算机。因此价格十分低廉。常见的有台式的和便携式的。微型计算机的主要应用对象是家庭。当经过可靠性“加固”后, 它也可以应用到工业中, 称为工业 PC。由于微型计算机的通用和廉价, 因此用途十分广泛。每年的生产数量巨大。

由于计算机性能日新月异, 上述划分标准正在逐渐失去意义。过去认为是大型机 (或中型机) 的, 现在在某些指标方面可能还不如高档微机。例如 Pentium 微机的芯片集成了 310 万只晶体管, 主频达 75~200MHz, 其性能已远远超过 IBM4300 等中大型机了。

2.2 电子计算机的应用

计算机已无孔不入地渗透到所有的应用领域。从工业、农业、商业、医药、机关事务、辅助教学甚至日常生活和家庭, 几乎找不到不用计算机的地方。

按照计算机处理信息的特点, 计算机应用一般可以分为两大类——数值计算和非数值应用。现在非数值应用范围已远远超过数值计算。归纳起来, 计算机的应用领域大致有如下几个方面:

1. 科学计算 在科学技术和工程设计中, 存在着大量的类型繁多的科学计算问题, 这些问题往往极其复杂, 工作量相当大, 精度和时间性要求高, 如大型水坝的应力分析、卫星轨道的计算、天气预报等等。在电子计算机出现之前, 由于使用的计算工具速度很慢, 一些复杂的科学和工程问题的计算无法在短期内得到精确解或者根本不可能进行计算, 使理论失去指导实践的意义。应用电子计算机对科学、工程问题进行计算, 速度快, 精度高, 节省了大量的人力、物力与时间, 并得到较理想的结果。数值计算一直是计算机应用的一个重要方面。

2. 数据 (信息) 处理 电子计算机应用最广泛的领域是数据处理。所谓数据处理是指用计算机处理生产、经营活动、社会和科学研究中获得的大量信息, 例如企业信息系统中的生产统计、计划制定、库存管理、财务会计、市场销售等; 人口信息系统中数据的收集、转换、分类、统计、处理、存储、传输和输出报表等。数据处理是一切信息管理、辅助决策的基础。管理信息系统 (MIS)、决策支持系统 (DSS)、专家系统 (ES) 以及办公自动化系统 (OA) 都需要数据处理的支持。

计算机在数据处理方面的应用, 使人们从大量繁琐的数据统计与管理事务中解放出来, 提高了管理水平, 使信息产生更大的效益。



3. 自动控制 计算机在工业控制和测量方面的应用十分成熟和广泛,如大型化工企业自动采集工艺参数进行检测、比较以控制工艺流程;大型冶金企业的高炉炼铁控制、钢材轧机控制;30万吨合成氨装置巡回检测和显示打印制表;数控机床控制;电炉温度闭环控制;国防工业中的导弹检测和控制、坦克大炮控制、飞机和舰艇的分布控制系统等等。微机的出现为实时控制开辟了更为广泛的应用领域,特别是单片机的应用,它代替了仪器仪表的功能,具有可编程、数据处理和对外接口的能力。仪器仪表智能化使工业自动化推进到新的水平,例如智能仪表通过通用接口总线直接和自动测试、自动控制系统联结,实现系统的遥测遥控。

4. 联机检索 计算机及通讯网络将全国性的业务联成一个有机整体,以供全国以至全世界检索和调用。例如民航售票系统,全市以至全国联成网络,在任何一个售票点可以预订某一日某一航班的机票;银行系统联成全市或全国性的网络,实现同类银行联机办理取、存款业务,办理清算业务,从而方便储户,提高清算速度,加快资金周转;旅游系统把全市乃至全国同一旅行社的旅馆联网,可联机办理客户预订,甚至还可与交通系统联网,实现自动订票业务;情报检索系统,通过卫星查阅国外某图书馆的图书资料;全球范围的商业系统,通过计算机网络实现电子邮政和无纸贸易。军事系统、公安系统、天气情报系统、铁路、交通、航海等系统都可以使用计算机网络进行信息交换与传递。

5. 计算机辅助设计和辅助制造 计算机辅助设计(CAD, Computer Aided Design)和计算机辅助制造(CAM, Computer Aided Manufacturing)是计算机很重要的应用领域。

CAD是指用计算机辅助实现产品的设计。包括把设计方案自动地变为生产图纸,进行结构分析和优化设计,实现产品制造之前的动态仿真等功能。

CAM是利用CAD的输出信息控制、指挥生产和装配产品,如用数控技术控制车床进行精密切削。

CAD/CAM广泛地用于航空航天、机械、电子轻工(服装、鞋)等行业,大大提高了设计的自动化水平,缩短了产品的设计制造周期,提高了产品的质量。

6. 办公业务自动化(OA, Office Automation)

办公业务自动化日益广泛地应用于政府部门和企业业的管理部门,这是因为传统的办公方式已无法应付今天的信息爆炸。OA主要是利用计算机及其网络和先

进的办公设备(复印机、传真机、扫描器、轻印刷系统等)对办公信息进行加工、复制、储存、检索和维护。在OA中计算机和网络是核心,它支持一切办公业务,如制定和管理日程,通过网络实现电子邮件,举行电子办公会议,办公文档的管理,公文的收、发、传管理,文字处理,统计报表的自动生成等。

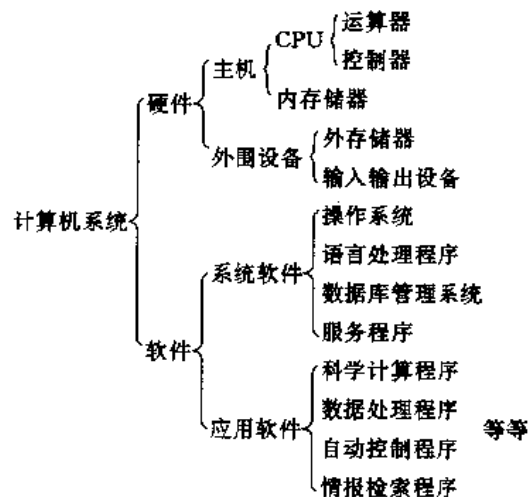
除上述主要应用领域外,计算机还在辅助测试(CAT, Computer Aided Test)和计算机辅助教学(CAI, Computer Aided Instruction)、模式识别、人工智能等方面也有广泛的应用。

3 电子计算机的基本组成

一个完整的计算机(或计算机系统)包括计算机硬件(Hardware)和计算机软件(Software)两大部分。两者互相依存,缺一不可。

计算机硬件是指构成计算机所有物理部件的集合。通常这些部件是由电子元器件、机械零部件等物理部件组成的,是“硬”设备,故称计算机硬件。而计算机软件则是在计算机中存储和运行的程序以及它们的文档总和。计算机运行程序才能使计算机“动”起来,完成计算机一个特定的应用(例如解题、控制或处理)。计算机程序在计算机运行时是看不见摸不到的,相对于硬件而言称为软件。

计算机系统构成如下表所示。



3.1 电子计算机硬件

3.1.1 冯·诺依曼计算机的结构

1946年6月美国数学家冯·诺依曼发表了《关于电子计算机逻辑设计的初步探讨》一文,提出了一个全



新的存储程序通用电子计算机方案 EDVAC (Electronic Discrete Variable Automatic Computer)。这个方案明确提出了计算机的硬件由五大部分组成,即:运算器、控制器、存储器、输入设备和输出设备,并提出采用二进制和存储程序。近50年来,计算机虽经历了四代,但计算机的硬件结构并没有发生变化,还是由冯·诺依曼所提出的五大部分组成。因此,截止到现在,电子计算机还被称为冯·诺依曼型计算机。

冯·诺依曼计算机的硬件组成,如图4-1-1所示。

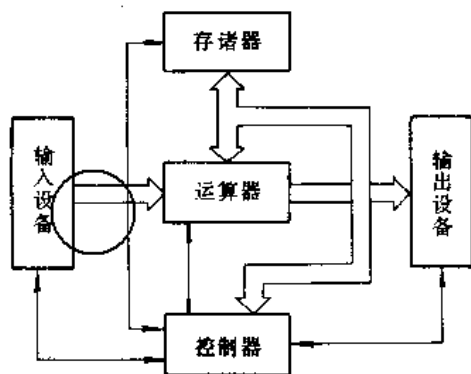


图 4-1-1 冯·诺依曼计算机的基本组成

其中运算器和控制器合称 CPU (Central Processing Unit) 即“中央处理器”。这是硬件的核心,承担计算机的运算和控制任务。存储器分主(内)存储器和辅(外)存储器。CPU 与主存储器合称为主机(Main Machine)。主存储器由记忆单元组成,存放数据、中间结果和运算命令。输入设备和输出设备总称外部设备,简称外设。输入设备用于输入原始数据和控制命令,输出设备用于输出运行结果。

图 4-1-1 中各部件的逻辑联结是通过两股信息流实现的。宽的代表数据流,窄的代表指令流。数据由输入设备输入至运算器,再存储于存储器中。在运算时,数据从存储器送入到运算器中进行运算,运算的结果再存入存储器,或者由运算器经输出设备输出。指令通过输入设备也以数据代码的形式存储于存储器中,运算时,指令由存储器送入控制器,由控制器控制各部件的工作。

3.1.2 总线结构的类型

五大部件的物理联结是通过总线(BUS)来实现的。所谓总线实际上是一条由并行导线组成的宽平线。并行导线的数目和计算机字长相同,数据和指令都是

通过总线传输的。从总线的形式看有以下三种:

1. 以 CPU 为中心的双总线结构 图 4-1-2 是以 CPU 为中心的双总线结构。

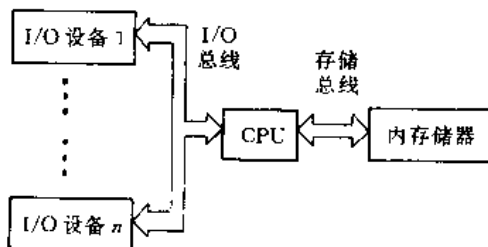


图 4-1-2 以 CPU 为中心的双总线结构

一条称为输入输出(I/O)总线,通过它把 CPU 和输入输出设备联系起来;另一条称为存储总线,是 CPU 和存储器之间的联结线。因为从存储器中输出数据到输出设备和从输入设备读入数据送入存储器都必须经过 CPU 的运算器,而运算器一般速度较高, I/O 设备的输入输出速度很低,因此这种结构会占用大量的运算器时间,大大影响了运算器的工作效率,其处理效率不高。

2. 以内存器为中心的双总线结构 为了把输入输出与 CPU 分开以提高运算器的效率,图 4-1-3 将存储器和 CPU 的位置与图 4-1-2 中的位置进行对换,这种结构 I/O 设备直接通过 I/O 总线和内存器传输数据而不通过 CPU 的运算器,从而提高了存取效率。70 年代以来的计算机基本上都是采用了这种总线方式。

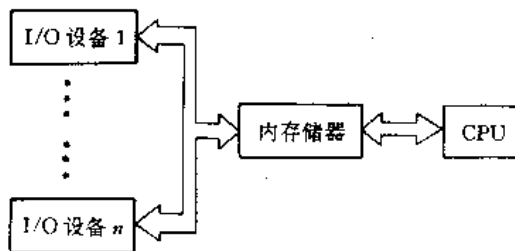


图 4-1-3 以内存器为中心的双总线结构

3. 单总线结构 除双总线结构之外,还有一种单总线结构。即总线只有一条,如图 4-1-4 所示。它将 I/O 设备、CPU、内存器、外存储器(磁盘、磁带等)联在一条总线上。单总线结构简单、增减设备方便。大多数微机采用这种方案。



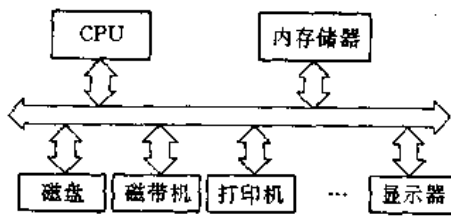


图 4-1-4 单总线结构

3.2 电子计算机软件

计算机软件通常分为系统软件和应用软件两大类。

1. 系统软件 系统软件是处于计算机硬件和应用软件之间的软件。它具有计算机各种应用所需的全部通用功能。但由于计算机技术发展很快,系统软件与应用软件的界限往往不十分清楚。一般说来,计算机系统软件是指包含具有下列功能的程序:

- (1) 高效使用硬件功能的程序;
- (2) 提供各种应用的通用服务功能的程序;
- (3) 与其他计算机或设备进行通信时,控制通信处理的程序;
- (4) 保护数据和程序等信息,支持计算机系统正确、安全运行的程序;
- (5) 支持计算机系统预防故障,处理异常的程序;
- (6) 提供软件环境,提高软件编制效率的程序;
- (7) 使计算机系统操作高效、简便的支持程序。

具体地讲,系统软件主要包括以下几种类别:

a. **操作系统** 其核心功能是对作业、任务、资源及故障处理等进行管理和控制。

b. **语言处理程序** 其作用是将程序设计语言书写的源程序翻译成机器语言程序,主要包括汇编程序、编译程序和解释程序。

c. **数据库管理系统** 它是将各种文件、数据统一管理,使其内容规范化、结构化,达到统一使用的目的。其功能包括控制和管理数据库的建立、检索、更新和故障的处理等。

d. **服务程序** 它的作用是为源程序的执行和大量数据操作提供服务功能,如连接编辑程序、输入编辑程序和合并分类程序等。

e. **软件编程支持程序** 它是为提高软件编制效率和质量而开发的程序。其中有多种支持程序与软件开发过程中各个阶段相对应,如系统分析工具、软件测试程序等。

f. **通信程序** 主要指对通信网络间的通信规程进行处理并进行通信故障检出和网络运行控制。

2. 应用软件 应用软件是计算机所有应用程序的总称。应用软件可分为两类,一类是不分业务、行业而可以公用的软件;另一类是按业务、行业分类的应用软件。

a. **公用应用软件** 公用应用软件可以分为以下几组:

- (1) 数据处理类软件,如数值分析、统计分析及模拟处理的程序等;
- (2) 进行声音、图形、图像、文献等信息处理的程序;
- (3) 进行各种有用信息的检索处理的程序;
- (4) 关于自然语言、模式识别、专家系统等人工智能方面的应用程序;
- (5) 计算机辅助设计与制造、计算机辅助教学、计算机辅助分析以及决策支持系统等方面的通用程序。

b. **按行业、业务分类的应用软件** 这种软件专业性很强,有的仅可用于某一行业或业务领域如 MRP I 软件,财务软件、注塑模设计软件等等。

当然,软件分类并不是固定不变的,分类形式也多种多样。系统软件、应用软件的区分有时也相当灵活,尤其是系统软件与公共应用软件更难区别。

4 计算机的性能指标

如何评价一台计算机的性能是一个复杂的问题。随着计算机的发展,评价指标有各种各样。这里我们提出以下几项常用的基本的评价指标:

a. **主频(时钟周期)** 主频是计算机的重要指标之一,它在很大程度上决定了运算速度。主频的单位是 MHz。现在 Intel 的 80486 芯片已达 66~100MHz, 80586 已达 75~200MHz。

b. **字长** 字长以二进制位为单位。字长愈长,运算精度愈高,寻址范围愈大。现在大多数微机字长在 32 位,工作站及中大型机一般为 48 位或 64 位。

c. **运算速度** 运算速度的单位是每秒百万次指令数,以 MIPS 表示。现在高档微机的运算速度已达 30~50MIPS。

d. **系统可靠性** 系统可靠性的指标是以平均无故障时间 MTBF 表示。若 t_i 是第 i 次无故障间隔时间, N 为故障次数,则



$$MTBF = \sum_{i=1}^N t_i / N$$

显然, MTBF 愈大愈好。

e. 系统可维护性 系统可维护性的含义是发生故障后能尽快恢复正常。因此可用平均修复时间 MTTR 衡量

若 T_i 为第 i 次故障至投入运行的时间, M 为总修复次数, 则

$$MTTR = \sum_{i=1}^M T_i / M$$

当然, MTTR 愈小愈好。

f. 开放性 开放性是指计算机系统的软硬件采用已实际使用的国际标准的程度。程度愈高, 则开放性

愈好。如总线标准、接口标准、网络标准是否是国际标准。有些虽然还没有统一的标准, 但由于应用的广泛性, 事实上已形成了实际上的“国际标准”也应予以重视, 如操作系统、数据库等系统软件的选择。

开放性愈好, 愈能够保护用户的软硬件投资, 在计算机高速发展的今天尤为重要。

g. 性能/价格比 这里讲的性能是指综合性能, 包括硬件性能、软件性能、使用性能等。而价格也不只是考虑硬件价格, 还包括软件价格。

除了上述评价指标以外, 在具体选型时还应考虑汉字处理能力、联网能力、公司的信誉、R&D 的投入和维修服务能力等因素。

第2章 数的表示和运算规则

1 数和数制

计算机机内采用二进制记数法。在书写时, 为了方便也可使用八进制或十六进制记数法。

1. 二进制记数法 一个二进制所表示的实际值 X_2 按如下公式计算:

$$X_2 = \sum_{i=-n}^m K_i \times 2^i \quad (4-2-1)$$

式中 n ——整数部分的位数;

m ——小数部分的位数;

K_i ——第 i 位上的数字符号;

对二进制取值 0 或 1;

对八进制取值 0~7 中之一;

对十六进制取值 0~15 中之一。

例如 $(101)_2 = 1 \times 2^2 + 0 \times 2^1 + 1 \times 2^0 = (5)_{10}$

式中 $(101)_2$ 表示二进制数 101, $(5)_{10}$ 表示十进制数 5。就是说, 二进制的 101 表示的值为十进制的 5。

2. 八进制记数法 一个八进制数所表示的实际值 X_8 按如下公式计算:

$$X_8 = \sum_{i=-n}^m K_i \times 8^i \quad (4-2-2)$$

此处的 K_i 只能取 0 到 7 中的一个数字。例如:

$(370)_8 = 3 \times 8^2 + 7 \times 8^1 + 0 \times 8^0 = (248)_{10}$

表明八进制的 370, 其值等于十进制的 248。

3. 十六进制记数法 一个十六进制的数的实际

值 X_{16} 按如下公式计算:

$$X_{16} = \sum_{i=-n}^m K_i \times 16^i \quad (4-2-3)$$

此处的 K_i 取 0 到 9 和 A 到 F 这 16 个数字中的任何一个, 在换算中 A 到 F 分别用 10 到 15 代替。例如:

$(3FF)_{16} = 3 \times 16^2 + 15 \times 16^1 + 15 \times 16^0 = (1023)_{10}$

表明十六进制的 3FF, 其值等于十进制的 1023。

2 数制间的转换

1. 十进制和二进制之间的转换 由二进制转换成十进制数, 是借用式 (4-2-1) 完成的。在转换过程中, 每一位的位数都选用了十进制表示的值, 完成求和操作的是十进制的运算规则, 故得到的是十进制表示的转换结果。同理用式 (4-2-2) 和式 (4-2-3) 可以实现八和十六进制数值向十进制的转换过程。

顺便指出, 在对位数较多的二进制向十进制转换时, 人们更喜欢借助八进制或十六进制完成这一转换过程。

对十进制到二进制的转换, 通常要区分整数的整数部分和小数部分。

对整数部分, 采用除 2 取余法, 规则是:

(1) 用 2 去除十进制整数部分, 取其除数即为转换后的二进制数的整数最低位数字;

(2) 再用 2 去除所得的商, 取其除数为转换后的二进制数高一位的数字;



(3) 重复执行第2步操作，直到商为0结束转换过程。

例如：把十进制数75转换成二进制数。

```

2 | 75 ..... 1 (低位)
2 | 37 ..... 1
2 | 18 ..... 0
2 | 9 ..... 1
2 | 4 ..... 0
2 | 2 ..... 0
2 | 1 ..... 1 (高位)
0
    
```

结果 $(75)_{10} = (1001011)_2$

对小数部分，采用乘2取整法，规则是：

(1) 用2去乘十进制数的小数部分，取乘积的整数为转换后二进制小数的最高位数字；

(2) 再用2去乘上一步乘积的小数部分，再取新乘积的整数为转换后二进制小数低一位数字；

(3) 重复第二步操作，直至乘积为0，或已得到二进制小数的位数满足需要为止结束转换过程。

例如，把十进制的0.48转换成二进制小数

```

          | 0.48 × 2
(高位) 0 | 0.96 × 2
        1 | 0.92 × 2
        1 | 0.84 × 2
(低位) 1 | 0.68 × 2
          | 0.36
    
```

取其精度至四位，结果 $(0.48)_{10} = (0.0111)_2$

对既有整数又有小数的十进制数，可先转换其整数，再转换其小数，再把两部分结果合起来，就得到了转换后的最终结果。

参照上述方法，也可以实现十到八进制、十到十六进制的转换过程。

2. 二进制、八进制和十六进制数之间的转换 这三种进制表示的数据之间的转换是十分方便的，因为每三个二进制位正好对应一个八进制位，每四个二进制位对应一个十六进制位。下面给出一组基本的对应关系（见表4-2-1）。

把二进制数转换成八进制或十六进制表示形式，对每三位或每四位二进制进行分组时，应保证小数点所在位置分别向左和右进行划分，若小数点左侧（整数）的位数不是3或4的整数位，可以按在数的最左侧补零的方法处理，对小数点右侧（小数），按在数的最右侧补零的方法处理。

表 4-2-1 各种进制数的对应关系

| 二进制数 | 八进制数 | 十六进制数 | 十进制数 |
|------|------|-------|------|
| 0000 | 00 | 0 | 0 |
| 0001 | 01 | 1 | 1 |
| 0010 | 02 | 2 | 2 |
| 0011 | 03 | 3 | 3 |
| 0100 | 04 | 4 | 4 |
| 0101 | 05 | 5 | 5 |
| 0110 | 06 | 6 | 6 |
| 0111 | 07 | 7 | 7 |
| 1000 | 10 | 8 | 8 |
| 1001 | 11 | 9 | 9 |
| 1010 | 12 | A | 10 |
| 1011 | 13 | B | 11 |
| 1100 | 14 | C | 12 |
| 1101 | 15 | D | 13 |
| 1110 | 16 | E | 14 |
| 1111 | 17 | F | 15 |

例如 $(10.101)_2 = (010.101)_2 = (0010.1010)_2 = (2.5)_8 = (2.A)_{16}$

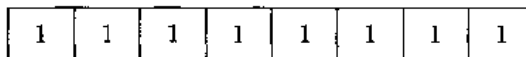
八和十六进制之间的转换，经过二进制的中间结果是十分方便的。

3 机器数和字长

数在机器中的表示形式称为机器数。表示机器数所需要的寄存器位数便是机器数字长。字长取决于构成寄存器的触发器的数目。计算机中字长有8位、16位、32位、64位等。对8位字长，通常又叫一个字节。现在机器的字长大多是字节的整数倍。

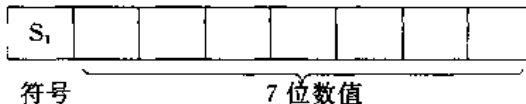
机器数的特点是：

(1) 机器数能表示的数和范围受到字长的限制。例如，字长为8位时，所能表示的无符号整数的最大值是8位全1，即 $(255)_{10}$ 。



运算时，若数值超过机器数能表示的范围，就停止运算，此情况称为“溢出”。

(2) 数的符号位数值化。规定用0表示正号；1表示负号。即在机器数中要占去一位，数值表示的范围就要减小。例如，用8位表示一个有理数，可表示的最大数为 $(01111111)_2$ ，即有理数为 $+ (127)_{10}$ 。



符号 7位数值



(3) 小数点要有约定的位置, 这是在设计机器时要加以规定的。若小数规定在最低位右边, 为定点纯整数; 若规定在最高位左边, 称为定点纯小数; 若小数点在数据中的位置可以左右移动, 称为浮点数。

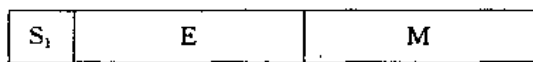
定点和浮点的格式如下:



定点纯整数



定点纯小数



浮点数

浮点数分为符号位 S₁, 阶码 E 和尾数 M。

按 IEEE 标准, 常用浮点数的格式为:

| | 符号位 位数 | 阶码 位数 | 尾数 位数 | 总位数 |
|------|-----------|----------|----------|-----|
| 短实数 | 1 | 8 | 23 | 32 |
| 长实数 | 1 | 11 | 52 | 64 |
| 临时实数 | 1 | 15 | 64 | 80 |

4 机器数的原码和补码表示

在机器数中, 数值和符号全部数值化。在数据运算时, 计算机中采用各种把符号位和数值一起编码的表示方法。最常用的是原码表示和补码表示。

原码是最简单的机器数表示法, 符号位用 0 表示正, 1 表示负, 数值写成二进制代码, 就是原码表示, 记为 [X]_原。例如:

$$X = -1010110$$

则 $[X]_{原} = 11010110$

因为用原码进行加减运算时, 控制线路非常复杂, 符号位要单独处理, 为克服原码的缺点, 人们找到了补码表示法, 记为 [X]_补。补码运算时, 符号位无需要单独处理, 可和数值一起参加运算, 作减法时, 把减法转化成加法进行运算。补码可以从原码表示直接求得。

正数的补码和原码表示一样。例如:

$$X = -1010110$$

则 $[X]_{补} = 01010110$

$$[X]_{补} = [X]_{原} = 01010110$$

负数求补码, 是对 [X]_原 除符号位外, 各位取反, 末位加 1。例如:

$$X = -1010110$$

则 $[X]_{原} = 11010110$

$$[X]_{补} = [X]_{原} = 10101001 + 1 = 10101010$$

↑
取反

5 二进制数的运算规则

在计算机内部, 一般都采用二进制实现各种算术与逻辑运算, 其规则如下。

1. 加法规则 $0+0=0, 0+1=1, 1+0=1, 1+1=0$ 并产生向高位的一次进位。

2. 减法规则 $0-0=0, 0-1=1$ 要向高位借位一次, $1-0=1, 1-1=0$ 。

3. 乘法规则 $0 \times 0=0, 0 \times 1=0, 1 \times 0=0, 1 \times 1=1$ 。

4. 除法规则 二进制除法的计算方法, 与十进制除法类似, 也由减法, 上商等操作逐步完成。

5. 逻辑“或”运算规则 (“或”运算符为 V)
 $0V0=0, 0V1=1, 1V0=1, 1V1=1$ 。

注意, 逻辑运算无进位和借位问题。

6. 逻辑“与”运算规则 (“与”运算符为 ^)
 $0 \wedge 0=0, 0 \wedge 1=0, 1 \wedge 0=0, 1 \wedge 1=1$ 。

7. 逻辑“非”运算规则 (“非”运算符为 ->)
 $->0=1, ->1=0$ 。

8. 逻辑“异或”运算规则 (“异或”运算符为 V)
 $0V0=0, 0V1=1, 1V0=1, 1V1=0$ 。

6 数字编码与字符编码

1. 数字编码 计算机输入、输出信息时要进行十进制到二进制数转换和二进制数到十进制数转换。常用二进制形式表示一位十进制数, 即十进制的二进制编码, 称为二进制编码或 BCD (Binary-Coded Decimal) 编码。

最常用的 BCD 编码是 8421 编码。它是用四位二进制数表示一位十进制数, 每一位对应的数, 分别是 8、4、2、1。四位二进制数可组合成十六种状态, 对 0 到 9 十个数字的编码只取 0000~1001 十种状态, 其余六种不用 (见表 4-2-2)。

表 4-2-2 8421 码与十进制数关系

| 十进制数 | 8421 码 | 十进制数 | 8421 码 |
|------|--------|------|--------|
| 0 | 0000 | 5 | 0101 |
| 1 | 0001 | 6 | 0110 |
| 2 | 0010 | 7 | 0111 |
| 3 | 0011 | 8 | 1000 |
| 4 | 0100 | 9 | 1001 |



还有许多二-十进制编码,其编码方法多至几十种,可分成两大类:一是有权编码,一是无权编码。8421码是最常用的,其余编码请参考有关专业书籍。

2. 字符编码 计算机中的字符,一般是用八个二进制位的编码来表示的,并且常用一个字节来保存这8个二进制位。现在用得最广泛的编码是美国标准信息交换码,简称ASCII(American Standard Code for Information Interchange)码。它规定8个二进制位的最高一位为0,余下的7位可以给出128个编码,表示128个不同的字符(见表4-2-3)。

表4-2-3 ASCII字符编码表

| b ₆ b ₅ b ₄ | 000 | 001 | 010 | 011 | 100 | 101 | 110 | 111 |
|----------------------------------------------|-----|-----------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 0 0 0 0 | NUL | DLE | SP | 0 | @ | P | , | p |
| 0 0 0 1 | SOH | DC ₁ | ! | 1 | A | Q | a | q |
| 0 0 1 0 | STX | DC ₂ | " | 2 | B | R | b | r |
| 0 0 1 1 | ETX | DC ₃ | # | 3 | C | S | c | s |
| 0 1 0 0 | EOT | DC ₄ | \$ | 4 | D | T | d | t |
| 0 1 0 1 | ENQ | NAK | % | 5 | E | U | e | u |
| 0 1 1 0 | ACK | SYN | & | 6 | F | V | f | v |
| 0 1 1 1 | BEL | ETB | ' | 7 | G | W | g | w |
| 1 0 0 0 | BS | CAN | (| 8 | H | X | h | x |
| 1 0 0 1 | HT | EM |) | 9 | I | Y | i | y |
| 1 0 1 0 | LF | SUB | * | : | J | Z | j | z |
| 1 0 1 1 | VT | ESC | + | ; | K | [| k | { |
| 1 1 0 0 | FF | FS | , | < | L | \ | l | |
| 1 1 0 1 | CR | GS | - | = | M |] | m | } |
| 1 1 1 0 | SO | RS | . | > | N | ↑ | n | ~ |
| 1 1 1 1 | SI | US | / | ? | O | — | o | DEL |

7 汉字的表示方法

从上面ASCII字符编码表可以看出,普通字符的编码值用的是0到127,当用一个字节存放一个字符时,字节最高二进位的值为0。可以规定,当这一位的值为1时,该字节的内容表示汉字编码。但最多也只有128个编码,表示的汉字太少。为此又规定,用两个连续的字节表示一个汉字,最多能表示出 $128 \times 128 = 16384$ 个汉字,此时两个字节的最高二进位的值均为1。这种方案通常被称为二字节汉字表示。在某些应用场合,如通信,只能传送ASCII码,最高位用于校验,就与汉字表示法产生矛盾。为此,有时也用三个字节表

示一个汉字,称为三字节汉字表示。当然,也有四字节汉字表示的。

1. 汉字内部码 汉字内部码亦称汉字内码或汉字机内码。常用的几种汉字内码表示形式为:

a. 二字节汉字内码 目前国内绝大部分微型计算机上的中文系统都采用以基本集汉字交换码(国标码)两个字节高位均加1形成的汉字内码,因此汉字内码标准较为统一。由于基本集的国标码为2121—7E7E,因此相应的汉字内码为A1A1—FEFE。同样,由于一级汉字的国标码为3021—5779,二级汉字的国标码为5821—777E,其它图形字符的国标码为2121—296F,因此相应一级汉字的内码为B0A1—D7F9,二级汉字的内码为D8A1—F7FE,其它图形字符的内码为A1A1—A9EF。国标码转换为内码的方法是:国标码加8080。

b. 三字节汉字内码 这种汉字内码多用带标识码的三字节汉字内码,其形式如下:

| | | |
|-----|------|------|
| 标识码 | 第一字节 | 第二字节 |
|-----|------|------|

当中文系统扫描汉字与西文字符混合的字符串时,遇到标识码后,就把紧随它的两个字节解释为一个汉字,否则仍把单个字节作为西文字符处理。

c. 四字节汉字内码 这种汉字内码多有带标识码的四字节汉字内码,其形式是一个标识码后跟三个字节的ASCII字符。例如,CCDOS的通信管理模块用这种汉字内码作传输码,它的编码格式是:标识码为7E(图形字符~),第二字节为数字0~9或大写字母A~F,第三字节和第四字节为数字0~9或大写字母A~F。

这种汉字内码由于只用于七位码,故在一般的微型计算机多用户系统中作传输码,可顺利地通过终端驱动模块,但这种内码用四个字节能表示一个汉字,开销太大。

2. 汉字编码字符集 为了确保中文信息处理与西文信息处理的一致性和兼容性,中文信息系统采用的汉字编码字符集,一般都是在信息处理交换用的字符集基础上扩充而来的。

计算机系统常用的信息处理交换用编码的字符集有如下几种:

a. 七位编码字符集 七位编码字符集主要用的是ASCII码,ASCII字符编码表见表4-2-3。

b. 汉字编码字符集—基本集 GB2312-80《信息交换用汉字编码字符集—基本集》共收录汉字等图



形字符 7445 个，基本集中包括汉字 6763 个及其它图形字符 682 个。

汉字分为两级：第一级汉字 3755 个，由于第一级汉字是常用字，一般都知道读音，故按汉语拼音字母顺序排列；第二级汉字 3008 个，由于第二级汉字大部分较生僻，不易掌握读音，所以按部首顺序排列。

c. 汉字编码字符集—辅助集 从 GB2312 的使用情况看，基本集已基本满足绝大部分用户的使用要求，但对于某些特殊用户，例如，台湾、香港等目前尚未推广简化汉字的地区，古汉语研究、古籍翻印、图书管理等则感到基本集还不够用。因此，又在基本集的基础上公布了 GB7589—87《信息交换用汉字编码字符集第二辅助集》和 GB7590—87《信息交换用汉字编码字符集第四辅助集》，从五万余汉字中又筛选了 1 万 6 千余字，作为基本集的扩充。

8 数据校验码

常用的数据校验码是奇偶校验码和海明校验码。

1. 奇偶校验码 奇偶校验的方法是为一个字节补充一个二进制位，称为校验位。用设置校验位的值为 0 或 1，使字节的 8 位与该校验位含有 1 值的个数为奇数或偶数。在使用奇数个 1 的方案进行校验时，称奇校

验；反之，则称为偶校验。

这种方法只能发现一位错，但不能确定是哪一位错。因考虑到，一位出错的几率比多位同时出错的几率高得多，该方案还是有很好实用价值。

2. 海明校验码 海明校验码能检测和自动校正一位错。

设校验位位数为 K ，数据位的位数为 N ，则编码应满足式： $2^{K-1} \geq N + K + 1$ 。该式表示， $K-1$ 个校验位的状态组合，应能表示 N 位数据位哪一位出错， K 个校验位哪一位出错和无错，共 $N+K+1$ 种情况。设置 K 个校验位还能发现两位错。按上述不等式，可以计算出某些 N 值和 K 值的对应关系，如表 (4-2-4) 所示。

表 4-2-4 校验位与数据位的对应关系

| N 值 | 最小的 K 值 |
|--------|---------|
| 1~3 | 4 |
| 4~6 | 5 |
| 11~25 | 6 |
| 26~56 | 7 |
| 57~119 | 8 |

第3章 电子计算机的指令系统

1 概述

一台计算机所能执行的各种不同类型指令的全体，称为这台计算机的指令系统，又称指令集。

任何一台电子计算机都有许多功能不同的指令，而每一条指令都指定了某一种类型的操作，称之为该条指令的功能。

计算机的性能与它所设置的指令系统有很大的关系，而指令系统的设置又与机器的硬件密切相关。一般说来，性能较好的计算机都有功能齐全、通用性强、指令丰富的指令系统。

不同型号的计算机它们的指令系统是不同的，但是同一系列上的不同型号计算机其基本指令系统是相同的，新推出的机器的指令系统一定包含所有旧机种的所有指令，在原先机器上开发运行的各种软件可以不加任何修改地在新机器上运行，因此能做到程序兼

容。正是因为这种情况使同一系列计算机的指令系统越来越复杂，可以多达几百条指令，称这些计算机为复杂指令系统计算机，简称 CISC (Complex Instruction Set Computers)。

复杂的指令系统需要复杂的硬件结构来支持，结构太复杂会使设计周期变长，正确性难以保证且难以调试和维护，甚至还可能降低整个系统的性能。另一方面，在复杂而庞大的指令系统中，只有一些比较简单的指令才是最经常使用的，仅占指令总数的 20%，而在程序中出现的频率却占 80%，相反，需要大量硬件支持的大多数复杂指令利用率却极低，这样造成硬件资源的很大浪费。这就出现了精简指令系统，随之诞生了精简指令系统计算机，简称 RISC (Reduced Instruction Set Computers)。

计算机的指令系统是十分重要的，它是计算机的神经系统。



2 指令格式

计算机CPU发出操作命令称为指令,它是一串由代码“1”和“0”所组成,称为指令码。计算机的指令格式与机器的字长、存储器的容量及指令的功能有关。指令格式的设计要使指令既能给出足够的信息,又要节省存储空间、缩短取指时间、提高机器性能。

1. 指令格式 计算机是通过执行指令来处理数据的。为了指出数据的来源、操作结果的去向及所执行的操作,一条指令必须包含下列信息:

(1) 操作码。指令的操作码部分提供的是操作控制信息,指明计算机应执行什么性质的操作。

(2) 操作数地址。CPU通过该地址取得所需的操作数。

(3) 操作结果存储地址。存放操作数处理后所产生的结果。

(4) 下一条指令的地址。当程序顺序执行时,下条指令的地址由程序计数器给出,仅当改变程序运行顺序时,下条指令的地址才由指令给出。

指令按其地址的数目不同分为如下几种:

(1) 零地址指令

格式:

| |
|--------|
| OPCODE |
|--------|

其中 OPCODE——操作码。

指令中只有操作码,而没有操作数,也叫无操作数指令。

(2) 一地址指令

格式:

| | |
|--------|---|
| OPCODE | A |
|--------|---|

其中 OPCODE——操作码;

A 为地址,它可以是直接操作数,或者是操作数的存储地址(存储单元地址或寄存器名)。

其功能是对这一地址所指定的操作数执行相应的操作。对运算指令,由地址码 A 给出第一个操作数,第二个操作数隐含在累加器中,执行相应操作后的结果取代累加器原来的内容。

(3) 二地址指令

格式:

| | | |
|--------|----------------|----------------|
| OPCODE | A ₁ | A ₂ |
|--------|----------------|----------------|

其中 OPCODE——操作码;

A₁——源操作数的存储地址或寄存器名;

A₂——目的操作数存储地址或寄存器名。

两个地址 A₁ 和 A₂ 分别指出源、目的两个操作数,并进行操作码所指定的操作后,其结果送入 A₂ 指定的内存单元或寄存器中。

(4) 三地址指令

格式:

| | | | |
|--------|----------------|----------------|----------------|
| OPCODE | A ₁ | A ₂ | A ₃ |
|--------|----------------|----------------|----------------|

其中 OPCODE——操作码;

A₁——第一个操作数存储地址或寄存器名;

A₂——第二个操作数存储地址或寄存器名;

A₃——操作结果存储地址。

其操作是把第一地址(A₁)中的数和第二地址(A₂)中的数进行操作码所规定的操作,产生结果送入第三地址(A₃)中。

(5) 多地址指令

格式:

| | | | |
|--------|----------------|----------------|-------------------|
| OPCODE | A ₁ | A ₂ | ...A _n |
|--------|----------------|----------------|-------------------|

其中 OPCODE——操作码;

A₁——第一个地址;

A₂——第二个地址;

A_n——第 n 个地址。

其功能是实现成批数据处理。指令中需要多个地址来指出数据存放的首址、长度、下标等信息。

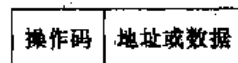
2. 指令长度 代表一条指令的所有二进制位数叫指令长度。

指令的长度取决于操作码长度、操作数地址长度和操作数地址的个数。

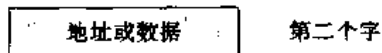
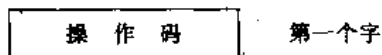
一般说来,指令的长度通常为字节的整数倍,如 8、16、24、32、40 和 48 位六种。

下面给出了不同指令长度的一种可能形式:

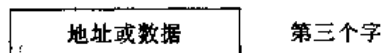
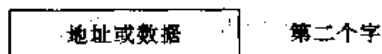
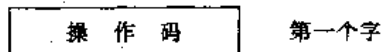
单字长指令



双字长指令



三字长指令



3. 指令长度与字长的关系 字长是指计算机能直接处理的二进制数据，它决定了计算机的运算精度和指令直接寻址能力。

为了便于处理字符数据和尽可能地利用存储空间，一般机器字长都是字节长度8位的1、2、4或8倍，即字长为8、16、32或64位。

指令的长度既可以小于或等于机器字长，也可以大于机器字长。若指令的长度大于机器字长，称这种指令为长格式指令，它需要几个连续字单元或字单元加字节单元来存储。若指令的长度小于或等于机器的字

长，称这种指令为短格式指令，它只需一个字单元或一至几个连续字节单元来存储。

3 寻址方式

数据和指令在内存中存放的位置称为地址，存放数据的地址称为操作数地址。操作数地址形成方式称为寻址方式，形成操作数地址的过程称为寻址过程。常用的寻址方式有直接寻址、间接寻址、立即寻址、变址寻址、相对寻址、堆栈寻址、寄存器寻址、寄存器间接寻址等。各种寻址方式的比较见表4-3-1。

表4-3-1 各种寻址方式比较

| 比较项目 寻址方式 | 提供操作数速度 | 寻址范围 | 实现设备 | 使用目的 | 特 点 |
|--------------|-----------------------|--------------|-----------------|------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| 立即寻址 | 立即提供 | — | — | 设置各种常数赋初值 | 提供操作数速度最快，指令一取出操作数即可获得，不用访问内存。受地址长度影响，操作数精度低 |
| 直接寻址 | 一次访问主存储器的时间 | 部分主存储器 | — | 直接访问主存储器零页空间 | 提供操作数的速度较快，访问的地址空间较小，如要改变操作数地址，必须改变指令 |
| 间接寻址 | 二次以上访问主存储器时间（由间接次数决定） | 全部主存储器 | 设置间接位 | 实现各种地址修改，可按地址表访问数据 | 改变间接地址单元内容即修改操作数地址，方便程序编制。提供操作速度慢 |
| 变址寻址 | 一次访问主存储器时间加地址计算时间 | 全部主存储器 | 要增设变址寄存器和地址形成逻辑 | 实现各种地址修改，支持向量、阵列等数据块的操作 | 改变操作数地址时，只要修改变址单元的内容，不用修改指令。对字符串处理，向量运算等成批数据处理中非常有用，可缩短程序长度 |
| 寄存器直接寻址 | 一次访问寄存器时间 | 全部通用寄存器 | 增设通用寄存器组 | 缩短指令长度，快速提供各种操作数，提供中间结果数据的缓冲 | 及时提供操作数，执行速度快。可缩短指令长度，节省存储空间。通用寄存器多时，其优化使用复杂，编制程序不方便 |
| 寄存器间接寻址 | 一次访寄存器时间加一次访存时间 | 全部主存储器 | 增设通用寄存器组 | 缩短指令长度，方便地实现各种地址的修改 | 变更操作数地址，只需要改变通用寄存器的内容。提供操作数的速度快于间接寻址 |
| 相对寻址 | 一次访主存时间加地址计算时间 | 部分或全部主存储器 | 增设地址形成逻辑 | 利用主存储器的小块地址空间 | 它将现行指令地址作为变址，允许指令和数据随程序一起浮动。位移量可正、可负，通常用补码表示 |
| 堆栈寻址 | 一次访堆栈时间 | 只访问堆栈顶和次栈顶单元 | 设置堆栈 | 支持多重中断，子程序嵌套调用、递归调用 | 存取速度快，只能访问堆栈中存储单元 |
| 基址寄存器寻址 | 一次访主存储器时间加地址计算时间 | 全部主存储器 | 增设段寄存器 | 扩大寻址空间 | 面向系统，主要用于逻辑地址到物理地址的变换，解决程序在存储器中的定位和扩大寻址空间 |



4 指令分类及其功能

指令分两类。一类为通用指令，应用相当广泛。另一类为专用指令，应用范围窄，在某些特定场合才用到它。

指令按其操作功能类型又可分为：数据传送指令、算术运算指令、逻辑运算指令、移位操作指令、堆栈操作指令、字符串处理指令、输入输出指令、特权指令、陷阱指令，转移指令和子程序调用指令等。

1. 数据传送指令 数据传送指令是将数据从计算机中的一个部分(源)传送到另一部分(目的)的指令，传送后不改变源数据的内容。

数据传送指令大体上可分为如下三类：

(1) 按指令的操作地址将内存储器相应单元的内容传送到某一寄存器，称为读指令。

(2) 按指令的操作地址将某一寄存器中的内容传送到存储器单元中，称为写指令。

(3) 寄存器与寄存器之间互相传送数据的指令。

数据传送指令既可以一次传送一个数据，也可以传送一批数据。例如 Intel 8086 的 MOVS 指令，一次

可传送一个字或字节，如再加上重复执行前缀(REP)，一次可以传送多达 64KB 的数据块。

2. 算术运算指令 定点加、减、乘、除等运算。浮点加、减、乘、除等运算，主要用在科学运算方面。十进制加、减、乘、除，主要用在商业计算上。向量运算指令，用在大型、巨型机上。

3. 逻辑运算指令 这类指令主要有求反、求补、逻辑乘、逻辑加、按位加(异或)、逻辑比较、逻辑移位和测试等。这些指令主要用来进行数码转换、字段分离，字段合并和逻辑运算。

4. 移位操作指令 移位操作指令分为算术移位、逻辑移位和循环移位三种，可以实现对操作数左移或右移一位或若干位。算术移位是对带符号数进行操作，仅对数值部分进行移位，符号位不变。逻辑移位对无符号数进行操作，因此是全部位进行移位。循环移位属于逻辑移位，分为小循环和大循环两种。进位位 C 不参加循环，称小循环(即自身循环)，和进位位 C 一起循环，称大循环。

图 4-3-1 表示了这些移位的操作情况。

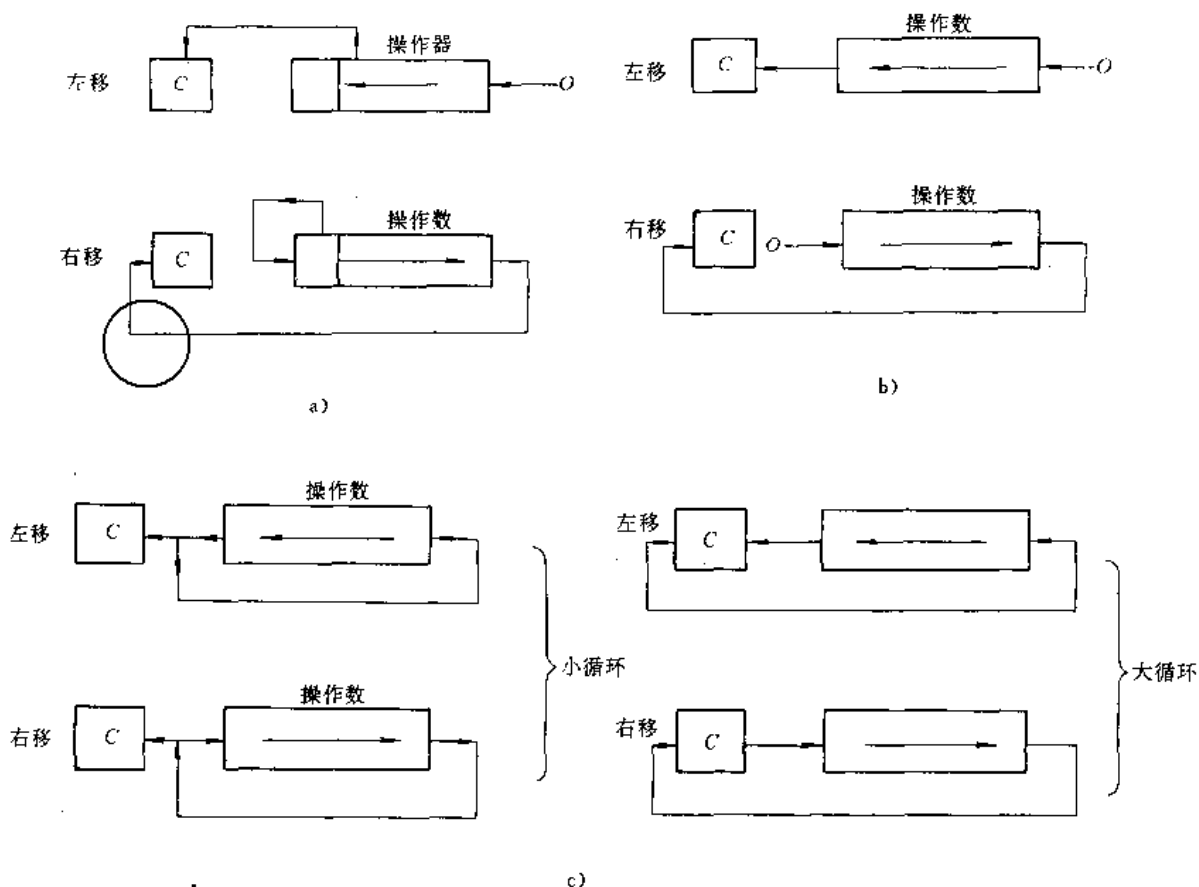


图 4-3-1 移位操作过程

a) 算术移位 b) 逻辑移位 c) 循环移位

此星公司制作 请尊重作者版权



5. 堆栈操作指令 堆栈操作指令用于访问堆栈,它只有两条,压入指令(PUSH)和弹出指令(POP)。实际上它们是一种特殊的数据传送指令。

压入指令 PUSH 把指定的操作数送入栈顶。

弹出指令 POP 把栈顶的数据取出送到目的地。

6. 字符串处理指令 字符串处理指令就是一种非数值处理指令,包括字符串传送、字符串转换(把一种编码的字符串转换成另一种编码的字符串)、字符串比较、字符串查找(查找字符串中某一子串)、字符串匹配、字符串抽取(提出某一子串)和字符串替换(把某一字符串用另一字符串替换)。

7. 输入输出指令 输入输出指令的一般格式如下:



其中 OPCODE——操作码;

REG——某一寄存器名;

A——外部设备地址(设备码)。

输入指令完成从 A 地址所指定的外部设备中读入一个数据到 REG 寄存器;输出指令是把 REG 寄存器中的数据送到 A 地址所指定的外部设备中。

除了输入输出数据外,CPU 还可以提供输入输出指令来发送和接收控制命令,用以控制外部设备的工作。

注:有些计算机采用外部设备与存储器统一编址的方法把外部设备看成存储器的某个单元,因此任何访问存储器的指令均可访问外部设备,不专门设置输入输出指令。

8. 特权指令 所谓特权指令是指具有特殊权限的指令,这类指令只能用于操作系统,而一般不直接提供用户使用。它主要用于系统资源的分配和管理,包括改变系统的工作方式,检测用户访问权限,修改虚拟存储器管理的段表、页表和完成任务的创建和切换。

9. 陷阱指令 计算机在运行过程中如果内部出现了一个意外事件(如故障),就自动地转移到一个特定的程序去处理这个意外事件,这种转移叫做陷阱又叫捕俘。执行这种功能的指令叫陷阱指令。例如:电源故障、奇偶校验出错、输入输出设备故障、用户使用了无定义的指令或特权指令等都可以通过执行陷阱指令来处理这些故障。

在一般计算机中,陷阱指令作为隐含指令,不提供给用户,只有在出现故障时,才由 CPU 自动产生并执行。有些计算机设置了可供用户使用的陷阱指令,利用

它来实现系统调用和程序请求。

10. 转移指令 转移指令用以控制程序的执行方向,可实现程序分支。

在通常情况下,CPU 是按顺序方式执行程序。但是由于实际问题的需要,常常打乱这种顺序执行指令的方式,而需要跳到一个新的指令地址处再开始顺序执行,这种具有“跳跃”功能而改变程序执行顺序的指令叫转移指令。

按转移的性质,转换指令分为条件转移和无条件转移两种。

a. 条件转移指令 条件转移指令根据算术运算或逻辑运算结果或某些寄存器、指示器(例状态寄存器)的状态来判断某一条件是否满足,并根据这个判断决定是否转移。例如“大于零转”,当运算结果大于零时,则执行这条指令后,就转向本指令中给出的地址去执行那条新的指令。如果上一条指令执行后结果不满足大于零的条件,则不转移,继续顺序执行下一条指令。

b. 无条件转移指令 无条件转移指令不受任何条件约束,用来无条件地改变正常的指令执行顺序,直接把控制转移到所指定的目的地,从那里开始执行。

除条件转移指令和无条件转移指令外,一般还设有转子、返回、循环开口、循环关门、计数跳等转移指令。

11. 子程序调用指令 子程序调用指令就是用来调用系统提供的或用户自己编写的各类子程序。

在编写程序过程中,常常有一些经常使用的能独立完成某一特定功能的程序段,在需要时能随时调用,

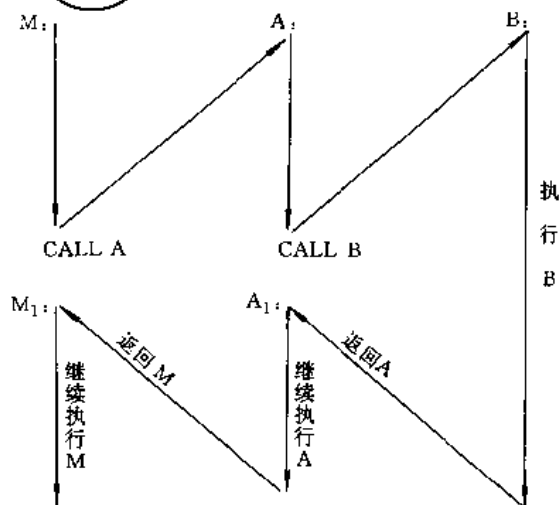


图 4-3-2 子程序嵌套调用



而不必多次重复编写。这种程序段称为子程序或过程。另外系统中还提供了大量通用子程序,如申请资源、读写文件、控制外部设备等,当主程序需要这些子程序时,只需使用转子指令,主程序就自动转入子程序入口地址并执行子程序,子程序的最后一条指令是返回指令,执行该指令后便自动地返回到原来主程序的断点

处,继续执行主程序。

为了能从子程序中正确返回,并能支持多重嵌套和递归,一般采用堆栈来保存返回地址。

子程序的嵌套调用如图 4-3-2 所示。

此外,子程序调用指令还能实现递归调用,就是可以使子程序自己调用自己。

第4章 中央处理器 (CPU)^[1]

1 CPU 概述

计算机硬件系统主要由运算器、控制器、存储器、输入设备、输出设备五大部件组成。运算器和控制器组成中央处理器,即 CPU (Central Processing Unit)。

当用计算机解决某个问题时,人们首先必须为它编写程序。程序是一个指令序列,这个序列明确告诉计算机应该执行什么操作,在何处找到操作的数据。一旦把程序装入主存储器,就可以由计算机自动完成取指令和执行指令的任务。专门用来完成此项工作的计算机部件称为中央处理器,通常称为 CPU。

当前大多数计算机的中央处理器由以下两种方法实现:

(1) 采用半导体工厂生产的微处理器构成通用的或专用的计算机系统以及工作站等。当前微处理器芯片已从 8 位、16 位 32 位、发展到 64 位。

(2) 一些计算机公司采用自行设计制造的芯片来构成大、中、小型计算机的 CPU,例如 IBM 公司和 DEC 公司就是如此。

1.1 CPU 的功能

计算机对信息进行处理(或计算)是通过程序的执行而实现的。程序是完成某个确定算法的指令序列。CPU 要控制整个程序的执行,它具有以下基本功能:

a. 程序控制 程序的顺序控制称为程序控制。由于程序是一个指令序列,这些指令的相互顺序不能任意颠倒,必须严格按程序规定的顺序进行。因此,保证机器按一定顺序执行程序是 CPU 的首要任务。

b. 操作控制 一条指令的功能往往是由若干个操作信号的组合来实现的。因此,CPU 管理并产生每条指令的操作信号,把操作信号送往相应的部件,从而控制这些部件按指令的要求进行动作。

c. 时间控制 对各种操作实施时间上的控制称为时间控制。因为,在计算机中,各种指令的操作信号均受时间的严格控制。另一方面,一条指令的整个执行过程也受到时间的严格控制。只有这样,计算机才能有有条不紊地自动工作。

d. 数据加工 所谓数据加工,就是对数据进行算术运算和逻辑运算处理。完成数据的加工处理是 CPU 的根本任务。因为原始信息只有经过加工处理后才能对人们有用。

1.2 CPU 的组成

中央处理器由两个主要部分——控制器和运算器组成。图 4-4-1 是 CPU 主要组成部分的逻辑结构图。

运算器由算术逻辑单元 ALU、累加器、数据缓冲寄存器和状态条件寄存器组成,它是数据加工处理部件。运算器接受控制器的命令而进行动作,即运算器所进行的全部操作都是由控制器发出的控制信号来指挥的,所以它是执行部件。运算器有两个主要功能:

(1) 执行各种算术运算;

(2) 执行各种逻辑运算,并进行逻辑测试,如零值测试或两个值的比较。

通常,一个算术操作产生一个运算结果,而一个逻辑操作则产生一个判决。

控制器由程序计数器、地址寄存器、指令寄存器、指令译码器、时序产生器和操作控制器组成,它是发布命令的“决策机构”,即协调和指挥整个计算机系统的操作。

控制器的主要功能是:

(1) 取指令。从内存中取出一条指令,并指出下一条指令在内存中的位置。为此要发出指令地址及控制信号。

(2) 分析指令。又叫解释指令、译码指令。是对取



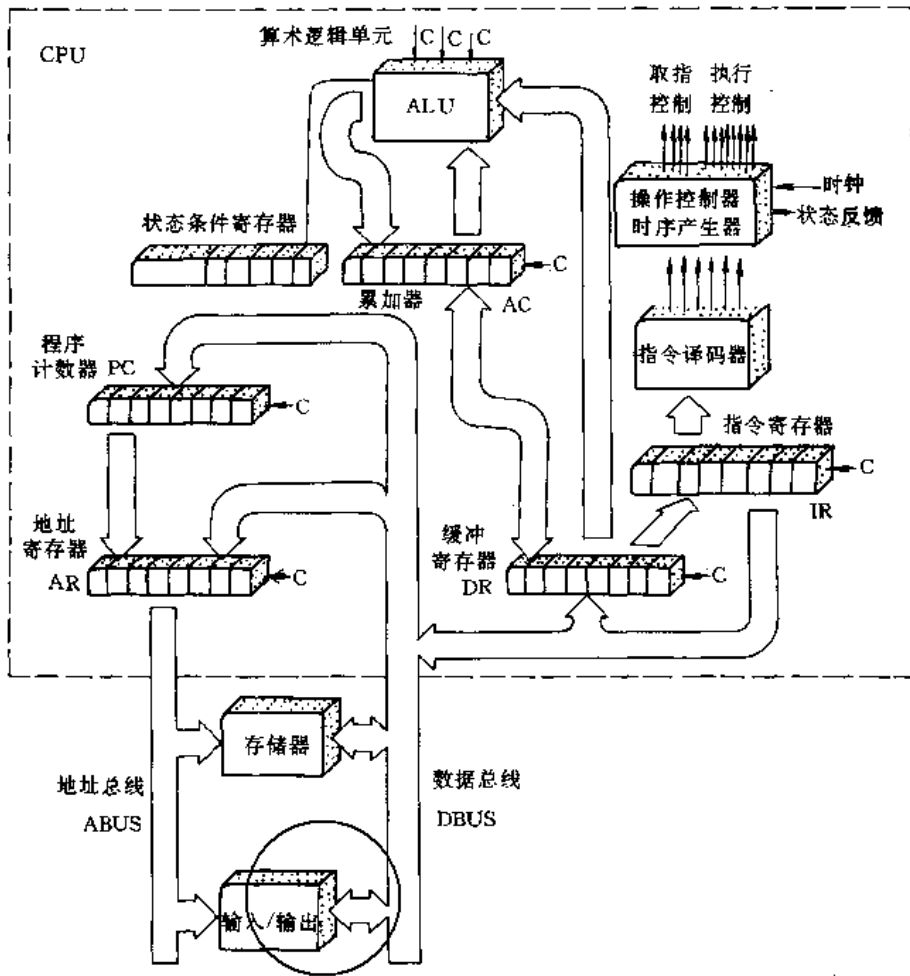


图 4·4-1 CPU 主要组成部分逻辑结构图

得的指令进行分析，指出它要求作什么操作，并产生相应的操作控制命令。如果参与操作的数据在存储器中，还需要形成操作数地址。

(3) 执行指令。根据分析指令时产生的“操作命令”和“操作数地址”形成相应的操作控制信号，通过运算器、存储器及输入输出设备的执行，实现每条指令的功能，其中包括对运算结果的处理以及下条指令地址的形成。

然后再取出下一条指令，并分析、执行……，如此循环，直到遇到停机指令或外来的干预为止。

(4) 控制程序和数据的输入与结果的输出。根据程序的安排或人工干预，在适当的时候向输入/输出设备发出一些相应的命令来完成输入/输出(I/O)功能，这实际上也是通过执行程序来完成的。

(5) 对异常情况和某些请求的处理。当机器出现某些异常情况，诸如算术运算的溢出和数据传送的奇偶错等；或者某些外来请求，诸如磁盘上成批数据需送

存储器或程序员从键盘送入命令等，此时由这些部件或设备发出中断请求，CPU响应中断请求并进行处理。

1·3 CPU 中的主要寄存器

各种计算机的 CPU 可能有这样或那样的差异，但在 CPU 中至少有六个主要寄存器。如图 4·4-1 所示。这些寄存器是指令寄存器 (IR)，程序计数器 (PC)，地址寄存器 (AR)，缓冲寄存器 (DR)，累加器 (AC)，状态条件寄存器。上述这些寄存器常用来暂存少量的信息，一般来说，只能存储一个计算机字。下面介绍这些寄存器的功能与结构。

1. 缓冲寄存器 (DR) 缓冲寄存器用来暂时存放由内存读出的一条指令或一个数据字，反之当向内存存入一条指令或一个数据字时，也暂时将它们存放在这里。缓冲寄存器的作用是：

(1) 作为 CPU 和内存、外部设备之间信息传送的



中转站。

(2) 补偿 CPU 和内存、外部设备在操作速度上的差别。

(3) 在单累加器结构的运算器中缓冲寄存器还兼作为操作数寄存器。

2. 指令寄存器 (IR) 指令寄存器用来保存当前正在执行的一条指令。当执行一条时,先把它从内存取到缓冲寄存器中,然后再传送到指令寄存器。指令划分为操作码和地址码字段,由二进制数字组成。为执行任何给定的指令,必须对操作码进行译码,以便指出所要求的操作。“指令译码器”部件就是负责这项工作的。指令寄存器中操作码字段的输出就是指令译码器的输入。操作码一经译码后,即可向操作控制器发出具体操作的特定信号。

3. 程序计数器 (PC) 为了保证程序能够连续地执行下去,CPU 必须具有某些手段来确定下一条指令的地址,而程序计数器 (PC) 正是起到这种作用,所以通常又称为指令计数器。在程序开始执行前,必须将它的起始地址,即程序的第一条指令所在的内存单元地址送入 PC,这时 PC 的内容就是要从内存提取第一条指令的地址。当执行指令时,CPU 将自动修改 PC 的内容,其内容总是保持将要提取的下一条指令的地址。由于大多数指令都是按顺序执行的,所以修改的过程通常只是简单的 PC 内容加 1。

但是,当遇到转移指令如 JMP 指令时,下一条从内存取出的指令将由转移指令来规定而不是象通常一样按顺序来取得。

4. 地址寄存器 (AR) 地址寄存器用来保存当前 CPU 所要访问内存单元的地址。由于内存和 CPU 之间存在着操作速度上的差别,所以必须使用地址寄存器来保持地址信息,直到内存读/写操作完成为止。

显而易见,当 CPU 和内存进行信息交换时,即 CPU 向存储器存/取数据或者 CPU 从内存读出指令时,都要使用地址寄存器和缓冲寄存器。同样,如果把外围设备的设备地址作为象内存的地址单元那样来看待,那么,当 CPU 和外围设备交换信息时,同样使用地址寄存器和缓冲寄存器。

5. 累加寄存器 (AC) 累加寄存器 AC 通常简称为累加器。它的功能是当运算器的算术/逻辑单元 (ALU) 执行全部算术和逻辑运算时,为 ALU 提供一个工作区。例如,在执行一个加法前,先将一个操作数暂时存放在 AC 中,再从内存中取出另一个操作数,然后同 AC 的内容相加,所得结果送回 AC 中,而 AC 中

原有的内容随即被破坏。累加器用来暂存 ALU 运算的结果信息,显然,运算器至少要有—个累加器。

由于运算器的结构不同,可采用多个累加寄存器,如有些计算机中有 2 个、4 个、8 个,甚至更多。当使用多个累加器时,就变成通用寄存器结构,其中任何一个可存放源操作数,也可存放结果操作数。在这种情况下,需要对寄存器加以编址。从硬件结构来讲,需要在 ALU 单元的两个输入端加入多路开关或使用三态门,以便选择输入信息源。

6. 状态寄存器 保存由算术指令和逻辑指令运行或测试结果建立的各种状态码内容,如运算结果进位标志 (C);运算结果溢出标志 (V);运算结果为零标志 (Z);运算结果为负标志 (N) 等。这些标志位通常分别由 1 位触发器保存。

除此之外,状态寄存器还保存中断和系统工作状态等信息,以便使 CPU 和系统能及时了解机器运行状态和程序运行状态。因此,状态寄存器是一个由各种状态标志拼凑而成的寄存器。

1.4 操作控制器及时序产生器

CPU 中的各主要寄存器,每一个完成一种特定的功能。各寄存器之间通过数据通路传送信息。

通常把许多寄存器之间传送信息的通路称为“数据通路”。信息从什么地方开始,中间经过哪个寄存器或多路开关,最后传送到哪个寄存器,都要加以控制。在各寄存器之间建立数据通路的任务是由称之为“操作控制器”的部件来完成的。操作控制器的功能,就是根据指令操作码和时序信号,产生各种操作控制信号,以便正确地建立数据通路,从而完成取指令和执行指令的控制。

根据设计方法不同,操作控制器可分为组合逻辑型、存储逻辑型、组合逻辑与存储逻辑结合型三种。第一种称为常规控制器,采用组合逻辑技术来实现。第二种为微程序控制器,它是采用存储逻辑来实现的。第三种称为 PLA 控制器,它是吸收前两种的设计思想来实现的。鉴于目前计算机设计中常用微程序技术,本篇只介绍微程序控制器。

CPU 中除了操作控制器外,还必须有时序产生器。因为计算机高速地进行工作,每一动作的时间非常严格,不能有任何差错。时序产生器的作用,就是对各种操作实施时间上的控制。

2 控制方式

控制器控制一条指令进行的过程是依次执行一个



确定的微操作序列的过程。无论在组合逻辑控制器或微程序控制器的计算机中都是这样。由于不同指令所对应的微操作数及其繁简程度很不一样，因此每条指令和每个微操作所需的执行时间也不相同，如何形成控制不同微操作序列控制信号就有多种方法，称为控制器的控制方式。常用的有同步控制方式、异步控制方式和联合控制方式。

2.1 指令周期、节拍周期、CPU 周期

所谓指令周期就是指执行一条指令所需要的时间，即从发送指令地址开始到发送下一条指令地址之间的间隔时间。

所谓节拍周期就是完成一个微操作所需要的时间。每一条指令包含了许多节拍周期。在微操作序列中，对应着每一个执行阶段，一般都要访问一次内存。由于 CPU 速度高，而内存的读写周期比较长，比一个微操作的节拍周期要长得多，因此访内操作就不可能在一个节拍周期中完成，需要包含多个节拍周期。

所谓 CPU 周期就是 CPU 与内存储器的一次信息交换所需要的时间，也称机器周期。究竟一个 CPU 周期包含几个节拍周期呢？在不同情况下是不一样的，它决定于一个 CPU 周期中所需要完成的微操作的多少。

这三个时间参量的关系是：一个指令周期，可以包含一个到多个 CPU 周期，而一个 CPU 周期又可以包含多个节拍周期。如图 4-4-2 所示。

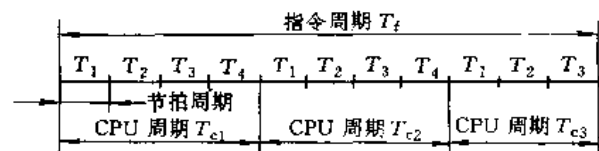


图 4-4-2 指令周期、CPU 周期和节拍周期之间的关系

2.2 控制方式

控制器所发出的微操作控制信号，应解决两个问题：

(1) 控制信号的定时，即什么时候进行操作。

(2) 控制信号的同步，即各个部件之间微操作如何在时间上配合，前后各个操作又如何衔接起来。

1. 同步控制方式 系统中各部件的微操作，由一个统一的时钟来同步，称为同步控制方式。时钟周期可以与节拍周期相同，它应该保证机器中最费时的微操作能够完成，那么所有的微操作就可以完成。如图 4-4-3a 所示，每个微操作的开始时间与完成该微操作所需的时间都由主时钟决定，这样控制器的任务就比较简单了，只需对不同微操作分配不同的时钟信号，易于实现。

2. 异步控制方式 系统中没有统一的时钟，各部件有自己的时钟信号，各个微操作的进行是采用应答方式工作。如图 4-4-3b 所示。每个微操作是在接到命令信号时开始，当操作完成后，给出一个回答信号，该回答信号是下一个微操作的命令信号。各个微操作所需的时间没有统一的规定，可以根据自己的实际需要可长可短。这种控制方式的优点是节省时间，但控制方式过于复杂，设备费用高。

3. 联合控制方式 同步控制和异步控制相结合的方式。对不同指令的各个微操作实行大部分统一，小部分区别对待的方式。即大部分微操作安排在一个固定机器周期中，并在同步时序信号控制下进行，而对那些时间难以确定的微操作则以执行部件送回的“回答”信号作为本次微操作的结束。例如，某些机器在 CPU 访问存储器时，依靠存储器送来的“Ready”信号作为读/写周期的结束，即为这种情况。

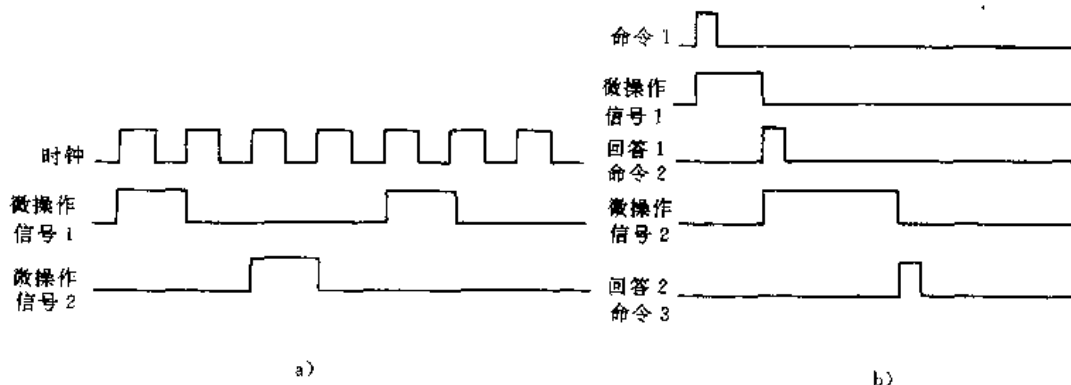


图 4-4-3 控制方式
a) 同步控制方式 b) 异步控制方式



3 微程序控制器

微程序控制的概念是将机器指令的操作（从取指令到执行指令）分解为若干个更基本的微操作序列，并将有关的控制信息（微命令）以微码形式编成微指令，输入到控制存储器中。这样每条机器指令与一段微程序相对应，取出微指令就产生微命令，实现机器指令要求的信息传送和加工。下面通过一个微程序控制器原理框图进一步说明它的基本工作原理。

3.1 微程序控制的基本工作原理

如图 4-4-4 所示，微程序控制器的核心部件是存储微程序的控制存储器 CM，一般用只读存储器 ROM 构成。而可擦去可编程只读存储器 EPROM 的出现为实现微程序修改提供了可能性。

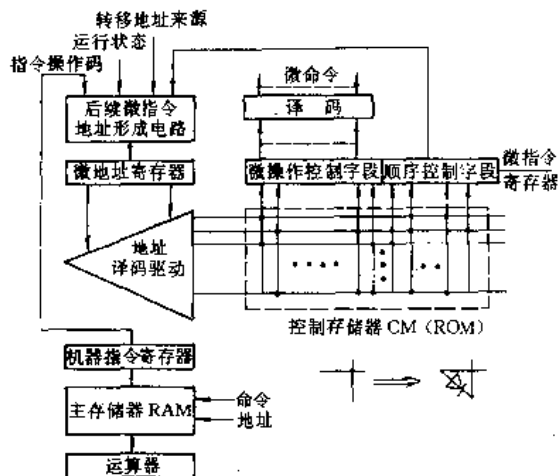


图 4-4-4 微程序控制器原理图

微指令寄存器存放从 ROM 中读出的微指令，它包括两大部分：微操作控制字段（微命令字段）、顺序控制字段（微地址字段）。前者可直接按位提供微命令或通过译码提供微命令。

1. 微程序控制的概念

a. 微命令 构成控制信号序列的最小单位。是指那些能直接作用于某部件控制门的命令。

b. 微操作 由微命令控制实现的最基本的操作。例如机器指令操作码表示的“加”是一个比较大的操作含义，它的实现要依靠建立相应的数据通路，打开一些门，发出相应的打入脉冲。也就是说，要分割成一些更基本的微操作。

c. 微周期 从控制存储器中读取一条微指令并执行相应的一步操作所需的时间。

d. 微指令 每个微周期的操作所需的控制命令构成一条微指令。或者说，控制存储器中每个单元存放的微命令信息组成一条微指令。

e. 微程序 一系列微指令的有序集合。

f. 机器指令与微指令、工作程序与微程序、主存储器与控制存储器 机器指令是提供使用者编程的基本单位，它表明机器能够完成的一项基本功能。微指令则是为实现机器指令操作的一系列微命令的组合，它作为机器内部的信息，不一定提供给使用者。程序员根据某项任务编制的工作程序是放在主存储器中（RAM），由程序计数器 PC 指示其流程。微程序则是机器设计者事先编好的，放在控制存储器中（ROM），作为支持工作程序实现的一种硬件手段。工作程序可能很长，但所用的指令种类有限，所对应的微程序也是有限的。

2. 微程序执行过程 由于将一条机器指令的执行分割为若干个微操作序列，对应地编制了一小段微程序，它的执行过程可描述如下：

(1) 从控制存储器中取出一条“取机器指令”用的微指令，并送到微指令寄存器，这是一条公用的微指令，一般可安放在 0 号或 1 号微地址单元。微命令字段产生有关控制信号，从主存储器中读出机器指令，送往指令寄存器。

(2) 机器指令操作码通过微地址线路产生对应的微程序入口。

(3) 逐条取出对应的微程序，每一条微指令提供一个微命令序列，控制有关操作。根据机器指令的需要和微指令功能的强弱，一条机器指令可能需要对应于一条微指令或一段微程序。微程序中有些部分可以是公用的，执行完一条微指令后，可根据微地址形成方法产生后续微地址，读取下一条微指令。

(4) 执行完对应于一条机器指令的一段微程序后，返回 0 号（或 1 号）微地址单元，读取“取机器指令”的微指令，以便取下一条机器指令。

上述工作过程涉及两个层次，一个是程序员所看到的传统机器级：机器指令工作程序、主存储器；另一层次是设计者看到的微程序级：微指令、微程序、控制存储器。

3.2 微指令的结构和格式

如何确定微指令的结构，乃是微程序设计的键。设计微指令结构时，所追求的目标是：

(1) 有利于缩短指令长度；



- (2) 有利于减少控制存储器的容量;
- (3) 有利于提高微程序的执行速度;
- (4) 有利于对微指令的修改;
- (5) 有利于微程序设计的灵活性。

1. 微命令编码 微命令编码就是对微指令中的微操作控制字段采用的表示方法。通常有以下三种方法:

a. 直接表示法 直接表示法就是微操作控制字段中的每一位代表一个微命令。这种方法的优点是简单直观,其输出直接用于控制。缺点是微指令字较长,因而使控制存储器容量较大。

b. 编码表示法 编码表示法是把一组相斥性的微命令信号组成一个小组(即一个字段),然后通过小组(字段)译码器对每一个微命令信号进行译码,译码输出作为微操作控制信号,其微指令结构如图4-4-5所示。采用此方法可以以较小的二进制信息位表示较多的微命令信号。与直接表示法相比,可使微指令字大大缩短,但要增加译码电路,使微程序的执行速度稍稍减慢。

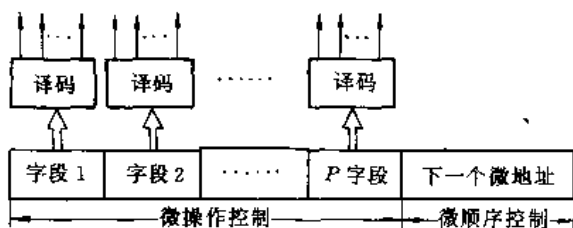


图4-4-5 字段直接译码法

c. 混合表示法 是把直接表示法与编码表示法相混合使用,以便能综合考虑微指令字长、灵活性和执行速度等方面的要求。

2. 微地址的确定方法 微指令执行的顺序控制问题,实际上是如何确定下条微指令的地址问题。通常产生后继微地址有两种方法:

a. 计数器方式 这种方式同用程序计数器来产生机器指令地址的方法相类似。在顺序执行微指令时,后继微地址由现行微地址加上一个增量来产生;在非顺序执行微指令时,必须通过转移方式,使现行微指令执行后,转去执行指定后继微地址的下一条微指令。在这种方法中微地址寄存器通常改为计数器。为此,顺序执行的微指令序列就必须安排在控制存储器的连续单元中。

b. 断定方式 所谓后继微地址的断定方式,就是后继微地址可由设计者确定,或者由设计者指定的差

别字段控制产生。在这种方式中,当微程序不产生分支时,后继地址直接由微指令的顺序控制字段给出;当微程序产生分支时,按顺序控制字段的判别标志和“状态条件”反馈信息形成后继微地址,其原理如图4-4-4所示。

3. 微指令格式分类 微指令的格式大体上可分成两类:

a. 水平型微指令 采用直接表示法进行编码的,属于水平型微指令的典型例子,其基本特点是在一定微指令中定义并执行多个并行操作的微指令。在实际应用中,直接表示法、编码表示法经常应用在同一条水平型微指令中。

b. 垂直型微指令 在微指令中设置有微操作码字段,采用微操作码编码法,由微操作码规定微指令的功能,称为垂直型微指令。其特点是不强调美观微指令的并行控制功能,通常一条微指令只要求能控制实现一、二种信息传递过程。这种微指令格式与指令相似:每条指令有一个操作码,每条微指令有一个微操作码。

3.3 微程序控制存储器

1. 微程序控制存储器 一般由只读存储器构成。因为微程序是以解释的方式执行指令,而指令系统一般是固定的,因此可以使用只读存储器。由于ROM中的内容不会丢失,使用ROM作为控制存储器比较可靠。

用RAM作为控制存储器优点是可以修改微程序,也就是说可以修改指令系统,所以可考虑部分控制存储器用ROM构成,实现固定的指令系统,部分控制存储器由RAM构成,用于扩充或修改一些指令。

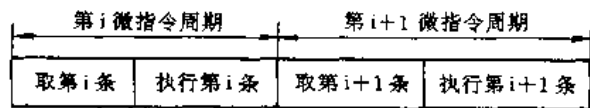
2. 控制存储器的操作 执行一条微指令的过程基本上分为两步,第一步将微指令从控制存储器中取出,称为取微指令,对于垂直型微指令还应包括微操作译码的时间。第二步执行微指令所规定的各个操作。这两步还可分为串行和并行两种工作方式。

a. 串行方式 在串行方式下微周期的安排如图4-4-6a所示。在串行微程序控制器中,执行现行微指令的操作与取下一条微指令的操作在时间上是串行进行的,所以微指令周期等于执行微操作时间加上取微指令时间(即等于只读存储器的读周期)。串行方式的微指令周期虽然长一些,但控制比较简单,形成微地址的硬设备也较少。

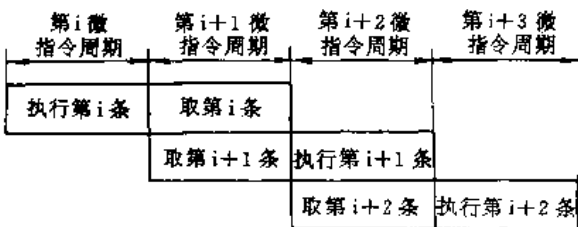
b. 并行方式 由于取微指令和执行微指令的操作是在两个完全不同的部件中执行,因此可以将这两



部分操作并行进行,以缩短微指令周期,也就是将这两部分操作在时间上重叠进行,这就是并行微程序控制的概念。如图 4-4-6b 所示。要求在执行本条微指令的同时,预取下一条微指令,从而节省取微指令的时间。所以微指令周期仅等于执行微操作的时间。为了微指令的正确执行,需增加一个微指令寄存器,用以暂存下一条微指令。另外当微程序出现转移时,需解决由本条微指令执行结果而确定下条微指令地址。



a)



b)

图 4-4-6 串行和并行微程序控制方式

a) 串行方式 b) 并行方式

3.4 微程序设计语言及微程序应用

1. 微程序设计语言 在微程序控制的计算机中,用机器语言表示的指令是由微指令解释执行而实现的。机器能执行的微指令是由二进制码表示的微命令组成的。这些微命令与机器硬件直接有关。

设计者或其它用户用来编制微程序的语言叫做微程序设计语言,用此语言编制的程序叫做源微程序,将它转换成二进制代码后,装入控制存储器。

微程序设计基本上沿用了程序设计方法。可以分成初级的微程序设计语言(微指令语言、微汇编语言、框图语言等)和高级微程序设计语言(接近于数学描述或自然语言)。

微汇编语言与汇编语言相似,是用符号表示的微指令语言,设计者先用微汇编语言编制源程序,利用微汇编程序翻译成 0 和 1 代码组成的微程序。微汇编程序中一条语句和微程序中一条微指令是一一对应的。

高级微语言类似程序设计中的高级语言。如用高级微语言描述图 4-4-7 相应的源微程序,那么可写成

K: A+B→A

K+1: IF (A(0) = 0) THEN (GO TO K+3)

K+2: 0-A→A

K+3: A→M(D)

上述程序表示 A, B 两数相加,结果的绝对值送存储单元 D, 其中 A(D) 为 A 数的符号位。

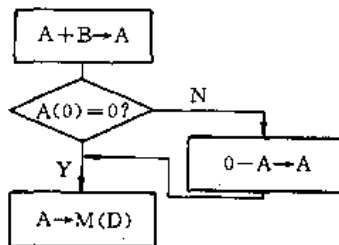


图 4-4-7 两数相加取绝对值的流程图

2. 微程序仿真 所谓微程序仿真,一般指在一台计算机上增加一些硬件、固件、软件来执行另一台计算机的机器语言。微程序仿真主要用来解决非兼容机的计算机系统之间程序兼容性问题,特别是解决新旧机器之间大量程序的应用问题。这种方法有很大的灵活性和通用性。

微程序仿真中,用来仿真的计算机称为宿主机,被仿真的计算机称为目标机。

实现微程序仿真,在宿主机运行于仿真状态下,则执行目标机的微程序。为此,还需要增加一些相应的组成控存的硬件结构。

微程序仿真的应用大大提高了计算机的功能。不只解决了程序的兼容问题,还可以在原有机器上开发试验新的机种。

3. 微诊断 诊断是指对计算机系统的故障进行检测与故障定位。微诊断主要用于系统硬件故障的测试。即利用微操作命令进行功能测试。设计思想与一般的程序诊断十分相似,所不同的是应用的语言是微指令级。正因为如此,微诊断将具有更高的故障定位精度。因为程序诊断用的是指令级语言,执行一条机器指令,在时间上要经历几个机器周期,或者说几个或十几个微操作周期。在空间上要涉及相当多的数据单元及数据通路。而微指令在这两方面却是很小,因而可以更精确的定位故障。它具有简单易行,易于修改、扩充、使用方便等优点,所以比较广泛的被采用。

4 指令解释的控制方式

计算机程序和原始数据的输入,在 CPU 内的信息处理, CPU 处理结果的输出,外围设备与主机之间的信息交换等都是在控制器的控制下实现的,控制器是



指令系统的执行机构。它完成任何一条指令通常都经过取指令、分析指令、执行指令等三个阶段,因此控制器必须有这三种功能,当然还有控制外围设备及中断处理等功能。

4.1 指令解释的三种控制方式

如何加快指令的执行过程,也就是如何加快机器语言的解释过程。解释过程是由机器内的控制机构控制,它调用一串微指令(或微操作)去实现每条机器指令,并控制这一串微指令与解释下一条机器指令的另一串微指令间的衔接。

为了加快单条指令的解释过程,可采用的途径有:选用更高速器件;采用更好的运算方法;减少解释过程所需的节拍数;使解释过程的各个动作并行执行等。在此基础上,为要提高机器语言程序的执行速度,则需采用同时解释两条、多条以至整段程序的控制方式。

指令解释可以有三种控制方式,即顺序方式、重叠方式和流水方式。

4.2 指令的顺序控制方式

顺序方式指的是各条机器指令间顺序串行执行,执行完一条指令后,才取出下条指令来执行,而且,一条机器指令内的各个微操作也是顺序串行执行的。

可以把解释一条机器指令的那些微操作归并成取指令、分析与执行几步。取指令指的是由内存中取出并送到指令寄存器中去。指令的分析包括对指令的译码,形成操作数真地址,取操作数及形成下条指令地址等。指令的执行指的是对操作数进行运算并存储运算结果。指令间的顺序解释如图4-4-8所示。

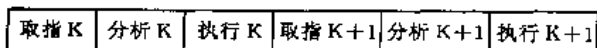


图4-4-8 指令间的操作顺序

顺序执行的优点是控制简单。由于下条指令的地址是在指令解释过程的末尾形成,因此不论是由指令计数器加1,还是由转移指令把转向地址送到指令地址计数器去形成下条指令地址,由本条指令转入下条指令的时间关系都是一样的。缺点是速度慢,上步操作未完成前,下步不能开始,机器各部件利用率也不高。例如,在取指令和取操作数期间,主存储器忙碌,但运算器空闲;在对操作数执行运算期间,运算器忙碌,主存储器却在等待。

4.3 指令的重叠控制方式

重叠方式指的是在解释第K条指令的操作完成

之前,就可开始解释第K+1条指令。图4-4-9为可能的一种方式。显然,重叠解释并不能加快指令的实现,但能加快相邻两条指令以至一段程序的解释。至于中央处理机、存储器和输入输出设备之间的重叠操作,即CPU启动I/O后,CPU和I/O可同时操作,也是一种重叠方式,但它只能实现I/O指令与其它指令的重叠。

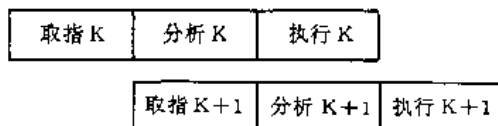


图4-4-9 指令重叠方式

下面分析为实现这种在同一时间内(纵向来看)“分析K”和“取指K+1”的重叠对计算机组成提出什么样的要求。

“分析K”的时间内主要操作是形成操作数真地址和访存取操作数,而“取指K+1”也需访存。一般的机器,操作数和指令是混合存储于同一主存内的,因而同时只能访问一个存储单元,这样就实现不了“分析K”与“取指K+1”的重叠。

为了实现重叠解释,可以采用不同硬件结构的方法来完成。

第一种方法:设置两个存储器,并独立编址,分别存放操作数及指令就可同时访问内存。

第二种方法:操作数和指令仍混合存于内存中,但用多体交叉结构,只要相邻的第K+1条指令及K条指令所需的操作数不在同一个存储体中,则能在一个主存周期中取出这两者,从而实现两条指令的“分析K”与“取指K+1”时间上的重叠。

第三种方法:设置指令缓冲寄存器,预先将指令由主存取到这个寄存器。这样,“分析K”就能和“取指K+1”重叠。因为只有前者“分析K”需访主存取操作数,而后者“取指K+1”是从指令缓冲寄存器取第K+1条指令。

若每次在“取指”时都可由“指缓”取得已从主存“预取”的指令,则“取指K+1”只需很短时间即可完成,所以合并到“分析K+1”内,从而构成图4-4-10所示的一次重叠方式。

所谓“一次重叠”指的是任何时候只是“执行K”与“分析K+1”重叠。就是当“分析K+1”比“执行K”提前结束时,“执行K+1”也不紧接在“分析K+1”之后,而要等到“执行K”结束后才执行。因此,这



种重叠方式的机器内只需要一套指令分析部件（如运算器等），这也有助于简化控制。一次重叠是重叠机器一般采用的方法。

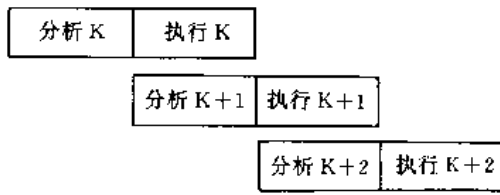


图 4-4-10 一次重叠方式图

4.4 指令的流水控制方式

这里主要从控制角度分析流水结构。流水方式在巨、大中型机中已普遍采用。

1. 流水的基本概念 一次重叠中将一条指令分解成“分析”和“执行”两个子过程，如图 4-4-11 所示。

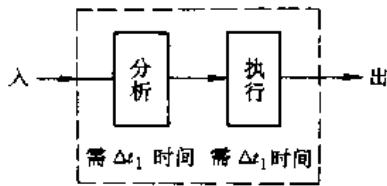


图 4-4-11 指令分解为“分析”与“执行”

由于这两个子过程分别用分析器和运算器的两个独立部件实现，所以不必等待上一条指令的“分析”、“执行”子程序都完成后才送入下一条指令，而是可以在上条指令的“分析”子过程结束，转入“执行”子过程时，就可接收下一条指令进入“分析”子过程。若实现“分析”与“执行”子过程都需要 Δt_1 时间，则就一条指令来看，是需要 $2\Delta t_1$ 才能完成。然而从机器的输出来看则每隔 Δt_1 就能完成一条指令的解释，这样，机器的吞吐率（即指单位时间内机器所能处理的指令数或机器能输出的结果数量），就由于把一条指令的解释过程分解成两个子过程而提高一倍。显然，若把“分析”子过程再分解成“取指令”、“指令译码”和“取操作数”子过程，并改进运算器结构以加快“执行”子过程，则可构成如图 4-4-12a 所示的解释过程。若这四个子过程都是需要 Δt_2 完成，则指令解释的时（间）—空（间）图如图 4-4-12b 所示。图中 1、2、3、4、5 表示处理机所处理的第 1、2、3、4、5 条指令。

这样，设要完成一条指令的时间为 T ，则对分解为“分析”和“执行”二个过程时，其 $T=2\Delta t_1$ ；而对分

解为“取指令”、“指令译码”、“取操作数”和“执行”四个子过程时，其 $T=4\Delta t_2$ 。

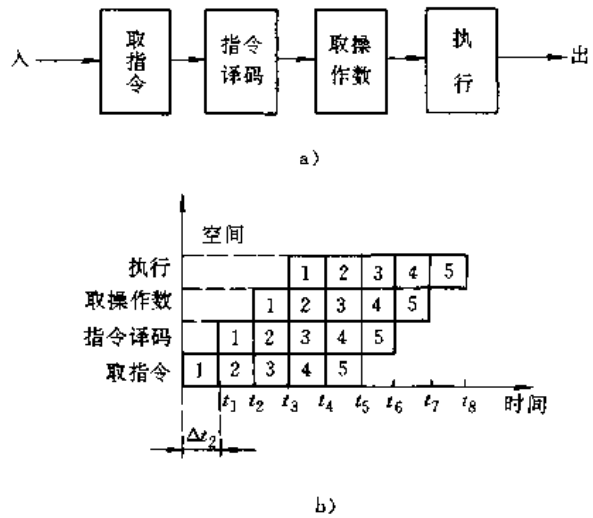


图 4-4-12 流水处理的时空图

a) 指令解释的流水处理 b) 指令解释的时空图

虽然完成一条指令所需时间仍是 T ，但对图 4-4-11 是每隔 $\Delta t_1=T/2$ 就可由处理机“流出”一个结果，即吞吐率提高了一倍；而对图 4-4-12 是每隔 $\Delta t_2=T/4$ “流出”一个结果，即吞吐率提高了 3 倍。可以看出，此种工作方式和工厂中流水线的概念是相同的，那里也是每隔 Δt_2 由流水线流出一个产品，而制造这个产品的总时间却可能比 Δt_1 大得多。“流水方式”，这个术语是借用了流水生产线的名词。

显然，“重叠”和“流水”在概念上是密切联系的。可以这样看：“一次重叠”和“流水”的差别在于前者是把一条指令的解释过程只分解为两个子过程，而后者则可分解为更多个子过程。一次重叠可同时解释两条指令，而图 4-4-12 的流水可同时解释 4 条指令。

注意：当流水线正常流动时，每隔 Δt_2 会流出一个结果，然而，在指令刚开始流动时，情况并不如此，由图 4-4-12 可以看出，在 t_4 之前（即首条指令流入后的 $4\Delta t_2$ 时间内）流水线并没有流出结果。也就是说，对首条指令来讲，流水方式和顺序方式是一样的。

2. 流水结构 流水结构类型众多且分类各异。以图 4-4-12 的流水结构开始分析，它可以向上和向下扩展。

向下扩展是指进一步分解成更多子过程。由于吞吐率与 Δt_1 成反比，而 Δt_1 又与子过程的个数成反比，所以若能分解成流水进行的更多个子过程，而且各个子过程的完成时间大致相等，则吞吐率就会进一步



增大。

从图 4-4-12 看向上扩展,可理解为由两个以上的处理机串行地对数据集进行处理,如图 4-4-13 所示。若进来的数据集需要多个任务的处理,且安排成各个任务分别由不同的处理机处理,则由于各个处理机都能同时工作,因此能流水地对不同的数据集进行处理,从而使处理能力得以较大提高。当然,在每个处理机内部,还可采用相应的流水技术。

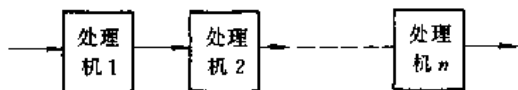


图 4-4-13 处理机间的流水处理

流水结构还可分为“动态”和“静态”以及“单功能”和“多功能”类型。“单功能”指的是只能实现一种功能(如只实现浮点加、减法或只实现乘法)的流水处理。多功能则是指同一流水线可以有多种联结方式以实现多种功能。例如 ASC 的运算器流水结构就是多功能的。它有 8 个可并行工作的独立功能块,如图 4-4-14a 所示。如果进行浮点加法或减法运算时,各功能块的联接如图 4-4-14b 所示,当进行定点乘法运算时,各功能块的联接如图 4-4-14c 所示。

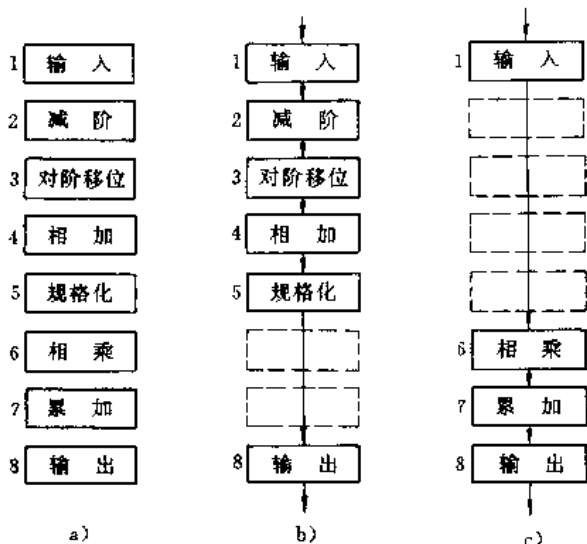
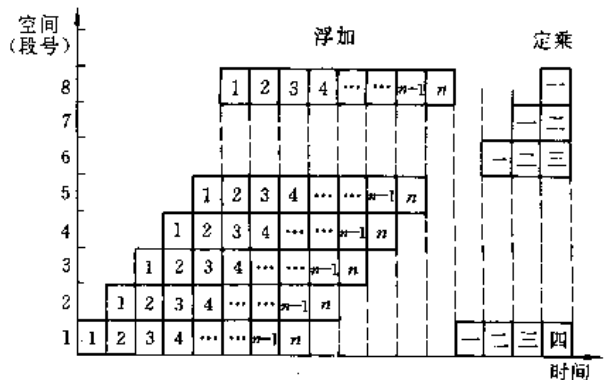


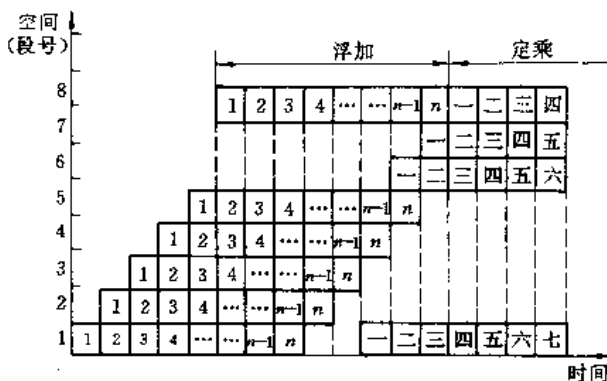
图 4-4-14 ASC 多功能运算器功能块图

a. 静态流水结构 指的是在同一时间内上述多功能结构中所有功能块只能按同一种运算的联结方式工作。例如,上述 ASC 的 8 个功能块或者都按浮点加、减运算,或是都按定点乘法运算,其静态时空图如图 4-4-15a 所示。

b. 动态流水结构 指的是在同一时间内,上述多功能结构中的各个功能块可按不同运算的联结方式工作。例如 4-4-14 的各个功能块可以做到在同一时间内,当某些功能块正在实现某种运算(如定点乘)时,另一些功能块却在实现另一种运算,其动态时空图如图 4-4-15b 所示。



a)



b)

图 4-4-15 动、静态多功能时空图举例

a) 静态 b) 动态

5 精简指令集计算机 (RISC)

5.1 RISC 技术的形成与发展

从计算机指令系统设计的角度看系统结构,当前可分为两大类:复杂指令集计算机 (Complex Instruction Set Computer——CISC) 和精简指令集计算机 (Reduced Instruction Set Computer——RISC)。以前所讨论的内容,主要以 CISC 为基础。七十年代末 RISC 技术形成以来,发展非常迅速,对计算机系统结构设计产生巨大的影响。

七十年代中期,IBM 公司开始研究指令系统的合理性问题。在对各条指令使用频度的统计分析中发现,



对于一个典型程序,其运行过程中所使用的指令,有80%的指令只占指令集中的20%,也就是说,在一组庞大的指令集中只有20%的指令是频繁使用的,其余80%的指令则不经常使用。

事实上,频繁使用的指令比如取数、存数、加法等,它们的操作却又非常简单。而不经常使用的指令,其操作却往往比较复杂。在对指令系统合理性研究以后,提出了不宜采用复杂指令系统的一些理由:

- (1) 各种指令使用频度相差悬殊;
- (2) 指令系统的复杂性,带来了系统结构的复杂性,增加了设计时间和造价;
- (3) 增加了VLSI设计的负担,不利于微机和单片机的向高档机发展;
- (4) 复杂指令的操作复杂,速度慢。

因此可以认为RISC技术是以精简指令为手段,以达到高性能(高速度)为目的。

1982年加州伯克莱大学的RISC机、斯坦福大学的MIPS机、IBM公司的801机宣告完成。从1983年开始推出商品化的RISC机以来,RISC机几乎已占据了整个计算机市场,比较著名的有IBM RT系列、HP公司的精密结构计算机(HPPA)、SUN公司的RISC芯片(称为SPARC)、DEC公司的 α 芯片等等。

5.2 RISC设计原则与技术措施

RISC概念的提出旨在采用精简指令系统,从而简化计算机结构和缩短程序的有效运行时间。一般应遵循如下原则:

- (1) 选取使用频度最高的少数指令;
- (2) 大多数指令应在一个机器周期内执行完;
- (3) 所有的指令长度和格式相同;
- (4) 除了“存数”和“取数”指令外,其余指令的数据传送都应在寄存器之间进行;
- (5) 以简单有效的方式支持高级语言。

RISC设计强调“单周期运行”,在每个机器周期,处理器可以执行一条指令。一台传统的处理器和RISC处理器相比,如果它们采用相同的器件技术,两者程序运行的时间差别,取决于执行单条指令所需要的机器周期数和程序指令条数。一般来说,RISC机器在运行一个大程序时比传统机器快2~5倍。RISC设计中的单周期执行原则,使大多数指令在一个周期内完成,大大减少了每条指令的执行周期数,与此同时稍稍增加每个程序的指令数,从而换取了总的性能提高。

RISC设计原则是通过以下部分或全部技术措施

的组合来实现的。

1. 硬件控制,少用或不用微码控制 目前的CISC机器几乎全有微程序控制器,复杂的指令由软件子程序(微程序)来实现。这样可使硬件设计简单,指令系统便于修改,在研制新机器时可利用现有资源,缩短研制周期,降低研制费用。但微码的采用使机器的执行速度下降(要经过一次解释),即使简单指令的执行也要耗费几个机器周期,增加了每条指令的周期数。RISC机器去掉指令系统中的复杂指令,采用精简指令集,指令的执行可直接由硬件实现。高级语言可以通过一次编译直接生成可由硬件执行的机器代码,缩短了执行一条指令的周期数,在较大程度上提高了执行速度(2倍左右)。

2. 简单的寻址方式和寄存器操作 在传统机器中,复杂的指令系统有多种指向内存的寻址方式,在程序执行过程中,需要处理器按不同的寻址方式计算内存的有效地址,影响指令执行速度。RISC机器采用固定的指令长度和格式。一般为32位指令字长,除了取数、存数外,所有指令都是寄存器-寄存器操作方式,操作比较简单,缩短了指令执行时间。由于对访存指令的限制,多数指令执行中,数据只在寄存器之间传送,这是获得单周期执行的关键之一。

3. 重叠寄存器窗口技术 RISC设计对高级语言的支持,主要体现在过程调用时,提高程序运行速度。根据对高级语言中各类语句的使用频度以及它们对程序运行速度影响的统计分析资料表明,过程调用访存频度是较高的。RISC机器,对于各类复杂语句,要用更多的子程序调用,如果仍然采用与CISC同样的调用方式,势必增加了调用次数和访问内存的频度,大大影响程序运行速度。

RISC设计采用重叠寄存器窗口技术来加速过程调用的方法。

重叠寄存器窗口技术的基本设计思想是,在硅片上做一个大的寄存器组,这些寄存器分成多个窗口,分配给各个过程使用。每个窗口分成三个区:IN、LOCAL和OUT。LOCAL为本过程专用,IN和OUT区用于过程调用。调用过程的OUT区和被调用过程的IN区重叠(实际上是使用同一组寄存器),以达到过程调用时的参数直接转移,无需访问存储器,实现无时延的参数传递。窗口的数目由过程调用的嵌套深度决定。图4-4-16示出一种重叠寄存器窗口技术方案。图中过程的高低依次为:过程A、过程B、过程C。由高过程依次调用低过程。采用此方案,当一个过程去使用它的



寄存器口 IN 区或 OUT 区时,实际上已完成了与其他过程的参数交换,这种交换过程没有任何延迟,除非超过了寄存器容量,出现溢出,才会引起存储器访问。

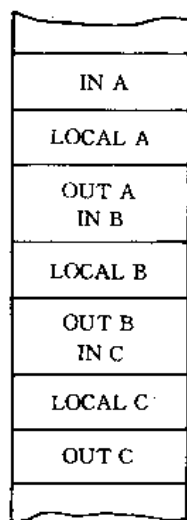


图 4-4-16 重叠寄存器窗口

4. 流水线技术 在现代处理器设计中流水线技术是提高指令平均执行速度的有效方法。传统机器由于各条指令的执行时间差异很大,使指令流水线的效率难以提高,有时会使流水线的执行过程处于短暂的停滞状态。比如,当处理器遇到一条执行时间较长的复杂指令,它必须延长这条指令的操作时间,这样要阻止后继指令在流水线中正常执行流水操作,直到这条复杂指令操作完毕。这样降低了运行效率,硬件结构设计复杂。在 RISC 设计中,由于各条指令执行时间基本上是一个机器周期,能预测指令执行时间,使流水线在高效率状态下运行。因此, RISC 机器一般采用流水线结构,在执行当前指令的同时,预取下条将要执行的指令。

引入流水线结构,就有可能发生流水线断流的问题,主要是在遇到转移指令和数据相关问题时,指令流会被截断,引起时间延迟。解决延迟的办法,可以由 RISC 优化编译程序自动完成。

5. 优化编译程序 在 RISC 设计中,访内存和条件转移都可能出现影响流水线效率问题。然而 RISC 机器不是靠使用复杂、昂贵的硬件,而是依靠优化编译程序,自动地重新排列指令顺序等方法去解决。

由于访问内存引起的时间延迟,可以通过合理地利用寄存器,使之达到延迟最小。例如,当一个寄存器的内容要为后继指令运算时所利用,不必写入存储器,然后再从存储器中去读取,这种情况,优化编译程序可以识别出来,给以安排。又如当访问内存是不可避免

时,编译程序也能为前后指令的执行顺序重新排列,使得处理器在等待数据读入寄存器这个时间内,有其他指令在流水线上执行,不需要空等取数时间。

条件转移是流水线断流的主要因素,通常用“延时转移”的办法来处理,即在转移指令后插入一条空指令,从而使转移目标指令的读取推迟一个周期。为了避免空等一个机器周期,在转移指令的判断条件及计算地址时间里,由编译程序安排读取紧接着的下一条指令。但是,这条指令是否真正能够执行,要看转移条件是否成立。如果成立,就发生转移,读取转移目标指令,取消这条被插进来的指令。相当于执行了一个无操作指令。如果条件不成立,不发生转移,该指令执行有效。

数据相关问题在 RISC 机器里,主要发生在执行 LOAD/STORE 指令时。优化编译程序合理地调正指令执行次序,加快了程序执行速度。例如,有下列四条指令:

| 调整前 | 调整后 |
|--------------|----------------------------|
| LOAD A, R | LOAD A, R ₁ |
| STORE R, B | LOAD A+1, R ₂ |
| LOAD A+1, R | STORE R ₁ , B |
| STORE R, B+1 | STORE R ₂ , B+1 |

这四条指令的作用是通过取数操作把 A 和 A+1 两个存储单元的内容转存到 B 和 B+1 两个存储单元中去。左边是调正前的程序,LOAD 和 STORE 交叉,并使用同一个寄存器 R。当上条指令未完成时,下条指令无法执行,每两条指令之间必须等待一个机器周期。右边是调正后的程序,当第一条指令 LOAD 进行取数时,后一条 LOAD 指令就可以开始执行,使每个周期都有新的指令开始执行,这样提高了流水线效率,从而提高了程序的运行速度。

流水线和优化编译技术与 RISC 相结合比传统机器更有效。RISC 结构的大量寄存器、少而简的指令系统以及单一的寻址方式,使得它比较容易设计出能较低限度地访问内存,能够识别计算序列、能够识别最有效地使用流水指令的编译程序。

6. 内存的分层技术 由于 RISC 机器提高了 CPU 性能,这就非常必要提供一个快速有效的内存层次,使它与处理器的效率相匹配。在 RISC 设计中,内存层次由大量的芯片寄存器、用于分离数据区和指令区的快速静态存储器、写缓冲区、芯片内存管理等几部分组成。由于当前半导体存储器的密度和速度不断上升,而价格下降,有利于设计出高性能的内存层次结构来支持 RISC 处理器的速度。



第5章 电子计算机的存储系统

1 概述^[1]

1.1 存储器的基本概念

存储器是组成计算机必不可缺的五大部件之一，是计算机的记忆设备。进入计算机的程序、数据都应放在存储器中，然后根据计算机运算的不同需要对它们进行相应的处理。一般情况下输入设备在CPU的控制下把程序和数据输入到存储器中，CPU从存储器中读取程序和数据，在存储器中的数据才能通过输出设备输出到计算机之外。存储器是计算机的记忆核心，是程序和数据收发集散地。可以给存储器下这样的定义：它是计算机中用于存放程序和数据。一般根据存储器的特性将存储器分为主存和辅存，也称内存和外存，CPU能够直接访问的存储器定义为主存（内存），不能直接访问的存储器定义为辅存（外存）。

存储系统指存储器硬件设备以及管理它们的软、硬件。由于计算机对存储器提出的基本要求是大容量、高速度、低成本，单一的存储器很难满足以上要求。因此将不同的存储器合理、有机地组织起来构成了计算机的存储体系，如图4-5-1所示。

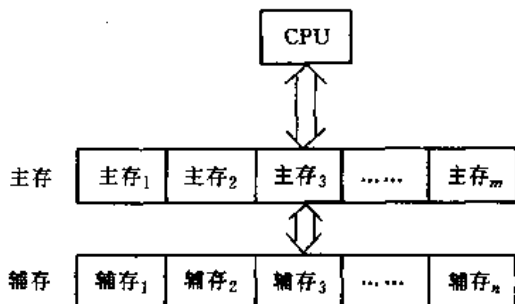


图4-5-1 存储体系示意图

1.2 存储器的作用

存储器作为计算机的记忆核心有如下几个方面的作用：第一，存储器是计算机中信息存储的核心。存储器象一个使用频繁的档案馆，任何客户可以随时检索其中存放的档案，并可以利用这些档案。存储器中存放的信息可以随时提供给计算机的其它部件使用，在以

存储器为核心的体系结构中，进入计算机的信息必须存放在存储器中，计算机其它部件只能通过存储器进行信息的交换。第二，内存是CPU与外界进行数据交换的窗口，CPU所执行的程序和所涉及到的数据都由内存直接提供，运算结果也由CPU送回内存。第三，内存可以与CPU有机结合达到高速、准确运算的目的。正常情况下，计算机处理的数据不可能经CPU一次处理完毕，内存是唯一、有效地存放这些非一次性处理信息的场所。第四，外存可以在计算机间断运行期间保存必须的程序和数据。内存上的信息将随计算机的断电而消失，外存上的信息可以在计算机断电之后继续存在。第五，外存也是充当计算机间信息交流的一种有效手段，象磁盘、磁带等介质可以将程序和数据在不同的计算机之间进行传递。

因此，存储器是计算机中信息的存放地，是CPU与外界进行数据交换的窗口，是计算机的有机组成部分。

1.3 存储器的性能指标

由于存储器本身的特点和在计算机中的作用，在评价存储器、存储体系的优劣时一般考虑容量、速度、价格等几个方面的因素。这些因素一方面影响着存储器发挥其作用，同时也影响着计算机整体效率的提高。一般情况下，容量大的存储器在速度上很难与CPU的速度相匹配，而能与CPU的速度相适应的高速存储器在容量上和价格上又是一般人所难以接受的。因此，如何评价各种不同存储器的性能，根据它们的性能指标选择组织合适的存储体系是非常重要的。常用评价存储器的主要性能指标有：

1. 存储容量 存储器可以容纳的二进制信息量为存储容量。存储容量一般有两种解释，一是指整个内存存储器或外存储器的容量；一是指一个功能完备的基本存储体（如集成电路块）所能汇集的最大信息量。通常用字数 x 位数或用字节数表示存储器的容量。常用单位为字节（Byte）、千字节（kB）、兆字节（MB）和吉字节（GB），它们之间的关系是：

$$1\text{kB} = 2^{10}\text{Byte} = 1024\text{Byte}$$

$$1\text{MB} = 1024\text{kB} = 1048576\text{Byte}$$



1GB=1024MB=1048576kB=1073741824Byte

一般来说,存储器容量越大,允许存放的程序和数据越多,越利于提高计算机的处理能力。

2. 存取时间 信息存入存储器的操作称为写操作,信息从存储器取出的操作称为读操作。存取时间是描述存储器读/写速度的重要参数。为了提高内存的工作速度使之与CPU的速度匹配,总是希望存取时间越短越好。一般用读/写时间、读/写周期和存取速度等指标来衡量存取时间。

读/写时间是指从存储器接到读(或写)的命令到完成读取(或写入)操作所需的时间,通常也称为存储器访问时间(Memory Access Time),用 T_A 表示。 T_A 取决于存储器中存储介质的物理特性和访问机构的类型,目前大多数计算机的 T_A 在纳秒(ns)级。

读/写周期是指存储器完成一次完整的存取操作所需的时间,即存储器进行两次连续、独立的操作(读或写)之间所需的时间(包括读与写操作时间)。通常也称为存取周期(Memory Cycle Time),用 T_M 表示。通常 $T_M > T_A$,原因是存储器进行读写操作之后需要短暂的稳定时间,另外有些存储器电路刷新需要时间。

存取速度是指每秒从存储器读写信息的数量,用 B_M 表示。设 W 为存储器传送的数据宽度(位或字节),则有 $B_M = W/T_A$,单位为bit/s或Byte/s。

3. 可靠性 存储器的可靠性是指在规定的时间内存储器无故障工作的情况,一般用平均无故障时间衡量。平均无故障时间越长,表示存储器的可靠性越好。

4. 性能/价格比 性能/价格比是衡量存储器的综合指标。通常要根据对存储器提出的不同用途,不同环境要求进行对比选择。一般用每字节价格 c 表示。 $c = \text{总价格 } A / \text{总容量 } S$ (单位为元/字节)。其中总价格 A 不仅包括存储器本身的价格,同时也包括存储系统中所必需的逻辑电路的价格。对于包括多种存储介质的存储体系,通常用平均字节价格 \bar{c} 来表示其性能价格比。设共有 n 种存储器,其中 A_i 为第 i 种存储器的价格, S_i 为第 i 种存储器的容量,则平均字节价格为

$$\bar{c} = (A_1 + A_2 + \dots + A_n) / (S_1 + S_2 + \dots + S_n)$$

1.4 存储器的分类

根据存储器的存储介质及使用方法不同,有不同存储器的分类方法。一般常用的有:

1. 按存储介质分类 用来制作存储器的物质称为存储介质。根据目前常用的存储介质可以把存储器分为半导体存储器、磁存储器和光存储器三种,

用半导体元件组成的存储器称为半导体存储器。主要包括由不同规模的集成电路组成的存储器。

用磁性材料组成的存储器称为磁存储器。主要包括磁心存储器、磁盘存储器和磁带存储器,后两者由于是将磁性材料涂在金属或塑料表面上制成,一般也称为磁表面存储器。

用光学原理制成的存储器称为光存储器。如正在发展的各种不同规格的光盘存储器。

2. 按存取方式分类 按照存储器的不同工作方式可以将存储器分为随机存储器(RAM)、只读存储器(ROM)、顺序存储器(SAM)和直接存取存储器(DAM)。

若存储器中任何存储单元的内容都能被随机存取,而且存取时间与存储单元的物理位置无关,则称它们为随机存取存储器(RAM)。半导体存储器和磁心存储器都是RAM。其特点是存取速度快,容易与CPU的速度相匹配,一般用于计算机的内存。

若存储器只能按某种顺序存取,即存取时间与存储单元的位置有关,则称它们为顺序存储器。磁带存储器是一个典型的顺序存储器。其特点是存储容量大、存取速度慢,但每个字节价格较低,一般用于计算机的外存。

若存储器存取数据时不必对存储介质作事先顺序搜索而直接存取信息,则将它们称为直接存取存储器(DAM)。磁盘存储器和光盘存储器是典型的DAM。其特点是存储容量大、存取速度介于RAM和SAM之间,一般用于计算机外存。

若存储器中的内容不能被刷新,各存储单元的内容只能读不能写,则将它们称为只读存储器(ROM)。通常ROM在内存中被用作存放重要的系统程序。

3. 按信息的可保护性分类 根据存储器中信息的可保护性可以将存储器分为永久性存储器和非永久性存储器。

断电后信息将消失的存储器称为非永久性存储器,一般的半导体存储器除ROM外均是非永久性存储器。它们可以分为动态和静态存储器两种。动态存储器依据存储单元内部的电荷保持信息,在使用过程中要经常刷新,静态存储器则依靠电源的电压保持信息。

断电后仍保持信息的存储器称为永久性存储器。磁盘、磁带存储器是典型的永久性存储器。永久性存储器的内容可以不依赖于计算机的运行而存在,因此主要用于计算机的外存,用来保护长久使用的信息。ROM也是一种特殊的永久性存储器。

4. 按所处位置及功能分类 按存储器所处的位置及功能可以将它们分为与CPU紧密相联的主存(内存)和辅助(外存)两类。

内存可以被CPU直接访问,由RAM和ROM组成,能快速进行读写操作。早期的内存通常由磁性存储器——磁心充当,随着半导体和集成电路技术的发展,目前是由半导体存储器充当计算机的内存,其容量在几十kB至几百MB之间。如此容量的内存仍不能满足存放日益丰富的计算机程序和数据的需要,因此在存储器设计中将大量处于不运行状态的程序和数据放置在内存之外以节省内存空间。

CPU不能直接访问的、存放暂时不用的程序和数据存储器称为计算机的外存。一般是由容量大、速度较慢、价格低的磁表面存储器和光存储器等充当。

2 主存储器

2.1 只读存储器 (ROM, Read Only Memory)

ROM是用外部手段写好程序的只能读出不能随意改写的一种存储器,是引导程序、监控程序、例行程序和汇编程序等等固定程序的存储器。只读存储器是非易失性的存储器,它所存储的内容不会因断电而丢失。

ROM往往是主存储器的一部分,它的编址范围就在主存储器的编址范围之内,占有一定的地址空间。

在有些单板机中ROM的容量比随机存取存储器的容量还大。

只读存储器的电路简单,故集成度高,速度快,可靠性高,成本低。

只读存储器可采用不同的存储元件做成,见表4-5-1。

目前广泛使用半导体集成电路只读存储器,它分为三类:

1. 固定掩模只读存储器 在集成电路制作时用固定掩模进行编程,改变只读存储的内容就得重新设计掩模。因此成本高,生产周期长,从而限制了它的广泛应用。

2. 可编程只读存储器(PROM) 一种在封装后可编程序的半导体只读存储器。这种存储器的初始存储内容全为“0”或全为“1”,用户可以根据需要用电或光照的办法进行编写程序,但仅能进行一次。若编程存在错误,即不能使用。编写程序时用外加足够大的电流熔断电阻性连接线或永久性地击穿P-N结来写入信息。这种只读存储器多用半导体双极型工艺制成,用来存入仿真程序、微诊断程序、输入输出控制程序等,适于大量生产。

3. 可擦除可编程只读存储器(EPROM) 用电的方法或紫外线照射等方法可擦除已写好的程序然后再重新写入修改后的程序或其他程序,这一过程可以重复多次。EPROM给应用带来了很大的灵活性,且器件可以重复利用。

表 4-5-1 目前使用的只读存储器

| 名称 | 原理图 | 说明 | 特点 |
|------------|-----|-------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| 二极管矩阵只读存储器 | | 耦合元件是二极管,由字线、位线上交点有无二极管决定信号的有无,驱动线上加上驱动信号,在有二极管的位线上就有耦合信号输出 | 高速度,但不易做到大容量,目前有研究用真空沉淀半导体材料形成二极管矩阵的印制电路板构成的只读存储器 |
| 半导体只读存储器 | | 图中以镍铬熔丝有无决定“1”和“0”(有时称为FROM)。此外尚有多种形式,例如双极型等等 | 集成度高,速度快,功耗低,可靠性高 |



2.2 随机存取存储器 (RAM, Random Access Memory)

存储单元的内容既可以读出又可以写入，而且存取时间与存储单元所在的地址无关的存储器称为随机存取存储器。主存储器主要由随机存取存储器组成。磁芯存储器和半导体存储器均属随机存取存储器。半导体存储器已取代磁芯存储器成为计算机的主存储器。

半导体随机存储器分双极型和 MOS 型两种。

1. 双极型存储器 以双极型晶体管作单元电路和外围电路的基本元件，并用双极集成工艺制成的存储器。由于双极型晶体管的开关时间短，其存储的速度大约比 MOS 型的快 10~30 倍左右。正因为它有速度快、稳定性好、开启电压低等优点，特别适合作小容量高速缓冲存储器。双极型存储器可以是 TTL (晶体管-晶体管逻辑) 逻辑也可以是 ECL (发射极耦合) 逻辑。ECL 比 TTL 有更高的速度 (见表 4.5-2)。

表 4.5-2 几种双极型存储器参数

| 电路形式 | 容量 (位) | 取数时间 (ns) | 每片功耗 (mW) | 组件引出线数 |
|------|--------|-----------|-----------|--------|
| TTL | 64 | 60 | 90 | 16 |
| ECL | 128 | 15 | 410 | 16 |
| ECL | 256 | 25 | 410 | 16 |
| TTL | 1024 | 125 | 150 | 16 |
| ECL | 1024 | 50 | 510 | 16 |

2. MOS 型存储器 MOS 即金属氧化物半导体存储器，是用金属氧化物半导体场效应晶体管作基本元件的大规模集成电路存储器。它比双极型存储器速度慢，但集成度高、功耗低、价格便宜。常用作大容量的主存储器。

它的存储单元有两种基本电路：静态和动态，静态存储电路是由两个增强型 MOS 反相器交叉耦合而成的触发器这一基本单元构成，它存储信息的能力无时间限制，只要有电源供电就存储；动态存储器电路则只能暂时存储信息，所以必须对它进行定期地“刷新”以保持住所存信息。动态存储器的电路简单，功耗低，开关速度快。

表 4.5-3 给出的 MOS 型存储器与其他存储器的参数比较。

表 4.5-3 存储器的比较

| 存储器元件种类 | MOS 型晶体管 | 双极型晶体管 | 磁心 |
|--------------|-----------------|---------------|-----------|
| 存取时间 | 中速 100~300ns | 高速 20~60ns | 低速 1μs |
| 大小 | 极小 | 小 | 大 |
| 存储中功率消耗 | 中 | 大 | 没有 |
| 破坏读出 (需要再写入) | 单管是 | 不是 | 是 |
| 存储挥发性 | 有 | 有 | 无 |
| 价格 | 特别便宜 | 便宜 | 贵 |

2.3 高速缓冲存储器 (Cache)

主存储器的存取时间对计算机速度的提高总是个限制，随着 CPU 速度的不断提高和主存储器容量的不断增大，这一问题越来越突出。另外，对大量典型程序的分析表明，大部分程序的执行时间被消耗在几项主要的例行程序上。当执行这些例行程序时，某些指令重复执行。这可能是简单的循环、嵌套循环或是几个互相重复调用的过程，这种理解被称为局部访问。

若将当前常用的程序段临时存放在一个 CPU 可直接访问的小容量高速存储器里，则程序执行时间显著地减少。这种安排在 CPU 和主存储器之间的存取时间短、容量不大的存储器就称作高速缓冲存储器。为使这种结构有效，它的存取速度必须比主存储器高一个数量级。这种高速缓冲存储器—主存储器的存储结构是分级存储系统的一种，它与主存储器-磁盘存储器的结构，在概念上都是虚拟存储系统。CPU 可以只通过高速缓冲存储器访问所存储的内容，而主存充当辅助存储器的角色。然而这个辅助存储仍可直接寻址。

随着程序的不断地执行，高速缓冲存储器的某些内容要不断地补充或更新。通常高速缓存和主存的结构都是按页面安排的，高速缓存可放若干页的程序，当被访问的指令或数据不在高速缓存之内时，要按一组规则或算法来决定把那页或那几页从高速缓存中调出，腾出空间来以便调进包含被访问指令或数据的页面。主存储器与高速缓冲存储器之间页面的交换采用交叉存取技术，速度很高。

高速缓冲存储器由高速双极型半导体存储器组成，而主存储器则由 MOS 型半导体存储器组成。

2.4 虚拟存储器

一个计算机系统，它的系统程序和绝大多数应用



程序都存放在磁盘一类的辅助存储器中，只有在需要运行时才从磁盘调入主存储器。无论主存储器的容量有多大，也不能存放下所有运行的程序。较大的用户程序，程序员必须采用覆盖技术把程序分成若干段，只有在运行时才按段从辅助存储器调入主存储器。

把需要的程序和数据块自动由辅助存储器调入物理主存空间的技术叫虚拟存储技术。它是通过硬件和软件的方法将主存储器和辅助存储器的物理地址编排成为一个统一的连续的地址空间，称为逻辑地址空间，CPU 提供的寻址范围与逻辑地址空间对应，程序设计时无须再受主存物理地址空间的限制。

必须建立一个机构将 CPU 要访问的逻辑地址转换成物理上的存储地址，这就是地址转换机构。转换的结果，若在主存储器的物理地址范围之内，CPU 就直接访问主存储器；若不在主存储器的地址范围之内，则必须将要访问的内容从辅助存储器调入主存储器的适当的地址空间，然后 CPU 才能访问。

采用虚拟存储结构，必须将程序和数据分成固定长度的页面，每页长 1024 字或 2048 个字，每页无论在主存还是辅存中必须占据连续的地址空间。主存和辅存之间的信息交换总是以页为单位进行的。

主存和辅存之间的页面交换同高速缓存与主存之间的页面交换过程和采用的替换算法极其相似。但是，高速缓存概念旨在弥补 CPU 和主存之间的速度的差距，因此，不但要求高速缓存的存取时间要短，页面调度的过程也要快。而主存储器-辅助存储器的存储结构的概念在于解决主存容量不足的矛盾，通过用软件与硬件结合的方法解决地址变换和页面的调度问题。

以固定长度页面为基础的地址变换方法大致如图 4-5-2 所示。CPU 产生的每个虚地址，都用页号（高位）后随一个字号（低位）来表示。主存中的一个页面表指出在当前主存中的页面的位置。页面表的起始地址保存在页面表基址寄存器中，寄存器的内容加上页数就得到页面表中相应的入口地址。这个存储单元的内容指定了存入所需页面的主存存储块；若该页不在主存，该单元指向该页所在的辅助存储器。控制位指出这一页目前是否在主存。

当一新页要从辅存调入主存时，页面表里的信息包含在磁盘的何处能找到这些数据细节，它或许是主存中某个字块的一个地址指示器，这个字块存储着这些详细的信息。页面的传递通常由 I/O 通道或 DMA (Direct Memory Access——直接存储器存取) 操作来执行。

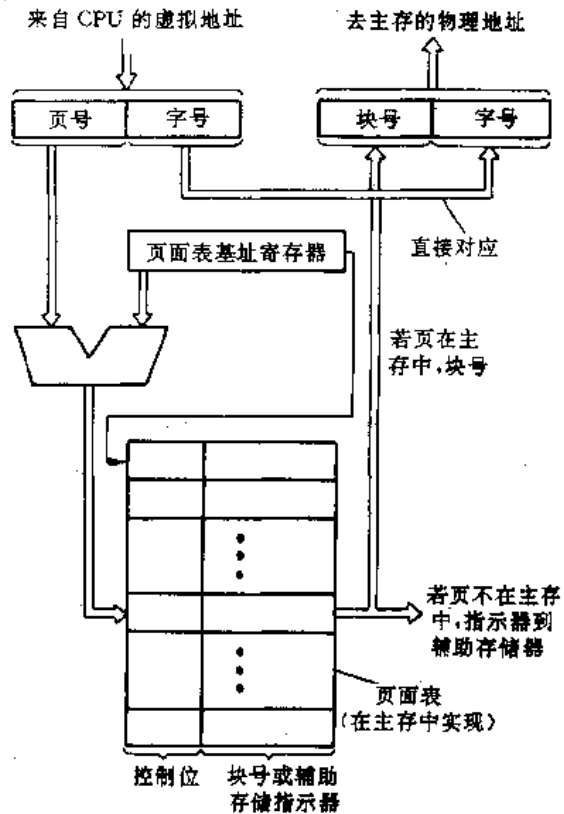


图 4-5-2 虚拟存储器地址转换

当调入一个新页时，必须采用某种算法确定把一页或几页从已满的主存中调出去。

页面表是存放在主存中的，查表要占用存取时间。用一个小容量快速存储器存放页面表，可以缩短地址变换时间，大容量的主存也可以减小页面调入调出的频度，提高系统的效率。

3 外存储器

计算机的外存储器也称辅助存储器，有硬磁盘存储器、软磁盘存储器、磁带存储器和光盘存储器。所有这些存储器基本都是基于磁记录原理。

3.1 磁记录原理与记录方式

1. 磁记录原理 凡是能记录和保存信息并且可携带的物体称之为信息载体，在金属或塑料等材料的表面涂上一层极薄的磁性材料，把信息记录在这些磁性材料的表面上，这就是磁表面记录。采用表面涂有磁性材料的不同材质、形状和运动方式的载体，可以制成不同的磁性存储器。

a. 信息存储原理 磁层由导磁材料制成，它必须有很大的剩磁强度。磁层厚度一般在 0.2~0.5μm 之间。为了使磁层磁化或感应出电动势来，要有磁头，磁



头是由高导磁率的软磁材料做成的电磁铁。把它安放在磁层的上方，在靠近磁层的地方开有一个很窄的缝隙，在磁头上分别绕上读写线圈，就可实现写和读信息了，存储原理见图 4-5-3。

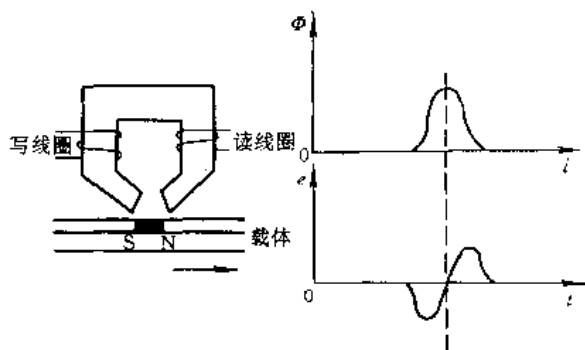


图 4-5-3 信息存储原理
 Φ —磁通 e —感应电动势
 l —长度(距离) t —时间

由电磁感应原理我们知道，当一个绕有线圈的铁心，在线圈通有电流的时候铁心就被磁化。如果铁心是马蹄形的，则在马蹄形的缺口处形成 N、S 两极，这两极中间形成一个磁场。把磁性材料放在磁场内部会被磁化。磁表面记录就是基于这个原理来存储信息。让马蹄形的磁头与磁层靠得非常近，使得空隙中的磁场能达到磁层表面(如图 4-5-3 的左边)，当要把信息写入磁层表面时，在写线圈中通过电流脉冲，在这脉冲期间，磁头铁心被磁化，在空隙处产生一个磁场。这个磁场就把下面磁层上的一小块区域磁化，这一小块磁化区域的方向与空隙的极性相反，它的长度就是电流脉冲持续期间载体所走过的长度。这样一小块区域就保存了一个信息。只要不对它改写，它就永远保持着。写“0”或写“1”可以用磁化的方向来区别，而磁化方向可通过改变写线圈中的电流方向来改变。第一个电流脉冲过去后第二个电流脉冲到来之间，载体走过了一定的距离。第二个电流脉冲又象以前那样使磁层一小块磁化，这样一直下去就在沿载体运动的方向使磁层磁化了一连串小区域，这就记录了一连串的信息。每个小区域之间未被磁化的空隙把每位信息清楚地分割开来。图 4-5-4 就表示了这种情况。一连串信息所在的路径叫作磁道，磁头向旁边移动一个位置，就产生了一条新的磁道。

b. 信息的读出 读出信息的时候，可将已被磁化成一连串小区域的磁层载体高速通过磁头缝隙的下面，这个磁化小区域的磁场就被磁头间隙切割，磁头磁路中的磁通量跟着磁化小区域的移动而变化，于是在

磁头读线圈中产生感应电动势，它的方向与磁通变化相反(见图 4-5-3 右边)，把它放大、整形后便得到原来记录的脉冲，也就得到了原来的信息。这里磁通的变化是由少到多再由多到少，每个磁化小区域形成的磁通变化的波形，及由磁通变化而感应出来的电动势的波形如图 4-5-3 所示。我们利用电动势的方向来区分“0”和“1”。

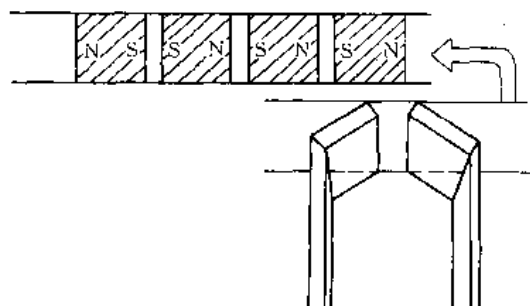


图 4-5-4 磁道的形成

2. 记录方式 上面讲了在磁表面上存储信息的原理，那么怎样正确地记录二进制信息呢?一般是将一连串二进制数据按特定的规律转换成相应的磁化状态，这种特定的规律称为记录方式或编码方式。在磁记录技术的发展过程中，围绕着提高可靠性和提高记录密度曾出现过多种记录方式，但目前用得最多的是以下几种记录方式。

a. 归零制记录方式(RZ) 所谓归零制记录方式，就是在磁头写线圈中通过正脉冲电流时作为写“1”信号，通以负脉冲电流时作为写“0”信号，不论写“1”与“0”在记录下一个信息之前，电流必须先回复到零(即无电流通过)。它可以用两种方法实现。

(1) 磁层原始状态没有磁化，这种方式是标准的归零制记录方式。磁层与正向磁化代表“1”，反向磁化代表“0”，在任意两个信息之间总有一个未被磁化的小间隙。如图 4-5-5 中 RZ1 所示波形。

(2) 磁层预先被反向磁化，这种记录方式先把磁层整个反向饱和磁化。正脉冲(正向磁化)还代表写“1”，负脉冲(反向磁化)还是代表写“0”，但是此时磁层已被反向饱和磁化，所以负脉冲电流实际上不起作用。它的好处在于：磁层原来已被反向饱和磁化，读出时的磁通量变化比较大，而且也不易受到干扰。图 4-5-5 中 RZ2 就是这种记录方式的波形。

b. 不归零制记录方式(NRZ) 记录信息时，如果在磁头的写线圈中不是通以正向电流就是通反向电流，而不存在无电流的时候，这种记录方式就叫作不归零制记录方式。



在这种记录方式中,磁层上正向饱和磁化表示写的信息是“1”,反向饱和磁化表示所写信息是“0”,在“1”与“0”的交界处磁化方向被改变。相邻的两个信息相同不改变磁化方向,不同时则改变磁化方向。这种记录方式的磁层磁化状态表示在图 4·5-5 NRZ 波形中。

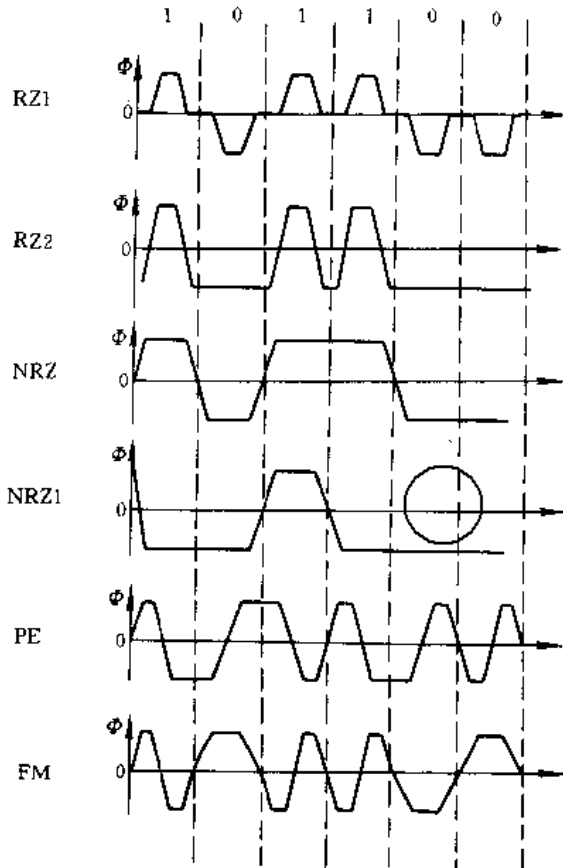


图 4·5-5 磁介质的几种记录方式

图 4·5-5 中 NRZ1 波形表示的是一种变相的不归零记录方式,叫做不归零—1 制。由图可见,这种记录方式的特点是:不论原来是什么磁化方向,只要是写“1”就要改变原来的磁化方向;凡是写“0”时则不改变原来的磁化方向。因此在读出的时候,读“1”有感应电动势产生,读“0”则没有感应电动势产生。然而,同样是“1”,感应出来的电动势的方向却不同,但只要感应电动势就是“1”,否则就为“0”。变相不归零制记录的密度比归零制提高一倍。

c. 调相制记录方式 (PE) 在这种记录方式,写“1”时的磁化方向是先正后负,写“0”时的磁化方向是先负后正,相当于两个不同的相位,根据相位可以区分“1”和“0”。图 4·5-5 中 PE 波形表示出这种记录方式的磁化状态。

d. 调频制记录方式 (FM) 调频制记录方式,也称倍频制记录方式。它是用不同的频率来代表“1”和“0”。图 4·5-5 中 FM 波形就表示这种记录方式,这里记录“1”的信号频率是记录“0”的信号频率的两倍。这种记录方式能提高记录密度。

现在计算机外存储器中最常使用的是不归零制和调频记录方式。

3.2 硬磁盘存储器

硬磁盘存储器作为主要外存储设备,广泛地用于各类计算机系统,实现虚拟存储器。是数据库和各种文件系统的重要支柱。硬磁盘存储器种类越来越多,不断改进的主要方向是增加密度和存储容量。但到目前为止,其基本原理没有变化,虽然已提出和制做了垂直磁化的磁头和盘面,但是还没达到实用阶段。

磁盘存储器由磁盘控制器和由它控制下的若干硬盘驱动器组成。

1. 硬磁盘驱动器 硬盘驱动器 (HDD, Hard Disk Driver), 根据结构和性能可分为固定头式、活动头固定盘式、活动头可换盘式几种。其中活动头固定盘式驱动器的磁头数比固定头式的少,提高了磁道密度且便于整体封装,应用较广,温式磁盘就属这种类型。

a. 硬磁盘驱动器的特点 与软磁盘驱动器 (FDD) 相比, HDD 有如下一些主要特点:

(1) 硬磁盘的盘片用铝合金制成,比较坚硬,而软磁盘的盘片由聚酯塑料制成,比较柔软,故分别称硬盘、软盘。

(2) 为了不损伤盘面的磁层, HDD 采用浮动磁头进行读/写,浮动磁头与盘面的间隙在几个微米之内,而软盘驱动器采用接触式读/写。

(3) 为了使磁头浮动起来, HDD 的主轴转速比较高,一般在 2400~3600r/min,而软盘驱动器的主轴转速一般为 360r/min。

(4) HDD 的存储容量大,一般在几十兆至几百兆字节,而软盘片只有几百 K 字节至几兆字节。

b. 基本结构及工作原理 HDD 是一种精密的电子机械装置,即有精密的机械结构,又有一套复杂的控制电路。不同类型的驱动器的具体结构虽有差别,但其基本结构是相同的。以下用可换盘盒、活动磁头的磁盘驱动器为例,介绍 HDD 的具体结构及其工作原理。其基本结构由主轴系统、数据转换系统、磁头驱动和定位系统、空气净化系统和接口电路等五部分组成,见图 4·5-6。



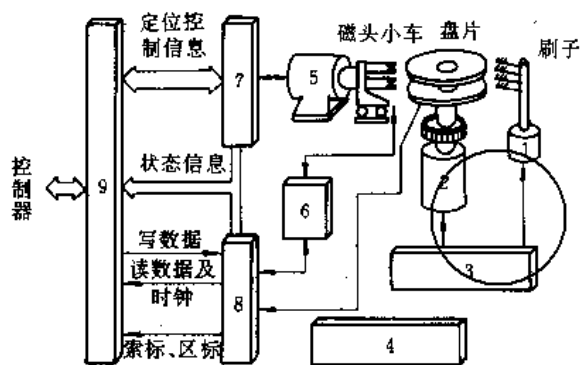


图 4-5-6 HDD 的基本结构

- 1—刷电动机 2—主轴电动机 3—控制电路 4—空气过滤器 5—音圈电动机 6—磁头选择电路 7—定位电路 8—索标、区标电路 9—接口电路

主轴系统由主轴电动机、主轴部件、盘片和控制器等组成。该驱动器有两个盘片，一个固定盘片，一个可换盘盒。主轴系统的作用主要是安装、固定盘片和盘盒，并驱动它们以额定转速稳定旋转。

数据转换系统包括磁头、磁头选择电路、读/写电路、索标和区标电路等。它的作用是接收来自主机的数据并写入到盘片上，或从盘片上读出数据并送回接口电路。

磁头驱动和定位系统由驱动和定位两部分组成。磁头驱动主要由磁头小车、音圈电动机来完成，磁头定位主要由定位电路控制完成。空气净化系统由风机、空气过滤器、刷电动机及其控制电路组成。它的主要作用是防尘、冷却和清洁盘面。

接口电路和作用主要是完成驱动器与磁盘控制器之间的数据传输。主要是接收和发送电路。

HDD 的工作过程是：在写入时，由控制器送来要写入的数据，通过接口送到写入电路，磁头选择电路选择好要写入的磁头，磁头驱动和定位系统把磁头定位在要写入的磁道的位置上，然后数据就可以写入到选定的盘面、磁道和扇区上；读出时，由磁头选择电路选定磁头，磁头驱动和定位系统使之定位在要读出的磁道位置，然后由磁头读出相应扇区的信息，通过读电路将读出的信号放大、滤波、整形等，然后送到接口电路。

c. 主轴系统 主轴的转速达 2400~3600r/min，这么高的转速，对其结构和制造精度的要求很高。

1. 主轴的结构 主轴的结构常见的有两种，一是将驱动电动机的主轴延长直接作为磁盘组的主轴，另一种是将驱动电动机的主轴加磁盘组的主轴通过联轴节连成主轴系统。前一种要用专用电动机，后一种则可

用普通电动机。对主轴电动机的要求是：起动力矩大、轴速均匀、噪声小、旋转精度高。小型磁盘机采用第一种主轴者居多，而大型磁盘则多采用第二种主轴形式。

2. 主轴的转速控制 驱动器主轴电动机的转速不仅影响读/写数据的可靠性而且也影响磁头的浮动，若转速过低，磁头不能浮起，将造成磁盘片磁层和磁头的损坏。因此要对主轴电动机的转速进行控制，以保证驱动器能正常工作。对于无刷直流电动机可以通过改变定子绕组电流来调节转速，为了检测出主轴的转速需要使用速度检测电路。测定主轴转速的原理，一般是将索标、区标信号的周期与一固定频率信号的某个计数值所用时间进行比较，若索标信号周期比由那个表示正常转速的计数值所用时间长，就说明主轴转速低，则控制电路就加大定子绕组的电流，以提高直流电动机的转速；否则，说明转速正常。具体实现这一要求的电路方案很多。

3. 磁盘组 将若干片磁盘在机械上组装成一个整体叫磁盘组。每个磁片有两个记录面，但为了可靠和保护的目的，磁盘组的顶面和底面是不用的。对于活动头式的驱动器来说，每个记录面对应地有一个磁头，磁头不移动时，磁盘组旋转一圈在磁头下方形成一个同心圆，叫做磁道，每个面上可有几百个磁道，磁道的序号是从外向内排列的。在各个磁盘面上的具有相同半径的磁道在空间上构成一个圆柱面，相当于一个磁鼓的柱面。显然，每个盘面上有多少磁道，则磁盘组就有多少个柱面，柱面的序号同磁道的序号。每个磁道又分成若干弧段，叫区段。每个记录面上，靠近轴心的部分和外缘都是不用的，所以有效磁道只分布在盘片的中间部分，这是因为外缘容易破损，靠近圆心的部分不用则是磁头不能与主轴靠得太近。再有，每个磁道上记录的信息量是相等的，但由于每个磁道上的线速度不同，记录密度不同，若内外磁道上读出信号的频率相差太大，对放大器的带宽要求就高，这是另一个原因。

图 4-5-7 是具有 11 个盘片的磁盘组的关于盘面号、磁道号（圆柱面号）及其排序的示意图。

磁盘存储空间也必须编址，才能确定信息存储的具体部位。有了磁盘的盘面号（对应磁头号），圆柱号就可确定磁道号。

从主机传送过来的信息一般是以字节或字的长度一个一个传送的，是并行的。那么怎样往磁盘写入呢？一种办法是一次只选中一个磁头往同一个盘面上一个磁道一个磁道地写，这就是将一个字节或一个字串行地写入；另一种办法是每次选择 8 个磁头或与字长相



等数目的磁头在一个柱面上一次写一个字节或一个字,这就是并行写入;或者以上两种办法的结合。这取决磁盘存储器控制器的设计。

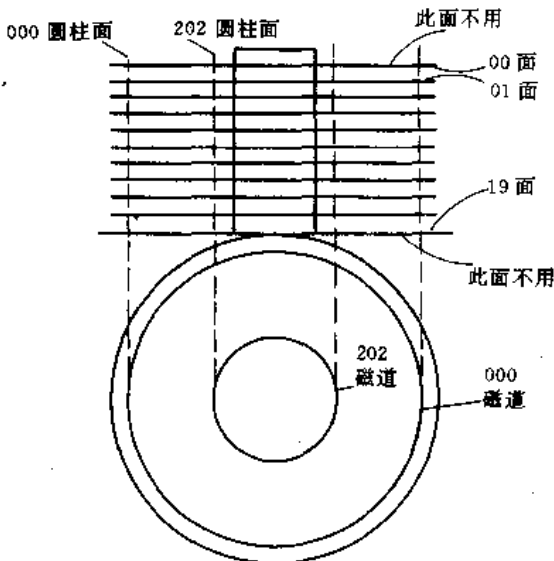


图 4-5-7 磁盘组示意图

d. 磁头驱动和定位系统 磁头驱动和定位系统是活动头磁盘驱动器的重要组成部分。目前,磁头驱动主要使用步进电动机和音圈电动机的驱动装置。音圈电动机驱动比步进电动机驱动有更高的记录密度和更快的存取时间,因此大容量磁盘驱动器多采用音圈电动机驱动。磁头定位系统分开环系统和闭环系统两大类,硬磁盘驱动器常采用闭环系统。

(1) 音圈电动机。音圈电动机可直接驱动磁头作直线运行,因此,又称直线电动机。是一种快速、高精度的驱动、定位装置。音圈电动机的工作原理与常见的扬声器相似,当电流加入音圈后,音圈产生运动,其运动的速度与方向随电流的大小和方向变化,将载有磁头的小车与音圈固定在一起,当音圈运动时,也就驱动磁头作直线运动。

(2) 磁头定位系统。磁盘机的读/写操作,要求磁头定位系统使磁头快而准地定位在目的磁道的道中心。为了实现这一要求,一般的定位系统都设计成两种控制方式。一种是当磁头所在的磁道与目的磁道不同时,也就是磁道地址的差值大于零时,按“时间最优”函数关系控制磁头以最短运行时间到达目的磁道。为了实现这一原则,一般是在启动音圈电动机时将按差值大小的不同往音圈电动机的定子绕组中通以相应的最大电流,使磁头作加速运动,当速度达到最大时,随着差值的减小,磁头作减速运动,使其平稳地接近目的磁道。这一段时间称作粗控,即速度控制阶段。而后按

磁道位置的模拟信号进行控制,以实现磁头准确的定位在目的磁道的中心,这一过程称为精控即位置控制过程。实现这一控制的逻辑和电路方案可以各式各样,但以下四部分不可缺少:

1) 磁头位置检测,在磁头定位系统中,过去常使用齿条感应式传感器,光栅位置检测装置和感应同步式位置检测装置等检测磁头的位置。这些适合早先的低密度磁盘驱动器,在磁道密度大于 254 道/英寸的驱动器中大都采用伺服盘位置检测装置来检测磁头的位置。这种方法有较高的位置精度,能跟随环境温度变化和主轴偏心引起的磁道位置偏移,因此允许较高的道密度。

伺服盘位置检测装置由伺服盘和伺服磁头组成,伺服盘预先写好伺服信息,伺服头用于寻道时读出伺服信息,得到伺服信号经过信号处理作为位置反馈信号,通过伺服控制系统对磁头精确定位。伺服信息有频率调制、相位调制、三位编码和双位编码等编码方式。记录伺服信息的伺服盘可用磁盘组中的任何一个记录面充任。

2) 差值计数器,差值计数器的作用是计算磁头当前所在磁道与目的磁道的序号差值,它的大小决定产生加速运动的电流的大小;它的符号去控制磁头的运动方向,差值是否为“0”的信号则控制粗控、精控开关电路的转换。

3) 磁头运动速度的检测,磁头定位系统用速度传感器来检测磁头运动的速度。速度传感器有电磁式和电子式两种。电磁式传感器用一个永久磁铁和一个线圈,线圈固定不动,而棒状的磁铁与磁头小车固定在一起,并随磁头在线圈中运动,于是线圈中感应出与运动成正比的电压。电子式传感器使用位置传感器输出的位置信号或其他与速度有关的信号,经过信号处理电路的处理获得磁头运行的速度。其方法有两种,一是对位置信号微分,一是对音圈电流积分。电伺服盘提供的位置信号为幅度恒定的近似三角波信号,其频率正比于磁头运动的速度,将此信号微分并整流就得到速度信号。

4) 速度产生器,速度产生器根据磁道号的差值,产生相应的输出电压,作为控制磁头运动速度的基准。“时间最优”控制的函数关系可以非线性输入网络、速度函数发生器等不同的电路近似实现。近来不少驱动器采用只读存储器存储的微程序和 D/A 转换器等关键部件构成速度产生器。

e. 数据分离电路 硬磁盘驱动器的读/写电路的



基本原理与软盘驱动器的基本相同，只由于硬盘的轨道密度和位密度比软盘高得多，写入电流的频率高，读出信号的幅度变化大，读/写电路要复杂一些。但也只是电路技术方面的问题。这里只介绍一下数据分离电路。

读盘时，从磁盘上读出的信号实际上是数据和时钟脉冲的混合信息流，既有数据信号又有时钟信号。因此，必须将数据信号和时钟信号分离开来以便得到数据，这就是数据分离。有直接分离和锁相环分离两种电路。

(1) 直接分离电路，这种方法的电路简单，只适合调制频率的数据分离。可靠性较差，只用于要求不高的场合。

(2) 锁相环分离电路，为了提高数据分离的可靠性，多采用锁相环分离电路。它不仅可靠性高，而且应用面广，不仅用于频率调制方式的编码，也适用改进调制频率方式。锁相环是一种相位误差控制系统，使压控振荡器的频率跟踪输入信号的频率。只要有了与读出信号同相位的稳定的信号源再根据不同记录方式的特点，就不难设计出可靠的数据分离电路来。

2. 硬磁盘存储器的控制器 同其他外存储器一样，磁盘驱动器必须在一个控制器的控制下才能工作。一个磁盘控制器通常控制数台磁盘驱动器，通过 I/O 接口或通道与主机连接。

控制器实际上就是一台专用计算机。它由一个 CPU 芯片、一个 DAM (直接存储器存取) 芯片、和一个专用的磁盘控制器芯片、若干个数据和状态寄存器以及控制和读写电路等组成。

磁盘控制器接在某个 I/O 通道上，当 CPU 要与磁盘交换信息时，由主机启动通道并指定要访问的设备 (驱动器)。通道开始选择给定台号的驱动器，选中后，将要求执行的命令送往控制器。控制器接到命令后，启动只读存储器中的微程序，翻译接收的命令，然后调用相应的微程序执行命令中规定的操作。通道命令至少包括三条不同的子命令：选择、定位、读 (写)。选中驱动器后，将磁头定位在指定的圆柱面 (磁道) 上，选出一个 (或一组) 磁头，然后进行读 (写) 操作。

磁盘控制器还有一套测试微程序，用来自动检查驱动器和控制器本身的状况，也存放在只读存储器中。

3.3 软磁盘存储器

软磁盘存储器由软磁盘驱动器和控制器组成。它存储信息的载体是类似塑料唱片的软磁盘片，使用时临时装入驱动器，用后取出。

1. 软磁盘驱动器的组成 软磁盘驱动器由四部分组成：软盘片驱动机构、磁头定位机构、加载机构及控制电路。图 4-5-8 是软磁盘机结构示意图。

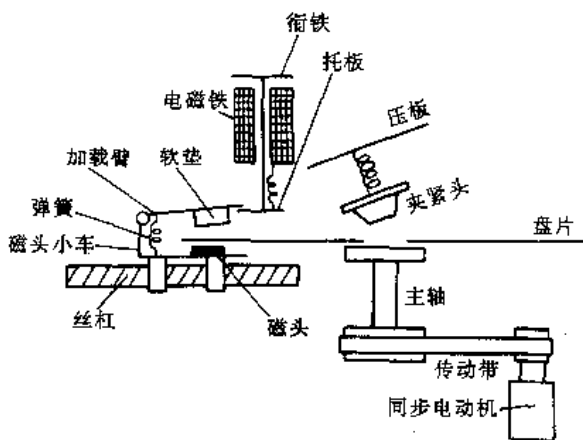


图 4-5-8 软磁盘机结构示意图

a. 软磁盘驱动机构 它包括同步电动机、传动带、传动轮、夹紧装置等。由于软磁盘在读/写时，磁头和盘片是接触的，磁盘片的转速一般都在 360r/min 左右。驱动机构的作用就是驱动盘片稳定地转动，当软磁盘片放入后，夹紧头就压向盘片中心孔，把盘片压紧在主轴上，主轴转动时就带动盘片一起转动。

b. 磁头定位机构 它包括步进电动机、磁头小车、磁头等。用来使磁头准确地定位在所要求的磁道上，从而可以准确地读/写数据。磁头在磁盘的盘面上移动靠步进电动机驱动丝杠进行，每个脉冲使步进电机转动 15°，这个转动通过丝杠变成磁头小车的平行移动，也就是磁头在盘面的径向移动，刚好移动一个磁道的位置。

c. 磁头加载机构 它由电磁铁和加载臂弹簧、托板、软垫等组成。它的功能是在磁头定位机构工作时 (即在找道期间、或不读/写期间) 把加载臂托起，使磁头与盘片保持一个很小的间隙，以减少不必要的磨损。当定位以后，读/写数据时，加载臂松开，靠加载臂弹簧把盘片压向磁头，使磁头与盘面接触良好，保证读/写的可靠。

2. 软盘片 塑料基片上涂上磁层的圆盘，尺寸为 5 1/4 in 或 3 1/2 in。记录面有单面和双面两种，记录密度有单密度和双密度之分。

软盘片封装在 5 1/4 in 或 3 1/2 in 见方的塑料外壳内，外壳上有三个孔，中央的大圆孔用于装入驱动器后由夹紧头压在主轴上，以便盘片随主轴转动。长圆孔是磁头接触盘面的读/写孔，小圆孔是区段索引孔。图 4-5-9a 是盘片外壳的形状，图 4-5-9b 是盘片本身的形



状。另外外壳的一个角上有个缺口，露出缺口表示只能读不能写，用不透明的胶纸贴上则可读可写。索引孔和写保护孔都用光电传感器检测孔的存在以实现同步和保护控制。

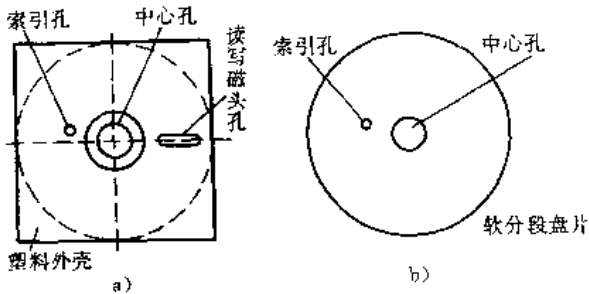


图 4-5-9 软磁盘片示意图

磁盘记录表面上划分为若干个同心圆，叫做磁道，共有 77 个，它的序号从外向内排定，由 00 到 76，每磁道又分成 26 个等长弧段，叫区段。同硬盘片一样，磁盘片的外缘和靠近圆心的部分是不用的，见图 4-5-10。

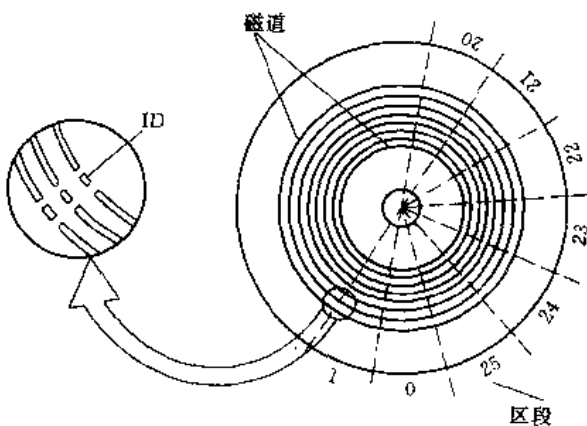


图 4-5-10 软磁盘的磁道与区段示意图

3. 软磁盘控制器

a. 软磁盘的工作过程 把软盘片装入驱动器后，把门关上。夹紧装置便自动夹住软盘，一旦驱动器加电，同步电动机便通过传动带带动盘片稳定旋转。当主机送出读/写命令到控制器后，控制器便发出定位命令，要求把磁头定位在所要求的磁道的位置上。磁头的初始位置是 00 号磁道，定位的过程是，从读到索引信号开始，接着读的是道号（磁道地址），若这个道号与控制器中所给定的道号一致，表示要找的磁道已经找到，磁头就定位在这个磁道上不动，否则不断地读出下一磁道的地址，直到找到为止。找到磁道后加载机构把磁头与盘片夹得更紧些。便在某一区段上读/写数据。读/写是串行的，而控制器与主机的信息传送则是并行

的，因而必须经过串/并和并/串转换。

b. 软盘控制器 软磁盘驱动器自身的控制电路只控制定位机构及其电动机和加载电磁铁等的动作，或信息的读/写变换等。其他则必须由软磁盘控制器来做。图 4-5-11 是一个软磁盘控制器的框图，由于软磁盘控制器比较复杂，这里表示的只是它的原理。其主要内容有：

(1) 数据移位寄存器（8 位）。它寄存要写入的或从磁盘读出的数据，写入时由主机并行接收然后串行写入磁盘，读出时，从磁头串行读出的数据一位一位地移入本寄存器，读完后并行地由主机取走，因此它是一个并/串和串/并移位寄存器。此外它还用来寄存目的磁道地址。

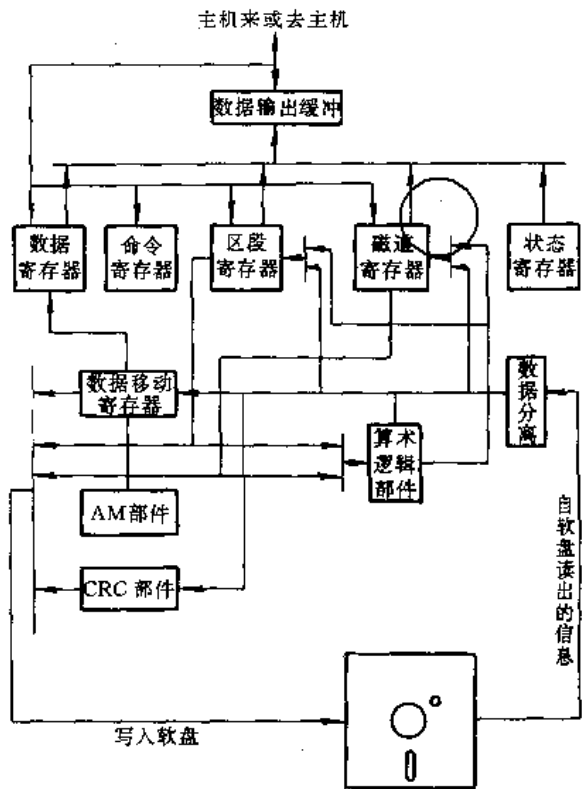


图 4-5-11 软磁盘控制器框图

(2) 磁道寄存器（8 位）。它用来保存磁头当前所在的磁道地址，有加 1 和减 1 的功能。它还用来将它的内容在磁头定位后与磁道上原先记录的磁道进行比较，比较的结果一致才确认磁头定位正确无误，开始读写。

(3) 区段寄存器（8 位）。它的内容与记录在软盘上的区段地址进行比较，一致表示找到了所要求的区段。

(4) 命令寄存器（8 位）。控制器是通过命令指挥



软磁盘驱动器工作的，命令总共 11 条左右，命令是用代码表示的，一条命令代表一系列特定的操作。通过执行一系列命令完成读/写等工作。

(5) 状态寄存器 (8 位)。控制器和驱动器的状态必须让 CPU 知道，以便 CPU 判断和决定下步的工作。CPU 通过数据缓冲寄存器取出状态信息 (或由软盘控制器主动送出)。

(6) CRC (循环冗余校验码) 部件。它是一个逻辑部件，它根据写入/读出的数据产生循环冗余校验码，通过比较进行校验，如果发现有不纠正不了的错误便中断读/写。

(7) 算术逻辑部件。它对寄存器的内容进行必要的运算以及地址的比较。软盘控制器的所有运算都在此进行。

(8) AM (地址标识) 部件。在读/写时用来检测索引地址标识、地址标识记录和数据记录中的地址标识，指明记录的开始。

(9) 数据分离部件。软磁盘存储器采用调频制记录方式，记录在磁盘上的信息，既有数据信号又有同步信号，读出时，通过这一部件把数据信息从读出信号中分离出来。

3.4 磁带存储器

磁带存储器是典型的顺序存取存储系统，它的主要特点是便宜。自 20 世纪 50 年代以来一直被用作海量存储器。和其他存储器一样，也主要由四组部分组成，它们是：载体、写入机构、读出机构和寻址机构。

1. 磁带 最普通的磁带是在 1mil 聚酯薄膜上连续涂覆一层约 0.5mil 厚的 Fe_2O_3 。带宽有 1/4、1/2 和 1in 几种，用得最多的是 1/2in。磁带上划为 7 个或 9 个磁道。最常用的是 9 磁道磁带。记录密度 800bit/in 和 1600bit/in 等。

2. 磁带的驱动机构 磁带机的读/写头固定不动，磁带必须按一定的速度在磁头下通过，才能进行读/写。磁带的驱动系统是磁带机的主要机构。它包括磁带的拖动和缓冲机构。

a. 磁带的拖动系统 拖动系统包括两个带盘、驱动带盘旋转的两台伺服电动机、驱动主动轮旋转的主轴电动机、导轮等。

b. 磁带的缓冲系统 缓冲系统有负压积带箱式和摆杆式两种。积带箱式包括负压积带箱、积带传感器、真空泵等；而摆杆式的系统主要是摆杆和导轮。摆杆是一端固定的并可转动的棒，棒上装有可以滚动的

导轮，并有弹簧将摆杆往外侧拉，磁带绕过固定导轮和摆杆上的滚动导轮就会被张紧。摆杆式缓冲系统的体积小，又用真空泵，但工作速度不如积带箱的快。图 4-5-12 是积带箱式的磁带驱动系统的示意图。图 4-5-13 则是摆杆式磁带驱动系统的示意图。

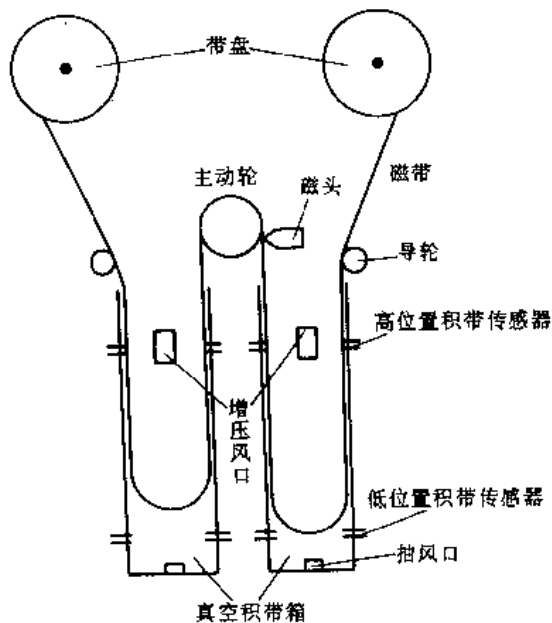


图 4-5-12 积带箱式磁带驱动系统示意图

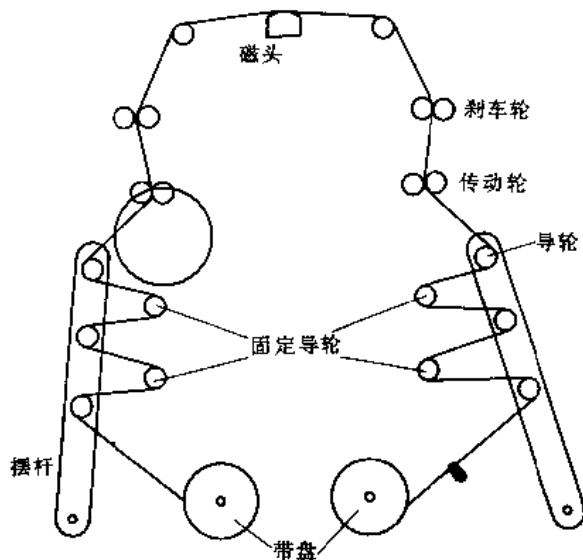


图 4-5-13 摆杆式磁带驱动系统示意图

近年来国外已普遍使用自动穿带机构，只要人工把带盘装上，利用气流和电磁吸引便可以把磁带自动地按规定的路径绕向另一个带盘。摆杆式磁带驱动机构已演化成图 4-5-14 所示的样子了。

3. 磁带存储器的控制器 磁带机的所有操作均在控制器的控制之下进行，一台控制器可控制多台磁



带机。

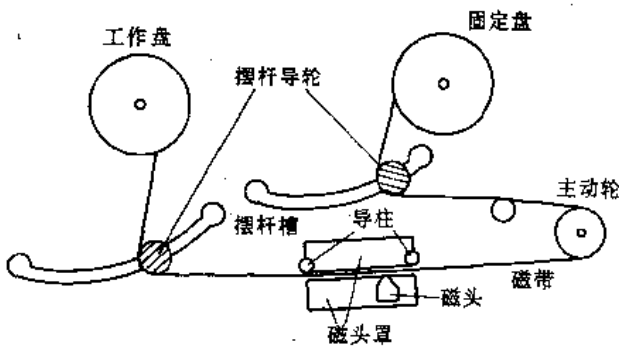


图 4-5-14 改进的摆杆式磁带驱动系统示意图

磁带机控制器的设计方法可以不同，但都必须包括如下诸功能：控制磁带的正、反走动、引带、倒带、读/写等；能寄存从 CPU 送来或从磁头读出的代码；发

送代码；能自动形成校验码；能从多台磁带机中选定指定的一台等等。图 4-5-15 是一般磁带控制器的控制逻辑框图。

4-5-15 图中的控制部分按功能码的定义，译成各种信号，对磁带机各种动作及读/写过程实行控制。信息寄存器用来寄存从主机送来的要求写入的数，或者从磁带中读出的信息。

图 4-5-15 中的校验电路对写入和读出的数据形成奇偶校验码和循环冗余校验码，它还有比较和纠错功能，当发现有不能纠正的错误，停止读/写，并向 CPU 报告。

选择和读/写电路的作用，一是选择磁带机的台号，选中后就进行读/写。

时间电路产生控制器工作用的主脉冲，节拍脉冲。

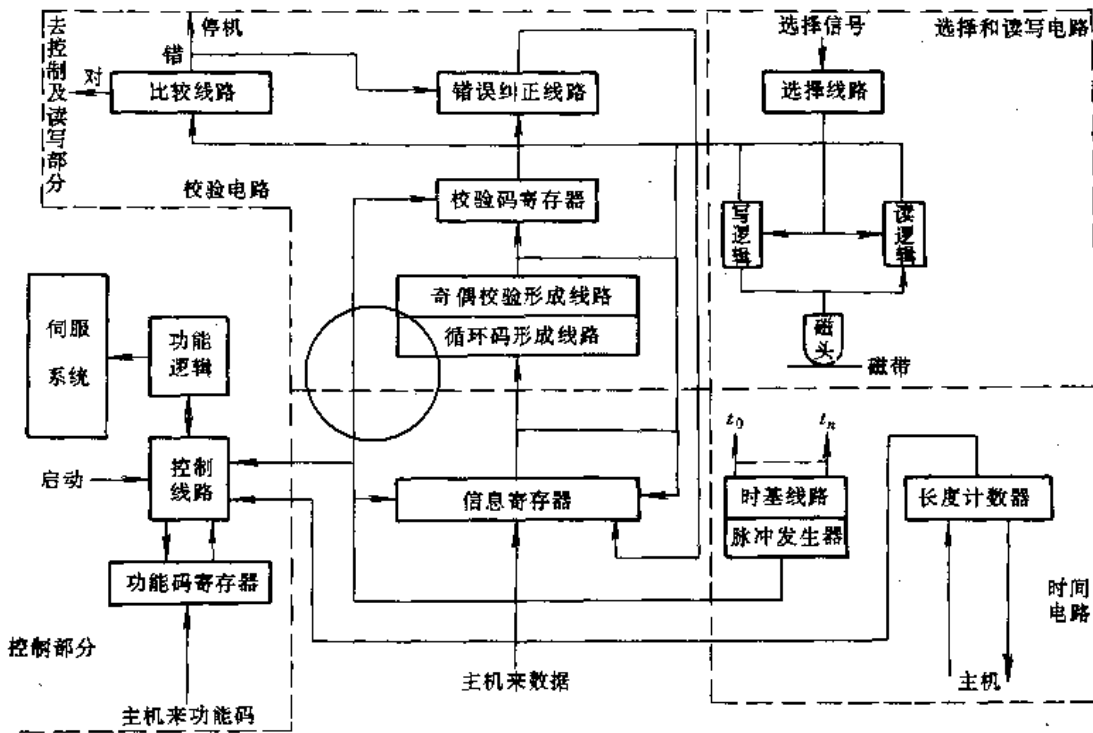


图 4-5-15 磁带机控制器的控制逻辑框图

读/写过程：首先，中央处理机送出访问磁带存储器的指令，指令中包括操作码、读/写标志、走向标志、磁带机台号、要从主存储器取出或要放入数据的起始地址等。这些内容分别寄存在控制器的相应寄存器中。若是写指令，CPU 送出要写入的数据，存入信息寄存器，然后送出启动命令，启动主动轮电动机正转，磁带开始正走。数据及校验码便一个接一个地写入磁带直到 CPU 送来结束信号为止，写操作也就结束。若主机送过来的是读指令，过程与写指令基本相同，但数据传送方向相反。但读出数据之前，必须首先寻找读出数据

块的位置，这就必须首先顺次读出那些标志并与 CPU 送来的信息进行比较，只有符合时才开始读这一数据。数据送入信息寄存器和校验电路，校验无误后送入指定的主存储器存储单元。

3.5 光盘存储器

光盘存储器，简称光盘，是一种新型数字式存储设备。它利用激光可聚焦成能量高度集中的极细的光束这一特点，来实现高密度数据存储。80 年代以来，随着新型激光器和光记录介质的出现，以及激光束精密



伺服技术的进步,光盘已进入实用化阶段。由于光盘有许多磁表面存储器所不可比拟的优点,可以满足现代社会对大容量、高可靠性信息存储设备的需要,将部分地取代磁盘存储器。

1. 光盘存储器的类型 光盘按其功能不同分成三种类型。

a. 只读光盘存储器 只读光盘是最早实用化的光存储设备。这种光盘的盘片由生产厂预先用激光束刻蚀上视频或音频数字信息,出厂后用户只能读光盘上的内容,不能再写入信息。激光电视唱片(VD)和数码唱片(CD)就属这类光盘。近来新出现的微机用只读存储器CD-ROM就是用激光唱片制作的。由于它的技术成熟,容量大,易复制、价格低等特点,在计算机界十分引人注目。国际上已通过CD-ROM标准。

这种CD-ROM容量已达GB级以上。有的光盘,一片就可记录27万页百科全书的内容。此外CD-ROM的记录介质不老化,数据不会丢失,可长期保存。特别适用于文献数据库和其他信息库。

b. 只写一次型光盘存储器 只写一次型光盘可由用户写入信息,但只能写一次,写后不能修改(相当于PROM)。但盘片上留有空白区,可把要修改和重写的信息追记在空白区内,由于容量极大,存储价格低,可弥补只写一次的缺点。它适用于不经常修改的大型数据库。日本已推出光盘文件存档系统,美国军界也研制出专用于存储军事地图的光盘系统。

c. 可重写光盘存储器 可重写光盘是目前最晚出现的光盘存储器;它利用激光效应来存取信息,即采用特殊的磁性薄膜作为记录介质,用激光束记录,再现(读出)和抹除信息,因此又称为磁光盘。

磁光盘的出现,克服或补充了前两种光盘的局限性,扩大了光盘的应用面。目前许多公司已推出光盘机产品,实现光存取技术的商品化。

2. 光盘读/写原理 与磁盘利用磁化翻转表示信息的原理不同,光盘存储信息是用激光束在盘面上烧蚀凹坑来实现的。

一个光盘存储系统包括半导体激光器,光束收集透镜(准直透镜),偏振光分离器,1/4波长片,反射镜,聚焦镜,光检测器等(见图4-5-16)。

当记录信息时,主机送来数据,经编码后用来调制激光器输出激光束的强度,以区分数据“1”或“0”,调制后的激光束经过光学系统收集校正,再经反射镜反射,到达物镜,即聚焦透镜,物镜再将激光束聚焦成直径为 $1\mu\text{m}$ 的光点照射到记录介质上。

光存储介质是一层吸光能力很强,熔点很低的材料,在激光束的照射下的部位温度迅速升高而被熔化。随着盘片的旋转,代表信息的激光束就在介质上沿同心圆或螺旋线形的导向沟,烧出一串直径很小,相隔很近的凹坑。

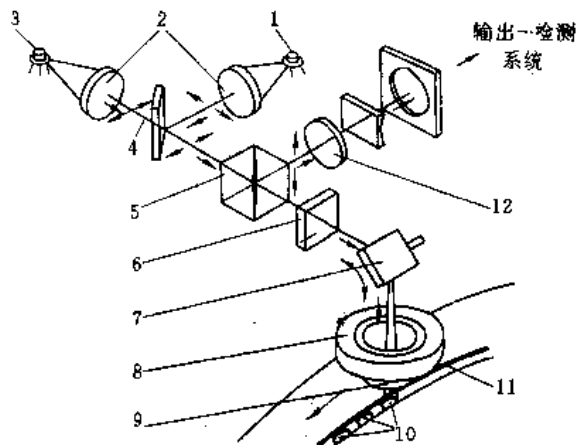


图4-5-16 光盘读/写原理

- 1—读激光器 2—准直透镜 3—写激光器 4—激光束
- 5—偏振分光镜 6—1/4波长片 7—反光镜
- 8—聚焦调节器 9—物镜 10—记录信息位
- 11—导向道 12—聚焦镜

烧蚀凹坑的剖面图如图4-5-17所示,有凹坑的部位露出反射层,能反射激光。有坑和无坑即代表二进制数据的“1”和“0”。介质的凹坑一旦形成之后无法重新填平,所以不可改写。

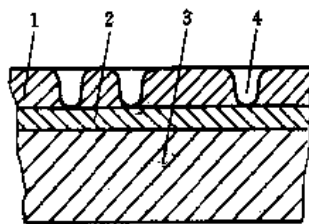


图4-5-17 烧蚀凹坑剖面

- 1—记录介质 2—反射层 3—盘基 4—烧蚀凹坑

在写入过程中,控制系统根据反馈信号不断地调整反射镜和物镜位置及控制盘片的转速,以使光盘头能准确、可靠地在光盘上记录信息。

当要在光盘上读出信息时,激光器发出功率小于介质记录阈值的激光束(一般约为写入时功率的1/10),以使写入的信息不被破坏。该激光束是未经调制的连续波,经光学系统后,同样在存储介质上聚焦成很小的读出光点。导向沟内无凹坑的地方,入射光被反射,其中大部分返回。有凹坑的地方坑深使反射光与入



射光抵消,大部分没返回。根据坑内、坑外对光反射能力的不同,就可读出记录在盘上的信息了。光束反射回来后,通过物镜到达1/4波长片,由于往返两次通过1/4波长片,光束在偏振极性上旋转了90°,这样,返回激光束经偏振光束分离器检测出数字信号,再经译码、校正送到主机。而定位误差检测器则将返回信号变成数字量,再送往有关的控制电路进行实时控制。

3. 光盘的盘片

a. 结构 光盘盘片主要由三层组成:基片、存储介质、密封(保护)层。保护层的作用是保持存储介质免受空气中腐蚀性物质的影响,也减少灰尘、指印、划痕等对读出信号的影响。保护层是在存储介质表面直接覆盖一层透明聚合物,另一种保护层的制作方法是将两个涂好存储介质的基片通过垫环将介质相对地粘结起来,形成一个洁净的空腔,使存储介质与外界隔绝。

b. 基片 由玻璃或模压聚合物制作,要求它有好的强度,平直度,光学性能及对存储介质的附着力。

c. 存储介质 对存储介质的要求是:分辨力高,噪声小,灵敏度高,性能稳定;能制作大面积无缺陷的薄膜。只写一次光盘目前采用碲(Te)或碲基合金,碲的熔点低(450°C),记录密度高。

4. 跟踪伺服系统 采用预制导向槽的伺服技术,在盘片上预先录制螺旋形导向槽(参看图4-5-18),其间距即数据道间距,根据不同的密度每张盘片上可有4.5万个至5.4万个导向槽。每圈又可分成若干段,用不同槽深的办法设置每个导向槽和各信息段的地址码,利用这些伺服信息对光盘头的闭环定位控制,即读/写跟踪伺服控制。

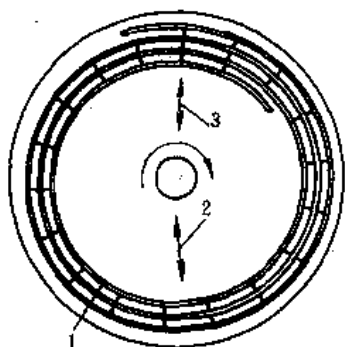


图4-5-18 双光头的写和读

1—记录扇段 2—写/读运动方向 3—擦光头运动方向

控制系统对光点实现三维伺服,即垂直盘片方向(焦距),径向(寻道),切向(速度)三向跟踪伺服。

a. 自动对焦伺服控制 采用控制物镜焦距方法,

即自动伺服对焦控制。它由焦点误差检测部分、伺服放大器 and 焦距调节部分组成。由于光盘轴向跳动的频率在音频范围之内,因此采用音圈电动机驱动物镜十分有效。在物镜周围有线圈绕组,整个部件放在永久磁铁中。焦距误差信号经由定位误差光检测器及焦距伺服控制电路反馈给音圈电动机,来控制音圈电动机带动物镜上、下跟踪移动。精度可达±0.5μm。

b. 径向跟踪伺服 径向光头寻址并定位用直线电动机驱动光头来实现。对光束进行光学径向跟踪伺服,使光点始终落在导向槽的中心。

它由径向误差检测器,伺服放大控制器、跟踪反射镜等部分组成。径向误差可达到±0.1μm。

c. 时基误差伺服 时基误差伺服控制由时基误差检测、伺服放大器、光束偏转器等部分组成。光束偏转方向为信息道的切线方向,偏转的振幅和频率类似于径向跟踪伺服。

5. 磁光盘记录原理 磁光盘记录信息的原理见图4-5-19。它是在光盘的基片上镀上一层矫顽力很大的、具有垂直磁化特性的磁性材料薄膜,例如MnBi薄膜或TbCo类薄膜等,然后使这层磁性薄膜在与盘片垂直的方向上均匀磁化(图中是向上磁化),形成一个排列均匀的磁畴。在光盘驱动器的盘片下方位置上施加一个小于材料矫顽力的外加磁场,平时它对记录介质上的磁化方向无影响。当要往盘上记录数据时,激光束经聚焦后的光点,其能量能使该处的温度升高到超过居里温度,此时,该光点处的磁性材料失去磁性。当光点移去,温度下降到低于居里温度时,这些失去磁性的磁畴在外加磁场的作用下,使磁化方向向下翻转,于是代表写入了数据。MnBi材料的磁化强度M、矫顽力H、与温度的关系见图4-5-20。

磁光盘记录信息的过程实际上只是磁性状态的变迁,即不永久破坏介质。

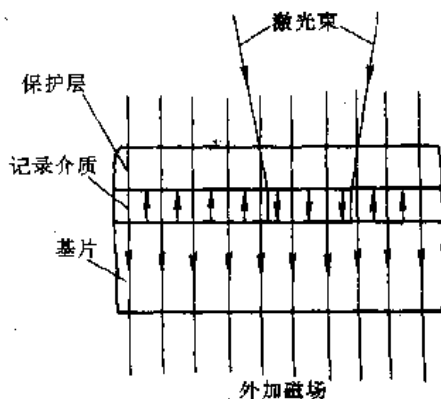


图4-5-19 磁光盘存储原理

电子工业出版社 清华大学出版社



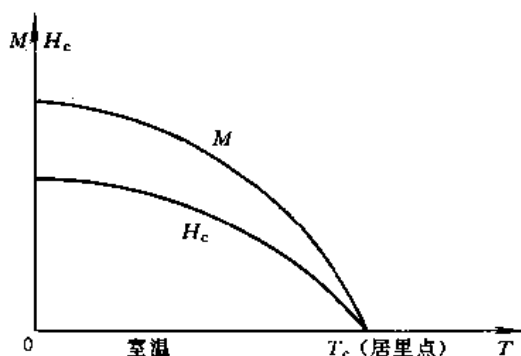


图 4-5-20 M、Hc 随温度的变化

擦除信息与记录信息的原理相同，即在对介质进行激光加热同时施加磁场，只是擦除磁场的方向与记录相反。

磁光盘是可重写的，但重写前必须先擦除原记录信息。

读出磁光盘上记录的信息要用到法拉第效应和卡尔效应，它们都属于磁光效应。法拉第效应是：当与磁场方向平行的直线偏振光通过透明的物质时，直线偏振面就发生偏转，其偏转方向与磁场的方向有关；卡尔效应则是：线偏振光受到磁极反射时，偏振面发生偏转，若磁极方向向上，则反射光偏振面向右偏转，而磁极方向向下，反射光偏振面向左偏转。因此磁光盘上记录信息的读出，就是检测记录介质磁化方向。对透明的记录介质，一般用法拉第效应，通过检测穿过记录介质后激光束的偏振面来确定介质的磁化方向，即记录的数据。对于不透明的介质，可利用卡尔效应测反射光束偏振方向，从而判断出记录的信息。目前磁光盘多数使用卡尔效应，但也有的采用两种效应结合的办法。

第 6 章 电子计算机的输入输出系统

1 概述

计算机通过各种总线和外部设备与外界通信或交换数据，这种过程称为输入输出。计算机的外部设备分为：输入设备（键盘、鼠标器、数字化仪、图形扫描仪等）；输出设备（显示设备、打印设备等）。这些外部设备有机械的，电子的，机电的。它们传送的信息有两种，数字（脉冲）信号和模拟信号（如连续变化的电流或电压信号）。这些信号电平有高有低，信号传送的速度也各不相同，把这些外部设备连接到计算机时，就需要相应的接口（又称适配器）电路。

CPU 通过输入输出接口与外部设备交换数据。接口的任务是，把外部设备送往 CPU 的数据转换成 CPU 适用的格式，或把 CPU 送往外部设备的数据转换成与外部设备相容的格式，向 CPU 提供外部设备的状态信息（如外部设备“准备好”、“忙”或“闲”、缓冲器“满”或“空”等），协调 CPU 与外部设备在时序或数据处理速度上的差异。一般来讲，每种外部设备根据 CPU 总线的不同都有自己的特点，必须用专门的接口电路实现 CPU 与外部设备之间信号的转换与匹配，并提供适当的时序和控制信号，进行数据缓冲、同步协

调、传递外部设备的状态信号以及可编程设置工作方式等功能。

CPU 与外部设备之间传输数据的方式有三种：（1）程序控制的数据传送方式；（2）用中断方式传送数据；（3）用 DMA 传送数据。

2 输入设备

2.1 键盘

键盘由一组排列成矩阵方式的按键开关组成，通常有编码键盘和非编码键盘两种类型。编码键盘中的某一个键被按后，能够提供与该键相应的编码信息。如果是 ASCII（美国信息交换标准码）键盘，就能够提供与该键相对应的 ASCII 代码。编码键盘的缺点是硬件设备会随着键数的增加而增加。非编码键盘不直接提供被按键的编码信息，而是用较为简单的硬件和一套专用程序来识别被按键的位置，并提供与被按键相应的中间代码，然后再把中间代码转换成要对应的编码。这样，非编码键盘就为系统软件在定义键盘的某些操作上提供更大的灵活性。

由于键盘通常排列成矩阵格式，因此可以用硬件

240

1 011313



或软件的方法对行、列分别进行扫描,去查找被按着的键。常用的方法有行反转法、行扫视法和行列扫视法等多种。

如果键盘排列成8行乘8列的64点阵,则可以把这两组8位的行列线分别连到两个并行接口双向传送的连接线上,点阵上的键一旦被按动,该点行列的信号就可认为被接通。先对行送全1,再对列送全0。结果行线上凡有键着的地方原来的1被列上送来的0所代替,记录下相应的行寄存器8位信息。反过来,把列送全1,再对行送全0,于是对应列上按着的线便变为0,再把列上信息送到另一个寄存器并记录下来,把行列两次记录下来的信息拼成一个16位的数据,就可以确定按着键的位置。如果16位数据中的0不止2个,则说明发生了重键,需要重新再做一遍,直至正确的代码出现为止,这就是行列反转法,简称行翻转法。

行扫视法是用一个步进的信号加到列线组上,每步进一次,就读回行线组上的状态,以检查有无键按动。如果向列扫视线上发送步进的1信号,行接收线在有按动的键时,就能从交点上获得1信号,否则为0。一旦行接收信号中只有一个1信号,就可以从8位列信号和8位行信号中确定出按着键的位置。同样,在一次列扫视结束后,若有两个以上的1出现在代码中,就是有重键产生。这时,要重新再做一遍,直到行列组成的代码中只有两个1时,才是应该读取的数据。

行列扫视法与行扫视法相似,它是先在列线上加入步进信号,依次检查哪一列有按键发生,然后再在行线上加入步进信号,依次检查哪一行有按键发生。根据行列线上的检查结果,就可以确定按键的位置。在IBM/XT中,对键盘就是采用这种扫视方法。

2.2 鼠标

鼠标器是一种能够移动的定位指示器。把鼠标器插到计算机串行接口上,在鼠标器驱动程序作用下,鼠标器产生的光标在画面上随意移动,从而可从画面上选取任一点或从屏幕菜单中选择任一命令。

鼠标器结构可分为机械式和光学两种。机械式如图4-6-1,在鼠标器内装有直径为25mm的金属球,当在桌上移动时,球便转动,这时通过正交的两个轴便可知鼠标器水平方向(x轴)和垂直方向(y轴)的移动量。正交的两个转轴上各装有称为旋转式编码器的检测转动量用的开关。旋转式编码器将转动量作为计数值输出。其结构如图4-6-2所示。

光学鼠标器结构如图4-6-3,使用时在鼠标器铝

制板垫上滑动。这个铝制板垫上每英吋刻有25条蓝色竖线和25条绿色横线,这种颜色不同的横竖格纹用装在鼠标器体内的两个发光二极管和传感器来检测。在一对发光二极管中,一个发红光,用于检测蓝线;另一个发红外光,用于检测绿线。实际上,光学鼠标器装有两对发光二极管。用这两对发光二极管不仅能检测鼠标器的x,y轴两个方向的转动,也可测知鼠标器本身的旋转,称为可转动方式。仅用一对发光二极管方式,称为不可转动方式。这二种方式切换通过鼠标器体内开关来执行(如表4-6-1)。

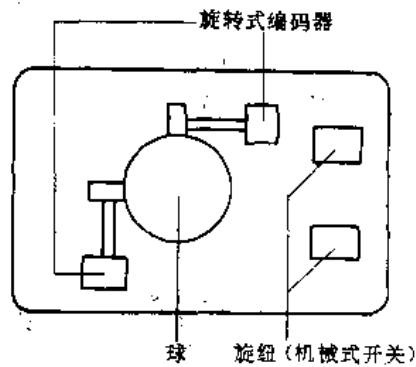


图 4-6-1 机械式鼠标器的基本结构

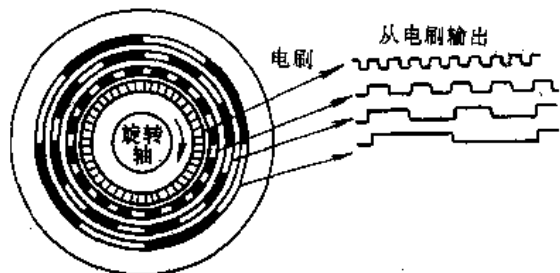


图 4-6-2 旋转式编码器的结构

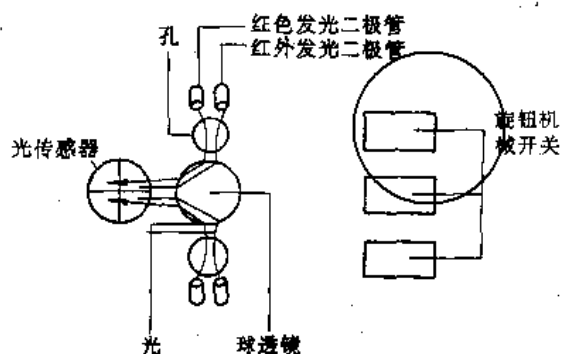


图 4-6-3 光学式鼠标器基本结构

由鼠标器发送 RS-232C 或 TTL 两种电平信号给微机。发送数据由 5 个字节组成的帧数据(参看表 4-6-2)。第一字节前 5 位为 10000 的同步模式,后三位



表示按钮开/关状态 (LMR 表示左、中、右的状态)。第二和第三字节分别表示一对二极管送来的 x 轴位移数据和 y 轴位移数据。第四和第五字节, 在可转动方式下, 表示另一对二极管送来的 x 轴和 y 轴位移数据, 在不可转动方式下, 第四和第五字节是 x 轴和 y 轴位移数据 (此时只有一对发光二极管) 送完后计算出新的 x 轴和 y 轴位移数据 $\Delta x'_1$ 和 $\Delta y'_1$ 。以上两种方式都不含奇偶位。移动量检测速度, 在不可转动方式中为 48 次/r; 在可转动方式中为 24 次/r。

表 4-6-1 鼠标器开关的选择

| 开 关 | 开 | 关 |
|-----|---------|---------|
| 1 | 1200 波特 | 300 波特 |
| 2 | 不可转动方式 | 可转动方式 |
| 3 | 标准方式 | 自检方式 |
| 4 | 水平 (绿线) | 垂直 (蓝线) |
| 5 | 正常 | 无干扰 |
| 6 | RS-232C | TTL |
| 7 | 未使用 | 未使用 |
| 8 | 未使用 | 未使用 |

表 4-6-2 鼠标器发送帧格式

| 字 节 | 内 容 |
|-----|----------------------------|
| 1 | 10000LMR |
| 2 | Δx_1 |
| 3 | Δy_1 |
| 4 | $\Delta x_2 (\Delta x'_1)$ |
| 5 | $\Delta y_2 (\Delta y'_1)$ |

2.3 数字化仪

将用户图形的坐标数据输入计算机是借助于坐标数字化仪, 常用的坐标数字化仪有机械式, 超声波式和全电子式等不同类型。

a. 机械式坐标数字化仪 这种坐标数字化仪是机械导轨传动, 光栅编码计数。其结构原理如图 4-6-4 所示。

这种设备是用手推动 y 向导轨作 x 方向运动, 推动 y 向小车作 y 向运动, 将标示器 8 上的十字线紧贴在图面上, 十字线的中心对准要读入的坐标位置, 用手起动标示器旁边的手动按键 7, 便将该点的坐标值输入到计算机, 或者记录到纸带或磁带上。其坐标产生的原理如下: 当标示器沿 y 方向导轨 2 作上下移动时, 通过钢丝绳 1 带动 y 光栅读数头 4 上的绳轮转动, 从而使主光栅轮转动, 并产生 y 向光电信号输出。当 y 导

轨 1 在 x 方向导轨 6 上移动时, 通过钢丝绳 5 带动 x 光栅读数头 3 的绳轮转动, 使 x 向的光栅产生 x 向的光电信号, 这个光电信号相当于标示器的板面上的某一点为起点运动到当前位置所产生的脉冲数, 从而得到这两点间相对距离的增量值。早期的坐标数字化仪一般采用这种原理。这种设备笨重, 移动不便, 寿命短, 因此逐渐被其它类型坐标数字化仪所替代。

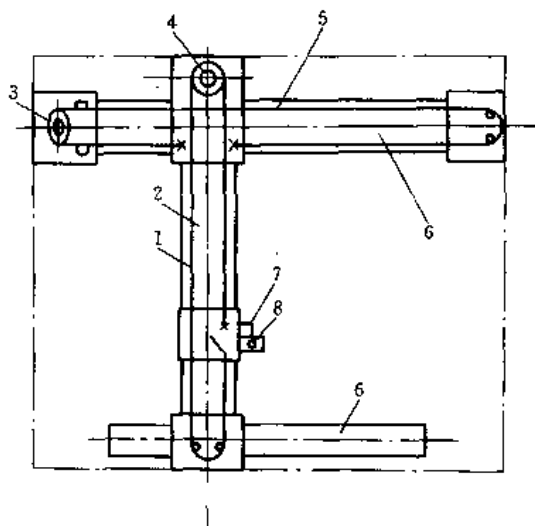


图 4-6-4 机械式坐标数字化仪结构原理图

1-y 方向钢丝绳 2-y 方向导轨 3-x 光栅读数头
4-y 方向读数头 5-x 方向钢丝绳 6-x 方向导轨
7-手动按键 8-标示器

b. 超声波式坐标数字化仪 这种设备工作原理是: 在 x 、 y 方向上各有一边装有一长条形状的超声波传感器, 在拾取图形坐标点的笔尖上装有超声波脉冲发生器, 当笔尖接触板上的一点时, 超声波脉冲经面板传到传感器, 记录下超声波传到 x 、 y 各边的最短时间, 从而换算出该点到两边的距离。这种设备对温度、湿度的变化比较敏感, 因而对环境要求比较高, 否则精度会受到较大的影响。

c. 全电子式坐标数字化仪 这种设备使用较普遍, 它利用了电磁感应原理 (其构造如图 4-6-5)。台板上在 x 、 y 方向上有许多平行的印制线, 每隔 $200\mu\text{m}$ 一条, 在游标中装有一个线圈, 当线圈中通有交流信号时, 在十字叉线的中心产生一个电磁场。这样, 当游标在台板上运动, 台板下的印制线上就会产生感应电流。印制板周围的多路开关等线路可以检测出最大的信号, 即游标十字叉线中心所在的位置, 从而得到该点的坐标值。这种设备对游标和印制板的制作工艺要求比较高, 但使用方便, 精度也比较高。



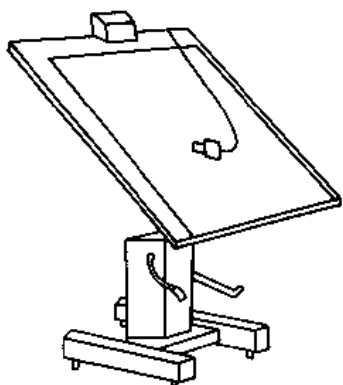


图 4-6-5 全电子式坐标数字化仪

2.4 图象输入设备

该设备是将图象数字化,然后供计算机进行处理。在进行数字化之前对图象进行取样和量化,即对图象所观察区域上选择一组点,在每一个这样的点上图象的特征被测量出来并用于后面的处理。通常图象输入设备有下列几种:

(1) 电视摄像机已实现了由光信号到电信号的转换,所得的电信号再由模-数转换器取样和量化。

(2) 专用的数字变换设备使用精密控制的光束,该光束按照预先确定的方式对图象扫描,如鼓形扫描器,它是将图纸或图象装在一个旋转的鼓上,而光束按

平行于鼓轴的方向移动,这种数据变换设备的速度通常比用电视摄像机的速度慢,但它能提供质量较好的输出。

(3) 飞点扫描器,它能一行一行地扫描图象,或可以编程去跟踪两个不同灰度或颜色的区域之间的轮廓。

(4) 输入板数字变换设备,人们能在它上面画线条并获得所画线条上各点的数字化坐标序列。由于是把图放在一个磁化表面上,然后用一个电指示笔或光标来确定点的位置,所以可获得与飞点扫描器同样的效果。

(5) 某些专用设备,它是用一根指针沿着图纸的表面移动而完成的,在指针移动的同时,其坐标也被取样而得到了。另外一种方法是使用图纸或图象的两个投影,这两个投影用输入板数字变换设备(如数字化仪)同时数字化,由于空间中的一个点完全由它在两个平面上的投影所决定。

图象输入的方法是将图象按行扫和帧扫方向分解成单个象素,并将每个象素的光学密度 $D(x, y)$ 进行量化分层,然后将它们的代码输入计算机。在计算机的存储器中,图象以一种数字场的形式存在,存储器的每一单元都对应一定的象素。

图象输入原理框图如 4-6-6 所示:

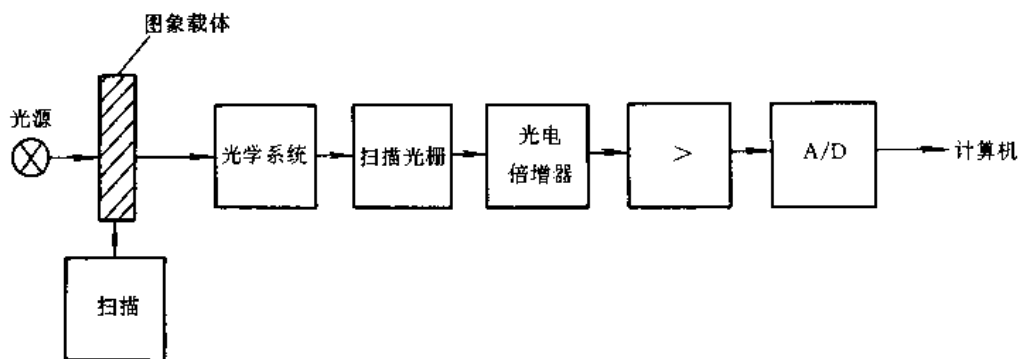


图 4-6-6 图象输入原理框图

3 输出设备

3.1 显示设备

显示设备按其工作原理可分为随机扫描显示器、存储管式显示器、光栅扫描式显示器等。按其显示内容可分为字符、图象显示器等。

1. 随机扫描显示器 这种显示器又称直接画线器或轨迹扫描设备。其基本工作过程是:从显示文件存储器中取出画线指令或显示字符指令或方式指令(如

亮度、线型等),送到显示控制器,由显示控制器控制电子束的偏转,在荧屏上出现一条发亮的图形轨迹。这种显示器一般用低余辉荧光粉,所以这个过程需要至少每秒 30 次的频率重复进行。否则图形就会闪烁。当扫描速度一定时,总的画线长度就被限定。

这种显示器基本组成的方框如图 4-6-7,除了 CRT (Cathode-Ray Tube, 阴极射线管) 之外,它还需要一个存储器,一个控制器和运算器,一个输出图形的矢量发生器和一个输出字符的字符发生器,还要有数/模转换以及偏转系统,加上光笔或键盘等输入设备



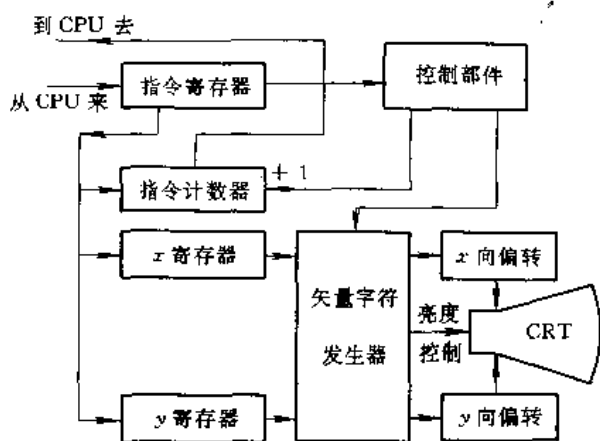


图 4-6-7 随机扫描图形显示器方框图

的连接部件，复杂程度可想而知。这种设备价格昂贵，但它具有高度的动态性能，较高的分辨率，明显的对比度，以及线条好，易于局部修改等优点，仍不失为较好的图形显示设备。

2. 存储管式的显示器 针对随机扫描显示器画线长度有限、造价高等缺点，发展了用显象管本身来存储信息的技术。表面看存储管象一个极长余辉的 CRT，一条线一旦写在屏幕上，一小时内都是可见的。从内部结构看，除了电子枪、聚焦、偏转系统荧光涂层类似外，其余情况就不一样了，这种显示器的电子束不是直接打在荧光屏上，而是先用写入枪将图形信息“写”在一个细网栅格（存储栅，每英寸约 250 条细丝）上，栅格上涂有绝缘材料，栅网装在靠近屏幕后面，其上有写入枪画出的正电荷图形。还有一个独立的读出电子枪，它发出连续的低能电子流把存储栅网上的图形“重写”在屏幕上。这种管子构造如图 4-6-8，紧靠着存储栅后是第二栅极，亦称收集栅。是一种细金属网其主要用途使读出电子流均匀，并以垂直方向接近屏幕。这些电子以低速流经收集栅，并被吸引到存储栅的正电荷部分上去（即存有图形信息的部分），而被存储栅的其余部分所排斥。被吸引过去的电子直接通过存储栅并轰击荧光物质。为了增加低速电子流的能量并从而产生一个明亮的图形，在屏幕背面的镀铝层上维持了一个较高正电位（+10kV）。

显示图形时，由 x 和 y 输入信号来偏转写入电子束，存储栅表面被写入电子束轰击的地方，就会发生二次电子发射，于是在写入电子束经过的表面产生正电荷。擦去图形正常办法是加一个持续 1~400ms 的正脉冲给存储栅。这时存储栅表面充电到与收集极同样电压，读出电子被带正电荷的存储栅表面吸引过去，使

存储面放电到等于读出电子枪的阴极电压，即地电位，图形就擦去了。当加在存储栅上的脉冲向负变化时，这时存储面与读出电子彼此相斥，存储面的电位将保持在负值上，为重新画图作好了准备。

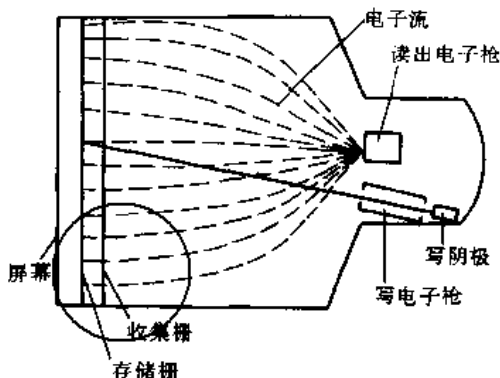


图 4-6-8 存储管的结构示意图

显示时通过存储栅的电子流移动速度相当慢，几乎不影响网上的电荷图形。但也带来难于局部清除存储的电荷以擦去部分图形的问题。尽管存储管显示器不具有局部图形的修改能力，同时只有一级亮度，但由于它具有存储大量信息的能力，省去了存储器，而由计算机直接向显示器发送数据和命令，使它具有显示大量而复杂的稳定图形的能力，价格也低廉，目前某些存储管显示器具有了刷新有限量矢量的能力，这就使得存储管显示器仍不失为一种受到广泛应用的图形显示设备。

3. 光栅扫描式显示器 这种图形显示器是基于电视的工作原理。在 CRT 中装有水平（行）偏转线圈和垂直（场）偏转线圈，分别产生水平和垂直磁场。电子束在水平偏转线圈产生水平磁场作用下，沿着水平方向扫描；在垂直偏转线圈产生的垂直磁场作用下，电子束沿着垂直方向扫描。通常电视机每幅图象扫描 512×512 个点，为了图象不闪烁，要求一秒钟产生 30 幅（帧）图象，即每秒要扫描 $30 \times (512 \times 512)$ 个点。每一个点称一象素。每一象素可以具有不同的灰度及颜色等属性，这些属性被存储起来并提供了修改的方便。这样存储器的容量是十分庞大的。假如一个象素只有亮或暗二种属性，则整个屏幕就要 512×512 位存储空间（256K 位）。实际上，许多光栅扫描式显示器设定 8 位（或更多位）来表示象素的灰度，即一个象素可以选择 $2^8 = 256$ 种灰度等级来显示。颜色常选择 $2^6 = 64$ 种。这样要保留屏幕上所有点的属性就需要一个相当大的存储器，通常称帧缓冲存储器。它和显示控制器的

电子工业出版社



关系如图 4-6-9 所示。随着性能可靠的大容量半导体存储器价格的大幅度下降,使得光栅扫描式显示器应用越来越普遍。

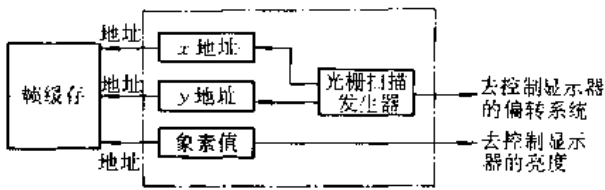


图 4-6-9 光栅扫描式显示器的帧缓存和控制部件

光栅扫描式显示器具有随机扫描显示器和存储管式显示器所没有的优点。它不仅可以显示物体的轮廓线和特征线,还可以显示被多种灰度和色调的像素所填充的面图形。这就使得输出具有实感的立体图形成为可能。另外,它有较好的动态特性,因而适宜做模拟器。它的不足之处是交互操作时的响应还比较慢,输入图形信息也较费时间,显示斜线时,线条的阶梯效应解决起来较麻烦。

4. 其他的显示设备 在显示设备的发展中正在向着二个方向发展,一是对现有显示设备改造扩充,使其功能越来越强;二是利用科技的新成就开发全新的显示器。

第一个发展方向是给显示配上微处理机,并将许多软件功能改由硬件来完成,像直线、圆弧图形的生成,一般的几何变换,显示文件的分段跳转,以及显示码的生成等都被固化。如正在开发的图形处理机,大大增强显示器的独立性和处理速度。

第二个发展方向是,推出了等离子显示板、激光扫描显示器、液晶显示器等,在探求大屏幕、低电压、更轻便、图象质量又好的显示设备方面有了许多突破,正在走向实用。

5. 字符显示器 CRT 显示器进行光栅扫描过程中,当电子束横过屏幕作水平移动时,在字符显示的情况下,只要对扫描的电子束简单地开关,就可以用点阵在屏幕上组成字符。

当要在屏幕上显示字符时,采用的办法是把有效的显示屏幕划分成许多块,每个方块被称为字符窗口,要显示的字符就移于字符窗口中,对应于每个字符窗口,所要显示的字符的代码是被存放在称为视频随机访问存储器 VRAM 中,如图 4-6-10 所示。在 IBM-PC/XT 中,字符窗口的数目为 80(列)×25(行),每个字符窗口所显示字符代码的存放位置是由列地址计数器和行地址计数器标出的。列地址计数器和行地址

计数器的输出就是 VRAM 的地址。

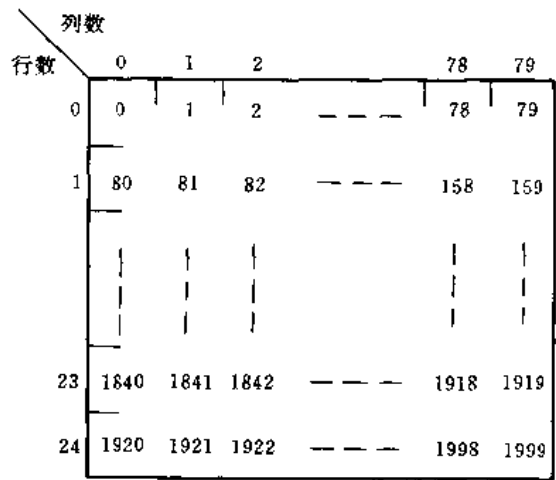


图 4-6-10 屏幕上字符位置的分配

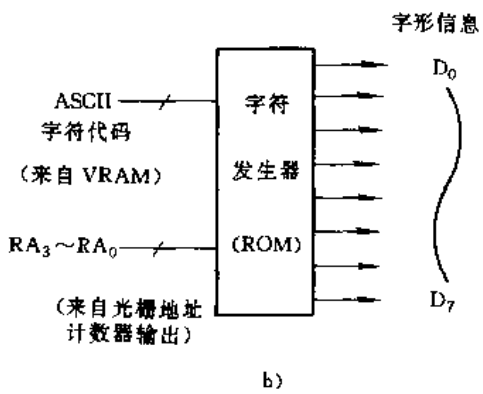
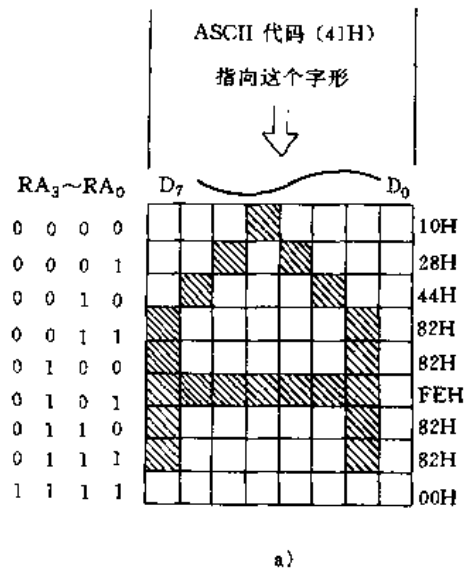


图 4-6-11 字形的产生

a) “A” 的点阵表示 b) 字符发生器的结构



对字符显示器来说,VRAM 中存放的是 ASCII 字符代码,它只是记住显示屏上某个字符窗口中要显示何种字符,而字符的形状(即字形)则是由字符发生器产生的。字符可以由 7×9 或 5×7 的点阵组成,存放在称为字符发生器的只读存储器(ROM)中,图 4-6-11a 给出字符“A”用点阵表示的例子,以及它位于字符窗口中的情况,图 4-6-11b 示出 ROM 的结构,ROM 的高位地址是来自 VRAM 中的 ASCII 代码,ROM 的低地址来自光栅地址计数器的输出 RA3~RA0,它具有指向这个字形点阵中的某个字节。

通过字符显示器选用的 CRT 控制器芯片,定时控制显示字符,一帧字符就显示出来了。

例如 IBM-PC/XT 单色显示接口板,板上使用一块 MC6845CRT 控制器芯片,一块 8k 字节的字符发生器 ROM,4k 字节的静态 RAM 存储器和 TTL 芯片。

该接口板的字符发生器 ROM 中固化有 256 个不同字形的点阵信息,配用该接口板的系统只能显示字符发生器固化的那些字节。显示模式可以为黑底白字正相显示、白底黑字反相显示、闪烁显示、划底线等,这些都由特征码来控制。全屏幕可显示 80(列) \times 25(行)个字符,每个字符占据 9(列) \times 14(行)个象素位置,字符由 7(列) \times 9(行)个点阵组成(对于某些小写字母如 j、g、p 等,其点阵下限可以达到第 12 行扫描线)。

全屏幕共有 $80 \times 25 = 2k$ 个字位置,接口板上 4k RAM 存储器中的 2k 就是用来存储字形 ASCII 码的,剩下 2k 则用作特征码存储器。屏幕上任一位置显示的任一模式字符都对应接口板上两个 RAM 存储单元;显示的字符取决于 RAM 存储单元中的字形 ASCII 码;显示的模式取决于特征 RAM 存储单元中的特征码。接口板上的 4k RAM 占据系统存储地址空间 \$B0000~\$B0F9F。其中字形 ASCII 码存入在偶数地址单元,特征码存放在奇数地址单元,CPU 可直接访问这些单元。4k 刷新 RAM 存储单元不接受奇偶校验,但 CPU 将对它们作写入——读出——比较测试。

图 4-6-12 为该接口板显示接口电路原理框图。开机后,CPU 首先对 6845CRTC 芯片进行初始化,以设定显示格式。接着 6845 芯片输出刷新地址对屏幕刷新存储器进行扫描,将字形 ASCII 码送给字符发生器,产生字形点阵信息,经移位送给视频合成电路。每一个字形 ASCII 码都伴随着一个特征码,特征码经特征译码电路产生模式控制信号。字形点阵信号和模式控制信号在视频合成电路中合成模式字符点阵视频信号,

最后送给显示器。

CPU 只要将欲显示的字符 ASCII 码和特征码写入接口板上刷新 RAM 存储器的某个单元,那么在与这个地址相对应的屏幕位置上就会显示出这个字符。

I/O 译码电路根据系统地址总线和 CPU 读写控制信号的状态发出 6845CRTC 芯片选通、RAM 选通或 CRT 状态口控制器选通信号,使这些器件接受 CPU 访问。

接口板上的控制信号、时钟信号都是由控制信号产生电路生成的。单色显示接口板正是在这些信号的控制下完成字符显示功能的。

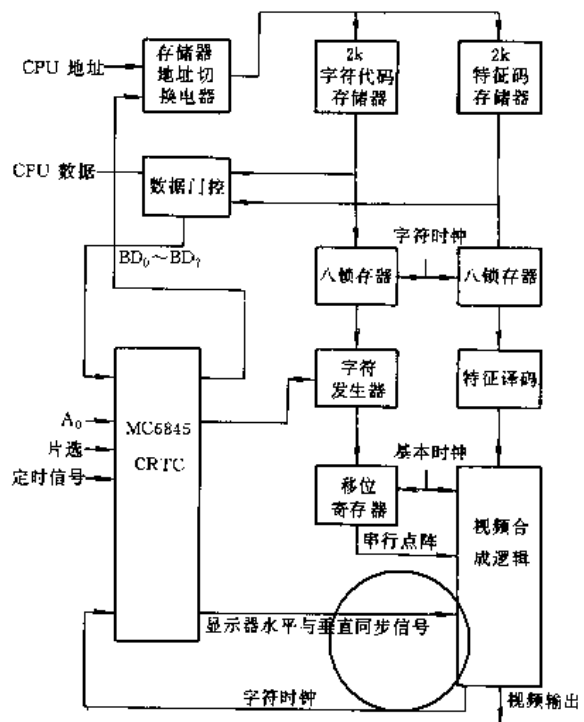


图 4-6-12 显示接口框图

6. 图形显示器 在 CRT 显示器进行光栅扫描过程中,当电子束横过屏幕作水平移动时,用图象信号(视频)控制电子束在各点的亮度,在 CRT 屏幕上就形成图象。一般的图象都是彩色的,所以使用的接口卡一般都是彩色图形接口卡。

例如 IBM-PC/XT 彩色图形接口卡,该接口卡也采用 6845CRTC 芯片作为基本控制单元,字符发生器为 8k 字节的 ROM 芯片,其中固化有三套字符点阵信息。为满足高分辨图形显示的需要,卡上还装有 8 块 2k RAM 芯片,共 16k 字节,作为屏幕刷新 RAM 存储体,占系统存储地址为 \$B8000~\$BFFFF。接口卡上 RAM 存储器不接受系统的奇偶校验,但 CPU 将它作



写入——读出——比较测试。

彩色图形接口卡可以工作在字符或图形两种工作方式下。当工作在字符方式时，如果用的低分辨率监视器或电视机就应使它处于40(列)×25(行)的方式显示；如果采用的高分辨率显示器就应使它处于80(列)×25(行)的方式显示。这两种显示方式中，每个字符的字框大小均为8(列)×8(行)象素。每种方式都有两套字符字体可选用，一套是单点阵字体，由5(列)×7(行)点阵组成；另一套是双点阵字体，由7(列)×7(行)点阵组成。

字符的显示也有黑白和彩色之分，当显示黑白字符时，同单色显示卡一样，可有正相、反相、闪烁和高亮度模式。屏幕上显示的字符同样分别以字形ASCII码和特征码来反映其字形信息和模式信息。显示彩色字符时，特征码可提供16种字符前景色，8种背景色及闪烁模式，同时还有16种屏幕边框色可供选择。

在40(列)×25(行)字符显示方式中，全屏幕共有1000个字符显示位置，每个显示字符占用屏幕刷新RAM存储器两个单元。这样全屏幕共占用2k个刷新RAM存储单元，接口卡上16k刷新RAM存储单元可存储8页屏幕字符。在80(列)×25(行)字符显示方式中，全屏幕共有2000个字符位置，每个显示字符同样占用两个RAM单元，全屏幕共占用4k个刷新RAM单元，16k刷新RAM可存储4页屏幕字符。字形ASCII码放在偶数单元M中，特征码放在奇数单元M+1中。

该接口卡可以显示三种分辨率的图形。低分辨率图形全屏幕由160(列)×100(行)个象素构成，每

个象素由2×2个象点组成，屏幕显示的每个象素均可取16种颜色，在使用时，除将6845CRTC芯片方式寄存器设置成40(列)×25(行)方式外，还要编制一段特别的支持软件。中分辨率图形全屏幕由320(列)×200(行)个象素构成，一个象素就是一个象点，显示彩色图象时，每个象素可取4种彩色中的一种。

在中分辨率图形中刷新RAM存储单元的每两个位代表屏幕上的一个显示象点信息。这样，一个字节可在屏幕上显示四点象点，全屏幕共需16k字节的刷新存储单元。

高分辨率图形全屏幕由640(列)×200(行)个象素构成，一个象素就是一个象点，只能显示黑白图案。在高分辨率图形中刷新RAM存储单元的每一个位代表屏幕上的一个显示象点信息，这样，全屏幕共需16k字节的刷新存储单元。

图4-6-13给出了彩色图形接口卡的原理框图。

在字符显示方式中，图中(1)号数据锁存器作为字形ASCII码锁存器，(2)号数据锁存器作为特征码锁存器。这里没有设置特征译码电路，而是利用IBM RGB直接驱动彩色显示器的特点将特征码单元经彩色编码器直接切换给显示器的信号输入端。在图形显示方式中，这两个数据锁存器作为输出图形点阵锁存器，这时全部屏幕刷新RAM存储单元都用来存放图形象点。

彩色编码的功能就是在方式控制信号和时序控制信号的配合下，完成图形点信号的切换以使显示器获得预定的彩色效果。为了丰富屏幕显示色彩的种类，接口卡设计了调色板电路。

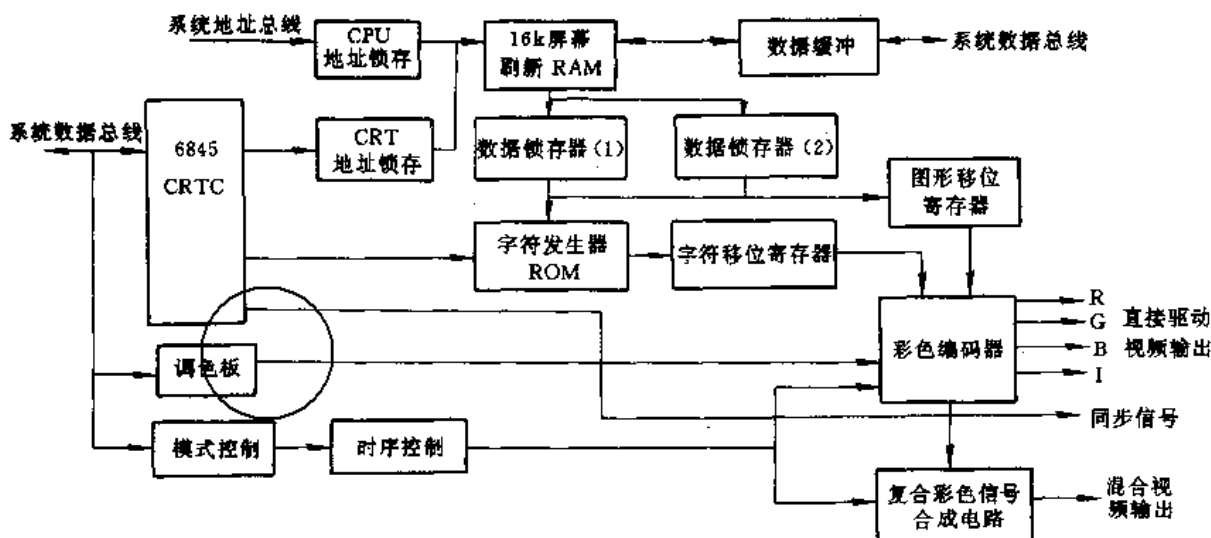


图4-6-13 彩色图形接口卡原理框图

电子工业出版社



该接口卡共有下列七种显示方式：40×25 黑色字符方式；40×25 彩色字符方式；80×25 黑白字符方式；80×25 彩色字符方式；320×200 彩色图形方式；320×200 黑白图形方式；640×200 黑白图形方式。

3.2 打印设备

3.2.1 字符打印设备

打印机是从计算机主机接收打印字符 ASCII 码，将它们暂存在打印机的缓冲 RAM 中，待接收到打印命令（一般为 CR 即回车）后再将字符 ASCII 码经打印字符发生器产生打印点阵信息，通过 I/O 控制芯片的作用经驱动后带动打印头中的针电磁铁将相应的打印针击出，在打印纸上印出字符。针和纸之间为色带。图 4-6-14 为打印机驱动结构示意图。早期的打印机大都采用球型、柱型、履带式打印头或采用菊花瓣字盘，把要打印的字符固定在打印头上，这样，大大限制了可打印字符的种类。随着计算机的应用需求急骤增加，近年来出现了点阵打印机。在点阵打印机中，各种打印字符、图案均可由打印针灵活组合。在打印机字符点阵发生器中固化有多种国别的字符点阵信息，可以通过设置开关来预先设定，以适应不同国别用户的需要。

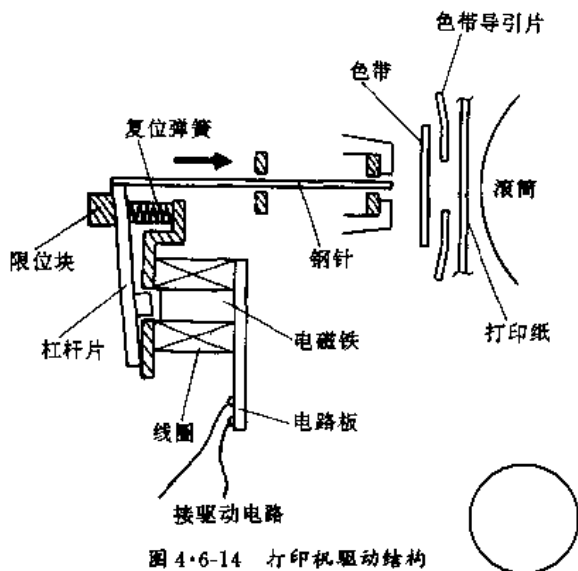


图 4-6-14 打印机驱动结构

打印机电路中通常都有一个主控处理器，有的还配有协从处理器。这些处理器功能特殊，一般都为单片机芯片。这些处理器内部除了常规的运算部件外，还设计有 ROM、RAM 存储器、定时计数器、I/O 控制器等。因此，打印机实际上是一个专用微机芯片控制系统。

字符打印原理与计算机屏幕字符显示原理相似。

对于 9 针打印机而言，打印字符一般由 7（列）× 8（行）打印点阵组成，字符列之间有数个点位置的间隔。图 4-6-15 为字符 A 的打印点阵排列示意图。打印 A 时，步进电动机先带动打印头移动一个点位置作为字符列间隔，然后打印第一列点阵，这时打印头第 4、5、6、7 组线圈导通，相应的打印针击出，导通脉冲的宽度约为 0.6ms 左右。接着步进电动机带动打印头再移动一个点位置，然后打印头系统 3、5 组线圈导通，相应的打印针击出，这样移动了 7 列点位置后就完成了一个字符的打印。接着打印下一个字符，直到一行字符打印完成后，走纸电动机起动，把打印好的一行字符向上移出，准备打印下一行。在实际打印过程中为了提高图象、文字的逼真度、往往都以半列点阵作为打印头的位移打印单位。

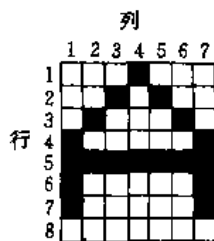


图 4-6-15 字符 A 点阵示意

3.2.2 绘图输出设备

绘图输出设备也称硬拷贝设备，可把图形画在纸上，产生工程图纸，有绘图仪与打印机两种。

1. 打印机 打印机是最廉价的产生图形硬拷贝设备，可分为撞击式与非撞击式两种。撞击式打印机使图形点阵信息通过色带印在纸上（如点阵打印机）。非撞击式打印机常用技术有：喷墨技术、激光技术、静电复印技术等，这类打印机速度快、无噪声，但成本高。

如 TH3070 打印机，是一种 24 针点阵式打印机。它的打印头内有 24 个电磁铁推动着 24 根针，使它们沿着导向装置打到纸上，印出点阵来。打印头装在一个小车上（字车），并可沿滑轨左右移动，字车、滑轨、带动字车的电动机和传动件构成字车机构。字车机构的动力还带动色带机构，使色带在打印时不停地移动。走纸机构驱动走纸滚轮或链轮，使打印纸在控制下有规律地进给，这些机构组成了打印机的机械部分。

打印机的控制器，控制打印机各部机构完成打印和走纸任务，它还要接收机内检测开关信号，机内功能预设开关的状态，以及来自面板开关的控制信号并点亮面板上几个信号灯。



打印机通过并行口与主机联系起来,接收主机发来的信息,向主机输出打印机的工作状态,TH3070打印机由8085CPU、ROM和RAM构成中央控制微处理器,它通过三总线及I/O口地址译码线联系外部接口,并通过驱动电路与执行机构相联。ROM中存有本机的管理程序和字库。8085CPU通过取指令、执行指令、发出控制指令、接收和响应一些中断信号来控制,指挥打印机协调工作。

2. 绘图仪

a. 滚筒式绘图仪 这种绘图仪用两个电动机分别带动绘图纸和绘图笔运动,从而产生图形轨迹。绘图纸卷在筒上由电动机带动沿着 x 方向来回运动,而绘图笔架在纸筒上方由另外的电动机带动,沿垂直于纸运动方向(即 y 方向)左右运动。笔架上带有几种颜色的笔,从而可以画不同颜色的图形。这种绘图仪结构简单,价格便宜,易于操作,但精度速度不高。常见的滚筒式绘图仪结构见图4-6-16,这种结构的绘图仪所绘图形随即被卷在纸筒中,不易发现绘图过程中的错误。为了克服这个缺点,一些滚筒式绘图仪可以把任意大小的单张纸压在笔架和滚筒之间,纸在滚筒的两边运动,便于用户监视绘图过程。

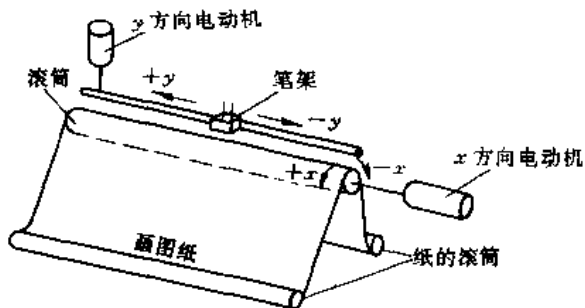


图 4-6-16 滚筒式绘图仪的结构原理

b. 平板式绘图仪 这种绘图仪的特点是绘图纸平铺在绘图平台上,平台板面从200mm×300mm到1800mm×5500mm,甚至长达十几米。由于绘图纸完全平铺在台面上,便于设计人员监视绘图过程,而且易于将绘图笔架改为刻图刀架进行刻图。从驱动方式上看,平板式绘图仪可分为二种,一种是步进电动机驱动,机械传动的绘图仪,另一种是平面电动机驱动的绘图仪。机械传动的绘图仪的传动装置一般用钢丝绳或齿轮齿条箱,在 x 、 y 两个方向上用步进电动机拖动笔架运动。笔架装在一根笨重的横梁上,因而这种绘图仪的速度和加速度都比较低。国产的这种绘图仪速度每分钟几米,国外的可达十几米。由于使用机械传动,这类绘图仪的精度容易下降,寿命较短,但价格相对便

宜。机械绘图仪的结构如图4-6-17所示。

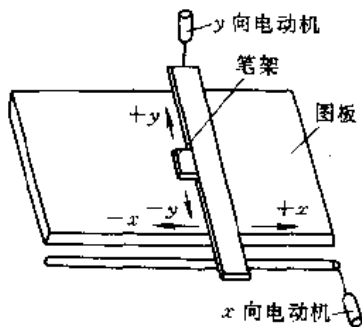


图 4-6-17 机械传动的绘图仪结构示意图

平面电动机驱动的绘图仪采用了两轴同时驱动的单向脉冲电动机,电动机的可动部分(称转子或 x 、 y 电动机)与不动部分(称定子)均为平板,也称平面电动机。这种绘图仪的可动部分(即转子)比较轻,转子和定子之间用空气轴承(即运动时转子和定子互不接触,其间留有十几微米的气垫间隙)。因此可以产生较高的速度和加速度(如XYNETICS绘图仪最大速度可达120m/min,加速度4g),大大缩短了绘图时间。由于绘图笔架和刻图刀架直接装在转子上,省去了机械传动机构,延长了机器的使用寿命。绘图纸一般以真空吸附或静电吸附的方式固定在绘图板上,对绘图纸没有特殊的要求。平板式绘图仪的价格比滚筒式绘图仪要高。其结构如图4-6-18所示。

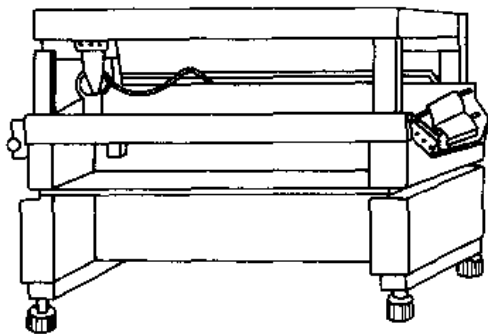


图 4-6-18 平面电动机驱动的绘图仪结构示意图

c. 静电绘图仪 这种绘图仪是打印机和绘图仪的结合,它的运动部分很少,只有供纸和调色盒是机械运动,其余都是电子线路。它的工作原理是:当程序控制的电压作阵列式输出,并作用在管头的针尖上时,被选中的针尖就在管头下面通过的纸上产生极小的静电点,然后纸暴露在液态的调色盒下,产生图形或字符。其绘图速度与图形的复杂性无关,但绘图过程对计算机是一个很重的负载,因此常常用脱机方式工作。这种绘图仪能够输出具有明暗度的平面图形,分辨率较高



此星公司制作 请尊重作者版权

(4~8点/mm),而且可靠,安静,但线条有锯齿状,用纸特殊且贵。结构见图4-6-19,近来出现的彩色喷墨绘图仪,不仅可以输出轮廓线图,还可以输出美丽的彩色画面,从而使绘图仪的使用范围更扩大。

d. 喷墨式绘图仪 喷墨式绘图仪是一种光栅类型的图形输出设备。该绘图仪的墨水泵将黄、红、青三种颜色的墨水分别注入三支细微的喷笔,墨水通过细长的玻璃毛细管喷出,墨水喷射压力可达35Pa,喷出的液柱断裂为微小的珠滴。每秒可喷射50万珠滴。当无图象信号时,喷笔内的过滤片受绘图机控制器的控制并有200V电压对墨水充电,带电的墨滴互相排斥形成分散的墨雾,墨雾在另一个2200V高压偏转电极的作用下发生偏转,并被汇集起来回收到废墨瓶中,当有图象信号时,过滤片不加电压,墨滴不带电,飞经偏转电场时不发生偏转,直接喷到贴在旋转滚筒上的纸或胶片上。滚筒每转一周则沿旋转轴方向完成一条线的绘制。每转完一圈喷笔架由步进电动机和丝杠驱动,沿滚筒水平轴方向移动一次,每次步进0.2mm,这样周而复始循环,在纸上扫描行距为0.2mm密集的直线。三个喷笔的物理位置各相差1cm(即相距50行的间隔),每一个象素的颜色是由黄、红、青三种基色合成的,每种基色有0至16级灰度,每个象素由一个4×4的点阵组成,如图4-6-20所示,对每一种基色而言,在这点阵中涂该基色的点数即是它在这象素处的灰度。

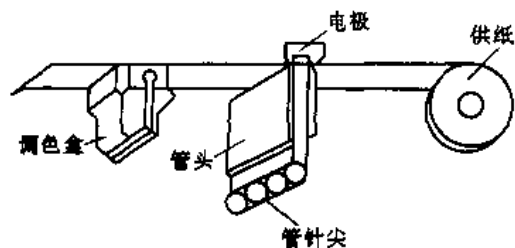


图4-6-19 静电绘图仪的结构示意图

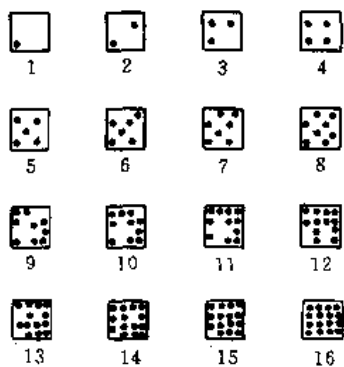


图4-6-20 4×4点面积调灰法

绘图时,从计算机给出每一个象素颜色值后,绘图机控制器根据颜色值分别控制三支喷墨笔喷出的墨点到达该象素的数量,使该象素涂上所需颜色,而由颜色各异的象素阵列形成一幅色彩鲜艳的图象,其图象分辨率可达5点/mm。其工作原理如图4-6-21所示。

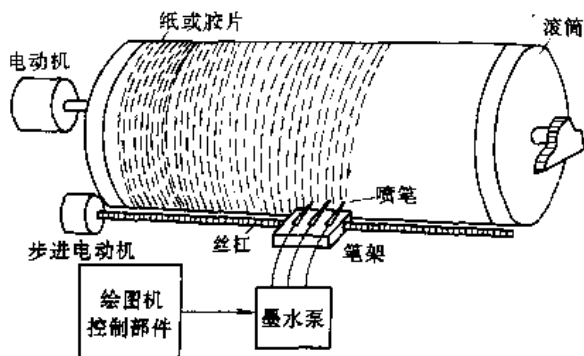


图4-6-21 喷墨式绘图机的工作原理

4 汉字处理设备

4.1 汉字输入设备

汉字输入计算机的方法,大体上可分成三大类。①用拼音字母、数字或新创符号将汉字编为代码的间接输入,通称为汉字编码输入。②采用字根和字元从键盘拼形输入或整字从大键盘的直接输入,通称为汉字键盘输入。③采用语音识别和文字识别手段的高级输入,通称为自然语言输入。自然语言输入目前还未大量应用,还处于研究开发阶段。从输入设备角度来看,主要采用键盘。键盘大部分利用一般计算机系统配置的标准小键盘,也有采用专门设计制造的汉字键盘。

采用英文字母和数字符代码输入计算机的汉字编码,国内研制的方案目前大约有400种,编码方法归纳如下:

(1) 流水码:邮电部一直沿用的电报码,此外还有国标码、国标区位码等。

(2) 纯音码:直接把拼音用字母abc……或数字123……作编码,并加标调。有人用此法编码,再加上排流水号的方法发展为字码。也有人把中国切韵加以发展形成双拼标调。

(3) 音形码:也可以称为声韵与部、形、义、频度结合码。有人在双拼标调的基础上再加部首码、形码、定义区别符或字顺序符来制定编码。有人把拼形的部件(字根、字元)用部件的读音代表符号来编码。

(4) 形码:也称纯形编码或从形编码。有人取汉字



结构特征的笔形,用字母 abc……或数 123……作代表符号来编码。有人用笔划形状来编码。也有人从拼形出发划分字元,充分利用引进的标准键盘转化为数字 123……,字母 abc……代码来制作编码。也有人用左右上下的直接可见端点数来作编码。例如四角号码就是一种形码,它是根据每个汉字四角的形状用四位十进制数来表示一个汉字。

键盘直接输入汉字,可以按照键盘上键位数量的多少,划分为大,中,小三种。一般大键盘属整字输入,中键盘属整字字元混合输入,小键盘属笔划字元输入。

汉字大键盘,将中文字依常用、间用、罕用或依注音、部首、笔划区分,以整个中文字为单位排列在一个或数个输入键盘的盘面上。每个盘面上拥有上千个中文字,每一个中文字有其固定位置。操作者利用指压或光笔,点字笔触键输入数据。盘面字数有限,应当确定盘外字的输入方案。随着技术发展,要求键盘应采用单片微处理机作控制部件,用以完成译码和盘外字的处理功能。键盘输出国标码或系统自定的内部码,以利于与系统连接。

汉字编码输入方案太多,一般比较常用的如长城 0520 系统收容了六种输入方法,它们是国际码、国标区位码、音韵部形码、电报明码、首尾码、汉语拼音码。

汉字通过键盘(标准小键盘或其他专用键盘)按各种输入编码方法输入计算机。不同的输入方案输入不同的字码。为了便于计算机存储、处理和交换,需要将这种字码转换成标准的汉字信息交换码或汉字系统自定的代码。这个转换工作可以由硬件来完成(译码),也可以由软件来完成(计算或查表)。目前,常用的是采用软件手段来处理。

从键盘输入的代码通常称为外部码,编码方案不同,外部码的长短和格式也不同,因此必须通过键盘解释程序把它变成统一的机内代码,即内部码。在计算机内,汉字信息处理都是以内部码形式进行,要实现外部码到内部码转换,必须先将键盘送来的一组外部码放在键码暂存区,通过汉字编码解释程序查找“输入字典”,找到相应的内部代码。

4.2 汉字输出设备

计算机输出汉字的过程是:先将汉字的内部码送入存储器的输出缓冲区,然后对汉字代码进行压缩,逐个在汉字库中找出对应的字形点阵代码,并将这些代码按某种格式进行加工,然后送去显示或打印。

汉字的显示输出有文本方式和图象方式两种。文

本方式的输出框图如图 4-6-22,它由 CRT 定时控制电路(CRTC),视频显示存储器(VRAM),汉字发生器和并-串转换电路等组成。显示输出时,CPU 先将内部码转换成字模的地址依次读入 VRAM,然后由定时控制电路控制 VRAM 按顺序读出。从 VRAM 读出的数据作为高位地址送到汉字发生器,指向要读取的汉字字模点阵。同时,定时控制电路还输出跟踪汉字窗口内光栅扫描线的光栅地址信号,作为汉字发生器的低位地址,去读取与汉字窗口内光栅线相对应的汉字点阵信息,并行送入并-串转换电路。然后,在点信号的作用下进行移位,将其变换成串行信息,作为视频信号与水平同步、垂直同步信号一起送往 CRT 监视器。

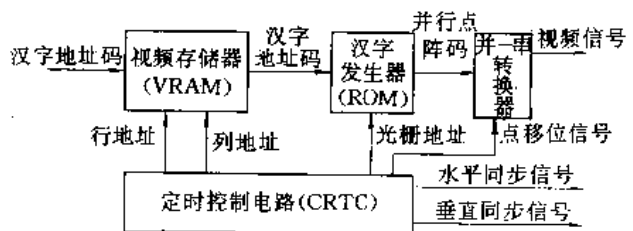


图 4-6-22 文本方式的输出框图

本输出法优点是实现简单,显示器使用的 VRAM 容量小,缺点是 ROM 字库是固定的,无法修改和扩充。为了弥补这一点,字库可以用 RAM 或部分用 RAM 构成,根据需要把某些汉字由软字库调入 RAM。

图象方式输出汉字原理是建立一个屏幕显示缓冲区,使缓冲区中每个字节的每位与屏幕上的每个显示点一一对应,也就是说缓冲区是面向屏幕的。改变缓冲区中某位二进制信息的值为 0 或 1,屏幕上相应点的亮暗也随之变化。只要将要显示的汉字、数字或字符点阵信息经软件进行加工,送入屏幕缓冲区的适当单元,就能够在 CRT 屏幕的某个位置上显示出来。这时,汉字点阵的行和列一般都是西文点阵的 2 倍,如西文点阵是 7×8 ,则汉字点阵是 14×18 。

另一类汉字输出设备是打印机。

a. 针式汉字打印机 针式打印机可分为 9 针式、16 针式以及 24 针式几种。9 针打印机有图形型和字符型两种。图形针式打印机可方便地用于打印汉字。字符针式打印一行汉字须分 2~3 次进行。16 针式打印机造价低于 24 针式打印机,适合于打印 15×18 点阵汉字。分辨率 4 点/mm,速度约 40~60 字/s。24 针式打印机适合于打印 22×24 点阵的汉字,速度 35 字/s 和 65 字/s,分辨率 4~5 点/mm。



这种打印机是以纵向笔划打印,因此提供给打印机的点阵信息也应该是纵向笔划。一般文字发生器为适应汉字显示需要,点阵信息是以横向笔划存储的,所以必须将文字发生器读出的点阵信息转换成针式打印机所需的字形输出码送给针式打印机。

b. 梳齿状汉字打印机 梳齿状汉字打印机的针头横向排成一行,每个针头负责打一个汉字。如我国自行设计的一台梳齿状打印机并行排列60根针,一次可打60个汉字。它的工作方式是,60根针同时印完一个点后,打印头水平移动到下一个相邻点位置,再印第二点,依次重复,直到一横排的点全部印完,此时走纸一步,然后又反方向地重复水平打印的周期,直到预定的水平周期结束,一行字全部印完,再将纸前进到需要打印的下一行的顶端。

这种打印机打印方式与CRT显示扫描方式相似(逐行扫描),联机方便。由于各针并行工作,减少打印横向行程,提高了打印速度,打印速度可达100字/s以上。

c. 热敏式印字机 热敏式印字机是把热着色的热敏纸与热记录头接触,根据信息瞬时地对微小的发热单元加热,形成所需图形的记录方法。这种印字方式不需显影、定影,印字完全是干式的,使用方便,缺点是需用专门的热敏纸,费用较高。热敏纸发色原理是:它在基纸的表面上均匀涂上厚度为数微米的发色层。发色层是由无色染料微粒和发色剂组成,有粘合剂粘着。当热元件对纸的表面加热时,发色剂和无色染料溶解,起化学反应着色。

d. 喷墨式汉字打印机 喷墨式汉字打印机是采用一定的技术方法,使墨水喷嘴喷出的墨水粒子发生偏转,从而形成汉字字形。它的特点是用普通纸,不需要定影,而且印字速度比较高。根据墨水粒子偏转的方法不同,可分为电场控制式、电荷控制式和压力控制式三种。其中电场控制式记录速度快,记录质量好,适合汉字印字。图4-6-23是电荷控制式喷墨式汉字印字机的工作原理图。将加压墨水供给喷嘴(压力为 $(20\sim 30)\times 10^4\text{Pa}$),喷嘴装有压电振子。如果用高频激励压电振子,就可以产生与振动频率相同的均匀粒子。在墨水柱分离成粒子的瞬间加上电场,粒子就带上电荷。根据要记录的字符来控制粒子的外加电荷。使之通过一定的电场,便可使带电粒子的轨迹产生相应的偏转,而形成要印字的文字。不印字的粒子不赋与电荷,因此在电场中不发生偏转,而被挡板回收。

e. 激光汉字印字机 激光印字机的特点是高速

和高分辨力。小型激光印字机的分辨力 $5\sim 7$ 点/mm。速度 $500\sim 1000$ 字/s。大型高精度激光汉字打印机的分辨力10点/mm,印字速度 $5000\sim 10000$ 字/s。

激光印字机主要由两大部分组成,即激光印字光学系统和电子照象转写系统。由激光器产生的激光束,经过声光调制器,受到汉字文字图形信息的控制,使激光束按照文字图形产生相应的偏转。然后经透镜及多面回转镜照射到光导鼓的表面上,把偏转形成的文字图形信息转换成电荷信号,形成图形潜象。潜象经显象部,在已曝光的鼓面的潜象部分加上显色剂(有机染料),然后经转印部。由于受到印字用纸表面所加电位的吸收,把显色剂向纸面转写,再经过定影部分热处理定影。

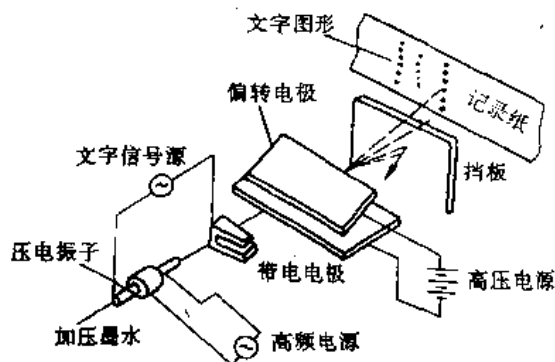


图4-6-23 喷墨式汉字打印机印字原理

5 存储器直接输入输出(DMA, Direct Memory Access)

中断技术解决了高速CPU与低速外部设备之间的矛盾,从而提高了CPU的效率,但对高速外部设备,它就无能为力了。当前某些外部设备数据传送速度非常快,一般微型机来不及响应。微型机上广泛使用的温式磁盘,其数据传送速率最低为每秒5M位,也就是每秒传送62.5万字节。为了快速传输大量数据,微机中采用DMA。用DMA方式传送数据时,在存储器和外部设备之间直接开辟高速传输数据通路,不需要CPU的干预,这时用一个总线周期就能完成数据在存储器和外部设备之间的传送,因而使数据传送速度达到最快。

对于成批传送数据的设备,为了避免中断方式下传送每个数据都要进行中断响应,保存现场,进入中断服务(传送数据),结束中断时恢复现场,返回主程序等重复的工作,减少CPU开销,这时也可用DMA方式进行传送数据。



利用 DMA 方式传送数据时,数据的传输过程完全由硬件控制,这种电路称 DMA 控制器,DMA 控制器具有如下功能:

(1) 向 CPU 申请 DMA 传送。

(2) 在 CPU 允许 DMA 工作时,把总线控制权转交给 DMA 控制器,避免因进入 DMA 工作而影响 CPU 的正常活动,或引起总线竞争。

(3) 在 DMA 期间管理系统总线,控制数据传送。

(4) 确定数据传输的起始地址和数据长度、修正传送过程中的数据地址。

(5) 在数据块传送结束时,给出表示 DMA 操作完成的信号。

在 IBM-PC/XT 中,用 8237A-5 可编程的 DMA 控制器(简称 8237)及其辅助电路控制 DMA 工作。8237 允许外部设备直接与系统存储器进行通信,也提供存储器到存储器的数据直接传送能力,它具有多种可编程的控制特性,可以在程序控制下对系统进行动态重新配置,实现系统最佳化,提高数据吞吐能力。

8237 有四个独立的 DMA 通道(若级联附加 8237,则通道数可任意扩充),每个通道都有 64K 地址和字节计数能力。用户可用程序选择 8237 的三种基本传送方式之一(单个数据传送方式、成组数据传送方式和询问传送方式),用以控制 DMA 服务的类型。每个通道都可独立地编程,编程结束后它们自动的设置到初始状态,就可开始 DMA 传送。任一通道达到计数终点时,8237 结束该通道的一次 DMA 传送,产生过程

结束信号 \overline{EOP} 。外界输入有效的低电平过程结束信号 \overline{EOP} ,也可终止正在执行的 DMA 传送。

由于 8088 有 20 位地址信息,而 8237 只能管理 16 位地址,为正确寻址 DMA 操作的存储器,PC/XT 中设有 DMA 页面寄存器,DMA 页面寄存器中存放存储器地址的高 4 位 $A_{15} \sim A_{12}$ 。利用 8237 本身管理的 16 位地址 $A_{15} \sim A_0$,加上 DMA 页面寄存器的高 4 位地址,就能在 8088 的全部存储空间中进行 DMA 操作了。

6 通用接口标准

a. RS-232-C 标准接口 RS-232-C 接口是美国电子工业协会(EIA)确定的标准串行接口,它规定了物理技术参数和传输数据的电气参数标准。这个标准最初制定是为了促进公用电话网进行数据通信。与电话网络连接,通常通过调制解调器设备来实现,所以标准中还定义了用于控制标准电话连接设备和标准调制解调器的对接信号。60 年代中期分时计算机的发展,几乎无例外地通过电话串行连接实现远距离访问,于是 RS-232-C 标准被广泛采用。80 年代随着微型机发展,除了真正远距离连接外,通常终端都直接通过 RS-232-C 端口与计算机连接而不用电话网络或调制解调器。现在,许多场合都以这种接口规范作为联接标准,如终端、绘图仪、逻辑分析仪、磁带驱动器和打印机基本都有一个 RS-232-C 的接口。

RS-232-C 接口在联线上规定了标准的 25 芯插头座,25 根插针的信号都已规定,见表 4-6-3。

表 4-6-3 RS-232-C 连接标准

| 引脚号 | 电路 | CCIT ID | 方向 | 说明 |
|-----|-----|---------|-----------|------------------------------------------------------------------|
| 1 | AA | 101 | | Protective ground (shield). 保护接地(屏蔽) |
| 2 | BA | 103 | 从终端到调制解调器 | Transmitted data. 发送数据 |
| 3 | BB | 104 | 从调制解调器到终端 | Received data. 接收数据 |
| 4 | CA | 105 | 从终端到调制解调器 | Request to send. 请求发送 |
| 5 | CB | 106 | 从调制解调器到终端 | Clear to send. 清除发送 |
| 6 | CC | 107 | 从调制解调器到终端 | Data set ready. 数据组准备好 |
| 7 | AB | 102 | — | Signal ground (Common return). 信号地(公共返回) |
| 8 | CF | 109 | 从调制解调器到终端 | Received line signal detector (carrier detected). 接收行信号检波器(载波检波) |
| 9 | — | — | — | Reserved for testing. 为测试保留的 |
| 10 | — | — | — | Reserved for testing. 为测试保留的 |
| 11 | — | — | — | Unassigned. 未指定的 |
| 12 | SCF | 122 | 从调制解调器到终端 | Secondary received line signal detector. 次级接收行信号检波器 |



(续)

| 引脚号 | 电路 | CCIT ID | 方向 | 说明 |
|-----|-----|---------|-----------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| 13 | SCB | 121 | 从调制解调器到终端 | Secondary clear to send. 次级清除发送 |
| 14 | SBA | 118 | 从终端到调制解调器 | Secondary transmitted data. 次级发送数据 |
| 15 | DB | 114 | 从调制解调器到终端 | Transmitter signal element timing (terminal transmitter clock). 发送器信号组件同步 (终端发送器时钟) |
| 16 | SBB | 119 | 从调制解调器到终端 | Secondary received data. 次级接收数据 |
| 17 | DD | 115 | 从调制解调器到终端 | Receiver signal element timing (modem receiver clock). 接收信号组件同步 (调制解调接收器时钟) |
| 18 | — | — | — | Unassigned. 未指定的 |
| 19 | SCA | 120 | 从终端到调制解调器 | Secondary request send. 次级请求发送 |
| 20 | CD | 108.2 | 从终端到调制解调器 | Data terminal ready. 数据终端准备好 |
| 21 | CG | 110 | 从调制解调器到终端 | Signal quality detector. 信号质量检测器 |
| 22 | CE | 125 | 从调制解调器到终端 | Ring indicator 振铃指示 |
| 23 | CH | 111 | 从终端到调制解调器 | Data signal rate selector, or 数据信号速率选择器, 或 |
| | CI | 112 | 从调制解调器到终端 | Data signal rate selector. 数据信号速率选择器 |
| 24 | DA | 113 | 从终端到调制解调器 | Transmitter signal element timing (terminal transmitter clock). 发送器信号组件同步 (终端发送器时钟) |
| 25 | — | — | — | Unassigned. 未指定的 |

表 4-6-4 列出在微计算机上常用的一些信号线。有时微型计算机主机通过 RS-232-C 接口与终端相连接, 只用三条线, 即发送 TD、接收 RD 和信号地 SGND。见图 4-6-24。



图 4-6-24 微型机与终端连接

RS-232-C 信号线提供单向数据发送线, 长度可达 50ft, 最高传输速率 20kbit/s, 正“1”电平大于 5V, 小于 15V。负“0”电平必须在 -5~-15V 之间。

b. RS-423, RS-422 和 RS-449 接口 这三个新标准用于新的接口技术弥补 RS-232-C 的不足, 以获得更长距离传输和更高的传送信号带宽。

RS-423 标准接口是 RS-232-C 接口标准的一种改进型式。许多较新的设备, 特别是具有高数据发送率的装置一般都有这种接口。它在 10ft 距离时可高达 100kbit/s, 发送是单向单端式的, 而接收器是一种平衡线型的接收器, 所以驱动器和接收器之间允许有接地电位差。逻辑“1”状态必须超过 4V, 并低于 6V, 逻辑“0”必须在 -4~-6V 之间。

RS-422 标准接口是对 RS-423 标准接口作进一步

的完善。其数据速率更高, 收发之间的距离可更远。它提供单向平衡线方式的传送, 在数据速率高达 10 兆位/s 时, 最大传送距离为 100ft, 较低传输速率可使传送距离增长到 4000ft, 接口可输出 ±2 到 ±6V 的电压, 而接收器能检测低到 200mV 的输入信号。

RS-449 标准接口采用 37 个引脚如表 4-6-5 主要用于通信中, 优点在于主通道使用 37 脚连接器连接的话, 那么多通道通信中的每个附加通道只需一个 9 脚连接器即可。

表 4-6-4 RS-232-C 部分信号线

| 信号名 | 联接 |
|-------------|------|
| (1) 地线 | |
| (2) 发送数据 | 至设备 |
| (3) 接收数据 | 来自设备 |
| (4) 发送请求 | 至设备 |
| (5) 发送清 | 来自设备 |
| (6) 数据准备就绪 | 来自设备 |
| (7) 信号地 | |
| (8) 载波检波 | 来自设备 |
| (19) 辅助设备忙线 | 来自设备 |
| (20) 终端就绪 | 至设备 |
| (22) 振铃指示 | |
| (12) +接收环电流 | |
| (24) -接收环电流 | |
| (13) -发送环电流 | |
| (25) +发送环电流 | |



表 4-6-5 RS-449 连接器标准 37 引脚连接器各引脚说明

| 引脚号 | 电路 | 方 向 | 类型 | 说 明 |
|-----|--------|--------|--------|-----------------------------------|
| 1 | Shield | | Ground | Protective shield. 防护屏蔽 |
| 2 | SI | 从调制解调器 | A-A' | Signaling-rate indicator. 信号速率指示器 |
| 3 | 备用 | — | — | — |
| 4 | SD | 到调制解调器 | A-A' | SEND data. 发送数据 |
| 5 | ST | 从调制解调器 | A-A' | SEND timing. 发送同步 |
| 6 | RD | 从调制解调器 | A-A' | RECEIVE data. 接收数据 |
| 7 | RS | 到调制解调器 | A-A' | Request to send. 请求发送 |
| 8 | RT | 从调制解调器 | A-A' | RECEIVE timing. 接收同步 |
| 9 | CS | 从调制解调器 | A-A' | Clear to send. 清除发送 |
| 10 | LL | 到调制解调器 | A-A' | Local loopback. 局部回送 |
| 11 | DM | 从调制解调器 | A-A' | Data mode. 数据方式 |
| 12 | TR | 到调制解调器 | A-A' | Terminal ready. 终端准备好 |
| 13 | RR | 从调制解调器 | A-A' | Receiver ready. 接收准备好 |
| 14 | RL | 到调制解调器 | A-A' | Remote loopback. 远程回送 |
| 15 | IC | 从调制解调器 | A-A' | Incoming call. 回来请求 |
| 16 | SF | 到调制解调器 | A-A' | Select frequency. 或 选择频率. 或 |
| | SR | 到调制解调器 | A-A' | Signaling rate selector. 信号速率选择器 |
| 17 | TT | 到调制解调器 | A-A' | Terminal timing. 终端同步 |
| 18 | TM | 从调制解调器 | A-A' | Test mode. 测试方式 |
| 19 | SG | — | C-C' | Signal ground. 信号地 |
| 20 | RC | 从调制解调器 | C-B' | RECEIVE common. 接收公用 |
| 21 | 备用 | — | — | — |
| 22 | SD | 到调制解调器 | B/C-B' | SEND data. 发送数据 |
| 23 | ST | 从调制解调器 | B/C-B' | SEND timing. 发送同步 |
| 24 | RD | 从调制解调器 | B/C-B' | RECEIVE data. 接收数据 |
| 25 | RS | 到调制解调器 | B/C-B' | Request to send. 请求发送 |
| 26 | RT | 从调制解调器 | B/C-B' | RECEIVE timing. 接收同步 |
| 27 | CS | 从调制解调器 | B/C-B' | Clear to send. 清除发送 |
| 28 | TS | 到调制解调器 | A-A' | Terminal in service. 检修终端 |
| 29 | DM | 从调制解调器 | B/C-B' | Data mode. 数据方式 |
| 30 | TR | 到调制解调器 | B/C-B' | Terminal ready. 终端准备好 |
| 31 | RR | 从调制解调器 | B/C-B' | Receiver ready. 接收准备好 |
| 32 | SS | 到调制解调器 | A-A' | Select standby. 选择准备 |
| 33 | SQ | 从调制解调器 | A-A' | Signal quality. 信号质量 |
| 34 | NS | 到调制解调器 | A-A' | New signal. 新的信号 |
| 35 | TT | 到调制解调器 | B/C-B' | Terminal timing. 终端同步 |
| 36 | SB | 从调制解调器 | A-A' | Stand-by indicator. 备用指示器 |
| 37 | SC | 到调制解调器 | C-B' | SEND comtr.on. 发送公用 |



第7章 电子计算机软件

1 操作系统^[2]

1.1 操作系统的发展

一个计算机系统包括硬件和运行于其上的软件。计算机系统必须有软件支持,才能有效地运转并为用户利用。软件分系统软件和应用软件。操作系统是最基本的、也是最重要的系统软件,它运行于裸机(物理机器)之上,是计算机硬件的第一级扩充,如图4-7-1所示。计算机系统的中央处理机(CPU)、内存储器、各种外部设备及通道等硬件设备,都在操作系统的动态管理下协调有序地工作。任何其他软件都是在操作系统支持下工作的。操作系统还要协调控制许多能够高度并行执行的程序段,提高系统的执行效率,保护系统和用户的信息安全。

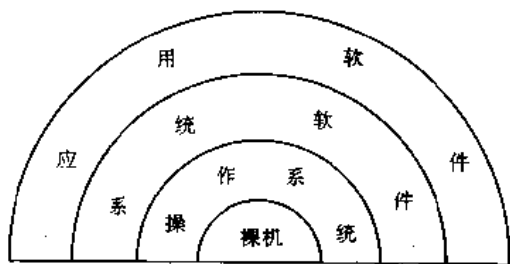


图 4-7-1 计算机系软硬件的层次结构图

计算机的操作经过了手工操作阶段、监督程序阶段、执行系统阶段、多道程序系统和分时系统阶段。多道程序系统和分时系统的出现才标志着操作系统的正式形成。

1. 手工操作阶段(50年代初~50年代中) 早期的计算机存储容量小、运算速度慢,主要用于科学计算。此时的计算机没有操作系统,用户通过控制台来操纵机器。源程序代码或机器语言代码是预先蓄在纸带或卡片上,计算机通过光电输入机或卡片读入机读入程序,程序运行的结果用打印机送出。程序的输入、运行和输出都通过用户在控制台上扳动扳键、按动按钮来操作。现在人们熟悉的显示器、键盘当时还没有出现。

这种手工操作的特点是计算机的全部资源归一个

用户的一个程序独占,操作过程必须由人工来干预。在人工操作时,CPU处于等待状态,造成机器资源的利用极不充分。

2. 监控程序阶段(50年代中至50年代末) 随着第二代计算机的诞生,计算机的速度和容量都有了很大的发展,使人机之间速度不匹配的矛盾更为突出。为了解决这个矛盾,提高计算机资源的利用率和增强系统的处理能力,出现了监控程序,用它来对计算机各种资源进行监督和管理。它是由系统操作员将各个用户提出的作业组合成一批作业,利用常驻在内存中的监控程序,接收操作人员提供的一批作业及其有关信息,这一批作业被分别输入到磁带中暂时保存起来,然后再由监控程序自动地顺序把作业逐一从磁带再调入内存运行,运行的结果也是先输入至另一条磁带,再逐个打印出来。计算机的这种工作方式被称为早期批处理。

3. 执行系统阶段(50年代末至60年代初) 执行系统的出现是基于以下的因素:首先是因为并行操作技术在计算机系统中获得成功,其次是由于硬件发展了通道、中断等技术。

通道是独立于CPU的专用处理器,用来管理输入输出工作。它代替CPU对输入输出操作进行控制,这样便实现了输入输出操作与CPU的并行工作。

中断是指外围设备或通道发出信号要求暂时停止主机当前的工作,而转去处理外设提出的请求——中断处理程序。

中断处理程序及负责控制输入、输出的服务程序称为执行系统。执行系统常驻内存,它对其它的系统程序和应用程序起控制指挥作用,而原来的监控程序只起相互调用的作用。执行系统根据需要将存放在外存中的语言处理程序、装配程序、库程序、输入输出控制程序等调入内存执行,实现了主机和外设之间的并行操作,主机与外设之间速度不匹配的矛盾缓解了。

执行系统的出现还促进了软件技术的发展,使系统程序设计实现模块化结构,宜于设计、修改和扩充。

但是,由于计算机本身工作的顺序性,即必须先要将数据输入后才能计算,计算出结果后才能打印等,计算机并不能完全消除主机对外设传输的等待。



4. 多道批处理操作系统阶段 (60年代初至60年代中) 为提高计算机CPU的运行效率,在内存中同时放入多个作业,而这些程序可以交替占用CPU和外围设备。这样从宏观上来看,一台计算机同时运行多道程序,而从微观上来看,CPU的某个时刻只在运行一道程序,这就是多道程序系统。

在多道批处理操作系统中,需要有个调度算法来解决把CPU分配给哪一道程序使用的问题,需要有个存储管理程序来解决多道程序在内存中的定位、分配以及避免遭到破坏,需要有个设备管理程序负责外围设备的分配、释放以及信息的交换,还需要有个文件系统来管理以文件形式存放在外存中的程序和数据。

由于多道批处理操作系统能利用主机的等待时间运行其他的程序,显著地提高了资源的利用率。批处理是指在作业的运行过程中,用户并不直接操作计算机,而是由用户事先设计好运行作业的步骤、作业运行过程中可能出现的问题及相应的解决办法,用多道程序系统可以识别的方式描述出来,与待运行的作业一起装入机器。在运行过程中不允许用户与计算机系统的交互,因此不适宜处理在运行时需要用户加以干预的程序。

5. 分时操作系统阶段 (60年代中期以后) 分时系统是一种高级的联机操作方式,它为多个用户分别提供了一台可以与系统进行交互会话的终端。用户在各自的终端上键入命令,用交互方式直接控制自己的程序,也可以对程序进行修改和补充。分时系统在处理完用户的程序以后,把结果报告给用户,并等待用户进一步的命令。

分时系统是采用划分时间片的方法来轮流接收和处理各个用户从终端输入的命令,即按某个轮换次序在用户之间分配允许使用CPU的时间。如果用户的某个处理要求时间较长,分给它的一个时间片还不够用,它只能暂停下来,等待下一次轮到时再继续运行。由于计算机运算的高速性能和并行工作的特点,使得每个用户感觉不到别人也在使用这台计算机,这好像他独占了整台计算机一样。分时系统适用于频繁交互的作业,如程序调试、软件开发等等。

多道程序和分时系统是操作系统形成的标志。随着计算机技术的发展,计算机的应用领域也从传统的科学计算扩展到数据处理、过程控制和信息管理等领域,操作系统的功能也随之更加完善,出现了实时操作系统、网络操作系统等新的操作系统。

实时操作系统一般都采用事件驱动的设计方法。

系统接收了某种信息后,自动选择一个程序加以处理,并在严格的计时程序下控制运行。例如用计算机控制某个生产过程时,计算机需要接收从各个传感器传过来的信息,并要在很短的时间内作出判断和处理,其中包括向被控制的对象发出控制信息。所以在实时系统里对计算机的响应时间有很高的要求,除此之外还要求计算机具有人机对话功能,能够实时地反映现场的情况。

网络操作系统是利用通信线路把分布在不同地点的多个独立的计算机系统连接起来组成一个网络,网上的用户可以实现相互间的数据传送,可以共享网络上的所有硬件、软件和数据等资源。网络操作系统是更高意义上的操作系统,它正在得到迅速的发展。

综上所述,在操作系统的发展过程中,只有当多道批处理操作系统和分时操作系统出现时,才标志着真正的操作系统的形成。通常我们把操作系统分成三大类,即:多道批处理操作系统、分时操作系统和实时操作系统。

1.2 操作系统的功能

操作系统负责管理和调度使用计算机系统内的各类资源。具体地说,操作系统具有处理器管理、存储管理、设备管理和信息管理的功能。

1. 处理器管理 处理器管理的功能主要是解决在多道程序的情况下如何把CPU的工作时间合理地、自动地分配给要执行的各道程序。

在处理器管理中经常使用的作业和进程两个概念和我们平时所使用的程序这个概念是有区别的。作业是指用户要求计算机完成的一项相对独立的任务,例如要求计算机把用户编好的程序加以编译、连接装配并执行就是一个作业。计算机每完成一个作业,就是执行了该作业中包含的所有任务。

进程是一种活动,它由一个动作系列组合,每个动作是在某个数据集上执行一段程序。进程和程序不一样,进程是动态的概念而程序是计算机指令的集合,本身没有运行的含义,它是静态的概念。进程在运行前产生,运行后消失,它是暂时的,而程序可以长期保存。一个进程可以执行一个或几个程序,而一个程序可以由多个进程加以执行。

作业和进程只有在多道程序情况下才有意义。在多道批处理操作系统中,一般有大批作业存放在外存储器上,形成一个作业队列。处理器管理面临的主要两个问题是:一是如何从这些作业中挑选出某个作业调



入主存,构成进程提交运行;二是如何在多个进程间分配处理器。

处理器管理是分为两级管理来解决这两个问题。第一级管理是作业调度,它的管理对象是作业。作业一旦投入运行,由进程调度来实施第二级管理,进程调度的管理对象是进程。

a. 作业调度 作业调度是根据用户的需要,合理地利用计算机的资源,从外存储器上的作业队列中选取可执行的作业,调入主存,完成作业从后备状态到就绪状态的转换,在作业运行完毕以后,进行一系列的善后工作。

作业调度主要做以下四項工作:

(1) 建立作业控制块。当用户向计算机提交一个作业后,此作业在进入外部存储器后,就进入后备状态,此时要为每一个作业建立一个作业控制块(JCB),在作业控制块中详细地记录着每个作业的信息,其主要内容有:作业名、作业现在的状态、作业的优先数、作业对设备资源的要求以及设备资源的使用情况等。作业控制块在作业调度中起着重要的作用,它在作业存在于系统的整个过程中,一直伴随着对应的作业同时存在。当作业退出系统时,它才随之撤消。

(2) 选择投入运行的作业。在大型计算机系统中,一般有数十个、甚至数百个作业处于后备状态,而进入内存可以运行的作业只能是几个,系统选择运行作业的原则体现在作业调度的算法中。常用的算法有:

先来先服务算法,该算法按照作业建立时间的先后顺序选择作业;

最短作业优先算法,该算法估计运行时间最短的作业;

最高响应比优先算法,响应比=响应时间/计算时间,响应时间是指作业处于后备状态中的等待时间,计算时间是指用户申请的计算时间。这样使短作业在等待了较短的时间后就被选中,而长作业也不至无限等待下去。

还有其它算法,要根据用户的需要和计算机的资源配置来决定实际使用的调度算法。

(3) 为选中的作业建立进程。作业调入内存以后,作业调度程序根据作业内容建立相应的进程,并为这些进程确定进程名、优先数和进程控制块,使得它与其它并行作业的进程合成一个进程队列,完成运行前的准备工作,然后由进程调度程序安排它们协同运行。

(4) 作业结束时的善后处理。当作业的最后—个进程执行结束时,作业调度程序要输出本作业的运行

时间和作业执行情况等信息,收回分配给该作业的全部资源,撤消与该作业有关的全部进程和作业控制块。

b. 进程调度 进程的基本状态可分为挂起、就绪和运行三种。挂起状态是指进程正在等待系统分配某种资源而暂不运行。就绪状态是指该进程已进入内存并具备了执行的条件但正在等待系统分配处理器以便投入运行。运行状态是指进程已占有处理器且正在运行。

一个作业的进程进入就绪状态以后,一般都要在进程的三个状态之间几经周折才能达到完成状态。正在运行中的进程,会因为资源不足或等待某些事件发生而转入挂起状态,以便把处理器先让给其它处于就绪状态的进程使用。

进程调度的主要任务是动态地将处理器分配给由作业调度程序建立起来的进程,从而使进程的状态在就绪、挂起和运行之间转换。

进程调度主要做以下三項工作:

(1) 建立进程控制块。当作业进入内存并构成进程时,系统立刻为该进程建立了一个进程控制块,进程控制块主要包括了以下一些信息:进程名、优先数、进程的当前状态。当进程由运动状态转入挂起或就绪状态时,进程控制块要保留各寄存器的内容,以便在该进程重新进入运动状态时,恢复当时的各寄存器的内容,继续运行。当进程在运行时与其他进程进行通信,进程控制块要记录通信的有关信息。

相同状态的进程控制块用链指针连接在一起,排成了队列。进程控制块中的信息大部分都要在进程调度过程中动态地填写或修改,从而保证了进程调度程序对系统中全部进程的有效管理。进程控制块将随着进程的结束而撤消。

(2) 按照进程调度算法分配处理器。当处理器空闲时,进程调度程序便按某种进程调度算法确定应把处理器分配给哪一个处于就绪状态的进程,确定应分配给它多长时间。进程的调度算法有多种,常用的有以下两种:

按优先数调度:系统给每个进程规定了优先数,当处理器空闲时,进程调度程序把处理器分配给就绪队列优先数最高的进程。当同一优先数的进程有多个时,一般采用先来先执行的办法。

轮转调度:系统每次都把处理器分配给位于就绪队列的第一个进程,并规定了该进程可占有处理器的一段时间——一个时间片。当该进程用完了规定的時間片以后,系统便把此进程送至就绪队列的末尾,并把



处理器分配给就绪队列中的下一个进程。

(3) 执行分配处理器的操作。把原来正在运行的进程的状态改为“就绪”或者“挂起”，并把它插入相应的队列中，然后把被选中的进程从就绪队列中移出，并把其状态改为“运行”。

处理器管理除了进行作业调度和进程调度以外，还要解决以下问题：

在多道程序的情况下，有许多进程在系统中并行地运行，这些进程间存在着同步和互斥的制约关系，为此要提供进程的通信功能，使进程之间保持一定的联系，以便协调地完成任

务。当若干个进程争占资源时，可能会出现这样的情况：每个进程所要求的资源都被另一个进程占用着，而这些进程在未得到所要求的资源之前又不会交出自己已占用的资源，于是没有一个进程能继续运行，这种情况称为死锁。这就象两只羊过独木桥，走到桥中间互不相让，所造成的僵持局面。为此要避免死锁的发生，一旦发生了死锁要检测出来并设法解决。

图 4-7-2 示出作业与进程状态的转换。

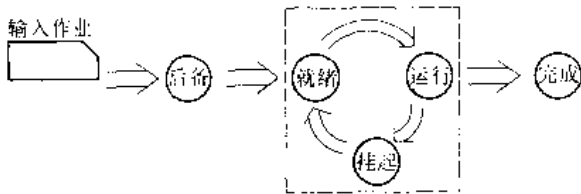


图 4-7-2 作业与进程状态转换示意图

2. 存储管理 计算机内存的容量总是有限的，面对规模越来越大的计算机软件，内存容量不足的矛盾始终是存在的。为了提高计算机内存的使用效率，操作系统的存储管理主要提供了以下功能。

a. 内存的分配 在多道程序系统中，有若干个作业同时存在于内存之中，操作系统的存储管理程序要合理地分配空间，避免各个作业发生冲突。操作系统要建立一个可利用存储空间分配表，当某作业申请存储空间时，系统根据规定的分配原则，从可利用存储空间分配表中选取最合适的空间分配给此作业，把分配掉的空间从可利用存储空间分配表上删去。在作业完成之后，收回分配给它的存储空间，归还给可利用存储空间分配表。

对存储器的管理存在着多种形式，最简单的是单一连续分配方式。在这种分配方式中，整个内存被分为两个部分，一部分给操作系统使用，另一部分给用户作

业使用。实际上用户不可能正好全部用完，所以总要剩下一些空白区，图 4-7-3 是单一连续分配方式的示意图。单一连续分配方式适用于配备有简单批处理功能的微型计算机的操作系统。

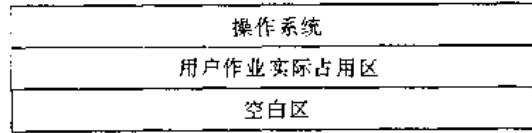


图 4-7-3 单一连续分配方式示意图

多道程序系统采用分区分配，它的基本思想是把内存划分成若干个分区，在每一个区中按照连续分配方式分配给作业，其中有固定式分区，它是把存储区划分成若干个大小不等的分区，在作业申请内存时，找出足够大的分区分配给它。表 4-7-1 给出了固定式分区中内存分配表的一个具体例子。

表 4-7-1 固定式分区的内存分配表

| 区号 | 容量 | 起始地址 | 状态 |
|----|------|------|-----|
| 1 | 64k | 20k | 已分配 |
| 2 | 128k | 84k | 未分配 |
| 3 | 256k | 212k | 已分配 |
| 4 | 256k | 468k | 未分配 |

由于分区大小事先已固定了，所以实际上每个分区都有一部分被浪费的空白区（称为碎片）。可变分区是在作业进入内存时，按作业的大小建立分区。当系统初始启动时，整个内存除了操作系统区以外，其余部分是一个空白分区。可变分区由于是动态地分配内存，需要建立已分配区表和空白区表，用来反映当前内存已分配的分区和未使用的分区，如表 4-7-2 所示。

表 4-7-2 可变式分区的内存分配表

| 已分配区表 | | | |
|-------|------|------|-----|
| 区号 | 容量 | 起始地址 | 状态 |
| 1 | 64k | 20k | 已分配 |
| 2 | 128k | 148k | 已分配 |
| 3 | 256k | 404k | 已分配 |
| ... | ... | ... | ... |
| 空白区表 | | | |
| 区号 | 容量 | 起始地址 | 状态 |
| 1 | 64k | 84k | 可用 |
| 2 | 128k | 276k | 可用 |
| ... | ... | ... | ... |



随着系统的运行,分区表中的内容不断地增加和删去,空白分区再也不会是一大块了,而是变成了好几个小块。可重定位分区采用的方法是把分区中的用户程序移动到内存的一端,把碎片集中于另一端。由于程序的移动,使得程序中涉及到地址的指令和数据都要调整,这种调整不是在程序执行前进行的,而是在程序执行过程中进行的,称为动态重定位。

b. 内存的保护 由于多个作业同时存在于内存之中,为了防止一个程序的存储空间在执行时被其它程序破坏,操作系统要采取一定的保护措施。不管用什么方式进行存储分配和地址转换,在操作数地址被计算出来以后,先要检查它是否在该程序分配到的存储空间之内,如果是的话,就允许访问这个地址;否则,就拒绝访问,并应该把出错的信息通知用户和系统。

c. 地址的转换 程序设计人员在编制程序的时候,无法知道程序将要放到内存空间的哪一个地址上运行,因此无法写出真实的物理地址。在编写源程序时,一般用符号来代替某一地址,编译程序把源程序编译成目标地址程序时把地址符号转换为逻辑地址,逻辑地址是把目标地址的起始地址作为零的相对地址。

在程序进入内存的过程中,必须把程序中的逻辑地址变为存储空间的真实物理地址,即绝对地址。这一过程称为程序重定位。在程序装入内存时完成的定位称为静态重定位,在装入内存以后再改变地址的定位称为动态重定位。

d. 内存的扩充 在通常的情况下,当作业存储量大于内存可用空间时,该作业就无法运行,必须对内存加以扩充到能满足作业的需要。虚拟存储管理是把外存(一般是磁盘)作为内存使用,它提供给用户一个比实际内存大得多的地址空间,使用户在编程时可以不考虑存储空间的限制。

在虚拟存储管理中,把一个运行进程访问的地址称为虚拟地址,把处理器可以直接访问的内存地址称为实际地址。在进程要访问虚拟地址时,必须把它们放在内存中,它是按照虚拟地址和实际地址的对应关系进行转换的,这种转换功能由动态地址映象机构加以实现。所以对进程来说,它是在一个虚拟地址空间中运行,对处理器来说,它所访问的还是实际的地址空间,两个地址空间的大小是独立的,中间用动态地址映象机构建立联系。这样,作业的大小可以不受内存空间大小的限制了。

实际上,一个程序在运行时,有些部分执行频繁,有些部分可能并没有使用,所以虚拟存储管理的策略

是把最近要用到的那部分的程序和数据装入内存,暂时不用的部分调出内存。这一部分的工作由带有虚拟存储管理功能的操作系统完成。常用的虚拟存储技术有:分页存储管理、分段存储管理和段页存储管理。

用户的虚拟存储空间并不能无限增大,它受到指令中允许的地址长度的限制以及外存储器大小的限制。

3. 设备管理 每台计算机都有许多外围设备,外围设备是进程与外界通信的途径,是信息的输入和输出机构。外围设备的种类较多,它们的性能和操作方式都不一样,操作系统的设备管理负责把设备合理地分配给对该设备提出申请的进程,消除各设备忙闲不均的现象,使它们更加有效地工作。设备管理的主要功能是:

(1) 分配和驱动外围设备。操作系统为每个提出申请使用设备的进程分配外设。从分配的角度来看,外围设备可分为独占设备和共享设备两类。独占设备一旦分配给某个作业后,便由该作业单独使用,直到该作业完成并释放它之后,其他作业才能使用,例如打印机、磁带机等。这种分配方式的设备利用率不高,可能造成这样一种现象,得到设备的作业实际只有很少时间使用这个设备,而其他作业因得不到所需设备而无法执行下去。共享设备不是让一个作业独占而是可被多个作业共同使用,例如磁盘机等。这类设备虽然在一段时间内可被多个作业所共享,但在某一瞬间仍只允许一个作业使用。当某个作业申请共享设备——磁盘时,是给它分配一定的空间,用户以文件形式将信息保存在磁盘上,因此各个作业通过文件管理系统来存取磁盘上的信息,不受其他作业的牵制。

(2) 处理外围设备的中断请求。现代计算机的外围设备多数不是由中央处理器直接控制,而是由专门的外围设备管理机构来控制,例如通道或外部设备处理器。通道是一种用于控制外部设备和内存之间进行信息传输的小型处理器,它能实现输入输出设备与内存之间的双向信息传送。

设备管理程序能够向通道发出命令,启动通道独立执行通道程序,再通过控制器控制外围设备执行输入输出操作,而通道或外围设备需要向操作系统报告事件时,一般都采用中断方式,由通道向CPU发出中断请求,在中断被响应后CPU进入中断处理程序,弄清产生中断的原因,然后按不同的原因进行不同的操作。

通道或外围设备产生中断的中断源主要有:



1) 通道操作或设备操作正常结束,这是每次操作结束都要产生的,以便处理器允许其它作业占用此通道或设备。

2) 操作中发生故障或错误,例如打印机上的纸用完了。

3) 操作人员人工输入的控制命令。

c. 实现虚拟设备 为了提高独占设备的使用效率,可以采用虚拟设备技术,它是利用高速的直接存储设备来模拟低速的独占设备,假脱机系统(Spooling系统)就是一种虚拟设备技术。

假脱机系统的思想是这样的:当用户请求输入设备时,系统将输入设备分配给用户,然后假脱机系统将作业从独占设备上输入的数据全部输入到磁盘上保存起来,这称为预输入。此后,这个输入设备就可由系统收回,重新分配。当作业运行要输入数据时,不必再动用输入设备,而只要从磁盘读入数据就行了。对于输出设备,作业运行中也不直接启动输出设备,而是作业的输出数据写入磁盘存放起来,这称为缓输出。等到作业全部运行完毕后,由假脱机系统动用输出设备,将保存在磁盘中的输出信息一次性输出。

假脱机系统给用户提供了虚拟设备,即采用虚拟技术在一类物理设备上模拟另一类物理设备。这样的分配方法,对每个用户而言是独占的,而对全体用户而言,大家共享了一台设备,从而提高了独占设备的利用率。

4. 信息管理 信息管理又称文件管理,主要是对计算机系统的软件资源即信息进行有效的管理,这些信息都是以文件的形式存储在磁盘、磁带等外部存储器中。

信息管理主要提供以下功能:

(1) 按文件名存取信息。所谓文件,是具有一个唯一名字的一个有序符号或字符的集合。这个名字(文件名)是文件的一个重要的组成部分,因为在计算机的外存储器中存放着大量的文件,对外存储器来说,必须要知道某个信息的具体物理位置,才能存取此信息,而用户能提供给系统的只有文件名,从文件名转换成外存储器上的物理位置这个过程就是由信息管理程序来完成的。

用户在访问一个文件时,提出文件名,再打开此文件。在打开文件后,信息管理程序将指出文件的存储位置,把文件名与实际文件联系起来,一旦存取完毕,用户一定要关闭文件,切断用户与该文件的实际联系。所以按文件名存取信息是信息管理所要提供的最基本也

是最重要的功能。

(2) 文件的共享和保密。在众多的文件中,有的文件是系统提供给各用户公用的,这些文件归全体用户所共享。有的文件是用户自己建立的,只有该用户和其它预先约定的用户才允许使用这些文件,而对于其他用户而言,这些文件是保密的。所以信息管理程序要对文件提供许多保护措施,使文件得以安全可靠地保存和使用,下面介绍几种方法。

1) 存取控制矩阵。存取控制矩阵是一个二维的表格,其中行表示用户的名字,列表示系统中所有文件的名字,矩阵元素为用户对文件的存取权限。表4-7-3是一个存取控制矩阵的例子,在这个例子中,R表示允许读,W表示允许写,E表示允许执行,N表示不允许使用。在表中,用户X对文件A允许执行,对文件B允许读写,对文件C不允许使用。

表 4-7-3 存取控制矩阵

| 权 限 文件 名 | 用 户 名 | | | |
|-------------|-------|-----|-----|-----|
| | X | Y | Z | ... |
| A | E | RWE | N | |
| B | RW | N | R | |
| C | N | R | RWE | |
| ... | | | | |

每当用户向文件管理程序提出使用文件申请时,系统将根据存取控制矩阵决定用户的使用权限,作出同意或拒绝的选择。

这一方法在用户和文件的数量很大的情况下,存取控制矩阵所占用的存储空间是相当可观的,考虑到对某个文件而言,通常只与几个用户有关,就产生了存取控制表。在存取控制表中只列出允许使用该文件的用户名和使用权限,没列出的用户名就不允许使用该文件。与表4-7-3的存取控制矩阵相对应的存取控制表见表4-7-4。

2) 按用户分类控制存取。把系统中用户分为三类:文件主、同组用户和一般用户。文件主是指文件的创建者,同组用户是指与文件主有关的用户。每个文件都说明了各个类别的用户对该文件的存取权力,图4-7-4就是一个例子,每类用户占有三位,分别表示读、写和执行三种权力,“1”表示允许,“0”表示不允许。在图中,允许文件主对该文件进行读、写和执行三种操作,允许同组用户对该文件进行读和执行两种操作,不允许一般用户使用该文件。



表 4-7-4 存取控制表

| 文件名 | 用户名 | 使用权限 |
|-----|-----|------|
| A | X | E |
| | Y | RWE |
| | ⋮ | ⋮ |
| B | X | RW |
| | Z | R |
| | ⋮ | ⋮ |
| C | Y | R |
| | Z | RWE |
| | ⋮ | ⋮ |

文件主 同组用户 一般用户

| | | | | | | | | |
|------|------|-------|------|------|-------|------|------|-------|
| 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 读标志位 | 写标志位 | 执行标志位 | 读标志位 | 写标志位 | 执行标志位 | 读标志位 | 写标志位 | 执行标志位 |

图 4-7-4 用户分类标志位

3) 口令。用户在建立一个文件的同时要为自己的文件规定一个口令，系统在登录该文件的同时也记录了相应的口令。建立文件的用户要把口令告诉允许使用此文件的其它用户。在文件建立以后，用户每次申请使用文件都必须先报告口令，系统把申报的口令和原先记录的口令相比较，两者一致，便允许使用该文件，反之则拒绝使用该文件。

(3) 分配管理存储空间。文件是驻留在外存储器上的，为了有效地利用外存储器上的存储空间，文件管理系统要合理地组织和分配存储空间。文件在外存储器上的组织形式，即文件的物理结构一般有三种类型：连续结构、链接结构和索引结构。

1) 连续结构。连续结构的文件是把逻辑上连续的文件存放在一个连续的物理介质上，物理顺序和逻辑顺序一致。这种结构的特点是只要知道文件存储的起始位置和每个记录的长度就可以很快地找到所需的记录，但如果要在文件中间删除或插入某个记录则十分费事。

2) 链接结构。链接结构的文件是存放在几块物理介质上，块内的文件是连续的，即物理顺序和逻辑顺序

一致，块与块之间通过指针取得联系，如图 4-7-5 所示。链接结构文件的插入和删除比较方便，用户也不必事先确定文件的最大长度。

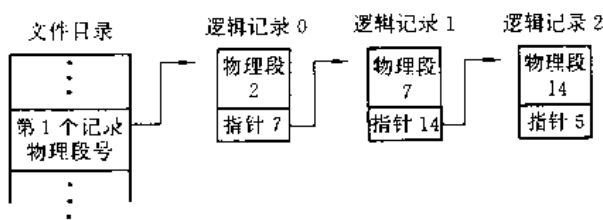


图 4-7-5 文件的链接结构

3) 索引结构。索引结构的文件也是存放在不同块的物理介质上，系统同时为每个文件建立一张索引表，索引表内按序登录着逻辑记录号，记录着与逻辑记录号对应的记录长度以及存放的物理位置，见图 4-7-6。这种结构有利于用户随机访问文件中的任意一个记录，当文件很长时，可以采用多重索引结构。

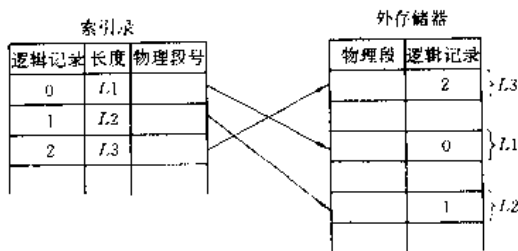


图 4-7-6 文件的索引结构

操作系统所具有的处理管理、存储管理、设备管理和信息管理功能是计算机系统正常运行时所必需的。尽管计算机机种不同，用途不同，所配置的系统也各不相同，但它们所管理的范围总是离不开这四项管理，因此，可以说，处理管理、存储管理、设备管理和信息管理是计算机操作系统最主要、最基本的功能。是学习任何具体操作系统的纲。

1.3 常用操作系统简介

1-DOS DOS (Disk Operating System) 是配置在 IBM-PC 及其兼容机上的单用户、单作业操作系统。现已成为微机的操作系统。MS-DOS 是 Microsoft 公司为 8086 微处理器开发的一种操作系统，IBM 公司将其作为 IBM PC 个人计算机的主操作系统后，又将其命名为 PC-DOS。本篇所述 DOS 系指 MS-DOS 或 PC-DOS。自 1981 年 Microsoft 公司公布 DOS1.0 版本以来，又对其作了多次更新，现在已出现了第六版

电子工业出版社



本。

DOS 由下面五个部分组成：

- (1) 引导程序 (BOOT RECORD)；
- (2) IBM BIO.COM：输入/输出设备管理程序；
- (3) IBM DOS.COM：由文件管理程序和系统调用程序组成；
- (4) COMMAND.COM：命令处理程序，用于接收解释 DOS 命令并运行相应程序；
- (5) DOS 系统盘上的其他程序：由 DOS 的外部命令及系统应用程序组成。

上面前四项是 DOS 的基本组成部分，主要功能是在进行命令处理；管理输入/输出设备（例如磁盘、键盘、打印机、显示器等）及管理磁盘文件（负责建立、删除、检索和存取文件）。

DOS 操作系统有如下显著特点：

(1) 把著名的 UNIX 操作系统中的许多优点吸收到 DOS 中 (2.0 以上版本)；

例如它的文件管理采用多级目录形式，在逻辑上与 UNIX 文件系统结构一致，支持程序间的重定向 I/O 和管道机制。

- (2) 提供很强的图形处理和显示功能；
- (3) 允许用户设置外设驱动程序；
- (4) 支持其他语言使用 BASIC 语言图形功能等。

2. CCDOS 汉字操作系统 CCDOS (Chinese Character Disk Operation System) 是为适应汉字处理的需要在 DOS 的基础上进行汉化，研究开发的具有汉字处理功能的操作系统，它与 DOS 完全兼容。

其特点是中西文兼容性强，既保留了原来的 DOS 操作系统的功能又增加了汉字输入、输出和处理的能力。汉字可以作为文件名，也可以作为命令名。在各种语言及应用程序中，汉字可以作为字符串与西文混合使用。而且由 DOS 支撑的大多数西文软件不作改动，就可以在 CCDOS 下获得汉字信息处理能力。

CCDOS 可以运行在 IBM PC 系列机及其兼容机或者其显示体制兼容的微机上。

至今 CCDOS 已发展有与 DOS 版本相对应的各版本，每个版本功能都有所增强，并有一些特殊功能。

由于 CCDOS 是汉字处理操作系统，所以要在 IBM PC 运行，首先必须具备汉字系统所需要的基本硬件环境，其次要有必备的软件。

基本硬件要求：

- (1) 内存 RAM 512k 字节以上；

- (2) 两级汉字字库约需 256kB RAM；
- (3) 彩色显示器及彩色图形接口板一块；
- (4) 点阵打印机一台；
- (5) IBM PC 键盘或兼容键盘一个；
- (6) 5 $\frac{1}{4}$ in 双面双密度软盘驱动器或有硬盘、光盘。

因为 CCDOS 是在 DOS 基础上扩充各种处理模块而成的。因此 CCDOS 本身也包括了全部 DOS 软件，基本软件组成如下：

- (1) DOS 系统软件
 - IBM DOS.COM (文件管理)
 - IBM BIO.COM (输入/输出管理)
 - COMMAND.COM (命令处理)
- (2) CCDOS 主体文件
 - CCCC.EXE (核心文件)
 - FILE1.EXE (引导文件)
 - CCLIB (汉字字库数据文件)
- (3) 打印模块
 - D320.EXE/D32024.EXE (24×24 点阵)
 - ALL24P.EXE/2024P.EXE/ALL9P.EXE (16×16 点阵)
 - KK33/KK14 (打印实用程序)
- (4) 批处理文件
 - AUTOEXEC.BAT (MS-DOS 到 CCDOS 转换程序)。

CCDOS 的显示方式如下：

ASCII 是 8×7 点阵，汉字 16×16 点阵，图形分辨率 640×200 像素；中文每屏 11 行×40 字符，西文每屏 25 行×80 字符；彩色方式图形分辨率 320×200 像素，中文每屏 11 行×20 字符，西文每屏 11 行×40 字符。

CCDOS 极大地推动了计算机在我国的应用及其发展。由于开发的应用软件有较好的人机界面（汉字提示），提高了程序的可读性（汉字注解）和可维护性，又由于直接处理汉字数据，也提高了系统的处理效率。因此，当前在我国 CCDOS 是应用最普遍的操作系统之一。

3. WINDOWS Windows 是 Microsoft 公司 1985 年 11 月推出的一个图形窗口环境软件。Windows 自问世后经历了不断的修改和更新，目前正在流行的是 Windows 3.1 版本。Windows 的推出，特别是 1990 年 5 月推出的 3.0 版以后，引起了用户的强烈反应，使得操作计算机的方法和软件开发过程发生了很大的变



化。涌现了大批 Windows 环境下的应用软件。

Windows 是一个多任务的 16 位操作系统,支持 32 位操作。它是 MS-DOS 的扩充作为一个子程序,它与 MS-DOS 共同管理计算机的硬件资源,MS-DOS 继续管理文件系统,而 Windows 管理其他一切,包括显示器、键盘、鼠标器、打印机和串行口,并负责内存管理和程序的执行、调度。

Windows 丰富多彩的界面改变了以往 DOS 系统的呆板面孔,给微机操作系统增添了新的活力。Windows 具有强大的存储管理能力,能同时运行多个任务,可以通过多种方式进行应用程序之间的数据交换,实现信息共享。能支持网络系统,在多媒体技术方面更将大显身手。1993 年 5 月 Microsoft 公司又正式推出了 Windows NT 操作系统,它是真正的 32 位操作系统。其主要特点是内存管理是线性的而不再分段,可访问内存空间达 4GB(16 位操作系统可寻址 1GB)。处理速度快。它的推出必将进一步推动 Windows 的普及应用。

Windows 具有以下特点:

(1) 漂亮、统一的用户界面 Windows 为设计漂亮、统一和友好的用户界面提供了一种全新的方法。Windows 是一个图形用户界面 (GUI—Graphics User Interface),各种操作对象都以图形形式显示在屏幕上。通过键盘或鼠标器,用户可以在屏幕上直接操纵这些对象。这样,用户与程序之间的交互变得更加紧密了,不再是单一的用键盘输入信息到屏幕上显示,而是直接与屏幕上的对象进行交互操作。

(2) 面向对象的程序设计,Windows 程序设计是面向对象的程序设计,这是目前最先进的程序设计方法之一。Windows 编程所涉及到的对象很多,主要是窗口、菜单、对话框等。

用户在屏幕上看到这些对象,可直接与它们进行交互完成程序设计。

(3) 消息驱动的程序结构,Windows 消息提供了应用程序与应用程度之间、应用程序与 Windows 系统之间进行通信的手段。例如,应用程序要实现的功能由消息来触发,并靠对消息的响应和处理来完成。因此,Windows 是消息驱动式系统。

(4) 多任务处理系统,Windows 是多任务系统。可以同时显示和运行多个应用程序,每个程序有各自的窗口。用户可以在屏幕上移动这些窗口,改变窗口的尺寸,在不同的程序间进行切换,并可以在应用程序之间进行数据交换。

Windows 实现多任务的方法与传统的多任务系统不同。Windows 是通过在程序间进行切换来实现多任务,而传统的多任务系统是基于硬件来实现的。

(5) 高效的内存管理,Windows 为保护多任务的运行,采取了一系列措施来提高内存的利用率。

Windows 突破了 DOS 对内存 640kB 的限制,提供了实模式、标准模式和 386 增强模式等运行模式。

在基于 Intel 8086 CPU 机器上,Windows 3.0 将以“实模式”运行;在 80286 CPU 的机器上,内存至少 1MB,Windows 3.X 将以标准模式运行;80386 及以上 CPU 的机器上,内存至少 2MB,Windows 将以增强模式运行,这种模式实现了虚拟内存管理。运行模式的选择可以由 Windows 系统自动进行,也可由用户定义。

(6) 数据交换与共享,Windows 提供了多种手段来实现应用程序之间的数据交换和共享,包括:剪接板 (Clipboard)、动态数据交换 (DDE) 和动态连接库 (DLL)。

剪接板是共享内存块的管理器,它能实现应用程序内部或应用程序之间的数据交换。

动态数据交换是更高级的数据交换手段。可以通过它建立数据链路,自动进行数据传送,不需用户干预。这种功能对于开发实时控制系统和监控系统具有十分重要的意义。

动态连接是应用程序之间实现代码和资源共享的一种手段。Windows 的所有运行库也均为 DLL,它是 Windows 的主要构成部分。程序员也可以开发自己的 DLL。

(7) 与设备无关的图形接口,Windows 提供了丰富的、与设备无关的图形处理功能。Windows 的应用程序并不直接询问图形显示设备,而是通过其图形程序设计语言(又叫图形设备接口,即 GDI)来实现图形输出的。图形输出可适用于任何显示或打印设备。

4. UNIX UNIX 操作系统是由 Ken Thompson 和 Dennis Ritchie 在 Bell 实验室开发的通用分时系统。该系统起源于 1969 年 Thompson 在 PDP 系列机上对一些文件系统的试验,第一个生成系统是 1971 年在 PDP-11/20 上建成的。自此以后,UNIX 系统广泛传播,从大型机到高档微机无不广泛使用。

操作系统是计算机软件系统的基础。一切应用软件与支持软件均建立在操作系统的这一平台上。然而传统的操作系统对计算机的硬件依附性很大,这样就束缚了用户,也影响了计算机应用的发展。于是,产生



了“开放系统环境”概念。开放系统的基本特征是互操作性 (interoperability)、可移植性 (portability) 和可伸缩性 (scalability)。

UNIX 系统的设计者最先考虑了同一操作系统在不同硬件平台上的可移植性, 由于 UNIX 的先进设计思想, 以及 AT&T 公布 UNIX 的源代码, 鼓励第三者将 UNIX 移植到不同类型计算机的政策, 使 UNIX 成为开放系统的最佳候选者。以 UNIX 界面定义为基础的 POSIX (Portable Operating System Interface) 操作系统界面标准, 已成为计算机工业界所接受的国际标准。UNIX 是开放系统的主要代表, 已成为当前世界主流操作系统之一。

目前 UNIX V 不断按 POSIX 标准推出新的版本, 最新版本是 UNIX V 第 4 版本。其功能在不断扩大, 处理能力在不断增强。

UNIX 有如下几个主要特点:

(1) 有一个分层的文件系统, 包括文件卷的可装卸。

分层的文件系统使用户可以用命名的方式存储信息。提供对硬件故障的保护和越权访问的安全措施。文件系统简单, 设有控制块, 设备隐蔽, 输入/输出有统一接口。文件系统包括三类文件:

- 1) 包括文本或程序的普通文件;
- 2) 登记其它文件或目录名字的目录文件;
- 3) 和输入/输出设备相对应的特殊文件。

(2) 启动异步进程的能力。UNIX 系统中所有作业均化作一组协同的进程来完成, 一个进程可以启动另一个要被执行的作业。

(3) 提供可编程的命令语言 Shell。Shell 是一种命令语言, 可编程, 它为用户提供了接口。

(4) 管道。管道 (pipe) 能使兼容的文件、设备和进程之间连接在一起, 相互之间可以进行输入/输出。Shell 语言提供了方便的管道命令。

(5) 高度的可移植性。UNIX 操作系统程序约有 8000 行 C 语言和 800 行汇编语言, 所以对于不同的计算机系统, 该系统的 95% 的 UNIX 代码是一样的, 这也就是该操作系统从大型机到微机都普遍采用的根本原因。

此外, 它还提供一系列应用程序, 尤其是用于程序开发和文件控制的应用程序。

该系统的核心是进行对文件和设备的输入/输出、进程建立和调度等任务。它简单, 易于理解, 功能强, 能做用户想要做的大部分事情, 用户接口完善。

5. XENIX XENIX 系统是由 UNIX 操作系统发展而来的, 是微机上的 UNIX 系统。它是由 Microsoft 公司和 AT&T 公司合作开发的。目前最新版本是 XENIX SYSTEM V5.3 版本和汉化版本 C-XENIX SYSTEM V 和 C-XENIX 2.2.3/2.3.2 等版本。

XENIX 操作系统是适合于 16 位、32 位微机的多用户多任务分时操作系统, 它的基本运行环境是:

- (1) IBM PC/XT 及以上档次的 Intel80386, 80286, 80386, 80486 机等;
- (2) 内存为 512kB 以上 (最好 640kB 以上);
- (3) 10MB 以上硬盘;
- (4) 软盘驱动器至少一个。

由于 XENIX 是 UNIX 系统的派生, 所以在功能、接口、软件、数据管理和外部设备的管理方面均符合 UNIX 系统的标准规范。从用户角度来看, XENIX 与 UNIX 的操作命令几乎完全一样。

XENIX 系统在微机上得到了广泛应用, 根本原因在于它本身的性能和特点。其主要特点是:

(1) 它是一个分时、多用户、多任务的操作系统。这是与 PC-DOS 的根本区别。

(2) 操作系统的内核程序和外核程序有机地结合。主要表现在把一些常用的命令和功能集中于内核, 以提高操作速度。而把许多丰富的辅助功能放在外核程序上, 这样有效地解决了内存有限与功能丰富的矛盾。

(3) 有良好的用户界面。它提供两种界面形式和系统调用。

(4) 树型结构的文件系统。它与 PC-DOS 相同, 但它的文件系统可以装卸, 这是 PC-DOS 所不能的。

(5) 文件与设备统一管理。即把设备当作文件处理, 简化了系统设计, 方便了用户。

(6) 有丰富的外核程序, 用户可以对其扩展形成外核系统程序。

(7) 系统用 C 语言写成, 具有良好的可移植性。PC-DOS 是用汇编语言写成, 不易移植。

(8) 在 XENIX 系统的管理和控制下, 可以引导和运行 MS-DOS 操作系统。为了支持 DOS 系统, XENIX 系统还提供存取 DOS 格式文件和磁盘的命令。

(9) 支持图形处理功能。例如美国的 SCO 公司的 CGI (Computer Graphics Interface) 可以在操作系统 SCO XENIX 386 System V、SCO XENIX 286 System V 支持下运行。



2 数据库系统

2.1 数据库系统的发展

数据库技术于60年代开始发展。当时计算机的主要应用领域已从科学计算逐渐转向数据处理，促使数据管理技术应运而生。最初的数据管理是由文件系统实现的。一个应用程序可以使用多个文件，不同的应用程序也可使用相同的文件，如图4-7-7a所示。文件系统虽可对数据进行统一管理，但存在着冗余度大，不能反映数据间的复杂联系的问题。为了适应大量数据的集中存储、统一控制和方便多个用户调用，出现了数据库技术，使数据管理进入了一个新的阶段。图4-7-7b表达出了用数据库管理的示意图。

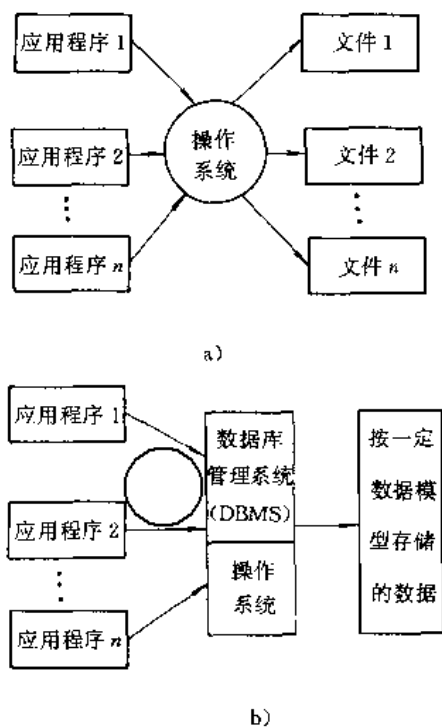


图4-7-7 文件与数据库系统的存取
a) 文件系统 b) 数据库系统

由于层次模型和网状模型十分自然地表达出了一些现实世界的实体联系，因而最初的数据系统大多采用这两种模型，直到今天，这种模型在一些大型计算机的数据库系统中仍被使用。

70年代，关系型数据库及其理论的提出，在数据库理论和技术方面产生了深远的影响，使数据管理技术产生了一次飞跃。经过大批数据库专家十余年的不懈努力，数据库领域在理论与实践上取得了丰硕成果。

现在，数据库技术已不仅仅应用在大中型计算机上，而且已随着微机的普及进入办公室、车间甚至家庭，这标志着数据库技术广泛的应用性。

随着计算机科学技术的发展，人们对数据库技术在数据的管理与控制方面，在更加自然地表达现实世界中实体的联系等方面，提出了越来越高的要求。目前，数据库技术与网络、人工智能、软件工程、自然语言相结合，不断扩展形成一些新的方向——分布式数据库的研究、知识库的研究、面向对象数据库的研究发展，它们将使一些数据管理技术再一次出现飞跃。

2.2 数据模型

1. 数据的型与值 有关数据的两个重要概念是数据的“型”与“值”。数据的型，是数据对象的总体，例如，对所有“学生”这一对象的描述包括“学号、姓名、年龄、性别、科目成绩”等，这就是型。数据的值表示数据的个体，如一个学生的记录“821101, 陆广庆, 18, 男, 92”就是学生这个型中的一个值。

2. 数据模型 数据模型 (Data model) 是对客观事物及其联系的描述。由于事物之间的联系方式不同，就产生了各种不同的数据类型。如图4-7-8的实体联系图给出了一学院的系及授课的数据模型。图中的每一个节点均给出了相应的属性说明。如系包括系号、系名，课程包括课时、学分等等。此模型表示数据间是一层次联系，包含这样一种联系的数据模型是层次模型。

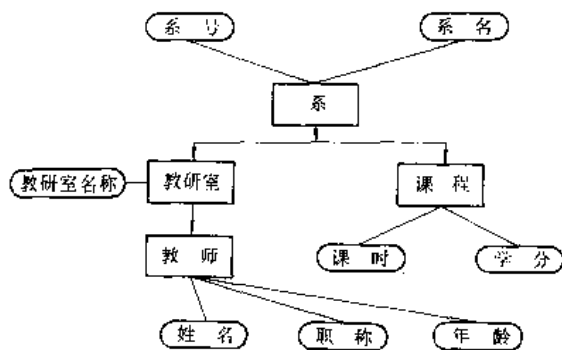


图4-7-8 实体联系图实例

数据模型只给出了一个框架，它只是对现实世界的一种抽象化表现，只在“型”一级说明数据对象，只有填入某些具体的“值”才构成一个实际的数据库。它一般包含以下内容：记录名称，数据项名、数据类型、与记录相关的一些特征等。

一个具体的应用所涉及的数据可能是数据模型中



的一部分,这时只要知道一个局部的逻辑结构就可以了,这种局部数据模式就称为数据子模式。

数据模型用数据模式描述语言(DDL)来描述,成为数据库模式。

2.3 数据库系统的体系结构

1. 数据库 数据库(Database或缩写为DB)是指计算机中合理组织,相互联系的数据的集合,使数据有最小冗余度,可为多个用户共享,数据的存储独立于使用它们的程序并被统一管理。

2. 数据库系统的三级体系结构 存储在数据库中的信息,是现实世界的事件或知识的表现,现实世界中的各种对象是以某些抽象的形式加以表现的,虽然这种抽象化有各种方法,产生了不同模型的数据库系统,但基本上都遵从ANSI-SPARC提倡的三级模式(Schema),它们是外部级、概念级和内部级。图4-7-9展示了这种结构的基本思想。

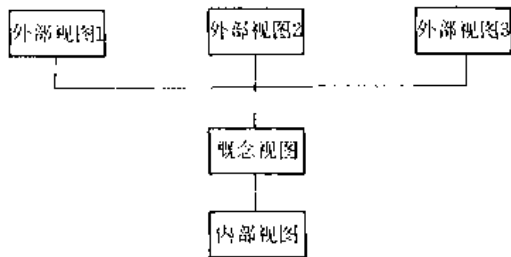


图 4-7-9 数据库系统的三级体系结构

外部级是数据库系统的用户级,包括终端用户和应用程序员。外部视图(External view)是用户所见到的数据结构,它包括了数据库中与某些特定用户有关的信息,从这些用户的角度来看,外部视图就是数据库。例如人事部门的用户可能把数据库看作是部门记录具体值的汇集加上工作人员具体值的汇集,但数据库中也许还包含着供销者与产品记录具体值的汇集,这批数据正是供销部门所关心的。显然,一个数据库可以有許多外部视图。

概念视图(Conception view)也即数据模型。它包括了数据库的全部逻辑结构,它是所在数据的型的汇集,是对许多现实世界具体对象的抽象,它主要关心的是客观世界中数据相互之间的关系。显然,外部视图只能是概念视图中的一部分概念记录的实例化。概念视图又称概念数据库或逻辑数据库。

内部视图(Internal view)是全部数据库在物理上

的结构。它由许多类型的内部记录和许多具体值组成,因此又被称为物理数据库。它主要关心的是数据在物理存储器上组织得更有效,存取速度更快。例如,如何对各种记录编码和分配存储器上的物理地址等。

3. 数据独立性 由于可以构造统一的概念视图,可以解决数据共享的问题,并为数据库系统提供了两级“数据独立性”。物理数据库(内部视图)的改变不会引起概念视图的变更,这是物理数据独立性。而概念视图的个性可能不影响现有的子模式,或者只是修改子模式到概念视图的映射关系,但可保证外部视图不受影响,这是逻辑数据独立性。当然,如果用户希望有使用新的属性的外部视图,那么用户必须建立新的外部视图或修改旧的外部视图。

2.4 数据库管理系统(DBMS)

支持人们建立、操作和维护数据库中数据的专用软件系统称为数据库管理系统(Data Base Management System或缩写为DBMS)。

1. 层次模型DBMS 层次模型数据库是以层次结构为模型设计的数据库。层次模型的数据结构是有序树或森林,即层次结构中一定有一个根节点(无父节点的元素),其它数据记录有且仅有一个父节点,并且没有环。如图4-7-10a所示的图是一个树,它可以表达层次关系数据结构,而图4-7-10b所示的图就不是一个树,节点B有两个父节点,而且B-C-D-B形成了一个环。图4-7-11a给出了一个含有五个记录类型的学校教学数据库的一个层次模型,而图4-7-11b给出了该模型的一个实例。

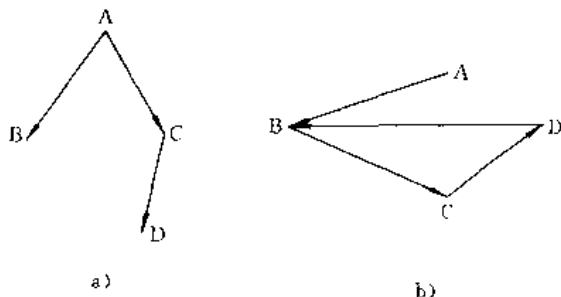


图 4-7-10 树和图

a) 树 b) 图

层次结构数据库具有层次清楚,构造简单,易于实现等优点,但对复杂的数据结构实现起来较为繁琐,且数据的冗余度较大,在上例中,开课教师的数据就与教师的数据有重复。



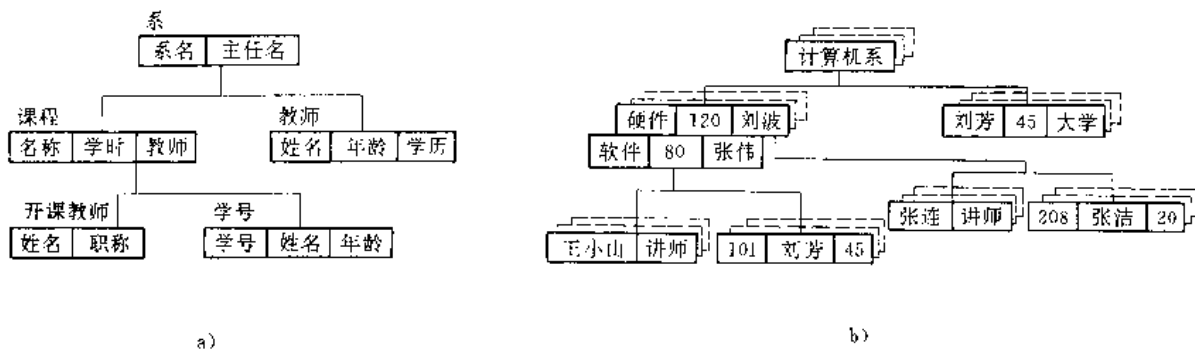


图 4-7-11 层次模型和实例

a) 层次模型 b) 层次模型实例

2. 网状模型 DBMS

a. 系 (set) 系又称为络,它是网状模型的一个基本构件。系是一具有层次联系的二级树,并对该联系命名,称为系名。它表达了数据之间的关系。在这个二级树中,父节点称为主记录,子节点称为属记录。

b. 网状模型 DBMS 依据网状模型设计的数据库管理系统称为网状模型 DBMS。网状数据库为一有向图,其中节点代表记录的型,用于描述实体,弧代表记录之间的联系,即为系。网状数据模型的基本单位是一个一个的系。图 4-7-12 为一网状模型,表达了教师、学生、授课之间的关系。该模型可分成三个系: {系、教师、学生}、{教师、课程}、{学生、课程},它们分别表示了系拥有教师和学生,教师开设课程,学生学习课程等情况。当然,系的划分并不是唯一的,例如可以将 {系、教师}、{系、学生} 看成两个系。

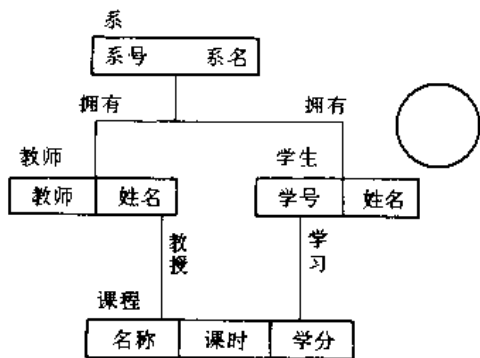


图 4-7-12 网状模型

网状模型数据库中的记录既可作为一系的主记录,又可作为其它系的主记录或属记录。由于引入了系的结构,因而把复杂的数据模型化整为零,具有较强的数据模拟能力。

目前世界上运行的许多网状数据库系统都是按照美国 CODASYL 组织,60 年代中期提出的 DBGT 报

告及其修改版本作为蓝图设计的。典型的网状数据库系统有 IDMS, TOTAL 等。

3. 关系模型 DBMS 关系是一组域的笛卡尔的子集。给定一组域 $D_1 \times D_2, \dots, \times D_n$, 其笛卡尔积为: $D_1 \times D_2 \times \dots \times D_n = \{d_1, d_2, \dots, d_n | d_i \in D_i, i = 1, \dots, n\}$, 其中每一元素 (d_1, d_2, \dots, d_n) 称作一个 n 元组,简称元组。一个关系 R 即为上述元组的集合,且 R 属于 $D_1 \times D_2 \times \dots \times D_n$ 。

简单地说,一个关系就是一个二维表,表标题中的各项构成了关系的一组域,和域相对应的每一列元素为该域的值,每一行就是一个元组。表 4-7-5a 反映了学生关系,表 4-7-5b 反映了教师任课情况,表 4-7-5c 反映了学习情况。

表 4-7-5 学校教学情况

| 表 (a) 学生关系 | | | 表 (c) 学习关系 | | |
|------------|------|-----|------------|-----|----|
| 学生 | 学生姓名 | 所属系 | 课程 | 学号 | 成绩 |
| 101 | 王小红 | 数学系 | 数学 | 101 | A |
| 102 | 张 荣 | 数学系 | 软件 | 101 | A |
| 203 | 刘 永 | 物理系 | 化学 | 101 | B |
| 304 | 张 英 | 化学系 | 数学 | 102 | A |
| 205 | 王文佳 | 物理系 | 软件 | 102 | B |
| | | | 数学 | 203 | A |
| | | | 化学 | 203 | A |
| | | | 电路 | 203 | A |
| | | | 语言 | 203 | B |
| | | | 数学 | 304 | B |
| | | | 语言 | 304 | C |
| | | | 数学 | 205 | B |
| | | | 电路 | 205 | C |
| | | | 软件 | 205 | A |

| 表 (b) 任课关系 | | |
|------------|------|------|
| 号码 | 教师姓名 | 所授课程 |
| T10 | 张 兴 | 数学 |
| T12 | 刘文正 | 软件 |
| T13 | 张文丰 | 电路 |
| T17 | 王 凯 | 化学 |

关系模型的最大特色是描述的一致性,即对象及其联系均采用关系描述。如用学习关系描述学生与课程之间的关系,通过上述三个表可以看出,我们除了可



以了解表中各个对象的情况,如学生张荣的学号是什么,属于哪个系,教师张兴教授哪门课等以外,还可以了解对象之间的联系,如学生王小红的各门课的成绩和相应的授课教师是谁,但这不能仅从一个表(关系)中看出,这时要使用关系代数对关系做交、并、差等运算。

4. 面向对象模型 DBMS

a. 面向对象(Object-Oriented)的程序设计方法

面向对象的程序设计方法,利用人们对客观事物的概括、分类和抽象能力,建立了一种更加自然的描述事物的方法。它将现实世界中的任何事物,从简单的数字、变量到复杂的工厂、宇宙飞船等都看成是一个对象,并将对象按照不同的性质划分为不同的类(Class),同类对象在结构和性质方面具有共性,被称为“对象类”。对象类可以表达十分复杂的实体,如图形的处理等,并且通过封装和继承等面向对象的方法所特有的性质可以更加自然地模拟现实世界中的事物及其行为。

封装(encapsulation)将对象类的数据结构、行为(如操作、约束规则等)组合为一个整体,从而使每一个对象类都具有独有的性质。通过封装,对象类功能实现的全部细节被隐藏起来,这对于开发复杂的大系统尤为重要。封装使得对事物的描述具有了十分丰富、灵活的方法,并提供了支持数据完整性的手段。

继承(inheritance)是一种在一个类的基础上建立新的次类的技术。后者自动继承前者的结构和行为特性,并可具备某些附加的特性或性质。通常将上层对象类称为超类,下层对象类称为子类。一个对象即可以是其子类的超类,又可以是其超类的子类。如“研究生”这一对象类是学生对象类的子类,又是“博士研究生”对象类的超类。

继承和封装是面向对象设计方法对传统设计方法的重要扩展。继承使得对事物(对象)的描述具有可扩充性,通过在一个对象类的基础上构造新类(可以是其超类或子类)可以表达十分复杂的对象,而封装使得复杂对象的行为更加完整、清晰和可靠。

动态联编(dynamic binding)为面向对象程序设计方法区别于传统程序设计方法的另一个重要特性。它允许一个消息(操作符)对应于多个对象,而不同的对象可以用适合于自身的参数、行为方式来响应相同的消息。例如,将消息“打印”送到图形对象中可以打印出图形,若发送到查询规则对象中则打印出所要的规则。

b. 面向对象数据库管理系统(OODBMS) 80年代以后,关系式数据库理论上的成熟和商品化的实现,关系模型成为数据组织的主要形式。然而随着数据库应用领域的不断扩展,尤其是在工程领域,由于所表达的对象种类繁多,它们都有着各自不同的定义方式和行为(操作)方法,制定通用数据模型及其标准操作是不现实的,单一数据模型不能有效完成多介质处理任务。由于面向对象的设计方法可以表达十分复杂的对象并支持多介质数据处理,因而被引入数据库系统的设计中,面向对象的数据库管理系统也就应运而生了。面向对象的数据库管理系统有以下特点:

(1) 数据按型加以分类。每一类定义中有适用于该类对象的程序或函数(称操作方法)以及完整性约束条件,这一类对象的动态性质封闭于这些方法及约束中,这一特性对应于面向对象的设计方法中的封装。

(2) 面向对象数据库的操作机理是消息通报。对象收到消息后,据其内容选择正确的方法加以执行,这一特性对应于面向对象设计方法中的动态联编。

(3) 在各类继承关系下构成网络。整个面向对象数据库模式为一有向无环图,次类可从所有超类中,按照一定的优先度继承性质,因此系统具有可扩充性。

此外,面向对象数据库还提供对象识别方面的支持,并具备模拟、管理、操作复杂对象的功能。

5. 分布式模型 DBMS 分布式数据库管理系统(DDBMS)是一个逻辑上统一、地域上分布的数据的集合,或者说是网络环境中各个场地上局部数据库的逻辑集合。这些数据库受DDBMS的控制和管理。通过协议使各局部数据库管理系统能一起参与系统要完成的查询处理等。图4-7-13a和b给出了集中式数据库系统和分布式数据库系统的结构示意图。

由于许多不同场地的机构,除了需要本地区的数据外,还需使用其它地区的数据。如果每个场地都与集中式数据库系统连接,通信就成为瓶颈问题。而分布式数据库系统在每个场地的局部数据库由局部DBMS管理,完全是“场地自治的”,这样每个地区就可以高效地处理本地区的数据。

数据库的三级体系结构具有物理和逻辑数据的独立性,将它们推广到分布式数据库中就产生了位置透明性的概念。由于数据存放的位置是属于数据的物理表示,由内部视图给出,所以用户并不知道数据存放在什么地方,当数据需要从数据库的一个位置移到另一个位置时,不必修改在外部(甚至概念)视图上的程序。



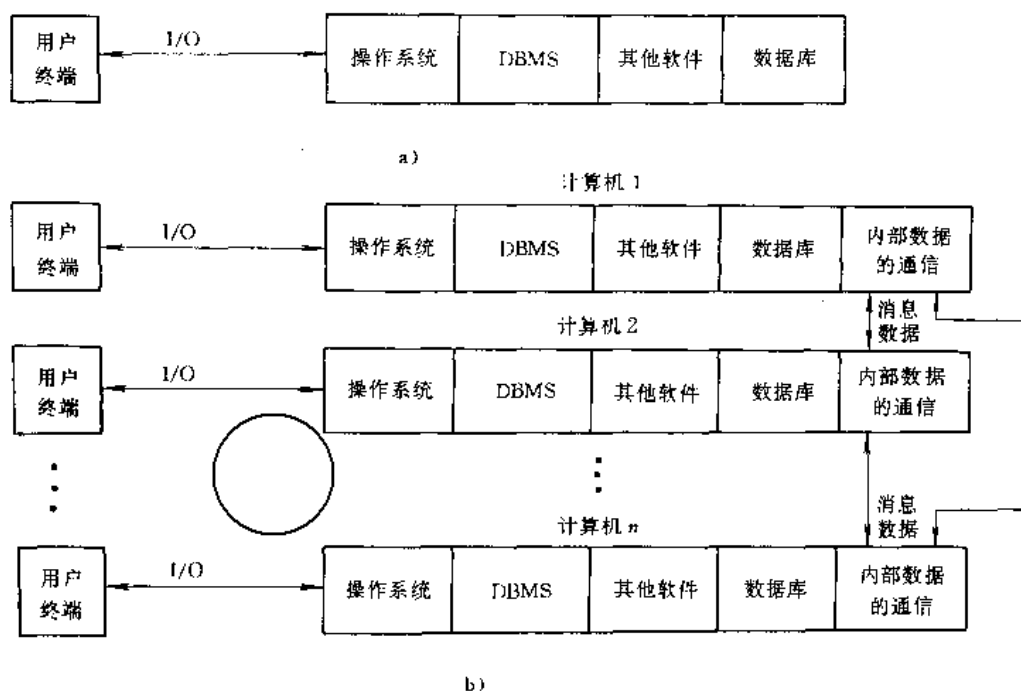


图 4-7-13 两种数据库系统结构

a) 集中式 b) 分布式

由于分布式系统既能满足场地自治，又能提供统一的集中管理，实现数据共享，使系统增加了可靠性，因而分布式数据库管理系统成为 DBMS 的一个发展方向。

6. DDL 语言 DDL (Data Description Language) 即数据描述语言，它是用来描述数据库的全局数据结构，即数据模型的语言。它应用于数据库设计及修改设计，主要为数据库管理员所使用。DDL 是非过程式的语言，就某一特定的数据模型而言，它是描述实体类型及实体类型间联系的一套表示法。DDL 也有某些语句来描述数据库的物理层。

数据描述语言的另一类为数据子模式描述语言 (SDDL)。它也是数据库管理员所使用的一种语言。对于应用程序员而言，只要了解子模式及其数据类型即可，无需了解子模式在数据模型中所占的地位，它们之间的关系，以及如何由模式中分解出子模式。对同一数据子模式描述语言可以采用不同于数据描述语言的数据类型，这就是通过模式到子模式的映射来解决。子模式描述语言一般常在高级语言 (如 COBOL) 中加入一些新的功能构成。也有少量的数据库管理系统设计一种独立的子模式描述语言。

7. DML 语言 DML (Data Manipulation Lan-

guage) 即数据操作语言是供用户在应用程序中操作数据库中数据的语言，它是用户与数据库接口之一。所有的 DML 都包括插入、修改、查询等功能，并提供其他一些如运算能力，赋值和打印命令、聚合功能 (如计算平均值，累加和等)。

DML 可以是一种独立语言，称为自含型语言，也可以与常用语言 (如 FORTRAN, COBOL) 相结合，称为宿主型语言。一个应用程序通常用传统的程序设计语言。例如 C, COBOL, PASCAL 等，这些语言称为主语言，加上 DML 语句编写而成。而 DML 则通过下列两种方法被主语言所调用：

(1) DML 的命令被主语言以调用方式 (在 C 中为函数，在 PASCAL 中为过程) 引用，调用的是 DBMS 所提供的 DML 过程。

(2) DML 作为主语言的扩充语句而出现，可以用预处理来处理 DML，也可采用一个扩展的编译程序来编译主语句和 DML 语句，这时，DML 的命令也转化为数据库管理系统提供的过程。

8. SQL 语言 SQL (Structured Query language) 是关系数据库语言中重要的一种语言。它的语句非常简单，易于掌握，但功能极强，它包含了查询、操作、定义、控制等关系数据库系统的全部功能。



SQL 语言可以与其他的一些如报表生成, 菜单设计等语言结合完成屏幕控制、菜单管理、报表生成等应用程序。1986 年, 美国国家标准化研究所 (ANSI) 已确认 SQL 为工业标准。有许多著名的数据库管理系统都使用或支持 SQL, 如 DB2, ORACLE, INGRESS 等。

SQL 语言的命令通常可分为四类:

a. 查询语句 查询语句是用来对已存于数据库中的数据, 按照特定的组合、条件表达式或次序进行检索, 其基本结构是由 SELECT 子句、FROM 子句和 WHERE 子句组成的查询块:

```
SELECT  (字段名表)
FROM    (表或视图)
WHERE   (查询条件)
```

b. 数据操作语句 数据操作语句用来改变数据库中的数据, 包括三种形式:

```
INSERT  往表中插入新的数据
UPDATE  更新数据行中内容
DELETE  删除数据行
```

c. 数据描述语言 (DDL) 用来建立数据库结构, 包括表、视图、索引、聚类等。

d. 数据控制语句 数据控制语句用来授予或者收回访问数据库的某种特权, 控制数据操纵事物的发生时间及效果, 对数据库进行监视等。

2.5 常用数据库系统简介

1. dBASE dBASE 数据库管理系统是 IBM-PC 及其兼容机上最流行的数据库管理系统之一。美国 Ashton-Tate 公司于 1980 年推出了基于 8 位微机的 dBASE I 数据库管理系统, 后来该系统在 IBM 及其兼容机上实现, 并经过扩充、修改于 1984 年用 dBASE II 的名字发行, 1986 年推出了其增强型版本 dBASE II PLUS。

dBASE II PLUS 是基于关系模型的数据库管理系统, 它并不支持 SQL, 但实现了 SQL 中 DML 的许多功能。它使用 CREATE 建立表, INDEX 建立索引, 用 LIST、LOCATE、FIND 等语句实现表的查询, 使用 INSERT、APPEND、DELETE 等对表进行编辑; AV-ERAGE、COUNT、SUM 实现表的聚类功能等。

dBASE II PLUS 还具有一些有用的特性。它包含一个菜单驱动的应用程序生成器, 帮用户更加方便地建立 dBASE 应用程序和设计表; 菜单驱动的屏幕描绘器, 用于帮助用户建立屏幕显示格式。此外, 它还包含一个视图文件, 用于存储和建立程序的设计环境。

1988 年 Ashton-Tate 公司推出 dBASE IV, 它对早期的版本作了一些实质性的改进。除了支持 SQL 以符合工业标准外, 还提供对 QBE (范例查询) 语言的支持, 并提供一个自含的第四代语言 (4GL)。在数据类型方面, dBASE IV 区分整型和浮点型数, 在数据操纵方面实现了多子女文件关联, 即一个数据库文件可同时关联其它多个数据库文件。

dBASE IV 可以用在局域网环境下。在该环境下, 用户可以共享文件、程序以及打印机等输入、输出设备, 并且通过管理器 (ADMINISTRATOR) 语句实现了一些并发控制和安全性命令。并发性控制通过加锁实现; 安全性则通过局域网提供的用户管理功能, 它提供口令、文件和域访问权以及数据加密。

dBASE IV 为用户提供了一个控制中心, 使数据库的一般应用人员以面向任务的方式非过程化地使用 dBASE 功能, 用户仅利用它就可以利用 dBASE IV 的各个部分, 如打开与关闭文件、访问菜单系统建立视图、设计屏幕、运行程序、管理文件与目录、记录查询等。dBASE IV 也提供了另外一些特性, 如支持一定的事物恢复功能, 增加了财会、三角及统计函数, 提供上下文相关的联机帮助等。另外, 它在内存管理上突破了 DOS 可以管理的 640k 内存, 可自动使用 EMS 扩展内存, 以提高程序运行的效率和数据处理能力。

dBASE IV 除了可以解释执行用户的应用程序外, 还提供了一个伪编译器, 用它可将用户的应用程序编译成目标代码, 以加快程序的执行, 但它没有提供与其它高级语言的接口。

2. FoxBASE FoxBASE 是美国 Fox Software 公司的产品, 主要运行于 IBM-PC 及其兼容机上, 在 XENIX 与 UNIX 系统下也有其产品。它也是一个基于关系模型的产品。1988 年 7 月推出的 FoxBASE PLUS (V2.10) 与 dBASE II PLUS 完全兼容, 但平均运行速度却比 dBASE II PLUS 快数倍, 该系统的大部分程序代码用 Microsoft C5.10 编写。

FoxBASE PLUS (V2.10) 版在许多方面与 dBASE IV 极为相似。它也包含一个控制中心 (FoxCentral), 屏幕设计生成器 (FoxView), 模板语言编译器 (FoxCode), 应用程序伪编译器 (FoxPcomp) 等, 并且在 DOS 下的版本也支持扩展内存调用。但 FoxBASE (V2.10) 版不支持 SQL 和 QBE。

FoxBASE PLUS (V2.10) 版的最大特色是菜单功能。它提供给用户弹出式菜单和下拉式菜单函数, 使用户可以编写出人机界面十分友好的应用程序。此外, 它



在错误陷阱处理方面也较出色。在数据操纵方面 FoxBASE PLUS (V2.10) 可建立多子女件关联, 并且操纵对象可在不同的工作区中。FoxBASE PLUS 还提供一个和汇编语言的接口, 用户可以用汇编语言编写程序, 处理一些特殊的事件。在 FoxBASE 环境中用 load 语句将汇编程序调入内存, 系统将把该程序视作通用函数处理, 但汇编语言必须以微型模式编写, 执行首地址必须在偏移量为零处。FoxBASE 系列产品还提供一个统计图形生成工具——FoxGraph, 它可以访问数据库, 并根据用户的要求生成三维直方图、饼图等。

Foxpro 是 FoxSoftware 公司自 FoxBASE PLUS 等软件之后, 推出的 Fox 数据库后继版本。它有 for DOS 和 for WINDOWS 两种版本。

Foxpro 具有下述突出特点:

- (1) 有一个良好的图形界面和窗口功能, 平滑且反应敏捷, 速度很快。
- (2) 具有一个功能很强的内部文本编辑器。
- (3) 使用户能访问数千个预先编写好的程序。
- (4) 具有较强的硬件适应性, 只需要标准较低的硬件配置。
- (5) 具有较为完善的真编译功能, 可编译成直接在操作系统下运行的 .EXE 文件。
- (6) 提供操作方便且处理范围广泛的纠错机制。
- (7) 具有一个内部报表生成器。它比独立的报表生成器更易使用且功能更强。
- (8) 用户真正用来处理多达数十万甚至数百万条记录。
- (9) 比任何其它的微机数据库管理系统都快。
- (10) Foxpro 与 FoxBASE PLUS 百分之百兼容。并且与 dBASE N 兼容。

(11) Foxpro 是目前 DOS 系统中唯一能支持鼠标的数据库管理系统, 它对鼠标提供自动透明的支持。

(12) 采用 "Rushmore" (快速查找) 的优化技术, 可使对较大数据库的查找速度比普通查找方法快几百倍, 数据库越大, 速度优势越明显。

(13) 提供高级外部程序接口 API, 可方便地和 C 语言及汇编语言连接。

(14) 支持 SQL (结构化查询语言)

3. ORACLE 美国 ORACLE 公司成立于 1977 年, 是一家专门从事研究、生产计算机关系数据库管理系统的专业厂家, 它于 1977 年推出的 ORACLE 第二版是世界上首批采用 SQL 作为数据语言的商用关系数据库管理系统, 该公司于 1986 年 8 月推出了第一个

开放性的数据库产品 SQL * STAR (ORACLE RDBMS V5.1)。

ORACLE 数据库是目前世界上比较流行的关系数据库管理系统。它具备以下几个特点:

(1) 较好的兼容性。它采用 SQL 作为数据库语言符合 ANSI 制定的工业标准, 它与 IBM 的 SQL/DS 和 DB2 完全兼容, 可以直接使用他们的数据库和应用程序。

(2) 可移植性。ORACLE 可以在许多不同机型和操作系统上运行。表 4-7-6 列出了可运行 ORACLE 的部分环境。

表 4-7-6 ORACLE 可用于的部分环境

| 大型机 | | |
|----------|--------------------------------|-------------------|
| CPU | 型 号 | 操 作 系 统 |
| IBM | 370, 4300, 30xx | VMS/CMS, MVS, UTS |
| Amdahl | 470, 580 | VM/CMS, MVS, UTS |
| Sperry | 1100 | UNIX |
| 小型机 | | |
| CPU | 型 号 | 操 作 系 统 |
| DEC | VAX—11, 8200, 8500, 8700, 8800 | VMS, UNIX, ULTRIX |
| DEC | PDP—11 | RSX—11M+ |
| HP | 9000 系列 | HP/UX |
| AT&T | 3B5, 3B15, 3B20 | UNIX |
| PRIM | 50 系列 | PRIMOS |
| SPERRY | 5000, 7000 | UNIX |
| WANG | VS 系列 | VS |
| SUN | 所有型号 | UNIX |
| 微型机 | | |
| CPU | 型 号 | 操 作 系 统 |
| IBM | PC/XT, PC/AT, PC/RT | DOS, XENIX, AIX |
| AT&T | 6300, PC7300, 3B2 | DOS, UNIX |
| CT | NiNi, Megafame | UNIX |
| MOTOROLA | 6300, 6600, 2000 | UNIX |
| NCR | Tower | UNIX |
| WANG | PC | DOS |

(3) 可连接性。ORACLE 提供的 SQL * Net 能与多种通信网络接口, 支持多种通讯协议, 提供在多种应用软件和数据库中进行分布式处理的能力。

(4) 提供丰富的二次开发工具。除了为程序员提

000



供两种类型的编程接口, 预编译程序接口 Pro * ORACLE 和子程序调用接口 Por * SQL 外, 还提供了应用程序生成器, 菜单管理, 报表生成电子表格等一批第四代语言工具。

ORACLE 的产品主要包括 ORACLE RDBMS, "EASY"ORACLE, "SQL"ORACLE 和 PROORACEL 等。

ORACLE RDBMS 是 ORACLE 产品的核心。它包括数据库管理核心以及帮助用户和数据管理员 DBA 维护、监视和使用数据库的工具。

"Easy"ORACLE 是专为初学者提供的。用户以点菜单的方式就可以实现用 SQL 操纵数据库系统的功能, 包括建立、查询、报表及图形、编辑数据库、修改视图、数据管理等。

SQL * ORACLE 系列产品。该系列产品主要是为那些具有 ORACLE 的 SQL 语言及数据库处理知识的用户服务。包括增强的 SQL * PLUS; SQL * FORM 用于建立基于屏幕格式的事物处理应用; SQL * MENU, 用于设计一个应用程序的用户菜单接口; SQL * Calc, 用于实现点子表格; SQL * GRAPH, 用于生成彩色饼图、直方图和线图, 具有交互式图形编辑功能; SQL * NET 和 SQL * Connect 提供了异构分布处理能力。

PRO * ORACLE 系列产品提供了 ORACLE 与其它语言的接口, 使用户可以在熟悉的高级语言中嵌入 SQL 语句。主要支持的语言包括 Pro * C、Pro * FORTRAN、Pro * COBOL PASCAL 等。

1988 年底, ORACLE 公司推出了其 RDBMS 的第六版, 增加了联机事务处理功能, 它的第七版的目标是要推出一个真正分布式的与智能化的数据库管理系统。

4. INGRES INGRES 是由美国关系技术公司 (Relation Technology Inc) 销售的关系数据库管理系统。它最早作为加州大学伯克利分校七十年代首创的关系数据库管理系统出现。从 1981 年起, 该系统配置在 VAX 环境下做为商品推出。目前它可以运行在大、中、小型机和微机上。

INGRES 基本数据操纵语言是 QUEL, 它是基于元组演算的数据库语言, 具有数据定义、查询、更新、存储控制和完整性检验等多种功能。

为了方便用户, INGRES 的许多功能是由表格化处理来完成的。表格的使用还能为不同的子系统提供形象以及统一的接口方法。INGRES 的所有表格化子

系统都可用菜单驱动, 这些子系统包括:

(1) QBF (Query By Forms): 用表格实现对数据的操纵。

(2) VIFRED (Visual Form Editor): 用于改变 (编辑) 表格内容。

(3) RBF (Report By Forms): 用表格写报表。

(4) FBF (Graph By Forms): 用表格作图。

(5) ABF (Application By Forms): 用表格写应用程序。

INGRES 除了提供 QUEL 作为联机终端的非过程化语言外, 还支持嵌入式的 QUEL—EQUEL。EQUEL 可将 QUEL 嵌入到 BASIC、C、COBOL、FORTRAN 和 PASCAL 等主语言中。INGRES 的主语言预编译器将 QUEL 语句代换成一个宏调用, 在运行时将该调用传给 INGRES 并由它负责解释执行, 这样形成的主语言目标代码较其他一些预编译方法形成的代码小得多。

为了使查询的结果有一个形象直观的表达, INGRES 提供了一个以对话方式使用的图示查询语言 CUPID, 用它对数据库查询所得到的回答是图象式的。CUPID 还具有检索和更新功能。

INGRES 其他的一些主要特性包括: 分布式数据库处理能力, 数据的完整性控制, 并发事物处理, 数据查询和优化等。

5. UNIFY 美国 UNIFY 公司成立于 1980 年, 该公司主要是开发 UNIX 操作系统上的软件。它所开发的 UNIFY, 可运行于几乎所有的基于 UNIX 操作系统的计算机, 也可运行于微机上的 SCO Xenix 操作系统, 在与主机为 UNIX 操作系统联网微机 WINDOWS 平台上也可运行。

1982 年 UNIFY 公司推出了其第一个关系数据库管理系统, 并于 1985 年推出了它的第一个第四代语言产品: ACCELL/IDS。它是一个集应用生成器、窗口接口、第四代语言工具和 RDBMS 为一体的开发环境, 它支持 UNIFY 5.0 DBMS。1988 年又推出了支持 UNIFY 2000 的 ACCELL/SQL 工具, 它向下兼容 ACCELL/IDS, 该工具除了可用于开发 UNIFY 数据库应用程序外, 还可用于 ORACLE、INFORMIX、SYBASE 等的数据库应用程序的开发。UNIFY 只支持有限的 SQL 功能。而且 SQL 不能作为嵌入式语言为高级语言所调用。UNIFY 以库函数的形式提供数据库与高级语言的接口。

UNIFY 提供的其它一些数据库开发工具有: 高级



报表生成器 ACCELL/IQ、数据库管理系统与 MS/PC-DOS 通信处理工具 ACCELL/CP、支持 TCP 网络协议和分布式处理能力的工具 ACCELL/Net 等。UNIFY2000 还具有联机事物处理能力和全局数据字典功能等特性。

6. SYBASE SYBASE 是 SYBASE 公司出品的关系数据库管理系统，该系统是以在线事务应用为目的而设计的。它参照数据远程访问 (RAD) 标准使用了客户/服务器模式，提供了在网络各个节点上的数据库真正实现互访操作的体系结构，并且 SYBASE 采用虚拟服务器体系结构 (Visual Server Architecture) 支持多处理器 (CPU) 的强大功能。SYBASE 可运行在基于 VMS 和 UNIX 操作系统的计算机上。

SYBASE 提供的相应的三个软件产品分别为：SYBASE SQL SERVER、SYBASE SQL TOOLSET 以及一个客户/服务器接口 SYBASE Client/Server Interface。

SQL TOOLSET 提供了 SYBASE 数据库开发的各种软件工具。它支持一个扩展的 SQL-TRANSACTION-SQL，它增加了一些过程化语言设计的控制结构，如：IF-ELSE 语句、GOTO 语句、WHILE 语句等，这一特性使得该语言本身成为一个数据库开发工具。TRANSACTION-SQL 的另一特色是它与其他高级语言的接口方法。它提供了一个编程语言接口——DB-LIBRARY。DB-LIBRARY 包含了用 C、COBOL 或 FORTRAN 语言调用的 SQL 命令的程序库。

SQL Server 是一个具有在线事务处理能力的 RDBMS 软件，它适用于大吞吐量、高速事务处理的应用。它的另一个突出的特点是：把由各个应用客户自行负责的数据完整性逻辑控制改为由数据库服务器软件 (SQL Server) 集中进行控制，因而当公司政策或政府方针变化时能迅速做出反应。

SYBASE Client/Server Interface 的功能是按照统一的规程实现客户对服务器的连接，它为各个服务器之间提供了相互可操作性能力。

SYBASE 的分布式数据库管理功能，通过网络上每个节点上运行的 SQL TOOLSET 或 SQL Server 以及 OPEN Server 接口软件提供了多机种互连的数据库管理功能。OPEN Server 使得 SYBASE 能按统一的形式去存取任何数据源，因此 SYBASE 适应于多机种互连的分布式数据库管理环境。它支持两种分布式结构：分布式数据存取处理和分布式数据库。分布式数据

存取通过一个中央 SQL Server 支持在不同机种上的应用，上百个用户可以通过不同机种对应中央 SQL Server，用户可利用它实现分布式功能。通过 SQL Server 用户可与基于微机操作系统 DOS、WINDOWS、Macintosh 及 OS/2 操作系统的计算机共享信息和资源。SYBASE 支持分布式查询、更新和恢复等功能，但不支持分布式查询优化。

3 程序设计语言

3.1 机器语言

机器语言是由有关计算机直接理解与执行的指令与数据代码表示的一种语言，通常表示为二进制形式。指令通常由操作符—操作数两部分组成。指令的操作数部分是由二进制整数表示的操作数地址或直接操作数本身。

由于机器语言是计算机可直接使用的语言，所以用此语言编写的程序精练，所占内存空间小，运行速度快。但是语言难以记忆，程序难易编写，还容易出错，出错后又很难查找和修改。因此，除特殊需要，一般很少使用机器语言。

3.2 汇编语言

汇编语言是一种面向机器的符号表示的低级程序设计语言。同其它高级语言一样，它是由基本符号、语句及使用规则组成。不同的机器配有不同的汇编语言，一般不能通用。

汇编语言的基本字符集通常是 26 个英文字母，十个数字 0~9，算术运算符 +、-、*、/、()，关系运算符有 GT, GE, LT, LE, EQ, NE，逻辑运算符有 NOT, AND, OR, XOR 等。

汇编语言的语句 (指令) 可分为三类：

(1) 用符号助记的机器指令，简称助记符。每条机器指令都对应一个助记符。

(2) 伪指令，主要用于程序员向汇编程序提供一些必要的信息，常用的伪指令有：

1) 说明汇编起始地址的伪指令 ORG

例：ORG5000 说明目标程序的首地址是 5000 单元。

2) 标号说明伪指令 EQU

例：CR: EQU120 说明标号 CR 赋值为 120。

3) 数据说明伪指令 DB

例：DAT: DB2, 4, 6 向汇编程序说明从数据区



中留出3个单元,分别存放上面三个数值。

4) 入口标号说明伪指令 ENTRY,用于说明子程序入口地址。

各种不同的汇编语言中,有不同的伪指令表示方法,但基本功能类同。

(3) 宏指令,是程序员自己定义的指令。

用汇编语言编写的程序中,经常会出现多次重复的程序段,这时可以用宏定义伪指令(如 MACRO, MEND)将这段程序定义为一个新的指令,通常称为宏定义。宏指令一经定义,后继程序就可以使用已定义的宏指令,即宏调用。宏定义和宏调用有一定的格式要求。

宏定义的一般格式为:

<宏指令名> MACRO <语言参数 1, 语言参数 2, ……>

宏指令体

MEND

其中宏指令体可以由助记符、伪指令和其他已定义的宏指令构成。由此可见宏指令可以嵌套到一定层次中。宏调用时,可直接写宏指令名,并代入“实参”。

例:

```
宏定义 { ROT A: MACRO #REG
        { ADD #REG
        { ADD #REG
        { MEND
```

START: LDA B

ROT A (宏调用)

ADD A, B

END

在系统软件中使用的系统宏指令,也可以为用户使用。

3.3 高级语言

1. C 语言

a. 历史与特点 C语言是一种通用程序设计语言。

最初是由 Dennis Ritchie 在 1972~1973 年为 DEC PDP-11 计算机设计和实现的。C语言是在 B语言(Basic Combined Programming Language 的缩写)的基础上重新设计的语言。B语言与C语言的主要区别是B语言中是无类型的,而C语言有各种数据类型。因此,C语言较好地反映了当前大多数计算机的体系结构。

C语言的特征是在表达式、控制流与数据结构等能力方面很经济,它是运算符与数据类型丰富的集合。

C语言以重写了UNIX操作系统第五版本和第六版本而举世瞩目。它已广泛的应用于各种程序的编写,包括UNIX操作系统、C编译程序本身及几乎全部的UNIX应用软件。除了系统软件之外,C语言还成功地用于较大的数值处理程序、文本处理程序及数据库程序等。由于C语言的高效率并具有汇编语言所具有的特点,在许多环境下,它已完全取代了汇编语言。C语言在系统软件、软件工程、软件工具和应用方面已占有独特的地位。

C语言有以下主要特点:

(1) 语言表达能力强。C语言是面向结构程序设计的语言,通用性好,不局限于某种机器。它可以直接处理字符、数字、地址,可以完成通常由硬件实现的算术、逻辑运算。它反映了当代计算机的性能,所以能有效地足以取代汇编语言编写的各种系统软件和应用软件。最明显的例证就是UNIX操作系统;

(2) 语言本身简洁、使用灵活、易于学习和应用。在表示方法上力求在明了易懂的前提下简单易行;

(3) 数据类型丰富,具有构造数据类型的能力;

(4) 具有很强的控制流结构,足以描述结构良好的程序;

(5) 语言生成的代码质量高,试验表明,用C语言编写的程序,其生成代码的效率仅比用汇编语言写的代码低10%~20%。由于用高级语言描述比汇编语言描述问题编程快、工作量少、可读性好、易于调试、修改和移植,所以C就成为人们描述系统软件和应用软件比较理想的工具;

(6) 可移植性好。可移植性是指程序可以从一个环境不加或稍加改变就可以搬到另一个完全不同的环境上运行。汇编语言因为依赖于机器硬件,所以不便携,而许多机器上的C语言编译程序都是经移植而得到的。据统计资料表明,不同机器上C语言编译程序80%的代码是公用的。因此用C语言编写的许多程序可以方便地移植到另一个环境上。可移植性是C语言最为突出的特点。

C语言优点很多,但也有一些不足,主要是:运算符优先级太多,不便记忆。尽管有些缺点,但仍是一个实用的通用程序设计语言。

b. 语言组成

(1) 控制流。C语言常见的控制流是:

```
stat1 stat2
```



```

if (expr) stat1 else stat2
while (expr) stat
do stat while (expr)
for (expr1; expr2; expr3) stat
switch (expr) {
    case const1; stat1
    case const2; stat2
    .....
    default; stat

```

其中, `expr` 是表达式, `stat` 是语句, 或者是简单语句, 或者是用花括号 `{...}` 括起来的一组语句。 `const` 是离散型常数。

在循环体内, `break` 语句导致立即退出, `continue` 导致下一个迭代循环开始。

(2) 数据类型。C 语言的基本数据类型是 `char` (字符型)、`int` (整型)、`short` 与 `long` (短/长整型)、`float` 与 `double` (浮点和双精度浮点型)。这些是简单变量类型, 在数据处理时, 根据处理要求, 这些数据类型可自动转换。

此外, 由简单变量类型可以构成复杂的类型, 称为构造类型。构造类型主要包括数组、指针、结构、联合和枚举。构造类型和简单类型的不同点在于构造类型的每一个分量它可以是一个简单类型或者构造类型。这些分量可以与简单变量一样被赋值和在表达式中使用。合理地使用构造类型, 可组织复杂的数据, 使程序清晰、简洁。

(3) 运算符与表达式。C 语言的运算符繁多, 按其在表达式中所起的作用, 则可分为算术运算符、逻辑运算符、关系运算符、字位逻辑运算符、赋值运算符、增 1 减 1 运算符; 如果按其表达式与运算分量的关系, 则可分为单目运算符、双目运算符和赋值运算符等。

例如, 单目运算符: `*` (指针)、`&` (求地址)、`++` (增量)、`--` (减量)、`!` (求非) 等; 双目运算符: `+`、`-`、`*`、`/` 及关系符等。

C 语言的表达式也十分丰富, 主要包括: 带有单目运算符的单目表达式、带有双目运算符的双目表达式、值表达式, 条件表达式和初等表达式。

(4) 程序结构。C 语言程序是由一系列外部说明、外部定义、一个主函数和多个子函数组成。这些函数可以独立编译。各函数说明不可嵌套。C 程序是块结构。

外部定义说明一个标识符的存储类型, 可以说明为全局的 (即对所有函数都有效), 也可以说明是静态

的, 以及其它规定类型。外部定义的作用域一直到说明它们的程序末尾。

外部定义可分为两大类: 外部函数定义和外部数据定义。从说明角度来论, 两者没有太大区别, 都是说明存储类型, 但对于函数还要给出其代码。

一个 C 程序, 必须而且只能有一个 `main` 函数, 其余的函数相当可被调用的子函数。

(5) 运行环境。在 C 语言中不提供输入/输出 (I/O) 语句。它也不提供存储管理或字符串处理。它只提供单线控制流结构, 没有多道程序设计、并行操作、同步化或协同程序。所有这些高级功能都由独立的函数来提供, 由一个标准的 I/O 库来为大部分 C 程序提供一致的运行环境。

2. PASCAL 语言

a. 历史与特点 PASCAL 是 Niklaus Wirth 在 1968 年设计的一种语言。它是 ALGOL 语言家族中的一员, 其主要语法很类似 ALGOL 的语法。其设计的动机是在于提供一种语言, 使程序员能根据结构程序设计原则来编写程序。因此, PASCAL 包括了与 ALGOL 不同的原则和特征。

PASCAL 最初是为了讲授计算机程序设计语言而设计的, 现在已广泛应用于各领域。它已在许多小型计算机与微型计算机得到应用, 由于它的小巧、简洁及效率特别适于小型机和微型机。它作为系统程序语言的适用性也已被人们认识, 因此它被选为美国国防部新语言 Ada 的基础。

PASCAL 语言有如下主要特点:

(1) PASCAL 的设计原则的一个重要方面是它是一个“小型”语言, 因此它小巧、简洁、结构性好;

(2) 具有丰富的数据类型和各种各样的程序控制结构, 它们可使程序与预定的意义密切地关联起来。使设计的程序易读、易于理解、程序设计错误少、易维护;

(3) PASCAL 通常也可以表征为把 ALGOL60 作为子集包括在内。虽然它略去了象乘幂运算符这样的 ALGOL 特征及 `for` 语句等, 但把 ALGOL 程序转换为 PASCAL 程序, 不需花费太大功夫;

(4) PASCAL 提供一种基本的输入/输出 (I/O) 设施, 易理解和便于应用, 但在复杂程序中使用要难些;

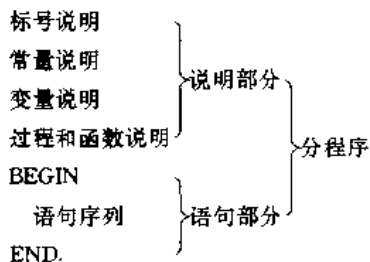
(5) PASCAL 语言也是为了帮助程序员快速找出编码错误而专门设计的几种程序设计语言之一。范围广泛的错误检查在编译期间及执行期间进行。



目前, PASCAL 已迅速地成为许多大学计算机课程讲授的受欢迎的语言。它也成为微型机上可广泛得到应用的语言。因此, 它对受训练的程序员的设计习惯有重要的影响。

b. PASCAL 语言的程序结构 PASCAL 语言严格规定了程序结构和书写格式。其格式如下:

PROGRAM 程序名(文件标识符表); 程序首部



值得注意的是: 所有的 PASCAL 程序都以 PROGRAM 作为第一个字; 说明部分的各说明语句都以各自的保留字开始, 以分号 (;) 结束; 过程说明和函数说明都由各自的过程首部或函数首部以及随后的分程序构成, 用以定义过程和函数, 其结构与主程序结构类似; 分程序的语句部分都是以 BEGIN 开始, 后面是一组语句, 最后是 END。由此可见, PASCAL 程序是做套结构, 层次分明。

c. PASCAL 语言的数据类型 PASCAL 语言有丰富的数据类型, 主要包括简单类型、构造类型和指针类型。

简单类型包括: 整型、实型、字符型、布尔型、枚举型和子界类型。

构造类型包括: 数组类型、集合类型、记录类型和文件类型。

PASCAL 语言设置记录类型是它的一个重要优点。记录类型是一种较复杂但又非常灵活的构造类型数据, 它由固定数量的元素组成, 允许元素类型不同。

文件类型是指由一系列相同类型数据组成的一个数据序列。其文件组织是顺序文件。

指针类型用于描述动态数据结构。利用指针类型可以把数据链成各种结构, 如线性链表(队列、堆栈)、树(二叉树……), 有向图等。

d. PASCAL 的语句类型 PASCAL 语言程序语句分无标号语句和有标号语句。

无标号语句包括:

- (1) 赋值语句;
- (2) 读语句、写语句和其他过程语句;

- (3) 转移语句;
- (4) 空语句;
- (5) 复合语句;
- (6) 控制循环语句、条件语句和开域语句。

e. PASCAL 语言的过程和函数 PASCAL 语言允许程序员在程序中定义过程和函数, 然后对它们进行调用。

PASCAL 语言也给出了 17 个标准函数及 13 个标准过程, 可以不加说明直接引用。

f. 递归 用 PASCAL 语言可以实现递归算法。由于用递归方法描述算法比较精炼和明晰, 所以递归是算法设计的有效方法之一。

3. FORTRAN 语言

a. 历史与特点 FORTRAN 语言是 FORMULA TRANSLATOR 的缩写, 意思是“公式翻译”。它是较早的一个高级程序设计语言, 最初是为解决数值计算而开发。它是科学计算领域里使用最广泛的程序设计语言, 在其它领域也有很多的应用。

FORTRAN 语言的研制工作, 早在 50 年代初期就已开始, 最早是在 1957 年由 IBM 公司在 IBM704 机上实现。它的研制成功为高级语言的发展提供了基础。

从 1960 年初开始, 相继在各种计算机上实现了 FORTRAN 编译系统, 于是 FORTRAN 语言得到迅速发展。在发展过程中, 对原版本不断修改和扩充及标准化工作, 形成了广泛使用的美国国家标准版本 FORTRAN77 全集及其子集。

FORTRAN 语言是面向过程的程序设计语言, 它有如下特点和不足之处。

FORTRAN 语言的主要特点:

- (1) 标准化程度高, 便于程序交换。
- (2) 较易优化、计算速度快。
- (3) 使用范围广。不仅是适用于科学计算(数值计算)领域, 越来越多的商业系统、企业单位也采用 FORTRAN 语言编制信息管理系统程序。

但是按现代标准检验, FORTRAN 还存在一些不足之处, 主要是:

- (1) FORTRAN 语言还不够简明。
- (2) 对结构程序设计来说还不是一个理想的工具。
- (3) FORTRAN 含有许多的特殊情况, 增加了编程的限制和错误的发生。

尽管 FORTRAN77 存在一些早期文本的缺陷, 但



新文本在许多方面已经有了改进,它采用了现代程序设计语言的一些新特点,并在逐步进行完善。

b. FORTRAN 语言组成

(1) 基本字符。FORTRAN 语言有 47 个基本字符,分为三大类:

- 1) 字母 (26 个大写英文字母);
- 2) 数字 (0~9 共 10 个);
- 3) 专用字符 (11 个) 即 = + - * /, / . ()

\$ blank.

(2) 数据类型。FORTRAN 允许使用六种不同类型的数据,即 INTEGER (整型)、REAL (实型)、DOUBLE PRECISION (双精度)、COMPLEX (复型)、LOGICAL (逻辑型) 和 CHARACTER (字符型)。

(3) 语句。FORTRAN 程序语句分为执行语句和非执行语句。

执行语句包括:

- 1) 算术、逻辑、语句标号和字符的赋值语句;
- 2) 无条件、计算和赋值的转移语句;
- 3) 算术、逻辑条件语句;
- 4) 循环语句;
- 5) 继续语句;
- 6) 调用、返回、停、暂停语句;
- 7) 读、写和打印语句;
- 8) 反绕、回退、文件结束、打开文件、关闭文件

和查询语句;

- 9) 执行语句;
- 10) 结束语句。

非执行语句包括:

- 1) 函数、子例程、数据块子程序语句;
- 2) 类型、公用、维数、等价和外部说明语句;
- 3) 数据初值语句;
- 4) 语句函数定义语句;
- 5) 格式语句。

(4) 运算符与表达式。运算符包括算术运算符、逻辑运算符、关系运算符和字符运算符。运算符的优先级由高到低是算术运算符、字符运算符、关系运算符和逻辑运算符。

由上述各种运算符组成相应的表达式,包括算术表达式、关系表达式、逻辑表达式和字符表达式。

(5) FORTRAN 的程序结构。FORTRAN 语言是块结构,即每个 FORTRAN 源程序由一个或几个相对“独立”的程序单元所组成。程序单元又分为主程序段和子程序段。子程序又分为数据块子程序和过程子程

序,过程子程序包括函数子程序和子例子程序。

一个 FORTRAN 程序或者只由一个主程序组成,或者由一个主程序和若干子程序组成,不论是主程序还是子程序,都以 END 作为结束行,它是程序单元的最后一行,表示程序执行结束或一个程序单元的终止。

FORTRAN 的源程序由注解行、结束行和若干语句组成。

4. BASIC 语言

a. 历史与特点 BASIC 是 Beginner's All Purpose Symbolic Instruction Code 的缩写,意思是“初学者通用符号指令代码”的缩写。这种语言是在 NSF (美国国家科学基金会) 的资助下,是由 Dartmouth 大学的 J. G. Kemeny 和 T. E. Kuitz 两位教授指导开发的会话型语言。BASIC 语言于 1965 年在 GE235 机上开始使用。现在多数的计算机,尤其是个人计算机上都配有 BASIC 语言,它是一种广泛普及的会话型语言。

自 BASIC 诞生以来,经不断改进扩充,其功能已相当完善。1985 年, BASIC 的创始人在总结 BASIC 应用经验和各种程序设计语言优点的基础上,推出了真正 BASIC (True BASIC)。它具有标准化、结构化的特点,很可能成为未来 BASIC 的标准语言。BASIC 是当今世界上应用最广泛的计算机语言之一。它的主要特点是:

(1) 小巧灵活,简单易懂,使用方便,适用于小型机和微型机上进行小型的科学计算;

(2) 具有会话功能;

(3) 具有台式计算机运算的命令,能实现台式计算机的功能;

(4) 具有字符串操作和与外部设备通信的特殊功能,从而使 BASIC 语言能够进行数据处理和实时控制;

(5) BASIC 多数是解释程序方式;

(6) BASIC 具有编辑功能以及方便地使用文件的指令,而且还具有图形功能;

总之, BASIC 虽然简单,但内容并不贫乏。BASIC 语言包括所谓字符串操作和矩阵运算函数,这些功能正是 ALGOL 语言和 FORTRAN 语言所没有的。

目前, BASIC 的种类繁多,例如配在大型计算机和小型机上的 BASIC,结构化 BASIC,针对微型机的 Tiny BASIC,图形用 BASIC,测量用 BASIC 等。

b. BASIC 语言的基本符号

- (1) 英文大写字母 26 个;
- (2) 数字 0~9;



(3) 其他符号包括:

. (小数点)、, (逗号)、; (分号)、() (圆括号)、" (引号)、□ (空格)、+ (加)、- (减)、× (乘)、/ (除)、^ (乘幂)、< (小于)、> (大于)、= (等于)、<= (小于等于)、>= (大于等于)、<> (不等于)、\$ (变量类型说明符号)。

c. BASIC 的数据类型 BASIC 的数据类型分为数值型和字符型。数值型又分为简单数值型和数组数值型。例如 500, "XYZ" 表示数值常数和字符串常数; A, 表示简单变量, W (X, X+Y/2) 表示数组型变量, A\$ 表示字符串变量。

d. BASIC 的表达式 BASIC 的表达式有数值表达式和字符串表达式两种。数值表达式由引用变量、常数, 以及函数进行 +、-、*、/、^ 的运算构成。例如: $\text{SQR}(X^2+Y^2)$ 。数值表达式的构成与计算, 是根据通常的代数规则来进行的。字符串表达式是由字符串变量以及字符串常数所构成。

e. BASIC 的基本语句

- (1) 赋值语句;
- (2) 打印输出语句;
- (3) 键盘输入语句;
- (4) 无条件转向语句;
- (5) 读数语句和置数语句;
- (6) 恢复数据区语句;
- (7) 条件转向语句;
- (8) 注释语句;
- (9) 暂停语句;
- (10) 结束语句;
- (11) 循环语句;
- (12) 转子语句和返回语句;
- (13) 数组说明语句 (DIM)。

f. BASIC 的程序结构 BASIC 的源程序是由若干行组成, 一行可以是一个或多个语句, 每个语句都是执行一定的操作, 如赋值、打印、结束等。一行中多个语句用 ";" 分开。

BASIC 的每个语句由四部分组成:

- (1) 行号 (标号), 必须是无符号整数, 其行号最大允许值受机器控制;
- (2) 语句定义符, 它规定计算机实现某一特定功能;
- (3) 语句体, 即在语句定义符后面说明需要具体执行的内容;
- (4) 回车, 表达本程序行结束。

每个 BASIC 程序通常都用 END 结束。END 是程序结束标志。

一个语句必须在一行内写完, 如果一行内写不完, 则可以把它拆成两行或多行语句; 每行长度不超过 255 个字符。

5. COBOL 语言

a. 历史与特点 COBOL 语言是 Common Business Oriented Language 的缩写, 称为通用商业语言。主要在数据处理方面的应用。

COBOL 语言在 1959 年 12 月由美国提出了世界上第一个 COBOL 语言文本, 后来经过多次修改、完善和扩充, 并出现了一系列版本。到 1978 年国际标准化组织 (International Standard Organization) 宣布 COBOL 的国际标准文本, 即 ISO COBOL-78。标准文本的出现, 为 COBOL 语言的推广应用创造了一个有利的条件。现在各国计算机厂商都以 COBOL 的标准文本作为依据。

尽管 COBOL 标准化程序比较高, 但不同厂家在计算机上实现它都有一些差别。

COBOL 是面向数据处理的语言。事实上, 除了商业之外, 各种管理工作都广泛使用 COBOL, 例如各种统计工作、财务管理、企业管理、情报检索等。COBOL 是目前世界上使用最广泛的高级语言之一, 它是专门为计算机信息管理而设计的计算机语言, 它不适合于科学计算, 其主要特点如下:

(1) 最适合于数据处理。特点是: 算术计算量少而逻辑处理多; 输入输出量大; 数据之间还有一定的逻辑关系; 分类排序; 报表输出等。

COBOL 语言就是针对数据处理的特点而设计的高级语言, 它所处理的问题就是具有数据量大、运算简单的特点。它具有良好的数据描述和分析处理数据的功能。

COBOL 对数据处理的过程, 与人工处理过程相似, 因此, 一般管理人员比较容易学习和掌握。

(2) 比较接近于自然语言。COBOL 大量采用普通英文词汇和句型, 因此 COBOL 的程序看起来像一篇英语文章, 容易理解和阅读。

(3) 标准化程度高, 通用性强。由于 COBOL 语言的标准化程度高, 不同厂家提供的 COBOL, 都是标准 COBOL 的子集。因此, 在不同计算机之间移植 COBOL 还是比较容易实现的。

(4) COBOL 的程序结构严谨、层次分明。每个程序分四大部分, 每个部分又分节和段, 每部分都有固定



格式和内容。

(5) 缺点是比较繁琐,程序无论大小,都要写四大部分,因此源程序比较长。

据国外统计,COBOL 是面向过程的语言中(例如 FORTRAN、ALGOL、PASCAL、PL/1、BASIC 等)应用最广泛的语言。

b. COBOL 的程序结构 每个 COBOL 程序都包括以下四大部分,每个部 (Division) 都有自己的部名。

(1) 标识部 (IDENTIFICATION DIVISION)。它是源程序中的第一部分,是程序不可缺少的部分。主要用来指出源程序名字,以便识别,也可以说明其他备忘信息。

(2) 设备部或称环境部 (ENVIRONMENT DIVISION)。这是整个 COBOL 源程序中唯一与计算机硬件设备有关的部分。在设备部中给出程序中用到的设备名称,以及程序中文件与外部设备之间的对应关系。此外还指定目标程序中使用的专门控制方法及程序所用内存空间的大小等。

(3) 数据部 (DATA DIVISION)。这是整个 COBOL 源程序中唯一描述数据的部分,也是任何源程序不可缺少的部分。凡在程序中涉及到的全部数据都在这一部分描述。包括输入、输出和中间数据。主要描述数据的类型和所占内存的大小。

(4) 过程部 (PROCEDURE DIVISION)。这是 COBOL 程序中的核心部分,用来给出程序要执行的指令,使计算机产生相应的操作。四个部中,只有过程部是执行部分。

COBOL 源程序中,除了标识部外,在每个部下,还可以分为若干个节 (SECTION),每个节都有标识。节下面还可以包括若干个段 (PARAGRAPH),每个段都有名字标识。

在过程部中,每一段都由若干句子组成,每个句子又由语句组成,每个语句又可分为若干个子句,每个子句都有一个操作命令,指定完成某种功能。

c. COBOL 程序的基本语句 (子句) COBOL 程序的最基本单元是子句,即语句。这些语句包括算术运算语句 (+、-、*、/)、条件语句、转向语句、数据的读、写、传送语句 (READ、WRITE、MOVE),数据的接收、显示语句 (ACCEPT、DISPLAY),文件的打开、关闭语句等。以及程序的执行和停止语句 (PERFORM、STOP)。这些语句是可操作的部分,还有其他语句,这里不做介绍了。

d. COBOL 数据处理特点 在数据处理中,许多

数据并不是互相孤立的,它们之间有一定的联系。COBOL 语言可以用层次定义把这些有关系的数据组织起来,组织成数据项,记录和文件。然后对它们进行处理。

COBOL 语言可以处理的文件有四种:

(1) 顺序文件——记录在文件中按存入的先后次序排列;

(2) 索引文件——记录在文件中按指定的记录键值的大小顺序排列;

(3) 直接文件——记录按程序中指定的地址直接存入;

(4) 相对文件 如一个记录建立一个“相对号”,在文件中记录按相对号的大小顺序依次排列。

COBOL 中有三种存取方式:顺序存取、随机存取和动态存取。

6. LISP 语言

a. 历史与特点 LISP 语言是迄今在人工智能学科中应用最广泛的一种程序设计语言。LISP 是表处理 List Processing 的缩写。

LISP 语言是麻省理工学院的 John Mccarthy 和他的研究小组在 1960 年首先设计实现的。以后,在多种计算机上都实现了 LISP。目前已发展了许多版本,得到广泛的应用。

LISP 语言不仅对人工智能在计算机上实现有着重要意义,而且也是人工智能理论研究的重要工具。

LISP 现在已用于以下几个方面:

符号代数处理;自然语言理解;机器翻译;形式逻辑推理;专家系统;自动定理证明;自动程序设计;机器人应用等。

LISP 语言具有许多与其他程序设计语言比如 FORTRAN、ALGOL、COBOL、PASCAL 不同的特征。LISP 语言具有如下特点:

(1) LISP 程序的通常形式是一串函数定义,其后跟着一串带有参数的函数调用,函数之间的关系只有在调用执行时才体现出来。LISP 语言没有语句概念,当然也就没有分程序结构或语法结构。语言中的一切成分都是以函数的形式给出;

(2) 在纯 LISP 中只有很少的几个原始函数,增加扩充的其他内部函数都可以用原始函数表示;

(3) 在 LISP 中,程序和数据在形式上是相同的。LISP 的唯一数据结构是 S——表达式 (表),把程序当作数据处理,也可以把数据当做程序来执行;

(4) 递归是 LISP 的基础,是语言的主控制结构。



它的递归处理是基于递归定义的数据结构。

b. LISP 的数据结构 S—表达式 LISP 是一种适合符号处理的语言。它处理的唯一对象是符号表达式。这种表达式称为 S—表达式。因此 LISP 程序就是对 S—表达式进行加工和处理。

一个 S—表达式可以是一个原子，或者是一个表结构。一个原子是基本的表元素，但它不是一个表。它可以分为符号原子和数原子。一个原子对应于英语中的一个字。一个表结构包括一个左圆括号，后跟任意个原子或表结构，后跟一个右圆括号。

例如，如下各项都是 S—表达式。

```
1992      数原子
(WHERE IS MA NOW) } 表结构
(A A C D)
```

实际上，数原子不只限于整数原子，它可分为定点数原子与浮点数原子。定点数原子表示整数，浮点数原子表示实数。此外，有的系统还引入了串原子，表示为“字符串”。

c. LISP 的基本函数 如前所述，LISP 语言没有语句概念，LISP 程序是由一串函数定义，后面跟着参数的函数调用组成。函数调用的一般形式为：

(函数名 自变量1 自变量2……)

其中函数名为符号原子，自变量为下面六种形式：S (S—表达式)、L (表)、F (函数)、A (原子)、NA (非原子)、N (数原子)。

下面介绍 LISP 最基本的几个函数：

(1) (CAR NA)

一元选择函数，取自变量中第一个元素(即表的头部)。

(2) (CDR NA)

一元选择函数，回送一张表，这张表包括了自变量中除第一个元素以外的所有元素，即表的尾部，它是 CAR 的补函数。

(3) (CONS S₁ S₂)

二元构造函数。当第二自变量为一张表时，则函数 CONS 回送一张表，该表的 CAR 是第一个自变量，它的 CDR 是第二个自变量。

(4) (ATOM S)

一元谓词函数。它判断自变量是否为原子，当自变量为原子时，函数值为 T；否则函数值为 NIL。

(5) (EQ A₁ A₂)

判断两个自变量是否为相同原子，若相同原子，则 EQ 函数值为 T，否则为 NIL。

(6) (NULL S)

判断自变量是否为空表，是空表时回送 T，否则回送 NIL。

(7) (QUOTE S)

函数 QUOTE 回送的值就是 S—表达式。

LISP 函数也可以由用户自己定义，大的函数可以由基本函数及扩充的内部函数通过复合及递归等方法构成。

在表处理过程中也常涉及一些算术运算，例如计算表长度等，因此 LISP 语言也有一些不能用基本函数定义的算术运算函数。

d. LISP 程序 程序通常是带有其变元的函数。几乎 LISP 的所有程序都遵从这一基本格式：(function arg1 arg2……)，即函数调用格式。其他种类的程序只有变量与常数以及条件表达式。变量与常数只是原子。条件表达式格式稍有不同：

(COND (arg1 arg2) (arg3 arg4) …)。

同函数构造一样，大的程序可以用嵌套方法构成。

e. 递归与迭代 LISP 语言一个重要的特征是有递归定义函数的能力，递归定义的函数即函数在自己的定义中使用(调用)自己，或者通过调用其他函数导致间接地对自身的使用(调用)。

例如，要计算某数 m 的 n 次幂 (n 为整数)。

数学上表示
$$\begin{cases} m^n = m \times m^{n-1} & n > 0 \\ m^0 = 1 \end{cases}$$

用 LISP 语言递归定义函数表示，则为

(DEFINE POWER (M N)

(COND ((ZEROP N) 1)

(T (TIMES M (POWER M (SUB1 N))))

其中，POWER 函数被多次调用。

由于递归定义函数，使得程序不仅功能强而且美观简单易读，一些大的数据结构经常能用小的数据结构处理。

LISP 语言主要以递归定义结构为主，但是后来也增加了一些迭代定义函数，如 PROG 函数。PROG 函数允许用户以一般程序设计语言通常使用的循环迭代方法编程。

在 PROG 函数中可以说明临时使用的局部变量，可以控制 S—表达式执行次序。

PROG 函数一般形式为：

(PROG LAT S₁ S₂…S_n)

其中，LAT 为局部变量表，S_i 为 S—表达式。如果 S_i 为 GO 字符原子，它是转移函数，当 PROG 函数执



行过程遇到 GO 函数时,就转到 GO 函数指定的字符原子,即打断了原来的执行顺序。

7. PROLOG 语言

a. 历史与特点 PROLOG 语言也是在人工智能学科中应用最广泛的一种程序设计语言,PROLOG 是逻辑程序设计 (Programming In Logic) 的缩写。

PROLOG 的思想最早是由 R. Komalski 首先提出。1972 年世界上第一个 PROLOG 系统是由 A. Colmerauer 及其研究小组在法国马赛研制成功。

PROLOG 是以逻辑程序设计为基础的非过程型语言。现在已被广泛应用于关系数据库、抽象问题求解、数理逻辑、公式处理、自然语言理解、专家系统以及人工智能的许多领域。

目前,PROLOG 语言和 LISP 语言是两种最主要的人工智能设计语言。早在 1981 年日本就宣布选择 PROLOG 作为第五代计算机的核心计算机语言,并已设计制造了 PROLOG 机,使得 PROLOG 更加令人瞩目。

PROLOG 语言的特点,主要表现在下面几个方面:

(1) 描述求解问题的方式不同于通用的程序设计语言。通常的程序设计语言 (如 FORTRAN, PASCAL) 解决问题时需要指明算法,即要指明计算机要执行的计算步骤,告诉计算机“如何做”。PROLOG 语言求解问题时,只要求程序员描述所解问题中的对象和反映它们之间关系的某些规则。而不需要告诉计算机执行顺序。由此可见,PROLOG 是更高级的语言。

(2) PROLOG 的程序结构和数据统一。PROLOG 提供一致的数据结构,称为项 (term)。正如 LISP 的程序和数据都是 S——表达式一样,它的程序和数据都是以项为基本单位,并且都有树型结构。

(3) PROLOG 能够自动实现模式匹配和回溯,这也是人工智能系统中最常使用的、最基本的操作。

(4) 同 LISP 语言一样,递归也是 PROLOG 语言的重要特点。由于这一特性,一个大的数据结构常能够由一个小的程序来处理。

b. PROLOG 的数据结构和递归

(1) 数据结构——项,PROLOG 提供一个一致的数据结构称为项。所有的数据和 PROLOG 程序都是由项构造而成的。PROLOG 中项的定义用 BNF 形式表示为:

$\langle \text{项} \rangle ::= \langle \text{常量} \rangle | \langle \text{变量} \rangle | \langle \text{结构} \rangle | (\langle \text{项} \rangle)$

项可以是常量、变量、结构或者在括号里的项。常量是原子或者是整数,变量是用来表示暂时不能命名或不需要命名的对象,结构或称为复合项。它可以是由一组其他对象 (也可称为结构) 组成的单个对象,这些其他对象称为它的成分。把几个成分组成一个结构作为单个对象是很有用处的,它可以构成很复杂的结构。

下面是一些结构的例子:

owns (john, book)

owns (john, book (Prolog, author (clocksin, Melish)))

a (b, c, d)

(2) 表和它的递归性,表是非数值程序设计中最常用的数据结构。LISP 和 PROLOG 都以表作为它们的数据结构。所不同的是,在 PROLOG 中表仅为一种特殊类的结构;而在 LISP 中,表是唯一的数据结构。PROLOG 中,一个表的元素可以是原子、结构或任何其他项。表能够表示人们在符号处理中希望使用的任一类结构。因为表是递归定义的。

PROLOG 中的表或者是一个没有元素的空表,或者是一个结构,它包括头和尾两个成分。一般表的表示方法为: . (头, 尾)

其中“.”是一个函数符,“头”和“尾”是表的头和尾的两个成分 (变元)。空表用 [] 表示。如果表的尾没有元素时,可以写为空表。例如由元素 a 组成的表为: . (a, []). 表也有其他表示方法。例如 [a, b, c, d], 表头为 a, 表尾为 b, c, d。

c. PROLOG 程序语句 PROLOG 语言只提供三种基本语句: 事实语句、规则语句和询问语句。

事实语句用以说明一个问题中的对象和它们之间的关系的已知事实。一般形式是:

关系 (变元) .

其中关系称为谓词,变元即对象可以是多个。例如: on (book, desk) . 说明一个事实,即书在桌子上。

规则语句用来定义对象和它们之间的一些已知事实。一个规则由“头”和“体”组成。“头”是符号“:-”的左边,“体”是符号“:-”的右边部分,“头”和“体”由符号“:-”相连。规则的“头”描述了该规则企图定义的事实,规则的“体”描述一些目标的连结。为使“头”成为真,这些目标必须逐个被满足,例如:

buy (x, car) :- have (x, money) .

意思是如果某人有钱,则他就买汽车。

询问语句用来询问有关对象和它们之间的关系。



PROLOG 的询问句的形式是：放一个专用符号“？”在事实的前面，例如：

? -Connected (a, b) .

意思是 a, b 是否连接。

在 PROLOG 中，事实和规则的集合称作数据库 (Data base)。

d. PROLOG 的搜索和回溯 PROLOG 语言实现自动搜索、自动进行模式匹配以及回溯。这是人工智能系统中最基本的操作和实现技术, PROLOG 有这一功能大大简化了所解问题的表达。这种功能和控制放进了系统内部, 而用户一级的控制利用 cut 操作来完成搜索或回溯。

第 8 章 电子计算机网络系统

1 概述

计算机网络是计算机技术和通信技术高度发展、紧密结合的产物。

1.1 计算机网络的发展

计算机网络经历了终端联机网络到计算机-计算机网络两个发展阶段。

1. 终端联机网络的发展 1955 年, 美国半自动化地面防空系统 (SAGE) 研制成功。系统主机是一台 IBM AN/FSQ-7, 雷达和其它测量控制设备的信息通过 1600 波特通信线路传送到中央机进行处理, 这可看成是计算机技术和通信技术的首次结合。

60 年代初, 由 IBM 和美国航空公司联合研制第一个联机订票系统 SABRE I, 它由一台中央计算机与全国范围内的 2000 个终端组成, 这些终端同中央计算机连接, SABRE I 的系统设计把计算机处理和通信技术融为一体, 是一个十分成功的应用系统。1971 年, NASDAQ 网络系统, 即证券商人自动报价系统开始运行, 系统大约有 1700 台终端, 位于 400 个不同城市的上千个地方, 用于收集全国所有证券市场的报价信息。NASDAQ 系统是终端网络的典型代表。

终端联机网络的缺点:

(1) 主机负荷太重, 既要承担通信工作, 又要进行数据处理, 因而降低了主机效率。

(2) 可靠性较差, 主机出现故障, 将影响整个系统的正常运行。

(3) 通信线路利用率低, 尤其在远距离时, 分散的终端要单独占用一条通信线路。

2. 计算机-计算机网络的发展 60 年代后期, ARPA (Defence-Department of Advanced Research Project Agency, DARPA 简称 ARPA), 即美国国防部

高技术研究中心, 开始资助美国许多大学的计算机科学系和一些私人公司进行有关计算机网络的研究, 1969 年 12 月, 一个具有 4 节点的试验性网络建立起来, 此后, 节点数不断增加, 现已发展到二万多台计算机, 地域分布跨越欧洲、大洋洲、拉丁美洲, 这就是著名的 ARPANET, 它的建立, 标志着计算机网络的诞生, 是计算机发展史上的里程碑。至此, 一门新的科学, 计算机技术与通信技术的结合——计算机网络出现了。

继 ARPA 网之后, 各种计算机网络更是如雨后春笋, 从局域网到远程网, 从微机网到大型机网, 从数据通信网到综合业务数字网 (ISDN), 各种网络技术和产品投入市场。

1.2 计算机网络的定义

相互独立的计算机通过通信介质连接起来, 按照某种协议, 达到相互通信和资源共享, 这样的系统称之为计算机网络。

定义中所谓“相互独立”, 意指具有独立处理能力。联机终端网不能算是计算机网络, 因为它只是终端与主机相连, 而终端是靠主机进行数据处理的。

“通信介质”可以是双绞线、同轴电缆、光缆、微波、卫星等任何一种或几种的混合。

1.3 计算机网络的特点和功能

计算机网络的主要目的是相互通信和资源共享, 表 4-8-1 对其功能进行了较详细的列举。

另外, 计算机网络还具有以下特点与功能:

(1) 提高了计算机系统的可靠性, 避免了单点失误而引起的系统瘫痪;

(2) 系统负载的均衡和协调运行;

(3) 大大提高了系统的性能价格比。



表 4-8-1 计算机网络的功能

| | | | |
|-----------------------------------------------|--------|------------------------------------------------|------------|
| 通 信 | 通信内容 | 数据(文本文件、二进制文件)、声音、图形、图象 | |
| | 通信方式 | 单工、半双工、双工 | |
| | 通信距离 | 凡 m~10km (局域网) 10~100km (远程网) 100km 以上 (远程网互联) | |
| | 通信速率 | kbps 量级(双绞线介质) Mbps 量级(局域网) 100Mbps (FDDI) | |
| 计 算 机 网 络 资 源 共 享 | 硬 件 | 主机资源 | CPU |
| | | | 存储器 |
| | | 外围设备 | 终端 |
| | | | 打印机 绘图仪 |
| | 软 件 | 系 统 软 件 | 操作系统 |
| | | | 数据库 |
| | | | 各种计算机语言 |
| | | 应 用 软 件 | 文件(文本、非文本) |
| | | | 数据库文件 |
| | | | 应用程序 |

2 数据通信

2.1 数据通信的概念

a. 数据 数据是具有一定意义的某种表达方式,如数字、字母、符号、代码等。在数据通信中,人们人为地赋予数据一定含义(即数据协议)称为信息,从而利用数据传递信息。此时,数据就是信息。

b. 数据通信 从数据源产生的数据,经过通信线路(信道),按照一定的通信协议传到目的端的过程。

c. 传输方式 数据传递有三种方式:单工、半双工、全双工(双工),分别如图 4-8-1 所示。

图中箭头表示在同一时刻数据能进行传送的方向。

d. 传输速率 每秒传送的比特数,称为数据通信的传输速率。

e. 传输误码率 $P = \frac{\text{错误接收的比特数}}{\text{传输的总比特数}}$

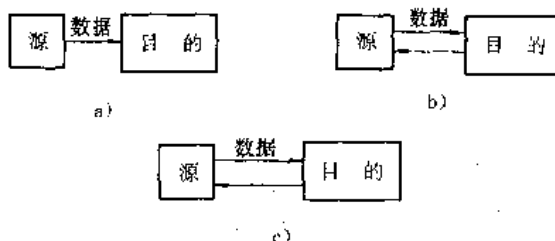


图 4-8-1 数据通信的三种方式
a) 单工 b) 半双工 c) 全双工

2.2 数据通信系统的组成

数据通信系统是指以电子计算机为中心,利用通信线路连接分散在远地的终端设备而进行数据通信的系统。

数据通信系统的模型如图 4-8-2。

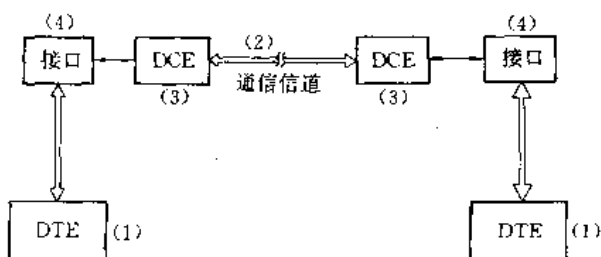


图 4-8-2 数据通信系统模型

可以看出,数据通信系统由四个部分组成:

(1) 计算机或终端, CCITT (the Consultative Committee for International Telephony and Telegraphy, 国际电报电话咨询委员会) 称之为 DTE (Digital Terminal Equipment), 即数据终端设备。

(2) 通信信道, 包括物理线路和通信协议。

(3) 用于通信线路控制的数据线路控制设备, 即 DCE (Digital Circuit Control Equipment)。

(4) DTE 与 DCE 间的接口。

2.3 信息传输介质

双绞线、同轴电缆、光纤、微波几种常用传输介质及其性能如表 4-8-2 所示。

表 4-8-2 通信介质及性能表

| 传输介质 | 双绞线 | 同轴电缆 (基带) | 同轴电缆 (宽带) | 光 纤 | 微 波 |
|------|-------|--------------|--------------|---------|---------|
| 性能 | | | | | |
| 带宽 | <6MHz | <100MHz | 50~450MHz | <300GHz | 1~20GHz |



(续)

| 性能 \ 传输介质 | 双绞线 | 同轴电缆 (基带) | 同轴电缆 (宽带) | 光纤 | 微波 |
|-----------|-----------|--------------|--------------|------------|------|
| 传输速率 | <10Mbit/s | <10Mbit/s | <150Mbit/s | <200Mbit/s | 多路传输 |
| 通信距离 | <300m | <2.5km | <150km | <100km | 任意 |
| 安装复杂性 | 中等 | 较易 | 较复杂 | 较复杂 | 中等 |
| 抗干扰 | 较差 | 好 | 好 | 很强 | 较差 |
| 安全性 | 一般 | 好 | 好 | 最好 | 差 |
| 经济性 | 便宜 | 中等 | 中等 | 稍贵 | 中等 |

2.4 数据编码技术

1. 数字信息、模拟信号 通常采用调制振幅、频率、相位这三个载波特之一或者它们的组合来对数字信息进行编码。三种基本的信号调制方式即：幅移键控法，频移键控法和相移键控法。

2. 数字信息、数字信号 最普遍、最常用的方法是直接使用二进制信号。但它有一个缺点，即接收器无法定位的开始和结束，通常采用曼彻斯特编码(Manchester encoding)或与此相关的差分曼彻斯特编码替代。三种编码技术如图 4-8-3 所示。

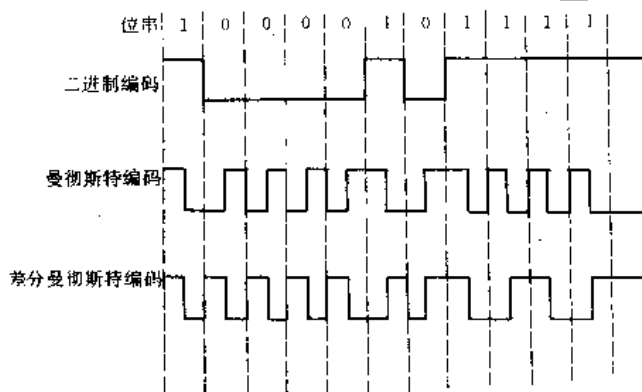


图 4-8-3 三种不同的编码技术

按照曼彻斯特编码方法，每个比特周期被分为两个相等时间段，当发送二进制“1”时让该周期内前半段电压为高，后半段为低；发送“0”时则相反：先低后高。从而保证在每一周期的中部总有电压的跳变，便于收方与发方的同步。缺点是所需带宽是直接二进制编码的两倍。

差分曼彻斯特编码是由基本曼彻斯特编码变化而来，规则是如果在区间开始处，电位不发生跳变则表示“1”，电位发生跳变表示“0”，它需要更复杂的设备，但

提供更好的噪声抑制性能。

3. 模拟信息、数字信号 脉冲代码调制(PCM)是对模拟数据进行编码的最常用方法。

根据奈奎斯特定理，以两倍于最高有效频率的速率对信号 $f(t)$ 进行采样，则这些采样值包含了原始信号的全部信息。再利用低通滤波器就可从这些采样中重新使信号复原。

2.5 数据传输技术

数据传输有串行和并行两种类型，而每种类型既可采用同步传输，又可采用异步传输两种方法。每种传输又有不同的具体实现规程，即协议。

1. 传输类型 串行和并行两种类型的传输特性归纳如表 4-8-3 所示。

表 4-8-3 两种传输类型比较

| 特征 \ 类型 | 线路 | 速率 | 复杂性 | 费用 | 应用 |
|---------|----|----|-----|----|--------------------|
| 串行 | 少 | 低 | 低 | 低 | 广泛适用于大多数数据通信 |
| 并行 | 多 | 高 | 高 | 高 | 计算机内部以及某些外围设备的本地通信 |

2. 传输方法

a. 异步传输 亦称起-止式同步传输，即每传送一字符时，都在字符代码前置一起始位，在代码后置若干个停止位，用于字符的传送和接收同步。图 4-8-4 是异步传输若干个 n 位字符的原理图。

b. 同步传输 在传送数据前，发送机先发送一个或多个同步字符，接收机识别同步字符，达到同步，然后进行实际数据传输。同步传输原理如图 4-8-5 所示。



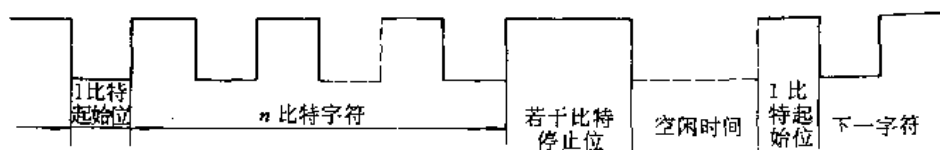


图 4-8-4 n 位字符的异步传输原理

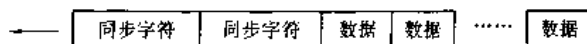


图 4-8-5 同步传输原理

表 4-8-4 列出了同步传输和异步传输两种技术的主要特征。

表 4-8-4 同步和异步两种传输技术比较

| 特征 \ 传输技术 | 异步 | 同步 |
|-------------|-------------------|-------------------|
| 速率 | 较低，一般小于 9600bit/s | 较高，一般大于 2000bit/s |
| 同步方式 | 起始位，终止位 | 建立同步字符 |
| 数据间有无空隙 | 有 | 无 |
| 定时方法 | 终端设备单独定时 | 调制解调器，终端设备共同定时 |
| 传送过程中有无空闲时间 | 无 | 有 |

c. 传输协议 众多通信协议基本可分为两大类，即字节控制协议 (BCP) 和面向比特的协议 (BOP)。

(1) 字节控制协议。字节控制协议，也就是面向字符的协议，它由一系列控制字符来完成传输规程。

传输字符及意义如表 4-8-5 所示。

信息电文基本格式如图 4-8-6。

表 4-8-5 传输控制字符及意义

| 名称 | 英文缩写 | 编码 | 说明 |
|----|------|----|---------------|
| 序始 | SOH | 01 | 标题开始 |
| 文始 | STX | 02 | 电文开始，标题结束 |
| 送毕 | EOT | 04 | 传输结束 |
| 询问 | ENQ | 05 | 确认通信对象 |
| 承认 | ACK | 06 | 肯定通信对偶、接通链路 |
| 否认 | NAK | 15 | 不能肯定通信对偶 |
| 转义 | DLE | 10 | 用于改变后继字符意义 |
| 同步 | SYN | 16 | 用于确立和保持收发双方同步 |
| 组终 | ETB | 17 | 一个电文分组结束 |

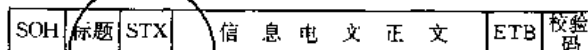


图 4-8-6 信息电文基本格式

交换线路的传输控制规程有以下几个方面：

- 1) 建立连接；
- 2) 确定收发关系；
- 3) 数据传送；
- 4) 通信结束的确认；
- 5) 拆除连接。

(2) 面向比特的协议。该协议传送的信息单位称为帧，帧分为信息帧和控制帧。在信息帧的数据字段中，不以字符为单位，而是二进制数据流，其位数不一定非要 8 的倍数，故称为面向比特的协议。

面向比特的协议，最早由 IBM 公司 1969 年以 SDLC 即同步数据链路规程推出，后被美国国家标准局 (ANSI) 采纳，并定名为“高级数据通信控制规程” (ADCCP)、ISO 在 SDLC 基础上作了少量修改补充而定名为 HDLC。

2.6 数据交换技术

数据通信的特点，决定了它采用的交换技术，目前主要有三种主要数据交换技术，即电路交换，报文交换和报文分组交换（包交换）。

1. 电路交换 当数据终端设备进行通信时，在为发送端和接收端建立一条物理通路，这种技术叫电路交换技术。其特点：

(1) 数据发送前，链路并不存在，所以一定要首先建立链路，链路建立时间受通信距离和通路忙闲影响。

(2) 一旦电路接通，就不会有争用的危险，整个链路全部为此通信服务。

(3) 通信延迟只是因信号传送时间引起，大约每 1000km 6ms。

应用：是目前远程数据通信最广泛的数据传输方式。

2. 报文交换 当发送与接收双方的传输允许有些延迟时，通过交换中心暂存报文信息，然后转发，主



要是防止线路争用和撞车。其特点:

(1) 发送端和接收端可以始终没有实际的物理通路。

(2) 数据延迟 = 传输延迟 + 转发排队延迟。

(3) 报文大小没有限制。

(4) 报文可在磁盘中缓存。

应用: 不太广泛, 适用于远程通信。

3. 报文分组交换 (包交换) 报文分组交换利用了电路交换和报文交换两种技术的优点, 把报文分成一些小的数据块, 即所谓的数据“包”, 在每一个包上附加一些控制信息, 通过数据包的发送和接收来传输信息。其特点:

(1) 一般数据的最大长度为 512bit。

(2) 包只在主存储器缓存。

(3) 传输延迟小, 通常不超过零点几秒。

应用: 计算机局域网大都采用报文分组交换技术。

3 计算机联网

3.1 计算机联网的分类

1. 局域网和远程网 根据计算机网络覆盖的地理范围, 可将其分为局域网 (LAN, Local Area Network) 和远程网或广域网 (WAN, Wide Area Network)。还有人提出扩展局域网的概念, 也有人提出都市网 (MAN, Metropolitan Area Network), 它们都是指网络覆盖地理范围和规模几倍于局域网 (LAN) 的计算机网络。

表 4-8-6 列举了 LAN 和 WAN 的一些特征。

表 4-8-6 LAN 和 WAN 的特性

| 类型 特征 | LAN | WAN |
|----------|------------------------------------|--------------------|
| 覆盖距离 | 几 m~10km | 几千米到几千公里以上 |
| 传输速率 | 高, Mbit/s 量级, 还 可达 100Mbit/s 以上 | 较低一般不超过 1Mbit/s |
| 交换技术 | 包交换 | 电路交换或包交换 |
| 传输延迟 | 很小, 零点几秒以下 | 几秒到几十秒 |
| 节点数 | <1024 | 可达几万个 |

2. 基带网和宽带网 根据网络的传输特性, 可将计算机网络分为基带网和宽带网。某一时刻, 只能传送

数字信号的网络, 称为基带网。能同时传送数字、语音、图象等信号的网络称为宽带网。

表 4-8-7 列出了基带网和宽带网的特点。

表 4-8-7 基带网和宽带网特点

| 类型 特点 | 基带网 | 宽带网 |
|----------|--------|---------|
| 复杂性 | 相对简单 | 复杂 |
| 安装难易 | 容易 | 困难 |
| 费用 | 相对低 | 较高 |
| 运行维护 | 简单 | 要求高 |
| 普及程度 | 普及、应用广 | 目前应用不太广 |

3.2 计算机互连的拓扑结构

物理上相互连接的计算机所呈现的几何形状, 称为计算机互连的拓扑结构。概括来说, 计算机互连拓扑结构有以下几种。

1. 星形 见图 4-8-7a, 其特点:

(1) 任意两节点间通信必须经过星心的转接, 星心负荷重, 是系统瓶颈。

(2) 可靠性低, 星心节点失误, 将造成整个系统停止运行。

(3) 结构简单, 建网容易且易扩展。

2. 环形 见图 4-8-7b, 其特点:

(1) 节点间通信共用一条信道。

(2) 数据单方向传送。

(3) 便于信道使用的控制和协调, 通常采用令牌控制法, 实时性较高, 重负载特性好。

3. 总线形 见图 4-8-7c, 其特点:

(1) 是局域网中最常见的拓扑结构。

(2) 通信时, 多节点争用同一条线路, 有总线竞争和令牌两种控制方式。

4. 树形 (层次结构) 见图 4-8-7d, 其特点:

(1) 可连接的节点数很多。

(2) 具有局部独立性, 可以局域自治, 本局域内通信不影响其他局域。

(3) 两节点间通信时, 有时需转发一次或多次。

(4) 层次不应太多。

5. 全连接形 见图 4-8-7e, 其特点:

(1) 结构复杂。

(2) 浪费资源。

(3) 通信方便, 无需选择通信路径。

(4) 适用于节点少, 距离近的环境。



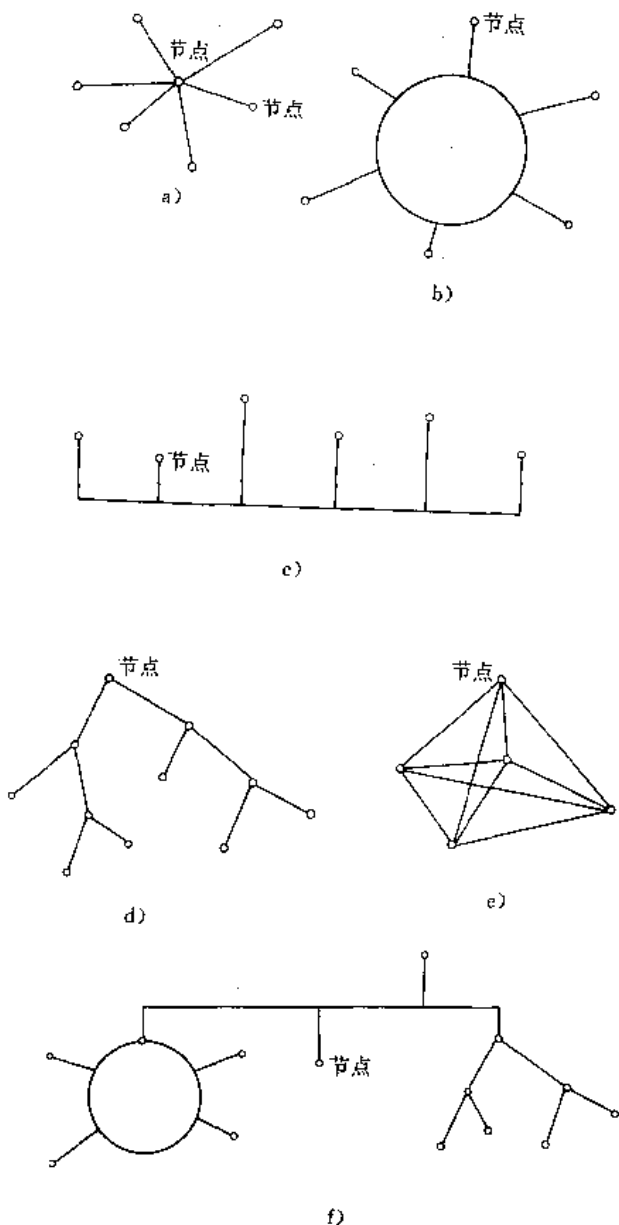


图 4-8-7 计算机互连的拓扑结构
a) 星形 b) 环形 c) 总线形 d) 树形
e) 全连接形 f) 混合形

6. 混合形 即具有前五种结构的两种或两种以上, 见图 4-8-7f, 其特点:

- (1) 适用于多节点、多应用系统。
- (2) 具有多种信道控制方式。
- (3) 依靠一主信道将多种拓扑结构网连接在一起。

3.3 开放式系统互连

1. 通信协议概念及其功能 通信协议是指为达到相互通信目的而共同规定的有关通信设备间物理连接、逻辑连接、信息传输等一整套规程或规约。通信协议的功能:

- (1) 保证通信设备的物理连通性。规定通信设备的物理、电气特性。
- (2) 保证通信信号的发送和接收。
- (3) 保证接收设备对接收信号的正确理解和执行。

2. OSI 开放系统参考模型

a. 网络体系结构的发展 ARPAnet 的建立是计算机网络诞生的标志, 它确立了许多计算机网络概念和多种计算机网络协议。

70 年代, 计算机网络飞速发展, 出现了数不清的网络和协议。表 4-8-8 列出了几个有影响的网络及体系结构。

b. OSI 参考模型概念 异种通信协议、异种网络体系结构、异种网络的并存和盲目发展, 必然给不同厂商间计算机互连和计算机网络的发展带来困难。国际标准化组织 (ISO) 于 1980 年制订了开放系统互连参考模型 (OSI, Open System Interconnect)。模型共分七层, 如图 4-8-8 所示。

c. OSI 参考模型各层内容和功能

(1) 物理层 (Physical Layer)

功能: 保证一条可用物理通路的建立。

表 4-8-8 几种网络及体系结构

| 时 间 | 69 年 | 74 年 | 76 年 | 80 年 |
|-------|---------------------|--------------------------------|----------------|--------|
| 网络名称 | ARPAnet | SNA 网 | Ethernet | DECnet |
| 建网者 | ARPA | IBM | Xerox | DEC |
| 用途 | 网络试验 | 本公司联网 | 网络开发 | 本公司联网 |
| 体系结构 | | SNA | | DNA |
| 特征协议 | TCP/IP | SDLC | CSMA/CD | DDCMP |
| 产生新概念 | IMP 资源子网 通信子网 | 节点 (Node) 网络可寻址部件 (IVAV) | 以太网 (Ethernet) | 端一端通信 |



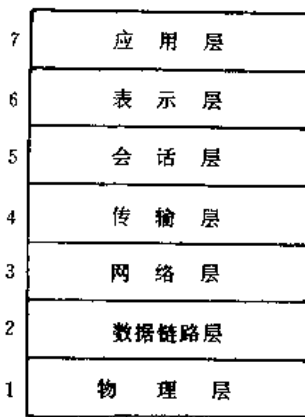


图 4-8-8 OSI 参考模型

内容：通信电路的物理、机械、电气特性及接口；多高电压代表“1”，多低电压代表“0”；每比特占用时间；传输类型，传输方式；DTE 和 DCE 接口。

(2) 数据链路层 (Data Link Layer)

功能：在相邻节点间确保提供一条无错的逻辑链路。

内容：发送和接收的速率匹配问题；信道争用；数据的校验等。

(3) 网络层 (Network Layer)

功能：保证一条终端到终端之间的无错链路。

内容：路由选择；拥塞控制及“流”控制；记帐。

(4) 传输层 (Transport Layer)

功能：保证主机到主机之间无错的数据传输，而不关心传输的内容。

内容：线路复用；端口控制；速率匹配。

(5) 会话层 (Session Layer)

功能：保证不同计算机系统间用户建立会话关系。

内容：实质上是两个系统进程间的会悟。

(6) 表示层 (Presentation Layer)

功能：保证计算机系统为用户提供同样的表示，即传送标准的信息的语法和语义而不管计算机内部的数据编码和存储方式。

内容：文本压缩；安全加密；存储转换。

(7) 应用层 (Application Layer)

功能：提供各种用户服务

内容：如文件传送，远程登入，虚拟终端等。另外，用户还可按需要，自己定义应用层的功能。

d. OSI 参考模型的协议和接口 OSI 参考模型的层、协议和接口如图 4-8-9 所示。

(1) 协议：等同实体间相互通信的规程或规约的

集合。所谓等同实体是指 OSI 参考模型中同一层间的通信的进程。

(2) 接口：OSI 参考模型相邻两层间的信息传递和功能调用。

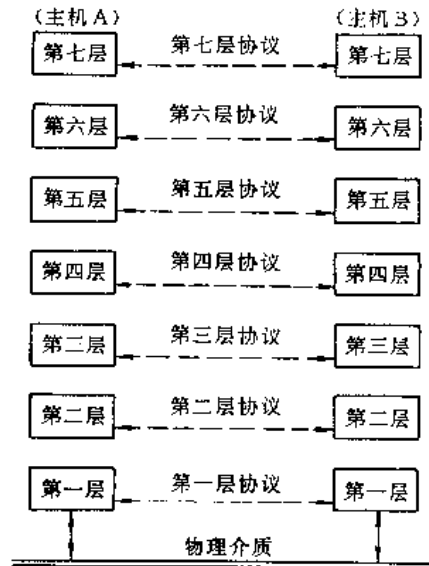


图 4-8-9 OSI 参考模型的层、协议和接口

e. OSI 参考模型的特点

(1) 清晰的层次结构，又有明确接口，使问题简单化，便于研究、实现及扩充修改。各层功能相对独立。

(2) 为计算机网络指定了一个开放的、标准的体系结构。

(3) OSI 参考模型是一概念，而非产品。都是按照 OSI 模型实现的网络不一定能相互通信，相互通信的计算机必须遵照同样的协议。

4 局域网的组成与网络互连

4.1 局域网的组成

计算机局域网实质上是一系列通信协议的硬软件实现。因此，总的说来，**局域网络**也是由硬件和软件两部分组成的，如表 4-8-9。

1. 通信介质

(1) 双绞线。物理结构如图 4-8-10a 所示。双绞线由两条相互绝缘的铜线组成，典型粗细约 1mm，它们象螺纹一样扭在一起，以减小相互的电气干扰。

双绞线的最大特点是价格低廉，但在传输速率、传输距离、抗干扰能力等方面受到许多限制。



表 4-8-9 局域网的组成

| | | |
|--------|--------|---------------------------|
| 硬 件 | 通信介质 | 双绞线 |
| | | 同轴电缆 |
| | | 光缆 |
| | | 微波、卫星 |
| | 线路辅助设备 | 电缆连接器 |
| | | 终结器 (Terminator) |
| | | 光电转换器 |
| | 网络接口设备 | 网络接口板 |
| | | 收发器 (Transceiver) |
| | | 收发器电缆 (Transceiver cable) |
| | 计 算 机 | 小型机 |
| | | 中型机 |
| | | 大型机 |
| | | 微机 |
| | | 工作站 |
| | 终端连接设备 | 终端服务器 (Terminal server) |
| | 网络互连设备 | 中继器 (Repeater) |
| | | 桥接器 (Bridge) |
| | | 路由器 (Router) |
| | | 网关 (Gateway) |
| 软 件 | 网络核心软件 | |
| | 网络管理软件 | |
| | 网络应用软件 | |

(2) 同轴电缆。物理结构如图 4-8-10b 所示。它以硬铜线为芯，外裹一层绝缘材料，这层绝缘体又被密集网状导体所环绕，网外覆盖一层保护性塑料。

同轴电缆具有高带宽和极好的噪声抑制特性。同轴电缆是计算机网络应用很广的一种传输介质。分为 50Ω 基带同轴电缆和 75Ω 宽带同轴电缆两种。基带同轴电缆又分为细缆和粗缆。

(3) 光缆。光缆是一种用光传输信号的介质，分为多模光纤电缆和单模光纤电缆二种。一根光缆可有多条光导纤维，即多芯光缆。单心光纤的横截面如图 4-8-10c 所示。光缆比其他通信介质有更多的优点：

- 1) 体积小、重量轻、高强度和高灵活性；
- 2) 传输频带宽、容量大；
- 3) 传输损耗低；
- 4) 抗干扰能力强；
- 5) 安全性高；

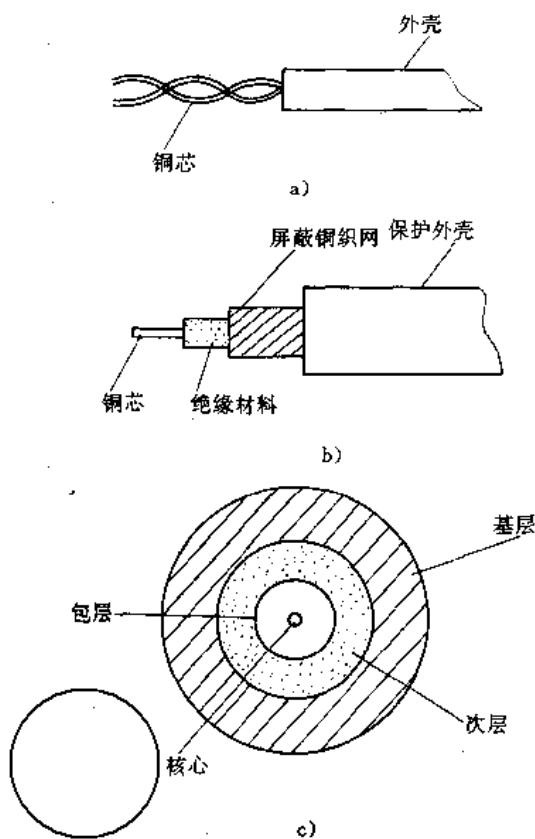


图 4-8-10 局域网的通信介质

a) 双绞线 b) 同轴电缆 c) 光缆

6) 适用相对高温作业。

2. 线路辅助设备

(1) 电缆连接器。用于将两段相同粗细，或粗细不同的电缆进行连接。

(2) 终结器。用来匹配同轴电缆的电气特性，终结器的电阻提供一个终端阻抗，其数值等于同轴电缆的特征阻抗，以抵消电缆端束的任何反射。

(3) 光电转换器。当同一网络中具有同轴电缆和光缆两种介质时，就必然存在电信号和光信号转换的问题，光电转换器是必不可少的。

3. 网络接口设备

(1) 网络接口板。网络接口板是一块插件板，插在主机的扩展槽上，当作主机与外部设备的接口。它具有以下功能：

1) 完成和站点主机总线的连接，接收主机发送来的各种控制命令，通过网络收发器实现和网络的连接，接收网上信息，然后送往站点主机。

2) 实现物理层和数据链路层的大部分功能，如数



据包的发送和接收、数据包的格式形成、数据的差错校验等。

3) 提供与以太网标准网络收发器相容的信号。

(2) 收发器。收发器把数据链路控制器和同轴电缆连接起来,收发器接口可以在同轴电缆与控制器之间传递数据,并指出碰撞的存在。

收发器分为内部收发器和外部收发器,内部收发器是指附在网络接口板上的,外部收发器是专门的收发器,用于粗缆连接。细缆连网时不需专门的收发器。

(3) 收发器电缆。收发器电缆是一种特制的4芯电缆线,用于收发器和网络接口板的连接。收发器电缆的最大长度一般为50m。

4. 终端连接设备 终端服务器提供了终端与主机相连的一种有效方式,多台终端直接或通过调制解调器与终端服务器相连,用户可根据需要登入网络中的机器,这样终端为网络中所有主机所共享。

4.2 网络互连

一些独立的、相隔一定距离的相同的或不同局域网之间的连接,称为网络互连。不管网络的硬件、软件、协议有多大差别,网络上的用户都可以与另一个网络上的用户相互交换信息。

1. 网络互连技术 虽说OSI是计算机网络互连的标准,但非OSI系统的数量非常大,所以,异种网络、异种协议的并存,给计算机网络的互连带来了很大的困难。目前,通常采用三种方法进行计算机网络互连。

(1) 向某一主网络靠拢,互连时采用主网络协议进行通信,各子网内部通信时,依然运行子网本身的协议。所谓主网络,是指互连网中规模最大、最具重要性的网络。

(2) 使用网关互连。各个网络相互使用网关,进行协议的转换,从而达到网间相互通信的目的,此种方法的缺点是,当异种网数量增多时,网络互连会发生困难。

(3) 采用TCP/IP。目前,TCP/IP不但是局域网流行协议,而且也是网间互连的主流技术。众所周知,TCP/IP不是标准,但由于其技术的成熟,TCP/IP已成为网络界默认的标准。TCP/IP和OSI的关系,就象是英语和世界语的关系,虽然语言学界普遍认为世界语会最终成为人们相互交流的公用语言,但事实上,英语的普及和流行程度远远超过世界语。所以,采用TCP/IP进行网络的互连是目前网络互连的主流。

2. 网络互连设备 中继器、桥接器、路由器和网关是网络互连的关键设备,其功能与OSI模型的对应关系如图4-8-11所示。

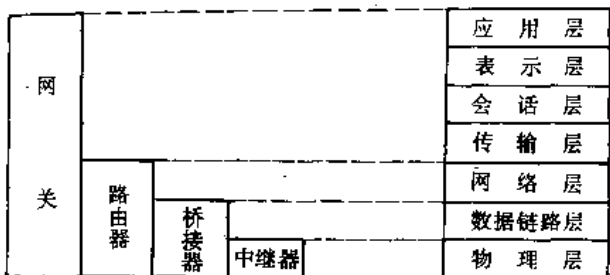


图4-8-11 网络互连设备的功能与OSI模型对应关系

(1) 中继器。一种用于信号放大,使之传输更远距离的设备。显然可用于两根电缆间的连接,只工作在物理层,主要缺点是放大信号的同时也放大了噪声。各种不同的介质有各种不同类型的中继器,有的中继器可实现不同种介质的转接和信号转换。

(2) 桥接器。桥接器工作在物理层和数据链路层,除了具有中继作用,更重要的是用于隔离和转发报文分组,使各个子网既相互独立,又相互连接。报文分组经过桥接器时,桥接器首先判断其目的地是否在子网以外(即是否需要穿过桥接器),若需要,则桥接器对其进行转发;否则,抛弃此报文分组,从而对网络交通进行了控制。

(3) 路由器。路由器完成了OSI模型下三层的某些功能,重要的是它能在几条网络路径中决定选用哪条来传送信息。路由选择有静态和动态两种,静态是通过查找固定的路由选择表来实现,动态路由选择能根据网络的流量、拥挤状况,通过一定算法,动态地给出信息的最佳传送路径。

(4) 网关。网关是用于不同计算机网络连接的设备,它的功能涉及到了OSI模型七层的内容;实现两个不同网络协议间的转换,将一个网络的报文分组以另一种网络能理解的形式传送到另一个网络。

网关是一个功能最强、最复杂的网络连接设备。

5 几种常见局域网系统

5.1 Novell网

1. Novell网概述 Novell网是泛指安装Netware系统的网络,Netware网络操作系统是Novell公司的先进网络软件产品,它是对网络硬件透明的多用户、多



任务网络操作系统软件,支持包括了 3+网、Token Ring、PLAN 网等在内的 200 多种网络产品,是当今国际上非常流行的局域网产品,在世界微机市场的占有率已达 50% 以上,在美国本地占有率达 70%。

Netware 产品从宏观上分为两类: Portable Netware 和 Native Netware。Portable Netware 面向小型机和大型机,而 Native Netware 面向微机,两类产品在功能上兼容。

近两年来,Novell 公司先后推出了 Advanced Netware 2.15, Netware 386 3.10 和 Netware 386 3.11 三个新版本,2.15 和 3.11 版用于 286、386 及 486 的局域网,且低版本可容易地升到高版本。目前,Netware 386 3.12 是 Novell 公司推出的版本最新、功能最强、最优秀的网络产品。

2. Netware 的特点 Netware 具有以下特点:

(1) 使用方便。DOS 的所有命令在 Netware 操作系统下仍然使用,而且 DOS 环境下的应用程序可以不加修改地引入网络。

(2) 安装容易。只需十几分钟便可使一台微机变成网络服务器,而网络工作站的安装就更容易。

(3) 支持多达 85 种以上局域网网卡,实现同一高层协议与多种低层协议的连接。

(4) 具有良好的并发处理能力。

(5) 具有多级容错技术和安全保密措施,增强了网络的可靠性和安全性。

(6) 采用开放性技术协议(OPT),允许多种协议并存、实现异种机互连和异构网通信。

3. Netware 对网络环境的要求 不同的 Netware 版本,对环境要求不尽相同,我们仅以 Netware 386 3.11 进行说明。

a. 对网络服务器要求 IBM PC/AT、286、386、486 及其兼容机。内存: ≥4MB。磁盘: ≥30MB。操作系统: 对标准结构文件服务器, DOS3.1 及以上版本; 对微通道文件服务器, DOS3.3 及以上版本。

b. 对网络工作站要求 IBM PC/XT, AT 或兼容机, IBM PS/2 (任何型号)。内存: ≥1MB。磁盘: 视具体情况而定。操作系统: DOS3.0 或以上版本。

c. 对网络硬件设备要求

(1) Novell Ethernet。支持网卡: NE1000, NE2000, NE/2, NE3000。具体要求如表 4-8-10 所示。

(2) 3Com Ethernet。支持网卡: 3C501、3C503、3C505、3C523。表 4-8-11 描述了 Netware 对其具体要求。

表 4-8-10 Netware 对 Novell Ethernet 的限制

| 技术特征 | 细缆以太网 | 粗缆以太网 |
|------------------|---------|---------|
| 干线最大数 | 5 (3+2) | 5 (3+2) |
| 最大干线电缆长 | 185m | 500m |
| 网间最大距离 | 925m | 2.5km |
| 收发器或 T 型连接器间最小距离 | 0.5m | 2.5m |
| 每段干线电缆的最大站点数 | 30 | 100 |
| 收发器电缆最大长度 | 无 | 50m |

表 4-8-11 Netware 对 3Com Ethernet 的要求

| 技术特征 | 细缆以太网 | 粗缆以太网 |
|------------------|---------|--------------------------------------|
| 干线最大数 | 5 (3+2) | 5 (3+2) |
| 最大干线电缆长 | 300m | 用 IEEE 收发器, 500m 用 3Com 收发器, 100m |
| 网间最大距离 | 1.5km | 2.5km |
| 收发器或 T 型连接器间最小距离 | 1m | 2.5m |
| 每段干线电缆的最大站点数 | 100 | 100 |
| 收发器电缆最大长度 | 无 | 50m |

(3) IBM Token Ring。对标准总线的计算机,支持的网卡有: PC adapter, 16/4 adapter 和 PC adapter I。对微通道结构的计算机,支持的网卡有: PC adapter/A, 16/4, adapter/A。

技术限制:

- 1) 站点最大数目: 96
- 2) 8288 (多站访问部件) 的最大数: 12
- 3) 8288 间最小距离: 45m
- 4) 8288 和站点间最大距离: 45m
- 5) 连接所有 8288 的最大连接电缆距离: 12m

(4) PC net 基带网。

基本的基带网支持 2~8 个站点,并限制总的网络电缆长度,该长度依站点多少而定,见表 4-8-12。

另外,网络的一端必须用一个 8 线端接器插塞端接,另一端上回绕插塞。

扩展的基带网具体要求是:

- 1) 最大站点数: 80
- 2) 站点间最大距离: 500~650ft
- 3) 每条站点链的一端必须用一个 8 线端接器插塞端接。



表 4-8-12 基本基带网站站数
与最大距离的限制

| | | | |
|-----|-------------|-----|-------------|
| 站点数 | 站点最大距离 (ft) | 站点数 | 站点最大距离 (ft) |
| 2 | 300 | 6 | 225 |
| 3 | 275 | 7 | 200 |
| 4 | 250 | 8 | 200 |
| 5 | 225 | | |

4) 另一端必须插入到基带扩展器的一个“IN”端口中。

5) 一个回绕插塞和一个端接器插塞必须插入到该基带扩展器上的两上“OUT”端口中。

4. Netware 的结构及工作原理

(1) Netware 结构及协议如图 4-8-12 所示。其中:

| | |
|-------|----------------------------------|
| 应用层 | Netware 服务及服务器应用 |
| 服务协议层 | Netware Streams |
| 通信协议层 | IPX/SPX, Apple Talk, TCP/IP, OSI |
| 链路支持层 | 开放链路数据接口 (ODI) |
| 驱动程序层 | |
| 硬件层 | |

图 4-8-12 Netware 结构及协议

1) ODI 是 Apple 公司和 Novell 公司创建的一种标准接口,它支持不取决于介质和通信协议的通信,从而允许 IPX/SPX, TCP/IP 和 Apple Talk 等多种传输协议在无冲突条件下共享同样的驱动程序和网络接口板。

2) IPX (网际报文分组交换) 和 SPX (顺序报文分组交换) 是两个网络接口板专用协议。

3) Streams 接口用于 Netware 操作系统和传输协议之间提供一个公用接口,允许一个单独的文件服务器不管使用什么传输协议都通过网络提供相同的服务组合。

4) Netware 服务面向服务器的服务,提供共享信息,共享应用程序和其他网络资源。

(2) Netware 工作原理如图 4-8-13 所示。

5. Netware 技术特征 Netware 的主要技术特征有:

(1) 一台文件服务器可带十几台工作站。

(2) 一台打印机服务器可支持 16 台打印机并且能对 8 个文件服务器上的打印队列进行服务。

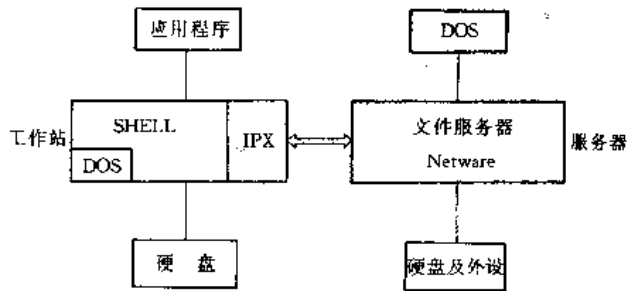


图 4-8-13 Netware 工作原理

(3) 文件服务器可支持多达 4GB 内存和 32TB 的磁盘存储空间。

(4) 文件服务器上至多包含 64 个卷。

(5) 可同时打开 10 万个用户。

(6) 可并发连接 250 个用户。

(7) 支持稀疏文件。

6. Netware 的功能

(1) 文件服务:可共享文件服务器信息,允许工作站用户对文件进行传输、拷贝、访问和管理。

(2) 打印服务:网络上任何用户可共用打印服务器,一台打印服务器可对 8 个文件服务器上的打印队列进行服务。

(3) 存储转发服务:亦即电子邮政,只不过是用户通过服务器传递信息。

(4) 提供数据共享支持:Netware 提供一 Etrieve 记录管理系统,但使用者较少。人们更习惯使用 Dbase Plus 和 Informax Plus。

(5) 资源管理和内存管理:采用最先进的共享硬盘和管理技术,支持扩展内存外壳,使 Netware386 可寻址高达 4GB。

(6) 网络管理:通过运行一些可装载模块和实用程序对网络的资源、运行状态等进行监控、记帐和测试。

(7) 支持 TCP/IP:通过对工业标准协议 TCP/IP 的支持,使其能与小型机、大型机互联,同时提供网络互连。

5.2 3+ 网

1. 概述 3Com 公司的 Ethernet 有两个系列: EtherSeries 和 3+。

1982 年,3Com 按照 Xerox 的 Ethernet 标准,推出了第一个局域网操作系统 EtherSeries。

1985 年,3Com 又在 EtherSeries 基础上推出了新



的局域网操作系统 3+。3+ 网络在硬件上仍支持 EtherSeries 网络的硬件，但在软件的设计思想上则完全不同。

3+ 网络可以说是一种成熟的局域网。由于许多原因，在我国被选为优选推广局域网，全国安装 3+ 网的单位几千家。目前，3+ 网的较高版本是 1.2 版。

2. 3+ 网的特点

(1) 多用户文件共享。多个用户可并行地工作在同一文件目录中，读写同一目录中的不同文件互不干扰，也允许多个用户同时对同一文件的不同记录进行读写操作，不会发生冲突。

(2) 较高的吞吐能力。主要采取三个措施来防止网络服务器成为影响网络吞吐能力的瓶颈，提高网络吞吐能力。

- 1) 采用数据高速缓存技术；
- 2) 采用目录高速缓存技术；
- 3) 采用电梯调度法进行服务器硬盘的访问。

(3) 具有较强的安全保密性。提供四级保密：入口令、用户级别、目录保密和文件属性。

(4) 支持远程工作站。通过调制解调器和电话线将远地工作站连入网。

(5) 软件安装灵活、使用方便。3+ 网络软件可分开安装，也可集中安装，从而增加了其灵活性。

(6) 适应性和可扩充性强。

3. 3+ 网的网络环境

(1) 网络工作站。IBM PC 系列个人计算机及其兼容机。内存 ≥ 1MB。磁盘容量视具体应用而定。操作系统：DOS3.1 或以上版本。至少一软盘驱动器。

(2) 网络服务器。分为低、中、高三档服务器。

- 1) IBM PC/XT/AT 及其兼容机；
- 2) 3Server 系列服务器；
- 3) VAX 机服务器。

(3) 对网络硬件的要求：支持网卡 3C501、3C503、3C505。表 4-8-13 列出了粗缆以太网和细缆以太网的技术要求。

另外，同轴电缆的每个端点必须装有终端器 (Terminator)，有且仅有一终端器接地。

4. 3+ 网结构及工作原理

(1) 3+ 网络系统采用 XNS (Xerox Network Systems) 体系结构，XNS 协议、3+ 实现及 OSI 模型对应关系如表 4-8-14 所示。

(2) 工作原理。图 4-8-14 清楚地描述了 3+ 网系统的工作原理。其中：MINDS (MS-DOS Internal Net-

work Drive Set)，网络通信协议集。

表 4-8-13 3+ 以太网技术要求

| 规 则 | 细缆网 | 粗缆网 |
|------------|--------|-------|
| 单根电缆最大长度 | 304.8m | 1000m |
| 每根电缆上最多站点数 | 100 | 100 |
| 相邻站点间最小距离 | 1m | 2.5m |
| 收发器电缆最大长度 | 无 | 50m |

表 4-8-14 XNS 协议、3+ 网实现及 OSI 模型对应表

| OSI | XNS | 3+ |
|-----|------------------------------|----------------------------------------------------|
| 应用层 | | 3N, 3F, 3P, 3R, 3Mail |
| 表示层 | 远程调用协议 Courier | DOS3.1, CIOSYS, Redirector |
| 会话层 | 远程调用协议 Couier | NETBIOS |
| 传输层 | 顺序报文分组协议 SPP 报文分组交换协议 PEP | SPP, SYS |
| 网络层 | 网间数据包协议 LDP | IDP, SYS, RID, SYS |
| 链路层 | Ethernet 协议 | ETH, SYS, Token, SYS, ACP, SYS, RPC, SYS, COM, SYS |
| 物理层 | | 网络硬件传输系统 |

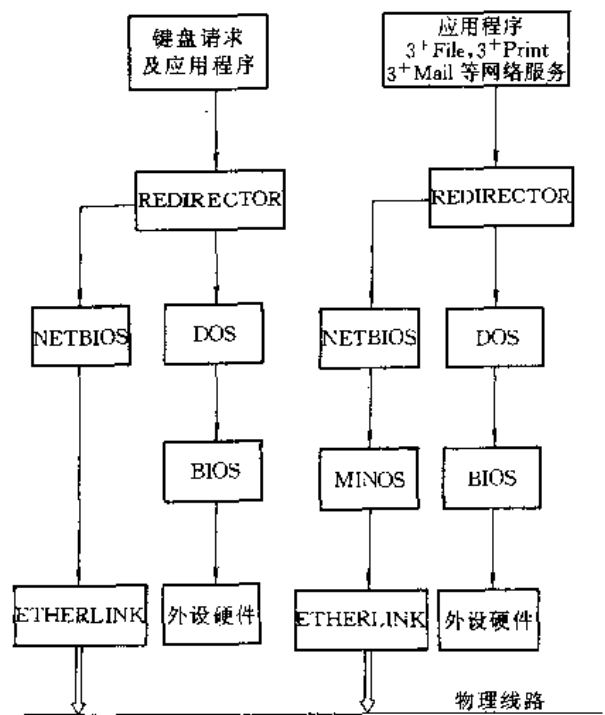


图 4-8-14 3+ 网工作原理

此星公司制作 请尊重原作者版权



5. 3+网系统功能

(1) 文件服务 (3F, 3+Share)。工作站上运行 3F 软件, 服务器上运行 3+Share 软件。3+ 网络文件命令分三类: 服务器用户命令、管理员用户命令和普通用户命令, 表 4-8-15 列出了主要的三种命令及其功能。

表 4-8-15 文件服务主要命令表

| 命令类 | 命令名 | 功能 |
|---------|-------------|------------------------------|
| 服务器用户命令 | 3F SHARE | 建立于子目录并设置共享名 |
| | 3F MOD | 修改目录共享名、口令和访问权限 |
| | 3F UNSHARE | 删除共享名 |
| 管理员用户命令 | 3F UNLINK | 解除用户与服务器的共享目录和共享打印的连接 |
| | 3F SHUTDOWN | 关闭文件和打印服务 |
| 普通用户命令 | 3F LINK | 将工作驱动器、标识符与服务器磁盘的共享目录连接起来 |
| | 3F UNLINK | 断开工作站上指定驱动器标识符与共享目录或私人目录之间连接 |
| | 3F SHARE | 为目录设置共享名, 使之可供网上其他用户使用 |
| | 3F MODIFY | 修改共享目录名的口令和访问权 |
| | 3F UNSHARE | 删除指定共享名 |
| | 3F HELP | 显示 3F 命令的说明信息 |
| | 3F LOGIN | 在文件服务器提示符下入网 |
| | 3F LOGOUT | 退出网络 |
| | 3F DIR | 显示共享名及有关信息 |

(2) 打印服务。用户可以对网络共享打印机进行共享操作, 并对假脱机到共享服务器上的任务进行管理。打印服务的主要命令及功能如表 4-8-16。

(3) 电子邮件服务。

- 1) 接收网络用户发来的邮件;
- 2) 读取;
- 3) 打印和保存;

- 4) 编辑;
- 5) 发送、答复或转发;
- 6) 删除。

表 4-8-16 打印服务主要命令表

| 命令类 | 命令名 | 功能 |
|---------|-------------|------------------------|
| 服务器用户命令 | 3P SHARE | 为打印机设一共享名 |
| | 3F MOD | 修改共享打印机口令 |
| | 3P UNSHARE | 删除共享打印机名字 |
| 管理员用户命令 | 3P UNLINK | 解除指定用户与共享打印机及共享目录的连接 |
| | 3P STOP | 停止指定共享打印机的操作 |
| | 3P SET | 设置假脱机打印文件的项目 |
| | 3P RESUME | 恢复打印 |
| | 3P DELETE | 从打印队列中删除打印文件 |
| | 3P SHUTDOWN | 关闭文件和打印服务 |
| 普通用户命令 | 3P LINK | 工作站单机上的打印机标识符与共享打印机的连接 |
| | 3P UNLINK | 解除工作站上打印机标识符与共享打印机的连接 |
| | 3P DIR | 显示共享打印信息 |
| | 3P STAT | 显示服务器上的用户及打印机状态 |
| | 3P SET | 设置打印机工作状态或文件参数 |
| | 3P DELETE | 从打印队列中删除文件 |

(4) 名字服务。名字服务是 3+ 网的最大特点之一, 它对网络的用户名和服务器名, 以及其他资源提供集中管理。

名字服务为每个用户和每种资源都提供了一个唯一固定的三段式名字, 用户名、地域名及机构名, 以便对它们进行有效地管理。

5.3 PC net 网

PC net 是 IBM PC 机专用网络, 支持国内或国外其他类型兼容机, AST, Compaq, 长城等。

PC net 有两个产品, PC net 基带网和 PC net 宽带



网。PC net 宽带网是 IBM 于 1984 年推出的新产品。

1. PC net 基带网

(1) PC net 的主要技术特征

- 1) 总线型拓扑结构。
- 2) 采用 CSMA/CD 信道访问技术。
- 3) 采用 75Ω CATV 同轴电缆。
- 4) 传输速率: 1Mbps。
- 5) 网络最大覆盖范围, 不需中断器: 1.7km; 用中断器: 6.5km。
- 6) 网络逻辑寻址能力: 223 台工作站。

(2) PC net 特点和功能。网络上节点分两类: 共享 PC (SPC) 和用户 PC (UPC), 分别相当于 Novell 或 3+ 网的服务器和工作站, 但不同的是 SPC 和 UPC 在网上都有一个唯一的标识号 (ID)。

显然, PC net 的最大特点是不需要专用服务器 (因用户既可共享 SPC, 又可共享 UPC), 所以网络上互连的任何二台 PC 均可安装成 SPC, 从而大大增加了灵活性和可靠性, 降低了工作站成本。

SPC 可以是资源共享中心, 执行服务台 (共享打印机) 和独立工作站三者的总和。

PC net 功能如下:

1) 文件共享 (虚拟体)。通过将 SPC 共享硬盘划分成虚拟驱动器 (或称虚拟体) 来实现文件共享, 它们可以是共用的, 也可以是专用的。

2) 磁盘资源共享。包括硬盘、软盘驱动器和 RAM 的共享。

3) 文件锁定。提供两级文件锁定: DOS 命令级和应用软件级。

4) 远程命令执行。允许 UPC 发送 DOS 命令给 SPC, 让 SPC 按照一定顺序自动执行这些命令。

5) 共享打印和脱机打印。

6) 利用串行通信口和 Modem, 支持远程工作站连接。

7) 电子邮政和屏幕会话。

2. PC net 宽带网 PC net 宽带网传输速率为 2Mbps, 仍采用 CSMA/CD 信息访问技术。但其实现要比基带网复杂得多。

PC net 宽带网主要由下列部件组成:

- 1) 网络适配器。
- 2) 网络翻译器 (Translator Unit)。
- 3) 网络连接部件。
- 4) 基本扩展器。

5) 重调制器。

在应用上, PC net 宽带网引入了专用服务器, 从而增强了共享的集中性。

6 计算机网络的应用

6.1 基本网络功能

计算机网络具有通信和资源共享两大功能, 但具体说来, 每个计算机网络都具备表 4-8-17 所示的基本功能。

表 4-8-17 计算机网络基本功能

| 序号 | 功能 | 说明 |
|----|-------------|---------------------------------|
| 1 | 文件传输 | 进行文件的传送和远程拷贝 |
| 2 | 文件访问和管理 | 对远程文件进行读、写、删、改等操作 |
| 3 | 虚拟终端 (远程登录) | 用本地终端登入到另外的机器上, 就好像终端直接与远地主机相连 |
| 4 | 电子邮政 | 方便地进行编辑、发送、读取和维护简短消息 |
| 5 | 共享打印 | 不同机器共用网络上的打印机 |
| 6 | 网络管理 | 对网络的硬、软件进行监控、测试、性能调整等, 确保网络正常运行 |

另外, 多数网络还具有以下功能:

(1) 名字服务。对一个规模较大的网络来说, 单靠文件的方式对节点信息、文件信息及用户信息提供用户服务和进行系统的维护是十分不便和困难的, 许多网络都采用名字服务来集中、统一管理网络资源, 提供更方便的网络服务。

(2) 远程过程调用 (RPC)。远程过程调用实质上就是不同机器的进程通信, 被调用的过程和调用者在不同机器上, 允许一个程序调用另一过程, 等待此过程完成, 并继续程序的运行。

(3) 网络文件的传输, 访问和管理可使用户共享远程文件, 但这种应用对用户来说是不透明的, 即用户可能频繁来往于本地和远地之间操作。网络文件系统可以将远地主机的某一或多个文件系统挂到 (mount) 本地主机, 挂到本地主机的文件系统就象是本地主机自己的, 用户可十分方便地使用。



6.2 分布式处理

分布式处理是计算机网络的一个特殊应用,包括分布式数据库系统、分布式计算和分布式操作系统三部分。

1. 分布式数据库 分布式数据库是当前数据库领域一个很新的课题,但目前还没有任何一个数据库制造商实现真正的分布式数据处理功能。

由于可靠性、机器容量等原因,同一应用系统的数据被分别存放在不同地点的机器内,而非同一机器上。怎样充分、合理地使用这些分布的数据,就是分布式数据库的任务。如数据的并发控制,访问和管理等问题会比一般的数据库更复杂、更困难。网络是分布式数据库的基础。

2. 分布式计算 分布式计算的思想是:当某一问

题计算量很大,超过机器工作负荷时,可将问题分小,交给其他机器分别处理,然后由一机器统一协调,完成整个计算任务。

分布式计算有五种不同的模式,它们分别是:分层模式、CPU超高速缓冲存储器模式、用户服务模式、公用处理机模式、数据流模式。

3. 分布式操作系统 在一个较大型的网络中,显然不希望要求每个网络用户在每个机器上都有一帐号、每个用户学会每个机器上的操作命令,甚至用户能全面管理诸程序和数据的分配。因此,必须有网络范围的操作系统,用统一的方法去管理数据和计算机。

网络操作系统是其中的一种实现方法,它虽不完美,但却容易实现,且能保持现有的软件运行环境。另一种方法是抛弃现有的操作系统,重新建立专门的分布式操作系统。目前,分布式操作系统还未达到实用阶段。

第9章 电子计算机病毒

1 计算机病毒的概念

计算机病毒已经形成一门属于计算机安全领域中新兴的学科,即计算机病毒学。它是一门专门研究计算机病毒的产生、活动机制、传染机制以及计算机病毒免疫和防治的科学。目前对计算机病毒的定义有多种不同的方法,但是在给计算机病毒下定义时,应注意能考虑到以下几个方面:

(1) 含有计算机病毒的指令集合可以是不同的形式。它可以含有软件中的程序指令、硬件指令,远程通信中的控制字符、参数,或作业控制语言。病毒的定义不应仅仅局限在用于传送病毒的任何特殊介质这一点上。

(2) 计算机病毒的定义不应局限于病毒所采取的繁殖形式。病毒可以在几个或多个软件系统中进行自我复制,但病毒可能复制与先前版本形式不同或内容不同的指令集合。

(3) 有些计算机病毒安全专家试图根据病毒所造成的危害程序而对良性及恶性病毒进行区分。然而,病毒很容易发生变异,所以,良性病毒常常会转化为恶性病毒,而且后果更为严重。

(4) 计算机病毒应与程序出错或程序故障区分开来。按照程序出错的定义,程序出错并不是蓄意造成

的,而计算机病毒则总是蓄意造成的。

(5) 定义的广泛适应性。按照病毒的原意,病毒应该是具有传染能力和破坏能力,并驻留于计算机系统使用的存储媒介中的一种程序,所以,病毒应该是广义的,而不是狭义的。

(6) 定义的时间延续性及其发展性。作为一个新事物的定义,其名称应是一类事物的一个统一的术语,而其定义的内容应包括这类事物的本质。所以在一定的时间内应具有一定的广泛适应性。其内容应反映事物发展的规律。

综上所述,作为计算机病毒的一个定义必须能够充分地描述计算机病毒的潜伏性、复制性、传染性和破坏性,而应该绝对抛开某一特定计算机病毒的特性,这样才能客观地定义计算机病毒的概念。但无论怎样定义都必须肯定这样一个事实,即计算机病毒实际上是一种程序。

因此,计算机病毒的科学定义应是:计算机病毒是隐藏在计算机系统的数据资源中,利用系统数据资源进行繁殖并生存,能影响计算机系统正常运行的并通过系统数据共享的途径进行传染的程序。

2 计算机病毒的结构

从目前出现的计算机病毒以及科学分析之后,可



以发现,所有计算机病毒都应该由传染模块和表现及破坏模块两部分组成。而计算机病毒的传染模块包括传染条件判断段和传染段两部分;计算机病毒的表现及破坏模块包括了表现及破坏条件判断段和表现及破坏段部分(见图4-9-1)。

计算机病毒的传染模块也称为计算机病毒的载体模块,即它是计算机病毒表现及破坏模块的载体。计算机病毒的表现及破坏部分是计算机病毒的主体模块。

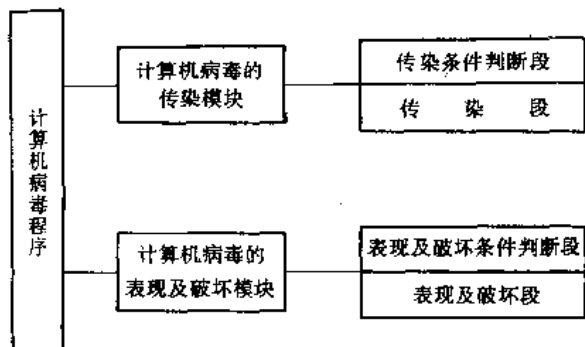


图 4-9-1 计算机病毒的结构

3 计算机病毒的分类

计算机病毒的分类方法很多,现有的分类方法有:

1. 按计算机病毒的攻击对象分类 分为三类:

(1) 攻击 IBM PC 机及其兼容机的病毒:这类病毒出现的最多,变种也最多,版本更新也较快。目前我国出现的计算机病毒基本上都是攻击 IBM PC 机及其兼容机的病毒。

(2) 攻击 Apple 系列机的病毒:目前出现的攻击 Apple 公司 Macintosh 机的病毒有 Scroce 病毒、NVIR 病毒及 Nacag 病毒等。

(3) 攻击 Unix 大家族的计算机病毒:由于目前 Unix 操作系统的广泛应用,攻击 Unix 大家族的计算机病毒也已出现。

2. 按计算机病毒攻击的机型分类 分为 3 类:

(1) 攻击微型计算机的病毒:这是世界上传染最广泛的计算机病毒。

(2) 攻击小型机的计算机病毒:由于网络的广泛应用,作为计算机网主机的小型机也已受到病毒的攻击。

(3) 攻击工作站的计算机病毒:由于工作站的应用越来越多,攻击工作站的病毒威胁很大。

3. 按计算机病毒的寄生方式分类 分为 4 类:

(1) 蠕虫程序。系指一种入侵计算机并使其失去

作用的一种程序。

(2) 特洛伊木马。它是一个古老的计算机安全问题,系指一种虽可执行正常功能,又可同时执行一些额外(通常是恶性)作用的程序。

(3) 细菌:细菌是指可不断在系统上传染自身,以占据计算机系统存储器的程序。

(4) 病毒:病毒是指一种可以通过自身传染机制把病毒自身链接于系统正常运行的程序之上,并在该程序执行时,有类似特洛伊木马那样的破坏作用的程序。

4. 按计算机病毒的链接方式分类 分为 4 类:

(1) 源码病毒。这种病毒攻击高级语言编写的程序。

(2) 入侵型病毒。它是将其自身侵入到现有程序之中,实际上是把计算机病毒的主体程序与其攻击的对象以插入的方式链接。一旦这种病毒侵入到一个程序,则变成合法文件的一部分,对其进行删除是非常难的。

(3) 操作系统病毒。这种病毒在运行时,用自己的逻辑部分取代部分操作系统的合法程序模块,根据病毒自身的特点和被代替的操作系统中的程度、在操作系统运行中的作用与地位以及病毒取代操作系统文件的方式等,对操作系统部分进行破坏,可以导致系统的瘫痪。

(4) 计算机外壳型病毒。这种病毒是将其自己包围在主程序四周,对原来的程序不作修改。

5. 按计算机病毒的破坏情况分类 分为 2 类:

(1) 良性计算机病毒。这类病毒是指那些只表现自己而不破坏系统数据并使系统瘫痪的一类计算机病毒。但这种病毒在一定程度上对系统也有破坏作用或副作用。

(2) 恶性计算机病毒。这类病毒的目的在于人为地破坏计算机系统的数据,其破坏力和危害极大。

6. 按计算机病毒的传染方式分类 分为 3 类:

(1) 磁盘引导区型传染的计算机病毒。这类病毒主要是用计算机病毒的全部或部分逻辑来取代正常的引导记录,而将正常的引导记录隐藏在磁盘的其他存储空间内,或进行保护,或不进行保护。由于磁盘的引导区是磁盘能正常使用的先决条件,所以这种病毒可在运行的一开始(如系统的启动、软盘的启动引导)就获得控制权,其传染的可能性较大。引导区传染的计算机病毒就目前来说是较为广泛的病毒,相对而言,其诊治方法也较为简单。



(2) 操作系统型传染的计算机病毒。操作系统是任何一个计算机系统能够得以运行的支持环境,它包括许多可执行程序及程序模块。操作系统型计算机病毒就是利用操作系统中所提供的一些程序及程序模块而寄生和传染的计算机病毒。这种计算机病毒和操作系统中的某些程序或程序模块进行链接。被传染的系统在运行操作系统的程序或程序模块时,计算机病毒获得控制权,并驻留内存,监视系统的运行和寻找可传染的寄宿主程序以进行传染。这种病毒目前已广泛存在,威胁极大。

(3) 一般应用程序传染的计算机病毒。这类病毒是以一般应用程序如电子表格软件、电子排版软件以及由各种计算机高级语言编写的用户程序等为攻击对象的计算机病毒程序。这种程序与一般应用程序通过链接而寄生并在被传染的应用程序执行时获得控制权,且驻留内存并监视系统的运行,寻找可以传染的对象进行传染。这类病毒传染极广。

以上这三种以传染方式分类的计算机病毒,实际上可归纳为两大类:一类是引导区型传染的病毒;另一类是可执行文件型传染的计算机病毒。

4 计算机病毒的防范

对于计算机病毒的问题,应以预防为主方针,在预防方面一是加强行政管理;二是采取必要的技术防范措施。

1. 对计算机病毒的预防要加强行政管理 要制定一套有效的安全计划。在制定有效安全计划时应包括以下内容:

a. 安全计划是否有效

(1) 要制定出一套覆盖所有机型(如主机系统、个人机和外部设备)的综合安全措施,并根据设备改变随时修改。

(2) 要明确安全责任。

b. 要保护关键计算机资源 在确定关键计算机资源后,要采取必要的保护措施,应考虑以下几点:

(1) 要有有效地存取控制。

(2) 所有关键计算机资源均被存取控制所保护。

(3) 在网络中对非授权插入作出保护。

(4) 对个人机数据作出保护。

(5) 对计算机中使用的软件种类作适当限制。

(6) 对可能的病毒入侵作应急的处理。

(7) 为了恢复被病毒感染的数据,对重要数据和软件要作适当备份。

c. 在实践中要采取妥善的安全措施

(1) 在安全计划中工作人员要受到较好的安全训练。

(2) 全体工作人员应有较高的计算机道德(如不拷贝软件)。

(3) 工作人员应能认识到病毒攻击的初始症状(如系统异常死机),应知道如何对付。

(4) 要使安全计划落实到实处,要有有效地措施和合法的行动。

2. 对计算机病毒的预防采取必要的技术防范措施 在制定技术防范措施时,应考虑以下内容:

(1) 培训。在技术、管理和用户方面提高对病毒实质和危害有关的知识的认识。

(2) 计划。在病毒攻击之前和之后要作出阻止和对付病毒感染的计划。

(3) 控制。建立一套规则,用一种实用有效的方式控制进程、使用系统或应用中的可执行程序,来达到减少病毒感染可能的目的。

(4) 标识。当一种异常情况出现后,要分清是病毒还是其他攻击,还是一个错误。如果是病毒,应能识别它的本质,并推荐一种解除方案。

(5) 反应。应能确定被感染的系统,能够追踪染源,并能制止扩散,在反击病毒时作到保护系统和应用。

(6) 重新构造。在让数据、程序和系统重新运行起来时,不引入病毒,重新建立起安全的数据库、系统和应用库。

(7) 评价。要能确定病毒是如何引入到系统、网络、处理器中的,并可以追踪到它的入口点,虽然找到精确的感染似乎是不可能的,但可以关闭感染的潜在通道。

5 反病毒工具

目前国内外流行的反病毒工具有两种:一种是反病毒的工具软件;另一种是反病毒卡。

1. 反病毒工具软件 目前国内外推出了不少反病毒工具软件,各具特色,在我国都得到了应用,现举出几种反病毒工具软件。

a. 我国公安部开发的解病毒软件 我国公安部最新开发的解病毒软件SCAN3.1和KILL V43.01。

SCAN3.1可以检查目前流行的500余种病毒,使用方法简单。该软件可以同时对一个或几个逻辑驱动器进行检查,也可以对指定的目录、指定的文件进行检



查。另外还可以根据用户的要求删去已检查出含有病毒的文件。KILL 43.01 软件在检查出系统或软、硬盘的文件上含有病毒时,立刻消除检查出的病毒。对于那些虽然能检查出来但尚不能消除的病毒,则给出提示,告诉用户已发现了病毒,但是此软件不能消除它。目前该软件可以检查和消除 43 种国内外常见的病毒。使用方便、简单。

b. TURBO ANTI-VIRUS 反病毒软件 该软件是由一直致力于反病毒软件研究的美国 CARMEL 公司开发的一组软件。该软件已经可以查出世界上大多数流行的病毒,查消病毒种类达 160 多种。该软件共含有五个文件,它们是:

TNTVIRUS.EXE 文件。它是一个菜单驱动的清病毒软件包;

TSAFE.COM 文件。该文件以驻留内存的形式监视病毒程序对可执行文件的非法修改和对软、硬盘的非法破坏;

BOOTS SAFE.EXE 文件。是一个以监视主引导区和引导扇区为手段的反病毒程序;

INSTALL.EXE 文件。它负责将该软件装配到硬盘上,并将运行命令加入 AUTOEXEC.BAT 文件,以便从开机时起,就不断地对病毒进行监视;

README.DOC 文件。此文件除了包括对怎样使用该软件包的简单说明之外,还有对 160 多种病毒的介绍,这些病毒都在 TURBO ANTI-VIRUS 防治范围之内。

c. 抗病毒软件 VIRUSCAN 2.0 V54 该软件由美国 McAfee Associates 公司于 1990 年 1 月 2 日发表,它由五个文件组成。

SCAN.EXE 文件。它为病毒搜索软件包;

SCANV54.DOC 文件。是为其进行版本、使用及参数介绍的说明文件;

VALIDATE.COM 文件。是染病文件病情检查的软件;

VALIDATE.DOC 文件。它是说明文件;

VIRLIST 文件。是对搜索对象 60 余种病毒的特性进行列表说明的文件。

该抗病毒软件版本不断更新,深受用户欢迎,在我国国内已得到广泛应用。

d. 病毒防御软件 FLU-SHOT⁺ 该软件是由 Software Concept 公司为 PC 机 DOS 操作系统免受病毒攻击而设计的,它提供了很强的对可执行文件和数据文件保护功能。此软件具有以下功能和特点:

1) FLU-SHOT⁺ 由数据文件 FLU-SHOT.BAT 控制,采取什么方式保护什么文件,都可以由用户自己决定。

2) FLU-SHOT⁺ 能够对所有文件进行读写保护。用户不但能用写保护方式保护可执行文件 .COM、.EXE 及 .SYS, 而且能用读保护方式保护 .BAT, 禁止读取。

3) FLU-SHOT⁺ 能够检查某个用户常用程序,检查方式十分灵活,可以在 FLU-SHOT⁺ 启动时检查,也可以在第一次运行该文件时检查,也可以每次都检查。

4) 由于很多病毒都驻留在内存,因此在程序驻留内存时 FLU-SHOT⁺ 要发出警告。但是在 FLU-SHOT.DAT 文件中登记过的文件驻留内存时除外。

5) 菜单提示,操作方便。

6) FLU-SHOT⁺ 可以在汉字状态下使用。

7) FLU-SHOT⁺ 的监视状态在屏幕右上角用 + 号表示,按热键可以关闭,可不显示。

2. 防病毒卡防治病毒工具 防病毒卡是根据普通软件防治病毒工具的被动性缺点,设计出一种主动预防、根据病毒特性检测病毒的方法。它将防病毒软件所具有的功能由防病毒卡中的程序来完成。

目前我国已有多种防病毒卡,如瑞星卡、华星卡、华能卡、新创卡、卫士卡、柯迪卡、敬业卡、巨斧卡等等。现仅举几例。

a. 瑞星防病毒卡 瑞星防病毒卡不受病毒种类限制,它根据病毒共性所设计,具有很强的广谱性。它还具有加速识别病毒理论和病毒前报技术。对病毒的漏报、误报率大大降低。清除内存病毒和安全运行带毒程序,可以保证有毒程序和无毒程序一样正常工作。

b. 新创智能型防病毒卡 新创防病毒卡是智能型的防病毒卡,它是根据病毒的行为动作的,也就是说,要看准病毒的“作案”才下手。该防病毒卡还能清除内存病毒,使带毒程序可以使用,不危害计算机系统。智能型防病毒卡在联网微机上也卓有成效。普通防病毒卡在网络上对信息传输中的病毒过滤时,对数据传输速度有明显影响,而“新创”卡能保持数据传输不变。

c. 粤安卫士防病毒卡 粤安卫士防病毒卡采用了模糊动态跟踪技术、进程控制技术和软件升级技术。该种防病毒卡特点是多功能、高可靠、全自动、防误报、病毒监测、病毒清除、带毒运行、硬盘保护、操作授权、写盘监视、软件升级等。

d. 柯迪防病毒卡 柯迪防病毒卡采用开放式结构设计,彻底解决了其他卡升级换代困难及检测方式



单一的缺陷。用户可在不更换 EPROM 的情况下,随时增加该卡的防毒性能,免除用户对新病毒防不胜防和不断投资的后顾之忧。此外,它采用人工智能判断的方法,通过多种途径,对所有新旧病毒采取有效的预防措施。它适用网络能力强。无死机现象。

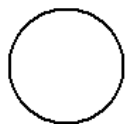
参考文献

- [1] 侯炳辉主编. 计算机原理与系统结构. 北京: 电子工业出版社, 1994 年
- [2] 陈维钧主编. 计算机软件基础. 北京: 电子工业出版社, 1994 年
- [3] 樊孝忠、龚元明. 计算机应用基础. 北京: 北京理工大学出版社, 1994 年
- [4] 徐安东主编. 微机系统与应用基础. 上海: 华东理工大学出版社, 1994 年
- [5] 黄俊杰主编. 电脑知识手册. 北京: 海洋出版社, 1984 年
- [6] 计算机概论编写组编著. 计算机概论. 北京: 高等教育出版社, 1985 年
- [7] 钱培德等. CC-DOS 操作系统技术大全. 北京: 清华大学出版社, 1991 年
- [8] 郑茂松. 中文软件与软件汉化. 北京: 电子工业出版社, 1992 年
- [9] 王爱英主编. 计算机组成与结构. 北京: 清华大学出版社, 1990 年
- [10] 郑纬民. 计算机系统结构. 清华大学出版社, 1992 年
- [11] R. E 马蒂克. 计算机存储系统与技术. 王公吴等译. 北京: 国防工业出版社, 1982 年
- [12] 猎濂博. 计算机系统的高可靠性技术. 尤国峻等译. 北京: 国防工业出版社, 1985 年
- [13] 张宁. 计算机外部设备. 北京: 北京航空学院出版社, 1987 年
- [14] 陈俊良. 电子计算机(外部设备分册). 南京: 江苏科学技术出版社, 1985 年
- [15] 刘筱楨、马文豹、梁伟民、曲春浩主编. 微型计算机系统原理分析与维修. 北京: 科学出版社, 1989 年
- [16] 高传善、郭健民、陈章龙. 接口与通讯. 上海: 复旦大学出版社, 1989 年
- [17] 孙家广、许隆文. 计算机图形学. 北京: 清华大学出版社, 1986 年
- [18] 郑建、刘武克. 电脑硬件原理及维修实用手册. 杭州: 浙江出版社, 1989 年
- [19] HAROLDS STONE 著. 微型计算机接口. 孙贞运、叶成兰、卢显良译. 北京: 清华大学出版社, 1985 年
- [20] 胡宗藻等. 微型计算机外围设备. 北京: 科学出版社, 1987 年
- [21] 郑茂松. 中文软件与软件汉化. 北京: 电子工业出版社, 1992 年
- [22] [美] Anothony Ralston. 计算机科学与工程百科全书. 许镇宇主编. 计算机科学与工程百科全书编译委员会译. 天津: 天津科学技术出版社, 1991 年
- [23] 高仲仪等. 编译原理及编译程序构造. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1990 年
- [24] 郑学坚. 计算机使用手册. 北京: 农业出版社, 1991 年
- [25] 金志权等. 人工智能程序设计. 南京: 南京大学出版社, 1986 年
- [26] 刘佩等. 高技术知识 500 问. 北京: 新时代出版社, 1988 年
- [27] 杜美雄等. 现代 BASIC. 江苏: 江苏科学技术出版社, 1990 年
- [28] [日]情报处理学会. 信息处理手册. 信息处理手册翻译组译. 北京: 机械工业出版社, 1986 年
- [29] 杨德元主编. 软件人员水平考试辅导. 北京: 清华大学出版社, 1988 年
- [30] 刘宾. COBOL 编译程序. 沈阳: 辽宁电子计算机学会, 1984 年
- [31] 孙立方、孟庆昌. C 语言教程. 北京: 中国科学院希望电脑公司, 1988 年
- [32] 赵学训等. 计算机辅助设计/制造集成系统的设计与实践. 北京: 国防工业出版社, 1991 年
- [33] 张福炎. 微型计算机 IBM PC 的原理与应用. 南京: 南京大学出版社, 1988 年
- [34] 韩玉彬. 微机常用数据库手册. 北京: 科学普及出版社, 1991 年
- [35] 杨德明等编译. dBASE N 实用手册. 哈尔滨: 黑龙江科学技术出版社, 1991 年
- [36] C. J. 戴特著. SQL 语言与关系数据库系统 DB2. 潘正伯等译. 北京: 电子工业出版社, 1990 年



- [37] 杨德元编译. 分布式数据库管理系统概论. 北京: 清华大学出版社, 1987年
- [38] [美]阿拉基克. 关系数据库技术. 钱士湘等译. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1989年
- [39] 邵集锋等. Borland C++ 2.0 程序设计指南. 北京: 电子工业出版社, 1992年
- [40] A. S. TANENBAUM, Computer Networks, 1988年
- [41] 李增智. 计算机网络原理. 西安: 西安交通大学出版社, 1991年
- [42] 胡道元. 计算机局域网, 北京: 清华大学出版社, 1990年
- [43] 阎胜天. 局部计算机网络原理与技术. 北京: 高等教育出版社, 1988年
- [44] 冯玉民、邵玉明、王国栋. 数据通信网络设备. 北京: 中国铁道出版社, 1992年
- [45] Telecommunications and Network, Digital Equipment Corporation, 1990年
- [46] 梁振年、梁波. 计算机互联网技术与TCP/IP协议. 北京: 海洋出版社, 1991年
- [47] 顾良士、唐培顺、马启文、高传善、赵桂法、古海. Novell Netware386 技术丛书. 北京: 希望电脑公司, 1991年
- [48] 汪日康、马启文. 计算机局域网技术与应用. 上海: 上海科学普及出版社, 1989年
- [49] 熊成烈等. 计算机网络概论. 西安: 西安交通大学出版社, 1991年
- [50] 黄铭晖、刘宇. 计算机病毒手册. 北京: 航空工业出版社, 1992年
- [51] 正确认识计算机防病毒卡的作用. 庄洪林. 《计算机世界》. 1993年
- [52] “潮起潮落”话“病卡”. 高丽华. 《计算机世界》. 1993年第38期
- [53] 谈计算机防病毒卡宣传的错误导向. 杨立军. 《软件报》1993年第40期
- [54] 陈勇孝、孟树锁. 计算机病毒解析及诊治. 北京: 希望电脑公司, 1993年
- [55] 刘丽华. 现代计算机最新反病毒技术. 上海: 上海科技出版社, 1993年





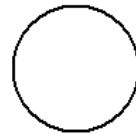
第 5 篇



自动控制理论



主编单位 哈尔滨工业大学
编写单位 哈尔滨工业大学
主 编 王子才
编写人 王子才 张家余 赵长安
主 审 于 渤

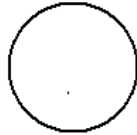


常用符号表

- | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>A——模糊子集</p> <p>$A(u)$——隶属度</p> <p>e——反馈控制系统的误差</p> <p>e_s——稳态误差</p> <p>$e^*(t)$——$e(t)$的采样值</p> <p>$E(s)$——$e(t)$的拉氏变换</p> <p>$E(z)$——$e(t)$的Z变换</p> <p>$f(t)$——函数； 干扰输入，或记作 $n(t)$</p> <p>$h(t)$——单位阶跃响应函数</p> <p>$h(nT)$——离散控制系统的过渡函数</p> <p>$h(z)$——$h(nT)$的Z变换</p> <p>$H(s)$——反馈通道传递函数</p> <p>H——哈密尔顿函数</p> <p>J——指标函数</p> <p>$k(t)$——冲激响应函数，也记作 $g(t)$</p> <p>$k(nT)$——离散控制系统的冲激过渡函数</p> <p>K——放大系数，或增益</p> <p>K_g——增益裕量</p> <p>\mathcal{L}——拉氏变换符号</p> <p>$L(\omega)$——对数频率特性</p> <p>$M(\omega)$——幅频特性</p> <p>M_p——谐振峰值， 也记作 M_r</p> <p>N——次数；个数</p> <p>$N(A)$——非线性描述函数，其中，A 为输入的正弦信号幅值</p> <p>p——传递函数的极点</p> <p>$P(\omega)$——实频特性，也记作 $U(\omega)$</p> <p>$Q(\omega)$——虚频特性，也记作 $V(\omega)$</p> <p>s——拉氏变换变量的符号</p> <p>$S(s)$——灵敏度函数</p> <p>t——时间变量，t_0 为初始时间，t_f 为终端时间</p> <p>t_r——上升时间</p> <p>t_s——调整时间，或过渡过程时间</p> <p>T——时间常数；采样周期</p> <p>$u(t)$——控制作用变量；输入变量</p> | <p>$u^*(t)$——最优控制函数</p> <p>$u(k)$——过程输入序列</p> <p>$u(kT)$——输入脉冲序列在采样点的值</p> <p>$V(x)$——李雅普诺夫函数</p> <p>$W(s)$——系统的传递函数，也记作 $G(s)$</p> <p>$W(z)$——离散控制系统的Z传递函数，也记作 $G(z)$</p> <p>$W(j\omega)$——系统的频率特性，也记作 $G(j\omega)$</p> <p>$W(j\omega)$——幅频特性，也记作 $G(j\omega)$</p> <p>$\angle W(j\omega)$——相频特性，也记作 $\angle G(j\omega)$ 或 $\phi(\omega)$</p> <p>$x(t)$——常用变量； 输入变量，也记作 $r(t)$</p> <p>$x^*(t)$——$x(t)$的离散型函数</p> <p>$X(s)$——$x(t)$的拉氏变换，也记作 $R(s)$</p> <p>$y(t)$——常用变量； 输出变量，也记作 $c(t)$</p> <p>$y(kT)$——离散系统输出脉冲序列 $y^*(t)$在采样点的值</p> <p>$Y(s)$——$y(t)$的拉氏变换，也记作 $C(s)$</p> <p>z——Z变换变量的符号；传递函数的零点</p> <p>Z——Z变换符号</p> <p>$A(t)$——系统矩阵</p> <p>$B(t)$——控制矩阵，也称输入矩阵</p> <p>$C(t)$——输出矩阵</p> <p>$D(t)$——直接传递矩阵；补偿器矩阵</p> <p>$f(x, t)$——函数矢量</p> <p>$G(s)$——开环系统传递函数矩阵</p> <p>I——单位矩阵</p> <p>$K(t)$——卡尔曼滤波器的增益矩阵；系统反馈矩阵</p> <p>$P(s)$——多项式系统矩阵</p> <p>$P(t)$——黎卡提矩阵方程的解阵；系统矩阵</p> <p>$Q(t)$——驱动矩阵；加权矩阵</p> <p>Q_c——鉴别系统可控性矩阵</p> <p>Q_o——鉴别系统可观测性矩阵</p> <p>$R(t)$——加权矩阵</p> <p>$S(t)$——加权矩阵</p> <p>$u(t)$——控制矢量；输入矢量</p> <p>$v(t)$——过程噪声</p> <p>$\omega(t)$——量测噪声；干扰矢量；参考输入矢量</p> |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|



- $x(t)$ ——状态矢量;
 x_c 表示被控对象状态矢量;或可调系统状态
 矢量; x_m 表示参考模型状态矢量
 $x^*(t)$ ——最优轨线,或极值轨线
 $\hat{x}(t)$ —— $x(t)$ 的估计值
 $y(t)$ ——输出矢量;
 $y_m(t)$ 表示参考模型输出矢量
 $Z(t)$ ——观测矢量
 $\delta(t)$ ——单位冲激函数
 $1(t)$ ——单位阶跃函数
 λ ——特征值;寻优过程步长
 ν ——控制系统无差度
 γ ——相位裕度
 σ ——超调量;最大奇异值;输入 x 的灵敏度函数
 η ——输出 y 的灵敏度函数
 τ ——滞后时间;也称作延迟时间
 ζ ——二阶系统阻尼系数;阻尼比
 ω ——角频率
 ω_b ——截止频率
 ω_c ——剪切频率
 ω_k ——谐振频率
 ω_n ——无阻尼自振频率
 ω_d ——阻尼振荡频率
 ω_s ——采样频率
 ϕ ——相位移
 $\Phi(s)$ ——闭环系统传递函数
 $\Phi(z)$ ——闭环系统 Z 传递函数
 $\varphi(\omega)$ ——相频特性
 $\mu_A(u)$ —— A 的隶属函数
 μ ——拉格朗日乘子矢量
 $\psi(t)$ ——伴随矢量,或共态矢量,或协状态矢量
 $\Sigma(t)$ ——估计误差的协方差矩阵
 $\Phi(t_0, t)$ ——系统转移矩阵



第 1 章 概 论

自动控制技术在航空航天、机器制造、生产过程等各个领域都得到了广泛应用，推动了各个领域的技术进步和发展，因此，从技术发展来看，要求有关专业的工程技术人员必须掌握一定的自动控制理论和技术应用知识。

1 控制系统的术语及定义

1. 受控对象 受控制的、完成某一特定动作或行为的设备称为受控对象(或简称为对象)。例如飞机、加热炉、电动机等。

2. 系统 系统是一些元部件的组合。这些元部件组合在一起完成一定任务。系统的概念不限于物理系统，也可以应用于抽象的动态现象，如社会学、经济学中遇到的一些现象。因此，系统的概念除了物理系统，还包含生物学、社会学、经济学中的一些现象。

3. 状态 能完全描述系统行为的一组变量称为状态或状态变量。

4. 过程 在一个设备(物体)上发生的人为的或随意的、连续进行的运行状态称为过程。一般来说，过程是由一系列控制动作构成的有规则的运动。例如飞行过程、化学过程等等。

5. 反馈 将输出端信号能量的一部分送还输入端的过程称为反馈。使输入信号强度增强的称为正反馈；减弱的称为负反馈。

6. 输入量 影响系统行为状态而不受系统状态变量影响的量称为输入量。输入量包括控制输入量和干扰。干扰是妨碍系统正常工作的信号。

7. 输出量 受输入量影响的系统的特定状态变量称为输出量。输出量常称为被控制量。

8. 反馈控制 反馈控制是利用输出量的反馈与参考输入量进行比较，根据其偏差进行控制，并力图减少这个偏差。

2 控制系统的组成及作用

自动控制系统是由具有一定功能的元部件组成，并按技术要求自动地执行，以完成指定任务的系统。不同元部件、元部件的不同组合所构成的系统的控制信号及信号传递方式是不一样的。在特定的控制信号作

用下，系统将完成相应要求的任务。

反馈控制系统随时测量被控制的输出量，并与给定值比较。根据比较所得的误差信号，经变换放大后驱动执行机构，以消除误差，即保持被控制量与给定值间的一定关系。

图 5·1-1 是电动机转速反馈控制系统。受控对象是电动机 M，被控制量(输出量)是转速。执行机构是伺服电动机 SD。这里用一测速发电机 SF 测量电动机的转速。测速发电机输出的端电压 u_{SF} 直接反映了电动机的转速。它们的关系式为

$$u_{SF} = K_{SF}n \quad (5\cdot1-1)$$

式中 u_{SF} ——测速发电机的端电压 (V)；

n ——电动机转速 (r/min)；

K_{SF} ——比例系数。

完成被控制量测量任务的元件或装置称为测量元件或测量装置。把测量得到的电压 u_{SF} 与给定值电压 u_0 进行比较，比较所得的误差值为

$$\Delta u = u_0 - u_{SF} \quad (5\cdot1-2)$$

式中 u_0 ——对应于规定转速的电压给定值。

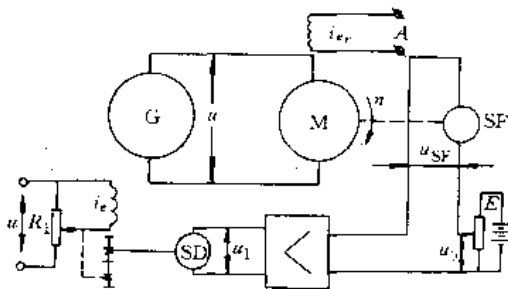


图 5·1-1 速度反馈控制系统

如果 $\Delta u \neq 0$ ，即说明转速偏离了给定值，从而需要进行控制，以使电动机转速尽可能达到给定值，亦即使 $\Delta u = 0$ 。一般情况下， Δu 很小，需要放大，才能推动后续装置。经放大器放大后的电压 u_1 控制伺服电动机 SD 转动，再通过减速器移动分压器 R_1 的滑臂，由分压器 R_1 上取得所需要的励磁电压和励磁电流 i_e ，改变供电发电机 G 的端电压，以使电动机的转速达到要求。

伺服电动机 SD 起着执行控制任务的作用，称为执行元件或执行机构。

反馈控制系统，是由控制对象、测量元件、变换放



大装置及执行机构组成的。反馈控制系统的特点是有反馈过程。反馈信号的引入,使控制系统从输入端到输出端,又从输出端回到输入端,形成一个闭合回路。所以它是一个闭环控制系统。

3 控制系统的分类

按控制系统的组成形式,控制系统可分为:

- (1) 开环控制系统或顺序控制系统。
- (2) 反馈控制系统或闭环控制系统。
- (3) 开环控制与闭环控制相结合的复合控制系统。

开环(顺序)控制系统的控制过程是按时间顺序或逻辑顺序进行的。

反馈控制系统是由反馈信号将控制系统构成闭环回路,随时测量被控制量与给定值或给定的变化规律之间的误差,根据这个误差改变受控对象的输入量以消除误差,这是一个随时都在出现误差,随时都在消除这个误差的运动过程。因此,对于反馈控制系统来说,必须考虑这个动态过程。

构成反馈控制系统的条件是:

- (1) 控制系统中必须引入负反馈;
- (2) 必须构成一个闭环回路;
- (3) 组成控制系统的元件、装置具有单向作用特性,即控制系统的信号是单向传递的。

复合控制系统是兼有开环控制及闭环控制特点的控制系

统。反馈控制系统,根据它所完成的任务不同,可划分为:

- (1) 镇定系统(或称为定值系统)。它的输入信号是常值。
- (2) 程序控制系统。它的输入信号是按已知规律变化的。
- (3) 随动系统。它的输入信号是随机的。

反馈控制系统按其系统特性可划分为:

- (1) 最优控制系统;
- (2) 适应控制系统;
- (3) 鲁棒控制系统;
- (4) 数字控制系统,等等。

反馈控制系统,按组成系统的元部件特性又可划分为:

- (1) 线性控制系统。这类系统的所有组成元件都是线性的。
- (2) 非线性控制系统。这类系统的组成元件中至

少存在着一个或一个以上的非线性元件。

4 控制系统的设计

4.1 设计大纲

设计大纲是设计工作的纲领性文件。它规定了设计任务、设计程序、验收标准等。在调查研究的基础上,在设计工作开始之前首先拟定设计大纲。大纲应包括以下几方面内容:

- (1) 明确受控对象及其控制过程的工艺要求。
- (2) 限定控制系统的工作条件及环境,确定安全保护措施及等级。
- (3) 关于控制方案的特殊要求。
- (4) 经济技术指标。
- (5) 试验项目。
- (6) 验收方式、验收项目、指标。

4.2 设计步骤

关于控制系统的设计,从提出设计技术指标到控制系统投入运行,是一个从理论到实践,再从实践到理论的多次反复过程。因此,很难为设计过程规定一个固定不变的程序,只能大体上给出要经过的几个过程。这些过程对于控制系统设计来说,是共同的、必须的,但它又往往是反复交叉进行的。

1. 建立受控对象的数学模型 受控对象的数学模型是进行控制系统设计的基础。建立对象数学模型的途径有两种:一是解析法;二是实验法。

解析法是根据对象行为的机理及服从的物理定律,利用数学解析方法推导得出数学模型。实验法是根据对象运行过程中测得的有关数据,利用模型辨识技术估计得到数学模型。

在简单的情况或比较理想的状态下,才可能应用解析法得到可靠的数学模型,一般情况下是难以得到精确的数学模型的。利用辨识方法得到的模型是一个等效的模型类,且所建立模型精度受干扰影响。

因此,在建立对象数学模型时,可同时使用两种方法,兼顾两者的优点,便有可能建立较为理想的数学模型。

2. 方案选择 从分析设计任务、技术指标开始,经过调查研究,根据经济效果、技术实验的可能性选择合理的方案。首先应根据控制系统所完成的任务和使用条件提出技术指标和有关设计数据作为系统设计、方案选择的依据,其内容大致包括:



(1) 关于控制系统的用途及使用范围。

(2) 负载情况,包括:1)负载的静阻力(矩)、惯性力(矩)及其它附加力矩;2)要求的(线、角)速度和加速度或被控制量的变化率以及其他形式的负载要求。

(3) 对所采用的元、部件的要求。

(4) 在各种工作状态下,对系统的精度要求。

(5) 对系统动态过程的要求。

(6) 工作条件的要求,包括:1)工作温度、湿度要求;2)冲击振动要求;3)防水、防腐、防爆、防尘的要求。

(7) 关于系统结构、安装的要求。

方案选择就是根据上述基本要求和数据选择合理的系统方案。在方案选择时,要考虑经济效益及实现的可能性,进行反复比较,最后确定。

3. 建立系统框图 在基本方案选择的基础上,根据选定的元部件或设计的元部件,将它们按选定的系统方案结构形式联系起来,构成系统框图。图 5·1-2 是图 5·1-1 所示的速度反馈控制系统的框图。这不是最终的系统框图,因为还要考虑到增加补偿装置、改变控制方式的可能。

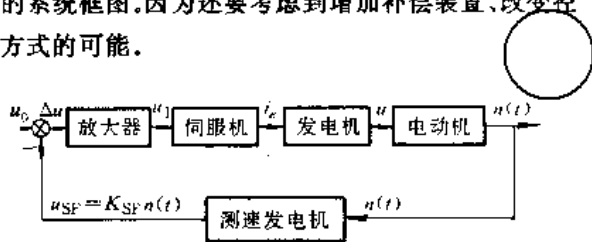


图 5·1-2 速度反馈控制系统框图

4. 静态计算 在控制系统方案初步确定后,首先要进行静态计算。静态计算的主要任务是根据系统的稳态工作要求,选择测量元件、放大变换元件、执行元件的结构、参数,确定系统的放大系数。静态计算中所要确定的参数不仅决定了系统的静态特性,而且也将影响系统的动态特性,因此,应兼顾两者的要求。

5. 动态特性分析及补偿装置设计 在静态计算后,即可进行动态分析计算,以判定系统的稳定性、稳定裕度、动态过程是否符合要求。经过分析计算,若动态特性不满足要求,就必须引入附加装置以改善系统的动态特性。这个附加装置称为补偿装置。

系统静态计算、动态计算有时需要反复交叉进行,直至满足要求。

6. 改变控制方式 在上述工作结束后,如满足控制系统全部要求有困难或不可能时,应重新考虑外干扰、给定信号的测量和处理方法以及与受控对象响应有关的诸量的测量方法、处理方法,满足控制要求的可

能控制方案,如采用干扰补偿、噪声滤波、辅助反馈等措施。

7. 实验与仿真 实验与仿真是验证设计正确性的手段。有些在设计过程中难以考虑的因素,只有在实验中考考虑。实验可在运行现场进行,但更经济的方式是采用仿真方法。仿真可在模拟机上进行,也可在数字计算机上进行。仿真系统中可采用部分实物,组成半实物仿真系统。半实物仿真系统不但可检验设计结果,还可以考核实际元、部件。

5 控制理论的发展与应用

控制理论是从 30 年代奈奎斯特(Nyquist)提出关于反馈放大器稳定性理论后开始发展起来的,到 40 年代采用频率法设计控制系统的理论已经逐渐完善。频率法设计理论的物理概念清楚,使用方便,在工程设计中广泛应用。这种设计理论适应了当时的工程需要。在这个阶段的控制理论所涉及的问题,主要限于线性定常单回路控制系统。对于非线性控制系统的分析设计,只是在线性定常单回路系统中引入一个相对简单的非线性环节,采用类似线性频率法的描述函数法处理。这个阶段的控制理论即所谓的经典控制理论。

随着工业技术的发展,对控制系统的要求越来越高,控制系统也愈加复杂。系统中所要控制的变量由单变量发展到多变量,系统也由单回路发展为多回路的复杂系统。经典控制理论已不能适应复杂工程控制系统的设计要求。另外,经典控制理论的频率法虽然物理概念清楚、适合于工程技术人员使用,但频率特性与系统动态特性的联系是间接的,难以从动态过程角度出发,直接设计控制系统。复杂控制系统的工作环境是复杂的,干扰影响是多样的。这些问题的出现,从实践角度促进了控制理论的发展,从 50 年代后期开始迈入了现代控制理论阶段。

现代控制理论在经典控制理论的基础上发展并丰富了控制理论内容。在现代变分法的基础上,完善了以系统性能指标函数为最优的最优控制系统设计理论。发展了从单回路传递函数的描述中解脱出来的状态空间描述理论,并建立了包括系统可控性、可观性、观测器设计、极点配置、解耦等内容的系统结构理论。建立了受随机干扰的线性系统的以递推形式为特点的滤波方法以及先滤波后控制的分离定理。

随着受控对象复杂程度的增加,控制系统也越来越复杂。如复杂的大工业生产过程、计算机集成制造系统、空间飞行器控制系统、带柔性的机器人等。在这类



系统中,复杂性的特征是多方面的,有系统特性和行为上的复杂性,有不确定性导致的复杂性,也有系统集成和控制中的复杂性。要处理和解决这类复杂系统的控制问题,还要不断地发展和丰富现代控制理论。

考虑系统结构不确定性和参数不确定性,必须使设计的控制系统具有较强的适应能力。在这个背景条件下,发展建立了适应控制理论和鲁棒控制理论。

为了适应系统的不确定性和环境干扰,系统的控制规律也不应该是固定不变的。以人类思维为借鉴,相应地建立了模糊控制理论和智能控制理论。这种新的控制模式是现代控制理论的又一个发展趋势。

生产制造过程中不断提出新问题,这推动了控制理论的发展,而控制理论的不断丰富和完善,控制系统性能进一步提高,又推动了工程技术的进步。现在,自动控制技术已广泛应用于各个工程和非工程领域。

控制理论的应用领域极广,例如,以控制理论为基

础建立的我国人口发展模型,指导了我国的计划生育工作。

以控制理论为基础我国各地区建立的经济发展模型,为各该地区的经济发展,制定经济策略提供了理论依据。

先进的控制技术的应用,使航空航天事业有了空前的发展。

自动控制技术在机器人工业中的应用,使机器人有可能部分地代替人进行各种复杂劳动。

自动控制技术与计算机技术的结合,从根本上改变了现在的工业生产模式,走向了集成制造时代。

在有危害人体健康的环境中进行生产操作的系统,采用自动控制技术就变成了唯一的选择。

总之,自动控制技术的广泛应用,将从根本上推动科学技术的进步。因此掌握自动控制理论,应用自动控制技术是科学技术进步的要求,是时代的要求。

第2章 数学模型

1 控制系统的数学模型

控制系统都是动态系统。控制系统运动的数学描述,如方程式,或其它表示一定数学关系的描述,称为系统的数学模型。

研究控制系统,首要的任务就是研究系统的数学模型。只有恰当地解决了数学模型问题,才可能进行深入分析系统的运动特性或精确设计系统的控制器。

控制系统的数学模型不是只有一种,其形式很多,如微分方程、差分方程、传递函数、冲激响应、频率特性、框图、信号流图等。对于一个具体的系统,在不同的条件下,或研究不同的问题时,所取的数学模型的形式可以不同。另外,对实际系统的数学描述的完善程度不同,也将导致数学模型的各异。例如,对于某一系统,在低频时使用它的集中参数模型是适当的,而在高频时,则需对其模型加以改进,采用较复杂的分布参数模型才行。

控制系统的数学模型,可分为时域的与频域的两类。对于诸多动态系统,都可以采用微分方程或其他形式的时域描述。在一定条件下,微分方程描述可以转化为频域描述。

1.1 传递函数、冲激响应

1.1.1 传递函数

设线性系统微分方程

$$\begin{aligned} & (p^n + a_1 p^{n-1} + a_2 p^{n-2} + \dots + a_n) y(t) \\ & = (b_0 p^m + b_1 p^{m-1} + \dots + b_m) x(t) \end{aligned} \quad (5.2-1)$$

式中 p ——微分算子, $p = d/dt$;

$y(t)$ ——系统输出量,有时也用 $c(t)$ 表示;

$x(t)$ ——系统输入量,有时也用 $r(t)$ 表示;

$a_i (i=1, 2, \dots, n)$ 、 $b_j (j=0, 1, \dots, m)$ 为由系统结构参数决定的常数。

对上式两端在零初始条件下进行拉普拉斯(简称拉氏)变换,并取比值,即得传递函数

$$G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{b_0 s^m + b_1 s^{m-1} + b_2 s^{m-2} + \dots + b_m}{s^n + a_1 s^{n-1} + a_2 s^{n-2} + \dots + a_n} \quad (5.2-2)$$

定义 在零初始条件下,系统输出的拉氏变换 $Y(s)$ 和输入的拉氏变换 $X(s)$ 之比称为系统的传递函数,记为 $G(s) = Y(s)/X(s)$ 。

传递函数具有以下性质:

(1) 传递函数是复变量 s 的有理函数,其中系数



a_i, b_j 均为实数。

(2) 对于实际的物理系统, 传递函数分子和分母的阶次有 $m \leq n$ 。

(3) 传递函数的分母多项式称为系统特征多项式。令

$$s^n + a_1 s^{n-1} + a_2 s^{n-2} + \dots + a_n = 0$$

称此方程为系统特征方程。特征方程中 s 的最高阶次等于系统的阶次。

(4) 将传递函数的分子、分母多项式分解为

$$G(s) = \frac{b_0(s-z_1)(s-z_2)\dots(s-z_m)}{(s-p_1)(s-p_2)\dots(s-p_n)} \quad (5.2-3)$$

称 $z_j (j=1, 2, \dots, m)$ 为系统零点, 称 $p_i (i=1, 2, \dots, n)$ 为系统极点。系统极点的分布对系统的动态性能有决定性影响, 稳定的控制系统所有极点必须位于复平面的左半平面。

(5) 系统的传递函数若没有实部为正的零、极点时, 则称这类系统为最小相位系统; 否则称为非最小相位系统。最小相位系统相对于非最小相位系统而言, 二者在幅频特性相同的条件下, 在全部频率变化范围内, 前者的相位变化绝对值为最小。

(6) 传递函数表征了控制系统(或元件)内在的运动规律。若已知系统的传递函数 $G(s)$, 则在任意输入量 $x(t)$ 的作用下所引起的输出量 $y(t)$ 的拉氏变换可由式 (5.2-2) 求得

$$Y(s) = G(s)X(s) \quad (5.2-4)$$

1.1.2 冲激响应

由于单位冲激函数 $\delta(t)$ 的拉氏变换等于 1, 所以, 在零初始条件下, 系统对单位冲激输入作用的输出量

的拉氏变换为

$$Y(s) = G(s)$$

其拉氏反变换记为

$$k(t) = \mathcal{L}^{-1}\{G(s)\} \quad (5.2-5)$$

定义 在零初始条件下, 系统对单位冲激输入作用的响应称为冲激响应, 也称为权函数, 记为 $k(t)$ 。

冲激响应是时域中系统描述的又一种形式。式 (5.2-5) 表明: 传递函数的拉氏反变换即为冲激响应函数。因此, 就系统的动态特性来说, 传递函数与冲激响应函数所包含的信息是相同的。

对于稳定系统, 冲激响应函数满足如下条件:

$$\begin{cases} \int_0^{\infty} |k(t)| dt < \infty \\ k(t) = 0, t < 0 \end{cases} \quad (5.2-6)$$

其中, 第一个关系式是控制系统的稳定条件; 第二个关系式是控制系统的物理条件, 即在没有加入外作用之前, 系统无输出(初始条件为零时)。

应用冲激响应函数, 可以求得系统在任意形式的输入作用下的输出。设系统输入量 $x(t)$ 从 $t=0$ 开始, 延续到 $t=t_1$, 那么系统输出量

$$y(t) = \int_0^{t_1} x(\tau)k(t-\tau)d\tau \quad (5.2-7)$$

可按下列卷积和的公式做近似计算:

$$y(t) = \sum_{k=0}^{N-1} k(t-n\Delta t)x(n\Delta t)\Delta t \quad (5.2-8)$$

比较式 (5.2-7) 与式 (5.2-8) 可知: 输入量 $x(t)$ 用 N 个连续的冲激量近似表示, 每个冲激量的宽度为 $\Delta t = t_1/N$, Δt 的选取应该使其比系统的最小时间常数小得多。用卷积和求系统输出, 可用图 5.2-1 表示。

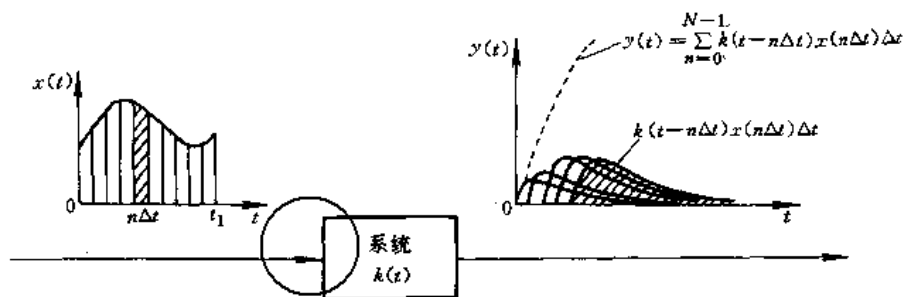


图 5.2-1 用卷积和求系统输出

冲激响应函数可以用实验方法测得。选取实验用的输入冲激面积为 1, 即冲激宽度为 Δt 、冲激幅度为 $1/\Delta t$, 改变 Δt 的值直到系统响应无显著区别时止, 此

时的输出可认为是系统的冲激响应。

图 5.2-2 示出了一阶系统在冲激信号作用下的响应曲线。由图可见, 当 $\Delta t < 0.1$ 时, 系统响应就非常接



近于系统的冲激响应。

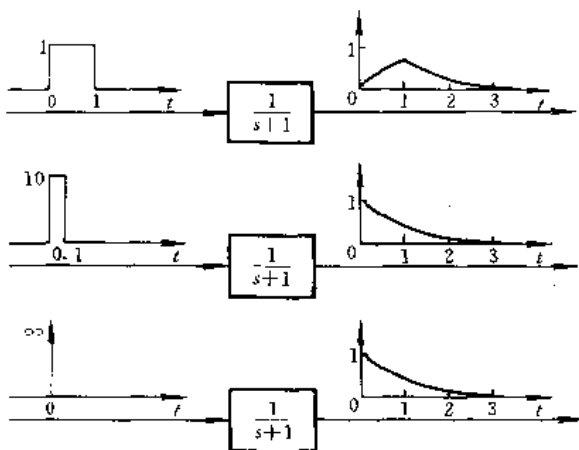


图 5-2-2 一阶系统对方波信号和冲激信号输入的响应曲线

1.2 频率特性

工程中,周期函数,如正、余弦函数是一类具有重要实用意义的典型函数。考虑到非周期函数在一定条件下,可以分解成为周期函数之和,因而,根据控制系统对于周期函数的响应,就可以推算出系统在任意非周期函数作用下的运动情况。

对于稳定的线性定常系统,在正弦输入信号作用下,其输出信号的稳态分量是和输入信号同频率的正弦信号;并且,输出信号稳态分量的振幅与输入信号振幅的比值、输出信号稳态分量对输入信号的相位移,这两者都是正弦信号频率的函数。

定义 系统对正弦输入的稳态响应称为频率响应。系统在正弦输入信号作用下,其输出信号的稳态分量与正弦输入信号之比称为系统的频率特性,记为

$$G(j\omega) = |G(j\omega)|e^{j\angle G(j\omega)} \quad (5.2-9)$$

其中

$$|G(j\omega)| = \left| \frac{Y(j\omega)}{X(j\omega)} \right| \quad (5.2-10)$$

$$\angle G(j\omega) = \angle \frac{Y(j\omega)}{X(j\omega)} = \phi(\omega) \quad (5.2-11)$$

式(5.2-10)表示正弦输出对正弦输入的幅值比,称为幅频特性。式(5.2-11)表示正弦输出对输入的相移,称为相频特性。

频率特性相对于传递函数而言,若已知传递函数 $G(s)$,欲求其相应的频率特性,只需把 $s=j\omega$ 代入即可。由式(5.2-2)得

$$G(j\omega) = \frac{b_0(j\omega)^m + b_1(j\omega)^{m-1} + \dots + b_n}{(j\omega)^n + a_1(j\omega)^{n-1} + \dots + a_n} \quad (5.2-12)$$

由于 $(j\omega)$ 是一个复变量,因此 $G(j\omega)$ 是一个复变函数。将式(5.2-12)分子、分母的 $(j\omega)$ 多项式加以整理,分成实虚两部分,便可表示为

$$G(j\omega) = U(\omega) + jV(\omega) \quad (5.2-13)$$

其中, $U(\omega)$ 称为实频特性, $V(\omega)$ 称为虚频特性。实频特性及虚频特性均为角频率 ω 的实变函数; $U(\omega)$ 是 ω 的偶函数, $V(\omega)$ 是 ω 的奇函数。

由式(5.2-9)和式(5.2-13),有

$$|G(j\omega)| = \sqrt{U^2(\omega) + V^2(\omega)} \quad (5.2-14)$$

$$\angle G(j\omega) = \arctan \frac{V(\omega)}{U(\omega)} \quad (5.2-15)$$

根据频率特性对频率的函数关系,可以将频率特性绘制成如下三种图示形式:极坐标图,也称为奈奎斯特图;对数幅频特性图和对数相频特性图,也称为伯德图;对数幅相图,也称为尼柯尔斯图。其中,常用的是伯德图和奈奎斯特图。

上述频率特性,虽定义为稳态情况下的系统输出与输入周期信号之比,但当输入信号为非周期信号时,可将非周期信号化为各角频率周期信号的总和,从频率特性可得到系统对各角频率周期信号的响应。因此,频率特性表现了系统的动态特性。它在频域内全面地描述了系统的性能,是系统数学模型的又一种表现形式。

频率特性可以通过实验的方法来测定,这正是频率特性优点之一。实验测定的方法是:改变输入正弦信号 $x(t) = X \sin \omega t$ 的频率 ω ,测出与之相应的稳态输出的振幅 Y 以及稳态输出相对于输入正弦信号的相移 ϕ 。然后,计算出振幅比 Y/X 对于频率 ω 的函数曲线,即幅频特性 $|G(j\omega)|$;得出相移 ϕ 对于频率的函数曲线,即相频特性 $\angle G(j\omega)$ 。

1.3 控制系统的图形描述

1.3.1 框图

框图是系统中每个元件或环节的功能和信号流向的图解表示,是描述系统的一种图示模型。框图形象地表明了系统中各元件或环节间的相互关系,它优于纯抽象的数学表达式,能清楚地表明实际系统中信号的流动情况。

框图,用方框表示组成控制系统的各元件或环节;方框外的进出线上标以箭头,箭头方向表示信号的传递方向;进出线旁的符号表示输入信号、输出信号的物理量;方框内写入相应元件或环节的传递函数或名称。



框图包含了与系统动态性能有关的信息，能体现系统动态特性，但不包含与系统物理结构有关的信息，不同物理结构的系统可能有相同的框图。对于同一个系统，由于分析角度的不同，可以得出多种不同的框图，因此，对于一定的系统其框图的形式并不是唯一的。

框图中，以符号“⊗”代表相加点，表示加或减运算；以符号“·”代表分支点，表示信号在此分成几路。

框图绘制的一般步骤如下：

(1) 确定系统的输入、输出信号；

(2) 找出反馈信号、误差信号与比较元件，画“⊗”；

(3) 找出系统中每个元件的输入、输出信号，用一个方框表示一个元件，并在方框内写入相应的传递函数；

(4) 从比较元件入手，根据信号的流向联结各方框，构成控制系统的框图。

在控制系统的框图中，一般采用三种联结方式：串联、并联及反馈。对于复杂系统的框图，可保持其输入、输出关系不变来进行简化，称之为框图的等效变换。框图等效变化的规则如表5·2-1所列。

表 5·2-1 框图等效变换

| 项 目 | 原 框 图 | 等 效 框 图 |
|-------|-------|---------|
| 相加点移动 | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| 分支点移动 | | |
| | | |
| 串联变换 | | |



(续)

| 项 目 | 原 框 图 | 等 效 框 图 |
|------|-------|---------|
| 串联变换 | | |
| 并联变换 | | |
| | | |
| 反馈变换 | | |
| | | |

1-3-2 信号流图

信号流图是表示控制系统中变量间相互关系与信号传递关系的又一种控制系统图示模型。

信号流图包含了框图所包含的信息。对于很复杂的控制系统，框图的简化过程很繁，而信号流图不需要进行简化、可直接应用梅森 (Mason) 增益公式求得系统的传递函数。

信号流图要求先将微分方程变换为以复变量 s 为变量的代数方程组，然后用节点、支路、增益等元素构成网络式的图形。

信号流图中使用的术语：

- (1) 节点。表示变量或信号的点，用符号“○”来代表。
- (2) 传输。两节点间的增益，也称传输。
- (3) 支路。连接两个节点的定向线段。
- (4) 输入节点。只有输出支路的节点，也称源点，对应于自变量。
- (5) 输出节点。只有输入支路的节点，也称阱点，对应于因变量。
- (6) 混合节点。既有输入支路，又有输出支路的节点。
- (7) 通路。沿支路箭头方向穿过各相连支路的途

径。如果通路与任一节点相交不多于一次，为开通路；如果通路的终点也是通路的起点，并且该通路与其任一节点相交不多于一次，为闭通路，也称为回路。

(8) 回路增益。回路中各支路传输之积。

(9) 不接触回路。相互间没有任何公共节点的回路。

(10) 前向通路。从输入节点到输出节点，且通过任何节点不多于一次的通路。

(11) 前向通路增益。前向通路中各支路传输之积。

信号流图具有如下性质：

- (1) 支路表示了一个信号对另一个信号的函数关系，信号只能沿着支路上箭头方向通过。
- (2) 节点可将所有输入支路的信号叠加，并把总和信号传送到所有输出支路。
- (3) 对混合节点可通过增加一个具有单位传输的支路，构成输出节点。用此法不能将混合节点变成输入节点。
- (4) 对于给定的系统，信号流图不是唯一的。

信号流图运算规则如表 5-2-2 所列。

信号流图的输入节点与输出节点间的总传输或总增益，即系统的传递函数，可用下面的梅森增益公式计算：

$$P(s) = \frac{1}{\Delta} \sum_k P_k \Delta_k \quad (5-2-16)$$



式中 P ——总增益;

p_k ——第 k 个前向通路增益(传输);

Δ ——信号流图的特征式,且有

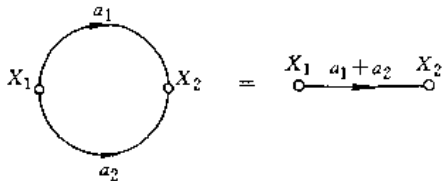
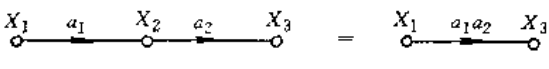
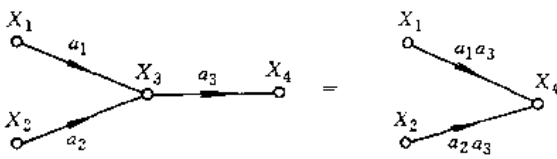
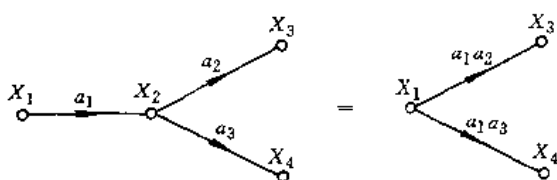
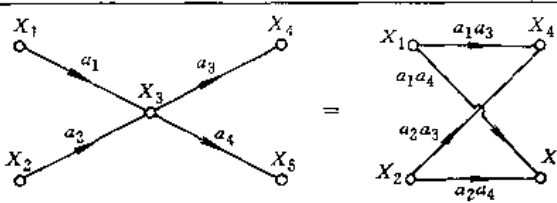
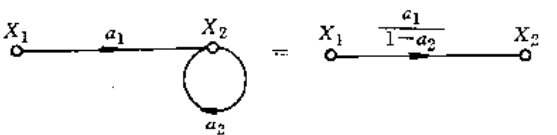
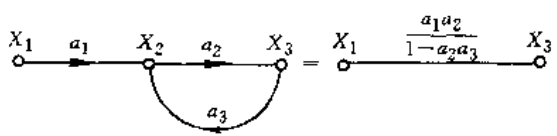
$\Delta = 1 - (\text{所有不同回路增益之和})$
 $+ (\text{每两个互不接触回路增益乘积之和})$

\dots (每三个互不接触回路增益乘积之和)

$+\dots$

Δ_k ——在流图特征式中除去与第 k 条前向通路接触的回路增益后所得的余式。

表 5-2-2 信号流图运算规则

| 项 目 | 图 示 | 结 果 |
|-----|-------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|
| 加法 |  | $X_2 = (a_1 + a_2) X_1$ |
| 乘法 |  | $X_3 = a_1 a_2 X_1$ |
| 分配 |  | $X_4 = a_1 a_3 X_1 + a_2 a_3 X_2$ |
| |  | $X_3 = a_1 a_2 X_1$ $X_4 = a_1 a_3 X_1$ |
| |  | $X_4 = a_1 a_3 X_1 + a_2 a_3 X_2$ $X_5 = a_1 a_4 X_1 + a_2 a_4 X_2$ |
| 自回路 |  | $X_2 = \frac{a_1}{1 - a_2} X_1$ |
| 反馈 |  | $X_3 = \frac{a_1 a_2}{1 - a_2 a_3} X_1$ |

1.4 多变量系统的数学描述

线性多变量系统的数学模型可有四种描述形式: 传递函数矩阵描述, 也称输入输出描述 (IOD); 状态空间描述 (SSD); 系统矩阵描述 (PMD) 和矩阵分式

描述 (MFD)。

1.4.1 传递函数矩阵描述

多输入-多输出系统如图 5.2-3 所示。该系统的输出





图 5-2-3 多输入-多输出系统

$$y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} k(t, \tau) u(\tau) d\tau \quad (5-2-17)$$

式中

$$k(t, \tau) = \begin{bmatrix} k_{11} & \cdots & k_{1l} \\ \vdots & & \vdots \\ k_{m1} & \cdots & k_{ml} \end{bmatrix}$$

$k_{ij}(t, \tau)$ —— 第 j 个输入 u_j 到第 i 个输出 y_i 之间的权函数, 称 $k(t, \tau)$ 为系统的权函数矩阵。

在初始条件为零时, 对式 (5-2-17) 做拉氏变换, 得

$$y(s) = G(s)u(s) \quad (5-2-18)$$

$$G(s) = \begin{bmatrix} k_{11}(s) & \cdots & k_{1l}(s) \\ \vdots & & \vdots \\ k_{m1}(s) & \cdots & k_{ml}(s) \end{bmatrix} \\ = [k_{ij}(s)]_{m \times l}$$

$G(s)$ 是系统的传递函数矩阵, $y(s)$ 是 $m \times 1$ 维输出列矢量, $u(s)$ 是 $l \times 1$ 维输入列矢量。

上述描述的讨论:

(1) 线性。设 H 为线性算子, 当且仅当对于任何输入 u_1 和 u_2 、以及任何实数 a_1 和 a_2 , 系统在零初始状态下的响应

$$H(a_1 u_1 + a_2 u_2) = a_1 H u_1 + a_2 H u_2$$

时, 称系统为线性的; 否则, 为非线性的。

(2) 因果性。系统 t 时刻的输出不取决于 t 以后的输入, 而仅与 t 以前的输入有关, 称此系统具有因果性。

考虑因果性, 有

$$y(t) = H u(-\infty, t)$$

$$k(t, \tau) = 0 \quad (\text{对所有 } \tau \text{ 和所有 } t < \tau)$$

$$y(t) = \int_{-\infty}^t k(t, \tau) u(\tau) d\tau$$

任何物理系统都具有因果关系。

(3) 松弛性。若一个系统在 t_0 时是松弛的, 则必要且只要输出 $y(t_0, \infty)$ 仅由 $u(t_0, \infty)$ 唯一地确定。

由

$$y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} k(t, \tau) u(\tau) d\tau \\ = \int_{-\infty}^{t_0} k(t, \tau) u(\tau) d\tau + \int_{t_0}^{\infty} k(t, \tau) u(\tau) d\tau$$

$$= y(t_0) + \int_{t_0}^{\infty} k(t, \tau) u(\tau) d\tau$$

若 $y(t_0) = 0$, 则

$$y(t_0, \infty) = \int_{t_0}^{\infty} k(t, \tau) u(\tau) d\tau$$

即一个在 t_0 时刻松弛的系统, 其输入输出关系为

$$y(t_0, \infty) = H u(t_0, \infty)$$

对线性系统在 t_0 时刻松弛的条件为

$$y(t_0) = H u(-\infty, t_0) = 0$$

所以具因果性、松弛性线性系统的输入输出关系为

$$y(t) = \int_{t_0}^t k(t, \tau) u(\tau) d\tau$$

(4) 定常性。若一个松弛系统是定常的, 则必要且只要

$$H Q_a u = Q_a H u$$

成立, 否则, 为时变系统。式中, Q_a 为移位算子, u 为任意输入, a 为任意实数。移位算子的作用相当于将输出信号在时间轴上向右平移了 a 个时间单位, 且不改变输出图形状。

对满足线性、因果性、松弛性、定常性的系统, 其输入输出关系为

$$y(t) = \int_{t_0}^t k(t - \tau) u(\tau) d\tau$$

或

$$y(t) = \int_0^t k(t - \tau) u(\tau) d\tau \\ = \int_0^t k(\tau) u(t - \tau) d\tau \quad (\text{设 } t_0 = 0)$$

对上式进行拉氏变换, 即得输入输出描述式 (5-2-18)。冲激响应矩阵的拉氏变换

$$G(s) = \int_0^{\infty} k(t) e^{-st} dt$$

称为传递函数矩阵。它是在系统线性、因果定常、且 $t = 0$ 时松弛的条件下得出的。应用时必须注意。

1.4.2 状态空间描述

1. 状态与动态方程

定义 系统在 t_0 时刻的状态, 是系统在 t_0 时刻的一组信息量, 它与 $u(t_0, \infty)$ 一起唯一地确定系统在 $t > t_0$ 时的全部行为。状态 x 张成的矢量空间, 称为状态空间。

描述输入、状态和输出之间关系的一组方程, 称为动力学方程, 也称为动态方程。

线性定常系统动力学方程



$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad x(t_0) = x(0) \quad (5.2-19a)$$

$$y(t) = Cx(t) + Du(t) \quad (5.2-19b)$$

式中 x —— n 维状态矢量;

u —— l 维输入矢量, 或控制矢量;

y —— m 维输出矢量;

A, B, C, D ——不依赖于 x 和 u 的常数矩阵, 分别称为系统矩阵、控制矩阵、输出矩阵和输入矩阵, 它们的维数分别为 $n \times n, n \times l, m \times n, m \times l$ 。

式 (5.2-19a) 为系统的状态方程, 式 (5.2-19b) 为系统的输出方程。若 u 为有限间断连续函数, 初始条件 $x(t_0)$ 为已知, 方程 (5.2-19) 有唯一解。

2. 系统传递函数矩阵

对动态方程 (5.2-19) 在零初始条件下作拉氏变换, 消去状态变量, 得

$$y(s) = [C(sI - A)^{-1}B + D]u(s) = G(s)u(s) \quad (5.2-20)$$

$$G(s) = C(sI - A)^{-1}B + D \quad (5.2-21)$$

式中 $G(s)$ ——开环系统传递函数矩阵。一般情况下,

$G(s)$ 可表示为

$$G(s) = \frac{C[\text{adj}(sI - A)]B}{|sI - A|} + D \quad (5.2-22)$$

式中 $(sI - A)$ ——系统特征矩阵;

$|sI - A|$ ——系统特征行列式;

$\text{adj}(sI - A)$ —— $(sI - A)$ 的伴随矩阵。

若系统前向通道传递函数矩阵为 $G(s)$, 反馈通道传递函数矩阵为 $H(s)$, 则闭环系统有

$$y(s) = [I + G(s)H(s)]^{-1}G(s)u(s) \quad (5.2-23)$$

$$\Phi(s) = [I + G(s)H(s)]^{-1}G(s) \quad (5.2-24)$$

式中 $\Phi(s)$ ——闭环系统传递函数矩阵。

1.4.3 系统矩阵描述

线性定常系统微分算子矩阵方程的一般形式为

$$T(D)\xi = U(D)u \quad (5.2-25a)$$

$$y = V(D)\xi + W(D)u \quad (5.2-25b)$$

式中 D ——微分算子;

T, U, V, W —— $r \times r, r \times l, m \times r, m \times l$ 算子 D 的多项式矩阵;

u —— l 维输入矢量;

y —— m 维输出矢量;

ξ —— r 维系统矢量, 也称分状态矢量。

在零初始条件下对式 (5.2-25) 作拉氏变换, 得

$$\begin{bmatrix} T(s) & U(s) \\ -V(s) & W(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \xi(s) \\ -u(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -y(s) \end{bmatrix} \quad (5.2-26)$$

定义 系统矩阵

$$P(s) = \begin{bmatrix} T(s) & U(s) \\ -V(s) & W(s) \end{bmatrix} \quad (5.2-27)$$

若 T, U, V, W 都是 s 的多项式矩阵, 则称 $P(s)$ 为多项式系统矩阵; 若 T, U, V, W 是 s 的有理函数矩阵, 则称 $P(s)$ 为有理分式系统矩阵。

式 (5.2-26) 为系统的多项式矩阵描述, 也称微分算子描述。

将式 (5.2-26) 联解, 消去 $\xi(s)$, 得

$$y(s) = [V(s)T^{-1}(s)U(s) + W(s)]u(s) = G(s)u(s) \quad (5.2-28)$$

$$G(s) = V(s)T^{-1}(s)U(s) + W(s) \quad (5.2-29)$$

式 (5.2-29) 为系统传递函数矩阵。可见, 系统的状态方程描述是系统矩阵描述的一种特殊形式, 系统矩阵描述是系统的最一般描述。

1.4.4 矩阵分式描述

若 $G(s)$ 是 $m \times l$ 严格真分式矩阵, 则 $G(s)$ 可表示为

$$G(s) = \frac{N(s)}{d(s)} \quad (5.2-30)$$

式中 $N(s)$ —— $m \times l$ 多项式矩阵;

$d(s)$ —— $G(s)$ 的所有元的首一最小公分母。

$G(s)$ 的矩阵分式的形式为

$$G(s) = N(s)[d(s)I_l]^{-1} \quad (5.2-31)$$

$$G(s) = [d(s)I_m]^{-1}N(s) \quad (5.2-32)$$

式 (5.2-31) 称为右分解表达式; 式 (5.2-32) 称为左分解表达式。由式 (5.2-31)、式 (5.2-32) 和式 (5.2-29) 可以从传递函数矩阵出发, 找到矩阵分式描述与系统矩阵描述之间的等价关系, 以右分解为例, 有

$$d(s) = \det T(s)$$

$$N(s) = V(s)\text{adj}T(s)$$

一般情况下, 矩阵分式描述不是唯一的。一个给定的 $G(s)$, 可以用许多种右的或左的矩阵分式描述。矩阵分式描述是一种较为新型的系统模型, 也是单输入-单输出系统传递函数模型的自然扩展。

2 控制系统数学模型的建立

2.1 概述

控制系统数学模型的建立, 既要求模型的准确性,



又要求模型尽量简单。因此,在建立系统模型的过程中,既要忽略系统或元件的一些非本质的和模型使用条件下非主要矛盾的物理特性,又要保留那些影响模型精确性的关键参数或主要关系,从而得到的是在准确性和简单性之间采取了适当折衷的数学模型。例如,在某确定条件下忽略系统中存在非线性特性和分布参数的影响,建立起线性集中参数的数学模型,如果利用这种数学模型进行分析,得出的结果和实际物理系统的实验结果非常接近,则说明在设定的条件下被忽略的因素对系统特性影响很小,这种建模过程中的折衷就被认为是合理的。

一般来说,建模过程有三类主要的信息源:

(1) 目标和目的,即建模所要研究的具体对象确定了建模过程的方向,并确定了系统边界等因素。

(2) 先验知识,即前人已经研究过的关于某类现象的知识,而且已经被集合、被统一成一个科学分支的有关定理、原理及模型。

(3) 试验数据,即通过对现象的试验与量测而获得的定量信息。

在为实现某种目的而建造一个模型的过程中,建模技术就在于成功地运用上述信息源。对上述信息源选择上的倾向,将构成以下不同的建模途径:

(1) 演绎法建模,它倾向于运用先验信息,在某些原理和假设的前提下通过数学逻辑的演绎来建立模型。这是从一般到特殊的建模途径。此时,试验数据只被用来进一步证实或否定原始的前提。

(2) 归纳法建模,它从被观测到的信息出发,并试图推导出一个与观测结果相一致的更高级的知识。这是从特殊到一般的建模途径。

(3) 实用建模,它是采用工程观点而且着眼于建模目的的一种建模途径。

单纯采用上述某一途径,都很难获得有效的结果,通常是混合采用。要获得满意的模型,必须对所建立的模型进行反复检验,以确保其可信性。

模型的可信性,一方面取决于模型的种类,另一方面又取决于模型的构造过程,它可以根据获取的困难程度分为:

(1) 在行为水平上的可信性,即模型是否能复现真实物理系统的行为,称为重复性。

(2) 在状态结构水平上的可信性,即模型能否与真实物理系统在状态上互相对应,称为复制程度。

(3) 在分解结构水平上的可信性,即模型能否表现出真实物理系统内部的工作情况,而且是唯一地表

示出来,称此为重构性。

鉴于上述,建模过程总描述可以用图 5-2-4 表示。

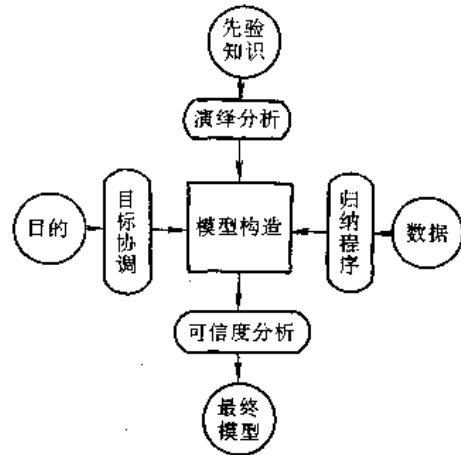


图 5-2-4 建模过程总框图

2.2 机理建模

机理建模是根据已知的系统结构和数据,从基本的物理和化学定律出发,用演绎法来建立系统的数学模型。用这种方法得到的数学模型称为机理模型或解析模型。

控制系统的机理模型,可以用运动方程式的形式来表示。当利用微分方程描述系统时,根据系统和元件的具体情况可分为:以非线性微分方程描述非线性系统;以偏微分方程描述分布参数系统;以线性微分方程描述线性系统。对于线性系统又要根据所研究的问题,分别采用常微分方程、微分方程组或一阶微分方程组标准型的描述形式。

控制系统运动方程式,代表了系统在运动过程中各变量之间的相互关系,既定性又定量地描述了整个系统的动态过程。建立系统运动方程的一般步骤是:

首先,分析系统的工作原理和系统中各变量间的关系,确定出待研究系统的输入量和输出量。

其次,根据系统、元件所遵循的定律,一般从系统的输入端开始,依次建立组成系统各元件或环节的运动方程式。需要特别注意的是,将系统按其组成元件划分的时候,要考虑相邻元件间的相互影响,即负载效应问题。

最后,在已建立起来的方程组中,消去中间变量,求取描述系统输入量和输出量之间的关系方程式,并化为标准形式,即将与输出量有关各项放在方程左边,与输入量有关各项放在方程右边,各导数项均按降幂排列。



控制系统的机理模型,可以是微分方程、差分方程,也可以是传递函数、频率特性等其他的形式。作为其中的一种,式(5·2-1)便是线性系统微分方程的一般表达式。

工程上常见的系统,在其所研究的有限条件下,可视为线性定常系统。描述线性定常系统的数学模型,其分类如表5·2-3所列。

表5·2-3 线性定常系统数学模型分类

| 系 统 | 参 数 模 型 | | 非参数模型 |
|--------|---------|--------|-------|
| 连续时间系统 | 微分方程 | 传递函数 | 频率特性 |
| | 状态微分方程 | | |
| 离散时间系统 | 状态差分方程 | Z 传递函数 | |
| | 差分方程 | | |

2·3 线性化

严格说来,构成控制系统各元件的输入输出特性都具有不同程度的非线性。因此,实际工程中的控制系统都是非线性系统,描述系统的运动方程为非线性方程。将非线性方程近似转化为线性方程的过程,称为线性化。根据系统的非线性程度,可将非线性分为本质非线性和非本质非线性两类。其中,前者不能进行线性化,后者可以进行线性化。这里,仅介绍常用的小偏差线性化法。

能够进行线性化的条件是:

(1) 系统在整个运动过程中,其变量的变化离其稳定状态下工作点的偏差很小,即小偏差。

(2) 非线性函数在其稳定工作点满足展开成台劳(Taylor)级数条件,即各变量与其各阶偏导数都为有限值。

线性化的过程是:在系统工作点附近的小范围内,将非线性函数展开成台劳级数,然后,忽略展开后的高次项,留取一次项,从而得到非线性函数的一次近似。这种一次近似,使系统的非线性描述转化为线性描述。

设非线性运动方程

$$F(y, \dot{y}, \ddot{y}, \dots; x, \dot{x}, \ddot{x}, \dots) = \varphi(f, \dot{f}, \ddot{f}, \dots) \quad (5\cdot2-33)$$

式中 y ——输出信号;

x ——输入信号;

f ——外干扰信号;

F 、 φ ——均为非线性函数。

将式(5·2-33)展开成台劳级数

$$\begin{aligned} & F(y, \dot{y}, \ddot{y}, \dots; x, \dot{x}, \ddot{x}, \dots) \\ &= F_0(y_0, 0, 0, \dots; x_0, 0, 0, \dots) \\ &+ \left(\frac{\partial F}{\partial y} \right) \Delta y + \left(\frac{\partial F}{\partial \dot{y}} \right) \Delta \dot{y} + \left(\frac{\partial F}{\partial \ddot{y}} \right) \Delta \ddot{y} + \dots \\ &+ \left(\frac{\partial F}{\partial x} \right) \Delta x + \left(\frac{\partial F}{\partial \dot{x}} \right) \Delta \dot{x} + \dots + R \\ &= \varphi(f, \dot{f}, \ddot{f}, \dots) \end{aligned}$$

式中 x_0 、 y_0 ——系统稳定状态工作点;

Δx 、 Δy ——偏差量;

R ——各偏差及其导数的高次项。

考虑到各偏差量及其导数均很小,因此可忽略高次项 R ,并整理得到线性运动方程

$$\begin{aligned} F - F_0 &= \left(\frac{\partial F}{\partial y} \right) \Delta y + \left(\frac{\partial F}{\partial \dot{y}} \right) \Delta \dot{y} + \left(\frac{\partial F}{\partial \ddot{y}} \right) \Delta \ddot{y} + \dots \\ &+ \left(\frac{\partial F}{\partial x} \right) \Delta x + \left(\frac{\partial F}{\partial \dot{x}} \right) \Delta \dot{x} + \dots \\ &= \varphi(f, \dot{f}, \ddot{f}, \dots) - \varphi(f, 0, 0, \dots) \\ &= \left(\frac{\partial \varphi}{\partial f} \right) \Delta f + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial \dot{f}} \right) \Delta \dot{f} + \dots \quad (5\cdot2-34) \end{aligned}$$

比较式(5·2-33)和式(5·2-34),可见:

(1) 前者是用变量 x 、 y 、 f 及其各阶导数的实际值作为变量,后者是用 Δx 、 $\Delta \dot{x}$ 、 \dots 、 Δy 、 $\Delta \dot{y}$ 、 \dots 、 Δf 、 $\Delta \dot{f}$ 、 \dots 等偏差量作为变量;

(2) 后者忽略了各偏差量及其导数的高次项,因此,后者相对于前者而言是近似的;

(3) 后者各项的系数 $\partial F/\partial y$ 、 $\partial F/\partial x$ 、 $\partial \varphi/\partial f$ 、 \dots 都是对于确定的工作点所得到的参数值,对于不同的工作点所对应的各系数值也各不相同;

(4) 前者是非线性方程,后者是线性方程。

为了书写方便,通常将各偏差量前面的符号“ Δ ”省略。

2·4 模型辨识

通常由于系统内部的结构非常复杂,往往不可能只通过理论分析就能建立起系统的模型。这时,就需要采用模型辨识来完成建模任务。模型辨识是根据系统的输入、输出数据,从给定的模型类中,寻找与所研究的系统等价的模型。

2·4·1 建模步骤

模型辨识的建模步骤可用图5·2-5来表示。

1. 辨识目的和先验知识 不同的建模目的,对辨识精度和速度的要求也不相同,根据不同的目的,选择合适的辨识方法。



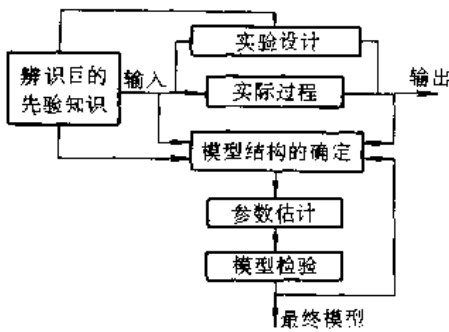


图 5-2-5 模型辨识的建模步骤

事先对被辨识系统的了解程度，也直接影响辨识方法的选择。为获得较多的先验知识，可对被辨识系统进行预备性试验，以获得如下信息：主要时间常数；允许输入信号的幅值；是否存在非线性；参数是否为时变的；噪声水平和性质以及延迟现象等。

2. 实验设计 根据辨识目的和先验知识进行实验设计，它一般包括：输入信号选择、采样速率确定、辨识的允许时间、开环还是闭环、在线还是离线、数据

存储与处理、产生信号的方法与设备等。

3. 模型结构的确定 合理地确定模型结构是模型辨识的关键问题。多数情况下，尽量采用演绎法来确定系统模型结构。对于参数模型，除确定模型的阶次外，还要解决与结构有关的延迟问题。

4. 参数估计 参数估计，确定模型参数，这是继模型结构确定之后的重要问题。在实际应用中，除经典的阶跃响应法和频率响应法以外，常用的参数估计方法有：相关分析法、最小二乘法、极大似然法和卡尔曼滤波法。

5. 模型校验 在获得初步的数学模型后，接着要校验模型与实际对象的误差是否满足给定指标要求。

2.4.2 辨识中几个问题的处理

1. 方法选择 建模方法的选择，很难给出一般性指导原则。表 5-2-4 和表 5-2-5 给出了不同的模型应用目的和几种主要参数估计方法性能对比，对建模方法的选择将有参考作用。

表 5-2-4 不同的模型应用目的与方法选择

| 模型应用目的 | 相应模型类别 | 精度要求 | 方 法 |
|-----------------|-----------------------|-------|---------------|
| 验证理论分析 所得的模型 | 连续时间非参数模型 离散时间参数模型 | 中等或较高 | 离线、频率法和相关法 |
| PID 控制的 参数校正 | 连续时间非参数 模型参数 | 较低 | 相关法、阶跃响应法 |
| 计算机在线 控制算法 | 离散时间非参数 模型参数 | 中等 | 在线实时参数估计法、相关法 |
| 运控或故障探查 | 连续时间参数模型 (有可能是非线性) | 较高 | 在线参数估计法 |

表 5-2-5 几种主要参数估计法性能对比

| 估计方法 | 实际噪声情况下的无偏性 | 计算机内存和机时消耗 | 未知输出直流分量估计不准的敏感性 | 对噪声模型的辨识能力 | 递推算法的收敛性和收敛速度 | 其 它 |
|--------------------|-------------|------------|-------------------------|------------|------------------------|---------------------------|
| 最小二乘法 (LS 法) | 差 | 小 | 敏感 | 无 | 可靠 | 噪声小时可用；噪声大时可作为 IV、ML 法启动用 |
| 辅助变量法 (IV 法) | 好 | 中等或较小 | 若 $\bar{u}(k) = 0$ 则不敏感 | 无 | 不可靠(与初值选择有关，宜先用 LS 启动) | 用于反馈控制 |
| 广义最小二乘法 (GLS 法) | 较好 | 较大 | | 有 | 噪声大时有可能收敛不到真值 | |



(续)

| 估计方法 | 实际噪声情况下的无偏性 | 计算机内存和机时消耗 | 未知输出直流分量估计不准的敏感性 | 对噪声模型的辨识能力 | 递推算法的收敛性和收敛速度 | 其它 |
|-------------------------|-------------|------------------|----------------------------|------------|---------------|-------------------|
| 增广最小二乘法 (ELS法) | 较好 | 中等 | | 有 | 不很可靠 | 适合于自适应控制 |
| 多级最小二乘法 (MSLS法) | 较好 | 中等 | | 有 | | |
| 相关分析——最小二乘两步法 (COR-LS法) | 好 | 第一步:较大 第二步:中等 | 若 $\bar{u}(k) = 0$ 则不敏感 | 无 | 可靠 | 可取出中间结果,易于辨识阶数和时延 |
| 最大似然法 (ML法) | 好 | 大 | | 有 | 可靠 | 可能得到的是损失函数的局部极小 |

2. 输入信号选择 模型辨识只能辨识动态系统的可控和可观测部分。因此,单靠采用恰当的辨识方法是不够的,还需使输入信号满足一定的条件:最低要求是输入信号应使辨识对象内部的动态模态被充分地激励起来,且可激励;最高的要求是在一定的噪声统计特征和输入、输出信号幅度和波形以及在一定记录长度等约束条件下,设计出使模型误差为最小的最优输入信号或最佳测试信号。下面分两种情况说明:

a. 非参数模型情况 直接测定对象的飞升曲线或冲激响应时,输入信号只能选用阶跃函数或较理想的冲激信号。

若采用频率法测 $G(j\omega)$, 则由

$$G(j\omega) = \frac{Y(j\omega)}{U(j\omega)} = \frac{S_{uy}(j\omega)}{S_u(j\omega)}$$

可见,至少在感兴趣的频带 $\omega_m \leq \omega \leq \omega_M$ 内,输入信号的幅度谱 $|U(j\omega)|$ 或功率谱密度 $S_u(j\omega)$ 均不应为零,即

$$|U(j\omega)| \neq 0 \quad \text{或} \quad S_u(j\omega) \neq 0 \quad \omega_m \leq \omega \leq \omega_M$$

式中 $Y(j\omega)$ ——输出信号幅度谱;

$S_{uy}(j\omega)$ ——输出信号功率谱密度。

因此,非周期信号、冲激信号或随机信号以及频率成分丰富的周期信号均可用来测试频率特性。

若采用相关分析法获取冲激响应函数,取时间间隔 $\Delta \ll T$, 则

$$r_{uy}(i\Delta) \approx \Delta \sum_{n=0}^i k(n\Delta) r_u(i\Delta - n\Delta) \quad i = 0, 1, \dots, p, \dots$$

式中, $p = T/\Delta \gg 1$ 。取前 $p+1$ 个方程写成矩阵形式

$$\begin{aligned} \hat{r}_{uy} &= \hat{\Delta R}_k k \\ k &= \hat{R}_u^{-1} \hat{r}_{uy} / \Delta \end{aligned}$$

将 $|\hat{R}_u| \neq 0$ 与 \hat{R}_u 非负定的要求综合起来,便可得出平稳输入信号 $u(t)$, 它应满足的 $(p+1)$ 阶持续激励条件为 \hat{R}_u 正定。

b. 参数模型情况 若采用包含多个频率成分的周期信号测试连续系统的频率特性 $G(j\omega)$, 则由

$$\begin{aligned} G(j\omega) &= \frac{b_0(j\omega)^m + b_1(j\omega)^{m-1} + \dots + b_m}{(j\omega)^n + a_1(j\omega)^{n-1} + \dots + a_n} \\ &= R(\omega) + jI(\omega) \end{aligned}$$

可见,每个频率为 ω_j 的谐波分量可用来确定实频特性 $R(\omega_j)$ 和虚频特性 $I(\omega_j)$, 从而可列出两个包含有 $n+m+1$ 个未知数 a_1, \dots, a_n 和 b_0, b_1, \dots, b_m 的方程。因此,为能测定全部参数,输入信号中频率不同的谐波个数至少不应低于 $(n+m+1)/2$ 。因通常 $m < n$, 故 $(n+m+1)/2 \leq n$ 。这表明,采用包含 n 个以上谐波分量的周期信号,便可确定频率特性的参数。

若采用最小二乘法时, n 阶差分方程

$$\begin{aligned} y(k) + a_1 y(k-1) + \dots + a_n y(k-n) \\ = b_0 u(k-d) + b_1 u(k-1-d) \\ + b_n u(k-n-d) \end{aligned}$$

中参数 $\theta = [a_1, \dots, a_n, b_0, \dots, b_n]^T$ 的估计

$$\hat{\theta}_N = (\Phi_N^T \Phi_N)^{-1} \Phi_N^T y_N$$

当 $\{u'(k)\}$ 和 $\{y'(k)\}$ 均为平稳遍历性序列,且 N 很大时,

$$\hat{\theta}_N \approx R_{\theta\theta}^{-1} r_{\theta y}$$

上式有解的条件为 $2n \times 2n$ 对称方程

$$R_{\theta\theta} = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \phi_k \phi_k^T = \begin{bmatrix} R_y & -R_{y\theta} \\ -R_{\theta y} & R_u \end{bmatrix}_{2n \times 2n}$$

的逆存在,即 $|R_{\theta\theta}| \neq 0$, 从而可推出 $|R_u| \neq 0$, 故采用

此星公司制作 请尊重作者版权

工力

工力



最小二乘法的输入信号 $u(k)$ 应满足的条件是 R_u 为正值。

采用最大似然法，也可导出相同的结论。

3. 观测数据的采集和预处理

a. 采样间隔选择 对离散时间系统，采样间隔 Δ 应等于或小于对系统进行数字控制时所采用的采样周期 T_s ，二者相差的倍数 $n_s = T_s/\Delta$ 最好为整数，以便直接辨别出采样周期为 T_s 的离散型系统模型。

如果 n_s 不是整数，那么辨识所得离散模型的采样周期与控制模型所用采样周期不可能正好一致。此时，可先辨识出采样周期为 $T'_s = n'_s \Delta$ (n'_s 为与 n_s 最接近的整数) 的离散模型，然后再折算出采样周期为 T_s 的离散模型。

采样周期 T_s 的选择非常重要。如果 T_s 太大，辨识所得系统模型会发生退化现象，使阶数比实际偏低；如果 T_s 太小，由于相邻观测数据过于接近，在采用最小二乘法时有可能使参数估计结果不稳定。因此，一般情况下可取

$$T_s = (0.05 \sim 0.2)t_s$$

式中 t_s ——系统调节时间(按 $\pm 5\%$ 允许误差范围)。

对连续时间系统，采样间隔宜取

$$\Delta \leq 1/(3 \sim 4)f_M$$

式中 f_M ——系统最高工作频率。

对包含有多个极点的系统， Δ 的选择应满足

$$\Delta = (0.2 \sim 0.4)T_{\min}$$

式中 T_{\min} ——系统中的最小时间常数。

b. 观测记录长度选择 离线辨识观测记录愈长，观测噪声对辨识结果的影响愈小，精度愈高。但实际上，由于受到现场运行和记录设备等条件限制，以及对有效输入输出信号和噪声平稳性要求等，记录时间并非愈长愈有利。一般情况下，记录时间至少不低于对象主要时间常数 T_s 的 10 倍，即采样总点数 N 应满足

$$N\Delta \geq 10T_s$$

c. 不良数据的剔除 比较简便的办法是采用程序判断滤波法。

将新采样值 $Y'(k\Delta)$ 与上一次采样值 $Y'(k\Delta - \Delta)$ 进行比较，若相差超过可能的最大范围 $\pm \Delta Y_m$ ，则认为本次采样值 $Y'(k\Delta)$ 为虚假的，应予剔除。滤波后的 $Y''(k\Delta)$ 为

$$Y''(k\Delta) = \begin{cases} Y'(k\Delta), & |Y'(k\Delta) - Y'(k\Delta - \Delta)| \leq \Delta Y_m \\ Y'(k\Delta - \Delta), & |Y'(k\Delta) - Y'(k\Delta - \Delta)| > \Delta Y_m \end{cases}$$

式中

$$\Delta Y_m = \left(\frac{dy}{dt} \right)_{\max} \Delta$$

d. 直流分量的辨识 程序滤波后可得动态模型的输入量与输出量

$$u''(k\Delta) = U''(k\Delta) - U_s$$

$$Y''(k\Delta) = Y''(k\Delta) - Y_s$$

其中，输入、输出的稳态值 U_s, Y_s 可由 $U''(k\Delta), Y''(k\Delta)$ 来估计：

$$\hat{U}_s = \frac{1}{N_s} \sum_{k=1}^{N_s} U''(k\Delta)$$

$$\hat{Y}_s = \frac{1}{N_s} \sum_{k=1}^{N_s} Y''(k\Delta)$$

式中 N_s 为一次记录中采样点总数。

e. 高频和低频噪声的消除 对高频噪声，可在观测值采样前用有源或无源的一、二阶模拟滤波器来消除。当 n_s 很大时，可对采样值 u'', y'' 每隔 n_s 个数据作一次加权平均，得出间隔为 T_s 的平滑值序列

$$\begin{cases} u''(k) = \sum_{i=0}^{n_s-1} a_i u''(k\Delta_0 - i\Delta) \\ y''(k) = \sum_{i=0}^{n_s-1} a_i y''(k\Delta_0 - i\Delta) \end{cases}$$

式中 a_i 为加权系数，满足

$$\begin{cases} a_0 + a_1 + \dots + a_n = 1 \\ a_0 \geq a_1 \geq \dots \geq a_n \end{cases}$$

对低频噪声，可采用一阶高通滤波器消除：

$$u'(k) = \epsilon u'(k-1) + u''(k) - u''(k-1)$$

$$y'(k) = \epsilon y'(k-1) + y''(k) - y''(k-1)$$

式中， $\epsilon = e^{-T_s/T_s}$ 。 T_s 为滤波器时间常数，其大小应选择得不至于削弱有效信号中的低频分量。

4. 阶和时延的检验

a. 纯时延检验 一般可以把时延为 d 的 n 阶离散模型

$$G(z) = \frac{b_1 z^{-1} + \dots + b_n z^{-n}}{1 + a_1 z^{-1} + \dots + a_n z^{-n}} z^{-d}$$

看成是无时延的 $n+d$ 阶离散系统模型

$$G'(z) = \frac{b'_1 z^{-1} + \dots + b'_{n+d} z^{-(n+d)}}{1 + a_1 z^{-1} + \dots + a_{n+d} z^{-(n+d)}}$$

在 $b'_1 = \dots = b'_d = 0$ 和 $a_{n+1} = \dots = a_{n+d} = 0$ 时的特例。如果

$$|\hat{b}'_1|, |\hat{b}'_2|, \dots, |\hat{b}'_d| \ll \sum_{j=1}^{n'} \hat{b}'_j \quad n' \geq n+d$$

且



$$|\hat{b}_2^A| \ll |\hat{b}_{2+1}^A|$$

便可认为 \hat{a} 就是时延估计值。以时延 \hat{a} 的模型再对模型的阶进行检验。

b. 阶的检验

(1) 损失函数 J 检验法

1) 最终陡峭下降准则

设已按同一组观测数据对 n_m 个不同阶数 ($n=1, 2, \dots, n_m$) 的模型作了辨识, 并分别算出 J 值。如果随 n 的增加, 在 $n-1$ 时 J 最后一次出现陡峭的下降, 此后大致不变, 则 \hat{n} 即为阶的估计值。

2) F 检验准则

取

$$t = \frac{J_1}{J_2} \frac{N - 2n_2}{2(n_2 - n_1)}$$

式中, J_1, J_2 为对 N 组输入、输出观测数据分别采用具有 $2n_1$ 和 $2n_2$ 个参数模型进行拟合所得最小残差平方和。当 $N \rightarrow \infty$ 时, t 的概率分布趋于自由度为 $f_1 = 2(n_2 - n_1)$ 和 $f_2 = N - 2n_2$ 的 $F(f_1, f_2)$ 分布。

通常取置信度 $\alpha = 0.05$, 由 F 分布的临界值 $F_{\alpha}(f_1, f_2)|_{\alpha=0.05}$ 的表格数据拟合出在常用 $f_1 \leq 10$,

$f_2 \geq 30$ 范围内近似计算公式

$$F_{0.05}(f_1, f_2) \approx 0.9 + \frac{2.94}{\sqrt{f_1}} + \frac{9.9}{f_2}$$

3) AIC 准则

AIC 准则, 是基于信息量定价的方法, 即

$$AIC \stackrel{\text{def}}{=} -2 \ln L + 2p$$

式中 p —— 模型中参数个数;

$\ln L$ —— 对数似然函数。

按 AIC 准则, 在阶数不同的模型中, 对应 AIC 取最小者即为所求模型阶数。

(2) 残差相关性检验法

设残差 $e(k)$ ($k=1, 2, \dots, N$), 其相关值为

$$\hat{r}_e(i) = \frac{1}{N-i} \sum_{k=1}^{N-i} e(k)e(k+i), \quad i=1, 2, \dots, M$$

当阶数选得最合适时, $\hat{r}_e(i) \approx 0, i \neq 0$ 。如果按 $\hat{r}_e(i)$ 画出的折线在 $i \neq 0$ 处波动幅度最小, 且穿过水平轴的次数愈接近 M , 则表明相应的残差愈接近白噪声。

3 典型环节的数学模型

3.1 典型环节的频率特性 (表 5.2-6)

表 5-2-6 典型环节的频率特性

| 典型环节 | 频率特性 | 极坐标图 | 伯德图 |
|------|------------------------|------|-----|
| 放大 | $G(j\omega) = K$ | | |
| 纯微分 | $G(j\omega) = j\omega$ | | |

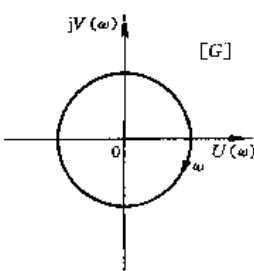
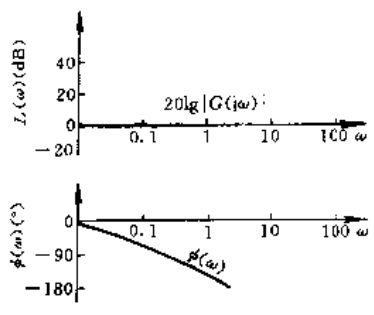


(续)

| 典型环节 | 频率特性 | 极坐标图 | 伯德图 |
|------|---------------------------------------------------------------|------|-----|
| 积分 | $G(j\omega) = \frac{1}{j\omega}$ | | |
| 一阶惯性 | $G(j\omega) = \frac{1}{jT\omega + 1}$ | | |
| 二阶振荡 | $G(j\omega) = \frac{1}{T^2(j\omega)^2 + j2\zeta T\omega + 1}$ | | |
| 一阶微分 | $G(j\omega) = j\tau\omega + 1$ | | |
| 二阶微分 | $G(j\omega) = \tau^2(j\omega)^2 + j2\zeta\tau\omega + 1$ | | |

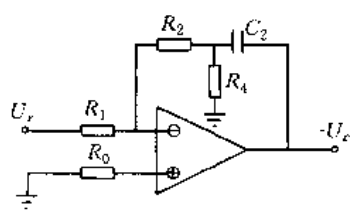
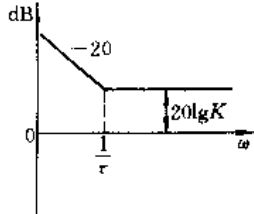
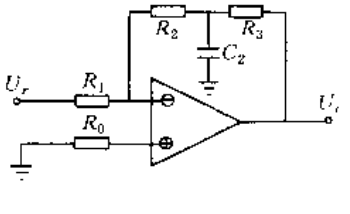
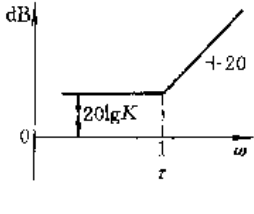
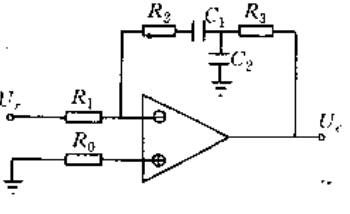
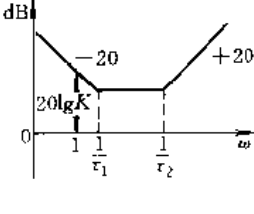
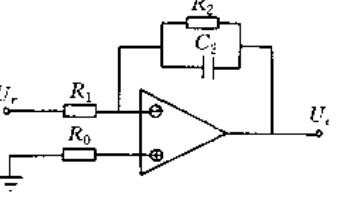
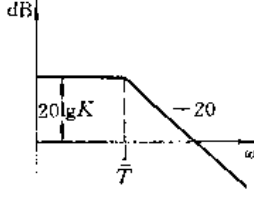


(续)

| 典型环节 | 频率特性 | 极坐标图 | 伯德图 |
|------|---------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| 时间滞后 | $G(j\omega) = e^{-j\omega\tau}$ |  |  |

3.2 典型电气网络传递函数及伯德图(表 5.2-7)

表 5.2-7 典型电气网络的传递函数及伯德图

| 网 络 | 伯 德 图 | 传 递 函 数 |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  |  | $\frac{U_c}{U_r} = -\frac{(\tau s + 1)}{T s} = -K_p \left[1 + \frac{1}{T_1 s} \right]$ $\tau = R_4 C_2, T = \frac{R_1 R_4}{R_2} C_2$ $T_1 = R_4 C_2, K_p = \frac{R_2}{R_1}, R_0 = R_1$ |
|  |  | $\frac{U_c}{U_r} = -K(\tau s + 1)$ $\tau = \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3} C_2, K = \frac{R_2 + R_3}{R_1}$ $R_0 = R_1$ |
|  |  | $\frac{U_c}{U_r} = -\frac{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)}{T s}$ $\tau_1 = R_2 C_1, \tau_2 = R_3 C_2, T = R_1 C_1$ $R_1 = R_0, R_1 \gg R_3, K = \frac{1}{T}$ |
|  |  | $\frac{U_c}{U_r} = -\frac{K}{(T s + 1)}$ $K = \frac{R_2}{R_1}, T = R_2 C_2, R_0 = R_1$ |

此星公司制作 请尊重原作者版权



(续)

| 网 络 | 伯 德 图 | 传 递 函 数 |
|-----|-------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| | | $\frac{U_c}{U_r} = -\frac{K(\tau s+1)}{(Ts+1)}$ $K_1 = \frac{R_2+R_3}{R_1}, \tau = \left(\frac{R_2 R_3}{R_2+R_3} + R_4\right) C_2$ $T = R_4 C_2, R_0 = R_1$ |
| | | $\frac{U_c}{U_r} = -\frac{K(\tau s+1)}{(T_1 s+1)(T_2 s+1)}$ $K = \frac{R_2}{R_1}, \tau = (R_3 + R_4) C_2, T_1 = R_2 C_1$ $T_2 = R_4 C_2, R_1 \gg R_3, R_0 = R_1$ |
| | | $\frac{U_c}{U_r} = -\frac{K(\tau_1 s+1)(\tau_2 s+1)}{(T_1 s+1)(T_2 s+1)}$ $K_1 = \frac{R_2+R_3}{R_1}, \tau_1 = \frac{R_2 R_3}{R_2+R_3} C_1$ $\tau_2 = (R_3 + R_4) C_2, T_1 = R_2 C_1$ $T_2 = R_4 C_2, R_1 \gg R_3, R_0 = R_1$ |
| | | $\frac{U_c}{U_r} = -K(\tau s+1) = -(T_D s + K_p)$ $\tau = R_1 C_1, K = \frac{R_2}{R_1}$ $R_0 = R_1$ |
| | | $\frac{U_c}{U_r} = -\frac{(\tau_1 s+1)(\tau_2 s+1)}{Ts} = -K_p \left(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s\right)$ $\tau_1 = R_1 C_1, \tau_2 = R_2 C_2$ $T = R_1 C_2, K = \frac{1}{T}$ |
| | | $\frac{U_c}{U_r} = \frac{K(\tau s+1)}{Ts+1}$ $K = \frac{R_2+R_1}{R_1}, \tau = \frac{R_1 R_2}{R_1+R_2} C_1$ $T = R_2 C_1, R_3 = R_1 // R_2 \ll R_r$ |

此星公司制作 请尊重原作者版权



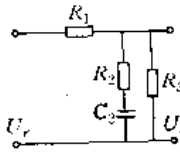
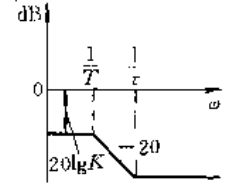
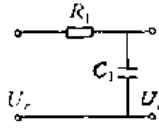
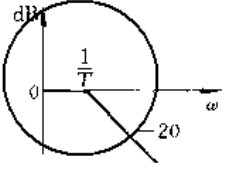
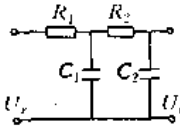
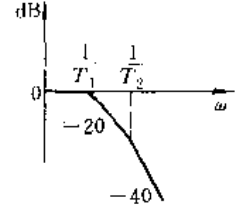
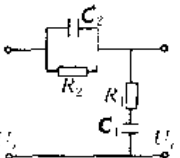
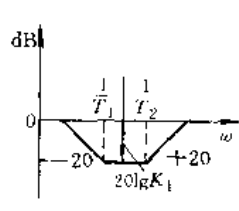
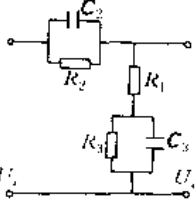
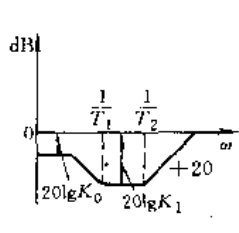
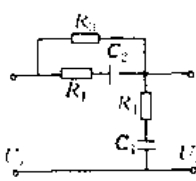
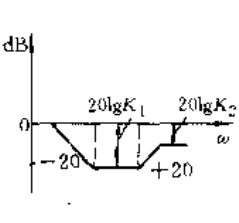
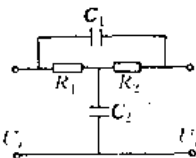
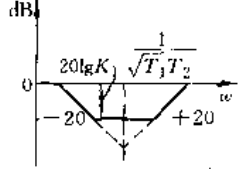
(续)

| 网络 | 伯德图 | 传递函数 |
|----|-----|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| | | $\frac{U_c}{U_r} = \frac{K(\tau s + 1)}{(Ts + 1)}$ $K = \frac{R_2 + R_3 + R_1}{R_1}$ $\tau = \left(\frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3} + R_4 \right) C_2$ $T = R_4 C_2, R_0 = R_1 // R_2 + R_3 \ll R_r, R_1 \gg R_3$ |
| | | $\frac{U_c}{U_r} = \frac{K(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)}$ $K = \frac{R_1 + R_2 + R_3}{R_1}, \tau_1 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} C_1$ $\tau_2 = (R_3 + R_4) C_2, T_1 = R_2 C_1, T_2 = R_4 C_2$ $R_1 \gg R_3, R_0 = R_1 // R_2 + R_3 \ll R_r$ |
| | | $\frac{U_c}{U_r} = \frac{K(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)}$ $K = \frac{R_1 + R_2 + R_3 + R_4}{R_1}, \tau_1 = \frac{(R_1 + R_2) R_3}{R_1 + R_2 + R_3} C_1$ $\tau_2 = (R_3 + R_4) C_2, T_1 = R_2 C_1, T_2 = R_4 C_2$ $R_1 \gg R_3, R_0 = R_1 // R_2 + R_3 \ll R_r$ |
| | | $\frac{U_c}{U_r} = \frac{Ts}{Ts + 1}$ $T = R_1 C_1, K = T$ |
| | | $\frac{U_c}{U_r} = \frac{T_1 T_2 s^2}{T_1 T_2 s^2 + \left[T_1 \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) + T_2 \right] s + 1}$ $T_1 = R_1 C_1, T_2 = R_2 C_2$ |
| | | $\frac{U_c}{U_r} = \frac{K(\tau s + 1)}{(Ts + 1)}$ $K = \frac{R_2}{R_1 + R_2}, \tau = R_1 C_1$ $T = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} C_1$ |
| | | $\frac{U_c}{U_r} = \frac{\tau s + 1}{Ts + 1}$ $\tau = R_2 C_2, T = (R_1 + R_2) C_2$ |

此星公司制作 请尊重原作者版权



(续)

| 网 络 | 伯 德 图 | 传 递 函 数 |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  |  | $\frac{U_c}{U_e} = \frac{K(\tau s + 1)}{T s + 1}$ $\tau_1 = R_2 C_2, \quad T = [(R_3 // R_1) + R_2] C_3$ $K = \frac{R_3}{R_1 + R_3}$ |
|  |  | $\frac{U_c}{U_e} = \frac{1}{T s + 1}$ $T = R_1 C_1$ |
|  |  | $\frac{U_c}{U_e} = \frac{1}{T_1 T_2 s^2 + [T_2 (1 + \frac{C_1}{C_2}) + T_1] s + 1}$ $T_1 = R_1 C_1, \quad T_2 = R_2 C_2$ |
|  |  | $\frac{U_c}{U_e} = \frac{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)}{T_1 T_2 s^2 + [T_1 (1 + \frac{R_2}{R_1}) + T_2] s + 1}$ $T_1 = R_1 C_1, \quad T_2 = R_2 C_2$ $K_1 = \frac{T_1 + T_2}{T_1 (1 + \frac{R_2}{R_1}) + T_2}$ |
|  |  | $\frac{U_c}{U_e} = \frac{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)}{T_1 T_2 s^2 + [T_1 (1 + \frac{R_2}{R_1}) + T_2] s + \frac{R_3 + R_1 + R_2}{R_1 + R_3}}$ $T_1 = \frac{R_1 R_3}{R_1 + R_3} C_1, \quad T_2 = R_2 C_2$ $K_0 = \frac{R_1 + R_3}{R_1 + R_2 + R_3}, \quad K_1 = \frac{T_1 + T_2}{T_1 (1 + \frac{R_2}{R_1}) + T_2}$ |
|  |  | $\frac{U_c}{U_e} = \frac{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)}{T_1 T_2 [1 + \frac{R_2 R_3}{R_1 (R_2 + R_3)}] s^2 + [T_1 (1 + \frac{R_2}{R_1}) + T_2] s + 1}$ $T_1 = R_1 C_1, \quad T_2 = (R_2 + R_3) C_2$ $K_1 = \frac{T_1 + T_2}{T_1 (1 + \frac{R_2}{R_1}) + T_2}, \quad K_2 = \frac{R_1 (R_2 + R_3)}{R_1 (R_2 + R_3) + R_2 R_3}$ |
|  |  | $\frac{U_c}{U_e} = \frac{T_1 T_2 s^2 + T_2 s + 1}{T_1 T_2 s^2 + [T_1 (1 + \frac{R_2}{R_1}) + T_2] s + 1}$ $T_1 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} C_2, \quad T_2 = (R_1 + R_2) C_1, \quad K_1 = \frac{1}{(1 + \frac{R_2}{R_1}) \frac{T_1}{T_2} + 1}$ |



第3章 控制系统分析

研究控制理论的最终目的,是要能够分析和设计一个工程上实用的控制系统,使之能够按照人们所预定的性能指标和要求正常工作。为了达到这一目的,必须首先对系统进行分析和研究。通过对大量系统的分析,总结出一些典型的共同规律,用来指导如何去设计具体系统。

对系统进行各种分析的前提是系统必须是稳定的。但是任何一个动态系统,在运动过程中不可避免地会出现各种干扰。另外,描述动态系统的物理模型和数学模型也会有各种各样的误差,所有这些客观存在的扰动和误差都会使系统运动偏离所预定的轨迹。如果偏离超出一定范围,那就可能成为一个不稳定系统,并且不能正常工作。因此,对系统稳定性的分析是最重要的问题。

1 控制系统的稳定性

1.1 稳定性概念

李雅普诺夫(Lyapunov)关于系统稳定性的三个基本概念就是稳定性、渐近稳定性和全局渐近稳定性。

1.1.1 稳定性

设系统的状态方程为

$$\dot{x} = f(x, t) \quad (5.3-1)$$

式中 x —— n 维状态矢量;

$f(x, t)$ —— n 维函数矢量。

其平衡状态为 x_0 。在平衡状态的邻域上取半径为 δ 的球域 $S(\delta)$

$$\|x - x_0\| \leq \delta \quad (5.3-2)$$

且

$$\|x - x_0\| = [(x_1 - x_{10})^2 + (x_2 - x_{20})^2 + \dots + (x_n - x_{n0})^2]^{\frac{1}{2}} \quad (5.3-3)$$

另取以 ϵ 为半径的球域 $S(\epsilon)$

$$\|\phi(t, x_0, t_0)\| \leq \epsilon \quad (5.3-4)$$

式中 $\phi(t, x_0, t_0)$ ——方程(5.3-1)的解。

如果对每一个 $S(\epsilon)$ 都存在一个 $S(\delta)$, 且当 $t > t_0$ 时, 从 $S(\delta)$ 中出发的任意轨迹不会越出 $S(\epsilon)$, 则称方程(5.3-1)所描述的系统, 其平衡点 x_0 在李雅普诺夫意义下是稳定的。

一般来说, 实数 δ 与 ϵ 有关, 通常也与 t_0 有关。如果 δ 与 t_0 无关, 则称这时的稳定平衡状态为一致稳定平衡状态。

1.1.2 渐近稳定

如果从 $S(\delta)$ 出发的任意一条轨迹, 当 t 无限增加时不离开 $S(\epsilon)$, 即平衡状态 x_0 在李雅普诺夫意义下是稳定的, 且又收敛于 x_0 , 则称式(5.3-1)所描述系统的平衡状态 x_0 是渐近稳定的。

在控制系统理论中, 所谓稳定性通常指的是渐近稳定, 渐近稳定是局部稳定问题。只确定平衡状态稳定性, 并不意味着系统能正常工作, 还必须确定渐近稳定的最大范围。对于渐近稳定系统, 当其输入为有界时, 输出也为有界。对于定常线性系统, 其渐近稳定的充要条件是系统特征方程根的实部全为负。

1.1.3 全局渐近稳定

如果从状态空间中任意状态出发的轨迹都保持渐近稳定, 则这种平衡状态就称为全局渐近稳定。即当 t 无限增加时, 式(5.3-1)的每个解都收敛于 x_0 。所以全局渐近稳定的特点就是在全状态空间中只有一个平衡点。

在控制问题中, 如果平衡状态不是全局渐近稳定的, 就需确定渐近稳定的最大范围, 这通常是比较困难的。对于实际问题, 能够确定渐近稳定范围足够大, 而系统受到扰动后, 它的运动并不超越此范围也就足够了。

1.1.4 不稳定性

对于某一实数 $\epsilon > 0$ 和任意实数 $\delta > 0$, 不管 δ 多么小, 在 $S(\delta)$ 内总存在有 x_0 , 从这点出发的轨迹总要离开 $S(\epsilon)$, 则称平衡状态 x_0 是不稳定的。

现以二维平面为例说明稳定性概念。图 5.3-1 分



别给出稳定性和不稳定性的四种情况。

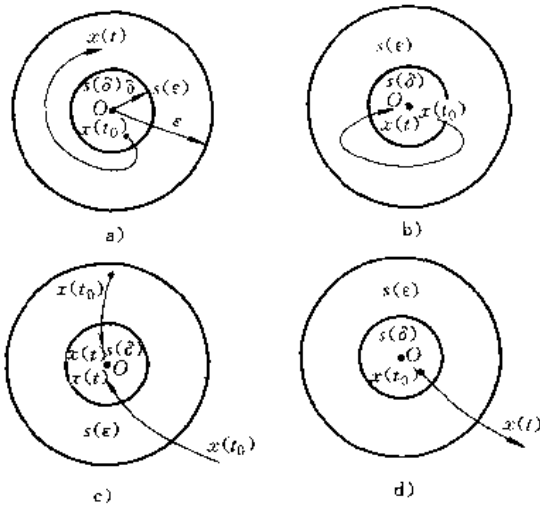


图 5-3-1 稳定性几何示意图

a) 稳定 b) 渐近稳定 c) 全局渐近稳定 d) 不稳定

1.2 劳思 (Routh) 和赫尔维茨 (Hurwitz) 稳定判据

控制系统的稳定条件是其特征方程的根均为负实根或实部为负的复根。其根的性质是由系统特征方程式各系数确定的。因此,可以直接根据这些系数判别特征方程式根的性质。

设系统特征方程为

$$a_0 s^n + a_1 s^{n-1} + \dots + a_{n-1} s + a_n = 0 \quad (5.3-5)$$

系统稳定的必要条件是:特征方程 (5.3-5) 的全部系数 a_i ($i=0, 1, \dots, n$) 皆不为零,且有相同的符号。

1.2.1 劳思稳定判据

劳思判据是根据常参数线性系统特征方程的系数判别其稳定性,同时还可确定不稳定特征根和虚根的数目,以及根取值的大致范围。

劳思判据就是根据特征方程式 (5.3-5) 的系数作劳思表:

$$\begin{array}{cccccc} s^n & a_0 & a_2 & a_4 & a_6 & \dots \\ s^{n-1} & a_1 & a_3 & a_5 & a_7 & \dots \\ s^{n-2} & b_1 & b_2 & b_3 & b_4 & \dots \\ s^{n-3} & c_1 & c_2 & c_3 & c_4 & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{array}$$

表中, b_1, b_2, b_3, \dots 可用下式进行计算:

$$b_1 = \frac{a_1 a_2 - a_0 a_3}{a_1} \quad b_2 = \frac{a_1 a_4 - a_0 a_5}{a_1}$$

$$b_3 = \frac{a_1 a_6 - a_0 a_7}{a_1} \quad \dots \quad (5.3-6)$$

系数 b_i 的计算一直进行到某 b_i 值后全部为零时为止。下面系数的计算类同,即

$$\begin{array}{l} c_1 = \frac{b_1 a_3 - a_1 b_2}{b_1} \quad c_2 = \frac{b_1 a_5 - a_1 b_3}{b_1} \\ c_3 = \frac{b_1 a_7 - a_1 b_4}{b_1} \quad \dots \end{array} \quad (5.3-7)$$

这种计算一直进行到第 $n+1$ 行结束,所得到的系数排列是三角形阵列。

根据上述对系数的计算可以推知,特征方程式 (5.3-5) 实部为正的根的数目等于劳思表中第一列系数的变号数,所以,劳思判据为,特征方程式 (5.3-5) 的根的实部全为负的充要条件是劳思表中第一列系数全部为正。

在计算过程中,用任意正数去乘或除某行,其系统稳定性结论不变。

【例 5.3-1】 给定系统的特征方程为

$$s^4 + s^3 - 25s^2 - 19s + 30 = 0 \quad (5.3-8)$$

试判别其稳定性。

解 现用劳思判据,判别其实部为正的根数。

作劳思表

$$\begin{array}{cccc} s^4 & 1 & -25 & 30 \\ s^3 & 1 & -19 & \\ s^2 & -6 & 30 & \\ s^1 & -14 & & \\ s^0 & 30 & & \end{array}$$

该表第一列系数变号两次,说明方程 (5.3-8) 有两个实部为正的根,故系统不稳定。

1.2.2 赫尔维茨稳定判据

它是代数稳定判据的另一种形式,和劳思判据是等价的。

对特征方程式 (5.3-5) 的系数作下列矩阵:

$$\begin{bmatrix} a_1 & a_0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots \\ a_3 & a_2 & a_1 & a_0 & 0 & 0 & \dots \\ a_5 & a_4 & a_3 & a_2 & a_1 & a_0 & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \\ a_{2n-1} & a_{2n-2} & \dots & \dots & & & a_n \end{bmatrix}$$

(5.3-9)

矩阵式 (5.3-9) 排列的规则是:对角线上的元素为特征方程系数,由 a_1 到 a_n 。每行元素从对角线上的元素开始向左排列下标逐渐增加,向右排列下标逐渐减小。取矩阵式 (5.3-9) 诸主子式行列式,即有



$$\left. \begin{aligned} \Delta_1 &= a_1 \\ \Delta_2 &= \begin{vmatrix} a_1 & a_0 \\ a_3 & a_2 \end{vmatrix} \\ \dots \\ \Delta_n &= \begin{vmatrix} a_1 & a_0 & 0 & 0 & \dots \\ a_3 & a_2 & a_1 & a_0 & \dots \\ a_5 & a_4 & a_3 & a_2 & \dots \\ \vdots & & & & \vdots \\ 0 & \dots & & & a_n \end{vmatrix} \end{aligned} \right\} \quad (5.3-10)$$

赫尔维茨稳定判据：具有特征方程式 (5.3-5) 的系统稳定的充要条件为 $\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_n$ 皆为正。从应用角度看，劳思判据比赫尔维茨判据计算方便，因此前者应用比较广泛。

1.3 奈奎斯特稳定判据

它是根据系统开环频率特性判别其闭环系统稳定性的判据。

假定开环系统传递函数 $W(s)$ 在 s 平面的右半平面上有 P 个极点，且 $\lim_{s \rightarrow \infty} W(s) = \text{常量}$ ，则当 ω 从 $-\infty$ 变到 $+\infty$ ， $W(j\omega)$ 逆时针包围点 $(-1, j0)$ P 次时，对应的闭环系统是稳定的。根据这一判据，

$$Z = N + P \quad (5.3-11)$$

式中 Z —— $1+W(s)$ 在 s 右半平面上的零点数，即闭环系统在 s 右半平面上的极点数；

N ——当 ω 从 $-\infty$ 变到 $+\infty$ 时， $W(j\omega)$ 顺时针包围 $(-1, j0)$ 点的次数。

对于稳定的闭环系统， $Z=0$ ，则 $N=-P$ ，即当 ω 从 $-\infty$ 变到 $+\infty$ 时， $W(j\omega)$ 逆时针包围点 $(-1, j0)$ P 次。

若 $W(s)$ 在 s 右半平面无极点，即 $P=0$ ，如果闭环系统稳定， $Z=0$ ，则当 ω 从 $-\infty$ 变到 $+\infty$ 时， $W(j\omega)$ 不包围点 $(-1, j0)$ 。

当 ω 从 $-\infty$ 变到 $+\infty$ 时， $W(j\omega)$ 顺时针包围 $(-1, j0)$ 点，则闭环系统一定是不稳定的。

当 $W(s)$ 有零点或极点位于虚轴上时，则属特殊情况，奈奎斯特判据仍然适用。

系统开环频率特性可以采用解析方法计算或用实验方法获得。在不能导出系统运动方程，而只能靠实验方法测得频率特性时，奈奎斯特判据就显出其具有突出的优点。

【例 5.3-2】 设系统开环传递函数为

$$W(s) = \frac{K}{(T_1s + 1)(T_2s + 1)}$$

试判别闭环系统的稳定性。

解 开环系统频率特性如图 5.3-2 所示。

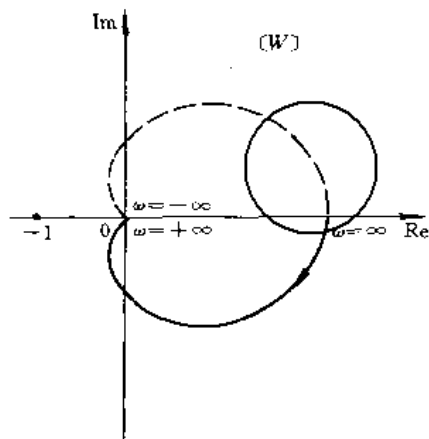


图 5.3-2 开环系统频率特性

由图 5.3-2 可知， $P=0, N=0$ ，故 $Z=0$ 。故对任意 K, T_1, T_2 ，闭环系统均稳定。

1.4 稳定贮备

稳定贮备是衡量系统所具有的稳定程度在量的方面的尺度。具体可用相位裕度 γ 和增益裕度 K_g 来度量。

相位裕度 γ 是指系统开环频率特性的幅值 $|W(j\omega_c)|$ 为 1 时对应频率 ω_c 上，使系统达到不稳定边缘所需要的附加相位滞后量，即

$$\gamma = 180^\circ + \angle W(j\omega_c) \quad (5.3-12)$$

式中 $\angle W(j\omega_c)$ ——系统开环频率特性在 ω_c 处的相角。

增益裕度 K_g 是指在系统开环频率特性相位等于 -180° 时对应频率 ω_g 上，幅值 $|W(j\omega_g)|$ 的倒数

$$K_g = \frac{1}{|W(j\omega_g)|} \quad (5.3-13)$$

以 dB 表示时

$$20 \lg K_g = -20 \lg |W(j\omega_g)| \quad (\text{dB}) \quad (5.3-14)$$

为了得到满意可靠的控制系统性能，相位裕度 γ 一般在 $30^\circ \sim 60^\circ$ 之间，增益裕度一般不大于 6dB。图 5.3-3 表示了开环系统是稳定的，闭环系统为稳定或不稳定时的相位裕度 γ 和增益裕度 K_g 。



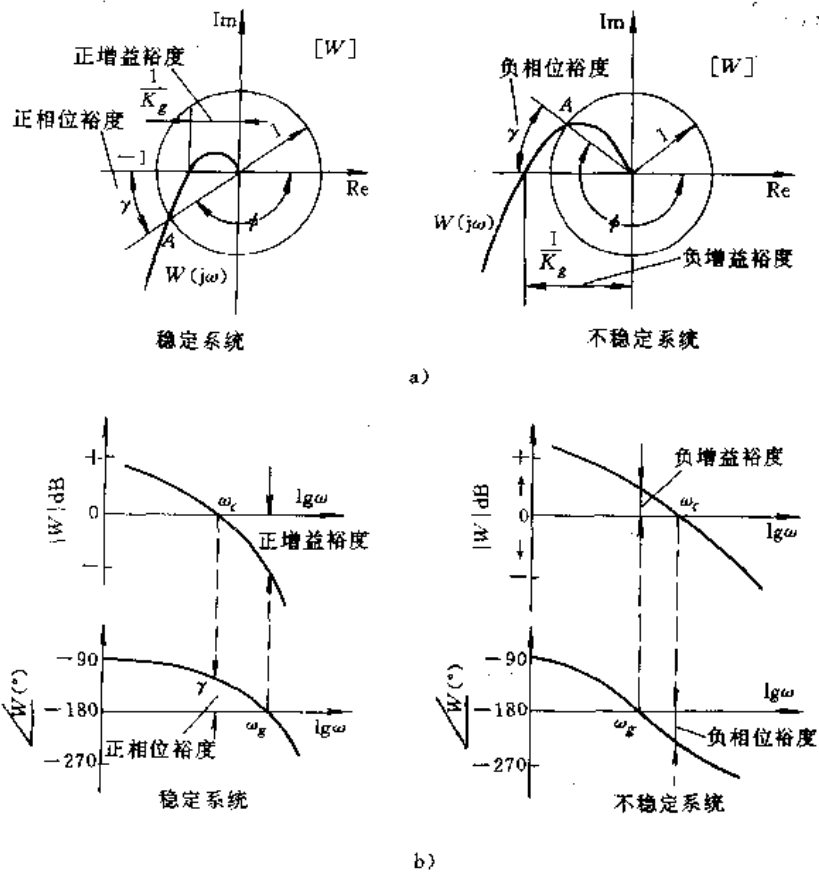


图 5-3-3 相位裕度和增益裕度

a) 根坐标 b) 伯德图

1.5 李雅普诺夫稳定性理论

李雅普诺夫稳定性理论是应用非常广泛的理论,它不仅适用于线性系统,而且也适用于非线性系统,它不受系统阶次的限制,也不需要求解系统方程,尤其是在其他方法无效的情况下,它能有效地解决一些系统的稳定性判别问题。

定理 1 稳定性定理

对于系统

$$\dot{x}(t) = f[x(t), t] \quad t \geq 0 \quad (5.3-15)$$

$f(0, t) = 0, x(t) \in R^n$ 。如果存在一个具有连续一阶偏导数的标量函数 $V(x, t)$, 对于任意 $\epsilon > 0$ 的实数, 这个标量函数在 $\|x\| < \epsilon$ 范围内, 对于所有的 x 都满足下列条件:

- (1) $V(x, t)$ 是正定的;
- (2) $\dot{V}(x, t)$ 是半负定的, 即 $\dot{V}(x, t) \leq 0$

则系统在原点是稳定的。

定理 2 渐近稳定定理

系统条件同定理 1, 如能满足:

- (1) $V(x, t)$ 是正定的;
- (2) $\dot{V}(x, t)$ 是负定的, 即 $\dot{V}(x, t) < 0$

则系统是渐近稳定的。

定理 3 全局渐近稳定定理

如果定理 2 的所有条件成立, 此外当 $\|x\| \rightarrow \infty$ 时, 有 $V(x, t) \rightarrow \infty$, 则系统在原点是全局(或大范围)渐近稳定的。

定理 4 不稳定定理

系统条件同定理 1, 但如果满足下列条件:

- (1) $V(x, t)$ 是正定的;
- (2) $\dot{V}(x, t) > 0$

则系统在原点处是不稳定的。

由上所述, 李雅普诺夫直接法的基本点是:

(1) 在平衡点附近, 构成一个正定的李雅普诺夫标量函数 $V(x, t)$, 且 $V(x, t)$ 中 x 项的最低阶数必须为偶数。经常采用的 $V(x, t)$ 为二次型函数

$$V(x, t) = \sum_{i=1}^n a_i x_i^2 \quad (5.3-16)$$

式中 a_i —— 正实数。



(2) 求 $V(x,t)$ 对时间的全导数

$$\dot{V}(x,t) = \sum_{i=1}^n \frac{\partial V}{\partial x_i} \dot{x}_i + \frac{\partial V}{\partial t} \quad (5-3-17)$$

对自治系统, $V(x)$ 不显含时间 t , 则 $V(x)$ 的时间导数可用下列矢量形式表示:

$$\begin{aligned} \dot{V}(x) &= \begin{bmatrix} \frac{\partial V}{\partial x_1} & \frac{\partial V}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial V}{\partial x_n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial x_1}{\partial t} & \frac{\partial x_2}{\partial t} & \dots & \frac{\partial x_n}{\partial t} \end{bmatrix}^T \\ &= \begin{bmatrix} \frac{\partial V}{\partial x_1} & \frac{\partial V}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial V}{\partial x_n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ f_2(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ \dots \\ f_n(x_1, x_2, \dots, x_n) \end{bmatrix}^T \end{aligned} \quad (5-3-18)$$

其简洁形式为

$$\dot{V}(x) = [f(x)] \text{grad} V \quad (5-3-19)$$

应用李雅普诺夫理论分析线性定常系统稳定性时, 有如下定理。

定理 5 设系统方程为

$$\dot{x}(t) = Ax(t) \quad (5-3-20)$$

若 A 为非奇异矩阵, 则原点 $x=0$ 是全局渐近稳定的充要条件是: 给定一正定的实对称矩阵 Q , 存在有与之对应的正定对称阵 P , 满足下列李雅普诺夫方程:

$$A^T P + PA = -Q \quad (5-3-21)$$

并且二次型标量函数 $x^T P x$ 就是系统(5-3-20)的李雅普诺夫函数, 即 $V(x) = x^T P x$, 则 $\dot{V}(x) = x^T (A^T P + PA)x$ 。取 $A^T P + PA = -Q$, 则有 $\dot{V}(x) = -x^T Q x$ 。为使系统平衡点 $x=0$ 是渐近稳定的, 这就要求 Q 为正定的。应用该定理时, 应注意:

(1) 若 $\dot{V}(x) = -x^T Q x$ 沿任意一条轨迹不恒为零, 则 Q 可取半正定阵。

(2) 一般来说, 先选定正定阵 Q , 然后通过 $A^T P + PA = -Q$ 计算 P 。由于 P 和 Q 均为对称阵, 故式(5-3-21)共含有 $n(n+1)/2$ 个代数方程。

(3) 在通常情况下, 选取 $Q=I$, 然后定 P , 并校验其是否正定。为保证 Q 和 P 皆为正定矩阵, 在计算过程中, Q 和 P 元素可随时调整。

(4) 二次型 $V(x) = x^T P x$ 可以作为李雅普诺夫函数的最简单的一类函数。

【例 5-3-3】 设非线性系统的状态方程为

$$\dot{x}_1 = -x_1 + 2x_1^2 x_2$$

$$\dot{x}_2 = -x_2$$

可以选 $V(x) = x_1^2 + x_2^2$, 则

$$\begin{aligned} \dot{V}(x) &= \frac{\partial V}{\partial x_1} \dot{x}_1 + \frac{\partial V}{\partial x_2} \dot{x}_2 \\ &= -2x_1^2(1 - 2x_1 x_2) - 2x_2^2 \end{aligned}$$

当 $1 - 2x_1 x_2 > 0$ 时, $\dot{V}(x)$ 是负定的, 因此可得到图 5-3-4 所

示的系统的稳定区域。从图中可知, 原点是渐近稳定的。

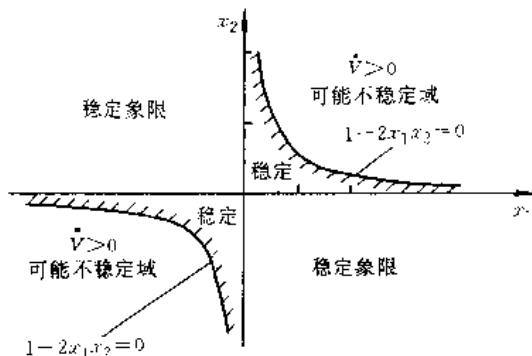


图 5-3-4 系统的稳定区域

2 控制系统动态特性分析

任何一个自动控制系统, 首先应该是稳定的。但是, 稳定的控制系统的工作情况可能是各不相同的; 有的精度高, 有的低; 有的动作快, 有的慢。因此, 在保证控制系统稳定的条件下, 应进一步研究控制系统在稳定条件下的工作质量, 以判定能否满足对控制系统所提出的要求。

控制系统从一个工作状态到达另一个工作状态的过渡过程, 就是系统的动态特性, 它全面地描述了控制系统的性能。

控制系统在实际运行中所接受的输入信号和干扰形式多样, 这就决定了控制系统的过渡过程形式也各异。为研究问题方便, 并使研究结果具有普遍意义, 常选择一些有代表性的典型信号。工程上常以控制系统承受单位阶跃作用和单位冲激函数作用下所产生的过渡过程来衡量控制系统的工作情况。

衡量过渡过程质量的指标是: 过渡过程时间 t_s 、超调量 δ 、振荡次数 n 、上升时间 t_r 、滞后时间 t_d 和稳态误差 ϵ_∞ 。

对控制系统进行质量分析时, 可用直接法求取过渡过程, 以确定上述各项指标, 也可用间接法确定上述指标。

2.1 直接分析法

直接法就是设法直接求取控制系统在典型外作用下的过程 $y(t)$ 。设系统的传递函数为

$$\Phi(s) = \frac{M(s)}{N(s)} \quad (5-3-22)$$

在单位阶跃作用下输出信号的拉氏变换式为

$$y(s) = \frac{M(s)}{N(s)} \frac{1}{s} \quad (5-3-23)$$

若已知特征方程 $N(s)=0$ 的根为 $s_i, i=1, 2, \dots$,



n , 且没有重根, 则根据拉氏反变换, 有

$$y(t) = \sum_{i=1}^n \frac{M(s_i)}{s_i N'(s_i)} e^{s_i t} + \frac{M(0)}{N(0)} \quad (5.3-24)$$

式中
$$N'(s_i) = \left. \frac{\partial N(s)}{\partial s} \right|_{s=s_i} \quad (5.3-25)$$

因此, 当求得特征方程 $N(s) = 0$ 的根为 s_i 时, 即可求出过渡过程。

直接近似求解特征根的方法之一, 可参考文献 [1]。



2.2 瞬态响应

分析控制系统的一般步骤是加入一个典型输入, 如阶跃、冲激或正弦输入, 然后求其输出响应。对于稳定系统, 输出响应将含有一个瞬态分量(响应)和一个稳态分量。

常用的两种典型输入:

(1) 单位冲激函数 $\delta(t)$, 其定义为

当 $t \neq 0$ 时, $\delta(t) = 0$; $t = 0$ 时, $\delta(t) = \infty$, 且其积分 $\int_{-\infty}^{+\infty} \delta(t) dt = 1$ 。

(2) 单位阶跃函数 $1(t)$, 其定义为

当 $t = 0^-$ 时, $1(t) = 0$; 当 $t \geq 0^+$ 时, $1(t) = 1$ 。

2.2.1 冲激过渡函数

系统在单位冲激函数 $\delta(t)$ 作用下, 在输出端得到的响应, 称为冲激过渡函数 $k(t)$ 。

任何外作用信号均可用足够多的脉冲之和来表示, 如图 5.3-5 所示。图中 $f(t)$ 为外作用, 每个脉冲宽度为 Δt_i , 高度为 $f(t_i)$, 每个脉冲可表示为

$$f(t_i) \Delta t_i \delta(t - t_i)$$

$f(t)$ 可近似表示为

$$f(t) = \sum_{i=-n}^n f(t_i) \Delta t_i \delta(t - t_i) \quad (5.3-26)$$

当 n 足够大时, 上式可精确地表示 $f(t)$ 。

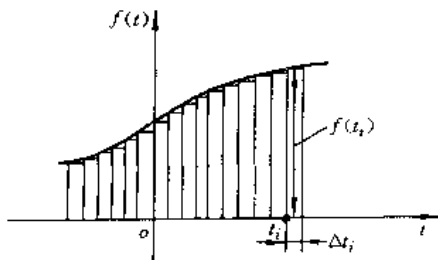


图 5.3-5 $f(t)$ 用单位冲激函数表示

根据定义, 由 $\delta(t - t_i)$ 作用于系统产生的输出应为 $k(t - t_i)$, 则由 $f(t_i) \Delta t_i \delta(t - t_i)$ 作用产生的输出为

$$f(t_i) \Delta t_i k(t - t_i) \quad (5.3-27)$$

由式 (5.3-26) 表示的 $f(t)$ 产生的输出为

$$y(t) = \sum_{i=-n}^n f(t_i) k(t - t_i) \Delta t_i \quad (5.3-28)$$

当 $\Delta t_i \rightarrow 0$ 时, 有

$$y(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} k(t - \tau) f(\tau) d\tau \quad (5.3-29)$$

根据控制系统的物理实现性条件, 当 $t < \tau$ 时, $k(t - \tau) = 0$ 。故式 (5.3-29) 可改写成

$$y(t) = \int_{-\infty}^t k(t - \tau) f(\tau) d\tau \quad (5.3-30)$$

令 $\lambda = t - \tau$, 则上式变为

$$y(t) = - \int_{\infty}^0 k(\lambda) f(t - \lambda) d\lambda$$

或写成一般用变量 τ 的形式

$$y(t) = \int_0^{\infty} k(\tau) f(t - \tau) d\tau \quad (5.3-31)$$

这样, 只要设法求得控制系统的冲激过渡函数 $h(t)$, 则控制系统对任意外作用的响应即可按式 (5.3-31) 求得。

2.2.2 单位阶跃响应函数

控制系统在单位阶跃函数 $1(t)$ 作用下, 在输出端得到的响应, 定义为单位阶跃响应函数 $h(t)$ 。

任意一个外作用 $f(t)$ 均可用足够多个单位阶跃函数 $1(t)$ 之和表示, 如图 5.3-6 所示。每个单位阶跃函数开始作用的时间为 t_i , 其高度为 $\Delta f(t_i)$, 即

$$\Delta f(t_i) \cdot 1(t - t_i)$$

这样, $f(t)$ 可近似表示为

$$f(t) = \sum_{i=-n}^n \Delta f(t_i) \cdot 1(t - t_i) \quad (5.3-32)$$

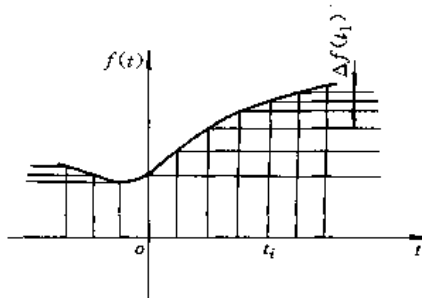


图 5.3-6 $f(t)$ 用单位阶跃函数表示

由外作用 $f(t)$ 产生的控制系统输出可表示为

$$y(t) = \int_0^{\infty} f(t - \tau) h(\tau) d\tau \quad (5.3-33)$$

一般可用单位冲激函数和单位阶跃函数作用于控制系统所产生的过渡过程来评价控制系统的品质。



表征过渡过程结束后的稳态特性的指标为稳态误差 e_{∞} 。瞬态响应各指标的含义如图 5-3-7 所示。

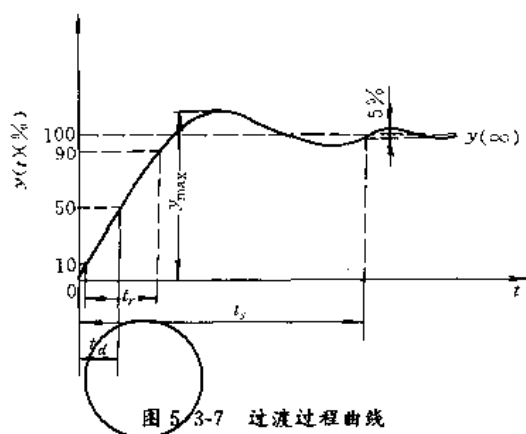


图 5-3-7 过渡过程曲线

超调量 σ 定义为

$$\sigma\% = \frac{y_{\max} - y(\infty)}{y(\infty)} \times 100\%$$

滞后时间 t_d 为响应曲线第一次达到稳态值 $y(\infty)$ 一半所需的时间。

上升时间 t_r 为响应曲线从稳态值的 10% 上升到 90% 所需的时间。

过渡过程时间 t_s 为系统受到阶跃扰动作用后从一个平衡状态到达新的平衡状态 5% 范围所经历的时间。

2.3 二阶系统时域响应

在工程实际控制系统中，许多系统均可处理成二阶系统，其系统框图如图 5-3-8 所示。其闭环传递函数可写成

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (5.3-34)$$

二阶系统的动态特性，可用阻尼比 ζ 和自然振荡频率 ω_n 两个参量加以描述。

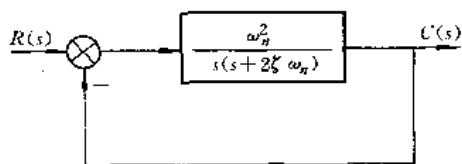


图 5-3-8 二阶系统框图

2.3.1 二阶系统的阶跃响应

图 5-3-8 所示二阶系统对单位阶跃输入的响应，可分为欠阻尼 ($0 < \zeta < 1$)、临界阻尼 ($\zeta = 1$) 和过阻尼 ($\zeta > 1$) 三种不同情况进行研究。

(1) 欠阻尼情况 ($0 < \zeta < 1$)。这时 $C(s)/R(s)$ 可写

成

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{\omega_n^2}{(s + \zeta\omega_n + j\omega_d)(s + \zeta\omega_n - j\omega_d)}$$

$$\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}$$

式中 ω_d —— 阻尼振荡频率。

对单位阶跃输入， $C(s)$ 可写成

$$C(s) = \frac{\omega_n^2}{(s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2)s} \quad (5.3-35)$$

对上式进行拉氏反变换，得阶跃响应 $c(t)$ 为

$$c(t) = 1 - \frac{e^{-\zeta\omega_n t}}{\sqrt{1 - \zeta^2}} \times \sin\left(\omega_d t + \arctan \frac{\sqrt{1 - \zeta^2}}{\zeta}\right) \quad t \geq 0$$

(5.3-36)

当 $\zeta = 0$ 时， $c(t) = 1 - \cos\omega_n t$ ，系统将以频率 ω_n 振荡；当 $\zeta > 1$ 时，系统响应为过阻尼，不产生振荡。

(2) 临界阻尼情况 ($\zeta = 1$)

$$C(s) = \frac{\omega_n^2}{(s + \omega_n)^2} \quad (5.3-37)$$

$$c(t) = 1 - e^{-\omega_n t}(1 + \omega_n t) \quad t \geq 0 \quad (5.3-38)$$

(3) 过阻尼情况 ($\zeta > 1$)

$$C(s) = \frac{\omega_n^2}{(s + \zeta\omega_n + \omega_n \sqrt{\zeta^2 - 1})(s + \zeta\omega_n - \omega_n \sqrt{\zeta^2 - 1})s} \quad (5.3-39)$$

$$c(t) = 1 + \frac{\omega_n}{2\sqrt{\zeta^2 - 1}} \left(\frac{e^{-s_1 t}}{s_1} - \frac{e^{-s_2 t}}{s_2} \right) \quad t \geq 0$$

(5.3-40)

$$s_1 = (\zeta + \sqrt{\zeta^2 - 1})\omega_n$$

$$s_2 = (\zeta - \sqrt{\zeta^2 - 1})\omega_n$$

这时系统的响应 $c(t)$ 含两个衰减的指数项。

图 5-3-9 给出了一族随 ζ 变化的响应曲线 $c(t)$ ，图中横坐标为无量纲量 $\omega_n t$ 。

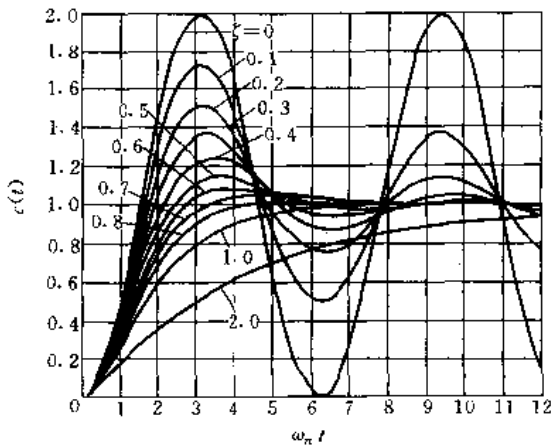


图 5-3-9 二阶系统单位阶跃响应曲线



2.3.2 二阶系统的冲激响应

当输入信号 $r(t)$ 为单位冲激函数时,二阶系统的单位冲激响应 $C(s)$ 为

$$C(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}$$

当 $0 \leq \zeta < 1$ 时,

$$c(t) = \frac{\omega_n}{\sqrt{1-\zeta^2}} e^{-\zeta\omega_n t} \sin(\omega_n \sqrt{1-\zeta^2} t) \quad t \geq 0 \quad (5.3-41)$$

当 $\zeta = 1$ 时,

$$c(t) = \omega_n^2 t e^{-\omega_n t} \quad t \geq 0 \quad (5.3-42)$$

当 $\zeta > 1$ 时,

$$c(t) = \frac{\omega_n}{2\sqrt{\zeta^2-1}} e^{-(\zeta-\sqrt{\zeta^2-1})\omega_n t} - \frac{\omega_n}{2\sqrt{\zeta^2-1}} e^{-(\zeta+\sqrt{\zeta^2-1})\omega_n t} \quad t \geq 0 \quad (5.3-43)$$

图 5.3-10 给出不同 ζ 值时系统的单位冲激响应曲线。

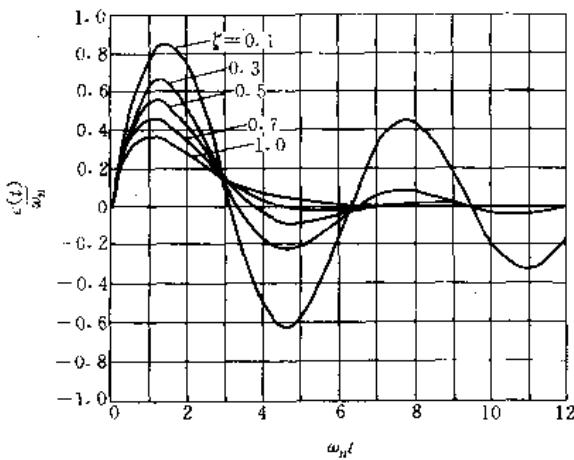


图 5.3-10 二阶系统单位冲激响应曲线

2.4 稳态误差及误差系数

闭环控制系统误差的稳态分量称为系统的稳态误差。它反映控制系统跟踪输入信号的准确度和抑制干扰的能力。图 5.3-11a 为一般系统框图,运用叠加原理,可画出图 5.3-11b 和 c 所示的反馈系统框图。定义误差信号 $e(t)$ 为

$$e(t) = r(t) - c(t)$$

由图 5.3-11b,c 可知:

$$E(s) = \Phi_e(s)R(s) + \Phi_f(s)F(s) \quad (5.3-43)$$

$$\Phi_e(s) = \frac{1}{1 + W_d(s)W_3(s)}$$

$$\Phi_f(s) = \frac{-W_2(s)W_3(s)}{1 + W_d(s)W_3(s)}$$

$$W_d(s) = W_1(s)W_2(s)$$

式中 $\Phi_e(s)$ ——对输入信号 $R(s)$ 的误差传递函数;

$\Phi_f(s)$ ——对干扰 $F(s)$ 的误差传递函数。

$$e(t) = \mathcal{L}^{-1}[E(s)] = \mathcal{L}^{-1}[\Phi_e(s)R(s)] + \mathcal{L}^{-1}[\Phi_f(s)F(s)] = e_r(t) + e_f(t) \quad (5.3-44)$$

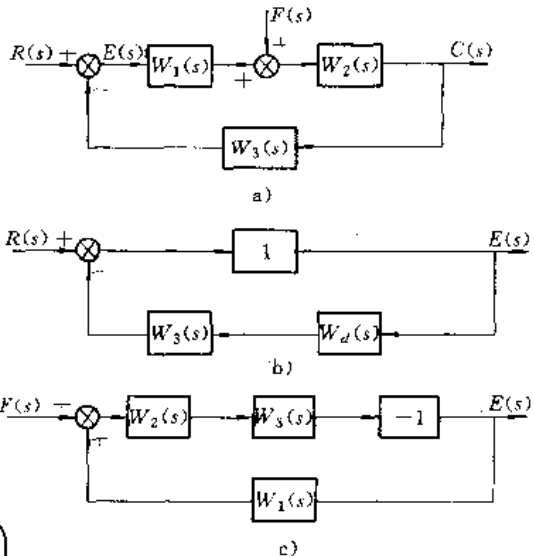


图 5.3-11 控制系统框图

$e(t)$ 中包含有误差的暂态分量和稳态分量,其稳态分量为

$$e_s(t) = e_{rs}(t) + e_{fs}(t) \quad (5.3-45)$$

式中 $e_{rs}(t)$ ——输入信号 $r(t)$ 引起的稳态误差;

$e_{fs}(t)$ ——干扰信号 $f(t)$ 引起的稳态误差。

终值定理为求稳态误差提供了一个简便的方法。

设系统误差信号 $E(s)$ 为

$$E(s) = \frac{1}{1 + W_d(s)W_3(s)} R(s) \quad (5.3-46)$$

则系统的终值误差为

$$e_s(\infty) = \lim_{s \rightarrow 0} sE(s) = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{sR(s)}{1 + W_d(s)W_3(s)} \quad (5.3-47)$$

在控制系统设计中,通常采用稳态误差系数作为系统的品质指标。系数越大,稳态误差就越小。

设系统开环传递函数为

$$W_d(s)W_3(s) = \frac{K}{s^r} \cdot \frac{1 + b_1s + b_2s^2 + \dots + b_ms^m}{1 + a_1s + a_2s^2 + \dots + a_ns^n}$$

则误差传递函数为



$$\begin{aligned} \Phi_e(s) &= \frac{1}{1+W_d(s)W_3(s)} \\ &= \frac{s^v(1+a_1s+\dots+a_ns^n)}{s^v(1+a_1s+\dots+a_ns^n)+K(1+b_1s+\dots+b_ms^m)} \\ &= \sum_{i=0}^{\infty} \frac{c_i}{i!} s^i \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} e_s(t) &= c_0r(t) + c_1\dot{r}(t) + \frac{c_2}{2!}\ddot{r}(t) + \dots \\ &= \sum_{i=0}^k \frac{c_i}{i!} r^{(i)}(t) \end{aligned} \quad (5.3-48)$$

k 的选择取决于输入信号的形式和所要求的计算精度。

式中 $c_0, c_1, \dots, c_i, \dots$ 称为稳态误差系数。

若已知输入信号 $r(t)$, 可得稳态误差为

表 5.3-1 给出控制系统在典型输入信号作用下稳态误差与无差度 ν 和 K 的关系。

表 5.3-1 系统无差度、输入信号与稳态误差的关系

| 开环系统中纯积分环节数 ν | 开环放大系数 K | 稳态误差 | | |
|-------------------|----------------------------------------|--------------------|-----------------|--------------------|
| | | 阶跃输入 $r(t) = 1(t)$ | 等速输入 $r(t) = t$ | 等加速输入 $r(t) = t^2$ |
| 0 (0 阶无差度) | $K = K_p$ 称位置放大系数 (无量纲) | $\frac{1}{1+K_p}$ | 随 t 增加而增大 | 随 t 增加而增大 |
| 1 (1 阶无差度) | $K = K_v$ (1/s) 称速度放大系数 | 0 | $\frac{1}{K_v}$ | 随 t 增加而增大 |
| 2 (2 阶无差度) | $K = K_a$ (1/s ²) 称加速度放大系数 | 0 | 0 | $\frac{2}{K_a}$ |
| 3 (3 阶无差度) | | 0 | 0 | 0 |

3 根轨迹法

3.1 根轨迹概念

系统过渡过程的基本特性与其闭环极点和零点在 s 平面上的分布位置有关。闭环极点在 s 平面上的分布又与开环极点和零点的分布密切相关。根轨迹法是一种图解法, 已知系统开环传递函数的极点和零点分布, 研究其某一个或某些参数变化对系统闭环极点分布的影响。同时, 若已知开环极点和零点分布, 经过简单的计算和作图, 即可确定满足系统性能指标的控制器极点和零点的分布。

控制系统特征方程的根随系统某一参数变化在 s 平面上的运动轨迹, 称控制系统的根轨迹。对图 5.3-12 所示的控制系统, 其特征方程为

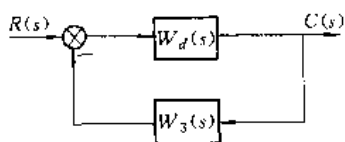


图 5.3-12 控制系统框图

$$1+W(s)=0 \quad (5.3-49)$$

$$\begin{aligned} W(s) &= k \frac{(s-z_1)(s-z_2)\dots(s-z_m)}{(s-p_1)(s-p_2)\dots(s-p_n)} \\ &= kW_1(s) \quad (n \geq m) \end{aligned}$$

式中, $p_i (i=1, \dots, n)$ 和 $z_j (j=1, \dots, m)$ 分别为系统的开环极点和零点; k 为与开环放大系数 K 有关的参数。式(5.3-49)可写成

$$W_1(s) = -\frac{1}{k} \quad (5.3-50)$$

根据定义, 特征方程 $1+W(s)=0$ 的根随参数 k 的变化在 s 平面上的运动轨迹即为闭环系统根轨迹。根轨迹上的每一点都应满足下列幅值条件和相角条件, 即

$$|W_1(s)| = \frac{1}{|k|} \quad -\infty < k < +\infty \quad (5.3-51)$$

$$\angle W_1(s) = (2i+1)\pi, i=0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad k \geq 0 \quad (5.3-52)$$

$$\angle W_1(s) = 2i\pi, i=0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad k < 0 \quad (5.3-53)$$

3.2 绘制根轨迹的基本规则

根据根轨迹应满足的相角条件式(5.3-52)和幅值条件式(5.3-51), 可得出下列基本规则:

- 1. 根轨迹的分支数** 根轨迹的分支数与闭环极点数目相等。
- 2. 连续性与对称性** 根轨迹是连续且对称于实轴的曲线。
- 3. 根轨迹的起点与终点** 根轨迹起始于开环极点, 终止于开环零点。若 $m < n$, 则有 $n-m$ 条根轨迹终



止于无穷远处。

4. 根轨迹的渐近线 根轨迹的渐近线共有 $n-m$ 条。渐近线与实轴正方向的夹角

$$\theta = \frac{\pm(2i+1)\pi}{n-m} \quad (i=0,1,\dots,n-m-1) \quad (5.3-54)$$

所有渐近线都相交于实轴上的一点,其位置由下式确定:

$$\sigma_a = \frac{\sum_{i=1}^n p_i - \sum_{j=1}^m z_j}{n-m} \quad (5.3-55)$$

5. 实轴上的根轨迹 实轴上的根轨迹只能是那些在其右侧的开环实极点和开环实零点的总数为奇数的线段。

6. 根轨迹在实轴上的分离点与会合点 如果根轨迹位于实轴上两个相邻的开环极点之间,则至少有一个分离点。同样,如果根轨迹位于实轴上两个相邻的开环零点(一个可以位于无穷远处)之间,则至少存在一个会合点。分离点或会合点的坐标 α 是方程

$$\frac{d}{ds} \frac{\prod_{i=1}^n (s-p_i)}{\prod_{j=1}^m (s-z_j)} \Bigg|_{s=\alpha} = 0 \quad (5.3-56)$$

的根。

7. 出射角与入射角 根轨迹离开开环复数极点处的切线方向与实轴正方向的夹角为出射角;而其进入开环复数零点处的切线方向与实轴正方向的夹角称为入射角。

a. 根轨迹始于开环复数极点 p_l 处的出射角

$$\theta_{p_l} = \pm 180^\circ + \sum_{j=1}^m \angle(p_l - z_j) - \sum_{i=1}^{l-1} \angle(p_l - p_i) - \sum_{i=l+1}^n \angle(p_l - p_i) \quad (5.3-57)$$

b. 根轨迹止于有限开环复数零点 z_l 处的入射角

$$\theta_{z_l} = \pm 180^\circ + \sum_{i=1}^n \angle(z_l - p_i) - \sum_{j=1}^{l-1} \angle(z_l - z_j) - \sum_{i=l+1}^m \angle(z_l - z_i) \quad (5.3-58)$$

8. 根轨迹与虚轴的交点 在特征方程中令 $s = j\omega$, 然后再分别使其实部和虚部等于零, 求出角频率 ω 的实数值即为根轨迹与虚轴交点的坐标。

9. 放大系数 k 的求取 对应于根轨迹上每一点 s_l 的参数 k_l 的值, 可根据幅值条件计算, 即

$$k_l = \left[\prod_{i=1}^n (|s_l - p_i|) / \prod_{j=1}^m (|s_l - z_j|) \right] \quad (5.3-59)$$

3.3 根轨迹法的应用

自动控制系统的设计包含两方面的问题: 分析与综合, 而根轨迹法能很好地解决这两方面的问题。

闭环系统瞬态响应的基本特性, 由闭环极点来确定, 因此, 在分析问题时, 确定闭环极点在 s 平面上的位置极为重要。在综合问题时, 希望通过改变开环极点和零点分布, 使闭环极点和零点位于 s 平面的所需位置上。根轨迹法正是根据开环零、极点来确定闭环系统极点的图解方法, 因而获得广泛应用。其主要特点是:

(1) 在根轨迹图上, 清楚地表明了每一个开环极点或零点对闭环极点位置的影响;

(2) 用根轨迹法时可以放大倍数为参数, 根据开环极点和零点, 找到闭环极点。这样, 通过图解, 可表示对应于开环放大倍数的全部闭环极点, 从而避免在其它经典方法中遇到的困难;

(3) 根轨迹指明了开环极点和零点应该怎样变化, 才能使系统的响应满足系统的性能指标, 这对系统综合十分方便。

4 频域法

控制系统的性能与系统频率特性的形状有着密切的关系。设系统的传递函数为 $W(s)$, 则 ω 的函数 $W(j\omega)$ ($-\infty < \omega < +\infty$) 称为系统的频率特性。它具有鲜明的物理意义: 它是频率为 ω 时稳态输出与正弦输入之比。根据频率特性来分析和设计系统时, 可直接利用实验所得的结果对系统的性能给出评价。

通常采用奈奎斯特(Nyquist)图和伯德(Bode)图来表示系统的频率特性。

4.1 奈奎斯特(奈氏)图

奈氏图是表示当 ω 由零变化到无穷大时, 在极坐标上 $|W(j\omega)|$ 和 $\angle W(j\omega)$ 的关系, 如图 5.3-13 所示。在奈氏图上, $W(j\omega)$ 每一点都表示一特定 ω 值的向量端点。曲线能显示出轨迹上的频率分布。 $W(j\omega)$ 在实轴和虚轴上的投影就是它的实部和虚部。

设闭环控制系统的传递函数为 $\Phi(s)$, 且系统是稳定的, 则可以证明, 在单位阶跃函数作用下的输出为

$$y(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{P(\omega)}{\omega} \sin \omega t d\omega \quad (5.3-60)$$

或

$$y(t) = P(0) + \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{Q(\omega)}{\omega} \cos \omega t d\omega \quad (5.3-61)$$

$$\Phi(j\omega) = P(j\omega) + jQ(\omega)$$



式中 $P(\omega)$ —— 实频特性;
 $Q(\omega)$ —— 虚频特性。

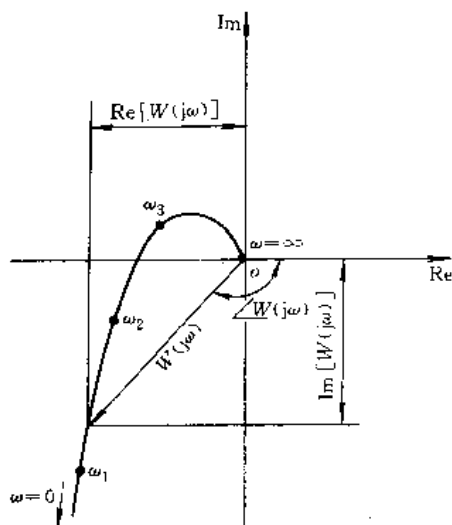


图 5-3-13 奈氏图

实际上,近似估价系统在单位阶跃函数下的品质,可直接根据 $P(\omega)$ 进行,不必按式(5-3-60)求积分。

(1) 被控量的终值

$$\lim_{t \rightarrow \infty} y(t) = P(0)$$

(2) 被控量的初值

$$y(0) = \lim_{\omega \rightarrow \infty} P(\omega)$$

(3) 超调量估计:超调量不大于 18% 的必要条件为

$$P(\omega) \geq 0 \quad \frac{dP(\omega)}{d\omega} \leq 0$$

(4) 单调过渡过程的条件

- 1) $\omega > 0$ 时, $P(0) \geq |P(\omega)|$
- 2) $0.5\omega_0 P(0) \geq \int_0^{\omega_0} |P(\omega)| d\omega$
- 3) $|P(\omega)| < P(0)G(\omega)$

式中 $G(\omega) = \cos[\pi/(1+\omega_0/\omega)]$

(5) 当 $P(\omega)$ 存在极值时,超调量为

$$\sigma\% = \frac{1.18P_{\max} - P(0)}{P(0)} \times 100\%$$

(6) 若 $P(\omega)$ 在 $\omega = \omega_1$ 处有间断,则系统处于振荡状态,振荡频率为 ω_1 。

(7) 若两个系统的实频特性相似,且 $P_1(n\omega) = P_2(\omega)$ 时,则其调节时间相差 $\frac{1}{n}$ 倍,即 $y_1\left(\frac{t}{n}\right) = y_2(t)$ 。

(8) 在区间 $0 < \omega \leq \omega_b$ 内, $P(\omega) \geq 0$, 则 ω_b 称为截止频率,过渡过程时间 $t_s > \pi/\omega_b$ 。若 $P(\omega)$ 是单调衰减的正函数时, $t_s > 4\pi/\omega_b$ 。

4.2 伯德图

伯德提出了另一种表示频率特性的方法,即伯德图(对数频率特性图)。该图是将幅频特性 $|W(j\omega)|$ 和相频特性 $\angle W(j\omega)$ 作为频率 ω 的函数分别画在两张图上。在幅值-频率图上幅值用 $20\lg|W(j\omega)|$ 表示,称为对数幅频特性,其度量单位为 dB。在相角-频率图上相角的度量单位为度,称为相频特性。此两张图的横坐标均为 $\lg\omega$ 。

采用伯德图的主要优点就在于,它可以将幅值的相乘转化为对数幅值的相加,便于工程上对控制系统进行分析与设计。

用系统的伯德图可以方便地对控制系统进行分析。设一般系统的开环频率特性为

$$W(j\omega) = \frac{K}{(j\omega)^n} W_0(j\omega) \quad (5-3-62)$$

其对数频率特性为

$$L(\omega) = 20\lg|W(j\omega)| = 20\lg K - n20\lg\omega + 20\lg|W_0(j\omega)| \quad (5-3-63)$$

其图形如图 5-3-14 所示。它由三个部分组成:

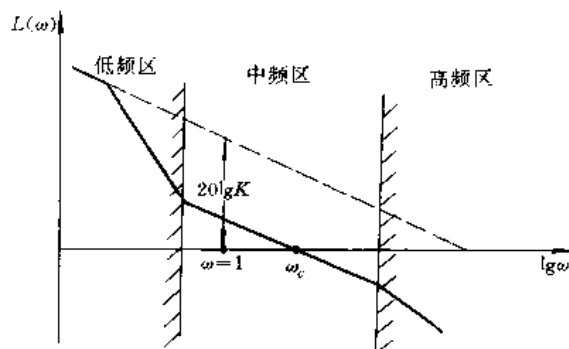


图 5-3-14 开环系统对数幅频特性

1. 低频段

$$L(\omega) \approx 20\lg K - n20\lg\omega$$

2. 高频段 在 ω 很高时,式(5-3-62)可近似为

$$W(j\omega) \approx \frac{KM(j\omega)}{D(j\omega)} = \frac{K}{(j\omega)^{n-m}}$$

式中 n —— $D(s)$ 的阶数;

m —— $M(s)$ 的阶数。

这时有

$$L(\omega) \approx 20\lg K - (n-m)20\lg\omega \quad (5-3-64)$$

3. 中频段 中频段特性与横轴相交的频率,即 $L(\omega) = 0$ 时的频率记为 ω_c ,称为剪切频率。

低频段特性确定了系统的无静差度和稳态精度,



而其宽度决定了系统在不发生显著畸变情况下复现控制信号的带宽。

中频段特性决定了系统的动态性能。因 $L(\omega)=0$ 时对应的相角 $\angle W(j\omega_c)$ 就是系统的相位裕度。相频特性 $\angle W(j\omega)=-180^\circ$ 时对应的 $L(\omega)$ 值就是增益裕度, 这些值均在中频段确定。另外, 剪切频率 ω_c 和系统截止频率相近, 因此它近似地确定了系统的带宽, 即 ω_c 的大小决定了系统的快速性。

高频段所在的区域称为小参数区, 对系统的品质影响不大。

4.3 系统频域性能指标与时域性能指标关系

1. 系统的频域性能指标

(1) 相位裕度 γ 和增益裕度 K_s ;

(2) 谐振峰值 M_r 和 谐振频率 ω_r 闭环系统幅频特性 $M(\omega)$ 的最大值称谐振峰值 M_r 。对应谐振峰值 M_r 的频率称为谐振频率 ω_r 。 M_r 反映了系统的振荡特性。

(3) 截止频率 ω_b 和带宽 BW 闭环幅频特性的幅值 $M(\omega)$ 下降到零频幅值 $M(0)$ 的 0.707 倍时的频率称为截止频率 ω_b ; 对应的频率范围 $0 \leq \omega \leq \omega_b$, 称为系统的带宽 BW 。

(4) 剪切频率 ω_c 和剪切率 系统开环对数幅频特性 $L(\omega)=0$ 时的频率值称为系统的剪切频率 ω_c ; 其在 ω_c 附近的斜率(过 0dB 线时的斜率)称系统的剪切率。它表征了系统从干扰噪声中复现控制信号的能力。

2. 频域与时域性能指标的关系 现以二阶系统为例, 建立频域与时域性能指标之间的关系。

设闭环系统的传递函数为

$$\Phi(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}$$

闭环频率特性为

$$\Phi(j\omega) = \frac{\omega_n^2}{\omega_n^2 - \omega^2 + j2\zeta\omega_n\omega}$$

在单位阶跃作用下, 系统的时域响应为

$$c(t) = 1 - e^{-\zeta\omega_n t} \frac{1}{\sqrt{1-\zeta^2}} \sin(\omega_d t + \theta) \quad t \geq 0$$

$$\omega_d = \omega_n \sqrt{1-\zeta^2}$$

$$\theta = \arctan\left(\frac{\sqrt{1-\zeta^2}}{\zeta}\right)$$

(1) 相位裕度 γ 与超调量 σ 和阻尼比 ζ

$$\gamma = \arctan\left(\frac{2\zeta/\sqrt{1+4\zeta^2}-2\zeta^2}{1-\zeta^2}\right)$$

$$\sigma = \exp\left(-\frac{\pi\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}}\right)$$

(2) 调节时间 t_s 与相位裕度 γ

$$t_s \omega_c = 6/\tan\gamma$$

(3) 超调量 σ 与谐振峰值 M_r ,

$$\sigma = \exp\left[-\frac{\pi(M_r - \sqrt{M_r^2 - 1})}{M_r + \sqrt{M_r^2 - 1}}\right]^{\frac{1}{2}}$$

(4) 截止频率 ω_b 与调节时间 t_s ,

$$\omega_b t_s = \sqrt{\frac{2\sqrt{M_r^2 - 1} + \sqrt{2M_r^2 - 1}}{M_r - \sqrt{M_r^2 - 1}}}$$

$$\times \ln \frac{\sqrt{2M_r}}{\Delta \sqrt{M_r + \sqrt{M_r^2 - 1}}}$$

$$\Delta = 0.02; 0.05$$

(5) 谐振频率 ω_r 与调节时间 t_s ,

$$\omega_r t_s = \sqrt{\frac{2\sqrt{M_r^2 - 1}}{M_r - \sqrt{M_r^2 - 1}} \ln \frac{\sqrt{2M_r}}{\Delta \sqrt{M_r + \sqrt{M_r^2 - 1}}}}$$

(6) 剪切频率 ω_c 与截止频率 ω_b ,

$$\frac{\omega_b}{\omega_c} = \sqrt{\frac{(1-2\zeta^2) + \sqrt{2-4\zeta^2+4\zeta^4}}{\sqrt{1+4\zeta^4-2\zeta^2}}}$$

对高阶系统, 频域与时域之间的关系很复杂, 但若其动态特性主要由一对共轭复数极点来确定, 则上述二阶系统所建立的关系仍可近似采用。对一般高阶系统, 可采用下列近似公式:

$$\sigma = 0.16 - 0.4(M_r - 1) \quad 1 \leq M_r \leq 1.8$$

$$t_s = \frac{\pi}{\omega_c} [2 + 1.5(M_r - 1) + 2.5(M_r - 1)^2]$$

$$1 \leq M_r \leq 1.8$$

$$M_r \approx \frac{1}{\sin \nu}$$

5 状态空间法

前面介绍的根轨迹法和频域法仅适用于单输入和单输出的线性定常系统的分析与设计, 为解决多输入-多输出时变系统的问题, 从 1960 年开始在状态概念基础上发展了一种新的现代控制理论。

状态 动力学系统的状态是表示系统的一组变量(称状态变量), 若已知该组变量在 $t=t_0$ 时刻的情况和 $t \geq t_0$ 时的输入, 则可完全确定系统在 $t \geq t_0$ 的任何时刻的行为。

状态变量 确定动力学系统状态的一组变量。如果以 n 个变量 $x_1(t), \dots, x_n(t)$ 就能完全描述动力学系统的行为, 则此 n 个变量即为一组状态变量。

状态矢量 若将 n 个状态变量视为矢量 $x(t)$ 的各个分量, 则称 $x(t)$ 为状态矢量。



状态空间 由 x_1 轴、 x_2 轴、 \dots 、 x_n 轴所组成的 n 维空间称为状态空间。任意状态均可用状态空间中的一点来表示。

系统输入是指由外部加到系统上的全部激励,记作 $u(t)$,而输出则是由系统中能直接量测的状态组成,记作 $y(t)$ 。

一般非线性、时变动态系统可用下列状态方程描述:

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}(t) &= f[x(t), u(t), t] \\ y(t) &= h[x(t), u(t), t] \end{aligned} \right\} \quad (5.3-65)$$

式中 f, h ——状态 x 和输入 u 的矢量函数。

对线性、时变动态系统,状态方程变为

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}(t) &= A(t)x(t) + B(t)u(t) \\ y(t) &= C(t)x(t) + D(t)u(t) \end{aligned} \right\} \quad (5.3-66)$$

式中 $A(t)$ ——系统矩阵;

$B(t)$ ——输入(或控制)矩阵;

$C(t)$ ——输出矩阵;

$D(t)$ ——直接传递矩阵。

且 $A(t), B(t), C(t), D(t)$ 具有相应的维数。

对线性定常系统,状态方程变为

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) &= Cx(t) + Du(t) \end{aligned} \right\} \quad (5.3-67)$$

A, B, C 和 D 为常数矩阵。

5.1 可控性

1. 可控性定义 对于式(5.3-66)所示 n 阶线性系统,在 t_0 时刻的初始状态为 x_0 ,若存在控制作用 $u(t), t \in [t_0, t_f]$,使之在有限的时间间隔 $[t_0, t_f]$ 内,能将 x_0 转移到 $x(t_f) = 0$,则称状态 x_0 在 $[t_0, t_f]$ 上是可控的。如果状态空间 R^n 中的全体状态在 $[t_0, t_f]$ 上都是可控的,则称线性系统 $[A(t), B(t), C(t)]$ 或矩阵对 $[A(t), B(t)]$ 在 $[t_0, t_f]$ 上完全可控。

2. 可控性判据 关于线性系统的可控性,有如下定理。

定理 1 由矩阵 $A(t), B(t)$ 描述的线性时变系统状态完全可控的充要条件是,对于每个 t_0 及 $t_f > t_0$, 格兰姆(Gramian)矩阵 $W(t_0, t_f)$ 是非奇异的。

可控性格兰姆矩阵定义为

$$W(t_0, t_f) = \int_{t_0}^{t_f} \phi(t_0, t) B(t) B^T(t) \phi^T(t_0, t) dt \quad (5.3-68)$$

式中 $\phi(t_0, t)$ ——系统转移阵。

若系统是线性定常的,该定理自然成立。这时

$$W(t_0, t_f) = \int_{t_0}^{t_f} e^{A(t_0-t)} B B^T e^{A^T(t_0-t)} dt \quad (5.3-69)$$

定理 2 由矩阵 A, B 描述的线性定常系统,其状态完全可控的充要条件是可控性矩阵 Q_c 的秩为 n 。

$$Q_c = [B, AB, A^2B, \dots, A^{n-1}B] \quad (5.3-70)$$

5.2 可观测性

1. 可观测性定义 n 阶零输入线性系统 $[A(t), B(t), C(t)]$, 在 t_0 时刻的状态 x_0 ,若能根据在 $[t_0, t_f]$ 上的输出 $y(t)$ 唯一确定时,称 x_0 在 $[t_0, t_f]$ 上是可观测的。状态空间的全部状态在 $[t_0, t_f]$ 上都可观测时,则称系统在 $[t_0, t_f]$ 上是完全可观测的。

2. 可观测性判据 关于线性系统可观测性,有如下定理。

定理 1 线性时变系统[式(5.3-66)]可观测的充要条件是对于每个 t_0 和 $t_f > t_0$, 格兰姆矩阵 $W_o(t_0, t_f)$ 是非奇异的。

可观测性格兰姆矩阵定义为

$$W_o(t_0, t_f) = \int_{t_0}^{t_f} \phi^T(t, t_0) C^T(t) C(t) \phi(t, t_0) dt \quad (5.3-71)$$

定理 2 由维数分别为 $q \times n$ 和 $n \times n$ 的矩阵 C, A 描述的线性定常系统(式(5.3-67)),可观测性的充要条件是可观性矩阵

$$Q_o = \begin{bmatrix} C \\ CA \\ \vdots \\ CA^{n-1} \end{bmatrix}$$

的秩为 n 。

5.3 可控规范型和可观测规范型

规范型是研究线性系统理论的一个重要方面,它揭示了系统代数结构的本质特点。

5.3.1 规范型

研究式(5.3-67)所示 n 维线性定常系统。如果系统 $\Sigma = (A, B)$ 是完全可控的,则必有

$$\text{rank}[B, AB, \dots, A^{n-1}B] = n$$

这表明在可控性矩阵中,且仅有 n 维列向量是线性无关的。因此,如果取这些线性无关的列向量的某种线性组合,则仍可导出一组线性无关的列向量。可构成状态空间的一组基底。所谓可控规范型,就是指可控对 (A, B) 在上述基底上所具有的规范形式。

同样,若假定系统 $\Sigma = (A, C)$ 是完全可观测的,则



有 $\text{rank}[Q_0]=n$ 。这表明,系统的可观性矩阵,有且仅有 n 维列向量是线性无关的,从而也可导一组基底。所谓可观规范型,就是指可观对 (A, C) 在上述基底上所具有的规范形式。

5.3.2 单输入单输出系统的可控规范型

设单输入单输出线性定常系统的状态方程为

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = Cx \end{cases} \quad (5.3-72)$$

式中 x —— $n \times 1$ 矢量;

u —— 标量。

若系统可控,则存在非奇异变换 $\hat{x} = Px$, 将状态方程化为可控规范型:

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}} = \hat{A}\hat{x} + \hat{B}u \\ y = \hat{C}\hat{x} \end{cases} \quad (5.3-73)$$

$$\hat{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -a_n & -a_{n-1} & -a_{n-2} & \cdots & -a_1 \end{bmatrix},$$

$$\hat{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5.3-74)$$

式中 \hat{C} —— $1 \times n$ 矩阵。

变换矩阵

$$P = \begin{bmatrix} P_1 \\ P_1 A \\ \vdots \\ P_1 A^{n-1} \end{bmatrix} \quad (5.3-75)$$

$$P_1 = [0 \ 0 \ \cdots \ 0 \ 1] [B \ AB \ \cdots \ A^{n-1}B]^{-1}$$

5.3.3 单输入-单输出系统的可观规范型

设单输入-单输出线性定常系统的状态空间表达式(5.3-73)所示。若系统可观,则存在非奇异变换 $x = T\hat{x}$, 可将系统方程(5.3-73)化为可观规范型。

$$\hat{A} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \cdots & 0 & -a_n \\ 1 & 0 & \cdots & 0 & -a_{n-1} \\ 0 & 1 & \cdots & 0 & -a_{n-2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & -a_2 \\ 0 & 0 & \cdots & 1 & -a_1 \end{bmatrix}, \quad \hat{C} = [0, \cdots, 0, 1]$$

式中 \hat{B} —— $n \times 1$ 矩阵。

变换矩阵为

$$T = [T_1 \ AT_1 \ \cdots \ A^{n-1}T_1]$$

式中

$$T_1 = \begin{bmatrix} C \\ CA \\ \vdots \\ CA^{n-1} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

5.4 对偶原理

设系统 Σ_1 的状态方程为

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = Cx \end{cases}$$

系统 Σ_2 的状态方程为

$$\begin{cases} \dot{z} = A^T z + C^T v \\ w = B^T z \end{cases}$$

式中 x, z —— n 维状态矢量;

u, v —— p 维、 q 维控制矢量;

y, w —— q 维、 p 维输出矢量。

比较 Σ_1 和 Σ_2 两个系统的可控性和可观性条件:

(1) 状态完全可控的充要条件:

$$\text{对 } \Sigma_1: \text{rank} Q_c = \text{rank} [B \ AB \ \cdots \ A^{n-1}B] = n$$

$$\text{对 } \Sigma_2: \text{rank} Q_c = \text{rank} [C^T \ A^T C^T \ \cdots \ (A^T)^{n-1} C^T] = n$$

(2) 状态完全可观的充要条件:

$$\text{对 } \Sigma_1: \text{rank} Q_o = \text{rank} [C^T \ A^T C^T \ \cdots \ (A^T)^{n-1} C^T] = n$$

$$\text{对 } \Sigma_2: \text{rank} Q_o = \text{rank} [B \ AB \ \cdots \ A^{n-1}B] = n$$

由上述条件可知, Σ_1 完全可控和 Σ_2 完全可观的条件相同; Σ_1 完全可观和 Σ_2 完全可控的条件相同, 就 Σ_1 和 Σ_2 而言, Σ_2 系统的相应矩阵 A^T, B^T 和 C^T 分别为 Σ_1 系统相应矩阵的转置, 且 B 与 C^T, C 与 B^T 在方程式中互相易位。

上述关系即称为系统可控性和可观性的对偶性。利用对偶原理, 可对系统的可控性和可观性做相应校验。

5.5 系统的实现

假定 p 维输入, q 维输出系统传递函数矩阵 $W(s)$ 是严格适宜的, 且可表示为

$$W(s) = C(sI - A)^{-1}B \quad (5.3-76)$$

式中 A —— $n \times n$ 矩阵;

B —— $n \times p$ 矩阵;

C —— $q \times n$ 矩阵。

则称状态方程



$$\left. \begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) &= Cx(t) \end{aligned} \right\} \quad (5.3-77)$$

为传递函数矩阵 $W(s)$ 的实现。换言之,实现问题就是根据给定系统的传递函数矩阵确定它的状态方程。 $W(s)$ 的实现以 (A, B, C) 表示,其状态变量 $x(t)$ 的维数就是实现的阶次。

对于给定的 $W(s)$,可有多个实现与之对应,但其中阶次最小的称为最小实现。最小实现也有多个,但它们阶次都相同,且是代数等价的。最小实现系统是可控可观测的,反之,若实现是可控可观测的,则它就是一个最小实现。传递函数矩阵 $W(s)$ 最小实现的阶次等于 $W(s)$ 的麦克米兰(McMillan)指数。

$W(s)$ 的麦克米兰指数等于汉克尔(Hankel)矩阵的秩。汉克尔矩阵定义为

$$H_r = \begin{bmatrix} R_0 & R_1 & \cdots & R_{p-1} \\ R_1 & R_2 & \cdots & R_p \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ R_{p-1} & R_p & \cdots & R_{2p-2} \end{bmatrix} \quad (5.3-78)$$

式中, R_i 由下式确定:

$$W(s) = R_0 + R_1 s^{-1} + R_2 s^{-2} + \cdots$$

由于

$$W(s) = C(sI - A)^{-1}B$$

则

$$W(s) = CB + CABs^{-1} + CA^2Bs^{-2} + \cdots$$

汉克尔矩阵为

$$H_r = \begin{bmatrix} CB & CAB & \cdots & CA^{p-1}B & B \\ CAB & CA^2B & \cdots & CA^pB & B \\ \vdots & \vdots & & \vdots & B \\ CA^{p-1}B & CA^pB & \cdots & CA^{2p-1}B & B \end{bmatrix} \\ = \begin{bmatrix} C \\ CA \\ \vdots \\ CA^{p-1} \end{bmatrix} [B \ AB \ \cdots \ A^{p-1}B]$$

如果给定的是系统的冲激响应矩阵或微分方程组,要求它的状态方程描述,同样也是实现问题。

系统实现主要用于系统仿真,将系统在频域中的描述变成在时域的描述,便于在计算机上实现。显然,最小实现在计算机上进行仿真时可以少占用内存,具有明显的优点。

5.6 模态分析

研究线性、时变动态系统,其状态方程为

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}(t) &= A(t)x(t) + B(t)u(t), x(0) = x_0 \\ y(t) &= C(t)x(t) \end{aligned} \right\} \quad (5.3-79)$$

式中, $A(t)$ 、 $B(t)$ 、 $C(t)$ 分别为 $n \times n$ 、 $n \times p$ 、 $q \times n$ 的时变矩阵。若系统是定常的,则系统的解为

$$\left. \begin{aligned} x(t) &= e^{At} + \int_0^t e^{A(t-\tau)} Bu(\tau) d\tau \\ y(t) &= Cx(t) \end{aligned} \right\} \quad (5.3-80)$$

这时,可采用模态概念,对 $x(t)$ 进行分析。为简便起见,设 A 具有互异特征值 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$, 其相应的特征矢量为 W_1, W_2, \dots, W_n 。定义特征矢量矩阵或模态矩阵为

$$E = [W_1, W_2, \dots, W_n] \quad (5.3-81)$$

故有

$$E^{-1}AE = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n)$$

并可得到

$$\begin{aligned} e^{At} &= Ee^{E^{-1}AE}E^{-1} \\ &= E \text{diag}\{e^{\lambda_1 t}, e^{\lambda_2 t}, \dots, e^{\lambda_n t}\} E^{-1} \end{aligned}$$

该式对理解系统动态特性意义很大。

定义一个新的状态矢量 $z(t)$

$$x(t) = Ez(t) \quad (5.3-82)$$

因 $\dot{x} = E\dot{z} = Ax + Bu = AEz + Bu$, 则可导出状态矢量 z 描述的系统模型为

$$\left. \begin{aligned} \dot{z}(t) &= E^{-1}AEz(t) + E^{-1}Bu(t), z(0) = E^{-1}x(0) \\ y(t) &= CEz(t) \end{aligned} \right\} \quad (5.3-83)$$

该式可以视为系统动态特性的一个等价描述。从 E 的定义可以逐项推导出

$$\dot{z}_i(t) = \lambda_i z_i(t) + \beta_i u(t), \quad 1 \leq i \leq n \quad (5.3-84)$$

式中 $\beta_i = E^{-1}B$ 的第 i 行。

由式(5.3-84)可见,各模态变量 $z_i(t)$ 的动态特性互不相关,它只依赖于初始条件和输入矢量 $u(t)$,且由极点 λ_i 加以描述。称特征矢量 w_1, w_2, \dots, w_n 为模态矢量,或简称为系统的模态,它们描述了在没有输入的情况下,状态特征行为的模式。

研究当初始条件为 $x(0) = w_i$ 时的齐次系统。这时

$$x(t) = e^{At}x(0) = e^{At}w_i \quad (5.3-85)$$

在更一般情况下,式(5.3-82)可表示为

$$x(t) = \sum_{j=1}^n w_j z_j(t) \quad (5.3-86)$$

这表明系统的状态响应可表示为系统模态的线性组合。各模态的幅值由相互无关的一阶标量微分方程决定。因此,将系统进行模态分解,可分别研究每个模态的行为,然后根据式(5.3-86)了解系统的状态行为。

在齐次的情况下(即 $u(t) \equiv 0$),有

$$x(t) = \sum_{j=1}^n w_j z_j(0) e^{\lambda_j t} \quad (5.3-87)$$



第4章 系统设计

1 控制器与系统设计问题

控制器与系统设计是控制系统研究中的一个重要课题。控制系统的设计问题,可以简单地用图5·4-1所示的框图表示。图5·4-1表示一个控制对象,其输出矢量为 $c(t)$,控制矢量为 $u(t)$ 。设计的目的是要求取 $u(t)$,使输出 $c(t)$ 的行为符合设计要求。

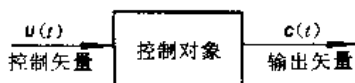


图 5·4-1 控制过程框图

满足控制要求的控制矢量 $u(t)$ 一经确定之后,通常需要一种控制器,其作用为根据参考输入及状态矢量或输出矢量 $c(t)$ 来实现 $u(t)$ 。图5·4-2所示为一种常用的控制系统框图,其控制矢量 $u(t)$ 是由输入矢量 $r(t)$ 和状态矢量 $x(t)$ 产生的。

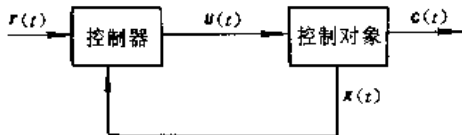


图 5·4-2 控制系统框图

要完成控制系统的设计,一般说来应依据第1章控制系统设计一节中给出的步骤进行。

控制系统设计最早是在频域中进行的,提出了奈氏图法、伯德图法等一些经典方法,其实质是频域上的图解法,其特点在于首先要确定控制系统的结构,通常的系统结构形式有串联控制器和并联(反馈)控制器两种结构,系统结构形式的正确选择,在很大程度上取决于设计者的经验。设计的性能指标通常是相位裕度、增益裕度、带宽及谐振峰值等。

伊文思(Evans)提出了根轨迹法,从而有可能在 s 平面上进行控制系统设计。该法基本上仍是试探法,依靠修改根轨迹来获得满足设计要求的闭环极点分布。

维纳(Wiener)提出了性能指标的概念和系统的统计设计法。该法根据一组给定的性能指标,用完全解析的方法完成设计。

从60年代初起,在状态变量、状态方程、可控性、可观测性等概念的基础上,发展了现代控制理论及其设计方法,其基本目标是获得最优控制。随着电子计算机的发展和应用,控制系统计算机辅助设计已获得飞速发展和广泛应用。

2 控制器的频域设计

2.1 频域设计法

系统性能与系统频率特性的形状有着密切关系。频率特性的低频段,表征了闭环系统的稳态性能;中频段表征了系统过渡过程的性能;高频段表征了过渡过程初始段的性能。因此,频域法是一种设计控制系统较为理想和实用的工程方法。用频域法设计控制系统的基本思路是:首先,根据对控制系统的技术要求确定系统的稳态和动态性能指标;然后,根据性能指标求得相应的希望开环对数频率特性;最后,将希望开环频率特性和系统固有开环频率特性进行比较,确定控制器(补偿装置)的结构和参数。

控制系统的频域性能指标,通常有二组指标可供选用:

- (1) 开环频率特性:增益裕度 K_g ;相位裕度 γ 。
- (2) 闭环频率特性:带宽 BW 、谐振峰值 M ,和谐振频率 ω_r 。

根据给定的闭环系统性能指标,并且考虑系统固有部分频率特性而确定的开环对数频率特性称为希望开环频率特性。对于最小相位系统,其开环幅频特性与相频特性之间具有单值的确定关系。因此,只用开环对数幅频特性就可对系统进行设计。

一般将希望开环对数频率特性划分为三个区段,如图5·4-3所示。

(1) 根据稳态误差、系统固有部分无差度 γ 和开环增益,作出希望特性的低频段。有时,为了精确地复现信号,要求开环对数幅频特性在 $0 \leq \omega \leq \omega_M$ 区域内应满足不等式

$$20\lg|W(j\omega)H(j\omega)| \geq 20\lg|1/\Delta|$$

式中 Δ ——系统的复现精度;

$W(j\omega)H(j\omega)$ ——开环频率特性。



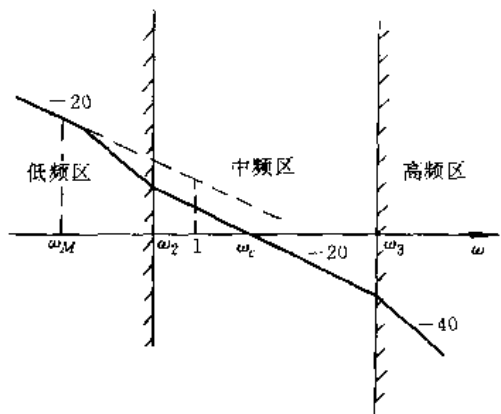


图 5.4-3 希望开环对数幅频特性

(2) 根据超调量 σ_p 和调节时间 t_s , 确定剪切频率 ω_c 。中频段的斜率(剪切率)一般均取为 -20dB/dec ; 中频宽度的确定可近似地按 I 型系统的“最佳比”计算, 即

$$\frac{\omega_3}{\omega_c} = \frac{M_r + 1}{M_r} \quad \frac{\omega_2}{\omega_c} = \frac{M_r - 1}{M_r}$$

(3) 作希望特性的高频段。高频段的特性对系统性能影响较小。为简化控制器设计, 应尽量使高频段特性与系统固有部分高频段特性一致或斜率相等。

(4) 将希望特性的低频段和中频段恰当地连接起来, 就得到完整的希望特性。

按希望特性进行设计的方法称综合法。在设计控制系统时, 还常采用试探法, 即设计者根据系统固有传递函数和设计指标, 选择一种控制器, 并确定其结构与参数, 得到初步设计的控制系统, 然后分析系统是否满足设计要求。如果不能满足, 则应改变控制器参数或控制方式, 重复上述设计过程, 直到系统全部满足给定的性能指标为止。

当系统的性能指标是以时域量值给出(如超调量 σ_p 、调节时间 t_s 、阻尼比 ζ 和无阻尼自然频率 ω_n) 时, 采用根轨迹法设计系统更为方便。由 ζ 和 ω_n 确定闭环系统的希望极点(即主导极点), 在系统中加入补偿装置(控制器), 使根轨迹通过希望极点。

2.2 超前补偿

相位超前补偿装置的传递函数

$$W_c(s) = \frac{1 + \alpha T_s s}{1 + T_s s} \quad (\alpha > 1) \quad (5.4-1)$$

最大超前相角

$$\phi_m = \arcsin \frac{\alpha - 1}{\alpha + 1} \quad (5.4-2)$$

相应的频率

$$\omega_m = \frac{1}{\sqrt{\alpha} T} \quad (5.4-3)$$

它为被补偿系统的中频段提供了正相角; 因而增加了系统的相位裕度和增益裕度, 即增加了系统带宽, 改善了系统的过渡过程特性。

从根轨迹角度看, 这类补偿装置的零点起主要作用, 它使未补偿系统的根轨迹向左移。通常把补偿装置的零点和极点配置在使补偿后的系统根轨迹主要分支通过希望极点。

2.2.1 用伯德图法设计相位超前补偿

1. 基本原理 利用相位超前特性, 将超前网络的交接频率 $1/(\alpha T)$ 和 $1/T$ 选在待补偿系统剪切频率的两边, 就可以使补偿后系统的剪切频率和相位裕度满足性能指标要求。

2. 适用范围 按已确定的开环增益绘制系统固有部分频率特性 $W_0(j\omega)$ 。若相位裕度不够或剪切频率 ω_c 偏小, 且在 ω_c 附近相频特性 $\angle W_0(j\omega)$ 的变化不大, 则可采用串联超前补偿装置。

3. 设计步骤

- (1) 根据稳态性能要求, 确定开环放大系数 K ;
- (2) 根据已确定的开环放大系数 K , 计算未补偿系统的相位裕度 γ ;
- (3) 根据所要求的相位裕度 γ , 计算超前补偿网络必须提供的最大超前相角 ϕ_m , 即

$$\phi_m = \gamma - [180^\circ + \angle W_0(j\omega_c)]$$

式中 ω_c —— 未补偿系统的剪切频率。

- (4) 由确定的 ϕ_m , 按式 (5.4-2) 求出 α ;
- (5) 令补偿后的剪切频率 ω_c 等于 ϕ_m 处所对应的频率 ω_m , 即在系统固有部分对数幅频特性 $20\lg |W_0(j\omega)|$ 上找出对应 $-10\lg \alpha \text{dB}$ 处的频率 ω_m , 从而求得 T (按式 (5.4-3))。若系统对剪切频率 ω_c 有要求且与 ω_m 相差甚远, 则可先根据 $\omega_m = \omega_c$ 的要求, 由 $20\lg |W_c(j\omega)| = 10\lg \alpha$ 计算出 α 。根据 α 计算出 ϕ_m , 再校核 γ 是否满足要求。若不满足, 则应重选 ω_m 值。一般是使 $\omega_m = \omega_c$ 的值增大, 然后重复上述计算;

(6) 根据初步确定的上述各值, 求出补偿后系统的开环传递函数; 然后用数字或模拟机仿真, 对系统进行分析和校核工作。

【例 5.4-1】 设一位置跟踪系统固有部分传递函数为

$$W_0(s) = \frac{K}{s(0.1s + 1)(0.001s + 1)}$$



对该系统的设计性能指标

- (1) 系统的相位裕度 $\gamma \geq 45^\circ$;
- (2) 在信号 $r(t) = Rt$ 作用下, 系统的稳态误差 $e_s(t) \leq 0.1$.

根据上述条件超前补偿装置的设计步骤如下:

- (1) 根据稳态误差要求可求出系统开环放大倍数 $K = 1000 (1/s)$;
- (2) 根据未补偿系统的传递函数 $W_0(s)$ (其中 $K = 1000 (1/s)$), 绘制出开环对数频率特性, 如图 5-4-4 所示。其剪切频率 $\omega_c = 100 (1/s)$, 相位裕度 $\gamma \approx 0^\circ$, 且在 ω_c 处相角变化不大, 适于采用超前补偿;

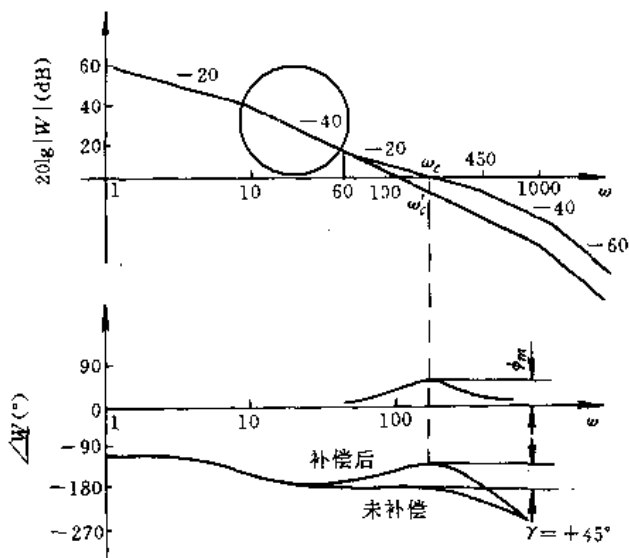


图 5-4-4 系统开环对数频率特性

- (3) 为满足 $\gamma \geq 45^\circ$, 超前补偿装置必须给出的最大超前相角为 $\phi_m \geq 45^\circ$ 。但考虑补偿后系统的剪切频率 ω_c 将稍大于未补偿系统 ω_c , 为保证补偿后系统的 $\gamma \geq 45^\circ$, 故对 ϕ_m 应追加超前相角 $\Delta\phi = 5^\circ \sim 10^\circ$ 。初取 $\Delta\phi = 5^\circ$, 则 $\phi_m = 50^\circ$ 。按式 (5-4-2) 计算, 得 $\alpha = 7.5$;

- (4) 计算参数 T 。首先, 由 $-10\lg\alpha = -10\lg 7.5 = -8.75\text{dB}$ 。在未补偿系统开环对数幅频特性 $20\lg|W_0(j\omega)|$ 上, 找出与 -8.75dB 对应的频率 $\omega_m = 164.5 (1/s)$ 。令 $\omega_c = \omega_m = 164.5 (1/s)$, 求得

$$T = \frac{1}{\omega_m \sqrt{\alpha}} = \frac{1}{164.5 \sqrt{7.5}} = 0.0022 (s)$$

由此可得串联超前补偿装置的两个交接频率为

$$\frac{1}{T} = \omega_m \sqrt{\alpha} = 450 (1/s)$$

$$\frac{1}{aT} = 60 (1/s)$$

- (5) 串联超前补偿网络的传递函数为

$$W_c(s) = \frac{aTs + 1}{Ts + 1} = \frac{0.0167s + 1}{0.0022s + 1}$$

补偿后系统开环传递函数为

$$W(s) = W_c(s)W_0(s) = \frac{1000(0.0167s + 1)}{s(0.1s + 1)(0.0022s + 1)(0.001s + 1)}$$

补偿后的开环对数频率特性如图 5-4-4 所示。从图中可知, 相位裕度 γ 约为 45° 。

2.2.2 用根轨迹法设计超前补偿装置

串联超前补偿装置的传递函数为

$$W_c(s) = \frac{1 + aTs}{1 + Ts} = \alpha \frac{s - z_c}{s - p_c}$$

设系统固有部分的传递函数为

$$W_0(s) = k \frac{(s - z_1)(s - z_2)\dots(s - z_m)}{s^r(s - p_1)(s - p_2)\dots(s - p_{n-r})}$$

则系统开环传递函数为

$$W(s) = W_c(s)W_0(s) = \alpha k \frac{(s - z_1)(s - z_2)\dots(s - z_m)}{s^r(s - p_1)(s - p_2)\dots(s - p_{n-r})} \times \frac{s - z_c}{s - p_c}$$

若 s_1 是系统的闭环极点, 则 s_1 必定在按 $W(s)$ 绘制的根轨迹上。根据绘制系统根轨迹的幅值条件, 得:

$$\frac{\alpha k |s_1 - z_c|}{M |s_1 - p_c|} = 1$$

$$\text{式中 } M = \frac{|s_1|^r |s_1 - p_1| |s_1 - p_2| \dots |s_1 - p_{n-r}|}{|s_1 - z_1| |s_1 - z_2| \dots |s_1 - z_m|}$$

对于图 5-4-5, 有

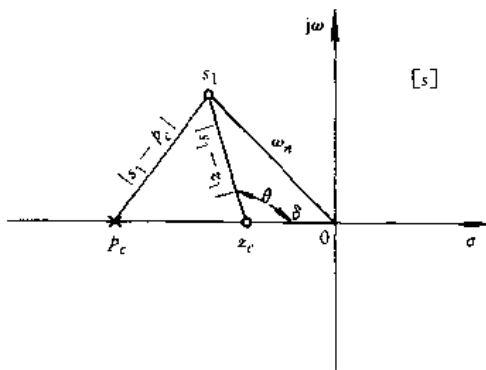


图 5-4-5 确定 z_c, p_c 的根平面图

$$\cot\alpha = \frac{M}{k} \csc\phi - \cot\phi$$

$$\delta = \arccos\zeta$$

$$\theta = \pi - \alpha - \delta$$

$$|z_c| = \frac{k\omega_n \sin(\phi + \alpha)}{M \sin\theta}$$

$$|p_c| = \omega_n \sin(\phi + \alpha) / \sin(\theta - \phi)$$

超前补偿装置设计步骤:

- (1) 根据对系统稳态误差要求, 计算 k ;



(2) 根据动态性能指标,确定闭环主导极点,随之确定 ξ 和 ω_n ,然后根据 $W_0(s)$ 的零极点分布,计算 M 值和所需补偿的相角 ϕ ,从而可确定超前补偿装置的极点和零点(即 p_c 和 z_c)位置;

(3) 按补偿后系统的开环极点和零点绘制系统的根轨迹,并在图上找出对应 k 的所有闭环极点和零点;

(4) 校验是否符合主导极点的条件,若不符合,则说明仅用简单的超前补偿装置无法满足系统的动态性能。

2.3 滞后补偿

滞后补偿装置的传递函数为

$$W_c(s) = \frac{1+aTs}{1+Ts}, \alpha < 1 \quad (5.4-4)$$

最大滞后相角

$$\phi_m = \arcsin \frac{1-\alpha}{1+\alpha} \quad (5.4-5)$$

相应的频率为

$$\omega_m = \frac{1}{T\sqrt{\alpha}} \quad (5.4-6)$$

利用它的高频幅值衰减特性,使系统的剪切频率下降,从而获得足够的相位裕度。这样就能提高系统的开环放大倍数,改善低频段性能,同时对中频段性能影响又不大。

2.3.1 用伯德图法设计相位滞后补偿

1. 基本原理 利用相位滞后特性,滞后补偿装置的最大滞后相角应力求避免发生在系统剪切频率附近,从而获得足够的相位裕度。

2. 适应范围 在系统响应速度要求不高而滤除噪声性能要求较高的情况下,可考虑采用滞后补偿。此外,如果未补偿系统具有满意的动态性能,而其稳态性能不满足指标要求,则也可提高其稳态精度,同时基本保持动态特性不变。

3. 设计步骤

- (1) 根据稳态误差要求,确定系统开环放大倍数 K ;
- (2) 利用已确定的 K ,绘出未补偿系统的开环对数频率特性,确定剪切频率 ω_c 、相位裕度 γ 和增益裕度 K_g ;
- (3) 选择不同的 ω_c ,计算不同的 γ 值,绘制 $\gamma(\omega_c)$ 曲线;
- (4) 根据对 γ 的要求,选择补偿后系统的剪切频率 ω_c 。考虑到滞后补偿装置在 ω_c 处会产生一定的相角

滞后 $\phi_c(\omega_c)$,故有

$$\gamma_0 = \gamma(\omega_c) + \phi_c(\omega_c) \quad (5.4-7)$$

式中 γ_0 为要求值。一般取 $\phi_c(\omega_c) = -6^\circ$ 。在 $\gamma(\omega_c)$ 曲线上可求得相应的 ω_c 值;

(5) 确定滞后补偿装置参数 α 和 T 。由 $20\lg\alpha = -20\lg|W_0(j\omega_c)|$ 和 $1/aT = 0.1\omega_c$,可求出 α 和 T ;

(6) 验算相位裕度和增益裕度是否满足设计要求。

【例 5.4-2】 设系统固有部分的传递函数为

$$W_0(s) = \frac{K}{s(0.1s+1)(0.2s+1)}$$

设计要求为:稳态精度: $c_0=0, c_1=1/30, \gamma \geq 40^\circ, K_g \geq 10\text{dB}, \omega_c \geq 2.31/s$ 。

首先,根据误差系数要求,确定开环放大倍数 $K_v = \frac{1}{c_1} = 30 (1/s)$ 。这时未补偿系统的开环传递函数为 $W_0(s) = 30/s(0.1s+1)(0.2s+1)$,其对数幅频特性如图 5.4-6 所示。由图可知, $\omega_c = 12(1/s)$ 。

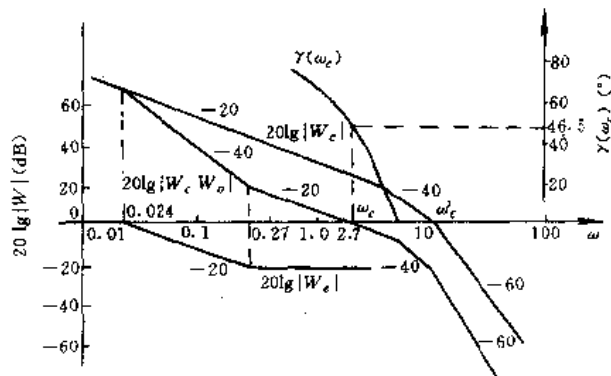


图 5.4-6 系统开环对数幅频特性

由此可计算得, $\gamma' = 90^\circ - \arctan(0.1\omega_c) - \arctan(0.2\omega_c) = -27.6^\circ$,显然系统不稳定,且 ω_c 大于要求值。为满足性能指标要求,选用滞后补偿装置。

图 5.4-6 中绘出了按下式计算的 $\gamma(\omega_c)$ 曲线

$$\gamma(\omega_c) = 90^\circ - \arctan(0.1\omega_c) - \arctan(0.2\omega_c)$$

根据 $\gamma_0 \geq 40^\circ$ 的要求,取 $\phi_c(\omega_c) = -6^\circ$,则 $\gamma(\omega_c) \geq 46^\circ$ 。由 $\gamma(\omega_c)$ 曲线查得 $\omega_c = 2.71/s$,满足指标要求。由图可知, $20\lg|W_0(j\omega_c)| = 21\text{dB}$ 。由设计步骤(5)可计算出 $\alpha = 0.09, T = 41s$,故滞后补偿装置的传递函数为

$$W_c(s) = \frac{1+aTs}{1+Ts} = \frac{1+3.7s}{1+41s}$$

滞后补偿装置和补偿后的系统开环对数幅频特性 $20\lg|W_c|$ 和 $20\lg|W_c W_0|$,如图 5.4-6 所示。

2.3.2 用根轨迹法设计滞后补偿装置

设计步骤如下:

- (1) 绘制未补偿系统的根轨迹图,根据给定性能



指标, 确定闭环主导极点;

(2) 根据绘制根轨迹的幅值条件, 计算与主导极点相对应的开环放大倍数;

(3) 根据稳态误差的要求, 确定系统开环放大倍数, 然后再计算与主导极点对应的开环放大倍数, 确定需要提高的倍数 (1/a);

(4) 确定补偿装置零点 z_c 和极点 p_c 的位置, 其比值应能给出开环放大倍数应提高的 1/a, 且应将相角滞后 $\phi_c = \angle(s_1 - z_1) - \angle(s_1 - p_1)$ 控制在 $5^\circ \sim 10^\circ$ 之内;

(5) 绘制补偿后系统的根轨迹图, 并在新的根轨迹图上按性能指标找出闭环主导极点, 按幅值条件计算相应的开环放大倍数, 最后校核性能指标。

2.4 滞后-超前补偿

如前所述, 超前补偿通常可以改善闭环系统的上升时间和超调量, 但增加了带宽, 对于稳定问题不太严重的系统它是有效的。另一方面, 滞后补偿可以改善超调量和相对稳定性, 但往往因带宽降低而引起上升时间增大, 因此, 这两种补偿方案各有其优缺点。然而, 对于某些系统, 不论采用哪种方案, 都不能得到满意的效果。因此, 就想到把超前和滞后补偿结合起来使用, 以便利用两方案的优点, 同时设法限制它们的缺点。

超前-滞后补偿装置的传递函数可写成如下形式:

$$W_c(s) = \frac{(T_a s + 1)(T_b s + 1)}{(\beta T_a s + 1)\left(\frac{T_b s}{\beta} + 1\right)} \quad \beta > 1 \quad (5.4-8)$$

式中, 第一项为滞后补偿特性; 第二项为超前补偿特性。其频率特性如图 5.4-7 所示。在频段 $0 \sim \omega_1$ 上, 具有滞后补偿特性; 在 $\omega_1 \sim \infty$ 上, 具有超前补偿特性。对

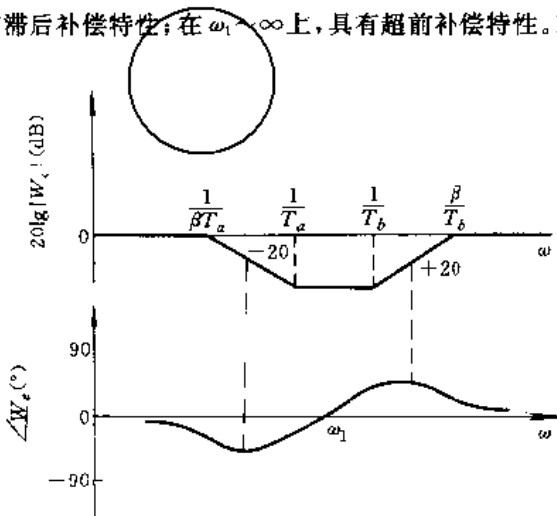


图 5.4-7 滞后-超前补偿对数频率特性

应相角为零处的频率为

$$\omega_1 = \frac{1}{\sqrt{T_a T_b}} \quad (5.4-9)$$

2.4.1 用伯德图法设计滞后-超前补偿

应用频域伯德图法确定滞后-超前补偿装置参数, 实际上是综合地运用滞后和超前补偿设计方法。其中超前部分用以增加相位裕度; 滞后部分可容许提高系统开环放大倍数以改善系统稳态性能。

设计步骤如下:

(1) 根据稳态性能要求确定开环放大倍数 K ;

(2) 利用已确定的 K 值, 绘出未补偿系统的开环对数幅频特性, 求出剪切频率 ω_c 、相位裕度 γ 和增益裕度 K_g (dB);

(3) 在未补偿系统开环对数幅频特性上, 选择从 -20dB/dec 变为 -40dB/dec 的交接频率, 作为超前部分的交接频率 ω_b ;

(4) 根据响应速度要求, 选择剪切频率 ω_c 。补偿装置的衰减因子 $1/\beta$, 可由下式求得:

$$-20\lg\beta + 20\lg|W_0(j\omega_c)| + 20\lg T_b \omega_c = 0 \quad (5.4-10)$$

$$T_b = \frac{1}{\omega_b}$$

$20\lg|W_0(j\omega_c)| + 20\lg T_b \omega_c$ 可由未补偿系统开环对数幅频特性 -20dB/dec 延长线在 ω_c 处的数值确定;

(5) 根据相位裕度要求, 估计滞后部分的交接频率 ω_a ;

(6) 校验系统性能指标。

【例 5.4-3】 设一位置随动系统, 其固有部分传递函数为

$$W_0(s) = \frac{K}{s\left(\frac{1}{6}s + 1\right)\left(\frac{1}{2}s + 1\right)}$$

设计性能指标为: 在最大速度输入为 $+180^\circ/\text{s}$ 时, 稳态误差不超过 1° ; 相位裕度 $\gamma \geq 45^\circ \pm 3^\circ$, 增益裕度 $K_g \geq 10\text{dB}$; 调节时间 $t_s \leq 3\text{s}$ 。

首先, 确定开环放大系数 K ;

$$K = K_v = \frac{\text{最大输入速度}}{\text{允许稳态误差}} = 180(1/\text{s})$$

这时未补偿系统开环对数幅频特性如图 5.4-8 所示。由图可知, 其剪切频率 $\omega_c = 12.5 \text{ 1/s}$; $\gamma = -55.5^\circ$; $K_g = -30\text{dB}$, 系统不稳定。

补偿装置超前部分的交接频率应取 $\omega_b = 2 \text{ 1/s}$, 加超前部分后对数幅频特性在 $0 \leq \omega \leq 6 \text{ 1/s}$ 区间的斜率为 -20dB/



此星公司制作 请尊重作者版权

dec.

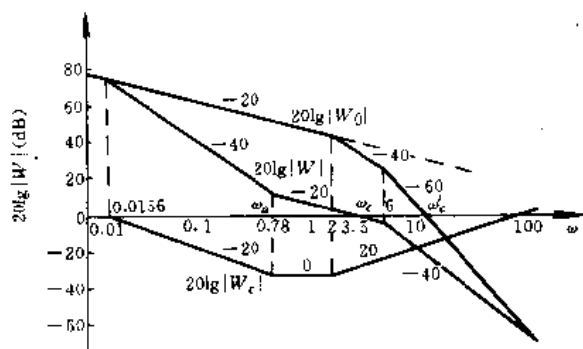


图 5-4-8 具有滞后-超前补偿的系统

开环对数幅频特性

根据 $t_s \leq 3s$ 和 $\gamma = 45^\circ$ 要求, 可算得 $\omega_c \geq 3.2 \text{ 1/s}$ 。取 $\omega_c = 3.5 \text{ 1/s}$, 相应有

$$20\lg|W_0(j\omega_c)| + 20\lg \frac{\omega_c}{\omega_b} = 34\text{dB}$$

按式 (5-4-10), 求得 $\beta = 50$ 。

补偿后系统的相位裕度为

$$\begin{aligned} \gamma &= 180^\circ + \arctan \frac{\omega_c}{\omega_a} - 90^\circ - \arctan \frac{\omega_c}{6} \\ &\quad - \arctan \frac{\beta\omega_c}{\omega_a} - \arctan \frac{\omega_c}{100} \\ &= 57.7^\circ + \arctan \frac{3.5}{0.78} - \arctan \frac{175}{0.78} \end{aligned}$$

考虑到 $\omega_a < \omega_b$, 故可取 $-\arctan(175/\omega_a) \approx -90^\circ$ 。因要求 $\gamma = 45^\circ$, 故上式可简化为

$$\arctan(3.5/\omega_a) = 77.3^\circ$$

从而求得 $\omega_a = 0.78 \text{ 1/s}$ 。最后得补偿装置和补偿后系统开环传递函数分别为:

$$\begin{aligned} W_c(s) &= [(1 + 1.28s)(1 + 0.5s)] \\ &\quad / [(1 + 64s)(1 + 0.01s)] \\ W(s) &= W_c(s) \cdot W_0(s) \\ &= \frac{180(1 + 1.28s)}{s(1 + 0.167s)(1 + 64s)(1 + 0.01s)} \end{aligned}$$

其对数幅频特性 $20\lg|W_c|$ 和 $20\lg|W_0|$ 如图 5-4-8 所示。

校验相位裕度和增益裕度, 计算得补偿后系统 $\gamma = 45.5^\circ$, $K_g = 27\text{dB}$, 符合设计要求。

2.4.2 用根轨迹法设计滞后-超前补偿装置

设计步骤如下:

- (1) 根据给定性能指标, 确定系统的闭环主导极点 $s_{1,2}$;
- (2) 为将闭环主导极点配置在希望位置, 补偿装置的超前部分应能给出足以补偿不符合相角条件的相角滞后量, 计算出超前相角 ϕ_c ;
- (3) 根据对系统开环放大倍数的要求, 计算未补

偿开环放大倍数 K 所应提高的倍数;

(4) 设滞后-超前补偿装置的传递函数为

$$\begin{aligned} W_c(s) &= \frac{(T_1s + 1)(T_2s + 1)}{\left(\frac{T_1}{\beta}s + 1\right)(\beta T_2s + 1)} \\ &= \frac{\left(s + \frac{1}{T_1}\right)\left(s + \frac{1}{T_2}\right)}{\left(s + \frac{\beta}{T_1}\right)\left(s + \frac{1}{\beta T_2}\right)} \quad \beta > 1 \end{aligned}$$

滞后补偿部分时间常数 T_2 应选得足够大, 使

$$\left| \frac{s_1 + \frac{1}{T_2}}{s_1 \beta T_2} \right| \approx 1$$

式中, s_1 为闭环主导极点。根据下列幅值条件和相角条件

$$\left| \frac{s_1 + \frac{1}{T_1}}{s_1 + \frac{\beta}{T_1}} \right| |W_0(s_1)| = 1 \quad \angle \frac{s_1 + \frac{1}{T_1}}{s_1 + \frac{\beta}{T_1}} = \phi_c$$

确定参数 T_1 和 β ;

(5) 利用已确定的参数 β , 选择参数 T_2 , 使其满足

$$\left| \frac{s_1 + \frac{1}{T_2}}{s_1 + \frac{1}{\beta T_2}} \right| \approx 1 \quad 0^\circ < \angle \frac{s_1 + \frac{1}{T_2}}{s_1 + \frac{1}{\beta T_2}} < 3^\circ$$

考虑到实现上的方便, βT_2 不宜选得过大。

2.5 串联补偿与并联补偿

补偿装置附加在系统中的形式有两种:

(1) 串联补偿。如果补偿装置与系统固有部分传递函数串联联接, 如图 5-4-9a 所示, 则这种补偿为串联补偿;

(2) 并联补偿。如果补偿装置与原系统中一部分环节相并联形成局部反馈, 如图 5-4-9b 所示, 则称并联补偿。

在补偿控制系统时, 系统的设计问题都可简化为合理的设计串联或并联补偿问题。究竟是选择串联补偿还是并联补偿, 这取决于系统中的信号性质、系统中各点功率的大小、可采用的元件、设计者的经验以及经济条件等。

一般来说, 串联补偿比并联补偿简单, 但串联补偿常需附加放大器, 以增大增益和进行隔离(为避免功率损耗, 串联补偿装置通常安排在前向通路中能量最低的点上)。一般来说, 当采用适当的信号时, 并联补偿需要的元件数目比串联补偿的少, 这是因为反馈补偿时, 信号是从功率较高点传向功率较低点的, 不需要



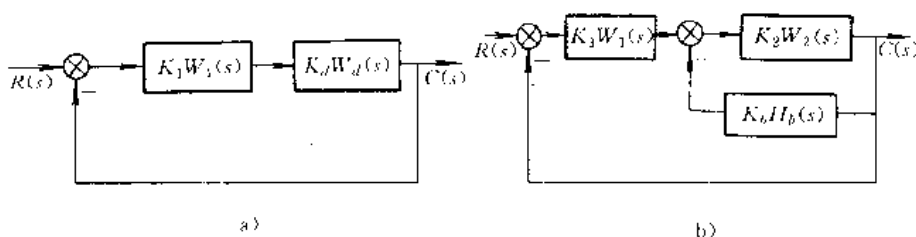


图 5-4-9 补偿装置在系统中的连接形式

a) 串联补偿 b) 并联补偿

附加放大器。

关于串联补偿设计问题,在以上各节中已介绍,这里研究并联(反馈)补偿的设计问题。下面根据希望特性方法确定并联补偿的结构和参数。

(1) 将并联补偿系统化为等效串联补偿系统。如图 5-4-9b 所示,图中 $K_1W_1(s)$ 、 $K_2W_2(s)$ 为系统固有部分传递函数; $K_bH_b(s)$ 为并联补偿传递函数

$$K_dW_d(s) = \frac{K_2W_2(s)}{1 + K_bH_b(s)K_2W_2(s)} = \frac{K_2W_2(s)}{1 + K_0W_0(s)} \quad (5-4-11)$$

式中 $K_dW_d(s)$ ——等效串联环节传递函数;

$K_0W_0(s)$ ——内闭环回路的开环传递函数。

首先,根据系统性能指标确定 $K_dW_d(s)$,建立 $K_dW_d(s)$ 与 $K_bH_b(s)$ 之间的关系。

1) 若 $|K_0W_0(s)| \gg 1$, 则

$$K_dW_d(s) = \frac{K_2W_2(s)}{1 + K_0W_0(s)} = \frac{K_2W_2(s)}{1 + K_2W_2(s)K_bH_b(s)} \approx \frac{1}{K_bH_b(s)} \quad (5-4-12)$$

2) 若 $|K_0W_0(s)| \ll 1$, 则

$$K_dW_d(s) = \frac{K_2W_2(s)}{1 + K_0W_0(s)} \approx K_2W_2(s) \quad (5-4-13)$$

3) 若 $|K_0W_0(s)| = 1$, 则应用式(5-4-11)的关系。

为使问题简化,在进行图解时,可先认为: $|K_0W_0(s)| > 1$ 时,式(5-4-12)成立; $|K_0W_0(s)| < 1$ 时,式(5-4-13)成立,在 $|K_0W_0(s)| = 1$ 附近将有误差。

(2) 速度反馈。这是最经常采用的一种并联补偿方法。这时

$$K_bH_b(s) = K_b s \quad (5-4-14)$$

式中 K_b ——测速部件(如测速机)的传递系数。

对机电控制系统,执行元件通常采用伺服电机,其传递函数为

$$K_2W_2(s) = \frac{K_2}{s(T_M s + 1)}$$

图 5-4-10 中的曲线 I、II 为 $K_2W_2(s)$ 和 $K_bH_b(s)$ 的对数幅频特性;曲线 III 为 $K_0W_0(s) = K_2W_2(s) \cdot K_bH_b(s)$ 的对数幅频特性。从图 5-4-10 可知:当 $\omega < 1/T_M$ 时, $|K_0W_0(s)| > 1$, $K_dW_d(s) = 1/(K_bH_b(s))$; 当 $\omega > 1/T_M$ 时, $|K_0W_0(s)| < 1$, $K_dW_d(s) = K_2W_2(s)$ 。等效串联传递函数为

$$K_dW_d(s) = \frac{K_d}{s(T_M s + 1)} \quad (5-4-15)$$

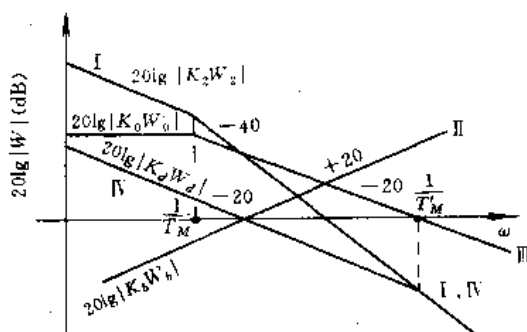


图 5-4-10 开环对数幅频特性

根据对数幅频特性的性质, $K_d = K_2/K_b = 1/K_b$; $T_M = T_M/K_b$ 。对比曲线 I、IV 可看出,采用速度反馈作并联补偿,相当于加入一个串联微分补偿,其等效传递函数为

$$K_dW_d(s) = \frac{1}{K_b} \frac{T_M s + 1}{T_M s + 1}$$

(3) 速度微分反馈 速度反馈可以改善系统的动态性能,但同时降低了开环放大倍数。用速度微分反馈可克服这个缺点,其传递函数为

$$K_bH_b(s) = \frac{K_b T_b s^2}{T_b s + 1}$$

若取

$$K_2W_2(s) = \frac{K_2}{s(T_M s + 1)}$$

则同样可用作图法求出 $K_bH_b(s)$ 和 $K_dW_d(s)$ 的关系。图 5-4-11 中 I、II 和 III 分别示出 $K_2W_2(s)$ 、 $K_bH_b(s)$ 和



$K_0W_0(s) = K_2W_2(s) \cdot K_bH_b(s)$ 的对数幅频特性。由图 5·4-11 可知： $K_dW_d(s)$ 与 $K_bH_b(s)$ 在 $|K_0W_0(s)| > 1$ 时，互为镜像特性，且当 $1/T_1 < \omega < 1/T_M$ 时， $|K_0W_0(s)| > 1, K_dW_d(s) \approx 1/[K_bH_b(s)]$ ；当 $\omega < 1/T_1$ 和 $\omega > 1/T_M$ 时， $|K_0W_0(s)| < 1, K_dW_d(s) \approx K_2W_2(s)$ ，从而可绘出 $K_dW_d(s)$ 对数幅频特性，如图中曲线 N 所示。其传递函数为

$$K_dW_d(s) = \frac{K_d(T_b s + 1)}{s(T_1 s + 1)(T_M s + 1)}$$

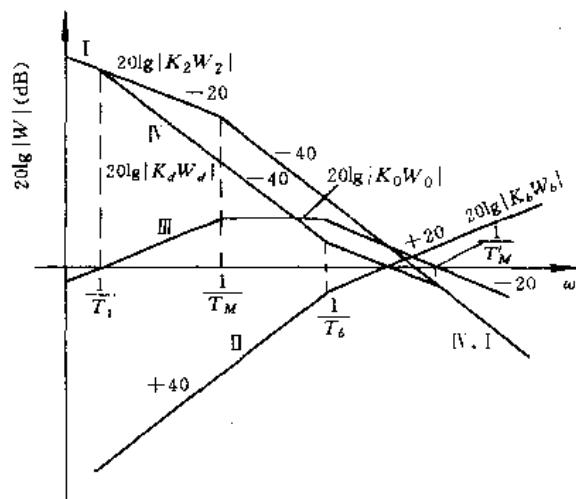


图 5·4-11 对数幅频特性

由对数幅频特性的性质可知： $K_d = K_2$ ； $T_1 = K_0 = K_2K_bT_b$ ； $T_M = T_M/(K_2K_b)$ 。

比较图 5·4-10 与图 5·4-11 中的曲线 N 可知，其中频和高频段的形状是相同的，而在低频段，采用速度微分反馈比速度反馈提高了 K_2K_b 倍。比较图 5·4-11 中曲线 I 与 N，采用速度微分反馈作并联补偿，相当于加入一个滞后-超前补偿，其等效传递函数为

$$K_cW_c(s) = \frac{(T_M s + 1)(T_b s + 1)}{(T_1 s + 1)(T_M s + 1)}$$

3 控制器的时域设计

3.1 PID 控制器设计

PID(比例-积分-微分)控制器对于生产过程是一种比较理想的调节器。由于生产过程大多数是缓慢的变化过程，因此只要采样周期 T_0 取得足够小，断续控制形式就趋近于连续控制形式。模拟 PID 控制器的理想算式为

$$u(t) = K_c \left[e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(t) dt + T_D \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (5.4-16)$$

式中 $u(t)$ ——控制器输出；
 $e(t)$ ——控制偏差；
 K_c ——控制器放大倍数；
 T_I ——积分时间常数；
 T_D ——微分时间常数。

其传递函数可表示为

$$W_c(s) = K_c \left(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right) \quad (5.4-17)$$

在实际应用中，PID 算式均用微机实现。理想的 PID 算式有三种形式：位置式、增量式和速度式。

(1) 位置式。理想 PID 的位置式可由式(5·4-16)得出，在第 k 次采样时刻，PID 计算结果为

$$u(k) = K_c e(k) + K_I \sum_{i=0}^k e(i) + K_D [e(k) - e(k-1)] \quad (5.4-18)$$

式中 K_I ——积分系数， $K_I = K_c T_0 / T_I$ ；
 K_D ——微分系数， $K_D = K_c T_D / T_0$ ；
 T_0 ——采样周期。

(2) 增量式。PID 运算的输出增量，为前后两次采样所计算的位置值之差 $\Delta u(k) = u(k) - u(k-1)$ ，即

$$\Delta u(k) = K_c [e(k) - e(k-1)] + K_I \cdot e(k) + K_D [e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)] \quad (5.4-19)$$

(3) 速度式。其输出是指直流电机的转速。速度式很容易从式(5·4-19)两边除以 T_0 得到

$$v(k) = \frac{\Delta u(k)}{T_0} = K_c \left\{ \frac{1}{T_0} [e(k) - e(k-1)] + \frac{1}{T_I} e(k) + \frac{T_D}{T_0^2} [e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)] \right\} \quad (5.4-20)$$

PID 控制器的设计，关键在于 T_0 、 K_c 、 T_2 和 T_D 的整定。

用于生产过程的控制系統一般均有较大的时间常数，而在大多数使用情况下，采样周期 T_0 与时间常数相比要小得多，所以基本的参数整定完全可以按模拟控制器的各种方法加以分析与综合。

下面按扩充临界比例法整定参数，其步骤如下：

- (1) 选择一足够小的 T_0 ，即 $T_0 < 0.1\tau$ ， τ 为控制对象的纯滞后时间；
- (2) 用上述选定的 T_{0min} ，采用与模拟控制器相同的临界比例度法，求出临界比例度 δ_K 及临界振荡周期 T_K ；
- (3) 选择控制制度。所谓控制制度，就是以模拟控制器为基准，将数字机的控制效果与模拟控制器的控制效

纯星公司制作 请尊重原作者版权



果相比较。

$$\text{控制度} = \frac{\left[\min \int_0^{\infty} e^2 dt \right]_{\text{数字}}}{\left[\min \int_0^{\infty} e^2 dt \right]_{\text{模拟}}} \quad (5.4-21)$$

(4) 计算出控制度后,按表 5.4-1 求得 T_0 、 K_c 、 T_I 和 T_D 值;

表 5.4-1 按扩充临界比例法整定 T_0 、 K_c 、 T_I 、 T_D

| 控制度 | 控制规律 | T_0 | K_c | T_I | T_D |
|------|------|------------|----------------|-----------|-----------|
| 1.05 | PI | $0.03T_k$ | $0.53\delta_K$ | $0.88T_k$ | — |
| | PID | $0.014T_k$ | $0.63\delta_K$ | $0.49T_k$ | $0.14T_k$ |
| 1.2 | PI | $0.05T_k$ | $0.49\delta_K$ | $0.91T_k$ | — |
| | PID | $0.043T_k$ | $0.47\delta_K$ | $0.47T_k$ | $0.16T_k$ |
| 1.5 | PI | $0.14T_k$ | $0.42\delta_K$ | $0.99T_k$ | — |
| | PID | $0.09T_k$ | $0.34\delta_K$ | $0.43T_k$ | $0.20T_k$ |
| 2.0 | PI | $0.22T_k$ | $0.36\delta_K$ | $1.05T_k$ | — |
| | PID | $0.16T_k$ | $0.27\delta_K$ | $0.40T_k$ | $0.22T_k$ |
| 模拟 | PI | — | $0.57\delta_K$ | $0.83T_k$ | — |
| | PID | — | $0.70\delta_K$ | $0.50T_k$ | $0.13T_k$ |

(5) 按求得的整定参数运行,观察控制效果,用探索法进一步寻求比较满意的值。

3.2 状态反馈控制器设计

闭环系统极点的分布情况决定了系统的稳定性和动态品质,因此,可将闭环极点的位置作为系统的动态品质指标。

现代控制理论中关于极点配置问题的研究表明,只要线性系统完全可控,则可采用状态反馈控制器,将闭环系统极点配置在任何位置上。设计问题的关键是如何选取状态反馈阵 K , 以实现极点的任意配置。

设线性系统的状态方程为

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (5.4-22)$$

采用全状态反馈控制

$$u = -Kx \quad (5.4-23)$$

式中 u ——标量控制;

K —— $1 \times n$ 反馈矩阵。

将式 (5.4-23) 代入式 (5.4-22), 得闭环系统方程

$$\dot{x} = (A - BK)x \quad (5.4-24)$$

可以证明,若 (A, B) 为可控对,则存在矩阵 K , 它能给出 $(A - BK)$ 的任意一组特征值。换言之,特征

方程

$$|\lambda I - (A - BK)| = 0 \quad (5.4-25)$$

的根,可以任意配置。

如果系统可控,它总可变成如下规范型:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 \\ -a_n & -a_{n-1} & -a_{n-2} & \cdots & -a_1 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

反馈矩阵 K 可写为

$$K = [k_1, k_2, \dots, k_n] \quad (5.4-26)$$

则有

$$A - BK =$$

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 \\ -a_n - k_1 & -a_{n-1} - k_2 & -a_{n-2} - k_3 & \cdots & -a_1 - k_n \end{bmatrix}$$

(5.4-27)

$A - BK$ 的特征值可从下列特征方程求得

$$|\lambda I - (A - BK)| = \lambda^n + (a_1 + k_n)\lambda^{n-1} + (a_2 + k_{n-1})\lambda^{n-2} + \cdots + (a_n + k_1) = 0 \quad (5.4-28)$$

可见,特征值可以通过选择 k_1, k_2, \dots, k_n 来任意选定。

【例 5.4-4】 设线性系统的传递函数为

$$W(s) = \frac{10}{s(s+1)(s+2)}$$

试设计状态反馈控制器 K , 以使闭环系统的极点配置在 $s_1 = -2, s_2 = -1+j$ 及 $s_3 = -1-j$ 位置上。

因给定的传递函数无零极点对消现象,故给定系统为状态完全可控。

与给定传递函数对应的状态方程为

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -2 & -3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} u$$

因状态变量共有三个,即 x_1, x_2 及 x_3 , 所以待定的状态反馈矩阵为

$$K = [k_1 \quad k_2 \quad k_3]$$

由



$$|sI - (A - BK)| = \begin{vmatrix} s & -1 & 0 \\ 0 & s & -1 \\ k_1 & 2 + k_2 & s + (3 + k_3) \end{vmatrix} = 0$$

求得闭环系统的特征方程式为

$$s^3 + (3 + k_3)s^2 + (2 + k_2)s + k_1 = 0 \quad (5-4-29)$$

由指定的闭环极点 s_1, s_2 及 s_3 , 确定闭环系统特征方程式为

$$(s+2)(s+1-j)(s+1+j) = s^3 + 4s^2 + 6s + 4 = 0 \quad (5-4-30)$$

比较式 (5-4-29) 与式 (5-4-30), 可求得 $k_1=4, k_2=4, k_3=1$, 即有 $K = [4 \ 4 \ 1]$ 。状态反馈系统的状态变量如图 5-4-12 所示。

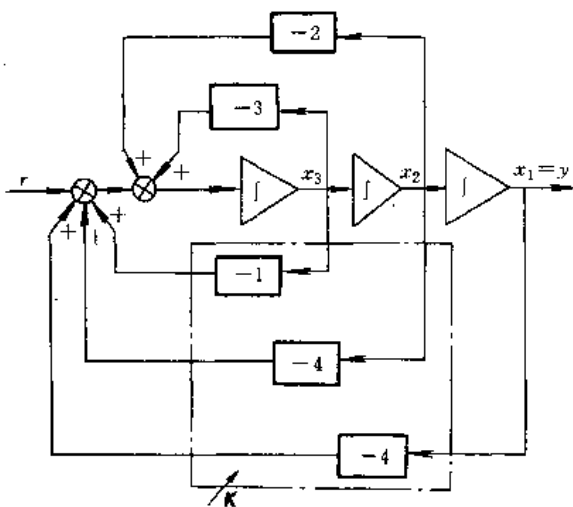


图 5-4-12 状态反馈系统状态变量框图

3.3 观测器设计

为实现状态反馈, 必须反馈全部状态变量。可是, 事实上并不是所有的状态变量都可以用来反馈的。可以假设只有输出和输入是可测量的, 在测量输入 $u(t)$ 和输出 $y(t)$ 所得信息的基础上, 对状态变量进行观测的子系统称为观测器。

为确定观测器存在的条件, 有如下定理: 已知 n 阶线性定常系统的状态方程和输出方程:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (5-4-31)$$

$$y(t) = Cx(t) \quad (5-4-32)$$

式中 x —— n 维状态矢量;

u —— 标量控制;

y —— q 维输出矢量。

如果系统是完全可观测的, 则状态矢量 x 就可以根据输出 y 、输入 u 以及这些变量的导数的线性组合来构成 (证明略)。

设计状态观测器有许多方法。直观地看, 观测器应当具有和原系统相同的状态方程。然而, 观测器应将 $u(t)$ 和 $y(t)$ 作为输入, 并使 $x(t)$ 和观测器状态 $x_c(t)$ 之间的误差最小。因 $x(t)$ 不可直接测量, 只好比较 $y(t)$ 和 $y_c(t)$,

$$y_c(t) = Cx_c(t) \quad (5-4-33)$$

据此, 在图 5-4-13 中的虚线部分给出了状态观测器框图。状态观测器的设计被归结为用 K_c 作反馈矩阵的反馈控制问题。设计的目的在于选择 K_c , 使 $y_c(t)$ 尽可能快地逼近 $y(t)$ 。当 $y_c(t)$ 等于 $y(t)$ 时, 可用下式描述状态观测器的动态特性:

$$\dot{x}_c(t) = Ax_c(t) + Bu(t) \quad (5-4-34)$$

或

$$\dot{x}_c(t) = Ax_c(t) + Bu(t) + K_c C [x(t) - x_c(t)] \quad (5-4-35)$$

图 5-4-13 示出具有观测器的控制系统框图。

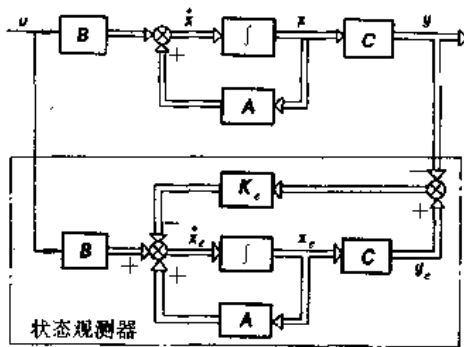


图 5-4-13 带观测器的线性反馈系统框图

反馈矩阵 K_c 的设计有许多方法。一种方法是本章 3.2 节中所讨论的特征值配置法。由式 (5-4-31) 减去式 (5-4-35), 得

$$[\dot{x}(t) - \dot{x}_c(t)] = (A - K_c C)[x(t) - x_c(t)] \quad (5-4-36)$$

状态观测器的特征方程为

$$|\lambda I - (A - K_c C)| = 0 \quad (5-4-37)$$

K_c 的选择应使 $x_c(t)$ 迅速地逼近 $x(t)$ 。下面举例说明观测器的设计步骤。

【例 5-4-5】 设系统的状态方程及输出方程分别为

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -2 & -3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u$$

$$y = [2 \ 0] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$$

要求设计一状态观测器, 使其极点配置在 $s_1 = s_2 = -10$ 上。

首先, 从给定的系统矩阵 A, B 看, 系统可控。又因

$$\text{rank} \begin{bmatrix} C \\ CA \end{bmatrix} = \text{rank} \begin{bmatrix} 2 & 0 \\ 0 & 2 \end{bmatrix} = 2$$



故系统可观测, 因此, 任意配置极点的观测器是存在的。

设观测器的反馈矩阵 K_e 为

$$K_e = \begin{bmatrix} k_{e1} \\ k_{e2} \end{bmatrix}$$

则

$$\begin{aligned} A - K_e C &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -2 & -3 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} k_{e1} \\ k_{e2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 2 & 0 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} -2k_{e1} & 1 \\ -2 - 2k_{e2} & -3 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

状态观测器的特征方程为

$$|sI - (A - K_e C)| = \begin{vmatrix} s + 2k_{e1} & -1 \\ 2 + 2k_{e2} & s + 3 \end{vmatrix} = 0$$

$$\text{即 } s^2 + (2k_{e1} + 3)s + (6k_{e1} + 2k_{e2} + 2) = 0$$

根据设计要求,

$$\begin{aligned} s^2 + (2k_{e1} + 3)s + (6k_{e1} + 2k_{e2} + 2) \\ = (s + 10)(s + 10) = 0 \end{aligned}$$

比较系数, 可求得 $k_{e1} = 8.5$, $k_{e2} = 23.5$, 即反馈矩阵 K_e 为

$$K_e = \begin{bmatrix} 8.5 \\ 23.5 \end{bmatrix}$$

4 复合控制系统控制器设计

在系统中引入输入信号的微分(一般为一、二阶微分), 以改善控制品质, 这种信号称为顺馈信号。前馈信号和误差信号一起对被控对象进行控制, 称为复合控制。复合控制可增加无差度, 减小稳态误差, 提高响应速度, 但不影响系统的稳定性。

1. 复合控制系统特性 复合控制系统的框图如图 5-4-14a 所示, 其变换后的等效框图如图 5-4-14b

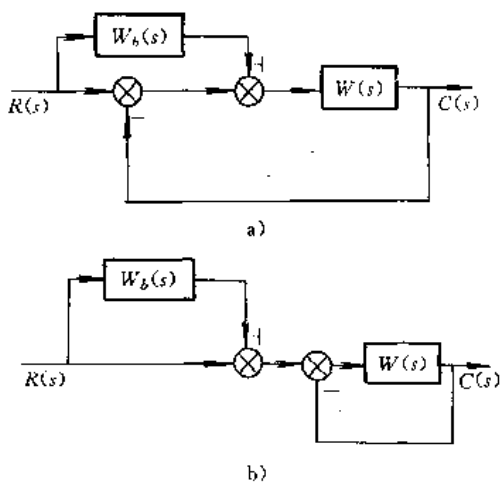


图 5-4-14 复合控制系统框图

$W_b(s)$ —前馈通道传递函数 $W(s)$ —按误差控制系统开环传递函数

所示。

复合控制系统闭环传递函数为

$$\Phi_c(s) = \frac{W(s)[1 + W_b(s)]}{1 + W(s)} \quad (5-4-38)$$

其开环等效传递函数为

$$W_c(s) = \frac{\Phi_c(s)}{1 - \Phi_c(s)} \quad (5-4-39)$$

若要求系统的输出完全复现控制输入, 则其条件是式(5-4-38)等于 1, 即要求

$$W(s)[1 + W_b(s)] = 1 + W(s)$$

$$W_b(s) = \frac{1}{W(s)} \quad (5-4-40)$$

该式说明, 前馈通道的传递函数为按误差控制系统开环传递函数的倒数。对一般系统, $W(s)$ 的分母阶次高于分子阶次, 且含有积分环节, 这就要求 $W_b(s)$ 必须含有纯微分环节, 这在工程实践中很难实现, 故常采用部分补偿的方法。

由式(5-4-38)可知, 引入 $W_b(s)$ 只含纯微分作用时, 并不影响闭环系统的特征方程式, 从而对系统的稳定性无影响。

若 $W_b(s) = M_b(s)/D_b(s)$, 则式(5-4-38)可改写为

$$\Phi_c(s) = \frac{W(s)[D_b(s) + M_b(s)]}{[1 + W(s)]D_b(s)} \quad (5-4-41)$$

这时复合控制系统的特征方程有变化, $D_b(s)$ 将影响特征方程, 但一般的前馈环节多是微分环节, 即或有惯性环节存在, 也都是稳定环节, 且其时间常数均很小, 对复合控制系统的稳定性影响不大。

一般, 对于外干扰作用进行补偿的复合控制系统框图如图 5-4-15 所示。

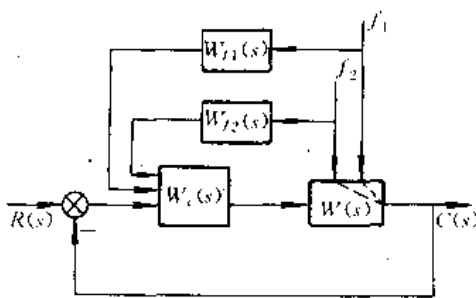


图 5-4-15 补偿干扰复合控制系统框图

这时, 为了补偿干扰作用 $f(t)$, 应使复合控制系统输出对干扰的等效闭环传递函数为零或接近于零。

2. 复合控制器设计 举例说明复合控制器的设计步骤。设系统框图如图 5-4-16 所示。



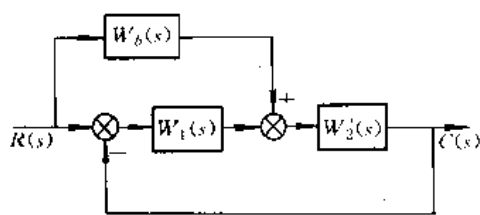


图 5·4-16 复合控制系统框图

(1) 首先, 绘制闭环系统原有部分 $W_1(s)$ 和 $W_2(s)$ 的对数幅频特性。设

$$W_1(s)W_2(s) = K_1 \frac{K_2'}{s(T_1s+1)(T_2s+1)} \quad (5\cdot4-42)$$

式中 $W_1(s) = K_1$

$$W_2(s) = \frac{K_2'}{s(T_1s+1)(T_2s+1)}$$

(2) 根据对系统性能指标要求, 绘制复合控制系统的等效希望开环特性 $W_{ed}(j\omega)$;

(3) 如果要求系统具有二阶无差度时, 可选定前馈通道的传递函数为

$$W_b(s) = \lambda_1 s \quad (5\cdot4-43)$$

(4) 设复合控制系统闭环部分的希望开环传递函数为

$$\begin{aligned} W_{ed}(s) &= W_1(s)W_2(s) \\ &= K_1 \frac{K_2'}{s(T_1s+1)(T_2s+1)} \end{aligned} \quad (5\cdot4-44)$$

式中 $W_1(s) = K_1$

$$W_2(s) = \frac{K_2}{s(T_1s+1)(T_2s+1)}$$

将图 5·4-16 中的 $W'_2(s)$ 换成 $W_2(s)$, 这时复合控制系统的等效希望闭环传递函数为

$$\Phi_{ed}(s) = \frac{W_2(s)[W_b(s) + W_1(s)]}{1 + W_1(s)W_2(s)}$$

将其代入式(5·4-39), 得复合控制系统等效希望开环传递函数为

$$W_{ed}(s) = \frac{W_2(s)[W_b(s) + W_1(s)]}{1 + W_1(s)W_2(s)}$$

将式(5·4-43)和式(5·4-44)代入上式, 得

$$W_{ed}(s) = \frac{K_1 K_2 (1 - B_1 s)}{s(A_0 + A_1 s + A_2 s^2)} \quad (5\cdot4-45)$$

式中 $B_1 = \lambda_1 / K_1$;

$$A_0 = 1 - K_2 \lambda_1;$$

$$A_1 = T_1 + T_2;$$

$$A_2 = T_1 T_2.$$

为保证系统具有二阶无差度, 必须 $A_0 = 0$, 即 $1 - K_2 \lambda_1 = 0$, 得 $\lambda_1 = 1 / K_2$ 。由此, 式(5·4-45)可改写为

$$W_{ed}(s) = \frac{K_1 K_2}{A_1} \frac{B_1 s + 1}{s^2 \left(\frac{A_2}{A_1} s + 1 \right)} \quad (5\cdot4-46)$$

将式(5·4-46)与已作出的复合系统希望特性相比较, 二者应相等, 从而可求得 K_2, T_1 和 T_2 值。

(5) 根据已知的 $W_{ed}(s)$ 和 $W_1(s), W'_2(s)$, 就可按本章 2 节所述的确定串联或并联的校正设计方法, 设计校正装置。

第 5 章 非线性系统

1 非线性系统的特点

对于构成自动控制系统的诸环节, 根据它们的静特性不同, 可分为线性环节和非线性环节两大类。当环节的输出输入静特性呈线性关系时, 例如, 最简单的情况

$$y = kx \quad (5\cdot5-1)$$

式中 y ——环节的输出;

x ——环节的输入;

k 常数。

称上述环节为线性环节。当静特性呈非线性关系时, 如

$$y = f(x) \quad (5\cdot5-2)$$

式中 $f(x)$ —— x 的非线性函数。

称为非线性环节。

在构成控制系统的诸环节中, 若存在一个或一个以上的非线性环节, 则称系统为非线性系统。

实际上, 组成控制系统的控制对象、测量变送装置、控制器等环节均不可避免地、或多或少地具有非线性特性。因此, 从本质上说, 几乎所有实际控制系统都是非线性系统。非线性系统有如下特点:

(1) 非线性系统的性能与其工作点有关。

(2) 非线性系统的稳定性与其初始条件有关。

(3) 非线性系统可能出现自振荡的运动形式。当非线性系统的输入为非周期函数时, 其输出可能是周



期函数。非线性系统输出的等幅振荡一般称之为系统的自持振荡或极限环，它区别于线性系统中的临界振荡。

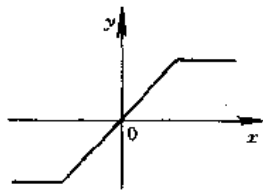
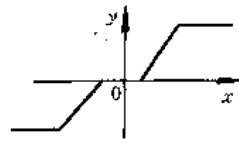
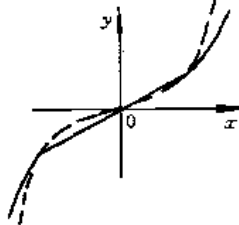
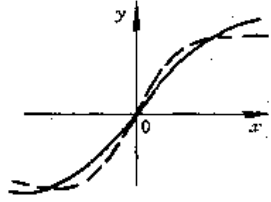
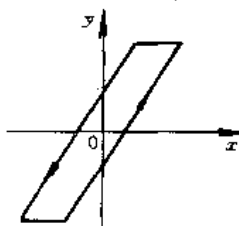
(4) 当非线性系统输入正弦信号时，其输出不再是正弦函数形式。此时，输出将出现谐波（输入信号频率的倍数），或出现由输入信号与系统内振荡信号组合产生的信号，还可能产生跳跃谐振现象。

2 典型非线性特性

非线性系统中常见的典型非线性特性有：继电特性、不灵敏区、间隙、饱和、局部线性区及量化特性等。其它更一般的非线性特性，可用典型非线性特性按不同方式组合而成。

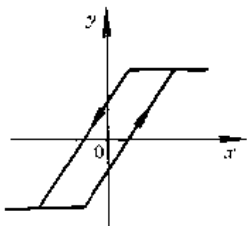
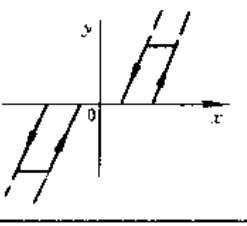
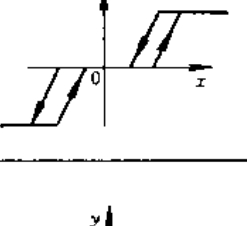
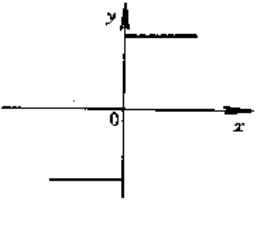
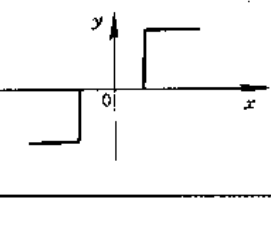
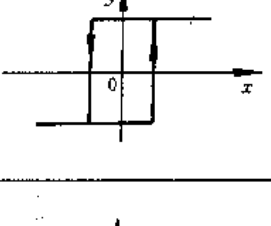
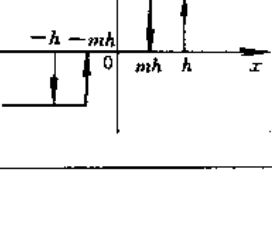
常见的典型非线性特性，示如表 5-5-1 中。

表 5-5-1 常见的典型非线性特性

| 序 | 名称 | 静特性 | 简要说明 | 基本区段 |
|---|-----------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|---------------|
| 1 | 单 值 非 线 性 |  | 输出量有限制（位置、速度、加速度）的元件特性 | 线性区和饱和区 |
| 2 | |  | 在控制元件中存在不灵敏区的饱和特性；在执行元件中存在摩擦...的特性 | 线性区、饱和区和不灵敏区 |
| 3 | |  | 逐段线性函数形成的特性 | 线性区段 |
| 4 | |  | 二次函数元件特性 | 线性区段（近似）或二次函数 |
| 5 | 非单值非线性 |  | 存在间隙、摩擦的元件特性 | 非单值区 |



(续)

| 序 | 名称 | 静特性 | 简要说明 | 基本区段 |
|----|----------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|---------------|
| 6 | 非单值非线性 |  | 同 5, 且输出量受限制的特性 | 非单值区、饱和区 |
| 7 | |  | 同 5, 在控制元件中有不灵敏区特性 | 不灵敏区、非单值区 |
| 8 | |  | 同 7, 且输出量受限制的特性 | 不灵敏区、非单值区、饱和区 |
| 9 | 单值继电器特性 |  | 理想继电器特性, 如继电器元件、恒速伺服马达等 | 饱和区 |
| 10 | 单值继电器特性 |  | 同 9, 且有不灵敏区 (如搭接量) 的元件特性 | 饱和区、不灵敏区 |
| 11 | 非单值继电器特性 |  | 存在间隙和摩擦的继电器元件特性 | 非单值区、饱和区 |
| 12 | 非单值继电器特性 |  | 同 11, 且存在不灵敏区特性 | 非单值区、饱和区和不灵敏区 |

此星公司制作 请尊重作者版权



(续)

| 序 | 名称 | 静特性 | 简要说明 | 基本区段 |
|----|-------------|-----|--------------------------|---------------|
| 13 | 不对称非单值继电器特性 | | 同 10, 且非对称特性 | 同 10 |
| 14 | 单值非线性 | | 具有不灵敏区的继电器元件, 变化后输出呈线性特性 | 不灵敏区、线性区 |
| 15 | 单值非线性 | | 具有负搭接量的元件特性 | 负不灵敏区、线性区 |
| 16 | 单值非线性 | | 同 15, 且输出量受限制的元件特性 | 负不灵敏区、饱和区和线性区 |
| 17 | 单值非线性 | | 计算机定点制截断处理而形成的量化特性 | 量化特性、不灵敏区 |
| 18 | 非单值非线性 | | 具有与输入量有关的滞环特性 | 非单值的场特性 |



3 相轨迹法

相轨迹法是一种图解分析法。

设非线性系统状态方程式

$$\dot{x} = f(x) \quad (5.5-3)$$

式中 x —— n 维状态矢量；

$f(x)$ —— x 的非线性函数。

状态矢量 $x(t)$ 完全确定了系统的运动状态。由各状态 $x_i(t) (i=1, \dots, n)$ 为坐标构成的 n 维空间, 称为相空间或状态空间。状态矢量在相空间运动的轨迹, 称为相轨迹。相轨迹的特征点是奇点和极限环。

当 $n=2$ 时, 相空间变成相平面。取 x 和 \dot{x} 作为平面的坐标, 系统的每一状态均相应于该平面上的一点。当时间 t 变化时, 这一点在 $x-\dot{x}$ 平面(相平面)上描绘出的曲线(相轨迹), 表征了系统的动态过程。用平面相轨迹这种几何方法表示系统动态特性的方法, 称为相平面法。相平面法是庞加莱(Poincare)首先提出的。由于绘制相轨迹存在困难, 因此相轨迹法一般适用于二阶系统。

3.1 奇点

奇点, 是相平面图上的特殊点, 相平面图上任何其它点称为普通点。奇点在数学上是不定值点, 相当于 $dx/dx=0/0$ 的点。在奇点处的积分曲线 $\dot{x}=f(x)$ 值是不定的, 所以“奇点”才成为多条相轨迹的逼近点或离开点。相反, 通过任意已知普通点的相轨迹仅有一条。

除了在奇点以外, 由所有可能初始条件来确定起始位置的相轨迹都不会彼此相交。

为使不同的奇点对应于不同的响应特性, 故要研究靠近奇点的相轨迹特性。将非线性系统式(5.5-3)在奇点(或平衡点)处线性化, 得

$$\dot{x} = Ax, x(0) = x_0 \quad (5.5-4)$$

式中 A —— $n \times n$ 阶系统矩阵。

一般认为 $x_0=0$ 。

当 $n=2$ 时, 式(5.5-4)可写成

$$\dot{x} + Px + Qx = 0 \quad (5.5-5)$$

根据特征值的取值不同, 系统有不同的运动规律。对于系统式(5.5-5), 在 P - Q 参数平面上, 可分成五个区域, 它们分别对应不同的根的分布, 如图 5.5-1 所示, 并在表 5.5-2 中说明。

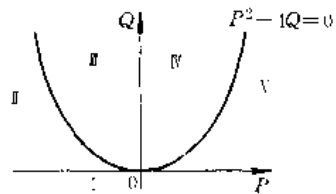


图 5.5-1 P - Q 参数平面区域划分

系统式(5.5-5)的奇点位于 $x-\dot{x}$ 平面的原点, 而特征根在复平面上的位置确定了奇点的特性。表 5.5-2 列出了各区域、根的分布、过渡过程曲线、相平面图以及对应奇点性质。图 5.5-2 给出了 P - Q 平面上的奇点分布。

表 5.5-2 P - Q 平面上的奇点分布

| 区域或分界线 | 根 分 布 | 过渡过程曲线 | 相 平 面 图 | 对应奇点性质 |
|--------|-------|--------|---------|--------|
| 区域 I | | | | 鞍点 |
| 区域 II | | | | 不稳定节点 |



(续)

| 区域或分界线 | 根分布 | 过渡过程曲线 | 相平面图 | 对应奇点性质 |
|---------------------------|-----|--------|------|--------|
| 区域Ⅱ | | | | 不稳定焦点 |
| 区域Ⅳ | | | | 稳定焦点 |
| 区域Ⅴ | | | | 稳定节点 |
| 半直线 $Q > 0$ $P = 0$ | | | | 中心点 |

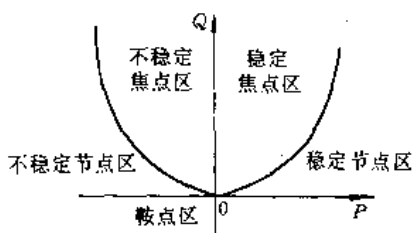


图 5-5-2 P-Q 平面上奇点分布

上述的奇点分类,只适用于二阶系统。对于三阶或高阶系统,通常将奇点区分为稳定的、渐近稳定的或不稳定的。

3.2 极限环

非线性二阶系统在满足一定条件时,相平面上可能出现孤立的封闭的相轨迹,称为极限环。它对应于系

统存在自振荡。

极限环附近的相轨迹,或都卷向极限环,或都从极限环卷出。根据非线性特性的不同,极限环将相平面分隔成内部平面和外部平面。极限环内部(或外部)的相轨迹,总是不可能穿过极限环而进入它的外部(或内部)。

根据极限环内、外平面上相轨迹的方向,可将极限环分为稳定极限环、不稳定极限环和半稳定极限环。各类极限环及相应的时域响应,如图 5-5-3 所示。图中,曲线 1(或 2)均分别对应极限环内(或外)平面的情况。

稳定的极限环对应的是系统呈等幅持续振荡,设计时应尽量缩小极限环,以满足准确度要求。不稳定的极限环对应的是小偏差时系统稳定,大偏差时系统不稳定,设计时应尽量扩大极限环,以扩大稳定区。



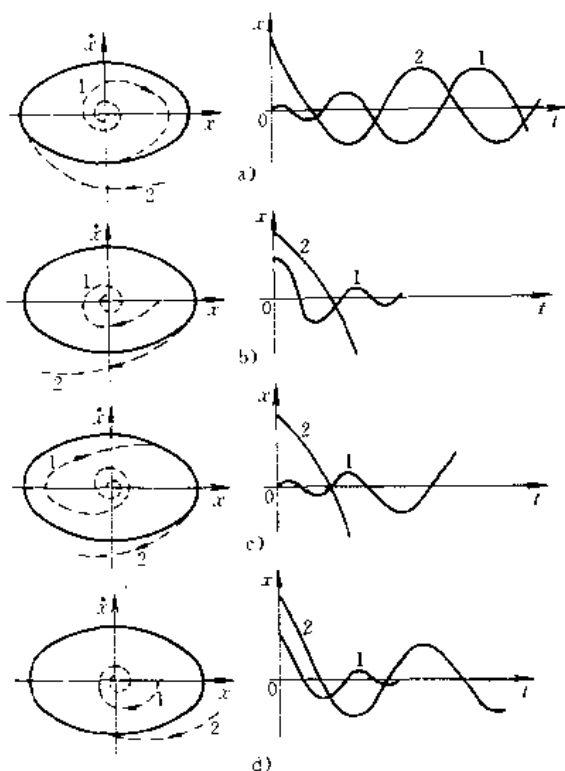


图 5-5-3 极限环与时域响应

- a) 稳定极限环
- b) 不稳定极限环
- c) 半稳定极限环
- d) 半稳定极限环

3.3 相轨迹绘制方法

3.3.1 解析法

当微分方程式比较简单时,常用解析法绘制相轨迹。

设非线性系统微分方程

$$\ddot{x} + f(x, \dot{x}) = 0 \quad (5.5-6)$$

则系统状态 x, \dot{x} 的关系方程有

$$\frac{d\dot{x}}{dx} = -\frac{f(x, \dot{x})}{\dot{x}} \quad (5.5-7)$$

因此,有如下两种方法可以用来解析地确定相轨迹的方程:

(1) 若式 (5.5-7) 简单,则可直接积分求得相轨迹方程

$$\dot{x} = g(x) \quad (5.5-8)$$

给定不同的初始条件,即可由式 (5.5-8) 绘出系统的相平面图。

(2) 若式 (5.5-7) 不能直接积分求解,则可以先求出时间解 $x(t), \dot{x}(t)$, 然后消去变量 t , 即可得相轨迹

方程。如果,消去变量 t 有困难或过于繁杂,则可求出不同 t 的 x, \dot{x} 值,据此数值关系亦可绘出相轨迹曲线。

3.3.2 图解法

当微分方程较复杂时,采用图解法。

1. 等倾线法 等倾线法是一种不必求解微分方程,而通过作图方法求取相轨迹的方法。这种方法适用于那些非线性特性能用数学表达式表示的系统。由式 (5.5-7) 知, $d\dot{x}/dx$ 表示相轨迹的斜率。令 $d\dot{x}/dx = \alpha$, 则

$$\alpha = \frac{-f(x, \dot{x})}{\dot{x}} \quad (5.5-9)$$

由式 (5.5-9) 可求得同一斜率时所有点上的 x, \dot{x} 值。相平面上,这些在多条相轨迹上的具有相同斜率的点的连线,称为相轨迹的等倾线。式 (5.5-9) 为等倾线方程。

给定不同的 α 值,可绘出一组等倾线。在每条等倾线的若干点上画出斜率等于等倾线值的短线段,这些短线段便在整个相平面上构成相轨迹切线的方向场。在给定初始条件后,即可由初始点出发,沿着方向场将这些短线段用光滑连续曲线连接起来,便得到系统的相轨迹。

等倾线和表示切线方向场的短线段,如图 5.5-4 所示。

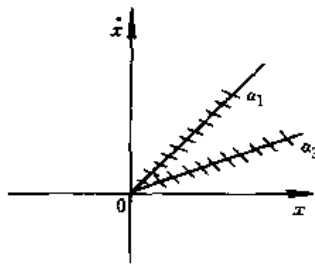


图 5-5-4 等倾线和方向场短线段

【例 5.5-1】 设系统的微分方程为

$$\ddot{x} + 2\zeta\omega\dot{x} + \omega^2x = 0 \quad (5.5-10)$$

则等倾线方程为

$$\dot{x} = \frac{\omega^2}{\alpha + 2\zeta\omega}x \quad (5.5-11)$$

可见,等倾线族为不同 α 值的通过原点的直线。若取 $\omega = 1, \zeta = 0.5$, 则相应的一族等倾线以及由初始条件确定的初始点 A 开始所作的系统相轨迹如图 5.5-5 所示。

2. 圆弧近似法(又称 δ 法) δ 法可应用于下列形式的方程



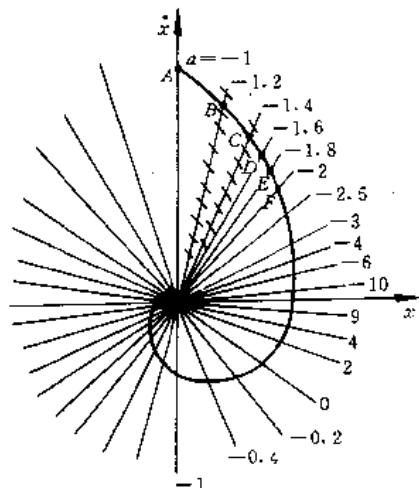


图 5-5-5 等倾线族与相轨迹

$$\ddot{x} = -f(x, \dot{x}, t) \quad (5-5-12)$$

式中, $f(x, \dot{x}, t)$ 可以是线性的, 也可以是非线性的, 且还可以是时变的; 但必须是连续和单值的。

为凑成圆方程的形式, 将式(5-5-12)改写为

$$\ddot{x} + \omega^2 x = -f(x, \dot{x}, t) + \omega^2 x \quad (5-5-13)$$

令

$$\delta = -\frac{f(x, \dot{x}, t) - \omega^2 x}{\omega^2}$$

代入式(5-5-13)得

$$\frac{\ddot{x}}{\omega^2} + x - \delta = 0 \quad (5-5-14)$$

δ 是 x, \dot{x}, t 的函数。当参数增量较小时, δ 可近似为一常数 δ_i , 代入式(5-5-14)并解得

$$\left(\frac{\dot{x}_i}{\omega}\right)^2 + (x_i - \delta_i)^2 = R_i^2 \quad (5-5-15)$$

式(5-5-15)表明, 在状态 (x_i, \dot{x}_i) 附近的相轨迹可以用圆心为 $(\delta_i, 0)$ 、半径为 R_i 的一小段圆弧来近似, 如图 5-5-6 所示。由初始状态点 (x_0, \dot{x}_0) 出发, 依次取 i 为不同数值, 过 (x_i, \dot{x}_i) 作小圆弧, 这样一系列相互衔接的圆弧便构成一条完整的相轨迹曲线。

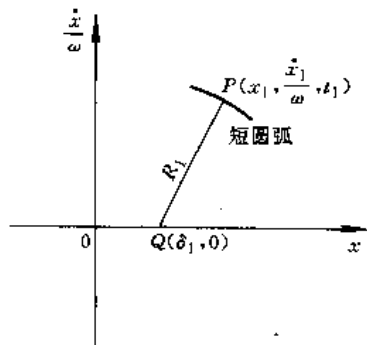


图 5-5-6 用 δ 法绘制相轨迹示意图

【例 5-5-2】 设非线性系统方程为

$$\ddot{x} + \dot{x} + x^3 = 0 \quad (5-5-16)$$

其初始条件为 $x(0)=1, \dot{x}(0)=0$ 。

由式(5-5-13), 令 $\omega=1$, 得

$$\delta = -\dot{x} - x^3 + x \quad (5-5-17)$$

绘制相轨迹时采用预测-校正的方法以求得相轨迹的近似圆弧。对于初始点 $A(1,0)$, 由式(5-5-17)有圆弧中心位置

$$\delta_A = -0 - 1 + 1 = 0$$

以 $(\delta_A, 0)$ 为圆心, OA 为半径作弧 \widehat{AB}' 。若 B' 点的坐标预测为 $(0.98, -0.2)$, 为提高准确度, 求弧 \widehat{AB}' 的均值 $\bar{x}_{AB'} = \frac{1}{2}(1+0.98) = 0.99$, $\bar{\dot{x}}_{AB'} = \frac{1}{2}(0-0.2) = -0.1$ 。由 $\bar{x}_{AB'}$ 、 $\bar{\dot{x}}_{AB'}$ 求得校正后的圆心位置

$$\delta_{AB} = 0.1 - 0.97 + 0.99 = 0.12$$

以 $(\delta_{AB}, 0)$ 即 $(0.12, 0)$ 为圆心, 通过 A 点绘出修正后的弧 \widehat{AB} , 确定 B 点的坐标为 $(0.97, -0.2)$, 这样反复校正, 直至圆心坐标基本不变为止。再由 B 点为新起点, 重复上述步骤, 便可逐步作出完整的相轨迹曲线, 如图 5-5-7 所示。

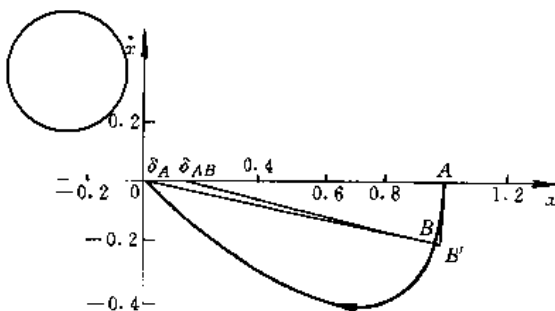


图 5-5-7 用 δ 法绘制的相轨迹图

需要指出, 当等倾线为直线时, 使用等倾线法比较方便; 当等倾线不是直线时, 使用 δ 法更为方便。

3.4 相平面法的应用

相平面法可以用来对二阶非线性或线性系统进行分析 and 补偿。由于它能较直观、准确、全面地表征过程的运动状态, 因而获得广泛的应用。

在常见典型非线性特性中, 多数可以用分段线性来近似, 或其本身就是分段线性的。在各线性段范围内, 系统用线性微分方程描述。因此, 在相平面上可以按分段情况来分区绘出相应相轨迹; 然后, 依次连接起来便得到非线性系统的完整相轨迹。这就是分区-衔接的方法。

下面举例说明非线性系统相平面分析。

【例 5-5-3】 具有非线性放大元件的系统如图 5-5-8 所



示。

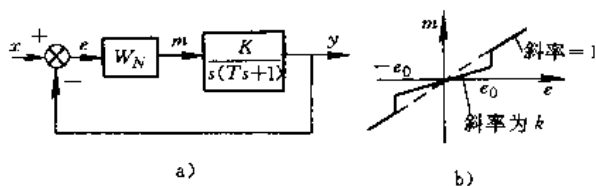


图 5-5-8 具有非线性放大元件的系统

该系统是分段线性的。假设系统开始处于静止状态,系统的微分方程为

$$T\ddot{y} + \dot{y} = Km$$

或

$$T\ddot{e} + \dot{e} + Km = T\ddot{x} + \dot{x} \quad (5-5-18)$$

式中

$$e = x - y$$

考虑阶跃输入,当 $t > 0$ 时, $\ddot{x} = \dot{x} = 0$, 式 (5-5-18) 改写成

$$T\ddot{e} + \dot{e} + Km = 0 \quad (5-5-19)$$

此时,线性段的微分方程分别为

$$T\ddot{e} + \dot{e} + Ke = 0, |e| > e_0 \quad (5-5-20)$$

$$T\ddot{e} + \dot{e} + kKe = 0, |e| \leq e_0 \quad (5-5-21)$$

假设 $T=1, K=4, k=0.0625, e_0=0.2, x(t)=1(t)$, 可以绘出整个相轨迹,如图 5-5-9 所示。

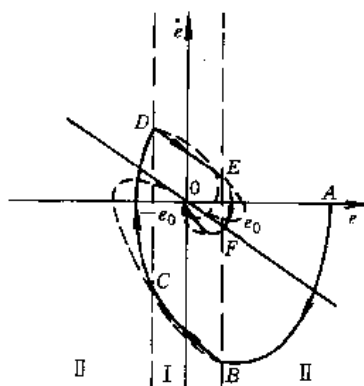


图 5-5-9 非线性增益系统相轨迹

由式 (5-5-20) 和式 (5-5-21) 可见,在相平面 $e-\dot{e}$ 上其原点 $(0, 0)$ 为该系统的奇点。因为,在原点处 $e=\dot{e}=0$, 且 $d\dot{e}/de=0/0$ 为不定。

相平面被分成三个区域,在直线 $e=e_0$ 和 $e=-e_0$ 范围内,系统的运动状态由式 (5-5-21) 描述;在这个范围以外,系统的运动状态由式 (5-5-20) 描述。

在图 5-5-9 中,相轨迹起于 A 点,由初始条件 $e(0)=1$ 和 $\dot{e}(0)=0$ 确定;根据式 (5-5-20) 相应的特征根的性质,系统为欠阻尼的,相轨迹趋于稳定焦点 $(0, 0)$ 。系统在 B 点发生转换,从 B 点开始一直到系统的运动状态再次发生转变之前,根据式 (5-5-21) 相应的特征根的性质,系统为临界阻

尼的,相轨迹趋于稳定节点 $(0, 0)$ 。在 C 点上系统的运动状态又发生转变,相继通过 D、E、F 点,最后,相轨迹趋于原点 $(0, 0)$ 。系统在稳态时,不存在误差。

系统的过渡过程如图 5-5-10 所示。对于小的阶跃输入信号,过渡过程无超调;对于大的阶跃输入信号,过渡过程可出现超调及反超调。可见,系统的运动状态与初始条件有关。

由式 (5-5-18) 可见,非线性系统的响应型式还取决于输入信号的型式。如考虑斜坡输入,奇点的位置将随斜坡输入信号的大小而在 e 轴上改变,系统的稳态误差将随之改变,系统的过渡过程也将随输入信号大小而具有不同的特性。

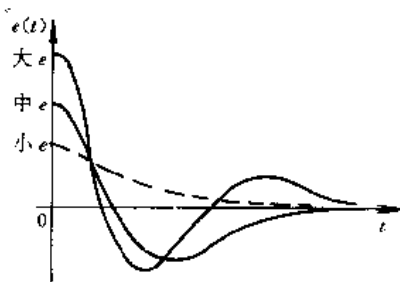


图 5-5-10 不同输入信号下的过渡过程曲线

4 描述函数法

描述函数法是以谐波等效线性化为基础的一种简易近似分析非线性系统的方法,是线性系统频率响应分析方法的推广,其实质是运用谐波线性化方法将非线性系统或元件的特性线性化,然后用线性系统中的频率特性分析方法的结论来研究非线性系统。

若非线性环节的输入信号为 $x(t) = A \sin \omega t$, 则其输出 $y = f[x(t)]$ 为与 $x(t)$ 同周期的非正弦信号。非线性环节等效近似的传递特性,可用描述函数表示。描述函数的定义为输出的基波分量对输入量的复数比,即

$$N(A) = |N(A)| e^{j\phi_1} = \frac{F_1}{A} e^{j\phi_1} \quad (5-5-22)$$

式中 $N(A)$ ——描述函数;

A ——输入正弦信号的幅值;

F_1 ——输出基波信号的幅值;

ϕ_1 ——输出基波信号对输入正弦信号的相位移。

将 $f[x(t)]$ 展开成傅里叶(Fourier)级数

$$\begin{aligned} f[x(t)] &= a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t) \\ &= a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} F_n \sin(n\omega t + \phi_n) \end{aligned}$$

若非线性特性是对称的,则 $a_0=0$ 。此时,输出可用其基波分量近似



$$y(t) = f[x(t)] \approx a_1 \sin \omega t + b_1 \cos \omega t$$

$$= F_1 \sin(\omega t + \phi_1) \quad (5.5-23)$$

式中 $a_1 = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f[x(t)] \sin \omega t d(\omega t) \quad (5.5-24)$

$$b_1 = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f[x(t)] \cos \omega t d(\omega t) \quad (5.5-25)$$

$$F_1 = \sqrt{a_1^2 + b_1^2} \quad (5.5-26)$$

$$\phi_1 = \arctan \frac{b_1}{a_1} \quad (5.5-27)$$

令 $a = a_1/A, b = b_1/A$, 则式 (5.5-22) 可表示为

$$N(A) = |N(A)| e^{j\theta} = a + jb \quad (5.5-28)$$

描述函数 $N(A)$ 也可称之为复放大系数。它类似于线性环节的频率特性, 但一般说来它是非线性环节输入信号幅值的函数。

4.1 典型非线性的描述函数

常见的典型非线性的描述函数, 如表 5.5-3 和表 5.5-4 所列。

表 5.5-3 常见单值非线性特性的描述函数

| 非线性类型 | 在正弦输入信号作用下的输出波形 | 描述函数 | 曲线 |
|----------|-----------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 理想继电器非线性 | | $N = \frac{4M}{\pi A}$ | |
| 具有不灵敏区 | | $A > h$ $N = \frac{4M}{\pi A} \sqrt{1 - \left(\frac{h}{A}\right)^2}$ | |
| 饱和非线性 | | $A > h$ $N = \frac{2K}{\pi} \left[\arcsin \frac{h}{A} + \frac{h}{A} \sqrt{1 - \left(\frac{h}{A}\right)^2} \right]$ | |
| 不灵敏区非线性 | | $A > h$ $N = K - \frac{2K}{\pi} \left[\arcsin \frac{h}{A} + \frac{h}{A} \sqrt{1 - \left(\frac{h}{A}\right)^2} \right]$ | |



(续)

| 非线性类型 | 在正弦输入信号作用下的输出波形 | 描述函数 | 曲线 |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|
| <p>不灵敏区饱和非线性</p> <p>斜率 K</p> <p>$-h_2, -h_1, 0, h_1, h_2, x$</p> | <p>$A > h_2$</p> <p>$0, \pi, 2\pi, \omega t$</p> | <p>$A > h_2$</p> $N = \frac{2K}{\pi} \left[\arcsin \frac{h_2}{A} - \arcsin \frac{h_1}{A} + \frac{h_2}{A} \sqrt{1 - \left(\frac{h_2}{A}\right)^2} - \frac{h_1}{A} \sqrt{1 - \left(\frac{h_1}{A}\right)^2} \right]$ | <p>$h_1 = \frac{1}{2} h_2$</p> <p>$1.0, A/h_2$</p> |
| <p>幂形式非线性</p> <p>$y = Kx^n$ (当 n 为奇数)</p> <p>$y = Kx^n \text{sgn} x$ (当 n 为偶数)</p> | <p>$0, \omega t$</p> | $N = \frac{3 \cdot 5 \cdots n}{4 \cdot 6 \cdots (n+1)} \cdot K A^{n-1}$ <p>n 为奇数</p> $N = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{2 \cdots n}{3 \cdots (n+1)} \cdot K A^{n-1}$ <p>n 为偶数</p> | <p>A</p> |
| <p>$M, \beta_1, \beta_2, h_1, h_2, x$</p> <p>$\tan \beta_1 = K_1$</p> <p>$\tan \beta_2 = K_2$</p> | <p>$A > h_2$</p> <p>$0, \pi, 2\pi, \omega t$</p> | <p>$A \geq h_2$</p> $N = \frac{2}{\pi} \left\{ (K_1 + K_2) \left(\arcsin \frac{h_1}{A} + \frac{h_1}{A} \sqrt{1 - \left(\frac{h_1}{A}\right)^2} - 2 \frac{h_2}{A} \times \sqrt{1 - \left(\frac{h_2}{A}\right)^2} - K_2 \left(\arcsin \times \frac{h_1}{A} - \frac{h_2}{A} \sqrt{1 - \left(\frac{h_2}{A}\right)^2} \right) \right\}$ | <p>A</p> |
| <p>$\beta_1, \beta_2, h_1, h_2, x$</p> <p>$\tan \beta_1 = K_1$</p> <p>$\tan \beta_2 = K_2$</p> | <p>$A > h_2$</p> <p>$0, \pi, 2\pi, \omega t$</p> | <p>$A \geq h_2$</p> $N = K_2 - \frac{2}{\pi} (K_2 - K_1) \left[\arcsin \frac{h_2}{A} + \frac{h_2}{A} \sqrt{1 - \left(\frac{h_2}{A}\right)^2} - K_1 \left[\arcsin \frac{h_1}{A} + \frac{h_1}{A} \sqrt{1 - \left(\frac{h_1}{A}\right)^2} \right] \right]$ | <p>A</p> |
| <p>M, β, x</p> <p>$\tan \beta = K$</p> | <p>$0, \pi, 2\pi, \omega t$</p> | $N = K + \frac{4M}{\pi A}$ | <p>$1.0, A$</p> |

此星公司制作 请尊重原作者版权



(续)

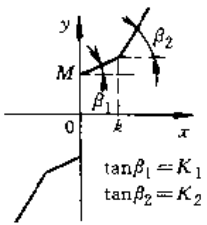
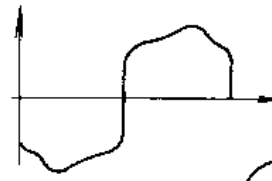
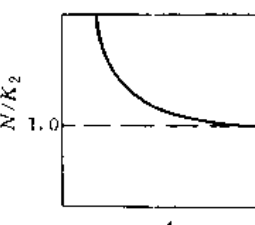
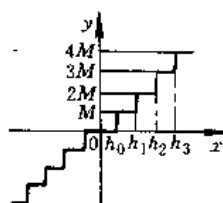
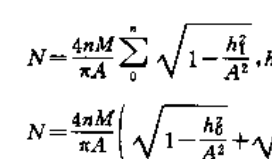
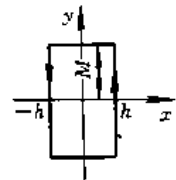
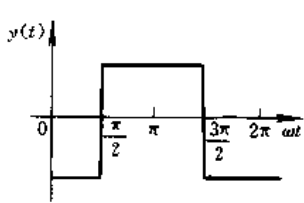
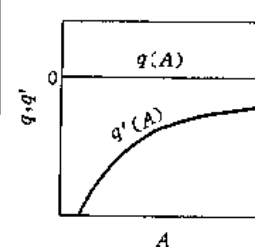
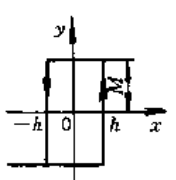
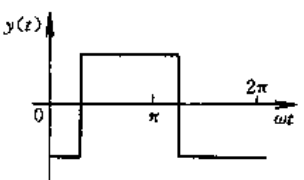
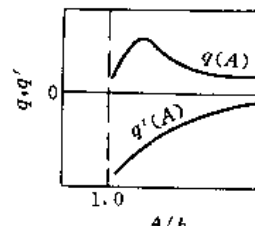
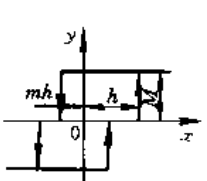
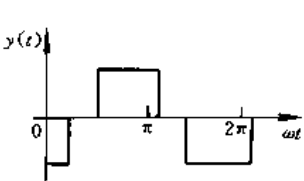
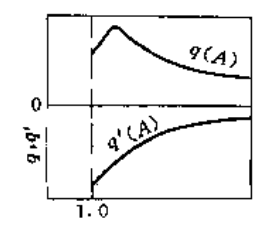
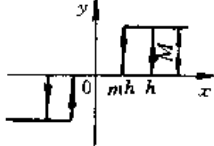
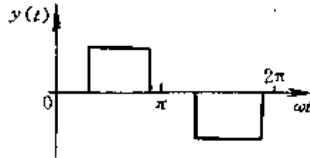
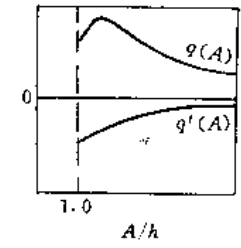
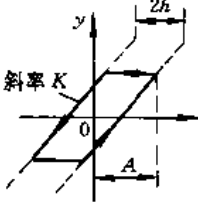
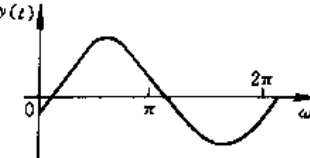
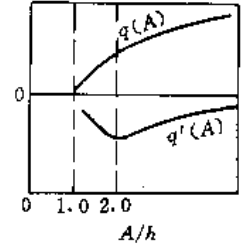
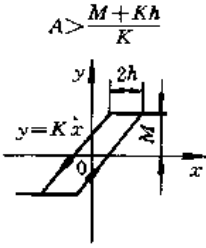
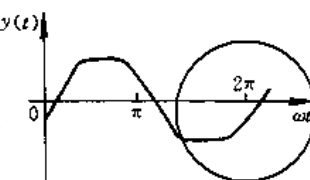
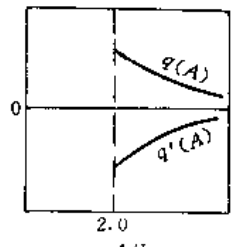
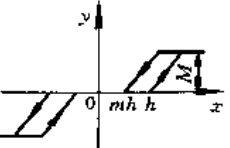
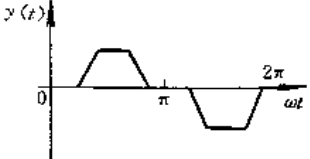
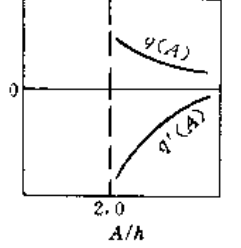
| 非线性类型 | 在正弦输入信号作用下的输出波形 | 描述函数 | 曲线 |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  <p>$\tan\beta_1 = K_1$ $\tan\beta_2 = K_2$</p> |  | $A > h$ $N = K_2 - \frac{2}{\pi}(K_2 - K_1) \left[\arcsin \frac{h}{A} + \frac{h}{A} \sqrt{1 - \left(\frac{h}{A}\right)^2} \right] + \frac{4M}{\pi A}$ |  <p>N/K_2</p> <p>1.0</p> <p>A</p> |
|  |  | $N = \frac{4nM}{\pi A} \sum_0^n \sqrt{1 - \frac{h_i^2}{A^2}}, h_n \leq A \leq h_{n+1}$ $N = \frac{4nM}{\pi A} \left(\sqrt{1 - \frac{h_0^2}{A^2}} + \sqrt{1 - \frac{h_1^2}{A^2}} \right), h_1 \leq A \leq h_2$ | |

表 5-5-4 常见非单值非线性的描述函数

| 非线性类型 | 在正弦输入信号作用下的输出波形 | 描述函数 | 曲线 |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 具有滞环的 继电特性 $A = h$  |  | $N = \frac{-4M}{\pi A} j$ |  <p>q, q'</p> <p>0</p> <p>A</p> |
| 具有滞环的 继电特性 $A > h$  |  | $N = \frac{4M}{\pi A} \sqrt{1 - \left(\frac{h}{A}\right)^2} - \frac{4Mh}{\pi A^2} j$ |  <p>q, q'</p> <p>0</p> <p>1.0</p> <p>A/h</p> |
| 具有滞环不灵敏区的 继电特性 $A > h$  |  | $N = \frac{2M}{\pi A} \left[\sqrt{1 - \left(\frac{h}{A}\right)^2} + \sqrt{1 - \left(\frac{mh}{A}\right)^2} \right] - \frac{2Mh}{\pi A^2} (1 + m) j$ |  <p>q, q'</p> <p>0</p> <p>1.0</p> <p>A/h</p> |



(续)

| 非线性类型 | 在正弦输入信号作用下的输出波形 | 描述函数 | 曲线 |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>具有滞环、不灵敏区的继电特性 $A > h$</p>  |  | $N = \frac{2M}{\pi A} \left[\sqrt{1 - \left(\frac{h}{A}\right)^2} + \sqrt{1 - \left(\frac{mh}{A}\right)^2} - j \frac{h}{A} (1-m) \right]$ |  |
| <p>滞环非线性 $A > h$</p>  |  | $N = \frac{K}{\pi} \left[\frac{\pi}{2} + \arcsin\left(1 - \frac{2h}{A}\right) + 2\left(1 - \frac{2h}{A}\right) \sqrt{\frac{h}{A} \left(1 - \frac{h}{A}\right)} - \frac{4Kh}{\pi A} \left(1 - \frac{h}{A}\right) j \right]$ |  |
| <p>滞环、饱和和非线性</p> <p>$A > \frac{M+Kh}{K}$</p>  |  | $N = \frac{K}{\pi} \left[\arcsin \frac{M+Kh}{KA} + \arcsin \frac{M-Kh}{KA} + \frac{M+Kh}{KA} \sqrt{1 - \left(\frac{1+Kh}{KA}\right)^2} + \frac{M-Kh}{KA} \sqrt{1 - \left(\frac{1-Kh}{KA}\right)^2} - \frac{4hM}{\pi A^2} j \right]$ |  |
| <p>滞环、饱和和不灵敏区非线性 $A > \frac{M+Kh}{K}$</p>  |  | $N = \frac{K}{\pi} \left[\arcsin \frac{M+Kh}{KA} + \arcsin \frac{M+mKh}{KA} - \arcsin \frac{h}{A} - \arcsin \frac{mh}{A} + \frac{M+Kh}{KA} \sqrt{1 - \left(\frac{M+Kh}{KA}\right)^2} + \frac{M+mKh}{KA} \sqrt{1 - \left(\frac{M+mKh}{KA}\right)^2} - \frac{h}{A} \sqrt{1 - \left(\frac{h}{A}\right)^2} - \frac{mh}{A} \sqrt{1 - \left(\frac{mh}{A}\right)^2} - \frac{2hM(1-m)}{\pi A^2} j \right]$ |  |

此星公司制作 请尊重作者版权



(续)

| 非线性类型 | 在正弦输入信号作用下的输出波形 | 描述函数 | 曲线 |
|-------------------------------------|-----------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 滞环、不灵敏区 非线性 $A = \frac{M+Kh}{K}$ | | $N = \frac{K}{\pi} \left\{ \frac{\pi}{2} + \arcsin \left[1 - \frac{h(1-m)}{A} \right] - \arcsin \frac{h}{A} - \arcsin \frac{mh}{A} + \left[1 - \frac{h(1-m)}{A} \right] \times \sqrt{1 - \left[1 - \frac{h(1-m)}{A} \right]^2} - \frac{h}{A} \sqrt{1 - \left(\frac{h}{A} \right)^2} - \frac{mh}{A} \sqrt{1 - \left(\frac{mh}{A} \right)^2} \right\} - \frac{2Kh}{\pi A} \left(1 - \frac{h}{A} \right) (1-m)j$ | |
| 滞环非线性 | | $A \geq h$ $N = K + \frac{4M}{\pi A} \sqrt{1 - \left(\frac{h}{A} \right)^2} - \frac{4Mh}{\pi A^2}j$ | |

4.2 描述函数分析法

$$G(j\omega) = -\frac{1}{N(A)} \quad (5-5-29)$$

简化的非线性系统框图如图 5-5-11 所示。

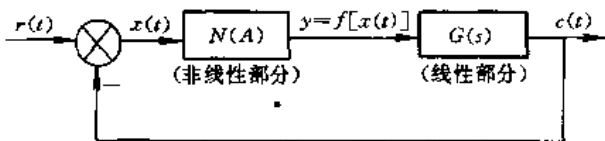


图 5-5-11 简化的非线性系统框图

图中, $N(A)$ 可视为非线性环节经过谐波线性化后的等效线性环节的特性, 因之, 可以运用线性理论中的频域分析方法来进行系统的分析与设计。

4.2.1 幅相稳定判据

图 5-5-11 所示系统的闭环频率特性为

$$\frac{C(j\omega)}{R(j\omega)} = \frac{N(A)G(j\omega)}{1 + N(A)G(j\omega)}$$

由其特征方程得:

称 $-1/[N(A)]$ 为描述函数的负倒幅特性。

式 (5-5-29) 就是非线性系统稳定性的判别式。据此, 非线性系统的幅相稳定判据为:

- (1) 若 $G(j\omega)$ 曲线没有包围 $-1/[N(A)]$ 曲线, 则闭环系统是稳定的;
- (2) 若 $G(j\omega)$ 曲线包围了 $-1/[N(A)]$ 曲线, 则闭环系统是不稳定的;
- (3) 若 $G(j\omega)$ 曲线与 $-1/[N(A)]$ 曲线相交, 则系统可能出现极限环振荡。振荡的频率与振幅由相交点处的 $G(j\omega)$ 对应的 ω_c 与 $-1/[N(A)]$ 对应的 A_c 来确定。

上述三种情况, 可用图 5-5-12 来表示。

4.2.2 极限环稳定性分析

运用幅相稳定性判据, 也可以判定极限环的稳定性, 其方法是:



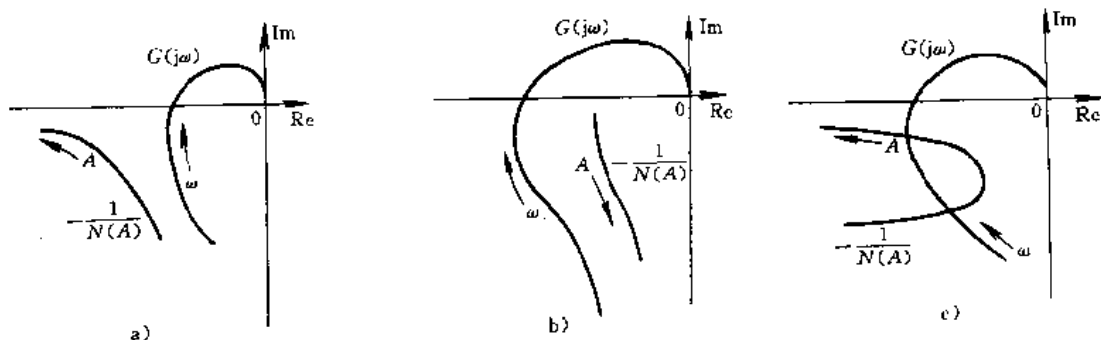


图 5-5-12 幅相稳定判据示意图

a) 稳定 b) 不稳定 c) 极限环振荡

(1) 当非线性为单值对称奇函数时, 只需在 $-1/N(A)$ 曲线上的极限环交点邻近处, 沿 A 增大方向的一侧取一点并标以“-1”点, 即可运用幅相稳定判据判定该极限环的稳定性。如图 5-5-13 所示的系统, 可以判定 c_1 点对应稳定的极限环, 因为 $G(j\omega)$ 不包围标以“-1”的 a_1 点, 可以判定 c_2 点对应不稳定的极限环, 因为 $G(j\omega)$ 包围了标以“-1”的 a_2 点。

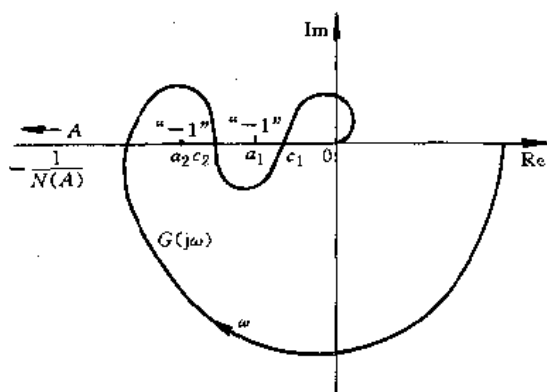


图 5-5-13 单值非线性系统极限环稳定性判定

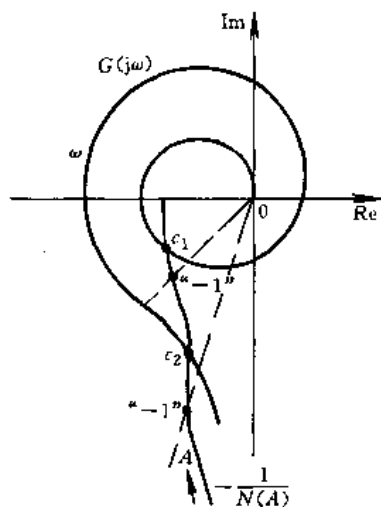


图 5-5-14 非单值非线性系统极限环稳定性判定

(2) 当非线性为非单值函数时, 只需在 $-1/N(A)$ 曲线上的极限环交点邻近处, 沿 A 增大方向的一侧取一点并与原点连成一直线, 在该直线与 $-1/N(A)$ 曲线交点处标以“-1”点, 将该直线当成负实轴, 即可运用幅相稳定判据判定该极限环的稳定性。如图 5-5-14 所示的系统, 可以判定 c_1 点对应不稳定的极限环; c_2 点对应稳定的极限环。

【例 5-5-4】某温度调节系统框图如图 5-5-15 所示。

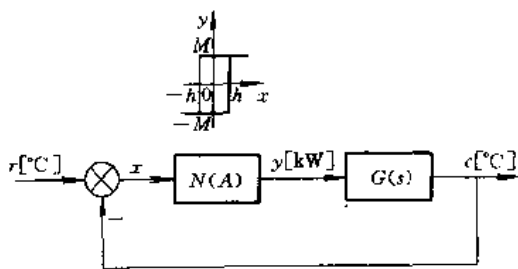


图 5-5-15 温度调节系统框图

图中

$$G(s) = \frac{Ke^{-\tau s}}{Ts + 1}$$

$$\tau = 6s$$

$$T = 120s$$

$$K = 15^\circ\text{C}/\text{kW}$$

$$N(A) = \frac{4M}{\pi A} e^{-j \arctan \frac{h/A}{\sqrt{1-(h/A)^2}}}$$

$$= \frac{4M}{\pi A} e^{-j \arcsin \frac{h}{A}}$$

$$h = 0.1^\circ\text{C}$$

$$M = 1\text{kW}$$

由描述函数得

$$\angle \left[-\frac{1}{N(A)} \right] = -180^\circ - \angle N(A) = -180^\circ + \arcsin \frac{h}{A}$$

(5-5-30)

$$\left| \frac{1}{N(A)} \right| = \frac{\pi A}{4M} = \frac{\pi A}{4}$$

或



$$20\lg \frac{1}{|N(A)|} = 20\lg \frac{\pi A}{4} \quad (5.5-31)$$

由传递函数得:

$$G(j\omega) = \frac{Ke^{-j\omega T}}{1+j\omega T} = \frac{15e^{-j0.1\omega}}{1+j2\omega} \quad (5.5-32)$$

由式(5.5-30)、式(5.5-31)及式(5.5-32),在对数幅相平面上即可画出一 $1/N(A)$ 曲线及 $G(j\omega)$ 曲线,如图5.5-16所示。

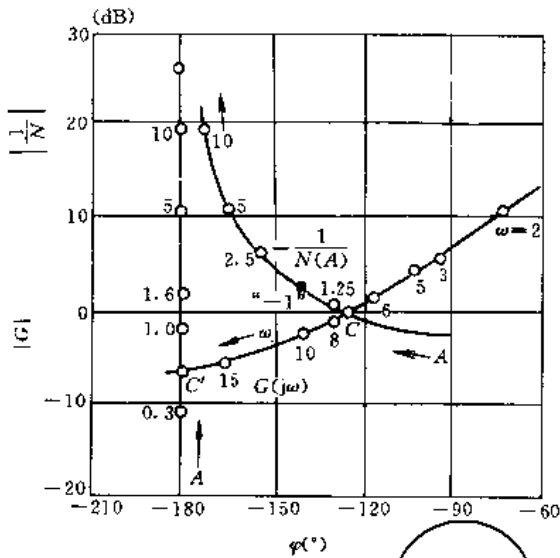


图 5.5-16 温度调节系统特性

从特性图可得出如下分析结论:

(1) 由于 $-1/N(A)$ 曲线与 $G(j\omega)$ 曲线相交,故系统将存在自振荡。从相交点 c 处的负倒幅特性曲线和频率特性曲线分别查得自振荡的幅值与频率为

幅值 $A_c = 1.24^\circ\text{C}$

频率 $\omega_c = 7.2$

(2) 由于 $G(j\omega)$ 曲线下方相当于不稳定区,标以“-1”的点不被 $G(j\omega)$ 所包围,所以 c 点对应为一稳定的自振荡。

(3) 当改变 K 或 M 时, c 点将发生变化,其趋势是:当增大 K 值时, c 点将沿 $-1/N(A)$ 曲线上移,自振荡的幅值和频率都随之提高。此外,当 $h=0$ 时,两条曲线应相交于 c' 点,它所对应的自振荡频率增高而振幅减小。因此,对于这类非线性控制系统的设计,应适当限制 K 值的增大与滞环量 h 的减小,以使系统的振荡幅值与频率符合生产上提出的实际要求。

4.3 双描述函数及其应用

对于非线性环节在交、直流双信号同时作用的情况,要引入双描述函数的概念。

设非线性环节的输入信号为

$$x(t) = A\sin\omega t + x^\circ \quad (5.5-33)$$

式中, $A\sin\omega t$ 为交流分量; x° 为常值分量,或为变化缓

慢,即其变化速率相对于交流分量角频率 ω 为十分小的直流分量。

非线性环节的输出可近似表示为

$$y(t) = f[x(t)] \approx aA\sin\omega t + bA\cos\omega t + N_x x^\circ \quad (5.5-34)$$

式中

$$a = \frac{1}{\pi A} \int_0^{2\pi} f[x(t)] \sin\omega t d(\omega t) \quad (5.5-35)$$

$$b = \frac{1}{\pi A} \int_0^{2\pi} f[x(t)] \cos\omega t d(\omega t) \quad (5.5-36)$$

$$N_x = \frac{1}{2\pi x^\circ} \int_0^{2\pi} f[x(t)] d(\omega t) \quad (5.5-37)$$

定义 $a+jb$ 和 N_x 为非线性环节对于交、直流双输入信号的复放大系数,称为双输入描述函数。

对于双输入继电器系统,可用图 5.5-17 表示。

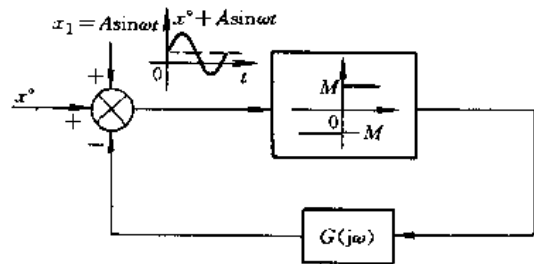


图 5.5-17 双输入继电器系统

该系统中 $G(j\omega)$ 具有低通滤波特性,可将 ω_b (滤波器频带)以上频率的信号滤除掉。

对于输入信号 x° ,其等效放大系数

$$N_x = \frac{\overline{f(x)}}{x^\circ} \quad (5.5-38)$$

式中 $\overline{f(x)}$ —— 非线性环节输出的平均值。

在满足条件 $A > |x^\circ|$ 时,根据式(5.5-35)、式(5.5-36)和式(5.5-37)可以得出:

$$a(A, x^\circ) = \frac{4M}{\pi A} \sqrt{1 - \left(\frac{x^\circ}{A}\right)^2} \quad (5.5-39)$$

$$b = 0$$

$$N_x(A, x^\circ) = \frac{2M}{\pi x^\circ} \arcsin\left(\frac{x^\circ}{A}\right) \quad (5.5-40)$$

由式(5.5-40)可以建立直流信号 x° 与其所对应的输出直流分量 $N_x x^\circ$ 的关系,如图 5.5-18 所示。

可见,该非线性环节输出信号的平均值与其输入的慢变信号之间,成近似线性关系。图 5.5-17 所示的系统,对其中慢变信号而言,可以用图 5.5-19 的等效框图来表示。



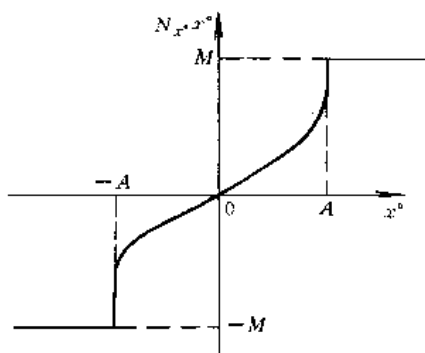


图 5-5-18 $x^0-N_{x^0}x^0$ 关系曲线

对于图 5-5-19 所示的等效线性化系统,便可应用线性理论来分析和设计。

这种近似的线性关系,是由于系统中存在一周期振荡而实现的。对于实际系统,只要满足系统振荡频率,并远远大于慢变信号频率、且在 $-A < x^0 < A$ 的范

围内工作,系统即为准线性化系统。这种系统的振荡可以是系统自身的自振荡,也可以是强迫振荡。至于输入的周期信号,既可以是正弦信号,也可以是三角波、矩形波等周期信号。

表 5-5-5 列出了在继电特性环节输入端加入不同形式的周期信号和慢变信号时,其输出端平均值 $\overline{f(x)}$ 与 x^0 之间的关系曲线。

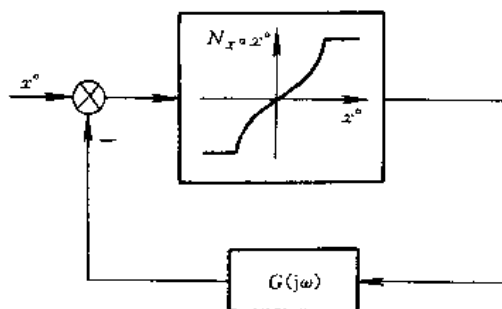


图 5-5-19 系统对慢变信号作用的等效框图

表 5-5-5 $x^0-\overline{f(x)}$ 关系表

| | | |
|--|--|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| | | <p>$-A < x^0 < A$ 时, $\overline{f(x)} = M \frac{2}{\pi} \sin \frac{x^0}{A}$ $x^0 > A$ 时, $\overline{f(x)} = \pm M$</p> |
| | | <p>$-A < x^0 < A$ 时, $\overline{f(x)} = \frac{M}{A} x^0$ $x^0 > A$ 时, $\overline{f(x)} = \pm M$</p> |
| | | <p>$-A < x^0 < A$ 时, $\overline{f(x)} = 0$ $x^0 > A$ 时, $\overline{f(x)} = \pm M$</p> |

5 波波夫稳定判据

适用于非线性控制系统的稳定性判别,在本篇第 3 章 1-5 节中已经介绍了李雅普诺夫稳定性理论,本节将介绍另一方法——波波夫法。

波波夫法是分析非线性控制系统稳定性的又一种极为简便的实用方法。此方法是在频率域内,由系统的线性部分的频率特性直接分析非线性系统的稳定性。它仅适用于能将系统中的非线性和线性部分分开的非线性系统。



5.1 应用波波夫稳定判据的条件

设非线性系统具有如图 5.5-11 所示的基本形式。系统中非线性特性 $f(x)$ 可具有任意形式,但必须满足下列条件:

$$\begin{cases} f(x)=0, & x=0 \\ k_1 \leq \frac{f(x)}{x} < k_2, & x \neq 0 \end{cases} \quad (5.5-41)$$

式中 x ——非线性部分的输入;
 $f(x)$ ——非线性部分的输出;
 k_1, k_2 ——将非线性特性 $f(x)$ 夹在中间的两条直线的斜率, k_2 可为任意值或无穷大,但要求 $k_1 \geq 0$ 。

对于一些典型非线性特性的 k_1 和 k_2 值如图 5.5-20 所示。

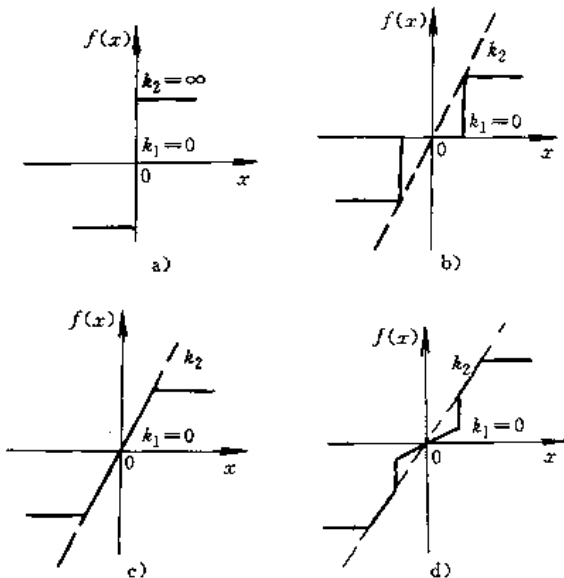


图 5.5-20 典型非线性特性的 k_1 与 k_2

满足条件式 (5.5-41) 的非线性系统,可应用波波夫稳定判据。

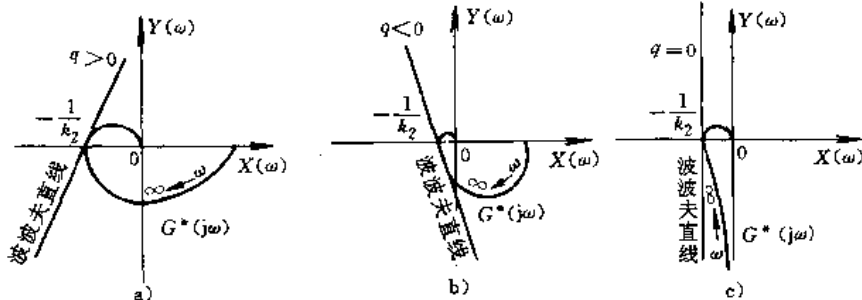


图 5.5-22 不同 q 值的波波夫直线

5.2 波波夫稳定判据

设非线性系统中线性部分的全部极点位于 $[s]$ 平面左半部,其频率特性为 $G(j\omega)$ 。再令

$$G^*(j\omega) = X(\omega) + jY(\omega) \quad (5.5-42)$$

式中

$$\begin{cases} X(\omega) = \text{Re}G(j\omega) \\ Y(\omega) = \omega \text{Im}G(j\omega) \end{cases} \quad (5.5-43)$$

则表征波波夫稳定判据的非线性控制系统大范围渐近稳定的条件为

$$X(\omega) - qY(\omega) + \frac{1}{k_2} > 0, \omega \geq 0 \quad (5.5-44)$$

式中 q ——某有限数。

如果令

$$X(\omega) - qY(\omega) + \frac{1}{k_2} = 0 \quad (5.5-45)$$

则式 (5.5-45) 代表一条在 $G^*(j\omega)$ 平面上通过点 $(-1/k_2, 0)$ 、斜率为 $1/q$ 的直线,称此线为波波夫直线,如图 5.5-21 中曲线 (1)。

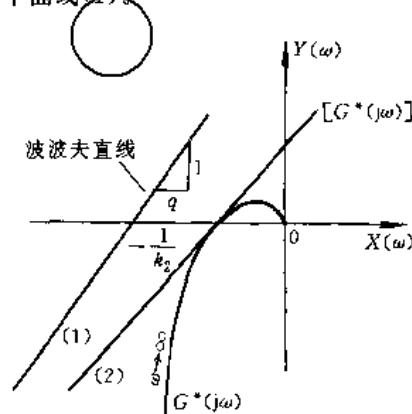


图 5.5-21 波波夫稳定判据图解之一

波波夫稳定判据第一法:若系统的 $G^*(j\omega)$ 轨迹线,对于所有 $\omega \geq 0$,均位于波波夫直线右侧,则此非线性系统为大范围渐近稳定。



此星公司制作 请尊重作者版权

讨论(1) 通过 $G^*(j\omega)$ 轨迹线和负实轴的交点作与 $G^*(j\omega)$ 相切的切线,如图 5-5-21 中直线(2)。如果整个 $G^*(j\omega)$ 轨迹线位于此切线右侧,则由此切线表示的波波夫直线将给出保证系统大范围渐近稳定时的最大 k_2 值。

讨论(2) 由于 $G^*(j\omega)$ 轨迹线的形状不同, q 的取值可以为 $q > 0$, 或 $q < 0$, 或 $q = 0$, 如图 5-5-22 所示。

【例 5-5-5】 设如图 5-5-11 所示的非线性控制系统,其线性部分传递函数为

$$G(s) = \frac{1}{(s+1)(s+2)(s+3)}$$

由此求得

$$G(j\omega) = \frac{1}{6(1+\omega^2) + j\omega(11-\omega^2)}$$

$$= \frac{6(1+\omega^2) - j\omega(11-\omega^2)}{[6(1-\omega^2)]^2 + [\omega(11-\omega^2)]^2}$$

$$X(\omega) = \frac{6(1-\omega^2)}{[6(1-\omega^2)]^2 + [\omega(11-\omega^2)]^2}$$

$$Y(\omega) = \frac{-\omega^2(11-\omega^2)}{[6(1-\omega^2)]^2 + [\omega(11-\omega^2)]^2}$$

计算 $G^*(j\omega) = X(\omega) + jY(\omega)$, 结果列于表 5-5-6, $G^*(j\omega)$ 的轨

表 5-5-6 例 5-5-5 $X(\omega), Y(\omega)$ 计算表

| ω | 0 | 0.2 | 0.5 | 1 | 1.5 | 2 | 2.5 | $\sqrt{11}$ |
|-------------|-------|---------|---------|------|---------|---------|---------|-----------------|
| $X(\omega)$ | 0.166 | 0.152 | 0.0915 | 0 | -0.0328 | -0.0346 | -0.0278 | $-\frac{1}{60}$ |
| $Y(\omega)$ | 0 | -0.0115 | -0.0545 | -0.1 | -0.086 | -0.0538 | -0.0262 | 0 |

讨论(3) 如果非线性系统中线性部分的极点中有一个为零, 其它极点都位于 $[s]$ 平面左半部, 则为使该系统大范围渐近稳定, 除应满足式 (5-5-41) 及式 (5-5-44) 外, 还应满足

$$\text{res}G(s)|_{s=0} > 0 \quad (5-5-46)$$

式中, $\text{res}G(s)|_{s=0}$ 为 $G(s)$ 在 $s=0$ 处的留数。

讨论(4)——波波夫稳定判据第二法如果非线性系统线性部分的 $G(j\omega)$ 轨迹线在复平面上不包围下面定义的圆, 也不和圆相交, 则非线性系统为大范围渐近稳定。其中, 圆的方程为

$$\left[X + \frac{k_1+k_2}{2k_1k_2} \right]^2 + Y^2 = \left[\frac{k_1-k_2}{2k_1k_2} \right]^2 \quad (5-5-47)$$

式中, X, Y 分别代表 $G(j\omega)$ 平面实轴和虚轴上的变量。

如果非线性特性的 $k_1=0$, 则上述圆的圆心坐标和圆的半径都将趋向无穷大。这样, 圆的方程将变为通过点 $(-1/k_2, j0)$ 、斜率为 $1/q = \infty$ 的直线方程, 即

迹线示于图 5-5-23。由图求得 $G^*(j\omega)$ 和负实轴相交于点 $(-1/60, j0)$, 相应的频率为 $\omega=3.3$ 。过相交点作 $G^*(j\omega)$ 轨迹线的切线, 使 $G^*(j\omega)$ 位于切线的右侧, 可求得该切线的斜率为 $q=0.5$ 。故波波夫直线方程为

$$X(\omega) - 0.5Y(\omega) + \frac{1}{60} = 0$$

所以, 为使该系统大范围渐近稳定, 系统的非线性特性的斜率应为

$$0 \leq k_2 < 60$$

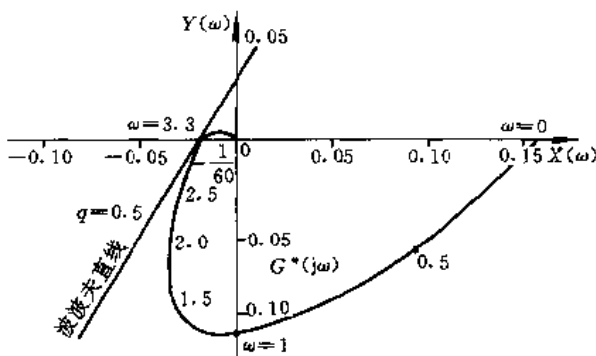


图 5-5-23 $G^*(j\omega)$ 轨迹线

$$X(\omega) + \frac{1}{k_2} = 0 \quad (5-5-48)$$

此时, 波波夫直线便是通过点 $(-1/k_2, j0)$ 、斜率 $1/q = \infty$ 的直线, 如图 5-5-24 所示。

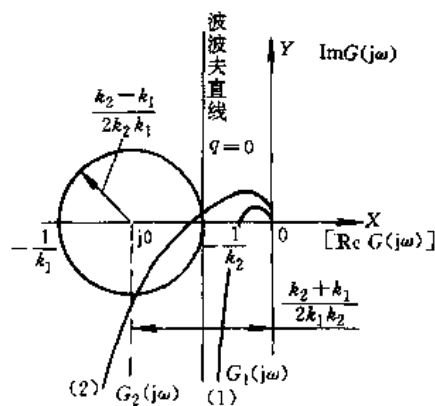


图 5-5-24 波波夫稳定判据圆之二

此星公司制作 请尊重作者版权



图中, $G_1(j\omega)$ 曲线(1)对应于系统为大范围渐近稳定; $G_2(j\omega)$ 曲线(2)对应于系统为不稳定。

【例 5-5-6】 设控制系统的框图如图 5-5-25 所示, 要求判定系统稳定性并求解保证系统大范围渐近稳定时非线性特性的最大增益 k_2 。

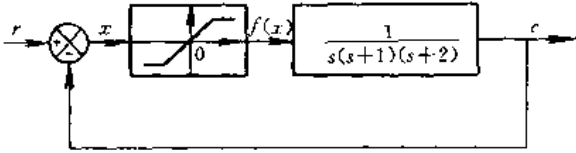


图 5-5-25 控制系统框图

下面, 分别应用波波夫稳定判据的两种方法来求解。

第一法: 由于本 $G(s)$ 中有一个极点为零, 因此先要校验条件式(5-5-46)。

从 $\text{res}G(s)|_{s=0} = \frac{1}{2} > 0$ 可见, 条件式(5-5-46)满足。由系统框图对应应有

$$G(j\omega) = \frac{1}{j\omega(j\omega+1)(j\omega+2)}$$

$$= \frac{-3\omega - j(2-\omega^2)}{\omega[9\omega^2 + (2-\omega^2)^2]}$$

$$X(\omega) = \frac{-3}{9\omega^2 + (2-\omega^2)^2}$$

$$Y(\omega) = \frac{-(2-\omega^2)}{[9\omega^2 + (2-\omega^2)^2]\omega}$$

$X(\omega)$ 、 $Y(\omega)$ 的计算值列于表 5-5-7。

由此, $G^*(j\omega)$ 轨迹线示于图 5-5-26。

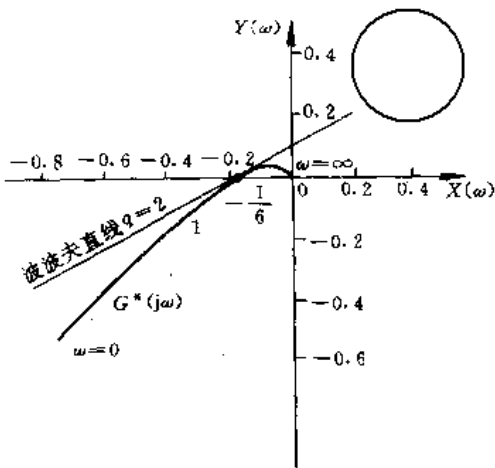


图 5-5-26 $G^*(j\omega)$ 轨迹线和波波夫直线

由图可见, 波波夫直线方程为

$$X(\omega) - 2Y(\omega) + \frac{1}{6} = 0$$

所以, 保证系统大范围渐近稳定的最大增益值为 $k_2=6$ 。

表 5-5-7 例 5-5-6 $X(\omega)$ 、 $Y(\omega)$ 计算表

| | | | | | |
|-------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|----------|
| ω | 0 | 1 | $\sqrt{2}$ | 2 | ∞ |
| $X(\omega)$ | $-\frac{3}{4}$ | $-\frac{1}{3}$ | $-\frac{1}{6}$ | $-\frac{3}{40}$ | 0 |
| $Y(\omega)$ | $-\frac{1}{2}$ | $-\frac{1}{9}$ | 0 | $\frac{1}{20}$ | 0 |

第二法: 由 $G(j\omega)$ 可直接计算, 结果见表 5-5-8。

表 5-5-8 例 5-5-6 $\text{Re}G(j\omega)$ 、

$\text{Im}G(j\omega)$ 计算表

| | | | | | |
|-----------------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|----------|
| ω | 0 | 1 | $\sqrt{2}$ | 2 | ∞ |
| $\text{Re}G(j\omega)$ | $-\frac{3}{4}$ | $-\frac{1}{3}$ | $-\frac{1}{6}$ | $-\frac{3}{40}$ | 0 |
| $\text{Im}G(j\omega)$ | $-\infty$ | $-\frac{1}{9}$ | 0 | $\frac{1}{41}$ | 0 |

$G(j\omega)$ 轨迹线示于图 5-5-27。由于本例中 $k_1=0$, 由图可见, 波波夫直线方程为

$$X(\omega) + \frac{3}{4} = 0$$

即波波夫直线必须通过点 $(-3/4, 0)$, 斜率 $1/q = \infty$ 。由此, 求得非线性的最大增益 $k_2=4/3$, 即

$$0 \leq \frac{f(x)}{x} < \frac{4}{3}$$

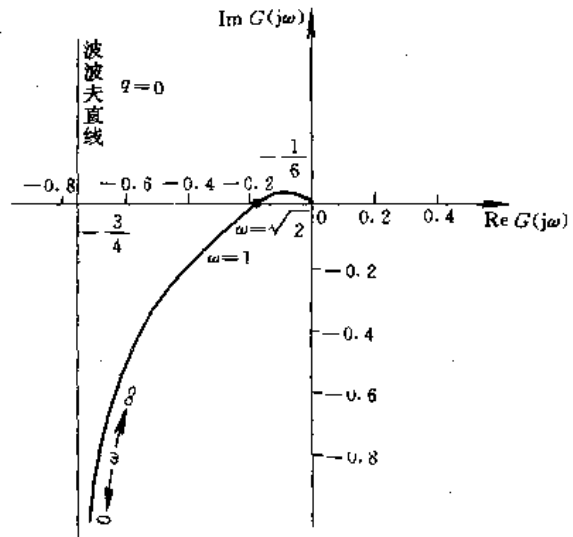


图 5-5-27 $G(j\omega)$ 轨迹线和波波夫直线

比较上面两种方法的分析可见: 由第二法求得的稳定充分条件比第一法的宽裕 (偏于保守) 得多。因此, 如果非线性系统需要具有充分的稳定裕度时, 则使用第二法较为稳妥。



第 6 章 离散控制系统

1 离散控制系统

离散控制系统是相对于连续控制系统而言的，也称为断续控制系统或采样控制系统。以数字计算机为控制器实现对连续对象(或过程)控制的离散控制系统又称为数字控制系统或计算机控制系统。

离散控制方法与连续控制方法相比，有它一定的优点，目前已广泛应用于各类控制系统。例如，对具有滞后和惯性的控制对象，采取离散控制方法可以有效地改善控制系统的特性。

采取离散控制方法，可以实现巡回检测的方式，用一台控制装置控制多个对象。如图 5·6-1 所示为巡回离散控制系统原理框图。它用一个巡回检测装置分别在 t_1, t_2, \dots, t_n 时刻依次关合一次采样开关 S_1, S_2, \dots, S_n 。经过一个固定周期 T ，再按上述顺序依次关合一次各采样开关。这样，每个加热炉控制系统都是以 T 为周期断续工作的，每隔 T 时间工作一次。

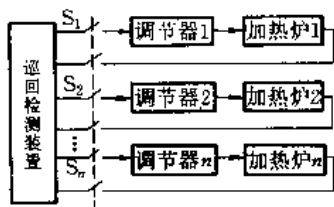


图 5·6-1 巡回离散控制系统原理框图

数字计算机具有很强的逻辑判断能力和极快的运算速度，因此，可用一台计算机以类似于图 5·6-1 方式按时分别控制多个对象。

图 5·6-2 是含有数字计算机的控制系统原理框图。保持器的作用是使计算机的输出信号在机器工作节拍内保持一定电平。这类保持器称为零阶保持器。如果使用一阶保持器，则可使计算机输出信号在机器工作节拍内按线性变化。

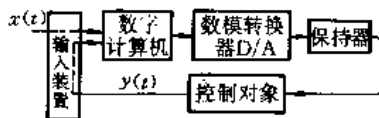


图 5·6-2 数字计算机控制系统框图

输入装置包含采样开关及模数转换器 (A/D)，当

输入信号 $x(t)$ 和对象输出信号 $y(t)$ 已是数字信号时，可不用模数转换器。

设采样周期为 T ，则每隔 T 时间输入装置轮流将 $x(t), y(t)$ 信号以数字形式送入计算机一次。

当计算机的计算引入时间滞后时，在画控制系统原理框图时，应在保持器后加入一个滞后环节 $e^{-\tau}$ (τ 为计算滞后时间)。一般计算机的计算速度极快，引入的时间滞后很小，在分析系统时可忽略不计。系统中的模数转换器 A/D 能把模拟信号转换成数字信号，但将引起量化误差，这个误差是非线性的。它的特性是多阶梯式的继电器特性，如图 5·6-3 所示。它的阶梯差为 $1/2^n$ (n 为 2 进制位数)。在控制系统实现过程中，可以选定适当字长，把量化误差压缩至系统精度允许范围之内，这就可对控制系统的影响较小，常可忽略。计算机输出端的数模转换器 D/A 引入的非线性，也是多阶梯式的继电器特性，但级数较输入端的低。在很多情况下仍可将这些非线性忽略。这样处理后，就可将图 5·6-2 所示的计算机控制系统作为线性离散控制系统看待了。

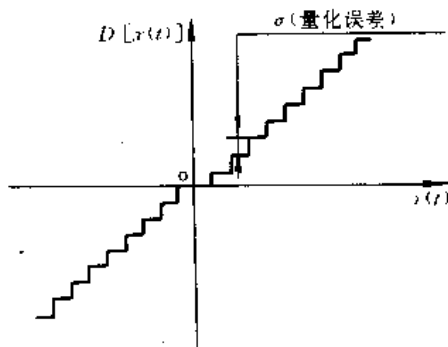


图 5·6-3 量化引起的误差示意图

2 采样过程

2.1 采样装置

在离散控制系统中，都有一处或几处的信号是以脉冲序列传递的。这就要有转换装置，以便把连续的模拟信号变换成脉冲序列。这种转换装置叫采样装置。

采样装置能对连续的模拟信号在不同时刻采样，并变成具有不同要求的脉冲序列，如图 5·6-4 所示。

北京航空航天大学出版社



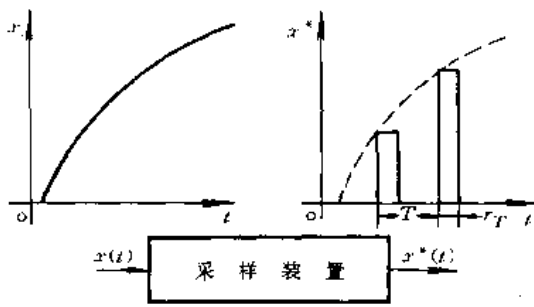


图 5-6-4 采样装置

采样装置输出的脉冲, 根据要求, 可以是矩形、三角形或正弦形的。脉冲幅值可以与输入信号在采样时刻的数值成正比 (即脉冲调幅), 也可使脉冲宽度与输入信号在采样时刻的数值成正比 (即脉冲调宽)。具有脉冲调幅采样装置的高散控制系统是线性系统, 而具有脉冲调宽采样装置的高散控制系统则是非线性系统。本章主要介绍线性高散系统。

采样装置输出脉冲的瞬间称采样时间, 其时间间隔 T 称采样周期。

采样装置所产生的脉冲形式, 对系统的运动特性是有影响的。当脉冲持续时间和系统连续部分过渡过程时间相比很小时, 可忽略不计。这时采样装置输出的脉冲序列可以用按面积调制的单位冲激函数 $\delta(t)$ 序列来代替, 即 $\delta(t)$ 的面积与采样时刻输入信号值成正比。

当必须考虑采样装置输出脉冲形式时, 为分析讨论问题方便, 可以把采样装置看成是由一个理想开关和一个保持器组成, 见图 5-6-5。

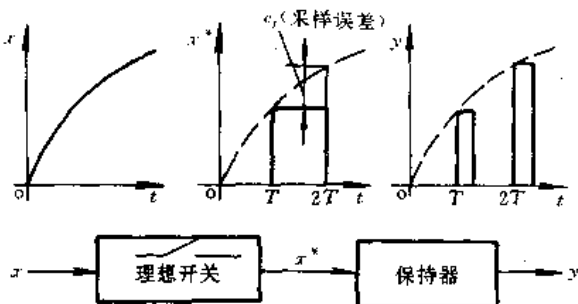


图 5-6-5 采样装置组成

理想开关在 nT 瞬时闭合, $n=0, 1, 2, \dots$ 。理想开关闭合即产生一个理想单位冲激函数 $\delta(t-nT)$, 因此可以认为理想开关是一个脉冲调制器, 调制脉冲为单位冲激函数, 冲激函数周期为 T 。作为脉冲调制器的理想开关产生的理想冲激序列可表示为

$$r(t) = \sum_{n=0}^{\infty} \delta(t-nT) \quad (5-6-1)$$

当理想开关输入一时间函数 $x(t)$ 时, 它就将 $x(t)$ 调制成调制冲激序列

$$x^*(t) = \sum_{n=0}^{\infty} x(nT) \delta(t-nT) = x(nT) \Big|_{n=0,1,\dots} \quad (5-6-2)$$

式中 $x(t)$ ——理想开关闭合瞬间的输入函数 $x(t)$ 的值;

$x^*(t)$ ——离散型函数。

保持器的输入是按面积调制的理想冲激函数, 由式 (5-6-2) 表示。其输出为实际采样装置的输出, 如矩形脉冲, 其幅值与输入信号在采样时刻的值成正比。这个脉冲就是保持器的冲激过渡函数, 它的拉氏变换式就是保持器的传递函数。如图 5-6-6 所示的矩形脉冲 (图中阴影部分), 可表示为两个单位阶跃函数之和:

$$y(t) = k_a [1(t) - 1(t-r_T)] \quad (5-6-3)$$

其拉氏变换式即为保持器的传递函数

$$W_a(s) = \frac{k_a(1-e^{-rTs})}{s} \quad (5-6-4)$$

式中 k_a ——放大系数;

r ——脉冲宽度比数。

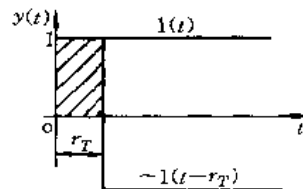


图 5-6-6 矩形脉冲分解图

2.2 采样定理

采样过程的采样周期应根据输入信号的频带选择。如果输入信号 $x(t)$ 的频带宽度为 ω_n , 即 $|\omega| \geq \omega_n$ 时

$$|x(j\omega)| \approx 0 \quad (5-6-5)$$

采样周期 T 至少应满足

$$T \leq \frac{\pi}{\omega_n}, \text{ 即 } \omega_s = \frac{2\pi}{T} \geq 2\omega_n \quad (5-6-6)$$

上式即为采样定理 (Shannon 定理)。按采样定理选择采样周期可保证不丢失有用信号。在实际使用时, ω_s 常常选得比 $2\omega_n$ 大许多。 ω_n 愈大, 采样误差愈小。

一个离散控制系统, 可能有一个或几个采样装置, 具体位置应根据实际情况确定。



3 Z 变换

3.1 离散控制系统的数学描述

离散控制系统时域描述是用差分方程式表示的。描述线性定常离散系统的数学表达式是线性常系数差分方程，本章仅限于讨论线性定常离散控制系统。

设 $u(kT)$ 、 $y(kT)$ 分别为离散系统的输入输出脉冲序列 $u^*(t)$ 、 $y^*(t)$ 采样点的值，并简记为 $u(k)$ 、 $y(k)$ ，则离散控制系统输入输出之间的关系可表示为如下的差分方程式：

$$y(k) + a_1 y(k-1) + a_2 y(k-2) + \dots + a_n y(k-n) = b_0 u(k) + b_1 u(k-1) + b_2 u(k-2) + \dots + b_m u(k-m) \quad (5.6-7)$$

或

$$y(k+n) + a_1 y(k+n-1) + \dots + a_n y(k) = b_0 u(k+m) + b_1 u(k+m-1) + \dots + b_m u(k) \quad (5.6-8)$$

式中 a_i, b_i —— 常系数；

$k-i$ —— 采样时刻，是 $(k-i)T$ 的简写。

3.2 Z 变换定义

设连续函数 $x(t)$ 经过理想开关以周期为 T 采样

后，变成离散型函数 $x^*(t)$ ，见图 5.6-4。 $x^*(t)$ 与原函数 $x(t)$ 的关系见式 (5.6-2)。

若对离散型函数 $x^*(t)$ 进行拉氏变换

$$\begin{aligned} X^*(s) &= L\{x^*(t)\} \\ &= \int_{-a}^{\infty} \left[\sum_{n=0}^{\infty} x(t) \delta(t - nT) \right] e^{-s t} dt \\ &= \sum_{n=0}^{\infty} x(nT) e^{-s nT} \end{aligned} \quad (5.6-9)$$

现引入变量 Z

$$Z = e^{Ts} \quad (5.6-10)$$

将 Z 代入式 (5.6-9)，得

$$X^*(s) = X(z) = \sum_{n=0}^{\infty} x(nT) e^{-s nT} \quad (5.6-11)$$

上式定义为离散型函数 $x^*(t)$ 的 Z 变换。 $x^*(t)$ 称为 $X(z)$ 的原函数， $X(z)$ 称为 $x^*(t)$ 的象函数，并且用 $Z\{\}$ 符号表示 Z 变换， $Z^{-1}\{\}$ 表示 Z 反变换。

3.3 Z 变换公式

离散型函数的 Z 变换，可以用级数求和、部分分式等方法求得。常用函数的变换公式列于表 5.6-1 中。表 5.6-2 列出了 Z 变换的基本定理。

$X(z)$ 和 $X(s)$ 的极点总是相等的，而且服从 $Z = e^{Ts}$ 的关系，但其零点一般是不等的，且不服从 $Z = e^{Ts}$ 关系。

表 5.6-1 Z 变换表

| 序号 | 原函数 | 拉氏变换式 | Z 变换式 |
|----|---------------------------|------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| 1 | $\delta(t)$ | 1 | 1 |
| 2 | $\delta(t-nT)$ | $e^{-s nT}$ | $\frac{1}{z^n}$ |
| 3 | 1(t) | $\frac{1}{s}$ | $\frac{z}{z-1}$ |
| 4 | 1(t-T) | $\frac{e^{-sT}}{s}$ | $\frac{1}{z-1}$ |
| 5 | t | $\frac{1}{s^2}$ | $\frac{Tz}{(z-1)^2}$ |
| 6 | $\frac{t^2}{2}$ | $\frac{1}{s^3}$ | $\frac{T^2 z (z+1)}{2 (z-1)^2}$ |
| 7 | $e^{\pm at}$ | $\frac{1}{s \mp a}$ | $\frac{z}{z - e^{\pm aT}}$ |
| 8 | $e^{-a_1 t} - e^{-a_2 t}$ | $\frac{a_2 - a_1}{(s+a_1)(s+a_2)}$ | $\frac{(e^{-a_1 T} - e^{-a_2 T}) z}{(z - e^{a_1 T})(z - e^{a_2 T})}$ |
| 9 | $\sin \omega t$ | $\frac{\omega}{s^2 + \omega^2}$ | $\frac{z \sin \omega T}{z^2 - 2z \cos \omega T + 1}$ |
| 10 | $\cos \omega t$ | $\frac{s}{s^2 + \omega^2}$ | $\frac{z(z - \cos \omega T)}{z^2 - 2z \cos \omega T + 1}$ |



(续)

| 序号 | 原函数 | 拉氏变换式 | Z变换式 |
|----|-----------------------------|--------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 11 | $e^{-\alpha} \sin \omega t$ | $\frac{\omega}{(s+\alpha)^2 + \omega^2}$ | $\frac{ze^{-\alpha T} \sin \omega T}{z^2 - 2ze^{-\alpha T} \cos \omega T + e^{-2\alpha T}}$ |
| 12 | $e^{-\alpha} \cos \omega t$ | $\frac{s+\alpha}{(s+\alpha)^2 + \omega^2}$ | $\frac{z(z - e^{-\alpha T} \cos \omega T)}{z^2 - 2ze^{-\alpha T} \cos \omega T + e^{-2\alpha T}}$ |
| 13 | $te^{-\alpha}$ | $\frac{1}{(s+\alpha)^2}$ | $\frac{Te^{-\alpha T} \cdot z}{(z - e^{-\alpha T})^2}$ |
| 14 | $1 - e^{-\alpha}$ | $\frac{\alpha}{s(s+\alpha)}$ | $\frac{(1 - e^{-\alpha T})z}{(z-1)(z - e^{-\alpha T})}$ |
| 15 | a^k | | $\frac{z}{z-a}$ |

表 5-6-2 Z变换的基本定理

| | | |
|---------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| 线性定理 | $x(nT) = \sum_{i=1}^k a_i x_i(nT)$ | $X(z) = \sum_{i=1}^k a_i X_i(z)$ |
| 初值定理 | $X(z) = \sum_{n=0}^{\infty} x(nT) z^{-n}$ | $x(0) = \lim_{z \rightarrow \infty} X(z)$ |
| 终值定理 | $X(z) = \sum_{n=0}^{\infty} x(nT) z^{-n}$ | $x(\infty) = \lim_{z \rightarrow 1} (1 - z^{-1}) X(z)$ |
| 象函数相乘定理 | $X_1(z) = \sum_{n=0}^{\infty} x_1(nT) z^{-n}$ $X_2(z) = \sum_{n=0}^{\infty} x_2(nT) z^{-n}$ | $X_1(z) X_2(z) = Z \left\{ \sum_{m=0}^n x_2(m) x_1(n-m) \right\}$ |
| 超前滞后定理 | $X(z) = \sum_{n=0}^{\infty} x(nT) z^{-n}$ $x(0) = x(1) = \dots = x(k-1) = 0$ $x(-1) = x(-2) = \dots = x(-k) = 0$ | $Z\{x[(n \pm k)T]\} = z^{\pm k} X(z)$ |

3.4 Z反变换

Z反变换是根据Z变换的象函数求其对应的原函数——离散型函数。这可以直接查表5.6-1求取。

例如,已知

$$X(z) = \frac{X_1(z)}{X_2(z)} = \frac{b_j z^j + b_{j-1} z^{j-1} + \dots + b_1 z + b_0}{a_i z^i + a_{i-1} z^{i-1} + \dots + a_1 z + a_0} \quad (5.6-12)$$

式中, $i > j$ 。

设 $X_2(z) = a_i(z-z_1)(z-z_2)\dots(z-z_j)$,

则

$$X(z) = \frac{c_1}{z-z_1} + \frac{c_2}{z-z_2} + \dots + \frac{c_i}{z-z_i} = \sum_{k=1}^i \frac{c_k}{z-z_k} \quad (5.6-13)$$

$$c_k = \left. \frac{X_1(z)}{X_2(z)} \right|_{z=z_k} \quad (5.6-14)$$

根据式(5.6-13),可分别查表求得各项的原函数。此外还可以用长除法求原函数。

如式(5.6-12)给出的函数,用分母除分子可得出级数式

$$X(z) = d_0 + d_1 z^{-1} + d_2 z^{-2} + \dots + d_{k-1} z^{-(k-1)} + \dots \quad (5.6-15)$$

又,根据Z变换定义知

$$X(z) = \sum_{n=0}^{\infty} x(nT) z^{-n} = x(0)z^{-0} + x(T)z^{-1} + x(2T)z^{-2} + \dots \quad (5.6-16)$$

比较上面两式可知, z^{-n} 的系数代表采样时刻脉冲的幅度, z^{-n} 的幂次就是脉冲出现的时刻。所以式(5.6-15)实际上应看作是脉冲序列, z^{-n} 本身可看作时间变量。这样,只要求得系数 d_0, d_1, \dots , 就得到了原函数。这些系数可在式(5.6-12)的分母除分子过程中确定。



4 离散控制系统 Z 传递函数

4.1 离散控制系统 Z 传递函数

和分析连续控制系统一样,传递函数可以完全描述系统的特性。关于离散控制系统 Z 传递函数的概念,与连续控制系统传递函数相似。

图 5-6-7 示出离散开环控制系统。图中 $W(s)$ 为连续部分的传递函数(包括保持器在内)。

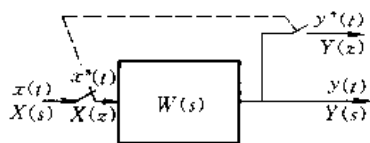


图 5-6-7 离散开环控制系统框图

输入函数 $x(t)$ 经过理想开关调制后,成为离散型脉冲序列 $x^*(t)$,并作用到线性连续部分 $W(s)$ 。系统输出取同步的采样脉冲 $y^*(t)$,而实际系统的输出是连续的 $y(t)$ 。为了研究离散控制系统的离散输入与离散输出间的关系,即研究系统输入与输出间的关系,在图 5-6-7 中用虚线画出了一个假想的同步开关。这是为了分析问题方便,有意设置的。

离散控制系统的 Z 传递函数 $W(z)$,定义为系统输入脉冲序列的 Z 变换 $X(z)$ 与系统输出脉冲序列 Z 变换 $Y(z)$ 之比:

$$W(z) = \frac{Y(z)}{X(z)} \quad (5-6-17)$$

4.2 开环离散控制系统 Z 传递函数

4.2.1 各元件间没有开关隔开的开环系统

如图 5-6-8 示出的开环系统,两个元件间是直接联系的。这类开环系统的 Z 传递函数为

$$\begin{aligned} W(z) &= z\{W_1(s)W_2(s)\} \\ &= W_1W_2(z) \end{aligned} \quad (5-6-18)$$

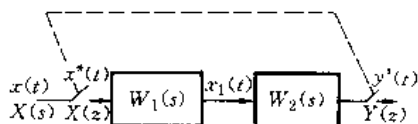


图 5-6-8 两元件直接相连的开环系统框图

式中, $W_1W_2(z)$ 表示 $W_1(s)$ 与 $W_2(s)$ 相乘后的原函数的 Z 变换,即各元件间没有开关隔开的离散开环系统的 Z 传递函数,是各连续元件传递函数相乘后的原函

数的 Z 变换。注意,不要将 $W_1W_2(z)$ 与 $W_1(z)W_2(z)$ 相混淆,它们并不相同。

4.2.2 各元件间有开关隔开的开环系统

如图 5-6-9 所示的离散开环控制系统,各元件间由开关隔开。

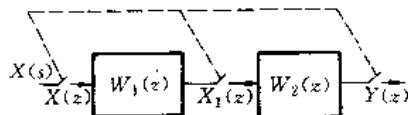


图 5-6-9 有开关隔开的开环系统框图

这类开环系统的 Z 传递函数等于各元件的 Z 传递函数的乘积

$$W(z) = W_1(z)W_2(z) \quad (5-6-19)$$

4.3 闭环离散控制系统的 Z 传递函数

图 5-6-10 示出闭环离散控制系统,在比较元件后有采样开关,故误差信号是以脉冲序列形式加入系统的。误差信号的 Z 变换为 $E(z)$ 。系统中连续部分的传递函数分别为 $W_1(s), W_2(s)$ 。系统的输入 $x(t)$ 是连续信号。系统各点间信号离散形式的 Z 变换分别为:

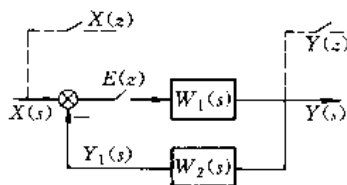


图 5-6-10 闭环离散控制系统框图之一

$$E(z) = X(z) - Y_1(z) \quad (5-6-20)$$

$$Y_1(z) = W_1W_2(z)E(z) \quad (5-6-21)$$

由上式得闭环系统的 Z 传递函数为

$$\Phi(z) = \frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{W_1(z)}{1 + W_1W_2(z)} \quad (5-6-22)$$

$$\Phi_e(z) = \frac{E(z)}{X(z)} = \frac{1}{1 + W_1W_2(z)} \quad (5-6-23)$$

同理,如图 5-6-11 示的闭环离散控制系统的 Z 传递函数为

$$\Phi(z) = \frac{W_1(z)W_2(z)}{1 + W_1(z)W_2W_3(z)} \quad (5-6-24)$$

$$\Phi_e(z) = \frac{1}{1 + W_1(z)W_2W_3(z)} \quad (5-6-25)$$

上述 Z 传递函数给出了离散控制系统在采样时系统输入和输出的关系。若想研究系统输出在其他时刻的情况,应研究 $\pm mT, (1 \pm m)T, (2 \pm m)T, \dots$,

此星公司制作 请尊重版权



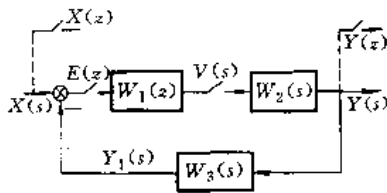


图 5-6-11 闭环离散控制系统框图之二

$(i-m)T$ 时刻的情况。这相当于输出端的采样时刻提前或滞后一个时间 $m(0 < m < 1)$, 即相当于在图 5-6-10 的输出采样开关前加入一个滞后或超前环节 $W(s) = e^{\pm ms}$ 。这时的 Z 变换称为具有 m 参数的 Z 变换, 详见参考文献[16]。

表 5-6-3 列出的是一些常见的离散控制系统的闭环传递函数。

表 5-6-3 常见离散控制系统的闭环传递函数

| 序号 | 系统方框图 | 脉冲转移函数 |
|----|-------|------------------------------------------------------------------|
| 1 | | $Y(z) = \frac{W_1(z)}{1 + W_1 W_2(z)} X(z)$ |
| 2 | | $Y(z) = z \left\{ \frac{W_1(s)}{1 + W_1(s)W_2(s)} \right\} X(z)$ |
| 3 | | $Y(z) = \frac{XW_1(z)}{1 + W_1(z)W_2(z)}$ |
| 4 | | $Y(z) = \frac{W_1(z)}{1 + W_1(z)W_2(z)} X(z)$ |
| 5 | | $Y(z) = \frac{W_1(z)}{1 + W_1(z)W_2(z)} X(z)$ |
| 6 | | $Y(z) = \frac{W_1(z)}{1 + W_1(z)W_2(z)} X(z)$ |
| 7 | | $Y(z) = \frac{W_2(z)XW_1(z)}{1 + W_3W_1(z)W_2(z)}$ |
| 8 | | $Y(z) = \frac{W_2(z)XW_1(z)}{1 + W_2(z) + W_1W_2(z)}$ |



5 离散控制系统的时间特性

和研究连续控制系统一样,把离散控制系统在典型外作用下引起的输出作为描述该系统特性的时间特性。

5.1 冲激过渡函数

离散控制系统在单位冲激函数 $\delta(t)$ 作用下引起的输出的时间函数,叫做离散控制系统的冲激过渡函数 $k(nT)$ 。

离散控制系统冲激过渡函数的 Z 变换,就是离散控制系统的 Z 传递函数

$$W(z) = Z\{k(nT)\} \quad (5.6-26)$$

显然,如图 5.6-7 所示的开环离散控制系统的冲激过渡函数 $k(nT)$ 和开环连续控制系统的冲激过渡函数相同,只是离散控制系统的冲激过渡函数是在采样时刻取值而已。作为连续控制系统时,其输出在连续元件 $W(s)$ 输出端取出,作为离散控制系统看,其输出应在输出端假想开关之后取。两者冲激过渡函数相同,物理解释是因为单位冲激 $\delta(t)$ 只在 $t=0$ 时有值,其余时间为零,故单位冲激函数 $\delta(t)$ 作用后,采样开关不再起作用。

闭环离散控制系统的冲激过渡函数是闭环离散控制系统的 Z 传递函数的 Z 反变换

$$k_s(nT) = Z^{-1}\{\Phi(z)\} \quad (5.6-27)$$

设 $\Phi(z)$ 可写成 Z 的有理分式

$$\begin{aligned} \Phi(z) &= \frac{M(z)}{H(z)} \\ &= \frac{b_j z^j + b_{j-1} z^{j-1} + \cdots + b_1 z + b_0}{a_i z^i + a_{i-1} z^{i-1} + \cdots + a_1 z + a_0} \end{aligned} \quad (5.6-28)$$

同时,设系统特征方程式 $H(z)=0$ 的根为 z_k , 并无重根。求式(5.6-28)的 Z 反变换,即得出系统的冲激过渡函数

$$k_s(nT) = \sum_{k=1}^i \frac{M(z_k)}{H'(z_k)} z_k^n \quad (5.6-29)$$

上式的求法与拉氏反变换类似,即将式(5.6-28)的分母作因式分解后再将式(5.6-28)作分项分式,每项单独查表,求得每项原函数,最后求和,即得式(5.6-29)。式中

$$\dot{H}(z_k) = \left. \frac{dH(z)}{dz} \right|_{z=z_k} \quad (5.6-30)$$

如求开环离散控制系统的冲激过渡函数,式(5.6-28)应为开环离散控制系统的 Z 传递函数。

5.2 过渡函数

和连续控制系统一样,离散控制系统在单位阶跃函数作用下引起的输出的时间函数,叫做离散控制系统的过渡函数 $h(nT)$ 。

离散控制系统过渡函数的 Z 变换为

$$h(z) = W(z) \cdot Z\{1(t)\} \quad (5.6-31)$$

若 $W(z)$ 写成 Z 的有理分式

$$W(z) = \frac{M(z)}{D(z)} = \frac{b_j z^j + b_{j-1} z^{j-1} + \cdots + b_1 z + b_0}{a_i z^i + a_{i-1} z^{i-1} + \cdots + a_1 z + a_0} \quad (5.6-32)$$

且系统特征方程式 $D(z)=0$ 的根为 z_k , 无重根^①。已知

$$Z\{1(t)\} = \frac{z}{z-1}, \text{ 则}$$

$$h(z) = \sum_{k=1}^i \frac{M(z_k)}{D'(z_k)} \frac{1}{z - z_k} \frac{z}{z-1} \quad (5.6-33)$$

查表 5.6-2 知

$$Z^{-1}\left\{\frac{1}{z - z_k} \cdot \frac{z}{z-1}\right\} = \frac{1 - z_k^n}{1 - z_k}$$

所以

$$\begin{aligned} h(nT) &= \sum_{k=1}^i \frac{M(z_k)}{D'(z_k)} \frac{1 - z_k^n}{1 - z_k} \\ &= \sum_{k=1}^i \frac{M(z_k)}{D'(z_k)} \frac{1}{1 - z_k} - \sum_{k=1}^i \frac{M(z_k)}{D'(z_k)} \frac{z_k^n}{1 - z_k} \end{aligned} \quad (5.6-34)$$

$$D'(z_k) = \left. \frac{dD(z)}{dz} \right|_{z=z_k}$$

式(5.6-34)中第一项与时间无关,即与 n 无关,为系统的稳态解;第二项为自由解,它反映了系统的过渡过程。

如图 5.6-10 所示闭环离散控制系统的过渡函数,应是其闭环离散控制系统 Z 传递函数与单位阶跃函数 $1(t)$ 的 Z 变换乘积的 Z 反变换。其结果形式与式(5.6-34)相同。

6 离散控制系统频率特性

离散控制系统的频率特性定义和连续控制系统频率特性定义相同,当输入周期信号 $x(t) = x_0 e^{j\omega t}$ 时,系统稳定的输出(自由分量衰减为零后),振幅 $y(\infty)$ 与输入信号振幅 x_0 之比与频率 ω 的关系,以及输出信号

^① 在有重根时,可分解为有 $\frac{1}{(z-z_k)^j}$ 的因式,它的 Z 反变换及系数运算可参阅参考文献[16]。



波形与输入信号波形相位差 φ 与频率 ω 的关系, 这些关系式称为离散控制系统的频率特性

$$W(e^{j\omega T}) = \frac{y(\infty)}{x_0} \angle \varphi \quad (5.6-35)$$

式中 $y(\infty)/x_0$ 和 φ 都是频率的函数, 即 $y(\infty)/x_0 = f(\omega), \varphi = \varphi(\omega)$ 。

如图 5.6-10 示闭环离散控制系统, 若 $W_2(s) = 1$ 时, 其闭环系统频率特性与开环系统频率特性的关系和连续控制系统的相同。

$$\Phi(e^{j\omega T}) = \frac{W(e^{j\omega T})}{1 + W(e^{j\omega T})} \quad (5.6-36)$$

将系统传递函数的变量 Z 换成 $e^{j\omega T}$, 即得系统频率特性。因为 $Z = e^{j\omega T}$, 若用 $j\omega$ 代替 s , 则 $Z = e^{j\omega T}$ 。这和连续控制系统的结论相同。

由于 $Z = e^{j\omega T}$, 设 $\omega_s = 2\pi/T$, 而 $\omega = \omega_s \pm k\omega_s$, 则 $Z = e^{j\omega T} e^{\pm j2k\pi} = e^{j\omega T}$ 。可见, 离散控制系统的频率特性对 ω 来说是周期函数。每间隔 ω_s , 频率特性均相同。这一点和连续控制系统频率特性不同。

另外, 式(5.6-35)、式(5.6-36)也可分成实部及虚部。

7 离散控制系统稳定性

7.1 关于离散控制系统的稳定概念

为使离散控制系统稳定, 就必须使其冲激过渡函数 $k(nT)$ 随时间增长衰减至零。即式(5.6-29)随 n 增大衰减至零。或者说, 过渡函数中的自由项随时间增长衰减至零, 即式(5.6-34)的第二项随 n 增大衰减至零。

这一概念和线性连续控制系统的稳定概念一样。

为了满足这一要求, 从式(5.6-29)及式(5.6-34)可见, 必须

$$|z_k| < 1 \quad (5.6-37)$$

即要求系统的特征方程式 $D(z) = 0$ [或 $H(z) = 0$] 的根的绝对值小于 1。这对应于其根应分布在 z 平面的单位圆之内, 见图 5.6-12。

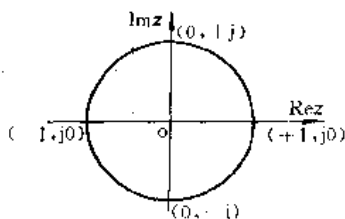


图 5.6-12 z 平面图

这样, 关于离散控制系统的稳定问题可综述为: 离散控制系统稳定的充分必要条件是其 Z 传递函数的极点, 或其特征方程式之根的绝对值应小于 1。即这些根应分布在 z 平面的单位圆内。

7.2 离散控制系统稳定判据

7.2.1 代数判据

为使离散控制系统稳定, 必须使特征方程

$$D(z) = a_n z^n + a_{n-1} z^{n-1} + \dots + a_1 z + a_0 = 0 \quad (5.6-38)$$

的根的绝对值小于 1, 即位于 Z 平面单位圆内。这个条件完全可用式(5.6-38)各系数表示。

在连续系统中, 赫尔维茨判据, 是用特征方程的系数判定其根是否位于 S 平面的左半平面。它无法判定离散系统中特征方程根的绝对值是否小于 1。若想应用赫尔维茨判据判别离散系统特征方程根的分布, 就必须进行复变量转换, 将 Z 平面的单位圆转换到另一平面, 例如 W 平面。通过 W 变换, 将单位圆周变成 W 平面的虚轴; 把圆内部分变成 W 平面的左半平面; 将圆外部分变成 W 平面的右半平面, 见图 5.6-13。

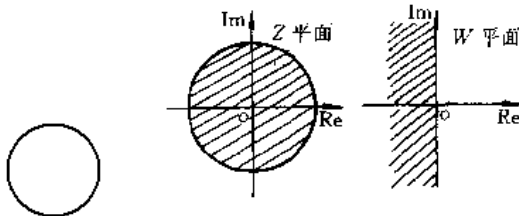


图 5.6-13 Z - W 平面变换影像图

这样就可应用赫尔维茨判据了。

Z 和 W 都是复数

$$Z = p + jq \quad (5.6-39)$$

$$W = u + jv \quad (5.6-40)$$

令

$$Z = \frac{1+W}{1-W} \quad (5.6-41)$$

或

$$W = \frac{z-1}{z+1} \quad (5.6-42)$$

将式(5.6-39)代入式(5.6-40), 得

$$W = \frac{(p^2+q^2)-1}{(p+1)^2+q^2} + j \frac{2q}{(p+1)^2+q^2} \quad (5.6-43)$$

根据式(5.6-39)知 $p^2+q^2 = |Z|^2$, 即对于所有幅值大于 1 的 Z, W 的实部均为正(见式 5.6-43), 对于幅值小于 1 的 Z, W 的实部均为负, 这就完成了如图 5.6-



13 所示的转换,从而可以对转换后的特征方程式,应用赫尔维茨判据。

【例 5.6-1】 设某系统的特征方程式为

$$Z^3 - 1.5Z^2 - 0.25Z + 0.4 = 0$$

判别该系统的稳定性。

解 将式(5.6-41)代入特征方程式得

$$\left(\frac{1+W}{1-W}\right)^3 - 1.5\left(\frac{1+W}{1-W}\right)^2 - 0.25\left(\frac{1+W}{1-W}\right) + 0.4 = 0$$

整理后得

$$1.85W^3 + 5.95W^2 + 0.55W - 0.35 = 0$$

根据上式,应用赫尔维茨判据。因上式中系数符号不相同,故系统不稳定。

7.2.2 奈氏(奈奎斯特)判据

奈氏判据是应用开环离散控制系统 Z 传递函数判别闭环离散控制系统的稳定性。

其证明和连续控制系统情况一样,应用幅角原理,并引用一辅助函数 $1+W(z)$ 。经证明,奈氏判据可综述如下:若离散控制系统在开环系统下稳定,闭环系统稳定的充分必要条件是,离散控制系统开环频率特性,当 ω 从 0 变到 π 时不包围 $W(e^{j\omega})$ 平面内的 $(-1, j0)$ 点。若开环系统不稳定,且开环系统特征方程式有 n 个根绝对值大于 1,闭环系统稳定的充分必要条件是开环频率特性 $W(e^{j\omega})$,当 ω 从 0 变到 π 时,沿逆时针方向包围 $W(e^{j\omega})$ 平面内 $(-1, j0)$ 点 $n/2$ 次。

离散控制系统在开环状态时,开关存在与否不影响它的稳定性,因此在讨论开环系统稳定问题时,可直接用连续部分特性讨论。

8 离散控制系统的静差

设离散控制系统承受的控制信号为 $x(t)$,其 Z 变换式为

$$X(z) = \frac{X_1(z)}{X_2(z)} = \frac{X_1(z)}{(z-z_{z1})(z-z_{z2})\cdots(z-z_{zr})} \quad (5.6-44)$$

系统误差 Z 传递函数为 $\Phi_e(z)$,则系统误差的 Z 变换式为

$$E(z) = \Phi_e(z)X(z) = \frac{1}{1+W(z)}X(z)$$

其系统框图如图 5.6-10 所示, $W(z) = W_1W_2(z)$ 。并设 $W(z)$ 具有式(5.6-32)形式。这时

$$E(z) = \frac{D(z)}{(z-z_1)(z-z_2)\cdots(z-z_r)}$$

$$\begin{aligned} & \times \frac{X_1(z)}{(z-z_{z1})(z-z_{z2})\cdots(z-z_{zr})} \\ & = \frac{C_1}{z-z_1} + \frac{C_2}{z-z_2} + \cdots + \frac{C_i}{z-z_i} \\ & \quad + \frac{B_1}{z-z_{z1}} + \frac{B_2}{z-z_{z2}} + \cdots + \frac{B_r}{z-z_{zr}} \\ & = \sum_{k=1}^i \frac{C_k}{z-z_k} + \sum_{k=1}^r \frac{B_k}{z-z_{zk}} \end{aligned} \quad (5.6-45)$$

式中

$$\left. \begin{aligned} C_k &= \frac{D(z_k)X_1(z_k)}{H(z_k)X_2(z_k)} \\ B_k &= \frac{D(z_{zk})X_1(z_{zk})}{H(z_{zk})\dot{X}_2(z_{zk})} \end{aligned} \right\} \quad (5.6-46)$$

$$H(z) = M(z) + D(z)$$

最后可求得误差的时间函数

$$\begin{aligned} e(nT) &= \sum_{k=1}^i \frac{D(z_k)X_1(z_k)}{H(z_k)X_2(z_k)} z_k^n \\ & \quad + \sum_{k=1}^r \frac{D(z_{zk})X_1(z_{zk})}{H(z_{zk})\dot{X}_2(z_{zk})} z_{zk}^n \end{aligned} \quad (5.6-47)$$

上式表明系统的误差 $e(nT)$ 分为两项:第一项与系统特征方程的根 z_k 有关,即由自身特性确定,与外作用无关,它表示过渡过程的自由分量项,若系统稳定, $|z_k| < 1$,故随 n 增加(时间增大),这一项衰减至零;第二项由外作用的极点 z_{zk} 确定,是强迫项,它确定了系统的静差。

使静差为零的条件是使系数 $B_k = 0$,即要求 $D(z_{zk}) = 0$ [因为 $X_1(z_{zk})$ 不能为零,否则 z_{zk} 既是外作用的极点,又是外作用的零点,这是不可能的]。

这个条件可以写成

$$D(z_{zk}) = 0 \quad k=1, 2, \dots, r \quad (5.6-48)$$

如外作用是单位阶跃函数,即 $X(z) = \frac{z}{z-1}$ 。这时为使静差为零,就必须开环离散控制系统特征方程式 $D(z) = 0$ 有一根为 $z=1$,

$$D(z) = (z-1)D_1(z) \quad (5.6-49)$$

这时系统的误差传递函数为

$$\Phi_e(z) = \frac{(z-1)D_1(z)}{H(z)} \quad (5.6-50)$$

开环系统 Z 传递函数为

$$W(z) = \frac{1-\Phi_e(z)}{\Phi_e(z)} = \frac{M(z)}{(z-1)D_1(z)} \quad (5.6-51)$$

○ 因 $W(e^{j\omega T})$ 是 ω 的周期函数,周期为 2π ,又 $W(e^{j\omega T})$ 的实频特性为偶函数,即 $W(e^{j\omega T})$ 对称实轴,只需研究 ω 从 $0 \sim \pi$ 变化时的 $W(e^{j\omega T})$ 就可以了解全貌。



上式说明,如果系统输入信号为 $1(t)$ 时,要保证系统无静差,必须开环系统 Z 传递函数有一极点为 $Z=1$ 。由 Z 变换知,若系统线性部分 $W(s)$ 有一积分环节 $1/s$,其对应的 Z 变换即有一项 $z/(z-1)$ 。为了得 $z=1$ 的极点,还可以用数字滤波器、计算机实现。

同理,如输入信号在 $z=1$ 处有 γ 阶极点时,即 $X(z)=X_1(z)/(z-1)^\gamma$,为使系统无差,必须满足下式:

$$D(z)=(z-1)^\gamma D_1(z) \quad (5.6-52)$$

9 离散控制系统的过渡过程

离散控制系统在 $x(t)$ 作用下输出 $y(t)$ 的 Z 变换式与式(5.6-47)类似:

$$y(nT) = \sum_{k=1}^i \frac{M(z_k)X_1(z_k)}{H(z_k)X_2(z_k)} z_k^n + \sum_{k=1}^r \frac{M(z_{rk})X_1(z_{rk})}{H(z_{rk})X_2(z_{rk})} z_{rk}^n \quad (5.6-53)$$

其中第二项为强迫项,第一项为自由项,即过渡过程由第一项 $y_1(nT)$ 表示。一般特征方程式的根为复根,令 $Z_k = \sigma_k e^{j\theta_k}$ 代入第一项,得

$$y_1(nT) = \sum_{k=1}^i A_k Z_k^n = A_1 \sigma_1^n e^{jn\theta_1} + A_2 \sigma_2^n e^{jn\theta_2} + \dots + A_i \sigma_i^n e^{jn\theta_i} \quad (5.6-54)$$

式中,若 $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3 \dots \geq \sigma_i$,则特征方程式的根均在正半平面以 σ_1 为半径的圆内。若系统稳定, $\sigma_1 < 1$,同时由式(5.6-54)知, σ_1^n 项影响最大,其它项随 n 增加很快衰减至零。所以 σ_1 数值的大小可以作为评价系统过渡过程 $y_1(nT)$ 的指标之一。 σ_1 小,则系统过渡过程快,这样,就要求 σ_1 越小越好。最理想是 $\sigma_1 = 0$ 。这对应于系统特征方程式 $H(z)$ 的根集中在 Z 平面的原点。若

$$H(z) = a_i z^i + a_{i-1} z^{i-1} + \dots + a_1 z + a_0 = 0$$

为保证特征方程式的根都集中在 Z 平面的原点,必须满足

$$a_{i-1} = a_{i-2} = \dots = a_1 = a_0 = 0 \quad (5.6-55)$$

此时

$$H(z) = a_i z^i = 0 \quad (5.6-56)$$

这时的离散控制系统 Z 传递函数应为

$$\Phi(z) = \frac{W(z)}{1+W(z)} = \frac{M(z)}{D(z)+M(z)} = \frac{M(z)}{H(z)} = \frac{M(z)}{a_i z^i} \quad (5.6-57)$$

$$\Phi_c(z) = \frac{1}{1+W(z)} = \frac{D(z)}{H(z)} = \frac{D(z)}{a_i z^i} \quad (5.6-58)$$

当离散控制系统具有式(5.6-56)所示条件时,则称该系统具有无穷大的稳定度。定义 $1/\sigma_1$ 为系统的稳定度。当系统具有无穷大稳定度时,在单位冲激函数 $\delta(t)$ 作用下,离散控制系统的误差 $\dot{\epsilon}(nT)$ 在有限时间 iT (i 为特征方程的阶数)内就衰减至零。这对于连续控制系统来说,是做不到的。连续控制系统,在理论上只有 $t \rightarrow \infty$ 时,误差才趋于零。

使离散控制系统具有无穷大稳定度的设计方法,称为有限过渡过程时间综合方法,也称为有限拍法。这种方法在使用上有一定限制条件,详见参考文献[16]等。

10 离散控制系统设计

10.1 离散控制系统的预期特性

根据前一节讨论,离散控制系统的预期特性,可根据系统对静态误差和过渡过程的要求拟定。

设输入信号为

$$x(t) = c_0 + c_1 t + c_2 t^2 + \dots + c_p t^p \quad (5.6-59)$$

则根据式(5.6-52)及式(5.6-58),为使系统无差,离散控制系统的预期误差传递函数应为

$$\Phi_0(z) = \frac{(z-1)^p D_1(z)}{a_i z^i}, \quad p \geq \nu \quad (5.6-60)$$

上式表示的系统,对于式(5.6-59)形式的输入信号为无差,且其误差冲激过渡函数在 iT 内衰减为零。

式(5.6-59)的 Z 变换为

$$X(z) = \frac{X_1(z)}{(z-1)^\nu} \quad (5.6-61)$$

$X_1(z)$ 为 Z 多项式,其阶次小于或等于 ν

$$X_1(z) = c'_0 + c'_1 z + c'_2 z^2 + \dots + c'_\nu z^\nu \quad (5.6-62)$$

将上式乘以式(5.6-60),得到系统误差的 Z 变换式

$$E(z) = \Phi_0(z)X(z) = \frac{(z-1)^p D_1(z)}{a_i z^i} \cdot \frac{X_1(z)}{(z-1)^\nu}$$

若 $p = \nu$,

$$D_1(z) = a_0 + a_1 z + a_2 z^2 + \dots + a_{i-\nu} z^{i-\nu} \quad (5.6-63)$$

则

$$E(z) = (a_0 + a_1 z + a_2 z^2 + \dots + a_{i-\nu} z^{i-\nu}) \times (c'_0 + c'_1 z + c'_2 z^2 + \dots + c'_\nu z^\nu) / a_i z^i = \epsilon_0 + \epsilon_1 z^{-1} + \epsilon_2 z^{-2} + \dots + \epsilon_i z^{-i} \quad (5.6-64)$$



式中 ϵ_k 由系数 a_i, a_k, c_k 确定, $k=0, 1, \dots, i$.

为了使系统的动态误差衰减至零的时间 t_p 减小, 应该力求使 i 及系数 a_0, a_1, \dots, a_{i-1} 小。但是系统特征方程式的阶次 i 及系数 a_0, a_1, \dots 的减小是有一定限度的。从式(5.6-60)可看出, i 不能小于 ν , 即分母的阶次不能小于分子的阶次。 $D(z)$ 的各系数不能全为零, 否则, 相当于 $\Phi_{\infty}(z)=0$, 这就没有实际意义。所以至少 $a_0 \neq 0$ 。按照这些原则考虑, 则预期特性式(5.6-60)应为

$$\Phi_{\infty}(z) = \frac{a_0(z-1)^\nu}{a_i z^i} = K_0 \frac{(z-1)^\nu}{z^i} \quad (5.6-65)$$

式中
$$K_0 = \frac{a_0}{a_i}$$

与式(5.6-60)及式(5.6-65)相对应的离散开环系统频率特性为

$$W_0(z) = \frac{1 - \Phi_{\infty}(z)}{\Phi_{\infty}(z)} = \frac{a_i z^i - (z-1)^\nu D_1(z)}{(z-1)^\nu D_1(z)} \quad (5.6-66)$$

或

$$W_0(z) = \frac{z^\nu - K_0(z-1)^\nu}{K_0(z-1)^\nu} \quad (5.6-67)$$

还可以根据系统过渡过程的要求, 如过渡过程的超调量、衰减速度、稳定时间等等对离散控制系统的预期特性提出要求。综合这些要求, 可决定离散控制系统开环 Z 传递函数 $W_0(z)$ 的预期特性。

上面讨论的有限过渡过程时间的综合方法, 虽然它的效果较好, 但要注意, 使用时是有一定条件的。上述讨论的综合方法, 是从图 5.6-11 出发的, 并设 $W_3(s) = 1, W_2(s)$ 为控制对象(包括保持器在内)的传递函数。由此得出补偿装置 $W_1(s)$, 而整个开环系统的 Z 传递函数为 $W_0(z) = W_1(z)W_2(z) = W_1(z) \cdot Z\{W_2(s)\}$ 。假如系统采用其他结构形式, 也可以变换为这种形式。

使用上述方法的限制条件如下:

(1) 对象 $W_2(s)$ 不能有不稳定根。

(2) 利用这一方法对某一输入信号 $x(t)$ 进行综合后, 假如 $x(t)$ 变了, 则整个过渡过程也将改变。如在 $x(t) = t$ 时用有限过渡过程时间综合法综合后, 当 $x(t)$ 变为 $x(t) = 1(t)$ 时, 虽然整个过渡过程还在原综合的有限时间内结束, 但超调量很大。如两步就结束过渡过程, 超调量可达 100%。在 $x(t) = t^2$ 时, 输出和输入间有很大的跟踪误差。因此, 这种方法只在生产机械运动规律比较明确时(如程序控制系统、定值调节系统等)才能使用。

(3) 使用上述方法时, 需要假定控制对象 $W_2(s)$ (图 5.6-11)前施加的作用 $u(t)$ 是没有幅度限制的条件。如要求 $|u(t)| \leq M$, 则综合后必须校核 $|u(t)|$ 是否小于 M 。

至于具体的综合方法, 也要根据输入信号 $x(t)$ 而有所不同。如 $x(t) = 1(t), X(z) = z/(z-1), W_2(s)$ 中包括零阶保持器, 零阶保持器的传递函数为 $(1 - e^{-Ts})/s$ 。又设 $W_2(s)$ 中除零阶保持器的 s 极点外, 另有 p 个零值极点, l 个左半平面上的实数极点, 则预期闭环传递函数应为

$$\Phi_0(z) = \frac{W_0(z)}{1 + W_0(z)} = \frac{H(z)}{z^{p+l+1}} \quad (5.6-68)$$

$H(z)$ 是 Z 的多项式, 过渡过程可在 $p+l+1$ 个周期后结束。如 $W_2(s)$ 在左半平面的极点中, 有一对共轭复极点, 其对应的传递函数为 $\omega_0 / [(s+a)^2 + \omega_0^2]$, 采样周期 $T = \pi/\omega_0$, 则闭环系统预期传递函数为

$$\Phi_0(z) = \frac{H'(z)}{z^{p+l}} \quad (5.6-69)$$

其过渡过程可在 $p+l$ 周期内结束。

如 $x(t) = t, x(z) = Tz/(z-1)^2$, 为了保证在采样点间隔内输出信号和输入信号没有误差, 这时 $W_2(s)$ 中应包括三角波调制器, 调制器的传递函数为 $(1/T) \times (1 - e^{-Ts})^2/s^2$ 。设对象中[和式(5.6-68)的对象条件一样]同样有 p 个零值极点, l 个左半平面的实数极点, 这时

$$\Phi_0(z) = \frac{H''(z)}{z^{p+l+2}} \quad (5.6-70)$$

即过渡过程在 $p+l+2$ 周期内结束。

如 $x(t)$ 像式(5.6-59)那样, t 的最高阶次为 ν , 对象相同, 则

$$\Phi_0(z) = \frac{H'''(z)}{z^{p+l+\nu+1}} \quad (5.6-71)$$

即过渡过程在 $p+l+\nu+1$ 周期内结束。

关于 $H(z), H'(z), H''(z), H'''(z)$ 的计算, 要使用具有 m 参数的 Z 变换, 可参阅参考文献[16]。

10.2 极点配置法

假如 $x(t)$ 为一未知的时间函数, 或虽知其形式如式(5.6-59)但其系数是可变的, 就不能用有限过渡过程时间综合法。更一般的情况下, 可使用极点配置法。和连续控制系统中使用的极点配置法几乎完全一样。设闭环系统特征方程式 $1 + W_1(z)W_2(z) = 0$ 有两个主根 $e^{(-\sigma_0 \pm j\omega_0)T}$ 及 $e^{(-\sigma_0 - j\omega_0)T}$ (相当于 s 平面上有一 $-\sigma_0 \pm$



$j\omega_0$, 即一对共轭复根), 或加一主根 $e^{-\beta T}$ 。这时闭环系统的过渡过程主要受这几个主导根的影响。设计时, 使闭环系统特征方程式中主根和规定的数值相符, 就是完成设计了。具体计算方法如下。

10·2·1 根轨迹法

连续控制系统中在 S 平面上画根轨迹的方法完全适用于离散控制系统中在 Z 平面上画根轨迹。详细叙述见参考文献[16]。

【例 5·6-2】

$$W_2(s) = \frac{1 - e^{-T}}{s^2(1 + 0.1s)(1 + 0.05s)}, T = 0.1s$$

输入 $x(t) = t$, 系统框图见图 5·6-11, $W_1(s) = 1$ 。要求综合 $W_1(z) = kW_1'(z)$, $W_1'(z)$ 中的 Z 的最高阶次的系数为 1。同时开环系统速度放大系数 $K_v = KT > 1.5$ 时, 闭环系统特征方程中两主根为一对共轭复根

$$e^{(-\xi \pm j\omega_0)T}, \xi = 0.7$$

解 在 Z 平面上画出 $Z = e^{(-\xi \pm j\omega_0)T}$ 的根轨迹线, ($T = 0.1, \xi = 0.7, \omega_0 = 0 \rightarrow \infty$), 图 5·6-14a, b 中曲线 1 即

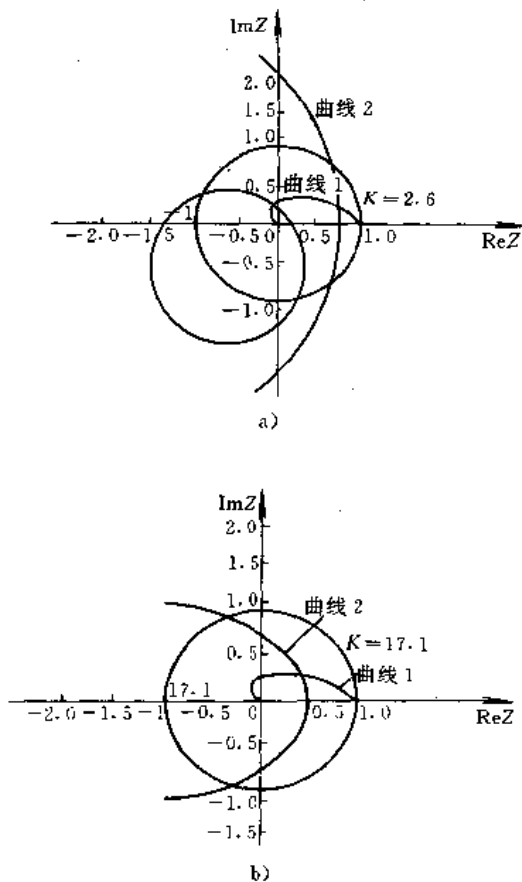


图 5·6-14 例 5·6-2 离散系统根轨迹

为这个根轨迹线。先使 $W_1(z) = 1$,

$$KW_2(z) = \frac{K \cdot 0.0164(Z + 0.12)(Z + 1.93)}{(Z - 1)(Z - 0.368)(Z - 0.131)}$$

的根轨迹线如图 5·6-14a 中的曲线 2。求得曲线 2 和曲线 1 交点处 $K = 2.6, K_v = 0.26 < 1.5$ 。不能满足要求。现将 $W_1'(z)$ 改用 $(Z - 0.368)/(Z + 0.95)$, 抵消 $W_2(z)$ 中的一极点。 $KW_2(z) \times W_1'(z)$ 的根轨迹线见图 5·6-14b 中曲线 2。曲线 2 和曲线 1 交点处 $K = 17.1, K_v = 1.71 > 1.5$ 。设计结果完全满足要求。

10·2·2 Z 多项式系数相等法

图 5·6-11 中

$$W_3(s) = 1, W_1(z) = \frac{M_1(z)}{D_1(z)}, W_2(z) = \frac{M_2(z)}{D_2(z)}$$

则闭环系统特征方程式

$$H(z) = D_1(z)D_2(z) + M_1(z)M_2(z) \tag{5·6-72}$$

如 $H(z)$ 的两个主根为 $e^{(-\xi \pm j\omega_0)T}$, 则 $H(z)$ 应为

$$H(z) = (Z^2 - 2Ze^{-\xi T} \cos \omega_0 T + e^{-2\xi T}) \cdot A(z) \tag{5·6-73}$$

$A(z) = A_1 Z^l + \dots + A_0$ 。使式 (5·6-72) 和式 (5·6-73) 中的 Z 同阶次系数相等, 可得到一线性方程组。同时, 为保证 $A(z), D_1(z)$ 为稳定多项式, 令 $Z = (1 + w)/(1 - w)$, 代入 $A(z), D_1(z)$, 用赫尔维茨准则求得 $A(z), D_1(z)$ 中系数的约束不等式, 以保证 $A(z) = 0, D_1(z) = 0$ 的根都在 Z 平面单位圆内。利用上述线性方程组及不等式, 可求出 $D_1(z), M_1(z)$ 的系数, 以及闭环系统特征方程式的其他根, 即 $A(z) = 0$ 的根。

【例 5·6-3】

$$W_2(s) = \frac{30(1 - e^{-Ts})}{s^2(1 + 0.1s)}, T = 0.1s$$

输入为阶跃函数。要求闭环系统特征方程式两主根为 $e^{(-1.5 \pm j1.5)T}$, 求 $W_1(z)$

解
$$W_2(z) = \frac{1.104(Z + 0.718)}{(Z - 1)(Z - 0.368)}$$

故

$$D_2(z) = (Z - 1)(Z - 0.368)$$

$$M_2(z) = 1.104(Z + 0.718)$$

设 $D_1(z) = C_1 Z + C_0; M_1(z) = B_1 Z + B_0; A(z) = A_1 Z + A_0$

则

$$\begin{aligned} &(Z - 1)(Z - 0.368)(C_1 Z + C_0) \\ &+ 1.104(Z + 0.718)(B_1 Z + B_0) \\ &= (Z^2 - 2Ze^{-1.5} \cos 1.5 + e^{-3})(A_1 Z + A_0) \end{aligned}$$

令 Z 的最高阶次项为 1, 则 $A_1 = C_1 = 1$ 。由上式可求得

$$\begin{aligned} C_0 - 1.368 + 1.104B_1 &= A_0 = 0.03157 \\ 0.368 - 1.368C_0 + 1.104B_0 + 0.7927B_1 \\ &= 0.04979 - 0.03157A_0 \end{aligned}$$



$$|A_0| < 1 \quad |C_0| < 1$$

设 $A_0 = 0.01$, 解得

$$C_0 = 0.4949, B_1 = 0.8515, B_0 = -0.2303$$

$$W_1(z) = \frac{0.8115(Z - 0.27)}{Z + 0.4945}$$

闭环系统特征方程式另有一根为 $Z = -0.01$ 。

10.3 离散控制系统补偿装置

由式(5.6.60)确定的预期特性是否合理, 主要还决定于工程上是否能够实现, 也就是补偿装置能否实现。因为系统原有部分特性一般不是预期特性, 为了实现预期特性, 就需要加入补偿装置, 以使整个系统特性符合预期要求。

按式(5.6.60)确定的需要加入的补偿装置一般都可写成 Z 的有理分式。若其分母阶次 l 高于分子阶次 m , 工程上是能够实现的。若分子阶次高于分母阶次, 则工程上难以实现。

补偿装置的实现条件为 $l \geq m$ 。在离散控制系统中, 实现补偿装置有两种方案: 一是和连续控制系统中相似, 补偿装置是普通线性环节; 二是使用离散补偿装置或计算机。

10.3.1 连续补偿

这种补偿方式及选择补偿装置的方法和连续控制系统完全相同。

1. 串联补偿 图 5.6-15 所示为串联补偿系统框图。图中 $W_1(s)$ 、 $W_2(s)$ 为系统原有部分, $W_d(s)$ 为补偿装置。

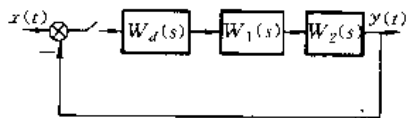


图 5.6-15 串联补偿控制系统框图

按式(5.6.66)确定离散控制系统开环状态的预期特性 $W_0(z)$ 。相对应的拉氏变换式为 $W_0(s)$, 则补偿装置的传递函数应为

$$W_d(s) = \frac{W_0(s)}{W_1(s)W_2(s)} \quad (5.6-74)$$

2. 顺向并联补偿 图 5.6-16 所示系统为顺向并联补偿装置, 其传递函数为

$$W_d(s) = \frac{W_0(s)}{W_2(s)} - W_1(s) \quad (5.6-75)$$

顺向并联补偿装置主要用于改变零点。

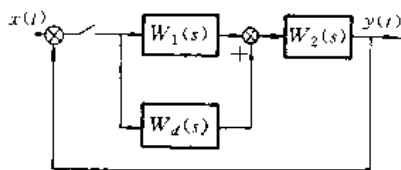


图 5.6-16 顺向并联补偿控制系统框图

3. 并联反馈补偿 图 5.6-17 所示系统为并联反馈补偿装置, 其传递函数为

$$W_d(s) = \frac{W_1(s)}{W_0(s)} - \frac{1}{W_2(s)} \quad (5.6-76)$$

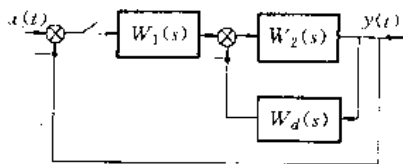


图 5.6-17 并联反馈补偿控制系统框图

求得补偿装置的传递函数后, 可按线性连续控制系统理论确定补偿装置形式、结构及参数。反馈并联补偿装置主要用于改变极点。

10.3.2 离散补偿

1. 串联补偿 串联补偿系统框图如图 5.6-18 所示。在补偿装置前后均有采样开关。系统预期开环特性 $W_0(z)$ 由式(5.6.66)确定, 设系统原有部分 $W_1(s)$ 、 $W_2(s)$ 的 Z 变换式 $Z\{W_1(s)W_2(s)\}$ 为 $W(z)$, 则补偿装置 Z 传递函数为

$$W_d(z) = \frac{W_0(z)}{W(z)} \quad (5.6-77)$$

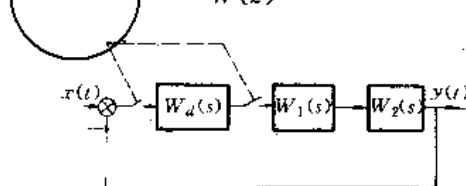


图 5.6-18 离散串联补偿控制系统框图

求得补偿装置 Z 传递函数 $W_d(z)$ 后, 一是可按 Z 变换求得相应的 $W_d(s)$, 再按网络计算理论, 设计补偿装置; 二是可以按图 5.6-19 所示框图实现离散补偿装置。一般 $W_d(z)$ 为 Z 有理分式

$$W_d(z) = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \dots + b_m z^{-m}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots + a_l z^{-l}} \quad (5.6-78)$$

式中 $l \geq m$ 。

图 5.6-19 所示的装置的 Z 传递函数恰好等于式(5.6-78)。从图中得



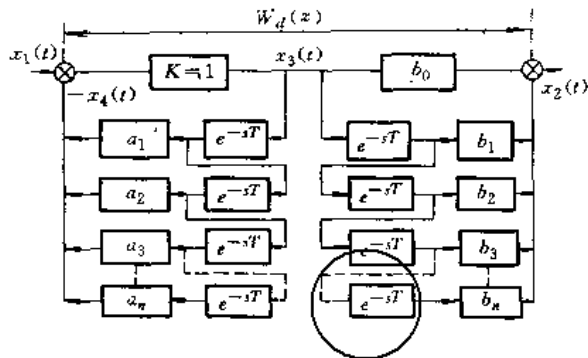


图 5-6-19 离散补偿装置框图

$$x_4(z) = (a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots + a_n z^{-n}) x_3(z) \quad (5-6-79)$$

$$x_1(z) - x_4(z) = x_3(z) \quad (5-6-80)$$

解上述两式,得

$$\frac{X_3(z)}{X_1(z)} = \frac{1}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots + a_n z^{-n}} \quad (5-6-81)$$

由图中知又有如下关系:

$$\frac{x_2(z)}{x_3(z)} = b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \dots + b_m z^{-m} \quad (5-6-82)$$

将式(5-6-81)、式(5-6-82)相乘得

$$\frac{x_2(z)}{x_1(z)} = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \dots + b_m z^{-m}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots + a_n z^{-n}} \quad (5-6-83)$$

比较式(5-6-78)及式(5-6-83)知,图 5-6-19 即为式(5-6-78)所表示的补偿装置框图。这类型的补偿装置在工程上应用很广泛。

2. 并联补偿 图 5-6-20 为并联补偿离散控制系统框图。其开环离散控制系统的 Z 传递函数为

$$W_0(z) = W_1 W_2(z) + W_1(z) W_d(z)$$

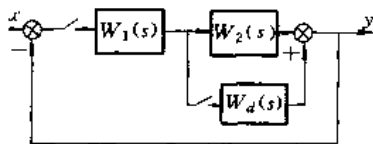


图 5-6-20 并联补偿离散控制系统框图

它应该等于给定的预期特性 $W_0(z)$, 由此得

$$W_d(z) = \frac{W_0(z) - W_1 W_2(z)}{W_1(z)} \quad (5-6-84)$$

根据上式,可以求得相应的 $W_d(s)$, 可用线性网络

实现,或者用图 5-6-19 形式的离散补偿装置实现。

10-3-3 采用数字计算机实现离散补偿

根据上面讨论,求得的补偿装置的 Z 传递函数 $W_d(z)$ 一般都可以用式(5-6-83)形式来表示。将该式左右乘开,得

$$\begin{aligned} & (1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots + a_n z^{-n}) x_2(z) \\ &= (b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \dots + b_m z^{-m}) x_1(z) \end{aligned} \quad (5-6-85)$$

利用 Z 变换滞后定理,可求得 x_1, x_2 原函数关系式:

$$\begin{aligned} & x_2(nT) + a_1 x_2[(n-1)T] + a_2 x_2[(n-2)T] \\ &+ \dots + a_n x_2[(n-l)T] \\ &= b_0 x_1(nT) + b_1 x_1[(n-1)T] + b_2 x_1[(n-2)T] \\ &+ \dots + b_m x_1[(n-m)T] \end{aligned} \quad (5-6-86)$$

式中, $x_1(nT)$ 和 $x_2(nT)$ 为现时瞬间输入和输出函数的数值, $x_1[(n-k)T]$ 和 $x_2[(n-k)T]$ 是 kT 时间之前的输入和输出函数值。

如果把 $x_1[(n-m)T], x_1[(n-m-1)T], \dots, x_1[(n-1)T]$ 和 $x_2[(n-l)T], x_2[(n-l-1)T], \dots, x_2[(n-1)T]$ 的数值相应地存储在存储器中,现时输入信号为 $x_1(nT)$, 则根据式(5-6-86)可求得其对应的输出信号

$$\begin{aligned} x_2(nT) = & \{b_0 x_1(nT) + \{b_1 x_1[(n-1)T] \\ &+ b_2 x_1[(n-2)T] + \dots + b_m x_1[(n-m)T]\} \\ &- \{a_1 x_2[(n-1)T] + a_2 x_2[(n-2)T] \\ &+ \dots + a_l x_2[(n-l)T]\} \end{aligned} \quad (5-6-87)$$

11 离散控制系统状态空间表达式

11-1 离散控制系统的状态方程

线性定常离散系统一般可由下述状态方程描述:

$$x(k+1) = Px(k) + Qu(k) \quad (5-6-88)$$

$$y(k) = Cx(k) + Du(k) \quad (5-6-89)$$

式中 $x(k)$ —— n 维状态矢量;

$y(k)$ —— m 维输出矢量;

$u(k)$ —— r 维输入矢量;

P —— $n \times n$ 维系统矩阵;

Q —— $n \times r$ 维驱动矩阵;

C —— $m \times n$ 维输出矩阵;

D —— $m \times r$ 维传输矩阵。

上式描述的系统的状态(矢量)方程解为



$$x(k) = P^k x_0 + \sum_{i=0}^{k-1} P^{k-1-i} Q u(i) \quad (5.6-90)$$

11.2 连续系统的离散化

设连续控制系统的状态方程为

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (5.6-91)$$

$$y(t) = Cx(t) + Du(t) \quad (5.6-92)$$

以采样周期 T 离散化后的离散系统的状态方程为

$$x(k+1) = Px(k) + Qu(k) \quad (5.6-93)$$

$$P = e^{AT}$$

$$Q = \left[\int_0^T e^{A\zeta} d\zeta \right] B \quad (5.6-94)$$

11.3 单输入单输出离散系统的状态空间表达式

设已知单输入单输出离散系统的差分方程为

$$y(k+n) + a_1 y(k+n-1) + \dots + a_n y(k) = bu(k) \quad (5.6-95)$$

令 $x_1(k) = y(k), x_2(k) = y(k+1), x_3(k) = y(k+2), \dots, x_n(k) = y(k+n-1)$, 则得

$$\left. \begin{aligned} x_1(k+1) &= x_2(k) \\ x_2(k+1) &= x_3(k) \\ &\vdots \\ x_{n-1}(k+1) &= x_n(k) \\ x_n(k+1) &= -a_n x_1(k) - a_{n-1} x_2(k) \dots \\ &\quad - a_1 x_n(k) + bu(k) \end{aligned} \right\} \quad (5.6-96)$$

$$y(k) = x_1(k) \quad (5.6-97)$$

将上式改写为矩阵形式, 即单输入单输出离散系统的状态方程:

$$x(k+1) = Px(k) + Qu(k) \quad (5.6-98)$$

式中系统矩阵

$$P = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & & & & & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \\ -a_n & -a_{n-1} & \dots & & & -a_1 \end{bmatrix} \quad (5.6-99)$$

输入矩阵

$$Q = [0, 0, \dots, 0, b]^T$$

输出矩阵

$$C = [1, 0, \dots, 0]$$

传输矩阵 $D=0$, 状态矢量

$$x(k) = [x_1(k), x_2(k), \dots, x_n(k)]^T$$

当输入函数 $u(k)$ 含有高阶差分情况, 应按下述方法变换。设单输入单输出离散系统差分方程为

$$\begin{aligned} &y(k+n) + a_1 y(k+n-1) + a_2 y(k+n-2) \\ &+ \dots + a_n y(k) \\ &= b_0 u(k+n) + b_1 u(k+n-1) + \dots + b_n u(k) \end{aligned} \quad (5.6-100)$$

设状态矢量为

$$\left. \begin{aligned} x_1(k) &= y(k) - h_0 u(k) \\ x_2(k) &= x_1(k+1) - h_1 u(k) \\ x_3(k) &= x_2(k+1) - h_2 u(k) \\ &\vdots \\ x_n(k) &= x_{n-1}(k+1) - h_{n-1} u(k) \end{aligned} \right\} \quad (5.6-101)$$

式中 $h_0 = b, h_1 = b_1 - a_1 h_0, h_2 = b_2 - a_1 h_1 - a_2 h_0, \dots, h_n = b_n - a_1 h_{n-1} - \dots - a_{n-1} h_1 - a_n h_0$

式(5.6-101)的矩阵形式即单输入单输出离散系统的状态空间表达式

$$x(k+1) = Px(k) + Qu(k) \quad (5.6-102)$$

$$y(k) = Cx(k) + Du(k) \quad (5.6-103)$$

式中

$$P = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & & & & & \vdots \\ -a_n & -a_{n-1} & \dots & & -a_2 & -a_1 \end{bmatrix}$$

$$Q = [h_1, h_2, \dots, h_n]^T$$

$$C = [1, 0, \dots, 0]$$

$$D = [b_0]$$

初始状态也作相应变化:

$$\left. \begin{aligned} x_1(0) &= y(0) - h_0 u(0) \\ x_2(0) &= y(1) - h_0 u(1) - h_1 u(0) \\ x_3(0) &= y(2) - h_0 u(2) - h_1 u(1) - h_2 u(0) \\ &\vdots \\ x_n(0) &= y(n-1) - h_0 u(n-1) - h_1 u(n-2) \dots \\ &\quad - h_{n-2} u(1) - h_{n-1} u(0) \end{aligned} \right\} \quad (5.6-104)$$

此星公司制作 请尊重版权



第7章 最优控制

1 概述

最优控制问题,是人们从事一切工作都会遇到的普遍性问题。例如,在从事某项工作时,都希望能以最小的代价换取最大的收益。采取什么样的手段或方式才能达到这个目的呢?这就是所要研究的最优控制问题。

例如,生产计划安排问题。现有A与B两种产品,每种产品各有两道工序,分别由两台机器完成这两道工序,根据一些客观约束条件,应如何安排生产计划,才能使总产值最高呢?

又如,要求用给定的厚度和密度的金属板设计一个容器,在要求体积一定的条件下,应如何设计才能使其重量最轻呢?

一枚空空导弹,要求在攻击目标的过程中应使其燃料消耗最小,且脱靶量尽可能小,应如何设计、选择控制规律?

诸如此类的控制问题,都是工程设计中经常碰到的最优控制问题。最优控制是从许多实际工程中提出的一个共性问题。

最优控制问题是相对于某一给定的性能指标进行最优设计问题。指导最优设计的基本理论是极大(小)值原理和动态规划。

2 控制变量无约束的极大值原理

设受控系统状态方程为

$$\dot{x} = f(x, u, t) \quad (5.7-1)$$

$$x(t_0) = x_0 \quad (5.7-2)$$

约束条件为

$$g[x(t_f), t_f] = 0, g \in R^p \quad (5.7-3)$$

指标函数为

$$\begin{aligned} \mathcal{J}[u(\cdot)] = & S[x(t_f), t_f] \\ & + \int_{t_0}^{t_f} L[x(t), u(t), t] dt \end{aligned} \quad (5.7-4)$$

式中 $x \in R^n$ —— 系统的 n 维状态矢量;

$u \in R^r$ —— 系统 r 维控制矢量;

$f(x, u, t)$ —— 定义在 $R^n \times [t_0, t_f] \times R^r$ 上的 n 维矢

量函数;

$g[x(t_f), t_f]$ —— 定义在 $D \times R^n \times [t_0, t_f]$ 上的 p 维矢量函数;

$S[x(t_f), t_f]$ —— 定义在 $D \times [t_0, \infty]$ 上的标量函数;

$D \in R^n, L[x, u, t]$ —— 定义在 $R^n \times [t_0, t_f] \times R^r$ 上的标量函数;

f, g, S, L —— 变元的二次连续可微函数。

所谓最优控制问题,就是求出一个最优控制函数 $u^*(t)$,使系统式(5.7-1)和式(5.7-2)在 $u^*(t)$ 的作用下,由 t_0 时刻从 x_0 出发的轨线 $x(t)$,在 $t=t_f$ 时刻到达由式(5.7-3)表示的目标集,并使由式(5.7-4)表示的指标函数取极大(或极小)。式(5.7-1)及式(5.7-2)对应于 $u^*(t)$ 的解 $x^*(t)$ 叫做最优轨线或极值轨线。相应的指标函数值叫做最优指标值,记为 \mathcal{J}^* 。

在本章下面讨论的问题中约定,用英文黑体小写字母表示列矢量,用英文黑体大写字母表示矩阵,用黑体希腊字母表示行矢量。并约定标量函数对于行矢量的导数为列矢量,标量函数对于列矢量的导数为行矢量。

2.1 t_f 固定, $x(t_f)$ 无约束的情况

终端时间固定,自由端点情况的最优控制问题,就是在式(5.7-1)、式(5.7-2)规定的约束条件下,求泛函式(5.7-4)表示的指标函数的条件极值问题。

定义哈密尔顿(Hamilton)函数 H 为

$$H(x, u, \Psi, t) = -L(x, u, t) + \Psi f(x, u, t) \quad (5.7-5)$$

则 t_f 固定, $x(t_f)$ 自由, $u(t)$ 无约束情况下的极大值原理给出的最优控制函数 $u^*(t)$ 、最优轨线 $x^*(t)$ 及伴随矢量 $\Psi(t)$ 应满足的必要条件是

$$\dot{x}^*(t) = \frac{\partial H[x^*(t), u^*(t), \Psi(t), t]}{\partial \Psi} \quad x(t_0) = x_0$$

$$\dot{\Psi}(t) = -\frac{\partial H[x^*(t), u^*(t), \Psi(t), t]}{\partial x} \quad (5.7-6)$$

$$\Psi(t_f) = -\frac{\partial S[x^*(t_f), t_f]}{\partial x} \quad (5.7-7)$$

$$\frac{\partial H[x^*(t), u^*(t), \Psi(t), t]}{\partial u} = 0 \quad (5.7-8)$$

⊙ 伴随矢量亦称为共态矢量或协状态矢量。



$$H[x^*(t), u^*(t), \Psi(t), t] = \text{const} \quad (\text{对定常系统}) \quad (5.7-9)$$

2.2 t_f 固定, $x(t_f)$ 受约束的情况

在终端状态受如式(5.7-3)表示的约束时,可通过拉格朗日乘子矢量 μ 将受约束的条件极值问题化为无约束的极值问题。等效的约束极值问题的泛函指标函数为

$$\begin{aligned} \mathcal{S}_1[u(\cdot)] = & S[x(t_f), t_f] + \mu g[x(t_f), t_f] \\ & + \int_{t_0}^{t_f} [L(x, u, t) + \psi(\dot{x} - f)] dt \end{aligned} \quad (5.7-10)$$

这样, t_f 固定, $x(t_f)$ 受约束情况下最优控制函数 $u^*(t)$ 、最优轨线 $x^*(t)$ 及伴随矢量 $\psi(t)$ 应满足的必要条件是

$$\dot{x}^*(t) = \frac{\partial H[x^*(t), u^*(t), \Psi(t), t]}{\partial \Psi} \quad x(t_0) = x_0 \quad (5.7-11)$$

$$\dot{\psi}^*(t) = -\frac{\partial H[x^*(t), u^*(t), \Psi(t), t]}{\partial x} \quad (5.7-12)$$

$$\Psi(t_f) = -\frac{\partial S[x^*(t_f), t_f]}{\partial x} - \mu \frac{\partial g[x^*(t_f), t_f]}{\partial x} \quad (5.7-13)$$

$$\frac{\partial H[x^*(t), u^*(t), \Psi(t), t]}{\partial u} = 0 \quad (5.7-14)$$

$$H[x^*(t), u^*(t), \Psi(t), t] = \text{const} \quad (\text{对定常系统}) \quad (5.7-15)$$

2.3 t_f 不固定的情况

在这种情况下,最优控制函数应满足的必要条件与上述两种情况相同,只是哈密顿函数的性质不同。在这种情况下,哈密顿函数具有如下特性

$$\begin{aligned} \frac{\partial S[x^*(t_f^*), t_f^*]}{\partial t_f} \\ - H[x^*(t_f^*), u^*(t_f^*), \Psi^*(t_f^*), t_f^*] = 0 \end{aligned} \quad (5.7-16)$$

当系统为定常系统时,即 S 中不显含 t 时,则

$$H[x^*(t_f^*), u^*(t_f^*), \Psi^*(t_f^*), t_f^*] = 0 \quad (5.7-17)$$

式中, t_f^* 表示最优终端时间, $t_f^* - t_0$ 表示最优过渡过程时间。

在 t_f 不固定,终端又有如式(5.7-3)的约束条件时,伴随矢量终端条件为

$$\Psi(t_f^*) = -\frac{\partial S[x^*(t_f^*), t_f^*]}{\partial x} - \mu \frac{\partial g[x^*(t_f^*), t_f^*]}{\partial x} \quad (5.7-18)$$

3 控制变量受约束的极大值原理

控制变量受约束的极大值原理即庞特里雅金

(Понтрягин)极大值原理。在许多实际工程中,控制函数都是有限的,即控制函数只能在有界闭集表示的控制域 U 中取值。在这种情况下,最优控制函数 $u^*(t)$ 、最优轨线 $x^*(t)$ 、伴随矢量 Ψ 、拉格朗日乘子矢量 μ 应满足的必要条件是

$$\dot{x}^*(t) = \frac{\partial H[x^*(t), u^*(t), \Psi(t), t]}{\partial \Psi} \quad x(t_0) = x_0 \quad (5.7-19)$$

$$\dot{\psi}^*(t) = -\frac{\partial H[x^*(t), u^*(t), \Psi(t), t]}{\partial x} \quad (5.7-20)$$

$$\begin{aligned} \Psi(t_f) = & -\frac{\partial S[x^*(t_f^*), t_f^*]}{\partial x} \\ & - \mu \frac{\partial g[x^*(t_f^*), t_f^*]}{\partial x} \end{aligned} \quad (5.7-21)$$

($x(t_f)$ 自由时,第二项为零)

$$\begin{aligned} H[x^*(t), u^*(t), \Psi(t), t] \\ = \max_{u \in U} H[x^*(t), u(t), \Psi(t), t] \end{aligned} \quad (5.7-22)$$

$$H[x^*(t_f^*), u^*(t_f^*), \Psi(t_f^*), t_f^*] = 0 \quad (5.7-23)$$

(对应于定常系统, t_f 不固定)

$$H[x^*(t_f), u^*(t_f), \Psi(t_f), t_f] = \text{const} \quad (5.7-24)$$

(对应于定常系统, t_f 固定)

极大值原理给出的必要条件是求解最优控制函数 $u^*(t)$ 、最优轨线 $x^*(t)$ 、伴随矢量 Ψ 及拉格朗日乘子矢量 μ 所必需的方程式数目及边界条件。

4 离散极大值原理

设离散系统状态方程为

$$\begin{aligned} x(k+1) = f[x(k), u(k), k] \\ k = 0, 1, 2, \dots, N-1 \end{aligned} \quad (5.7-25)$$

$$x(0) = x_0 \quad (5.7-26)$$

式中 $x(k)$ —— n 维状态矢量;

$u(k)$ —— r 维控制矢量。

控制函数 $u(k)$ 的限制区域为 U , 即

$$u(k) \in U \in R^r \quad (5.7-27)$$

给定指标函数为

$$\mathcal{S}[u(\cdot)] = \sum_{k=0}^{N-1} L_k[x(k), u(k)] + L_N[x(N)] \quad (5.7-28)$$

使式(5.7-28)表示的指标函数达到极小(大)的最优控制函数 $u^*(k)$ 、最优轨线 $x^*(k)$ 、伴随矢量 Ψ 、拉格朗日乘子矢量 μ 同时满足的必要条件是:

$$\begin{aligned} x^*(k+1) = \frac{\partial H[x^*(k), u^*(k), \Psi(k+1), k]}{\partial \Psi(k+1)} \\ x(0) = x_0 \end{aligned} \quad (5.7-29)$$



$$\Psi(k) = \frac{\partial H[x^*(k), u^*(k), \Psi(k+1), k]}{\partial x(k)} \quad (5.7-30)$$

$$\psi(N) = -\frac{\partial L_N[x(N)]}{\partial x(N)} \quad (\text{终端自由}) \quad (5.7-31)$$

$$\text{或 } \psi(N) = -\frac{\partial L_N[x(N)]}{\partial x(N)} - \mu \frac{\partial g[x(N), N]}{\partial x(N)} \quad (5.7-32)$$

(终端受约束)

$$\frac{\partial H[x^*(k), u^*(k), \Psi(k+1), k]}{\partial u(k)} = 0$$

(控制变量无约束情况) (5.7-33)

$$\text{或 } H[x^*(k), u^*(k), \Psi(k+1), k]$$

$$= \max_{u \in U} H[x^*(k), u(k), \Psi(k+1), k] \quad (5.7-34)$$

(控制变量受约束情况)

5 动态规划

动态规划是在研究多级决策过程中发展起来的。目前这种方法在多个领域都得到了广泛的应用。极大值原理给出了设计动态系统最优化问题的完整理论和具体算法,但它必须求解两点边界问题,这在数学上仍然是没有彻底解决的难题。利用动态规划方法可以将两点边界问题转换为初值问题。特别是当输入变量受限制和系统具有非线性时,用极大值原理分析计算都会遇到许多困难,但应用动态规划法,很容易在计算机上获得数值解。

应用动态规划法研究控制系统还有一个重要特点,就是它能够给出最优控制信号与系统状态变量之间的关系,即能够得到最优反馈控制。这一点,在控制系统设计中是非常重要的。

动态规划的基础是“最优原理”,它首先将最优控制问题转换为多级决策过程,然后利用“最优原理”逐级求出最优控制函数。

5.1 最优原理

最优原理可概述为:最优控制策略应具有的性质是,不论初始状态如何,不论初始决策如何选择,其余的决策必须依据第一个决策所形成的状态组成一个最优控制策略。

通俗地说,若想使 N 级决策过程是最优的,则每级过程到最后一级的整个过程都应该是最优决策过程。如从 A 地到 F 地,途经 B, C, D, E 各地,若想从 A 地到 F 地的路程最短,则必须使 E 地到 F 地, D 地到 F 地, C 地到 F 地及 B 地到 F 地各段路程都是最短才

可。

最优原理的正确性可用反证法证明。设某 N 级决策过程最优策略由 N 级决策所构成,它使过程终了时刻的状态变量 $x^* = (x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)^T$ 的某一指标函数 $S(x^*)$ 取极大值。现取这个 N 级决策过程的前 m 级过程,这前 m 级决策采用最优决策。将 m 级决策过程终了后所得到的状态变量记做 $x' = (x_1', x_2', \dots, x_n')$ 。现在证明,若以 x' 做为初始状态,并使用原 N 级决策过程中的后 $(N-m)$ 级决策,则这个 $(N-m)$ 级决策也必然构成一个最优策略。因为,若不然,则必存在另一同级的最优策略,它将使 $S(x^*)$ 取极大值。这样,这个 $(N-m)$ 级决策将同前 m 级决策组成一个由原初始状态开始的最优策略,这与原来的 N 级最优策略相矛盾,因此得证。

5.2 多级决策过程

下面通过一个简单的例子,引出动态规划的概念。

例如资金分配问题。设年初资金为 x_0 , 分配给两个工业部门,如第一个部门分到的资金为 y_0 , 则第二个部门分到的资金为 $x_0 - y_0$ 。到第一年结束时,从第一个部门得到的收益为 $g(y_0)$, 从第二个部门收到收益为 $h(x_0 - y_0)$ 。问应该如何分配资金,使得一年后总的收益 $R_1(x_0, y_0)$ 为最大。用数学描述为

$$R_1(x_0, y_0) = g(y_0) + h(x_0 - y_0) = \max_{0 \leq y_0 \leq x_0} \quad (5.7-35)$$

这个问题归结为选择一个最优的 y_0 值,使得 $R_1(x_0, y_0) = \max$ 。如果 $g(y_0)$ 和 $h(x_0 - y_0)$ 对所有的 $x_0 \geq 0$ 都是连续的,则总可以找到 $R_1(x_0, y_0)$ 关于 y_0 的极大值。

上述问题是一次合理分配资金的问题,叫做一级决策过程。从控制角度看, y_0 可以看做控制量。

再进一步研究该资金的分配问题。在一年之后,由于设备折旧等原因,第一个部门的资金已不是 y_0 , 而折旧为 ay_0 ($a = \text{const}, 0 \leq a \leq 1$); 第二个部门的资金折旧为 $b(x_0 - y_0)$ ($b = \text{const}, 0 \leq b \leq 1$)。第一年结束时剩下的总资金

$$x_1 = ay_0 + b(x_0 - y_0) \quad (5.7-36)$$

x_1 作为第二年开始的初始资金(这里为了简化所讨论的问题,没有将第一年的收益加入第二年的资金中去)。在第二年开始时,把资金 x_1 在第一个部门和第二个部门之间进行重新分配。如果第一个部门分到 y_1 , 第二个部门分到 $x_1 - y_1$ 。第二年结束时,第一个部



门给出的收益为 $g(y_1)$, 第二个部门给出的收益为 $h(x_1 - y_1)$ 。那么第二年结束时的两年总收益

$$R_2(x_0, y_0, y_1) = g(y_0) + h(x_0 - y_0) + g(y_1) + h(x_1 - y_1) \quad (5.7-37)$$

这时应该将资金分配 y_0 和 y_1 选择得使两年的总收益 $R_2(x_0, y_0, y_1)$ 为最大。这个问题称为二级决策问题。式(5.7-37)中的 x_0 是已知的, x_1 可以用 x_0, y_0 表示, 如式(5.7-36)所示。因此二级决策过程中, 只有 y_0, y_1 是未知的, 并且它们满足不等式约束条件

$$0 \leq y_0 \leq x_0 \quad 0 \leq y_1 \leq x_1 \quad (5.7-38)$$

因此, 求 $R_2(x_0, y_0, y_1)$ 关于 y_0, y_1 的极值问题, 就是求两个变量 y_0, y_1 的函数极值问题。

以此类推, 按上述原则, 将资金分配 N 次的过程称为 N 级决策过程。在第 N 年结束时, N 年的总收益

$$\begin{aligned} R_N(x_0, y_0, y_1, \dots, y_{N-1}) &= g(y_0) + h(x_0 - y_0) + g(y_1) + h(x_1 - y_1) \\ &\quad + g(y_2) + h(x_2 - y_2) + \dots + g(y_{N-1}) \\ &\quad + h(x_{N-1} - y_{N-1}) \end{aligned} \quad (5.7-39)$$

式中

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= ay_0 + b(x_0 - y_0) & 0 \leq y_0 \leq x_0 \\ x_2 &= ay_1 + b(x_1 - y_1) & 0 \leq y_1 \leq x_1 \\ x_3 &= ay_2 + b(x_2 - y_2) & 0 \leq y_2 \leq x_2 \\ &\vdots \\ x_{N-1} &= ay_{N-2} + b(x_{N-2} - y_{N-2}) & \begin{aligned} 0 \leq y_{N-2} \leq x_{N-2} \\ 0 \leq y_{N-1} \leq x_{N-1} \end{aligned} \end{aligned} \right\} \quad (5.7-40)$$

N 级决策过程问题, 是选择控制变量 $y_0, y_1, y_2, \dots, y_{N-1}$, 以使 N 年的总收益 $R_N(x_0, y_0, y_1, \dots, y_{N-1})$ 达到最大值的问题。在这个问题中, x_1, x_2, \dots, x_{N-1} 都能表示为变量 y_0, y_1, \dots, y_{N-1} 的函数, 因此它们不是独立变量, y_0, y_1, \dots, y_{N-1} 是独立的控制变量, 且受不等式式(5.7-40)的约束。

动态规划就是在处理多级决策过程中发展起来的一种方法。这种方法的实质是, 将求解多元函数极值问题转化为多次求解一元函数的极值问题。动态规划就是把 N 级决策过程转换为 N 个单级决策过程来处理了。

对于一级决策过程, 如果用 $W_1(x_0)$ 表示收益 $R_1(x_0, y_0)$ 的极大值, 则 $W_1(x_0)$ 可由下式表示:

$$\begin{aligned} W_1(x_0) &= \max_{0 \leq y_0 \leq x_0} R_1(x_0, y_0) \\ &= \max_{0 \leq y_0 \leq x_0} [g(y_0) + h(x_0 - y_0)] \end{aligned} \quad (5.7-41)$$

设 y_{01} 表示一级决策过程的最优 y_0 值。在式(5.7-41)

中只有一个变量 y_0 , 因此可以比较容易地求得 $R_1(x_0, y_0)$ 的极大值。 R_1 的极大值 $W_1(x_0)$ 只与 x_0 有关, y_0 的最优值 y_{01} 也只与 x_0 有关。

对于二级决策过程, 如果用 $W_2(x_0)$ 表示二级决策过程的总收益 $R_2(x_0, y_0, y_1)$ 的极大值, 即

$$\begin{aligned} W_2(x_0) &= \max_{\substack{0 \leq y_0 \leq x_0 \\ 0 \leq y_1 \leq x_1}} R_2(x_0, y_0, y_1) \\ &= \max_{\substack{0 \leq y_0 \leq x_0 \\ 0 \leq y_1 \leq x_1}} [g(y_0) + h(x_0 - y_0) \\ &\quad + g(y_1) + h(x_1 - y_1)] \end{aligned} \quad (5.7-42)$$

第二级的初始值为 $x_1 = ay_0 + b(x_0 - y_0)$ 。如果想使二级决策过程的总收益为最大, 那么, 不论第一级 y_0 如何选择, 第一级留给第二级的初值 x_1 应当合理地加以利用, 以使第二级收益 $g(y_1) + h(x_1 - y_1)$ 为最大。这是动态规划的核心思想, 是一个非常重要的概念。根据这个概念, 应取第二级收益 $g(y_1) + h(x_1 - y_1)$ 为极大值 $W_1(x_1)$ 。将 $x_1 = ay_0 + b(x_0 - y_0)$ 代入 $W_1(x_1)$, 得

$$W_1(x_1) = W_1[ay_0 + b(x_0 - y_0)] \quad (5.7-43)$$

经过这样处理后, 二级决策过程的总收益

$$R_2(x_0, y_0, y_1) = g(y_0) + h(x_0 - y_0) + W_1[ay_0 + b(x_0 - y_0)] \quad (5.7-44)$$

这时应当将 y_0 选择得使二级决策过程的总收益 R_2 取极大值, 即

$$W_2(x_0) = \max_{0 \leq y_0 \leq x_0} \{g(y_0) + h(x_0 - y_0) + W_1[ay_0 + b(x_0 - y_0)]\} \quad (5.7-45)$$

上式称为函数递推方程或别尔曼(Bellman)方程, 它表示了函数 $W_2(x_0)$ 和 $W_1[ay_0 + b(x_0 - y_0)]$ 之间的关系。原来的 $R_2(x_0, y_0, y_1)$ 中有两个变量 y_0 和 y_1 , 而式(5.7-45)中只有一个变量 y_0 。因此, 利用函数递推方程, 将求解二元函数极大值问题转换为求解一个变量的函数的极大值了。 $R_2(x_0, y_0, y_1)$ 的极大值 $W_2(x_0)$ 只与初值 x_0 、级数 2 有关。假设二级决策过程的 y_0 最优值为 y_{02} ($y_{02} \neq y_{01}$), y_{02} 只与 x_0 有关。

对于三级决策过程, 如用 $W_3(x_0)$ 表示三级决策过程总收益 $R_3(x_0, y_0, y_1, y_2)$ 的极大值

$$\begin{aligned} W_3(x_0) &= \max_{\substack{0 \leq y_0 \leq x_0 \\ 0 \leq y_1 \leq x_1 \\ 0 \leq y_2 \leq x_2}} R_3(x_0, y_0, y_1, y_2) \\ &= \max_{\substack{0 \leq y_0 \leq x_0 \\ 0 \leq y_1 \leq x_1 \\ 0 \leq y_2 \leq x_2}} [g(y_0) + h(x_0 - y_0) + g(y_1) \\ &\quad + h(x_1 - y_1) + g(y_2) + h(x_2 - y_2)] \end{aligned} \quad (5.7-46)$$

进一步建立 W_3 和 W_2 的函数递推方程式。三级决策过



程的总收益为第一级收益加上后两级收益。第二级的初始值为 $x_1 = ay_0 + b(x_0 - y_0)$ 。如果想使三级决策过程的总收益为最大,那么无论 y_0 如何选择,都应合理地使用第二级的初始值 x_1 ,即应使第二级和第三级的总收益为最大值。根据二级决策过程的计算结果,后两级的收益的最大值为

$$W_2(x_1) = W_2[ay_0 + b(x_0 - y_0)] \quad (5.7-47)$$

于是式(5.7-46)可写成

$$W_3(x_0) = \max_{0 \leq y_0 \leq x_0} \{g(y_0) + h(x_0 - y_0) + W_2[ay_0 + b(x_0 - y_0)]\} \quad (5.7-48)$$

利用上述函数递推方程,将求取三个变量的函数的收益 $R_3(x_0, y_0, y_1, y_2)$ 的极大值问题转化为求取一个变量的函数的极大值问题。假设三级决策过程的最优值为 y_{03} ($y_{03} \neq y_{02} \neq y_{01}$),则 y_{03} 只与 x_0 有关。

同理,可将上述思想推广到 N 级决策过程,得到关于 N 级决策过程的函数递推方程:

$$W_N(x_0) = \max_{0 \leq y_0 \leq x_0} \{g(y_0) + h(x_1 - y_0) + W_{N-1}[ay_0 + b(x_1 - y_0)]\} \quad (5.7-49)$$

利用式(5.7-49)给出的递推关系,将求取 N 个变量的函数 $R_N(x_0, y_0, y_1, \dots, y_{N-1})$ 的极大值问题转换为求 N 次一元函数的极大值问题了。 R_N 的极大值只与 x_0 和级数 N 有关。假定 N 级决策过程最优的 y_0 值为 y_{0N} ,则 y_{0N} 只与 x_0 有关。

根据式(5.7-41)算出 $W_1(x_0)$,然后按式(5.7-49)函数递推方程可算出 $W_2(x_0), W_3(x_0), \dots, W_N(x_0)$ 。在求解过程中,除了求出 W_1, W_2, \dots, W_N 外,还分别算出了一级决策过程、二级决策过程、三级决策过程……和 N 级决策过程的第一级过程的 y_0 的最优值 $y_{01}, y_{02}, \dots, y_{0N}$ 。这些值都是 x_0 的函数,可表示为 $y_{01}(x_0), y_{02}(x_0), \dots, y_{0N}(x_0)$ 。根据上述方法, N 次求解单变量函数的极值,只是找到了 N 级决策过程的第一级过程的 y_0 的最优值 y_{01} ,其余各级过程的最优控制值还需要进一步确定。

N 级决策的第二级,相当于初始值为 $x_1 = ay_{0N}(x_0) + b[x_0 - y_{0N}(x_0)]$ 的 $(N-1)$ 级决策过程的第一级。因此, N 级决策过程的第二级的 y_1 的最优值为 $y_{0,N-1}(x_1)$ 。

N 级决策过程的第三级,相当于初始值为 $x_2 = ay_{0,N-1}(x_1) + b[x_1 - y_{0,N-1}(x_1)]$ 的 $(N-2)$ 级决策过程的第一级。这一级的 y_2 的最优值为 $y_{0,N-2}(x_2)$ 。

依此类推, N 级决策过程的第 N 级,相当于初始值为 $x_{N-1} = ay_{0,2}(x_{N-2}) + b[x_{N-2} - y_{0,2}(x_{N-2})]$ 的一级

决策过程。 y_{N-1} 的最优值为 $y_{0,1}(x_{N-1})$ 。这样,得到的 N 级决策过程的各级过程的最优控制值为

$$y_0 = y_{0,N}(x_0) \quad y_1 = y_{0,N-1}(x_1) \\ y_2 = y_{0,N-2}(x_2) \dots y_{N-1} = y_{0,1}(x_{N-1}) \quad (5.7-50)$$

式中, x_1, x_2, \dots, x_{N-1} 是按式(5.7-40)计算得到的。

5.3 最优控制系统设计

在清楚了动态规划概念的基础上,将进一步讨论如何应用动态规划的方法设计最优控制系统的问题。假定所讨论问题的初始条件已给定,终端状态自由,设受控系统的状态方程为

$$x_{k+1} = f_k(x_k, u_k), x(t_0) = x_0 \\ k = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (5.7-51)$$

式中, $f_k \in R^n, x \in R^n, u \in D(x) \in R^p$ 。上式表示 N 级决策过程的状态转移方式。对照上节讨论的资金分配问题来看,它可以是逐年资金转移方式。这个 N 级决策过程的每级指标函数为

$$r_k(x_k, u_k) \quad (5.7-52)$$

N 级过程总的指标函数为

$$R_{0,N} = \sum_0^{N-1} r_k(x_k, u_k) \quad (5.7-53)$$

将式(5.7-52)及式(5.7-53)与前面讨论过的资金分配的例子对应起来看,就是每年的收益及总的收益。

对于这样一个多级过程的控制问题(任何一个控制过程都可以经过离散化后分解为多级控制过程),根据最优原理和动态规划的函数递推方程,从初始点出发到最后一级整个过程中所选择的最优(决策)控制函数,应使这个过程构成最优过程,且这个过程经过状态 x_k ,从 x_k 开始,后面的子最优(决策)控制函数必然使得由 x_k 出发的后面的子过程构成最优过程。这个性质对于任意最优过程及其任意子过程都是成立的。根据这个性质和函数递推方程的概念,一个 N 级(决策)控制过程的最优(决策)控制函数应该这样确定:用后面部分最优子(决策)控制函数逐步向前递推地求取全过程的最优(决策)控制函数。即从倒数第一级开始计算,逐步向前递推求取各级最优(决策)控制函数。但在计算过程中,由于事先并不能确切知道最优过程经过的各级状态 x_1^*, x_2^* ,所以在计算时,应对各段可达状态(各段可达状态集合内的所有点)进行多次计算,然后再根据确定的初始条件计算出通过各段状态的最优过程。

式(5.7-53)表示的指标函数,对于任意 k 的情况,可写成



$$R_{k,N}[x_k, u_{k,N}(x_k)] = r_k(x_k, u_k) + R_{k+1,N}[x_{k+1}, u_{k+1,N}(x_{k+1})] \quad (5\cdot7-54)$$

式中, $u_{k,N}(x_k)$ 表明最优(决策)控制函数 $u_{k,N}$ 是状态 x_k 的函数, 即控制是反馈控制。设对所有可能的状态 x_{k+1} 都已经求出了后部分子过程的最优子(决策)控制函数 $u_{k+1,N}^*(x_{k+1})$, 相应的后部分子过程的指标函数 $R_{k+1,N}$ 达到了最优值(极大或极小), 并以 $W_{k+1,N}$ 表示。这时应该将最优(决策)控制函数 $u_{k,N}$ 选择得使下式达到最优值:

$$R_{k,N}[x_k, u_{k,N}(x_k)] = r_k(x_k, u_k) + W_{k+1,N}[x_{k+1}, u_{k+1,N}^*(x_{k+1})] \quad (5\cdot7-55)$$

即求

$$\text{opt}_{u_k \in D(x_k)} \{r_k(x_k, u_k) + W_{k+1,N}[x_{k+1}, u_{k+1,N}^*(x_{k+1})]\} \quad (5\cdot7-56)$$

的解 $u_k^*(x_k)$ 。式中, $D(x_k)$ 为允许的(决策)控制函数的集合。根据式(5·7-56)求得的 $u_k^*(x_k)$ 和 $u_{k+1,N}^*(x_{k+1})$ 组成了 $u_{k,N}^*(x_k)$ ——最优(决策)控制函数。这样, 求解一个最优控制过程的数学表示式可写成

$$\left. \begin{aligned} W_{k,N}(x_k) &= \text{opt}_{u_k \in D(x_k)} \{r_k(x_k, u_k) + W_{k+1,N}(x_{k+1})\} \\ x_k &\in \tilde{x}_k \\ x_{k+1} &= f_k(x_k, u_k) \\ W_{N,N}(x_N) &= 0, \quad k = N-1, \dots \end{aligned} \right\} \quad (5\cdot7-57)$$

这个表示式称为动态规划方程, 记为 DP 方程。式中, \tilde{x}_k 是每段的 x_k 可达集合。 $W_{N,N}(x_N) = 0$ 表示从 N 到 N 段过程的指标函数为零, 这是显然的。初始条件 x_0 可以是固定的, 也可以是自由的。

上述 DP 方程给出了设计 N 级最优(决策)控制过程的各级最优(决策)控制函数的原则。这样设计得到的最优(决策)控制函数是状态的函数, 所得的系统是一个反馈系统。

6 时间最优控制

时间最优控制是工程实际中经常遇到的一类最优控制问题。例如惯性导航系统中的快速对准问题, 某些热处理过程中的温度控制问题, 等等。这类问题可根据极大值原理、动态规划和李雅普诺夫理论来处理。

6.1 时间最优控制的必要条件

设受控系统的状态方程为

$$\dot{x}(t) = f[x(t), u(t), t], x \in R^n \quad (5\cdot7-58)$$

$$x(t_0) = x_0 \quad (5\cdot7-59)$$

给定终端状态为 $x(t_f) = x_f$ 。这样终端约束条件可表示为

$$x(t_f) - x_f = 0 \quad (5\cdot7-60)$$

控制变量约束为

$$u(t) \in U \subset R^r \quad (5\cdot7-61)$$

要求选择允许的最优控制函数 $u^*(t)$, 使得式(5·7-58)表示的系统从 x_0 出发转移到终端状态 x_f 的过程所需要的时间最短, 即 $(t_f - t_0) = \min$ 。 t_f 是过程终止时间, 是待求的。 t_0 是开始时间, 已知的。这样, 时间最优控制问题的性能指标函数可表示为

$$J[u(\cdot)] = \int_{t_0}^{t_f} dt = t_f - t_0 \quad (5\cdot7-62)$$

对于定常系统, 哈密尔顿函数为

$$H[x, \psi, u] = -1 + \psi f(x, u) \quad (5\cdot7-63)$$

根据极大值原理给出的结果, 时间最优控制的最优控制函数应满足的必要条件为

$$\dot{x}^*(t) = \frac{\partial H(x^*, u^*, \psi)}{\partial \psi} \quad x(t_0) = x_0 \quad (5\cdot7-64)$$

$$\dot{\psi}(t) = -\frac{\partial H(x^*, u^*, \psi)}{\partial x} \quad \psi(t_f) = -\mu \quad (5\cdot7-65)$$

$$H(x^*, u^*, \psi) = \max_{u \in U} H(x^*, u^*, \psi) \quad (5\cdot7-66)$$

$$\psi(t) f(x^*, u^*) = 1 \quad t \in [t_0, t_f] \quad (5\cdot7-67)$$

当系统是时变系统时, 可通过引入附加变量的方法将系统归化为定常系统处理。

当受控系统为线性系统时, 系统状态方程为

$$\dot{x}(t) = A(t)x(t) + B(t)u(t) \quad (5\cdot7-68)$$

$$x(t_0) = x_0$$

若控制函数的控制域是一个有界闭集, 且是一个方体时, 即

$$U = \left\{ u = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_r \end{bmatrix} \mid |u_i| \leq \alpha_i, i = 1, 2, \dots, r \right\} \quad (5\cdot7-69)$$

时, 根据时间最优控制所应该满足的必要条件可求出时间最优控制函数为

$$u_i^*(t) = -\alpha_i \text{sgn}[\mu \Phi(t_f, t) b_i(t)] \quad i = 1, 2, \dots, r \quad (5\cdot7-70)$$

或

$$[u^*(t)]^T = -\alpha \mu \Phi(t_f, t) B(t) / |\mu \Phi(t_f, t) B(t)| \quad (5\cdot7-71)$$

式中 α ——由控制域给定的常数;

$\phi(t_2, t_1)$ ——系统(5·7-68)的基本解阵;

纯星公司制作 请尊重原作者版权



$b_i(t)$ —— $B(t)$ 阵的第 i 列矢量。

由式(5·7-70)和式(5·7-71)可见,时间最优控制函数是时间 t 及 μ 的函数。这里的 n 维行矢量 μ 是待定的,因此尚不能直接给出最优控制函数。 μ 和终端状态有关,终端状态又取决于终端时间 t_f ,终端时间也是待定的。只要这 $(n+1)$ 个未知量确定了,最优控制函数就确定了。这 $(n+1)$ 个未知量可联立求解,如下两个方程:

$$x_f = \Phi(t_f, t_0)x_0 + \int_{t_0}^{t_f} \Phi(t_f, \tau)B(\tau)u^*(\tau, \mu)d\tau \quad (5\cdot7-72)$$

$$\begin{aligned} H[x^*(t_f), u^*(t_f), \psi(t_f), t_f] \\ = -1 + \psi(t_f)[A(t_f)x_f + B(t_f)u^*(t_f, \mu)] \\ = 0 \end{aligned} \quad (5\cdot7-73)$$

或

$$-1 = \mu[A(t_f)x_f + B(t_f)u^*(t_f, \mu)] \quad (5\cdot7-74)$$

由式(5·7-70)、式(5·7-71)表示的控制函数施加于系统进行控制的方式称为 Bang-Bang 控制。一般,只有继电型非线性系统才能实现时间最优控制。上述结果是直接由极大值原理推出的。

6·2 时间最优控制的切换曲面

通过前节讨论,清楚地看到,如果控制函数的控制域是有界闭集,则时间最优控制系统是 Bang-Bang 型继电控制系统。控制函数取控制域的边界值。如果能够确定控制函数的切换条件,那么关于时间最优控制的问题就得到了解决。所以时间最优控制系统的设计问题,就归结为确定控制函数的切换曲面问题了。

对于式(5·7-68)所示的线性系统,设由式(5·7-69)表示的控制域的 $a_1 = a_2 = \dots = a_r = 1$ 时,它的切换曲面的参数表示式为

$$\left. \begin{aligned} x_0 &= - \int_{t_0}^{t_f} \Phi(t_0, \tau)B(\tau) \operatorname{sgn}[\lambda \Phi(t_0, \tau)B(\tau)]^T d\tau \\ \lambda b_i(t) &= 0 \quad |\lambda| = 1 \end{aligned} \right\} \quad (5\cdot7-75)$$

式中 $\Phi(t_2, t_1)$ ——线性系统的基本解阵;

$b_i(t)$ —— $B(t)$ 阵的第 i 列矢量;

λ ——行矢量;

$$\lambda = -\mu \Phi(t_f, t_0) \quad (5\cdot7-76)$$

因 λ 的大小不影响切换曲面的计算,故计算时取 $|\lambda| = 1$ 。让 t_f 从 t_0 变化到 ∞ ,即可按式(5·7-75)求得切换曲面上的状态,这些状态编织成了切换曲面的一半。另一半由 $(-\lambda)$ 条件确定。切换曲面又称为开关曲面。

对于线性定常系统,当输入是单输入的情况下,这时

$$\Phi(t, t_0) = e^{A(t-t_0)} \quad B = b \quad (5\cdot7-77)$$

式(5·7-75)表示的切换曲面的参数表示式可简化为

$$\left. \begin{aligned} x_0 &= \int_0^{t_f} y \operatorname{sgn}[\lambda A y(s) + \lambda b] ds \\ \lambda b &= 0, \quad |\lambda| = 1 \end{aligned} \right\} \quad (5\cdot7-78)$$

式中

$$y(t) = -Ay - b, \quad y(0) = 0 \quad (5\cdot7-79)$$

6·3 次时间最优控制

时间最优控制问题还可以用李雅普诺夫函数描述。设一个系统的李雅普诺夫函数(以下简称为李氏函数)为

$$V(x) \quad (5\cdot7-80)$$

所谓时间最优控制,就是选择这样一个控制函数 $u^*(t)$,使李氏函数对于时间 t 的导数为负定函数,且应使这个导数为最小,即

$$V_t(x, u^*) = \min_{u \in U} V_t(x, u) \quad (5\cdot7-81)$$

上式表明 $V(x)$ 的衰减速度最快,即系统以最短时间从初始状态向原点运动。

按式(5·7-81)确定的时间最优控制系统是真时间最优控制系统。这样的真时间最优控制系统的切换曲面(线)是比较复杂的切换曲面(线),这不仅在理论上求解非常复杂,而且工程实现上也是非常困难的。另外,构造李氏函数也十分困难。在工程实际中,不一定追求真的最优性,而是要求系统在工作中既有一定的最优性且实现简单就足够了。最优控制的真实意义就在于它给出了设计系统的最优目标,有了这个目标,在设计系统时,就可以力求接近这个目标。因此在工程实际中,人们更感兴趣的是实现简单的次最优控制系统的设计问题。

为了这个目的,可事先给定一个李氏函数,这个李氏函数的形式应该便于在设计中进行数学处理。然后根据这个给定的李氏函数,按照式(5·7-81)给出的原则求取最优控制函数。由于李氏函数是选定的便于进行数学处理的形式,当然,这样得到的最优系统就要比理想的真时间最优控制系统的特性差些,因此称为次时间最优控制系统。次时间最优控制系统的切换曲面(线)是折面(线),这在设计过程中计算比较简单,更主要的是工程实现上比较容易,所以这类系统在工程实际中有很大的实用价值。

次时间最优控制系统的李氏函数常以二次型形式



给定,因为这种形式在数学上处理比较方便。二次型李氏函数可以表示为

$$V(x) = x^T P x \quad (5.7-82)$$

式中 P ——常数正定矩阵。

设受控系统的状态方程为

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (5.7-83)$$

$$x(t_0) = x_0 \quad (5.7-84)$$

式中 x —— n 维状态矢量;

u —— r 维控制矢量;

A —— $n \times n$ 常数矩阵;

B —— $n \times r$ 常数矩阵。

根据给定的李氏函数形式(5.7-82),可求得它关于时间的导数为

$$\begin{aligned} \dot{V}_t(x, u) &= \dot{x}^T P x + x^T P \dot{x} \\ &= x^T (A^T P + P A) x + 2u^T B^T P x \end{aligned} \quad (5.7-85)$$

$$\text{令} \quad A^T P + P A = -Q \quad (5.7-86)$$

则得

$$\dot{V}_t(x, u) = -x^T Q x + 2u^T B^T P x \quad (5.7-87)$$

式中 A ——稳定矩阵;

P, Q —— $n \times n$ 常数正定矩阵。

为了实现时间最优控制,应该这样选择矩阵 P ,使得由它构造的李氏函数 $V(x_0)$ 等于最短控制时间 T_{\min} ,且使得李氏函数对于时间的导数为负且最小。这样就可以把所讨论的问题归结为要求下述指标函数同时达到极小,即

$$\mathcal{F}_1[u(\cdot)] = x_0^T P x_0 = t_r [P x_0 x_0^T] \quad (5.7-88)$$

$$\mathcal{F}_2[u(\cdot)] = t_r (-Q) \quad (5.7-89)$$

式中 t_r ——矩阵的迹。

为计算方便,式(5.7-89)表示的指标函数可转换为求 $t_r(Q)$ 极大,或求 $t_r(Q^{-1})$ 极小。这样,可将式(5.7-89)改写为

$$\mathcal{F}_2[u(\cdot)] = t_r(Q^{-1}) \quad (5.7-90)$$

同时达到极小的两个指标函数可以合并为单一指标函数

$$\begin{aligned} \mathcal{F}[u(\cdot)] &= \mathcal{F}_1[u(\cdot)] + \mathcal{F}_2[u(\cdot)] \\ &= t_r(P x_0 x_0^T) + t_r(Q^{-1}) \end{aligned} \quad (5.7-91)$$

为求使上式指标函数为极小的 P ,可将式(5.7-91)对 P 求导并令其等于零

$$\begin{aligned} \frac{d\mathcal{F}[u(\cdot)]}{dP} &= \frac{d}{dP} [t_r(P x_0 x_0^T) + t_r(Q^{-1})] \\ &= x_0 x_0^T + (A Q^{-2} - Q^{-2} A) = 0 \end{aligned}$$

最后得

$$A Q^{-2} + Q^{-2} A = -x_0 x_0^T \quad (5.7-92)$$

这样,满足时间最优控制的矩阵 P, Q 及最优控制函数由下述方程确定:

$$A(Q^{-1})^{-2} + (Q^{-1})^{-2} A^T = -x_0 x_0^T \quad (5.7-93)$$

$$A^T P^* + P^* A = -Q^* \quad (5.7-94)$$

$$u^*(t, x) = -\text{sgn}(B^T P^* x) \quad (5.7-95)$$

上式给出的设计结果,是反馈控制时间最优系统。

7 线性最优调节器

调节器问题,就是当系统(装置)初始时刻输出或其导数不为零(或偏离平衡点)时,设计一个恰当的控制(输入)信号施加于系统(装置),使其输出及其导数迅速趋于零(或平衡点)。

一般总希望所设计的施加于系统的控制信号是系统状态的函数: $u(t) = K[x(t), t]$, 以实现闭环控制。从工程实现角度要求,希望这个控制函数是系统状态变量的线性函数。用这样的控制信号构成的系统称为线性调节器。如果所设计的控制信号能使得某一给定的指标函数达到极值,则称这个系统为线性最优调节器。在后面的讨论中,假定受控系统(对象)是完全可控、完全可观测的。

对于线性系统,若取其性能指标函数为系统状态变量和控制变量的二次型函数的积分形式,则可以得到一个和系统状态变量呈线性关系的最优控制函数。这个最优控制函数具有解析表达式。这类调节器问题又称为二次型问题。这类问题不但可以得到解析解,而且在工程中具有实际的物理意义。下面将着重讨论这类最优调节器问题。

7.1 有限时间最优调节器

设受控系统为

$$\dot{x}(t) = A(t)x(t) + B(t)u(t) \quad (5.7-96)$$

$$x(t_0) = x_0 \quad (5.7-97)$$

控制函数 $u(t)$ 无约束。给定指标函数为

$$\begin{aligned} \mathcal{F}[u(\cdot)] &= \frac{1}{2} x^T(t_f) S x(t_f) \\ &+ \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_f} [x^T(t) Q(t) x(t) \\ &+ u^T(t) R(t) u(t)] dt \end{aligned} \quad (5.7-98)$$

式中, x 为系统的 n 维状态矢量,在一般情况下,它表示相对于平衡状态的偏差量; $u(t)$ 为 r 维控制矢量; $A(t)$ 是 $n \times n$ 系统矩阵; $B(t)$ 是 $n \times r$ 驱动矩阵; S 为 $n \times n$ 非负定常数矩阵; $Q(t)$ 为 $n \times n$ 非负定对称矩阵; $R(t)$ 为 $r \times r$ 正定对称矩阵。 $A(t), B(t), Q(t), R(t)$ 及其导数的各元在 $[t_0, t_f]$ 上连续或分段连续,且 $R^{-1}(t)$ 存



在。\$t_0, t_f\$ 分别为起始时间和终了时间,是固定的。

性能指标的第一项相当于对系统稳态误差的要求。积分号下的第一项相当于对系统动态误差的要求,第二项表示对控制能量的限制要求。加权矩阵 \$S, Q(t), R(t)\$ 约束了各变量相对限制的程度。式(5·7-98)表示的指标函数的物理意义是很明显的,它包含了经典控制理论中关于过渡过程、超调量、超调次数及稳态误差等各项要求。

有限时间最优调节器问题就是在 \$t_f\$ 给定,终端无约束、控制函数无约束条件下,求取最优控制函数 \$u(t)\$,使指标函数式(5·7-98)达到最小的最优控制问题。这类问题可直接应用极大值原理求解。根据极大值原理给出的最优控制函数所应满足的必要条件可得出有限时间最优调节器问题的解由下式确定:

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}(t) &= A(t)x(t) + B(t)u(t), x(t_0) = x_0 \\ \dot{\psi}(t) &= -[x(t)]^T Q(t) - \psi(t)A(t) \\ \psi(t_f) &= -[x(t_f)]^T S \\ u(t) &= R^{-1}B^T(t)\psi^T(t) \end{aligned} \right\} \quad (5\cdot7-99)$$

上式是给定两个端点边界条件的方程组。求解两点边界问题是数学中的难题,这个问题只在个别情况下,才有解析解。这个问题,可以通过设定伴随矢量与最优轨线间存在的线性关系得到解决。设

$$\psi^T(t) = -P(t)x(t) \quad (5\cdot7-100)$$

则最优控制函数为

$$u^*(t) = -R^{-1}(t)B^T(t)P(t)x^*(t) \quad (5\cdot7-101)$$

式中 \$P(t)\$——正定对称矩阵,是下列黎卡提(Riccati)矩阵微分方程的解阵。

$$\left. \begin{aligned} \dot{P}(t) + P(t)A(t) + A^T(t)P(t) + Q(t) \\ - P(t)B(t)R^{-1}(t)B^T(t)P(t) = 0 \\ P(t_f) = S \end{aligned} \right\} \quad (5\cdot7-102)$$

7.2 无限时间最优调节器

对于控制系统来说,如果时间 \$t_f\$ 大于系统的过渡过程时间,那么, \$t_f\$ 相对于过渡过程时间来说,和 \$t_f = \infty\$ 相对于过渡过程时间的意义是相当的。如果所要考察的终端时刻 \$t_f\$ 大于控制系统的过渡过程时间(大多数工程实际中的系统满足这个条件),则可将所讨论的调节器问题看作 \$t_f \rightarrow \infty\$ 来处理。这样处理,在工程实践中将会带来许多方便。

设受控系统的状态方程及初始条件按式(5·7-96)及式(5·7-97)给定。无限时间最优调节器问题的指标

函数形式为

$$\mathcal{J}[u(\cdot)] = \int_0^{\infty} [x^T(t)Q(t)x(t) + u^T(t)R(t)u(t)] dt \quad (5\cdot7-103)$$

无限时间最优调节器指标函数只有当 \$t \rightarrow \infty\$ 时, \$x(\infty) \rightarrow 0, u(\infty) \rightarrow 0\$, 积分有限,才有意义。因此,这时不再存在式(5·7-98)表示的未值项。

无限时间最优调节器问题,就是寻求一个最优控制函数 \$u^*(t)\$,使式(5·7-103)表示的性能指标达到极小。

根据极大值原理,可得到类似有限时间最优调节器的结果,即最优控制函数为

$$u^*(t) = -R^{-1}(t)B^T(t)P_0(t)x(t) \quad (5\cdot7-104)$$

式中

$$P_0(t) = \lim_{t_f \rightarrow \infty} P(t, 0, t_f)$$

是黎卡提矩阵微分方程

$$\left. \begin{aligned} \dot{P}(t) + P(t)A(t) + A^T(t)P(t) + Q(t) \\ - P(t)B(t)R^{-1}(t)B^T(t)P(t) = 0 \\ P(\infty) = 0 \end{aligned} \right\} \quad (5\cdot7-105)$$

的正定对称解阵。

对于线性定常系统来说, \$A, B, Q, R\$ 都是常数矩阵。这种情况下的最优控制函数

$$u^*(t) = -R^{-1}B^T P_0 x(t) \quad (5\cdot7-106)$$

式中, \$P_0\$ 是代数黎卡提矩阵方程

$$P_0 A + A^T P_0 + Q - P_0 B R^{-1} B^T P_0 = 0 \quad (5\cdot7-107)$$

的正定对称解阵。

7.3 最优调节器的性质

最优调节器具有一系列工程优良性质。

1. 性能指标的最小值 有限时间最优调节器的性能指标最小值为

$$\mathcal{J}[u(\cdot)]_{\min} = \frac{1}{2} (x_0^*)^T P(t_0) x_0^* \quad (5\cdot7-108)$$

无限时间最优调节器(时变)的性能指标最小值为

$$\mathcal{J}[u(\cdot)]_{\min} = \frac{1}{2} (x_0^*)^T P_0(t_0) x_0^* \quad (5\cdot7-109)$$

无限时间最优调节器(定常)的性能指标最小值为

$$\mathcal{J}[u(\cdot)]_{\min} = \frac{1}{2} (x_0^*)^T P_0 x_0^* \quad (5\cdot7-110)$$

2. 最优调节器的频率特性 对于线性定常系统

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t), x(t_0) = x_0 \quad (5\cdot7-111)$$

指标函数为



$$\mathcal{J}[u(\cdot)] = \int_0^{\infty} [x^T(t)Qx(t) + u^T(t)Ru(t)] dt \quad (5.7-112)$$

最小的最优控制函数

$$u^*(t) = -R^{-1}B^T Px(t) = -Kx(t) \quad (5.7-113)$$

则由最优反馈矩阵 K 所组成的闭环反馈系统必定满足不等式

$$\begin{aligned} & [I_{n \times n} + R^{\frac{1}{2}}K(-j\omega I - A)^{-1}BR^{-\frac{1}{2}}]^T \\ & \times [I_{n \times n} + R^{\frac{1}{2}}K(j\omega I - A)^{-1}BR^{-\frac{1}{2}}] \geq I \end{aligned} \quad (5.7-114)$$

反过来说,凡满足不等式(5.7-114)的闭环反馈系统,都必定是对应于某一个二次型指标函数的最优调节器。式(5.7-114)称为最优调节器的频率条件。对于单输入单输出系统, $R=1, B=b$, 则频率条件变为

$$|1 + K(j\omega I - A)^{-1}b|^2 \geq 1 \quad (5.7-115)$$

由式(5.7-111)和式(5.7-113)组成的闭环反馈系统可等效为如图 5.7-1 所示的具有单位负反馈的闭环系统。其开环频率特性是

$$W_o(j\omega) = K(j\omega I - A)^{-1}b \quad (5.7-116)$$

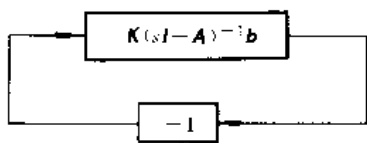


图 5.7-1 具有单位负反馈的闭环系统框图

由频率条件式(5.7-115)约束可知,最优调节器的频率特性被约束在复平面的某个区域内,即 $W_o(j\omega)$ 上的任一点与 $(-1, j0)$ 点的距离至少为 1。这说明 $W_o(j\omega)$ 不会进入以 $(-1, j0)$ 点为圆心的单位圆内。

3. 最优调节器的增益裕度 从理论上讲,开环增益无穷增大不会改变最优调节器的渐近稳定性。这样,最优调节器具有无限的增益裕度,这个性质是直接由频率特性的性质导出的。在实际中,由于设计中忽略了一些小时间常数及延迟的影响及没有考虑到的因素,所以实际系统在增益大到一定程度就会失去稳定性。从实际观点看,只能说最优调节器具有较大的增益裕度。

4. 最优调节器的相位裕度 由最优调节器的频率条件可以导出,最优调节器的相位裕度最小为 $\pi/3$ 。

5. 最优调节器的滞后容限 设最优调节器中存在滞后环节,它的开环频率特性变为

$$W_o(j\omega) = K(j\omega I - A)^{-1}be^{-j\omega\tau} \quad (5.7-117)$$

它在复平面内与以原点为圆心的单位圆的交点频率和相角分为 $0 < \omega_1^0 < \omega_2^0 < \dots < \omega_r^0, 0 < \phi_1^0 < \phi_2^0 < \dots < \phi_r^0$ 。根据最优调节器频率条件知道, $W_o(j\omega)$ 不会进入以 $(-1, j0)$ 点为圆心的单位圆内,所以可导出

$$\tau_0 < \frac{\phi_r^0}{\omega_r^0} = \frac{\pi}{3\omega_r^0} \quad (5.7-118)$$

所以最优调节器的滞后容限至少是 $\left[0, \frac{\pi}{3\omega_r^0}\right]$ 。

6. 最优调节器的非线性容限 对于如图 5.7-1 所示的单位负反馈闭环系统,当反馈回路存在下述形式非线性 $\Phi(y)$ 时,不会破坏最优调节器的渐近稳定性。

$\Phi(y)$ 满足的条件是:

(1) $\Phi(y)$ 是 r 维矢量函数,它将 r 维矢量 y 变换为 r 维矢量 $\Phi(y)$ 。 $\Phi(y)$ 是作为输入函数加到系统上去的。假设 $\Phi(y)$ 是 y 的连续函数。

(2)

$$\left(\frac{1}{2} + \epsilon\right) y^T y \leq y^T \Phi(y) \quad (5.7-119)$$

式中, ϵ 是一个充分小的正数。不等式(5.7-119)的特殊情况变为

$$\left(\frac{1}{2} + \epsilon\right) y_i \leq \Phi_i(y_i), \quad \forall y_i, i=1, 2, \dots, r \quad (5.7-120)$$

在实际工程中,这种第 i 个输出仅取决于第 i 个输入的情况是比较普遍的。

式(5.7-120)表明,对于每一个 i ,在 $\Phi_i(y_i)$ 坐标平面内,非线性函数 $\Phi_i(y_i)$ 是由斜率为 1/2 和无穷大的两条直线限定的扇形区域内的任意连续函数。

7. 带有状态观测器的最优调节器 根据分离定理知,带有状态观测器的最优调节器,它的极点由原最优调节器的极点和状态观测器的极点组成,且两者互相独立。因此,在设计带有状态观测器的最优调节器时,最优调节器的设计和状态观测器的设计可以独立进行。附加的状态观测器不会影响最优调节器的稳定性。

实际中,因为观测器本身不可能没有误差,因此观测器的引入必然会损失系统的最优性。

8 具有指定稳定度的最优调节器

前面讨论的线性最优调节器问题,也称为标准调节器问题。对于它的研究具有普遍意义。因为在实际工程中所遇到的调节器问题是多种多样的,其指标函数不尽然相同,但总可以通过不同方法,将其归化为标准调节器形式,这样,前面讨论过的关于标准调节器的结

44



论,对于能归化为标准调节器的其它调节器,都是适用的。

具有指定稳定度的调节器将以不小于规定的速度趋于平衡点。

设受控系统为线性定常系统,其状态方程如式(5·7-111)所示。具有指定稳定度的最优调节器问题,就是设计一个最优控制函数使下式指标函数达到最小:

$$\mathcal{J} = \int_0^{\infty} e^{2\alpha t} [x^T(t)Qx(t) + u^T(t)Ru(t)] dt \rightarrow \min \quad (5\cdot7-121)$$

对于这个问题,可以通过适当的变量变换,将其归化为标准调节器问题。然后就可以引用前面讨论过的标准调节器的分析设计方法进行设计。

引入新的变量

$$x_1(t) = e^{-\alpha t} x(t) \quad (5\cdot7-122)$$

$$u_1(t) = e^{-\alpha t} u(t) \quad (5\cdot7-123)$$

则原系统及指标函数变为

$$\dot{x}_1(t) = A_1 x_1(t) + B u_1(t) \quad x_1(t_0) = e^{-\alpha t_0} x_0 \quad (5\cdot7-124)$$

$$\mathcal{J} = \int_0^{\infty} [x_1^T(t)Qx_1(t) + u_1^T(t)R u_1(t)] dt \quad (5\cdot7-125)$$

这样变换后,具有指定稳定度的最优调节器问题就转化为式(5·7-124)及式(5·7-125)所描述的标准调节器问题了。等价的标准调节器的最优控制函数为

$$u_1^*(t) = -R^{-1} B^T P_2 x_1(t) \quad (5\cdot7-126)$$

式中, P_2 是代数黎卡提方程

$$A_1 P_2 + P_2 A_1^T + Q - P_2 B R^{-1} B^T P_2 = 0 \quad (5\cdot7-127)$$

的正定对称解阵。

$$A_1 = (aI + A) \quad (5\cdot7-128)$$

求得最优控制函数 $u_1^*(t)$ 及最优轨线 $x_1^*(t)$ 后,可按式(5·7-122)及式(5·7-123)求得原系统的最优控制函数 $u^*(t)$ 及最优轨线 $x^*(t)$:

$$u^*(t) = e^{-\alpha t} u_1^*(t) \quad (5\cdot7-129)$$

$$x^*(t) = e^{-\alpha t} x_1^*(t) \quad (5\cdot7-130)$$

由上式可见, $x(t)$ 至少以 $e^{-\alpha t}$ 的速度趋向于平衡点。

9 有常值干扰作用的最优调节器

当受控系统有常值干扰和外输入作用时,组成闭环反馈后,直接加给受控系统的控制作用,稳态时必定是一个常值。这个常值是用来维持系统有一定的输出,用以克服常值干扰造成的误差。对于这种情况,设计最

优控制系统仍使用通常的二次型指标函数,是不可能得到实用结果的,因为积分号下有常值时,无限积分值将趋于无穷大。因此,必须修改性能指标函数。选用式(5·7-131)形式的指标函数是合适的

$$\mathcal{J} = \int_0^{\infty} [x^T(t)Qx(t) + \dot{u}^T(t)R\dot{u}(t)] dt \quad (5\cdot7-131)$$

因为 $\dot{u}(t)$ 是趋向于零的衰减函数,这就保证了积分有限。这样处理的结果,相当于在原受控系统上增加一个积分环节。相对于原系统,增加附加环节的系统叫增广系统。

对于有外输入作用和干扰作用的调节器问题,都可以通过增广系统将其归化为标准调节器问题来处理。

设受控系统为

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + f \quad (5\cdot7-132)$$

$$y(t) = Cx(t) \quad (5\cdot7-133)$$

式中 $x(t)$ —— n 维状态矢量;

$u(t)$ —— r 维控制矢量;

$y(t)$ —— m 维输出矢量;

f —— n 维常值干扰矢量。

如果给定输入函数是 m 维常值矢量 y_r , 在系统有常值干扰作用下,要求确定一个最优控制函数,使得系统的某个二次型指标函数最小,并使 $y(t)$ 最终尽量接近 $y_r(t)$, 或其误差为零。

为了使用二次型指标函数,得到有实用意义的结果,首先将系统增广为附加有积分环节的系统。附加的积分环节为

$$\dot{u}(t) = w(t) \quad (5\cdot7-134)$$

增广后的系统方程可写成

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + f \quad (5\cdot7-135)$$

$$\dot{u}(t) = w(t) \quad (5\cdot7-136)$$

$$y(t) = [C, O] \begin{bmatrix} x(t) \\ u(t) \end{bmatrix} \quad (5\cdot7-137)$$

令

$$e_x(t) = x(t) - x_s, e_u(t) = u(t) - u_s \quad (5\cdot7-138)$$

$$\delta x(t) = \begin{bmatrix} e_x(t) \\ e_u(t) \end{bmatrix} \quad (5\cdot7-139)$$

式中, x_s, u_s 是系统稳态时的系统状态变量及控制变量值。考虑式(5·7-138)、式(5·7-139)以及矩阵

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & O \end{bmatrix} \quad (5\cdot7-140)$$

逆存在,满秩,可将增广系统写成偏差量的形式

$$\dot{\delta x}(t) = \begin{bmatrix} A & B \\ O & O \end{bmatrix} \delta x(t) + \begin{bmatrix} O \\ I \end{bmatrix} w(t)$$



$$= A_1 \delta x(t) + B_1 w(t) \quad (5.7-141)$$

对于上式表示的系统,就可以应用二次型指标函数来讨论最优设计问题了。因为这个系统在 $t \rightarrow \infty$ 时, $w(\infty) \rightarrow 0, \delta x(\infty) \rightarrow 0$,这就保证了二次型指标函数有限。取指标函数为

$$\mathcal{J} = \int_0^{\infty} [\delta x^T(t) Q \delta x(t) + w^T(t) R w(t)] dt \quad (5.7-142)$$

如果选择加权矩阵 $Q = C^T C$, C 是 $m \times n$ 阵。则式(5.7-142)可改写成

$$\begin{aligned} \mathcal{J} &= \int_0^{\infty} [\delta x^T(t) C^T C \delta x(t) + w^T(t) R w(t)] dt \\ &= \int_0^{\infty} [\|y(t) - y_r(t)\|^2 + w^T(t) R w(t)] dt \end{aligned} \quad (5.7-143)$$

式中 $\|y(t) - y_r(t)\|^2 = \delta x^T(t) C^T C \delta x(t)$

式(5.7-141)和式(5.7-142)表示的问题,是标准最优调节器问题。根据标准最优调节器给出的结果,可求得这个问题的最优控制函数:

$$\left. \begin{aligned} w^*(t) &= -R^{-1} B^T P \delta x(t) = G \delta x(t) \\ G &= -R^{-1} B^T P \end{aligned} \right\} \quad (5.7-144)$$

式中, P 是代数矩阵黎卡提方程

$$A_1^T P + P A_1 + Q - P B_1 R^{-1} B_1^T P = 0$$

的正定对称解阵

考虑到式(5.7-138)及式(5.7-139)以及稳态关系, $w^*(t)$ 还可以表示为

$$w^*(t) = K_1 \dot{x}(t) + K_2 [y(t) - y_r] \quad (5.7-145)$$

$$[K_1, K_2] = G \begin{bmatrix} A & B \\ C & O \end{bmatrix}^{-1} \quad (5.7-146)$$

最后可求得原系统的最优控制函数

$$u^*(t) = K_1 \dot{x}(t) + K_2 \int_0^t [y(\tau) - y_r] d\tau \quad (5.7-147)$$

对应于这种情况的最优控制系统框图如图 5.7-2 所示。这个系统的最优控制信号由两部分组成:一部分是和通常最优调节器一样的状态反馈信号;另一部分是输出误差的积分信号。该系统实现了比例积分和微分(包括在状态反馈中)控制。积分控制保证了在常值干

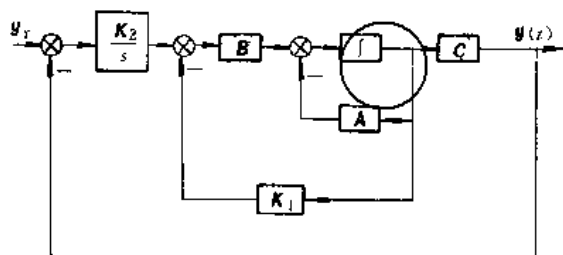


图 5.7-2 具有常值干扰的最优控制系统框图

扰下输出误差趋于零。这些结果与经典控制中得到的结果相同。但这里得到的 PID 控制参数是相对于给定指标函数确定的最优值,不是试凑得到的。

10 随机最优控制与卡尔曼滤波器

10.1 随机最优控制

设受控系统为线性定常系统,受到的外部干扰为随机干扰,其状态方程式如下:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + \Gamma v(t) \quad x(t_0) = x_0 \quad (5.7-148)$$

$$y(t) = Cx(t) + w(t) \quad (5.7-149)$$

式中 $x(t)$ —— n 维状态矢量;

$u(t)$ —— m 维控制矢量;

$y(t)$ —— p 维输出矢量;

$v(t)$ —— r 维过程噪声;

$w(t)$ —— p 维量测噪声。

$v(t), w(t)$ 为服从相互独立正态分布的白色噪声,其统计特性如下:

$$E\{v(t)\} = 0 \quad \text{cov}\{v(t), v(\tau)\} = V\delta(t-\tau) \quad (5.7-150)$$

$$E\{w(t)\} = 0 \quad \text{cov}\{w(t), w(\tau)\} = W\delta(t-\tau) \quad (5.7-151)$$

$$\text{cov}\{v(t), w(\tau)\} = 0 \quad (5.7-152)$$

式中 V —— 正半定协方差阵;

W —— 正定协方差阵。

初始条件 x_0 服从与 $v(t), w(t)$ 独立的正态分布,即

$$E\{x_0\} = \bar{x}_0 \quad \text{cov}\{x_0, x_0\} = \Sigma_0 \quad (5.7-153)$$

这类随机最优控制问题,除去系统受随机干扰和初始条件是随机的这一点之外,与前面所讨论的最优控制问题是一样的。

如给定的性能指标为二次型指标函数,但因系统中含有随机干扰,所以必须考虑指标函数的数学期望。因此,不同于前面,指标函数为

$$\mathcal{J} = \frac{1}{2} E \left\{ \int_0^T [x^T(t) Q x(t) + u^T(t) R u(t)] dt \right\} \quad (5.7-154)$$

这里不加证明地给出最优控制函数和指标函数的最小值为

$$u(t) = -R^{-1} B^T P(t) x(t) \quad (5.7-155)$$

$$\mathcal{J}_{\min} = \frac{1}{2} x_0^T P(0) x_0 + \frac{1}{2} \text{tr} [\Sigma_0 P(0)] + \frac{1}{2} a(0) \quad (5.7-156)$$



式中, $P(t)$ 是黎卡提矩阵方程的正定解阵; $\alpha(t)$ 是下述方程的解:

$$-\dot{\alpha}(t) = \alpha(t) [F^T V F^T P(t)], \alpha(t_f) = 0 \quad (5.7-157)$$

上述结果是当系统状态完全可观测时, 才能实现的最优控制系统。

当系统状态不能完全可观测时, 必须使用状态观测器来实现。系统虽然有随机干扰, 使用状态观测器实现最优控制时, 分离定理仍然成立。但状态观测器, 因要对承受随机干扰的系统估计其状态, 就不能使用常规的观测器设计方法了, 必须采用卡尔曼 (Kalman) 滤波器。

10.2 卡尔曼滤波器

对承受随机干扰的系统式 (5.7-148)、式 (5.7-149) 的状态进行估计, 使其估值的均方差

$$E\{\|x(t) - \hat{x}(t)\|^2\} \quad (5.7-158)$$

最小的状态观测器, 称为卡尔曼滤波器。式中, $\hat{x}(t)$ 是 $x(t)$ 的估计值。卡尔曼滤波器由下列方程给出:

$$\frac{d}{dt} \hat{x}(t) = A \hat{x}(t) + B u(t) + K(t) [y(t) - C \hat{x}(t)] \quad (5.7-159)$$

$$\hat{x}(0) = \bar{x}_0 \quad (5.7-160)$$

$$K(t) = \Sigma(t) C^T W^{-1} \quad (5.7-161)$$

$$\frac{d}{dt} \Sigma(t) = A \Sigma(t) + \Sigma(t) A^T + F^T V F^T - \Sigma(t) C^T W^{-1} \Sigma(t) \quad (5.7-162)$$

$$\Sigma(t) = \text{cov}\{[x(t) - \hat{x}(t)], [x(t) - \hat{x}(t)]\}, \Sigma(0) = \Sigma_0 \quad (5.7-163)$$

式中, $K(t)$ 称为卡尔曼滤波器的增益矩阵, $\Sigma(t)$ 称为估计误差的协方差阵。

第8章 适应控制

1 概述

要成功地设计一个性能良好的控制系统, 都要首先知道受控系统的精确数学模型。但实际上有一些受控对象或过程难以精确掌握, 或存在着不确定性, 或者数学模型是变化的。引起受控对象或过程数学模型或模型参数变化的原因, 一般是由工作情况变化和条件变化引起的。对于这类对象, 采用通常的反馈控制或最优控制方法设计控制系统, 难以达到预期目的。

针对受控对象或过程的数学模型的不确定性或变化时的情况, 如何设计一个理想的控制系统, 是适应控制所要解决的问题。

反馈控制起消除状态干扰的作用, 适应控制起消除控制系统结构性干扰的作用, 这些结构性干扰实质上是由受控对象的动态参数变化引起的。

2 适应控制的定义

能够利用可调系统的输入、状态和输出来度量某个性能指标, 将所测得的性能指标与规定的性能指标相比较, 然后由适应机构来修正可调系统的参数或产生一个辅助的输入信号, 以保持系统的性能指标接近于给定性能指标的系统称为适应控制系统。

3 适应控制系统的类型

根据结构的不同, 适应控制系统大致可分为以下几种类型。

1. **变增益适应控制系统** 这类适应控制系统, 当系统参数因工作情况和环境变化而变化时, 系统将自动改变调节器的变增益结构以适应参数变化, 并保持系统性能的优良性趋于不变。这类系统的框图如图 5.8-1 所示。

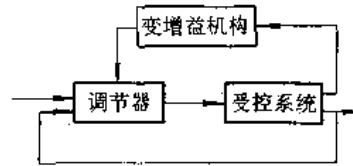


图 5.8-1 变增益适应控制系统框图

2. **模型参考适应控制系统** 模型参考适应控制系统框图如图 5.8-2 所示。当受控对象受干扰影响使运行特性偏离最优轨线时, 则优化了的参考模型输出 y_m 与受控对象输出 y 相比较产生一个广义误差 e 。广义误差作用于适应机构, 适应机构根据一定的适应规律修改调节器参数或产生一个辅助控制信号, 促使由调节器、被控对象和反馈调节器组成的可调系统与参考模型相一致, 广义误差 e 趋向极小值或减少到零。



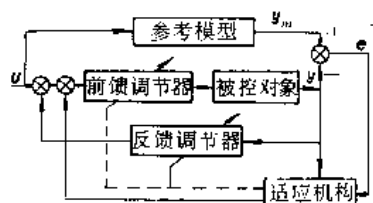


图 5·8-2 模型参考适应控制系统框图

3. 自校正(调节器)控制系统 自校正调节器亦称参数适应控制系统,其框图如图 5·8-3所示。它是在反馈控制系统上增加一个参数辨识器和调节器参数设计计算机组成的外环控制回路。它在运行中,不断估计被控对象的参数,根据估计结果进行调节器参数选择设计,改变调节器参数以消除被控对象参数变化造成的影响。

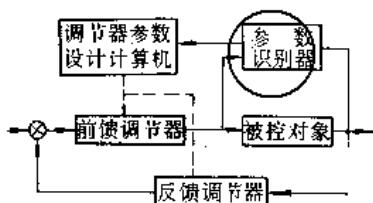


图 5·8-3 自校正(调节器)控制系统框图

4. 直接优化指标函数的适应控制系统 这类适应控制系统的框图如图 5·8-4所示。它的基本思想是给定一个指标函数形式,根据一定的适应控制算法,不断修正控制器参数以使指标函数达到极小。

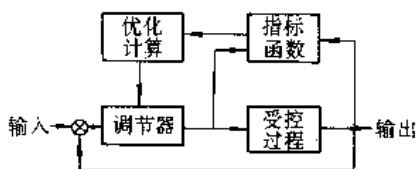


图 5·8-4 直接优化指标函数的适应控制系统框图

4 适应控制系统的稳定理论

判定适应控制系统稳定性的基本理论,是李雅普诺夫稳定理论和超稳定理论。关于李雅普诺夫稳定理论参见本篇第3章1节,这里只是不加证明地给出超稳定理论的一些结论。

4·1 正实函数的定义与性质

满足下列两个条件的实有理函数 $H(s)$ 为正实函数:

(1) $H(s)$ 的极点在左半平面,但是虚轴上只有阶极点,且留数为正;

(2) 对任意频率 ω , 其 $\text{Re}H(j\omega) \geq 0$, 即当 $\sigma=0$ 时, 有 $\text{Re}H(s) \geq 0$ 。

$H(s)$ 的极点只在左半平面,且满足条件(2)的有理函数 $H(s)$ 称为严格正实函数。正实函数具有下列性质:

- (1) $H(s)$ 正实, 则对 $C>0$, $CH(s)$ 正实;
- (2) $H_1(s)$ 、 $H_2(s)$ 正实, 则 $H_1(s)+H_2(s)$ 正实;
- (3) $H(s)$ 、 $F(s)$ 正实, 则 $H[F(s)]$ 正实;
- (4) $H(s)$ 正实, 则 $1/H(s)$ 及 $H(1/s)$ 正实。

4·2 超稳定理论

设一闭环系统由线性前向环节和反馈环节组成,如图 5·8-5所示。

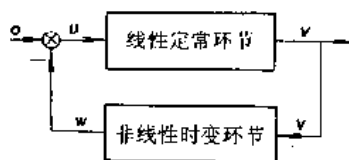


图 5·8-5 标准多变量非线性时变反馈系统

它是一个标准多变量反馈系统,反馈环节可以是线性的或非线性的,时变的或定常的。前向环节的状态方程为

$$\dot{x} = Ax + Bu = Ax - Bw \quad (5·8-1)$$

反馈环节的状态方程

$$w = f(v, t, \tau) \quad \tau < t \quad (5·8-2)$$

$$v = Cx \quad (5·8-3)$$

式中 x 是 n 维前向环节状态矢量; $u(u = -w)$ 是前向环节的 r 维输入矢量; A 、 B (这里 $B = I$) 和 C 是适当维数的矩阵; $f(\cdot)$ 是向量泛函数。 (A, B) 完全可控, (A, C) 完全可观测。

考虑波波夫(Popov)不等式

$$\int_0^t w^T v dt > -r_0^2 \quad \forall t > 0 \quad (5·8-4)$$

式中 r_0 ——一个有限正常数。

这个不等式称为波波夫不等式,因为 $u = -w$,所以上式又可表示为

$$\int_0^t u^T v dt \leq r_0^2 \quad (5·8-5)$$

系统超稳定性定义:对式(5·8-1)~式(5·8-3)所描述的闭环系统,如果存在一个正常数 $K > 0$ 和一个正常数 r_0 以及任意满足不等式(5·8-4)的反馈环节 $w = f(v, t, \tau)$,使上述式(5·8-1)和式(5·8-3)的所有以 $x(0)$ 为初始状态的解 $x[x(0), t]$ 满足不等式

$$\|x(t)\| < K[\|x(0)\| + r_0] \quad \forall t > 0 \quad (5·8-6)$$



则称这个闭环系统对于平衡点 $x=0$ 为超稳定的,或者说,由式(5·8-1)及式(5·8-3)确定的前向环节是超稳定的。

系统渐近超稳定的定义:由式(5·8-1)~式(5·8-3)确定的闭环系统,如果

(1) 它是超稳定的;

(2) 对任意满足不等式(5·8-4)的矢量泛函数 $w=f(v',t,\tau)$ 有 $\lim_{t \rightarrow \infty} x(t)=0$, 则称该系统为渐近超稳定的。

超稳定性定理:由式(5·8-1)~式(5·8-3)所描述的反馈系统为(渐近)超稳定的,或者说它的前向环节是(渐近)超稳定的必要充分条件为传递矩阵

$$H(s)=C(sI-A)^{-1}B \quad (5·8-7)$$

是(严格)正实。

对于单输入单输出情况, $H(s)$ 简化为 s 的一元函数,定理条件就变成要求 $H(s)$ 是(严格)正实函数。

5 模型参考适应系统的数学描述

5.1 用状态方程描述的模型参考适应系统

设并联模型参考适应系统的基本结构如图 5·8-6 所示。

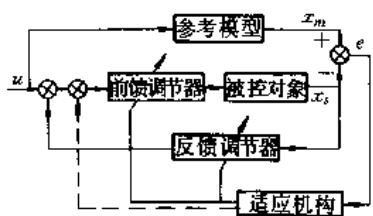


图 5·8-6 典型模型参考适应系统框图

对于参考模型,可用如下线性状态方程描述:

$$\dot{x}_m = A_m x_m + B_m u, \quad x_m(0) = x_{m0} \quad (5·8-8)$$

可调系统的状态方程为

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_s &= A_s(e,t)x_s + B_s(e,t)u \\ x_s(0) &= x_{s0} \quad A_s(0) = A_{s0} \quad B_s(0) = B_{s0} \end{aligned} \right\} \quad (5·8-9)$$

式中 x_m, x_s —— 参考模型和可调系统的 n 维状态矢量;

u —— m 维分段连续的输入矢量;

A_m 和 B_m —— $n \times n$ 维和 $n \times m$ 维常数矩阵;

$A_s(e,t)$ 和 $B_s(e,t)$ —— $n \times n$ 维和 $n \times m$ 维时变矩阵,它们是广义误差矢量

$$e = x_m - x_s \quad (5·8-10)$$

的函数。参考模型为稳定的,并且是完全可控和完全可观测的。

对于采用信号综合型式的模型参考适应系统的可调系统的状态方程为

$$\dot{x}_s = A_s x_s + B_s u + u_d(e,t) \quad (5·8-11)$$

$$x_s(0) = x_{s0}, u_d(0) = u_{d0} \quad (5·8-12)$$

这里, A_s 和 B_s 相对于适应过程来说,可以看成是常数矩阵,而信号 $u_d(e,t)$ 是由广义误差 e 通过适应规律形成的。

对于参数适应的情况,设计的目的是确定一个特定的适应规律,使广义误差矢量 e 按照一定的适应规律来调节参数矩阵 $A_s(e,t)$ 和 $B_s(e,t)$,在系统稳定的情况下,这种调节作用使得广义误差矢量 e 逐渐趋向零值。为了使调节作用不至于随着广义误差矢量 e 的趋向于零而消失,适应规律中应包含有记忆性质的积分作用。这样,对于可调参数来说,它不仅依赖于广义误差的现时值 $e(t)$,而且也依赖于它的过去值 $e(\tau), \tau \leq t$, 因此,对参数自适应情况,适应律可以由下列方程确定:

$$A_s(e,t) = F(e,\tau,t) + A_s(0) \quad 0 \leq \tau \leq t \quad (5·8-13)$$

$$B_s(e,t) = G(e,\tau,t) + B_s(0) \quad 0 \leq \tau \leq t \quad (5·8-14)$$

式中, F 和 G 表示在 $0 \leq \tau \leq t$ 上 $A_s(e,t), B_s(e,t)$ 与矢量 e 之间的函数关系,一般可由下式表示:

$$F(e,\tau,t) = \int_0^\tau F_1(v,\tau,t) d\tau + F_2(v,t) \quad (5·8-15)$$

$$G(e,\tau,t) = \int_0^\tau G_1(v,\tau,t) d\tau + G_2(v,t) \quad (5·8-16)$$

对于信号综合适应系统,信号的适应规律可表示为

$$u(e,\tau,t) = \int_0^\tau u_1(e,\tau,t) d\tau + u_2(v,t) \quad (5·8-17)$$

由上述诸式可见,适应规律包含有积分和比例作用。式中 $v = De$, 矩阵 D 称为线性补偿器,它的作用是为了满足系统稳定性所需附加的补偿条件。

5.2 用输入-输出方程描述的模型参考适应系统

采用输入-输出方程描述模型参考适应系统,一般采用微分算子的形式表示参考模型:

$$N(p)y_m = M(p)u \quad (5·8-18)$$

$$p \stackrel{\text{def}}{=} \frac{d}{dt} \quad N(p) = \sum_{i=0}^n a_i p^i \quad M(p) = \sum_{i=0}^m b_i p^i \quad (5·8-19)$$

这是公司制作请尊重版权



式中 r ——标量输入信号;
 y_m ——标量输出信号;
 a_i, b_i ——参考模型的输入输出方程的常系数。

对参数适应的情况,并联可调系统的输入-输出方程为

$$N_s(p, t)y_s = M_s(p, t)r \quad (5-8-20)$$

$$N_s(p, t) = \sum_{i=0}^n a_{si}(e, t)p^i \quad M_s(p, t) = \sum_{i=0}^m b_{si}(e, t)p^i \quad (5-8-21)$$

式中 y_s ——可调系统的标量输出信号;
 $a_{si}(e, t)$ 和 $b_{si}(e, t)$ ——可调系统输入-输出方程的时变系数,这些系数由广义输出误差 e 通过适应规律进行适当调整。

广义输出误差定义为

$$e = y_m - y_s \quad (5-8-22)$$

适应规律形式如下:

$$a_{si}(e, t) = f_i(e, \tau, t) + a_{si}(0) \quad (5-8-23)$$

$$b_{si}(e, t) = g_i(e, \tau, t) + b_{si}(0) \quad (5-8-24)$$

$$\tau \leq t$$

对于信号综合型式的适应系统,可调系统的方程为

$$N_s(p)y_s = M_s(p)[r + \mu(e, t)] \quad (5-8-25)$$

$$N_s(p) = \sum_{i=0}^n a_{si}p^i \quad M_s(p) = \sum_{i=0}^m b_{si}p^i \quad (5-8-26)$$

$$\mu(e, t) = u(e, \tau, t) + u(0) \quad 0 \leq \tau \leq t \quad (5-8-27)$$

上述各式中的 $f_i(e, \tau, t), g_i(e, \tau, t), u(e, \tau, t)$ 表征了适应规律,它们具有积分作用和比例作用。

上面讨论了并联模型参考适应系统,对于串-并联和串联模型参考适应系统的数学模型,其基本分析方法是相同的。而且这几类模型参考适应系统之间都存在着内在的联系,经过简单变换,可以互相等效。例如图 5-8-7 所示串联模型参考适应系统的结构,可转化为并联模型参考适应系统形式。

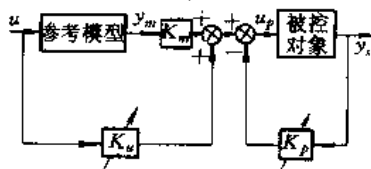


图 5-8-7 串联模型参考适应系统框图

根据图 5-8-7 可列出下列方程:

$$u_p = K_u u + K_m y_m - K_p y_s$$

$$= K_u u + K_m (y_m - y_s) + (K_m - K_p) y_s = K_u u + K_m e + (K_m - K_p) y_s \quad (5-8-28)$$

由此方程,可将图 5-8-7 所示串联模型参考适应系统转换为等效的并联模型参考适应系统,如图 5-8-8 所示。

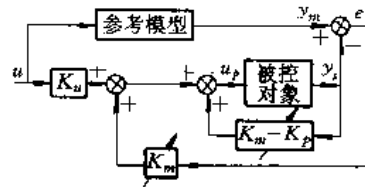


图 5-8-8 等效并联适应系统框图

5.3 模型参考适应系统的误差方程

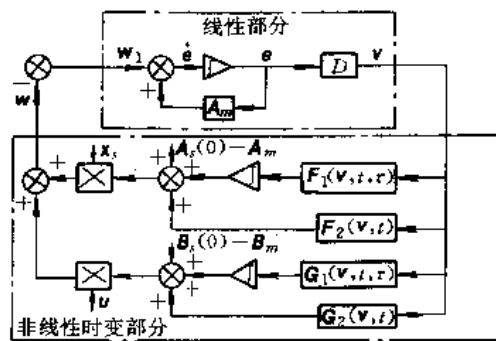
由式(5-8-8)、式(5-8-9)、式(5-8-13)、式(5-8-14)可求得可调参数情况的误差方程:

$$\dot{e} = A_m e + [A_m - A_s(0) - F(e, \tau, t)]x_s + [B_m - B_s(0) - G(e, \tau, t)]u \quad (5-8-29)$$

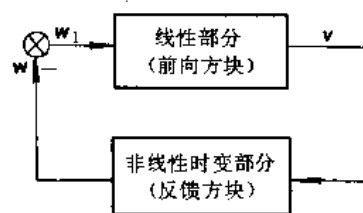
将式(5-8-15)、式(5-8-16)代入上式,得

$$\dot{e} = A_m e + \left\{ [A_m - A_s(0) - \int_0^t F_1(v, \tau, t) d\tau - F_2(v, t)]x_s + [B_m - B_s(0) - \int_0^t G_1(v, \tau, t) d\tau - G_2(v, t)]u \right\} \quad (5-8-30)$$

令式(5-8-30)右边第二项等于 w_1 , 则可得下列一组描述并联模型参考适应系统的等价方程:



a)



b)

图 5-8-9 并联模型参考适应系统等价框图



$$\begin{aligned} \dot{e} &= A_m e + w_1 \\ w &= -w_1 = \left[\int_0^t F_1(v, \tau, t) d\tau + F_2(v, t) \right. \\ &\quad \left. + A_r(0) - A_m \right] x + \left[\int_0^t G_1(v, \tau, t) d\tau \right. \\ &\quad \left. + G_2(v, t) + B_r(0) - B_m \right] u \end{aligned} \quad (5-8-31)$$

由上述方程组可画出如图 5-8-9 所示等价框图。它由两部分组成：一部分为线性部分，它的输入和输出分别为 w_1 和 v ；另一部分为时变非线性反馈部分，它的输入和输出分别为 v 和 w 。图 5-8-9a 可以用更为简单的图 5-8-9b 所示的框图表示。

6 模型参考适应系统局部参数优化设计法

具有可调增益的模型参考适应系统框图如图 5-8-10 所示。系统中具有一个可调整的增益 K_r ，理想模型的增益 K 是常数。当被控系统中 K_r 受环境影响或干扰影响而变化时，将使被控系统的动态特性与模型的动态特性之间产生偏差。为了克服 K_r 的变化所造成的影响，可由适应机构来调节可调增益 K_r ，使得 K_r 和 K 的乘积与参考模型的增益相一致。

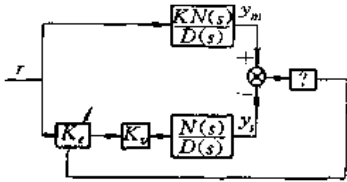


图 5-8-10 具有可调增益的适应系统框图

设理想的参考模型的传递函数为

$$G_m(s) = \frac{KN(s)}{D(s)} \quad (5-8-32)$$

被控系统的传递函数为

$$G_r(s) = \frac{K_r N(s)}{D(s)} \quad (5-8-33)$$

广义误差

$$e = y_m - y_s \quad (5-8-34)$$

式中 y_m —— 参考模型的输出；

y_s —— 被控系统的输出。

广义误差 e 表示输入信号为 $r(t)$ 时，被控系统的输出与参考模型的输出之间的差。

给定性能指标函数为

$$\mathcal{F}_{RM} = \frac{1}{2} \int_{t_0}^{\infty} e^2(\tau) d\tau \quad (5-8-35)$$

利用梯度寻优法，可求得使指标函数 \mathcal{F}_{RM} 为最小

的 K_r 。最后求得

$$K_r = \mu e y_m \quad (5-8-36)$$

$$\mu = \lambda K_r / K \quad (5-8-37)$$

式中 λ —— 寻优过程的步长。

式(5-8-36)就是可调增益 K_r 的调节规律，即适应规律。这个设计方案最早是由美国麻省理工学院(MIT)提出的，故又称为 MIT 适应系统。这个系统的适应机构是由一个乘法器和一个积分器所组成，如图 5-8-11 所示。按 MIT 规则设计的适应系统，在设计过程中未考虑稳定性问题。因此在求得适应规律后，尚需进行稳定性校验。

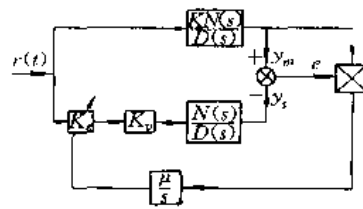


图 5-8-11 MIT 适应系统框图

利用参数优化方法设计模型参考适应系统时，应用不同的寻优方法，将得到不同的适应规律。由于参数优化过程中需要一定的适应调整时间，因此这种系统只适用于系统参数因干扰、环境影响变化较慢的情况。

7 模型参考适应系统李氏稳定理论设计法

利用局部参数优化方法设计的模型参考适应系统，设计过程中未考虑稳定性问题，所以必须进行稳定性校验。但许多实际系统无法用解析方法检验其全局稳定性。为了克服这个缺点，可直接利用李雅普诺夫稳定性理论设计系统，导出适应算法，以保证适应系统的全局渐近稳定性。

7.1 用可调系统状态变量构成适应规律的设计方法

用状态变量构成适应规律的适应系统框图如图 5-8-12 所示。

设参考模型的状态方程为

$$\dot{x}_m = A_m x_m + B_m u \quad (5-8-38)$$

可调系统的状态方程为

$$\dot{x}_r = A_r(t) x_r + B_r(t) u_1 \quad (5-8-39)$$

$$u_1 = K(t) u + F(t) x_r \quad (5-8-40)$$



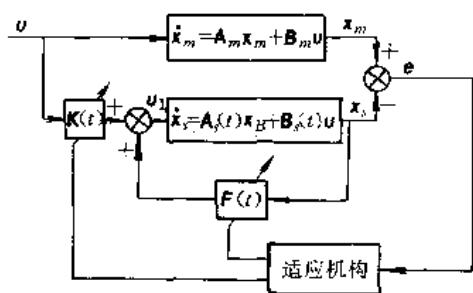


图 5·8-12 用状态变量构成适应规律的适应系统框图

式中 $A_p(t)$ —— $n \times n$ 维矩阵;
 $B_p(t)$ —— $n \times m$ 维矩阵;
 $K(t)$ —— $m \times m$ 维可调前馈增益矩阵;
 $F(t)$ —— $n \times m$ 维可调反馈补偿矩阵。

设系统的广义误差矢量为

$$e = x_m - x_p \quad (5\cdot8-41)$$

利用李雅普诺夫稳定性理论可求得参数适应调节规律为

$$F(t) = \int_0^t \Gamma_1 (B_m K^*)^T P e x_p^T d\tau + F(0) \quad (5\cdot8-42)$$

$$K(t) = \int_0^t \Gamma_2 (B_m K^*)^T P e u^T d\tau + K(0) \quad (5\cdot8-43)$$

式中 K^* ——可调系统与参考模型相匹配时的 K 值;
 Γ_1, Γ_2 及 P ——构造李氏函数的适当维数的正定对称矩阵。

7·2 用被控对象的输入-输出构成适应规律的设计方法

用可调系统状态变量构成适应规律的方法,需要准确获得状态变量信息,这对于许多实际系统很难实现。因此,人们考虑用被控对象的输入-输出构成适应规律。关于这个问题,可以采取两种方式实现:一是根据被控对象的输入-输出或系统输出广义误差矢量构成适应规律,调节某一特定结构的控制器的可调参数,使得由控制器和被控对象所组成的可调系统的传递函数与参考模型的传递函数相匹配,这种方法称为直接法;另一个方式是,利用被控对象的输入-输出构造一个适应式观测器,实时地估计对象的未知参数和状态,然后利用这些估计值构成适应规律,调整可调参数,使可调系统的传递函数和参考模型的传递函数相匹配,这种方法称为间接法。这里主要介绍直接法。

这里只讨论具有可调增益的适应系统的适应规律的设计方法。

图 5·8-13 所示为具有可调增益的模型参考适应系统的开环框图。在初始时刻, K_v 由于干扰的影响而发生变化,使得 $K, K_v \neq K$, 于是产生输出广义误差 $e = y_m - y_p$, 误差传递函数为

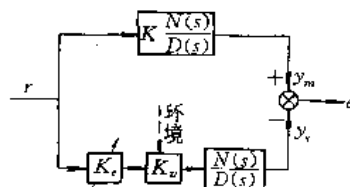


图 5·8-13 具有可调增益模型参考适应系统开环框图

$$\frac{E(s)}{R(s)} = \frac{\tilde{K} b_{n-1} s^{n-1} + b_{n-2} s^{n-2} + \dots + b_0}{s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_0} \quad (5\cdot8-44)$$

$$\tilde{K} = (K - K_v K_f) \quad (5\cdot8-45)$$

广义误差方程为

$$e^n + a_{n-1} e^{n-1} + \dots + a_0 e = \tilde{K} (b_{n-1} r^{n-1} + b_{n-2} r^{n-2} + \dots + b_0 r) \quad (5\cdot8-46)$$

上述诸式的矢量微分方程表示式为

$$\dot{e} = A e + \tilde{K} C r \quad (5\cdot8-47)$$

$$e_1 = h^T e \quad (5\cdot8-48)$$

式中

$$e = [e_1, e_2, \dots, e_n]^T$$

$$e_1 = e, e_2 = \dot{e}, \dots, e_n = e^{(n-1)} = \frac{d^{n-1}}{dt^{n-1}} e$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & 0 & 1 & & \vdots \\ \vdots & \vdots & 0 & & \vdots \\ & & & & 1 \\ -a_0 & -a_1 & \dots & & -a_{n-1} \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} c_n \\ c_{n-1} \\ \vdots \\ c_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ a_{n-1} & 1 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_1 & a_2 & \dots & a_{n-1} & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} b_{n-1} \\ b_{n-2} \\ \vdots \\ b_0 \end{bmatrix}$$

$$h^T = [1, 0, 0, \dots, 0]$$

根据李雅普诺夫稳定性理论,求得适应规律为

$$\dot{K}_v = \frac{1}{K_v \lambda} \mu e_1 r = \frac{1}{K_v \lambda} \beta^T e_1 r \quad (5\cdot8-49)$$

式中 λ ——大于零的实数,是构成李氏函数确定的;
 μ ——大于零的实数,它由下式确定:

$$PA + A^T P = -Q \quad Q \geq 0 \quad (5\cdot8-50)$$

$$Pc = h \mu \quad \mu > 0 \quad (5\cdot8-51)$$



式中, P, Q 分别是构造李氏函数选择的恰当维的正定、半正定对称矩阵。

根据上述方法确定的模型参考适应系统框图如图 5-8-14 所示。

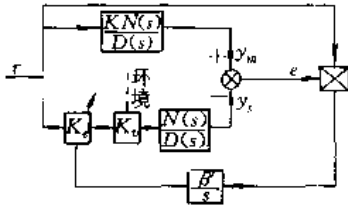


图 5-8-14 具有可调增益模型参考适应系统

8 模型参考适应系统的超稳定理论设计法

应用李雅普诺夫稳定性理论设计适应系统的主要缺点是, 针对具体系统难于选择合适的李氏函数, 所以不容易获得较好的适应规律。用超稳定性理论来设计模型参考适应系统, 可以给出一族适应规律, 因此有利于结合实际系统比较灵活地选择较合适的适应规律。

应用超稳定性理论设计模型参考适应系统的设计步骤可归纳如下:

- (1) 将模型参考适应系统等价为由一个线性前向环节和一个非线性时变反馈环节组成的标准多变量非线性时变反馈系统。
- (2) 使等价系统的前向环节满足 Popov 不等式, 由此确定合适的适应规律。
- (3) 确定等价系统前向环节成为严格正实的所必须的附加条件, 从而确定另一部分的适应机构。
- (4) 将等价系统返回到原系统, 完成整个模型参考适应系统的框图。

8.1 用状态变量构成适应规律的设计方法

设系统的基本结构如图 5-8-15 所示。图中参考模型的状态方程为

$$\dot{x}_m = A_m x_m + B_m u \quad (5-8-52)$$

被控对象的状态方程为

$$\dot{x}_s = A_s(v, t)x_s + B_s(v, t)u \quad (5-8-53)$$

式中 $x_s(0) = x_0$ $A_s(0) = A_{s0}$ $B_s(0) = B_{s0}$

第一步: 转换为等价非线性时变系统, 该系统的广义误差为

$$e = x_m - x_s \quad (5-8-54)$$

$$\dot{e} = \dot{x}_m - \dot{x}_s = A_m e + [B_m - B_s(v, t)]u + [A_m - A_s(v, t)]x_s \quad (5-8-55)$$

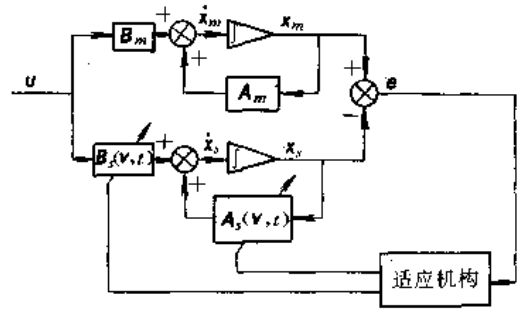


图 5-8-15 用状态方程描述模型参考适应系统框图

等价非线性时变反馈系统, 是由对象和参考模型所组成的等效前向环节和有非线性时变性质的适应机构等价反馈环节组成。根据超稳定理论, 对等价反馈环节, 要求它满足 Popov 不等式, 同时要求等价前向环节必须是严格正实的。为了要满足前向环节严格正实的要求, 一般需要在前向通道中串入一补偿器 D , 并且有

$$v = De \quad (5-8-56)$$

在式(5-8-53)中的 $A_s(v, t), B_s(v, t)$ 是受环境影响而变化的参数, 同时它们又受适应机构的调节作用而力图使它们接近 A_m, B_m 。适应规律是 v 的时变非线性函数。为了使得在 $v=0$ 时仍能保持调节作用, 适应规律中应包含具有记忆功能的积分规律。因此, 一般可采用比例及积分的调节规律:

$$\left. \begin{aligned} A_s(v, t) &= \int_0^t \Phi_1(v, t, \tau) d\tau + \Phi_2(v, t) + A_{s0} \\ B_s(v, t) &= \int_0^t \Psi_1(v, t, \tau) d\tau + \Psi_2(v, t) + B_{s0} \end{aligned} \right\} \quad (5-8-57)$$

式中, Φ_1, Φ_2 为 $n \times n$ 维, Ψ_1, Ψ_2 为 $n \times m$ 维矩阵。

这样, 等价非线性时变反馈系统可由下式描述:

$$\dot{e} = A_m e + I w_1 \quad (5-8-58)$$

$$v = De \quad (5-8-59)$$

$$w = -w_1 = \left[\int_0^t \Phi_1(v, t, \tau) d\tau + \Phi_2(v, t) + A_{s0} - A_m \right] x_s + \left[\int_0^t \Psi_1(v, t, \tau) d\tau + \Psi_2(v, t) + B_{s0} - B_m \right] u \quad (5-8-60)$$

等价系统框图如图 5-8-16 所示。

第二步: 使等价反馈环节满足 Popov 不等式, 由此可求得反馈环节的调节规律式(5-8-57)和式(5-8-58)中的 $\Phi_1, \Phi_2, \Psi_1, \Psi_2$:



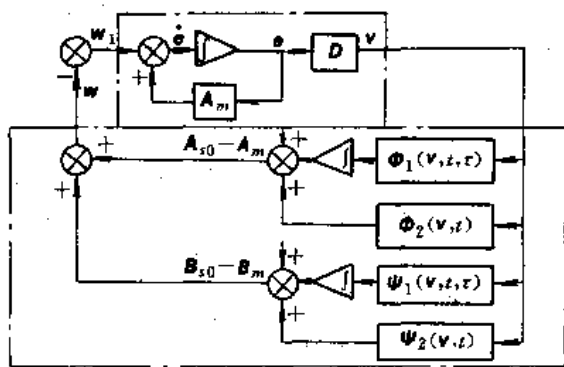


图 5-8-16 并联模型参考适应系统等价系统框图

$$\Phi_1(v, t, \tau) = F_a(t-\tau)v(\tau)x^T(\tau) \quad (5-8-61)$$

$$\Phi_2(v, t) = F_a(t)v(t)x^T(t) \quad (5-8-62)$$

$$\Psi_1(v, t, \tau) = F_b(t-\tau)v(\tau)u^T(\tau) \quad (5-8-63)$$

$$\Psi_2(v, t) = F_b(t)v(t)u^T(t) \quad (5-8-64)$$

式中 F_a, F_b ——适当选择的正定矩阵积分核；

F_a, F_b ——非负定矩阵。

因此 F_a, F_b, F_a, F_b 可以有很多种选择。最简单的情况，可以选择

$$F_a(t-\tau) = F_a > 0 \quad F_b(t-\tau) = F_b > 0 \quad \tau \leq t$$

$$F_a(t) = F_a \geq 0 \quad F_b(t) = F_b \geq 0 \quad t \geq 0$$

第三步，根据等价前向环节正实性要求，确定线性补偿器 D 。

当等价系统的反馈环节满足 Popov 积分不等式后，要使系统为渐近稳定的，则要求由式(5-8-58)和式(5-8-59)形成的前向环节的传递函数

$$G(s) = D(sI - A_m)^{-1}I \quad (5-8-65)$$

必须是严格正实的。

当参考模型为渐近稳定时，总可以找到正定对称阵 P, Q 使得下列方程成立：

$$PA_m + A_m^T P = -Q \quad (5-8-66)$$

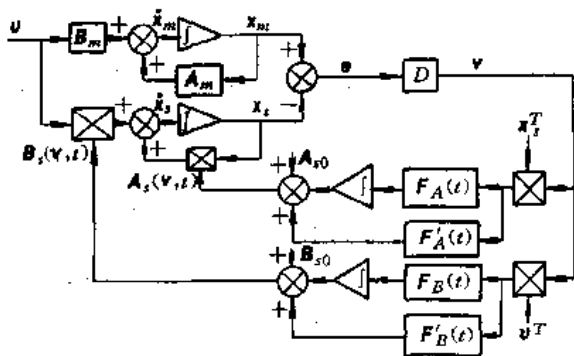


图 5-8-17 用超稳定性设计的并联模型参考适应系统框图

$$PI = D \quad (5-8-67)$$

满足上述方程的解 D 必能使式(5-8-65)表示的传递函数 $G(s)$ 为严格正实的。

第四步：在确定了 $F_a(t), F_b(t)$ 及 D 后，即可作出适应系统的框图，如图 5-8-17 所示。

8.2 用输入-输出构成适应规律的模型参考适应系统设计方法

用状态变量构成适应规律设计适应系统，需要全部状态可观测，这对许多实际系统是很难实现的。用输入-输出的测量值来构成适应规律比较容易实现，但是所构成的适应规律中往往不仅包含输入-输出变量本身，而且还包含它们的各阶导数。这就意味着适应机构中需要引入微分器。这样，必然降低了适应机构对干扰的抑制能力。为克服这一缺点，可根据需要在系统中引入状态滤波器。

1. 无状态滤波器的情况 这种情况的系统框图如图 5-8-18 所示。其中参考模型的方程为

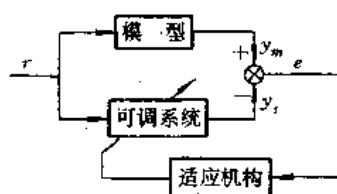


图 5-8-18 无状态滤波器的并联模型参考适应系统框图

$$\left(\sum_{i=0}^n a_{ni} p^i \right) y_m = \left(\sum_{i=0}^m b_{mi} p^i \right) r \quad a_{nn} = 1 \quad (5-8-68)$$

可调系统方程为

$$\left(\sum_{i=0}^n a_{ni} p^i \right) y_s = \left(\sum_{i=0}^m b_{mi} p^i \right) r \quad a_{nn} = 1 \quad (5-8-69)$$

广义误差

$$e = y_m - y_s \quad (5-8-70)$$

串联线性补偿器为 $D(p)$ ：

$$v = D(p)e = \left(\sum_{i=0}^{n-1} d_i p^i \right) e \quad (5-8-71)$$

适应规律为

$$a_{ii}(v, t) = \int_0^t \phi_{1i}(v, t, \tau) d\tau - \phi_{2i}(v, t) + a_{ii}(0) \quad (5-8-72)$$

$$i = 0, 1, 2, \dots, n-1$$

$$b_{ii}(v, t) = \int_0^t \phi_{1i}(v, t, \tau) d\tau + \phi_{2i}(v, t) + b_{ii}(0) \quad (5-8-73)$$

$$i = 0, 1, \dots, m$$

根据超稳定性理论对于等价反馈环节的要求,可求得

$$\phi_{11} = -K_{a1}(t-\tau)v(\tau)p^i y_e(\tau) \quad (5.8-74)$$

$$\phi_{21} = -K'_{a1}(t)v(t)p^i y_e(t) \quad (5.8-75)$$

$$\phi_{12} = K_{a2}(t-\tau)v(\tau)p^i r(\tau) \quad (5.8-76)$$

$$\phi_{22} = K'_{a2}(t)v(t)p^i r(t) \quad (5.8-77)$$

等价前向环节的传递函数为

$$H(s) = \frac{D(s)}{\sum_{i=0}^n a_{mi}s^i} = \frac{\sum_{i=0}^{n-1} d_i s^i}{\sum_{i=0}^n a_{mi}s^i} \quad (5.8-78)$$

2. 有状态滤波器的情况 这种情况的系统框图如图 5.8-19 所示。描述这个系统的方程,除方程式(5.8-68)~式(5.8-73)之外,还增加有参考模型输出端状态滤波器方程:

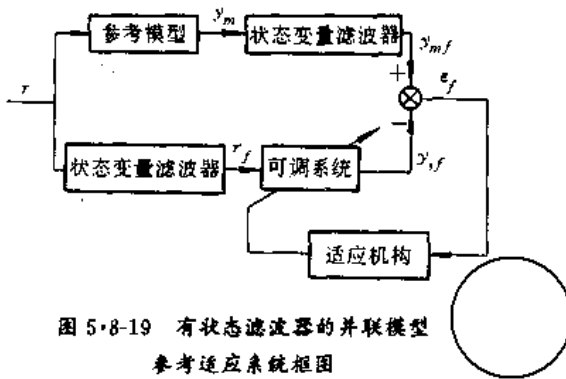


图 5.8-19 有状态滤波器的并联模型参考适应系统框图

$$\left(\sum_{i=0}^{n-1} c_i p^i\right) y_{mf} = y_m \quad c_{n-1} = 1 \quad (5.8-79)$$

和可调系统输入端状态滤波器方程:

$$\left(\sum_{i=0}^{n-1} c_i p^i\right) r_f = r \quad c_{n-1} = 1 \quad (5.8-80)$$

根据超稳定性理论,可求得

$$\phi_{11} = -K_{a1}(t-\tau)v(\tau)p^i y_{fj}(\tau) \quad i=0,1,\dots,n-1 \quad (5.8-81)$$

$$\phi_{21} = -K'_{a1}(t)v(t)p^i y_{fj}(t) \quad i=0,1,\dots,n-1 \quad (5.8-82)$$

$$\phi_{12} = K_{a2}(t-\tau)v(\tau)p^i r_f(\tau) \quad i=0,1,\dots,m \quad (5.8-83)$$

$$\phi_{22} = K'_{a2}(t)v(t)p^i r_f(t) \quad i=0,1,\dots,m \quad (5.8-84)$$

前向环节的传递函数形式与式(5.8-78)相同。上述诸式中的 $K_{a1}(t-\tau)$ 和 $K_{a2}(t-\tau)$ 是恰当选择的标量正定积分核。 K'_{a1} 、 K'_{a2} 在 $t \geq 0$ 时为时变非负增益。

9 随机适应控制系统

当受控系统的动态特性未知,而又受到随机干扰

时,无法设计一个定常的反馈控制系统来达到预期的性能要求。解决这一问题的主要途径是通过辨识方法近似估计系统的动态特性,然后构成控制作用。自校正调节器是一类较为简单的随机适应控制系统。

自校正调节器是根据被控过程的输入和输出的实测数据,用在线递推辨识方法辨识过程和干扰的数学模型。然后在线地自校准调节器的参数,可以随着过程动态的变化自动校正控制作用,以便能够在随机干扰作用下达到预期的控制目标,例如使输出方差最小,实现二次型高斯控制或按需要配置极点、零点。

9.1 最优预报器和最小方差控制器

对于单输入单输出的过程的动态特性可由线性差分方程描述:

$$y(k) + a_1 y(k-1) + \dots + a_n y(k-n) = b_0 u(k-d) + b_1 u(k-d-1) + \dots + b_n u(k-d-n) + \lambda[\varepsilon(k) + c_1 \varepsilon(k-1) + \dots + c_n \varepsilon(k-n)] \quad (5.8-85)$$

式中 $u(k)$ 、 $y(k)$ ——过程的输入和输出序列;

$\varepsilon(k)$ ——干扰,它是零均值的白色噪声序列;

d ——输出对输入响应的滞后时间;

n ——过程的阶次;

λ ——常数, $\lambda > 0$,它决定了干扰的强度,即噪声方差的大小。

如果用滞后算子式表示过程的动态特性,则式(5.8-85)可改写为

$$A(z^{-1})y(k) = z^{-d}B(z^{-1})u(k) + \lambda C(z^{-1})\varepsilon(k) \quad (5.8-86)$$

式中

$$A(z^{-1}) = 1 + a_1 z^{-1} + \dots + a_n z^{-n}$$

$$B(z^{-1}) = b_0 + b_1 z^{-1} + \dots + b_n z^{-n}$$

$$C(z^{-1}) = 1 + c_1 z^{-1} + \dots + c_n z^{-n}$$

这里约定:各多项式的阶数均为 n ,其中有的可以低于 n 阶,但至少有一个多项式阶次为 n 阶。

式(5.8-86)可改写为

$$y(k) = \frac{z^{-d}B(z^{-1})}{A(z^{-1})}u(k) + \lambda \frac{C(z^{-1})}{A(z^{-1})}\varepsilon(k) \quad (5.8-87)$$

将 $C(z^{-1})/A(z^{-1})$ 分解得

$$\frac{C(z^{-1})}{A(z^{-1})} = F(z^{-1}) + z^{-d} \frac{G(z^{-1})}{A(z^{-1})} \quad (5.8-88)$$

或



$$C(z^{-1}) = A(z^{-1})F(z^{-1}) + z^{-d}G(z^{-1}) \quad (5.8-89)$$

式中, F, G 分别是 $d-1$ 阶和 $n-1$ 阶多项式, 即

$$F(z^{-1}) = 1 + f_1 z^{-1} + \dots + f_{d-1} z^{-d+1} \quad (5.8-90)$$

$$G(z^{-1}) = g_0 + g_1 z^{-1} + \dots + g_{n-1} z^{-n+1} \quad (5.8-91)$$

将式(5.8-88)、式(5.8-89)代入式(5.8-87)中, 两端分别乘以 z^{+d} , 得

$$y(k+d) = \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})} u(k) + \lambda F(z^{-1}) \varepsilon(k+d) + \lambda \frac{G(z^{-1})}{A(z^{-1})} \varepsilon(k) \quad (5.8-92)$$

考虑到式(5.8-86)、式(5.8-92)及式(5.8-89), 经代换整理后得

$$y(k+d) = \frac{G(z^{-1})}{C(z^{-1})} y(k) + \frac{B(z^{-1})F(z^{-1})}{C(z^{-1})} u(k) + \lambda F(z^{-1}) \varepsilon(k+d) \quad (5.8-93)$$

上式右端第三项是 $\varepsilon(k+d), \varepsilon(k+d-1), \dots, \varepsilon(k+1)$ (共 d 项) 的线性组合, 而右端第一项和第二项和 $\varepsilon(k), \varepsilon(k-1), \dots$ 有关。由于 $\varepsilon(k)$ 是白色噪声序列, 所以右端前两项与第三项是线性独立的。

可用 $\hat{y}(k+d/k)$ 表示在 k 时刻对 $k+1$ 时刻输出量 $y(k+d)$ 的预报。现在的问题是如何找到一个最优的 d 步预报 $\hat{y}^*(k+d/k)$, 使得预报误差的方差最小, 即满足下式:

$$E[y(k+d) - \hat{y}^*(k+d/k)]^2 \leq E[y(k+d) - \hat{y}(k+d/k)]^2 \quad (5.8-94)$$

式中, $\hat{y}(k+d/k)$ 为任意一个时刻 k 向前 d 步的线性预报。

将式(5.8-93)代入式(5.8-94), 并考虑到式(5.8-93)右端第三次与前两项的独立性, 如果选择

$$\hat{y}^*(k+d/k) = \frac{G(z^{-1})}{C(z^{-1})} y(k) + \frac{B(z^{-1})F(z^{-1})}{C(z^{-1})} u(k) \quad (5.8-95)$$

则可使式(5.8-94)达到极小。因此式(5.8-95)表示的预报即为向前 d 步的最优预报器。

所谓最小方差控制器是在随机干扰作用下及控制作用与输出之间存在 d 步滞后的情况下, 使得实际输出 $y(k+d)$ 与要求的给定值 y_r 间的误差最小的控制器, 即使得

$$E[y(k+d) - y_r]^2 = \min \quad (5.8-96)$$

显然, 只要使 $\hat{y}^*(k+d/k) = y_r$, 就能实现最小方差控制。因此最小方差控制律为

$$u^*(k) = [C(z^{-1})y_r - G(z^{-1})y(k)] / B(z^{-1})F(z^{-1}) \quad (5.8-97)$$

9.2 自校正调节器

大多数实际系统的动态特性往往是未知的, 或者存在着一定的不确定性。另外, 受到干扰时将使系统的动态特性发生变化。因此, 如前所述, 用一个定常确定性模型来描述系统实现最小方差控制, 是很难达到预期目标的, 会出现很大的偏差。如果在线地随时辨识估计被控对象的模型, 使其真实地反映实际过程, 才有可能真实地实现最小方差控制。将最小二乘递推辨识和最小方差控制策略结合起来的控制系统是基本的自校正调节器。

现仍讨论式(5.8-85)描述的单输入单输出系统, 并将其差分方程换成如下形式:

$$\begin{aligned} y(k+d) + a_1 y(k+d-1) + \dots + a_{d-1} y(k+1) \\ + a_d y(k) + \dots + a_n y(k+d-n) \\ = b_0 u(k) + b_1 u(k-1) + \dots + b_n u(k-n) \\ + \lambda [\varepsilon(k+d) + c_1 \varepsilon(k+d-1) + \dots \\ + c_n \varepsilon(k+d-n)] \end{aligned} \quad (5.8-98)$$

或

$$A(z^{-1})y(k+d) = B(z^{-1})u(k) + \lambda C(z^{-1})\varepsilon(k+d) \quad (5.8-99)$$

自校正调节器, 就是在 $A(z^{-1}), B(z^{-1}), C(z^{-1})$ 未知和变化时实现最小方差控制的。

根据式(5.8-98)可以求得自校正调节器的第 d 步预报模型

$$\begin{aligned} y(k+d) = a_1 y(k) + a_2 y(k-1) + \dots \\ + a_p y(k-p+1) + \beta_0 u(k) + \beta_1 u(k-1) \\ + \dots + \beta_q u(k-q) + \varepsilon(k+d) \end{aligned} \quad (5.8-100)$$

式中

$$\begin{aligned} \varepsilon(k+d) = \mu_0 \varepsilon(k+d) + \dots + \mu_q \varepsilon(k-p+1), \\ p=n, q=n+d-1 \end{aligned}$$

根据式(5.8-100)在 k 时刻对 $y(k+d)$ 作预报估计是物理可实现的。式中, $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_p, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_q$ 都是需要在线进行估计的, $\varepsilon(k)$ 是随机干扰。

为了简化辨识过程和自校正调节规律的计算, 选定 β_0 (通过试验或工艺分析), 不参与辨识。 β_0 的选择将影响参数估计的收敛性。若 $\hat{\beta}_0$ 为 β_0 的某个估计值, 则当

$$\left| 1 - \frac{\beta_0}{\hat{\beta}_0} \right| < 1 \quad \text{或} \quad \frac{\beta_0}{\hat{\beta}_0} \in (0, 2)$$

时, 参数的递推估计收敛。



自校正调节器的第 d 步预报方程可改写为

$$y(k+d) = \beta_0 u(k) + \varphi^T(k)\theta + \sum_{i=0}^{d-1} \mu_i \varepsilon(k+d-i) \quad (5.8-101)$$

式中

$$\begin{aligned} \theta^T &= [\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_p; \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_q], \\ \varphi^T(k) &= [y(k), \dots, y(k-p+1), \\ &\quad u(k-1), \dots, u(k-q)] \end{aligned}$$

这时, θ 的估计值可用最小二乘法求得。由式(5.8-101)可得到下式:

$$y(k+d) - y_r = \beta_0 u(k) + \varphi^T(k)\theta + \sum_{i=0}^{d-1} \mu_i \varepsilon(k+d-i) - y_r$$

式中, y_r 为参考输入, 考虑到干扰和输出间的独立性, 得

$$E[y(k+d) - y_r] = E\left[\sum_{i=0}^{d-1} \mu_i \varepsilon(k+d-i)\right]^2 + E[\beta_0 u(k) + \varphi^T(k)\theta - y_r]^2$$

即

$$E[y(k+d) - y_r] \geq \sum_{i=0}^{d-1} \mu_i^2 \quad (5.8-102)$$

上式等号成立的条件是

$$\beta_0 u(k) + \varphi^T(k)\theta - y_r = 0$$

因此, 最小方差控制系统的最优控制函数为

$$u(k) = \frac{1}{\beta_0} [y_r - \varphi^T(k)\theta] \quad (5.8-103)$$

当 θ 用递推最小二乘估计值代入时, 即得到基本自校正调节器的控制函数:

$$u(k) = \frac{1}{\hat{\beta}_0} [y_r - \varphi^T(k)\hat{\theta}] \quad (5.8-104)$$

基本自校正调节器框图如图 5.8-20 所示。

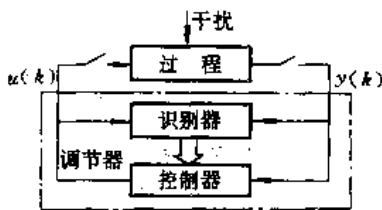


图 5.8-20 基本自校正调节器框图

基本自校正调节器的物理解释是很清楚的。它的基本结构是一个预报器, 将预报结果与要求的输出值进行比较, 用比较得到的差确定控制作用。它不断地修正预报参数, 跟踪过程的变化。它对于未知参数的定常

系统和慢时变系统都能得到满意的结果。

最小方差控制是在过程参数已知的情况下得出的, 而与自校正调节器对应的是参数未知的情况, 它依据参数的在线估计值。因此就产生一个问题: 自校正调节器是否实现了最小方差控制。可以证明(K. J. Åström), 如果 p, q 对于过程来说选择得足够大, 参数估计是收敛的, 则自校正调节器收敛于对象参数已知时的最小方差控制器。

9.3 零极点配置的自校正调节器

考虑一个过程的传递函数为

$$G_p = \frac{B}{A}$$

式中, A, B 都是前移算子多项式。假设 A, B 互素。希望设计一个调节器, 使其闭环系统传递函数为

$$G_M = \frac{B_m}{A_m} \quad (5.8-105)$$

式中 A_m, B_m —— 前移算子多项式, 且互素。

一般, 线性调节器产生的信号 u 可由给定值和输出表示:

$$Ru = Ty_r - Sy \quad (5.8-106)$$

R, S, T 是前移算子多项式。

从给定输入到闭环系统输出 y 的传递函数为

$$G = \frac{TB}{AR + BS} \quad (5.8-107)$$

设计的任务, 就是寻求多项式 R, S, T , 使得闭环系统传递函数 G 等于希望的传递函数 G_M :

$$\frac{TB}{AR + BS} = \frac{B_m}{A_m} \quad (5.8-108)$$

因为 B 包含着闭环系统的零点, 所以把 B 分解成两部分:

$$B = B^+ B^- \quad (5.8-109)$$

式中, B^+ 表示其零点位于 Z 平面的单位圆内, 而 B^- 表示其零点位于单位圆外。

为了使问题有解, 令

$$B_m = B_m^+ B^- \quad (5.8-110)$$

式中, B_m^+ 是预先给定的希望因子。 A_m 的阶数通常低于 $(AR + BS)$, 这意味着多项式 $AR + BS$ 和 TB 有公因子。

希望的观测器的零点用已给定的 T_1 确定

$$T = T_1 B_m^+ \quad (5.8-111)$$



希望的观测器的极点用已知的 B^+ 确定

$$R = R_1 B^+ \quad (5.8-112)$$

此时,式(5.8-108)变为

$$AR_1 + B^- S = A_m T_1 \quad (5.8-113)$$

将式(5.8-109)~式(5.8-113)代入式(5.8-107),可以证明式(5.8-108)成立,即 $G = G_m$ 。这表明闭环系统的传递函数等于希望的传递函数,即系统具有了所要求的零点、极点。

这种情况下的自校正调节器,将不断地递推估计 A, B ,跟踪过程的变化,形成控制作用。基于最小二乘估计的零极点配置的自校正调节器框图如图 5.8-21 所示。

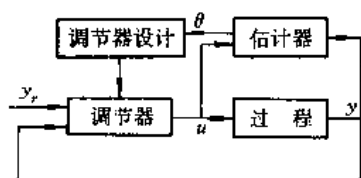


图 5.8-21 零点、极点配置的自校正调节器框图

当系统有过程噪声干扰时的零极点配置的自校正调节器设计问题,可参考文献[15]。

9.4 自校正控制器

从前节讨论知,自校正调节器在过程控制中易于实现,且控制效果较好。但在有些情况下,控制效果差。这是因为在其指标函数中未约束控制作用,因此往往要求过大的控制作用,这在实际系统中可能是不允许的。另外,对于非最小相位系统控制效果较差。

自校正控制器是为克服上述缺点而提出的。

被控过程为

$$A(z^{-1})y(k) = B(z^{-1})u(k-d) + e(k) \quad (5.8-114)$$

指标函数为

$$\mathcal{J} = E\{[P(z^{-1})y(k+d) - R(z^{-1})y_r(k)]^2 + [Q(z^{-1})u(k)]^2\} \quad (5.8-115)$$

当系统参数未知或变化时,能自动递推估计系统参数并形成使指标函数式(5.8-115)为极小的控制称为自校正控制器。

自校正控制器设计过程如下:

(1) 在时刻 k , 得到 $y(k)$ 测量值后, 计算辅助输出

$\phi(k)$

$$\phi(k) = P(z^{-1})y(k) + Q(z^{-1})u(k-d) - R(z^{-1})y_r(k) \quad (5.8-116)$$

(2) 按下式计算估计值 $\hat{\theta}(k), \hat{\theta}(k+1)$

$$\hat{\theta}(k+1) = \hat{\theta}(k) + K(k)[\phi(k+1) - \varphi^T(k-d+1)\hat{\theta}(k)] \quad (5.8-117)$$

$$K(k) = P(k)\varphi(k-d+1) \times [1 + \varphi^T(k-d+1)P(k)\varphi(k-d+1)]^{-1} \quad (5.8-118)$$

$$P(k+1) = P(k) - P(k)\varphi(k-d+1)[1 + \varphi^T(k-d+1)P(k)\varphi(k-d+1)]^{-1} \times \varphi^T(k-d+1)P(k) \quad (5.8-119)$$

式中

$$\theta^T = (m_0, m_1, \dots, n_0, n_1, \dots, h_0, h_1, \dots)$$

$$\varphi^T = \{y(k), y(k-1), \dots, u(k), u(k-1), \dots, y_r(k+d), y_r(k+d-1), \dots\}$$

(3) 将计算得到的估计值 $\hat{\theta}(k)$ 代入下式

$$\varphi^T(k)\hat{\theta}(k) = 0 \quad (5.8-120)$$

可求得自校正控制器的控制函数 $u(k)$ 。

计算中的 $P(z^{-1}), R(z^{-1})$ 及 $Q(z^{-1}) = \frac{q_0}{b_0} Q'(z^{-1})$ 是已知的指标函数中的多项式, $P(k)$ 则是被估计参数的协方差阵, 由式(5.8-119)确定。计算过程中所用到的多项式, 可参见 9.1 中的各式关系。

10 适应式状态观测器

关于状态观测器的设计问题, 参见本篇第 3 章。当被观测系统的参数未知或变化时, 就不能直接使用本篇第 3 章给出的方法了。这时应根据模型参考适应系统设计理论来进行设计。

这时, 可将被观测系统作为参考模型, 而用一个可调系统代替第 3 章中给出的定常线性观测器。这个可调系统的参数是可以跟踪观测系统参数变化的。调整可调系统参数的适应信号是由适应机构给出的。这是一个典型的由系统输入输出信号构成适应规律的模型参考适应系统。其设计方法, 可用前面讨论过的李雅普诺夫稳定理论或超稳定性理论来设计。具体设计方法可参见参考文献[29]。



第9章 新型控制技术

1 概述

在60年代以前,频率响应法和根轨迹法已发展完善,形成了第一代控制理论——经典控制理论。这一理论主要解决确定性的单变量控制系统的分析和设计问题。

从60年代初期开始,出现了以状态空间分析为基础的现代控制理论,解决了系统的可控性、可观测性问题,接着发展了多变量控制、最优控制、估计理论、适应控制理论、滤波理论及系统辨识理论等,推动了控制理论的发展。这是第二代控制理论。

随着科学技术的进步和工业生产的发展,需要加以控制的对象变得愈益复杂,对控制质量的要求也日益提高。现代许多军事和工业领域的被控对象都在一定程度上具有非线性和不确定性,因而难以建立精确的数学模型,甚至有些对象是无法建模的。对这类系统,现代控制理论是软弱无力的。为解决这类系统的控制问题,一些新型的控制技术就逐渐发展起来了。

为设计具有模型不确定性的控制系统,从70年代后期开始发展了鲁棒控制理论。鲁棒控制是研究具有不确定性的系统的控制理论,以保证这类控制系统的稳定鲁棒性和品质鲁棒性。

对于难于获得精确数学模型的被控对象,在有经验的人员操纵下,往往却能根据他们以往所积累的操作经验作出正确的判断,从而对其进行有效的控制。因此,形成一种把人们凭经验所采取的相应措施总结成一系列语言控制规则,并进而把这些规则编成计算机的控制程序,由计算机构成模糊控制器去完成控制,这就形成了模糊控制技术。

随着计算机学科的飞速发展以及控制论、信息论、系统科学、神经生理学、仿生学及数学等学科的相互渗透,形成了一门研究人脑的智能机理,研究如何利用各种方法来模拟人的思维过程和某些智能行为的科学——人工智能。将控制理论、人工智能及计算机科学结合就逐渐形成了智能控制。

2 鲁棒控制

2.1 控制系统灵敏度分析

用来表征控制系统性能受参数变化(参数不确定性)影响程度的量称为参数变化灵敏度。控制系统的性能可以用被控制量的响应特性(轨迹)来直接评价,也可用性能指标函数、闭环系统特征值等间接评价。因而,相应轨迹灵敏度、性能指标灵敏度和特征值灵敏度。

2.1.1 轨迹灵敏度

设控制系统方程为

$$y=f(x,u,\alpha,t) \quad (5.9-1)$$

式中 y —— $q \times 1$ 维输出矢量;

x —— $n \times 1$ 维状态矢量;

u —— $p \times 1$ 维控制矢量;

α —— $r \times 1$ 维参数矢量。

定义输出 y 和状态 x 的灵敏度函数分别为

$$\eta_i = \frac{\partial y}{\partial \alpha_i} \quad i=1, \dots, r \quad (5.9-2)$$

$$\sigma_i = \frac{\partial x}{\partial \alpha_i} \quad i=1, \dots, r \quad (5.9-3)$$

设线性、定常系统的状态方程为

$$\left. \begin{aligned} \dot{x} &= A(\alpha)x(t, \alpha) + B(\alpha)u(t) \\ x(0, \alpha) &= x_0(\alpha) \\ y &= C(\alpha)x(t, \alpha) + D(\alpha)u(t) \end{aligned} \right\} \quad (5.9-4)$$

将式(5.9-4)对 α_i 求导,可得系统的轨迹灵敏度方程:

$$\left. \begin{aligned} \dot{\sigma}_i &= A(\alpha)\sigma_i + \frac{\partial A}{\partial \alpha_i}x + \frac{\partial B}{\partial \alpha_i}u, \sigma_{i0} = \frac{\partial x_0}{\partial \alpha_i} \\ \eta_i &= \frac{\partial C}{\partial \alpha_i}x + C\sigma_i + \frac{\partial D}{\partial \alpha_i}u \end{aligned} \right\} \quad (5.9-5)$$

2.1.2 比较灵敏度

为了比较和深入了解闭环系统具有降低参数灵敏度的性能,研究当系统参数变化时,开环和闭环系统的控制效果。为此定义比较灵敏度函数 $S(s, \alpha)$

$$S(s, \alpha) = [1 + P(s, \alpha)G(s)H(s)]^{-1} \quad (5.9-6)$$



式中 $P(s, \alpha)$ ——对象传递函数;
 $G(s)$ ——正向补偿装置传递函数;
 $H(s)$ ——反馈通道传递函数。

开环误差 $E_0(s, \alpha)$ 与闭环误差 $E_c(s, \alpha)$ 的关系为

$$E_c(s, \alpha) = S(s, \alpha)E_0(s, \alpha) \quad (5.9-7)$$

若 $|S(s, \alpha)| < 1$, 则 $E_c < E_0$ 。对一般闭环系统, 所设计的 $|S(s, \alpha)|$ 均小于 1。

2.1.3 性能指标灵敏度

设系统的状态方程为

$$\dot{x} = f[x, u, \alpha, t], x(t_0) = x_0 \quad (5.9-8)$$

设计性能指标为

$$J = G[x(t_f), t_f] + \int_{t_0}^{t_f} L(x, u, \alpha, t) dt \quad (5.9-9)$$

针对标称参数 ($\alpha = \alpha_0$) 时求出的最优控制为

$$u_{opt}(t) = K(x, \alpha_0, t) \quad (5.9-10)$$

设控制函数 u_{opt} 不因 α 的变化而改变结构形式, 则式(5.9-8)可写成

$$\dot{x} = f[x, \alpha, t, K(x, \alpha_0, t)] \quad x(t_0) = x_0$$

求解此方程, 可得到轨迹 $x(t)$, 并可计算出性能指标 $J = J(x_0, t_0, \alpha, \alpha_0)$ 对微小的参数变化, 即 $\Delta\alpha = \alpha - \alpha_0$, 有

$$\Delta J = \sum_{j=1}^r \left. \frac{\partial J}{\partial \alpha_j} \right|_{\alpha_0} \Delta \alpha_j = \left. \frac{\partial J}{\partial \alpha} \right|_{\alpha_0} \Delta \alpha = J_\alpha \Delta \alpha \quad (5.9-11)$$

式中

$$\Delta J = J(x_0, t_0, \alpha, \alpha_0) - J(x_0, t_0, \alpha_0, \alpha_0)$$

$$J_\alpha = \left[\frac{\partial J}{\partial \alpha_1}, \dots, \frac{\partial J}{\partial \alpha_r} \right]_{\alpha_0} \quad (5.9-12)$$

此式即定义为性能指标灵敏度。

2.1.4 特征值灵敏度

特征值灵敏度表征对象参数变化对闭环系统特征值变化的影响, 其定义为

$$\lambda_{ij} = \frac{\partial \lambda_i}{\partial \alpha_j} \quad i, j, l = 1, \dots, n \quad (5.9-13)$$

式中 λ_i ——闭环系统第 i 个特征值;

a_{jl} —— A 阵的第 j 行 l 列上的元素。

$$\lambda_{ij} = \frac{1}{g(\lambda_i)} t_r \left[R(\lambda_i) \frac{\partial A}{\partial \alpha_j} \right] \quad (5.9-14)$$

式中 A ——闭环系统矩阵;

$g(\lambda)$ ——闭环特征多项式在 $\lambda = \lambda_i$ 处的导数;

$R(\lambda)$ ——矩阵 $(\lambda I - A)$ 的伴随阵。

2.2 参数不灵敏控制系统

设具有不确定参数的系统的状态方程为

$$\dot{x} = A(\alpha)x + B(\alpha)u, x(0) = x_0 \quad (5.9-15)$$

式中 x —— $n \times 1$ 状态矢量;

u —— $p \times 1$ 控制矢量;

α —— $r \times 1$ 不确定参数矢量;

A —— $n \times n$ 系统矩阵;

B —— $n \times p$ 控制矩阵;

x_0 ——初始状态矢量;

α_0 ——标称参数矢量。

设 α 处于某一封闭的有限域内, 即 $\alpha \in \Omega$ 。要设计一个参数不灵敏控制系统, 可选择下述定性设计指标:

(1) 参数为标称值时的系统性能指标, 用来表示系统标称工作状态时的期望性能。对线性最优控制器设计, 一般取

$$J = \int_0^{\infty} (x^T Q x + u^T R u) dt \quad (5.9-16)$$

式中 Q —— $n \times n$ 半正定加权阵;

R —— $p \times p$ 正定加权阵。

(2) 在参数偏离其标称值时系统允许的性能指标。

在设计参数不灵敏控制系统时, 必须将参数变化的灵敏度函数考虑在设计性能指标中。性能指标直接与表征系统期望性能的不灵敏度的类型有关。根据实际需要, 常用的灵敏度函数有: 轨迹灵敏度 $\partial x / \partial \alpha$; 性能指标灵敏度 $\partial J / \partial \alpha$; 特征值灵敏度 $\partial \lambda / \partial \alpha$; 奇异值灵敏度 $\frac{\partial \sigma}{\partial \alpha}$ 等。现以设计具有轨迹不灵敏控制系统为例, 其性能指标可选择为

$$\tilde{J} = \tilde{J} \left(x, u, \alpha, \frac{\partial x}{\partial \alpha} \right) \quad (5.9-17)$$

具体可取为

$$\tilde{J} = \int_0^{\infty} \left[x^T Q x + u^T R u + \sum_j \left(\frac{\partial x}{\partial \alpha_j} \right)^T S_j \left(\frac{\partial x}{\partial \alpha_j} \right) \right] dt \quad (5.9-18)$$

式中 $\partial x / \partial \alpha_j$ ——状态对第 j 个参数 α_j 的轨迹灵敏度函数;

S_j ——半正定加权阵。

参数不灵敏控制系统的提法是: 对式(5.9-15)所描述的系统, 按性能指标式(5.9-18), 确定相应的反馈控制规律, 使给定性能指标取极小。

根据给定性能指标的不同, 参数不灵敏控制系统有多种设计方法。如增广系统设计法; 二自由度结构



法;确保性能指标设计法;最小灵敏度极点配置设计法;参数空间法等。

下面简介增广系统设计法。其实质为将灵敏度向量 σ 视为新的状态向量,与原系统向量 x 一起组成增广状态向量 $z = [x^T \ \sigma^T]^T$ 。为降低控制系统的参数灵敏度,可对增广系统进行最优设计。

设原系统的状态方程为

$$\dot{x} = A(\alpha)x + B(\alpha)u \quad x(0) = x_0 \quad (5.9-19)$$

其相应的轨迹灵敏度模型为

$$\dot{\sigma} = \left(\frac{\partial A}{\partial \alpha} \right) x + A\sigma + \left(\frac{\partial B}{\partial \alpha} \right) u + B \left(\frac{\partial u}{\partial \alpha} \right) \quad (5.9-20)$$

联合式(5.9-19)和式(5.9-20),即得增广系统方程

$$\dot{z} = A^*z + B^*u^* \quad z(0) = z_0 \quad (5.9-21)$$

式中

$$z = \begin{bmatrix} x \\ \sigma \end{bmatrix} \quad A^* = \begin{bmatrix} A & 0 \\ \frac{\partial A}{\partial \alpha} & A \end{bmatrix}$$

$$B^* = \begin{bmatrix} B & 0 \\ \frac{\partial B}{\partial \alpha} & B \end{bmatrix} \quad u^* = \begin{bmatrix} u \\ \frac{\partial u}{\partial \alpha} \end{bmatrix}$$

设计性能指标可取为

$$\tilde{J} = \int_0^{\infty} (z^T Q^* z + u^{*T} R^* u^*) dt \quad (5.9-22)$$

式中 Q^* —— $2n \times 2n$ 半正定加权阵;

R^* —— $2p \times 2p$ 正定加权阵。

对增广系统式(5.9-21),按线性最优控制器方法设计,可得控制规律

$$u^* = K^* z \quad (5.9-23)$$

$$K^* = -R^{*-1} B^{*T} P^* \quad (5.9-24)$$

式中 P^* 为 Riccati 方程

$$A^{*T} P^* + P^* A^* - P^* B^* R^{*-1} B^{*T} P^* + Q^* = 0$$

的解。

由于在反馈中引入灵敏度向量,故能降低参数灵敏度,但这需要建立灵敏度模型,因而导致系统的设计计算和实现均变得复杂和困难。

2.3 H_{∞} 优化理论

2.3.1 频域中的整形

研究图 5.9-1 所示的闭环系统,干扰 $w(s)$ 与输出 $y(s)$ 间的传递函数 $S(s)$ 为

$$y = Sw \quad S = \frac{1}{I+L} \quad L = GK \quad (5.9-25)$$

$S(s)$ 为灵敏度函数,误差 e 与输入 r 的关系为

$$e = Sr \quad (5.9-26)$$

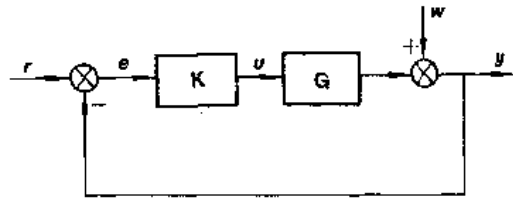


图 5.9-1 系统框图

如果能直接指定 $|S(j\omega)|$,则可保证系统特性,这就是关于频率响应整形的概念。要求 $S(s)$ 满足

$$|S(j\omega)| < \gamma \frac{1}{|L(j\omega)|} \quad (5.9-27)$$

即要求控制器 K 满足

$$\max |\Phi(j\omega)| < \gamma \quad (5.9-28)$$

$$\Phi(s) = L(s)S(s)$$

式中 γ —— 给定的正数。

将式(5.9-28)左边称为函数 Φ 的 H_{∞} 范数。

$$\|\Phi\|_{\infty} = \max |\Phi(j\omega)| \quad (5.9-29)$$

相应于 H_{∞} 范数, H_2 范数定义为

$$\|\Phi\|_2^2 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |\Phi(j\omega)|^2 d\omega \quad (5.9-30)$$

显然,对于具有任意有界 H_2 范数的 $d(s)$,一定满足

$$\|\Phi\|_{\infty} \geq \frac{\|\Phi d\|_2}{\|d\|_2} \quad (5.9-31)$$

若将 H_{∞} 范数表示为信号能量,则有

$$\|\Phi\|_{\infty} = \max_{\text{输入}} \frac{\text{输出能量}}{\text{输入能量}}$$

当 $\Phi(s)$ 为矩阵时, H_{∞} 范数可定义为

$$\|\Phi\|_{\infty} = \max \sigma[\Phi(j\omega)]$$

式中 σ —— 最大奇异值。

2.3.2 鲁棒稳定性

频率响应整形对鲁棒镇定问题具有重要意义,其基础是小增益定理。

小增益定理:设图 5.9-2 中 G 和 H 都是稳定的,则此反馈系统稳定的充分条件为

$$\|GH\|_{\infty} < 1 \quad (5.9-32)$$

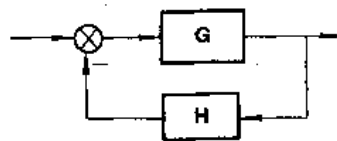


图 5.9-2 反馈系统框图

此定理表明仅由 H_{∞} 范数即可确定稳定性。现研



究模型 $G(s)$ 上加有未知稳定摄动 $\Delta(s)$ 的反馈系统,如图 5-9-3a 所示,等价变换如图 5-9-3b 所示。对等价变换图,有

$$\|\Delta - Q\|_{\infty} < 1 \quad Q = K(I + L)^{-1} \quad (5-9-33)$$

式中, Q 必须是稳定的。如果已知 $\Delta(j\omega)$ 的上限

$$|\Delta(j\omega)| \leq |\gamma(j\omega)| \quad \forall \omega \quad (5-9-34)$$

则系统鲁棒稳定的充分条件是

$$\|\gamma Q\|_{\infty} < 1 \quad (5-9-35)$$

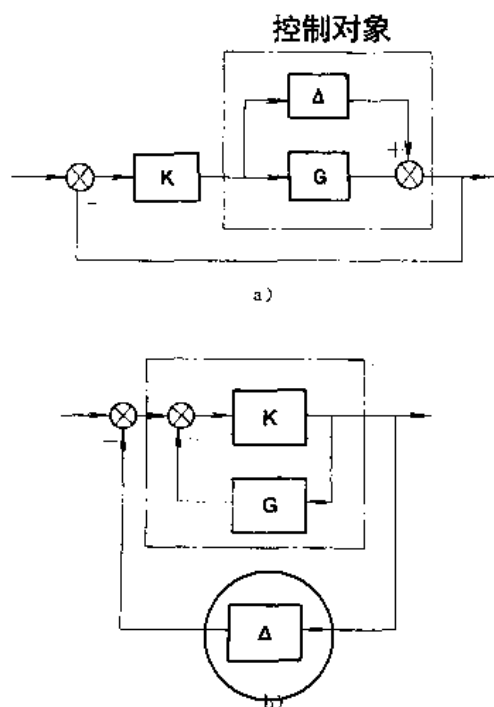


图 5-9-3 具有加型不确定的闭环系统

2.3.3 H_{∞} 控制标准问题

在 H_{∞} 控制中,控制对象的描述为

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + B_1 w + B_2 u \\ z = C_1 x + D_{11} w + D_{12} u \\ y = C_2 x + D_{21} w \end{cases} \quad (5-9-36)$$

式中 x —— 状态矢量;
 w —— 外部输入(干扰,参考输入等);
 u —— 控制输入;
 z —— 输出(被控量);
 y —— 观测输出。

若用传递函数表示,

$$\begin{bmatrix} z \\ y \end{bmatrix} = P \begin{bmatrix} w \\ u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} \\ P_{21} & P_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w \\ u \end{bmatrix} \quad (5-9-37)$$

式中 $P_{ij}(s) = D_{ij} + C_i(sI - A)^{-1}B_j$

控制器可表示为

$$u = Ky \quad (5-9-38)$$

将式(5-9-38)代入式(5-9-37),并消去 y

$$\Phi = P_{11} + P_{12}K(I - P_{22}K)^{-1}P_{21} \quad (5-9-39)$$

H_{∞} 控制的目的是确定控制器 K ,使闭环系统内稳定并满足

$$\|\Phi\|_{\infty} < \gamma \quad (5-9-40)$$

式中 γ —— 给定的正数。

对于标准化的 H_{∞} 控制问题,只要适当选择被控对象 P ,可使式(5-9-39)的 Φ 对应于各种控制问题,表 5-9-1 列出了 H_{∞} 所含的几个重要的控制问题。

表 5-9-1 H_{∞} 控制所含控制问题

| 控制问题 | P 的构成 | P 的框图 |
|---------------|-------------------------------------------------------|---------|
| 灵敏度极小化问题 | $P = \begin{bmatrix} W & -WG \\ I & -G \end{bmatrix}$ | |
| 鲁棒镇定问题(加型不确定) | $P = \begin{bmatrix} 0 & r \\ I & -G \end{bmatrix}$ | |
| 鲁棒镇定问题(乘型不确定) | $P = \begin{bmatrix} 0 & rG \\ I & -G \end{bmatrix}$ | |



(续)

| 控制问题 | P 的构成 | P 的框图 |
|-----------|-----------------------------------------------------------------------|---------|
| 混合灵敏度问题 | $P = \begin{bmatrix} W_1 & -W_1G \\ 0 & W_2G \\ I & -G \end{bmatrix}$ | |
| 输入加权的跟踪问题 | $P = \begin{bmatrix} q & -qG \\ 0 & I \\ I & -G \end{bmatrix}$ | |
| 滤波问题 | $P = \begin{bmatrix} 0 & I & -I \\ I & G & 0 \end{bmatrix}$ | |
| 自由度问题 | $P = \begin{bmatrix} D & -G \\ I & 0 \\ 0 & -G \end{bmatrix}$ | |

3 模糊控制

模糊控制是以模糊集合论、模糊语言变量及模糊逻辑推理为基础的一种计算机控制。它具有以下特点：

- (1) 不需知道被控对象的数学模型；
- (2) 易于对不确定性和非线性系统进行控制；
- (3) 对系统参数变化具有较强的鲁棒性；
- (4) 对干扰有较强的抑制能力。

3.1 模糊集合及其运算

在经典集合论中，一事物要么属于一个集合，要么不属于该集合，二者必居其一。这表明经典集合所表达概念的内涵和外延必须是明确的。在人们的思维中，有许多没有明确外延的概念，即模糊概念。表现在语言上有许多模糊词，如以人的年龄而论，“青年”、“中年”、“老年”都没有明确的外延。因此，模糊概念不能用经典集合加以描述，因为不能绝对地区别“属于”或“不属于”，即论域上的元素的属性不是绝对的0或1，而

是介于0和1之间的一个实数。

3.1.1 模糊子集定义及表示

定义：设给定论域 U ， U 到 $[0, 1]$ 闭区间的任一映射 μ_A

$$\mu_A: U \rightarrow [0, 1]$$

$$u \rightarrow \mu_A(u) \quad (5.9-41)$$

都确定 U 的一个模糊子集 \underline{A} ， μ_A 称为模糊子集的隶属函数， $\mu_A(u)$ 表示 u 对于 \underline{A} 的隶属度。隶属度也可记为 $\underline{A}(u)$ 。在不混淆的情况下，模糊子集也称模糊集合。

定义表明，论域 U 上的模糊子集 \underline{A} 由隶属函数 $\mu_A(u)$ 来表征，其取值范围为 $[0, 1]$ ，其大小反映了 u 对于模糊子集的从属程度。

模糊子集的表达方式有：

- (1) 当 U 为有限集 $\{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ 时，
- 1) 扎德表示法



$$\underline{A} = \frac{A(u_1)}{u_1} + \frac{A(u_2)}{u_2} + \dots + \frac{A(u_n)}{u_n} \quad (5.9-42)$$

式中, $\underline{A}(u_i)/u_i$ 并不表示“分数”, 而是表示论域中元素 u_i 与其隶属度 $\underline{A}(u_i)$ 之间的对应关系; “+”不表示“求和”, 而是表示模糊集合在论域 U 上的整体。

2) 序偶表示法

将论域中的元素 u_i 与其隶属度 $\underline{A}(u_i)$ 构成序偶来表示 \underline{A} , 则

$$\underline{A} = \{(u_1, \underline{A}(u_1)), (u_2, \underline{A}(u_2)), \dots, (u_n, \underline{A}(u_n))\} \quad (5.9-43)$$

3) 矢量表示法

$$\underline{A} = (\underline{A}(u_1), \underline{A}(u_2), \dots, \underline{A}(u_n)) \quad (5.9-44)$$

(2) 当 U 是有限连续域时, 可表示为

$$\underline{A} = \int_U \frac{\mu_A(u)}{u} \quad (5.9-45)$$

式中, $\mu_A(u)/u$ 不表示“分数”, 而是表示论域上元素 u 与隶属度 $\mu_A(u)$ 之间的对应关系; “ \int ”表示论域上元素 u 与隶属度 $\mu_A(u)$ 对应关系的一个总括。

3.1.2 模糊子集的运算

1. 模糊子集的包含和相等关系

设 $\underline{A}, \underline{B}$ 为论域 U 上的两个模糊子集, 对 U 中每一元素 u , 都有 $\mu_A(u) \geq \mu_B(u)$, 则称 \underline{A} 包含 \underline{B} , 记作 $\underline{A} \supseteq \underline{B}$ 。

如果 $\underline{A} \supseteq \underline{B}$, 且 $\underline{B} \supseteq \underline{A}$, 则称 \underline{A} 与 \underline{B} 相等, 记作 $\underline{A} = \underline{B}$ 。

2. 模糊子集的并、交、补运算

设 $\underline{A}, \underline{B}$ 是 U 上的两个模糊子集, 规定 $\underline{A} \cup \underline{B}$, $\underline{A} \cap \underline{B}, \underline{A}^c$ 的隶属函数分别为 $\mu_{\underline{A} \cup \underline{B}}, \mu_{\underline{A} \cap \underline{B}}, \mu_{\underline{A}^c}$, 并且对 U 的每一个元素 u 都有

$$\mu_{\underline{A} \cup \underline{B}}(u) \stackrel{\text{def}}{=} \mu_A(u) \vee \mu_B(u) \quad (5.9-46)$$

$$\mu_{\underline{A} \cap \underline{B}}(u) \stackrel{\text{def}}{=} \mu_A(u) \wedge \mu_B(u) \quad (5.9-47)$$

$$\mu_{\underline{A}^c}(u) \stackrel{\text{def}}{=} 1 - \mu_A(u) \quad (5.9-48)$$

上三式分别为 \underline{A} 与 \underline{B} 的并集、交集和 \underline{A} 的补集。式中, \vee 表示取大运算; \wedge 表示取小运算, 并称其为扎德算子。

3. 模糊子集的代数运算

代数积: 称 $\underline{A} \cdot \underline{B}$ 为模糊集合 \underline{A} 和 \underline{B} 的代数积, 其隶属函数为

$$\mu_{\underline{A} \cdot \underline{B}} = \mu_A \cdot \mu_B \quad (5.9-49)$$

代数和: 称 $\underline{A} + \underline{B}$ 为模糊集合 \underline{A} 和 \underline{B} 的代数, 其隶属函数为

$$\mu_{\underline{A} + \underline{B}} = \begin{cases} \mu_A + \mu_B, & \mu_A + \mu_B \leq 1 \\ 1, & \mu_A + \mu_B > 1 \end{cases} \quad (5.9-50)$$

环和: 称 $\underline{A} + \underline{B}$ 为模糊集合 \underline{A} 和 \underline{B} 的环和, 其隶属函数为

$$\mu_{\underline{A} + \underline{B}} = \mu_A + \mu_B - \mu_{\underline{A} \cdot \underline{B}} \quad (5.9-51)$$

3.2 模糊矩阵与模糊关系

3.2.1 模糊矩阵

定义: 如果对任意的 $i \leq n, j \leq m$, 都有 $r_{ij} \in [0, 1]$, 则称 $R = (r_{ij})_{n \times m}$ 为模糊矩阵。通常以 $\mu_{n \times m}$ 表示全体 n 行 m 列的模糊矩阵。同模糊子集一样, 对模糊矩阵也可进行运算。

3.2.2 模糊关系

模糊关系是普通关系的推广, 它描述元素间的关联程度。

设 X, Y 是两个非空集合, 则直积

$$X \times Y = \{(x, y) | x \in X, y \in Y\}$$

中的一个模糊子集 R 称为从 X 到 Y 的一个模糊关系, 记作

$$X \begin{matrix} \xrightarrow{R} \\ \sqcap \\ \xrightarrow{Y} \end{matrix} \quad (5.9-52)$$

模糊关系 R 由其隶属函数

$$\mu_R: X \times Y \rightarrow [0, 1] \quad (5.9-53)$$

完全刻画。序偶 (x, y) 的隶属度为 $\mu_R(x, y)$, 表明了 (x, y) 具有关系 R 的程度。

3.3 模糊逻辑与模糊语言

3.3.1 模糊逻辑

与经典集合论相对应的逻辑是二值逻辑, 在二值逻辑里将一个意义明确的可以分辨真假的句子 (陈述

此是公刊制作请尊重版权



句)称为命题,具有模糊概念的陈述句称为模糊命题。模糊命题 \underline{P} 的真值记作

$$V(\underline{P}) = x \quad 0 \leq x \leq 1$$

当 $x=1$ 时, \underline{P} 完全真; $x=0$ 时, \underline{P} 完全假; 当 x 介于 $0, 1$ 之间时, 表征 \underline{P} 真假的程度。

通常将研究模糊命题的逻辑称为连续值逻辑, 也称为模糊逻辑。

3.3.2 模糊语言

1. 自然语言与形式语言

自然语言是指人们在日常生活和工作中所使用的语言, 它实际上是以字或词为符号的一种符号系统。形式语言是人与计算机对话使用的语言, 它是用一系列符号去代表计算机的动作用和被处理单元的状态, 它只是在形式上起符号作用。自然语言和形式语言最重要的区别在于, 前者具有模糊性, 而后者不具有模糊性。把具有模糊概念的语言称为模糊语言。

2. 集合描述的语言系统

任何一种语言都是以一定的符号来代表一定的意思, 这种符号被称为文字, 语言中的“字”和“义”的对应关系称为语义。

语义通过语言主题 T 到一个单词集合 U 的对应关系 N 来表示。 N 通常是一个模糊关系, 对任意固定的 $a \in T$, 记

$$N(a, u) = \mu_A(u) \quad (5.9-54)$$

它是一个模糊子集, 可记为 $\underline{A}(u)$ 。单词 a 对应于 U 的这个模糊子集, 用与 a 相对应的 A 表示这个集合。当 $\underline{A} = A$ 时, 集合为普通集合, 单词 a 的意义是明确的, 否则称为模糊的。

单词之间通过连接词“或”, “且”连接起来, 或在单词前面加否定词“非”, 从逻辑上对应于集合运算, “或”对应于 \cup , “且”对应于 \cap , “非”对应于 C 。这样可以把词组分解成单词, 也可以由单词组成词组。

3. 模糊语言算子

1) 语气算子

$$(H_\lambda \underline{A})(u) \stackrel{\text{def}}{=} [\underline{A}(u)]^\lambda \quad (5.9-55)$$

式中 $\underline{A}(u)$ —— 论域 U 的一个模糊子集;

H_λ —— 语气算子;

λ —— 正实数。

如论域 U 为年龄, 而 $\underline{A}(u)$ 表示单词 [老], 那么 $(H_\lambda \underline{A})(u)$ 随着 λ 取不同值, 就可以表示出“年老”的

程度。

2) 模糊化算子

$$\begin{aligned} (FA)(u) &\stackrel{\text{def}}{=} (E \cdot A)(u) \\ &= \bigvee_{v \in U} (E(u, v) \wedge A(v)) \end{aligned} \quad (5.9-56)$$

式中 E —— U 上的一个相似关系, 论域 $U = (-\infty, +\infty)$ 。

E 一般取为正态分布形式, 即

$$E(u, v) = \begin{cases} e^{-(u-v)^2}, & |u-v| < \delta \\ 0, & |u-v| \geq \delta \end{cases}$$

式中 δ —— 参数, 其取值大小反映模糊化程度。

3) 判定化算子

$$(P_a \underline{A})(u) \stackrel{\text{def}}{=} d_a[\underline{A}(u)] \quad (5.9-57)$$

式中 P_a —— 判定化算子;

d_a —— 定义在 $[0, 1]$ 区间上的实函数。

4. 模糊语言变量

语言变量是以自然或人工语言中的字或句作为变量, 用以表征那些十分复杂或定义很不完善而又无法用通常的精确术语进行描述的现象。

模糊语言变量定义: 一个语言变量可定义为一个五元体:

$$(X, T(X), U, G, M)$$

式中 X —— 语言变量名称;

$T(X)$ —— 语言变量语言值名称集合;

U —— 论域;

G —— 语法规则;

M —— 语义规则。

3.4 模糊控制原理及分析设计方法

模糊控制属于计算机数字控制的一种形式。因此, 其组成类同于一般的数字控制系统。其原理如图5.9-4所示。它的核心部分为模糊控制器(如图中虚线框中部分所示), 其控制规律由计算机程序来实现。实现一步模糊控制算法的过程为: 微型计算机经采样获取被控制量的精确值, 经与给定值比较得误差信号 E 。一般将 E 作为模糊控制器的一个输入量。先对 E 的精确量进行模糊量化变成模糊量, 并用相应的模糊语言表示。这样得到了误差 E 的模糊语言集合的一个子集 e (实为一个模糊矢量)。再由 e 和模糊控制规则 R (模糊关系) 根据推理的合成规则进行模糊决策, 得到模糊控制量



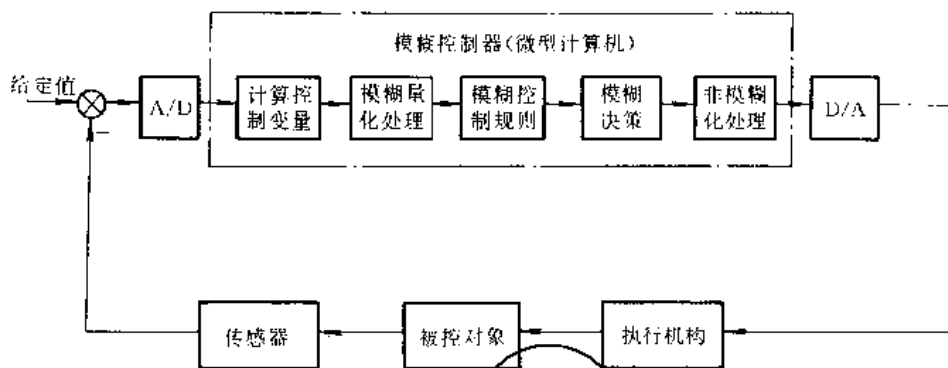


图 5-9-4 模糊控制原理框图

$$u = e \cdot R$$

(5-9-58)

到如表 5-9-2 所列的赋值表。

为对被控对象施加精确控制，还需将模糊量 u 转换成精确量，这一步称为非模糊化处理（亦称清晰化）。得到精确数字控制量后，经数模转换变成模拟量送给执行机构，实现对被控对象的进一步控制。然后，等待第二次采样，进行第二步控制…。如此循环，从而实现模糊控制。

为说明模糊控制系统的工作原理，下面通过温控系统进行论述。

某电热炉用于对零件的热处理，按热处理工艺要求保持炉温 600℃ 固定不变。由于炉温受被处理零件多少、体积大小以及电网电压波动等因素影响而波动，故要求设计一个温控系统取代人工控制。

采用模糊控制以控制炉温时，控制系统的工作原理为：

1. 模糊控制器的输入变量和输出变量

将炉温 600℃ 作为给定值 t_0 ，测量得到的炉温，记作 $t(k)$ ，则误差

$$e(k) = t(k) - t_0 \quad (5-9-59)$$

作为模糊控制器的输入变量（输入变量可不止 e 一个，还可以有 \dot{e} 等）。模糊控制器的输出变量选为触发电压 u ，该电压直接控制电热炉的供电电压大小。

2. 输入变量及输出变量模糊语言描述

描述输入变量及输出变量语言值的模糊子集为：{负大，负小，0，正小，正大} 或简记为 {NB, NS, 0, PS, PB}

设误差 e 的论域为 X ，并将误差大小量化为 7 个等级（亦可多于 7 个），即

$$X = \{-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3\}$$

设输出量（即控制量 u ）的论域为 Y ，且亦量化为 7 个等级，即

$$Y = \{-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3\}$$

图 5-9-5 给出了语言变量的隶属函数曲线。由此可得

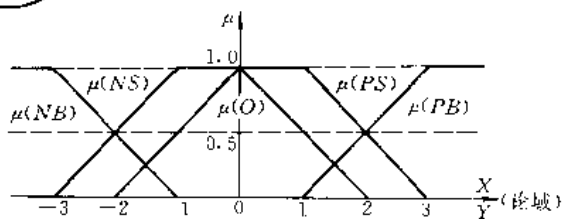


图 5-9-5 语言变量的隶属函数

表 5-9-2 模糊变量 (e, u) 的赋值表

| 隶属度 \ 量化等级 | -3 | -2 | -1 | 0 | 1 | 2 | 3 |
|------------|----|-----|-----|---|-----|-----|---|
| 语言变量 | | | | | | | |
| PB | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.5 | 1 |
| PS | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0.5 | 0 |
| O | 0 | 0 | 0.5 | 1 | 0.5 | 0 | 0 |
| NS | 0 | 0.5 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| NB | 1 | 0.5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

3. 模糊控制规则的语言描述

根据手动控制策略，模糊控制规则如下：

- (1) if $e = NB$ then $u = PB$
- (2) if $e = NS$ then $u = PS$
- (3) if $e = O$ then $u = O$
- (4) if $e = PS$ then $u = NS$
- (5) if $e = PB$ then $u = NB$

4. 模糊控制规则的矩阵形式

模糊控制规则实际上是一组多重条件语言，它可以表示为从误差论域 X 到控制论域 Y 的模糊关系 \tilde{R} 。这里 \tilde{R} 可用矩阵表示：

$$\tilde{R} = (NB_e \times PB_u) + (NS_e \times PS_u) + (O_e \times O_u) + (PS_e \times NS_u) + (PB_e \times NB_u) \quad (5-9-60)$$

式中

$$NB_e \times PB_u = (1, 0.5, 0, 0, 0, 0, 0)$$



$$\begin{aligned} & \times (0, 0, 0, 0, 0, 0.5, 1) \\ NS_e \times PS_e &= (0, 0.5, 1, 0, 0, 0, 0) \\ & \times (0, 0, 0, 0, 1, 0.5, 0) \\ O_e \times O_e &= (0, 0, 0.5, 1, 0.5, 0, 0) \\ & \times (0, 0, 0.5, 1, 0.5, 0, 0) \\ PS_e \times NS_e &= (0, 0, 0, 0, 1, 0.5, 0) \\ & \times (0, 0.5, 1, 0, 0, 0, 0) \\ PB_e \times NB_e &= (0, 0, 0, 0, 0, 0.5, 1) \\ & \times (1, 0.5, 0, 0, 0, 0, 0) \end{aligned}$$

5. 模糊决策 模糊控制器的控制作用取决于控制量 $\tilde{u} = \tilde{e} \cdot R$, 即为 \tilde{e} 和 R 的合成。当取 $\tilde{e} = PS$ 时, 有

$$\begin{aligned} \tilde{u} = \tilde{e} \cdot R &= (0, 0, 0, 0, 1, 0.5, 0) \cdot R \\ R &= (0.5, 0.5, 1, 0.5, 0.5, 0, 0) \end{aligned}$$

6. 控制量的模糊量转化为精确量 \tilde{u} 为一模糊向量, 即

$$\begin{aligned} \tilde{u} &= (0.5/-3) + (0.5/-2) + (1/-1) \\ &+ (0.5/0) + (0.5/1) + (0/2+0/3) \end{aligned}$$

根据隶属度最大原则, 应选取控制量为“-1”级。实际控制时,“-1”级电压要变为精确量, 它可根据事先确定的范围计算出来。

7. 模糊控制器响应表 模糊控制规则由 R 来描述, 其每一行正数是对每个非模糊的观测结果所引起的模糊响应。对于每个非模糊的观测结果, 均从 R 中确定一个确切响应, 可以列成响应表, 也称控制表, 如表 5-9-3 所列。

表 5-9-3 控制表

| | | | | | | | |
|-----|----|----|----|---|----|----|----|
| e | -3 | -2 | -1 | 0 | 1 | 2 | 3 |
| u | 3 | 2 | 1 | 0 | -1 | -2 | -3 |

从上述可知, 模糊控制系统的关键在于设计模糊控制器, 其设计包含下列内容:

- (1) 确定控制器的输入和输出变量;
- (2) 设计控制规则;
- (3) 确立模糊化和非模糊化方法;
- (4) 选择控制器输入和输出变量的论域并确定控制器参数(如量化因子、比例因子);
- (5) 编制模糊控制算法的应用程序;
- (6) 合理选择模糊控制算法的采样时间。

3.5 模糊控制规则

控制规则是设计模糊控制器的关键, 一般包括如下三部分设计内容: 选择描述输入和输出变量的词集;

定义各模糊变量子集; 建立控制器的控制规则。

3.5.1 选择描述输入和输出变量词集

模糊控制器的控制规则表为一组模糊条件语句, 语句中描述输入和输出变量状态的一些词汇(如“正大”、“负小”等)的集合, 称为这些变量的词集。

通常人们选用“大、中、小”三个词汇来描述模糊控制器的输入和输出变量状态。由于人的行为在正、负两个方向的判断基本上是对称的, 将大、中、小再加上正、负两个方向, 并考虑变量的零状态, 共 7 个词汇, 用英文字头表示为:

$$\{NB, NM, NS, O, PS, PM, PB\}$$

描述输入和输出变量的词汇都具有模糊性, 可用模糊集合来表示。

3.5.2 定义各模糊变量的模糊子集

定义一个模糊子集, 实际上就是要确定模糊子集隶属函数的形状。将确定的隶属函数曲线离散化, 就可得到有限个点上的隶属度, 便构成了一个相应的模糊变量的模糊子集。

3.5.3 建立模糊控制器的控制规则

利用语言归纳手动控制策略的过程, 实际上就是建立模糊控制器控制规则的过程。常见的模糊条件语句及其对应的模糊关系 R 概括为

$$(1) \text{ if } A \text{ then } B, R = A \times B \quad (5.9-61)$$

$$(2) \text{ if } A \text{ then } B \text{ else } C, \\ R = (A \times B) + (\bar{A} \times C) \quad (5.9-62)$$

$$(3) \text{ if } A \text{ and } B \text{ then } C, R = (A \times B) \cdot (B \times C) \quad (5.9-63)$$

$$(4) \text{ if } A \text{ or } B \text{ and } C \text{ or } D \text{ then } E, \\ R = [(A+B) \times E] \cdot [(C+D) \times E] \quad (5.9-64)$$

$$(5) \text{ if } A \text{ then } B \text{ and if } A \text{ then } C, \\ R = (A \times B) \cdot (A \times C) \quad (5.9-65)$$

$$(6) \text{ if } A_1 \text{ then } B_1 \text{ or if } A_2 \text{ then } B_2, \\ R = A_1 \times B_1 + A_2 \times B_2 \quad (5.9-66)$$

3.6 模糊系统辨识

用模糊集合理论, 从系统输入和输出量测值来辨识系统的模糊模型, 也是系统辨识的又一有效途径。

3.6.1 模糊模型概念

一个模糊模型可以表示为



$$M(A, Y, U, F)$$

- 式中 A ——表示模糊算法；
 Y ——表示过程的有限离散输出空间；
 U ——表示过程的有限离散输入空间；
 F ——表示过程的有限离散输入、输出空间中
 所定义的所有基本模糊子集的集合。

所谓模糊模型是指描述系统特性的一组模糊条件语句，即

if $u(t-k) = A$ or B and $y(t-l) = C$ or D then $y(t) = E$ 语句中， A 和 B 为 U 中的模糊集合； C 、 D 和 E 为 Y 中的模糊集合。每条语句为一条规则。

3.6.2 模糊模型的品质指标

(1) 用描述系统特性的规则条数 p 作为衡量模糊模型复杂程度的一个品质指标。条数越多，越复杂。

(2) 取量测值 $y(t)$ 与输出预测值 $\hat{y}(t)$ 之差的均方值

$$p_2 = \frac{1}{L} \sum_{t=1}^L [y(t) - \hat{y}(t)]^2 \quad (5.9-67)$$

作为衡量模糊模型精确性的指标。式中， L 为总的量测次数。

3.6.3 模糊模型的建立方法

建立模糊模型大体有以下三个内容：

(1) 对系统输入输出量测值进行量化处理，建立输入空间 U 和输出空间 Y ，选择 U 和 Y 中的模糊集合 B_i 和 C_j ；

(2) 确定模糊模型的结构 $[u(t-k), y(t-l), y(t)]$ ，即确定 k 和 l 。为确定模型结构，首先必须将输入和输出数据进行模糊化处理，构成输入和输出量测值的模糊集合，通过相关试验来确定模型的结构；

(3) 建立模糊模型。设模型结构已确定为

$$[u(t-k), y(t-l), y(t)]$$

把 $u(t-k)$ 、 $y(t-l)$ 和 $y(t)$ 的值一一对应列成表格，表中每一行实际对应着一条规则。

4 智能控制

4.1 人工智能与自动控制

4.1.1 智能与人工智能

一般说来，智能是指人类所特有的智慧和才能的综合，也可认为人类的智能就是人类认识世界和改造

世界(包括自己在内)的才智(即才能和智慧)和本领。

人工智能是一门新兴的边缘学科，其目标就是使用计算机去做那些过去只有人才能做的具有智能的工作。人工智能也称机器智能，就是要机器更“聪明”，具有类似人的智能，同时又与人的智能互为补充，互相促进，从而组成知识信息处理的智能系统。

当前，人工智能正在按照两条不同的途径探索电脑对人脑智能的模拟：一条是走仿生学脑模型的道路，即从结构和功能上模拟人脑；另一条是不考虑脑结构，直接通过启发式程序模拟人脑功能。

4.1.2 人工智能的基本问题

从人工智能学科的理论基础、基本工作原理及工程应用三个方面，可将其划分为三个层次：

(1) 人工智能理论基础 包括数学理论中的离散数学、模糊数学、突变论等；思维科学理论中的心理学、逻辑思维学、形象思维学；计算机科学中的计算机软件、硬件、智能接口等。

(2) 人工智能基本原理 研究知识的表示、知识的获取、知识的处理、机器学习及利用知识求解问题等。

(3) 人工智能工程应用 以人工智能的基本原理为指导建立的工程系统，例如专家系统、图象识别、智能机器人及自然语言理解等。

因此，知识表示、知识利用与知识获取是人工智能的三个基本问题。

4.1.3 人工智能的研究领域

人工智能是一门综合性很强的边缘学科，其研究渗透到许多领域，主要有：

(1) 专家系统。专家系统是一个具有大量专门知识与经验的计算机程序系统。

(2) 自然语言理解。研究计算机理解自然语言，对人-机交换信息是非常重要的。

(3) 自然语言生成。研究语言生成系统和语音合成系统。

(4) 自动定理证明。研究将人证明定理的过程变成一系列能在计算机上自动实现的符号演算和推理演绎过程。

(5) 自动程序设计。

(6) 问题求解。问题求解的过程就是消除当前状态与期望目标状态之间差异的过程。

(7) 模式识别与物景分析。



(8) 机器人和机器人学。

(9) 智能检索系统(知识库系统)。

(10) 决策支持系统。它由语言系统、知识系统和问题处理系统三部分组成。

(11) 博弈。博弈就是对策或斗智。它为人工智能提供许多概念和方法。

近年来,随着人工智能的迅速发展,使传统的控制理论和工业控制技术的发展面临严峻的挑战。在系统控制和决策中引入人工智能,实现对传统控制理论难以控制的系统进行有效控制,这种仿效人类智能的控制,称为智能控制。这表明控制理论在传统的控制理论基础上又面临一次新的飞跃,即第三代控制理论——智能控制理论已经诞生。

4.2 专家系统与知识工程

4.2.1 专家系统

专家系统是一个具有大量专门知识与经验的程序系统,它应用人工智能技术,根据一个或多个专家提供的特殊领域知识、经验进行推理和判断,模拟专家做决策的过程来解决那些需要专家决定的复杂问题。专家系统的功能主要依赖于大量的知识,因此它又称为知识基系统(Knowledge-based System)。专家系统具有许多优良特性:(1)具有启发性、透明性和灵活性;(2)工作不受时间、空间和环境的影响;(3)能够高效率、准确无误、周密全面、迅速而不疲倦地进行工作。

一般专家系统由知识库、数据库、推理机、解释部分和知识获取5个部分组成,其结构如图5-9-6所示。

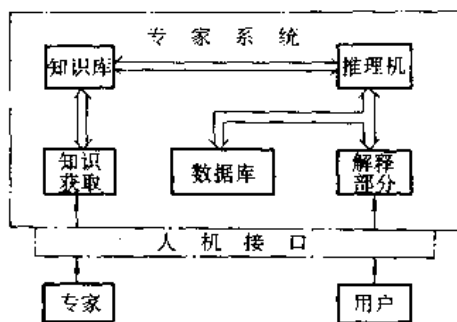


图 5-9-6 专家系统结构

(1) 知识库。它储存以适当形式表示的从专家那里得到的关于某个领域的专门知识、经验以及书本知识,它是领域知识的存储器。

(2) 数据库。它是存放专家系统当前工作已知的一些情况,用户提供的事实和由推理得到的中间结果。

(3) 推理机。它是计算机的一组程序,目的是用于控制、协调整个专家系统的工作。

(4) 解释部分。它也是计算机的一组程序,用于对推理给出必要的解释,为用户了解推理过程,向系统学习和维护系统提供方便。

(5) 知识获取部分。它用于修改知识库中原有的知识和扩充知识提供手段,是专家系统的瓶颈部分。

4.2.2 知识的表示

对知识工程而言,知识表示即知识的机器表示,或称知识表达。知识表示的最好方法是与要解决问题的性质和求解方法密切相关的。知识表示有如下几种:

(1) 逻辑表示法。利用命题演算、谓词演算等知识来描述一些事实,并根据现有事实推出新事实的方法。

(2) 语义网络表示法。利用图解表示知识。一般说来,一个语义网络是一个由表示实体、概念等的节点及表示节点之间关系的链组成的有向图。

(3) 产生式表示法。它根据串替换规则提出一种计算模型,其中每一条规则称为一个产生式。每一条产生式对应一个知识模块的一条规则,其形式为

IF a THEN b

式中, a 称为前提; b 称为结论。

(4) 框架表示法。它是将人们头脑中的不同概念视为一定的知识体或一定的数据结构,即看作框架。因此,框架就是描述某种形态的数据结构。

(5) 过程表示法。它是用一段子程序表示某一类知识,即把知识包含在若干个过程之中,这些过程就是小程序。例如,要表示 n 个知识,可采用 n 个子程序 S_1, S_2, \dots, S_n 分别表示 n 个知识,在使用这些知识推理时,只需调用这些子程序即可。

4.2.3 知识的获取

知识获取是指在人工智能和知识工程系统中,通过人工方法或机器学习、机器感知方式使机器从外部环境获取知识的过程。对于专家系统而言,所谓知识获取是指通过人工方法从一个领域专家处提炼知识,并把它转化为计算机程序的过程。它包括问题的定义、实现、完善以及表达从专家处获取的事实和关系。

1. 知识获取的途径 主要有如下三种:

(1) 通过特殊的知识编辑系统,把人类的知识直接用程序编辑后存入计算机;

(2) 把知识用自然语言表达出来并传授给计算机;



(3) 自动进行知识获取,即建立机器的学习系统,使机器本身具有从经验中学习的能力,以便能经常总结经验,修正错误,总结规律,增长知识,从而丰富自己的知识库。

2. 知识获取的步骤 知识获取过程的主要步骤如图 5-9-7 所示。

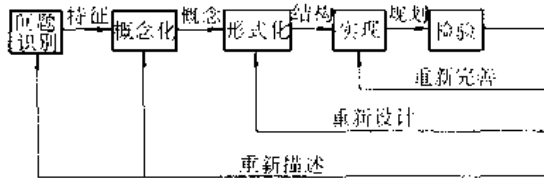


图 5-9-7 知识获取过程

- (1) 问题识别阶段,即认识问题的特征;
- (2) 概念化阶段,即找出表达知识的概念;
- (3) 形式化阶段,即设计组织知识的结构;
- (4) 实现阶段,即形成概括知识的规则;
- (5) 测试阶段,即验证组织知识的规则。

4.3 智能控制与智能控制系统

智能控制可看作自动控制、运筹学和人工智能三个学科的结合物,如图 5-9-8 所示。智能控制就是应用人工智能的理论和技术及运筹学的优化方法同控制理论方法与技术相结合,在未知环境下,仿效人类的智能,实现对系统的控制。

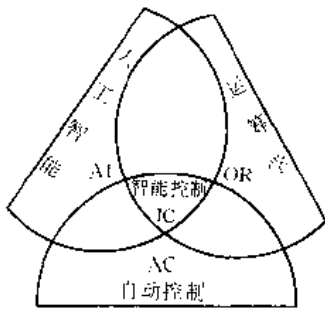


图 5-9-8 智能控制

智能控制系统有如下几种常见类型:

- (1) 多级递阶智能控制系统。按智能程度的高低分为智能组织级、协调级和运行控制级的控制形式。
- (2) 专家控制系统。专家系统和实时控制系统相结合,是基于人类控制专家的专业知识和熟练操作工人的实践经验而设计的系统。
- (3) 仿人智能控制系统。根据对人脑的宏观结构功能模拟与对人的控制行为功能模拟相结合,直接对人的控制经验、决策行为和各种直觉推理机制出发而

设计的系统。

(4) 自寻优模糊智能控制系统。在模糊控制系统基础上,对控制参数进行在线自寻优处理,以获得最佳控制性能的智能控制系统。

(5) 自学习控制系统。是指通过在线实时学习,自动获取知识,并能不断地提高和完善控制性能的智能控制系统。

(6) 学习控制系统。是指控制系统本身能够根据先前的控制经验,对于一类具有可重复性的被控对象,寻找一条理想输入特性曲线,使被控对象产生期望的运动。

(7) 基于神经网络的控制系统。从微观上模拟人脑的结构和功能,即从研究和模拟人的神经网络结构、功能以及传递、处理和信息的机理出发而设计的控制系统。

参 考 文 献

- [1] John. G. Truxal Control Engineers' Handbook. New York; McGraw-Hill Book Company, 1958
- [2] Солодовников В. В. Основы автоматического регулирования. том I. Москва; Машигиз, 1954
- [3] Солодовников В. В. Основы автоматического регулирования. том II. Москва; Машигиз, 1959
- [4] 高井宏幸. 实用自动控制ポケットブック. 東京: オーム社, 1971
- [5] 加藤一郎. 自動化設計便覧. 東京: 工業調査會, 1973
- [6] 正田英介. 最適制御理論. 東京: コロナ社, 1970
- [7] 哈尔滨工业大学编. 自动调节原理. 上册. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学印刷, 1961
- [8] 哈尔滨工业大学编. 自动调节原理. 下册. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学印刷, 1962
- [9] Батков. А. М. Теория и техника следящих систем. перевод. Москва; Машигиз, 1961
- [10] 钱学森, 宋健. 工程控制论. 北京: 科学出版社, 1980
- [11] Mishkin, E. Braun L. JR. Adaptive Control System. New York, London; McGraw-Hill Book Company, 1961
- [12] 安德森, B. D. O. 莫尔 John B. 线性最优控制. 北京: 科学出版社, 1982

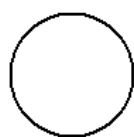


- [13] Athans M. and Falb P. L. Optimal Control. New York, London; Mcgraw Hill, 1966
- [14] 绪方胜彦著. 现代控制工程. 北京: 科学出版社, 1980
- [15] Lammers, H. L. et al. Simple Self-tuning Control. In 6th IFAC Symposium on Identification and System Parameter Estimation. Washington. 1982, pp1052-1057
- [16] Julius. T. Tou. Digital and Sampled Data Control Systems. New York; Mcgraw-Hill Book Comp any, 1959
- [17] Rubio. J. E. The Theory of Linear Systems. New York; New York Academic Pr. , 1971
- [18] 庞特里雅金 П. С. 等著. 最优过程的数学理论. 陈祖洁译. 上海: 上海科技出版社, 1965
- [19] 罗伯特 E. 等著. 动态规划原理. 陈伟基等译. 北京: 清华大学出版社, 1984
- [20] 钟瑚绵编. 最佳控制的数学方法及其应用. 南京: 江苏科学技术出版社, 1982
- [21] 解学书. 最优控制理论和应用. 北京: 清华大学出版社, 1986
- [22] 王子才 赵长安. 应用最优控制. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1990
- [23] 海宁. 吐尔著. 最优化方法. 曹长修译. 北京: 机械工业出版社, 1979
- [24] 塞奇. 怀特著. 最优系统控制. 汪寿基等译. 北京: 水利电力出版社, 1985
- [25] 韩曾晋编. 自适应控制系统. 北京: 机械工业出版社, 1983
- [26] 徐南荣, 程明熙等编. 自适应控制. 北京: 国防工业出版社, 1986
- [27] 奥斯特隆姆 K. J. 著. 随机控制理论导论. 北京: 科学出版社, 1983
- [28] 市川邦彦. 制御系の設計理論. 東京: 技術書院, 1989
- [29] 市川邦彦. 適応制御. 東京: 昭晃堂, 1985
- [30] 机械工程手册电机工程手册编辑委员会编. 机械工程手册, 第55篇: 自动控制基础理论. 北京: 机械工业出版社, 1982
- [31] 赵长安主编. 控制系统设计手册(上). 北京: 国防工业出版社, 1991
- [32] 王子才主编. 控制系统设计手册(下). 北京: 国防工业出版社, 1993
- [33] 沈绍信. 线性系统理论. 高等学校教材. 大连: 大连理工大学出版社, 1989
- [34] (美)詹姆希迪 M. 等著. 线性控制系统. 沈春林等编译. 北京: 航空工业出版社, 1989
- [35] 胡克定, 郑卫新. 线性多变量系统理论与设计. 南京: 东南大学出版社, 1991
- [36] (比)斯普里特 J. A. 等著. 计算机辅助建模和仿真. 王正中等译. 北京: 科学出版社, 1991
- [37] 赵长安, 王子才编著. 鲁棒控制系统. 北京: 宇航出版社, 1991
- [38] 李士勇等编著. 模糊控制和智能控制——理论与应用. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1990
- [39] Zames G. Feedback and Optimal Sensitivity: Model Reference Transformation, Multiplicative Seminorms, and Approximate Inverses, IEEE, Trans. On AC. Vol. AC-26, No. 2, April, 1981
- [40] Doyle J. C. and Stein G. Multivariable Feedback Design: Concepts for a Classical/Modern Synthesis. IEEE, Trans. AC, Vol. AC-26. No. 1, Feb. 1981
- [41] 冯纯伯, 史维. 自适应控制. 北京: 电子工业出版社, 1986
- [42] 吴广玉. 系统辨识与自适应控制(下册). 哈尔滨: 哈工大出版社, 1987



第 6 篇

数 控 技 术



主编单位 浙江大学

编写单位 浙江大学

主 编 蒋静坪

编写人 诸 静 蒋静坪 项占琴

主 审 胡纲衡



第 1 章 概 论

1 基本概念

数控技术是采用数字代码形式的信息，按给定的工作程序、运动速度和轨迹，对被控对象进行自动操作的技术。它综合了计算机、微电子、自动控制、检测、精密机械和信息处理等技术，因而它具有技术密集、多学科交叉、应用范围广的特点。

数控技术具有高速度、高精度、高柔性和高集成化等优点。尤其在多品种、小批量、高效益、复杂形状零件的自动加工中，显示出了极大的优越性。

数控技术应用范围十分广泛，它首先在机械加工中获得广泛的应用，有数控铣床、数控磨床、数控加工中心等数控设备。其次，在仪器仪表、医疗电子仪器、纺织、印刷、包装等行业中，也出现了许多数控设备。此外，数字显示、数字检测、生产系统的数字控制等，都可归属于数控技术中。

微电子技术和计算机技术的进步，推动了数控技术的迅速发展，近期推出的数控设备，在结构上、功能上以及实现的技术手段上都与传统的数控设备有很大的差异，性能指标有很大的提高。

数控技术在国民经济建设中具有很重要的作用。它可以把机械加工设备的功能、效率、柔性提高到一个新水平，大大改善产品的加工质量，提高生产效率。它是机电产品的关键技术，对推动机电产品的发展有着重要的作用。它是近期发展起来的、具有更大柔性和更高效率的柔性制造系统（Flexible Manufacturing System—FMS）和计算机集成制造系统（Computer Integrated Manufacturing System—CIMS）的基础技术之一。FMS 和 CIMS 也向数控技术的发展提出了新的更高要求，正在开发面向 FMS 和 CIMS 的新型数控技术。

由于数控技术在机械工业中的重要地位，世界上近 10 年来，数控机床的数量增加 10 倍。日本的数控机床品种已达 1300 多种，机床产值数控化率为 70%。有些现代化机械加工车间，使用机床的数控化率已超过 90%。

总之，数控技术已成为当今工业设备不可忽视的新技术，对我国今后的技术进步和科学发展具有重要

的先导作用，急需大力发展。

1.1 数控系统

数控设备由数控系统（信息载体、数控装置、伺服系统、检测装置）及被控对象组成，见图 6.1-1。

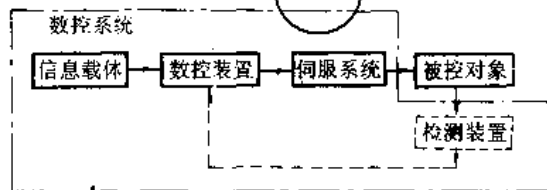


图 6.1-1 数控设备的组成

在图 6.1-1 中，除了被控对象以外的其他部分，通称为数控系统。所以，数控系统包括以下几个部分。

1. 信息载体 又称为控制介质，是人与被控对象之间建立联系的媒介。在信息载体上存储着数控设备的全部操作信息。信息载体有多种形式，常用的有穿孔带、穿孔卡、磁带、磁盘或拨码开关等，作为人机对话终端设备的操作键盘，也可以视为信息载体。

2. 数控装置 接受来自信息载体的控制信息并转换成数控设备的操作（指令）信号。数控装置由输入装置、控制器、运算器和输出装置等 4 大部分组成，如图 6.1-2 点划线框内部分所示。

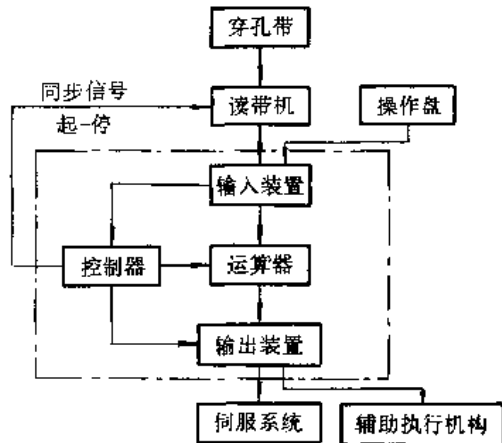


图 6.1-2 数控装置

输入装置接受由读带机或操作盘输出的代码，经译码后分别送往各寄存器。控制器接受输入装置指令并控制运算器与输出装置。运算器接受控制器的指令和输入装置送来的数据进行插补运算后，将结果送给



输出装置。输出装置根据控制器的指令将运算器送来的计算结果,输送给伺服系统和辅助执行机构。

3. **伺服系统** 是数控设备位置控制的执行机构。它的作用是将数控装置输出的位移指令经功率放大后迅速、准确地转换为位移量或转角。

4. **检测装置** 用来检测数控设备工作机构的位置或驱动电动机的转角等,用作闭环系统的位置反馈或开环、半闭环系统的误差补偿。检测装置是保证数控设备精度的关键。

1.2 数控设备的工作原理和分类

1.2.1 数控设备的工作原理

下面以数控机床为例来说明数控设备的工作原理。数控机床加工过程可分为以下几个步骤:

1. **程序编制** 是将零件的加工工艺、工艺参数、刀具位移量及位移方向和有关辅助操作,按指令代码及程序段格式编成加工程序单。然后,将加工程序单以代码形式记录在信息载体(如穿孔带、磁带)上。程序编制可以是手工编制,也可以用计算机自动编程。

2. **数控代码** 用来表示数控系统中的符号、字母和数字的专用代码,并组成数控指令。在信息载体中,数控代码通常用规定的格式记录。目前,国际上使用EIA (Electronic Industries Association) 代码和ISO (International Organization for Standardization) 代码。我国规定ISO代码为标准代码。

对数控代码进行识别并翻译成数控系统能用于运算控制的信号形式称为译码。它有硬件译码和计算机程序译码两种。在硬件译码中,根据规定的代码孔,设计成相应的电路。当一定的代码输入后,译码电路就打开相应的门,表示该代码已输入系统。在计算机数控中,译码程序取代硬件译码电路。译码之前,先将零件程序存放在缓冲器中。译码时,译码程序依次将一个字符和相应的数码与缓冲器中零件程序进行比较,若两者相等,说明输入了该字符。译码程序是串行工作的,而硬件译码电路则是并行工作的,因而它较高的译码速度。

3. **刀具轨迹计算** 将穿孔带上的程序数据,逐段输给数控系统的有关部分后,数控系统就要进行刀具轨迹计算,即计算刀具中心沿各坐标轴移动的增量值。

4. **插补运算** 根据刀具中心点沿各坐标轴移动的指令信息,以适当的函数关系进行各坐标轴脉冲分配的计算。只有通过插补运算,使两个坐标轴或两个以

上坐标轴协调地工作,才能合成所需要的目标位置的几何轨迹或加工出需要的零件形状。

数控系统每发出一个进给脉冲,数控设备运动部件所产生的相应位移量称为脉冲当量。它是数控设备的一个基本技术数据。其他技术数据还有最大编程尺寸、进给速度范围、快速移动速度、插补种类(定位、直线插补、圆弧插补及螺旋线插补等)、控制轴数及同时控制轴数等。

典型的数控系统的技术性能,见表6-1-1。

表 6-1-1 数控系统的典型技术性能

| 项 目 | 数 据 或 功 能 |
|--------|-------------------------------------------------------------|
| 控制轴数 | 5轴(X, Y, Z, W, V) + 主轴 |
| 同时控制轴数 | 3轴 |
| 设定单位 | 0.001/0.002/0.005/0.01mm 或 0.0001/0.0002/0.0005/0.001/in |
| 最大编程尺寸 | ±8388.607mm (分辨力为0.001mm) 或 ±330.2599in (分辨力为0.0001in) |
| 快速移动速度 | 65000mm/min |
| 进给速度范围 | 1~65000mm/min (进给速度倍率0~120%) |
| 进给速度指定 | 用F5.4以mm/min或用F3.4以mm/r编程 |
| 加减速控制 | 自动加减速控制 |
| 插补功能 | 定位、直线插补、圆弧插补及螺旋线插补 |
| PLC功能 | 编程,调速和固化 |
| 诊断功能 | 系统硬件自动诊断,接口诊断,通信出错诊断 |
| 显示功能 | 动态轨迹图形显示,加工状态及执行数控程序显示 |
| 补偿功能 | 刀具补偿,伺服单元零点漂移自动补偿,反向间隙补偿 |
| 通信功能 | RS-232C和RS-485接口、DNC、PLC |
| 其他功能 | 螺纹切削,断电保护数据 |

1.2.2 数控设备的分类

(1) 数控系统按被控对象运动轨迹可分为点位控制系统、直线控制系统和连续控制系统等。

1) 点位控制系统。被控对象只能由一个点到另一个点作精确定位。定位精度和定位速度是该类系统的两个基本要求。这类被控对象在移动时并不进行加工,故移动的路径并不重要,而达到定位点后才进行各种加工。使用这类系统的数控设备有坐标镗床、数控钻床和数控冲床等。



2) 直线控制系统。被控对象不仅要实现由一个位置到另一个位置的按直线轨迹精确移动,而且在移动过程中,同时要加工。因此,要求该类系统移动速度保持均匀。它的伺服系统要求有足够的功率、宽的调速范围和优良的动态特性。

3) 连续控制系统。该类系统能对两个或两个以上的坐标轴同时进行控制,实现任意坐标平面内的曲线或空间曲线的加工,它不仅能控制数控设备移动部件的起点与终点坐标,而且能控制整个加工过程每一点的速度与位移量,也就是说要控制加工轨迹。这种系统在加工过程中,需要不断地进行插补运算,并进行相应的速度与位移控制。这类数控设备有数控铣床、数控磨床等。

(2) 按伺服系统工作原理可分为开环控制系统、半闭环控制系统和闭环控制系统等。

1) 开环控制系统。是不带反馈装置的控制系。通常用功率步进电动机或电液脉冲马达作为执行机构。开环控制系统具有结构简单、成本低廉、调整维护方便等优点。由于没有位置检测装置,不能对步进电动机的步距误差、齿轮和丝杠等的传动误差进行补偿。所以,开环系统的精度比较低。

2) 半闭环控制系统。是带有位置反馈的控制系统。在它的驱动电动机轴上装有角位移检测装置(光电盘、数码盘等),并将角位移检测和驱动电动机做成一个整体。通过检测驱动电动机的转角间接地测量移动部件的直线位移,并反馈至数控装置中。由于角位移检测装置的结构比较简单,安装调整方便、稳定性好,如果配上精密滚珠丝杠,能够达到一定的精度。这种系统实用性强,正在广泛地使用。

3) 闭环系统。是在数控设备运动部件位置上,直接装上位置检测装置,并将检测到的实际位移值反馈到数控装置中去,与输入的指令位移值进行比较,用偏差值进行伺服系统的控制。闭环系统能补偿包括传动装置中的各种误差,有高的精度。但是,由于检测装置的引入,增加了复杂性,而且对传动系统的刚性及间隙等各种因素,也提出了较高的要求。

1.3 数控设备的检测装置

检测装置的作用是检测位移和速度,发送反馈信号,构成闭环控制。数控设备的加工精度与检测装置的精度有很大关系。检测装置能测量的最小位移量称为分辨力。分辨力与检测元件和测量线路有关。在设计数控系统时,必须精心选择。

1.4 数控设备的辅助功能

数控设备的辅助功能有:表示主轴转速的S功能;表示刀具寿命的T功能;表示冷却液起停、换刀等的M功能;表示坐标运动方式,为插补控制作准备的G功能。

在传统的数控中,上述的M、S、T、G等功能,采用继电器控制逻辑来实现;在计算机数控中,一般采用可编程逻辑控制器(PLC)来实现。

1.5 数控系统的故障诊断

早期的数控系统中,一般只有纸带输入的纵、横奇偶校验,同步孔丢失检查,非法指令码检查,以及越位报警等功能。上述各种检查功能都是采用硬件电路实现的。在现代数控系统中,引入软件检查功能,使故障诊断范围扩大,并具有联机自诊断能力,加速了故障的处理,提高了设备利用率。所谓联机自诊断是指运行中的自我诊断。在运行程序中融合自诊断程序,随时检查不正常的事件。

现代数控系统中,除了自诊断功能外,还有脱机诊断功能。所谓脱机诊断不是在系统运行程序中包含诊断程序,而是模拟运行条件的一种离机诊断。例如,数控系统提供各种脱机诊断程序纸带,通过读带机读入,即可检查存储器、外围设备等是否有故障存在。

2 数控技术的发展和现状

2.1 数控技术的发展

为了解决多品种、小批量、高精度与复杂形状的零件加工,发展了数控机床。1952年,美国帕森公司和麻省理工学院合作研制成功世界上第一台3坐标数控铣床,标志着数控技术发展的开始。它的数控系统采用电子管。从此以后,随着电子技术的飞跃发展,数控技术也得到迅速地发展,经历了几个发展阶段。

第1阶段,1952年至1970年。这一阶段的数控系统采用由硬件电路组成的专用计算装置。这种数控系统称为传统型数控(Numerical Control—NC)。传统型数控所采用的器件虽然经过电子管、晶体管、中小规模集成电路等几次变革,但各种控制功能,如输入装置、插补运算、控制器等,都是由硬件逻辑电路来实现。因此控制功能比较简单,而且使用中灵活性较差。在传统数控系统中,所需的元器件数量很多,致使整个系统的可靠性比较差。



第2阶段,1970年至1974年。由于计算机的迅速发展,性能价格比不断提高,在传统数控系统中引入了小型计算机,代替了由硬件构成的专用计算装置。这种数控系统称为计算机数控系统(Computer Numerical Control—CNC)。计算机数控用软件实现了各种控制功能,不仅大大地降低了需用元器件数量,增强了可靠性,而且具有灵活、易变的优点。只要通过改写计算机的应用程序,就能方便地改变控制功能,使数控系统具有更大的适应性。

第3阶段,从1974年开始,随着采用超大规模集成电路的微处理器(Microprocessor)迅速发展,出现了采用微型计算机控制的数控系统(Microcomputer Numerical Control—MNC)。微处理器的集成度不断提高,运算速度越来越快,功能越来越丰富。现在生产的16位、32位微处理器的性能已超过了中档小型计算机。微型计算机数控系统具有高速化、复合化、智能化等优点。今后微处理器的速度还会提高,新的软件将不断获得开发,加上多微处理器的应用将使数控的功能有更大的提高。因此,除了有特殊要求的系统以外,小型计算机数控均可用微型计算机数控来代替。

从上述可知,CNC系统可分为小型计算机CNC系统和微型计算机CNC系统。

2.2 数控技术的现状

1. 采用32位微型计算机,应用精简指令集计算机(RISC),能进行高速处理 计算速度达到20至30MIPS(1MIPS等于100万条指令/s),比一般指令系统提高计算速度5倍。高速计算能实现复杂形状的插补,满足复杂几何形状零件的加工,在模具加工中有明显的优点。高速计算还有利数据的高速处理,能实现加工误差的补偿。

2. 具有智能化的功能 能在加工中实时进行人机对话式的编程,能自动地确定加工参数。具有故障自诊断和排除故障的指导功能。具有强的显示功能,能在屏幕上显示刀具轨迹的功能。

3. 高精度与高速化 近期推出的数控系统,主轴转速为50000r/min,快速进给速度为2m/s,还设有快速自动换刀和自动交换工作台等。近期推出的数控系统的设定单位已达 $0.01\mu\text{m}$,正在研制的为 $0.001\mu\text{m}$ 。

4. 采用模块化结构 通常有CPU模块,位置控制模块,系统程序模块,接口模块,文字、图形处理模块等。模块化结构有许多优点,例如,选择不同的模块,可组成各种数控系统,能及时引入新开发出来的各种

硬、软件技术成果,促进数控系统的迅速发展。

5. 有丰富的软件功能 通常CNC系统有引导程序、基本系统程序、特殊加工软件包、快速测量软件包、工件加工程序、刀具补偿程序、系统程序等软件。有各种通用数据和专用数据,例如,有各轴的漂移补偿、伺服系统反馈增益等各种数据。

6. 采用全数字化交流变频伺服系统 近期推出的CNC系统采用基于矢量控制的正弦脉宽调制(SPWM)交流伺服系统。伺服系统的位置环、速度环和电流环都实现了数字化,研制成几乎不受机械负载变动影响的高性能伺服系统。

3 数控技术的发展趋势

数控技术正朝以下几个方向发展:

1. 向系列化、模块化、高性能化和成套化方向发展 现在的数控装置都采用16位和32位微处理器、标准总线及软、硬件模块结构。内存容量扩大到1MB以上,控制轴数可达16个。配置各种检测仪器和检测软件,使系统达到高质量和高可靠性。

2. 向小型化方向发展 随着半导体器件的不断高度集成化,各种标准型部件日趋小型化,数控装置也必然趋向小型化。三维空间安装技术将获得进一步的发展。由于数控装置的小型化,使其更紧密地与机械相结合,甚至直接安装在机械结构中,促进了机电一体化发展。

3. 向高精度、高速度、高柔性、多功能方向发展 主轴转速达10000r/min,分辨力要达到 $0.001\mu\text{m}$,快速进给速度达24m/min,换刀时间2~3s。具有多主轴、多工位、多刀库的高度柔性和自动上下料、自动监控、自动检测和通信功能的高度自动化,也是重要的发展方向。

4. 向智能化方向发展 应用人工智能的会话型自动编程将会迅速地增加;补偿机床热变形和机械变形的各种智能策略会获得应用;检测主轴负荷、主轴及设备变形的传感器及带有信号处理器的智能化传感器也将获得发展。基于专家系统的诊断技术,并能通过电话线和主计算机相连接,组成远距离诊断功能;依靠大型数据库和智能传感器,在故障产生之前,实现元器件的更换等将成功地获得应用。

5. 向增强进入柔性制造系统(FMS)和计算机集成制造系统(CIMS)的适应能力方向发展 FMS是一个由计算机集中管理和控制的自动化制造系统,具有多个半独立的工位和一个物料储存运输体系的体系,从提高生产设备的性能和利用率着手,达到提高效率



的目的,用于高效率地制造中小批量、多品种的零部件的生产。CIMS 是考虑产品的整个生产过程(包括经营)的优化而提出的一种新的生产方式和经营管理思想。这种系统能通过信息技术将设计与工艺、制造和管理联系在一起,并要对企业的环境进行分析与预测。由

此可见, CIMS 涉及的领域十分广泛。

数控技术是 FMS 和 CIMS 的重要基础技术,要开发面向 CIMS 的新一代 CNC,要研究面向 CIMS 的数控工作站。

第 2 章 数控系统的点位和轨迹控制原理

数控系统是通过向各坐标的伺服驱动系统发出一个个进给脉冲来控制坐标运动的,每个脉冲对应着坐标一定的移动量,脉冲的频率则对应着进给运动的速度。这种向各坐标发出脉冲以控制其运动的处理过程通常叫做脉冲分配计算。在传统数控中,脉冲分配计算一般用数字逻辑电路来实现,而在计算机数控中,则通过实时处理程序(软件)来实现(参见第 6 章),见表 6-2-1。

表 6-2-1 脉冲分配实现

| | |
|-------------------------|-------------------|
| 点位和直线控制 仅用简单的逻辑电路可实现 | 连续控制 通过插补运算来实现 |
|-------------------------|-------------------|

1 点位控制

点位(Point to Point—PTP)控制的进给运动控制仅要求准确定位,而对于被控对象从一个工作位置移动到另一个给定位置的运动轨迹无要求。因此,点位控制一般为直线运动,控制中主要考虑的是如何以最短的时间精确地定位。实际上,它是按坐标轴方向对移动长度的控制。多维空间的点位控制称为“多轴控制”。

它可以是多个轴间互不同步的各个轴的独立移动,也可以是多个轴同时而又协调地工作,并且其他轴同步于移动量最大轴的“长轴同步”控制。点位控制方式通常有增量方式和绝对值方式两种。

1. 增量方式 是指目标点位置的坐标值以上一个工位点为原点的相对坐标值来给定的。若以图 6-2-1a 的 1、2 孔位为例, X 轴坐标的指令数值应该是 $+X_1$ 和 $-X_2$ 。一种增量方式的点位控制系统见图 6-2-1b。它的输入指令经输入与运算电路后被分离为方向和计数两个控制信号。方向控制信号用来控制 X 轴的移动方向,高电平为 $+X$ 端输出脉冲,低电平为 $-X$ 端输出脉冲;而计数值 $|X|$ 被指令寄存器作减法运算,直至检零输出为低电平,才停止移动。

2. 绝对值方式 是指目标点位置的坐标值以固定零位为原点的绝对坐标值来给定。它可以避免增量方式中的累积误差,因此定位精度较高。图 6-2-2 所示的是绝对值输入、模拟量输出的点位控制系统。其中 X' 为实际位置反馈值,与给定坐标值 X 比较,其差值 ΔX 经 D/A 转换后,作为驱动器输入,直至 $\Delta X=0$ 。

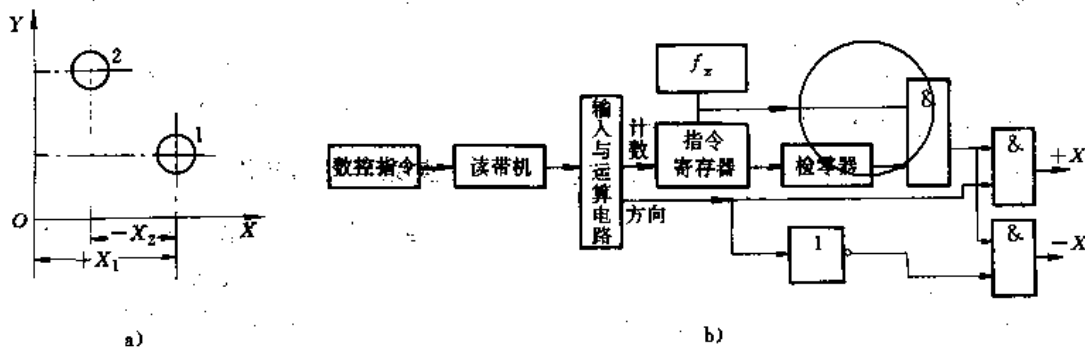


图 6-2-1 增量方式点位控制

a) 相对坐标 b) 增量方式点位控制系统

f_z —主振频率



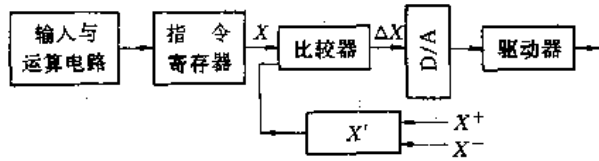


图 6-2-2 绝对值方式点位控制

2 插补原理

直线和连续轨迹控制都是使两个坐标或两个以上坐标的运动指令信息以适当的函数关系进行分配，从而合成所需要的连续的直线或曲线的目标位置移动轨迹。控制中既要考虑运动的速度，又要考虑动态的位置精度。这种适当分配多轴运动指令信息的函数算法被称为“插补运算”。它是数控的核心。根据不同的插补原理，目前已有多种插补运算的方法，如数字脉冲乘法器、逐点比较法、数字积分器和时间分割法，以及后来在此基础上又发展的比较积分法、矢量判别法和最小偏差法等。

2.1 数字脉冲乘法器

数字脉冲乘法器插补是最早被使用于数控系统的一种最简单的直线插补算法，并且可以方便地实现多坐标联动。

2.1.1 数字脉冲乘法器的基本原理

数字脉冲乘法器是一种将二进制数的给定指令转换成相应的一串脉冲序列的驱动装置。它通常由脉冲源、分频器、寄存器和门电路所组成。

1. 分频器 实质上是一个二进制计数器。图 6-2-3 所示为分频器原理图。图中部件可以由下降沿 JK 触发器和单稳态电路 DM 组成。由图可知，每输入 8 个来自脉冲源的计数脉冲 CP，分频器就完成一个计数周期。所有触发器的 Q 端由全“0”态开始计数，到下一个全“0”态所需的时间被称为周期时间 T，可以由溢出脉冲 YC 的间隔时间来标志。

对于 n 位分频器，一个周期内第 i 个输出端 P_i 的输出脉冲数为 P_i = 2ⁱ⁻¹，并且这些脉冲在时间上互不重叠，因此才有可能把一个二进制数正确地转换成相应的一串脉冲序列。

2. 乘法器 它通常由寄存器 D_x(D_y) 和门电路组成。设一个二进制数 [X] = x_nx_{n-1}...x_i...x₂x₁ 存于 D_x，x_i 为二进制数的第 i 位数，当其为 1 时，相应位“与”门开放，允许 P_i 端脉冲通过；当其为 0 时，则“与”门关闭。这样，“或”门输出端 S 的输出脉冲总数为 S =

$\sum_{i=1}^n 2^{i-1} x_i$ ，它正好等于二进制 X 值。当 X 值不变时，经过 m 个周期时间，S 端输出脉冲数 S = mx，这就是数字脉冲乘法器的工作原理。

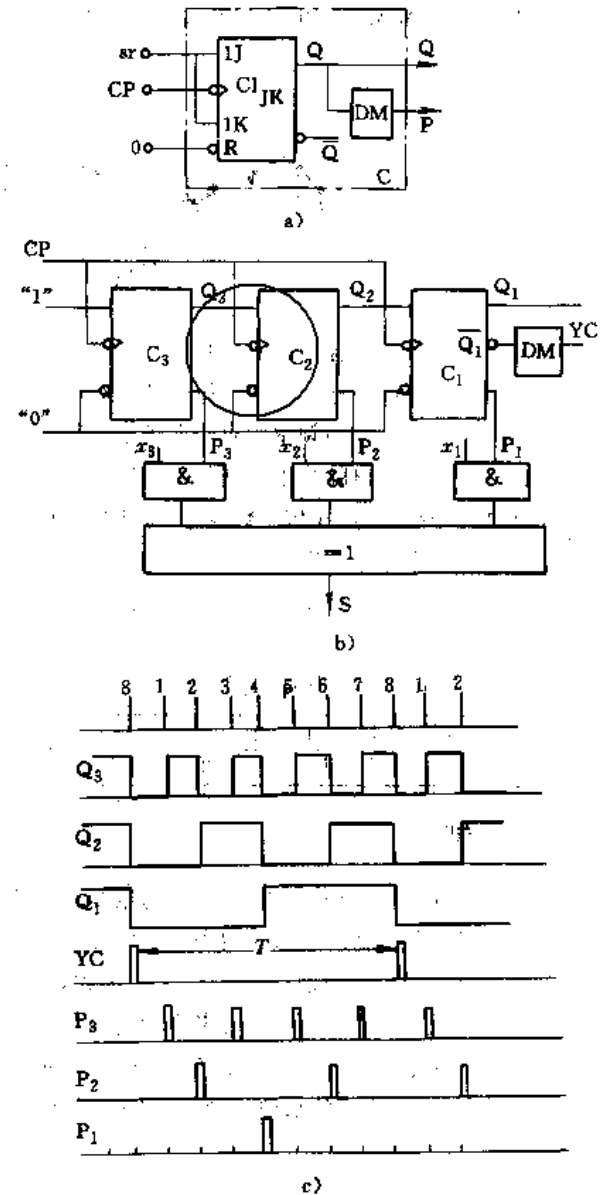


图 6-2-3 分频器原理

a) C 电路 b) 8 分频电路 c) 输出波形

2.1.2 直线插补及其应用

1. 直线插补原理 如图 6-2-4 所示，设被控对象在 XOY 平面内沿 \overline{OP} 作直线运动，由 O 点移动至 P(X_t, Y_t) 点时，X、Y 轴的增量分别为 X_t、Y_t。 \overline{OP} 与长轴 X 间夹角为 α。设 SA 段内的插补周期时间 t*、瞬时进给速度 f_i 和各轴总增量 X_t、Y_t 为已知，由 $\tan\alpha = Y_t/X_t$ ， $\cos\alpha = 1/\sqrt{1+\tan^2\alpha}$ ，可求得 SA 段插补进给量



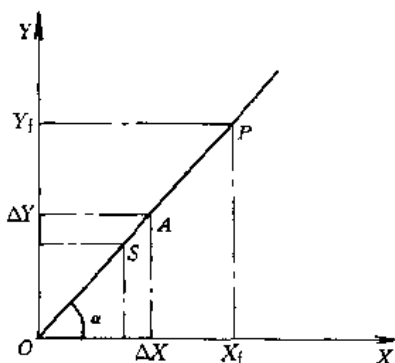


图 6·2-4 直线插补原理

$$\Delta X = f_t \cdot \cos\alpha \quad \Delta Y = (Y_f/X_f)\Delta X \quad (6\cdot2-1)$$

2. 应用电路 图 6·2-5 给出了数字脉冲乘法器在两坐标平面内的直线插补原理框图。当寄存器容量足够时,可直接将 X_f, Y_f 以二进制数存入 D_x 与 D_y 。当 OP 段较长而 $D_x(D_y)$ 容量有限时,可以分段进行。即将上述经过计算机运算得到的 \overline{SA} 段的增量值 $\Delta X, \Delta Y$, 通过十进制转二进制运算,以二进制数分别存在寄存器 D_x, D_y 内。其输出端直接和门电路中“与”门连接,在 S_x 和 S_y 端将输出两个脉冲序列 $S_x = \Delta X, S_y = \Delta Y$, 去控制各自的伺服驱动系统。图中触发器是插补控制和终点控制的状态触发器。该电路可以推广到四象限域内的直线插补,只要将寄存器 D_x 和 D_y 的最高位 X_{n+1} 和 Y_{n+1} 作为符号位,通过相应门电路的逻辑判别,实现进给方向控制。应用于多个坐标轴的插补时,只要相应增加指令寄存器和门电路就可以了。

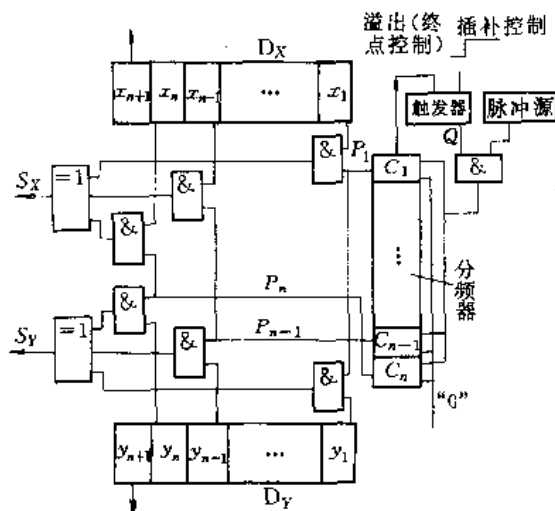


图 6·2-5 二维数字脉冲乘法器

2·2 逐点比较法

逐点比较法也称为区域判别法。它的基本特点是由偏差判别、给出向指定轨迹靠拢的进给、偏差计算和

终点判断四个工作节拍来完成。

2·2·1 逐点比较法的基本原理

逐点比较法的基本原理是计算机在控制被控对象运动轨迹过程中,每进给一步就要计算一次新的坐标点与给定轨迹之间的偏差,并加以判别,以确定下一步进给的坐标方向,从而使被控对象运动轨迹小于允许偏差而逼近给定的直线或曲线轨迹。

1. 直线插补原理

a. 偏差判别 设 $X-Y$ 平面上的给定直线段 \overline{OF} 在第一象限内,起始点 O (原点) 与终点 F , 以及某瞬间加工点 $P_i(X_i, Y_i)$, 直线 \overline{OF} 和 $\overline{OP_i}$ 与 X 轴夹角分别为 α_f, α_i , 并且 $\tan\alpha_f = Y_f/X_f, \tan\alpha_i = Y_i/X_i$, 见图 6·2-6。由于 $\tan\alpha_f - \tan\alpha_i = Y_f/X_f - Y_i/X_i = (X_i Y_f - X_f Y_i)/(X_i X_f)$, 当 P_i 点和 F 点在同一象限时, $X_i X_f > 0$ 。定义直线段加工偏差算式为

$$E_i = X_i Y_f - X_f Y_i \quad (6\cdot2-2)$$

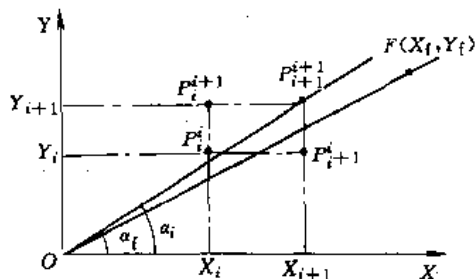


图 6·2-6 逐点比较直线插补

可以得到下列判据:

(1) 当 $E_i \geq 0$ 时,加工点 P_i 在 \overline{OF} 直线上方,或正好在 \overline{OF} 线上,下一步进给应按 X 轴方向给出。

(2) 当 $E_i < 0$ 时,加工点 P_i 在 \overline{OF} 直线下方,下一步进给应按 Y 轴方向给出。

b. 偏差计算 偏差计算式 (6·2-2) 每次运算需作 2 次乘法和 1 次减法运算,比较费时。为了加快偏差计算和判别,可采用递推算法。设前一加工点 P_i 在直线 \overline{OF} 上方 (或在 \overline{OF} 上), 即 $E_i \geq 0$, 下一步应沿 X 轴正方向发一进给脉冲,使加工点移至 P_{i+1} 点,这时 P_{i+1} 点的 $X_{i+1} = X_i + 1$, 并且偏差为 $E_{i+1} = E_i - Y_i$ 。同理,若 P_i 在 \overline{OF} 下方,即 $E_i < 0$, 那么应向 Y 轴正方向进给一步,使加工点移至 P_{i+1} 点,这时 $Y_{i+1} = Y_i + 1$; 偏差为 $E_{i+1} = X_i + E_i$ 。

要实现上述偏差算法,至少要设置以下 4 个寄存器:

- (1) 寄存器 D_x : 寄存终点 F 的 X 轴坐标值 X_f ;
- (2) 寄存器 D_y : 寄存终点 F 的 Y 轴坐标值 Y_f ;
- (3) 寄存器 D_E : 寄存每次进给后偏差运算的结果



E_i 值;

(4) 终点寄存器 D_F : 寄存加工过程中 X 与 Y 所走步数总和, 用来作终点判断值。

2. 圆弧插值原理

a. 偏差判别 设 X - Y 平面上给定圆弧段 \widehat{AF} 在第一象限内, 其起始点 A 和终点 F , 圆心 O (原点) 和半径 R 。对于某瞬时加工点 P_i 与原点 O 的距离为 $R_i^2 = X_i^2 + Y_i^2$, 见图 6-2-7。它与给定圆弧段的径向误差为

$$E_i = (R_i)^2 - R^2 = X_i^2 + Y_i^2 - R^2 \quad (6\cdot2\cdot3)$$

根据 E_i 可以得到与式 (6-2-2) 同样判据。

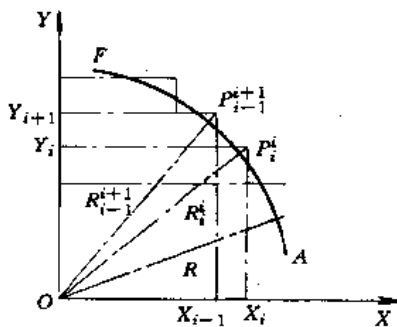


图 6-2-7 逐点比较圆弧插补

b. 偏差算法 同样可以采用递推算法。按逆时针走向为基准, 当 P_i 在 \widehat{AF} 以外 (或在 \widehat{AF} 上) 时, $E_i \geq 0$

0, 下一步进给应在 X 轴的负方向上, 即 $X_{i+1} = X_i - 1$, 偏差为 $E_{i+1} = E_i - 2X_i + 1$ 。反之, 若 P_i 在 \widehat{AF} 以内, $E_i < 0$, 下一步进给应在 Y 轴的正方向上, 即 $Y_{i+1} = Y_i + 1$, 偏差为 $E_{i+1} = E_i + 2Y_i + 1$ 。

3. 抛物线插补 抛物线方程为 $Y^2 = kX$, 偏差算式可以写成 $E_i = Y_i^2 - kX_i$ 。在第一象限内, 加工点 P_i 在轨线上方 (或在轨线上) 时, $E_i \geq 0$, 应在 X 轴正方向进给一步, 得到 $E_{i+1} = E_i - k$; 不然 $E_i < 0$, 应在 Y 轴正方向进给一步, 得到 $E_{i+1} = E_i + 2Y_i + 1$ 。

2.2.2 四象限域的推广

1. 四象限域的直线插补 根据直线插补基本原理分析, 第一象限内的插补偏差判别和递推算法, 可以很方便地推广到四象限广义域中。对于各象限中设定轨线 $L_1 \sim L_4$ 的偏差判别与算法, 以及其进给方向参见表 6-2-2。

2. 四象限域的圆弧插补 与上同理, 按逆时针和顺时针的两种不同情况, 它们给定轨线分别设定为 $NR_1 \sim NR_4$ 和 $SR_1 \sim SR_4$ 时, 根据圆弧插补基本原理, 同样可以将第一象限的偏差判别和递推算法推广到四象限广义域中, 参见表 6-2-3。

表 6-2-2 广义域直线插补

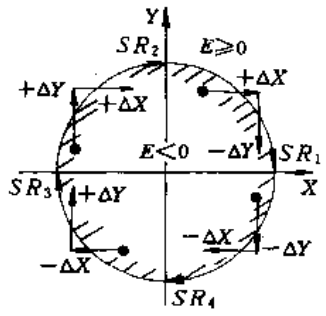
| 四象限进给方向 | 偏差判别 | 设定轨线 | 进给方向 | 偏差算法 |
|---------|-----------------------------------|------------|-------------|-----------------------------------------------|
| | $E_i \geq 0$ 时 设逻辑变量 $e_i = 1$ | L_1, L_4 | $+\Delta X$ | $E_{i+1} = E_i - e_i Y_i + (1 - e_i) X_i $ |
| | | L_2, L_3 | $-\Delta X$ | |
| | $E_i < 0$ 设 $e_i = 0$ | L_1, L_2 | $+\Delta Y$ | |
| | | L_3, L_4 | $-\Delta Y$ | |

表 6-2-3 广义域圆弧插补

| 四象限进给方向 | 给定轨线 | 进给方向 | | 偏差算法 |
|---------|--------|--------------|-------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| | | $E_i \geq 0$ | $E_i < 0$ | |
| | NR_1 | $-\Delta X$ | $+\Delta Y$ | 下一步进给为 $\pm \Delta X$ 时, 设逻辑变量 $L = 1$; 为 $\pm \Delta Y$ 时, 设 $L = 0$, 则 $E_{i+1} = E_i - \text{sign}(E_i) \times 2[LX_i + (1 - L)Y_i] + 1$ 符号函数: $\text{sign}(E_i) = \begin{cases} 1, & E_i \geq 0 \\ -1, & E_i < 0 \end{cases}$ |
| | NR_2 | $-\Delta Y$ | $-\Delta X$ | |
| | NR_3 | $+\Delta X$ | $-\Delta Y$ | |
| | NR_4 | $+\Delta Y$ | $+\Delta X$ | |



(续)

| 四象限进给方向 | 给定轨线 | 进给方向 | | 偏差算法 |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------|--------------|-----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| | | $E_i \geq 0$ | $E_i < 0$ | |
|  | SR ₁ | -ΔY | +ΔX | 下一步进给为±ΔX时, 设逻辑变量L=1; 为±ΔY时, 设L=0, 则 $E_{i+1} = E_i - \text{sign}(E_i) \times 2[LX_i + (1-L)Y_i] + 1$ 符号函数: $\text{sign}(E_i) = \begin{cases} 1, & E_i \geq 0 \\ -1, & E_i < 0 \end{cases}$ |
| | SR ₂ | +ΔX | +ΔY | |
| | SR ₃ | +ΔY | -ΔX | |
| | SR ₄ | -ΔX | -ΔY | |

2.2.3 进给速度的合成

在连续轨迹控制中, 进给速度的调节和控制有着重要意义。它直接影响到被控对象运动速度均匀性和定位精度, 并且与生产率、工具和传动机构的寿命密切相关。进给速度的设定是按工艺技术条件来选择并编入程序, 通常用F代码以“指令进给速度”值给出(参见第6章4.1.1节)。在加工过程中, 由于种种因素需要随时调整时, 可由操作面板上进给速度设定旋钮来调节。设X轴的进给脉冲频率为 f_x (个/s)、脉冲当量 δ (mm/脉冲), 则该轴进给速度

$$v_x = \delta f_x \times 10^{-3} \quad (\text{m/s})$$

1. 合成进给速度 直线插补时合成进给速度为

$$v = \delta \sqrt{f_x^2 + f_y^2} \times 10^{-3} \quad (\text{m/s}) \quad (6.2.4)$$

由于逐点比较法中X、Y轴的进给脉冲均来自同一个进给速度脉冲源, 其频率为 f_g , 并且 $f_g = f_x + f_y$, 脉冲源速度 $v_g = v_x + v_y = \delta f_g \times 10^{-3}$ (m/s)。令合成进给速度 v 与X轴向速度 v_x 夹角为 α , 则

$$\frac{v}{v_g} = \frac{1}{\cos\alpha + \sin\alpha} = g(\alpha) \quad (6.2.5)$$

由图6.2-8给出 $v/v_g = g(\alpha)$ 曲线可知: 在 f_g 不变时,

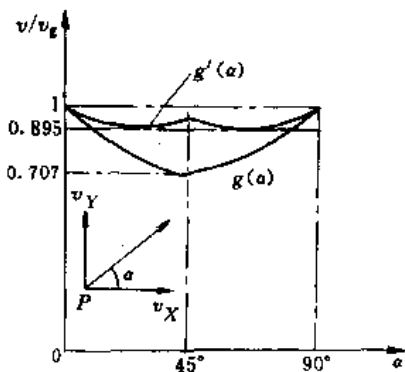


图 6.2-8 $v/v_g = g(\alpha)$ 曲线

v 随 α 角而改变, 变化范围是 $v = (1 \sim 0.707)v_g$, 其波动率为1.414。

在圆弧插补中, 合成进给速度的算法和直线插补完全相同, 只是 α 角为圆心到加工点间连线与X轴的夹角。

2. 进给速度稳定性的改善 由图6.2-8可知, 当 $\alpha = 45^\circ$ 时, 合成进给速度为最小(0.707 v_g); 并且在 $\alpha = 0^\circ$ 和 $\alpha = 90^\circ$ 处, v/v_g 变化率最大。为了改善合成进给速度稳定性, 通常可以采用1/2分频方法。即选用频率 $2f_g$ 的脉冲, 经1/N分频后作为进给脉冲源频率。在 $\alpha = 0^\circ$ 或 $\alpha = 90^\circ$ 时, 取 $N=2$; 而 $\alpha = 45^\circ$ 时, 取 $N=1$ 。这样, 当 $\alpha = 0^\circ$, 沿X轴向插补时, $v_x = v_g$; $\alpha = 90^\circ$, 沿Y轴向插补时, $v_y = v_g$ 。并且

$$0^\circ \leq \alpha \leq 45^\circ \text{ 时: } \frac{v}{v_g} = \frac{1}{\cos\alpha + \frac{1}{2}\sin\alpha} \quad (6.2-6)$$

$$45^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ \text{ 时: } \frac{v}{v_g} = \frac{1}{\frac{1}{2}\cos\alpha + \sin\alpha} \quad (6.2-7)$$

由上面两式可得到 $v/v_g = g'(\alpha)$ 曲线(见图6.2-8), 这时, 合成进给速度变化范围为 $v = (1 \sim 0.895)v_g$, 波动率为1.117。

自动实现1/2分频的原理线路见图6.2-9。触发器DT_n是偏差寄存器D_E的符号位。设 $E_i \geq 0$ 时, X轴方

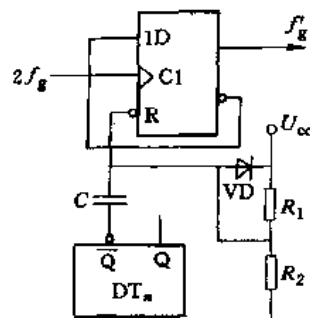


图 6.2-9 1/2 分频电路



向进给, $\bar{Q}=1$; $E_i < 0$ 时, Y 轴方向进给, $\bar{Q}=0$ 。当进给由 X 轴转向 Y 轴时, \bar{Q} 端由 1 变 0, 由微分电路产生一个负脉冲, 将 D 触发器置“0”。这时只要 C1 端来一个脉冲, 则 D 触发器由“0”变“1”, 即产生一个进给脉冲, $N=1$; 其他情况, 都需要输入两个脉冲, D 触发器才产生一个进给脉冲, 即 $N=2$ 。

2.2.4 终点判断

在逐点比较法的每次插补运算以后, 数控系统都要求出各轴的插补进给量, 用来计算到达轨迹段终点所剩的距离 S_i , 然后进行终点判断。当即将到达终点时, 设置相应标志, 以便进行程序段转接和减速处理。在到达加工轨迹段终点时, 即停止进给和插补运算。

直线插补的终点判断方法有如下几种:

1. **分轴计数判断** 设计算出的 X、Y 轴的进给步数分别为 S_x 和 S_y 。当 X 或 Y 轴每进给一步, 计算 $S_x = S_x - 1$ 或 $S_y = S_y - 1$, S_x 或 S_y 先减至零的坐标轴, 先停止进给, 当 $S_x = S_y = 0$ 时, 表示已到达终点。

2. **总进给步数判断** 这时, 总进给步数为 $S = S_x + S_y$, 当 X 或 Y 轴每进给一步, 则计算 $S_i = S_{i-1} - 1$; 当 $S_i = 0$ 时, 表示已到达终点。

3. **长轴计数判断** 设 $Y_i \geq X_i$, 则 Y 轴为长轴, 取 $S = S_y$, 而后每当 Y 轴进给一步, 计算 $S_i = S_{i-1} - 1$, 而 X 轴 (短轴) 进给时, 不计算。当 $S_i = 0$ 时, 表示已到达终点。

上述方法, 对于圆弧插补的终点控制同样适用。只是长轴计数判别法中, 当终点落在 X 轴两侧的 45° 区域内, 取 Y 轴为长轴, 当终点落在 Y 轴两侧的 45° 区域内, 取 X 轴为长轴。

逐点比较法应用较广, 它除了能作直线、圆弧、抛物线插补以外, 还可作其他二次曲线的函数插补, 插补最大误差不超过一个 δ , 因此, 插补精度较高。

2.3 数字积分法

数字积分法又称为微分分析器 (Digital Differential Analyzer—DDA) 法。它不仅可以实现平面直线、圆弧以及高次函数曲线的插补, 而且由于它的各轴插补运算的独立性, 容易实现多个坐标轴间的联动控制, 特别适用于复杂的连续空间曲线加工, 因此被广泛应用于数字控制系统的插补运算中。

2.3.1 数字积分法的基本原理

从几何概念上讲, 函数 $Y = f(x)$ 的积分值就是该

函数曲线与时间轴之间所包围的面积。当用增量 $\Delta t = 1$ (一个脉冲当量 δ) 代替微变量 dt 时, 终点时间 $t_i = m\Delta t$ 。有

$$S = \int_0^t Y dt = \sum_{i=0}^m Y_i \Delta t = \sum_{i=0}^m Y_i \quad (6.2-8)$$

因此, 当 δ 足够小时, 用求和代替积分运算也可以达到所要求的精度。根据这个原理, 用被积函数寄存器 D_Y 、累加寄存器 D_A 和全加器 Σ 可以组成一个进行上述运算的数字积分器, 见图 6.2-10。其积分原理是: 每增加一个 Δt , 就将 D_Y 中被积函数值 Y_i 累加于 D_A 一次, 取 D_A 为一个单位面积值, 则累加满溢一个脉冲, 就表示一个 Δs 。在 m 个 Δt 作用下, D_A 的总溢出脉冲数 S 值即为积分值。

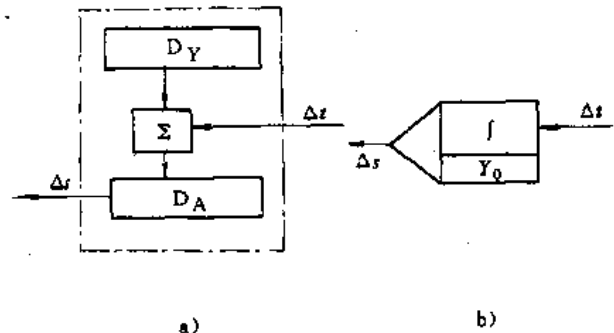


图 6.2-10 数字积分器与符号

a) 电路组成 b) 逻辑符号

1. **DDA 直线插补** 设 $F(X_i, Y_i)$ 为直线轨迹终点, v_x, v_y 为速度 v 在相应轴上的分量, 由于 $v_x/v_y = X_i/Y_i = c$, 则在 Δt 时间内各轴方向增量为 $\Delta X = cX_i\Delta t$, $\Delta Y = cY_i\Delta t$ 。那么对 Y 轴而言, 以 Δt 为单位时间的 m 次累加值为

$$s_y = \sum_{i=1}^m cY_i\Delta t_i \Big|_{m-1} = cY_i m \Big|_{m-\frac{1}{c}} = Y_i \quad (6.2-9)$$

由此可知, 当 $m=1/c$ 时, D_A 溢出脉冲总数 s_y 等于以脉冲当量为单位的 Y 轴终点坐标值 Y_i 。

在 DDA 直线插补时, 一般取 $1/c$ 值等于 n 位累加寄存器 D_A 的容量 2^n , 并且可用两个积分器分别对 X、Y 轴作累加运算, 其溢出脉冲分别控制相应轴方向上的进给, 从而获得直线运动轨迹。

【例 6.2-1】如图 6.2-11 所示, 已知终点 A(5, 3), 寄存器容量 $N=2^3=8$, 试对 \overline{OA} 进行直线插补。

解 以 $\Delta X=5/8$, $\Delta Y=3/8$ 分别存于 D_x 和 D_y , 累加次数 $m=1/c=N=8$ 。插补运算过程见表 6.2-4。

如果选 $m=5$ (长轴 X 的坐标值), 而 D_y 内存有 $\Delta Y/\Delta X = 4.8/8$, 仅用一个积分器作 Y 轴插补运算, 并且每次累加 X



轴均给出一进给脉冲,这时Y轴插补运算过程见表6-2-5。这样可节省一个积分器,它被称为“比值积分插补”。

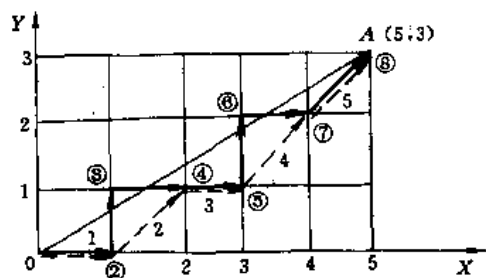


图 6-2-11 直线插补例

表 6-2-4 插补运算过程

| m | 寄存器 D _x | | 寄存器 D _y | |
|---|--------------------|-----------------|--------------------|-----------------|
| | 余数 | Δs _x | 余数 | Δs _y |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 5/8 | 0 | 3/8 | 0 |
| 2 | 2/8 | 1 | 6/8 | 0 |
| 3 | 7/8 | 0 | 1/8 | 1 |
| 4 | 4/8 | 1 | 4/8 | 0 |
| 5 | 1/8 | 1 | 7/8 | 0 |
| 6 | 6/8 | 0 | 2/8 | 1 |
| 7 | 3/8 | 1 | 5/8 | 0 |
| 8 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

表 6-2-5 Y轴插补过程

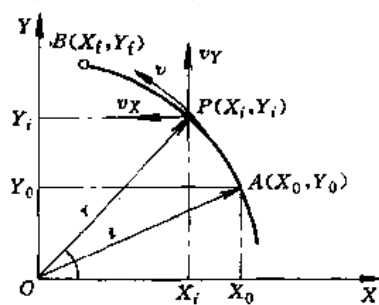
| m | 寄存器 D _y | |
|---|--------------------|----------------|
| | 余数 | s _y |
| 0 | 0 | 0 |
| 1 | 4.8/8 | 0 |
| 2 | 1.6/8 | 1 |
| 3 | 6.4/8 | 0 |
| 4 | 3.2/8 | 1 |
| 5 | 0 | 1 |

2. DDA 圆弧插补 如图 6-2-12a 所示, 设轨迹段 \widehat{AB} , 圆心为 O , 半径 r , 工位点 $P(X_i, Y_i)$ 处切向速度 v_x, v_y , 由于 $X = r \cos t, Y = r \sin t$, 可得到

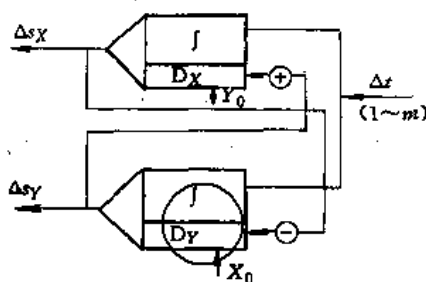
$$v_x = \frac{dX}{dt} = -Y, \quad v_y = \frac{dY}{dt} = X \quad (6-2-10)$$

用增量表示时, $\Delta X = -Y \Delta t, \Delta Y = X \Delta t$, 且

$$X_i = \sum \Delta X = \sum (-Y); Y_i = \sum \Delta Y = \sum X \quad (6-2-11)$$



a)



b)

图 6-2-12 DDA 圆弧插补

a) 插补原理 b) 逻辑符号

与直线插补相比, DDA 圆弧插补时 X, Y 轴的被积函数寄存器 D_x, D_y 分别存放的是工作点 P 的坐标变量 Y 与 X 。由于 Y, X 值是随加工点 P 的移动而改变的, 所以它们必须分别用相应的 Y 与 X 坐标的累加寄存器的溢出脉冲 Δs_y 与 Δs_x 来随时作增 1 和减 1 修改, 其原理见图 6-2-12b。

2.3.2 四象限域工作

DDA 直线插补, 在四个象限域中, X, Y 轴的被积寄存器累加值一般取为 $c|X_i|$ 和 $c|Y_i|$, 插补运算过程也都相同, 只是进给伺服电动机的走向应根据输入的终点坐标值, 在不同象限域内的正、负号来决定, 见表 6-2-6。

表 6-2-6 直线插补的进给方向

| 象限域 | I | II | III | IV |
|-------|---|----|-----|----|
| X轴电动机 | 正 | 反 | 反 | 正 |
| Y轴电动机 | 正 | 正 | 反 | 反 |

在 DDA 圆弧插补中, 对于顺向或逆向圆的轨迹线, 其四象限域工作的插补原理是相同的, 只是控制各坐标轴 $\Delta s_x, \Delta s_y$ 的进给方向不同。被积函数修改值是增 1 还是减 1, 应由 X, Y 轴向的增减来定。具体可参



表 6-2-7 圆弧插补的进给方向

| 轨线方向与象限域 | | 逆向圆/顺向圆轨线 | | | |
|----------|-------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| | | I | II | III | IV |
| 进给轴方向 | Δs_x | -/+ | -/+ | +/- | +/- |
| | Δs_y | +/- | -/+ | -/+ | +/- |
| 被积寄存器 | $D_x(\Delta s_y)$ | \oplus/\ominus | \ominus/\oplus | \oplus/\ominus | \ominus/\oplus |
| | $D_y(\Delta s_x)$ | \ominus/\oplus | \oplus/\ominus | \ominus/\oplus | \oplus/\ominus |

见表 6-2-7。

2.3.3 合成进给速度与改善方法

1. 合成进给速度 由 DDA 直线插补原理分析可知, 当累加寄存器容量 $N=2^n$ 时, X 和 Y 方向平均进给分配率为 X/N 与 Y/N , 设进给脉冲源频率为 f_s , 并令 $k=f_s/N$, 那么 X 、 Y 轴的进给频率分别为

$$f_x = kX \quad f_y = kY \quad (6.2-12)$$

设 $L = \sqrt{X^2 + Y^2}$, 则合成进给速度为

$$v = \delta L k \times 10^{-3} = \delta f_s L / N \times 10^{-3} \quad (\text{m/s}) \quad (6.2-13)$$

在直线插补中 L 为直线段长度。这样, 其进给速度 $v = Lv_s/N$, 与 L 成正比。由于 L 的变化范围是 $0 \sim 1.414N$, 因此直线插补中合成进给速度变化范围是 $v = (0 \sim 1.414)v_s$ 。对于圆弧插补, L 即为圆弧半径, 其进给速度 $v = Rv_s/N$, R 的变化范围是 $0 \sim N$, 因此圆弧插补中合成进给速度变化范围为 $(0 \sim 1)v_s$ 。进给速度 v 有这样大的变化范围, 一般是不许可的, 必须设法改善。

2. 进给速度的均化 DDA 插补的特点是进给脉冲源每发一个脉冲就代表一个单位的时间增量 Δt , 而且不论行程长短, 任何一个轴都必须作 m 次累加, 完成时间也都是相同的, 因此, 行程越长的轴其进给速度越快, 反之亦然。为此, 必然影响加工面质量和短行程的生产率, 有必要使 Δs_y 和 Δs_x 的溢出速度均化。进给速度均化的常用方法是“规格化”方法, 见图 6-2-13a, 寄存器中所存的数, 若其最高位为 0, 称为“非规格化的数”, 反之为“规格化的数”。将一个非规格化的数通过向左移位操作, 变成规格化数的过程叫做“规格化”。 X 、 Y 轴被积寄存器存数的规格化过程也就是将 X 、 Y 两个轴的脉冲分配速度扩大了相同倍数, 而两者的比值不变, 直线段斜率也不变。但是, 作为终点判断的累加次数 m 必须作相应位数的减少, 才能保证总溢出数 $S_y = Y_i$ 和 $S_x = X_i$ 。要做到这一点, 只要在 D_x 、 D_y 左移的同时, 对终点判断计数器作右移, 并将 1 填入最高

位, 见图 6-2-13b。通过规格化使得短轴的累加次数 m 减小得多, 而长轴的累加次数减小得少, 从而达到进给速度的均化作用。

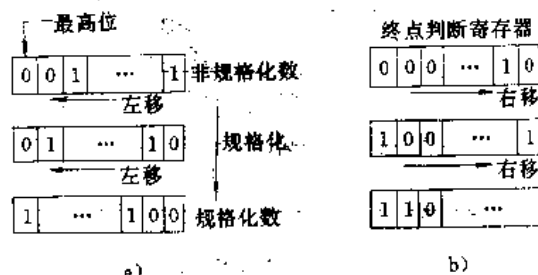


图 6-2-13 “规格化”过程

对于圆弧插补, 由于 D_x 、 D_y 中的数在累加过程中不断地修改, 存数也将不断增大, 会造成不应有的溢出, 因此, 必须将规格化定位在寄存器的次最高位, 即 $(n-1)$ 位。此外, 右移位数为 k 位, 即 D_x 、 D_y 中的数扩大了 2^k 倍, 为 $2^k X$ 和 $2^k Y$ 。这样累加寄存器 D_{Ax} 、 D_{Ay} 每溢出一个 Δs_x 或 Δs_y , 寄存器 D_x 、 D_y 就应该相应增减一个 2^k , 即在第 $(k+1)$ 位上加减“1”。

3. 进给速度变化率的改善 通常采用前述的“规格化”方法, 可以减少寄存器中 L 值的变化范围。其最小数 $L_{\min} = N/2$ (因为 $X=10\cdots00=2^{n-1}$, $Y=0$), 而最大数 $L_{\max} = \sqrt{2}N$ (因为 $X=Y=11\cdots11=2^n-1$)。因此, 合成速度的变化范围为 $v = (0.5 \sim 1.414)v_s$, 变化率为 2.828, 这样仍太大, 还可以通过进给速率数 (Feed Rate Number—FRN) 编程方式进一步减少。该方式是把速度代码 F 后面的数字用 FRN 值编入。FRN 定义为 $F = v_0/L$ 或 $F = v_0/R$ (v_0 为指令进给速度)。在 DDA 插补中,

$$v = \delta L k \times 10^{-3} \quad (\text{m/s}) \quad (6.2-14)$$

令 $L' = \delta L$, 单位为 mm, 即 $v = L'k \times 10^{-3} \quad (\text{m/s})$ 。若取脉冲源频率 f_s 为 $f_s = Nv_0/L$, $v_0 = Lf_s/N = Lk \times 10^{-3} \quad (\text{m/s})$, 即有 $v = v_0$ 。这表明插补产生的合成进给速度将恒等于指令进给速度。

4. 插补精度的提高 DDA 插补运算中, 累加寄存器 D_A 的溢出脉冲 Δs 的当量等效于寄存器容量 N , 而累加和的余数小于 N 时不产生溢出脉冲, 因此, 这种溢出脉冲作为进给增量时, 其最大插补误差可达 $2^n - 1$, 也就是说误差处理方法是“取整舍余”。为了提高插补精度, 在累加运算前, 在 D_A 中预置一个 2^{n-1} 数, 而累加运算时仍按“取整舍余”处理, 但其结果却相当于“四舍五入”的插补精度。

2.4 时间分割法

在 FANUC 7M 数控系统 (参见第 6 章 2.2 节) 中



采用了该方法,它根据工作方式(快速进给或工作进给)和F(速度)指令(mm/min)自动进行加/减速,计算出在规定时间间隔 t^* 单位(7M系统中为8ms)内的瞬时合成进给量 Δs ($\mu\text{m}/t^*$),并进行插补运算和终点判断。再由 Δs 对各轴按比例分配,给出各轴的进给量。

2.4.1 自动加/减速

按定义,系统在每个 t^* 时间内的进给量称为“瞬时速度” f_i ,而把系统在稳定进给状态时,每单位时间 t^* 内插补一次的进给量称为“稳定速度” f_s ,当 $t^*=8\text{ms}$ 时,有

$$f_s = 1/7500YF \quad (\text{mm}/t^*) \quad (6.2-15)$$

式中 F ——速度指令值(mm/min);

Y ——速率系数,决定于快速倍率、工作进给倍率等可调因素。

当系统启动、停止以及调节进给速度时,系统需进行自动线性加/减速。设进给速度 F ,系统由静止加速到 F 所需时间为 T (ms),取时间单位 t^* 为8ms,则平均加(减)速度为

$$a = 1.07F/T \quad [\mu\text{m}/(8\text{ms})^2] \quad (6.2-16)$$

系统每次插补都要进行自动加/减速度处理。

(1) 加速:当计算的稳定速度 f_{sc} 大于原稳定速度 f_s 时,需作加速度处理,每次加速处理后瞬时速度为 $f_{i+1} = f_i + at^*$

(2) 减速:每次插补都需终点判断,并算出离开终点的瞬时距离 s_i 与减速区域 s 比较,决定是否要减速。减速区域 $s = f_i^2/2a$,每次减速处理后的瞬时速度为 $f_{i+1} = f_i - at^*$,加/减速处理后,系统按 f_{i+1} 作插补运算,并对各轴进行分配。直至新的稳定速度或减速到零为止。

2.4.2 插补原理

直线插补原理(参见本章2.1.2节)。

1. 圆弧插补原理 如图6.2-14所示,圆上两点A、B间圆弧 \widehat{AB} 和弦 \overline{AB} ,轨迹方向为顺时针,有

$$\Delta Y = \frac{\left(X_i + \frac{1}{2}\Delta X\right)\Delta X}{Y_i - \frac{1}{2}\Delta Y} \quad (6.2-17)$$

由此可知,欲使新插补点必定在圆上,则需按上式进行插补运算。该插补原理是“以弦代弧”,并以满足插补精度为前提。

2. 算法 如图6.2-14所示, M 为 \overline{AB} 的中点,由于 $\triangle MOD \sim \triangle BAP$,可以得到: $\tan(\alpha_i + \Delta\alpha/2) = \tan\beta_i = (X_i + f_i \cos\beta_i/2)/(Y_i - f_i \sin\beta_i/2)$ 。由于 $\cos\beta_i$ 和 $\sin\beta_i$ 为未知,难以求得 $\tan\beta_i$,因此,近似地用 $\cos 45^\circ$ 和 $\sin 45^\circ$ 来代替,即可得到

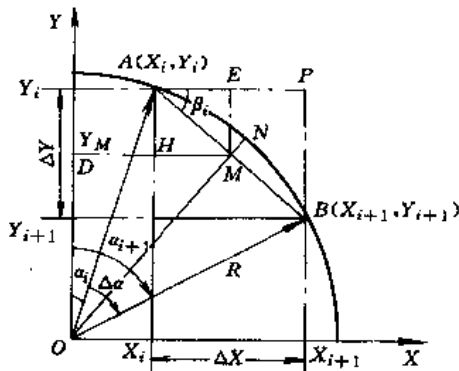


图6.2-14 时间分割圆弧插补

$$\tan\beta_i \approx \frac{X_i + \frac{1}{2}f_i \cos 45^\circ}{Y_i - \frac{1}{2}f_i \sin 45^\circ} \quad \cos\beta_i = \frac{1}{\sqrt{1 + \tan^2\beta_i}} \quad (6.2-18)$$

求得下一插补点B坐标为

$$\left. \begin{aligned} X_{i+1} &= X_i + f_i \cos\beta_i \\ Y_{i+1} &= Y_i - \frac{\left(X_i + \frac{1}{2}\Delta X\right)\Delta X}{Y_i - \frac{1}{2}\Delta Y} \end{aligned} \right\} \quad (6.2-19)$$

尽管式(6.2-18)为近似算式,给 ΔX 带来偏差,但插补点B还是始终在圆弧上的。并且该算法简便、可行,插补速度快。

3. 误差分析 在圆弧插补中,由于“以弦代弧”,因此进给速度越高,在 t^* 时间内进给的弦越长,径向误差也越大。当 R (mm)给定,为了使径向绝对误差满足要求,对进给速度要有一定限制。令图6.2-14中 $\overline{MN} = \epsilon$, $\overline{AB} = l$,由 $\triangle OBM$ 得到, $(l/2)^2 = R^2 - (R - \epsilon)^2 = 2\epsilon R$ 。为保证给定的径向精度 ϵ ,必须使 $l \leq 2.828 \times \sqrt{\epsilon R}$ 。当 $\epsilon_{\max} \leq 1\mu\text{m}$ 时,则速度指令必须满足 $F \leq 670.82 \sqrt{R}$ 。

4. 终点判断

a. 直线插补终点判断 由式(6.2-1)求得直线插补进给增量 ΔX 和 ΔY ,则插补点瞬时坐标值为 $X_i = X_{i-1} + \Delta X$; $Y_i = Y_{i-1} + \Delta Y$ 。设 X 为长轴,该点离终点 (X_t, Y_t) 的距离为

$$s_i = |X - X_t|/\cos\alpha \quad (6.2-20)$$



b. 圆弧插补终点判断 令轨迹圆弧对应的圆心角为 θ , 见图 6-2-15。

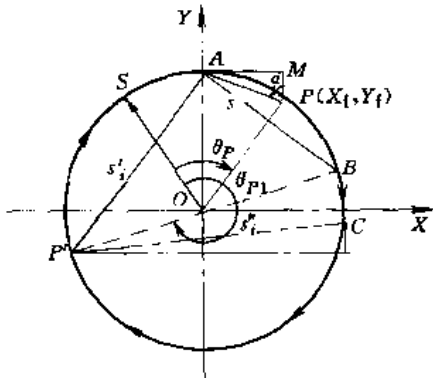


图 6-2-15 终点判断

(1) 当 $\theta = \theta_p < \pi$ 时, 轨迹圆弧 \widehat{SP} 上某瞬时点 $A(X_i, Y_i)$, \widehat{AM} 为A点与终点 $P(X_t, Y_t)$ 间距离 s_i 在长轴X方向上的投影, 则

$$\left. \begin{aligned} a &= \arctan(X_t - X_i) / (Y_t - Y_i) \\ s_i &= |MP| / \cos a = |Y_t - Y_i| / \cos a \end{aligned} \right\} \quad (6.2-21)$$

(2) 当 $\theta = \theta_{p1} > \pi$ 时, B点为轨迹圆弧 $\widehat{SP'}$ 上离终点 $P'(X_t, Y_t)$ 的弧长圆心角等于 π 时的点, C为离终点 P' 的弧长圆心角小于 π 时的插补瞬时点。

从插补圆弧起点S开始至B点这一段, 瞬时点A至终点P'的距离 s_i 越来越大, 直至B点时 $s_i = 2R$; 到B点以后, 与情况(1)完全相同。因此对 $\theta > \pi$ 情况, 若 s_i 在逐渐变大, 则不进行终点判断, 等到 s_i 逐渐变小时, 再按式(6.2-21)进行终点判断。

3 刀具半径补偿原理

3.1 基本概念

无论哪种数控系统, 被应用于诸如各类金属切削机床、线切割机机械零件加工设备上时, 通常都应具备刀具半径自动补偿功能。

3.1.1 刀具偏移

由于加工刀具(如铣刀、砂轮等)均有一定的半径, 在连续轨迹控制中, 刀具中心不能按加工轮廓的实际轨迹运行, 应该根据加工轮廓在工件内侧或外侧的不同情况, 在比轮廓线向外或向内偏移一个刀具半径的等距轨迹上运动。这种刀具中心对加工轮廓的偏移称为“刀具半径补偿”。刀具半径补偿一般有两种处理方式。

1. 人工补偿方式 首先, 由工艺员按加工轮廓线, 根据选定刀具半径和偏移方向(内偏或外偏)计算

出刀具中心轨迹, 程序员再按这刀具中心的实际轨迹编程, 并输入数控系统。这种方式计算量大而复杂, 当刀具半径改变时, 所编程序不具有通用性。

2. 自动补偿方式 程序员只要按加工轮廓轨迹编程, 并且将刀具半径 r 参数和偏移方向指令同时输入, 由系统自动计算刀具中心轨迹, 进行刀具半径自动补偿。

常用的刀具半径补偿方法有: r^2 法、比例法、矢量法等。此外, 由于更换刀具带来的位置误差, 也会直接影响连续轨迹控制的精度, 所以数控系统除了应该有刀具半径补偿功能外, 还应刀具位置进行自动补偿。

3.1.2 刀具偏移类型

根据加工轮廓线的不同, 刀具中心应有不同类型的偏移, 见图 6-2-16。

1. 直线加工 如图中 \widehat{CB} 段, 刀具中心轨迹应该从零件轮廓线向内或向外平移一个刀具半径 r , 即 $c_1 \rightarrow b_1$ 或 $c_2 \rightarrow b_2$ 。这时直线插补的起点 c_1 (或 c_2)坐标为 X_{c1} (或 X_{c2}) = $X_{C(\mp)}$ | r_{Xc} |, Y_{c1} (或 Y_{c2}) = $Y_{C(\mp)}$ | r_{Yc} |; 终点坐标 b_1 (b_2)坐标为 X_{b1} (或 X_{b2}) = $X_{B(\mp)}$ | r_{Xb} |, Y_{b1} (或 Y_{b2}) = $Y_{B(\mp)}$ | r_{Yb} |。

2. 圆弧加工 如图中 \widehat{BA} , 刀具中心轨迹应该是零件轮廓线半径缩减或增加一个刀具半径 r 的同心圆, 即 $b_1 a_1$ 或 $b_2 a_2$ 。这时圆弧插补的起点 b_1 (或 b_2)坐标同前, 而终点 a_1 (或 a_2)的坐标为 X_{a1} (或 X_{a2}) = $X_{A(\mp)}$ | r_{Xa} |, Y_{a1} (或 Y_{a2}) = $Y_{A(\mp)}$ | r_{Ya} |。当直线与圆弧轨线光滑连接时, 其刀具中心轨迹也应该是光滑连续的, 如 \widehat{CB} 与 \widehat{BA} 。

3. 进刀或退刀 如图中刀具从零位S点接近加工工件轮廓线H点或从该点离开返回零点。若令 $\widehat{SH} = l$, 这时进刀/退刀的行程应该是 $l - r$ (内偏)或 $l + r$ (外偏), 即缩短或增长一个刀具半径, 路径为 $\widehat{Sh_1}$ 或 $\widehat{Sh_2}$, h_1 (或 h_2)的坐标为 X_{h1} (或 X_{h2}) = $X_{H(\mp)}$ | r_{Xh} |, Y_{h1} (或 Y_{h2}) = $Y_{H(\mp)}$ | r_{Yh} |。

4. 两段(直线或圆弧)线段非光滑连接 如图中 \widehat{HG} 与 \widehat{GE} (或 \widehat{BA} 与 \widehat{AD}), 这时刀具中心轨迹应该是在两段连接处附加一段圆弧, 内偏时为 $\widehat{g_1 g'_1}$, 外偏时为 $\widehat{g_2 g'_2}$, 增加段圆弧的起点 g_1 (或 g_2)坐标为 X_{g_1} (X_{g_2}) = $X_{G(\mp)}$ | r_{Xg_1} |, Y_{g_1} (Y_{g_2}) = $Y_{G(\mp)}$ | r_{Yg_1} |。终点 g'_1 (或 g'_2)坐标为 $X_{g'_1}$ ($X_{g'_2}$) = $X_{G(\mp)}$ | $r_{Xg'_1}$ |, $Y_{g'_1}$ ($Y_{g'_2}$) = $Y_{G(\mp)}$ | $r_{Yg'_1}$ |。



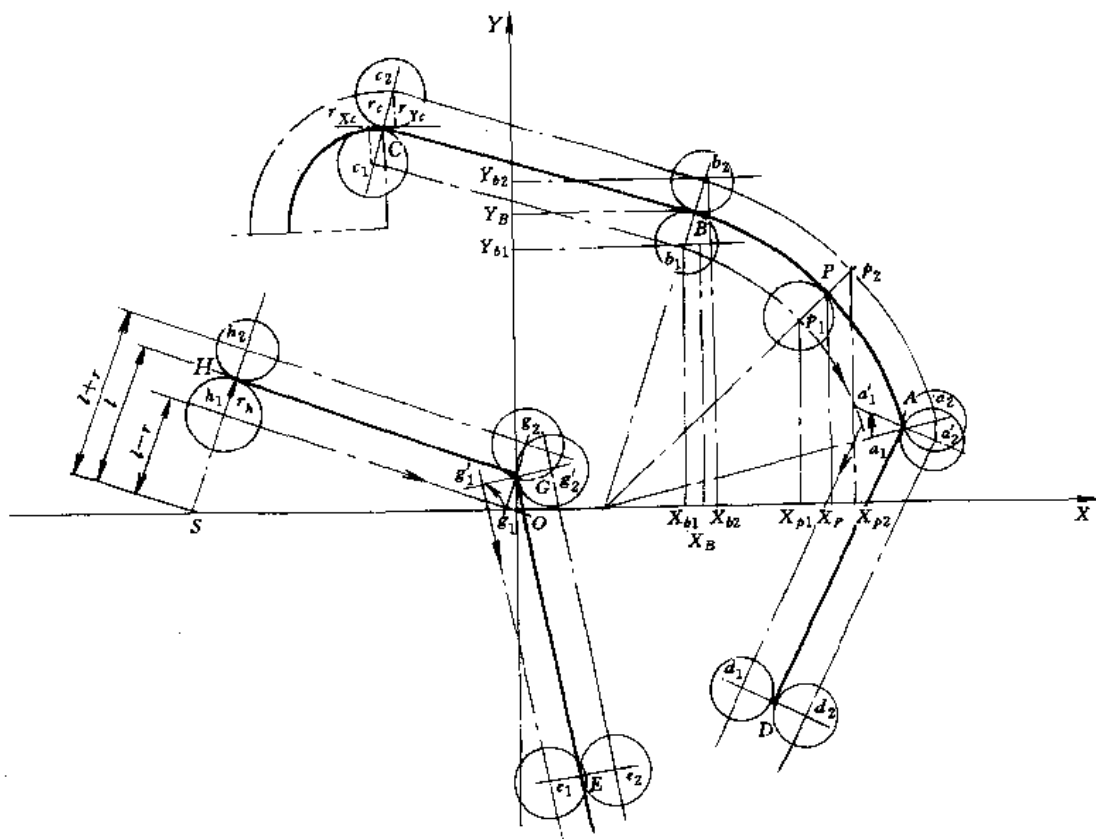


图 6-2-16 刀具偏移类型

3.2 硬件数控的刀具半径补偿方法

3.2.1 r^2 法

该方法是按逐点比较法的插补原理进行的，其补偿精度较高，硬件实现容易，应用也最广泛，但需要较长非加工时间进行刀具半径补偿计算。

1. 偏移分量计算 以 H 点的偏移分量 r_{xH} 和 r_{yH} 为例，根据 \overline{SH} 的斜率用逐点比较法进行等效于 r 长度的直线插补运算，并将 X 、 Y 轴方向的进给脉冲数分别计入寄存器 D_x 、 D_y ，当运算终止， D_x 、 D_y 内的寄存器数即为 H 点沿 \overline{SH} 方向的刀具半径偏移分量 r_{xH} 和 r_{yH} 。由此可知：

(1) 即使刀具半径相同，其偏移方向不同， r_x 和 r_y 分量值也不相同。

(2) 计算 r_x 、 r_y 分量时插补运算，加工刀具是不作进给移动的。

2. 终点判别 偏移分量计算中的终点判断与逐点比较法中直线插补的终点判断稍有不同。若令 $F_{i,j} = X_i^2 + Y_j^2 - r^2$ ，由递推法可以得到

$$\left. \begin{aligned} F_{i+1,j} &= F_{i,j} + 2X_i + 1 \quad \text{当 } X_i \text{ 增 1 时} \\ F_{i,j+1} &= F_{i,j} + 2Y_j + 1 \quad \text{当 } Y_j \text{ 增 1 时} \end{aligned} \right\} \quad (6.2-22)$$

运算到 $F_{i,j} \geq 0$ ， $X_i^2 + Y_j^2 \geq r^2$ 时，运算结束，即 $r_x = X_i$ ， $r_y = Y_j$ 。在插补运算前应先作偏移分量计算，初值为 $X_i = Y_j = 0$ ， $F_{0,0} = -r^2$ 。因此在偏移分量计算之前，必须先求出 $-r^2$ 值，并存入相应寄存器，故称为 r^2 法。

3. r^2 计算和硬件实现 设寄存器 R_3 存 i (计算次数累加值)； R_4 存 r ； R_0 存 r^2 。初始值 $R_4 = r$ ，其余为“0”。 r^2 计算按递推式 $(r_i + 1)^2 = r_i^2 + 2r_i + 1$ ($i = 0, 1, 2, \dots$)。若令 $r = 6$ ，其运算过程见表 6-2-8。有了 r^2 值 $\rightarrow R_0$ ，就可以计算 r_x 和 r_y 分量值。其计算过程参见表 6-2-9。

表 6-2-8 r^2 法运算过程

| i | $(R_4) =$ | $(R_0) + 2(R_3) + 1 \rightarrow R_0$ | $(R_3) + 1 \rightarrow R_3$ | 终点判断 $(R_3) - (R_4)$ |
|-----|-----------|--------------------------------------------|-----------------------------|-------------------------|
| 0 | 6 | $0 \rightarrow R_0$ | $0 \rightarrow R_3$ | $-6 < 0$ |
| 1 | 6 | $0 + 2 \times 0 + 1 = 1 \rightarrow R_0$ | $1 \rightarrow R_3$ | $-5 < 0$ |
| 2 | 6 | $1 + 2 \times 1 + 1 = 4 \rightarrow R_0$ | $2 \rightarrow R_3$ | $-4 < 0$ |
| 3 | 6 | $4 + 2 \times 2 + 1 = 9 \rightarrow R_0$ | $3 \rightarrow R_3$ | $-3 < 0$ |
| 4 | 6 | $9 + 2 \times 3 + 1 = 16 \rightarrow R_0$ | $4 \rightarrow R_3$ | $-2 < 0$ |
| 5 | 6 | $16 + 2 \times 4 + 1 = 25 \rightarrow R_0$ | $5 \rightarrow R_3$ | $-1 < 0$ |
| 6 | 6 | $25 + 2 \times 5 + 1 = 36 \rightarrow R_0$ | $6 \rightarrow R_3$ | $= 0$ (终止) |



表 6·2-9 r_x, r_y 分量计算过程

| 寄存器 | 初值设置 | 刀具偏移运算(每步) | 起、终点偏移计算及结果 |
|-------|-------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| R_1 | 起点坐标值 X_0 | | $(R_1) \pm (R_7) \textcircled{1} \rightarrow R_1$ |
| R_2 | 起点坐标值 Y_0 | | $(R_2) \pm (R_7) \textcircled{1} \rightarrow R_2$ |
| R_3 | 终点坐标值 X_f | | $(R_3) \pm (R_7) \textcircled{1} \rightarrow R_3$ |
| R_4 | 终点坐标值 Y_f | | $(R_4) \pm (R_7) \textcircled{1} \rightarrow R_4$ |
| R_5 | 0 | $(R_5) \geq 0 \rightarrow (R_5) - (R_4) \rightarrow R_5$ $(R_5) < 0 \rightarrow (R_5) + (R_3) \rightarrow R_5$ | |
| R_6 | $-r^2$ | $(R_6) + 2(R_7) + 1 \rightarrow R_6$ $(R_6) + 2(R_8) + 1 \rightarrow R_6$ | |
| R_7 | 0 | $(R_7) + 1 \rightarrow R_7$ | 结果: $(R_7) = r_x$ |
| R_8 | 0 | $(R_8) + 1 \rightarrow R_8$ | $(R_8) = r_y$ |

① 式中符号“-”适用于内轮廓加工情况。

3·2·2 矢量判别法

刀具半径补偿的矢量判别法属于误差补偿方法,适用于各种插补运算,并且无需停刀计算刀具半径,可提高加工效率和降低表面粗糙度值,但计算精度较低,最大达 2 个脉冲当量的误差。

1. 偏移计算原理 如图 6·2-17 所示,加工内轮廓线为圆弧 \widehat{AB} ,加工开始时刀具中心正好在 \overline{OA} 线上 A_0 点,且 $\overline{AA_0} = r$ (刀具半径),要求加工结束时,刀具中心在 B_0 点。如果不对刀具半径补偿随时进行修正,按 \widehat{AB} 进行插补运算,将使刀具中心在 $OX'Y'$ 坐标系内以 O' 为原点,以 $\overline{O'A} = R$ 为半径的圆弧上运动,轨迹坐标为

$$X' = R \cos(\omega t + \varphi); \quad Y' = R \sin(\omega t + \varphi) \quad (6·2-23)$$

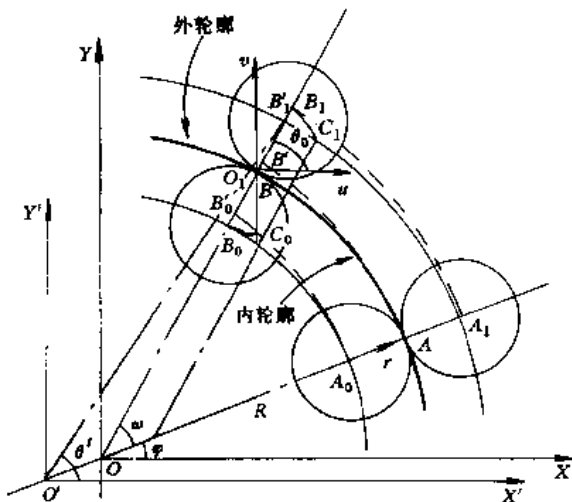


图 6·2-17 矢量判别的偏移计算

式中 φ —初始角;

ω —相当于 $\widehat{A_0B_0}$ 插补的角速度。

其轨迹实际上为 $\widehat{A_0B_0}$,使加工轮廓偏离 \widehat{AB} 而为 $\widehat{A'B'}$,为此必须在刀具运动过程中不断修正其中心位置,以保证加工出来的内轮廓轨迹和 \widehat{AB} 的误差小于允许范围。

坐标框 (O') 与 (O) 间变换关系为

$$X = X' - r \cos \varphi \quad Y = Y' - r \sin \varphi \quad (6·2-24)$$

$$\left. \begin{aligned} X &= (R-r) \cos(\omega t + \varphi) \\ &\quad -r[-\cos(\omega t + \varphi) + \cos \varphi] = X_1 - X_2 \\ Y &= (R-r) \sin(\omega t + \varphi) \\ &\quad -r[-\sin(\omega t + \varphi) + \sin \varphi] = Y_1 - Y_2 \end{aligned} \right\} \quad (6·2-25)$$

由上式可知, A_0 点以 O' 为圆心转过 ω 角后,坐标位置 X, Y 由两部分合成:一项是为了获得内轮廓 \widehat{AB} 所需的圆运动 X_1 和 Y_1 ,另一项为附加的圆运动 X_2, Y_2 ,须在加工中不断修正的。如果以 O' 为原点,以 R 为半径的插补主运动,同时又不断地以圆弧 \widehat{AB} 上某点(如 A, \dots, B 点)为原点,以 r 为半径作修正运动,且两者方向相反,就能实现刀具半径补偿,并保持刀具中心按给定误差沿 $\widehat{A_0B_0}$ 轨迹运动(加工外轮廓时,有同样原理,只是式(6·2-24)和(6·2-25)中等号右边两项之间“-”号换成“+”号)。

2. 判别函数 以加工外轮廓为例,设主运动转角为 θ' ,而补偿运动转角为 θ_0 ,计算坐标系分别为 $O'X'Y'$ 和 O_1uv 。为了比较 θ' 和 θ_0 角大小,定义判别函数: $F = |\vec{R} \times \vec{r}| = (vX' - uY')$ 。当 $F \geq 0$ 时,说明 $\theta_0 \geq \theta'$,刀



具中心应该由修正运动转到主运动；而当 $F < 0$ 时，则由主运动转换到修正运动。主运动时，刀具中心的 u 、 v 值不变， X' 、 Y' 值不断改变；修正运动时，则反之。

因此，刀具半径补偿的矢量判别法是通过判别函数 F ，把两组圆弧插补结合起来进行，而与圆弧插补所用方法无关。

3.3 计算机数控的刀具半径补偿方法

3.3.1 CNC 系统中“C 功能”

在传统数控中，采用 r^2 法、矢量法、比例法等进行刀具半径补偿有一个共同点，就是对加工轮廓的连接均以圆弧来完成的。这样在碰到两直线段非光滑连接时（见图 6-2-18a），由于轮廓尖角端处于切削路径上，往往被加工成小圆角，此外，由于运算速度的硬件结构的限制，不容易求得交接点 C' 和 C'' ，特别在内轮廓加工时，要求程序员人为地编入一个半径大于刀具半径的辅助加工过渡圆弧 \widehat{AB} ，这不仅麻烦，而且容易

出现过切削情况。

在 CNC 系统中，由于运算速度提高，存储容量扩大和系统工作方式的改进，可以做到直接求出刀具中心轨迹交点，采用直线过渡的刀具半径补偿方法——“C 功能”刀具半径补偿（以下简称“刀补”）。在 FANUC-6ME 和 7M 系统中已经得到应用。C 功能刀补工作流程见图 6-2-18b。

(1) 系统起动后，首段程序被送到 BS，在 BS 中算得的首段编程轨迹送 CS 暂存，又将下段程序读入 BS，同时算出该段编程轨迹。

(2) 接着判别两段轨迹的连接方式，按判别结果对 CS 中首段轨迹作修正，并送 AS。同时将 BS 中编程轨迹送 CS。

(3) 由 CPU 将 AS 中内容送 OS 进行插补运算，将运算结果输出，由伺服装置执行，并利用 OS 的插补间隙又将再下一段程序读入 BS，……，照此逐段相继处理。在刀补状态，系统内部同时存有 3 个程序段信息。

C 功能刀补方法，不仅把直线段圆弧插补中的起、终点半径及其弦长都看作矢量，而且把刀具半径也看作大小等于其半径值、方向始终指向刀具中心的“刀具半径矢量”，它在直线加工时垂直于刀具移动方向，圆弧加工时始终垂直于编程圆弧瞬时切点的切线。这样有利于交点计算和对各种编程段情况进行分析与综合。

根据 ISO 标准的 G 功能代码（参见第 6 章 4.1.3 节），当刀具中心轨迹在加工轮廓前进方向右边时，称为“右刀补”（功能代码为 G42）；反之称为“左刀补”（G41）。并且刀补消除功能代码为 G40。刀具半径的补偿过程一般按三步进行：

(1) 刀补建立—刀具从零点接近工件，刀具中心轨迹由 G41 或 G42 来确定，沿编程轨迹伸长或缩短一个刀具半径。

(2) 刀补执行—刀具中心轨迹与编程轨迹始终相距一个刀具半径。

(3) 刀补消除（G40）—刀具离开加工工作轮廓，回到零点，刀具中心也要比编程轨迹伸长或缩短一个刀具半径。

3.3.2 矢量转换分类

在加工过程中，前后两段编程的连接方式不同，相应刀具中心的轨迹矢量也有不同的转接类型。两个编程轨迹段在工件侧的角度 $\alpha \geq 180^\circ$ 时称为“内侧”；反之

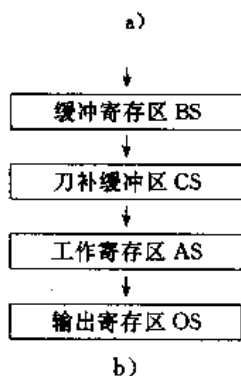
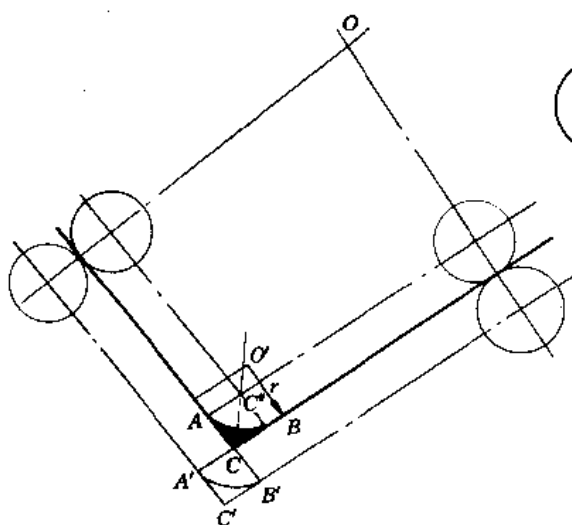


图 6-2-18 “C 功能”刀具半径补偿

a) 原理 b) 工作流程



称为“外侧”。

见表 6·2-11。

1. 刀补建立状态 以 G42 指令为例, 该状态下矢量转接分类见表 6·2-10。

3. 刀补消除状态 系统进入刀补消除之后, 通常将下一个被执行的程序段存入缓冲寄存器, 而不读入刀补缓冲寄存器 CS。此时矢量转接分类见表 6·2-12。

2. 刀补执行状态 正 θ 状态下的矢量转接分类

表 6·2-10 刀补建立状态下矢量转接分类

| 转接矢量 加工轮廓面 | 直线—直线 | 直线—圆弧 |
|---------------------------------------------------|---------------------------|------------|
| 内侧 $\alpha \geq 180^\circ$ | | |
| 外侧 钝角 $90^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$ | A型: B型: | |
| | 锐角 $\alpha < 90^\circ$ | A型: B型: |
| 当 $\alpha < 1^\circ$ 时 | | |

注: 1. ———编程轨迹; ---刀具中心轨迹。

2. S—单程序段暂停点; l—直线运动; c—圆弧运动; J—交点。

表 6·2-11 刀补执行状态下矢量转接分类

| 转接矢量 加工轮廓面 | 直线—直线 | 直线—圆弧 | 圆弧—直线 | 圆弧—圆弧 |
|--------------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| 内侧 缩短型 $\alpha \geq 180^\circ$ | | | | |
| 外侧 $l - \alpha < 1^\circ$ | | | | |



(续)

| 加工轮廓面 | | 直线—直线 | 直线—圆弧 | 圆弧—直线 | 圆弧—圆弧 |
|-------|-------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|-------|-------|-------|
| 外侧 | 钝角 $90^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$ 伸长型 (G42) | | | | |
| | 锐角 $\alpha < 90^\circ$ 插入型 | 插入I型: Y G41 插入II型: G42 | | | |

注: 同表 6·2-10 的注。

表 6·2-12 刀补消除状态下矢量转移分类

| 加工轮廓面 | | 直线—直线 | 圆弧—圆弧 |
|-------|---------------------------------------------|--------------------|--------------------|
| 外侧 | 内角 $\alpha \geq 180^\circ$ | | |
| | 钝角 $90^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$ | A型: B型: | A型: B型: |



(续)

| 转接矢量 | | 直线—直线 | 圆弧—圆弧 |
|--------|---------------------------|-------|-------|
| 加工轮廓面 | | | |
| 外 侧 | 锐角 $\alpha < 90^\circ$ | | |
| | 当 $\alpha < 1^\circ$ 时 | | |

注：同表 6-2-10 的注。

3.3.3 转接矢量算法

1. 刀具半径矢量 r 设 β 表示直线编程矢量与 X 轴的夹角 $\angle XOA$ (见表 6-2-11 中 $\alpha \geq 180^\circ$ 时的直线—直线状态)。由 $r=AB$ 得到

$$\left. \begin{aligned} G41: r_x &= |r|(-\sin\beta) & r_y &= |r|\cos\beta \\ G42: r_x &= |r|\sin\beta & r_y &= |r|(-\cos\beta) \end{aligned} \right\} \quad (6.2-26)$$

对于圆弧编程矢量，上式同样适用，只是把 PA 的顶端 A 点切线与 X 轴的夹角设为 β 角 (见表 6-2-11 中 $\alpha \geq 180^\circ$ 时的圆弧—圆弧状态)。

2. 转接交点矢量

a. 伸长型矢量 AS 见表 6-2-11 中 $90^\circ \leq \alpha < 180^\circ$ 的直线—直线状态。设图中 $\angle XOA$ 和 $\angle XAE$ 分别为 β_1 和 β_2 ，以及 $r=AB=AD$ ， OA ， AE 均为已知量。则

$$\left. \begin{aligned} AS_x &= r \frac{\sin\beta_1 + \sin\beta_2}{1 + \cos(\beta_2 - \beta_1)} \\ AS_y &= -r \frac{\cos\beta_1 + \cos\beta_2}{1 + \cos(\beta_2 - \beta_1)} \end{aligned} \right\} \quad (6.2-27)$$

对于 OA ， AE 编程轨迹的刀具中的轨迹分别为 $OA + (AS - AB)$ 和 $(AD - AS) + AE$ 。

b. 插入型矢量 AS 、 AS'

(1) 对于 G41 的插入 I 型，见表 6-2-11 中 $\alpha < 90^\circ$ 的直线—直线 (插入 I 型)：

$$\left. \begin{aligned} AS_x &= r(\cos\beta_1 - \sin\beta_1) \\ AS_y &= r(\sin\beta_1 + \cos\beta_1) \\ AS'_x &= -r(\cos\beta_2 + \sin\beta_2) \\ AS'_y &= r(\cos\beta_2 - \sin\beta_2) \end{aligned} \right\} \quad (6.2-28)$$

(2) 对于 G42 的插入 I 型，见表 6-2-11 中 $\alpha < 90^\circ$

的直线—直线 (插入 I 型)：

$$\left. \begin{aligned} AS_x &= r(\sin\beta_1 + \cos\beta_1) \\ AS_y &= r(\sin\beta_1 - \cos\beta_1) \\ AS'_x &= r(\sin\beta_2 - \cos\beta_2) \\ AS'_y &= -r(\sin\beta_2 + \cos\beta_2) \end{aligned} \right\} \quad (6.2-29)$$

c. 缩短型交点矢量 AS

(1) 直线与直线连接：其算式与式 (6-2-27) 相同，只是应注意转接矢量的方向。

(2) 直线与圆弧连接：见表 6-2-11 中 $\alpha \geq 180^\circ$ 的直线—圆弧转接。由于直线矢量 FA 、圆弧起点半径矢量 OA 、刀具半径矢量 r 为已知量。且 $AS=OS-OA$ ，必须先求得 OS ，即可得到 AS 。而且

$$\left. \begin{aligned} OS_x &= -\sqrt{(R-r)^2 - |SD|^2} \cos\angle XAE \\ &\quad - |SD| \sin\angle XAE \\ OS_y &= -\sqrt{(R-r)^2 - |SD|^2} \sin\angle XAE \\ &\quad + |SD| \cos\angle XAE \end{aligned} \right\} \quad (6.2-30)$$

根据不同的刀补方向和编程圆弧走向，其等号右边各项的符号将发生变化，可以有 8 种不同的算式 (圆弧—圆弧连接时，缩短型交点矢量的计算更为复杂，但与式 (6-2-30) 相类似，也有 8 种之多)。

3.3.4 刀补造成的过切削报警

在 CNC 系统中，采用上述直线过渡的刀补方法，在下列情况会因刀补而造成“过切削”，此时，系统将提前报警，并停止切削，以免工件报废。

1. 加工小于刀具半径的圆弧内侧 见图 6-2-



19a, 在遇到这种状况时, 系统在该程序段起点处发出警报并停车。应该注意的是在单程序段执行时, 由于刀具在完成该程序段之后才停止, 因此仍有过切削可能。

2. 加工一个小于刀具直径的槽 见图 6·2-19b, 由于刀补强制刀具中心轨迹反程编方向运动, 会导致

过切削, 此时在该程序段起点报警、停车。

3. 加工一个小于刀具半径的台阶 见图 6·2-19c, 在加工小于刀具半径的台阶中, 由圆切削指令进行加工时, 通常刀具中心轨迹成反程编方向运动, 也会造成过切削。

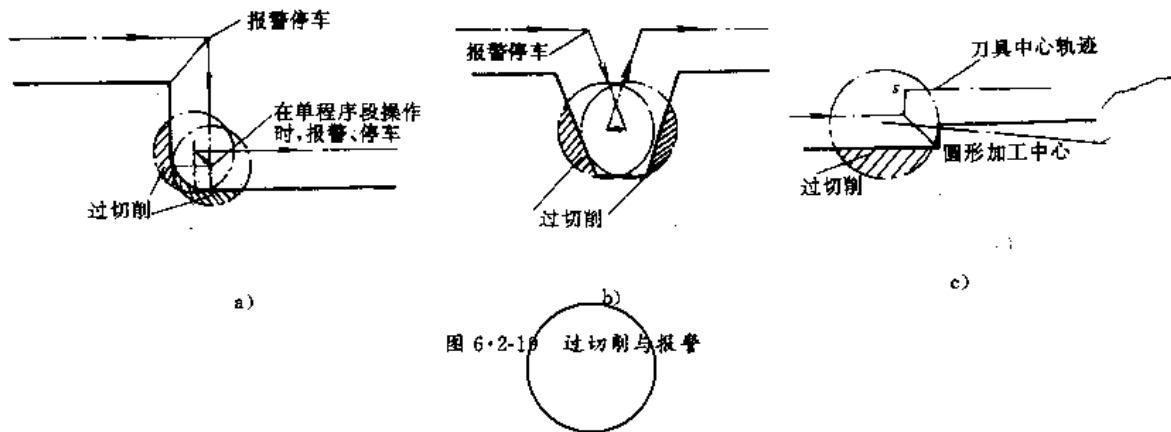


图 6·2-19 过切削与报警

第3章 数控程序编制

1 程序编制的目的和方法

1.1 程序编制的目的

在第1章已作了介绍, 程序编制的目的是将零件的加工工艺、工艺参数、刀具位移量及位移方向和有关辅助操作, 按指令代码及程序段格式编成加工程序单, 并以代码的形式记录在信息载体上, 使用时把它送入数控装置的存储器中, 然后数控装置对它逐条地进行解释和执行。不同的数控装置, 指令格式不尽相同, 所以程编员在编制加工程序前必须熟悉本装置的指令格式。

1.2 程序编制的方法

1.2.1 示教编程

例如, 在点位控制机器人系统中, 操作人员使用一系列控制盒上的按钮, 控制各个轴运动, 当到达所需的位置时, 将该点的各坐标值存入计算机的存储器中。对每个所需的点要重复进行这个过程。当再现这些存储点时, 每个轴以其最大的速度移动, 直至到达所需的新坐标点为止, 因此某些轴将在其他轴之前到达其所需的坐标值。机器人端部执行机构在点间的轨迹是不可预见的。

1.2.2 手工编程

手工编程适用于几何形状较为简单的图形或零件, 计算工作量较少, 程序又不长, 这时程序员用手工方式计算出运动轨迹, 确定有关参数及动作顺序, 一条条地编写出数控指令, 用手工制备穿孔带或用人机对话方式直接送入数控装置。

1.2.3 自动编程

自动编程是用计算机代替手工编程的大部分工作。对数控机床编程时, 使用“数控语言”描述切削加工时的刀具、工件的相对运动轨迹和一些加工工艺过程。程序员只需使用规定的数控语言编写零件的“语言程序”。当零件源程序输入计算机后, 计算机自动完成机床运动轨迹计算、加工程序的编制和数控带制作等工作。对机器人编程时, 也有自己的编程语言可以使用。对于绘图仪, 一般直接与计算机连接, 使用高级语言绘图。

2 数控机床程序编制的有关规定

2.1 数字控制的标准和代码

为了设计、制造、使用和维修的方便, 在数控代码、坐标系统、加工指令、辅助功能及程序格式等方面逐渐



形成了两种国际通用标准,即ISO和EIA。我国已正式批准的数字控制标准有:JB3208—83《数字控制机床穿孔带程序段格式中的准备功能G和辅助功能M的代码》等标准。由于各类机床使用的代码、指令的含义不一定完全相同,因此程编人员还必须按照数控机床使用手册的具体规定来进行程序编制。

2.1.1 穿孔纸带及其代码

数控装置最初采用的控制介质是八单位穿孔纸带。穿孔纸带的编码,国际上采用ISO和EIA标准。两

种代码的纸带规格均按照EIA RS-237标准制定,见图6.3-1。在ISO标准中,代码由七位二进制数及偶校验位组成。其第8位用来补偶,通过该位孔的有无,使每行的数目为偶数。在EIA标准中,每个代码由六位二进制数及奇校验位组成。第5位孔用来补奇,使每行孔的数目为奇数。数控机床的输入系统中有专门的奇偶校验电路。当输入代码的奇偶数不相符时,控制系统即发出奇偶校验错误信息,命令输入系统停机。

数控机床用ISO编码见表6.3-1。

穿孔带程序段格式中符号的含义见表6.3-2。

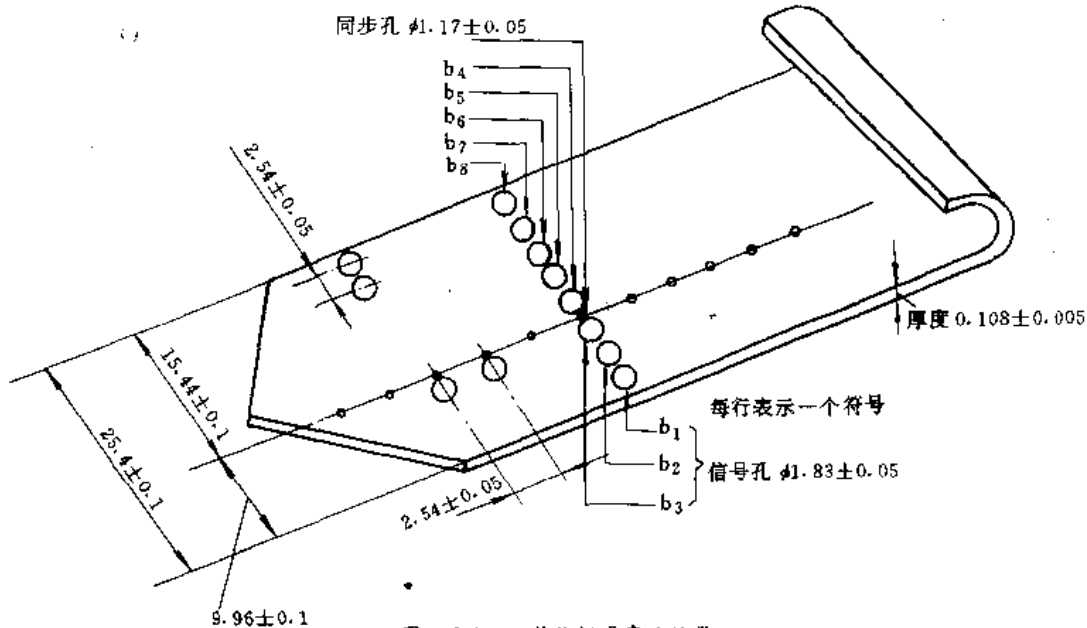


图6.3-1 八单位标准穿孔纸带

表6.3-1 ISO 编码特征

| b ₄ | b ₃ | b ₂ | b ₁ | 列 行 | b ₇ | b ₆ | b ₅ | | | | | | |
|----------------|----------------|----------------|----------------|--------|----------------|----------------|----------------|----|---|---|---|---|-----|
| | | | | | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | NUL | | SP | 0 | | P | | | |
| 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | | | | 1 | A | Q | | | |
| 0 | 0 | 1 | 0 | 2 | | | | 2 | B | R | | | |
| 0 | 0 | 1 | 1 | 3 | | | | 3 | C | S | | | |
| 0 | 1 | 0 | 0 | 4 | | | | 4 | D | T | | | |
| 0 | 1 | 0 | 1 | 5 | | | | 5 | E | U | | | |
| 0 | 1 | 1 | 0 | 6 | | | | 6 | F | V | | | |
| 0 | 1 | 1 | 1 | 7 | | | | 7 | G | W | | | |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 8 | BS | | | 8 | H | X | | | |
| 1 | 0 | 0 | 1 | 9 | HT | EM | | 9 | I | Y | | | |
| 1 | 0 | 1 | 0 | 10 | LF/NL | | | 10 | J | Z | | | |
| 1 | 0 | 1 | 1 | 11 | | | | 11 | K | | | | |
| 1 | 1 | 0 | 0 | 12 | | | | 12 | L | | | | |
| 1 | 1 | 0 | 1 | 13 | GR | | | 13 | M | | | | |
| 1 | 1 | 1 | 0 | 14 | | | | 14 | N | | | | |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 15 | | | | 15 | O | | | | DEL |



表 6-3-2 穿孔带程序段格式中符号的含义

| 编码表中位置 | 符 号 | 意 义 |
|--------|---------|---------|
| 0/8 | BS | 返 回 |
| 0/9 | HT | 分 隔 符 |
| 0/10 | LF 或 NL | 程序段结束 |
| 1/9 | EM | 纸带终了 |
| 2/5 | % | 程序开始 |
| 2/8 | (| 控制暂停 |
| 2/9 |) | 控制恢复 |
| 2/11 | + | 正 号 |
| 2/13 | - | 负 号 |
| 2/15 | / | 跳过任选程序段 |
| 3/10 | : | 对准功能 |
| 7/15 | DEL | 注 销 |

2.1.2 数控机床的坐标轴与运动方向

为了保证数控机床的运行、操作及程序编制的一致性，对数控机床制订了 JB3051-82《数字控制机床坐标和运动方向的命名》标准。

(1) 标准的坐标系，采用右手笛卡儿坐标系。基本坐标轴为 X、Y、Z 直角坐标，对相应每个坐标轴的旋转运动符号为 A、B、C，见图 6-3-2。

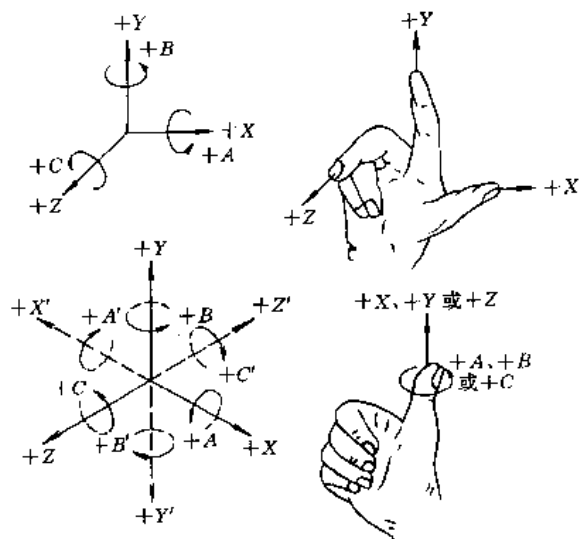
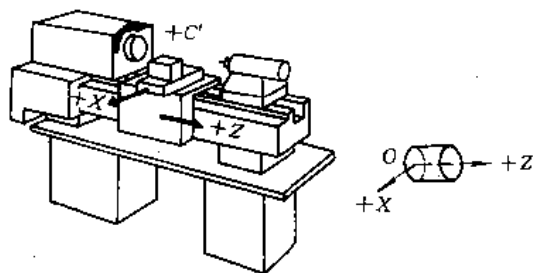


图 6-3-2 右手坐标系

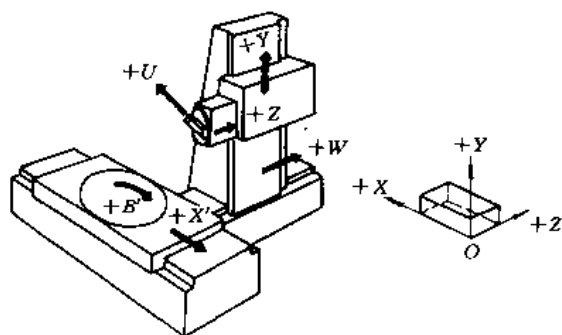
(2) Z 轴为平行于机床主轴的坐标轴，如果机床有一系列主轴，则尽可能选垂直于工件装卡面的主要轴为 Z 轴。Z 轴的正方向，定义为从工件到刀具夹持的方向。

X 轴作为水平的、平行于工件装卡平面的轴，它平行于主要的切削方向，且以此为正向。Y 轴的运动方向，根据 X 和 Z 轴按右手手法则确定。旋转坐标轴 A、B 和 C 相应地在 X、Y、Z 坐标轴的正方向上，按照右手螺旋前进的方向来确定。

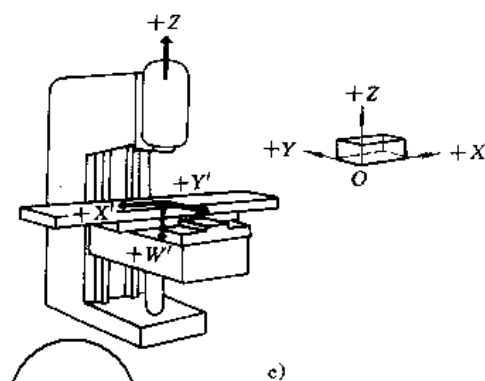
(3) 附加直线轴和附加旋转轴，均有相应规定，见图 6-3-3。



a)



b)



c)

图 6-3-3 数控机床的坐标系

a) 数控车床 b) 数控镗床 c) 数控立式铣床

2.1.3 绝对坐标系与增量坐标系

刀具(或机床)运动位置的坐标值是相对于固定的坐标原点给出的，称为绝对坐标值。该坐标系称为绝对坐标系。绝对坐标系通常用 X、Y、Z 表示，见图 6-3-



4a, A点的坐标为 $X_A=10, Y_A=12, X_B=30, Y_B=37$ 。

刀具(或机床)运动位置的坐标值相对于前一位置,而不是相对于固定的坐标原点给出的,称为增量(或相对)坐标值。该坐标系称为增量(或相对)坐标系。增量坐标系常用 $U、V、W$ 表示, $U、V、W$ 分别与 $X、Y、Z$ 平行,且同向。图 6-3-4b 中, B 的坐标是相对于前面的 A 点给出的,其增量坐标为 $U_B=20, V_B=25$ 。

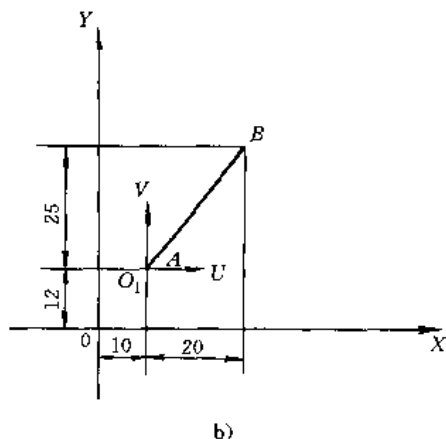
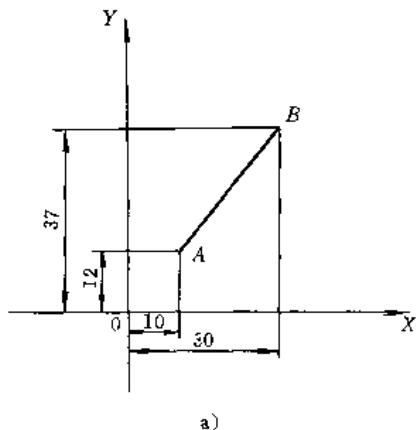


图 6-3-4 绝对坐标系与增量(相对)坐标系
a) 绝对坐标 b) 增量坐标

2.1.4 程序段格式

所谓程序段,就是指为了完成某一动作要求所需的功能“字”的组合。“字”表示某一功能的一组代码符号。如 $X2500$ 为一个字,表示 X 方向尺寸为 2500; $F20$ 为一个字,表示进给速度为 20。程序段格式是指一个程序段中名字的排列顺序及其表达形式。

1. 固定顺序程序段格式 各字无地址码,字的顺序即为地址的顺序,各字的顺序及字符行数是固定的(不管某一字的需要与否),所以各程序段所占穿孔带的长度为一定。

2. 字地址程序段格式 字地址程序段的特点是每个程序段由若干个字组成,每个字由英文字母开头,其后紧随数字(有的数字前面有符号)组成的。字母代表字的地址,其一般格式为:

程序段序号字 字……字 程序段结束符号

例: $N3 G90 G00 X-5.5 Y-6.0$; 目前,国内外广泛采用字地址程序段格式。

3. 分隔符固定顺序格式 该程序段格式的特点是用分隔符号将字分开,每个字的顺序及代表的功能固定不变的。例如“3B”指令,其一般表示为

$B X B Y B J G Z$

其中, B 为分隔符,每个字代表的功能是固定的,其意义见表 6-3-3。

表 6-3-3 3B 指令的意义

| | | | |
|------|-------|------|-------|
| B | X | B | Y |
| 分隔符号 | X 坐标值 | 分隔符号 | Y 坐标值 |
| B | J | G | Z |
| 分隔符号 | 计数长度 | 计数方向 | 加工指令 |

目前我国线切割数控装置大多数采用“3B”(或 4B)指令。

在程序段中所用字符的意义见表 6-3-4。

表 6-3-4 字符的意义

| 字符 | 意义 |
|-------|-------------------------------|
| A | 关于 X 轴的角度尺寸 |
| B | 关于 Y 轴的角度尺寸 |
| C | 关于 Z 轴的角度尺寸 |
| D | 第二刀具功能,也有定为偏置号 |
| E | 第二进给功能 |
| F | 第一进给功能 |
| G | 准备功能 |
| H | 暂不指定,有的定为偏置号 |
| I | 平行于 X 轴的插补参数或螺纹导程 |
| J | 平行于 Y 轴的插补参数或螺纹导程 |
| K | 平行于 Z 轴的插补参数或螺纹导程 |
| L | 不指定,有的定为固定循环返回次数也有定为子程序返回次数 |
| M | 辅助功能 |
| N | 顺序号 |
| O | 不用,有的定为程序编号 |
| P | 平行 X 轴的第三尺寸,也有定为固定循环的参数等 |
| Q | 平行 Y 轴的第三尺寸,也有定为固定循环的参数 |
| R | 平行 Z 轴的第三尺寸,也有定为固定循环参数,圆弧的半径等 |
| S | 主轴速度功能 |
| T | 第一刀具功能 |
| U | 平行于 X 轴的第二尺寸 |
| V | 平行于 Y 轴的第二尺寸 |
| W | 平行于 Z 轴的第二尺寸 |
| X、Y、Z | 基本尺寸 |



2.2 常用的程序编制指令

在数控编程中,使用G指令、M指令及F、S、T指令代码,描述数控机床的运动方式,加工种类,主轴的起、停,冷却液开、关辅助功能,以及规定进给速度、主轴转速、选择刀具等。

2.2.1 准备功能指令

准备功能指令由字母“G”和其后的两位数组成,见表6-3-5。从G00至G99可有100种。该指令的作用主要是指定数控机床的运动方式,为数控机床的插补运算作好准备,所以在程序段中,G指令一般位于坐标字指令的前面。

表 6-3-5 G 的代码表

| 代 码 | 功 能 | 功能保持到被取消或取代 | 功能仅在出现段内有效 | 代 码 | 功 能 | 功能保持到被取消或取代 | 功能仅在出现段内有效 |
|---------|--------------------|-------------|------------|---------|----------------|-------------|------------|
| G00 | 点定位 | a | | G55 | (原点沿 Y 轴)直线偏移 | f | |
| G01 | 直线插补 | a | | G56 | (原点沿 Z 轴)直线偏移 | f | |
| G02 | 顺时针方向圆弧插补 | a | | G57 | (原点沿 XY 轴)直线偏移 | f | |
| G03 | 逆时针方向圆弧插补 | a | | G58 | (原点沿 XZ 轴)直线偏移 | f | |
| G04 | 暂停 | | ○ | G59 | (原点沿 YZ 轴)直线偏移 | f | |
| G05 | 不指定 | # | # | G60 | 准确定位 1(精) | h | |
| G06 | 抛物线插补 | a | | G61 | 准确定位 2(中) | h | |
| G07 | 不指定 | # | # | G62 | 快速定位(粗) | h | |
| G08 | 加速 | | ○ | G63 | 攻丝方式 | | # |
| G09 | 减速 | | ○ | G64~G67 | 不指定 | # | # |
| G10~G16 | 不指定 | # | # | G68 | 刀具偏置,内角 | #(d) | # |
| G17 | XY 平面选择 | c | | G69 | 刀具偏置,外角 | #(d) | # |
| G18 | ZX 平面选择 | c | | G70~G79 | 不指定 | # | # |
| G19 | YZ 平面选择 | c | | G80 | 注销固定循环 | c | |
| G20~G32 | 不指定 | # | # | G81 | 钻孔循环,划中心 | c | |
| G33 | 等螺距的螺纹切削 | a | | G82 | 钻孔循环,扩孔 | c | |
| G34 | 增螺距的螺纹切削 | a | | G83 | 深孔钻孔循环 | c | |
| G35 | 减螺距的螺纹切削 | a | | G84 | 攻丝循环 | c | |
| G36~G39 | 永不指定 | # | # | G85 | 镗孔循环 | c | |
| G40 | 注销刀具补偿或刀具偏移 | d | | G86 | 镗孔循环,在底部主轴停 | c | |
| G41 | 刀具补偿—左 | d | | G87 | 反镗循环,底部主轴停 | c | |
| G42 | 刀具补偿—右 | d | | G88 | 镗孔循环,有暂停,主轴停 | c | |
| G43 | 刀具偏置—正 | #(d) | # | G89 | 镗孔循环,有暂停,进给返回 | c | |
| G44 | 刀具偏置—负 | #(d) | # | G90 | 绝对尺寸 | j | |
| G45 | 刀具偏置(在第 I 象限)+/+ | #(d) | # | G91 | 增量尺寸 | j | |
| G46 | 刀具偏置(在第 IV 象限)+/- | #(d) | # | G92 | 预置寄存,不运动 | | ○ |
| G47 | 刀具偏置(在第 III 象限)-/- | #(d) | # | G93 | 进给率时间倒数 | k | |
| G48 | 刀具偏置(在第 II 象限)-/+ | #(d) | # | G94 | 每分钟进给 | k | |
| G49 | 刀具(沿 Y 轴正向)偏置 0/+ | #(d) | # | G95 | 主轴每转进给 | k | |
| G50 | 刀具(沿 Y 轴负向)偏置 0/- | #(d) | # | G96 | 主轴恒线速度 | i | |
| G51 | 刀具(沿 X 轴正向)偏置 +/0 | #(d) | # | G97 | 主轴每分钟转速,注销 G96 | i | |
| G52 | 刀具(沿 X 轴负向)偏置 -/0 | #(d) | # | G98 | 不指定 | # | # |
| G53 | 注销直线偏移 | f | | G99 | 不指定 | # | # |
| G54 | (原点沿 X 轴)直线偏移 | f | | | | | |

- 注: 1. 指定功能代码中,凡有小写字母 a, b, c, ...等指示的,为同一类型的代码。在程序中,这种功能指令为保持型的,可以为同类字母的指令所代替。
2. “不指定”代码,即在将来修订标准时,可能对它规定功能。
3. “永不指令”代码,即在本标准内,将来也不指定。
4. “○”符号表示功能仅在所出现的程序段内有用。
5. “#”符号表示若选作特殊用途,必须在程序格式解释中说明。
6. 本表参照标准 JB3208-83 编写,功能栏()内的内容,是为便于对功能的理解而附加的说明,一切内容以部颁标准为准。

此是公可制作请尊重作者版权



2.2.2 辅助功能指令

和其后的两位数字组成的,从M00至M99,共100种,见表6.3-6。这类指令主要用于机床加工操作时的工艺性指令。

辅助功能指令也称为“M”指令。它是由字母M

表 6.3-6 M 代码表

| 代 码 | 功 能 | 功 能 开 始 | | 功能保持到注 销 或 被 取 代 | 功能仅在所出现的程序段用 |
|---------|------------------|------------|-----------|------------------|--------------|
| | | 与程序段指令同时开始 | 在程序段指令后开始 | | |
| M00 | 程序停止 | | ○ | | ○ |
| M01 | 计划停止 | | ○ | | ○ |
| M02 | 程序结束 | | ○ | | ○ |
| M03 | 主轴顺时针方向(运转) | ○ | | ○ | |
| M04 | 主轴逆时针方向(运转) | ○ | | ○ | |
| M05 | 主轴停止 | | ○ | ○ | |
| M06 | 换刀 | # | # | | ○ |
| M07 | 2号冷却液开 | ○ | | ○ | |
| M08 | 1号冷却液开 | ○ | | ○ | |
| M09 | 冷却液关 | | ○ | ○ | |
| M10 | 夹紧(滑座、工件、夹具、主轴等) | # | # | ○ | |
| M11 | 松开(滑座、工件、夹具、主轴等) | # | # | ○ | |
| M12 | 不指定 | # | # | # | # |
| M13 | 主轴顺时针方向(运转)及冷却液开 | ○ | | ○ | |
| M14 | 主轴逆时针方向(运转)及冷却液开 | ○ | | ○ | |
| M15 | 正运动 | ○ | | | ○ |
| M16 | 负运动 | ○ | | | ○ |
| M17~M18 | 不指定 | # | # | # | # |
| M19 | 主轴定向停止 | | ○ | ○ | |
| M20~M29 | 水不指定 | | # | # | # |
| M30 | 纸带结束 | | ○ | | ○ |
| M31 | 互锁旁路 | # | # | | ○ |
| M32~M35 | 不指定 | # | # | # | # |
| M36 | 进给范围1 | ○ | | ○ | |
| M37 | 进给范围2 | ○ | | ○ | |
| M38 | 主轴速度范围1 | ○ | | ○ | |
| M39 | 主轴速度范围2 | ○ | | ○ | |
| M40~M45 | 如有需要作为齿轮换挡,此外不指定 | # | # | # | # |
| M46 | 不指定 | # | # | # | # |
| M48 | 注销M49 | | ○ | ○ | |
| M49 | 进给率修正旁路 | ○ | | ○ | |
| M50 | 3号冷却液开 | ○ | | ○ | |
| M51 | 4号冷却液开 | ○ | | ○ | |
| M52~M54 | 不指定 | # | # | # | # |
| M55 | 刀具直线位移,位置1 | ○ | | ○ | |
| M56 | 刀具直线位移,位置2 | ○ | | ○ | |
| M57~M59 | 不指定 | # | # | # | # |
| M60 | 更换工件 | | ○ | | ○ |
| M61 | 工件直线位移,位置1 | ○ | | ○ | |
| M62 | 工件直线位移,位置2 | ○ | | ○ | |
| M63~M70 | 不指定 | # | # | # | # |
| M71 | 工件角度位移,位置1 | ○ | | ○ | |
| M72 | 工件角度位移,位置2 | ○ | | ○ | |
| M73~M89 | 不指定 | # | # | # | # |
| M90~M99 | 永不指定 | # | # | # | # |

注:1. 本表参照JB3208-83编写,功能栏()内的内容,是为便于对功能的理解而附加的说明。

2. “#”号表示如选作特殊用途,必须在程序说明中标明。

3. M90~M99可指定为特殊用途。

4. “不指定”代码,在将来修订标准时,可能对它规定功能。



3 程序编制的步骤和实例

3.1 程序编制的步骤

一般来说,程序编制过程主要包括分析零件图样、工艺处理、数学处理、编写程序单、制作控制介质及程序检验,见图6-3-5。在编制程序前,编程人员应了解所用数控机床的规格、性能,其数控系统所具备的功能及编程指令格式等,然后开始上面的过程,具体步骤如下。

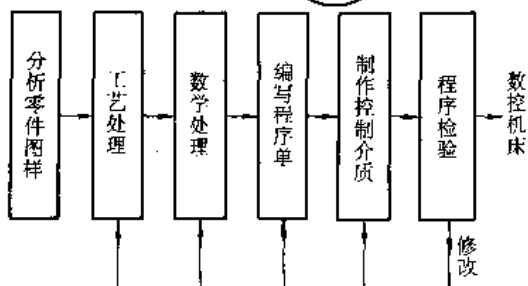


图 6-3-5 数控机床程序编制过程

3.1.1 对零件图样的分析和工艺处理

这一步的内容包括对零件图样进行分析,以明确加工的内容及要求,确定加工方案,选择合适的数控机床,设计夹具,选择刀具,确定合理的走刀路线及选择合理的切削用量等。工艺处理涉及问题很多,编程人员要注意如下几点:

1. **确定加工方案** 此时应考虑使用机床的合理性与经济性,要充分发挥机床的功能。

2. **工件夹具的设计和选择** 应特别注意迅速完成工件的定位和夹紧过程,以减少辅助时间,夹具还应便于安装,便于协调工件和机床坐标的尺寸关系。

3. **正确地选择对刀点** “对刀点”是刀具相对于工件运动的起点,也是程序执行的起点,故也称为“程序原点”。选择对刀点的原则如下:

(1) 所选的对刀点应使程序编制简单。

(2) 对刀点应该选择为便于找正,并在加工过程中便于检查的位置。

(3) 引起的加工误差小。

对刀点可以设置在加工零件上,也可以设置在夹具上或机床上。

对刀点经常又是程序的终点。因此还要考虑一次加工循环后对刀的重复精度。

4. **选择合理的走刀路线** 走刀路线的选择应从下面几个方面考虑:

(1) 尽量缩短走刀路线,减少空走刀行程,以提高生产效率。

(2) 保证加工零件的精度和表面粗糙度的要求。

(3) 有利于简化数值计算,减少程序段的数目。

5. **合理选择刀具** 应根据工件材料的性能、机床的加工能力、加工工序的类型、切削用量,以及其他有关因素来正确选择刀具。

6. **确定合理的切削用量** 正确确定切削深度和宽度、主轴转速、进给速度及是否要使用冷却液等。具体数值应根据数控机床使用说明书的规定、被加工工件材料类型、加工工序以及其他工艺要求,并结合实际经验来确定。

3.1.2 数学处理

在完成了工艺处理工作以后,下一步需要根据零件的几何尺寸、加工路线,计算刀具中心运动轨迹,以获得刀位数据。对于加工由圆弧与直线组成的平面零件,计算出零件轮廓的相邻几何元素的交点或切点的坐标值,得出各几何元素的起点、终点、圆弧圆心的坐标值。如果数控系统中无刀具补偿功能,还应计算出刀具运动的中心轨迹。对于较复杂的零件或零件的几何形状与控制系统的插补功能不一致时,就需要进行较复杂的数值计算。

3.1.3 零件(加工)程序单的编写、控制介质的制作及程序的检验

在完成工艺处理及数值计算工作后,编程人员即可按照数控系统的程序指令及规定格式,逐段编写零件程序单。编写好程序后,将程序单上的程序按 ISO 代码或 EIA 代码穿孔制成数控纸带。穿好孔的纸带先利用穿、复、校功能,检查穿孔是否有误。然后,再经光电读带机输入数控系统,进行空走刀检验。对于平面零件,可用笔代替刀具,在坐标纸上画图,通过检查机床动作和运动轨迹的正确性检验程序。在具有图形显示功能的机床上,可通过显示走刀轨迹或模拟刀具对工件的切削过程,对程序进行检查。对于复杂零件,需采用铝件、塑料或石蜡等易切材料进行试切。通过检查试件,不仅可确认程序是否正确,还可知道加工精度是否符合要求。

3.2 数控车床的程序编制

3.2.1 数控车床的编程特点

(1) 在一个程序段中,根据图样上标注的尺寸,可



以是绝对值、增量值或两者混合编程。

(2) 由于图样尺寸和测量的都是直径值，故直径方向用绝对值编程时，X以直径值表示，用增量值编程时，以径向实际位移量的两倍值编程。

(3) 为提高径向尺寸精度，X向的脉冲当量取Z向的一半。

(4) 由于毛坯常用棒料或锻料，加工余量较大，所以数控装置常具备不同形式的固定循环功能，可进行多次重复循环切削。

(5) 为了提高刀具寿命和提高加工表面光洁程度，车刀刀尖常磨成半径不大的圆弧。为此，当编制圆头刀程序时，需对刀具半径进行补偿。

3.2.2 数控车床程序编制实例

如图6.3-6的零件，需进行精加工，图中φ85mm处不需加工。选用具有直线、圆弧插补功能的数控车床加工该零件，编制精加工程序过程如下：

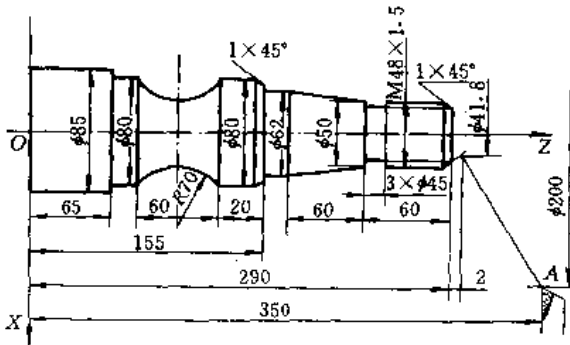


图 6.3-6 车削零件

1. 按先后后次的加工原则，确定其工艺路线

(1) 先切削外轮廓面自右向左加工，其路线为先倒角→切削螺纹的实际外圆φ47.8mm→切削锥度部

分→车削φ62mm外圆→倒角→车削φ80mm→切削圆弧部分→车削φ80mm。

- (2) 切槽。
- (3) 车螺纹。

2. 选择刀具及画出刀具布置图 根据加工的要求，选用三把刀具。I号刀车外圆，II号刀切槽，III号刀车螺纹。刀具布置图见图6.3-7。采用对刀仪对刀，螺纹刀尖相对于I号刀尖在Z向偏置15mm，由III号刀的程序进行补偿，保持刀尖位置一致。

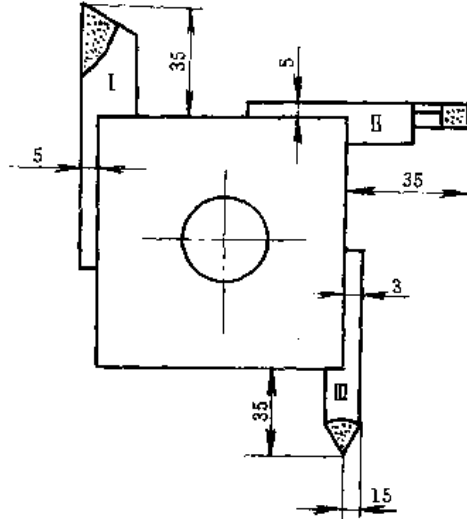


图 6.3-7 刀具布置图

3. 确定切削用量 车外圆时，主轴转速确定为S31=630r/min，进给速度为F15。切槽时，主轴转速为S23=315r/min，进给速度为F10，切削螺纹时，主轴转速为S22=200r/min，进给速度为F150。

4. 编写程序单 确定O为工件坐标系的原点，并将A点作为对刀点（见图6.3-6），也是程序的起点，该零件的加工程序单见表6.3-7。

表 6.3-7 车削零件程序单

| N | G | X | + | Z | + | I | + | K | + | F | S | M | T | M | LF | |
|------|-----|---|------|---|--------|---|---|---|---|-----|-----|-----|-----|-----|----|-------|
| | | U | - | W | - | | | | | | | | | | | |
| N001 | G92 | X | | Z | | | | | | | | | | | LF | 坐标设点 |
| N002 | G00 | X | 4180 | Z | 29200 | | | | | | S31 | M03 | T11 | M08 | LF | |
| N003 | G01 | X | 4780 | Z | 28900 | | | | | F15 | | | | | LF | 倒角 |
| N004 | | U | 0 | W | - 5900 | | | | | | | | | | LF | φ47.8 |
| N005 | | X | 5000 | W | 0 | | | | | | | | | | LF | 退刀 |
| N006 | | X | 6200 | W | - 6000 | | | | | | | | | | LF | 锥度 |
| N007 | | U | 0 | Z | 15500 | | | | | | | | | | LF | φ62 |
| N008 | | X | 7800 | W | 0 | | | | | | | | | | LF | 退刀 |
| N009 | | X | 8000 | W | - 100 | | | | | | | | | | LF | 倒角 |



(续)

| N | G | X | + | Z | + | I | + | K | + | F | S | M | T | M | LF | |
|------|-----|---|-------|---|---|-------|---|------|----|------|------|-----|-----|-----|----|------|
| | | U | - | W | - | | - | | - | | | | | | | |
| N010 | | U | 0 | W | - | 1900 | | | | | | | | | LF | φ80 |
| N011 | G02 | U | 0 | W | - | 6000 | I | 6325 | K | - | 3000 | | | | LF | 圆弧 |
| N012 | G01 | U | 0 | Z | | 6500 | | | | | | | | | LF | φ80 |
| N013 | | X | 9000 | W | | 0 | | | | | | | | | LF | 退刀 |
| N014 | G00 | X | 20000 | Z | | 35000 | | | | | | M05 | T10 | M09 | LF | 退刀 |
| N015 | | X | 5100 | Z | | 23000 | | | | | S23 | M03 | T22 | M08 | LF | |
| N016 | G01 | X | 4500 | W | | 0 | | | | F10 | | | | | LF | 割槽 |
| N017 | G04 | U | 50 | | | | | | | | | | | | LF | 延迟 |
| N018 | G00 | X | 5100 | | | | | | | | | | | | LF | 退刀 |
| N019 | | X | 20000 | Z | | 35000 | | | | | | M05 | T20 | M09 | LF | 退刀 |
| N020 | G00 | X | 5200 | Z | | 29600 | | | | | S22 | M03 | T33 | M08 | LF | |
| N021 | G76 | X | 4720 | Z | | 23150 | | | | F150 | | | | | LF | 切螺纹 |
| N022 | | | | | | | I | - | 60 | K | 0 | | | | LF | 切螺纹 |
| N023 | | | | | | | I | - | 50 | | | | | | LF | 切螺纹 |
| N024 | | | | | | | I | - | 30 | | | | | | LF | 切螺纹 |
| N025 | G00 | X | 20000 | Z | | 35000 | | | | | | | T30 | M02 | LF | 退至起点 |

3.3 数控铣床的程序编制

3.3.1 平面与曲面加工的工艺处理

1. 平面轮廓加工 平面轮廓多由圆弧或各种曲线构成,常用两坐标联动的三坐标铣床加工。图 6-3-8 所示的平面轮廓 ABCDEA, 采用圆柱铣刀进行周向加工, 刀具半径为 r 。当机床具有刀具半径补偿功能时,可直接按轮廓 \widehat{AB} 、 \widehat{BC} 、 \widehat{CD} 、 \widehat{DE} 、 \widehat{EA} 划分程序段编程,若机床不具备刀具半径补偿,则按刀心轨迹 $\widehat{A'B'}$ 、 $\widehat{B'C'}$ 、 $\widehat{C'D'}$ 、 $\widehat{D'E'}$ 、 $\widehat{E'A'}$ 划分程序段,并按虚线所示的坐标值编程。为保证加工平面平滑过渡,增

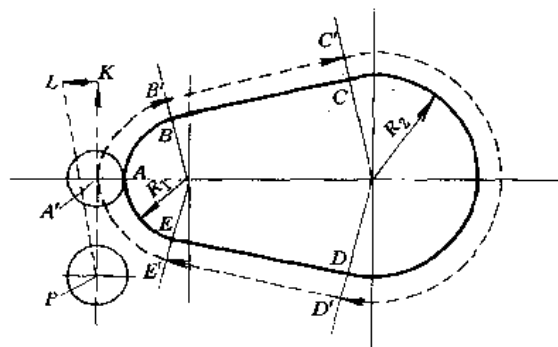


图 6-3-8 平面轮廓铣削

加切入外延 PA' 、切出外延 $A'K$ 、让刀 KL 以及返回 LP 等程序段。应尽可能避免法向切入和进给中途停顿。

由于一般数控装置只具备直线和圆弧插补功能,当平面轮廓为任意曲线时,常用多个直线段和圆弧段去逼近它,见图 6-3-9。逼近线段的交点称为“节点”,这时可按节点划分程序段。要注意逼近线段的误差 δ 应小于允许误差。考虑到工艺系统及计算等误差的影响, δ 一般取零件公差的 $1/5 \sim 1/10$ 。编程时应计算与逼近线段相对应的铣刀中心轨迹的节点坐标。

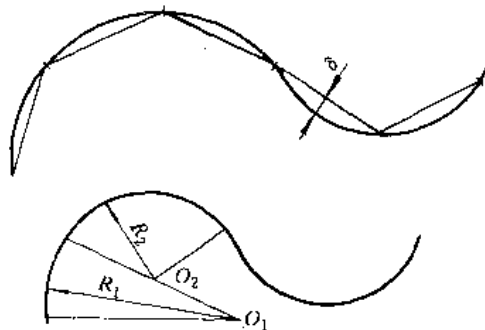


图 6-3-9 曲线的逼近

2. 曲面轮廓的加工 对立体曲面的加工,根据曲面形状、刀具形状及精度要求,采用不同的铣削方法。

(1) 两坐标联动的三坐标行切法加工。对图 6-3-



10所示的曲面,可在两坐标联动的三坐标铣床上加工,将X向分成若干段,圆头铣刀沿YZ面所截的曲线进行铣削,每一段加工完后进给 ΔX ,再加工另一相邻曲线,如此依次切削即可加工整个曲面。这种方法通常叫做行切法。根据表面粗糙度及刀头不干涉相邻表面的原则选取 ΔX ,采用的刀具常是球头铣刀,刀头半径应小于曲面的最小曲率半径。

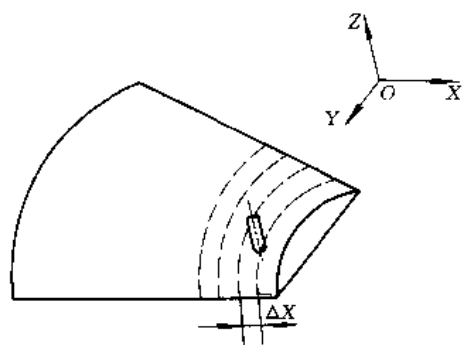


图 6-3-10 曲面行切法

(2) 三坐标加工。用三坐标联动加工曲面,有利于提高曲面的加工精度。如图 6-3-11 所示, P 平面为平行于 YZ 坐标面的一个行切面,与其曲面的交线 ab 若为一条平面曲线,则应使球头刀与曲面的切削点总是处在平面曲线 ab 上,以获得规则的残留留纹。显然,这时的刀心轨迹 O_1O_2 不在 P_{yz} 平面上,而是一条空间曲线(实际上是空间折线),因此需要 X 、 Y 、 Z 三轴联动加工。

(3) 四坐标加工。图 6-3-12 侧面为直纹扭曲面,加工时拟采用圆柱铣刀在四坐标铣床上进行周边切削。即除三个直角坐标运动外,刀具还应绕 O_1 或 O_2 作摆角联动,以使刀具和工件的型面始终贴合。由于摆角运动,导致直角坐标(图中为 Y) 需作附加运动。

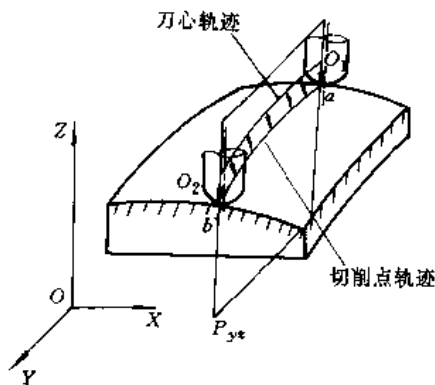


图 6-3-11 三坐标加工

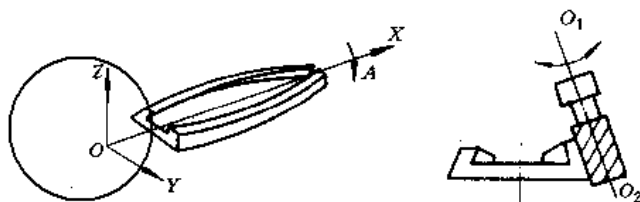


图 6-3-12 四坐标加工

(4) 五坐标加工。五坐标加工的典型零件之一是螺旋桨,其叶片的形状及加工原理见图 6-3-13。在半径为 R_1 的圆柱面上与叶面的交线 ab 为螺旋线的一部分,螺旋角为 φ_1 ,叶片的径向叶型线(轴向剖面) EF 的倾角 α 为后倾角。对螺旋线 ab ,采用极坐标加工方法,并以折线段逼近。线段 mn 是由 C 坐标旋转 $\Delta\theta$ 与 Z 坐标位移 ΔZ 合成。当 ab 加工完后,刀具径向位移 ΔX (改变 R_1),再加工相邻的另一条型线,依次逐一加工,即可形成整个型面。由于叶面的曲率半径较大,所以常用端面铣刀加工,以提高生产率并简化程序。因此,为保证铣刀端面始终和曲面贴合,铣刀还应作坐标 A 和坐标 B 的摆角运动,在摆角的同时,还应作直角

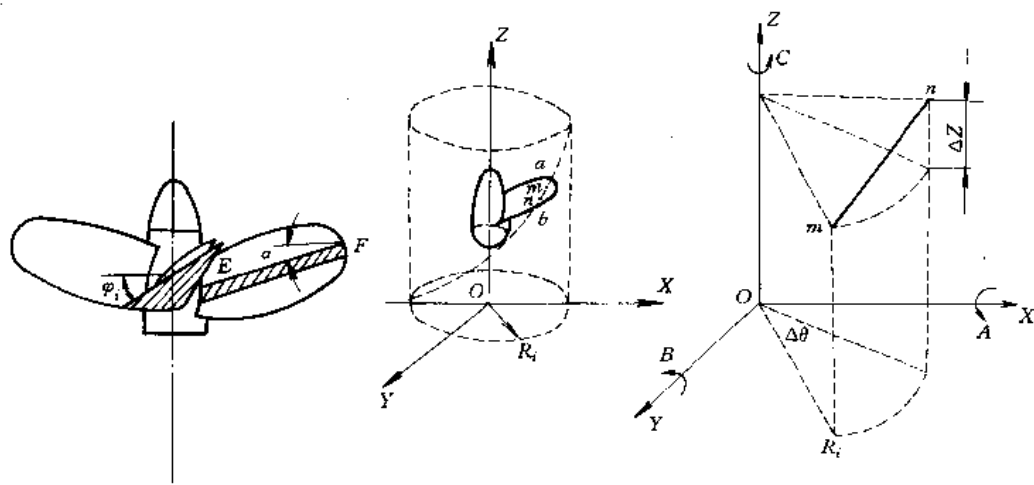


图 6-3-13 五坐标加工



坐标的附加运动,以保证铣刀端面中心始终位于编程值的位置上,所以需要Z、C、X、A、B五坐标加工。

3.3.2 非圆曲线与列表曲线的数学处理

1. 非圆曲线的节点计算 在机械加工中,常遇到一些非圆曲线(如摆线、渐开线、抛物线、双曲线等)构成的零件。一般的数控系统不具备这些插补功能,必须采用直线或圆弧逼近的方法加工,这时就必须先进行数学处理。

(1) 等间距直线逼近的节点计算。这是一种最简单的方法。如图6-3-14a所示,已知方程 $Y=f(X)$,根据给定的等间距 ΔX 求出 X_i ,将 X_i 代入 $Y=f(X)$,即可求出一系列 Y_i 。 X_i, Y_i 即为每一个线段的终点坐标,并以该坐标值或对应的刀心坐标值编制直线程序段。

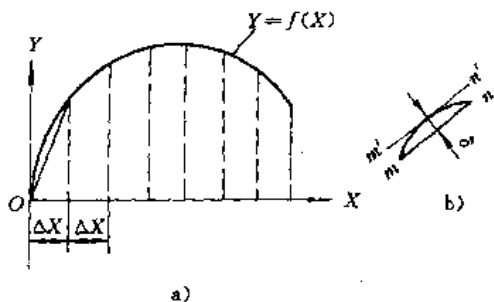


图6-3-14 等间距逼近

ΔX 决定于曲线的曲率和允许误差 δ 。一般取 $\Delta X=0.1\text{mm}$ 试算并校验。误差校验方法见图6-3-14, mn 为某一逼近线段,作 $m'n'$ 平行于 mn ,并与曲线相切,切点至 mn 的距离为 δ ,可得 mn 及 $m'n'$ 方程为

$$mn: AX+BY+C=0$$

$$m'n': AX+BY=C\pm\delta\sqrt{A^2+B^2}$$

求解联立方程组

$$\begin{cases} AX+BY=C\pm\delta\sqrt{A^2+B^2} \\ Y=f(X) \end{cases}$$

即得 δ 。要求 $\delta\leq\delta_{\text{允}}$,一般 $\delta_{\text{允}}$ 取为零件公差 $1/5\sim 1/10$ 。

等间距法计算简单,但由于 ΔX 为定值,当曲线曲率变化较大时,程序段数过多。

(2) 等步长直线逼近的节点计算。使所有逼近线段的长度相等(见图6-3-15),即 $ab=bc=\dots$ 。其计算步骤如下:

1) 确定允许的步长 l 。由于曲线各处的曲率不等,等步长后,最大误差 δ_{max} 必在 R_{min} 处(设为图中 de 段),则 l 为

$$l=2\sqrt{R_{\text{min}}^2-(R_{\text{min}}-\delta)^2} \approx 2\sqrt{2R_{\text{min}}\delta} \quad (6.3-1)$$

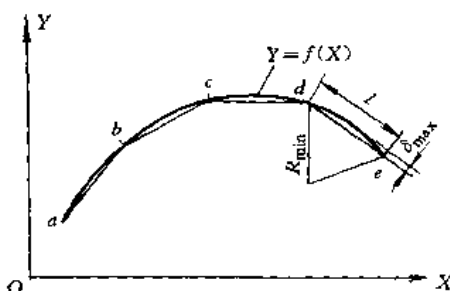


图6-3-15 等步长逼近

2) 求 R_{min} 。曲线 $Y=f(X)$ 的任一点的曲率半径为

$$R=(1+Y'^2)^{3/2}/Y'' \quad (6.3-2)$$

取 $dR/dX=0$, 即

$$3Y'Y''^2-(1+Y'^2)Y'''=0 \quad (6.3-3)$$

根据 $Y=f(X)$ 求得 Y', Y'', Y''' ,并代入式(6.3-3)得 X ,再将 X 值代入式(6.3-2)即得 R_{min} 。

3) 以曲线起点 a 为圆心,作半径为 l 的圆方程交曲线 $Y=f(X)$ 于 b 点,联立求解

$$\begin{cases} (X-X_a)^2+(Y-Y_a)^2=l^2 \\ Y=f(X) \end{cases}$$

得 X_b, Y_b 。

4) 顺序以 b, c, \dots 为圆心,重复步骤3),即可求得其余各节点的坐标值。等步长法适用于曲线各处的曲率变化不大的曲线节点计算。

(3) 等误差直线逼近的节点计算。即使所有逼近线段的误差 δ 相等,见图6-3-16。其计算步骤如下:

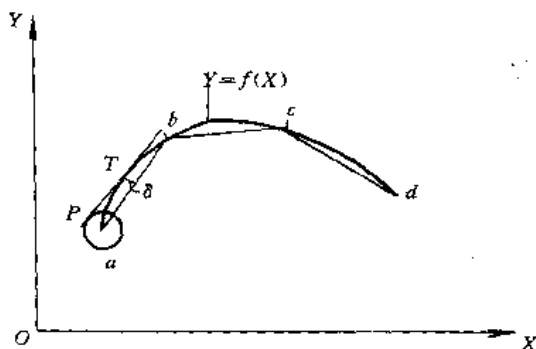


图6-3-16 等误差逼近

1) 确定允许误差 δ 的圆方程,即以起点 $a(X_a, Y_a)$ 为圆心、 δ 为半径作圆。

$$(X-X_a)^2+(Y-Y_a)^2=\delta^2$$

2) 求圆与曲线公切线 PT 的斜率 k

$$k=(Y_T-Y_P)/(X_T-X_P)$$

此星公司制作 请尊重原作者版权



3) 求弦长 ab 方程, 使 ab 平行于 PT , 并设 ab 弦斜率为 k , 则 ab 方程为

$$Y - Y_a = k(X - X_a)$$

4) 联立曲线方程和弦方程求得 b 点坐标

$$\begin{cases} Y = f(X) \\ Y - Y_a = k(X - X_a) \end{cases}$$

5) 按上述步骤依次求得 c 、 d 、 e 、... 各节点坐标。

对于曲率变化较大的曲线用等误差法求得节点数最小。

(4) 用圆弧逼近的节点计算。曲线用圆弧逼近有曲率圆法、三点圆法和相切圆法等方法。三点圆法是通过已知三个节点求圆, 并作为一个圆弧程序段。相切圆法是通过已知四个节点分别作两个相切圆, 编出两个圆弧程序段。这两种方法都必须先用直线逼近方法求出各个节点, 再求出各圆。

图6-3-17 为曲率圆法, 这是一种等误差圆弧逼近方法。其步骤如下:

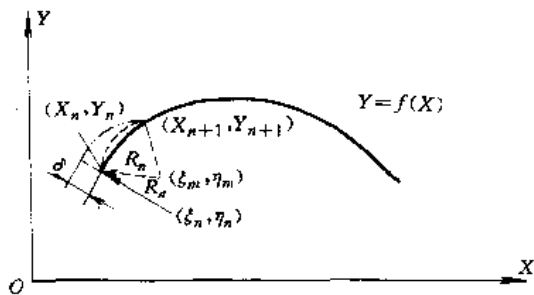


图 6-3-17 圆弧逼近

1) 以曲线 $Y = f(X)$ 的起点 (X_n, Y_n) 开始作曲率圆, 其曲率参数为

$$\begin{aligned} \text{圆心: } \xi_n &= X_n - Y_n' \frac{1 + (Y_n')^2}{Y_n''} \\ \eta_n &= Y_n + \frac{1 - (Y_n')^2}{Y_n''} \end{aligned}$$

$$\text{半径: } R_n = \frac{[1 + (Y_n')^2]^{\frac{3}{2}}}{Y_n''}$$

2) 已知允许误差 δ , 求偏差圆与曲线的交点, 即解联立方程。

$$\begin{cases} (X - \xi_n)^2 + (Y - \eta_n)^2 = (R_n \pm \delta)^2 \\ Y = f(X) \end{cases}$$

得 (X_{n+1}, Y_{n+1}) 。

3) 求过 (X_n, Y_n) 和 (X_{n+1}, Y_{n+1}) 两点、半径为 R_n 的圆的圆心, 即求

$$(X - X_n)^2 + (Y - Y_n)^2 = R_n^2$$

$$(X - X_{n+1})^2 + (Y - Y_{n+1})^2 = R_n^2$$

的交点 (ξ_n, η_n) 。该圆即为逼近圆, 其起点为 $(X_n,$

$Y_n)$, 终点为 (X_{n+1}, Y_{n+1}) , 半径为 R_n , 圆心为 (ξ_n, η_n) 。以这些参数编制圆弧程序段。

4) 重复上述步骤, 依次求得其他逼近圆。

2. 列表曲线的数字处理 所谓列表曲线, 是指已给出曲线上某些坐标点, 但没有给出方程。若列表点已密到不影响曲线精度的程度, 可在相邻列表点间直接用直线段和圆弧段编程, 否则应根据已知列表点导出插值方程, 据此进行插点加密求得新的节点, 然后根据这些节点编制逼近线段的程序。

用方程式拟合出来的曲线必须满足如下的要求:

- (1) 拟合曲线必须通过给定的各列表点。
- (2) 拟合曲线在连接处的一阶导数、二阶导数连续, 曲线光滑。
- (3) 拟合曲线与列表点给出的曲线凹凸一致, 不应在列表点凹凸性之外增加新的拐点。

列表曲线的拟合方法很多, 有三次样条、三次参数样条、B 样条、圆弧样条、双圆弧样条、抛物线拟合及牛顿插值方法等。

3. 自由曲面的数学处理 自由曲面零件, 如涡轮叶片及各种其他叶片、机翼翼型、汽车覆盖件的模具等, 这种型面反映在图样上的数据是列表数据。对这类零件进行数控加工程序编制时, 常常都是用三维的坐标点 (X_i, Y_i, Z_i) 表示的。

自由曲面的拟合方法有多种, 如 B 样条法、Bezier 方法、Coons 曲面拟合法等。当粗加工、半精加工时, 常用 Ferguson 曲面拟合法, 对精度要求较高的曲面采用 Coons 曲面法。

3.3.3 棱角过渡的处理

当铣削棱角轮廓时, 若刀心位移量与轮廓尺寸相同, 则会产生图 6-3-18 所示的刀心轨迹不连续或干涉现象。为此, 手工编程时应考虑棱角处的过渡轨迹或过渡程序。其基本方法参见图 6-3-19。图 a 为直线与直线轮廓, 过渡点应为两刀心轨迹的交点 S ; 图 b 为直线与圆弧轮廓, 过渡点为 S , 并增加 SA' 程序; 图 c 为圆弧与直线轮廓, 棱角小于 90° , 增加 $A'S (=r)$ 、 SS' 、 $S'A' (=r)$ 三个直线程序 (r 为刀具半径); 图 d 为内



图 6-3-18 棱角过渡的不连续与干涉



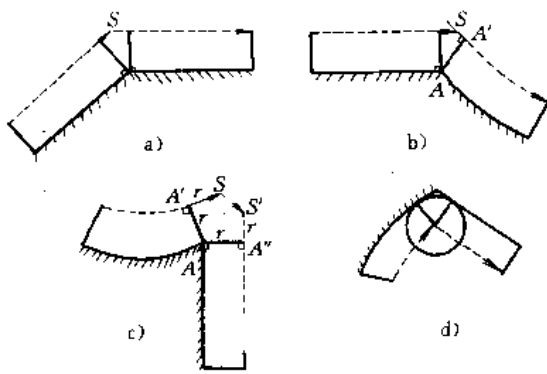


图 6-3-19 棱角过渡

轮廓的刀心轨迹。

3.3.4 数控铣床的程序编制实例

图 6-3-20 所示的凸轮零件，在具有刀具半径补偿功能的两坐标联动的三坐标数控铣床上进行加工，编程过程如下：

1. 确定加工路线、工艺参数 定位装夹选在 $\phi 20\text{mm}$ 的中心孔上，并以此为坐标原点及对刀点。选用 $\phi 15\text{mm}$ 的立铣刀，主轴转速为 985r/min ，铣刀下端距零件底面 48mm ，并考虑 1mm 的超越量。走刀路线见图 6-3-20 箭头所示。

2. 数学处理 图 6-3-20 所示的凸轮，由直线和圆弧组成，所以要求出各几何元素相交或相切的基点

坐标。

3. 编写程序单 按程序格式编写的凸轮零件铣削加工程序单见表 6-3-8。

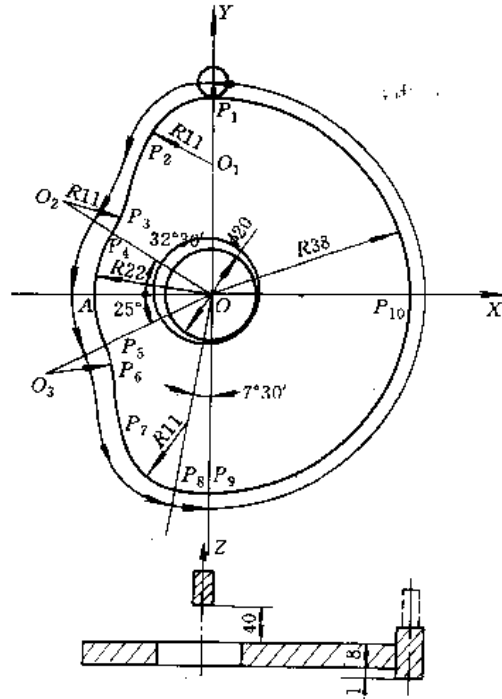


图 6-3-20 凸轮零件的铣削加工实例

表 6-3-8 凸轮零件铣削加工程序单

| N | G | I | J | K | X | Y | Z | F | M | CR | 备注 |
|------|-----------------|-------|-------|---|--------|--------|--------|----------------|-----|----|---------------------------------|
| N001 | G01 G17 G41 | | | | | Y+3800 | | F ₀ | | CR | 0→P ₁ |
| N002 | G19 G40 | | | | | | Z-3900 | | | CR | Z向快速下刀 |
| N003 | | | | | | | Z-1000 | F ₁ | | CR | Z向切入 |
| N004 | G03 G17 G37 G42 | | J1100 | | X-1012 | Y+429 | | F ₂ | | CR | P ₁ →P ₂ |
| N005 | G01 | | | | X-758 | Y-1783 | | | | CR | P ₂ →P ₃ |
| N006 | G02 | I1012 | J429 | | X+927 | Y-591 | | | | CR | P ₃ →P ₄ |
| N007 | G03 | I1855 | J1182 | | X-2200 | | | | | CR | P ₄ →A |
| N008 | | I2200 | | | X-1994 | Y-929 | | | | CR | A→P ₅ |
| N009 | G02 | I997 | J465 | | X-1060 | Y+294 | | | | CR | P ₅ →P ₆ |
| N010 | G01 | | | | X+518 | Y-1871 | | | | CR | P ₆ →P ₇ |
| N011 | G03 | I1060 | J294 | | X-143 | Y-1090 | | | | CR | P ₇ →P ₈ |
| N012 | | I496 | J3767 | | | Y-3800 | | | | CR | P ₈ →P ₉ |
| N013 | | | J3800 | | X+3800 | | | | | CR | P ₉ →P ₁₀ |
| N014 | | I3800 | | | | Y+3800 | | | | CR | P ₁₀ →1 |
| N015 | G01 G19 | | | | | | Z+4900 | F ₀ | | CR | 快速抬刀 |
| N016 | G17 G41 | | | | | Y-3800 | | | | CR | 回原点 |
| N017 | | | | | | | | | M02 | CR | 程序停止 |



4 计算机数控自动程序编制系统

4.1 计算机自动编程的工作原理

计算机数控自动编程的整个过程是由计算机自动完成的。如图 6-3-21 所示,编程人员只需根据零件图样的要求,使用数控语言编写出一个简短的零件源程序输入计算机,计算机经过翻译处理和刀具运动轨迹

处理,生成刀具位置数据(Cutter Location Data—CLDATA),再经过后置处理,生成符合具体数控机床要求的零件(加工)程序。该零件程序可以按程序单方式打印输出,也可以穿孔纸带输出,还可以通过通信接口直接送到 CNC 系统的存储器予以调用。经计算机处理的数据还可以通过屏幕图形或绘图仪自动绘图,绘出刀具运动的轨迹,用以检查数据处理的正确性,编程人员据此分析错误,验证程序,并予以修改。

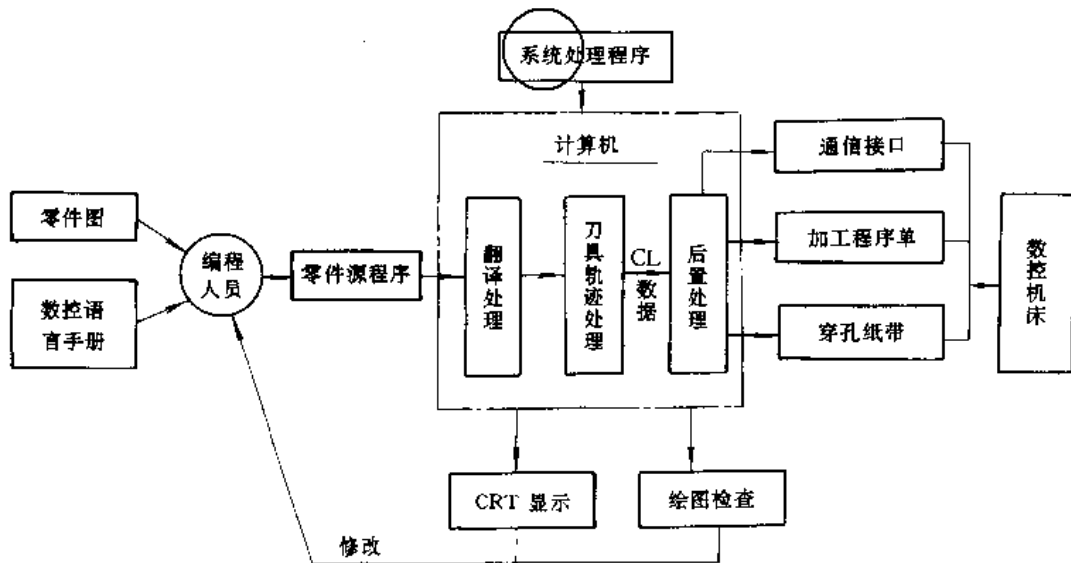


图 6-3-21 计算机编程的一般工作原理

数控语言是一套规定好的基本符号、字母数字及由它们来描述零件加工的语法、词法规则。这些符号及规则接近于日常车间用语。用它来描述零件形状、尺寸大小、几何元素间的相互关系及走刀路线、工艺参数等。用该语言编写出的零件加工程序称为零件源程序。它不能直接用于控制机床,只是作为自动编程计算机的输入程序。

将零件源程序输入计算机后,必须有一套预先存放在计算机里的程序系统将源程序翻译成计算机可以计算、处理的形式。这个程序系统是事先由设计者使用高级语言编制而成的,统称为系统处理程序,由它对零件源程序进行翻译、计算、后置处理等操作,最后生成能控制数控机床完成零件加工的零件程序。

4.2 数控语言

4.2.1 数控语言的发展概况

随着 50 年代初第一台数控机床问世,美国在

1955 年最早研制成功专门用于机械零件数控加工的自动编程语言(Automatically Programmed Tools—APT)。随后 APT 语言被逐步更新和扩大,形成了 APT I、APT II、APT N 等不同版本。

我国自 60 年代中期开始了数控自动编程方面的研究工作,70 年代已研制出了 SKC、ZCX、ZBC-1、CKY 等具有平面轮廓铣削加工、车削加工等功能的数控自动编程系统。尔后,又研制出具有解决复杂曲面编程功能的数控编程系统 CAM-251 等多功能语言系统。随着计算机技术的发展,微机数控自动编程系统以其较高的性能价格比发展起来。近年来推出了 HZAPT、EAPT、SAPT 等微机数控自动编程系统。

目前,由于各主要工业国,甚至一个公司集团都有各自的数控语言,而且大多与 APT 语言基本类似。为了国际间的通用性,国际标准化组织在 APT 语言的基础上制定了 ISO4342-1985 数控语言标准。我国将在此基础上,制定国标。



表 6-3-9 国外有代表性的数控语言

| 名称 | 研制者 | 所用计算机 | 适用范围 | |
|-------------------|---------------|-----------------|----------|-----------------|
| | | | 数控装置 | 坐标数 |
| APT ₁ | MIT (美) | IBM7090 (256KB) | 通用 | 3~6 |
| APT _N | HTRI (美) | 多种 | 通用 | 3~6 |
| APT _{AC} | 美国 | IBM370 | 连续 | 4~5 |
| ADAPT | IBM (美) | IBMS/360F | 连续 | 2 |
| AUTOSPOT | 美国 | IBMS/360E | 点位直线 | 3 |
| AUTOMAP-1 | 美国 | IBM1620 | 连续 | 2 |
| EXAPT1 | EXAPT 协会 (德国) | 多种 | 点位 | 3 |
| EXAPT2 | | | 车床、连续 | |
| EXAPT3 | | | 连续、两坐标联动 | |
| 2C | NEL (美) | 多种 | 连续、主要车床 | 2 |
| 2CL | | | 连续 | 3 |
| 2PC | | | 点位 | |
| IFAPT-P | ADEPA (法) | 56KB 容量计算机 | 点位 | 3 |
| IFAPT-C | | | 连续 | |
| IFAPT-CP | | | 点位、连续 | |
| FAPT | 富士通 (日) | FAOOM270-10 | 连续 | 2 $\frac{1}{2}$ |
| HAPT | 日立 (日) | HIT-AC5020 | 连续 | 2 |

4.2.2 APT 语言

1. APT 语言编程实例 图 6-3-22 是待加工的零件,表 6-3-10 是加工该零件的 APT 语言源程序单。下面对各条语句加以说明。

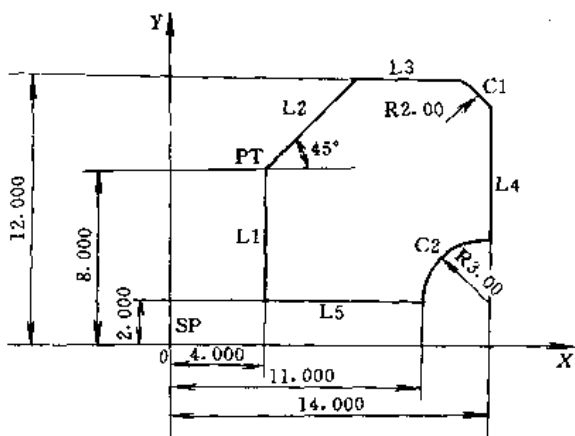


图 6-3-22 典型零件定义

(1) PARTNO N/C 360 APT SAMPLE PART PROGRAM

识别零件,并作为程序单的标题,以及用来识别控

制带。

(2) SP=POINT/0, 0, 0

对坐标值 $X=0, Y=0, Z=0$ 的点赋予 SP 的名字。

(3) L1=LINE/4, 0, 0, 4, 8, 0

定义一条过两点的直线。点的坐标为 $X=4, Y=0, Z=0$ 和 $X=4, Y=8, Z=0$

(4) PT=POINT/4.0, 8.0, 0

定义一个点,其坐标为 $X=4, Y=8, Z=0$

(5) L2=LINE/PT, ATANGL, 45

定义一条过 PT 点的直线,该直线与 X 轴线成 45° 角。

(6) L3=LINE/8, 12, 0, 12, 12, 0

定义一条过两点的直线,点的坐标为 $X=8, Y=12, Z=0$ 和 $X=12, Y=12, Z=0$

(7) L4=LINE/14, 5, 0, 14, 10, 0

定义一条过两点的直线,点的坐标为 $X=14, Y=5, Z=0$ 和 $X=14, Y=10, Z=0$

(8) L5=LINE/0, 2, 0, 11, 2, 0

定义一条过两点的直线,点的坐标为 $X=0, Y=$



表 6-3-10 源程序单

| | |
|----|---------------------------------------|
| 1 | PARTNO N/C360 APT SAMPLE PART PROGRAM |
| 2 | SP=POINT/0, 0, 0 |
| 3 | L1=LINE/4, 0, 0, 4, 8, 0 |
| 4 | PT=POINT/4.0, 8.0, 0 |
| 5 | L2=LINE/PT, ATANGL, 45 |
| 6 | L3=LINE/8, 12, 0, 12, 12, 0 |
| 7 | L4=LINE/14, 5, 0, 14, 10, 0 |
| 8 | L5=LINE/0, 2, 0, 11, 2, 0 |
| 9 | C1=CIRCLE/12, 10, 0, 2.0 |
| 10 | C2=CIRCLE/14, 2, 0, 3.0 |
| 11 | INTOL/0 |
| 12 | OUTTOL/.005 |
| 13 | CUTTER/.25 |
| 14 | SPINDL/2000, CLW |
| 15 | COOLNT/ON |
| 16 | FEDRAT/20.0 |
| 17 | FROM/SP |
| 18 | GO/TO, L1 |
| 19 | TLLFT, GOLFT/L1, PAST, L2 |
| 20 | GORGT/L2, PAST, L3 |
| 21 | GORGT/L3, TANTO, C1 |
| 22 | GOFWD/C1, TANTO, L4 |
| 23 | GOFWD/L4, PAST, C2 |
| 24 | GORGT/C2, PAST, L5 |
| 25 | GORGT/L5, PAST, L1 |
| 26 | GOTO/SP |
| 27 | COOLNT/OFF |
| 28 | SPINDL/OFF |
| 29 | FINI |

2, Z=0 和 X=11, Y=2, Z=0

(9) C1=CIRCLE/12, 10, 0, 2.0

定义一个圆, 圆心坐标为 X=12, Y=10, Z=0, 其半径为 2。

(10) C2=CIRCLE/14, 2, 0, 3.0

定义一个圆, 圆心坐标为 X=14, Y=12, Z=0, 其半径为 3。

(11) INTOL/0

规定零件内容差为 0, 此容差表示零件加工后的尺寸比理论尺寸小的最大允许量。

(12) OUTTOL/.005

规定零件外容差为 0.005mm, 这表示加工后最大允许余量。

(13) CUTTER/.25

规定所采用的刀具直径为 0.25in[⊙]。

(14) SPINDL/2000, CLW

规定机床主轴转速为 2000r/min, 转动方向为顺时针。

(15) COOLNT/ON

规定接通冷却液。

(16) FEDRAT/20.0

表示进给速度为 20.0in/min。

(17) FROM/SP

规定加工起始基准点是 SP 点。

(18) GO/TO, L1

规定刀具从当前位置(SP 点)开始运动直到 L1 为止。

(19) TLLFT, GOLFT/L1, PAST, L2

规定刀具在零件的左边(TLLFT), 到 L1 时转向左(GOLFT)(顺着走刀方向看)。刀具继续沿 L1 运动, 直到走过 L2 线为止。

(20) GORGT/L2, PAST, L3

规定刀具向右(GORGT), 沿着 L2 继续运动, 直到走过 L3 为止。

(21) GORGT/L3, TANTO, C1

规定刀具向右, 沿 L3 继续运动, 直到刀具与圆 C1 相切(TANTO)为止。

(22) GOFWD/C1, TANTO, L4

规定刀具向前(GOFWD), 沿 C1 圆继续运动, 直到与 L4 相切为止。

(23) GOFWD/L4, PAST, C2

规定刀具向前, 沿 L4 继续运动, 直到走过 C2 圆为止。

(24) GORGT/C2, PAST, L5

表示刀具向右沿 C2 继续运动, 直到走过 L5 为止。

(25) GORGT/L5, PAST, L1

表示刀具向右, 沿 L5 继续运动, 直到走过 L1 为止。

(26) GOTO/SP

规定刀具直接走到 SP 点(使刀具回到原始起点)。

(27) COOLNT/OFF

规定断开冷却液。

⊙ 1in=25.4mm。



(28) SPINDL/OFF

规定主轴停车。

(29) FINI

表示此零件程序结束。

2. APT 语言主要语句分类 APT 语言主要语句, 可分为下面五类:

(1) 几何定义语句。这是用来说明零件轮廓的几何形状、进刀点位置和进刀方向等, 为后面描述走刀路线作准备。它的一般表达形式是:

〈几何元素标识符〉= 〈几何元素类型字〉/ 〈几何元素定义方式〉

等号左边是用户为几何元素所起的名字, 便于以后引用。等号右边是 APT 的专用字和给定的几何定义形式及参数。APT 语言提供的几何定义类型有 ZSURF 定义、点 (POINT) 定义、直线 (LINE) 定义、圆 (CIRCLE) 定义、平面 (PLANE) 定义、圆柱面 (CYLNDR) 定义、椭圆 (ELLIPS) 定义、双曲线 (HYPERB) 定义、圆锥面 (CONE) 定义、一般二次曲线 (GCONIC) 定义、作图二次曲线 (LCONIC) 定义、矢量 (VECTOR) 定义、矩阵 (MATRIX) 定义、球面 (SPHERE) 定义、二次曲面 (QADRIC) 定义、列表柱面 (TABCYL) 定义、多段锥面 (POLCON) 定义、直纹面 (RLDSRF) 定义、点阵 (PATTERN) 定义等 20 余种几何定义类型, 每种类型的几何元素均有多种定义形式。

表 6-3-10 中, 第 2~10 条语句就是几何定义语句。

(2) 刀具运动语句。该语句用来描述刀具的运动轨迹。为了明确指定刀具相对于工件的关系, APT 系统定义了三个控制面, 它们是:

1) 零件面 (Part Surface——PS)。这是待加工的表面, 在一连串的走刀运动中始终保持不变。

2) 导动面 (Drive Surface——DS)。用来引导刀具运动, 在走刀过程中逐次发生变化。

3) 检查面 (Check Surface——CS)。用来确定每次走刀的刀具终止位置, 见图 6-3-23。

此外, 还有修饰字进一步明确刀具轴线和控制面的相对关系, 如“走到”(TO)、“走上”(ON)、“走过”(PAST)、“走切”(TANTO)、“切于零件面”(PSTAN), 以及“右偏”(TLRGT)、“中立”(TLON) 等。

APT 语言的刀具运动语句分为点位程序编制语句和轮廓程序编制语句。

点位程序编制语句有起始语句 (FROM)、绝对运动语句 (GOTO)、增量运动语句 (GODLTA) 等语句, 及 INVERS、OMIT、RETAIN、AVOID、THRU、CONST 修饰词。

轮廓程序编制语句有 FROM、GOTO、GODLTA、INDIRV、INDIRP、GO、OFFSET、GOLFT、GORGT、GODOWN、GOFWD、GOBACK 等语句。

表 6-3-10 中, 第 20~26 语句是刀具运动语句。

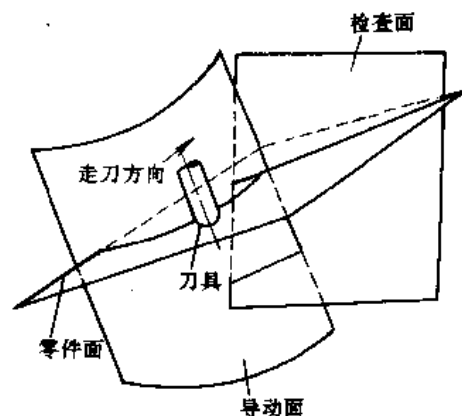


图 6-3-23 刀具运动轨迹的控制面

3. 宏指令与循环指令 APT 处理程序的循环指令允许反复定义, 并使用几何表面和标变量。

有循环功能的程序由允许反复计算的 IF 和 JUMPTO 语句和 LOOPST、LOOPND 语句组成。LOOPST 和 LOOPND 确定一组语句的范围, 循环在这组语句中进行, 并在完成之后跳出这组语句。

下面是循环语句应用的例子。

```
RESERV/LH, 100, LV, 100, PI, 100
I=1
LOOPST
1A) LH(I)=LINE/CANON, 0, 1, 0, (I-1)
   LV(I)=LINE/CANON, 1, 0, 0, (I-1)
   PI(I)=POINT/INTOF, LH(I), LV(I)
   IF(I-100)2A, 3A, 3A
2A) I=I+1
   JUMPTO/1A
3A) LOOPND
```

具有宏指令功能的 APT 语言程序, 由 MACRO、TERMAC 和 CALL 语句组成。前两种语句确定宏指令定义的范围, 后一种语句确定要调用的宏指令在零件程序中的位置。

```
RESERV/LH, 100, LV, 100, PI, 100
MAC1=MACRO/K
```



```

LH (K) =LINE/CANON, 0, 1, 0, (K-1)
LV (K) =LINE/CANON, 1, 0, 0, (K-1)
PI (K) =POINT/INTOF, LH (K), LV (K)
TERMAC
I=1
LOOPST
2A) CALL/MAC1, K=I
    I=I+1
    IF (I-100) 2A, 2A, 3A
3A) LOOPND
    
```

4. 辅助机能语句 对应数控机床辅助功能的 APT 语句, 有 SPINDL、COOLNT/ON、COOLNT/OFF、FEDRAT 等语句。

5. 其他语句 这类语句包括注释、说明、几何变换、输入、输出等语句, 如 PARTND、REMARK、PPRINT、INSERT、TITLES、NDPLOT、MACHIN、NOPOST、CLPRNT、CLTY、PTONLY、FINI、PUNCH、READ、INDEX、COPY、TRACUT、VT-LAXS、WCORN、INTOL、OUTTOL 等。

APT 处理程序大多用 FORTRAN 语言编写, 分成几个主要处理阶段。首先是源语句的翻译、整理, 将几何元素的名字和定义参数转换成统一格式, 将 APT 专用词代换成内部码; 然后进入数学处理, 根据走刀路线的要求计算出刀位点坐标, 存入磁带中, 形成刀位数据文件。源程序以及各个中间处理阶段的结果可以打印输出, 便于用户检查和追踪错误; 最后进入后置处理, 根据用户指定的机床型号, 将通用的刀位数据转换成数控系统所能接受的指令格式, 或打印输出, 或穿孔纸带, 或通过通信接口直接送入 CNC 系统的内存储器中。

4.3 数控自动程序编制系统的程序设计

4.3.1 计算机数控自动程序编制系统的总体结构

计算机数控程序编制系统主要由前置处理程序及后置处理程序两大部分组成, 见图 6-3-24。前置处理程序的任务是对零件源程序的输入翻译, 数学处理计算出刀具运动中心轨迹, 得到刀位数据 (CLD) 文件。后置处理程序则将刀位数据和有关的工艺参数、辅助信息等处理成具体的数控系统所要求的指令和程序格式, 并自动地输出数控机床所能接受的零件程序清单、穿孔纸带或直接通过通信接口传送给数控系统。

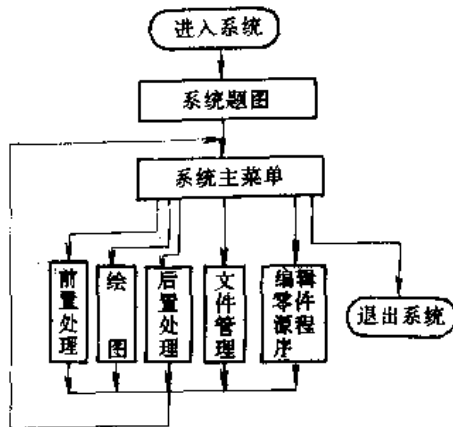


图 6-3-24 数控自动程序编制系统程序总体框图

4.3.2 前置处理程序的组成及功能

前置处理程序由输入模块及计算模块组成, 见图 6-3-25。

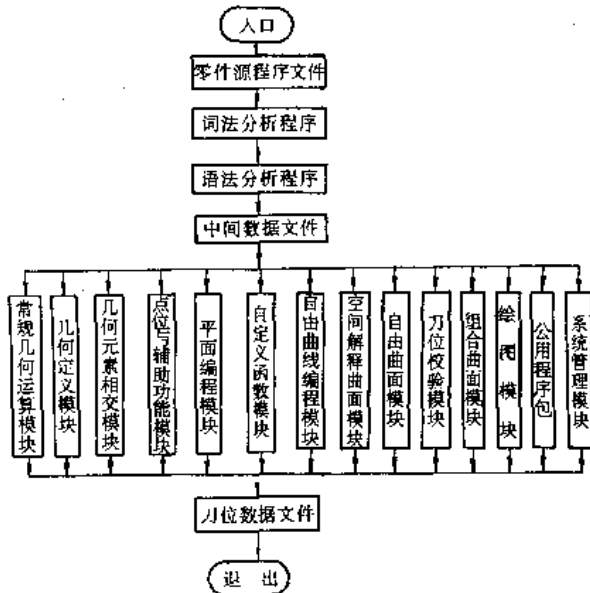


图 6-3-25 前置处理程序框图

(1) 输入翻译阶段包括输入模块、词法分析和语法分析模块。要对源程序依次进行扫描, 进行词法分析, 对各字符串进行分解, 识别单词。在此基础上, 再进行语法分析, 把单词符号串分解成各类语法单位, 确定整个输入串是否构成一个语法上正确的句子, 如发现源程序中有不符合语法或词法的地方, 要输出错误信息, 以便修改。

(2) 计算阶段程序的组成及功能。在得到没有词法和语法错误的零件源程序后, 即进入计算阶段, 求得零件的基点、节点及刀具运动的中心轨迹, 即刀位数据。该部分由下面的模块组成。



1) 常规几何运算模块。该模块程序包括平面的平移、旋转、对称的计算,点到直线距离的计算,矢量叉乘,线段中点计算,已知三点求平面,一点沿矢量平移以及投影计算等。

2) 几何定义模块。该模块程序确定了直线、圆弧、空间直线、平面、球、圆柱、圆锥、圆环、矢量、螺旋面,一般二次曲面的各种定义形式,用户可自由选择不同定义方式,并且允许嵌套定义。

3) 几何元素相交模块。该模块程序具有两条直线相交、直线圆弧相交、两圆弧相交、两圆弧相切、直线圆弧相切、直线平面相交、直线球面相交、直线椭圆面相交、两平面相交、三平面相交、直线椭圆面相切、直线一般二次曲面相交、直线自定义参数曲线相交、圆弧自定义参数曲线相交、两直线间圆角过渡、直线圆弧间圆角过渡、两圆弧间圆角过渡、直线自定义参数曲线间圆角过渡、圆弧自定义参数曲线间圆角过渡等功能。

4) 点位与辅助功能模块。该模块程序具有钻孔、攻螺纹、镗孔、组孔加工、槽加工等点位编程功能,同时还有程序名、平面选择、容差、刀具偏置、刀具补偿、换刀、进给、转速、主轴停转、冷却、取参数、程序结束等辅助功能。

5) 平面编程模块。该模块程序,对零件源程序进行语法分析、词法分析,对圆点、直线、圆弧相互连接组成的平面零件轮廓编程。

6) 自定义函数模块。该模块程序允许用户以表达式的形式输入数值和几何参数,可对用户任意定义参数曲线编程,大大扩展了系统的编程能力。

7) 自由曲线编程模块。该模块程序提供了按点列或给出位矢量与切矢量两种类型方法描述的自由曲线的程序编制功能,并提供了自由、夹紧、与前段相切、与后段相切、闭合等不同端点的条件。

8) 空间解析曲面模块。该模块程序具有对球面、圆柱面、圆锥面、圆环面、螺旋面,以及由任意平面曲线绕任意轴旋转构成曲面的程序编制功能。

9) 自由曲面模块。该模块程序具有对点阵描述的曲面按 Coons 曲面、Ferguson 曲面插值功能,同时对广泛用于生产中用截面描述的曲面编程,并可对曲面进行光顺处理。

10) 刀位校验模块。该模块程序,根据多面体数控加工方法,自动校验铣削加工时的刀具干涉问题,并提高加工精度或切削效率,分别给出最大的刀具切削半径或深度。

11) 组合曲面模块。该模块程序能将不同表面组

合在一起,具有对复杂形体编程的功能。

12) 绘图模块。该模块程序能使用户在屏幕上快速绘图,也允许用户在绘图仪上进行绘图校验,能根据用户需要绘制 XOY, YOZ, ZOY 中间正投影、二等测、三等测投影图和一般透视投影图,并具有局部放大功能。

13) 公用程序包。该模块程序,包括正切计算、行列式计算、求最大值、存取几何元素、存取切削数据、分区词判别、刀具偏置、高斯法解方程、追赶法解方程等子程序。

14) 系统管理模块。系统的硬、软件资源由该模块统一管理、调用。

4.3.3 后置处理程序的组成及功能

后置处理程序 (POST PROCESSOR) 是将刀位数据及相应的切削条件、辅助信息等处理成对应数控系统所要求的指令和程序格式,并制成穿孔纸带及打印出零件程序单等。后置处理程序是专用的,数控系统不同,后置处理程序也不同,一个应用广泛的数控程序编制系统应具有丰富的后置处理程序,以适用于尽可能多的数控系统。

后置处理程序采用模块式设计,其程序总框图见图 6-3-26。

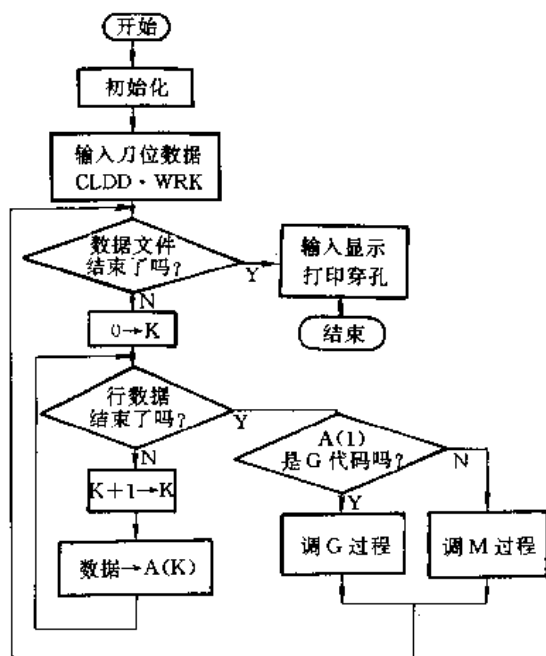


图 6-3-26 后置处理程序总框图

(1) 输入及控制模块。该模块的作用是将前置处理阶段计算得到的并已存入数据文件 CLDD.WRK 中的刀位数据及辅助功能信息输入到后置处理程序中。



然后再判断、控制、调用其他模块。

(2) 运动模块。运动模块包括 G 代码的判断处理模块、直线插补处理模块及圆弧插补处理模块。

G 代码判断处理模块的特点是使用了情况语句 (CASE 语句)。其选择表达式的值由刀位数据的每一行的第一位数值确定。该数值与 G 代码中的“G”字母后面的数字相一致。当判断了刀位数据每行的第一位数值后,即可知是哪一种 G 代码,通过程序处理成所需的加工程序指令。

(3) 辅助功能模块。该模块的作用主要是判断和

处理辅助功能 M 代码及 F、S、T 指令。其程序设计特点与运动模块相似,使用了情况语句。

(4) 输出模块。系统提供多种输出方式。可在显示屏上显示零件程序,打印程序清单,输出穿孔纸带,也可存入磁盘。

由于采用了模块式程序结构,每个模块的功能一目了然。运动及辅助功能模块中,处理各种指令的语句也很明确。因此,如有不同之处,易修改,便于生成新的后置处理程序。

第4章 数控伺服系统

数控伺服系统的作用是用控制指令按给定运动速度和运动轨迹进行准确跟踪或准确定位。

伺服系统,按照控制方式的不同,可分为开环系统和闭环系统;根据闭环系统中的位置检测单元所在的位置不同,又可分为半闭环系统和全闭环系统;按照被调量的不同,可分为速度伺服系统和位置伺服系统;按照调节器的类型不同,还可为模拟型伺服系统、数字型伺服系统和模拟、数字混合型伺服系统;按照执行单元的不同,还可为交流伺服系统和直流伺服系统。

分析与综合伺服系统的理论基础是自动控制理论。自动控制理论的最新成就开辟了伺服系统设计的新方法,从而使伺服系统的性能不断提高。

本章首先讨论各种伺服系统的基本原理及结构,然后讨论伺服系统的分析与综合方法。

1 伺服系统的组成

伺服系统由各功能单元组成。其中,包括给定单元、比较单元、调节单元、执行单元、被控对象和检测单元等。它的基本结构见图 6-4-1。

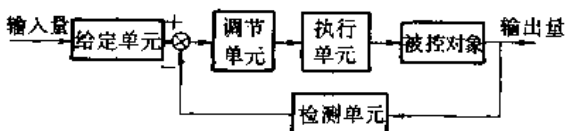


图 6-4-1 伺服系统的基本框图

1. 给定单元 在数控设备中,一般指数控装置供给伺服系统的输入给定值,即进给脉冲。

2. 比较单元 将输入信号与反馈信号进行比较的环节,从比较单元输出的信号叫偏差信号。

3. 调节单元 对速度环和位置环进行调节,使伺服系统具有较好的静态和动态特性。调节单元可以由模拟电路或微型计算机组成。

4. 执行单元 输出足够的功率,对控制对象进行控制。执行单元可以是电动机、液压或气动部件等。

5. 被控对象 一般是指数控设备的工作部件,例如数控机床的工作台。通常执行单元和控制对象之间设置液珠丝杠进行减速。

6. 检测单元 由各种传感器检测出速度和位置量,并反馈到比较单元中。

对数控伺服系统有以下几点要求:

- (1) 要有高的动态和静态精度;
- (2) 要有足够宽的调速范围 (通常要求有 1:10000 的调速范围);
- (3) 要有快的动态响应特性;
- (4) 要有准确定位和负载运行时准确控制轨迹的功能,在低速时不产生爬行;
- (5) 要有强的抗干扰和适应参数变化的能力。

2 开环伺服系统

没有位置反馈的伺服系统,称为开环伺服系统,它的原理框图见图 6-4-2。

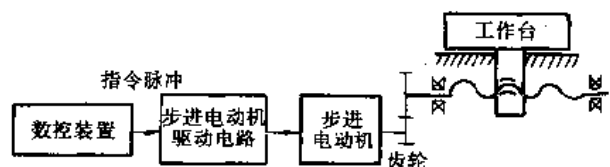


图 6-4-2 开环伺服系统原理框图



开环伺服系统结构简单，调试维护方便，可靠性高，价格低廉。但精度较低，应用在精度要求较低的设备中。

2.1 步进电动机的主要技术数据和技术特性

开环伺服系统通常采用步进电动机驱动。有关步进电动机的工作原理及结构特点，可参阅第2篇第6

章。下面将从控制角度介绍步进电动机的技术数据及技术特性。

步进电动机的主要技术数据，见表6.4-1和表6.4-2。表6.4-1表示国产反应式(BF)和磁阻式(BC)步进电动机的技术数据；表6.4-2表示5相BYG型功率步进电动机的技术数据。

表6.4-1 国产反应式、磁阻式步进电动机技术数据

| 型号 | 相数 | 步距角 (°) | 电压 (V) | 相电流 (A) | 最大静转矩 (N·m) | 最高空载起动频率 (Hz) | 运行频率 (Hz) | 转子转动惯量 ($\times 10^{-5}$ kg·m ²) | 线圈电阻 $\pm 5\%$ (Ω) | 分配方式 | 质量 (kg) | 外形尺寸 (mm) | | |
|------------|----|------------|--------|---------|-------------|---------------|-----------|-----------------------------------------------|-----------------------------|-------|---------|-----------|-----|----|
| | | | | | | | | | | | | 外径 | 长度 | 轴径 |
| 36BF002 I | 3 | 3/6 | 27 | 0.6 | 0.049 | 1900 | | 0.0784 | 6.7 | 3相6拍 | 0.2 | 36 | 42 | 4 |
| 36BF003 | 3 | 1.5/3 | 27 | 1.5 | 0.078 | 3100 | | 0.0784 | 1.6 | 3相6拍 | 0.22 | 36 | 43 | 4 |
| 45BF003 I | 3 | 1.5/3 | 60 | 2 | 0.196 | 3700 | 12000 | 0.147 | 0.94 | 3相6拍 | 0.38 | 45 | 82 | 4 |
| 45BF005 I | 3 | 1.5/3 | 27 | 2.5 | 0.196 | 3000 | | 0.137 | 0.94 | 3相6拍 | 0.4 | 45 | 58 | 4 |
| 45BF005 II | 3 | 1.5/3 | 27 | 2.5 | 0.098 | 2900 | | 0.137 | 0.83 | 3相6拍 | 0.4 | 45 | 56 | 5 |
| 45BF006 | 3 | 1.875/3.75 | 27 | 2.5 | 0.196 | 2500 | | 0.137 | 0.93 | 3相6拍 | 0.4 | 45 | 56 | 4 |
| 45BF008 | 3 | 1.5/3 | 24 | 0.2 | 0.118 | 500 | | 0.137 | 120 | 3相6拍 | 0.4 | 45 | 58 | 4 |
| 45BC340C | 3 | 1.5/3 | 12 | 0.4 | 0.118 | 500 | | 0.137 | 30 | 3相6拍 | 0.4 | 45 | 58 | 4 |
| 55BF001 | 3 | 7.5/15 | 27 | 2.5 | 0.372 | 750 | | 0.647 | 1.43 | 3相6拍 | 0.8 | 55 | 70 | 6 |
| 55BF003 | 3 | 1.5/3 | 27 | 3 | 0.666 | 1800 | | 0.617 | 0.7 | 3相6拍 | 0.83 | 55 | 70 | 6 |
| 55BC340B | 3 | 1.5/3 | 27 | 3 | 0.392 | 2500 | | 0.529 | 0.5 | 3相6拍 | 0.8 | 55 | 60 | 6 |
| 55BF004 | 3 | 1.5/3 | 27 | 3 | 0.49 | 2200 | | 0.529 | 0.54 | 3相6拍 | 0.65 | 55 | 60 | 6 |
| 55BF004 I | 3 | 1.5/3 | 30 | 0.5 | 0.49 | 550 | | 0.529 | 45 | 3相6拍 | 0.8 | 55 | 62 | 6 |
| 55BF005 | 3 | 3.75/7.5 | 30 | 3 | 0.343 | 1300 | | | 1.398 | 3相6拍 | 0.65 | 55 | 70 | 6 |
| 55BF009 | 4 | 0.9/1.8 | 27 | 3 | 0.784 | 2500 | | 0.701 | 1.2 | 4相8拍 | 0.78 | 55 | 70 | 6 |
| 70BF001 | 5 | 1.5/3 | 60 | 3.5 | 0.392 | 4000 | 16000 | | 0.475 | 5相10拍 | 1.6 | 70 | 88 | 6 |
| 70BF003 | 3 | 1.5/3 | 27 | 3 | 0.784 | 1600 | | | 0.44 | 3相6拍 | 1.2 | 70 | 65 | 8 |
| 70BF004 | 4 | 0.9/1.8 | 27 | 3 | 0.784 | 2100 | | | 0.57 | 4相8拍 | 1.1 | 70 | 63 | 8 |
| 70BC340D | 3 | 1.5/3 | 27 | 3 | 0.784 | 1600 | | | 0.44 | 3相6拍 | 1.2 | 70 | 65 | 8 |
| 75BF001 | 3 | 1.5/3 | 24 | 3 | 0.392 | 1750 | | 1.274 | 0.62 | 3相6拍 | 1.1 | 75 | 53 | 6 |
| 75BF003 | 3 | 1.5/3 | 30 | 4 | 0.882 | 1250 | | 1.568 | 0.82 | 3相6拍 | 1.58 | 75 | 75 | 8 |
| 75BF004 | 3 | 1.5/3 | 80 | 5.8 | 0.49 | 2500 | 16000 | 1.284 | 0.134 | 3相6拍 | 1.25 | 75 | 72 | 6 |
| 75BC340D | 3 | 1.5/3 | 24 | 3 | 0.55 | 1500 | | | 0.62 | 3相6拍 | 1 | 75 | 53 | 6 |
| 75BC340E | 3 | 1.5/3 | 30 | 4 | 1.2 | 1100 | | | 0.82 | 3相6拍 | 1.5 | 75 | 75 | 8 |
| 90BF001 | 4 | 0.9/1.8 | 80 | 7 | 3.92 | 2000 | 8000 | 17.64 | 0.3 | 4相8拍 | 4.5 | 90 | 145 | 9 |
| 90BF002 | 5 | 0.75/1.5 | 80 | 7 | 3.92 | 3800 | 16000 | 17.64 | 0.248 | 5相10拍 | 4.5 | 90 | 145 | 9 |
| 90BF003 | 3 | 1.5/3 | 60 | 5 | 1.96 | 1500 | 8000 | | 0.265 | 3相6拍 | 4.2 | 90 | 125 | 9 |
| 90BF004 | 5 | 0.75/1.5 | 60 | 7 | 2.45 | 4000 | 16000 | | | 5相10拍 | 3 | 90 | 118 | 9 |



(续)

| 型号 | 相数 | 步距角 (°) | 电压 (V) | 相电流 (A) | 最大静转矩 (N·m) | 最高空载起动频率 (Hz) | 运行频率 (Hz) | 转子转动惯量 ($\times 10^{-5}$ kg·m ²) | 线圈电阻 $\pm 5\%$ (Ω) | 分配方式 | 质量 (kg) | 外形尺寸 (mm) | | |
|------------|----|-----------|--------|---------|-------------|---------------|-----------|-----------------------------------------------|-----------------------------|-------|---------|-----------|-----|-------------|
| | | | | | | | | | | | | 外径 | 长度 | 轴径 |
| 90BF006 | 5 | 0.36/0.72 | 24 | 3 | 2.156 | 2400 | | | 0.76 | 5相10拍 | 2.2 | 90 | 65 | 9 |
| 110BF003 | 3 | 0.75/1.5 | 80 | 6 | 7.84 | 1500 | 7000 | 46.06 | 0.37 | 3相6拍 | 8.5 | 110 | 160 | 11 |
| 110BF004 | 3 | 0.75/1.5 | 30 | 4 | 4.9 | 500 | | 34.3 | 0.76 | 3相6拍 | 5.5 | 110 | 110 | 11 |
| 110BF003新 | 3 | 0.75/1.5 | 80~300 | 6 | 7.84 | 1400 | 15000 | 50 | 0.47 | 3相6拍 | 8.5 | 110 | 186 | 14 |
| 110BC380B | 3 | 0.75/1.5 | 80~300 | 6 | 9.8 | 1350 | 15000 | 65 | 0.56 | 3相6拍 | 11 | 110 | 206 | 14 |
| 110BC380C | 3 | 0.75/1.5 | 80~300 | 6 | 9.8 | 1350 | 15000 | 65 | 0.56 | 3相6拍 | 11 | 110 | 206 | 14 |
| 130BC3100 | 3 | 0.6/1.2 | 80~300 | 8 | 11.76 | 1450 | 15000 | 102 | 0.37 | 3相6拍 | 10 | 130 | 180 | 22 1:10k |
| 130BC3100A | 3 | 0.6/1.2 | 80~300 | 10 | 19.6 | 1300 | 15000 | 189 | 0.65 | 3相6拍 | 18 | 130 | 240 | 22 1:10k |
| 130BF001 | 5 | 0.75/1.5 | 80/12 | 10 | 9.31 | 3000 | 10600 | 46.06 | 0.163 | 5相10拍 | 9.2 | 130 | 170 | 14 |
| 150BF003 | 5 | 0.75/1.5 | 80/12 | 13 | 15.68 | 2600 | 8000 | 102.9 | 0.127 | 5相10拍 | 16.5 | 150 | 178 | 18 1:10k |
| 200BF001 | 5 | 10'/20' | 2 | 4 | 14.7 | 1300 | | 1293.6 | 0.77 | 5相10拍 | 16 | 200 | 93 | 28 1:10k |

表 6-4-2 国产 BYG 5 相功率步进电动机技术数据

| 型号 | 步距角 (°) | 静转矩 (N·cm) | 最大转矩 (N·cm) | 转子转动惯量 (kg·cm ²) | 每转步数 (步/r) | 最高空载起动频率 (kHz) | 最高运行频率 (kHz) | 最大相电流 (A) | 相电阻 (Ω) | 相电感 (mH) | 外形长度 (mm) | 质量 (kg) |
|-----------|-----------|------------|-------------|------------------------------|------------|----------------|--------------|-----------|------------------|----------|-----------|---------|
| 86BYG017 | 0.72/0.36 | 120 | 110 | 0.7 | 500/1000 | 2.4 | 30 | 1.25 | 2.1 | 7.0 | 135 | 1.5 |
| 86BYG018 | 0.72/0.36 | 220 | 200 | 1.2 | 500/1000 | 1.9 | 30 | 1.15 | 3.5 | 15 | 168 | 2.5 |
| 86BYG019 | 0.72/0.36 | 360 | 300 | 1.8 | 500/1000 | 2.5 | 30 | 2.8 | 1.0 | 4.6 | 201 | 3.5 |
| 110BYG007 | 0.72/0.36 | 680 | 630 | 7.5 | 500/1000 | 1.8 | 30 | 5.0 | 0.3 | 1.9 | 252 | 7.5 |
| 110BYG008 | 0.72/0.36 | 1030 | 945 | 11.5 | 500/1000 | 1.8 | 30 | 5.0 | 0.37 | 3.4 | 300 | 11 |

步进电动机的主要技术特性:

t ——螺距。

1. 步距角 步进电动机的步距角有 0.75°、0.9°、1.5°、1.8°、3°、3.6°、7.5°、15°、30°等。在数控系统中,根据脉冲当量来选用步距角。脉冲当量是由数控系统要求的精度确定的。当已选定脉冲当量和丝杠的导程以后,可用下式计算步距角:

$$\beta = \frac{360^\circ \delta_p}{h_p i} \quad (6-4-1)$$

$$h_p = kt$$

式中 δ_p ——直线脉冲当量 (mm);

h_p ——丝杠导程 (mm);

i ——步进电动机与丝杠的传动比;

k ——螺纹头数;

步进电动机的实际步距角与理论步距角存在一定的偏差,该偏差称为步距偏差。国产步进电动机都有 2 种或 3 种精度等级。“0”级最高;“1”级其次;“2”级最低。

2. 最大静转矩 是步进电动机在通电状态下,使转子离开平衡位置的极限转矩值。它反映了步进电动机承受外加转矩的最大值,见图 6-4-3。

步进电动机的起动转矩与最大静转矩、相数和运行拍数有关,可表示为

$$\text{起动转矩} = \beta \times \text{最大静转矩}$$

式中 β ——步进电动机起动转矩与最大静转矩的比值,见表 6-4-3。



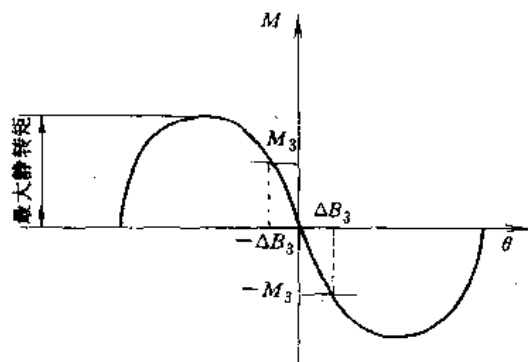


图 6-4-3 矩角特性

表 6-4-3 步进电动机 β 值

| 电动机相数 | 3 | | 4 | | 5 | | 6 | |
|-------|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 运行拍数 | 3 | 6 | 4 | 8 | 5 | 10 | 6 | 12 |
| β | 0.5 | 0.866 | 0.707 | 0.907 | 0.807 | 0.981 | 0.866 | 0.956 |

3. 转矩/工作频率特性(矩频特性) 电动机转动以后, 输出转矩随工作频率的增高而下降, 见图 6-4-4。

矩频特性是正确选择和使用步进电机的重要依据。矩频特性不仅与电动机本身有关, 还与驱动电源的性能有很大的关系。图中, M_L 为负载转矩, f_c 为工作频率。

4. 空载和负载起动频率 当外加负载为零时, 步进电动机从静止突然起动保证转子不失步地进入正常运行的最高脉冲频率, 称为空载起动频率或空载突跳频率。空载起动频率不仅与电动机本身有关, 而且还与

驱动电源有很大关系。空载起动频率是衡量电动机和驱动电源性能的一项重要指标。

负载起动频率与负载转动惯量的大小有关, 一般随负载转动惯量的增加而减小。

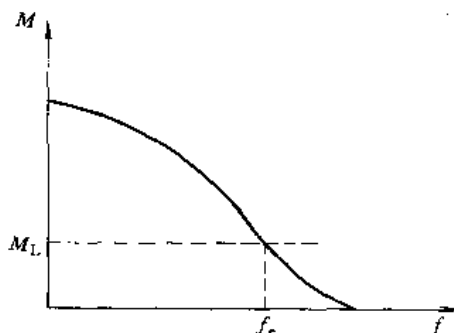


图 6-4-4 矩频特性

5. 空载和负载最大工作频率 当步进电动机不失步起动以后, 将脉冲频率逐步升高, 在额定负载下, 电动机仍能保持正常运行的极限脉冲频率, 称为负载最大工作频率。空载下的极限脉冲频率称为空载最大工作频率。

2.2 步进电动机控制电路

步进电动机控制电路包括环形分配器和驱动电路(功率放大电路)等两部分。

1. 环形分配器 它的作用是把输入脉冲信号按照一定的循环规律依次分配给各绕组。常用的分配原则见表 6-4-4。

表 6-4-4 3 相、4 相步进电动机的脉冲分配原则

| 电机相数 | 分配方式 | 各绕组导电顺序 | 特性 |
|------|---------|-------------------------------------------|--------------------------------|
| | 3 相 3 拍 | A → B → C | 电源提供功率比较小, 转矩比较小 |
| 3 相 | 双 3 拍 | AB → BC → CA | 电源提供功率比较大, 转矩较大, 工作频率较高时尤其明显 |
| | 3 相 6 拍 | A → AB → B → BC → C → CA | 步距角小, 精度高, 电源提供功率介于其他两种之间, 转矩大 |
| 4 相 | 4 相 4 拍 | A → B → C → D | 同 3 相 |
| | 双 4 拍 | AB → BC → CD → DA | 同 3 相 |
| | 4 相 8 拍 | AB → ABC → BC → BCD → CD → CDA → DA → DAB | 同 3 相 |



尽管步进电动机的相数和拍数各不相同，但其环形分配器基本上都是由移位寄存器组成的。环形分配器的设计方法是，首先根据绕组的通电方式写出真值表；由真值表写出函数式；利用布尔代数或卡诺图进行简化，最后得到逻辑电路。采用JK触发器时，还可以用时序电路设计法进行简化。近年来，随着微处理器价格不断下降，可以用微处理器或单片机来实现环形分

配器的功能。

2. 功率驱动电路 对环形分配器输出的微弱电流进行放大，产生步进电动机所需的电流。功率驱动电路的结构对步进电动机的工作性能有十分重要的作用。功率驱动电路型式很多，基本型式及其性能见表6-4-5。它们的相应电路见图6-4-5。

表 6-4-5 步进电动机功率驱动电路型式及特性

| 序号 | 型 式 | 特 性 |
|----|------------|----------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 | 单电压功率驱动电路 | 结构简单，外接电阻消耗能量，效率低，适用于中、小功率步进电动机 |
| 2 | 单电压恒电流驱动电路 | 用恒电流源代替外接电阻，降低功耗，提高了效率 |
| 3 | 高低电压功率驱动电路 | 起动时采用高电压，正常运行时转向低电压。各绕组接通时，电流上升快，高频时有较大的转矩，适用于中、大功率步进电动机。缺点是高低电压转换时，电流不够平滑，影响电动机运行的平稳性 |
| 4 | 脉宽调制驱动电路 | 能克服高、低电压驱动电路的缺点，功耗低，有较高的效率和较大的转矩 |
| 5 | 细分驱动电路 | 通过控制绕组中电流的数值来调整步进电动机步距角的大小，控制精度高 |

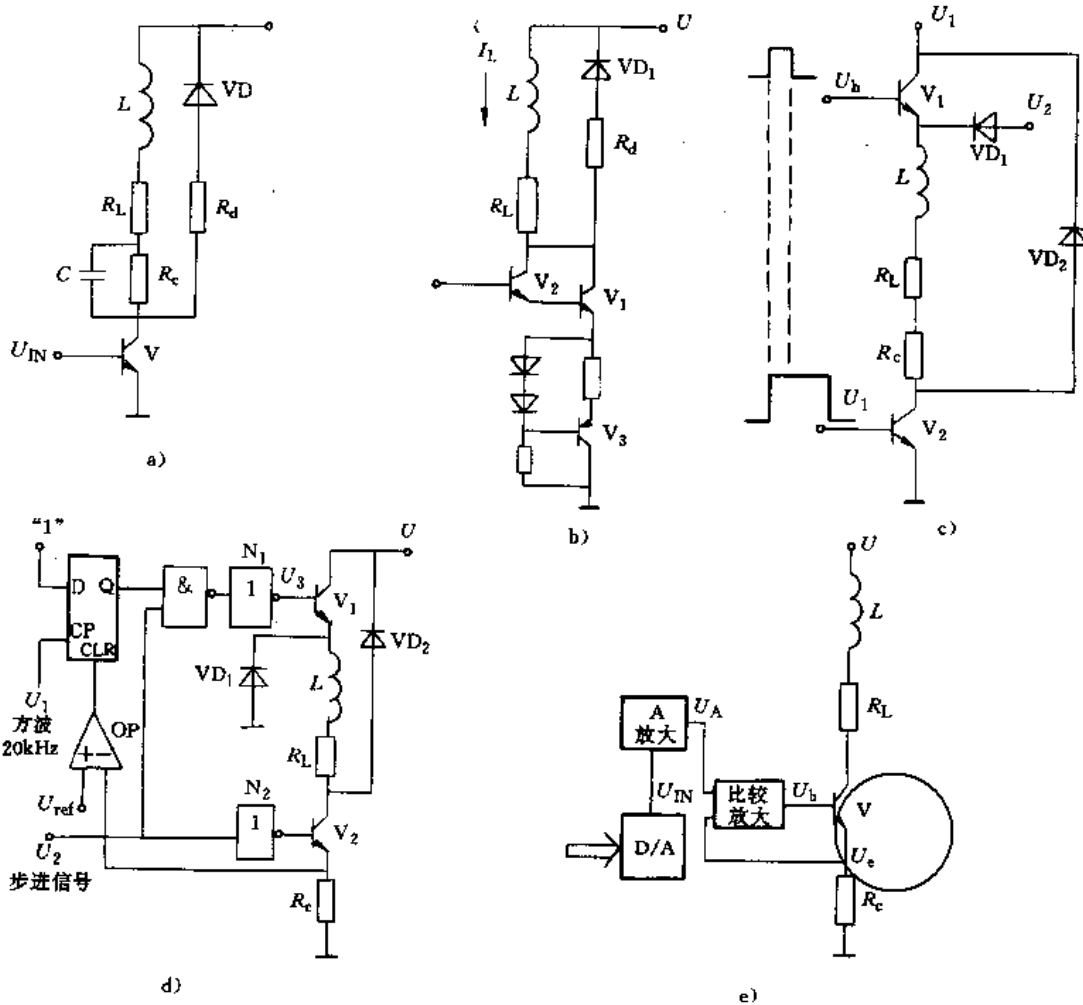


图 6-4-5 功率驱动电路原理图

a) 单电压驱动电路 b) 单电压恒电流驱动电路 c) 高低电压功率驱动电路 d) 脉宽调制驱动电路 e) 细分驱动电路



2.3 用单片机控制步进电动机

单片机是性能极好的控制处理器，它比步进电动机的传统控制部件，无论从功能、灵活性、可靠性等方面都要好得多。

步进电动机用单片机控制的主要技术关键是硬件接口和软件。

1. 硬件接口 包括电压隔离接口、电流放大接口、工作方式接口和工作频率发生器等。

电压隔离器：用于把低电压部分的单片机和高电

压部分的步进电动机驱动电路隔离开来。典型的电压隔离接口可以用脉冲变压器或光耦合器件。光耦合器件具有体积小、耐压高、可靠性高等一系列优点。

电流放大器：它是步进电动机功率放大电路的前置放大电路。它的作用是为了把光耦合器的输出信号进行电流放大，以便向功率放大电路提供足够大的驱动电流。

工作方式接口和频率发生器：用单片机控制步进电动机，需要在输入输出接口上用3条I/O线对步进电动机进行控制，见图6.4-6。

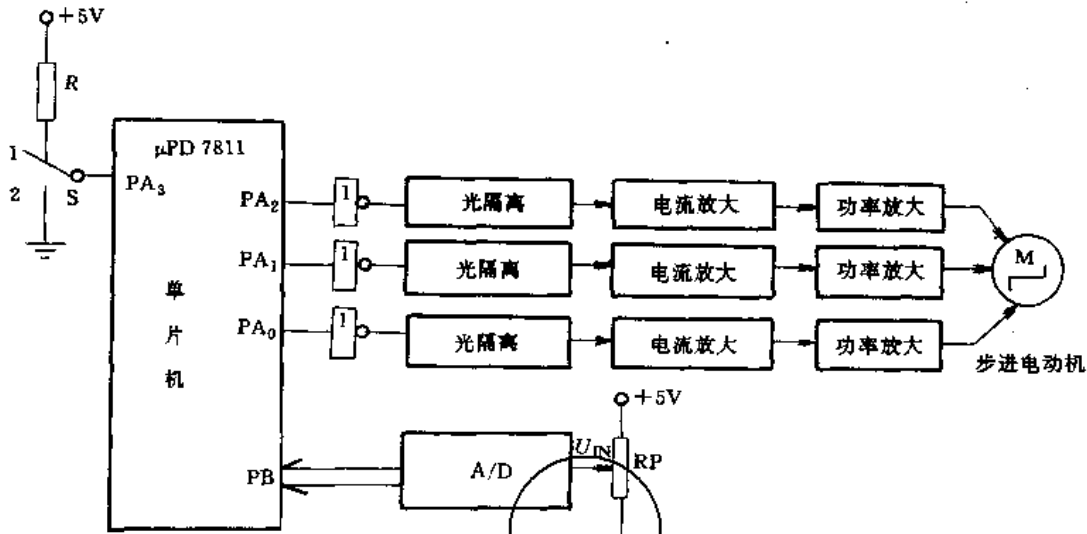


图 6.4-6 单片机控制步进电机框图

在图 6.4-6 中，单片机 I/O 口的 PA₁、PA₂、PA₃ 控制步进电动机的 A、B、C 相。当 PA₁ 输出高电位时，A 相绕组通电；输出低电位时，A 相绕组断电。其余两相类同。

由单片机控制步进电动机时，可以方便地改变步进电动机的工作频率。在图 6.4-6 中，单片机的 PB 口和一个 A/D 转换器相连。调节 A/D 转换器所连接的电位器 RP，就可改变 A/D 转换器的输入电压 U_{IN}。将 U_{IN} 变换成相应的数字量，并通过 PB 口送入单片机中。单片机将输入数字作为定时器的定时数据或作为延时子程序的延时数据，就可获得不同的工作频率。

2. 软件接口 单片机控制步进电动机时，除了要有恰当的硬件电路以外，还需要有相应的控制软件。对 3 相步进电动机来说，通常有 3 相 3 拍和 3 相 6 拍控制软件。从图 6.4-6 中可见，μPD 7811 是用它的 I/O 口 PA₀ 至 PA₂ 3 个输入/输出端口对步进电动机进行控制的。下面介绍 3 相 6 拍工作制的控制软件。

在实现 A→AB→B→BC→C→CA→A 顺序通电时，要在 PA 口中输出信息串是 04H→06H→02H→

03H→01H→05H→04H。在执行反转时，则在 PA 口上输出的控制信息串顺序相反，通电的相序也自然相反。

3 相 6 拍控制软件清单如下，可以根据开关 S 的状态控制步进电动机的正反转。

```

START: MVI A, 08H ; PA0~PA2 为输出
; PA3 为输入

MOV MA, A

TEA3: MOV A, PA3 ; PA3 是高电位?
ANI A, 08H
EQU A, 08H
JMP ROL2 ; 否, 则转向 ROL2

ROL1: LXI H, HDAR; 信息串首址送入 HL
ROLP: LDAX H+ ; 取信息码到 A, HL
+1
MOV PA, A ; 信息码送 PA 口
CALL DELY ; 延时
EQU A, 05H ; 是最后的信息?
JMP ROLP ; 否, 则转去 ROLP
JMP TEA3 ; 是, 则转去 TEA3
    
```



```

ROL2: LXI H, EDAR ; 信息串尾址送入 HL
ROLN: LDAX H- ; 取信息码到 A, HL
      -1
      MOV PA, A ; 信息码送 PA 口
      CALL DELY ; 延时
      EQI A, 04H ; 是最先的信息?
      JMP ROLN ; 否, 则转向 ROLN
      JMP TEA3 ; 是, 转去 TEA3
DELY: MVI C, 3FH ; 延时子程序
DELO: NOP
      DCR C
      JMP DELO
      RET
HDAR: DEFB 04H ; 信息码表
      DEFB 06H
      DEFB 02H
      DEFB 03H
      DEFB 01H
EDAR: DEFB 05H
    
```

在上述程序中, ROL1 是正转程序段, ROL2 是反转程序段。

ROL1 程序段工作时, 把信息串的首址 HDAR 送

给寄存器 HL, 即把信息码 04H 的地址送给 HL。接着取 HL 的内容为地址的信息码, 经累加器后送到 PA 口, 同时 HL 的内容加 1, 即为下一个信息码地址。这样可获得正向运行的信息串。

ROL2 程序段工作时, 从地址 EDAR 开始往 HDAR 地址方向取信息码表中的信息, 这样可获得反向运行的信息串。

2.4 开环系统的反馈补偿方法

开环系统的反馈补偿原理框图见图 6-4-7。

在图 6-4-7 中, 反馈回路并不是伺服系统的位置反馈, 只是一个自动检测补偿误差的回路。当系统没有误差时, 反馈回路没有信号产生, 与一般开环系统一样。当系统有误差时, 给出补偿脉冲, 并与指令脉冲相加, 实现误差的补偿。补偿脉冲包括步进电动机的步距误差、机械系统的误差(丝杠螺距、间隙误差)等。这种系统中, 伺服回路和补偿回路的脉冲当量可以分别选定。

这种系统的稳定性相当于开环系统的稳定性, 而其精度接近闭环系统的精度, 是一种性能好、易调整的系统。

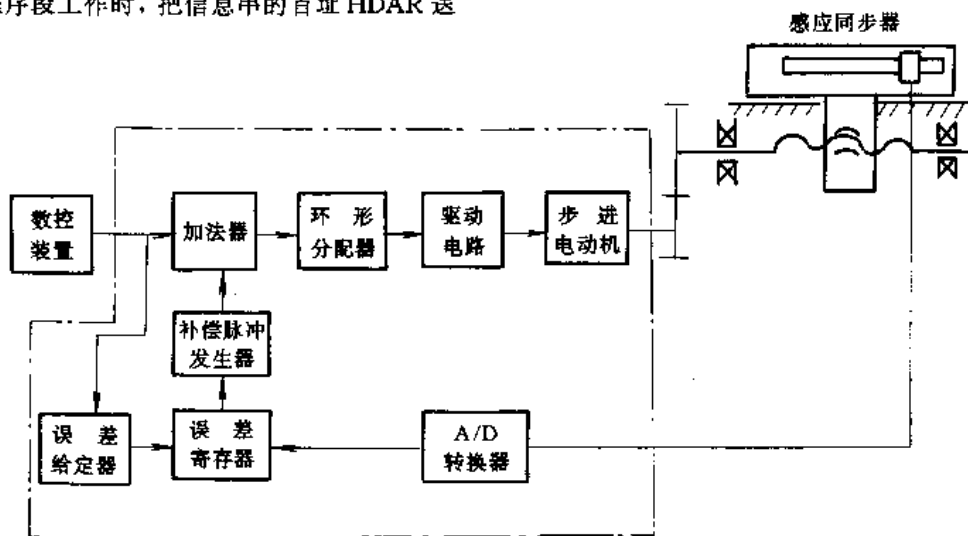


图 6-4-7 开环系统反馈补偿框图

3 闭环伺服系统

闭环伺服系统的原理框图见图 6-4-8。

数控伺服系统多数是位置伺服系统, 因此, 闭环系统一般有速度环和位置环。其中, 速度环内还有电流环。位置环的反馈装置应直接安装在数控设备的工作台上。给定指令信号为要求工作台移动的位置信号, 而

位置反馈装置能测出工作台实际位移的反馈信号。两者进行比较后, 作为伺服驱动系统的输入信号。为了获得较高的动态和静态性能, 速度环控制是十分必要的。

在闭环系统中, 机械传动系统的误差、间隙等都可以得到适当补偿。这种系统具有较高的精度, 但成本较高, 调试、维护比较困难。

如果位置反馈不包含设备本身, 而将反馈装置安

此是公刊制作请尊重作者版权



装在伺服电动机的输出轴上,这就成为半闭环系统,见图6-4-9。

半闭环伺服系统的精度及其技术难度都介于开环系统和闭环系统之间。

闭环位置伺服系统可以看成是在交、直流调速系统外面再加上一个位置环,组成了交、直流闭环位置伺服驱动系统。有关这方面详细内容可参见第7篇,本篇仅作简要地介绍。

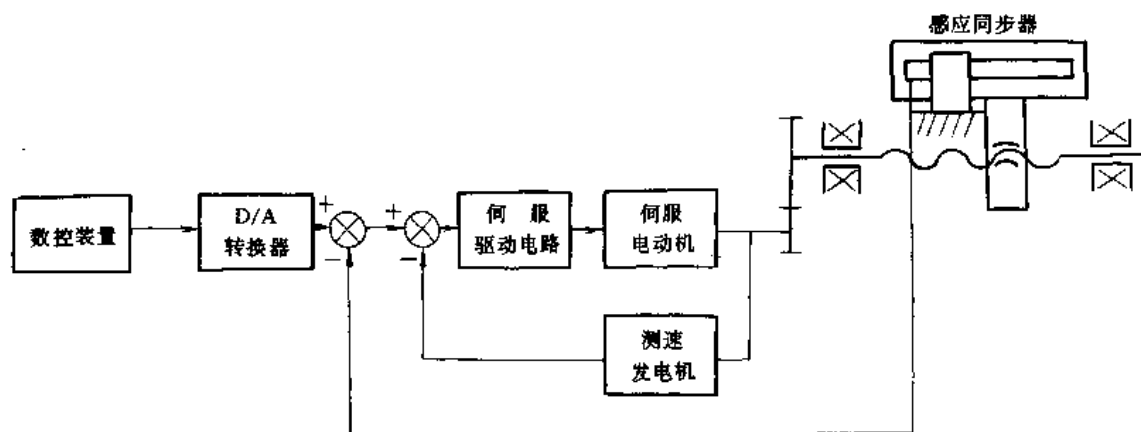


图6-4-8 闭环伺服系统原理框图

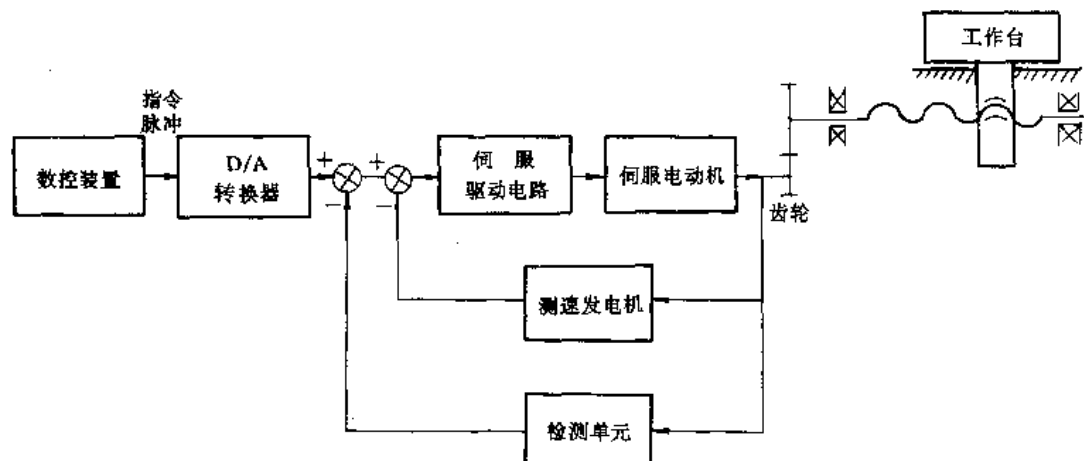


图6-4-9 半闭环伺服系统框图

3.1 直流位置伺服驱动系统

统可分为可控整流和脉宽调制两种类型。详细分类及特性,见表6-4-6。

按照改变电压的方法不同,直流位置伺服驱动系

表6-4-6 直流位置伺服驱动系统的分类及特性

| 类 | 别 | 特 性 |
|----------------|---------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| 可控整流直流位置伺服驱动系统 | 不可控环流系统 | 系统结构简单,在反转时电流反向可以平滑过渡,没有断流的间隙时间,缺点是需要有限制环流的电抗器,并会增加变压器的容量和系统的能耗 |
| | 可控环流系统 | 这种系统充分利用了环流的有利一面,避开了电流断续区,使系统在正反向过渡过程中没有死区,提高了快速性;同时又克服了环流的不利一面,减少了环流的损耗,获得了广泛的应用 |
| | 逻辑无环流系统 | 可省去环流电抗器,没有附加环流损耗,没有附加设备容量,与有环流系统相比,降低了故障率;缺点是有电流换向死区,影响过渡过程快速性 |



(续)

| 类 别 | 特 性 |
|----------------|----------------------------------------------------------------------------------------|
| 可控整流直流位置伺服驱动系统 | 错位无环流系统 不设置复杂的逻辑控制器。在错位无环流系统中,设有电压内环,可缩小电压死区,提高切换快速性,抑制动态环流,保证电流安全换向,抑制电流断续引起的不稳定现象 |
| 脉宽调制直流位置伺服驱动系统 | 双极型脉宽调制系统 优点:电流一定连续;电动机能在4个象限中运行,低速平稳性好 缺点:开关损耗大,可靠性较差 |
| | 单极型脉宽调制系统 电力半导体器件中,总有一个常导通,一个常截止(阻断),运行中无须频繁交替导通,比双极型系统开关损耗少,可靠性有所提高 |

3-1-1 可控整流器直流位置伺服驱动系统

由表 6-4-6 可知,可控整流器直流位置伺服电动机驱动系统,按照可控整流器的工作原理可分为有环流控制系统和无环流控制系统两类。其中有环流控制系统又可分为不可控环流系统和可控环流系统两种,无环流控制系统又可分为逻辑无环流系统和错位无环流系统两种。下面以最常见不可控环流直流位置驱动系统为例,对它的工作原理作简要的探讨,该系统的原理框图见图 6-4-10。

不可控环流系统工作时,正反向两组晶闸管同时加上触发脉冲。一组工作在整流状态;另一组处在待逆变状态。当选取触发延迟角 α 与触发超前角 β 相等时,

整流电压 u_{di} 与逆变电压 u_{di} 大小相等、方向相顶。按照 $\alpha = \beta$ 的条件来控制两组晶闸管,就可以消除直流平均环流。然而,晶闸管装置输出的电压是脉动的,正向组整流电压 u_{di} 和反向组逆变电压 u_{di} 的瞬时环流并不相等,从而产生一个不通过负载的交流瞬时环流,所以必须串接环流电抗器来限制环流。在实际工作中,难免会受到干扰而发生 $\alpha < \beta$, 此时将会产生直流平均环流。因此,消除直流平均环流的条件应该是 $\alpha \geq \beta$ 。

$\alpha = \beta$ 工作制时,逆变过程可表示为当一组晶闸管处于整流状态时,另一组便处于待逆变状态,此时没有电能回馈电网。当制动时,并在改变控制时,同时降低 u_{di} 和 u_{di} , 当电机的反电动势 $E > |u_{di}| = |u_{di}|$ 时,整流组电流被阻断,逆变组投入逆变状态,使电动机产生

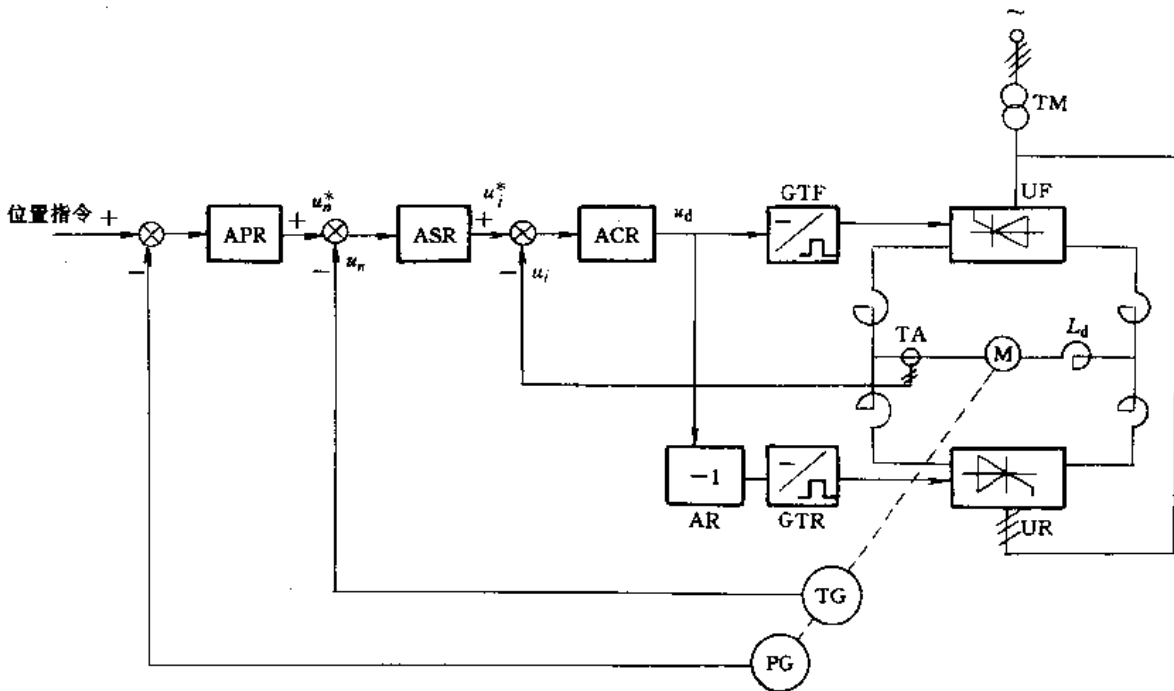


图 6-4-10 不可控环流直流位置伺服驱动系统原理框图

APR—位置调节器 ASR—速度调节器 ACR—电流调节器 GTF、GTR—正、反向组触发装置
AR—反相器 PG—位置检测单元 TG—速度检测单元

此星公司制作 请尊重版权



回馈能量至电网的再生制动。当逆变组回馈电能时，另一组处在待整流状态。当 $\alpha=\beta$ 工作时，负载电流能按正反两个方向平滑过渡，任何时候，只有一组晶闸管在工作，另一组则处于等待工作状态。

在图6-4-10中，有两条并联的环流通路，所以要用4个环流电抗器。由于环流电抗器流过较大的负载电流就要饱和，因此在电枢回路中还要另设一个体积较大的平波电抗器 L_d 。控制线路采用典型的转速、电流和位置3闭环系统。电流反馈信号，取自正反向两组

晶闸管输出电路中的直流电流互感器TA。电流调节器ACR的输出分别控制正反向两组晶闸管的触发。速度调节器ASR和电流调节器ACR都设置了双向输出限幅，以限制最大动态电流和最小触发延迟角 α_{min} 和最小触发超前角 β_{min} 。

3.1.2 可控整流器直流位置伺服驱动系统的动态结构图

见图6-4-11

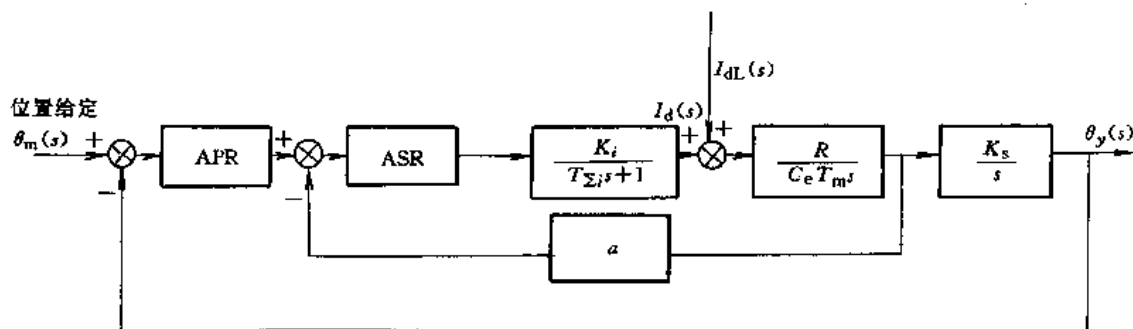


图6-4-11 可控整流器直流位置伺服驱动系统动态结构图

APR—位置调节器 ASR—速度调节器 T_{Σ} —电流环等效时间常数 T_m —机电时间常数 C_e —电动势常数
 R —电枢回路电阻 K_s —减速器放大系数 K_i —电流环的放大倍数 a —反馈系数

3.1.3 脉宽调制直流位置伺服驱动系统

采用由开关频率较高的GTO、GTR、IGBT等电力电子器件组成的直流脉冲宽度调制(PWM)型直流位置伺服驱动系统有很多优点，开关频率高，导通损耗小，装置效率高；主电路简单，功率器件少；调速范围宽，低速性能好，抗干扰能力强。目前，直流PWM伺服驱动系统，还只限于中、小功率的系统。随着器件的发展，它的应用领域将随着扩大。

直流脉宽调制器有不可逆与可逆两类。可逆直流脉宽调制器又有双极式、单极式等多种型式。国内已生产的可逆与不可逆直流脉宽调制器技术参数见表6-4-7。

下面以双极式可逆直流脉宽调制器为例说明工作原理，然后再简要地说明其他方式的特点。

双极式可逆直流脉宽调制器的电路原理图见图6-4-12。

4个晶体管的基极驱动电压分为两组： $U_{b1}=U_{b4}$ ； $U_{b2}=U_{b3}=-U_{b1}$ 。当 $U_{b1}=U_{b4}$ 为正时，晶体管 V_1 和 V_4 饱和导通；因为 $U_{b2}=U_{b3}$ 为负， V_2 和 V_3 截止，A、B两端施加正电压。反之，当 $U_{b2}=U_{b3}$ 为正时， V_2 和 V_3 饱和导通， V_1 和 V_4 截止，A、B两端施加负电压。

表6-4-7 直流脉宽调制器技术参数

| 型式 | 名称 | 规格 |
|------------|---------|---------------------|
| 不可逆直流脉宽调制器 | 直流额定电压 | 180或220V |
| | 直流额定电流 | 10, 30, 60A |
| | 静差度 | $\leq +0.4\%$ (最高速) |
| | 调速范围 | 1:500 |
| | 适用电动机功率 | 1至10kW |
| 可逆直流脉宽调制器 | 直流额定电压 | 180或220V |
| | 直流额定电流 | 10, 30, 60A |
| | 静差度 | $\pm 0.2\%$ (最高速) |
| | 调速范围 | 1:20000 |
| 配用力矩电动机 | | 1000r/min, 5~10N·m |

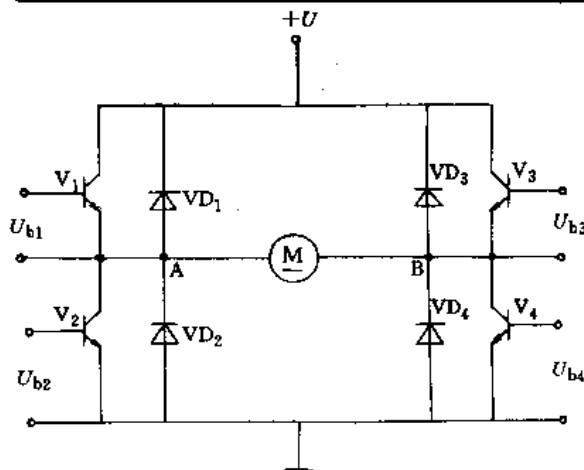


图6-4-12 双极式可逆直流脉宽调制器原理框图



如果, $U_{b1}=U_{b2}$ 为正的时间 t_1 大于 $T/2$ (T 为开关周期) 时, 则 A、B 两端的平均电压为正, 电动机正转; 当 $t_1 < T/2$ 时, 平均电压为负, 电动机反转。图中, $VD_1 \sim VD_4$ 是续流二极管, 在电枢电感释放储能时, 起续流作用。

双极式直流脉宽调制器的优点是: 电流一定连续, 电动机能在 4 个象限中运行, 低速平稳性好, 调速范围广; 缺点是: 在工作过程中, 4 个晶体管都处在开关状态, 开关损耗大, 容易发生上、下晶体管直通事故。

为了克服双极式直流脉宽调制器的上述缺点, 对

于调速范围和静、动态性能要求低一些的系统, 可采用单极式直流脉宽调制器。它的电路图和双极式一样, 但驱动脉冲信号不同。在单极式直流脉宽调制器中, $U_{b1} = -U_{b2}$; 当电动机正转时, U_{b3} 恒为负, U_{b4} 恒为正; 当电动机反转时, U_{b3} 恒为正, U_{b4} 恒为负。由于单极式调制器的晶体管 V_3 和 V_4 中, 只有一个常导通, 另一个常截止, 运行中不需频繁交替导通。这样, 开关损耗可以减少, 装置可靠性有所提高。

脉宽调制 (PWM) 直流位置伺服系统原理框图见图 6-4-13。

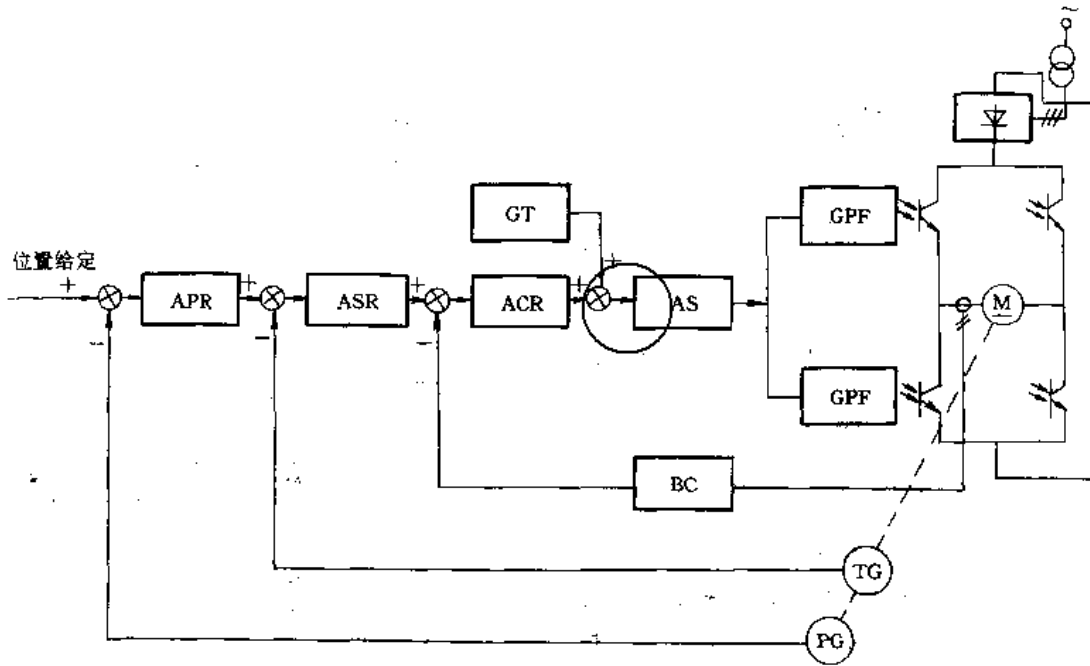


图 6-4-13 PWM 直流位置伺服驱动系统原理框图

GT—三角波发生器 AS—综合器 GPF—正向基极驱动器 GPR—反向基极驱动器 BC—电流变换器

PWM 直流位置伺服驱动系统的动态结构图与可控整流器直流位置伺服驱动系统基本相同, 唯一区别的地方就是脉宽调制器本身的传递函数。根据工作原理, 当控制电压 U_b 改变时, 脉宽调制器的输出电压要到下一个周期才能改变, 因此, 可把脉宽调制器看成一个滞后环节。参考晶闸管装置传递函数, 当整个系统开环频率特性的截止频率满足下式时:

$$\omega_c \leq \frac{1}{3T}$$

可将滞后环节近似看成一阶惯性环节。因此, 脉宽调制器的传递函数为

$$W_{PWM}(s) = \frac{K_{PWM}}{Ts + 1} \quad (6-4-2)$$

$$K_{PWM} = \frac{U_d}{U_b}$$

式中 U_d ——脉宽调制器的输出电压 (V);
 U_b ——脉宽调制器的控制电压 (V)。

3.2 交流位置伺服驱动系统

交流位置伺服驱动系统种类很多, 但最主要是基于变频调速的交流位置伺服驱动系统。下面首先介绍变频调速的基本原理和各种变频装置及其特性, 然后讨论各种交流位置伺服驱动系统及其特性。

3.2.1 变频调速的基本原理及变频装置

在电动机调速时, 通常希望保持每极磁通量 Φ_m 为额定值不变, 即电动机输出转矩不变。

三相交流电动机定子每相电动势的有效值为

$$E_g = 4.44 f_1 N_1 k_{w1} \Phi_m \quad (6-4-3)$$



式中 N_1 ——每相绕组串联匝数；

k_{w1} ——基波绕组系数。

由式(6-4-3)可知,要保持 Φ_m 不变,当频率 f_1 从额定值 f_{1N} 向下调节时,必须同时降低 E_g 值,使

$$\frac{E_g}{f_1} = \text{常值}$$

因为 $U_1 \approx E_g$,得

$$\frac{U_1}{f_1} = \text{常值}$$

上式就是恒压频比的控制方式。

在基频以上调速时,频率可以从 f_{1N} 往上增高,但电压 U_1 不能超过额定电压 U_{1N} ,只能保持 $U_1 = U_{1N}$ 。因

此,迫使磁通与频率成反比降低,相当于直流电动机弱磁升速的状态。

基频以下,属于恒转矩调速;基频以上,属于恒功率调速。

因为电网的交流电源都是恒压恒频的,为了获得变压变频电源,必须采用变频装置或变压变频(VVVF)装置。

按照结构的不同,变频装置可分间接变频装置、直接变频装置、电压源与电流源变频装置和正弦波脉宽调制变频装置等。各种变频装置的结构形式及主要特点,见表6-4-8。

图6-4-14 表示间接变频装置的结构形式。

表 6-4-8 变频装置的结构形式及特点

| 类 型 | 结 构 形 式 | 主 要 特 点 |
|-------------------|-------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 间接变频装置(交-直-交变频装置) | 1. 用可控整流变压,用逆变器变频,见图6-4-14a | 结构简单,控制方便,但变压、变频分两处控制,需要协调一致 |
| | 2. 用斩波器变压,逆变器变频,见图6-4-14b | 输入功率因数高,输出谐波较大 |
| | 3. 用逆变器变压及变频,即PWM逆变,见图6-4-14c | 变压、变频都在PWM逆变器中实现,不需要两处控制及协调,输入功率因数高,谐波小。采用正弦波脉宽调制(SPWM)逆变器时,输出波形接近正弦波,是当前最有发展前途的一种形式,下一小节将作进一步介绍 |
| 直接变频装置(交-交变频装置) | 将恒压恒频的交流电源直接转换成变压变频电源 | 一次换能,效率高。电网功率因数低,元器件数量较多。适用于较大容量的传动系统 |
| 电压源变频装置 | 在交-直-交变频装置中,当中间环节采用大电容滤波时,直流电压波形比较平直,相当于恒压源,称为电压源变频装置 | 输出阻抗小,对晶闸管耐压要求低。线路结构比较复杂,动态响应较慢,过电流及短路保护比较困难 |
| 电流源变频装置 | 在交-直-交变频装置中,当中间环节采用大电感滤波时,电流波形比较平坦,相当于恒流源,称为电流源变频装置 | 线路结构比较简单,动态响应较快,过电流及短路保护比较容易,输出阻抗大 |

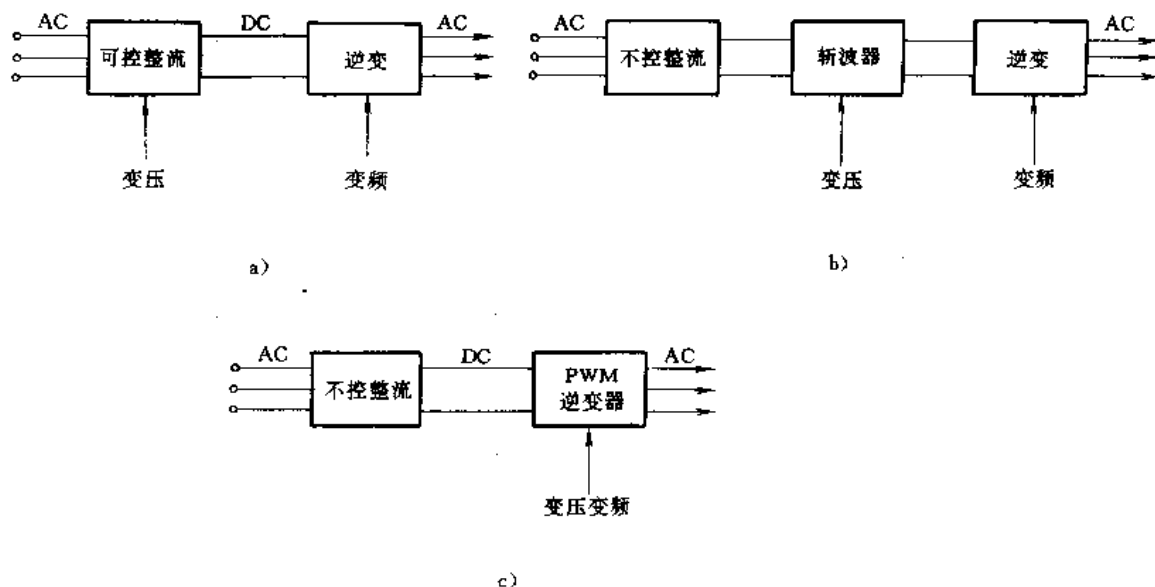


图 6-4-14 间接变频装置的结构形式

此是公可制作请尊重作版权



3.2.2 正弦波脉宽调制变频装置

脉宽调制 (PWM) 变频装置的主要优点有: 使用不可控整流器, 功率因数高; 逆变器在变频的同时实现变压, 加快了系统的动态响应; 输出电压波形好, 接近正弦波, 提高了系统性能。

PWM 逆变器靠改变脉冲宽度来控制其输出电压, 通过改变调制周期来控制输出频率。

脉宽调制的方法很多, 按调制脉冲的极性分, 有单极性调制和双极性调制两种; 按载频信号和参考信号频率之间的关系分, 有同步式和非同步式两种。下面对最常用的双极性正弦波脉宽调制 (SPWM) 方法做简单的介绍。

双极性正弦波脉宽调制波形见图 6.4-15。

双极性正弦波脉宽调制方式是以载波信号 u_c 与参考信号 u_r 相比较后, 产生逆变器中开关器件的驱动信号。 u_c 为双极性三角波, u_{ra} 、 u_{rb} 、 u_{rc} 为三相正弦波。当 u_r 大于 u_c 时, 开关器件导通。双极性控制时逆变器的同一桥臂上下两个开关器件交替通断, 处于互补的工作方式。

SPWM 的基本特点是各脉冲之间等距, 而脉宽和正弦曲线下的积分面积成正比, 脉宽基本上成正弦分布。SPWM 比一般交-直-交变频装置的波形更接近正弦波, 谐波分量大为减少。输出电压的大小和频率均由参考电压 u_r 控制。当改变 u_r 的幅值时, 即改变了输出电压的大小; 改变 u_r 的频率时, 即改变了输出电压的

频率。

当三角波和正弦波的频率成比例改变时, 此时 SPWM 称为同步调制式 SPWM; 当三角波频率固定时, 此时 SPWM 称为非同步调制式 SPWM。

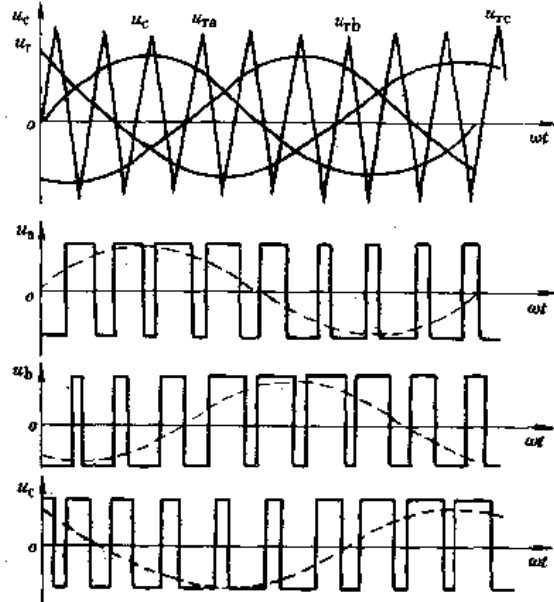


图 6.4-15 双极性正弦波脉宽调制波形

3.2.3 交流位置伺服驱动系统的基本类型

1. 转速开环恒压频比的交流位置伺服驱动系统

这种形式驱动系统, 结构简单, 成本低, 适用于静、动态特性要求不高的系统。它的基本结构见图 6.4-16。

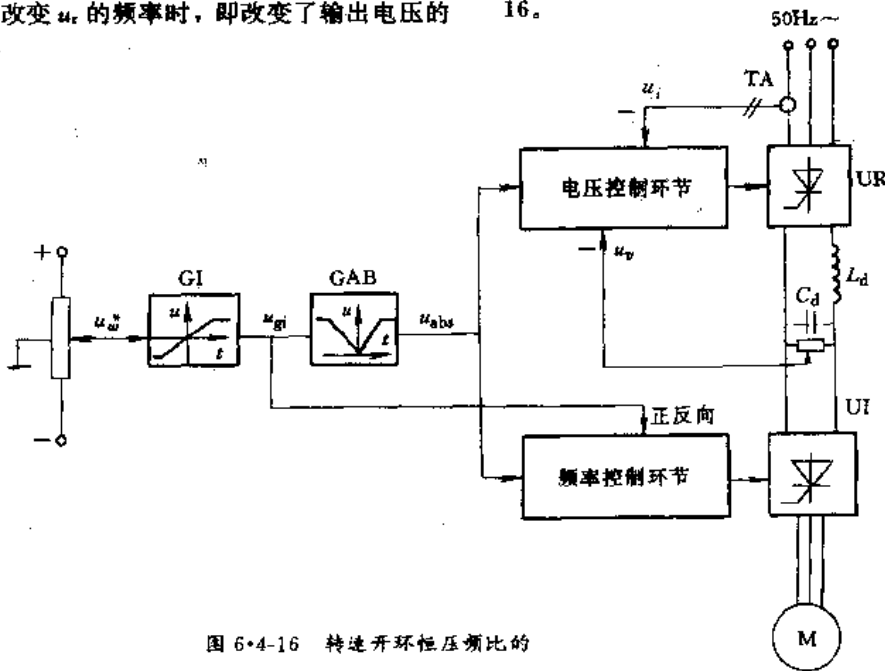


图 6.4-16 转速开环恒压频比的交流位置伺服驱动系统

GI—积分器 GAB—绝对值变换器



这种系统,由电压控制环节控制输出电压;由频率控制环节控制输出频率。电压和频率控制采用同一控制信号 u_{ab} , 以保证两者的协调。电动机的旋转方向取决于变频电压的相序。

2. 转速闭环转差频率控制的交流位置伺服驱动系统 采用转差频率控制,可以显著地提高系统的静、动态性能。它的基本结构框图见图 6·4-17。

在图 6·4-17 中,转差频率 $\omega_s = s\omega_1$ (其中 ω_1 为定子频率, s 为转差率) 的控制作用分为两部分。第一,

通过 $I_1 = f(\omega_s)$ 函数发生器 GF, 按转差频率给定值 $u_{\omega s}$ 的大小产生相应的 $u_{\omega 1}$ 信号, 再通过电流调节器 ACR, 供给参考信号发生器, 用来改变参考信号的幅值, 从而控制定子电流, 以保持 Φ_m 为恒值。第二, 按 $\omega_s + \omega = \omega_1$ 的规律, 产生对应于定子频率 ω_1 的控制电压 $u_{\omega 1}$, 用来给定参考信号的频率, 从而决定逆变器的输出频率。

在图 6·4-17 中, DPI 为极性鉴别器, 用来判断 $u_{\omega 1}$ 的极性, 从而确定参考信号的极性。GAB 为绝对值变

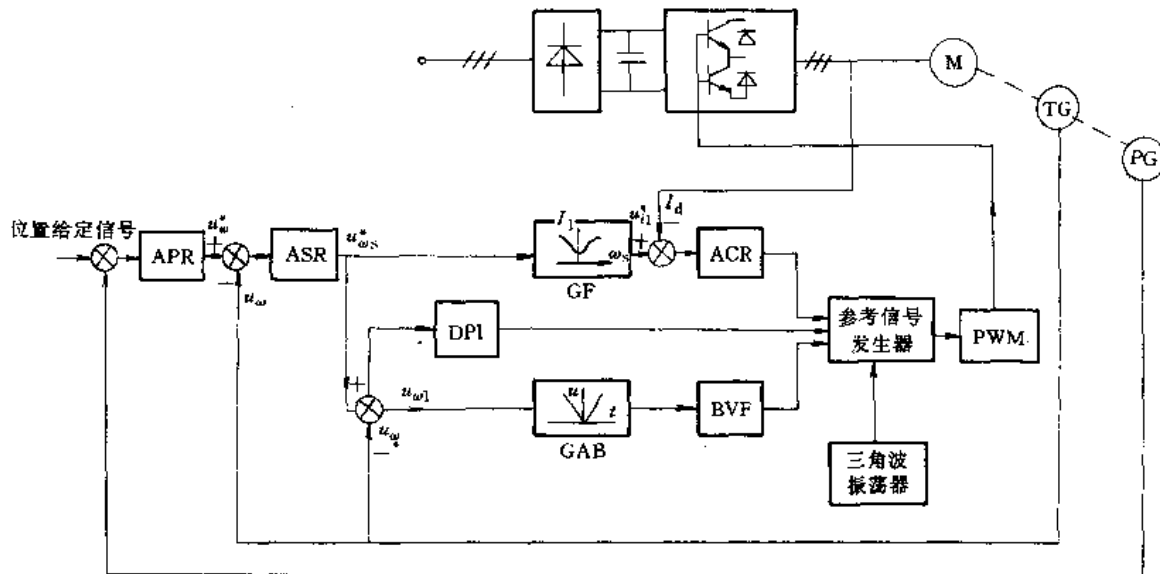


图 6·4-17 转速闭环转差频率控制的交流位置伺服驱动系统

APR—位置调节器 ASR—速度调节器 GF—函数发生器 ACR—电流调节器
DPI—极性鉴别器 GAB—绝对值变换器 BVF—变频变换器

换器, $u_{\omega 1}$ 信号经过 GAB 后, 确定输出频率的高低。

转差频率控制系统的主要特点有:

(1) 频率控制环节的输入是转差信号与转速信号相加后得到的, 即 $u_{\omega 1} = u_{\omega s} + u_{\omega}$ 。可见, 频率控制环节的输入与实际转速 ω 同步上升或下降, 加、减速比较平滑。

(2) 采用控制定子电流的方法来保持磁通 Φ_m 恒定。这种方法只在稳态时才能达到, 在动态过程中 Φ_m 难以保持恒定。

(3) 电流调节器 ACR, 只能控制定子电流幅值, 而不能控制电流的相位。

(4) $I_1 = f(\omega_s)$ 是非线性的, 在函数发生器中, 会存在一定的误差。

转速闭环转差频率控制的交流位置伺服驱动系统的动态结构框图见图 6·4-18。

结构图是在假设 Φ_m 为恒定, 每一个环节都是线性的条件下得出的。

3. 基于矢量控制的交流位置伺服驱动系统 交流电动机的矢量控制是一种新的控制方法, 矢量控制技术模仿直流电动机的控制, 以转子磁场定向, 用矢量变换的方法, 实现了对交流电动机的转速和磁链控制的完全解耦。有关矢量控制的基本原理可参阅第 7 章第 5 章, 这里不再重述。

基于矢量控制的交流位置伺服驱动系统, 如图 6·4-19 所示。它的动态结构框图见图 6·4-20。

上述系统与图 6·4-17 所示的转差频率控制系统相比, 主要优点是将转差频率控制系统中的 $I_1 = f(\omega_s)$ 关系变换成矢量控制器, 成为转差型矢量控制系统。这样, 就可避免转差频率控制系统中存在的缺点, 提高了系统的动态性能。

在上述矢量控制系统中, 磁场定向是由给定信号和矢量控制方程式确定的, 不需要在系统运行中检测转子磁链的实际相位, 因此称为间接磁场定向。这种磁场定向比较简单, 但在动态过程中实际的定子电流幅



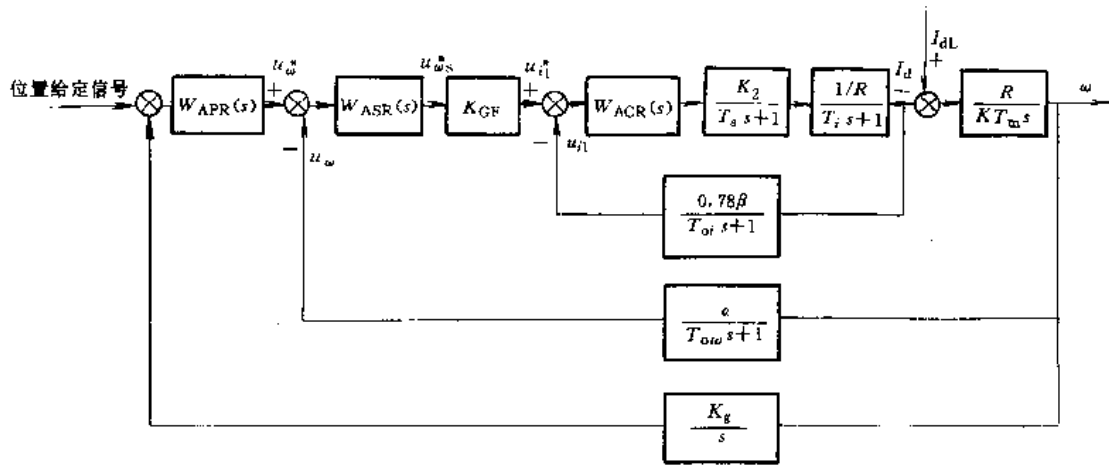


图 6-4-18 转速闭环转差频率控制的交流位置伺服驱动系统的动态结构框图

$W_{APR}(s)$ —位置环调节器的传递函数 $W_{ASR}(s)$ —速度环调节器的传递函数 $W_{ACR}(s)$ —电流环调节器的传递函数 T_{ω} —转速反馈时间常数 T_{oi} —电流反馈滤波时间常数 K_{GF} —函数发生器的传递函数，从 $I_1 = f(\omega_s)$ 函数经线性化后求得 α —转速反馈系数 K_g —位置反馈系数 T_m —机电时间常数 R —电枢回路电阻 β —该电流反馈系数 K_2 —减速器放大系数 T_s —减速器时间常数

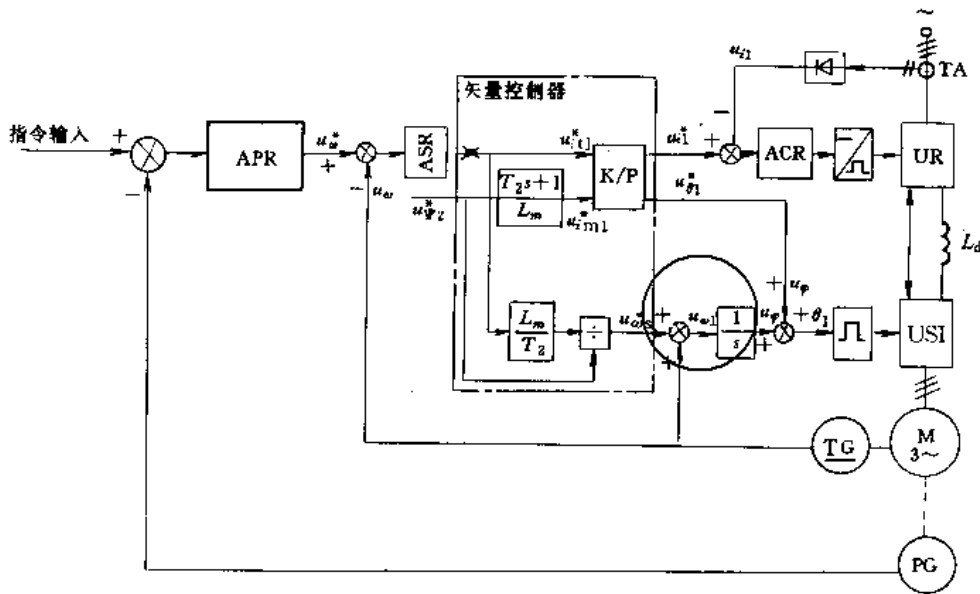


图 6-4-19 基于矢量控制的交流位置伺服驱动系统

K/P—直角坐标/极坐标变换器 $u_{\psi_2}^*$ —转子磁链给定信号 u_{im1}^* —定子电流励磁分量给定信号 u_{i1}^* —定子电流的转矩分量给定信号 $u_{\theta 1}^*$ —定子电流幅值给定信号 $u_{\theta 1}^*$ —定子电流相角给定信号 u_{ω}^* —转差频率信号 $u_{\omega 1}$ —定子频率信号 u_{φ} —转子磁链相位角 φ 的信号 θ_1 —定子电流矢量和转子磁链方向的夹角 $1/s$ —积分符号 UR—整流器 USI—逆变器

值和相位与给定值之间总存在着偏差，这就会造成磁场定向上的误差。

矢量控制系统的速度调节器和电流调节器的设计，严格地说，需要应用多变量、非线性系统理论来进行。现在，在假设条件下，近似地当作一个线性、单变量系统，其动态结构图 6-4-18 与图 6-4-20 所示的转差频率控制系统的动态结构图基本上一致，主要差别

在于传递函数 K_{vc} 和 K_2 。其中 K_{vc} 是电流传递函数，它是一个非线性函数

$$K_{vc} = \frac{u_{i1}^*}{u_{i1}^*} = \frac{I_1}{i_{i1}} = \frac{\sqrt{i_{\theta 1}^2 + i_{im1}^2}}{i_{i1}} = f(i_{i1}) \quad (6-4-4)$$

式中 K_2 —电磁转矩和中间直流环节电流之比。

$$K_2 \approx \frac{T_e}{I_d}$$



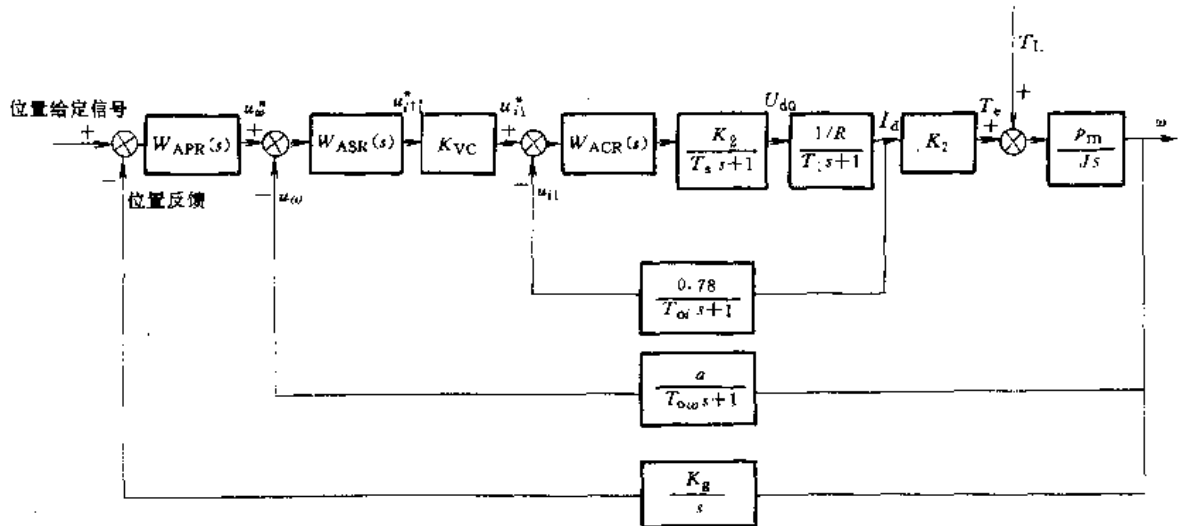


图 6.4-20 基于矢量控制的交流位置伺服系统的动态结构框图

式中 $T_e = p_m \frac{L_m}{L_r} i_{11} \Psi_2$

$I_{11} = 0.78 I_d$

因此
$$K_2 = 0.78 p_m \frac{L_m}{L_r} \Psi_2 \frac{i_{11}}{I_1}$$

$$= 0.78 p_m \frac{L_m}{L_r} \Psi_2 \left(\frac{1}{K_{VC}} \right) \quad (6.4-5)$$

- 式中 p_m ——极对数；
- L_m ——dq 坐标系同轴等效定子与转子绕组间的互感；
- L_r ——dq 坐标系等效两相转子绕组的自感；
- Ψ_2 ——转子磁链。

从式 (6.4-4) 和式 (6.4-5) 可知，图 6.4-20 的转速环中 K_{VC} 与 K_2 表达式的分母中 K_{VC} 互相抵消了，所以 K_{VC} 虽是非线性函数，但不会影响转速环的线性特性。

4 典型位置伺服驱动系统简介

4.1 AC-200 交流位置伺服驱动系统

AC-200 系列交流伺服驱动系统是上海机床研究所 (SMTRI) 引进美国通用电气 (GE) 公司技术生产

的 80 年代新产品，用于 MTC-2M 数控系统中。MTC-2M 数控系统适用于控制铣床，也可控制加工中心。

AC-200 系列交流伺服驱动系统具有高精度、高响应和高开关频率的特性，还具有转矩脉动小、低速运转平滑和噪声低等特点。

AC-200 系列交流伺服驱动系统采用模块式结构，便于维修的插入式结构。

伺服系统的主要控制性能：

- (1) 具有快响应的加减速特性和频率特性 (200~600rad/s)；
- (2) 在进给驱动 1:10000 的调速范围内，有额定的输出转矩；
- (3) 采用了矢量发生器和大规模集成电路，使驱动器有高的可靠性；
- (4) 由于采用高开关频率和 PWM 正弦波控制技术，从最低速到高速都能平稳运转，并且噪声低。
- (5) 伺服模块保护功能完整。

其详细规格见表 6.4-9；驱动电动机规格见表 6.4-10。

AC-200 系列交流伺服驱动系统原理框图见图 6.4-21。其速度和扭矩指令电路见图 6.4-22。

表 6.4-9 AC-200 交流伺服驱动系统的技术数据

| 项 目 | 技 术 数 据 |
|--------|--------------------------------------------------|
| 控制方式 | 矢量控制晶体管正弦波 PWM |
| 反馈信号 | 增量式光电编码器 2048P/R |
| 位置输出信号 | 增量编码器 A, \bar{A} , B, \bar{B} , Z, \bar{Z} |
| 速度控制范围 | 1:10000 |
| 最低转数 | 0.2r/min |



(续)

| 项 目 | | 技 术 数 据 |
|---------|---------------|-----------------------|
| 速 度 变 化 | 负载变化 (0~100%) | ±0.1%以下 (2000r/min 时) |
| | 电源电压变化 (±10%) | ±0.1%以下 (2000r/min 时) |
| | 温度变化 (15±15℃) | ±0.5%以下 (2000r/min 时) |
| 转 矩 限 制 | | 可设定 0~150%的转矩限制 |
| 转 矩 监 测 | | 可连接 DC 1mA 的转矩监测仪表 |

表 6-4-10 驱动电动机规格

| 类 型 | 伺 服 | | | | | | | | | | |
|----------------------------|-----|---------------------|-------|------|------|------|------|------|------|------|--|
| | 型 号 | 19X | 19 | | 30 | | 40 | | 180 | | |
| 额定输出功率 (kW) | | 0.28 | 0.39 | 0.53 | 1.1 | 1.6 | 3.0 | 4.4 | 4.2 | 6.7 | |
| 额定转矩 (N·m) | | 1.3 | 1.8 | 2.6 | 5.3 | 7.6 | 14.3 | 21.0 | 20.0 | 32.0 | |
| 零速转矩 (N·m) | | 1.5 | 2.1 | 3.3 | 6.8 | 10.0 | 21.0 | 30.0 | 28.0 | 42.0 | |
| 最大转矩 (N·m) | | 4.7 | 5.9 | | 19.6 | | 45.0 | | 70.0 | | |
| 转动惯量 (kg·cm ²) | | 0.03 | 0.042 | | 0.21 | | 0.48 | | 1.6 | | |
| 冷 却 方 式 | | | 自冷 | 风冷 | 自冷 | 风冷 | 自冷 | 风冷 | 自冷 | 风冷 | |
| 额定转速 (r/min) | | 2000 | | | | | | | | | |
| 最高转速 (r/min) | | 2000 | | | | | | | | | |
| 安装方式 | | 法兰式 | | | | | | | | | |
| 内 装 件 | | 增量式光电编码器、冷却风扇、温度传感器 | | | | | | | | | |
| 选 择 器 | | 机械式制动器 | | | | | | | | | |
| 质量 (kg) | | 4.5 | 6.1 | 8.0 | 15.0 | 16.5 | 27.0 | 30.0 | 44.0 | 48.0 | |

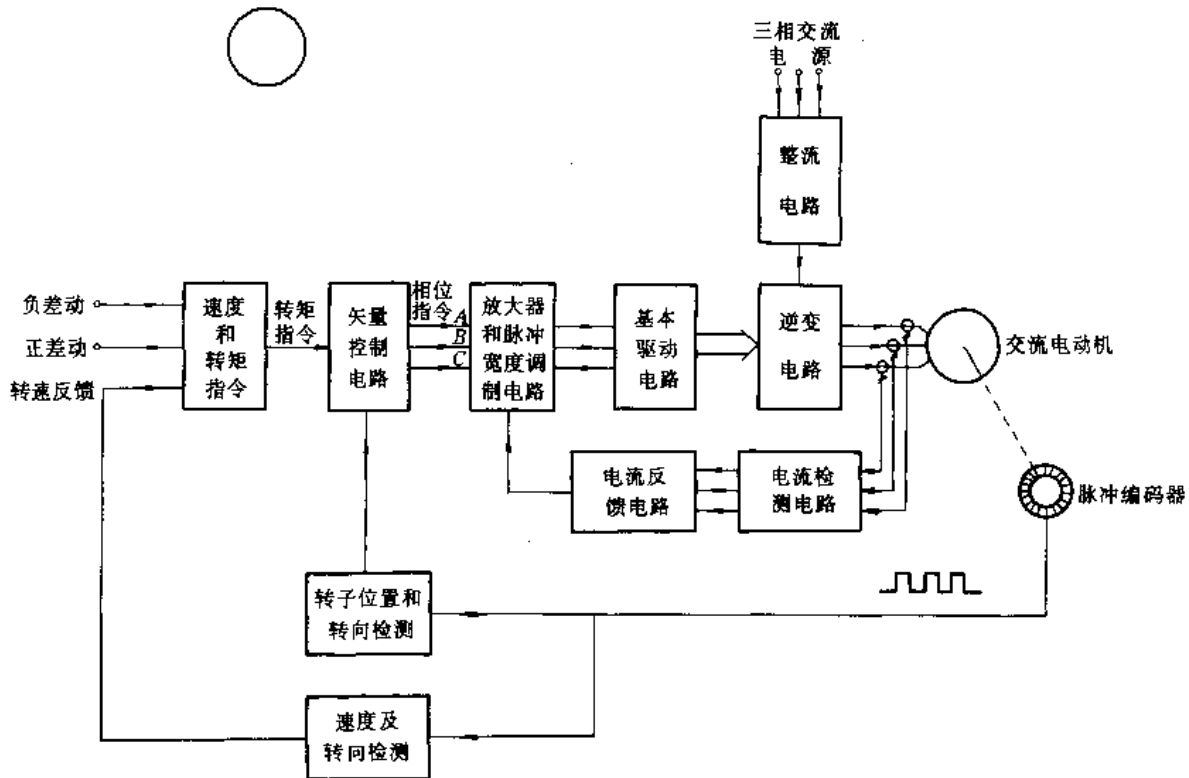


图 6-4-21 AC-200 交流伺服驱动系统原理框图



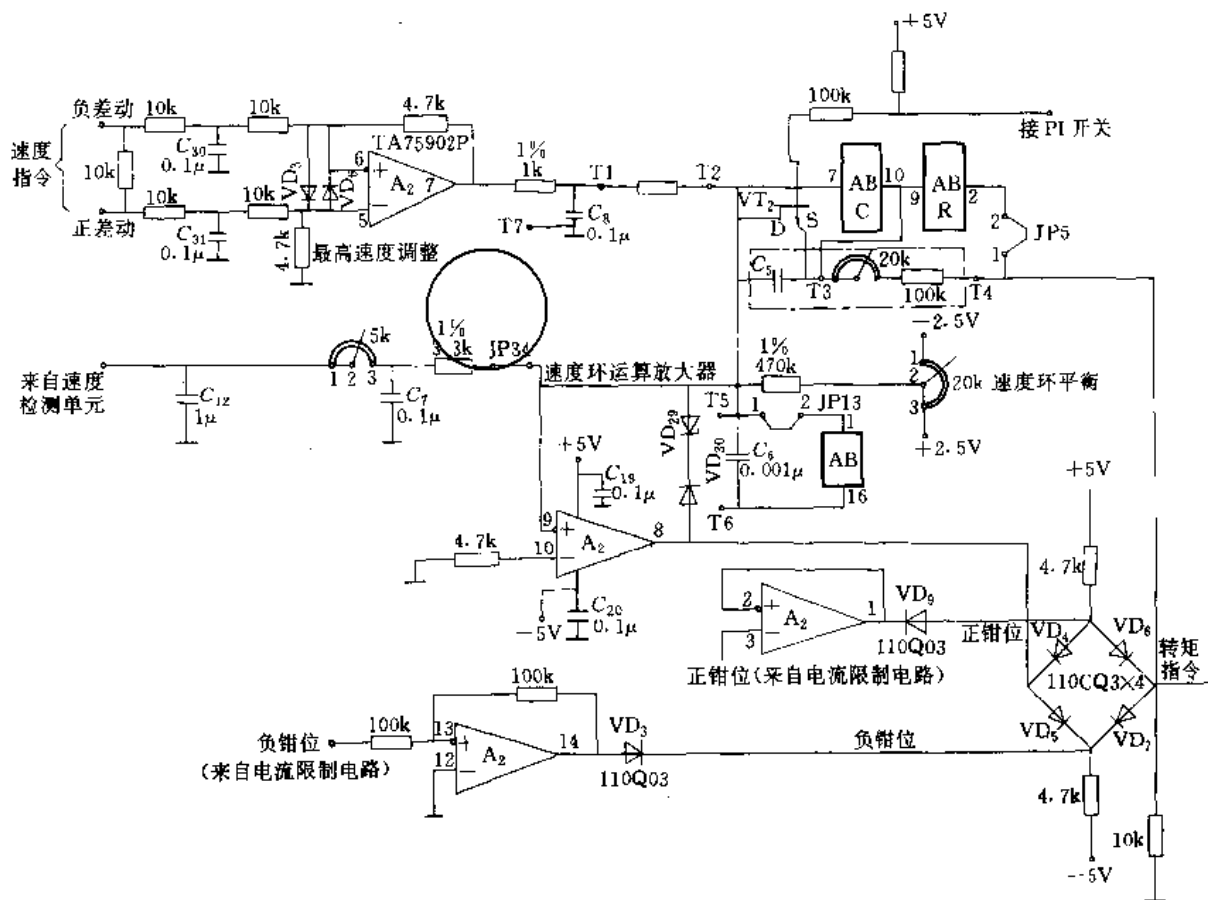


图 6-4-22 速度和转矩指令电路

注：JP13—工厂预调整跨接排，按说明书设定。

JP5—当使用安装在专用模块中的补偿电路时，短接1和2。仅当需要在T2、T3和T4之间安装专用起稳定作用的元件时，去掉1和2之间的跨接排。

4.2 FANUC-BESK 6ME 直流位置伺服驱动系统

FANUC-BESK 6ME 是一种用于控制铣床的、具有高精度、高性能、固定软件的 CNC 系统。它的控制

电路采用高速微处理机、大规模集成电路和半导体器件，从而提高了可靠性，有效地改善了价格/性能比。

FANUC-BESK 6ME 直流伺服驱动系统，采用高性能脉冲编码器、旋转变压器或感应同步器作为位置反馈传感器，构成闭环系统。它的规格，见表 6-4-11。

表 6-4-11 FANUC-BESK 6ME 直流伺服驱动系统规格说明

| 项 目 | 规 格 |
|---------|---------------------------------------------|
| 适用电动机型号 | 15 25 |
| 额定输出电压 | 93V 123V |
| 额定输出电流 | 30A 30A |
| 额定容量 | 5kVA |
| 三相电源输入 | 额定输入电压 3相, 190/230/380/420/460/550, 50/60Hz |
| | 允许电压波动 +10% -15% |
| | 允许频率波动 ±1Hz |
| 主回路方式 | 3相全波晶闸管全桥反并联 |
| 控制方式 | 晶闸管相位控制方式 |
| 电 流 控 制 | 140A |
| 过电流保护 | 热敏继电器 31A 30A |
| | 过电流报警 80A |



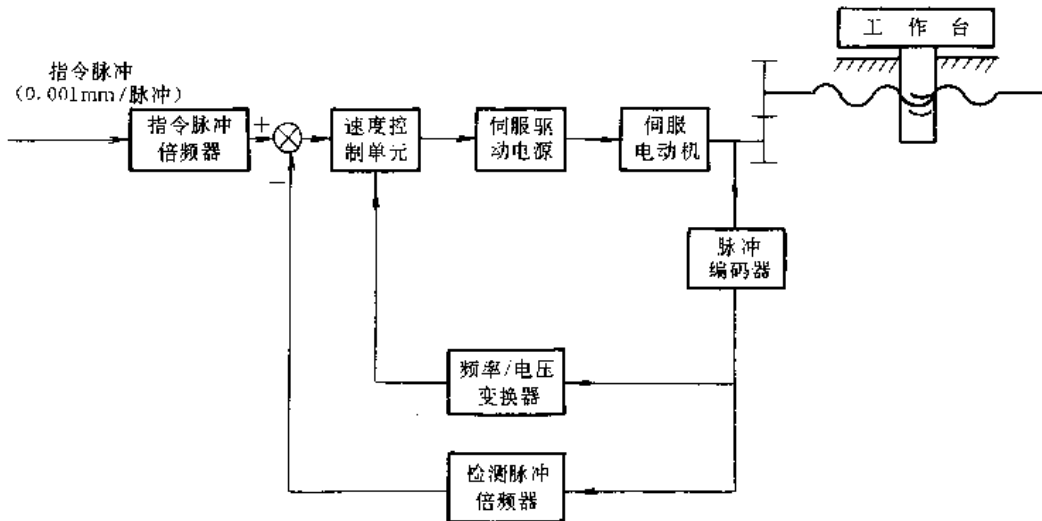


图 6-4-23 FANUC-BESK 6ME 直流伺服驱动系统的原理框图

CMR—指令倍率 DMR—检测倍率 F/V 变换器—频率/电压变换器

FANUC-BESK 6ME 直流伺服驱动系统的原理框图见图 6-4-23。

脉冲当量为

$$\text{脉冲当量} = \frac{L(\text{mm})}{2000 \text{ 脉冲}/r \times \text{DMR}} \quad (6-4-6)$$

式中 L 表示脉冲编码器每转位置移动量，假设为 4mm；设 DMR 取为 2；又设编码器每转的脉冲数为 2000。这样

$$\text{脉冲当量} = \frac{4(\text{mm})}{2000 \text{ 脉冲}/r \times 2} = 0.001\text{mm}$$

伺服系统的主要组成部分：

1. 位置控制单元 包括脉冲编码器、CMR 和 DMR。
2. 速度控制单元 它的电路图见图 6-4-24。其中，速度反馈信号可从测速发电机引出，也可从脉冲编码器经 F/V 变换器获得。

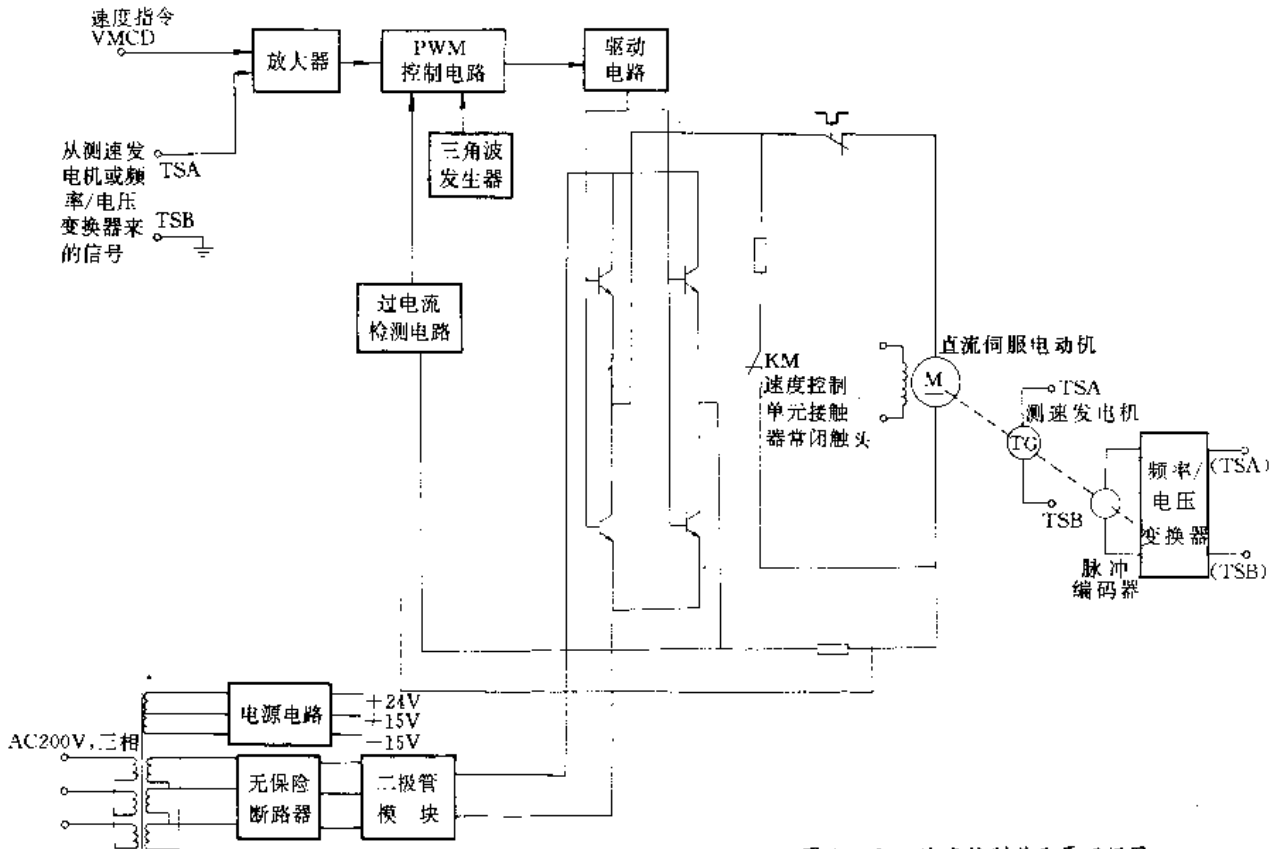


图 6-4-24 速度控制单元原理框图



5 伺服控制系统的设计方法

伺服控制系统的设计可分为静态设计和动态设计两个方面。

5.1 伺服控制系统的静态设计方法

伺服控制系统的静态设计主要是计算稳态精度,并求取系统的放大系数。所谓稳态精度就是指稳态运行时,系统输出量与输入量之间的误差,有时也称为稳态误差。产生稳态误差的原因有:位置测量单元的误差、负载扰动的误差与输入信号及系统结构有关的系统稳态误差等。以下只讨论系统稳态误差。

无论直流伺服系统,还是交流伺服系统或矢量控制交流伺服系统,经过适当的简化,总可以获得系统的开环传递函数 $W(s)$ 。

如果 $W(s)$ 中不包含积分环节,即

$$W(s) = \frac{KN(s)}{D(s)} \quad (6.4-7)$$

这种系统,通常被称为“0”型系统。

如果 $W(s)$ 中包含有 1 个积分环节,即

$$W(s) = \frac{KN(s)}{sD(s)} \quad (6.4-8)$$

被称为 I 型系统。

同样,对 $W(s)$ 中包含有 2 个积分环节的系统,被称为 II 型系统。

根据控制理论,伺服系统的误差传递函数为

$$E(s) = \frac{U(s)}{1+W(s)} \quad (6.4-9)$$

式中 $U(s)$ —— 输入信号的拉氏变换。

按照拉氏变换的终值定理,稳态误差可由下式求得,即

$$e_s = \lim_{s \rightarrow 0} sE(s) \quad (6.4-10)$$

伺服系统是在调速系统的基础上加上一个位置环,故伺服系统的开环传递函数至少有 1 个积分环节,有时有 2 个积分环节。由此可见,分析伺服系统的稳态误差,也就是分析 I 型或 II 型系统的稳态误差。

1. I 型系统的稳态误差 在单位阶跃函数输入下,即 $U(s) = 1/s$

$$e_s = \lim_{s \rightarrow 0} sE(s) = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{1}{s} \frac{1}{1 + \frac{KN(s)}{sD(s)}} = 0 \quad (6.4-11)$$

在斜坡函数输入下,即 $U(s) = 1/s^2$

$$e_s = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{D(s)}{sD(s) + KN(s)} = \frac{1}{K} \quad (6.4-12)$$

在加速度函数输入下,即 $U(s) = 2/s^3$

$$e_s = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{2D(s)}{s[sD(s) + KN(s)]} = \infty \quad (6.4-13)$$

以上讨论表明,对 I 型系统来说,在单位阶跃函数输入下,系统的稳态误差为零;在斜坡函数输入下,系统的稳态误差为 $1/K$;在加速度函数输入下,稳态误差为无穷大,即 I 型系统不能在加速度函数输入下工作。当斜坡函数输入时,根据对系统稳态误差的许可值,可求得系统的静态放大倍数。

2. II 型系统的稳态误差 I 型系统的开环传递函数为

$$W(s) = \frac{KN(s)}{s^2D(s)} \quad (6.4-14)$$

误差传递函数为

$$E(s) = \frac{U(s)}{1+W(s)} = \frac{s^2D(s)U(s)}{s^2D(s) + KN(s)} \quad (6.4-15)$$

在单位阶跃函数输入下,即 $U(s) = 1/s$

$$e_s = \lim_{s \rightarrow 0} sE(s) = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{1}{s} \frac{s^2D(s)}{s^2D(s) + KN(s)} = 0 \quad (6.4-16)$$

在斜坡函数输入下,即 $U(s) = 1/s^2$

$$e_s = \lim_{s \rightarrow 0} sE(s) = s \frac{1}{s^2} \frac{s^2D(s)}{s^2D(s) + KN(s)} = 0 \quad (6.4-17)$$

在加速度函数输入下,即 $U(s) = 2/s^3$

$$e_s = \lim_{s \rightarrow 0} sE(s) = s \frac{2}{s^3} \frac{s^2D(s)}{s^2D(s) + KN(s)} = \frac{2}{K} \quad (6.4-18)$$

由此可见,II 型系统对单位阶跃输入和斜坡函数输入都是无差系统;对加速度输入,稳态误差与开环系统的放大倍数成反比。如果设定在加速度输入下的允许误差,即可求得开环系统的放大倍数。

5.2 伺服控制系统的动态设计方法

伺服控制系统的动态设计方法有多种,但可归纳为基于经典控制理论的频域设计方法和基于现代控制理论的时域设计方法两大类。

1. 基于经典控制理论的设计方法 有串联校正、并联校正和复合控制等 3 种。

(1) 串联校正。通常采用 PID 调节器。当系统是稳定的,其瞬态响应也是快的,但是稳态精度不够。这种情况下可采用 PI 调节,增加系统的低频增益,减小稳态误差,同时保持曲线的高频部分,如图 6.4-25a 中虚线所示。

当系统不稳定时,或系统虽稳定,并有满意的稳态



误差,但瞬态响应不理想,即快速性不够。这种情况下可采用PD调节,改变伯德图的高频部分,即提高幅值穿越频率,如图6·4-25b虚线所示。

当系统是稳定的,但瞬态响应和稳态误差都不满意。这种情况下必须采用PID调节,既提高低频增益,又提高高频响应,如图6·4-25c虚线所示。

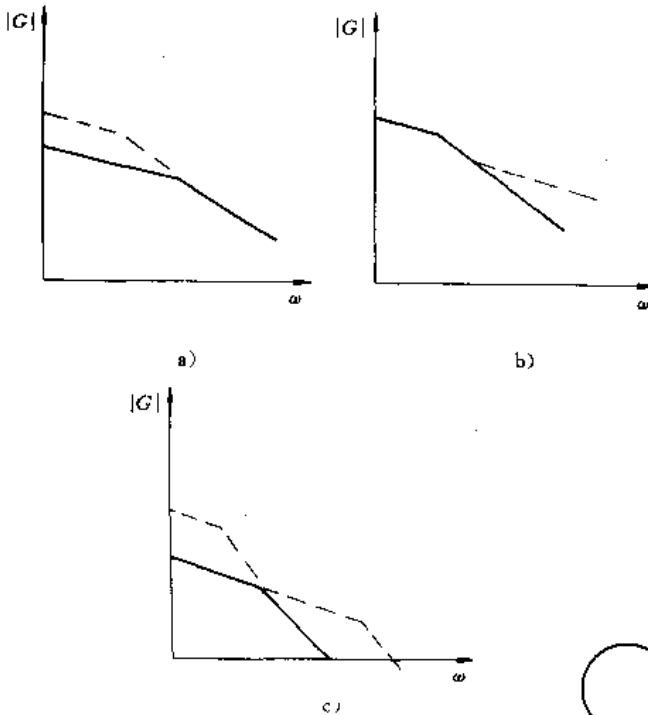


图6·4-25 串联校正的伯德幅频特性
a) PI调节 b) PD调节 c) PID调节

下面着重介绍PID调节器的工程设计方法。

通常位置伺服系统的动态结构图见图6·4-11。速度环内通常有两个惯性环节:一个是电枢回路电磁时间常数形成的;另一个是机电时间常数形成的。通常 $R/(C_e T_m s)$ 可近似表示为 $R/(C_e (T_m s + 1))$ 。这样,就成为两个惯性环节。一般说来, T_m 大于 T_e , 令 $(K_i/C_e)Ra = K_1$ 为伺服系统速度环的放大系数。若将速度环校正成典型I型系统,调节器必须具有一个积分环节和一个比例微分环节,以便对消掉伺服系统中的一个惯性环节,一般都是对消掉大惯性环节,使校正后的系统响应更快些。

令校正环节的传递函数为

$$W_c(s) = \frac{K_c \tau_1 s + 1}{\tau_1 s} \quad (6\cdot4-19)$$

校正后系统的开环传递函数变成

$$W(s) = W_c(s)W_o(s) = K_c \frac{\tau_1 s + 1}{\tau_1 s} \frac{K_1}{(T_m s + 1)(T_e s + 1)} \quad (6\cdot4-20)$$

取 $\tau_1 = T_m$, 使两个环节对消,并令 $K_1 K_c / \tau_1 = K$, 则

$$W(s) = \frac{K}{s(T_e s + 1)} \quad (6\cdot4-21)$$

上式就是典型的I型系统,即将速度环校正成典型的I型系统。

位置环的设计任务是将校正后的速度环I型系统,校正为典型II型系统。它的开环传递函数为

$$W(s) = \frac{K_2(\tau s + 1)}{s^2(T_e s + 1)} \quad (6\cdot4-22)$$

在式(6·4-22)中,由于分母中已经有 s^2 , 对应的相频特性是 -180° , 再考虑一个惯性环节,要使系统稳定,分子上必须有一个比例微分环节,即位置环的串联校正应是一个PD调节器。设计时, τ 、 T_e 和幅值穿越频率 ω_c 应符合下述关系,即

$$\frac{1}{\tau} < \omega_c < \frac{1}{T_e} \quad (6\cdot4-23)$$

或 $\tau > T_e$

而相角稳定裕度为

$$\begin{aligned} \gamma &= 180^\circ - 180^\circ + \arctan(\omega_c \tau) - \arctan(\omega_c T_e) \\ &= \arctan(\omega_c \tau) - \arctan(\omega_c T_e) \end{aligned} \quad (6\cdot4-24)$$

τ 比 T_e 大得越多,则稳定裕度越大。

(2) 并联校正。在位置伺服系统速度环中,引入输出量的微分负反馈是一种很有效的并联校正。它可以抑制振荡,减小超调,提高系统快速性。

位置伺服系统的输出量是位置,位置的微分是转速,因此转速负反馈可以方便地组成并联校正。它的结构框图见图6·4-26。

经简化后,伺服系统的传递函数可表示为

$$W_o(s) = \frac{K_o}{s(T_m s + 1)} \quad (6\cdot4-25)$$

式中 $K_o = \frac{K_i K_f R}{C_e}$

转速反馈即位置微分反馈的传递函数为

$$W_c(s) = K_c s \quad (6\cdot4-26)$$

其中, $K_c = a/K_f$, a 为反馈系数。

这样,可求得转速反馈的闭环传递函数为

$$W_{cl}(s) = \frac{W_o(s)}{1 + W_o(s)W_c(s)} = \frac{K_{cl}}{s(T_{cl}s + 1)} \quad (6\cdot4-27)$$

其中

$$K_{cl} = \frac{K_o}{1 + K_o K_c} \quad (6\cdot4-28)$$

$$T_{cl} = \frac{T_m}{1 + K_o K_c} \quad (6\cdot4-29)$$

由式(6·4-29)可知,引入转速反馈后,减少了时



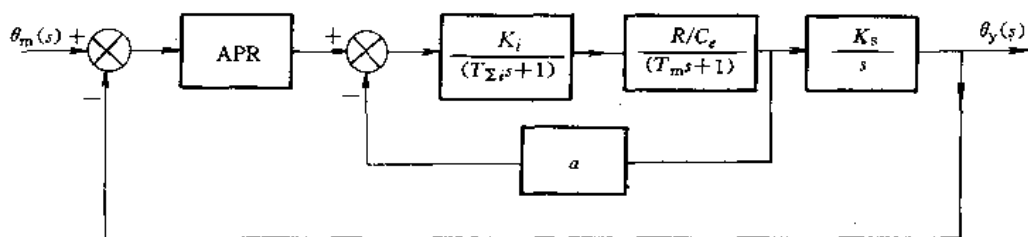


图6·4-26 带转速负反馈的并联校正

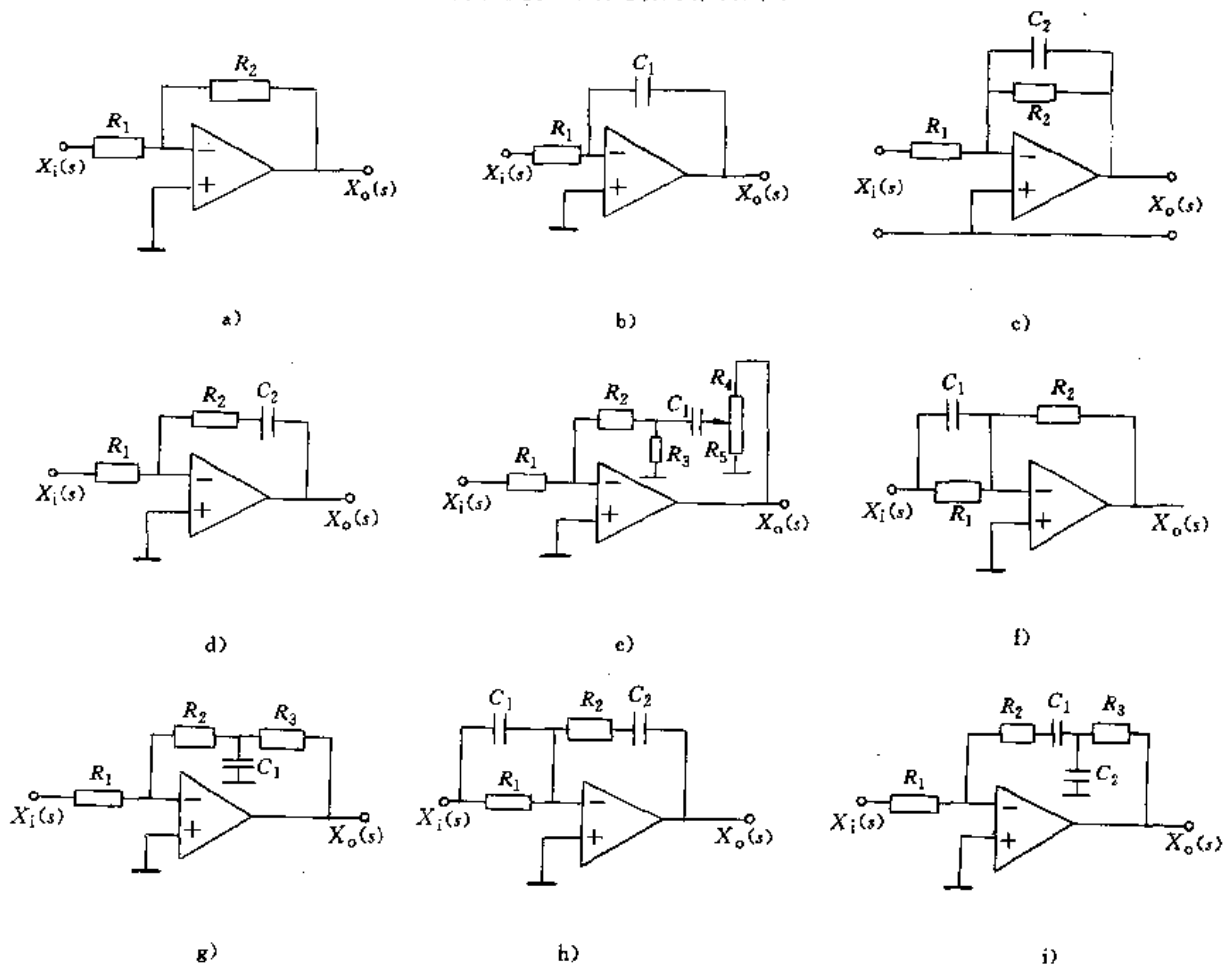


图6·4-27 常用调节器的线路

间常数，增强了快速性，同时降低了放大倍数，致使系统的稳态精度降低。为了保持原有的稳态精度，可加大放大倍数，或采用转速微分负反馈的并联校正。

(3) 常用调节器的特性及线路。它的线路见图6·4-27。

比例调节器 (见图6·4-27a)

$$W_c(s) = -K_P \quad K_P = \frac{R_2}{R_1}$$

积分调节器 (见图6·4-27b)

$$W_c(s) = -\frac{1}{T_i s} \quad T_i = R_1 C_1$$

一阶惯性环节 (见图6·4-27c)

$$W_c(s) = K_P \frac{1}{\tau s + 1} \quad K_P = \frac{R_2}{R_1} \quad \tau = C_2 R_2$$

比例-积分调节器 (见图6·4-27d)

$$W_c(s) = -K_P \left[1 + \frac{1}{T_i s} \right]$$

$$T_i = R_2 C_2 \quad K_P = \frac{R_2}{R_1}$$

比例-积分调节器 (见图6·4-27e)

$$W_c(s) = -\frac{\tau s + 1}{T_i s} = -K_P \left[1 + \frac{1}{T_i s} \right]$$

$$\tau = \left(\frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3} + \frac{R_4 R_5}{R_4 + R_5} \right) C_1$$

$$K_P = \frac{R_2}{R_1} (1 + a) + \frac{R_4}{R_1} \left(\frac{R_2 + R_3}{R_3} \right)$$



$$a = R_4/R_5 \quad T_i = \frac{\tau}{K_P} \quad T_i = \tau$$

当 $R_2 \gg R_3, R_2 \gg R_4 + R_5$ 时

$$\tau = \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3} C_1 \quad K_P = \frac{R_2}{R_1} (1 + a)$$

比例-微分调节器 (见图 6·4-27f)

$$W_c(s) = -(T_d s + K_P) = -K_P(T_D s + 1)$$

$$T_d = R_2 C_1 \quad K_P = \frac{R_2}{R_1}$$

$$T_D = \frac{T_d}{K_P} = R_1 C_1$$

比例-微分调节器 (见图 6·4-27g)

$$W_c(s) = -K_P(T_D s + 1)$$

$$K_P = \frac{R_2 + R_3}{R_1} \quad T_D = \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3} C_1$$

比例-积分-微分调节器 (见图 6·4-27h)

$$W_c(s) = -\frac{(\tau_1 s - 1)(\tau_2 s + 1)}{T_i s}$$

$$= -K_P \left[1 + \frac{1}{T_i s} + T_D s \right]$$

$$\tau_1 = R_1 C_1 \quad \tau_2 = R_2 C_2 \quad T_i = R_1 C_2$$

$$K_P = \frac{\tau_1 + \tau_2}{T_i} = \frac{C_1}{C_2} + \frac{R_2}{R_1}$$

$$T_i = \tau_1 + \tau_2 = R_1 C_1 + R_2 C_2$$

$$T_D = \frac{\tau_1 \tau_2}{\tau_1 + \tau_2} = \frac{R_1 R_2 C_1 C_2}{R_1 C_1 + R_2 C_2}$$

比例-积分-微分调节器 (见图 6·4-27i)

$$W_c(s) = -\frac{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)}{T_i s}$$

$$\tau_1 = (R_2 + R_3) C_2$$

$$\tau_2 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} C_2 \quad T_i = R_1 C_1$$

T_i, T_D, K_P 同上。

(4) 复合控制。它是提高伺服系统的动态、静态品质的有效途径。复合控制的结构框图见图 6·4-28。

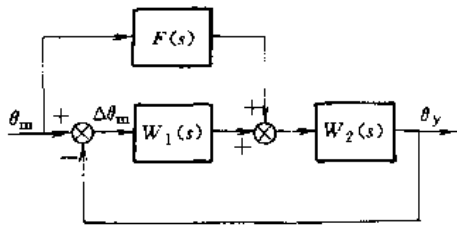


图 6·4-28 伺服系统复合控制结构框图

在图 6·4-28 中, $F(s)$ 为前馈部分的传递函数, $W_1(s)$ 与 $W_2(s)$ 为伺服系统的传递函数。通过结构图变换, 可求得图 6·4-28 所示的复合控制系统的闭环传递函数

$$W(s) = \frac{W_1(s)W_2(s) + W_2(s)F(s)}{1 + W_1(s)W_2(s)} \quad (6·4-30)$$

如果选择

$$F(s) = \frac{1}{W_2(s)} \quad (6·4-31)$$

则 $W(s) = 1$, 这时候可大大降低稳态和动态误差。对给定信号实现了完全不变性, 通常称为不变性原理。式 (6·4-31) 称为不变性条件。

上述复合系统对干扰 f 来说, 仍然是误差控制, 要想完全消除干扰 f 对系统输出的影响, 必须建立补偿通道, 见图 6·4-29。

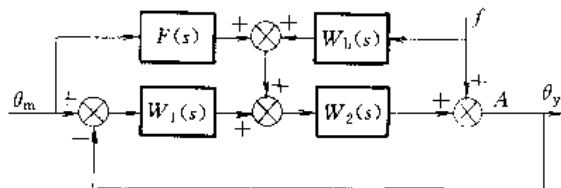


图 6·4-29 复合控制与扰动补偿结构图

首先, 将干扰 f 测量出来, 然后通过补偿环节再加入到系统上, 正好抵消 f 对系统输出的影响。取

$$W_b(s) = \frac{1}{W_2(s)} \quad (6·4-32)$$

则干扰 f 在 A 点的正、反作用相抵消, 即 f 对系统的输出没有影响。这种建立补偿通道来消除干扰影响的办法, 称为扰动补偿, 对可测的干扰来说, 这种补偿方法是行之有效的。

2. 基于现代控制理论的设计方法 有极点配置、二次型最优控制和自适应控制等设计方法。

由图 6·4-26 所示的伺服系统结构框图, 经过简单变换以后, 可表示为下述的状态方程

$$x(k+1) = Gx(k) + Hu(k) \quad (6·4-33)$$

式中 G —— $n \times n$ 维状态矩阵;

H —— $n \times 1$ 维输入矩阵。

假定系统是线性的、定常的、可控的和可观的, 并假定控制信号 $u(k)$ 为

$$u(k) = -Kx(k) \quad (6·4-34)$$

式中 K ——状态反馈增益矩阵 ($1 \times n$ 维矩阵)。

于是系统成为图 6·4-30b 所示的闭环控制系统。

$$x(k+1) = (G - HK)x(k) \quad (6·4-35)$$

(1) 伺服系统的极点配置设计方法。由式 (6·4-33) 表示的系统特征方程式是

$$|zI - G| = z^n + a_1 z^{n-1} + a_2 z^{n-2} + \dots + a_{n-1} z + a_n = 0 \quad (6·4-36)$$

令变换矩阵为

$$T = MW$$



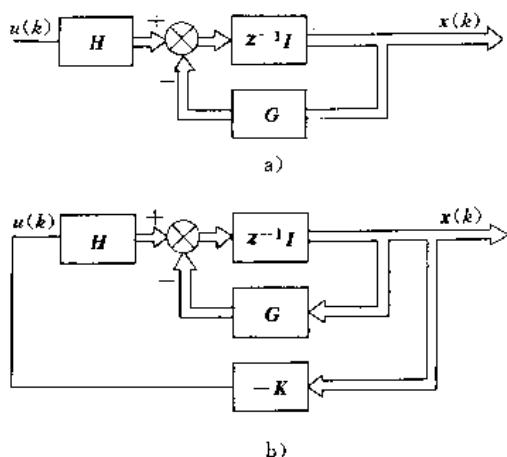


图 6.4.30 开环和闭环控制系统
a) 开环系统 b) 闭环系统

其中, $M = [H \mid GH \mid \dots \mid G^{n-1}H]$, 它的秩为 n 。

$$W = \begin{bmatrix} a_{n-1} & a_{n-2} & \dots & a_1 & 1 \\ a_{n-2} & a_{n-3} & \dots & 1 & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ a_1 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (6.4-37)$$

则 $T^{-1}GT = \hat{G} = (MW)^{-1}G(MW) = W^{-1}M^{-1}GMW$

$$= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \\ -a_n & -a_{n-1} & -a_{n-2} & \dots & -a_1 \end{bmatrix} \quad (6.4-38)$$

及 $T^{-1}H = \hat{H} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} \quad (6.4-39)$

即成为可控规范形式。

令 $\hat{K} = KT = [\delta_n \ \delta_{n-1} \ \dots \ \delta_1] \quad (6.4-40)$

于是

$$\hat{H}\hat{K} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} [\delta_n \ \delta_{n-1} \ \dots \ \delta_1] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ \delta_n & \delta_{n-1} & \dots & \delta_1 \end{bmatrix} \quad (6.4-41)$$

由式 (6.4-35) 表示的系统特征方程式为

$$\begin{aligned} |zI - G + HK| &= |zI - \hat{G} + \hat{H}\hat{K}| \\ &= z \begin{vmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 0 & 1 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 1 \\ -a_n & -a_{n-1} & \dots & -a_1 \end{vmatrix} \\ &+ \begin{vmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ \delta_n & \delta_{n-1} & \dots & \delta_1 \end{vmatrix} \\ &= \begin{vmatrix} z & -1 & \dots & 0 \\ 0 & z & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & -1 \\ (a_n + \delta_n) & (a_{n-1} + \delta_{n-1}) & \dots & z + a_1 + \delta_1 \end{vmatrix} \\ &= z^n + (a_1 + \delta_1)z^{n-1} + \dots + (a_{n-1} + \delta_{n-1})z + a_n + \delta_n = 0 \quad (6.4-42) \end{aligned}$$

假设, 根据系统动态特性的要求, 系统的期望特征方程式为

$$(z - \mu_1)(z - \mu_2) \dots (z - \mu_n) = z^n + \gamma_1 z^{n-1} + \gamma_2 z^{n-2} + \dots + \gamma_{n-1} z + \gamma_n = 0 \quad (6.4-43)$$

使式(6.4-42)和式(6.4-43)中 z 的阶次相同项的系数相等, 得

$$\left. \begin{aligned} \gamma_1 &= a_1 + \delta_1 \\ \gamma_2 &= a_2 + \delta_2 \\ &\vdots \\ \gamma_n &= a_n + \delta_n \end{aligned} \right\} \quad (6.4-44)$$

由式(6.4-40)和式(6.4-44)可得

$$\begin{aligned} K &= \hat{K}T^{-1} \\ &= [\delta_n \ \delta_{n-1} \ \dots \ \delta_1]T^{-1} \\ &= [\gamma_n - a_n \ \gamma_{n-1} - a_{n-1} \ \dots \ \gamma_1 - a_1]T^{-1} \quad (6.4-45) \end{aligned}$$

由上式可知, 只要知道系统的期望极点 μ_i ($i=1, \dots, n$), 根据式 (6.4-44), 即可求得 γ_i ($i=1, \dots, n$)。此外, a_i 是已知的系数, T 为已知的矩阵, 这样, 就能求出系统的反馈增益矩阵 K 。

(2) 状态观测器。上一小节讨论的极点配置设计方法, 要求全状态反馈。但在实际工程中, 不是所有的状态都是可以直接测量的。当系统的状态不能直接测量时, 可以用状态观测器进行观测。

状态观测器的任务就是通过系统的输入和输出变量, 将不能直接测量出来的状态变量计算出来。必须指出, 只有当系统满足可观性条件时, 才能进行状态观测。



假设 $x(k)$ 是需要观测的状态, 我们总希望观测值 $\tilde{x}(k)$ 与实际值 $x(k)$ 尽可能地接近。因为状态是不可测的, 这样状态观测值 $\tilde{x}(k)$ 不可能与实际状态 $x(k)$ 进行比较。通常输出量 $y(k) = Cx(k)$ 是可测量的, 这样输出量的估计值 $\tilde{y}(k) = C\tilde{x}(k)$ 与输出量的实际值是可以进行比较的。采用输出测量值与估计值之间的误差作为校正项的状态观测反馈控制系统, 见图 6-4-31。

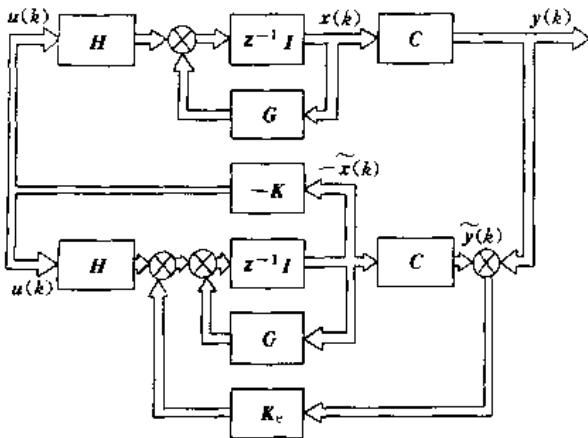


图 6-4-31 状态观测反馈控制系统

由图 6-4-31 可得

$$x(k+1) = Gx(k) + Hu(k) \quad (6-4-46)$$

$$y(k) = Cx(k) \quad (6-4-47)$$

$$u(k) = -K\tilde{x}(k) \quad (6-4-48)$$

$$\tilde{x}(k+1) = G\tilde{x}(k) + Hu(k) + K_c[y(k) - \tilde{y}(k)] \quad (6-4-49)$$

式中 K_c ——观测器的反馈增益矩阵 $[(n \times 1)$ 维]。式 (6-4-49) 可改写为

$$\tilde{x}(k+1) = (G - K_c C)\tilde{x}(k) + Hu(k) + K_c y(k) \quad (6-4-50)$$

在方程式 (6-4-50) 中, 因为观测值 $\tilde{x}(k+1)$ 比测量值 $y(k)$ 超前一个采样周期, 所以由式 (6-4-50) 给出的状态观测器称为预报观测器。

考虑单输入单输出系统, $y(k)$ 、 $u(k)$ 为标量, $x(k)$ 为 n 维向量, 令

$$Q = (WN^*)^{-1} \quad (6-4-51)$$

式中 $N = [C^* \mid G^* C^* \mid \dots \mid (G^*)^{n-1} C^*]$

(“*”号表示矩阵转置)

$$W = \begin{bmatrix} a_{n-1} & a_{n-2} & \dots & a_1 & 1 \\ a_{n-2} & a_{n-3} & \dots & 1 & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ a_1 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

其中, a_1, a_2, \dots, a_{n-1} 为式 (6-4-36) 的特征方程式

系数, 即

$$|zI - G| = z^n + a_1 z^{n-1} + \dots + a_{n-1} z + a_n = 0 \quad (6-4-52)$$

再令 $x(k) = Q\xi(k)$ (6-4-53)

将式 (6-4-55) 代入式 (6-4-46)、式 (6-4-47) 中, 得

$$\xi(k+1) = Q^{-1}GQ\xi(k) + Q^{-1}Hu(k) \quad (6-4-54)$$

$$y(k) = CQ\xi(k) \quad (6-4-55)$$

$$\text{式中 } Q^{-1}GQ = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 & -a_n \\ 1 & 0 & \dots & 0 & -a_{n-1} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 1 & -a_1 \end{bmatrix} \quad (6-4-56)$$

$$CQ = [0 \ 0 \ \dots \ 1] \quad (6-4-57)$$

再令 $\tilde{x}(k) = Q\tilde{\xi}(k)$ (6-4-58)

将式 (6-4-58) 代入式 (6-4-50) 中, 得

$$\tilde{\xi}(k+1) = Q^{-1}(G - K_c C)Q\tilde{\xi}(k) + Q^{-1}Hu(k) \quad (6-4-59)$$

将式 (6-4-54) 减去式 (6-4-59), 得

$$\begin{aligned} &\xi(k+1) - \tilde{\xi}(k+1) \\ &= (Q^{-1}GQ - Q^{-1}K_c CQ)[\xi(k) - \tilde{\xi}(k)] \end{aligned} \quad (6-4-60)$$

令 $e(k) = \xi(k) - \tilde{\xi}(k)$, 由式 (6-4-60), 可得

$$e(k+1) = Q^{-1}(G - K_c C)Qe(k) \quad (6-4-61)$$

在求取反馈增益矩阵 K_c 时, 总希望动态误差 $e(k)$ 能以足够快的速度趋向于零值。实际上, 首先选择观测器的期望极点, 然后求取矩阵 K_c 。因为

$$Q^{-1}K_c = \begin{bmatrix} a_{n-1} & a_{n-2} & \dots & a_1 & 1 \\ a_{n-2} & a_{n-3} & \dots & 1 & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ a_1 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C \\ CG \\ \vdots \\ CG^{n-2} \\ CG^{n-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \\ \vdots \\ k_{n-1} \\ k_n \end{bmatrix} \quad (6-4-62)$$

式中

$$K_c = \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \\ \vdots \\ k_n \end{bmatrix} \quad (6-4-63)$$

因为 $Q^{-1}K_c$ 是 n 维向量, 可写成为

$$Q^{-1}K_c = \begin{bmatrix} \delta_n \\ \delta_{n-1} \\ \vdots \\ \delta_1 \end{bmatrix} \quad (6-4-64)$$

那末, 参照式 (6-4-57) 得



$$Q^{-1}K_c C Q = \begin{bmatrix} \delta_n \\ \delta_{n-1} \\ \vdots \\ \delta_1 \end{bmatrix} [0 \ 0 \ \dots \ 1]$$

$$= \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 & \delta_n \\ 0 & 0 & \dots & 0 & \delta_{n-1} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & \delta_1 \end{bmatrix} \quad (6.4-65)$$

及

$$Q^{-1}(G - K_c C)Q = Q^{-1}GQ - Q^{-1}K_c C Q$$

$$= \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 & -a_n & -\delta_n \\ 1 & 0 & \dots & 0 & -a_{n-1} & -\delta_{n-1} \\ 0 & 1 & \dots & 0 & -a_{n-2} & -\delta_{n-2} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 1 & -a_1 & -\delta_1 \end{bmatrix} \quad (6.4-66)$$

特征方程式 $|zI - Q^{-1}(G - K_c C)Q| = 0$

即

$$\begin{bmatrix} z & 0 & 0 & \dots & 0 & a_n + \delta_n \\ -1 & z & 0 & \dots & 0 & a_{n-1} + \delta_{n-1} \\ 0 & -1 & z & \dots & 0 & a_{n-2} + \delta_{n-2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & -1 & z + a_1 + \delta_1 \end{bmatrix} = 0 \quad (6.4-67)$$

或 $z^n + (a_1 + \delta_1)z^{n-1} + (a_2 + \delta_2)z^{n-2} + \dots + (a_n + \delta_n) = 0$ (6.4-68)

由上式可见，每一个 $\delta_i, \delta_{n-1}, \dots, \delta_1$ ，只与特征方程式的系数有关。

假设动态误差的期望特征方程式为

$$(z - \mu_1)(z - \mu_2)\dots(z - \mu_n)$$

$$= z^n + \gamma_1 z^{n-1} + \gamma_2 z^{n-2} + \dots + \gamma_{n-1} z + \gamma_n = 0 \quad (6.4-69)$$

期望特征值 μ_i 决定了状态观测值收敛于系统的状态实际值的快慢。比较式 (6.4-68) 与式 (6.4-69) 的系数，得

$$\left. \begin{aligned} \delta_1 &= \gamma_1 - a_1 \\ \delta_2 &= \gamma_2 - a_2 \\ \vdots & \\ \delta_n &= \gamma_n - a_n \end{aligned} \right\} \quad (6.4-70)$$

于是，由方程式 (6.4-64) 和式 (6.4-70)，得

$$Q^{-1}K_c = \begin{bmatrix} \delta_n \\ \delta_{n-1} \\ \vdots \\ \delta_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma_n - a_n \\ \gamma_{n-1} - a_{n-1} \\ \vdots \\ \gamma_1 - a_1 \end{bmatrix} \quad (6.4-71)$$

因此

$$K_c = Q \begin{bmatrix} \gamma_n - a_n \\ \gamma_{n-1} - a_{n-1} \\ \vdots \\ \gamma_1 - a_1 \end{bmatrix} = (WN^*)^{-1} \begin{bmatrix} \gamma_n - a_n \\ \gamma_{n-1} - a_{n-1} \\ \vdots \\ \gamma_1 - a_1 \end{bmatrix} \quad (6.4-72)$$

由上式可知，一旦期望特征值 μ_i 选好后，观测器的设计可采用类似极点配置的设计方法。通常，期望特征值选择是使观测器的响应时间比闭环系统的响应时间快 4 至 5 倍。

(3) 伺服系统的最优化设计方法。假设伺服系统可表示为

$$x(k+1) = Gx(k) + Hu(k) \quad (x(0) = C) \quad (6.4-73)$$

假定系统的状态是完全可控的，求最优控制序列 $u(0), u(1), \dots, u(N-1)$ ，使二次型性能指标极小。作为二次型性能指标一个例子，对有限时间过程 ($0 \leq k \leq N$) 是

$$J = \frac{1}{2} x^*(N) S x(N) + \frac{1}{2} \sum_{k=0}^{N-1} [x^*(k) Q x(k) + u^*(k) R u(k)] \quad (6.4-74)$$

式中 Q ——正定或半正定矩阵；

R ——正定矩阵；

S ——正定或半正定矩阵。

矩阵 Q, R, S 按照由状态向量 $x(k) (k=0, 1, 2, \dots, N-1)$ 和控制向量 $u(k) (k=0, 1, 2, \dots, N-1)$ 以及最终状态 $x(N)$ 等有关的性能指标的重要性进行选择。

可以证明，当 N 足够大时，可求得控制向量

$$u(k) = -K(k)x(k) \quad (6.4-75)$$

其中， $K(k)$ 为反馈增益矩阵，它可以由下述方程式求出

$$K(k) = [R + H^* P(k+1)H]^{-1} H^* P(k+1)G \quad (6.4-76)$$

其中， $P(k)$ 为黎卡提方程，可表示为

$$P(k) = Q + G^* P(k+1)G - G^* P(k+1) \times H [R + H^* P(k+1)H]^{-1} H^* P(k+1)G \quad (6.4-77)$$

从 $k=N$ 到 $k=0$ ，计算方程式 (6.4-77)。即从 $P(N)$ 开始 (它是给定的) 计算出 $P(N-1), \dots, P(0)$ ，求得 $P(k)$ 以后，可按式 (6.4-76) 计算 $K(k)$ 。求得 $K(k)$ 以后，可按式 (6.4-75) 计算最优控制向量 $u(k)$ 。



第5章 数控检测装置

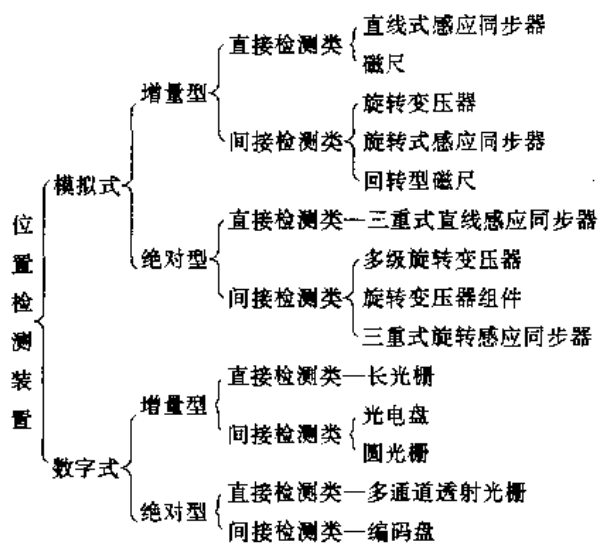
1 概述

多数开环数控系统是采用步进电动机、电液脉冲马达等伺服驱动元件,按照数控装置输出的指令脉冲进行工作的。每一个脉冲产生对应的位移,一般无需使用位置检测装置。与此相反,在闭环及半闭环系统中,通常采用交流或直流伺服电动机来驱动被控对象。为了保证其位置控制的精度,必须引入反馈信息,因此,位置检测装置就成为不可缺少的关键部件。

1.1 位置检测装置的分类

根据测量要求和工作条件的不同,数控系统中位置检测装置可按表 6.5-1 进行分类,并且由表可知:

表 6.5-1 位置检测装置分类



(1) 模拟式检测装置所测得的被测量是连续变化的物理量,用它实现大量程精确测量较为困难,而数字式是将被测量量化,以数字形式表示,其测量精度将随着量化当量减小而提高。

(2) 增量型检测装置是检测位移增量,它比较简单,无需设置固定零位,大都被采用于连续控制的数控系统中,但是一旦检测有误,必须从起始点重新测量、计数;而绝对型检测装置必须事先设置零位,且当被测位移量越大、测量精度要求越高时,所需数码位数也越多,装置结构也就越复杂。

(3) 直接位置检测装置是直接安装于被测位移量

的工作部件上,所测得位移量无需任何转换,它检测精度高,但可测量程必须和被测量等长,因此对装置的制造、使用和精度要求带来困难;而间接位置测量装置所测得的角位移信号必须经过转角/位移的信号转换,由此会引入误差而影响测量精度,但它使用方便、可靠、无检测长度限制。

1.2 对位置检测装置的要求

数控系统对位置检测装置有如下要求:

1. **高可靠性** 在规定的 work 环境下,能可靠地长时间连续使用。

2. **高分辨能力** 数控系统应用于不同类型的工作机械时,其对精度和速度的要求是不同的。目前,数控系统正向着高精度、高速度方向发展,其关键是取决于位置检测装置的分辨能力,目前可以达到的指标是:测量精度为 $\pm 0.001 \sim 0.02 \text{mm/m}$,分辨力为 $0.001 \sim 0.01 \text{mm}$,最大移动速度为 $10 \sim 15 \text{m/min}$ 。

3. **高稳定性** 要求测量输出值受温度影响小,抗干扰能力强,并能长期保持检测精度。

4. **其他** 还要求维修方便、成本低、体积小、使用简单等。

2 光电盘和编码盘

在数字型角位移检测装置中,目前使用较多的是光电式码盘。它一般分为增量型光电盘和绝对型编码盘。它们的输出均为脉冲信号。

2.1 光电盘

1. **工作原理** 它的工作原理比较简单(见图 6.5-1),是在圆盘上有规则地相间刻画有辐射状透光狭缝或黑白线条,利用光源直射或反射原理,当圆盘旋转时,产生周期为 T 的正弦交变光信号,再经过整形、放大,变换为一系列电脉冲,因此它也被称为光电脉冲发生器。

圆盘每转一圈发出的一个基准信号 D' ,称为同步脉冲(或零位脉冲),用作参考坐标的原点返回或循环操作的起点标志,其他两路输出脉冲信号 S'_1 和 S'_2 ,相位差为 $T/4$,根据它们间的相位超前与滞后关系,可



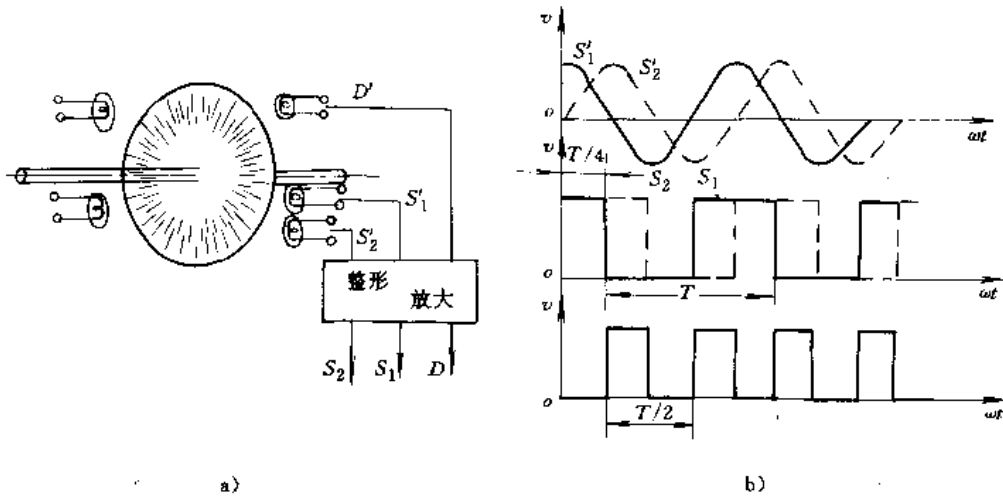


图 6-5-1 光电盘工作原理

a) 原理图 b) 波形

可以由硬件或软件直接判别光电盘的转向。

目前在数控系统中应用的增量型光电盘，每转脉冲可有 2000、2500、3000、4000 个等几种，最高每转脉冲数可达 2×10^5 个。

2. 应用系统实例 由图 6-5-2 所示的光电盘应用系统实例可知：经整形放大后的脉冲信号 D 和 S_1 、 S_2 送入数控系统输入接口电路，进行电平转换和抗干扰处理后，信号 S_1 和 S_2 经过鉴相电路，得到角位移增量反馈值 $\Delta\theta_f$ ，再与插补器输出给定的进给指令值 $\Delta\theta_d$ 作比较，将其角位移偏差值 $\Delta\theta_e$ 存入偏差寄存器，再经过脉宽调制 (PWM) 电路和数/模 (D/A) 转换器将信号转换成模拟量，作为驱动器给定电平，构成闭环控制系统。旋转速度的反馈信号是由鉴相器给出的具有...

定频率的脉冲信号，通过频率/电压 (F/V) 变换器转换成电压模拟值来实现。

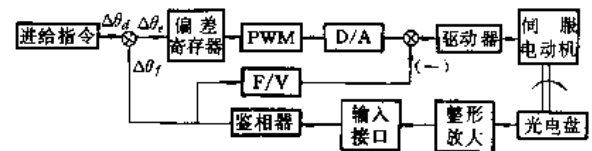


图 6-5-2 光电盘应用系统实例

$\Delta\theta_d$ —给定值

3. 鉴相器 又称相位比较器，用于鉴别两列脉冲信号的相位差大小和相位滞后或超前。鉴相电路种类很多，常用的宽域鉴相器，在理论上认为其鉴相范围不受限制，可以在相邻两个周期之内单值鉴相。

图 6-5-3a 给出了鉴相器的逻辑原理，它由 D 触发

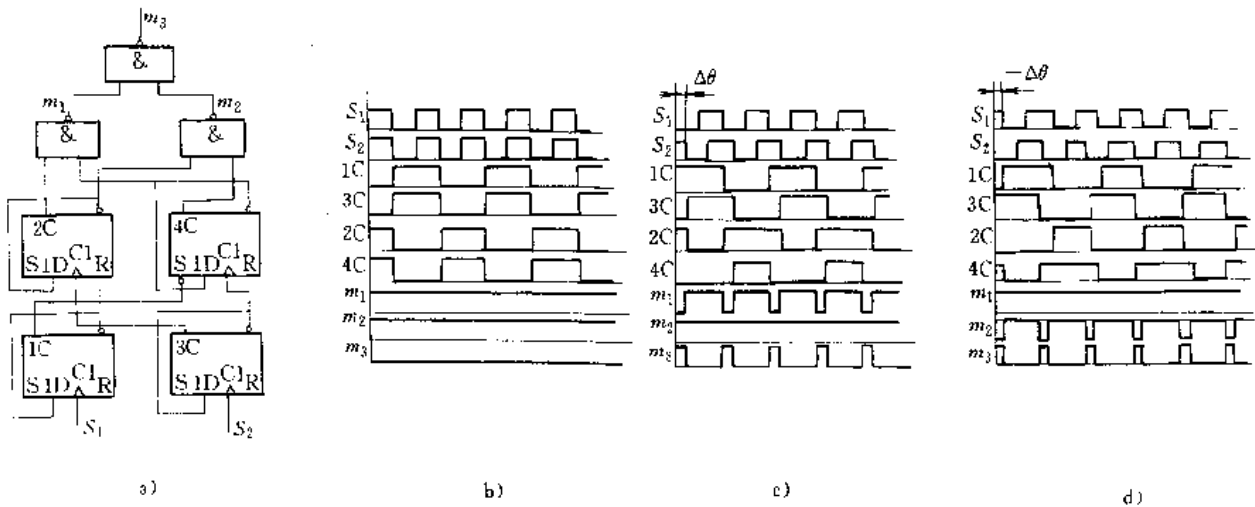


图 6-5-3 鉴相器原理及其波形

a) 逻辑原理图 b) S_1 和 S_2 同相位时波形 c) S_1 相位超前于 S_2 时波形 d) S_1 相位滞后于 S_2 时波形

217

217



器构成的分频器 1C、3C 和相位比较触发器 2C、4C，以及三个与非门组成。当不用 1C、3C 时，鉴相范围为 $\pm 180^\circ$ ，若 1C、3C 由分频系数为 n 的分频器代替，则鉴相范围为 $\pm 180^\circ \times n$ 。其工作原理是：

(1) 当 S_1 和 S_2 同相位时，鉴相器输出 m_3 为恒定的低电平，见图 6-5-3b。

(2) 当 S_1 相位超前于 S_2 时， m_2 为恒定高电平， m_1 、 m_3 输出脉冲，宽度为 $\Delta\theta = S_1 - S_2$ ，见图 6-5-3c。

(3) 当 S_1 相位滞后于 S_2 时， m_1 为恒定高电平， m_2 、 m_3 输出脉冲，宽度为 $-\Delta\theta = S_1 - S_2$ ，见图 6-5-3d。

2.2 编码盘

编码盘是一种绝对位置检测装置，它的种类较多，常用的是光电编码盘。它的工作原理与光电盘相似，只

是按二进制编码规则在圆盘上相间刻有透光狭缝或黑白线条。有时为了避免差错及读数模糊，还可以采用循环二进制或二十进制编码方法，见图 6-5-4a、b、c。利用图 6-5-5 所示光电转换电路原理，可以从编码圆盘上直接读出数码。其角度分辨力由线条道数来决定，码道越多，容量越大，分辨力也越高。 n 个码道的角度分辨率为 $360^\circ/2^n$ ，当 $n=10$ 时，约为 0.36° 。光电编码盘无接触点，转速可高达 5000r/min ，每转可有 100 个点的分辨度，所需转动转矩很小，又无需初始化位置，与微机控制配合使用更为方便而有效。但缺点是结构较复杂，不宜使用于有噪声的（如步进电动机驱动等）场合，并当出现振动时，精度将会大大下降。光源寿命缩短。光电盘的精度不及编码盘，但它结构简单，价格便宜，比较适用于精度要求不太高的场合。

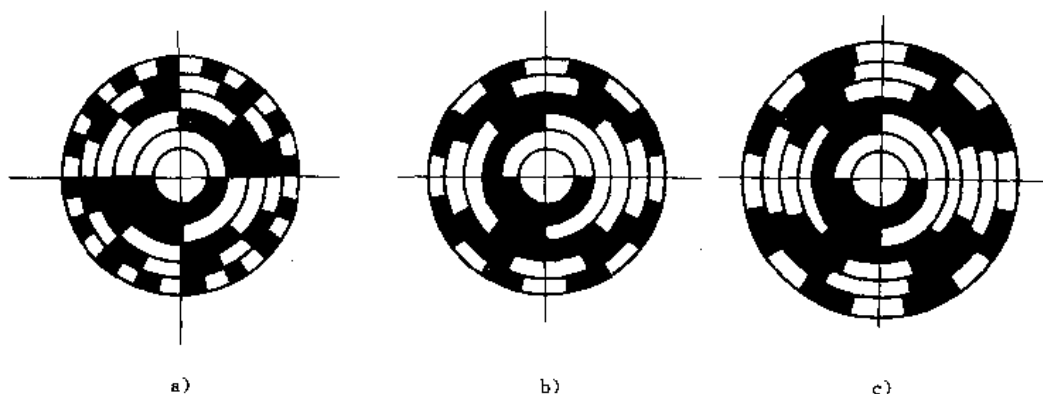


图 6-5-4 编码盘

a) 二进制 b) 循环二进制 c) 循环二十进制

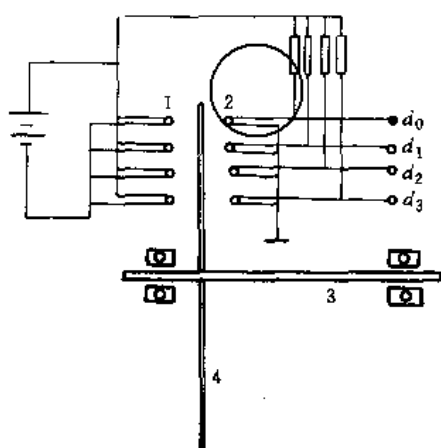


图 6-5-5 光电转换电路

1—光源 2—光电晶体管 3—轴 4—码盘

除上述光电编码盘以外，在结构上类同的还有接触式和电磁感应式编码盘。接触式编码盘的圆盘是由导电部分和绝缘部分相间而成，并通过导电电刷取得信号；感应式编码盘则是用直径 $1.4\sim 2\text{mm}$ 的永久磁铁等距地嵌在圆盘周围代替透光狭缝，并用霍尔元件的磁电效应取得信号。接触式编码盘体积小，输出信号强，无须放大，但由于电刷磨损，寿命不长，转速也不能太高。电磁感应式编码盘也是一种无接触式编码盘，所以寿命长，精度高，转速也很高，是一种很有前途的直接编码盘。

3 感应同步器

感应同步器是应用电磁感应原理，将运动部件的位移或转角变为电信号，用来进行测量或反馈控制。它是一种精密测量元件，在数字控制系统中应用很多，并



能满足较高的精度要求。

3.1 感应同步器的工作原理和信号处理

3.1.1 基本原理

如图 6.5-6a 所示, 感应同步器由定尺和滑尺两部分组成, 定尺上有单向均匀连续感应绕组, 绕组节距为 τ ; 滑尺上有两组励磁绕组, 一组称为正弦绕组, 另一组称为余弦绕组, 节距与定尺相同。当正弦绕组线圈与定尺绕组对齐时, 余弦绕组的所有线圈和定尺绕组相差 $\tau/4$ 。设 $\tau=2\pi$ 电角度, 则 $\tau/4=90^\circ$ 电角度。当向滑尺上正弦绕组通以交流电压 u_s 时, 根据电磁感应原理, 在定尺绕组上将感应出同频率, 相位与滑动位置有关, 而幅值正比于两绕组耦合度的感应电动势 e_s , 见图

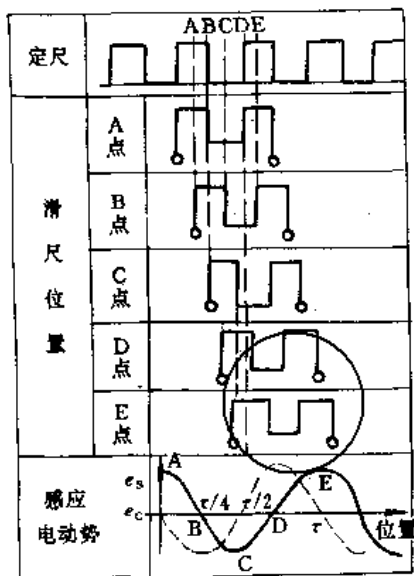
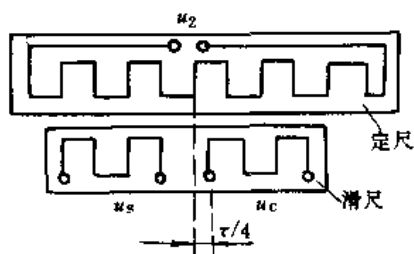


图 6.5-6 感应同步器
a) 结构 b) 工作原理

6.5-6b。同理, 当余弦绕组上也通以与正弦绕组同样的交流电压时, 由于其与定尺相位差为 90° , 故在定尺上相应的感应电动势为 e_c , 也与 e_s 相差 90° 。

3.1.2 信号处理

根据励磁信号和励磁绕组的不同选取方式, 感应同步器的测量信号处理方式也有所差异。它们可以分为如下三大类:

1. 鉴幅型 它是根据感应电动势的振幅变化来检测角位移量的。它可分为滑尺励磁和定尺励磁两种方式。其中滑尺励磁方式是对滑尺上正、余弦两个绕组, 同时供以相位与频率相同, 而幅值变化规律不同的交流电压。

2. 鉴相型 是按照感应电动势的相位变化来检测角位移量的, 亦分为滑尺励磁和定尺励磁两种方式。其中, 滑尺励磁方式是对滑尺上正、余弦两个绕组供以幅值与频率相同, 但相位差为 $\pi/2$ 的交流电压。

3. 脉冲调宽型 它与鉴幅型区别在于采用周期为 2π 的方波脉冲作为励磁电压, 并且使正、余弦两绕组励磁方波电压按下式所示规律变化 (见图 6.5-7):

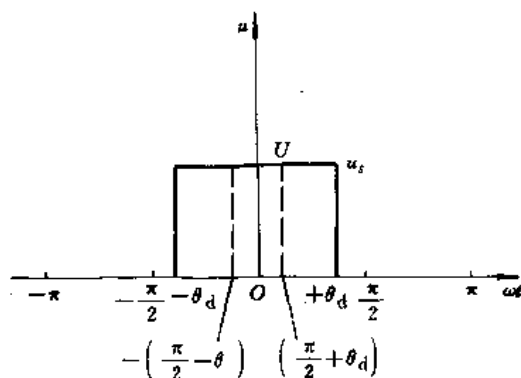


图 6.5-7 脉冲调宽

$$u_s = \begin{cases} 0 & -\pi \leq \omega t < -\theta_d \\ U & -\theta_d \leq \omega t \leq \theta_d \\ 0 & \theta_d \leq \omega t \leq \pi \end{cases}$$

$$u_c = \begin{cases} 0 & -\pi \leq \omega t < -(\pi/2 - \theta_d) \\ U & -(\pi/2 - \theta_d) \leq \omega t \leq (\pi/2 - \theta_d) \\ 0 & (\pi/2 - \theta_d) < \omega t \leq \pi \end{cases}$$

(6.5-1)

设给定指令要求滑尺移动距离为 x_d , 其相应的角位移为 θ_d , 而滑尺相对于定尺实际移动距离为 x , 所对应电角度 $\theta_x = 2\pi x/\tau$ 。定、滑尺间电磁耦合系数为 k , 它与励磁电源频率成正比, 而感应电动势值不仅与 k 有



表 6-5-2 感应同步器的各种信号处理方式与结果

| 相应信号 处理方式 | 励磁电压 | 感应电动势 | 合成电动势 $e=e_s+e_c$ | 采用的信号 处理部件 |
|-----------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|
| 鉴幅型 | 滑尺励磁方式 $u_s=U_m \sin \omega t$ $U_{sm}=U_m \sin \theta_d$ $u_c=U_{cm} \sin \omega t$ $U_{cm}=U_m \cos \theta_d$ | 在定尺上: $e_s=kU_m \cos \omega t \sin \theta_d \cos \theta_x$ $e_c=kU_m \cos \omega t \cos \theta_d$ $\times \cos(\theta_x+\pi/2)$ | $kU_m \cos \omega t \sin(\theta_d-\theta_x)$ 且: $e=\begin{cases} 0 & \text{当 } \theta_x=\theta_d \text{ 时} \\ kU_m \Delta \theta \cos \omega t & \text{当 } \sin(\theta_d-\theta_x) \approx \Delta \theta \text{ 时} \end{cases}$ | |
| | 定尺励磁方式 $u=U_m \sin \omega t$ | 在滑尺上: $e_s=kU_m \cos \omega t \cos \theta_x$ $e_c=kU_m \cos \omega t \sin \theta_x$ | 副边合成: $e=e_s \sin \theta_d + e_c \cos \theta_d$ $=kU_m \cos \omega t \sin(\theta_d-\theta_x)$ | 采用正、余弦变压器,一次输入 e_s, e_c , 转角为 θ_d |
| 鉴相型 | 滑尺励磁方式 $u_s=U_m \cos \omega t$ $u_c=U_m \sin \omega t$ | 在定尺上: $e_s=kU_m \sin \omega t \cos \theta_x$ $e_c=kU_m \cos \omega t \sin \theta_x$ | $kU_m \sin(\omega t+\theta_x)$ | |
| | 定尺励磁方式 $u=U_m \cos \omega t$ | 在滑尺上: $e_s=kU_m \sin \omega t \cos \theta_x$ $e_c=kU_m \sin \omega t \sin \theta_x$ | $e'_c=kU_m \cos \omega t \sin \theta_x$ $e=e_s+e'_c$ $=kU_m \sin(\omega t+\theta_x)$ | 移相器将 e_c 移相 $\pi/2$ |
| 脉冲调宽型 (滑尺励磁) | $u_s = \frac{U}{\pi} \theta_d + \frac{2U}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \times \sin n \theta_d \cos n \omega t$ $u_c = \frac{U}{\pi} \left(\frac{\pi}{2} - \theta_d \right) + \frac{2U}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \times \sin n \left(\frac{\pi}{2} - \theta_d \right) \cos n \omega t$ | 在定尺上: $e_s = \frac{2U}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{k_n}{n} \sin n \theta_d \times \cos \theta_x \sin n \omega t$ $e_c = \frac{-2U}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{k_n}{n} \sin n \times \left(\frac{\pi}{2} - \theta_d \right) \times \sin \theta_x \sin n \omega t$ | $e = e_{s1} + e_{c1}$ $= \frac{2k}{\pi} U \sin \omega t \sin(\theta_d - \theta_x)$ 其中 $k=k_1$ | 基波带通电路,滤去高次谐波 |

关,显然还决定于励磁电压的大小,各种信号处理方式与结果见表 6-5-2。

3.2 感应同步器的分类和主要参数

根据被测量的性质(线位移或角位移)、测量尺寸的范围、安装条件和精度要求等不同情况,可以按照 JB3582.2-84 标准选用不同形状和结构种类的感应同步器。它们主要可以分为直线式、旋转式和三重式感

应同步器。

3.2.1 直线式感应同步器

直线式感应同步器,用来测量线位移的长度。其定尺固定于静止部分,而滑尺安装在移动部件上,根据需要也可以互换。它又可分为标准型、窄型和带型,主要参数和特征见表 6-5-3。


对于标准型,为了保证定、滑尺间在全长范围内的

表 6-5-3 直线式感应同步器的型式、主要参数和特征

| 参 数 | 分 类 | 标 准 型 | 窄 型 | 带 型 |
|--------------|-----|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|
| 定尺规格 (mm) | | 定尺长度有 136, 250, 750, 1000 四种,最常用的是 250。GZD-1 型: 250, 定尺尺寸为: $(249.82^{+0.10}_{-0.03}) \times (58.92 \pm 0.13) \times (9.45 \pm 0.04)$ | GZD-2 型: $(159.82^{+0.10}_{-0.03}) \times (29.92 \pm 0.13) \times (9.45 \pm 0.04)$ | GZD-3 型定尺呈钢带状,绕组直接印制在带上,有效行程为 200~3000 |



(续)

| 参 数 | | 分 类 | 标 准 型 | 窄 型 | 带 型 |
|--------------|----|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| 滑尺规格 (mm) | | | 滑尺有 2 个绕组, GZH-1 型为: (101.6 ± 0.13) × (73 ± 0.13) × (9.5 ± 0.04) | GZH-2 型 (101.6 ± 0.13) × (37.24 ± 0.13) × (9.5 ± 0.1) | 滑尺可以跨在带状定尺上 随滑板移动 |
| 节距(检测周期) | | | 2 mm | 2 mm | 2 mm |
| 阻抗 (Ω) | 定尺 |  | 4.5 | 2.2 | 10/m |
| | 滑尺 | | 0.9 | 0.53 | 0.5 |
| 定尺输出电压(V) | | | 0.027 | 0.008 | 0.065 |
| 滑尺输入电压(V) | | | 1.2 | 0.6 | 0.5 |
| 滑尺最大功率(W) | | | 1.5 | 0.6 | |
| 精 度(μm) | | | ±0.5, ±1.5 | ±5 | ±10 |
| 重复精度(μm) | | | 0.25, 0.15 | 0.5 | 1 |
| 特 征 | | | 直线感应同步器中精度最高的一种(可达 ±1.5 μm), 使用范围广 | 定、滑尺宽度只有标准型的一半, 适合于安装位置有限的场合; 但电磁耦合情况不如标准型, 故精度较低 | 结构上是带状定尺穿过游框状滑尺上附加导板的槽孔, 以保证耦合要求; 制成盒式组装结构, 使用上有较大灵活性, 有“一尺多用”效果 |

注: 本表电参数为励磁电源频率 10kHz 时所得。

正常耦合, 应保证满足以下技术要求:

(1) 定、滑尺对导轨基准面的侧母线平行度公差分别为 0.04mm (全行程内) 和 0.01mm。

(2) 定、滑尺对导面的上面线(平行度)公差分别为 0.1mm (全行程内) 和 0.02mm。

(3) 定、滑尺间的间隙选择允许范围为 0.15 ~ 0.35mm, 全行程内允许变化量为 ±0.05mm。

(4) 滑尺对定尺在同一位置上的安装平行度允差为 0.01mm。

(5) 几根定尺连接时, 总长度上读出误差允许为 ±1 个该数值当量(如 0.01mm 为最小显示位当量时, 即允差为 ±0.01mm)。

(6) 必须加能屏蔽空间电磁场和防止尘粒的屏蔽罩。

3.2.2 旋转式感应同步器

旋转式感应同步器用来测量角位移的大小。其工作原理与直线式相同, 周期一般为 $\tau=2^\circ$, 即转子连续绕组由夹角为 1° 的 360 条辐射导线连接而成。定、转子的直径越大, 耦合系数越大, 精度也越高。为了减小定、转子间的不同心误差, 一般都把它们装配成一体。为了减少转子绕组外接线数目, 通常在转子上放置单相连续绕组, 相当于直线式的定尺; 而定子上置有正、余弦绕组, 相当于直线式滑尺。定、转子的外径一般为 $\phi 50 \sim 300\text{mm}$, 极对数为 50 ~ 1000 对。旋转式感应同步器又可分为吊线型、电磁耦合型和集电环型, 主要电参数和特征见表 6-5-4。

表 6-5-4 旋转式感应同步器的型式、主要参数和特征

| 参 数 | | 分 类 | 吊 线 型 | 电 磁 耦 合 型 | 集 电 环 型 |
|-----------|----|-----|-----------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|
| 转子尺寸 (mm) | | | $\phi 68.7 \times 6.12$ | $\phi 146 \times 7.92 \pm 0.08$ | $\phi 251.2 \times 9.4 \pm 0.08$ |
| 定子尺寸 (mm) | | | $\phi 93.5 \times 6.12$ | $\phi 117.8 \times 7.92 \pm 0.08$ | $\phi 302 \times 9.4 \pm 0.08$ |
| 节距(检测周期) | | | $\phi 75$ (3in) 为 2° | $\phi 175$ (7in) 为 2° | $\phi 300$ (12in) 为 2° |
| 阻抗 (Ω) | 转子 | | 3.5 | 1.5 | 1.5 |
| | 定子 | | 0.5 | 0.53 | 0.9 |

此为公司制作请尊重版权



(续)

| 参 数 \ 分 类 | 吊 线 型 | 电 磁 耦 合 型 | 集 电 环 型 |
|-------------|----------------------------------------|----------------------------------------------------|----------------|
| 精 度 (") | ±4 | ±3 | ±1 |
| 重 复 精 度 (") | 0.4 | 0.3 | 0.1 |
| 间 隙 (mm) | 0.15 | 0.20 | 0.25 |
| 特 征 | 转子电信号由转子上吊接导线引入, 结构简单, 但不能用在单方向连续旋转的情况 | 转子信号通过定子上耦合线圈, 以无接触输送方式送入。可以用在单方向连续旋转场合。但对耦合线圈要求很高 | 转子信号由转子上的集电环输入 |

注: 同表 6·5-3 注。

3·2·3 三重式感应同步器

三重式直线型感应同步器的滑尺与定尺都由粗、中、细三套绕组组成。定尺上的粗、中绕组相对于位移的垂直方向倾斜一个不同的角度, 而细绕组和标准式一样; 滑尺上的粗、中、细三套绕组分别组成三个独立的电路, 并构成一套测量范围为 0.002~2000mm、只有一个绝对零位的绝对坐标测量系统。粗、中、细的极距分别是 4000、100 和 2mm, 单块定尺的长度有 200 和 300mm 两种。

根据同样原理, 也可以构成三重式旋转型感应同步器, 应用于绝对坐标角位移测量系统。

3·3 感应同步器的特点

感应同步器适用于多种场合, 这和它的特点相关。

1. 精度高 由于感应同步器的极对数多, 其产生的误差平均效应使得测量精度可比制造精度高, 并且输出信号只受滑、定尺或定、转子间的耦合系数影响, 而且无机机械转换关节。

2. 测量长度不受限制 对于过长的测量长度要求, 可以由多块定尺拼接加长, 并用激光测长仪进行严格调整, 可达到总长度累积误差不大于单块定尺的最大允许偏差。

3. 有较强的适应能力 由于感应同步器的基板采用与工作机械(如机床、仪器等)底座材料的热膨胀系数相近的铸铁或钢板制成, 因此, 受热变形影响小, 并且利用电磁感应原理产生信号, 加上滑尺表面的铝箔层屏蔽和定尺表面的耐腐蚀绝缘层保护, 均使其对环境适应能力加强。

4. 抗干扰性能强 感应同步器在静止和运动时, 都会输出稳定的信号, 它的绕组阻抗非常低(见表 6·5-3 和表 6·5-4), 不易受空间磁场的干扰; 并且测量

信号往往通过相位比较来获得, 因此, 不受电源波动和随机干扰的影响。它能在电压波动±20%、频率波动±1%和有接触火花的场合下正常工作。

5. 维护方便 它没有磨损, 不需经常检查和清扫, 尺面防护要求低。切削油和润滑油的浸入, 对其工作影响亦不大。

必须注意的是励磁电压的对称性和失真度, 如鉴幅系统中两绕组电压 $U_m \cos \theta_x$ 和 $U_m \sin \theta_x$ 的精确性和鉴相系统中严格的 $\pi/2$ 移相。

3·4 系统的构成和应用

各类感应同步器在数控系统中应用极为广泛, 大致可以分为测量-数显系统和测量-控制系统, 前者往往是开环系统, 而后者则是闭环系统。

3·4·1 测量-数显系统

测量-数显系统的主要目的是把位置测量值用数字来显示, 它根据不同要求, 也可以分为开环和闭环两种。

1. 开环数显系统 它实际上是一种数显装置, 见图 6·5-8。

a. 滑尺励磁 励磁电压为 $u_s = U_m \sin \omega t$ 和 $u_c = U_m \cos \omega t$, 在定尺上感应电动势为 $e = kU_m \sin(\omega t + \theta_x)$, 经放大、滤波, 由鉴相器将定尺与滑尺的相对位移 θ_x 转换成脉冲序列, 送到计数器计数并显示。

b. 定尺励磁 励磁电压为 $u = U_m \sin \omega t$, 滑尺上感应信号为 $e_s = kU_m \cos \theta_x \sin \omega t$ 和 $e_c = kU_m \sin \theta_x \sin \omega t$, 分别经过放大和相敏解调器, 得到 $kU_m \sin \theta_x$ 和 $kU_m \cos \theta_x$, 再由鉴相器将 θ_x 转换成脉冲列, 在控制器协调、计数下送数码显示。

2. 闭环数显系统 如图 6·5-9 所示, 它实际上包含有数字显示和位移跟踪两个环节。前者是由 A/D



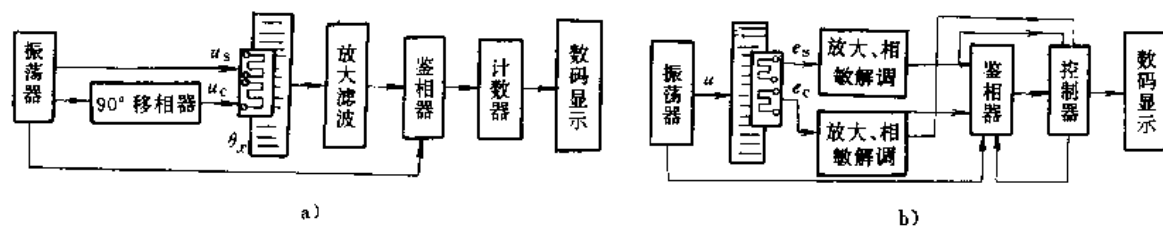


图 6-5-8 开环数显系统

a) 滑尺励磁 b) 定尺励磁

转换器将对应于 θ_x 的检测信号转换成位移脉冲，并计数、显示；而后再将这脉冲列的计数值，经 D/A 转换器产生一个与 $\Delta\theta_x$ 相等价的相移去校正励磁电压，使得 $\theta_x = \theta_d$, $e = 0$, 达到 θ_x 跟踪指令给定值 θ_d 的目的。

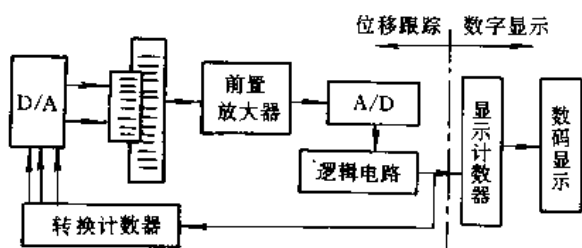


图 6-5-9 闭环数显系统

上述系统均采用了鉴相型感应同步器，开环系统有简单可靠的特点，而闭环系统复杂，相应地增加了故障率，但由于加入了跟踪环节使测量过程保持在 $e=0$ 附近，从而提高了系统抗干扰能力和测试灵敏度。

3-4-2 测量控制系统

感应同步器在测量控制系统中应用广泛，从而构成多种功能的高精度自动控制系统。它们可以分为定位控制、轨迹控制、随动控制、补偿控制等系统类型。

1. 定位控制系统 主要用于使控制对象按指令给定值来移动位置，而对运动的速度和路径无特殊要求，重要的是完成点到点的准确定位。目前，用可编程程序控制器 (PLC) 和感应同步器测量控制系统相结合的点位控制系统，得到很好的应用。

2. 轨迹控制系统 将插补器输出的进给脉冲，转换成指令信号 θ_d 的电相角移动，即可控制感应同步器闭环伺服系统移动对应的位置 θ_x 。两个或两个以上的伺服系统（如 X 坐标及 Y 坐标）在插补器的控制下运动，就能实现轨迹控制。

3. 随动控制系统 将定尺和滑尺分别安装于主、从两个运动部件上，可实现精密的随动控制，主动部件

的位置检测信号作为指令给定值，从动部件检测信号用于反馈控制，始终使两者严格同步随动。由于它清除了机械传动副的制造、装配、变形等误差因素影响，可以获得很高的随动精度。

4. 补偿控制系统 数控系统中往往受到各种因素（如热变形、弹性变形）的影响，致使达不到精度要求，为此，也可利用感应同步器检测信号的特点来进行各种补偿控制，如构成差动补偿控制、刀具半径补偿控制、转角误差实时补偿控制、热形变补偿控制等系统。

a. 差动补偿系统 系统处于定位控制状态下，完成一个较长而复杂的工作任务时，定位点往往要有所改变，因此，要求在不改变指令给定 θ_d 的情况下，通过给定一个差动信号 $\theta_{\Delta} = \theta_d - \theta_x$ 来实现这个要求，这种系统被称为差动补偿系统。 θ_{Δ} 通常由系统中的差动变压器来实现。

b. 刀具半径补偿系统 参见第 2 章 3 节刀具半径补偿原理，可以利用旋转变压器和感应同步器的组合，来实现刀具半径的补偿控制。如图 6-5-10 所示，加工点坐标值 x_i 和 y_i 由指令给定，通过控制电路使电动机 M 转动旋转变压器转子一个 α 角。定子感应电动势为 $R\cos\alpha$ 和 $R\sin\alpha$ ，经放大分别驱动电动机 M_x 和 M_y ，转角为 $\theta_{\Delta x}$ 和 $\theta_{\Delta y}$ 。再把 $\theta_{\Delta x}$ 和 $\theta_{\Delta y}$ 分别送到 X 运动方向和 Y 运动方向的差动补偿系统中的旋转变压器，就能实现多种方式的刀具半径补偿。

上述各种测量控制系统的构成原理，见表 6-5-5。

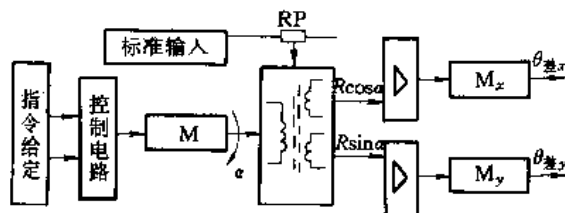


图 6-5-10 角差信号产生原理



表 6-5-5 几种测量—控制系统的构成原理

| 应用方式 | 系统类型 | | |
|-------|--------|--------|--------|
| | 定位控制系统 | 随动控制系统 | 差动补偿系统 |
| 定尺励磁 | | | |
| 滑尺励磁 | | | |
| 定尺励磁 | | | |
| 滑尺励磁 | | | |
| 脉冲调宽型 | | | |

图中符号： $a = \sin\theta_d$ $b = \cos\theta_d$ $c = \sin\theta_x \cos\omega t$ $d = \cos\theta_x \cos\omega t$ $e = \sin\theta_x \cos\theta_d \cos\omega t$ $f = \cos\theta_x \sin\theta_d \cos\omega t$ $g = \sin(\theta_d - \theta_x)$
 $h = \cos\theta_x \sin\omega t$ $i = \sin(\omega t + \theta_x)$ $j = \sin(\omega t + \theta_d)$ $k = \sin(\omega t + \theta_x)$ $l = \sin(\omega t + \theta_d)$ $m = \sin(\theta_x \pm \theta_d)$ $n = \cos(\theta_x \pm \theta_d)$
 $o = \cos(\omega t - \theta_d)$ $p = \sin[\theta_d - (\theta_x \pm \theta_d)]$ $q = \sin[(\theta_d \pm \theta_d) - \theta_x]$ $r = \sin(\omega t - \theta_d)$ $s = \sin(\omega t - \theta_d)$
 $\times \cos\theta_x$ $t = \cos(\omega t - \theta_d) \sin\theta_x$ $u = \sin\omega t$ $v = \cos\omega t$ $w = \sin(\omega t - \theta_d - \theta_x)$ $x = \sin\theta_x$ $y = \cos\theta_x$ $z = \sin(\omega t - \theta_d)$ $m' = \sin(\theta_d \pm \theta_d)$ $n' = \cos(\theta_d \pm \theta_d)$



4 旋转变压器

4.1 旋转变压器的基本原理(参见第2篇第6章)

4.2 旋转变压器的工作方式

在数控系统中,旋转变压器与上节所述感应同步器一样,也有鉴幅、鉴相和脉冲调制等工作方式。不过,因为其测量的是转角信号,通常构成半闭环的位置伺服系统。

4.2.1 鉴幅型

当定子两个绕组的励磁电压相位与频率均相同,而幅值分别与给定角位移 θ_d 的正弦和余弦函数有关,即

$$u_{11} = U_m \sin \theta_d \sin \omega t \quad u_{12} = U_m \cos \theta_d \sin \omega t \quad (6.5-2)$$

则转子正弦绕组感应电压为

$$u_{2s} = kU_m \sin(\theta_d - \theta_0) \quad (6.5-3)$$

这时,感应电压的幅值严格按指令给定角位移 θ_d 与转子初始转角 θ_0 的差值的正弦规律变化。工作于鉴幅方式的闭环控制系统原理见图 6.5-11。当 $\theta_0 \neq \theta_d$ 时, $u_{2s} \neq 0$, 直流伺服电动机旋转,直至 $\theta_0 = \theta_d$ 时停止。由于信号在传输、放大过程中,将会有相位移动,为此用基准信号作相位补偿,再由相敏放大器判断符号,决定电动机转向。

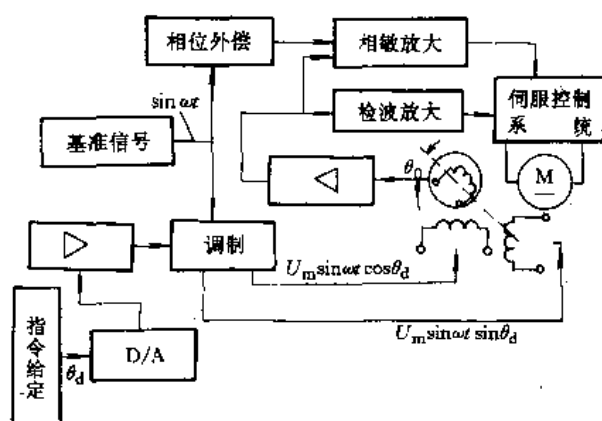


图 6.5-11 鉴幅型工作方式

4.2.2 鉴相型

其工作原理参见 4.1 节,相应的闭环控制系统见

图 6.5-12。旋转变压器的转子输出电压 u_{2s} 经放大、反馈到鉴相器与指令给定值 θ_d 比较,当 $\theta_0 \neq \theta_d$ 时,鉴相器输出为 $U = k(\theta_d - \theta_0)$,经放大后驱动直流伺服电动机转动,直至 $\theta_0 = \theta_d$ 时, $U = 0$ 。

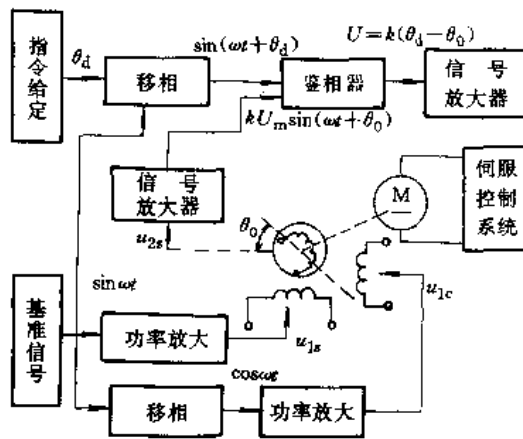


图 6.5-12 鉴相型工作方式

4.2.3 脉宽调制型

1. 工作原理 如图 6.5-13a 与 b 所示,在旋转变压器的两个定子绕组上,若分别加上励磁电压:

$$u_{11} = U_m \cos \alpha \sin \omega t \quad u_{12} = U_m \sin \alpha \sin \omega t \quad (6.5-4)$$

式中, α 为脉冲调宽相角,可变范围为 $0 \sim 360^\circ$ 。其合成磁通为

$$\Phi(t) = -\frac{U_m}{\omega N_1} \cos \omega t \quad (6.5-5)$$

设转子绕组的法向与 Φ_1 夹角为 δ ,则合成磁通 Φ 在转子绕组中产生的感应电压为

$$u_{2s} = kU_m \sin(\delta - \alpha) \sin \omega t = U_{CM} \sin \omega t \quad (6.5-6)$$

通常设 $k = N_2/N_1 = 1$,即 $U_{CM} = U_m \sin(\delta - \alpha)$,当 $(\delta - \alpha)$ 值变化范围为 $\pm \pi/2$ 时,则

$$U_{CM} = \begin{cases} > 0 & \delta > \alpha \text{ 时} \\ = 0 & \delta = \alpha \text{ 时} \\ < 0 & \delta < \alpha \text{ 时} \end{cases} \quad (6.5-7)$$

于是可得到图 6.5-14 所示的特性。利用此特性可使 α 跟随 δ 而变化。设闭环反馈系统的初始状态 $\alpha = \delta$ 。当转动转子,增大 δ 时, $(\delta - \alpha) \neq 0$ 。用转子绕组的感应电压 u_{2s} 作为反馈信号,由于 α 落后于 δ ,由 $(\delta - \alpha)$ 值产生一定频率的脉冲信号去控制 α 角的变化。当转子旋转越快, $|\delta - \alpha|$ 值越大,产生的脉冲频率越高,使 α 角跟随 δ 角也越快,反之亦然。当转子停止时, $\alpha = \delta$ 。

在位置检测装置中,可以认为 $\alpha \approx \delta$,控制 α 角度变化的脉冲数可用来代表 δ 角的变化值,也就是代表



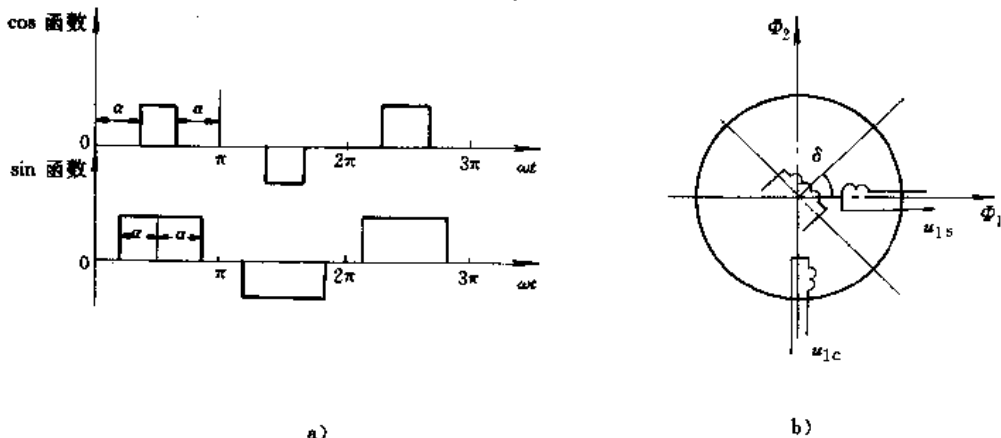


图 6-5-13 脉宽调制型工作方式

a) 励磁电压 b) 合成磁通

该轴的位移测量值。

2. 应用实例 7M 数控系统中的位置检测装置就

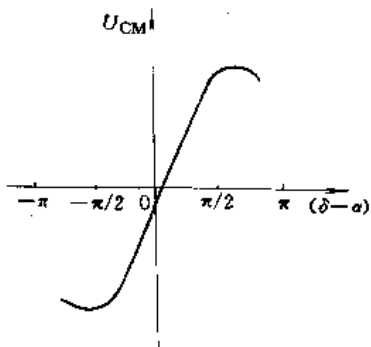


图 6-5-14 U_{CM}

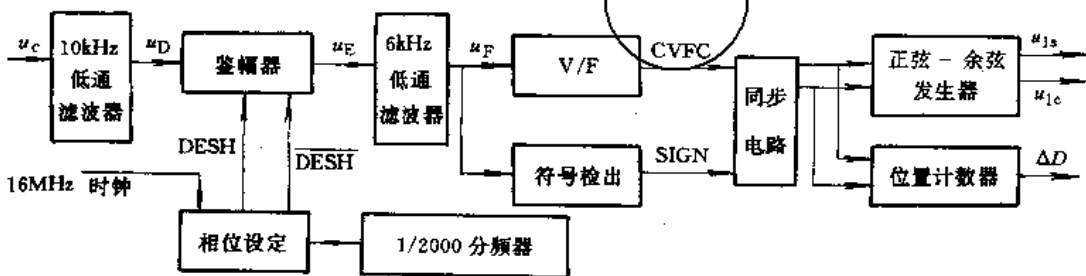


图 6-5-15 位置检测装置

DESH、 $\overline{\text{DESH}}$ —8kHz 方波

开关电路,见图 6-5-16。放大器 A_1 的增益 $k_1=6.8$, A_2 为反相器,当 u_D 正半波时 S_1 接通,负半波时 S_2 接通,经反相使 u_E 端均为正向半波信号。由于 u_D 经滤波后有一个小的移相角 ϵ ,因此分频器前必须有相位设定电路,以保持 DESH 信号与 u_D 同相,而获得最大的鉴幅输出信号 u_F 。

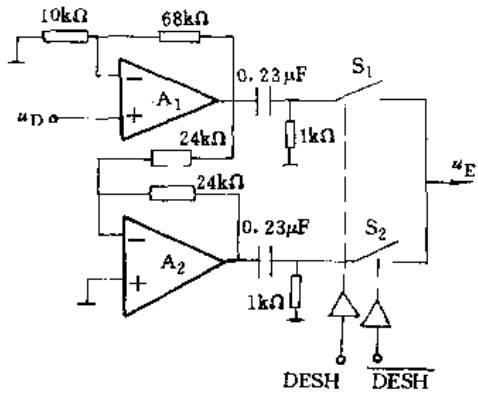
b. 正弦-余弦发生器 它由一个 JK 触发器作为计数器的混合电路、两套分频比为 1000 的计数器和正

是根据上述原理,由鉴幅器、V/F 变换器、正弦-余弦发生器、位置计数器等部件组成,见图 6-5-15。由正弦-余弦发生器产生的 8kHz 的正、余弦电压被送到旋转变压器的定子绕组,其转子绕组感应出信号电压 u_2 作为输入信号 u_c ,经 10kHz 低通滤波器去除谐波和干扰信号后送鉴幅器,鉴幅后输出电压 u_E 再经 6kHz 低通滤波器,获得平滑的直流电压 u_F 。V/F 和符号检出电路是将 u_F 变换成频率与其成正比的脉冲序列 CVFC 和符号信息 SIGN,这两个信号经同步电路后被送到正弦-余弦发生器和位置计数器,前者用来控制相角 α ,产生脉宽调制的正弦-余弦电压,后者由计数器计数,表示该段时间内的位移量 ΔD 。

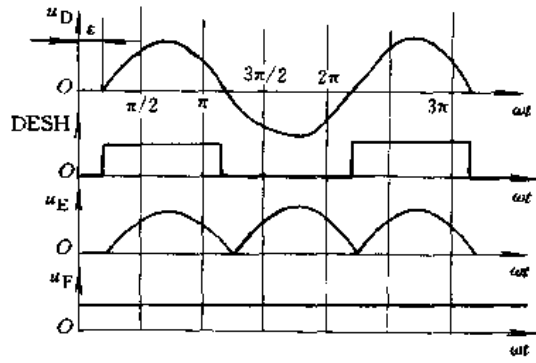
a. 鉴幅器 是一个带放大器和反相器的电子

弦-余弦波形组合门电路及驱动电路组成,见图 6-5-17a。计数器 1 输出波形 A 滞后 α 角, B 滞后 $90^\circ + \alpha$, 而计数器 2 输出波形 C 超前 α 角, D 滞后 $90^\circ - \alpha$ 。其组合门电路的逻辑关系为 $E = \overline{A} \cdot C$, $F = \overline{A} \cdot \overline{C}$, $G = \overline{B} \cdot D$, $H = \overline{B} \cdot \overline{D}$ 。经驱动电路。实际加在旋转变压器定子绕组的电压为 $u_{1s} = F - E$ 和 $u_{1c} = H - G$ 。这就是所要求的余弦和正弦调宽脉冲波形,见图 6-5-17b。而 α 角实际上是受脉冲 CVFC 和符号 SIGN 信号控制,在





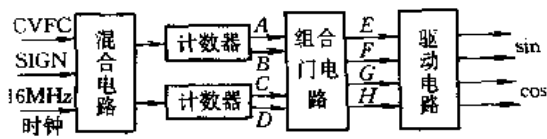
a)



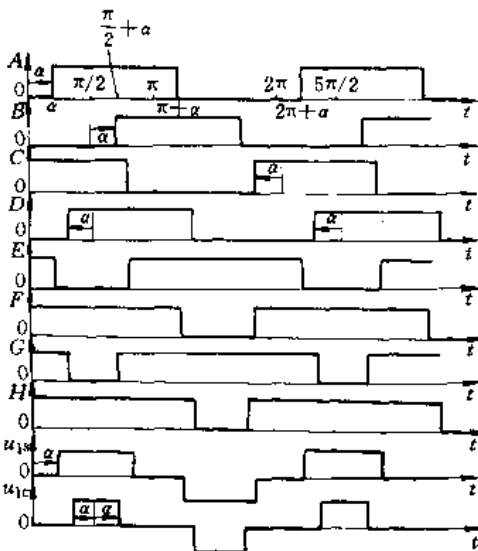
b)

图 6-5-16 鉴幅器原理与波形

a) 原理图 b) 波形



a)



b)

图 6-5-17 正弦-余弦发生器

a) 原理图 b) 波形

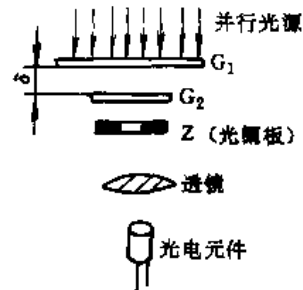
混合电路中输入一个正向脉冲时，计数器 1 封闭一个脉冲，即延时一个时间周期；而对计数器 2 而言，要加一个计数脉冲，以超前一个时钟周期；反之亦然。这样就起到改变 α 角的作用。

5 光栅

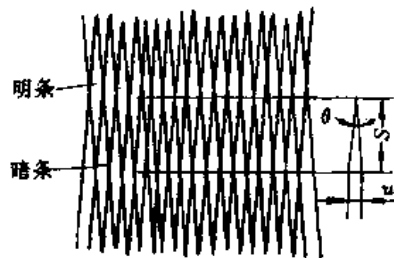
5.1 光栅的基本原理

通常把能透射或反射光线的等间距排列的细条狭

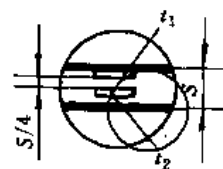
缝称为光栅。相邻两条刻缝间的距离称为栅距。单位长度（通常指毫米）内的条纹数目称为刻线密度。



a)



b)



c)

图 6-5-18 光栅检测原理

a) 光栅装置 b) 莫尔条纹 c) 节距 S



光栅位置检测装置由光源、长光栅与短光栅、光闸板和光电器件等组成,见图6·5-18a。长光栅 G_1 被固定于移动部件上,称为标尺光栅;短光栅 G_2 装在静止部件上,称为指示光栅。两块光栅的刻线密度应相同,并且互相平行,保持一定的间隙 δ (如0.05~0.1mm);光闸板Z的缝宽为1/2栅距。

1. 莫尔条纹生成 如果将指示光栅在安装平面内旋转一个很小角度 θ ,使两块光栅的刻线相交,在相交处即出现黑色条纹——莫尔条纹,见图6·5-18b。设栅距为 w ,光栅线条间夹角 θ (rad),则莫尔条纹的节距

$$S = \frac{w \cos(\theta/2)}{\sin\theta} \approx \frac{w}{\theta} \quad (6.5-8)$$

上式表明,莫尔条纹的节距是栅距的 $1/\theta$ 倍,当标尺光栅沿X方向移动一个栅距 w 时,莫尔条纹将沿垂直于光栅的Y方向移动一个节距 S ,在光闸板狭缝处就检出一条莫尔条纹,通过透镜和光电元件检测出移过的莫尔条纹数目 N ,就可知道X方向的位移量: $X = Nw$ 。

2. 莫尔条纹特点

a. 放大作用 由于 $S = w/\theta$,当 θ 很小,取为0.001rad时,则 $S = 1000w$,相当于把栅距放大1000倍,从而大大减轻了光电系统的增益要求和复杂程度。这是光栅技术的重要特点。

b. 平均效应 如果刻线密度为100线,节距为10mm的莫尔条纹就有1000条线纹组成。这样,栅距误差将被平均化,也就是说 S 的误差取决于 $1/\theta$ 条光栅刻线的平均误差。

c. 可逆性 莫尔条纹的移动方向不仅与指示光栅移动方向有关,而且与标尺光栅和指示光栅间的相对转角方向有关,并具有可逆性,见表6·5-6。为了判别莫尔条纹的移动方向,可在光闸板上刻有相距为 $S/4$ 的两条狭缝 t_1 和 t_2 ,这样光电元件接受到的是通过两条狭缝的光线所生成的电信号,虽然它们波形一致,但相位差 $1/4$ 周期,由此可以判别莫尔条纹移动方向。

表 6·5-6 莫尔条纹可逆性

| 莫尔条纹 指示光栅 相关转角 θ | 左 移 | 右 移 |
|-------------------------------|----------------------|----------------------|
| 逆时针方向 $+\theta$ | 下移(t_1 信号超前1/4周期) | 上移(t_2 信号超前1/4周期) |
| 顺时针方向 $-\theta$ | 上移(t_2 信号超前1/4周期) | 下移(t_1 信号超前1/4周期) |

5.2 光栅的分类

5.2.1 透射与反射光栅

根据透射与反射的不同光学原理,光栅可分为透射光栅和反射光栅两类。

1. 透射光栅 是在光学玻璃的感光材料涂层上或金属镀膜上做成光栅条纹。这种光栅通常用于中、小型机床等场合,其优点是:

(1) 光源可采用平行入射光,光电元件可以直接接受。因此,光电结构比较简单,取得信号的幅值也较大。

(2) 刻线密度高,一般为10、25、50、100、200和250线/mm,从而减轻了电子线路的负担。

2. 反射光栅 是在抛光不锈钢带的镜面上用照相腐蚀工艺制造或钻石刀直接刻划而成,其特点是:

(1) 标尺光栅的线膨胀系数与普通钢、铸铁等较一致。

(2) 标尺光栅的安装、调整方便,可用螺钉直接固定,不易破碎。

(3) 容易制成长光栅或将几根短光栅接长。

(4) 为了使反射后莫尔条纹反差大,刻线密度不宜太高,一般为4、10、25、40、50线/mm。

5.2.2 直线光栅与圆光栅

根据测量直线位移和角位移的对象不同,光栅还可分为直线光栅与圆光栅两类。圆光栅是在圆形底座的外环端面上,制成黑-白间隔的条纹。根据不同使用要求,条纹数也不同:

(1) 六十进制的,如10800,21600,32400,64800条等。

(2) 十进制的,如1000,2500,5000条等。

(3) 二进制的,如512,1024,2048条等。

5.3 光栅的测量装置

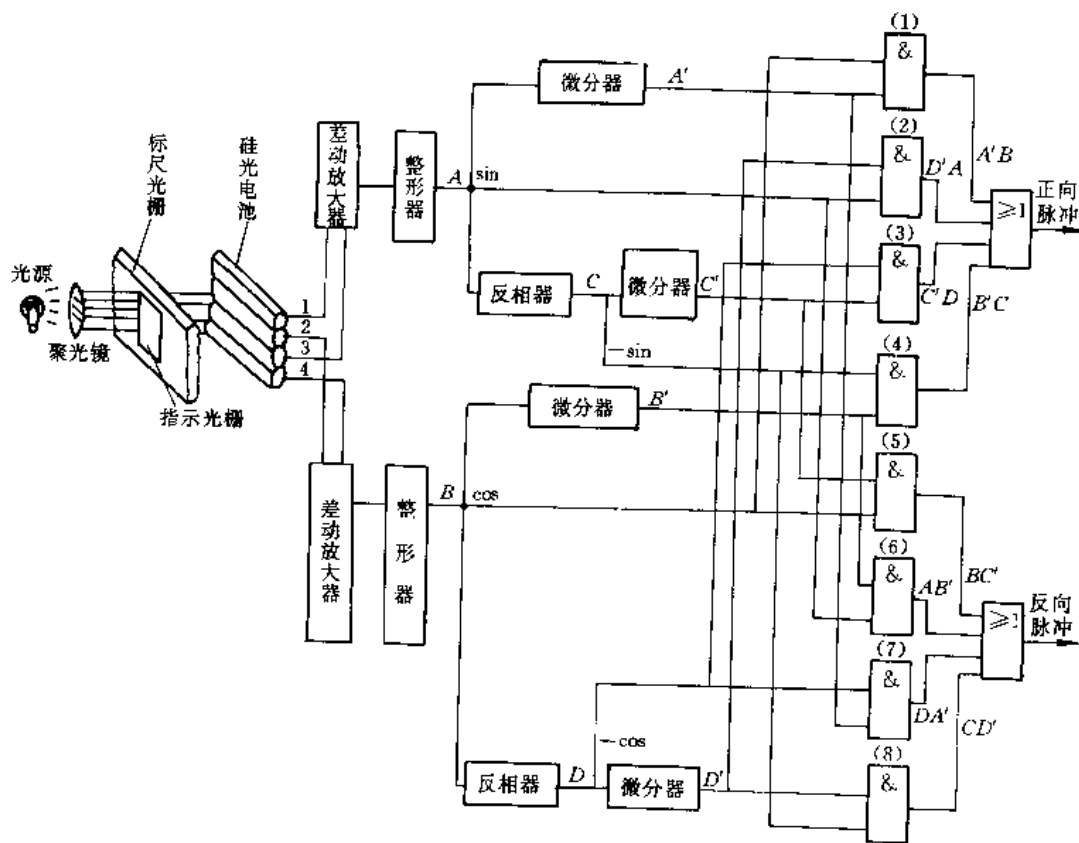
5.3.1 读数头

实际使用的光栅测量装置,多数是把光源、指示光栅和光电元件组装在一起,称为读数头。读数头的结构形式很多,且各有特点,见表6·5-7。

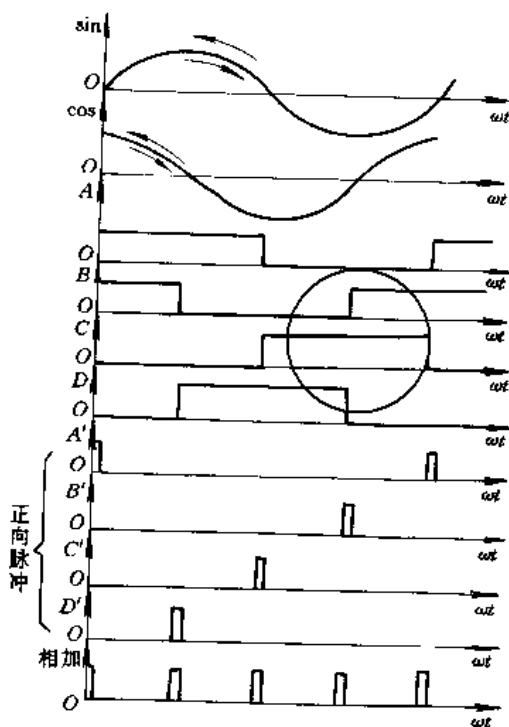
5.3.2 装置原理

如图6·5-19a所示,采用4个硅光电池构成四倍





a)



b)

图 6-5-19 光栅位置检测装置原理

a) 光栅检测装置 b) 波形



表 6-5-7 读数头类型与特点

| 读数头类型 | 结构原理 | 特点 |
|---------|------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 垂直入射读数头 | | <ol style="list-style-type: none"> 1. 应用于刻线密度为 25~125 线/mm 的玻璃透射光栅系统 2. 间隙 δ 决定于光波波长 λ 和栅距, 且 $\delta = w^2/\lambda$ 3. 其精度可高达 0.001/1000mm |
| 分光读数头 | | <ol style="list-style-type: none"> 1. 刻线截面为锯齿形, 其倾斜角 β 决定于光栅材料折射率和入射光的波长 2. 栅距与间隙 δ 均较小, w 约为 0.004mm 3. 常采用左图所示的“等倍投影系统”, 以弥补 δ 小在应用上带来的困难 4. 适用于高精度、精密测量场合 |
| 反射读数头 | | <ol style="list-style-type: none"> 1. 应用于 25~50 线/mm 以下反射系统 2. 经过准直透镜 T1 的平行光, 与光栅法面间的 λ 射角 α, 一般为 30° |

注: 图中, L—光源; $T_1 \sim T_4$ —透镜; G_1 、 G_2 —光栅; Z—光栅板; A—受光元件。

频线路,其目的是为了提提高光栅分辨精度。当系统有直线位移时,硅光电池就产生正弦波电流信号,经差动放大(5G922)、整形(射极跟随),获得 A、B 两路方波,再由反相、微分和逻辑门电路,组合成正向输出脉冲,见图 6-5-19b。反向输出脉冲可按同理类推。

若光栅栅距 $w = 0.02\text{mm}$, 四倍频后,每一个脉冲就相当于 0.005mm , 分辨精度提高了 4 倍。同理,倍频数还可适当提高,但要细分到 20 倍以上就较困难了。

6 磁尺

磁尺位置检测装置是一种较为新型的检测元件。它制造简单,采用激光录磁可有较高精度;对使用环境要求低,不受油污影响,对电磁场抗干扰能力强;在机床上录制磁尺无安装误差,有利于大型精密数控机床应用。特别随着新型高导磁磁性材料的开发,更显得有

发展前途。磁尺的工作原理可参见图 6-5-20。

1. 磁性标尺 是在非导磁材料的基体上镀有一层导磁薄膜,其磁化信号可以是脉冲、正弦波或饱和磁波。信号节距 λ 一般有 0.05、0.1、0.2、1mm 等几种。磁膜厚度的均匀度要求为 $10 \sim 20\mu\text{m}$ 。

2. 磁头 磁尺位置检测装置中使用的磁头均为“磁通响应型”,它利用可饱和铁心的磁性调制器原理制成。它可以在低速移动,甚至静止时检测出磁性标尺上的磁化信号。当励磁线圈上通入高频励磁电源后,在读取线圈上就有调制信号输出,其载波频率是励磁电流频率的两倍,感应电动势 e 为

$$e = E_0 \sin \frac{2\pi x}{\lambda} \sin 2\omega_1 \quad (6-5-9)$$

式中 x ——位移量;

E_0 ——常系数;

λ ——磁化信号的节距;

ω_1 ——励磁电流频率。

由于 e 信号很小(几~十几毫伏),可以采用几个或几十个磁头以一定方式串联起来组成多道磁头。这样不仅加大了输出电压,还可以提高分辨力和精度。

为辨别位移方向,通常采用间距为 $(m \pm 1/4)\lambda$ 的两组磁头(见图 6-5-20b), m 为任意整数,其输出电压分别为

$$e_1 = E_0 \sin \frac{2\pi x}{\lambda} \sin \omega t \quad e_2 = E_0 \cos \frac{2\pi x}{\lambda} \sin \omega t \quad (6-5-10)$$

即可根据 e_1 和 e_2 相位的超前与滞后,来判别位移方向。

3. 工作方式 磁尺与感应同步器相类似,也可分为直线磁尺和旋转磁尺两类,且均为模拟量输出。根据所配检测电路的不同,工作方式也可分为幅值检测和相位检测两种。

相位检测方式是将第一组磁头的励磁电流移相 $\pi/4$, 或者将其输出移相 $\pi/2$, 则其输出电压为

$$e_1 = E_0 \sin \frac{2\pi}{\lambda} x \cos \omega t \quad (6-5-11)$$

此时再将两组输出电动势相加,总输出为

$$e = e_1 + e_2 = E_0 \sin \left(\frac{2\pi}{\lambda} x + \omega t \right) \quad (6-5-12)$$

相位方式的检测电路与感应同步器相似。

幅值检测方式见图 6-5-21,两个读取磁头通以同频率、同相位、同幅值的励磁电流 i_1 和 i_2 , 但两个读取磁头相位差为 90° , 即

$$i_1 = i_2 = I_m \sin \frac{\omega}{2} t \quad (6-5-13)$$



两个磁头输出电压分别为

$$e_1 = U_m \sin \frac{2\pi}{\lambda} x \cos \omega t \quad e_2 = U_m \cos \frac{2\pi}{\lambda} x \cos \omega t \quad (6.5-14)$$

上式表示的调幅波是以位移量 x 为调制信号，即调制信号的幅值随 x/λ 而变化。信号的解调过程见图 6.5-21b，将其输出脉冲送至可逆计数器，即可用来进行伺服控制或数字显示。

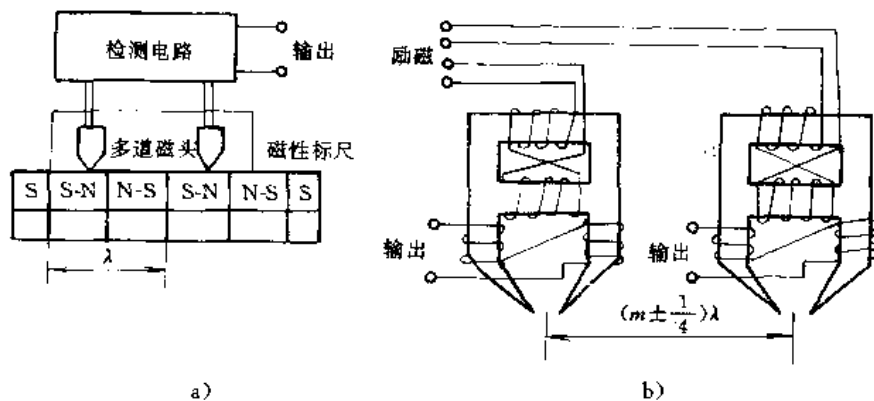


图 6.5-20 磁尺工作原理
a) 磁尺检测装置 b) 磁头

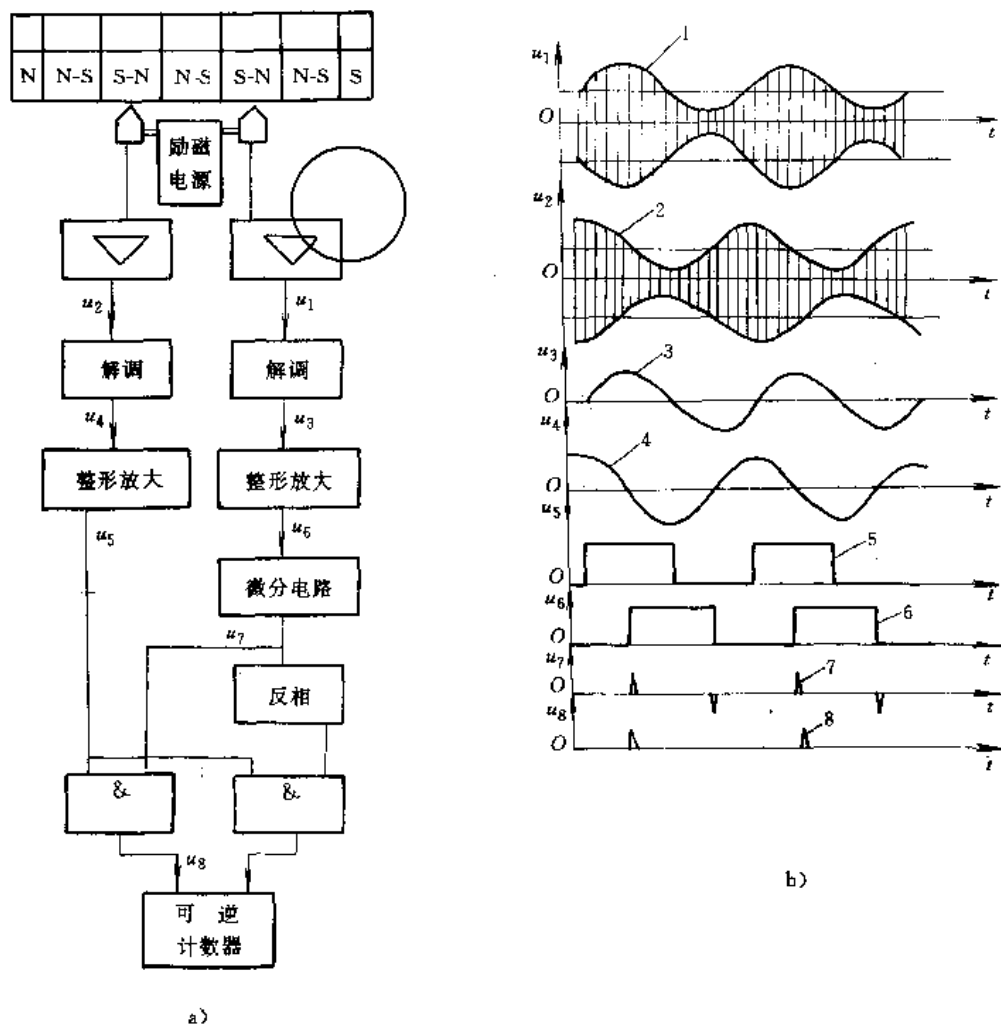


图 6.5-21 磁尺幅值检测方式
a) 原理图 b) 波形



第6章 计算机数控系统

1 计算机数控系统概述

随着近代电子学和计算机技术的飞速发展，数控系统已经由传统的数控发展成计算机数控(CNC)，如果把传统的数控系统称为硬件数控的话，那么计算机数控可被称为软件数控。目前在CNC系统中已经不是采用小型计算机，而是采用以微型计算机(以下简称为“微机”)为主的结构系统。

计算机在CNC系统中主要用来进行数值和逻辑运算，对于各类被控对象进行实时控制。当被控对象或生产产品改变时，只要修改计算机中控制软件，就能按一种新的工艺要求实现数字控制，因此CNC系统的控制软件易于修改和扩展，并具有多种控制功能，这要比

传统数控优越而又方便得多。

1.1 计算机数控系统的定义

CNC系统按美国电子工业协会(EIA)所属的数控标准化委员会的定义是：用一台存储有程序的计算机，按照存储在计算机内部读写存储器中的控制程序去执行数控装置的一部分或全部功能，在计算机之外的唯一装置是接口，这种数字控制装置被称为CNC装置。

1.2 计算机数控系统的组成

CNC系统通常由微型计算机(包括中央处理器、存储器、系统总线)和各种输入/输出接口电路组成，系统组成框图见图6-6-1。

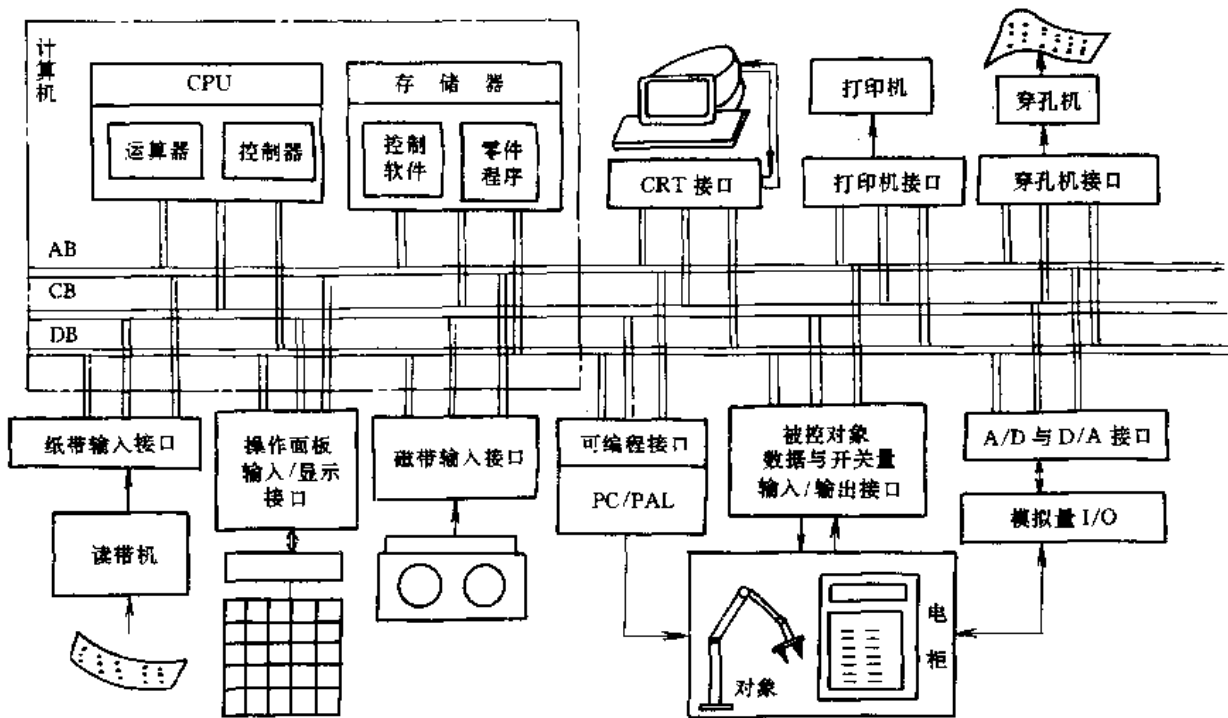


图 6-6-1 CNC 系统组成框图

CNC系统中计算机可以采用现成微机系统，也可以是生产厂家自己制造的专用微机，通常要求其运算频率高、存储容量大、字长为16位或32位。它们品种繁多，性能指标不一，但其组成都大致相同。

中央处理器 (Central Processing Unit—CPU)

包括有运算器和控制器两部分。运算器是一种能对来自数据总线(Data Bus—DB)的数据进行算术和逻辑运算的单元。控制器是CNC系统的核心部分，一方面能依次取出控制程序的指令，通过译码，在指令周期的时序控制下，向CNC系统的各部分发出控制信号，



完成执行任务；另一方面又能及时接收来自执行部件发出的反馈信息，决定下一步的命令操作。

存储器用于存储控制软件与用户的零件加工程序，并将运算的中间结果或处理后的工艺参数保存起来。一个存储器的可存储全部信息的总量为存储容量，通常以1KB为单位（1KB=1624B）。随着被控对象复杂化、加工零件数量的增多，对存储器容量的要求也将不断增加，而且需要有只读存储器（Read Only Memory——ROM）和随机存取存储器（Random Access Memory——RAM）等多种类别。

系统总线包括专门用来传送地址代码、控制代码和数据的地址总线（Address Bus——AB），控制总线（Control Bus——CB）和数据总线。它们是系统信息传递的主干道。

输入/输出设备及其接口是CNC系统实现人机联系的必要通道。典型的CNC系统的输入设备有读带机、磁盘（硬盘和软盘）驱动器、磁带机和操作面板等；输出设备有纸带穿孔机、打印机和CRT（Cathode-Ray Tube）显示器等，而磁盘驱动器和磁带机可兼作输入和输出设备。

1.3 计算机数控系统的特点

CNC系统通常具有如下几个特点：

1. 灵活性大 传统的数控系统，当控制对象改变或者生产工艺要求更新时，必须相应地改变其硬件电路及其连线；而对于CNC系统，由于它是程序数字控制，只要修改其相应软件功能，就能满足上述的要求。因此，CNC系统具有极大灵活性。

2. 可靠性高 CNC系统具有很高的可靠性，主要体现在以下两个方面。

(1) 在CNC系统中，以微处理器为基础，利用可编程控制器（Programmable Controller——PC）的逻辑功能，代替了传统数控装置中M、S、T代码的继电器控制和其他许多硬件电路，这不仅使系统的信息处理速度加快，并且元器件的出错率也大为下降，因此大大地提高了系统可靠性。

(2) 传统的数控装置，在生产加工过程中，加工程序是由读带机逐个读入，依次执行的，而CNC系统中可以将加工程序一次性读入到读写存储器中，并可长时间保留，这样，既可减少输入故障，又有利于系统稳定、可靠工作。

3. 功能性强 由于目前计算机已经具有超高性能的运算能力、完备的多级中断功能和丰富的指令系

统，因此可以很容易地实现诸如高次曲线的轨迹插补运算、刀具半径补偿、多轴联动等多种复杂功能。

4. 通用性好 随着大规模与超大规模集成电路不断研制和开发，目前CNC的硬件多数是采用模块结构，接口电路也可由标准的部件来组成。标准化与模块化不仅为CNC系统结构和用户带来极大方便，而且更主要的是使CNC系统具有很强通用性。对于不同被控对象和用户要求，可以配以不同的系统组件和控制软件。

5. 维修方便 CNC系统中，可以通过配置工程师面板和诊断软件，方便地进行系统调试、硬件故障寻找和软件查错。这不仅使调试与维修工作十分方便，而且还具有保护被加工零件的能力（如能保证零件程序数据的正确性，监视程序数据在被控对象上的执行情况，并能及时检出错误，保证被加工零件不致成为废品等）。

6. 具有通信能力 为了对CNC系统实现集中控制和现代管理，通信是不可缺少的重要功能。特别是当CNC被应用于计算机直接数控（Direct Numerical Control——DNC）、FMS和CIMS系统时，则要求系统间具有更强的通信联络能力。

2 计算机数控和微机

2.1 对微机的功能要求

对CNC系统中计算机的功能评价，除了上述的指令字长、运算速度和存储器容量以外，另一个重要指标是指令系统功能（包括基本指令条数、指令结构和寻址方式等）。由于通用计算机指令系统的基本指令数多，寻址功能强，因此采用现成裸机的CNC系统，其系统软件往往并没有充分利用这些计算机的指令系统功能和寻址能力；与此相反，采用自制计算机的CNC系统，虽然其指令系统功能不如现购计算机的强，但较适合数控系统软件使用。如美国AB（ALLEN-BRADLEY）公司的7360系统所采用的计算机，其基本指令数为76条，寻址方式简单，只有直接寻址、间接寻址、本页寻址和零页寻址四种方式。

此外，CNC系统还要求计算机具有一定数量的输入/输出通道（接口）和较完善的中断系统。因为在CNC系统中接有许多输入/输出设备（如各种开关、按键、读带机、信号指示灯、输出显示和电传打印机等），而这些设备经过输入/输出接口电路与微机相连接，同时为了对被控对象的控制和测量，也必须留有足够的通道数。中断是计算机中一种非常有效的信息交换方式，它可以解决CPU高速运算与低速外围设备间的信



息传输的矛盾,提高CPU的工作效率;应用中断还可以处理一些随机情况,并能及时处理实时信息,因此CNC系统中,对计算机完善的中断功能要求是极为重要的。

由于16位微机越来越多,其性能/价格比也越来越高,目前在CNC系统中,有采用多台16位微机的,它们间采用适当连接方法来增强CNC系统功能,满足被控对象对性能日益提高的要求。如有的CNC系统将其基本功能划分为输入/输出、插补运算与定时,以及伺服控制三部分,可以分别用三台微机进行控制。

2.2 典型系统中微机功能简介

由日本富士通(FANUC)公司和德国西门子公司联合设计的7M系统,是一种带有固定软件的高精度、高性能的闭环CNC系统。系统中计算机是采用为该系统专门设计的AM2901位片式双极型高速16位字长微处理器。它们主时钟频率为5.741MHz,脉冲当量为0.001mm时,最高位移速度可达15m/min,内部存储器有三种,即

(1) 存放处理机控制程序的22KB容量的半导体EPROM(Electrically Programmable ROM)存储器。

(2) 存放工作参数的1KB容量的CMOS(Complementary Metal-Pxide-Semiconductor)随机存取存储器(RAM)。

(3) 有用来存储工作过程中的状态和数据的1KB容量的NMOS(N-Channel Metal Oxide-Semiconductor)RAM,作为CNC系统工作存储器区域。此外,为了存放数控加工用的用户程序,根据用户需要,可以选

用适量的“零件程序存储器”,7M系统的可选容量是8KB CMOS RAM和96KB动态RAM,以及1KB NMOS RAM的缓冲存储器。

7M系统的指令系统很有特色。例如,为了便于作各种运算,专门设有乘、除运算指令;为了保证运算精度,很多算术、逻辑操作指令能直接对双字长操作数进行运算;为了便于判断四个位移方向的某些标志位,专门设有特殊寻址方式的位测试指令,可以编制循环程序。它的具体功能有:

(1) 指令长度有单字长指令和双字长指令两种,双字长格式的指令可以用来扩展寻址方式。

(2) 按指令功能大致可以分为7大类:存取类指令,算术、逻辑操作类指令,位移类指令,位测试类指令,跳转类指令,中断指令和停机指令等。

(3) 寻址方式有立即数寻址、寄存器寻址和存储器的间接寻址、自增间接寻址、绝对寻址和变址寻址等方式。

(4) 微程序结构,即每一条机器指令对应于一段微程序,而微程序由若干条微指令组成,机器周期中一个节拍执行一条微指令,每一条微指令由若干位组成。这些位分别具有位控制作用和决定下一条微指令的微地址作用。

(5) 中断功能强,系统除了具有硬件中断以外,还有软件中断。数据程序的工作流程,如输入处理、插补运算等功能模块都是以软件中断方式调用的。

在7M系统中共有8个中断级别(见表6-6-1),并且允许多重中断。

由此可知,7M系统中的微机是为该CNC系统

表6-6-1 7M系统中断功能表

| 中断级别 | 主要功能 | 中断源 |
|-------|---------------------------|-------------|
| 0 (低) | 控制CRT显示 | 硬件 |
| 1 | 数控指令译码处理, 刀具中心轨迹计算, 显示控制 | 软件, 16ms定时 |
| 2 | NC键盘监控, I/O信号处理, 穿孔机控制 | 软件, 16ms定时 |
| 3 | 外部操作面板和电传机处理 | 硬件, 8ms软件定时 |
| 4 | 插补运算、终点判别及转段处理 | 软件, 8ms定时 |
| 5 | 读带机阅读纸带处理 | 硬件或软件(需要时) |
| 6 | 伺服系统位置控制处理 | 4ms时钟 |
| 7 (高) | 通过7M测试板进行存储器数据读、写, 程序调试处理 | 硬件 |

专门设计的。它不但具有一般微机的共性,而且更适合于数控系统的工作要求和特点。

3 计算机数控系统中的输入和显示

在被控对象进入工作状态前,CNC系统需要输入

控制程序的工作参数,并要求实时显示;在控制过程中,还需要显示工作过程中的各种状态和数据;当系统发生故障时,应显示故障信号;并当进入故障诊断时,及时显示出诊断结果等。因此,输入设备、输入接口和显示装置是CNC系统的重要组成部分。



3.1 输入设备及其接口

3.1.1 输入设备

CNC 系统中的输入设备通常有 NC 操作面板、读带机等。

1. NC 操作面板 它通常由电源开关、用来给定刀具相对工作运动速度(通常称为进给功能,或简称 F 功能)的 F 电位器和内部位置显示器、手动数据输入/显示 (Manual Data Input—MDI/Display and Panel—DPL) 单元和紧急停止按钮等组成。其中 MDI/DPL 单元又包括状态指示灯、地址键、数字键、控制

键、通用显示器和号码显示器等部分,它们的作用见表 6-6-2。

2. 读带机 在 CNC 系统中,通常仍然采用读带机,用来输入零件程序(用户程序)及相关数据,但它的作用已经不同于 NC 装置中的作用。在 NC 装置中,每加工一个零件,就需要将穿孔纸带在读带机中运行一次,这样很容易磨损和变脏,造成输入故障。而在 CNC 系统中,全部零件程序可以一次输入,存入规定的存储区,并且程序员可以将任一零件程序调用到显示器中显示,进行校核和修正。每当加工某一零件时,便从存储器中调出该零件程序,并投入运行,进行加工。由此,可以大大避免读带机的输入故障。

表 6-6-2 MDI/DPL 单元部件与作用

| 部件名称 | 作用 | 功能指示 |
|-------|----------------------------|----------------------------------------------------|
| 状态指示灯 | 指示 NC 装置现在的工作状态 | 表示:正在循环、进给保持、到位、程序停止、报警、暂停、基准点指示等 |
| 地址键 | 有字母键和“/”键 | 在选择数据显示、手动数据输入、纸带编辑等操作中,由这些键形成数控指令 |
| 数字键 | 有数字 0~9 和负号键 | |
| 控制键 | 子方式键 | 如有缓冲存储器子方式,工作存储器子方式,数据或参数设定子方式,主程序或子程序子方式,校正程序子方式等 |
| | 操作控制键 | 与地址键、数字键、子方式键和显示器相配合 |
| 通用显示器 | 用来显示各种数据 | 如地址显示和数据显示等 |
| 号码显示器 | 是 4 位数据显示器,用于显示报警号、顺序号和数据值 | |

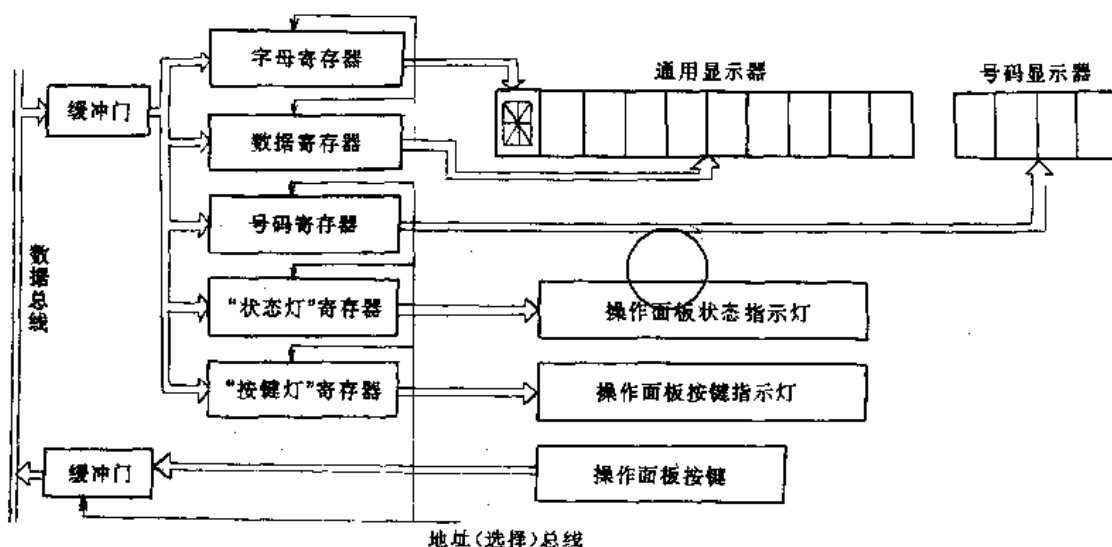


图 6-6-2 NC 操作面板接口框图



3.1.2 输入接口

输入接口是输入设备和微机系统间连接电路的统称。根据输入设备不同，可以有数控（NC）操作面板接口和读带机接口等。

1. NC 操作面板接口 它是数控箱上操作面板和系统微机间的接口，见图 6-6-2。

NC 操作面板接口的作用是接收 NC 面板上的按键信号，将按键灯、状态灯、号码显示器和通用显示器所需数据送至 NC 面板。计算机 CPU 定时（如每隔 16ms）对 NC 面板上的所有按键扫描一遍，如果有按键信号，软件就作相应处理，并将处理结果（数据信息）在显示器上显示出来，或点亮相应按键灯、状态灯。

2. 读带机接口 该接口电路由纸带进给控制电路、走带和纸带盘控制电路以及孔信号接收电路组成，见图 6-6-3。纸带进给和走带控制电路是接收来自计算机控制信号，去驱动正、反向驱动电动机与相应电磁铁控制走带方向，或停止走带；并且根据有人-机联系作用的受卷盘控制开关和人工正、反向绕带控制开关，以及调节卷带松紧程度的左、右臂开关等信号来带动盘旋转电动机；孔信号接收电路是以发光二极管为光源，光敏晶体管为光信号接收器。纸带的 8 孔光信号被变换为电信号后经放大，送到纸带数据寄存器，而纸带中导孔光信号同样被变换为电信号后经放大，送至脉冲发生电路，产生脉冲至中断请求触发器，向微机发出第 5 级中断请求信号。

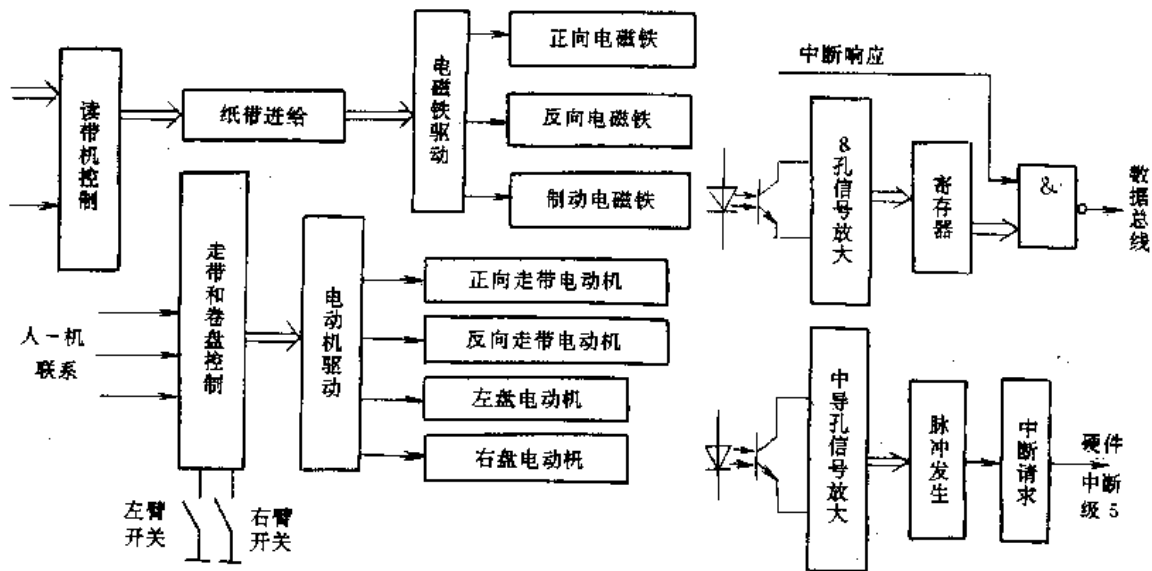


图 6-6-3 读带机接口框图
a) 纸带进给与走带控制 b) 孔信号接收

3.2 显示设备及其接口

在传统的 NC 系统中，通常采用数码管、信号灯等作为简单的显示。随着微机技术的迅速发展，CNC 系统中，都采用了显示功能强的 CRT 屏幕显示。它不仅能显示各种表格、数据、程序和操作信息、工作状态等，还能显示二维轨迹图形，有的还可以实现三维彩色动态图形的显示，成为 CNC 系统中的重要组成部分，同时 CRT 显示装置也是 CNC 系统实现人-机会话式编程的重要工具。这里介绍几种典型 CNC 系统中的 CRT 显示装置和接口电路。

3.2.1 FANUC 7M 数控系统的 CRT 显示装置与接口

FANUC 7M 数控系统的 CRT 显示控制与接口见图 6-6-4。它的 CRT 显示器可以用来显示各条数控指令内容、所设定的参数值、加工轨迹、偏移量和多达 80 余种报警信号（以数字序号来区分），以及各种故障诊断结果。CRT 的控制程序是存放在固定区域的 EPROM 中（占 6KB 容量），并且在 1KB 容量的 NC-MOS RAM 工作存储器区域中选用了 32 个地址单元作为 CRT 的工作存储器；选用了 480 个地址单元作为刷新存储器的复制存储器区域。凡是需要写入刷新存



储器的内容,先与该复制存储器区域中的内容作比较,如两者不同,则同时写入复制存储器和刷新存储器;不然,即表示要写入的字符已与原刷新存储器的内容相

同,可不必重写。

由图 6-6-4 可知, CRT 显示控制电路是由时序电路、刷新存储器及其地址控制电路、字符发生器和

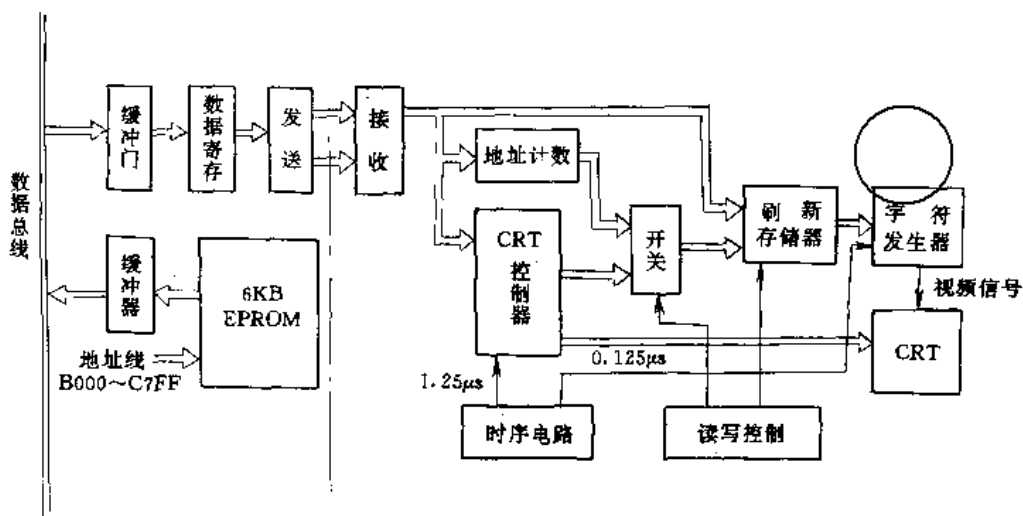


图 6-6-4 FANUC 7M 系统 CRT 显示控制与接口

CRT 的水平与垂直同步脉冲产生电路所组成。其中,刷新存储器的读出地址和水平、垂直同步脉冲,均由一块作为 CRT 控制器的大规模集成电路 (HD-46505R) 生成。刷新存储器的写入地址和数据是由数据总线经双线发送/接收器依次送来,写入地址先被送到地址计数器寄存,再由双路开关来选通刷新存储器的地址,并将由数据总线送来的数据写入刷新存储器。

FANUC 7M 系统的 CRT 显示采用光栅扫描方式,每帧扫描 272 条线,行扫描周期为 63.75μs,帧扫描周期为 18.36ms。整个画面可按纵、横方向 15×32 个字符排列方式显示 480 个字符。

3.2.2 ACRAMATIC 900 数控系统的 CRT 显示装置

美国辛辛那提-米拉克隆公司生产的 ACRA-MATIC 900 计算机数字控制系统 (以下简称 900 系统) 的重要特色是采用“菜单”式操作方法,并在 CRT 显示装置上显示出各种操作功能,在初始状态时,显示器提供的“菜单”有 5 个操作类别:

- 程序控制 PGM CONT
- 设置 SETUP
- 刀具管理 TOOL MGT
- 编辑 EDT
- 状态 STATUS

该系统的“菜单”选择示意图见图 6-6-5。由图可知:

(1) 在“程序控制方式”(PGM CONT)类别下:

1) 若按“查找”键,则可用来调用内存中的零件加工程序, CRT 显示器会立刻显示出“搜索方向”、“特征字”、“程序标志”、“开始或结束”等项“菜单”,提供选择;

2) 若要将已编辑好的程序存入内存,则可按“存储”键, CRT 显示器同样会显示出“重排程序号”、“编辑起作用”等提示项,供存储操作选用;

3) 若要将编辑好的程序,由纸带穿孔机输出,则可按“穿孔输出”键,此时 CRT 也会有多项“菜单”提供选用。

此外,在该类别下,还有“纸带”(纸带程序输入)、“手动”等按键供操作使用。

(2) 在“参数设置”(SETUP)类别下,可以通过相应按键来设置“夹具偏置量”、“工作台号”、“伺服参数”、“参数显示”等状态。

(3) “刀具管理”(TOOL MGT)类用来设置或检查“刀具磨损”、“刀具数据”及其“纸带输入”和“穿孔输出”等方式。在按“刀具数据”键后,“菜单”又会进一步提示刀具数据是针对交换工作台几号台、刀具号等项选择的内容。

(4) “编辑”(EDT)类操作,主要是用来以人-机会话方式对程序进行“修正”、“插入”、“删去”、“查找”等编辑工作。

(5) “状态”(STATUS)类操作与运行方式有关,如操作者可在该操作方式下选择“英制”或“米制”数据,是否允许“任意停止”、程序“单段”执行以及



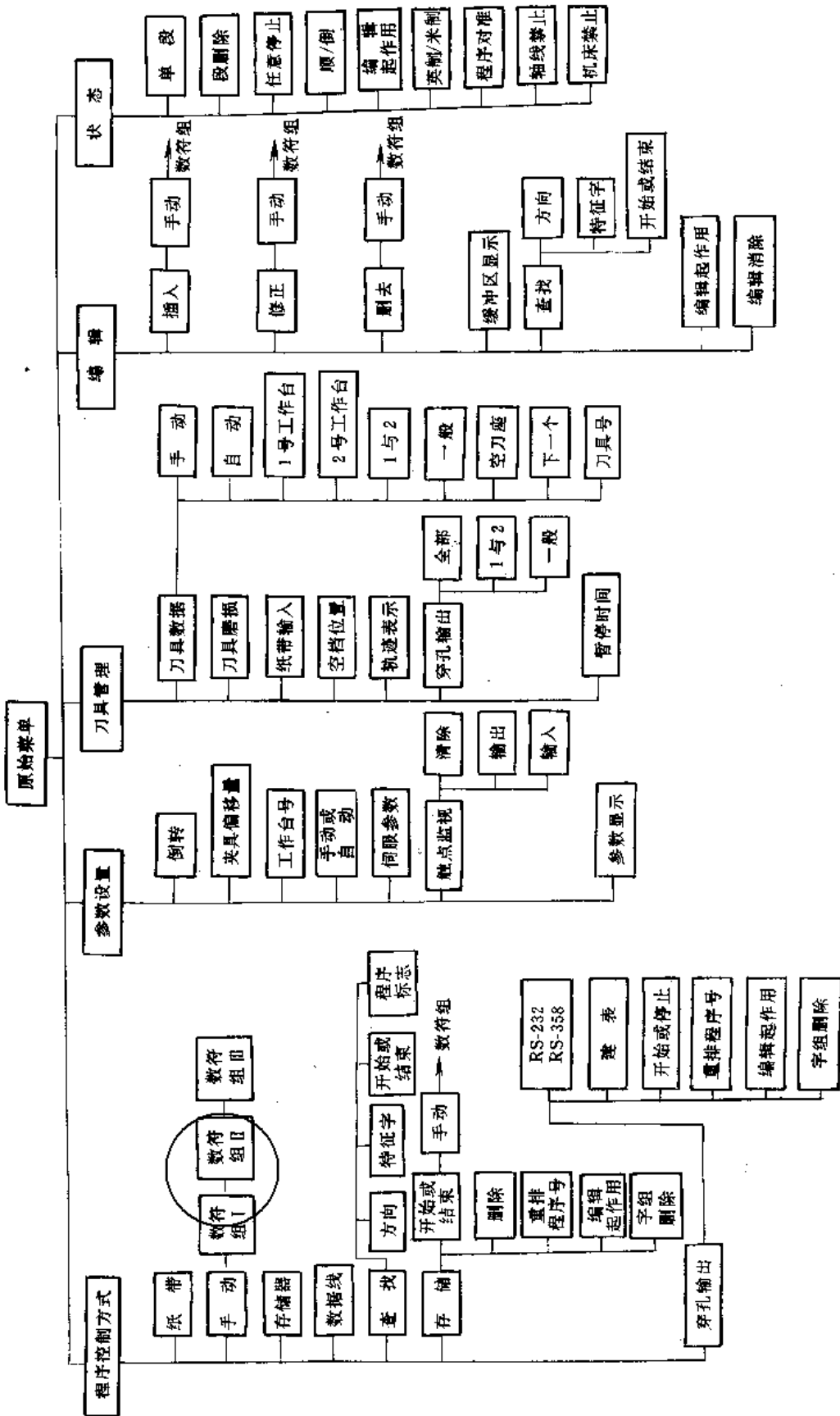


图 6-6-5 900 系统“菜单”选择流程图



“编辑起作用”是否认可等。

4 输出和可编程应用逻辑

4.1 速度和逻辑功能输出

在CNC系统中的输出量主要有进给速度、主轴转速输出和其他逻辑功能输出两类，它们分别用功能代码F、S和G、T、M来表示。

4.1.1 进给功能

进给功能亦称F功能。用来指定刀具相对工件运动的进给速度，其单位是mm/min。在进给速度和主轴转速有关时，一般使用mm/r。进给功能字以代码符“F”为首，其后跟一串数码。常用的有：

1. 三位数码法 F后跟三位十进制数字。第一位数字为进给速度整数位位数加上固定值“3”；后两位是进给速度的前两位有效数字。如进给速度为1800mm/min，则用F718来给定。

2. 二位数数码法 F后跟两位数码00~99，分别代表相应的指定速度，参见表6-6-3（表中速度单位为mm/min）。表中除了00和99以外，数码由01向98递增时，速度值按 $\sqrt[20]{10}=1.12$ 等比关系增值。

此外，还有一位数码法、直接指定法和进给速率数指定法等。

表 6-6-3 二位数数码法进给速度对照表

| 代码 | 速度 | 代码 | 速度 | 代码 | 速度 | 代码 | 速度 | 代码 | 速度 |
|----|------|----|------|----|-----|----|------|----|-------|
| 00 | 停 | 20 | 10.0 | 40 | 100 | 60 | 1000 | 80 | 10000 |
| 01 | 1.12 | 21 | 11.2 | 41 | 112 | 61 | 1120 | 81 | 11200 |
| 02 | 1.25 | 22 | 12.5 | 42 | 125 | 62 | 1250 | 82 | 12500 |
| 03 | 1.40 | 23 | 14.0 | 43 | 140 | 63 | 1400 | 83 | 14000 |
| 04 | 1.60 | 24 | 16.0 | 44 | 160 | 64 | 1600 | 84 | 16000 |
| 05 | 1.80 | 25 | 18.0 | 45 | 180 | 65 | 1800 | 85 | 18000 |
| 06 | 2.00 | 26 | 20.0 | 46 | 200 | 66 | 2000 | 86 | 20000 |
| 07 | 2.24 | 27 | 22.4 | 47 | 224 | 67 | 2240 | 87 | 22400 |
| 08 | 2.50 | 28 | 25.0 | 48 | 250 | 68 | 2500 | 88 | 25000 |
| 09 | 2.80 | 29 | 28.0 | 49 | 280 | 69 | 2800 | 89 | 28000 |
| 10 | 3.15 | 30 | 31.5 | 50 | 315 | 70 | 3150 | 90 | 31500 |
| 11 | 3.55 | 31 | 35.5 | 51 | 355 | 71 | 3550 | 91 | 35500 |
| 12 | 4.00 | 32 | 40.0 | 52 | 400 | 72 | 4000 | 92 | 40000 |
| 13 | 4.50 | 33 | 45.0 | 53 | 450 | 73 | 4500 | 93 | 45000 |
| 14 | 5.00 | 34 | 50.0 | 54 | 500 | 74 | 5000 | 94 | 50000 |
| 15 | 5.60 | 35 | 56.0 | 55 | 560 | 75 | 5600 | 95 | 56000 |
| 16 | 6.30 | 36 | 63.0 | 56 | 630 | 76 | 6300 | 96 | 63000 |
| 17 | 7.10 | 37 | 71.0 | 57 | 710 | 77 | 7100 | 97 | 71000 |
| 18 | 8.00 | 38 | 80.0 | 58 | 800 | 78 | 8000 | 98 | 80000 |
| 19 | 9.00 | 39 | 90.0 | 59 | 900 | 79 | 9000 | 99 | 高速 |

4.1.2 主轴转速功能

主轴转速功能亦称为S功能，以r/min为单位，用来指定主轴转速，功能字定义为S后跟一串数字。与F功能字一样，可以采用三位、二位、一位数字代码法或直接指定法。数字的意义、分档办法及对照表与F功能通用，仅单位不同。

4.1.3 逻辑功能

数控系统有如下一些逻辑输出功能：

1. 准备功能 亦称G功能，它是使数控系统准备好某种加工方式的指令。一般包括坐标移动或定位方法的选定；直线或圆弧插补方式的选择；螺纹切削、攻螺纹、固定循环等加工方式的确定；刀具补偿或刀具偏移量的设定；加工平面的选择以及主轴加、减和进给速度方法的指定等功能。按ISO国际标准编码规定，G功能定义见表6-3-5。

2. 工具功能 亦称T功能。当更换刀具时，用它来指定更换刀具的编号及设定刀具补偿长度。由于刀具半径值在一个加工循环中变化次数频繁，因此，通常不将其直接编入零件加工程序中，而由操作者通过拨码盘或键盘输入方式给出。其功能字定义为T后跟一串数字（最多五位），对于不同的数控系统有不同规定，即使同一个数控系统也可以有不同的含义。例如同一个功能字T08在换刀时表示选用08号刀具，而在刀具补偿时，表示按08号数字拨码盘所设定的数字进行补偿。在用四位数指定时，写成T0808，即前两位表示刀具号，后两位表示刀补拨码盘号。

3. 辅助功能 亦称M功能。它是数控系统中用来控制开关动作的一组指令，这些功能包括给定主轴转向与起动、停止；冷却液系统的开、闭；机械运动部件的夹紧和放松；工件的角位移与直线位移的给定；程序结束与纸带终止等。按ISO国际标准码规定，M功能字定义见表6-3-6。

这些逻辑输出的M、G、T功能在普通数控系统中是由继电器操作来实现的。继电器控制电路虽然已被人们熟悉，但它的动作时间长（约几十毫秒），可靠性差，寿命有限，需要经常维修，当控制顺序或加工工艺变更时，原来的控制电路要更改就极其困难。如果把各种开关控制动作编成为软件控制功能，和加工程序一样，存入存储器的某一固定区域中，由系统主机来处理，使被控对象的全部动作，包括坐标轴运动、主轴的运转控制、冷却液的开、关，刀具数据输入，限位开关的状态



转换等全部功能由软件来实现,并进行监视.这类软件功能被称为可编程应用逻辑(Programmable Application Logic——PAL)程序.目前它已被广泛应用于CNC系统中.

4.2 可编程逻辑控制器及其应用

4.2.1 可编程逻辑控制器

随着数控系统的日趋复杂,开关量触点数剧增,无论采用继电器或固态器件,均属于由导线连接成逻辑控制电路的方式,无法克服其自身诸多的弊端.电子计算机技术的迅速发展,出现了完全可以代替继电器逻辑器件的可编程逻辑控制器(PC).PC的结构见图6-6-6.

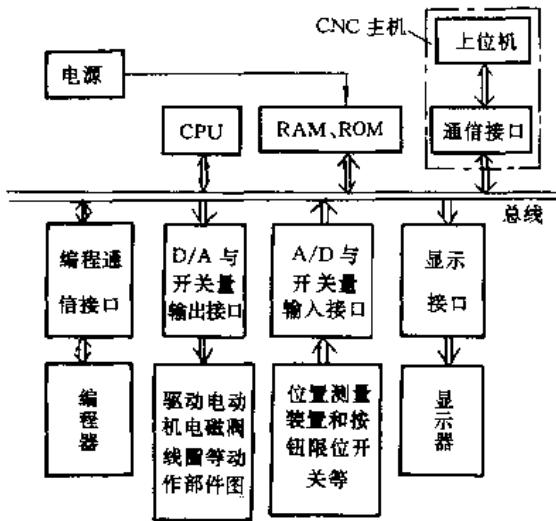


图 6-6-6 可编程逻辑控制器

由图6-6-6可知,PC是一种数字电子装置,它把逻辑运算、顺序控制、定时和算术运算等功能,以规定的指令寄存于存储器中,在CPU的控制下按顺序执行指令,并通过数字或模拟输入/输出接口,对被控对象的状态或参数进行检测,或者对机械设备或生产过程进行控制,世界各国主要PC产品的性能指标见第8篇第4章8.4.5节.

PC是在固化于ROM中的系统程序控制与监视下进行工作的.其工作顺序通常是:

1. 故障诊断 PC在给电或完成一次顺序扫描后即进行故障自诊断,包括CPU和RAM的测试、总线的动态检测和系统软件的自校验等,一旦出现异常状况时,即终止下一次顺序扫描,直至停止运行.在PC无异常状况时,可进入下一列顺序.

2. 数据和现场状态输入 由PC将与A/D、开关量输入接口相连的现场状态与输入数据(包括连续模拟量和开关量等),按固定顺序传送到存储器的输入缓冲区.

3. 执行用户程序 进入用户程序,将输入的现场状态和数据,替代相应的原有编程逻辑,存入状态存储器的输出缓冲区,并按固定顺序经输出模块送至执行机构,作现场控制.

4. 通信与信息传输 PC在顺序扫描过程中,定期与编程器以及上位计算机通信接口进行信息传输.编程器一般在调机时使用,它将新编程序或修改的参数送至PC主机;反之,PC主机将需要显示的数据、状态或出错标志送给编程器显示.上位机通过接口的信息传输控制PC的工作,可采用中断方式进行状态、参数传输和令PC执行停机、起动、修改等命令.

4.2.2 可编程逻辑控制器在计算机数控系统中应用

在CNC系统中,PC普遍用作可编程应用逻辑(PAL)的硬件支持,视为计算机与控制对象间的接口,实现机床操作中的各种逻辑控制,被称为可编程接口,它的优点在于:

(1) 提高了系统的可靠性.由于PC本身的高可靠性和对环境温度、湿度、电源电压变化等强的现场适应能力,以及实现了接口软件化,大大提高了CNC系统的可靠性,连续无故障运行时间可达几万小时.

(2) 增强了系统的灵活性.当加工工艺或控制功能变更时,不需要更换逻辑电路或重制继电器板,可以通过修改软件而灵活地改变顺序控制功能,并有易于扩展和通用性强的特点.

(3) 有利于系统部件标准化.CNC系统采用可编

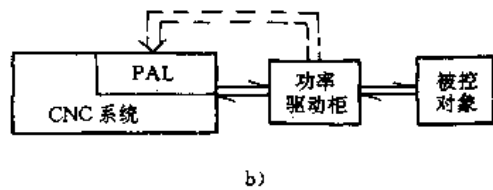
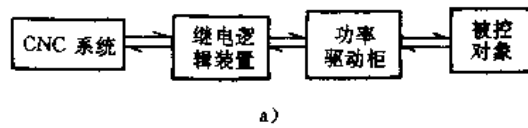


图 6-6-7 继电器逻辑与 PAL

a) 继电器逻辑 b) PAL



程接口后,继电器逻辑装置由可编程应用逻辑所替代,并存储于PC的存储器中,这样就有利于可编程逻辑软件标准化的实现,见图6-6-7。由图可知,可编程逻辑代替的仅是原继电器逻辑中的继电器及连接电路,而由接触器、晶闸管、电磁线圈等组成的功率执行电器柜仍将被保留。

PC在CNC机床系统中,通常可以有三种不同的配置方案:

(1) 方案1。将PC配置在机床一侧,代替传统的

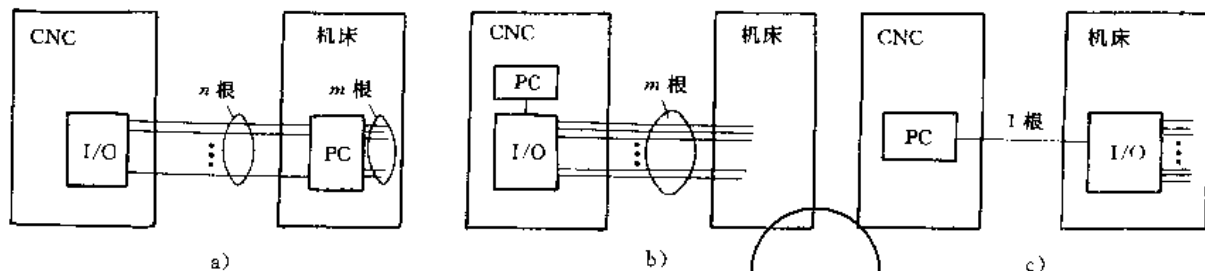


图6-6-8 PC配置方案

I/O—输入/输出接口

4.3 可编程应用逻辑 (PAL)

4.3.1 可编程应用逻辑的硬件支持

在CNC系统中,目前采用的可编程接口有:

(1) 共用接口 即可编程接口软件和CNC系统软件合用一套指令系统。例如,辛辛那提-米拉克隆公司产品中数控系统所采用的就是可编程共用接口。

(2) PAL接口 在这种CNC系统中,通常选用通用型PC,然后专门设计使PC和主机的两套指令系统兼容的软件。可编程接口软件是使用PC指令集,采用梯形图编程方式,把梯形图形式的指令转换成可执行的机器码;而CNC系统软件仍使用主机指令。艾伦-布拉德利公司的7360系统是属于该类接口。

PAL所需的硬件支撑除了CPU和ROM、RAM以外,主要靠标准的接口组件,以7360系统为例,它们有:

(1) 模拟量输出接口。其主要作用是向系统提供模拟量的指令电压,输出的指令电压幅值和极性由PAL程序计算来确定。在7360系统中指令电压范围为 $0 \sim \pm 9V$ 直流电压,由该组件的地址选择码来给出。

(2) 开关量输入接口。主要功能是电平转换,如把被控对象上的24V开关信号电平转换成+5V的逻辑

继电器逻辑系统,见图6-6-8a。这时PC有 $(m+n)$ 个输入/输出点,成本高而外接线多。

(2) 方案2。PC配置在CNC系统柜一侧,这时PC仅有 m 个输入/输出点,因而元器件数目较少,成本低,易于维修,见图6-6-8b。

(3) 方案3。PC仍配置在CNC系统柜内,而将输入/输出接口放在机床一侧,见图6-6-8c。这种方式同样具有方案2的优点,而且使CNC系统与机床接口的电缆线大大减少,仅需一根。

电平。变换后的信号通过双向数据总线送入I/O表。

(3) 开关量输出接口。其功能是将+5V的逻辑电平转换成适合于被控对象控制所需要的+24V电平,经功率放大后去驱动各种直流负载。

每个输入/输出的开关量对应于一套相应的转换电路,每块组件板上通常有8~16套。此外,还有光隔离器和为了避免触点弹跳影响而设置的消除抖动电路等。每套电路具有相应的地址选择码,组件板经I/O适配器挂入总线。

为了实现PAL的程序输入、编辑和人-机联系,还必须有键盘、打印机等I/O外设、CRT显示及其相应接口等硬件来支持。

4.3.2 可编程应用逻辑的指令

PAL指令集中的指令按功能通常可分为两大类,即监控命令和用户编程指令。用户编程定时指令、分支转移指令、取存数指令和测试指令等,供用户编程时使用。以艾伦-布拉德利公司的7360系统为例,它提供的按功能分析归纳的PAL指令集见表6-6-4。

4.3.3 可编程应用逻辑工作原理

PAL程序是以软件逻辑功能代替硬件继电器控制电路。由于PAL程序是以顺序扫描的循环方式工作的,如果把梯形图中每一个继电器及其各控制触点组



表 6-6-4 PAL 指令及功能

| 类别 | 机器码与格式 | 助 记 符 | 指 令 功 能 |
|-------|-----------|-----------|-------------------------|
| 算术运算类 | 8080 ×××× | - [×] - | 乘法运算指令 |
| | 8100 ×××× | - [÷] - | 除法运算指令 |
| | 8B40 ×××× | - [+] - | 加法运算指令 |
| | 8B50 ×××× | - [-] - | 减法运算指令 |
| 控制类 | 836Y ×××× | - (L) - | 输出锁定指令 |
| | 8ABY ×××× | - (/) - | 释电输出指令 |
| | 8ACY ×××× | - () - | 馈电输出指令 |
| 定时类 | 8A63 ×××× | - (TON) - | 时基 0.1s, 通电延时指令 |
| | 8A64 ×××× | - (TON) - | 时基 1.0s, 通电延时指令 |
| | 8A65 ×××× | - (TOF) - | 时基 0.1s, 释电延时指令 |
| | 8A66 ×××× | - (TOF) - | 时基 1.0s, 释电延时指令 |
| | 8A69 ×××× | - (PTR) - | 清除定时器累加值, 保留其预置指令 |
| 分支转移类 | 8A6A ×××× | - (GTO) - | 转移指令 (和标号指令联用) |
| | 8AA0 ×××× | | 分支结束指令 |
| | 8AB0 ×××× | | 分支起始指令 |
| | 8AF0 ×××× | - [LBL] - | 标号指令 (指定转移的目标地址) |
| 存取类 | 8A6B ×××× | - [TBL] - | 查表指令, 从常数表中取数 (和取数指令联用) |
| | 8AD0 ×××× | - (G) - | 取数指令 |
| | 8B20 ×××× | - (PUT) - | 存数指令 |
| 测试类 | 8A7Y ×××× | - [] - | 测试“接通”为真 |
| | 8A8Y ×××× | - [/] - | 测试“断开”为真 |
| | 8B00 ×××× | - [=] - | 测试“等于”为真 |
| | 8B10 ×××× | - [<] - | 测试“小于”为真 |

注: 1. ××××是内存单元地址, 按十六进制计数。

2. Y 是所使用内存单元的位地址, 也以十六进制计数。

成的分支电路叫做为一个“横档”, 以及电路中触点和输出位称作为“元素”的话, 那么 CNC 系统处理器也就是以串行方式, 逐行把检查梯形图的每一横档, 以至检查横档中的每一个元素, 从而决定其输出操作。在更新输出位的迭代中, 若程序控制位状态的产生先于被更新的输出位, 则本次输出操作后相应输出位状态是本次控制位迭代的结果; 反之, 如果程序控制位状态的产生迟于被更新的输出位, 则本次输出操作后, 相应输出位状态是上一次控制位迭代的结果, 程序中控制位的本次迭代结果, 将要到下一次输出操作时才对输出位生效。所以, 常把顺序扫描的周期时间作为可编程接口的性能指标之一, 通常是毫秒级的。而原硬件继电器控制线路中, 同时馈电的继电器及其触点是瞬时动

作的并行工作方式, 它的动作时间为几十至几百毫秒级。

此外, 在 PAL 程序中, 原继电器的触点状态和逻辑连线分别由内存单元的一位二进制数的 PAL 程序所代替, 当 PAL 程序被执行时, 将按规定对存于“系统标志表”中的系统软件信息数据和存于“I/O 映射表”中的被控对象 (如机床等) 开关量状态信息进行算术运算和逻辑判断, 在此基础上建立起自己一套“中间状态变量”的标志, 并将结果输出, 实现动作控制或更新系统标志表相关内容, 向系统程序作出报告。也就是以“监测输入—判断决策—状态输出”的执行过程, 代替了硬件继电器的触点开闭。PAL 程序运行流程见图 6-6-9。



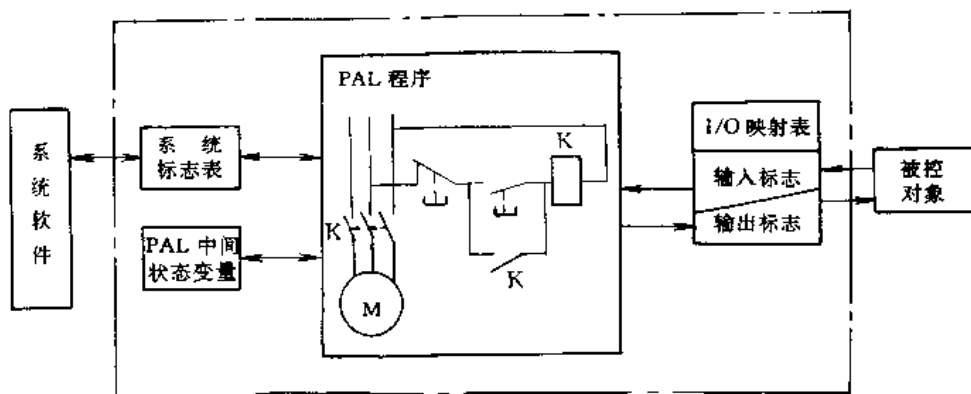


图 6-6-9 PAL 运行流程图

4-3-4 可编程应用逻辑的功能

CNC 系统中，为了模拟继电器控制电路的逻辑功能，可以采用 PAL 程序来完成几乎所有的辅助功能，并具有测试、比较和算术运算等能力，其主要控制性能有：

- (1) 完成与机床有关的 M、T、G 码的译码。
- (2) 根据 M 码控制主轴箱的变速，冷却液的开、关，自动对刀装置的上、下移动，以及卡盘的夹紧与放松。
- (3) 根据 T 码控制换刀动作。
- (4) 根据 G 码控制自动对刀装置，在若干个不同的方向进行刀补测量。
- (5) 根据主轴转速编程值进行主轴转速模拟量转换，并设置最小、最大恒速值。

(6) 对被控对象各种错误和故障实行监控。

以艾伦-布拉德利 (A-B) 公司 8400MP 系列数控系统为例，PAL 程序提供的 M 功能见表 6-6-5。有关可编程应用逻辑程序的内容，参见本章 6-2 节说明。

表 6-6-5 8400MP 系列数控系统 PAL 程序提供的 M 机能

| 机能码 | 功能 | 机能码 | 功能 |
|-----|----------|---------|----------|
| M00 | 程序停 | M15~M18 | 短响应输出 |
| M01 | 选择程序停 | M19 | 主轴准停 |
| M03 | 主轴正转 | M20~M27 | 刀具交换指令 |
| M04 | 主轴反转 | M28 | 低速齿轮 |
| M05 | 主轴停 | M29 | 高速齿轮 |
| M06 | 手动刀具交换 | M30 | 程序结束 |
| M07 | 雾冷却 | M31~M34 | 长响应输出 |
| M08 | 液冷却 | M35~M38 | 用户选通脉冲输出 |
| M09 | 冷却停 | M39~M46 | 用户锁存信号输出 |
| M10 | 夹紧有效 | M47 | 计数复位 |
| M11 | 夹紧松开 | M48 | 向上定时 |
| M12 | 用户选通脉冲输出 | M49 | 向下定时 |
| M13 | 主轴正转带冷却 | M50 | 条件分支 |
| M14 | 主轴反转带冷却 | | |

5 计算机数控中的软件插补

在传统的数控装置中，第 2 章所述的数字脉冲乘法器、逐点比较法和数字积分法等插补方法，都是利用硬件电路来实现轨迹插补的。在 CNC 系统中，各种插补方法均可由软件来完成，也就是由算法程序来替代上述电路功能。这对于计算机来讲是并不困难的，而问题却在于：多轴（如三轴或三轴以上）联动的 CNC 系统中，每一个轴都具有一套数字进给电路，而计算机软件插补，执行每一条指令又都需要一定时间，为了提高系统对进给率和分辨率的要求，如何在实际的 CNC 系统中，由算法程序和硬件电路互相配合，交替实现轨迹插补。因此，通常在 CNC 系统中将插补功能分为软件插补和硬件插补两部分。计算机控制软件将插补轨迹分割成若干段，而硬件电路在段的起点和终点之间进行“细分”，使插补精度满足误差要求。也就是计算机软件实现“粗插补”，而硬件电路实现“细插补”。第 2 章所述的时间分割法就是一种较典型的软件“粗插补”算法。

设有空间直线 \overline{OP} ，起点 O 为坐标原点，终点 P 的坐标值是 X_e, Y_e, Z_e ，见图 6-6-10。假定 CNC 系统每

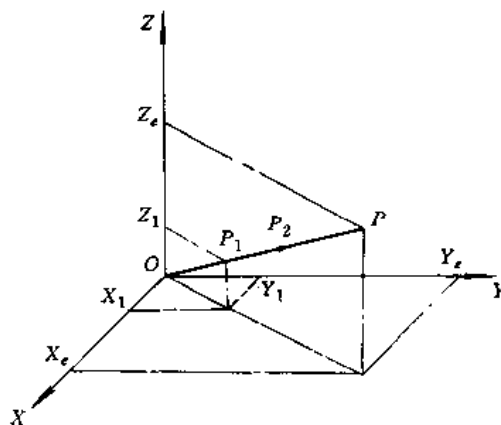


图 6-6-10 “粗插补”



8ms 中断一次进行插补计算, 每 4ms 中断一次进行伺服系统控制, 且规定伺服控制的中断级别高于插补运算中断级别。插补中断时, 计算出 8ms 内各坐标的位移量; 而伺服中断时, 把上述位移量送给硬件伺服系统, 控制各轴位移。

“粗插补”的任务是根据编程的进给速度 F 和终点坐标值 X_c, Y_c, Z_c 计算 8ms 内各坐标轴位移量 Δs :

$$\Delta s = F \times \frac{10 \times 8}{60 \times 1000} = \frac{F}{750}$$

式中进给速度 F 0.01mm/min 为单位; Δs 以 0.001mm 为单位, 则 \overline{OP} 在各坐标轴上的分量

$$X'_c = X_c / \sqrt{X_c^2 + Y_c^2 + Z_c^2}$$

$$Y'_c = Y_c / \sqrt{X_c^2 + Y_c^2 + Z_c^2}$$

$$Z'_c = Z_c / \sqrt{X_c^2 + Y_c^2 + Z_c^2}$$

那么, 8ms 内各坐标轴的位移分量为

$$\Delta s_x = \Delta s X'_c; \Delta s_y = \Delta s Y'_c; \Delta s_z = \Delta s Z'_c$$

设 X_r, Y_r, Z_r 为未插补的剩余量, 它们初值为

$$X_r = X_c; Y_r = Y_c; Z_r = Z_c$$

每中断一次, 输出一组插补运算结果 $\Delta s_x, \Delta s_y, \Delta s_z$, 同时作如下计算, 求得新的剩余量:

$$X_r - \Delta s_x \rightarrow X_r; Y_r - \Delta s_y \rightarrow Y_r; Z_r - \Delta s_z \rightarrow Z_r$$

当 $|X_r| < |\Delta s_x|; |Y_r| < |\Delta s_y|; |Z_r| < |\Delta s_z|$

时, 即为最后一次插补运算, 设标志“FL”为 1, 这时输出到伺服系统的剩余值为 X_r, Y_r, Z_r 。在插补运

算中, 计算结果存储在段值寄存器 X_s, Y_s, Z_s 中。第一次插补中断, 刀具由原点移动到 $P_1(X_1, Y_1, Z_1)$ 点。下一次中断则移动到 P_2 点, ……, 依次完成原点至 P 点的移动。其编程框图见图 6-6-11。在插补程序中, 计算结果送往段值寄存器后, 设标志“READY”为 1, 表示允许伺服控制中断取出该段值, 否则立即返回。由于插补中断是 8ms 一次, 伺服控制中断是 4ms 一次, 因此, 一次软件插补中断计算得到的结果, 应供给两次硬件插补中断使用。如第 i 次 4ms 中断时, 伺服控制软件把段值寄存器中存数的一半送至命令值寄存器; 则在第 $(i+1)$ 次的 4ms 中断时, 伺服控制软件再把剩余一半送到命令值寄存器中, 按此类推, 直至完成全部插补。

6 计算机数控系统软件

本节以艾伦-布拉德利公司 7360 数控系统为例, 较系统地说明 CNC 系统的软件结构。该系统为一种典型的数字采样实时控制系统, 整个软件采用模块结构。各种控制功能都被当作“任务”编成独立模块, 由系统程序来调用。

6.1 插补和控制程序

6.1.1 插补程序

在轮廓控制中, CNC 系统最重要的功能是插补。从上一节的叙述中可知, 目前采用的软件插补方法可分为:

1. 脉冲增量插补 这是用软件来完成 NC 系统的逐点比较法或数字积分法 (DDA)。插补结果以脉冲方式输出行程增量。脉冲频率决定于插补运算所需时间。

2. 数字采样插补 插补程序以采样频率运行, 在每次采样间隔内, 计算出坐标轴位置增量作为进给指令, 再与坐标轴实际位置相比较, 求出跟随误差, 并作为进给速度指令送到驱动装置。由于插补频率较低 (约 60~125Hz), 因此很容易由微机来实现。

7360 数控系统采用数字采样插补法, 并且采用的是在数字积分法 (DDA) 基础上扩展的 DDA 软件插补法 (参见本篇第 2 章 2.3 节)。它是根据编程的进给速度, 将轮廓曲线 (或直线) 分割为每一采样周期时间的进给量 (称为轮廓步长)。这种方法只要求计算机进行加、减法及有限次数的乘法, 没有函数计算, 因此计算速度较快、精度可达到 $1\mu\text{m}$ 。插补程序的流程见图 6-6-12, 其圆弧插补所需最长时间可达 2.5ms。

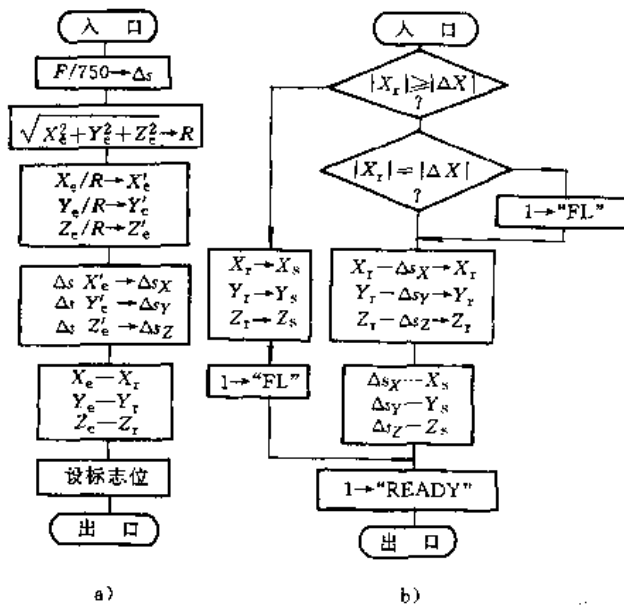


图 6-6-11 插补运算中断程序框图

a) 插补预计算框图 b) 插补运算框图



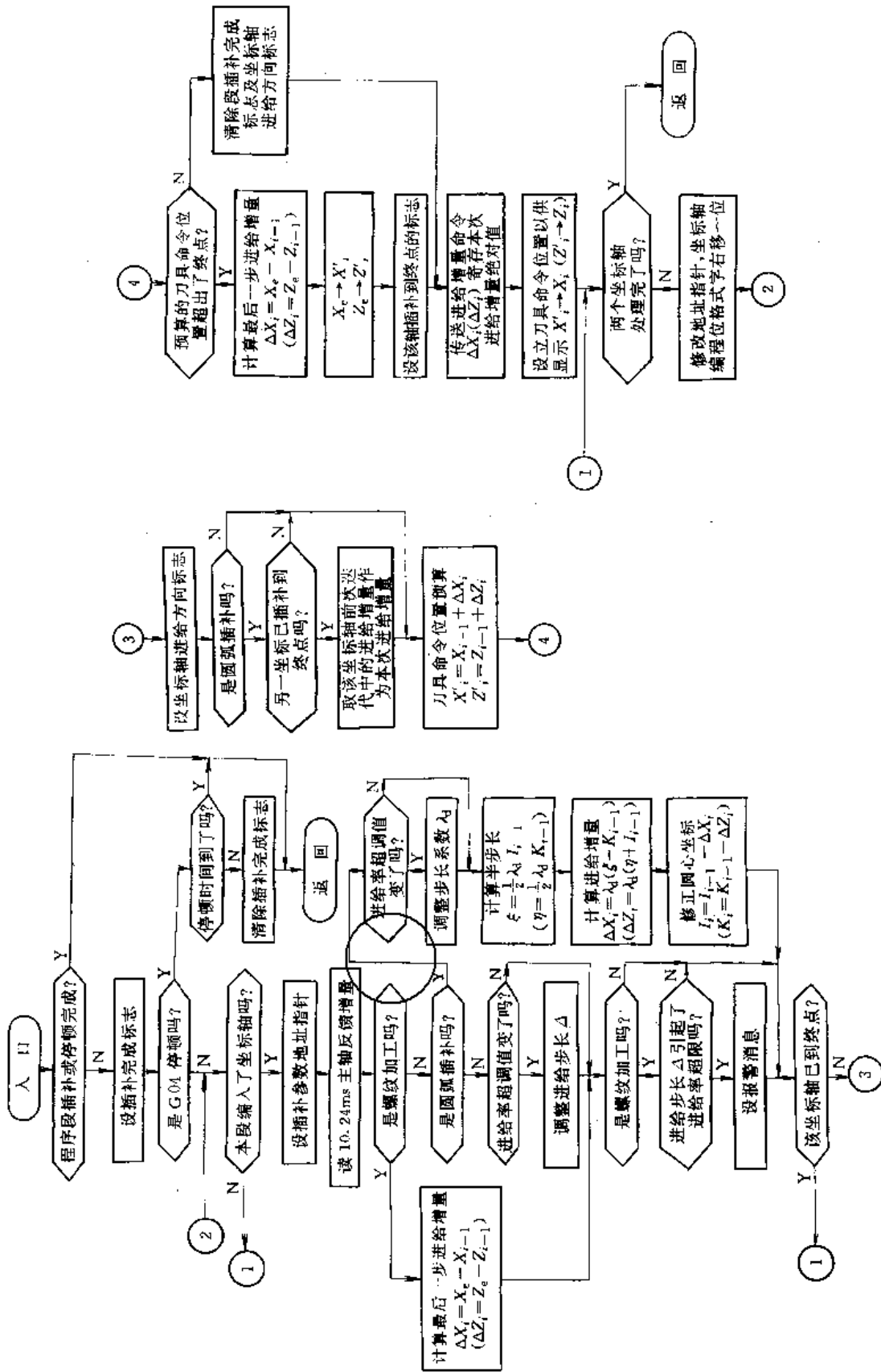


图 6-6-12 插补程序流程图



6.1.2 位置控制程序

7360 数控系统中位置控制是由软件和硬件共同来实现的。硬件系统中伺服驱动装置和位置检测组件是通过计算机构成位置控制反馈回路的；在软件方面，采用数字采样方法，采样周期为 10.24ms，由实时时钟中断来完成。在每一中断周期服务结束前，算出下一周期坐标轴的位置增量指令，每当一个中断周期开始，位置控

制程序对坐标轴的实际位置采样，并与增量指令值相比较，算出跟随误差。跟随误差的数字量经处理送至伺服输出组件，经 D/A 转换，作为进给速度指令电压，以驱动坐标轴的电动机，从而完成按偏差的位置控制。在整个 10.24ms 采样周期中，进给速度指令电压维持不变。7360 数控系统的位置控制程序流程见图 6-6-13。

由于上述插补程序和位置控制程序均在 10.24ms 的中断服务程序中调用，因此，了解系统中断服务程序

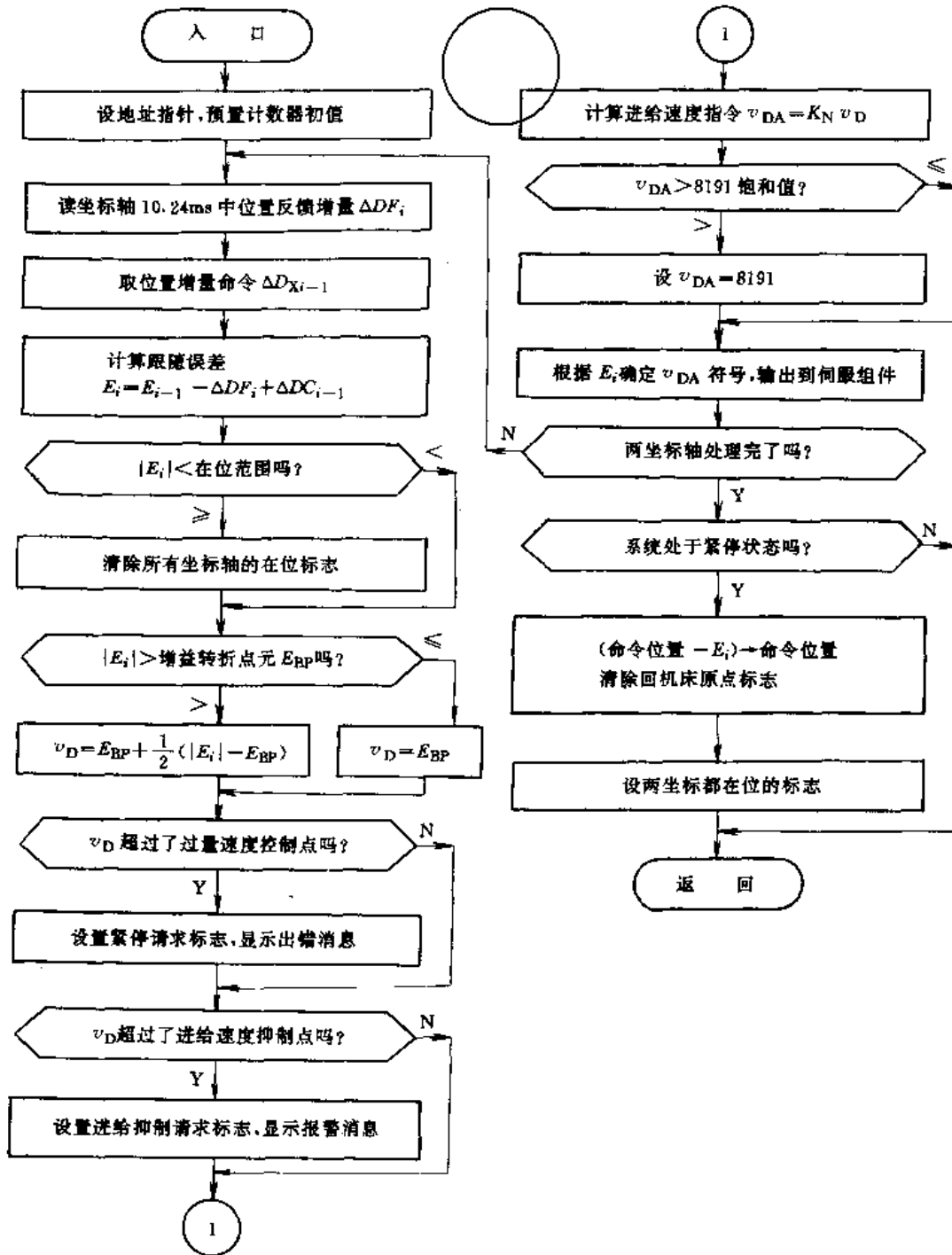


图 6-6-13 位置控制程序流程框图



的流程也极为重要。

能见表 6-6-6。

6-1-3 中断服务程序

10.24ms 实时时钟中断服务程序的流程框图，见图 6-6-14。该带机中断和键盘中断流程基本相似，见

在 7360 数控系统中，设置了五级硬件中断，其功 6-6-15 图。

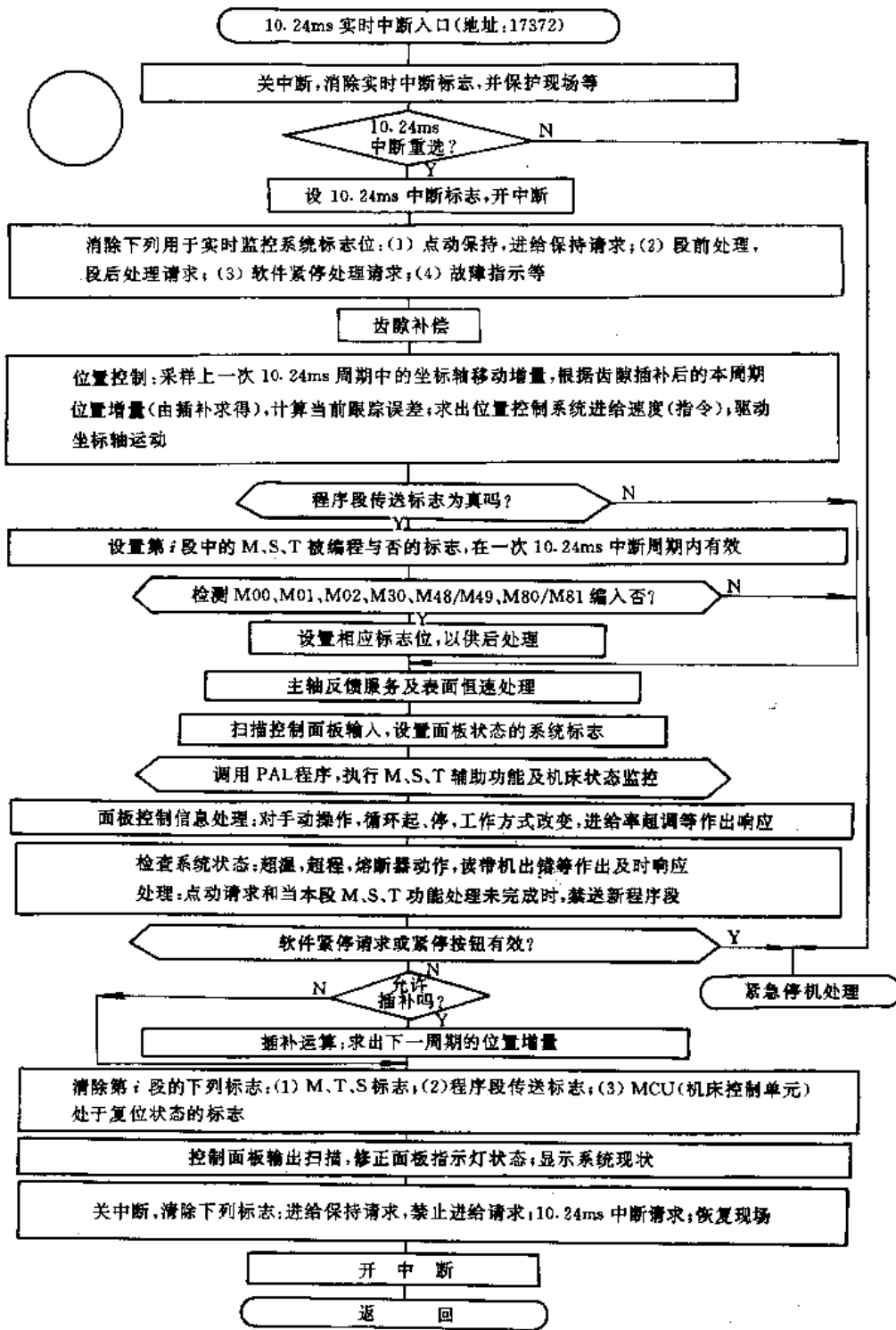


图 6-6-14 实时时钟中断服务流程



表 6-6-6 7360 数控系统硬件中断

| 中断性质 | 中断名称 | 优先级 | 中断功能 |
|--------|----------|------------|-----------------------------|
| 不可屏蔽中断 | 断电及复电自启动 | 1级 (最高) | 断电显示, 停机, 复电自启动, 进入初始化程序 |
| | 存储器奇偶错 | 2级 | 显示内存奇偶错单元地址, 并停机 |
| 可屏蔽中断 | 读带机中断 | 3级 | 读入一个字符, 中断一次, 并进行字符处理和存储 |
| | 实时时钟中断 | 4级 | 完成位置控制, PAL 实时监控和顺序扫描以及插补处理 |
| | 键盘中断 | 5级 (最低) | 键入一个字符, 中断一次, 并进行字符处理和存储 |

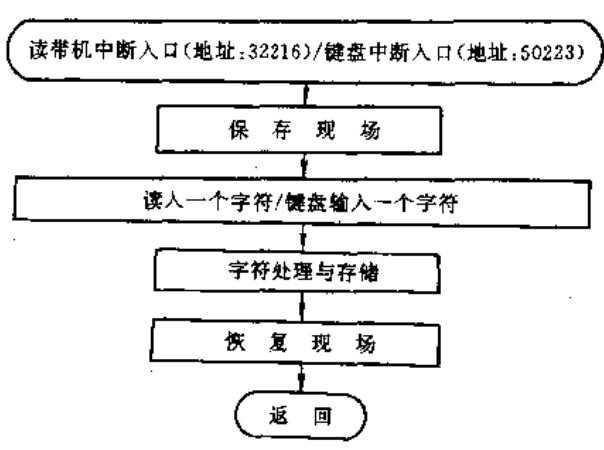


图 6-6-15 中断流程图

系统状态信息送入系统标志表, 准备供 PAL 程序使用。

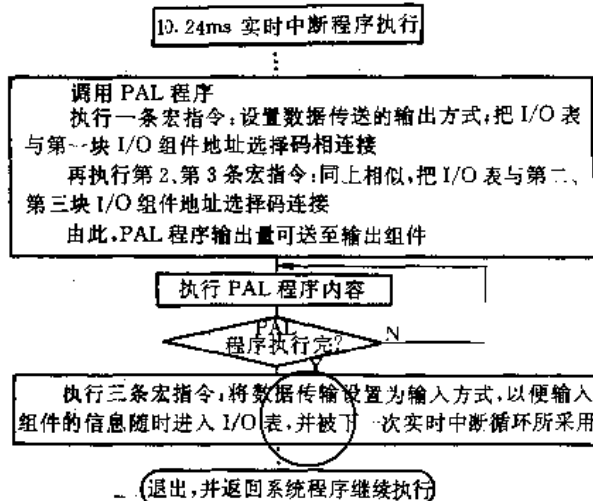


图 6-6-16 PAL 程序调用

6.2 可编程应用逻辑程序

6.2.1 可编程应用逻辑与系统软件的关系

在系统程序执行过程中, M、S、T、G 编码值的

表 6-6-7 PAL 程序功能分类

| 功能 | 内 容 | 功能 | 内 容 |
|----------|----------------------------------------------------------------------------------------------|----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| M、T、G 译码 | 1. M 码译码, 非法 M 码处理和显示 2. T 码译码 3. G 码译码 4. M 码出错清除 | 辅助功能 (M) | 1. 阅读门控制 2. 润滑与冷却液控制 3. 液压装置监控 4. 卡盘压力与卡盘爪控制 5. 滑板点动与手动控制 6. 主轴点动控制 7. 超行程控制 8. M05 (主轴停止) / M09 (关冷却液) 命令处理 |
| 准备功能 (G) | 1. 初始化 2. 允许机床工作 3. 机床循环启动 4. 机床控制单元 (MCU) 方式设置和复位处理 5. 设置坐标轴原点指示灯 6. 去向参考点设置 | | 出错与故障监控 |
| 刀具功能 (T) | 1. 刀库、刀架控制 2. 刀组监控 3. 自动对刀装置控制 | | |
| 模拟量转换 | 主轴模拟量输出显示 | | |



系统标志表标志了整个系统的全部状态信息。它是根据正在执行的零件程序段编程和运行情况，由系统程序(包括主程序和中断服务程序)以及系统的实时状态来设置的，通常包括：(1) 控制面板状态；(2) 控制方式；(3) 主轴状态；(4) 行程限位；(5) 进给保持；(6) 程序段；(7) 点动保持；(8) 刀具等信息。

程序，对数控命令、系统现行状态以及反馈信息，由 PAL 加以运算和作出逻辑判断，完成对被控对象控制中的辅助功能，并对系统程序进行连锁。只有当主轴变速、换刀等功能完成，插补条件满足时，才可运行插补程序。

在 10.24ms 实时中断服务程序中，先执行 PAL

PAL 程序内容按本章 4.3.4 节功能分类大致为表 6-6-7 所示。PAL 程序的调用流程见图 6-6-16。

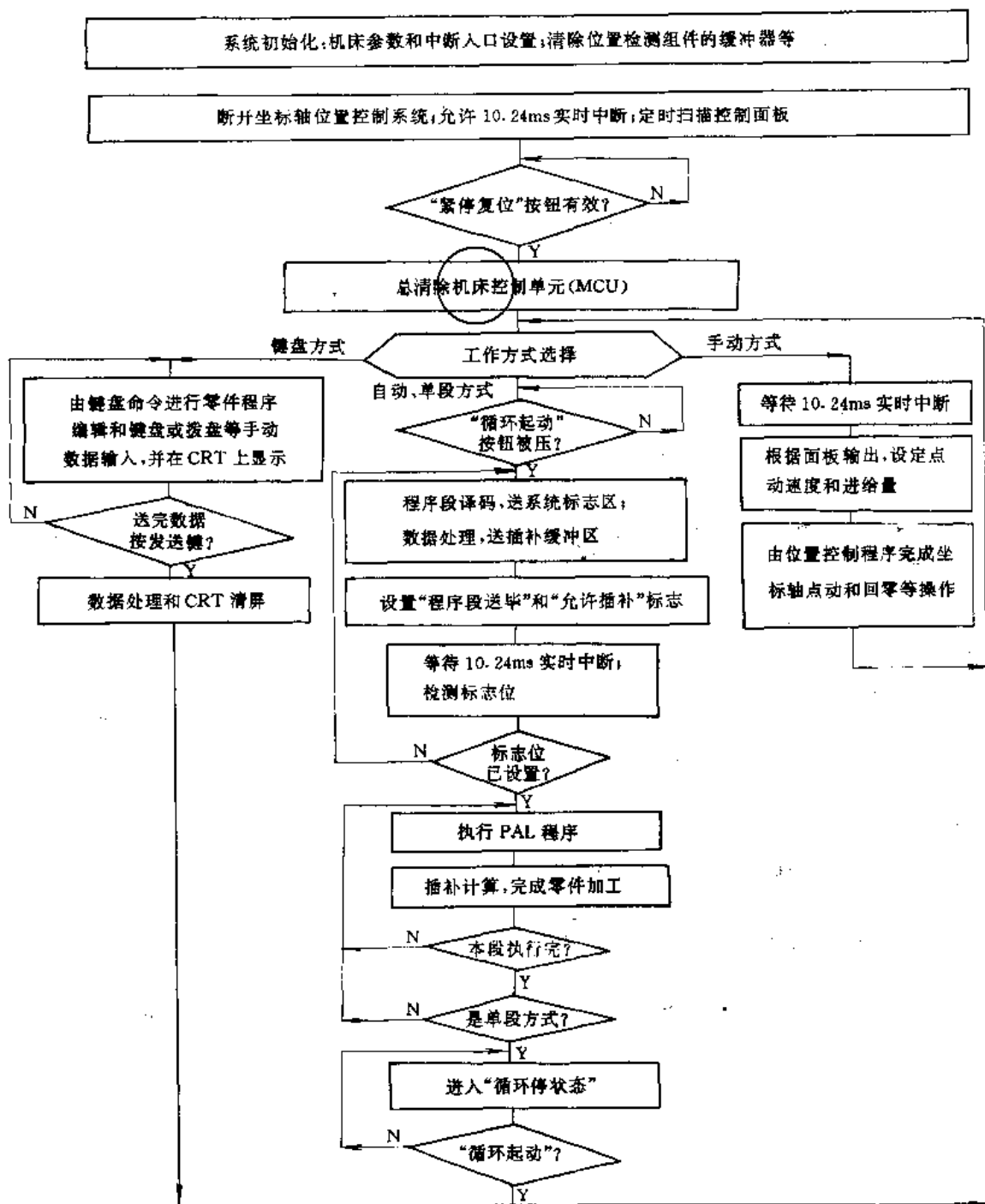


图 6-6-17 主程序流程框图

北京航空航天大学出版社



6.2.2 可编程应用逻辑程序

7360 数控系统中 PAL 程序,采用梯形图设计方法,指令的操作数地址采用八进制的 PAL 地址。CRT 能按 PAL 地址显示出 PAL 逻辑梯形图。生成 PAL 目标程序时, PAL 地址变成内存的绝对地址,地址转换由软件自动完成。I/O 组件地址选择码与 PAL 地址差为常值。

7360 数控系统 PAL 程序技术指标为:

- (1) 循环扫描时间为 10.24ms;
- (2) 循环扫描时间中, PAL 程序最大允许执行时间为 4.5ms;

(3) PAL 所采用数控命令及其他系统状态的信息标志单元数为 56;

(4) 被控对象及操作面板的 I/O 信号量为 71/43;

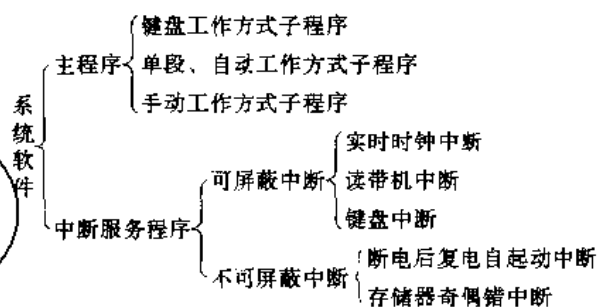
(5) PAL 的中间信息(10 个单元, 129 个信号)常数、消息表、延时器、软件接口标志单元数目: 124。

6.3 主程序

7360 系统软件具有处理中断、调度和监督各种任

务的实施等功能。整个系统软件包括主程序和中断服务程序两部分,见表 6.6-8。

表 6.6-8 系统软件组成



其中主程序的主要功能是按控制面板命令确定系统工作方式,并调度工作任务。当系统程序纸带输入结束或断电后复电并重新启动时,系统立即执行初始化程序,然后进入“紧停复位”状态,等待“紧停复位”按钮有效。当“紧停复位”按钮被按下时,起动主程序,按确定的工作方式进入相应的服务程序。主程序流程图见图 6.6-17。

第 7 章 数控系统的故障诊断和可靠性

在数控系统中,线路非常复杂,特别是出现计算机数控且数控系统在生产中大量应用后,情况更加复杂。例如某些计算机分级控制的系统中,直接在线工作的计算机多达数十台。而且,带有数控系统的设备,如数控机床,一般处于生产过程的关键位置,要求连续工作且加工零件的过程中不能出现故障,因此,保证整个数控系统的正确可靠运行,是十分重要而急需解决的问题。要求故障率极低而且一旦出现故障以后要及时发现,迅速排除,减少停机时间,提高设备利用率。

在传统数控中,故障诊断的功能比较少,一般只有纸带输入的纵、横奇偶校验,同步孔丢失,非法指令码检查,以及越限报警等功能。在计算机数控中,在软件的支持下,诊断功能大大地增强,并能通过打字机、

CRT 或数码显示,明确地诊断出故障产生的原因及位置。

本章首先介绍故障诊断的基本概念,接着论述现代数控系统中,故障诊断和故障自诊断技术,最后简要地介绍数控系统的可靠性。

1 故障诊断的基本概念

本节着重介绍故障的分类、故障的规律和故障的诊断与处理技术等的基本概念。

1.1 故障的分类

数控系统的故障,按照故障的性质、功能及产生的原因等进行多种的分类,见表 6.7-1。

表 6.7-1 故障的分类

| 序号 | 分类方法 | 故障名称 | 说明 |
|----|-----------|-----------|------------------------------------|
| 1 | 按故障产生情况分类 | (1) 系统性故障 | 在满足一定条件下,必然产生的故障 |
| | | (2) 随机性故障 | 偶然产生的故障,如元器件工作特性漂移,机械结构松动等引起的偶然性故障 |



(续)

| 序号 | 分类方法 | 故障名称 | 说明 |
|----|-------------|--------------|----------------------------------------|
| 2 | 按故障的性质分类 | (1) 破坏性故障 | 这类故障不允许重演故障现象, 排除困难 |
| | | (2) 非破坏性故障 | 故障排除后, 数控系统能恢复工作 |
| 3 | 按故障后设备的特性分类 | (1) 设备的特性下降 | 故障排除后, 虽设备仍能工作, 但性能下降, 需要重新调整才能符合要求地工作 |
| | | (2) 设备的性能不下降 | 故障排除后, 设备仍能符合要求地工作 |
| 4 | 按故障产生的位置分类 | (1) 硬件故障 | 需更换元器件才能排除故障 |
| | | (2) 软件故障 | 改变程序就能排除故障 |

1.2 故障产生的规律

按照数控系统产生故障的次数, 在整个使用期中, 大致可分为3个阶段, 即初始运行期、稳定运行期和损坏运行期, 见图6-7-1。

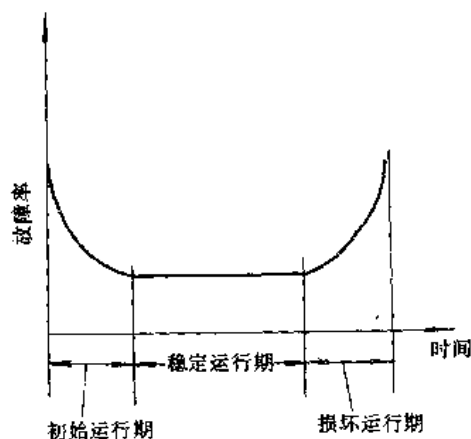


图6-7-1 故障率曲线

1. 初始运行期 约为0.5至1年左右。这一运行期内, 故障次数较多, 但无规律可找。因为在初始运行期中, 数控系统的电子元器件和各种电子装置正在受到交变负载及电路接通与开断时浪涌电流和反电动势的冲击, 可能引起某些元器件损坏, 致使整个系统出现故障。因此, 数控系统安装后, 要长期连续运行, 让初始运行期在保修期内结束。

2. 稳定运行期 数控系统在经历了初始运行期的各种老化、调整后, 进入相对稳定的正常运行期。在此运行期中, 故障次数较少, 且故障发生的概率几乎相等, 绝大多数可以排除。所以, 在这一运行期内, 必须做好设备运行记录, 以备进行故障诊断及处理时作参考。稳定运行期时间较长, 一般定为7至10年。

3. 损坏运行期 设备已达到规定使用期。数控系

统中各类元器件已开始老化, 故障次数明显地增加, 系统已到了寿命的极限。在这一时期内, 应坚持作好设备运行记录, 并全面考虑维修费用与设备使用价值等问题。

1.3 故障的判断和处理

目前现有数控系统种类繁多, 但无论何种类型, 发现故障时可按照表7-1-2所示的判别方法进行综合判断。

表6-7-2 故障的一般判断法

| 序号 | 判别方法 | 说明 |
|----|--------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| 1 | 直观法 | 根据维修人员的经验, 根据故障发生时的现象来判断故障可能发生的部位, 逐步缩小检查范围 |
| 2 | 利用硬件报警信号 | 在现代数控系统中, 设有各种硬件报警指示灯, 可以大致上判断出故障所在位置 |
| 3 | 利用软件报警信号 | 在计算机数控系统中, 设有基于软件的故障自诊断系统。在数控系统运行中, 能应用自诊断程序对系统进行故障定时的快速诊断, 并可显示在CRT上或点燃各种报警指示灯 |
| 4 | 利用CRT画面显示的状态 | 这种方法主要用来诊断计算机输入/输出接口信号, 能判别出故障发生在数控系统中还是在数控设备中, 缩小检查范围 |
| 5 | 备件替换法 | 用印制板备件进行替换, 可以迅速找出故障, 减少停机时间 |
| 6 | 利用印制板上检测孔 | 在印制板中, 通常提供一定的测试点, 可利用这些测试点检测该印制板工作是否正常 |
| 7 | 闭环系统的开环检查法 | 可判定是数控系统故障, 还是某个伺服部件故障, 或是机械故障 |



以上各种故障判别方法,各有特点。对于某些故障,需要几种方法同时综合运用,使用者应根据具体情况,合理地选用。

2 CNC系统的故障诊断

一般CNC系统具有联机自诊断和离机诊断功能。所谓联机自诊断,是指CNC系统运行中的自我诊断。自诊断系统的诊断程序与系统执行程序组合在一起,在数控系统运行过程中同时进行故障的自诊断。这样,随时能检查故障。所谓离机诊断是指在计算机数控系统与被控对象脱离,计算机停止执行系统程序,而用专用的诊断程序输入计算机进行诊断。CNC系统通常提供各种离机诊断程序纸带,通过阅读机读入,进行各种故障诊断。

2.1 联机自诊断

通常自诊断程序分散在系统程序的各个功能模块中。各种自诊断程序有各自的诊断内容。典型的自诊断系统的诊断功能,见表6-7-3。

表 6-7-3 联机自诊断功能

| 序号 | 自诊断功能 | 说明 |
|----|------------|--------------------------------------------------------------------------------|
| 1 | 数据输入过程的诊断 | 主要检查读带机准备是否就绪,读带机的纵、横奇偶校验,同步孔丢失校验、纸带超行程校验有否出错等。如有出错,停止阅读机运行 |
| 2 | 数据处理过程中的诊断 | 主要检查有否非法字符、非法语句和有否发生坐标轴行程超限等。如有错误,进入循环停状态 |
| 3 | 实时控制过程中的诊断 | 主要检查位置伺服系统、主轴、可编程接口、读带机等工作状态。如发现设备超程、控制箱超温、熔断器熔断、读带机出错等故障时,按报警、循环停、自动紧急停止等方式处理 |

2.2 离机诊断

在计算机停止运行系统程序条件下,把诊断程序通过读带机输入到计算机内存,然后启动诊断程序,进行各项的检查,它的诊断功能见表6-7-4。

表 6-7-4 离机诊断功能

| 序号 | 诊断功能 | 说明 |
|----|------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 | ROM、PROM和EPROM诊断 | 检查时将相应的诊断纸带通过读带机输入到RAM中,然后启动诊断程序运行 |
| 2 | 随机存储器(RAM)的软件诊断 | 在CNC系统中,随机存储器中存放各类实时控制的状态数据,在CNC运行期间都是可变量,很难用一种简单的模型来表示。一般采用功能测试的方法,并构成RAM诊断软件 |
| 3 | 输入/输出接口电路及其软件诊断 | 目前,大多数输入/输出接口电路都采用光隔离线路。检查方法是,将输入/输出接口与外设脱开,接上一个测速电阻板,将每一个输入电路与对应的输出电路通过一个电阻接成闭环,以进行信息传送与检验。如果信息从一个输出电路发出后,能够正确返回至输入端,且响应及时,说明电路无误。诊断软件主要功能是,检查电路板有否接上,输入/输出电路的信息传输响应是否太长等 |

2.3 故障的常规处理方法

(1) 做好数控设备的故障记录。发生故障时,不要立即关断电源(除出现影响设备或人身安全的紧急情况外),应记录故障出现时的工作方式、故障位置、报警号及CRT的位置显示等。这些记录对查找故障源、分析原因提供重要依据。

(2) 不能自行排除故障时,应及时与维修部门联系。一定要避免非维修人员随便拆卸、调试数控系统,以免造成更多的故障与损坏。

(3) 应向维修部门迅速传送准确而详尽的信息,以便专业维修人员做好充分技术准备,迅速排除故障。

向维修部门传送故障信息举例,见表6-7-5。

表 6-7-5 向维修部门传送故障信息举例

| 序号 | 传送信息 | 说明 |
|----|-----------------|---------------------------------------|
| 1 | 有关设备的合同、到货和安装信息 | 设备生产厂家,设备类型和型号,数控系统生产厂家,系统名称和型号,出厂系列号 |



(续)

| 序号 | 传送信息 | 说明 |
|-----------|-----------------|------------------------------------------------------------|
| 2 | 有关故障的信息 | 是全部轴还是某一轴不准,定位误差有多少,是否有规律,手动、自动时是否都存在定位不准 |
| | (1)设备定位不准 | 发生在全部轴还是某一轴,电源接通时发生还是运行时发生 |
| | (2)设备发生振动、颤动或超调 | 故障的报警号是多少,发生故障时位置显示值是多少,故障发生时进行何种操作,自动还是手动,故障发生时是否有外界影响因素等 |
| | (3)数控系统有报警和动作异常 | CRT 显示的报警号或伺服系统上哪些报警指示灯亮,发生报警是哪一个轴,电机的种类及型号,位置及速度检测器的种类 |
| (4)伺服系统故障 | | |

3 几种典型数控系统的故障诊断

本节以几种常用数控系统为例,详细地说明故障诊断、常规处理方法和常见故障分析方法等,使读者对故障诊断有更深入的理解。

3.1 MC1 数控系统的常见故障

MC1 数控系统是上海机床研究所从美国 GE 公司引进技术生产的系统。

1. MC1 数控系统的基本组成 它由电源板、CRT 板、主控制电路和 I/O (输入/输出) 接口电路板 4 部分组成。其中主控制电路由 3 个主、从方式连接的 8085 微处理器及其相位的存储器组成。主 CPU 监控其他两个 CPU 和零件程序和参数存储器。其他两个 CPU 为插补 CPU 和 CRT 的 CPU。通信接口选用 RS-232C。

2. MC1 数控系统故障自诊断报警 MC1 数控系统具有 100 多种故障自动诊断报警功能。主要的故障报警见表 6-7-6。

除了上述 MC1 数控系统故障诊断报警信号以外,还有 MC1 数控接口与设备故障诊断、伺服驱动装置故障诊断等。

属于 MC1 数控接口与设备故障有:各坐标轴不能运动,辅助功能不能正常工作,回零参考点不能正常工作,输出接口电路故障等。

属于伺服驱动装置故障有:交流输入电源欠电压,

表 6-7-6 MC1 数控系统故障报警信号

| 序号 | 报警内容 | 说明 |
|----|------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 | 插补用 CPU 存储器故障与报警 | CRT 显示 87 [#] 、88 [#] 、89 [#] 报警时,分别表示插补 CPU 的 CMOSRAM、EPROM U50、EPROM U51 器件的故障 (U×× 表示该器件在电路上的位置) |
| 2 | 正反向计数器电路故障报警 | CRT 显示 85 [#] 、86 [#] 报警时,表示 X 轴正反向计数电路故障。同样,其他各轴也有相应的故障诊断报警信号 |
| 3 | 主 CPU 存储器故障报警 | CRT 显示 100 [#] 、101 [#] 、102 [#] 、103 [#] 、104 [#] 报警时,表示主 CPU 的 CMOS、RAM、U40、U39、U37、U36 器件故障 |
| 4 | 位置反馈故障报警 | CRT 显示 76 [#] 报警时,表示 Y 轴位置反馈故障,应检查脉冲编码器、连接轴及有关电路、电源是否正常。同样,其他各轴也有相应的故障诊断报警信号 |
| 5 | 可编程通信接口故障报警 | CRT 显示 90 [#] 、91 [#] 、92 [#] 报警时,表示 PPI1 (U26)、PPI2 (U27)、PPI3 (U28) 可编程通信接口集成电路故障。常见故障为不能正常控制各轴模拟量输出、I/O 接口信号不能传送等 |
| 6 | 各轴动态误差报警 | CRT 显示 70 [#] 报警时,表示 X 轴进给动态跟踪误差太大,应检查伺服电动机额定转速是否太高,模拟量输出锁存器是否正常,模拟量输出增益电位器是否良好,脉冲编码器连接轴是否良好,脉冲编码器及伺服模块是否正常等。同样,其他各轴也有动态跟踪误差报警信号 |
| 7 | 机床参数故障报警 | CRT 显示 94 [#] 至 99 [#] 报警时,表示设备参数、刀具补偿值表、M 功能译码表数值不正常。应检查电源,并重新设置参数 |

直流母线过电压,大功率晶体管过电流,伺服电动机不运转,伺服电动机运转不稳定等。

3.2 FANUC 数控系统的常见故障

日本 FANUC 公司和北京数控设备厂生产的数控系统的常见故障见表 6-7-7。



表 6-7-7 FANUC 公司数控系统的常见故障

| 序号 | 故障内容 | 说明 |
|----|---------------------------------------|----------------------------------------|
| 1 | CRT 无辉度或无任何画面 | 电缆连接不良,电压是否正常, CRT 本身有否故障 |
| 2 | CRT 无显示,设备不能工作 | 主控印制板或 ROM 不良 |
| 3 | CRT 无显示,但设备能正常工作 | CRT 部分故障 |
| 4 | 设备不能工作 | 数控系统处于不正常状态或设定错误 |
| 5 | 数控系统接通电源时,出现“NOT READY”显示,并经延时后自动切断电源 | PC 有故障,可通过查对 PC 的参数及梯形图来发现 |
| 6 | 用户宏程序出现超程报警或显示“PROGRAM STOP” | 用户宏程序故障。可以清除数控系统内存,重新输入 NC、PC 的参数 |
| 7 | 手动数据输入方式(MDI)内存方式(MEMORY)无效 | 操作面板与数控柜之间连接发生故障或继电器损坏 |
| 8 | 设备不能正常地返回零位参考点 | 应检查脉冲编码器及其连接电缆 |
| 9 | 返回零位参考点时,出现“NOT READY”状态 | 应检查减速开关是否正常 |
| 10 | 手摇脉冲发生器不能工作 | 应检查手摇脉冲发生器的方式选择信号有否输入,手摇脉冲发生器及其接口板有否故障 |

除了上述数控系统常见故障以外,还有伺服驱动系统故障,主要有高电压报警、大电流报警、欠电压报警、过载报警、速度反馈断线报警、速度控制单元熔断器熔断报警、保护开关动作等,以及在 CRT 上显示出来的软件报警形式。

3.3 SINUMERIK810 数控系统的常见故障

SINUMERIK810 是德国西门子公司生产的数控系统。

1. SINUMERIK810 数控系统组成 它由 CPU 模块、位置控制模块、系统存储器模块、接口模块、文字图形处理器模块、电源模块、集成式可编程控制器(PLC)和相应的软件系统组成。

2. SINUMERIK810 数控故障自诊断 810 系统具有很强的自诊断功能,能及时识别出 NC、PLC 和设备中的故障,它的主要诊断功能见表 6-7-8。

表 6-7-8 810 数控系统常见故障

| 序号 | 诊断内容 | 说明 |
|----|----------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 | CPU 模块红色发光二极管(LED)常亮 | CPU 模块硬件故障, EPROM 故障,总线板损坏 |
| 2 | EPROM 自诊断 | 在启动和 CPU 循环工作中,自动对存储器内容进行检查,如有错误,显示报警 |
| 3 | 常见报警的处理 | <p>(1) 1[#]至 15[#]报警 反映系统自身故障。例如,1[#]报警反映工作存储器的电池用完;6[#]报警,反映数据存储器的电池用完;3[#]报警,反映 PLC 处于停止状态</p> <p>(2) 16[#]至 48[#]报警(RS-232C 接口的报警) 反映了连接电缆、系统和传输设备的状态、数据规格、传输识别符号以及传输波特率等方面故障</p> <p>(3) 100[#]至 196[#](其中 * 为轴号,0,1,2,3 等)进给轴专用报警 反映设备的位置控制闭环中各个环节出现故障。例如,104[#]表示数/模转换达到极限,116[#]表示轴运行速度过高,132[#]表示位置反馈回路硬件故障</p> <p>(4) 2000[#]至 2999[#]报警 这类故障在运行中出现,指示设备的运行状态故障,指示出设备专备的状态功能</p> <p>(5) 6000[#]至 6031[#]报警 反映电气控制方面及接口方面故障,不属系统本身故障</p> |

4 数控系统的可靠性

一台数控设备的可靠性与很多因素有关。例如,数控设备的机械执行部分,刚性要好,精度保持性好,能准确无误执行每一个动作;数控系统和伺服驱动系统动作要可靠,而这部分由于原理复杂、元器件品种繁多、结构紧密,容易出现故障。本节首先介绍有关可靠性的基本概念,然后从数控系统和伺服驱动系统方面,探讨提高可靠性的一些措施,提高可维修性的一些常规方法。

4.1 可靠性和可维修性的基本概念

可靠性是指在规定的条件下,数控设备维持无故障的能力。可靠性是设备的内在特性,是一个重要的质量指标。规定的工作条件是指设备设计和出厂时要求的环境条件、使用方法和使用条件。

可维修性是指使用的系统一旦出现故障,能够恢复到正常状态的能力。



评价可靠性可用以下几种指标:

1. **平均无故障工作时间 (MTBF)** 它是指一个系统在使用中两次故障之间正确工作的平均时间,即总共工作时间和总故障数之比

$$MTBF = \frac{\text{总工作时间}}{\text{总故障数}} \quad (6.7-1)$$

2. **不能工作时间 (又称修复等待时间, MTTR)** 它是指可以修复的系统在出现故障后,等待修复和恢复到正常工作之前的那一段时间。

3. **有效度 A** 它是指对一个系统从无故障时间和修复时间的一项综合评价。

$$A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (6.7-2)$$

4. **可维修度 M(t)** 这是指系统维修的容易程度。它表示可维修的系统在规定的条件下进行维修时,在规定时间内完成维修的概率。

4.2 可靠性设计和可靠性技术

采用可靠性设计和可靠性技术是提高数控系统可靠性的有力措施。

4.2.1 可靠性设计

可靠性设计是一种容错设计,可以通过下述方法达到:

1. **静态冗余** 使用多余的硬件来屏蔽故障。如3倍冗余就是每个重要部件都有3套,采用“多数表决法”决定输出。这种方法的优点是,设计和操作都很简单,能避免错误。缺点是需要增加硬件,使成本提高、体积和功耗增加。

2. **动态冗余** 又称选择冗余。一旦出现故障时,能自动替换备件,对每个被替换的备件处在冷态备用,

功耗小,但设计较困难。

3. **软件失误系统** 在设计软件时,考虑允许某一部件损坏或出故障而不影响机器的正确运算或运转,可避免采用冗余设计,能降低成本和功耗。

4.2.2 可靠性技术

可靠性技术包括范围很广,这里介绍常见的几种:

(1) 采用微电子技术可极大地提高数控系统的可靠性。现代数控系统,由于采用了高速微处理器和大规模或超大规模集成电路,使数控系统的平均无故障时间已达2万小时。

(2) 采用模块化结构可提高可靠性,并可缩短寻找故障和修复时间。

(3) 采用完善的自诊断系统。例如,采用完善的诊断程序,包括输入部件的诊断程序、存储器的诊断程序、软件诊断程序等以及专门用来检查接口电路的输入输出信息,它能很快判断故障的性质与部位。此外,要设置完善的报警及保护电路。

(4) 加强抗干扰措施。数控系统工作在一般的生产车间,车间内设备繁多,类型复杂,操作频繁,电网波动也大,存在着各种严重干扰源。因此,数控系统要加强抗干扰措施,提高抗干扰能力。常用的抗干扰措施有:接地线的合理设计、信号传输的阻抗匹配、抑制放大器的干扰和噪声、印制电路板上安装“去耦电容”,采用隔离变压器防止干扰。在储能元件接通与开断时要设计好泄放能量回路,强弱电之间设置电平转换电路,设计好系统内部电源的抗干扰措施。

(5) 建立完善的日常保养和维修制度。表6.7-9提供了某台数控设备定期维护表,可供参考。

表 6.7-9 数控设备定期维护表

| 序号 | 检查期 | 检 查 部 位 | 检 查 要 求 |
|----|-----|-------------------|-------------------------------|
| 1 | 每天 | 导轨润滑油箱 | 检查油标、油量,及时添加润滑油,润滑泵能定时启动打油及停止 |
| 2 | 每天 | X、Y、Z 轴向导轨面 | 清除切屑及脏物,检查润滑油是否充分、导轨面有无划伤损坏 |
| 3 | 每天 | 压缩空气气源压力 | 检查气动控制系统压力,应在正常范围 |
| 4 | 每天 | 气源自动分水滤气器、自动空气干燥器 | 及时清理分水滤气器中滤出的水分,保证自动空气干燥器工作正常 |
| 5 | 每天 | 气液转换器和增压器油面 | 发现油面不够时及时补充油 |
| 6 | 每天 | 主轴润滑恒温油箱 | 工作正常,油量充足并调节温度范围 |



(续)

| 序号 | 检查期 | 检查部位 | 检查要求 |
|----|-----|--------------------|---------------------------------------|
| 7 | 每天 | 液压系统 | 油箱、油泵无异常噪声,压力表指示正常,管路及各接头无泄漏,工作油面高度正常 |
| 8 | 每天 | 液压平衡系统 | 平衡压力指示正常,快速移动时平衡阀工作正常 |
| 9 | 每天 | CNC的输入/输出单元 | 如光电阅读机清洁,机械结构润滑良好等 |
| 10 | 每天 | 各种电气柜散热通风装置 | 各种电柜冷却风扇工作正常,风道过滤网无堵塞 |
| 11 | 每天 | 各种防护装置 | 导轨、设备防护罩等应无松动、漏水 |
| 12 | 每周 | 清洗各电柜过滤网 | |
| 13 | 每半年 | 滚珠丝杠 | 清洗丝杠上旧的润滑脂,涂上新油脂 |
| 14 | 每半年 | 液压油路 | 清洗溢流阀、减压阀、滤油器,清洗油箱箱底,更换或过滤液压油 |
| 15 | 每半年 | 主轴润滑恒温油箱 | 清洗过滤器,更换润滑油 |
| 16 | 每年 | 检查并更换直流伺服电动机电刷 | 检查换向器表面,吹净碳粉去除毛刺,更换长度过短的电刷,并应跑合后才能使用 |
| 17 | 每年 | 润滑油泵、滤油器清洗 | 清理润滑油池底,更换滤油器 |
| 18 | 不定期 | 检查各轴导轨上镶条,压紧滚轮松紧状态 | 按设备说明书调整 |
| 19 | 不定期 | 冷却水箱 | 检查液面高度,冷却液太脏时需更换,并清理水箱底部,经常清洗过滤器 |
| 20 | 不定期 | 排屑器 | 经常清理切屑,检查有无卡住等 |
| 21 | 不定期 | 清理废油池 | 及时取走废油池中废油,以免外溢 |
| 22 | 不定期 | 调整主轴驱动带松紧 | 按设备说明书调整 |

第8章 数控技术的应用

随着电子技术和计算机技术的发展,数控技术的应用已日益广泛。从国防工业到民用工业,从重工业到轻工业,数控技术的应用与计算机的应用紧密结合在一起,几乎已渗透到每一个领域。而数控机床则是数控技术应用的一个主要方面。

1 数控机床

1.1 数控机床的构成、功能和特点

1. 主机 主机是数控机床的主体,是用于完成各种切削加工的机械部分,包括床身、立柱、主轴、进给机构等机械部件。它在结构上具有以下特点:

(1) 采用高性能的主轴及伺服传动系统,使数控机床的机械结构得到了简化,传动链较短。

(2) 采用高效传动部件,如滚珠丝杠副、直线滚动导轨等。

(3) 机械结构具有较高的动态刚度、阻尼精度及耐磨性,热变形较小。

2. 数控装置 这是数控机床的核心,用于输入零件程序、信息存储、数据变换、插补运算以及实现各种控制功能。现代数控机床的数控装置可具备以下功能:

(1) 多坐标控制(多轴联动)。

(2) 实现多种函数的插补(直线、圆弧、抛物线等)。

(3) 代码转换(EIA/ISO代码转换、英制/公制转换、二-十进制转换、绝对值/增量值转换等)。

(4) 人机对话,手动数据输入,加工程序的输入、编辑及修改。

(5) 加工选择,各种加工循环,重复加工,凹(凸)模加工,镜象加工等。

(6) 可实现各种补偿功能,进行刀具半径、刀具长度、传动间隙、螺距误差的补偿。

(7) 实现故障自诊断。

(8) CRT显示,实现图形、轨迹、字符显示。

(9) 联网及通信功能。

3. 伺服驱动装置 是数控机床执行机构的驱动部



件,包括主轴驱动单元、进给驱动单元、主轴电动机及进给电动机等,通过电气或电液伺服系统驱动执行机构,完成点位、直线、平面曲线或空间曲面的加工。要求伺服系统有良好的快速响应性能和高的跟踪精度。

4. 数控机床的辅助装置 指数控机床的一些必需的配套部件,以保证数控机床的运行。它包括液压和气动装置、排屑装置、交换工作台、数控转台和数控分度头,以及刀具和监控检测装置。

5. 编程机及其他一些附属设备 利用编程机可在机外进行零件程序编制,将程序记录在信息载体(如纸带、磁带、磁盘等)上,然后送入数控装置。

1.2 国外典型的数控装置简介

1.2.1 国外几家主要生产厂历年产品 (见表 6-8-1)

1.2.2 FANUC 公司的数控装置

1. FANUC 0 系列 F0 系列是结构紧凑的、可组成

面板装配式的 CNC 装置,它适用于各种中小型机床。

F0-MA/MB/MEA/MC: 用于加工中心、镗床和铣床。

F0-MF: 用于加工中心、镗床及铣床的对话型 CNC 装置。

F0-TA/TB/TEA/TC: 用于车床。

F0-TF: 用于车床的对话型 CNC 装置。

F0-TTA/TTB/TTC: 用于一个主轴双刀架或两个主轴双刀架的四轴控制机床。

F0-GA/GB: 用于磨床。

F0-PB: 用于回转头压力机。

(1) 构成。F0 系列由主印制电路板、PMC (Programmable Machine Controller) 板、增设 I/O 板、图形控制板和电源单元板构成。

主板为大板结构,其他板为小板结构,并把它们插在主板上,组成 F0 系列的控制部分。

FANUC 0 系列中的 C 系列是 0 系列中的最高档产品。采用了表面安装技术和更多地使用了专用 LSI,

表 6-8-1 国外几家主要生产厂历年产品

| 年代(份) | 厂名 日本 FANUC 公司 | 德 国 SIMENS 公司 | 美 国 ALLEN-BRADLEY |
|---------|------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|-----------------------------|
| 60 年 代 | F220, F230 F240, F250 F260, F330A/B F280, F132 | | |
| 70 年代初期 | F10, F20 F30 | SINUMERIK 500 SINUMERIK 5 | A, B3300 A, B7300 |
| 70 年代中期 | F1000, F2000 F3000, F200A/B F2000C F3000C FS5, FS7 F200C Mate Series 330D | PRIMO S/SG SINUMERIK 500C SINUMERIK7 | |
| 70 年代末期 | FS2 FS3 FS6 FS9 | SINUMERIK8 | |
| 90 年代初期 | | SINUMERIK3 | A, B8200 |
| 80 年代中期 | F10/11/12 F0 F00/100/110-/120 F0 Mate | SINUMERIK810/820 | A, B8400 A, B8600MC/TC |
| 80 年代末期 | FS15 FS150 | SINUMERIK850/880 | A, B8600AT90 A, B8600IWS |
| 1990 年 | FS16 | | |
| 1991 年 | FS18 | | |



使硬件结构更加紧凑,体积减小到0A系列和0B系列的40%。

使用薄型显示/MDI,采用EL(场致发光)器件。与CRT显示比较,显示装置的厚度尺寸减少了2/3。

(2)特点。F0系列是一个多微处理器系统。0A系列主CPU为80186,0B系列主CPU为80286,0C系列主CPU为80386。

PMC采用8086作为CPU。此外,图形控制和操作面板控制等都有各自的CPU。

F0系列用内装式PMC,有两种规格,即FANUC PMC-MODEL L和FANUC PMC-MODEL M。M型功能比L型强。

F0C系列在已有的RS-232C串行接口之外,又增加了高速串行接口远程缓冲器,以此实现高速DNC运行。

(3)逻辑框图(见图6·8-1)。在控制线路中使用的

专用LSI有BAC(Bus Arbitration Controller)、IOC(Input Output Controller)、MB87013等。MB87013用于位置控制,其中包括DDA插补、误差寄存器基准计数器、脉宽调制及检测倍数DMR的运算等。

2.FANUC系统FS15系列 它是FANUC新的32位CNC装置,称为人工智能CNC装置。

(1)构成。按功能模块化设计,根据不同的配置可选用带7、9、11和13个槽的控制单元母板,便于插入各种电路板。电路板有控制用的BASE0~BASE2、对话用的CPU板、图形CPU板、PMC RAM板和远程缓冲器板等。

有多种规格控制柜,如自立型、分离型、单元型和面板装配型等。

(2)特点。FS15系列采用了模块式多主总线(FANUC BUS)结构,是多微处理器控制系统。主CPU为68020,还用了一个SUB CPU,在PMC、轴控制、

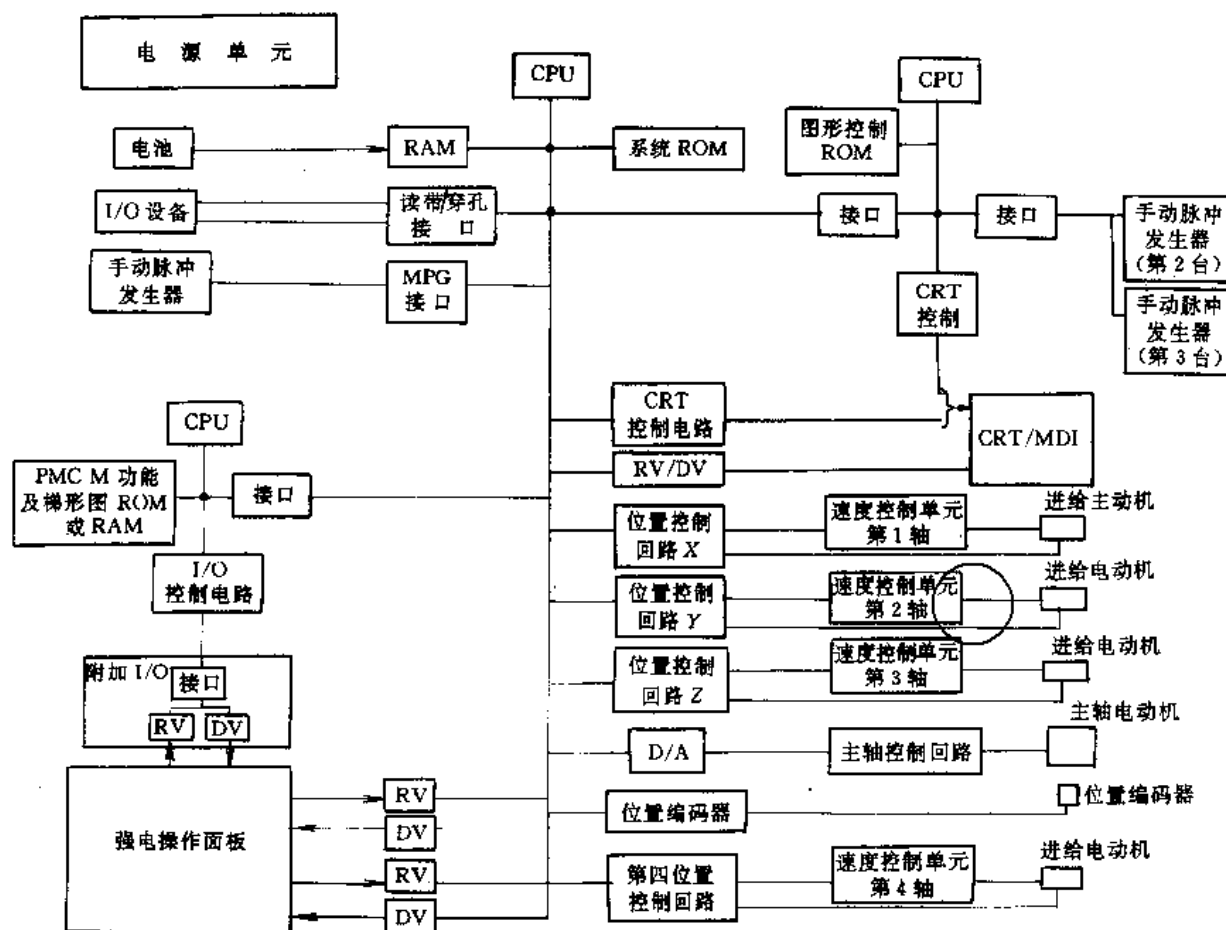


图6·8-1 F0系列逻辑框图
RV—接收器 DV—驱动器

此星公司制作 请尊重作者版权



图形控制、通信及自动编程等功能中也都有各自的 CPU。

FS15 系列可构成最小至最大系统,可控制 2 根轴至 15 根轴,还有 PMC 的轴控制功能。它可用于大型机床、复合机床的多轴控制和多系统控制。

由于采用了 32 位高速多主总线和 32 位微处理器,实现了很高的加工速度。当最小设定单位为 0.001mm 时,进给速度可达到 240m/min。

可实现连续微小程序段的高速加工,以满足模具等复杂形状零件的高速加工。

为了实现与上一级计算机之间数据信息的高速传输,使用了通信专用微处理器和 RS-422 接口,并有远距离缓冲功能。

FS15 系列带内装式 PMC,型号为 FANUC PMC-N。设有 BMI 接口和 FS3/FS6 接口。

FS15 系列增加 64 位精简指令 (RISC) 微处理器作为选择件,使加工速度提高 4 倍。

(3) 逻辑框图。在 FS15 系列中,CNC 的各功能模块是备有各自的微处理器的独立硬件模块,并在它们之间用 32 位宽的多主总线连接起来而实现的。其框图见图 6-8-2。

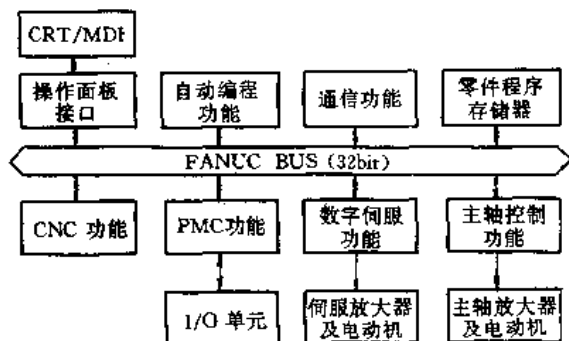


图 6-8-2 FS15 系列框图

3. FANUC 系统 16 系列 FS16 系列是在功能上位于 FS15 系列和 F0 系列之间的最新 CNC 装置。它的特点是:

(1) 作为控制用的 32 位 CISC (Complex Instruction Set Computer) 上又增加了 32 位高速 RISC (Reduced Instruction Set Computer), 用于高速运算。

(2) 采用了表面安装电子器件的 SMD (Surface Mounted Device) 模块,印制电路板变成三维高密度安装结构,实现了 CNC 装置的小型化。

(3) 采用了具有多主控制功能的高速 32 位 FANUC BUS。

(4) 采用了薄型 TFT (薄膜晶体管) 彩色液晶显

示技术。

4. FANUC 系统 FS18 系列 FS18 系列是继 FS16 系列之后推出的最新 32 位 CNC 装置。功能上位于 FS15 系列和 F0 系列之间,但低于 FS16 系列。它的特点是:

(1) 高密度三维安装技术,四轴伺服控制,PM-C 及显示等全部功能都集约在两个模板槽中。

(2) 基本功能与 FS16 系列相同,但取消了 RISC 等高价功能。

(3) TFT 彩色液晶显示。

(4) 在画面上可显示调试控制电动机的波形。

(5) 在操作性能、机床接口、编程等方面均有与 FS16 系列之间的互换性。

1.2.3 西门子 (SIEMENS) 公司的数控装置

SIEMENS CNC 装置有 SINUMERIK 3、8、810、820、850 及 880 系列。其中 SINUMERIK 810 和 820 在体系结构和功能上相近,SINUMERIK 850 和 880 也在体系结构和功能上相近。

1. SINUMERIK 3 该系列适用于各种机床的控制,有 M 型、T 型、TT 型、G 型及 N 型等。

3T 系统借助于 TRANSMIT (转换) 功能,可使一般的 CNC 车床变成一个柔性切削中心。

中央单元的主 CPU 为 8086,内设或外设两个 PLC。这种控制装置除可由计算机辅助编制用户程序外,对简单的零件程序可在加工现场直接编程。图形和操作提示功能给用户编程提供了方便,通过对屏幕的直接监视可排除机床和刀具的故障。

NC 与 PLC 之间设有很宽的窗口,可满足机床的各种自动加工功能的要求。

通过配置软件,可使 SINUMERIK 3 进入 FMS。

SINUMERIK 3 有多种改进型,它们是 GA0~GA3、GA4A、GA4B 及 GA4C。

SINUMERIK 3 (GA4B) 逻辑框图见图 6-8-3。

2. SINUMERIK 810/820 该系列适用于一般小型机床,分为 M、T、G 型。M 型用于镗床、铣床及加工中心,T 型用于车床,G 型用于磨床。主 CPU 为 80186,采用通道式结构,有主通道和辅助通道。用 RS-232C 接口进行数据传输及通信联网;操作者可在 CRT 上调用任何一种软件菜单内容,输入加工程序,还可以快速模拟程序。

采用集成式 PLC,具有很强的扩展功能。

SINUMERIK 810/820 的逻辑框图见图 6-8-4。



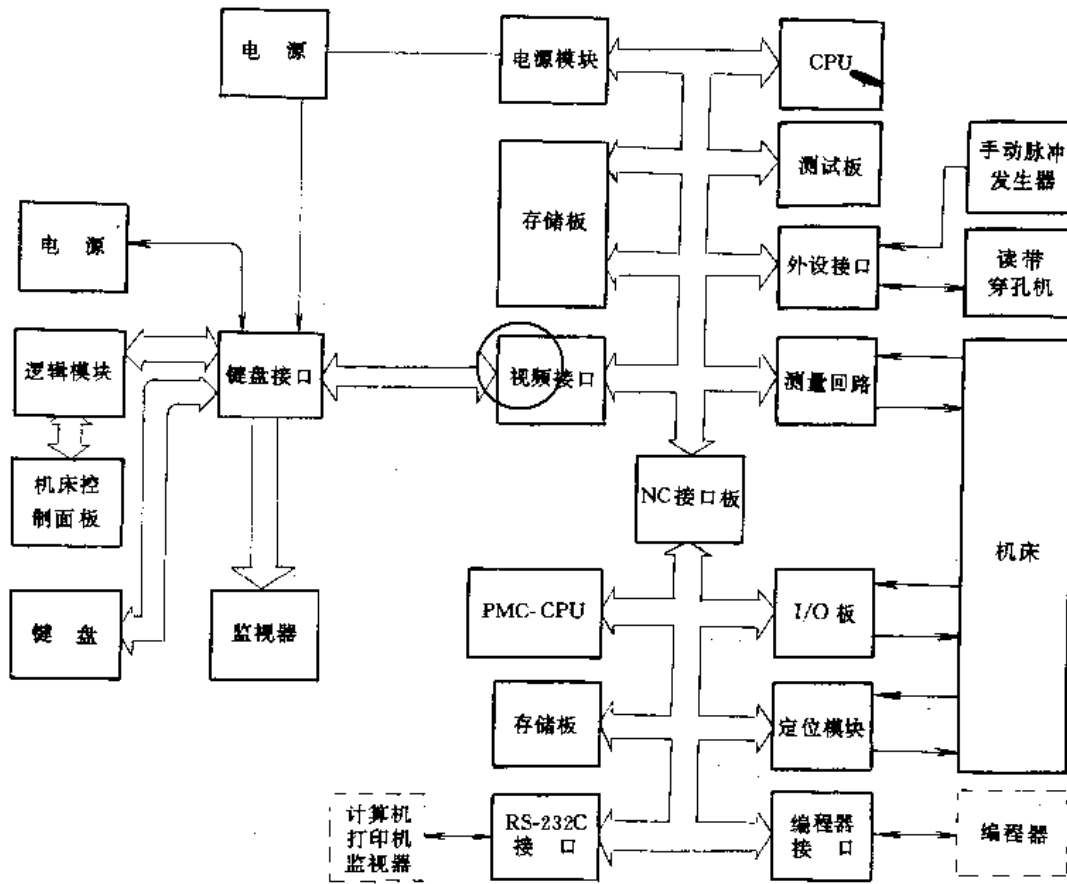


图 6·8-3 SINUMERIK 3 (GA4B) 逻辑框图

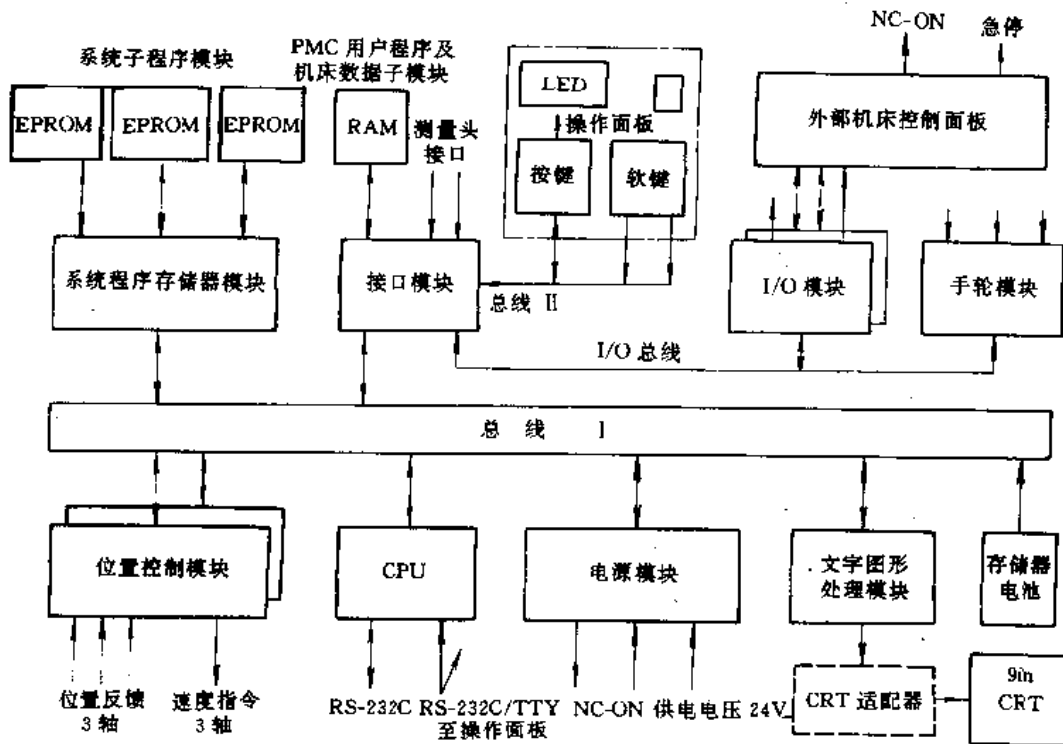


图 6·8-4 SINUMERIK 810/820 逻辑框图



3. SINUMERIK 850/880 该系列是西门子公司最新的 CNC 产品,它适用于高度自动化水平的机床及柔性制造系统。它有 850M、850T、880M、880T 规格。850 和 880 在结构体系方面相近,但功能上有明显的区别,参见表 6-8-2。

表 6-8-2 850 与 880 的主要功能区别

| 功能名称 | SINUMERIK 850 | SINUMERIK 880 |
|----------------|---------------|---------------|
| 控制轴数 | 最多 12 个 NC 轴 | 最多 24 个 NC 轴 |
| NC 通道数 | 最多 8 个 | 最多 16 个 |
| 控制主轴数 | 最多 4 个 | 最多 6 个 |
| 可任意设定轴/主轴用测量电路 | 12 个 | 30 个 |
| PLC | S5-130WB | S5-135W |
| 可连接 PLC 数 | 2 个 | 4 个 |

SINUMERIK 850/880 为柔性紧凑型通道结构 CNC 装置。主 CPU 为 80386,还设有伺服控制用 CPU、通信用 CPU 及 PLC 用 CPU。在附加模块的插座位置上可插入存储器模块、测量模块、扩展 CPU 模块、PC 的输入/输出模块及扩展单元的接口模块等。采用 12in (30.5cm) 彩色 CRT。系统有很强的通信功能,可与计算机集成制造系统通信。

部分印制电路板采用了表面安装技术,如存储器模块。

880 采用两个支架 1、2 两列中央控制器。还设有两个串行接口 (RS-232C) 和电流环等。

1.2.4 美国 ALLEN-BRADLEY (A-B) 公司的数控装置

1. A-B 8200 系列 8200 系列是结构紧凑的小型 CNC 装置,可用于车削中心、加工中心、磨床、滚齿机、火焰切割机、深孔钻、测量机、激光焊接机、机器人等设备上。

(1) 构成。由 12in CRT、键盘、控制器、电源、标准存储器 (64KB)、磁泡存储器、数字 I/O 模块、端子板、模拟 I/O 模块、远程 I/O 模块、基本通信模块、高速数据通道、A-B CAM 工厂通信模块等组成。

(2) 特点。主 CPU 为 8086,具有内装 PLC,具有可连接到厂级宽带通信系统的功能。备有远程 I/O 接口、高速数据通道、RS-232C 接口以及 A-B CAM 厂级通信接口,主计算机可对 8200 系列进行监控和直接驱动。

该系列在操作上有独特功能,如有 JOG 返回、多级程序段返回以及偏置累加等功能。对于刀具检测,采用动态编辑修改偏置。

(3) 逻辑框图 (见图 6-8-5)。

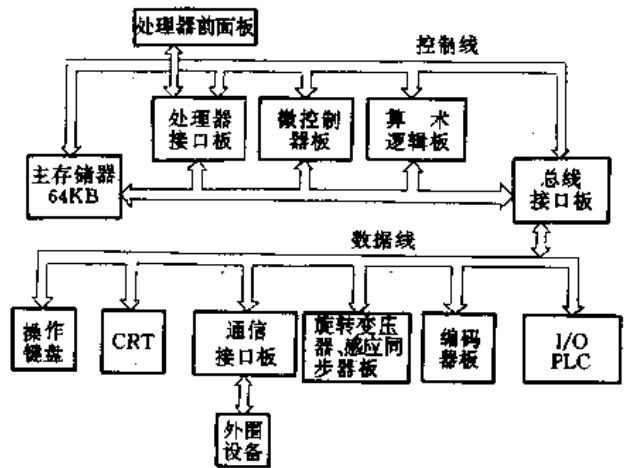


图 6-8-5 8200 系列逻辑框图

2. A-B 8400 系列 8400 系列操作简单,编程容易,配置方便,是价格低廉的 CNC 产品,广泛用于各种机械加工设备上。

CPU 为 8086,单微处理器,带有 8087 协处理器,有内装式 PLC。

它主要由中央处理单元模板、显示及接口模板操作面板组成。

采用单页面操作方式,有主菜单页面、手动操作页面、任务设置页面、程序编辑页面、程序检查页面、自动操作页面、装入/保存页面、支持页面以及图形状态显示页面等。

逻辑框图见图 6-8-6。

3. A-B 8600 系列 8600 系列是可用于各种机械加工设备的柔性 CNC,具有不同的硬件配置和全功能的软件包。

8600 有 8605、8610、8650、8600AT90、8600IWS 等多种规格。

8605 是一种固定硬件配置结构,可用于车床,可控制两根轴和主轴,采用脉冲编码器反馈,有全功能软件包、完整的图形功能和 I/O 模块,是 8600 中结构最紧凑的 CNC 装置。

8610 能提供硬件可变性,用于铣床、加工中心等机床,有 10 个模块插槽。

8650 能够满足较多的应用要求,有 20 个插槽,可配置存储器和各种接口来满足使用要求。

8600AT90 及 8600IWS 比上述三种产品技术性能更高。

(1) 构成。8600 由 CPU 模块、轴管理 CPU 模块、操作面板接口模块、存储器模块、I/O 模块、终端面板、



远程 I/O 通信模块、高速数据通道通信接口模块、反馈用模块、A/D 和 D/A 转换模块、磁泡存储器模块、WINCHESTER 硬盘接口模块、电源及辅助控制模块、SIPROM 开发模块，以及用于外设的软盘驱动器等组成。

(2) 特点。8600 系列为多主、从结构的多微处理器装置，主系统微处理器有标准的和高速的两种规格。标准的用 8086 和它的 8087 协处理器；高速的用 80286 和 80287 协处理器。用于轴控制的 CPU 为 8086，数据高速通道 I 模块的 CPU 为 80186。

具有多组程序处理能力，最多可并行执行 5 组零

件程序。

根据控制轴数或者坐标位置更新速度的需要，轴控制 CPU 最多可用 4 个，用于进行插补，伺服环和螺距误差补偿等。

开发了 ASSET 高级语言，用于进行外围设备操作、文件操作、与计算机的通信及制作用户画面等。

具有多种编程方法：蓝图直接编程、几何工艺语言 (GTL) 编程、参数化编程。

具有可连接到厂级宽带通信系统的能力。

还为机床和 8600CNC 装置接口开发了以梯形图为基础的特殊的高级语言——SIPROM 语言。它象一

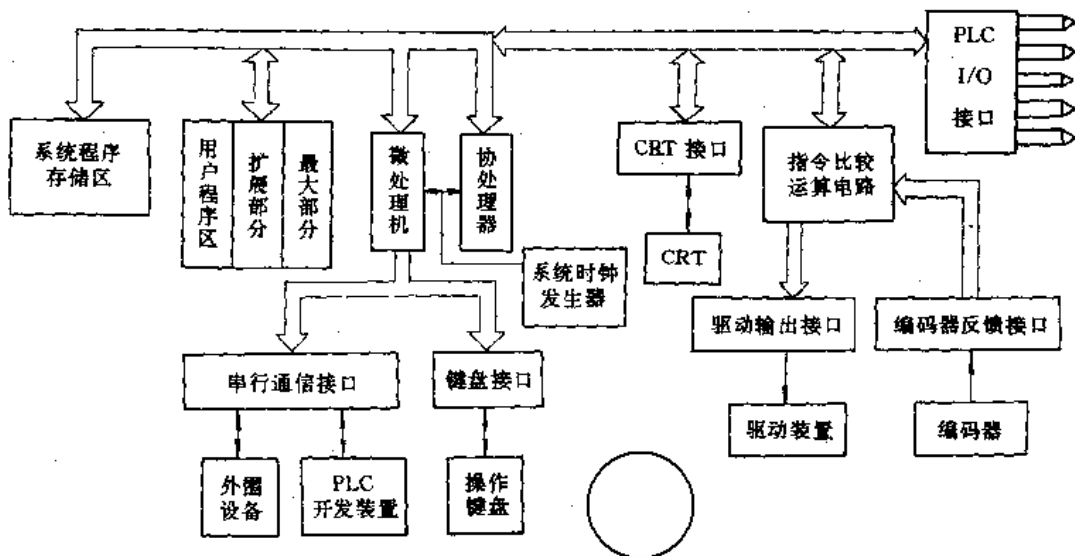


图 6-8-6 8400 系列逻辑框图

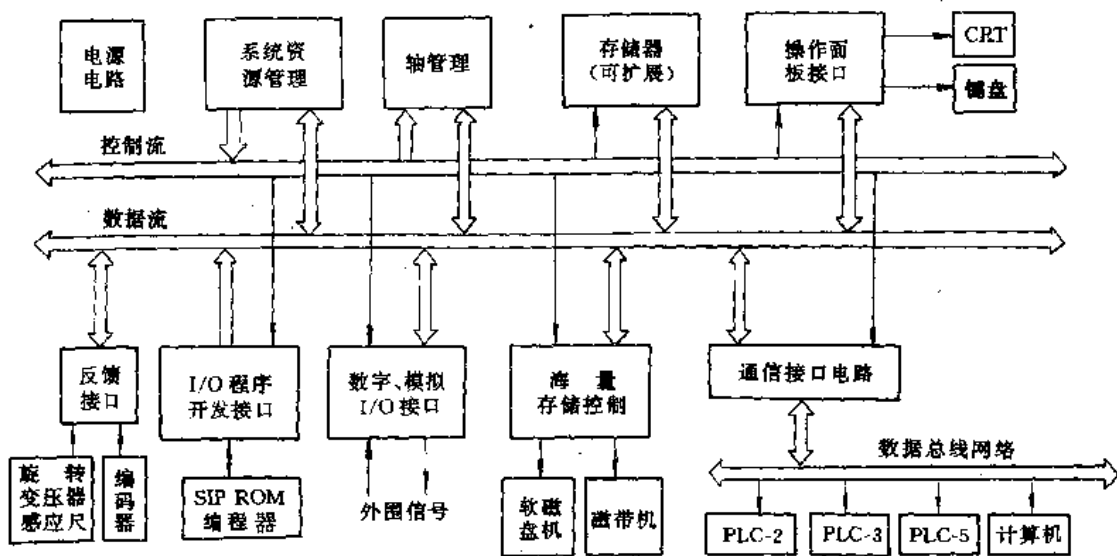


图 6-8-7 8600 系列逻辑框图



个自动编程器，很容易地使用用户程序生成文件。

内装逻辑分析器，可用于显示输入、输出信号的状态，观察其时序关系。

(3) 逻辑框图 (见图 6·8-7)。

1.3 国内几家主要生产厂的数控装置

1.3.1 北京数控设备厂 (BESK) 的数控装置

北京数控设备厂的 CNC 产品有两类：一类是从 FANUC 公司引进的许可证制造的产品，有 FANUC-BESK 3 系列、FANUC-BESK 6E 系列，还有与 FANUC 公司合作生产的产品 FANUC-BESK O Mate E 系列；另一类是自行开发的产品，有 BS02、BS03C、BS04、BS06 和 BS07 系列。

BS02B 为单轴数控系统，用于各种简单机械设备的单轴控制。BS03C 为经济型数控系统，主要用于功能较简单的车床控制。

BS04 系列适用于各种中小型的机床，功能适中，单微处理器结构，CPU 为 8086，采用内装式 PMC，其型号为 BESK-PC。

BS07 系列主要用于控制轴数为 6 轴、联动轴数为 5 轴或 6 轴的铣床、加工中心及柔性加工单元。主 CPU 为 8086，PMC 用的也是 8086，带有 8087 协处理器。

FANUC-BESK 6E 系列有 6ME 和 6TE 两种规格。6ME 用于加工中心和铣床，6TE 用于车床。它采用大板结构，是多微处理器控制系统，用了多个 8086。系统中采用了专用大规模集成电路，采用内装式 PMC。逻辑框图见图 6·8-8。

FANUC-BESK O Mate 系列有 O-M Mate E 和 O-T Mate E 两种系统，前者用于加工中心和铣床，后者用于车床，是一个多微处理器 CNC 装置。主 CPU 为 80286，PMC 用 CPU 为 8086，图形显示用 CPU 为 80186。采用内装式 PMC，规格为 PMC-L。逻辑控制电路中采用了专用 LSI，其中 MB87103 为 CMOS 电路，用于位置控制。操作面板具有软件键操作功能。

1.3.2 上海机床研究所的数控装置

MTC 数控系列是在引进消化吸收美国 GE 公司 Mark Century One 的基础上开发的 CNC 装置，能满足各种机床的需要，有 T、M、B、C 等型号。它由电源板、CRT 板、主板及输入/输出板组成。主 CPU、插补用 CPU 及 CRT 控制用 CPU 均采用 8085，系统软件丰富。具有结构紧凑、体积小、功能强和操作维修方

便等特点，易于实现机电一体化。其逻辑框图见图 6·8-9。

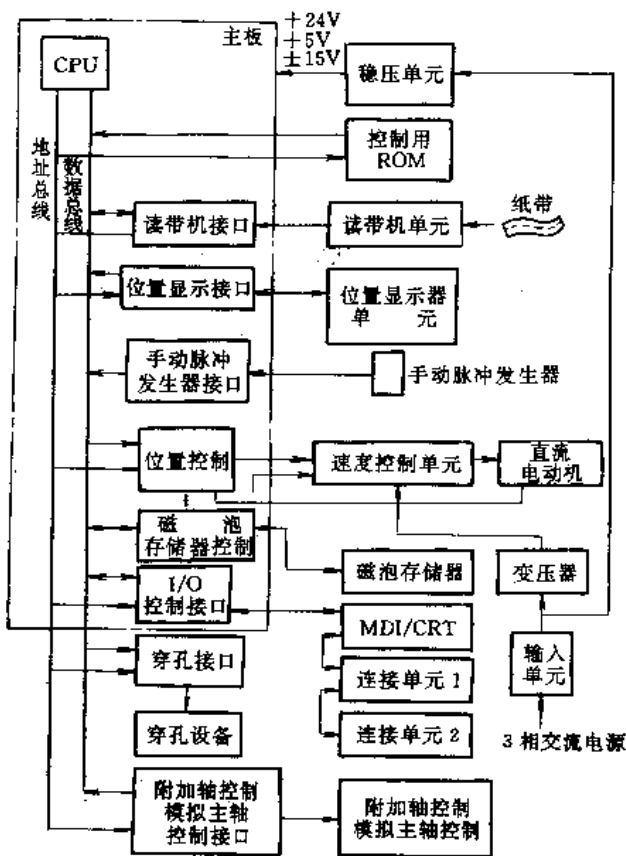


图 6·8-8 FANUC-BESK 6E 系列逻辑框图

1.3.3 辽宁精密仪器厂数控中心的数控装置

LJ-10 系列和 LJ-20 系列是该厂引进美国 DYNAPATH SYSTEM 10 和 20 的基础上开发的 CNC 装置，有 T、M、P、AM 等型号。

LJ-10 系列是一个多微处理器 CNC 装置，主 CPU 为 8086，其他为 8085 或 8088，采用模块小板和总线结构，由主板、存储器板、外圈控制板、面板 PIC、I/O 板、电源模块及 CRT 组成。备有的选择件有：图形控制板、程序中中断控制器 (PIC) Ⅱ板、第 4 轴控制板、刀库轴控制板等。PLC 采用内装式。逻辑框图见图 6·8-10。

LJ-20 系列也是多微处理器 CNC 装置，主 CPU 用 80186，辅助控制用 CPU 为 8085。采用与 IEEE796 兼容的总线结构。在选择件中，增加了第 5 轴控制板和测量探头控制板。采用了内装式 PLC，用个人计算机

此是公刊制作请尊重原作者版权



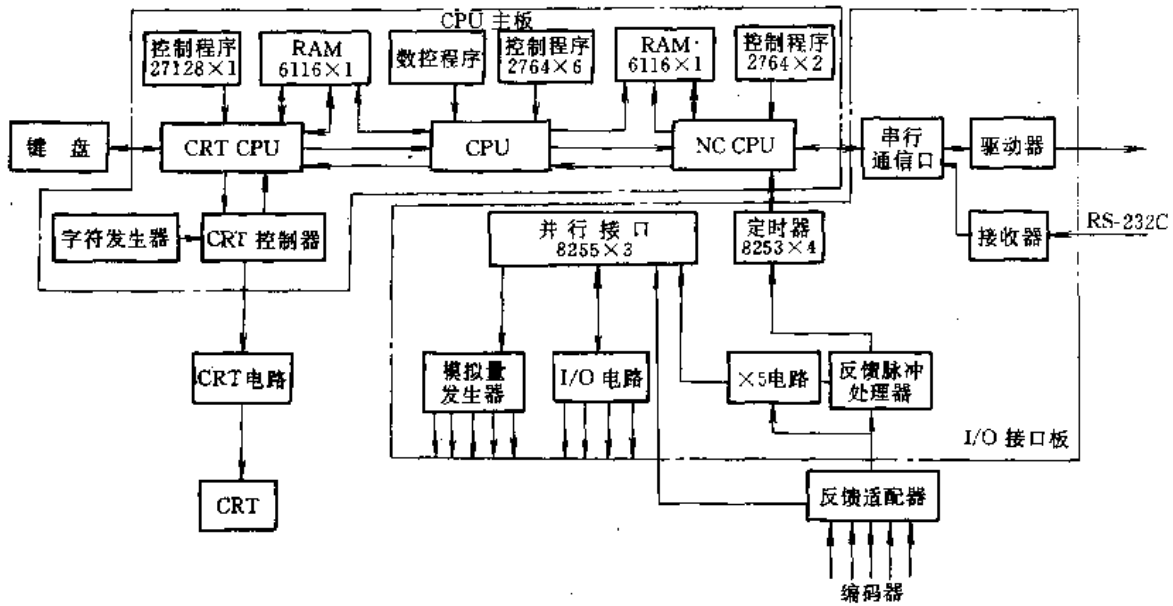


图 6-8-9 MTC 系列逻辑框图

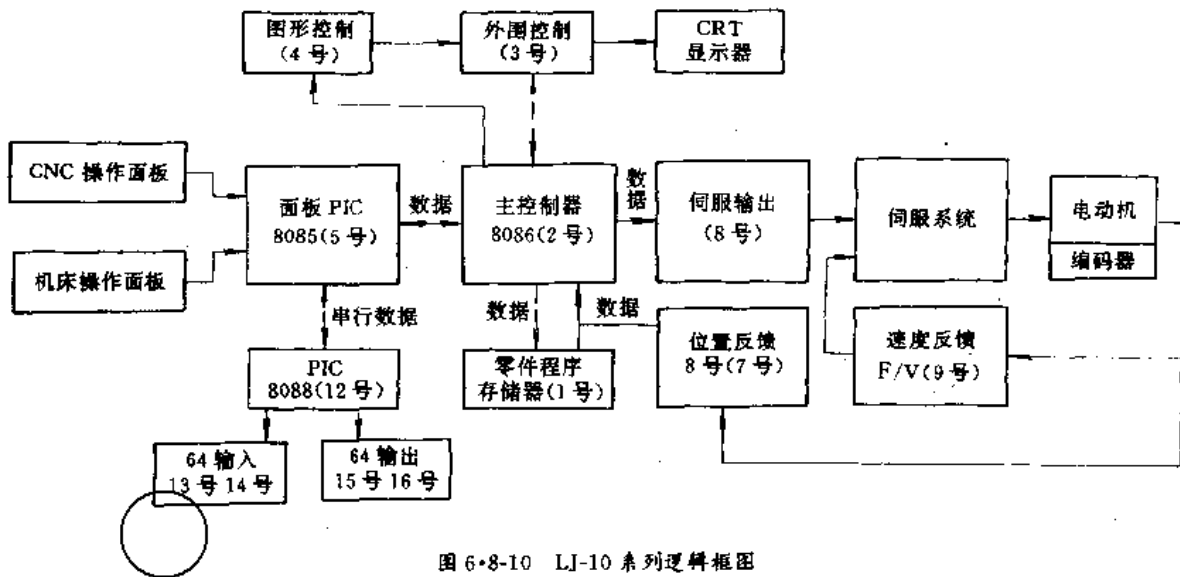


图 6-8-10 LJ-10 系列逻辑框图

PIC—程序中斷控制器

编程,形成目标文件和梯形图文件。该系统具有并行操作功能,在加工的同时可以输入和编辑程序。还具有刀具标定功能,可以自动计算和补偿刀具补偿值,可编程材料表格提供了自动按最佳工艺参数的切削能力。在各种切削循环中具有自动排列切削顺序的功能。

2 自动绘图仪

2-1 自动绘图仪的产生和发展

20 世纪 50 年代末至 60 年代初,美国 GERBER 公司首先开发应用 APT (AUTOMATIC PROGRAM-

MING TOOLS) 语言控制工作机工作,根据数控机床的原理,用绘图笔代替刀具,从而诞生了世界上第一台数控绘图仪,并首先在飞机制造业上得到了应用。美国的 CALCOMP 公司也将数控技术与 X-Y 记录仪结合,制成了一种滚动式结构的自动绘图仪,还开发出了成套绘图软件,为用户提供从图形输入到图形输出的全部软硬件设备。

60 年代至 70 年代,随着计算机技术、数控技术、精密加工技术和精密测量技术的发展,为绘图技术和自动绘图技术的进步创造了条件,各类自动绘图机不断涌现。近 10 余年来,随着微处理机技术的出现和发



展,一种将微处理机与自动绘图仪相结合在一起的新颖绘图仪应运而生。这些智能化的绘图仪,不但简化了设备的控制逻辑,而且还具备一定的存储功能,自检功能和某些处理功能,此外还可选配多种与计算机连接的标准接口。

目前生产绘图仪较有名的公司还有美国的 XY-NETICS 公司生产平面永磁式线性脉冲电动机的自动绘图仪,HP 公司、TEKTRONIX 公司和 HOUSTON INSTRUMENTS 公司主要生产中小型自动绘图仪。除美国外,还有日本、法国、德国、挪威和俄罗斯等国也有不少厂家生产自动绘图仪。

我国于 1968 年研制成功了 LZ-5 自动绘图仪,70 年代后发展较迅速,先后开发了 LZ 系列、MSB-1、LS 系列、CTS-1,以及 HTJ-1855 和 JHT-2 等多种型号和系列的自动绘图仪,还开发出了 PDH-1000 和 PB-1800 型平面永磁式线性脉冲电动机型自动绘图仪等品种。近年来又开发成功了带有微处理机的新一代自动绘图仪。

2.2 自动绘图仪的组成

自动绘图仪与多数数控设备一样,由控制系统、传动机构和绘图机械等几部分组成,见图 6-8-11。

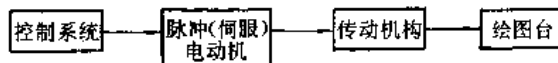


图 6-8-11 自动绘图仪结构示意图

控制系统是自动绘图仪的核心部分,它的作用除了将计算机输出的绘图命令和绘图信息加工成一组组有序脉冲列外,还要将这一组组有序脉冲列转换和放大成驱动脉冲电动机旋转的驱动信号,驱动脉冲电动机转动,带动传动机构和绘图机械在绘图台上画出图来。

自动绘图仪的控制系统,根据不同的绘图要求分为开环控制式和闭环控制式两种。

自动绘图仪应包括硬件和软件两部分。软件部分是指支配自动绘图仪的控制系统生成图形的数字处理程序。这些程序一般固化在自动绘图仪的只读存储器中。

2.3 自动绘图仪的基本原理

普通自动绘图仪对平面曲线的处理方法有两种:

(1) 按特定的代数方程,根据笛卡儿坐标的原理,直接生成相应曲线;

(2) 将笛卡儿坐标平面上的某些给定参数的离散点,在满足精度的前提下,用自动绘图仪生成的一次或二次曲线,按处理程序分段逼近并连成相应的光滑

曲线。

自动绘图仪上产生的任何平面曲线,都是绘图笔在 X 和 Y 方向上合成运动的轨迹。控制器每送一个指令脉冲,绘图笔就在相应方向上移动一个脉冲当量的距离,这样步进式地绘出图形。

绘图数据由专门的输入设备输入计算机,这些数据是加工数据段参数或工具动作指令,如直线段的终点相对于始点的坐标参数、圆弧段的终点及圆心相对于始点的坐标参数,以及抬落笔指令等。

在规定的坐标点之间,根据一定的规律插入足够的的数据是由插补完成的。采用的插补方法通常有逐点比较法、微分分析法、脉冲乘法器、正负法和 SFG 法等。

2.4 自动绘图仪的主要功能和技术指标

2.4.1 自动绘图仪的主要功能

- (1) 绘制任意曲线;
- (2) 可以对所绘制的图形作任意角度的旋转及完成笔标转换;
- (3) 可以对图形按比例任意缩放和开窗;
- (4) 可以以相对坐标绘图,也可以以绝对坐标绘图;
- (5) 具有宏指令;
- (6) 可便于人机对话;
- (7) 多笔自动绘图仪应具备自动换笔功能;
- (8) 在特殊需要场合,有便于进行数据处理和编排的功能。

2.4.2 自动绘图仪的主要技术指标

1. 精度

(1) 重复精度 e_R 。重复精度是指绘图仪在重复绘制曲线时造成的误差。

(2) 定位精度 e_P 。定位精度是衡量绘图仪最大定位误差的指标。定位误差主要由重复误差、检测元件误差和机械传动链的误差所决定。

(3) 动态精度 e_D 。动态精度指自动绘图仪在绘图过程中给图形带来的误差。

自动绘图仪的综合精度就是定位精度和动态精度的综合。综合精度为

$$e = \sqrt{e_P^2 + e_D^2}$$

2. 速度

- (1) 额定速度 v_R ;
- (2) 最大绘图速度 v_{max} ;
- (3) 爬行速度 v_{min} 。



3. 其他指标 其他指标包括绘图幅面、工具功能(包括笔的数量)、分辨率、使用环境、与计算机的连接接口、绘图命令,以及功耗和外形尺寸等。

2.5 自动绘图仪的分类

绘图仪种类型号很多,但结构大致相似,分类方法也不尽相同。

按绘图幅面的尺寸大小,可分为大型、中型和小型几种。幅面大的可达数米,幅面小的只有A3号纸那么大。

按绘图仪采用的控制方式,可分为开环、闭环和半闭环几种。

按绘图仪结构特点和使用场合不同,又可分为滚动式的、平台式的、台式便携式的、喷墨式的、静电行式的等。

2.6 DXY-800 和 DXY-101 平台式自动绘图仪

2.6.1 工作原理和总体结构

DXY-800 和 DXY-101 平台式自动绘图仪是一种采用开环控制方式的绘图仪。其逻辑框图见图 6.8-

12。在控制逻辑内装有 8049 单片机, 8KB EPROM 固化了插补程序和功能性程序, X 和 Y 两个方向的驱动电路把指令脉冲放大后推动两个方向的脉冲电动机带动变速机构,并通过绳轮使横梁和笔架作平面运动。

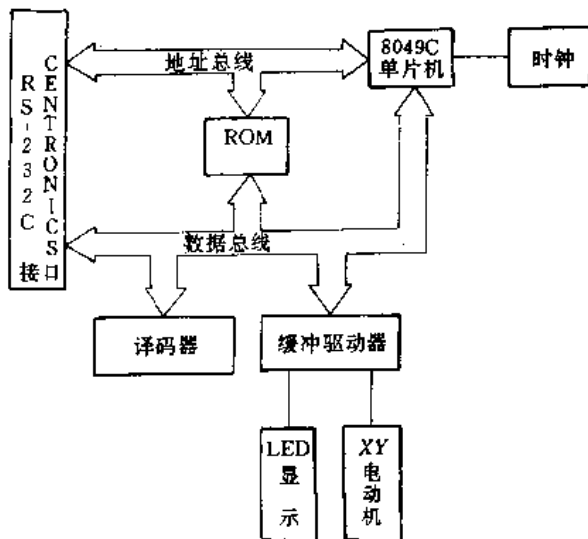


图 6-8-12 DXY-800/101 绘图仪控制逻辑图

DXY-800 和 DXY-101 自动绘图仪采用平台式横梁结构。其总体布置见图 6-8-13。

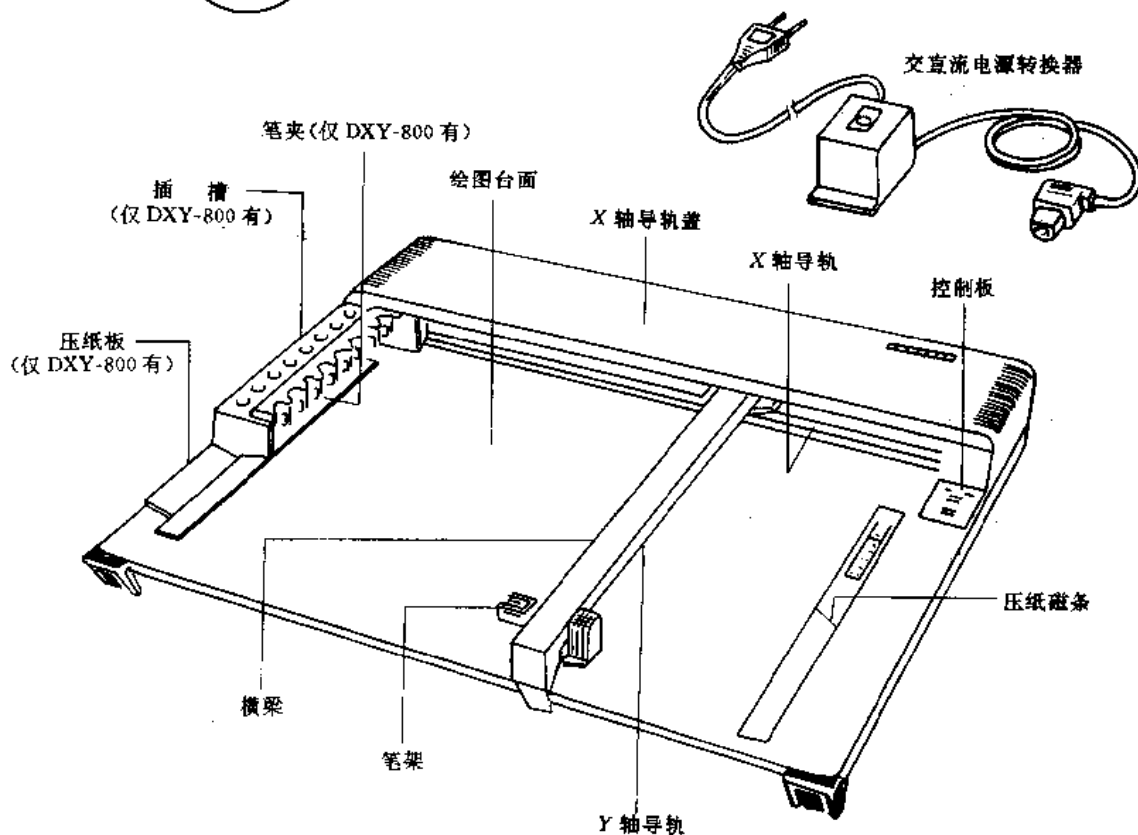


图 6-8-13 DXY-800/101 绘图仪总体布置



绘图仪 X 方向的脉冲电动机、变速传动机构等均安装在绘图台面下的基架上, Y 方向的脉冲电动机、变速传动机构和笔架等均安装在横梁上。

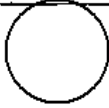
绘图仪的控制逻辑只有一块印制板, 安装在绘图仪基架的右下角, 所有与外部连接的插座则安置在控制逻辑板的罩壳上。绘图仪的电源作为一个独立的部

件, 通过连接电缆与绘图仪相连。

2.6.2 主要功能和技术指标

DXY-800 和 DXY-101 绘图仪主要功能和技术指标见表 6-8-3。

表 6-8-3 DXY-800 和 DXY-101 绘图仪技术规格

| 指 标 | 产 品 | |
|-------------|-------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| 指标名称 | DXY-800 | DXY-101 |
| 有效绘图幅面 | X 轴: 350mm, Y 轴: 260mm | X 轴: 370mm, Y 轴: 260mm |
| 绘图速度 | 180mm/s (沿 X 轴方向的最高速度) |  |
| 步 距 | 0.1mm | |
| 位置精度 | 移动距离的 1% (或小于 1%) | |
| 重复精度 | 小于或等于 0.3mm | |
| 开关种类 | 具有电源、抬/落笔、归零、速度选择、位选择开关 | |
| 发光二极管 | 给电、出错、抬笔指示 | |
| 并行接口 | 与 Centronics 兼容 | |
| · 输入 | 选通 (STROBE) 1 位, 并行数据 7 位或 8 位 | |
| · 输出 | 忙碌 (BUSY) 1 位, 应答 (ACK) 1 位, 出错 (ERROR) 1 位 | |
| · I/O 信号电平 | TTL 电平 | |
| · 输入传输系统 | 异 步 | |
| · 输入数据 | 7 位或 8 位 | |
| 串行接口 | 与 RS-232C 兼容 | |
| · 传输方法 | 非同步简单数据传输 | |
| · 传输速度 | 300, 600, 1200, 2400, 4800, 9600 波特 (使用 DIP 开关选择) | |
| · 停止位 | 1 位或 2 位 (使用 DIP 开关选择) | |
| · 奇偶校验 | 奇校验或偶校验或不校验 (使用 DIP 开关选择) | |
| · 数据位数 | 7 位或 8 位 (使用 DIP 开关选择) | |
| 绘图笔 | 8 支 (黑、红、褐、蓝、绿、紫、橙、粉红), 1 支 (黑色) | |
| 电 源 | 交直流转换电源 (输出: DC+9V, +28V) | |
| 功 耗 | 20W | |
| 尺 寸 (长×宽×高) | 496mm×435mm×77mm (19 $\frac{1}{2}$ in×17 $\frac{1}{8}$ in×3in) | |
| 质 量 | 4.1kg | 4kg |

3 数控技术在纺织机械中的应用

3.1 应用概况

70 年代末, 数控技术和计算机技术开始渗透到纺织工业中, 最先取得大面积突破的是落后的针织机械。现在针织横机、针织圆机、袜机和经编机等主要针织机械都已广泛地采用了计算机控制, 纺织机器人、服装机器人的开发也成了各国的热点。其他的纺织机械, 如清钢联、整经机、浆纱机和无梭织机等也广泛使用了程序

控制和计算机控制。随着计算机绣花服饰风靡市场, 国内外各种型号、规格的计算机绣花机迅速发展起来, 成了数控技术在纺织机械中的典型应用产品。

3.2 计算机绣花机

3.2.1 计算机绣花机的构成及工作原理

计算机绣花机有单头单针、单头多针、多头多针之分, 但基本构成大致相同, 其原理框图参见图 6-8-14。绣花机头的机械结构与缝纫机的原理基本相似, 机头

11114



的运动由动力电动机带动，动力电动机是一台可变速的电动机，由控制装置控制起停和调速。动力电动机只带动缝纫机针上下运动。每转能使机针上下往返一次，完成一针的缝纫。绣花时将面料固定在框架的花绷上，框架的运动受 X、Y 两台驱动电动机的控制。驱动电动机较多采用步进电动机。绣花的花样程序由专门的 CAD 系统设计经后置处理形成规定格式的绣花指令，存放在纸带、磁盘上或写入 EPROM，绣花指令至今尚未有统一标准，各制造厂家不太一样。花样输入装置可以是读带机，也可以是磁盘驱动器。如采用 EPROM，也就不需要输入装置了。在绣花开始时，控制装置首先把花样程序读入 RAM 中，接着起动力电动机带动机针上下运动，同步检测装置用于检测机针的位置，当机针运动到布面以下位置时，计算机取出存放在 RAM 中的一针数据，进行分析处理，形成步进电动机的控制数据，以备运行。当检测到机针离开布面时，输出脉冲供给 X、Y 步进电动机，完成一个针距的移动。这是一种点位控制。针距的变化范围在 0.1~12.7mm 之间，而脉冲当量一般取 0.1mm，所以针距变化时，输出给步进电动机的脉冲数也变化，由于采用开环控制，为保证花绷框架能移动到位，并避免当针插入面料时花绷还在移动导致面料拉破，动力电动机必须进行调速，针距长时，转速放慢；针距短时，转速加快。通常把动力电动机的转速分成几档，根据针跑长短自动换档。在机头上还装有断线检测装置。当检测到绣花线拉断时，计算机命令动力电动机停止运转，线接好后再继续运转。

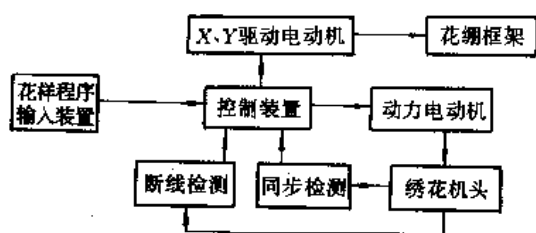


图 6-8-14 计算机绣花机原理框图

单头多针和多头多针的计算机绣花机还必须有剪线和换针机构，当需要换色时，计算机先输出剪线信号，驱动电动剪刀，把线剪断，接着送出换针信号，换针机构进行换针。

3.2.2 计算机绣花机的主要功能和指标

计算机绣花机一般具有以下主要功能和指标：

- (1) 针距：0.1~12.7mm；

- (2) 针速：200~1000r/min；

- (3) 机头数和针数；

- (4) 最大刺绣有效宽度；

- (5) 花型能自动放大、缩小；

- (6) 花型能按给定角度旋转；

- (7) 能从纸带或磁盘输入花型程序；

- (8) 能断线自动检测和自动换色；

- (9) 具有多种刺绣方式；

- (10) 可以显示各种花样的加工针数、坐标及速度。

4 数控技术在计算机集成制造中的应用

4.1 数控技术和工厂自动化的关系

数控技术是在机床自动化过程中产生的。实现工厂自动化 (Factory Automation——FA)，数控技术是重要的基础技术之一。这不仅因为数控机床及相关数控设备是工厂自动化的基本设备，而且其他自动化设备也渗透着数控技术。例如，在 CAD/CAM 中，各种信息的输入、参数的描述是以数控为基础的。在管理和决策中，各种数据库和工艺参数也是以数控为基础的。在工业机器人的技术中，90% 以上的内容离不开数控技术。由 NC 发展到 FA，是制造技术、自动化技术、信息技术和管理技术等相互渗透和发展的过程。人们在规划和发展机械制造业的自动化时，在准备开发 FA 和计算机集成制造 (Computer Integrated Manufacturing——CIM) 时，都要衡量一下本身的数控技术基础。图 6-8-15 是日本于 1984 年发表的从 NC 到 FA 的技术流程图。

从图中可以看出，1970 年以前，CAM、加工中心、NC 是各自相对独立的。1970 年以后，NC 渗透到 CAM、DNC、FMS 和 Robot (机器人) 中，推动和扩展了这些技术，进而推向工厂自动化。

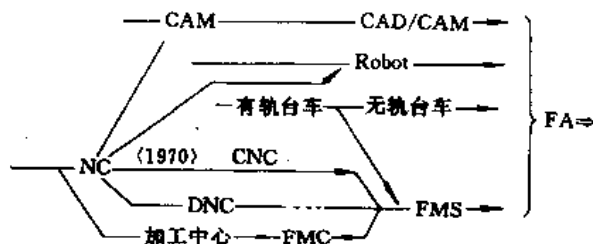


图 6-8-15 从 NC 到 FA 的技术流程图



4.2 计算机集成制造技术为数控技术的发展提出了新的方向

由于世界市场急剧的变化,企业在竞争的环境中,已经不能采用传统的生产方式,必须寻求一种新的生产方式,以实现高效率、高质量、高柔性和低成本的生产。计算机集成制造系统(CIMS)就是在这种环境中产生的。从1985年起,许多人认为,CIMS是未来工厂自动化的一种模式。

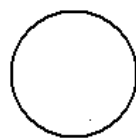
CIMS带有智能化的特征,是高技术的密集,是管理科学、系统工程、信息技术和制造技术的集合。CIMS是一种探索,是人们用新的概念和方法来经营和指导工厂,对传统的制造业进行全面的技术改造,力求形成一个从市场调研、资源利用、生产决策、产品设计、工艺设计、制造和控制、经营和销售的良性循环,以提高制造业的效益和在多变的市场环境中的竞争力。

数控技术是CIMS的基础技术之一。CIMS也为数控技术提出了新的要求。要开发面向CIMS的新一代CNC、机器人控制器,要开发单元控制器技术,要研究面向CIMS的数控工作站等。美国是最早研究CIMS的国家,它的CIMS技术发展分为三个阶段。第一阶段就是从NC机床入手,研究生产企业中如何将制造技术与计算机技术和自动化技术进行综合。第二阶段是研究和开发CAD/CAM、制造资源计划和FMS。第三阶段是开发CIMS。由此可以看出,数控技术不仅是当前自动化的基础,而且也与未来制造业的发展密切相关。要从面向集成制造的方向来发展数控技术。

参 考 文 献

- [1] 机床数字控制编写组编著. 机床数字控制. 北京: 国防工业出版社, 1982
- [2] 刘又午主编. 数字控制机床. 北京: 机械工业出版社, 1983
- [3] 王文熙编著. 机床数字调节技术. 北京: 中国科学技术出版社, 1992
- [4] 吴祖育, 秦鹏飞主编. 数控机床. 上海: 上海科学技术出版社, 1989
- [5] 上海市电气自动化研究所编著. 机床的数字控制与计算机应用. 北京: 机械工业出版社, 1983
- [6] 上海交通大学, 沈阳机电学院, 华南工学院, 华东纺织工学院编著. 数控机床. 上海: 上海科学技术出版社, 1981
- [7] 李诚人等编. 机床计算机数控. 西安: 西北工业大学出版社, 1988
- [8] 彭炎午主编. 计算机数控(CNC)系统. 西安: 西北工业大学出版社, 1988
- [9] 端木时夏, 刘纪荀等编著. 感应同步器及其数显技术. 上海: 同济大学出版社, 1990
- [10] 陈伯时主编. 电力拖动自动控制系统. 北京: 机械工业出版社, 1992
- [11] 沈明珠, 沈秀嵩, 汪雄海编著. 数控技术. 杭州: 浙江大学出版社, 1992
- [12] 蒋静坪编著. 计算机实时控制系统. 杭州: 浙江大学出版社, 1992
- [13] 上海市机床研究所数控部编. AC200系列交流伺服驱动系统(说明书)
- [14] 北京机床研究所. FANUC-BESK 6M、6T系统(说明书), 1992
- [15] 北京机床研究所. FANUC-BESK 6ME系统(说明书)
- [16] 北京机械工业自动化研究所. 机械工业自动化. 北京机械工业自动化研究所出版 1993~1994
- [17] 机械工业部机床研究所. 机床. 北京: 机床杂志社. 1990~1993
- [18] 中国机械工程学会主编. 机械工程学报. 机械工业出版社 第25卷至第29卷
- [19] 李福生等编著. 数控机床程序编制——自动编程. 北京: 机械工业出版社, 1988
- [20] 毕承恩主编. 现代数控机床. 北京: 机械工业出版社, 1991
- [21] 范本明等主编. 自动绘图仪与图形数字化仪. 北京: 电子工业出版社, 1991
- [22] 沢边雅二. (新版)知りたい測定の自動化、シ“ヤハ”ニ又シニスト社, 1982 (12)





第 7 篇

电气传动控制 系 统



主编单位 机械工业部天水电气传动研究所

编写单位 机械工业部天水电气传动研究所
甘肃长城电器工业公司

主 编 张振武

副主编 李贺平

编写人 张振武 王毓岩 赵卫东 董成明
李繁桂 屈稳太 王兴贵 周也平

主 审 许大中



常用符号表

| | |
|----------------|-------------------|
| A ——功 | S ——视在功率 |
| a ——加速度 | 转速变化率 |
| 厚度 | s ——转差率 |
| B ——磁通密度 | T ——时间常数 |
| 磁感应强度 | 转矩 |
| b ——宽度 | 周期时间 |
| C ——电容 | t ——时间 |
| 常数 | 时间间隔 |
| D ——调速范围 | U ——电势差 |
| 直径 | 电位差 |
| E ——能量 | 电压 |
| 电动势 | u ——电压(瞬时值) |
| e ——电动势(瞬时值) | V ——电势 |
| 阻抗电压百分值 | 电位 |
| F ——力 | 体积 |
| f ——频率 | 容积 |
| G ——发生器 | v ——速度 |
| g ——重力加速度 | W ——功 |
| h ——高度 | 能量 |
| I ——电流 | ω ——角速度 |
| J ——转动惯量 | α ——延迟角 |
| K ——系数 | 控制角 |
| L ——电感 | β ——超前角 |
| l ——长度 | 逆变角 |
| M ——力矩 | γ ——裕度角 |
| 互感 | δ ——稳速精度 |
| m ——质量 | 厚度 |
| 相数;采样次数 | η ——效率 |
| N ——绕组匝数 | λ ——平均故障率 |
| n ——转速 | 过载倍数 |
| P ——功率 | Φ ——磁通 |
| 有功功率 | τ ——时间常数 |
| p ——极对数 | σ ——小时间常数 |
| 脉波数 | φ ——相位差 |
| Q ——无功功率 | 相角 |
| R ——电阻 | ρ ——回转半径 |
| r ——半径 | μ ——磁导率 |
| 径向距离 | 滑动摩擦系数 |

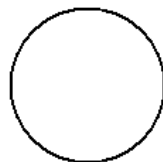


θ ——相位差
 相角
 温度
 GD^2 ——飞轮力矩
 FC——负载持续率
 MTBF——平均无故障工作时间

下角标

a——电枢的
 交流的
 阳极
 b——制动的
 cr——临界的
 最大的
 d——动态的
 偏差的
 f——励磁的
 频率的
 i——瞬时的
 j——最佳的
 加速的
 k——短路的
 阴极的
 L——负载的
 M——电动机的
 m——机械的
 max——最大值

med——中间值
 min——最小值
 N——额定值
 o——空载的
 输出
 开路
 p——脉动的
 r——响应的
 re——恢复的
 rms——方均根值
 s——同步的
 稳定的
 起动的
 调节的
 t——时间的
 瞬时的
 st——稳态的
 Σ ——和
 ~——交流
 ————直流
 i——输入,
 定子侧
 初级
 2——输出
 转子侧
 次级
 μ ——小惯量



第 1 章 概 论

1 电气传动控制系统的组成与分类

电气传动控制系统通常由传动工作机械的电动机、电动机的电源装置及电气传动控制装置组成。

电气传动控制系统的分类见表 7·1-1。

表 7·1-1 电气传动控制系统的分类

| 分类 | 种 类 |
|------------|----------------------------------------------------------|
| 按传动电动机类型 | 直流电气传动——直流电动机 |
| | 交流电气传动 { 笼型异步电动机 绕线转子异步电动机 同步电动机 |
| 按电动机电源装置类型 | 公共母线电源 { 直流公共母线电源 交流公共母线电源 |
| | 交流机组电源 (已很少用) |
| 按控制装置类型 | 电力电子变流电源 { 整流电源 交流调压电源 变频电源 { 交-直-交变频电源 交-交变频电源 |
| | 电器控制 |
| 按调速方式 | 磁放大器控制 |
| | 模拟电子控制 |
| | 数字控制 |
| 按调速方式 | 有级调速 |
| | 无级调速 |

电气传动控制系统的功能是将电能转换为机械能,并对其进行控制,以满足工作机械及生产线生产工艺的各种要求。电气传动控制系统性能的优劣直接影响着工作机械乃至整个生产线的性能,影响着产品的产量、质量及生产成本,影响着工人的劳动条件及设备维修等。电气传动技术越来越广泛地应用于国民经济的各个部门。

2 电气传动技术的发展

在过去的工业应用中,直流电气传动以其优良的调速性能一直占据着调速传动的主导地位。电力电子变流技术、微电子技术的发展及其在直流电气传动中的广泛采用,使得控制系统简单、调试容易的直流电气

传动控制系统在性能及功能方面更趋完善。但是直流电动机本身结构复杂、维护工作量大,电机功率和转速都受到限制。深调速的直流传动系统还存在着功率因数低、无功冲击大、高次谐波分量对电网及其他用电设备造成干扰等问题。

交流电动机,特别是笼型异步电动机,结构简单、运行可靠、价格低廉、维修方便,故应用非常广泛。过去由于它的调速比较困难,在调速传动方面一直处于从属地位。变频调速技术的发展,特别是矢量控制技术的突破,使交流电气传动系统的调速性能可以做到与直流电气传动系统的一样,在输出功率等级和高转速方面,又大大突破了直流电动机的限制,因此交流电气传动系统在轧机、矿井提升机、造纸机等传动中获得广泛应用。在风机、水泵等传动领域,也已由交流调速传动系统取代原有的恒速传动系统。在伺服传动领域,性能优良的交流伺服系统也正在逐步取代直流伺服系统。交流调速传动正从原来的从属地位上升为调速传动的主导地位。

以微型计算机为基础的数字控制技术、数据通信技术的发展,使电气传动实现了从模拟控制向数字控制的过渡。数字控制系统可以采用最少量的硬件标准单元,通过编制不同的软件满足各种控制要求。微型计算机运算速度快、功能强、内存容量大,多微型计算机可以协同工作,因此可以实现实时快速计算和控制、故障自诊断与保护、数据通信与处理,使数字控制的电气传动系统的整体性能显著提高。

可编程控制器(PC或PLC),由于硬件结构简单、安装维修方便、编程容易、工作可靠,在电气传动自动化系统中获得了广泛应用。它既可取代继电器系统实现逻辑顺序控制,又使电气传动向大型多功能方向延伸。用单台或多台PC联网,实现基础自动化;采用上位计算机实现监控管理,与电气传动控制系统一起,可以组成具有人-机接口及数据通信的大型综合分布式控制系统。

电气传动技术已发展为多学科交叉的综合性技术。随着技术的进步,电气传动控制装置将会向集成化、数字化、标准化、系列化方向发展,传动系统的性能必将进一步提高。



3 电气传动调速系统的主要指标

3.1 静态品质指标

表示电气传动调速系统在稳态运转时的性能，通常有：

1. **转速变化率** 在某一给定转速下稳态运行时，负载由空载（不大于额定负载的10%）到额定负载变化时，其转速变化的相对值，即转速变化率为：

$$S = \frac{n_0 - n}{n} \times 100\% \quad (7-1-1)$$

式中 n ——电动机额定负载下的转速 (r/min)；

n_0 ——电动机空载下的转速 (r/min)。

电气传动闭环调速系统相对额定转速的转速变化率一般为1%~0.5%。

2. **调速范围** 指在额定负载下，转速变化率 S 不大于规定值时，从最高工作转速 n_{max} 到最低工作转速 n_{min} 的可调范围。调速范围为

$$D = \frac{n_{max}}{n_{min}} \quad (7-1-2)$$

式中 n_{max} ——符合规定转速变化率时的最高工作转速 (r/min)；

n_{min} ——符合规定转速变化率时的最低工作转速 (r/min)。

电气传动闭环调速系统的调速范围 D 可达100以上。

3. **稳速精度** 在稳速系统中，常使用稳速精度的指标。测量稳速精度时，应使设备在规定的调速范围内的某一指定转速下连续运行，供电电压和频率在规定的允差范围内变动，且使设备处于规定的负载条件下（若无特殊要求，电源扰动与负载扰动不同时叠加），然后按一定时间间隔进行短时平均转速 n_i 的测量。稳速精度 δ 的计算方法有两种：

(1) 按 n_i 的最大值 n_{max} 和最小值 n_{min} ，用平均值方法计算，即

$$\delta = \frac{n_{max} - n_{min}}{n_{max} + n_{min}} \times 100\% \quad (7-1-3)$$

(2) 按方均根值计算，即

$$\delta = \frac{\sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \left(n_i - \frac{\sum n_i}{m} \right)^2}}{n} \times 100\% \quad (7-1-4)$$

式中 n_i ——第 i 次采样的平均转速；

m ——在连续运行时间中的采样总次数。

转速测量仪器应基于表征电动机转角的脉冲计数和计时的原理。每个短时平均转速的脉冲采样时间以秒计，连续运行时间以小时计，采样间隔（可等于或大于采样时间）决定于所需采样总次数。

数字稳速系统的稳速精度可达 $10^{-4} \sim 10^{-5}$ 。

3.2 动态品质指标

它是表示调速系统在动态过程中性能的数据。调速系统常用的动态品质指标及其定义见表7-1-2。

表 7-1-2 调速系统常用动态品质指标

| | | 项 目 | 响应曲线 | 备 注 |
|----------|---|-----------------------|------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 对阶跃给定的响应 | 1 | 响应时间 t_r | | 1. Δ 为指定的稳态误差范围，一般为 $\pm 1\% \sim \pm 5\%$ 2. 对无超调系统， t_r 按到达 90% 给定值的时间计算 3. 动态过程中调节器输出不应出现饱和和限幅值 |
| | 2 | 超调量 Δ_{max} | | |
| | 3 | 调节时间 t_s | | |
| 对扰动的响应 | 4 | 动态速降 Δn | | 1. ΔT_L 为负载扰动，一般 $\Delta T_L = T_{LN}$ T_{LN} 为额定负载转矩 2. Δ 为指定的稳态误差范围 |
| | 5 | 恢复时间 t_{re} | | |



不同的生产机械对动态品质指标有不同的侧重。例如,连轧机要求动态速降及恢复时间都要小;而初轧机希望过渡过程平稳,对动态速降大小的要求不高;张力调节系统要求超调量小;提升机要求过渡过程平缓。

3.3 经济性

选用调速系统时,除考虑上述的技术指标外,还必须考虑经济指标。调速系统的经济指标取决于调速系统的设备投资费用及运行费用,而运行费用又取决于电能损耗、维修费用及功率因数等。

4 电气传动控制系统的可靠性

通常,产品的可靠性是指在规定的条件下和规定的时间内,完成规定功能的能力。“规定的时间”是可靠性定义的核心因素,不谈时间就无可靠性可言,一定的可靠性是对一定的时间(寿命)而言的,“规定的条件”是指产品的使用条件、环境条件、维护条件、操作水平等,这是比较产品质量的前提。“规定的功能”是指产品应具有的各种性能指标,这是讨论产品可靠性的准则。“能力”是指可靠性的各项指标,如平均寿命、失效率、可靠度等,这是比较同类产品可靠性的重要依据。

电气传动控制系统作为产品,有其可靠性的问题,但与通常的产品相比,又确有许多不同的特点,因此也有不同的考核方法。

4.1 电气传动控制系统可靠性的特点

(1) 电气传动控制系统由传动电动机、电动机电源装置和控制装置所组成。而电源装置(电力电子变流装置)和控制装置各由若干个单元组成,每个单元完成一定的控制功能。各个单元又由大量的半导体器件、阻容元件、电器元件及仪器仪表组成。因此电气传动控制系统的可靠性与它的各个组成部分的可靠性密切相关。

通常将控制一台或一组电动机的电气传动控制系统称为一个基本系统。大型成套电气传动控制系统一般由电气传动级、基础自动化级和过程监控级组成。电气传动级又由若干台电动机的控制系统组成。

可见,电气传动控制系统,尤其是大型成套系统,是一个多层次组合的系统。它的可靠性与它的各个组合层次的可靠性密切相关,可靠性的考核也应按不同的组合层次分别考核。

(2) 电气传动控制系统种类繁多,加之各种生产工艺对传动系统的要求五花八门,因此存在着大量的

非标产品。标准化工作只限于柜体结构及控制单元这一层次,或者只限于较简单的电气传动基本系统。可靠性考核工作不能像一般电工产品那样具体化,只能把某一大类品种视为一种产品来处理。如晶闸管直流传动系统,作为一种产品列为考核对象。

(3) 电气传动控制系统是为某种生产机械配套的。系统的可靠性,除与电动机和传动装置有关外,还与转速检测器件、生产机械的状况,如转动惯量、负载波动、环境条件等许多因素有关。加之,电气传动控制系统单价很高,批量又小,不可能在实验室创造工作环境与条件,因此可靠性考核只能以现场数据为主。当然,现场使用条件与工作状况的差异在一定程度上会影响现场数据的可比性。

4.2 电气传动控制系统可靠性的考核

根据上述的电气传动控制系统的特点,以各大类产品为考核对象,按不同层次,采用不同的指标,分别对传动控制单元、基本系统及大型成套系统进行考核。

(1) 传动控制单元的可靠性考核。传动控制单元是组成基本系统的基础单元,一般多为标准化产品,通用性较强,因而有一定批量可以抽样进行试验室试验。

传动控制单元的可靠性指标,以平均故障率计算。平均故障率为

$$\lambda = \frac{r}{nt} \quad (7.1-5)$$

式中 r ——试验中发生的故障数;

n ——试验样品数;

t ——试验时间。

传动控制单元的可靠性是系统可靠性的基础。有了控制单元的可靠性数据,就能比较准确地计算系统的可靠性。

(2) 基本系统的可靠性考核。基本系统是不能再分割的电气传动控制系统。大型成套电气传动控制系统通常由若干个容量、转速、控制方式各不相同的基本系统组成。这些不同的基本系统,均作为相同产品等效处理,其平均无故障工作时间为

$$MTBF = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_i \quad (7.1-6)$$

式中 N ——观测的基本系统总数;

T_i ——每个基本系统的无故障工作时间。

实际上,可以不要分别计算每个基本系统的无故障工作时间,而直接进行综合计算,即

$$MTBF = \frac{NT}{r} \quad (7.1-7)$$



式中 T ——观测期内整个成套设备的工作时间 (h)
(各基本系统时间相同);

r ——观测期内各基本系统的故障总数。

基本系统的平均无故障工作时间,主要通过现场观测数据进行测算。

对于容量小、批量大的电气传动控制系统,可以考虑进行试验室试验。

(3) 大型成套系统的可靠性考核。设置平均有效度指标 A , 对大型成套系统进行整体考核。

$$A = \frac{t_w}{t_w + t_R} \quad (7.1-8)$$

式中 t_w ——观测期内系统工作时间 (h);

t_R ——观测期内由故障引起的停机修理时间 (h)。

4.3 提高电气传动装置可靠性的措施

在系统与产品的设计中,首先应将可靠性放在十分重要的位置上。没有可靠性,技术的先进性也就失去了意义。提高可靠性的措施有:

(1) 对大型成套系统,应采用若干个基本系统组合的分散控制系统,避免集中控制。这种系统有如下优点:

- 1) 系统响应速度快,控制功能强;
- 2) 各基本系统容易采用统一的标准控制单元,可靠性高;
- 3) 整个系统控制单元品种少,便于设计,整体可靠性高,且备件容易准备;
- 4) 容易实现功能块控制。

(2) 设置完善的故障诊断环节。每个基本系统均应具有此环节,以便帮助用户尽早发现装置运行中的隐患,并予以及时处理,或在装置发生故障之后,帮助用户最快地找到故障原因,并及时排除,使设备恢复运转。

故障诊断环节应包括故障的检测与识别、故障的传输与正确处理。

(3) 根据生产工艺的要求,慎重地选择合理的传动方案和控制电路,并力求简单、可靠。

(4) 正确地选用元器件,应使装置的元器件都能实现合理的降额使用。

(5) 按照抗干扰技术的要求,精心地设计柜体结构、器件布局,合理配线;精心地设计印制电路板。

(6) 对所选用元器件进行严格的老化筛选。

(7) 提高制造工艺水平,保证装置的制造质量,严

格做好出厂检查和调试。

(8) 提高装置的可维修性。发生故障后,尽快地更换故障单元,恢复装置运行,最大限度地缩短故障停车时间。

5 晶闸管传动设备中干扰及其抑制

晶闸管变流装置广泛应用于各种类型的电气传动设备中。为保证传动设备可靠运行,既要采取措施抑制设备外部环境对设备的各种干扰,也要抑制设备内部元器件间和部件间存在的互相干扰,如晶闸管主电路对触发及调节电路的干扰,模拟电路功率放大级通过电源公共阻抗或公共零线对弱电电路的干扰等。尽管设计阶段考虑到各种干扰并采取抑制措施,但在调试中还可能遇到干扰问题。抑制干扰是传动设备设计、制造、安装、调试及运行中的一个很重要的课题。

5.1 晶闸管变流装置的干扰及其抑制

晶闸管变流装置是电源的非线性负载,工作时是一个很强的干扰源,通过电网传导和辐射,影响邻近电气系统(包括通信系统)和其他传动装置的工作。主要影响有:

1. 谐波干扰 晶闸管变流装置的运行,在交流侧和直流侧引起电流和电压的谐波分量。

交流侧电流谐波分量的次数 n 为

$$n = kp \pm 1 \quad (7.1-9)$$

式中 k ——正整数, 1, 2, 3, ...;

p ——整流电路脉波数。

直流侧电压谐波分量的次数 n 为

$$n = kp$$

交流侧谐波电流流过电源时,在其内阻上产生高次谐波压降,使电源端电压发生畸变。电源电压中的谐波使用电设备损耗加大,温升增高;使直流电机换向恶化,产生噪声,使接入交流系统的电容产生过电流等。

2. 电压降与电压波动 晶闸管变流装置,在进行相位控制时,会增加电源电流的无功分量,降低电源电压。在进行相位调节时出现电源电压波动。

3. 瞬变干扰 晶闸管是大功率开关器件,在开通和关断时,电流急剧变化,形成高频噪声。晶闸管换相时造成电源电压缺口。这类高频噪声既影响本装置工作,也影响邻近系统的工作。

为降低晶闸管变流装置的谐波干扰及相位控制时的无功分量,应采取下列措施:

- (1) 采用脉波数更高的变流器联结方式;



- (2) 限制电网内晶闸管变流装置的容量;
- (3) 设置高次谐波吸收装置;
- (4) 设置功率因数补偿装置。

为降低瞬变干扰,可适当增大变流装置交流侧电感,以降低换相时电源电压的缺口;合理选配变流装置换相电感及阻容参数,降低 di/dt 及 dv/dt 的数值。

5.2 调节控制电路的干扰及其抑制

晶闸管传动设备中,调节电路、触发电路、逻辑控制电路以及微处理机等,对干扰很敏感,同时又与变流装置和继电器等在空间上靠得很近,甚至组装在一个柜中,在电气上共用统一电源。强电电路很容易对弱电电路产生干扰,所以必须采取措施,以保证传动系统可靠工作。

1. 控制电源方面 当控制电源取自动力电源时,由于本系统或外系统晶闸管变流装置的工作,控制电源中存在大量的强干扰,影响调节控制电路的正常工作。实践证明,来自电源的干扰是很严重的,必须采取有效的措施。

(1) 配置专用控制电源。对于大型成套系统,配置接至高压母线供电的专用控制电源变压器,送给各基本系统用作控制电源。

(2) 采用有静电屏蔽并良好接地的电源变压器或恒压变压器。

(3) 采用交直流滤波电路。如触发用交流同步电源,一般滤波后相位滞后 $30^\circ \sim 60^\circ$,滤去电源中的高次谐波及缺口。直流电源除采用大容量的电解电容器滤波外,还要有小容量的高频电容器,滤除残余的高频干扰。

2. 控制电源负载方面 传动设备的操作电路和用继电器实现的逻辑控制电路接有大量的继电器及接触器,有些系统还使用交直流电磁阀,这些元件都是控制电源的感性负载。接至交流电源的接触器与电磁阀的线圈,接通电源时起动电流冲击很大,通过控制电源公共阻抗干扰弱电电路工作。

继电器、接触器、电磁阀的线圈断电时,在线圈两端及连接导线上出现很高的浪涌电压,并伴有衰减的高频振荡,这是很强的瞬变干扰,如不采取措施,常常会干扰调节控制电路的工作。

(1) 将继电器、接触器、电磁阀用电源与调节控制电源分开;

(2) 在交流电感线圈上并联 RC 吸收环节。对小型交流继电器,可直接并联电容。

(3) 在直流电感线圈上并联二极管或稳压管。

在安装吸收电路时应将它直接并联在电感线圈的两端,这样效果最好。

3. 触发电路方面 触发电路和变流装置主电路大多通过脉冲变压器耦合。变流装置主电路电压高、晶闸管阴极电位变化剧烈。如果脉冲变压器绝缘损坏或击穿,变流装置主电路的高电压将会直接传导至触发电路,致使触发电路故障。因此,脉冲变压器必须有足够的耐压和绝缘电阻值。另外,变流装置主电路中剧烈的电位变化会通过脉冲变压器一次、二次绕组间分布电容传递到触发电路,产生干扰。因此脉冲变压器应采取双重屏蔽:一重屏蔽接晶闸管阴极,另一重屏蔽接屏蔽地。

为消除公共阻抗干扰及磁场干扰,触发用门极引线及阴极引线单独引出,并采用对绞方式,直接接至脉冲变压器输出端。

4. 结构与配线方面 传动装置内各部件和控制单元的合理布局与配线,将会提高装置的抗干扰能力。

(1) 将电气上联系密切的单元组装在一起,把单元之间敏感的外部接线改为组合装置的内部接线,尽量缩短敏感电路的长度。

(2) 传动装置中强电与弱电分柜布局,或在同柜中分块布局。

(3) 柜内布线、端子出线均应按照强弱电分开走的原则。例如,强电走柜内一侧,弱电走另一侧。重要的信号线采用双绞或三绞线。不允许用公共导线传送不同的信号。例如,不允许采用公共零线作为各晶闸管的触发脉冲引线。

5. 接地方面 接地是电气传动设备抗干扰的重要手段之一。正确的接地能抑制干扰影响,错误的接地反而会引入严重干扰,甚至使系统无法工作。

电气传动设备有三种接地:

a. 保护接地 保护接地有两种方式:保护接零和保护地线,由电气设备配电系统的接地方式决定。

在三相四线制中性点接地的配电系统中,必须采用保护接零方式。保护接零线必须与电源零线分开配置。电源零线是为取得单相电源设置的。保护接零线在正常情况下是不流过电流的,或只流过很少泄漏电流,当设备外壳与某相火线接触时,保护接零线才流过短路电流,使保护电器动作,切断电源。这种方式简单、可靠,广泛应用于低压动力、照明及小容量控制设备配电系统中。

在中性点不接地或不直接接地的配电系统中,采



用保护地线方式。这种方式干扰影响小,适用于控制设备,但必须设置接地监视器。

b. 系统接地 电气传动控制系统中的基准电位是调节、触发各电路工作的参考电位,基准电位的连接线称为系统地,通常是控制电路直流电源的零伏导线。

系统接地方式有三种。第一种是浮地方式,这是电气传动控制系统中经常采用的方式。浮地系统对地电阻大,对地分布电容较小,对外部共模干扰抑制能力强,适用于小型系统。对于大型成套电气传动系统,由于系统地对地有较大的分布电容,因此很难保持真正的悬浮,基准电位受干扰而不稳定时,通过对地分布电容出现位移电流,影响系统正常工作,所以对于大型成套系统,宜于采用第二种接地方式,即直接接地方式。第三种接地方式是电容接地方式,系统地经过 $2 \sim 10 \mu\text{F}$ 电容接大地,适用于系统地与大地间可能有直流或低频电位差的情况,电容应有良好的高频特性及足够的耐压特性。

需强调指出的是,系统接地必须遵守一点接地的

原则,以免装置间产生地电位差干扰,或形成闭合电路而产生电磁干扰。小型设备采用放射式,大型设备采用干线式接法。

c. 屏蔽接地 为抑制变化电场的干扰,电气传动设备中广泛采用多种静电屏蔽。静电屏蔽的导体必须良好接地,才能发挥作用。

与系统接地一样,屏蔽接地也必须遵守一点接地的原则。在单台装置内部,各屏蔽层都应单独引到专用的屏蔽接地端子(或汇流排)汇总后接地。大型成套装置应设置独立的屏蔽母线,然后统一接地。

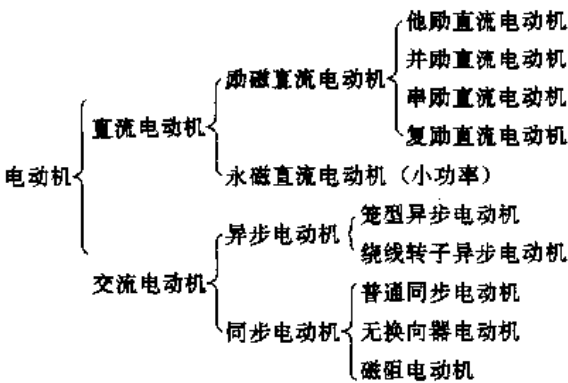
各种屏蔽层在不同的使用场合,应与不同的接地线连接。信号电缆屏蔽层应在控制柜一侧集中接系统地。电源变压器屏蔽层应接保护地。具有双重静电屏蔽的电源变压器,其一次绕组的屏蔽层接保护地,二次绕组的屏蔽层接系统地或屏蔽地。具有双重屏蔽的脉冲变压器,其一次侧屏蔽层接屏蔽地,二次侧屏蔽层接晶闸管阴极。

第2章 电动机的选择

1 电动机的类型与结构型式的选择

1.1 电动机的类型与机械特性

电动机分为交流电动机和直流电动机两大类:



其机械特性见图 7-2-1。

不同种类的电动机其机械特性也不同,一般说来,转矩的增加,都将导致电动机转速的下降。根据转速下降程度的不同,机械特性分为硬特性和软特性两类。如图 7-2-1 所示,曲线 1、2 和 3,分别为同步电动机、他励直流电动机和一般异步电动机的机械特性曲线,它

们都属于硬特性,即负载转矩在允许的范围内变化时,电动机转速变化不大,特别是,同步电动机的转速保持恒定。曲线 4 和 5 分别为串励直流电动机和绕线转子异步电动机转子回路串电阻的机械特性曲线,它们属于软特性,即随转矩的增加,电动机的转速显著下降,

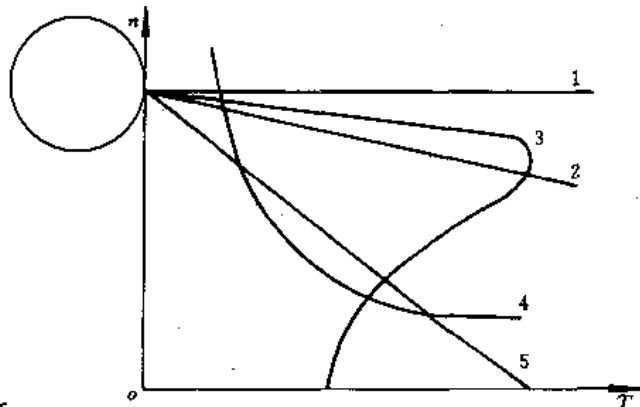


图 7-2-1 电动机机械特性

- 1—同步电动机 2—他励直流电动机 3—一般异步电动机 4—串励直流电动机 5—绕线转子异步电动机(转子回路串电阻)



但其起动转矩大。

电动机的机械特性有固有特性与人为特性之分。固有机械特性,对直流电动机来说,是指在电动机电枢电压和励磁磁通均为额定值,电枢不串电阻时的机械特性;对异步电动机来说,是指定子加额定电压、额定频率,定子绕组按规定的接线方式连接,且转子回路不串阻抗时的机械特性。当改变上述某一参量时,可以得到一系列(见表7·2-3和表7·2-4)人为机械特性,用来满足各种不同负载对电动机机械特性的不同要求。

1·2 交流电动机的选择

交流电动机结构简单,价格便宜,适用于恶劣工作环境,维护工作量小,凡能满足生产需要的场合,都应优先选用交流电动机。

1. 普通励磁同步电动机的选择 由于同步电动机功率因数高,比异步电动机的效率高,但需要附加励磁装置,故常用于大功率不调速场合。

近年来,由于采用了交-交变频传动方式,可得到20Hz以下的变频调速设备,尽管比较复杂,但其传动特性已接近直流传动。因此,在轧钢、卷扬、船舶驱动等要求低转速、大容量的场合,已有取代直流电动机的趋势。

2. 永磁同步电动机的选择 永磁同步电动机与脉宽调制(Pulse-Width Modulation—PWM)变频装置配合使用,电流为正弦波。配以锁频系统,可以满足纺织工业对速度精度的要求;配以按转子位置定向的矢量控制系统,伺服系统的性能可与直流电动机控制系统比拟,但成本略高,只适用于高性能场合。目前它的容量一般在几个千瓦以下,个别已做到几十千瓦。

3. 无换向器电动机的选择 用静止变频器,对专用同步电动机供电,组成无换向器电动机。当按磁极与电枢的相对位置来控制变频器的频率时,可实现电动机转速与变频器的频率严格同步,得到与直流电动机工作原理相似的调速特性。由于用自同步变频器取代了直流电动机的机械式换向器,故可用于恶劣环境。

无换向器电动机用大功率晶闸管变频器供电,可做到大容量(上万千瓦)、高转速(3000r/min)、高电压,适用于负载平稳、过载不大的大中功率场合,如风机、水泵等。

小功率无换向器电动机可与大功率晶体管(Giant Transistor—GTR)的PWM变频器配合,用于一般性能的伺服系统。

这种电动机有谐波电流大、转矩有脉动、低速性能差的缺点。

4. 异步电动机的选择 笼型异步电动机结构简单、制造容易、价格便宜、便于维护,对于不要求调速、起动特性没有限制的偶而起动设备,应尽量选用笼型异步电动机。

绕线转子异步电动机,可通过在转子回路中串电阻、串频敏变阻器及通过双馈的方法,改变电动机特性,从而改善起动性能,并可实现调速。

在要求起动转矩大或操作频繁的场所,宜选用绕线转子异步电动机,它也可用于调速性能不高的小功率机械中。

5. 磁阻电动机 这是一种能与小功率笼型异步电动机媲美的新型电动机,定子有多相绕组,转子为实心铁心,靠反应转矩使电动机旋转。它与笼型异步电动机相比,虽然功率因数和效率相差不多,但结构更加简单,再配上简单的变频器,可用于小功率调速装置。目前它的容量较小,在几个千瓦以下,个别可达到几十千瓦。

1·3 直流电动机的选择

(1) 起制动频繁,需要较大起动转矩和恒功率调速的机械,如电车、牵引机车等,宜选串励直流电动机。

(2) 负载变动较大而又需要宽调速时,选用复励直流电动机。

(3) 其他要求宽调速、对起制动特性有较高要求的场合,多用他励直流电动机。选用时要注意按生产机械的恒转矩和恒功率调速范围,合理选择电动机的基速及弱磁倍数。

1·4 电动机结构型式的选择

电动机的结构型式,按其安装位置的不同,可分为卧式与立式两种。卧式电动机的转轴是水平安放,立式电动机的转轴则与地面垂直,两者的轴承不同,因此不能随便混用。

电动机在特殊情况下可制成两端轴伸,以供安装测速发电机及同时拖动两台生产机械时用。

电动机的外壳结构型式与防护方式是密不可分的。为了防止电动机被工作环境中的不利因素(灰尘、水滴、腐蚀性气体等)而影响正常运转,甚至损坏,反之,电动机本身的故障也有可能引发环境灾害(如爆炸),为此,必须根据不同环境条件选择相应防护结构的电动机。电动机外壳结构型式及其防护方式见表

5.1.10



7-2-1.

表 7-2-1 电动机外壳结构型式及防护方式

| 外壳结构型式 | 防护方式 |
|--------|-------------------------------------------|
| 开启式 | 转动及带电部分无专门的防护 |
| 防护式 | 外壳和轴承座的结构可以防护带电及转动部分免受机械损伤, 又不显著妨碍通风 |
| 网罩式 | 通风口有穿孔遮盖物, 使带电与转动部分不能与外物直接接触 |
| 防滴式 | 通风口处可以防止垂直下落的液体和固体物直接进入电动机内部 |
| 防溅式 | 通风口处可以防止与垂直线成100°以内的任何方向的滴水或固体物进入电动机内 |
| 封闭式 | 外壳全封闭, 可以防止注水或固体物及灰尘进入电动机内 |
| 自然冷却式 | 靠外壳表面自然冷却, 无附带冷却装置 |
| 自扇冷却式 | 在本身转轴上装有风扇, 以冷却机身 |
| 管道通风式 | 有特殊通风口与通风管道相连接, 电动机靠外通风冷却 |
| 防爆式 | 系全封闭式, 机壳有足够的强度, 能抵抗内部气体的爆炸, 而不致传到外部可燃性气体 |

电动机外壳结构型式及保护方式应按环境条件选择。

1. **开启式** 这种电动机价格便宜, 散热条件好, 但容易侵入水滴、铁屑、灰尘、油垢等, 影响电动机寿命和正常运转, 因此只能用于干燥及清洁的环境中。

2. **防护式** 这种电动机一般可防滴、防溅及防止外界物件从上面落入电动机内部, 但不能防止潮气及灰尘的侵入, 因此适用于干燥、灰尘不多和没有腐蚀性和爆炸性气体的环境。这种电动机通风冷却条件较好, 一般情况下均可选用此种类型电动机。

3. **封闭式** 这种电动机因为封闭, 所以水和潮气均不易侵入, 适用于潮湿、多腐蚀性灰尘、易受风雨侵蚀的场合, 做成密闭式还可以在水中工作(如潜水泵电动机)。

4. **防爆式** 这类电动机应用在有爆炸危险的环境(如在瓦斯矿的井下或油池附近等)中。

其他湿热带或船用电动机还有特殊的防护要求。

2 电动机电压与转速的选择

2.1 电动机电压的选择

电动机的额定电压和容量范围, 见表 7-2-2。

表 7-2-2 电动机额定电压和容量范围

| 额定电压 (V) | 容量范围 (kW) | | | |
|-------------|------------|----------|----------|----------|
| | 同步电动机 | 异步电动机 | | 直流电动机 |
| | | 笼型 | 绕线型 | |
| ~110 | — | — | — | 0.25~110 |
| ~220 | — | — | — | 0.25~320 |
| ~440 | — | — | — | 1.0~500 |
| ~600~870 | — | — | — | 500~4600 |
| ~380 | 3~320 | 0.37~320 | 0.6~320 | — |
| ~3000 | 250~2200 | 90~2500 | 75~3200 | — |
| ~6000 | 250~10000 | 200~5000 | 200~5000 | — |
| ~10000 | 1000~10000 | — | — | — |

电动机电压的选择, 取决于电力系统对企业的供电电压。系统电压为10kV时, 大容量同步电动机宜采用10kV直接供电; 中等容量电动机, 视降压变压器情况而定, 如用三绕组变压器, 则采用6kV电动机, 如用双绕组变压器, 电动机电压需经经济比较后确定, 若采用10/3kV与10/6kV的变压器差别不大时, 宜采用6kV电动机。系统电压为6kV时, 大中容量电动机均应采用6kV直接供电。一般车间低压电网为380V, 所以小容量电动机, 一般选用380V电压。

直流电动机的电压也要与电源电压互相配合。由直流发电机供电时, 小功率电动机额定电压常用220V或110V; 大功率电动机可提高到600~800V, 甚至达到1000V。当直流电动机由晶闸管整流装置直接供电时, 为了配合不同的整流电路, 新改型的Z3型电动机除了原来的电压等级外, 新增加了160V和440V两种电压等级; Z2型电动机也增加了180、340、440V等几种电压等级。

大容量的直流电动机, 一般选600、750、1000V等。

对大容量电动机来说, 电压等级的决定还要结合交流设备的性能/价格比来考虑。

2.2 电动机转速的选择

电动机额定转速的选择, 应满足生产机械对转速的要求。一般来说, 生产机械的转速比较低, 可以选择



机械工业出版社 请尊重版权

低速电动机直接拖动，也可以选择高速电动机经机械减速机构间接拖动。选哪种方式，在考虑速度要求的同时，还要考虑技术经济指标。

(1) 对于一般的高、中转速机械（如泵、压缩机、鼓风机等），宜选用相应转速的电动机直接与机械连接。

(2) 对于不调速的低速机械（如球磨机、水泥转窑、轧机等），宜选用适当转速的电动机通过机械减速机构来传动。但对于大功率机械，电动机的转速不能选得太高，要考虑大型减速机（尤其是大减速比）加工困难及维修不便等因素。

(3) 对于要求调速的机械，电动机的最高转速应与生产机械的最高转速相适应。如果选用直流电动机，是采用变电枢电压调速还是采用兼有变励磁调速，以及基速的确定，都要从充分利用电动机功率的合理性来考虑。

(4) 对于要求快速频繁起、制动的断续周期工作制的机械，电动机转速除了要满足生产机械所需要的最高稳态转速之外，还应考虑在加减速时，能获得起、制动最快的效果，为此应按下式考虑最为合理：

$$GD_m^2 n_{MN}^2 = GD_n^2 n_n^2 \quad (7.2-1)$$

即得到所谓最佳传动比，近似可表示为

$$j_i = \sqrt{\frac{GD_m^2}{GD_n^2}} \quad (7.2-2)$$

式中 GD_m^2 ——电动机（包括电动机轴上的传动装置）的飞轮力矩（ $N \cdot m^2$ ）；

n_{MN} ——电动机额定转速（ r/min ）；

GD_n^2 ——生产机械在机械轴上的飞轮力矩（ $N \cdot m^2$ ）；

n_n ——机械轴转速（ r/min ）；

j_i ——最佳传动比。

根据最佳传动比来选择电动机的转速，既可满足生产机械过渡过程的快速性要求，又能满足稳态时对最高转速的要求。

(5) 对于某些低速断续周期工作制的机械，如某些轧钢机、提升机等，宜采用无减速机构的低速电动机直接拖动。

(6) 自扇冷却式电动机的散热效能随电动机转速而变，不宜长时间在低速下运行。如果因调速需要在低速下长时间运行，且超过电动机允许时，应外加通风措施，以免损坏电动机。

3 常用电动机的性能与应用

3.1 电动机的机械特性与性能

- (1) 直流电动机的机械特性及性能见表 7-2-3。
- (2) 交流电动机的机械特性及性能见表 7-2-4。

表 7-2-3 直流电动机的机械特性

| | 特性曲线 | 性能 |
|---------|------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 直流电动机 | | <p>调速性能好，调速范围宽，采用电子控制时，能充分适用各种机械负载特性的需要，但它的价格贵，维护复杂，且需直流电源，因此只在交流电动机不能满足调速要求时才采用</p> <p>串励直流电动机的特点是起动转矩大，特性软，过载能力大，适用于电力牵引机械和起重机等</p> |
| 他励直流电动机 | | <p>复励直流电动机的起动转矩和过载能力比他励直流电动机大，但调速范围稍窄。接成积复励时，适用于起动转矩很大，负载具有强烈变化的设备上</p> |

① 按 GB3102.3-92《力学的量和单位》规定，不应采用飞轮力矩（ $N \cdot m^2$ ），而应采用转动惯量 J （ $kg \cdot m^2$ ）（ $GD^2 = 4gJ$ ），但考虑到电气传动系统计算公式往往按 GD^2 给出，电机制造厂有的只给出 GD^2 数据等实际情况，本手册仍暂保留采用 GD^2 这个物理量。——编者注



(续)

| 特性曲线 | | 性能 |
|---------|------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 他励直流电动机 | <p>改变励磁 (虚线为恒功率调速)</p> | <p>调速性能好, 调速范围宽, 采用电子控制时, 能充分适用各种机械负载特性的需要, 但它的价格贵, 维护复杂, 且需直流电源, 因此只在交流电动机不能满足调速要求时才采用</p> <p>串励直流电动机的特点是起动转矩大, 特性软, 过载能力大, 适用于电力牵引机械和起重机等</p> <p>复励直流电动机的起动转矩和过载能力比他励直流电动机大, 但调速范围稍窄。接成积复励时, 适用于起动转矩很大, 负载具有强烈变化的设备上</p> |

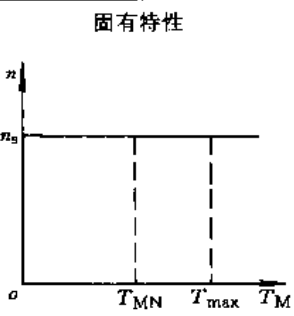

表 7-2-4 交流电动机的机械特性

| 特性曲线 | | 性能 |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 异步电动机 | <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="width: 45%;"> <p>固有特性</p> </div> <div style="width: 45%;"> <p>不同极数</p> </div> </div> | <p>笼型异步电动机简单、耐用、可靠、易维护、价格低、特性硬, 但起动和调速性能差, 轻载时功率因数低。一般在无调速要求的机械中广泛采用。在可变频率电源供电下可平滑调速。变极数多速电动机可分极变速调节, 但体积大, 价格较贵</p> <p>绕线转子异步电动机有集电环, 比笼型异步电动机维护麻烦, 价格也稍贵, 但由于它的起动转矩大, 起动时功率因数高, 且可进行小范围的速度调节, 控制设备简单, 故广泛用于各种生产机械, 尤其适用于电网容量小、起动次数多的机械, 如提升机、起重机及轧钢机械等</p> |
| <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="width: 45%;"> <p>不同转子电阻 ($U_1 = \text{常数}$)</p> </div> <div style="width: 45%;"> <p>不同供电频率 ($U_1/f = \text{常数}$)</p> </div> </div> | | |
| <p>不同电源电压 ($R_2 = \text{常数}$)</p> | | |

此星公司制作 请尊重作者版权



(续)

| 特 性 曲 线 | | 性 能 |
|---------|-------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 同步电动机 | 固有特性  | 恒转速，功率因数可调节，价格贵，一般只在不需调速的高压、低速、大容量的机械上采用，能提高功率因数  |

3.2 常用电动机的性能与应用范围 (表 7-2-5)

表 7-2-5 常用电动机性能及应用范围

| 型 号 | 名 称 | 容量范围 (kW) | 转速范围 (r/min) | 电压 (V) | 结构型式及性能 | 应 用 范 围 |
|----------|-----------------|-----------|------------------------------------|--------|-----------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| Y (IP23) | 小型三相异步电动机 (防护式) | 11~250 | 600 750 1000 1500 3000 | 380 | IP23 型外壳防护结构为防护式，能防止水溅或其他杂物从垂直线成 60°角的范围内，落入电机内部，适用于周围环境较干净、防护要求较低场合 | 为一般用途三相笼型异步电动机，可以用于对起动性能、调速性能及转差均无特殊要求的机器及设备，如金属切削机床、水泵、鼓风机、运输机械等 |
| Y (IP44) | 小型三相异步电动机 (封闭式) | 0.55~160 | | 380 | IP44 型外壳防护结构为封闭式，能防止灰尘、水滴大量地进入电机内部，适用于灰尘多、水土飞溅的场所 | 与 Y (IP23) 用途相同，此外还能适用于灰尘多、水土飞溅的场合，如球磨机、碾米机、脱谷机及其他农业机械、矿山机械等 |
| YA | 增安型三相异步电动机 | 0.55~90 | | 380 | IP54 型外壳防护结构为防爆式，适用于 1 级区域爆炸危险的场合 | 适用于石油、化工、矿井、船舶等有爆炸危险的场合 |
| YB | 隔爆型三相异步电动机 | 0.55~160 | | 380 | IP54 型外壳防护结构为防爆式，适用于 0 级区域爆炸危险的场合 | 同 YA 型 |
| YCJ | 齿轮减速电动机 | 0.55~15 | 15~600 | 380 | 由 Y 系列电动机与齿轮减速器组合而成，可正反两个方向传递功率 (转矩) | 是专用于低速大转矩机械传动的驱动电动机，适用于矿山、轧钢、制糖、造纸、化工、橡胶等工业 |
| YCT | 电磁调速电动机 | 0.55~90 | 125~1250 132~1320 | 380 | 由电磁转差离合器和拖动电动机 (Y 系列 IP44) 两部分组成，它与调速发电机控制器组成交流调速驱动装置，具有结构简单、控制功率小、调速范围广等特点 | 是一种恒转矩无级调速电动机，调速比为 1:2~1:10，转速变化率精度可达到 <3% |

此星公司制作 请尊重原作者版权



(续)

| 型号 | 名称 | 容量范围 (kW) | 转速范围 (r/min) | 电压 (V) | 结构型式及性能 | 应用范围 |
|--------------|--------------|--------------|-----------------------------|-----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|
| YD | 变极变速三相异步电动机 | 0.55~90 | 500~3000 | 380 | 利用改变电动机定子绕组的不同接线方式,有二速、三速、四速三种类型。速度是逐级调节的 | 可以用在有级调节速度的场合 |
| YEP | 旁磁制动电动机 | 0.55~11 | 1000 1500 | 380 | 转子非轴伸端装有分磁块及制动装置,它与电动机组成一体 其负载持续率(FC)为25%, 制动时间可达到0.2s以内 | 该电动机具有制动快的特点,可使用在启动运输机械、升降机械及其他要求迅速和准确停车的场合,做主传动和辅助传动用 |
| YEJ | 电磁铁制动电动机 | 0.55~45 | | 380 | 由电动机与电磁铁制动器组合而成,有制动能力,其制动时间在0.4~1.5s范围内 | |
| Y-F | 化工防腐型三相异步电动机 | 0.55~90 | 750 1000 1500 3000 | 380 | 在Y系列(IP44)电动机基础上采取加强结构密封和材料工艺防腐等措施,根据环境又分为户外、轻腐蚀、中等腐蚀、强腐蚀等四种防护类型 | 适用于有化学腐蚀介质环境中,如石油、化工、化肥、制药等企业用水泵、油泵、鼓风机、排风扇等 |
| Y-W | 户外型三相异步电动机 | | 适用于户外水泵、油泵、矿山机械等 | | | |
| YLB | 立式深井泵异步电动机 | 5.5~132 | 1500 3000 | 380 | 机座不带底脚,安装型式为立式。下端盖上有凸缘(配泵体),无轴伸 | 是驱动立式深井泵的专用电动机,适用于广大农村及工矿吸取地下水用 |
| YQS2 | 井用潜水三相异步电动机 | 3~185 | 1500 3000 | 380 | 该系列电动机为特性专用产品,是驱动井用潜水泵的专用电动机与井用潜水泵组装成井用潜水电泵,潜入水下长期工作。机座无底脚,用凸缘安装 | 适用于广大农村、城市工矿企业和高原山区抽取地下水用 |
| YR (IP44) | 绕线转子三相异步电动机 | 4~132 | 750 1000 1500 | 380 | 转子为绕线型,能在较小启动电流下,提供较大启动转矩,并能在转子回路中增减外接电阻,改变其转速 YR(IP44)为封闭结构,可用于灰尘较多,水土飞溅的场合 YR(IP23)为防护式结构,能防止水滴从与垂直方向成60°的范围内进入电机内部,可用于环境较干净的场合 | 适用于要求启动转矩大及需要小范围的调节速度且频繁起制动的传动装置上 通常,它用在压缩机、榨糖机、纺织机、拉丝机、输送机、印刷机等机械的动力设备上 |
| YR (IP23) | | 7.5~132 | | | | |

(续)

| 型号 | 名称 | 容量范围 (kW) | 转速范围 (r/min) | 电压 (V) | 结构型式及性能 | 应用范围 |
|-----|----------------------------|--------------|-----------------------------|--------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| YX | 高效率 三相异步 电动机 | 2.2~90 | 1000 1500 3000 | 380 | 在基本系列(IP44)的基础上, 改进设计降低各种损耗 | 电机效率指标较基本系列平均 提高3%,适用于运行时间较长、 负载率较高的场合,可较大幅度 地节约电能 |
| YXJ | 摆线针 轮减速电 动机 | 0.55~55 | | 380 | 摆线针轮减速器与Y系列电 动机组成的减速装置,具有减速 比大(87:1)、体积小、效率高、 噪声低的特点 | 使用场合同齿轮减速电动机 |
| YZ | 起重冶 金三相异 步电动机 | 1.5~30 | 750 1000 | 380 | YZ系列为笼型异步电动机, 基准工作制为S3,持续率FC= 40%,其他持续率分为S2~S6 五种,与其对应的功率,可查电 机厂产品样本 | 该系列为特殊专用产品,用于 断续工作制场合,常用于各种形 式的起重运输机械及冶金辅助设 备的电力传动 |
| YZR | | 1.5~200 | 600 750 1000 | | YZR系列为绕线转子异步电 动机,除持续率分为S2~S8七 种外,其他同YZ系列 | |
| YZC | 低振 动、低噪 声三相异 步电动机 | 0.55~15 | 750 1000 1500 3000 | 380 | 在基本系列Y(IP44)的基础 上,提高精度,使其达到低振动、 低噪声 | 适用于精密机床 |
| Z2 | 直流电 动机 | 0.4~200 | 600~3000 | 110 220 | 防护式自扇冷通用产品 | 用于一般直流调速电力传动 |
| Z02 | 直流电 动机 | 0.4~13 | 750~3000 | 110 220 | 封闭式自扇冷 | 用于多尘埃场所的金属切削机 床 |
| Z3 | 直流电 动机 | 0.25~200 | 600~3000 | 110 220 160 440 | 防护式自扇冷 | 普通用途,惯性小,适合晶闸 管供电 |
| ZT2 | 宽调速 直流电 动机 | 0.3~55 | 300/1200 750/3000 | 110 220 | 防护式自扇冷,弱磁调速范围 分为1:3、1:4两种 | 用于传动调速范围较宽的生产 机械 |
| ZZ | 起重冶 金用直流 电动机 | 1.3~125 | 390~1470 | 220 440 | 封闭式自然冷却或强迫通风, 断续定额 | 用于起重机械及冶金工厂辅助 机械 |
| ZZK | 起重冶 金用直流 电动机 (高速) | 2.5~53 | 750~2000 | 220 440 | | |

冶金工业出版社



(续)

| 型号 | 名称 | 容量范围 (kW) | 转速范围 (r/min) | 电压 (V) | 结构型式及性能 | 应用范围 |
|-------------|----------------|---------------|-------------------|---------------------------|---------------------------------------|-----------------------------|
| ZZY | 起重冶金用 直流电动机 | 1.9~43 | 750~2000 | 220 | 封闭自冷式, 断续定额 | 用于起动物械及冶金工厂 辅助机械 |
| ZD ZJD | 大型直流电 动机 | 800~5500 | 25~160 100~500 | 630 750 800 1000 | 防护式及管道通风式 | 用于大型轧机、矿井提升 机, 有可逆和不可逆两种 |
| ZD | 中型直流电 动机 | 55~1250 | 320~1500 | 220 330 440 660 | | 用于轧机、提升机械、大 型机床、挖土机等 |
| ZTD | 电梯用直流 电动机 | 13~23 | 150~1000 | 160 | 开启式及防护式, 短时 (30min) 工作制 | 高层建筑载客电梯用 |
| ZBD | 刨床用直流 电动机 | 60 | 1000 | 220 440 | 防护式, 强迫通风 | 龙门刨床用 |
| TD | 同步电动机 | 250~ 10000 | 166~1500 | 3000 6000 10000 | 密闭循环通风管道 | 传动风机、水泵及电动-发 电机组 |
| TDK | 压缩机用同 步电动机 | 200~4000 | 125~500 | 3000 6000 10000 | 防护式管道抽风型、防爆安全 型、防护式自冷通风型、开启式 | 用于传动活塞式压缩机和 对称平衡式压缩机 |
| TDMK TDQ | 球磨机用同 步电动机 | 380~1300 | 150~250 | 3000 6000 10000 | 两个座式轴承, 整块底板, 开 启式自通风 | 用于传动格子型球磨机、 棒磨机、磨煤机 |
| TDZ TZ | 轧机用同步 电动机 | 800~ 10900 | 500~1000 | 3000 6000 10000 | 两个座式轴承, 管道通风式, 过 载能力较高, 可达2.5~3.0倍 | 用于传动轧机及电动-发 电机组 |
| TDG | 高速同步电 动机 | 5000 | 3000 | 6000 | 转子为隐极结构或者凸极实心 磁极结构 | 用于透平压缩机及高炉和 炼焦用鼓风机 |
| TDL | 立式同步电 动机 | 400~1600 | 150~600 | 3000 6000 | 悬式结构 | 常用于立式轴流泵及立式 离心泵 |

4 电动机的功率计算与相关图表

电动机容量计算的基本公式见表 7-2-6; 不同几

何形状的部件飞轮力矩的计算见表 7-2-7; 机械传动效率的平均值见表 7-2-8。根据以上各表给出的数据按公式就可估算电动机的容量。



表 7-2-6 电动机容量计算用公式

| 名称 | 公 式 | 符 号 |
|-----------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. 功率 | $P = \frac{T_M n_M}{9550}$ $P = \frac{Fv}{\eta} \times 10^{-3}$ $P = \frac{T_M \omega_M}{1000}$ | <p>P——电动机功率 (kW)</p> <p>T_M——电动机转矩 (N·m)</p> <p>n_M——电动机转速 (r/min)</p> <p>ω_M——电动机角速度 (rad/s)</p> |
| 2. 运动物体的动能 | $\omega_M = \frac{\pi n_M}{30}$ $E = \frac{mv^2}{2}$ $E = \frac{J\omega^2}{2}$ $E = \frac{GD^2 n^2}{7200}$ | <p>F——作用力 (N)</p> <p>v——运动速度 (m/s)</p> <p>η——传动效率</p> <p>E——运动物体的动能 (J)</p> <p>m——物体的质量 (kg)</p> <p>J——转动惯量 (kg·m²)</p> <p>ω——角速度 (rad/s)</p> <p>GD^2——飞轮力矩 (N·m²)</p> <p>n——转速 (r/min)</p> |
| 3. 折算到电动机轴上的静阻转矩 | $T_L = T_m \frac{1}{i\eta}$ $T_L = F \frac{v}{\omega_M} \frac{1}{\eta}$ $T_L = \frac{FR}{i\eta}$ $i = \frac{n_M}{n_m}$ | <p>GD^2——飞轮力矩 (N·m²)</p> <p>n——转速 (r/min)</p> <p>T_L——电动机轴上的静阻转矩 (N·m)</p> <p>T_m——机械轴上的静阻转矩 (N·m)</p> <p>R——物体运动的旋转半径 (m)</p> <p>i——传动比</p> <p>n_m——机械轴转速 (r/min)</p> |
| 4. 折算到电动机轴上的转动惯量和飞轮力矩 | $J_{Mm} = J_m / i^2$ $GD_{Mm}^2 = GD_m^2 / i^2$ $\Sigma GD^2 = GD_M^2 + \frac{GD_{m1}^2}{i_1^2} + \frac{GD_{m2}^2}{i_2^2} + \dots + \frac{GD_{mn}^2}{i_n^2}$ $i_1 = \frac{n_M}{n_{m1}}$ $i_2 = \frac{n_M}{n_{m2}}$ \vdots $i_n = \frac{n_M}{n_{mn}}$ | <p>J_{Mm}——折算到电动机轴上的转动惯量 (kg·m²)</p> <p>GD_M^2——机械轴上的飞轮力矩 (N·m²)</p> <p>GD_{Mm}^2——折算到电动机轴上的飞轮力矩 (N·m²)</p> <p>GD_m^2——电动机转子飞轮力矩 (N·m²)</p> <p>ΣGD^2——电动机轴上的总飞轮力矩 (N·m²)</p> <p>$GD_{m1}^2 \sim GD_{mn}^2$——相应于转速为 $n_{m1} \sim n_{mn}$ 轴上的飞轮力矩</p> <p>$i_1 \sim i_n$——各轴对电动机轴的传动比</p> |
| 5. 电动机起、制动时间 | <p>(1) 动态转矩恒定下起动 (加速) 时间 制动 (减速) 时间</p> $t_s = \frac{\Sigma GD^2 (n_2 - n_1)}{375 T_d}$ $T_d = T_M - T_L$ $t_b = \frac{\Sigma GD^2 (n_1 - n_2)}{375 (-T_d)}$ $-T_d = -(T_M + T_L)$ <p>(2) 动态转矩线性变化下</p> $t_s = \frac{\Sigma GD^2 (n_2 - n_1)}{375 (T_{M1} - T_{M2})} \ln \frac{T_{M1} - T_L}{T_{M2} - T_L}$ <p>(3) 动态转矩非线性变化时</p> $t_b = \frac{\Sigma GD^2 (n_2 - n_1)}{375 (T_{M1} - T_{M2})} \ln \frac{T_{M1} + T_L}{T_{M2} + T_L}$ | <p>(1)</p> <p>(2)</p> |



(续)

| 名称 | 公式 | 符 号 |
|---------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| 5. 电动机起、制动时间 (1) 动态转矩恒定下起动(加速)时间 制动(减速)时间 (2) 动态转矩线性变化下 (3) 动态转矩非线性变化时 | $t_s = \frac{\Sigma GD^2 \int_{n_1}^{n_2} \frac{dn}{T_d}}{375} \quad (T_d > 0 \text{ 时加速})$ $t_b = \frac{\Sigma GD^2 \int_{n_1}^{n_2} \frac{dn}{T_d}}{375} \quad (T_d < 0 \text{ 时减速})$ (3) | t_s —起动(加速)时间(s) t_b —制动(减速)时间(s) T_d —动态(加减速时)转矩(N·m) |
| 6. 动态转矩恒定时, 加减速过程电动机行程 | $S = \frac{\Sigma GD^2 (n_1^2 - n_2^2)}{45000 T_d}$ | |

表 7-2-7 飞轮力矩的计算

| 飞 轮 力 矩 | 物体的几何形状 | 符 号 及 单 位 |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 实心圆柱体 $GD^2 = G \frac{D^2}{2} = \frac{\pi}{8} g \gamma L D^4$ | | GD^2 —飞轮力矩(N·m ²) G —重量(N), $G=mg$ D_1 —外径(m) γ —密度(kg/m ³) L —长度(m) D_2 —内径(m) D —圆环直径(m) d —环截面直径(m) a —厚度(m) b —宽度(m) ρ —回转半径(m) g —重力加速度(m/s ²) m —质量(kg) |
| 空心圆柱体 $GD^2 = \frac{G (D_1^2 - D_2^2)}{2}$ $= \frac{\pi}{8} g \gamma L (D_1^4 - D_2^4)$ | | |
| 圆环 $GD^2 = G (D^2 - 0.75d^2)$ $= \frac{\pi^2}{4} g \gamma (D^3 d^2 + 0.75 D d^4)$ | | |
| 六面体(对轴线 01-01) $GD_{01}^2 = \frac{G (a^2 + b^2)}{3}$ $= \frac{a^2 + b^2}{3} g \gamma 4bl$ | | |
| 六面体(对轴线 02-02) $GD_{02}^2 = GD_{01}^2 + 4G\rho^2$ | | |

此星公司制作 请尊重原作者版权



表 7-2-8 机械传动效率平均值

| 传动装置 | 效率 η |
|---------------------------------|-----------|
| 齿轮传动 (圆锥、圆柱、伞形) 一般数据 | 0.96~0.98 |
| 圆柱形齿轮传动 | |
| (1) 磨制过的正齿轮 | 0.99 |
| (2) 车削加工的正齿轮 | 0.98 |
| (3) 粗加工的正齿轮 | 0.96 |
| (4) 人字齿轮 | 0.985 |
| 伞齿轮减速机 | 0.97~0.98 |
| 链条传动 | 0.98 |
| 摩擦传动 | 0.7~0.8 |
| 蜗轮传动 ($\mu=0.1$) | |
| (1) 螺纹角为 $4^\circ\sim6^\circ$ | 0.41 |
| (2) 螺纹角为 $8^\circ\sim10^\circ$ | 0.55 |
| (3) 螺纹角为 $15^\circ\sim20^\circ$ | 0.66 |
| 钢绳传动 | 0.90 |
| 带传动 | 0.94~0.98 |
| V带传动 | 0.90 |
| 绳索及链条卷筒 | 0.96 |
| 绳索及链条滑车 | 0.94~0.96 |
| 复式滑车 | 0.92~0.98 |
| 支座轴颈 | |
| (1) 滚动轴承 | 0.99 |
| (2) 滑动轴承 | 0.97 |
| (3) 滑动轴承, 但润滑不足 | 0.94 |
| (4) 带油环润滑 | 0.98 |

5 连续工作制下电动机容量的选择

5.1 恒定负载连续工作制下电动机容量的计算

根据负载转矩及转速, 计算出所需要的负载功率 P_L , 应选择电动机的额定功率 P_N 略大于 P_L 。

1. 在基速以下工作时

$$P_N \geq P_L = \frac{T_L n_{MN}}{9560} \quad (\text{kW}) \quad (7-2-3)$$

式中 P_N ——电动机额定功率 (kW);
 P_L ——折算到电动机轴上的负载功率 (kW);
 T_L ——折算到电动机轴上的负载转矩 (N·m);
 n_{MN} ——电动机额定转速 (r/min)。

2. 基速以上调速时 应按所需要的最高转速计算:

$$P_N \geq \frac{T_L n_{max}}{9560} \quad (\text{kW}) \quad (7-2-4)$$

式中 n_{max} ——电动机的最高工作转速 (r/min)。

对起动条件沉重 (静阻转矩大或带有较大的飞轮力矩) 而采用笼型异步电动机或同步电动机传动的场合, 在初选电动机的额定功率和转速之后, 还要按式 (7-2-5) 和式 (7-2-6) 分别校验起动过程中的最小起动转矩 T_{Mmin} 和允许的最大飞轮力矩 GD_m^2 , 以保证生产机械能顺利地起动和在起动过程中电动机不致过热。

电动机最小起动转矩应为

$$T_{Mmin} \geq \frac{T_{Lmax} K_s}{K_u} \quad (\text{N} \cdot \text{m}) \quad (7-2-5)$$

式中 T_{Mmin} ——电动机的最小起动转矩 (N·m);
 T_{Lmax} ——起动过程中可能出现的最大负载转矩 (N·m);

K_s ——保证起动时有足够加速转矩的系数, 一般取 1.15~1.25;

K_u ——电压波动系数, 即起动时电动机端电压与额定电压之比, 全电压起动时取 0.85。

电动机允许的最大飞轮力矩 GD_m^2 应为

$$GD_m^2 = GD_m^2 \left(1 - \frac{T_{Lmax}}{T_{Mmax} K_s} \right) - GD_m^2 \quad (\text{N} \cdot \text{m}^2) \quad (7-2-6)$$

要求 $GD_m^2 \geq GD_m^2$

式中 GD_m^2 ——电动机转子飞轮力矩 (N·m²);
 GD_m^2 ——折算到电动机轴上的传动机械的最大飞轮力矩 (N·m²);

GD_m^2 ——包括电动机在内的整个传动系统允许的最大飞轮力矩 (N·m²), 折算到电动机轴上的数值, 由电动机资料中查取;

T_{Mav} ——电动机的平均起动转矩 (N·m)。

若按式 (7-2-5) 和式 (7-2-6) 两项校验均能通过, 则所选电动机功率可以采用。

5.2 变动负载连续周期工作制下电动机容量的计算

变动负载连续周期工作制典型负载图, 见图 7-2-

2。



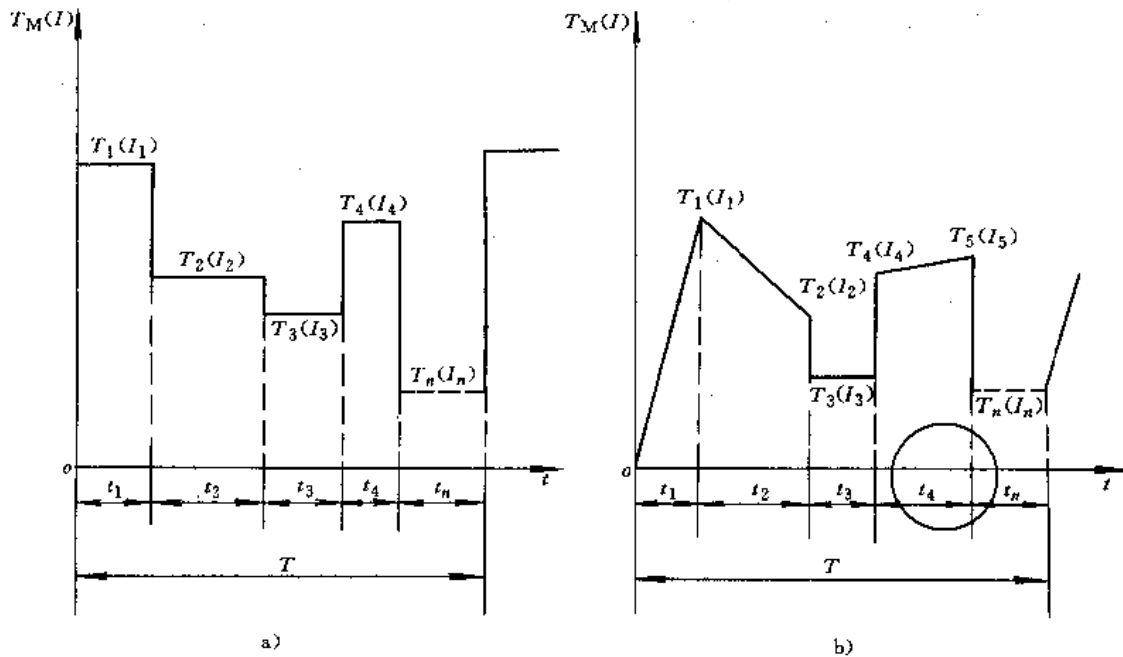


图 7-2-2 变动负载连续周期工作制电动机负载图

a) 矩形负载 b) 梯形或三角形负载

在这种工作制下,电动机功率的计算,可先按等效(方均根)转矩或等效(方均根)电流法,计算出一个周期内的等效转矩 T_{rms} 或等效电流 I_{rms} 值,然后选取电动机的额定转矩 T_{MN} 或额定电流 I_{MN} , 使其

$$T_{MN} \geq T_{rms}$$

或

$$I_{MN} \geq I_{rms}$$

如图 7-2-2a 所示矩形负载时,等效 T_{rms} 和 I_{rms} 的计算可按式 (7-2-7) 和式 (7-2-8) 进行。

$$T_{rms} = \sqrt{\frac{T_1^2 t_1 + T_2^2 t_2 + T_3^2 t_3 + \dots + T_n^2 t_n}{T}} \quad (\text{N} \cdot \text{m}) \quad (7-2-7)$$

或

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{I_1^2 t_1 + I_2^2 t_2 + I_3^2 t_3 + \dots + I_n^2 t_n}{T}} \quad (\text{A}) \quad (7-2-8)$$

式中 T_1, \dots, T_n —— 各分段时间内的转矩值 ($\text{N} \cdot \text{m}$);

I_1, \dots, I_n —— 各分段时间内的电流值 (A);

T —— 一个周期的总时间 (s)

$T = t_1 + t_2 + t_3 + \dots + t_n$ (s)

当负载不是矩形,而是如图 7-2-2b 所示的三角形或梯形时,应增加对每一个相应时间间隔内的转矩或

电流换算成等效平均值的计算。先等效成矩形,然后同样可以用式 (7-2-7) 或式 (7-2-8) 来计算等效转矩或等效电流。

对应时间 t_2 内转矩或电流的等效平均值可按式 (7-2-9) 或式 (7-2-10) 计算

$$T_{av2} = \sqrt{(T_1^2 + T_1 T_2 + T_2^2) / 3} \quad (7-2-9)$$

$$\text{或} \quad I_{av2} = \sqrt{(I_1^2 + I_1 I_2 + I_2^2) / 3} \quad (7-2-10)$$

对应时间 t_1 内三角形曲线转矩或电流的等效平均值可按式 (7-2-11) 或式 (7-2-12) 计算

$$T_{av1} = \sqrt{T_1^2 / 3} = 0.578 T_1 \quad (7-2-11)$$

$$\text{或} \quad I_{av1} = \sqrt{I_1^2 / 3} = 0.578 I_1 \quad (7-2-12)$$

按 T_{rms} 或 I_{rms} 选取电动机的额定值以后,还要用最大负载转矩 T_{Lmax} 按式 (7-2-13) 校验电动机的过载能力。

$$T_{MN} \geq T_{Lmax} / (0.9 K_v \lambda_T) \quad (\text{N} \cdot \text{m}) \quad (7-2-13)$$

式中 K_v —— 电网电压波动对电动机转矩的影响系数,一般对同步电动机取 $K_v = 0.85$, 对异步电动机取 $K_v = 0.72$, 对直流电动机取 $K_v = 1.0$;

λ_T —— 电动机转矩过载倍数,由电动机资料中



查取；

0.9——是考虑计算误差和参数波动而取的安全系数。

等效转矩法只能适用于转矩与电流成正比的场合，如不采用变励磁调速的直流电动机、稳定工作速度下的绕线转子和笼型异步电动机及同步电动机，而不能用于串励直流电动机。

有弱磁段工作的他励直流电动机，应将弱磁段的负载转矩 T_L 折算成额定磁通下的转矩 T'_L ，然后按 T'_L 选取电动机，这样等效转矩法仍然有效。折算公式为

$$T'_L = T_L \frac{n}{n_N} \quad (n > n_N) \quad (7.2-14)$$

6 短时工作制下电动机容量的选择

短时工作制下同样可以按式 (7.2-3) 和 (7.2-4) 计算出所需要的负载功率，然后选择具有对应工作时间的短时定额电动机，这时应有

$$P_N \geq P_L$$

短时定额电动机的标准工作时间一般规定为 30、60 和 90min。

实际上，负载持续时间很难与标准时间相同，这时应采用折算方法按式 (7.2-15) 计算出需要的工作时间对应的电动机功率。

$$P_e = P_{sb} \sqrt{\frac{t_{sb}}{t_e} + \alpha \left(\frac{t_{sb}}{t_e} - 1 \right)} \quad (\text{kW}) \quad (7.2-15)$$

式中 P_{sb} ——标准工作时间电动机功率 (kW)；

P_e ——实际工作时间电动机允许功率 (kW)；

t_{sb} ——标准工作时间 (s)；

t_e ——实际工作时间 (s)；

α ——系数，对普通直流电动机， $\alpha=1\sim1.5$ ，对冶金用直流电动机， $\alpha=0.5\sim0.9$ ；对普通笼型异步电动机， $\alpha=0.5\sim0.7$ ；对冶金用中小型绕线转子异步电动机， $\alpha=0.45\sim0.5$ ；对冶金用大型绕线转子异步电动机， $\alpha=0.9\sim1.0$ 。

由于短时工作制电动机生产得较少，故还可选连续工作制的电动机，此时 P_N 比 P_L 小，当小得比较多时，发热已不成问题，而过载能力和起动能力却成了主要矛盾，这时电动机的功率应按过载能力选择。

对于直流电动机：

$$P_N \geq \frac{P_L}{\lambda_I} \quad (7.2-16)$$

对于异步电动机：

$$P_N \geq \frac{P_{Lmax}}{0.75\lambda_T} \quad (7.2-17)$$

式中 λ_I ——电流过载倍数；

λ_T ——电动机的转矩过载倍数。

7 断续周期工作制下电动机容量的选择

典型的负载变化见图 7.2-3。

首先，按式 (7.2-18) 计算出实际的负载持续率，

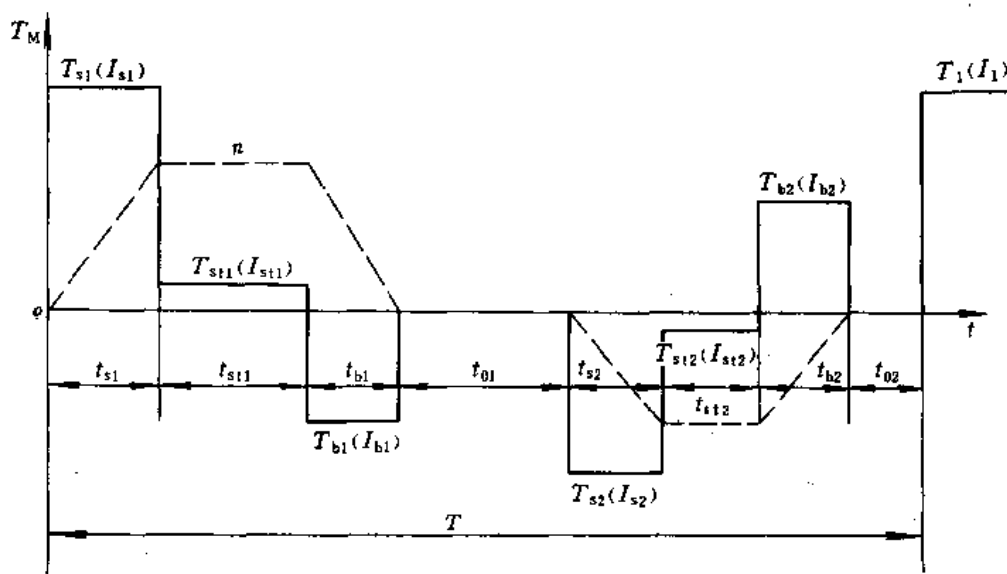


图 7.2-3 断续周期工作制下电动机的典型负载图



$$FC = \frac{\Sigma t_s + \Sigma t_b + \Sigma t_n}{T} \times 100\% \quad (7\cdot2-18)$$

然后,按式(7·2-19)、式(7·2-20)计算出等效转矩或等效电流值。

(1) 选用断续定额电动机时

$$T_{rms} = \sqrt{\frac{\Sigma T_s^2 t_s + \Sigma T_n^2 t_n + \Sigma T_b^2 t_b}{C_s (\Sigma t_s + \Sigma t_b) + \Sigma t_n}} \quad (\text{N} \cdot \text{m}) \quad (7\cdot2-19)$$

或

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{\Sigma I_s^2 t_s + \Sigma I_n^2 t_n + \Sigma I_b^2 t_b}{C_s (\Sigma t_s + \Sigma t_b) + \Sigma t_n}} \quad (\text{A}) \quad (7\cdot2-20)$$

(2) 选用连续定额电动机时:

$$T_{rms} = \sqrt{\frac{\Sigma T_s^2 t_s + \Sigma T_n^2 t_n + T_b^2 t_b}{C_s (\Sigma t_s + \Sigma t_b) + \Sigma t_n + C_\beta \Sigma t_0}} \quad (\text{N} \cdot \text{m}) \quad (7\cdot2-21)$$

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{\Sigma I_s^2 t_s + \Sigma I_n^2 t_n + \Sigma I_b^2 t_b}{C_s (\Sigma t_s + \Sigma t_b) + \Sigma t_n + C_\beta \Sigma t_0}} \quad (\text{A}) \quad (7\cdot2-22)$$

$$C_s = \frac{1 + C_\beta}{2}$$

- 式中 T_s ——起动转矩 (N·m);
 T_b ——制动转矩 (N·m);
 T_n ——稳态运转转矩 (N·m);
 I_s ——起动电流 (A);
 I_b ——制动电流 (A);
 I_n ——稳态运转电流 (A);
 Σt_s ——一个周期内起动时间总和 (s);
 Σt_b ——一个周期内制动时间总和 (s);
 Σt_n ——一个周期内稳态运转时间总和 (s);
 Σt_0 ——一个周期内中间停歇时间总和 (s);
 C_s ——电动机起制动过程中散热恶化系数;
 C_β ——停止时电动机散热恶化系数,见表(7·2-9)。

在选择电动机时,如果实际负载持续率 FC 能和电动机的额定负载持续率 FC_N 相一致,则按式(7·2-19)~式(7·2-22)选择相应的电动机。但是,实际负载持续率多数不与电动机额定负载持续率相一致,这时应将式(7·2-19)~式(7·2-22)所计算出的 T_{rms} 或 I_{rms} 值按式(7·2-23)和式(7·2-24)折算到电动机具

有相同的 FC_N 值时的数值,即

表 7·2-9 C_β 值

| 电动机的冷却方式 | | C_β 值 |
|----------|--------|-------------|
| 封闭式电动机 | 无冷却风扇 | 0.95~0.98 |
| | 强迫风冷 | 0.9~1.0 |
| | 自带内冷风扇 | 0.45~0.55 |
| 防护式电动机 | 自带内冷风扇 | 0.25~0.35 |

$$T'_{rms} = \sqrt{\frac{FC}{FC_N}} T_{rms} \quad (\text{N} \cdot \text{m}) \quad (7\cdot2-23)$$

$$I'_{rms} = \sqrt{\frac{FC}{FC_N}} I_{rms} \quad (\text{A}) \quad (7\cdot2-24)$$

所选 FC_N 应尽量接近 FC,只有这样,式(7·2-23)和式(7·2-24)才更准确。

选取电动机的额定转矩 $T_{MN} \geq T'_{rms}$ 或额定电流 $I_{MN} \geq I'_{rms}$ 。然后再按式(7·2-13)校验过载能力,如果也能通过,则所选电动机可以采用。

8 对电动机的校验

按负载预选的电动机,还必须进行下述校验。

8·1 发热校验

根据生产机械的工作制及负载图按等效(方均根)电流法或平均损耗法进行校验,就可以确定电动机发热是否能够通过,详见本章9节。当遇到某些生产机械负载图不易确定时,可通过试验实测或对比(与实际运行的类似机械相比较)等方法来校验。然后还应从生产发展、负载性质及考虑电网电压的波动、计算误差等因素出发,留有适当的裕度(一般10%左右)是必要的。

8·2 对电动机过载能力的校验

对电动机的瞬时过载,可以不考虑发热问题,只考虑对过载承受能力的问题。

交流电动机的过载能力受临界转矩的限制,常以转矩过载倍数来表示,一般可参见表7·2-10。

直流电动机的过载能力受换向器的耐火花能力的限制,常以电流过载倍数来表示,一般可参见表7·2-11。

电动机过载能力的实际值,应该由电动机制造厂给出。



表 7-2-10 交流电动机的转矩过载倍数 λ_T

| 电动机类型 | 工作制 | $\lambda_T = \frac{T_{Mmax}}{T_{MN}}$ | |
|-----------|---------------|---------------------------------------|-------------|
| 笼型异步电动机 | 一般用途, 连续工作制 | ≥ 1.6 | |
| | 高起动转矩型, 连续工作制 | ≥ 2 | |
| | 起重冶金型 | 10kW 及以下 | ≥ 2.5 |
| | | 10kW 以上 | ≥ 2.8 |
| 绕线转子异步电动机 | 一般用途, 连续工作制 | ≥ 1.8 | |
| | 起重冶金型 | 10kW 及以下 | ≥ 2.5 |
| | | 10kW 以上 | ≥ 2.8 |
| | 同步电动机 | $\cos\varphi = 0.8$ (超前) | ≥ 1.65 |
| 强励时 | | 3~3.5 | |

电动机过载能力, 可按下面公式来校验:

表 7-2-11 直流电动机的过载能力

| 电动机类型 | 工作条件 | 允许的工作过载 | | 切断电流过载倍数 | |
|-------------------------|----------|------------|--------|-----------|-----|
| | | 电流倍数 | 时间 (s) | | |
| 一般用途中小型电动机 (如 Z2 系列) | 基速及以下 | 1.5 | 120 | | |
| 起重、冶金用电动机 (如 ZZ、ZZY 系列) | 并励 | 2.5 | 60 | 2.8 | |
| | 复励 | 2.7 | | 3.0 | |
| 中型无补偿变速电动机 (ZD 系列) | 基速及以下 | 1.5 | 60 | | |
| 中型有补偿变速电动机 (ZD 系列) | 基速及以下 | 2.5 | 15 | 2.75 | |
| | 基速以上 | 1.6 | | 2.0 | |
| 大型轧钢电动机 | 第一类 | 基速及以下 | 15 | 1.1 倍工作过载 | |
| | | 基速以上 | | | 2.0 |
| | 第二类 | 基速及以下 | 60 | | |
| | | 2 倍基速及以下 | | | 1.8 |
| | | 2.5 倍基速及以下 | | | 1.7 |
| | | 3 倍基速及以下 | | | 1.5 |
| 第三类 | 基速及以下 | 2.5 | 15 | | |
| | | 2.5 | 30 | | |
| | 2 倍基速及以下 | 1.7 | 30 | | |
| 2.5 倍基速及以下 | 1.5 | 30 | | | |

8-3 对电动机平均起动转矩的校验

电动机在起动过程中, 起动转矩并非恒定。直流电动机在基速以下可以按恒转矩考虑, 基速以上应按恒功率对应的变转矩考虑。

异步电动机和同步电动机异步起动时, 在起动过

对于直流电动机

$$I_{max} \leq K \lambda_I I_{MN} \quad (7-2-25)$$

对异步电动机

$$T_{max} \leq K K_s \lambda_T T_{MN} \quad (7-2-26)$$

对同步电动机

$$T_{max} \leq K \lambda_T T_{MN} \quad (7-2-27)$$

式中 I_{max} ——瞬时最大负载电流 (A);
 T_{max} ——瞬时最大负载转矩 (N·m);
 λ_I ——允许电流过载倍数;
 λ_T ——允许转矩过载倍数;
 I_{MN} ——电动机额定电流 (A);
 T_{MN} ——电动机额定转矩 (N·m);
 K_s ——电压波动系数, 取 0.85;
 K ——裕量系数, 对直流电动机取 0.9~0.95, 对交流电动机取 0.9。

程中其机械特性为非线性, 加速转矩是一个变量。在没有得到电机制造厂给出的数据之前, 为了初选电动机, 可先按表 7-2-12 给出的平均起动转矩来估算电动机的起动能力。

对起动沉重的机械, 若交流电动机采用直接起动时, 应按式 (7-2-28) 校验。



表 7-2-12 电动机平均起动转矩

| 电动机类型 | 平均起动转矩 | 符 号 |
|-----------------------|-----------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 直流电动机 | $T_{sav} = 1.3 \sim 1.4 T_N$ | T_{sav} ——平均起动转矩 (N·m) T_s ——初始起动转矩 (N·m) (s=1) T_{pi} ——引入转矩 (N·m) T_{cr} ——临界转矩 (N·m) T_{N-25} ——当 FC=25% 时的额定转矩 (N·m) |
| 同步电动机 | $T_{sav} = 0.5 (T_s + T_{pi})$ $T_{sav} = 1.0 \sim 1.1 T_s$ | |
| 笼型电动机 一般型 起重冶金型 | $T_{sav} = 0.45 \sim 0.5 (T_s + T_{cr})$ $T_{sav} = 0.9 T_s$ | |
| 绕线转子异步电动机 起动冶金用 | $T_{sav} = 1.0 \sim 2.0 T_{N-25}$ | |

$$K_s^2 K_{min} T_{MN} > K_s T_L \quad (7-2-28)$$

式中 T_{MN} ——电动机额定转矩 (N·m);
 T_L ——起动时电动机轴上的静阻转矩 (N·m);
 K_s ——最小起动电压与额定电压之比;
 K_{min} ——电动机最小起动转矩与额定转矩之比;
 K_s ——保证起动时有足够加速度的系数, 应根据起动时间的要求和电动机轴上飞轮力矩计算得来, 如无明确要求取 1.2~1.5。

8.4 其他校验

1. 电动机的 GD^2 校验 某些机械对电动机动态性能有特殊要求, 例如, 飞剪对电动机起动时间和行程有要求; 连轧机主动对速降及速度动态响应时间有要求, 这时需要校验电动机的 GD^2 能否满足生产要求。

2. 其他特殊校验 例如, 辊道类电动机的打滑转矩校验等。

9 功率计算及校验举例

9.1 离心式风机的电动机功率计算

$$P = \frac{kQp}{1040\eta_e} \quad (\text{kW}) \quad (7-2-29)$$

式中 P ——电动机功率 (kW);
 Q ——标准大气压 (101.33kPa) 和绝对温度 273K 下的送风量 (m^3/s);
 p ——空气压力 (Pa);
 η_e ——风机效率, 约为 0.4~0.75;

η_c ——传动效率, 直接传动时为 1;

k ——裕量系数, 见表 7-2-13。

表 7-2-13 风机电动机的裕量系数 k

| 功率 (kW) | 1 以及 | 1~2 | 2~5 | 大于 5 |
|----------|------|-----|------|-----------|
| 裕量系数 k | 2 | 1.5 | 1.25 | 1.15~1.10 |

【例 7-2-1】 求风量 $Q_1 = 15 \text{m}^3/\text{s}$ 、有效全压 $p = 500 \text{Pa}$ 鼓风机传动电动机的容量。当地的大气压 $p_1 = 95 \text{kPa}$ 、最高空气温度 $t_1 = 35^\circ\text{C}$ 、取风机效率为 0.65、裕量系数见表 7-2-13。求直接连接时电动机所需容量。

解 首先计算送风量, 按式 (7-2-30) 计算折算到标准大气压和绝对温度 273K 下的送风量。

$$Q = Q_1 \frac{p_0}{p_1} \cdot \frac{273 + t_1}{273} \quad (\text{m}^3/\text{s}) \quad (7-2-30)$$

将数值代入式 (7-2-30) 有

$$Q = 15 \cdot \frac{101.33 \times 10^3}{95 \times 10^3} \cdot \frac{273 + 35}{273} = 18 \text{m}^3/\text{s}$$

进而将数据代入式 (7-2-29) 中得

$$\begin{aligned}
 P &= \frac{kQp}{1040\eta_e} \\
 &= \frac{k \times 18 \times 500}{1040 \times 0.65 \times 1} \\
 &= 13.3 \text{kW}
 \end{aligned}$$

不考虑裕量, 功率已为 13kW 以上, 查表 7-2-13 取 $k = 1.15$, 所以

$$P = 1.15 \times 13.3 = 15.3 \text{kW}$$

选电动机容量为 17kW。

9.2 离心式泵的电动机功率计算

$$P = K \frac{\rho Q (H + \Delta H)}{102\eta_e} \times 10^3 \quad (\text{kW}) \quad (7-2-31)$$

式中 P ——电动机功率 (kW);



- ρ ——液体密度 (t/m^3);
- Q ——泵的出水量 (m^3/s);
- H ——水头 (m);
- ΔH ——主管损失水头 (m);
- η ——水泵效率, 一般取 0.6~0.84;
- η_c ——传动效率, 与电动机直接连接时为 1;
- K ——裕量系数, 见表 7-2-14。

表 7-2-14 泵电动机的余量系数

| | | | | | |
|---------|------|---------|-----------|-----------|--------|
| 功率 (kW) | 2 以下 | 2~5 | 5~50 | 50~100 | 100 以上 |
| 裕量系数 | 1.7 | 1.5~1.3 | 1.15~1.10 | 1.05~1.03 | 1.05 |

【例 7-2-2】 将每分钟 22m³ 的矿井地下涌水, 用水泵抽到地面上, 扬程为 150m, 需用几台 150kW 电动机传动的水泵? 损失水头按实际扬程的 15%, 泵的效率按 75%, 直接传动。

解 每一台抽水机的抽水量为

$$Q = \frac{102\eta_c P \times 60}{K\rho(H + \Delta H) \times 10^3}$$

$$= \frac{102 \times 0.75 \times 1 \times 150 \times 60}{1.05 \times 1 \times 150(1 + 0.15) \times 10^3}$$

$$= 3.81 m^3/min$$

所用抽水机台数为

$$n = \frac{\Sigma Q}{Q} = \frac{22}{3.81} = 5.8 \text{ 台}$$

实际可选用 6 台水泵。

9-3 起重机的电动机功率计算

起重机各机构按其工作繁忙程度, 分为轻级、中级、重级和特重级四种类型, 与其对应的传动电动机负载持续率 FC 分别为 15%、25%、40%、60%。

(1) 起升机构功率计算

$$P = \frac{Fv}{\eta} \times 10^{-3} \quad (\text{kW}) \quad (7-2-32)$$

式中 F ——对起升机构, 为额定起升重量 (N);

v ——起升速度 (m/s);

η ——机械传动效率。

(2) 行走机构功率, 按经验式 (7-2-33) 计算

$$P = \frac{\Sigma G (c + 7v)}{\eta} \times 10^{-6} \quad (\text{kW}) \quad (7-2-33)$$

式中 ΣG ——运动部分总重量 (N);

v ——行走速度 (m/s);

c ——行走阻力系数, 滚动轴承时, $c = 10 \sim 20$, 滑动轴承时, $c = 20 \sim 25$;

η ——机械传动效率。

【例 7-2-3】 某车间有一台一般用途桥式起重机, 其额定起升重量为 30t, 起升速度为 3m/min, 横行速度为 20m/min, 行走速度为 30m/min, 求提升、横行、行走用电动机容量。已知横行小车全重 10t、桥重 20t、横行阻力系数 $c = 10$ 、行走阻力系数 $c = 12$, 机械传动效率取 0.75。

解

(1) 各机构所需功率

提升机构:

$$P = \frac{Fv}{\eta} \times 10^{-3} = \frac{30 \times 1000 \times 9.8 \times \frac{3}{60}}{0.75} \times 10^{-3}$$

$$= 19.6 \text{ kW}$$

横行机构:

$$P = \frac{\Sigma G (c + 7v)}{\eta} \times 10^{-6}$$

$$= \frac{(30 + 10) \times 9.8 \times 10^3 \times \left(10 + 7 \times \frac{20}{60}\right) \times \frac{20}{60}}{0.75} \times 10^{-6}$$

$$= 2.14 \text{ kW}$$

行走机构:

$$P = \frac{\Sigma G (c + 7v)}{\eta} \times 10^{-6}$$

$$= \frac{(30 + 10 + 20) \times 9.8 \times 10^3 \times \left(12 + 7 \times \frac{30}{60}\right) \times \frac{30}{60}}{0.75} \times 10^{-6}$$

$$= 6.08 \text{ kW}$$

(2) 本起重机的提升、横行、行走等各机构的工作类型均属中级, 对应 FC = 25%。

(3) 电动机容量选择, 确定减速比后按产品样本, 选择 YZR 型绕线转子异步电动机如下:

提升电动机 YZR-225M 型 22kW

横行电动机 YZR-132M1 型 2.2kW

行走电动机 YZR-160M2 型 7.5kW

9-4 平稳负载长期工作制下电动机容量的校验

下面将通过一个实例来说明平稳负载长期工作制下电动机容量的校验方法。

【例 7-2-4】 负载转矩 $T_L = 1447 \text{ N} \cdot \text{m}$, 起动过程中的最大静阻转矩 $T_{L\max} = 562 \text{ N} \cdot \text{m}$, 要求电动机转速 $n = 2900 \sim 3000 \text{ r/min}$, 传动机械折算到电动机轴上的总飞轮力矩 $GD_{\Sigma}^2 = 1962 \text{ N} \cdot \text{m}^2$ 。

解

(1) 计算负载功率:

$$P_L = \frac{T_L n_N}{9560} = \frac{1447 \times 2975}{9560} = 450 \text{ kW}$$

初选中功率、高转速的 JK-500 笼型异步电动机, 其数据为: $P_N = 500 \text{ kW}$, $n_N = 2975 \text{ r/min}$, $\lambda = 2.5$, 最小起动转矩倍数为 0.73, 电动机转子飞轮力矩 $GD_{\Sigma}^2 = 441 \text{ N} \cdot \text{m}^2$, 允许的最



大飞轮力矩 $GD_2^2 = 3826 \text{ N} \cdot \text{m}^2$ 。

电动机的额定转矩为

$$T_{MN} = \frac{9560 P_N}{n_N} = \frac{9560 \times 500}{2975} = 1607 \text{ N} \cdot \text{m}$$

电动机的实际负载率为

$$\epsilon = \frac{P_L}{P_N} = \frac{450}{500} = 0.9$$

(2) 校验最小起动转矩: 假定电动机按全电压起动, 最小起动转矩为:

$$T_{\min} = \frac{T_{L\max} K_s}{K_2^2} = \frac{562 \times 1.25}{0.85^2} = 972 \text{ N} \cdot \text{m}$$

电动机的最小起动能力为

$$T_{M\min} = 0.75 T_{MN} = 0.75 \times 1607 = 1173 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$T_{M\min} > T_{\min}$, 故最小起动转矩校验通过。

(3) 校验允许的最大飞轮力矩: 平均起动转矩为

$$\begin{aligned} T_{\text{av}} &= 0.45(T_s + T_{\text{st}}) = 0.45(0.73 + 2.5) T_{MN} \\ &= 0.45(0.73 + 2.5) \times 1607 \\ &= 2336 \text{ N} \cdot \text{m} \end{aligned}$$

根据最大允许飞轮力矩式 (7-2-6) 得

$$\begin{aligned} GD_2^2 &= GD_2^2 \left(1 - \frac{T_{L\max}}{T_{\text{av}} \cdot K_2^2} \right) - GD_2^2 \\ &= 3826 \left(1 - \frac{562}{2336 \times 0.85^2} \right) - 441 \\ &= 2111 \text{ N} \cdot \text{m}^2 \end{aligned}$$

由于 $GD_2^2 (2111 \text{ N} \cdot \text{m}^2) > GD_2^2 (1962 \text{ N} \cdot \text{m}^2)$ 故允许的最大飞轮力矩校验通过。

综上所述校验结果, 各项校验均可通过, 故所选的 JK-500 型电动机可以采用。

9.5 直流电动机短时工作的发热和过载校验

连续工作电动机在短期负载下工作时, 应按式 (7-2-34) 将短期负载折算成连续工作方式下的负载功率

$$P_L' = P_L \sqrt{\frac{1 - \exp\left(-\frac{t_g}{T_0}\right)}{1 + \alpha \exp\left(-\frac{t_g}{T_0}\right)}} \quad (\text{kW}) \quad (7-2-34)$$

式中 P_L' ——折合后的功率 (kW);

P_L ——短期负载功率 (kW);

T_0 ——发热时间常数 (min);

t_g ——短时工作时间 (min);

α ——铁损与铜损之比, 额定负载时 $\alpha=1$ 。

【例 7-2-5】 有一台直流电动机, 额定功率为 $P_N = 20 \text{ kW}$, 过载能力 $\lambda=2$, 发热时间常数 $T_0=30 \text{ min}$, 额定负载时铁损与铜损之比 $\alpha=1$ 。校验下列两种情况下, 此台电动机是否可以采用。

(1) 短期负载, $P_L=40 \text{ kW}$ $t_g=20 \text{ min}$;

(2) 短期负载, $P_L=44 \text{ kW}$ $t_g=10 \text{ min}$ 。

解

(1) $P_L=40 \text{ kW}$, $t_g=20 \text{ min}$ 时:

$$\begin{aligned} P_L' &= P_L \sqrt{\frac{1 - \exp\left(-\frac{t_g}{T_0}\right)}{1 + \exp\left(-\frac{t_g}{T_0}\right)}} \\ &= 40 \sqrt{\frac{1 - \exp\left(-\frac{20}{30}\right)}{1 + \exp\left(-\frac{20}{30}\right)}} \\ &= 40 \sqrt{\frac{1 - 0.5134}{1 + 0.5134}} \\ &= 22.68 \text{ kW} \end{aligned}$$

因为 $P_N=20 \text{ kW} < P_L' (22.68 \text{ kW})$, 故发热不通过, 不能采用

(2) $P_L=44 \text{ kW}$, $t_g=10 \text{ min}$ 时:

$$\begin{aligned} P_L' &= P_L \sqrt{\frac{1 - \exp\left(-\frac{t_g}{T_0}\right)}{1 + \exp\left(-\frac{t_g}{T_0}\right)}} \\ &= 44 \sqrt{\frac{1 - \exp\left(-\frac{10}{30}\right)}{1 + \exp\left(-\frac{10}{30}\right)}} \\ &= 44 \sqrt{\frac{1 - 0.7165}{1 + 0.7165}} \\ &= 17.88 \text{ kW} \end{aligned}$$

$P_N=20 \text{ kW} > P_L'=17.88 \text{ kW}$, 发热可以通过, 但实际过载倍数 $\lambda = P_L'/P_N = 44/20 = 2.2$, $\lambda > \lambda=2$, 过载能力不够, 尽管发热通过, 也不能采用。

9.6 直流电动机断续周期工作下的发热校验

下面将通过一个实例来说明直流电动机断续周期工作下的发热校验方法。

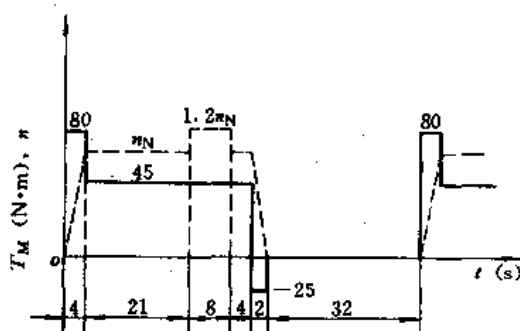


图 7-2-4 【例 7-2-6】电动机转速曲线及负载图

【例 7-2-6】 一台断续周期工作方式的他励直流电动机, $FC=60\%$ 时, $T_N=45 \text{ N} \cdot \text{m}$, 铁损与铜损之比 $\alpha=1$ 。当拖动某生产机械运行时, 负载见图 7-2-4。其中, $t_1=4 \text{ s}$ 段为起动过程, $t_2=21 \text{ s}$ 段为额定转速运行, $t_3=8 \text{ s}$ 段为弱磁升速段, 其



转速为 1.2nN, t₄=4s 段为额定转速运行, t₅=2s 段为制动停车过程, t₆=32s 段为停歇段, 校核该电动机发热是否通过。

解

(1) 计算实际负载持续率

$$FC = \frac{t_B}{t_B + t_0} = \frac{4 + 21 + 8 + 4 + 2}{4 + 21 + 8 + 4 + 2 + 32} = 54.93\%$$

(2) 计算实际负载持续率相对 60% 标准负载持续率的折算系数 K

$$K = \sqrt{\frac{FC}{FC_0}} = \sqrt{\frac{54.93}{60}} = 0.957$$

(3) 计算弱磁段的折算转矩

$$T_{M3}' = T_{M3} \frac{n}{n_N} = 45 \frac{1.2n_N}{n_N}$$

$$= 54N \cdot m$$

(4) 计算等效转矩, 若为他励冷却式电动机, 其等效转矩按下式计算:

$$T_{rms} = K \sqrt{\frac{T_1^2 \cdot t_1 + T_2^2 \cdot t_2 + T_3^2 \cdot t_3 + T_4^2 \cdot t_4 + T_5^2 \cdot t_5}{t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5}} = 0.957 \sqrt{\frac{80^2 \times 4 + 45^2 \times 21 + 54^2 \times 8 + 45^2 \times 4 + (-25)^2 \times 2}{4 + 21 + 8 + 4 + 2}} = 0.957 \sqrt{\frac{100803}{39}} = 48.65N \cdot m$$

因为 $T_{rms} > T_{MN} = 45N \cdot m$, 所以发热通不过, 不能用。

若为自励冷却式电动机, 则起动、制动时间还要乘以小于 1 的冷却恶化系数, 故 T_{rms} 将更大, 发热就更通不过了。



第3章 常用控制电路与电器选择

常用控制电路是由继电器、接触器、按钮等元件组成的有触点控制电路, 用来对生产机械进行自动控制, 并实现电动机的起动、制动、反转、调速等工作。控制电路工作的可靠性, 不仅取决于电路的正确设计, 还取决于合理地选择电器元件和部件。

1 常用控制电路的基本环节

利用表 7-3-1 所示的典型的基本环节, 可设计组合成各种继电-接触器控制系统, 常用来控制电动机及其他执行元件。

1.1 电动机起动控制

电动机的起动方式, 一般可分为直接起动和减压起动。

1. 交流电动机直接起动应满足的条件

(1) 起动时对电网造成的电压降不应超过规定的数值。一般要求: 对经常起动的电动机, 不大于 10%; 对偶尔起动的电动机, 不大于 15%。实际情况下, 在保证生产机械所要求的起动转矩, 又不致影响其他用电设备的正常工作时, 其电压降可允许为 20% 或更大一些。

由单独变压器供电的电动机, 起动时其电压降允

许值由生产机械的起动转矩决定。

(2) 保证起动转矩所需要的端电压。为保证电动机起动转矩大于生产机械的负载转矩, 所需的电动机端电压为

$$U^* \geq \sqrt{\frac{1.1T_c^*}{T_c}}$$

式中 U^* —— 电动机的端电压标么值;

T_c^* —— 传动机械的负载转矩标么值;

T_c —— 电动机的起动转矩标么值。

(3) 一般按电源情况可允许直接起动的功率见表 7-3-2。

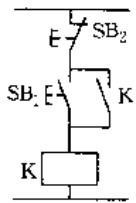
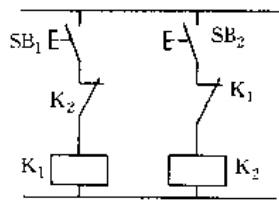
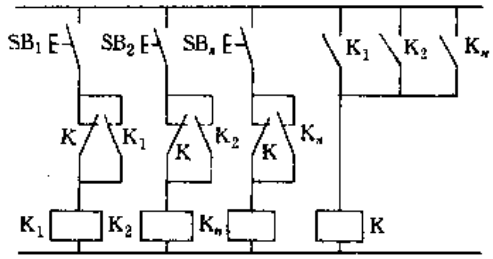
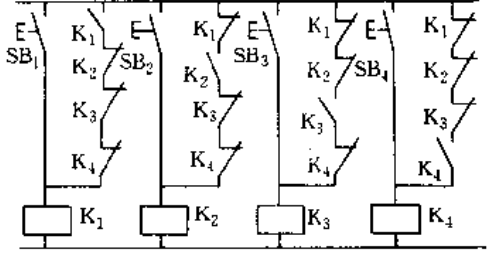
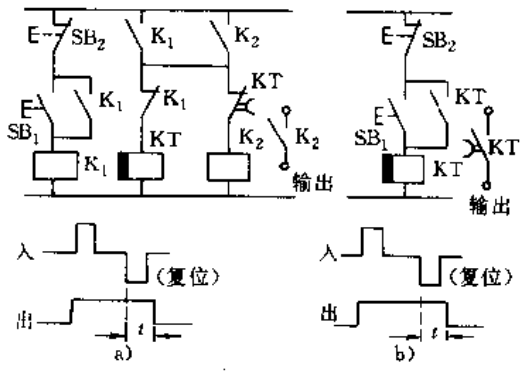
2. 各类电机起动控制电路

a. 交流笼型异步电动机起动 大容量笼型异步电动机减压起动通常有四种形式: 电阻减压起动、Y-Δ 起动、延边三角形起动、自耦变压器减压起动。各种起动方式的特点见表 7-3-3。

b. 交流绕线转子异步电动机的起动 绕线转子异步电动机一般采用频敏变阻器或电阻器起动。偶尔起动用电动机配用 BP1-2、BP1-3、BP2-7 型频敏变阻器, 电动机最大容量可达 2240kW, 如水泵、空压机、鼓风机等。对重复短时工作制电动机配用 BP1-0、BP1-4 及 BP1-5 型频敏变阻器, 电动机最大容量可达



表 7-3-1 常用控制电路典型基本环节

| 线路名称 | 线 路 | 说 明 |
|---------|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|
| 自保持电路 |  | <p>为记忆电路的一种基本形式，用于记忆外部信号</p> |
| 互锁电路 |  | <p>在两个输入信号的电路中，以先动作的信号优先，另一信号因受联锁作用不会动作</p> |
| 先动作优先电路 |  | <p>在数个输入信号的电路中，以最先动作的信号优先，在最先动作的信号除去前，其他信号无法动作</p> |
| 后动作优先电路 |  | <p>在数个输入信号的电路中，以最后动作的信号优先，前面的动作所决定的状态自行解除</p> |
| 延时复位电路 |  | <p>输入信号加入后有瞬时信号输出，当输入信号解除后经过设定的时间 t 后才会停止输出。图 a 为采用通电延时的继电器图 b 为采用断电延时的继电器</p> |

此星公司制作 请尊重原作者版权



(续)

| 线路名称 | 线路 | 说明 |
|----------------|----|----------------------------------------------------------|
| 延时动作 延时复位电路 | | 加入输入信号后, 经设定时间 t_1 后有信号输出, 输入信号解除后经设定时间 t_2 , 停止输出信号 |
| 周期动作电路 | | 输入信号加入后, 产生输出量周期变化 |

表 7-3-2 按电源容量允许直接起动的笼型异步电动机功率

| 电 源 | 允许直接起动的笼型异步电动机最大功率 |
|----------|----------------------------------------------|
| 小容量发电厂 | 每 1kVA 发电机容量为 0.1~0.12kW |
| 变电所 | 经常启动时, 不大于变压器容量的 20% 偶尔启动时, 不大于变压器容量的 30% |
| 高压线路 | 不超过电动机连接线路上短路容量的 3% |
| 变压器-电动机组 | 电动机容量不大于变压器容量的 80% |

125kW。对于交流绕线转子异步电动机, 亦有采用电阻启动, 如启动转矩很大以及有低速运转要求的传动装置等, 其启动特性及电阻值计算见表 7-3-4。

c. 同步电动机启动 同步电动机的启动应尽量采用直接启动, 当电网和电动机结构不允许时, 可采取减压启动方式。减压启动时, 一般常用电抗器减压启动方式, 如启动的生产机械需要较大的启动转矩, 但又不允许有大的启动电流冲击时, 可采用自耦变压器减压启动方式。

d. 直流电动机启动 直流电动机启动时, 在电枢回路接入启动电阻, 以限制启动电流不致过大。

启动电阻计算, 可用分析法或图解法, 图解法计算较为方便, 图 7-3-1 与图 7-3-2 以并励直流电动机为例计算启动电阻。

(1) 用百分值绘出电动机的自然特性, 见图 7-3-

2。

(2) 根据传动装置要求, 确定最大启动转矩 T_1 和切换转矩 T_2 为

$$T_1 \approx (1.5 \sim 2.2)T_N$$

$$T_2 \approx (1.1 \sim 1.2)T_L$$

式中 T_N ——额定转矩;

T_L ——负载转矩。

(3) 当 $T_L = T_N$ 时, 求出各级启动电阻为

$$r_1 \% = \frac{yz}{uw} \quad r_1 = r_1 \% R_N$$

$$r_2 \% = \frac{xy}{uw} \quad r_2 = r_2 \% R_N$$

$$r_3 \% = \frac{vx}{uw} \quad r_3 = r_3 \% R_N$$

$$R_N = U_N / I_N$$

此星公司制作 请尊重原作者版权



表 7-3-3 减压起动方式比较

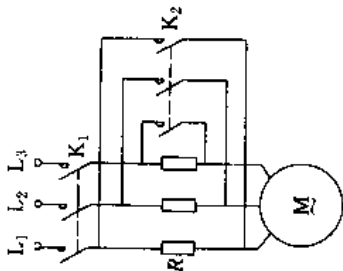
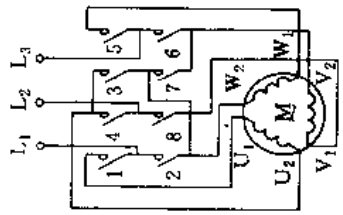
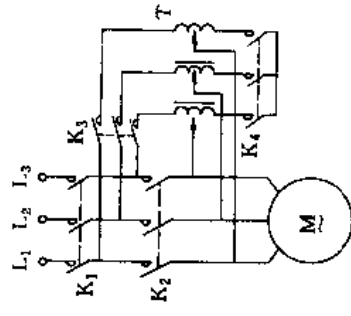
| 起动方式 | 电阻减压起动 | Y-Δ 起 动 | 延边三角形起动 | | 自耦变压器减压起动 |
|-------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|----------------|
| | | | 抽头比 $K=a/b$ | | |
| | | | 1:2 | 1:1 | 2:1 |
| 接线方式 |  <p>起动时 K_1 闭合, 起动后 K_1 和 K_2 闭合</p> |  <p>起动时Y接线, 触头1、8、5、3、7闭合, 起动后Δ接线, 触头1、2、5、6、4、8闭合</p> |  <p>起动时 K_1、K_3、K_4 闭合, 起动后 K_1、K_2 闭合, K_3、K_4 断开</p> | | |
| 起动电压 额定电压 = α | 0.8 | 0.58 | 0.78 | 0.71 | 0.66 |
| 起动电流 全压起动电流 | 0.8 | 0.33 | 0.6 | 0.5 | 0.43 |
| 起动转矩 全压起动转矩 | 0.64 | 0.33 | 0.6 | 0.5 | 0.43 |
| 适用电动机 | 低压电动机 | 具有6个出线头的低压电动机 | 具有9个出线头的低压电动机 | 具有9个出线头的低压电动机 | 高压电动机 低压电动机 |
| 特点 | 起动电流较大, 起动转矩较小, 起动时电阻消耗能量较大 | 起动电流小, 起动转矩较小 | 起动电流小, 起动转矩较大, 兼有自耦变压器和Y-Δ两种减压起动方式优点 | 起动电流较小, 起动转矩较大 | |

表 7-3-4 电阻器起动的特性及电阻值计算

| 电动机类型 | 接线方式 | 启动特性 | 启动级数 q | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| | | | 电动机功率 (kW) | 级数 |
| 绕线转子异步电动机 | | | 0.75~7.5 | 1 |
| | | | 10~20 | 2 |
| | | | 20~35 | 2~3 |
| | | | 35~55 | 3 |
| | | | 60~95 | 4~5 |
| | | | 100~200 | 4~5 |
| 200~370 | 6 | | | |
| T_1, T_2 取值 | | 启动电阻计算 | | 符 号 |
| <p>一般取</p> <p>$T_1 \leq 0.8T_{cr}$</p> <p>$T_2 \geq 1.1 \sim 1.2T_L$</p> | | $\lambda = \frac{T_1}{T_2} = \sqrt[q]{\frac{1}{s_N T_1'}}$ <p>$r_3 = r_N (\lambda - 1)$</p> <p>$r_2 = r_3 \lambda$</p> <p>$r_1 = r_2 \lambda$</p> <p>$r_N = s_N R_{2N}$</p> | | <p>s_N —— 电动机的额定转差率</p> <p>R_{2N} —— 转子额定电阻 (Ω)</p> $R_{2N} = \frac{U_{2N}}{\sqrt{3} I_{2N}}$ <p>T_1' —— 最大启动转矩对额定转矩的标么值</p> <p>$T_1' = T_1 / T_N$</p> <p>U_{2N} —— 电动机转子额定电压 (V)</p> <p>I_{2N} —— 电动机转子额定电流 (A)</p> |

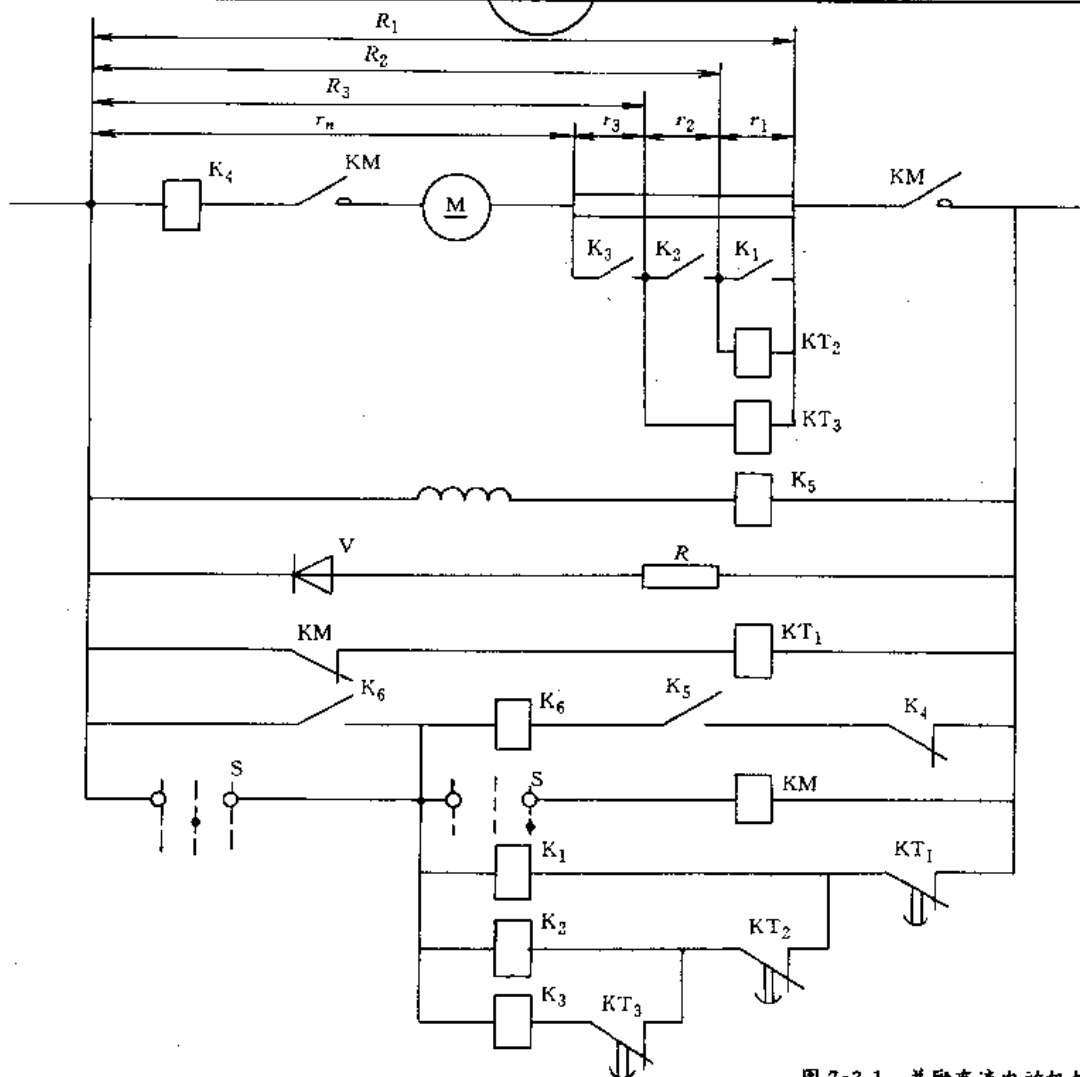


图 7-3-1 并励直流电动机控制原理图



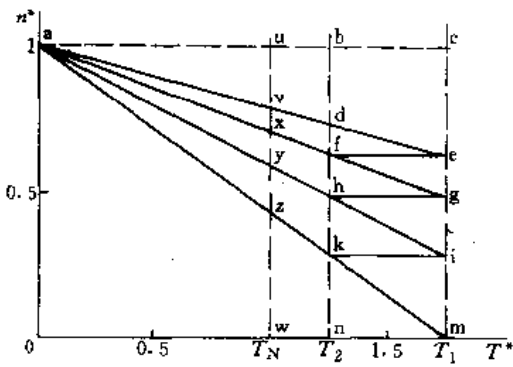


图 7-3-2 并励直流电动机起动特性

式中 $r_1\%$ 、 $r_2\%$ 、 $r_3\%$ ——各段电阻百分值；

R_N ——电动机额定电阻。

由上可求得开始起动时的电枢回路电阻

$$r = r_1 + r_2 + r_3$$

1.2 电动机制动控制

电动机常用的电力制动方式有三种：能耗制动、反接制动和再生制动。三种电力制动方式的比较见表 7-3-5。

1. 异步电动机制动控制

a. 异步电动机的能耗制动 (图 7-3-3) 将运行

表 7-3-5 电力制动方式比较

| 制动方式 | 制动特点 | 适用场合 |
|------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 能耗制动 | <ol style="list-style-type: none"> 1. 制动转矩与转速成比例地减小 2. 制动平滑，能得到倾斜度小的特性 3. 可使生产机械准确地停在一定位置上 | <ol style="list-style-type: none"> 1. 适用于经常起动、频繁逆转并要求迅速准确停车的机械，如轧钢车间升降台 2. 并励直流电动机多采用 3. 同步电动机和大容量笼型异步电动机，因反接制动冲击电流太大，功率因数低，亦采用此法 4. 交流高压绕线转子异步电动机为防止集电环上感应高电压，亦采用此法 |
| 反接制动 | <ol style="list-style-type: none"> 1. 在任何转速下，制动都可靠 2. 能够完全制动停止 3. 制动转矩较大而恒定 4. 制动电流冲击大，能量消耗较大 5. 有自动逆转的可能 | <ol style="list-style-type: none"> 1. 适用于经常正反转的生产机械，如轧钢机辊道 2. 绕线转子异步电动机常正、反转时宜采用 3. 串励直流电动机常用 |
| 再生制动 | <ol style="list-style-type: none"> 1. 不用改变电路，即可从电动状态自动地转入制动状态 2. 能量可回馈入电网，较经济 3. 在 $n > n_0$ 时，才能得到制动转矩 | 适用于高速时重物下放，获得稳定制动，如起重机下放负载等 |

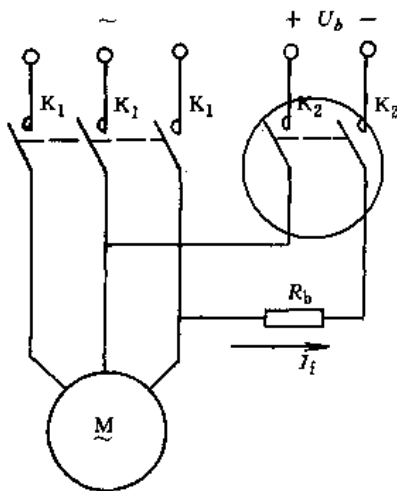


图 7-3-3 笼型异步电动机能耗制动电路图

中的笼型异步电动机定子绕组从电网上断开后，接至制动用直流电源上，供电动机定子励磁。此时电动机变为一台交流发电机，其电能消耗在转子回路，并产生制动转矩。随着电动机转速下降，制动转矩相应减小。调节励磁电流 I_f ，可改变制动转矩，其制动特性见图 7-3-4。

制动时的励磁电流 I_f 一般取 $I_f = (1 \sim 2) I_{1N}$ (I_{1N} 为电动机定子额定电流)。

b. 绕线转子异步电动机反接制动 (图 7-3-5) 断开接触器 K_1 ，合上接触器 K_2 ，即改变了所接定子电源相序，使定子旋转磁场反向，因此，所产生的转矩方向与转速方向相反，从而产生制动作用，其特性见图 7-3-6。

反接制动时，转子回路必须串接反接制动电阻



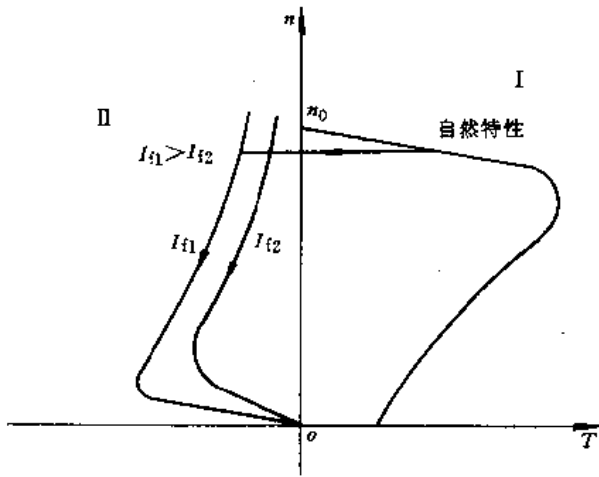


图 7-3-4 异步电动机能耗制动机械特性

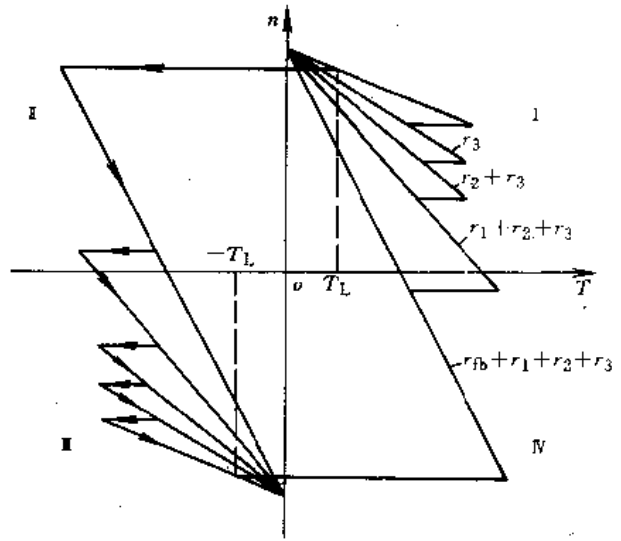


图 7-3-6 绕线转子异步电动机反接制动机械特性

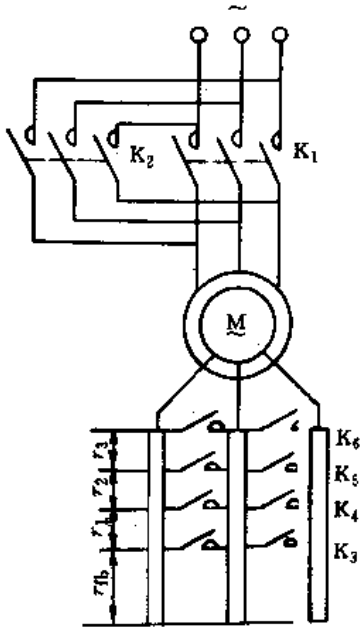


图 7-3-5 绕线转子异步电动机反接制动电路图

r_b ，以限制反接电流。若 r_b 换成频敏变阻器更好，因其阻抗可随频率的变化而变化，能自动限制反接制动电流，可得到平滑的正反向运转。

c. 异步电动机的再生制动 当电动机被生产机械的位势负载拉着作为发电机运转时，将机械能变为电能送回电网并产生制动转矩。此时转速 n 大于同步转速 n_0 ，运行特性曲线在第二象限，此时，电动机为一台与电网并联的异步发电机，从电网吸收无功功率作励磁之用。其特性见图 7-3-7。

2. 直流电动机制动控制

a. 他励直流电动机能耗制动(图 7-3-8) 将电动

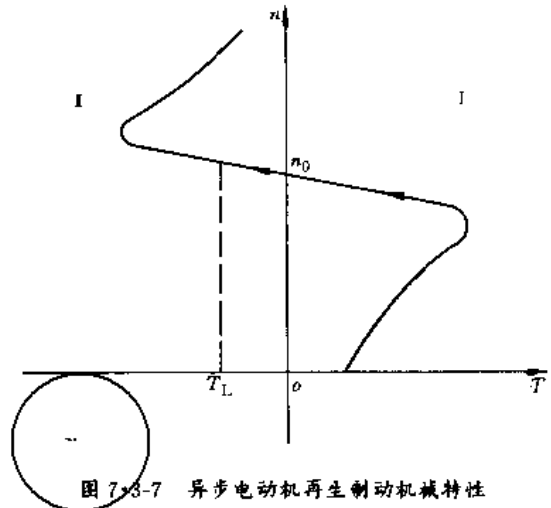


图 7-3-7 异步电动机再生制动机械特性

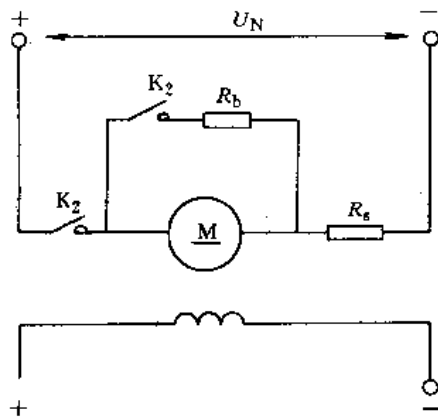


图 7-3-8 他励直流电动机能耗制动电路图

机电枢从电源断开后，并联制动电阻 R_b ，此时，电动机依靠生产机械的动能或位能作发电运转，向 R_b 供电而产生制动转矩。制动电阻 R_b 越小，制动越迅速。其



特性见图 7-3-9。制动电阻的计算式为

$$R_b = \frac{E}{I_b} - r_a \quad (7-3-1)$$

式中 R_b —— 制动电阻 (Ω);
 r_a —— 电动机电枢电阻 (Ω);
 I_b —— 电动机的最大制动电流 (A);
 E —— 制动开始时电动机的反电动势。

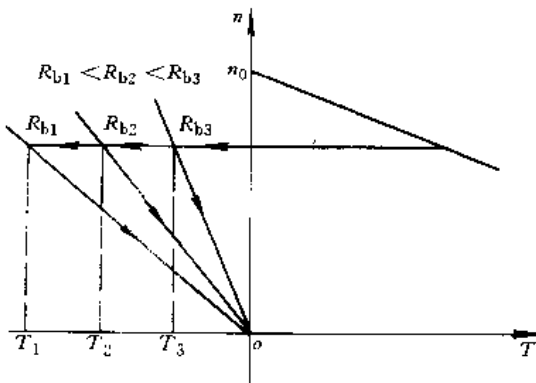


图 7-3-9 他励直流电动机能耗制动机械特性

b. 他励直流电动机反接制动 (图 7-3-10) 在直流电动机运转时, 励磁不变, 突然将电枢电源反接, 此时外接电源极性与电动机反电动势相同, 在电枢回路产生较大的制动电流 I_b 。其特性见图 7-3-11。

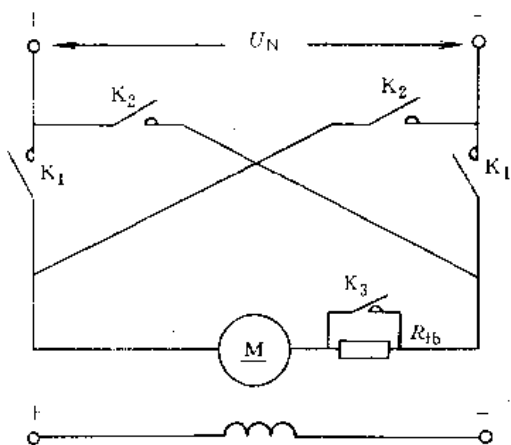


图 7-3-10 他励直流电动机反接制动简图

从图 7-3-11 可看出, 当被反接制动的电动机转速降到零 (C 点), 若电源还不断开, 电动机将反向起动。在可逆系统中, 采用反接制动, 可以方便地使电动机由正转变为反转。

反接制动电阻 R_b 计算式为

$$R_b = \frac{U_N + E_{\max}}{I_{b\max}} - (R_a + R_s) \quad (7-3-2)$$

式中 $I_{b\max}$ —— 允许最大的反接制动电流 (A);
 E_{\max} —— 电动机最大反电动势 (V);
 R_s —— 起动电阻 (Ω);
 R_a —— 电枢电阻 (Ω);

$I_{b\max}$ 取决于电机允许的电流过载倍数, 一般取 $(1.5 \sim 2.5) I_N$ 。

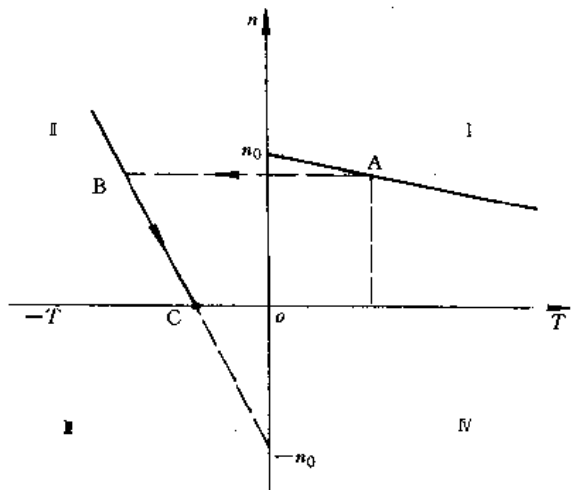


图 7-3-11 他励直流电动机反接制动机械特性

c. 他励直流电动机再生制动 (图 7-3-12) 当他励直流电动机被生产机械的位势负载拉着作为发电机运转时, 此时转速 $n > n_0$, 转矩 T_M 为负值, 即处于图 7-3-13 的第二象限部分。此时, $n > n_0$, T_M 与 n 反向, 电动机作发电运行, 并将电能回馈到电网。

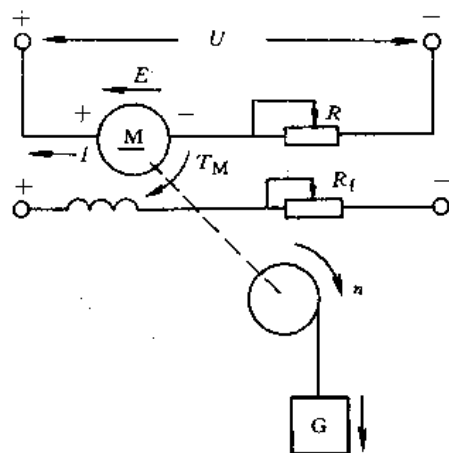


图 7-3-12 他励直流电动机再生制动简图



这种制动方式常用于起重重物下放。

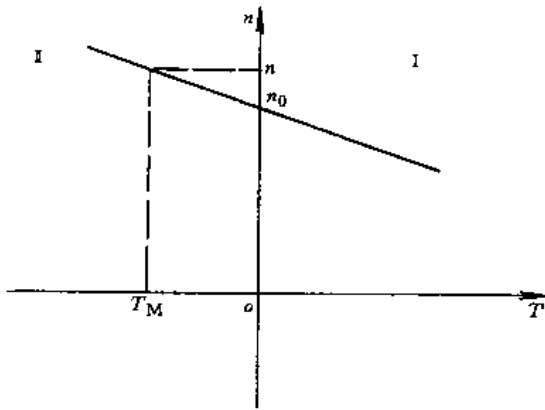


图 7-3-13 他励直流电动机再生制动机械特性

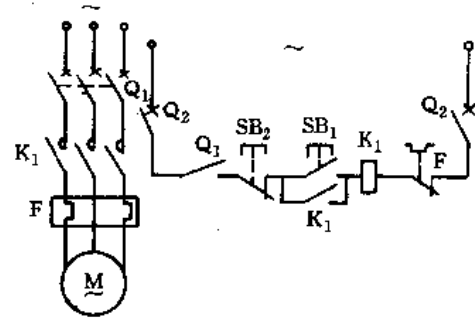


图 7-3-14 笼型异步电动机不可逆控制电路

2. 笼型异步电动机不可逆带能耗制动控制电路
应用于不要调速,而需要较准确停车的生产机械,见图 7-3-15。

2 常用控制电路

2.1 电路设计的基本要求

- (1) 满足生产机械的工艺要求。
- (2) 电器元件动作准确可靠,不受外界干扰,当个别电器损坏时,电路工作顺序不致破坏。
- (3) 有过载、超速、超行程、误操作等保护。接通、分断、事故等有声、光信号指示。
- (4) 电路操作和维修方便。
- (5) 电路简单、经济。

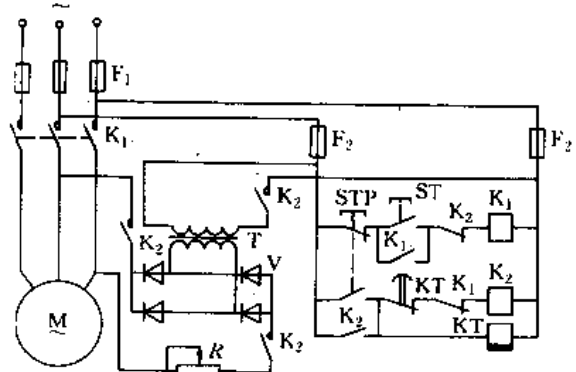


图 7-3-15 笼型异步电动机不可逆带能耗制动控制电路

2.2 常用控制电路

1. 笼型异步电动机不可逆控制电路 用于不需要调速和改变转向的生产机械,见图 7-3-14。

3. 笼型异步电动机可逆带能耗制动控制电路
适用于不需要调速、需要频繁操作和反转的生产机械,

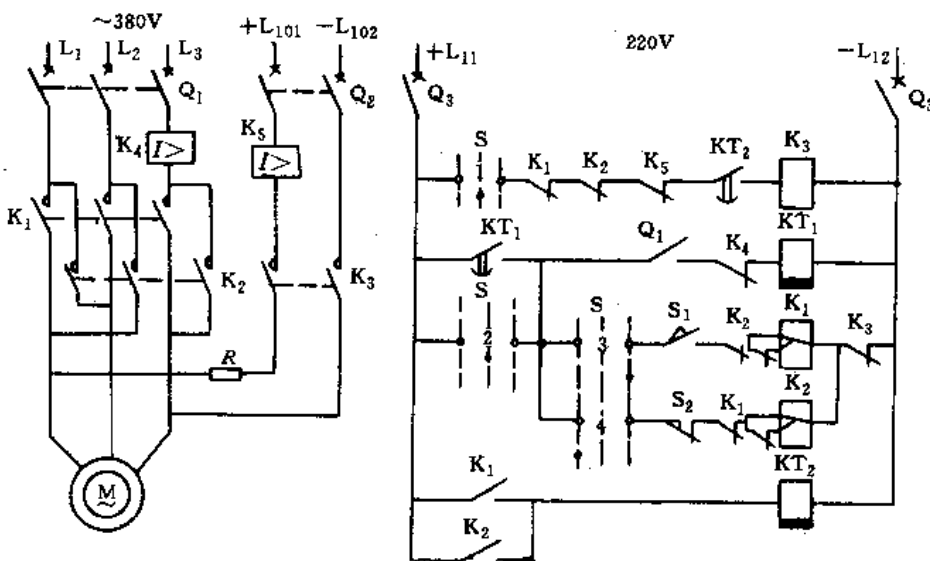


图 7-3-16 笼型电动机可逆带能耗制动控制电路



见图 7-3-16。

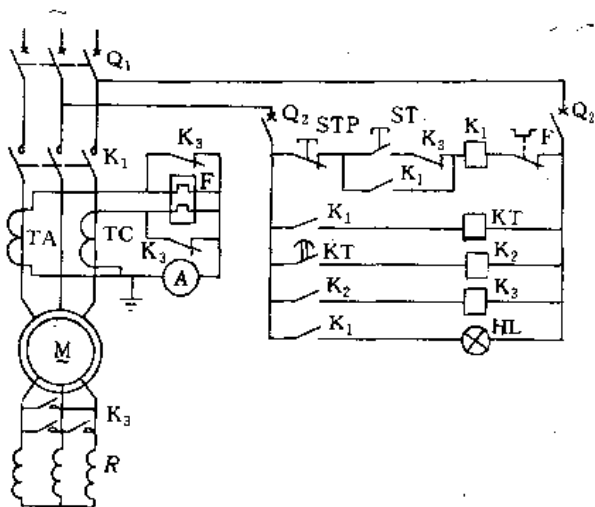


图 7-3-17 绕线转子异步电动机频敏变阻器控制电路

4. 绕线转子异步电动机频敏变阻器控制电路
适用于不需要调速，需频繁操作的生产机械，见图 7-3-17。

5. 交流电动机通用电器控制设备

a. GCK、BFC 系列电动机控制中心 (Motor Control Center—MCC) 主要由一些组合式控制单元和其他功能单元组合而成。这些单元以抽屉式安装在封闭的柜体内，用设置在柜体上方的水平母线将每个柜体连接在一起，同一柜内的各组功能单元则并联在垂直母线上，每个柜体内分水平母线区、垂直母线区、电缆区和电器设备安装区等四个互相隔离的区域。功能单元分别安装在各自的小室内。功能单元容量和操作有多种标准规格，可根据控制对象的要求自由选配。当任何一个功能单元发生事故时，均不影响其他单元，可以防止事故的扩大。

b. GCK-1 系列 MCC 主要技术参数及使用条件 (表 7-3-6)

表 7-3-6 GCK-1 系列 MCC 主要技术参数

| 型 号 | 项 目 | 规 范 | |
|-----------------|----------------|---------------------------------|--------------------------------|
| GCK-1 | 符合标准 | IEC439, NEMA ICS-2-322, JEM1195 | |
| | 防护等级 | IEC IP40, NEMA TYPZ-1 | |
| | 额定工作电压 (V) | ~380 | |
| | 频率 (Hz) | 50~60 | |
| | 额定绝缘电压 (V) | 660 | |
| | 工作条件 | 环境 | 室内 |
| | | 海拔高度 (m) | 不高于 2000 |
| | | 环境温度 | -5~+40℃, 在储存、运输条件下, 最低温度为 -30℃ |
| | | 相对湿度 | 不超过 85% |
| | 可控制的电动机容量 (kW) | 0.5~155 | |
| | 机械寿命 (次) | 500 | |
| | 额定电流 (A) | 水平母线 | 1600, 3000 |
| | | 垂直母线 | 600 |
| | | 主电路触头接插件 | 200, 400 |
| | | 辅助电路触头接插件 | 20 |
| 馈电电路最大电流 | | 400 | |
| 额定短时耐受电流 | 受电电路 | 1000, 1600, 2000, 2500 | |
| | 有效值 (kA/s) | 15, 30, 50, 80 | |
| | | 峰值 (kA) | 30, 63, 110, 176 |
| 耐压试验 (1min) (V) | 2500 | | |



3 常用控制电器的选择

3.1 低压断路器的选择

断路器用于电动机回路或配电回路，作过载和短路保护，并可频繁地接通和分断电路。一般，DZ系列作保护电动机用，DW、ME系列作保护变压器及配线路用。

(1) 按电动机额定电流或线路计算电流 I_N 选取断路器额定电流 I_{ZN} 。

(2) 延时动作的过电流脱扣器的整定电流 I_{DZ} 应大于线路计算电流 I_N ，即

$$I_{DZ} \geq 1.1 I_N \quad (7.3-3)$$

延时动作过电流脱扣器在电动机长期过载 20% 时应动作，而在电动机起动时不应动作。

(3) 瞬时动作的过电流整定值 I_{DZ} ，按大于电动机起动电流 I_s 选取，即

$$I_{DZ} \geq KI \quad (7.3-4)$$

式中 K ——整定系数，断路器动作时间 $> 0.02s$ 时

$K=1.35$ ；断路器动作时间 $< 0.02s$ 时，

$K=1.7 \sim 2$ 。

常用的新型空气断路器有：DZ20 系列塑料外壳式断路器，DZ15L 漏电保护断路器，DW15、ME 系列万能式断路器。

3.2 熔断器的选择

熔断器一般用作电动机长期工作制起动和短路保护。熔断器的熔断电流与周围介质的温度、湿度，熔断器的预热情况，电动机的起动和运转时间有关。常用的熔断器有 RT0、RM0、RL1、RC1A 型等（参见本卷第 2 篇第 9 章 2.4 节）。

熔断器的熔体额定电流是按电动机起动方式而定。

(1) 减压起动的电动机，选用熔断器熔体的额定电流等于或略大于电动机的额定电流，即

$$I_R \geq I_N \quad (7.3-5)$$

式中 I_R ——熔断器熔体额定电流 (A)；

I_N ——电动机额定电流 (A)。

(2) 直接起动的电动机，如熔断器熔体电流选择过小，则易造成某一相熔断而发生电动机单相运转。一般来说，熔断电流与起动电流、起动时间长短有关。

$$I_R = KI \quad (A) \quad (7.3-6)$$

式中 I_s ——电机起动电流 (A)；

K ——系数

起动时间 3s 以下时 $K=0.25 \sim 0.35$

起动时间 3~8s 时 $K=0.4 \sim 0.5$

起动时间 8s 和起动频繁或带反接制动时 $K=0.5 \sim 0.6$

起动时间的长短，可根据生产机械实际起动时间或计算而定。

若加速转矩是恒定值，起动时间也可按下式计算：

$$t_s = \frac{GD^2 n_N}{375 T_s} \quad (s) \quad (7.3-7)$$

式中 t_s ——起动时间 (s)；

n_N ——电动机额定转速 (r/min)；

GD^2 ——电动机飞轮力矩 ($N \cdot m^2$)；

T_s ——加速转矩 ($N \cdot m$)。

(3) 熔断器熔体的熔断时间与起动设备的动作时间要配合好，当短路电流超过起动设备的极限分断电流时，要求熔体的熔断时间小于起动设备的分断时间，以免损坏起动设备。如果此条件不能满足，可采用下列方法之一：

(1) 改用快速动作的断路器；

(2) 选用较大分断电流的起动设备。

3.3 交直流接触器的选择

交直流接触器是有触点控制系统中主要元件，用来接通和分断带有负载的主电路或控制电路，并能借助按钮实现远距离控制。

控制系统中接触器选用需注意的事项：

(1) 接触器的主触头的额定电流、工作电压、频率、分断能力，主触头和辅触头数目，线圈电压等必须符合电路的要求。

(2) 选用时，应注意接触器适用的负载类别。一般 CJ12、CJ24 系列适用于冶金、轧钢、起重机等设备中，频繁地起动、停止和反转交流电动机。

CJ10、CJ20 系列适用于电力系统中接通和断开电路及频繁地起动和控制交流电动机，引进产品 B 系列、3TB 系列、LC 系列具有良好的技术性能，可代替 CJ10、CJ20 系列接触器。

CZ0、CZ18 系列适合于冶金、机床等设备中直流电动机的频繁起动、停止以及换向或反接制动。

(3) 接触器的额定工作电流与操作频率和负载性质有关，故选择接触器容量时，需参照负载曲线和实际操作频率按等效容量折算，并按接触器的三种工作状态（长期工作制、短时工作制、重复短时工作制）来选



定。

3.4 热继电器的选择

热继电器用于交流电动机的过载保护和起动过程中电动机过热保护,当过载相当大时,能瞬时断开,起到保护作用。由于加热元件有热惯性,它不能保护电动机短路。

热继电器的额定电流按电动机额定电流的 0.95~1.05 倍选用,整定值为 $1.1I_N$,当热继电器的周围环境不是 35℃ 时,应按下表校正其电流:

$$I_r = I_{35} \sqrt{\frac{95-t}{60}} \quad (7-3-8)$$

式中 I_r ——环境温度为 t (℃) 时的电流值 (A);

I_{35} ——热继电器在规定温度下的电流值 (A);

t ——环境温度 (℃)。

当电动机长期过载 20% 时,应可靠动作。此外,热继电器的动作时间必须大于电动机长期允许过载的时间及起动时间。

对于起动时间较长的电动机,为防止起动过程中热继电器动作,应选用速饱和电流互感器与热继电器配合。

为防止电动机的单相运转,可选用 JR-D、JR16-D 型带断相运行保护的热继电器。引进产品 T 系列热继电器可代替 JR16 系列。

3.5 保护继电器的选择

1. 过电流继电器 过电流继电器常用于电动机的短路保护和堵转保护。继电器的额定电流应大于或等于电动机的额定电流。其动作电流可整定为 110%~140% 电动机的最大起动电流。对于轧钢机辊道等机械,当有堵转情况时,选用过电流继电器通过延时继电器组成堵转保护环节,其延时时间略大于电动机起动时间。其整定值应使得在电动机长期过载或堵转时,继电器动作,而在电流接近额定电流时,继电器应释放。常采用高返回系数的 JL14、JL15 型过电流继电器。

2. 欠电流继电器 欠电流继电器常用于直流电动机的励磁回路,作失磁超速保护。继电器的额定电流应大于或等于电动机的额定励磁电流。继电器的释放电流应整定在电动机最小励磁电流的 80%~85% 范围内。

3. 过电压继电器 过电压保护多用于直流发电机的端电压保护。目前经常采用的继电器为 JT3 系列直流电压继电器。当控制系统过电压时,继电器线圈两

端的电压不应超过其额定电压值。过电压继电器的动作整定值一般为电路额定电压的 1.1~1.2 倍。而 JT3 系列电压继电器的吸引电压仅为线圈额定电压的 30%~50%,因此,为了保护电路过电压,又不使加于继电器的电压超过其额定值,继电器线圈必须串接附加电阻。

4. 欠电压继电器 欠电压继电器用于当电源电压显著降低或完全消失时,将电动机从电路上切除,以防止电源电压恢复时,电动机自起动而引起人身和设备事故。

欠电压继电器根据电路电压选择,一般控制系统对释放电压值无特殊要求。

3.6 时间继电器的选择

时间继电器按照其延时原理有:阻尼式、水银式、钟表式、电动式、晶体管式、热敏电阻式等。必须了解各类时间继电器的特点,并根据使用场合及控制系统的要求,选用合适的时间继电器。

对操作频繁的场所,常采用电磁式时间继电器。

空气阻尼式延时继电器可吸合延时(得电延时),但是其延时精度差,一般常用于延时精度要求不高的控制系统。

对延时精度要求较高、动作频率较高的场合,可用晶体管式时间继电器。

对要求长延时(以分或小时计)的场合,可采用电动机式时间继电器。

对多尘或有潮气的场合,可用水银式时间继电器,或用封闭式或防潮式时间继电器。

4 可编程序控制器在控制系统中的应用

可编程序控制器 (Programmable Controller——PC) 是以微机为核心的新一代程序控制器,它不仅以执行开关量处理功能,还可以执行数字处理功能,包括四则运算、逻辑处理、数码变换、数据传送、计时、

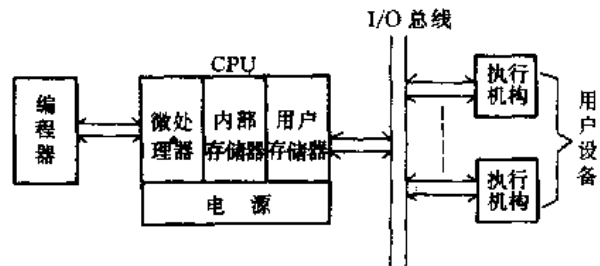


图 7-3-18 可编程序控制器基本框图



计数、数组处理、数组传送、列表处理等。在编程技术方面开发了面向用户的梯形图编程法。可编程序控制器基本框图见图 7-3-18。

4.1 可编程序控制器的特点

(1) 全面引入了微型计算机技术, 做到了体积小、价格低、可靠性高。

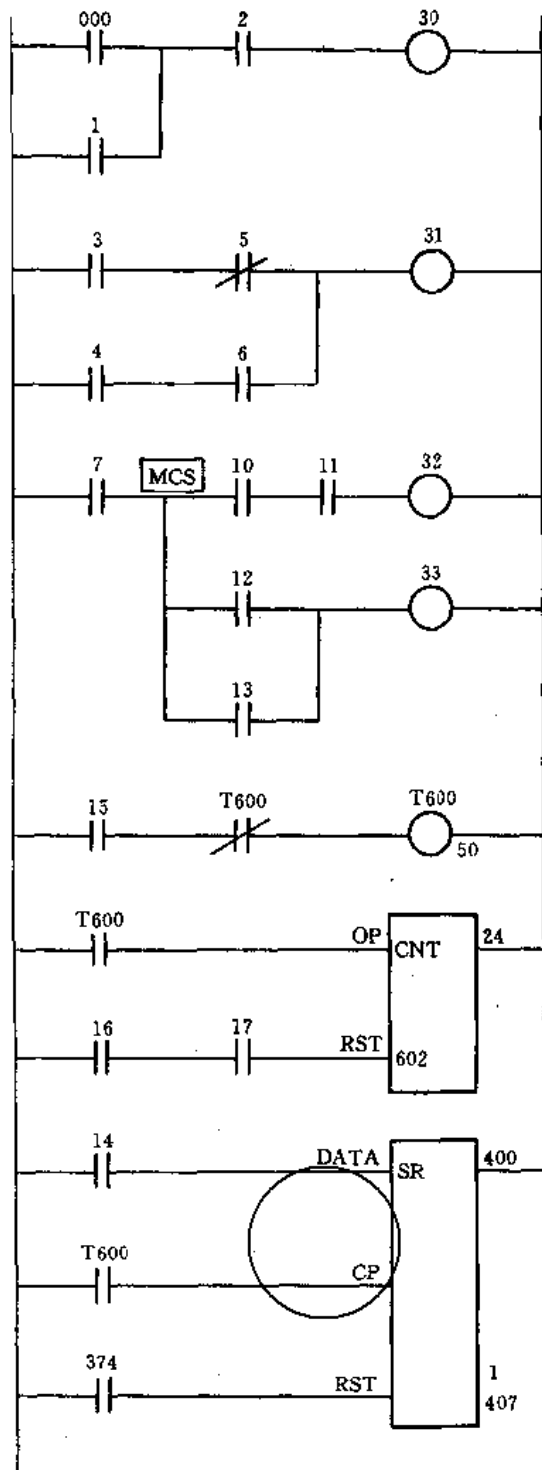
把传统的继电器触点展开图技术引入 PC 中, PC 在内部以编程技术充分发挥微型计算机程序存储技术优势。在外部, 对使用者仍沿用传统继电器触点展开图——梯形图来描述控制过程, 梯形图编程对用户来说, 易学易懂, 使用方便, 小型 PC 机梯形图基本指令见表 7-3-7。

图 7-3-19 为位处理梯形图及程序例举。

表 7-3-7 梯形图基本指令表

| 类别 | 命令符 | 梯形图符 | 操作键 | 功能说明 |
|--------|-----------------|------------------|---------------------------|---------------|
| 开关量位处理 | STR | | STR ××× | 开始读入常开触点 |
| | STR NO | | STR NOT ××× | 开始读入常闭触点 |
| | AND | | AND ××× | 串接常开触点 |
| | AND NOT | | AND NOT ××× | 串接常闭触点 |
| | OR | | OR ××× | 并接常开触点 |
| | OR NOT | | OR NOT ××× | 并接常闭触点 |
| | AND STR | | AND STR | 和前面结果与运算 |
| | OR STR | | OR STR | 和前面结果或运算 |
| | MCS | MCS | MCS | 前面结果构成主控母线 |
| | MCR | MCR | MCR | 结束主控母线 |
| | OUT | | OUT ××× | 输出 |
| | TMR | | TIM ××× ×××× | 计时器 |
| | CNT | | CNT ××× ×××× | 计数器 |
| 数字量处理 | D·STR | - [D·STR××××] -1 | | 从某单元读入数据 |
| | D·AND | - [D·AND××××] -1 | | 同某单元数据做与运算 |
| | D·OR | - [D·OR××××] -1 | | 同某单元数据做或运算 |
| | D·OUT | - [D·OUT××××] -1 | | 向某单元输出数据 |
| | + | - [+××××] -1 | | 与其单元数据相加 |
| | - | - [-××××] -1 | | 与某单元数据相减 |
| | × | - [×××××] -1 | | 与某单元数据相乘 |
| | ÷ | - [÷××××] -1 | | 与某单元数据相除 |
| | BIN | - [BIN ××××] -1 | | 将累加器中结果变成二进制数 |
| BCD | - [BCD ××××] -1 | | 将累加器中结果变成十进制数 | |





| | | |
|-------------|-----|---------|
| STR | 0 | |
| OR | 1 | |
| AND | 2 | |
| OUT | 30 | |
| STR | 3 | |
| AND NOT | 5 | |
| STR | 4 | 压入堆栈 |
| AND | 6 | |
| OR STR | | 堆栈弹出 |
| OUT | 31 | |
| STR | 7 | 主控继电器开始 |
| MCS | | |
| STR NOT | 10 | |
| AND | 11 | |
| OUT | 32 | |
| STR | 12 | |
| OR | 13 | |
| OUT | 33 | |
| MCR | | 主控结束 |
| STR | 15 | |
| AND NOT TMR | 600 | |
| TMR | 600 | |
| STR TMR | 600 | 计算 |
| STR | 16 | 清零 |
| AND | 17 | |
| CNT | 602 | |
| | 24 | |
| STR | 14 | 数据入 |
| STR TMR | 600 | 移位时钟 |
| STR | 374 | 清零 |
| SR | 400 | |
| | 407 | |

图 7-3-19 位处理梯形图及程序列举

(2) 可靠性高。中小容量 PC 的连续无故障运行时间达 2 万 h 以上, 面向设备控制, 当系统故障, 如电源临时中断时, 由备用电池供电, 不打乱用户设备的运行方式, 不丢失必要的运行数据, 并在电源恢复后能从

中断工况开始恢复正常运转。

(3) 环境适应性强。面向工业环境, 抗干扰能力强, 绝缘强度高, 相当于常规有触点控制电器水平。

(4) 通用性强。当现场控制流程发生变化, 控制规



模有增或减,只要增减输入输出组件或更换各个组件,就可适应新的现场要求,并且其程序修改也十分方便。这是常规继电器控制线路无法实现的。

(5) 有完善的运行监控和自诊断功能,可方便地对程序语法的正确性进行自诊断。

4.2 可编程序控制器的应用

可编程序控制器有高、中、低三档,输入输出 60

点以下的系统,如机械手、电镀线、翻砂线等,可根据工艺流程选择低档机。输入输出 60~120 点的系统,如机床群控、小型轧钢生产线等可选择中档机。输入输出 120 点以上复杂的成套设备,如火电站输煤、水处理等的综合控制系统,宜选择高档机。

现以 650 轧机轧线控制为例加以简要说明。650 轧机由三个机架组成,见图 7-3-20。

(1) 系统主要用于从 1 号机架后 22M 开始,至 3

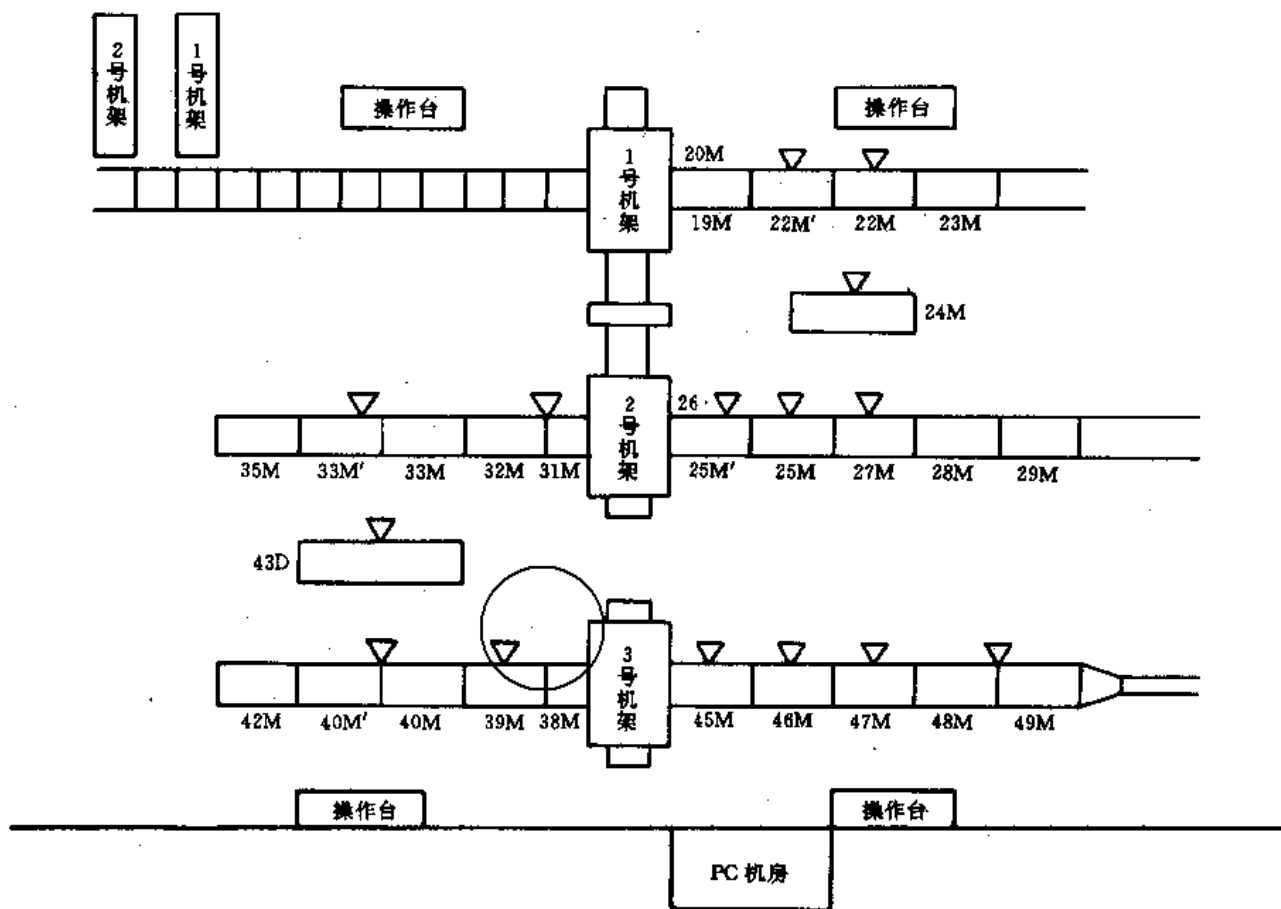


图 7-3-20 650 轧机轧线图

号机架后 47M 为止轧线部分的自动控制。其控制原理为:由探头检测出轧线上钢坯位置,并将此信号送至 PC,PC 对所有输入信号(包括探头信号、轧制钢种信号、手动/自动切换信号、复位信号等)按程序进行逻辑分析处理后,输出控制信号,控制辊道、拉钢机、升降台进行轧钢。

本系统在轧线上共设置 15 处探头(图 7-3-20 中有“▽”符号处),总共控制 15 台交流电动机。

(2) 系统具有如下功能:

1) 在生产正常情况下,对 60、75、90 方坯,板坯,管坯等钢种按工艺流程要求进行自动控制轧钢。

2) 能在线显示计时、计数器运行中的变化和显示输入信号、输出信号及内部线圈运行过程中的通/断变化。

3) 能在线修改各类计时、计数器的设定值。

4) 对终轧根数进行计数。

5) 具有钢坯位置、辊道运行方向、拉钢机往返、升降台升降及轧线故障部分指示功能。

6) 具有声光报警功能。

冶金工业出版社



- 7) 具有手动/自动控制切换、报警切除功能。
- 8) 具有实时显示生产流程功能。
- 9) 具有停电保护功能。

(3) 系统硬件：系统结构见图 7-3-21，主要由可编程程序控制器 (PC)、输入和输出模块、探头、模拟板、声光报警器等组成。

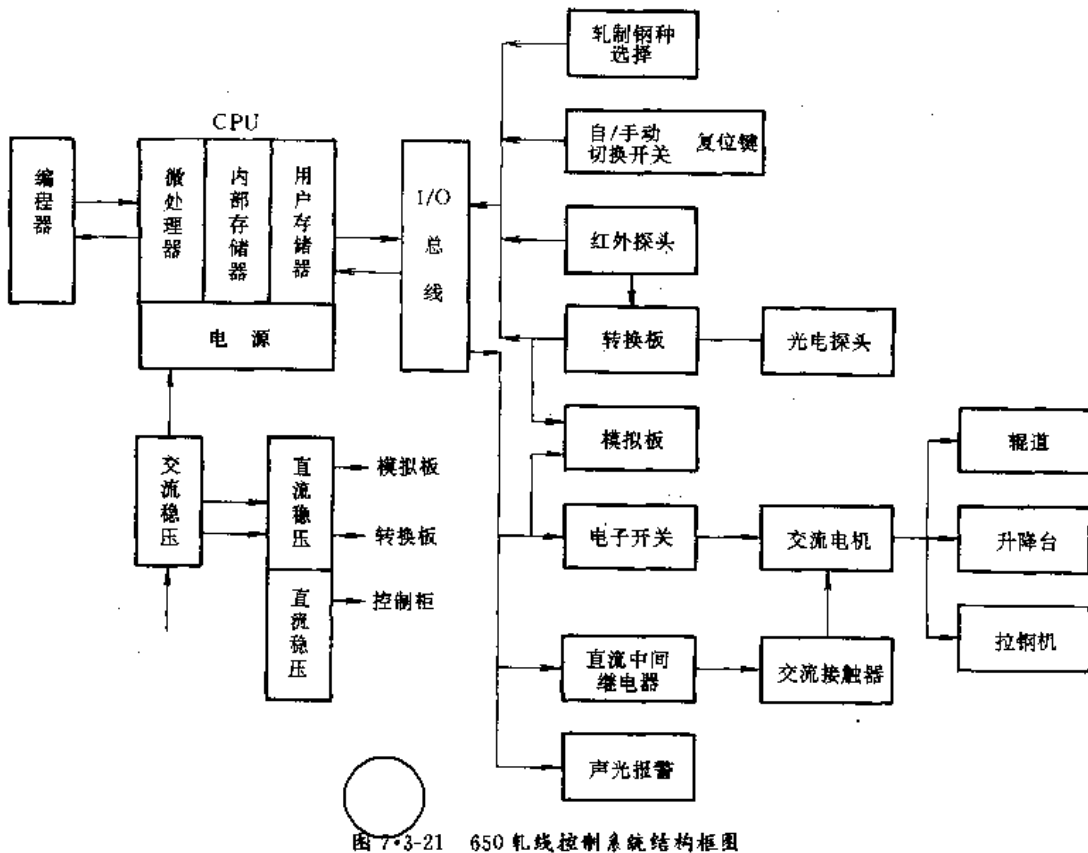


图 7-3-21 650 轧线控制系统结构框图

表 7-3-8 650 轧线控制系统应用软件

| | | |
|--------------------|------|------------------------------------|
| 650 轧机轧线控制系统应用软件任务 | 自动控制 | 钢坯位置信息采集 |
| | | 22M、33M 辊道定位停钢控制 |
| | | 24M、43M 拉钢机拉钢控制 |
| | | 25M、27M、31M、32M、40M、39M、38M 辊道运行控制 |
| | | 26M 升降台升降控制 |
| | | 2号机架道次自动更新 |
| | | 45M、46M、47M、48M、49M 辊道自动排钢控制 |
| | 人机对话 | 故障处理 |
| | | 轧制钢种变换处理 |
| | | 各轧区手动/自动切换处理 |
| | | 计时/计数器常数设定 |
| | | 终轧钢坯计数 |
| | | 信号灯音响器报警输出处理 |
| | | 故障恢复处理 |

(4) 系统软件：程序主要根据 650 轧线生产工艺要求，并考虑了轧钢现场复杂情况来编制。本程序采用继电器逻辑梯形图编写，所完成的任务有 14 项，见表 7-3-8。

4.3 可编程序控制器选型简介

PC 的发展及应用还在不断扩大，品种规格繁多，下面对几种应用较普遍的机型作简要介绍：

1. 西门子公司 PC 在中小型 PC 中优选机型有 S5-115U 和 S5-100U。在大型 PC 中有 S5-135U 和 S5-150U。该系列 PC 机适合于逻辑控制、PID 控制和计算、协调和通信、操作员控制和监视、信号传输及列表任务等。S5-135U 是一个多处理器的 PC，有三个处理器：S 处理器，用于闭环或逻辑控制、监视和信号传输任务；R 处理器，用于算术功能、闭环和 PID 控制、监视和信号传输；M 通信处理器，用于操作员过程通信监视和其他系统通信。PC 工作时，每个处理器均独立地执行它自己的程序。S5-150H 是容错 PC，可以同时控制两台 S5-150U 的 CPU，两台 CPU 轮流操作，一



台 CPU 执行控制时,另一台 CPU 作热备用。容错 PC 用于要求平均无故障时间长的控制系统中。

2. 哥德公司 PC 优选机型有 984 系列产品,可取代 484、584 和 884 机型。984PC 机适用于中大型过程控制,为过程控制领域提供高速开关量控制和先进的指令系统,机柜设计使 984PC 能在高温、振动和充满电噪声和严酷工业环境中工作。先进的自诊断和完善的校验系统,可保证良好的操作、简化故障检测过程。规整的模块化结构,使 984PC 便于安装、容易维护。984PC 的软件易于兼容和扩展,应用软件也是可以移植的。如果与 IBM 编程软件配合使用,还可以建立应用软件的磁盘操作系统库,组合成新的系统。

为了增强 984PC 功能,哥德公司还备有一些可选模块,这些模块可以直接插入 984PC 的底板。

P190 编程器是一种便携式带 CRT 和键盘的装置,可用于对所有哥德 PC 产品编程,CRT 为 9in (≈23cm) 琥珀色屏幕,用以显示梯形图和寄存器表等。

3. GE Fanuc 公司 PC 优选机型有增强型 6 系列、5 系列和增强型 1 系列。

大型 PC 有 6 系列,按 CPU 控制规模来划分有 6-60 型、6-600 型、6-6000 型及 6-PLUS (增强型) 4 种。

一台 6 系列 PC 机由 CPU 机箱和若干台 I/O 机

箱组成。CPU 机箱和 I/O 机箱可根据现场接线及设备配置情况,组成若干个站,如对 CPU I/O 站,机箱间电缆长度不能超过 15m;对本地 I/O 站,机箱间电缆长度不能超过 150m;对远程 I/O 站,机箱间电缆长度不能超过 3km。

中小型 PC 主要有 1、3、5 系列。由于销售渠道不同,对每种机型又有英文型号和日文型号之别。如 3 系列的日文型号为 SR-400、SA-400B;5 系列的日文型号为 SG-8。5 系列属于中高档 PC,该机运算速度快,有灵活的高级指令,除用梯形图语言编程外,还可用顺序功能图 (SFC) 语言编程。

增强型 1 系列指令系统同 3 系列,在小型 PC 中为优选机型。

4. 立石 (OMRON) 公司 PC 它有 SYSMAC-C 系列 PC,从小型到大型 PC,其设计思想是一贯的,都具有通信功能,指令系统兼容,不仅有顺序控制功能,还具有计算机功能,并配置有位置控制模块、高速计数器模块、远程 I/O 模块和上位链接等智能模块。C 系列有 C20、C120、C500、C200H、C1000H、C2000H 等规格。C2000H PC,或者是单 CPU,或者是双 CPU,采用双 CPU 系统时,可提高 PC 系统的可靠性。

第 4 章 直流电动机调速系统

1 他励直流电动机调速系统

直流电动机的转速

$$n = \frac{U - IR}{K_e \Phi} \quad (7-4-1)$$

式中 U ——电枢电压 (V);

I ——电枢电流 (A);

R ——电枢电阻 (Ω);

Φ ——磁通 (Wb);

K_e ——结构系数。

由式 (7-4-1) 可知,直流电动机调速方法有三种:改变电枢回路串联的电阻;改变电动机的磁通;改变电枢电压。其调速特性见表 7-4-1。

由表 7-4-1 可见,改变电枢电压的调速方式,调速范围为 10:1 左右,由于电动机电阻压降和电枢反应等影响,限制了调速范围的继续增加。欲进一步扩大调

速范围,可以采用反馈控制、系统中加入中间放大器、提高放大系数,这样调速范围可增至 200:1 左右。作为系统被控制的反馈量,既可用电枢电压,也可用测速发电机电压。采用有 IR 补偿的电压反馈时,调速范围为 50:1,控制精度约为额定转速的 $\pm 2\%$ 。用转速反馈控制,控制精度约为额定转速的 $\pm 0.5\%$,采取一定措施后,精度还能提高。但对测速发电机必须有特殊要求,这在元件选择、设备安装和系统设计时都须十分注意。

1-1 晶闸管变流器的选用

晶闸管变流器电路有多种,其特点列于表 7-4-2。变流器的空载电压,考虑到电源波动的影响,通常取电动机额定电压的 1.2~1.3 倍。变流器的额定电流要求考虑电动机的过载能力和持续时间。

晶闸管变流器给直流电动机供电时,由于变流器



输出电压的脉动,整流电流中含有脉动分量,轻载时甚至产生电流断续,在电动机中引起附加损耗,使电动机温升提高,火花增大,换向困难。在晶闸管变流器供电

的直传动中,电枢供电回路通常接有滤波电抗器,以限制电流脉动率。

电流连续时直流电压和延迟角有如下关系:

表 7-4-1 直流电动机调速特性

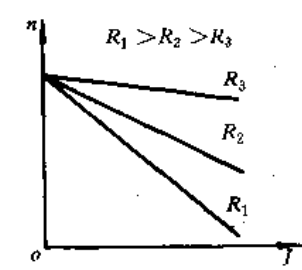
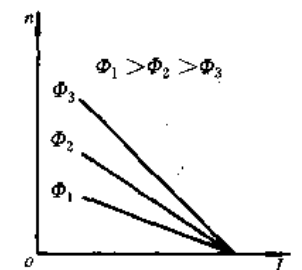
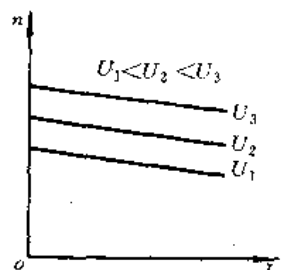
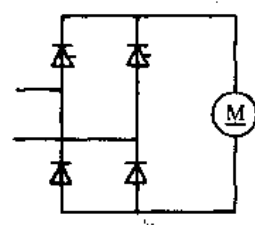
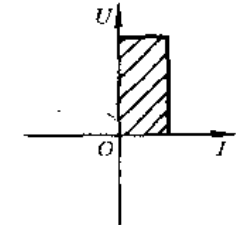
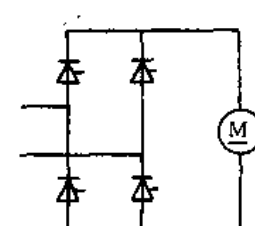
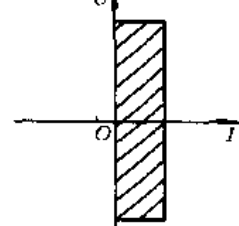
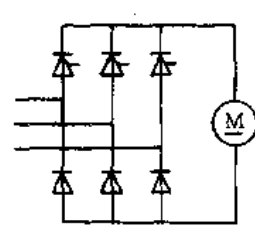
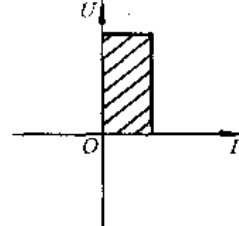
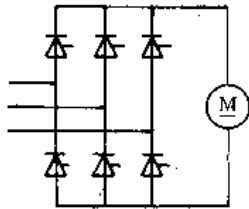
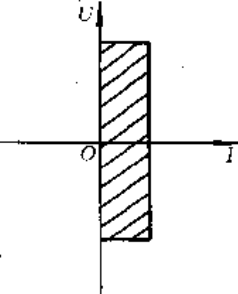
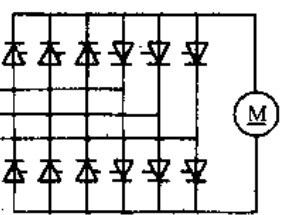
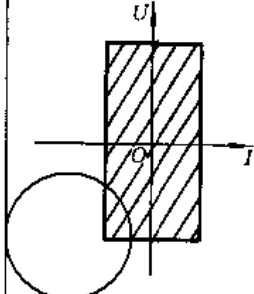
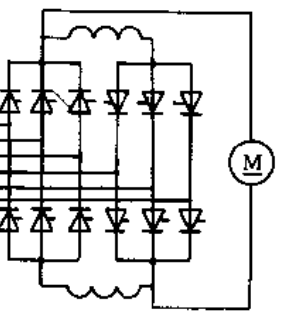
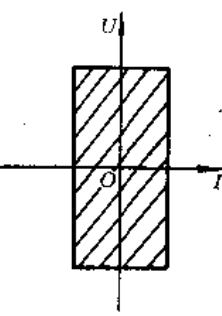
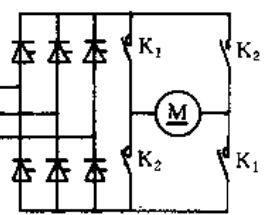
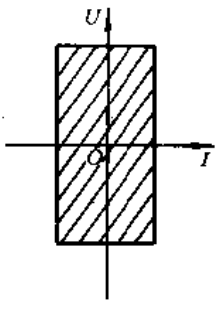
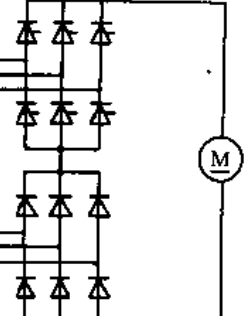
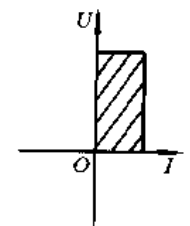
| 调速方法 | 改变电枢回路串联的电阻 | 改变电动机磁通 | 改变电枢电压 |
|------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| 机械特性 |  |  |  |
| 调速范围 | 2:1 | 3~4:1 | 10:1 或更大 |
| 平滑性 | 有级调速 | 可得无级调速 | 可得无级调速 |
| 经济性 | 能耗大 | 电动机尺寸大, 价格高 | 设备投资大 |
| 负载特性 | 恒转矩调速 | 恒功率调速 | 恒转矩调速 |
| 适用范围 | 1. 短时低速运转的场合 2. 重复短时运转的场合 | 卷取机 切纸机 调磁调压复合调节, 用于轧机或机床的调速系统 | 广泛用于恒转矩调速的场合 |

表 7-4-2 晶闸管变流器电路及特点

| 种类 | 联结方式 | 工作范围 | 特点 | 用途 |
|-------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|--------------------------|
| 单相半控桥 |  |  | 一般用于 3.7kW 以下容量直流电动机控制, 调速范围 10:1 以下, 不能逆变 | 机床、泵、鼓风机、印刷机等 |
| 单相全控桥 |  |  | 用于 3.7~5.5kW 小容量直流电动机控制, 调速范围 10:1 以下, 可以逆变 | 机床、纺织机、挤压机等 |
| 三相半控桥 |  |  | 3.7~150kW 小容量直流电动机控制, 调速范围 10:1, 不能逆变 | 机床、印刷机、挤压机、中小容量单独传动的生产机械 |



(续)

| 种类 | 联结方式 | 工作范围 | 特点 | 用途 |
|----------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|-----------------------|
| 三相全控桥 |  |  | 3.7kW 到几千千瓦, 大容量时每个桥臂可用数个晶闸管并联 | 机床、轧钢机、造纸机、挤压机等 |
| 三相桥反并联 |  |  | 用于电动机可逆运行场合, 切换线路用逻辑无环流控制, 确保任何时候只有一套变流器工作, 切换有死时 | 轧钢机、造纸机、机床、各种试验机等 |
| 三相交叉联接 |  |  | 需两组阀侧绕组, 用于有环流可逆线路, 主回路要设电抗器限制环流, 正反向切换无死区 | 轧钢机、机床、造纸机及各种试验机等 |
| 主回路接触器切换 |  |  | 开关切换用逻辑线路控制, 切换有死时, 为改善控制性能, 要求有快速动作接触器 | 金属切削机床以及各种试验机等 |
| 不可控整流桥与可控整流桥串联 |  |  | 不可控整流桥电压与可控整流桥电压叠加, 使电压由零到最大平滑控制, 这种线路可以改善功率因数 | 金属切削机床、造纸机、纺织机、塑料压延机等 |



$$U_{da} = U_0 \cos \alpha \quad (7-4-2)$$

式中 U_{da} ——延迟角为 α 时的整流电压 (V);

U_0 ——延迟角为零时的整流电压 (V);

α ——延迟角。

$\alpha < 90^\circ$ 时为整流状态, $\alpha > 90^\circ$ 时为逆变状态。 $\alpha > 90^\circ$ 时的延迟角通常用超前角 β 表示, α 和 β 的关系为

$$\alpha + \beta = 180^\circ \quad (7-4-3)$$

整流器的相位控制角理论上可为 $0^\circ \sim 180^\circ$, 为使逆变时晶闸管正常换相, 必须保持一最小超前角 β_{min} , 其大小通常取 $25^\circ \sim 30^\circ$ 。考虑这一因素, 选择变流器侧电压时要留有裕量。

1.2 晶闸管变流器励磁的调速系统

晶闸管变流器励磁的发电机电动机调速系统线路简单, 调速性能好, 工作可靠, 调整方便。

采用晶闸管变流器励磁时, 必须考虑工艺对电气传动系统的要求, 如励磁电流是否需要反向, 在零电压附近是否经常工作。根据这些要求, 选用不同的整流电路。

对于励磁电压强迫倍数要求不高的小容量励磁装置, 可选用单相全波整流电路。对系统需要励磁电压强迫倍数要求较高的场合, 可选用三相桥式整流电路。上述电路在过渡过程中电压可以有两个方向, 但电流不能反向, 故只能用于发电机电压不反向的场合。

当电动机需要快速可逆运转时, 发电机励磁电路须采用两套晶闸管变流器组成的可逆线路, 在零励磁电流下还需要稳定工作时, 通常采用有环流交叉联结的可逆线路比较合适。

为使励磁电流按一定的速率上升, 必须施加强励电压, 加快系统的过渡过程。设计变流器线路时, 需要

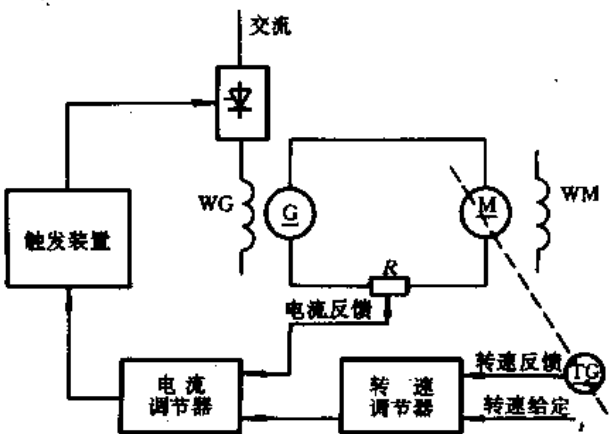


图 7-4-1 晶闸管励磁调节系统

考虑强迫所需的电压储备。

晶闸管变流器励磁的调速系统见图 7-4-1。它是以电流为引导的转速反馈控制系统, 改变转速调节器的限幅值, 可以限制电枢回路的电流。电流调节器和转速调节器都采用比例积分调节, 改变调节器参数, 能获得良好的过渡过程。

1.3 晶闸管变流器供电的不可逆调速系统

采用转速反馈控制的系统见图 7-4-2。控制系统由电流内环和转速外环组成。这种双闭环系统具有精度高、响应快、易于稳定等特点, 在晶闸管变流器供电的调速系统中是常用的。转速环用于电动机转速控制, 其输出为电流环给定, 对转速调节器进行限幅控制, 即可改变电流的最大值。

要求平滑加速的, 在系统的主令信号中可设置给定积分器。当给定积分器输入端加上阶跃信号时, 其输出信号总是按整定的斜率上升。

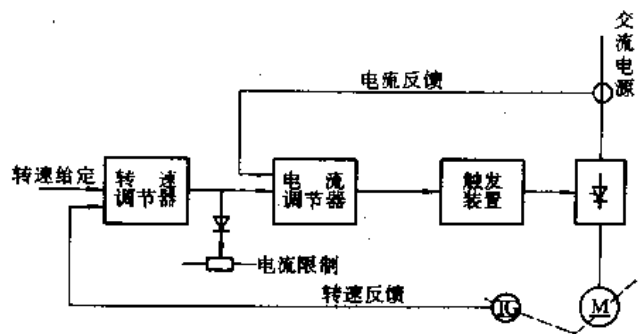


图 7-4-2 不可逆调速系统

晶闸管传动系统, 设置常用的过电流保护、过电压保护、失磁保护等, 还可用门极封锁实现过电流保护。这时要判断系统是工作在整流状态还是逆变状态。如在整流工作状态, 可直接封锁门极; 如在逆变工作状态, 则先把脉冲移向最大逆变, 经过延时后, 再封锁门极。

在某些调速系统中, 电流环内又增设了电流变化率环或采用电流自适应调节器, 用以补偿变流器在电流断续时特性的非线性。

对于轧钢机的主传动系统, 可采用图 7-4-3 带电流变化率控制的电流调节器, 限制 di/dt , 改善变流器在电流断续时的非线性, 改善电动机换向条件, 逆变时可防止晶闸管换相失败, 改善系统在电流断续时的动态特性。

对转速精度没有太高要求时, 可以采用电压反馈代替转速反馈, 见图 7-4-4。



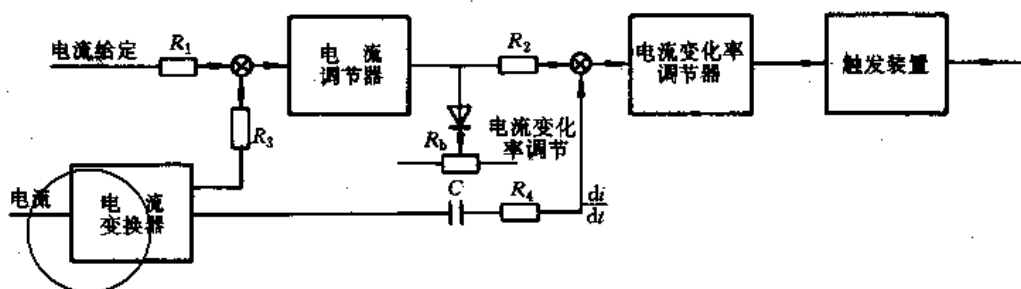


图 7-4-3 带电流变化率控制的电流调节器

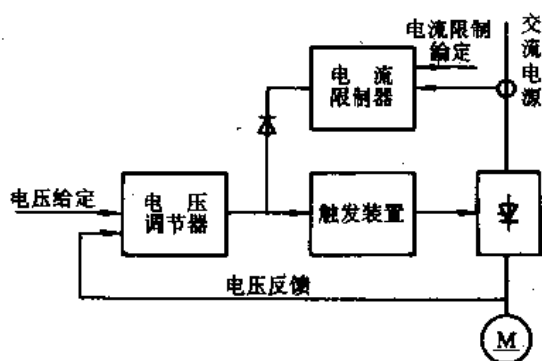


图 7-4-4 带电流限制的电压控制系统

对于卷取机,在生产过程中要求保持张力恒定,通常采用电流控制,见图 7-4-5。系统中设有电流调节器、转速调节器和电流综合放大器。正常工作时,电动机在电流反馈控制下具有软特性(即负载增加时转速降落很大),改变电流综合放大器的给定,可以改变电动机的电流值。在特殊状态下,例如卷取机断带,负载电流突然下降,电动机将不断加速,于是由电流控制转换成转速控制,以防止转速继续上升。

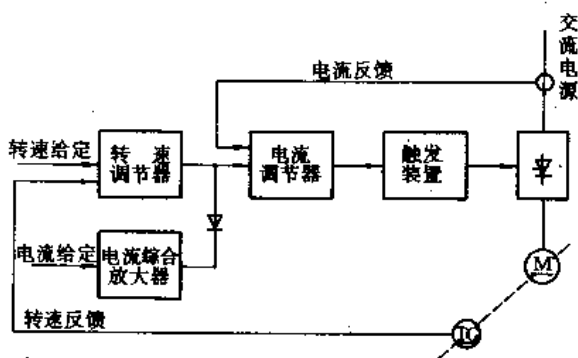


图 7-4-5 带转速限制的电流控制系统

某些生产机械在低速时需要大转矩工作,高速时允许转矩相应降低,通常采用先升压后弱磁升速的控制系统。其控制原理和控制特性分别见图 7-4-6 和图 7-4-7。

在电动机励磁调节回路中设有一个或门,分别控制励磁电流反馈和电动势反馈,两个值中选择其中较大的一个值起作用,系统参数的选择使电动机在基速以下,励磁电流反馈起作用,保持励磁电流恒定。当转速达到 0.95 额定电动势后,电动势反馈投入工作,系统自动地由励磁电流反馈转入电动势反馈,转速增加,磁通减小,电动势不变,直到电动机转速和要求的给定转速相等为止。

对于多台电动机需要转速协调运行的场合,可以

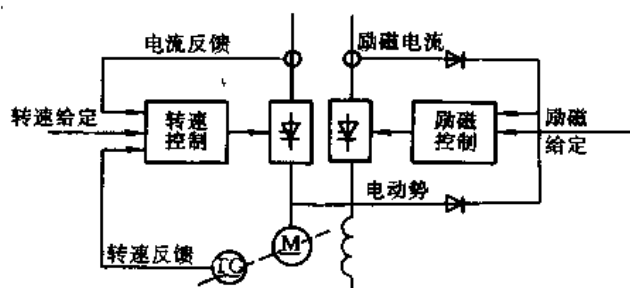


图 7-4-6 先升压后弱磁的控制系统

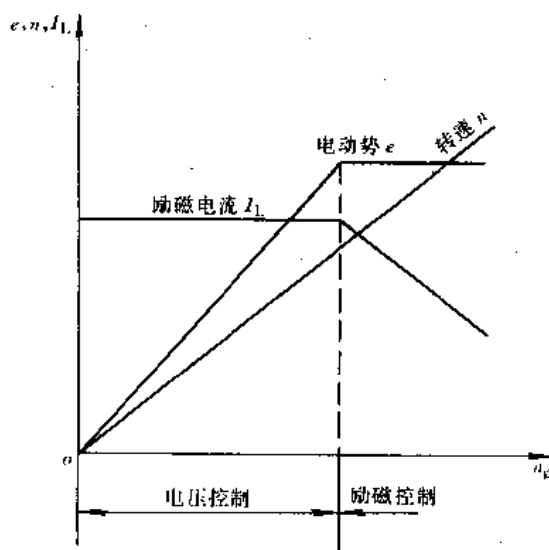


图 7-4-7 先升压后弱磁系统的特性



采用图 7-4-8 和图 7-4-9 所示的控制方式。

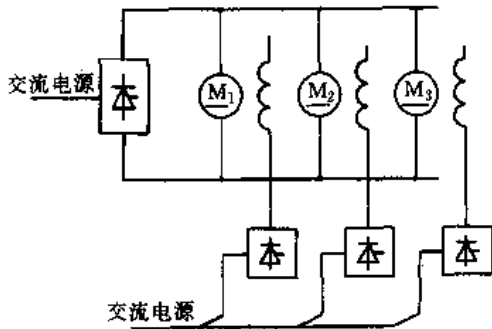


图 7-4-8 励磁控制的多台电动机转速协调运行

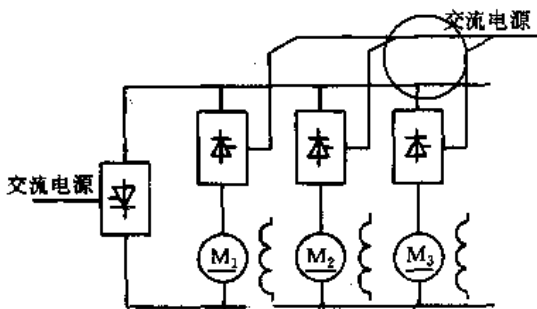


图 7-4-9 带升压机的多台电动机转速协调运行

电动机间精确的转速协调可分别调整各电动机的励磁。

图 7-4-9 是带升压机的转速协调系统。主变流器的作用与图 7-4-8 的相同，各电动机间精确的转速协调调整与该电动机串联的升压机的电压来实现。

1.4 晶闸管变流器供电的可逆调速系统

晶闸管变流器供电的可逆直流传动常用的方式有：交叉联结方式、反并联联结方式、电枢切换方式、励磁切换方式。

1.4.1 交叉联结方式

控制系统见图 7-4-10。整流变压器有两套阀侧绕组，分别给正向组和反向组晶闸管变流器供电。正向组和反向组晶闸管同时加上触发脉冲，使一组工作在整流状态，另一组工作在逆变状态。由于两组变流器工作时瞬时电压不相等，就产生不经过负载而经正、反向组晶闸管流动的环流。为此，必须设置均衡电抗器，以限制环流。

有环流系统的优点是正反向转换时平滑，无死区，可以避免晶闸管变流器在电流断续情况下工作。

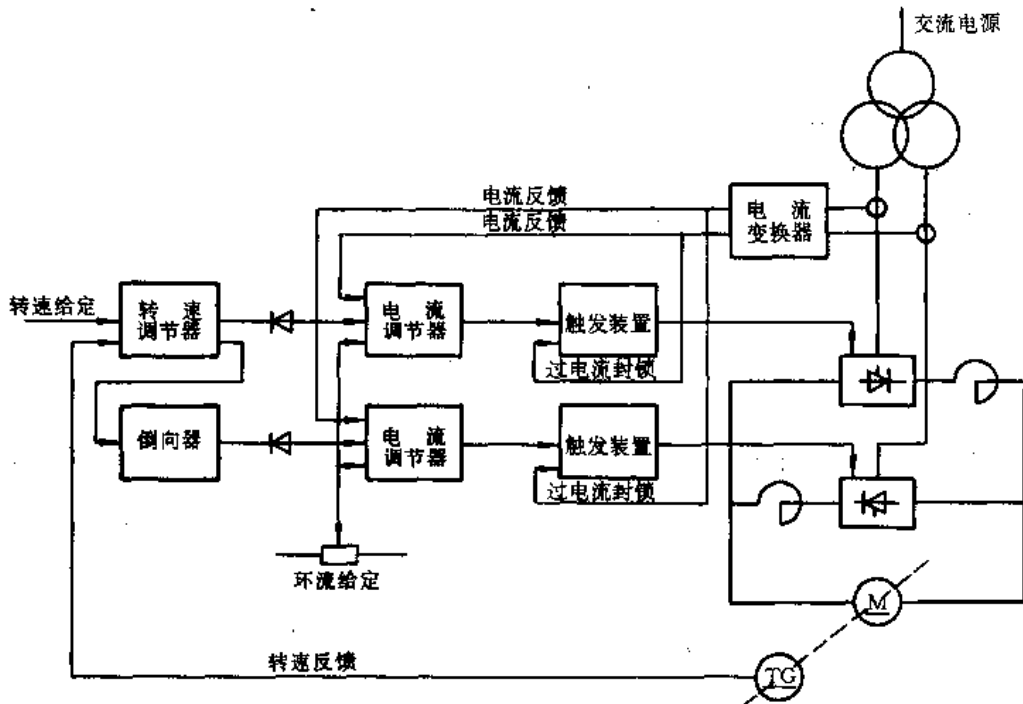


图 7-4-10 有环流系统

1.4.2 反并联联结方式

控制系统见图 7-4-11。整流变压器只需一套阀侧

绕组，正反向组晶闸管可直接反并联，简化了主电路接线。当需要流过正向电流时，向正向组晶闸管供触发脉冲，投入工作，反向组晶闸管触发脉冲被封锁。当需要



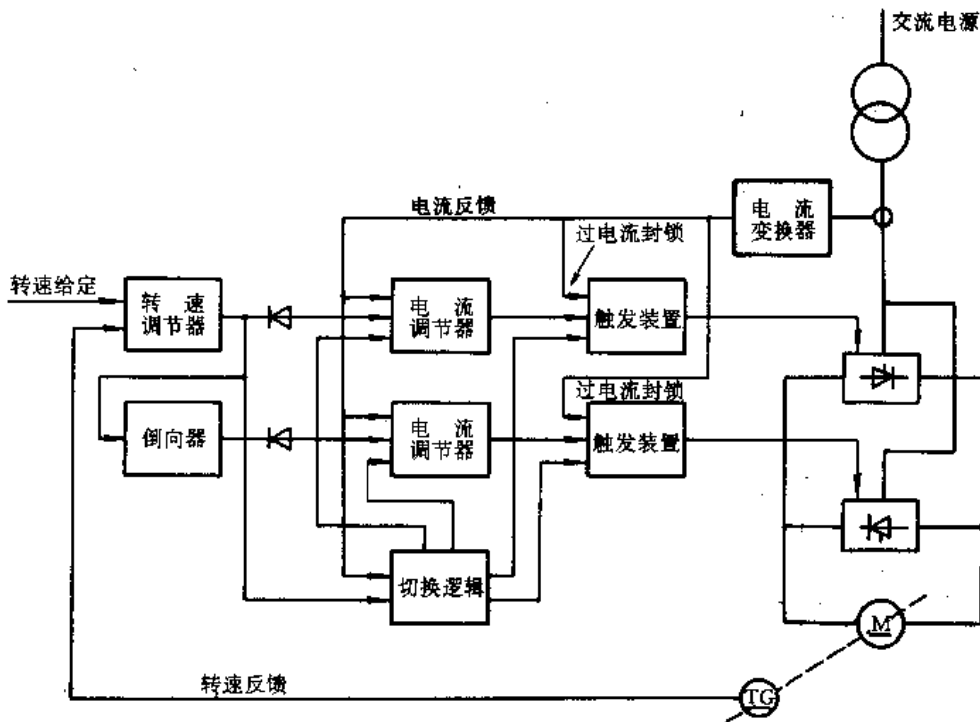


图 7-4-11 反并联逻辑无环流系统

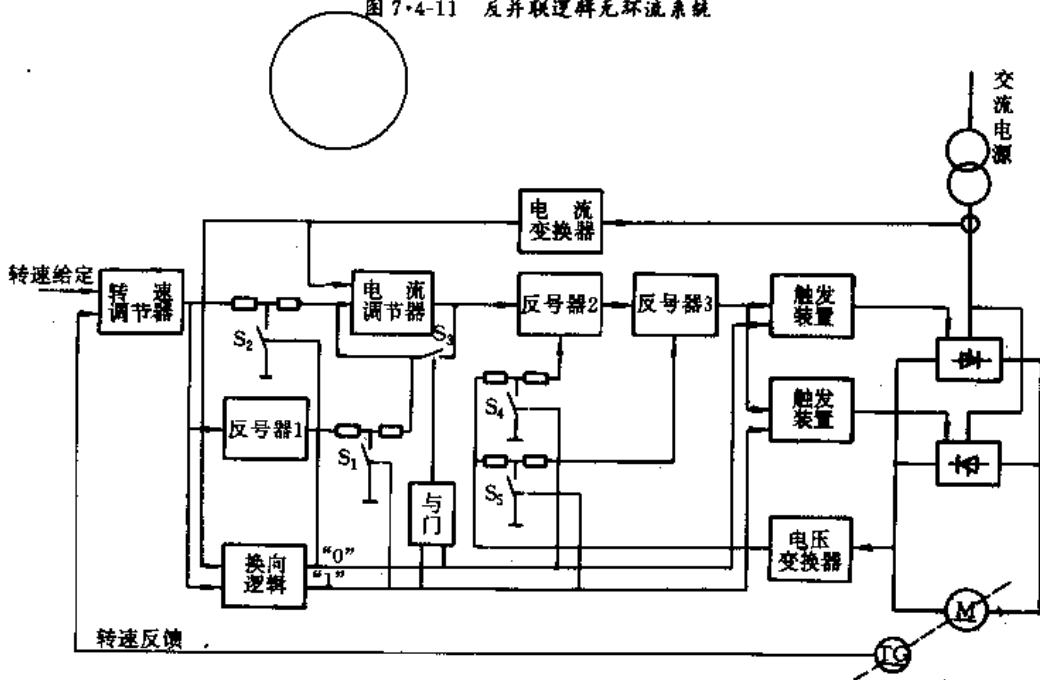


图 7-4-12 有准备切换逻辑无环流系统原理框图

流过反向电流时，给反向组晶闸管供触发脉冲，正向组晶闸管触发脉冲被封锁。任何时刻，总是只有一组整流器工作，因此可以省去笨重的环流电抗器。为了可靠切换，正反向电流切换必须有一死区，对于三相桥式线路约为 5~20ms。

反并联接线的无环流控制系统，根据正反向切换

的工作原理可分为逻辑无环流和错位无环流。

逻辑无环流系统中，控制电路设有转速误差极性检测和主电路零电流检测环节。当转速误差反向（相当于要求转矩或电流反向），必须待主电路电流确实断续后，才能封锁原来导通组晶闸管的触发脉冲，经过数毫秒延时后，再给出待导通组晶闸管的触发脉冲，如果在



导通的晶闸管尚未关断时就使待导通组晶闸管投入工作，交流电源会通过两组晶闸管而短路，使切换失败，造成严重后果。

为了防止切换时造成过大的电流冲击，减少切换死区，可以采用有准备切换的措施，控制待导通组晶闸管导通时的输出电压和电动机反电动势相等。图7-4-12是有准备切换逻辑无环流系统的原理框图。

错位选触无环流控制系统见图7-4-13。这种系统利用了错位原理，起始延迟角 α_0 不设在 90° ，而设在 $\alpha_{10} = \alpha_{20} > 90^\circ$ ，根据不同的选择触发电路，起始延迟角可选在 $120^\circ \sim 180^\circ$ 。这种电路省掉了逻辑无环流那一套复杂的逻辑关系，它既不要检测电流的有无和断续，也不需要采用电流自适应等环节，具有结构简单、调整容易等特点。其输出特性见图7-4-14。

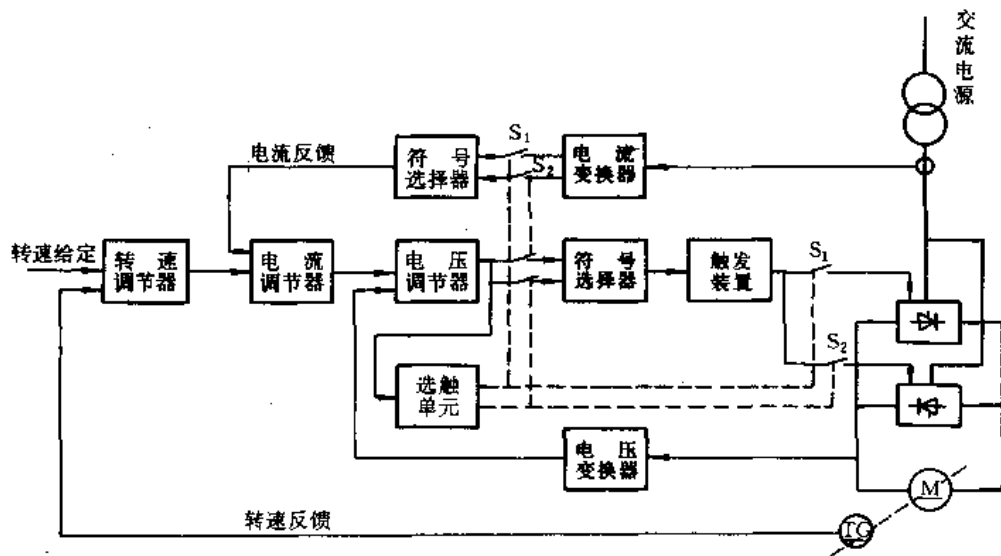


图 7-4-13 错位选触无环流系统 ($\alpha_{10} = \alpha_{20} = 180^\circ$)

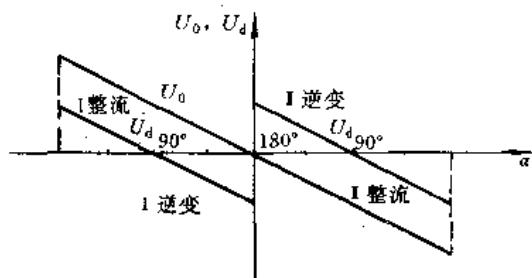


图 7-4-14 变流器组工作特性

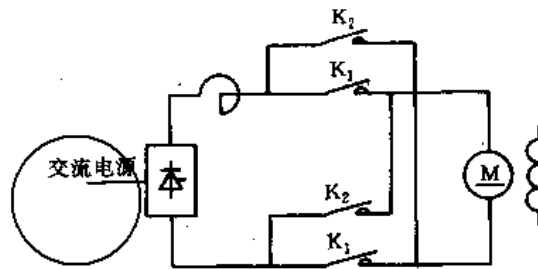


图 7-4-15 电枢切换方式

1-4-3 电枢切换方式

控制系统见图7-4-15。用一套变流器，加上电枢回路切换开关实现四象限可逆工作。为了改进切换性能，必须选用快速动作的接触器。接触器的切换逻辑和反并联联结相同，也需要设置转矩极性检测和主电路零电流检测环节，确保所要求的转矩极性已经改变，主电路电流已降到零以后才允许切换，响应时间约为0.2s。通常用于100kW以下，正反向切换不频繁的场所，如起重机等。

1-4-4 励磁切换方式

励磁切换方式见图7-4-16。电枢回路由一组变流器供电，磁场由两组晶闸管变流器供电，可逆运行由改变电动机的磁场来实现。由于电动机励磁绕组时间常数很大，为了很快地产生制动转矩，使电动机降速或反转，电动机励磁往往需要加很高的强迫电压，通常取额定励磁电压的4倍左右。

这类系统的响应时间约为0.5s，适用于正反向不频繁，容量为几百千瓦到几千千瓦直流电动机传动，如



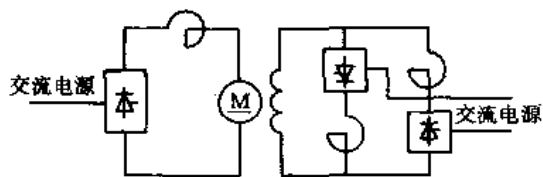


图 7-4-16 励磁切换方式

矿井提升机等。

2 串励直流电动机调速系统

2.1 特点

串励直流电动机供电方便,无需励磁电源,较其他直流电动机运行更可靠,具有机械特性软、起动转矩大等特点,因此特别适用于传动要求调速精度不高且具有恒功率调速特性负载的生产机械,如电气牵引车辆、绞车等。

串励直流电动机不能实现再生制动,只能在 I、II 象限运行,需要反转或制动时用接触器切换,实现动力制动还要提供另外的励磁电源。

当负载很小时,电动机转速将增至非常高的数值,可能造成电动机损坏。因此,串励电动机不可在较高的电枢电压下空载起动或空载运行。

2.2 电压调节

磁通差不多与电枢电流成正比变化是串励直流电动机的重要特性。串励电动机的转速方程为

$$n = \frac{U - IR_a}{K_e (\Phi_0 - \Delta\Phi)} \quad (7-4-4)$$

式中 Φ_0 ——串励绕组产生的磁通;

$\Delta\Phi$ ——因电枢反应的去磁效应而引起的磁通减小量;

R_a ——电枢及串励绕组的内阻;

K_e ——结构系数。

现在对 n 起主要作用的是 Φ_0 的变化。当负载电流较小时,由于磁路不饱和,认为 $\Delta\Phi=0$ 及 $\Phi_0 \propto I$ 。式(7-4-3)可写成

$$n = \frac{U}{K_e I} \left(1 - \frac{IR_a}{U} \right) \quad (7-4-5)$$

并可得到串励直流电动机的速率特性(图 7-4-17)中的曲线 1,曲线 2 是 $n=U/K_e I$ 的双曲线。

串励直流电动机的电压调节见图 7-4-18,给定不同的电压就可以得到一组串励直流电动机的机械特性,见图 7-4-19。

这种具有软速率特性的装置用于传动牵引车辆等机械。

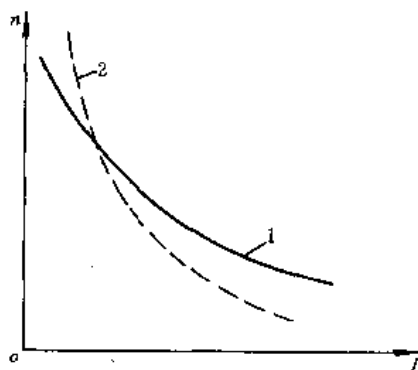


图 7-4-17 串励电动机速率特性

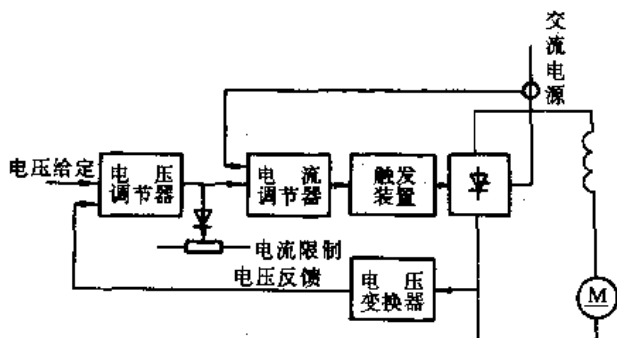


图 7-4-18 串励直流电动机的电压调节

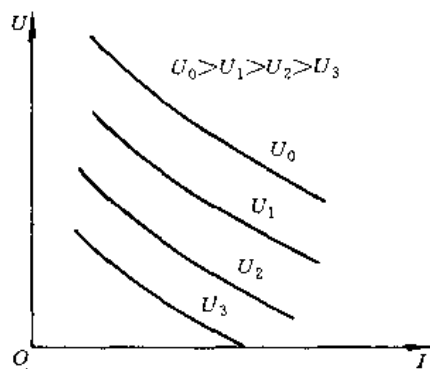


图 7-4-19 串励直流电动机的机械特性

变流器选用可参考 1.1 节。电压调节可以选用带电流限制的电压调节,也可以采用带电流调节环引导的双环电压调节,更有利于保护变流器及电动机过载。

为了防止电动机超速及获得反转、动力制动时的切换条件,需要检测负载电流。一般说来,当电流为额定电流的 2%~5% 时可认为是空载,该电流信号可作为零电流信号,用于封锁变流器输出、实现间接的超速保护及进行工作状态切换。



2.3 转速调节

有些用串励直流电动机传动的生产机械，如钻井泵等，对传动系统的机械特性的硬度有较高要求，可以通过转速调节来实现。其原理见图 7-4-20 所示。

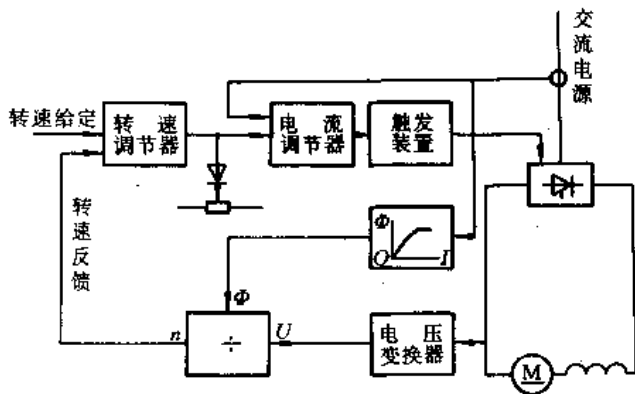


图 7-4-20 串励直流电动机转速调节

3 数字式直流调速系统

3.1 特点

现代电力电子技术和微电子技术的迅速发展，使直流传动控制已从传统的模拟式控制向以微处理机为基础的全数字式控制发展。数字式控制的特点是：

- (1) 转速调节精度高，再现性好 额定转速时精度一般比模拟式高 10 倍以上，低速时更高。
- (2) 可靠性高 系统硬件数量的减少使可靠性提高，平均无故障时间 (MTBF) 提高 2 倍以上。
- (3) 控制功能多。数字式控制具有数据记忆功能，可以存储故障发生前系统各状态的数据，能实现较完

善的自诊断及监视功能，分析故障方便。通过接口可与上位机连接，实现数据通信及更高级的自动化控制。

3.2 结构

目前，数字式直流调速系统大都采用 16 位微处理机，各种控制功能均由软件来实现。系列产品的硬件及软件都是模块化的，且都十分丰富，采用适当的硬件和软件就可以组成需要的系统。

程序设计也开发了模块化语言。只要绘出方块图，显示在编程器上，按照所需接好线即可。

数字式直流调速系统的结构见图 7-4-21。

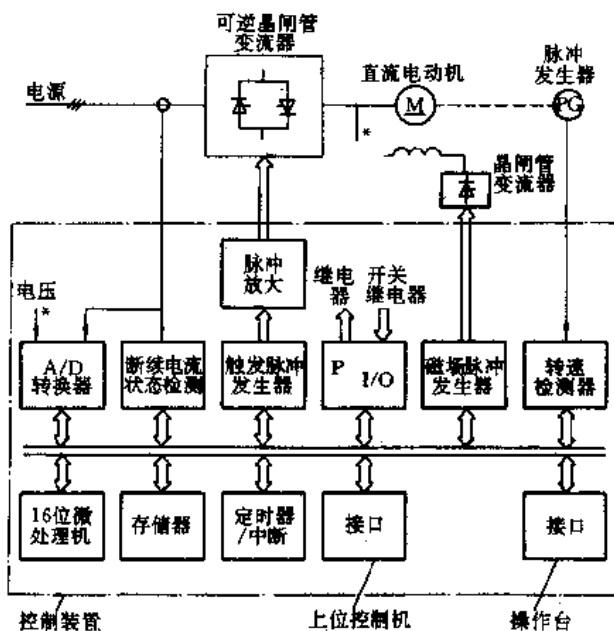


图 7-4-21 数字式调速系统结构图

第 5 章 交流电动机调速系统

1 绕线转子异步电动机串级调速系统

1.1 概述

在绕线转子异步电动机的转子回路中引入与转子电动势频率相同、相位相同或相反的附加电动势 E_2 后，转子电流值将发生变化，从而改变了异步电动机的转矩，达到调速的目的，这种调速称为串级调速。异步电动机转子

电流 I_2 、转矩 T 及转差率 s 关系的表达式为

$$I_2 = \frac{sE_{20}}{\sqrt{r_2^2 + (sX_{20})^2}} \quad (7.5-1)$$

$$s = \frac{n_0 - n}{n_0} = \frac{f_2}{f_1} \quad (7.5-2)$$

$$T = C_T \Phi I_2 \cos \varphi_2 \quad (7.5-3)$$

$$\cos \varphi_2 = \frac{r_2}{\sqrt{r_2^2 + (sX_{20})^2}} \quad (7.5-4)$$

此星公司制作 请尊重作者版权

1-2-1-1-1



- 式中 s ——转差率；
 n_0 ——定子旋转磁场的转速，称为同步转速；
 n ——转子转速；
 f_1 ——定子电流的频率；
 f_2 ——转子电流的频率，称为转差频率；
 E_{20} ——转子不转时转子绕组感应电动势；
 X_{20} ——转子不转时转子绕组漏抗；
 r_2 ——转子绕组直流电阻；
 Φ ——气隙中磁通量；
 $\cos\varphi_2$ ——转子电路的功率因数；
 C_T ——转矩常数。

当附加电动势 E_k 与转子电动势相位相反时，转子电流 I_2 为

$$I_2 = \frac{sE_{20} - E_k}{\sqrt{r_2^2 + (sX_{20})^2}} \quad (7.5-5)$$

改变 E_k 的大小，电动机将在低于同步转速下运行，称为次同步串级调速。 E_k 值愈大，转速愈低。

当附加电动势 E_k 的相位与转子电动势相位相同时，转子电流 I_2 为

$$I_2 = \frac{sE_{20} + E_k}{\sqrt{r_2^2 + (sX_{20})^2}} \quad (7.5-6)$$

由于 E_k 的引入，将使 I_2 和 T 增大，从而使电动机升速，直到 I_2 和 T 与负载相适应。当 E_k 增大到一定值后，电动机转速将超过同步转速，称为超同步串级调速。

根据附加电动势与转子电动势之间的大小和相位关系的不同，串级调速具有四种工作状态。四种运行状态下的功率传递关系见图 7.5-1（图中所示的功率传递关系均忽略了电动机内部的各种损耗）。

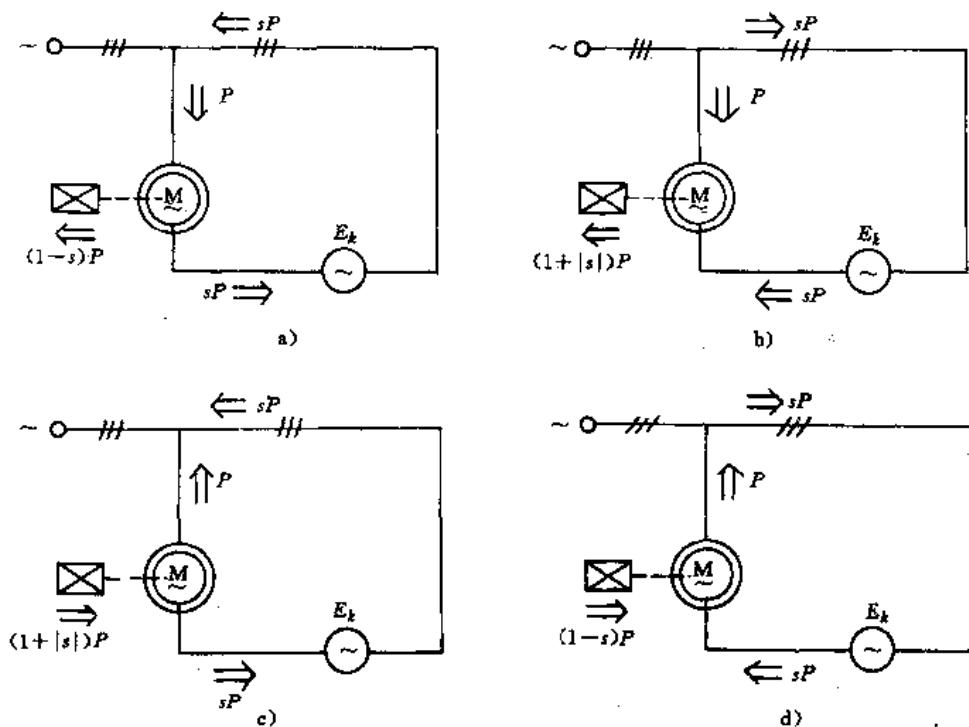


图 7.5-1 四种运行状态下串级调速的功率传递图

- a) 低于同步转速的电动状态 ($1 > s > 0$) b) 高于同步转速的电动状态 ($s < 0$)
 c) 高于同步转速的发电制动状态 ($s < 0$) d) 低于同步转速的发电制动状态 ($1 > s > 0$)

1.2 次同步串级调速

直流附加电动势 E_k 的作用是吸收转子的转差功率 sP ，并把它加以利用或回馈给电网。根据转差功率回馈方式的不同，可分为机械串级调速和电气串级调速两种。

图 7.5-2 为机械串级调速的原理电路。附加电动势由直流电动机产生，改变其励磁电压的大小就可调节直流电动机的电动势大小，从而实现异步电动机的调速。该系统中直流电动机输入功率为转差功率 sP ，若忽略损耗，其轴上输出功率也应为 sP ，异步电动机轴上输出的功率为 $(1-s)P$ 。两台电动机总输出



机械功率为 P ，从而可获得恒功率调速。该方案的缺点是增加了一台直流电动机，使系统的机组庞大，增加了维护工作量，且使噪声增大，目前已较少采用。

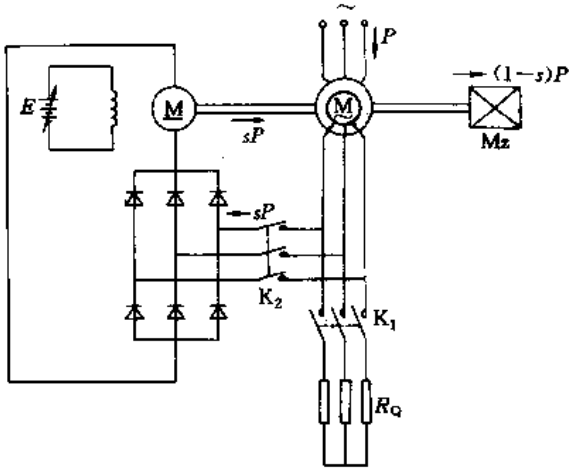


图 7-5-2 异步电动机机械串级调速原理电路

图 7-5-3 为异步电动机采用晶闸管的电气串级调速原理电路。转子电动势经过三相整流桥整流为直流电压 U_d 后，再加入到逆变桥两端。附加电动势 E_{hd} 是将电网三相交流电经反馈变压器由逆变桥变换得到，其极性与 U_d 相顶。改变逆变角 β 的大小（ β 可以在 $90^\circ \sim 30^\circ$ 范围内变化），就可改变附加电动势的大小，电动机转速则可在接近额定转速的高速至最低速范围内变化。逆变器同时将直流电变换成具有交流电网频率的交流电，将转差功率 sP 回馈给电网。

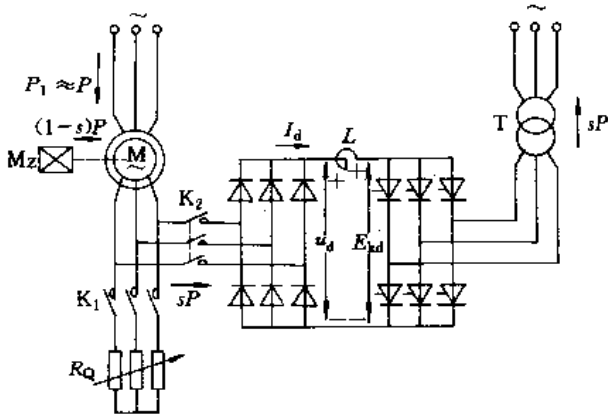


图 7-5-3 异步电动机的晶闸管电气串级调速原理电路

该调速系统的机械特性见图 7-5-4。

次同步电气串级调速系统结构简单，控制方便，且有较高的效率。由于串级调速装置的容量与调速范围有关，调速范围越小，此时串级调速装置需反馈的功率 sP 就越小，对装置容量以及主回路元器件耐压的要求

就越低。在调速精度要求不高的场合，可用开环控制。如欲得到高精度的调速，则需采用带转速负反馈的自动调速系统，它是由转速调节器和电流调节器组成的双闭环调速系统。图 7-5-5 画出了这种系统的框图。

次同步串级调速系统的一个缺点是本身不能产生制动转矩。如欲得到制动转矩，可采用串级调速动力制动的运行方式，即制动时断开定子交流电压，立即在定子中通入直流电流。该系统的另一个缺点是功率因数较低。低速时更为突出。

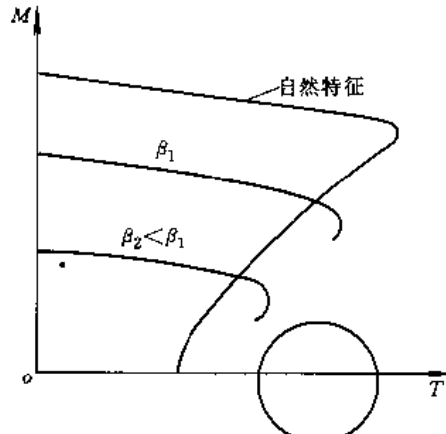


图 7-5-4 晶闸管电气串级调速系统的机械特性

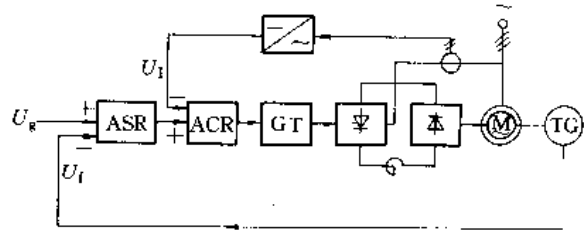


图 7-5-5 晶闸管串级调速闭环控制系统原理框图

ASR—转速调节器 ACR—电流调节器 GT—触发器

晶闸管串级调速系统的控制电路在设计时必须做到，有严格的起动和切换顺序，有正确的停车顺序。主要原则为：当电动机起动时的转速升至设计的最低值时，才允许投入串级调速装置；逆变器应比整流器提前接入电网，且在整流器合闸的情况下不得断开逆变器；停车时保证先断开整流器，后断开逆变器，并保证停机过程中转子无开路状态。

1.3 超同步串级调速

利用异步电动机的双馈原理，串级调速装置可以实现超同步的电动运行和低于同步转速的电气制动。超同步运行时，只要电动机有足够的机械强度，便可产生比额定功率大的输出功率，且其功率因数较次同步



串级调速的高。实现超同步串级调速的方法有两种，一种是将次同步串级调速电路中的不可控整流桥改为全控整流桥；另一种方法是在转子绕组回路中接入三相交-交变频器，当电动机运行在同步转速以下时，变频器将电动机转差能量回馈给电网，当电动机运行在同步转速以上时，变频器向电动机转子供电。

2 笼型异步电动机变频调速系统

2.1 概述

变频调速是通过改变电动机供电频率来改变同步转速的方法而实现调速的。它既适用于异步电动机，也适用于同步电动机，具有高效率、宽调速范围的特点。

变频电源可以用变频机组产生。但它的设备庞大，效率低，不易维护，运行噪声大，目前已较少使用，而由电力半导体器件构成的静止式变频装置所替代。

对异步电动机而言，额定转速以下变频调速时，要求频率 f 与电压 U 成正比关系协调控制，以保持主磁通 Φ 恒定，保证输出转矩不变，并可避免因磁路饱和而引起励磁电流增大、铁心过热。在低速段，还需考虑定子绕组电阻压降的影响，应适当提高 U/f 的比值。而在额定转速以上变频调速时，由于定子电压受额定电压的限制，因此，在升高频率时，定子电压保持额定值而不再变化。随着转速的上升，磁通将减小，转矩也减小，从而得到近似恒功率的调速。异步电动机变频调速时的机械特性见图 7-5-6。

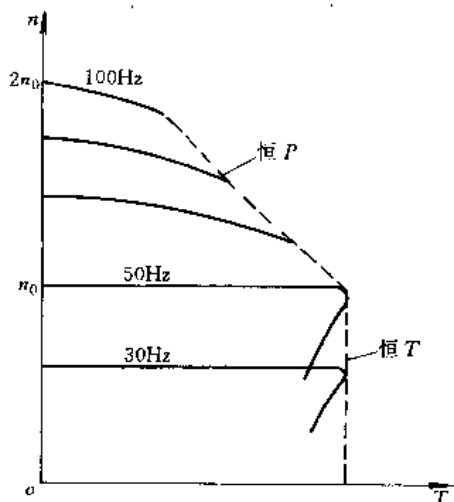


图 7-5-6 异步电动机变频调速时的机械特性

变频调速系统可分为交-直-交变频调速与交-交变频调速两大类，前者又称为带直流环节的间接变频

调速，后者又称为直接变频调速。在交-直-交变频调速中，根据其直流环节滤波方式的不同，又可分为电压型变频调速和电流型变频调速两大类。

2.2 交-直-交电压型变频调速

交流整流成直流的中间环节采用电容器滤波，直流电压波形较平直，等效阻抗较低，类似于电压源。逆变器输出电压波形为矩形波。它适用于多电动机并联运行或对动态指标要求不高的单机拖动的场合。

逆变器的主开关功率器件可以采用晶闸管，也可采用具有自关断功能的功率晶体管（GTR）或可关断晶闸管（GTO）等。晶闸管电压型变频器需用快速关断型晶闸管（KK 型），并需设置强迫关断回路。

由晶闸管作为主开关器件所构成的电压型变频电路，按换相方式的不同，主要有以下几种典型电路。

图 7-5-7 为串联电感式变频电路。同一桥臂上的两只晶闸管，一只触发导通而使另一只晶闸管因承受反向电压而自动关断（即所谓“相互换相”式）。只要换相元件（电容和电感）参数选择适当，这种电路的换相可靠性高，且电路简单，缺点是环流较大。它适用于小功率且调频范围较小（一般最高频率不超过 200Hz）的场合。

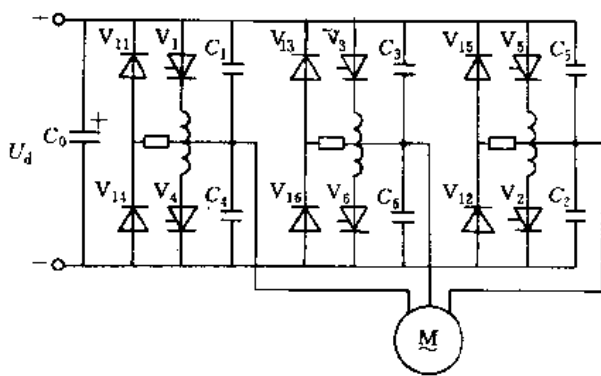


图 7-5-7 串联电感式变频电路

图 7-5-8a 为串联二极管式电压型变频电路。与串联电感式变频电路不同之处在于增加了六只隔离二极管 $V_{11} \sim V_{16}$ 。由于它们的隔离作用，使换相与负载无关，输出电压稳定；换相电容的接法也不同，而且在相同的系统中，电容量要比前者为小。该电路的调频范围虽然可做得较串联电感式变频器的高些，但同样因为有环流存在，输出的最高频率仍受到限制，且器件承受的最高反向电压值也较高。为有效地处理好换相过程中产生的环流，发展了图 7-5-8b 所示的曲折联结的串联二极管式电路。



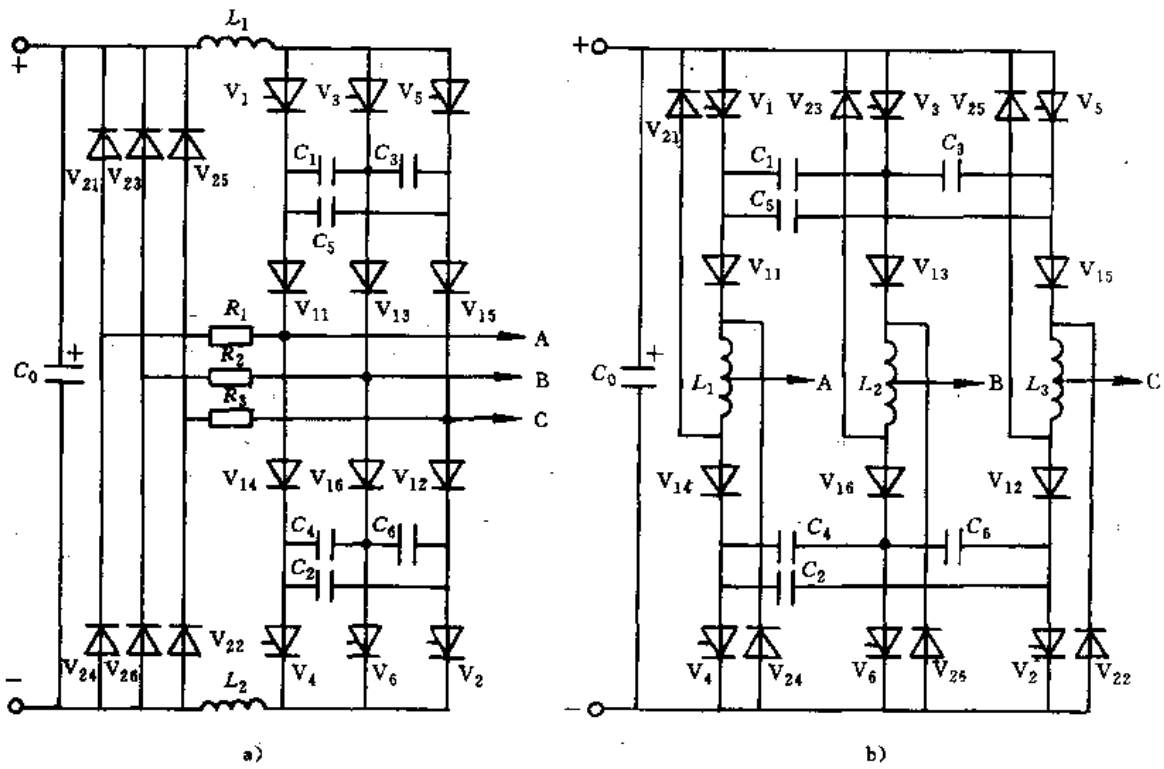


图 7-5-8 串联二极管式电压型变频电路
a) 普通式电路 b) 反馈二极管与换流电感的折联结式电路

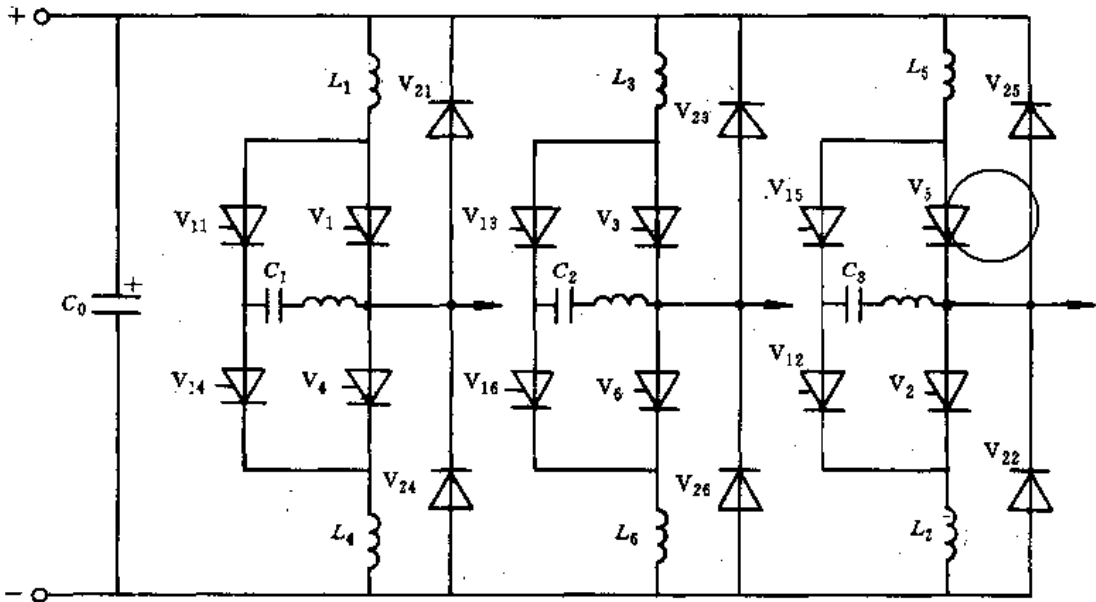


图 7-5-9 带辅助晶闸管的电压型变频调速主电路

图 7-5-9 为带辅助晶闸管的电压型变频电路。主晶闸管 $V_1 \sim V_6$ 的关断是靠辅助晶闸管 $V_{11} \sim V_{16}$ 触发导通后给相应的主晶闸管施加反向电压而实现的。换相能力受直流电压变化的影响较小，并能随负载电流

的增加而自动提高。另外，换相结束时储存于换相电感 $L_1 \sim L_6$ 中的能量又给换相电容 $C_1 \sim C_3$ 反向充电，没有环流，适用于调频调压范围较宽（可在 500Hz 以上）和功率较大（数百千瓦以上）的场合。但该电路的



主电路所用元器件较多,另外,由于电容器上电压的建立要滞后于电流一个相位角,因此对冲击较大的负载适应能力较小。

图 7-5-10 为交-直-交电电压型变频调速系统框图。同一给定信号分别控制可控整流桥的输出电压和逆变桥的输出频率,在负载电动机上得到所需的与其转速相对应的电压和频率值。

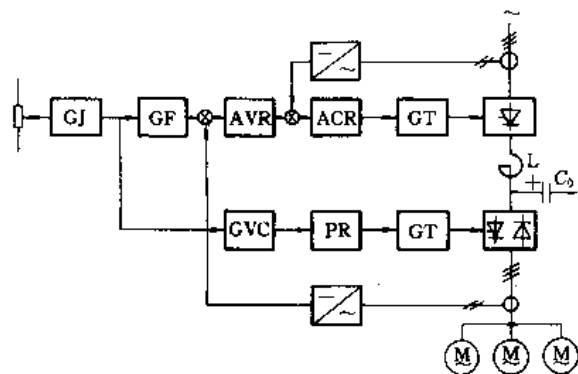


图 7-5-10 交-直-交电电压型变频调速系统框图
GJ—给定积分器 GF—函数发生器 AVR—电压调节器 ACR—电流调节器 GVC—压控振荡器 PR—环形计数器 GT—触发器

2.3 交-直-交电流型变频调速

采用串联二极管式变频器的交-直-交电流型变频电路见图 7-5-11。该电路的直流中间环节采用大电感滤波,直流电流波形较平直,等效阻抗较高,类似于电流源。逆变器输出电流波形为矩形波。该电路具有再生发电制动能力。

电流型变频电路对短路电流有较强的抑制能力,不易损坏管子和快速熔断器,对晶闸管的关断时间无

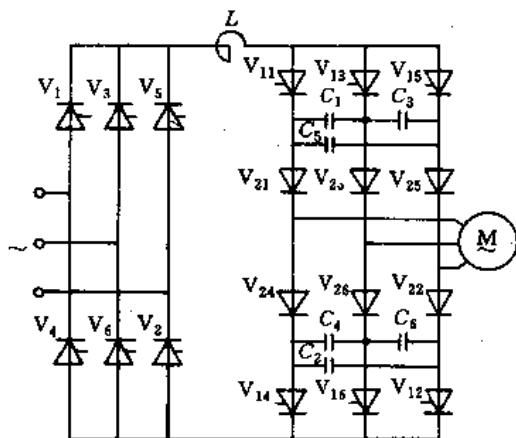


图 7-5-11 交-直-交电流型串联二极管式变频电路

严格要求,可以使用 KP 型普通晶闸管。该电路中电动机定子绕组参数对换相过程影响较大,元器件承受的峰值电压较电压型变频器的高,同时系统稳定性的整定也不如电压型变频系统容易。

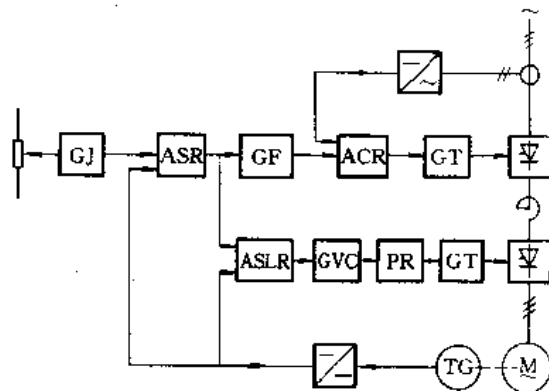


图 7-5-12 转差频率控制的电流型变频调速系统框图

GJ—给定积分器 ASR—转速调节器 GF—函数发生器 ACR—电流调节器 GT—触发器 ASLR—转差调节器 GVC—压控振荡器 PR—环形计数器

图 7-5-12 为采用转差频率控制的电流型变频调速系统框图。它有一个转速环和一个电流环。在直流传动系统中,若他励直流电动机的励磁电流(磁通)不变,电枢电流即代表转矩。而在异步电动机变频调速系统中,欲使电动机磁通 Φ 恒定,则需使转子电流 I_2 与转差频率 f_2 之间按一定比例线性变化。系统中转速调节器的输出分为两路,一路作为转子电流给定,另一路作为转差频率给定。转速调节器设有限幅环节,用以限制转差频率,使其不超过最大值。这种电路能保证电动机在最大转矩下进行加、减速,可以得到较好的动态特性。

2.4 交-交变频器

常见的交-交变频器主电路见图 7-5-13。图 a 为三相零式电路,图 b 为三相桥式电路。

由于反并联可逆整流装置输出电压

$$U_d = U_{d0} \cos \alpha \quad (7-5-7)$$

式中 α —延迟角。

如果使

$$\cos \alpha = \frac{u_k}{u_{kmax}} \quad (7-5-8)$$

或

$$\alpha = \arccos \frac{u_k}{u_{kmax}} \quad (7-5-9)$$

式中 u_k —控制电压, u_{kmax} 为其最大值。



其输出电压 $U_d = U_{d0} u_k / u_{kmax}$ (7·5-10)
 如果 u_k 按正弦规律变化, U_d 就按正弦规律变化。所以交-交变频器输出电压可以得到近似的正弦波, 与其他非正弦的变频电路相比, 电动机的脉动转矩较小, 效率较高。交-交变频电路也可控制为阶梯波输出。

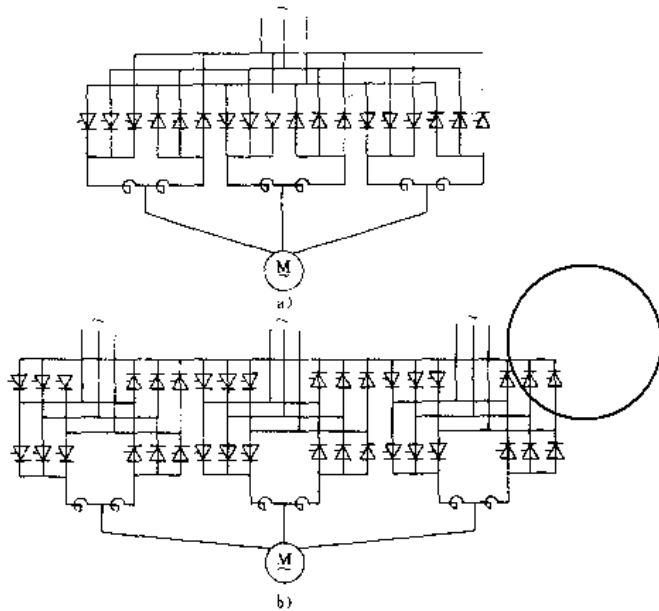


图 7·5-13 交-交变频器主电路原理图
 a) 三相零式电路 b) 三相桥式电路

交-交变频由于是利用电网电压换相, 因此换相不能在任意时刻进行, 它的输出电压是由电网电压若干段“拼凑”起来的, 故最高输出频率只有电网频率的 1/2 左右, 否则输出波形就会发生严重的畸变及不对称, 所以这种变频方式适用于低速传动。

交-交变频器的主电路是三套可逆整流电路, 因此在直流可逆传动中采用的有环流、无环流等技术都可采用。当采用无环流控制技术时, 图 7·5-13 中的均衡电抗器可省去, 但输出频率一般只能达到电源频率的 1/3, 采用有环流控制技术时, 输出频率可得到提高。交交变频调速系统大都采用矢量控制技术, 从而大大提高了系统的性能。

2·5 由大功率晶体管构成的脉宽调制变频调速系统

2·5·1 脉宽调制逆变器的工作原理

脉宽调制 (Pulse Width Modulation——PWM) 逆变器是控制电路中按一定规律控制开关器件的通断, 从而使逆变器的输出端得到一组等幅而不等宽的矩形

脉冲波形, 与正弦电压波形等效。图 7·5-14a 所示是将正弦波的正半周 N 等分, 每一等分的正弦曲线下的面积都用一个与此面积相等的等高矩形脉冲所代替。这样由 N 个等高不等宽的矩形脉冲所组成的波形与正弦波的正半周等效。正弦波的负半周也可用同样方法来等效。

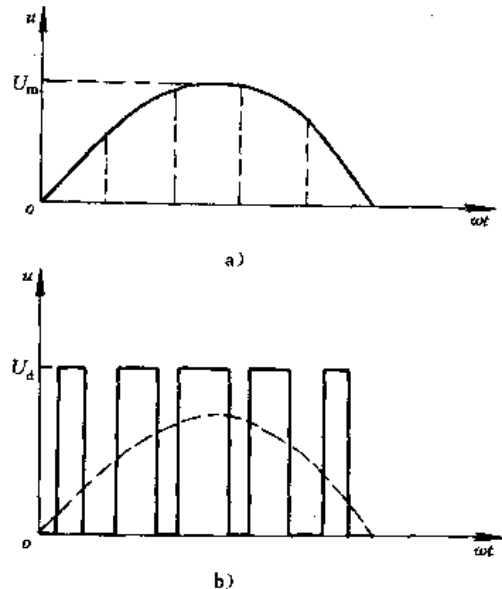


图 7·5-14 与正弦波等效的矩形脉冲波形
 a) 正弦半波等分图 b) 正弦波与矩形脉冲等效波形

如果用这样一组矩形脉冲作为逆变器各开关器件的控制信号, 则在逆变器输出端可以获得一组类似的矩形脉冲, 其幅值为逆变器直流侧电压 U_d , 而宽度按正弦规律变化。同理, 这一组幅值为 U_d 的矩形脉冲可用正弦波来等效, 见图 7·5-14b 虚线所示波形。

大功率晶体管 (GTR) 构成的 PWM 变频调速系统主要由整流器、平波电容器、GTR 逆变器和 PWM 控制电路等组成, 见图 7·5-15。

2·5·2 脉宽调制控制回路

获得 PWM 控制信号的最基本方法是采用正弦波与三角波相交来产生, 三角波称为载频波 u_c , 正弦波称为参考波 u_r 。这种调制方式称为正弦波脉宽调制方式。产生的调制波是等幅、不等宽的脉冲列, 这种调制波的脉冲宽度基本上成正弦分布, 各脉冲与正弦曲线下对应的面积成正比。此种逆变器输出基波电压的大小和频率均由参考电压 u_r 来控制。当改变 u_r 幅值时, 脉冲宽度随之改变, 从而改变输出电压的大小; 当改变



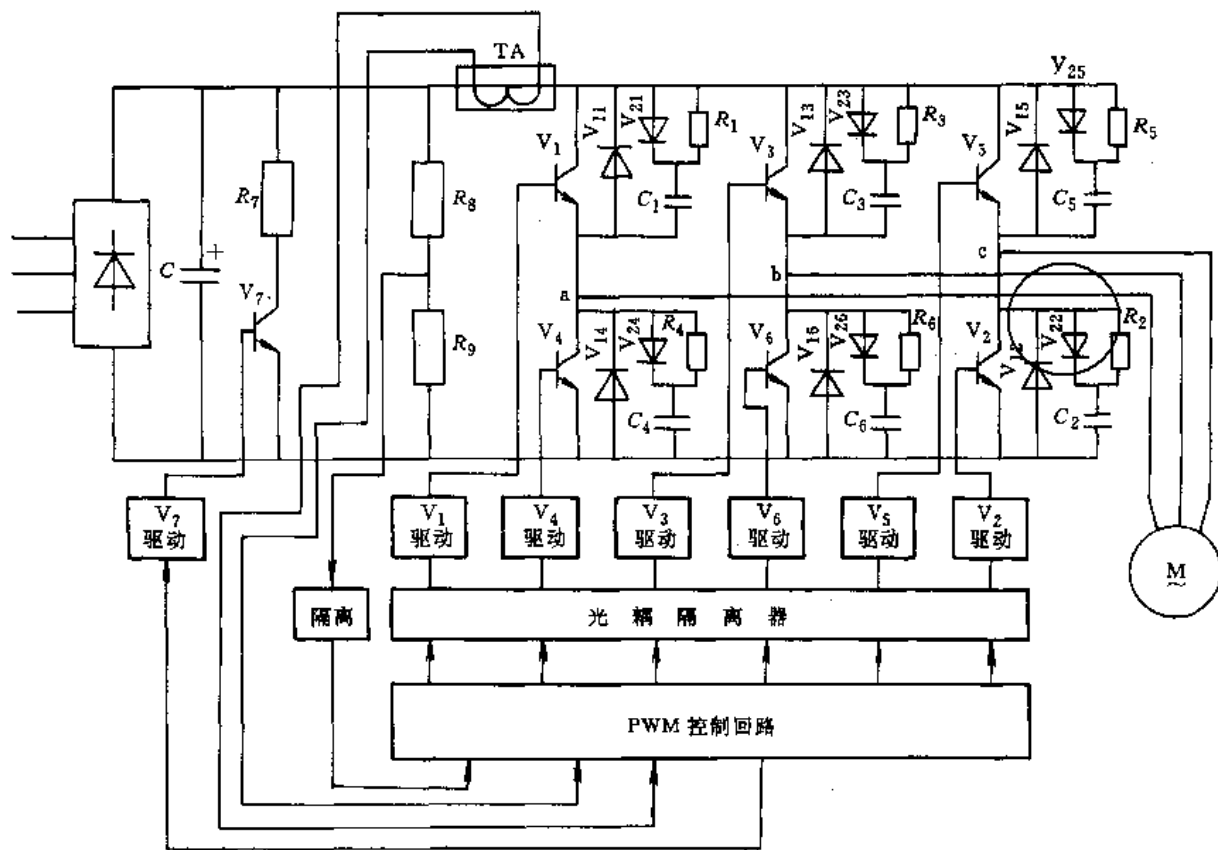


图 7-5-15 GTR 组成的 PWM 变频系统

ω_r 频率时，输出电压的频率随之改变。但正弦波最大幅值必须小于三角波幅值，否则输出电压的大小和频率就将失去所要求的配合关系。这种调制有单极性与双极性调制两种方式，每一种调制方式又有同步调制与异步调制两种方法。

图 7-5-16 所示为一相单极性调制波形。对于三相逆变器，必须产生互差 120° 的三相调制波。载频三角波可以共用，但必须有一个三相可变频变幅的正弦波发生器，产生可变频变幅的三相正弦参考信号，然后分别与三角波相比较，产生三相脉冲调制波。若脉冲调制波在任何输出频率情况下，正、负半周始终保持完全对称，即为同步调制。若载频三角波频率一定，只改变正弦参考信号频率，这时正、负半周的脉冲数和相位就不是随时都对称了，这种调制方法叫做异步调制。异步调制将会出现偶次谐波，但每周的调制脉冲数将随输出频率的降低而增多，有利于改善低频输出特性。据分析，一般三角波频率应比正弦参考电压频率高 9 倍以上，否则偶次谐波的影响就较大。

图 7-5-17 所示为三相双极性调制波形，对上述的单极性调制，必须加倒向控制信号，而对双极性调制，就不需要倒向信号。

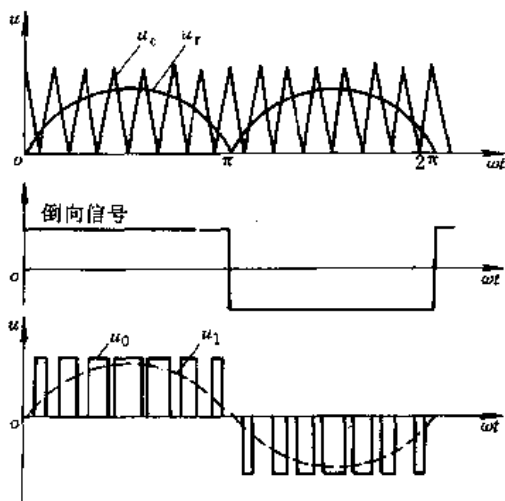


图 7-5-16 单极性脉宽调制波形

三相可变频正弦波发生器是此控制电路中的一个关键性环节，而直接用模拟电路产生这样的正弦波是比较困难的，目前大都用微处理机实现，或使用 PROM 再加少量的数字元器件来实现。

随着微电子技术的发展，出现了专门用于产生

电力电子技术

五十一



PWM 信号的大规模集成电路，HEF4752 芯片就是一种常用的产生 PWM 信号的大规模集成电路。图 7-5-18 是 HEF4752 的管脚图。

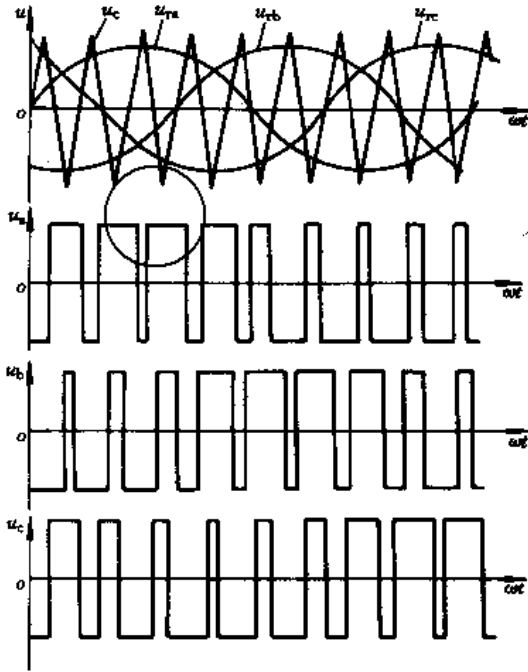


图 7-5-17 三相正弦波脉宽调制波形

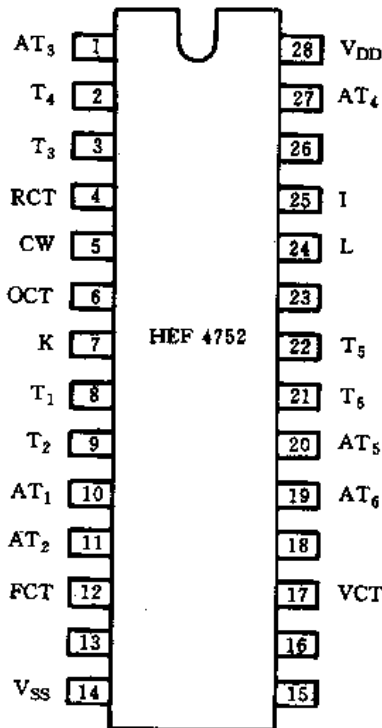


图 7-5-18 HEF4752 管脚图

2.5.3 大功率晶体管逆变器主电路

PWM 型逆变器常采用电压型逆变器，见图 7-5-15，它由二极管三相整流桥整流的恒定直流电压供电。平波电容器 C 起着中间能量存储作用，使逆变器与交流电网去耦，对异步电动机等感性负载，可以提供必要的无功功率，而有功功率由电网来补充。由于直流电源是二极管整流器，所以能量只能单方向传送，不能向电网反馈能量。因此当负载工作在制动情况下，反馈能量将经过续流二极管 $V_{11} \sim V_{16}$ 向电容 C 充电。为了避免直流电压过高，在直流侧接入放电电阻 R_f 和晶体管 V_f ，当直流电压高到某一限定值后，使 V_f 饱和导通。接入电阻 R_f ，将部分反馈能量消耗在电阻上。

逆变器由六个大功率晶体管和六个续流二极管组成，可以采用任何一种脉宽调制方法驱动，而且可以进行高频调制。异步电动机为感性负载，当电流连续时，不管采用何种脉宽调制方法，逆变器每相输出的调制电压波都是双极性的，而输出电流则为带有锯齿的正弦波，见图 7-5-19。以 a 相为例，在输出电流正半周，当 V_1 导通时，a 点（参见图 7-5-15）接到直流电压正极，电流上升，当 V_1 管截止时，感性负载电流不能突断，势必要经过二极管 V_{11} 由直流电源负极续流，电压为负，电流下降，如此循环下去。其负半周和 b、c 两相的工作情况与此类似。

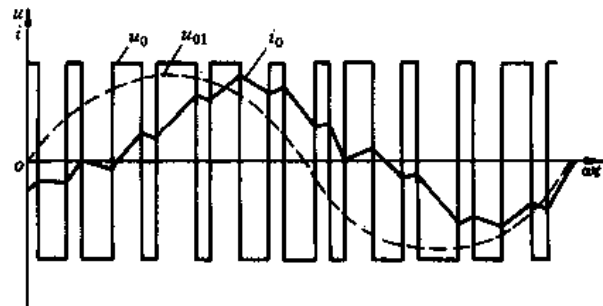


图 7-5-19 逆变器输出电压、电流（单相）

感性负载时，晶体管由饱和导通转换到截止的瞬间，管子上的瞬时功耗可以达到正常工作时的上百倍，这对管子来说是很严酷的。因此，必须采取措施，使管子集电极电压 U_{ce} 上升慢些，而使集电极电流 I_c 下降快些。与 GTR 并联的二极管 V_{21} 、 R_1 、 C_1 （参见图 7-5-15）吸收回路，其作用之一就是延缓管子 U_{ce} 的上升速率。而在使管子截止时，由驱动器在基极上加反向



电压,使 I_c 迅速下降。晶体管工作时,在任何情况下都不允许超过安全工作区。

在此系统中,过电压保护与过电流或短路保护是必需的。过电压信号一般用接于直流回路中的分压电阻,如图 7-5-15 中的 R_5 、 R_6 检出,此信号进入控制回路时必须用延时很短的隔离器件隔离。过电流和短路信号大都用霍尔电流传感器(图 7-5-15 中 TA)检出,由于霍尔电流传感器检出的信号是与主电路隔离的,故不必再加隔离器件,它的延迟很短,一般为 $2\sim 3\mu s$,这种传感器对过电流和短路保护比较有效。

2.6 由可关断晶闸管构成的变频调速系统

可关断晶闸管(GTO)是在门极上加正脉冲时即触发导通,而加负脉冲时立即关断。由 GTO 构成的变频调速系统的主电路见图 7-5-20。

由于 GTO 靠门极负脉冲即可自行关断,因此变

频电路中不需再增设强迫关断电路,使系统结构和控制方式都大为简化。GTO 具有更快的开关速度,因此适用于较高频率的负载。GTO 变频调速系统的控制电路与一般晶体管或晶闸管变频电路的相似。

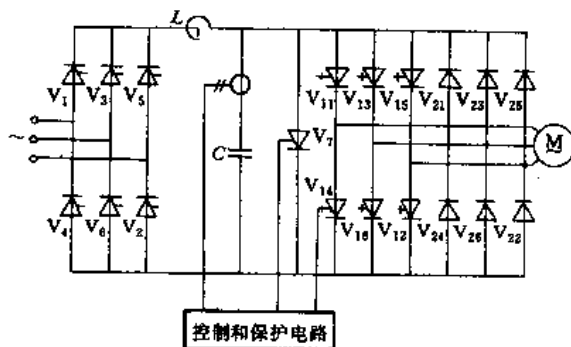


图 7-5-20 GTO 变频调速系统主电路
GTO 门极基本控制电路见图 7-5-21。

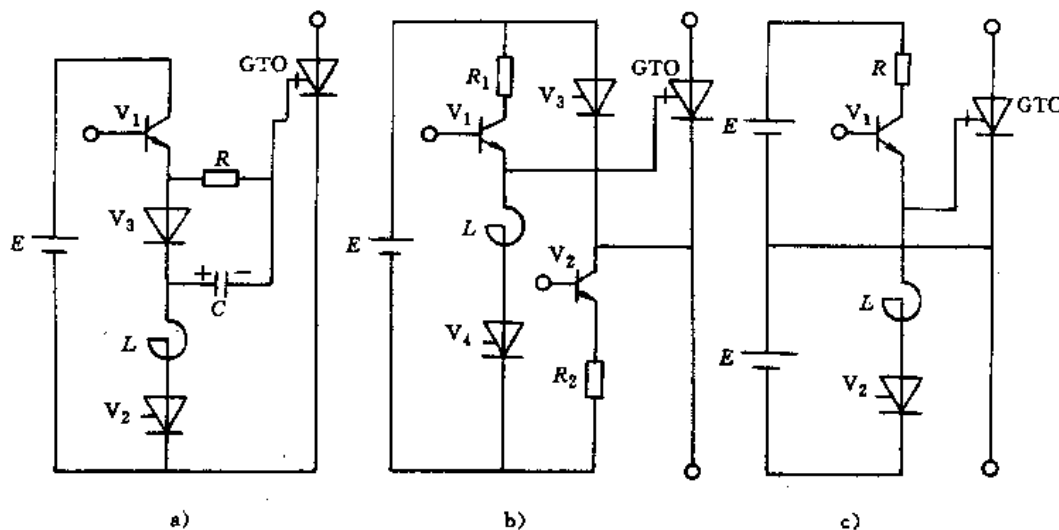


图 7-5-21 GTO 门极基本控制电路

a) 从属方式 b) 公用方式 c) 独立电源方式

2.7 由功率场效应晶体管构成的变频调速系统

功率金属-氧化物-半导体场效应晶体管(MOSFET)具有更快的开关速度,比双极型功率晶体管快一个数量级,工作频率可达几兆赫。它有很高的输入阻抗(约 $10^9\Omega$ 以上),是一种理想的电压控制器件,且驱动电路较简单,用一般的 CMOS 集成电路都可直接驱动它。它具有很宽的安全工作区域,而且无二次击穿问题。

功率 MOSFET 的保护主要有两个方面,一是栅极的过电压保护,栅压一般不应超过额定值(多为 $\pm 20V$);二是防止静电击穿,可采用将栅-源短路或用齐纳二极管保护栅-源的简单方法。

由功率 MOSFET 构成的变频调速系统的主电路见图 7-5-23,其控制系统结构与一般功率晶体管或晶闸管变频电路的相似。

图 7-5-22 为功率 MOSFET 的几种典型驱动电路。



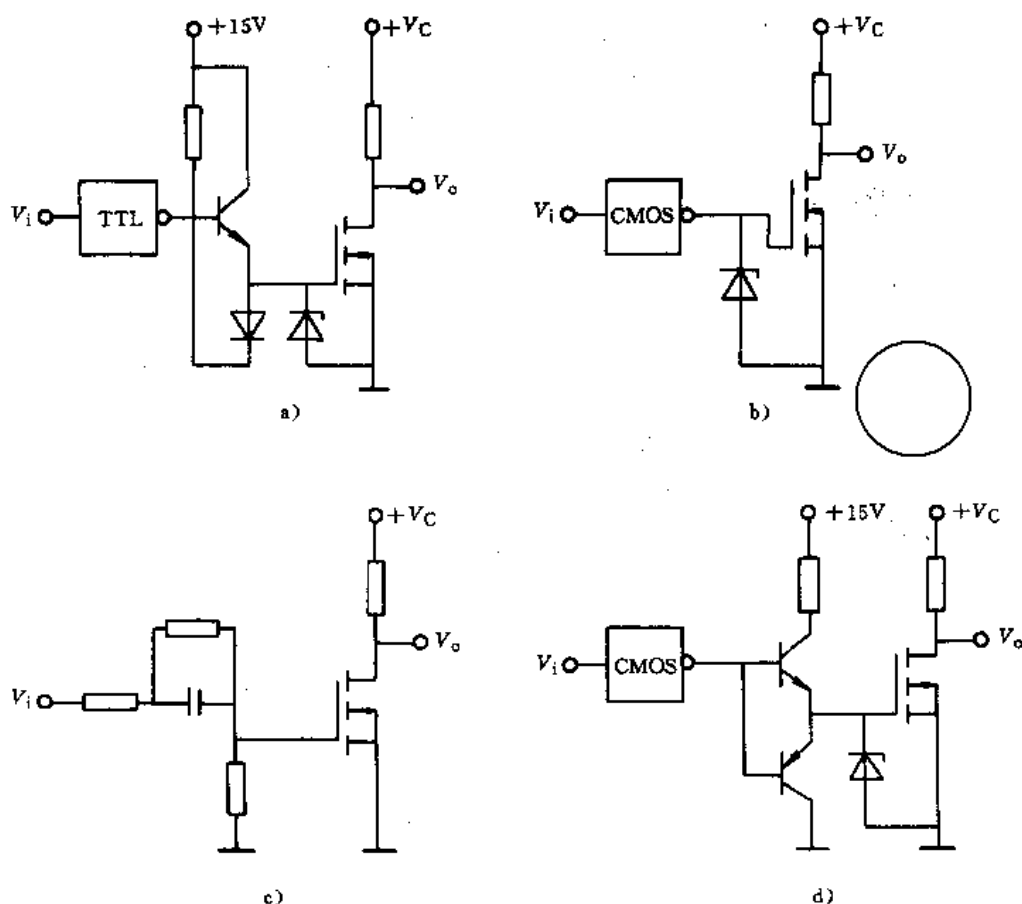


图 7-5-22 功率 MOSFET 的驱动电路

- a) 采用 TTL 的驱动电路 b) 采用 CMOS 的驱动电路 c) 具有加速电容的驱动电路
d) 采用 CMOS 和射极跟随的驱动电路

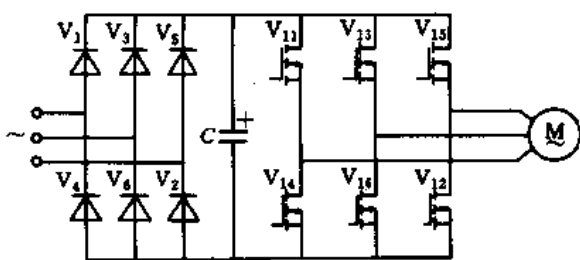


图 7-5-23 功率 MOSFET 变频调速系统主电路

3 矢量控制系统

3.1 矢量控制的基本原理

直流电动机的控制性能之所以非常优越，是因为在一般直流电动机中主磁通 Φ 完全是由定子励磁电流所决定，它与电枢绕组的电流 i_a 所产生的电枢反应磁动势 F ，在空间相垂直。若不考虑磁路饱和的影响，

两者之间没有耦合关系，互不影响。由这两者相互作用而产生的电磁转矩为 $T = C_T \Phi i_a$ ，可以通过调节励磁电流或电枢电流来分别加以控制，特别是当励磁电流保持恒定时，转矩和电枢电流成正比，所以通过控制电枢电流就可以方便地控制电动机的转矩，使传动系统的动态性能得以优化。但异步电动机的情况比直流电动机要复杂得多。在异步电动机中，定子、转子上有多相绕组通有电流，它们互相紧密耦合，共同产生气隙旋转磁场，而且各相绕组中通过的电流不仅仅是磁化电流，还有产生转矩的有功分量，两者纠缠在一起，使得电动机总的相电流并不和电磁转矩成正比，所以在异步电动机中单单控制电动机的电流并不能达到控制转矩的目的。

在异步电动机中，稳态电磁转矩 $T = C_T \Phi_m I_2 \cos \varphi_2$ ，它是气隙磁通 Φ_m 和转子电流有功分量 $I_2 \cos \varphi_2$ 相互作用而产生的，但是从异步电动机的矢量图（见图 7-5-24）可以看到，异步电动机转子绕组的



总磁链 $\Psi_2 = \Psi_m + \Psi_{2\sigma}$ 和转子电流 I_2 在相位上正好相差 90° ，而且它的大小为 $\Psi_2 = \Psi_m \cos \varphi_2$ 。把它代入转矩公式可得异步电动机的转矩关系式为

$$T = C_T \Psi_m I_2 \cos \varphi_2 = C_T \Psi_2 I_2 \quad (7.5-11)$$

在形式上它和直流电动机的转矩公式完全相似。这说明在异步电动机中，若能设法保持转子磁链 Ψ_2 恒定，则通过控制转子电流 I_2 就能有效地控制电动机的转矩，这就是所谓以转子磁链定向的矢量控制方法，简称矢量控制。至于在实际电动机中如何控制三相电流 i_a 、 i_b 、 i_c ，以达到上述矢量控制的目的，这需要用到坐标变换的方法。

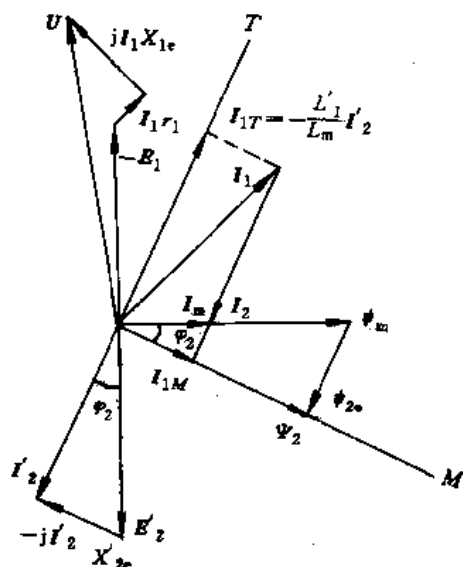


图 7-5-24 异步电动机的矢量图

所谓坐标变换，从数学的角度来讲，就是将某些方程式中原来一组变量（如 i_a 、 i_b 、 i_c ）用另一组新的变量（例如 i_x 、 i_y 、 i_0 ）来代替，以使方程式得到某种简化的方法。例如原来三相电动机中变量 i_a 、 i_b 、 i_c （称为三相坐标系）代表电动机三相绕组中的电流，它们产生一定的磁场，现在可用另一组假想的两相绕组（两相坐标系）中的电流 i_x 、 i_y 来等效（图 7-5-25），使它们也能产生同样的磁场。在三相的情况下，由于相与相之间相差 120° ，有互感存在，列写方程式比较复杂；而在两相系统中，因两相绕组的轴线互相垂直，没有互感，所以列写方程式就比较简单。在两相坐标系中，一般用 i_x 、 i_y 代表两相绕组中的电流，而取 $i_0 = (i_a + i_b + i_c) / 3 = i_0$ ，它是三相电流中的零序分量，一般等于零。即使 $i_0 \neq 0$ ，零序分量在电动机气隙中不产生磁场，不参加机电能量变换，它对电动机转矩和动态过程没有影响。

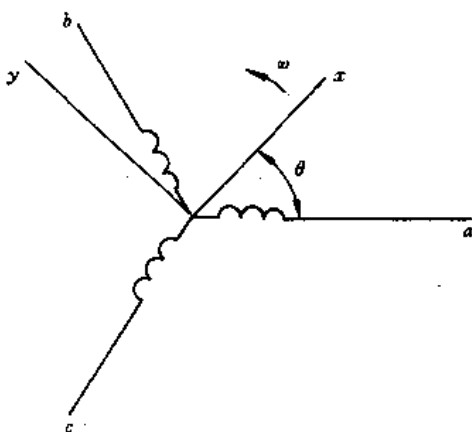
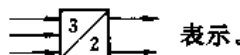


图 7-5-25 三相坐标系与两相坐标系

根据使两相电流 i_x 、 i_y 和三相电流 i_a 、 i_b 、 i_c 所产生的磁动势相同的原理，一种经常采用的变换式（称为派克变换式）为

$$\begin{aligned} i_x &= \frac{2}{3} [i_a \cos \theta + i_b \cos(\theta - 120^\circ) + i_c \cos(\theta + 120^\circ)] \\ i_y &= -\frac{2}{3} [i_a \sin \theta + i_b \sin(\theta - 120^\circ) + i_c \sin(\theta + 120^\circ)] \\ i_0 &= \frac{1}{3} (i_a + i_b + i_c) \end{aligned} \quad (7.5-12)$$

这个由三相变两相的变换式通常在图上用符号

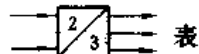


表示。

而其反变换式，即由两相变回到三相的变换式为

$$\begin{aligned} i_a &= i_x \cos \theta - i_y \sin \theta + i_0 \\ i_b &= i_x \cos(\theta - 120^\circ) - i_y \sin(\theta - 120^\circ) + i_0 \\ i_c &= i_x \cos(\theta + 120^\circ) - i_y \sin(\theta + 120^\circ) + i_0 \end{aligned} \quad (7.5-13)$$

这个反变换式在图上一般用符号



表示。其中， θ 角为三相坐标系中 a 轴和两相坐标系中 x 轴之间的夹角（图 7-5-25）。如 θ 为常数（通常取 $\theta = 0$ ），表示 x 、 y 两相坐标系和 a 、 b 、 c 三相坐标系相对静止，则称为 α 、 β 坐标系。如 $\theta = \omega t + \theta_0$ ，则表示两相坐标系 x 、 y 对三相坐标系 a 、 b 、 c 有相对运动，其转速为 ω 。在实用上，常取 $\omega = \omega_s$ （同步角速度）或 $\omega = \omega_r$ （转子旋转角速度）。这里需要指出的是，当变量从一种坐标系变到另一种有相对运动的坐标系时，变量的交变频率会发生相应的变化。例如，原来定子坐标系上以 50Hz 交变的电流 i_a 、 i_b 、 i_c ，当变换到以同步速度



旋转的两相坐标系上时, 电流 i_x, i_y 将变成直流量, 这相当于定子三相绕组中通入三相 50Hz 交流电流 i_a, i_b, i_c 所产生的旋转磁场, 用一组以同步速度旋转的两相绕组中通入相应的直流电流 i_x, i_y 来等效。

在矢量控制中, 就是利用了上述坐标变换的原理, 把以同步速度旋转的两相坐标系中 x 轴选得与异步电动机转子磁链的方向相一致, 称为以转子磁链定向, 这个 x 轴一般称其为 M (磁化) 轴, 而与转子磁链相垂直并与电动机转矩成正比的转子电流将在 y 轴的方向上, 见图 7-5-24。这个 y 轴通常把它叫做 T (转矩) 轴。

进一步的理论分析表明, 在矢量控制的动态过程中, 只要保持转子磁链恒定, 转子磁链的大小只决定于定子电流中磁化分量 i_{1M} ; 而电动机的电磁转矩和定子电流中的转矩分量 $i_{1T} = -i_2'$ 成正比。这样异步电动机变得和直流电动机一样, 只要保持定子磁化电流 i_{1M} 恒定不变, 控制定子电流中的转矩电流分量 i_{1T} 就能有效地控制异步电动机的转矩。

在知道了所需要的定子电流的磁化分量 i_{1M} 和转矩分量 i_{1T} 以后, 就不难利用两相到三相的反变换式求出实际上需要的定子三相瞬时电流值 i_a, i_b, i_c 。

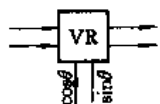
在矢量控制系统的具体实施中, 除了上述三相变两相和两相变三相的变换以外, 还常用到另外两种变换。一种是从一种两相坐标系变到另一种两相坐标系的变换, 例如从静止的两相坐标系变到以某一转速旋转的两相坐标系, 这里要用一种所谓旋转变换 (VR) 的关系式, 如

$$i_M = i_\alpha \cos\theta + i_\beta \sin\theta \quad (7-5-14)$$

$$i_T = -i_\alpha \sin\theta + i_\beta \cos\theta \quad (7-5-15)$$

或
$$i_\alpha = i_M \cos\theta - i_T \sin\theta \quad (7-5-16)$$

$$i_\beta = i_M \sin\theta + i_T \cos\theta \quad (7-5-17)$$

这种旋转变换通常用符号  表示。

另一种常用的变换关系是直角坐标与极坐标之间的变换 (K/P), 其关系式为

$$F = \sqrt{(i_x)^2 + (i_y)^2} \quad (7-5-18)$$

$$\sin\epsilon = i_y/F \quad \cos\epsilon = i_x/F \quad (7-5-19)$$

3.2 异步电动机矢量控制系统

异步电动机空间矢量关系见图 7-5-26。取两相静止 α - β 坐标系中 α 轴的方向, 与三相静止 a - b - c 坐标系中 a 轴的方向一致, 取同步旋转 M - T 坐标系中 M 轴

的方向, 与转子全磁通矢量 Φ_2 的方向一致。根据获得作为 M 轴线的转子磁通矢量 Φ_2 位置角 φ 的方法不同, 矢量控制系统可以分成磁通检测式 (包括直接磁通检测和磁通观测器) 和转差频率控制式两种。

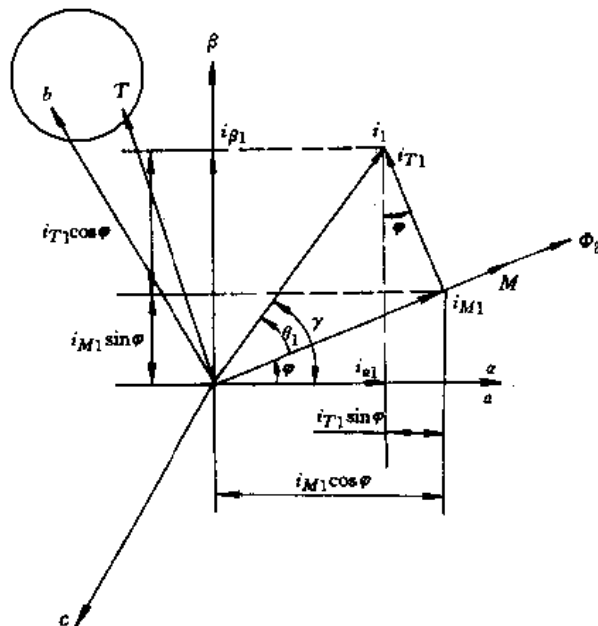


图 7-5-26 异步电动机空间矢量图

磁通检测式通过直接或间接的手段检测出磁通瞬时值后, 直接求得磁通矢量 Φ_2 的位置角 φ , 这种方式中调速系统的性能取决于磁通检测精度, 低速时有磁通脉动和磁饱和问题。转差频率控制式是由实测的转子位置角与计算求得的转差角相加获得转子磁通位置角 φ , 这种方法的优点是可以在包括零速在内的全转速范围内使系统获得高性能。

1. 磁通检测式异步电动机矢量控制系统 图 7-5-27 所示是一种应用磁通观测器的磁通检测式异步电动机矢量控制系统框图。

系统的工作原理, 主电路采用电流源逆变器, 具有转速和电流双闭环, 角速度给定信号 ω^* 与实际电动机角速度 ω 相比较, 经转速调节器 ASR 输出为等效的转矩电流给定值 i_{T1}^* 。与此同时, 根据实际转速 ω , 按照基频以下恒磁通 (恒转矩), 基频以上弱磁通 (恒功率) 的调节规律, 由函数发生器 GF 给出磁链给定信号 Ψ_2^* ; Ψ_2^* 与从磁通观测器 AFO 测得的电动机实际转子磁链 Ψ_2 相比较, 差值经磁通调节器 AMR 输出等效的励磁电流 i_{M1}^* 。 i_{T1}^* 与 i_{M1}^* 经直角坐标-极坐标变换 (K/P), 一方面给出定子电流大小的给定值 $|i_1^*|$ 信号, 同时也给出定子电流矢量 i_1^* 相对于同步旋转坐标系 M 轴的空间位置角给定值 θ_1^* (以 $\sin\theta_1^*, \cos\theta_1^*$ 形式给



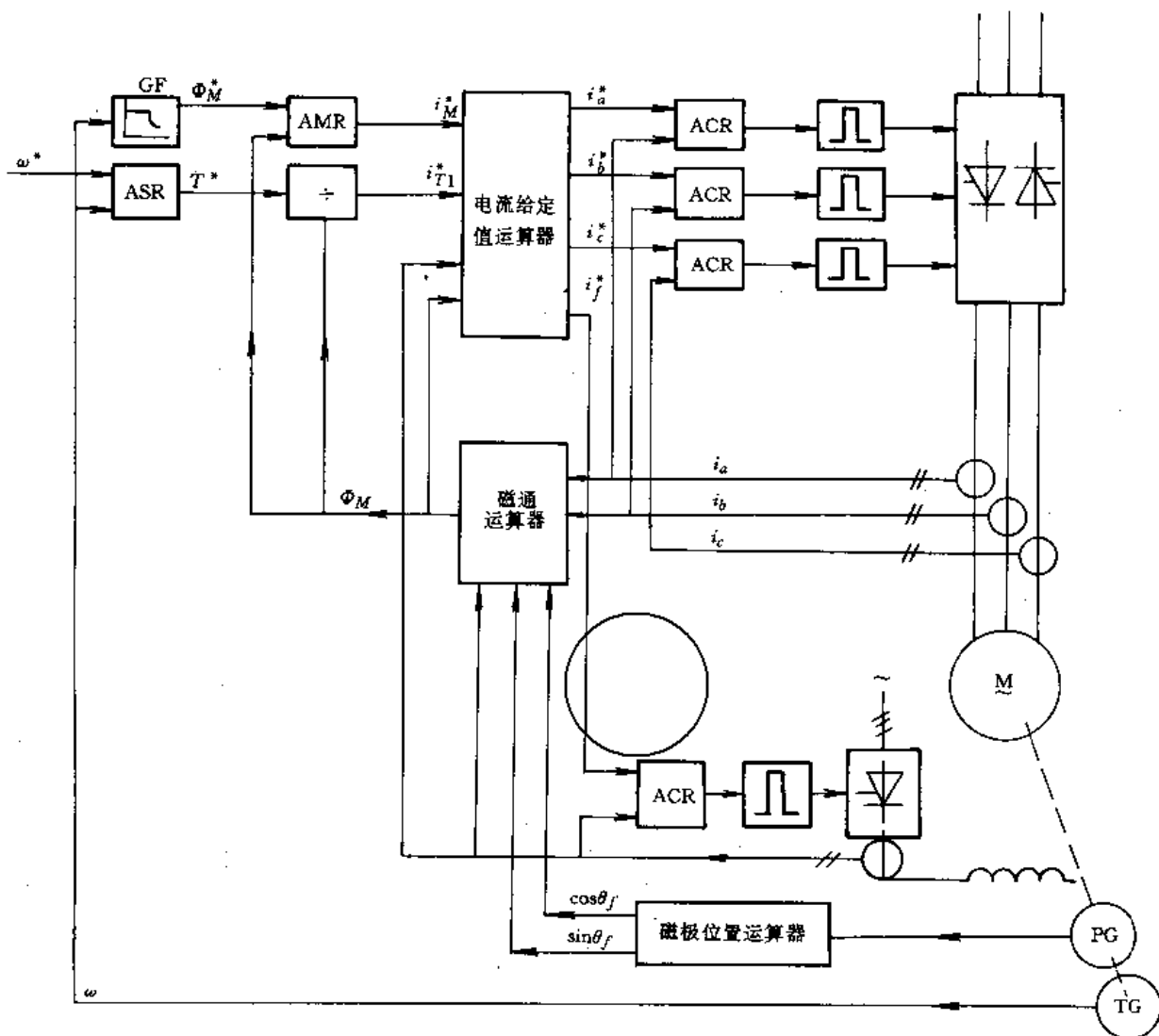


图 7-5-30 同步电动机矢量控制系统框图

GF—函数发生器 ASR—转速调节器 AMR—磁通调节器 ACR—电流调节器 PG—转子位置检测器

中，同步电动机定子绕组由交-交变频器供电，转子磁场绕组由可控整流器供电。电枢和磁场中均设有电流调节回路，此外还设有有效磁通和转速的调节回路。

整个控制系统的主控指令来自角速度给定信号 ω^* 。角速度给定值 ω^* 与实测的转子角速度 ω 相比较，其误差信号经转速调节器 ASR 输出为转矩给定值 T^* 。通过除以有效磁通 $|\Phi_M|$ 的运算，得到电枢的等效转矩电流给定值 i_{T1}^* 。与此同时，根据实际转速，按基速以下恒磁通（恒转矩）、基速以上弱磁通（恒功率）的调节规律，由函数发生器 GF 给出有效磁通给定值 Φ_M^* 。磁通调节器 AMR 根据有效磁通给定值 Φ_M^* 与由磁通运算器标出的实际有效磁通 Φ_M 的误差信号调节，产生磁化电流给定值 i_M^* 。磁极位置运算器根据转子位置检测器 PG 检测到的磁极位置，计算出输出转

子磁极相对于定子绕组的空间位置角 θ_f （以正余弦形式给出），供坐标变换用。磁通运算器是一个根据输入的电枢电流、磁场电流及磁极位置角来计算有效磁通的大小、位置及功率角的运算电路。电流给定值运算器则是按电枢的等效磁化电流给定值、等效转矩电流给定值及磁通运算器的输出信号，计算所需三相电枢电流及磁场电流给定值的运算回路。它们都是同步电动机矢量控制系统中的核心运算部分。

4 无换向器电动机调速系统

4.1 无换向器电动机的组成

无换向器电动机是由一台同步电动机、一组变流器和一个转子位置检测器组成，见图 7-5-31。它具有



直流电动机的转速控制特性,但没有换向器,所以结构简单,只要改变逆变器触发脉冲的顺序,即可改变电动机转矩方向,实现四象限运行,不需要像直流电动机调速那样采用两组整流桥反并联电路。

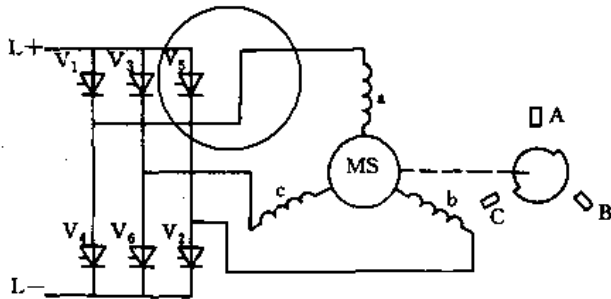


图 7-5-31 无换向器电动机组成示意图

无换向器电动机中逆变器的频率不是独立调节的,而是受控于转子位置检测器。该逆变器是一个自控式逆变器,转子位置检测器通常由三个固定的位置检测元件 A、B、C 以及随电动机转子一起转动的圆盘组成。当圆盘缺口对准某一元件时,该元件会产生信号去触发相应晶闸管。例如,用检测元件 A 去触发晶闸管 V_1 等,使电流在相应时刻输入到对应的电动机绕组中去。

无换向器电动机由于采用自控式逆变器作电源,电动机的输入与电动机转速始终保持同步,电动机和逆变器输出之间不会产生振荡和失步,这是无换向器电动机调速控制系统的重要特点。

4.2 无换向器电动机中逆变器的换相过程

无换向器电动机中晶闸管的换相一般都是利用电动机中的反电动势进行的,图 7-5-32 说明了电动机的 a 相到 b 相的换相过程,换相条件是 $e_a > e_b$ 。

4.3 无换向器电动机的调速系统

图 7-5-33 为一种无换向器电动机调速系统框图。无换向器电动机与直流电动机有很多相同的地方,但另一方面,两者在控制正反转方式上又有很大区别:(1)无换向器电动机的主回路电流不管正转还是反转,其方向总是不变的;(2)无换向器电动机可逆运转不需要在电枢回路或励磁回路内进行切换,因此,无换向器电动机非常适用于要求宽调速范围及经常要求可逆运转的场合。

该系统的结构与直流电动机可逆调速系统很相似,也是一个包括电流内环的双闭环系统,正反转控制是由转矩指令装置 A 经电子开关 1S 和 2S 的切换来

实现的。

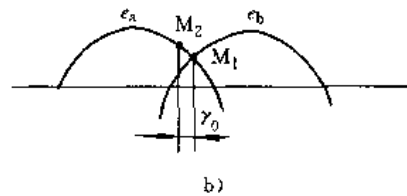
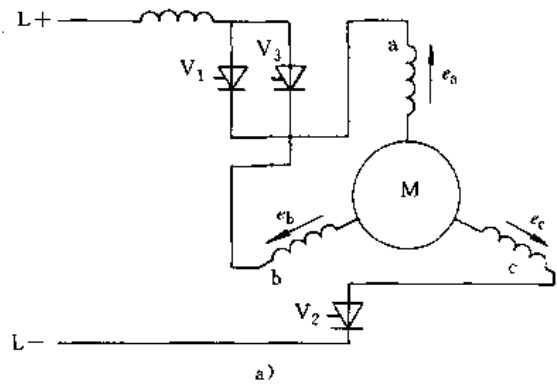


图 7-5-32 反电动势换相原理图

a) a 相到 b 相换相过程 b) 换相波形

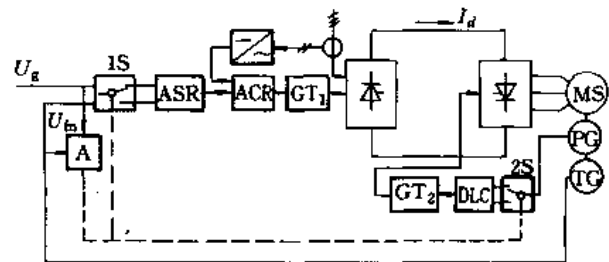


图 7-5-33 无换向器电动机调速系统

图中, ASR 为转速调节器; ACR 为电流调节器; GT_1 、 GT_2 为触发器; DLC 为逻辑电路; MS 为同步电动机; PG 为位置检测器; TG 为测速发电机; A 为转矩指令装置。

转速调节器及电流调节器的作用及起动与加速过程都与直流电动机可逆系统中相似,但在反转和制动上有所不同。如果给以反转指令,即 U_d 变号(如由正变负),则转速偏差信号 ΔU 也变号,转矩指令装置动作,使得送至转速调节器和逆变器正反转逻辑电路上的信号极性改变,于是系统自动地进行下列切换:(1)晶闸管整流器由 $\alpha < 90^\circ$ 的整流状态变为 $\alpha > 90^\circ$ 的逆变状态,而由于触发顺序改变,逆变器进入整流状态;(2)无换向器电动机处于再生发电制动状态,与此同时,电动机减速;(3)当电动机减速到零时,整流器又恢复到整流工作状态,而逆变器也恢复到逆变状态;



(4) 电动机在反方向上加速，直到达到稳定转速时为止。

5 其他类型的交流电动机调速系统

5.1 异步电动机的定子调压调速

异步电动机的转矩与定子电压的平方成正比，改变定子电压就可改变电动机的转矩大小和机械特性，就可实现调速。异步电动机的定子调压调速要求电动机具有高电阻的转子或具有频敏特性的转子。为扩大调速范围和提高系统的静态和动态指标，这种调速系统中一般都引入转速负反馈。图7-5-34为三相异步电动机可逆调压调速主回路原理图。

定子回路中可以采用双向晶闸管，也可以采用普通晶闸管反并联接入。图中的4号和5号管子作为反向工作用。此系统可以工作在机械特性的四个象限。

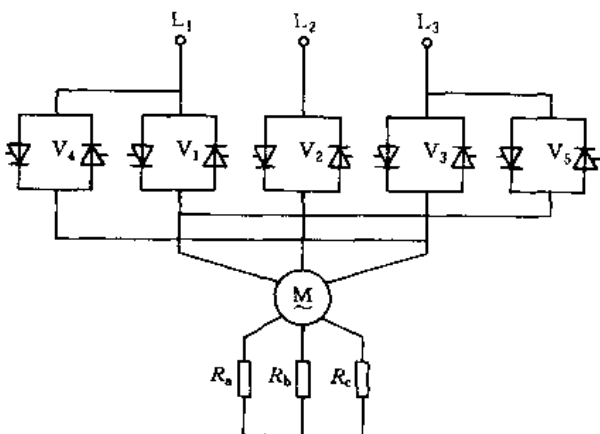


图 7-5-34 三相异步电动机可逆调压调速主回路原理图

定子调压调速的控制电路较简单，装置投资较少，缺点是自然机械特性较软，欲得到稳定的转速，必须采用测速反馈，而且轻载时有失控区。另外，由于转差能量消耗于转子回路，所以效率较低，转速越低，表现越明显。定子调压调速特别适用于通风机和泵类等生产机械。对于一些需频繁起、制动及低速运行时间较短的场合，例如起重运输机械及对电效率要求不高的中小功率传动等，也可采用这种调速方法。图7-5-35画出了带转速负反馈的晶闸管调压调速系统的机械特性（虚线为异步电动机调压调速开环控制的机械特性）。点1为电动运行状态稳定工作点，点2和点3为电源反相序进行反接制动时，转速急剧变到零的过程。随后又反向起动，强制下放重物，当转速上升到点4时，使正转控制的晶闸管导通，电动机就处于负载倒拉的反

转制动，并产生制动转矩阻碍重物下放，此时电动机由重物带动稳定运行于点5。

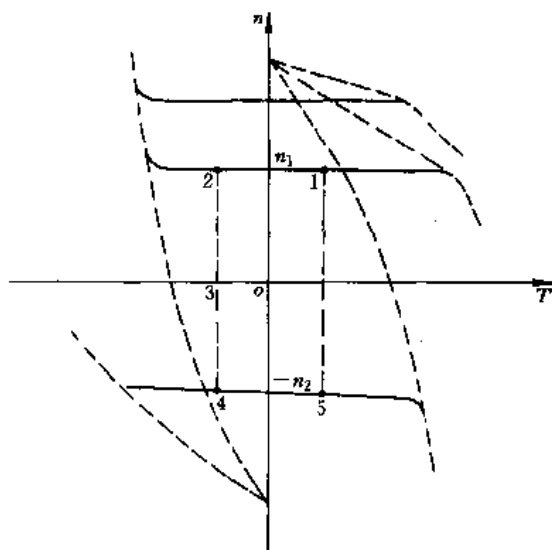


图 7-5-35 带有转速反馈的异步电动机调压调速系统的机械特性

5.2 转子回路中串电阻调速与转子电阻斩波器调速

5.2.1 转子回路中串电阻调速

绕线转子异步电动机的转子回路外接附加电阻，通过接触器触头的切换来改变附加电阻的大小，即可有级地改变临界转差率 s_k 值，而最大转矩 M_m 值保持不变。随着阻值的增大，机械特性越软，转差率 s 越大，转速 n 也越低。这是依靠增加转差功率损耗的办法来降低转速的，经济性较差，多用在起重机等生产机械。该方法的优点是设备简单，除了有调速的作用外，还可得到改善异步电动机起动性能的效果。

5.2.2 转子电阻斩波器调速

将异步电动机的转子绕组接到三相整流桥的交流输入端，在整流桥的直流输出电路中接入外部电阻 R ，可等效为转子串电阻的结构型式。在电阻 R 两端并联一个斩波器，改变斩波器的导通和关断的时间比率，就可以改变整流电路中的有效电阻值而达到调速的目的。

设斩波器的工作周期为 T ，其中导通时间为 t_{on} ，关断时间为 t_{off} ，则斩波器的导通率为

$$\alpha = t_{on} / T \quad (7-5-24)$$



此时，转子电路的等值电阻近似为

$$R_{da} = (1-\alpha)R \quad (7\cdot5-25)$$

因此，改变导通率 α 的大小，等值电阻 R_{da} 可以在 $0 \sim R_d$ 之间变化。这种方法可以实现异步电动机的无级调速，且电路简单可靠，特别适用于通风机和泵类负载的调速，此时由于斩波功率等于转差功率，因此斩波器的成本不高。图 7-5-36 是斩波器调速的主电路原理图。图中三只晶闸管 V_1 、 V_2 、 V_3 ，电容器 C 和附加直流电源 U_c 等与电阻 R 构成转子电阻斩波电路。 V_1 和 V_3 同时触发导通，电容 C 上充有下“+”上“-”的电压；当 V_1 导通经过 t_{on} 后，触发 V_2 ，由于电容经 V_2 的放电作用，使 V_1 关断。

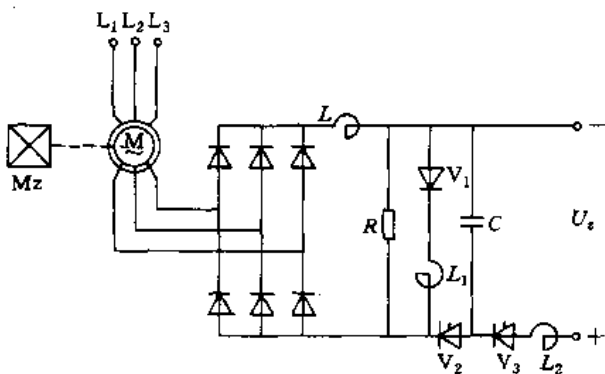


图 7-5-36 转子电阻斩波调速主电路原理图

5.3 电磁调速电动机调速

电磁调速电动机曾称为滑差电动机、电磁转差离

合器或 VS 电机等。该调速系统主要由笼型异步电动机、电磁转差离合器和直流励磁电源三部分组成。电磁转差离合器由电枢和磁极两部分构成，相互间可以自由转动。电枢由不调速的笼型电动机同轴连接带动旋转，磁极则通过联轴节与负载相连。改变磁极中励磁电流的大小，就可改变磁场的强弱，从而改变由电枢中的涡流与该磁场相互作用所产生的转矩的大小，即可实现调速的目的。图 7-5-37 为该调速系统示意图。

图 7-5-38a 是这种调速系统的机械特性，从图可看出，它的机械特性较软，为了改善系统的机械特性、提高工作稳定性和扩大调速范围，一般都需要增设转速负反馈。采用转速负反馈后的闭环系统机械特性见图 7-5-38b。

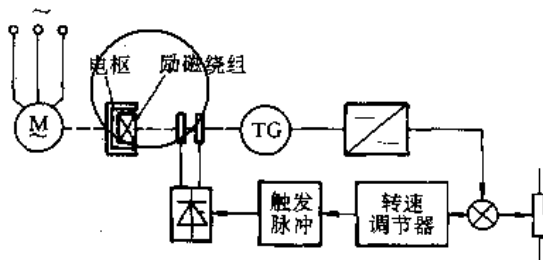


图 7-5-37 电磁调速电动机调速系统示意图

该调速系统的主要优点是结构较简单，价格较低，控制电路也较简单，运行可靠性也较高。其缺点是低速时效率低，且离合器发热较厉害，高速时特性较软，最高转速只能达到 80% 额定转速左右，转速损失较大。在负载小于 10% 额定转矩时，有一段失控区。该系统对风机、泵类负载较为合适。

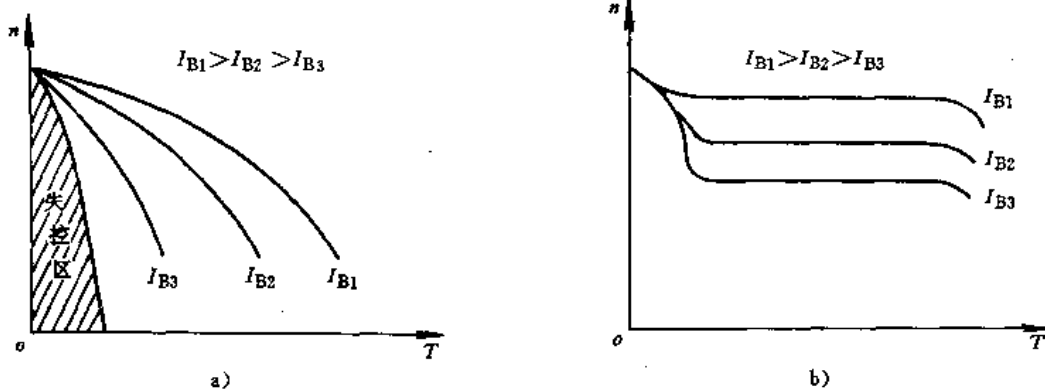


图 7-5-38 电磁调速电动机调速系统的机械特性

a) 电磁调速电动机的机械特性 b) 采用转速负反馈的闭环机械特性

5.4 异步电动机的变极对数调速

变极对数调速要由变极电动机来实现。变极电动

机的转子为笼型，其定子绕组可为单一绕组，也可为多绕组，利用附设的接触器控制电路来改变定子绕组的接线方式，以改变电动机的磁极对数 p 。由于异步电动



机的同步转速 n_0 与定子供电频率 f 和极对数 p 之间有以下关系:

$$n_0 = \frac{60f}{p} \quad (7.5-26)$$

因此, 改变极对数 p 就可改变同步转速 n_0 值, 达到调速目的。

常用的两种三相绕组改接方法, 一个是由一个星形改接成两个星形的并联(即 $\Upsilon/\Upsilon\Upsilon$), 第二个是由一

个三角形改接成两个星形的并联(即 $\Delta/\Upsilon\Upsilon$)。两种改接办法都使电动机磁极对数减少一半, 即同步转速升高一倍。其机械特性见图 7.5-39。其中 $\Upsilon/\Upsilon\Upsilon$ 变换属恒转矩调速, $\Delta/\Upsilon\Upsilon$ 变换属恒功率调速。在作上述变换时, 还需同时注意三相电源的相序, 以保持调速前后的转向一致性。

该调速方法的优点是效率高, 控制简单, 初投资少; 主要缺点是有级调速。

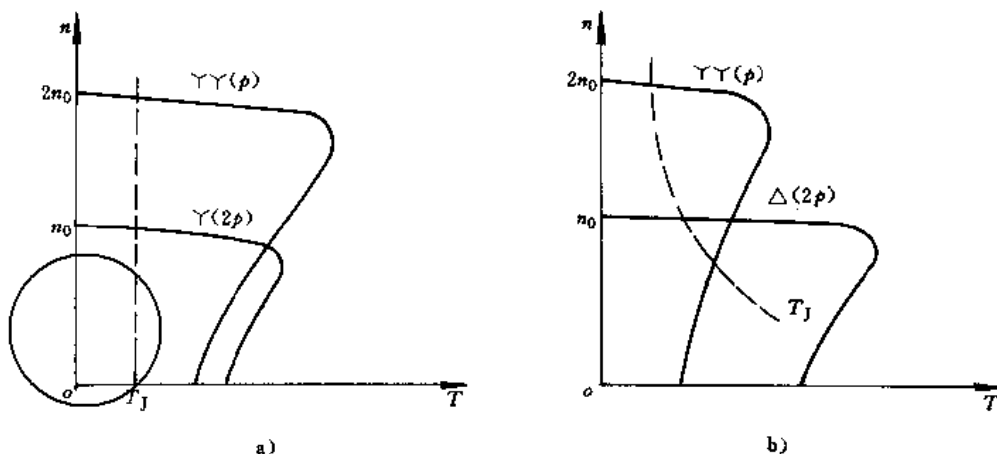


图 7.5-39 变极对数调速的机械特性
a) $\Upsilon/\Upsilon\Upsilon$ 变换时 b) $\Delta/\Upsilon\Upsilon$ 变换时

第6章 电气传动系统的工业应用

1 轧机电气传动控制系统

1.1 概述

轧机主传动不仅功率大, 而且要求调速范围宽, 转速控制精度高, 动态响应快, 是典型的高性能电气传动控制系统。

在 80 年代以前, 各种轧机的主传动采用直流电气传动控制系统。80 年代以来, 新型采用矢量控制原理的交流电动机控制技术获得了与直流电动机相同甚至更高的控制性能, 并已成功地用于多种轧机的主传动。近年来, 采用交流传动的轧机发展迅速, 常用的轧机交流传动为由交-交变频器供电的交流电动机系统。交流电动机可采用笼型异步电动机或同步电动机。交-交变频器分为无环流式和有环流式两种类型。图 7.6-1 为

各种交-交变频器—交流电动机系统的主电路。

现代轧机的交、直流传动系统, 其控制技术已从模拟式向采用微处理机的数字式发展。表 7.6-1 列出轧机主传动系统的性能比较。

各种轧机对电气传动系统的要求及适用的主传动系统见表 7.6-2。

1.2 带钢冷连轧机电气传动控制系统

1.2.1 直流电气传动控制系统

带钢冷连轧机的主传动包括 5 个机架, 开卷、卷取机均采用反并联连接的三相全控桥式晶闸管变流器—直流电动机系统, 由 16 位微处理机实现数字式控制。图 7.6-2 为微处理机数字式直流电气传动系统及硬件结构。



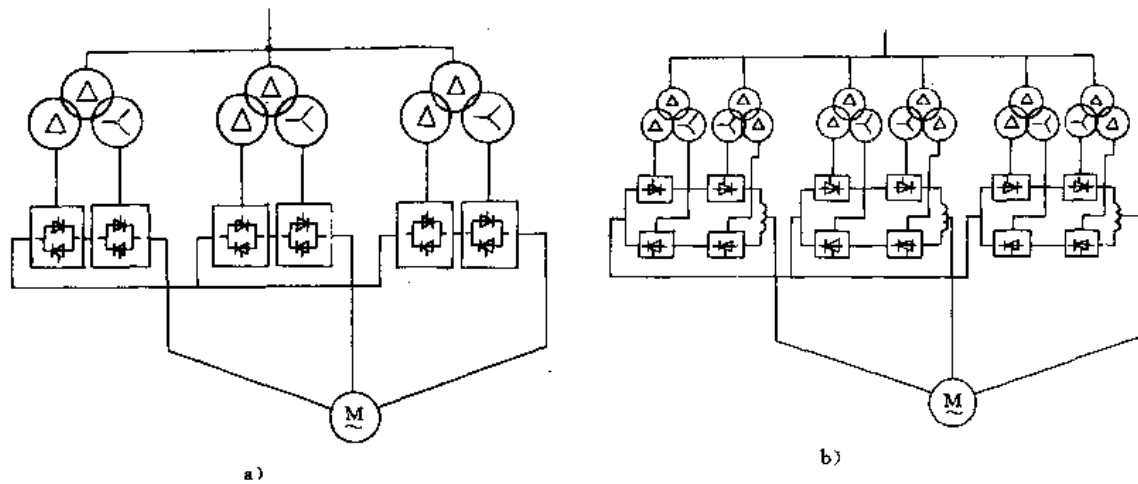


图 7-6-1 交-交变频器-交流电动机传动主电路

a) 无环流式 b) 有环流式

表 7-6-1 轧机主传动系统的性能比较

| 传动方式 比较项目 | | 直流传动 | 笼型异步电动机 | | 同步电动机 | |
|--------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | | | 无环流式 交-交变频器 | 有环流式 交-交变频器 | 无环流式 交-交变频器 | 有环流式 交-交变频器 |
| 传动系统规格 | 单机最大容量 | 受电动机常数的制约 | 没有制约 | | | |
| | 最高转速 (r/min) | 受电动机常数制约 | 600 | 1500 | 600 | 1500 |
| | 调速范围 | 1:3 | 1:7.5 | 1:7.5 | 1:3~5 | 1:3~5 |
| 控制性能 | 转速控制精度 (%) | ±0.01 | ±0.01 | ±0.01 | ±0.01 | ±0.01 |
| | 转速控制范围 (%) | 0.1~100 | 0~100 | 0~100 | 0.1~100 | 0.1~100 |
| | 转速控制响应 (rad/s) | 30 | 50 | 60 | 40 | 50 |
| | 转矩控制响应 (rad/s) | 200 | 600 | 900 | 500 | 700 |
| | 转矩脉动 (%) | ≈0 | 0~2 | ≈0 | 0~2 | ≈0 |
| 综合特性 | 电源功率因数 | 0.72 | 0.55 | 0.4~0.5 | 0.65 | 0.6 |
| | 综合效率 (%) | 87~88 (基准) | +2 | +2 | +3 | +3 |
| | 设备容量 | 小 | 中 | 大 | 中 | 大 |
| | 维护性 | 换向器、电刷 需要维护 | 无需维护 | | 维护量小 (有集电环) | |



表 7-6-2 轧机的要求及适用的传动系统

| 项 目 | 轧机 | 热 轧 机 | | | | 冷 轧 机 | |
|---------|----------------|---------------------------------|---------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|----------------------------|----------------------------|
| | | 低速可逆 | 中高速可逆 | 中高速不可逆 | 高速不可逆 | 中高速 | 中高速不可逆 |
| | | 厚板、粗轧机等 | 立辊轧机等 | 精轧机等 | 棒钢、线材轧机等 | 可逆式冷轧机 | 冷连轧机等 |
| 要求的性能 | 最高转速 (r/min) | 120 | 900 | 1100 | 1600 | 1200 | 1500 |
| | 转速控制响应 (rad/s) | 20 | 20 | 30 | 30 | 30 | 50 |
| | 极低速特性 | 不要 (但要失速转矩) | 不要 | 不要 | 不要 | 需要 | 需要 |
| | 弱磁范围 | 1:2.5 | 1:3 | 1:3.5 | 1:3.5 | 1:6 | 1:6 |
| | 转矩脉动 (%) | 5 以下 | 5 以下 | 2 以下 | 2~5 以下 | ≈0 | ≈0 |
| | 容量范围 (kW) | 1000~10000 | 1000~10000 | 1000~10000 | 500~10000 | 500~10000 | 500~10000 |
| 适用的传动系统 | | 1. 无环流交-交变频器—MS (MC) 2. 直流传动 | 1. 无环流交-交变频器—MS (MC) 2. 有环流交-交变频器—MS (MC) 3. 直流传动 | 1. 无环流交-交变频器—MS (MC) 2. 有环流交-交变频器—MS (MC) 3. 直流传动 | 1. 无换向器电动机 2. 有环流交-交变频器—MS (MC) 3. 直流传动 | 1. 有环流交-交变频器—MC 2. 直流传动 | 1. 有环流交-交变频器—MC 2. 直流传动 |

注：MC—笼型异步电动机；MS—同步电动机。

变流装置通常采用 6 相整流，特定场合可采用 12 相整流。速度控制环的采样周期为 10ms，电流及电流变化率内环的采样周期为 2.8/3.3ms。

数字式直流传动控制装置的硬件设备由 16 位微处理器 (MPU) 以及专用过程输入/输出设备 (PI/O) 组成。

数字式直流传动系统的性能规格见表 7-6-3。

传动系统中的转速检测器包含一台微处理器和三个计数器，而触发脉冲发生器由一台微处理器与计数器、脉冲分配电路、同步电路组成。

软件包括初始程序、主程序和应用程序。

初始程序在起动时执行。

主程序用于起动前检验印制电路板的运行状态以及引入监控程序。除了用于监控之外，在设备停机后，这种监控程序还可以用于打印存于专用存储器内控制

变量的诊断数据，诊断数据还可以发送至上位主数字式控制器或 CRT。

应用程序分为下述部分：

每 10ms 执行的转速控制程序；

每 2.8/3.3ms 执行的电流及电流变化率控制程序；

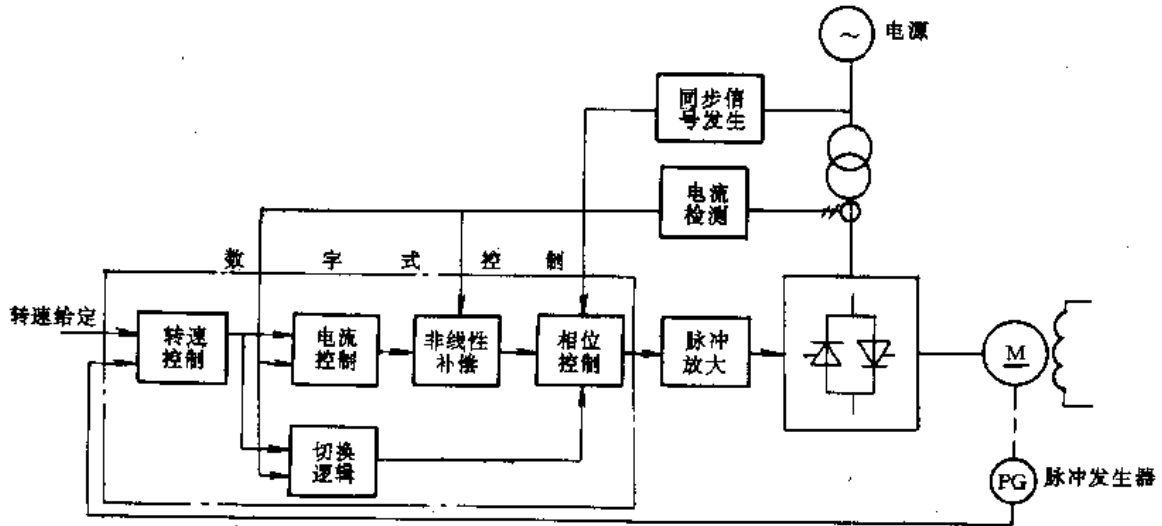
每 100ms 执行的时序程序；

在请求的最高级执行的保护程序。

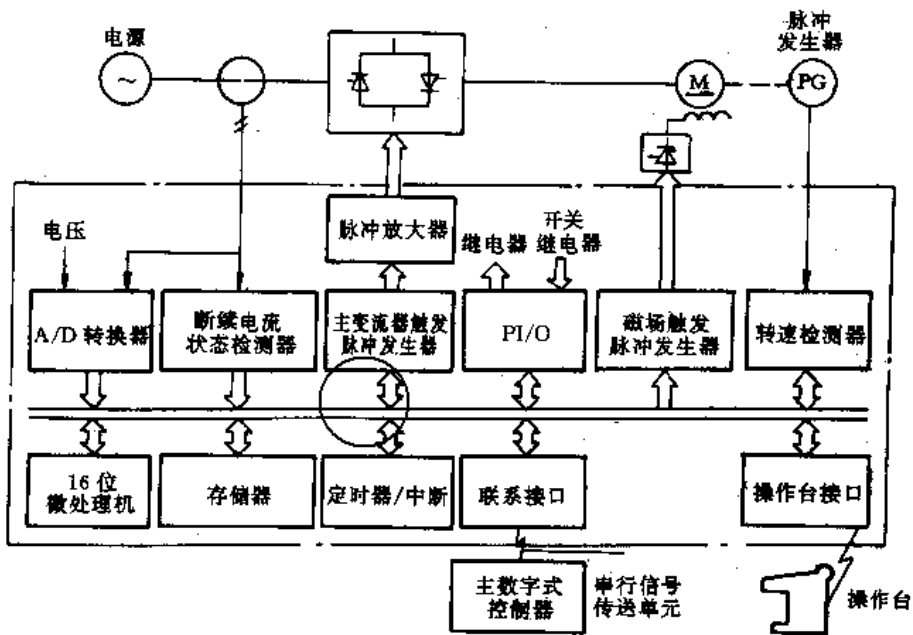
转速控制程序由以固定的周期产生的中断信号来启动。以转速检测器测得的数据为基础，微处理器计算出电动机的转速并且判断其是否超过额定转速。当电动机转速高于额定值时，即执行减小电流或使电动机停转这样一些保护性任务。电动机转速正常时，在转速给定条件下调节转速。

电流控制程序和电流变化率控制程序是由每个触





a)



b)

图 7-6-2 微处理机数字式直流传动及硬件结构

a) 数字式直流传动系统 b) 硬件结构



表 7-6-3 数字式直流传动系统的性能规格

| 项 目 | | 性 能 规 格 | |
|------------------|--------------------------|------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|
| 硬 件 设 备 | MPU | 16 位 5MHz RAM 1KB ROM 6KB | |
| | PI/O | 模拟输入 | 8 点, 12 位 |
| | | 数字输入/输出 | 数字输入 8 点 数字输出 8 点 |
| | | 与上位控制器联系的接口 | 串行联系, 专用 LSI 发送器 2 字 接收器 2 字 |
| | | 转速检测器 | 以微处理机为基础的转速检测器, 模拟量转换为数字量时不出现误差 |
| 触发脉冲发生器 | 具有快速响应, 以微处理机为基础的触发脉冲发生器 | | |
| 控 制 功 能 | 主环 | 采样周期 10ms 转速控制, 电压控制, 电流控制 | |
| | 内环 | 采样周期 2.8/3.3ms 对于转速/电压主控制环, 采用带有电流变化率控制的电流控制 对于电流主控制环, 采用电流变化率控制 | |
| 诊 断 | 起动前的离线检验 | 校验 MPU 校验主要的过程输入/输出设备 | |
| | 运行中的在线检验 | 检验执行时间 检验印制电路板的连接状态 检验被控参量 (转速、电压、电流等) | |
| | 故障后离线检验 | 在 CRT 或数据读出纸上显示出选取的故障数据 | |

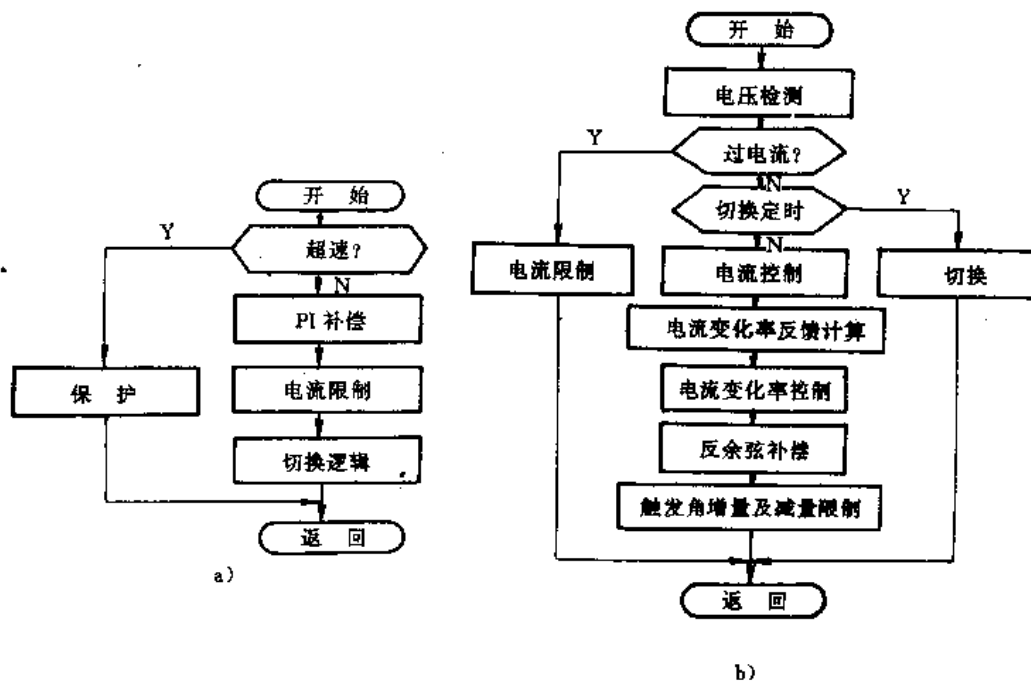


图 7-6-3 基本的软件结构

a) 转速控制程序 b) 电流及电流变化率控制程序



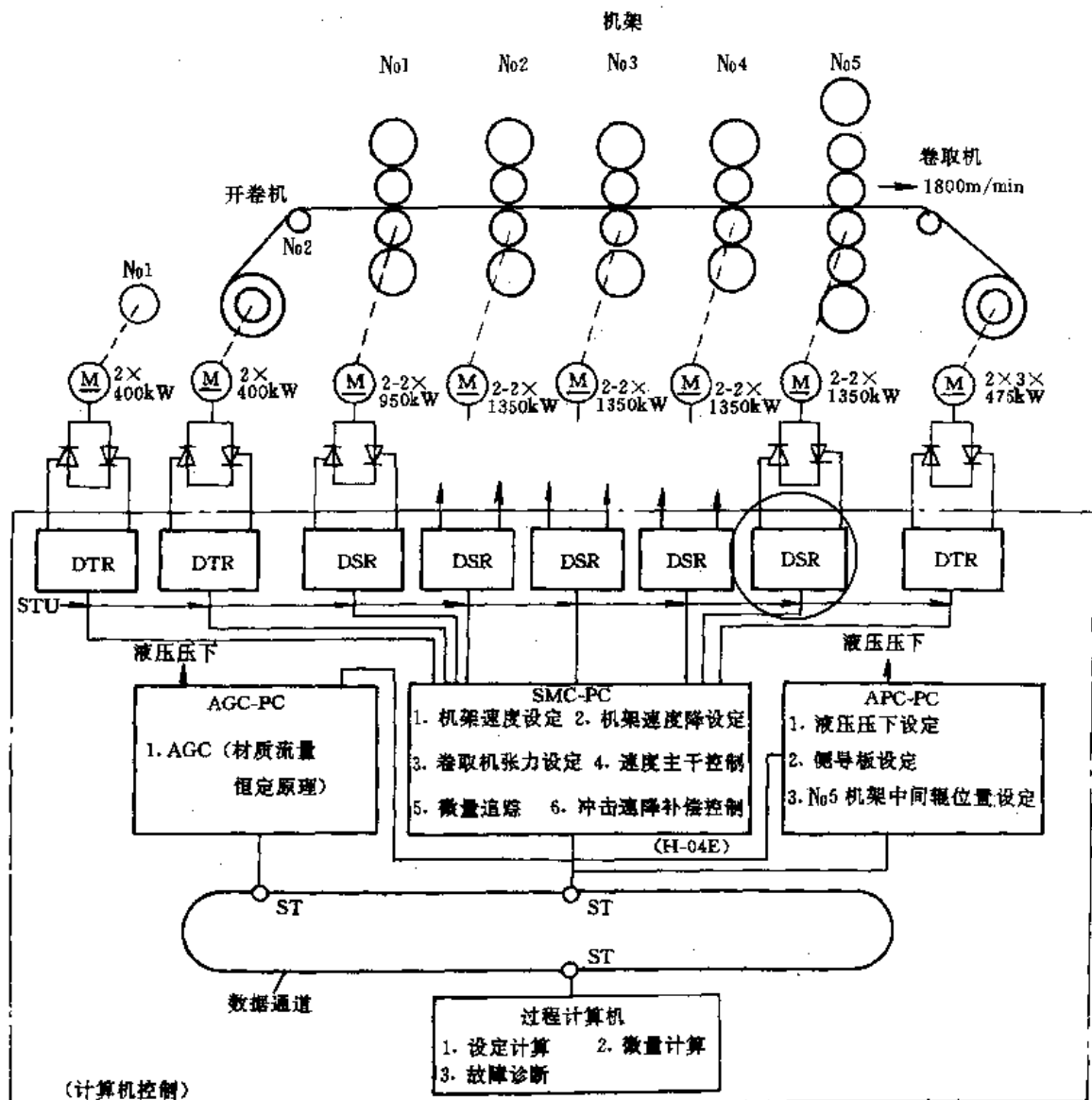


图 7-6-4 冷连轧机计算机控制系统

DSR—数字式控制装置 (转速调节) DTR—数字式控制装置 (张力调节) PC—可编程序控制器 ST—数据通信站
 SMC—转速主干控制 AGC—自动厚度控制 APC—自动位置控制 STU—串行信号传送单元

发脉冲产生的中断信号来启动的。通过 A/D 转换器检测瞬时电流值和平均值，每次产生一个触发脉冲。接着按照这些值是否超过允许的电流和/或电流变化率来检验。若超过了，则将会减小或限制这些值。以额定电流在四象限运行时，在反向定时内执行反向。在其他时间，则根据转速控制程序计算出的电流给定执行电流操作。结果，计算出电流变化率给定。随之，执行电流变化率程序，用瞬时电流计算出电流变化率反馈值。电流变化率运算结果需经采用反余弦补偿的非线性补偿。由此计算出触发脉冲发生器的触发角给定值。这些程序的基本软件结构见图 7-6-3。

带钢冷连轧机由监控级 (过程计算机，1 台) 一直连接数字控制级 (可编程序控制器，3 台) —传动控制级 (微处理机数字式控制装置) 组成轧制线全计算机数字式控制系统，实现综合自动化，见图 7-6-4^[3]。

1.2.2 交流电气传动控制系统

冷连轧机各机架主动传动均采用以矢量控制原理为基础的 72 桥臂有环流交-交变频器—笼型异步电动机传动系统 (见图 7-6-5)，以 4 台 32 位微处理机作为基本处理单元 (BPU) 实现数字式控制。

矢量控制原理的基本要点就是，在旋转磁场上建



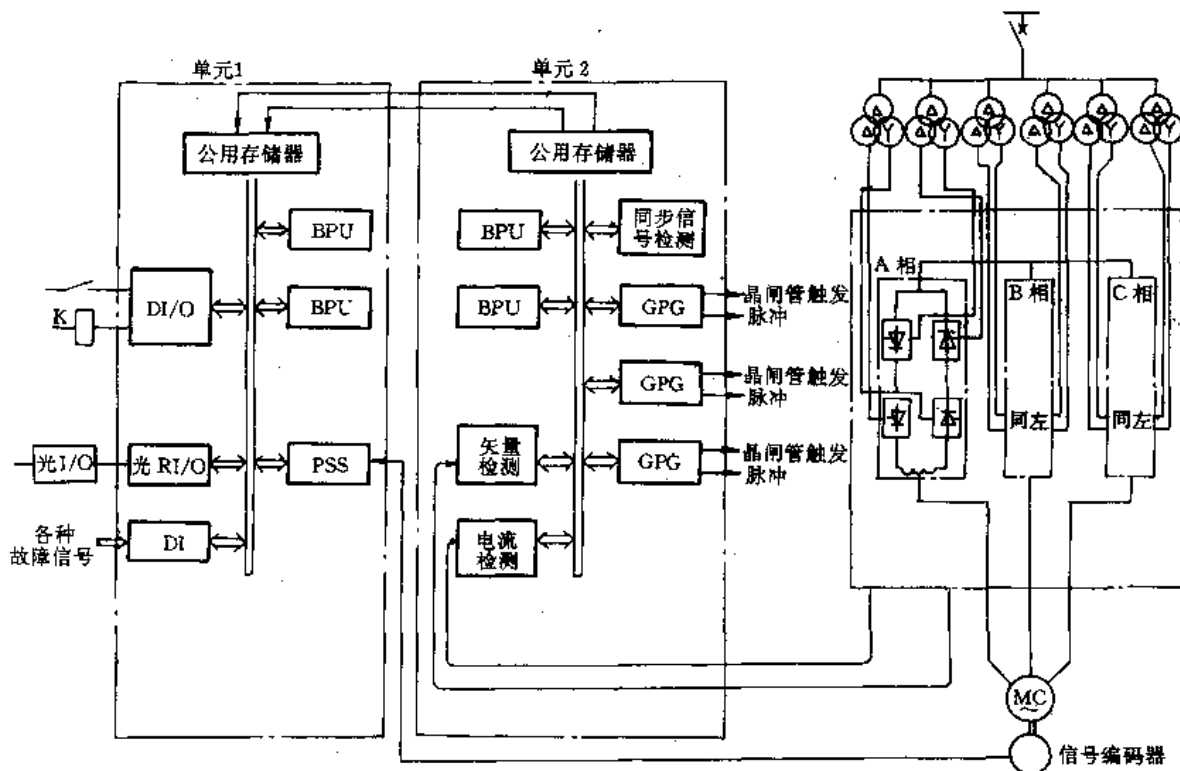


图 7-6-5 有环流交-交变频器—笼型异步电动机控制系统

BPU—基本处理单元 PSS—转速检测器 RI/O—远程输入/输出 GPG—触发脉冲发生器
DI/O—数字输入/输出

立坐标系，交流电动机的定子电流以及磁通则是各自以相同角速度旋转的矢量。将定子电流矢量分解为励磁电流分量(与合成磁通坐标轴平行)及与其垂直正交的转矩电流分量。这两个电流分量分别产生磁通、转矩。立足在旋转坐标系，励磁电流及转矩电流分量均为直流量。这样，将这两个分量各自独立地控制就能获得与直流电动机同样好的控制性能。从而，根本上解决了交流电动机难于控制的问题。

以 32 位微处理机组成的多处理机，实现了高速运算处理以及负载转矩观测器抑制轴振动，励磁电流、转矩电流的解耦控制，循环电流、负载电流解耦控制等新技术的应用，使冷连轧机主传动获得优异的控制性能，其主要指标如下：

- 交-变频器容量 9600kVA;
- 转速控制精度 $\pm 0.01\%$;
- 转速检测器 信号编码器 (每转 15000 脉冲);
- 转速响应 60rad/s;
- 调速范围 0~100%;
- 弱磁范围 1:6;
- 转矩响应 900rad/s;

- 主电路效率 93%;
- 功率因数 0.5;
- 晶闸管 4000V, 1500A

1.3 粗轧机电气传动系统

一个热轧厂，其 R3 粗轧机采用同步电动机作为主电机。同步电动机的电枢设计成双绕组，由 12 脉冲交-交变频器供电，转子励磁绕组由晶闸管变流器供电。以矢量控制原理为基础的无环流交-交变频器—同步电动机传动系统的主要数据如下：

- 额定功率 9000kW;
- 电压 1650V, 3 相;
- 电流 $2 \times 1619A$;
- 频率 8.33/19.26Hz;
- 转速 250/578r/min.

交流主传动从零到基速的加速时间为 0.25s，从零到最高速的加速时间为 0.9~1s，动态速降 1.9%，恢复时间 80ms。

同步电动机功率因数为 1，效率为 98.1% (未计励磁损耗)，励磁损耗为 88.4kW，115% 额定功率连续运



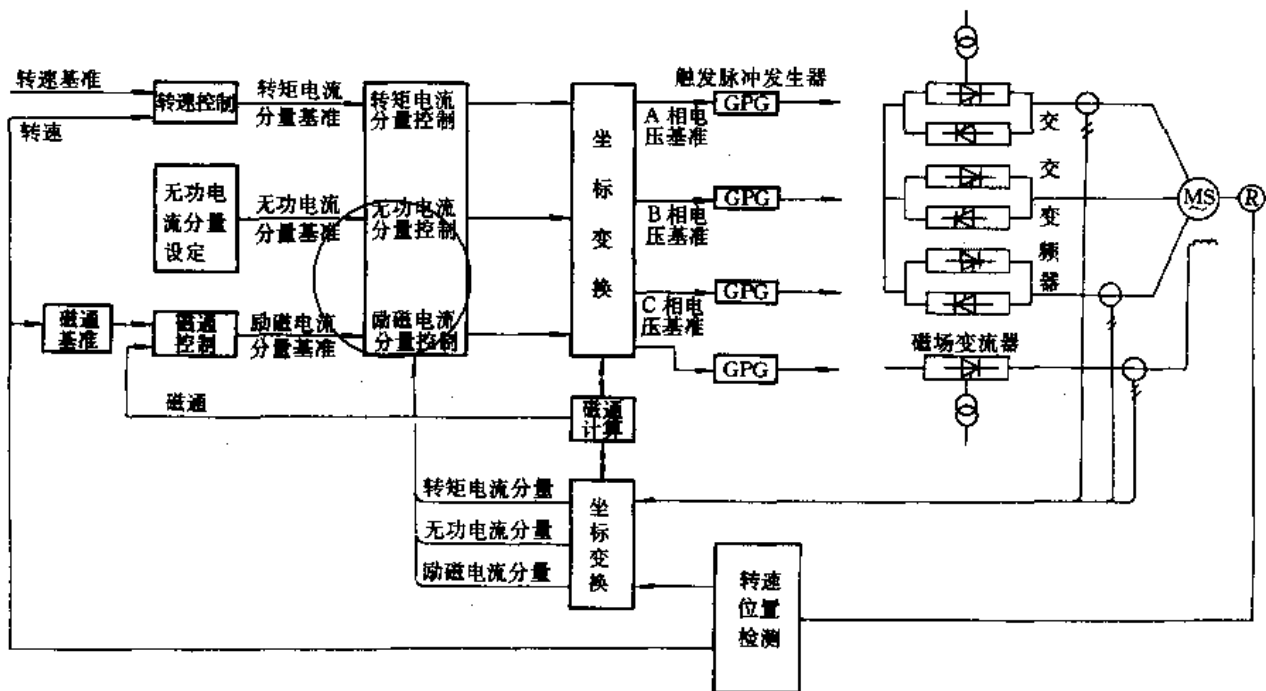


图 7-6-6 传动系统的组成

运行时过载转矩倍数为 2.3 倍，电动机采用 F 级绝缘。

另一个热轧厂，其 R1、R2 粗轧机以及立式破鳞机 VSB 均采用无环流交-交变频器—同步电动机传动系统。同步电动机可以实现功率因数为 1 的运行。传动系统的规格见表 7-6-4，系统组成见图 7-6-6。

传动系统采用 1 台微处理机 (μP)、2 台数字信号处理机 (DSP) 组成多 CPU 系统，执行数字式控制，以便使功能分散，提高可靠性并实现快速、高精度的运算处理。以矢量控制原理为基础的无环流交-交变频器—同步电动机传动系统的硬件结构见图 7-6-7。

表 7-6-4 传动系统的规格

| 轧机 | 破鳞机 VSB | 粗轧机 R1 | 粗轧机 R2 |
|------------|--------------|----------------|-----------|
| 项目 | | | |
| 同步电动机台数 | 1 | 2 | 2 |
| 额定功率 (kW) | 3750 | 2×3000 | 2×7000 |
| 转速 (r/min) | 180/360 | 16.5/33 | 35/70 |
| 频率 (Hz) | 9/18 | 2.2/4.4 | 4.67/9.33 |
| 过载能力 | 225%，60s | | |
| 晶闸管 | 4000V, 1000A | 4000V 1500A | |

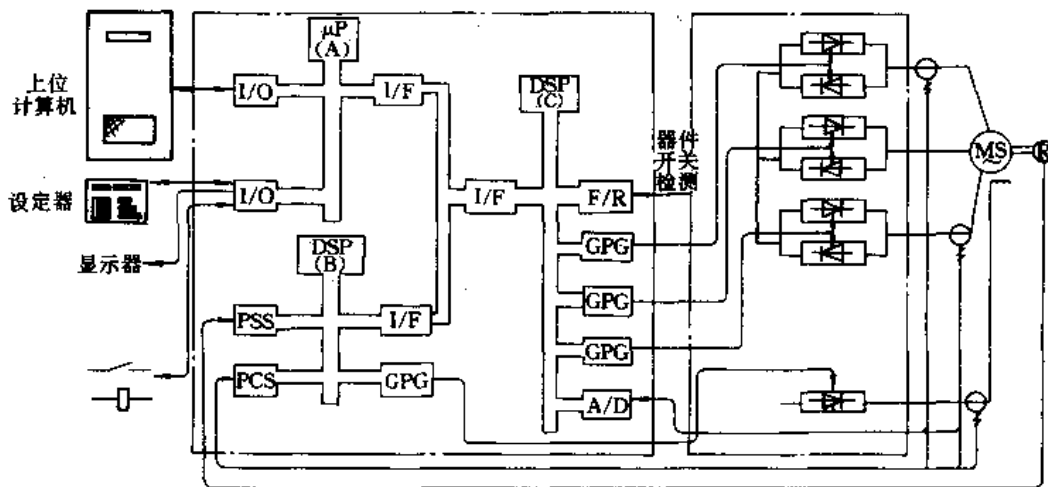


图 7-6-7 传动系统的硬件结构

GPG—触发脉冲发生器 F/R—交-交变频器极性切换电路 PSS—速度检测器 PCS—电流检测器



微处理机 $\mu P(A)$ 执行转速控制、磁通基准运算, 以及对外部硬件设备的连接和对 DSP 的控制。数字信号处理机 DSP (B) 执行电流控制、磁通运算、坐标变换等控制功能。DSP (C) 专门执行无环流交-交变频器的触发控制。解算器 R 可以高精度检测电动机转速和磁极位置。为了提高维护性能和操作性, 传动装置具有故障诊断、数据扫描等功能, 还可和上位计算机进行数据传送。图 7-6-8 为传动系统的阶跃速度响应性能, 轧制时传动系统的波形图见图 7-6-9^[2]。

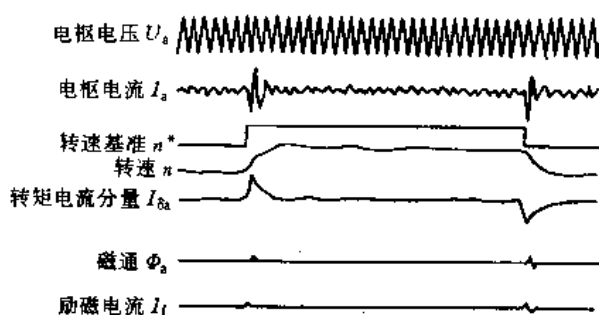


图 7-6-8 传动系统阶跃速度响应性能

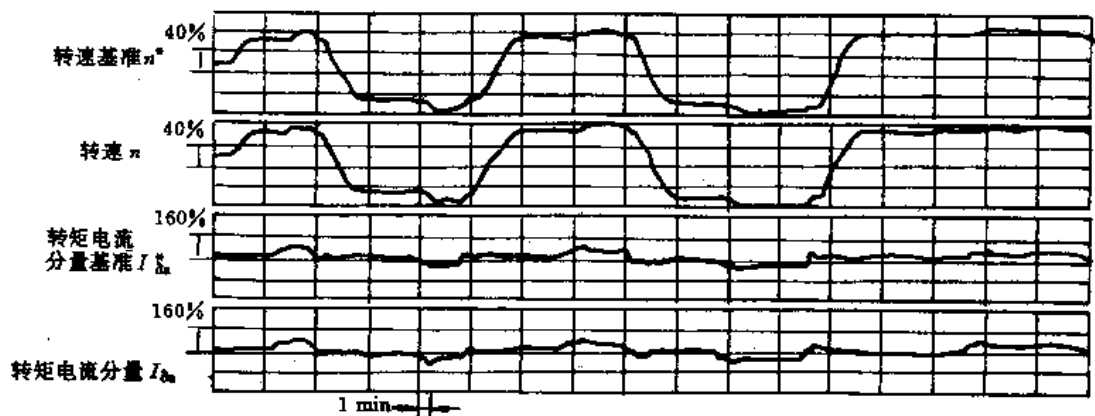


图 7-6-9 轧制时传动系统的波形图

1-4 高速线材轧机计算机控制系统

高速线材轧机是具有 25 个机架的连轧设备。在主轧线上, 从加热炉出口侧开始, 有 1 号夹送辊、1 号卡断剪、4 架 500mm 紧凑式大压下量初轧机、1 号飞剪、5 架 400mm 悬臂式中轧机、2 号飞剪、6 架 300mm 悬臂式预精轧机、3 个立活套装置、3 号飞剪、4 号旋转碎断剪、转换器、1 个侧活套装置、2 号卡断剪、10 架 200mm 75 度角无扭精轧机组、三段式喷水装置水冷却线、2 号夹送辊、吐丝机。

主轧线及风冷线辊道所有传动均采用直传动。精轧机组的驱动电动机, 4 台采用两串两并方式, 其余轧机均为单机驱动。除 3 号飞剪外, 其他驱动设备都是不可逆系统。

来料: 135mm × 135mm × (9000~12000) mm 连铸坯。

成品: $\phi 5.5 \sim 13$ mm, 共 10 种规格。

品种: 普通钢、低碳钢、中碳钢、高碳钢、低合金钢、冷镦钢、焊条钢、螺纹钢、弹簧钢等。

轧制速度: 保证速度 90m/s, 最高速度 108m/s。

产量: 300000t。
卷重: 最大 1.7t。

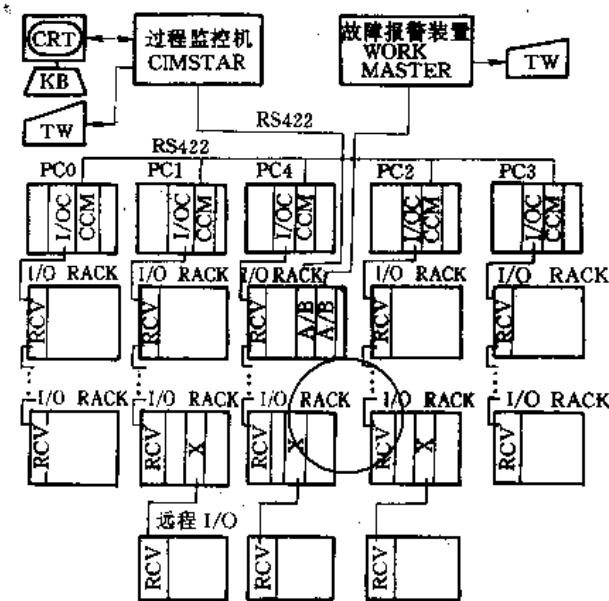


图 7-6-10 高速线材轧机计算机系统配置图
I/O C—I/O CONT X—XMTR RCV—I/O 接收



高速线材轧机计算机系统是由过程监控级和设备控制级构成的两级分布式控制系统:

过程监控级——CIMSTAR 过程监控计算机, 1台;

设备控制级——可编程序控制器(PC), 5台。

此外, 还设置了 WORK MASTER 故障报警装置。图 7-6-10 为高速线材轧机计算机控制系统配置图。

1.4.1 过程监控计算机

CIMSTAR 过程监控计算机, 其 CPU 为 80286, 时钟频率为 10MHz, 内存容量为 1MB, 配有 20MB 的硬盘驱动器和 2 台 720KB 的软盘驱动器, 另外还设有带键盘的 CRT 显示设备和 80 列输出打印机。

过程监控计算机使用 MS-DOS3.02 版本操作系统, 采用美国 MICROSOFT 公司的 QUICKBASIC 编程语言进行编程。

过程监控计算机控制时采用程序设定方式, 具有下述监控功能:

(1) 设定值产生与传送是将各种钢材的规格和品种的原始参数值以及设备的特性参数值(如辊径、齿轮比等)制作成各种不同规格品种的轧制规程设定值表, 以表格文件方式存入计算机。计算机随时根据所轧制钢材的规格、品种, 将相应的设定值表调出, 实时地传送给设备控制级。设定值表有 100 个(10 种规格×10 个品种)。

(2) 借助 CRT 画面和键盘, 可以很方便地将轧制规程设定值表调出, 进行在线实时修改, 以便完善优化轧制规程表。

(3) 收集生产过程中有关的运行参数值, 进行 CRT 画面显示, 以便操作人员了解掌握运行状况, 供操作指导用。

(4) 将收集的生产信息(如轧制根数、重量等)制成记录文件, 进行班报、日报打印。

1.4.2 可编程序控制器

美国通用电气(GE)公司生产的 6 系列 6-6000 型 PC, 是 16 位字长的位片机, 存储容量为 32KB, I/O 量为 2048 点, 每 1KB 解算速度为 2ms。采用梯形图语言进行编程, 具有丰富的算术、逻辑、移位、表传送、矩阵运算、子程序、I/O 强制等功能指令供用户使用。

设备控制级的任务由 5 台 PC 来完成。

(1) PC0——实现加热炉区的控制;

(2) PC1——实现粗轧区和中轧区的控制。

这 2 台 PC 担负着从加热炉出口至 2 号飞剪沿轧线各设备的运转动作控制, 其主要功能有:

- 1) 1~9 号机架的转速给定和级联调速控制;
- 2) 1~9 号机架的微张力控制;
- 3) 1~9 号机架的动态速降补偿控制;
- 4) 1 号、2 号飞剪的切头切尾和故障碎断控制;
- 5) 1 号卡断剪的动作控制;
- 6) 1 号夹送辊的转速和动作控制;
- 7) 1~9 号机架间故障诊断控制。

(3) PC2——实现预精轧区和精轧区的控制。

它担负着从 10 号机架至吐丝机间沿轧线设备的运行动作控制, 其主要控制功能有:

- 1) 以精轧末架转速为基准, 进行轧制系统基准转速的设定;
- 2) 对 10~15 号机架、2 号夹送辊、吐丝机进行转速设定;
- 3) 进行轧机的起动、升速、运转、减速、停车控制;
- 4) 10~15 号机架的级联调速控制;
- 5) 活套系统的活套量自动控制;
- 6) 3 号飞剪的自动定尺切头控制;
- 7) 3 号飞剪、转换器、4 号旋转碎断剪的故障碎断控制;
- 8) 10~15 号机架及精轧机组动态速降补偿控制;
- 9) 故障诊断、废品探测处理控制。

(4) PC3——实现精轧区的控制。

它担负着从风冷线辊道至钢卷运输线的终点卸卷台间各设备的运转控制。

(5) PC4——实现整个系统的通信任务。

它负责过程监控级与设备控制级间的信息通信, 在设备控制级各 PC 之间, 以主 PC 身分向各从 PC 进行信息通信。

PC 与过程监控计算机、故障报警装置间的信息传送是通过安装在 PC4 的输入输出框架中的 A/B 模块来实现的。A/B(ASC I/BASIC)模块实际上是由 1 台 8085 微处理器及其支持电路组成的微型计算机, 它可以和 CPU 直接进行信息交换, 同时它的 2 个串行 I/O 口在 GE-BASIC 编程语言控制下, 可与使用 RS-232 或 RS-422 接口的设备相连接。过程监控计算机将各设定参数值通过通信接口传送给 PC4。同时 PC4 将设备控制级收集到的实际过程运行参数值传送给过程监控计算机。PC4 只向故障报警系统传送故障报警信息。



WORK MASTER 故障报警装置配置 2 台软盘驱动器, 自带 1 台屏幕显示器, 用于对过程中产生的各种故障报警信息进行处理, 并按故障等级的高低进行排序显示和实时打印记录。

故障报警装置使用 MS-DOS3.02 版本操作系统, 在 GE-LOGICMASTER 6 编程软件支持下进行程序编制和修改, 并可对程序的运行状态进行监视。

2 矿井提升机电气传动控制系统

矿井提升机是矿业中联系井下与地面的运输工具, 用于竖井和斜井提升煤炭、矿石以及升降人员、材料和设备等。矿井提升机可采用直流传动和交流传动, 其中以矢量控制原理为基础的交流变频器—交流电动机系统是 80 年代进入工业应用的新型交流传动, 发展迅速。交—交变频器采用无环流式。交流电动机中同步电动机与笼型异步电动机均可应用, 而以同步电动机

机为主流, 尤其是对大型的矿井提升机。

2.1 直流电气传动控制系统

某煤矿主井提升机晶闸管变流器—直流电机传动系统基本数据如下:

井深 510.4m, 提升高度 488.7m;

箕斗 自重 7.5t, 载煤量 12t;

最大提升速度 12.5m/s (第 1 期);

14.4m/s (第 2 期);

最大加速度 0.7m/s²;

直流电动机 2100kW, 715V, 3300A, 46r/min。

提升机直流传动系统采用电枢单向供电、磁场可逆供电方案。电动机电枢回路采用两个三相全控桥相串联顺序控制后再并联的顺序控制方案。图 7-6-11 为 2100kW 提升机晶闸管直流传动系统图。

电枢回路供电方式有以下特点:

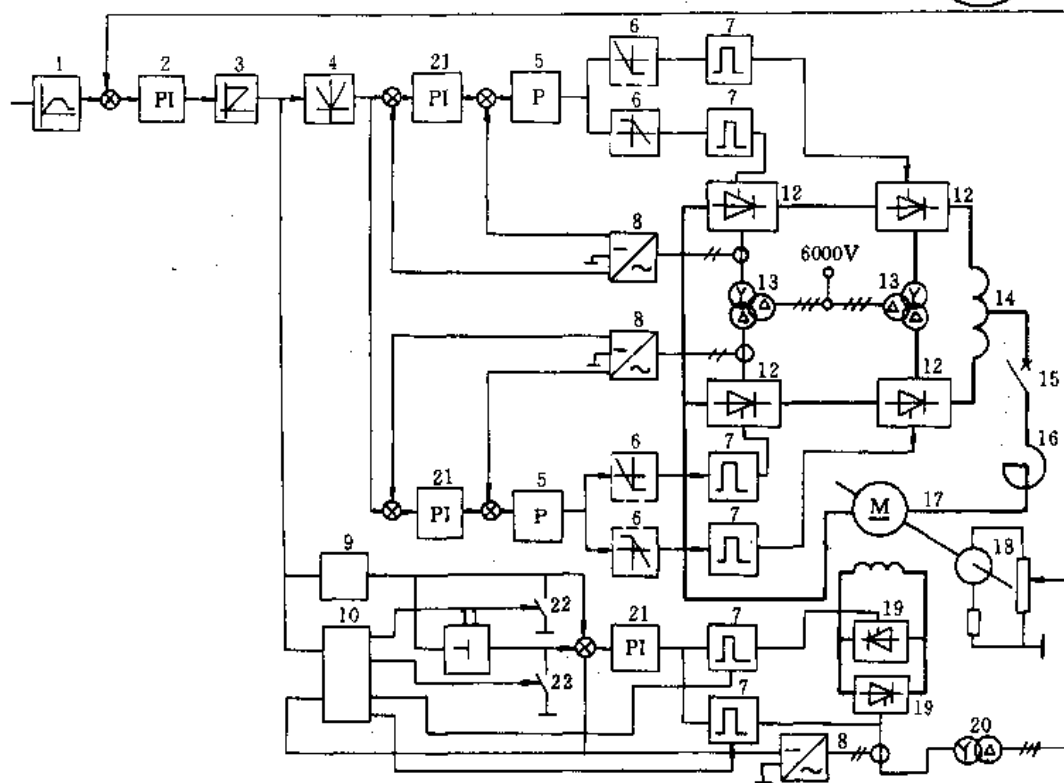


图 7-6-11 提升机直流传动系统

- 1—给定积分器 2—转速调节器 3—电流斜率限制器 4—绝对值调节器 5—P 调节器 6—顺序调节器
 7—触发装置 8—电流检测 9—比例调节器 10—无环流逻辑切换 11—倒相器 12—主变流器 13—主变压器
 14—平衡电抗器 15—快速断路器 16—滤波电抗器 17—直流电动机 18—测速发电机 19—磁场变流器
 20—磁场变压器 21—电流调节器 22—电子开关

(1) 减少启动、制动时的无功电流冲击和减少无功功率造成的损耗;

(2) 尽可能减少晶闸管整流电路造成的高次谐波对电网供电质量的影响;



(3) 两个串联顺序控制电路借助平衡电抗器并联得到输出 24/12 相波形。

2.2 交流传动控制系统

2.2.1 交-变频器—同步电动机系统

矿井提升机为罐笼式。载人——30min 可载 750 人，提升煤——20t。提升速度为 12m/s，井深为 1050m，内装电机式摩擦轮直径为 6.5m。同步电动机额定功率为 2200kW，电压为 1650V，3 相，额定频率为 14.1Hz，额定转速为 35.1r/min，电动机极数为 48 (24 对)。矿井提升机传动，以矢量控制原理为基础，采用无环流交-变频器—同步电动机系统，由多微处理机 (16 位) 实现数字式控制。

多微处理机系统的硬件设备由下述部分组成：10 块处理机模板，5 个输入/输出模块，1 个模拟输出模

块，2 个通信缓冲器模块，2 个框架连接模块，用于交-变频器矢量控制系统。

10 块处理机模板分别用于：

执行设定值/实际值监控功能；

执行通信功能；

用于基准输入变量发送器；

执行位置控制功能；

执行转速控制功能；

用于矢量控制和坐标变换；

执行 A 相电流控制功能；

执行 B 相电流控制功能；

执行 C 相电流控制功能；

执行励磁电流控制功能。

提升机交流传动控制系统其软件按控制功能设计成软件包，与硬件模板、模块结构协调适配。图 7-6-12 为提升机交流传动的软件框图。

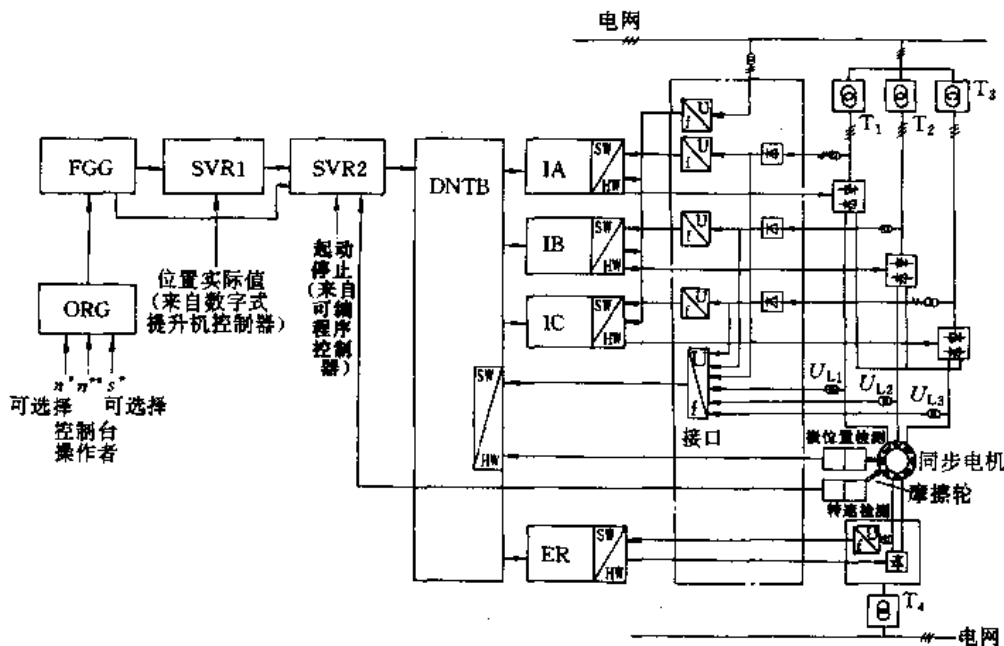


图 7-6-12 提升机交流传动系统的软件框图

HW—硬件 SW—软件 n^* —转速设定 n^{**} —通过控制电平的转速给定 s^* —转速目的地 (位置) 设定

软件承担的控制任务有交-变频器的闭环控制、计算以及开环控制等。此外，软件的任务还有自诊断、维护、操作控制等。它共有 9 个软件功能包，各自执行下述控制任务和功能。

功能包 FGG：基准输入变量发送器；输入设定；位置；转速；加速度。

功能包 SVR1：带有 S 斜率函数发生器的位置控制。

功能包 SVR2：转速控制。

功能包 DNTB：矢量控制；坐标变换；电压模型；电流模型；DC 变量调节器；磁通调节器；设定变换。

功能包 IA：A 相电流控制；电流设定校正。

功能包 IB：B 相电流控制；电流设定校正。

功能包 IC：C 相电流控制；电流设定校正。

功能包 ER：励磁电流控制；

功能包 ORG：FGG 的参数化 (与操作方式有关)。



它们有5种不同的采样时间供用户程序所用。与传动有关的功能部分使用的采样时间为3.5ms。监视程序用于人机接口,可以随机存取,处理参数,变量的周期性输出以及参数显示。数据传送程序用于对外部设备及上位控制器——可编程序控制器的串行接口。

数字式控制系统的特殊优点就是有自诊断功能。运行期间,自诊断功能可以在线检查模板、模块的功能和状况,可以监视所有的参数。在传动闭环控制系统中

有400种监视功能。一旦出现故障就会发出警报或使传动停车。监视和诊断软件使故障信息传送初始化,并通过串行接口传送到可编程序控制器。这些信息就直接传送到诊断处理机,选择显示设备,并在提升机控制台的显示设备上显示出来。

矿井提升机交流传动应用的另一实例是,同步电动机的额定功率为4200kW,设计有两个分开的三相定子绕组,由两套无环流式交-交变频器供电。图7-6-13为4200kW交-交变频器的主电路。

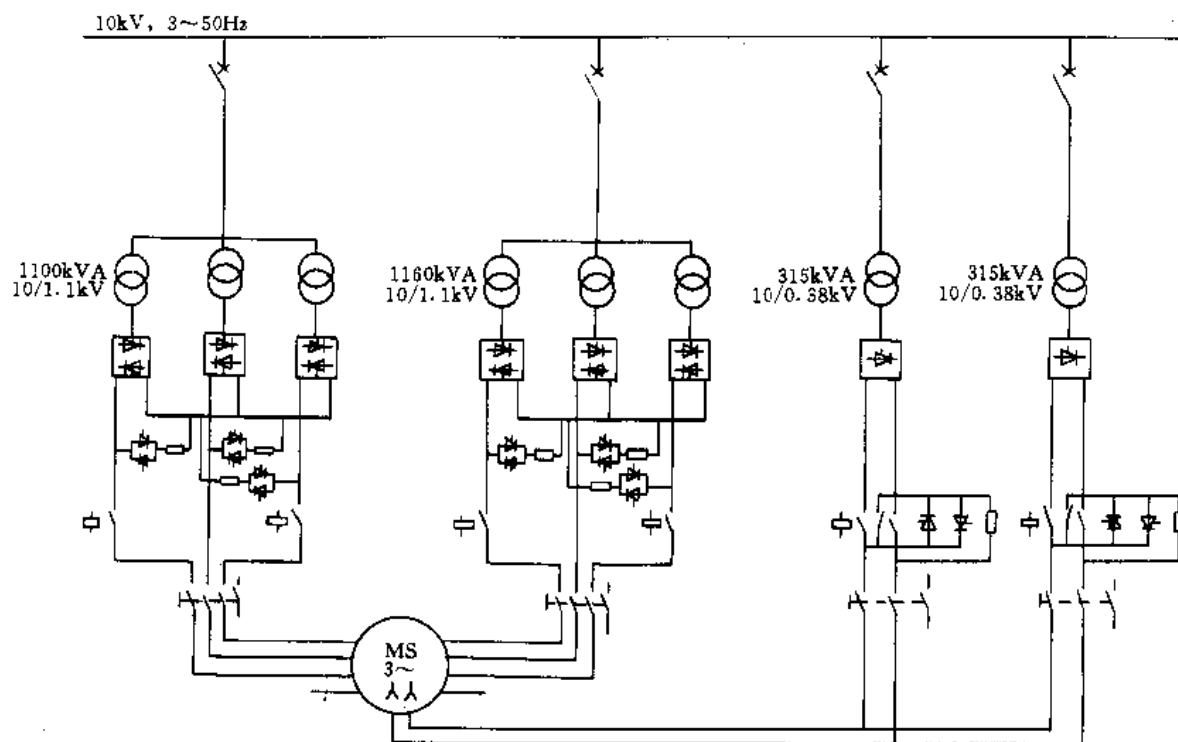


图 7-6-13 4200kW 交-交变频器的主电路

双交-交变频器—同步电动机传动系统采用高速可编程序控制器实现控制。三相同步电机为低速凸极电动机,稳态运行时功率因数为1。同步电动机的效率为96%,气隙为11mm,提升机交流传动具有下述性能规格。

提升机:

种类 6绳、摩擦轮式提升机,落地式;

有效提升载重 30t (35t);

井深 1283m (1450m);

罐笼 160人的载人罐笼(4层),载物罐笼(2层);

制动设备 液压双盘式。

同步电动机:

额定功率 4200kW;

转速 45.86r/min;

频率 7.65Hz;

定子电压 $2 \times 3 \times 1680V$;

最大转矩 2187kN·m。

交-交变频器:

型式 三相无环流式,12脉冲;

电压 $2 \times 3 \times 1680V$;

闭环控制 高速可编程序控制器 PHSC。

双交-交变频器供电的传动系统,假若调用应急操作,能将一组不正常运行的交-交变频器脱离电网,由手动操作使电动机端断电。应急操作过程中,额定速度可用50%的电动机转矩获得。此外,为减小提升机传



动的谐波电流，设置了由3个串联谐振电路组成的补偿设备，谐振频率调整为204、247及346Hz。

2.2.2 交-变频器—笼型异步电机系统

某矿井单滚筒式提升机用于运送矿物和人员，井深为2000m。交流传动采用的是无环流交-变频器—笼型异步电动机系统，具有下述主要性能规格。

笼型异步电动机：750V，530kW，9Hz，55r/min，

18极，F级绝缘，过载能力200%（30s）。

交-变频器：无环流正弦波交-变频器，采用转差频率型矢量控制原理，由多微处理机（16位）实现数字式控制，见图7-6-14。

三台16位微处理机分别执行下述各种控制功能。

主微处理机：转速控制；磁通控制；矢量运算；极坐标电流控制。

SEQ微处理机：顺序；保护；服务。

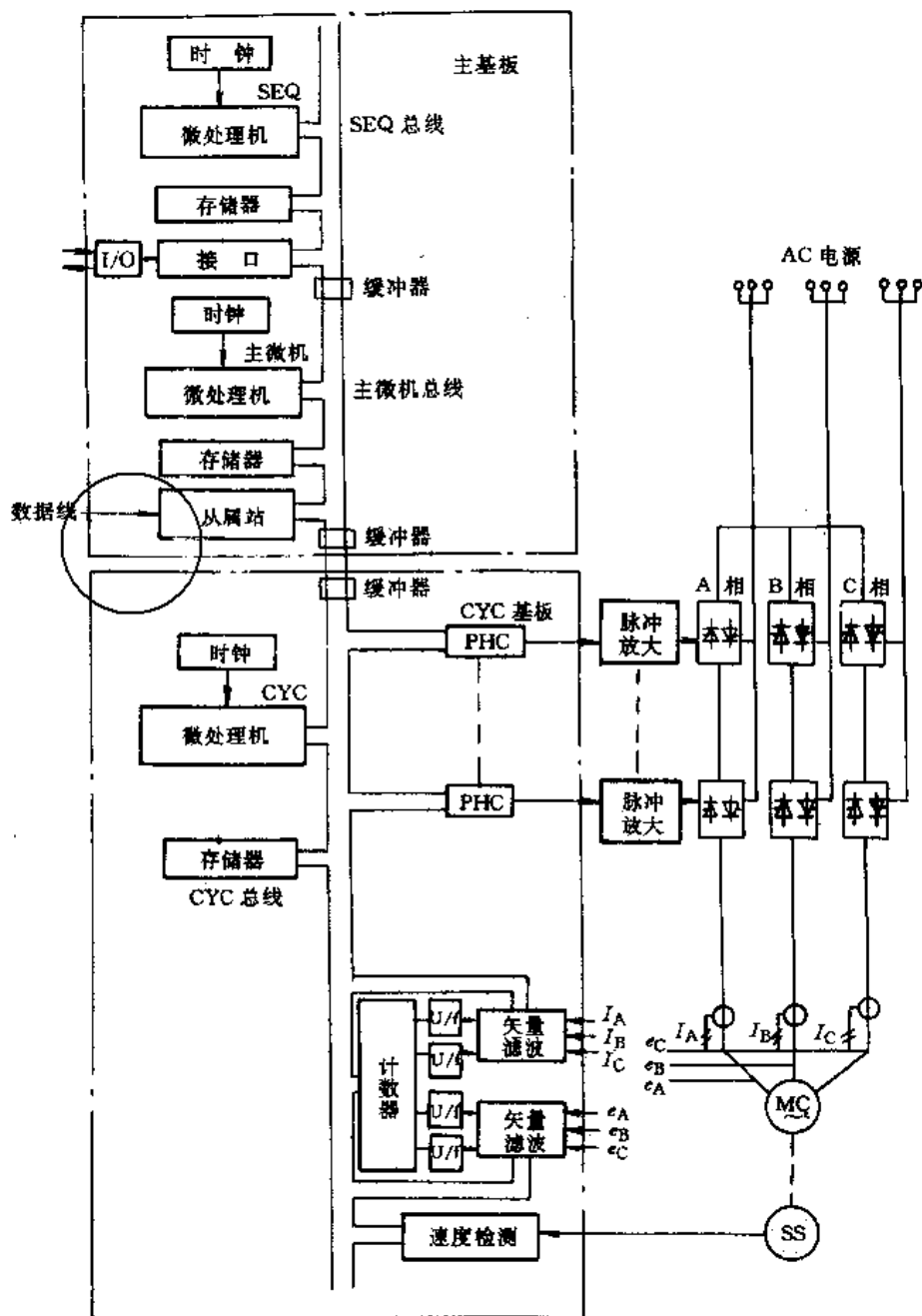


图7-6-14 交-变频器—笼型异步电动机数字式控制系统

此星公司制作 请尊重原作者版权



CYC 微处理机：相位控制 (PHC)，功率因数改善控制；矢量滤波。

主微处理机、SEQ 微处理机设置在主基板上，CYC 微处理机设置在 CYC 基板上。

3 海洋石油钻机电气传动系统

设置海洋石油钻机的平台 (或钻井船) 远离陆地，因而一般都有数套柴油发电机组构成的自备电站，供给动力用电和生活用电，大型钻井船的电站容量可达

15000kVA 或更大。

海洋石油钻机通常采用晶闸管变流装置供电的直流电动机驱动，典型的钻机有 4~10 台电动机，每台额定功率为 550~750kW，电压为 720~750V，防护等级为 Ex (P) 级，采用风冷或水冷散热装置。图 7-6-15 为海洋石油钻井平台电气系统的典型布局，自备电站的电力通过 6000V/600V 变压器馈电给 10 套晶闸管变流装置，并经接触器分别给各直流电动机供电。

转盘采用单台电动机驱动，为钻杆提供动力转矩。

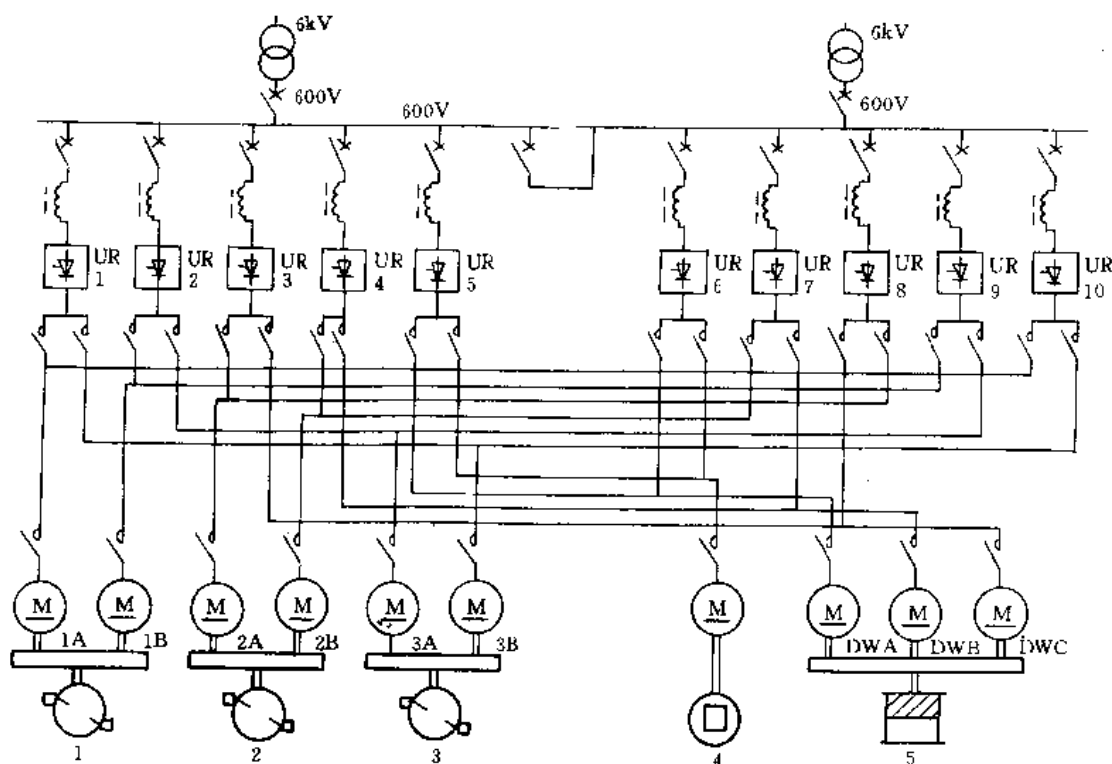


图 7-6-15 海洋石油钻井平台电气系统图

1、2、3—泥浆泵 4—转盘 5—绞车

UR—普通晶闸管装置 DWA—绞车 A DWB—绞车 B DWC—绞车 C

绞车用于提升及控制钻杆和钻井设备。

泥浆泵是大型活塞泵，用来将钻井泥浆通过钻杆压入井内。钻井时，泥浆将小石片和岩屑从井中带出。此外，它还具有冷却和润滑钻头、保持井孔内的压力、避免井壁塌方、防止井喷的作用。

海洋石油钻机电气系统采用了微处理机控制的新技术。微处理机囊括了柴油机—交流发电机自备电站的自动控制、钻机传动系统的调节控制、晶闸管数字触发、系统运转前的自检、故障诊断与显示 (可记忆主导故障，对某些故障的反复确证)、保护 (对晶闸管过载按结温分级保护，对电机过载按发热状态预报)，以及

运转程序逻辑处理等功能。图 7-6-16 为海洋石油钻井平台微处理机控制系统图。

近来，海洋石油钻机还发展了交流传动控制技术。转盘传动采用了 GTO 电压型逆变器—笼型异步电动机变频控制系统，见图 7-6-17。

笼型异步电动机额定功率为 760kW，电压为 0~900V，3 相，转速 1050r/min，频率为 35Hz。弱磁运行的最大转速为 1560r/min，频率为 52Hz。

GTO 逆变器 (PWM 控制) 输出功率为 760kW，输出电压 0~900V，3 相，输出频率 0~52Hz (恒转矩范围为 0~35Hz，弱磁范围为 35~52Hz)。



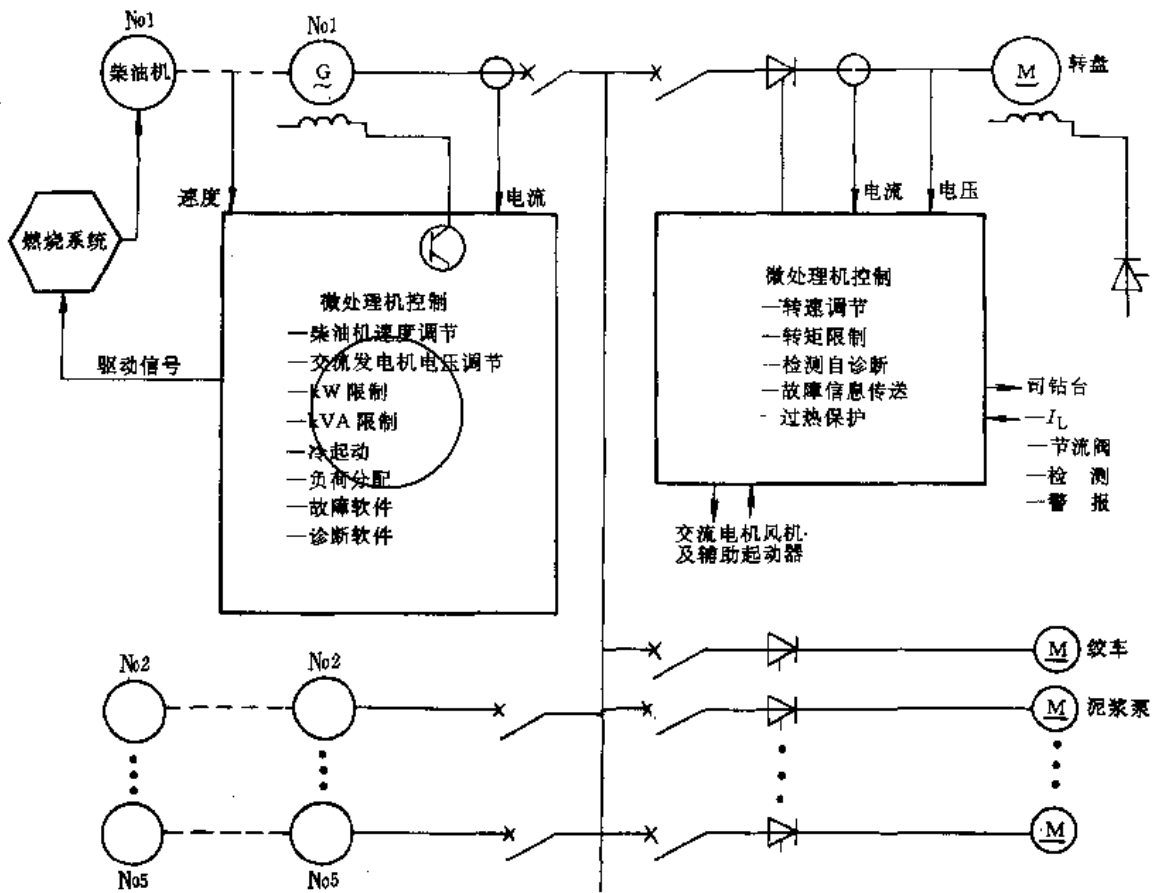


图 7-6-16 海洋石油钻井平台微处理器控制系统

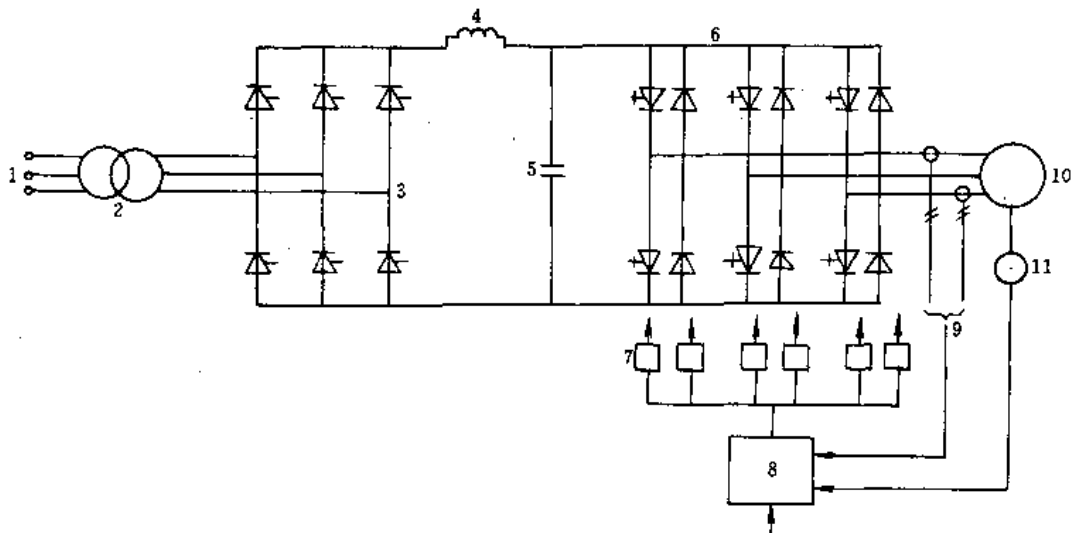


图 7-6-17 笼型异步电动机变频控制系统

- 1—电网 2—变压器 3—整流器 4—滤波电感器 5—滤波电容器 6—GTO逆变器 7—触发脉冲发生器
8—控制系统 9—电流检测 10—笼型异步电动机 11—转速传感器(数字式)



为了使电动机得到要求的速度和转矩，必须同时控制电压和频率，由GTO逆变器的控制来实现。三角波形的辅助控制电压用于脉宽调制(PWM)。转盘系统中，笼型异步电动机、齿轮箱和液压操作管钳是装在一个可在井架上沿着导轨上下移动的滑车上。因而，这种系统滑车可以升起，吊装一根长27m的钻井套管（它由3根9m长的套管组成），并可连续钻井，从而明显减少了套管次数，缩短了停顿时间。这对生产费用十分昂贵的海洋石油钻井平台来说，具有重要意义。

4 造纸机电气传动控制系统

造纸机是包括多种工艺流程的生产机械。各种机械设备多至10余个分部，主要包括把纸浆流到铜网上去的网部、起脱水作用的压榨部、干燥部、压光部和卷取部。造纸机电气传动是要完成多台电动机协调运行和稳速运行的典型系统，不仅要求调速范围宽，而且在电源波动或负载变化时要求速度保持高精度、长期稳定运行。

某造纸机直流电动机分部传动系统采用微型计算机数字式控制。传动总功率为7150kW，造纸机最高速度为1065m/min，正常速度为488m/min。每一分部采用1台16位微型计算机作为分部控制器。此外，还有用作主令控制器的微型计算机和监视通信控制用的微型计算机，构成了造纸机多微机数字式控制系统。

分部控制器用软件编程来执行控制算法。控制算法采用高级语言编写，并装入EPROM，对速度环、电流环和分部的逻辑控制（如起动-停止电路等）的算法

都写成各自的分部程序。其他的控制功能则存储在主令控制器中。图7-6-18为分部控制系统框图。

主令控制器对造纸机的各分部发出运行速度给定值，主令控制器的程序通过总线使各个分部系统密切配合，还通过通信控制与人机接口，使整个控制系统协调一致。

另一台造纸机实例是，分部传动采用以矢量控制原理为基础的逆变器—笼型异步电动机数字式控制系统。

造纸机的规格：

网宽 5800mm；

抄速 1000m/min；

纸质 上等纸；

分部数 15（包括风机、泵）；

控制精度 $\pm 0.01\%$ 。

电气设备的规格：

电动机 38台；

单台电动机功率 8~470kW；

电动机总功率 5200kW；

晶闸管电流型逆变器 13套；

晶体管电压型逆变器 25套；

主令控制用可编程序控制器 PC-50，1台；

维护监视用可编程序控制器 PC-50，1台；

中央操作室CRT装置 PD4000，1台；

生产管理计算机 G8050，1台。

造纸机分部传动，165kW以下采用晶体管电压型逆变器—笼型异步电动机系统，165kW以上则采用晶

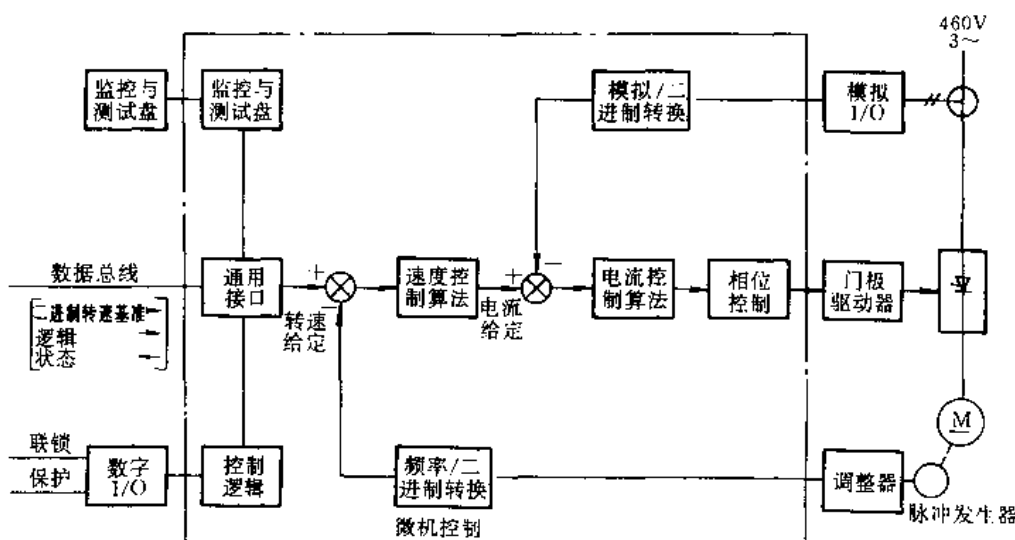


图7-6-18 分部控制系统框图



闸管电流型逆变器—笼型异步电动机系统。

采用晶闸管的电流型逆变器,由16位微处理机进行矢量控制,图7-6-19为电流型逆变器—笼型异步电动机控制系统。交流电源经整流器变换成可调的直流电压,再由逆变器将其变换成任意频率,对笼型异步电动机进行调速控制。

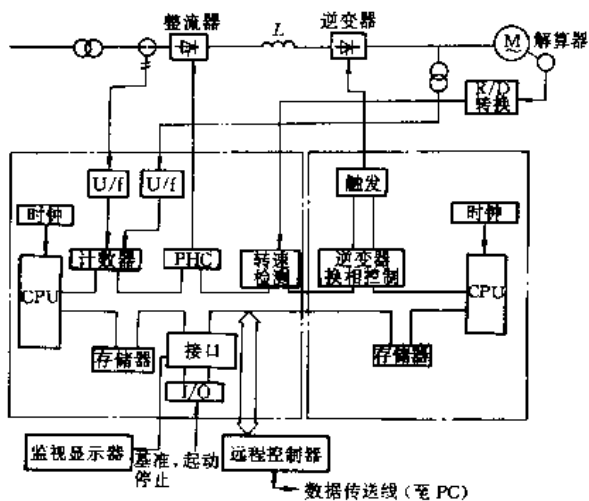


图 7-6-19 电流型逆变器—笼型异步电动机控制系统

在低频输出时,采用转矩频率调制(TFM),扩大了调速范围。TFM是同时进行脉宽调制和脉幅调制的控制技术。转速检测采用高分辨力的无刷解算器与数字式控制相结合,可实现±0.01%的控制精度。

功率为165kW以下的分部传动,以矢量控制原理

为基础,采用了晶体管电压型逆变器—笼型异步电动机系统(图7-6-20),由微处理机实现数字式控制。交流电源经整流器变换成恒定的直流电压,再由晶体管逆变器PWM控制实行调速控制。因为采用了PWM控制,基本上没有转矩脉动,而且还由于采用了矢量控制,获得了高性能。逆变器可进行再生控制,实现四象限运行。电压型逆变器控制柜体上设有监视显示设备,可以进行数据监视、设定、故障显示等。

主令控制采用了1台可编程序控制器,对各分部逆变器—笼型异步电动机传动进行总体控制。可编程序控制器执行下述控制功能:抄速运算;各分部抄速差运算;风机、泵转速控制;张力控制;松弛控制;总体传动程序。

维护监视用PC-50可编程序控制器对各分部逆变器、电动机及电气系统进行维护监视,能快速查明故障发生的原因。如转速反馈异常时,在故障发生时刻的200ms内,打印出故障发生前14点,故障发生后5点,总共20点的数。

维护监视用PC-50可编程序控制器执行的维护监视功能如下:各电动机异常检测、监视(转速、转矩、电流);各电动机的故障监视(包括温度);打印出上述故障发生时的履历;打印出接地等系统故障的信息;切纸时打印出该部分的履历数据。

在中央操作室内设置了1台PD-4000可编程序显示器作为人机接口装置,进行造纸机主令控制常数的显示、设定,分部传动装置的状态显示,纸的种类,各分部间的抄速差的显示、设定等。显示器采用20in

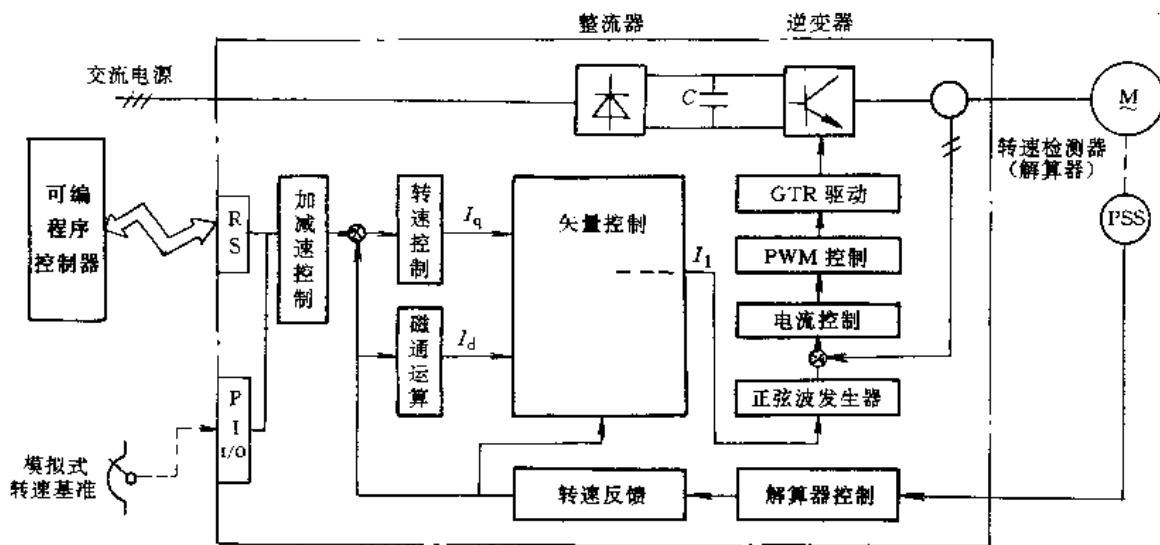


图 7-6-20 电压型逆变器—笼型异步电动机控制系统

此星公司制作请尊重原作者版权



(50.8cm) 彩色 CRT, 操作键盘采用平面型键盘。

可编程序显示器的功能如下:

机械数据显示、设定, 各分部主要滚筒的滚径、传动比的显示以及滚筒研磨时的设定变更;

各分部的速度基准、实际速度、设定图的显示, 各分部的抄速差的显示;

流程图的显示;

流程图表的显示, 用柱形图表示各分部主要电动机的负载率;

运行状态显示, 各分部的准备、运行、故障及维护监视项目的状态显示;

抄速设定显示、变更, 抄速设定的操作场所及设定、运行状态的显示以及设定变更。

中央操作室 PD-4000 可编程序显示器与 PC-50 主令可编程序控制器之间采用 TL-1000 光纤数据传输装置进行联系。

生产管理计算机、可编程序控制器、各分部逆变器传动数字式控制装置等各级设备之间, 由于各种数据传输装置的采用, 信息传送速度快, 可靠性高, 工程操作容易。

造纸机数字式逆变器—笼型异步电动机分部传动系统在宽的调速范围(1:30~1:40)内获得稳定的控制, 实现了高的控制精度; 采用矢量控制, 对负载的变动可以得到与直流电动机同样好的快速响应; 不存在

转矩脉动, 也不存在扭转矩对机械系统的有害影响, 没有电刷的维修问题。

5 电梯电气传动控制系统

对电梯的基本控制要求是安全可靠, 平稳舒适, 平层准确, 合理运行, 效率高, 经济实用。

电梯按运行速度分为两类: 105m/min 以下为低速电梯, 120m/min 以上为高速电梯。

低速电梯以往一般采用交流单速系统, 交流变极电动机双速系统或定子调压系统。近年来已经迅速发展采用调压变频(VVVF)的晶体管电压型逆变器—笼型异步电动机传动系统, 有些还进而采用矢量控制的晶体管电压型逆变器—笼型异步电动机传动系统。

高速电梯采用直流传动或逆变器—笼型异步电动机传动系统, 它的发展尤为受到注目。

5.1 交流传动系统

5.1.1 晶体管电压型逆变器—笼型异步电动机系统

电梯交流传动技术中, VVVF 传动系统在低速到高速电梯中得到应用。表 7·6-5 列出了 VVVF 笼型异步电动机传动系统在电梯中的应用情况。速度为 60~105m/min 电梯的 VVVF 传动系统见图 7·6-21。高速、超高速电梯 VVVF 传动系统见图 7·6-22。

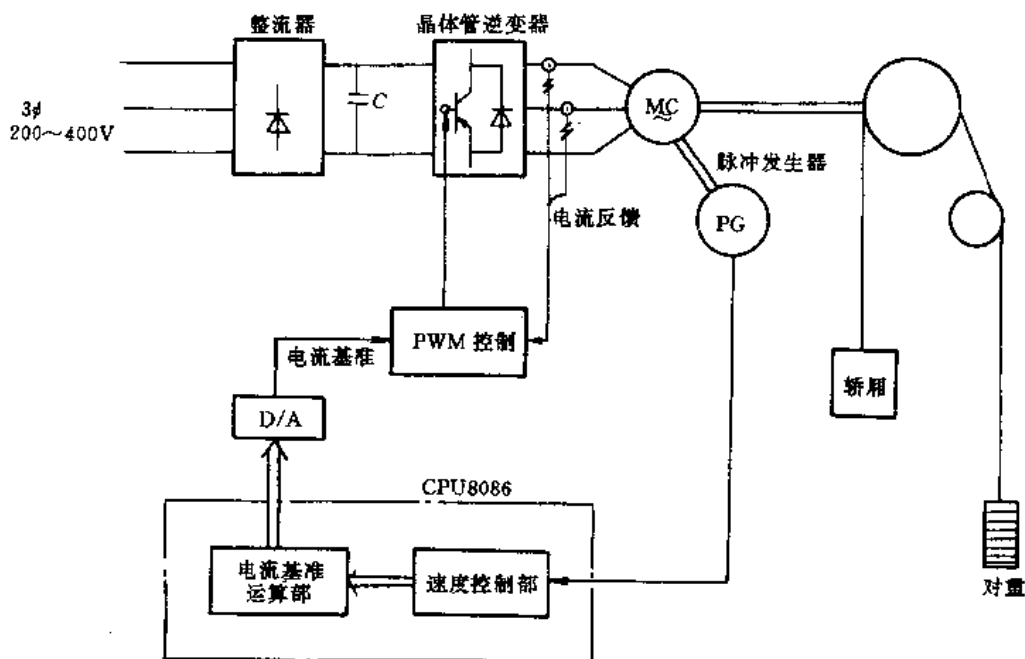


图 7·6-21 低速电梯 VVVF 传动系统

此星公司制作 请尊重作者版权



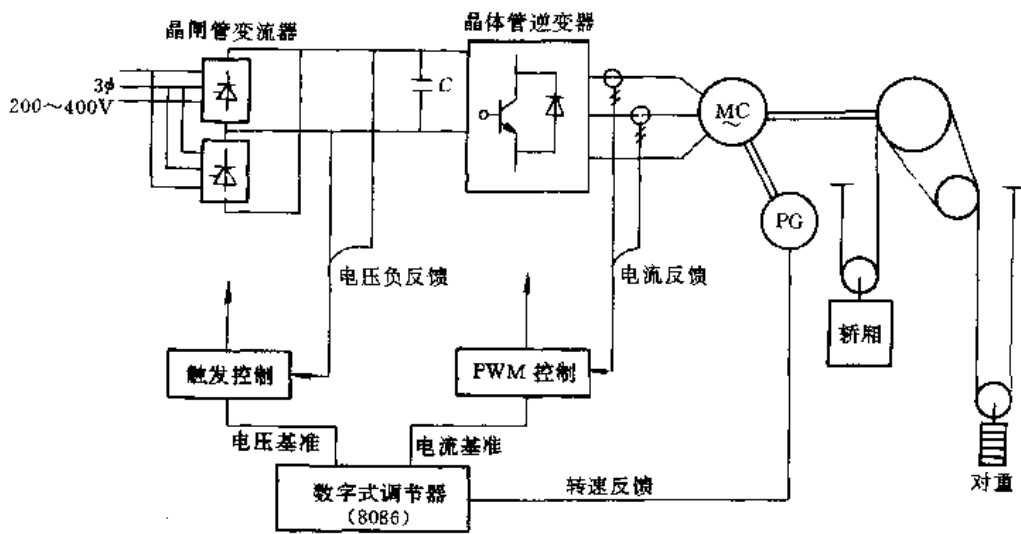


图 7-6-22 高速、超高速电梯 VVVF 传动系统

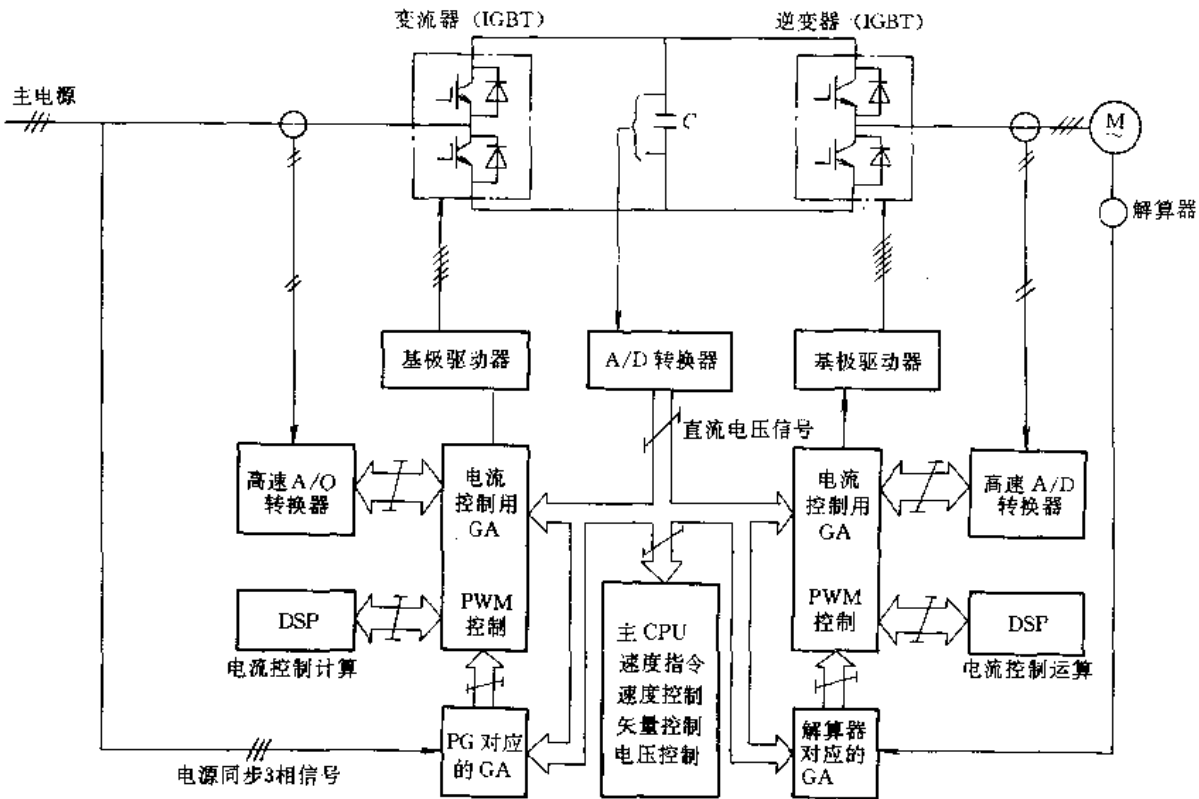


图 7-6-23 矢量控制电压型逆变器—笼型异步电动机系统

GA—门阵列 PG—脉冲发生器

高速、超高速电梯 VVVF 传动系统采用 16 位微处理器控制，软件分为三部分：转速控制、电流基准值运算和电压基准值运算。转速控制部分从转速给定值和转速反馈值运算出差频率，其结果送到电流基准值运算部分和电压基准值运算部分。

电流基准值运算部分计算出电流基准值，用于晶体管逆变器的 PWM 控制；电压基准值运算部分将运算结果作为给定值送到晶闸管的门极，用于晶闸管变流器的脉幅调制（PAM）控制。

以矢量控制原理为基础的电压型逆变器—笼型异



步电动机系统见图 7-6-23, 传动功率为 110kW, 用于 600m/min 超高速电梯。

表 7-6-5 VVVF 交流调速电梯应用情况

| | | | |
|--------------|--------|---------|---------|
| 速度范围 (m/min) | 60~105 | 120~240 | 300~360 |
| 电动机容量 (kW) | 3.7~15 | 18~45 | 35~65 |
| 机械传动装置 | 蜗轮蜗杆 | 螺旋减速机 | 无减速机 |
| 变频器采用的器件 | 硅整流器 | 晶闸管或晶体管 | 晶闸管或晶体管 |

变频器、逆变器均采用 1200V、300A 绝缘栅双极晶体管 (IGBT) 模块, 由微处理器、数字信号处理机 (DSP) 组成多 CPU 系统, 执行全数字式控制。主微处理器承担转速控制、矢量控制、电压控制, 变频器及逆变器各采用 1 台 DSP, 执行电流控制运算。

5.1.2 正弦波电流型逆变器—笼型异步电动机系统

多微处理器控制的正弦波电流型逆变器电梯传动系统 (图 7-6-24), 在高速、超高速电梯中应用取得了

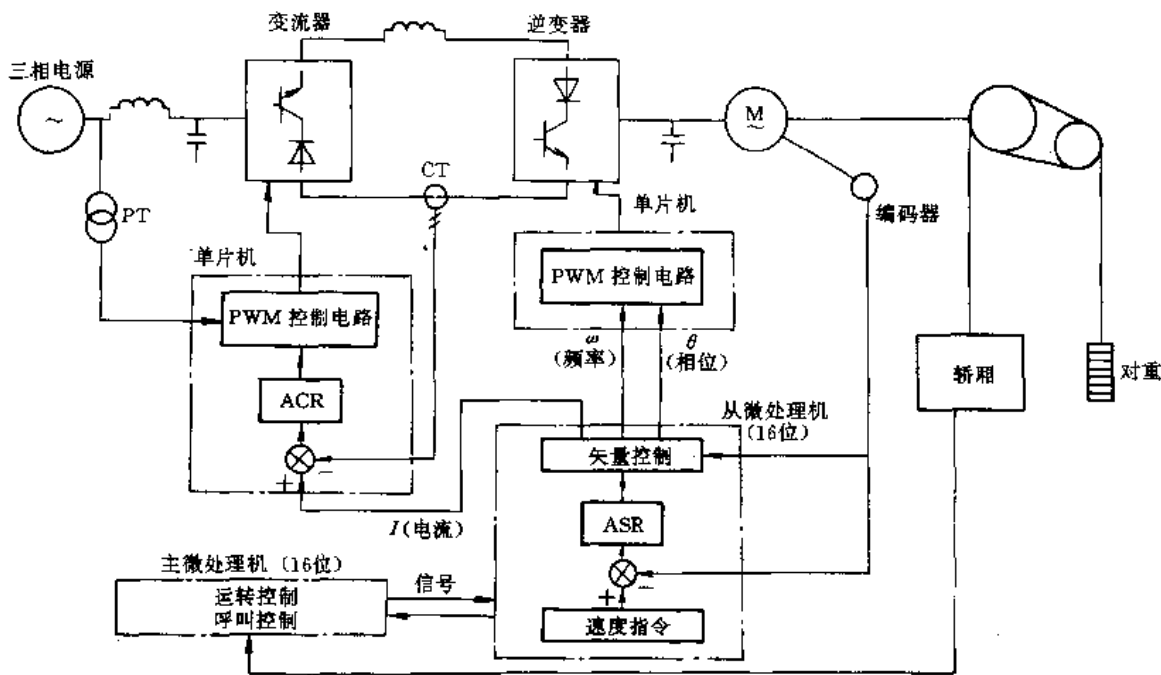


图 7-6-24 多微处理器控制正弦波电流型逆变器传动系统

ASR—转速调节器 ACR—电流调节器 CT—电流互感器 PT—电压互感器

良好的效果。

它采用了超精密 PWM 控制技术。主微处理器 (16 位) 执行运行控制、呼叫控制。从微处理器进行矢量控制、转速控制。2 台单片机, 1 台用于电流控制、变频器 PWM 控制, 另一台用于逆变器 PWM 控制。超高速电梯不需要减速机, 直接和笼型异步电动机相连接。传动系统具有优良的控制特性, 乘坐舒适, 可以迅速而平滑地加速。作为实例的 360m/min 电梯全负载上升运行时性能优良。与晶闸管直流供电的超高速直流电梯传动相比, 正弦波电流型逆变器电梯传动功率因数高, 节电 10%, 电源设备容量可减小 30%, 而且高次谐波含量大幅度减少。正弦波逆变器与晶闸管直流供电传动系统功率因数的比较见图 7-6-25。

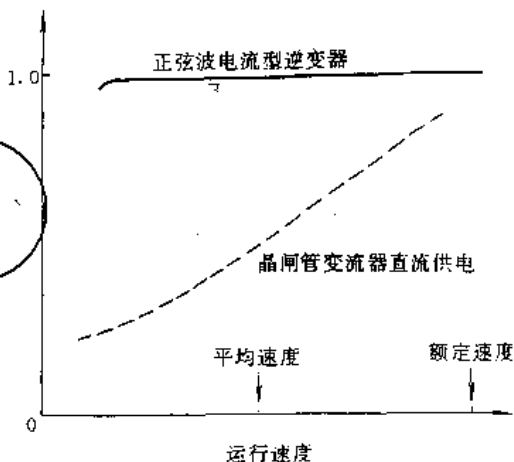


图 7-6-25 正弦波逆变器与晶闸管直流传动功率因数比较



表 7-6-6 正弦波逆变器控制方式的效果^[13]

| 项 目 | 晶闸管直流 供电方式 | 正弦波逆 变频器方式 |
|------------|---------------|---------------|
| 电能消耗量 | 1① | 0.9 |
| 电源设备容量 | 1① | 0.7 |
| 高次谐波含量 (%) | 20 (相对基波) | 5 以下 (相对基波) |
| 控制柜安装面积 | 1① | 0.5 |
| 卷扬机重量 | 1① | 0.6 |

① 以晶闸管直流供电方式时 1 作为基准。

高速、超高速电梯采用正弦波电流型逆变器传动系统取得的效果见表 7-6-6。

5.2 直流传动系统

直流电梯有机组供电和晶闸管变流器供电两种，适用于高速电梯。晶闸管变流器供电的高速电梯传动系统（图 7-6-26），调速性能好，平层精度高，用得较

为普遍。

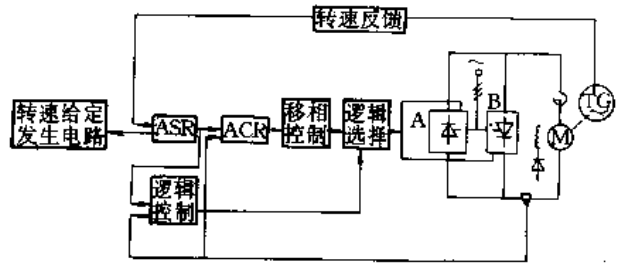


图 7-6-26 晶闸管变流器供电的高速电梯传动系统

近年来，微处理机已用于电梯的直流传动控制，如在 480m/min 超高速电梯（载重 1650kg）传动系统中，采用了微处理机，实现高性能、高精度控制，平层精度达 ±5mm，图 7-6-27 为 1 层上升、39 层下降时的运行特性。采用微处理机控制，不仅控制装置小型化，而且充实了保护功能，调整维护容易。

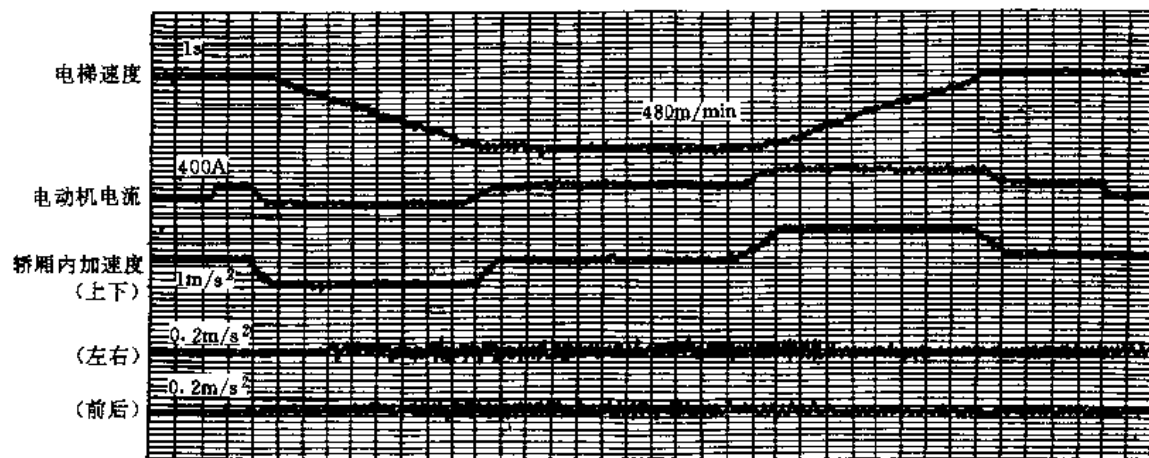
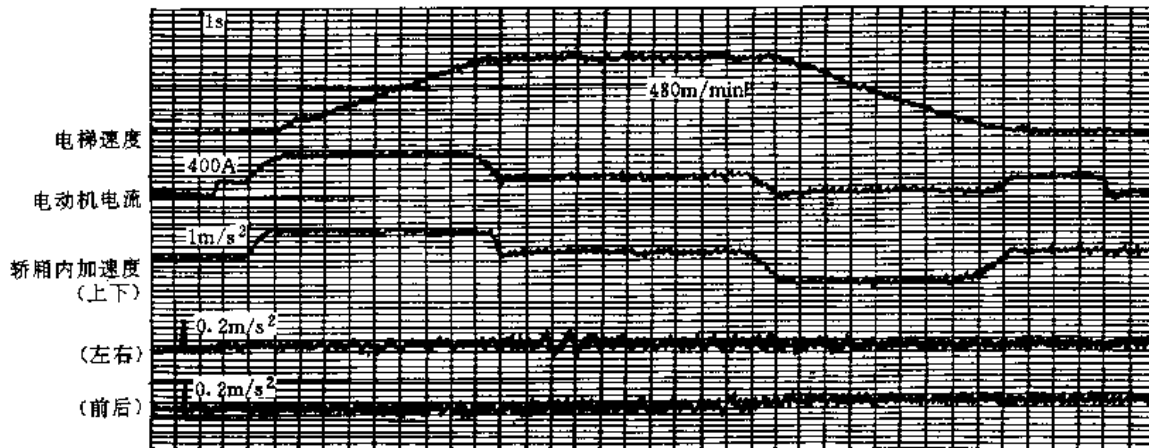


图 7-6-27 超高速直流电梯的运行特性



5.3 电梯群控管理

近年来,高层建筑日益增多,每一高层建筑内都设置了多台电梯,为缩短电梯候梯时间,提高总体运行效率和提高服务质量,通常将数台电梯编组管理,即进行电梯群控。电梯群控系统中,控制逻辑的核心是厅门呼叫分配逻辑。各系统要对候梯时间直接进行预测和运算,使之缩短并平均化。在一些新型系统中,把发出厅门呼叫所反映的客流量的微小变化,作为整个电梯群的变量来加以控制。不仅对刚发出的呼叫,而且对所有呼叫的候梯时间都及时测算,求出整个电梯群服务状况的最佳解,确定由哪部电梯接应。

首先,各台电梯控制装置采用微处理机控制,使原来由继电器执行的大部分功能,如轿厢呼叫信号,厅门呼叫信号的响应、记忆,轿厢的运行方向,停止层次的选择、起动、减速、停层,开门的指令以及轿厢、厅门的层楼指示等,均由微处理机进行程序控制。新型的各台电梯控制装置采用2台微处理机,其中1台用于传动的转速控制,另1台用于运行控制。在运行过程中,万一其中1台微处理机出现故障,可由另1台微处理机支援,将电梯运行至最近楼层,排除了关人事故,提高了系统的可靠性。轿厢位置的检测采用脉冲发生器,对脉冲数进行累计,累计值与存储在微处理机内的数据进行比较,经过运算后控制电梯传动系统进行减速制动和停层,以获得良好的舒适感和准确的停层精度。

群控管理系统采用3台微型计算机,图7-6-28为电梯群控系统的构成图。

群控管理系统由三个部分组成:分配控制部分、乘场控制部分、信号传送控制部分。各部分均应用1台微型计算机,各自执行独立的功能,提高了处理能力并进行正确和迅速的控制。

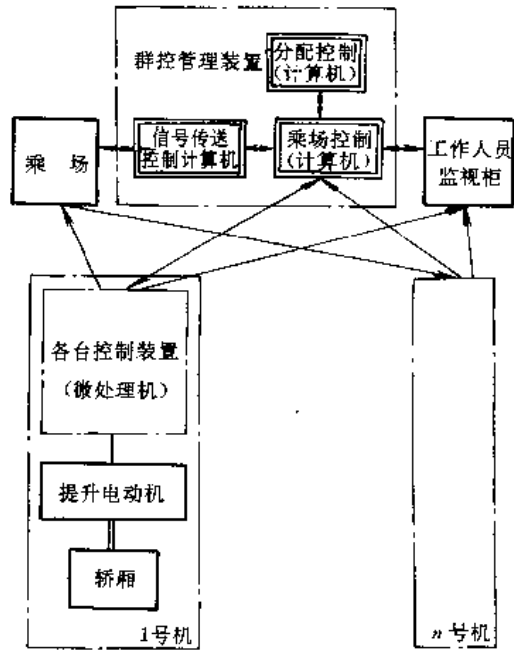


图 7-6-28 电梯群控系统的构成图

分配控制部分用于调度电梯。乘场控制部分对乘场厅门呼叫信号进行处理和控制。信号传送控制部分用于信号的接收和传送。群控管理系统万一出现故障,微型计算机之间可以相互支援,因而提高了系统的可靠性^[1]。

6 机床电气传动控制系统

机床设备对电气传动的要求如下:与机床特性要配合一致,采用短时工作制或长期工作制电动机;精度高、振动小,能适应有导电尘埃、切屑和润滑液的工作环境;安全可靠,维修方便。

各种机床传动方式选择见表7-6-7。

机床的控制方式见表7-6-8。

表 7-6-7 机床运动和传动方式

| | 主轴运动 | 进 给 | 辅 助 装 置 | | |
|--------------|--------------|----------------|-----------|------------|---------|
| 车床 | 工件旋转 ①④⑤⑥ | 刀具进给 ①④⑧ | 快速进给 ② | 尾座 ② | |
| 铣床 (铣削) | 刀具旋转 ① | 工件、工具移动 ①④⑧ | 快速进给 ② | | |
| 立式镗床 (车削) | 工件旋转 ①④⑤ | 刀具进给 ①④ | 快速进给 ② | 横导轨移动 ② | 夹紧 ② |
| 卧式镗床 | 刀具旋转 ①④ | 刀具进给 ① | 快速进给 ② | 主轴箱升降 ② | 夹紧 ② |



(续)

| | 主轴运动 | 进给 | 辅助装置 | | |
|-------------|-------------------|-------------------------------|-----------|-----------|-----------|
| 钻床 (钻孔) | 刀具旋转 ①⑤ | 刀具进给 — | 摇臂升降 ② | 夹紧 ② | 冷却液泵 ① |
| 磨床 (磨削) | 刀具旋转 ①④⑤ ⑥⑧ | 刀具进给 刀具往复 工件往复旋转 ①④⑦ | 冷却液泵 ① | 润滑油泵 ① | 除尘装置 ① |
| 龙门刨 (刨削) | 工件往复 ③④⑦ | 刀具间歇进给 ③④ | 横梁升降 ② | 夹紧 ② | 润滑油泵 ① |
| 插床 | 刀具往复 ①④⑦ | 工作间歇移动 ①③④ | | | |
| 拉床 | 刀具进给 ①④⑦ | | | | |

注：①—笼型异步电动机；②—带制动器的笼型异步电动机；③—电磁离合器；④—直流电动机；⑤—变极电动机；⑥—交流换向器电动机；⑦—液压传动；⑧—电磁转差离合器；⑨—笼型异步电动机，变频调速。

表 7-6-8 机床的控制方式

| 控制方式 | 特殊电气设备 | 应用的机床 |
|--------------|-------------------------------------------|----------------------------|
| 自动启动、停车 | | 专用机床、连续自动工作等机床、自动机 |
| 自动单循环控制、程序控制 | 自动单循环限位开关、定时器、脚踏限位开关 | 冲床、专用机床；自动机床、铣床 |
| 预选控制、预选控制 | 预选装置、离合器、晶闸管变流器或直流发电机—电动机组 | 钻床、六角车床、铣床 |
| 定转数控制 | 计数继电器、计数器 | 剃齿机、螺旋伞齿铣齿机 |
| 定时控制 | 时间继电器、电动机式时间继电器 | 磨床(定时时限、无火花磨削时限珩磨、抛光) |
| 自动定尺寸 | 气动测微计、光电式长度传感器差动变压器 | 磨床 |
| 定位、位置控制 | 差动变压器、自整角机、感应式传感器 | 坐标镗床、坐标铣床、坐标磨床、卧式镗床、钻床、镗槽机 |
| 间隙补偿 | 力矩电动机 | 向下铣削的铣床、大型车床 |
| 稳速控制 | 测速发电机、电压电流检测传感器、晶闸管变流器或直流发电机—电动机组、电磁转差离合器 | 尤其是用宽调速范围的调速电动机的机床 |
| 恒切削速度控制 | 凸轮、电阻式设定器、直流发电机—电动机组、电磁转差离合器 | 大型车床、立式镗床、端面车床 |
| 同步运转 | 大功率自动同步机、电气伺服装置、同步电机 | 大型车床(螺纹车削进给) |
| 协调运转 | 测速发电机、晶闸管变流器或直流发电机—电动机组、电磁转差离合器 | 机床(主轴和进给、锥形切削) |
| 仿形 | 一维 | 差动变压器伺服电机 |
| | 二维 | 差动变压器伺服电机 |
| | 三维 | 差动变压器伺服电机，但用于x、y、z三轴 |
| 数字控制 | 穿孔纸带、信息处理用电子装置 | 铣床、镗床、钻床、压力机 |
| 自动可逆 | 自动可逆限位开关、晶闸管变流器或直流发电机—电动机组、电磁离合器 | 刨床、插床、磨床、剃齿机 |



在机床电气传动的应用中,龙门刨床是熟知的一个典型例子,如某大型龙门刨床(主传动直流电动机功率为55kW)的技术要求:快速正反转,并要求加减速或反向时过渡过程平滑。调速比为1:15(120~1800r/min),基速以下(120~1000r/min)采用满磁调电枢电压方式调速,基速以上(1000~1800r/min)采用电枢电压恒定的调励磁的方式调速。晶闸管变流器供电回路采用三相桥式反并联无环流联结方式,由电流调节器及转速调节器组成双环控制系统。磁场回路则采用单相全控桥式电路。磁场系统以励磁电流调节器为核心采用单环控制。弱磁升速的控制采用非独立控制方式,其方法是通过一对二极管将电枢电压信号和磁场电流信号进行比较,取其大者为反馈信号。低速时,电枢电压信号小于磁场电流信号,所以磁场电流为负反馈信号,系统表现出恒磁调压的特性。高速时,由于电枢电压信号大于磁场电流信号,所以电枢信号就成了负反馈信号,系统表现出恒压调磁的特性。

在机床主轴电气传动中,新型交流传动控制技术得到迅速发展。以矢量控制原理为基础的晶体管电压型逆变器—笼型异步电动机数字式主轴传动系统见图7-6-29。

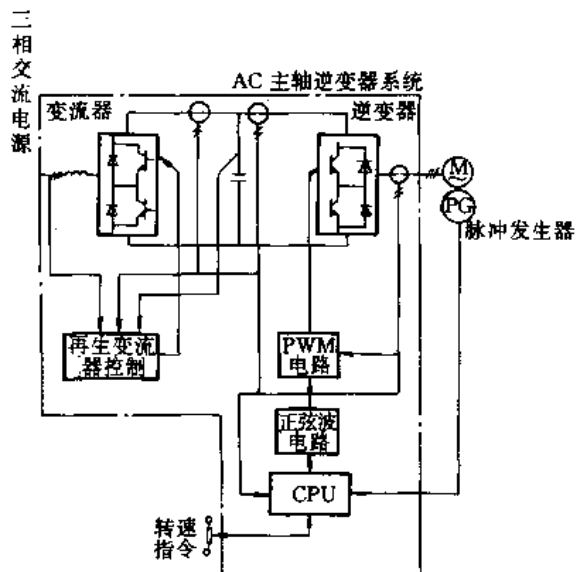


图 7-6-29 机床主轴数字式交流传动系统

电动机采用具有特殊冷却结构的全封闭笼型异步电动机,额定功率为5.5kW时,基速为1500r/min,最高转速可达8000r/min,额定功率为15kW时,基速为1500r/min,最高转速可达6000r/min。矢量控制部分框图见图7-6-30。

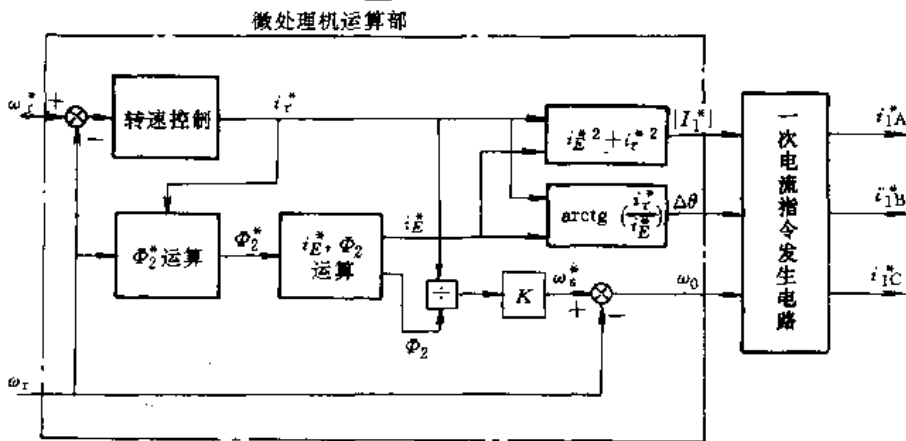


图 7-6-30 矢量控制部分框图

ω_r^* —角速度指令 ω_1 —实际角速度 ω_s^* —转差频率指令 ω_0 —一次频率 Φ_2^* —二次磁通指令
 Φ_2 —推定的二次磁通 i_E^* —励磁电流分量指令 i_r^* —转矩电流分量指令 $\Delta\theta$ —转矩偏角
 $|I_1^*|$ —一次电流指令振幅 i_{1A}, i_{1B}, i_{1C} —一次电流(瞬时值)指令

采用16位微处理机执行位置控制、转速控制、电流控制。它具有调速范围宽、控制精度高、快速响应等特点,而且还能通过变流器实现再生制动,亦即变流器部分通常运行时采用二极管变流器,而在电动机减速等情况下处理再生能量时采用强迫换相型的再生变流器—晶体管变流器。

7 风机、水泵电气传动控制系统

7-1 概述

风机、水泵等机械设备广泛应用于冶金、煤炭、电力、石油、化工、机械、轻工、纺织、国防和农业等生



产部门以及生活设施。这些量大、面广的机械设备在国民经济部门中占有重要地位。

当前,风机、水泵等运行设备很多还比较陈旧,效率低,在需要调节流量或风量的地方,有不少仍采用挡板或阀门来调节风量和流量,功率损失很大。因此,在风机、水泵应用中实行节能、降耗,采用先进的调速传动技术具有重要的作用。

7.2 风机的节能方法与调速控制

风机的基本节电方法有:

- (1) 减少运行时间;
- (2) 采用高效机器及设备(包括控制装置、电动机、传动装置、风机等);
- (3) 减少空气动力。

风机的具体节电方法见表 7-6-9。

表 7-6-9 风机的节电方法

| 分类 | 措施 | 节电方法 |
|--------|---------|---------------------------------------------------|
| 减少运行时间 | 电动机的通断 | 直接起动、电抗器起动、转子回路串电阻起动(绕线转子异步电动机)、VVVF 起动 |
| | 传动装置的通断 | 液压离合器、无级变速机 |
| 采用高效机器 | 高效传动装置 | 直接连接型联轴器、齿轮、传动带、液压联轴器、液压离合器、无级变速机 |
| | 高效电动机 | 绕线转子、笼型异步电动机 |
| | 风机 | 轴流、径流、涡轮 |
| 减少空气动力 | 降低风机风量 | 将电动机换为多极的,电动机与风机间加齿轮,带传动时换带轮,加工叶轮使外径减小,风门开度减小 |
| | 风量控制 | 出口风门、入口风门、入口叶片 |
| | 调速控制 | 液压联轴器、无级变速机;电动机采用变极数、转子回路串电阻、串级调速、VVVF 控制,无换向器电动机 |

在风量随时间变化较大的负载中,选用风机的调速控制方法是节电的有效措施,风机的调速控制方法常用的有以下几种:

- (1) 转子回路串电阻控制(绕线转子异步电动机);

- (2) 转子斩波调速控制(绕线转子异步电动机);
- (3) 液力偶合器控制;
- (4) 液体转差离合器控制;
- (5) 电磁调速电动机控制;
- (6) 涡流制动器(感应制动器)控制;
- (7) 调压控制;
- (8) 串级调速控制(绕线转子异步电机);
- (9) VVVF 控制;
- (10) 无换向器电动机(同步电动机)控制;
- (11) 变极对数控制。

各种调速控制方法的效率比较见图 7-6-31。从图可看出,液力偶合器和转子回路串电阻控制方法效率最低,转速愈低,效率愈低。而无换向器电动机控制效率最高,另外,串级调速和电流型逆变器控制系统(电流型变频器)效率也较高。

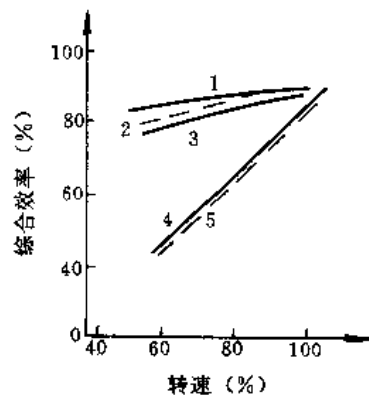


图 7-6-31 各种调速控制方法的效率比较

- 1—无换向器电动机 2—串级调速 3—电流型变频器 4—转子回路串电阻 5—液力偶合器

不同控制方法的电动机电力消耗特性曲线见图 7-6-32。在输出同样风量的情况下,变极对数、串级调速和 VVVF 控制的功率损耗最小。转子回路串电阻和液力偶合器控制方式的电力消耗较大,两者几乎相等。而调出口风门来调节风量的方法电力消耗最大。

7.3 水泵的节能方法与调速控制

水泵节电的基本方法有:减少不必要的流量;减少管路的阻力;用高效的方法控制流量,如同隙运转、并联台数控制、串联台数控制、翼角控制、调速控制等。

在调速控制方法中,按效率高低顺序排列为:

- (1) 变极对数;
- (2) VVVF 调速,串级调速,无换向器电动机调



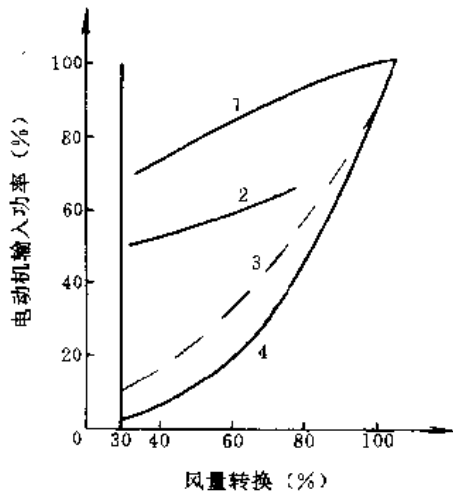


图 7-6-32 风机电动机的电力消耗特性曲线
1—出口风门控制 (100%转速) 2—入口风门控制 (100%转速) 3—转子回路串电阻、液力耦合器 4—串级调速、VVVF 控制

速；

(3) 流体转差离合器(液压软连接), 转子串电阻, 转子斩波调速, 调压调速, 电磁调速电动机, 液力耦合器。

7.4 应用实例

7.4.1 钢厂烧结鼓风机无换向器电动机传动系统

烧结鼓风机(13000kW)无换向器电动机传动系统见图 7-6-33。

该系统有如下特长: 与输出变压器相结合实现多相化——12相, 从而有助于减小转矩脉动; 无传感器(无分配器、无转速检测器)控制, 实现了高的可靠性; 采用了水冷方式, 晶闸管数量减少, 有利于装置的小型化和提高可靠性。

无换向器电动机调速传动系统风量控制与耗电量的关系见图 7-6-34。

风量和转速成正比, 而耗电量与转速的 3 次方成正比。用挡板改变风量时造成相当大的能量损耗, 而采用无换向器电动机传动系统, 以调节转速来实现风量控制时, 可以节约大量的能量, 并降低了成本。

7.4.2 高炉出铁场除尘风机电流型变频起动装置

除尘风机电动机共有 4 台(一次除尘及二次除尘各 2 台), 每台为 1600kW、3kV 笼型异步电动机。风

电机约每 100min 起动一次, 因两台风机轮换工作, 对电动机来说, 相当于每 200min 起动一次。变频装置(VVVF)是由 2 台 425kVA、480V 组成的 850kVA、1750V、35Hz 的变压器耦合输出型二重化电流型变频器, 起动时用变频装置先起动至 60% 额定速度, 再用电抗器起动至全速。

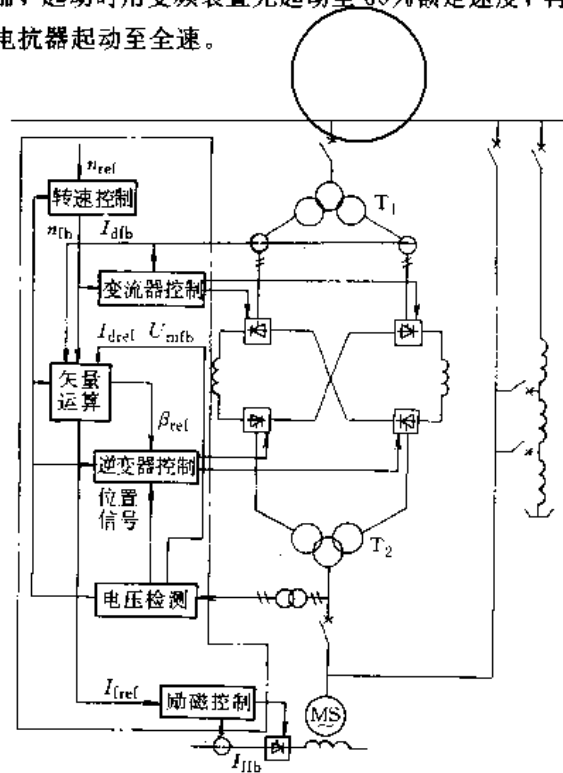


图 7-6-33 烧结鼓风机无换向器电动机传动系统

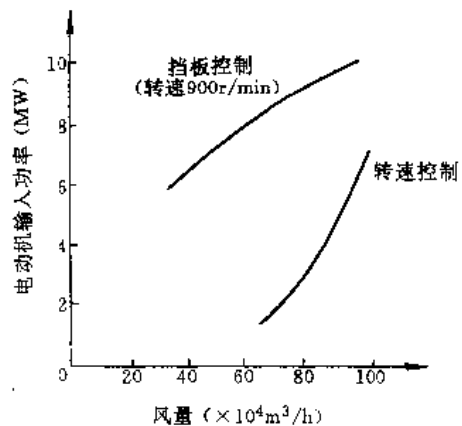


图 7-6-34 风量控制与耗电量的关系

电流型变频装置由整流器、平波电抗器、逆变器及控制电路组成。整流器相位控制由改变延迟角 α 来实现, 属于电源自然换相。逆变器为串联二极管式强迫换相, 属于 120° 通电型, 2 台逆变器在控制上错开 30° 电



角度。吸收装置采用再生回路，将换相能量回馈到电网，使装置的效率提高。通常在额定频率下回馈功率时，回馈功率为变频装置容量的7%~9%。这种变压器耦合输出型二重化电流型变频装置可以改善输出电流波形，消除5次、7次谐波，降低转矩脉动，减少谐波损失，基本保证了电动机的出力，还可使装置的器件耐压降低，易于选择。

7.4.3 水厂配水泵串级调速系统

城市水厂给水配水泵担负提供工业和民用的用水

表 7.6-10 水泵串级调速与恒速运行的经济指标对比

| 对比 | 全年出水量 (万t) | 全年全厂用电 (万kW·h) | 全年平均单耗 (kW·h/kt) | 出水增量 (%) | 用电增量 (%) |
|--------|---------------|-------------------|---------------------|-------------|-------------|
| 恒速运行 | 3003.3115 | 656.49 | 218.6 | | |
| 串级调速系统 | 3154.8062 | 646.98 | 205.1 | +5.04 | -1.45 |

7.4.4 水泥厂窑炉风机串级调速系统

串级调速在风机、水泵的调速传动中应用取得了良好的节能效果，但其功率因数较低，约为0.4~0.6，为电力部门所不许。对此开发了一种高功率因数串级调速系统，其结构与普通的串级调速系统基本相同，只是在普通的串级调速系统中增加两个辅助晶闸管和一个换相电容器。图7.6-35为逆变器采用三次谐波辅助换相的高功率因数串级调速系统的构成图。

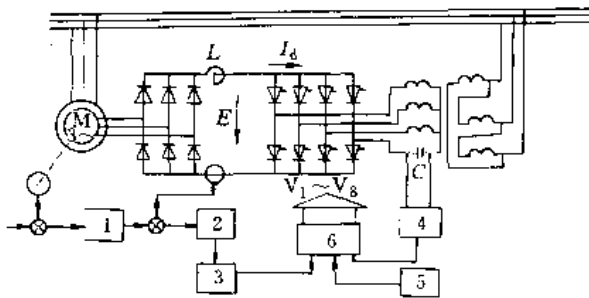


图 7.6-35 高功率因数串级调速系统

- 1—速度调节器 2—电流调节器 3—移相控制电路
- 4—延迟触发控制电路 5—逆变器启动控制电路
- 6—逻辑综合与触发放大电路

绕线转子异步电动机转子的转差频率电流经二极管整流桥整流以后变成直流电，然后通过由主晶闸管 $V_1 \sim V_6$ 组成的逆变桥逆变成交流电，经逆变变压器回馈到电网。用了两个辅助晶闸管 V_7 、 V_8 及一个换流电容器 C 帮助换流。用了三次谐波辅助换相以后，逆变时可工作在 $\alpha > 180^\circ$ 的范围内，变流器从电网吸收的电

任务。由于用水部门对水量的要求是不断变化的，若配水泵恒速运行，必然带来能源的浪费。在寻求既有服务质量，又能节约能源的配水泵调速传动方面，下述例子表明已取得了一定的成效。

某控制泵站设一台由550kW、6极电动机拖动的离心泵($Q=3000\text{m}^3/\text{h}$, $H=47.4\text{m}$)。平时水厂供水压力为28~40m，水泵机组在恒速运行时的实测效率为64%，而采用串级调速系统后，平均效率提高到72%，投产以来运行可靠。水泵串级调速系统与恒速运行的各项经济指标对比见表7.6-10。

流相位将超前于电压，呈电容性，它不但不会使系统的功率因数变坏，而且可以补偿异步电动机从电源吸收的磁化电流，使整个系统的功率因数大为改善。用于风机、水泵类负载时，它的功率因数可达0.7~0.95。某水泥厂窑炉鼓风机用罗茨风机，185kW绕线转子异步电动机采用三次谐波辅助换相高功率因数串级调速系统后，与普通串级调速系统相比，从电网吸取的电流可以减少40%，而节电效果提高10%。新型串级调速系统增加投资不多，费用低于电容补偿，而且能就地动态补偿，补偿效果良好。在系统设计时经过计算机仿真研究，优选系统的各项主要参数，包括换相电容 C 、逆变变压器的等效电感 L_k 和直流中间回路的平波电抗器 L 等，以抑制晶闸管上的过电压。

7.4.5 水泵电磁调速电动机传动系统

电磁调速电动机传动系统主要由笼型异步电动机、涡流式电磁转差离合器、直流励磁电源(或称控制装置)三部分组成。用3.7kW电磁调速电动机进行泵的排出量调节，每天的运行时间、负荷分配如下：

- 0.75 m^3/min ——6h；
- 0.50 m^3/min ——10h；
- 0.30 m^3/min ——8h。

若水泵24h连续运行1年，与以往采用阀门调节方式相比，采用电磁调速电动机传动系统可节电44%。

表7.6-11列出了泵的排出量调节采用电磁调速电动机传动系统与采用阀门调节的运行情况比较。



表 7-6-11 转速调节与阀门调节运行情况比较

| 调节方式 | 排出量 (m ³ /min) | 全扬程 (m) | 转速 (r/min) | 功率 (kW) | 运行时间 (h) | 用电量 (kW·h) | 总用电量 (kW·h) |
|-------------|------------------------------|------------|---------------|------------|-------------|---------------|----------------|
| 阀门调节 | 0.3 | 23 | 1420 | 2.62 | 2920 | 7650.4 | 27564.8 |
| | 0.5 | 21 | | 3.26 | 3650 | 11899 | |
| | 0.7 | 18 | | 3.66 | 2190 | 8015.4 | |
| 电磁调速 电动机 | 0.3 | 2.25 | 533 | 0.94 | 2920 | 2744.8 | 15461.4 |
| | 0.5 | 6.25 | 888 | 1.69 | 3650 | 6168.5 | |
| | 0.7 | 12.25 | 1243 | 2.99 | 2190 | 6548.1 | |

8 其他应用

交直流电气传动在许多领域都有较广的应用，以下介绍几个其他工业、交通领域的应用实例。

1. 超高速大容量压缩机交流传动系统 超高速大容量压缩机采用 GTO 电压型逆变器—笼型异步电动机传动系统。图 7-6-36 为电压型逆变器传动系统的主电路，它采用了转差频率控制方式。

变流器采用 4000V、1500A 普通晶闸管，逆变器采用 4500V、2500A GTO。

超高速压缩机传动系统具有下述性能规格。

笼型异步电动机：

额定功率 3500kW；

极数 2；

额定电压 4000V；

额定频率 133.3Hz；

额定转速 8000r/min。

GTO 电压型逆变器：

型式 三相，三绕组（变流器用）；

额定输出容量 5500kVA；

额定频率 50Hz。

输出变压器：

型式 三相（逆变器用）；

额定输出容量 2×2500kVA；

额定频率 133.3Hz。

2. 箔、薄膜生产线交流电气传动系统 塑料薄膜在箔蒸着装置中形成铝箔。开卷机、箔蒸着设备及卷取机均采用矢量控制原理的晶体管电压型逆变器—笼型异步电动机传动系统，见图 7-6-37。一台公用变流器（二极管式）通过直流母线向三台逆变器供电。

每台逆变器均采用 32 位数字信号处理机（DSP）执行数字式控制，主要控制性能如下：

转速控制精度 ±0.01%；

转速控制范围 1：1000；

频率响应性能 50Hz；

转矩控制精度 ±5%。

采用可编程控制器作为上位控制器，实现自动控制。可编程控制器对开卷机、蒸着设备、卷取机传动发出运行指令，还作为主令控制器对蒸着设备的传动发出转速指令。对开卷、卷取机传动发出的转矩指令是经过卷径、加减速补偿等运算的指令。

在生产线上多电机传动（中小容量传动）中，电压型逆变器—笼型异步电动机系统的应用日益广泛。这是因为以矢量控制原理为基础的电压型逆变器—笼型异步电动机系统控制性能优良，可采用公用变流器通过公共直流母线向多台逆变器传动系统供电的方式，减少了柜体数量，装置的体积及安装面积也可减小，有利于提高技术经济指标。此外，笼型异步电动机坚固耐用，结构简单，没有换向器和电刷，无需维护。

3. 升降设备交流电气传动系统 在中小容量的升降设备交流传动中，应用了电压型逆变器—笼型异

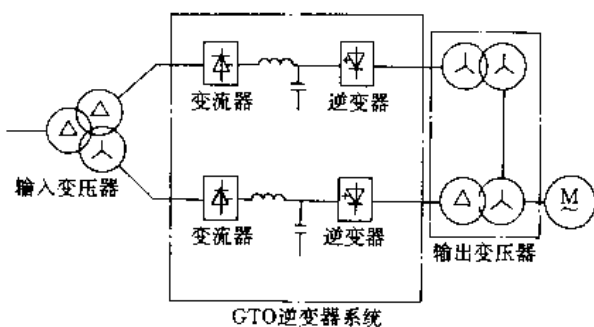


图 7-6-36 电压型逆变器传动系统主电路

型式 三相高压 12 脉动 GTO 逆变器；

额定输出容量 5000kVA；

额定输出频率 133.3Hz。

输入变压器；



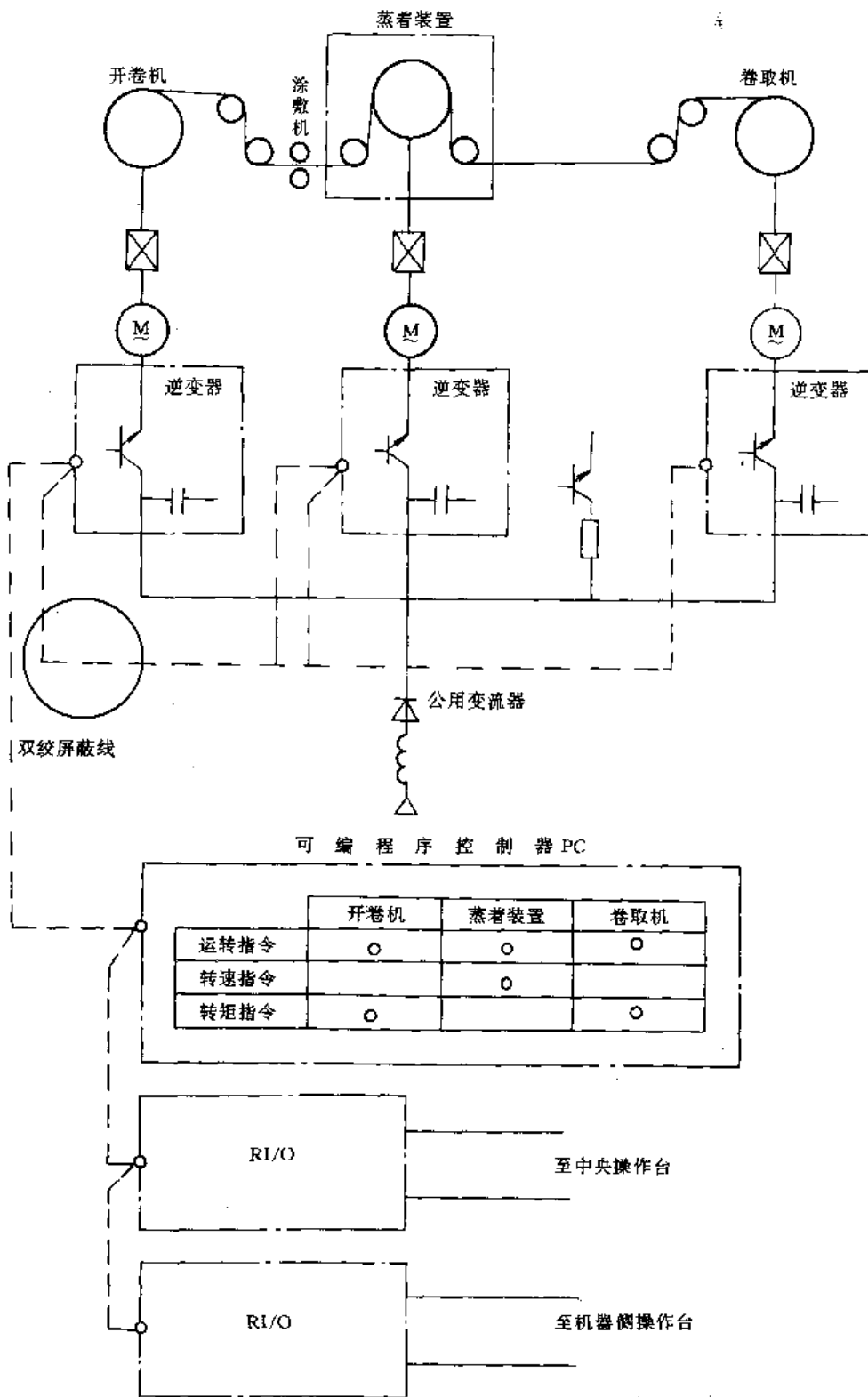


图 7-6-37 箔、薄膜生产线交流电气传动控制系统

步电动机系统。

应用广泛的中小容量电压型逆变器通常采用自关

断器件，其中，绝缘栅双极晶体管 (IGBT) 就是一种新型器件。



升降设备交流电气传动的电压型逆变器，采用了新一代的智能化功率模块（IPM）、数字式控制，使控制装置的体积明显减小。

为电气传动行业注目的智能化功率模块，是以绝缘栅双极晶体管为基础，连同基极驱动电路、保护功能电路实现一体化的功率模块。

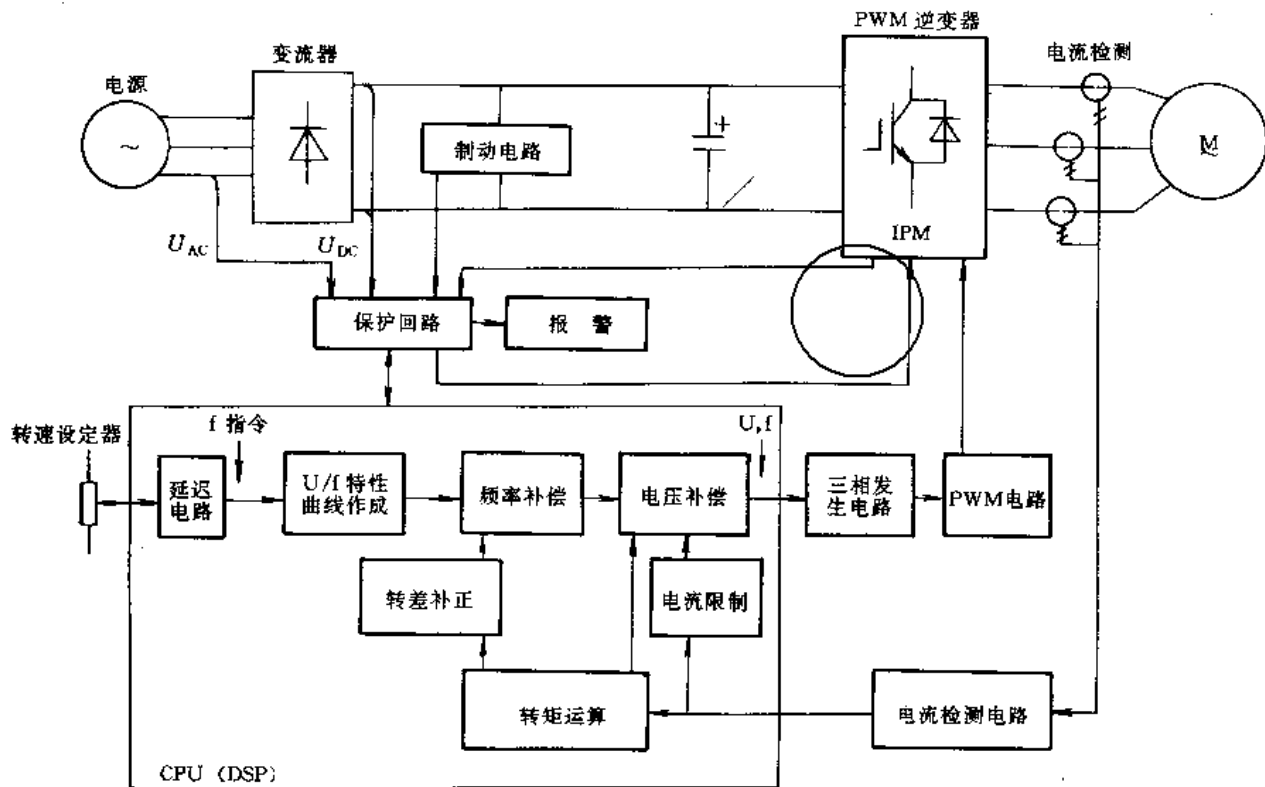


图 7-6-38 电压型逆变器交流传动系统
IPM—智能化功率模块 DSP—数字信号处理机

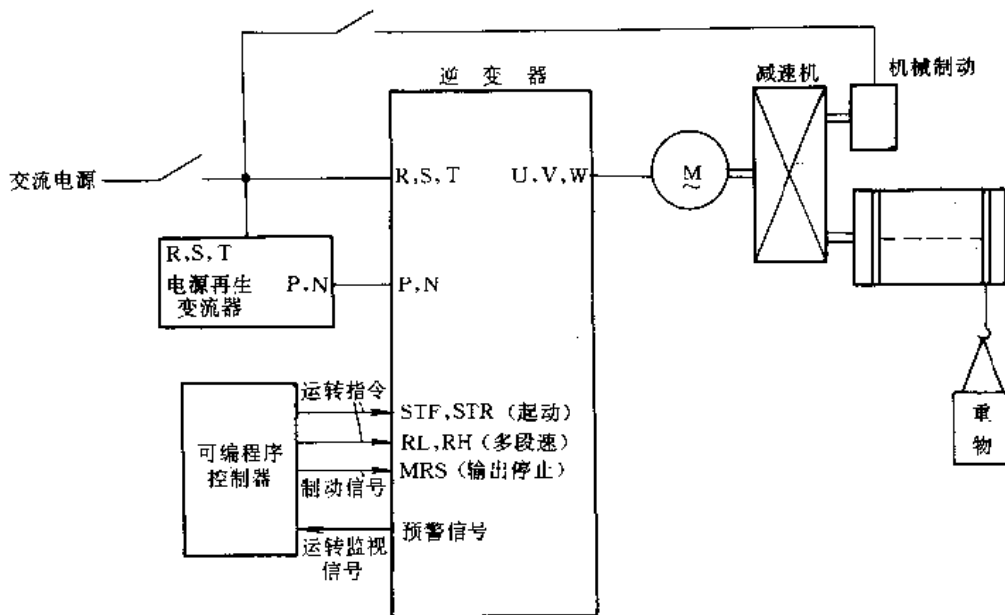


图 7-6-39 升降设备传动应用实例

此星公司制作 请尊重作者版权



电压型逆变器为高载波频率正弦波 PWM 方式，采用无速度传感器的磁通矢量控制或可选择采用 U/f 控制。

升降设备电压型逆变器—笼型异步电动机传动系统见图 7-6-38。

交流传动的额定功率为 55kW，频率控制范围为 0.2~400Hz，由 32 位数字信号处理机 (DSP) 执行数字式控制。升降设备传动应用实例见图 7-6-39，运行图见图 7-6-40。

采用可编程序控制器作为上位控制器——运行指令装置。

另一实例为某立体停车场升降设备传动系统，采用 IGBT 电压型逆变器—笼型异步电动机传动系统，以矢量控制原理为基础，用 32 位微处理机 (MCU) 及数字信号处理机 (DSP) 执行数字式控制。图 7-6-41 为矢量控制电压型逆变器—笼型异步电动机传动系统，逆变器为正弦波 PWM 方式 (高载波频率)。

DSP 用于数字式高速电流控制，MCU 用于转速

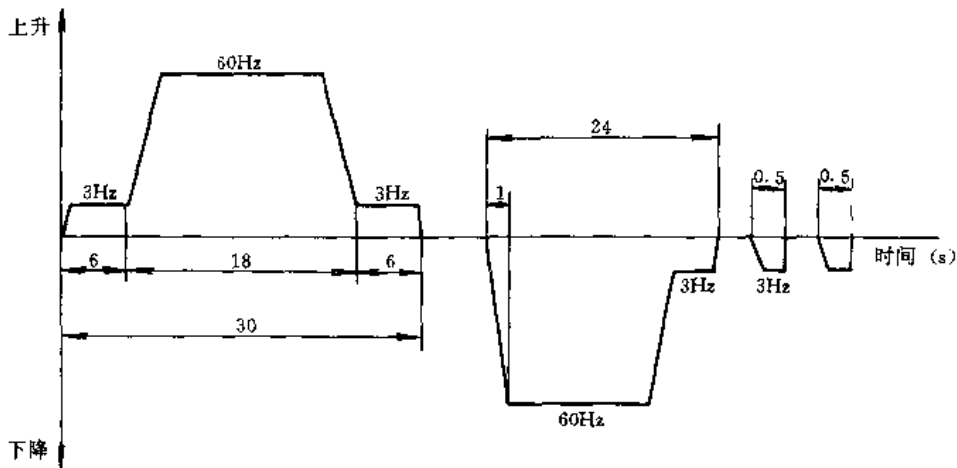


图 7-6-40 运行图实例

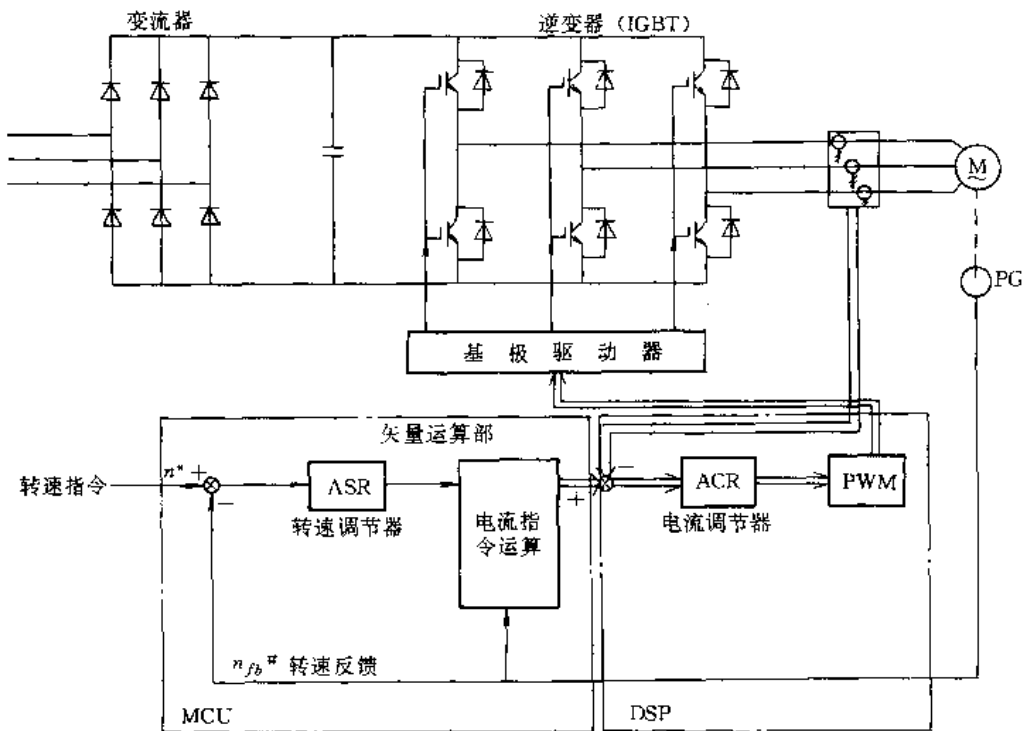


图 7-6-41 矢量控制电压型逆变器—笼型异步电动机传动系统



控制、矢量控制以及保护功能运算。交流传动的主要性能指标如下：

- 额定传动功率 132kW；
- 转速控制精度 $\pm 0.01\%$ ；
- 转速控制范围 1:1000；
- 额定转速 1750r/min；

转矩特性 1.75~1750r/min (恒转矩), 1750~2100r/min (恒功率)。

交流传动系统具有最大为9种的多段速运行、s字加减速、零速控制、任意转矩检测等应用技术和功能。平层精度高，并且具有故障诊断功能。图7-6-42为立体停车场升降机交流传动的应用实例。

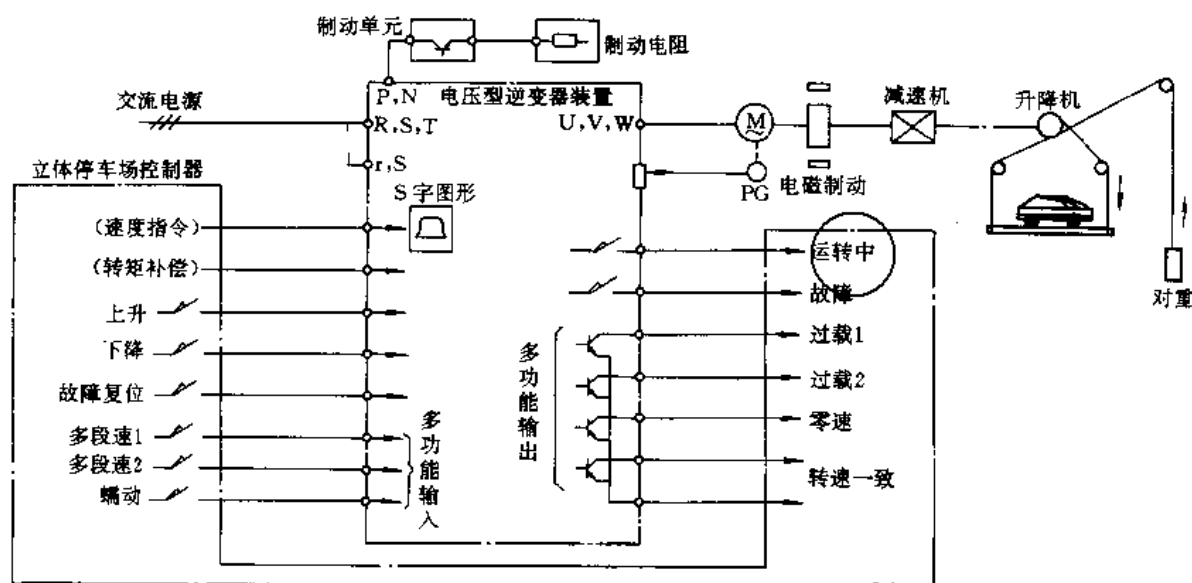


图 7-6-42 立体停车场升降机交流传动应用例

4. 风洞设备交流传动系统 无换向器电动机可应用于风洞设备。传动系统主电路为12相电路，逆变器和变流器相互串联连接。无换向器电动机传动控制系统由转速控制、变流器控制、逆变器控制、励磁控制以及矢量控制部分构成。采用4台微处理机执行全数字控制。其中，主微处理机(16位)进行转速控制、变流器控制，并对外部设备、接口以及对副微处理机、从属微处理机具有中央处理功能。副微处理机(16位)执行高速矢量运算的专用功能，对逆变器实现高速、高精度的控制。2台从属微处理机(8位单片机)执行逆变器触发相位控制。

风洞设备无换向器电动机传动系统的主要性能数据如下：

- 同步电动机 22500kW, 8极, 3相双绕组；
- 调速范围 70~710r/min；
- 转速控制精度 $\pm 0.03\%$ 。

5. 无轨电车斩波调速系统 城市无轨电车斩波调速系统见图7-6-43。直流电动机额定功率为90kW，

斩波器选用逆导型晶闸管，这样不仅可使器件数量减少、线路简化，而且无器件间引线电感。

带电制动的无轨电车斩波调速系统的主要参数如下：

- 电压 直流 600V；
- 电流 167A；
- 最大不失控电流 350A；
- 工作频率 200Hz；
- 导通比 8%~93%；
- 控制方式 牵引时恒压控制，制动时恒转矩控制；
- 制动有效速度范围 8~55km/h。

为了安全可靠运行，整个系统采用了较齐全的保护措施。例如，过电流超过400A时，断路器可在26ms内可靠地切断主电路；如果出现失控，则迅速检出失控检测信号后送至触发装置，触发装置发出指令使牵引(制动)接触器跳开并发育出声、光报警信号。与此同时，断路器也会因过电流而跳闸。出现过电压时，则由电压检测信号检测出，送入触发装置。如果电网或电动机



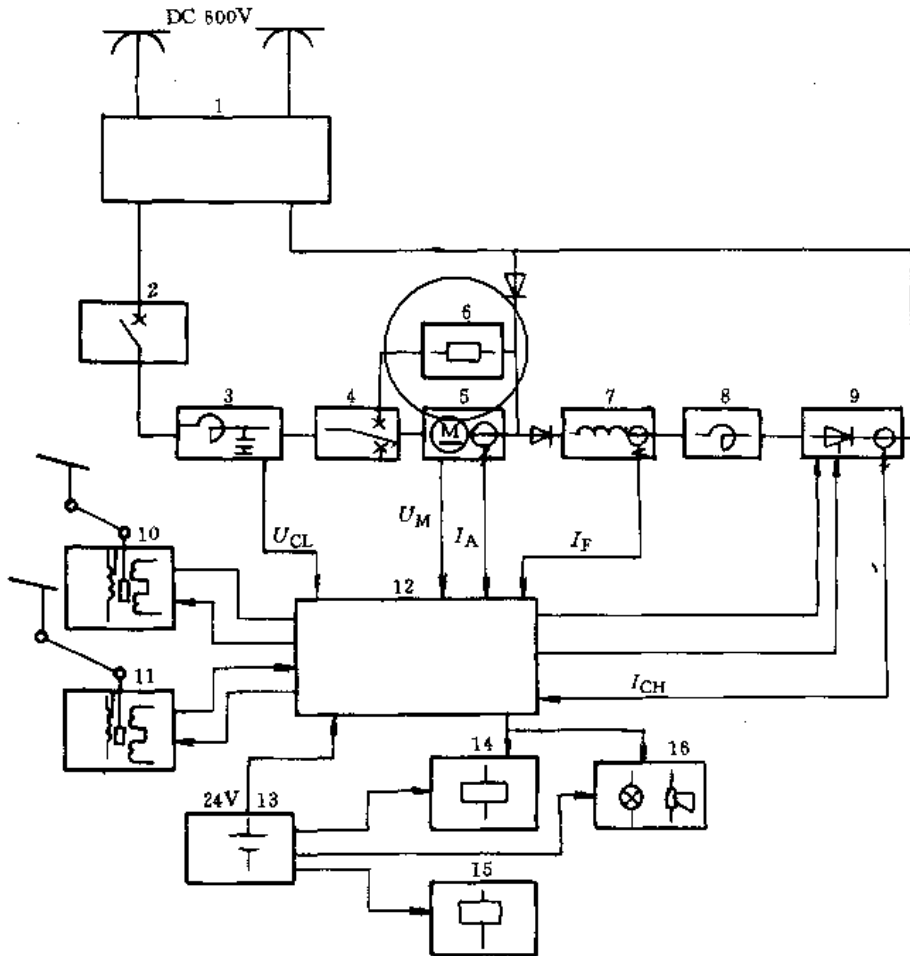


图 7-6-43 90kW 无轨电车斩波调速系统

- 1—反线(向)器 2—断路器 3—滤波器 4—牵引、制动转换接触器 5—牵引电动机 6—制动电阻 7—磁场绕组
 8—主平波电抗器 9—斩波器 10、11—制动、牵引给定器 12—触发装置 13—低压电源
 14—转换接触器线圈 15—电磁锁线圈 16—声光显示装置

压超过 800V，则切断主电路并发出警报。发生欠电压或脱弓情况时，同样发出报警信号，同时切断主电路。

城市无轨电车斩波调速系统起动平稳，加速快，电制动无急刹车现象，乘坐舒适。

6. 电力机车交流传动系统 电力机车牵引为 1500V 直流母线供电的 GTO 电压型逆变器—笼型异步电动机传动系统，VVVF 方式，采用 16 位微处理器执行数字控制。

电力机车交流传动采用 1 台额定输出容量为 1390kVA 的 GTO 电压型逆变器，向 4 台笼型异步电动机（每台额定功率为 170kW）供电的方式。逆变器中使用了 4500V、2000A 的 GTO。

7. 船舶推进器交流传动系统 大型客轮的 2 台主推进器，由 2 套无环流式交—交变频器—同步电动机系统驱动。每台同步电动机的额定功率为 14000kW。图 7-6-44 为主推进器交流传动系统框图。

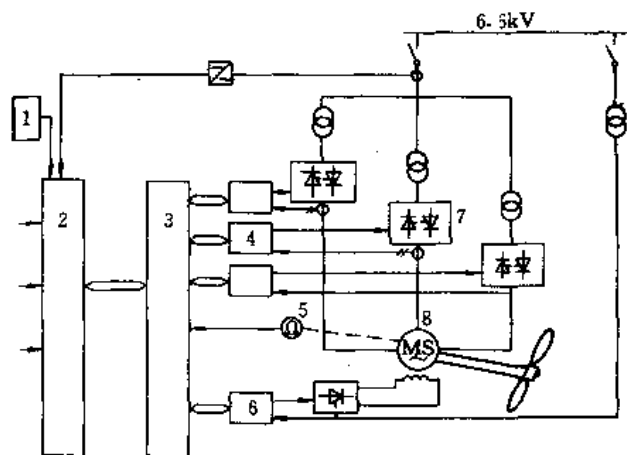


图 7-6-44 主推进器交流传动系统框图

- 1—电源管理系统 2—系统控制计算机 3—矢量控制计算机 4—定子电流控制 5—轴位置编码器 6—励磁电流控制 7—交-交变频器 8—同步电动机



无环流式交-交变频器—同步电动机系统采用矢量控制原理,由计算机实现数字式控制。转速控制范围为0~200r/min,可以满转矩在两个方向运行。新型交

流传动系统的采用,可以直接驱动主推进器,不需要减速齿轮箱。

第7章 电气传动控制系统的调试

本章阐述电气传动控制系统的现场调试。在电控设备安装完毕并投入运行之前,必须根据控制对象的参数及现场工况进行系统调试,以满足各种生产工艺提出的要求,保证系统运行时具有良好的品质。

现场调试是在电控设备出厂调试的基础上进行的。出厂调试阶段,除对电控设备的各个部分进行调试及参数预整定外,还要按国标 GB3797—89《电气传动控制设备第二部分 装有电子器件的电控设备》进行各项检查及出厂试验,例如:高压小电流试验及低压大电流试验,在试验中对各种保护亦进行了预整定。整定结果附在出厂检查报告上。无疑,搞好出厂调试,既能保证电控设备质量,又能大大缩短现场调试的时间。

1 调试的基本原则与步骤

由于电机类型、供电方式、容量等级及控制要求不同,存在着各种各样的控制系统。纵观这些系统,基本上由四部分组成:(1)操作联锁与保护回路;(2)磁场控制回路;(3)变流装置;(4)调节与控制回路。因此,调试的基本原则是一致的。其基本原则是:先查线,后通电;先操作联锁与保护,后触发与调节;先磁场,后电枢;先开环,后闭环;先内环,后外环;先静态,后动态;先基速,后高速;先空载,后负载。

本章将以晶闸管供电的各种直流调速系统为例,介绍现场的系统调试。调试的基本步骤如下:

- (1) 调试前准备工作;
- (2) 操作联锁与保护回路调试;
- (3) 触发与调节回路调试;
- (4) 磁场回路调试;
- (5) 电枢回路开环调试;
- (6) 电流闭环调试;
- (7) 转速闭环调试;
- (8) 给定回路及上位机调试;
- (9) 负载试车及系统性能测试。

2 调试前准备工作

2.1 设备清点与检查

2.1.1 设备清点

根据设计图样,检查系统中所有设备的铭牌数据,均应符合图样要求,主要元器件(如低压断路器、接触器、保护继电器、时间继电器)的型号、规格也应符合图样要求。

2.1.2 设备安装检查

检查各设备的安装是否符合该设备的安装规程。设备安装不良将会影响电气传动控制系统的正常运转和品质,严重时甚至不能工作。

(1) 检查电动机轴中心与机械设备轴中心或离合器轴中心的同心度。同心度超出允许范围会使设备在运转中产生振动,损坏设备及轴承。

(2) 检查电动机轴中心与测速发电机、光电编码器轴中心的同心度。若同心度超出允许范围,将使测速发电机、光电编码器输出信号中含有与转速成比例的脉动分量。该脉动分量会引起系统的低频振荡,从而严重影响系统品质,甚至会使系统无法工作。测速发电机、光电编码器由于剧烈振动也会很快损坏。

(3) 检查变流装置、控制柜、控制屏的安装,其垂直度、水平度以及屏、柜面的平面度均应符合有关规定。屏、柜安装基础牢固,柜内冷却风机运转时柜体不应产生有感振动。接触器、低压断路器等元件的开关过程不应引起其他元件误动作。

2.1.3 工作环境检查

电控设备的正常使用环境条件见表7-7-1,对电子设备,应特别注意安装场所的防室。

2.1.4 电缆检查

(1) 检查电缆芯线截面积,电缆标志号应符合图



样要求。

在电缆架(槽、沟)中分开走线。电缆按电压类别和等级分开走线的分类见表7-7-2。

(2) 应检查电缆敷设是否按不同类别与电压等级

表7-7-1 电控设备正常使用环境条件 (GB4720—84, GB3797—89)

| 环境温度 (°C) | | 相对湿度 | 海拔 (m) | | 空气中浮游尘埃浓度 (mg/m ³) | | 腐蚀性气体 |
|-----------|----|--------------------------------|---------|---------|--------------------------------|-------|-------|
| 最高 | 最低 | | 电子设备 | 其他设备 | 电子设备 | 其他设备 | |
| +40 | -5 | ≤50% (+40°C时) 或90% (+20°C时) | 1000及以下 | 2000及以下 | 0.1以下 | 1.0以下 | 无 |

表7-7-2 电缆分开走线分类

| 类别 | 名称 | 电压等级 (V) | 类别 | 名称 | 电压等级 (V) |
|----|-------|----------------------|----|--------|----------|
| 1 | 高压动力线 | AC >380 | 3 | 一般控制线 | AC 220 |
| | | DC >750 | | | DC 110 |
| 2 | 低压动力线 | AC 380 | 4 | 低压控制线 | AC 48 |
| | | DC 750 | | | DC 24 |
| | | AC 220 DC 440~750 | | | |
| | | AC ≤110 DC <440 | 5 | 信号及调节线 | DC ≤15 |

(3) 电缆接头与母线连接应符合规程。

经发现受潮或绝缘受到损伤的设备应烘干或修复后再进行绝缘检查。

2.1.5 接地检查

成套电气传动控制系统一般有三种接地方式: 保护接地, 系统接地, 屏蔽接地。应根据图样要求检查三种接地干线的截面积、各控制装置与接地干线的连接、接地极的埋设。

2.2 配线检查

2.2.1 柜外配线检查

根据原理设计, 检查变压器、电抗器、电机、快速断路器、电控装置、控制台之间的动力电缆配线及控制电缆配线是否正确无误。

2.2.2 地线绝缘检查

拆开各接地干线的接地引线(或干线间连线), 测量彼此间绝缘电阻值, 确认彼此间电气隔离后, 再恢复拆开处的连接。

2.3 绝缘检查

绝缘检查主要是检查设备在运输、存放、安装过程中电气设备的绝缘是否受到损伤或受潮气的侵袭。已

2.3.1 绝缘电阻测量

绝缘电阻测量采用兆欧表。兆欧表的额定电压应根据各电路的额定工作电压而定, 见表7-7-3。对不能承受兆欧表电压的元器件(如半导体器件、电容等), 测量时应将其短接。水冷设备应在无水情况下测量。

表7-7-3 兆欧表额定电压选用

| 电路额定工作电压 (V) | 兆欧表额定电压 (V) |
|--------------|-------------|
| <48 | 250 |
| ≥48 | 500 |
| ≥500 | 1000 |
| ≥1000 | 2500 |

绝缘电阻测量应在设备中两个独立的带电回路之间或带电回路与地之间进行。绝缘电阻值应不小于1MΩ或按1MΩ/1000V考核。

2.3.2 介电强度试验

损伤严重经现场修复的电气设备, 在确认绝缘电阻符合要求之后, 还应按照有关标准规定进行介电强度试验, 进一步检查其绝缘水平。

此为公司制作 请尊重版权

ELECTRIC

7-108



3 操作联锁与保护回路的调试

3.1 控制与辅助电源受电

(1) 检查开关二次侧相间、对地绝缘,测量开关二次侧相间、对地直流电阻,判定是否存在短路现象。

(2) 拔出插件箱上所有插件模板,确认与上位机、微机间的通信线均已从端子板上卸下,并用胶布包好。

(3) 检查开关一次侧电压的大小及相序。

(4) 给控制电源及辅助电源送电(励磁回路除外)。

3.2 检查各种电源

(1) 检查各种稳压电源模板交流输入电压大小,确认正确后在断电状态下推上稳压电源模板,再送电,测量各稳压电源模板输出电压大小及稳压波形。

(2) 检查触发模板用同步电压的大小及相序。

(3) 检查各控制模板上的直流电源电压大小及极性。

(4) 检查给继电器、接触器供电的操作电源。

3.3 操作回路的调试

操作回路调试主要是检查各元件动作的正确性与可靠性,是在主回路不通电的情况下进行空操作的。空操作应在85%额定电压下可靠动作。调试要点是:

(1) 检查各电器元件动作顺序及相互连接状态是否正确。

(2) 检查保护与联锁是否正确。暂不具备动作条件的联锁,采用模拟的办法检查正确性。与生产机械位置或行程有关的联锁采用模拟办法粗调其位置,最后与生产机械联动调整其准确位置。

(3) 对于快速断路器、大容量断路器等元件,先手动合闸检查合闸机构动作灵活正确之后再电动操作。

(4) 操作过程中检查各电器元件是否有卡住、粘住或滞缓现象。检查主触头是否同时接通,触头超行程是否符合要求。还应检查各触头分断能力、元件动作噪声、线圈发热等。

3.4 故障综合与显示回路的调试

3.4.1 常见故障及整定值

电气传动控制系统常见故障及整定值见表7-7-4。

表 7-7-4 常见故障及整定值

| 名称 | 整定值 |
|---------|----------------------------------------------------|
| 电源异常 | 三相主电源: 80%~50% 三相控制电源: 90%~60% 稳压电源: 90%~70% |
| 过电流 | 1.1 堵转电流 |
| 过电压 | 110% |
| 过励磁 | 115% |
| 欠励磁 | 80%弱磁值 |
| 超速 | 110% |
| 快速熔断器熔断 | |
| 快速断路器分断 | 1.2 堵转电流 |
| 测速发电机失磁 | 85% I_{LN} |
| 风机停运 | |

3.4.2 故障综合处理功能与实现

故障综合处理电路功能有:

(1) 按照故障轻重及事先规定的处理措施,及时处理故障。

(2) 显示出故障原因,便于查找故障源。

(3) 实现合闸联锁。只有在无故障状态下,或在故障排除后电路复位(按动复位按钮)状态下,才能实现主接触器合闸。

故障综合处理电路有下列实现方法:

(1) 电器控制线路;

(2) 集成电路元件组成的数字硬件电路;

(3) 可编程序控制器;

(4) 用微型计算机实现故障自诊断与显示。

3.4.3 调试方法与步骤

(1) 检查故障综合处理与显示电路所需电源电压的大小与极性。

(2) 如果是模板结构,应先调试单个模板的输入输出控制特性。

(3) 如果是可编程序控制器或微型计算机,应先调试程序使其进入正常运转状态。

(4) 在各故障输入端均模拟为无故障输入,最后输出状态应是无故障状态或允许主接触器接通状态。检查各显示回路状态亦应正确。

(5) 在各故障输入端逐个地模拟每个故障状态时,音响报警应立即动作(一般均可手动切除音响),相



应的故障指示灯也闪亮。综合电路最后输出立即转换到分断主接触器的状态。撤除故障后，按动复位按钮，电路恢复正常。全部故障输入点均要如此试验一遍，动作全部正确后结束试验。

(6) 对于具有“先入为主”特性的电路，在规定的输入范围内，先模拟一个故障输入，音响报警动作，故障指示灯熄亮。再模拟第二个、第三个故障输入，相应的故障指示灯不再闪亮。撤除第一个故障输入后，第一个故障指示灯熄灭，同时第二个或第三个故障指示灯闪亮，再撤除闪亮的故障指示灯对应的故障输入，该指示灯熄灭，同时最后一个故障输入的指示灯闪亮，再撤除该故障输入，故障指示灯全部熄灭。按动复位按钮，电路恢复正常。这种电路的特点是显示最先出现的第一位故障。无此特性的电路，多个故障输入应有相应的多个故障指示灯闪亮。

综合电路不能正常工作时，若是数字硬件模板，应沿着故障信号传递方向逐级查找故障点，发现输入输出关系不对的组件时，应检查组件电源是否正确、有无虚接，输入信号电平是否符合组件电平规定，输入有否虚接或电气连线错误等；若是可编程序控制器或微型计算机，应检查输入信号是否送进程序或程序运转是否正确等。

4 触发与调节回路的调试

4.1 触发装置的调试

对触发装置的要求及常见的触发电路参见第2篇10.3节。直流调速系统中常用的双窄脉冲可逆触发电装置的原理图见图7-7-1。它由CSR触发输入及保护单元、CF触发脉冲单元及MB脉冲输出板组成。

触发装置的调试重点是检查各晶闸管的触发脉冲移相范围与其阳极电压相位之间的配合关系，所以调试应从检查主电源相序开始逐步进行。现以三相桥反并联联结方式的变流装置为例加以说明。三相桥反并联联结主电路见图7-7-2。

4.1.1 检查主电源相序

(1) 变流装置主电路受电条件

- 1) 断开触发电源或使触发脉冲处于封锁状态。
 - 2) 测量变流装置交流进线开关二次侧相间及对地绝缘电阻，判定有无短路现象。
 - 3) 直流侧负载回路处于开路状态。
- (2) 交流侧进线开关合闸，变流装置受电。

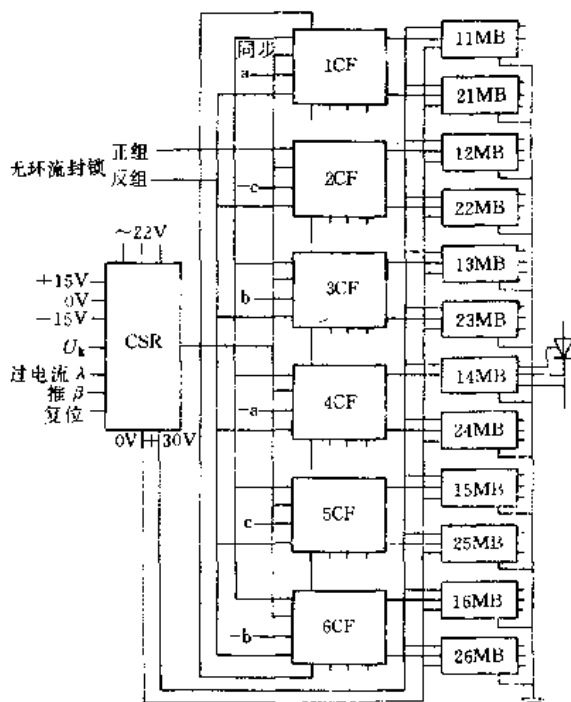


图 7-7-1 双窄脉冲可逆触发电装置原理电路

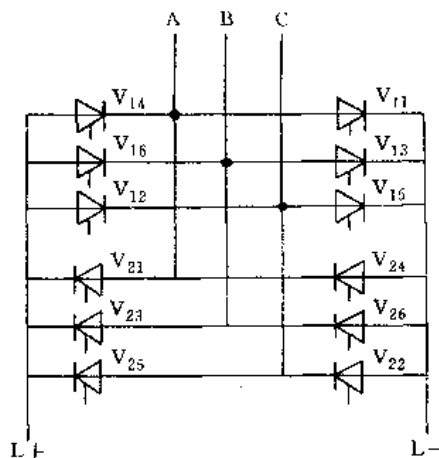


图 7-7-2 三相桥反并联联结电路

- (3) 测量主电源电压大小及相序是否正确。
- (4) 检查桥各臂晶闸管电压波形是否正确。
- (5) 检查交、直流侧阻容保护及压敏电阻等工作是否正常（观看波形及温升）。
- (6) 检查主电源检测变压器输出电压的大小是否正确。

4.1.2 检查触发脉冲

(1) 触发装置各控制模板受电条件；



- 1) 变流装置主电路处于断电状态。
- 2) 检查各模板用电源进线的电压 ($\pm 15\text{V}$ 、 $\sim 22\text{V}$) 及各触发板同步电源电压的大小及相位是否正确。

然后, 将触发装置各板插入插座。

(2) 检查触发脉冲波形及相序。给触发装置送电。首先检查 CSR 触发输入及保护单元: 1) 检查输入输出静态特性; 2) 检查触发用 30V 直流电源电压大小及极性; 3) 人为制造过电流信号, 检查过电流保护特性及粗整定值。然后检查 CF 触发脉冲单元。将 CSR 的控制输入端接控制地; 将正向组封锁输入端接控制地 (或插入换向逻辑模板, 施加正向组工作指令), 使正向组脉冲解除封锁。用示波器检查各触发脉冲单元的输出脉冲: 在一个电源周期内应出现一组间隔 60° 的双窄脉冲, 脉冲幅值、宽度及前沿陡度均应符合要求。如无脉冲或出现单脉冲时, 应检查故障单元的脉冲封锁、双脉冲形成、锯齿波及脉冲形成等环节; 如脉冲波形不正确, 应检查脉冲整形与功放环节。各触发脉冲单元输出脉冲均正常后, 再检查变流装置正向组各晶闸管门极-阴板的触发脉冲, 如无脉冲或波形不正确, 应检查脉冲传输连接线是否松脱、接线是否正确, 更进一步, 再查找相应的 MB 脉冲输出板内部的故障。以上均正常后, 打开正向组封锁输入端接地线, 将反向组封锁输入端接地, 对反向组各晶闸管, 重复做上述各检查项目。

正反向脉冲波形均正常后, 再检查正反向晶闸管触发脉冲的相序是否正确。以图 7-7-2 中正向组为例, 相序排列为 $V_{11}-V_{12}-V_{13}-V_{14}-V_{15}-V_{16}-V_{11}\dots$ 。如相序不正确, 应检查同步变压器的接线及同步电压连接线是否正确。

(3) 检查脉冲相位及移相范围。触发脉冲与主电路之间有一定的相位关系, 称之为同步关系。通常在设计阶段, 根据整流变压器及主电路的联结方式, 选配同步变压器的接线方式, 保证需要的相位关系。在装置出厂调试时, 也检查过相位关系。现场调试时, 由于设备安装, 必须重新检查相位关系。仍以图 7-7-2 的三相桥联结方式为例说明检查相位的方法。

在相序正确的前提下, 只要检查 V_{11} 管脉冲相位关系正确, 其余各管的脉冲相位关系也就正确, 如图 7-7-3 所示。 V_{11} 管的脉冲移相范围恰与线电压 u_{AC} 的相位相对应。检查相位时, 首先在示波器屏幕上确定线电压 u_{AC} 的位置, 在触发输入端施加 $u_k=0$ 的电压, 用示波器观察此时 V_{11} 管脉冲位置, 应如图 7-7-3 所示, 位于 $\alpha=90^\circ$ 处。在限定的控制电压正负变化范围内, 改

变 u_k 数值, 脉冲应在 $\alpha=0$ 及 $\alpha=180^\circ$ 之间出现, 此时, 则可确认相位关系正确。如相位关系不正确, 应检查同步变压器的接法。

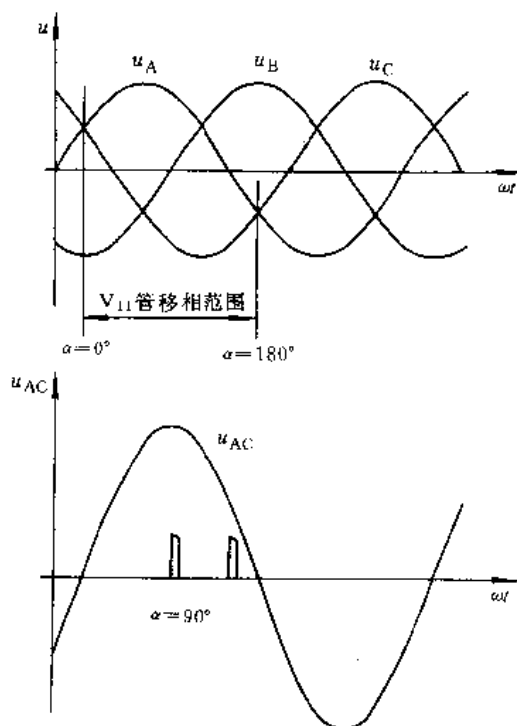


图 7-7-3 V_{11} 管触发脉冲与阳极电压相位关系

有些系统, 初始相位不定在 $\alpha_0=90^\circ$ 处, 可在 $u_k=0\text{V}$ 时根据系统要求调整偏移电压来整定初始相位角 α_0 , 如对错位无环流系统, $\alpha_0=180^\circ$ 。

(4) 检查脉冲对称度。在同一控制电压下, 各晶闸管触发脉冲移相角度的一致性称为对称度。一般检查 $u_k=0\text{V}$ 及 $u_k=\pm 8\text{V}$ 时脉冲对称度满足要求即可。对全数字触发, 采用锁相技术解决对称度问题; 较完善的模拟触发线路也有较高的脉冲对称度, 并具有自动频率补偿功能。一般的触发电路脉冲对称度需要精心调试。对称度调好后将调试用电位器锁紧。

(5) 整定 β_{\min} 及 α_{\min} 。最小逆变角 β_{\min} 是确保变流装置在逆变状态下换相、防止发生颠覆故障所必需的。最小逆变角

$$\beta_{\min} \geq \arccos \left[\cos(\gamma_{GD} + \Delta\gamma + \theta) - 2K_x \frac{e}{100} \frac{I_d}{I_{dN}} \right] \quad (7-7-1)$$

- 式中 γ_{GD} ——与器件关断时间相关的电角度;
 $\Delta\gamma$ ——触发脉冲相角误差 ($^\circ$);
 θ ——安全裕量角 ($^\circ$);
 K_x ——换相电抗压降计算系数;
 e ——变压器阻抗电压百分数;



I_d ——整流电流 (A);

I_{dN} ——变流装置额定整定电流 (A)。

γ_{GD} 一般取 $5^\circ \sim 10^\circ$ 。 $\Delta\gamma$ 一般小于 10° 。 θ 取 $5^\circ \sim 10^\circ$ 。一般情况下, β_{min} 在 $30^\circ \sim 45^\circ$ 范围内。

最小延迟角 α_{min} 也是一个很重要的参量。在计算整流变压器容量时,已考虑它的选取。如果取得偏大,将增大变压器容量,使功率因数降低;如果取得偏小,会影响 α_{min} 附近变流装置的工作性能。在调试时,一般应按设计给出的数值整定。如未给出 α_{min} ,可考虑按下述因素进行整定:

- 1) 采用锯齿波移相时, α_{min} 的取值应比正弦波移相略大些。
- 2) 采用双窄脉冲触发时, α_{min} 取值应比宽脉冲触发的略大些。
- 3) 对于不可逆系统或逻辑无环流系统,采用双窄脉冲触发时, $\alpha_{min} = 10^\circ \sim 20^\circ$,采用宽脉冲触发时, $\alpha_{min} = 5^\circ \sim 15^\circ$;对于有环流系统,为避免出现过大大环流,可取 α_{min} 略小于 β_{min} ,一般取 $\alpha_{min} = 30^\circ$ 。

α_{min} 及 β_{min} 的整定在 CSR 板上进行,仍按 V_{11} 管触发脉冲与 u_{AC} 的相位关系确定。整定后锁紧电位器。

4.2 调节回路的调试要点

4.2.1 调节器类

调节器类包括电流调节器、转速调节器、励磁电流调节器、磁通调节器、电动势调节器等。在进行闭环调

试之前,对调节器应进行以下检查:

- (1) 检查调节器调节特性。在调节器的给定输入或反馈输入端,分别施加正负交替的阶跃电压,用慢扫描示波器观察调节器输出电压波形。根据调节器的类别,输出波形呈比例特性、积分特性、比例积分特性、微分特性或比例积分微分特性。阶跃电压的幅值要根据调节器的放大倍数适当调整,否则会引起波形失真。
- (2) 调节器置零检查。在调节器上施加输入信号的情况下,在调节器置零输入端上施加置零电平,调节器输出立即降至 0V;撤除置零电平,输出偏离 0V。
- (3) 检查输入电子开关的工作。在做调节特性检查时,对输入通道的电子开关控制端施加阻断电平时,输出不跟随输入变化;施加导通电平时,调节特性正常。
- (4) 检查或整定调节器限幅。
- (5) 在以上检查中,如发现调节器输出呈现高频振荡状态,或某输出区段呈高频振荡状态,应改变放大器本身校正参数,以消除自激振荡。

4.2.2 逻辑控制类

(1) 换向逻辑单元。该单元用于逻辑无环流直流可逆电气传动系统中,根据电流给定极性和电流反馈检测结果,以一定时间及逻辑关系,输出正、反向组无环流工作和安全切换所需的触发脉冲工作及封锁信号。单元原理电路见图 7-7-4。

调试时有如下两项内容要检查:

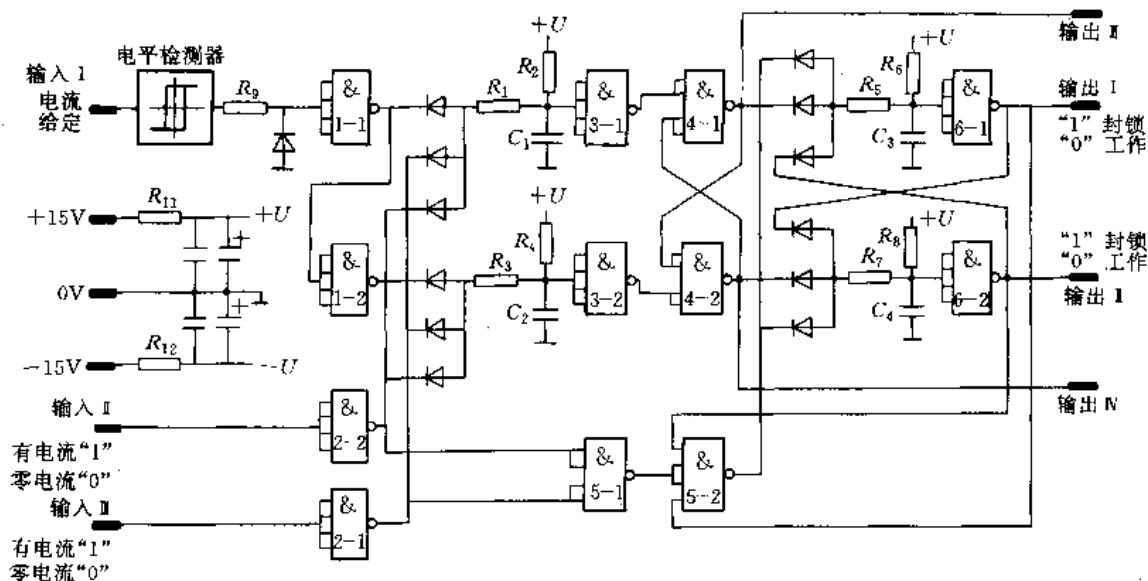


图 7-7-4 换向逻辑单元原理电路



1) 检查电流给定电平检测器特性。预期特性见图 7-7-5。最小动作电压 (绝对值) $h \leq 0.1 \sim 1V$, 正负值之差 $\leq 0.05V$ 。

2) 检查逻辑及延时。将零电流输入端 I 及 II 接 0V, 在电流给定输入端 I 加交流电压 (10V 以下), 用双踪示波器分别观察输入及输出量, 判断其翻转和延时是否正确。

延时时间: 关断延时 0.3~0.5ms

开放延时 0.5~0.8ms

(2) 运转指令及保护单元。该单元用于调速系统, 根据转速给定与反馈的有无, 以及运转、事故状态, 输出有关单元所需的工作和封锁信号、控制和故障信号,

保证系统正常工作和可靠停车。其原理电路见图 7-7-6。现场调试时应检查下述内容:

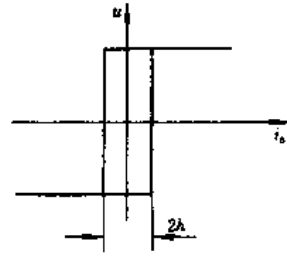


图 7-7-5 电平检测特性

i_s : 以规范电压 (0~10V) 表示的电流值

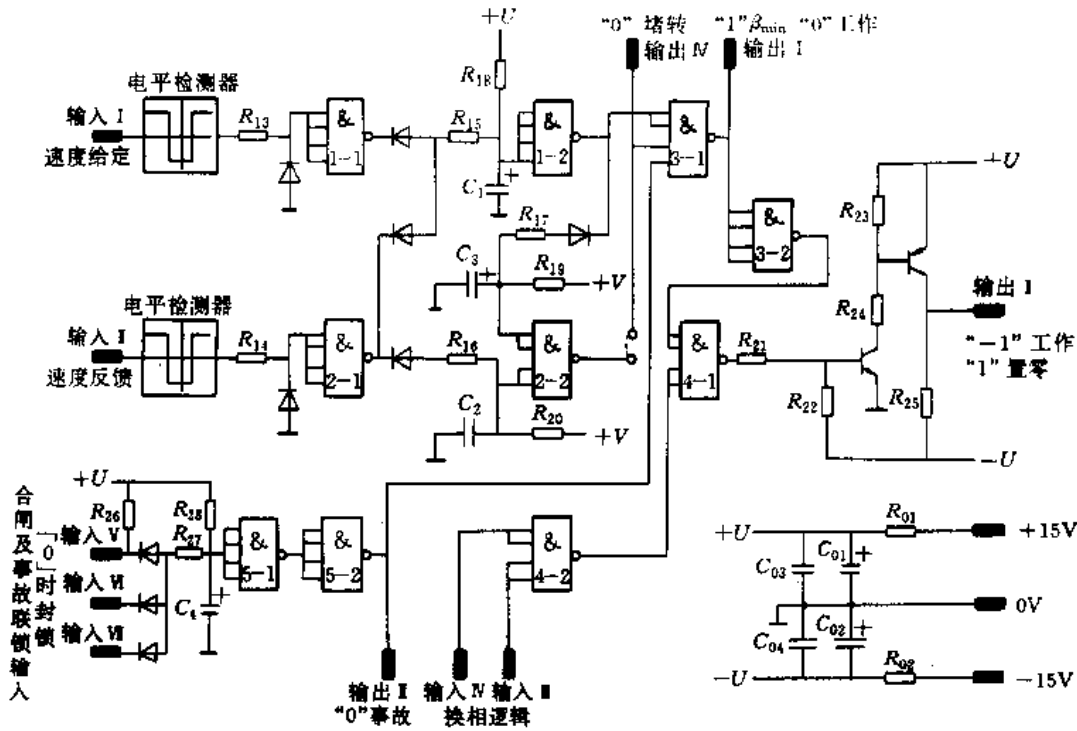


图 7-7-6 运转指令及保护单元原理电路

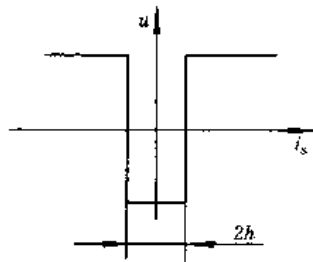


图 7-7-7 电平检测特性

1) 检查电平检测器特性。预期特性见图 7-7-7。最

小动作电压 $h \leq 0.2V$, 正负值之差小于 0.05V。

2) 起动控制检查。起动前, 系统应处于封锁状态 (脉冲推至 β_{min} , 调节器处于置零状态)。起动时 ($n_r \neq 0$) 解除封锁。若 1s 后无反馈 n_r 输入, 恢复封锁并发出堵转信号。

3) 停车控制检查。令 $n_r = 0$, $n_i \neq 0$, 系统不封锁。停车后 ($n_i = 0$), 延时 100ms 后转为封锁。用示波器监视输出状态并检查延时。

4) 逻辑转换状态检查。两逻辑转换输入均为 "1" 时, 输出转换为调节器置零状态, 有一个逻辑输入为



“0”时，置零状态撤除。

5) 故障状态检查。事故输入时，系统立即封锁，事故排除后，延时100ms解除封锁。

4.2.3 隔离变换类

交直流电流检测、直流电压变换、转速变换等单元均属于这一类，在系统中提供反馈控制量。现场调试时，一般在开环状态时检查反馈量的整定值及输入输出关系。如单元中含有保护环节，要同时检查保护动作值。如出厂整定不正确，应重新精确整定。

4.2.4 给定指令类

包括有触点给定、无触点给定及给定积分器等单元。现场调试时，着重检查输入输出关系的正确性。

5 磁场回路的调试

5.1 磁场回路的传递函数

直流电动机磁场的等效电路及传递函数见表7-7-5。

表 7-7-5 磁场等效电路及传递函数

| 等效电路 | 框图 | 传递函数 |
|------|----|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| | | $\frac{I_{Mf}(s)}{U_{Mf}(s)} = \frac{1}{R_{Mf} \beta T_{Mf} s + 1} \cdot \frac{\beta}{T_{cd} s + 1}$ $\frac{I_{\phi}}{I_{Mf}} = \frac{\beta}{T_{cd} s + 1}$ $T_{Mf} = \frac{L_{Mf}}{R_{Mf} // R_{cd}} \quad T_{cd} = \frac{L_{cd}}{R_{cd}}$ |

注： U_{Mf} ——励磁回路电压(V)； I_{Mf} ——励磁回路电流(A)； R_{Mf} ——励磁回路电阻(Ω)； T_{Mf} ——励磁回路时间常数(s)； β ——磁化曲线斜率； L_{Mf} ——励磁回路电感(H)； I_{ϕ} ——励磁电流分量(A)； R_{cd} ——涡流电阻(Ω)； T_{cd} ——涡流时间常数(s)。

5.2 不可逆励磁回路的调试

动作整定值见表7-7-4。精确整定后锁紧。

5.2.1 励磁回路开环的调试

(1) 检查励磁触发装置的触发脉冲及相位关系、触发脉冲波形及对称度，整定初始相位、 α_{min} 及 β_{min} 等。

(2) 检查励磁主电路受电条件及联锁，如测量励磁回路绝缘、起动电动机外通风电动机等。

(3) 励磁主电路受电。对于具有强迫励磁的电路，励磁装置的全电压往往是额定励磁电压的数倍，全电压施加到励磁回路，会出现过电流，所以最好在 $\alpha=90^\circ$ 时使主电路受电，然后前移脉冲，用示波器观察整流电压波形，检查是否缺相及整个输出电压范围内的波形齐正度，同时注意励磁电流不要超出额定值。

(4) 检查交直流侧阻容保护工作是否正常。

(5) 在开环状态下进行下述整定：

1) 应在励磁电流调节器或磁通调节器输入端处，检查励磁电流反馈或磁通反馈的极性，整定反馈强度。

2) 整定欠励磁保护动作值。

3) 整定过励磁保护动作值。

5.2.2 励磁回路闭环的调试

直流电动机磁场回路在电路结构上分为独立励磁和非独立励磁两种方式。在晶闸管供电的弱磁调速系统中，多采用非独立励磁方式。非独立励磁又分为最大值选择器方式与电动势、磁通双环方式。

无论采用何种结构方式，在闭环调试之前，需根据磁场有关参数及调节器型式，初步估算调节器的参数，检查模板上元器件参数能否满足参数调整的需要。然后，按调节器类检查方法检查调节器工作正常后才能进行闭环调试工作。

1. 最大值选择器励磁方式 其框图见7-7-8。

调节器参数按工程近似处理方法计算。

$$\Sigma t_L = \frac{T_d}{2} + T_{FE}$$

$$\beta = \frac{1}{3} \sim 1$$

$$\omega = 1 \sim 2$$

在电压环工作时



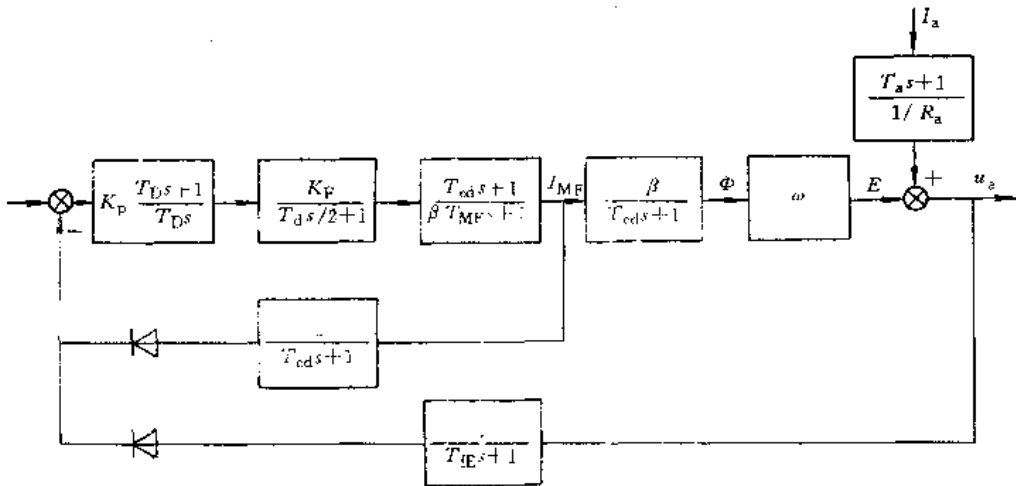


图 7-7-8 励磁回路最大值选择器励磁方式框图

$$\begin{cases} K_p = \frac{T_{MF} - 1}{K_F \cdot 2 \Sigma L_a \omega} \\ T_D = (5 \sim 6) \Sigma L_a \end{cases} \quad (7-7-2)$$

在励磁电流环工作时

$$\begin{cases} K_p = \frac{T_{MF} - 1}{K_F \cdot 2 \Sigma L_a \omega} \beta \\ T_D = (5 \sim 6) \Sigma L_a \end{cases} \quad (7-7-5)$$

一般情况下，因 T_{MF} 值很大，可以采用比例调节器。这样，既能保证控制精度，又有良好的动态特性。这时只需比较两式中的 K_p 值确定选取值。

首先，调试励磁电流闭环。在给定端施加阶跃给定，调节器参数在计算值附近变化，用示波器反复观察磁通量（涡流模拟环节输出）的响应波形，当品质符合

要求时锁定调节器参数。考虑式 (7-7-3) 的计算参数偏低，整定时可适当偏高些，兼顾电压闭环工作时的品质。

电压闭环工作时的品质，需在调试转速环弱磁段时检查。

2. 电动势、磁通双环结构励磁方式 其框图见图 7-7-9。

先进行内环调试。磁通调节器 AMR 采用比例调节

$$\left. \begin{aligned} \Sigma L_a &= \frac{T_d}{2} \\ K_p &= \frac{T_{MF} - 1}{K_F \cdot 2 \Sigma L_a \omega} \end{aligned} \right\} \quad (7-7-4)$$

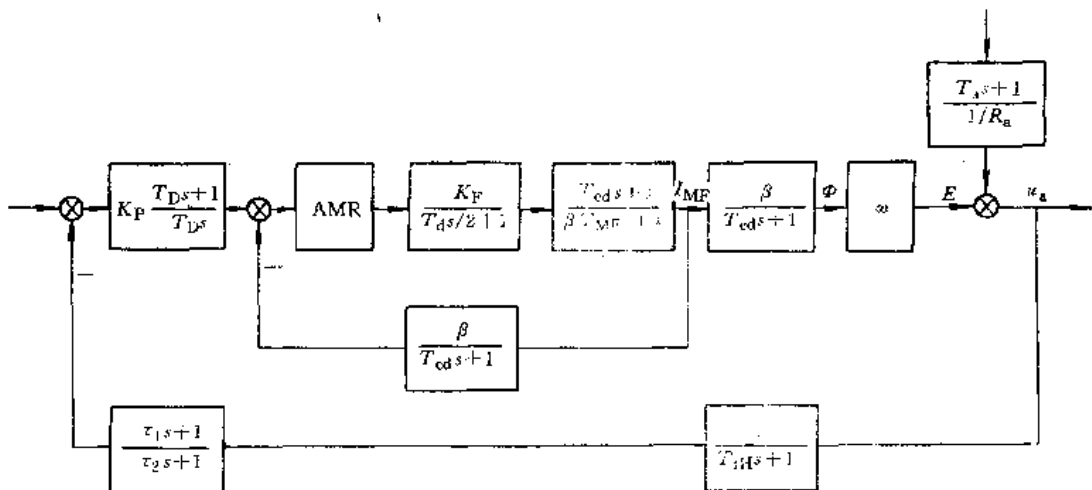


图 7-7-9 磁场回路双闭环结构励磁方式框图



磁通输出量(涡流模拟环节输出)的响应波形应符合二阶系统的品质指标。

然后,计算外环调节器参数。此时,内环等效为时间常数 $T_{1e}=2\Sigma\tau_e$ 的惯性环节。外环电动势调节器采用 PI 方式,则有

$$\left. \begin{aligned} \Sigma\tau_e' &= T_{1e} + T_{IH} = 2\Sigma\tau_e + T_{IH} \\ \tau_1 &= 4\Sigma\tau_e' \\ \tau_2 &= T_D = 2\Sigma\tau_e' \\ K_P &= \frac{1}{2\omega} \frac{1}{2\Sigma\tau_e'} \end{aligned} \right\} (7-7-5)$$

外环调节品质需在调试转速环弱磁段时检验。

5.3 可逆励磁回路的调试

5.3.1 接触器切换可逆励磁方式

对于小容量电动机的磁场,可在额定励磁下直接切换。对于较大容量的电动机磁场,为改善接触器工作条件,降低对其他设备的干扰,在切换前应将励磁电流给定值降至零,待励磁电流实际值降到较小值时,再分断正向接触器,接通反向接触器。

接触器切换操作应在操作回路调试时完成。开环与闭环的调试与本章 5.2 节所述的相同。闭环调试完成后,应在磁场送电情况下检验接触器切换逻辑的正确性。

5.3.2 逻辑无环流可逆励磁方式

这种可逆励磁方式就一个方向看,与本章 5.2 节所述的不可逆励磁方式工作情况相同,调试方法也相同。调试步骤如下:

(1) 应先检查逻辑转换单元的工作是否正常。然后在电流给定输入端施加正向组工作电压,以保证在调整正向组时反向组的触发被封锁。反之亦然。

(2) 按本章 5.2 节所述的方法,分别调试正向组磁通环及反向组磁通环。

(3) 电动势环的动态品质检验仍在调试转速环弱磁段时进行。

6 系统调试

6.1 转速、电流双环不可逆调速系统的调试

调速系统原理图见图 7-7-10。外环为转速环,内环为电流环。在触发装置调试完毕后开始系统调试。

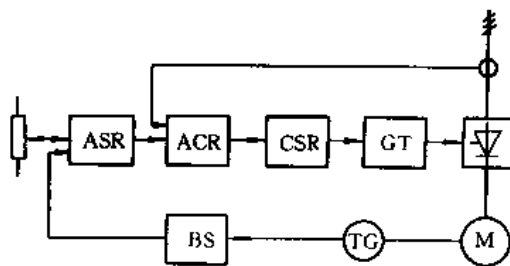


图 7-7-10 转速、电流双环不可逆调速系统

ASR—转速调节器 ACR—电流调节器 CSR—触发输入
GT—触发装置 BS—转速变换

6.1.1 开环调试

操作连锁及故障保护电路已调试完毕。在满足合闸连锁时,可以给主电路送电。由于系统调试要使电动机转动,因此,要事先检查电动机及其拖动的旋转部件,都应处于正常工作状态。

电动机起动时存在一定的粘阻转矩。起动大型电动机时要谨慎对待。变流装置受电后,缓慢地改变控制电压,使触发脉冲前移,用示波器监视整流电压(在刚出现整流电压波形时,应注意是否缺相及齐正度),同时观察电枢电流数值。电流增至某值时,电动机转动,其后电流降至空载电流值。若电流增至较大值(如 $10\%I_N$ 左右),电动机仍不转动,则应断开主电路,检查原因或人工盘车。电动机转动后,应在低速下再检查一下转动部件情况,然后逐渐升至较高转速(注意滑动轴承在低速时磨损严重)。

在开环状态下应进行以下检查:

- (1) 在基速以下整流电压波形的齐正度。
- (2) 所有转动部件在低速、高速时的转动情况。
- (3) 用示波器检查测速发电机输出电压的波形,应不含与转速成比例的脉动分量或较大的齿谐波。若系统装有脉冲发生器时,应用示波器检查输出脉冲在各种转速下不应出现左右晃动现象及丢失脉冲的情况。

(4) 检查变流装置交直流侧 RC 保护有无异常现象。

(5) 检测转速反馈强度和反馈特性。将电动机转速升至额定转速,检查出厂调试时整定的反馈强度和反馈极性(插入转速变换单元,在转速调节器输入端进行检查)。然后,分几档降速,测出每档转速的转速值与反馈强度值,做出转速-反馈强度的特性曲线,检查



线性度是否良好。

(6) 检查电流反馈极性和反馈强度。如果有条件接入电阻负载(切除电动机),将变流装置电流升至1/2额定值,在电流调节器输入端检查电流反馈极性及反馈强度。如果无电阻负载,开环转动电动机时,可以检查反馈极性,反馈强度保持出厂调试时的位置不变(可在断电时测量电阻分压系数后计算反馈强度),闭环调试时再精确整定。

6.1.2 整定保护单元动作值

在闭环调试之前,必须整定各保护单元的动作值,使保护环节进入工作状态。

(1) 超速保护整定。对于恒磁系统,可采用直接整定方式;对于弱磁系统,可采用模拟方法预整定。动作整定值见表7-7-4。

(2) 过电压保护整定。可采用直接整定方式进行整定(开环)。动作整定值见表7-7-4。

(3) 缺臂故障整定。在电动机开环运转,人为制造缺臂故障(如撤去某晶闸管的脉冲)下整定其动作值。

(4) 接地保护整定。在电动机开环运转,人为制造正、负母线接地故障下,整定其动作值。整定要兼顾低压时的灵敏性和高压时的热稳定性。

(5) 快速断路器整定。为提高整定的准确度,避免设备较长时间流过大大电流,采用闭环整定方式。为保护直流电动机,应短接电枢绕组,保留滤波电抗器。电流调节器采用PI方式,估算并配置调节器参数,按调节器类调试要点检验调节器特性,然后接通电流闭环。

在小阶跃给定情况下,调整调节器参数,使电流过渡过程既快又无超调。在最大电流给定值的1/2或1/4时,检查并精确整定反馈强度。然后增大阶跃给定值,观看过渡过程品质有无变化。

然后,利用阶跃给定值给出主电路直流电流,整定快速断路器动作值。其动作值见表7-7-4。快速断路器的动作值既与主电路电流数值有关,也与电流上升率有关。所以,采用闭环整定方式可以提高整定的准确度。整定时,大电流的持续时间要短。快速断路器整定电流刻度盘上指示值仅供整定时参考,调整整定值时,刻度盘只能按照规定旋转方向旋转。

(6) 过电流保护整定。与快速断路器的整定相同,采用闭环整定方式。其动作值见表7-7-4。

6.1.3 电流闭环的调试

忽略反电动势环的影响,电流闭环的调节对象转

化为一个大惯量环节 $1/R_a(T_a s+1)$ 和一个近似处理的小惯量环节 $1/(T_{as}/2+1)$ 。 T_a 是变流装置的触发滞后时间,由变流电路的类型确定。调节器既可采用串联PI型式也可采用并联PI型式。采用并联PI型式时,电流调节环的结构图见图7-7-11。

(1) 调节对象参数估算。需估算的对象参数有电枢回路电磁时间常数 T_a 及对象放大系数 K 。估算方法有:

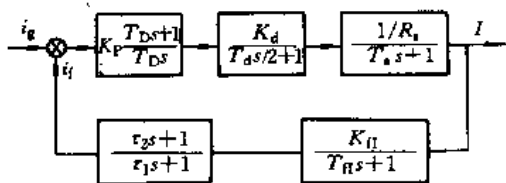


图 7-7-11 电流环结构图

1) 采用现场测量方法确定。主电路电阻一般采用电桥法测量;主电路电感一般采用交流伏-安法测量。直流电动机电枢电感在额定励磁时测量值偏低,在欠励磁或不送励磁时测量值偏高;有铁心的滤波电抗器电感值与主回路电流值有关,测量时应尽量在接近运行工况下进行。电阻、电感值应是包括电动机、滤波电抗器及连接电缆在内的总值。

2) 经验估计法。主回路电磁时间常数 T_a ,在配置直流滤波电抗器时, $T_a=40\sim 70\text{ms}$;在不配置直流滤波电抗器时, $T_a=18\sim 35\text{ms}$ 。放大系数 $K=K_d K_n/R_a$,根据主电路额定电流电阻压降的百分值及堵转电流与额定电流比值($I_{堵转}/I_{DN}$)估计。例如,额定电流电阻压降 $I_{DN} R_a/U_{DN}=7\%$, $I_{堵转}/I_{DN}=2$,则放大系数近似为 $K \approx \frac{1}{0.07 \times 2} \approx 7$ 。

(2) 校核电流调节器参数。调节器的型式在原理设计中已经确定。调试前应根据调节对象的参数、调节器的型式及反馈系统工程处理原则,校核调节器参数能否满足生产机械对调节系统品质的要求。

1) 对于要求动态速降小及恢复时间短的系统,如连轧机主传动,在电动机及生产机械允许承受的 di/dt 范围内,应使电流闭环的过渡过程尽可能的快,且超调量很小或无超调。因此,必须尽量提高电流闭环的截止频率 ω_c 。

2) 对过渡过程品质要求不高的生产机械,电流闭环不必调得很快,以免过大的 di/dt 造成对传动齿轮的冲击。这类机械希望电流过渡过程无超调,电流波形各相均衡整齐。



(3) 电流闭环动态调试。通常闭环调试在电动机磁场不送电的情况下进行,有制动机构的生产机械,可将制动器抱紧。检查过调节器参数后,应按调节器类单元调试要点再检查一下调节器特性,然后接入闭环。

在无电流给定(为安全起见可以稍许施加反向的给定)情况下,给主电路送电。逐步增大电流给定,用示波器观看一下电流波形是否正常,给定值与实际电流对应关系是否正确。给定值不宜大,确认关系正确后可以阶跃响应调试。

首先观看电流连续区的阶跃响应波形。阶跃值从较小给定开始,根据响应波形的快慢、超调量的有无或大小,调整调节器参数,使之出现满意的波形。然后,再逐步增大阶跃给定值。根据大阶跃给定值时响应波形情况,如不理想再调整参数,以大值阶跃响应波形良好为基准,确定电流连续区参数。电流环的响应时间一般为10~20ms。在做阶跃响应,尤其是大电流阶跃响应时,阶跃给定时间要短,以免电动机换向片过热损坏。

若系统设有电流自适应环节,在电流连续区调试完毕后,才开始电流断续区调试。首先,整定断续电流检测器的特性,根据电流“有”、“无”,检测器输出“1”及“0”电平,控制相关的电子开关通、断。断续区品质同样要通过阶跃响应校核。确定电流断续范围后,首先在断续范围内做阶跃响应,调整参数,使过渡过程有较好的品质,再检查断续到连续时的响应,均能达到满意结果时,电流环调试结束。具有自适应环节的电流调节器,断续区的品质能接近或达到连续区的品质。

电流环调试结束后,各调整参数应锁定,并做好调试记录。

6.1.4 转速闭环的调试

根据工程近似处理原则,电流调节环在转速环内可以等效为一个小惯量环节。时间常数的数值取决于电流调节环是按二阶系统或三阶系统校正。转速调节器既可采用串联校正,也可采用并联校正。在采用并联校正时转速闭环的结构图见图7.7-12。

(1) 调节对象参数估算。转速环调节对象是启动时间常数

$$T_Q = \frac{GD^2}{375 C_M \Phi I_{\max}} n_{\max} \quad (7.7-6)$$

T_Q 的数值可用两种方法得到:

1) 直接测量法。小容量拖动系统可以采用此法。

电动机处于额定励磁状态,生产机械空载运行,在电流环给定端给出1/2(或1/4)额定电流,忽略空载电流的影响,电动机转速以恒定加速度上升,当转速升至额定转速时,准确地切断供电电源,记录转速上升时间,通过换算求得 T_Q 值。这种测量方法比较危险,生产机械不允许有较大冲击时不能采用。大容量系统通常不采用。

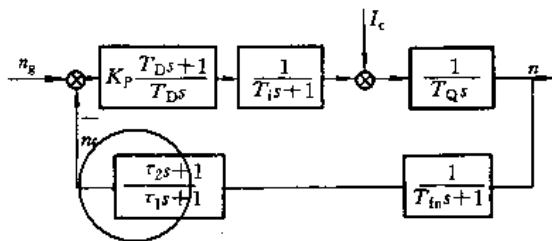


图 7.7-12 转速环结构图

2) 计算方法。由式(7.7-6)可知, T_Q 与系统的 GD^2 有关。 GD^2 可以通过计算求得,也可以通过测量求得。 $C_M \Phi$ 根据铭牌参数计算求得。因此 T_Q 可以计算出来。

通常,对于小容量系统, $T_Q < 1s$ 。对于快速正反向系统 T_Q 值也较小, $T_Q = 1 \sim 2s$ 。但对于某些 GD^2 很大的系统, $T_Q = 10 \sim 20s$ 。

(2) 校核转速调节器参数。根据调节对象的参数及原理设计所选用的调节器的类型,校核调节器参数是否能满足生产机械要求。如同校核电流调节器参数时阐明的原则:对于要求动态速降小、恢复时间短的生产机械,要尽可能提高转速环的截交频率 ω_c ;对于柔性连接的生产机械(如提升机),要求过渡过程平稳,防止钢丝绳抖动,此时,转速环的截交频率一般较低;对于一般生产机械,截交频率在以上两种情况之间。生产机械对超调量的要求在校核参数时也应给予考虑。

(3) 转速环动态调试。转速闭环调试,应在各种保护与联锁均正常投入工作的前提下进行。校核好调节器参数后,仍按调节器类单元调试要点检查调节器特性正常后,接通转速闭环。

缓慢地增大转速给定值,电动机转速从零逐渐上升。用示波器观察转速反馈波形,对应于每个给定值,转速反馈均应是一条稳定的直线,不应出现振荡波形。在50%转速给定时,复核一下电动机转速,应是50%最大转速。

转速环仍采用观看转速阶跃响应波形的方法进行动态调试。阶跃给定值是在某个给定值基础上的增量,其数值不应使转速调节器输出出现饱和和限幅。



当系统出现超调量时,由于电流不能反向,降速时是自由停车波形,改变调节器参数,使转速阶跃响应波形达到要求时锁定调节参数。然后投入转速给定环节,清理调试现场,在操作室或操作点上进行操作。在整个转速范围内升速或降速,检查各种转速下的运转状况,均正常后,空载调试结束。

6.1.5 负载试车

负载试车是在实际运行工况下,考核电气传动控制系统的品质,同时也考核生产工艺及生产机械。通常,空载调试品质满足要求后,负载运行时都能满足生产工艺要求。必要时,可以测量系统的静态和动态性能指标。对动态品质要求高的机械,用示波器监测突加负载时的速度降落和恢复时间,如不能满足要求,必须重新调整调节器参数,在保证稳定的前提下,进一步减少积分时间常数,增大比例系数,提高系统的快速性。

负载试车时,还应注意电动机在大电流下的换向与温升、变流装置各部分的温升等,一旦有问题,应停机检查,解决问题后再试车。

6.2 逻辑无环流可逆调速系统的调试

该调速系统原理图见图 7-7-13, 仍为转速外环、电流内环的双环调速系统。调试时应按正向和反向分别进行。就一个方向而言,调试步骤与方法不可逆系统时基本相同。调试步骤如下:

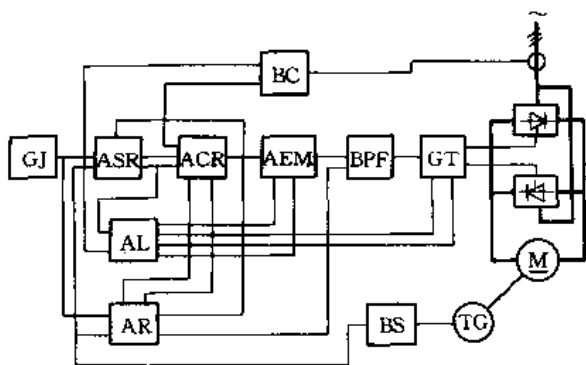


图 7-7-13 逻辑无环流可逆调速系统

GJ—给定积分器 ASR—转速调节器 ACR—电流调节器 AEM—电势记忆 BPF—触发输入 GT—触发
AL—换向逻辑 AR—运转控制 BS—转速变换 BC—电流变换

(1) 首先检查逻辑转换单元工作特性。然后在电流给定输入端施加负电压,确保在调试正向组时反向组被封锁。反之亦然。

(2) 先调整正向组触发装置,再调反向组触发装置。

(3) 先调试正向组开环,再调试反向组开环。调试方法与本章 6.1.1 节所述的相同。重复部分免做。

(4) 整定保护单元动作值。先在正向组调试时进行,反向组调试时可校核一遍,使正、反向动作值尽量一致。

(5) 先调试正向组电流闭环,再调试反向组电流闭环,正、反向组动态品质应尽量一致。然后,正、反向组均投入工作,在正、反向阶跃给定情况下观察正、反向电流响应品质及零电流死时的大小。若死时过大,适当调整逻辑转换单元的延时。

(6) 进行转速闭环调试

(7) 投入给定环节,做空载及负载试车。

6.3 有环流可逆调速系统的调试

调试步骤大体如下:

(1) 先进行正向组开环调试、整定保护单元动作值及电流闭环调试,再做反向组相同内容的调试。然后正、反向组同时投入工作,在电流给定为零时整定环流给定数值,再做正、反向阶跃给定试验,观察正、反向阶跃电流响应波形是否一致。

(2) 进行转速闭环调试。

(3) 投入给定环节,进行空载及负载试车。

6.4 非独立控制弱磁调速系统的调试

非独立控制弱磁调速系统广泛应用于各种领域。磁场回路的调试在本章 5 节中已阐述,转速系统的调试在本章 6.1、6.2 及 6.3 节中已阐述。弱磁调速段的调试应在上述调试完成后进行。

(1) 静态调试。逐渐增大转速给定值,使电动机转速超过基速后再继续升速,用示波器监测转速反馈信号,同时监视整流电压。在各个转速给定下运转时,转速反馈波形应无振荡及其他不正常波形。如果在改变转速时,出现振荡次数较多的衰减振荡波形,应修正电动势调节器的参数。

(2) 动态调试。在缓慢改变转速给定值、转速反馈波形正常的情况下,进行转速阶跃响应调试。将电动机转速升至弱磁段某值,再给出转速给定的阶跃增量,观察转速反馈的响应波形及整流电压的调整波形,均满意时锁定电动势调节器的参数。

励磁回路电感值较大,为加快过渡过程,励磁回路通常都有一定的强励倍数。在配置有涡流模拟环节时,



欲保证磁通量有较快的过渡过程,励磁电流量必然有一定超调。在进行弱磁段调试时,要注意避免弱磁升速时引起欠励保护动作,增磁降速时引起过励保护动作。

弱磁段调试结束后,投入转速给定环节,进行空载及负载试车。

6.5 卷取机张力控制系统的调试

张力控制方法可以分为间接法和直接法。目前绝大多数张力控制系统均采用间接法。

间接张力控制系统又有两种类型:恒电流恒电动势控制系统和最大转矩控制系统。图7-7-14给出的卷取机张力控制系统属于恒电流恒电动势控制系统。这种系统应用面较广,通常控制系统由下述的两个独立部分组成。

(1) 电枢电流控制部分:维持 $I_a = \text{常数}$,靠调节电动机电枢电压来控制。

(2) 磁场控制部分:维持 $\Phi/D = \text{常数}$,靠调节电动机励磁电流来控制。

张力控制系统调试步骤大致如下:

(1) 先调试磁场控制回路及磁通环。

(2) 调试电流环及电压环。在没有张力设定的情况下,系统自动转换为电压环工作。

(3) 模拟调试卷经测量与记忆环节。

(4) 模拟调试动态补偿环节,实测空载损耗之后整定电动机空载损耗补偿(简称空补)环节。

(5) 调试张力设定环节及张力综合环节。

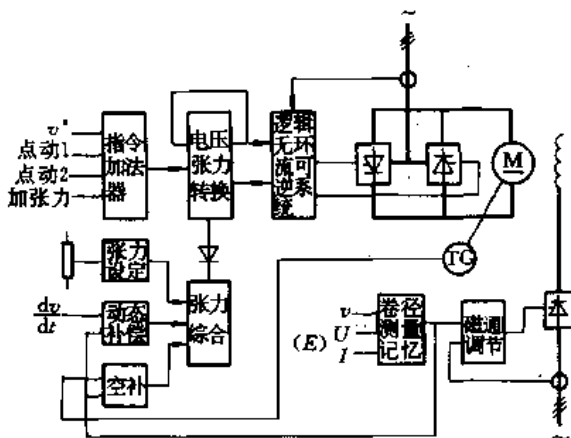


图 7-7-14 卷取机张力控制系统

v —带材线速度 dv/dt —带材线加速度 U —电动机端电压 E —电动机的电动势, $E=U-IR$

(6) 负载联机试车。观察卷经测量与记忆环节、动补环节等工作情况,加减速过程中带材张力波动情况,

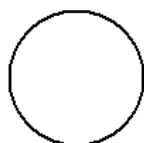
再适当修改相关的参数。

参考文献

- [1] 天津电气传动设计研究所编著. 电气传动自动化技术手册. 北京: 机械工业出版社, 1992
- [2] 机械工程手册电机工程手册编辑委员会编. 机械工程手册 第6卷: 机械设计(3). 北京: 机械工业出版社, 1982
- [3] 机械工程手册电机工程手册编辑委员会编. 电机工程手册 第9卷(自动控制系统). 北京: 机械工业出版社, 1982
- [4] 机械工程手册电机工程手册编辑委员会编. 电气工程师手册. 北京: 机械工业出版社, 1987
- [5] 徐灏主编. 机械设计手册 第5卷. 北京: 机械工业出版社, 1992
- [6] 季杏法主编. 小型三相异步电动机技术手册. 北京: 机械工业出版社, 1987
- [7] 杨兴瑶. 电动机调速的原理及系统. 北京: 水利电力出版社, 1979
- [8] 何冠英. 电子逆变技术及交流电动机调速系统. 北京: 机械工业出版社, 1985
- [9] 徐根泉主编. 交流调速系统及其应用. 高等纺织院校教材. 北京: 纺织工业出版社, 1990
- [10] 中国电工技术学会电控系统与装置专业委员会编著. 风机水泵交流调速节能技术. 北京: 机械工业出版社, 1990
- [11] 刘竞成主编. 交流调速系统. 上海: 上海交通大学出版社, 1984
- [12] 佟纯厚主编. 近代交流调速. 北京: 冶金工业出版社, 1985
- [13] 王耀德, 冷增祥. 电气传动控制系统. 南京: 东南大学出版社, 1990
- [14] 陈坚. 交流电机数学模型及调速系统. 北京: 国防工业出版社, 1989
- [15] 苏彦民. 电力拖动系统的微型计算机控制. 西安: 西安交通大学出版社, 1988
- [16] 山本国城等. 交流可变速ドライブの鐵鋼プラントへの適用. 三菱電機技報, 1990, 64(12): 19~26
- [17] 周也平. 主轧机现代交流传动控制技术. 电气传动自动化, 1993(4): 2~16
- [18] 周也平. 直流电气传动数字式控制技术的新发



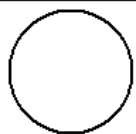
- 展. 电气传动自动化, 1991 (3): 1~13
- [19] 何万民等. 唐钢高速线材轧机计算机控制系统. 冶金自动化, 1990 (4)
- [20] 周也平. 大型矿井提升机现代交流传动的技术水平. 第二届中国交流电机调速传动学术会议论文集. 中国重庆, 1991: 52~65
- [21] S. O. Olsen, A. Rufer. The Power Swivel-advanced Drive Technology for Oil and Gas Drilling. Brown Boveri Review, 1985, 72 (8/9)
- [22] Steven C. Harker, Patrick T. Mcnlty. Implementation of a Fully Microprocessor-Controlled Paper Machine Drive System. IEEE Transactions on Industry Applications, 1984, IA-20 (2)
- [23] 渡边幹夫. デジタル化されるブラシレスドライブシステム. 電気計算, 1988, 56 (6)
- [24] 磯井安秋等. インバータ制御エレベーターの超高速化技術. 東芝レビュー, 1989, 44 (9)
- [25] 许大中. 高功率因数异步电动机晶闸管串级调速系统. 电工技术杂志, 1991 (5)
- [26] 長谷川和彦. 箔. フィルム製造ライン. オートメーション, 1992, 37 (5)
- [27] Thomas Hackman. Electric propulsion systems for ships. ABB Review, 1992 (3)





第 8 篇

机 械 制 造 自 动 化 系 统



主编单位 清华大学

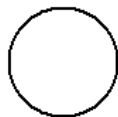
编写单位 清华大学

主 编 吴 澄

副主编 肖田元

编写人 吴 澄 任守渠 许隆文 童秉枢
王先逵 朱亚清 吴年宇 马振平
蔡复之 成 晔 冯平法 万 军
潘建岳 胡道元 俞盘祥 熊光楞
肖田元

主 审 程耀东



缩 写 词 表

| | | | |
|--------------|------------------------------------------------------------------------------|------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|
| AE | Acoustic Emission 声发射 | CIMS | Computer Integrated Manufacturing System 计算机集成制造系统 |
| AFMS | Advanced Factory Manufacturing Systems 先进的工厂制造系统 | CLD | Cutter Location Data 刀位数据 |
| AGV | Automatic Guided Vehicle 自动导引小车 | CMIP/CMIS | Common Management Information Protocol/Common Management Information Services 公共管理信息协议/公共管理信息服务 |
| AMRF | Automated Manufacturing Research Facility 自动化制造研究设施 | CNC | Computer Numerical Control 计算机化的数字控制 |
| API | Application Programming Interface 应用程序接口 | CSG | Constructive Solid Geometry 实体的几何构造法 |
| APT | Automatic Programming Technology 自动编程技术 | DC | Device Coordinate 设备坐标系 |
| AS | Activity Scanning 活动扫描法 | DBMS | Data Base Management System 数据库管理系统 |
| BOM | Bill of Material 材料明细表 | DDBMS | Distributed DBMS 分布式数据库管理系统 |
| bps | bits per second 每秒位 | DDL | Data Definition Language 数据定义语言 |
| B-rep | Boundary Representation 边界表示法 | DFA | Design For Assembling 设计为了装配 |
| BSDNC | Broud Scope DNC 扩展功能型 DNC | DFM | Design For Manufacturing 设计为了制造 |
| CAD | Computer Aided Design 计算机辅助设计 | DML | Data Manipulation Language 数据操作语言 |
| CAE | Computer Aided Engineering 计算机辅助工程 | DMIS | Dimensional Measurement Interface Specification 几何尺寸测量接口规范 |
| CAGD | Computer Aided Geometric Design 计算机辅助几何设计 | DNC | Direct Numerical Control 直接数字控制 |
| CAI | Computer Aided Inspection 计算机辅助检测 | | Distributed Numerical Control 分布数控 |
| CAM | Computer Aided Manufacturing 计算机辅助制造 | DSS | Dicision Support System 决策支持系统 |
| CAO | Computer Aided Office 计算机辅助办公自动化 | DXF | Drawing Exchange File 图形交换文件 |
| CAPM | Computer Aided Production Management 计算机辅助生产管理 | EDAS | Engineering Design Automation System 工程设计自动化系统 |
| CAPP | Computer Aided Process Planning 计算机辅助工艺规划 | EDB | Engineering Data Base 工程数据库 |
| CAQ | Computer Aided Quality 计算机辅助质量 | EDBS | Engineering Data Base System 工程数据库系统 |
| CCITT | Consultative Committee for International Telegraph and Telephone 国际电报电话咨询委员会 | EDI | Electronic Data Interchange 电子数据 |
| CCD | Charge-Coupled Device 电荷耦合器件 | | |
| CE | Concurrent Engineering 并行工程 | | |
| CIM | Computer Integrated Manufacturing 计算机集成制造 | | |



- 交换
- EIA** Electronic Industry Association 电子工业协会
- ES** Expert System 专家系统
Event Scheduling 事件调度法
- EPA** Enhanced Performance Architecture 增强型结构局域网
- FA** Factory Automation 工厂自动化
- FDBMS** Federated Data Base Management System 联邦式数据库管理系统
- FDBS** Federated Data Base System 联邦式数据库系统
- FMC** Flexible Manufacturing Cell 柔性制造单元
- FMS** Flexible Manufacturing System 柔性制造系统
- FTAM** File Transfer Access and Management 文件传递存取管理
- FTP** File Transfer Protocol 文件传递协议
- GKS** Graphics Kernel System 图形核心系统
- GM** General Motor 通用汽车公司
- GRAI** Graphs with Results and Activities Interrelated 格雷网
- GT** Group Technology 成组技术
- ICAM** Integrated Computer Aided Manufacturing 集成化计算机辅助制造
- IDC** International Data Cooperation 国际数据公司
- IDEF** ICAM DEFinition method (或 Integration DEFinition method) 集成定义方法
- IEC** International Electrotechnical Commission 国际电工技术委员会
- IGES** Initial Graphics Exchange Specification 初始图形交换规范
- IMSS** Integrated Manufacturing Simulation Software 一体化制造仿真软件
- IPC** Interprocess Communication 进程间通信
- IPIM** Integrated Products Information Model 集成产品产品信息模型
- ISO** International Standards Organization 国际标准化组织
- IT** Information Technology 信息技术
- ITI** the Industrial Technology Institute 工业技术研究所
- JIT** Just In Time 准时制
- LLC** Logical Link Control 逻辑链路控制
- MAP** Manufacturing Automation Protocol 制造自动化协议
- MAS** Manufacturing Automation System 制造自动化系统
- MC** Modeling Coordinate 造型坐标系
- MDBS** Multi-Data Base System 多数据库系统
- MHS** Message Handling System 报文处理系统
- MIPS** Million of Instructions Per Second 每秒百万条指令
- MIS** Management Information System 管理信息系统
- MMS** Manufacturing Message Specification 制造报文规范
- MPS** Master Production Schedule 主生产计划
- MRP- I** Material Requirement Planning 物料需求计划
- MRP- II** Manufacturing Resource Planning 制造资源计划
- NC** Numerical Control 数(字)控(制)
- NDC** Normalized Device Coordinate 规格化设备坐标系
- NFS** Network File Service 网络文件服务
- NPC** Normalized Projective Coordinate 规格化投影坐标系
- NP-C** Non-Polynomial Complete NP 复杂性
- NRC** National Research Council 国家研究委员会(美国)
- NURBS** Non-Uniform Rational B-Spline 非均匀有理B样条
- ODBMS** Object-oriented DBMS 面向对象数据库
- ODM** Object Data Management 对象数据管理
- OEM** Original Equipment Manufacturing 初始设备制造厂家
- OID** Object IDentifier 对象标识
- OIM** Object Information Management 对象信息管理
- OIS** Office Information System 办公室信息系统
- OKP** One Kind of Product 单件生产模式



| | | | |
|--------------|---------------------------------------------------------------------|---------------|--------------------------------------------------------------------|
| OO | Object Oriented 面向对象 | RPC | Remote Procedure Call 远程过程调用 |
| OODB | Object-Oriented Data Base 面向对象数据库 | SAM * | Sematic Association Model 语义关联模型 |
| OPT | Optimal Production Technology 最优化技术 | SC | Sequence Controller 顺序控制器 |
| OSE | Open System Environment 开放系统环境 | SFC | Sequential Function Charts 顺序功能流程图 |
| OSI | Open System Interconnection 开放系统互连 | SME | Society of Manufacturing Engineers 制造工程师协会 |
| PC | Programmable Controller 可编程控制器 | SNMP | Simple Network Management Protocol 简单网络管理协议 |
| PFA | Production Flow Analysis 生产流程分析法 | SSAD | Structured Systems Analysis and Design 结构化分析与设计方法 |
| PHIGS | Programmer's Hierarchical Interactive Graphics System 程序员的层次交互式图形系统 | STEP | Standard for the Exchange of Product model data 产品模型数据交换标准 |
| PI | Process Interactive 进程交互法 | TCP/IP | Transmission Control Protocol/Internet-work Protocol 传输控制协议/网络互联协议 |
| PLC | Programmable Logic Controller 可编程逻辑控制器 | TOP | Technical and Office Protocol 技术与办公自动化协议 |
| PPC | Production Planning and Control 生产计划与控制 | TV | Television 电视 |
| RISC | Reduced Instruction System Constructure 精简指令系统结构 | VC | View Coordinate 观察坐标系 |
| | | WC | World Coordinate 全局坐标系 |





第 1 章 概 论^[1]

1 机械制造业自动化系统及其发展历史

1.1 不同类型制造业的特点

机械制造业属于离散型制造业。离散型制造业的主要特点是其生产过程为断续的。这类企业生产的产品有汽车、飞机、机床、电工电子产品及其他机械产品。另外两类制造业是流程型(或连续型)制造业(如石油、化工、冶金等)和混合型制造业(如食品、钢材制品、纸制品等制造业)。

生产对象及制造工艺决定了自动化系统的形式及内容。离散型制造业自动化系统主要控制机械运动(如刀具运动、工件运动、毛坯运动等)及可能变化的制造工艺,使整个生产处于优化状态。而流程型制造业则需控制其生产过程的各种连续量,如温度、压力、流量、液位、成分等,达到生产的优化。这两类自动化系统至今都是平行地发展起来的。由于产品不同,资源管理也有差别,控制方式及系统也不相同,甚至相应的控制理论也不相同。连续过程控制采用目前发展得比较成熟的有关控制理论,而离散型制造的控制理论,如离散事件系统理论还正在发展中。但是从企业生产管理及制造一体化的角度看,特别是系统的信息模型及其实现方面,两类系统又有很多类似。

机械制造业按其产品特点可分为如下三类:大批生产;多品种、中小批生产;单件生产。显然,这三者的自动化系统也是不相同的。

对大批生产的机械制造业,往往采用流水生产线,用特殊设备及相应控制系统(如顺序控制)来满足产品加工、装配的需要。生产效率高是其主要优点。缺点是柔性差,生产线难以适应产品较大范围内的变动。

手工操作或单台数控机床最适宜于单件生产。柔性好,但效率低,并且质量也不易保证。

多品种、中小批的产品制造,生产情况是最复杂的。目前这类企业自动化程度不高,效率也不高。随着社会进步,适应市场多样化的需求是其主要发展方向。即使以往认为是标准大批生产的汽车制造业,也在演变成多品种、中小批生产方式。日本《丰田生产方式的新发展》一书(1983)统计了3个月的生产情况后指出:

若以发动机输出功率、外观颜色以及音响设备等汽车可选项区分小汽车的种类,3个月内共生产36万4千台,完全相同的同一种汽车的最多产量为17台,最少为6台。即使这个数量也不是同时安排生产,而是按用户的订单先后生产。这一例子说明,大批生产的汽车工业也成了一种要求多品种、中小批生产的行业了。

由于上述原因,本篇着重于多品种、中小批生产的机械制造业自动化系统,包括设计过程自动化、加工制造过程自动化及管理、决策过程的自动化,以及支持自动化,特别是集成自动化所必需的网络、数据库技术。

自动化永远不可能完全取代人。上述各类自动化系统只是在不同程度上代替人的体力与智力劳动。

本篇内容对于大批生产或单件生产的机械制造业,同样是有用的。

1.2 机械制造业自动化系统的发展历史

机械制造业自动化系统的发展与计算机的发展是密切不可分的。1946年世界上制成第一台电子计算机。1951年商用计算机进入市场。1954年计算机开始用于机械加工的数控(NC, Numerical Control)。1955年开始有自动编程技术(APT, Automatic Programming Technology),实际上,这是计算机辅助制造(CAM, Computer Aided Manufacturing)的开始。60年代初开始有计算机辅助绘图及辅助设计(CAD, Computer Aided Drawing and/or Design)。针对企业管理的物料需求计划(MRP, Material Requirement planning, 即MRP-I)开始用于企业。随即出现了企业制造资源计划(MRP-II, Manufacturing Resource planning)。国外在60年代工业机器人开始用于生产,70年代有很大发展。日本的汽车工业在此期间进行了改造。这段时间数控机床与微电子技术、计算机技术同步迅速发展,除了NC系统的性能大大提高以外,60年代开始从单机转变到直接数控(DNC, Direct Numerical Control)。70年代开始出现了针对中小批产品加工制造的柔性制造系统(FMS, Flexible Manufacturing Systems)。相应地,自动导引小车(AGV, Automatic Guided Vehicle)、立体仓库等都有很大发展和应用。

我国数控机床从1958年开始起步,1979年开始



采用国内机床配国外数控系统及驱动器,提高了数控机床的性能和可靠性。

从60年代开始,我国企业利用计算机对机械产品进行设计计算,取得了较好的技术经济效果。在引进国外硬、软件的同时,机械、电子、航空、造船、轻工等行业自行开发了CAD/CAM应用系统,用于产品设计和加工。目前已有自主版本的二维CAD系统、三维CAD系统进入市场。

70年代初,我国开始了机器人技术的研究。近年来,由于生产需要和技术进步,我国机器人发展较快,已研制成功喷漆、弧焊、点焊、搬运等工业机器人,在工业应用中取得成效。

从1974年开始研制立体仓库,已建成各类立体仓库几十座。80年代初,在引进FMS的同时,开始自行设计和研制,与此同时,我国还先后引进和开发了能长期无人看管运行的立式、卧式加工中心。

70年代,我国开始了计算机辅助生产管理(CAPM, Computer Aided Production Management),多数为计算机事务处理。80年代开始在一些大、中型骨干企业引进或自行开发了计算机辅助经营管理系统,取得了明显的经济效益。

国际机械制造业自动化系统的发展对机械制造业的进步影响是巨大的。我国机械制造业自动化系统与国外相比还有较大差距,这严重影响了我国经济实力的提高和社会进步。因此,用微电子技术(主要通过自动化技术)改造传统机械制造业,是极为重要和迫切的任务。

2 机械制造业自动化系统发展的主要趋势 ——计算机集成制造系统

2.1 计算机集成制造系统的由来和发展

机械制造业的自动化,经历了单机自动化、局部自动化到集成自动化的发展道路,计算机集成制造系统(CIMS, Computer Integrated Manufacturing System)是制造业自动化发展的主要方向。

推动这一发展的原动力是市场竞争和科技进步。

微电子技术的飞速发展及在各行各业的广泛应用,引起世界发生深刻变革。通信、交通的迅猛进步,统一的世界市场逐步形成,随即带来全球范围的市场竞争,造成产品生命周期(更新换代)变短、价格降低、质量提高,按用户要求设计制造的产品比例越来越高。多品种、中小批生产已成为发展的趋势,这就要求企业

必须具有强的应变能力以适应市场变化的需要。

单机及局部自动化无法实现上述目标,其原因是局部自动化系统总是孤立地满足某种局部需要,没有考虑或实现这些系统之间的信息交换。计算机硬件、软件、各类控制系统之间的兼容性差。这种信息或自动化“孤岛”,使新产品开发周期长,企业应变能力差,生产效率低,质量不易保证,使企业很难适应现代市场竞争的需要。

集成化,即将企业的设计、制造、经营管理过程中的信息集成起来,将计算机、机器、制造工艺和人集成起来,求得企业生产的优化运行,这是解决上述问题的重要途径。

1973年美国Joseph Harrington最早提出了计算机集成制造(CIM, Computer Integrated Manufacturing)概念,他认为:企业生产的各个环节,从市场分析、产品设计、加工制造、经营管理及售后服务等,是一个不可分割的整体,需要统一考虑,整个制造过程实质上是对信息的采集、传递和加工处理的过程(产品是数据的物化形式)。

Harrington的这一观点随着微电子技术的迅速发展,在80年代中期为越来越多的人所重视,并且具备了实现的可能性。

因此,CIMS就是在自动化技术、信息技术和制造技术发展的基础上,通过计算机及软件,将制造工厂全部生产经营活动所需要的各种分散的自动化系统有机地集成起来,在总体上成为高效益的、柔性的、智能制造系统。

2.2 计算机集成制造系统的效益

信息集成以及在此基础上将经营、组织(包括人员)与技术进行集成,是未来工厂的一种模式。它将使产品更新的速度加快,质量进一步改善,设备利用率提高,成本降低,管理科学化,企业效益将大大提高。

美国国家航空航天局(NASA)委托国家研究委员会(NRC, National Research Council)对MacDonnell飞机公司、Ingersoll 铣床公司等5家公司的CIMS集成效益进行了研究,得到如下结果:

| | |
|------------------|---------|
| 降低工程设计成本 | 15%~30% |
| 生产周期缩短 | 30%~60% |
| 生产率提高 | 40%~70% |
| 在制品减少 | 30%~60% |
| 产品质量提高(废品率降低) | 2~5倍 |
| 工程技术人员分析问题的广度和深度 | |



(在相同时间内) 3~35 倍

设备利用率提高 2~3 倍

日本富士通一家工厂经过一年半的观察和分析,

在采用 CIM 技术后的效益为:

生产率提高 60%

直接生产率提高 2 倍

生产人员减少 50%

库存资产减少 35%

废品率降低到原来的 1/3

信息集成后,便于采用并行工程(CE, Concurrent Engineering)技术,将产品开发过程中的市场、设计、工艺、制造、安装及售后服务等专业人员,按协同工作小组(Team work)组织并行工作,这将带来进一步的效益。美国 DEC 公司的存储器生产在采用并行工程后,经统计其效益如下:缩短产品开发周期 50%;成本降低 50%;产品可靠性改善 50%;用户安装时的问题减少 70%。

3 机械制造业自动化系统的主要内容

以往,机械制造业自动化系统主要针对制造过程(如加工、检测、装配等)的自动化,后来扩展到设计过程、经营管理过程的自动化系统。当然,支持这样广泛范围的自动化还需要工厂自动化网络和数据库以及优化运行的方法与技术。CIMS 则是这些自动化系统的信息集成和功能集成。

3.1 自动化子系统与计算机集成制造系统的联系和区别

机械制造业的各种自动化子系统的集合和 CIMS 是既有联系又有区别。各种自动化子系统是 CIMS 的基础,没有这些自动化子系统,CIMS 便只是一种概念。另一方面,CIMS 是各种自动化子系统的集成,则是工厂自动化进一步发展的趋势。

但是,各种自动化子系统的集合并不就是 CIMS,其主要区别如下:

(1)各种自动化子系统往往是封闭的,缺乏相互之间的通信接口及协议标准。CIMS 是开放的,它要求各子系统是可集成的,即有接口,并且接口、协议是标准的。在各软件系统之间,应该有相应的接口,使全局信息交换成为可能。

(2)各自动化子系统的集合不可能考虑并实现总系统的优化问题。系统的构成要服从需要达到的目标。现存的各种子系统的集合不可能成为一个有效的系

统。只有按 CIMS 总体规划与设计,才可能建立从企业目标出发的总体系统的功能模型、信息模型、动态模型。全局优化只可能在 CIMS 中实现。

从一个企业自动化的实际情况出发,解决两者之间区别与联系的基本原则是:“自顶向下的规划与设计,自下而上的分步实现”。

因此,实现 CIMS 的一个基本思路是:在企业 CIMS 总体规划与设计指导下(仅占总投资的很小一个比例),按照工厂的急需和可能,从先实现一、二个自动化子系统着手,分步实现,保证投资的长期有效,边实施、边见效。

3.2 工程设计自动化系统

产品设计 CAD 常包括:三维实体造型(Solid Modelling)和/或二维详细设计;计算机辅助工程(CAE, Computer Aided Engineering,如有限元分析软件);成组技术(GT, Group Technology);计算机辅助工艺规划(CAPP, Computer Aided Process Planning);夹具设计,数控编程及后置处理等。

通常的设计自动化系统,往往是在计算机硬件(工作站或微机或主机图形终端)的支撑下,用商用 CAD、CAE、CAM 软件,用户进行二次开发。由于 CAPP 受机械加工的实际环境影响较大,因而商用软件很少,多数需要自行开发。

CIMS 要求 CAD/CAPP/CAM 的集成,要求各工作站之间能方便地交换几何信息及工艺信息。由于各商用软件的封闭性,给集成造成很大困难。利用图形数据交换规范,建立中性文件,可以在一定程度上解决 CAD/CAPP/CAM 的集成问题,但仍受商用软件核心层封闭的严重影响。另一条途径是采用产品模型数据交换标准(STEP,英文原名为 Standard for the Exchange of Product model data 现易名 Product data Representation and Exchange)。集成化的 CAD/CAM 软件系统正在开发中。

除了 CAD/CAM 内部集成之外,CIMS 要求设计自动化子系统与管理信息系统及加工制造自动化之间的接口和集成。这需要建立分布数据库系统及依靠网络进行文件通信。

3.3 企业管理信息系统

企业管理信息系统(MIS, Management Information System)除了通常的计算机事务处理外,必须包含制造资源的优化及市场经营的有关决策。通常包括如



下的功能:

(1) 物料管理, 包括物料需求计划, 采购管理、库存控制, 物料消耗定额管理等。

(2) 生产计划, 包括考虑了资源综合平衡在内的主生产计划、月生产计划等。

(3) 质量管理与规划。

(4) 财务管理, 包括资金平衡, 产品销售、财务工资、会计报表和成本核算等。

(5) 人力资源管理, 包括人事劳资、培训教育、医疗保健档案等。

(6) 经营管理, 包括生产经营状态信息, 市场预测, 合同管理, 售后服务管理, 总经理办公信息系统及决策支持系统。

MIS 除了本身应有统一的数据模型, 以保证各功能模块的集成以外, CIMS 总体要求它与 CAD/CAM 及加工制造自动化子系统(车间及单元级的管理控制)的集成。前者是通过物料清单(BOM, Bill of Material)进行联系。后者是通过文件和分布数据库进行联系。

3.4 制造自动化系统

不同的产品对象和制造工艺, 制造自动化系统(MAS, Manufacturing Automation System)可以有较大的不同。一般机械制造系统由下面一些工作站组成:

(1) 加工工作站, 包括各类加工中心(卧式、立式、车削加工中心), 数控机床, 其他加工设备等。

(2) 刀具管理工作站, 包括刀具预调仪、中央刀库及刀具管理系统, 其数据库是分布式数据库系统的一部分。

(3) 物料工作站, 包括立体仓库及堆垛机, 自动导引小车(或其他传送装备), 各种托盘站等。物料工作站的数据库也是分布数据库的一部分。

(4) 装夹工作站, 完成毛坯或工件的安装或拆卸。在 CIMS 中, 毛坯或工件在装夹工作站后进线, 整个过程由计算机跟踪。

(5) 装配工作站, 如各种输送机构、工业装配机器人等。

(6) 单元控制器, 对上述各工作站的管理和控制。

对 CIMS 而言, 车间层、单元层的管理控制是十分重要的。它是信息流、物流和决策流的汇集点。在车间层需完成周生产计划及日生产(双日滚动)计划, 以实现车间各种资源的平衡和优化。单元层要实现对设备、刀具、物料的实时调度和监控。各种设备的控制系

统的通信联网是首先要满足的。往往由于各制造厂商采用不同的通信协议, 因此不同控制系统的通信接口及协议转换是实现加工层信息集成的关键技术之一。动态实时调度的理论还不够成熟。目前较多的是采用基于调度规则的专家系统及仿真技术, 以实现运行偏离计划时的实时再调度。

3.5 检测及质量系统

通常包括了清洗机、数控三坐标测量机及其他质量信息采集处理系统。

在 CIMS 中, 数控测量机也是联网运行的。测量 NC 程序应当在 CAD 时自动生成, 并通过网络以文件送至测量工作站计算机。测量结果应反馈到有关设计及管理部門。实现产品质量的保障体系, 应该有一软件系统负责质量的规划、管理及监控。

3.6 工厂自动化网络及数据库

对局部自动化来说, 网络和数据库技术只是局部应用。

网络技术需解决 CIMS 中异种计算机及控制系统的接口及通信、协议转换及过渡等问题。在当前的工业环境下, 通信协议 TCP/IP (Transmission Control Protocol/Internet Protocol, 传输控制协议/网络互联协议) 是一种广泛流行并可以满足制造自动化需要的协议。但它要逐步过渡到符合国际标准化组织 (ISO, International Standard Organization) 的开放系统互联 (OSI, Open Systems Interconnection) 的协议。其中协议 MAP/TOP (Manufacturing Automation Protocol/Technical and Office Protocol, 制造自动化协议/技术与办公自动化协议) 是符合 OSI 的。因此网络技术应该解决例如 TCP/IP 到 ISO/OSI 协议的共存和过渡问题。

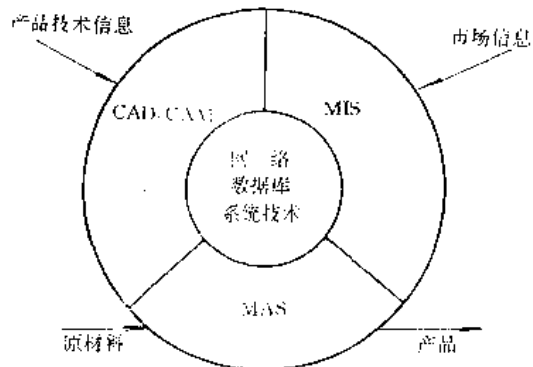


图 8-1-1 CIMS 的各功能模块及外部关系

全局数据库是 CIMS 的关键技术。工程环境下的数据类型比一般办公自动化的数据复杂。统一处理各



种数据(图形的、关系的、……)是CIMS中应该解决的问题。另外,异种数据库的数据共享,是多数工厂实际存在并必须解决的。

从功能角度,CIMS是集成了上述各类子系统,它们与外部信息的关系如图8-1-1所示。

就技术而言,CIMS是系统技术、计算机技术和制

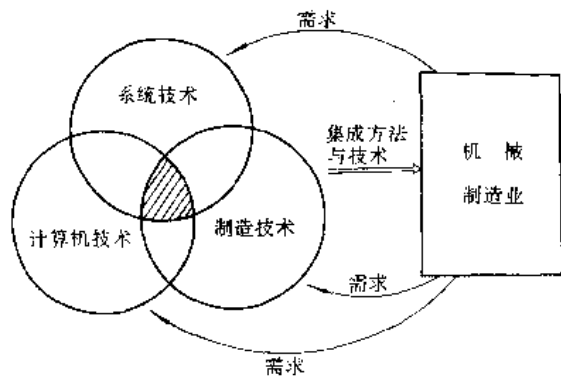


图 8-1-2 不同技术集成的 CIMS 与应用对象的关系

注:系统技术指:系统分析、系统设计、优化方法、仿真技术等;计算机技术指软件工程、网络、数据库、人工智能等;制造技术指产品设计、工艺设计、数控编程、成组技术、检测技术、工业机器人等。

造技术的集成,见图 8-1-2。

4 发展机械制造业自动化系统的意义

同发达国家相比,我国机械制造业的生产技术水平、产品设计水平和经营管理,目前存在较大差距,必须面对挑战,加快改革,依靠技术进步,加速机械制造业自身的改造和发展。

用微电子技术、自动化技术和 CIMS 改造传统机械制造业,意义十分重大:

(1)企业生存的关键是企业的市场竞争能力,国家竞争能力的主要标志是制造业,特别是机械制造业的竞争能力。国家综合经济实力的基础是制造业。

我国机械制造业在总产值、职工人数、固定资产总值及上缴国家的利税总额均占全国工业的 1/4 左右。这一数字表明加快机械制造业的自动化、现代化是极为重要的。

(2)提高企业效益是推动我国社会经济发展的决定因素。机械制造业的自动化系统和 CIMS 是达到这一目标的技术手段。CIMS 是从根本上解决质量、品种、效益的技术手段。

第 2 章 机械制造业管理信息系统与决策支持系统^{[2]~[8]}

1 基本概念

70 年代中期,世界市场发生了重大的变化,由过去传统的相对稳定型市场,演变成动态的、多变型的市场,同行业之间、跨行业之间相互竞争十分剧烈。在这种异常激烈的竞争环境中,能否更快、更好地以更低成本制造出满足顾客特殊需求的新产品投入市场,是制造业生存的关键。产品生命周期愈来愈短是现代市场竞争最显著的特征,时间是决定胜负的最关键因素。

信息技术(IT, Information Technology)在这段时期得到迅速的发展,它包括计算机技术、软件技术和通信技术。它不仅大大改变了人们传统的时间与空间的观念,而且也为人们提供了一种处理复杂问题的新模式,即人同计算机交互迭代的方式来获得复杂问题的解,奠定了交互式的决策方法及理论基础。

市场竞争的不断加剧和信息技术的成就,导致制造业组织朝着实体变小,联系愈来愈广的方向发展。组织单位间的界面逐渐模糊,由静态递阶结构向网络结构过渡。有目的地采集信息、正确地处理信息、及时地传递信息和有效地应用信息是现代管理与决策的主要内容。

1.1 管理与决策的基本概念

管理在企业中指的是控制与指导复杂的生产与经营过程的一种科学方法。复杂生产与经营过程,必然是按专业化分工进行的。管理的作用是指导这些专业部门和人员为了特定的共同目标而协调一致地工作。一般地说,这种管理是分层次的。基层管理人员的作用是控制与指导各种工人的作业活动;中层部门经理的管理是协调基层管理人员间的活动;企业中总经理的管理是控制与协调全企业的资源利用,而且是通



过中层部门经理进行的。

决策指的是人们在复杂的生产与经营过程中所面临的选择或决择,因此,它必须有两个或两个以上的方案供决策者选择。决策一般是具有不确定性的复杂过程,而且必须付出资源代价,承担风险。

管理与决策,在企业中都是为了争夺机遇,而机遇是竞争的,具有挑战性的。管理与决策必须有信息的支持,而信息总是具有不确定的因素。管理与决策都必须付出资源,而资源总是有限的。因此,机遇、信息与资源是管理与决策过程中决策者要统筹考虑的三大要素。

管理信息系统(MIS)和决策支持系统(DSS, Decision Support System)迄今尚无一致的定义和明确的界面。但是, MIS 和 DSS 在企业界和工程技术界却被广泛地应用着。除这两个术语外,还有“信息处理系统”、“信息与决策系统”或“组织中信息系统”。不论名称如何却都共同描述了客观存在的同一实体,即以计算机为基础的信息系统,用来支持组织中的操作、管理和决策。

本章中的 MIS 和 DSS 指的是用来支持制造企业中的操作、管理和决策的信息系统。它是以计算机为基础,人与计算机交互运转的人-机系统。

复杂的管理与决策问题,按人们对其规律或知识掌握的程度,可以分成结构化、半结构化和非结构化三种。结构化决策,又称可程序化决策,指的是这样的一类决策,人们事先完全知道它的因果间的规律,因此完全可以按照严格程序进行。非结构化决策,则完全相反,人们完全不知道客观进程中的因果关系,只能靠决策者经验和进程中不完备的信息作决策。半结构化是介于二者之间。从这种分类原则来看, MIS 主要支持结构化管理与决策过程,如企业中的事务管理、报表统计等。DSS 主要支持非结构化决策过程,如报价、风险投资等。

1.2 系统与环境

系统总是由一些子系统所组成,而现实世界中存在的各种系统,其子系统(或称实体)总是有限的。因此,系统是有边界的,边界之外称为系统的环境。例如,市场、供应商就是制造业的环境。根据系统同它的边界之间的不同关系,人们将系统分成:孤立系统、封闭系统和开放系统三类,见图 8-2-1。也有的只分成封闭系统与开放系统两类。分类原则主要是根据系统同它的环境之间的交换关系来确定。有的是根据系统同它的

环境进行物质、能量和信息交换的关系来确定;也有的只考察物质、能量的交换。这主要是由于观察者的目的与角度不同而造成的。例如,热力学系统只研究系统同环境进行物质、能量的交换。对于信息系统,除物质与能量外,必须考察信息交换。

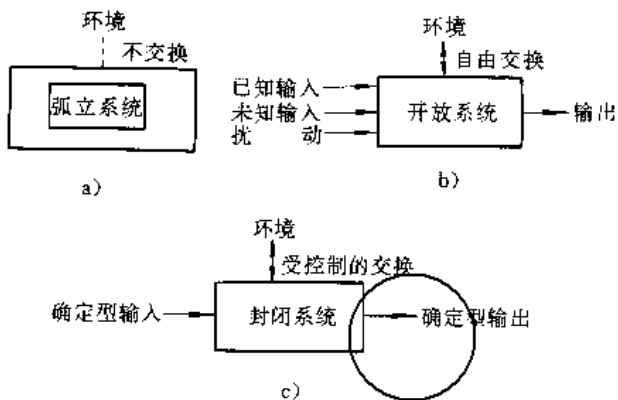


图 8-2-1 系统与环境

a) 孤立系统 b) 开放系统 c) 封闭系统

1. 孤立系统 指的是系统同环境不进行任何物质、能量或信息的交换。如图 8-2-1a 所示。这种系统客观上是不存在的,它是科学研究中常用的极限和理想化的概念。例如,在一个同外界完全隔离的理想容器中的化学反应系统。这种系统,理论上最后将因熵的不断增加而进入无序状态。

2. 开放系统 指的是系统同环境直接毫无约束地自由地进行信息、物质与能量的交换,如图 8-2-1b 所示。这类系统是时、空无界的理想系统,在现实世界中也是不存在的。但是,构造这种另一极端的理想系统,对人类研究现实世界中的各种系统却是有益的。这类系统具有大量未知输入和不可预测的扰动。自组织、自学习和自适应能力是这类系统同环境交换与竞争中生存的重要内因。这些能力实质上是一种机制。

3. 封闭系统 在信息系统中,又称相对孤立或封闭的系统,它同环境进行信息、物质或能量的交换不是自由的,而是受控制的,系统输入是已知的,如图 8-2-1c 所示。

实际系统是介于孤立系统与开放系统之间的系统。目前流行的封闭系统,指的是相对接近孤立系统的一类系统。开放系统,指的是相对接近于图 8-2-1b 所示的理想开放系统的一类系统。本章如不特别指明,“开放系统”与“封闭系统”都代表这种俗称内涵。

生产经营型企业,由于直接同它的环境、市场交换物质、信息或能量,属于开放系统。信息是它们生存的重要资源,开放系统具有复杂的层次结构,包括宏观



层、中观层和微观层。开放系统必须保持宏观有序,否则系统会出现混沌而导致崩溃。信息系统的功能,是支持生产经营型企业的管理与决策,因此,它属于开放系统。环境不是静止不变的,而是动态变化的,例如,顾客对某一商品或服务的要求是日新月异的。因此,系统对环境变化的响应能力(或称应变能力)是衡量开放系统的性能品质的主要指标。环境变化,一般地讲人们不可能事先完全知道,而表现为各种不确定性。因此,研究和处理不确定性是开放系统的重要内容。

1.3 数据、信息与知识

1. 数据的定义 数据定义为—组有序的符号。它可以表示客观世界中的数量,如2台机床中的2;2.5元人民币中的2.5。可以用来代表客观世界中的实体,如1[#]机床中的1[#];组织B中的B等。也可以表示客观世界中实体之间的作用,如程序指令中的符号,它们是程序员作用于计算机的命令。在信息系统中,人们又将数据定义为用以载荷信息的物理符号。

2. 信息的定义 信息一词来自英文 Information,有时译为情报。它是目前十分流行的生活用语和广为应用的科技词汇,但却无统一的、一般化的科学定义。

在制造业管理信息系统与决策支持系统这一范畴之中,信息定义为向人们(或机器)提供关于现实世界新的事实的知识。它是由数据处理而成(又称再生数据),并表达成接收者能够理解的形式,对接收者当前或未来的行动是有意义的。“数据”和“信息”这两个词汇在有的书籍和文章中交叉使用,但应该看到上述这些区别。数据作为一种原材料,只有经过处理成为有用的信息才能体现出它的价值。

3. 知识的含义 目前还没有对知识作出严格准确的定义,它涉及社会学、语言学、哲学和自然科学。这里仅从信息工程角度说明它的内涵。一般认为客观存在的事实就是知识,这种事实是客观规律的体现。例如,“地球是在不停地转动着”,“多人合作完成某项任务就需要管理与协调”,“现在车间运转正常”等均是事实,它们是知识的体现。除事实是一种知识外,目前还存在事件、技能和元知识等类型。事件知识指客观世界发生的行为和事件。例如,“明天1[#]机床将检修”。技能知识指的是做某种事情的技巧。元知识是指有关知识本身的知识,例如,某个专业对某个问题的结论,这样在推理过程中,不必从头推起。知识是通过对各种有关信息经过综合处理加工后发现的。例如,某个企业每天产品生产量这个原始数据,经过统计处理后得到“平

均值”和“方差”,这是反应生产状况的信息。利用这些生产状况信息以及设备能力信息和市场信息等,经过一定的综合变换处理成反映企业经营状况的综合信息(或称知识)。因此,数据、信息和知识是相对于接收者的一种相对的概念。对于某一接收者来说是信息,对于另一接收者来说可能是一种数据。

数据、信息与知识的关系如图8-2-2所示。一般企业建立信息系统的初期,由于经验不足,呈现原始数据较多。随着企业逐渐走向成熟,原始数据中的冗余项经过提炼被消除,基本信息部门信息与综合信息(即知识)则随企业发展而增加。因此,企业原始数据逐渐减少,趋于某一稳定值,而再生数据则不断上升。

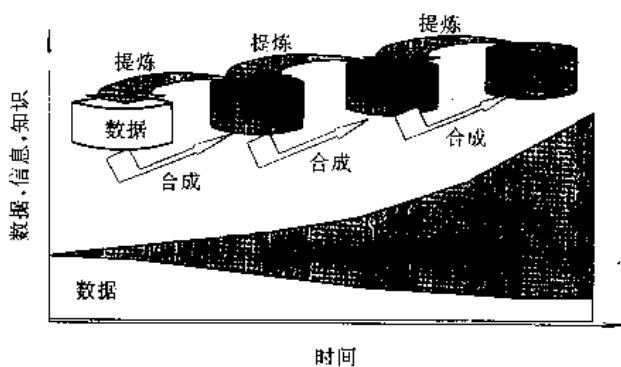


图 8-2-2 数据、信息和知识三者间的关系

4. 信息量与负熵 信息作为一种资源必然有它的数量与质量的标准。信息作为一个科学的概念是申农(C. E. Shannon)于1948年创立的。他用概率论的观点和方法对信息进行了定量的研究,定义了熵函数。

设某一随机事件 X ,其可能出现的事件是一个集合,即 $X = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\}$, $P = \{p_1, p_2, p_3, \dots, p_n\}$ 是事件 X 的概率分布。则事件 X 整体信息量

$$H(x) = - \sum_{i=1}^n P(x_i) \log P(x_i) \quad (8-2-1)$$

申农称 $H(x)$ 为熵(Entropy),它描述信息源 X 所含有的信息量在平均意义上的总体特征。在任一通信系统中除了信息源外,必然还有接收者或信宿 Y ,其间由信道 C 连接,如图8-2-3所示。

设 $H(y)$ 为接收者收到的信息量, $H(x/y)$ 为条件熵。即接收者收到信号 Y 后,对信息源 X 仍有不确定性的度量。

经过传送后接收者收到的信息量,又称相互信息量 $I(p)$

$$I(p) = H(x) - H(x/y) \quad (8-2-2)$$

若不存在任何干扰, $II(x) = II(y)$,即 $H(x/y) =$



0, 则 $I(p) = H(x)$ 。若完全是干扰, $H(x/y) = H(x)$, 则 $I(p) = 0$ 。

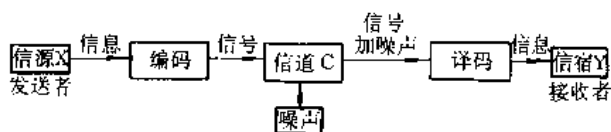


图 8-2-3 通信系统概念模型

$H(x)$ 同热力学中熵的公式几乎完全一样, 只差一个负号。维纳曾指出: “信息量是一个可以看作概率量的对数的负数, 它实质上是负熵”。熵是物质系统状态的一个物理量, 它描述系统无序的程度。信息量也是系统状态的一个物理量, 它描述系统有序的程度。一个系统有序程度越高, 它含有的信息量就越大, 熵就越小。因此, 信息是使管理信息系统与决策支持系统运转有序的基础。

上述信息量的数学描述, 只是从信息传递过程效率这一技术角度来讨论信息。它的物理意义是, 若接收者事先对某一信息 x_i 知道得愈少 [即 $P(x_i)$ 小], 则一收到 x_i 后就会感到愈惊奇, 即信息量就越大。式 (8-2-1) 中的对数若以 2 为底, 则称单位为比特 (bit)。这时设共有 8 个字母的信息, 每个字母出现的概率均为 $1/8$, 则式 (8-2-1) 说明用 3 位二进制数字即可表达这 8 个字母的信息。因此, 信息量本身不表示任何语义。但是, 对于管理与决策过程的管理人员与决策者来说, 获取信息的目的是为了改进管理与提高决策的质量。因此, 除信息量外还要求信息表达形式易于理解, 所获得的信息对他们的工作是有价值的。因此, 从信息论及其应用两个方面都必须包括信息量、信息表达和信息价值这三个方面。前者描述信息的数量, 后两个方面描述信息的质量。信息能够帮助人们降低或消除不确定性的风险, 它帮助决策者作出正确决策, 而信息也只能在决策过程中体现出它的价值。信息作为现代制造业的一种重要资源已被越来越多的人所认识。但是, 同其他物质或能源等资源不同, 它是一种特殊的资源, 人们每用它一次, 其数量并不减少, 可以重复使用, 是一项永不消耗的资源。这一特点却鲜为人知。信息不会消耗, 却会增殖 (每天产生许多新信息), 处理不当势必爆炸。它不仅使系统效率降低, 而且还会导致系统逻辑上的混乱。有效的信息系统应该是善于筛选信息, 而不是增殖信息。企业作为资源保存的应该是原始数据, 而不是经过加工处理后的信息。

2 制造业管理模式

2.1 制造业概念模型

模型是对客观实体的一种描述, 是经过简化、抽象后的一种突出本质的描述。它的表达方式, 可以是数学式, 也可以是语言和图形, 它是人们交流与思考的工具。近代制造业这一实体, 主要活动是把企业的产、供、销中的人、物、能量和信息等资源, 高质量、低成本、快速及时地变换成市场需要的各种商品和服务, 它的概念模型如图 8-2-4 所示, 图中: 1、2、...、 n 表示实体。它们可以是机器设备, 也可以是人员及部门, 实体间的连接线表示实体间的有关联系。

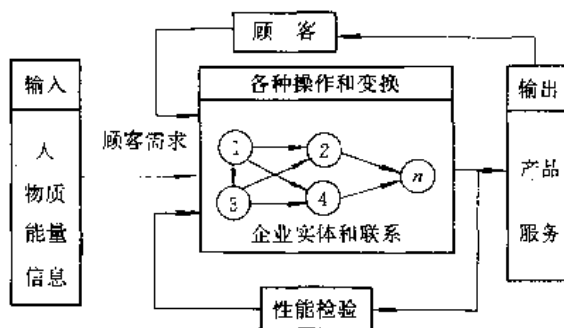


图 8-2-4 制造业概念模型

输入包括有关的各种资源, 输出是各种产品及服务, 反馈有产品及服务性能品质反馈、顾客及用户需求和意见反馈。

管理过程就是有效地控制实体间的联系。例如, 在保证质量及合理的成本条件下, 及时高效率地将产品及服务推到市场。机床实体同原材料实体间相互作用的联系表现为加工功能和加工过程; 工程人员实体之间的联系及同有关技术信息实体的联系表现为设计功能和设计过程; 决策人员实体间以会议形式相互作用的联系则表现为决策分析过程与决策的功能。因此, 用图 8-2-4 来表示这种以抽象方法描述产品设计、制造和管理过程, 有利于揭示各种企业复杂过程的共同本质, 也有利于同信息技术的语言与模型的沟通。

理想的管理模式应是需求和供给处处、时时维持平衡, 库存为零。这里需求、供给和库存均是广义的, 可以是最终产品, 也可以指半成品或资金等。真正的广义零库存是不可能的, 因为它是一种复杂的过程, 而人的认知能力和企业的力量均是有限的。从系统学、控制论和信息论角度看, 管理过程的复杂性主要表现为:

(1) 大量的不确定因素。现代经营型企业, 无论企



业外部环境（如市场需求），还是企业内部（如能力等），均存在许多事先难以预测的不确定因素。对品种少、批量大的产品需求，一般说是一种平稳的随机过程，目前有各种预测技术可供使用。但是，对于多品种、中小批量的非平稳过程以及单件类型的突发事件目前尚无有效的方法。对于企业内部的能力，如设备完好率、各种定额等也是如此。

(2) 大维数的离散事件动态过程。与化工、石油、电能等连续生产过程的企业不同，制造业是一种离散过程。尽管也有流水生产线，但是，它的零件是在不同设备上一个个地加工出来的，它的最终产品是由各种零件经过不同工序装配出来的。这种过程在排序和调度上遇到了计算上的复杂性。计算量同变量数之间不是多项式的关系，出现了所谓 NP 完全性 (NPC, Non Polynomial Complete) 复杂的优化问题。

(3) 过程中具有大量的非线性与非结构化的问题。

现代制造业的生产和管理过程中除了可以用现有理论和数学方法描述的结构化的成分外，还有目前尚不能描述或只能部分描述的非结构化和半结构化的成分。对于结构化部分，不少过程呈复杂的非线性关系，非线性是系统中的层次结、多目标与资源有限等原因造成的。这些说明人们对于如图 8-2-4 所示的生产与管理过程的规律远未完全掌握，不少部分需靠管理人员的经验甚至直觉来把握。

不确定性只能靠计划与控制来解决，计划把握主航道（平均值）控制调节偏差（方差）；对于大维数的复杂的离散过程可以用分层次管理来减少复杂性；对于非线性则通过研究系统结构和科学的分类来解决；对于半结构化和非结构化问题只能靠人在有关信息支持下，以人/机交互方式来解决。因此，现代制造业的管理模式必须有效地处理人-机-问题这三者的综合问题，如图 8-2-5 所示。图中，人指的是有关管理、工程及生产人员，用的是自然语言，他们处理问题服从于行为模型。机指的是信息技术，用的是机器语言，处理问题服从于计算机模型。问题指的是经营管理问题，用的是经营语言，服从于经营管理模式。为了实现人同机器有效的合作，以交互的方式来处理经营管理问题，必须沟通自然语言、机器语言和经营语言这三种不同的语言；必须综合与集成行为模型、机器模型和经营管理模型这三种模型。系统工程与系统科学的理论与方法是沟通这三种语言，集成这三种模型，使它们协同运转的主要手段。因此，现代管理是多学科相互渗透相互融合的产物。它包括行为科学、计算机科学和管理科学。事

实上，目前这三个学科正向着相互靠拢与结合的方向上发展，以适应信息时代的语言、思维与工作习惯。经营管理中出现的管理思想与管理模式均是以计算机与信息技术为基础的。这些新型管理模式有：物料需求计划 (MRP)；制造资源计划 (MRP I)；准时制 (JIT, Just-In-Time) 生产；最优生产技术 (OPT, Optimal Production Technology)；单件生产模式 (OKP, One Kind of Product)；并行工程 (CE)；精良生产模式 (Lean Production) 和敏捷技术与企业 (Agile Technology & Enterprise) 等。在人-机-问题三者相互协同中，人是诸因素中最重要的决定性的因素。人因素 (Human Factors) 研究是当前十分活跃热门的课题，涉及心理学、组织学、人机接口及交互技术、系统中人的适应性等。

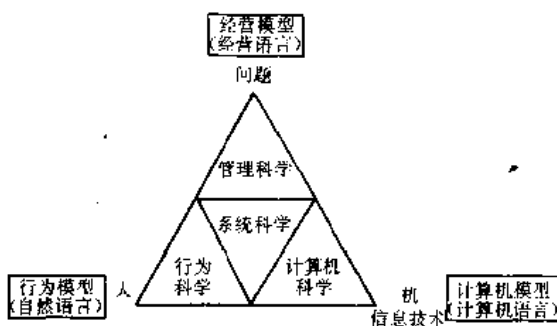


图 8-2-5 人-机交互式管理模式

提高工作效率是管理的根本目标。因此，管理技术将向专业化分工，增加工作可重复性及过程标准化；采用自动化及近代先进的信息技术实现管理与决策过程的科学化等方向发展。

2.2 物料需求计划

物料需求计划 (MRP) 是 70 年代提出的、目前世界上普遍采用的一种离散型制造业的企业管理模式。其基本思想是将生产过程中的需求，分成独立需求 (Independent Demand) 和相关需求 (Dependent Demand)。相关需求是独立需求的函数，是可以计算出来的，如某一产品的零部件、材料及工时的需求量。独立需求是无法通过确定性的数学方法计算出来的，如产品需求量、废品数量、设备完好率等，这些只能通过预测进行估计。MRP 的原理如图 8-2-6。

它有三种输入：主生产计划 (MPS, Master production Schedule)；产品结构 (BOM)；库存状态。MPS 又称生产大纲，是一种针对最终产品的生产计划，包括生产数量和完成时间。生产数量包括已有订单及市场预测。BOM 是一种产品结构，表示完成某一最终产品



时所需的零件、部件的数量及其相互关系。库存状态表示企业仓库中存有的零件部件的情况。MRP的输出是采购计划、加工计划。MRP的运行机制(或称算法)是依据MPS规定的最终产品生产的数量和时间要求,毛坯零件库存、在制品数据、前期计划执行情况和生产提前期等来决定采购计划与加工计划,即

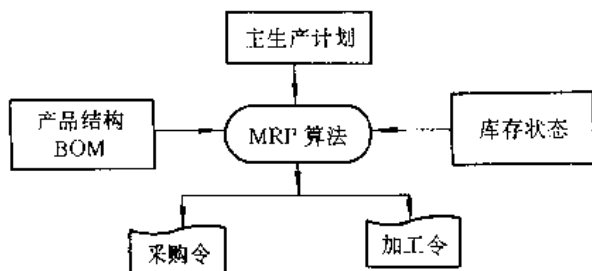


图 8-2-6 MRP 逻辑关系

其中:

净需求量 = 毛需求量 - 计划接收量 - 可利用库存

毛需求量 = 计划需求量 × 每件件数

计划接收量 = 在制品计划入库数量

可利用库存 = 现有库存 - 安全库存 - 已分配数量

产品结构,又称物料清单,一般呈树状结构,如图8-2-7所示。图中,表示由两个最终产品1、2,四个部件(即A、B、C和D),及三种零件(即 α 、 β 、 γ)组成的产品结构。它是四个层次的树状结构。树根是最终产品,树叶是加工或装配的最基本的零件,中间层是各种装配的部件。联线上标的数字表明要组成上层父项部件所需子件的数量。如要组装一个B部件要两个C部件和一个 γ 零件。实际产品结构远比该图复杂。部件和零件数目以及层次数,在理论上是没有限制的。

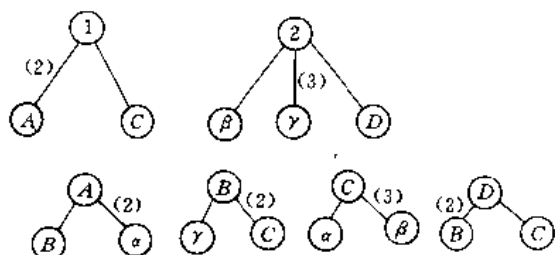


图 8-2-7 产品结构

MRP不同于传统的按“台份”投料的生产管理模式,它是按零部件组织批量生产,将加工工艺相似的零部件按成组技术组织批量生产,从而大大提高了生产效率。在确定某类零件的批量时还要权衡更换生产零件而损失加工时间(Set up Cost)和在制品管理费用。一般批量越大,在制品管理费用越大,损失掉的时间就越小,这里存在需要确定所谓“经济批量”的问题。

2.3 制造资源计划

MRP I是在MRP基础上发展起来的一种企业管理模式。MRP模式的准确性取决于对市场产品需求和制造能力这两类不确定因素估计的准确性。由于企业能力是变化的,实际生产周期也是变化的。MRP中却假定生产周期是不变的常数,这只有在无限资源下才成立。实际上企业能力总是有限的,因此,MRP I中引入了资源能力反馈,以弥补MRP的不足,MRP I逻辑如图8-2-8所示。

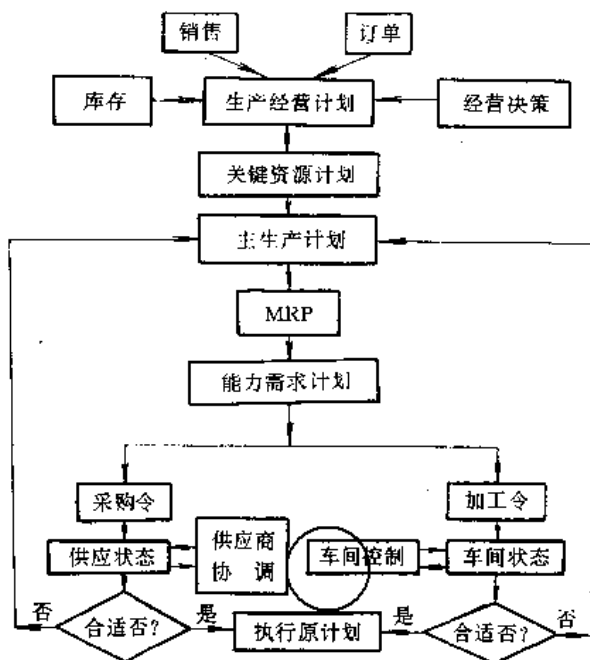


图 8-2-8 MRP I 逻辑原理

MRP I还将MRP对物料资源优化的思想,扩充到包括人员、设备、资金、物资、信息等广义资源,涉及企业的产、供、销、人、财、物等整个生产经营活动,包括市场预测、经营计划管理、主生产计划管理、销售管理、厂级生产管理、车间管理、物资供应管理、库存管理、财务管理、成本管理、设备管理、人事管理、工具管理、技术管理、综合统计、生产与技术数据管理等功能。MRP I的设想是好的,但是这种以计划驱动的集中控制,对于具有多品种车间级的离散事件优化处理的能力比较弱,对于处理诸如大型工程项目、紧急订单等突发事件的反应能力差。但是,它对于企业全局宏观计划的制定和按成组技术组织批量生产是一种有效的方法。

2.4 准时制生产管理模式

准时制(JIT)又称适时生产,是80年代初日本丰



田汽车公司创立的。它是继泰勒管理和福特系统之后的又一革命性的企业管理模式。它的概念很简单,即在正确时间 (Right Time)、正确地点 (Right Place)、干正确的事情 (Right Thing),以期达到零库存、无缺陷、低成本的理想生产模式。为此,主张精简产品结构,简化加工过程,消除一切对最终目标不增加价值的活动,视这些活动为垃圾并将它消除在萌芽状态。日本目前流行的看板 (Kan Ban) 就是 JIT 思想的具体实施。对某一零件的加工在数量与完成时间上的要求,是由下一道工序状况来决定。如若下道工序拥挤阻塞,上道工序减慢或停止,这些信息均靠工卡来传递。JIT 不同于 MRP I,它是反馈控制为主的生产管理系统,是一种微观方法。JIT 适用于市场需求比较稳定的产品的生产与管理,如若市场需求波动大,则光靠反馈是不够的。基于 JIT 思想,专业化分工是十分重要的,它是管理上的集结方法,来减少不确定性对库存的影响。日本工厂中的“零件生产厂就是我厂这种零件的仓库”的说法与思想就是这种概念。JIT 要求有责任感、技术全面和有全局观念的高素质的人员及良好的供应线。JIT 的目的不仅是为了减少库存,乃至消除库存,它的价值还在于发现瓶颈,及时消除瓶颈,提高企业的应变能力。有人将企业运转比喻作船舶在江河中航行,库存如水位,瓶颈尤如暗礁。这样降低水位可以早日发现暗礁,及时消除保证河道畅通。本章 2.1 节中已经指出,市场需求与企业能力等两类不确定性是造成管理复杂性的主要原因,而计划与控制这两个手段综合应用是处理不确定性的有效方法。因此,MRP I 同 JIT 相结合进行企业的计划与控制是一种有效管理方法。计划主要是把握好宏观主航道,控制主要处理实际情况与计划主航道出现偏离时的反馈与调整问题。

2.5 最优生产技术

最优生产技术 (OPT) 是以色列物理学家 Moshe Elizahu Goldratt 在研究晶体原子热运动的过程中找到的一种大变量离散过程优化的方法,并把它用于企业的生产计划和作业控制。1979 年美国 GOI (Greative Output Inc) 公司推出 OPT 算法的商品软件并获得成功。OPT 不同于 MRP I 和 JIT 等生产管理模式,它从系统观点出发,纵观全局,力求取得全局满意解。OPT 认为企业的生产能力是由瓶颈决定。这里,瓶颈是指企业中的关键设备、人力和物资等。为此,通过有效的技术手段寻找企业瓶颈,解决瓶颈从而达到均衡生产。对于非关键资源,其生产计划及作业安排则服从于关键

资源的充分利用。OPT 基本原理如图 8-2-9 所示。其中,关键资源排序是 OPT 的核心。在数学上,它是一种 NP-C 问题,只能得到近似解 (或满意解)。

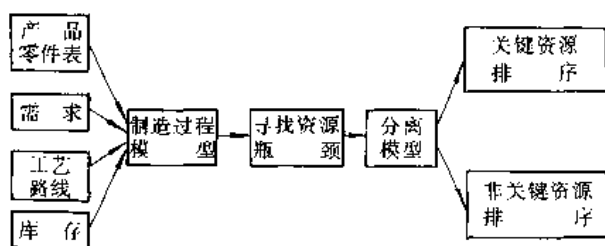


图 8-2-9 OPT 基本原理

2.6 先进管理模式与运行方式

精良生产、敏捷技术与企业和并行工程是新的制造业的经营管理模式与运行方式。不论这些模式起源于何处,未来趋势是管理模式的系统空间必然不断扩大,运转方式必然不断深入。

精良生产和敏捷技术与企业,把系统空间扩大到顾客与供应商。其中,敏捷技术与企业,为了优化利用各种资源,提出虚拟公司 (Virture Companies) 概念,将系统空间扩展到全国,通过全美工厂网络 (Factory America Network),建立信息交流所 (Information Clearing house),以便企业在设计某一新产品时,可以通过这一网络在全国寻找合适的技术与人力资源。未来企业先进管理模式与运转方式的方向是,经营管理目标更加提高,追求精益求精,尽善尽美地满足顾客当前与未来的需求 (产品质量、成本及投入时间)。为此,主张简化过程,不断改进过程,提倡以人为中心,用分散决策代替集中控制,用协商机制代替递阶命令,把传统的大批量生产方式与单件生产方式统一起来,实现个性与共性的统一,力图做到象艺术家生产方式那样满足顾客特殊需求,又能达到大批量生产那样的低成本。支持这种模式的信息系统必然十分复杂与庞大,多专业、多层次协同工作的鲁棒群件 (Robust Groupware) 是未来信息系统的基础。

时间是争夺机遇的关键。并行工程是一种以空间换取时间的运行方式,它将企业中复杂的工程、制造和经营管理过程中的各种作业,按最终目标,在时间与空间上并行交互式进行,从而大大缩短了传统串行作业方式所需的时间和反复修改的次数,大幅度地提高作业质量,加快进程,降低成本。CE 的基本概念如图 8-2-10 所示。

CE 与传统串行作业的基本区别如下:

机械工业出版社 请尊重作者版权



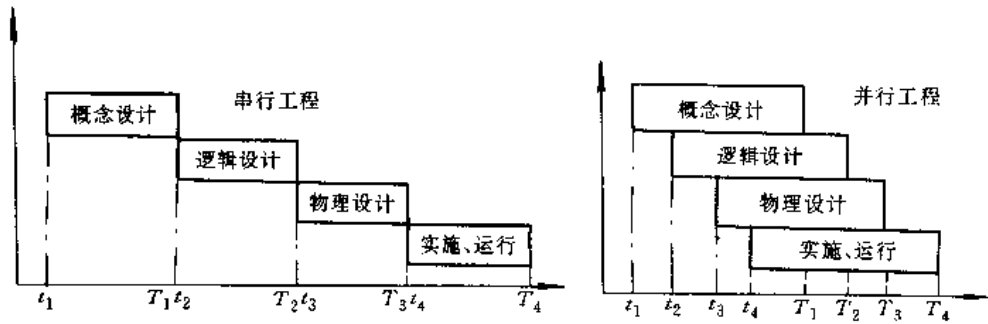


图 8-2-10 并行工程基本概念

(1) 传统串行作业是一个时间一件工作, 并行工程则是一个时间多个作业并行工作。

(2) 传统串行作业的工作区是相互独立, 顺序进行, 并行工程是工作区间相互交叉与重叠。

(3) 传统串行作业是多工程(专业), 相互独立地工作, 并行工程是多工种的协同工作。

并行工程是一种系统化的方法, 用来支持产品设计、制造和售后服务等, 进行集成化的并行作业。它要求开发者从开始就考虑产品生命周期的全部因素, 从概念到质量、价格、计划安排及用户需求。

并行工程实质上是合作、协同的过程。因此, 称它为协同工程更加确切。空间与时间作为资源, 它们亦是有限的。为了争夺未来的机遇, 必须串行, 早作准备, 牺牲当前一点时间, 夺取未来的机遇(空间), 研究、教育等均属这类性质。

3 制造业信息系统体系结构

3.1 基本概念

体系结构(Architecture)概念迄今尚无公认严格定义。它是一种宏观模型。

面向制造业的信息系统是一种时空非常庞大的复杂的开放系统, 系统空间日益扩大, 永不停止, 信息技术也是日新月异的。因此, 在规划、设计、开发与运行这类信息系统时出现了如下基本矛盾:

(1) 特殊性与通用性间的矛盾。每一个具体的用户总是要求设计出的应用系统能够满足它自己企业特定时间的特殊需求。软件制造商则希望通用化和标准化。

(2) 整体性与灵活性间的矛盾。系统随着时间的推移, 规模必然越来越大, 而企业的应变能力及系统的性能品质均希望系统具有良好的整体完整性。随着时间的推移, 企业对系统必然有新的需求, 信息技术也必然有新的产品出现。因而, 又希望系统具有可扩充性和可更新的灵活性。

(3) 友好性与系统性能品质间的矛盾。信息系统是一种人机系统, 其运转方式是人机交互地进行的。因此, 人机界面的友好性是十分重要的。在资源有限条件下, 友好性的提高有时会降低系统运转的效率。

上述三个方面的冲突本质上反映了局部与整体、现在与未来、人与计算机这三对矛盾。理论与实践表明, 必须认真统一上述矛盾, 否则今天适用的系统明天就可能变得不十分适用。统一这些矛盾就是要设计好系统结构。

现代科学已经揭示出任何复杂的系统均是由一些基本元素或单元, 通过一定的方式组合与装配而成的。信息系统是由数据与处理程序这两种基本单元组成。在面向对象(实体、客体)技术中, 将这两种基本单元在逻辑上归纳成一种单元, 称为对象或实体。不同的信息系统, 其不同的功能是由不同实体通过不同连接装配而成的。系统功能是系统外部性能的描述, 它反映系统能完成哪些工作。系统体系结构则是系统内部特性。它描述系统如何完成这些功能。系统复杂性不仅表现在内部结构中的基本单元种类多、数量大, 而且也表现在这些单元或实体呈复杂的层次和网状关系。上一层级的客体接收来自下一层次的状态信息, 并对下一层次的行为施加影响与控制。开放系统之所以能适应环境变化, 主要是通过内部这种层次结构自组织、自学习和自适应的能力来实现的。

面向管理与决策的信息系统是一种技术与社会综合的复杂系统, 它是由多专业、多层次人员共同设计出来的, 每一专业人员在设计过程中又分成不同阶段, 每一阶段突出某一方面的问题。因此, 信息系统的体系结构是一组多层次、多视图(或侧面)的模型集合, 包括: 经营体系结构、信息体系结构、系统体系结构和物理体系结构。它们分别面向经营决策者、系统使用者、系统设计者和系统实施者。每一体系结构又可分解成三个侧面视图, 即功能视图、实体视图和联系(或称通信)视图。功能视图这里指的主要是经营管理的活动, 实体视图主要是数据和人员等资源, 联系视图指的是实体



间的逻辑关系。这些是相对独立于具体企业的信息系统共性的模型,是设计与实施具体企业信息系统的基礎。

3.2 功能体系结构

现代企业组织呈层次状的结构,作为支持企业经营管理的信息系统,在企业组织结构合理条件下,信息系统的功能结构应同企业组织结构协调一致。如图8-2-11所示,该结构包括战略计划层、控制管理层、作业控制层和事务处理层。层次越高,面临的非结构化的决策也越多。不同管理模式,将用不同的方法来实现各个层次的功能。

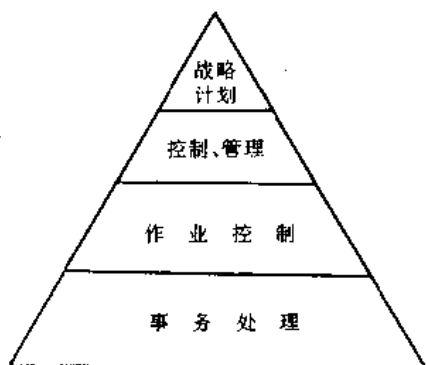


图 8-2-11 信息系统功能体系结构

随着企业外部环境的进一步复杂化及信息技术与系统技术的进一步发展,企业组织必然走向分散与自治,以协商取代命令,以目标与资源间平衡与协调取代具体的工作指令间的平衡与协调,以宏观控制代替微观控制,使企业在更大的空间与时间范围内优化资源的利用和取得更大的效益。这种处理复杂性方法的关键是“集结”各种相似功能于一体,并将它封闭起来,便于重复使用,工程设计中的标准零部件,工艺设计中的成组技术,管理中的专业化及经济批量生产和软件技术中的面向对象技术等均是系统工程中集结概念的具体应用。随着人们认识的深化,相似性必然会在更大的范围内和更深的层次上进行集结,使系统品质获得进一步的提高。

3.3 信息体系结构

信息系统中,数据与处理相比较,数据是相对独立的部分。相同的数据经过不同的处理后可以得到不同的信息,支持不同的组织功能。作为现代企业的重要资源之一的数据,为了安全可靠地保存,要求数据间独立无冗余。从应用角度,则又要求有冗余。因为经过综合处理出来的数据必然是函数相关的冗余项。因此,一个

正确的数据体系结构是保证信息系统可靠、有效和灵活的基础。

面向制造业信息系统的信息体系结构如图8-2-2所示。图中,原始数据是企业中无冗余的基本数据。企业要保存的是这些基本数据,它是从企业各种信息中提炼出来的。基本信息是供各种管理与决策用的信息源,它由原始数据处理合成而且是随时间变化的,它们之间是有冗余的。这类数据是企业中的档案数据。部门信息的特点是面向职能部门,如工程设计、财会等。它们是由基本信息合成的。知识(综合信息)是面向高层决策者的,它是由部门信息经过综合处理合成的。这里信息处理的特点是交互启发式的,多数信息供个人使用。因此,基本不存在共享或分享中冲突而引起协调问题。同合成处理过程相反是提炼的过程,它从上一层提炼出共性的下一层信息与数据。

数据分成原始数据和再生数据。随着时间的推移,企业再生数据必然愈来愈多。数据还可以按其拥有权,分成共享数据与分享数据。原始数据及基本信息是共享数据,其修改权必须严格统一管理。部门数据所有权属于相应职能部门,综合数据属于个人,其修改权属于有关部门与人员。

4 决策分析及决策支持系统

决策支持系统主要处理战略层和非结构化的问题。决策分析是决策科学化的理论基础,是分析复杂决策过程的科学框架。它是一门研究决策过程的逻辑和偏好(Preference)的综合性学科。它有着自己的公理体系,研究人们决策过程中的风险态度、多目标评价及时间因素的偏好,并建立这些方面的数学模型,如效用函数(Utility Function)。效用函数一般呈指数函数状。它包括随机过程的每个阶矩,而线性函数只包括一阶矩,只能描述平均值。二次函数只包括一和二阶矩,只能描述风险中的方差。值得指出的是,决策理论是建立在决策者是有理性的这一基本假设前提下的。因此,决策者的行为理性和素质是关键因素。决策分析是决策者与决策支持系统之间的桥梁与接口。

4.1 决策过程的西蒙模型

诺贝尔经济学奖获得者西蒙(Herbert A. Simon)分析研究了复杂的决策过程,抽象出了决策过程的三个阶段模型,如图8-2-12所示。

(1) 情报阶段(Intelligence Phase)。主要任务是发现问题,寻找机遇。为此,必须收集、分析和研究同



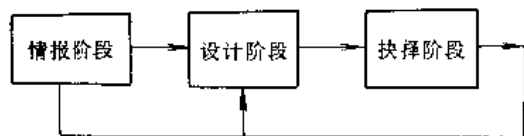


图 8-2-12 决策过程的 Simon 模型

问题有关的社会、技术和经济等方面的信息。所谓问题是现状与理想之间的差别。而且这种差别不是现象而是本质。因此，理想模式的建立和现象到问题实质间的转换是本阶段的关键。问题明确后，尚须寻找解决问题的技术、经济和社会的条件，即机遇。本阶段相当于可行性论证阶段。

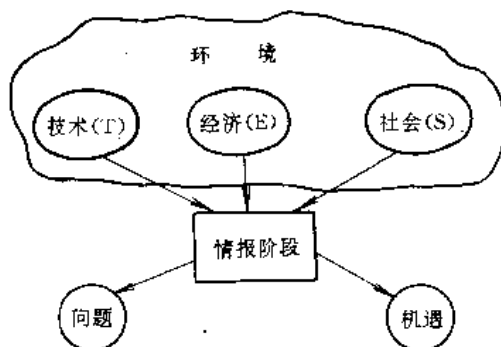
(2) 设计阶段 (Design Phase)。主要任务是为了解决问题，构思和设计各种现实可行的方案，这里强调可行方案要尽可能地充分。

(3) 抉择阶段 (Choice Phase)。主要目的是从可行方案中选出一个令决策者满意的方案。

基于决策过程的复杂性，Simon 还提出了著名的有限合理性原理 (Principle of Bounded Rationality)。该原理指出：“…人们对复杂问题的认识总是有限的。因此，对复杂系统只能取得满意解，不可能取得最优解。…，解应是一个集合，而不是唯一解。”这些模型与原理是指导我们研究、开发与应用决策支持系统的理论基础。有限合理性原理告诉人们，复杂的决策过程首先要建立宏观模型并对其求解，这个宏观解返回到现实世界是一个范围。然后在这有限空间中采用反馈机制或启发式问题求解方法，通过人/机交互手段取得满意解。通过经验不断地积累，会逐步逼近真正的最优解。相反，如果没有宏观框架，片面追求准确的“最优解”，其结果则往往是劣解。

4.2 决策分析的递阶过程

决策分析过程实际上是一种风险评估和减少不确定性的过程。决策分析不仅要建立对象本身的模型，还要描述和建立决策者的价值模型，价值模型包括：决策者对于多目标协调的价值准则、时间价值（即近期、远期）和风险态度等。决策过程中既要处理大量确定性问题，更要处理许多重要的不确定性问题。信息是减少不确定性的物质基础。因此，决策分析与决策过程是分层次、分阶段进行的，每一阶段、每一层次侧重分析或解



决某一问题，如图 8-2-13 所示。

值得指出的是，决策的关键取决于决策者的价值

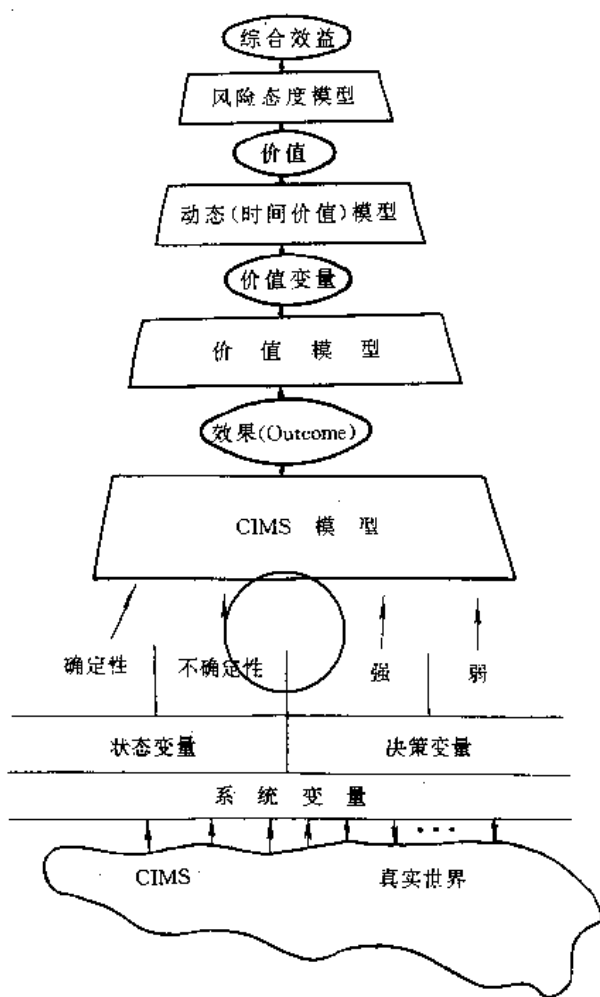


图 8-2-13 决策分析的递阶过程

观念和 risk 态度。价值观念包括局部与整体利益的协调，表现为多目标协调这一个空间价值观；其次，是现在与未来利益协调的时间价值观。风险是不依人们意志为转移的。因此，合格的决策者必须深刻认识决策三要素，即机遇、信息与资源。机遇是决策者的期望与目的，它是挑战性的，在竞争环境中，机遇给对手取走，



将是灾难。信息则要求准确、充分、及时并具有价值。资源则是有限的。决策者的任务是：在信息支持下，合理分配资源，争夺当前与未来的机遇。决策支持系统就是支持这一过程。

4.3 面向计算机集成制造决策支持系统的基本框架

决策支持系统从 70 年代的支持数据处理和信息获取，发展到今天具有问题分析与诊断、方案生成及方案选择，未来将在广度及深度上还会不断继续前进。但是，永远只是计算机辅助决策，不可能实现决策过程全部自动化和无人化。决策支持系统一般包括问题输入、问题分析、问题求解和结果输出等功能。内部结构包括数据库、模型库、知识库及有关接口，面向 CIM 决策支持系统概念模型如图 8-2-14 所示。该系统的主要特征如下：

(1) 决策环境是制造业。因此，技术决策过程的基础数据是工程数据 (CAD、CAPP)、制造数据 (CAM)、质量数据 (CAQ, Computer Aided Quality) 和经营管理数据 (MIS)。复杂过程的决策需要综合信息的支持。因此，综合信息获取和综合信息库的建立是

十分重要的。

(2) 决策问题与决策模式是与企业的经营管理模式相适应的。精良生产及敏捷技术与企业等未来企业经营管理的模式把决策空间扩充到市场中的顾客与供应商，决策深入到顾客需要这些不可量化 (Intangible) 的因素。因此，面临大量非结构化问题和突发事件 (事件发生概率事先完全不知道)，决策是在有限理性原理指导下，通过人/机交互的方式，不断降低风险、提高决策的满意度的过程。

(3) 决策面临的是多种目标，多种专业人员，集中与分散、递阶与协商，串行与并行等相互冲突的过程。因此，价值模型、资源的约束、冲突分析和目标协商等是决策支持系统的重要功能。多专业 (工程、经营)、多层次交互式的协同工作是决策支持系统的主要运行方式。

(4) CIM 是一种发展中的技术和不断改进的过程。它的决策空间在广度与深度上会不断扩大与深入。因此，是一种开放系统，具有自组织及重构的能力，是随着企业决策案例的积累，逐渐抽取和积累各种决策模型实体，逐渐扩大决策支持功能的一种繁殖过程。

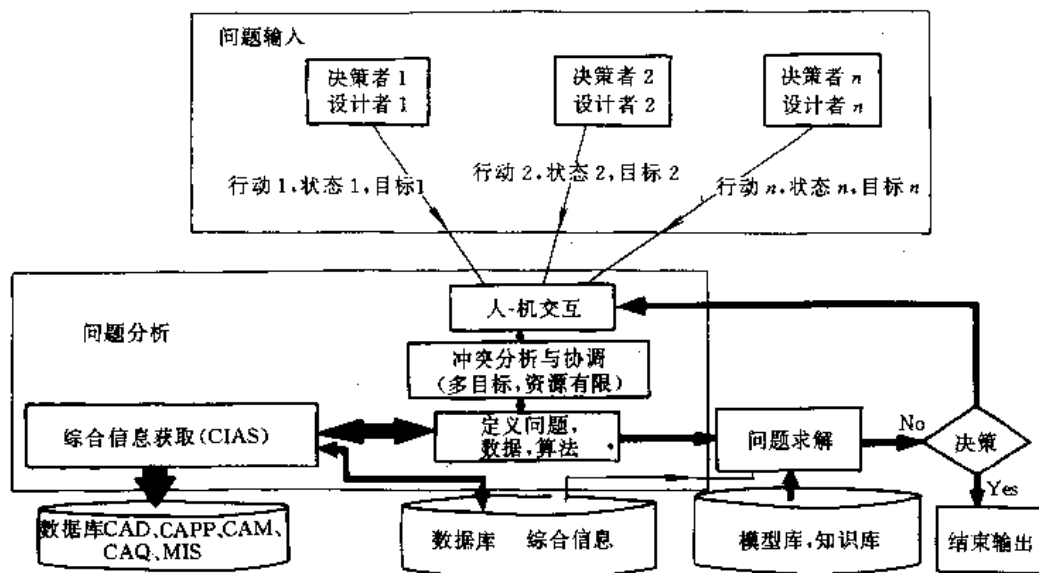


图 8-2-14 面向 CIM 决策支持系统概念模型

5 系统规划、分析、设计和实施方法的基础

制造业 MIS 和 DSS 是一种复杂系统。特定企业欲建造这种系统，硬件及各种典型标准软件等作为零部件是可以买到的，但是，特定企业的具体 MIS 和 DSS 是买不到的。因此，系统规划、分析、设计和实施是十

分重要的问题。目前已有不少书籍及文章讨论不同的分析与设计方法，如美国的结构化系统分析与设计方法 (SSAD, Structured Systems Analysis and Design)。但是这些方法多数是从某种学科或某一侧面分析与设计系统，缺乏综合。例如，不少 SSAD 法都是侧重从计算机角度来分析系统和设计系统，而各种



管理模式又多侧重于经营管理学科。但是一个以计算机为基础的,支持企业经营管理的信息系统应该实现计算机科学与管理科学的统一。因此,本节不再重复介绍这些方法,重点讨论综合与集成这些学科和已有的方法的概念与手段,包括:语言的沟通和系统分析与设计的框架。

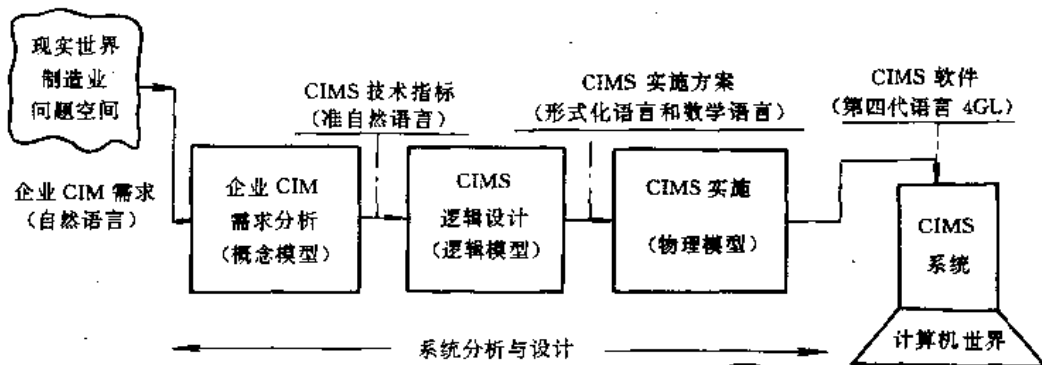


图 8-2-15 系统分析设计过程生命周期

这里,计算机世界用的是二进制形式的机器语言,思维方式是以数理逻辑为基础的抽象思维,工作方式是微观串行,宏观并行。现实制造业世界中人们用的是以自然语言为基础的专业语言,思维方式是以模糊逻辑为基础的形象思维,工作方式微观是并行的,宏观是串行的。因此,设计过程必须有效地统一语言或正确地翻译;必须有效地协调不同的思维与工作方式,达到人同计算机正确分工与协作,来满足各种实际需求。要沟通两个不同的世界是件复杂的系统工程,因此要分阶段、分专业、分层次而又协调一致地进行,如图 8-2-15 所示,共分为如下三个阶段。

(1)需求分析阶段。本阶段主要任务是深入全面理解用户真正的需求,并将企业面向 CIMS 信息系统需求(以自然语言描述)转换成以准自然语言描述的 CIMS 信息系统的技术指标。本阶段是面向用户的,系统分析者主要同用户对话。按问题求解(Problem-Solving)的工程概念,用户提出的需求多半是向题的现象。因此,系统分析与设计者要善于将现象转化为问题。了解用户需求,更确切地说要理解支持用户需求的概念是否正确。科学地说,这一阶段的任务是建立用户需求的概念模型。这一阶段是系统功能充分性的保证。因此,如无充分把握断定某些需求是不合理、难以实现或冗余的,就不要轻易去掉。

(2)逻辑设计阶段。本阶段主要任务是将以准自然语言描述的 CIMS 信息系统各种技术要求,转换成以形式化语言或数学语言描述的信息系统的实施方案。本阶段是面向设计者的。系统分析者要同有关专业技

5.1 两种不同语言、思维与工作习惯的世界和设计的生命周期

系统分析、设计与实施的过程犹如架设一座桥梁,沟通制造业的现实世界与计算机世界,如图 8-2-15 所示。

术人员对话。主要工作内容包括:人同计算机间的分工与接口设计。对于要由计算机完成的各种要求,寻找合适成熟的技术来解决,例如数据库技术、网络技术、优化技术、专家系统技术、仿真技术等。如果现有技术不能复盖全部需求则要制定研究和开发的项目。如果经费或技术研究条件不允许,应返回第一阶段修改需求。本阶段是问题技术求解阶段,要求保证系统功能与结构的最小实现,去掉一切逻辑上冗余的成分,实现系统逻辑上的优化。至此,系统功能结构对于需求来说做到了既无多余又无遗漏,即保证了充分与必要条件。值得指出的是,日后若系统逻辑模型是混乱的,不仅系统品质低劣,而且会崩溃,必须十分重视这一阶段。

(3)物理实现阶段。这阶段主要任务是将以形式化语言描述的系统方案转换成各种软、硬件。目标是最经济。本阶段主要是面向实施者。主要内容包括:计算机配置及选型,数据库及应用软件选型,人员培训等。如果技术、经济和环境条件对某些实施方案不具备,则应返回到第二阶段,甚至第一阶段进行必要的调整。

上述三个阶段不是相互独立的,而是相互交叉、迭代逐步逼近到技术、经济和社会环境约束下的满意解。为了加快这种反复过程,应按上节介绍的并行工程的概念与方法来指导系统分析与设计。

5.2 功能设计的递阶过程

生命周期是对复杂系统分析与设计在时间上的分解。对于像 CIMS 这样复杂的信息系统还必须进行基于功能上的空间分解,形成包括决策层、管理层、监控



层及事务处理层。每层再按上述生命期进行时间上分阶段工作。如果没有这一概念,只注意生命周期,往往会忽略了高层次的设计。

5.3 设计过程的交叉学科与协同工作

目前以事务处理为主要内容的信息系统分析与设计方法,只做到数据优化,这里数据库设计是中心内容,而且已有比较严格而实用的框架。但是,数据是为了综合出信息,信息是为了支持功能,功能是为一定目标而设置的,目标选择及协调是受决策者的价值观支配的。从系统复杂性来看,功能、信息和数据是多维的,目标是一维的,价值则是零维的,它是这种递阶层次的终极。因此,必须从系统角度统一考虑价值、目标、功能、信息、数据和它们间的变换。否则,即使信息子系统是优化合理的,而它所支持的功能是错误的或者功能与信息之间不具有严格的对应关系,那么这些信息是无价值的。各个部分涉及不同的学科。因此,这类复杂系统的分析与设计必须实现相关学科间的交叉与融合。这里实质上是一种问题-求解的工程,问题包括价值、目标、功能、信息和数据,求解包括三个层次,即理论、方法和工具。为此,必须实行多专业、多层次的协同工作。

5.4 问题求解的基本概念及系统分析设计框架

系统分析与设计是以系统论为基础的一门技术。

它同其他技术一样,是有继承性的,必须综合和继承相关学科技术的已有成果,另一方面新的复杂对象必然有新的问题,相关学科及相关技术间也有冲突之处。因此,在继承和集成相关技术时必须按问题-求解工程方法进行。

问题-求解工程方法是一种处理复杂问题的科学方法。该方法视用户需求为现象,必须通过综合分析找出需求的问题实质。求解必须对症下药,寻找已有或新研制的方法去解决。集成新旧各种方法必须设计出合理的框架(Framework)、使能机制(Enabling Mechanism)和使能器(Enabler)去协调这些方法间的冲突。面向制造业管理与决策信息系统的分析与设计的问题求解框架,如图8.2-16所示。图中表明了复杂系统分析与设计的总步骤,即以系统论为指导,在有关参考模型和开发工具支持下,沿着三个子问题(或子空间)将用户需求一步一步地变换成以计算机为基础的信息系统。系统论主要是保证信息系统的协同性(Synergy)和整体性(Holism)。协同性告诉设计者如何选择子系统,要消除一切对最终价值无意义的目标、功能、信息和数据,从而保证了子系统协调一致的工作。整体性告诉设计者要以高效的模式来组织这些有价值的子系统的相互联系与工作,并行工程等非线性管理模式就是整体性的体现。因为这种非线性模式能使各子系统给总系统带来新的附加效益,除了各子系统的效益外,还有各子系统相互合作的集成协同效益(数学上是乘积的关系故称非线性,物理意义是其中任一项为零,其他项再

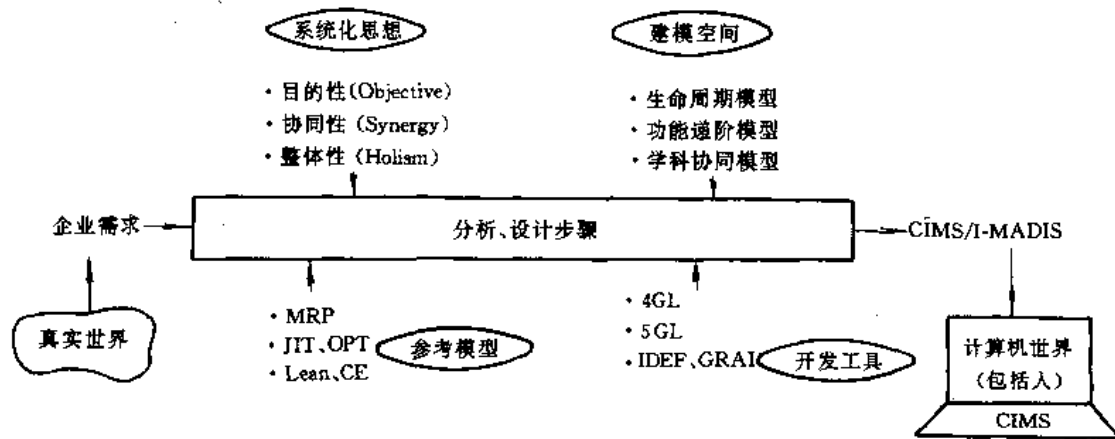


图 8.2-16 系统分析与设计的问题求解框架

大、乘积后总结果仍为零,故称合作项)。参考模型指的是典型管理模式,尤如标准零部件。开发工具主要指的是计算机辅助软件开发及系统设计的工具。建模空间是将复杂的系统分析与设计问题在空间分解成三个正交的子空间,即生命周期、功能递阶和学科协同。

最后应该指出,系统分析与设计是一种创造性的工作。分析是认识信息系统这个客观世界,掌握它的基本规律的过程。设计是改造客观世界过程,是我们的最终目的。只有两者紧密结合才能设计出科学、先进和实用的系统。



第3章 工程设计自动化系统^{[9]~[29]}

1 系统构成及其选型

1.1 典型工程设计自动化系统流程图

工程设计自动化系统(EDAS, Engineering Design Automation System)在CIMS中居有重要位置。它是CIMS中产品设计及工艺信息的主要发源地。在EDAS中产生产品的设计信息,加工工艺有关的机床、刀具、切削用量等信息,以及与数控(NC)加工有关的信息等。EDAS由计算机辅助设计(CAD)、计算机

辅助工艺过程设计(CAPP)及计算机辅助制造(CAM)三部分组成。CAD完成方案设计、建立产品模型、进行工程分析以及详细设计等工作;CAPP完成加工装配及检测工艺过程的设计工作;CAM则完成产生NC加工信息的工作。图8-3-1为EDAS的流程图。其中,CAD子系统相对封闭、独立,除接受来自管理层发来的新产品设计指令以及向管理层、车间发送零件明细表等信息之外,主要设计结果直接输往CAPP与CAM子系统。CAPP与CAM子系统则要输出加工工艺过程、工时定额、成本、原材料需求、NC

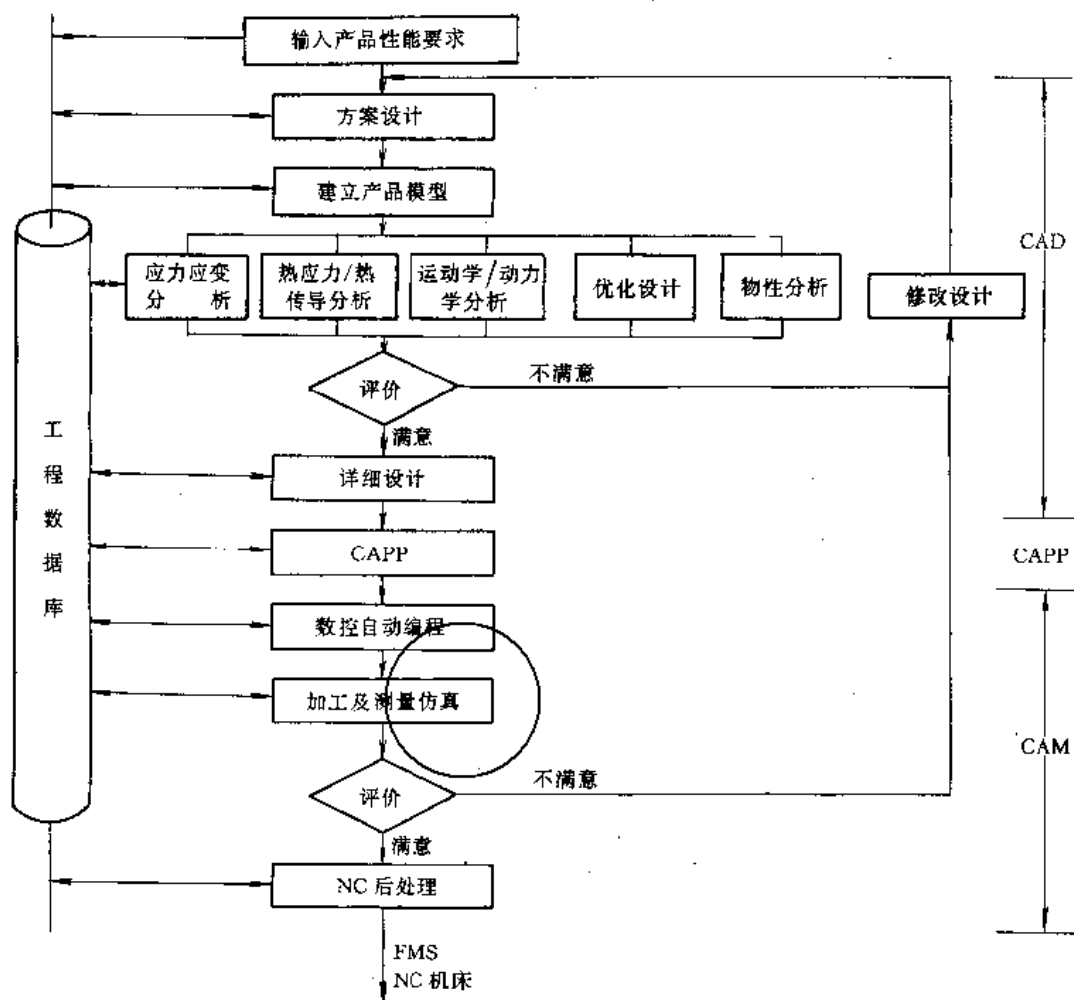


图 8-3-1 工程设计自动化系统流程图



信息等多项生产信息,与管理层、车间控制层等 CIMS 其他系统集成关系密切,因而在信息集成上居有重要地位。

为了加速产品的更新换代、开发出各具特色的新产品,产品的方案设计、建立三维模型以及进行各种工程分析是关键的设计环节。如果进一步将 CAD 与 CAPP、CAM 集成起来,则将大大提高设计效率及经济效益,并进一步缩短新产品的研制、开发周期,极大地提高企业在市场的竞争能力。

1.2 系统硬件

1. 大型机系统 这是 60 年代出现的 CAD 系统。由于当时硬件昂贵,只有大型企业才能购置。其结构型是以一、二台大型计算机作为主机,配置若干台图形终端、字符终端以及绘图机、打印机、磁带机等多种外部设备形成系统。其特点是众多用户通过各自的终端共享主机的资源,包括中央处理机、内存、外存(硬盘)及数据库等。厂商提供系统软件,而由用户开发自己的应用系统。这是一种资源集中型、用户开发型的系统。图 8.3-2 为大型机 CAD 系统结构示意图。

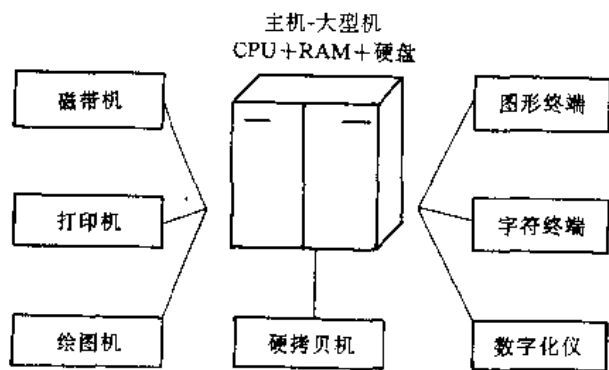


图 8.3-2 大型机 CAD 系统

2. 小型成套 (Turnkey) 系统 这是 70 年代出现的 CAD 系统。其结构型是以一台小型计算机作为主机,其余环境与上述大型机系统相近。厂商除提供系统软件之外,还可提供适合机械、电子、土建行业用的 CAD 支撑软件,包括图形、工程分析及数控加工等方面的软件。对于用户只要一旋转钥匙 (Turnkey) 就可以使用了。当然,用户仍需自己开发大量的应用程序。

3. 工程工作站加网络的分布式系统 这是 80 年代出现的 CAD 系统,是目前 CAD 系统的主流。工程工作站市场销售额在各类计算机中增长最为迅速,年增长率在 25% 以上。其性能也在飞速提高,目前单 CPU 的运算速度已达 80~150MIPS (每秒百万条指

令, Million of Instructions Per Second)。工作站之间以网络互连,以实现资源的共享。这是一种高效的系统。由于工作站的数量可以视财力情况逐年添置,比较适合我国中小企业开展 CAD 工作的需要。图 8.3-3 为分布式 CAD 系统结构示意图。

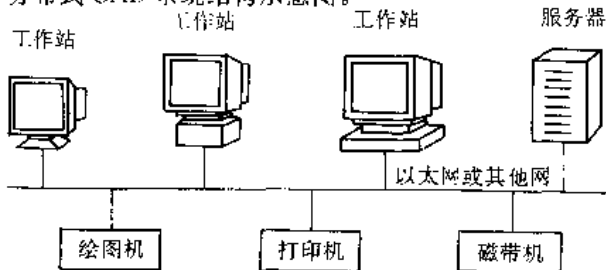


图 8.3-3 分布式 CAD 系统

4. 微机系统 结构上与上述工程工作站加网络的分布式系统相似。微机系统是单用户系统,也可通过网络互联或作为主机系统的一个终端。其投资较低,运算能力较差,缺乏强有力的 CAD 软件系统的支持。随着其 CPU 由 80386 升级为 80486、80586、..., 其性能大为增强,与工程工作站的界限正趋向缩小。这类系统在我国机械工厂中可以作为上述各类系统的补充,也可作为中、小工厂 CAD 应用的初级系统。

1.3 系统软件与支撑软件

关于系统软件,目前 EDAS 硬件的主流操作系统是 UNIX,程序设计语言主要使用 FORTRAN 语言与 C 语言,C++ 语言正在逐渐受到用户的欢迎。X 窗口系统作为一种具有高可移植性的、网络透明的、功能很强的软件开发环境,已成为事实上的工业标准。

EDAS 的支撑软件包括交互式图形软件、实体/曲面造型软件、工程分析软件、CAPP 软件、NC 加工仿真与后处理软件、文档生成软件及工程数据库等通用软件,此外还包括塑料模具、冲压模具 CAD 以及钣金加工 CAD 等行业通用软件。本章后续诸节将分别介绍以上通用软件的工作对象与功能。

1.4 软、硬件的选型

在进行选型之前,要对本企业迫切要解决的技术问题以及经费、人员技术水平等先决条件进行认真的分析研究,明确 EDAS 的分阶段目标与进度。

在软件与硬件之间应以优先选择软件为原则。这是因为目前各厂商提供的硬件虽各具特点,但是在基本功能方面则仍属大同小异;其次是因为硬件好比人的脑器官,软件则反映人脑中知识的积累程度。因此,应首先对比企业的需求,选择出最适合当前及未来若



干年中产品开发需要的软件,进而选择适合该软件运行的硬件系统。

1. 支撑软件的选型 一般考虑下述五点:

(1) 技术的先进性。例如采用基于非均匀有理 B 样条 (NURBS Non-Uniform Rational B-Spline) 的实体/曲面造型系统,采用基于参数化特征造型、变量化设计的产品造型系统以及基于方便、醒目的字符/图形菜单等友好的用户界面等。

(2) 集成性。一个集成的软件系统应具有统一的数据模型、统一的数据库、统一的用户界面,便于实现各软件模块间的数据共享与集成。此外,还能提供专用或标准的数据交换接口,如初始图形交换规范 (IGES, Initial Graphics Exchange Specification)、图形交换文件标准 (DXF, Drawing exchange File)、产品数据表达与交换标准 (STEP)。

(3) 开放性。为适应企业的特殊应用,必须对引进软件进行二次开发。因此,该软件系统是否便于扩充,提供了什么二次开发的手段以及这些手段是否便于使

用等均是极为重要的。

(4) 是否提供符合国际标准化组织 (ISO) 标准的程序员的层次交互式图形系统 (PHIGS, Programmers Hierarchical Interactive Graphics System)、图形核心系统 (GKS, Graphics Kernel System) 等图形软件包?

(5) 有条件的可以先到企业试操作一下,或出一、二道典型的题目请推销商试做,以判断是否适合企业的需要。

关于上述 (1)、(2)、(4) 各点,后续相应节次中有进一步的介绍。

2. 硬件的选型 一般考虑以下四点:

(1) 优先选择主流机型。表 8-3-1 为美国国际数据公司 (IDC, International Data Cooperation) 于 1992、1993、1994 年发表的,1990 年到 1993 年间各著名工作站厂商在全世界工作站市场中的装机台数及所占的市场份额 (%)。据国外估计,1995 年时前四名仍将为 SUN、HP、DEC 与 IBM 公司。多数估计 SUN 公司仍居首位,也有人估计 IBM 公司将会领先。

表 8-3-1 工程工作站市场份额 (安装台数) IDC (92.5, 93.1, 94.1)

| 年 度 公 司 | 1990 | | 1991 | | 1992 | | 1993 | |
|------------------|--------|------|--------|------|--------|------|--------|------|
| | 台 数 | % | 台 数 | % | 台 数 | % | 台 数 | % |
| SUN | 146050 | 38.3 | 189200 | 39.6 | 217600 | 38.1 | 238800 | 39.7 |
| HP | 75550 | 19.8 | 80125 | 16.8 | 99000 | 17.4 | 98000 | 16.2 |
| DEC | 64000 | 16.8 | 65900 | 13.8 | 63500 | 11.1 | 68100 | 11.3 |
| IBM | 16405 | 4.3 | 26900 | 5.6 | 40000 | 7.0 | 41100 | 6.8 |
| SGI | 9690 | 2.5 | 14000 | 2.9 | 29000 | 5.1 | 27600 | 4.6 |
| INTERGRAPH | 14470 | 3.8 | 16000 | 3.4 | 28000 | 4.9 | | |
| NEXT | 11000 | 2.9 | 25600 | 5.4 | 17000 | 3.0 | | |

(2) 系统平台。优先采用工业标准的硬件与系统软件,例如选择精简指令系统结构 (RISC, Reduced Instruction System Constructure) 32 位工作站, UNIX 操作系统、X 窗口系统及 TCP/IP 网络协议等。

(3) 工程工作站按功能可分为高、中、低三档。图形显示器有单色、彩色两种。企业中一般以选择中、低档为主,单色与彩色图形显示器搭配使用为好。

(4) 选择具有较优性能价格比的机型。

除上述几点之外,在软硬件选型中还需考虑以下四点:

(1) 厂商的服务支持,例如硬件是否有固定的维修站,推销商在中国的技术支持能力,用户对厂商服务实际状况的意见以及技术合作的可能性。

(2) 在中国的用户情况:有没有“用户协会”,用户数量,主要用户单位。此外,要了解是否有汉字及国际化绘图的二次开发成果等。

(3) 鉴于硬件的性能价格比逐年提高很快,以逐年分批购进为好。

(4) 争取做到一套软件可以分模块供几台工作站共用。

2 计算机图形系统

2.1 图形自动输入与存储系统

计算机图形学及 CAD 技术已能解决图形生成与输出问题。但是大量的工程图、技术文档、地图等如何



有效地输入计算机以实现图样存档与建库,进而进行更新设计却一直未能很好解决。图形自动输入就是要解决如何将扫描所得的点阵信息进行处理,变成矢量化的图形信息或优化的点阵信息,再进行图形的输出与存储。该项技术涉及计算机硬件、图象学、图形学、模式识别和人工智能等高新技术,有较大难度。迄今为止,尽管国内外有关这方面的软件层出不穷,但还没有十分完美成熟的系统。

图形自动输入系统可分成如下二类:

1. 点阵-矢量信息转换系统 其核心思想是将扫描所得图纸点阵信息经细化处理形成骨架图(仍为点阵),再经跟踪成折线集矢量信息,最后经后处理拟合

成直线与圆弧的长矢量信息。除线图形外,还必须对原图上文本、符号、箭头等经模式识别转化为矢量信息。

2. 点阵-优化点阵系统 扫描所得原图的点阵信息,不经矢量化,而经点阵图象编辑器,对原图进行去污、背景处理、图素增删和修改,以及文本与符号的编辑等,形成优化的点阵信息,然后输出图形。

此外尚有上述系统的混合系统。

图 8-3-4 是一个图形自动输入系统的结构框图,同时兼有两类系统的功能。图中点阵图象管理系统负责扫描输入参数的设定、信息压缩存储与复原、文档管理与控制等。点阵图象编辑器的功能类似于一般的交

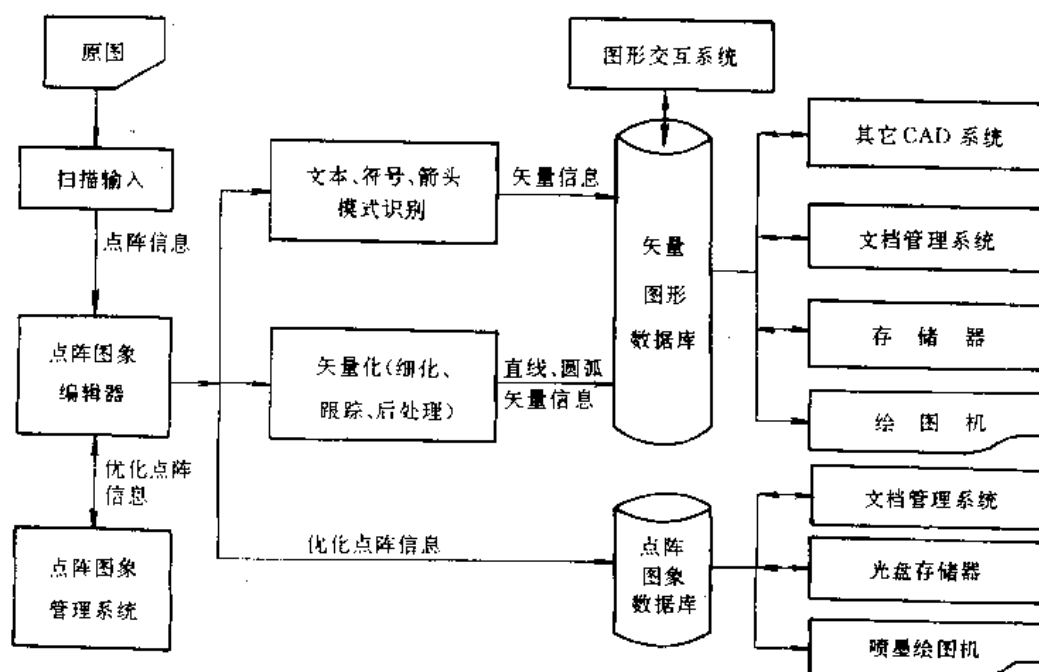


图 8-3-4 图形自动输入系统结构框图

互图形系统,不过对象是点阵图,它也应包括对图象的动态二值化处理。在模式识别模块中包含图文分离技术,以及对任何方位、大小的手写体字母、数字、特殊符号及常用汉字的识别,一般采用人工智能技术。在矢量化模块中,目前已有的数十种细化算法大都采用 3×3 象素窗口,用并行算法进行迭代,对图线边缘进行剥离以获取图形骨架。在矢量跟踪及进一步的后处理中,图形连接点的处理是一个难点。用硬件实现矢量化中的部分算法将使处理速度提高数十倍,是非常吸引人的。矢量图形数据库中的图形数据,一方面要求能为系统自身的图形交互处理模块进行编辑与修改,另外又要能为别的 CAD 或文档管理系统所接受,因此具有标准的数据交换文件格式(如 IGES 或 DXF)是不

可缺少的。由于工程图数量巨大,为了图库的有效存储,光盘机是理想的选择。

2.2 交互式图形系统

交互式图形系统是指操作者运用各种人机交互工具,实时输入及处理图形信息的系统。这是一种边操作边显示图形,可以随时按操作者意图进行修改,最终得出所希望图形的作图系统。其特点是将人的智慧与计算机的高速运算能力很好地结合起来,并且与传统的人工设计绘图过程相近似,易于为人们所掌握。这是当前计算机图形系统的主流。

人机交互工具以屏幕字符菜单(Menu),图形菜单(Icon),鼠标器(Mouse)及键盘为主。此外,还有图



形输入板、数字化仪、光笔、跟踪球及操纵杆等。目前,交互式图形系统正朝着功能强、运行可靠、人机交互界面友好的方向发展。

1. 交互式图形系统的基本功能

a. 二维图形的基本作图功能

(1) 基本图形元素的生成。如点, 线段, 圆与圆弧, 圆锥曲线, 样条曲线, 组合曲线等的生成与显示。

(2) 图形的编辑与操作。如两个图形元素求交, 倒角与圆角操作, 两个封闭图形的逻辑交、并、差操作, 元素的几何数据与属性修改, 封闭图形的剖面线, 图形的平移、旋转等各种变换, 图形复制, 图形拾取, 开窗与裁剪, 图段与子图形的生成、装配及删除等。

(3) 各种标注功能。这对输出实用化的机械图样起着关键作用。例如长度、半径、直径、角度等各种尺寸标注, 形状与位置公差标注, 表面粗糙度标注, 各种字符的生成与标注等。

(4) 辅助作图功能。如线型、颜色、公(英)制单位的选择, 作图区网格点化, 作水平、垂直的辅助线, 作直线的平行线、垂直线等。

b. 三维图形的基本作图功能 有三维图形的平移、旋转等各种变换, 三维窗口与裁剪, 画轴测图、透视图、剖切图、消隐图、彩色明暗图, 二维正投影图的生成等。

2. 交互图形系统的增强功能

(1) 参数化图形的生成、处理。

(2) 典型图库、符号库的建立与管理。

(3) 图形系统内部数据的提取以及高级语言程序调用的接口。

(4) 用户二次开发工具, 例如提供宏命令、用户自定义菜单设计工具等。

(5) 与其他图形系统进行图形数据交换的接口(如 IGES、DXF 图形交换文件的接口等, 参见本章 8.2 节)。

2.3 图形软件标准

在 CAD 市场上, 各硬、软件厂商推出了为数众多的商用图形软件系统。它们之间体系结构不同, 实现同一功能的子程序(过程)名与参数也各不相同, 这给应用程序的开发与移植带来了很大的困难。为此, 70 年代中期开始图形软件标准化的工作。到 1991 年为止, 国际标准化组织(ISO)已经制订了图形核心系统 GKS 与 GKS-3D、程序员的层次交互式图形系统 PHIGS、计算机图形元文件及计算机图形接口等标准, 目前正在

制订中的还有 PHIGS PLUS、计算机图形参考模型等标准。下面简要介绍 GKS 与 PHIGS 标准。

1. 图形核心系统

能实现最基本图形功能的系统称为图形核心系统(GKS)。它的突出特点是具有独立性, 即它与计算机、图形输出设备、程序设计语言及应用领域都没有从属关系。

德国的 DIN 于 1977 年提出了二维图形系统标准 GKS1.0。经过 ISO 的多次讨论与修改, 1982 年 5 月决定将 GKS7.2 采纳为国际标准草案 DIS7942。1985 年成为正式标准 IS7942。1988 年通过了 GKS 的三维扩充本 GKS-3D 的国际标准 IS8805 以及 GKS 和高级语言结口的国际标准 IS8651-1, 2, 3。

GKS 定义了与语言无关的二维图形系统的内核。它定义了一组图形功能, 这些功能作为某种程序设计语言的子程序实现的。一种专门语言, 例如 FORTRAN、PASCAL 的实现称为语言相关层。对不同类型的应用领域, 还可以在语言相关层之上建立所需要的(例如绘制剖面线及各种标注等)功能, 这些功能构成了面向应用层。应用程序则建立在所有这些资源之上。图 8-3-5 表示了 GKS 所处的结构层次。

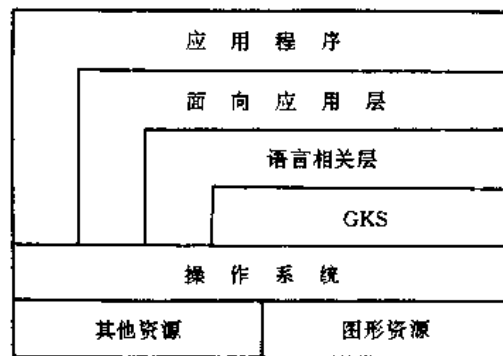


图 8-3-5 GKS 所处的结构层次

工作站(Workstation)的概念是 GKS 的基础。它是一个抽象的图形输出、输入设备。有以下六类: 输出工作站; 输入工作站; 输出/输入(交互)工作站; 独立于工作站的图段存储器(WISS); GKS 元文件(GKSM)输出工作站以及 GKSM 输入工作站。

GKS 提供如下六种输出图素: 即通过点集的多边折线(polyline); 以各种符号标识一系列点的位置(polymarker); 在给定点输出字符串(text); 多边形区域填充(fill area); 单元阵列填充(cell area)以及通用图素(GDP)。通过 GDP 可以输出特殊的几何形状,

如绘制圆弧、样条曲线等。GKS 中没有画笔当前位置的概念，是它的一个主要特点。

GKS 定义了如下三种坐标系：用户坐标系 (WC, World Coordinate)；规格化设备坐标系 (NDC, Normalized Device Coordinate)；设备坐标系 (DC, Device Coordinate)。GKS 还定义了由 WC 到 NDC 的规格化坐标变换及由 NDC 到 DC 的工作站变换。

GKS 可以执行如下输入方式：在用户坐标系下给定点的位置或输入一组点；输入选择；输入一个实数；图段选择；输入字符串。可以采用询问、采样或事件等三种模式进行上述输入。

图段 (segment) 是 GKS 的重要概念，是输出图素及其属性的一个组成单元，也是图形系统控制或操作的一个独立的逻辑图形单元。一个图形可以由若干个图段组成。图段是由应用程序定义的，因此当图段及其构成的图素送到活化状态的工作站后，应用程序还可用各种方式去控制它们。这是与一般图素的主要区别。

GKS 的元文件 (metafile) GKSM 是一个顺序文件，用以长期保存和交换图形信息。

根据实现的功能多少，GKS 共分为九个层次：0a, 0b, 0c, 1a, 1b, 1c, 2a, 2b, 2c。其中 0, 1, 2 反映了输出功能的层次，a, b, c, 反映了输入功能的层次。其含意是：

- 0——最低的输出能力。
- 1——基本图段功能，全部输出功能。
- 2——全部图段（包括 WISS）功能。
- a——无输入功能。
- b——有询问模式的输入功能。
- c——有全部输入功能。

2. 程序员的层次交互式图形系统 PHIGS

与 GKS 一样，是对于应用程序的基本图形功能接口标准。1982 年美国国家标准协会 (ANSI) 开始立项研究。1985 年成为 ISO 的工作项目。1987 年 10 月发表了 DIS9592，1989 年 4 月成为正式文本 IS9592。

PHIGS 是针对 GKS 存在以下问题而提出的新标准：

- (1) 虽然开发了 GKS-3D, 但还不能很好地满足三维的需要。
- (2) 段的结构只限一层，难以表达复杂的图形结构关系。
- (3) 工作站依附的约束，GKS 采用了与设备无关的叙述表，对于程序员极为繁琐。
- (4) 属性指定方法烦杂，造成系统效率下降。

PHIGS 的 ISO 文本由以下三个分册构成：

- 第一册：功能描述 (IS9592-1)；
- 第二册：保存文件格式 (IS9592-2)；
- 第三册：保存文件的可读文字编码 (IS9592-3)。

PHIGS PLUS 是为补充 PHIGS 的有关处理阴影、光照等明暗图功能的标准。1991 年 2 月完成 DIS 文本，已决定作为 PHIGS 文本的第四部。

PHIGS 标准与 GKS 标准相比，有以下几个特点：

(1) 结构是 PHIGS 的重要概念，是图形元素及其属性、变换矩阵、结构调用元素等的一个组成单元，是在造型空间中定义的模型数据。结构之间可以通过层次调用产生联系。图 8·3-6 表示了结构间的联系。

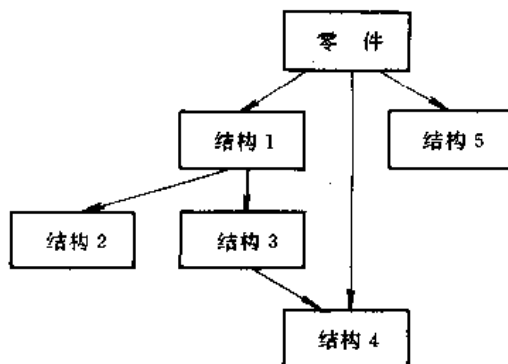


图 8·3-6 PHIGS 结构的层次联系

(2) PHIGS 是具有高度机动性、交互性的图形工具包，能高速描述应用模型，迅速修改模型数据，显示出相应图形。PHIGS 中的结构及其各组成元素需要时均可修改。

(3) PHIGS 定义了五种坐标系。除 GKS 中的用户坐标系 (WC) 及设备坐标系 (DC) 外，还有造型坐标系 (MC, Modeling Coordinate)，观察坐标系 (VC, View Coordinate) 及规格化投影坐标系 (NPC, Normalized Projective Coordinate)。

3 工程分析与优化

工程分析与优化 (CAE) 的范围很广，包括有限元分析、机械运动学分析、机械系统动态分析、热力学及热传导分析、优化设计以及各种面向具体应用问题的工程分析等。本节着重介绍有限元前、后置处理，有限元分析，机械系统动态分析与运动学分析及优化设计方面的内容。

3.1 有限元前、后置处理

前、后置处理指在有限元分析之前对输入数据和信息，以及在有限元分析之后对输出数据和信息的加



工处理。其软件实现广泛采用了CAD技术。

1. 前、后置处理的基本内容 前置处理的基本内容是:

(1) 构造几何模型并划分有限元网格。即生成节点坐标、节点编号、单元编号、单元组合节点号等。

(2) 引入并生成载荷数据、材料数据和边界约束条件数据。

(3) 对以上数据的诊断及编辑修改。

后置处理接受有限元分析产生的大量输出数据,处理的基本内容是:

(1) 数据检索及制表。有选择地抽取结果中有意义的部分,例如临界值以上的数据,并制表输出。

(2) 数据的进一步处理。例如应力数据的处理,为后续设计服务的数据转换等。

(3) 数据的图形表示。如结构载荷图、变形图、应力图、位移、应力和温度等的等值线图、彩色色调图等。

2. 前、后置处理软件的基本功能 前、后置处理软件的类型大致可分为两类:一种是在图形处理软件中根据造型生成的计算机内的几何数据或有限元分析结果数据进行加工处理,实现前、后置处理的基本内容,此种软件处于CAD图形支撑软件的应用层上;另一种是单独为某个有限元分析程序做前、后置处理,连同分析程序一起成为一套完整系统,这种系统既能批处理又能图形编辑,既可在通用计算机上又可在CAD工作站上运行。

前处理软件的基本功能如下:

(1) 用户接口。提供用户命令语言、面向问题语言、数据编辑、菜单驱动,以及与数据库接口等界面。

(2) 模型生成。几何构形、网格生成与拼装、节点编号优化、单元编号及分类等。

(3) 模型局部处理。确定主从、区域、偏心、各种非标准连接及接触边界、节点参数自动标定等。

(4) 诊断显示。数据诊断、错误定性定位等。

(5) 绘图与显示。模型网络显示,交互修改等。

后置处理软件的基本功能如下:

(1) 用户接口。提供批处理、交互使用、与数据库连接等界面。

(2) 结果编辑输出。搜索、检查结果、列表、计算合成量等。

(3) 绘图与显示。多种结果可视化的图形方式、裁剪、消隐和缩放等图形功能。

图8-3-7为前、后置处理图形显示的一个例子。

3. 有限元网格的自动生成 迄今网格自动生成

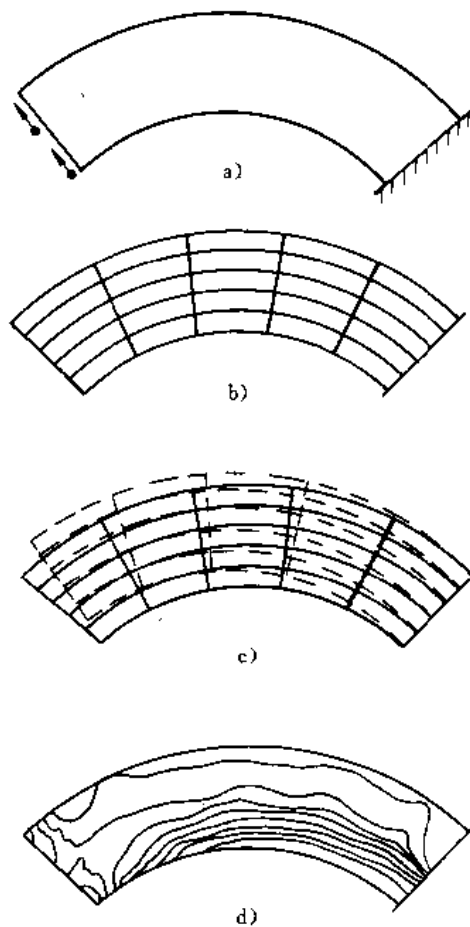


图8-3-7 前、后置处理的图形显示

a) 载荷图 b) 网格图 c) 变形图 d) 主应力等值线图

尚无通用算法,已有方法仅能生成某类或某几类单元,因此实用中大都采取局部网格自动生成与交互控制相结合的方法。网格生成方法可分为如下二种:

(1) 半自动划分。由用户按总体结构-子结构-子块划分为许多规则子块,如三角形、四边形、四面体和六面体等,再对这些子块进行网格自动划分,然后拼装。自动划分算法有映射法、剖分法、代数插值法、差分坐标法及扫描法等。

(2) 全自动划分。对原始的实体模型直接划分。沃登魏拜尔(Wordenweber)1981年提出了元素提取算法;70年代以后提出了域的三角剖分算法以及递归空间算法(四分法、八分法)等。各种算法还在发展中,目前尤其注意由实体模型自动生成有限元网格的算法。

3.2 有限元分析

在过去30多年中,有限元法随着计算机的普及与工程分析的增长,达到了成熟应用的程度。目前通用有



有限元分析软件对固体力学中几乎所有问题，无论是复杂形状或复杂边界、静力与动力、线性与非线性，均能进行结构分析。此外，在流体力学、热学、电磁学及声学等非结构问题中也获得了广泛应用。

1. 有限元分析的步骤 以弹性力学中静力分析的有限元位移法为例，简述分析步骤。

a. 离散化 用有限多个有限大小的单元在有限多个节点上互相连接成离散结构，代替原有的连续弹性体。常见单元见图 8-3-8 和图 8-3-9。每个节点的位移量 $\{\delta\} = [U_i, V_i, W_i]^T$ 为待求的未知量。已知量为各节点坐标值、各单元的节点组成、各单元的弹性参数 (E 及 μ)、各节点所受外载荷 $\{P\}$ 及约束。

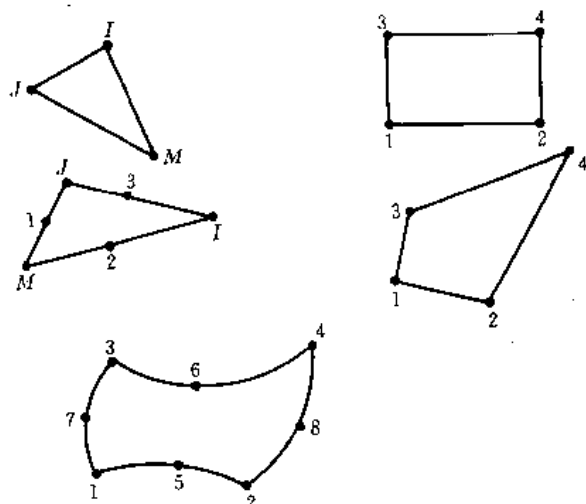


图 8-3-8 常见平面单元

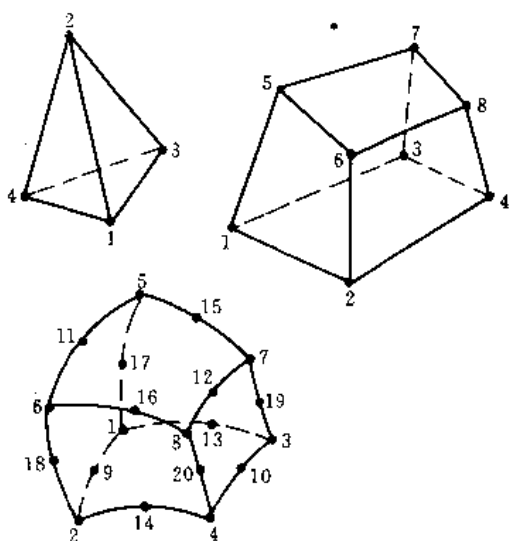


图 8-3-9 常见立体单元

b. 单元分析 主要是求单元刚度矩阵 $[K]^e$ 。

(1) 先确定单元的位移模式 $\{f\} = [N] \{\delta\}^e$, $[N]$ 为形函数矩阵, $\{\delta\}^e$ 为节点位移。

(2) 由几何方程得单元应变 $\{\epsilon\} = [B] \{\delta\}^e$, $[B]$ 为几何矩阵。

(3) 由弹性方程得单元应力 $\{\sigma\} = [D] [B] \{\delta\}^e$, $[D]$ 为弹性矩阵。

(4) 由虚功方程得单元结点力 $\{F\}^e = [K]^e \{\delta\}^e$, $[K]^e$ 为单元刚度矩阵。

$$[K]^e = \iiint_{V^e} [B]^T [D] [B] dx dy dz$$

式中 V^e 为单元体积。

c. 结构的整体分析

(1) 建立结构整体节点平衡方程组

$$[K] \{\delta\} = \{P\} \quad (8-3-1)$$

式中 $[K]$ —— 总刚度矩阵, 由单元刚度矩阵叠加而成, 即 $[K] = \sum [K]^e$;

$\{P\}$ —— 结构整体节点所受外载荷, 为已知;

$\{\delta\}$ —— 结构整体节点待求的位移。

(2) 根据支承条件对平衡方程 (8-3-1) 进行处理。
(3) 求解式 (8-3-1) (为线性方程组), 解得各节点位移 $\{\delta\}$ 。

(4) 由 $\{\sigma\} = [D] [B] \{\delta\}^e$ 求各单元应力。

2. 有限元分析软件 国内外市场上拥有众多的有限元分析软件, 有代表性的大型通用结构分析软件有 NASTRAN、ASKA、ADINA、SAP、ANSYS, 以及我国的 JIGFEX、HAJIF、FEPS 等。表 8-3-2 列出了常见有限元软件的功能。在现在商品化的 CAD/CAM 系统中, 多数具有有限元分析模块, 它与二维绘图、三维几何造型等模块一起构成了功能强大的 CAD 系统。

有限元软件的进一步发展是:

(1) 采用人工智能及专家系统技术, 形成类似“顾问”的系统, 帮助用户确定分析策略, 选择分析路径及对结果的决策判断。

(2) 在完善各特殊领域线性有限元软件的同时, 研制高效率非线性有限元分析软件。

(3) 发展前、后置处理软件, 与专业 CAD 系统相结合。

(4) 完善固体-流体耦合问题的程序开发, 研制有限元-边界元-无限元耦合问题的大型通用结构分析软件。



表 8-3-2 常用有限元软件功能简表

| 比较项目 | | ADINA | ANSYS | ASAS | ASKA | BERSAFE | CUSTOM | DIAL | FLASHZ | MARC | MSC/NASTRAN | NASTRAN | PAFEC | PDA/ANG | SAP7 | TITUS | GTSRUDL | JIGFEX |
|---------|--------|-------|-------|------|------|---------|--------|------|--------|------|-------------|---------|-------|---------|------|-------|---------|--------|
| 单元类型 | 杆、梁元 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 二维平面元 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 三维块体元 | | | | | | | | × | | | | | | | | | |
| | 轴对称环体 | | | | | | | | | | | | | × | | | | |
| | 板弯曲元 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 壳元 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 边界元 | × | × | × | × | × | | | × | × | | × | | | | | | × |
| | 裂纹元 | | | | | | × | | × | × | × | | | × | × | | | × |
| 求解问题 | 弹塑性力学 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 断裂力学 | | | | | | × | | × | | × | × | | × | × | | | × |
| | 流体力学 | | × | | | | | × | × | | × | | | × | × | | | × |
| | 热传导 | | | | | | | × | × | | | × | | | × | | | |
| 前后置处理功能 | 网格自动生成 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 点号自动生成 | | | × | | | | | | × | | | | | | | | |
| | 绘图操作 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 交互式图形 | | | | | | × | | | | | | | | | | | |
| | 子结构解法 | | | | | | | | × | | | | | × | × | | | |

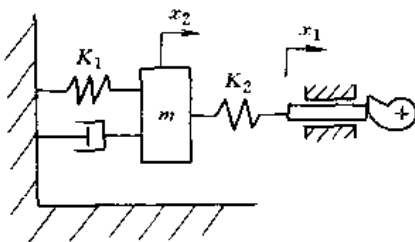
注：表中空白表示有该功能；“×”表示无该功能。

3.3 机械系统动态分析

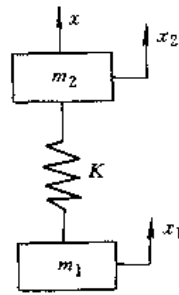
机械系统是指某组具体的、有内在联系的机械构成的总和。可能是一个独立的机械，也可能是一组机构

或部件的总和。图 8-3-10 中：图 a 是顶杆机构的等效系统图；图 b 是一对轮齿啮合的等效系统图；图 c 是平面连杆机构。

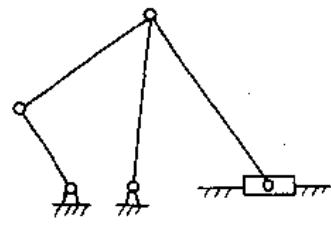
机械系统动态分析的内容包括如下三方面：



a)



b)



c)

图 8-3-10 机械系统举例

a) 顶杆机构 b) 轮齿啮合 c) 平面连杆机构

1. 系统固有特性 如固有频率、振型、阻尼等。计算的目的一方面是为了防止系统共振，另一方面是为计算其他特性打基础。

2. 系统的动态响应 即分析在外来的力干扰或位移干扰等激振作用下系统受迫振动的运动规律、振

幅、振动频率、阻尼的影响等问题。计算的目的是要将系统振动控制在允许的范围，以防过大的动应力所导致的疲劳破坏，过大的位移导致的精度损坏，以及过大的噪声等。并以这些分析为导向寻求具有最佳动态特性的机械结构。



3. 系统动力稳定性 计算产生自激振动的临界条件, 以确保机器的稳定工作。

系统动态分析对设计高精度、高转速、大型重载机械有着特殊重要的意义, 因为原有的静态分析或类比设计已远远不能满足设计此类机械的要求。计算机的应用使动态分析得以实现, 并已成为工程分析的重要组成部分。由于机械系统种类的千变万化以及各不相同的设计目标(例如有过渡过程分析、动平衡分析、机构动力分析、车辆的振动分析等等), 因此, 不可能有一种万能的通用动态分析软件, 而只能做到在某一类或几类问题范围内有一定的通用性。大量的面向对象的专用程序还需由用户不断开发。此类软件一般的开发步骤如下:

(1) 建立数学模型。即推导出一个单元系统、一个子系统、或乃至一个完整机械系统的运动微分方程式。

(2) 选择一种算法。对多自由度系统而言, 使用较多的是矩阵迭代法及传递矩阵法。

(3) 模块详细设计及编程调试。

现以美国 SDRC 公司的 I-DEAS System Dynamics 为例, 说明动态分析软件的一般功能。

(1) 界面与接口。具有内部可编程语言, 菜单驱动, 用户自定义菜单, 标准格式数据交换文件, 与数据库及与其他应用模块的接口。

(2) 建模能力。定义构件的各种方式, 包括模态、子结构、梁、壳单元、刚体及矩阵形式等。定义连接件的各种方式, 包括弹簧-质量-阻尼方式、矩阵方式及轴承方式等。定义系统组成的各种手段, 包括定位、连接及检验等。定义激振, 包括变化的力及位移等。根据以上定义所确定的各种参数, 程序自动建立数学模型。

(3) 解算项目。主要有固有频率、振型、不同激振的响应、连接力及约束力等。

(4) 显示能力。系统结构图, 模型动画、变形及色调图, 响应的各种函数显示, 以及列表等。

3.4 机械系统运动学分析

运动学分析是机械产品设计中进行机械系统和机构分析的重要内容。其任务是根据系统的机械运动关系分析它们的运动特性。目前运动学分析的对象仍以刚体为主要元素, 研究离散系统模型; 也已经开始逐渐加入若干可变形体的元素, 并向离散与连续系统的混合模型发展。

进行机械系统与机构的运动学分析的一般步骤如下: 首先建立运动学分析模型, 然后据此列出运动方程

组并求解, 最后输出分析结果以及针对所研究的问题进行结果分析。

运动学分析模型是一个系统(或机构)的结构简图, 包括零件、连接与约束关系、空间大小、形状、位置以及运动学关系等几何特性。模型建立后, 运动学分析程序便可以根据模型中定义的构件、约束及几何、力学及其他物理特性自动建立位移方程或约束方程, 自动调用数值方法库中的程序去求解机构的位移、速度、加速度等。

运动学分析的常用分析方法有矢量法、回路法、方向余弦矩阵法、基本组法等。

运动学分析软件也需要有前后处理程序。前处理程序主要用于建模; 后处理程序用于将分析结果转换成直观的时域或频域响应曲线, 以方便分析评价, 或与计算机绘图系统相集成成为动态显示机械系统、机构的运动、受力状态图, 或与实体建模系统相集成成为检查运动机构的干涉情况等。

目前, 已有不少通用的运动学分析软件在运行, 如 IBM 公司研制的用于空间连杆机构运动学分析的 KAM 系统和用于平面机构分析的 COMMEND 系统; SDRC 公司的 I-DEAS Mechanism Design 软件则是一个模拟铰接机构复杂运动的综合功能软件。

3.5 优化设计

优化设计是以数学规划论为理论基础, 以计算机为计算工具, 按照设计者预定的优化目标, 在现有工程条件约束下求取最满意和合理设计方案的一种现代设计方法, 是 CAE 技术的重要组成部分。

数学规划是二次大战期间发展起来的一个新的数学分支。依据不同的数学规划形成了不同类型的优化问题, 主要有线性规划与非线性规划问题。此外, 还有几何规划、动态规划、整数规划等。不同的优化类型解决具有不同特点的实际问题。机械优化设计大多属非线性规划问题。优化设计有如下两个关键问题。

1. 数学模型的正确建立 用设计变量、目标函数和约束条件构成设计问题的优化数学模型。表达为

$$\min f(X) \quad X = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T \quad X \in E^n$$

$$S. T. \quad g_i(X) \geq 0 \quad i = 1, 2, \dots, m$$

$$h_j(X) = 0 \quad j = 1, 2, \dots, p \quad p < n$$

式中 X 为设计变量; $f(X)$ 称目标函数, 即优化目标的数学表达式, 为设计变量 X 的函数; $g_i(X)$ 及 $h_j(X)$ 分别为不等式约束和等式约束, 也为 X 的函数, 反映性能或边界约束情况。



2. 解算方法的正确选择 在CAD系统中常备有优化方法程序库。可根据解算问题的性质及各种优化算法的特点,选定某种算法。非线性规划问题的常用优化方法列在表8-3-3中。它们的程序一般能在优化方法库中找到。

表8-3-3 非线性规划问题常用优化方法

| 优化问题 | 一维搜索 | 无约束问题 | 有约束问题 |
|------|------------------|----------------------|----------------|
| 优化方法 | 切线法 (牛顿法) | 坐标轮换法 | 随机试验法 |
| | Fibonacci法 | 最速下降法 | 复合法 |
| | 黄金分割 (0.618)法 | Newton-Raphson法 | 可行方向法 |
| | 二次插值法 | 共轭梯度 (FR)法 | 可变容差法 |
| | 三次插值法 | 共轭方向及改进 (Powell)法 | 广义简约 梯度法 |
| | | 单纯形法 | 罚函数法 (SUMT) |
| | | 变尺度法 (DFP, BFGS) | 约束变尺度法 |
| | | | 拉格朗日乘子法 |
| | | 序列二次规划法 | |

近年来,国内外出现了一些通用优化设计软件包,如国内的《常用优化方法程序库OPB》,这类软件算法先进,数值计算稳定性好。此外,也出现了一些针对具体专业应用问题的优化软件包,如我国的常用机械零部件优化设计软件包等。

优化设计除广泛用在参数优化问题外,现正日益用于结构优化(包括形状优化)及机械系统动态设计优化问题上。结构优化采用了非线性规划与有限元分析相结合的基本方法,其数学模型的一般描述如下:

$$\text{目标函数 } \min f(X, Z, \zeta)$$

$$X = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T \text{ 是设计变量, } Z = [z_1, z_2, \dots, z_m]^T \text{ 是性能变量, } \zeta \text{ 是 } f(X, Z, \zeta) \text{ 的特征值。}$$

可能的约束条件如下:

$$\text{平衡方程 } K(X)Z = F(X)$$

$$\text{几何方程 } K(X)Y = \zeta M(X)Y$$

$$\text{应力约束 } C_s(X, Z) \leq 0$$

$$\text{位移约束 } C_d(Z) \leq 0$$

$$\text{几何边界约束 } C_g(Z) \leq 0$$

$$\text{屈服准则约束 } C_u(\zeta) \leq 0$$

式中 $K(X)$ 为结构刚度矩阵; $F(X)$ 是载荷向量; Y 是相应的特征向量; $M(X)$ 是结构几何矩阵。

优化技术的进一步发展趋势是:发展新的优化方法;引入CAD图形技术;引入专家系统技术使具备咨

询与决策等功能。

4 计算机辅助设计

计算机辅助设计(CAD)是用计算机系统辅助人们对产品或工程进行设计、修改及显示输出的一种设计方法。在CAD中人与计算机密切合作,充分发挥各自的特长。计算机在大量信息存储与检索、快速分析与计算、以及作大量重复工作方面有特殊优点;人则在设计策略逻辑控制、信息组织、以及经验及创造性等方面发挥优势。二者的有机结合必然能提高设计质量,缩短设计周期,降低设计费用。

CAD是一门多学科综合性技术,涉及到图形处理、工程分析、数据管理与数据交换等技术。CAD的应用遍及国民经济各行各业,特别在机械、电子、轻工、土建、水利等部门有着广泛的应用。

4.1 实体造型与参数化特征造型

1. 实体造型与参数化特征造型 实体造型指用计算机系统构造复杂物体,并在计算机内存储完整三维几何信息的一种几何造型技术。实体的表示方法主要有如下二种:

a. 实体的几何构造法(CSG, Constructive Solid Geometry) CSG法构造物体时,由若干简单体素通过几何变换和集合运算(交、并、差等操作)得到。常见的简单体素可预先定义在系统内,包括立方体、圆柱体、圆锥体及球体等。用户也可利用自己定义的二维图形经平移扫描或旋转扫描生成体素参与拼合。形体拼合过程可以用CSG树描述,见图8-3-11。底层叶结点为基本体素或运动变换参数(即图中 P_1 、 P_2 、 P_3 及 ΔX);其余结点为正则化集合算子或运动算子。正则化集合算子有交、并、差三种,分别用符号 \cap^* (或 \times)、 \cup^* (或 $+$)和 $-^*$ 表示;运动算子有平移、旋转等。树根即为拼合所得物体。图8-3-12描述了构造一个机器零件的过程。

CSG法在计算机内存储的是物体CSG树的全部信息,即基本体素的类型及其参数、运动算子及运动参数,以及集合算子。CSG法的优点是存储结构简单,无二义性,形体覆盖域较广。缺点是不能直接产生和存储实体外表的面、边、顶点数据,故不能直接显示物体及生成表面数控加工信息,必须要在内部将CSG的存储信息转换成边界表示的数据。

b. 边界表示法(B-rep, Boundary Representation) 此法视实体为一组封闭的边界表面所包围,



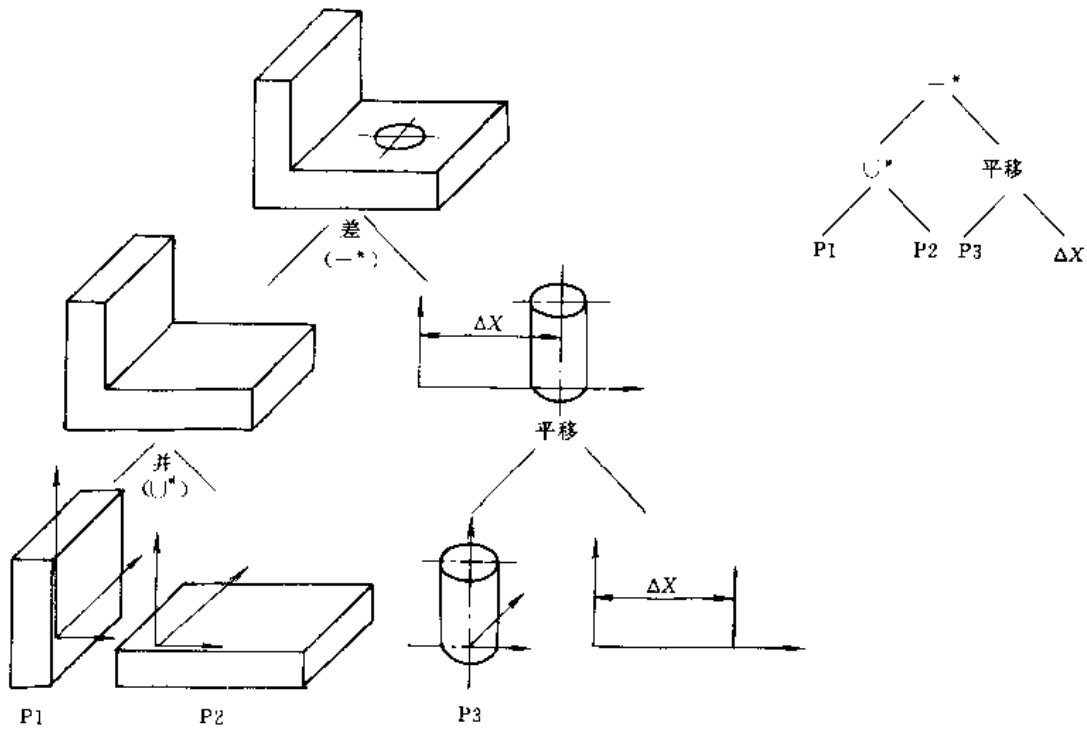


图 8-3-11 形体拼合的 CSG 树

因此可用体、面、边及顶点的几何及拓扑信息来表示实体。图 8-3-13 为一个四面体的 B-rep 数据结构。

几何信息指各顶点的坐标值及各面的数学方程式的系数等。拓扑信息指面-边-顶点的联系关系。具体的数据结构可能互有不同，但一般均由体、面、环、边及顶点各表组成。B-rep 表示的系统在输入界面上常常

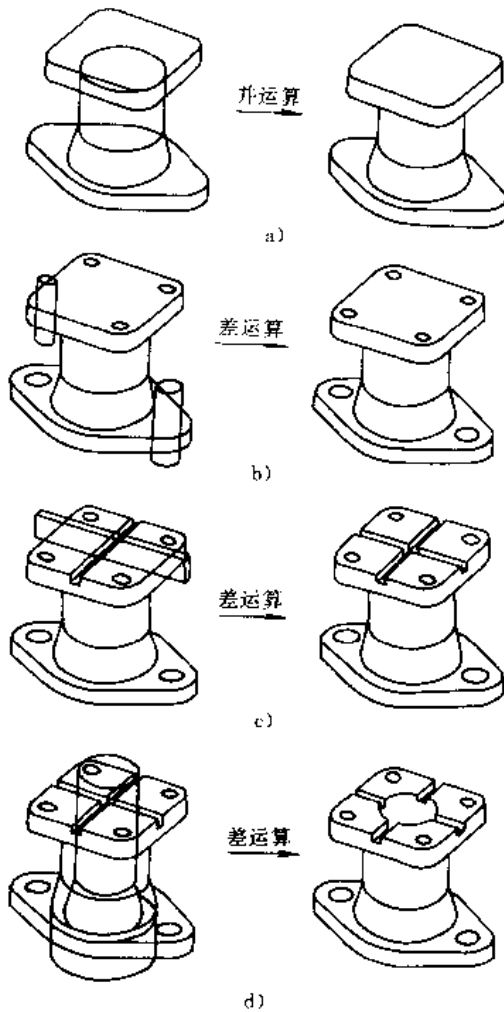


图 8-3-12 CSG 法构造零件的过程

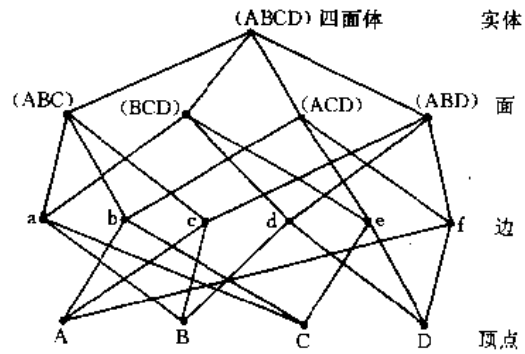
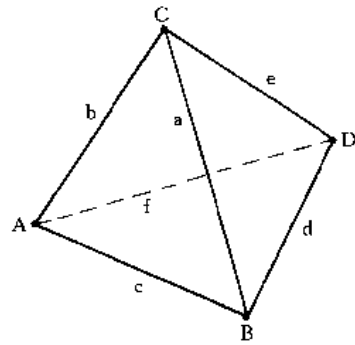


图 3-3-13 四棱锥的 B-rep 数据结构原理

中国美术学院

1992



采用 CSG 法的构形方式,当进行具体拼合运算时,程序内部对数据结构各表及时地进行动态修改,并最终形成新实体的数据存储。二种表示方法在机内的存储及转换常取图 8-3-14 所示方式。

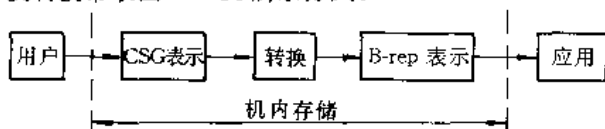


图 8-3-14 CSG 及 B-rep 在机内的存储方式

2. 实体造型的优缺点 实体造型的突出优点是机内真正存储了形体的三维几何与拓扑信息。这使形体体积、面积、重心、惯性矩等的自动计算、隐线隐面消除、有限元网络自动划分、形体截切及碰撞干涉检查、加工表面 NC 代码生成、CAD/CAM 初步集成、动画模拟、逼真图形实现等成为可能,从而使这一技术在 CAD/CAM、模拟仿真、医学、广告、计算机艺术等领域获得了广泛应用。

实体造型的主要缺点是只存储了形体几何形状方面的信息,缺乏产品开发在 CAD/CAPP/CAM 生命周期内所需的全部信息,诸如材料、加工特征、装配、尺寸公差及形位公差、以及表面粗糙度等信息,导致了 CAD/CAPP/CAM 集成的先天困难。此外,在零件造型设计中,采用初级点、线、面或简单体素拼合的方法也不能满足设计、制造对构形的实际要求与工程师的构形设计习惯。

3. 参数化造型 常规的实体造型所建立的几何模型具有确定的形状及大小,一旦建立,即使结构相似但想改变某些形状的尺寸,也只能重新造型。因此,称这些系统为静态造型系统或几何驱动系统(Geometry-Driven System)。

参数化造型使用约束来定义和修改几何模型,约束包括尺寸约束、拓扑约束和工程约束(如应力、性能等),这些约束反映了设计时要考虑的因素。实现参数化的那组参数与这些约束保持一定的关系,初始设计的形体自然要满足这些约束,而当输入那组参数的新值时,也将保持这些约束关系并获得一个新的几何模型。这样设计人员在更新或修改图形时,无需再去为保持那些约束条件而操心,可以真正按照自己的意愿动态地、创造性地进行新产品设计,因此有人称这种系统为动态造型系统。参数化造型系统可分为如下两类:

a. 尺寸驱动系统 尺寸驱动系统亦称参数化造型系统。它不考虑工程约束,只考虑几何约束(尺寸及拓扑)。采用预定义的办法建立图形的几何约束集,指定一组尺寸作为参数与几何约束集相联系,因此改变

尺寸值就能改变图形。

尺寸驱动的几何模型由几何元素、尺寸约束和拓扑约束三部分组成。当修改某一尺寸时,系统自动检索该尺寸在尺寸链中的位置,找到它的起始几何元素和终止几何元素,使它们按新尺寸值进行调整,得到新模型,接着检查所有几何元素是否满足约束,如不满足,则让拓扑约束不变,按尺寸约束递归修改几何模型,直到满足全部约束条件为止。

图 8-3-15a 是驱动前图形,尺寸参数为 A、B;图 b 为修改尺寸值 $A+X$ 后的图形。前后图形拓扑关系不变。

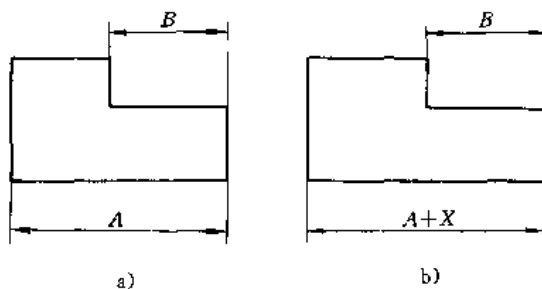


图 8-3-15 图形的尺寸驱动

由上述可知,尺寸驱动一般不能改变图形的拓扑结构。因此,想对一个初始设计作方案上的重大改变是做不到的,但对系列化标准化零件设计以及对原有设计作继承性修改则十分方便。目前所谓的参数化设计系统实际上大多是尺寸驱动系统。

b. 变量设计系统 这类系统考虑了所有的约束,即不仅考虑图形变动而且考虑工程应用的有关约束,从而可表示更广泛的工程设计情况。这种系统更适合于设计人员考虑更高级的设计特征,作出不同设计方案对这些高级特征影响的分析,更适合作方案设计,因此变量设计是一种约束驱动的系统。

变量设计的原理如图 8-3-16 所示。图中几何元素指构成物体的直线、圆等几何因素,几何约束包括尺寸约束及拓扑约束;尺寸值指每次赋给的一组具体值;工程约束指表达设计对象的原理、性能等;约束管理用来确定约束状态,识别约束不足或过约束等问题,约束网络分解可将约束划分为较小方程组,通过联立求解得到每个几何元素特定点(如直线上的两端点)的坐标,从而得到一个具体的几何模型。除了采用代数联立方程求解外,还有采用推理方法的逐步求解。

虽然变量设计系统从理论上讲比尺寸驱动系统或传统造型系统更灵活,更适合于概念设计,但目前还很少使用。原因是求解方程组很困难,使系统不易实现,迄今还没有商品化的三维变量设计系统,有待进一步



的研究。

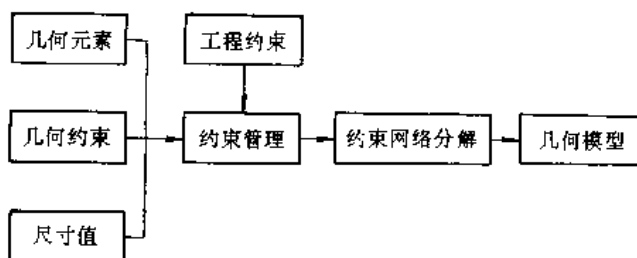


图 8-3-16 变量设计原理框图

4. 参数化特征造型 80年代初研究的特征造型 (Feature-based Modeling) 是以实体模型为基础, 用具有一定设计或加工功能的特征作为造型的基本单元来建立零部件的几何模型。目前尚无统一的特征分类方法, 一般来说有形状特征、材料特征、精度特征、工艺特征等。形状特征有不同的分类方法, 可以将各种槽、凹坑、凸台、孔、壳、壁等作为形状特征, 也可从某类零件出发, 用统计归纳及成组技术的思想制定一套规范化的特征图库, 并以形状特征为载体, 加上精度、工艺、材料等信息进行造型。这种系统的优点是能以工程师所熟悉的方式进行设计, 因此比传统的实体造型有更高的设计效率; 更为重要的是由此所建立的几何模型不仅包括了几何信息, 还包括了工艺加工等信息, 形成了真正符合数据交换规范的产品信息模型, 从而实现了 CAD/CAPP/CAM 的真正集成。

将参数化造型的思想用到特征造型中来, 用尺寸驱动或变量设计的方法定义特征并进行类似的操作, 这样就形成了参数化特征造型。由于特征均采用参数化定义, 因此对形状、尺寸、公差、表面粗糙度等均可随时修改, 最终达到了修改零件的目的。

目前已研制出一些以特征为基础, 具有尺寸驱动功能的参数化造型系统, 有些已经商品化, 如美国 PTC 公司的 Pro/Engineer, 日本东芝公司研究开发中心的 PIGMOD (Parametric and Interactive Geometric Modeler for Mechanical Design) 等。一些早期开发的系统, 如麦克唐纳-道格拉斯咨询系统公司的 UG I, SDRG 公司的 I-DEAS 6.0, 法国 MATRA/DATAVISION 的 EUCLID 等也都引进了参数化尺寸驱动和特征造型的功能。

4.2 计算机辅助几何设计

计算机辅助几何设计 (CAGD, Computer Aided Geometric Design) 运用计算几何的理论来建立形体的数学模型, 并用计算机辅助人们方便灵活地对几何形

体进行描述、分析、修改和设计, 输出的几何数据存储在计算机中, 供后续的 CAD、CAM 或生产管理用。计算几何是由函数逼近论、微分几何、代数几何、计算数学、数控技术等形成的一门边缘学科, 1974 年确认了这门学科的成立。

CAGD 的描述对象是具有曲线曲面的形体。一类是具有自由曲线曲面的复杂形体, 如人体及汽车外形等; 另一类是由各种二次曲线曲面构成的形体, 如回转类零件等。两类形体的再组合可形成更复杂的形体。

CAGD 中描述几何形体的数学方法一般有如下三类:

(1) 60 年代的各种样条函数法, 后发展为参数样条的曲线曲面法及孔斯 (Coons) 曲面法等。它们均能实现对复杂曲面的拟合与插值, 但局部修改性能不好, 也不易控制形状。

(2) 70 年代以逼近论为基础的贝齐尔 (Bezier) 曲线曲面法。采用多边形顶点来定义和控制曲线, 数学模型简单, 几何直观性强, 便于实现人机交互, 但也不具备局部修改性, 逼近性也不理想。

(3) 70 年代中期的 B 样条法。采用 B 特征多边形控制 B 样条曲线, 用 B 特征网格顶点控制 B 样条曲面, 具有优良的局部修改性能, 在逼近、计算复杂性等方面也优于贝齐尔法。70 年代后期进一步提出了非均匀有理 B 样条方法 (NURBS, Non-Uniform Rational B-Spline), 除能方便地表达和控制自由曲线曲面外, 也能精确表达二次曲线曲面, 从而实现了数学模型的统一表达, 使 NURBS 成为 80 年代曲线曲面设计的主流方法。

CAGD 的软件种类繁多, 但不外乎有线框模型 (Wireframe model)、表面模型 (Surface Model) 及实体模型 (Solid Model) 三类。例如美国 SDRG 公司的 I-DEAS Solid Surface Design 就是一个基于 NURBS 的实体曲面设计系统, 擅长自由曲面设计。所采用的基本方法是通过空间的一组三维曲线蒙上一张光滑的表皮来完成造型。主要功能有: 在沿三维迹线 (准线) 的各截面轮廓线上蒙皮, 在网格曲线上蒙皮, 在网格点上蒙皮; 用边界曲线定义曲面, 以及各种删除、增加、修改等操作手段。

CAGD 广泛应用在各种工程设计和科学实验领域中。除机械外形设计中的飞机、船舶、汽车、叶片及模具型腔等外, 在土建及水利工程中的壳体及坝体设计, 轻工业中的服装、鞋类设计, 以及各种物理场描述 (如应力、应变、温度、压力场等) 中都有广泛应用。



4.3 人工智能与专家系统技术的应用

工程设计包括二类工作：一种为数值计算型工作，包括计算、分析、绘图等，属于传统CAD技术；另一种为符号推理型工作，包括方案设计、评价、决策、结构设计等。后者需引入人工智能与专家系统技术来解决此类问题。因此，现代的CAD技术应该是传统CAD技术与专家系统技术的有机结合，即发展为智能CAD技术，这是CAD技术发展的必然趋势。

专家系统(ES, Expert System)是指在特定领域中，具有专家工作水平的计算机程序。它的基本结构见图8-3-17。图8-3-17中各模块简述如下：

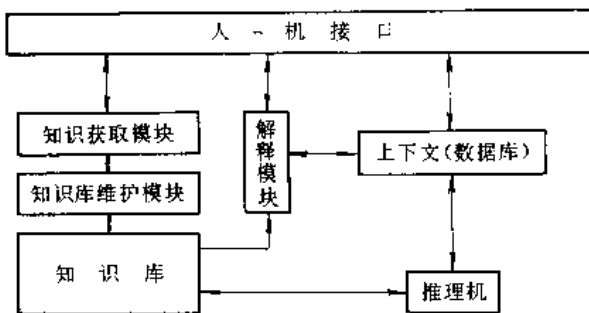


图 8-3-17 专家系统的基本结构

(1) 知识库。存放对象的领域知识。机械设计中知识大都用产生式规则、框架或其他综合法来表示。

(2) 上下文。为一工作存储区，类似数据库，用来动态地存入原始数据及事实，以及中间和结果信息。

(3) 推理机。在一定的控制策略下针对上下文中信息，选取知识库中知识进行推理，以求解问题的结果。常分精确与不精确推理二大类。每类又可分为：数据驱动的正向推理；目标驱动的反向推理；正、反向的混合推理或其它改进的推理方式。

(4) 知识获取模块。用人工方式，半自动或自动方式获取知识。

(5) 知识库维护模块。对知识库进行检查、调整及增、删、改等维护性操作。

(6) 解释模块。根据所记录的推理过程，回答用户提问，说明求解状态。

(7) 人机接口。负责有关信息的输入与输出，与数据库或与其他外部系统的连接，以及提供友好的操作界面。

CAD中相当一部分工作需用设计型ES来求解。设计型ES通常有以下特点：

(1) 时常采用“设计—评价—再设计”的过程决策模型。

(2) 多种资源的密切结合以支持整个设计决策，包括规划资源、设计资源、数据资源、分析资源、图形资源及评价资源等。

(3) 需解决某些特殊困难问题，包括决策空间大、多目标及解的不唯一性、知识多样性及模糊性、设计子任务与设计目标的相关性，以及接口技术的综合性等。

因此设计型ES的开发存在不少困难，相对其他类型ES来说，还不够成熟。

目前智能化CAD系统发展极为迅速并试图解决许多应用问题，例如产品或部件的方案设计，某些机器零件的详细设计（如轴、齿轮等），有限元分析及优化设计中的决策与咨询，设计系统中的决策支持，设计为了制造(DFM, Design For Manufacturing)，设计为了装配(DFA, Design For Assembling)，参数化几何模型生成，成组技术零件识别与编码，产品报价等等。但要达到实用化水平目前还有不少距离。

近年来，针对建造某种类型ES（如咨询、诊断等）出现了大批商用开发工具，这对减少开发费用，缩短开发周期起了积极作用。但属于设计型ES的开发工具依然寥寥无几，还需进一步研究与开发。

4.4 面向对象的应用系统

这种系统一般由硬件、支撑软件及应用软件组成。系统可大可小，但都应进行周密的设计，以期发挥最大的投资效益。

1. 应用系统设计需考虑的问题

(1) 明确系统需求。即明确领域对象，解决问题的深度，具体目标及关键技术。

(2) 近期目标与长远目标。由当前约束条件(人力、资金、技术水平等)制定近期目标；考虑竞争与发展制定长远目标。还需在系统的针对性与通用性、高水平与实用性间作出适当平衡。

(3) 集成要求。要考虑数据库、网络、数据交换标准及各种接口问题。

2. 应用系统设计的方法与步骤

(1) 系统定义阶段(可行性论证)。采取自顶向下的目标驱动思想进行需求分析，明确要求与约束，确定系统目标与功能、技术方案与路线、关键技术、初步实施计划、资金人力概况、效益分析等。

(2) 系统总体设计阶段

1) 建立系统功能模型及信息模型。例如，采用IDEF方法，用IDEF0图描述系统的功能活动及联系，用IDEF1图描述系统信息及联系。



2) 建立系统实现模型。提出设备配置、订货清单、投资预算、课题分解及实施计划等。

3) 提出集成技术的实施方案。包括对数据库、网络、数据交换标准及各种接口的分析研究。

(3)详细设计阶段。以分解的课题为单元进行模块划分、设计与编码。

3. 应用系统硬、软件选配原则

(1) 技术的先进性与使用的针对性之间取得适当平衡。

(2) 硬、软件必须配套与集成。要符合流行的工业标准，防止出现孤岛，力求好的性能价格比。

(3) 良好的开放性 & 二次开发性。

(4) 可靠性及可维护性。要运行可靠，售后服务及时，综合经济效益好等。

4. 举例

图 8-3-18 为建在清华大学内的国家 CIMS 工程研究中心(简称 CIMS-ERC)CAD 子系统的实现模型。每个流程框右边为自行开发的应用程序或接口程序，

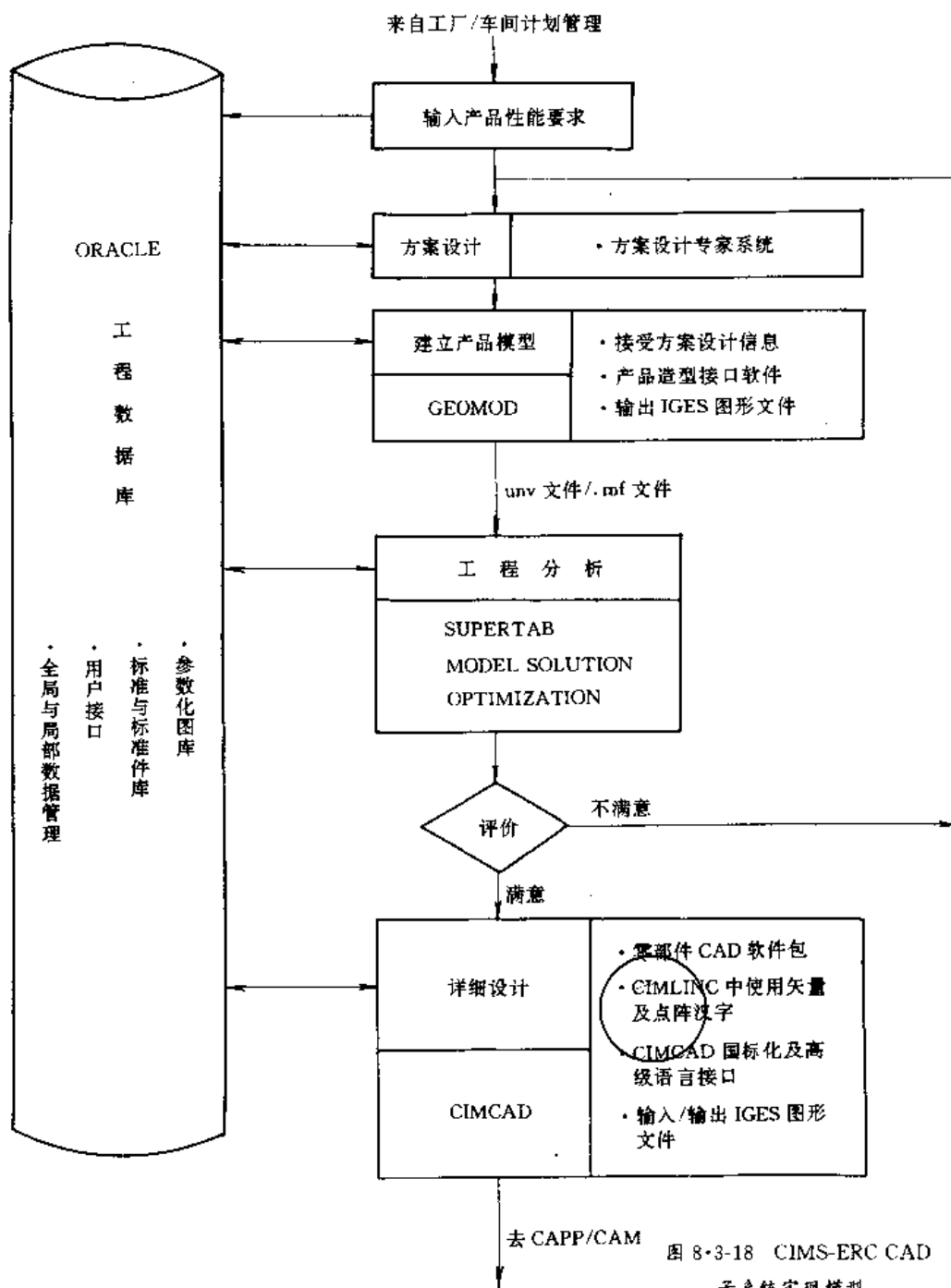


图 8-3-18 CIMS-ERC CAD 子系统实现模型



左边(英语名称)为购得的支撑软件。

该子系统的功能是:

(1)用专家系统进行产品的方案设计,确定外形尺寸、结构布置及主要设计参数。以此为基础在三维造型系统中设计三维部件,并对主要零件进行三维实体造型、有限元分析、优化设计。通过设计—评价—再设计的有限次迭代获得满意的设计结果,并输出 IGES 或 DXF 图形文件。

(2)利用二维图形系统产生工程图纸。首先读入三维系统产生的 IGES 或 DXF 文件,再利用国标化及汉字等扩充功能的交互系统完成工程图样的详细设计。

(3)实现信息集成。依靠 ORACLE 数据库实现 CAD 各部分信息的传递与共享;依靠 IGES 数据转换实现不同 CAD 系统(I-DEAS 与 CIMLINC 系统)间图形数据的传输;通过专用接口向 CAPP 及 CAM 输出所需几何及工艺信息,实现了 CAD/CAPP/CAM 的集成。

5 计算机辅助工艺过程设计

5.1 计算机辅助设计、工艺过程设计和制造三者之间的关系和界面

在计算机集成制造系统(CIMS)中,计算机辅助设计(CAD)是计算机辅助工艺过程设计(CAPP)的输入,其注意力主要是在机械零件的设计上,涉及机械零件的绘图及几何造型。它的输出主要是零件的信息,有几何信息(图形)和加工工艺信息(材料、热处理、

批量等)。

计算机辅助工艺过程设计,就是利用计算机来进行制订零件的机械加工工艺过程。它的输入是零件信息,有两种情况:一是由计算机辅助设计直接输入;另一是根据零件图纸通过人机交互输入。前者显然易于实现信息和功能的集成。计算机辅助工艺过程设计的输出主要有零件的工艺过程和工序内容,其中包括:

- (1) 定位夹紧选择;
- (2) 加工方法选择;
- (3) 加工顺序安排;
- (4) 通用刀具和夹具选择;
- (5) 机床选择;
- (6) 加工参数(切削用量)确定;
- (7) 专用刀具和夹具设计方案的提出;
- (8) 时间定额计算;
- (9) 其他。

计算机辅助制造(CAM)从广义来说,是通过一个计算机分级结构网络来监测、控制和管理制造过程各个阶段的工作,它包括生产管理与控制、工程分析与设计、财会与供销等方面。在这里是从狭义上说,主要指数控加工。它的输入是零件的工艺过程和工序内容,其输出是刀位文件和数控机床的数控程序。刀位文件表示了刀具运动轨迹,与夹具、工件在一起可进行加工仿真以防运动干涉,同时又是编制数控程序的根据。根据刀位文件,通过后置处理程序就可获得某数控机床的加工程序。

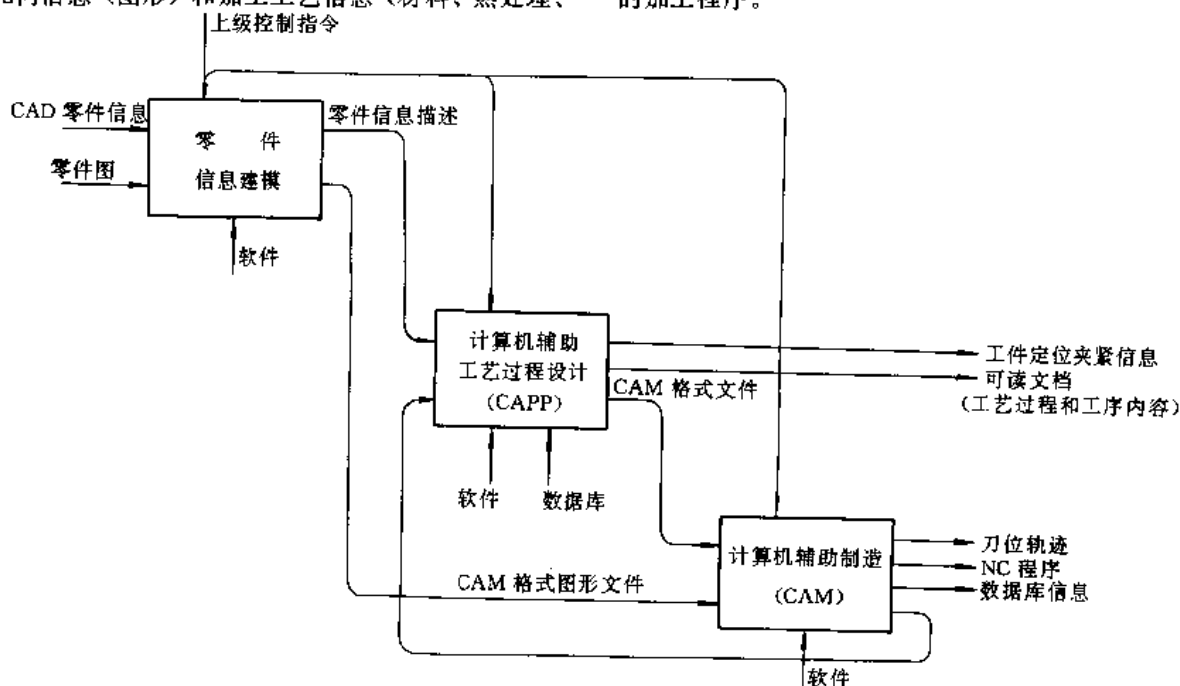


图 8-3-19 计算机辅助设计、工艺过程设计和制造 (CAD/CAPP/CAM) 间的集成关系



工艺过程设计是设计与制造之间的桥梁，设计信息只能通过工艺过程设计才能形成制造信息，因此在集成制造系统中，自动化的工艺过程设计是一个关键，占有很重要的地位。图 8-3-19 表示了计算机辅助设计、工艺过程设计和制造三者之间的集成关系。其中，计算机辅助设计只提出了零件信息建模。该图是采用 IDEF0 方法绘制的功能模块图，根据需求分析表达了各模块之间功能关系。

图 8-3-20 是一个在集成制造环境下的计算机辅助工艺过程设计系统结构框图。图中还表示出它与计算机辅助制造的关系。该工艺过程设计系统的输入有两种方案，其输出可生成可读工艺文件和 CAM 格式文件，并可存入共享数据库中，以供其他环节调用。

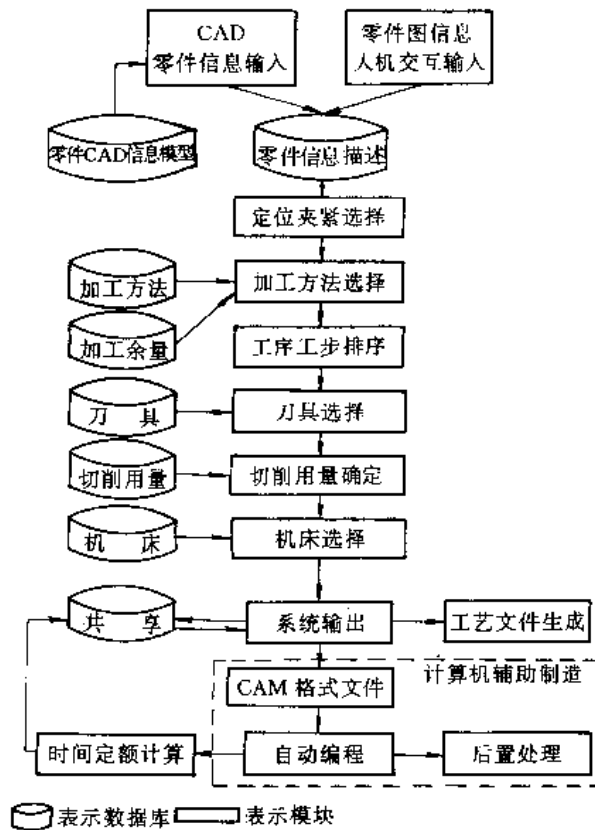


图 8-3-20 在集成制造环境下的计算机辅助工艺过程设计 (CAPP) 系统结构框图

5.2 计算机辅助成组技术

1. 成组工艺的基本原理 成组技术是一门涉及多种学科的综合技术，它是柔性制造系统的基础，其核心是成组工艺。成组工艺与计算机技术和数控技术相结合，就形成了成组技术。

成组工艺是把尺寸、形状、工艺相近似的零件组成一个零件族（组），按零件族制订工艺进行制造，这样

就扩大了批量，减少了品种，便于采用高效率的生产方法，从而提高了劳动生产率，为多品种、小批量生产的经济效益提高开辟了一条道路。图 8-3-21 所示为成组工艺的基本原理。

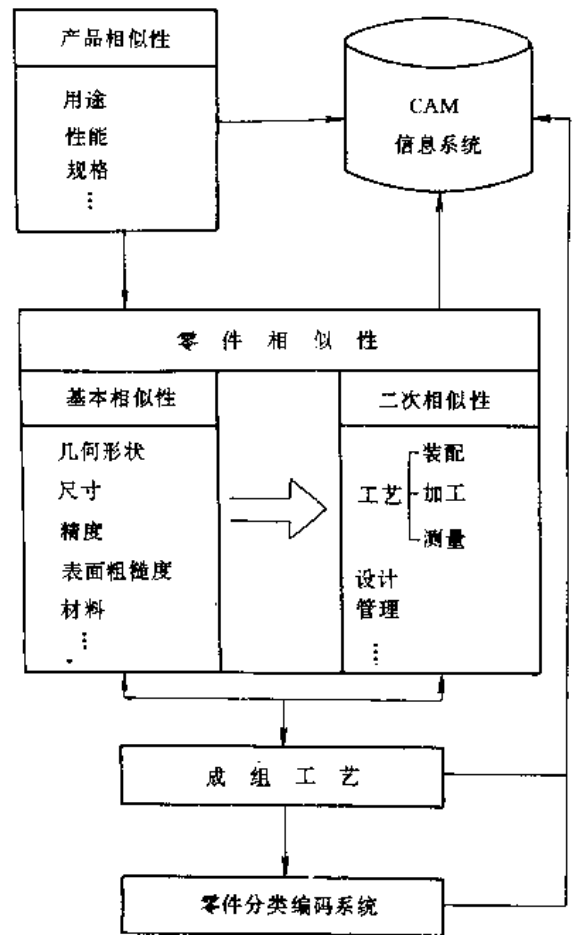


图 8-3-21 成组工艺的基本原理

零件在几何形状、尺寸、功能要素、精度、材料等方面的相似性称为基本相似性；以基本相似性为基础，在制造、装配等生产、经营、管理方面所导出的相似性，称为二次相似性或派生相似性。成组技术就是揭示和利用这些基本相似性和二次相似性，使工业企业得到统一的数据和信息，获得经济效益，并为建成集成信息系统打下基础。

图 8-3-22 所示的 16 个盘类零件在几何形状和功能要素方面有一定的相似性，可形成一个零件族，并设计一个能集中全族功能要素的复合零件，制定该复合零件的工艺过程，可根据复合零件的工艺过程组织全族零件的生产。

成组技术在产品设计、制造工艺和生产组织管理等方面有广泛的应用和良好的效果。用成组技术指导



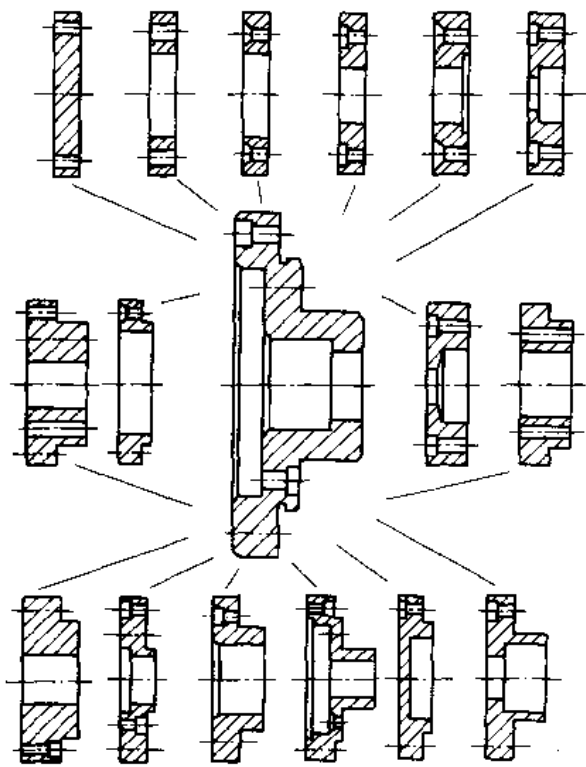


图 8-3-22 成组零件族及其复合零件

产品设计可使设计合理化、标准化, 加快设计速度, 减少工艺准备工作和降低制造成本。成组技术用于制造工艺方面最为广泛, 也可根据相近似的零件所形成的零件族, 设计各零件族的成组工序, 并由成组工序集成成组工艺过程; 在成组工序中可采用同一设备、成组夹具、成组刀具、成组量具等; 这可大大缩减工艺准备工作时间, 实现工艺设计合理化和标准化, 降低制造费用、提高工效。在生产系统中全面实施成组技术, 可建

立成组工段、成组车间, 采用成组生产计划及作业计划, 形成成组生产管理系统, 简化生产计划和管理工作, 减少在制品及库存, 改进质量管理工作。

成组工艺的实施步骤如下:

- (1) 产品零件按零件分类编码系统进行分组分类。
- (2) 制订零件的成组加工工艺过程, 可应用计算机辅助编制零件加工工艺。
- (3) 设计成组工艺装备, 如成组夹具、成组刀具、成组量具等。
- (4) 组织成组加工生产线, 设计输送装置、装卸装置、仓库等。

2. 零件的分类编码系统

(1) 零件分类编码的基本原理。每个零件都有识别码, 它就是零件的件号或图号, 零件的识别码是唯一的。零件的分类码是推行成组技术时才提出的。零件的分类是根据其特征来进行的, 即结构特征(几何形状、尺寸大小、结构类型、毛坯类型等)和工艺特征(工艺过程、加工方法、夹具、使用的机床等)。

(2) 分类系统。零件的分类系统可分为多级和单级两大类。多级分类中又有链式、树式和混合式三种结构, 如图 8-3-23 所示, 混合式是链式和树式的混合。链式结构中, 系统各横向分类环节之间彼此完全独立, 是一种独立环节的分类系统。树式结构中, 系统内相邻横向分类环节之间互相关联, 形成从属关系, 是一种关联环节的分类系统。

在分类编码系统中, 一般需要描述的信息, 如表 8-3-4 所示。

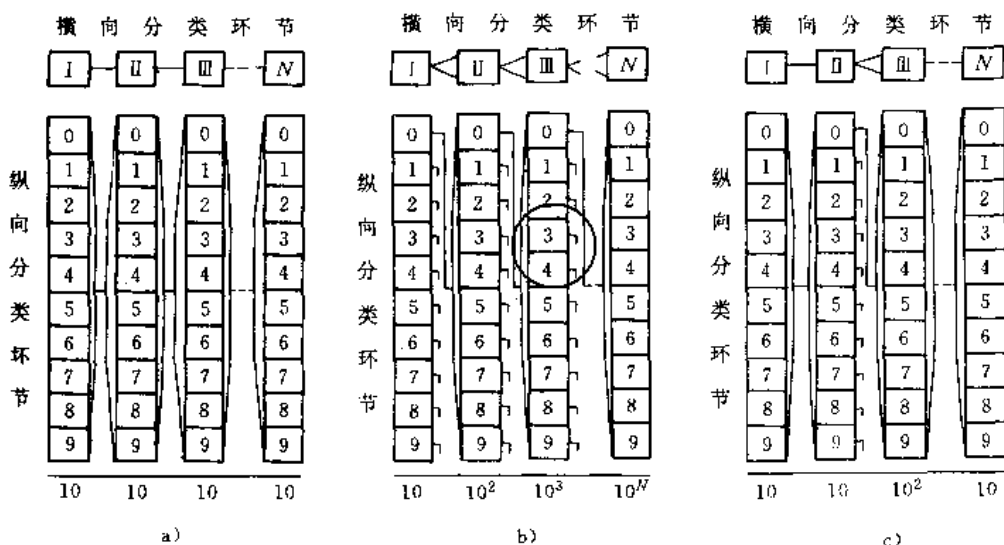


图 8-3-23 成组工艺多级分类系统

a) 链式结构 b) 树式结构 c) 混合式结构



表 8-3-4 分类编码系统需要描述的信息

| 码 | | 位 | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---------|-----------|-------------------|---------|---------|---------|-----|-----|-----|-----|---------|---------|-----|---------|---------|-----|-------|-----|---------|
| 主 | | 辅 助 码 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 功 能 | 形 状 | 主要表面 (内部、外部) 形状要素 | | | | | | | | | | | 工 艺 要 素 | | | | | |
| 回 转 体 | 单 轴 线 | 尺 寸 和 比 例 | 外 圆 | 孔 及 孔 系 | 键 槽 和 槽 | 螺 纹 | 齿 轮 | 花 键 | 偏 心 | 锥 和 成 形 | 非 圆 截 面 | 材 料 | 毛 坯 形 状 | 主 要 尺 寸 | 精 度 | 热 处 理 | 批 量 | 时 间 定 额 |
| | 多 轴 线 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 非 回 转 体 | 尺 寸 和 比 例 | 平 面 | 孔 及 孔 系 | 键 槽 和 槽 | 螺 纹 | 齿 轮 | 花 键 | 锥 体 | | | | | | | | | | |

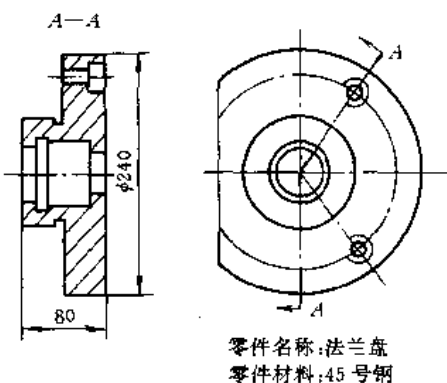
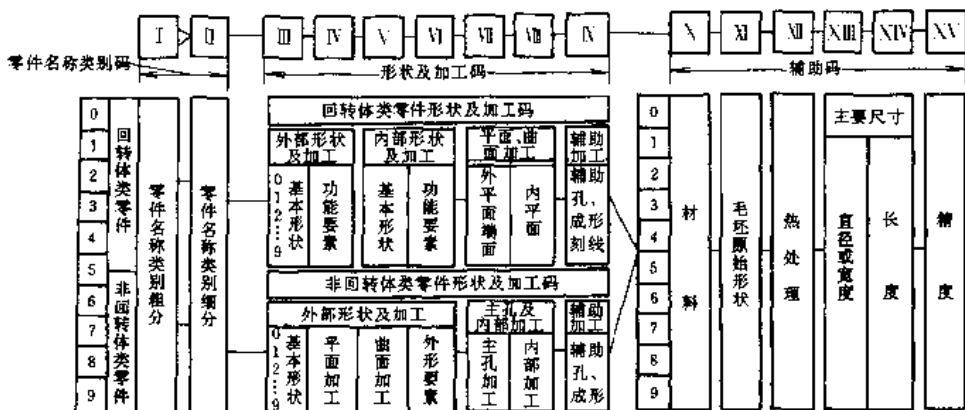
当前,国内外零件分类编码系统非常多,常用的有德国的 Achen 工业大学 OPITZ 系统、日本通产省机械研究所的 KK-3 系统和中国机械工业部的 JLBM-1 系统等。JLBM-1 系统是一个由零件名称类别码、形状及加工码、辅助码所组成的 15 位分类编码系统。图 8-3-24 为其基本结构及零件编码示例。

3. 零件分类成组方法 零件分类成组方法主要有视检法、生产流程分析法、编码分类法等几种。

(1) 视检法。这是由有生产实践经验的技术人员根据个人的经验,把具有相似特征属性的零件归为一类。

(2) 生产流程分析法 (PFA, Production Flow Analysis)。该方法是以零件的加工工艺流程为依据,通过分析,把工艺过程相似的零件归为一类,形成加工族,其具体的分类成组方法有:核心机床法、顺序分枝法、聚类分析法等。

(3) 编码分类法。编码分类是根据零件编码相同来



| 码位 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
|-----|-------------------|--------------|---------------|-----------|----------------|-------------|-------------|--------|--------------|---------|-----------|--------|----------------------------------------|---------------------------------------|------------|
| 码域 | 0 | 2 | 1 | 0 | E | 1 | 1 | 0 | 1 | 2 | 6 | 0 | 5 | 1 | 3 |
| 注 释 | 名称类别别粗分: 回转体类、轮盘类 | 名称类别别细分: 法兰盘 | 外部基本形状: 单向往台阶 | 外部功能要素: 无 | 内部基本形状: 双向台阶通孔 | 内部功能要素: 有环槽 | 外平面端面: 单一平面 | 内平面: 无 | 非同轴线孔: 均布轴向孔 | 材料: 普通钢 | 毛坯原始形状: 无 | 热处理: 无 | 主要尺寸 (直径): $D > 160 \sim 400\text{mm}$ | 主要尺寸 (长度): $L > 50 \sim 120\text{mm}$ | 精度: 内外圆与平面 |

图 8-3-24 零件分类编码系统

a) 基本结构 b) 零件图 c) 零件编码

这是公司制作请尊重版权



进行分类,它有特征码位法、码域法和特征位码域法等。

4. 成组工艺过程设计 成组工艺过程设计归纳起来,基本上有如下两种方法:

(1) 复合零件法。在一个零件族中,选择或设计一个能包含该族零件的全部加工表面要素的零件,这个零件就是复合零件,或称之为样件(见图8·3-22)。复合零件的工艺过程就是这族零件的成组工艺过程。

(2) 复合工艺过程法。零件分类成组后,在一个零件族中,根据每个零件的工艺过程,制订一个能包含全部零件加工工序的最长工艺过程,即为成组工艺过程。

5·3 零件信息描述和转换

1. 零件信息描述的要求和内容 输入零件信息是进行计算机辅助工艺过程设计的第一步,零件信息描述是计算机辅助工艺过程设计的基础和关键问题。

零件信息描述的准确性、科学性和完整性将直接影响所设计的工艺过程的质量和可靠性。因此,对零件信息描述提出以下要求:

(1) 信息描述要准确、完整;

(2) 信息描述要易于被工程技术人员理解和掌握,并易于被计算机接受和处理;

(3) 信息描述系统必须考虑计算机辅助设计、计算机辅助工艺设计、计算机辅助制造等多方面的要求。

零件信息描述的内容包括两个方面,即几何信息和工艺信息。几何信息是指几何形状和尺寸,即图形,而工艺信息是指毛坯特征、材料、加工精度和表面粗糙度、热处理等技术要求。要有上述两方面的信息,才能设计出零件的工艺过程。

2. 零件信息描述方法 零件信息描述方法很多,从描述零件的组成结构上来看,有分类法、形体法、型面法等;从所用的描述工具来看,有编码描述、语言描述、数学描述等。同一种结构可用不同的描述工具,可根据具体情况选择。

a. 零件的分类编码描述法 即代码描述法。零件的分类是根据特征属性的异同将零件分为不同组别,编码是用顺序排列的字符对零件的信息进行标识描述。零件的分类编码与成组技术是密切相关的,借助于分类编码系统使零件得到分类码,它反映出零件的名称、功能、结构、形状、工艺等信息。零件信息的分类编码描述主要是根据其几何特征和工艺特征。图8·3-24b中所示的零件,用JLBM-1分类编码系统来描述,其编码及各码位的意义如图8·3-24c所示。为便于

用计算机对零件的特征数据进行处理,可将零件分类代码转换为特征矩阵形式,图8·3-25就是图8·3-24所示同一零件的特征矩阵,先将零件代码转换为二维数组,然后再列成矩阵形式。

| 码域 | 码 位 | | | | | | | | | | | | | | |
|----|-----|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
| 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| 2 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

图8·3-25 零件特征矩阵

b. 零件的型面描述法 型面又称表面元素。任何零件都是由若干个型面按一定的关系组合而成,每一种型面可用一组特征参数描述,并对应一组加工方法。将组成零件的各型面逐个地按一定顺序输入到计算机中,就可以描述出整个零件。

为了有效地对零件进行描述,许多型面描述系统采用特征分层结构,将型面分成基本型面和组合型面(或称复合型面),也有将型面分成为主型面和辅助型面。型面的描述可采用编码、语言、数学等形式。

型面单元的划分都是同时考虑零件的几何结构特征和工艺特征两个方面,而不是纯几何的划分,因此一个型面单元可以是单一几何表面,也可以是组合表面。型面单元的具体划分,各系统差异可能较大。

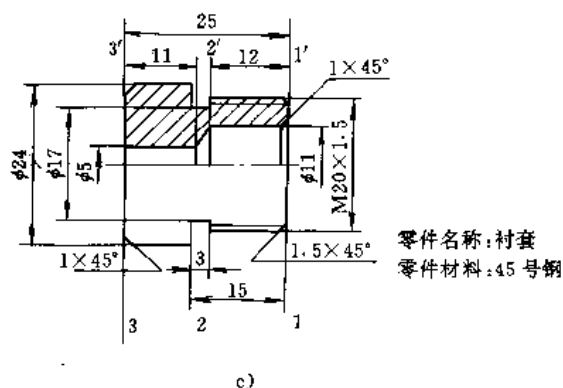
现介绍如下几种典型的型面描述系统:

(1) 零件的型面编码描述。编码被广泛应用于回转体及非回转体零件的型面描述,有些系统把外圆柱表面和内圆柱表面这两类型面划为主型面,而把位于主型面上的螺纹、沟槽、倒角、圆弧等型面划为辅助型面。图8·3-26表示了部分主型面类型及其编码、部分辅助型面及其编码和示例零件。在编码时,通过垂直于该零件轴向各端面的截面划分为若干个单独区段,各区段只有一种直径尺寸和同一精度及表面粗糙度要求。各截面位置称为界线,内外界线的编号是从零件最右端开始,分别用1, 2, 3和1', 2', 3', 标注。可见该零件有两个外圆柱表面和两个内圆柱表面共四个主型面,还有位于主型面上的螺纹、沟槽和两处倒角共四个辅助型面。



| 主型面及其编码 | | | 辅助型面及其编码 | | |
|---------|------|----|----------|------|-----|
| 编码 | 型面名称 | 简图 | 编码 | 型面名称 | 简图 |
| 10 | 圆外表面 | | 130 | 沟槽 | |
| | 柱内表面 | | | 150 | 倒角 |
| | | | 170 | | 螺纹制 |

a) b)



c)

图 8-3-26 零件的型面编码系统

a) 主型面及其编码 b) 辅助型面及其编码 c) 示例零件

(2) 零件的型面语言描述。某些型面描述系统将零件的型面划分为基本型面和组合型面。各组合型面皆由基本型面所组成。

各型面特征采用大量系统字以近似语言的方式进行表达,即用谓词的形式来进行具体描述。主要的谓词有特征谓词和关系谓词两个。

特征谓词: 用来描述基本型面, 其数据形式为:

feature (Pn, Nf, Fea, List)

其中 Pn——零件编号;

Nf——此型面在本零件中的编号;

Fea——型面类型 (如外圆柱面、内圆柱面、通螺纹孔等);

List——型面具体数据。

关系谓词: 用来描述组合型面、位置尺寸和形位公差, 如线性尺寸、角度尺寸、圆度、平面度、垂直度、平行度等, 其数据形式为:

relation (Pn, Type, List)

其中 Type——类型, 即组合型面类型;

List——组合型面具体数据, 如线性尺寸、角度尺寸、位置公差、形状公差等。

表 8-3-5 表示了用谓词描述的型面。

(3) 零件的型面数学描述。数学描述法很多, 用顶点表示组成零件的型面, 用边表示两个相邻型面的连接, 边上的值表示连接情况; 再在相应顶点上增加辅助型面, 用虚线相连, 这就是用图论方法来描述零件, 图 8-3-27 为用图论方法描述零件的例子, 图 b 为零件图, 零件各表面均用图 a 所示的型面符号表示; 图 c 为各表面之间的关系, 如平面 P₂ 与外圆柱面 C₂ 在零件体内的夹角为 270°; 图 d 为该零件轴向尺寸有向图, 图中以表面为顶点, 以尺寸为边; 图 e 为图 d 的尺寸关联矩阵。零件轴向尺寸也可用无向图表示。

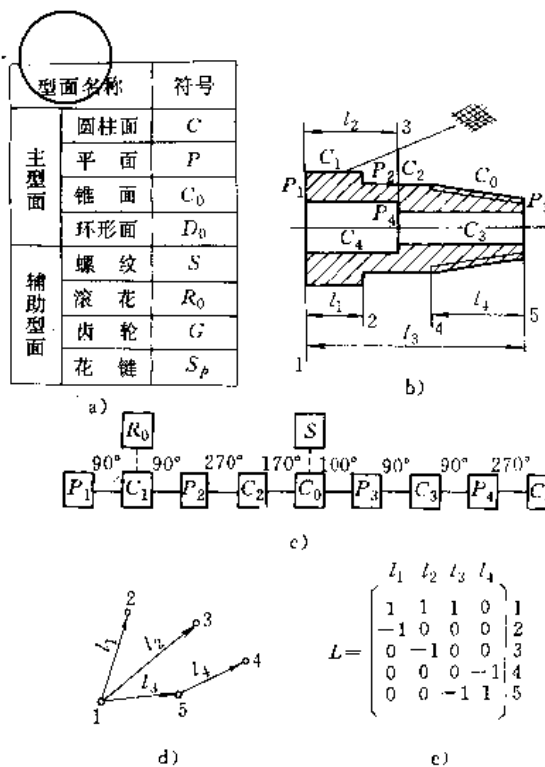


图 8-3-27 用图论方法描述零件

a) 型面及其符号 b) 零件图 c) 图论描述

d) 尺寸有向图 e) 尺寸关联矩阵

c. 零件的形体描述法 形体描述比较理想, 它是实体造型方法, 易于实现计算机辅助设计、工艺过程设计和制造之间的集成。零件的形体描述法有如下两种:

(1) 零件的体素组合描述。体素又称体元素。零件总可以划分为许多体素, 将各种体素描述出来, 并说明其间的相对位置关系, 便可描绘出整个零件。

首先要设计出基本体素, 每种体素都用体素语句进行定义, 其内容是描述体素的形状和尺寸。常用的基本体素有立方体、圆柱体、圆锥体, 楔体、球等。

体素语句表示如下:



表 8-3-5 用谓词描述的型面

| 基本型面 | | | 组合型面 | | |
|------|-------|----|------|------------|----|
| 型面名称 | | 简图 | 型面名称 | | 简图 |
| 平面 | 主平面 | | 槽与导轨 | 矩形 | |
| | 子平面 | | | T形 | |
| 圆柱面 | 内 | | | V形 | |
| | 外 | | | 燕尾形 | |
| 螺纹孔 | 通 | | | 圆周均布孔或均布螺孔 | |
| | 盲 | | | | |
| 基本孔 | 无倒角通孔 | | 封闭内腔 | | |
| | 盲孔 | | | | |
| | 圆锥孔 | | | | |
| 组合孔 | | | | | |

Statement/ $\pm X, \pm Y, \pm Z$

其中 Statement——体素名称;

$\pm X, \pm Y, \pm Z$ ——坐标尺寸及方向。

为了进行体素的组合, 还需要下列三种语句:

1) 坐标转换语句。因为每个基本体素的尺寸是按自己的坐标系标注的, 组合时需要转换坐标。坐标转换语句, 用“TRANSF”表示:

TRANSF/ $\pm X, \pm Y, \pm Z$

其中 $\pm X, \pm Y, \pm Z$ ——转换后的坐标原点坐标。

2) 体素组合语句。用“SOLID”表示, 其中用

“PLUS”表示增添体素, “MINUS”表示去除体素。

3) 参考基准语句。说明坐标系基准点的位置, 用“REF”表示。

表 8-3-6 列举了一个零件的体素组合过程, 零件是立方体 K , 它是立方体 K_1, K_2, K_3, K_4 的代数, $K = K_1 - K_2 - K_3 + K_4$, 由于 K_1, K_2, K_3, K_4 的坐标原点分别为 M_1, M_2, M_3, M_4 , 所以在进行代数求和时, 有时要进行坐标转换。例中 K_2, K_3 在 Z 向相邻, Z 向坐标原点均取 M_2 ; 而 K_1, K_4 在 X 向相邻, X 向坐标原点均取 M_1 。



表 8·3-6 一个零件的体素组合过程

| 零件图 | 立方体体素的语句结构 | |
|--------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| | 语句结构 | 示 例 |
| | <p>PRIREC/ $\pm X \pm Y \pm Z$</p> <p>立方体</p> <p>棱边在 $\begin{matrix} X \\ Y \\ Z \end{matrix}$</p> <p>坐标上的长度</p> | <p>$K_i = \text{PRIREC} / -25, 28, -33$</p> |
| 体素组合过程 | 语句描述 | 注 释 |
| | <p>$K_1 = \text{PRIREC} / 90, 100, 60$</p> | <p>立方体 K_1 尺寸 (坐标原点 M_1)</p> |
| | <p>$M_2 = \text{TRANSF} / 60, 0, 60$ $K_2 = \text{PRIREC} / -30, 100, -15$</p> | <p>坐标原点由 M_1 移至 M_2 (位移值相对于 M_1) 立方体 K_2 尺寸 (坐标原点 M_2)</p> |
| | <p>$M_3 = \text{TRANSF} / 10, 0, -30$ $K_3 = \text{PRIREC} / -50, 100, -30, \text{REF}, M_2$</p> | <p>坐标原点由 M_2 移至 M_3 (位移值相对于 M_2) 立方体 K_3 尺寸 (X、Y 坐标原点 M_3, Z 坐标原点 M_2)</p> |
| | <p>$M_4 = \text{TRANSF} / \text{REF}, M_1, -105, 0, 0$ $K_4 = \text{PRIREC} / 105, \text{REF}, M_1, 100, 15$</p> | <p>坐标原点由 M_3 移至 M_4 (位移值相对于 M_1) 立方体 K_4 尺寸 (X 坐标原点 M_1, Y、Z 坐标原点 M_4)</p> |
| | <p>$K = \text{SOLID} / \text{PLUS}, K_1, K_4$ MINUS, K_2, K_3</p> | <p>立方体 $K = K_1 + K_4 - K_2 - K_3$</p> |

(2) 零件的平面轮廓扫描描述。简称扫描法。这种方法的原理是一个零件可由一个二维平面在空间图形扫描而形成。扫描方式有直线扫描、旋转扫描和复合扫描。复合扫描是指按非圆二次曲线扫描。

直线扫描和旋转扫描如表 8·3-7 所示,表中分别表示了非回转体和回转体零件的描述。

表 8·3-8 中列举了零件信息的各种描述方法、特点和主要系统,供选用时参考。



表 8-3-7 用平面轮廓扫描描述零件

| 语句结构 | 举 例 |
|------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>PROFIL/</p> <p>非回转体 主要位移坐标轴 扫描位移尺寸 轮廓名称</p> | <p>$CON_1 = \text{CONTUR/CLOSED}$ $K_1 = \text{PROFIL/YAX.12.CON}_1$</p> |
| <p>PROROT/</p> <p>回转体 旋转坐标轴 轮廓名称</p> | <p>$CON_1 = \text{CONTUR/OPEN}$ $K_1 = \text{PROROT/YAX.CON}_1$</p> |

5.4 工艺过程设计中的决策方法

计算机辅助工艺过程设计的核心问题就是要研究在工艺过程设计中各类问题的决策规律和方式，探索如何利用计算机进行求解。

工艺过程设计中的各类问题很多，其决策方式可归结为如下三类：数学模型决策；逻辑推理决策；创造性思维决策。

1. 数学模型决策 数学模型决策是以建立数学模型并求解作为主要的决策方式，工艺过程设计中以数值计算为主的问题多用这一方式求解，如工艺尺寸链的计算、切削参数的计算、材料消耗定额的计算等。数学模型可分为系统性数学模型、随机性数学模型和模糊性数学模型三类。

2. 逻辑推理决策 在工艺过程设计中，有许多问

表 8-3-8 零件信息的描述方法、特点和主要系统

| 描 述 方 法 | 特 点 | 主 要 系 统 | |
|-----------------------|-------------|------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 分类编码 | 代 码 | 适于成组加工 适于检索式、派生式工艺过程设计系统 宏观描述简单方便，详细描述较困难 简单方便，应用广泛 | 德国 OPITZ 系统，9 位（阿亨工业大学） 英国 CODE 系统，8 位（制造系统公司） 日本 KK-3 系统，21 位（机械技术研究所） 中国 JLBM-1 系统，15 位（机电工业部） |
| | 特征矩阵 | 便于计算机处理 | |
| 型 面 (型面单元 表面元素) | 编 码 | 适于创成式工艺过程设计系统 简单方便，应用十分广泛 比较适用于回转体零件 | 美国 APPAS 系统中的 COFORM 编码(Pur-due 大学) |
| | 语 言 (谓词) | 减少构造知识库的工作量 一个表面的描述中隐含了一些加工方法 等知识帮助推理 极易理解和扩展，应用广泛 适于创成式工艺过程设计系统 | 法国 GARI 系统 中国 THCAP-1 系统中的特征分层描述(清华大学) |
| | 数 学 (图论) | 适于计算机处理 便于尺寸链计算 应用较少 | |
| 形 体 (体元素、 形状元素) | 体素组合 | 为 CAD 实体造型 便于 CAD/CAM 集成 可以自动绘图 | 美国 COMPAC 语言 德国 AUTAP 系统（阿亨工业大学） |
| | 平面轮廓扫描 | 为 CAD 实体造型 便于 CAD/CAM 集成 应用面不够广 | 日本 CIMS/PRO 系统中的 CIMS/DES 语言（神户大学） |

题可以使用确定性和逻辑推理来决策，如各种型面加工方法的选择、工序工步排序、刀具选择、机床选择等都可采用判定树和判定表来决策。

(1) 判定树，又称决策树。判定树和判定表都是描述和处理“条件”和“动作”之间的关系和方法，凡是能用判定树来表示的，无疑也能用表来表示，视在应用

计算机时哪一种方法的表达对程序设计更为有利。判定树是一种由结点和分支(边)构成的图。结点有根结点、终结点和中间结点；根结点无前趋结点，终结点无后继结点；中间结点有单一的前趋结点和一个以上的后继结点。结点表示一次测试或一个动作，拟采取的动作一般放在终结点上。分支连接两次测试和动作，表达



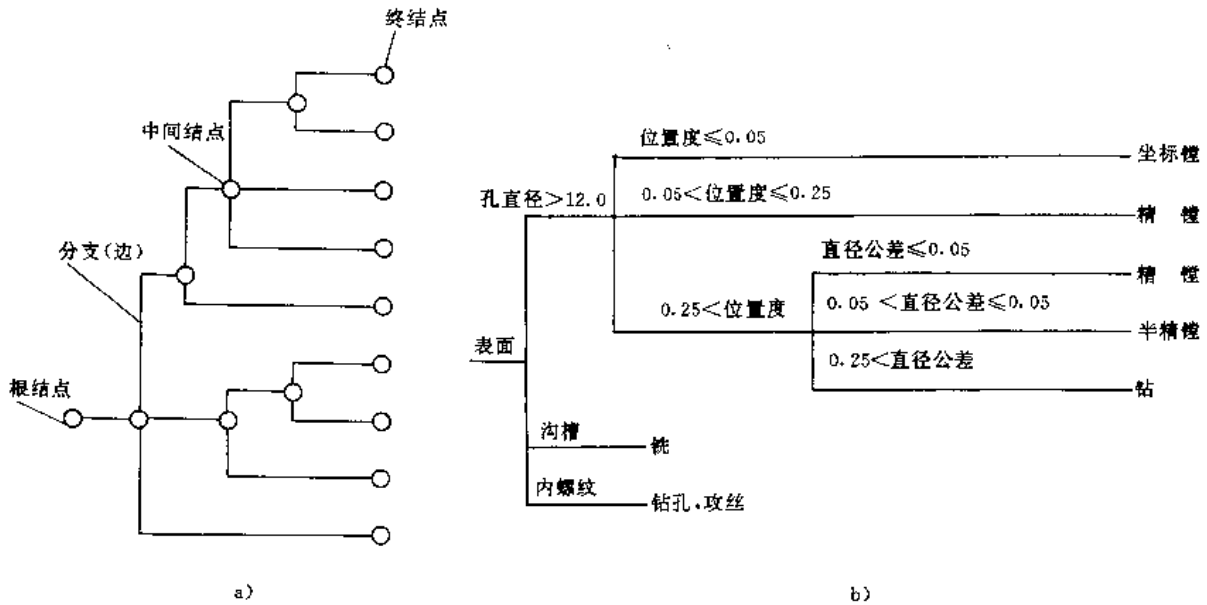


图 8-3-28 判定树的结构和示例
a) 判定树结构 b) 加工方法选择判定树

| | | 条件组合 | | | | | | | |
|----|----|------|---|---|--|--|--|--|--|
| | | A | B | C | | | | | |
| 条件 | C1 | T | T | | | | | | |
| | C2 | | | | | | | | |
| | C3 | | F | | | | | | |
| | : | | | | | | | | |
| | : | | | | | | | | |
| 动作 | A1 | X | 1 | | | | | | |
| | A2 | | 2 | | | | | | |
| | : | | | | | | | | |
| | : | | | | | | | | |
| | : | | | | | | | | |

| 孔 | T | T | T | T | T | | |
|--------------------|---|---|---|---|---|---|---|
| 直径 > 12.0 | T | T | T | T | T | | |
| 位置度 ≤ 0.05 | T | | | | | | |
| 0.05 < 位置度 ≤ 0.25 | | T | | | | | |
| 0.25 < 位置度 | | | T | T | T | | |
| 直径公差 ≤ 0.05 | | | T | | | | |
| 0.05 < 直径公差 ≤ 0.25 | | | | T | | | |
| 0.25 < 直径公差 | | | | | T | | |
| 沟槽 | | | | | | T | |
| 内螺纹 | | | | | | | T |
| 坐标镗 | X | | | | | | |
| 精镗 | | X | X | | | | |
| 半精镗 | | | | X | | | |
| 钻 | | | | | X | | 1 |
| 铰 | | | | | | X | |
| 攻丝 | | | | | | | 2 |

图 8-3-29 判定表及其示例
a) 判定表 b) 加工方法选择判定表



一个条件是否满足。满足时动作沿分支向前传送,实现逻辑“与(AND)”的关系;不满足时则转向另一分支以实现逻辑“或(OR)”的关系。由根结点到终结点的一条路径表示一条决策规则。图8-3-28表示了判定树的结构和加工方法选择判定树示例。

(2) 判定表,又称决策表。判定表是用符号描述事件之间逻辑关系的一种表格。它是用横竖两条粗线(或双线)划分成四个区域。左上方区列出所有条件,左下方区列出根据条件组合可能出现所有动作。竖线右侧为一个矩阵,其中上方为条件(可能)组合,下方为对应的动作。因此矩阵的每一列可看成是一条决策规则。图8-3-29a为判定表,b为示例。

判定表表达清晰准确、格式紧凑、易于检查、修改、扩展,使用方便。

在建立一个判定表时,必须考虑完整性、精确度、冗余度、一致性、循环和大小。冗余度出现在两条规则具有同样的动作而它们的条件互相重迭时。当一种动作被用来改变条件,并重复调用该表时,就会产生死循环而不能得出结论。

3. 创造性思维决策 工艺过程设计中有些问题的决策往往依赖于工艺人员的经验和创造性思维能力,因此需要应用人工智能,建立专家系统。智能是运用知识解决问题的能力,学习、推理和联想三大功能是智能的重要因素,专家系统是智能的一种具体体现,它是由专家来分析、推理和决策复杂问题的计算机软件

系统。

专家系统由知识库、推理机、数据库、知识获取设施(工具)和用户输入/输出接口等组成,如图8-3-30所示。知识库是存储从专家那里获取的某个领域的专门知识。推理机是根据知识推导结论,而不是简单地搜索现成答案。数据库是存放已知事实和由推理得到的事实。

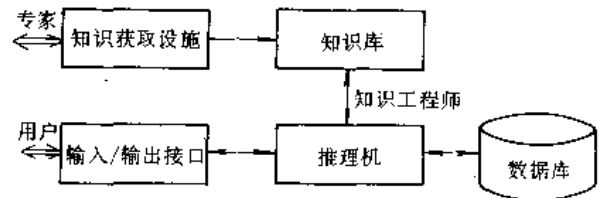


图8-3-30 专家系统的组成

专家系统的建立有以下几个主要问题:

- (1) 知识获取,一般由知识工程师完成。
- (2) 知识表达方法的选择。
- (3) 系统的试验、验证、改进和扩展。

知识表达的工作不仅涉及设计计算机程序中储存信息的数据结构,而且包括智能管理这些数据结构以进行推理的过程。表8-3-9列出了在工艺过程设计中常用的知识表达方法。

机械制造工艺过程设计中各类问题的决策方式可归纳在表8-3-10中。

表8-3-9 计算机辅助工艺过程设计专家系统的知识表达

| 方法 | 含义 | 表现形式 | 特点 |
|------|--------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|
| 谓词逻辑 | 谓词逻辑的基本组成部分是谓词符号、变量符号、函数符号和常量符号,并用圆括弧、方括弧、花括弧和逗号隔开,以表示论域内的关系 | 谓词公式 原子谓词公式 $P(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 分子谓词公式(复合谓词公式) 用连词把原子谓词公式组成 | 是一种自然的知识表达形式;可以表示很准确的知识;知识表达方法可独立于推理方法;模块式结构;无法描述复杂结构 |
| 框架 | 框架是一种数据结构,它提供了一个结构、一种组织形式,可以用从过去的经验中得到的概念来分析和解释新事物 | ((框架名)((槽1)((侧面1)((值1)) ((值2)) : ((侧面2)((值1))...)) ((槽2)((侧面1)((值1))...))...)) | 是一种复杂的语义网络;可以由许多框架组成框架系统;框架由一组槽组成,适合于描述具有固定格式的物体、事件和动作,例如描述零件表面信息 |
| 语义网络 | 语义网络是知识的图解表示。它由结点和弧组成。结点表示事物,概念和事件等,弧则表示所连结之间的分类、聚集、泛化、联合等关系 | | 无形式语义,对所给定的表达结构所表示的语义没有统一的表达法;可直接访问相关结点,共享某些信息 能表达实体的结构属性及实体间的因果联系,既简明又是显式的 |



(续)

| 方法 | 含 义 | 表 现 形 式 | 特 点 |
|-------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| 产生式系统 | 产生式系统由产生式规则库、控制侧策略和总数据库组成。产生式规则是一个以如果这个“条件”满足,就应采取这个“行动”,每条规则是一个“条件-行动”产生式。总数据库又称上下文、前数据库或暂时存储器。控策略说明应该选用什么规则 | IF <事实 1 是真> <事实 2 是真> : : <事实 n 是真> THEN <结论(行动)1> <结论(行动)2> : : <结论(行动)n> | 具有模块性;规则库中各规则有统一的结构可方便地表示专家的知识;效率低;是最常用的知识表达方式 |

表 8-3-10 机械制造工艺过程设计中的决策方式

| 制造工艺设计任务项目 | | 决策方式 | | |
|------------|-----------------|------|------|-------|
| | | 数学决策 | 逻辑决策 | 创造性决策 |
| 加工工艺 | 结构工艺性研究 | | ○ | |
| | 定位基准选择 | | | ○ |
| | 工艺路线设计 | | ○ | |
| | 工艺方法选择 | | ○ | |
| | 工序间尺寸余量计算 | ○ | | |
| 工艺装备 | 机床选择 | | ○ | |
| | 刀具选择 | | ○ | |
| | 夹具选择 | | ○ | |
| | 专用机床、刀具、夹具、量具设计 | | | ○ |
| | 专用辅具设计 | | | ○ |
| 时间定额 | 工时研究 | ○ | | |
| | 工时定额计算 | ○ | | |
| 工厂、车间设计 | 工厂布局设计 | ○ | | ○ |
| | 车间、工段设计 | ○ | | ○ |
| | 工作地设计 | | ○ | |
| 供应计划 | 材料供应计划 | | ○ | |
| | 生产设备供应计划 | | ○ | |
| | 工艺装备供应计划 | | ○ | |
| | 劳动力需求计划 | | ○ | |
| 生产周期 | 生产周期设计 | ○ | | |
| | 节拍时间设计 | | ○ | |
| 生产成本 | 材料成本计算 | ○ | | |
| | 设备成本计算 | ○ | | |
| | 加工维持费用计算 | ○ | | |
| | 劳动工资计算 | ○ | | |

注:○表示采用。

5.5 计算机辅助工艺过程设计的原理和方法

计算机辅助工艺过程设计系统按其工作原理可分为检索式、派生式、创成式和综合式四类。其中检索式就是将设计好的零件工艺过程存储在计算机中,使用时进行检索查找。综合式是派生式和创成式的结合,即工序设计用派生式而工步设计用创成式。因此主要是派生式和创成式两种工艺过程设计系统。

1. 派生式工艺过程设计系统 零件有相似性,相似的零件有相似的工艺过程。派生式工艺过程设计就是通过检索相似零件的工艺过程并加以增删或编辑而派生一个新零件的工艺过程。这种方法也称修订式、变异式或样件法。派生式工艺过程设计系统的工作,一般可分为准备阶段和运行阶段。

(1)准备阶段。其工作过程如下:

- 1)利用分类编码系统对现有零件进行编码。
- 2)根据零件编码和工艺过程,按成组分类原则建立零件族和零件族特征矩阵。
- 3)为每个零件族设计出主样件(又称标准件)及其工艺过程。(包括工艺路线及工序内容两个文件)

4)设计检索模块。

5)设计编辑和修改模块。

(2)运行阶段。其工作过程如下:

- 1)对欲编工艺过程的零件进行编码。
- 2)根据检索程序查出该零件所属的零件族。
- 3)调出该零件族的主样件工艺过程。
- 4)根据输入的零件信息,对主样件的工艺过程进行修改和编辑,形成该零件的工艺过程。

图 8-3-31 是一个典型的派生式工艺过程设计系统原理框图。

2. 创成式工艺过程设计系统 创成式工艺过程设计系统和派生式系统不同,它是根据输入的零件信



息,依靠系统中的工程数据和决策方法自动生成零件的工艺流程,因此又称为生成式系统。这种方法的特点如下:

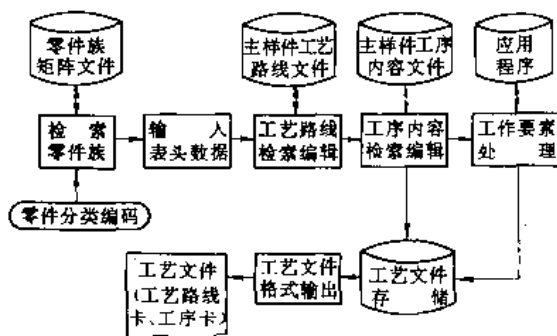


图 8-3-31 派生式工艺过程设计系统原理框图

(1)能通过决策逻辑、专家系统、制造工程数据库自动生成新零件的工艺,运行时一般不需要人的技术性干预,是一种比较理想而有前途的方法。

(2)适应范围广,对回转体和非回转体零件的工艺过程设计都能胜任,具有较高柔性。

(3)便于计算机辅助设计和制造的集成。

(4)由于工艺过程设计的复杂性和智能性,自动化程度很高、功能完全的创成式系统目前尚难实现。

创成式系统的工作也可以分为准备阶段和实现阶段。准备阶段的工作如下:

(1)确定系统的对象范围,是回转体零件还是非回转体零件,或者范围较小的某类零件。

(2)设计零件的信息描述,一般多采用型面系统谓词描述、体素组合语言描述。在设计中应充分考虑成组技术的思想。

(3)确立零件工艺过程设计中各项任务的决策方式,一般多采用数学运算、决策树、决策表、产生式规则知识表达的专家系统等。

(4)建立刀具库、切削用量库、机床库等工程数据库。

前面图 8-3-20 所示的从零件信息输入开始到共享数据库输出,就是一个比较典型的创成式工艺过程设计系统。

6 计算机辅助检测

计算机辅助检测(CAI & CAT, Computer Aided Inspection & Computer Aided Test)泛指在机器零部件或整机的加工质量检验和性能测试中,计算机参与控制、采样及数据处理的检测过程,涉及到从原材料、几何精度到磨损、疲劳、寿命等性能指标。本节着重机械制造业中零件加工几何精度的计算机辅助检测

(CAI)。

6.1 离线与在线检测

质量检测是机械加工中必不可少的一个重要环节。在自动化生产中,加工零件的几何精度测量起初是按传统方式进行,即在零件加工完成后脱离生产线由人工用量具或量仪逐件检测或抽检,称为“离线检测”。随着计算机技术的发展和在工业上的广泛应用,机械制造业自动化程度日益提高,几何精度测量逐步被纳入自动化生产,在计算机控制下完成。再进一步,测量结果反馈控制生产过程,使加工零件符合公差要求,形成加工—质量检测—加工的闭环控制系统(称为“在线检测”),以达到保证产品质量、节省劳力和提高生产效率的目的(详见本篇第 5 章 3 节)。本节侧重于以坐标测量机实现的计算机辅助检测。

6.2 坐标测量机

参见本篇第 5 章 3 节。

以下各节分别介绍 FMS 或 CIM 系统中计算机控制坐标测量机自动测量的实现。

6.3 零件形状、尺寸、精度等与测量有关信息的输入

计算机控制坐标测量机检测零件的关键是要有相应的测量程序。一般的方法是在各种测量机编程软件功能支持下,由人针对零件图纸要求编写,或是由人按照测量规划控制测头运动、边示教测量、边生成测量程序。人工编程效率低,在 FMS 或 CIM 环境中不能体现测量环节的自动化。因而,要求自动生成测量程序。面临的问题首先是如何用计算机语言完整地将零件描述成检测工艺需要而又易于获取的测量信息。

多年来,设计人员根据对零件功能的要求设计出用图样描述的零件已成常规。随着自动化生产的发展和 CAD 技术的提高,要求零件的设计适应各后续环节,即 CAD 数据信息能直接输入被加工、检测和装配工艺过程设计系统并加以利用。因此,要有革新的零件描述方法。针对检测环节,完整的零件描述应包括如下内容:

(1)点、线、面各元素由一定的相互关系和位置构成零件几何形体。

(2)精度描述,包括尺寸、形状和位置精度及对表面质量要求。

(3)材质描述,包括材料类型、硬度和热处理等要



求。

(4)其他技术要求。

一般前两项为检测规划需要的信息。

目前国内外已有的零件描述方法有编码描述、语言描述、几何型面描述、特征描述、拓扑描述等,各有特点,又各有局限性。且均有人工介入。如何将侧重于零件功能描述的设计信息及侧重于工艺特征的描述客观地溶于一体,开发出加工各环节均易于获取和利用的零件描述方法,至今仍是制造系统信息集成的一个关键课题。

6.4 测量工艺规划的生成

测量工艺规划是实现自动检测的关键,也是程序生成的前提。规划涉及多方面的问题,主要有:

(1)零件形体相互关系的处理和识别。面对被测零件,首先要获取零件描述信息,通过对各型面之间的相互关系及定位分析,识别零件形体结构。

(2)选择定位基准。以在最少定位次数下完成测量为原则,选择形状、面积、加工条件适合的型面作为定位基准。确定每次定位中要完成的测量项目。

(3)确定测量基准。考虑到设计及工艺,选择适当的形面作基准将零件在坐标测量机上找平找正,建立起零件坐标系。

(4)确定测量项目顺序,尽量避免重复测量路径和重复更换测头。

(5)计算出各被测型面的实际形状和尺寸。

(6)生成零件在该定位下的装夹工艺,包括支点、夹紧点的确定和支承、夹紧元件参数的确定。

(7)各被测型面上测点数目的确定和测点的分布。

(8)各测头形状、尺寸、长度、方向和组合的确定和测头标定。

(9)按照测量顺序,以最短路径、少重复、少换测头、避免碰撞为原则确定各测头测量路径。

(10)测点数据的管理和处理,包括储存、拟合、相关、调用和输出。

6.5 测量规划的后置处理

详尽的测量工艺规划最后体现于各选用测头的测量运动路径和相应的测量数据处理,形成一种通用的测量文件,以适用于各种计算机控制的坐标测量机。但是各厂家生产测量机的主体结构、测量和测头系统、控制系统以及数据处理系统各不相同,因而需要对测量规划做后置处理。开发测量规划后置处理系统,一方面

要从某一具体的测量规划生成系统出发;另一方面要针对选用的坐标测量机,将测量规划指令转换为该测量机可运行的测量程序。可以认为,后置处理系统是计算机辅助检测规划对坐标测量机的软件接口。

测量规划后置处理的内容视其测量规划系统而定,一般应包括:测头的管理和标定;坐标系转换;对测量机基本测量系统及其测量数据管理;存储和处理功能的调用;输出测量结果以及写出测量程序等。

对测量规划进行后置处理,生成测量程序的全部过程,不仅适用于FMS及CIM系统,同样可以用于独立工作的计算机控制坐标测量机。

在CIM系统中,针对CAD/CAM的零件设计和工艺规划以及坐标测量机对零件检测之间的双向信息交换和集成,美国开发出几何尺寸测量接口规范(DMIS, Dimensional Measurement Interface Specification)。规定了在CAD/CAM系统中生成的坐标测量机测量程序的标准格式,以及返回CAD系统的测量结果的标准格式。各种测量机只需开发本测量机系统与DMIS的接口软件。在广泛采用的基础上,1990年DMIS在美国已被订为标准,1993年将被国际标准化组织ISO采纳并制订为国际标准。

6.6 测量机自动测量的计算机仿真

测量机自动测量过程与加工中心的加工过程相类似,包含着大量的复杂因素在内。一般手编程序也常需进行修改调整后才能运行。自动生成的测量程序则直接受到测量规划和编程系统开发人员经验技术的丰富程度、对测量过程的分析、归纳和逻辑推理、采用的数学模型、系统设计的完整性、准确性和编程技术所影响。为了确保测量任务准确无误地完成而测量机和测头不受碰撞,在测量程序自动生成后应先通过计算机仿真测量。仿真系统包括以下内容:

(1)在计算机上实现被测零件及测量机的三维构图。

(2)计算机以三维形式构造各种不同形状、尺寸、长度、测杆方向以及不同组合的测头和测头族。

(3)以生成的测量程序驱动仿真器构造的测头,令其按测量规划对构造的零件三维实体仿真模型实现一系列的触测。

(4)在三维空间,程序运行中模拟测头对被测件的正常触测、未接触、碰撞及其他误动作的判断。

(5)检查核实是否完成全部测量任务。

自动生成的测量程序通过仿真后方可投入实用。



如发现问题,应及时修改后再用仿真器模拟检测。人工编写的测量机测量程序也可以先通过计算机仿真模拟检验后再用于实际检测。

6.7 测量结果的处理和反馈

测量零件的最终目的是得到测量结果,用以判断加工质量、分析设计和工艺中的问题并指导今后的生产。首先要将单个零件测量结果逐项对比设计要求,做出合格性判断,最后做出综合结论,即合格、返工、返修、不合格四种结论。需要指出的是,将非合格品区分为返工、返修和不合格三类是有相当难度的,要有相当丰富的软件系统来完成。其次,对成批零件的测量结果

可以做统计分析以及加工趋势预测,分析产生原因,提供给设计和工艺人员参考,以便能及时修改设计或工艺规划,以确保产品的质量。

7 计算机辅助制造

7.1 计算机辅助制造的含义

前已叙及,计算机辅助制造在这里的含义主要指计算机辅助机械加工(CAM, Computer Aided Machining),更明确地说,就是数控加工(Numerical Control Machining)。其主要工作可从图 8-3-32 所示功能图上看出。

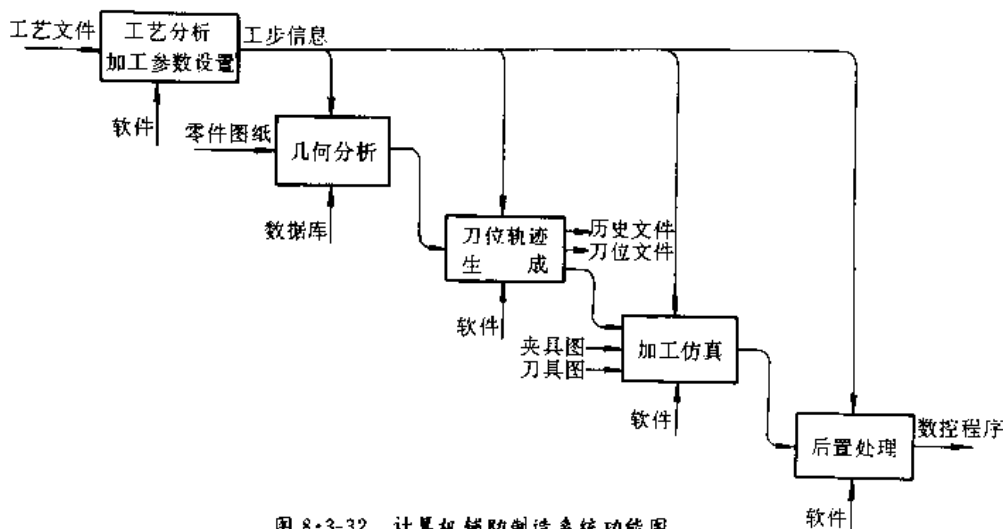


图 8-3-32 计算机辅助制造系统功能图

工艺分析和加工参数设置模块是根据零件工艺过程设计的工艺文件输入,对各工序设定切削用量、刀具补偿、刀具起点等,其所需原始数据在工艺文件上都有。

几何分析模块的作用是分析零件的图形文件,得到图形的一些特征参数,并将这些参数传递给需要它的加工子程序,用以协助加工的自动完成。

刀位轨迹生成模块的作用是计算刀位轨迹、产生历史文件和刀位文件。根据加工工艺调用相应的加工子程序,从而自动产生该加工方法的详细描述。这些描述及零件的图形被记录为历史文件(类似 APT 语言),同时也产生了刀位文件(二进制或 ASCII 格式)。加工子程序为各种加工方法的处理程序,它是对各种加工方法的具体描述,所提供的加工方法越多,软件应用的范围越广。

加工仿真模块的作用是检验刀位轨迹,避免刀具-夹具的干涉,优化刀具行程路径等。

后置处理模块产生具体加工机床所用数控程序。

图 8-3-33 为计算机辅助制造软件系统框图。

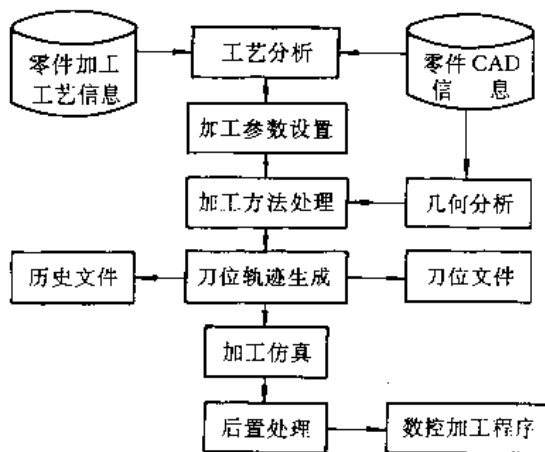


图 8-3-33 计算机辅助制造软件系统框图

7.2 计算机辅助数控加工程序编制

1. 计算机辅助程序编制过程 计算机辅助编程就是借助于通用计算机来编制程序,其编制过程分为如下两个阶段:



(1)编制源程序阶段。根据零件图及其工艺规程,用专为数控机床加工用的自动编程语言(数控语言)编制出源程序。

(2)编制目标程序阶段。将源程序输入通用计算机,通过编译程序(数控软件)翻译成机器语言,经前置处理和后置处理后,输出机床数控系统所需的加工程序,称之为目标程序和结果程序。

计算机辅助编程过程如图 8-3-34 所示。

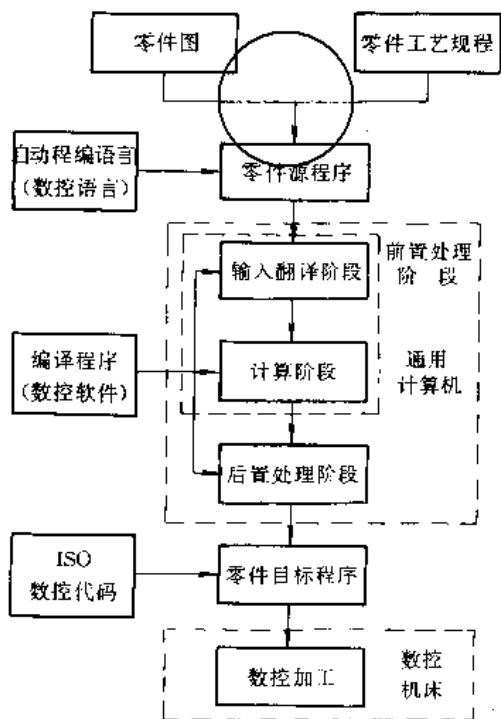


图 8-3-34 计算机辅助数控加工程序编制过程

2. 数控语言及其选择 数控语言系统的来源有两种:选用现成语言系统和自行研制语言系统。后者显然要花费很多的人力、物力和时间,现成数控语言系统有美国 APT,德国 EXAPT,日本 FAPT 等系统,种类繁多。在这些自动编程系统中,以 APT 系统最为出名,应用最为广泛,许多系统都是在它的基础上发展起来的。为了国际间的通用性,国际标准化组织(ISO)于 1985 年制订了 ISO4342—85《数控机床处理程序输入——基本零件程序参考语言》国际标准,供各成员国使用。图 8-3-35 是 APT 系统的结构框图。APT 系统是一种功能丰富、通用性非常强的系统,但需要一台大型计算机,编程费用大,因此美国在发展 APT 系统的同时,还开发了一些针对性强、范围窄的小型语言系统,以适应中、小企业。

选用数控语言系统时要考虑下列因素:

(1)如果零件数控加工时所需的坐标数超过 3 个,一般为多坐标,这时应选用 APT 语言较好,因为 APT 语言的多坐标功能较强。

(2)所选数控语言应与拥有的计算机相适应。因为每一种数控语言的编译系统都是针对一定的计算机设计的。

(3)如果只要求处理几何信息,则选用 APT 语言系统;如果要处理几何信息和工艺信息,则选用 EXAPT 语言系统较好。

(4)某些数控语言系统是针对某类零件设计的,如机床零件、飞机零件等,因此可根据不同类别的零件来选用。

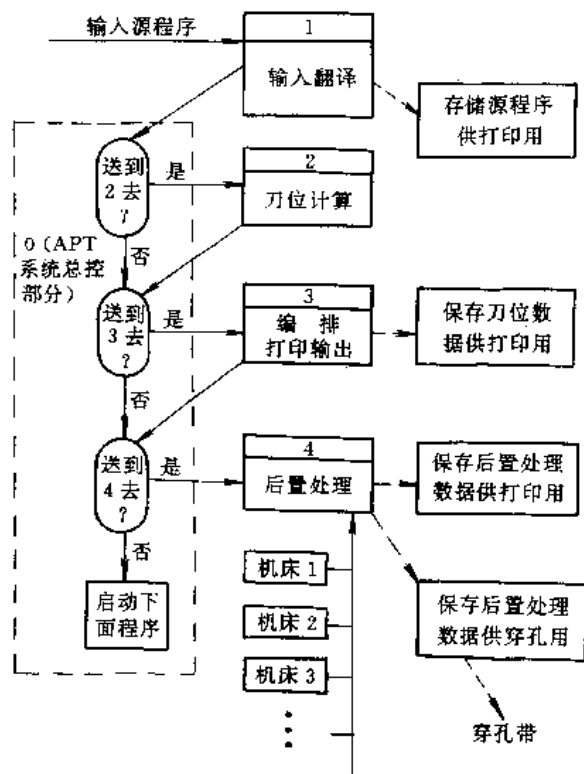


图 8-3-35 APT 系统的结构框图

在众多的自动编程系统中,其语言结构各有不同,我国基本上是按 ISO4342—85 制订了 JB 或 GB 标准。该语言是为数控机床开发的,是一个参考语言,语言的部分或子集可适用于特定情况。

7.3 前置处理和后置处理

一个完整的数控语言系统,由前置处理和后置处理两部分组成。前置处理又称主处理、主信息处理或信息处理,这部分工作与具体的数控机床控制系统关系不大,因此可独立于具体的数控机床进行工作,一般通用性较强。



而后置处理多随数控机床控制系统而异,专用性很强。图 8-3-36 为前置处理和后置处理的结构框图。

1. 前置处理

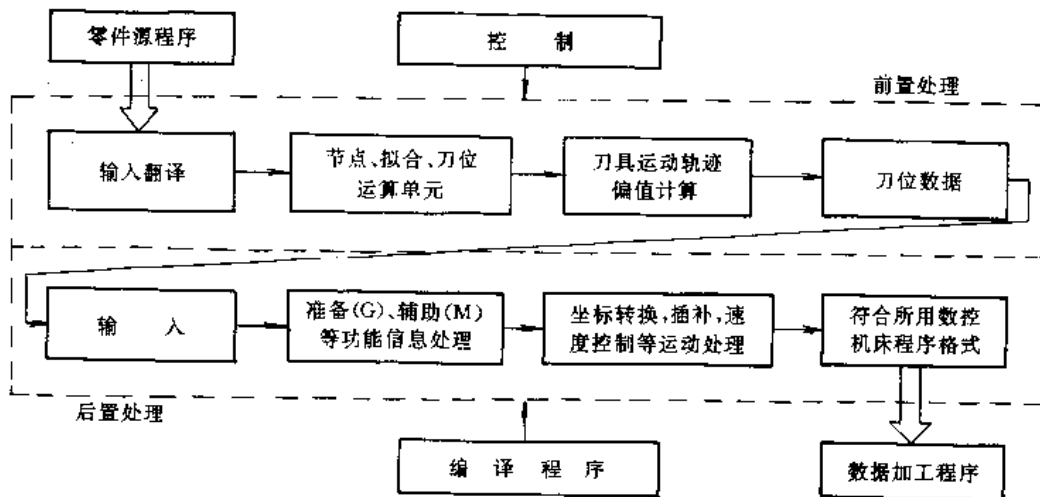


图 8-3-36 前置处理和后置处理的结构框图

(1)控制。用来控制输入、翻译、运算、输出等工作。

(2)输入翻译。输入零件源程序,阅读并翻译为通用计算机能够处理的形式,同时进行语法错误检查。

(3)运算单元。具体运算节点、拟合、刀具位置等。

(4)偏值计算。计算刀具运动轨迹,输出刀位数据,并存储在刀位文件中。

2. 后置处理 后置处理是按数控机床的要求来设计的,它把刀位数据转换成该数控机床的数控装置能够接受的指令集,并以该数控机床所用的信息载体形式输出。

后置处理结构由五部分组成:

(1)控制。控制各部分的工作。

(2)输入。其输入数据是刀具数据,其中包括刀具移动点的坐标值、运动方向、数控机床的各种功能等。

(3)辅助。其功能主要是处理有关特定数控机床的准备、辅助功能的一些信息,如 G、F、S、T、M 等功能信息,以及在前置处理中不能处理的数控机床的一些特殊功能指令。

(4)运动。这部分工作有从零件坐标系到机床坐标系的转换、行程极限校验、间隙校验、进给速度码计算、超程与欠程校验、线性化处理、插补处理、数据变换单位并圆整化、自动控制进给速度、计算加工时间等。

(5)输出。将辅助部分和运动部分处理的结果转换为向数控装置输入的格式,编辑以后输出程序清单和信息载体。

零件源程序进行翻译,并计算刀具中心轨迹,输出刀位数据(CLD,Cutter Location Data)。前置处理结构组成如下:

后置处理软件随数控机床的不同而异,专用性很强,采用模块组成的通用后置处理软件是非常有前途的。

7.4 加工仿真

1. 加工仿真含义 加工仿真的含义很广,可归纳为以下几方面:

(1)刀具中心的运动轨迹仿真。主要用来检验数控程序编制的正确性,刀具与被加工工件轮廓的干涉等。可以采用动画显示的方法,已比较成熟而有效。

(2)刀具与夹具间运动干涉(碰撞)仿真。主要反映刀具、夹具、工件的相对系。需采用三维仿真、实体几何模型仿真才能判别。

(3)加工精度仿真。检查零件轮廓尺寸与位置精度是否与设计要求一致,若不一致能自动修正,这里是指在实际加工前的仿真。

2. 加工仿真的方法 目前,加工仿真的手段不多,实用性也不够,常用的仿真方法有:

(1)二维动画显示仿真。与二维视图的工件图纸比较一致,比较简单方便,但由于加工是三维的,因而必然有一视图不清楚,因此有时要用两个二维视图来显示。

(2)三维实体几何模型仿真。比较理想,难度较大,因为加工是一个动态过程。对复杂、不规则的非回转体零件的加工仿真更为困难。

8 工程设计自动化系统集成关键技术

8.1 工程数据库技术

1. 工程数据库在工程设计自动化系统中的地位与作用 EDAS 是以图形、实体造型功能为基础,以工程分析、仿真、人工智能为技术手段,以工程数据库 (EDB, Engineering Data Base) 为核心的集成系统。图 8-3-37 表示了 EDB 在 EDAS 中的核心作用。

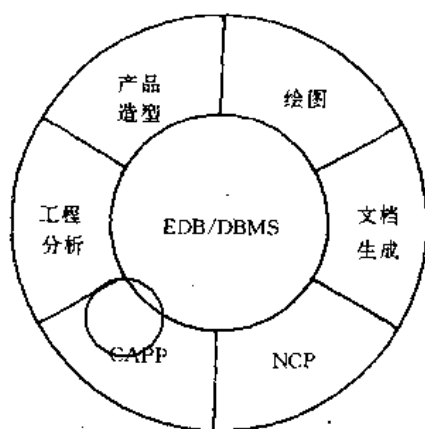


图 8-3-37 EDB 在 EDAS 中的地位

注:DBMS—数据库管理系统

NCP—数控后处理

EDAS 各子系统内部以及子系统之间通过 EDB 实现设计、制造数据的共享。通过 EDB 可以大大提高系统的集成水平,提高整个系统的处理速度与效率。

2. 工程数据库的特点 EDB 与一般事务处理用数据库在对数据进行检索、插入、修改、删除、排序、分类及索引等基本操作上是大致相同的。EDB 所处理的工程数据与一般事务数据相比,有以下三个特点:

(1)要处理与产品信息有关的形状、精度等各种数据。数据类型及数据间联系均较复杂。

(2)是一个动态的数据库。数据模式、数据间联系均需动态修改。

(3)要能支持对相同产品不同版本的管理。

3. 工程数据库的内容 包括以下两个方面:

(1)支持产品设计用的标准与标准件库,参数化图形库,产品库及工作库。支持工艺设计用的设备、刀具、夹具、切削用量等数据库。

(2)与用户友好、使用方便的交互式以及程序调用

的应用接口。

4. 工程数据库的种类

(1)低水平的文件系统。实现方便,但是对于数据进行检索,增、删、改等均较困难。

(2)在一般商用数据库管理系统 (ORACLE、INGRES 等)基础上进行扩充、改造。这是目前 EDB 的主流。或者商用数据库管理和文件管理相结合的方式处理工程数据。这类系统实现方便,缺点是响应速度较慢。

(3)在基于传统的层次、网状、关系模型的基础上,开发新的 EDBMS。例如,基于网状模型的 TORNADO 数据库管理系统,基于层次、网状和关系混合模型的 IPIP 数据库管理系统。这类系统使用效果好,但开发周期长,技术难度大。

(4)采用面向对象的语义模型,开发新的工程数据库管理系统。这是当今研究的主流。

8.2 图形数据与产品数据的交换标准

1. 初始图形交换规范 (IGES) 初始图形交换规范是不同 CAD 系统之间进行图形数据交换的一种中性文件格式标准,也是产生最早,已确立其主导地位的图形数据交换标准。许多商用 CAD 系统均提供这一技术。由美国国家标准局 (NBS) 联合通用电气公司 (GE)、波音飞机公司制定。1980 年 1 月发表 1.0 版本,并在 1981 年 9 月成为美国国家标准协会 (ANSI) Y14.26M 标准。随后经过不断地改进与扩充,到 1990 年 9 月已发表了 5.0 版本。

a. 支持的实体种类 主要包括几何实体、注释实体及结构化实体三大类。以几何实体为重点,按几何模型不同可分为如下五大类:

(1)与二维绘图相关的实体。包括圆弧、圆锥曲线、组合曲线、直线、参数样条曲线、有理 B 样条曲线、各种尺寸标注以及子图定义和视图等。

(2)与线框模型相关的实体。包括圆弧、直线、组合曲线、参数样条曲线及有理 B 样条曲线等。

(3)与曲面模型相关的实体。包括平面、参数样条曲面、规则曲面、回转面、有理 B 样条曲面以及修剪曲面等。

(4)与实体模型中实体的几何构造 (CSG) 法相关的实体。

(5)与实体模型中边界表示 (B-rep) 法相关的实体。

IGES 1.0 版本~3.0 版本主要支持上述的前三项



实体。4.0与5.0版本则分别增加了上述第四、第五项实体。

b. 文件的结构 一般按文件顺序分为:起始段,全局段,目录条目段,参数数据段及终止段。

IGES3.0版本规定了一种压缩的ASCII数据格式。此时,在起始段前增加特征段加以说明。

c. 图形数据交换的过程 如图8-3-38所示,不同CAD/CAM系统是通过IGES中性文件实现图形数据交换的。

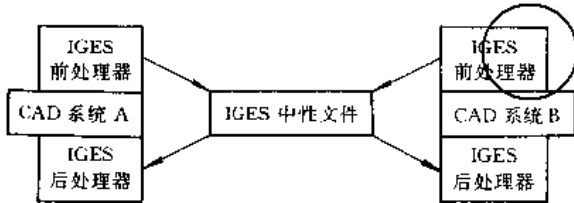


图 8-3-38 通过 IGES 文件实现图形数据交换

d. IGES 文件的不足之处

(1)商用CAD系统只提供IGES规范的一个子集。因此,通过IGES文件交换图形数据,有时会出现丢失数据现象。需再做中间调整接口。

(2)不包括形状特征、精度、表面性质等信息,难以完善地传递CAD信息。

2. 产品数据表达与交换标准 STEP 国际标准化组织(ISO)制定的关于产品数据表达与交换标准是STEP。其目的是提供能够系统地、综合地表达产品生命期各环节的数据,包括产品形状、尺寸、精度、表面性质、加工方法、装配顺序、生产准备、管理及维修等各方面的数据。STEP既适用于中性文件交换,又可作为共享数据库的基础。1988年11月通过了1.0版(建议草案DP10303)。1991年7月发表了STEP R1(Release 1)文本。

ISO将STEP划分为许多项目,现已确定的项目共36个,并将它们划分为如下六组:(1)表达方法;(2)集成资源;(3)应用协议;(4)抽象测试套;(5)实施方法;(6)一致性测试。

以下列出各项目的编号、名称及标准制定的进度。编号为1的,正式标准代号为10303-1。IS代表国际标准,DIS代表国际标准草案。

- 1 概述和基本原理。IS。
- 11 描述方法:EXPRESS语言参考手册。IS。
- 21 实现方法:交换文件结构的纯正文编码(即通称的中性文件结构)。IS。
- 22 实现方法:标准数据访问接口。

- 31 一致性测试方法论和框架:一般概念。IS。
- 32 一致性测试方法论和框架:测试实验室需求。
- 33 一致性测试方法论和框架:抽象测试套的结构和使用。
- 34 一致性测试方法论和框架:抽象测试方法。
- 41 集成通用资源:产品描述基础和资源。IS。
- 42 集成通用资源:几何和拓扑表达。IS。
- 43 集成通用资源:表达结构。IS。
- 44 集成通用资源:产品结构配置。IS。
- 45 集成通用资源:材料。
- 46 集成通用资源:形象化表示。IS。
- 47 集成通用资源:形状公差。
- 48 集成通用资源:形状特征。
- 101 集成应用资源:绘图。IS。
- 102 集成应用资源:船体结构。
- 104 集成应用资源:有限元分析。
- 105 集成应用资源:运动学。
- 201 应用协议:显式绘图。IS。
- 202 应用协议:相关绘图。
- 203 应用协议:配置管理设计。IS。
- 204 应用协议:使用边界表示的机械设计。
- 205 应用协议:使用曲面表示的机械设计。
- 206 应用协议:使用线框表示的机械设计。
- 207 应用协议:钣金模具和成型。
- 208 应用协议:生命周期产品变动过程。
- 209 应用协议:通过合成分析的设计和金属结构。
- 210 应用协议:印制电路装配产品设计数据。
- 211 应用协议:电子测试诊断和重新制造。
- 212 应用协议:电子技术工厂。

a. 总体结构 图8-3-39表示了STEP标准的总体结构。其方法学的基本内容是形式定义语言(如EXPRESS等)、参照模型与三层结构。EXPRESS语言用以规范地描述产品数据,以便从逻辑层无二义地直接映射到物理层。参照模型用来构造其它模型,以使用基本的参照模型按某种层次结构构造复杂的参照模型。三层结构包括应用层、逻辑层和物理层。应用层采用形式定义语言描述各应用领域的需求模型。逻辑层对这些需求模型进行分析,找出共同点、协调冲突,形成统一的不矛盾的集成产品信息模型(IPIM, Integrated Products Information Model)也称概念模式,然后转换为EXPRESS语言描述,用以与物理层建立联系。在物理层,概念模式或者被用以生成数据库结构,或者转换



为 STEP 交换文件。

b. STEP 标准的实现 分为四级：文件交换；在内存中的工作格式 (Working Form) 交换；数据库交换；知识库交换。

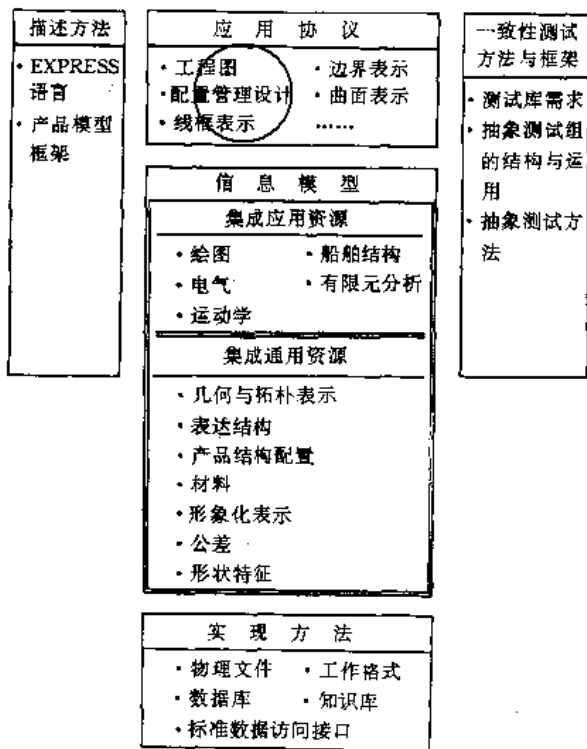


图 8-3-39 STEP 标准的总体结构

3. 图形交换文件标准 DXF DXF 目前已成为事实上的工业标准。许多著名的微机图形软件以及在工作站上运行的 CAD/CAM 软件包都提供 DXF 文件接口。DXF 文件可以由用户编制的程序来建立，然后转换为 Auto CAD 环境下的图形。Auto CAD 与其他 CAD 系统之间也可以通过 DXF 文件实现图形数据交换（图形传输），见图 8-3-40。

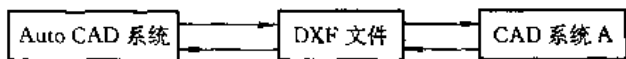


图 8-3-40 通过 DXF 文件实现图形数据交换

a. DXF 文件的结构 由以下五段组成：

- (1) 标题 (HEADER) 段。含有与图形相关变量的设置。每个变量具有一个变量名和一个相关值。
- (2) 表格 (TABLE) 段。含有命名项的定义。由线型表、图层表、字体表和视图表组成。
- (3) 块 (BLOCK) 段。含有组成图形各个块的定

义。每一个块代表一个独立的子图形，它由若干实体组成。

(4) 实体 (ENTITY) 段。是整个文件的核心部分。包括直线、点、圆弧、圆、实心区 (SOLID)、文本、宽线 (TRACE)、形状 (SHAPE)、插入和属性等实体。每个实体均需说明其实体名，所在的图层号及必要的参数。

(5) 文件结束 (END OF FILE) 段。给出一个文件结束标志 EOF。

一个 DXF 文件由多个组组成，每一组占文件的两行。第一行是一个组代码，它是 FORTRAN 语言中“I3”格式的非负整数。第二行是组值，其格式取决于组代码所确定的组的类型。

| 组代码值 | 跟随值 |
|-------|-----|
| 0~9 | 字符串 |
| 10~59 | 浮点数 |
| 60~79 | 整数数 |

组代码值的具体意义如下：

- 0: 实体、表项目和文件的分隔符；
- 1: 一个实体的初始文本值；
- 2: 一个名字、属性标记、块名等；
- 3~5: 其他文字和名字的值；
- 6: 线型名；
- 7: 文字字体名；
- 8: 图层名；
- 9: 变量名标识符（仅在标题段使用）；
- 10: 初始 X 坐标；
- 11~18: 其他 X 坐标；
- 20: 初始 Y 坐标；
- 21~28: 其他 Y 坐标；
- 30~38: Z 坐标；
- 40~48: 浮点数（文字高度、比例因子）；
- 50~58: 角度；
- 62: 颜色号；
- 66: “实体跟随”标记；
- 70~78: 整数数。

b. DXF 文件的产生与读入 在 Auto CAD 环境下，借助于 DXFOUT 命令，能从屏幕上现有图形产生一个图形交换文件。文件的尾缀为 .dxf。

如前所述，.dxf 文件亦可以用高级语言编写的程序写出。

借助于 DXFIN 命令，可以将 DXF 图形交换文件转变为 Auto CAD 环境下的图形。



第4章 机械制造业自动化设备 与系统^{[30]~[48]}

1 概述

自动化制造系统的控制结构和控制装置是实现自动化制造的基础。本章首先介绍自动化制造系统的通信特点及原理,然后详细介绍实现控制结构的基本装置——可编程控制器(PC),有关CNC请参见第6篇,有关工业机器人请参见第9篇;还将介绍自动制造系统基本控制结构以及FMS的设计仿真、计划仿真和调度仿真。

自动化制造系统广义上讲包含了从毛坯加工成成品的全过程以及保证加工顺利、高效进行的生产管理系统。本章介绍的生产管理系统包括在柔性制造系统的硬环境下,单元控制级根据上级下达的生产计划生成以日、小时为单位的短期生产计划和制定生产准备计划(包括刀具、夹具、毛坯等),并执行作业调度、监控和协调生产过程,上报现场状态等功能。

2 自动化系统的通信

自动化系统中的各种活动的相互协调,相互作用,相互影响,相互制约都是通过通信而实现的。随着自动化系统向更高级形式的发展,出现了智能自动化系统、柔性自动化系统及集成自动化系统。这些系统的结构特点之一是它们都具有一个功能很强的通信系统,以便把大量计算机和设备互连起来,彼此交换信息。由于环境及设备的复杂性使自动化系统的通信具有许多与一般通信系统(如电话网、传真网)不同的特点。

2.1 自动化系统通信的特点

(1) 通信距离短,通常在几公里之内。一个规模较小的自动化系统只涉及一个车间或一幢楼房,通信距离大约为几十米至几百米。

(2) 通信实时性强。除了要求支持文件传输,虚拟终端,电子邮件等应用服务外,工业自动化系统往往要求灵活的实时通信服务,把加工命令,加工结果或存储在某处的数据快速地传送到另一台设备或另一处,从而大大缩短时空差距。常用响应时间表示通信的实时

性。从毫秒级至秒级都属于实时范围。实时性应根据应用要求确定,就目前水平,异种机之间网络报文通信能达到几百毫秒,点对点通信可达到毫秒级。

(3) 异构环境下的通信。在企业自动化的进程中,工业设备及计算机系统往往在不同的时间来自不同的厂家,企业中已经开发的各个自动化功能子系统也常常是各自独立配置,彼此互不兼容,这就是所谓的异构环境。实现异构环境下的通信系统比非异构环境要困难得多,复杂得多。

(4) 通信系统的功能要易于扩展。工业通信系统往往属于某一企业,随着企业的发展变化就会要求扩展、更新通信系统功能使之适应新的要求,例如延长通信线路,增加通信设备,改善通信系统的管理和控制等。也就是说,工业通信的要求常处在变化之中,因此要求通信系统有良好的灵活性,可扩展性,以适应不断的变化。

2.2 通信的基本原理

2.2.1 报文

报文是信息的一个逻辑单位。把报文从一台设备通过通信系统传送到另一台设备即为报文通信。在自动化系统中,报文通信是很频繁的,例如经常要把加工命令报文从上级控制计算机传送到设备控制器,或者把设备状态及故障报文从计算机化数字控制器(CNC, Computerized Numerical Controller)、可编程程序控制器(PC, Programmable Controller)回传给上级计算机,通过报文交换达到自动控制。

2.2.2 报文通信特点

(1) 每条报文的信息量不大,报文长度从几十字节至几千字节。例如3964R协议中规定的报文长度为128字节,制造报文规范(MMS, Manufacturing Message Specification)则规定为2千字节。

(2) 要求较快的响应,即实时性要求高。如为了确保系统的安全性、可用性,要求把设备的故障报文快速地回传给上级计算机以便及时采取相应措施。



2.2.3 报文类型

报文可分为请求报文和响应报文。上级计算机作为请求方,加工设备作为响应方。由控制计算机向加工设备发出加工命令请求报文,设备接收到命令后,用响应报文告诉上级机能否执行其命令。在通信过程中,利用请求报文和响应报文的交互来提高通信的可靠性。

2.2.4 报文的组成

报文中包括目的地址、源地址、类型和正文。目的地址代表报文的接收方,源地址是发送方,类型说明正文的类别,正文是报文的主体部分。在分布式控制系统中,必须要用目的地址和源地址,以确保通信双方在相关的上下文中交换报文。至于简单的点一点控制系统,源和目的地址都是确定的,在报文中可取消地址域。

报文正文除了有请求报文和响应报文二个大类外,按报文的功​​能又可区分为连接管理,设备运行管理,刀具管理,加工程序管理,机械操作控制,状态及故障报告等类,每一类中又可定义若干条或十几条相关报文。报文的总数根据自动化系统的规模及报文通信需求而定。从目前收集到的资料统计,最少的有一、二十条,最多的可达七、八十条。

2.2.5 报文通信协议

报文通信协议指通信双方彼此都同意遵守的一整套通信约定和规则。按照通信协议进行信息交换才能达到预期的通信效果。由国际标准化组织(ISO)公布的或公认的工业通信协议称为通信协议标准,它们是报文通信的基础。例如 ISO9506 是用于 CIMS 中制造报文通信的国际标准协议。

2.2.6 通信用户

通信双方称为用户,例如用户 A,用户 B。在发送信息之前,用户应按照报文协议把要交换的信息转换成报文,这是为了保证双方有共同的语言,能彼此正确理解对方的信息含义。

2.2.7 通信方式

报文通信有如下两种方式:

(1) 建立连接的方式。用户发送报文前,需要先与对方建立逻辑连接,然后在已建立的连接上互相交换报文直到通信结束后终止连接。这种通信方式可靠性高,但建立连接需要时间。

(2) 数据报方式。利用这种通信方式时,双方不需先建立连接。每个报文中都需附有目的地址。数据报通信方式速度快。在自动化系统通信中,由于报文短,种类多,要求实时性好,因此常选用数据报方式。

2.2.8 通信时序

时序是报文通信中的重要概念,它规定报文通信的过程,即报文的定时。在自动化系统通信中,时序可具体分为以下两个方面:

(1) 请求报文、响应报文的定时。在一般通信系统中,若没有得到对请求报文的响应,请求方还可接着发出其它请求报文,接到响应前允许发送的请求报文数由协议中规定的“窗口”大小决定。但是在自动化系统中,报文用于对设备或系统的控制,为保证控制的正确性,合理性,因此在没有得到前一操作的完成状态前,通常是不能再发出操作命令报文的,这就要求请求报文和响应报文是一一对应的,也就是说它们之间具有顺序性。

(2) 上下文定时。用户报文协议一方面定义了每条报文的功​​能,另一方面又定义了各种报文的有序组合,也就是报文的上下文,或者称为报文的时序。通信过程中,一旦发现报文“乱序”,就只能终止通信直到恢复正常​​的报文时序。例如在连接方式的通信中,请求建立连接的报文必须先于其他报文。

2.3 通信的开放系统互连参考模型

用户报文在通信系统的支持下,才能在设备(或计算机)之间传递。通信系统由传输介质、通信接口、通信协议、通信控制与管理等硬、软件组成。为了描述、实现及标准化,国际标准化组织(ISO)提出用于通信系统的开放系统互连(OSI, Open System Interconnection)参考模型,它为通信系统确立了概念和功能上的框架,是设计和实现通信系统的重要依据。

OSI 参考模型是 OSI 标准中的一个,它从 OSI 体系结构的角​​度规定开放系统在分层、对等实体间的通信、标识符、服务访问点、数据单元、层操作、OSI 管理等方面的基本元素,作出与它们的组成和功能有关的定义,并从逻辑上把每个开放系统划分为功能上相对独立的七个有序子系统,即物理层、数据链路层、网络层、运输层、会话层、表示层和应用层(见图 8-4-1)。第一层是物理层,最高层是应用层。

OSI 参考模型标准为协调研制现有的和未来的系统互连标准提供共同的基础,包括 OSI 体系结构,OSI



所有七层共用的公共术语、属性和功能,使得有关人员在研制 OSI 参考模型中规定的各层标准时,能创造性地独立进行工作。但是 OSI 参考模型并不是具体实现的规范,它不规定它所描述的功能及各特定层具体实现的方法。

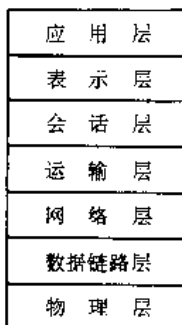


图 8-4-1 OSI 参考模型

在自动化系统中,按照 OSI 模型建立的制造自动化协议 (MAP) 网,技术办公室协议 (TOP) 网发展迅速,前者适用于工厂自动化,后者用于办公自动化领域。具有七层协议的 MAP/TOP 协议栈中的协议都选自 ISO 标准协议,因此 MAP 网, TOP 网可以把来自不同厂家的成千上万台设备互连通信,它们适用于大型自动化企业的通信需求。有关 MAP、TOP 的协议体系结构可参见本篇第 6 章 1.2 节及 1.3 节。对于中小规模的企业,为了节省开销,可以选用其他网络,如以太网, Netware 网等。特别是设备层控制系统,更不必用全部七层功能的互连通信系统,可将它简化为三层结构(见图 8-4-2)。应用层提供各种用户服务,如文件传送,事务处理,制造报文服务,虚拟终端等。应用层是直接向用户提供应用服务的界面,它的功能的强弱对用户是关键的,它是通信系统中不可缺少的部分。数据链路层在通信实体间提供传送数据的功能和过程,包括流控和代码检测,以校正物理链路产生的差错,因此它也是通信体系结构中不可缺少的一层。物理层提供通信的物理链路,信息最终将通过物理链路传输,因此物理层是任何通信系统必须具备的一层。

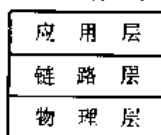


图 8-4-2 通信的三层结构

包含有 OSI 模型中三层结构的通信系统对于设备层通信特别有用,通过这种系统可以把大量智能调节器,传感器,可编程控制器,条形码阅读器等互连起来,由主控计算机对它们进行监控。

2.4 通信标准化

通信标准化涉及二方面的问题,即通信网络体系结构标准化和通信协议的标准化。

网络体系结构标准化问题基本上已由 ISO 用最高级的抽象概念——OSI 基本参考模型予以解决。各大计算机公司已从研制各自的网络体系结构转向开放系统,并按照 OSI 标准开发各种计算机网络新产品,使本公司的产品成为开放系统的一部分,能方便地与其它公司的系统互连通信。

通信协议是同等层实体通信时共同遵守的规定。各大计算机公司早先都独自制定在本公司范围内使用的各种协议,造成异构环境下通信的不兼容性。为了使各个公司的系统能彼此开放地交换信息,国际标准化组织对于 OSI 模型中的每一层都严格进行了服务定义和协议标准化工作,称为 OSI 服务定义和协议标准,只有完全按照这些标准研制出的产品才能彼此通信,可以称之为符合 OSI 标准的产品。

自从 1978 年 ISO 的一个开放系统互连分技术委员会 SC16 对 OSI 参考模型及标准进行研究以来,OSI 通信标准化工作进展很快,到目前为止,已经发布了几十个国际标准,它们大多是由比较成熟的工业产品规范或企业研究成果经过整理,修改后形成为国际标准。

1980 年成立的主管局域网标准化工作的 IEEE802 委员会是美国的一个学术性机构。这个机构制定的许多局域网标准已成为 ISO 标准。例如由 IEEE802 委员会制定的逻辑链路控制 (LLC, Logical Ulink Control) 协议 802.2 已被 ISO 接受并命名为 ISODIS 8802/2。

成立于 1956 年的国际电报电话咨询委员会 (CCITT, Consultative Committee for International Telegraph and Telephone) 也有研究组专门研究公用数据网标准并提出了著名的 X.25 建议。

目前,ISO、CCITT、IEEE802 等各标准化组织不断加强沟通,使通信协议标准化工作在全世界范围内协调一致。

在自动化系统通信中,除了遇到普遍存在的计算机系统之间通信体系结构标准化问题外,另有一个突出的难题,那就是可编程设备的通信接口标准化问题,由于各个设备控制器厂家开始时都各自开发产品,从而形成许多自动化孤岛,它们彼此不能通信,难以组成象 CIMS 这样的高级自动化系统。由此产生了对设备通信接口标准化的迫切要求。目前虽有了一些通信标



准的备选方案,例如MAP/TOP协议栈,MAP的简化型 mini MAP或场地总线(Field bus)等三层体系结构,但至今仍未确定为国际标准。估计设备通信接口各自为政的情况还将持续一段时间,在此期间,经过实践考验,深受用户欢迎的工业产品的通信标准会脱颖而出,最终被选为国际标准。例如制造报文规范(MMS)是MAP网中选用的应用层协议,它已经被确认为ISO标准协议,在各种设备通信接口中已成功地使用,它很可能被确定为设备通信接口的应用层标准。

2.5 通信结构、局域网、场地总线

基于工厂、企业的结构特点,国际上有人提出自动

化工厂的六层组织模式,即公司层、工厂层、车间层、单元层、工作站层和设备层。其中最高层为公司层,最低层为设备层。每一层组织与其相邻层之间都有通信要求,例如上层向下层实体发出请求信息,下层则需向上层报告执行结果及所处状态,在同一层的不同组织之间也需交换各自的活动情况,以便协调工作。为了满足上述通信要求,一个能完成上下左右各个组织之间信息交互的通信网络对任何自动化企业都是至关重要的。

对于分散在多个建筑物中的组织,配备一个分布式网络结构通信系统(见图8-4-3)无疑是一种最佳选择。

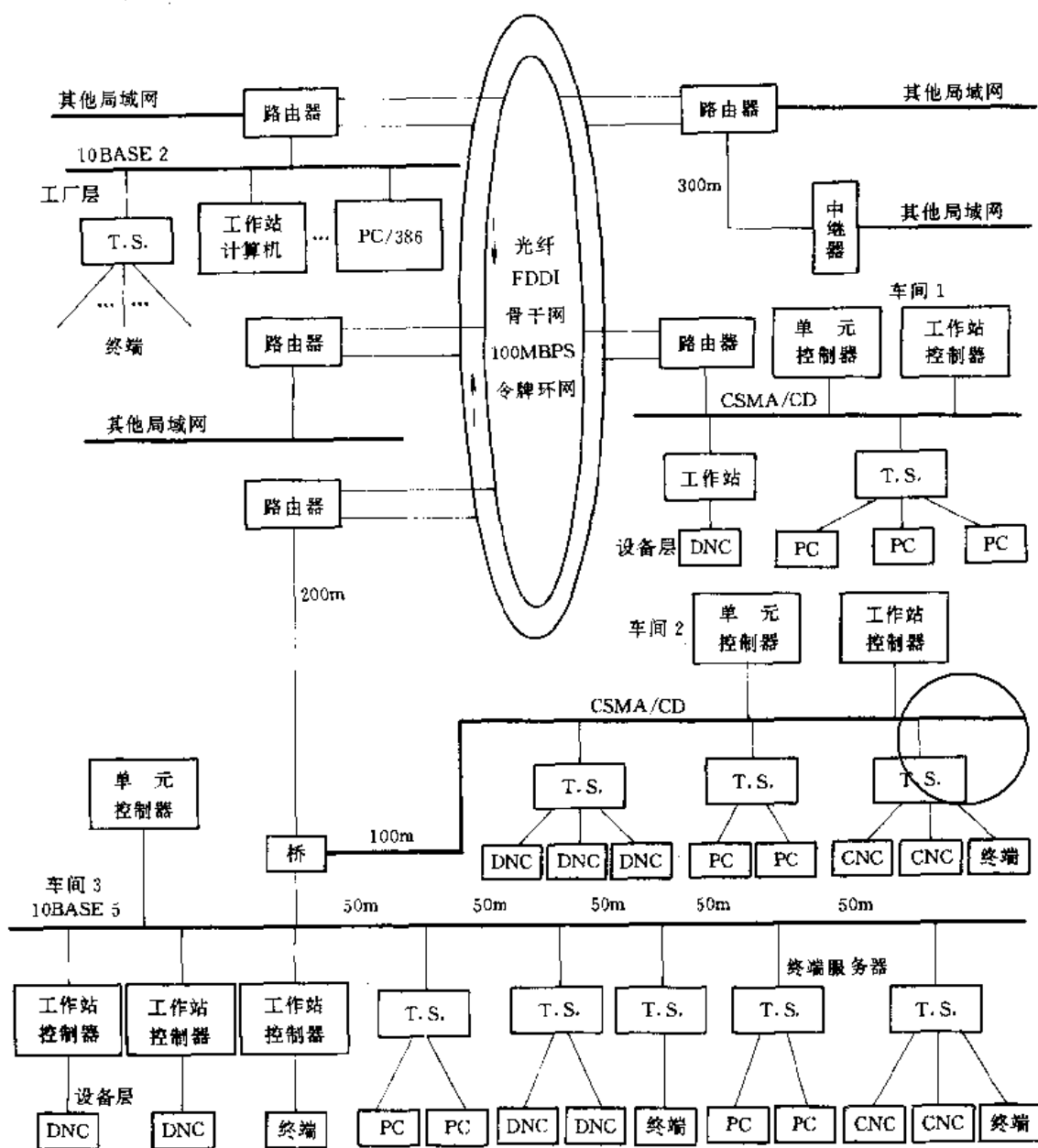


图 8-4-3 工厂分布网络系统



在图 8-4-3 中,网络的主体部分是局域网,因为它具有自动化系统通信所需的特性,即高数据传输率、低误码率、地理上足够覆盖一个企业、安装操作方便、易于扩展维护、价格低廉、有许多成熟的软件产品可供选用。这许多特点使局域网成为自动化系统网络的主要构成部分。

常用的工业环境局域网有三类:CSMA/CD 总线网,令牌环网和令牌总线网,用得最多的是 CSMA/CD 总线网。随着光纤通信技术的发展,光纤器件的价格不断下降,光纤令牌环网常用作为骨干局域网,用它来沟通、互连工厂和车间中的各个局域网。互连局域网要使用一些网络互连设备如桥、路由器,网间连接器等。

对于设备层,几乎很少横向通信要求,即设备之间几乎不需通信,这一层突出的问题是如何解决把数量庞大的各种底层设备经济而有效地与工作站相连,达到通过工作站监控底层设备的目的。一种方法是通过简单的点——点链路把设备一台台与工作站相连接通信;另一种是利用分布式总线系统把多台设备与工作站互连通信,建成分布通信环境(见图 8-4-4)。如果设备离工作站较远,显然第二种方法由于共享介质而降低了通信成本,同时利用高速通信接口板可以提高数据传输率,进一步满足实时控制的要求。

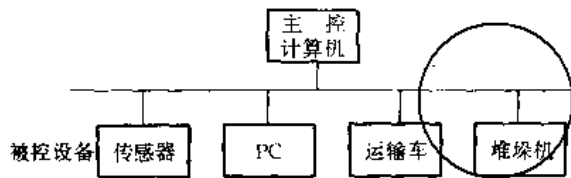


图 8-4-4 分布通信环境

场地总线(Field Bus)是国际电工技术委员会(IEC, International Electrotechnical Commission)提出的一种用于互连现场底层测量设备和控制设备,利用串行数字通信的一种现场底层总线局域网。与一般局域网相比,它具有成本低、易于安装等优点,适用于对通信服务要求低的设备层互连通信,网络只提供数据传递和状态采集服务。由于底层设备量大,因此,采用场地总线可以节省大量投资。有关场地总线的详细介绍可参见本篇第 6 章的 2-4 节。

2-6 点-点通信

点-点通信是把底层设备与其控制器直接相连后实现信息交换的一种通信方法(见图 8-4-5)。由于大多数底层通信设备及计算机系统都配备了点-点通信物理接口,它们之间需要通信时只要用电缆把它们的

通信接口互相正确地连接起来就建立了通信的物理链路。点-点通信物理接口标准化工作进行得很早,效果也最显著,使用最广泛的是由美国电子工业协会(EIA, Electronic Industry Association)提出的 EIA RS-232-C 接口标准。它采用 25 针连接器,并定义了其中 20 根针的功能。在具体使用 RS-232-C 时,并不是全都用到 20 条信号线,而只是取其子集,例如 PC 机通过 RS-232 接口互连通信时,仅涉及到包含三条信号线的一个子集。即 TXD(第二针),RXD(第三针)及 SG(第七针信号地)。连接方法如图 8-4-6 所示。在规程方面,RS-232-C 可用于单向发送或接收,半双工、全双工等多种场合,因此 RS-232-C 有许多种接口类型,对应于每类接口,规定了相应的规程特性,正确选用接口类型是至关重要的。

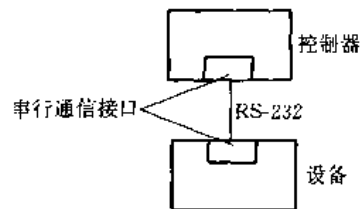


图 8-4-5 点-点通信

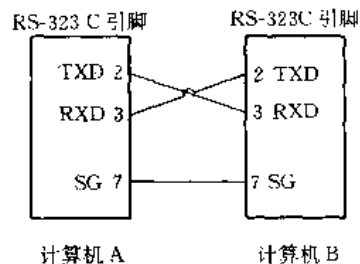


图 8-4-6 计算机互连通信

RS-232-C 的传输距离为 15m,最高数据传输率为每秒 9600 位。性能优于 RS-232-C 接口标准的是 RS-422-A 和 RS-423-A。主要是提高了数据传输率,加长了接口电缆的距离。

3 可编程控制器

3-1 可编程控制器的诞生和命名

1968 年美国通用汽车公司(GM, General Motor)为了提高市场竞争力,招标研制工业控制设备,提出如下十条要求:第一,编程简单,能在现场修改程序;第二,易于维护,优先考虑插件式结构;第三,可靠性高于继电器控制柜;第四,体积小于继电器控制柜;第五,可向上级计算机传送数据;第六,价格低于



继电器(或半导体)控制柜;第七,输入适用于交流115V。第八,输出为交流115V、电流2A以上,能直接控制电磁阀;第九,扩展时对原系统影响小;第十,用户编程存储的容量至少能扩展到4k。1969年美国数据设备公司(DEC, Digital Equipment Company)研制成PDP-K控制机,达到了GM公司的要求,成为世界上第一台可编程控制器。1971年日本从美国引进该技术,研制成日本第一台可编程控制器(称为DSC-8型)。1973年欧洲研制成首台可编程控制器。我国1974年开始研制顺序控制器,1977年开始应用。首台PDP-K控制机取名为可编程逻辑控制器简称PLC(Programmable Logic Controller)。此后根据用户需要,功能不断扩大,应用范围日益广泛。美国电气制造商协会(NEMA)于1980年正式取名为可编程控制器PC。国际电工委员会(IEC)1980年11月颁布了可编程控制器标准草案第一稿,1985年1月发表了第二稿。对PC定义如下:

“可编程控制器是一种数字运算操作的电子系统,是专为在工业环境下使用而设计的。它采用可编程序的存储器,由内部存储的面向用户的指令实现逻辑运算、顺序控制、定时、计数和算术运算,通过数字式或模拟式的输入和输出去控制各种类型的机械、设备或生产过程。可编程控制器及其外部设备,都应接易于与工业控制系统形成一个整体,易于扩充其功能的原则设计。”

顺序控制器(SC, Sequence Controller)泛指采用机械的或电气的或电子的手段,实现被控对象按预定的、不可变动的、前后相关的动作次序,依次按约束关系或定时关系动作的装置。早期PC是SC中的一种类型。

3.2 可编程控制器的发展

图8-4-7描述了1968~1992年可编程控制器在结构、应用方面的演变。

1. 近来发展特点 随着微电子技术的迅速发展,

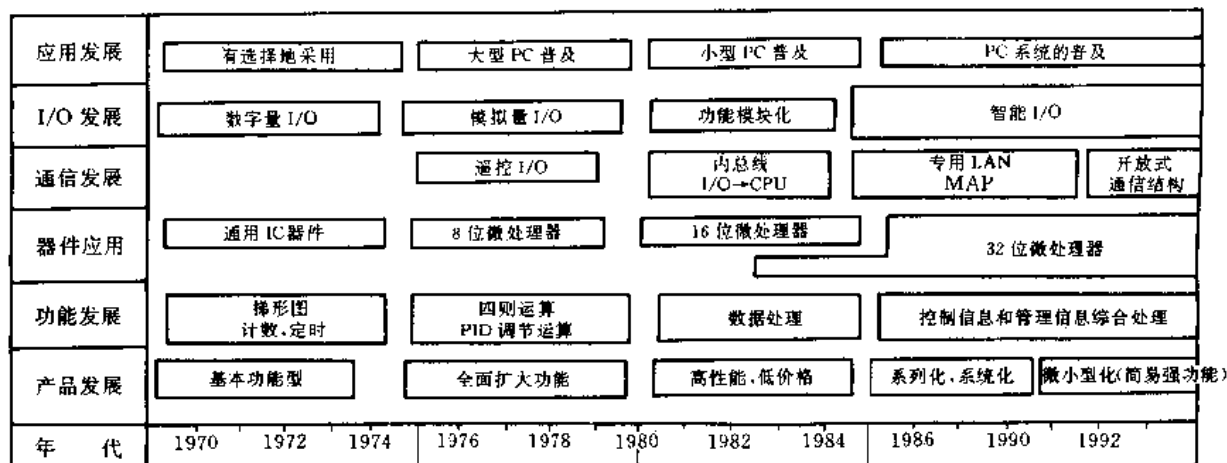


图8-4-7 可编程控制器的发展

PC功能越来越强,应用也愈益广泛。已广泛应用于化工、石油、钢铁、采矿、电力、水泥、机械制造、轻纺工业、环保检测和娱乐等部门。其近来发展特点如下:

(1) 微小型化。80年代初日本多家公司开发出体积小,价格低的整体式PC。

(2) 系列化。世界上知名制造厂已推出可供用户选择、各种档次的PC产品;高档次PC具有存储容量大(接近2M)、速度快(零点几毫秒)、功能强(提供多种I/O和智能I/O模板),有很高的性能价格比,见表8-4-1。

(3) 设置网络通信口。在制造厂商提供的网络通信环境下,PC可形成分布式工业控制系统,大部分的PC

均可与微型计算机互联互通。

(4) 输入/输出功能增强和智能化。按功能划分的输入/输出模板品种增多,便于用户挑选,方便组成工业控制系统。

(5) 发展利用个人计算机作为编程器的硬件和软件环境。

2. PC主要应用功能

(1) 定时、计数和逻辑控制,适用于机械或机床的电气控制、电机控制、上料传送系统、起重升降控制、仓库货物的提取和存放系统、人工气候环境的控制、……等场合。

(2) 位置控制,适用于高速高精度地控制单个或多个坐标轴的位移。



表 8-4-1 可编程控制器主要性能示例

| 主要性能 | 公司 | 美国 ALLEN -BRADLEY | 德国 SEMEMS | 德国 AEG | 美国 TI | 日本 三菱 | 日本 日立 | 日本 松下电工 |
|------------|----|-------------------------|----------------------------------------------------------------------|-----------|------------------------------|------------------------|----------|----------------|
| | 型号 | PLC5-40 | S5-1350 | A130 | T1530 | A3N | C20P | FP1 (C16) |
| 数字量输入/输出点数 | | 2048 | 4096 | 512 | 1024 | 2048 | 36 | 32 |
| 模拟量输入/输出点数 | | 2048 | 132 | | | | | |
| 最大用户程序存储容量 | | 48k 字 | 64k 字 | 5k 字 | 7k 字 RAM 外接 4k 字 EPROM | 60k 字 | 1194 步 | 900 步 |
| 速度 | | 0.5~2.0ms /1k 字 | 0.9~2.0ms /1k 字 | | | | | |
| 修理速度 | | | | | | 1.0μs/步 | 4~95μs/步 | 1.6μs/步 |
| 支持网络 | | Data Highway Plus | SINEC L ₁ SINEC L ₂ SINEC H ₁ | | | MELSECNET | SYSWAY | C-NET |
| 智能 I/O | | 过程 PID 位置控制 伺服编码 | 高速高普交 PID 控制 位置控制 高速计数 信号处理 | 位置控制 | | PID 控制 高速计数 位置控制 | 位置控制 | 高速计数 单轴位置控制 |

(3) 过程控制, 实现直接数字控制 DDC 的功能, 如 PID 调节器控制、回路监控、闭环控制等。

(4) 近程和远程数据采集及数据处理, 通过有线或无线方式实现数据通信, 采集现场数据送到中央控制计算机处理。

(5) 作为工厂自动化 (FA, Factory Automation) 或 CIM 中的最基本的工业控制装置, 用于刀具管理、自动运输车控制、物料流的控制和管理、自动仓库……等方面作业的监控。

(6) A/D 和 D/A 转换。

随着大规模集成电路、计算机技术、通信技术的进一步发展, 在可编程控制器技术发展动向上, 值得注意的是: 支持高速通信网、分布式控制结构; 采用通用的语言实现编程; 人机界面的改善; 智能外围接口的不断发展及故障诊断的更加完善。

3.3 可编程控制器的控制结构

3.3.1 早期可编程控制器的控制结构

用户以专用语言描述被控对象输入量和输出量之

间的逻辑、算术运算或函数关系, 编制程序, 存入用户程序存储器。CPU 对用户程序按地址顺序扫描, 逐条解释用户程序, 并对程序中涉及的输入量进行采集, 经过判断、比较和运算, 使相关的输出量变更或动作。当扫描到最终地址后, 系统又回到用户程序的起始地址, 循环进行。在系统正常时, 循环扫描将连续地进行下去。一旦发生死循环或超过系统允许的最长扫描周期 (参见本章 3.4.1 节), 系统自动停机。

早期 PC 的控制结构如图 8-4-8 所示, 它的特点

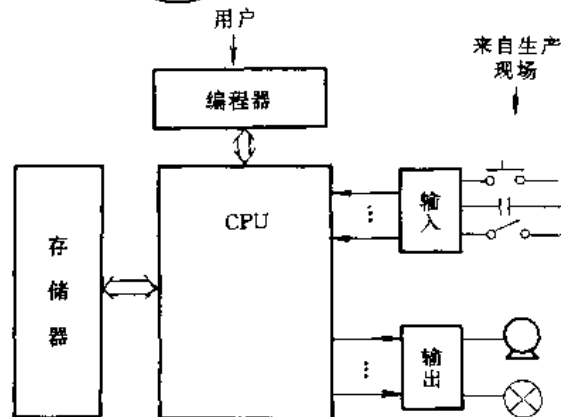


图 8-4-8 早期可编程控制器的控制结构



是：程序中的数据直接来自输入或输出接口模块；用户程序存储器每一地址存放的内容是操作码和操作数；系统存储器主要存放管理系统工作的系统程序及系统运行过程中累加器、数据寄存器、移位寄存器、定时器、计数器、内部输入输出状态以及内部继电器的动作状态；系统由单任务的操作系统管理。执行的时序为：对输入扫描，读用户程序，对输出扫描。

3.3.2 近代可编程控制器的控制结构

与早期可编程控制器相比，近代可编程控制器程序中数据并不直接来自输入或输出模块，而是来自输入/输出存储映象区，即数据映象存储器。输入数据或状态经扫描输入到周期刷新的映象区中，然后被采集到输入映象存储器中，通过读用户程序，执行用户程序，其输出结果保存于输出映象存储器中，经刷新输出锁存器后，由映象存储器转送到输出锁存器中，控制输出单元动作，见图 8-4-9。

用户存储器中的数据分为两大部分，即输入输出映象存储区和内部数据区。内部数据区包含定时、计数、移位寄存、步进控制以及梯形图中的内部触点和线圈。数据存储区的地址分为两类：位地址和寄存器地址。位地址分配给内部线圈和触点、输入/输出中的开关量数据。寄存器地址分配给定时、计数、移位寄存、输入/输出等功能所需的数据。

用户存储器的重要部分存储用户程序。对用户程序的循环扫描，实现控制的目的。循环扫描归结为三个过程：输入采样；读程序并执行程序；刷新输出锁存器后接受输出数据（或状态）。整个系统在一个专用的操作系统管理下工作。

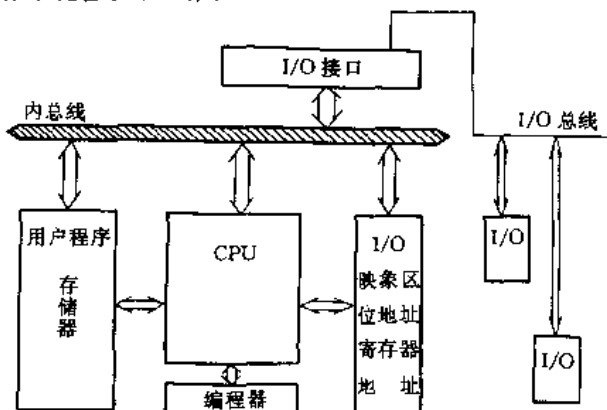


图 8-4-9 近代可编程控制器的控制结构

3.3.3 并行处理结构

对功能较强的可编程控制器采用多微处理器控制

结构，它由字处理器、位处理器和浮点处理器组成。在多任务操作系统支持下输入输出的状态映射到全局数据表中，大大提高了可编程控制器的运行速度，实现了真正的并行处理。

3.4 可编程控制器的系统结构

近代 PC 硬件结构分密集型整体式和模块组合式（或称插件总线式）两种。前者在超小型 PC 和小型 PC 中采用；后者在大、中、小型 PC 中采用。插件模块采用总线连接，构成用户所需的 PC 系统，便于扩展和维护。这里所指 PC 系统包括编程器、打印机、可编程控制器本体以及与外部设备相连接的通信接口、功能扩展接口、及其支持软件，如图 8-4-10 所示。PC 本体部分由中央处理模块（CPU）、存储器扩展模块、数字量输入/输出模块、模拟量输入/输出模块、专用功能模块（例如调整计数、闭环控制、数据通信）及电源等部分组成。各制造厂研制的 PC 模块的性能规格不同，选用时必须直接查阅有关手册。下面仅提供典型模块及其相关指标，以便于读者对照比较。

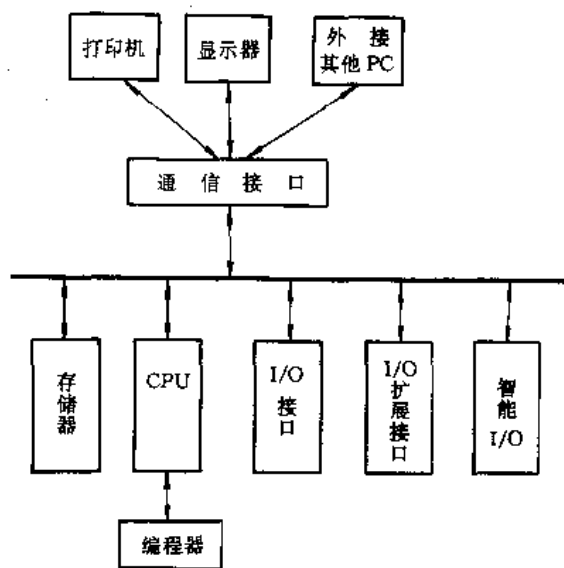


图 8-4-10 可编程控制器系统结构

3.4.1 主要性能指标

(1) 控制方式。通常有两种：循环执行方式（即对存储程序进行循环扫描，又称存储程序方式）；高级语言执行方式（与微型计算机系统的工作方式相似）。

(2) 扫描周期。CPU 对用户程序的扫描时间和系统处理时间之和，称之为扫描周期。前者随用户程序的不同而变化，后者是系统固有的，一般是不变的。用户可通过程序设计来控制扫描周期。系统处理时间包括

INTERNET

1-1-1



自监视、多CPU系统中与其它处理器进行信息交换及与网络进行通信等扫描过程的时间。

(3) 扫描速度(或称执行时间)。扫描用户程序存储器1k字所需的时间,单位为ms/k字,通常在数十毫秒到十分之几毫秒的范围内。

(4) 处理速度。读取和执行用户程序存储器中一个地址内容所需的时间,单位为 $\mu\text{s}/\text{步}$ 或 $\mu\text{s}/\text{Step}$ (1k字=1024步)。高速PC的处理速度仅0.15微秒/步。有些制造厂还提供执行指令所需时间:例如布尔逻辑运算 $1.6\mu\text{s}$,置换操作 $160\mu\text{s}$ 。

(5) 最大输入输出总点数。通常指数字量输入输出点数与模拟量输入输出点数之和。大型PC总点数在2048点以上,中型PC在512点以上,小型PC小于256点,微型PC小于120点。

(6) 用户程序容量。允许用户储存程序及程序所需数据的最大容量,单位为字或步,最常见的容量在1k步到60k步之间,大型PC可达896k字。经验的估算公式为

$$\text{程序容量} = K \Sigma \text{I/O 总点数}$$

K为描述控制难易的系数,取6~12之间,系统控制愈复杂,取值愈大。

$$\text{存储器容量} = 1.1 \text{ 程序容量}$$

它包含了用户程序存储器、输入输出信号暂存区、中间标志暂存区。

(7) 指令。PC功能愈强,指令的类型和数量愈多。指令有如下类型:

逻辑指令,包括“与”、“或”、“非”、等于、“与非”、先“与”后“或”、先“或”后“与”、置位/复位操作等。

运算指令,包括二进制和BCD码的各种运算,例如单精度加减法、双精度加减法、乘法、除法、加1和减1运算。

计数、定时指令,包括定长脉冲计时、延伸型定长脉冲计时、延时启动计时、保持型延时启动计时、延时关闭计时,双向可逆计数等。

数据传送指令,包括字与字之间、数据表之间、数据源到数据表、数据表到数据目的地、块传送、传送字的左8位、传送字的右8位、单个数据传送。

数制转换指令,包括二进制数、BCD码等不同码制之间的数值转换。

数值比较指令,包括比较两个数值的大小,小于、大于、大于等于、小于等于、不等于等。

控制指令,包括空操作、跳转、子程序块的调用、

返回、暂停I/O服务、立即I/O服务、变址指令。

表操作指令,包括读表、写表、表传送、表排序等。

矩阵操作指令,对矩阵中某点置位操作或复位操作、对长度相同的两矩阵相应的点进行“与”、“或”、“异或”等操作。

(8) 中间标志位数量。标志位数量反映了可控信息量,一般范围为512、1024、2048。PC功能愈强,标志位数量愈多。

(9) 计数器和定时器的个数。常见的数量各为16个、32个、64个、128个、256个。

(10) 扩展功能模板的能力。例如允许接入高速高精度PID控制、位置控制、高速计数、信号处理等智能模板。

(11) 操作员操作通信能力及系统显示功能。

(12) 通信接口能力。点-点通信或联局域网。

3.4.2 中央处理(主控)模板

其主要作用为:接收和存储用户程序及数据;选择运行方式(运行、保持或停止);实现扫描控制;读取、解释、执行程序;诊断故障(电源、CPU、存储器、I/O及通信接口的);对输入或输出的控制。

存储器通常包含在主控模块之中,分内部存储器(或称系统程序存储器)和用户存储器两部分,前者不允许用户直接存取,主要保存系统管理程序、功能化子程序等。用户存储器存储用户程序和数据,数据类型有输入/输出状态或数据的映象表,以及储存PC的内部信息:例如内部线圈状态、输入/输出数据、定时器的设定值和累计值、计数器的设定值和累加值、ASCII字符表等。目前使用的存储器类型有CMOS型RAM、EPROM、EEPROM等。CMOS型存储器可用锂电池供电,经常负载下可运行1~5年。

3.4.3 数字量输入模板

用于将外部生产过程的触点和开关信号转换成可编程控制器内部电平信号。选用时的要求有:输入点数;带电隔离的输入点数;输入电压特征(交流电压额定值、频率、直流电压极性及幅值)。(例如交流110V,220V,直流24V,48V等)输入信号为“1”时的标准输入电流值;信号从“0”到“1”和从“1”到“0”的延迟时间;电源模块供电下的电流消耗值;允许联结点间的最大长度(使用屏蔽电缆比使用非屏蔽电缆要长)。

3.4.4 数字量输出模板

用于将可编程控制器的内部电压转换成外部过程



所需的信号电压,驱动继电器、执行机构、信号灯等单元。选用时要求有:带(或不带)电隔离的输出点数;对负载供电的电压值(允许电压的范围)、允许的最大纹波电压值(峰到峰);输出为“1”时输出电流的额定值以及电源总电流值;输出为“0”时的剩余电流值;输出信号电压为“0”时的最大电压值(例如+3V)和为“1”时的最大电压值(例如—2.5V);电阻负载或电感负载不允许的最大开关频率;允许输出的最长电缆长度;短路保护方式。

3.4.5 模拟量输入模板

用于把来自外部生产过程的模拟信号转换成数字信号,以便CPU作进一步处理。选用时的要求有:输入额定值范围(例如±50mV,±500mV,±1V,±5V,±10V,±20mA,4~20mA);输入通道数;带电隔离个数;输入电阻值(MΩ);输入信号数字表示(编码方式及位数,如12位的二进制数);测量原理(如积分法);转换原理(如电压-时间转换);积分时间;最大编码时间;输入点之间允许的最大电压值;输入点与主机接地点之间允许的最大电压值(例如18V);允许输入电压的最大值;使用联结屏蔽电缆的最大长度;消耗电源的电流值。

3.4.6 模拟量输出模板

用于把可编程控制器CPU形成的数字量转换成外部控制过程所需的模拟量信号。选用时的要求有:输出通道数;带光电隔离的通道数;额定输出电压(或电流)的范围(例如0~10V;±10V;4~20mA);输出信号数字量表示时的编码及字长(例如12位二进制码);负载能力(如在电压输出情况下,其负载电流可达50mA);输出点之间允许的最大电压值;输出点与中心接地点之间允许的最大电压值;允许过载能力(用百分比表示);数字量转换成模拟量所需时间;有无短路保护;短路电流值;开路电压值;联结用屏蔽电缆的最大长度;消耗电源的电流值(在给定的内部电压时)。

3.4.7 计数器模板

用于“计数”和位置译码,主要要求有:计数器个数;有无电隔离;最高计数频率(数百Hz到数百kHz,更高频率可达2MHz,但需选择专门的高速计数模板);允许计数范围;设定计数目标值的型式(开关设定或软件设定);对输入信号的要求(额定电压值、“0”信号电压值范围、“1”信号电压值范围、“1”信号

时的输入电流值等);输入信号用屏蔽(或非屏蔽)电缆传输时允许的最长距离;输出信号特性(包括“1”信号时输出电流允许范围、“0”信号最大电压值、“1”信号最大电压值、短路保护方式等);输出信号传输用电缆(屏蔽或非屏蔽)允许的最大长度;供电电源性能(额定电压值、波纹电压、允许变化范围、消耗功率等)。

3.4.8 定时器模板

用于定时控制、延时操作等。定时值可由电位器人工设定,也可由软件设定。定时范围由数百毫秒到几分钟。选用时注意:模块上带有定时器的数量;定时范围;设定方式;设定误差;重复误差;消耗电源功率等。

3.4.9 输入/输出模板

部分可编程控制器配有独立的输入/输出模块。选用时的主要参数有:输入或输出电压的等级;输入输出点数;动作电压范围(输入动作的最小电压和最大电压);输入响应时间(接通响应时间和断开响应时间);消耗电源功率。

3.4.10 智能输入输出模块

智能输入输出模块带有单独的CPU和系统程序,可以在主CPU管理下独立工作,以提高处理速度。近年来智能模板品种不断扩大,已包括通信模板、闭环控制模板、高速计数模板等,下面介绍几种常用典型模板。

(1)温度控制模块。能监视和控制温度,也能对模拟值进行测量和监控。它可替换多个单回路控制器,模块中的各单回路控制器相互独立,若有需要,也可级联。典型产品如西门子IP244;可替换13个控制器,可以对原有每个控制回路PID编程,可以选择阈值和滞后宽度,以避免输出端的频繁接通;采样时间可在800ms至32s之间选择。中央处理器在一个扫描周期读入IP244所有控制器的控制值,并将这些控制值传送到模拟量输出模块。

(2)加热电流检测模块。通常与温度控制模块配合使用。通过本模块上的电流互感器检测加热电流,并将测量值输入温度控制模块。输入元件为热电偶。通过电流检测或电压检测监视加热元件。

(3)阀门控制模块。可直接控制比例阀或伺服阀,并可选择开环或闭环调节阀门的开启度。选择时注意输入电压的范围和输出电流电压的范围。



(4) 位置控制模块。用于控制步进电机或交/直流伺服电机, 驱动 1~3 个独立的坐标轴, 进行定位或变速, 实现位置控制。具有原点搜索、间隙补偿、多点定位等功能。步进电机使用开环控制, 交/直流伺服电机采用闭环控制。

(5) 高速计数和位置译码模块。用于接收和处理高速计数脉冲 (频率 500kHz~2MHz), 用户程序可选择多种计数方式, 例如 BCD 计数、二进制计数、单脉冲计数、周期计数、正跳沿或负跳沿计数、正向 (加) 计数、负向 (减) 计数、内部脉冲计数、外部脉冲计数、带或不带有启动/禁止控制等。

位置译码器用来获取、匹配和处理多个位置编码器的信号。

(6) 闭环控制模块。可广泛应用于高速处理控制环, 模块中有多个闭环控制回路, 每个回路可实现三种调节结构: 第一种为转速调节结构 (用于碾磨机、涡轮机……) 和驱动调节结构 (用于造纸机械或薄膜压延机械); 第二种为带有自适应的驱动调节结构, 用于直流电机速度自动控制系统, 用户只需将工厂有关电气、机械数据输入, 该模块可自行确定最佳参数; 第三种是标准调节器结构, 适用于温度、压力、流量控制等一般应用。通过写入参数, 实现 P (比例)、I (积分)、D (微分)、PI (比例积分)、PD (比例微分) 或 PID 调节。

3.5 可编程控制器的编程语言

PC 编程语言是面向被控制对象、直观形象的一种专用语言, 编制程序需要专用的编译器或使用装有专用软件的个人计算机。目前, 世界上各大制造厂开发的编程语言是互不兼容的, 使用时应参照制造厂提供的编程手册。虽然编程时各厂家要求不同, 但语言的结构和功能是相似的。现有的编程语言按编程形式可分为如下四种: 梯形图语言、功能图语言、指令语句表和计算机高级语言。前两种用图形描述, 后两种用文字描述。另有一种称作顺序功能流程 (SFC) 方式是图、文结合的描述语言。通常除高级语言外, 梯形图、功能图、指令语句表之间是可以相互转换的。

3.5.1 梯形图语言

PC 替代了继电器控制柜, 但工程技术人员熟悉的继电器控制系统的梯形图却以 PC 梯形图语言的形式继承了下来 (参看图 8.4-11)。它是一种实时的、图形化编程语言, 与继电器控制图的符号相似, 简称梯形图。

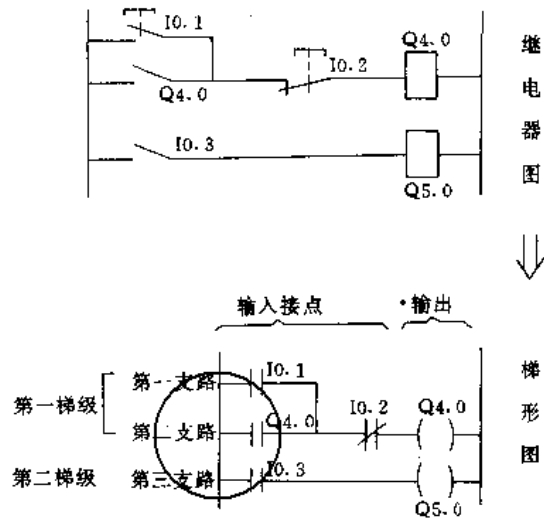


图 8.4-11 继电器图一梯形图

梯形图由多个梯级组成, 每个梯级由一条或多条横向线路组成, 横向线路又称支路由输入接点和输出单元组成。支路中允许不设输出单元。一个 (或多个) 输出单元可构成一个梯级。每个梯形图允许的支路数是有限的, 每条支路允许的输入接点数 (串联接点或并联接点) 也是有限的, 具体的限制值参阅生产厂的手册。

梯形图中每个输入接点和输出单元应按要求加标号。通常用字母、数字串定义, 一个输出单元只允许有一个定义标号。接点标号确定后, 其状态允许作无数次的读出。

按照 PC 扫描工作原理, 对输入状态的读取、处理 (逻辑的或算术的) 和处理结果的输出是依次顺序进行的。

3.5.2 功能图语言

采用类似数字电子电路的符号, 用方块表示功能单元, 用不同的字符标记“与”、“或”、取反、计数、定时、算术运算和比较操作等功能, 按照数字电子电路工作原理设计成所需要的逻辑系统图, 实现对被控对象

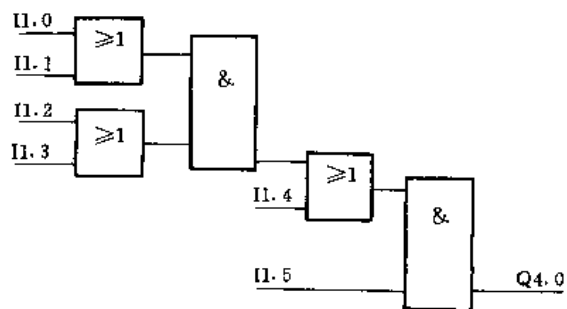


图 8.4-12 功能图及其语句表



的控制。编程时，使用专用的编程器（或专用软件）产生功能单元的图形，并由功能单元图自动变换成目标程序送入PC，这种功能图语言适用于熟悉数字电子电

路的系统设计人员使用，图8-4-12描述了其基本结构，图的信号流向规定为自左至右，功能单元的左侧为输入量或称操作变量（用1表示），右侧为操作结果的

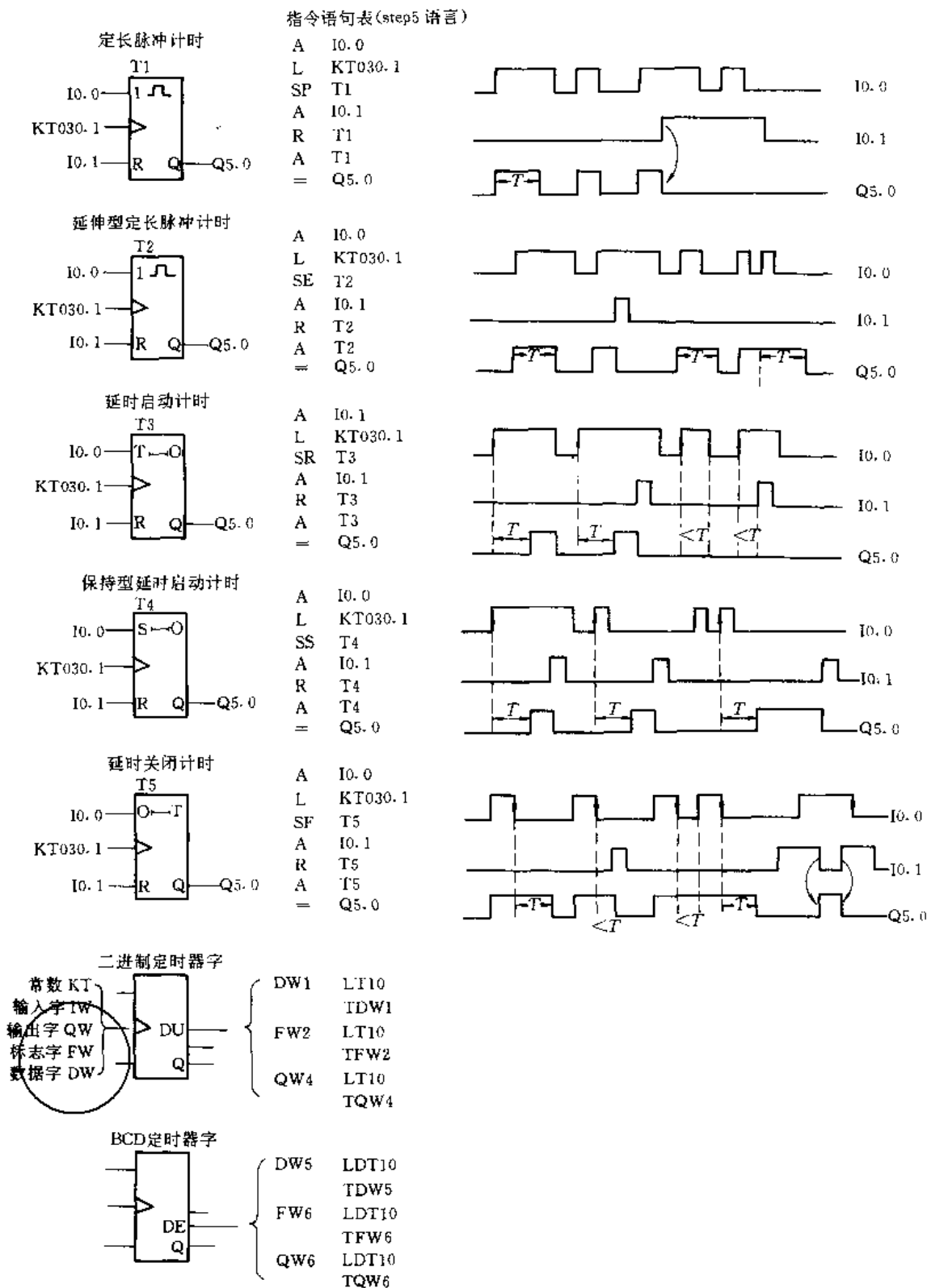


图 8-4-13 时序逻辑功能单元示例图



(续)

输出(用Q表示)。每个操作变量要按规定标注(例如: I1.0, I1.1, …, Q4.0), 每个功能单元的操作变量个数、功能单元之间串级数、每一组逻辑运行的输出个数等的最大允许组值参见编程器制造厂的手册。图8-4-13列出了西门子公司 Step5 语言中对时序逻辑功能单元的描述。

这种图形语言只能完成逻辑、计数、定时、数值比较等功能, 在使用上有一定的局限性。

3-5-3 指令语句表

这是由一系列顺序排列的语句组成, 每条语句类似于汇编语言的助记符表达式; 每个控制功能由一条或多条语句实现。常见指令语句表有如下两种结构: 操作码+操作数; 操作码+标识符+参数。

操作码描述操作的功能, 操作数表示执行操作功能所需信息或信息的地址, 操作数标识符描述参数的性质。参数类型有: 输入变量(输入接口板采集到的开关量信号或数字量信号); 输出变量(输出接口板的开关量输出或数字量输出); 中间变量(需暂存留用的运算中间值、逻辑操作中间标志、定时器或计数器的设定值); 常数(运算系数、定时器或计数器的设定值)。

作为一个实例, 表8-4-2~表8-4-3分别列出了西门子公司 step5 语言中指令语句表的操作码和操作数标识符。各制造公司均备有详细的指令语句资料供用户设计时查阅。

表 8-4-2 西门子公司 step5 通信指令语句中的操作码

| 操作码 | 定义功能 | 允许的操作数 |
|-----|-------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| A | 逻辑“与” | I, Q, F, T, C |
| AN | 逻辑“与反” | I, Q, F, T, C |
| O | 逻辑“或” | I, Q, F, T, C |
| ON | 逻辑“或反” | I, Q, F, T, C |
| A (| 逻辑“与”带括号 | |
| O (| 逻辑“或”带括号 | |
| (| 闭括号 | |
| S | 置位 | I, Q, F |
| R | 复位 | I, Q, F |
| L | 装载(操作数)→累加器 | IB, QB; IW, QW, T, C FY, FW, DL, DR, DW, KC KB, KS, KF, KH, KM, KY, KT |

| 操作码 | 定义功能 | 允许的操作数 |
|----------|--------------------|--------------------------------------|
| T | 传送(累加器)→累加器 | IB, QB, IW, QW FY, FW, DL, DR, DW |
| SP | 定时(上升沿起动作) | T |
| SD | 定时(上升起动作, 延时接通定时器) | T |
| SE | 上升沿启动扩展脉冲定时器 | T |
| SS | 上升沿启动存储延时接通定时器 | T |
| SF | 下降沿启动延时关断定时器 | T |
| CU | 计数器操作, 上升沿加1计数 | C |
| CD | 计数器操作, 上升沿减1计数 | C |
| NOP0 | 空操作, 所有位=“0” | |
| NOP1 | 空操作, 所有位=“1” | |
| +F | 定点数加 | |
| -F | 定点数减 | |
| ! =F | 比较操作等于 | |
| ><F | 不等于 | |
| >F | 大于 | |
| >=F | 大于或等于 | |
| <F | 小于 | |
| <=F | 小于或等于 | |
| JU | 块调用, 无条件跳转到一个程序块 | PB/PY, FB |
| JC | 有条件跳转 | PB/PY, FB |
| C | 调用数据块 | DB |
| BE (BEC) | 块结束操作(BEC, 有条件块结束) | |
| STP | 停机操作, 结束扫描循环 | |



表 8-4-3 西门子公司 step5 语言指令语句中的操作数标识符

| 标识符缩写 | 含 义 | 标识符缩写 | 含 义 |
|--------|--------------|-------|------------|
| ACCUM1 | 累加器 1 | PW | 外设 (I/O) 字 |
| ACCUM2 | 累加器 2 | Q | 输出 |
| C | 计数器 | QB | 输出字节 |
| CAP | 计数器正跳沿计数 | QW | 输出字 |
| F | 标识位或定点数 | RLO | 逻辑操作结果 |
| FY | 标识字节 | SAC | STEP 地址计数器 |
| FW | 标识字 | T | 定时器 |
| DL | 数据字 (左字节) | G | 浮点数 |
| DR | 数据字 (右字节) | D | 双精度定点数或数据字 |
| DW | 数据字 | | |
| I | 输入 | | |
| IB | 输入字节 | | |
| IW | 输入字 | | |
| KB | 常数 (1 字节) | PB | 程序块 |
| KC | 常数 (计数值) | FB | 功能块 |
| KF | 常数 (定点数) | SB | 顺序块 |
| KH | 常数 (十六进制码) | DB | 数据块 |
| KM | 常数 (2 字节位模式) | | |
| KS | 常数 (2 字符) | | |
| KT | 常数 (定时器时间值) | | |
| KY | 常数 (2 字节) | | |

用指令语句描述图 8-4-12 时:

```

A (
A (
OI 1.0
OI 1.1
)
A (
OI 1.2
OI 1.3
)
OI 1.4
)
AI 1.5
=Q 4.0

```

图 8-4-13 给出了时序逻辑功能单元及其对应的指令语句表。

3.5.4 顺序功能流程图

顺序功能流程图 (SFC, Sequential Function Charts), 由法国首创, 它由步、转换、路径三个基本元素组成。用图的形式描述顺序控制的过程, 根据转换“条件”, 决定图的流向。

‘步’相当顺序控制中描述一个独立的、完整功能

(或某种操作) 的一个程序段, 例如起动、结束、自循环起点和终点等, 用单线方框表示。

‘转换’表示从当前步转向下一步的必要和充分的条件。既满足当前步的结束条件, 又满足下一步的起动条件, 常用短横表示。

‘路径’表示各个步之间的连接关系, 有两种类型: 选择路径和并行路径, 前者由转换条件决定, 哪条路径中的“条件”先成立则先通行; 后者是一旦条件成立,

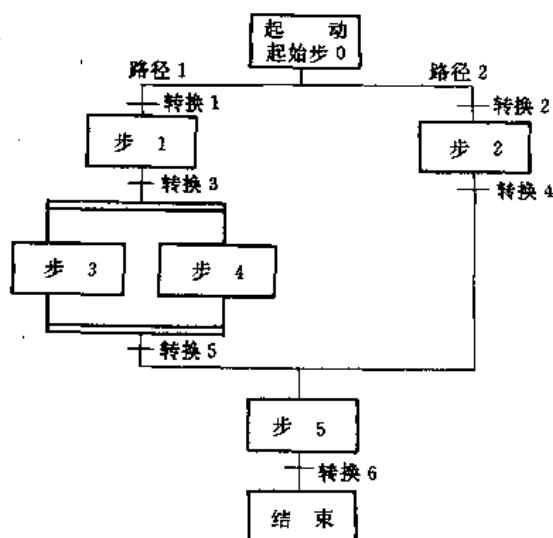


图 8-4-14 SFC 图的基本形式



相关的路径同时开放执行,执行时按照先上后下,自左至右的流向依次进行,到达‘结束步’后,检查该步转换条件是否成立;若是,停止执行。若‘不是’,返回‘起始步’。图 8·4-14 描述了 SFC 图的基本形式。

3·5·5 高级语言

标准化组织 IEC 推荐 PC 采用的结构化语言为 C 语言、Pascal 语言和 Ada 语言。

目前市场上已出现使用 BASIC 语言的 PC。

3·6 程序设计

3·6·1 程序设计内容

了解 PC 控制原理、硬件和软件结构,掌握 PC 编程语言是进行程序设计的基础。设计的基本内容和步骤如下:

(1) 确定被控对象的工艺流程、控制方式、单台或多台控制以及系统响应时间(即输入信号引起可编程控制器输出信号改变所需的时间,它不包括执行机构动作时间)。

(2) 确定输入和输出信号的名称、特征,列出输入输出变量表,表中包括硬件编号、信号端子号、信号标识符、信号名和信号有效状态。信号可分为三种:1) 开关量信号、以‘位’的形式表示,有‘1’或‘0’两种状态;2) 数字量信号、以字节或字表示的二进制数据,有带符号的二进制数(定点数)和以科学记数法表示的浮点数两种形式;3) 模拟量信号,外部系统、设备或部件产生的连续变化的信号。信号有效状态包括上升沿或下降沿有效;“0”状态或“1”状态有效;状态保持(锁定)有效。

(3) 确定程序结构,按照工艺流程、确定完成各种作业的先后次序,组成顺序的程序结构。

(4) 确定功能流程。作业可分解为各种基本功能。描述每种功能的程序流程即是功能流程。由输入信号与输出信号变化关系描述实现功能的过程。确定输出信号的置位和复位条件是设计的关键。

(5) 绘制程序框图,参见图 8·4-15。

(6) 编制程序。

(7) 程序测试。

(8) 编写程序说明书。

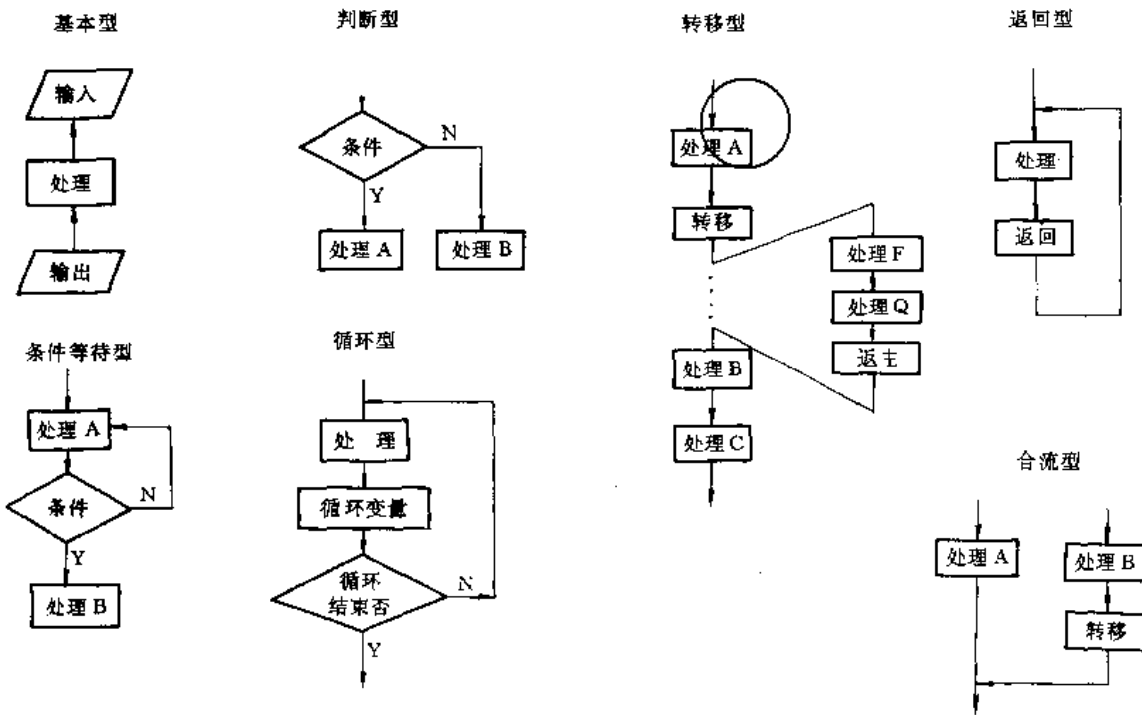


图 8·4-15 程序流程图基本型式

3·6·2 程序编制方法和步骤

(1) 熟悉编程器和所选用的编程语言。
 (2) 对输入信号和输出信号分组和编号,编号原

则为:相同电压等级、相同输入类型(如按钮输入、开关输入等)、相同输出部件和相同输出功能编排在—起,然后按编程器的要求编号。

(3) 确定寄存器的数量。运算过程或操作过程产



生的中间结果、中间标志信号和运算常数存放在暂存器中。暂存器可按功能编排,依次编号。预留一定数量的暂存器作检测时用。

(4) 对计数器、定时器编号,可按功能分类,然后连续排列依次编号。

(5) 确定信号地址。综合考虑上述(2)~(4)项,对内存按信号类别分区,通常分用户程序区、开关量存储区、数字量存储区、‘暂存’存储区、通信存储区等,分配时应留有足够的余量,以利于编程。

(6) 用编程语言编写程序。

(7) 程序测试。测试是发现问题,完善设计的重要步骤,通常先测试各功能单元,设定并改变输入信号,观察输出信号的变化。功能单元测试通过后,再测试作业流程。并测试各部分的接口情况,直到符合要求为止。

3-6-3 程序设计举例

程序设计与编程语言、指令类型和指令格式紧密相关。不同厂家的PC,采用的指令系统不同,因而设计时必须要有制造厂提供的编程手册,通常编程手册资料较全,并有详细的实例。购置PC时,应订购编程设

计资料,以便查阅。

3-7 可编程控制器的通信

3-7-1 可编程控制器通信系统

PC已成为实现工厂自动化的基本装置,广泛用于工业控制系统、集散系统和计算机集成制造系统。大量现场信息通过PC传送给上位计算机,上位机向PC发送控制指令和参数,PC与计算机之间的数据交换有两种方式:点到点串行通信方式,适用于小型自动化系统,一台计算机管理数台(约2~4台)PC;另一种是计算机局域网通信,可联结较多的控制设备适用于多级分布式控制系统。

多级分布式控制系统结构要根据工厂管理的体制建立区域性计算机局域网(信息管理局域网、制造信息局域网)、PC间互联通信、PC和输入/输出之间的互联通信等层次(参见图8-4-16)。连接区域网或管理级局域网上的PC功能较强,这类PC至少有能与上、下级通信的接口。PC与PC间、PC与输入/输出之间的通信方式可通过总线式局域网,也可采用点到点串行通信联结。

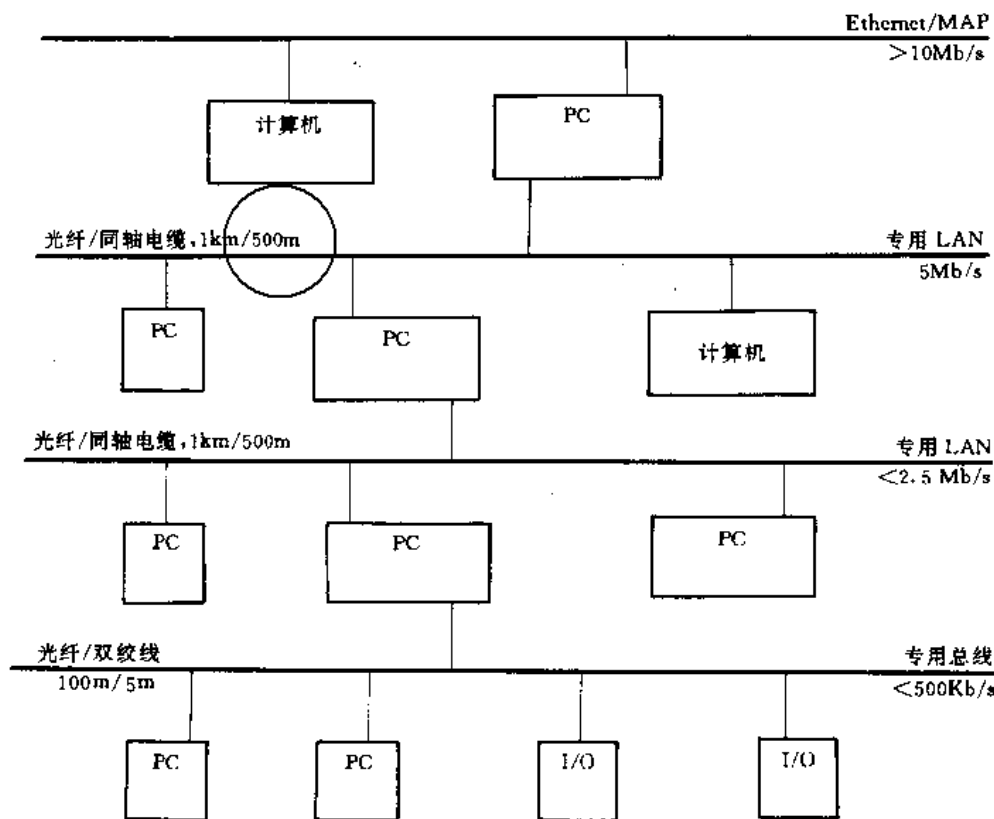


图 8-4-16 可编程控制器通信系统示例图



选择制造信息局域网考虑因素如下:

(1) 信息交互方式:主从式交互(设备与主计算机交互、设备之间不能交互);双向式交互;

(2) 允许联接的最大设备数,一般用网络的节点数描述;

(3) 波特率:有 9.6kbps (Kilo-bits per Second, 每秒千位), 19.2kbps, 1.5Mbps, 5Mbps (Mega-bits per second, 每秒兆位), 10Mbps 等等级;

(4) 传输介质:双绞线、同轴电缆、光纤;

(5) 拓扑类型:总线型和环形等;

(6) 覆盖距离:与传输介质有关,使用光纤损耗减少,覆盖距离可增加;

(7) 价格。

3.7.2 可编程控制器通信接口

近代 PC 为了适应不同的局域网和不同的通信功能,提供了不同的通信接口供用户选择,选择时应注意:

(1) 通信结构。直接联局域网;点到点通信、混合结构(点到点连接网络服务器,网络服务器通过网络实

现数据交换)。

(2) 通信方式。主从式通信方式;对等式通信方式。

(3) 互联通信接口数及其接口标准。通信接口板可用于连接计算机、显示器、打印机、键盘、同类型的可编程控制器、编程器等设备,用户根据需要选用带有多个接口的通信接口。常用的接口标准有 RS-232C/RS-232、RS422A/RS485。

(4) 接口板的参数设定。常见的有:

1) 数据传输波特率 设有 110, 300, 600, 1200, 2400, 4800, 9600, 19.2k, 38.4k 等档,单位均为 bps。各公司提供的波特率范围并不相同。

2) 物理层接口标准及通信方式选择。

3) 物理层,奇/偶校验设定。

4) 通信延时允许时间(滞后时间),在点到点通信时在 550ms 以内,发送方和接收方在开始通信连接时,发送方发出信息经延时允许时间后未接收到接收方的响应,认为原发送信息失效,需重新发送,通常允许重发三次。

表 8.4-4 作为一个例子,列出了工业通信网的部分性能。

表 8.4-4 工业通信网性能

| 网络名称 | SINEC L1 | SINC L1/L2FO | SINC H1/HIFO |
|--------------------|----------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| 特点 | 主从通信方式中断优先级驱动价格较低 | 西门子 PROFIBUS 总线 DIN 19245 part 1 标准主从令牌通信方式 | 符合 IEEE802.3 (CSMA/CD) |
| 波特率 | 9.6kbps | 9.6kbps~500kbps 1.5Mbps | 10Mbps |
| 传输距离 | 50km | 23.8km (光纤) 9.6km (双绞线) | 4.6km (光纤) 1.5km (三芯电缆) |
| 节点(个) | 32 | 127 (有 32 个主动节点) | 1024 |
| 使用协议及应用范围 | L1: 联接西门子 S5 系列 PC 产品 31 台 | L2-DP: 用于设备层快速响应 L2-TF: 适用 MMS L2-FMS 德国标准 DIN 19245 第 1, 第 1 部分 | H1-TF 允许联接第三方产品 例: Digital, HP, Tandem H1-MAP: MAP30 协议 |
| 通信接口板名(用于 PC 上)及性能 | CP530 · 接口 RS-485 · 数据传输协议 AS-511 (带 BCC 校验) | CP5430 · 总线端子 RS-485 | CP143 CP535 |



3.8 可编程控制器标准化问题

3.8.1 标准化近况

PC 应用日益广泛,它已成为自动化制造系统中的通用工业控制装置。为了适应世界市场发展的需要,在多厂商供货环境下,如何提高产品的互联性及减少用户的开销等问题,已受到各国的关注,主要工业国已分别制定了相关标准,例如:美国 NEMA 3-304,德国 DIN19240,法国 NF C63850。

国际电工委员会(IEC)在工业过程测量和控制这一分组(IECTC65)中,下设 SC65A(系统)、SC65B(设备)、SC65C(数字通信)三个小组,可编程控制系统附属于 SC65B,代号为 WGT,正从五个方面拟定标准:

- TF1 1131-1 通用信息
- TF2 1131-2 设备特征和测试要求
- TF3 1131-3 编程语言
- TF4 1131-4 用户指南
- TF5 1131-5 与 MMS(参见本章 2.4 节)相关的标准

日本通产省工业技术院正依照昭和 63 年“推进 FA 标准化五年计划”在平成三年作为日本工业标准(JIS)实施。其中要点有:用语定义、功能特性、语言、

试验方法、通信等五方面,均以 IEC 标准为准。

3.8.2 编程语言标准

IEC1131-3 关于编程语言标准规定了数据类型、功能定义、功能单元定义的标准(参见表 8.4-5~表 8.4-7)

表 8.4-5 PC 编程数据类型

| 类型 | 名称 | 符号 | 字长 |
|-------|-----------|-------|------|
| 名词 | 位 | BOOL | 1 位 |
| | 字节 | BYTE | 8 位 |
| | 字 | WORD | 16 位 |
| | 双倍字长 | DWORD | 32 位 |
| | 长字长 | LWORD | 64 位 |
| 整型 | 短整型 | SINT | 8 位 |
| | 整型 | INT | 16 位 |
| | 双倍字长整型 | DINT | 32 位 |
| | 长整型 | LINT | 64 位 |
| 无符号整型 | 无符号短整型 | USINT | 8 位 |
| | 无符号整型 | UINT | 16 位 |
| | 无符号双倍字长整型 | UDINT | 32 位 |
| | 无符号长字长整型 | ULINT | 64 位 |
| 实型 | 实型 | REAL | 32 位 |
| | 长实型 | LREAL | 64 位 |

表 8.4-6 功能定义

| 功能符号 | 定义 | 功能符号 | 定义 |
|------|------------|-------|----------------|
| AND | 与 | SIN | 正弦 |
| OR | 或 | COS | 余弦 |
| XOR | 异或 | TAN | 正切 |
| NOT | 否(反) | ASIN | 反正弦 |
| SHL | 左移几位 | ACOS | 反余弦 |
| SHR | 右移几位 | ATAN | 反正切 |
| ROL | 向左旋转几位 | SEL | 选二进制中的位 |
| ROR | 向右旋转几位 | MIN | 最小值 |
| ADD | 累加 | MAX | 最大值 |
| SUB | 减 | LIMIT | 极值 |
| MUL | 乘 | MUX | Extensible MUX |
| DIV | 除 | GT | 大于 |
| MOD | 取模 | GE | 大于或等于 |
| EXPT | 指数 | EQ | 等于 |
| ABS | 绝对值 | LT | 小于 |
| SQRT | 平方根 | LE | 小于或等于 |
| LN | 自然对数 | NE | 不等 |
| LOG | 以 10 为底的对数 | LEN | 字符串长度 |
| EXP | 以 e 为底的对数 | LEFT | 左边几个字符 |



(续)

| 功能符号 | 定 义 | 功能符号 | 定 义 |
|------------------------|-----------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------------|
| RIGHT MID CONCAT | 右边几个字符 取字符串中部分字符 Concatenation 联接 | INSERT DELETE REPLAC FIND | 插入某字符串到指定位置 删去某字符串中的字符 替换 查找某字符 |

表 8·4-7 功能单元定义

| 功能类型 | 单元名称符号 | 定 义 |
|------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 双稳 | SR RS SEMA | Set Dominant Flip-Flop 触发器置位 Reset Dominant Flip-Flop 触发器复位 Semaphore with non-interruptible "Test and Set" 具有不可中断的“测试与设置”功能的信号灯 |
| 边沿 | R-TRIG F-TRIG | Rising Edge Detector 上升沿检测 Falling Edge Detector 下降沿检测 |
| 计数 | CTU CTD CTUD | Up-Counter 加法计数 Down-Counter 减法计数 Up-Down Counter 可逆计数 |
| 计时 | TP TON TOF RTC | Pulse Timer 脉冲计时器 On Delay Timer 闭合延时 Off Delay Timer 断开延时 Real Time Clock 时钟 |
| 通信 | SEND RCV USEND URCV READ WRITE ALARM NOTIFY CONNECT STATUS USTATUS | 发送 接收 不发送 不接收 读 写 报警 通知 联接 状态 无状态 |

4 自动化制造系统的控制和管理

4.1 自动化制造系统的控制结构和功能

4.1.1 直接数字控制系统

1. 直接数字控制系统的组成 由计算机直接控制和管理多台数控机床作业的系统称作直接数字控制(简称 DNC)。60年代初,数控机床日益增多,使用上存在两个问题,即控制器价格偏高和光电阅读器输入信息可靠性偏低。小型计算机出现后,用计算机加载 NC 程序到多台 NC 系统成为现实。通常把早期这种控

制系统称作“群控”。70年代微处理器的出现,很快使 NC 升级为计算机数字控制系统(CNC)。进入80年代后控制功能更扩大了,除 NC 程序管理外,增加了刀具数据管理、托盘数据管理、故障自检、实时监控、程序编制,设备运行状态、成品、废品统计、机床利用率等和数据通信的能力。在 CNC 系统上配置能与计算机进行数据交换的通信接口,称为 DNC 接口。多台带有 DNC 接口的 CNC 系统在一台计算机管理下就组成了 DNC 系统。对具有上述功能的 DNC,国外称作分布式数字控制系统。当前 DNC 系统已成为自动化制造系统的基本结构。它投资少,见效快,控制的设备已不局限于数控机床,扩展到物流控制、刀具控制等范围,并



能适应于少则控制几台、多则控制十几台设备的制造环境。这种系统也称作扩展功能型 DNC (BSDNC, Broad Scope DNC)。

2. DNC 系统的功能和组成 DNC 联接对象为机床的数控系统和可编程控制器,实际上包含了切削机床、注塑成型机、电加工设备、切割机、机械手(机器人)、运输小车等各类设备。DNC 功能如下:

- (1) 由计算机管理和分配各台机床的加工任务。
- (2) 由计算机管理和分配 NC 程序。
- (3) 由计算机对机床运行情况 and 加工情况进行统计并保存历史数据、维护报告、安装说明、生产日期等。
- (4) 刀具管理(刀具寿命管理和加工前的检查)。
- (5) 系统的实时监控(包括对设备,对生产信息,对质量控制等方面)。
- (6) 实现与 CAD/CAPP/CAM 的集成。
- (7) 图形显示刀具轨迹、仿真加工路线。

上面列举了较为完善的 DNC 系统的各项功能,简易型的 DNC 系统仅对 NC 程序进行管理。

DNC 系统由主控计算机、控制器通信口和通信系统(见图 8-4-17)三部分组成,系统中设置 CAD/CAM 接口十分必要,对于某些专用的或小尺寸的 CAD/CAM 或 CAPP,可以集成于 DNC 主机中,在后台运行。

DNC 主机的布局取决于通信系统的布局和系统控制要求,既可远离控制器,也可设置在控制器附近,前者通常出现在控制台数较多的场合下。通信系统采用点到点结构或计算机局域网结构。

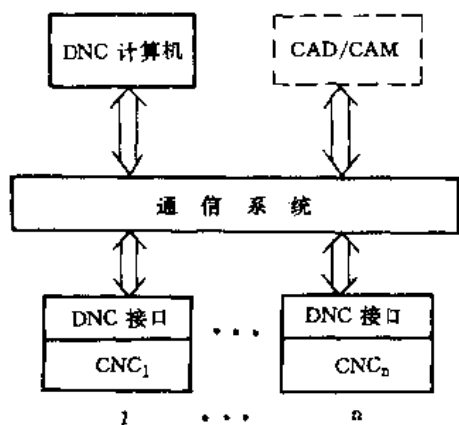


图 8-4-17 DNC 系统图

3. DNC 通信系统——物理层 DNC 通信结构一般采用 OSI 七层参考模式,常选用其中应用层、链路层、物理层等三层组成。物理层的拓扑结构有星型、总线型、环型和混合型(例如星型与总线型的混合)。

星型结构把主机看作一节点,设备看作另一节点,进行点到点串行通信,其优点是结构简明、便于掌握维护;缺点是控制距离受串行通信的限制,分布距离 $\leq 30m$,连接机床台数不宜超过 8 台。

总线型结构是计算机局域网的一种类型,便于挂接,分布距离广。

混合型结构是 CNC 系统通过网络终端服务器与总线网相连,每个终端服务器可与 8 台 CNC 相联接,实现点到点的通信。

物理层目前使用得较多的是 RS-232C 和 RS-422 标准,数据传输率范围为 2400~9600bps。通常传输距离愈长,选用速率愈低。为提高传输的可靠性,应采用 20mA 电流环。异步传输时应根据 DNC 接口的要求,在计算机侧设置如下相应的参数:数据位(5, 6, 7 或 8 位);停止位(1, 1.5 或 2 位);校验位(奇或偶校);校验位的位数(1 或 2 位)。总线型通信介质可选用同轴电缆或光纤。

4. DNC 通信系统——链路层 这一层主要的任务是在物理层提供的数据位服务的基础上确保传输的可靠性。

链路层协议中常用的控制字采用 ASCII 码,常用的通信字符有:

- ENQ (05H) 请求发送
- ACK (06H) 确认
- STX (02H) 文始
- NAK (15H) 不确认
- ETB (17H) 传送帧(块)结束
- DLE (10H) 数据联接换码
- ETX (03H) 文终
- WACK (0EH) 等待确认
- EOT (04H) 传送结束
- CRC、CCITT 标准、校验码

DNC 系统中,各制造厂使用的通信协议各不相同,较典型的串行通信链路层协议是西门子公司采用的 3964R 协议(图 8-4-18)、LSV2 协议(图 8-4-19)、RS-484 协议。

同步串行链路层通信协议常见的有 BISYNC (IBM 公司)、SDLC (IBM 公司)、HDLC (ISO)、ADCCP (ANSI)、X-25 (CCITT)、DDCMP (DEC 公司)、UDLC (UNIVAC)。

5. DNC 通信系统——应用层 由于制造环境不同、制造设备不同、控制功能多种多样,从发展来看,对应用对象的描述将逐步趋向采用 MAP 标准的



MMS。主要有 ISO9506-1 (MMS 的服务——对控制

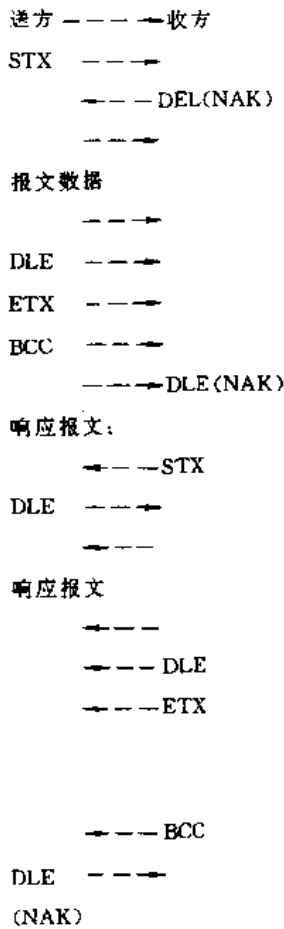


图 8-4-18 3964R 协议

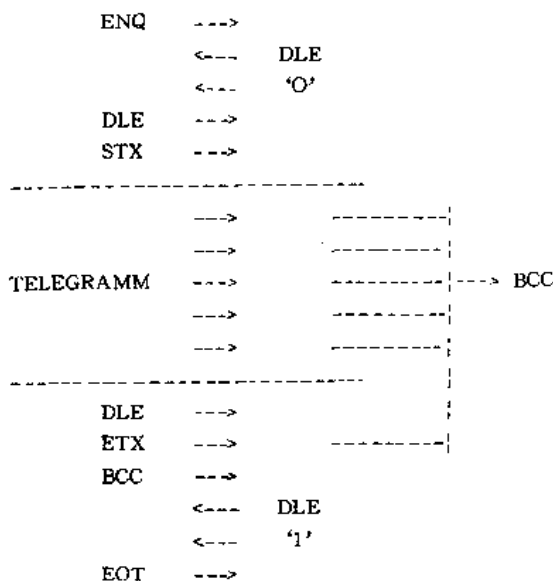


图 8-4-19 LSV2 协议

器之间交互类型的描述)和 ISO9506-2 (MMS 的协议——实现“服务”,对 MMS 用语说明的描述)两部分。相关的标准还有 ISO9506-3 (机器人相关的标准), ISO9506-4 (NC 相关的标准), ISO9506-5 (PC 相关的标准)和 ISO9506-6 (过程控制相关的标准)。读者在设计时可查阅上述标准。

对非标准的应用层,设计时应注意:

- (1) 通信报文的数据结构(定长或不定长)。
- (2) 功能标识符的定义。
- (3) 通信数据的结构(类型、格式和字长)。例如:有定字长和不定字长;字符有 ASCII 码或 BCD 码、二进制等。

DNC 系统虽然制造厂商提供的功能标识符不全相同,但其基本功能相似,主要功能有:

- (1) NC 程序管理。CNC 上传;计算机下发;删除;压缩内存。
- (2) 加工管理。选择 NC 程序、启动(或执行)NC 程序;加工结束;CNC 状态报告;报警;
- (3) 刀具管理。读机床刀库刀具数据;列出卸刀具清单;换刀;通知计算机卸刀;请求装刀并由计算机输入数据。
- (4) 托盘管理。加工件零偏移值下发到控制器,加工件零偏移值上传给计算机;加工结束调出托盘。
- (5) 通信管理。计算机和控制器建立联接;查询控制器是否与上级机建立联接;挂起正执行的程序;清除执行中的 NC 程序。

通信报文中与加工有关的数据有 NC 加工程序号、零偏移值、托盘号、托盘在机床上的位置(缓冲位或加工位)和故障报警信号。

与刀具有关的数据有刀具号、刀库号、刀具标志、同类刀的数量、刀具几何参数(长度、半径、刀片号等)、刀具空间位置标志(在刀库、在主轴或在换刀机械手上)、刀具空间相邻位标志(有刀或无刀、在前或在后)、刀具寿命和报警。

6. DNC 通信接口的性能 CNC 系统与上级计算机的联接可能有四种情况:第一,通过串行口与计算机相联,大部分采用 RS-232C 或 RS-422 标准,该接口主要用于加载(或上传)NC 程序;第二,通过 DNC 接口与计算机相联,目前大部分采用 RS232 或 RS-422 标准,连接距离大于 15m,为提高可靠性,宜采用 20mA 电流环;第三,通过连接计算机局域网的 DNC 接口与计算机局域网相联,采用 RS-485 标准或制造厂标准;第四,DNC 接口按 MMS 规范设计,通过串



行接口与网络的终端服务器的串行口相联,采用 RS-484 标准。

为实现计算机与 CNC 的连接, DNC 接口应提供下列资料:

(1) 数据传输率(波特率): 2400, 4800, 9600bps。

(2) 串行传输参数设定: 起动位、数据位、停止位、奇偶校验位(例如 1、8、1、1)。

(3) 链路层通信协议说明,例如 3964R、LSV2、...等。

(4) 应用层通信交互报文说明细则,包括报文标志符、报文格式、数据格式等。

4.1.2 柔性制造单元

减少加工过程的非切削用时间和增加多品种小批量的生产能力是改进自动化制造系统的基本出发点。

柔性制造单元(FMC, Flexible Manufacturing Cell)在实际应用中有两种结构:一种是改变机床加工件出口的结构,在 CNC 单机自动化基础上加上 4~8 个托盘自动交换站达到连续加工的目的;另一种是由一台计算机控制多台数控机床,加工同族的不同规格的零件,并可配置物流控制系统,实现自动上、下料和自动运输。

FMC 系统可以实现的功能如下:

(1) 管理多台机床的作业时序;

(2) 存储和分配 NC 加工程序;

(3) 管理(小车控制,托盘交换控制,毛坯、成品的出入库管理);

(4) 系统的运行管理:作业、设备、加工件的运行记录和统计(包括报表);

(5) 系统的实时监控。

4.1.3 柔性制造系统

1. FMS 系统的形成 60 年代英国 Molins 公司的 D. T. N. Williamson 首先提出把多台机床从逻辑控制到物理布局联成一体的构想,并获得了专利。当时由于主控制计算机性能差、价格昂贵而未能推广实施。80 年代微型机的广泛应用和 CNC 性能的提高,这一构想得到实现。在一台计算机管理和控制下把生产装备(机床)逻辑地组织起来,在物理布局上通过运输管理系统有机地联结起来的系统称作柔性制造系统 FMS。

FMS 系统由两部分设备组成:一部分为主要设备,包括各类数控机床、清洗机和坐标测量机等;另一部分辅助设备,包括托盘站、装卸零件站、刀具预调仪、

刀具号阅读仪、刀库、辅助立体仓库(毛坯和成品)、堆垛机、运输系统(刀具、毛坯和成品)、自动运输小车、机械手等。所有上述设备均受单元计算机控制。单元计算机下面可根据生产规模和单元计算机能力设置(或不设置)工作站,例如加工工作站、刀具工作站、装卡站、...等。

系统靠数据流、物料流和刀具流协调管理各个设备的运作。物料流从物理上决定了运输小车与加工中心、缓冲站、托盘站、装卸站和仓库之间的关联。刀具流从物理上决定了刀库、刀具进出站、机床刀库和刀具机械手之间的关联,有的刀具装卸过程还需运输小车介入,有的则依靠专门的刀具传动链来传送刀具。数据流从逻辑上收集、处理各种状态及信息,按预先确定的算法和流程,作出判断,决定物流和刀具流的流向,使整个系统可靠运行。

2. FMS 的结构和功能 FMS 结构与多种因素有关,主要应考虑:根据生产零件类型和数量的要求确定机床的类型和数量;确定刀具库及刀具流,确定小车间向:环形、直线单列(指机床布置在一侧)或直线双列(机床布置在小车轨道的两侧);确定仓库的结构和位置;确定装卸站的位置;确定缓冲站的数量和位置;确定单元控制计算机、工作站的位置;确定通信结点和施工路线。

较完善的 FMS 系统应具有下列功能:

(1) 制订和调整生产作业计划(根据系统软件的能力制订日、双日滚动、周或月计划)的能力;

(2) 检查生产准备(包括物料、刀具、托盘、机床、NC 程序等);

(3) 生产情况统计;

(4) 对刀具流和物料流的控制和管理;

(5) 实时监控;

(6) 计划变更时的作业调度;

(7) 机床故障时的作业调度;

(8) 系统故障检测。

3. FMS 的类型 根据加工的特征可以分为如下五种类型:

(1) 顺序型。按预定计划加工,一小批零件加工完后,加工另一种零件,依次按计划地进行下去,这种类型的 FMS 称顺序型。

(2) 专用型。加工零件基本不变,仅有限品种的小批量生产,这种类型的 FMS 称专用型。

(3) 随机型。加工零件类别不是事先确定的,允许在任何时间加工某种零件(新品或已加工过的),能实



现这种工作方式的 FMS 称随机型。

(4) 工业型。在 FMS 整个生命期中加工零件的品种和批量是确定的。

(5) 模块型。单元控制计算机的软件系统有较好的扩展性和适应性,当用户需要时,可实现上述四种类型中任一种功能。这种类型的 FMS 称作模块型。

若按柔性划分,则可分为如下两种类型:

(1) 系统运行正常时,加工路线是确定的;机床发生故障时,加工路线根据故障情况重新组织。

(2) 在机床发生故障时,加工路线不须重新组织,这种类型在零件进入加工机床之前、零件流向就是不固定的,国外称为 Actual Type,而把第 1 种称为 Potential Type。

4. 关于 FMS 的效益 选用 FMS 会带来下列好处:

(1) 可增加机床切削时间。统计资料表明,从毛坯送入加工位置到成品完工,真正在机床切削的时间随自动化水平的提高有明显增加,下面是一些统计数据:

| | |
|-------------------------|-----|
| 单机自动化 (NC) | 5% |
| 单机自动化 (CNC 系统带自动换刀) | 26% |
| 单机自动化 (CNC 系统带自动换刀及交换台) | 39% |
| 机床在 DNC 系统自动装载 NC 程序 | 45% |
| 机床在 FMS 系统下运转 | 85% |

(2) 可降低成本,因生产设备利用率提高、库存减少,生产周期缩短,使加工件费用减少。

(3) 可提高生产能力。同时生产不同的品种,增加多品种小批量生产能力,缩短产品投入时间。

(4) 有利于销售服务、缩短交货期。能迅速决策承接用户订货的能力,加速新产品的开发。

(5) 有利于公司(制造厂)的发展。改善公司(制造厂)的形象,提高竞争能力,提高和改善产品的质量。

据统计,投资者从 FMS 可得到下列经济效益:

| | |
|----------|-----------|
| 操作方面受益 | 112%~310% |
| 全部生产费用得益 | 14%~27% |
| 节省劳动力费用 | 30% (+) |
| 节省材料费用 | 13%~15% |
| 减少库存 | 50% |
| 减少现场面积 | 50% |
| 节省投入时间 | 40% |
| 提高机床利用率 | 30% |

FMS 能带来效益,但是目前的控制结构,管理模

式并非唯一的,随着人们运用 FMS 经验的积累,必定会产生出更加能发挥人的作用的控制结构及其相应的软件和硬件系统。

5. FMS 的柔性 柔性体现系统在生产计划变更或运行状态变更或运行条件变更时能适应新情况继续运行的能力。实现柔性首先是 FMS 的硬设备和软设备有柔性。例如,具有自动托盘交换机构、有刀具管理能力和主轴定位的加工中心有较好的柔性;能装载不同类型托盘的运输系统设备柔性就好;对生产产品的柔性则取决于 CAD/CAM 系统生成 NC 程序的能力,以及管理 NC 程序的数据库能力。单元控制计算机配有功能较强的软件或软件工具,能适应各种应变要求。

运行柔性表现在执行作业计划过程中,如果出现了瓶颈,运行人员能修改运行路径或者修改当前生产计划,减少某品种零件的生产;经销部门接到紧急订货,需迅速调整计划,立即投产;在线机床因维修,或用手动操作加工急需零件时(或试切削新零件时),须离线运行(不受主机的控制)等情况。运行人员通过计算机界面的交互操作就能更改加工的机床或更改运行路线。

计划柔性表现在不更改软件和硬件环境下,能修改当前计划、修改短期计划(日、周)和修改长期计划。上述情况在机床故障、加工故障、新订单的插入、计划调整时就会发生。柔性程度主要取决于主计算机的控制软件,因此配置一个适用的、较成熟的软件十分重要。

6. FMS 系统实例 一个完整的 FMS 系统由下列几部分组成:多台加工中心;运料小车;刀具库;换刀机械手;刀具预调仪;刀具进出站;存放托盘的缓冲站;装卸加工件的夹具站;检测和质量保障系统;物料库;控制机和终端操作站。

图 8-4-20 是德国 WERNER-KOLB 公司制造的由三台 TC-500 型加工中心组成的一条 FMS 生产线。它设有一个中央刀具库,在机床加工过程中,换刀机械中仍可整理刀具库或更换部分机床上的刀具,在小车沿线设有缓冲站,缓冲站存放加工件(毛坯、半成品或成品),固定加工件的载体为托盘,在一条 FMS 生产线上的托盘尺寸都是标准的,缓冲站的高度应与加工中心上加工件进、出站的高度一致,以便小车装卸。缓冲站的数量和位置根据加工批量大小和机床的布局决定,所有加工件必须在夹具站按工艺要求,用指定的夹具固定,成品经测量机检验合格后即送入夹具站进行拆卸。



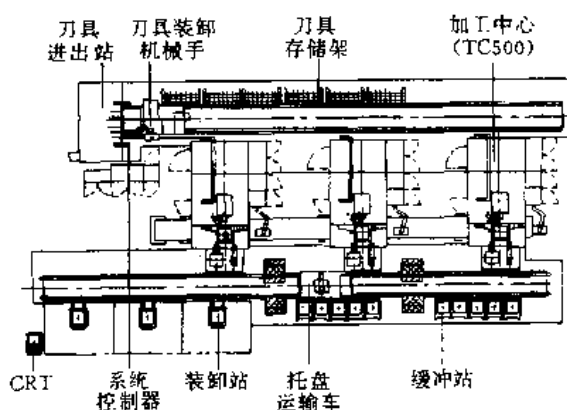


图 8-4-20 由三台加工中心组成的 FMS 系统

FMS 运作时,控制机先检查“加工准备”条件,检查项目有:加工中心是否准备完毕(加工程序已装、刀具齐全);夹具站毛坯是否已装卡完毕;小车已作好运作准备否;系统各安全装置正常否(如安全门已关)。检查后认为正常,启动 CNC,指挥小车装载加工件到机床入口,机床自动把工件由入口位调入加工位。加工完毕后,自动进入出口位,等待小车运到指定的缓冲位或物流库的入口。

4.1.4 刀具工作站

在自动化制造系统中,刀具需要量很大,对刀具信息的管理和刀具流的控制,无论是人工装卸刀具,还是机械手装卸刀具都将影响到制造系统运转的效率和加工的质量。为此可设置刀具工作站来管理刀具信息和控制刀具流。

1. 刀具信息管理系统 刀具信息包括:基本数据(刀具分类编码、刀具号、刀具标志);几何参数;切削参数;刀具空间位(刀库号、机床刀库位、刀具空间相邻位置);刀具寿命参数;刀具实时状态(破损或磨损);刀具结构参数(刀柄、刀具或刀杆、附件三部分及其组装成的刀具组件)。可建立数据库来管理刀具信息。

在自动化制造系统中,刀具信息主要用于:制订生产计划时调用刀具库信息;为 CAPP 确定零件加工工艺提供刀具参数;为制造系统核查开工前刀具准备情况、监控刀具寿命、必要的刀具调用和装卸。

设计刀具信息管理系统的主要步骤如下:首先用 IDEF1 方法建立刀具数据库模型,确定刀具管理功能视图,它包括刀具的采购计划(新刀入库)、刀具组件的构成(标准刀具组件由刀具、刀柄和附件组成)、编制刀具供应计划、在线刀具下线处理等部

分;其次,对刀具件和刀具组件编码,包括标准刀具编码、刀具组件编码,在线刀具编号(例如条形码编码);最后进行刀具数据的属性设计,属性项的设计应满足相关子系统的要求,例如,刀具进给量、切削速度、刀具材料等属性项与 CAPP 有关,刀具编码、刀柄编码和附件编码与刀具安装有关。刀具数据属性主要包括刀具状态信息、几何信息以及切削参数等属性信息。

2. 刀具静态管理系统 刀具静态管理是保障刀具供应的系统,供应流程的硬件装置及布局可根据工厂实际情况决定。主要功能应包括:

(1)刀具预调系统。目前加工中心不带刀具几何参数测量系统,一般均采用机外预调。预调仪生成的几何参数通过串行口送入刀具工作站。

(2)刀具进出线管理。根据生产作业计划准备的刀具要进入生产线,生产线上不用的刀具、损坏的刀具或到寿命期的刀具要退出生产线。通过进出线管理便于统计出刀具进出库数量以及报废刀具数量。对于全自动装卸刀具系统,进出站也是机械手交换刀具的缓冲站。在进出站上可设置指示灯,出站的刀具,刀具在位用红灯;进站的刀具经过参数检查后参数正确亮绿灯,不正确亮红灯。

(3)刀具识别。条码是常用的识别标志,刀具出入库或进出站时应配置条码阅读器。

(4)刀具的存放管理。制造系统自动化程序愈高,制造系统规模愈大,刀具使用量愈大,为确保生产的顺利进行,有必要建立中央刀库,暂时存放从机床刀库卸下的暂时不用的刀具和等待使用而机床刀库又容纳不下的刀具。对于暂时不用的刀具、刀柄和附件可建立刀具部件库。

(5)刀具的传送系统。全自动装卸刀具的自动化制造系统,设计和选用刀具传送系统涉及机床的布置、中央刀库的结构,机械手的配置等方面。常用的传送方案有架空链传送和采用运输小车传送,到达加工中心后,由机械手装入加工中心刀库。

上述管理功能由刀具工作站中的静态管理系统软件控制。

3. 刀具实时监控

(1)刀具实时监控。主要有刀具寿命监控、刀具破损监控和磨损监控。

(2)刀具寿命管理。其必要条件是 CNC 系统应具备刀具使用时间累计的功能,并作为刀具数据记录中的一项。刀具工作站通过接收 CNC 发送来的刀具数据



记录,修改刀具数据库中的刀具寿命值,当到达寿命极限时报警并提示“取下”该刀。有些CNC系统带有刀具破损、磨损监控附件,用户在订购加工中心时,要求制造厂提供其检测元件和测量线路,并在“故障信息”中有所反映。

4. 刀具的实时动态调度 在加工作业计划临时更改、插入临时性作业时,要求加工的同时提出加工该零件所需的刀具,完成加工过程中刀具信息的动态处理。通常由刀具工作站和单元控制计算机之间进行交互通信,最后由刀具工作站调度刀具。

5. 刀具信息管理系统实例 我国投入运行的完整的刀具管理系统如图8-4-21所示。它由四台加工中心组成FMS的刀具管理系统,其由刀具准备车间、刀具供给系统和刀具输送系统等三部分组成。

刀具准备车间:包括存放暂时不用的刀具、刀柄及

刀具附件的部件库、刀具装卸台、刀具刃磨设备、刀具预调仪系统(由对刀仪及微机控制系统组成)。

刀具供给系统:包括条形码阅读器,刀具进出站和中央刀库等部分。中央刀库由一系列标准的框架体组成,便于扩展每框架的装刀数。

刀具运输系统:包括装卸刀具机械手、传送链(或运送小车)等部分。机械手通常应能在三个坐标轴方向位移。机械手的数量根据刀库规模,布置方案,传送方式等因素确定,图8-4-21中用了—个轨道行走式机械手。

控制上述三部分协调工作的是一台微型计算机,用作刀具管理和系统的实时监控。刀具数据由键盘、或刀具预调仪,或条形码阅读器经串行口输入微型计算机,计算机根据作业要求、现场信息、输入命令协调刀具装卸机械手、运输小车和加工中心的动作。

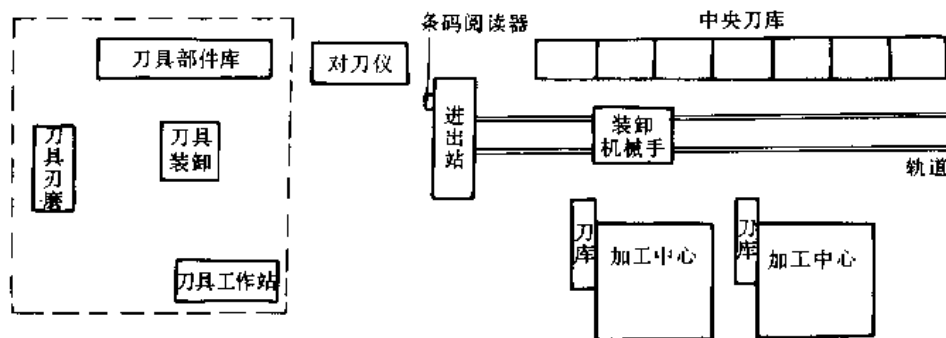


图8-4-21 刀具管理系统

4.1.5 物流的控制结构

在加工过程中,托盘是在线调用、转移、输入毛坯、输出成品或半成品的基本单元,计算机控制运输小车,按指定的路线,在指定的位置装、卸托盘。从而形成了在线物料流。通常系统中设置组装零件的托盘装卡站和用作暂存的托盘缓冲站,站数由生产规模决定。托盘信息在加工作业中十分有用,利用托盘的调入机床加工位和成品(半成品)调出加工位就可以统计加工零件所需的工时;安排生产任务首先从组织调度托盘入手,托盘的运作路线也反映了加工工艺路线;在系统因故需要重新组织生产时,首先根据加工件的优先级重新调度托盘。小车按作业单的安排,按固定的时序工作。一旦需要插入“新作业”,由单元控制计算机执行动态调度,重新组织小车的运输时序。

4.2 自动化制造系统计算机支撑环境

计算机软、硬件的配置与系统的控制结构、网络结

构、数据库系统、自动化程度、操作要求等因素有关。不同的制造系统,不同的规模,不同的要求,很难用一个标准模式照套照搬,具体情况具体分析。通常有两种考虑方法:一是以一、两家公司的产品为主来配置计算机系统,使机型种类尽量少,以便减少信息集成时带来较大的二次开发工作量,这对维护也有利,且容易取得供货方的技术支持;二是允许多种型号机型并存,强调接口兼容性,用开放结构的计算机系统和网络系统解决各种设备的互联问题,这是在现有设备基础上集成为更高层次的自动化系统时的一种解决方法,也是老企业技术升级的现实途径。两者相比后者的开发工作量大。

近代自动化制造系统的控制结构倾向于在逻辑上采用递阶控制的层次结构。在物理上采用总线型层次结构和环形总线结构。层次结构特点是:层次之间只有相邻两层之间的信息联系,各层功能清晰,逐级递减,避免了高层上的信息过份集中。

选择计算机系统时,应先考虑系统的应用目标



和功能,然后是支持软件,最后决定硬件的规模。应用目标侧重于系统的规模、能力和扩展性。应用功能主要包括:生产能力和生产计划;生产准备;实时控制和监控;生产数据的采集和管理。近几年来,支持软件有较快的发展,市场上已出现用于CIMS、FA、FMS环境下的集成软件。从系统需求出发,在网络结构和通信标准确定后选择合适的操作系统和数据库管理系统。选择过程中还应同时考虑硬件环境。硬件的能力必须能满足制造系统的需要,在配置中主要应考虑如下几点:

(1) 系统的响应速度。这涉及计算机的运算速度、操作系统实时响应能力和计算机内存的容量。配置设备时需综合考虑,内存容量应留有余地。

(2) 用户界面。界面是人机交互的窗口,一个友好的用户界面对系统的操作和维护起直接的作用。应选

择操作简便、显示简明、便于监控和维护的界面。

(3) 软件接口。在软件产品日趋丰富的今天,选配软件时应注意接口兼容性问题,接口标准应符合系统的需要。

(4) 计算机的运行环境。在工业现场运作时,计算机应符合工业环境运行标准(如国际上通用的NEMA标准),包括防工业干扰、防爆、防尘、抗静电等。计算机的电源质量不能忽视,并应有相应的安全保护措施。

4.3 柔性制造系统的控制与管理

柔性制造系统的控制与管理是计算机集成制造系统中的重要一环,是实现柔性的基本保障。它的主要任务是生成短期作业计划、作业调度和作业监控等。这三部分及其与其他部分的关系如图8.4-22所示。

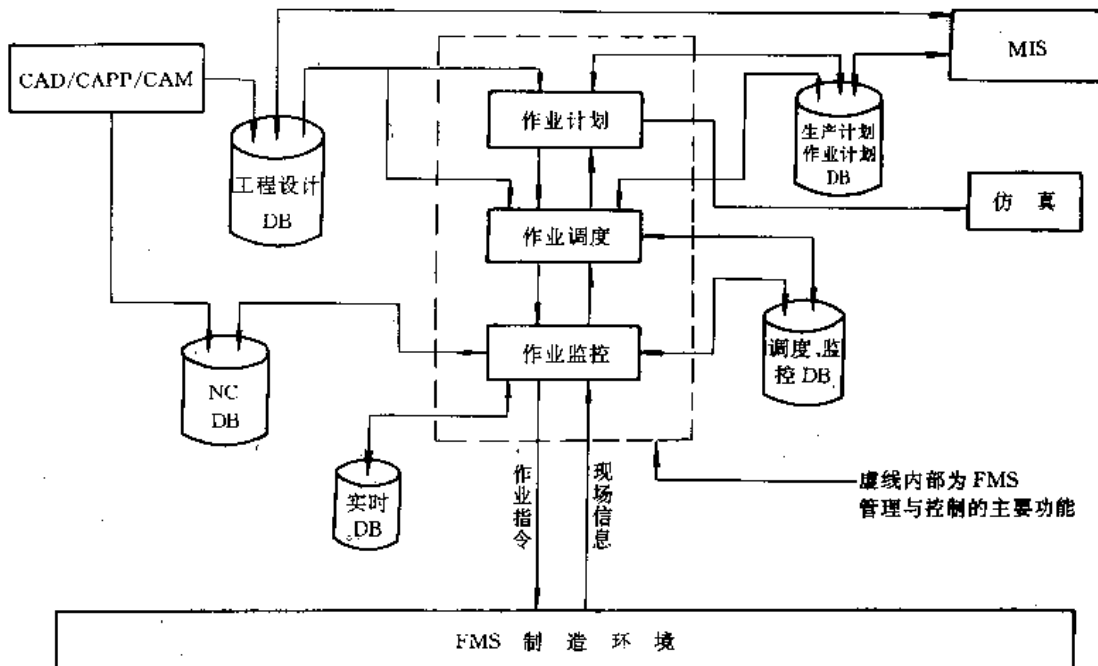


图 8.4-22 FMS 系统结构图

4.3.1 柔性制造系统的作业计划

作业计划生成子系统接受来自上一级信息管理决策系统制定的,以月、周为单位的中期生产计划。通过查询工程数据库中加工零件的工艺参数等数据制定以日、小时为单位的短期生产计划或双日滚动计划。生成短期作业计划的模型和算法甚多,根据优化的目标确定,常用的有交货期、设备利用率、产品制造成本,在制品的库存费用等。不同的目标有各自的特点和局限性。选择优化目标时应根据具体制造环境和生产能力

等因素来考虑。

根据作业计划和CAPP产生的工艺过程和CAD产生的技术要求制定生产准备计划,包括刀具、夹具、毛坯等的准备计划以及相应零部件的检测计划。

对生成的作业计划可通过离线仿真进行分析。若有必要可改选优化模型,调整原计划,直到获得满意的结果。合理的作业计划是保证FMS系统协调工作,高效率组织生产活动的基础。

一个完整的作业计划子系统是一个闭环系统,可根据系统的当前运行状况和出现的问题及时调整生产



计划,使系统尽量处于最佳工作状态。另一方面,当上级生产计划变更或材料供应变化时,作业计划子系统也能作出响应,并把执行情况向上级报告。

作业计划的发放有两种方法:直接下发至工作站;存放在相应数据库中,必要时转发。

子系统应具有查询计划执行情况的能力,并对计划完成情况,设备利用率,实际加工时间,辅助作业时间等数据进行统计,以便对系统运行状态作出评价。

4.3.2 柔性制造系统的作业调度

FMS系统中作业调度的任务是:根据短期生产计划、CAPP制订的工艺规程和现场状态信息,确定零件的加工顺序和流动路线;确定每一步操作的时间并分配资源;在作业计划变更或现场状态变化时,及时协调生产过程,并把执行结果向上级报告。

调度方法有静态调度和动态调度两类。静态调度是指采用预先作业排序的方法完成生产系统的作业调度,而不考虑外部条件和内部状态的改变。因此,静态调度又称为静态确定性调度。其中,静态指有 n 个作业, m 台机床,找一个最优的调度方案,并且仅仅考虑这几个作业。确定性是指每个作业在制造系统中每台机床上的加工时间是固定不变的。在一段较长时间里是采用优先准则方法对调度问题进行仿真。Johnson提出了用“算法”解决此类问题。实现了二台机床 n 个作业的排序。Johnson的工作对静态确定性排序问题的进步研究有很大影响。

排序是指 m 台机床, n 个零件,给定每个零件在多台机床上的加工顺序并给出相应的加工时间,确定一个加工顺序使得给定的目标函数最小或最大。排序问题包括:Flow-shop型排序和Job-shop型排序。前者表示, n 个作业依次由 m 台机床完成($m>1$),具有固定的加工顺序,每个作业每次在一台机床上加工,每台机床每次也只能加工一个作业,作业无优先级之差别;后者不同之处是加工顺序可能是不固定的,前者是后者的一种特殊情况。

传统的调度方法可分为以下几类:单台机床的调度策略,算法调度,枚举法,启发式调度法,项目调度和控制方法,离散事件仿真方法,人工智能方法。上述这些方法总是要求在一定的前提下使用,例如机床总是可用的,每道工序只能在--台机床上完成等,使用上有一定的局限性。

为解决静态调度的不足提出了动态调度问题。成功的动态调度具有下列特点:上级计划变更,插入紧急

加工件、系统出现局部故障时调度系统能对运行状态的变化作出判断并作相应的变化;具有柔性的控制结构,作业调度控制分为若干个子系统,各子系统能在最低层完成各自的调度任务;每个模块功能定义明确,有标准接口;有较好的人机交互能力,在发挥人的能动性,利用人的经验方面有精心的考虑。

4.3.3 柔性制造系统的作业监控

作业监控的主要功能是:根据调度指令生成实时操作命令,下发给设备层,同时对控制过程进行监控,记录状态信息和操作控制的反馈信息,实时采集、监测和跟踪控制对象的状态,为质量控制、故障检测和诊断提供依据;统计作业完成情况,及时向上级报告运行状态和统计数据。

作业监控系统对传递的信息或命令要求有足够的响应速度,以防信息丢失,它是自动化制造系统中实时性要求最高的层次。监控操作的用户界面十分重要,在设计或配置时应作重点的考虑。

4.4 柔性制造系统仿真

仿真是通过对一个已存在的或正在设计中的系统进行建模并在计算机上运行这个模型,以便研究、分析、设计或完善该系统的一种技术。

由于FMS的高投资及控制的复杂性,在设计阶段、运行阶段均要求采用仿真技术以便减少设计风险,提高系统运行效率。

从仿真建模角度来看,FMS属于离散事件系统,即系统的状态是受在一些离散时间点上的随机事件的驱动而发生变化。FMS的状态可以定义为:加工中心的忙/闲,缓冲站存放零件的数量,运输设备的忙/闲及位置等。引起这些状态的发生变化的事件定义为:待加工零件由系统外到达系统,零件从一个缓冲站运输到另一个缓冲站,加工中心完成了一个零件的加工任务等。

对于离散事件系统的建模与仿真已有一系列成熟方法(参见本篇第7章2和3节)。

4.4.1 柔性制造系统设计仿真

FMS设计仿真的主要任务是根据需要生产的零件的品种数量及加工工艺要求等来确定FMS中所需要的加工设备、运输设备及缓冲站的种类、数量及布置。

由于FMS可同时加工不同品种的零件,同一种



类零件又可在不同的加工设备上进行加工,因此,FMS设计仿真时要尽可能将各种生产方案的组合考虑进去,并且采用不同的零件发放规则、缓冲站排队规则及设备占用规则,以便考察各种设计方案的优劣。

由于仿真并不是一种最优化方法,它仅是对某一具体方案给出运行时的性能,所以如何修改设计方案,如何确定最终设计方案仍要求由设计者来考虑。

现在已开发出一些专门用于FMS设计的仿真软件,比如清华大学及航天部204所联合开发的一体化制造仿真软件(IMSS, Integrated Manufacturing Simulation Software),它具有友好的建模前端及生动逼真的动画输出,并能给出设计方案的性能分析报告,FMS设计工程师能很容易地学会使用。

4.4.2 柔性制造系统计划仿真

FMS的日生产计划通常是由工厂的计划生成模块给出的,它一般根据周生产计划及车间生产能力采用某种平衡算法获得的,为了确认这一计划的优劣,可以在计划下达前,通过仿真方法对这一计划进行“试运

行”(在仿真模型上运行),以便考察各加工中心及运输设备的利用率,缓冲站的队长,是否有瓶颈存在,能否按时完成生产计划等。各种计划仿真,有一定时间的限制,一般要求在10min左右完成,否则将影响日生产计划的下发。

4.4.3 柔性制造系统调度仿真

FMS在接收到工厂下达的日生产计划后,要对当日生产进行具体的调度,现在有静态调度与动态实时调度二种调度方法。不论采用哪种方法,都要依赖于仿真技术。即通过仿真来确定FMS中各种设备的工作顺序(指在什么时间应做什么工作)。对调度仿真来讲,仿真的速度比计划仿真要求更高,尤其是动态实时调度,要求在一个工作指令发出后,在最短时间内完成一次仿真,以便在第二个工作指令发出前确定下一个工作指令,由于二个工作指令之间一般仅有十到几十秒的间隔,所以要求在十到几十秒之间完成一次仿真。调度仿真和设计仿真、计划仿真的另一个不同是:后两者必须考虑随机因素(如加工时间是一个随机变量),而调度仿真则一般不考虑随机因素。

第5章 质量控制中的检测 与监测技术^{[49]~[68]}

1 概述

1.1 现代化加工中的质量控制

质量是目前产品参与激烈国际市场竞争的重要因素,因此零件加工过程中的质量控制越发引起人们的重视。现代化加工过程中的质量控制是在传感技术、信号处理技术、计算机技术的基础上,通过计算机及其软件,实现在加工过程中对质量数据的获取、处理、分析,并对加工过程进行有效的控制,从而保证产品的加工质量满足设计要求。

1.2 加工过程中质量控制的内容

加工过程中质量控制的内容包括:制定零件检测规程;质量数据采集与处理,加工设备状态监控,质量评价与反馈控制,质量信息管理等。其中:检测规程包

括制定检测手段、数据处理方法、设备状态监控策略等;质量数据采集与处理是在实际加工过程中根据检测规程制定的方案获取质量数据;加工设备状态监控是在加工过程中对加工设备状态进行监测,并对其产生的故障进行诊断,预报;质量评价与反馈控制是根据检测的数据进行分析评价,并把结果反馈到控制系统,对加工过程进行实时控制;质量信息管理是对整个加工过程中的质量信息进行有效的管理。

制造过程的质量数据可以通过多种途径获取。通常采用以下方法:

- (1) 接触测量;
- (2) 非接触测量;
- (3) 数据人工输入。

这几种方法通常都是把零件质量数据(或加工过程数据)转换成电压或电流参数,经A/D转换后送入计算机。



质量数据的处理通常采用统计方法。主要有直方图、因果图、波动图、工序能力指数计算、分布图等。

1.3 影响质量的因素

影响质量的因素包括在产品的的设计、加工和管理的全部过程中。产品的设计包括设计方法的合理性、科学性；加工过程中的因素包括加工工艺方法，加工设备精度、工艺系统变形、刀具磨损、测量误差等；管理因素包括人员素质、产品标准、产品数据档案的科学性等。

1.4 加工过程质量控制手段

对自动化加工系统实施质量控制的手段主要有检测和监测两个方面。

检测的对象包括制造过程参数、毛坯、外购件、工件及成品。自动检测获得的质量数据经过一定预处理，提供给质量评价与分析系统，对加工过程能力、毛坯与产品等的质量水平作出判断，决策后由反馈控制系统对加工过程进行修正和优化。

监测的对象是加工系统中的设备。其目的是对设备的运行状态进行监测、辨识及报警。设备故障诊断系统能自动进行诊断、定位、预测，并提出故障恢复计划和对策。并可实现刀具破损、磨损的自动监测和实时处理。

2 集成质量控制系统

计算机集成制造系统中质量保证系统由以下四个功能子系统组成：质量规划子系统，检测与监测子系统，质量评价与控制子系统，质量管理子系统。

1. 质量规划子系统 该子系统完成检测方法制定、监控与诊断策略的生成，其主要功能有：

(1) 从CAD/CAPP/CAM中提取质量信息，并用数据模型表述质量特征。

(2) 制定被加工工件的检测项目、方法和所用仪器，并生成自动检测程序。

(3) 选择刀具状态（磨损和破损）及夹具状态的监控策略。

(4) 确定设备运行状态监控与故障诊断方法。

2. 检测与监测子系统 该子系统是执行由质量规划子系统产生的工作指令，其主要功能有：

(1) 质量数据采集系统对加工过程中工件的质量数据（加工精度、表面粗糙度）进行在线检测。

(2) 刀具磨损、破损监测系统对刀具的磨、破损进

行实时监测与报警。

(3) 设备故障诊断系统对设备故障进行自动诊断、定位和预测。

3. 质量评价与控制子系统 该子系统对检测与监测结果进行分析、评价，并对加工过程进行合理控制，保证加工过程的顺利进行，其主要功能如下：

(1) 根据获取的质量数据进行分析、评价，消除影响工件质量的不良因素。并对加工质量变化趋势进行预报及控制。

(2) 针对刀具的磨损状况进行刀具补偿，并在刀具破损或剧烈磨损时及时控制机床换刀。

(3) 对设备故障进行故障自恢复处理。

4. 质量管理子系统 该子系统完成质量数据库的有效管理，实现与计算机集成制造系统中其它功能子系统间的数据共享和通信。

3 质量检测技术

3.1 概述

在自动化制造系统中，加工产品的质量应由相应的自动化检测设备检测。检测环节是制造过程质量控制系统中产品质量的主要信息源。

1. 检测的要求 与常规制造系统相比，集成质量控制对检测技术提出了以下更高的要求：

(1) 检测设备能自动检测产品质量，检测过程无须人工参与；

(2) 检测系统具有较高柔性，适应多品种、小批量或单件生产的柔性生产模型；

(3) 对检测的质量数据能自动进行评价、分析，并将结果反馈到加工设备控制系统。

2. 检测的对象与内容 在机械制造业中，质量检测的主要对象是机械零件。其检测内容主要有：

(1) 零件表面的尺寸、形状和位置误差；

(2) 零件表面粗糙度；

(3) 零件材质（如表面硬度、夹砂缺陷等）。

3. 检测方法分类 检测方法按其在制造系统中所处位置可分为：

(1) 离线检测。在自动化制造系统生产线以外进行检测。其检测周期长，难以及时反馈质量信息。

(2) 在线检测。检测系统集成于制造系统之中。一般用于零件加工工序之间的中间检验和加工完毕后的最终检验，检测周期较短。

(3) 过程中检测。检测装置与加工设备集成，多用



于加工工序内部的中间检验或工件、刀具的标定。质量信息反馈迅速，检测数据可直接进入加工设备控制系统，修正加工参数。

在同一制造系统中，上述三种检测方法可能同时存在，分别服务于不同类型的质量检测，互为补充。

按检测方式，又可分为：

(1) 接触检测。传感元件与被测件接触，常用的有接触触发测头和接触扫描测头。

(2) 非接触检测。传感元件不与被测件接触，如激光非接触测头等。近年国内外在视觉检测领域发展很快，它是将摄像机拍摄的电视图象信号进行数据处理得到有关质量信息。

3.2 过程中检测

1. 检测目的 这种检测是在工序内部，即工步或走刀之间，利用机床上装备的测头检测工件的几何精度或标定工件零点和刀具尺寸。检测结果直接进入机床数控系统，修正机床运动参数，保证工件质量。

2. 检测方法

(1) 测头安装在主轴上（镗铣加工中心）或刀架上（车削中心），通过触点测量和数据处理，检测工件上加工表面的尺寸和形位误差，或标定工件坐标零点在机床坐标系中的位置。

(2) 测头安装在机床工作台（镗铣加工中心）或床身（车削中心）上，机床坐标轴运动使刀具与测头接触，测出刀具在各方向的偏置量，输入机床数控系统进行补偿；也可利用切削前后测量的差值计算刀具的磨损量，监控刀具使用状态。

3. 适用范围 过程中检测方法存在以下不足：

(1) 测头型式简单，长度有限，一般只有一种测尖，不能自动更换测尖和转位。所以只能检测较简单的加工表面和精度要求较低的零件，不适合对工件内部较深的复杂表面进行测量。

(2) 数据处理能力较差，一般不能对复杂表面之间的相对位置、尺寸误差进行测量。

(3) 受机床坐标轴位置反馈元件精度的限制，测量精度较低。

4. 加工中心用测头实例 英国 Renishaw 公司的 MP3 测头，其尾部结构与普通刀具锥柄相同，放置于机床刀库中，对工件进行测量时由换刀机械手将其安装在机床主轴上。测头的光学单元和固定在机床上的光学单元利用红外光束进行通信，传递控制信号和测头触发信号。图 8-5-1 为测头系统结构和工作原理。在

测尖接触工件的一瞬间，触发信号进入机床控制系统，记录下此时的各轴坐标位置。对多个测点的数据可用数控宏程序进行拟合、处理，计算孔径、圆心等。

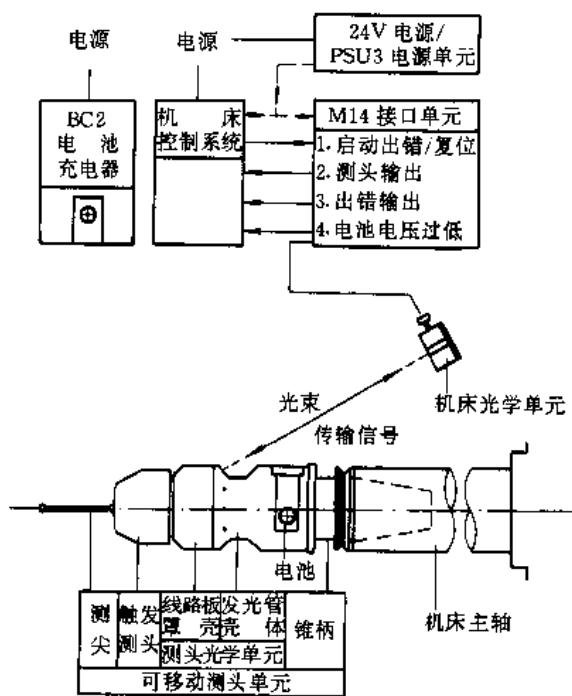


图 8-5-1 无线测头系统

3.3 在线检测

机械零件进行加工后，在线检测的主要手段是利用坐标测量机综合检测零件的几何尺寸与形状位置精度。

1. 坐标测量机综述 坐标测量机按精度可分为生产型和精密型（又称计量型）两大类；按自动化水平可分为手动、机动和计算机直接控制（又称数控型）三类。在自动化制造系统中，一般选用计算机直接控制的生产型坐标测量机。

随着计算机技术的迅速发展，测量机的数据处理能力和自动化程度不断提高，已成为一种进行综合几何精度检测的通用仪器设备。

坐标测量机一般有三个或更多的运动坐标轴，多采用高精度、无摩擦的空气静压导轨支承，由精密计量元件（如光栅尺、感应同步器、双频激光等）检测各轴位移。测量机可配置点位触发测头、扫描测头或非接触光学测头等。测头在工件表面上得到的测点坐标数据输入计算机后，首先将测点拟合为基本几何元素，得到它们的尺寸与形状误差；还可利用已储存的几何元素进一步进行处理，求出表面之间的距离或相对位置误



差。利用专门的软件还可处理螺纹、齿轮、自由曲面上的测点数据。

2. 坐标测量机的结构形式 坐标测量机的一般结构如图 8-5-2。由于待测工件的形状、外形尺寸、重量等有很大差异,使用环境也不相同,坐标测量机在结构型式上差别较大。

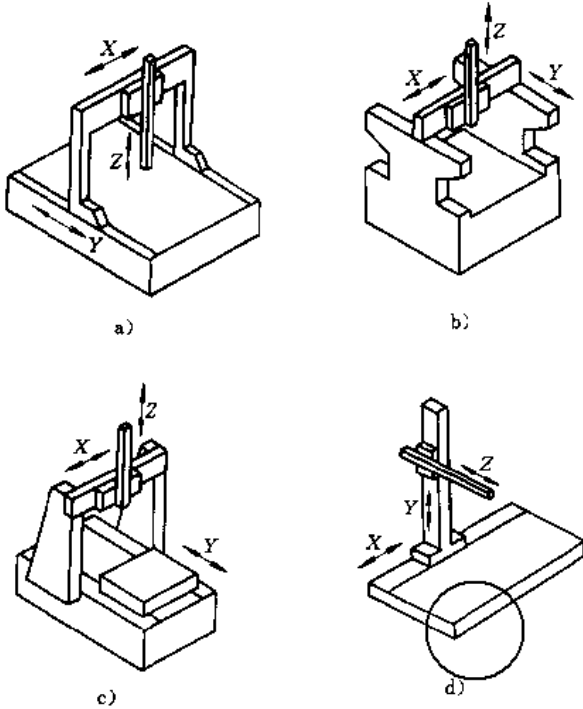


图 8-5-2 坐标测量机的结构形式

3. 计算机直接控制的坐标测量机 在自动化制造系统中,测量机应为数控型,以使测量过程在无人干预情况下自动完成。

由于要求在控制测量机运动的同时还要进行大量数据处理工作,故一般采用计算机直接控制的坐标测量机。

测量机在驱动方式上与数控机床有较大区别,一般采用轻型齿轮齿条驱动、同步齿形带驱动或直线电机驱动等轻便、灵巧的驱动方式。

4. 测头系统 测头系统是坐标测量机的重要组成部分,对检测精度和检测效率影响甚大,其价格有时占整机价格的五分之一。

当测量机应用于自动化制造系统时,测头系统一般由机动回转测头座、测头延长棒系列、测头、测尖系列等组成。有的还配备测头自动更换装置。

a. 机动回转测头座 图 8-5-3 所示为广泛应用的 Renishaw PH9 型机动回转测头座。其上端轴头可夹紧在测量机主轴孔中,下部通过螺纹连接测头或测头延

长棒。计算机控制 PH9 内的电机使测头可在垂直平面 (A) 和水平平面 (B) 内旋转。A 轴为 $0^{\circ}\sim 105^{\circ}$,步距角 7.5° 。测头的指向可方便地在很大范围内调整,以满足测量需要。机动回转测头座的应用省去了测量机在各方向分别安装测头,大大提高了测量机的工作效率和自动化程度。

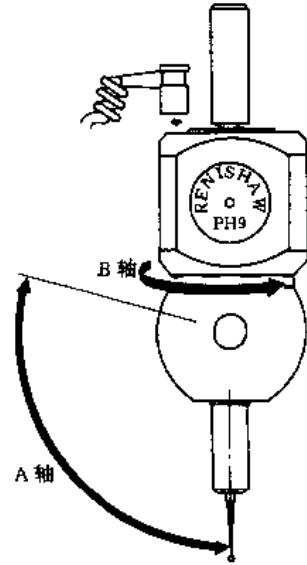


图 8-5-3 机动回转测头座

b. 测头 测头是测量机的传感元件。当工件待测表面较深时,可在测头后部加装适当长度的延长棒。

坐标测量机上的测头主要有两类:一类是触发测头,用于点位采样测量;另一类是扫描测头,其内部是一套小型三维测量机构,用于连续采样测量,如图 8-5-4 所示。

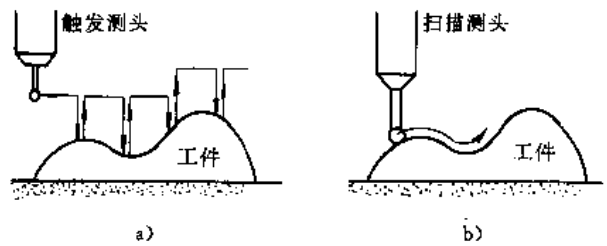


图 8-5-4 测头采样方式

由于触发测头具有较高测量精度 ($0.5\mu\text{m}$ 量级),在实际工作中应用最为广泛,在一些场合也可以通过加密测点分布来取代连续采样测量。

c. 测尖 测头前部安装的测尖又称探针,其端部一般镶嵌红宝石球与工件表面接触,触点采样。为适应各种复杂的工件结构和表面型式,一般有一个测尖系列可供选择使用。

d. 测头自动更换装置 为进一步提高自动化程



度,有的坐标测量机还配有测头自动更换装置。常用的几种测头可预先安放在测头架上。测头座可自动地从测头架上取出所需测头进行测量。由于测头座与测头之间重复定位的精度极高,换上的新测头无须重新标定,提高了工作效率。

5. 测点数据处理

a. 测点坐标存储与管理 坐标测量设备在工件表面上触点采样的测点坐标值自动进入计算机测点存储器中,并顺序排列。程序可以控制测点坐标值的插入、删除或移位等操作。

b. 拟合几何元素及其存储管理 将测点存储器中的数据按一定规则拟合为基本几何元素,如点、直线、圆、平面、圆柱、圆锥、球等。几何元素的尺寸与形状误差及其所处位置、方位角等即可得出。拟合的几何元素存储于存储器中,待后续处理用。

c. 建立工件坐标系 由于工件在坐标测量机工作台上不准确定位,因此其孔的轴线或平面法线与机器坐标轴方向不一致。利用已测得的几何元素,建立工件坐标系,可使测头按工件坐标运动,避免意外碰撞,并使测量和数据处理更为方便。

d. 已拟合几何元素的相关处理 工件的部分精度要求是表面之间的距离或相对位置要求。将有关表面上的测点分别拟合为几何元素,利用这些几何元素计算表面相互的距离或位置。

e. 螺纹、齿轮、凸轮的测点数据处理 对这一类零件进行测量,可用专门软件对采样的测点进行处理,得到各项技术参数。

f. 自由曲面测点数据处理与应用 对叶片、模具等具有自由曲面的工件,所采集的测点数据不仅可用来作曲面、曲线轮廓度的处理与评价等,还可与CAD软件配合,生成零件的三维几何造型,绘出零件图纸,亦可与CAM或APT软件配合,生成其数控加工程序。

g. 测量结果统计分析 坐标测量机可配置统计分析软件包,用于对多个工件或多个参数的测量结果进行进一步分析、处理,如绘出分布直方图、X-R图、X-S图等。

6. 工件的运输和安装 在常规制造系统中,工件在坐标测量机工作台上不必定位,只须放在一个便于测量的位置即可。但在自动化制造系统中,工件在测量机上必须以一定的姿态到达一个固定的位置。其定位精度不要求很高,只要保证在建立工件坐标系的过程中测头能正常运动即可。一般将工件装夹在托盘上,再

将托盘沿导轨送到测量机工作台的固定位置。

4 加工过程的监测技术

4.1 机床系统监测

机床的良好运行状态是保证零件质量的关键因素之一。对机床系统的监测主要有以下几个方面:

(1)环境参数及安全监测。环境参数监测是监测加工前后及加工过程中,生产环境(包括温度、湿度、油压、电压等)是否满足加工的需要和要求。安全监测主要指火灾、触电和生产过程中非法物进入生产环节的监测。

(2)刀库状态监测。监测刀库中刀具位置、类别、型号是否正确。

(3)机床负载监测。监测机床的主轴负载和进给负载,以防止机床过载而损坏工件、刀具、机床系统。

(4)工作台振动监测。监测加工过程中机床工作台振动的大小,它直接影响工件质量,是机床运行状态的重要标志之一。

(5)冷却与润滑系统监测。监测机床的冷却与润滑系统,使机床的运动部件处于良好的润滑状态,并使机床不致过热而影响加工精度。

(6)CNC/PC系统监测。一般数控机床、加工中心的控制器均有自诊断功能,将这些功能进行集成就可以监测CNC/PC系统运行状态。

典型的机床运行状态监测系统如表8-5-1。

表8-5-1 机床运行状态监测系统

| 监测对象 | 信号拾取及预处理 | | | 中央处理器 |
|--------|-------------|-----|------|-------|
| 刀库状态 | 传 感 器 | 力 | 放大器 | |
| 环境安全 | | 功率 | | |
| 机床负载 | | 位移 | 滤波器 | |
| 工作台振动 | | 加速度 | | |
| 冷却、润滑 | | 光电 | 采样装置 | |
| CNC/PC | | 测头 | | |
| 机床精度 | 其它 | | | |
| 刀具切削 | 见本章4.2节 | | | |

(7)机床加工精度监测。在工序前后或加工过程中测量刀具尺寸或工件尺寸,可得到机床的加工误差状态。机床加工精度监测是保证加工质量的重要环节,一般通过触发式测头测量系统来完成。

中央处理器的功能是充分利用各类信号的大小及



其变化形态,采用信号处理技术(如模式识别、过程建模、系统辨识、神经网络、专家系统等),根据信号特征及其组合,自动地识别不同的故障情况(早期的、局部的和灾难性的),并确定和执行补救措施,使机床处于最佳运行状态,加工出合格的产品。

4.2 刀具状态监测

在切削加工过程中,对刀具失效(主要包括刀具磨损、破损、折断和刀刃塑变等)的监测是提高机床利用率,降低废品率,保证工件加工质量的重要环节。监测系统由切削过程参数传感检测单元、信号处理单元、接口电路和识别决策单元等组成。在机床上安装相应的传感器(包括相应的前置放大器等),实时获取输入信

号,并将它们转换成电压或电流信号;信号处理单元对上述信号进行预处理(包括信号放大、滤波、检波、求均、去除趋势项及其他改善信噪比的处理)和特征提取;识别决策单元根据这些信号特征,通过识别决策模型和算法,识别出刀具的状态。

对刀具状态监测技术的要求是快速、准确、稳定、可靠。一般可分为“直接测量法”和“间接测量法”两类。“直接测量法”就是直接测量刀具的磨损、破损,一般在非切削时间内进行,所以是一种“离线”技术;“间接测量法”是在切削时间内测量与刀具磨损、破损有关的物理量变化,是一种“在线”技术。表8.5-2和表8.5-3列出了刀具磨损、破损的主要监测方法。

表8.5-2 刀具破损的监测方法

| 传感参数 | 传感原理 | 传感器 | 主要特征 |
|------------------------------------------|---------------------------------------------|--------------------------------------------------------|----------------------------------------------|
| 直接法 | 光学图象 光反射、折射、傅氏传递函数变换, TV ^① 摄像 | 光敏、激光、光纤、光学传感器, 电荷耦合器件(CCD) ^② 或摄像管 | 可提供直观图象, 结果较精确, 受切削条件影响, 不易实现实时监视, 正在进行实用化开发 |
| | 接触 电阻变化 开关量 磁力线变化 | 电阻片、印刷电阻电路, 开关电路, 磁间隙传感器 | 简便, 受切削温度、切削力和切削屑变化影响; 不能实时监视; 尚待解决可靠性问题 |
| 间接法 | 切削力 切削力变化量 切削分力比率 | 应变片, 动态应变仪, 力传感器 | 灵敏, 但动态应变仪难装于机床上; 简便, 有商品供应, 识别的主要障碍是阈值的确定 |
| | 扭矩 主电机, 主轴或进给系统扭矩 | 应变片, 电流表等 | 成本低, 易使用, 已实用, 对大钻头破损(折断)探测有效, 灵敏度不高 |
| | 功率 主电机或进给电机功率消耗 | 功率传感器 | 成本低, 易使用, 灵敏度不高, 有商品供应 |
| | 振动 切削过程振动及其变化 | 加速度计, 振动传感器 | 灵敏, 有应用前途和工业使用潜力 |
| | 超声波 接受主动发射超声波的反射波 | 超声波换能器与接受器 | 可实现扭矩限制, 但受切削振动变化的影响, 处于研究阶段 |
| | 噪声 切削区环境噪声探测分析 | 拾音器 | 尚处于研究阶段 |
| 声发射(AE) ^③ 刀具破损时发射的AE信号特征分析 | 声发射传感器 | 灵敏、实时, 使用方便, 成本适中, 是最有希望的刀具破损探测方法, 少量供应市场, 有较广泛的工业应用潜力 | |

① 电视(TV, Television)。

② 电荷耦合器件(CCD, Charge-Coupled Device)。

③ 声发射(AE, Acoustic Emission)。



表 8-5-3 刀具磨损的监测方法

| | 传感器 | 应用场合 | 主要特征 |
|-----|----------------------|----------------------|----------------------------------------------------------------------|
| 直接法 | 光学图象法 | 砂轮磨损或离线、或在线非实时监视多种刀具 | 分辨力 0.1~2μm, 精度 1~5μm, 正在进一步研究实用化, 摄像法较贵 |
| | 接触 | 车削, 钻削刀具 | 灵敏度 10μm, 提供直接评价, 受切屑与切削温度变化影响, 有应用前景 |
| | 放射线法 | 各种切削工艺 | 灵敏度 10μm, 不受切屑, 冷却液和切削温度影响, 需进一步解决防护问题, 有应用前景 |
| 间接法 | 切削力 (扭矩法) | 车、钻、镗削等 | 灵敏度 20~100μm, 其中比切削力方法与功率谱分析法有应用价值 |
| | 功率 (电流) 法 | 车、铣、钻削等 | 灵敏度低, 响应时间较长, 易使用 |
| | 切削温度 | 车削 | 灵敏度相当低, 响应慢, 不可用于冷却使用状态, 预测无应用前途 |
| | 刀具-工件距离探测法 | 车削等 | 分辨力 0.5~2μm, 精度 2~5μm, 探测刀具-工件间距离变化; 多数方法处于实验研究阶段 |
| | 振动分析法 | 车、铣削等 | 工作精度主要取决于 DDS 模型阶数, 与信号处理有关, 经进一步改进有工业应用潜力 |
| | 声分析法 (AE 法、噪声、声振动分析) | 车、铣、钻、拉、镗、攻丝等 | 已证明, 其中声发射 (AE) 法对车、铣、钻削等刀具磨损灵敏, 但尚未建立极度磨损的全部判据, 在有限条件下可供工业应用, 有应用前景 |
| | 表面粗糙度法 | 车、铣等 | 受切削条件影响, 不易实现实时监测 |

1. 刀具、工件尺寸及相对距离测定法 测量刀具和工件的尺寸一般采用接触式触发测头。测头的安装方式有两种：一种是安装在机床床身上测量刀具的尺寸，称为刀具测头，一种是相当于一个特殊刀具，安装在机床主轴或刀架上测量工件的尺寸，称为工件测头。

图 8-5-5 所示是测量刀具-工件相对距离的原理图。 δ_s 为刀体的位移量， δ_c 为新成表面的位移量，则工件新成表面与刀体的距离变化量 δ_w 为：

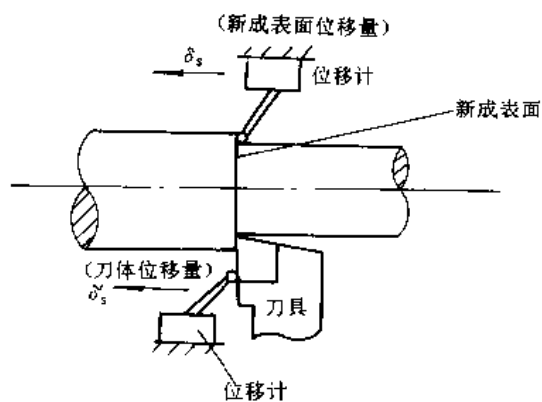


图 8-5-5 刀具与工件相对距离的测量

$$\delta_w = VB \tan \alpha = \delta_s \delta_c \quad (8-5-1)$$

式中 VB ——刀具后刀面的磨损量；

α ——刀具的后角。

这样通过在线测量 δ_s 和 δ_c 即可求出刀具的磨损量。

2. 放射线法 在刀刃的磨损部分渗入同位素，通过测量同位素的辐射量的大小来确定刀具的磨损量 (或破损量)。

3. 电阻法 其基本原理是：随着刀具磨损量的增加，刀具与工件的接触面积增大，因而刀具-工件的接触电阻减小；或把一种精密的电阻材料均匀地涂在刀具的后刀面上，随着刀具磨损量的增加，电阻材料不断减少，电阻值逐渐下降。

4. 光学图象法 光学方法是利用磨损区比未磨损区有更强光反射能力的原理，把一束强光照射在后刀面上，根据反射光的强度来判定刀具的使用状况。光学图象法使用工业电视，原理框图如图 8-5-6 所示。

显微镜接收刀刃部分的图象，输送给工业电视摄像机，根据图象上各点辉度的不同，把信号数字化并存入存储器，通过微型机进行图象处理，滤掉干扰信号，和原来存储的阈值比较，确定刀具的使用状况。

5. 切削力法 测力仪的安装根据加工条件而定。



一般情况是：在车床上将其安装在刀架、刀杆上；在铣床、钻床等，则将其安装在工作台上。

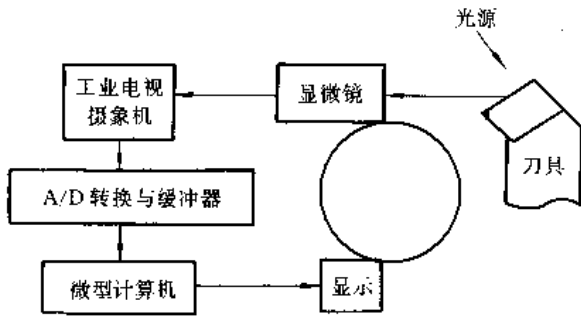


图 8-5-6 用工业电视测量刀具状态

利用切削力监测刀具状态有多种实施方案，图 8-5-7 是其中的一种，利用主切削力 F_x 与切削力 F_x 、 F_y 之比 F_x/F_x 、 F_y/F_x 及其变化率 $d(F_y/F_x)/dt$ 综合地监测刀具的磨损、破损。此外，还可用机床的主轴扭矩和轴承力来监测刀具的切削状态。

6. 切削温度法 测量切削温度主要有三种方法：热化学反应法；磁辐射法；热电势法。应用较多的是热电势法，它以热电偶作为测量元件，把热电偶嵌入刀具中可以测量切削温度，监测刀具的磨损。切削温度法不适用于断续切削的情况，且不能用来监测刀具的破损。

7. 切削功率法 切削功率（主电机功率、进给电机功率）是切削力的延伸。功率的测量可以采用交流互

感器、直流互感器、霍耳功率计、分流分压器等。功率法的优点是信号获取简单、可靠，传感器便于安装，便于在生产中推广。但功率信号中的刀具磨损、破损信息较弱，灵敏度低。

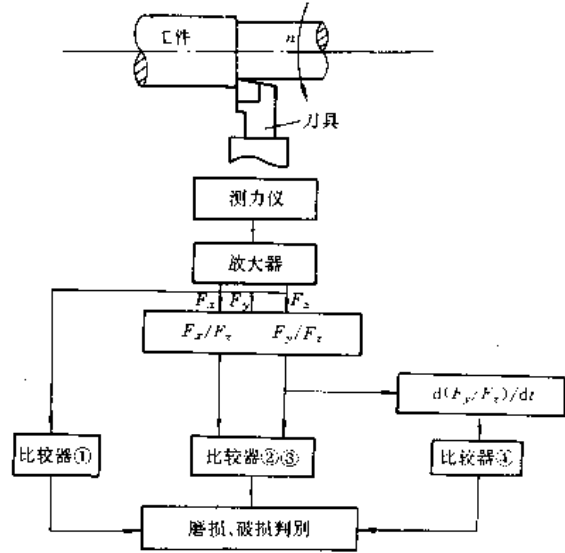


图 8-5-7 切削力检测刀具的磨损、破损

8. 振动法 将加速度传感器安装在机床工作台或刀架上，测量机床的振动信号，然后对其进行时域和频域的分析，得出刀具的状态信息。图 8-5-8 所示为一个用振动信号监测刀具状态的原理图。

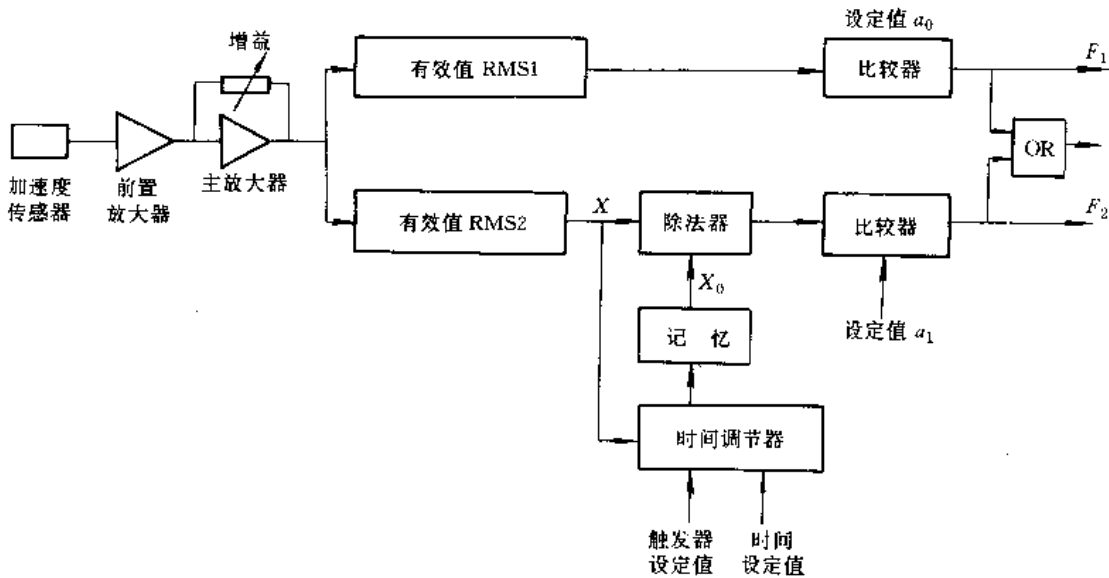


图 8-5-8 用振动信号监测刀具状态

9. 噪声分析法 测量并分析机床的噪声信号可以监测刀具的状态。一般来说，用噪声信号中某一频段的能量来监测刀具状态更为有效。但此方法受环境干扰大。

10. 声发射法 在材料发生塑性变形、破裂时，会释放瞬时的弹性能，即声发射。声发射信号的频率范围为几万 Hz 到几十万 Hz。

图 8-5-9 表示在切削过程中，声发射的主要来源：



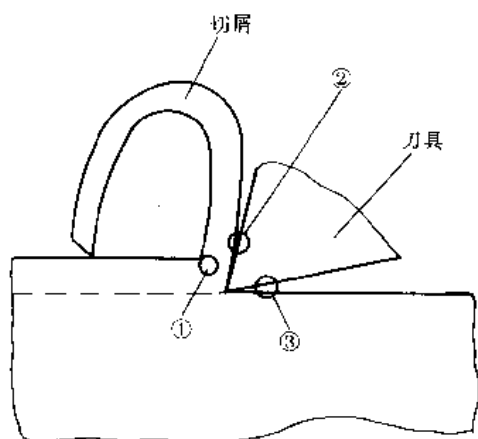


图 8-5-9 可能的 AE 源

①-第一变形区 ②-第二变形区 ③-第三变形区

(1)在第一变形区,当切屑成形时主切削区出现的塑性变形;

(2)在第二变形区,前刀面与切屑底面的摩擦;

(3)在第三变形区,后刀面与新成表面的摩擦;

(4)切屑与断屑器之间的摩擦;

(5)刀具的破裂;

(6)工件材料的破裂;

(7)切削液的喷射;

(8)切屑的碰击。

声发射信号的特点是受切削参数的影响小,特别适用于监测刀具的破损。

11. 加工表面粗糙度法 从质量控制的观点出发,这种方法是最直接的监测方法。在切削过程中,当加工表面的粗糙度超差时,就认为刀具已不能再使用。表面粗糙度的测量可以用光干涉法和接触探针法。

目前,各国对刀具磨损、破损的监测还处于研究阶段,实用化的商品还比较少。普遍认为有发展前景的监测方法有:切削力(扭矩)法、振动法、功率(电流)法和声发射法等。

4.3 传感技术

传感器是把加工系统中被监测的机械参量转换为电参量的关键元件。性能优良的传感器要求安装方便,不影响设备的使用性能,并具有较高的精密度和稳定性。

1. 检测系统的主要性能

a. 精确度 精确度表示测量结果与被测量真值接近的程度。精确度指标通常用极限误差与满量程之比的百分数表示。

b. 灵敏度 灵敏度定义为检测系统在稳定状态

下单位输入变化量 ΔX 与所引起的输出变化量 ΔY 的比值。

c. 分辨力 分辨力定义为检测系统指示值可以响应或分辨的最小输入量的变化,它表示系统响应或分辨输入量微小变化的能力。

d. 线性度 线性度定义为系统输出量与输入之间的关系曲线与选定的工作直线偏离的程度。

e. 漂移 检测系统在保持输入信号不变时,输出信号随时间(或温度)缓慢地变化称为漂移。随时间的漂移称时漂;随环境温度的漂移称温漂。

f. 可靠性 可靠性是指在规定工作条件和工作时间内,检测系统保持原有技术性能的能力。

g. 响应时间 检测系统的响应时间定义为当系统输入阶跃信号时,系统输出从一个稳态值变到另一个稳态值(有时取其 90%)所需要的时间。

2. 传感检测方法

a. 直线位移检测 用于检测直线位移的传感器有很多种类。各种传感器的原理、测量范围、精确度和线性度等特性都不同。传感器的选取应根据实际使用情况,精确度要求等来确定。表 8-5-4 列出了常用的几种直线位移检测传感器的原理和性能。

b. 力和力矩的检测

(1)电阻丝应变传感器。电阻丝应变传感器是利用电阻丝变形使其电阻值发生变化而进行检测的。它的基本结构如图 8-5-10 所示。

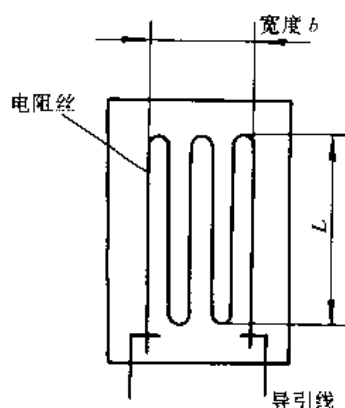


图 8-5-10 电阻丝应变片

(2)弹性杆轴向载荷传感器。该传感器是利用力作用于弹性元件产生微小位移并通过位移传感器转换成电量。

(3)悬臂梁式力传感器。对检测比较小的力或载荷时,一般采用悬臂梁式的弹性元件。它特别适合于检测垂直于悬臂梁轴线的两个相互垂直轴的弯曲力矩。

(4)压电晶体传感器。力传感器中的压电晶体常用



表 8-5-4 常用测位移传感器主要性能

| 原理 | 测量范围 | 精确度 | 线性度 | 特 点 | |
|-----------------------|--------------------------------------|-----------------------------------------------|----------------------------------------------|------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| 电 感 式 | 线性差动 变压器式 传感器 | $2 \times 10^{-4} \sim 0.5\text{m}$ | — | 小于 0.5% | 寿命长, 分辨率高, 可测位移频率为激励电压频率的 1/10, 需有较复杂后续电路, 有残余电压, 精确度受限制 |
| | 衔铁移动 电感传感器 (螺旋管式) | $0.5\text{mm} \sim 2500\text{mm}$ | — | $\pm 0.5\%$ | 衔铁最大速度 5mm/s , 能测大位移, 使用寿命长, 频率限制在交流电桥激励的 1/10。大位移时, 传感器有两个以差动方式连接的线圈以保证线性度 |
| | 涡流式 | $\pm 2.5\text{mm}$ $\sim \pm 250\text{mm}$ | $\pm (1\% \sim 3\%)$ | $< 3\%$ | 结构简单, 耐油污、水, 被测对象材料不同, 灵敏度不同, 线性范围须重新校正 |
| 电 容 式 | 变面积 | $(1 \sim 100)\text{mm}$ | $\pm 0.005\%$ | $\pm 1\%$ | 受介质常数影响大 (易受温度影响) 线性范围大, 精确度高 |
| | 变间隙 | $(10^{-8}$ $\sim 10)\text{mm}$ | 0.1% | $\pm 1\%$ | 分辨力好, 非线性较大 |
| 振弦式 | ± 2.5 $\sim \pm 750\text{mm}$ | 0.1%~1% | — | 非线性较大, 要求有温度补偿, 有较好的长期稳定性 | |
| 编码式码 | $1 \sim 1000\text{mm}$ | 0.5%~1% | — | 量程大, 体积大 | |
| 感应同步器 | 定尺 250mm, 其工作长度 120mm | $\pm 1.5\mu\text{m}$ | — | 可接长定尺, 用于测量大位移, 按误差合理安排尺序, 可使大量程内累积误差不断增长 | |
| 光栅 | $0 \sim 1000\text{mm}$ | $0.5 \sim 3\mu\text{m}$ | — | 测大位移, 超过 $0.5 \sim 1\text{m}$ 时可接长使用 | |
| 磁栅 | 1m | 0.01mm | — | 制造简单, 使用方便, 磁信号可重新录制。分辨力 $1 \sim 5\mu\text{m}$ | |
| 光纤 | $0.5 \sim 5\text{mm}$ | 1%~2% | $0.5\% \sim 1\%$ | 体积小, 抗干扰强, 制造工艺要求高 | |
| 激 光 式 | 全息显微测长 | $45 \times 60\text{mm}$ (全息图尺寸) | $0.2\% \sim 0.01\%$ | — | 被测物尺寸受全息图尺寸限制, 分辨力可达 $3\mu\text{m}$ |
| | 调制法测距 | 白天可测 30km 夜间可测 80km | $\pm (10\text{mm}$ $+ 10^{-6}D)$ D 为量程 | — | 激光传播途中由于空气折射率变化影响测量精度, 调制法主要用于航测和大地测量 |
| | 扫描法测尺寸 | 双光路可测 100mm 以上 | 0.05mm | — | 可实现非接触动态测量 |
| | 量子干涉测长 | 40cm | 1% | — | 量程大, 分辨力高达 $10 \sim 11\text{cm}$, 精度一般 |
| 霍 尔 效 应 式 | 霍尔片 | $0.5 \sim 5\text{mm}$ | — | $\pm (0.5\%$ $\sim 2\%)$ | 简单, 体积小, 对温度敏感 |
| | 霍尔开关 集成电路 | 几米 | — | $\pm (0.5\%$ $\sim 1\%)$ | 量程大, 体积小, 对温度敏感 |



石英晶体。传感器是将压电元件与弹性元件装在一起，通过弹性元件将力或压力作用到压电晶体上，使压电晶体产生电荷变化。

图 8-5-11 为单向压电式测力传感器的结构简图，它是利用纵向压电效应来实现力-电转换的。

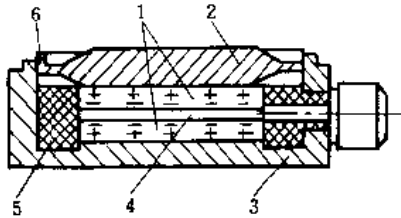


图 8-5-11 单向压电式测力传感器
1—晶片 2—上盖 3—底座 4—电极
5—绝缘套 6—电子束焊缝

三向压电测力传感器的压电元件由三个晶片组成，其中一个晶片利用厚度变形测量垂直分力，另外两个晶片利用剪切变形，测量互成 90° 的两个水平分力。当空间任意方向上的力作用在传感器上时，三块晶体分别感受三个方向的分力，自动地分解成互相垂直的分力进行测量。

(5) 扭矩传感器。检测扭矩的方法是用被测扭矩使圆筒扭转而产生应变，再用应变传感器将应变转换成电量。

c. 转速的检测 旋转物体的转速一般采用间接方法测量，即通过各种形式的变换器，将转速变换为其它物理量，如机械量，电量、磁和光等。转速传感器可分为模拟式和数字式两种。模拟式变换器，输出信号的大小是转动速度的函数，要求在整个有效速度范围内是线性的。数字式传感器，输出信号的频率是同转动速度成正比的。

(1) 电容式转速传感器。电容式转速传感器是以电容量变化作为转动位置的函数。有两种方法：一种是改变电容板的相对位置，如图 8-5-12 所示的电容传感器是一个简单的相对位置可变的电容式传感器。图 8-5-13 表示可移动极板的电容式传感器。

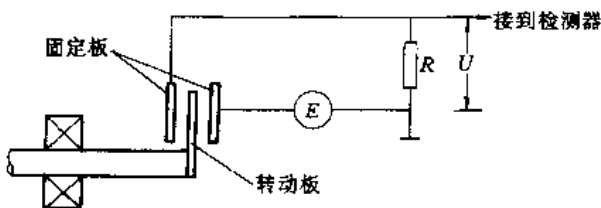


图 8-5-12 可变位置的电容式传感器原理图

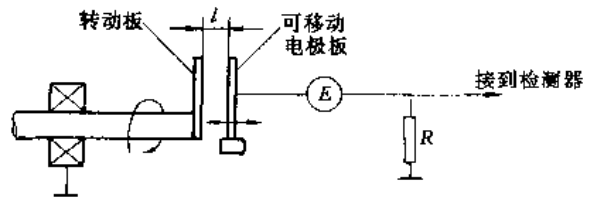


图 8-5-13 可移动电极板的电容式传感器原理图

另一种电容式转速传感器是改变介质介电常数，将转子的金属极用具有很高介电常数的材料代替，这种材料比两个极板间的介电常数大得多。这样等效的介电常数是转轴位置的函数，转轴旋转时，电容量产生周期性的变化。

(2) 涡流式转速传感器。其原理如图 8-5-14 所示，用高导电材料制造的元件安装在转轴上。当轴转动时，传感器线圈的电感和电阻发生变化，其变化量是轴转动速度的函数。涡流式转速传感器的读出线路，如图 8-5-15 所示。用电桥检测变换器线圈中微小的电感变化，由电容和电感线圈组成并联谐振电路。涡流转速传感器具有很高的分辨力，其速度范围可以从 $0 \sim 50000$ r/min。

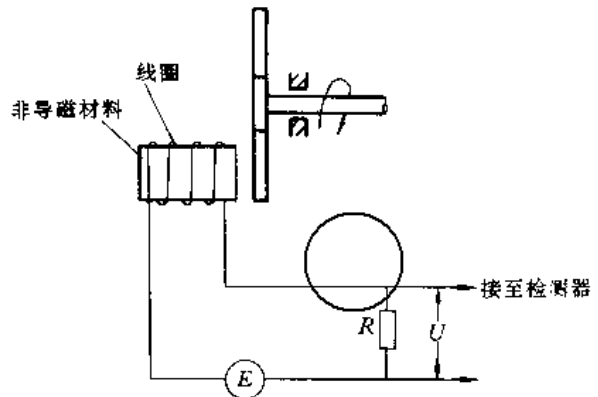


图 8-5-14 涡流式转速传感器原理图

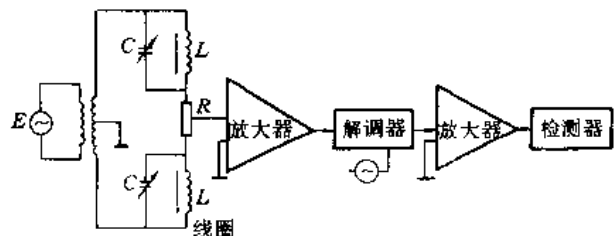


图 8-5-15 涡流式转速传感器的读出电路

(3) 光电数字式转速检测系统。光电数字式转速检测原理可分为如下两类：

1) 依据距离分割原理，如图 8-5-16 所示的光学编码器。当光源发出的光线穿过透明格子射向光敏元件时，在光敏元件上就会产生与码盘转轴位置变换成比



例的光脉冲,并由光敏元件转换成电脉冲,经过整形放大处理后以数字脉冲形式输出。被测转轴的转速

$$n = \frac{60N}{mt} \quad (\text{r/min}) \quad (8.5-2)$$

式中 N ——计数器的读数;
 m ——转动物件表面的标记数;
 t ——计数的时间(s)。

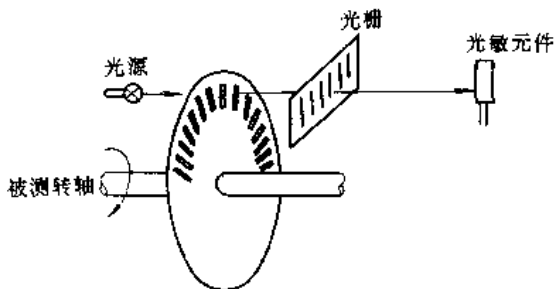


图 8-5-16 光电测速用的增量编码器

转轴速度检测的测速方框图如图 8-5-17 所示。

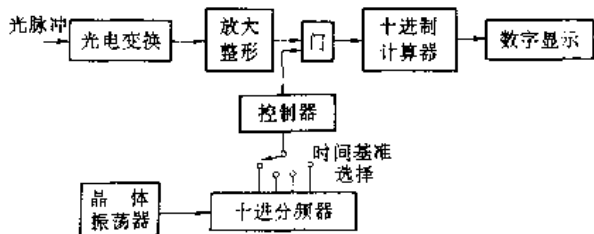


图 8-5-17 光电数字测速逻辑线路方框图

2) 依据时间分割原理的转速检测系统。这种检测系统具有较高的精确度和分辨力,并适用于很宽速度范围内的检测。图 8-5-18 为该系统原理方框图。

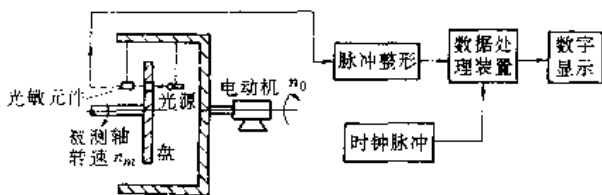


图 8-5-18 时间分割法转速检测系统的原理图

设 n_0 为伺服电动机的参考转速, n_m 为被测轴的转速。它们的相对转速 n 称作旋转脉冲比, n 可用下式求出:

$$n = n_0 + n_m \quad (8.5-3)$$

如果 t 为光电变换器发出两个相邻脉冲之间测得的时间, 则

$$n = \frac{K}{t} \quad (8.5-4)$$

式中 K 为光电传感器的常数。由此可得

$$n_m = \frac{K}{t} - n_0 \quad (8.5-5)$$

4.4 信号前置处理

在自动化加工过程质量监测系统中, 传感器所获得的信号包含丰富的信息内容,但在监测过程中,由于外部各种因素对系统的干扰和影响,必然在微弱的信号中,夹杂着许多不需要的成分,因此首先需对所获取的信号进行前置处理,其目的是:

- (1) 剔除混杂在信号中的噪声和干扰;
- (2) 突出、强化信号中感兴趣的成分;
- (3) 修正波形畸变;
- (4) 将信号转换成便于分析和识别的形式。

1. 信号放大

a. 放大器的技术指标 放大器的主要技术指标有非线性度、偏置漂移、建立时间,最大摆率以及共模抑制比等,这些指标均为放大器增益的函数。

b. 测量放大器

(1)功能。测量放大器是一种精密的差动电压增益部件,其主要功能如下:

- 1)输入缓冲。提供一个高阻抗给传感器信号源。当不采用信号滤波时,测量放大器可直接与信号源相连。
- 2)信号放大。用户可选外接电阻或软件编程来改变测量放大器增益。
- 3)共模抑制能力。测量放大器采用差动输入方式时,可提供很高的共模噪声抑制能力。
- 4)单端输出。测量放大器的一般组成如图 8-5-19 所示。

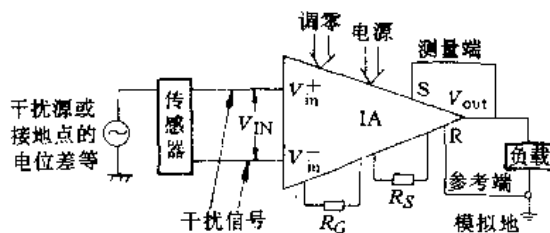


图 8-5-19 测量放大器的组成

通用测量放大器的组成如图 8-5-20 所示。

放大器的输出信号电压

$$V_{out} = (V_{in}^+ - V_{in}^-) \left(\frac{2R_s}{R_1} + 1 \right) \quad (8.5-6)$$

式中 V_{in}^+ ——输入信号正极电平值;

V_{in}^- ——输入信号负极电平值。

(2)增益调节。由于应变片、压力传感器及热电偶等传感器,往往提供宽广变化的信号电平,因此要求测量放大器的增益能够随被选中的每个多路开关通道而



同步变化。有三种测量放大器形式可供选择：

1) 缓冲放大器：对数据采集的各通道提供固定增益。

2) 电阻可控测量放大器：对图 8·5-20 所示电路，用户可以通过调整外接电阻 R_1 来改变放大器增益，由 1 到 1000。

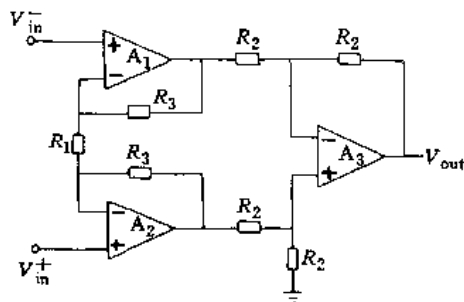


图 8·5-20 通用测量放大器

3) 软件编程测量放大器：允许用户用软件建立由 1 到 1024 的增益变化。使用软件控制增益选择开关，在任一时刻仅一对开关接通。

2. 信号滤波

(1) 低通滤波器。低通滤波器用于提取信号中有用的低频成分。滤波器截止频率的选择根据信号中需要分析的最高有效频率而定。一般机械系统的有效信号属低频范围信号，因此，常用低通滤波器。

(2) 高通滤波器。高通滤波器允许高频信号通过，并抑制或衰减低频信号。滤波器截止频率的选择应根据信号中需分析的最低有效频率而定。

(3) 带通滤波器。带通滤波器只允许通过某一频段的信号，在此频段以外的信号将被抑制或衰减。其作用是提取信号中某一频段的有效信号。若带通滤波器的中心频率能随某一基频变化而改变，则称为跟踪滤波器，跟踪滤波器应用十分广泛。

3. 数字信号的预处理 传感器输出的模拟信号，经放大、滤波以及 A/D 转换后，变为相应的数字信号。由于各种因素的影响，在信号中常常混有噪声。因此，在对该信号作数字处理之前，须进行预处理，尽可能地去除噪声，提高信号的信噪比。

a. 去除奇异项 测量数据在传输过程中，由于存在干扰，可能丢掉数据点或出现有较大误差的数据点，这些数据点被称为奇异项。

采用一阶差分方法可去除奇异项。一阶差分方程式为

$$\hat{X}_t = X_{t-1} + (X_t - X_{t-1}) \quad (8\cdot5\cdot7)$$

式中 \hat{X}_t —— t 时刻的预测值；

X_{t-1} —— t 时刻前一个采样点的值；

X_{t-2} —— t 时刻前二个采样点的值。

其判别的准则是，给定一个误差限 ΔW ；若 t 时刻的实际数据值为 X_t ，当 $|\hat{X}_t - X_t| > \Delta W$ 时，则认为此采样值不符合正常变化规律，属奇异项。一般 ΔW 的大小要根据数据采集系统的采样率，物理量的变化特性决定。

b. 去除均值 信号的均值相当于一个直流分量。信号的均值 $\hat{\mu}_x$ 用下式估计：

$$\hat{\mu}_x = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} X_N(n) \quad (8\cdot5\cdot8)$$

式中 $X_N(n)$ —— $X(n)$ 的 N 个点的记录；

$\hat{\mu}_x$ ——是对 $X(n)$ 的真正均值 μ_x 的估计值。

去除均值时，先用式 (8·5-8) 估计出 $\hat{\mu}_x$ ，然后从 $X_N(n)$ 中把它去掉。

c. 去除趋势项 在获得的数据中，一般会含有周期大于记录或测量长度的频率成分，称为趋势项。去除趋势项常采用最小二乘法。即用最小二乘法拟合一个函数 $\hat{X}(t)$ ，使 $\hat{X}(t)$ 与 $X(t)$ 的误差平方和为最小。拟合后的信号 $\hat{X}(t)$ ，体现了信号 $X(t)$ 中的趋势项，把 $X(t)$ 和 $\hat{X}(t)$ 对应相减后即去除了趋势项。

4.5 计算机与过程监测

过程监测就是对过程状态的监视和测试。它是传感技术、自动控制技术、半导体技术、微电子技术、计算机软硬件技术和数据采集技术的综合应用。通常以计算机为核心，连接各种传感器、智能器件及数据转换等功能模块，组成过程监测系统。

1. 数据采集系统 数据采集系统是把传感器或其它方式得到的模拟信号，转换成数字信号，供存储、传输、处理和显示。

a. 数据采集系统的组成 一个数据采集系统一般应包括传感器、信号调理电路、模拟多路器件、采样保持电路及模数转换芯片等，如图 8·5-21 所示。

传感器的作用，就是把各种非电量转换为电量，或把强电转换为便于处理的弱电。

传感器给出的电信号往往不便于直接采样处理，因而需要经过信号调理电路对信号进行修整调理。如把信号调理到符合 A/D 转换所需要的数值；滤掉信号中的无用成分，提高信噪比；把信号调整到便于进一步处理的需要（非线性校准、绝对值处理等）；对信号作



对数压缩,降低对后续电路性能指标的要求等。

模拟多路转换器用以选择模拟通道,使数据采集系统能够同时(顺序)采集多个通道的模拟信号。

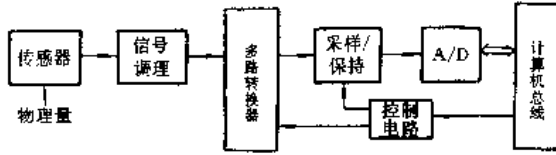


图 8-5-21 数据采集系统框图

采样保持电路保证在 A/D 转换完成之前,信号保持不变。

b. 采样定理 采样是把一个连续变化的参量在时间轴上离散化的过程。

在决定采样频率时,如果采样频率 f_s 选得过高,即采样间隔小,则在一定的时间间隔里采样点数过多,造成对计算机容量的需求过大和计算时间太长。如果 f_s 选得太低,则将在离散傅立叶变换的运算时出现频域混叠现象,形成频谱失真,因而不能反映原来的信号。因此采样定理规定:采样频率 f_s 应等于或大于信号所含有的最高频率 f_n 的两倍,即

$$f_s \geq 2f_n \quad (8-5-9)$$

在实际的数据采集系统中,常采用下列措施:

- (1) 预先确定模拟信号的有用频带宽度;
- (2) 对模拟输入信号进行低通滤波,使信号的频率成分限制在一定频带之内;
- (3) 选用尽可能高的采样频率。常取

$$f_s = (4 \sim 10) f_n \quad (8-5-10)$$

2. 模数转换 模拟信号转换成数字信号有两种方法:采用 A/D 变换器(ADC)或 V/F 器件。

A/D 变换器的类型很多,系统中常用的有逐次近似法,积分法和直接比较法。逐次近似法转换速度比较快,通常在几至几百微秒之间;积分法转换速度慢,但精度高;直接比较法转换速度最快,但成本高。一般数据采集系统多选用逐次近似法 A/D 变换器。

ADC 器件的主要指标是分辨力(位数)和转换时间(即精度和速度),它直接决定系统的性能和成本。目前 ADC 器件的分辨力可达到 24 位。对 10 位 A/D 转换时间仅为 $1.5\mu s$ 。

V/F 转换是把电压信号转换成频率随信号幅值变化的脉冲串,经计数可以确定信号幅值。见图 8-5-22。

如果 V/F 转换最大频率为 1MHz,要求 12 位分辨力,则转换时间为 4.096ms。

3. 硬件接口技术 接口就是两个部件之间的连

接点或边界。接口电路有以下四个功能:

- (1) 提供被连接两部件之间的数据缓冲;
- (2) 寻址,用来选择存储器单元或 I/O 接口;
- (3) 命令译码,用来解释和产生各种操作指令;
- (4) 同步控制,用来协调被连接部件动作时间的差异。

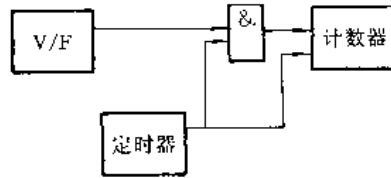


图 8-5-22 脉冲串定时计数

按照与外围设备交换数据的方式区分,有并行接口与串行接口两种。并行接口数据传送速度快;串行接口与外部设备之间的物理连接数据线只有一根,适用远距离数据通信。

并行接口是一组能与微处理器系统总线相连接的逻辑电路。一个完整的并行输入/输出端口有以下几个特点:

- (1) 具有与总线相连的数据缓冲器和数据传送线;
- (2) 具有与输入输出设备进行应答的同步机构;
- (3) 具有地址译码和选片功能;
- (4) 具有中断请求和处理功能。

常用的并行接口芯片有: 8212, 8255, Z80PIO, MC6820 等。

远程数据通信中常采用串行通信方式,常用芯片有: MC6850-ACIA, MC6852-SSDA, 8251-USART, 8279, MC6854, Z80-SIO 等。

4. 监测软件设计与调试 过程监测系统是一个实时系统,在设计及调试监测软件时应注意几点:

- (1) 研究监测系统的硬件背景;
- (2) 划分模块,分模块设计调试;
- (3) 选择合适的编程环境和算法语言,必要时可以采用几种语言混编;
- (4) 系统软件的实时性。

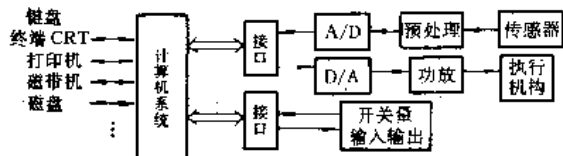


图 8-5-23 过程监测系统硬件框图

过程监测系统硬件框图如图 8-5-23 所示。监测软件设计可分为系统监控程序设计、监测算法程序设计,开关量通道控制软件设计,模块通道控制软件设计



(A/D 控制, D/A 控制) 等几个部分。系统监控程序中又可分显示模块、打印模块等。划分模块进行设计、调试, 使编程过程简化, 提高了编程效率。

系统软件的实时性非常重要。监测系统工作时, 要实时采集过程状态参量, 并用监测算法程序判断。所有程序运行都必须在两次采样之间完成, 否则将导致系统混乱。因此既要保证过程状态参量的特征变化能被正确地采集 (采样频率应为信号中最高频率的 4~10 倍, 或在一个阶跃响应的上升段采样 3~5 点), 又必须保证算法程序在两次采样之间运行完毕。

(FMS)。FMS 的故障诊断分为系统级、单元级、加工中心级。

系统级故障诊断是对 FMS 中的加工中心、数控机床、运输设备以及计算机网络等子系统的运行故障进行诊断, 实现各子系统间的协调工作。

单元级故障诊断包括编制制造设备的检测程序, 确定状态识别策略; 完成同上下级诊断系统的通信。

加工中心级故障诊断是对加工中心的运行状态进行监视, 检测其故障。它包括: 原始数据的采集; 特征量的提取; 故障的预测及报警; 同上级系统的通信等。

5 自动化制造系统中的质量故障诊断

5.2 柔性制造系统故障树

5.1 故障诊断的层次结构

FMS 故障主要分为如下两类形式:

自动化制造系统的主要类型是柔性制造系统

(1) 组成 FMS 的各子系统、部件、元件的位置、运动关系或动作不正常。

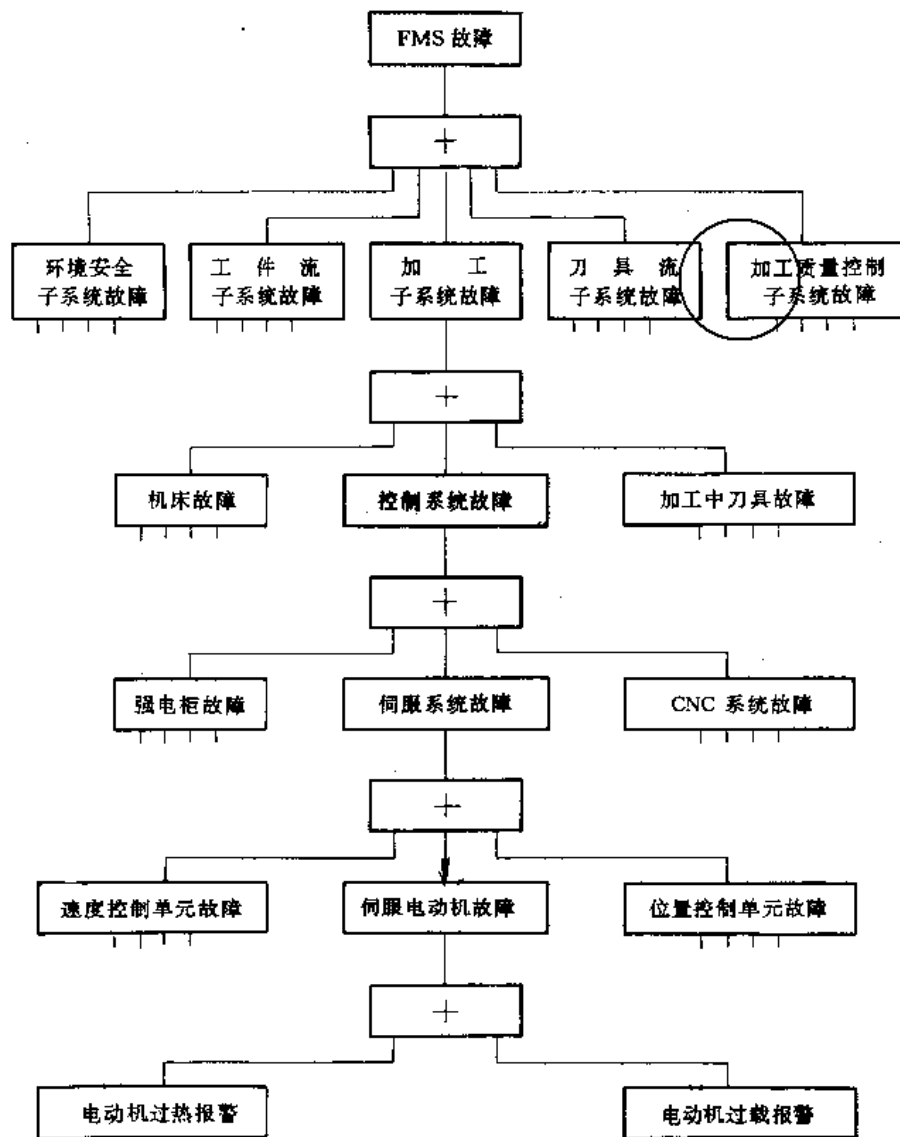


图 8-5-24 FMS 故障树



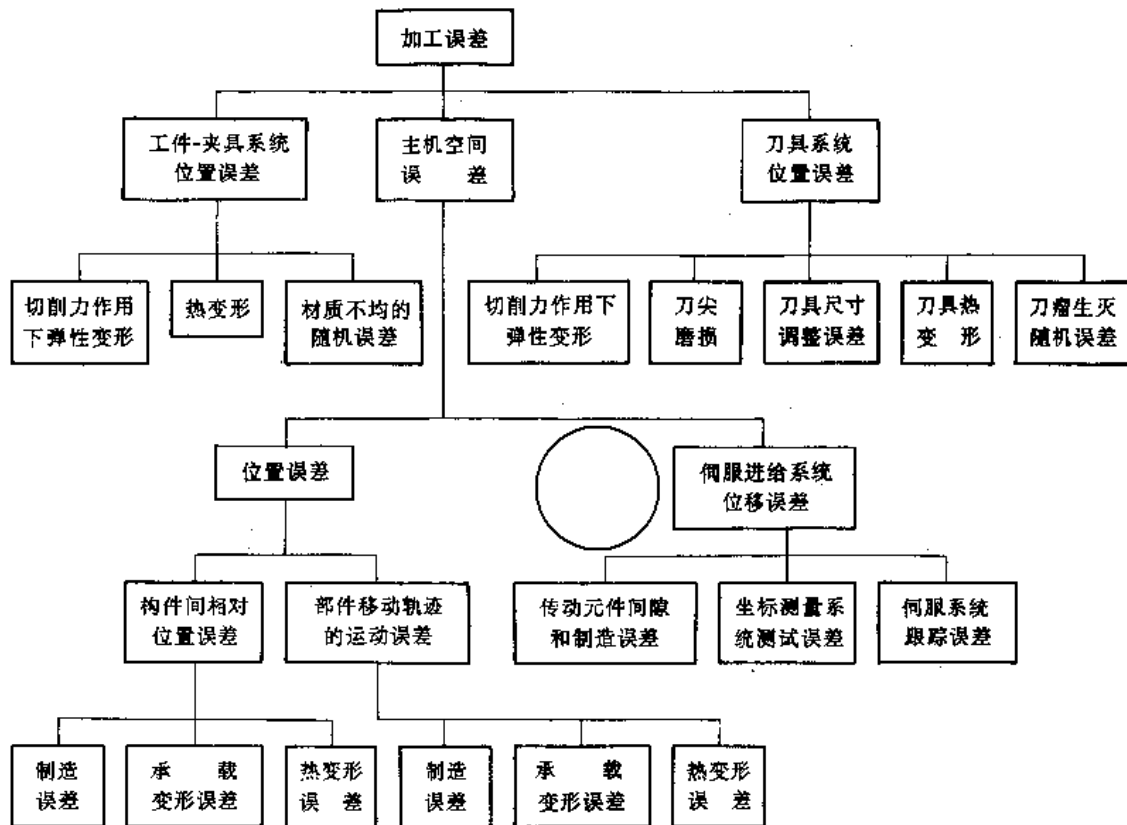


图 8-5-25 数控机床加工误差的组成

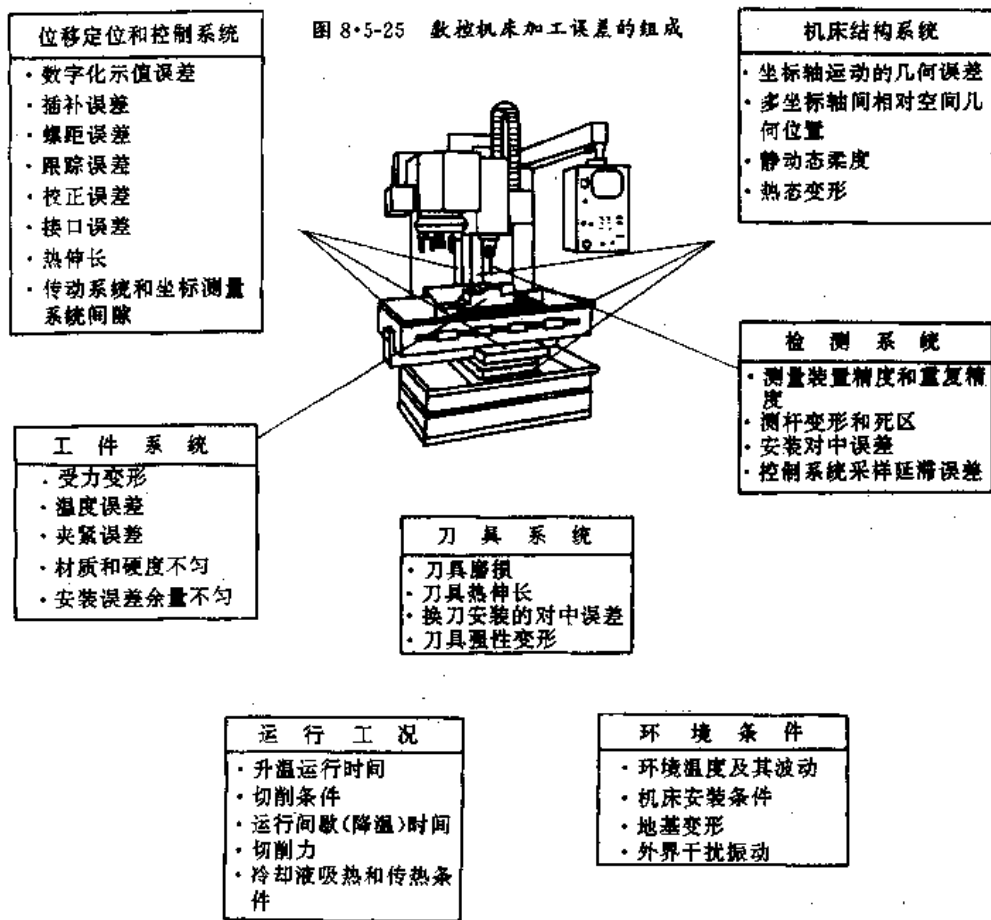


图 8-5-26 影响加工中心精度的各种因素



(2) FMS生产的工件出现技术参数达不到加工精度或质量要求。

FMS故障树如图8-5-24所示。

故障树分析法是一种将系统故障形成的原因由总体至单元按树枝状逐级细化的分析方法,其目的是判明基本故障,确定故障的原因、影响和出现概率。

质量故障是指机床加工的工件精度不能满足设计要求。影响精度的因素包括:机床系统的空间定位误差(简称空间误差);刀具系统的位置误差和工件-夹具系

统的位置误差等。图8-5-25表示构成加工误差的各因素。如果进一步考虑环境条件、运行工作状况以及检测系统误差等,则影响精度的因素将更多。图8-5-26以加工中心为例列出各项影响因素。

由于影响加工设备状态和工件精度的因素很多,以及加工过程本身的复杂性与多变性,对自动化加工过程的故障诊断技术要求越来越高。传统的诊断方法已不能满足要求。目前,人工智能、专家系统技术以及人工神经网络技术已被广泛应用于故障诊断中,并取得了明显的效果。

第6章 工厂自动化中的网络及数据库技术^{[69]~[74]}

1 计算机集成制造系统网络

1.1 网络特点

(1) 开放性。一个开放式的适合于工厂自动化和办公自动化的异构型计算机网络是CIMS的基础。因此,CIMS网络最重要的特点是开放性。为了将来自不同厂家的各种设备集成起来,需要提供一个开放式的通信网络环境,具有连通性、互操作性和集成管理的功能。

(2) 标准化。实现CIMS网络开放性的主要途径是标准化的制订和实施。这些标准基于已有的、或正在制订的国际标准和工业标准。它们包括ISO/OSI参考模型、广泛流行的运输层和网络层工业标准TCP/IP、MAP、TOP,以及在更广范围的开放系统环境OSE(Open System Environment)等。

(3) 丰富的网络服务。提供适合于工厂管理、设计、制造等各种应用的网络服务;提供适合于工厂的制造报文规范的网络服务;提供应用层的网络服务、应用程序接口以及底层的通信服务。

(4) 实时性。在单元层-工作站层-设备层的递阶控制的柔性制造系统集成环境中,需要实时性强的进程间制造信息通信和数据库查询,有的需要毫秒级的响应速度。

(5) 适应工厂物理环境。主要是适应工厂的温度、湿度、干扰、振动等条件。

(6) 高可靠性和可用性。

(7) 可维护性好。

(8) 灵活的可扩展性。

1.2 制造自动化协议

MAP是美国通用汽车公司(GM)提出的一种用于制造自动化的局域网协议。由于GM的规模和影响使MAP已经成为工业界流行的一种局域网。在CIMS环境下,通过MAP可使各种计算机、可编程控制器、机器人和智能设备连网通信。MAP为众多来自不同厂家的各种设备的集成提供一个标准的、开放式的通信网络环境。

自GM于1982年推出第一个MAP版本MAP1.0至今,陆续提出过MAP2.0, MAP2.1, MAP2.2直到1988年提出的MAP3.0。MAP3.0要稳定一段时间以利于形成产品和推广使用。

MAP是基于ISO的OSI参考模型形成的,它有七层结构。MAP3.0与OSI的兼容性更好,图8-6-1是MAP的协议结构,由于实时要求,局域网的介质访问控制协议选用802.4令牌总线,网络层选用无连接型网络服务。在应用层有一个适用于CIMS环境的MMS。



在MAP3.0体系中,七层协议使开销大,所以在很多场合可选用简化MAP协议,称为mini MAP和性能增强型结构局域网(EPA, Enhanced Performance Architecture)。这种结构见图8·6-2。普通MAP系统具有完整的七层协议,但对于一些要求实时性好或开销小的系统,则采用mini MAP,由于把应用层直接置于链路层之上,因而大大简化了通信协议的复杂性。为了使mini MAP能进入MAP网络系统,MAP/EPA起桥梁作用,它兼有完整的MAP协议和mini MAP体系,使mini MAP系统通过MAP/EPA能完成与其它MAP系统的通信,图8·6-2中左边节点为MAP系统,它有完整的七层MAP协议,中间节点为MAP/EPA,它左边的协议和MAP系统完全兼容,而它右边的协议又和mini MAP兼容,因此它既可与MAP系统,又可与mini MAP系统通信,但是MAP和mini MAP之间不能直接通信,它们必须通过MAP/EPA间接通信。

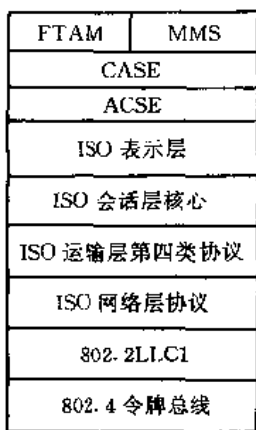


图 8·6-1 MAP 协议

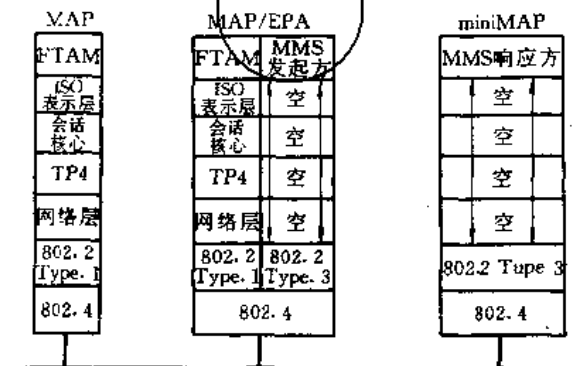


图 8·6-2 MAP 通信系统

MAP/EPA 的主要用途是作为 MAP 与 mini MAP 二个局域网之间的连接器。

1.3 技术和办公自动化协议

办公自动化的基本思想就是使人们能比较方便地使用办公室里的各种设备,这些设备不仅是大、中、小型及个人计算机,而且有经常在办公室里可以见到的各种设备,如打印机、绘图仪等,还有越来越多的电子文件和数据库。办公自动化的程度越高,办公室工作人员的工作效率就会随着提高。

局域网由于它的基本特征较好地符合办公室设备互连通信的需求,因而在办公自动化领域得到广泛应用。可以说,局域网的发展和使用在办公自动化中起着关键的作用。

局域网为办公自动化提供的基本服务是文件传送、电子邮件、资源共享等。例如利用文件传送服务,通过网络传送比较长的文件也只需几秒或十几秒。比较短的文件可以用电子邮件传递,它比常规的邮件投递服务的速度更快,价格也逐渐降低到比邮件服务便宜。

在办公自动化的实施过程中遇到的最大麻烦是多厂家供货环境的机器之间无法进行通信问题,几乎没有两个制造厂家生产的机器之间能够顺利地通信。例如,美国波音公司的办公室和工程部中分布着来自 80 多个不同制造商的 45 台主机,400 台小型机以及大约 20000 个工作站和终端设备,因此没有哪一个单独的厂商能够满足该公司如此众多的设备的连网需求。因为波音公司需要的是通用的开放网络,只要网络是一种专用型网络,那么该网络就绝不可能提供计算机集成办公所需要的服务和通用性。为此波音公司于 80 年代初就着手研究这种用于办公自动化的网络开放系统体系结构,并于 1985 年 11 月推出基于 OSI 参考模型的用于办公自动化的局域网协议-技术办公室协议 TOP。它的七层协议体系结构如图 8·6-3 所示。和 MAP 一样, TOP 也是选用已有的或正在制订中的国际标准和工业标准,以满足用户开发和应用的需。TOP 的第二个版本是与 MAP3.0 同时发布的 TOP3.0,它与 TOP1.0 一样,低层采用 IEEE802.3 标准,和 MAP3.0 应用层服务相同的部分是文件传送存取管理 (FTAM, File Transfer Access and Management) 和网络管理服务等。在 MAP3.0 中没有提供,而在 TOP3.0 中提供的服务有基本类虚拟终端协议 VT-B,它提供一个基于连接的服务,支持交互式全双工的进程与终端之间的通信; X.400 报文处理系统 (MHS, Message Handling System),它为电子邮件提供了一个



世界范围内标准,定义了传送报文的方法、域和格式以及用于处理、传递和发送报文的服务和协议。这个协议是 CCITT 标准,它与 ISO 的 MHS 标准有相当距离,后经协调统一成一个国际标准。

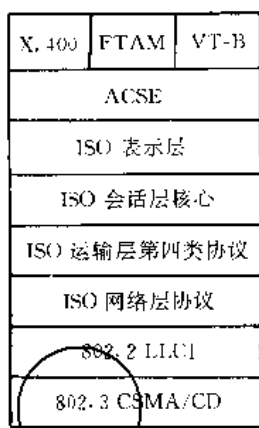


图 8-6-3 TOP 协议

1.4 场地总线

场地总线 (Field Bus) 是由 IEC 提出的一种用于互连工业低层设备,利用串行数字通信的一种工业低层总线局域网。与一般局域网相比,它具有成本低、易于安装等优点,适用于对通信服务要求低的设备层互连,网络只提供数据传递和状态采集服务。由于低层设备量大,往往有几十,上百甚至上万台设备,若采用场地总线代替局域网可以节省大量投资。

场地总线是指分布在生产现场的初级自动化设备与控制室里较高级自动化设备之间的一种用于短报文传输的数字式串行通信链路,现场指制造现场或过程处理现场,统称为场地 (Field)。初级自动化设备称为场地设备,例如各类智能传感器执行装置,其中包含有微处理器和存储器。控制室里的典型设备是多回路控制器、分布式控制系统、单元控制器、工作站控制器等。场地设备和场地总线组成 CIMS 的底层。当然,如果现场安装了较高级的 PC 或先进的加工中心,它们具有直接连网通信的能力,这种情况下,一般仍然利用局域网进行场地通信。

美国仪器协会所属标准实施 50 委员会,简称 SP-50 委员会 (Standard Practice 50 Committee),专门从事于场地总线的研究,该组织根据不同的应用场合把场地总线定义为二类,取代号为 H1 和 H2 场地总线。H1 总线是点-点通信链路,利用 20mA 电流回路系统

传输数字信号。控制室设备与场地设备之间的通信用主-从模式,链路的最高载波频率为 9600Hz。H1 总线用于干扰、噪声大,比较恶劣的现场环境。建议的总线长度为 1900m。H2 总线是多点通信链路用屏蔽双绞线、同轴电缆或光纤,进行基带传输或载波传输,载波频率超过 100kHz。H2 总线用在场地设备多,要求传输速率高的场合,建议的长度为 750m。无论是 H1 还是 H2 总线,其通信网络体系结构都采用三层模型,相当于 OSI 参考模型中的应用层、链路层和物理层。虽然国际标准化组织至今仍未有确定场地总线的协议标准,但该问题已引起国际上的广泛重视和关注,许多国家都在积极研究、开发有关协议,提出了众多方案供国际标准化组织选择。

目前,应用层协议倾向于采用 MAP3.0 中的 MMS 的子集,链路层则用 3964R, RS-484, SDLC, LLC 等,物理层有 RS-232C, RS-485, RS-449 等。

1.5 通信结构

由于 CIMS 各部分对通信要求的差别甚大,采用单一的 ISO/OSI 模型是不实际的,应该根据不同的要求选择不同的网络,并且通过网络互连构成一个综合的通信网络,以达到优化的结果。例如,在实时控制情况下,网络通信的响应时间要求在毫秒级,但是每次传送的数据量很小,而在工厂办公室环境下,计算机节点之间往往有大量数据需要传送,传送数据的时间达几秒,甚至几分钟,因此,用于建立计算机之间连接的时间相对来说就不十分重要。

大型 CIMS 通信网络结构中可包括:广域网 WAN; TOP; MAP 主干局域网; MAP/EPA 和 mini MAP 网; 场地总线。这五类网可通过桥 (Bridge)、路由器 (Router) 和网间连接器 (Gateway) 互连成一个大 CIMS 通信体系结构,如图 8-6-4 所示。图中的 MAP/EPA 节点把处于 MAP 局域网中单元控制器的信息传送到 mini MAP 网中各节点,同时把它们的信息反馈上传给控制器,因此它是一个十分重要的节点,实际上也可以把它看作为一个协议转换器,进行 MAP 协议与 mini MAP 协议之间的转换。处于场地总线与 mini MAP 网之间的网间连接器则进行场地总线协议与 mini MAP 协议之间的转换和路由选择。图 8-6-4 中的路由器只完成路由选择。

图 8-6-4 所示的 CIMS 通信体系结构由于通信协议采用的是工业标准,因此具有良好的开放性和可扩展性,性能优良,但造价高,适用于大型企业中的



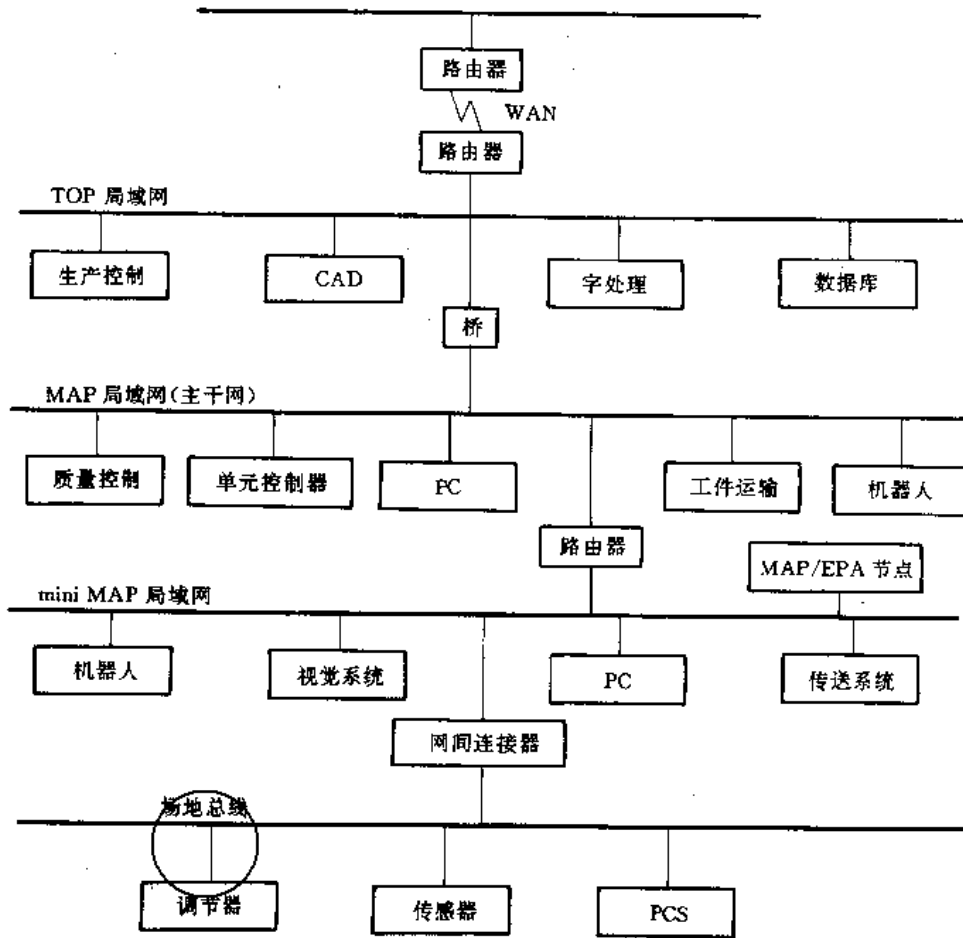


图 8-6-4 大型 CIMS 通信体系结构

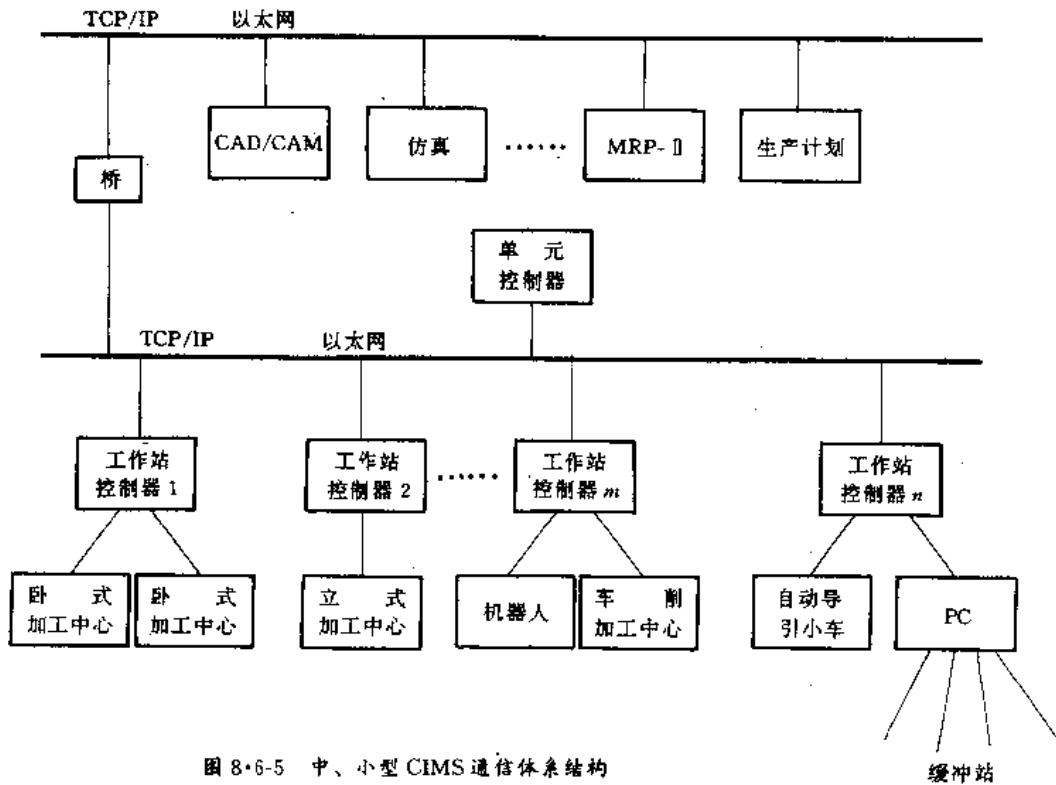


图 8-6-5 中、小型 CIMS 通信体系结构

缓冲站



CIMS。在中、小型企业的 CIMS 中,常常采用价格较低,实现起来比较容易的 TCP/IP 和以太网互连的中、小型 CIMS 通信体系结构,如图 8·6-5 所示。通信结构由上、下二层局域网组成,二层网络的低层都是以太网,因此在各种计算机系统和工作站中都配置了以太网通信接口板和相应的 TCP/IP 软件。这样就可以利用 TCP/IP 提供的文件传送协议 (FTP, File Transfer Protocol) 在异种机之间传送文件,利用 TCP/IP 提供的进程间通信服务进行异种机进程间实时通信,快速地在控制器与设备间进行报文交换,达到实时控制目的。上下二层局域网之间用桥互连,这种桥只需具有路由功能,而不必进行通信协议的转换,因此价格比网间连接器和路由器便宜。

图 8·6-5 中的工作站的作用是上挂下连,通过工作站使连接的设备入网,这样做主要是解决设备不能直接连网的问题。低层设备与工作站之间可通过 RS232C 接口进行点-点通信。

低层设备中的一些简单装置,如缓冲站,条形码阅读器则可以通过 PC 间接入网。

1.6 MAP/TOP 产品

MAP/TOP 产品目录详细列出主要厂商生产的 MAP/TOP 软硬件产品。该产品目录由美国两个组织出版。一个是制造工程师协会 (SME, The Society of Manufacturing Engineers); 另一个是工业技术研究所 (ITI, The Industrial Technology Institute)。

所列产品包括以下几类:

最终系统 (end systems);

中间系统 (intermediate systems);

初始设备制造厂家 (OEM, Original Equipment Manufacturing) 产品;

网间连接器;

网络产品;

网络服务。

以下几类产品尚未列入产品目录;

和非 MAP/TOP 网互连的网间连接器;

网络控制设备;

网络管理设备;

网络软件维护和测试。

2 工厂自动化网络的设计和实施

2.1 网络的需求分析

网络需求分析涉及六个方面: 服务需求; 通信特

性; 物理环境; 可用性; 可维护性; 可扩展性。

1. 确定服务需求 包括收集信息、开发一个服务结构和编制服务需求文本三步。需要收集的信息包括连网目的, 接入网络的设备以及要求网络提供何种服务。在制定方案和初步设计阶段, 有时难以提出确切的服务需求, 可以借助于原型试验或仿真技术。开发服务结构的主要任务是将用户需求转换成连网的要求, 涉及数据量、网络进程通信以及用户应用程序和网络服务间的功能分配。编制服务需求文本是将上两步工作结果编成文本, 包括列出满足服务需求的网络标准、网络服务需求、入网设备以及管理控制等要求。

2. 建立网络通信特性 包括收集基本信息、确定基本应用特性、开发通信矩阵、开发各个设备的统计特性以及确定网络总通信量。基本信息包括所有直接访问网络的用户设备和每个连网设备相关的全部应用。确定基本应用特性的目标是确定每个应用的通用基本特性, 如分组单元的大小, 通信类型是数据流还是事务处理, 从而得出每个应用类的网络特性描述。开发通信矩阵是指开发一个典型的各用户对之间的通信型式模型, 采用数据流图和通信矩阵来构成模型, 参数包括平均值和峰值以及用户对之间每一个应用的性能要求, 如延迟、吞吐率等。开发各个设备统计特性是将面向用户的应用层数据转换成每个用户设备在网上产生的实际通信量。包括通信负载、访问网络次数以及在面向连接的应用中每个站点需要的并发连接数, 最后可产生一个描述设备统计特性的表。确定网络总通信量是汇总上面几步的结果, 总平均值只是各个设备平均通信量之和, 总的峰值要比各个设备的峰值通信量之和低得多, 例如可取 50%。

3. 网络物理环境 包括环境条件、连网设备及接口以及传输的数据。环境条件有地理区域的大小, 设备所在楼群的分布, 设备位置以及温度、湿度、振动和电磁干扰等。连网设备及接口包括 MAP/TOP 设备和非 MAP/TOP 设备以及网络连接设备网间连接器等。在网上传输的数据包括 OSI 数据和非 OSI 数据, 数字数据、声音、图象等以及编码图形、产品数据和文字处理文本的协议标准。

4. 可用性 全网可靠性和局部可靠性用平均故障时间和平均修复时间来评定, 也可用网络提供的服务质量降低来衡量。

5. 可维护性 包括硬件故障、软件故障和故障检测。可配置网络监控器来检测故障, 制订正确的维护条例和维护方法以提高可维护性。



6. 可扩展性 包括网络应用扩充, 网络容量扩充, 物理配置和分布的灵活性, 在分析现状和预测今后的基础上制定扩展途径和措施。

2.2 网络设计和选择

网络设计在技术上要解决以下四个方面的问题: 网络的连通性; 网络的互操作性; 网络的控制和管理; 网络分布应用服务。

网络的连通性涉及选择合适的拓扑结构(环型、星型、总线型、树型、网状); 选择合适的传输介质(双绞线、基带载波同轴电缆、宽带同轴电缆、光纤以及微波、红外、卫星等无线介质); 设计场地布线系统; 选择合适的介质访问控制方法(CSMA/CD, 令牌环, 令牌总线和光纤分布数据接口等); 设计网络互连的方法(采用中继器、桥、路由器、网间连接器等)。

网络的互操作性是指网上两个子系统互相合作执行同一任务的能力, 通常按照开放系统的体系结构和标准化来设计和选择网络体系结构和协议。可选择的标准有 ISO/OSI, MAP/TOP, TCP/IP 等, 还有一些流行的局域网操作系统如 Novell 的 Net Ware, Microsoft 的 Windows NT。

网络的管理包括差错、配置、计费、性能和安全管理等, 也要尽可能遵照标准, 如简单网络管理协议(SNMP, Simple Network Management Protocol)就是目前比较流行的网络管理标准。公共管理信息协议/公共管理信息服务(CMIP/CMIS, Common Management Information Protocol/Common Management Information Services)则是 ISO 制定的异构网络管理协议。

网络的分布应用包括虚终端访问、文件传送和电子邮件等基本服务外, 还包括目录服务、进程通信、文件共享、客户服务器模式以及用在制造环境中的 MMS 等。

在设计过程中要充分重视网络经济, 包括投资考虑(设备、安装、培训和用户支持以及运行和维护费), 效益考虑(用户生产力的提高、服务质量和产品质量的提高以及其它费用的降低)和投资/效益分析。在网络设备订购中尽量选用流行的先进工业产品以减少开发时间, 获得长远的用户支持, 提供完整的文本资料以及好的性能价格比。

引入竞争机制选订设备, 先制定功能需求说明, 由厂商根据功能要求提出建议书, 组织专家评定建议书, 签订合同, 并由供应厂商保证售后服务支持。

2.3 网络安装和管理

网络安装包括: 建筑物布线系统安装(双绞线、屏蔽双绞线、基带同轴电缆、宽带同轴电缆、光缆等); 网络接口的安装(分离设备、接入计算机的插件和 VLSI 片); 网络服务器的安装(文件服务器, 打印服务器, 电子邮件服务器和网络通信服务器)。安装前需制定详细的安装计划, 然后组织队伍安装实施。

网络管理包括计划和预算、配置管理、订货和安装验收、库房管理、名字服务和目录服务、文件后备和恢复、维护和检修、培训和用户支持。网络控制包括网络监控、故障检测和故障排除。

网络安全包括物理安全, 访问控制(用户访问资源的权限)和传输安全(采用密码技术以防止信息泄漏和破坏)。

2.4 网络性能评价

对网络进行性能评价的目的是:

- (1) 预测在给定输入负载下网络的性能;
- (2) 对不同的网络设计策略、设计方案进行评价;
- (3) 对已存在的网络可以通过控制其输入负载,

从而得到需要的性能。

网络性能评价主要有以下两种方法:

- (1) 分析法;
- (2) 模拟法。

这两种方法都是根据网络的基本特性构成模型, 两者的区别是构成模型的方法不同, 即从实际的系统到模型的抽象方法不同, 前者是用数学方法加以抽象, 后者是用模拟程序来抽象。

网络基本特性包括以下三个方面:

- (1) 硬件特性: 传输介质速率、网络接口的处理、网络接口设备中的缓冲器数目。
- (2) 资源分配策略: 介质访问控制、流控和拥挤控制、网络接口中的缓冲器管理、优先调度计划。
- (3) 用户特性: 各种用户的数量、数据到达的速率、分组长度的分布特性。

上述三方面特性都将影响性能评价模型的构成。一般来说, 硬件特性决定了模型的配置, 资源分配策略决定了模型的分组流, 而网络的负载由用户特性来决定。上述三方面中的每一项都可当作模型的一个参数, 所谓性能评价, 就是要决定模型各参数和性能量度之间的关系。网络性能主要指的是吞吐率、网络延迟和利用率等。



分析法是基于单服务器队列和排队网络模型的理论。其结果是由模型参数和性能量度之间的数学关系提供。

模拟法是通过一个模拟程序来实现模型。模型参数和性能量度之间的关系是通过运行模拟程序而得到的。

分析法的优点是开销小,但对复杂模型很难用分析法,因为计算太复杂了,有时甚至不可能求解,而只能用近似的分析法,但结果精度差。模拟法的优点是模拟复杂的模型,但这种方法往往开销甚大。

在局域网性能评价中,对介质访问控制协议的性能评价,已取得了不少成果和有意义的结论。目前,对网络应用和层次协议结构的模型及其性能评价的研究正得到人们的关注。

2.5 网络应用服务

面向用户的网络应用服务主要是网络在应用层向用户提供的服务,常用的应用服务有以下几种:

(1) 虚终端服务。网络用户可以用虚终端服务命令登录到网上的计算机,并作为该计算机的终端使用。

(2) 文件传送服务。网络用户可以用文件传送命令,在网上传送 ASCII、二进制等文件。

(3) 电子邮件 E-mail。它既是一种通用的网络应用,也是其他网络应用的一个基础。除了一般发送 ASCII 文本外,还有许多应用,包括多媒体 E-mail、电子数据交换 (EDI, Electronic Data Interchange) 和各种由 X.400 标准支持的不同类型应用服务。

(4) X.500 目录服务。它为使用网络的用户和程序提供一个丰富的信息结构。它包括:信息模型,即在目录数据库中的数据模型;目录服务即目录存取协议;分布服务即服务器对服务器的协议;身份验证和安全保密的机制等。

(5) X Window 是一个独立于厂商、对网络透明的窗口系统。它包括: X 结构,即用户/服务器通信,各种资源和特性;窗口的层次结构、配置和属性;图形和文本的描述以及色彩;事件的处理、事件传递的控制等。X Window 正被广泛采用,对用户和程序产生深刻的影响。

(6) MMS 是集成制造系统对设备实施自动控制必不可少的信息服务。MMS 标准将设备抽象为虚拟制造设备,便于服务的定义。MMS 服务类似于文件传送协议,遵从主从关系。

除了应用层服务外,网络还向用户提供一些更有

效的编程接口,常用的编程接口有:

(1) 进程间通信 (IPC, Inter Process Communication)。这是一种基于套接字 (Socket) 的通信形式,允许网上不同机器的进程进行通信。两个进程各自产生一个套接字,然后通过这一对套接字进行通信。

(2) 远程过程调用 (RPC, Remote Procedure Call)。用户可以很方便地调用网上远程机器上的过程,就象调用本机上的过程一样,而这些过程实际上是在远程机器上执行的,这些过程在远程机器上执行后返回远程机器的有关信息。

(3) 应用程序接口 (API, Application Programming Interface)。为网络用户和软件开发者提供一个通用的编程环境,API 定义了各种操作系统和应用软件之间通信的公共规则,可使应用程序在不同厂商的计算机上运行。

(4) 网络文件系统 (NFS, Network File System)。是一种透明的共享网上文件系统的协议。这种分布文件系统,从用户观点看是透明的文件存取;从应用程序观点看,是一种过程接口;从系统管理员的观点看,用来组织管理一个集团。

2.6 客户-服务器模式

传统的基于局域网的服务器共享模式是在局域网上配置不同用途的服务器,如打印服务器提供网上用户共享打印服务;终端服务器提供用户终端集中器功能;磁盘服务器提供大量存储能力给网上用户;文件服务器为用户提供文件共享、生成文件、删除文件等操作系统的文件管理功能。这种模式的服务器只有有限的智能,其操作完全由运行在工作站的应用决定,因而网上的负载较重,服务器的利用率也未能充分发挥。

客户-服务器模式是由客户进程发送请求给服务器进程,服务器进程处理共享的资源,并将最后结果回送给客户。资源共享是通过客户与服务器的进程间通信完成的,因而网上负载较轻,服务器的利用率可很高。

在传统的分时系统中,所有的处理都由主机完成,包括各种应用程序和数据库管理。而在客户-服务器模式中,应用程序在个人计算机上执行,服务器只是读、写共享的数据块,主机的长处是数据库管理和数据库处理能力强、多用户环境、集中数据管理、安全性好,并提供信息共享。PC 机的长处是图形用户接口和交互式应用能力强,个人环境、性能价格比好,使用方便。利用客户-服务器模式能最大限度地集成这些长处,是



一种优化的组合,能最有效地利用计算机和网络资源。客户是请求服务的一方,服务器是管理共享资源的一方,各自完成相应的操作。根据功能的不同,可分为各种不同的服务器,如数据库服务器、分布逻辑应用服务器、分布数据管理服务器、通信服务器以及多服务接口的服务器等。

客户-服务器的基本结构如图 8-6-6 所示,其基础是企业网络,它是支持整个信息系统的基础设施。操作环境建立在企业网络之上。共享数据层用于管理企业的数据。标准的服务接口提供对企业数据的访问。工具层通过服务接口存取共享数据。用户在最上层,最终要依靠高效率的人来支持整个金字塔结构。

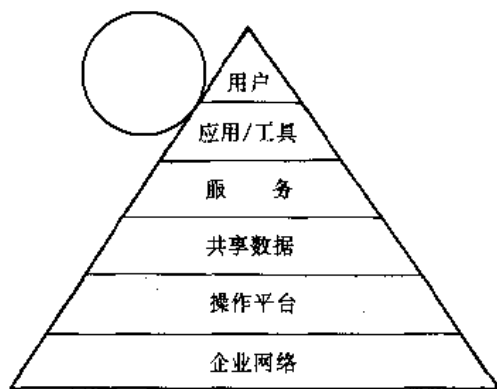


图 8-6-6 客户-服务器模式

3 工厂自动化中的信息管理

随着计算机技术、计算机网络技术、分布式数据库技术以及计算机辅助工程技术迅速发展,拓宽了工厂自动化的道路,在企业中可借助于计算机系统完成产品开发与设计、生产管理和车间制造等方面的工作。如在设计方面,已有自动制图、计算机辅助设计(CAD)、计算机辅助制造(CAM)、计算机辅助工艺规划(CAPP)计算机辅助工程(CAE)等。在生产方面,已有数控、加工中心、柔性制造系统(FMS)、自动仓库等。在生产管理方面,已有成组工艺、制造物料需求计划(MRP)、准时生产(JIT)、在线生产管理以及办公自动化等。这些系统大多数是单独运行,要使企业获得最大的效益,很大程度上取决于企业的各种功能的协调,只有各种功能有机地集成在一起才可能共享信息,才能在较短的时间内作出高质量的经营决策,才能提高产品的质量,降低成本。所以不是单纯地使用了计算机、提高自动化技术后就能达到,必须将构成系统的每一部分集成起来,构成一整体。网络技术将各单个计

算机连接在一起,达到硬、软件资源共享。但要实现上述功能集成,除了要有计算机网络支持外,关键是信息集成,要提供一种机制,能使各过程之间可共享公共数据和公共资源。数据库技术是实现共享公共数据的一种先进的方法。现在流行的一些商用数据库管理系统,它主要服务于事务处理,即面向于管理信息系统(MIS),它不是为工程应用而设计的,所以现行的商用数据库管理系统要对一个企业的全部数据(工程设计、制造和经营管理)进行管理存在一些问题,例如,有些数据类型(矩阵、向量、集合等)在数据库中不能表示;对有些处理效率比较低、性能比较差等。为了适合工厂自动化和集成制造系统需求,需研究和开发新型的数据库管理系统。

3.1 工厂自动化中信息类型和数据模型要求

目前,在世界上已有很多企业实施计算机集成制造系统(CIMS),下面介绍一些工厂的CIMS,以了解工厂自动化的需求。

1. 德国西门子公司奥斯堡工厂的CIMS 该厂开发和制造数据处理装置和数据传输装置以及计算机外围设备。为此,他们建立了计算机辅助工业(CAI, Computer Aided Industry),到1988年已安装了生产计划与控制(PPC, Production Planning and Control)、CAD、CAM、CAPP和CAO(Computer Aided Office, 即计算机辅助办公自动化),如图8-6-7所示。CAD工作站通过功能接口将产品结构数据传给PPC系统,并将元件布置的数据传给CAPP系统。为了在印制板上自动插上元器件,由程序生成器生成各种数控程序以及插件板沿生产线行走的工艺路线单。根据生产计划的要求调整生产设备的配置。PPC根据工艺路线单、生产完成期和零件可提供性的情况下确定每天应完成部件数量,并将它传送给制造控制机。CAM系统按在线工作方式完成其规定的任务,并将已完成的插件板情况回报给PPC。

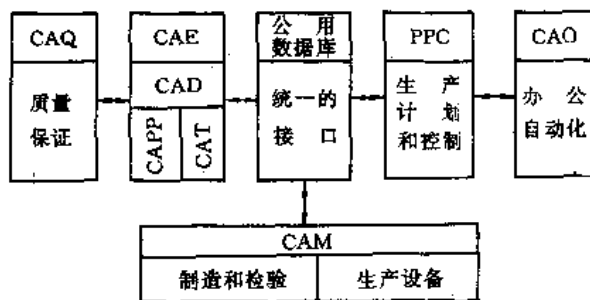


图 8-6-7 德国西门子公司奥斯堡工厂的CAI结构



2. 日本法纳克筑波工厂的 CIMS 日本的法纳克 (FANUC) 公司是世界最大的工厂自动化 (FA) 产品的供应商。主要生产 CNC 控制装置、工业机器人、钻

削中心、伺服电动机、主轴电动机、注塑机等。在 1989 年末建成筑波电加工机床装配工厂的 CIMS, 其结构如图 8-6-8 所示。

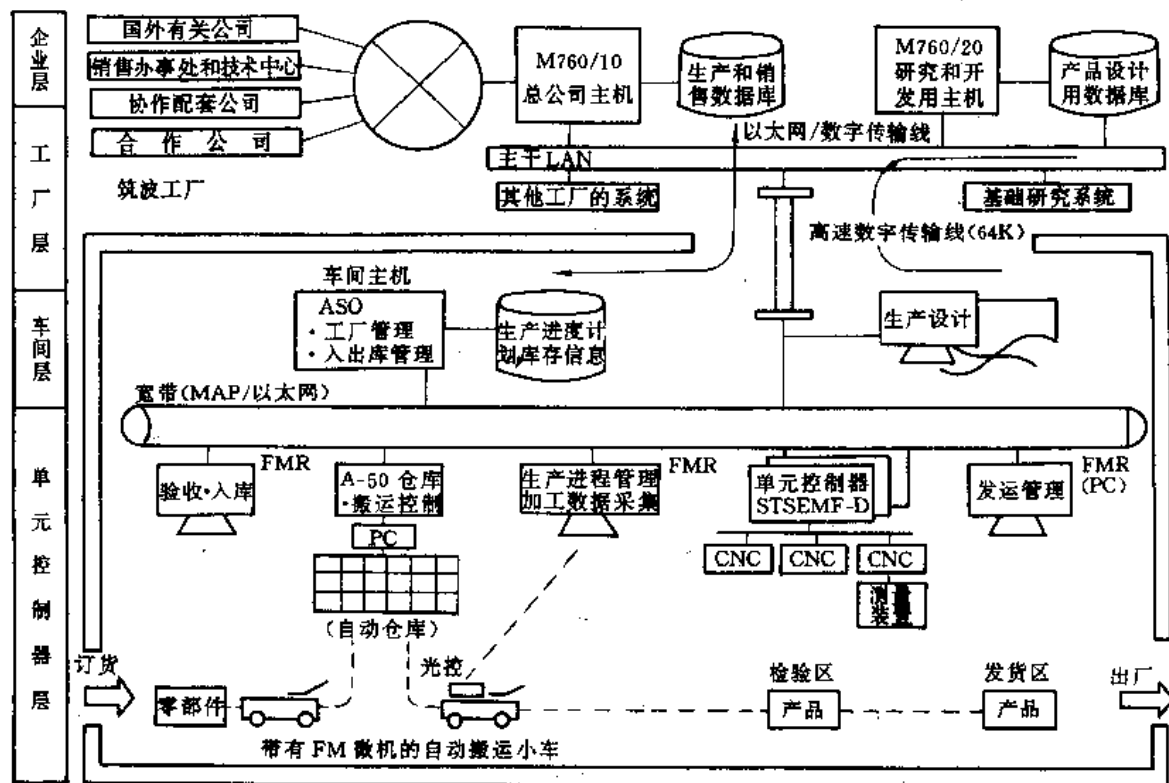


图 8-6-8 日本法纳克筑波工厂的 CIMS

为了支持工程设计、制造和经营管理三种功能,在工厂自动化环境下必须支持下列数据类型:

(1) 复杂数据类型。除了提供常规的整数、实数、字符和布尔数据类型外,要求支持更复杂的数据类型,如向量、矩阵、集合、串、有序集、时间和日期等,或支持用户自定义的抽象数据类型。这些数据类型数据在 CAD/CAPP/CAM 中是非常一般的,要求 DBMS 为这些类型数据提供操作。

(2) 复杂的对象。在工程设计中,一个对象是由它的成分定义,其结构繁杂,且具有层次性,而且还会随着设计过程动态地变化。在工程设计中不仅涉及结构化数据,而且还有非结构化数据对象。NC 代码、几何图形数据是非结构化数据的典型。

(3) 动态变化的数据模型结构。由于工程设计系统的设计过程是一个动态地变化的不断进展的过程,因此用于支持工程系统设计过程的数据模型必须具备动态变化的特点。

(4) 版本数据之间的时序联系。在工程设计中,经常会对图样作修改,形成另一设计版本,这种逐步改进可能有多次,新老版本之间有一定联系,需对这种历史资料进行管理。

由于工程设计对数据类型的特殊需求,支持工程设计的数据模型具有下列特殊要求:

- (1) 模型必须适应工程应用动态变化的要求。
- (2) 模型必须适宜表示工程应用中的层次性。
- (3) 模型必须适合工程应用中的查询操作。
- (4) 模型必须适宜表示工程应用中的非结构化数据对象,如图形、NC 代码等。
- (5) 模型应尽量地表示更多的语义信息。

3.2 集成制造数据库管理系统结构

支持工厂自动化的数据库管理系统到目前还处于研究阶段,如在美国 ICAM 计划、IPAD 规划以及美国国家标准技术研究院 (NIST) 的自动化制造研究基地



(AMRF) 都在研究, 但由于管理对象复杂, 到目前为止还没有一个完全满意的管理系统。在工厂自动化中, 实现设计、制造和管理等功能(技术)的集成不是一件容易的事, 由于已有技术, 如计算机辅助设计(CAD)、计算机辅助制造和计算机辅助管理系统等都是独立开发, 相互之间无接口联系。在中国国家 CIMS 实验工程中采用了集成制造数据管理系统, 其结构为: 在底层采用多种机制实现多种类型数据的管理(包括定义、操纵和维护等), 由基本服务执行系统实现每个结点(指网络环境中每一计算机)事务处理和管理, 每个结点的系统结构如图 8-6-9 所示, 实现和支持整个系统的信息集成。

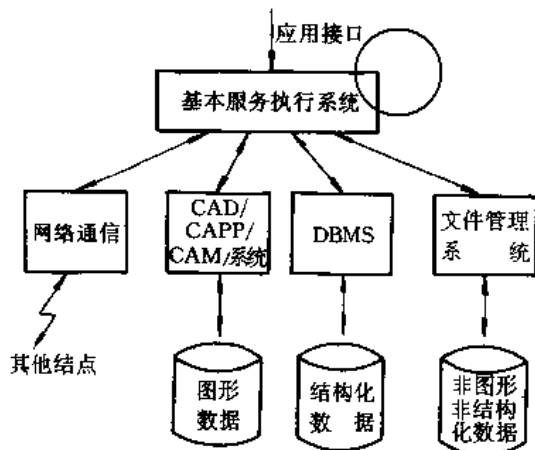


图 8-6-9 集成制造数据管理系统结构

在系统中, 图形数据的操作(显示、删除、输入、修改)由 CAD/CAPP/CAM 系统(为 CIMLINC 系统)实现, 结点之间(即 CAD/CAPP/CAM 系统之间)通过标准交换接口(如 IGES 文件)实现连接和共享。对于结构化信息, 采取关系型分布式数据库管理系统进行管理, 实现共享, 对于管理信息, 通过调用(DBMS, Data Base Management System)进行操作。对于非图形非结构化数据, 如 NC 代码文件, 采用文件管理系统管理, 通过网络通信功能实现结点之间数据的传递。

在我国近期实现的 CIMS 应用工厂中, 采用的数据管理系统的体系结构同国家 CIMS 实验工程的方案相类似。整个数据管理系统由三个子系统(CAD/CAPP/CAM 系统、数据库管理系统和文件系统)组成, 分别管理三种不同数据类型。三个子系统之间的交叉部分, 通过应用程序接口进行数据转换, 并实现其数

据的一致性。数据库管理系统 DBMS 一般采用分布式数据库管理系统(DDDBMS, Distributed DBMS), 通过它可实现对本地数据库查询、远程数据库查询和分布式查询(同时对多个数据库的数据查询)。利用所提供的一些机制, 如数据库链、视图及同义词, 实现数据存储位置的透明性, 使应用程序对数据具有较高独立性。

4 工厂自动化中的数据集成技术

数据库技术原先是满足管理信息系统数据综合管理的需求而发展起来。随着工厂自动化的发展, 数据库技术不仅应用于管理, 实现信息集成和共享, 而且逐步地应用于工程设计。工程设计对数据库技术提出了新的要求, 促进了数据库技术的发展。其发展方向可归结为: 工程数据库系统、多数据库系统和联邦式数据库系统、支持语义数据模型数据库系统、面向对象数据库系统、数据技术与人工智能技术结合、多媒体数据库系统等。

4.1 工程数据库系统

工程数据库系统(EDBS, Engineering Data Base System)是支持工程应用的数据管理系统。在 70 年代后期, 挪威国家工业中心开发的工程数据库系统 TONADO (Technical and Oriented Network Data Organization), 是应用网状模型作为工程数据库系统的模型, 该系统在北欧国得到应用。在 80 年代初期, 工程数据库系统模型以关系模型的扩充最为突出, 将抽象数据类型的概念和方法引入到关系模型。从 80 年代中后期至今, 面向对比数据模型的工程数据库系统的研究成为热点。

1. TONADO 工程数据库系统 TONADO 系统是用 FORTRAN 语言实现的, 可处理变长度和动态改变长度的记录, 系统允许多种数据类型, 除常规的外(整型、实型、字符型、双精度等), 还允许处理复数型和逻辑型数据。它在几何产品模型、塑表面模型、实体几何、装配平板建筑和船舶设计等应用方面取得较好的效果。

2. ARDBID 工程数据库系统 ARDBID (A Relational Data Base for Interactive Design) 是基于关系模型的工程数据库系统, 在数据库中可存储结构化的非图形数据, 也可存储非结构化的图形信息, 包括二维图形信息和三维图形信息。该系统主要应用于集成电路和机械零件设计, 仅能用于三维线框的实体表示, 不能用于实体造型的数据描述。



3. 支持 STEP/PDES 产品模型数据交换的工程数据库系统 STEP 是 ISO 对 PDES 和 CAD * I 等研究基础上制定的用于不同 CAD/CAM 系统间进行数据交换的国际标准。STEP 规范的产品定义模型是用 EXPRESS 语言描述,所以提出以 EXPRESS 支持的模型为基础,开发工程数据库管理系统。STEP 的体结构参照了 ANSI/SPARC 三级模式结构,提出了 STEP 的三级结构(应用层、应用协议;逻辑层,集成资源;物理层)的实现形式。为了提高 CAD/CAM 系统与工程数据库管理系统之间的信息集成效率,减少中间转换环节,国内一些单位正在进行研制基于 STEP. EXPRESS 模型的工程数据库系统。

4.2 多数据库系统和联邦式数据库系统

多数据库系统 (MDBS, Multi-Data Base System) 是由多个数据库系统组成的一个集合,实现多个数据库之间的互操作。在多数据库系统中其成分数据库系统可以是集中式的,或者是分布式的,它们都由各自的、可以是不同的成分数据库管理系统管理。

在一个 MDBS 中,如果其所有的成分数据库管理系统都是相同的数据库管理系统 (DBMS),则称该数据库系统为同构型。如果是由不同类型的数据库管理系统管理,则称为异构型 MDBS。在异构型 MDBS 中,其成分数据库系统在数据模型、查询语言及模式等方面均可不相同。

在一些部门(或单位)中,已在不同的数据库管理系统下开发了不同的应用管理,随着计算机网络和数据库技术发展,要求在不同管理系统下的数据库之间实现数据共享,多数据库系统是一种实现方法。在该系统中可开发综合应用。多数据库技术实现多个数据库间互操作, MDBS 的语言实现成分数据库数据互操作的全部功能,允许用户方便地定义和操纵自治的数据库的集合。

MDBS 根据其成分数据库的自治性可为两类,即非联邦式数据库系统和联邦式数据库系统。非联邦式数据库系统,由非自治的成分 DBMS 集成,系统只有一级管理,执行的全部操作是一致的,从用户看来,它类似于分布式数据库系统。

联邦式数据库系统 (FDBS, Federated Data Base System),其成分数据库系统是自治的,它可参于一个以上的联邦,允许部分地和有控制地共享它的数据。而不影响已存在的应用。

联邦式数据库系统结构如图 8-6-10 所示。FDBS

支持两种类型操作:全局的和局部的操作。全局操作包括使用联邦式数据库管理系统 (FDBMS, Federated Data Base Management System) 的数据存取以及存取多个成分数据库系统所管理的数据,成分数据库系统必须预先给予授权存取。局部操作为直接交给成分数据库系统的操作。在联邦式系统中,由联邦式管理系统软件控制和协调各成分数据库系统间的操作。

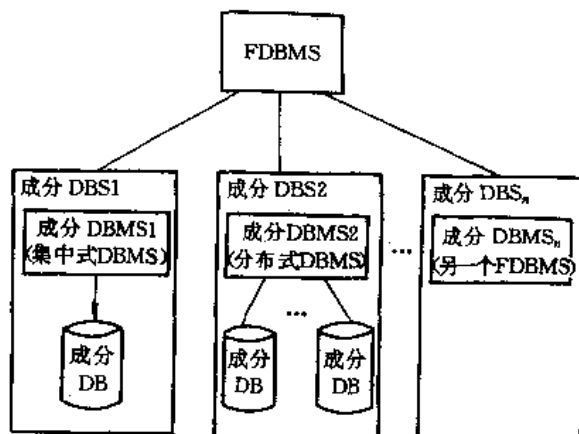


图 8-6-10 联邦式数据库系统结构

联邦式数据库系统具有一个五级模式的参考模型,如图 8-6-11 所示。五级模式如下:

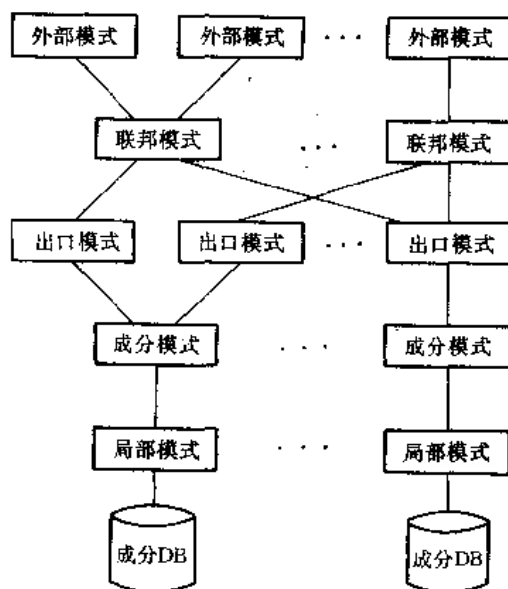


图 8-6-11 FDBS 的五级模式结构

局部模式:是成分 DBS 的概念模式,由成分 DBMS 的概念模式表示。



成分模式:是由局部模式导出的数据模式,称为 FDDBS 公用的数据模式。

出口模式:是成分模式的子集,可适用于某一个 FDDBS。它包含关于联邦用户可存取的控制信息。

联邦模式:是由多个出口模式集合而成,它包含数据分布信息。在一个 FDDBS 中,可以有多个联邦模式,对应于每一类联邦用户。

外部模式:是为用户或应用而定义的模式,它是相关联的联邦模式信息的子集。

根据联邦管理的方式,FDDBS 可分为松散耦合和紧密耦合两种。如果由用户负责建立和维护联邦,联邦系统和它的管理程序不实施控制,则为松散耦合的 FDDBS,又称为可互操作的数据库系统。如果联邦和它的管理程序负责建立和维护联邦,主动地控制对成分数据库的访问,则为紧密耦合型的 FDDBS。

在紧密耦合型 FDDBS 中,可使用在集中式或分布式 DBMS 使用的同一种查询语言,这是由于紧密耦合型 FDDBS 提供位置、分布和重复的透明性。在大部分松散耦合型 FDDBS 中,提供一种多数据库语言,允许联邦用户对多个成分 DBS 存取数据。多数据库语言的例子如 DBSL、MSQL 和 GSQL 等。

4.3 语义数据模型

为了支持设计、制造、工厂管理、销售及产品服务所需数据的存储和处理,需要有一个公共的数据模型来定义其结构、约束和操作,表示数据的语义特性。为了对不同活动的集成,要求数据模型在语义上更丰富,可定义各种工程、统计和事务数据库,允许和处理更复杂的数据类型。面向对象(OO, Object Oriented)数据模型和语义数据模型(Semantic Data Model)可更多地获取应用领域中的语义。例如在美国国家标准技术研究院(NIST)所开发的集成制造系统(ARMF)中采用了语义关联模型(SAM*, Semantic Association Model*),SMA*模型可以用于模拟和获取下列特性:复杂数据类型;时态、位置和过程性联系;数据对象的递归定义;复杂对象;划分和重复数据的模拟;多版本设计的模拟;综述和分类属性区分等。

在 SAM* 中,一个 CAD/CAM 数据库可以由相关概念的网状结构所模拟。有两种概念类型,即原子的和非原子的。一个原子的概念为不可分割的可观测物理对象、抽象的对象、事件或为任何数据元素,可以是基本信息单位,也可为复杂形式,如字符串、向量或集合等;非原子的概念为一个物理对象、抽象的事物或事

件等,其含义是由其他原子的或非原子的概念所描述。

另一类非原子概念称为关联,它描述原子的或非原子概念的聚集。不同类型的关联可按其不同的结构特性、操作特性和语义约束所区分,在 SAM* 模型中支持以下七种关联:

(1) 成员关联(简称 M 关联)。为同质原子概念的集合,它的成员具有同一数据类型,来自于同一个域。

(2) 聚合关联(简称 A 关联)。通过它的属性或特征定义一概念,如物理对象、抽象的事物或事件等。例如零件可有四种属性:零件号、零件名、重量和体积的聚合关联。

(3) 互连关联(简称 I 关联)。由聚合关联定义的独立实体类型归类,描述一组事件或事实,是实体类型的值之间互连(作用或联系)的结果,在这种关联类型中,所有成分概念类型形成一个组合键,其值能唯一标识由互连关联所模拟的事件或事实。

(4) 概括关联(简称 G 关联)。按照其一般的特性将概念类型归类,形成一个更一般的概念类型。成分概念类型的值是定义的一般概念的一个实例。例如在一个工厂中使用的零件有两类:自制零件和外购零件,它们组合起来,形成更一般的零件概念。在概括关联中,定义每个成分概念类型的属性可以相同,也可以不同,但所有成分概念类型的码属性必须在同一域上定义。

(5) 组合关联(简称为 C 关联)。将若干个类似的或不似的概念类型归类,进一步由其他概念描述。

(6) 叉积关联(简称为 X 关联)。为一些概念类型的归类,其值是由成分概念类型的值叉积而成,经常在统计数据库中使用。

(7) 总和关联(简称为 S 关联)。其定义一实体集,提交统计总和等特性信息。

在 SAM* 模型中,经常用结点和有向边(弧)表示数据结构和七种关联类型的重要约束,其数据模型为语义网状图。由 SAM* 模型所定义的数据库是为结点的网络,每个结点可由弧指向。图 8-6-12 所示为集成制造数据库的 SAM* 模型。

SAM* 模型的七种模拟构造可用于数据的结构特征、约束和操作,在 CAD/CAM 应用中是有用的。使用这种数据模型,一个集成的 CAD/CAM 数据库可用图形表示为关联结点的网络。以 SAM* 模型为基础的数据库管理系统可以处理数据、执行类型检查和实施约束。

我国 863 计划 CIMS 的预研项目 CIMBASE 数据库系统就是基于 SAM* 模型。



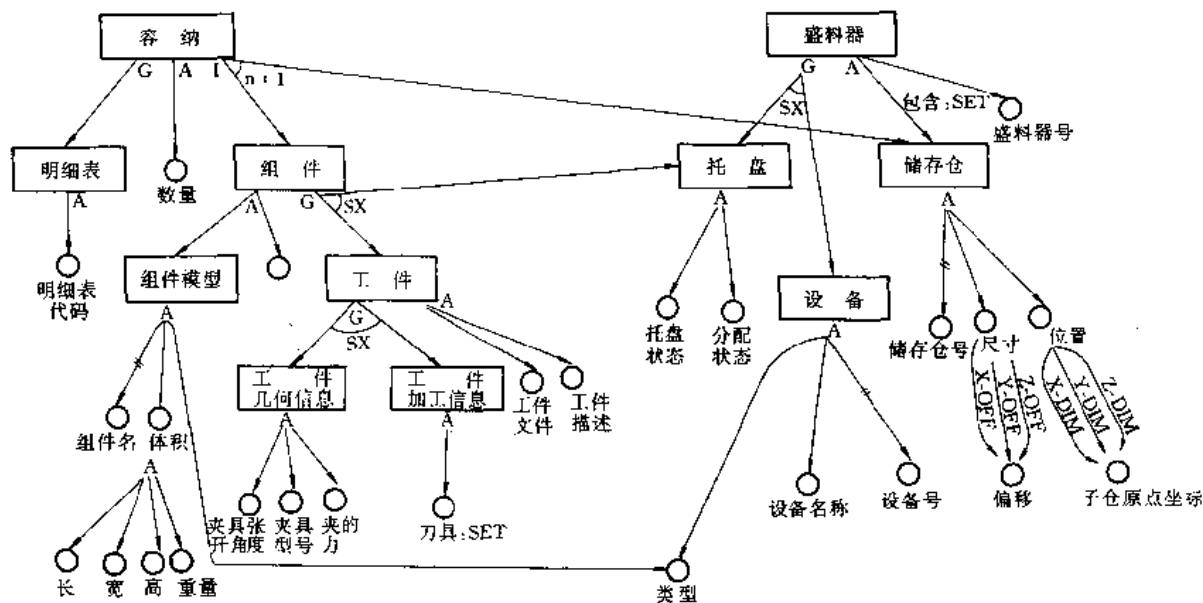


图 8-6-12 集成制造数据库 SAM* 模型

4.4 面向对象数据库系统

面向对象数据库是数据库技术与面向对象程序设计方法相结合的产物，是支持非常规应用领域需求的新一代数据库系统。在最近几年中，面向对象数据库从建立实验系统到理论观点，受到广泛关注。在 1989 年，美国 ANSI 成立 DBSSG/OODBTC 组织专门研究面向对象数据模型规范，于 1991 年 8 月给出了最终报告，提出了对象数据管理 (ODM, Object Data Management) 参考模型和对象信息管理 (OIM, Object Information Management) 标准化的建议。

一个面向对象数据库 (OODB, Object-Oriented Data Base) 是由面向对象的数据模型所定义的对象集合体，这些对象支持面向对象程序设计语言中对象的语义。一个面向对象的数据模型可用来描述现实世界中实体 (对象) 的逻辑组织、对象间的限制及联系等的模型。一系列面向对象的核心概念构成了面向对象数据模型的基础。核心概念如下：

(1) 现实世界中的任一实体统一地模型化为一个对象，并赋予一个唯一的标识符，称为对象标识 (OID, Object Identifier)。OID 独立于值，在系统内全局唯

(2) 每个对象是状态和行为的封装。状态是该对象的一系列属性值的集合，而行为是在对象状态上操

作方法的集合。

(3) 所有具有同样属性和方法集的对象组合构成一个类 (CLASS)。任何一个对象一定是属于某一个类的一个实例。类由类说明和类实现两大部分组成。类说明统一地描述对象类的结构、约束规则以及可执行的操作。类实现是由系统开发人员所研制，是实现操作的程序设计。这样处理可在类说明中隐藏了实现的全部细则，称之为面向对象 (OO) 方法信息隐藏性。类和型 (TYPE) 的差别在于：型定义一相似对象组，而类定义一相似对象的方法 (Method)、消息 (Message) 和属性集。所以，类是型的一个实现；型只是描述静态特征，而类包括动态特征。

(4) 类属性的定义域可以是任何类，可为原始类 (如整数、字符串、布尔型等)，也可包含自身属性和方法的一般类。

(5) 所有类组成一个带根的有向非环图或层次结构 (称为类层次)。一个类可继承 (直接地或间接地) 祖先类中的所有属性和方法，它是所继承属性和方法的类的特例，该类称为子类。一个类为其子类的抽象，该类称为超类。

(6) 被封装的状态和行为，在对象外部，只能通过显式地定义的消息传递来存取。OO 方法具有动态联编能力，相同消息发送到不同对象，可获得不同的响应，这种特性称为 OO 方法的多形性，又称为操作重



载。

OO 数据库系统至今已有一些商品化系统，如 GEMSTONE、G-BASE、VBASE、VERSANT、ORION 和 OBJECTIVITY/DB 等。在 CAD/CAM、CASE (计算机辅助软件工程)、印刷等方面试图应用 OO 系统实现数据管理。

1. VERSANT 面向对象的数据库系统 VERSANT 面向对象数据库 (ODBMS, Object-oriented DBMS) 可以在一种复杂的计算环境中对对象进行存储、检索和更新，在底层通过 VERSANT STAR，可将现有的应用和数据库集成到 VERSANT 系统中。VERSANT 支持广泛的高级编程语言如 C、C++、SMALLTALK、OBJECT SQL，以及其他语言。VERSANT 提供一组类 (CLASS) 库和专门的应用框架 (Frame-work) 利用它可方便地开发应用系统。VERSANT ODBMS 支持在 1989 年发表的“面向对象数据库系统宣言中”所指定的必需特性及所推荐的可选特性。其系统结构如图 8-6-13。

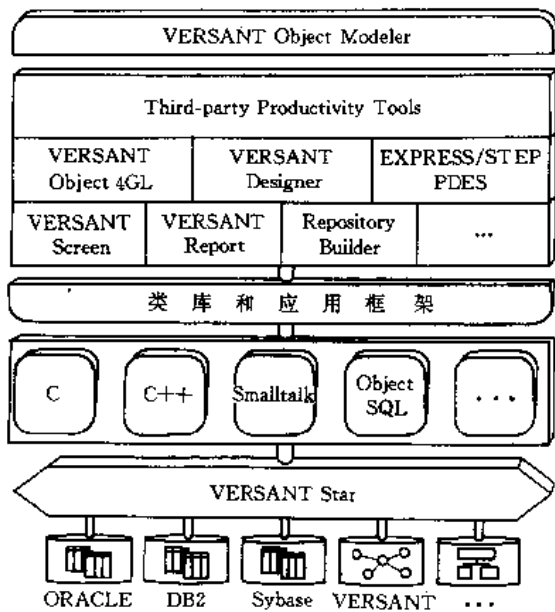


图 8-6-13 VERSANT 数据库系统的体系结构

应用程序可使用多种不同的语言，通过各个面向语言的接口实现与数据库系统相连接。VERSANT MANAGER 是操纵类的软件，处理查询，修改对象，缓冲存储对象，提供长事务支持等。VERSANT SERVER 是 VERSANT ODBMS 的基础，它利用操作系统检索或存储数据库的数据，定义短事务等。各个应用处理的过程如图 8-6-14 所示。

在 VERSANT 中引入了个人数据库的概念，利用

它实现对长事务处理的支持。对象集可从共享数据库中检索出来，保持在个人数据库中，可保存数小时或数天，不影响共享数据库的使用。

VERSANT 提供对不同版本对象的支持，这种特性是工程和制造领域中所需的基本特征。VERSANT 支持多重继承性，它与 C++ 提供的特征完全兼容，在复杂的数据建模中是极其有用的。

2. OBJECTSTORE 面向对象数据库系统 OBJECTSTORE 是一个可移植、高性能的面向对象的数据库系统，在 1988 年由 Object Design 公司开发。它满足 CAD/CAM、CAE、CASE、科学应用、办公自动化和出版等的应用需要。它提供多种应用接口：C 语言接口、C++ 库、C++ 数据操纵语言。它支持单继承性和多继承性，隐藏性、虚拟函数和对象属性。利用 C++ 可存取 OBJECTSTORE，可以使用 SQL 对关系数据库查询，实现关系数据库和面向对象数据库的集成。

OBJECTSTORE 的 ODBMS 有如下三个主要成分：OBJECTSTORE DBMS 运行系统；应用接口；C++ 开发工具。利用 C++ 开发工具 BROWSER，可查看数据库的内容。利用开发工具开发应用，可缩短应用的开发时间，降低开发费用。

3. Orion 系统 Orion 系统是由美国 MCC 公司开发，于 1985 年底开始研制。是为 CAD、办公室信息系统 (OIS, Office Information System) 人工智能等应用领域提供一种融面向对象程序设计风格和数据库功能为一体的应用系统开发工具。是用 COMMON LISP 语言实现，它的操作语言是扩充的 COMMON LISP 语言，是一种计算完备的面向对象数据库语言。支持如下一些基本的面向对象数据模型特性：对象、类、消息和方法等基本概念同一般的面向对象系统，支持多重继承性和复杂对象；支持版本控制。

Orion 提供了一个数据定义语言 (DDL, Data Definition Language)，用于定义数据库模式，描述类。其语法同 Smalltalk-80，为简单的消息表达式语法形式。语法形式如下：

(消息选择字 消息接收者 [参数 1, 参数 2, ...])

例如：可用如下的消息定义一个新类：

(make_class 类名 [: Superclass (超类表)])

[: attributes (属性表)]

[: method (方法描述表)]

它定义类的超类、属性及方法。

Orion 提供数据操纵语言 (DML, Data Manipula-



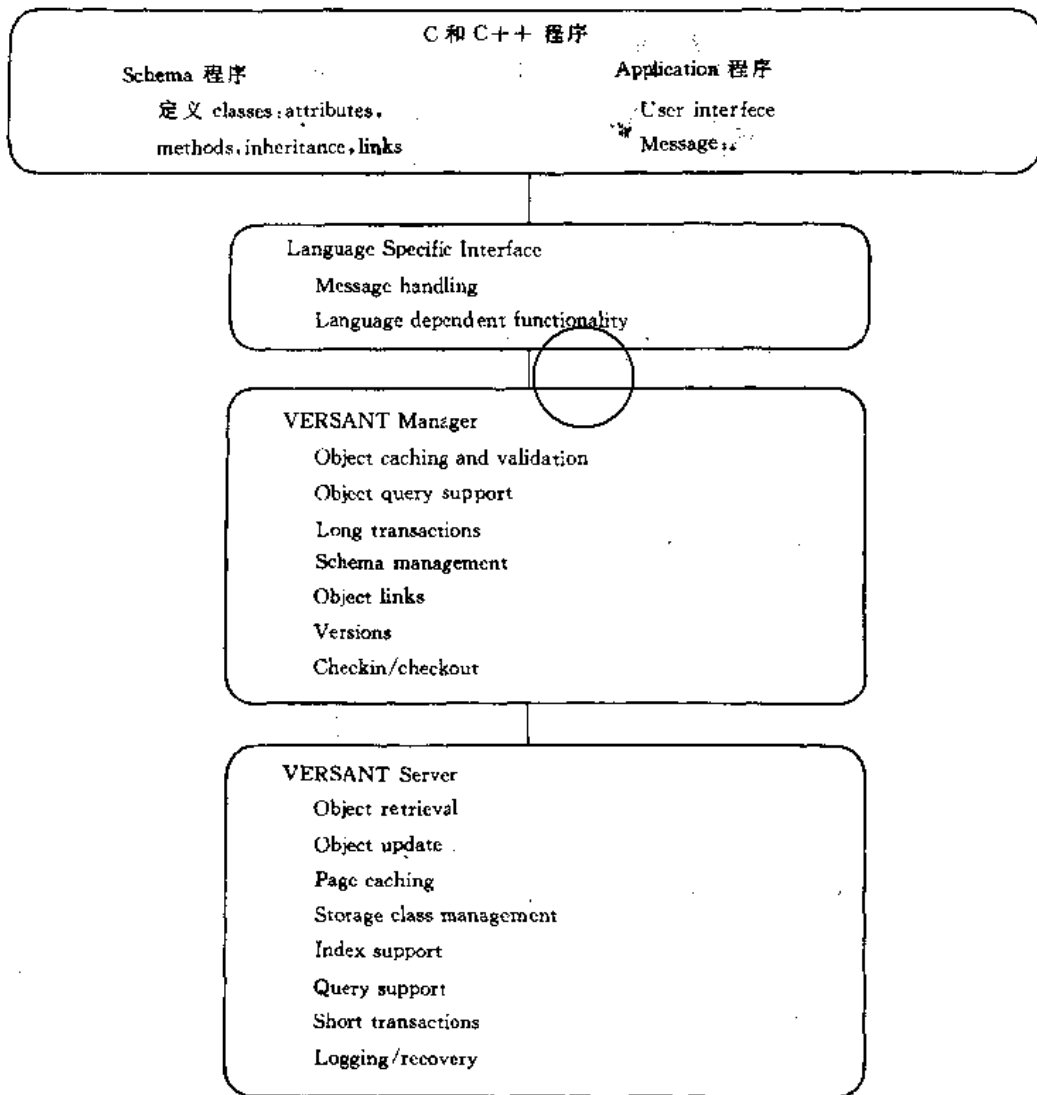


图 8-6-14 VERSANT 中应用处理的过程

tion Language), 利用 Orion DML 向系统发送消息以获得数据库系统功能服务, 完成对象在面向对象数据库 (OODB) 中的插入、查询、修改和删除。

(1) 向系统发送 make 消息, 进行实例化, make 的基本语法形式如下:

```

(make 类名: 属性名 1 属性值 1
:
:
: 属性名 n 属性值 n)
  
```

(2) 查询。Orion 的查询语言采用扩充的 SQL 语法形式, 例如:

```

SELECT: S FROM STUDENT: S
WHERE: S NAME = "Jill"
  
```

在 Orion 查询语言中, 对象变量名前要冠以“:”, 对象变量在 From 子句中说明, 语法形式为:

类型名: 对象变量名

(3) 对象的删除。当一个对象不再有用时, 可向系统发送消息, 令系统从 OODB 中将其删除。有两条消息用于对象删除, 形式为:

```

(delete 类名 [查询条件])
(Delete_object 对象标识符)
  
```

(4) 对象的修改。可向系统发送一个 Change 消息来修改对象, 其语法为:

```

(Change 类名 [查询条件] 属性名 新属性值)
  
```

Orion 系统已成为当前最有影响, 也被认为最先进的面向对象数据库管理系统。



第7章 计算机集成制造系统的体系结构、建模与仿真^{[75]~[78]}

1 计算机集成制造系统的体系结构

计算机在如下两个方面为制造业提供了十分重要的支持：工程方面的计算机辅助设计、制造及管理；控制方面的在线优化。为了充分发挥上述两方面的支持作用以获得企业的最佳效益，关键是将企业集成为一个整体，建立起计算机集成制造系统（CIMS）。

1.1 计算机集成制造系统的主要活动

从一个工厂的活动来看，CIMS 应包括以下五个主要方面：产品设计和工艺设计，生产规划，生产控制，产品制造，产品销售。

至关重要的一点是，所有这些活动以及有关的各类装备及过程都必须是制造系统被集成的部分。也就是说，这个制造系统是一个利用计算机来实现自动化、最优化、集成化的系统。

1. 产品设计和工艺过程设计 通过几何造型、特征分析、二维与三维图形、工艺设计、加工仿真等计算机软件，建立起被建议生产的产品所必须的初始数据库，包括：产品零件的几何形状、尺寸、特征、性能、加工工艺过程、工序以及数控加工代码。它的依据是市场提出的对产品的需求、设计者提出的产品概念以及已有生产装备及生产过程的成本与能力。

2. 生产规划 在产品设计和工艺过程设计所形

成的数据库的基础上加入市场及生产数据与信息（例如订货量、交货时间、外购件到货时间、各种零部件生产次序及时间、装配时间等），以产生一个生产这种产品的计划。它同样受已有生产装备及生产过程的成本与能力的制约。

3. 生产控制 在生产规划的基础上，进一步加入生产装备与生产过程的性能数据及信息（例如加工某一工序的时间、更换夹具及刀具的时间、仓库及缓冲站的数量、运输设备的能力与性能等），以形成生产调度表。常用的方法是基于对生产过程的建模与仿真。为了实现生产活动的持续最优化，生产控制与调度应根据生产装备及生产过程的实时状态信息进行动态调整。

4. 产品制造 在生产控制的基础上加入产品制造的信息（例如数控机床的控制指令、机器人及自动运输车的工作方式与控制时序等），完成对产品制造的控制与操作（包括启动、停止、按某号数控程序进行加工、更换刀具等），最终生产出成品。

5. 产品销售 将产品按订单要求发货或按市场需求投放市场，并进行售后服务（如培训、维护等）。

综上所述，计算机已能够将整个制造过程，从市场预测、订单输入与管理到产品设计、生产规划、产品制造，最后到产品销售及售后服务，集成为一个有机的整体，这个整体就称为计算机集成制造系统，如图8-7-1所示。

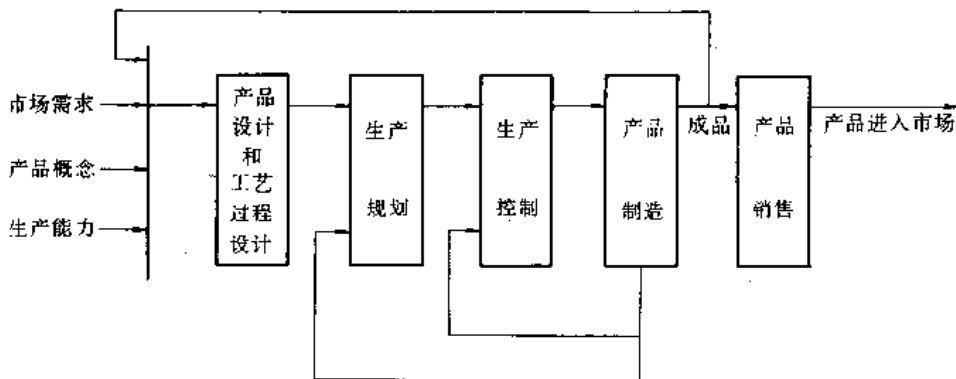


图 8-7-1 CIMS 的体系结构



1.2 计算机集成制造系统的组成

近20年来,在制造业中利用计算机实现自动化已形成了许多自动化单元,例如早在60年代数控机床就已获得了应用,70年代就有了自动编程技术(APT)并逐步发展为计算机辅助制造技术(CAM——它包括APT、刀具轨迹仿真、数控代码生成及后置处理等)。70年代后期,计算机辅助设计(CAD)也获得了广泛的应用。它们是实现CIMS的基础,现在的问题是如何在集成的要求下改造它们,充实它们,增加必要的应用系统,使它们能形成一个集成系统。

例如,为实现CAD/CAM的集成,除必须对CAD/CAM系统进行改造与充实(如建立产品的特征模型,开发适合于CAD/CAM环境的工程数据库,通过图形交换标准实现不同系统之间图形信息的交换等),同时必须发展计算机辅助工艺规划(CAPP),并实现CAD/CAPP/CAM的集成,即在设计好以后,首先要进行工艺过程设计,然后才能进行数控编程。

关于CIMS的组成,图8-7-2给出了一种描述。它是将CIMS分成功能子系统及支持系统两大部分,其中功能子系统包括工程设计,生产制造及规划与控制,而支持系统则包括系统建模与仿真、网络与数据库。

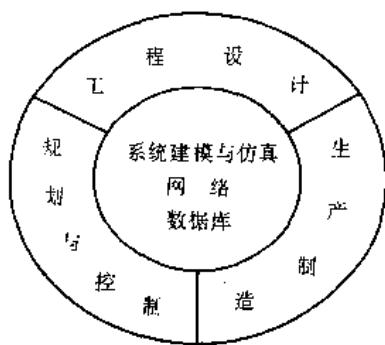


图 8-7-2 CIMS 组成

1.3 计算机集成制造系统的递阶结构

CIMS是一个复杂的大系统,根据大系统分解与协调的基本原理,可将CIMS看作是一个具有递阶结构的系统,如图8-7-3所示。

从控制功能上来考察,递阶结构的主要特点是整个系统具有明显的层次性。各层主要只从其上一层接受命令,并向上反馈信息;各层也只向其下一层发命令,并接受下一层的反馈信息。从建模的角度分析,是基于将复杂的决策问题按任务的复杂性纵向分解,而

将横向协调工作交由上级解决。

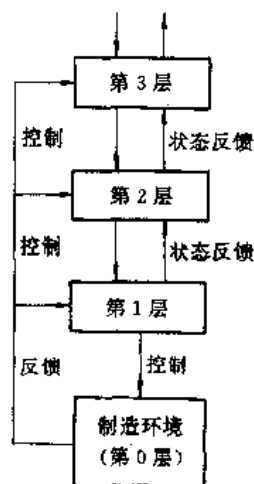


图 8-7-3 CIMS 的递阶结构

递阶的概念既体现于企业中决策、计划、控制的层次划分,也表现在计算机及自动化系统的递阶结构形式中。

对CIMS的递阶结构,目前有两种比较流行的描述模型:一种是由计算机制造公司(Computer Manufacturing INC)提出的先进的工厂制造系统(AFMS, Advanced Factory Manufacturing System)的模型;另一种是由美国国家标准局提出的自动化制造研究所(AMRF, Automated Manufacturing Research Facility)模型。

1. AFMS 模型 它将CIMS分成如下四层:

- a. 工厂控制层 确定最终产品需求,产品结构定义(产品规划),各车间产量及能力规划。
- b. 作业车间层(Jobshop) 接受工厂层的计划,并产生对工作中心层的命令,组织最终产品的生产,即将生产分解成加工序列并进行作业调度。
- c. 工作中心层 接受车间层的命令,并从协调要求出发,将这些指令分解为对设备的详细指令。
- d. 设备/资源层 它根据工作中心层下达的指令完成一系列具体操作。

2. AMRF 模型 它将CIMS分成如下五层:

- a. 工厂层 信息管理,制造工程(CAD/CAPP/CAM),生产管理。
- b. 车间层 任务管理,资源分配(作业与资源协调),即将作业分批,组成虚拟单元,分配刀具、卡具及材料,其中虚拟单元是AMRF引进的新概念,它是动态方式组织加工设备资源,即虚拟制造单元的数目及结构(布局)是随时间动态变化的。



c. 单元层 批管理, 调度, 发送调度单, 即调度与控制作业。

d. 工作站层 设置, 确定设备任务, 向设备层下达任务指令。

e. 设备层 加工, 贮运, 检测。

两种模型的类似之处是都认为 CIMS 是一个分层递阶结构; 另外, 它们都假定存在分布式数据库以代替集中数据库。不同点是, AMRF 模型中的车间层及单元层相当于 AFMS 模型中的作业车间层, 即增加了单元层 (Cell) 一个层次。对单元层的控制有如下四种方案:

成组单元——利用成组技术组成单元, 许多控制功能仍由操作人员来完成。

自动化单元——利用成组技术组成单元, 控制功能是通过计算机软件来实现的。

虚拟单元——单元的组合是动态的, 即可以根据需要将不同设备组合成一个或多个单元, 控制功能除管理, 调度外, 还应包括单元的动态组合。

智能单元——单元的组合不仅是动态的, 而且是利用人工智能技术来实现动态组合及控制, 以达到最优组合及控制的目的。

由上述模型可知, CIMS 有以下特点:

(1) CIMS 是由许多子系统组成, 而且是分层的。

(2) 在一个子系统中又包括许多设备, 例如, 一个制造单元可能由机器人、传送带、仓库、自动运输车 (AGV), 直接数字控制 (DNC) 机床, 可编程控制器 (PC) 及其他微型计算机组成;

(3) 上下层子系统间的通信与子系统内部的通信起着十分重要的作用。

1.4 开放式结构

1. 开放式结构的含义 包括以下两个方面:

(1) 一个计算机集成制造系统允许由多种计算机硬/软件及多种制造设备组成 (对多个制造厂商开放);

(2) 当系统要求增添新的功能, 或修改其中的一部分功能时, 不会影响整个系统 (对多项功能开放)。

2. 开放式结构的必要性 可以从两方面来分析:

(1) CIMS 是一个复杂的大系统, 包含了大量计算机硬/软件以及制造设备, 不可能只选用一个制造厂商的计算机/设备来实现它, 即使在实现的第一阶段, 从性能价格比考虑选用了某一家的计算机或设备, 但实现的第二阶段很可能选用另一家厂商的具有更强功能和更低价格的计算机或设备。

(2) 为适应动态多变的市场的需要, 一个工厂的 CIMS 也要求不断修改与扩充, 单纯从软件模块化设计的角度是很难保证在增添与修改时不影响整个系统, 而必须从系统的结构上加以保证。

3. 实现开放式结构的要求

(1) 标准化。它包括计算机操作系统 (如 UNIX)、网络协议 (如 TCP/IP、MAP/TOP)、数据模型与管理 (如 SQL)、控制器的通信报文格式 (如 MMS)、图形数据交换 (IGES)、产品数据交换 (PDES/STEP) 等。括号中所表示的是已确定为国际标准或工业标准或可能成为标准的规定。

(2) 集成平台。它是将已经标准化的规范集成在一起, 形成一个可供用户开发应用软件, 并使之集成在一起的软件平台, 从计算机软件角度来看, CIMS 可以看作是如图 8-7-4 所示的结构。其中, 计算机系统是指计算机硬件及操作系统。集成平台可以包括下三层, 也可包括下四层。

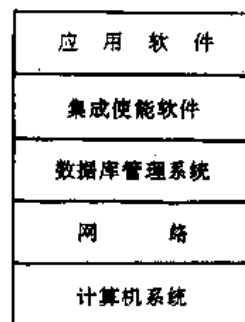


图 8-7-4 CIMS 软件分层结构

1.5 计算机集成制造系统原型实例

CIMS 作为现代企业模式, 其内涵不断地得到发展和延伸。我国 863 高技术计划, 在自动化领域于 1987~1993 年实施的 CIMS 实验工程, 是我国 CIMS 的首次实践。

该中心在计算机网络及分布式数据库支持下实现了机械零件从工程设计、生产调度与控制到加工制造的集成制造, 包括: 箱体类及轴套类机械零件 CAD/CAPP/CAM 的集成; 一个包括加工制造、物料贮运、刀具与夹具管理、测量等八个工作站的柔性单元; 系统采用递阶控制结构, 实现了 CAD/CAPP/CAM 与柔性制造单元的集成及车间层、单元层、工作站层、设备层的递阶调度与控制。图 8-7-5 描述了 CIMS 实验工程的结构。



2 计算机集成制造系统建模

CIMS 是一个复杂的大系统,为了设计、分析与研究 CIMS,必须首先建立它的模型。可以从不同角度来建立 CIMS 的模型,例如描述 CIMS 的组成与结构的模型(如图 8-7-2 及递阶结构模型如图 8-7-3),为从功能角度设计 CIMS 的功能模型,为从信息角度设计 CIMS 的信息模型以及为从动态运行角度分析、设计与研究 CIMS 的动态模型等。

IDEF (Integration DEFinition) 方法是目前国际上比较流行的建立 CIMS 模型的方法。它包括如下三部分:建立功能模型的方法 IDEF0;建立信息模型的方法 IDEF1;建立动态模型的方法 IDEF2。

2.1 建立功能模型的方法

IDEF0 是一种用图形方法来描述复杂系统功能的建模方法,它已被广泛用于建立 CIMS 的功能模型。

IDEF0 规定系统由许多基本模型组成,如图 8-7-6 所示。

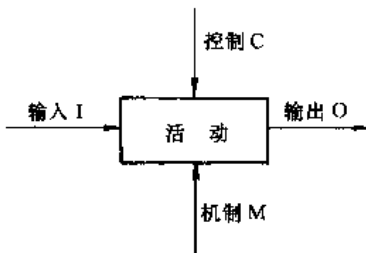


图 8-7-6 IDEF0 的基本模型

方框的内容是活动(Activity),它表示一种功能,也就是说通过这一活动将要发生对某些数据(它包括状态、信息、条件、事物或任何可以用名词短语来描述的其它东西)的变换。在方框四周有 4 个箭头:输入(Input),控制(Control),输出(Output)及机制(Mechanism)简称 ICOM。它们的含义分别是:

- 输入——该活动所要处理和转换的数据;
- 输出——该活动处理所得到的结果;
- 控制——指导、支配和影响活动的因素;
- 机制——支持实现活动的手段。

IDEF0 方法是一种自上而下、递阶结构的模块化分解方法。通过逐步分解,可将一个复杂的系统分解为一些简单成分,如图 8-7-7 所示。现在已开发出一些软件工具来支持 IDEF0 方法的使用。

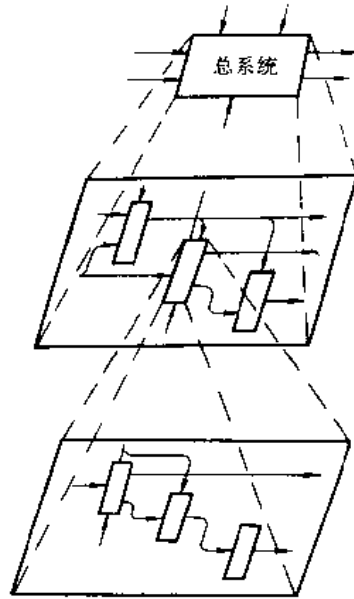


图 8-7-7 功能模型的分解

2.2 建立信息模型的方法

IDEF0 仅仅描述了 CIMS 的各功能(活动)之间的关系,而功能之间的关系是通过大量数据(信息)加以联系的,虽然 IDEF0 也对各功能之间的数据关系作了描述,但从数据管理的角度来看是十分不够的,为此必须在功能模型的基础上,建立系统的信息模型。

IDEF1 方法是在关系数据库设计的实体-关系(E-R)方法基础上发展起来的,它同样使用三模式的概念(即外部模式(也称用户视图)、内部模式(也称计算机视图)以及概念模式)。它的基本特点如下:

- (1) 支持概念模式的开发, IDEF1 语法支持概念模式开发所必需的语义结构,完善的 IDEF1 模型具有所期望的一致性、可扩展性及可变换性。
- (2) 它是一种相关语言,即它对不同的语义概念都具有简明的一致性结构。
- (3) IDEF1 是可自动化的,即 IDEF1 图能由一组图形软件包自动生成出来。

IDEF1 模型的基本结构(见图 8-7-8)如下:

- (1) 包含数据的有关事物,如人、概念、地方和事物等都方框来表示;
- (2) 事物之间的联系用连接方框的连线来表示;
- (3) 事物的特性用方框中的属性名来表示。

IDEF1 的模型成分有:实体(分为独立标识实体及从属标识实体两大类);联系(分为连接联系、分类



联系及非确定联系三大类); 属性/关键字。

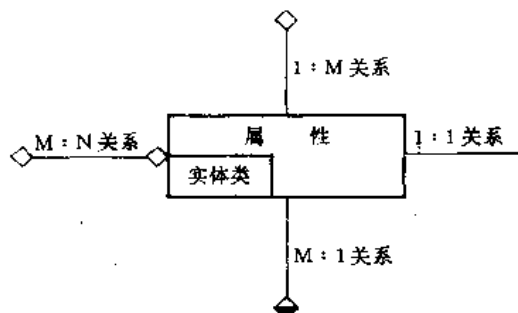


图 8-7-8 IDEF1 模型的基本结构

2.3 建立动态模型的方法

IDEF2 用于建立动态模型。这些模型可描述一个制造系统(或环境)的功能、信息和资源的时变特性,这种描述可应用计算机仿真进行分析,并产生对制造系统特性的测定,如生产率、满足交货期的能力、资源利用率、库存等。

IDEF2 采用分层建模方法,即将制造系统分成四大类子模型:

(1) 设备类。用于描述加工、贮运、检测等各种设备及资源。

(2) 实体流类。用于描述在设备间流动的产品或信息。

(3) 资源分配类。用于当资源可用但不够充分时描述资源的分配。

(4) 系统控制类。用于描述这样一类活动的发生,这些活动控制实体的流动,但不预先规定实体的流动。

建立 IDEF2 模型的步骤就是首先建立上述四类子模型,然后将它们组合起来描述系统的时变特性。其好处是:

(1) 将一个大系统分解为若干子系统,有利于在一段时间内将精力集中于较少的细节,因此,可由几个建模者同时来完成;

(2) 大系统的数据采集可以得到简化,因为可以开发与构造子模型相同的组织与构造数据的方法;

(3) 可将困难的统计学知识从实体描述中分离开来,建模者无需使用困难的统计学知识;

(4) 同一子模型可应用于不同类型的分析研究。

IDEF2 十分类似于一般的离散事件系统仿真语言,有关它的进一步说明可参看本章 3.3.3 节。

3 计算机集成制造系统仿真

3.1 仿真在计算机集成制造系统中的作用与地位

由于 CIMS 的复杂性,仿真是 CIMS 开发生命周期中最为有效的工具之一。

CIMS 开发生命周期一般分为需求分析、系统设计、系统实施与运行维护四个主要阶段。在每一阶段,仿真提供的支持及作用是不完全相同的。

3.1.1 需求分析仿真

CIMS 需求分析阶段的主要任务是在系统分析的基础上进行需求定义,确定系统的功能模型,因而仿真是针对系统的功能度进行的;另一方面,该阶段要进行费用/效益分析,因而仿真要与某些经济分析工具结合起来进行。

该阶段仿真的特点是:由于被仿真的系统尚不存在(或不完全存在),往往需要由系统的功能模型及信息模型建立不同的动态模型,以便分析比较不同方案的优劣;仿真软件应具有方便而灵活的建模环境,一般采用通用离散事件仿真语言建模,模型中可不考虑随机因素的影响。

3.1.2 设计仿真

CIMS 的设计一般要经过两个阶段,即概要设计与详细设计,因而仿真也应分两步进行。

1. 概要设计阶段 本阶段的任务是要确定系统的基本结构(如主要设备的数量、类型、物理布置等),系统中各部分之间的接口及外部接口,以满足需求分析阶段确定的功能。

该阶段仿真的特点是:仿真模型是面向设计方案中的物理系统,因而最好采用面向对象的描述方法,以便为详细设计阶段的仿真建模提供基础;仿真实验设计只考虑正常环境下的输入模式,系统内部的随机因素及某些细节(如辅助设备与资源数量,控制逻辑及时序等)一般加以忽略。本阶段所采用的仿真软件要根据仿真对象而定。例如,对柔性制造系统(FMS)来说,应选用制造类仿真软件,或具有制造类专用语句的离散事件系统仿真语言;对递阶控制系统应选用具有多任务并发功能的仿真软件为宜。

2. 详细设计阶段 本阶段所使用的仿真模型是概要设计阶段的扩充与细化,它实际上是未来实际系



统的“样机”。它应能对未来实际系统的操作步骤进行描述(包括操作逻辑,时序,位置等);模型参数要与实际有较高的吻合度;仿真实验条件要能覆盖将来可能出现的运行环境,随机因素必须加以考虑;仿真软件应具有动画功能,以便观察“未来系统”的运行细节。

详细设计仿真往往是未来系统一一对应的模仿(EMULATION)。

3.1.3 仿真测试

CIMS 的实施是一个分步实现的过程。仿真是子系统测试及整个系统测试不可缺少的工具。

详细设计阶段建立的模型是仿真测试的原型。仿真测试时,需要在此基础上建立与实际物理系统(或子系统)的接口(数据接口及物理接口),并且有时需要以实际时钟来驱动仿真的运行。

3.1.4 运行与维护的仿真支持

系统投入运行时,难免产生意想不到的问题或缺陷,仿真可视作实际系统的分析器,即根据发生问题的环境重构仿真实验条件,通过运行模型重现问题发生的原因,从而为解决提供依据及途径。

在正常运行时,仿真可为实际系统提供决策支持环境。CIMS 中存在诸多的决策点,包括:物料需求计划的确认;订货与交货计划的制订;生产计划可行性分析;单元作业的静态调度;单元作业的实时动态调度等。

仿真软件可与实际系统并发运行,或嵌入到 CIMS 的功能模块中。此时,仿真可视作实际系统的预测器,为决策提供准确而详细的数据及决策依据。

3.2 计算机集成制造系统仿真分类

根据以上分析,CIMS 的仿真内容可概括为以下四类:制造环境仿真;递阶控制系统仿真;物料贮运系统仿真;加工过程仿真。

1. 制造环境仿真 仿真可为 CIMS 制造环境提供如下技术支持:

- (1) 设备与人员的需求;
- (2) 产品种类及数量的确定;
- (3) 运行策略评价。

2. 递阶控制系统仿真 仿真可为递阶控制系统提供如下技术支持:

- (1) 递阶控制结构的确定;
- (2) 递阶控制指令的逻辑及时序分析;
- (3) 系统测试,包括单步测试,确定性连续测试,

随机性连续测试以及超负荷测试。

3. 物料贮运系统仿真 仿真可为物料贮运系统提供如下技术支持:

- (1) 仓库容量及数量的确定;
- (2) 仓库的平面及空间布局;
- (3) 运输设备的类型及数量的确定;
- (4) 运输设备的路径布置及行走规则;
- (5) 货物进出与存放规则的选择。

4. 加工过程仿真 CIMS 的高度自动化集中反映在零件从 CAD, CAPP, CAM 到机床加工的高度信息集成。在这一过程中,仿真可提供如下技术支持:

- (1) 零件 CAD 仿真分析,包括几何造型的合理性分析,强度分析,应力分析等;
- (2) 零件 CAPP 仿真分析,包括毛坯造型的合理性,工艺规程的合理性等;
- (3) 零件 CAM 的仿真检验,包括数控(NC)代码的正确性检验,加工过程碰撞干涉检验等;
- (4) 零件正式加工前的试切仿真,检验装夹后加工过程中刀具、夹具及加工台面之间的碰撞与干涉,刀具与被加工表面的干涉(过切)及运输碰撞干涉检验等。

3.3 离散事件动态系统仿真

系统状态只在某些时间点上由于随机事件的驱动而发生变化的系统称之为离散事件动态系统。

3.3.1 离散事件动态系统仿真的基本概念

(1) 实体。是描述系统的要素之一,在某些文献中亦称为成分(Component)。离散事件动态系统中的实体可分为临时实体与永久实体两大类。临时实体指在系统中只存在一段时间的实体;永久实体指永久驻留在系统中的实体。临时实体按某种规律产生,在永久实体作用下通过系统,并且最终离开系统,从而使系统呈现出动态特性。

(2) 事件。是引起系统状态发生变化的行为。例如,在排队系统中,临时实体(如顾客,待加工的零件等)的到达可称为“到达事件”,因为它引起系统状态发生变化(服务台从“闲”变“忙”或排队的长度增加)。

(3) 活动。是描述系统的要素之一。在离散事件动态系统中,活动通常用于表示有关联的两个事件之间的过程。

(4) 进程。由若干个事件及若干活动组成。一个进程描述它所包括的事件及活动间的相互逻辑关系及时序关系。



3.3.2 离散事件动态系统仿真建模

目前流行的方法有三种：事件调度法 (ES, EVENT SCHEDULING)；活动扫描法 (AS, ACTIVITY SCANNING)；进程交互法 (PI, PROCESS INTERACTIVE)。

1. 事件调度法 用事件的观点建立仿真模型，即通过定义事件及每个事件发生对系统状态的影响，预定每个事件发生的时间，并按发生时间的先后，顺序地处理每类事件。

2. 活动扫描法 用活动的观点建立仿真模型，即通过定义成分活动及活动发生的条件来描述被仿真的系统。模型中，活动的发生时间也作为活动发生的条件之一，而且较之其他条件具有更高的优先权。仿真执行过程中，对所有成分的活动及其发生的条件按优先权从高到低进行扫描；当某一成分的仿真钟值小于或等于系统仿真钟值，且该成分的活动发生的条件满足时，执行该成分的活动；所有活动扫描一遍后，按同样顺序重新扫描，直到仿真结束。

3. 进程交互法 用进程的观点建立仿真模型。它将模型中的成分历经系统时所发生的事件及活动按时间顺序进行组合，从而形成进程表。模型中有两张事件表，其一是当前事件表 (记为 CEL)，它包含从当前时

间点开始有资格执行的事件，但该事件是否确能发生的条件尚未加以测试；其二是将来事件表 (记为 FEL)，它包含在将来某个仿真时刻发生的事件。每一个事件记录中必有说明该事件在进程中所处位置的指针。仿真钟推进时，满足“成分仿真钟值小于或等于系统仿真钟值”的所有事件记录从 FEL 移到 CEL 中，然后对 CEL 中的每个事件记录进行扫描。这时，先判断该事件发生的条件；若条件满足，则确定该事件所属进程及其在该进程中的位置并执行该进程；在执行的每一步，都包含条件判断及动作执行两部分，只要条件允许，该进程可连续推进；若条件不满足，则退出该进程，然后对下一事件扫描，直到扫描结束。下一步再将 FEL 中的事件记录移到 CEL 中，又重新扫描 CEL，直到仿真结束。

3.3.3 离散事件动态系统仿真软件

为对离散事件动态系统进行建模与仿真，从60年代开始，陆续开发出许多离散事件动态系统仿真软件，其中 SLAM (Simulation Language for Alternative Modeling)、SIMSCRIPT、ECSL (Extended Common Simulation Language) 及 GPSS (General Purpose Simulation System) 最为流行。表 8-7-1 列出了目前较流行的十种离散事件动态系统仿真语言的性能。

表 8-7-1 常用仿真语言性能一览表

| 常用仿真语言名称 | 推出时间 | 仿真建模 | | | | | | | 仿真运行 | | | | 仿真动画 | | | | 统计与输出 | | | |
|----------------|------|------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|--------|------|----------|----------|----------|---------|---------|----------|--------|---------|------|-------|
| | | 建模方式 | 混合仿真能力 | 模型输入方式 | 在线输入检错 | 建模在线帮助 | 初态设置能力 | 可用计算机机型 | 交互调试能力 | 预热能力 | 终止状态保存能力 | 重复独立运行能力 | 动画画面描述方法 | 动画与模型并发 | 动画开/关能力 | 动画加速减速能力 | 随机数流个数 | 标准概率分布 | 标准报告 | 报告生成器 |
| CADmotion | 1986 | E,P | 无 | L,G | 有 | 有 | 有 | PC | 有 | 有 | 有 | 无 | G,Mo | 是 | 有 | 有 | 10 | Ex,N,U | 有 | 有 |
| GPSS/PC | 1985 | P | 有 | L,M,G | 有 | 有 | 无 | PC | 有 | 无 | 无 | 无 | M,G,Mo,P | 是 | 有 | 有 | 不限 | Ex,N,U | 有 | 有 |
| INSIGHT | 1986 | E,P | 无 | L,M | 有 | 有 | 有 | 不限 | 有 | 有 | 有 | 有 | 无 | 无 | 无 | 无 | 不限 | ① | 有 | 有 |
| PCmodel | 1984 | E,P | 无 | L,G | 有 | 有 | 有 | PC | 有 | 有 | 有 | 无 | G,Mo | 是 | 无 | 有 | 10 | Ex,N,U | 有 | 有 |
| RESQ | 1982 | P | 无 | L | 有 | 有 | 有 | min/ma | 无 | 有 | 无 | 有 | 无 | 无 | 无 | 无 | 20 | Ex,Er,U | 有 | 有 |
| SIMAN/CINEMA | 1984 | E,P | 有 | L | 有 | 有 | 有 | 不限 | 有 | 有 | 有 | 有 | M,G,Mo | 是 | 有 | 有 | 9 | ② | 有 | 有 |
| SIMPLE-1 | 1985 | E,P | 有 | L | 有 | 有 | 有 | PC | 有 | 有 | 有 | 无 | P | 是 | 无 | 无 | 11 | ③ | 有 | 有 |
| SIMSCRIPT II.5 | 1962 | E,P | 有 | L | 有 | 有 | 有 | 不限 | 有 | 有 | 有 | 任选 | M,G,Mo,P | 是 | 有 | 有 | 10 | ① | 无 | 有 |

此星公司制作 请尊重作者版权



(续)

| 常用仿真语言名称 | 推出时间 | 仿真建模 | | | | | | 仿真运行 | | | | 仿真动画 | | | 统计与输出 | | | | | |
|------------|------|------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|--------|------|----------|----------|----------|---------|---------|----------|--------|--------|------|-------|
| | | 建模方式 | 混合仿真能力 | 模型输入方式 | 在线输入检错 | 建模在线帮助 | 初态设置能力 | 可用计算机机型 | 交互调试能力 | 预热能力 | 终止状态保存能力 | 重复独立运行能力 | 动画画面描述方法 | 动画与模型并发 | 动画开/关能力 | 动画加速减速能力 | 随机数流个数 | 标准概率分布 | 标准报告 | 报告生成器 |
| SLAM II | 1981 | E,P | 有 | L | 无 | 无 | 有 | 不限 | 有 | 有 | 有 | 有 | M,G,Mo | 无 | 无 | 无 | 10 | ② | 有 | 有 |
| SLAMSYSTEM | 1988 | E,P | 有 | L,M,G | 有 | 有 | 有 | PC | 有 | 有 | 有 | 有 | M,G,Mo,P | 是 | 有 | 有 | 10 | ② | 有 | 有 |

注：表中符号说明

1. 仿真建模栏

E——事件调度法

P——进程交互法

L——语言规定的代码

M——菜单输入

G——图形输入

PC——微型计算机

min——小型计算机

ma——主机(大型计算机)

2. 仿真动画栏

M——菜单输入

G——图形输入

Mo——鼠标输入

P——用户用高级语言编程

3. 统计与输出栏

Be——Beta (β分布)

Er——Erlang (爱尔兰分布)

Bi——Binominal (二项分布)

Ex——Exponential (指数分布)

Ga——Gama (γ分布)

L——Lognormal (对数正态分布)

P——Poisson (泊松分布)

U——Uniform (均匀分布)

Ge——Geometric (几何分布)

N——Normal (正态分布)

T——Triangular (三角分布)

W——Weibull (韦伯分布)

① Be, Bi, Er, Ex, Ga, L, N, P, T, U, W

② Be, Er, Ex, Ga, L, N, P, T, U, W

③ Er, Ex, L, N, P, T, U

3.4 制造系统仿真软件

制造系统仿真软件经历了如下四个发展阶段。

1. 第一阶段 60年代前。主要特征如下：

(1) 仿真模型，实验控制，输出报告均由用户采用高级语言编程实现。

(2) 人机分离的批处理方式。

2. 第二阶段 60年代到70年代初。主要特征如下：

(1) 通用仿真语言的出现。

(2) 提供规定的模型/实验框架。

(3) 用户可采用仿真语言的语句定义模型及实验。

(4) 一般只具有一种建模方法。

3. 第三阶段 70年代中到80年代中。主要特征如下：

(1) 通用仿真语言性功能进一步扩充，包括建模方法的多样性，仿真执行的跟踪功能，模型与实验分离，特别是增加了专用于制造系统建模的功能。

(2) 专用于制造系统的仿真器出现。

4. 第四阶段 80年代到现在。主要特征如下：

(1) 一体化仿真支撑软件的出现，实现了仿真建模、仿真运行及输出分析的集成环境与并发执行的机制，并在数据库管理基础上实现了模型数据、实验数据及仿真结果的统一管理；人工智能与仿真的结合等。

(2) 广义制造系统仿真器的出现，实现了对某些制造系统的非语言建模(Nonlanguage modeling)，模型的数据驱动等功能。

表8.7-2列出了目前较流行的制造系统仿真软件的性能。



表 8-7-2 制造系统仿真软件性能一览表

| 制造系统仿真软件名称 | 推出时间 | 仿 真 建 模 | | | | | | | | | | | | | |
|------------|------|---------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|-----------------|------------------|---------|-----------|---------------|---------|--|
| | | 模型输入方式 | 在线输入检错 | 建模在线帮助 | 初态设置能力 | 混合仿真能力 | 可用计算机机型 | 零件属性通用性 | 基于系统状态选择零件路径的能力 | 单一模块描述多个加工工作站的能力 | 专用传送带模块 | 专用自动小车的模块 | 专用 AS / RS 模块 | 专用机器人模块 | |
| FACTOR | 1985 | M | 有 | 有 | 有 | 无 | 不限 | 强 | 强 | | 有 | 有 | 有 | | |
| HEIRTSS | 1981 | L, G | 有 | 无 | 有 | 无 | PC | 强 | 强 | 有 | | | | | |
| Inter Fase | 1986 | L | 无 | 无 | 有 | 无 | 无 PC | 强 | 强 | 有 | | | | | |
| MAST | 1980 | M, G | 有 | 有 | 有 | 有 | PC | | 强 | 有 | 有 | 有 | 有 | 有 | |
| PROMOD | 1986 | M | 有 | 有 | 有 | 无 | PC | 强 | 强 | | 有 | 有 | 有 | 有 | |
| SIMFACTORY | 1986 | M, G | 有 | 有 | 有 | 无 | PC, W | | 强 | 有 | 有 | 有 | | | |
| STARCELL | 1987 | M | 有 | 无 | 无 | 无 | PC | 强 | | 有 | 有 | | | 有 | |
| WITNESS | 1986 | LMG | 有 | 有 | 有 | 无 | 无 W | 强 | 强 | 有 | 有 | 有 | | | |
| XCELL+ | 1986 | G | 有 | 有 | 有 | 无 | PC | | 强 | | | 有 | | | |
| Automod II | 1988 | LMG | 有 | 无 | 有 | 无 | W | 强 | 强 | 有 | 有 | 有 | 有 | 有 | |

| 制造系统仿真软件名称 | 推出时间 | 仿真运行 | | | | 仿真动画 | | | | | 统计与输出 | | | |
|------------|------|--------|------|----------|----------|----------|---------------|---------|----------|---------|--------|-------------|------|-------|
| | | 交互调试能力 | 预热能力 | 终止状态保存能力 | 多次独立运行能力 | 动画画面描述方法 | 模型与动画画面同时构造能力 | 动画开/关能力 | 动画加速减速能力 | 动画与模型并发 | 随机数流个数 | 标准概率分布 | 标准报告 | 报告生成器 |
| FACTOR | 1985 | | 无 | | 无 | P | | 有 | 有 | 有 | 无 | 无 | 有 | 有 |
| HEIRTSS | 1981 | | 有 | | | P, Mo | | | 有 | 有 | | | | 有 |
| Inter Fase | 1986 | 有 | 有 | | | M, G, Mo | 有 | 有 | | 有 | 64 | ExGaNTU | 有 | 有 |
| MAST | 1980 | 有 | 有 | | | M, G, Mo | 有 | 有 | 有 | | 10 | ① | 有 | 有 |
| PROMOD | 1986 | 有 | 有 | | | M, G, Mo | | 有 | 有 | 有 | 9 | Ex, N, T, U | 有 | 有 |
| SIMFACTORY | 1986 | 有 | 有 | | 有 | M, G, Mo | | 有 | 有 | 有 | 10 | ② | 有 | 有 |
| STARCELL | 1987 | 无 | | 有 | | M | 有 | 有 | 有 | 有 | 3 | Ex, U | 有 | 无 |
| WITNESS | 1986 | 有 | 有 | 有 | | M, G, Mo | 有 | 有 | 有 | 有 | 100 | ② | 有 | 有 |
| XCELL+ | 1986 | | 有 | 有 | | 自动 | 有 | 有 | 有 | 有 | 1 | Ex, N, U | 有 | |
| Automod II | 1988 | 有 | 有 | | | M, G, Mo | 有 | 有 | 有 | 有 | 64 | ExGaNTU | 有 | 有 |

注：表中符号说明

1. 仿真建模栏

L——语言输入
M——菜单输入

G——图形输入
PC——微型计算机

W——工作站计算机

2. 仿真动画栏

M——菜单输入 G——图形输入 Mo——鼠标输入 P——用户用高级语言编程

3. 统计与输出栏

Be——Beta (β 分布) P——Poisson (泊松分布) Ge——Geometric (几何分布)
Er——Erlang (爱尔兰分布) U——Uniform (均匀分布) N——Normal (正态分布)
Ga——Gama (γ 分布) Bi——Binominal (二项分布) T——Triangular (三角分布)
L——Lognormal (对数正态分布) Ex——Exponential (指数分布) W——Weibull (韦伯分布)

① Be, Er, Ex, Ga, L, N, U

② Be, Bi, Er, Ex, Ga, L, N, P, T, U, W



参 考 文 献

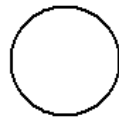
- [1] CASA of SME, A Program Guide for CIM Implementation. U. S. A., 1985
- [2] Davis G. B, Olsen M. M. management Information Systems: Conceptual Foundations, Structure and Development, Second Edition McGraw-Hill Company, 1985
- [3] Keeney R. L, Reiffa H. Decisions with Multiple Objectives, Preferences and Value Trade-offs, John Wiley & Sons, 1976
- [4] Inmon W. H. Data Architecture: The Information Paradigm Information Sciences. Inc, 1989
- [5] Lawrence Peters. Advanced Structured Analysis and Design. Prentice Hall, 1987
- [6] 任守策, 吴澄. 计算机综合自动化制造系统 CIMS 的结构与概念. 清华大学学报, 1987 (1, Vol27): 87~95
- [7] 任守策. 制造类、离散过程企业决策支持系统, 发展战略与系统工程, 学术期刊出版社, 中国系统工程学会编, 453~458, 1987. 6
- [8] Ren S. J., Luo S. W. An Analysis and Design Framework for Engineering CIM-Oriented Information System, In: proceedings of Beijing International Symposium on Computer Integrated Manufacturing Systems, ISCIMS'92, Beijing 1992, 81~92
- [9] 唐荣锡等编. 计算机图形学教程. 北京: 科学出版社, 1990
- [10] 许隆文等编. 计算机绘图. 北京: 机械工业出版社, 1989
- [11] 许隆文等. CIMS 中 CAD/CAM 子系统的设计, 第一届中国计算机集成制造系统学术会议论文集, 1990
- [12] 方家骥. 图形核心系统的评价, 计算机工程与应用, 1984 年第 11 期
- [13] 服部幸英, CG, CAD/CAM 的国际标准化动向, PIXEL, 1991 年第 7~9 期
- [14] T. L. J. Howard, Evaluating PHIGS for CAD and general graphics applications, computer-aided design, 1991 年第 4 期
- [15] ISO CD 10303-1 Product data representation and exchange, overview and fundamental principles
- [16] Peter Imgham. CAD system in Mechanical and Production Engineering. 1990
- [17] 孙家广等编. 计算机辅助设计技术基础. 北京: 清华大学出版社, 1990
- [18] 任仲贵编. CAD/CAM 原理. 北京: 清华大学出版社, 1991
- [19] 贺兴书编. 机械振动学. 上海交通大学出版社, 1989
- [20] 杨菊生等编. 有限元法程序设计. 西安: 西安交通大学出版社, 1990
- [21] 黄少昌等编. 计算机辅助机械设计技术基础, 北京: 清华大学出版社, 1988
- [22] 吴信东等编. 专家系统技术. 北京: 电子工业出版社, 1988
- [23] 南京航空学院航空制造工程系编译. 机械制造系统. 上海: 上海科学技术出版社, 1984
- [24] (美)T. C. Chang, R. A. Wysk 著. 工艺过程自动设计导论, 黄乃康等译, 西安: 西北工业大学出版社, 1988
- [25] 王先逵编. 机械制造工艺学(上、下册), 北京: 清华大学出版社, 1989
- [26] 赵汝樵编. 计算机辅助工艺设计, 北京: 机械工程师进修大学出版, 1989
- [27] 杜裴, 黄乃康编. 计算机辅助工艺过程设计原理, 北京: 北京航空航天大学出版社, 1990
- [28] Mikell P. Groover, Emory W. Zimmers, JR. CAD/CAM: Computer-Aided Design and Manufacturing, New Jersey: Prentice-Hall, INC., 1984
- [29] T. C. Chang, R. A. Wysk, H. P. Wang, Computer-Aided Manufacturing, New Jersey: Prentice-Hall, INC., 1991
- [30] INCENT C. JONES. MAP/TOP Networking. McGraw-Hill, Inc. 1988
- [31] 胡道元编. 计算机局域网. 北京: 清华大学出版社 1990
- [32] 王东意等编. 微电脑可编程序控制器. 上海: 上海科技文献出版社, 1990
- [33] 朱绍祥等编译. 可编程序控制器原理与应用. 上海: 上海交通大学出版社, 1988
- [34] 金广业等编. 可编程序控制器原理与应用, 电



- 子工业出版社, 1991
- [35] 朱善君等编. 可编程序控制系统, 原理, 应用, 维护. 北京: 清华大学出版社, 1992
- [36] 西门子公司, SIMATIC S5. Catalog ST50, Siemens AG 1993
- [37] 西门子公司 S5-135U 可编程序控制器操作手册编号 6ES5 998-1UL22C, 北京, 1992
- [38] Allen-Bradley, Control, Communication and Information Product, Catalog, June 1992
- [39] 陈春雨等编. 可编程序控制器应用软件设计方法与技巧. 北京: 电子工业出版社
- [40] Computers in Industry (an international journal). Elsevier Science Publishers B. V., Amsterdam, The Netherlands. 1990~1993
- [41] 张曙编. 生产制造工程学. 北京: 机械工业出版社, 1990
- [42] David L. Goetsch. Advanced Manufacturing Technology. Delnarpublishers Inc, 1990
- [43] Robert U. Ayres. Computer Integrated Manufacturing, Vol. I, Chapman & Hall, 1991
- [44] August-Wilhelm Scheer. CIM Computer Integrated Manufacturing. Springer-Verlag, 1989
- [45] Brandolese A. Garrett M. FMS Control System: Design Criteris and Performance Analysis. In Proceedings of 3rd International Conference on Flexible Manufacturing Systems; 1983; 365~381
- [46] Kimemia G T, S B Gershuin. An Algorithm for the Computer Control of Production in Flexible Manufacturing Systems. IIE Trans; (Vol. 15, 1983. No. 4 353~362)
- [47] Johnson S M. Optional Two and Three Stage Production Schedule with Set Up Times Included. Naval Reviews; Logist. 1954, Quart 1: 61~68
- [48] 张德顺. 生产管理中确定投产顺序的几种方法. 机械工厂设计, 1985 (5);
- [49] 萨师焯编. 数据库系统概论. 北京: 高等教育出版社, 1991
- [50] C. J. DATE. An Introduction to Database Systems. Addison-wesley publishing Company 1981
- [51] David K. Hsiao and Magdi N. Kamel. Heterogenous Databases. Proliferation, Issue and Solution.
- [52] Stanley Y. W. Su Modeling Integrated Manufacturing Data with SAM *
- [53] Amit P. Sheth. Federated Database System for Managing Distributed Heterogeneous and Autonomous Databases. ACM Computing Surveys Vol 22 No. 3. September 1990
- [54] Eric Teicholz, Joel N. Orr. Computer-Integrated Manufacturing Handbook. New York: McGraw-Hill Book Company, 1987
- [55] Ming-Shing Lan, Yngve Naerheim. In-process Detection of Tool Breakage in Milling. Journal of Engineering for Industry Vol. 108, pp191~197, 1988
- [56] Jiri Tlustý, Y. S. tarng. Sensing Cutter Breakage in Milling. Annals of the CIRP, Vol. 37, pp. 45~51, 1988
- [57] Juran's. Quality Control Handbook. Fourth Edition. New York: McGraw-Hill Book Co. . 1988
- [58] AUTOFA CT'89: Conf., Proc., Detroit, Michigan, Society of Manufacturing Engineers, 1989
- [59] Proceedings of the IFIP TC5/WG5. 3 Working Conference on Computer Integrated Quality System in CIMS Systems. Belgrade, Yugoslavia, 20~30 June, 1989
- [60] Ulrich Rem Bold (德) 等著. 计算机集成制造技术和系统, 田雨华等译. 北京: 兵器工业出版社, 1991
- [61] 林志航等编著. CIMS—集成化质量控制系统技术网点技术设计. 西安: 西安交通大学, 1989
- [62] 张是勉等编著. 自动检测, 北京: 科学出版社, 1987
- [63] 沈兰荪编著. 数据采集技术. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1990
- [64] 张是勉等编著. 自动检测系统实践. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1990
- [65] 许宜生等编. 自动检测仪表电子电路设计. 北京: 原子能出版社, 1986
- [66] 赵负图著. 数据采集与控制技术. 北京: 北京



- 科学技术出版社, 1987
- [67] 高传善等著. 接口与通信. 上海: 复旦大学出版社, 1989
- [68] 周明德编著. 微型计算机硬件软件及其应用. 北京: 清华大学出版社, 1988
- [69] 胡道元编著. 计算机局域网. 北京: 清华大学出版社, 1990
- [70] Mincent C Jones. MAP/TOP Networking. McGraw-Hill Book Company, 1988
- [71] C. J. Date, An Introduction to database systems. Addison-wesley Publishing company, Inc. 1981
- [72] Y. W. Su Modelling Integrated Manufacturing data with SAM *
- [73] A. M. Alashqur, Y. W. Su, OQL: A Query Language for Manipulating Object-Oriented Database, Proceedings of the Fifteenth International Conference on very Large Databases
- [74] Amit. P. Sheth; Federated database system for managing distributed, Heterogeneous, and Autonomous Databases, ACM computing surveys. Vol 22. No. 3. September 1990
- [75] 陈禹六, 周之英等编著. 复杂系统通用的设计分析方法. 北京: 电子工业出版社, 1991
- [76] 熊光楞等编著. 连续系统仿真与离散事件系统仿真. 北京: 清华大学出版社, 1991
- [77] 肖田元. 制造系统集成中的仿真技术. 系统仿真学报, 1991年第2期
- [78] 熊光楞. 系统仿真的应用领域及应用要求. 系统仿真学报, 1990年第3期



第 9 篇

工业机器人



主编单位 机械工业部北京机械工业自动化研究所

编写单位 机械工业部北京机械工业自动化研究所
北京航空航天大学

主 编 高世义

副主编 陈佩云

编写人 高世义 陈佩云 吴瑞祥 吴 岱
刘宽信 康 波 王金友 王慧群
尚援朝 袁洪璋 赖维德 沈重重
张 珣 方启闾 聂尔来

主 审 蒋静坪

UR

上海科技



第 1 章 概 论

1 工业机器人的定义、构成和分类

机器人学是关于设计、制造和应用机器人的一门正在发展的新兴学科。工业机器人技术涉及机构学、控制理论和技术、计算机、传感技术、人工智能、仿生学诸领域，是一门多学科的综合性高新技术，是当代研究十分活跃、应用日益广泛的领域。机器人的应用情况标志着一个国家工业自动化的水平。

1.1 工业机器人的定义

工业机器人 (industrial robot) 是一种能自动控制、可重复编程、多功能、多自由度的操作机，能搬运材料、工件或操持工具，用以完成各种作业。

工业机器人的应用非常广泛，制造业和非制造业各领域都可以采用。目前常用的工业机器人有喷涂机器人、点焊机器人、弧焊机器人、搬运机器人、装配机器人、冲压及压铸上下料机器人等，还有在特殊作业环境下采用的机器人。本篇所述的机器人一般意指工业机器人。

1.2 工业机器人的构成

一台工业机器人一般由操作机、控制装置和驱动

单元三部分构成。

1. 操作机 (manipulator) 是具有和人手臂相似的动作功能，可在空间抓放物体或进行其他操作的机械装置，由机座、手臂、手腕、末端执行器等构成。

a. 机座 (base) 为工业机器人机构中相对固定，并承受相应力的基础部件。

b. 手臂 (arm) 由操作机的动力关节和连接杆件等构成，用于支承和调整手腕和末端执行器位置的部件 (手臂又称主轴)。

c. 手腕 (wrist) 支承和调整末端执行器姿态的部件 (手腕又称次轴)。

d. 末端执行器 (end effector) 操作机直接执行工作的装置 (如夹持器、工具和传感器等)。

e. 机械接口 (mechanical interface) 为与末端执行器相联接的机械联接界面。

有些机器人还带有使操作机移动的机械装置——移动机构和行走机构。

2. 控制装置 (control device) 机器人控制装置是由人操作起动、停机及示教机器人的一种装置。机器人控制装置由计算机控制系统、伺服驱动系统、电源装置及操作装置 (如操作面板、显示器、示教盒和操纵杆等) 组成。

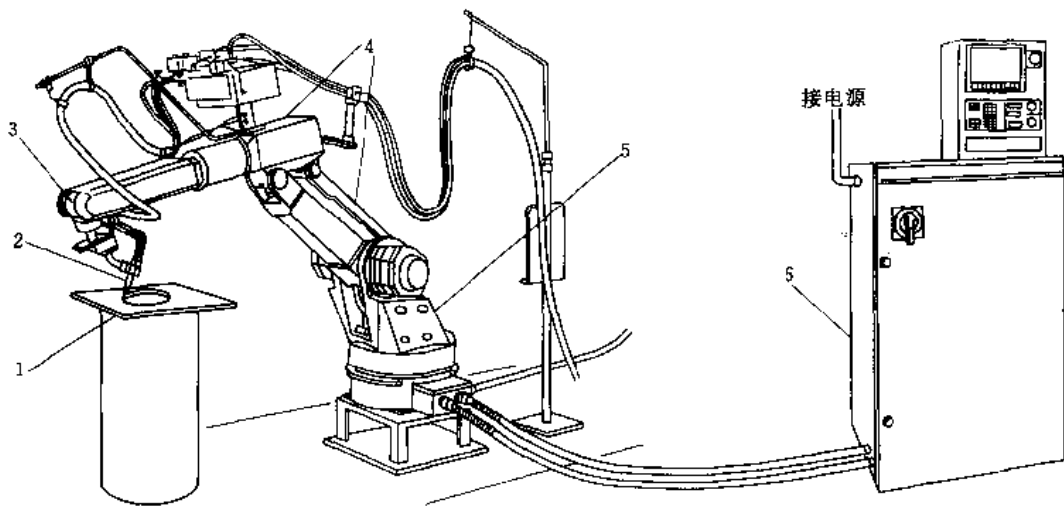


图 9-1-1 工业机器人的构成

1—工件 2—末端执行器 3—手腕 4—手臂 5—操作机 6—控制系统



(续)

3. 驱动单元 (driving unit) 驱动单元是由驱动器、减速器及检测元件等组成的组件。

a. 驱动器 是将电能或流体能等转换成机械能的动力装置。按动力源的类别可分为电动驱动、液压驱动和气动驱动三类。

b. 减速器 机器人所采用的传动减速机构与一般的机械传动机构相类似,常用的有谐波齿轮减速器、摆线针轮减速器、蜗杆减速器、滚珠丝杠、链条、同步齿形带、钢带及钢丝绳等。

c. 检测元件 检测机器人自身运动状态的元件,包括位置传感器(位移和角度)、速度传感器、加速度传感器及平衡传感器等。

工业机器人的构成见图 9-1-1。

机器人系统(Robot system)除包括机器人的各构成部分外,还包括机器人进行作业所要求的外围设备。

1.3 工业机器人的分类

关于工业机器人的分类目前尚无统一的国际标准。根据国际机器人联盟(IFR)和日本标准 JISB 0134-86,做如下分类:

- (1) 一般分类见表 9-1-1。
- (2) 根据控制方式分类见表 9-1-2。
- (3) 根据动作机构分类见表 9-1-3。

表 9-1-1 工业机器人的一般分类

| 分类名称 | 含义 |
|---------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| 操作型机器人 Manipulating Robot | 是一种能自动控制、可重复编程、多功能、具有几个自由度的操作机。可固定在某处或可移动,用于工业自动化系统中 |
| 顺控型机器人 Sequenced Robot | 按预先要求的顺序及条件对机械动作依次进行控制的机器人 |
| 示教再现型机器人 Playback Robot | 是一种能按示教编程输入工作程序,自动重复地进行工作的机器人 |
| 数控型机器人 Numerically Controlled (NC) Robot | 通过数值、语言等示教其顺序、条件、位置及其他信息,根据这些信息进行作业的机器人 |
| 智能机器人 Intelligent Robot | 由人工智能决定行动的机器人 |

| 分类名称 | 含义 |
|---------------------------------------|-----------------------------------------------|
| 感觉控制型机器人 Sensory Controlled Robot | 利用感觉信息进行动作控制的机器人 |
| 适应控制型机器人 Adaptive Controlled Robot | 具有适应控制功能的机器人。所谓适应控制是指适应环境变化改变控制等的特性,以满足所需要的条件 |
| 学习控制型机器人 Learning Controlled Robot | 具有学习控制功能的机器人。所谓学习控制是指反映作业经验,进行适当的作业控制 |

表 9-1-2 工业机器人根据控制方式分类

| 分类名称 | 含义 |
|----------------------------------------------------|--------------------------------|
| 伺服控制型机器人 Servo-Controlled Robot | 通过伺服机构进行控制的机器人。有位置伺服、力伺服、软件伺服等 |
| 非伺服控制型机器人 Nonservo-Controlled Robot | 通过伺服以外的手段进行控制的机器人 |
| 连续路径控制机器人 Continuous Path (CP) Controlled Robot | 不仅要控制行程的起点和终点,而且控制其路径的机器人 |
| 点位控制机器人 Pose to Pose (PTP) Controlled Robot | 只控制运动所达到的位姿,而不控制其路径的机器人 |

表 9-1-3 工业机器人根据动作机构分类

| 分类名称 | 含义 |
|------------------------------------------|----------------------------------------|
| 直角坐标型机器人 Cartesian Coordinate Robot | 操作机的手臂具有三个直线运动关节,并按直角坐标型式动作的机器人 |
| 圆柱坐标型机器人 Cylindrical Coordinate Robot | 操作机的手臂具有一个旋转运动和两个直线运动关节,并按圆柱坐标型式动作的机器人 |
| 球(极)坐标型机器人 Polar Coordinate Robot | 操作机手臂具有两个旋转运动和一个直线运动关节,并按球坐标型式动作的机器人 |
| 关节型机器人 Articulated Robot | 操作机手臂具有三个旋转运动关节,并作类似人的上肢关节动作的机器人 |



2 工业机器人的发展历史

1954年,美国G. C. Devol发表“通用重复型机器人”专利论文,首先提出了工业机器人和示教再现的概念。1958年,美国Consolidated Control公司研制出第一台数控工业机器人原型机,揭开了研制机器人的序幕。60年代初,美国机床和铸造公司(AMF)研制出示教再现型工业机器人商品Versatran、圆柱坐标机构、点位(PTP)和连续路径(CP)两种控制方式。同时美国Unimation公司研制出实用机器人Unimate、极坐标机构、电液伺服驱动、磁鼓存储方式、可示教多达200种动作,该机与Versatran至今仍在使用。

在此期间开始了智能机器人的研究。1961年美国麻省理工学院研制出带触觉传感器的机器人MH-1,用计算机控制,处理放射性物质。1967年又研制出带视觉的智能机器人。1969年美国斯坦福大学研制出能移动的智能机器人。

60年代末至70年代初,对机器人的研究达到了高潮。喷漆、焊接等工业机器人相继得到应用,并进入了柔性生产线,从而引起企业界的重视。随着计算机和人工智能技术的发展,在美国、日本、德国等国竞相开发了具有视觉、触觉、手、足,能行走、爬树或蛇行的各类智能机器人,用于空间、海洋及核工业等的开发研究。1979年,美国Unimation公司研制出Puma系列装配机器人,全电动关节式机构,PTP-CP控制方式,采用多CPU二级微机控制系统,有机器人专用语言系统,具有视觉、触觉、力觉等,可进行协调控制。

进入80年代,工业机器人开始普及应用。同时其操作机、驱动器、控制系统不断改进,以达到高速、高精度、轻量化和智能化。1985年美国GMF公司推出的全电动喷漆机器人P-150,具有交流伺服驱动系统,PTP-CP控制方式,多微处理器控制系统,MAP(制造自动化协议)通信接口,高级编程语言。80年代后期,各类带焊缝跟踪的弧焊机器人、高性能装配机器人相继应用于柔性自动化生产系统中,以满足多品种、少批量的各类需求。

90年代是具有各类传感功能的第二代工业机器人走向实用化的年代。瑞典ABB机器人公司推出TR5002、TR5003 6-7轴新型交流伺服喷漆机器人,并推出IRB 6000交流伺服点焊机器人新系列,负载达1176N(120kgf)。近年来,各种类型具有视觉、触觉、高灵巧手指、能行走的智能机器人相继出现,开始用于精密装配、核工业、宇航和深海开发、各种恶劣环境和

农业部门,并出现了多传感器融合、具有一定语言能力的机器人。机器人正朝着自学习、自适应控制、自治行动的智能化第三代方向发展。

3 工业机器人专用术语

参照国家标准GB/T 12643—90、GB/T 12642—90,本篇所涉及的机器人专用术语,部分见本章1节,其余列于本节。

3.1 有关机械结构和性能的术语

1. **轴(axis)** 描述机器人构件独立运动的方向线(可沿此作直线运动或转动)。

2. **绝对坐标系(world coordinate system)** 参照工作现场地面的坐标系。

3. **机座坐标系(base coordinate system)** 以机座安装面为参照的坐标系。

4. **机械接口坐标系(mechanical interface coordinate system)** 参照末端执行器机械接口的坐标系。

5. **杆件坐标系(link coordinate system)** 参照工业机器人指定构件的坐标系。

6. **位姿(pose)** 工业机器人末端执行器在指定坐标系中的位置和姿态。

7. **调准位姿(alignment pose)** 机械接口坐标系相对于机座坐标系的一个指定位姿。

8. **工具中心(tool center point)** 在机械接口坐标系中,根据工作要求定义的实点或虚点,是一个和工具有关的参考点。

9. **自由度(degree of freedom)** 表示工业机器人动作灵活程度的参数,一般是沿轴线移动和绕轴线转动的独立运动数来表示。

10. **手腕参考点(wrist reference point)** 手腕两个最前端轴的交点,无交点时则为前端轴的一个规定点。

11. **工作空间(working space)** 工业机器人正常运行时,手腕参考点能在空间活动的最大范围。

12. **机械原点(mechanical origin)** 在机座坐标系中,工业机器人的各运动轴都归零时的原始点。

13. **操作原点(operating origin)** 工业机器人操作时选定的基准点。

14. **额定速度(rated velocity)** 工业机器人在额定负载、匀速运动过程中,机械接口中心或工具中心的最大速度。

15. **单轴速度(individual axis velocity)** 某一轴



运动时的速度。

16. **合成速度** (resultant velocity) 由各轴速度分量合成的速度。

17. **路径速度** (path velocity) 在连续路径控制中, 末端执行器或工具中心沿指定路径运动时获得的合成速度。

18. **额定加速度** (rated acceleration) 工业机器人在额定负载、匀加速运动过程中, 机械接口中心或工具中心速度的最大变化率。

19. **单轴加速度** (individual axis acceleration) 某一轴在运动时的加速度。

20. **合成加速度** (resultant acceleration) 由各轴加速度的分量合成的加速度。

21. **轨迹加速度** (path acceleration) 在连续轨迹控制中, 末端执行器或工具中心沿指定轨迹运动达到预定速度前的合成加速度。

22. **负载** (load) 是机器人所承受重量、惯性力矩和静、动态力的一种功能, 在规定的速度和加速度条件下, 用沿各运动轴方向作用于机械接口处的力和扭矩来表示。

23. **额定负载** (rated load) 在工业机器人规定的性能范围内, 机械接口处能承受负载的允许值。

24. **极限负载** (limiting load) 工业机器人在限制的操作条件下, 保证其机械结构不损坏, 机械接口处能承受负载的最大值。

25. **最大推力** (maximum thrust) 保证工业机器人机械结构不损坏的情况下, 连续作用于机械接口处力的最大值。

26. **最大扭矩** (maximum torque) 保证工业机器人机械结构不损坏的情况下, 连续作用于机械接口处扭矩的最大值。

27. **定位时间** (positioning time) 在额定负载条件下, 机械接口中心或工具中心由某一位置运动到另一位置的稳定状态所需要的时间。

28. **分辨力** (resolution) 工业机器人各运动轴能够实现的最小移动距离或最小转动角度。

29. **静态柔顺性** (static compliance) 工业机器人机械接口上施加单位负载所产生的最大位移量。

30. **姿态准确度** (pose accuracy) 多次执行同一姿态指令, 实到姿态与指令姿态之间的不一致程度。

31. **姿态重复性** (pose repeatability) 在相同的条件下, 用同一方法操作时, 重复多次所测得的同一姿态散布的不一致程度。

32. **路径准确度** (path accuracy) 机械接口中心跟随指令运动路径的不一致程度。

33. **路径重复性** (path repeatability) 机械接口中心沿同一路径运动, 重复多次所测得的路径的不一致程度。

34. **路径速度准确度** (path velocity accuracy) 机械接口中心沿某一路径运动时, 指令速度和实际速度之间的不一致程度。

35. **路径速度重复性** (path velocity repeatability) 在相同条件下, 重复多次运动的实际速度之间的不一致程度。

36. **循环时间** (cycle time) 机器人重复执行一个给定的操作程序所需要的时间。

37. **路径速度波动** (path velocity fluctuation) 对一指令速度重复一次时速度的最大偏差。

38. **距离准确度** (distance accuracy) 指令距离和实到距离平均值之间位置和姿态的偏差。

39. **距离重复性** (distance repeatability) 在同一方向上对同一指令距离重复运行 n 次, 几个实到距离之间散布的不一致程度。

40. **姿态稳定时间** (pose stabilization time) 从机器人发出“姿态到达”信号的瞬间至实际姿态达到规定偏差之内的瞬时止所经历的时间。

41. **姿态超调量** (pose overshoot) 机器人给出姿态到达信号后, 瞬时姿态和稳定姿态之间的最大偏差。

42. **姿态准确度漂移** (drift of pose accuracy) 在指定时间间隔内实到姿态的缓慢变化程度。

43. **拐角偏差** (corner deviation) 当指令路径由互相垂直两直线组成时, 在拐角处指令路径和实际路径之间的偏差。

44. **稳定路径长度** (stable path length) 从指令路径拐角点起, 到第二段指令路径上机器人开始能按路径特性运行的点之间的长度。

3.2 有关控制和安全的术语

1. **协调控制** (cooperative control) 使多手臂或多台机器人互相协调, 同时进行一种或多种作业的控制。

2. **分级控制** (hierarchical control) 将系统按控制的性质或规模分为几个级别, 对各级采用相应的控制装置进行控制。

3. **自适应控制** (adaptive control) 在控制系统



中,不断地自动修正控制参数,以达到接近最佳性能和要求的控制。

4. 群控系统 (group control system) 用一个控制装置集中控制多台机器人,或集中控制多台控制对象的控制系统。

5. 感觉控制 (sensory control) 机器人的运动或力可按照外部传感器输出信号进行调整的控制方式。

6. 学习控制 (learning control) 将过去作业周期中取得的经验自动地用于改变控制参数和(或)算法的控制方式。

7. 自动方式 (automatic mode) 机器人控制系统按照作业程序进行的操作方式。

8. 手动方式 (manual mode) 机器人通过诸如按钮或操作杆等进行操作的方式。

9. 正常操作状态 (自动操作) (normal operating state, automatic operation) 通过执行连续程序而无误地完成其编程作业的机器人状态。

10. 紧急停机功能 (emergency stop function) 为防止由于机器人的误动作产生的危险性所具有迅速而准确停机的能力。

11. 报警功能 (warning function) 机器人具有事先警告潜在人身安全事故等的的能力。

12. 示教编程 (teaching programming) 通过人工引导末端执行器或机械模拟装置或示教盒进行示教,使机器人运动达到预期要求的示教方式。

13. 目标编程 (goal directed programming) 所需完成的任务由程序员给出,而末端执行器的轨迹不预先确定的编程方法。

14. 存储容量 (memory capacity) 机器人的存储器中可存储的位置、顺序、速度等信息量,通常用时间或位置点数来表示。

15. 自诊断功能 (self diagnosis ability) 机器人判断本身的全部或部分状态是否处于正常的的能力。

16. 示教盒 (teach pendant) 与控制系统连接用以对机器人编程(或使之运动)的一种手持装置。

17. 操作杆 (joystick) 通过所测不同位置和姿态或给出的力,产生机器人控制系统指令的一种手动控制装置。

4 国内外几种典型机器人性能参数 (表 9·1-4)

表 9·1-4 国内外几种典型机器人性能参数

| 系 统 | 机 器 人 型 式 | 电 动 机 类 型 | 自 由 度 数 | 重 复 性 (mm) | 最 大 负 载 (×9.8N) | 最 大 末 端 速 度 (m/s) | 编 程 语 言 | 外 部 通 信 接 口 | 主 要 应 用 领 域 | | | | | | | | | | | 生 产 国 | | |
|---------|-------------------------------|-----------------------|------------------|---------------------|-----------------------------|-------------------------------------|------------------|----------------------------|------------------|--------|--------|----------------------------|------------------|------------------|-----------------------|---------------------------------|------------------|------------------|------------------|-------------|-----------------------|-----------------------|
| | | | | | | | | | 表 面 喷 涂 | 点 焊 | 弧 焊 | 磨 削 / 去 毛 刺 | 电 子 装 配 | 一 般 装 配 | 涂 胶 / 封 接 | 激 光 切 割 / 焊 接 | 注 射 成 型 | 机 械 装 载 | 冲 压 上 料 | | 搬 运 / 堆 垛 | 培 训 / 研 究 |
| IRB6 | 关节式 | DC 伺服 | 5 或 6 | 0.2 | 6 | 2 | ARLA | RS232 | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | 瑞典 | |
| IRB60 | 关节式 | DC 伺服 | 5 或 6 | 0.4 | 60 | 2.5 | ARLA | RS232 | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | 瑞典 | |
| IRB90 | 关节式 | DC 伺服 | 6 | 0.5 | 90 | 2.5 | ARLA | RS232 | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | 瑞典 | |
| IRB300 | SCARA① | DC 伺服 | 4 | 0.5 | 2.5 | 0.16 | PASLA | RS232 | | | | ● | ● | | | | | | | | 日本 | |
| IRB1000 | 关节式 | DC 伺服 | 6 | 0.1 | 4 | 单轴 | ARLA | RS232 | | | ● | ● | ● | | | | | | | | 瑞典 | |
| IRB2000 | 关节式 | AC 伺服 | 6 | 0.1 | 10 | 300°/s | ARLA | RS232 | | | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | 瑞典 | |
| IRB3000 | 关节式 | AC 伺服 | 6 | 0.15 | 30 | | ARLA | RS232 | | | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | 瑞典 | |
| IRB8200 | 龙门式 | DC 伺服 | 4 | 0.4 | 125 | | ARLA | RS232 | | | | | | | | | | | | | 德国 | |
| Fanuc | 关节式 | AC 伺服 | 至 9 | 0.01 | 35 | 11.8 | PASCAL | RS232 | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | 日本 |
| | SCARA① 直角坐标 圆柱坐标 板坐标 | | | 0.5 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

机器人制作请尊重版权



(续)

| 系 统 | 机 器 人 型 式 | 电 动 机 类 型 | 自 由 度 数 | 重 复 性 (mm) | 最 大 负 载 ($\times 9.8N$) | 最 大 末 端 速 度 (m/s) | 编 程 语 言 | 外 部 通 信 接 口 | 主 要 应 用 领 域 | | | | | | | | | | | 生 产 国 | | |
|----------------------|--------------------------|-----------------------|------------------|---------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|------------------|----------------------------|------------------|--------|--------|----------------------------|------------------|------------------|-----------------------|---------------------------------|------------------|------------------|------------------|-------------|-----------------------|-----------------------|
| | | | | | | | | | 表 面 喷 涂 | 点 焊 | 弧 焊 | 磨 削 / 去 毛 刺 | 电 子 装 配 | 一 般 装 配 | 涂 胶 / 封 接 | 激 光 切 割 / 焊 接 | 注 射 成 型 | 机 械 装 载 | 冲 压 上 料 | | 搬 运 / 堆 垛 | 培 训 / 研 究 |
| IR163/8 | 关节臂 球形 | AC 伺服 | 6~8 | 0.2 | 8 | | SRCL | RS232 | | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | 德国 |
| IR163/15/ 30.1 | 关节臂 球形 | AC 伺服 | 6~8 | 0.2 | 15 或 30 | | SRCL | RS232 | | | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | 德国 |
| IR163/60/ 100.1 | 关节臂 球形 | AC 伺服 | 6~8 | 0.5 | 60 或 100 | | SRCL | RS232 | | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | 德国 |
| IR203 | 关节式 龙门式 安装 | AC 伺服 | 6 | 0.5 | 60 | 3.4 | RSCL | RS232 | ● | | | | | | | | | | | | | 德国 |
| IR363/8/ 15.0 | 关节臂 球形 | AC 伺服 | 6 | 0.1 | 8 或 15 | | SRCL | RS232 | | | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | 德国 |
| IR403 | 龙门式 | AC 伺服 | 2~6 | 0.25 | 100 或 150 | | SRCL | RS232 | | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | 德国 |
| IR663/60/ 100/150 | 关节臂 地面安装 | AC 伺服 | 6 或 7 | 0.5 | 60/100/150 | 3.7 | SRCL | RS232 | | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | 德国 |
| PU800 | 直角坐标 龙门式 模块化 组合 | AC 伺服 | 1~10 | 0.3 | 60~2500 | | SRCL | RS232 | | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | 德国 |
| Puma | 关节式 | DC 伺服 | 6 | 0.1 | 20 | 1 | VALII | RS232 | | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | 英国 |
| | SCARA① | DC 伺服 | 4 和 6 | | 40 | 6 | VALII | RS422 | | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | |
| Motoman K6S | 关节式 | AC 伺服 | 6 | 0.1 | 6 | 2 | INFORM | RS232 RS422 | | ● | | | | | | | | | | | | 日本 |
| Motoman K10S | 关节式 | AC 伺服 | 6 | 0.1 | 10 | 2 | INFORM | RS232 RS422 | | ● | | | | | | | | | | | | 日本 |
| Motoman L15S | 关节式 | AC 伺服 | 6 | 0.3 | 15 | 2 | INFORM | RS232 RS422 | | ● | ● | | | | | | | | | | | 日本 |
| Motoman L30S | 关节式 | AC 伺服 | 6 | 0.2 | | 2 | INFORM | RS232 RS422 | | | ● | | | | | | | | | | | 日本 |
| Motoman L60S | 关节式 | AC 伺服 | 6 | 0.3 | 60 | 2 | INFORM | RS232 RS422 | | ● | ● | | | | | | | | | | | 日本 |
| Motoman L100S | 关节式 | AC 伺服 | 6 | 0.5 | 100 | 2 | INFORM | RS232 RS422 | | ● | | | | | | | | | | | | 日本 |
| PJ-1 | 关节式 | 电液伺服 | 5 | 2.5 | 5 | 1.7 | | | ● | | | | | | | | | | | | | 中国 |
| PJ-500 | 关节式 | 电液伺服 | 5 | 2 | 5 | 1.7 | | | ● | | | | | | | | | | | | | 中国 |
| PJ-600 | 关节式 | 电液伺服 | 6 | 2 | 5 | 1.7 | | | ● | | | | | | | | | | | | | 中国 |
| EPR-501 | 关节式 | AC 伺服 | 5 | 1.5 | 5 | 1.4 | C | RS232 | ● | | | | | | | | | | | | | 中国 |
| AR-4001 | SCARA① | 步进电机 | 4 | 0.1 | 1.5 | 1.5 | | | | | | ● | ● | | | | | | | | | 中国 |
| AR-4002 | SCARA① | 步进电机 | 4 | 0.1 | 2 | 2 | | | | | | ● | ● | | | | | | | | | 中国 |
| ZHS- R005 | 关节式 | DC 伺服 | 5 | 0.2 | 12 | 1.5 | RC75/01 专用语言 | RS232C | | ● | | | ● | | | | | | | | | 中国 |
| GJR-G1 | 关节式 | DC 伺服 | 6 | 0.2 | 5 | 单轴 180°/s | PASCAL | RS232C | | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | 中国 |
| GJR-G2 | 关节式 | AC 伺服 | 6 | 0.5 | 60 | | | | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | 中国 |
| JRS-80 | 关节式 | DC 伺服 | 6 | 0.5 | 80 | 单轴 140°/s | RC75/01 专用语言 | RS232 | | ● | | | | | | | | | | | | 中国 |

注：●表示用于某领域。

① SCARA 可选择的柔顺装配机器人手臂，采用平面关节型坐标结构。

机器人制作请尊重版权



5 工业机器人性能规范和测试方法

工业机器人的测试通常是指性能规范的测试。按照国家标准 GB/T 12642—90 的规定,工业机器人的性能规范包括位姿特性、轨迹特性、最小定位时间和静态柔顺性。

5.1 工业机器人性能规范

表征工业机器人位姿特性和轨迹特性的参数有:

- (1) 单方向位姿准确度和重复性;
- (2) 多方向位姿准确度;
- (3) 距离准确度和重复性;
- (4) 位姿稳定时间、位姿超调量、位姿准确度漂移;
- (5) 轨迹准确度和重复性;
- (6) 拐角偏差;
- (7) 稳定轨迹长度;
- (8) 轨迹速度准确度、重复性和波动。

5.2 工业机器人测试方法

在测试工业机器人时,必须是在额定负载下按国家标准 GB/T 12645—90 所规定的测试环境、测试速度、测试次数、测试步骤以及按规定设置的测试点和测试轨迹进行。

工业机器人性能规范的测试方法和测试设备,仍在不断的开发中。就目前而言,可归纳为以下 6 类:末端执行器具有简单几何形状的测量法、轨迹比较法、三边法、极坐标测量法、三角法和坐标测量法。

选择测试方法时,除考虑能否满足性能规范的测试外,还必须考虑到测试系统的维数、准确度、重复性、分辨力、测试空间大小、适应范围和采样速率等。

1. 末端执行器具有简单几何形状的测量法 工业机器人的末端执行器是规则的立方体或球体。测试系统的测试支架上安装有六个接触式或非接触式位移传感器。机器人的操作机从基准位置按机座坐标系的 X、Y 或 Z 方向进行运动,逼近或接触位移传感器。由位移传感器检测到的数值进行计算,便可得到末端执行器的测试位姿。

2. 轨迹比较法 此方法是采用一标准的机械梁或一激光束作为参考标准,在机器人的末端执行器上安装有传感器,当机器人的末端执行器沿机械梁或激光束运行时,即可得到两者之间的距离偏差值。从而可计算出位姿或轨迹的准确度和重复性。

3. 三边法(距离-距离) 用几台激光干涉仪的三

条或六条激光束,瞄准机器人末端执行器上的反射器(一个或三个)。当机器人的操作机运动时,激光干涉仪跟踪测量,即可测得距离数据。从而计算出位姿或轨迹准确度和重复性。

采用带有电位器装置的机械式钢丝绳测距系统测试机器人的位置亦属此类。

4. 极坐标测量法(距离-方位角) 机器人的腕部安装有反射器作为目标,用具有跟踪系统的激光干涉仪瞄准机器人的目标镜,从而得到距离数值和两个轴的方位角数值。由此计算出机器人的位置和姿态。

另一种测量系统则是采用直线规和一对回转编码器。直线规的顶端安装在机器人上,另一端与编码器夹持在一起。当机器人的操作机运动时,由直线规可得到距离数值,由编码器可得到两个方位角数值。因此,可计算出机器人的位置和轨迹。

5. 三角法(方位角-方位角) 在机器人的腕部安装反射器。两套两轴光学扫描器对其进行扫描,即可测得两组方位角的数据,从而可得到机器人的位置。

6. 坐标测量法 机器人的腕部安装有光笔。当机器人操作机的腕部在一套图形输入板的板面上运行时,就能观察到机器人运行的 X-Y、Y-Z、Z-X 的坐标值,或者采用坐标测量机来测量机器人的位置。其他还有作图法等。

6 机器人的效益

机器人的研究与开发至今已有近 40 年的历史,它正在以制造业为中心迅速地得到推广和普及应用,产生了巨大的效益:

- (1) 提高劳动生产率数倍到数十倍;
- (2) 提高产品质量和可靠性;
- (3) 实现了多品种、多批量和少批量的柔性生产;
- (4) 改善了劳动环境;
- (5) 节约能源、节省材料、节省劳动力。

以我国第二汽车厂和机械工业部北京机械工业自动化所联合研制的“东风系列驾驶室多品种混流机器人喷涂线”为例,该生产线代替了原来两条人工喷涂线,产量翻番,质量提高,成品率由过去的 85% 提高到 96%,实现了七种车型的混流,劳动力节省一半,每年仅油漆一项即可节省 200 多万元,把工人从恶劣的漆雾环境中解放出来。

机器人的使用将使人类从“人—机器—自然界”的生产方式过渡到“人—机器人—机器—自然界”的生产方式,从而使人类从直接的生产岗位中解放出来,上升



到指挥、管理、监督生产的位置。机器人并不是在简单意义上代替人的劳动，而是综合了人的特长的一种拟人的电子机械装置，既有人对环境状态快速反应和分

析判断的能力，又有机器持续工作、精确度高、抗恶劣环境的能力。从某种意义上讲，它也是机器的一种进化过程。

第2章 工业机器人操作机

1 工业机器人操作机的自由度与坐标型式

1.1 操作机的概念

工业机器人操作机的定义参见本篇第1章1.2节。目前，大多数操作机的功能类似人臂。一个典型的操作机 P-100 如图 9-2-1 所示。

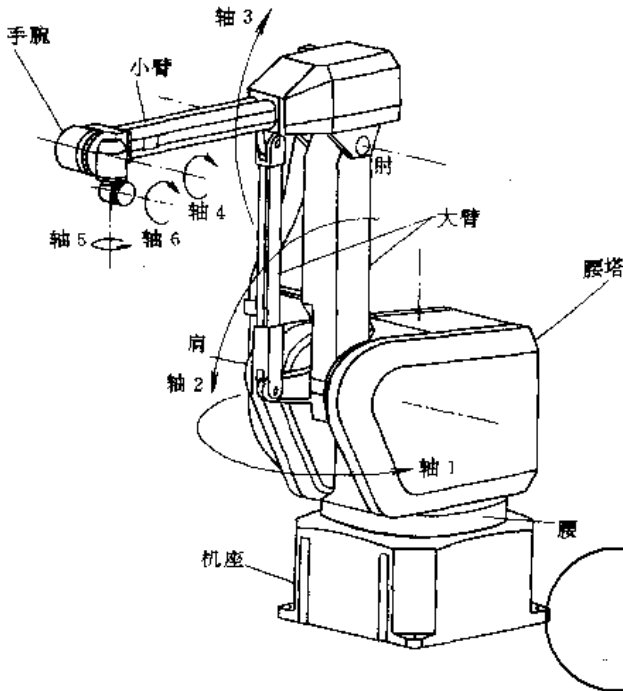


图 9-2-1 P-100 操作机

1.2 自由度

1. 刚体的自由度 刚体能够对坐标系进行独立运动的数目称为刚体的自由度。

2. 机器人的自由度 表示机器人动作灵活的尺度，以机器人所具有的运动副数目表示，参见本篇第1章3.1节。

1.3 工业机器人运动的坐标型式

按机器人操作机末端执行器定位方式的不同，操

作机的运动常采用四种坐标型式。

1. 直角坐标 即笛卡儿坐标，操作机的运动由三个相互垂直的直线运动来实现。

2. 圆柱坐标 操作机的运动由两个移动和一个转动来实现。

3. 球坐标 操作机的运动由一个移动和两个转动来实现。

4. 关节坐标 操作机的运动由三个转动来实现。

2 操作机的不同结构及其特点

操作机的结构根据坐标型式的不同而有所不同。

1. 直角坐标型操作机 这类操作机在空间三个相互垂直的方向 X、Y、Z 上作移动运动，运动是独立的，如图 9-2-2a 所示。其控制简单，易达到高精度，但操作灵活性差，运动速度较低，操作范围较小。

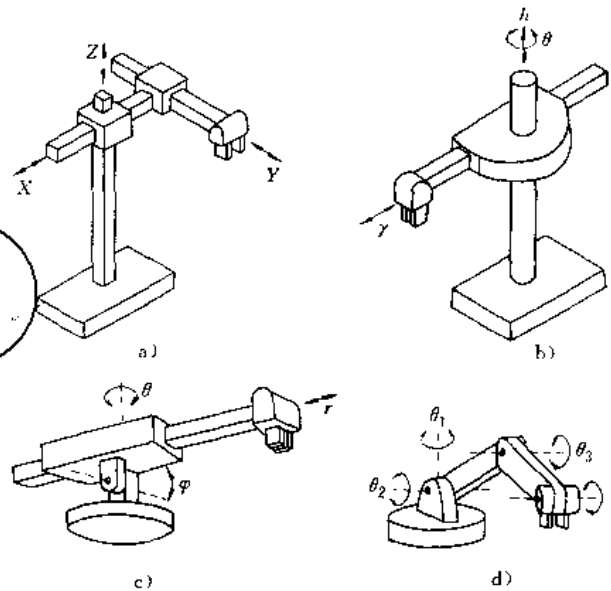


图 9-2-2 四种不同坐标型操作机

a) 直角坐标型 b) 圆柱坐标型 c) 球坐标型
d) 关节型

2. 圆柱坐标型操作机 这类操作机在水平转台上装有立柱，水平臂可沿立柱上下运动并可在水平方



向伸缩,如图 9·2-2b 所示。其操作范围较大,运动速度较高,但随着水平臂沿水平方向伸长,其线位移分辨率越来越低。

3. **球坐标型操作机** 也称极坐标型操作机,工作臂不仅可绕垂直轴旋转,还可绕水平轴作俯仰运动,且能沿手臂轴线作伸缩运动,如图 9·2-2c 所示。其操作比圆柱坐标型更为灵活,但旋转关节反映在末端执行器上的线位移分辨率是一个变量。

4. **关节型操作机** 这类操作机由多个关节联结的机座、大臂、小臂和手腕等构成,大小臂既可在垂直于机座的平面内运动,也可实现绕垂直轴的转动,如图 9·2-2d 所示。其操作灵活性最好,运动速度较高,操作范围大,但精度受手臂位姿的影响,实现高精度运动较困难。

3 机器人操作机的运动学与动力学

3.1 基本定义

1. **机器人运动学** 主要研究机器人相对机座坐标系的运动与时间的关系,重点研究关节变量与机器

人末端执行器位置和姿态的关系。

2. **机器人动力学** 主要研究机器人各关节输入力、力矩与输出运动之间的关系。

3. **D-H 坐标系** 由 Denavit 和 Hartenberg 于 1955 年提出的一种建立杆件坐标系的方法。以转动关节联接的杆系为例,如图 9·2-3 所示。定义 a_n 为关节 n 的轴线与关节 $n+1$ 的轴线间公垂线的长度; α_n 为垂直于 a_n 的平面内上述两轴线间的夹角; d_n 为关节轴 n 与 $n+1$ 的公垂线及轴 n 与 $n-1$ 的公垂线之间沿轴 n 的距离; θ_n 为垂直于关节轴 n 的平面内上述两公垂线的夹角。按 D-H 法,取坐标系 n 的 z_n 轴与关节轴 $n+1$ 重合; X_n 轴沿 a_n 从关节 n 指向关节 $n+1$; Y_n 轴可按右手法则确定,图中一般不画出; n 系的原点位于 a_n 与关节轴 $n+1$ 的交点处。

4. **A 矩阵** 表示相邻两杆件在空间相互位置和姿态关系的 4 阶方阵,可通过相应的平移和旋转齐次变换得到。

5. **T 矩阵** 表示不相邻的两杆件之间在空间相互位置和姿态关系的 4 阶方阵,由若干个 A 矩阵相乘而得。

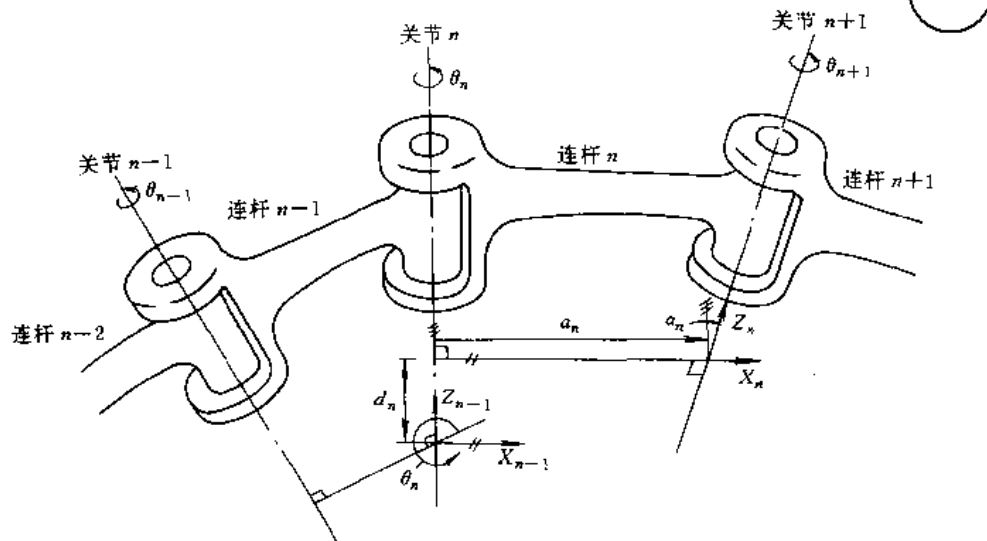


图 9·2-3 D-H 坐标系

3.2 机器人运动学正问题

机器人运动学正问题指已知操作机杆件的几何参数和关节角,求末端执行器相对于机座坐标系的位置和姿态。

机器人运动学方程的建立步骤如下:

(1) 根据 D-H 法建立操作机的机座坐标系和各杆件坐标系。

(2) 从机座坐标系出发,根据各杆件尺寸及相互位

置参数,逐一确定 A 矩阵。

(3) 根据需要将若干个 A 矩阵连乘起来,即得到不同的运动方程。对 6 自由度操作机,手部相对于机座坐标系的位置变化为

$$T_c = A_1 \cdot A_2 \cdot A_3 \cdot A_4 \cdot A_5 \cdot A_6$$

此即手部的运动方程。

3.3 机器人运动学逆问题

指已知操作机杆件的几何参数和末端执行器相对



于机座坐标系的位姿,求操作机各关节变量。

求解机器人运动学逆问题的解析法又称为代数法和变量分离法。在运动方程两边乘以若干个A矩阵的逆阵,如

$$A_1^{-1}T_6 = A_2 \cdot A_3 \cdot A_4 \cdot A_5 \cdot A_6 = {}^1T_6$$

$$A_2^{-1}T_6 = A_3 \cdot A_4 \cdot A_5 \cdot A_6 = {}^2T_6$$

⋮

$$A_5^{-1}T_6 = A_6 = {}^5T_6$$

将得到的新方程展开,每个方程可有12个子方程,选择等式左端仅含有所求关节变量的子方程解之,可求出相应的关节变量。

除解析法外,还有几何法、迭代法等。

3.4 微分关系式

操作机作微小运动时,其位置及姿态的微小变化与微分变换有关。

3.4.1 微分平移变换

对微分矢量d来说,微分平移变换为

$$\text{Trans}(d) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & d_x \\ 0 & 1 & 0 & d_y \\ 0 & 0 & 1 & d_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

3.4.2 微分旋转变换

对绕任意轴k的微分旋转dθ来说,微分旋转变换为

$$\text{Rot}(k, d\theta) = \begin{bmatrix} 1 & -k_y d\theta & k_x d\theta & 0 \\ k_x d\theta & 1 & -k_z d\theta & 0 \\ -k_x d\theta & k_x d\theta & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

3.4.3 动系T与固定系之间微分变换关系

$$\begin{aligned} d_{xT} &= n \cdot ((\delta \times p) + d) & \delta_{xT} &= n \cdot \delta \\ d_{yT} &= a \cdot ((\delta \times p) + d) & \delta_{yT} &= a \cdot \delta \\ d_{zT} &= a \cdot ((\delta \times p) + d) & \delta_{zT} &= a \cdot \delta \end{aligned}$$

式中 d——固定系微分平移矢量;
δ——固定系微分旋转矢量,即dθ;

n、a、p——微分坐标变换T的列矢量。

3.5 雅可比(Jacobian)矩阵

3.5.1 雅可比矩阵(简称J阵)

是关节速度到直角空间速度的线性变换,它反映

了关节微小转动dθ与手部微小运动dx的关系,即

$$dx = J \cdot d\theta$$

对6自由度操作机,其J阵可由每个关节坐标的微分旋转和微分平移组成的6阶方阵表示

$$J = \begin{bmatrix} d_{1x}, T_6 & d_{2x}, T_6 & d_{3x}, T_6 & d_{4x}, T_6 & d_{5x}, T_6 & d_{6x}, T_6 \\ d_{1y}, T_6 & d_{2y}, T_6 & d_{3y}, T_6 & d_{4y}, T_6 & d_{5y}, T_6 & d_{6y}, T_6 \\ d_{1z}, T_6 & d_{2z}, T_6 & d_{3z}, T_6 & d_{4z}, T_6 & d_{5z}, T_6 & d_{6z}, T_6 \\ \delta_{1x}, T_6 & \delta_{2x}, T_6 & \delta_{3x}, T_6 & \delta_{4x}, T_6 & \delta_{5x}, T_6 & \delta_{6x}, T_6 \\ \delta_{1y}, T_6 & \delta_{2y}, T_6 & \delta_{3y}, T_6 & \delta_{4y}, T_6 & \delta_{5y}, T_6 & \delta_{6y}, T_6 \\ \delta_{1z}, T_6 & \delta_{2z}, T_6 & \delta_{3z}, T_6 & \delta_{4z}, T_6 & \delta_{5z}, T_6 & \delta_{6z}, T_6 \end{bmatrix}$$

3.5.2 雅可比逆阵

是直角空间速度到关节速度的线性变换。当J⁻¹存在时,可由手部微分旋转和平移确定各关节变量的微小变化,即

$$d\theta = J^{-1} dx$$

当J阵奇异时,J⁻¹不存在,对应的手臂位姿为奇异位姿,手部中心点所占据的空间点为该操作机工作空间中的奇异点。

3.6 机器人动力学问题的常用分析方法

3.6.1 拉格朗日法

此方法推导简单,系统性强,能得到封闭形式的方程,结构紧凑,方程中不包含约束力,便于分析和上机计算,但计算效率较低,实时性差。

1. 拉格朗日方程的一般型式 设K为刚体系统的动能,P为系统势能,定义拉格朗日函数L为

$$L(q_i, \dot{q}_i) = K - P$$

式中 q_i——第i个广义坐标;

q̇_i——对应的广义速度。

由刚体系统动力学第二类拉格朗日方程,刚体系统动力学方程为

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial L}{\partial q_i} = Q_i \quad i=1, 2, \dots, n$$

式中 Q_i——第i个广义力;

n——操作机自由度。

2. 操作机的拉格朗日方程 从拉格朗日方程的一般型式出发,通过计算操作机杆件的速度、动能和势能,建立拉格朗日函数并求导,即可推导出操作机的拉格朗日方程为

$$\sum_{j=1}^n D_{ij} \ddot{q}_j + \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n D_{ijk} \dot{q}_j \dot{q}_k + D_i = Q_i \quad i=1, 2, \dots, n$$



式中 $D_{ii}\ddot{q}_i$ ——第 i 个关节处的等效惯性力矩；
 $D_{ij}\ddot{q}_j$ ——第 i 个关节和第 j 个关节之间的耦合惯性力矩 ($j \neq i$)；
 $D_{ii}\dot{q}_i^2$ ——第 i 个关节的速度在第 i 个关节处产生的离心力矩；
 $D_{ijk}\dot{q}_j\dot{q}_k$ ——第 j, k 个关节的速度在第 i 个关节处产生的科氏 (Coriolis) 力矩 ($j \neq k$)；
 D_i ——重力力矩。

3.6.2 牛顿-欧拉法

牛顿-欧拉法常用迭代方程的型式, 计算速度快, 实时性好, 但方程中含有约束力, 且破坏了动力学模型的封闭结构。

1. 牛顿-欧拉基本方程

$$f_{i-1,i} - f_{i,i+1} + m_i g - m_i \dot{v}_c = 0 \quad i=1, 2, \dots, n$$

$$N_{i-1,i} - N_{i,i+1} + r_{i,c} \times f_{i,i+1} - r_{i-1,c} \times f_{i-1,i} - I_i \dot{\omega}_i$$

$$- \omega_i \times (I_i \omega_i) = 0 \quad i=1, 2, \dots, n$$

式中 $f_{i-1,i}$ ——杆件 L_{i-1} 作用在杆件 L_i 上的力；
 $f_{i,i+1}$ ——杆件 L_i 作用在杆件 L_{i+1} 上的力；
 $N_{i-1,i}$ ——杆件 L_{i-1} 作用在杆件 L_i 上的力矩；
 $N_{i,i+1}$ ——杆件 L_i 作用在杆件 L_{i+1} 上的力矩；
 $r_{i,c}$ ——从第 i 个杆系的原点到质心 c_i 的位置矢量；
 $r_{i-1,c}$ ——从第 $i-1$ 个杆系的原点到质心 c_i 的位置矢量；
 m_i ——杆件 L_i 的质量；
 \dot{v}_c ——杆件 L_i 质心的线加速度矢量；
 I_i ——杆件 L_i 在固定系中绕质心的惯性张量；
 ω_i ——杆件 L_i 质心的角速度矢量。

上述各量如图 9-2-4 所示。

2. 牛顿-欧拉方程的迭代形式

$$f_{i-1,i} = f_{i,i+1} + m_i \dot{v}_c - m_i g$$

$$N_{i-1,i} - N_{i,i+1} - r_{i,c} \times f_{i,i+1} + r_{i-1,c} \times f_{i-1,i} + I_i \dot{\omega}_i + \omega_i \times (I_i \omega_i)$$

关节力矩

$$\tau_i = \begin{cases} z_{i-1}^T N_{i-1,i} & \text{对旋转关节} \\ z_{i-1}^T f_{i-1,i} & \text{对移动关节} \end{cases}$$

式中 z_{i-1}^T 为第 $i-1$ 系 z 轴的单位矢量。

3. 速度和加速度迭代公式

$$v_{i+1} = \begin{cases} v_i + \omega_{i+1} \times r_{i,i+1} & \text{对旋转关节} \\ v_i + \omega_i \times r_{i,i+1} + \dot{q}_{i+1} z_i & \text{对移动关节} \end{cases}$$

$$\dot{v}_{i+1} = \begin{cases} \dot{v}_i + \dot{\omega}_{i+1} \times r_{i,i+1} + \omega_{i+1} \times (\omega_{i+1} \times r_{i,i+1}) & \text{对旋转关节} \\ \dot{v}_i + \dot{q}_{i+1} z_i + \dot{\omega}_i \times r_{i,i+1} + 2\omega_i \times \dot{q}_{i+1} z_i + \omega_i \times (\omega_i \times r_{i,i+1}) & \text{对移动关节} \end{cases}$$

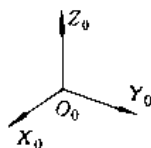
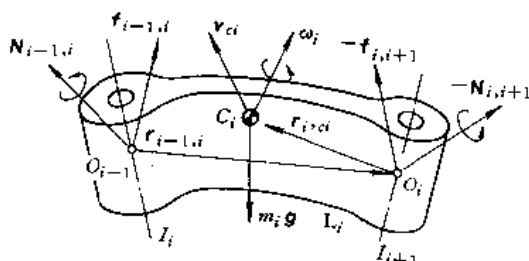


图 9-2-4 杆件 L_i 受力图

4. 用迭代方程求解动力学逆问题

(1) 计算牛顿-欧拉方程所需的所有运动量。用上述速度和加速度迭代公式, 从机座开始向手部计算, 根据已知的 q_1, \dot{q}_1 和 \ddot{q}_1 , 算出杆件 1 的 $v_{c1}, \dot{v}_{c1}, \omega_1$ 和 $\dot{\omega}_1$, 再根据已知的 q_2, \dot{q}_2 和 \ddot{q}_2 , 利用求出的 $v_{c1}, \dot{v}_{c1}, \omega_1$ 和 $\dot{\omega}_1$, 算出杆件 2 的 $v_{c2}, \dot{v}_{c2}, \omega_2$ 和 $\dot{\omega}_2$, 如此迭代直到求出手部的运动量。

(2) 从手部开始, 将算出的量代入牛顿-欧拉迭代方程, 可逐一算出所有的 $f_{i-1,i}$ 和 $N_{i-1,i}$, 将它们代入关节力矩计算式, 即可求出关节力矩 τ_i 。

4 工业机器人的工作空间及与结构尺寸的相关性

4.1 工作空间

工业机器人工作空间定义见本篇第 1 章 3.1 节。描述工作空间的手腕参考点可以选在手部中心、手腕中心或手指指尖, 参考点不同, 工作空间的大小、形状也不同。图 9-2-5 表示了几种不同型式的工作空间。工作空间是操作机的一个重要性能指标, 是操作机机构设计要研究的基本问题之一。当给定操作机结构尺寸时, 要研究如何确定其工作空间, 而给定工作空间时, 则要研究操作机应具有什么结构。



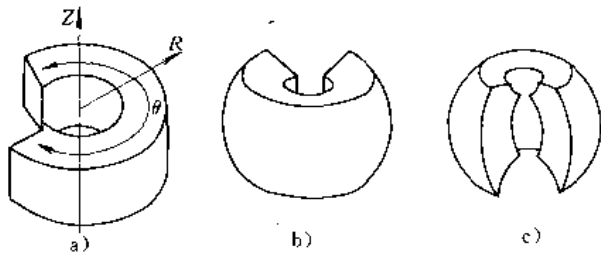


图 9-2-5 工作空间示意图

a) 圆柱坐标操作机 b) 球坐标操作机
c) 关节型操作机

4.2 确定工作空间的几何法

采用改变某个关节变量而固定其他关节变量的方法,用几何作图可画出工作空间的部分边界,然后改变其他关节变量,又可得到部分边界。重复此方法,可得到完整的工作空间边界。

对于具有一个垂直关节、两个水平关节的操作机,如图 9-2-6 所示,改变 θ_2 可获得工作空间在子午截面中的前后边界,改变 θ_3 可获得上下边界,改变 θ_1 (θ_1 为垂直关节的旋转角)可获得整个工作空间。

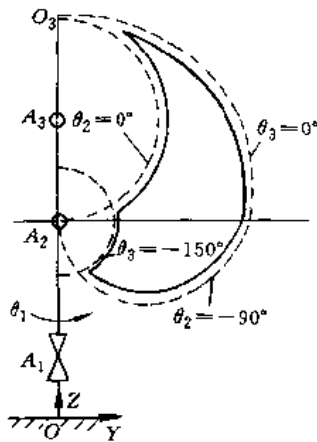


图 9-2-6 工作空间边界形成图

4.3 包容正方体

是设置于工作空间内应用得最多的一部分空间中的正方体。其边平行于机座坐标系而体积为最大。该正方体的大小直接反映了工作空间中可用部分的大小,对一定的操作机,其包容正方体是唯一的。

4.4 工作空间与操作机结构尺寸的相关性

工作空间的形状取决于操作机的结构型式,直角坐标型操作机的工作空间为长方体;圆柱坐标型操作

机的工作空间为中空圆柱体;球坐标型操作机的工作空间为球体的一部分;关节型操作机的工作空间比较复杂,一般为多个空间曲面拼合的回转体的一部分。

直角坐标型操作机工作空间的大小取决于沿 x 、 y 、 z 三个方向操作机行程的大小。圆柱坐标型操作机工作空间的大小取决于立柱的尺寸和水平臂沿立柱上下行程,还取决于水平臂尺寸及水平伸缩行程。球坐标型操作机工作空间的大小取决于工作臂的尺寸、工作臂绕垂直轴转动的角度及绕水平轴俯仰的角度。关节型操作机工作空间的大小取决于大小臂的尺寸、大小臂关节转角的角度以及大臂绕垂直轴转动的角度。

5 操作机尺度规划中的优化设计及关键尺寸的选定

尺度规划有两类问题:其一为给定一组工作点,优化结构参数,使工作空间能包络所有工作点,且体积最小;其二为给定一组工作点及操作机总长度,优化设计使工作空间能包络所有工作点,且体积最大。

5.1 位置结构的优化设计

三自由度以上操作机的位置主要由从机座出发的前三个自由度决定,故尺度规划主要针对前三杆进行,称前三杆为位置结构。以前三个关节均为旋转关节的 RRR 结构为例。

5.1.1 要求使工作空间最小的优化设计

典型的 RRR 位置结构如图 9-2-7 所示。

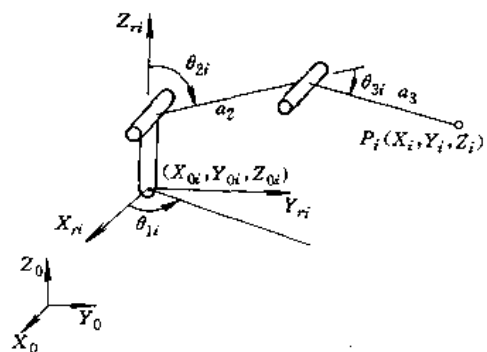


图 9-2-7 位置结构优化

(1) 设参考坐标系 o_r, x_r, y_r, z_r 的原点为 (x_0, y_0, z_0) , 给定的工作点 P_i 在固定系中的坐标为 (x_i, y_i, z_i) , 则工作点在参考系内的坐标为



$$\begin{cases} x_n = x_i - x_{0i} \\ y_n = y_i - y_{0i} \\ z_n = z_i - z_{0i} \end{cases}$$

(2) 设操作机的长度为

$$L = \max_{1 \leq i \leq n} \{l_i\}$$

且设 $a_2 = \frac{L}{k+1}$ $a_3 = ka_2$

式中 a_2 、 a_3 ——第2、3杆长度；

k ——两臂不等长系数，一般 $k \geq 1$ 。

(3) 将以上数值代入下列式中求出 $\theta_{1i} \sim \theta_{3i}$ ：

$$\theta_{1i} = \arctan(y_n/x_n)$$

$$\theta_{2i} = \arccos(z_n/l_i) - \arccos[(l_i^2 + a_2^2 - a_3^2)/(2a_2l_i)]$$

$$\theta_{3i} = \arccos[(l_i^2 - a_2^2 - a_3^2)/(2a_2a_3)]$$

(4) 将 $\theta_{1i} \sim \theta_{3i}$ 、 a_2 及 a_3 代入下列式中：

$$V = \Delta\theta_1 A \bar{x}$$

$$A = 2a_2a_3\Delta\theta_2\sin\bar{\theta}_3\sin\left(\frac{\Delta\theta_3}{2}\right)$$

$$A \bar{x} = a_2a_3^2\Delta\theta_3\sin\left(\frac{\Delta\theta_2}{2}\right)\cos\bar{\theta}_2 + 4a_2^2a_3\sin\left(\frac{\Delta\theta_2}{2}\right)\sin\left(\frac{\Delta\theta_3}{2}\right)\sin\bar{\theta}_2\sin\bar{\theta}_3 - a_2a_3^2\sin\left(\frac{\Delta\theta_2}{2}\right)\sin\Delta\theta_3\cos(\bar{\theta}_2 + 2\bar{\theta}_3)$$

$$\Delta\theta_i = \theta_{i\max} - \theta_{i\min}$$

$$\bar{\theta}_i = \frac{1}{2}(\theta_{i\min} + \theta_{i\max}) \quad i = 2, 3$$

式中 V ——工作空间体积；

A ——工作空间在子午截面内的面积；

\bar{x} ——工作空间截面形心的横坐标。

(5) 以 V 为优化目标函数求极小值，以 x_{0i} 、 y_{0i} 、 z_{0i} 及 a_2 、 a_3 为设计变量，优化后求得所需的位置结构。

5.1.2 要求使工作空间最大的优化设计

(1) 同 5.1.1 步骤 (1)。

(2) 取 a_2 、 a_3 值同上，但保证约束条件

$$\max_{1 \leq i \leq n} \{l_i\} \leq L$$

恒成立，若不成立，重新选择 x_{0i} 、 y_{0i} 、 z_{0i} 。

(3) 同 5.1.1 步骤 (3)。

(4) 计算 V 值。

(5) 以 V 为目标函数，优化求其最大值。

5.2 尺度规划时关键尺寸的选定

对关节型操作机来说，当给定大小臂总长度时，要使工作空间最大，一般应使 $k=1$ ，即 $a_2=a_3$ ，大小臂

等长最好。

6 操作机整机设计原则和设计方法

6.1 操作机整机设计原则

1. **最小运动惯量原则** 由于操作机运动部件多，运动状态经常改变，必然产生冲击和振动，采用最小运动惯量原则，可增加操作机运动平稳性，提高操作机动力学特性。为此在设计时注意在满足强度和刚度的前提下，尽量减小运动部件的质量，并注意运动部件对转轴的质心配置。

2. **尺度规划优化原则** 当设计要求满足一定工作空间要求时，通过尺度优化以选定最小的臂杆尺寸，这将有利于操作机刚度的提高，使运动惯量进一步降低。

3. **高强度材料选用原则** 由于操作机从手腕、小臂、大臂到机座是依次作为负载起作用的，选用高强度材料以减轻零部件的质量是十分必要的。

4. **刚度设计的原则** 操作机设计中，刚度是比强度更重要的问题，要使刚度最大，必须恰当地选择杆件剖面形状和尺寸，提高支承刚度和接触刚度，合理地安排作用在臂杆上的力和力矩，尽量减少杆件的弯曲变形。

5. **可靠性原则** 机器人操作机因机构复杂，环节较多，可靠性问题显得尤为重要。一般来说，元器件的可靠性应高于部件的可靠性，而部件的可靠性应高于整机的可靠性。可以通过概率设计方法设计出可靠度满足要求的零件或结构，也可以通过系统可靠性综合方法评定操作机系统的可靠性。

6. **工艺性原则** 机器人操作机是一种高精度、高集成度的自动机械系统，良好的加工和装配工艺性是设计时要体现的重要原则之一。仅有合理的结构设计而无良好的工艺性，必然导致操作机性能的降低和成本的提高。

6.2 操作机的设计方法和步骤

6.2.1 确定设计要求

1. **负载** 根据用户作业不同要求，操作机负载可由数千克到数百千克。

2. **速度** 一般给出速度上限要求。

3. **示教方式** 确定是示教盒示教、人工手把手示教还是计算机示教。

4. **工作空间** 根据作业要求确定工作空间的大



小和形状。

5. 附加运动 确定操作机是否需要整体移动或工具是否需要直线运动、螺旋运动等。

6. 环境要求 是否需要防爆、防电磁干扰、防射线等。

6.2.2 选定驱动型式

根据不同的作业,可选定不同的操作机驱动方式。气压驱动适用于快速运动场合,产生的冲击力大,所需费用低,但负载能力较小,精度较难控制。液压驱动负载能力较大,运动平稳,定位精度高,能防火防爆,但费用较高。电动驱动控制灵活方便,负载能力适中,定位精度较高,目前直流伺服驱动已很普遍,交流伺服驱动正在发展之中。

6.2.3 确定坐标型式和运动轴数

根据作业的内容和复杂性的不同,确定采用直角坐标、圆柱坐标、球坐标或关节坐标。目前关节坐标型用得较多。在满足作业的情况下,应使运动轴数最少,有利于简化结构,提高控制精度,降低制造成本。

6.2.4 尺度规划

根据对工作空间的要求,对操作机臂杆长度尺寸和臂杆转角进行优化,使其具有最小尺寸。

6.2.5 整机及部件配置设计

(1) 腰关节的支承结构和各轴电缆的通道尺寸决定了操作机机座的容积和尺寸。

(2) 肩关节对腰关节的偏置,可以增大工作空间。

(3) 肘关节的传动可优先考虑大臂内的双连杆传动型式,其传动刚度大,结构紧凑,有发展前途。

(4) 腕关节传动可采用链式传动、轴传动等。

(5) 平衡机构在尺寸允许的情况下,最好装入操作机内部。

(6) 末端执行器接口方式可根据作业和负载不同选定。

6.2.6 传动系统设计

(1) 减速器可选用传动刚度大、质量小、尺寸小的减速器,如行星减速器和谐波减速器等。

(2) 按需要设置必须的复合关节,可采用齿形带、链、齿轮、轴等传递力矩和运动。

6.2.7 臂的强度和刚度校核

在初步设计后,考虑负载、末端执行器重量及各杆惯性力,对大小臂进行强度和动刚度校核。为简化计算,可将大小臂视为等截面梁,增加一定的裕度即可。

6.2.8 关节运动的耦合和解耦

对大多数非直接驱动的操作机而言,前面关节的运动会引起后面关节的附加运动,产生运动耦合效应。此耦合附加运动的大小和方向随传动型式和传动比的不同而不同。在运动学计算时,可对其反向补偿达到解耦的目的。

6.2.9 工艺性设计

鉴于操作机结构不同于一般机械装置,对其关键件要审慎处理好加工工艺,使操作机不仅易于装配,而且易于调整,以有利于消除某些可能消除的系统误差,从而提高机器人的再现精度和运动平稳性。

7 操作机腰部、臂部和腕部结构

7.1 腰部结构

操作机腰部包括机座和腰关节,机座承受机器人全部重量,要有足够的强度和刚度,一般用铸铁或铸钢制造,机座要有一定的尺寸以保证操作机的稳定,并满足驱动装置及电缆的安装。腰关节是负载最大的运动

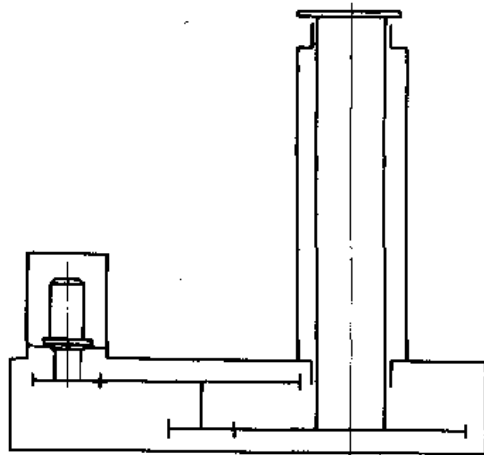


图 9-2-8 PUMA 机器人腰部结构

轴,对末端执行器运动精度影响最大,故设计精度要求高。腰关节的轴可采用普通轴承的支承结构,如图 9-2-8 所示的 PUMA 机器人腰部结构。其优点是结构



简单,安装调整方便,但腰部高度较高。为了减少腰部高度,可采用单列十字交叉滚子轴承。

7.2 臂部结构

臂部的作用是连结腰部和腕部,实现操作机在空间里的运动。手臂的尺寸要满足工作空间的要求,各关节轴线应尽量平行,垂直的关节轴线尽量交汇于一点。由于手臂是腰部的负载且要灵活运动,故应尽可能选用高强度轻质材料,减小其质量。手臂结构可分为伸缩型结构,旋转伸缩型结构和屈伸型结构。图9-2-9示出了PUMA560机器人小臂传动结构。

7.3 腕部结构

腕部用来连结操作机手臂和末端执行器,并决定末端执行器在空间里的姿态。腕部一般应有2~3个自由度,结构要紧凑,质量要小,各运动轴采用分离传动。如图9-2-10a所示P-100机器人腕部结构(其中轴1~轴3为手臂轴未画出)是一种典型的3轴分立型式,图9-2-10b为JRS-80机器人的手腕原理图,本图是类似P-100典型手腕的实际结构的一种型式。

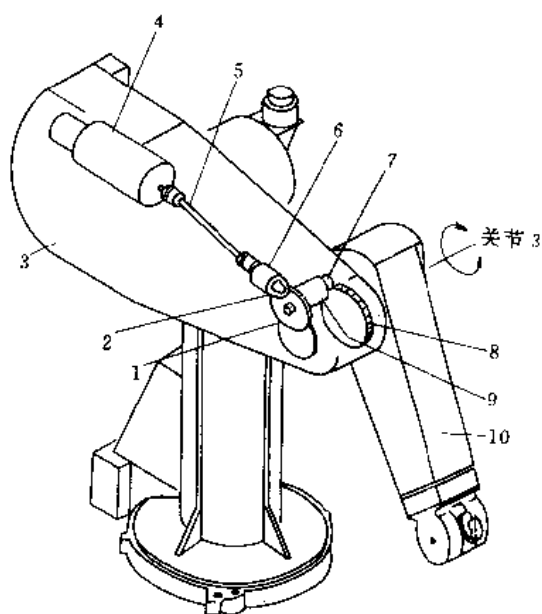


图9-2-9 PUMA560机器人小臂传动图

- 1—大锥齿轮 2—小锥齿轮 3—大臂 4—小臂电机
- 5—驱动轴 6—偏心套 7—小齿轮 8—大齿轮
- 9—偏心套 10—小臂

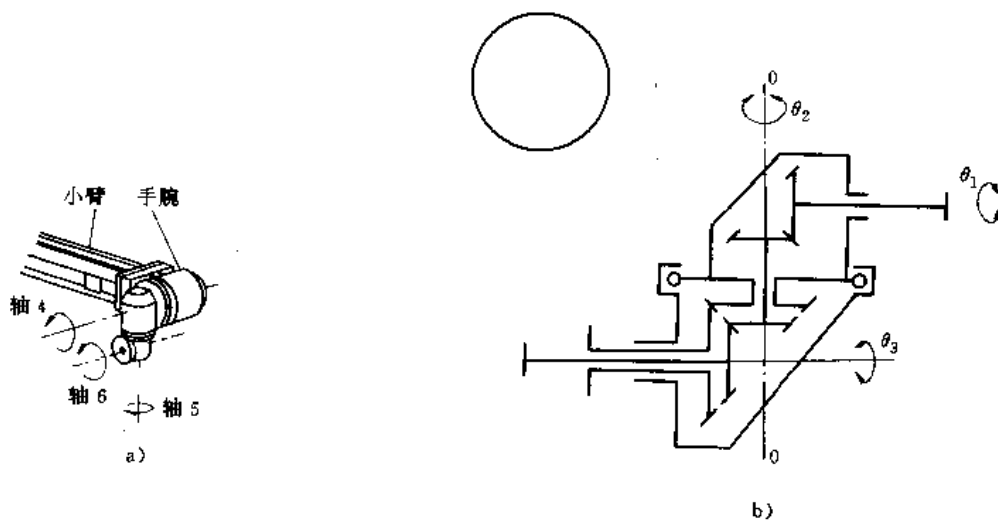


图9-2-10 机器人腕部结构

- a) P-100手腕 b) JRS-80手腕

8 刚度、强度计算及误差分配

8.1 操作机刚度计算

操作机刚度指操作机在外力的作用下抵抗变形的能力,既包括臂部的刚度,也包括关节刚度和传动刚度。

就手臂而言,由于结构上多采用悬臂梁型,故刚度很差。为此,应尽可能选用封闭型空心截面等抗弯抗扭刚度较高的截面形状来设计手臂,以提高支承刚度,减小支承间的距离,合理布置作用力的位置和方向,这样可减小变形。

对于有两处支承的臂杆可以简化成图9-2-11所示的双支点悬臂梁,若设外力合力 P 作用在 C 点处,



臂杆将产生弯曲变形, 则臂端 D 处的最大挠度 y_{max} 和 C 处截面的转角 θ_c 分别为

$$y_{max} = \frac{Pb^2}{3EJ} (a+b) - (l-b) \tan\theta_c$$

$$\theta_c = \frac{Pb}{6EJ} (2a+3b)$$

式中 E ——臂杆材料的弹性模量;
 J ——臂杆截面惯性矩。

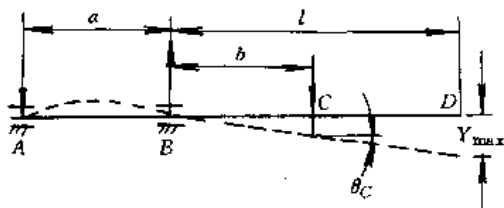


图 9-2-11 手臂端点变形图

8.2 操作机强度计算

操作机的强度计算可按材料力学和机械设计中的公式进行, 根据负载情况, 一般按许用弯曲应力方法进行计算。对于负载很小的机器人, 强度计算不是主要问题。

8.3 操作机连杆参数的误差分配

精度是操作机的主要性能指标之一。由加工和装配等引起的误差对操作机的精度有较大的影响。通过选择合理的连杆参数公差和关节变量公差, 可以使所产生的手部绝对位姿误差和重复位姿误差满足相应的

精度要求。一般采用优化方法, 如以公差成本为目标函数求最小, 确定最优连杆参数公差及关节变量公差。

优化的结果表明, 对设计精度期望值(绝对位置精度和重复精度)不同及满足这一精度要求的概率水平要求不同, 连杆参数和关节变量公差的最优值也不同, 可以根据情况选择。此外, 分析表明批量生产的连杆参数公差值可比单件生产时放宽一些, 连杆长度相等的杆件, 其公差值不一定一样。

9 平衡机构的计算

为克服关节型操作机大小臂自重和负载引起的不平衡状态, 以减小驱动功率, 使人工示教更灵活轻便, 需设置平衡机构。

9.1 配重平衡机构

此种机构原理如图 9-2-12a 所示。设手臂质量 m_1 与配重质量 m_2 及关节中心在同一直线上, 则不平衡力矩为

$$M_1 = m_1 g l \cos\gamma$$

配重产生的力矩为

$$M_2 = m_2 g l' \cos\gamma$$

静力平衡条件为

$$M_1 = M_2$$

即

$$m_1 l = m_2 l'$$

这种平衡机构简单, 平衡效果好, 易于调整, 工作可靠, 但增加了手臂的惯量和关节的负荷, 适用于不平衡力矩较小的情况。

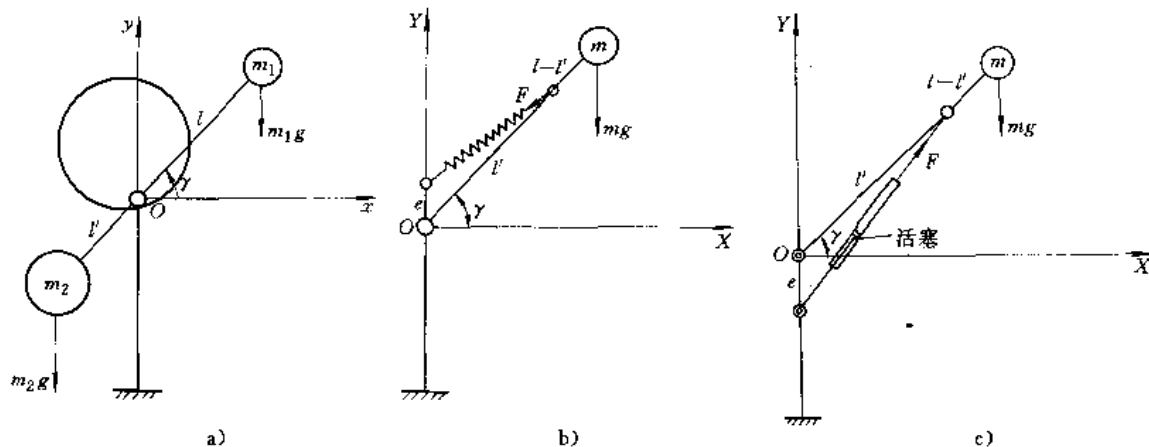


图 9-2-12 操作机平衡机构原理图

a) 配重平衡机构 b) 弹簧平衡机构 c) 汽缸平衡机构



9.2 弹簧平衡机构

其原理如图 9-2-12b 所示,臂的不平衡力矩为

$$M_1 = M_{11} - M_{12} = mgl\cos\gamma - Ia$$

式中 M_{11} ——静不平衡力矩;

M_{12} ——惯性力矩;

I ——手臂对关节轴的转动惯量;

a ——臂运动平均加速度。

弹簧产生的平衡力矩为

$$M_2 = kl'e \left(1 - \frac{R}{\sqrt{e^2 + l'^2 - 2el'\sin\gamma}} \right) \cos\gamma$$

式中 k ——弹簧刚度;

l' ——弹簧在手臂上安装点到关节轴的距离;

e ——弹簧另一端安装点到关节轴的距离;

R ——弹簧自由长度。

静力平衡条件为

$$M_2 = M_{11}$$

动平衡条件为

$$M_2 = M_{11} + M_{12}$$

这种平衡机构结构简单,平衡效果也较好,工作可靠,适用于中小负载,但平衡范围相对较小。

9.3 汽缸平衡机构

这种平衡机构原理如图 9-2-12c 所示。手臂不平衡力矩为

$$M_1 = M_{11} + M_{12} = mgl\cos\gamma + Ia$$

汽缸产生的平衡力矩为

$$M_2 = Fl'e \frac{1}{\sqrt{(l'\cos\gamma)^2 + (l'\sin\gamma - e)^2}} \cos\gamma$$

式中 F ——汽缸活塞推力;

其余参数同上。

静力平衡条件为

$$M_2 = M_{11}$$

动平衡条件为

$$M_2 = M_{11} + M_{12}$$

汽缸平衡机构多用在重载搬运和点焊机器人操作机上,液压的体积小,平衡力大;气动的具有很好的阻尼作用,但体积较大。

10 终端刚度计算

设第 i 个关节的刚度为 K_i , 关节轴的挠度为 Δq_i ,

关节力矩为 τ_i , 则有

$$\tau_i = K_i \Delta q_i$$

写成矩阵型式, 有

$$\tau = K \Delta q$$

其中

$$K = \begin{bmatrix} K_1 & & & \\ & K_2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & K_n \end{bmatrix}$$

故当 $K_i \neq 0$ 时, K^{-1} 存在, 有

$$\Delta q = K^{-1} \tau$$

由 J 阵定义 (参见本章 3.5 节), 有

$$\Delta p = J \Delta q$$

这里 Δp 表示手臂端点 (即机械接口处) 挠度。从上述两式得

$$\Delta p = JK^{-1} \tau$$

又由端点力 F 与关节力矩 τ 的关系, 有矩阵方程

$$\tau = J^T F$$

将此式代入 $\Delta p = JK^{-1} \tau$ 式中, 于是有

$$\Delta p = JK^{-1} J^T F = CF$$

式中, C 称为手臂端点柔度矩阵。若 J 为满秩方阵, C^{-1} 存在, 则有

$$F = C^{-1} \Delta p$$

这里 C^{-1} 即为操作机手臂端点刚度矩阵。

11 关节驱动力矩计算

11.1 对移动关节驱动力的计算

关节驱动力为

$$P_o = F_m + F_z \pm W$$

式中 F_m ——各支承处的摩擦力;

F_z ——起动时的惯性力;

第三项为运动部件总重力, 当关节向上移动时取 $+W$, 反之取 $-W$ 。

惯性力可估算如下:

$$F_z = \frac{Wv}{gt}$$

式中 v ——臂部运动速度;

t ——起动所需时间, 一般为 $0.01 \sim 0.5s$;

g ——重力加速度。

11.2 对转动关节驱动力矩的计算

关节驱动力矩为



$$M_0 = 1.3 (M_m + M_z)$$

式中 M_m 为各支承处的摩擦力矩, M_z 为起动时的惯性力矩, 系数 1.3 是考虑到起动时非匀加速等因素加上的。

惯性力矩可按下式计算:

$$M_x = I \frac{\omega}{t}$$

式中 I ——臂部对转轴的转动惯量;
 ω ——手臂转动角速度;
 t ——起动所需时间。

第3章 工业机器人驱动系统

1 工业机器人驱动系统特点

工业机器人驱动系统,按动力源分为液压驱动、气

动驱动和电动驱动三种基本驱动类型。根据需要也可采用由这三种基本驱动类型组合成的复合式驱动系统。这三种基本驱动系统的主要特点见表 9-3-1。

表 9-3-1 工业机器人三种基本驱动系统的主要特点

| 内 容 | 驱 动 方 式 | | |
|-------------|--------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| | 液压驱动 | 气动驱动 | 电动驱动 |
| 输出功率 | 很大, 压力范围为 50~1400N/cm ² , 液体的不可压缩性 | 大, 压力范围为 40~60N/cm ² , 最大可达 100N/cm ² | 较大 |
| 控制性能 | 控制精度较高, 输出功率大。可无级调速, 反应灵敏, 可实现连续轨迹控制 | 气体压缩性大, 精度低, 阻尼效果差, 低速不易控制。难以实现伺服控制 | 控制精度高, 功率较大。能精确定位, 反应灵敏。可实现高速、高精度的连续轨迹控制, 伺服特性好, 控制系统复杂 |
| 响应速度 | 很高 | 较高 | 很高 |
| 结构性能及体积 | 结构适当, 执行机构可标准化、模块化, 易实现直接驱动。功率/质量比大, 体积小, 结构紧凑, 密封问题较大 | 结构适当, 执行机构可标准化、模块化, 易实现直接驱动。功率/质量比较大, 体积小, 结构紧凑, 密封问题较小 | 伺服电机易于标准化。结构性能好, 噪声低。电机一般需配置减速装置。除 DD 电机外, 难以进行直接驱动, 结构紧凑, 无密封问题 |
| 安全性 | 防爆性能较好, 用液压油作传动介质, 在一定条件下有火灾危险 | 防爆性能好, 高于 1000kPa (10 个大气压) 时应注意设备的抗压性 | 设备自身无爆炸和火灾危险。直流有刷电机换向时有火花, 对环境的防爆性能较差 |
| 对环境的影响 | 液压系统易漏油, 对环境有污染 | 排气时有噪声 | 无 |
| 在工业机器人中应用范围 | 适用于重载, 低速驱动, 电液伺服系统适用于喷涂机器人、重载点焊机器人和搬运机器人 | 适用于中小负载, 快速驱动, 精度要求较低的有限点位程序控制机器人。如冲压机器人、机器人本体的气动平衡及装配机器人气动夹具 | 适用于中小负载, 要求具有较高的位置控制精度和轨迹控制精度, 速度较高的机器人。如 AC 伺服喷涂机器人、点焊机器人、弧焊机器人、装配机器人等 |
| 成本 | 液压元件成本较高 | 成本低 | 成本高 |
| 维修及使用 | 方便, 但油液对环境温度有一定要求 | 方便 | 较复杂 |

2 工业机器人驱动系统设计的选用原则

工业机器人驱动系统的选用, 应根据工业机器人的性能要求、控制功能、运行的功耗、应用环境及作业要求、性能价格比以及其他因素综合加以考虑。在充分考虑各种驱动系统特点的基础上, 在保证工业机器人性能规范、

可行性和可靠性的前提下, 做出决定。一般情况下, 各种工业机器人驱动系统的设计选用原则大致如下:

1. 控制方式 物料搬运(包括上、下料)、冲压用的有限点位控制的程序控制机器人, 低速重负载的可选用液压驱动系统; 中等负载的可选用电动驱动系统; 轻负载、高速的可选用气动驱动系统。冲压机器人多选



用气动驱动系统。

用于点焊、弧焊及喷涂作业的工业机器人，要求具有任意点位和连续轨迹控制功能，需采用伺服驱动系统，例如：电液伺服和电动伺服驱动系统。在要求控制精度较高如点焊、弧焊等工业机器人时，多采用电动伺服驱动系统。重负载的搬运机器人及须防爆的喷涂机器人可采用电液伺服控制。

2. 作业环境要求 从事喷涂作业的工业机器人，由于工作环境需要防爆，考虑到其防爆性能，多采用电液伺服驱动系统和具有本征防爆的交流电动伺服驱动系统。水下机器人、核工业专用机器人、空间机器人以及在腐蚀性、易燃易爆气体、放射性物质环境中工作的移动机器人，一般采用交流伺服驱动。如要求在洁净环境中使用，则多要求采用直接驱动（Direct Drive——DD）电动机驱动系统。

3. 操作运行速度 对于装配机器人，由于其具有很高的点位重复精度和较高的运行速度，通常在运行速度相对较低（ $\leq 4.5\text{m/s}$ ）的情况下，可采用AC、DC或步进电动机伺服驱动系统。在速度、精度要求均很高的条件下，多采用直接驱动（DD）电动机驱动系统。

3 电液伺服驱动系统

电液伺服驱动控制系统是由电气信号处理单元与液压功率输出单元组成的闭环控制系统。它综合了电气和液压控制两方面的优点。具有控制精度高、响应速度快、信号处理灵活、输出功率大、结构紧凑、功率/质量比大等特点，在机器人中得到了较为广泛的应用。采用电液伺服系统的工业机器人，具有点位控制和连

续轨迹控制功能，并具有防爆能力。

电液伺服驱动的工业机器人所采用的电液转换和功率放大元件有电液伺服阀、电液比例阀等。由以上伺服阀与其他液动力机构可组成电液伺服马达、电液伺服液压缸、电液步进马达、电液步进液压缸、液压回转伺服执行器（RSA-Rotary Servo Actuator）等各种电液伺服动力机构。根据工业机器人的结构设计要求，电液伺服马达和电液伺服液压缸可以是分离式的，也可以组合成一体。

在工业机器人的电液伺服驱动系统中，常用的电液伺服动力机构是电液伺服液压缸和电液伺服摆动马达。回转执行器（RSA）是一种由伺服电动机、步进电动机或比例电磁铁驱动的、安装在摆动马达或连续回转马达转子内的一个回转滑阀，通过机械反馈，驱动转子运动的一种电液伺服机构。它可以安装在机器人手臂和手腕的关节上，实现直接驱动。它既是关节机构，又是动力元件。

对采用电液伺服驱动系统的工业机器人来说，人们所关心的是如何按给定的运动规律实现机器人手臂运动的位置和姿态以及运动速度的控制。机器人常用的阀控电液伺服驱动系统，其单轴的电液伺服系统框图如图9-3-1所示。

因伺服阀的频率响应高达 $50\text{Hz}\sim 200\text{Hz}$ ，而机器人其液压固有频率较低，一般为几赫兹至几十赫兹。因此，在设计机器人电液伺服驱动系统时，伺服阀的传递函数不必按二阶环节计算，可按惯性环节或比例环节计算。伺服系统中具有速度及位置检测传感器，以形成闭环回路。反馈信号一般为模拟量，其检测元件为旋转

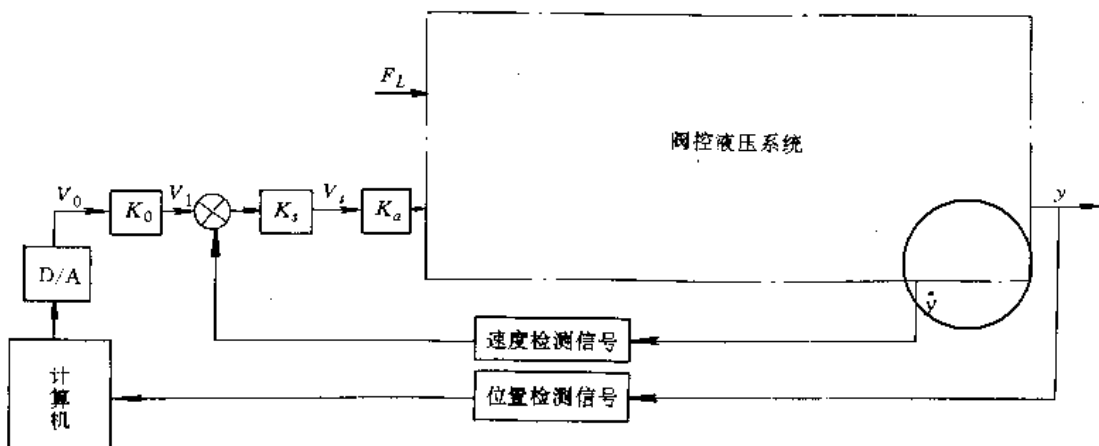


图 9-3-1 机器人单轴电液伺服系统原理框图

F_L —静负载力 K_0 —伺服放大器的输出电压到伺服阀力矩马达输入电流之间的导纳 K_s —伺服放大器的增益 K_a —输出放大器增益 点划线框内所列阀控液压系统



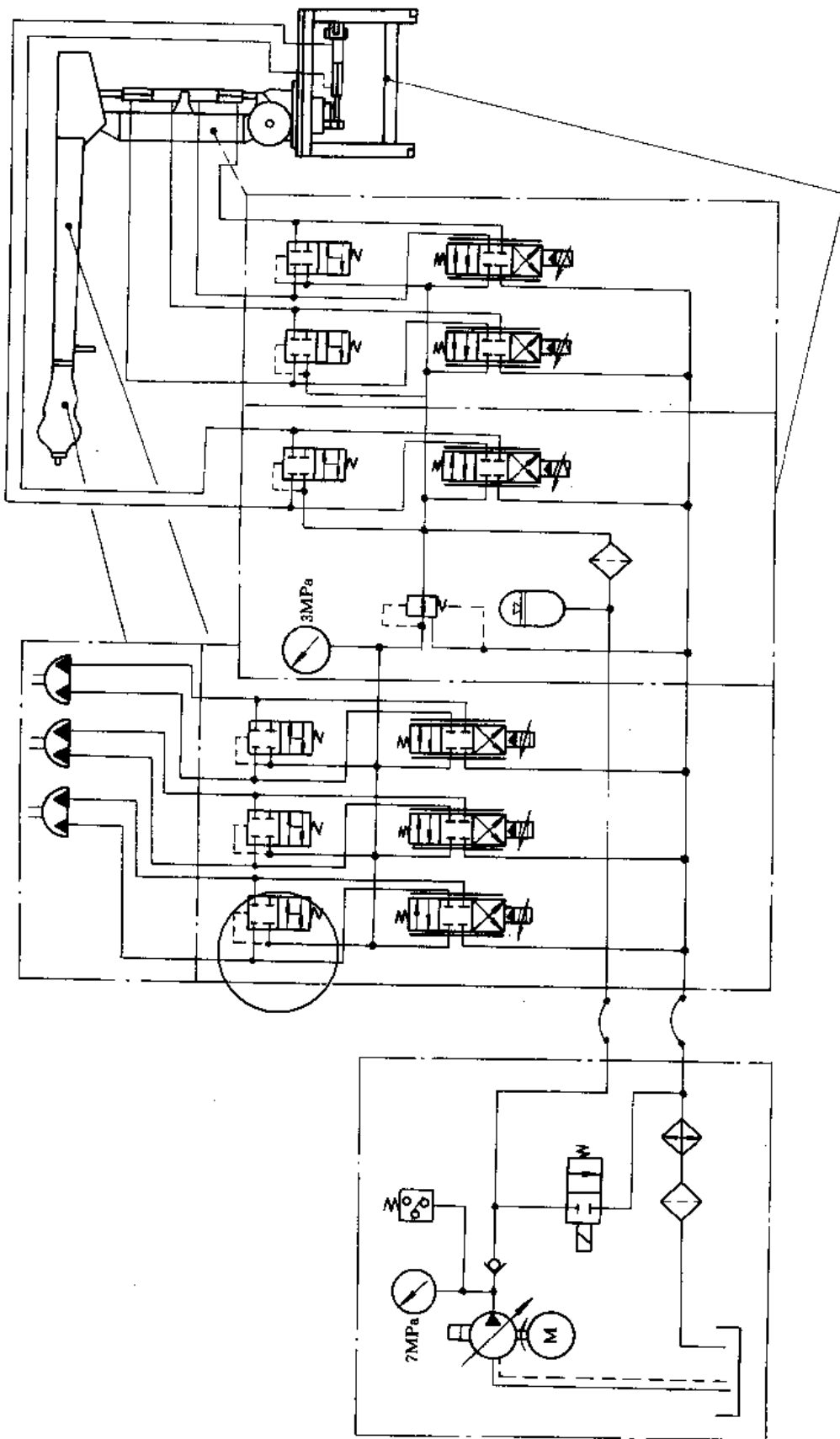


图 9-3-2 喷涂机器人电液伺服原理图



变压器或光电码盘经 f/v 变换所得的电压信号。位置传感器多采用光电码盘、旋转变压器或线性度较高的电位器（一般线性度为 $\pm 0.1\%$ ）。

图 9-3-2 为一种电液伺服喷涂机器人的电液伺服原理图。

在采用电液伺服驱动的工业机器人系统设计中，伺服阀的布置，应使伺服阀与其相联接的驱动器之间的管线距离最短，按照承载能力设计要求，使驱动器体积达到最小。通过上述两种方法来改变动态响应，尤其是阀与驱动器之间的联接件，应采用硬壁管而不用柔性软管，以增加系统工作压力，就可使用较小的驱动器。然而由于大多数工业机器人液压驱动器的负载小，且小型液压驱动器的损失较大，所以动力源压力以适中 $[889.5 \sim 1379 \text{kPa} (100 \sim 200 \text{psi})]$ 为宜，允许使用较大的驱动器。

采用电液伺服驱动的工业机器人在低负载、高关节速率的情况下，大量能量转换为热量，被液压油带

走，回油管以及油冷却器必须按一定的尺寸制造，以允许热量散发，不致使泵进油口处油温升高，以防止液压油分解，并损坏回路上的部件，特别是损坏液压伺服阀。

4 气动驱动系统

气动驱动系统多应用于两位式或有限点位控制的工业机器人（如冲压机器人）中，或作为装配机器人的气动夹具以及应用于点焊等较大通用机器人的气动平衡中，其组成结构框图如图 9-3-3 所示。

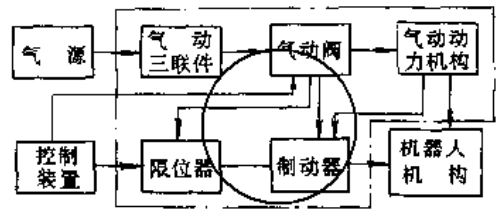


图 9-3-3 机器人气动驱动结构框图

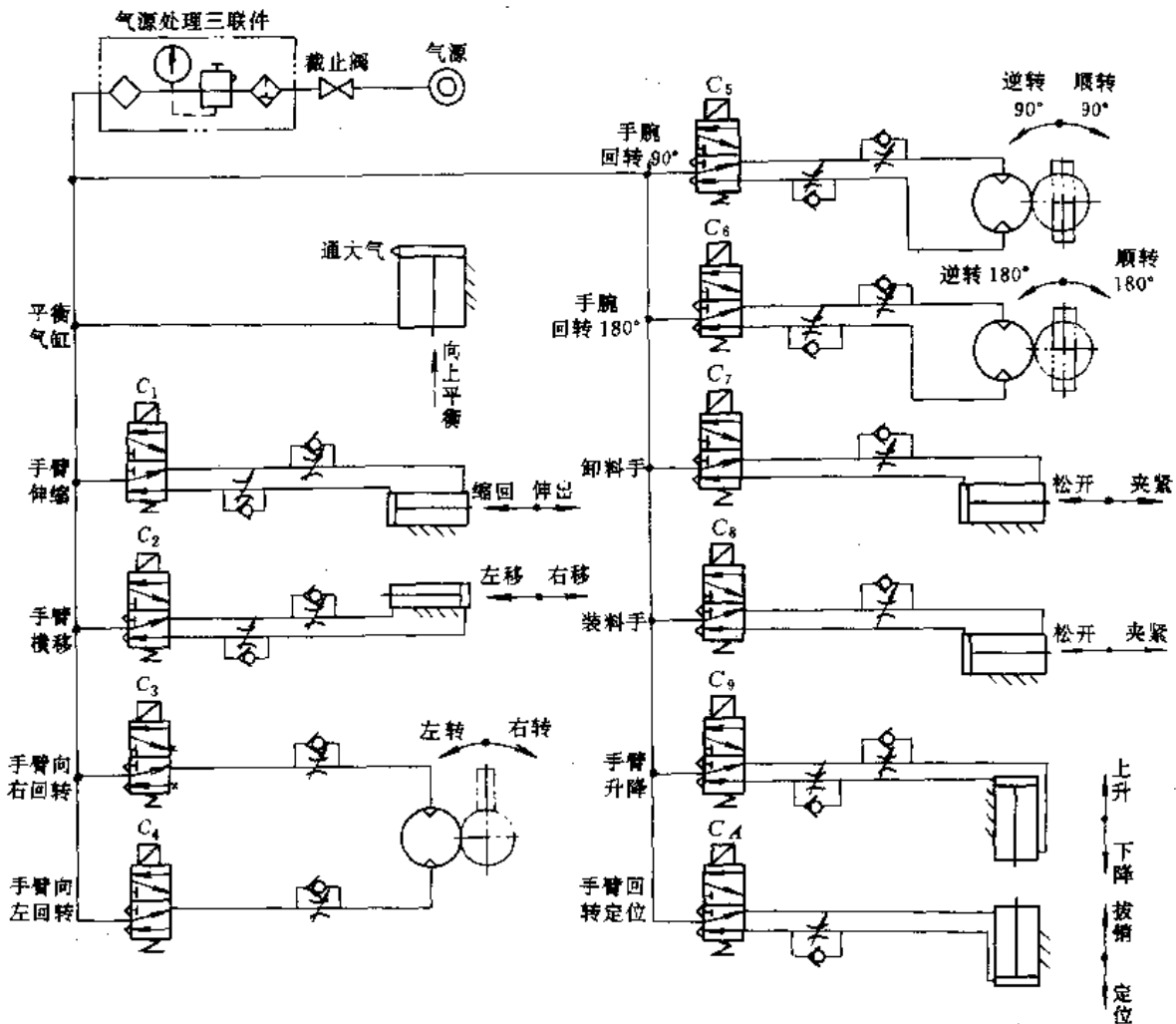


图 9-3-4 ZHS-R002 机器人气动系统简图

气动驱动系统



机器人气动驱动系统常用的气动元件包括：

1. 气源 包括空气压缩机、储气罐、气水分离器、调压器、过滤器等。
2. 气动三联件 由分水滤气器、调压器和油雾器组成。
3. 气动阀 包括电磁气阀、节流调速阀和减压阀

阀等。

4. 气动动力机构 多采用直线气缸和摆动气缸。ZHS-R002 机器人气动系统简图如图 9-3-4 所示。SMART 和 KUKA 机器人的气动平衡原理如图 9-3-5 所示。

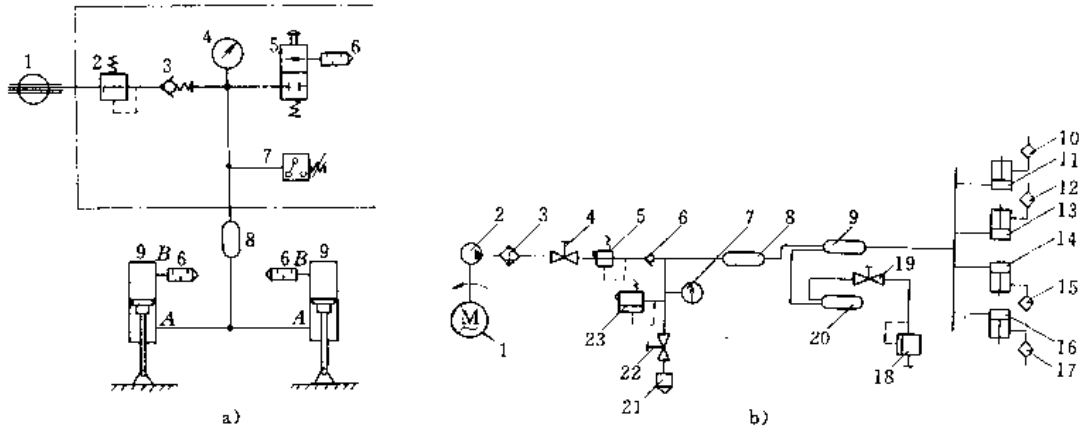


图 9-3-5 气动平衡原理图

a) SMART 机器人气动平衡原理图

- 1—压缩空气入口 2—压力开关 3—单向阀 4—压力表 5—手动排气阀 6—消声器
7—控制开关 8—储气罐 9—平衡气缸

b) KUKA 机器人平衡系统气压回路图

- 1—交流电动机 2—空气压缩机 3—压缩空气过滤器 4—压缩空气入口开关 5—压力调节阀 6—单向阀
7—接点压力计 8、9、20—压缩空气贮存罐 10、12、15、17—空气过滤器 11、13、14、16—气缸
18—外控溢流阀 19—压缩空气出口开关 21—消音器 22—压缩空气释气开关 23—安全阀

5 电动驱动系统

机器人电伺服驱动系统是利用各种电动机产生的力矩和力直接或间接地由机械传动机构去驱动机器人本体的执行机构，以获得机器人的各种运动。

适合于工业机器人的关节驱动电动机，应包括需要的最大功率/质量比、扭矩/惯量比、高起动力矩、低惯量和较宽广且平滑的调速范围。特别是象机器人末端执行器(手爪)应采用体积、质量尽可能小的电动机，尤其是要求快速响应时，伺服电动机必须具有较高的可靠性和稳定性，并具有大的短时过载能力。这是伺服电动机在工业机器人中应用的先决条件。

机器人对关节驱动电动机的主要要求是：

(1)快速性。电动机从获得指令信号到完成指令所要求的工作状态的时间短。响应指令信号的时间愈短，电伺服系统的灵敏性愈高，快速响应性能愈好，一般是以伺服电动机的机电常数的大小来说明伺服电动机快速响应的性能。

(2)起动力矩/惯量比大。在驱动负载的情况下，要求机器人的伺服电动机的起动力矩高，转动惯量小。起动力矩/惯量比是衡量伺服电动机动态特性的一个重要指标。

(3)控制特性的连续性和直线性。随着控制信号的变化，电动机的转速能连续变化。有时还需转速与控制信号成正比或近似成正比。

(4)调速范围宽。能使用于 1:1000~1:10000 的调速范围。

(5)体积小、质量小、轴向尺寸短。

(6)能经受得起苛刻的运行条件。可进行十分频繁的正反转和加减速运行，并能在短时间内承受过载。

(7)高可靠性。可在恶劣环境下使用。

目前，由于高起动力矩、大转矩、低惯量的交、直流伺服电动机在工业机器人中得到了广泛应用，一般负载在 100kgf (相当于 1000N) 以下的工业机器人大多采用电伺服驱动系统。所采用的关节驱动电机主要是 DC 伺服电动机，AC 伺服电动机和步进电动机。其



中：直流伺服电动机、交流伺服电动机、直接驱动电动机(DD)均采用位置闭环控制，一般应用于高精度、高速度的机器人驱动系统中。步进电动机驱动多适用于精度、速度要求不高的小型简易机器人开环系统中。交流伺服电动机由于采用电子换向、无换向火花，在易燃易爆环境(如喷涂)中得到了较为广泛的使用。机器人关节驱动电动机的功率范围一般为0.1~10kW。工业机器人驱动系统中所采用的电动机，可分为以下几种：

- (1) 直流伺服电动机。包括小惯量永磁直流伺服电动机、印刷绕组直流伺服电动机、大惯量永磁直流伺服电动机、空心杯电枢直流伺服电动机等。
- (2) 交流伺服电动机。包括同步型交流伺服电动机及反应式步进电动机等。
- (3) 步进电动机。包括永磁感应步进电动机。
- (4) 直接驱动电动机(DD)。包括变磁阻型直接驱动电动机及变磁阻混合型直接驱动电动机等。

其中，大惯量永磁直流伺服电动机一般仅用于大中型工业机器人腰部回转驱动。

速度传感器多采用测速发电机和旋转变压器；位置传感器多用光电码盘和旋转变压器。伺服电动机可与测速发电机、光电码盘(或旋转变压器)、制动器、减速机构相结合，以形成伺服电机驱动单元。

直接驱动DD电动机作为一种新型的伺服电动机，由于具有极高的精度和运行速度、无减速装置，已广泛地应用于要求高速、高精度的装配机器人中，特别适合于洁净度高达10级以上的环境中。

电动机的固有特性是扭矩/质量比较小，但它能以高速运动作补偿，一般需要通过减速机构以增加扭矩，来适应机器人关节驱动的需要。采用减速机构又带来了系统的动态响应和动力损耗，以及减速机构的顺应

性和间隙问题。通常，减速机构的顺应性降低了动态响应，间隙导致系统的不稳定，一般采用重力加载方式来消除正常运行过程中的间隙。在电气系统设计中，主要考虑系统的动态响应，扭矩/质量比值，应当在满足动态响应特性要求的前提下取最大值。机器人驱动系统要求传动系统间隙小、刚度大、输出扭矩高以及减速比大，常用的减速机构有：

- (1) 谐波减速机构；
- (2) 摆线针轮减速机构；
- (3) 齿轮减速机构；
- (4) 蜗轮减速机构；
- (5) 在紧凑、轻便、无间隙、低顺应性装置中，常采用高减速比的滚珠丝杠传动以及金属带/齿形带传动。

工业机器人电动机驱动原理框图如图9-3-6所示。

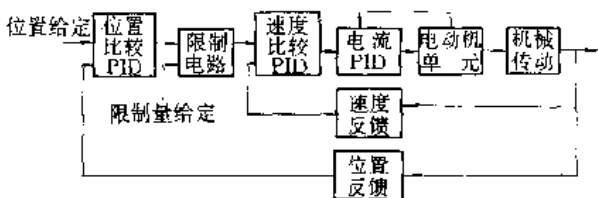


图 9-3-6 工业机器人电动机驱动原理框图

工业机器人电伺服系统的一般结构为三个闭环控制，即电枢电流闭环、速度闭环和位置闭环。为了满足三环伺服控制反馈信号，要求系统采用多种传感器。电流传感器一般采用取样电阻、霍尔集成电路传感器。在工业机器人电伺服系统中，速度闭环和电流闭环一般采用模拟控制系统，位置闭环则采用数字控制。

表9-3-2为工业机器人常用关节驱动电动机的特点及使用范围。

表 9-3-2 工业机器人常用关节驱动电动机的特点及使用范围

| 名称 | 主要特点及性能 | 结构特点 | 用途及使用范围 | 适用驱动器 |
|--------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|----------------------------|------------------------|
| 小惯量直流永磁伺服电动机 | 转子直径较小，因此电动机的惯量小，理论加速度大，快速反应性好。由于没有齿槽，低速性能好，故一般调速比可以做到1:10 ⁴ 范围，但由于转子较细，故低速输出力矩不够大，而且负载惯量的改变对整个系统产生很大的影响。又由于转子细长，不利散热，转向器也较易损坏 | 其转子多为细长形，这是因为直径小则转动惯量小，而要保证输出功率则要加长转子长度，为消除齿槽效应多将转子绕组直接粘在电枢表面 | 其驱动系统适用于对快速性要求严格而负载力矩不大的场合 | 直流PWM伺服驱动器 晶闸管变压驱动器 |



(续)

| 名称 | 主要特点及性能 | 结构特点 | 用途及使用范围 | 适用驱动器 |
|----------------------|---------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|
| 印刷绕组直流永磁伺服电动机(盘式电动机) | 其转动惯量小,快速响应性能好;转子无铁损,效率高;换向性能好;寿命长;负载变化时转速变化率小,输出力矩平稳 | 具有特殊的转子结构,转子由薄片形绕组叠装而成,各层绕组按一定连接方式接成闭环,整个转子无铁心,具有轴向平面气隙 | 可以频繁起制动、正反转工作,响应迅速。由于轴向尺寸小,能够紧密地联接到负载机构上,可以构成一个抗扭力的结构体系,适用于机器人、数控等机电一体化产品 | 直流 PWM 伺服驱动器 晶闸管变压驱动器 |
| 大惯量直流永磁伺服电动机(力矩电动机) | 输出力矩大,转矩波动小,机械特性硬度大,可以长期工作在堵转条件下 | 与小惯量电机相比,其转子明显加粗 | 适用于要求驱动力矩较大的场合,由于力矩较大可以不用齿轮变速直接驱动负载,消除了齿轮变速系统的齿轮间隙问题 在制造上不需采用特殊的工艺,故比较经济,对负载惯性匹配问题不敏感 | |
| 反应式步进电动机 | 可以将电脉冲信号直接变换为转角,其转角的大小与输入的脉冲数成正比,而其旋转方向则取决于输入脉冲的顺序,步进电动机伺服系统多用于开环控制系统,其输出力矩也比较大 | 其转子无绕组,由永磁体构成转子磁极,其定子绕组按其分布形式有集中绕组和分布绕组两种 | 主要应用于数字系统中作为执行元件,如各类数控机床、工业机器人、自动传送机械等 | 直流 PWM 伺服驱动器 晶闸管变压驱动器 |
| 同步式交流伺服电动机 | 其转速与定子绕组所建立的旋转磁场严格同步,从低速到高速,只要在水久磁体不退磁的范围内,定子绕组都可通过大的电流,所以起、制动转矩不会降低,可以频繁起、制动 | 其转子由永久磁体做成,定子由三相绕组组成,为减小转子的转动惯量,转子直径往往做得较细 | 主要用于中小容量的伺服驱动系统中,如数控、机器人等伺服系统中 | 交流 PWM 变频调速器 |
| DD 驱动电动机 | DD 电动机输出转矩大,转矩波动小,功率/质量比大,精度极高;低速平稳,检测精度高 | DD 电动机具有两种结构形式,双定子结构和中央定子结构 | 适用于需高精度、高速运行的工业机器人中,并适用于洁净度 10 级环境,如装配机器人等 | 交流 SPWM 驱动器 |

5.1 直流伺服电动机驱动器

直流伺服电动机驱动器多采用脉宽调制 (PWM) 伺服驱动器,其电源电压为固定值,由大功率晶体管 GTR、MOS 管或 IGBT 作为开关元件,以固定的开关频率动作。但其输出的脉冲宽度可以随电路控制而改变。通过改变脉冲宽度以改变加在电动机电枢两端的

平均电压,从而改变电动机的转速。这种伺服驱动器一般由电流内环和速度外环构成。功率放大采用晶体管等其他开关元件组成的桥式开关电路。其原理框图如图 9-3-7 所示。

PWM 伺服驱动器具有调速范围宽、低速特性好、响应快、效率高、过载能力强等特点。在工业机器人中常作为直流伺服电动机驱动器。

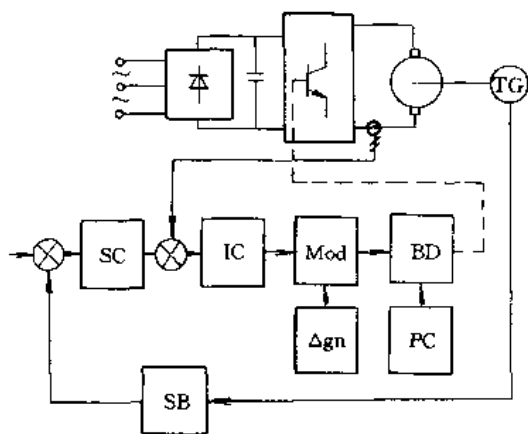


图 9-3-7 直流 PWM 伺服驱动器原理框图
SC—速度调节器 IC—电流调节器 Mod—调制器
Δgn—三角波发生器 PC—保护电路 BD—基极
驱动电路 SB—速度反馈单元 TG—测速机

5.2 同步式交流伺服电动机驱动器

同 DC 伺服电动机驱动系统相比，同步式交流伺服电动机驱动器具有扭矩/转动惯量比高、无电刷及换向火花等优点。在工业机器人（包括喷涂机器人）中得到广泛应用。

同步式交流伺服电动机驱动器通常采用电流型脉宽调制（PWM）三相逆变器 and 具有电流环为内环、速度环为外环的多环闭环控制系统，以实现对三相永磁同步伺服电动机的电流控制。根据其工作原理、驱动电流波形和控制方式的不同，可分为两种伺服系统：

- (1) 矩形波电流驱动的永磁交流伺服系统；
- (2) 正弦波电流驱动的永磁交流伺服系统。

采用矩形波电流驱动的永磁交流伺服电动机称为无刷直流伺服电动机，采用正弦波电流驱动的永磁交流伺服电动机称为无刷交流伺服电动机。

同步式永磁交流伺服驱动器的组成如图 9-3-8 所示。主电路由三部分组成：第一部分是整流器，将工频电源变换为直流；第二部分是逆变器，按照电动机转子位置来控制交流电流；第三部分是吸收来自电动机再生能量的再生功率吸收电路。控制电路由下列几部分组成：即把速度给定信号与电动机速度反馈信号进行比较，用以产生电流给定信号 I_a 的调节器，按照电动机转子位置产生相电流给定值 i_u 、 i_v 、 i_w 的电流函数发生器，以及控制相电流的电流调节器。

对正弦波电流驱动的永磁交流伺服驱动器来说，电流函数发生器产生如下电流参考值：

$$i_u = I_a \sin \theta_r$$

$$i_v = I_a \sin \left(\theta_r - \frac{2}{3} \pi \right)$$

$$i_w = I_a \sin \left(\theta_r - \frac{4}{3} \pi \right)$$

式中 i_u ——U 相电流；
 i_v ——V 相电流；
 i_w ——W 相电流；
 I_a ——电流幅值；
 θ_r ——转子位置。

其转矩为

$$T = K_t I_a \Phi$$

式中 K_t ——比例常数；

Φ ——有效磁场磁通。

所采用的逆变器为晶体管正弦波 PWM 逆变器。

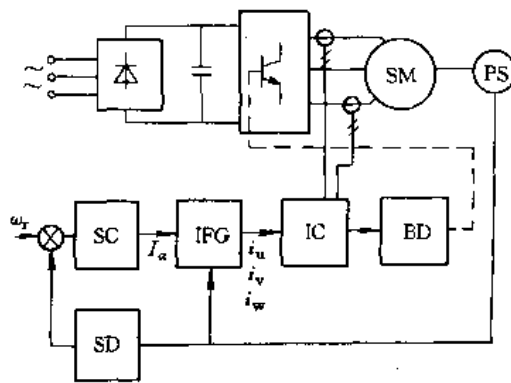


图 9-3-8 同步式伺服电动机驱动器组成
SC—速度调节器 SD—速度反馈单元 IFG—电流函数
发生器 IC—电流调节器 BD—基极驱动电路
PS—转子位置检测器 SM—同步式交流伺服电
动机 ω_r —速度指令

对矩形波电流驱动的永磁交流伺服驱动器，即把速度给定信号与电动机速度反馈信号进行比较，用以产生电流给定信号 I_a 的调节器；由转子位置传感器信号处理得到转子每转 360° （电角度）的周期内区分出 6 个状态的位置信号，用这个信号和对相绕组电流采样信号综合形成一个与电动机转矩瞬态值成正比的合成电流信号，将指令电流信号和合成电流信号比较、放大和校正，进入 PWM，根据电动机转子位置，电流函数发生器产生相电流给定值 i_u 、 i_v 、 i_w ，电流调节器控制相电流，通过逆变桥的基极驱动电路，控制电动机的相电流，其幅值与指令电流信号成正比。其转矩为

$$T = K_t I_a \Phi$$



式中 K_t ——比例常数;

Φ ——有效磁场磁通。

所采用的逆变桥为晶体管矩形波 PWM 逆变器。

从永磁交流伺服系统的两种驱动模式中,正弦波电流驱动的永磁交流伺服驱动器是一种高性能的控制方式,电流是连续的,理论上可获得与电机转角无关的均匀输出转矩,可做到 3% 以下低速转矩纹波,具有优良的低速平稳性,大大改善了中高速大转矩时的特性,铁心中附加损耗较小,并可在小范围内调整相电流和相电动势相位,实现弱磁控制,拓宽高速范围。但系统构成较复杂,成本高。它是系统发展的主流方向。

5.3 步进电动机驱动器

步进电动机是将电脉冲信号变换为相应的角位移或直线位移的元件。它的角位移量或线位移量与脉冲数成正比。转速或线速度与脉冲频率成正比。在负载能力的范围内,这些关系不因电源电压、负载大小、环境条件的波动而变化。误差不长期积累,步进电动机驱动系统可以在较宽的范围内,通过改变脉冲频率来调速,实现快速启动,正反转制动。作为一种开环数字控制系统,在小型机器人中得到较广泛的应用。但由于其存在过载能力差,调速范围相对较小,低速运动有脉动,不平衡等缺点,一般多应用于小型或简易型机器人(如经济型装配机器人,负重 $\leq 30\text{N}$,速度 $\leq 2.5\text{m/s}$)中。一般为了使工业机器人具有示教/再现功能,多采用配置光电码盘的工作型式。

步进电动机所用的驱动器,主要包括脉冲发生器、环形分配器和功率放大器等几部分。

脉冲发生器可以按照启动、制动及调速要求,改变控制脉冲的频率,以达到控制步进电动机的转速。环形分配器是控制步进电动机各绕组的通电次序以决定步进电动机的转动(在机器人控制系统中,多由计算机来实现其功能)。

环形分配器将脉冲发生器送来的脉冲信号按照一定的循环规律依次分配给步进电动机的各个绕组,以便步进电动机按照一定的规律运动。

功率放大器将环形分配器输出的毫安级电流放大至安培级以驱动步进电动机。图 9-3-9 为步进电动机驱动器原理图。其中脉冲发生器及脉冲分配器可由微处理器实现。在保证步进电动机不丢步的情况下,其控制精度由电动机决定。系统采用光电隔离电路以防止步进电动机的高压、大功率脉冲信号对微处理器或其控制电路产生干扰以及实现两者不同电压的转换。

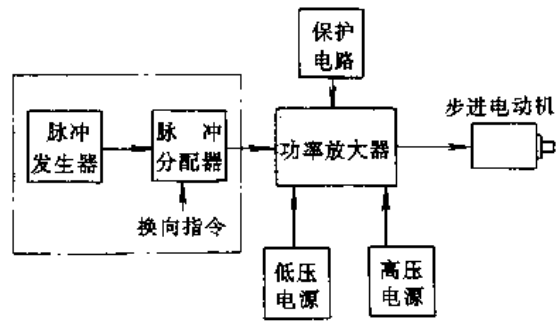


图 9-3-9 步进电动机驱动器原理框图

5.4 直接驱动

所谓直接驱动(DD)系统,就是电动机与其所驱动的负载直接耦合在一起,中间不存在任何减速机构。

同传统的电动机伺服驱动相比,DD 驱动减少了减速机构,从而减少了系统传动过程中减速机构产生的间隙和松动,极大地提高了机器人的精度,同时也减少了由于减速机构的摩擦及传送扭矩脉动造成的机器人控制精度降低。特别是采用传统电动机伺服驱动的有关节型机器人,其机械刚性差,易产生振动,阻碍了机器人运行操作速度的提高。而 DD 驱动由于具有上述优点,机械刚性好,可以高速高精度动作,且具有部件少,结构简单,容易维修,可靠性高等特点。在高精度、高速度工业机器人应用中越来越引起人们的重视。

作为 DD 驱动技术的关键环节是 DD 电动机及其驱动器。它应具有以下特性:

(1) 输出转矩大。应为传统驱动方式中伺服电动机输出转矩的 50~100 倍;

(2) 转矩脉动小。DD 电动机的转矩脉动应抑制在输出转矩的 5%~10% 以内。

(3) 效率。与采用合理阻抗匹配的电动机相比(传统驱动方式),DD 电动机是在功率-功率转换较差的使用条件下工作的。因此,负载越大,越倾向于选用较大的电动机。

目前,DD 电动机主要分为变磁阻型和变磁阻混合型,有以下两种结构型式:

(1) 双定子结构变磁阻型 DD 电动机。变磁阻型 DD 电动机采用双定子杯形结构(见图 9-3-10),包括无刷驱动器和分解器,只有一个轴承,该轴承在大多数情况下,可以直接支撑负载,该电动机为可变磁阻电动机,电动机里没有永磁体,采用三相电源。电动机由层压金属板和板上压制的 18 个极构成。环绕着每个极是一些铜丝绕组,这些绕组用导线按先后次序连接起来。



实际上形成了12个极。每个极上有三组绕组。极表面上加工有许多齿,这些齿在极表面上分散传导能量。其转子是一个薄的圆柱形环,同定子类似,但上面没有线圈绕组。由于有内、外定子,转子传导磁场从内定子到外定子,又从外定子到内定子。在每个完整的电气换向周期里,转子旋转通过一个磁场周期——这是相邻齿间的角距。按照电动机大小,电动机每转有100~150个电气周期。

扭矩波动通过三相操作和采用内、外定子保持在最低水平。装在驱动器里的是一个功率放大器、解算器接口和信号处理器;所有的模拟信号被转换成数字信号型式。微处理器控制着所有重要的控制功能。运动指令以位置、速度或扭矩的型式,发送给数字信号处理器,该处理器调节着各种电气参数,以获得所需结果。这些变化的时序依赖于接受到的、来自于分解器的数据。

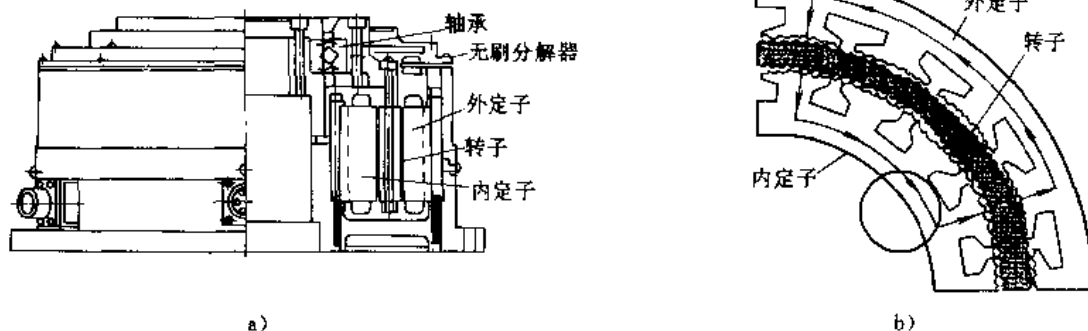


图 9-3-10 双定子杯形结构的变磁阻型 DD 电动机

a) 结构图 b) 磁路

双定子结构 DD 电动机驱动器包括以下几个部分: 1) 功率放大; 2) 分解→数字量变换; 3) 换向部分; 4) 接口部分; 5) 可编程运动控制部分。电动机通过相位选择来改变 DD 电动机的扭矩方向。驱动器内置微处理器来实现换向功能。功率放大采用 20kHz 的单极性、半 H 桥结构以避免功放管的交叉导通。应用数字信号处理器 DSP, DD 电动机驱动器可完成以下几种功能:

- 1) 速度环 (比例或比例积分);
- 2) 位置环 (比例或比例积分);
- 3) 双速度环低通滤波器;

4) 双速度环二阶陷波滤波器。

为了解决变磁阻型 DD 电动机的失步、转矩脉动等问题,伺服驱动系统采用基于转子位置传感器的电流平滑细分闭环控制策略。电流波形应满足:

$$I_u = I_m \sin \omega t r_1 + I_m \sin (\omega t - 60^\circ) r_2$$

$$I_v = I_m \sin (\omega t - 120^\circ) r_2 + I_m \sin (\omega t - 180^\circ) r_3$$

$$I_w = I_m \sin (\omega t - 240^\circ) r_3 + I_m \sin (\omega t - 300^\circ) r_1$$

其中: 当 $0^\circ \leq \omega t \leq 120^\circ$ 时, $r_1 = 1, r_2 = r_3 = 0$;
 当 $120^\circ \leq \omega t \leq 240^\circ$ 时, $r_2 = 1, r_1 = r_3 = 0$;
 当 $240^\circ \leq \omega t \leq 360^\circ$ 时, $r_3 = 1, r_1 = r_2 = 0$;

图 9-3-11 为该电动机的控制框图。

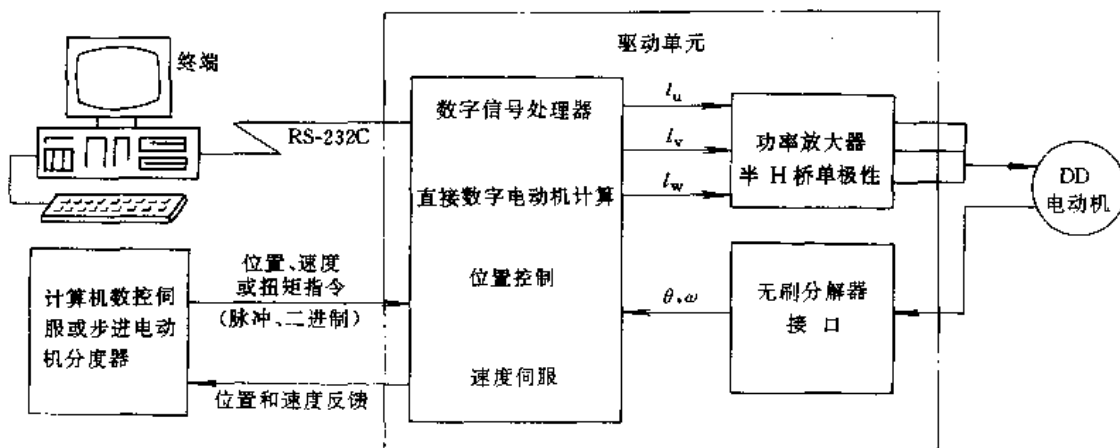


图 9-3-11 双定子杯形结构的变磁阻型 DD 电动机控制框图



(2) 中央定子形结构的变磁阻混合型 DD 电动机
 变磁阻混合型 DD 电动机的定子或转子上含有稀土永磁体,其间隙磁通密度的恒定分量由永磁体提供,从而使电动机的效率大大提高,励磁电流减少,降低了其功率放大器的设计和制造的难度。变磁阻混合型 DD 电动机的永磁磁路为轴向,降低了永磁材料的用量,从而降低了电动机造价。变磁阻混合型 DD 电动机为单定子结构,采用内定子(外转子)型式。这种结构的 DD 电动机,具有一个中央定子,转子围绕着定子旋转。定子与转子均由铁心叠片制成,其上有沿圆周精细分布的 124 个步距小齿;在转子磁心上有两个相同的圆环,但安装偏离相位半个步距。在定子上也有两个圆环,它们之间通过永磁体隔开,永磁体提供磁偏置从而改善

了扭矩与电流的线性关系。在定子上有 12 个绕组,采用三相对称连接,绕组电流为三相正弦波,以提供 AC 三相操作,并保持扭矩波动在 5% 以内。

图 9-3-12 为中央定子结构的变磁阻混合型 DD 电动机结构图。

该结构 DD 电动机采用如图 9-3-13 所示的光电码盘。该码盘基于发光二极管 LED 和一个通过光刻产生 320196 条狭缝的圆盘。由 LED 发出的光通过一个透镜和狭缝照在光电管阵列 PDA 上。阵列上具有加“权”通道。输出信号以正弦波的形式转换成脉冲信号,以产生 655360 个脉冲/转的分辨力。

中央定子结构的变磁阻混合型 DD 电动机驱动器构成如图 9-3-14 所示。

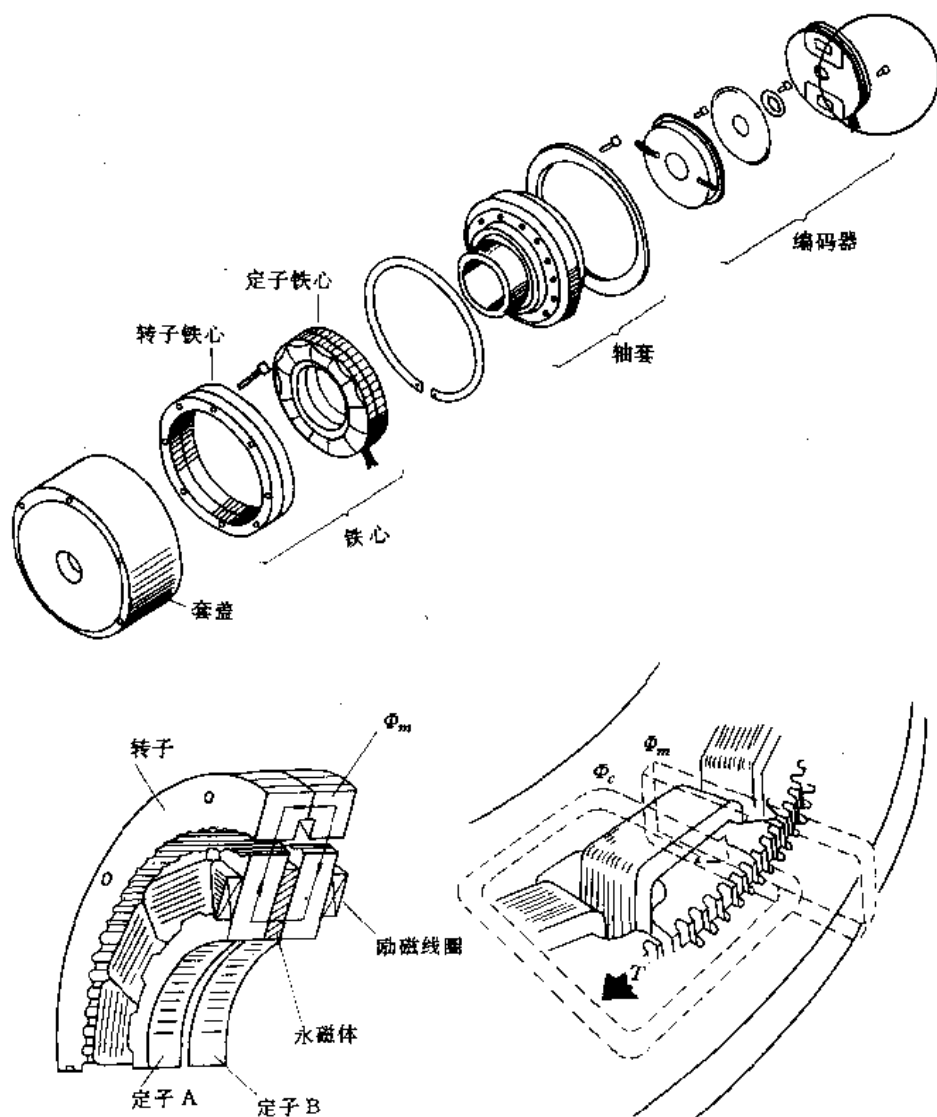


图 9-3-12 中央定子结构的变磁阻混合型 DD 电动机结构图



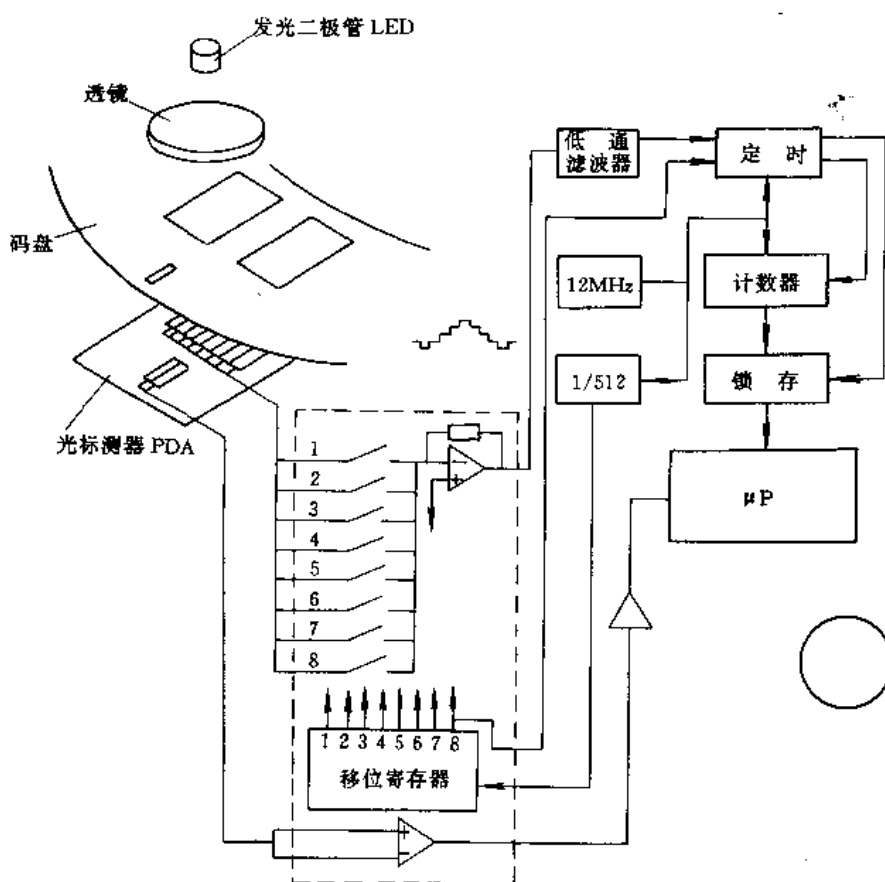


图 9-3-13 DD 驱动电动机的光电码盘原理结构

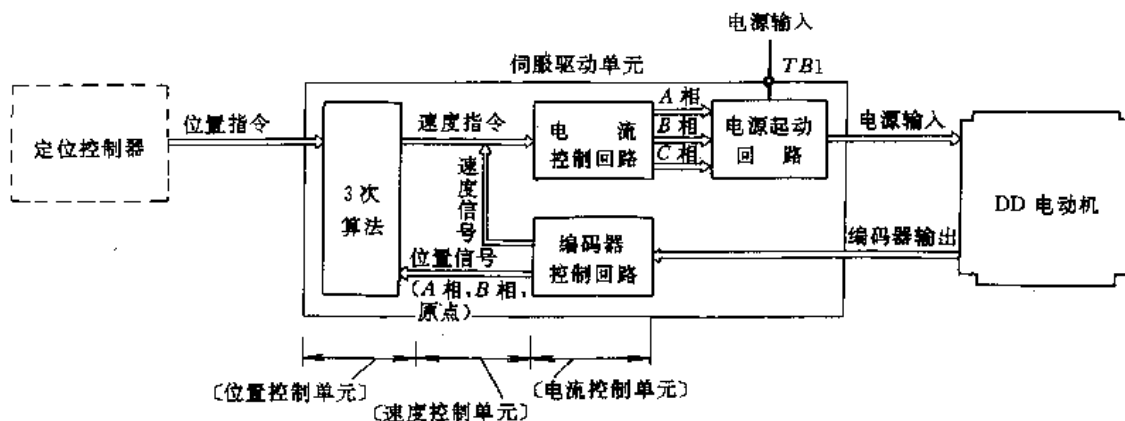


图 9-3-14 中央定子结构的变频阻混合型 DD 电动机驱动器原理构成

为了改进 DD 电动机伺服性能，伺服系统采用比例-积分-微分算法 (PID)。该算法用来比较速度命令和速度微分信号之间的差别，也用于比较位置命令和实际位置之间的差值。

应用这种 DD 电动机伺服控制系统，机器人控制器仅仅需要决定脉冲数和速度。这个 PID 算法能够使

电动机运行平滑，并减少运动开始和结束时由于粘启动和过冲造成的振动。

该 DD 电动机驱动系统有三个参数控制：速度、位置和电流。当采用三阶 PID 算法伺服控制环在设定时间少于 0.2s 时，可提供角度位置精度为 ±2°。



第4章 工业机器人控制系统

(续)

1 机器人控制系统的功能、组成和分类

1.1 对机器人控制系统的一般要求

机器人控制系统是机器人的重要组成部分，用于实现对操作机的控制，以完成特定的工作任务。其基本功能见表 9-4-1。

表 9-4-1 机器人控制系统功能

| 功 能 | 说 明 |
|-----------|-------------------------------|
| 记忆功能 | 作业顺序，运动路径，运动方式，运动速度，与生产工艺有关信息 |
| 示教功能 | 离线编程，在线示教。在线示教包括示教盒和导引示教两种 |
| 与外围设备联系功能 | 输入、输出接口，通信接口，网络接口，同步接口 |

| 功 能 | 说 明 |
|------------|-----------------------------|
| 坐标设置功能 | 关节、绝对、工具三种坐标系 |
| 人机接口 | 显示屏、操作面板、示教盒等 |
| 传感器接口 | 位置检测，视觉、触觉、力觉等 |
| 位置伺服功能 | 机器人多轴联动，运动控制，速度、加速度控制，动态补偿等 |
| 故障诊断安全保护功能 | 运行时系统状态监视，故障状态下的安全保护和故障诊断 |

1.2 机器人控制系统的组成 (图 9-4-1)

控制系统构成说明见表 9-4-2。

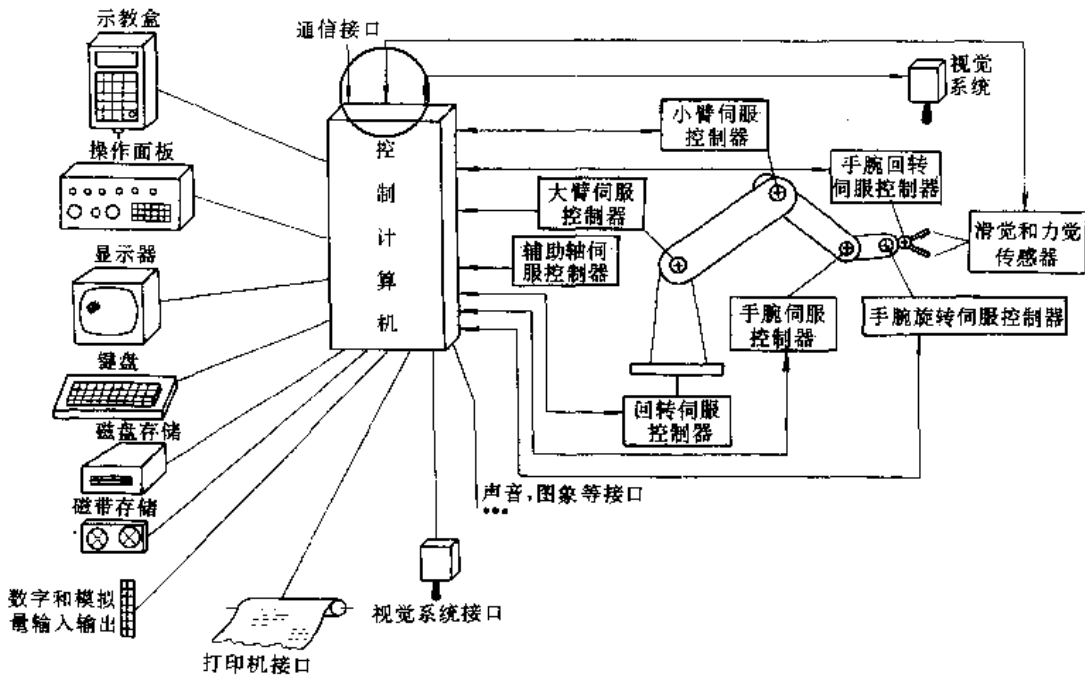


图 9-4-1 机器人控制系统组成框图



表 9-4-2 控制系统构成说明

(续)

| 名称 | 说明 |
|------------|------------------------------------------------------------------|
| 控制计算机 | 控制系统的调度指挥机构。一般为小型机或微型机。微处理器有8位、16位、32位等,如8086、80286、68030、68040等 |
| 示教盒 | 示教机器人的工作轨迹和参数设定。通常用与主计算机通信方式实现 |
| 操作面板 | 由各种操作按键、状态指示灯构成,其作用与示教盒相同 |
| 显示器 | 人机接口的显示设备。用于编程,工作菜单显示,状态和故障诊断显示等。一般采用CRT |
| 键盘 | 编程及操作中的数据 and 命令输入工具 |
| 磁盘及磁带存储 | 存储机器人工作程序的外围存储器 |
| 数字和模拟量输入输出 | 各种状态和控制命令的输入或输出 |
| 打印机接口 | 记录需要输出的各种信息 |
| 传感器接口 | 用于外部信息的自动检测,实现机器人柔顺控制。一般为力觉、滑觉和视觉传感器 |
| 轴控制器 | 完成机器人各关节位置、速度和加速度控制 |
| 辅助设备控制 | 用于和机器人配合的辅助设备控制,如手爪等 |
| 通信接口 | 实现机器人和其他设备的信息交换。一般有串行接口、并行接口,或网络接口等 |

1.3 机器人控制系统分类 (表 9-4-3)

表 9-4-3 控制系统分类

| 分类方式 | 类别 | 说明 |
|------|--------|----------------------------------------------------------------|
| 控制方式 | 顺序控制系统 | 按预定的顺序进行一连串的控制动作。采用开关信号,执行元件多数是继电器和电磁阀。用于工作条件完全确定和不变的情况,目前很少采用 |

| 分类方式 | 类别 | 说明 |
|------|------------|-----------------------------------------------------------|
| 控制方式 | 程序控制系统 | 给每一自由度传动系统施加一定规律的控制作用,机器人就可实现要求的空间轨迹 |
| | 适应控制系统 | 当外界条件变化时,为保证所要求的品质或为了随着经验的积累而自行改善控制品质,控制系统的结构和参数应能随时间自动改变 |
| | 人工智能系统 | 事先无法编制运动程序,而是要求在运动过程中根据所获得的周围状态信息实时确定控制作用 |
| 驱动方式 | | 参见本篇第3章3~5节 |
| 运动方式 | 点位式 | 要求机器人准确控制末端执行器的位姿,而与路径无关 |
| | 轨迹式 | 要求机器人按示教的轨迹和速度运动 |
| 控制总线 | 国际标准总线控制系统 | 采用国际标准总线作为控制系统的控制总线。如VME, MULTI-Bus, STD-Bus, PC-Bus等 |
| | 自定义总线控制系统 | 由生产厂家自行定义使用的总线作为控制系统总线 |
| 编程方式 | 物理设置编程系统 | 由操作者设置固定的限位开关、停止点等编程。只能用于简单的拾起和放置作业 |
| | 在线编程 | 通过人的示教来完成操作信息的记忆过程编程方式,包括手把手示教、模拟示教和示教盒示教 |
| | 离线编程 | 机器人作业的信息记忆与作业对象不发生直接关系,通过使用高级机器人编程语言,远程或离线生成机器人作业轨迹 |



(续)

2 机器人整体控制系统设计方法

2.1 控制系统结构 (表 9.4-4)

表 9.4-4 控制系统结构分类

| 系统结构 | 定义及说明 | 特点 |
|--------|----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| 集中控制方式 | 利用一台微机实现系统的全部功能控制。构成框图见图 9.4-2 | 构造简单, 经济性好, 实时性差, 难以扩展, 适合于低速、精度要求不高场合 |
| 主从控制方式 | 采用主、从两个处理器实现系统的全部功能控制。主 CPU 实现管理、坐标变换、轨迹生成和系统自诊断等。从 CPU 实现所有关节的动作控制。构成框图见图 9.4-3 | 实时性较好, 适于高精度、高速控制, 扩展困难, 维修性差, 接传感器难, 是目前流行方式之一 |

| 系统结构 | 定义及说明 | 特点 |
|--------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|
| 分级控制方式 | 按系统的性质和方式将控制分为几个级别, 每一级各有不同的控制任务和控制策略, 各级之间有信息传递。一般分为两级: 上级负责管理、坐标变换、轨迹生成等; 下级由若干处理器组成, 每一处理器负责一个关节的动作控制。构成框图见图 9.4-4 | 实时性好, 易于实现高速高精度控制, 易于扩展, 可实现智能控制。是目前流行最广的方式 |

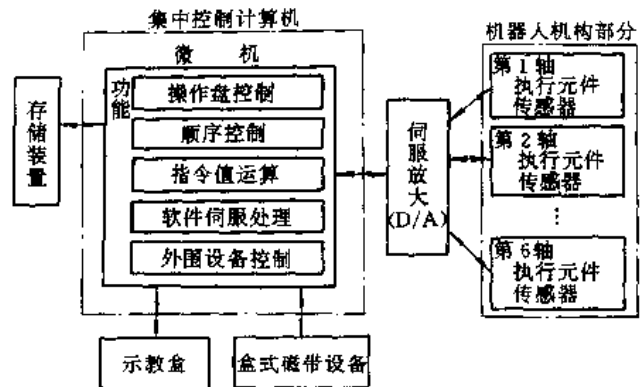


图 9.4-2 集中控制方式框图

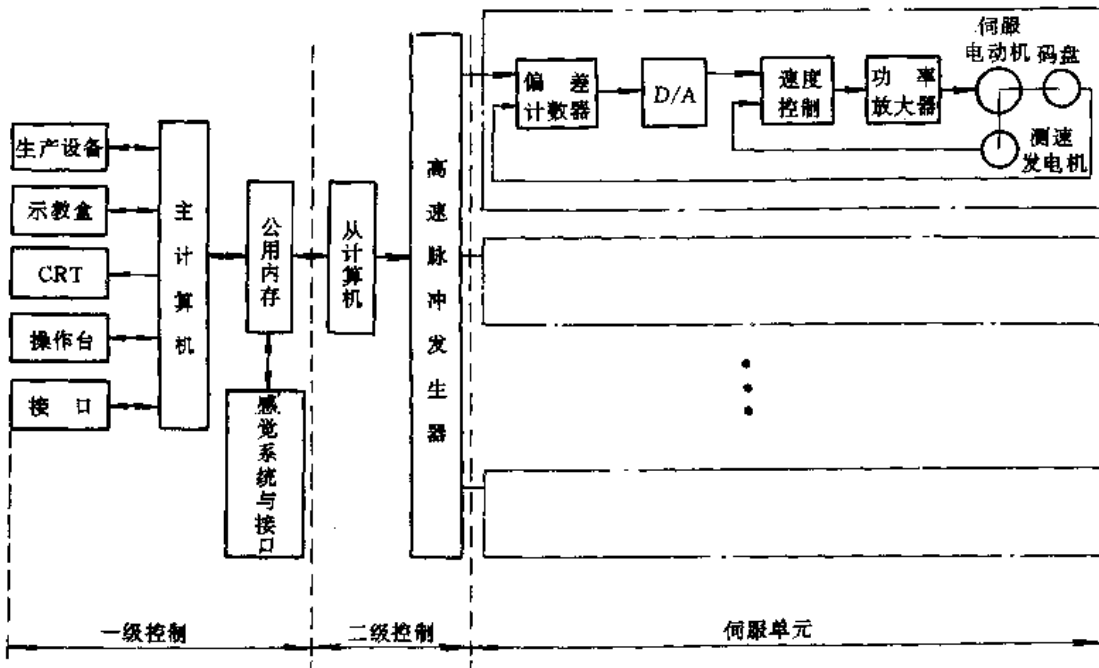


图 9.4-3 主从控制方式框图



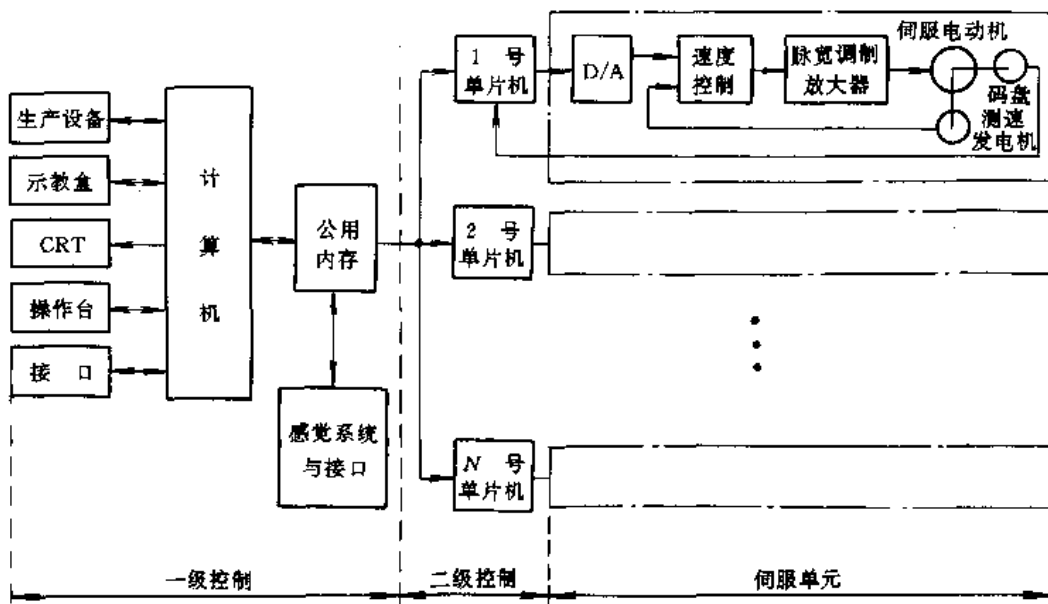


图 9-4-4 分级控制方式框图

2.2 控制系统设计原则

根据不同的控制要求可有不同的设计方法，但一般应遵从以下设计原则：

(1) 用国际标准总线结构。由于作为国际标准总线已经很成熟，功能模块化，且种类齐全，可灵活组态。软件兼容性扩充性好，可与通用微机兼容，可支持高级语言和运行众多应用软件。开发软件环境可以在已建立的平台上进行。

(2) 实时中断和响应能力。软件中任务切换时间和中断延误时间要尽量短。特别对于安全系统的中断，一般应给予较高的优先级。

(3) 可靠性设计和可靠性措施。首先应按照可靠性工程方法对系统进行认真分析、设计。其次要考虑软硬件任务分配和选择、接地、隔离、屏蔽以及工艺性等方面。

(4) 良好的开发环境。如开发工具尽量利用已有的仪器设备，应在成熟的软件平台上进行软件开发，利用高级语言、实时操作系统及已开发或应用的软件资源。

(5) 结构简单，工艺性合理，易于现场维护，更换备件时间要尽量短。

(6) 系统要标准化，开放性好，易于和其他设备通信或联网，便于用户使用。

(7) 考虑系统后续投入批量生产问题。各种结构、器件、工艺一定要适合我国的工业基础现状，并考虑机

器人的批量和规模。

2.3 控制系统选择方法 (见表 9-4-5)

表 9-4-5 控制系统选择方法

| 方式 | 说明 | 特点 |
|---------|---------------------------|-------------------------------------------------|
| 整机构成方式 | 采用现有微机构成控制系统 | 硬软件资源丰富，可用高级语言编程，可用现有的操作系统，开发周期短，结构庞大，成本较高 |
| 微处理器构成法 | 从选择微处理器入手，配以适量的存储器和接口部件构成 | 器件最少，结构简单，造价低，设计调试任务重，周期长，只能用于特定场合，难以扩展，后续生产工作量 |
| 总线式模板构成 | 以 一种国际标准总线的功能模板为基础构成系统 | 可靠性高，速度快，支撑环境好，易于扩展，质量容易保证，兼容性好，维修方便，系统较复杂，保密性差 |
| 多处理器方式 | 由多处理器构成复杂的控制系统 | 各处理器分散功能，提高了系统的可靠性，简化了管理程序（操作系统），调试方便，价格较高，系统复杂 |



2.4 机器人仿真

机器人仿真是在全部时间内，通过对系统动态数学模型进行二次模型化，得到一个仿真模型，用计算机运算及显示的过程。

仿真的具体步骤为：

- (1) 确定实际系统的数学模型；
- (2) 将它转化为能在计算机上运行的仿真模型；
- (3) 编写仿真程序；
- (4) 对仿真模型进行修改、校验。

机器人仿真应能完成一类机器人的运动学、动力学、轨迹规划及控制算法、图形显示和输出等功能。其基本结构如图 9-4-5 所示。

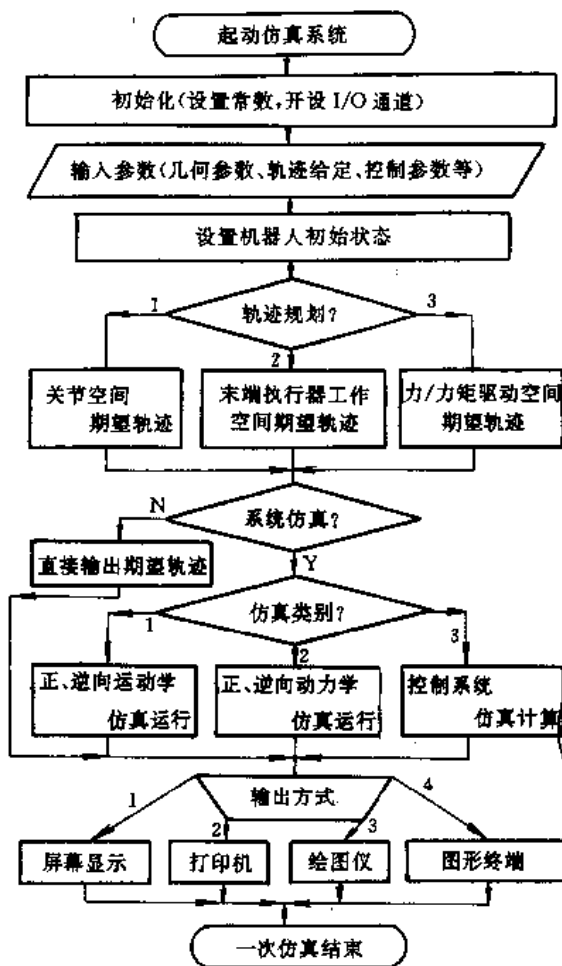


图 9-4-5 仿真系统基本结构

控制系统仿真是机器人仿真的重要组成部分，可实现下述控制功能仿真：

- (1) 单关节 PID 控制；
- (2) 分解运动的速度控制；
- (3) 分解运动的加速度控制；

- (4) 计算力矩控制；
- (5) 最优控制；
- (6) 解耦控制；
- (7) 自适应控制；
- (8) 变结构控制；
- (9) 多机器人协调控制；
- (10) 柔性运动控制等。

近几年，机器人系统仿真发展迅速，并成功地应用于工业生产中。例如，Technomatics 公司的 ROBCAD 软件就是其中一例。该软件共有 7 个模块：

- (1) 功能需求分析，初步设计模块。
- (2) 运行及支援环境模块。用户友好的图形接口。
- (3) 部件建模模块。实体建模，线框到曲面及实体变换、数据输入。
- (4) 运动学建模工具模块。自动闭环逆变换生成、多关节设备生成及参考控制，机器人控制的特征文件。
- (5) 布局优化模块。自动机器人布局、工件布局。
- (6) 生产过程连续仿真模块。生产节拍计算，I/O 通信及控制，碰撞检测。
- (7) 专用软件包、适合于各种机器人特殊作业过程，如喷漆、点焊、装配等。

3 几种典型的控制方法

工业机器人要求能满足一定速度下的轨迹跟踪控制（如喷漆、弧焊等作业）或点到点（PTP）定位控制（点焊、搬运、装配作业）的精度要求，因而只有很少机器人采用步进电动机或开环回路控制的驱动器。为了得到每个关节的期望位置运动，必须设计一控制算法，算出合适的力矩，再将指令送至驱动器。这里要采用敏感元件进行位置和速度反馈。

当操作机跟踪空间轨迹时，可对操作机进行位置控制。当末端执行器与周围环境或作业对象有任何接触时，仅有位置控制是不够的，必须引入力控制器。例如在装配机器人中，接触力的监视和控制是非常必要的，否则会发生碰撞、挤压，损坏设备和工件。

下面给出几种常用的控制方法。

3.1 PID 控制

PID 控制是指将比例（P）、积分（I）、微分（D）三种控制规律综合起来的一种控制方式。其控制器运动方程为

$$u = K_p \varepsilon(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t \varepsilon(t) dt + K_p \tau \frac{d\varepsilon(t)}{dt}$$



式中 u ——控制器输出控制信号;
 ϵ ——控制器输入偏差信号;
 K_p ——比例系数;
 T_i ——积分时间常数;
 τ ——微分时间常数。

控制器的设计就是选择 K_p 、 T_i 、 τ 或者加上其他补偿控制,使系统达到所要求的性能。

提高控制器的增益 K_p , 固然可以减小控制系统的稳态误差, 从而提高控制精度。但此时相对稳定性往往因之而降低, 甚至造成控制系统的不稳定。积分控制可以消除或减弱稳态误差, 从而使控制系统稳态性能得到提高。微分控制能给出控制系统提前开始制动(减速)的信号, 且能反映误差信号的变化速率(变化趋势), 并能在误差信号值变得太大之前, 引进一个有效的早期修正信号, 有助于增加系统的稳定性。

下面以单关节控制器参数选择为例讨论控制器的设计方法。

假设机器人关节驱动为直流伺服电动机, 则动作器输出力矩 T_m 和控制电压分别为

$$T_m = J_e \ddot{\theta}_m + B_e \dot{\theta}_m$$

$$U = K_b \dot{\theta}_m + L_R \frac{di_R}{dt} + r_R i_R$$

$$T_m = K_t i_R$$

式中 T_m ——动作器输出力矩;
 J_e ——等效转动惯量;
 θ_m ——动作器转角;
 B_e ——等效阻尼系数;
 U ——控制电压;

K_b ——反电势系数;
 L_R ——转子电感;
 r_R ——转子电阻;
 i_R ——转子电流;
 K_t ——转矩系数。

忽略 L_R 后, 系统的传递函数为

$$\frac{\theta_m(s)}{U(s)} = \frac{K_t}{s(r_R J_e s + (r_R B_e + K_t K_b))}$$

引入偏差信号

$$e(t) = \theta_d(t) - \theta_s(t)$$

并将偏差转为电压信号

$$U(t) = K_p e(t)$$

而 $\theta_m(s) = \theta_s(s)/n$

式中 θ_d ——给定转角信号;
 K_p ——增益系数;
 θ_s ——负载侧转角;
 n ——传动比, 一般小于 1。

在单位位置反馈和速度负反馈条件下, 闭环传递函数为

$$\frac{\theta_s(s)}{\theta_d(s)} = \frac{n K_p K_t}{r_R J_e} \times \frac{1}{s^2 + [r_R B_e + K_t(K_b + K_t K_t)]s / (r_R J_e) + n K_p K_t / (r_R J_e)}$$

式中 K_t ——测速发电机常数;
 K_t ——速度反馈增益系数。

其控制器结构图见图 9-4-6。图中 $E(s)$ 为位置偏差信号, $T_c(s)$ 为前馈补偿, $T_m(s)$ 为摩擦力矩, $T_g(s)$ 为重力矩, K_R 为增益系数, $I_R(s)$ 为转子电流, 其他文字符号已在公式中叙述。

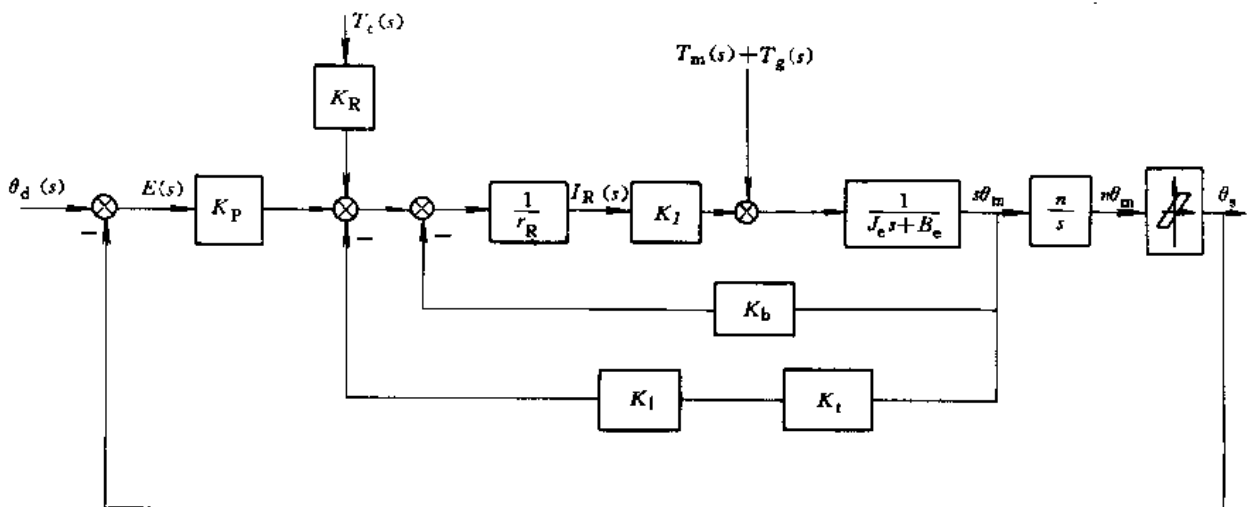


图 9-4-6 单个关节控制器结构图



根据经典控制理论，从系统特征方程可得

$$\omega_n = \sqrt{nK_p K_1 / (r_R J_c)}$$

$$\xi = [r_R B_c + K_1 (K_b + K_1 K_1)] / (2 \sqrt{nK_p K_1 r_R J_c})$$

式中 ω_n —— 自然频率；

ξ —— 阻尼比。

单个关节的扭振方程和扭振谐振频率为

$$J_c \ddot{\theta} + K_c \theta = 0$$

$$\omega_r = \sqrt{K_c / J_c}$$

$$K_c = \omega_c^2 J_c$$

式中 K_c —— 等效扭振刚度系数；

ω_r —— 扭振谐振频率；

ω_c —— 根据某一惯量 J_c 得到的谐振频率。

取 $\omega_n \leq \frac{1}{2} \omega_r, \xi \geq 1$

则 $K_p \leq (J_c \omega_c^2) r_R / (4nK_1)$

$$K_1 \geq r_R (\omega_c \sqrt{J_c J_c} - B_c) / (K_b + K_1 K_1)$$

因为 J_c 随负载变化，因此， J_c 应取最大值，以避免出现欠阻尼。

也可以根据经典控制理论，采用其他方法选择 K_p 、 K_1 ，其具体值还要经过实际调试后才能最后确定。

由于机器人是一多关节耦合的非线性系统，高速运行时很小的非线性因素会显著地降低线性控制器的性能，故必须加入前馈补偿，以消除重力项、摩擦力和科氏力的影响。

3.2 滑模控制

随着机器人作业范围的扩大，控制器的设计也变得越来越复杂。未来机器人必须面向“自适应控制”，以适应机器人大范围的运动、负载的变化及各种因素的影响。自1960年引入“滑动面”的概念以来，基于变结构理论的“滑动模”控制得到了迅速发展。

滑模控制是指该类控制系统预先在状态空间设定一个特殊的超越曲面，由不连续的控制规律，不断变换控制系统结构，使其沿着这个特定的超越曲面向平衡点滑动，最后渐近稳定至平衡点。

滑模控制有以下特点：

(1) 该控制方法对系统参数的时变规律，非线性程度以及外界干扰等不需要精确的数学模型，只要知道它们的变化范围，就能对系统进行精确的轨迹跟踪控制；

(2) 控制器的设计对系统内部的耦合不必做专门解耦，其参数选择也不十分严格；

(3) 系统进入滑态后，对系统的参数及扰动的变化反应迟钝，始终沿着设定滑线运动，具有很强的鲁棒性；

(4) 滑模变结构控制系统性能好，无超调，计算量小，实时性强。

滑模控制的一般结构如图9-4-7所示。

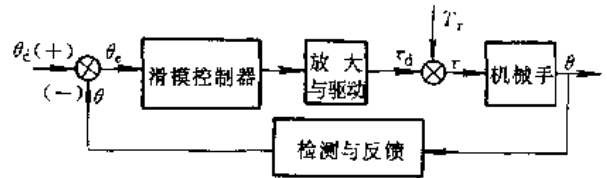


图 9-4-7 滑模控制系统结构

3.3 自适应控制

自适应控制是指当环境条件和对象参数有急剧变动时，通过控制系统参数和控制作用的适应性改变，而保持其某一性能仍运行于最佳状态的方法。其定义参见本篇第1章3.2节。模型参考自适应系统结构见图9-4-8。

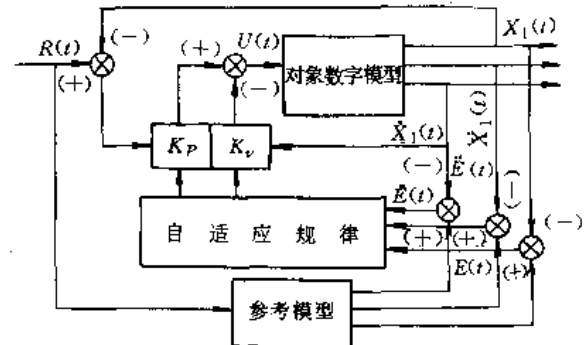


图 9-4-8 模型参考自适应系统结构

自适应控制一般包括参数辨识和控制规律部分。它只适用于线性定常系统，不能直接用于机器人控制。但是如在自适应过程中，对象参数认为不变，即使模型和对象为线性的假设不成立，也能给出满意的结果。

3.4 模糊控制

模糊控制是通过被控对象的输入输出变量的检测，对各种状态进行一系列有针对性的推理和判断，并作出适应性的最优控制，以获得良好效果的一种控制方式。

模糊控制的系统结构如图9-4-9所示。



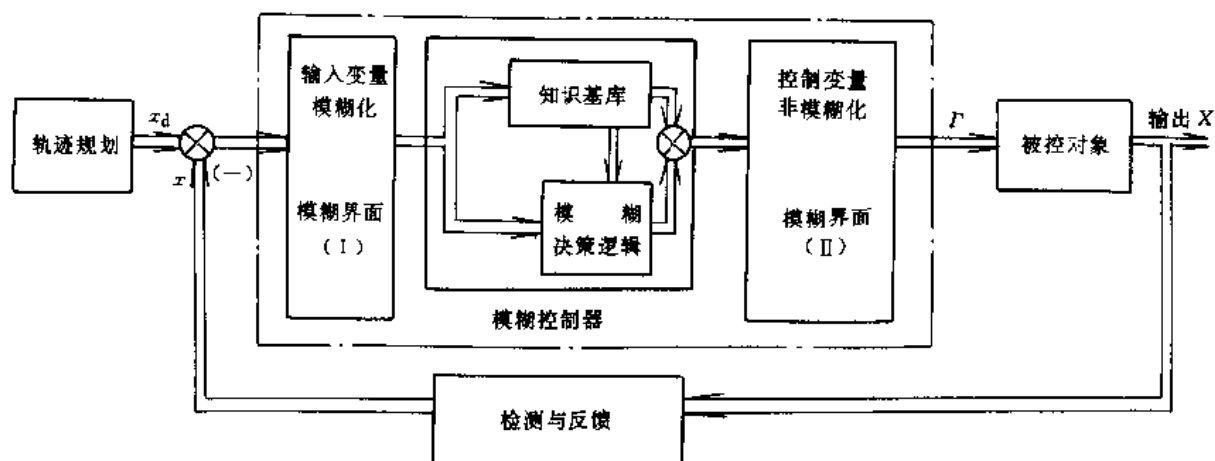


图 9-4-9 模糊控制系统结构

x_d —给定状态向量 Γ —给定力矩向量

输入变量模糊化是对输入变量值经离散化后，在设定域中按隶属函数(Membership function)关系赋予模糊值。

知识库包括数据库和规则库两部分。数据库主要存放隶属函数表，以便查找。模糊控制器通常以角位移和角速度偏差 E 、 \dot{E} 为输入变量。规则库是通过一系列语言形式的模糊控制规则，使得控制目标和控制决策特征化，从而产生模糊规则表。

模糊规则通常由实际控制经验出发，按常规控制经验类推出一些推理规则。实用而有效的模糊规则要通过实际系统的反复修正来确定。

控制规则形式一般为条件语句，

如 IF $E(K)$ AND $\dot{E}(K)$ THEN $\Delta Y(K)$

机器人模糊控制性能由模糊规则定义的正确性、模糊规则库拥有规则数量和模糊域的细分程度等三要素确定。

决策逻辑是基于模糊概念的人类决策，应用模糊

逻辑中的推理规则，从模糊控制量子集所包含的信息中得出确定性的模糊控制量。

模糊决策一般采用下列三种方法：

- (1) 最大隶属度原则；
- (2) 中位数判断；
- (3) 加权平均判断。

输出变量的非模糊化，是变量模糊化的反变换，即作为模糊输出的控制量转换成实际确定值，以模拟控制量形式控制对象。

为了进一步提高模糊控制系统的被控变量精度，在系统中常常引入检测和反馈环节，构成闭环形式系统结构。

【例 9-4-1】 设输入变量角位移和角速度偏差 E 、 \dot{E} 的论域定义为 $(-6, 6)$ 之间，输出控制量 U 的论域定义为 $(-7, 7)$ 之间，并且每个变量均有 8 个模糊值 PL, PM, ..., NL，它们在正负两个方向上的模糊值对称。

模糊变量 E 、 U 的隶属函数表和控制状态表分别见表 9-4-6~表 9-4-8。

表 9-4-6 模糊变量 E 、 \dot{E} 隶属函数表

| | -6 | -5 | -4 | -3 | -2 | -1 | -0 | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|----|-----|------|-----|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|-----|------|-----|
| PL | | | | | | | | | | | 0.1 | 0.3 | 0.75 | 1.0 |
| PM | | | | | | | | | | 0.2 | 0.75 | 1.0 | 0.75 | 0.2 |
| PS | | | | | | | | 0.3 | 0.8 | 1.0 | 0.8 | 0.3 | | |
| PO | | | | | | | | 1.0 | 0.5 | 0.1 | | | | |
| NO | | | | | 0.1 | 0.5 | 1.0 | | | | | | | |
| NS | | | | 0.8 | 1.0 | 0.8 | 0.2 | | | | | | | |
| NM | 0.2 | 0.75 | 1.0 | 0.75 | 0.2 | | | | | | | | | |
| NL | 1.0 | 0.75 | 0.1 | | | | | | | | | | | |



表 9-4-7 模糊变量 U 隶属函数表

| | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----|-----|-----|------|-----|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|-----|------|-----|-----|
| | -7 | -6 | -5 | -4 | -3 | -2 | -1 | -0 | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| PL | | | | | | | | | | | | | 0.1 | 0.3 | 0.8 | 1.0 |
| PM | | | | | | | | | | | 0.2 | 0.75 | 1.0 | 0.75 | 0.2 | |
| PS | | | | | | | | | 0.5 | 1.0 | 0.8 | 0.5 | 0.2 | | | |
| PO | | | | | | | | | 1.0 | 0.5 | 0.1 | | | | | |
| NO | | | | | | 0.1 | 0.5 | 1.0 | | | | | | | | |
| NS | | | | 0.2 | 0.5 | 0.8 | 1.0 | 0.5 | | | | | | | | |
| NM | | 0.2 | 0.75 | 1.0 | 0.75 | 0.2 | | | | | | | | | | |
| NL | 1.0 | 0.8 | 0.3 | 0.1 | | | | | | | | | | | | |

表 9-4-8 控制规则表

| | | | | | | | | |
|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| | NL | NM | NS | NO | PO | PS | PM | LP |
| NL | NL | NL | NM | NS | S | PS | PS | PM |
| NM | NL | NL | NM | NS | NS | PS | PM | PL |
| NS | NL | NM | NS | NS | NS | PM | PM | PL |
| O | NL | NM | NS | PO | PO | PM | PM | PL |
| PS | NM | NM | PS | PS | PS | PM | PM | PL |
| PM | NM | NM | PS | PS | PS | PM | PM | PL |
| PL | NM | NM | PM | PM | PM | PM | PL | PL |

4 控制系统硬件构成

本节以 PUMA-560 为例，介绍控制系统硬件结构。

PUMA-560 控制系统结构框图如图 9-4-10 所示。PUMA-560 控制系统原理框图如图 9-4-11 所示。PUMA-560 硬件配置与作用见表 9-4-9。PUMA-560 系统功能和通信见表 9-4-10。

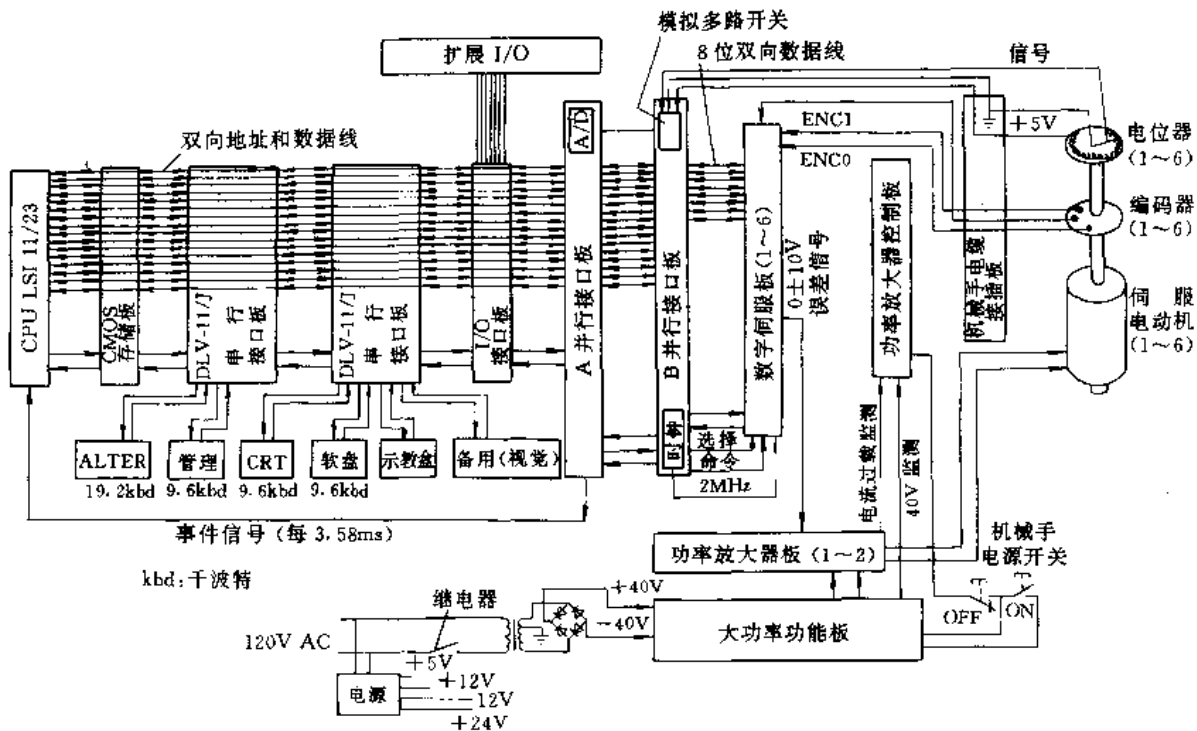


图 9-4-10 PUMA-560 控制系统结构框图



(续)

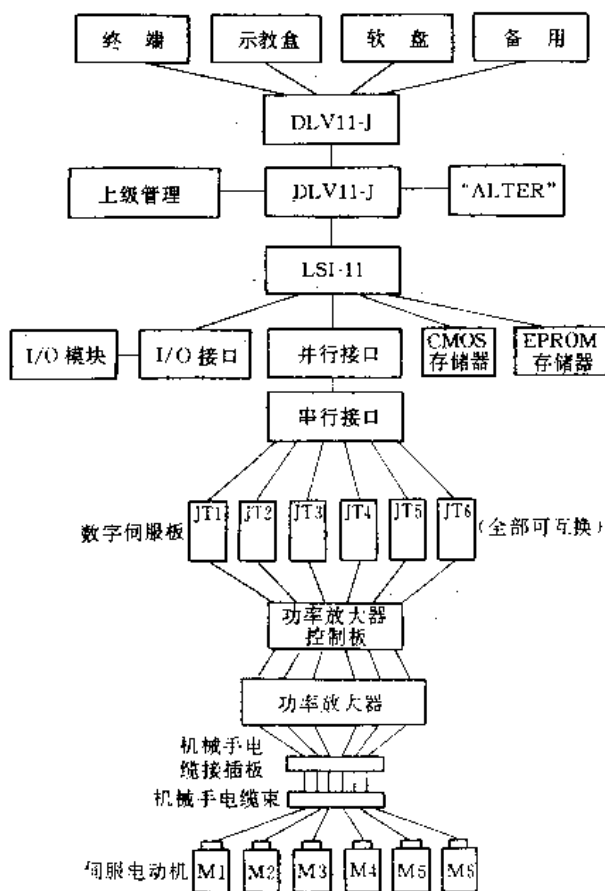


图 9-4-11 PUMA-560 控制系统原理框图

表 9-4-9 PUMA-560 硬件配置与作用表

| 硬件配置 | 部 件 | 说 明 |
|------|------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 控制器 | DEC LS-11 计算机 | 标准 DEC 系统, 包括处理器、存储器 and 通信板。系统软件 and 用户程序存储在 CMOS 存储器中。VAL I 需 64kW, 而 VAL, VAL-Plus 分别需 32kW 和 48kW |
| | DLV-11 串行接口板 | 四个异步串行通信接口。其中三个分别用作处理器和终端、示教盒和高密磁盘的通信。另一个备用或与上级计算机联接。对于 VAL Plus 需 1 块, 对 VAL I 需 2 块 |
| | A 并行接口板 B 并行板 | VAL 语言的引导程序存储器 (EPROM)。B 并行板带有时钟。LS-11 通过 A 并行接口板把命令和数据传送到 B 并行接口板, 这些信息再由 B 板传送给控制系统的伺服驱动模块。一旦命令和数据接受并运行, 就以相反顺序传送给 LSI-11 |

| 硬件配置 | 部 件 | 说 明 |
|------|-------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 控制器 | 数字伺服板 (6 块) | 通过每一块板上的 6503 处理器对关节进行控制。LSI-11 每隔 28ms 向各数字伺服板送一次位置信息, 微处理器把这些数字信息送到数模转换器生成驱动直流伺服电动机的模拟信号, 伺服板使用中断服务程序把回答信息送到 LSI-11 |
| | 功率放大板及控制板 | 数字伺服板输出的直流模拟信号经功率放大板放大后, 由电缆插件送到各个关节的伺服电动机。控制板主要用来监测功率板工作, 指示热警报, 关节电流过载并设有过载保护后重新启动按钮 |
| | 非标准接口板 | 可配置 4 个 I/O 模块, 提供 32 入/32 出 |
| | 机械手电缆板 | 测量关节位置的码盘和电位器与控制器之间的信息交换通过这块板进行。板上还装有零线接收器和信号噪声抑制器 |
| 外围设备 | 终端 | 可配 2 种终端, 屏幕显示终端 (CRT) 和打印终端 (TTY); 通过 RS-232C 接口与系统进行通讯, 用户通过屏幕终端编辑用户程序, 进行示教以及与系统交换信息。运行程序时可与系统断开 |
| | 示教盒 | 有四种示教方式, 关节 (JOINT) 方式, 自由 (FREE) 方式, 绝对坐标 (WORLD) 方式和工具坐标 (TOOL) 方式。RECORD 按钮用来将机器人当前位置存入存储器; 速度按钮用以设置、调节手动控制时机器人手爪的运行速度; CLAMP 按钮控制手爪关闭; 字母数字显示器显示当前的工作状态和系统发出的错误信息 |
| | 软盘驱动器 | 5in 高密双面软磁盘, 标准 RS-232C 串行接口将其和主机联在一起; 波特率为 9600 或 2400, 存储内容为 VAL I 操作系统及用户程序和数据 |



表 9-4-10 PUMA-560 系统功能和通信

| 系统功能 | 说 明 |
|------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 系统初始化 | 当启动系统时, LSI-11 首先在运行 VAL I 语言中, 把所有外围设备接口都置成启动状态 (RESET), 把 VAL I 语言内部需要的数据字和标志位都赋上初始值, 给关节控制板上的微处理器 6503 的部分内存赋上初值 |
| 标定机器人的初始位置 | 系统启动后, 用户必须首先用 CALIBRATE 命令标定机器人的初始位置, 然后才能进行操作。系统响应后, 驱动各个关节旋转一个很小角度, 使关节编码器中的读数器正对码盘的零线。这时通过测量电位器读出对应关节角度, 经过适当的精度修正, 转换为编码器的计数值, 赋予编码器, 标定过程结束 |
| 系统保护 | VAL I 包含许多保护程序用来保护设备的安全运行。例如当 VAL I 发现某个关节超出了软件允许的运动范围时, 立即停止机器人运动并输出错误信息 * Fatal out of range * $J_i(n)$ |
| 关节控制器功能 | 每 28ms 关节微处理器接收一次来自 LSI-11 的位置信息, 并检测, 确认这一信息。然后对关节位置的新值和当前值进行轨迹段内插值计算。将其运动角度 32 等分, 于是轨迹段每一小间隔时间为 0.875ms。微处理器每隔 0.875ms 还从码盘寄存器中读出关节的当前位置值以便下一小间隔的插补计算用 |

包括坐标变换, 为操作机传递应用的特殊命令, 提供轨迹生成、运动学和动力学的限制条件, 处理力反馈、速度控制、视觉输入和其他传感器输入, 处理输出数据和面向机器级的 I/O 错误。为提供这样可维护、自生成文件和结构化程序, 常常用 Pascal、C 或其他适合实时应用场合的商用高级结构语言。汇编语言常用于编写一些实时性强, 而其他语言又无法处理的场合。

3. 机器人语言 机器人语言是软件接口, 编程者通过它可直接操纵机器人执行需要的动作。这种语言应具有与用户友好的界面, 提供简单的编辑功能, 可使用宏指令或子程序解决应用的具体任务。

5.2 软件功能

机器人控制系统软件功能是由机器人的应用过程决定的。控制系统软件一般由实时操作系统进行调度管理。简单的控制系统软件则在监控程序下运行。对于一般的机器人控制系统, 其软件功能如图 9-4-12 所示。

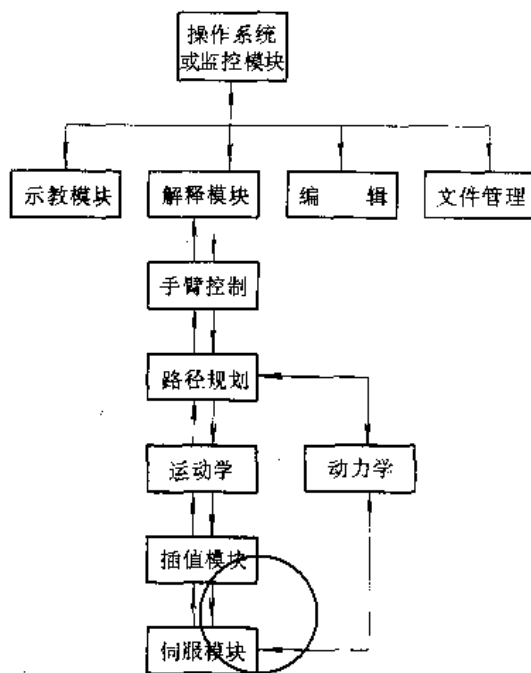


图 9-4-12 机器人控制系统软件功能

(1) 操作系统或监控模块。协调系统中各模块的工作, 此模块通过启动文件中的指令激活。

(2) 编辑模块。允许用户通过终端、键盘建立和修改文件。

(3) 解释模块。将源程序命令翻译成机器码, 这个模块在系统工作时起作用。

5 控制系统软件构成

5.1 软件构成^[5]

控制系统软件由下述三部分构成:

1. 操作系统 操作系统是与硬件系统相关的程序集合, 用于协调控制器内部任务, 也提供同外部通信的媒介。其任务同计算机操作系统相类似, 包括主存储器处理、接收和发送数据、输入输出单元、外围设备、传感器输入设备及其他通信要求的响应。机器人操作系统应快速响应实时产生的信号, 可以扩展服务于更复杂的用户要求。对于规模较小的控制系统则采用监控系统。

2. 机器人专用程序模块 机器人专用程序模块



(4) 示教模块。允许操作员通过示教盒人工控制机器人手臂，同时支持有限的按键编程能力。

(5) 手臂控制。用来监控手臂的控制功能，它接受内部机器码形式的指令，并能调用其他手臂控制程序。

(6) 路径规划。它由手臂控制模块启动，从解释模块取出产生的运动描述，将其转换成具有确切时间、位置、速度和加速度的运动详细说明书。

(7) 动力学模块。用来处理力矩控制的有关计算，它与路径规划同时进行。

(8) 运动学模块。将末端执行器端点所需的位置方向的笛卡尔坐标转换成各运动副的绞接变量。

(9) 插值模块。从路径规划模块或运动学模块取

出输出点的集合，为各关节计算驱动命令。

下面以电动机器人控制系统软件为例来说明其软件功能。图 9-4-13 为其控制系统软件功能框图。各部分功能概述如下：

(1) PAX 系统初始化。在 PAX 系统初始化过程中，首先将初始化任务投入运行，在系统任务中首先要完成用户实时中断向量，PAX 实时中断向量的设置，串行通信口的初始化、创建示教任务、再现任务、监控任务、单步任务、诊断任务、编辑任务、编程任务。

(2) 主控任务。主控任务完成与示教盒或面板的通信，根据控制命令进行各应用任务的启动与挂起。另外进行通讯队列的创建与管理，特殊命令的处理。

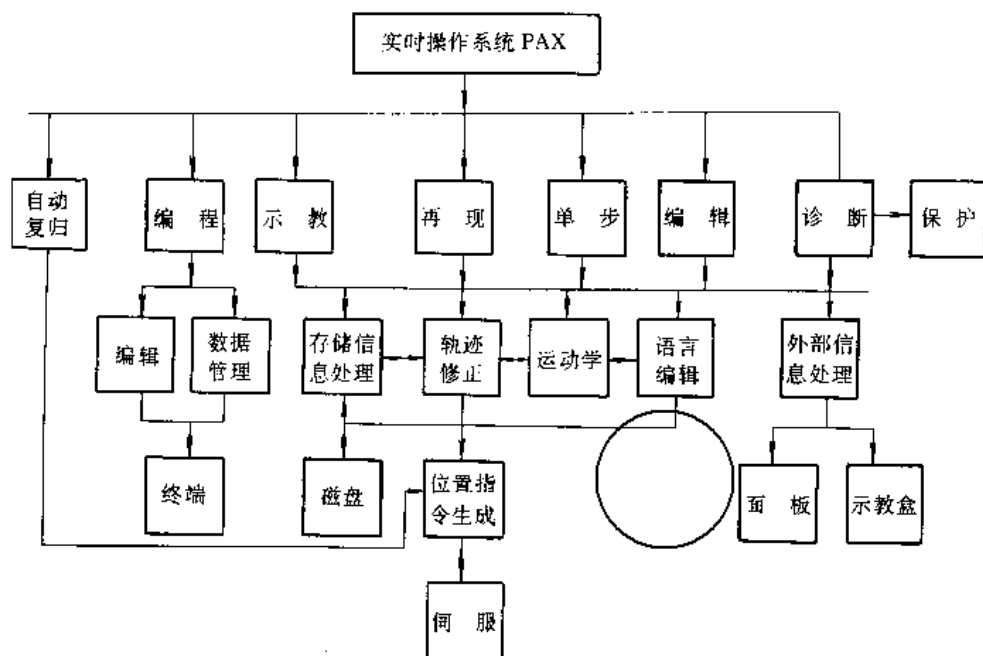


图 9-4-13 电动机器人控制系统软件功能框图

(3) 示教任务。示教分 CP 示教和 PTP 示教。

CP 示教完成示教者手把手示教机器人时的连续轨迹记录，每 50ms 采样一次，并将结果记录下来，同时记录末端执行器的状态。

PTP 示教是操作者通过示教盒控制机器人在直角坐标系或者工具坐标系或关节坐标系内运动，只采样轨迹的起止点。在直角坐标系和关节坐标系中可进行位置的调整，在工具坐标系和关节坐标系中可进行姿态的调整，在运动过程中步长可任意调整。

PTP 示教是机器人运动学的实际应用，它包括机器人手臂端部的轨迹规划和腕部的姿态规划。

(4) 再现。再现亦分成 CP 示教程序的再现和 PTP

示教程序的再现。

CP 再现根据 CP 示教的记录数据进行均值插补，每两点之间是定时插补，每 10ms 发送一点，为保证位置同步，则两点之间插 4 个点。

PTP 再现要根据机器人语言程序中轨迹的规划进行实时运动学计算。机器人语言程序在编程任务中的全屏编辑环境下编制，规划的轨迹运动方式有直线运动、圆弧运动、关节运动。在运动过程中还包括两条轨迹交接处的平滑计算及机检的解耦计算。

对各关节的运动控制由数字伺服单元来完成，它提供了一个程序库 tech80cl.LIB，用户只要使用它提供的函数，就可进行采样、定位、运动等操作。



(5) 单步任务与编辑任务。单步功能是为检验 PTP 示教数据的正确性,通过手动控制走三种轨迹方式:直线、圆弧、关节。在单步测试过程中,如发现某点位置不适应则进行编辑任务,对原来示教的位置数据进行编辑修改,功能有:通过示教盒把机器人运动到指定位置,进行插点和删点操作。

(6) 编程任务。编程任务是机器人语言的编辑环境,有全屏编辑功能,可进行各种文件操作。

(7) 故障诊断任务。对控制系统的故障进行实时监测,可进行电动机运行状态的诊断、串行口的诊断和开关口的诊断等。

机器人控制软件流程图实例见图 9-4-14。

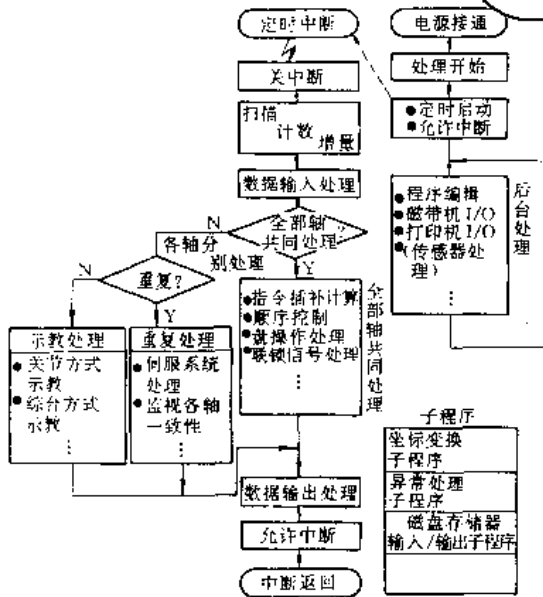


图 9-4-14 机器人控制软件流程图

从微机接入电源开始,程序启动。以后每隔一定间隔产生一次定时中断,在中断之前,程序在允许中断状态下进行后台处理。进入中断后,立即停止后台处理,从定时中断处开始,程序开始执行。首先扫描计数器(关节数)加1,然后将与该轴相对应的输入数据全部读入。其次,如果扫描计数器为0时,则执行全部轴共同处理程序;如果不为0时,则执行各轴分别处理程序。各个处理程序执行完成后,则输出相应数据,在允许状态下,执行“中断返回”指令。这时因中断而停止的后台处理又继续进行。

6 机器人语言

6.1 机器人语言分类

机器人语言是指在人与机器人之间记述或交换信

息的语言,它是一种用符号描述机器人动作的方法,可实现包含传感器处理的复杂作业逻辑程序。

机器人语言分类见表 9-4-11。

表 9-4-11 机器人语言分类

| 类别 | 说明 |
|--------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 命令级 | 机器人动作的基本指令用带有参数的命令表示,通过汇编后执行,相当于计算机中的汇编语言 |
| 原始动作级 | 用于表示机器人手爪动作,即用 Move To (destination)形式。由于动作表示只限于手爪动作,语言处理系统比较简单。实现复杂作业手爪的位姿必须由软件设定,相当于计算机中的 BASIC 语言 |
| 构造动作级 | 以构造方式描述作业过程,可增加面向机器人动作的各种语句,语言规格可以扩充,可实现对对象物及手的位姿坐标系关系管理,免去由于手爪和抓取物体偏差换算成多坐标系值,程序负担轻,是描述复杂作业的一般性语言,相当于计算机中的 PASCAL |
| 对象物状态级 | 基于作业是对象物的状态变化编程的,为此将部件定位在某一位置或把某一部件和其他部件组合起来,以这样单纯的状态变化为单位区分作业。在描述对象物间的相对关系时,具体的数据需由程序设定 |
| 作业目标级 | 是对象物状态级语言的一般化形式。只给出作业的最终目标,具体的作业顺序和数据自动生成,是最理想的机器人语言 |

6.2 机器人编程语言构成

- (1) 指令集合。随语言水平不同,指令数可有数个至数十个。
- (2) 程序的格式与结构。
- (3) 程序表达码和载体。用以传递源程序。

6.3 机器人语言语句操作

- (1) 作业环境、对象的描述;
- (2) 作业过程的描述;
- (3) 作业码:描述单元作业方式;
- (4) 作业数:描述单元作业运动或作业量。



6.4 机器人语言采用的信息

(1) 动作信息。姿态控制、动作控制、轨迹控制等动作关联的命令集。

(2) 末端执行器信息。装配手爪控制命令、特殊用途的命令。

(3) 外部信息。传感器信息、外部信号处理、外围设备接口以及和传感器接口通信。

(4) 运动命令、位置信息是特殊结构变量，可代入

演算。

(5) 程序控制、判断、反复等。

6.5 采用机器人语言的必要性

(1) 可离线进行编程和检查；

(2) 通过坐标运算功能，可使示教位置点数最少；

(3) 适于复杂作业的示教；

(4) 可对应于视觉等传感器信息的智能作业；

(5) 程序易理解、易存储和交流。

第5章 机器人用传感器

机器人用传感器按用途分为内部传感器和外部传感器。内部传感器装在操作机上，包括位移、速度、加速度传感器，是为了检测机器人操作机内部状态，在伺服控制系统中作为反馈信号。外部传感器，如视觉、触觉、力觉、距离等传感器，是为了检测作业对象及环境或机器人与其关系。使用外部传感器，可以提高机器人自适应能力和智能水平。

1 位移传感器

位移传感器包括直线位移传感器和角位移传感器。电位器等可用于测量直线位移，也可用于测量角位移；编码器、旋转变压器等可用于测量角位移。其分类如图 9-5-1 所示。

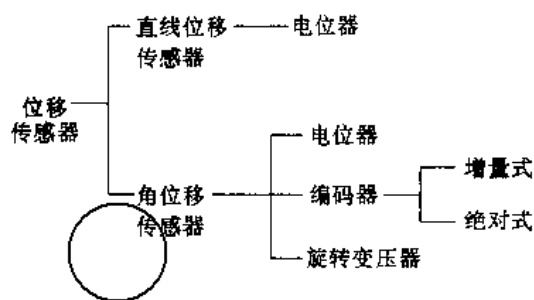


图 9-5-1 位移传感器分类

1.1 电位器

电位器可作为直线位移和角位移检测元件，其结构型式如图 9-5-2 所示，电路原理图如图 9-5-3 所示。

$$\text{当 } R_L \gg R \quad u_o = \frac{R_1}{R} e_o$$

式中 e_o —— 电源电压；

R_1 —— 触点分压电阻；
 R —— 电位器总电阻；
 R_L —— 负载等效电阻；
 u_o —— 输出电压。

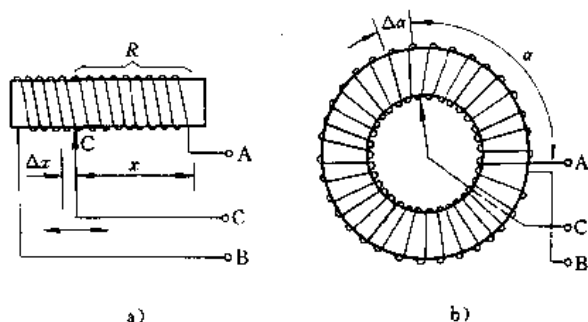


图 9-5-2 电位器式传感器型式
 a) 直线位移型 b) 角位移型

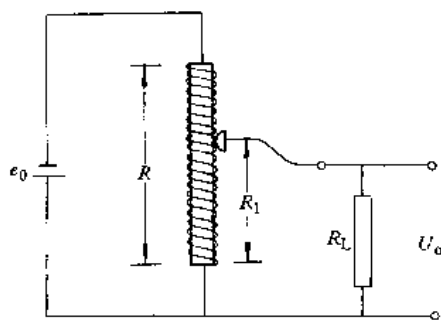


图 9-5-3 电位器式传感器等效电路

所以为了保证电位器的线性输出，应保证等效负载电阻远远大于电位器总电阻。



电位器式传感器结构简单,性能稳定,使用方便。但分辨力不高,且当电刷和电阻之间接触面磨损或有尘埃附着时会产生噪声。

1.2 光电编码器

编码器可以是机械式的、电磁式的或光电式的,按其刻度方法的不同又可分为增量式的和绝对式的。作为机器人位移传感器增量式光电编码器应用最为广泛。

光电编码器的工作原理如图 9-5-4 所示,在圆盘上有规则地刻有透光和不透光的线条,当圆盘旋转时,便产生一系列交变的光信号,由另一侧的光敏元件接收,转换成电脉冲。

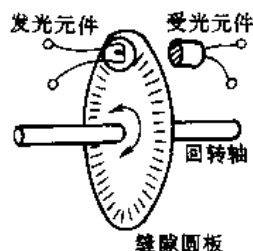


图 9-5-4 光电编码器工作原理图

如图 9-5-5 所示,增量式编码器有 X、Y、Z 三路输出信号。其中 X、Y 为相位相差 90° 的两路脉冲信号; Z 为标志信号,码盘每转一圈,产生一个脉冲,旋转方向可由硬件电路检测。

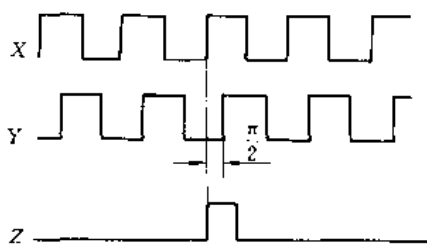


图 9-5-5 增量式编码器的输出波形

绝对式编码器与增量式不同之处即在圆盘上透光不透光的线条图形,绝对式编码器可有若干码道,位置可由码值直接读出。码道的设计可采用二进制码、循环码、二进制补码等,编码器的分辨度为 $2^n \times 360^\circ$, n 为盘上的码道数。图 9-5-6 为循环码盘面图形。

光电编码器无触点,可以用在快速旋转的场合。此外,绝对式编码系统难以适应有噪声的环境,如电源干扰、机械振动,且成本高,所以不如增量式编码器应用

普遍。

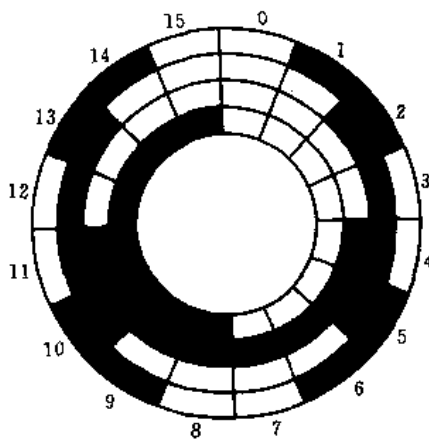


图 9-5-6 绝对式编码器的盘面图形举例——循环码

1.3 旋转变压器

应用最广的是正余弦旋转变压器。它是一种小型的交流电机,定子和转子都有两个相互垂直的绕组,如图 9-5-7 所示,定子上两个绕组的励磁电压为 $E_M \sin \omega t$ 、 $E_M \cos \omega t$ 。其幅值相等,均为 E_M ,角频率相等,均为 ω ,相位相差 90° 。转子两个绕组输出电压为 $K E_M \sin(\omega t + \theta)$ 、 $K E_M \cos(\omega t + \theta)$,其幅值与励磁电压的幅值成正比,对励磁电压的相位移等于转子的转动角度 θ ,检测出相位差为 θ ,即可测出角位移。

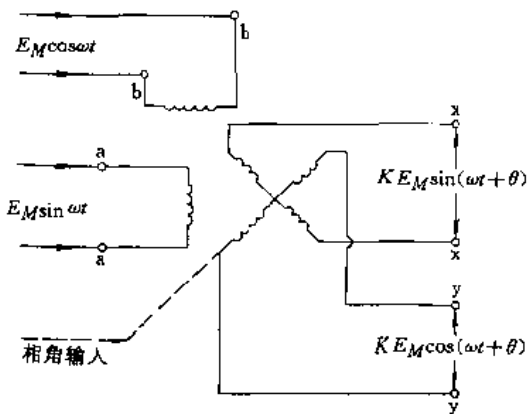


图 9-5-7 旋转变压器两相励磁移相器

2 速度传感器

因为测量直线速度需要特殊的传感器,所以一般只限于测角速度,位移的导数是速度,所以在很小的时间间隔内对位移采样,可计算出速度。利用这种方法,位移和速度测量可共用一个传感器(如增量式编码



器),但这种方法有其局限性:在低速时,存在不稳定的危险,而在高速时,只能获得较低的测量精度。

最通用的速度传感器是测速发电机,有直流测速发电机和交流测速发电机,其输出电动势(或电压)与转子转速成正比。若使用旋转变压器作为位移传感器,则交流测速发电机可和旋转变压器共用一个传感器。

3 加速度传感器

加速度的测量可通过以下方法实现:

(1)由速度计算,加速度是速度的时间导数。在一定的时间内对速度采样,可计算出加速度;

(2)根据牛顿定律, $a=F/m$,对于已知质量 m 的物体,使用力觉传感器,测量其所受的力 F ,即可求出加速度 a ;

(3)力可为电磁力等,电机的电磁力的大小与电流有关,所以加速度的测量可转化为电流的测量,电流伺服反馈是最常用的控制加速度的方法。

4 触觉传感器

触觉是接触、冲击、压迫等机械刺激感觉的综合。触觉可用于进行自适应抓取;触觉还常用来作为视觉的补充;利用触觉可进一步感知物体的形状、软硬、疏密等物理性质。但是由于目前尚缺乏理想的触觉传感器,使得触觉系统的应用受到了很大的影响。到目前为止,触觉系统在工业生产中成功应用的例子还很少。触觉包括接触觉、接近觉和滑觉等。

4.1 接触觉

接触觉是通过与对象物体彼此接触而产生的,所以最好使手指表面高密度分布触觉传感器阵列,且柔软易于变形,以增大接触面积,并且有一定的强度,便于抓握。

1. 机械式触点 利用触点的接触断开,获取“1”、“0”二态信息,这种传感器主要用于识别物体的二维轮廓。由于结构的关系无法高密度排列。

2. 压敏导电橡胶 采用压敏橡胶的触觉元件,可以做得很薄,且能高密度排列。且因元件本身具有弹性,抓取时不会损伤所抓取的物体。元件容易制造且使用方便,在实用和安装上有许多优点。然而,因导电橡胶具有磁滞和响应迟缓,以及接触电阻大等缺点,在实用中需要进一步设法予以解决。

3. 柔性皮肤传感器 图9-5-8所示澳大利亚Wollongong大学研制的一种柔性皮肤传感器,硅橡胶

膜构成传感器的外层皮肤,传感器的下面由聚氨酯泡沫材料支撑。当与物体接触时,硅橡胶皮肤弯曲和拉伸,这些变化由附着在皮肤内表面的0.5mm厚的导电聚合物带进行检测。该材料是加有石墨的硅基聚合物,应变和电阻间有可预测的关系。该传感器可用于跟踪和测绘物体表面,即跟踪边缘、探测顶点、定位凸缘和凹处并形成表面轮廓。该传感器有以下特点:(1)对小的接触力有高的敏感度;(2)分辨力较高;(3)高度柔性的表面。

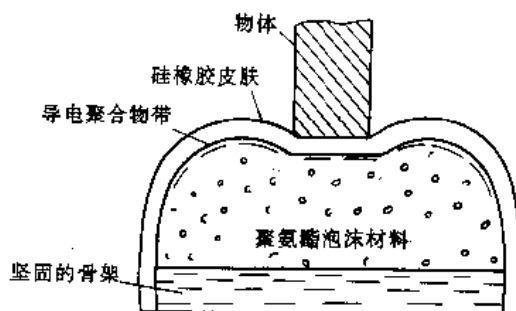


图9-5-8 柔性皮肤触觉传感器断面图

4. 光纤传感器 这种传感器包括由一束光纤成的光缆和一个可变形的反射表面(也作为感觉表面)。光通过光纤束投射到可变形的反射材料上,反射光按相反方向通过光纤束返回。如果反射表面是平的,则通过每条光纤所返回的光的光强是相同的;如果反射表面因与物体接触受力而变形,则反射光的光强不同,用高速光扫描技术进行处理,即可得到反射表面的受力情况。

4.2 接近觉

接近觉是一种粗略的距离感觉,接近觉传感器的主要作用是在接触对象之前获得必要的信息,用来探测在一定距离范围内是否有物体接近,以及物体的接近距离和对象的表面形状及倾斜等状态,一般用“1”和“0”二态表示。在机器人中,主要用于对物体的抓取和躲避。接近觉一般用非接触式测量元件,如霍尔效应传感器、电磁式接近开关和光学接近传感器。

以光学接近传感器为例,其结构如图9-5-9所示,由发光二极管和光敏三极管组成。发光二极管发出的光经反射被光敏三极管接收,接收到的光强和传感器与目标的距离有关,输出信号 V_{out} 是距离 x 的函数: $V_{out}=f(x)$ 。红外信号被调制成某一特定频率,可大大提高信噪比。



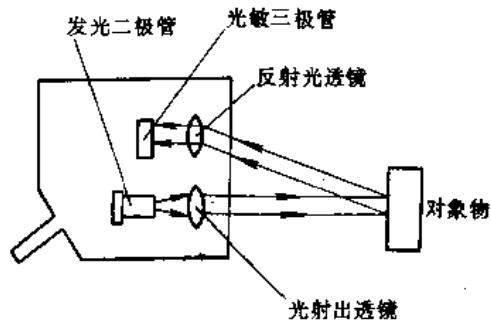


图 9-5-9 光学接近觉传感器

4.3 滑觉

机器人在抓取不知属性的物体时，其自身应能确定最佳握紧力的给定值。当握紧力不够时，要检测被握持物体的滑动，利用该检测信号，在不损害物体的前提下，考虑最可靠的夹持方法。为此目的的滑动检测器，称之为滑觉传感器。

图 9-5-10 所示为采用光学系统的滑觉传感器，检测滚子用弹簧片支撑在机器人手指上，手指张开时，滚子高出握持面 1mm，手指闭合握持物体，滚子退至手指握持表面，装在滚子内刻有 30 条缝隙的圆盘和光学传感器，可检测滚子的回转位移，得到滑动位移对应的

脉冲信号。

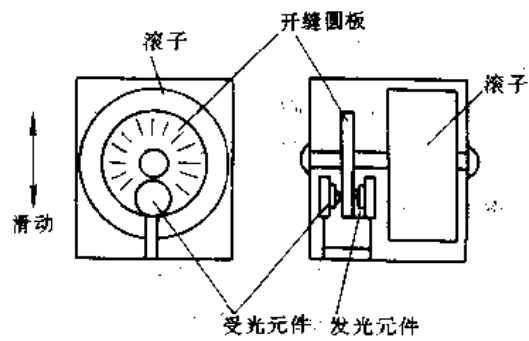


图 9-5-10 光学滑觉传感器

另一种传感器由橡胶表皮、高分子压电材料 PVDF 和橡胶基底叠合而成。PVDF 质地柔软，压电电压常数高，频响宽，是较理想的触觉传感材料。利用该传感器可实现接触觉和滑觉同体检测。当手指表面开始接触到物体时，PVDF 由于受阶跃应力的作用，生成接触压电信号，而物体相对手指表面滑动时，摩擦力引发表皮产生诱导振动，生成交变压电信号，图 9-5-11a、b 分别示出了典型的接触、滑动响应信号。为相对滑动时引发微振动，可以设计各种表皮形状，如图 9-5-12 所示，图中 a、b 能全方位感知滑动，图 c 只能感知垂直于纹路方向的滑动。

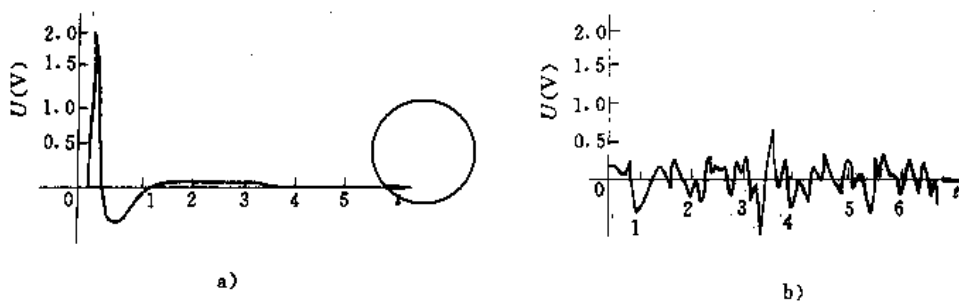


图 9-5-11 PVDF 接触觉和滑觉典型响应信号

a) 接触信号 b) 滑动信号

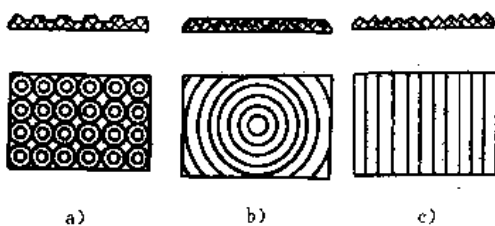


图 9-5-12 表皮结构形状

a) 点阵状 b) 三角齿圆弧状 c) 三角形齿直纹

5 力觉传感器

力觉是指对机器人指、肢和关节等运动中所受力的感知，主要包括腕力觉、关节力觉和支座力觉等。腕的输出力或腕所承受的力感觉成为腕力觉。腕力觉的测量大多包括力的三个分量和力矩的三个分量。测量力可采用压电元件或应变片等，机器人广泛采用应变片。

因为力觉传感器要检测多维力的构成，就要在不



同的位置上立体地安装多个应变片。因此,信号的处理一般比较复杂,不过,若适当选择安装应变片的基板结构和应变片的安装位置,传感器的输出处理电路便可得到简化。由于机械滞后和残余变形,为测定微小的力带来困难。

如图9-5-13所示,铝制圆筒形弹性体由八根梁支撑(上层四根竖梁,下层四根横梁)。当机器人手受力时,弹性体发生形变,由在梁的两侧粘贴八组应变片(R_1 和 R_2 为一组)测得的信息(将各测试点的形变转换成电信号),就能算出加在 x 、 y 、 z 轴上的分力以及各轴的分转矩。

$$F_x \propto P_{y+} + P_{y-}$$

$$F_y \propto P_{x+} + P_{x-}$$

$$F_z \propto Q_{z+} + Q_{z-} + Q_{y+} + Q_{y-}$$

$$T_x \propto Q_{y+} - Q_{y-}$$

$$T_y \propto -Q_{z+} + Q_{z-}$$

$$T_z \propto P_{x+} - P_{x-} - P_{y+} + P_{y-}$$

式中 P_{x+} 、 Q_{z+} —— 所测量的 x 轴正向腕力传感信号值;

P_{y+} 、 Q_{y+} —— 所测量的 y 轴正向腕力传感信号值;

P_{x-} 、 Q_{z-} —— 所测量的 x 轴负向腕力传感信号值;

P_{y-} 、 Q_{y-} —— 所测量的 y 轴负向腕力传感信号值。

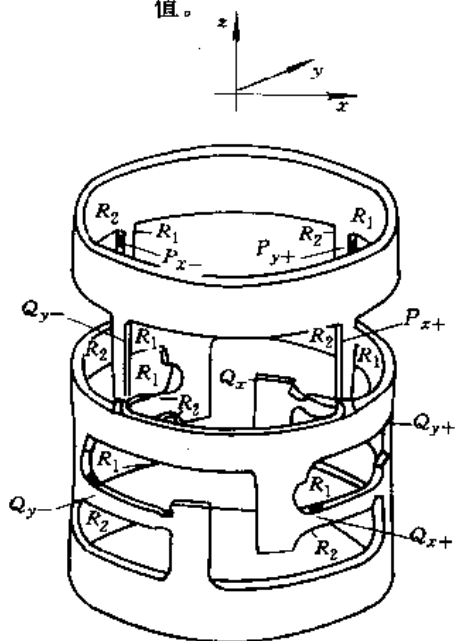


图9-5-13 筒式腕力传感器

6 距离传感器

距离传感器可用于机器人导航和回避障碍物,也

可用于对机器人工作空间内的物体进行定位及确定其一般形状特征。目前最常用的测距法有两种:

1. **超声波测距法** 超声波是频率20kHz以上的机械振动波,利用发射脉冲和接收脉冲的时间间隔推算出距离。超声波测距法的缺点是波束较宽,其分辨力受到严重的限制,因此,主要用于导航和回避障碍物。

2. **激光测距法** 激光测距法也可以利用回波法,或者利用激光测距仪,其工作原理如下:

氦氖激光器固定在基线上,在基线的一端由反射镜将激光点射向被测物体,反射镜固定在电机轴上,电机连续旋转,使激光点稳定地对被测目标扫描。由CCD(电荷耦合器件)摄像机接受反射光,采用图象处理的方法检测出激光点图象,并根据位置坐标及摄像机光学特点计算出激光反射角。利用三角测距原理即可算出反射点的位置。

7 多传感器信息融合

每种传感器都有一定的使用条件和感知范围,并且仅能给出环境或对象的部分或某个侧面的信息。使用多传感器可以互相取长补短,建立较全面的环境或对象模型,消除或减少对感知对象解释的多义性、不完全性、不确定性和误差。多传感器信息融合,是把多种(个)传感器集中于一个统一的感知系统中,从而有机地综合、利用从多个传感器获得的数据和信息,建立一致的、不存在矛盾的世界模型或有关检测对象的状态。融合后的信息是对感知环境或对象的更为确切的相关解释和更高层次的描述。传感器的融合技术涉及神经网络、知识工程、模糊理论等信息、检测、控制领域的新理论和新方法。传感器汇集类型有多种,现举两种为例:

1. **竞争性的** 在传感器检测同一环境或同一物体的同一性质时,传感器提供的数据可能是一致的,也可能是矛盾的。若有矛盾,就需要系统裁决。裁决的方法有多种,如加权平均法、决策法等。在一个导航系统中,车辆位置的确定可以通过计算法定位系统(利用速度、方向等记录数据进行计算)或陆标(如交叉路口、人行道等参照物)观测确定。若陆标观测成功,则用陆标观测的结果,并对计算法的值进行修正,否则利用计算法所得的结果。

2. **互补性的** 传感器提供不同形式的的数据。例如,识别三维物体的任务就说明这种类型的融合。利用彩色摄像机和激光测距仪确定一段阶梯道路,彩色摄像机提供图象(如颜色、特征),而激光测距仪提供距



离信息,二者融合即可获得三维信息。

目前要使多传感器信息融合体系化、一般化尚有困难,而且缺乏理论依据。多传感器信息融合的理想目标应是人类的视觉、识别、控制体系,但由于对后者尚

无一个明确的工程学的阐述,所以机器人传感器融合体系要具备什么样的机能尚是一个模糊的概念。相信随着机器人智能水平的提高,多传感器信息融合理论和技术将会逐步完善和系统化。

第6章 机器人视觉

1 概述

机器人视觉通常也称为机器视觉或计算机视觉,它是从视野环境内的图象中抽取、描述和解释信息的一个过程。视觉对于机器人的智能化来说具有非常重要的意义。它可以使机器人快速、准确、及时、大量地获得外界信息。它赋予机器人一种高级感觉机构,使机器人能对其周围环境进行识别并做出相应的灵活反应。

目前机器人视觉已发展到了第三代。第一代机器人视觉系统是根据物体的剪影工作的,由物体的剪影判断物体的位置、姿态、尺寸等参数。此种视觉系统以二值图象处理为其特征,图象一般由逆光景象生成。第二代机器人视觉系统可采用灰度等级表征物体。这种系统可以根据面光景象工作,并可区分纹理模式。第三代视觉系统采用立体技术,可以从二维图象中理解和构成一个三维世界的模型,也可确定景象中可见物体的三维坐标,甚至推断出不可见表面。

目前,只能在有限的环境中设计并实现上述视觉系统,并以满足某些特定任务的要求为目标。何时才能使机器人视觉具有人类视觉同样的感觉能力,是一个有待今后解决的问题。

工业机器人视觉系统从应用角度出发可分为三类。

(1)用于图象识别。视觉系统将图象信息传递给机器人控制系统,以达到判断操作对象和识别环境的目的,如图9-6-1所示自动喷漆系统。这种应用要求机器人控制器有较高的计算速度,因此,采用的技术要尽可能简单。

(2)用于定位。如根据坡口位置等控制电弧焊焊枪的定位,检测零部件的位置和姿态进行装配等。图9-6-2所示为一个有定位视觉系统的装配机器人。

(3)用于检测。如检测印制电路板和掩膜图的损伤、缺陷以及检测产品的外形尺寸等。图9-6-3所示为

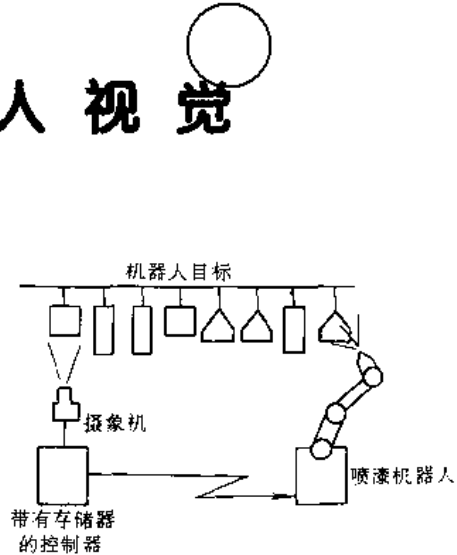


图 9-6-1 自动喷漆系统

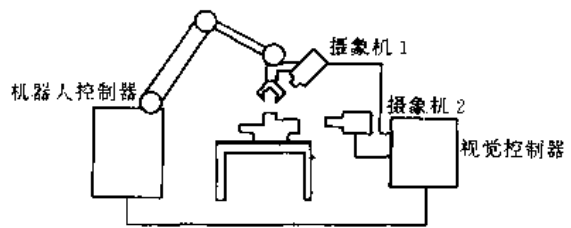


图 9-6-2 有定位视觉系统的装配机器人

一个检测导线直径的视觉系统。

自70年代以来,世界各国在机器人视觉方面做了大量工作。如早在70年代半导体制造工程中,已应用模式识别技术完成自动焊接工作。这在当时是非常先进的技术。其后应用视觉技术的中心转到了半导体生产中的检查部门。典型应用是光掩膜图象缺陷检查装置。还可以应用视觉技术检查照片底板的图象和彩色阴极射线显象管荫罩图象等。在装配自动化中,十几年前已开始研究采用有视觉的机器人,但直到最近廉价的通用视觉装置出现以后,有视觉的机器人才能真正使用于自动化装配作业。

目前虽有许多视觉系统应用于各种不同的领域内,但对于一般工业应用来说,价格还是太高。在特殊的工业应用环境中,如柔性自动生产线、放射性或有毒



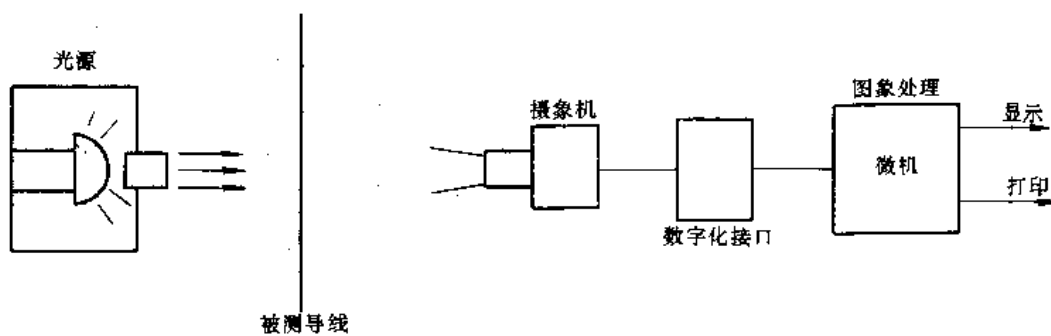


图 9-6-3 检测视觉系统

环境、高精度仪器装配作业中，机器人视觉技术已具有实用价值。随着生产技术的发展，机器人视觉系统的成本必将进一步降低，性能也会不断提高。因此，可以断定机器人视觉的应用和发展不可限量。

用于表面光滑的规则物体。当物体表面是主要研究对象时，一般采用这种方式照明。

2 机器人视觉硬件系统

机器人视觉硬件系统由照明光源、视觉传感器、视觉信号数字化接口和图象处理单元等组成。图 9-6-4 所示为机器人视觉硬件系统框图。

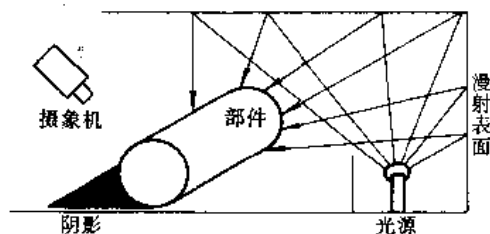


图 9-6-5 漫射照明

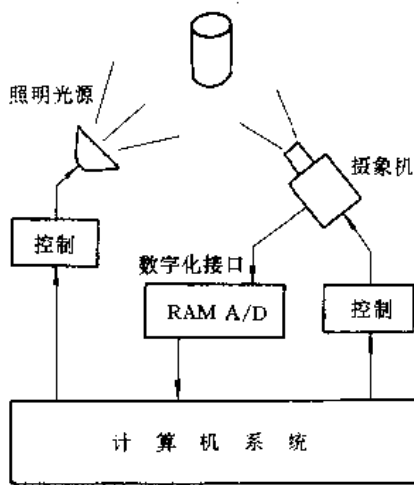


图 9-6-4 机器人视觉硬件系统框图

(2) 背光照明，如图 9-6-6 所示。当物体的剪影足以用来识别或测量物体本身时，背光照明特别适用。

2.1 照明光源

在工业机器人视觉应用中，最重要的问题之一就是考虑照明光源的形式。一个好的照明系统应当使形成图象的复杂性最小，使所需的信息得到增强。照明光源主要有三种：点光源、线光源、面光源。利用这些光源可以构成不同的照明方式。机器人视觉所用的照明方式主要有四种：

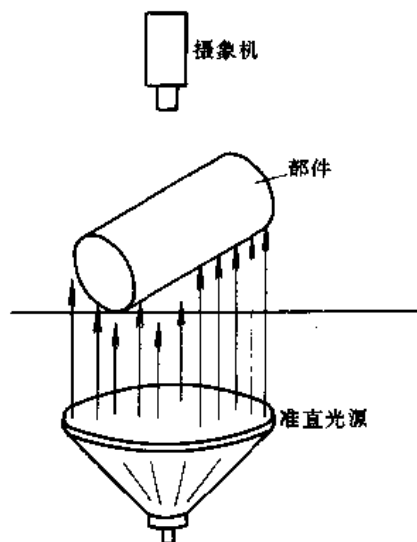


图 9-6-6 背光照明

(1) 漫射照明，如图 9-6-5 所示。这种方式一般适

(3) 定向照明，如图 9-6-7 所示。这种照明方式主要用于物体表面的检测。利用高度定向的光束（如激光）照射物体表面，并测量光的散射量便可检测表面缺



陷，如是否有砂眼或划痕等。

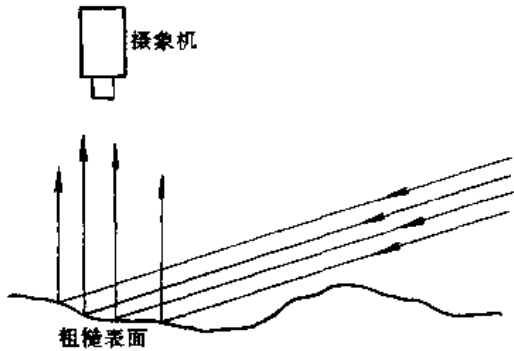


图 9-6-7 定向照明

(4) 结构光照明，如图 9-6-8 所示。这种照明方式在工作空间形成了一个已知的光模式。如果这个光模式发生变化，则可知有物体进入工作空间。根据光模式变化的情况，还可以了解物体的三维特性。

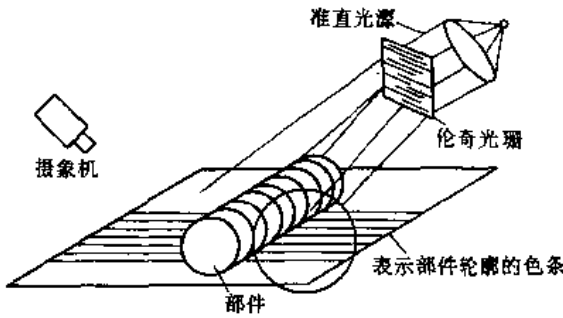


图 9-6-8 结构光照明

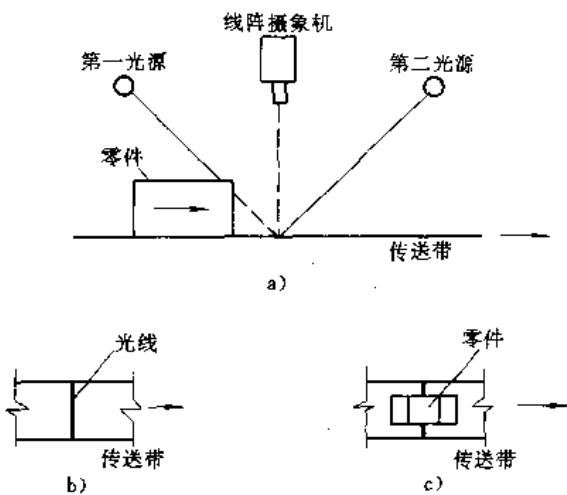


图 9-6-9 结构光照明视觉系统工作原理

a) 照明方式 b) 无零件 c) 有零件

图 9-6-9 给出了一个采用结构光照明方式的机器人视觉系统的工作原理。这个照明系统采用了两个线光源，从不同方向投射于传输带上，并在该表面汇集成一条光线。线阵摄像机位于传输带上方，瞄准传输带上的目标光条，见图 9-6-9a。当一个零件进入摄像机正下方时，即遮断两个光面，使光条在零件通过的地方发生偏移。摄像机看到一条连续亮线时，传输带上没有零件通过，见图 9-6-9b。摄像机看到亮线有黑暗之处时，即有零件正在通过，见图 9-6-9c。

2.2 镜头和视觉传感器

摄像机是视觉系统的主要部件，它由两部分构成，即光学部分——镜头和视觉传感器。

1. 光学部件——镜头 镜头有两种，即定焦和变焦镜头。定焦距镜头适用于目标物位置固定不变的情况。这时摄像机采用固定安装法。定焦距镜头的优点是：成像质量好，质量小，体积小，价格便宜等。不足之处是可调整性差，不能改变视野范围。变焦距镜头适用于要求视野范围可变的摄像系统，如焊缝跟踪系统。这时要对光圈、摇摄、俯仰摄、变焦和聚焦等进行控制。因此，要增加相应的控制电路。

焦距 f 、物距 a 以及象距 b 等参数的成像公式为

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}$$

定焦距镜头的放大率 m 为

$$m = \frac{b}{a}$$

视场角 θ 是由画面尺寸和焦距决定的

$$\theta = 2 \arctan \frac{B}{2f} \text{ (rad)}$$

式中 θ ——视场角；

B ——画面水平宽度；

f ——焦距。

镜头最大范围值 F 与成像亮度有关，是决定摄像机灵敏度的重要因素之一。 F 值越小（光圈越大）成像亮度越亮，则摄像机有较高的灵敏度。但是 F 值越小，则镜头价格越高。 F 值越大（光圈越小），景深越大，对提高图象质量有利。选用镜头时，要根据具体情况综合考虑上述参数。

2. 视觉传感器 视觉传感器的种类很多，如光敏晶体管、激光传感器、光导摄像管、析象管、固态摄像器件等。但主要只有两种适用于工业机器人领域，即光导摄像管和固体摄像器件。

光导摄像管是最早采用的图象传感器。它具有



切电子管的缺点,即体积大,抗振性差,功耗大,寿命短等。因此,近年来在工业上有被固体器件逐渐取代的趋势。但摄像管在分辨率及灵敏度等性能指标上,目前仍有优势。所以在一些要求较高的场合仍得到广泛应用。

图 9-6-10 是一个摄像管的结构原理图。摄像管外面是一圆柱形玻璃外壳。一端是电子枪,用来发射电子束。另一端是内表面镀有一层透明金属膜的屏幕。一层很薄的光敏“靶”附着在金属膜上,靶的电阻与光的强度成反比。靶后面的金属网格使电子束以近于零的速度到达靶面。聚焦线圈使电子束聚得很细,偏转线圈使电子束上下左右偏转扫描。

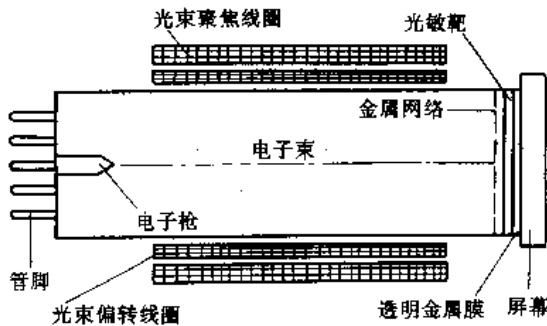


图 9-6-10 光导摄像管结构示意图

工作时,金属膜加有正电压。无光照时,光敏靶呈绝缘体特性,电子束在靶内表面形成电子层,平衡金属膜上的正电荷,这时光敏层相当于一个电容器。有光投射到光敏靶上时,其电阻降低,电子向正电荷方向流动,流动电子的数量正比于投射到靶上某区域上的光强。因此,在靶表面上的暗区电子剩余浓度较高,而在亮区较低。电子束再次扫描靶面时,使失去的电荷得到补充,于是在金属膜内形成了一个正比于该处光强的电流。从管脚将电流引入,加以放大,便得到一个正比于输入图象强度的视频信号。选用时,主要考虑响应时间,标准扫描时间为 1/60s 一帧图象。

固体摄像器件,它的摄像原理与摄像管基本一致。不同的是图象投射屏幕由硅成象元素即光检测器排列的矩阵组成,用扫描电路替代了真空电子束扫描。它具有质量小,体积小,结构牢靠等优点。而且价格也越来越便宜,为工业应用带来了广阔的前景。

固体摄像器件中应用较多的是电荷耦合器件 (Charge Coupled Device——CCD)。

图 9-6-11 是 CCD 器件摄像原理示意图。CCD 器件可分为行扫描传感器和面阵传感器。行扫描传感器

只能产生一行输入图象。适合于物体相对传感器作垂直方向运动的应用(如传送带),或一维测量应用。其分辨率一般在 256~2048 象素之间。面阵传感器的分辨率常用的为 256×256 象素、480×480 象素,1024×1024 象素。正在研制的 CCD 传感器还要达到更高的水平。

在选用视觉传感器时主要应考虑:分辨率,扫描时间与形式,几何精度,稳定性,带宽,频响,信噪比,自动增益,控制等因素。

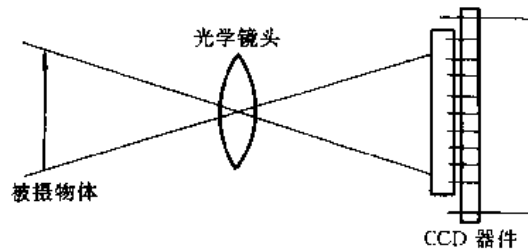


图 9-6-11 CCD 固体器件摄像原理示意图

2.3 数字化接口

从视觉传感器输出的信号是逐点串行的模拟信号,其电压变化范围为 0~1V。计算机或机器人控制系统逻辑电路的电平是 0~5V 之间阶跃变化的数字信号。因此,视觉传感器输出的模拟信号必须要经过数字化接口将其转换为与计算机兼容的信号。

数字化接口可分为模数转换器和象素存储器 (RAM) 两部分,见图 9-6-4。

模数转换过程可分为两步,即采样和量化。采样即是把连续空间信号转换为离散值的过程。采样一般可分解为 2 的幂次如 128×128,或 512×512 图形象素。把转换后的每点象素的强度分成离散的级别(又称灰度)即是量化的过程。一幅图象的灰度等级一般在 2~256 (8bit) 范围内。

象素存储器主要作用是将模数转换后的数字信号存储起来。储存一帧图象所需的存储容量由采样分解度决定。分解度提高则所需容量将迅速增加。例如,分解度为 64×64 象素的一幅 256 灰度等级的图象,需要 4KB 的存储器。当把分解度提高到 256×256 象素时,同样的图象要 64KB 存储器。同时随着图象分解度的提高,数字化接口的复杂性也将加大。

3 机器人视觉图象处理

图象处理在早期一般采用小型通用计算机。近年



来多使用经济、灵巧的微型计算机并将一部分软件固化,使结构进一步简化。图象处理的方法很多,但对于工业应用来说,要满足计算机速度和低成本的要求。

3.1 一般图象处理

图象处理一般分为两个过程:图象预处理和图象识别。主要图象处理方法及其用途和实现方法见表9.6-1。

表 9.6-1 图象处理方法及其用途和实现方法

| 名称 | 作用 | 实现方法 |
|-------|--------------------|----------------------------------------|
| 图象输入 | 将数据输入处理机 | 串行形式,依次输入存储器中 |
| 图象补偿 | 排除噪声干扰,增加图象反差,突出主体 | 均值法,百分比增益法定值加减法 |
| 图象滤波 | 消除各种干扰,增强信号,简化识别 | 邻域平均法,中值滤波法,空间微分法 |
| 图象特征化 | 为识别处理做准备 | 跟踪棱线,寻找棱线改变方向的顶点和顶点类别。提取面积、周长、孔眼数等特征参数 |
| 图象识别 | 识别所摄图象 | 特征参数比较法,模式匹配法,窗口检测法 |

为了降低成本和实时处理图象,在工业机器人视觉应用中,常采用下列措施:

- (1) 尽量采用分辨力低的图象传感器;
- (2) 采用隔行或隔多行扫描采样方法;
- (3) 尽可能采用黑白图象轮廓分析;
- (4) 轮廓线性化,用直线逼近曲线轮廓;
- (5) 尽量减少识别特征参数的数量。

3.2 灰度图象及二值化处理

从视觉角度来看,物体所具有的特性可以分为几何特性、质的状况及附加状况。形状的认识是分选工序自动化所不可少的,位置识别则与装配自动化密切相关。质的状况是检测物体好坏的重要特征。而附加状况如产品名称、出厂号这类标记和字母也是识别检验产品的重要视觉信息。

工业视觉系统在处理以上物体特性的识别时,通常可以采取的措施,使其简缩到二维平面内。质的状况和附加状况一般要用较高灰度等级图象处理。而对几何性质来说大多数情况下可以简化成二值形式。这样做的结果使视觉系统硬件简化并可达到较高处理速度。

有多种方法可以获得二值图象。利用本章2.1节所提出的背光和结构光照明方法可以得到二值图象。也可以利用边沿检测方法得到二值图象。使用较普遍又方便的方法是阈值法。

用阈值法将一幅灰度图象二值化可以借助于直方图。直方图是以某一特定灰度为底,将其对应的图象点数用高度表示成图表的简单方法。这种直方图的计算只需要用其灰度值指向正确的存储地址,再增加相应的象素数存储单元即可。例如,8bit256灰度等级的图象在直方图中只需256个存储单元。灰度直方图示于图9.6-12中。若要把灰度图象转化为二值形式,可以取直方图各点作为阈值。低于阈值的任意灰度皆置为0,高于阈值的任意灰度皆置为1,即可生成一幅二值图象。

由直方图决定的阈值是一种随图象光亮度值的频度分布而变化的浮动阈值。也可以根据具体情况选取一固定阈值把灰度图象二值化。这种固定阈值法往往可以使摄像机的灵敏度不均及电信号畸变得到补偿。固定阈值法可以用硬件电路实现,也可以用计算机软件实现。

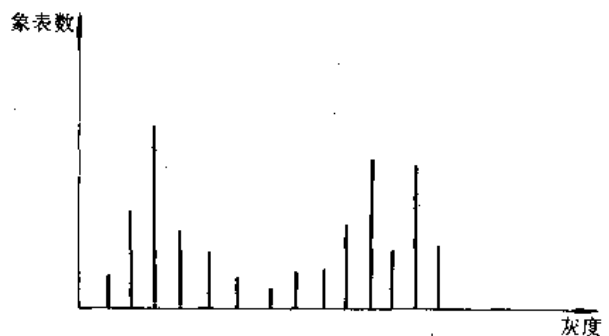


图 9.6-12 灰度直方图

3.3 三维视觉

三维视觉是图象处理和人工智能的一个新的研究领域。这一领域的研究工作已有十多年历史。目前的绝大部分研究工作仍以满足某些特定任务为目标。三维



视觉的工业应用问题主要是研制高效的硬设备和实现视觉算法。另外，成本、速度、灵活性及复杂性等因素也限制了三维视觉技术在工业环境中的应用。

机器人视觉的主要目的是全面、完整地理解一个给定的三维景物。此过程称为景物分析或图象理解。应当指出图象理解与图象处理的不同，图象处理是一种图象到另一种图象的转换，不是一种描述过程。

图象理解中摄像机所拍摄的三维世界称为景物(Scene)。图象理解中不仅要考虑亮度急剧变化的特点，同时也要根据物体各个面的方向、距离、颜色、反射率等特征来构成物体的三维模型。这些特征与照明情况、观看者位置等无关，是物体固有特性，称为景物特征。因象的特征是二维的，景物的特征是 $2\frac{1}{2}$ 维的，而物体的认识是三维的。

获得景物的三维信息的主要方法有两种。

(1) 立体视觉是获得三维信息最自然的方法，就象人眼一样只要用两部摄像机就可构成立体视觉传感器。但要在两幅立体图象上找到相关的点是个十分困难的问题。立体视觉主要处理给定物体三维参数的计

算和利用三维信息进行图象分割。

(2) 利用距离传感器，如激光测距仪可以获得更精确的三维信息。与立体视觉相比，它需要增加摄像机的附属激光光学装置，并且输入距离信息的速度较低。但它能直接提供深度信息，使视觉算法简化、可靠。因此，工业应用较为普遍。

4 机器人视觉系统实例

4.1 二值系统

作为二值机器人视觉系统的实例，首先介绍一下 VS-100 系统。

该系统可分为两大部分：摄像处理机与特征处理机。其原理框图如图 9-6-13 所示。摄像处理机可控制频闪照明装置，并可接受一个或几个摄像机的输入。特征处理机完成监控、特征计算及物体识别。系统将待测物体的特征与存储的样板进行比较来识别物体。

首先扫描输入样板图象，计算灰度直方图，并选定阈值，将阈值和样板特征存储于存储器中。然后对待测

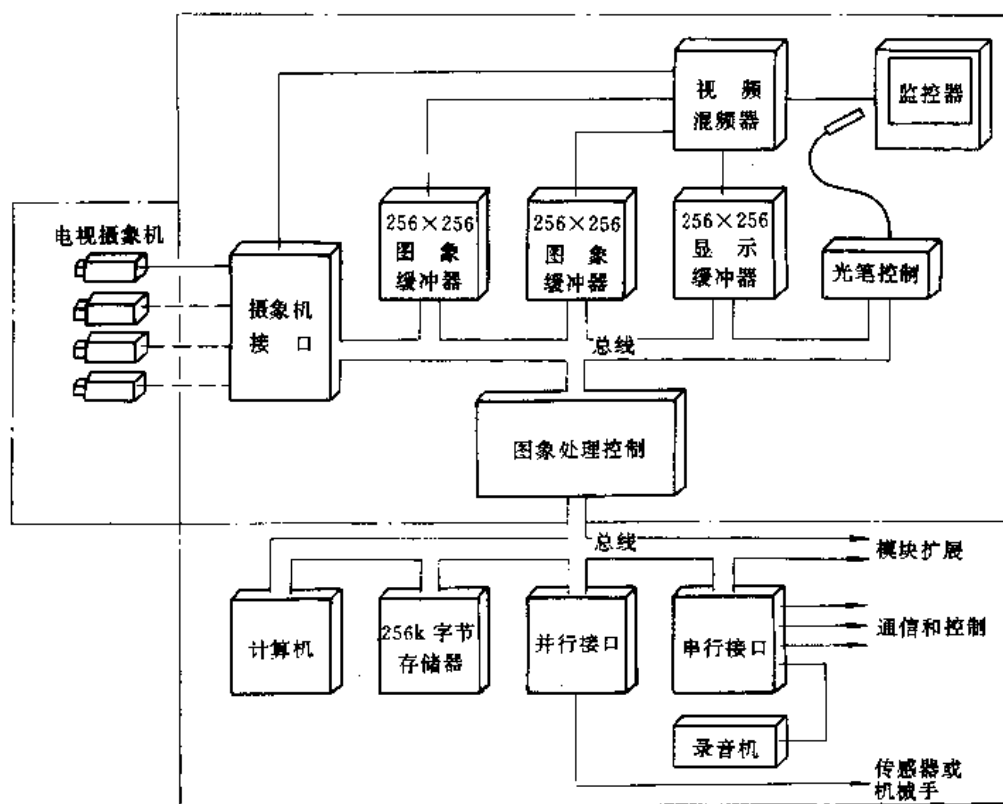


图 9-6-13 VS-100 视觉系统原理框图



物体扫描输入图象用预定阈值进行二值化。接着找到物体棱点,以确定物体外形。最后计算特征,如周长、面积、位置等。并把计算的特征与预先存储的样板进行比较来识别物体。

第二个应用实例是 CCD-1 型电线电缆动态测径仪。CCD 器件作为传感器,其特点是测量时间短,被测物体可连续快速运动。目前德国、美国、日本等国的电线电缆生产线普遍采用了这种新型检测方法。主要用于非接触动态测量电线电缆的直径等。其测量范围为 0.1~80mm,准确度为 0.008mm。CCD-1 型系统的主要特点是在图象二值化过程中,量化电平随着信号的强弱变化而变化。因此,可以补偿由于照明状态的波动而引起的测量误差。另外,由于采用普通小电珠照明而降低了成本。

该仪器原理框图如图 9-6-14 所示。主要由照明光源、光学成像系统、CCD 视觉传感器、数字化接口及微机等组成。采用背光照明将被测电线或电缆的剪影经光学系统成象于 CCD 器件上。CCD 器件将影象转变成电信号,经数字化接口处理后成为二值图象,并送入微机进行特征计算。最后将结果显示打印。如果需要,还可以控制某种设备构成闭环系统。

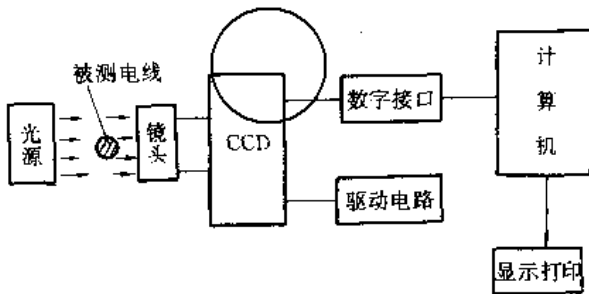


图 9-6-14 CCD-1 型电线电缆动态测径原理图

4.2 灰度系统

可以进行灰度处理的机器人视觉系统的例子很多。这里先介绍一种“内部视觉 100”系统。该系统使用固体器件摄像机,可处理二值和 64 灰度图象。处理速度可达每秒 10 幅图象,或每秒 30 幅窗口检测。“内部视觉 100”可用于非接触测量、轮廓识别、随机方位零件的存在检验。如导线架及通用印制电路板等,每分钟可检验 4800 个零件。

另一个可进行灰度处理的机器人视觉系统是应用于皮革分类。在皮革生产过程中,皮革材料的检验分类直接影响到产品的质量和档次。由于分类工作的作业

环境很差,加之高速化要求及分类质量的保证,靠人工很难圆满完成这项工作。因此,可采用如图 9-6-15 所示的机器视觉系统。

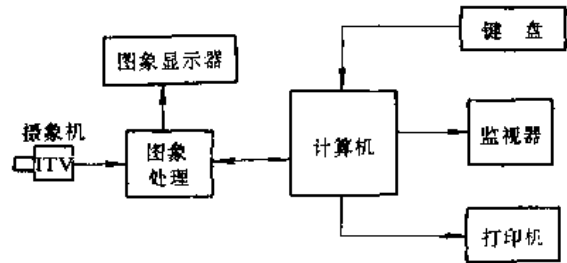


图 9-6-15 皮革分类视觉系统配置图

“皮革分类系统”由一台 VAX-11/780 计算机为主机,用于数据处理与管理。图象的量化及处理采用具有较高速度的 IP8500 图象处理系统。用一台工业摄像机作为图象传感器,完成图象采集。配有 HP-1 打印机、图象显示器、平面光源等辅助设备。该系统有如下功能:

- (1) 可利用人机交互制采集图象,也可采用定时采集方式。
- (2) 直方图分析,产生皮革图象的直方图,并可任意选择分析区域。
- (3) 功率谱分析,可产生皮革纹理的功率谱,并对其进行径向和角向积分。
- (4) 计算特性参数,如亮度、颜色等。
- (5) 自动识别,根据所提取的图象特征,利用分类器把皮革分别归入相应类别,输出结果。
- (6) 学习功能,根据专家提出的样本,对分类器进行修正。

4.3 三维系统

三维机器人视觉的一个突出应用是弧焊机器人的焊缝自动跟踪系统。电弧焊中常常要进行曲线接缝的焊接。而当焊接路线是空间曲线时,很难对全部路径示教,因而弧焊机器人需要具备三维视觉系统,以便能自动跟踪焊缝。

弧焊机器人系统结构及原理如图 9-6-16 所示。该系统具有体积小,质量小,结构坚固的特点。几乎可以适用于一切焊接坡口的测量应用。此外,它的窥视孔很窄,并且使用了保护气体和压缩空气来保持窥视孔不被焊接所产生的烟气或其他尘埃所污染。

通过两个光学系统将工件表面长条形区域成象于

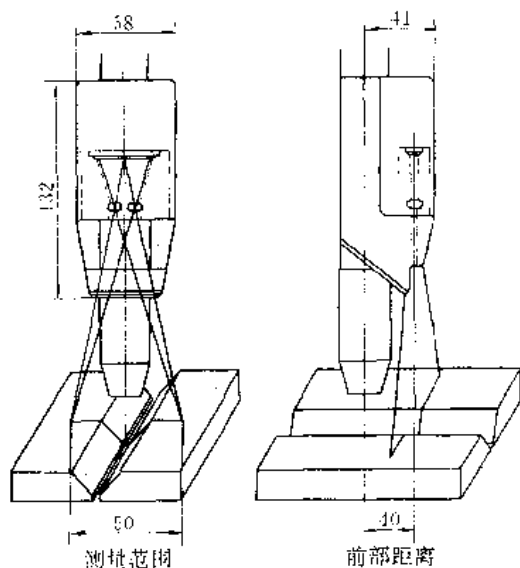


图 9-6-16 弧焊机器人视觉系统原理图 (单位: mm)

同一个 CCD 视觉传感器的两个相邻区域上。工件表面结构可以在最终的“立体图象”中显示出来。焊缝的偏移量与其到摄像机的距离成比例。控制系统输入由 CCD 转换后的图象信号,并计算出工件表面各点的空间位置。

利用上述原理可以把高精度测量用的摄像机做得又小又坚固。但是要求高分辨力的 CCD 传感器及功能很强的计算机系统。由于该系统测量精度很高,因此,

在焊接机器人领域中有着广阔的应用前景。

该视觉系统的图象处理框图示于图 9-6-17 中。图象处理单元包括了 12 个微处理器和 4 套计算机硬件,可以计算出相关公式。并可经过 RS232 串行接口把修正数据传送到机器人控制器。这些数据包括焊接起始点、焊缝位置、改进焊接参数、修改焊接终点位置,并可连续摄像和定位、自动校准等。

该机器人视觉系统还有自动曝光控制并且带有辅助激光,可以在没有弧焊时,寻找焊接起点。该系统的摄像机控制器是多处理器系统,有附加硬件存储器,用于存储图象信号,预处理计算值及焊缝样板。多处理器可以完成焊缝坡口位置及容积的计算。该系统测量误差可达到 $\pm 0.2\text{mm}$ 。该系统还有一个专家系统,可以自动使摄像机和焊枪处于最佳焊接角度,并且针对不同的坡口容积选择正确的焊接参数。另外,专家系统也是离线编程的重要组件。

下面简要介绍最近研制的一种机器人视觉新方法。该方法能大大降低上下料机器人视觉导向设备的成本,并可提高低档装配系统的精度。采用这一新方法后用低成本系统元件就能达到全面改善性能的目的。该方法是使摄像系统对准机器人手臂,控制系统进行监控,并采用快速重复观看技术对机器人手臂进行定位。机器人处于摄像机一场景的反馈控制回路中,该回路每 20ms 执行一次,控制机器人手臂向零件方向移动,直到到达正确位置。这种反馈方法补偿了所有标定误差和失真问题。

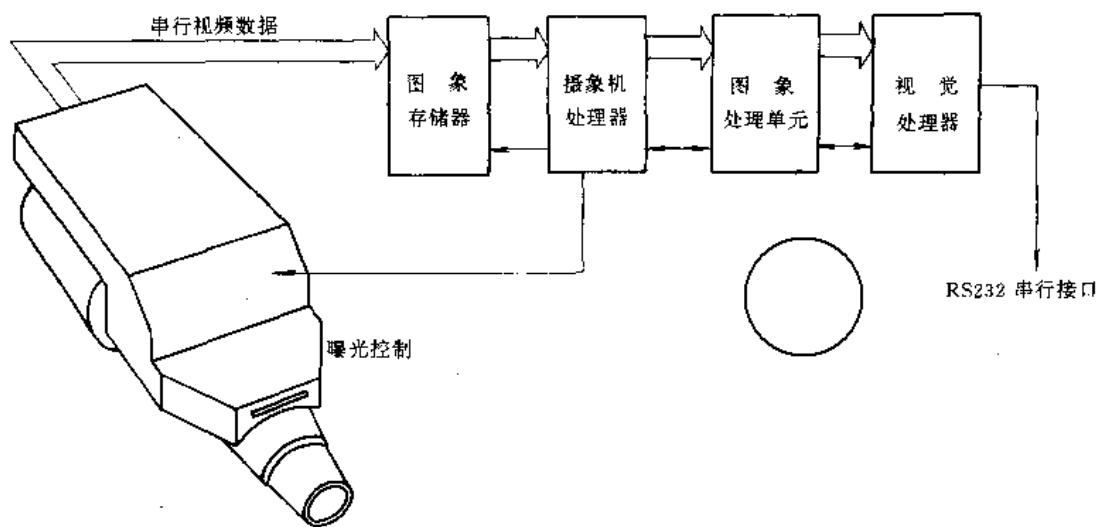


图 9-6-17 弧焊机器人图象处理框图



第7章 几种典型工业机器人简介及其应用

工业机器人用途很广,型号达数百种。这里重点介绍常用的几种典型工业机器人,对其他机器人只作略述。

1 喷涂机器人

1.1 喷涂机器人的结构

喷涂机器人操作机的机械结构主要参数列于表 9-7-1 中。

表 9-7-1 喷涂机器人操作机机械结构参数

| | |
|------|---------------------------------------------|
| 结构形式 | 大多为关节型,少量为直角坐标型、极坐标型及圆柱坐标型,近几年门式机器人有所发展 |
| 轴数 | 以 5~6 轴为多,少量 1、2、3、4、7、9 轴 |
| 负载 | 以 49N (5kgf) 左右居多,范围 9.8~4900N (1~500kgf) |
| 速度 | 一般 1~2m/s, 最高达 40m/s |
| 重复性 | 一般 ±2mm, 最高达 0.025mm |
| 驱动方式 | 以电液伺服驱动为多,80 年代中后期 AC 伺服驱动有所发展,少量气动和步进电动机驱动 |

电液伺服驱动操作机的构成见图 9-7-1。其中回

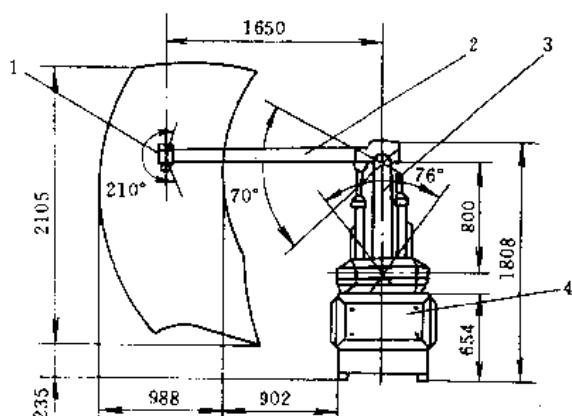


图 9-7-1 电液伺服驱动操作机构成

1—腕部 2—小臂 3—大臂 4—回转机构

转机构、大臂、小臂和腕部每个轴均由电液伺服控制,并带有独立油源,以实现操作机的驱动。

1. 回转机构 主要由回转支座和伺服机构组成。
2. 大臂机构 主要由立臂、伺服机构、直线油缸和平衡机构组成。
3. 小臂机构 主要由横臂、伺服机构、直线油缸和平衡机构组成。小臂平衡机构结构示意图见图 9-7-2。

4. 腕部机构 一般有两种形式:一种是挠性手腕,由两个伺服机构的直线缸和一个伺服机构的摆动缸实现 ±90° 的两个摆动和绕轴线转动;另一种是摆动手腕,由两个摆动缸或者三个摆动缸组成,分别实现二轴或三轴运动,其回转角度小于 240°。

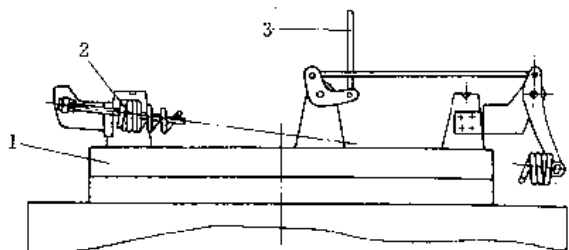


图 9-7-2 小臂平衡机构结构示意图

1—机座回转轴 2—传感器 3—直线油缸

5. 电液伺服系统 由泵、溢流阀、电磁换向阀、单向节流阀、蓄能器、液控换向阀、滤油器、伺服阀和短路阀等器件组成。用来驱动和控制三个直线缸和两个摆动缸。可根据需要增减控制油缸的数量,参见本篇第 3 章 3 节。

1.2 喷涂机器人控制系统

电液伺服喷漆机器人的控制系统工作原理框图见图 9-7-3。

电液伺服喷漆机器人的控制系统构成框图见图 9-7-4。它具有实时多任务调度、实时控制函数插补计算、汉字菜单提示、故障检测、工件识别、多机通信、报警、人机对话等功能,是多 CPU 两级主从式计算机控制系统。采用准 16 位微处理器,STD 总线控制技术,模块化软件硬件结构,采用 CP (连续) 和 PTP



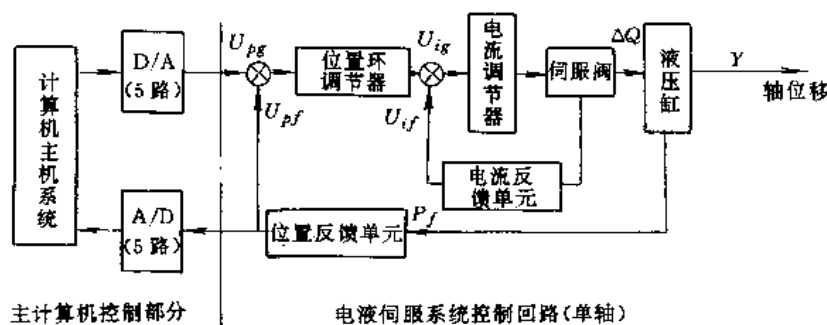


图 9-7-3 电液伺服喷漆机器人的控制系统工作原理框图

U_{pf} —位置环反馈电压 U_{pg} —位置给定电压 U_{ig} —电流环给定电压

U_{if} —电流反馈电压 P_f —位置反馈 ΔQ —液压油流量

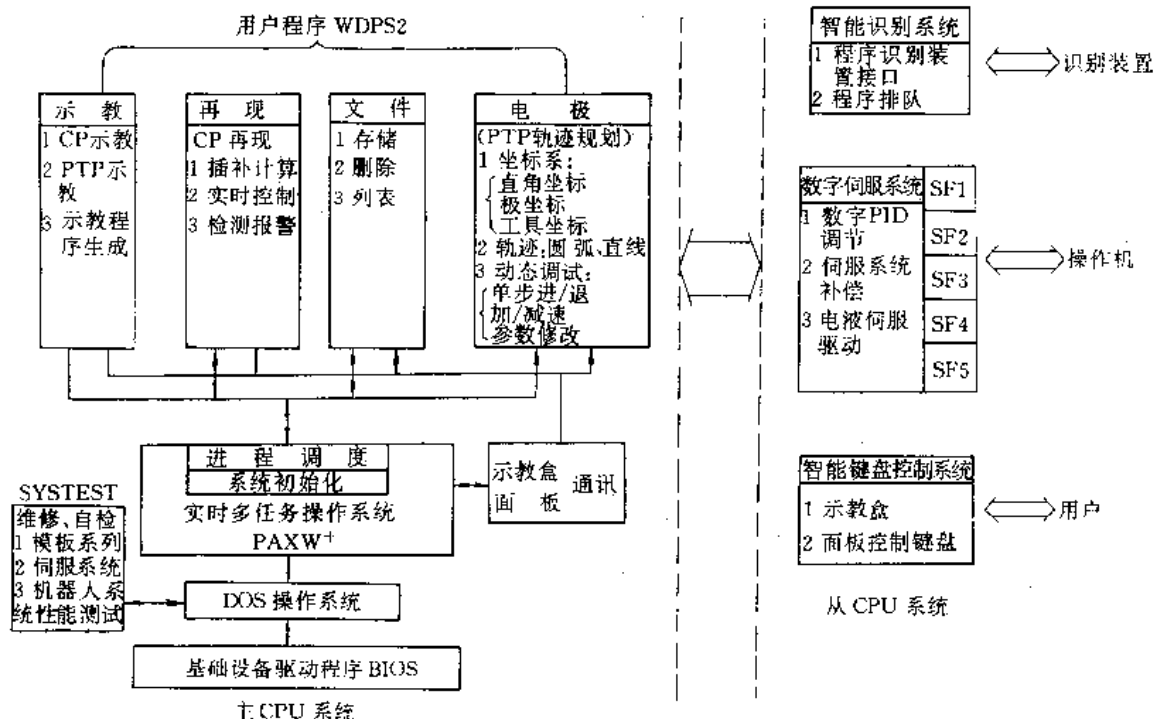


图 9-7-4 电液伺服喷漆机器人的控制系统构成框图

(点位) 两种示教方式，具有 CP 再现功能。

交流伺服电动喷漆机器人控制系统总体构成框图见图 9-7-5。它由主计算机、操作面板、手持示教盒、磁盘存储、接口控制、伺服系统、外设控制和电源系统等构成。其系统配置见图 9-7-6。本系统具有二级 CPU 系统、中断控制、示教盒示教、隔离和安全保护等功能。

对 80 余种喷涂（包括涂胶、密封）机器人产品控制系统参数的统计情况列于表 9-7-2 中。

喷涂机器人采用的内部传感元件主要有旋转变压器、光电码盘和电位器等，近年来已开始采用视觉和接近觉的外部传感元件。

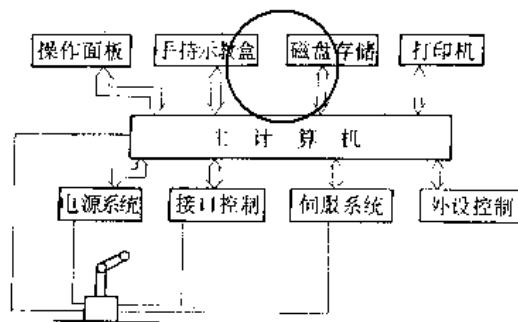


图 9-7-5 交流伺服电动喷漆机器人控制系统总体构成框图



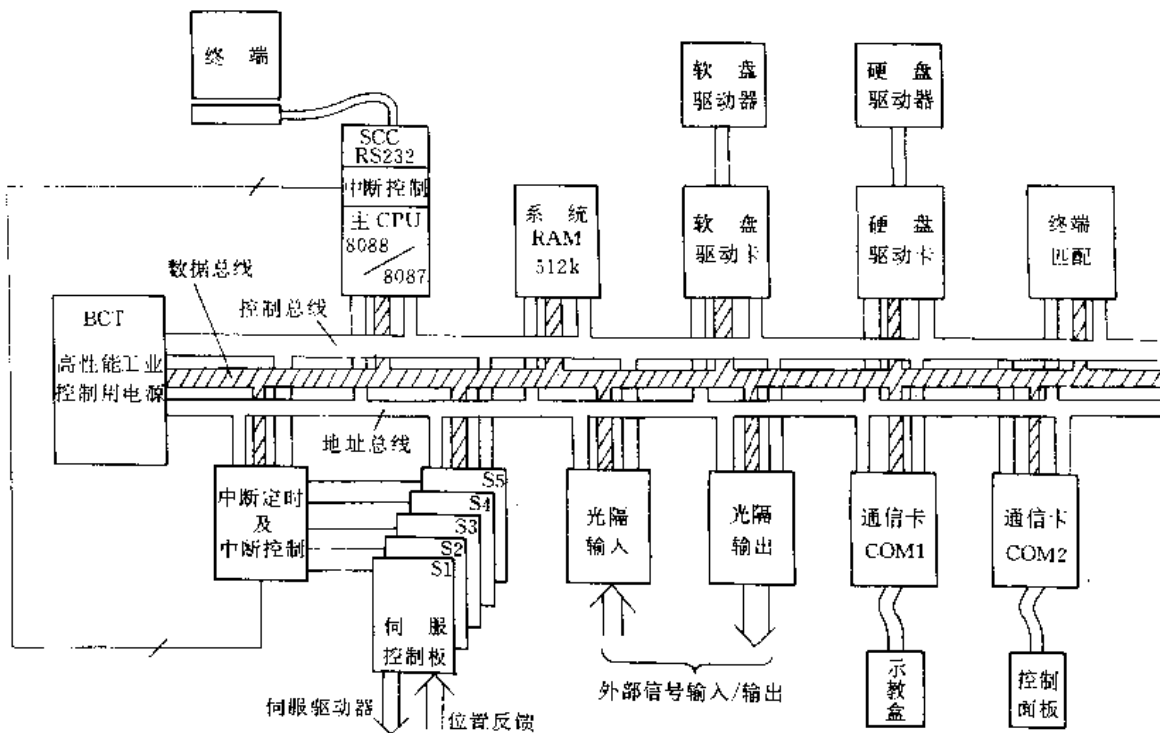


图 9-7-6 交流伺服电动喷涂机器人控制系统配置

表 9-7-2 喷涂机器人控制系统参数

| | |
|------|------------------------------------------------------|
| 控制器 | PLC、RF-Karel、STD 总线等 |
| 示教系统 | 手把手引导、示教盒、离线 |
| 接口 | RS232 为多, 其他有 RS422、模拟, 90 年代发展了 MAP、Parallel、IEEE 等 |
| 编程 | 用户菜单、控制台, 最近发展 CAD |
| 监控系统 | 一般都有 |
| 语言 | CROCUS、ARLA、C、PARL、DARL、PASCAL、机器代码, 最近发展有直接英语、用户制定等 |

1.3 直接示教轻动化

示教轻动化在连续引导示教喷涂机器人中有特别重要性, 可使机器人获得平滑、准确和匀速的运动轨迹, 既可以满足工艺要求, 又可保证机器人可靠地进行工作。

1.3.1 示教轻动化的概念

示教轻动化是指手牵引机器人操作机末端示教时, 操作机机构逆传动的实际效率及省力程度。它是人手牵引操作机末端, 引导机器人运动的牵引力的大

小来描述的。

1.3.2 影响示教轻动化的因素及解决途径

对于操作机来说, 影响示教轻动化的因素, 可归纳为两类: 一是逆传动的效率; 另一是机构的轻量化。由此可知实现示教轻动化的途径有 3 条: (1) 减小各运动部件的质量和惯量; (2) 设计出理想的平衡机构; (3) 解决机器人机构逆传动效率。

减小部件的质量及降低惯量是设计紧凑合理平衡机构的基础。

1. 平衡机构 大负载机器人多采用气缸平衡, 小负载机器人则多采用弹簧机构平衡, 个别机型也有采用伺服气缸来平衡负载力矩的。近年来, 一些机器人又采用全方位平衡技术, 以达到最佳平衡效果。

2. 逆传动的效率 在普通机械传动中, 机械传动效率取决于各运动副的材料、表面粗糙度、相对运动副的结合状态及其传动链的长短等。对减速比大的机构, 其逆传动效率往往很低, 甚至自锁。这也正是电传动机器人难以获得理想示教轻动化的直接原因。

液压驱动的机器人与电动机器人不同。其传动属于直接驱动, 机构的效率主要反映在各驱动件的摩擦力、各驱动件及管路中的液体阻力和各铰链的摩擦力



矩。这三种阻力中,铰链机构采用滚动轴承,其摩擦力矩很小,所以,其阻力主要来自前两种。驱动件主要是直线油缸和摆动油缸。活塞和缸体间用分离活塞或者用间隙密封和压力平衡槽可使摩擦力明显降低。对于长管路的液体阻力,可在缸体旁采用短路阀予以降低。对于差动油缸的油量补偿和多余油量的排除,可采用特殊短路阀予以解决。

3. 低惯量设计 液压操作机运动部件主要包括手腕、小臂、大臂、腰关节转轴、三个直线油缸及平衡机构等。

对于手腕部件的低惯量,应主要从结构、材料着手,研制结构紧凑的摆动缸手腕部件和挠性手腕部件,予以解决。

对于小臂、大臂和三个直线缸的低惯量,在保证刚度的前提下,一方面应从结构和材料着手减轻质量;另一方面应尽可能将其质心移回转轴的方式,予以解决。

对于腰关节转轴的低惯量,在保证刚度的前提下,应尽可能减小外形尺寸及质量,予以解决。

对于平衡机构的低惯量,主要从紧缩机构,尽可能把平衡机构设置在腰回转轴上等方法予以解决。

综上所述,解决示教轻动化,要从机械液压等方面进行系统分析,综合处理好相关的问题,才能获得满意的结果。

1.4 应用实例

喷涂作业机器人的应用范围越来越广泛,除了在汽车、日用电器和仪表壳体的喷涂作业中大量采用机器人工作外,已在涂胶、铸型涂料、耐火饰面材料、陶瓷制品釉料、粉状涂料等作业中开展应用,现已在高层建筑墙壁的喷涂、船舶保护层的涂复和炼焦炉内水泥喷射等作业开展了应用研究工作。机器人喷涂作业的自动化程度越来越高,以汽车为例,已由车体外表面多机自动喷涂,发展到多机内表面的成线自动喷涂。

图 9-7-7 是第二汽车制造厂东风系列驾驶室多品种混流机器人系统喷涂线。它由 4 台 PJ-1B、2 台 PJ-1A 喷漆机器人、2 台 PM-111 顶喷机、一台工件识别装置、一台同步器、多台起动装置和总控制台等组成,并具有连锁保护、故障报警和自动记录喷涂工件数量等装置。由一台工业 PC 机(微型计算机)为主构成的总控台,通过通信系统,对 6 台机器人、2 台顶喷机及相关终端,进行群控,实现面漆喷涂自动作业。此喷涂线已应用数年,获得明显的经济效益。

ABB 集团挪威 TRALLFA 机器人公司已开发出

新的自动喷涂系统,具有自动喷涂所需要柔性和集成的喷涂线—TRACS。其中有较大模块式喷涂系统,包括近 100 台机器人采用特殊示教方式,将示教程序应用到实际喷漆中,使车体喷涂具有柔性和能够喷涂车体内外表面,获得了相当满意的喷涂质量。其编程方式用手动 CP 和 PTP 示教,动力伺服控制示教,以这三种形式结合编程,可实现最佳循环时间和连续喷涂手把手示教所不能实现的复杂形面。该线具有下列特点:

(1) 包括模块在内的每一个完整单元采用全集成化控制系统;

(2) 能喷车体所有部分,外部用专用设备,内部用机器人,具有柔性系统。

(3) 有开启发动机罩、车门和行李箱盖的操作机,该操作机能跟踪输送链并与其同步。有的开门操作机具有光学传感系统的适应性手爪,以适应多工位开门的需要。

(4) 所有机器人及开门操作机都装在移动的小车上。

(5) 全线的控制功能。包括能控制多种机器人(开门机),机器人和开门机与输送链的同步,起动喷枪、换色、安全操作和人机通信等。

2 点焊机器人

2.1 点焊机器人操作机的结构

点焊机器人的操作机要满足点焊工艺的要求,即:

- (1) 焊钳要可到达每个焊点;
- (2) 焊接点的质量应达到要求。

第一点意味着机器人操作机应有足够的运动自由度和适当长的手臂;第二点要求机器人的焊钳所需的工作电流(对点焊来说是很大的)能安全可靠地到达机器人手臂端部,机器人焊钳的工作压力也达到要求。对于前者,本篇第 2 章 2 节中所列举的几种操作机的结构在原则上都是可行的,只要操作机空间可达性可以满足被焊件的焊点位置分布,就可以用于点焊机器人。对于后者,点焊焊钳和点焊电源(即点焊变压器)的形式起了主要作用,而其形式又对机器人的承载能力提出了不同的要求(见表 9-7-3)。

点焊机器人所用的焊钳与点焊变压器的联接若是通过二次电缆相联,则点焊所需的 10kA 以上的大电流不仅需要粗大的电缆线,而且需要用水冷却。所以,这种电缆一般较粗,且质量大。无论点焊变压器是装在机器人上还是在机器人的边上,对焊钳来说都要影响



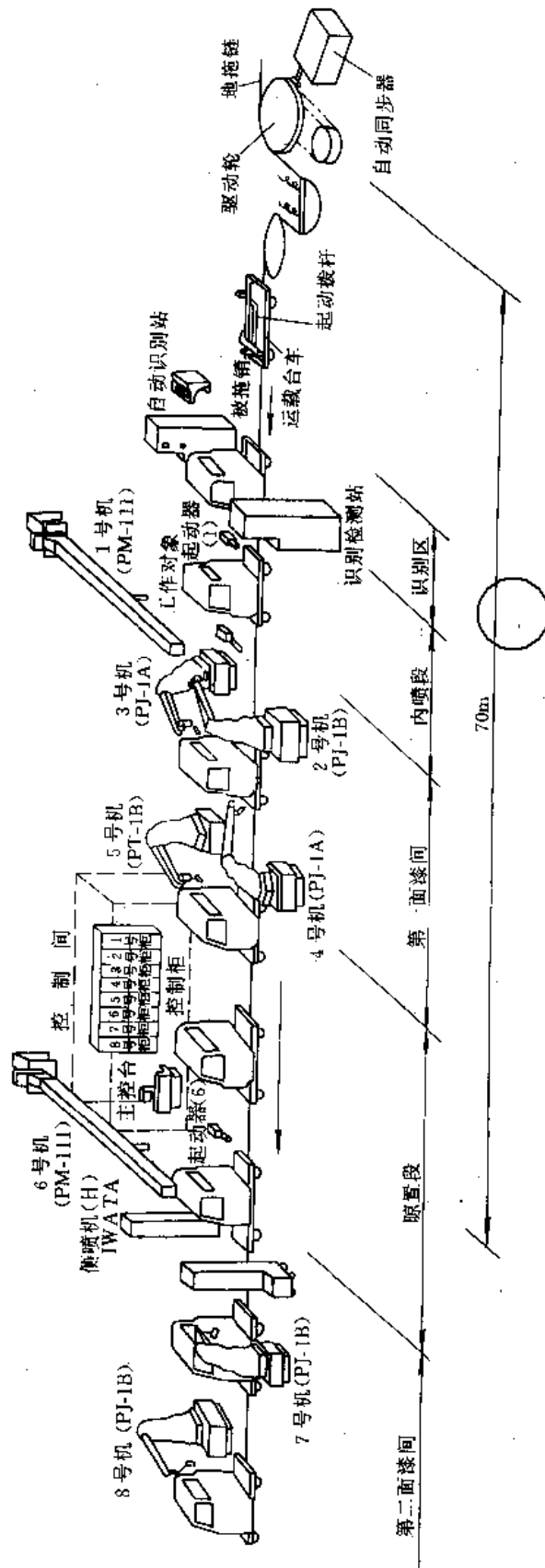


图 9-7-7 东风汽车系列驾驶室多品种混流机器人系统喷漆线

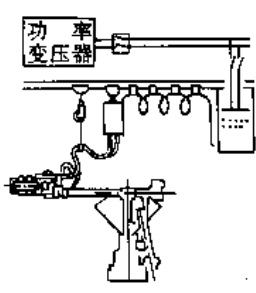
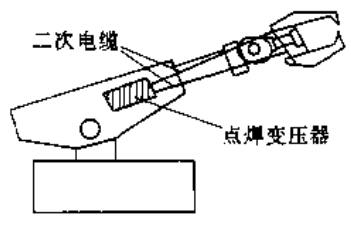
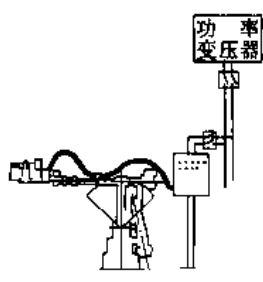


其运动的灵活性和范围。这样的点焊变压器为了补偿导线损耗又必须做得容量较大；使其能耗大，效率低。这种结构的优点是对机器人的承载能力要求低，80年代，国际上开始在工业中采用一体式焊钳。这种焊钳既不影响机器人的运动灵活性和范围，还有能耗低、效率高的优点。但其对机器人的承载力要求比前者的高，使机器人的造价较高。

所以，在引入点焊机器人时，应考虑以下几个问题：

- (1) 焊点的位置及数量；
- (2) 焊钳的结构形式；
- (3) 工件的焊接工艺要求，如焊接电流、焊点加压保持时间及压力等；
- (4) 机器人安放点与工件类型及工作时段间的关系；
- (5) 所需机器人的台数和机器人工作空间的安排。

表 9-7-3 点焊机器人及焊接系统的分类

| 系统类型 | 分离式点焊机器人系统 | 内置式点焊机器人系统 | 一体式点焊机器人系统 |
|------------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| 系统图示 |  |  |  |
| 机器人载重要求(腕) | 中 | 小 | 大 |
| 点焊电源功耗 | 大 | 大 | 小 |
| 机器人通用性 | 好 | 差 | 中 |
| 系统造价 | 高 | 中 | 低 |

对 20 余种点焊机器人统计，其机械结构参数见表 9-7-4。

表 9-7-4 点焊机器人机械结构参数

| | |
|------|----------------------------------------------------|
| 结构形式 | 大量为关节型，少量是直角坐标型、极坐标型和组立式，近年发展门式 |
| 轴数 | 大量为 6 轴，其余 1~10 轴不等，6 轴以上为附加轴 |
| 重复性 | 大多为 ±0.5mm，范围为 ±0.1~1mm |
| 负载 | 大多为 588~980N (60~100kgf)，范围为 49~24500N (5~2500kgf) |
| 速度 | 2m/s 左右 |
| 驱动方式 | 绝大多数为 AC 伺服，少量为 DC 伺服，极少数为电液伺服 |

2.2 点焊机器人控制系统

点焊机器人的控制系统并没有特殊的要求。由于在本篇第 4 章中已有详细介绍，这里就不赘述。需要指出的是，点焊机器人虽其工作特点是点到点 (PTP) 的

作业，但由于在许多工业应用场合，往往是多台机器人同时作业，而它们的工作空间又互相交叉，为了防止碰撞，必须对它们的作业轨迹进行合理规划。因此，需要机器人有连续轨迹 (CP) 控制功能。

点焊机器人控制系统主要参数见表 9-7-5。

表 9-7-5 点焊机器人控制系统主要参数

| | |
|-------|-------------------------------------|
| 控制器类型 | RC20/41、MOTOROLA 68020 (32 位)、PLC 等 |
| 接口 | RS232 为多，少数 RS422 |
| 语言 | SRCL 为多，其他有 INFORMT、PDL2 等 |
| 示教方式 | 示教盒、离线编程 |
| 存储容量 | 最大可达 1.4MB |
| 自诊断功能 | 一般都有 |
| 焊点 | 300 个左右 |

2.3 点焊机器人应用实例

这里介绍日本两家公司的应用实例，一个是 NACHI-FUJIKOSHI 公司的点焊机器人工作单元；另



一个是 KAWASAKI HEAVY INDUSTRIES 公司的点焊机器人生产线。

2.3.1 机器人工作单元

图 9-7-8 是这个机器人工作单元要完成的工件的焊点分布示意图。

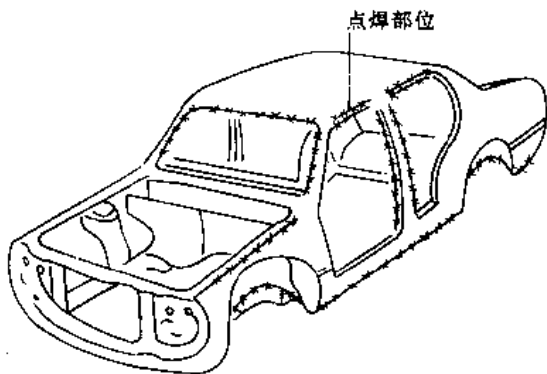


图 9-7-8 工件焊点分布示意图

图 9-7-9 是这个单元的机器人所使用的一体化焊钳。

这个单元里所使用的机器人是载重量为 65kg 以上的垂直多关节型工业机器人。

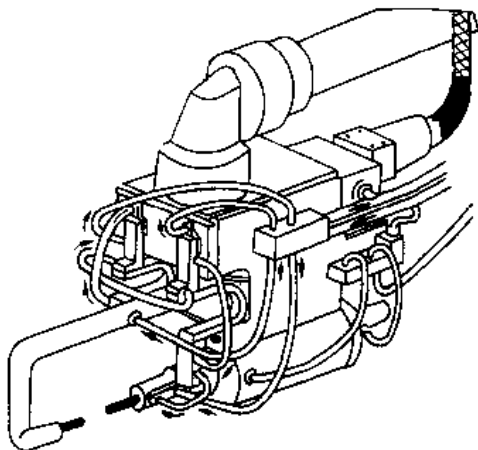


图 9-7-9 机器人所用一体化焊钳

2.3.2 机器人生产线

图 9-7-10 是这条点焊线要完成的汽车驾驶室焊点的分布图。图中数字为各区的焊点数。

这条点焊线采用的是可使用内藏式焊钳系统的极坐标型工业机器人。

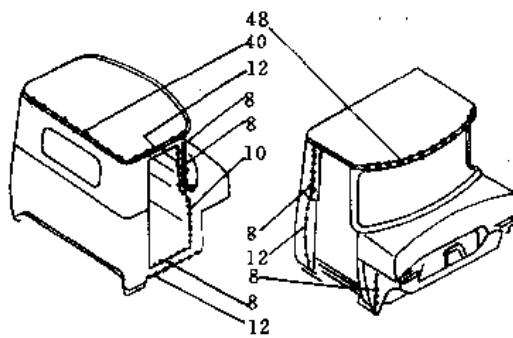


图 9-7-10 汽车驾驶室焊点分布图

3 弧焊机器人

3.1 弧焊机器人的结构

与喷漆、搬运、点焊等机器人一样，弧焊机器人也是应用最广泛的机器人类型之一。弧焊机器人操作机的结构与上述机器人基本相似，主要的区别在于其末端执行器是焊枪。一些通用型机器人也可用于弧焊。弧焊机器人的机械结构主要参数列于表 9-7-6 中。

表 9-7-6 弧焊机器人的机械结构参数

| | |
|------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| 结构形式 | 空间关节型(见图 9-7-11)多,也有直角坐标型(见图 9-7-12)。关节型适合于焊接直线、弧形等各种空间曲线焊缝,直角坐标型焊接长的直线焊缝。90 年代发展门式 |
| 轴数 | 一般 5~6 轴,最长达 12 轴(6 个附加轴) |
| 重复性 | ±0.1~±0.2mm 为多,在 ±0.01~±0.5mm 范围 |
| 负载 | 49~147N(5~15kgf)为多,范围为 24.5~24500N(2.5~2500kgf) |
| 速度 | 1m/s 左右居多,范围为 0.09~11.8m/s |
| 驱动方式 | DC 伺服较多,AC 伺服驱动近年大有发展 |

弧焊机器人必须和焊接电源等周边设备协调使用,才能获得理想的焊接质量和高的生产率。图 9-7-13 为由弧焊机器人与焊接设备、夹具、控制装置及附属设备等组成的焊接工作站。

为了提高焊缝(特别是长焊缝)的精度,近年来发展了一种先进的三维激光焊缝识别及跟踪装置(见图 9-7-14)。其工作原理是将轻巧紧凑的跟踪装置安装在弧焊机器人焊枪之前,点弧前该装置的激光发射器对焊缝起始处进行扫描,引弧后,边前移焊接,边横向跨



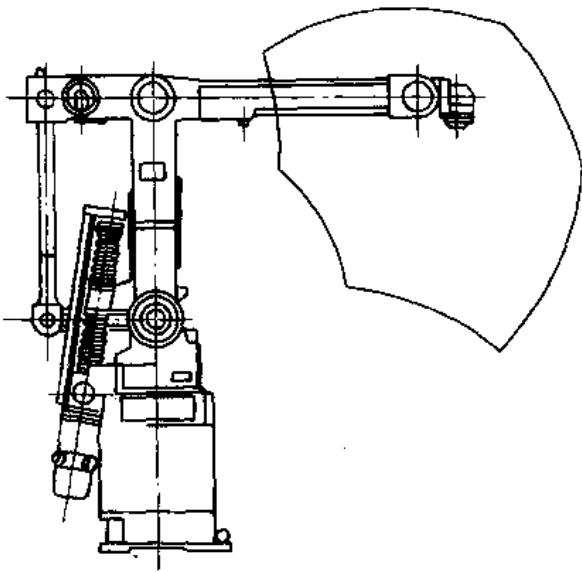


图 9-7-11 GJR-G1 型 6 自由度空间关节型弧焊机器人

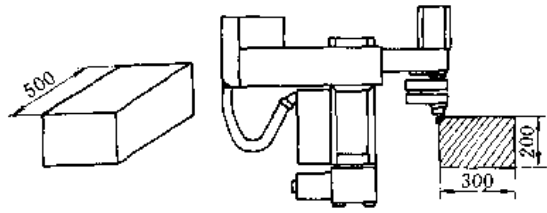


图 9-7-12 ISEON 4 自由度直角坐标型弧焊机器人 (单位: mm)

焊缝扫描,由激光传感器获取焊缝的有关数据(如焊缝形式及走向、焊缝诸横截面各处深度等),将数据输入机器人控制装置中进行处理,并与存入数据库中的焊缝模型数据进行比较,把实时测得数据与模型数据之差值作为误差信号,去驱动机器人运动,修正焊枪的轨迹,以提高焊接精度。英国曾把激光视觉焊缝跟踪装置装在 Adept One 焊接机器人上,在直径为 2.8m,长度为 3m 火箭外罩的 TIG 焊接中获得精度为 0.08mm 的焊缝。

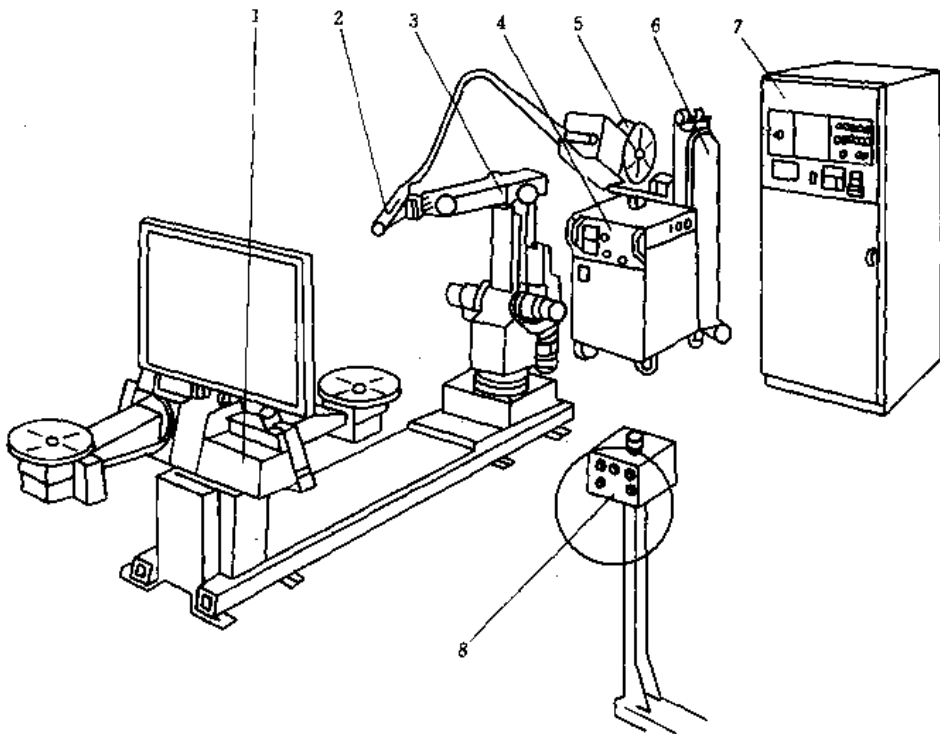


图 9-7-13 焊接工作站

- 1—多自由度焊接工作台 2—焊枪 3—弧焊机器人操作机 4—焊接控制器及焊接电源
5—走丝机构 6—保护气体瓶 7—机器人控制装置 8—操作盘



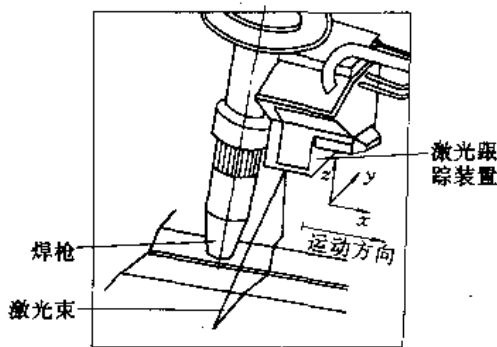


图 9-7-14 三维激光焊缝识别跟踪装置示意图

3.2 弧焊机器人控制系统

弧焊机器人控制系统在控制原理、功能及组成上和其他类型机器人基本相同,参见本篇第4章。其控制系统参数列于表 9-7-7 中。弧焊机器人周边设备的控制,如工件上料速度及定位夹紧、送丝速度、电弧电压及电流、保护气体供断等的调控,设有单独的控制装置(见图 9-7-15),可以单独编程,同时又和机器人控制装置进行信息交换。由机器人控制系统实现焊接工作站全部作业的协调控制。

表 9-7-7 弧焊机器人控制系统参数

| | |
|------|-------------------------------|
| 控制器 | MCS6000 多处理机系统、MAS-410、两级计算机等 |
| 控制方式 | PTP、CP,有直线圆弧插补 |
| 示教方式 | 示教盒、键盘、离线示教 |
| 语言 | ARLA、INFORM、SRCL、英语等 |
| 接口 | RS232、RS422 等 |
| 存储容量 | 64KB 左右 |
| 焊缝跟踪 | 90 年代产品大多有 |

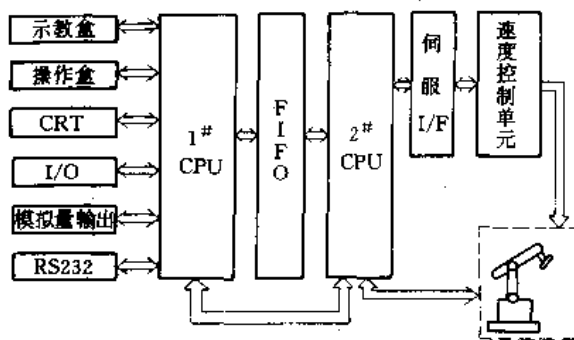


图 9-7-15 RC-75 机器人控制系统框图

我国研制的“RC-75 机器人控制系统”实现了全部

国产化,用它控制弧焊机器人,以 40mm/s 和 200mm/s 的速度各重复 10 次焊接同一条直线焊缝,位置重复性达到 $\pm 0.045\text{mm}$;以 60, 80, 100, 150mm/s 速度重复焊接同一圆弧焊缝,位置重复性达到 $\pm 0.067\text{mm}$ 。图 9-7-15 是 RC-75 机器人控制系统的框图。

3.3 弧焊机器人应用实例

弧焊机器人在我国已应用在汽车、自行车、汽车千斤顶等大批量机械产品的自动焊接生产中。1989 年天津自行车二厂采用国产机器人焊接自行车前三角架,提高了产品质量,并获得了显著的社会、经济效益。

3.3.1 系统组成

GJR-G1 弧焊机器人及控制系统、双工位回转工作台及夹具、焊接设备及其他附属设备,见图 9-7-16。

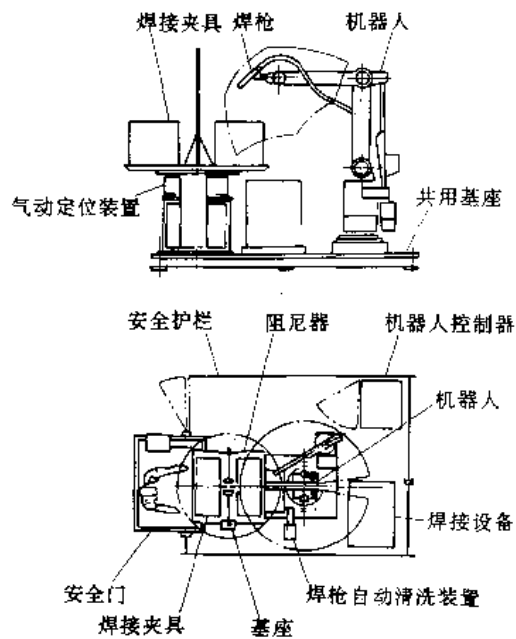


图 9-7-16 自行车前三角架弧焊系统

(1) GRJ-G1 弧焊机器人(结构见图 9-7-11)的技术参数(表 9-7-8)。

表 9-7-8 GRJ-G1 机器人技术参数

| 结构形式 | 自由度 | 腕部最大负载 | 驱动方式 | 位置重复性 | 操作方法 | 位置控制方式 |
|--------|-----|------------|--------|--------------------|------|--------|
| 空间多关节式 | 6 | 49N (5kgf) | 直流伺服电机 | $\pm 0.2\text{mm}$ | 示教再现 | PTP CP |

(2) 双工位回转工作台,可手动操作回转 180° 。中间加隔板,工人在一边上、下料,另一边机器人施焊。



气动定位锁紧。回转夹具出现误动作时，机器人不动作以保安全。

3.3.2 工件 (图 9-7-17)

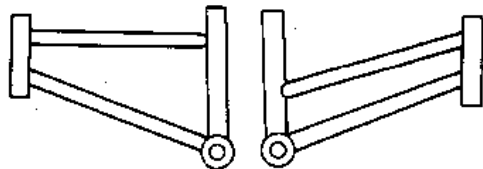
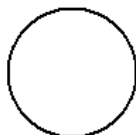


图 9-7-17 男、女自行车前三角架结构形式

3.3.3 焊接工艺要点

(1)注意焊枪起弧后快速移到起焊点并延时,以防虚焊;熄弧时逐渐减小电流至零。

(2)焊接电压采用 DC16~44V,焊接电流采用 DC60~400A;焊接速度为 5~20mm/s;混合气体比例 CO₂:Ar 为 1:4。



3.3.4 经济效益

(1)废除了旧的采用管接头联接的盐浴钎焊工艺,采用机器人对三角架接头处进行直接焊接,大大节约了金属材料及工时,见表 9-7-9。

表 9-7-9 采用弧焊机器人后的效益

| 车型 | 焊接工艺 | 金属材料定额 | 三角架 | 前叉 |
|-------------|------------------|------------|-------------|------------|
| SPRICK、QE01 | GJR-G1 弧焊机器人直接焊接 | 9.45 kg/辆 | 20.16 min/件 | 9.0 min/件 |
| 飞鸽、QE205 | 管接头,盐浴钎焊 | 13.26 kg/辆 | 29.10 min/件 | 11.6 min/件 |

(2)提高了产品质量,产品一次合格率由过去的 93%上升到 99%。

(3)根据表 9-7-9,如果按该厂年产 40 万辆自行车计算,则可节约原材料约 1500t,每年节约工时 32 人年。

(4)由于省掉了盐浴炉钎焊,大大降低了能耗,减轻了工人的劳动强度;同时由于回转工作台装有遮光板,上方有固定风道,改善了工人的劳动环境。

(5)以往产品更新需要一年时间,现在两个月即可推出一种新车型,增强了产品竞争能力。

4 搬运机器人

搬运机器人主要从事物料的位置搬移或改变其放置姿态,在搬运大型零件和爆炸、腐蚀性物质时,大大改善了操作者的工作条件,提高了生产效率。表 9-7-10 是搬运机器人的主要技术参数。

表 9-7-10 搬运机器人的主要参数

| | |
|--------|---------------------------------------------------|
| 机械结构形式 | 以关节型和门式居多,占 60%。80~90 年代发展 SCARA 型,其他形式各有少量 |
| 轴数 | 一般为 4~6 轴,范围为 1~10 轴 |
| 重复性 | 0.05~0.5mm 约占 70%,范围为 0.01~2mm |
| 负载 | 98~9800N (10~100kgf) 为多,范围 9.8~24500N (1~2500kgf) |
| 速度 | 1~2m/s 居多,范围 0.25~40m/s |
| 驱动方式 | DC、AC 伺服驱动约占 80%,电液驱动极少 |

搬运机器人的驱动方式一般有电液伺服驱动、直流伺服驱动和交流伺服驱动。

4.1 搬运机器人的结构

搬运机器人的臂结构有直角坐标式、空间关节式、水平关节式和龙门式。

1. 空间关节式 图 9-7-18 是我国研制的 GJR-G2 机器人。这种机器人是空间关节式,结构紧凑,负载大,臂的平衡采用弹簧平衡和配重平衡。

主要技术参数如下:

控制轴: 6 轴

最大负载: 600N

位置重复性: ±0.5mm

驱动方式: 交流伺服电动机

位置控制方式: PTP

2. 水平关节式 日本 FANUC 公司制造的 M400 型机器人 (见图 9-7-19) 采用水平关节型臂结构。这种机器人结构较简单,便于制造,适合主体运动在一个平面内的搬运作业。其主要技术参数如下:

自由度: 4

最大负载: 500N

位姿重复精度: ±0.5mm

驱动方式: 交流伺服电动机

搬运机器人的末端执行器由于搬运对象不同而不同,主要有钳爪式和吸盘式。

此是公刊制作请尊重版权



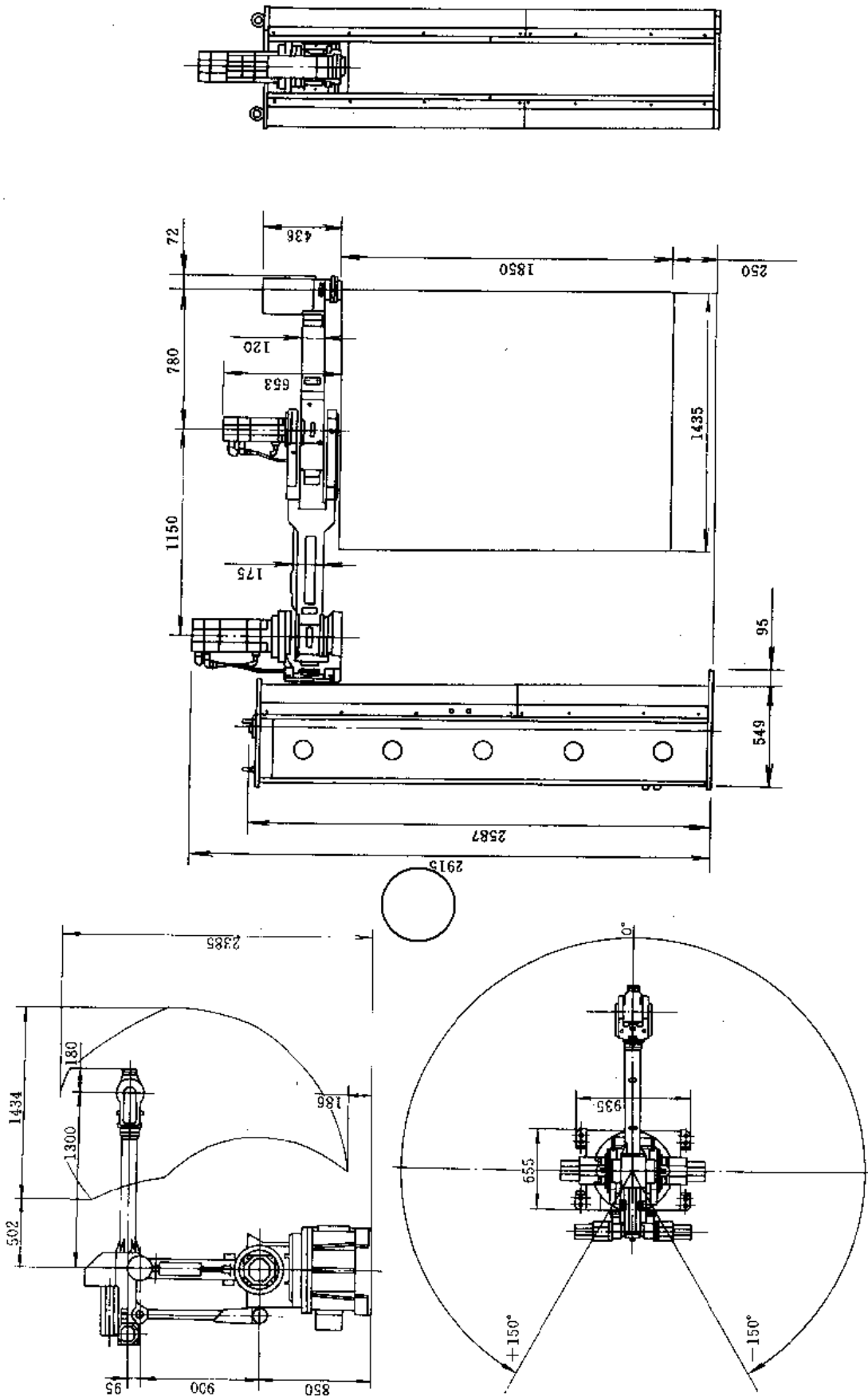


图 9-7-19 M400 型机器人 (单位: mm)

图 9-7-18 GJR-G2 机器人 (单位: mm)



4.2 搬运机器人控制系统

根据搬运作业的特点，机器人搬运过程时的初始和要达到定位点的位置和姿态都要进行控制，两定位点之间的轨迹不需要控制。所以一般搬运机器人采用点位(PTP)控制。由于用户需要搬运的物料质量不同，机器人负载也不同。在机器人出厂前，无法把伺服系统调至最佳控制，因此，搬运机器人伺服系统配置数字PID调节器，用户可以根据搬运负载调整伺服系统参数，使伺服系统达到良好的动态品质和位姿精度。

搬运机器人工作中有堆垛作业。堆垛有行堆和方堆两种方式，要实现这种功能，控制系统必须设计有根据几个示教参考点而完成有规则堆垛的控制程序。

搬运机器人工作时，必须与周边设备按相应的顺序工作。在控制系统有若干I/O控制接口时，通过这些接口可实现顺序控制和与周边设备的互锁控制。搬运机器人控制系统参数列于表9-7-11中。

表9-7-11 搬运机器人控制系统参数

| | |
|------|------------------------------------|
| 控制方式 | PTP 为多，兼有 CP |
| 语言 | ARL、VAL 1 等 20 多种，也有专用及用户定的 |
| 接口 | 70%以上为 RS232 及 RS422，近年发展 MAP、并行接口 |
| 示教方式 | 手动或数据输入 |

4.3 搬运机器人应用实例

图9-7-20是一个耐火砖自动压制系统，它由压机、搬运机器人和烧成车组成。制造耐火砖时，把和好的耐火材料送入压机，经过模压后，使耐火材料成砖的形状，搬运机器人从压机中把砖夹出，在烧成车上堆垛，然后把烧成车同砖送入炉中烧烤。搬运机器人的主要作业是从压机中取出砖块，按堆垛要求，把砖块堆放在烧成车上。机器人与压机、烧成车按一定顺序作业，并保持一定的互锁关系。

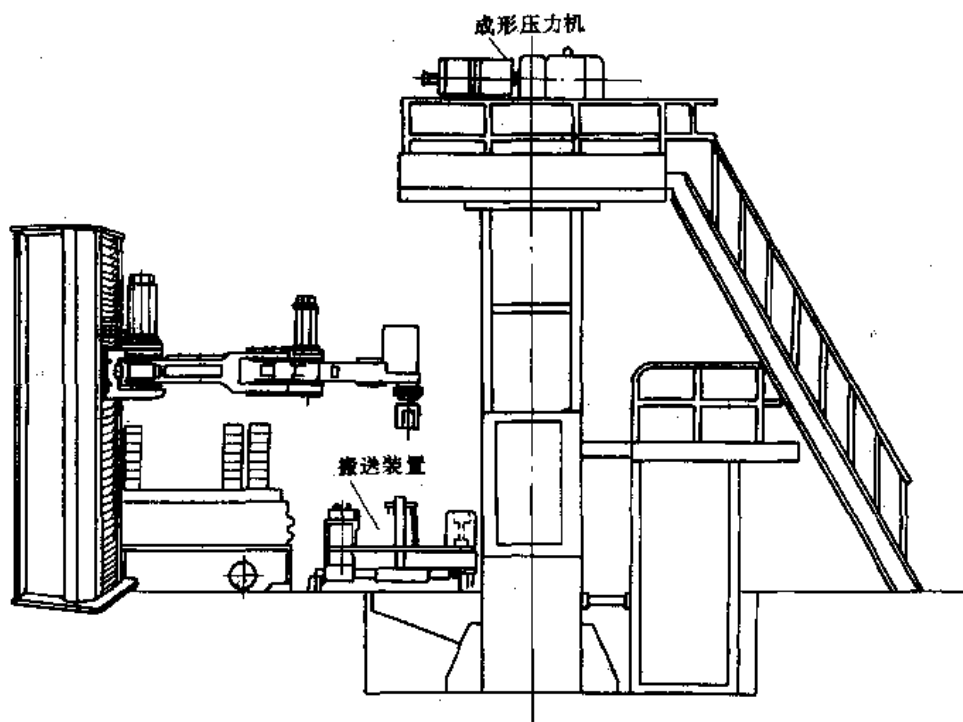


图9-7-20 耐火砖自动压制系统

耐火砖自动压制系统参数如下：

机器人型号：M400 型

成形压机：10000kN 液压压机

夹持装置：带平行夹持缓冲机构

耐火砖参数：18种、50~170N/个

工作节拍：压制成形 30s

堆垛 19s

堆垛精度：±1mm

搬运耐火砖过程中，要求机器人工作平稳，保证运行精度，柔性操作，并能适应由于砖厚、硅砂散布造成



的尺寸变动。

5 装配机器人

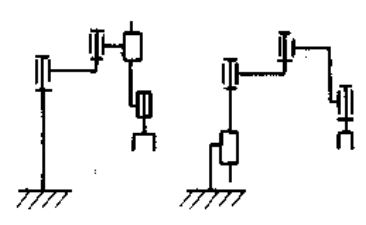
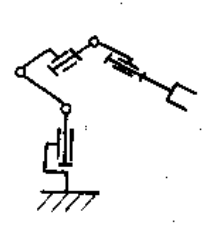
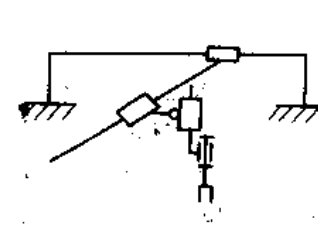
5.1 装配机器人操作机的结构

装配机器人的操作机结构，主要是保证其有较高的速度(加速度)和较高的定位精度，包括重复性和准确度，同时要考虑装配作业的特点。由于装配作业的种

类繁多，特点各不相同，所以，可以是本篇第2章2节中所列举的五种结构中的任意一种。

就装配作业的统计数字上看，与插装作业相关的作业占装配作业的85%，如销、轴、电子元件脚等插入相应的孔，螺丝拧入螺孔等。所以，目前世界上较常见的、以装配作业为主的工业机器人是以直角坐标型和关节坐标型为主。在关节坐标型中，又分为空间关节型和平面关节型，见表9-7-12。

表 9-7-12 装配机器人的结构及参数

| 坐标型式 | 平面关节 | 空间关节 | 直角坐标 |
|---------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| 典型结构简图 |  |  |  |
| 性能参数及特点 | | | |
| 重复精度 | 高 ±(0.01~0.05)mm | 中 ±(0.05~0.3)mm | 高 ±(0.005~0.05)mm |
| 速度 | 高 2.2~11.3m/s | 中 0.5~2.2m/s | 低 0.5~1.5m/s |
| 工作范围 | 中、小，根据臂长决定 | 大，相对于臂长 | 大、中、小，根据臂长 |
| 负载 | 小、中 9.8~98N (1~10kgf) | 小、中 [典型 49N (5kgf)] | 大、中、小，根据结构 |
| 编程控制 | 简单 (运动学逆解简单) | 难 (运动学逆解复杂) | 简单 |
| 机械机构 | 简单 | 复杂 | 简，中等复杂 |
| 造价 | 低 | 高 | 中，高 |

5.1.1 SCARA 装配机器人

所谓 SCARA 型结构是英文 Selected Compliance Assembly Robot Arm 的缩写，意为“可选择柔性装配机器人手臂”，首创于日本。其特点为：采用平面关节

型坐标机构。操作机一般为四个自由度，其中两个自由度(手臂1和手臂2，见图9-7-21) θ_1 、 θ_2 的运动构成其平面上的主要运动。垂直方向的运动 Z 有两种不同的形式，如图9-7-21所示，一种沿 θ_3 轴中心线运动，另一种沿 θ_1 轴中心线运动。SCARA 机构的运动范围

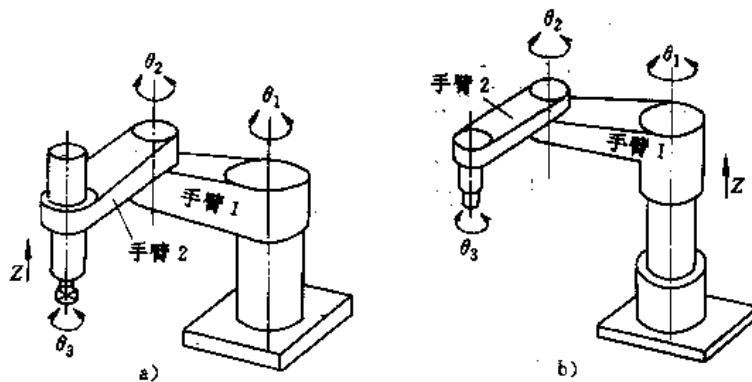


图 9-7-21 SCARA 型结构操作机
a) 沿 θ_3 轴中心线的运动 b) 沿 θ_1 轴中心线的运动



取决于 θ_1 、 θ_2 与 Z 构成的空间。而其运动速度、精度则主要取决于 θ_1 、 θ_2 的运动及控制，计算式为

运动速度 (机器人工具接口中心处)

$$V_i = \omega_1(L_1 + L_2)/n_1 + \omega_2 * L_2/n_2 (m/s) \quad (9.7-1)$$

式中 n_i ——第 i 轴传动机构减速比;
 ω_i ——第 i 轴电机转动角速度 (rad/s);
 L_i ——第 i 轴对应手臂的长度 (m)。

精度 (机器人工具接口中心处)

$$\Delta \approx \delta_{1a} (L_1 + L_2) / n_1 + \delta_{2a} L_2 / n_2 + \delta_{1b} + \delta_{2b} (mm) \quad (9.7-2)$$

式中 δ_{ia} ——第 i 轴电机和位置检测传感器的分辨力的综合误差 (rad);
 δ_{ib} ——第 i 轴传动系统之综合误差 (mm)。

式 (9.7-2) 是计算机器人各轴误差分配时的计算式,机器人的实际精度必须通过实际测试才能获得(参阅国标“工业机器人性能测试方法” GB/T12645—90 及“工业机器人性能规范” GB/T12642—90)。

SCARA 机器人操作机安装空间小,易与不同应用对象组成自动装配线。其结构在平面运动上有很大的柔顺性,而在其垂直方向又有较大刚性(与一般空间关节型机器人相比),因此,很适合插装作业。由于插装类作业占装配作业很大比例,所以 SCARA 机器人在装配机器人中也占了很大比例。

5.1.2 装配机器人的驱动系统结构

装配机器人的控制精度要求比其他类型的工业机器人高,因此,装配机器人的驱动系统结构主要是要满足精度要求。另一方面,由于装配机器人比其他机器人要求更高的速度和加速度,所以,驱动系统又要考虑能获得高速的要求,特别是离线编程技术的应用,对机器人操作机提出的要求。因此,目前由直接驱动电动机(DD 电动机),及其配套高分辨力编码器组成的驱动单元,在装配机器人结构中采用得越来越多了。而且,DD 驱动系统特别适于 SCARA 结构。

5.2 机器人控制系统

装配机器人的控制系统特点主要有以下三个:

(1) 高速实时响应性。在装配机器人作业时,往往有各种各样的外部信号,要求机器人实时响应,如视觉信号、力觉信号等。

(2) 较多的外部信号交互通信接口。

(3) 与复杂的多种作业相适应的人机对话技术。与其他机器人相比,装配机器人由于其所对应的作业范

围广,作业复杂,所以更需要较强的人机技术软件。

国际上的发达国家对其生产的装配机器人都配备了机器人专用语言。这是由于装配机器人的应用范围广泛,作业对象复杂,机器人生产厂家必须对用户提学、易操作的控制、编程方式才行。由于上述原因,装配机器人的操作机与控制系统的成本比往往为 1:3 ~ 1:5 左右。

5.3 装配机器人应用实例

5.3.1 用机器人装配电子印制电路板 (PCB)

日本日立公司的一条 PCB 装配线,装备了各型机器人共计 56 台。可灵活地对插座、可调电阻、IFI 线圈、DIP-IC 芯片和轴向、径向元件等多种不同品种的电子元件进行 PCB 插装。各类 PCB 的自动插装率达 85%,插装线的节拍为 6s。该线具有自动卡具调整系统和检测系统,机器人组成的单元式插装工位既可适应工作节拍和精度的要求,又使得线的设备利用率高,线装配工艺的组织可灵活地适应变化的要求。

5.3.2 用机器人装配计算机硬盘

用两台 SCARA 型装配机器人装配计算机硬盘的系统如图 9.7-22 所示。它具有一条传送线,两个装配工件供应单元;一个单元供应 A~E 五种部件,另一个单元供应螺钉。传送线上的传送平台是装配作业的基台。一台机器人负责把 A~E 五个部件按装配位置互相装好,另一台机器人配有拧螺钉手爪,专管把螺钉

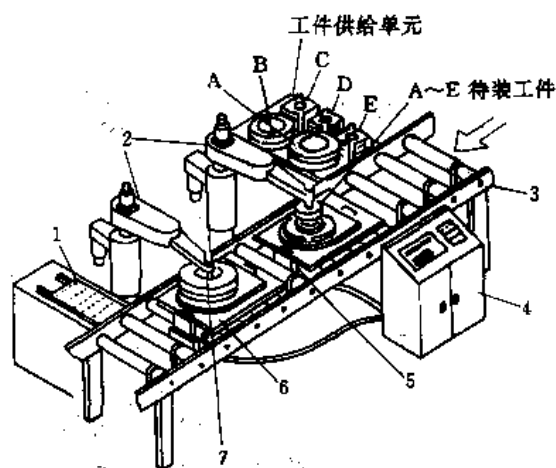


图 9.7-22 机器人装配计算机硬盘

- 1—螺钉供给单元 2—装配机器人 3—传送轨道
- 4—控制器 5—定位器 6—随行夹具
- 7—拧螺钉器



按一定力矩要求安装到工件上。全部系统是在超净间安装工作的。

6 冲压机器人

6.1 冲压机器人的结构

6.1.1 臂结构

1. 直角坐标冲压机器人结构 直角坐标机器人一般有水平和垂直运动两个自由度。这种结构适合于面积较大的板材的搬运,对水平、垂直运动可以进行编程控制,机器人一般挂装在压机上。美国 Danly Machine 生产的 Danly 上料/下料机器人见图 9-7-23,其主要性能参数如下:

- 最大负载: 890N
- 水平行程: 2794mm
- 垂直行程: 610mm
- 位置准确度: $\pm 0.13\text{mm}$
- 驱动方式: 伺服电动机

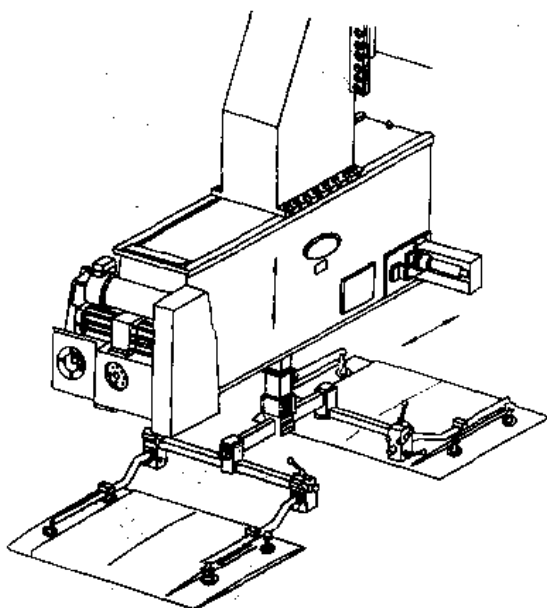


图 9-7-23 Danly 上料/下料机器人

2. 曲柄连杆—曲线导轨冲压机器人结构 这种机器人通过伺服电动机驱动滚珠丝杠带动螺母往复运动,曲柄连杆使两组平行四连杆机构在曲线导轨的约束下运动,实现升起、平移、落下动作。这种机器人的特点是结构简单,造价低,质量小,便于悬挂在压机上工作。PR1400 冲压机器人(见图 9-7-24)采用了曲柄连杆—曲线导轨机构。这种机器人主要性能参数是:

- 额定负载: 245N
- 水平行程: 1400mm
- 垂直行程: 180mm
- 工作频率: 15 次/min
- 位置准确度: $\pm 0.2\text{mm}$

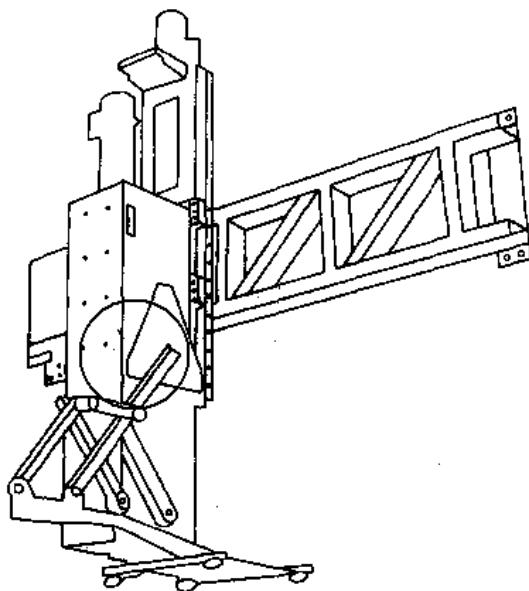


图 9-7-24 PR1400 冲压机器人

3. 复合缸步进送料机器人结构 这种机器人采用双气缸复合增速机构,用双手爪步进送料。其特点是速度快,适合小板料冲压加工快速上下料。图 9-7-25 是这种机器人的机构。图 9-7-26 所示的 CR80-1 型冲压机器人用于电机硅钢片的冲压加工上下料作业。CR80-1 型冲压机器人主要技术参数如下:

- 额定负载: 10N
- 工作频率: ≤ 34 次/min
- 送料行程: 800mm
- 送料速度: 1000m/s
- 自由度: 2
- 抓取方式: 真空吸附
- 最大工件尺寸: $\phi 325\text{mm} \times 0.5\text{mm}$

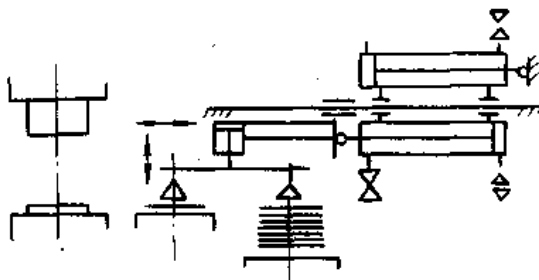


图 9-7-25 复合增速机构



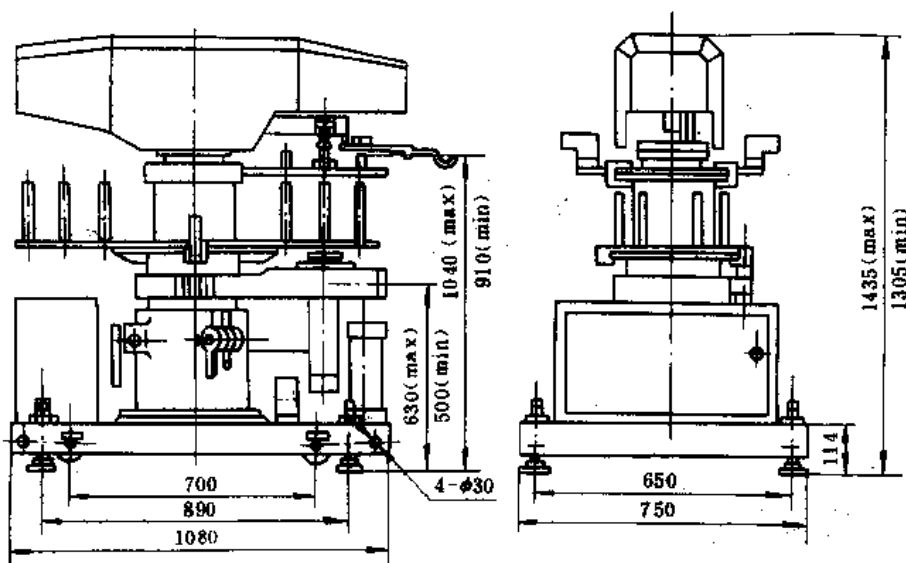


图 9-7-26 CR80-1 型冲压机机器人 (单位: mm)

6.1.2 末端执行器结构

冲压机机器人的末端执行器即手爪一般采用吸盘式手爪。

1. 气吸式吸盘

a. 真空吸盘 见图 9-7-27, 真空吸盘用真空泵把橡胶皮碗中空气抽掉, 产生吸力。其特点是吸力大, 工作可靠, 应用较普遍。这种吸盘需要真空泵系统, 成本较高。

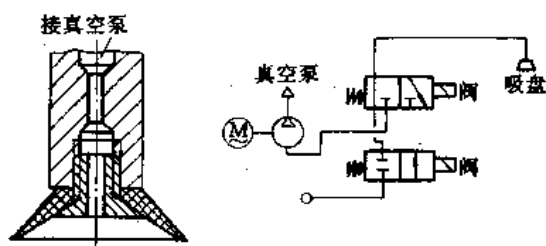


图 9-7-27 真空吸盘及控制原理

b. 气流负压吸盘 见图 9-7-28, 这种吸盘利用气流喷射过程中速度与压力转换产生负压, 使橡胶皮碗产生吸力。关掉喷射气流, 负压消失。其特点是结构简单, 成本低, 但噪声大, 吸力小些。图 9-7-29 是气流负压的特性曲线。图 9-7-30 是吸盘的典型应用结构。

2. 电磁吸盘 见图 9-7-31, 其特点是吸力大, 结构简单, 寿命长, 这种吸盘的另一优点是能快速吸附工

件。它的缺点是电磁吸盘只能吸附磁性材料, 吸过的工件上会有剩磁, 吸盘上会残存铁屑, 妨碍抓取定位精度。

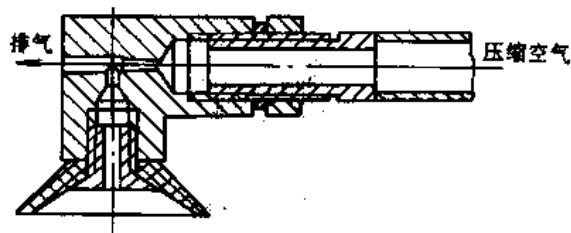


图 9-7-28 气流负压吸盘结构

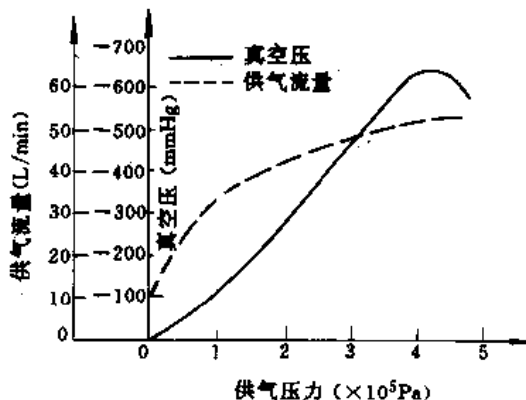


图 9-7-29 气流负压的特性曲线
注: mmHg 为压力的非法定单位
1mmHg=133.322Pa



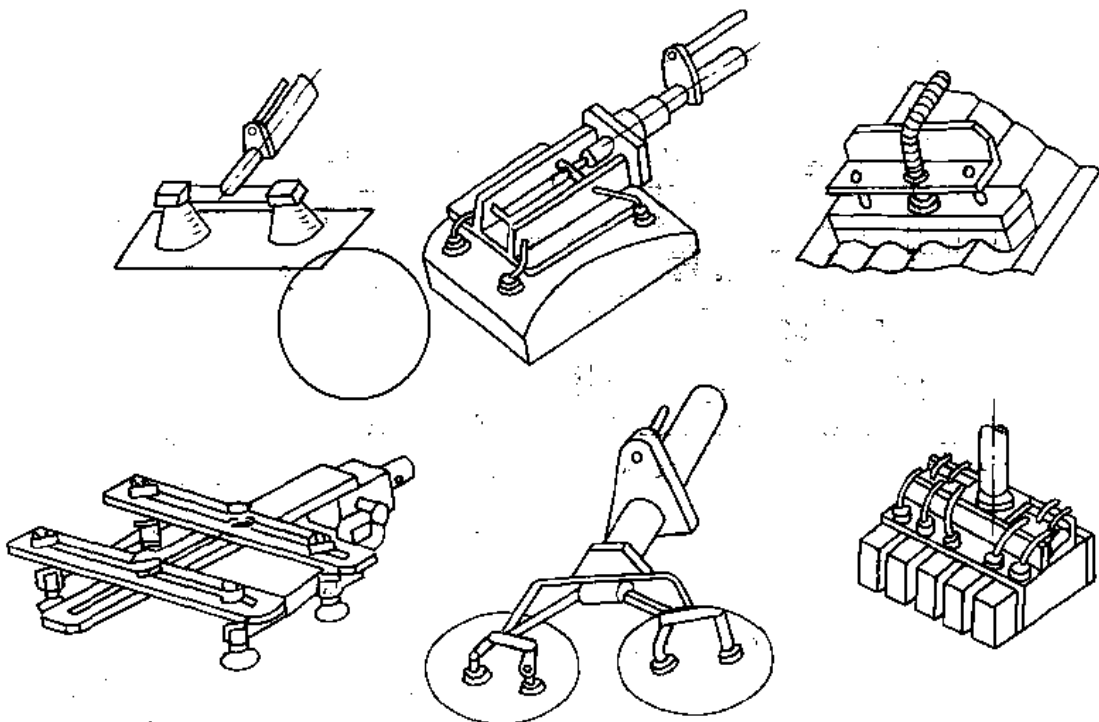


图 9-7-30 吸盘典型应用结构

(续)

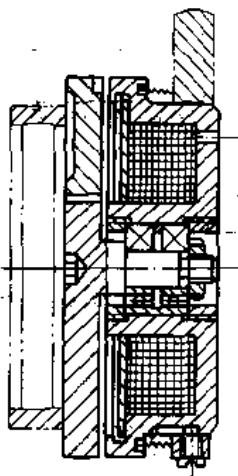


图 9-7-31 电磁吸盘结构

6.2 冲压机器人控制系统

冲压机器人一般采用微型计算机控制，少数也有采用可编程控制器（PLC）控制，参见本篇第4章。冲压机器人控制系统及机械结构参数列于表 9-7-13 中。

表 9-7-13 冲压机器人控制系统及机械结构参数

| | |
|------|---------------------|
| 结构形式 | 关节式占 50%左右，近年门式发展较快 |
| 驱动方式 | DC、AC 伺服驱动占 80%以上 |

| | |
|------|-------------------------------------------------------|
| 轴数 | 5~6 轴为主，范围为 1~10 轴 |
| 重复性 | 一般 ±(0.1~0.5)mm，范围 ±(0.01~0.5)mm |
| 负载 | 一般为 9.8~4.9N (10~90kgf)，范围为 11.8~19600N (1.2~2000kgf) |
| 速度 | 1m/s 为多，范围为 0.25~15m/s |
| 语言 | ARL、PASCAL、BASIC、汇编等 20 余种 |
| 接口 | 主要为 RS232，少量 RS422、PARALLEL 等 |
| 控制方式 | 主要有 PTP，少量有 CP |
| 控制器 | 主要用微型计算机及 PLC |

6.3 冲压机器人应用实例

冲压机器人可以用在汽车、电机、电器、仪表、日用电器等工业中，与压力机构成单机自动化冲压和多机冲压自动线。

6.3.1 冲压机器人在应用中几个问题

(1) 在冲压加工自动线上，每天有可能更换 2~3 种冲压工件。对于不同的工件，冲压工作量不同，为了提高生产率，压力机的工作频率也不同。机器人必须适



应在不同的频率下与压力机同步工作,保持节拍一致。

(2) 在冲压加工中,机器人的上、下料动作必须与压力机压下、抬起动作互相协调,并且要有一定的时间差保证机器人与压力机不干涉和碰撞。与压力机和辅助设备必须有互锁功能,以保证设备安全。

(3) 缩短上、下料时间是提高生产率的关键。机器人必须工作平稳,减少工件振动,快速定位,才能快速完成上下料动作。

6.3.2 机器人在汽车工业冲压加工中的应用

美国克莱斯勒公司的一条车门冲压自动线采用了10台 Danly 上/下料机器人,用于冲压加工中的上、下

料作业。冲压自动线由压力机、机器人、翻转机和传输机组成(见图9-7-32)。其主要技术数据如下:

- 工件名称: 车门里板
- 工件尺寸: 1280mm×1640mm×0.9mm
- 冲压工序数: 5
- 生产率: 600 件/h
- 压机数量: 5 台
- 机器人数量: 10 台
- 取料机数量: 1 台
- 翻转机数量: 1 台
- 水平旋转机数量: 2 台
- 传输机数量: 3 台

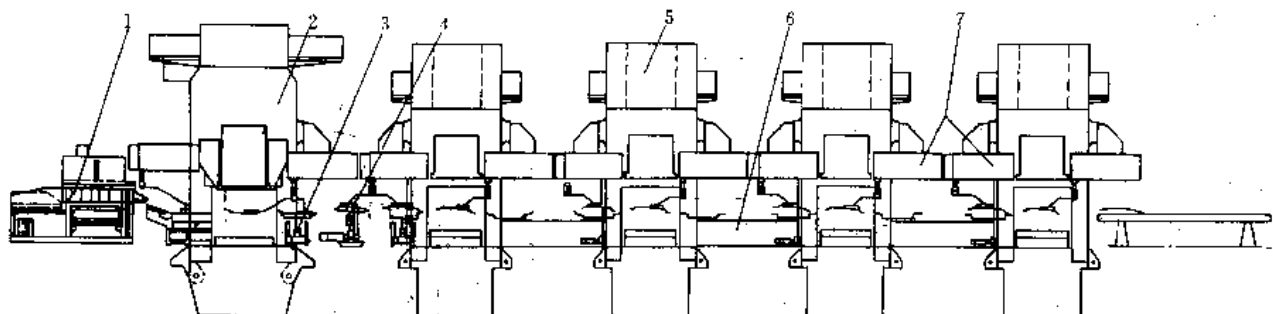


图 9-7-32 车门冲压自动线

1—取料机 2、5—压力机 3—水平旋转机 4—翻转机 6—传输机 7—机器人

(续)

7 压铸机器人

压铸生产过程是在高温高压下,将合金熔液注入金属型或压模以生产零部件。压铸工业已可成功地用机器人进行装料、淬火、卸料、切边等作业。

7.1 压铸机器人结构

压铸机器人属搬运机器人的一种,但必须适应高温、多尘的作业环境。其机械结构形式与大多数搬运机器人类似,见表9-7-14。

表 9-7-14 压铸机器人机械结构

| | |
|-------|------------------------------------------------------------------------|
| 结构类型 | 直角坐标型、球坐标型、圆柱坐标型、关节型;其他还有球坐标加关节型、圆柱坐标加关节型、直角坐标加关节型、SCARA 型(平面关节型)、龙门式等 |
| 轴数 | 1~11 |
| 操作机质量 | 11~3000kg 范围 |

| | |
|---------|----------------------------------------------------------------|
| 额定负载 | 9.8~14700N (1~1500kgf) 范围 |
| 定位装置 | 机械挡块、接近开关、编码器 |
| 末端执行器类型 | 真空吸盘(垫、杯)、磁性、三点式夹持器、各类机械夹钳、夹具、工具握持器、软接触夹持器、各类通用夹持器、按用户需求的专用夹持器 |
| 安装方式 | 地面安装占 90% 以上,其他有悬吊、墙壁安装等方式 |

7.2 压铸机器人控制系统

压铸机器人是国际上最早开发、应用的机器人,随着几代计算机的发展,机器人控制系统的类型也由简单的 8 位微处理器发展到 32 位微处理器控制,见表 9-7-15。

压铸机器人的其他性能指标参数列于表 9-7-16 中。



表 9-7-15 压铸机器人控制系统

| | |
|-----------------|-------------------------------------------------------------|
| 控制系统类型 | 微型计算机、PC 可编程序控制器、微处理器；其他还有小型计算机、继电器式、计算机数控、PLC、步进数以及专用控制系统等 |
| 控制方式 | PTP (点位居多)、CP (连续轨迹少量) |
| 示教方式 | 手持示教板 (示教盒)，其他有字母数字键入、自动读入、离线示教等 |
| 存储装置类型 | EP ROM、RAM、CMOS RAM；其他磁带盒、软硬盘、磁泡等 |
| 标准存储容量 | 1KB~256KB |
| I (输入) / O (输出) | RS232 接口等 |
| 机器人语言 | Ladder logic、CPM-86、ASM-86、BASIC、Pascal、VAL、Forth、C、汇编语言等 |
| 诊断软件 | 大多数机器人有 |
| 驱动系统类型 | 气动、液压、DC 伺服，其他还有 AC 伺服、步进电动机驱动等 |
| 动力源 | 各类机器人自定 |
| 传感功能 | 零件检测、接近觉、视觉、轨迹跟踪、力反馈；其他还有移动选择、激光检查等 |
| 与环境同步 | 多数机器人具有此种功能 |

表 9-7-16 压铸机器人性能参数范围

| | |
|------|----------------------------------------------------------|
| 分辨力 | $\pm(0.0001\sim 2)\text{mm}$, $\pm(0.001''\sim 3')$ |
| 准确度 | $\pm(0.005\sim 2)\text{mm}$, $\pm(0.002''\sim 0.040'')$ |
| 重复性 | $\pm(0.001\sim 2)\text{mm}$, $\pm(0.002''\sim 0.020'')$ |
| 工作空间 | 随机器人结构类型而不同 |
| 速度范围 | 0~11m/s, 大多数压铸机器人速度可编程 |

7.3 压铸机器人应用实例

压铸机器人是在恶劣环境下 24h 代替人工操作的极好的例子。目前用于压铸的机器人大多是通用型机器人，专门用于自动压铸系统的机器人为数极少，AL-MART 系列机器人是其中具有代表性的一种，该系列自 70 年代推出，至 90 年代已开发出三代型号，用于 80, 125, 150, 250t 压铸机，进行汽车零件等的压铸

生产。一般来说，引入压铸机器人的条件至少包括以下各项：

- (1) 力求将自动浇注机、压铸机、机器人、切边压力机、堆垛装置联成一系统；
- (2) 要有足够的工作空间，既不影响机器人的动作，又不妨碍更换金属模的作业；
- (3) 机器人及系统选择要满足生产节拍的要求；
- (4) 除特殊需求外，夹持器应尽量通用化并具有适当强度 (以防搬运中工件脱落变形)；
- (5) 具有检测工件的手段；
- (6) 具有一定的安全保证措施。

作业系统的平面布置与构成应随不同的生产要求而定。作为压铸机器人应用一例，见图 9-7-33。

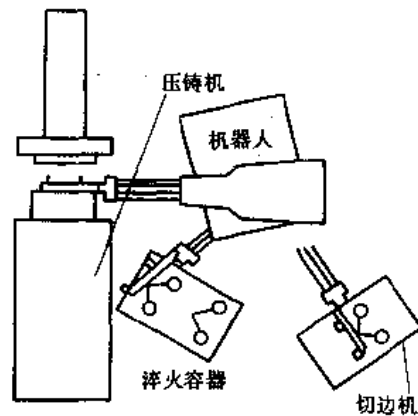


图 9-7-33 压铸机器人应用例——取工件、淬油和切边

使用压铸机器人，可得到如下效益：

- (1) 保证产品质量均匀稳定；
- (2) 集约化生产，有效利用时间，缩短了作业周期，劳动生产率提高了 50%；
- (3) 实现了多品种、少批量的柔性化生产；
- (4) 一人可同时管理多台压铸机，节省劳力达 6 倍以上；
- (5) 不必熟练操作工，节省培训费用；
- (6) 把操作者从多尘、易被烧伤的恶劣环境中解放出来。

8 其他机器人

从作业内容来看，还有机床上、下料、注塑铸锻、精整、码垛、激光加工、密封粘接、切割、检查分选、打包包装等。

从应用领域看，已从汽车制造业推广到其他制造业，从制造业扩展到非制造业，详见表 9-7-17。



表 9-7-17 工业机器人今后的应用领域

| 应 用 领 域 | 所 需 技 术 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|------------|-------------|------------------|------------------|------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-----------------------|------------------|------------------|------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|--------|------------------|---------------------------------|------------------------------------------------|-----------------------|------------------|------------------|----------------------------|------------------|------------------|-----------------------|--------|
| | 高 速 化 | 高 可 靠 性 | 高 精 度 化 | 低 成 本 化 | 小 型 化 | 轻 量 化 | 大 负 载 | 互 换 性 | 模 块 化 | 末 端 执 行 器 | 移 动 机 构 | 关 节 机 构 | 安 全 机 构 | 小 轻 大 功 率 | 新 型 操 作 机 | 自 诊 断 功 能 | 群 控 | 分 级 控 制 | 适 应 控 制 及 功 能 | 学 习 机 构 及 计 算 机 控 制 | 机 器 人 语 音 | 环 境 示 教 | 作 业 示 教 | 处 理 自 然 语 音 | 问 题 解 决 | 环 境 识 别 | 视 觉 、 触 觉 | 听 觉 |
| 汽车制造 | * | * | * | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | | | | * | ○ | ○ | | * | ○ | ○ | * | * | * | * | ○ | * | ○ | | | |
| 机械制造 | * | * | * | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | | | ○ | * | * | ○ | | * | * | ○ | * | * | * | * | ○ | ○ | * | ○ | | |
| 精密机械 | * | * | * | ○ | | * | | ○ | | | ○ | * | | | | * | * | ○ | * | * | * | * | ○ | ○ | * | ○ | ○ | |
| 电气机械 | * | | ○ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 交通运输 | * | | ○ | ○ | | | | | | | | | | | | | | | * | | | | | | | * | | |
| 金属制造 | * | * | * | ○ | | ○ | ○ | ○ | | | ○ | * | ○ | ○ | | * | * | ○ | * | * | * | ○ | ○ | * | ○ | | ○ | |
| 钢铁工业 | ○ | * | | ○ | | * | | | | | ○ | * | | | | * | * | | | | ○ | | | | | ○ | | |
| 橡胶工业 | ○ | * | ○ | ○ | | | | ○ | | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | | ○ | * | ○ | ○ | | ○ | ○ | ○ | | * | * | ○ | |
| 石油化工 | * | | ○ | | | | | | | | | | | | | | | | * | | | | | | | * | ○ | |
| 合成树脂成型加工 | ○ | * | | ○ | | | ○ | ○ | | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | | * | ○ | ○ | ○ | | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | * | ○ | |
| 木材工业 | ○ | * | | ○ | ○ | | ○ | * | | * | | | ○ | | | * | | | * | | * | | | | * | ○ | ○ | |
| 纤维制造加工 | ○ | * | ○ | ○ | | ○ | ○ | | | ○ | ○ | | ○ | | | * | ○ | ○ | * | | ○ | ○ | ○ | | * | ○ | ○ | |
| 造纸工业 | ○ | * | | ○ | | | ○ | | | ○ | | ○ | | | | ○ | * | | | ○ | | | | | * | ○ | ○ | |
| 食品加工 | ○ | * | | ○ | | | ○ | | | ○ | ○ | ○ | | | | ○ | ○ | ○ | ○ | | ○ | ○ | ○ | | * | * | ○ | |
| 摩托车、自行车 | * | | ○ | ○ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 轻工搪瓷 | * | * | * | ○ | | ○ | * | | * | * | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 纺织工业 | * | | ○ | | | | | | | | | | | | | | | | | | ○ | * | | | | | | |
| 建筑建材 | * | | ○ | | | * | | | * | * | | * | | | | | | | | ○ | * | | | | | | | |
| 矿山采掘 | * | | ○ | | | | | | | | | | | | | | | | | * | | | | | * | | | |
| 农业林业牧业 | * | | ○ | | | | | | | | | | | | | | | | * | | | | | | * | | | |
| 冶金工业 | * | | ○ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 电子工业 | * | | ○ | | | | | | | | | | | | | | | | | | ○ | | | | | | | |
| 玻璃陶瓷、窑业 | * | ○ | ○ | * | | | | | * | * | | | | | | ○ | * | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | * | ○ | ○ | |
| 医药、福利 | * | * | ○ | | * | | | | * | * | * | * | * | * | * | * | ○ | ○ | ○ | | | | | * | ○ | * | * | * |
| 核能工业 | * | | ○ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | * | | | |
| 邮电 | * | | ○ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 军用 | * | | ○ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 消防救灾 | * | | ○ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 看守、警备 | * | | ○ | | | | | | | | | | | | | | | | | | ○ | | | | | | | |
| 服务、家用 | * | | ○ | | | | * | | | | | | | | | | | | | ○ | | | | | | | | |
| 水下、海洋开发 | * | | ○ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 空间、宇航 | * | | ○ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| FMS 和 CIMS | * | | ○ | | | | | | | | | | | | | * | | | | | | | | | | | | |
| 教育培训 | * | | ○ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

此星公司制作 请尊重作者版权



(续)

| 应用领域 | 所需技术 | | 机器人应用作业内容 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----------|------|--------------------|-----------|----|----|----|----|----|------|-------|----|----|----|----|----|----|----|----|------|------|------|----|----|----|----|---|
| | 平衡感觉 | 力觉 接近觉 新型驱动器 | 行走机构 | 材质 | 喷涂 | 点焊 | 弧焊 | 装配 | 电子装配 | 机床上下料 | 压铸 | 注塑 | 铸造 | 冲压 | 锻造 | 搬运 | 码垛 | 精整 | 激光加工 | 密封粘接 | 检查分选 | 切割 | 处理 | 打包 | 其他 | |
| 汽车制造 | ○ | | | | * | * | ○ | ○ | | | ○ | ○ | * | * | * | | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * |
| 机械制造 | ○ | | | | | | * | | * | | | | | * | | | * | * | | | | | | | | |
| 精密机械 | * | | | | | | * | | | | | | | | | | * | * | | | * | | | | | |
| 电气机械 | | | | | | * | * | * | * | | | | | | | * | * | | | | * | | | | | |
| 交通运输 | | | | | | | | | | | | | | | | * | * | | | | | | | * | | |
| 金属制造 | ○ | | | | * | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 钢铁工业 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 橡胶工业 | ○ | | | | | | | | | | | | | * | | | | | | | | | | | | |
| 石油化工 | | | | | * | | | | | | | | | | | | * | | | * | | | * | | | |
| 合成树脂成型加工 | ○ | | | | | | | | | | | | | * | | | | | | | | | | | | |
| 木材工业 | | | | | * | | | * | | | | | | | | | * | | | | | | | | | |
| 纤维制造加工 | ○ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 造纸工业 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | * | | | | | |
| 食品加工 | | | | | | | | | | | | | | | | | * | * | | | * | | | * | | |
| 摩托车、自行车 | | | | | | | * | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 轻工搪瓷 | | | | | * | | | * | | | | | | | | | * | | | | * | | | ④ | | |
| 纺织工业 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 建筑建材 | | | | | * | ○ | ○ | * | | | | | | | | * | * | | | | ○ | | | | ① | |
| 矿山采掘 | | | | * | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | ③ | |
| 农业林业牧业 | | | | | * | | | * | | | | | | | | | | | | | | | | | ② | |
| 冶金工业 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 电子工业 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 玻璃陶瓷、窑业 | | | | | | | | | | | | | | | | | * | * | | | | | | | | |
| 医药、福利 | ○ | * | * | * | * | * | * | * | * | | | | | | | * | * | | | | * | | ○ | * | ○ | |
| 核能工业 | | | | | | | | | | | | | | | | * | | | | | * | | * | | | |
| 邮电 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | * | | * | | | |
| 军用 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | * | | * | | | |
| 消防救灾 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 看守、警备 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 服务、家用 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 水下、海洋开发 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 空间、宇航 | | | | | | | | * | | | | | | | | | * | | | | | | | | | |
| FMS和CIMS | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 教育培训 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

注：○—需要。

*—非常需要。

- ① 建筑建材专用：凿岩、开挖、平整、制模、整理、拆除、铺路、砌石砖、混凝土浇注、钻孔。
- ② 农业专用：收割、磨粉、打捆、果实跟踪等。
- ③ 矿山专用：采掘、清理、洗涤等。
- ④ 轻工专用：剪切、装订、缝纫等。

机器人制作请尊重版权



第8章 机器人应用工程中的群控系统

在加工制造业中,采用若干台工业机器人及相关辅助设备,构成多品种混流自动作业生产线以实现柔性化生产。机器人应用工程中的群控系统就是指对这种柔性生产线上运行的机器人及辅助设备进行实时过程控制、协调、监测和管理的系统,为叙述方便,以下简称为群控系统。

1 群控系统的构成

图9-8-1表示柔性生产线机器人群控系统的一般构成框图,它通常是一个二级管理系统。线上各机器人及相关子设备的控制计算机作为下位机,总控台的控制计算机则为上位机,后者通常可选择一台工业控制计算机来担任。机器人生产线在总控计算机统一管理下运行;总控计算机通过人机接口,接收人的各种操作命令,传达到各机器人和子设备。后者把各自的状态信息传送到总控,总控计算机则将这些信息以图形或文字方式显示出来,供运行人员监视并进行综合判断,对各机器人及子设备下达各种操作命令,使全线协调地正常运行。

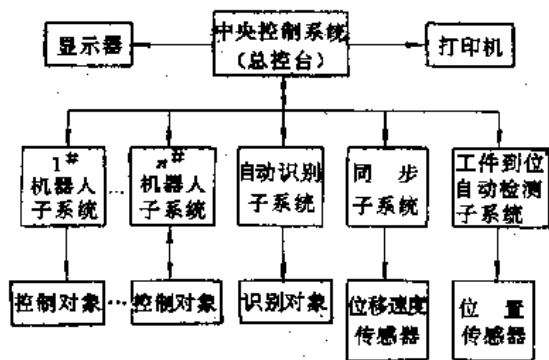


图9-8-1 群控系统的构成

2 群控系统的功能设置

机器人群控系统的功能是根据对生产线自动化程度要求来设置的,在要求自动化程度较高的情况下,应考虑以下功能设置。

2.1 工件识别

多品种混流生产线必须具有工件识别系统,多品

种工件自动识别的目的是自动识别生产线上运行工件队列,并将队列信息传送到总控系统,参见本章4、5节。

2.2 同步运行

在生产线运行时,如果机器人需对行进中的工件进行操作,并且工件与机器人末端执行器间相对位置精度要求较高,则必须设置用于保证工件传输系统(各种输送链、转台等)与机器人动作协调的同步系统。

2.3 全线自动起停和联锁

任何生产线一般都有若干个基本保证条件,如风、气、油、水、电、料等。对于机器人生产线,还存在各子系统是否处于“待机”状态的问题。所有这些都必须由总控执行监测和控制,只有这些条件具备时才能启动,以保证系统安全可靠地运行,避免由于误操作造成人身安全和设备损坏事故。总控应按一定顺序启动各种设备和机器人,直至全线正常运行。正常停线时,总控也应按一定顺序向各种设备和机器人发出停机命令,直至全线停止运行。总之,自动化程度越高,起停要求人的干预也越少。

2.4 全线工况的实时动态模拟显示

为使操作人员及时了解现场作业情况,使系统具有良好的人机接口,采用多窗口管理及菜单驱动技术,通过软件把各机器人及子设备的工作状态、传输速度、队列情况及作业区内工件品种、日期、时间、产量统计、设备故障、系统功能等重要信息以图形及文字的形式实时地显示在彩色监视器上,以便有效地对全线运行情况进行实时监控、管理,并及时进行故障诊断和排除。

2.5 统计功能

统计包括两类:一类是产量统计,如工件的分类和班产、日产、月产总量等;另一类是各机器人和全线运行时间及分类故障时间统计。上述所有统计均应形成数据文件存放于磁盘,并设计独立的软件来读



取。

2.6 灵活的联机/离线切换功能

由多台机器人及若干个子设备组成的一个庞大的系统,其故障概率比单台机器人的要高。因此,群控系统必须首先考虑到,如果总控系统发生故障,全线可按各单机独立运行方式工作;如果单台机器人发生故障,应允许它离线,经修复后立即返回正在运行的生产线工作。

3 群控系统的信息交换

机器人群控系统从某种意义上可以理解为总控与各单台机器人及子系统的信息交换系统。这些信息中有些是开关量,有些则是约定数字代码,下面仅对总控与各单机的信息交换进行分析。

3.1 各单机向总控发出的信息

单机向总控发出的信息大体可分三类。

3.1.1 申请联机/离线

能联机工作的单台机器人均应设有运行方式选择开关。被设置为“联机”方式运行的机器人起动后经过一系列电和机的初始化,再向总控发出“申请联机”信息。在等待总控发回“允许联机”信息过程中,仍要不断检测其运行方式选择开关。这一过程有时也称为“握手”。如果单机等到总控发出的“允许联机”,即握手成功,此台单机将按总控发来的命令运行,一般除急停以外,单机操作面板上的键盘被禁止。如果一直等不到总控的“允许联机”,即握手失败,操作人员可选择“离线”运行方式,该单机将不接受总控控制,其操作面板上的键盘可以使用,并能独立运行。

已联机运行的单机因种种原因需离线,应向总控发出“申请离线”信息,总控收到后将不再查询该机信息,也不向它发任何命令,并将该机离线状态显示于屏幕上。但总控仍将不断巡检离线单机有无发来申请联机信息,如果有,则在适当时刻向它发“允许联机”信息。这就保证了全线运行中各单机退出和返入的灵活性。

3.1.2 正常工作循环中的单机状态信息

正常运行下单机工作循环一般可分成三个阶段:就位—延时(简称准备),作业(简称忙)和等待下一作业(简称闲),如图9-8-2所示。

这三个阶段的时间总和就是生产节拍。每个阶段开始,单机都要将其状态报告总控,总控进行排队,若收到单机“闲”的信息,总控就将下达该机操作程序号。

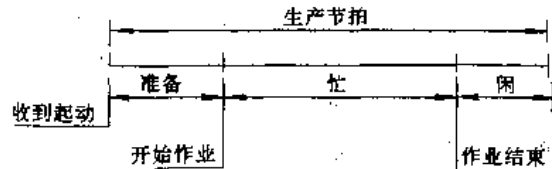


图 9-8-2 机器人工作循环示意图

3.1.3 故障信息

一台完善的工业机器人应具有自诊断功能,诸如超调、超温、超压、失控、调不出相应数据文件等。按故障的严重程度,单机自己做出决定是否停机。若需立即停机,单机依次将故障信息及离线申请发往总控后自行停机;若继续运行,仅向总控发故障信息,总控则将该故障信息显示,提请运行人员及时处理。

3.2 总控向单机发出的命令信息

总控向单机发出的命令信息大致可分为两类:一类是将操作人员键入的命令转达到各单机,例如,操作人员键入停线命令,总控将巡检各单机状态,一旦某台单机进入“闲”状态,即令其停机;另一类是总控根据全线或单机状态给单机下达命令信息,例如,允许联机,下一作业程序号等,此类命令信息无需人的干预。

4 通信系统

工业机器人群控系统的通信系统有如下特点:

(1) 首先要求十分可靠,能抗住工业现场各种强电磁干扰。任何误码均可能导致严重的设备或人身事故,例如,操作程序号传错就可能发生机器人与工件相撞事故;

(2) 通信距离一般为几十米至几百米;

(3) 总控与各单机的通信是双向的,总控与其他智能化设备间的通信也应是双向的;

(4) 与文本处理系统相比,其信息量不大,通常无大块数据传送;

(5) 一般来说,生产节拍对于总控计算机处理速



度而言是极慢的过程,又无大块数据传送,故对实时性无很高要求。

下面是机器人群控系统中可能采用的几种通信系统方案。

4.1 并行通信

图 9-8-3 示出总控与机器人并行通信(图中将并行通信接口简称并口)的原理框图。各单机用独立通道把状态信息传向总控,若单机的状态信息少于 128 个(用不了 8 位,通常如此),则 8 位通道中的一位腾出来送到总控另一个口,供总控判别是哪台单机的信息(即单机地址信息)。还可以把所有单机的这一信息通过“或”逻辑触发总控中断。总控的命令信息则通过另一 8 位总线通道同时传送到各单机。再用一个输出各位分别触发各单机中断。只有被选中的单机去读取该总线上的总控命令信息。这种双向并行锁存的通信系统在硬件原理上比较简单。但应指出此处的并行通信并非计算机技术中的双向并行 I/O,后者通常可利用现成的并行接口芯片(如 Intel8255, MOTOROLA6820 等)的双向方式实现双向握手,数据传输速率是以 CPU 的机器周期计的。上述并行通信必须经光电隔离(简称光隔),数据必须锁存,并且收发双方必须等待由于光电隔离而造成的延迟。也就是说这种并行通信方案并不具备并行 I/O 快速的优点,而其电缆多、接插点多等缺点则显而易见。

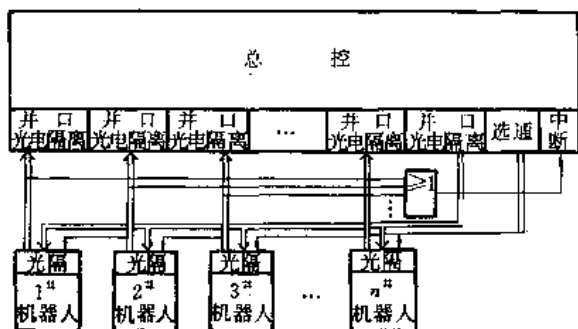


图 9-8-3 总控和单机并行通信原理图

4.2 独立通道的串行通信

串行通信适用于远程通信。常用的串行通信接口(图 9-8-4 中简称串口)芯片都有很强的硬件握手逻辑和中断功能。用串行通信代替上述并行通信可省去图 9-8-3 中的选通,单机地址可判别这些逻辑,所需的电

缆和接插点可大幅度减少,有利于降低成本和提高系统的可靠性。但是通常采用的 RS232 接口不完全适用于机器人生产线的现场条件。可以采用光电隔离电流环或加光电隔离的 RS422 接口。实际使用表明,在 100m 范围内这两种接口是可靠的。图 9-8-4 示出了总控和机器人之间采用独立串行通道的通信系统原理。

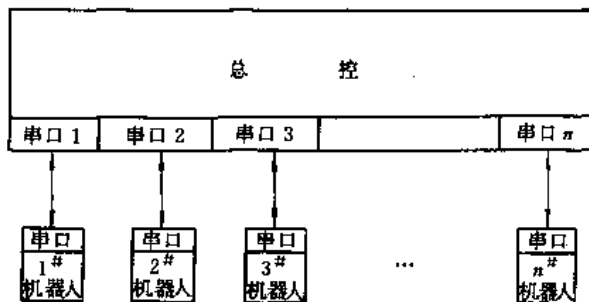


图 9-8-4 独立串行通道的通信系统原理

4.3 串行总线和位总线(Bit Bus)通信系统

大约出于工业控制中越来越广泛地采用多 CPU 主从系统的原因,70 年代中期相继生产出了具有多机串行通信的 CPU,如 Intel8031 系列,8096/8098 系列,ZLOG64180 等。利用这类 CPU 的多孔通信功能可以构成串行总线,使电缆和接插点进一步减少。这种通信是针对一对多的主从系统设计的,恰好符合工业机器人群控需要。但是必须指出,这种通信机制(在这里从机就是各单台机器人或子设备)不具备主动发信能力,只有主机(在这里就是总控计算机)查询到它时

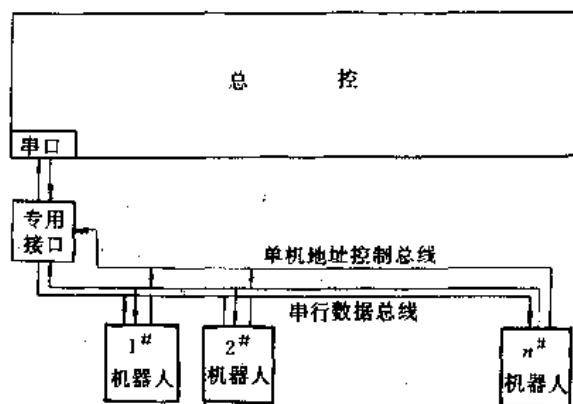


图 9-8-5 基于多机通信原理的串行总线通信系统



才能将其状态信息上报给主机。因此正常运行时,从机将不断地被主机的查询所中断。所以还需开发出专门接口来解决从机也具有主动发信能力问题。图 9·8-5 示出了基于多机通信原理的串行总线通信系统原理。

多机通信另一个不足之处是没有强有力的硬件检错能力,检错要靠软件,CPU 负担较重。为此,Intel 公司又推出专用于通信的 RUP18044 系列。这实际上是双 CPU 芯片:8031+SIU (SIU 是串行接口单元的缩写)。它自动执行 HDLC[⊖]或 SDLC[⊖]。它支持一对多

半双工方式通信,采用 RS485 接口。所有参与通信的从机都可直接挂到总线上,在自同步方式加转发器条件下连接的节点处理机可多达 250 个,它传送的距离达 13.2km,数据传输速率不低于 62.5kbit/s。由于硬件有 16 位 CRC 冗余校验,可以认为误码概率几乎为零。目前市场上已有 IBM-PC 总线的 BIT BUS 接口板和 STD 总线的 BIT BUS 接口板现成产品。只要在这些接口板的应用层作相应软件即可用于机器人群控系统。缺点是目同造价较高。图 9·8-6 示出了利用位总线构成的通信系统。

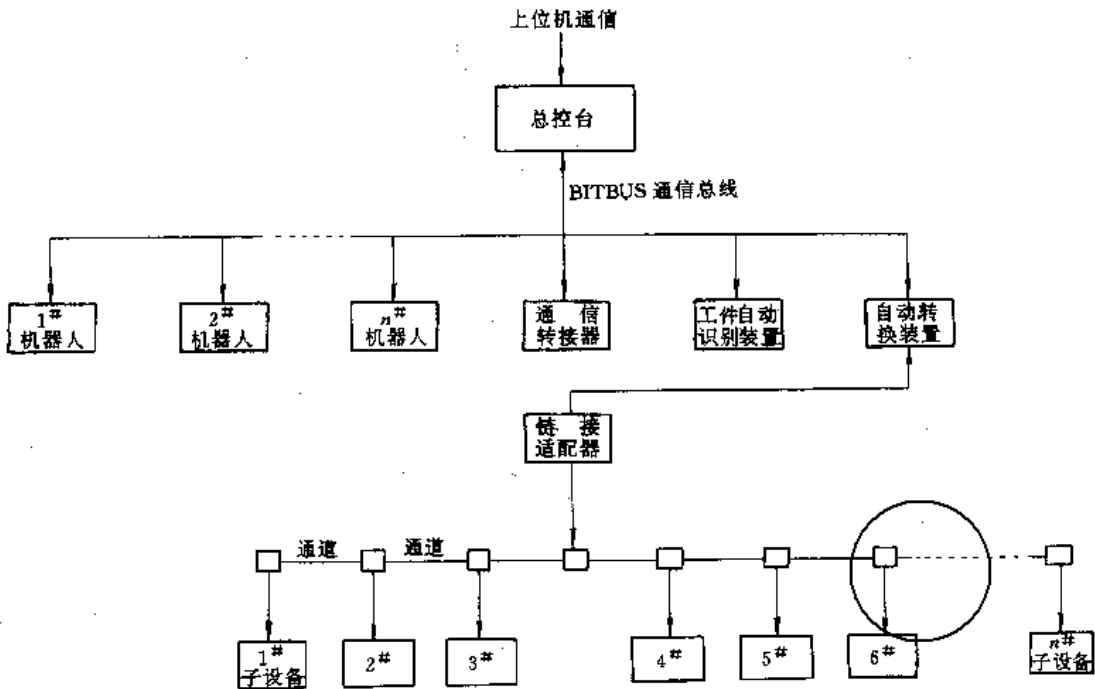


图 9-8-6 利用位总线构成的通信系统

5 识别和排队

对于多品种混流机器人生产线,识别和排队是十分重要的专门问题。混流生产线上的每台机器人必须知道它即将对之操作的工件型号,以便调用相应的操作程序。最理想的方案是单台机器人具有识别能力,但目前就多数工业机器人而言,还难以做到这一点,还是采用集中识别的办法,把识别装置设置在生产线的入端。识别装置(下称识别站)的任务是对通过它进入生产线的工件产生一个相应代码,通常是机器人操作程

序号。如果工件品种较少,定位比较准确,形状也比较简单,识别装置可用若干光电传感器采集一些特征点来判别,形成程序号,这就构成自动识别装置。若工件品种较多,或工件姿态定位不准确,无法用有限特征点来识别,只得用人工在线的入口处用手动方法置入

- ⊖ HDLC 是“高级数据链控制”的缩写,是国际标准化组织 (ISO) 建立的通信标准。
- ⊖ SDLC 是“同步数据链控制”的缩写,SDLC 是 HDLC 一个子集,是 IBM 公司的通信协议。



相应程序号,这就是手动识别。一般手动识别只需在更换工件品种时,才置入新的程序号,无论是自动识别还是手动识别,位于生产线入口的识别站产生的程序号并非线上各台机器人立即要执行的程序号。若称生产线入口为“前”,则后面的机器人操作程序号将滞后于其前面的机器人。例如,2#机器人在物理位置上在1#机器人后面三个工位,则2#机操作程序号要滞后于1#机器人程序三个位置。这就是说识别站生成的程序号必须以先进先出顺序排成队列保存起来,即所谓排队。

由此可见,“排队”问题是由于集中识别引出来的。对于这种系统,工件实物队列与保存的程序号队列必须严格吻合,见图9-8-7。实现排队的方案有多种,下面介绍三种可能的方案。

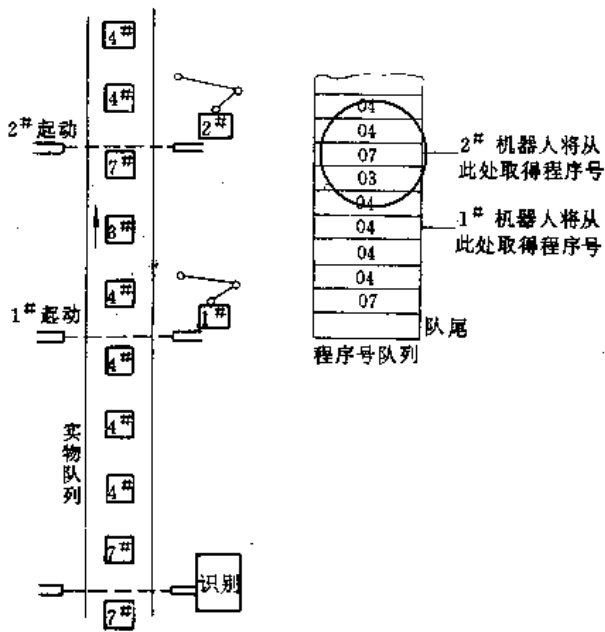


图 9-8-7 工件队列和程序队列对应关系

5.1 总控排队

识别站生成的程序号传送到总控,在总控的存储器内形成程序号队列,再由总控在收到单机完成当前作业信息后从程序号队列中取出相应程序号传送到该单机,告诉它下一作业干什么。

5.2 单机排队

图9-8-8是单机排队方案示意图。识别站生成程

序号分别传到各单机,由各单机在各自的存储器内排成队列,新进的程序号排在队尾,原来的所有程序号向前挪一位置。单机收到起动信号后从队首取出程序号,调出相应作业程序,并将程序显示在自己的显示器上,同时上报总控(如果设置总控的话),让总控显示在监视系统上。

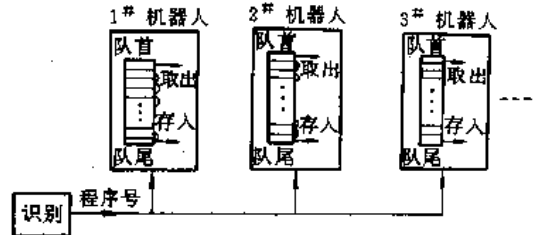


图 9-8-8 单机排队示意图

5.3 识别器排队

识别器生成的程序号队列存放在自己的存储器中,各单机完成当前作业后,向识别器索取下一作业程序号。图9-8-9示出了识别器排队示意图。

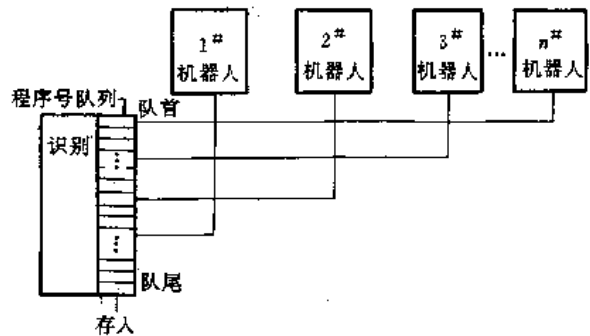


图 9-8-9 识别器排队示意图

这三种方案中,单机排队方案省掉一次信息传输,出错概率在同样硬、软件条件下当然也降低一半。但是在硬件上需要识别站到各单机的一对多通信系统。并且一旦队列出错,需逐台单机去改正或重新编辑,这是非常麻烦的事。所以这种方案对于多台机器人群控是不适合的。但非常适合于单台或至多两台机器人的混流生产线。这种场合不设总控。

有时为节省投资不设总控,单机又没有排队功能,

自动识别



则识别器排队显得有优越性。实际上识别器取代了总控的这一功能,因此这种场合对识别器要求有显示、保存和编辑程序号队列功能。图9-8-10为智能识别站原理框图。

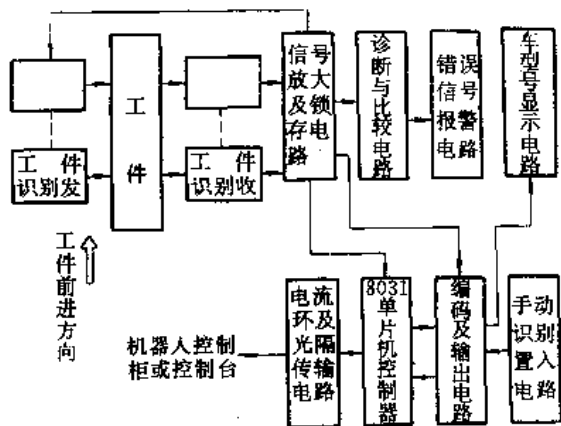


图9-8-10 智能识别站原理框图

对于停留在机器人生产线工件较多的场合,还有一个队列保存问题。这种生产线往往要求下班停线时生产线不能放空,不论哪种排队方案,都要求把停线时的程序号队列准确可靠地保存起来,可以用磁盘、带电池保持静态RAM或E²PROM等手段实现。但是要准确记录停线时队列却非易事,问题是什么时刻才能全线停车(一般也就是停传送链)。在一个生产节拍中,若在延时阶段停机,意味着它已接收到当前作业程序号,但还未执行就停机了。下次线起动时总控将送给它下一作业程序号,则发生错号危险。若在“忙”阶段停机,意味着作业中断,造成废品。所以对于单台机器人,必须在其“闲”阶段停机。对于全线而言,必须所有机器人都处于“闲”阶段才能停线。这就要求全线时序上存在一个所有机器人均处于“闲”状态的时间段。一旦总控操作台下达停机命令,总控应立即向各单机转达,各单机在收到此命令后,并不立即停机,而是待当前作业完成后停机,总控查询到各机器人均已停机,立即停链,遂即存放此时队列。要做到这一点,对机器人安装位置,起动开关位置及示教程序都要求有周密安排。

6 机器人与生产线的同步技术

机器人群控系统设置同步子系统的目的是保证机器人动作速度与工件传输速度匹配。通过机械传

动或直接通过传感器取出速度信息转换为控制系统可以采集的数字信息称为同步信息。

同步子系统的核心部件是光电编码器(圆光栅)。通过减速器与工件传输系统在机械上耦合。一般,同步子系统安装在传输链的驱动站主轴或从动轴上。编码器发出的方波信号经整形,必要时加倍频或分频电路,与减速器的减速比一起使其频率与各单机内同步脉冲频率匹配,经驱动后分送至各单机、总控及其他需要的地方。由于同步信号的频率反映了传输系统速度(通常就是链速),用此信号代替单机内同步脉冲,就能实现机器人与工件同步。总控对同步信号定时累加(积分)就可以得到表征链位移的数据,与预先设定的阈值比较,就可判别是否链速正常或超差。一旦发现超速或过缓,总控将报警。在生产线起动时,总控也应检测链速,当其达到正常值后再与各子系统和单机通信握手。如果机、电参数选配合适,使链的一个节距对应的同步脉冲正好是整数,则对同步脉冲的定额计数可得到节距脉冲。节距脉冲是实现不等距工件放置的重要信号。

同步子系统在原理上并不复杂,但实际应用中往往由于机械振动、荷重链的蠕变等因素造成链的运动并不理想均匀,从而造成机器人在同步时抖动。遇到这种情况,对同步脉冲的采样值进行平滑数据处理往往十分有效。例如,五次采样值平均,即丢掉最前一次采样值,加入最后一次采样值,五值平均。同步器原理见图9-8-11。

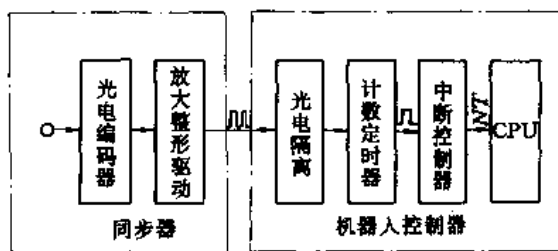


图9-8-11 同步器原理图

7 实时控制系统的软件设计

机器人应用工程的群控系统在我国已经起步,机械工业部北京机械自动化研究所成功地设计了第二汽车制造厂东风汽车机器人自动喷涂柔性生产线。其中软件系统则是整个群控系统的核心。



7.1 软件结构

工厂里的机器人操作者不一定是软件工程师，所以在设计软件时必须这样构造软件：使操作人员只须

和与他有关的必要的软件包打交道，软件基本可以分为两类：离线编程、轨迹生成和应用软件。应尽量使操作人员只与应用软件打交道。图 9·8-12 示出软件结构。

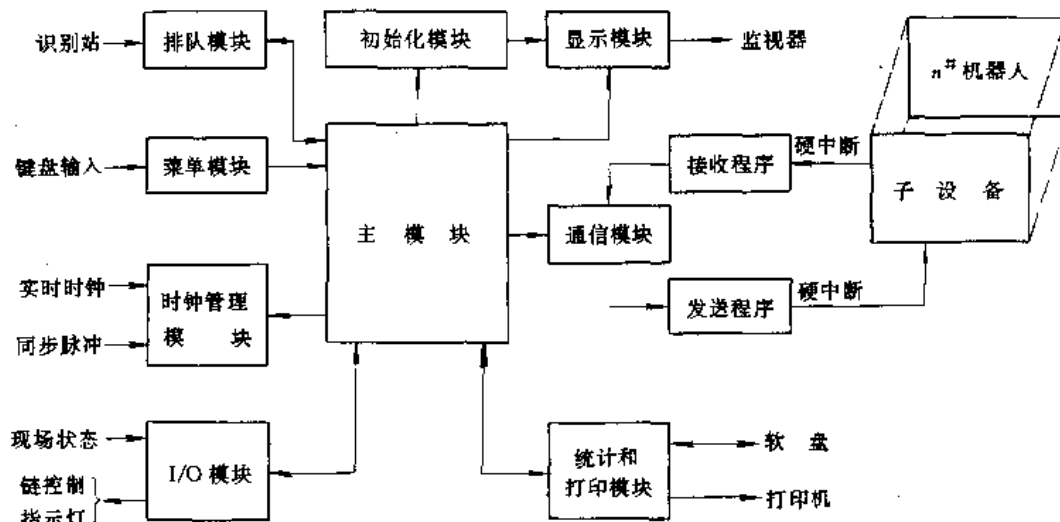


图 9·8-12 软件结构示意图

7.2 系统软件及开发工具

最好选用一种实时多任务的操作系统，用 C、C++ 这类高级语言来设计总控系统的软件。其优点是设计图形、菜单方便，快捷，而中断程序又可用嵌入式的汇编语言来书写，执行快、短而精。

7.3 总控软件功能

作为总控软件至少要完成如下功能：

- (1) 发出每个机器人开始工作和结束工作的命令；
- (2) 发出机器人转换成另一种工作程序的命令；
- (3) 接受机器人的故障信号，并登录故障原因，将故障显示到显示屏上，并尽可能自动处理故障；
- (4) 产品统计和打印报表；
- (5) 计算每台机器人的机时和等待时间；
- (6) 确定自动化系统中每一工位的故障次数；
- (7) 实现各种传感器接口及信号处理；
- (8) 实现故障诊断和安全联锁；
- (9) 实时、动态的工况显示。

整个总控软件至少要分成如下四个模块：

- (1) 系统软件。完成多任务和前后台作业的调度、系统资源管理。
- (2) 菜单驱动软件。使工厂操作人员只通过一个菜单驱动软件来与控制系统联系，减少操作失误，易学习、易掌握。
- (3) 控制软件。实现多机协调控制、通信、管理，以完成生产任务。
- (4) 诊断软件。前面提到的软件结构分离，可使操作人员快速诊断故障，但仍有必要设计出好的诊断软件，除了对机器人本身进行诊断外，应用系统，如喷涂、焊接等系统的诊断也应当包括进去，这种软件将会随着每种应用而有所不同，必须容易修改，以便使那些起初未被重视的、而后来随着时间被证明是很严重的缺点得以修正。软件系统框图见图 9·8-13。

机器人群控技术的要求，反映了制造工厂向完全工厂自动化和计算机集成制造 (CIMS) 的趋势。将计算机控制的设备(机器人)集成到制造系统中需要有很强数据通信能力，但目前大多数机器人还不具备或不完全具备这种能力，这在设计机器人和机器人群控系统中应引起充分的重视。



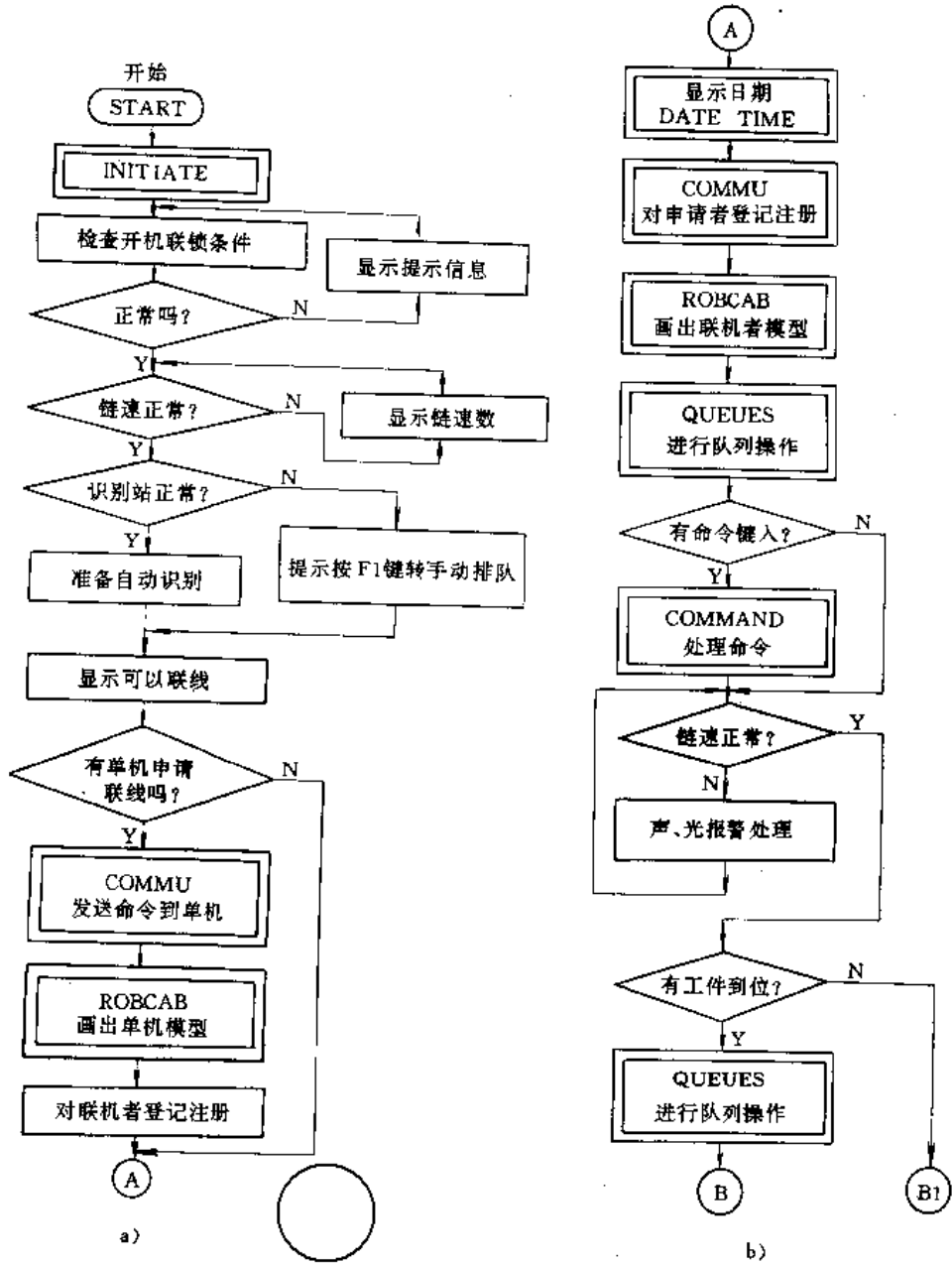
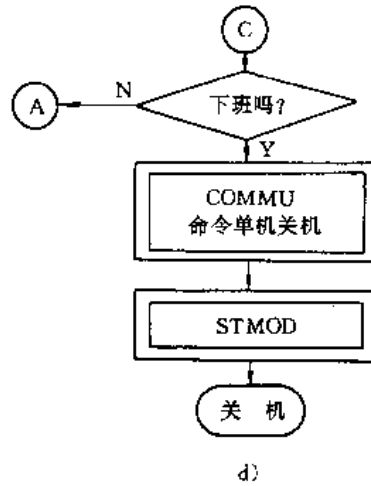
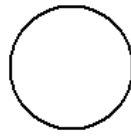
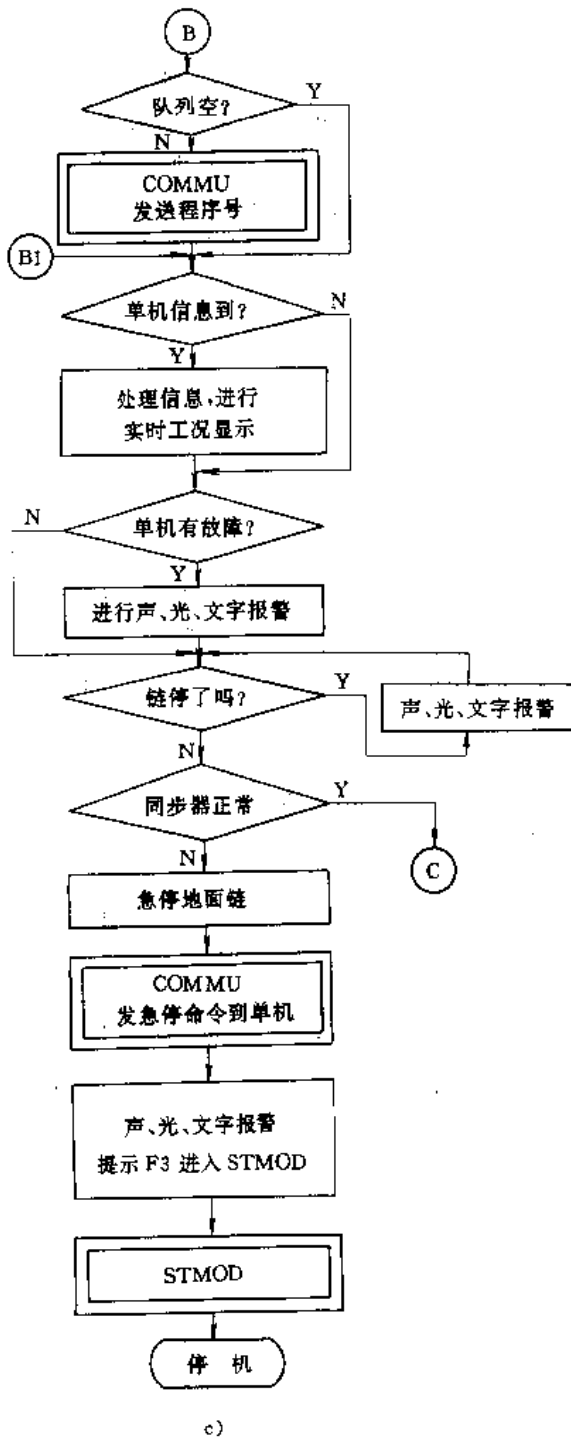


图 9-8-13 软件

a) 第一部分 b) 第二部分





系统框图

c) 第 3 部分 d) 第 4 部分



第9章 机器人智能化

1 概述

工业机器人智能化至少包括以下四个方面：感觉功能、控制功能、移动功能和安全可靠性（自诊断、自修复功能）等。

1.1 感觉功能智能化

1. 检测 智能化的工业机器人除具有对本身的位姿、速度等状态的内部检测外,还必须具备对外界对象物的状态和环境状况等的外部检测。其实质类似于

人的五官和身体感觉功能,即视觉、触觉、力觉、滑觉、接近觉、压觉、听觉、味觉、嗅觉、温觉等。上述前5种感觉在本篇第5、6章已有详述。此处“压觉”指机器人感知在垂直于其手部与对象物接触面上的力的能力;“听觉”指机器人对于音响的分辨能力;“味觉”指机器人对于液态物质等成分的分析能力;“嗅觉”指机器人对于气态物质等成分的分析能力;“温觉”指机器人对温度信息的感知能力。

各类感觉及其信息的融合所形成的外部检测与机器人动作控制的智能化密切相关。图9-9-1给出了非

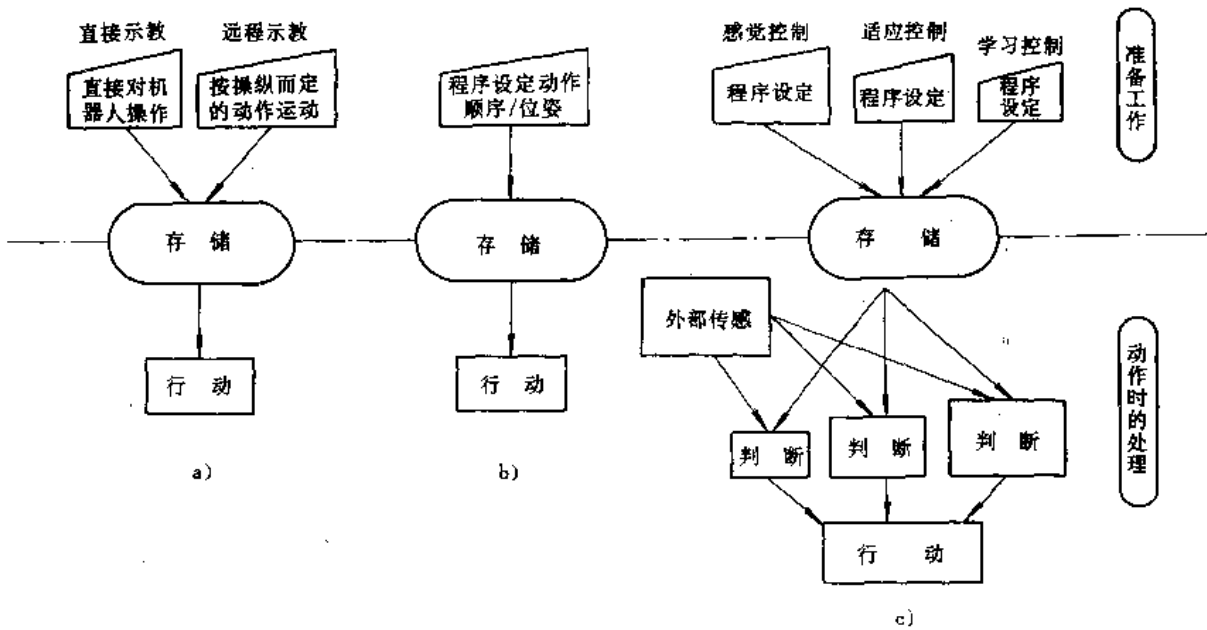


图9-9-1 控制信息的产生方式

a) 示教再现机器人 b) 数控机器人 c) 智能机器人

智能机器人与智能机器人控制信息的产生方式。

2. 控制信息交换 信息传递形态多种多样,为保证相互匹配,可采用制造自动化协议(Manufacturing Automation Protocol——MAP)等以实现信息传递与交换的标准化。

3. 识别 欲对内、外部检测结果分析整理,变为控制信号,决策行动,必须具有识别功能,将必要的信息以一定的基准集约或融合。

1.2 控制功能智能化

1. 示教的智能化

(1) 示教再现型机器人的示教。无论直接示教还是远程示教(用操作杆或操纵把),在操作人员的脑中难以定量化,又如位姿不可能完全收入控制系统内,且由于机械的原因、传感器的分辨力等,都不可避免地引入误差,精度难以评价。



(2) 数控机器人的示教。理论上直接指示位姿输入数据，避开误差，但实际不可避免，包括动作机构、工作空间狭窄引起的违章操作、联接处非线性摩擦变形等。检出工具中心点 (TCP) 进行反馈，方法较简便，但也难保证精度。

(3) 智能示教。用编程语言输入，希望与自然语言相近，但很难，有待开发。

2. 适应控制 运用现代控制论，正确把握各种参数，已设计出各类不同的适应控制系统。其中较常用的模型规范适应控制系统 (MRACS) 参见本篇第4章，它将具有所希望的动态特性的系统做成模型，构成使设备输出与模型输出一致的适应算法。对机器人而言，可对惯性力矩、负载等的变化采取对应的有效的控制，适应控制可望得到应用。但目前的适应控制，须满足下述前提条件：

- (1) 规范模型要求定系数、线性的；
- (2) 规范模型与设备维数相同；
- (3) 设备的可调节参数依存适应机构本身。

如上述条件不满足，则问题变得非常复杂。随着微处理器的发展，演算时间的缩短，可能会有更高水平的适应控制。

3. 握持力的采样开关控制 在末端执行器上装压力传感器，通过驱动器的正反动作来控制末端执行

器的开合，而不是控制速度，加以微分补偿，只需1次切换到达稳定点，对握持力实现简单的适应控制。

1.3 移动功能智能化

随着工业机器人应用领域的不断扩展，对移动功能的需求日益迫切：

- (1) 长距离搬运；
- (2) 作业对象很大，而机器人工作空间小；
- (3) 作业对象多，而机器人不能一一对应；
- (4) 极限作业：高空、宇航、深海、核工业管道等。

移动机构有轮带式 and 行走式。轮带式有有轨和无轨两类，有些只有车轮，有些带有履带。行走式有二足、多足、无数足、滑翔式等。

移动机构的智能化包括：感觉功能，路径探索，决策行动，量程宽的、高分辨力的三维传感器，回避障碍物，图象处理高技术。首先达到感觉控制的水平，逐步扩展到适应控制和学习控制的领域。

1.4 智能化与安全可靠性

机器人的安全事故来自人的责任和机器人的异常状态两方面。作为这一人机系统的智能化，为检测出事故的因素，防患于未然，确保安全，必须做到以下几点：

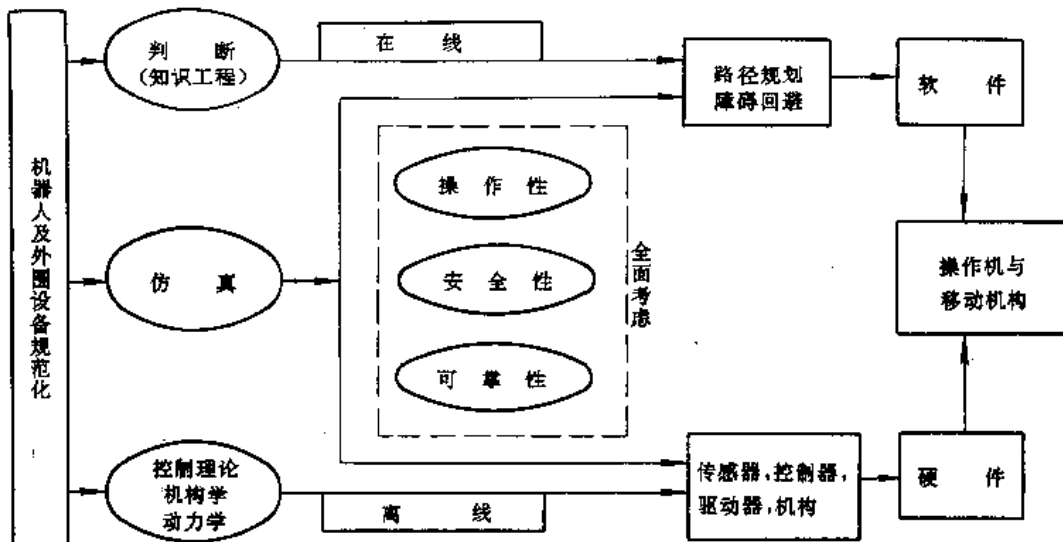


图 9-9-2 工业机器人智能化方向及面临的课题

(1) 危险状态发生之前即已探知，并采取确切对策。

(2) 保证硬件的高可靠性，降低故障率。进行机构的可靠性研究，握持力的可靠性控制，引入自诊断功

能。

(3) 实现软件的完全监督，减少误动作。在生成程序的过程中，要考虑到各方面因素的影响。

(4) 尽力排除外来干扰的影响，减少误动作。外来



干扰有来自天然的雷电、宇宙射线等,有来自人工的各种机器的火花放电、高频电磁干扰等,还有来自机器人自身的时钟脉冲作业信号及其他噪声干扰。

(5) 控制系统除具有高可靠性外,机器人还要具备自诊断、自修复功能。这包括硬件级、软件级、应用级、人机系统级的自诊断和自修复,属于硬件的必须进行硬件处理,属于软件的如程序的误动作,程序的丢失,人的错误等,要由机器人软件来纠正。

(6) 人机接口的适配与完善化。

工业机器人智能化的方向及面临的课题概括如图9-9-2所示。

2 机器人技术的发展动向

2.1 操作机构

1. 快速操作机 为大大提高作业效率,需开发新型手臂和手腕机构、新型驱动系统,建立一种能适应操作机姿态快速变化时引起的惯性急剧变化的控制方法。

2. 轻量化操作机 目前的操作机负载能力约为自重的1/3。为提高操作机的负载/自重比,需研制轻型结构材料,以实现更灵活的操作。

3. 冗余自由度柔性操作机 目前的机器人自由度过少(一般为1~6个,带冗余自由度为10个左右),很难适应狭小环境中的灵活操作,要像人手那样地灵巧,需达到27个自由度,且结构可变的柔性操作机。

4. 高精度、多自由度的力控制操作机 用于复杂状态下的精密装配。

5. 微型操作机 其线径小于1mm,用于军事侦察和各种微型操作。

2.2 移动行走机构

1. 新型移动机构 开发用于凹凸不平路面、楼梯、高山、丛林、窄管、海面、水下、高空等环境中的移动机构。

2. 用于行走的传感技术 主要是高级主动的三维视觉、触觉和接近觉等。

3. 移动路途分析 采用动态规划等方法,对移动环境、成本、时间等进行综合分析,规划最佳路径。

4. 人机协调行走控制 对于复杂环境的行走,单纯用计算机控制有困难,可用人机协调方式。

5. 行走动作选择 对于复杂环境多自由度行走,需事先制定行走方案,选择最佳动作,研究最佳关节配

置及动作级语言。

2.3 传感、检测技术

1. 视觉

a. 视觉数据输入装置 电荷耦合器件(CCD)、彩色、红外、紫外等摄像装置、三维空间测距仪,具有实时性、高析象清晰度、高分辨力的距离测量等。

b. 图形识别 与CAD/CAM(计算机辅助设计/制造)的数据库结合进行。

c. 高速图形处理 CCD与高性能微处理器相结合,实现高速、实时、低成本的视觉系统。

d. 主动视觉系统 眼在手上的手眼协调系统,头戴两眼的头-眼系统,网膜形视觉传感器,主动识别活动物体、彩色立体视觉系统等。

2. 其他传感器及融合技术

a. 其他传感器 触觉、力觉、嗅觉、听觉(语音识别)、味觉、生物传感器、微型传感器等。

b. 融合技术 各类传感信息的采集融合处理,传感器与驱动器的一体化技术,视觉传感器与动作集成一起的系统等。

2.4 智能控制

1. 多级分布式计算机控制 目前机器人手、眼、足等功能的处理,大多由单台计算机划分时间段控制,受计算机速度所限,很难达到高级功能。多级分布式计算机控制采用多个处理器,并行处理多种信息,控制机器人完成复杂的作业。

2. 基于神经网络的控制 研究和模拟神经细胞和神经网络,采用电子部件来建立具有智能的系统(如神经系统模拟器计算机等)对机器人进行控制。

3. 通用化 通用模块、智能机器人核心程序模块,机器人操作系统等。

2.5 人工智能

1. 规划和知识表达 将复杂的系统或问题划分为若干子系统或子问题,以减少问题求解时进行搜索的盲目性,这种规划方法也用于智能机器人。用计算机模拟人的智能,还必须研究知识表达方法,将各种知识编码、存储,以便快速处理和运用。已研究出生成规划、语义网络和框架结构等有效的知识表达方法。随着第五代计算机的开发会得到更深入的进展。

2. 机器人数据库 智能机器人需快速存取大量环境信息、工作任务信息、工作顺序信息等,为此要建



立多功能数据库,采用随机管理技术,向高度智能化发展。

3. 自治功能

a. 自治控制 环境理解、行动规划、控制、管理,不完全数据处理等;常识的赋予,错误修正;综合的体系结构(如神经网络模拟控制等)。

b. 自学习 认识判断学习,知识获取、表示、应用、技能学习,知识工程与专家系统。

c. 自立能源 能源内藏,能量获取等。

d. 高的安全可靠性能 群体行动机器人系统的高可靠性,自诊断、自修复、自保护功能,耐环境能力等。

4. 智能通信

a. 人机通信 自然语言、人工现实感、虚拟环境、移动信息通信;多方对话的语音识别,紧急声音识别,表情,姿态的非接触规划;对人类错误的处理等。

b. 机器人间通信 多机智能通信、多机协调等。

2.6 示教技术

1. 机器人综合语言 目标是实现复杂的柔性作业。

2. 离线示教技术 带有三维动态显示的离线示教以适应多机群控操作。

3. 智能主从操作示教 以满足复杂环境的行走和野外作业。

3 智能机器人应用前景

目前世界上运行的工业机器人总数已超过 60 万台,预计到 2000 年将会超过 100 万台。在制造业领域,工业机器人的应用正向广、深发展;在非制造业领域,工业机器人随着智能化程度的提高,不断开辟新的用途,除操作机器人外,还有移动式机器人、水下机器人、空间作业机器人及飞行机器人等。在本世纪末和下世纪初,将要实现的先进的智能机器人技术应用前景列于表 9-9-1 中。

表 9-9-1 智能机器人技术应用前景

| 应用行业 | 智能技术应用前景 |
|-------|------------------|
| 食 品 | 脱骨加工系统,冷冻室内加工自动化 |
| 纤 维 | 自动缝制系统 |
| 木 制 品 | 木制家具表面磨光及装配自动化 |
| 造 纸 | 产品在线自动检测 |

(续)

| 应用行业 | 智能技术应用前景 |
|---------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 化 工 | 工厂设备监控,安全自动化 |
| 石 油 | 油罐清理、检查、涂装自动化 |
| 陶 瓷 | 烧成作业自动化 |
| 橡 胶 | 粘结剂涂布自动化 |
| 钢 铁 | 压延自动化,炉体修补自动化 |
| 通用机械 | 透平机翼、金型研磨自动化,水切割自动化,切边打毛刺自动化 |
| 电子、电气机械 | 真空半导体及真空材料制造机器人,自治行走式清扫房间及搬运机器人,半导体等加工用微型机器人,一级洁净度用的机器人,总装自动化 |
| 汽 车 | 堆垛、拆垛,具有三维识别的插装机器人 |
| 机械信息产业 | 自动仓库用自动命令上下架机构,车间内声控作业自动化,超高速 DD(直接驱动)装配机器人,对移动物体进行三维识别的机器人,智能制造系统(IMS, Intelligent Manufacturing System),激光加工机器人 |

以上为制造业,以下为非制造业

| | |
|-------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 畜 牧 | 剪羊毛机器人,挤乳机器人,畜舍清扫机器人 |
| 农林水产 | 摘果机器人,种植、施肥作业机器人,植物车间育苗机器人,喷洒农药行走机器人,整枝、间伐、采伐作业机器人,剔鱼肉、挑选鱼、包装自动化 |
| 建设/建筑 | 钢筋组装自动化机器人,配钢筋机器人,耐火材料喷涂机器人,混凝土预制机器人,混凝土地基铺设机器人,外壁抹灰机器人,装卸天花板、照明灯具及内装修机器人,装卸窗户机器人,混凝土外壁面清理、涂装、墙壁切断机器人,大楼外壁诊断机器人,贴瓷砖机器人,房间清扫、洁净度检查机器人,钢筋混凝土建筑物老化诊断机器人,桥梁涂装自动化 |
| 土木工程 | 土质、地质调查自动化系统,小口径管道、地下电缆敷设作业、混凝土隧道喷涂机器人,隧道工事弓梁自动安装机器人,混凝土预制件的堆砌作业机器人,地下建筑拆卸机器人 |



(续)

| 应用行业 | 智能技术应用前景 |
|----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|
| 海洋 | 海底调查(地基、地貌)机器人,海底勘探、采矿机器人,海底建设、保全作业机器人,水下礁石清理机器人 |
| 矿业 | 采矿、采煤自动化 |
| 电力 | 配线作业,绝缘子洗净作业机器人,变电所巡查机器人,水压铁管检查机器人,火电厂排水路的点检、清扫机器人,输电铁塔升降机器人,核堆放射材料容器安全检查机器人,核堆拆卸机器人,核垃圾处理机器人 |
| 气、水管道 | 配管作业机器人,地下管道检修机器人,容器检修、涂装机器人,下水道清洗机器人 |
| 楼群物业管理 | 警卫、保安、消防机器人,清扫机器人,洁净度检查,楼内引导服务 |
| 医疗 | 脑外科手术机器人,乳腺癌自动诊断机器人,内脏、血管检查手术机器人,角膜移植手术微型机器人,细胞操作微型机器人,病人引导、病历、病人运送机器人 |
| 福利及服务机器人 | 卧病老人服务机器人(入浴,饮食等),老年人轻度劳动辅助移动机器人,残疾人助手系统(导盲犬机器人,操作机器人),康复支援系统,动力假肢 |
| 家务自动化 | 清扫,洗餐具,警卫,护理病人 |
| 防灾 | 灭火(建筑,森林),警卫(大楼),救助(火灾,人埋入地下等),火灾避难引导作业,海面漏油防灾 |
| 宇宙空间 | 宇宙构造物的组装、检查、修补机器人,卫星、自由飞行器的自动回收作业机器人,宇宙工厂作业机器人,宇宙空间检查,资源采集等 |

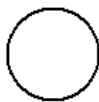
参 考 文 献

- [1] 徐灏主编. 机械设计手册 第5卷第42篇: 工业机器人. 北京: 机械工业出版社, 1992
- [2] (美) 付京逊, R C 冈萨雷斯, C S G 李著. 机器人学. 杨静宇, 李德昌, 李根深等译. 北京: 中国科学技术出版社, 1989
- [3] GB/T 12643—90 工业机器人 术语和图形符号. 北京: 中国标准出版社, 1991
- [4] GB/T 12642—90 工业机器人 性能规范. 北京: 中国标准出版社, 1991
- [5] 米本完二. 産業用ロボットの現状と展望. ロボット, 1992 (89): 62~81
- [6] 蔡自兴编著. 机器人原理及其应用. 长沙: 中南工业大学出版社, 1988
- [7] 张伯鹏, 张昆, 徐家球编著. 机器人工程基础. 北京: 机械工业出版社, 1989
- [8] (日) 渡边 茂主编. 产业机器人技术. 唐蓉城, 许婉英译. 北京: 机械工业出版社, 1987
- [9] (日) 渡边 茂主编. 产业机器人的应用. 卜炎, 张宝兴, 刘守谦译. 北京: 机械工业出版社, 1986
- [10] (日) 前川禎男, 大野荣一编著. 微型计算机控制的机器人入门. 徐荣庶, 胡玉雁译. 北京: 高等教育出版社, 1986
- [11] 高德林, 王康华编译. 机器人学导论. 上海: 上海交通大学出版社, 1988
- [12] 辻三郎, 江尻正良 監修. ロボット工学とその応用. 社団法人電子通信学会編. 東京: 電子通信学会, 1984
- [13] (苏) 尤列维奇 EI 等著. 机器人和机械手控制系统. 刘兴良, 满淑芬译. 北京: 新时代出版社, 1985
- [14] P G Ranky, C Y HO. Robot Modelling Control and Application with Software. Springer-Verlag; IFS (Publication) Ltd, UK, 1985
- [15] 吴广玉, 姜复兴编. 机器人工程导论. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1988
- [16] 秋山勇治, 大輪武司共編. ロボットの設計と製作. オーム社
- [17] Richard P Paul. Robot Manipulators; Mathematics, Programming and Control. USA: MIT Press, 1981
- [18] 陈明哲编著. 机器人控制. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1989
- [19] 诸静编著. 机器人与控制技术. 杭州: 浙江大学出版社, 1991
- [20] 周远清, 张再兴等编著. 智能机器人系统. 北京: 清华大学出版社, 1988
- [21] 张建民编著. 工业机器人. 北京: 北京理工大



- 学出版社, 1988
- [22] 吴芳美主编. 机器人控制基础. 北京: 中国铁道出版社, 1992
- [23] 李自茂编译. 机器人学. 北京: 科学技术出版社, 1990
- [24] 严普强, 黄长艺主编. 机械工业测试技术基础. 北京: 清华大学出版社, 1984
- [25] 第三届全国机器人学术讨论会论文集. 北京: 1991-11 陈佩云主编. 北京: 中国机械工程学会等五学会, 1991
- [26] “七五”机器人开发研究论文报告集. 北京, 1991-11 陈佩云主编. 北京: 机械电子工业部科学技术司, 1991
- [27] 张是勉, 杨树智. 自动检测. 北京: 科学出版社, 1987
- [28] 齐继光等. 基于黑板结构的多传感器数据融合系统 FS-1. 机器人, 1991 (3)
- [29] 尔尼 L 贺尔, 贝蒂 C 贺尔. 机器人学入门. 刘又午等译. 天津: 天津大学出版社, 1987
- [30] 孙耀明. 微型计算机在机器人技术中的应用. 北京: 科学技术文献出版社, 1987
- [31] 杜祥瑛. 工业机器人及其应用. 北京: 机械工业出版社, 1986
- [32] 天津大学编. 工业机械手设计基础. 天津: 天津大学科学技术出版社, 1980
- [33] Japan Industrial Robot Association. The Specifications and Applications of Industrial Robots in Japan. Japan: JIRA, 1990
- [34] Philip c Flora. Robot Industry Directory. USA: Technical Database Corporation, 1986
- [35] Japan Industrial Robot Association. The Application of Industrial Robots in Japan. Japan: JIRA, 1986
- [36] Japan Industrial Robot Association. The Specifications of Industrial Robots in Japan. Japan: JIRA, 1986
- [37] Danly Machine. 产品样本. 1991
- [38] Automation. 1990, 26 (8)
- [39] Pierre Sicard, Martin D Levine. Joint Recognition and Tracking for Robotics Arc Welding. IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics, 1989, 19 (4)
- [40] Joe Morris. Vision Seam Tracking Extents to TIG. UK: The Industrial Robot, 1987 (Dec.)
- [41] Shimon Y Nof. Handbook of Industrial Robotics. USA: John Wiley & Sons, 1985
- [42] V Daniel Hunt. Robotics Soursbook, 1988
- [43] 稻垣莊司, 安藤嘉則. 産業用ロボットの智能化. 日本: 1988





索 引

1. 本索引按汉语拼音字母表顺序排列,都相同的字按总笔画数排列。如笔画相同,则按起笔笔形依“横竖撇点折(一丨丿、乙)”顺序排列。
2. 非汉字开头的索引词依次排在本索引最后部分,其顺序为数字、拉丁字母、希腊字母。
3. 主索引词顶格排,二级词前空一格。复合索引词,以主词为主体,其限定词用逗号分开,列在主词之后。

A

安培(Ampere)定律 1-16
 安培环路定律 1-86
 按钮 2-99
 按优先数调度 4-63
 暗电阻,光敏电阻 3-25

B

八进制 4-9
 搬运机器人 9-67
 办公业务自动化(OA) 4-6
 半闭环控制系统 6-5
 半导体存储器 4-31
 半导体二极管 3-5
 半导体光电器件 3-24
 半功率点 1-63
 半功率点带宽(见通频带) 1-63
 半加器 3-103
 半结构化决策,管理信息系统 8-12
 伴随矢量 5-88
 包络检波 3-135
 包容正方体 9-14
 保持器 5-73
 保护接地 7-9
 报警功能 9-7
 报文 8-60
 报文分组交换 4-91
 报文交换 4-91
 倍频式逆变器 3-190
 比较单元 6-42
 比较灵敏度 5-112
 比较器(见集成电压比较器) 3-59
 比例积分微分(PID) 5-49
 闭环调试 7-114,7-117 闭环控制
 (见反馈控制) 5-6
 闭环系统 6-5
 边缘效应 1-88

编程语言,可编程控制器 8-70
 编码 3-99
 编码分类法 8-43
 编码描述法 8-44
 编码盘 6-70
 编码器 3-99
 变换对,拉普拉斯变换 1-69
 变极对数调速 7-72
 变量设计,系统 8-36
 变流 3-164
 变流器 3-165
 变流器,高压直流输电 3-187
 变流器,直流电动机调速 3-186
 变流器,中频感应加热 3-188
 变频调速 7-57
 变容二极管 3-7
 变压变频装置 6-53
 变压器 2-5
 变压器效率 2-11
 变压器运行 2-11
 变增益适应控制系统 5-100
 变址寻址 4-15
 标么值 2-14
 表处理(LISP) 4-85
 表示层 4-94
 表现及破坏段 4-102
 表现及破坏条件判断段 4-102
 并联补偿 5-47,5-86 并联逆变器
 3-188
 并联校正 6-62
 并联谐振 1-64
 并联运行 2-13
 并联运行方法,三相同步发电机 2-
 30
 并联运行条件,三相同步发电机 2-
 29
 并行 4-90
 并行比较型A/D转换器 3-143
 并行处理结构,可编程控制器 8-67
 并行工程 8-9,8-17

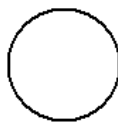
病毒 4-103
 波波夫(Popov)稳定判据 5-69
 波顶因数 1-59
 波形产生电路 3-118
 波形成因数 1-59
 伯德(Bode)图(见对数幅频特性图)
 5-10,5-37 补码 4-11
 不变性原理 6-64
 不对称三相电路 1-39
 不对称三相负载 1-39
 不归零 4-35
 不可逆变流器 3-186
 不稳定性 5-27
 步进电动机 2-61
 步距角 6-44
 部分分式法,拉普拉斯反变换 1-70

C

采购计划 8-16
 采样-保持电路 3-146
 采样定理 5-74,8-100
 采样控制系统(见离散控制系统) 5-
 73
 采样频率,采样-保持电路 3-146
 采样装置 5-73
 参数不灵敏控制系统 5-113
 参数估计方法 5-18
 参数化特征造型 8-37
 参数化造型 8-36
 参数模型 5-19
 操作杆 9-7
 操作回路调试 7-109
 操作机 9-3
 操作机,工业机器人 9-10
 操作控制 4-18
 操作控制器 4-20
 操作码 4-14
 操作系统 4-61
 操作系统病毒 4-103



- 单一连续分配方式 4-64
 单周期运行 4-28
 单轴加速度 9-6
 单轴速度 9-5
 单总线结构 4-7
 刀补(见刀具半径补偿) 6-19
 刀具半径补偿 6-16
 刀具补偿 6-16
 刀具偏移 6-16
 刀具信息 8-83
 刀具状态监测 8-92
 刀开关 2-99
 等幅振荡响应 1-53
 等价单结晶体管 3-17
 等离子炉 2-87
 等离子体显示板 3-33
 等倾线法 5-59
 等效电流 7-22
 等效电路,三相异步电动机 2-19
 等效电路,双极性晶体管 3-10
 等效电源 1-23
 等效电源定理 1-23
 等效电阻 1-23
 等效正弦波 1-60
 等效转矩 7-22
 低通滤波电路 1-66
 低通滤波器 3-69
 低压电器 2-99
 低压漏电保护器 2-122
 地址 4-14
 地址寄存器(AR) 4-20
 逆阶控制系统仿真 8-124
 典型非线性特性 5-54
 点-点通信 8-64
 点焊机器人 9-62
 点位控制 6-7
 点位控制机器人 9-4
 电场强度 1-5
 电磁调速电动机调速 7-72
 电磁调速异步电动机 2-24
 电磁阀 2-74
 电磁感应定律 1-16
 电磁功率 2-20
 电磁滑差离合器 2-25
 电磁换向阀(见电磁阀) 2-74
 电磁离合器 2-75
 电磁联轴器(见电磁离合器) 2-75
 电磁式继电器 2-117
 电磁铁 2-68
 电磁铁器件 2-68
 电磁铁吸力 2-70
 电磁吸盘 2-76
 电磁转差式离合器 2-76
 电磁转矩 2-21
 电磁转矩,直流电机 2-38
 电动机控制中心(MCC) 7-38
 电动机校验 7-24
 电动机选择 7-10
 电动势 1-5
 电动势,直流电机 2-38
 电感元件 1-10
 电工基础 1-5
 电工设备 2-5
 电功 1-6
 电功率 1-5
 电焊变压器 2-5
 电焊机 2-77
 电荷 1-5
 电荷耦合器件(CCD) 9-53
 电弧焊 2-95
 电弧焊机 2-87
 电弧炉 2-83
 电力变压器 2-5
 电流(见电流强度) 1-6
 电流放大作用,双极性晶体管 3-9
 电流互感器 2-14
 电流密度 1-6
 电流强度 1-5
 电流谐振(见并联谐振) 1-64
 电流源 1-15
 电炉 2-77
 电炉变压器 2-5
 电路 1-7
 电路交换 4-91
 电路模型 1-92
 电平比较器 3-61
 电平转换电路 3-105
 电气传动控制系统 7-5
 电气串级调速 7-55
 电气设备,电弧炉 2-85
 电容式转速传感器 8-97
 电容元件 1-13
 电枢 2-25
 电枢切换方式 7-52
 电位 1-5
 电压 1-5
 电压比较器,集成 3-59
 电压变化率(见电压调整率) 2-11
 电压调节 7-53
 电压调整率 2-11
 电压调整器 2-124
 电压互感器 2-14
 电压谐振(见串联谐振) 1-62
 电压型逆变器 7-62
 电压源 1-14
 液压伺服驱动系统 9-21
 电源电动势 2-38
 电源设备,感应炉 2-82
 电渣炉 2-87
 电子管 3-28
 电子管放大电路 3-40
 电子计算机 4-3
 电子式时间继电器 2-118
 电子束炉 2-86
 电子邮件 8-109
 电阻法,测量刀具磨损 8-93
 电阻焊 2-95
 电阻焊电源 2-96
 电阻焊机 2-95
 电阻炉 2-79
 电阻丝应变传感器 8-95
 电阻元件 1-8
 叠加性 1-22
 叠加原理 1-22
 定点纯整数 4-11
 定位时间 9-6
 定值系统(见镇定系统) 5-6
 定子调压调速 7-71
 动力学,机器人 9-11
 动态电阻 1-26
 动态调度,作业调度 8-86
 动态规划 5-90
 动态规划方程 5-93
 动态过程 5-8
 动态流水结构 4-27
 动态模型 8-123
 动态冗余 6-107
 动态速降 7-6
 动态移位寄存器 3-113
 动态重定位 4-65
 独占设备 4-65
 读/写时间 4-31
 读/写周期 4-31
 短路电压(见阻抗电压) 2-11
 短路试验 2-11
 短路损耗 2-12
 段页存储管理 4-65
 断续控制系统(见离散控制系统) 5-73
 堆栈操作指令 4-16
 堆栈寻址 4-15
 对称三相电路 1-39
 对称三相负载 1-39



- 对偶原理 5-40
 对数幅频特性图 5-10
 对数幅相图 5-10
 对数相频特性图 5-10
 多变量系统 5-13
 多传感器信息融合 9-49
 多道程序系统 4-62
 多道批处理操作系统 4-62
 多端式集成稳压器 3-158
 多极放大电路 3-58
 多级决策过程 5-90
 多输入多输出系统 5-13
 多数据库系统 8-113
 多谐振荡器 3-128
 多重极点 1-75
 多轴控制 6-7
- ### E
- 额定负载 9-6
 额定加速度 9-6
 额定数据, 变压器 2-17
 额定数据, 三相同步电动机 2-34
 额定数据, 三相异步电动机 2-27
 额定数据, 直流电机 2-44
 额定速度 9-5
 恶性计算机病毒 4-103
 二十进制(BCD) 3-99
 二十进制译码器 3-101
 二次击穿, 双极型功率晶体管 3-15
 二次型性能指标 6-67
 二极管, 半导体 3-5
 二阶网络 1-81
 二进制 4-9
 二进制译码器 3-101
- ### F
- 发光二极管(LED) 3-24
 发光数码管 3-32
 发热校验 7-24
 发射极耦合电路(ECL) 3-95
 阀用电磁铁 2-73
 阈值电压, 门电路 3-92
 阈值法 9-54
 反病毒工具软件 4-14
 反并联连接方式 7-50
 反电动势 2-38
 反接制动 7-34
 反馈 5-5
 反馈放大电路 3-46
 反馈控制 5-5
 反馈深度, 放大电路 3-47
 反射光栅 6-80
 反相输入, 集成运算放大器 3-53
 反向恢复时间, 开关二极管 3-7
 反转, 直流电动机 2-41
 方均根值(见有效值) 1-59
 防爆式, 电机结构型式 7-12
 防病毒卡 4-105
 防护式, 电机结构型式 7-12
 仿真 5-7
 仿真, 计算机集成制造系统 8-123
 纺织, 数控技术 6-119
 放大倍数, 放大电路 3-33
 放大电路 3-33
 放射线法, 测量刀具磨损 8-93
 飞轮力矩 7-18
 非参数模型 5-19
 非工频阻焊变压器 2-96
 非结构化决策, 管理信息系统 8-12
 非破坏性故障 6-103
 非伺服控制型机器人 9-4
 非线性电阻 1-26
 非线性控制系统 5-6
 非线性系统 5-53
 非相干解调 3-135
 非永久性存储器 4-31
 非正弦波发生器 3-122
 非正弦周期电路 1-59
 非正弦周期量 1-59
 分辨力 9-6
 分辨力, A/D 转换器 3-145
 分辨力, D/A 转换器 3-143
 分布式模型 4-74
 分布式数据管理系统 4-74
 分布式数字控制 8-78
 分段存储管理 4-65
 分级控制 9-6
 分级控制方式 9-34
 分接头 2-7
 分类编码系统, 零件 8-42
 分立元件基本放大电路 3-33
 分区分配 4-64
 分散控制系统 7-8
 分时操作系统 4-62
 分压比, 单结晶体管 3-17
 分页存储管理 4-65
 封闭式, 电机结构型式 7-12
 封闭系统 8-12
 封装 4-74
 冯·诺依曼(Von Neumann)计算机 4-6
 浮点数 4-11
 幅度调制 3-134
 幅频特性 1-62, 1-79
 幅频响应 1-79
 幅频响应(见幅频特性) 1-62
 幅相稳定判据 5-66
 辅存 4-32
 辅助功能 6-91
 辅助晶闸管式变频 7-57
 负倒相特性 5-66
 负反馈, 放大电路 3-47
 负逻辑, 逻辑电路 3-90
 负载 9-6
 负载, 可控整流电路 3-170
 负载试车 7-119
 负载运行 2-8
 负载最大过流 1-24
 负偏 8-14
 复合工艺过程法 8-44
 复合管 3-45
 复合控制系统 5-6, 5-52 复合零件法 8-44
 复频域分析, 线性电流 1-69
 复数导纳 1-31
 复数域分析 1-74
 复数阻抗 1-31
 复杂指令集计算机(CISC) 4-27
 傅里叶(Fourier)级数 1-54
- ### G
- 概念视图 4-72
 概念数据库(见概念视图) 4-72
 干扰, 放大器 3-80
 干扰, 晶闸管传动设备 7-8
 杆件坐标系 9-5
 感觉功能智能化 9-88
 感觉控制 9-7
 感觉控制型机器人 9-4
 感应加热设备 2-81
 感应炉 2-81
 感应熔炼炉 2-81
 感应同步器 6-70
 刚度设计原则 9-15
 高阈值逻辑(HTL) 3-94
 高级微程序设计语言 4-24
 高级语言 4-80
 高强度材料选用原则 9-15
 高速缓冲存储器(Cache) 4-33
 高通滤波电路 1-66



给定单元 6-42
 根轨迹 5-35, 5-84 工程分析与优化 8-29
 工程设计库 8-57
 工程设计自动化系统 8-24
 工程数据库系统 8-112
 工具功能 6-91
 工具中心 9-5
 工频阻焊变压器 2-96
 工业电子技术 3-5
 工业机器人 9-3
 工艺性原则 9-15
 工作室间 9-5
 工作站 4-5
 功率, 非正弦周期电路 1-59
 功率场效应晶体管 3-16
 功率放大器 3-44
 功率晶体管 3-15
 功率因数 1-33
 功率因数 1-60
 功能模型 8-122
 功能设置, 群控系统 9-79
 功能体系结构 8-18
 功能图语言 8-70
 攻击对象 4-102
 共发射极放大电路 3-34
 共基极放大电路 3-38
 共集电极放大电路 3-37
 共漏极放大电路 3-40
 共模信号, 差分放大电路 3-41
 共模抑制比, 差分放大电路 3-41
 共态矢量(见伴随矢量) 5-88
 共享设备 4-65
 共源极放大电路 3-39
 共轭极点 1-76
 孤立系统 8-12
 故障诊断 6-102, 7-8
 挂起 4-63
 拐角偏差 9-6
 关节型机器人 9-4
 关系模型 4-73
 管理 8-11
 管理信息系统 8-9, 8-12 光存储器 4-31
 光电二极管 3-25
 光电脉冲发生器 6-68
 光电盘 6-68
 光电器件 3-23
 光电三极管 3-25
 光电数字是转速检测系统 8-97
 光控晶闸管 3-25

光敏电阻 3-24
 光盘存储器 4-42
 光学图象法, 测量刀具磨损 8-93
 光栅扫描显示器 4-48
 光耦合器 3-25
 广域网(见远程网) 4-92
 归零 4-35
 估算 2-9
 规范型 5-39
 规格化 6-14
 硅控制开关(SCS) 3-23
 轨迹加速度 9-6
 轨迹灵敏度 5-112
 滚筒式绘图仪 4-54
 过程 5-5
 过程, 仿真 8-124
 过程监测 8-99
 过程中检测 8-89
 过电压保护, 晶闸管 3-196
 过渡函数 5-32, 5-79
 过励运行, 三相同步电动机 2-31
 过流保护, 晶闸管 3-196
 过切削 6-22
 过载能力校验 7-24
 过阻尼响应 1-53

H

哈密尔顿(Hamilton)函数 5-88
 海明校验码 4-13
 亥维赛(Heaviside)展开定理(见部分分式法) 1-70
 函数发生器 3-123
 汉字操作系统(CCDOS) 4-68
 汉字内部码 4-12
 汉字输出设备 4-56
 汉字输入设备 4-55
 合成加速度 9-6
 合成进给速度 6-11
 合成速度 9-6
 赫尔维茨(Hurwitz)判据 5-80
 恒压变压器(见稳压变压器) 2-15
 红外线炉 2-87
 宏调用 4-80
 宏定义 4-80
 宏指令 4-80
 后置处理 6-41
 后置处理数控语言 8-56
 弧焊变压器 2-89
 弧焊发电机 2-89
 弧焊机器人 9-64

弧焊整流器 2-89
 弧源电源 2-87
 互补MOS(CMOS) 3-96
 互补单结晶体管 3-17
 互补对称式功率放大电路 3-44
 互感器 2-14
 滑差率(见转差率) 2-19
 滑觉 9-48
 滑模控制 9-38
 环路滤波器(见低通滤波器) 3-69
 环形 4-92
 环形计数器 3-117
 缓冲寄存器(BR) 4-19
 换路 1-43
 换路定律 1-43
 换向逻辑 7-112
 灰度图象 9-54
 恢复时间 7-6
 辉光数码管 3-31
 回路电流法 1-20
 汇编语言 4-79
 会话层 4-94
 绘图输出设备 4-53
 绘图仪 4-54
 混合计算机 4-4
 混合型制造 8-7
 混合形 4-93
 活动, 仿真 8-124
 活动扫描法, 仿真 8-125

J

击穿电压 1-5
 击穿强度 1-5
 机理建模 5-16
 机器人仿真 9-36
 机器人视觉 9-50
 机器人视觉图象处理 9-53
 机器人系统 9-4
 机器人学 9-3
 机器人语言 9-44
 机器数 4-10
 机器语言 4-79
 机械串级调速 7-55
 机械接口 9-3
 机械接口坐标系 9-5
 机械特性, 三相同步电动机 2-30
 机械特性, 直流电动机 2-39
 机械系统动态分析 8-32
 机械系统运动学分析 8-33
 机械原点 9-5



- 机械制造自动化系统 8-7
 机遇 8-20
 机座 9-3
 机座标系 9-5
 积分电路 1-51
 基本RS触发器 3-106
 基本磁化曲线(见磁化曲线) 1-82
 基本性质,拉普拉斯变换 1-72
 基带网 4-92
 基尔霍夫(Kirchhoff)定律 1-18
 基于矢量控制交流位置伺服系统 6-55
 基准电压源 3-160
 畸变功率 1-60
 畸变因数 1-59
 激光汉字打印机 4-57
 激光显示管 3-33
 极大值原理 5-90
 极点配置 5-83,6-64
 极限负载 9-6
 极限环 5-58
 极坐标图 5-10
 集成触发电路 3-179
 集成电路 3-26
 集成功放(见集成功率放大器) 3-57
 集成功率放大器 3-57
 集成化 8-8
 集成锁相环 3-68
 集成运放(见集成运算放大器) 3-50
 集成运算放大器 3-50
 集电极开路门电路 3-93
 集中控制方式 9-34
 计数器 3-113
 计算机(见电子计算机) 4-3
 计算机病毒 4-102
 计算机辅助测试(CAT) 4-6
 计算机辅助工艺过程设计 8-40
 计算机辅助检测 8-52
 计算机辅助教学(CAI) 4-6
 计算机辅助设计(CAD) 4-6,8-34
 计算机辅助制造(CAM) 4-6,8-40
 计算机集成制造 8-8
 计算机集成制造系统 6-3,8-116
 计算机控制系统(见数字控制系统) 5-73
 计算机联网 4-92
 计算机数控(CNC) 6-6,6-84
 计算机数控(CNC)系统 6-84
 计算机外壳型病毒 4-103
 计算机网络 4-88
 技术和办公自动化协议 8-104
 继承 4-74
 寄存器 3-111
 寄存器间接寻址 4-15
 寄存器寻址 4-15
 加法器 3-103
 加工表面粗糙度法,测量刀具磨损 8-95
 加工仿真 8-56
 加工过程仿真 8-124
 加工计划 8-16
 加速度传感器 9-46
 假脱机系统 4-66
 间接变频器(见交-直-交变频器) 3-185
 间接加热式电弧炉 2-84
 间接寻址 4-15
 监测技术,加工过程 8-91
 监督程序 4-61
 检测单元 6-42
 检测及质量系统 8-10
 减幅振荡响应(见欠阻尼响应) 1-53
 减压起动 7-29
 建模,计算机集成制造系统 8-122
 渐近稳定 5-27
 鉴幅器 6-78
 鉴相器 6-69
 鉴相器,锁相环 3-68
 键盘 4-45
 交-交变频器 3-186
 交-直-交变频器 3-185
 交叉联接方式 7-50
 交互式图形系统 8-27
 交流磁路 1-91
 交流电磁铁 2-70
 交流电磁铁吸力 2-70
 交流调速变频器 3-190
 交流调压器 3-193
 交流伺服电动机 2-55
 交流通路,放大电路 3-36
 角度调制 3-136
 角频率 1-28
 矫顽力 1-82
 阶跃响应,RC电路 1-45
 阶跃响应,RL电路 1-47
 阶跃信号 1-42
 接触觉 9-47
 接触器 2-106
 接近觉 9-47
 节点电位法 1-21
 节能,三相异步电动机 2-23
 节拍周期 4-21
 结构化查询语言(SQL) 4-75
 结构化决策,管理信息系统 8-12
 结型场效应管 3-12
 截止频率 5-37
 解调 3-134
 解析法 1-27
 解析模型(见机理建模) 5-16
 介电常数 1-14
 金属氧化物半导体(MOS) 3-12
 紧急停机功能 9-7
 进程调度 4-63
 进程交互法,仿真 8-125
 进程控制块 4-63
 进程名 4-63
 进给功能 6-91
 进给速度均化 6-14
 晶体管(见双极型晶体管) 3-8
 晶体管接近开关 2-114
 晶体管晶体管逻辑(TTL) 3-91
 晶体三极管(见双极型晶体管) 3-8
 晶闸管 3-19
 晶闸管交流器 7-45
 晶闸管变频器 3-183
 晶闸管触发电路 3-177
 晶闸管整流电路 3-166
 经典法 1-44
 经济批量 8-16
 经济运行 2-12
 精简指令集计算机(RISC) 4-27
 精良生产 8-17
 精密放大电路 3-79
 景物 9-55
 景物分析(见图象理解) 9-55
 静差 5-81
 静电感应晶体管(SIT) 3-16
 静电感应晶闸管(SITH) 3-22
 静电绘图仪 4-54
 静态电阻 1-26
 静态调度,作业调度 8-86
 静态工作点,放大电路 3-34
 静态流水结构 4-27
 静态冗余 6-107
 静态柔顺性 9-6
 静态重定位 4-65
 就绪 4-63
 局部参数优化设计,模型参考适应系统 5-104
 局域网 4-92
 矩频特性 6-45
 矩形波发生器 3-122
 巨型机 4-5



距离传感器 9-49
 距离重复性 9-6
 距离准确度 9-6
 锯齿波发生器 3-123
 锯齿波移相控制触发电路 3-178
 决策 8-12
 决策方法, 工艺过程 8-48
 决策分析 8-19
 决策支持系统 8-12, 8-19 绝对平均值 1-59
 绝对值方式 6-7
 绝对坐标 6-25
 绝对坐标系 9-5
 绝缘门极晶体管(IGBT) 3-17
 绝缘栅场效应晶体管 3-12
 均流, 晶闸管 3-196
 均压, 晶闸管 3-195

K

开放式结构, 计算机集成制造系统 8-120
 开放系统 8-12
 开放系统互连参考模型(OSI) 4-93, 8-61
 开放性 4-9
 开关电容滤波器 3-87
 开关电容网络 3-71
 开关二极管 3-7
 开关型稳压电源 3-161
 开环调试 7-114, 7-116 开环控制 5-6
 开环控制系统 6-5
 开启式, 电机结构型式 7-12
 科学计算 4-5
 壳式变压器 2-6
 可编程控制器 8-64
 可编程逻辑控制器 6-92
 可编程应用逻辑(PAL) 6-93
 可编程只读存储器(PROM) 4-32
 可变速分区 4-64
 可擦除可编程只读存储器(EPROM) 4-32
 可程序化决策(见结构化决策) 8-12
 可关断晶闸管 3-21
 可观测性 5-7, 5-39 可靠性 6-106
 可靠性, 电气传动控制系统 7-7
 可靠性原则 9-15
 可控硅(见普通晶闸管) 3-19
 可控性 5-7, 5-39 可控整流电路 3-166
 可逆变频器 3-187
 可逆整流电路 3-175
 可维修性 6-106
 可选择柔性装配机器人手臂(SCARA) 9-70
 可预置计数器 3-114
 可重触发单稳态触发器 3-128
 可重定位分区 4-65
 可重写光盘存储器 4-43
 客户-服务器模式 8-109
 空气式时间继电器 2-118
 空气隙 1-87
 空心变压器 2-5
 空载损耗 2-12
 空载特性, 直流发电机 2-38
 空载运行 2-7
 控制电流 7-29
 控制电器 7-39
 控制对象 6-42
 控制功能智能化 9-88
 控制继电器 2-117
 控制结构, 可编程控制器 8-66
 控制器 4-18
 控制器系统灵敏度 5-112
 控制微电机 2-53
 控制系统 5-5
 控制系统, 电弧焊 2-92
 控制系统, 电阻焊 2-97
 控制系统, 感应炉 2-82
 控制系统, 工业机器人 9-32
 控制系统, 炼钢电弧炉 2-85
 控制系统分析 5-27
 控制装置 9-3
 口令 4-67
 库存状态 8-15
 跨导, 电子管 3-40
 快速晶闸管 3-21
 宽带网 4-92
 矿热炉 2-84
 框图 5-10

L

拉格朗日(Lagrange)法 9-12
 拉普拉斯(Laplace)变换 1-69
 拉普拉斯反变换 1-70
 拉氏变换(见拉普拉斯变换) 1-69
 累加寄存器(AC) 4-20
 离机诊断 6-104
 离散控制系统 5-73
 离散事件动态系统 8-124
 离散型铸造 8-7
 离线编程 9-33
 离线检测, 零件 8-52
 黎卡提(Riccati)矩阵方程 5-96
 李氏稳定理论设计, 模型参考适应系统 5-104
 力觉 9-48
 立即寻址 4-15
 立式, 电机结构型式 7-11
 励磁回流 1-88
 励磁机 2-28
 励磁切换方式 7-52
 连续结构 4-67
 连续路径控制机器人 9-4
 连续型制造(见流程型制造) 8-7
 联邦式数据库系统 8-113
 联合控制方式 4-21
 联机检索 4-6
 联机自诊断 6-104
 炼钢电弧炉 2-85
 链接结构 4-67
 链路层, 直接数字控制通信 8-79
 良性计算机病毒 4-103
 临界负载率 2-23
 临界阻尼响应 1-53
 零输入响应 1-45
 零状态响应 1-45
 留数定理 1-70
 流程型制造 8-7
 流水控制方式 4-26
 流水线技术 4-29
 漏磁通 1-85
 鲁棒控制 5-112
 鲁棒控制系统 5-6
 鲁棒群件 8-17
 路径速度 9-6
 路径速度波动 9-6
 路径速度重复性 9-6
 路径速度准确度 9-6
 路径重复性 9-6
 路径准确度 9-6
 路由器 4-96
 滤波电路 1-65, 3-151
 滤波特性 1-65
 轮换调度 4-63
 逻辑程序设计(PROLOG) 4-87
 逻辑代数 3-88
 逻辑地址 4-65
 逻辑非 4-11
 逻辑功能 6-91
 逻辑或 4-11



逻辑数据库(见概念视图) 4-72
 逻辑推理决策,工艺过程 8-48
 逻辑无环流 7-51
 逻辑无环流系统 6-50
 逻辑异或 4-11
 逻辑与 4-11
 逻辑运算指令 4-16

M

脉冲编码调制 3-138
 脉冲对称度 7-111
 脉冲分配计算 6-7
 脉冲幅度调制 3-137
 脉冲解调 3-139
 脉冲宽度调制 3-137
 脉冲位置调制 3-138
 脉冲相位 7-111
 脉动磁场 2-46
 脉动系数,整流电路 3-147
 脉宽调制(PWM) 6-52,7-60
 梅森(Mason)增益公式 5-12
 门电路 3-88
 弥尔曼(Milman) 1-22
 面向对象的程序设计 4-74
 面向对象模型 4-74
 面向对象数据库 8-115
 面向对象应用系统 8-38
 描述函数 5-61
 描述函数法 5-61
 敏捷技术与企业 8-17
 模糊关系 5-117
 模糊集合 5-117
 模糊矩阵 5-117
 模糊控制 5-116,9-38
 模糊控制规划 5-120
 模糊逻辑 5-117
 模糊模型 5-120
 模糊系统辨识 5-120
 模糊语言 5-118
 模拟乘法器,集成 3-62
 模拟调制 3-134
 模拟集成电路 3-50
 模拟计算机 4-4
 模拟开关,集成 3-65
 模拟信号运算与处理 3-75
 模式识别 4-6
 模数转换 3-141
 模态分析 5-41
 模型 8-14
 模型辨识 5-17

模型参考适应控制系统 5-100
 模型参考适应系统 5-102
 摩擦片式电磁离合器 2-75
 末端执行器 9-3
 目标编程 9-7
 目标机 4-24

N

奈奎斯特图(见极坐标图) 5-10,5-36
 奈氏(奈奎斯特)判据 5-81
 内部传感器 9-45
 内部视图 4-72
 内存(见主存) 4-32
 能耗制动 7-34
 尼科尔斯图(见对数幅相图) 5-10
 逆导晶闸管 3-22
 牛顿-欧拉(Newton-Euler)法 9-13
 扭环形计数器 3-117
 扭矩传感器 8-97
 诺顿(Norton)定理 1-24

O

欧姆(Ohm)定律 1-18
 耦合,放大电路 3-48
 耦合电路 1-51

P

排队 9-83
 派生式工艺过程设计系统 8-51
 判别函数 6-18
 抛物线插补 6-10
 喷墨式汉字打印机 4-57
 喷墨式绘图仪 4-56
 喷涂机器人 9-58
 批处理 4-62
 频率 1-28
 频率调制 3-136
 频率特性 1-62,1-79
 频率特性,放大电路 3-36
 频率特性,离散控制系统 5-79
 频率特性,连续控制系统 5-10
 频率稳定度,正弦波振荡器 3-119
 频敏变阻器 2-24
 频敏变阻器起动机 2-110
 频谱 1-57
 频谱图(见频谱) 1-57
 频域法 5-36

频域分析,线性电路 1-54
 频域设计 5-42
 平板式绘图仪 4-54
 平衡机构 9-18
 平均功率(见有功功率) 1-32,1-60
 平均故障率 7-7
 平均气动转矩校验 7-25
 平均无故障工作时间 7-7
 平均无故障时间(MTBF) 4-8
 平均修复时间(MTTR) 4-9
 平均有效度 7-8
 平均值 1-29,1-59
 平面轮廓扫描描述 8-47
 屏蔽,放大电路 3-81
 屏蔽接地 7-10
 破坏模块 4-102
 破坏性故障 6-103
 普通晶闸管(SCR) 3-19
 潜线 1-57

Q

七段译码驱动器 3-101
 齐次性 1-22
 奇点 5-57
 奇偶校 3-24
 奇偶校验码 4-13
 奇异项,测量数据 8-99
 起动,三相同步电动机 2-32
 起动,直流电动机 2-39
 起动控制 7-29
 起动机 2-17
 气动驱动系统 9-24
 气隙磁导 1-87
 气隙磁阻 1-87
 牵引电磁铁 2-72
 前后置处理,有限元 8-29
 前置处理 6-40
 前置处理数控语言 8-56
 箝位器 3-134
 欠阻尼响应 1-53
 桥接器 4-96
 桥式功率放大电路 3-46
 切换曲面,时间最优控制 5-94
 切削功率法,测量刀具磨损 8-94
 切削力法,测量刀具磨损 8-93
 切削温度法,测量刀具磨损 8-94
 球坐标型机器人 9-4
 驱动单元 9-4
 驱动微电机 2-45
 驱动系统,工业机器人 9-20



趋势项,测量数据 8-99
 权函数(见冲激响应函数) 5-9
 全电流定律 1-17
 全加器 3-103
 全局渐近稳所 5-27
 全局数据库 8-10
 全连接形 4-92
 全通滤波电路 1-66
 全响应,RC电路 1-46
 全响应,RL电路 1-48
 群控系统 9-7
 群控系统,机器人 9-79

R

绕线式异步电机三级起动机 2-111
 绕线转子三相异步电动机 2-24
 绕组 2-6
 热继电器 2-120
 热敏式印字机 4-57
 人工补偿 6-16
 人工智能 5-121
 人工智能系统 9-33
 容错设计 6-107
 容量选择,短时工作制 7-23
 容量选择,断续周期工作制 7-23
 容量选择,连续工作制 7-21
 熔断器 2-103
 熔体 2-103
 柔性制造系统 6-3,8-81
 柔性制造系统故障树 8-101
 蠕虫程序 4-103
 入侵型病毒 4-103
 软磁材料 1-85
 软磁盘存储器 4-39
 软件,计算机 4-6
 软件插补 6-95

S

三端式集成稳压器 3-154
 三极管(见双极型晶体管) 3-8
 三角波发生器 3-123
 三角函数形式,傅里叶级数 1-54
 三角形网络 1-25
 三态输出门电路 3-93
 三相触发电路 3-178
 三相电动势 1-39
 三相交流调压器 3-193
 三相交流无触点开关 3-194
 三相桥式并联逆变器 3-184

三相桥式可控整流电路 3-170
 三相驱动微型异步电动机 2-46
 三相同步电机 2-27
 三相异步电动机 2-18
 三相正弦电路 1-39
 三要素法 1-44
 扫描法(见平面轮廓扫描描述) 8-47
 设备管理 4-65
 设计自动化系统 8-9
 射极输出电路(见共集电极放大电路) 3-37
 生产大纲(见主生产计划) 8-15
 生产节拍 9-80
 生产结构 8-15
 生产流程分析法 8-43
 声发射法,测量刀具磨损 8-94
 剩磁 1-82
 剩余磁感应强度(见剩磁) 1-82
 失真,放大电路 3-35
 施密特(Schmitt)触发器 3-124
 十六进制 4-9
 石英晶体多谐振荡器 3-128
 石英晶体谐振器 3-121
 时基电路(见555定时器) 3-130
 时间常数 1-45
 时间分割法插补 6-14
 时间分割式逆变器 3-190
 时间继电器 2-118
 时间控制 4-18
 时间最优控制 5-93
 时序产生器 4-20
 时域分析 1-42
 时域设计 5-49
 时域特性 1-76
 时钟触发器 3-107
 时钟周期(见主频) 4-8
 识别和排队,群控系统 9-82
 实时操作系统 4-62
 实体,仿真 8-124
 实体几何构造法 8-34
 实在地址 4-65
 矢量控制 7-64
 矢量判别法 6-18
 示波管 3-30
 示教编程 9-7
 示教盒 9-7
 示教轻动化 9-60
 示教再现型机器人 9-4
 事件调度法,仿真 8-125
 试探法 1-26
 视检法 8-43

视觉传感器 9-52
 视在功率 1-33,1-60
 适时生产(见准时制) 8-16
 适应控制 5-100
 适应控制系统 5-6,9-33
 适应控制型机器人 9-4
 适应式状态观测器 5-111
 收敛条件,拉普拉斯变换 1-69
 手臂 9-3
 手动方式 9-7
 手工操作 4-61
 手腕 9-3
 手腕参考点 9-5
 受控电流源 1-15
 受控电压源 1-15
 受控对象 5-5
 受控源电路分析 1-25
 梳齿状汉字打印机 4-57
 输出量 5-5
 输出设备 4-48
 输入接口 6-88
 输入设备 4-45,6-88
 输入输出指令 4-17
 鼠标器 4-46
 树形 4-92
 数据 4-89,8-13
 数据操作语言(DML) 4-75
 数据处理 4-5
 数据传送指令 4-16
 数据的型 4-71
 数据的值 4-71
 数据分配器 3-102
 数据集成技术 8-112
 数据加工 4-18
 数据交换技术 4-91
 数据库 4-71
 数据库管理系统(DBMS) 4-72
 数据链路层 4-93
 数据描述语言(DDL) 4-75
 数据模型 4-71
 数据通路 4-20
 数据通信 4-89
 数据校验码 4-13
 数据选择器 3-102
 数控机床 6-108
 数控技术 6-3
 数控检测装置 6-68
 数控伺服系统 6-42
 数控系统 6-3
 数控型机器人 9-4
 数控语言 6-36



数控装置 6-3
 数模转换 3-141
 数学描述,模型参考适应系统 5-102
 数学模型决策,工艺过程 8-47
 数值比较器 3-104
 数制 4-9
 数字调制 3-139
 数字化仪 4-47
 数字积分法插补 6-12
 数字计算机 4-4
 数字计算机 4-4
 数字控制系统 5-6,5-73
 数字脉冲乘法器 6-8
 数字模型 5-6
 数字式直流调速 7-54
 衰减系数 1-66
 双基极二极管(见单结晶体管) 3-17
 双积分型 A/D 转换器 3-144
 双极型存储器 4-33
 双极型功率晶体管 3-15
 双极型晶体管 3-8
 双极型脉宽调制系统 6-51
 双口网络 1-35
 双输入描述函数 5-68
 双速度环 9-29
 双向晶闸管 3-21
 双总线结构 4-7
 水平型微指令 4-23
 顺序存储器(SAM) 4-31
 顺序功能流程图 8-73
 顺序控制(见开环控制) 5-6
 顺序控制方式 4-25
 顺序控制器 8-65
 顺序控制系统 9-33
 瞬变干扰 7-8
 瞬时功率 1-32,1-60
 瞬时速度 6-15
 瞬态响应 5-32
 死锁 4-64
 伺服电动机 2-54
 伺服控制型机器人 9-4
 伺服系统 6-3
 速度传感器 9-46
 速度环 9-29
 速度继电器 2-120
 宿主机 4-24
 算术逻辑单元(ALU) 3-103,4-18
 随动系统 5-6
 随机存储器(RAM) 4-33
 随机扫描显示器 4-48
 随机适应控制系统 5-108

随机性故障 6-102
 随机最优控制 5-99
 碎片 4-64
 隧道二极管 3-7
 索引结构 4-67
 锁存器 3-108
 锁相环 3-68

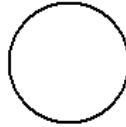
T

弹性杆轴向载荷传感器 8-95
 弹性结构 8-105
 特勒根(Tellegen)定理 1-19
 特洛伊木马 4-103
 特权指令 4-17
 梯形图语言 8-70
 体素 8-45
 体素组合描述 8-45
 体系结构 8-18
 体元素(见体素) 8-45
 调幅(见幅度调制) 3-134
 调节单元 6-42
 调节回路调试 7-110
 调频制 4-36
 调试,电气传动控制系统 7-107
 调速,直流电动机 2-39
 调速范围 7-6
 调速系统,交流电动机 7-54
 调速系统,直流电动机 7-45
 调相制 4-36
 调压开关 2-7
 调制 3-134
 调准位姿 9-5
 铁磁材料 1-82
 铁磁粉末式电磁离合器 2-76
 铁耗(见铁心损耗) 1-83
 铁损耗(见空载损耗) 2-12
 铁心变压器 2-5
 铁心损耗 1-82
 听觉,机器人 9-88
 通带 1-65
 通道 4-61
 通频带 1-63
 通信介质 4-94
 通信系统,可编程控制器 8-75
 通信系统,群控系统 9-80
 通信协议 4-93
 通信信道 4-89
 通用计算机 4-4
 通用接口 4-58
 通用商业语言(COBOL) 4-84

通用微型电动机 2-52
 同步补偿机 2-27
 同步传输 4-90
 同步调相机(见同步补偿机) 2-27
 同步技术,机器人 9-84
 同步计数器 3-116
 同步解调(见相干解调) 3-135
 同步控制方式 4-21
 同步转速 2-19
 同相输入,集成运算放大器 3-54
 同组用户 4-66
 铜损耗(见短路损耗) 2-12
 图解法 1-27
 图象理解 9-55
 图形核心系统 8-28
 图形交换文件 8-59
 图形显示器 4-51
 图形自动输入系统 8-26
 推挽功率放大电路 3-46
 退磁曲线 1-82
 退耦电路,放大电路 3-50
 拓扑结构 4-92

W

外部传感器 9-45
 外部视图 4-72
 外存(见辅存) 4-32
 外特性,直流发电机 2-38
 网关 4-96
 网络,计算机集成制造系统 8-103
 网络操作系统 4-62
 网络层 4-94
 网络函数 1-74
 网络互操作性 8-108
 网络互连 4-96
 网络接口板 4-95
 网络连通性 8-108
 网状模型 4-73
 微变等效电路,放大电路 3-36
 微操作 4-22
 微程序 4-22
 微程序仿真 4-24
 微程序结构 6-86
 微程序控制 4-22
 微程序控制存储器 4-22
 微程序控制存储器 4-23
 微程序设计语言 4-24
 微地址 4-23
 微分电路 1-51
 微分分析器(见数字积分法插补) 6-



12
 微汇编语言 4-24
 微命令 4-22
 微型计算机 4-5
 微型计算机数控 6-6
 微型同步电动机 2-59
 微型永磁直流电动机 2-52
 微型直流电动机 2-48
 微诊断 4-24
 微指令 4-22
 微指令语言 4-24
 微周期 4-22
 伪指令 4-79
 位移传感器 9-45
 位置环 9-29
 位置检测装置 6-68
 位姿 9-5
 位姿超调量 9-6
 位姿稳定时间 9-6
 位姿重复性 9-6
 位姿准确度 9-6
 位姿准确度漂移 9-6
 味觉,机器人 9-88
 温度控制系统,电阻炉 2-81
 湿觉,机器人 9-88
 文件 4-66
 文件传送服务 8-109
 文件的保密 4-66
 文件的共享 4-66
 文件管理(信息管理) 4-66
 文件主 4-66
 纹波系数,整流电路 3-147
 稳定理论,适应控制系统 5-101
 稳定路径长度 9-6
 稳定速度 6-15
 稳定性 5-27
 稳定性,离散控制系统 5-80
 稳定贮备 5-29
 稳速精度 7-6
 稳态 1-42
 稳态分量 1-45
 稳态分析,非正弦线性电路 1-61
 稳态误差 5-34,6-61
 稳压变压器 2-5
 稳压电路 3-152
 稳压电压,稳压二极管 3-7
 稳压二极管 3-7
 稳压管稳压电路 3-153
 稳压器 3-153
 问题-求解过程方法 8-23
 涡流式转速传感器 8-97

涡流损耗 1-82
 卧式,电机结构型式 7-11
 握手 9-80
 无差系统 6-61
 无触点开关 3-194
 无功分量 1-93
 无功功率 1-33,1-60
 无换向器电动机 7-69
 无刷直流电动机 2-48
 无限时间最优调节器 5-96
 物理层 4-93
 物理地址 4-65
 物理设备编程系统 9-33
 物理数据库(见内部视图) 4-72
 物料清单(见产品结构) 8-16
 物料需求计划 8-15
 物料贮运系统仿真 8-124
 物流控制结构 8-84
 误差方程 5-103
 误差系数 5-34

X

西蒙(Simon)模型,决策过程 8-19
 希望频率特性 5-42
 系统 5-5
 系统传递函数矩阵 5-15
 系统调试 7-116
 系统函数(见网络函数) 1-75
 系统接地 7-10
 系统结构,可编程控制器 8-67
 系统矩阵 5-15
 系统可靠性 4-8
 系统可维护性 4-9
 系统软件 4-8
 系统设计 5-42
 系统特征方程 5-9
 系统性故障 6-102
 细菌 4-103
 先进的工厂制造 8-119
 先来先服务 4-63
 显示器 3-30
 显示设备 4-48
 显象管 3-31
 现场调试 7-107
 线电流 1-39
 线电压 1-39
 线路辅助设备 4-95
 线性电路性质 1-22
 线性定常系统 5-17
 线性化 5-17
 线性控制系统 5-6
 陷井指令 4-17
 相电流 1-39
 相电压 1-39
 相对距离测定法,测量刀具磨损 8-93
 相对寻址 4-15
 相对值(见标么值) 2-14
 相干解调 3-135
 相轨迹 5-57
 相角(见相位) 1-28
 相角差(见相位差) 1-28
 相空间 5-57
 相量 1-29
 相量图 1-92
 相频特性 1-62,1-79
 相频响应(见相频特性) 1-62,1-79
 相平面 5-59
 相位 1-28
 相位比较器(见鉴相器) 3-69,6-69
 相位补偿,放大电路 3-50
 相位差 1-28
 相位调制 3-136
 相位频谱 1-57
 相位裕度 5-29
 相序 1-39
 肖特基(Schottky)二极管 3-8
 削波器 3-132
 小信息二极管 3-5
 小型机 4-5
 效用函数 8-19
 协调控制 9-6
 协状态矢量(见伴随矢量) 5-88
 谐波分量 1-54
 谐波分析器 1-65
 谐波干扰 7-8
 谐振 1-62
 谐振电路 1-62
 谐振频率 1-62
 心式变压器 2-6
 信号流图 5-12
 信号前置处理 8-98
 信息 8-13,8-21
 信息处理(见数据处理) 4-5
 信息管理 4-66
 信息技术 8-11
 信息交换,群控系统 9-80
 信息量 8-13
 信息描述 8-45
 信息模型 8-122
 信息体系结构 8-19



信息系统功能体系结构 8-18
 信息载体 6-3
 星型 4-92
 星型三角形起动机 2-109
 星型网络 1-25
 行程开关 2-114
 形体描述法 8-45
 型面描述法 8-44
 性能/价格比 4-9
 绣花机 6-119
 嗅觉, 机器人 9-88
 虚地, 集成运算放大器 3-53
 虚拟存储器 4-33
 虚拟地址 4-65
 虚拟公司 8-17
 虚拟终端服务 8-109
 悬臂梁式力传感器 8-95
 旋转变压器 2-66, 6-77
 旋转磁场, 三相同步电机 2-27
 旋转电枢, 三相同步电机 2-27
 旋转矢量 1-29
 选频放大电路 3-43
 选频特性(见选择性) 1-63
 选择性 1-63
 学习控制 9-7
 学习控制型机器人 9-4
 寻址反射 6-86
 寻址方式 4-15
 循环时间 9-6

Y

压电晶体传感器 8-95
 压觉, 机器人 9-88
 压控振荡器, 锁相环 3-68
 压铸机器人 9-75
 牙嵌式电磁离合器 2-76
 雅可比(Jacobian)矩阵 9-12
 雅可比逆阵 9-12
 盐熔炉 2-81
 掩膜只读存储器 4-32
 液晶显示 3-31
 液压回转伺服执行器 9-21
 液压继电器 2-121
 一般用户 4-66
 一次重量 4-25
 一阶网络 1-79
 移幅键控, 数字调制 3-140
 移频键控, 数字调制 3-140
 移位操作指令 4-16
 移位功能智能化 9-89
 移位寄存器 3-111
 移相范围 7-111
 移相键控, 数字调制 3-140
 异步传输 4-90
 异步计数器 3-114
 异步控制方式 4-12
 异步起动法, 同步电动机 2-32
 译码 3-101
 译码器 3-101
 应用层 4-94
 应用软件 4-8
 荧光数码管 3-32
 硬磁材料 1-85
 硬盘存储器 4-36
 硬件, 计算机 4-6
 硬拷贝设备(见绘图输出设备) 4-53
 永磁材料(见硬磁材料) 1-85
 永久磁铁磁路 1-94
 永久性存储器 4-31
 优化编译程序 4-29
 优先编码器 3-100
 优先数 4-63
 有功分量 1-93
 有功功率 1-32
 有功管功率(见平均功率) 1-60
 有限时间最优调节器 5-95
 有效值 1-28
 有效值 1-59
 有源滤波电路 3-82
 有源逆变电路 3-173
 右手定则 1-17
 右手螺旋定则 1-16
 语气关联模型 8-114
 语义数据模型 8-114
 原码 4-11
 圆光栅 6-80
 圆弧插补 6-10
 圆弧近似法 5-59
 圆柱坐标型机器人 9-4
 源极输出器(见共漏极放大电路) 3-40
 源码病毒 4-103
 远程网 4-92
 运动学, 机器人 9-11
 运动学逆问题 9-11
 运动学正问题 9-11
 运算电路 3-75
 运算法(见复频域分析) 1-74
 运算器 4-18
 运算速度 4-8
 运行 4-63

运行特性, 变压器 2-11
 运行特性, 三相同步发电机 2-28
 运行特性, 三相异步电动机 2-20
 运转指令 7-113

Z

再生制动 7-34
 在线编程 9-33
 在线检测 8-89
 在线检测, 零件 8-52
 暂态 1-42
 暂态分量 1-45
 噪声, 放大电路 3-81
 噪声分析法, 测量刀具磨损 8-94
 噪声容限, 门电路 3-93
 噪声系数, 放大电路 3-81
 增量方式 6-7
 增量坐标 6-25
 增益裕度 5-29
 针式汉字打印机 4-57
 真空电弧炉 2-84
 振荡放电 1-52
 振动法, 测量刀具磨损 8-94
 振幅频谱 1-57
 镇定系统 5-6
 整流电路 3-147
 整流二极管 3-6
 整形电路 3-118
 正常操作状态 9-7
 止逻辑, 逻辑电路 3-90
 正实函数 5-101
 正弦-余弦发生器 6-78
 正弦波脉宽调制 7-60
 正弦波振荡器 3-118
 正弦电 1-28
 正弦响应, RC 电路 1-50
 支撑软件, 过程数据自动化系统 8-25
 支路电流法 1-20
 知识 8-13
 知识获取 5-122
 知识库 9-39
 执行单元 6-42
 执行系统 4-61
 直角坐标型机器人 9-4
 直接变频器(见交-交变频器) 3-186
 直接存取存储器(DAM) 4-31
 直接起动 7-29
 直接驱动 9-25
 直接数字控制 8-78



- 直接寻址 4-15
 直流磁路 1-88
 直流电磁铁 2-69
 直流电磁铁吸力 2-69
 直流电动机 2-36
 直流电动机起动器 2-112
 直流电机 2-35
 直流电路分析 1-20
 直流调压器(见直流斩波器) 3-194
 直流发电机 2-37
 直流伺服电动机 2-54
 直流通路,放大电路 3-35
 直流无触点开关 3-194
 直流斩波器 3-195
 直线插补 6-8
 直线光栅 6-80
 直线位移检测 8-95
 只读存储器(ROM) 4-32
 只读光盘存储器 4-43
 只写一次型光盘存储器 4-43
 指令 4-13
 指令长度 4-14
 指令格式 4-14
 指令寄存器(IR) 4-20
 指令系统 4-13,6-86
 指令周期 4-21
 指数形式,傅里叶级数 1-55
 制动,直流电机 2-41
 制动电磁铁 2-74
 制动控制 7-34
 制造报文服务 8-109
 制造环境仿真 8-124
 制造业管理模式 8-14
 制造资源计划 8-16
 制造自动化系统 8-10
 制造自动化协议 8-103
 质量决策技术 8-88
 质量控制,加工过程 8-87
 质量树分析法,柔性制造系统 8-103
 智能 5-121
 智能化,机器人 9-88
 智能机器人 9-4
 智能控制 5-121
 滞后-超前补偿 5-46
 滞后补偿 5-45
 滞回特性,施密特触发器 8-125
 中断 4-61
 中断功能 6-86
 中断器 4-96
 中央处理器(CPU) 4-18
 重叠寄存器窗口 4-28
 重叠控制方式 4-25
 重拟设备 4-46
 周期 1-28
 轴 9-5
 轴控制器 9-33
 逐次渐近型 A/D 转换器 3-144
 逐点比较器 6-9
 主磁通 1-85
 主从控制方式 9-34
 主存 4-32
 主令电器 2-99
 主令开关(见主令电器) 2-99
 主令控制器 2-99
 主频 4-8
 主生产计划 8-15
 主轴速度功能 6-91
 助记符 4-79
 专家系统 5-122
 专用计算机 4-4
 转差率 2-19
 转差频率控制电流型变频 7-59
 转换开关 2-102
 转矩,工作频率特性(见矩频特性) 6-45
 转矩特性,单相异步电动机 2-47
 转入量 5-5
 转速闭环转差频率控制交流位置伺服系统 6-55
 转速变化率 7-6
 转速调节 7-54
 转速开环恒压频比交流位置伺服系统 6-54
 转移指令 4-17
 转子电阻斩波调速 7-71
 装配机器人 9-70
 状态 5-5,5-38 状态反馈控制器 5-50
 状态方程 5-86
 状态观测器 5-51,6-65
 状态寄存器 4-20
 状态空间(见相空间) 5-14,5-57
 状态空间表达式 5-86
 状态空间法 5-38
 准备功能 6-91
 准时制 8-16
 准时制生产管理模式 8-16
 资源 8-21
 子程序调用指令 4-17
 自动编程 6-36
 自动补偿 6-16
 自动方式 9-7
 自动化系通信 8-60
 自动绘图仪 6-116
 自动加/减速 6-15
 自动开关 2-103
 自动控制 4-5,5-5
 自激,放大电路 3-49
 自适应控制 9-6,9-38
 自校正调节器 5-110
 自校正调节器控制系统 5-101
 自由度 9-5
 自诊断功能 9-7
 自整角机 2-63
 自耦变压器 2-15
 自耦减压起动器 2-110
 字长 4-8,4-15
 字符编码 4-12
 字符串处理指令 4-17
 字符打印机 4-53
 字符显示器 4-50
 总线结构 4-7
 总线形 4-92
 阻带 1-65
 阻抗电压 2-11
 组合逻辑 4-20
 最大扭矩 9-6
 最大推力 9-6
 最短作业优先 4-63
 最高响应比优先 4-63
 最小方差控制器 5-108
 最小逆变角 7-111
 最小延迟角 7-112
 最小运动惯性量原则 9-15
 最优调节器 5-94
 最优调节器,具有指定稳定度 5-97
 最优调节器,有常值干扰作用 5-97
 最优轨线 5-88
 最优控制 5-88
 最优控制函数 5-88
 最优控制系统 5-6
 最优生产技术 8-17
 最优预报器 5-108
 最优原理 5-90
 左手定则 1-16
 坐标测量机 8-52
 坐标测量机 8-93
 坐标轴 6-25
 作业 4-62
 作业调度 4-62,8-86
 作业控制块 4-63
 3+ 4-98



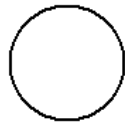
- 3dB 带宽(见通频带) 1-63
- 555 定时器 3-130
- A/D 转换器 3-141
- AC(Accumulator, 见累加寄存器) 4-20
- ADC(Analog-Digital Converter, 见 A/D 转换器) 3-141
- ALU(Arithmetic Logic Unit, 见算术逻辑单元) 4-18
- AR(Address Register, 见地址寄存器) 4-20
- A 矩阵 9-11
- BASIC(Beginner's All Purpose Symbolic Instruction Code, 见初学者通用符号指令代码) 4-83
- BASIC 语言 4-83
- BCD(Binary Coded Decimal, 见二进制) 3-99
- BCD 码 3-99
- BR(Buffer Register, 缓冲寄存器) 4-20
- CAD(Computer Aided Design, 见计算机辅助设计) 4-6
- CAI(Computer Aided Instruction, 见计算机辅助教学) 4-6
- CAM(Computer Aided Manufacturing, 见计算机辅助制造) 4-6
- CAT(Computer Aided Test, 见计算机辅助测试) 4-6
- CCD(Charge Coupled Device, 见电荷耦合器件) 9-53
- CCDOS(Chinese Character Operation System, 汉字操作系统) 4-68
- CISC(Complex Instruction Set Computer, 见复杂指令集计算机) 4-27
- CMOS 电路 3-99
- CNC(Computer Numerical Control, 见计算机数控) 6-6, 6-84
- CNC 系统 6-6, 6-84
- COBOL(Common Business Oriented Language, 通用商业语言) 4-84
- COBOL 语言 4-84
- CPU(Central Processing Unit, 见中央处理器) 4-18
- CPU 周期 4-21
- CRT 显示 6-88
- C 功能, 刀具半径补偿 6-19
- C 语言 4-80
- D-H 坐标系 9-11
- D/A 转换器 3-141
- DAC(Digital-Analog Converter, 见 D/A 转换器) 3-141
- DAM(Direct Access Memory, 直接存取存储器) 4-31
- DBMS(Data Base Management System, 见数据库管理系统) 4-72
- DDL(Date Description Language, 见数据描述语言) 4-75
- DDL 语言 4-75
- DMA(Direct Memory Access, 见存储器直接输入输出) 4-57
- DML(Date Manipulation Language, 见数据操作语言) 4-75
- DML 语言 4-75
- DOS(Disk Operating System, 见磁盘操作系统) 4-67
- D 触发器 3-108
- D 锁存器 3-108
- ECL(Emitter Coupled Logic, 见发射极耦合逻辑) 3-95
- ECL 电路 3-95
- EPPOM(Erasable Programmable Read-Only Memory, 见可擦可编程只读存储器) 4-32
- FORTAN 语言 4-82
- FoxBase 4-77
- FoxPro 4-77
- F 功能(见进给功能) 6-91
- G 功能(见准备功能) 6-91
- HCMOS 电路 3-99
- HTL(High Threshold Logic, 高阈值逻辑) 3-94
- HTL 电路 3-94
- H 控制标准问题 5-115
- I²L(Integrated Injection Logic, 见集成注入逻辑) 3-96
- I²L 电路 3-95
- IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor, 见绝缘门极晶体管) 3-17
- INGRES 4-78
- IR(Instruction Register, 指令寄存器) 4-20
- JK 触发器 3-110
- J 矩阵(见雅可比矩阵) 9-12
- LC 正弦波振荡器 3-120
- LED(Light Emitting Diode, 见发光二极管) 3-24
- LISP(List Processing, 见表处理) 4-85
- LISP 语言 4-85
- MCC(Motor Control Center, 电动机控制中心) 7-38
- MCT(MOS Controlled Thyristor, 见 MOS 控制晶闸管) 3-23
- MOS(Metal Oxide Semiconductor, 见金属氧化物半导体) 3-12
- MOS 管 3-12
- MOS 控制晶闸管(MCT) 3-23
- MOS 型存储器 4-33
- MTBT(Mean Time Between Failure, 见平均无故障时间) 4-8
- MTTR(Mean Time To Repair, 平均修复时间) 4-9
- M 功能(见辅助功能) 6-91
- NMOS 电路 3-97
- Netware 网络操作系统 4-96
- Novell 网 4-96
- OA(Office Automation, 见办公业务自动化) 4-6
- ORACLE 4-77
- OSI(Open System Interconnect, 见开放系统互连参考模型) 4-93
- PASCAL 语言 4-81
- PC(Program Counter, 见程序计数器) 4-20
- PCnet 网 4-100
- PID(Proportional Integral and Differential, 比例积分微分) 5-49
- PID 控制 9-36
- PID 控制器 5-49
- PLA 控制器 4-20
- PMOS 电路 3-96
- PN 结 3-5
- PROLOG(Programming in Logic, 见逻辑程序设计) 4-87
- PROLOG 语言 4-87
- PROM(Programmable Read-Only Memory, 可编程只读存储器) 4-32
- PWM(Pulse Width Modulation, 脉宽调制) 7-60
- RAM(Random Access Memory, 随机存储器) 4-31
- RC 正弦波振荡器 3-119
- RLC 并联交流电路 1-31



- RLC 串联交流电路 1-31
- ROM (Read-Only Memory, 只读存储器) 4-31
- RS-232-C 标准接口 4-58
- RS-423 标准接口 4-59
- RS-442 标准接口 4-59
- RS-449 标准接口 4-59
- RS 触发器 3-109
- SAM (Sequential Access Memory, 顺序存储器) 4-31
- SCARA (Selected Compliance Assembly Robot Arm, 见可选择柔性装配机器人手臂) 9-70
- SCARA 型结构 9-70
- SCR (Silicon Controlled Rectifier, 见普通晶闸管) 3-19
- SCS (Silicon Controlled Switch, 见硅控制开关) 3-23
- SIT (Static Induction Transistor, 见静电感应晶体管) 3-16
- SITH (Static Induction Thyristor, 见静电感应晶闸管) 3-22
- SQL (Structured Query Language, 见结构化查询语言) 4-75
- SQL 语言 4-75
- SYBASE 4-79
- S 功能(见主轴速度功能) 6-91
- S 平面 1-69
- S 域分析(见复频域分析) 1-74
- TTL (Transistor-Transistor Logic, 见晶体管晶体管逻辑) 3-91
- TTL 电路 3-91
- T 功能(见工具功能) 6-91
- T 矩阵 9-11
- UJT (Unijunction Transistor, 见单结晶体管) 3-17
- UNIFY 4-78
- UNIX 4-67
- V 形曲线, 三相同步电动机 2-31
- Windows 4-67
- X500 目录服务 8-109
- XENIX 4-70
- Z 变换 5-75
- Z 传递函数 5-77
- Z 反变换 5-76
- dBase 4-76
- δ 法(见圆弧近似法) 5-59

(索引编辑 徐家宗 李书全 江颖)





全国特大型、大型一类机电工业企业名单^①

(截止于 1993 年度)

| 单 位 | 地 址 | 邮 编 |
|-------------|---------------------|--------|
| 第一拖拉机制造厂 | 河南省洛阳市建设路 154 号 | 471004 |
| 第一重型机器厂 | 黑龙江省齐齐哈尔市富拉尔基区 | 161042 |
| 陕西彩色显像管总厂 | 陕西省咸阳市彩虹路 | 712021 |
| 西安电力机械制造公司 | 陕西省西安市丰登路 | 710077 |
| 安徽省全椒柴油机总厂 | 安徽省全椒县湘河镇建设东路 | 239500 |
| 北京第一机床厂 | 北京市朝阳区酒仙桥八间房 | 100026 |
| 北京电子管厂 | 北京市酒仙桥路 10 号 | 100016 |
| 北京金属结构厂 | 北京市建国门外 1 号 | 100004 |
| 北京牡丹电子集团公司 | 北京市海淀区花园路 2 号 | 100083 |
| 北京重型电机厂 | 北京市西郊吴家村 | 100039 |
| 甘肃长城电器工业公司 | 甘肃省天水市天开路 | 741018 |
| 国营长风机器厂 | 甘肃省兰州市 53 号信箱 | 730070 |
| 兰州电机厂 | 甘肃省兰州市七里河区民乐路 66 号 | 730050 |
| 兰州石油化工机器厂 | 甘肃省兰州市七里河区 | 730050 |
| 广州重型机器厂 | 广东省广州市工业大道中 122 号 | 510252 |
| 深圳华强电子工业总公司 | 广东省深圳市南中路华强路口 | 518043 |
| 深圳桑达电子总公司 | 广东省深圳市上步区振华路 20 号 | 518043 |
| 柳州工程机械厂 | 广西壮族自治区柳州市柳太路 1 号 | 545007 |
| 玉林柴油机总厂 | 广西壮族自治区玉林市大牛窝 | 537005 |
| 长征电器公司 | 贵州省遵义市上海路 | 563002 |
| 保定变压器厂 | 河北省保定市江城路 23 号 | 071056 |
| 石家庄显像管总厂 | 河北省石家庄市光华路电厂街 8 号 | 050041 |
| 中国环宇电子集团公司 | 河北省石家庄市裕华西路 13 号 | 050000 |
| 第二砂轮厂 | 河南省郑州市华山路 | 450006 |
| 洛阳矿山机械厂 | 河南省洛阳市涧西区建设路 210 号 | 471039 |
| 洛阳轴承厂 | 河南省洛阳市涧西区建设路 | 471039 |
| 南阳防爆电机厂 | 河南省南阳市宛城路 | 473011 |
| 郑州电缆厂 | 河南省郑州市华山路 79 号 | 450006 |
| 哈尔滨第一工具厂 | 黑龙江省哈尔滨市道外区南马路 69 号 | 150020 |
| 哈尔滨电机厂 | 黑龙江省哈尔滨市大庆路 35 号 | 150040 |

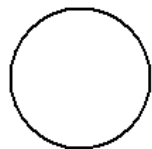
① 按国经贸企[1992]176 号文件、国经贸[1993]338 号文件和国经贸企[1994]743 号文件公布的全国大型工业企业名单列出。



| 单 位 | 地 址 | 邮 编 |
|-------------------|---------------------|--------|
| 哈尔滨电缆厂 | 黑龙江省哈尔滨市道外区景阳街 30 号 | 150020 |
| 哈尔滨锅炉厂 | 黑龙江省哈尔滨市动力区大庆路 17 号 | 150040 |
| 哈尔滨量具刃具厂 | 黑龙江省哈尔滨市动力区和平路 36 号 | 150040 |
| 哈尔滨汽轮机厂 | 黑龙江省哈尔滨市动力区大庆路 3 号 | 150040 |
| 哈尔滨轴承总厂 | 黑龙江省哈尔滨市香坊区红旗大街 9 号 | 150030 |
| 佳木斯电机厂 | 黑龙江省佳木斯市光复路 325 号 | 154002 |
| 齐齐哈尔第二机床厂 | 黑龙江省齐齐哈尔市永安大街 54 号 | 161005 |
| 齐齐哈尔第一机床厂 | 黑龙江省齐齐哈尔市安顺路 61 号 | 161005 |
| 湖北红旗电缆厂 | 湖北省宜昌市江南 | 443006 |
| 武汉锅炉厂 | 湖北省武汉市武珞路 290 号 | 430070 |
| 武汉仪器仪表自动化工业(集团)公司 | 湖北省武汉市前进 4 路 160 号 | 430014 |
| 武汉重型机床厂 | 湖北省武汉市武昌区中北路 108 号 | 430077 |
| 襄阳轴承厂 | 湖北省襄樊市万山工业区 | 441022 |
| 湘潭电机厂 | 湖南省湘潭市下摄司 | 411101 |
| 湘潭电缆厂 | 湖南省湘潭市建设南路 | 411101 |
| 长春拖拉机制造厂 | 吉林省长春市荣光路 59 号 | 130031 |
| 常州柴油机厂 | 江苏省常州市怀德中路 123 号 | 213002 |
| 国营华东电子管厂 | 江苏省南京市中央门外迈皋桥 | 210037 |
| 国营南京无线电厂 | 江苏省南京市中山东路 301 号 | 210002 |
| 国营南京有线电厂 | 江苏省南京市中央门外安怀村 | 210037 |
| 江苏华宁电子集团 | | |
| 徐州工程机械集团公司 | 江苏省徐州市苏堤北路 4 号 | 221004 |
| 盐城无线电总厂 | 江苏省盐城市人民中路 104 号 | 224002 |
| 中国华晶电子集团公司 | 江苏省无锡市梁溪路 14 号 | 214061 |
| 鞍山红旗拖拉机制造厂 | 辽宁省鞍山市立山区红旗路 30 号 | 114042 |
| 长白计算机集团公司 | 辽宁省沈阳市大东区大北关街 2 号 | 110041 |
| 朝阳柴油机厂 | 辽宁省朝阳市黄河路三段 51 号 | 122000 |
| 大连电机厂 | 辽宁省大连市汉阳街 | 116022 |
| 大连机床厂 | 辽宁省大连市沙河口区长生街 38 号 | 116021 |
| 大连冷冻机厂 | 辽宁省大连市沙河口区春柳街 1 号 | 116033 |
| 大连起重机器厂 | 辽宁省大连市河北口区汉阳街 208 号 | 116022 |
| 大连显像管厂 | 辽宁省大连市甘井子区后革镇堡 | 116033 |
| 大连重型机器厂 | 辽宁省大连市沙河口区汉阳街 220 号 | 116022 |
| 沈阳变压器厂 | 辽宁省沈阳市铁西区北二中路 18 号 | 110025 |
| 沈阳第三机床厂 | 辽宁省沈阳市铁西区北二东路 10 号 | 110025 |
| 沈阳第一机床厂 | 辽宁省沈阳市铁西区兴华北街 22 号 | 110025 |
| 沈阳电机厂 | 辽宁省沈阳市铁西区卫工北街 20 号 | 110026 |
| 沈阳电缆厂 | 辽宁省沈阳市铁西区兴华北街 34 号 | 110025 |
| 沈阳高压开关厂 | 辽宁省沈阳市铁西区景皇北街 38 号 | 110025 |



| 单 位 | 地 址 | 邮 编 |
|----------------|--------------------|--------|
| 沈阳鼓风机厂 | 辽宁省沈阳市铁西区云峰北街 36 号 | 110021 |
| 沈阳矿山机器厂 | 辽宁省沈阳市大东区大东路 178 号 | 110024 |
| 沈阳水泵厂 | 辽宁省沈阳市铁西区熊家岗路 28 号 | 110026 |
| 沈阳拖拉机制造厂 | 辽宁省沈阳市铁西区建设中路 62 号 | 110026 |
| 沈阳重型机器厂 | 辽宁省沈阳市铁西区兴华北街 8 号 | 110025 |
| 瓦房店轴承厂 | 辽宁省瓦房店市 | 116300 |
| 中国辽宁北方铸钢厂 | 辽宁省鞍山市立山区灵山路 41 号 | 114042 |
| 中捷友谊厂 | 辽宁省沈阳市大东区珠林路 25 号 | 110043 |
| 宁夏西北轴承厂 | 宁夏回族自治区银川市新市区北京西路 | 750021 |
| 博山电机厂 | 山东省淄博市博山人民路 42 号 | 255200 |
| 济南第二机床厂 | 山东省济南市机床二厂路 4 号 | 250022 |
| 济南第一机床厂 | 山东省济南市槐荫区经七路 | 250022 |
| 莱阳动力机械总厂 | 山东省莱阳市五龙北路 10 号 | 265200 |
| 山东潍坊拖拉机厂 | 山东省潍坊市潍德路 8 号 | 261031 |
| 山西东方电子集团 | | |
| 太原矿山机器厂 | 山西省太原市解放北路 12 号 | 030009 |
| 太原重型机器厂 | 山西省太原市河西区玉河街 21 号 | 030024 |
| 榆次液压集团公司 | 山西省榆次市经纬路 258 号 | 030620 |
| 国营长岭机器厂 | 陕西省宝鸡市 43 号信箱 | 721006 |
| 国营黄河机器制造厂 | 陕西省西安市幸福北路 8 号 | 710043 |
| 西安仪表厂 | 陕西省西安市大庆路 | 710082 |
| 西安重型机器厂 | 陕西省西安市未央区辛家庙 | 710032 |
| 上海标准件公司 | 上海市西藏南路 615 号 | 200011 |
| 上海柴油机厂 | 上海市军工路 2636 号 | 200432 |
| 上海电机(集团)公司 | 上海市福州路 89 号 | 200002 |
| 上海电机厂 | 上海市闵行区江川路 555 号 | 200240 |
| 上海电缆厂 | 上海市杨浦区军工路 1076 号 | 200093 |
| 上海电器公司 | 上海市水电路 1900 号 | 200437 |
| 上海电线电缆(集团)公司 | 上海市恒丰路 600 号 | 200070 |
| 上海电站辅机厂 | 上海市杨浦路 2200 号 | 200090 |
| 上海广播电视(集团)公司 | 上海市漕家路 680 号 | 200031 |
| 上海锅炉厂 | 上海市闵行区华宁路 250 号 | 200240 |
| 上海华通开关厂 | 上海市闸北区共和新路 2500 号 | 200072 |
| 上海机床厂 | 上海市杨浦区军工路 1146 号 | 200093 |
| 上海汽轮机厂 | 上海市闵行区江川路 333 号 | 200240 |
| 上海通用机械(集团)公司 | 上海市东大名路 393 号 | 200080 |
| 上海仪表(集团)公司 | 上海市北京东路 137 号 | 200002 |
| 上海真空电子器件股份有限公司 | 上海市静安区胶州路 485 号 | 200040 |
| 上海重型机器厂 | 上海市闵行区江川路 1800 号 | 200240 |



| 单 位 | 地 址 | 邮 编 |
|---------------|-------------------------|--------|
| 上海轴承公司 | 上海市西藏中路 725 弄 23 号 | 200003 |
| 上海自动化仪表公司 | 上海市北京西路 1421 号 | 200040 |
| 东方电机厂 | 四川省德阳市 | 618000 |
| 东方锅炉厂 | 四川省自贡市 | 643001 |
| 东方汽轮机厂 | 四川省绵竹县汉旺镇 | 618201 |
| 国营红光电子管厂 | 四川省成都市建设南支路 4 号(106 信箱) | 610051 |
| 国营零八一总厂 | 四川省广元市 22 信箱 | 628017 |
| 四川仪表总厂 | 四川省重庆市北碚区 | 630700 |
| 上海电子元件总公司 | 上海市延安中路 816 号 | 200041 |
| 天津电视机厂 | 天津市河西区友谊路 16 号 | 300074 |
| 天津津京联合玻壳厂 | 天津市西青区杨柳青公路口 | 300380 |
| 天津市电机总厂 | 天津市河西区太湖路 21 号 | 300210 |
| 天津市海河电冰箱压缩机公司 | 天津市河东区八纬路 103 号 | 300171 |
| 天津通信广播公司 | 天津市河北区新大路 185 号 | 300140 |
| 天津拖拉机制造厂 | 天津市南开区红旗路 184 号 | 300190 |
| 天津重型机器厂 | 天津市北郊区高峰路马庄 | 300400 |
| 杭州制氧机厂 | 浙江省杭州市东新路 50 号 | 310004 |
| 东风汽车公司 | 湖北省十堰市车城路 1 号 | 442001 |
| 第一汽车制造厂 | 吉林省长春市 | 130000 |
| 上海汽车工业总公司 | 上海市武康路 390 号 | 200031 |
| 北京汽车摩托车联合制造公司 | 北京市朝阳区东三环北路 32 号 | 100020 |
| 大连柴油机厂 | 辽宁省大连市沙河口区东北路 49 号 | 116021 |
| 金杯汽车股份有限公司 | 辽宁省沈阳市 | 110044 |
| 济南汽车制造总厂 | 山东省济南市西工商河路 13 号 | 250031 |
| 潍坊柴油机厂 | 山东省潍坊市民主街 26 号 | 261001 |
| 天津市汽车工业公司 | 天津市和平区烟台道 78 号 | 300040 |
| 杭州汽车发动机厂 | 浙江省杭州市湖墅南路 130 号 | 310005 |
| 上海机床总公司 | 上海市福州路 89 号 | 200002 |
| 中国第二重型机械集团公司 | 四川省德阳市 | 618031 |
| 中国东方电气集团公司 | 四川省成都市一环路西一段 115 号 | 610041 |
| 安徽省合肥叉车总厂 | 安徽省合肥市西市区望江路 21 号 | 230222 |
| 中国扬子电气公司电冰箱总厂 | 安徽省滁州市南谯路 129 号 | 239016 |
| 北京高压气瓶厂 | 北京市朝阳区黄厂路 | 100023 |
| 广东科龙电器股份有限公司 | 广东省顺德市容奇镇容港路 8 号 | 528303 |
| 广东韶关铸锻总厂 | 广东省韶关十里亭 | 512031 |
| 湛江三星农用运输车制造公司 | 广东省湛江市人民大道北 | 524043 |
| 第七砂轮厂 | 贵州省清镇县 2 号信箱 | 551414 |
| 石家庄内燃机配件总厂 | 河北省石家庄市和平东路 8 号 | 050031 |



| 单 位 | 地 址 | 邮 编 |
|-----------------|---------------------|--------|
| 平顶山高压开关厂 | 河南省平顶山市开源路南段 | 467001 |
| 江苏江淮动力机厂 | 江苏省盐城市环城西路 213 号 | 224001 |
| 南京机床厂 | 江苏省南京市大光路 67 号 | 210007 |
| 南京汽轮电机厂 | 江苏省南京市中央门外东门街 140 号 | 210037 |
| 山东推土机总厂 | 山东省济宁市太白楼东路 58 号 | 272135 |
| 汉江机床厂 | 陕西省汉中市 | 723003 |
| 黄河工程机械厂 | 陕西省华阴市观北康营 | 714202 |
| 陕西压延设备厂 | 陕西省富平县庄里北街 | 711711 |
| 陕西重型机器厂 | 陕西省西安市北郊辛家庙 | 710032 |
| 彭浦机器厂 | 上海市共和新路 3201 号 | 200072 |
| 上海大隆机器厂 | 上海市光复西路 5 号 | 200061 |
| 上海轻工机械股份有限公司 | 上海市南京西路 1576 号 | 200040 |
| 上海重型矿山机械公司 | 上海市东大名路 393 号 | 200800 |
| 重庆机床厂 | 四川省重庆市九龙坡区道角 | 630055 |
| 天津动力机厂 | 天津市河北区南口路 4 号 | 300230 |
| 天津液压机械集团公司 | 天津市南开区三纬路 63 号 | 300100 |
| 南京汽车制造厂 | 江苏省南京市中央路 331 号 | 210037 |
| 北京吉普汽车有限公司 | 北京市朝阳区广渠路 36 号 | 100021 |
| 长沙汽车电器厂 | 湖南省长沙市东风路 2 号 | 410005 |
| 四川汽车制造厂 | 四川省重庆市双桥区双龙东路 | 630900 |
| 国营长虹机器厂 | 四川省绵阳市跃进路 4 号 | 621000 |
| 国营锦江电机厂 | 四川省成都市东郊厂北路 | 610051 |
| 上海港口机械制造厂 | 上海市南码头路 | 200127 |
| 国营金城机械厂 | 江苏省南京市中山东路 518 号 | 210002 |
| 北内集团总公司 | 北京市东郊九龙山东环南路 18 号 | 100022 |
| 沈阳机床股份有限公司 | 辽宁省沈阳市沈河区西顺城街 247 号 | 110011 |
| 北京巴布科克威尔科克斯有限公司 | 北京市八角村 | 100043 |
| 北京轻型汽车有限公司 | 北京市首体南路 3 号 | 100044 |
| 北人集团公司 | 北京市广渠门外双井 | 100022 |
| 厦门工程机械股份有限公司 | 福建省厦门市夏禾路 668 号 | 361004 |
| 柳州佳力电机公司 | 广西壮族自治区柳州市飞鹅路 53 号 | 545005 |
| 柳州汽车厂 | 广西壮族自治区柳州市屏山大道 | 545005 |
| 南宁机械厂 | 广西壮族自治区南宁市中尧路 48 号 | 530000 |
| 河北汽车(集团)有限责任公司 | 河北省石家庄市正定大街 52 号 | 050041 |
| 河北省宣化工程机械厂 | 河北省张家口市宣化区东升路 21 号 | 075105 |
| 许昌继电器厂 | 河南省许昌市建设路 178 号 | 461000 |
| 猴王集团 | 湖北省宜昌市夷陵路 344 号 | 443000 |
| 南京第二机床厂 | 江苏省南京市水西门菱角市 66 号 | 210004 |
| 南京电瓷总厂 | 江苏省南京市燕子矶笆斗山 | 210038 |



| 单 位 | 地 址 | 邮 编 |
|------------------|---------------------------|--------|
| 武进柴油机厂 | 江苏省武进县湖塘桥北 | 213161 |
| 景德镇华意电器总公司 | 江西省景德镇市官庄 | 333000 |
| 抚顺电瓷厂 | 辽宁省抚顺市新抚区公园街 | 113001 |
| 山东牟平发动机集团公司 | 山东省牟平县宁海镇工商街 45 号 | 264100 |
| 淄博牵引电机(集团)股份有限公司 | 山东省淄博市张店区共青团东路 34 号 | 255030 |
| 陕西汽车制造总厂 | 陕西省西安市灞桥区幸福北路副 18 号 | 710043 |
| 上海印刷包装机械总公司 | 上海市中兴路 408 号 | 200071 |
| 上海造纸机械总厂 | 上海市共和新路 3001 号 | 200072 |
| 成都内燃机总厂 | 四川省成都市外北荆竹坝 | 610082 |
| 成都三电股份有限公司 | 四川省成都市九眼桥宏济新路 2 号 | 610061 |
| 天津市电缆总厂 | 天津市南开区黄河道西头 | 300012 |
| 昆明重型机器厂 | 云南省昆明市官渡区茨坝 | 650203 |
| 北京东方电子集团股份有限公司 | 北京市朝阳区酒仙桥 | 100016 |
| 河南省周口市通信电缆厂 | 河南省周口市七一路东段 | 466000 |
| 南京电子管厂 | 江苏省南京市中山北路 215 号(七七二厂) | 210009 |
| 南京电子网板有限公司 | 江苏省南京市中央门外迈皋桥何家村 | 210028 |
| 大连华录集团公司 | 辽宁省大连市中山区唐家屯 | 116013 |
| 浪潮电子信息产业集团公司 | 山东省济南市南山大路 224 号 | 250013 |
| 国营成都宏明无线电器材总厂 | 四川省成都市二环路东二段 29 号(82 号信箱) | 610051 |
| 国营涪江机器厂 | 四川省绵阳市跃进路 4 号 | 621000 |
| 内蒙古第一机械制造厂 | 内蒙古自治区包头市青山区青山东路 | 014031 |
| 中国贵航集团西南工具总厂 | | |
| 新航机械公司 | | |
| 中南传动机械厂 | | |
| 上海飞机制造厂 | 上海市龙华机场 | 200232 |
| 朝阳重型机器厂 | 辽宁省朝阳市红旗路一号 | 122000 |
| 广东省二轻制冷机公司 | 广东省广州市东华北路 50 号 | 510400 |
| 台山市空调器总厂 | 广东省台山县 | 529200 |
| 珠海格力电器股份有限公司 | 广东省珠海市 | 519000 |
| 山东塑料橡胶机械总厂 | 山东省莱芜市文化南路 1 号 | 271100 |
| 国营第一钟表机械厂 | 陕西省长安县太乙宫镇 | 710105 |
| 上海三菱电器股份有限公司 | 上海市浦东洋泾建平路 2 号 | 200135 |
| 上海双鹿电器股份有限公司 | 上海市天山路 651 号 | 200051 |
| 上海水仙电器实业股份有限公司 | 上海市汶水路 19 号 | 200072 |
| 加西贝拉压缩机有限公司 | 浙江省嘉兴市 | 314000 |



重点企业产品介绍

无锡市机床电器厂

我厂成立于1959年7月,是我国最早专业生产机床电器产品的厂家之一,企业性质为全民所有制,隶属于无锡市机械工业局,是机械工业部机床电器行业重点企业,特定振兴企业,江苏省高新技术企业。经过30多年的不断发展,现有职工1200多人,其中工程技术人员151人,工厂占地面积4万余 m^2 ,建筑面积3万多 m^2 ,固定资产2500万元。

我厂技术力量雄厚,设备精良,拥有主要生产设备220台,其中进口设备23台,建有设备齐全的精密模具制造中心,能制造高精度多工位级进模和一模多腔注塑模,模具加工精度达 μ 级,适应高精度电器产品的生产需要,并可对外承接加工业务。工厂还拥有先进的零部件加工和制造设备以及能满足多种电器产品试验的产品检测中心,保证了产品质量,满足了批量生产要求,目前已形成年产300多万台电器产品的生产能力。

我厂产品品种多,规格齐,主要产品有ST、JSZ8、JSZ9、JSS1、JSS20系列时间继电器,HH5、JZG6、JZC1、JZO2、JZW4、JZW5、RT11系列中间继电器,JDM9系列计数继电器,CJX1系列交流接触器,MFZ1、MFJ1、MFZ3-YC、MFJ3-YC系列阀用电磁铁,JW系列微动开关,LX12-2型行程开关以及各种机床电气控制柜,低压配电屏,直流调速装置,机床数控系统和温度控制仪等,并先后承担了国家“七五”重点科技项目——柔性制造系统电气控制装置和“八五”国家重点企业技术开发项目——模块化组合控制电器的研制开发任务,产品的设计水平和制造水平一直处于同行业的领先地位。我厂生产的各类产品不仅满足了机械工业配套需要,而且广泛应用于纺织、冶金、电子、家电、轻工、化工和矿山机械等各种领域,产品畅销全

国各省市并远销海外,深受用户欢迎。

ST系列超级时间继电器和HH5系列小型控制继电器是我厂引进日本富士电机公司技术生产的产品,ST系列时间继电器规格品种齐全,有通电延时型、瞬动型、断电延时型、断开延时型、星三角起动延时型、往复循环延时型等多种规格,采用大规模专用集成电路,具有体积小、重量轻、功耗低、抗干扰性高、可靠性好、寿命长等特点,延时精度达0.5%,延时范围为0.05s~24h,触点开闭容量AC220V3A,机械寿命5000万次,电寿命50万次。HH5系列小型控制继电器是一种高可靠性通用型继电器,具有体积小、重量轻、功耗低、开闭容量大,可靠性高、寿命长等特点,输出触点有二、三、四转换,开闭容量为AC220V5A,机械寿命5000万次,电寿命50万次,除基型产品外,有带动作指示灯,带浪涌抑制回路,带隔弧片等规格,安装方式有插拔式、印制板焊装式、法兰式、螺栓固定式等多种,可供用户选择使用,由于采用了合理的设计,先进的工艺和优质的材料,保证了接触可靠性和较长的使用寿命,并且消除了交流噪音。目前,引进产品已成为我厂主导产品之一,年生产能力达150万台,产品通过日方质量认可,并分获部优和省优称号。

我厂地处风景秀丽的太湖之滨,气候适宜,交通便利,是理想的电器产品生产基地。工厂以用户服务为宗旨,以市场需求为目标,竭诚为国内外用户提供优质产品和优良服务,欢迎各位宾客来厂参观、洽谈。

地址:江苏省无锡市中桥金星路

邮编:214073

电话:(0510) 555938 557745

传真:(0510) 557663



广东省中山市和泰机电厂

本厂是国家机械工业部、电力工业部定点生产互感器专业厂，是中国工程建设标准化协会会员、全国电气工程标准技术委员会委员、电力工业部电测量标准化技术委员会委员、全国环氧树脂应用技术学会华南分会会员、全国变压器标准化网网员、全国仪用互感器科技情报网网员等 15 个专业委员。设有“华南国家计量测试中心高电压计量站”（国家级）。

本厂土地面积 7.7 万 m²，建筑面积 3.3 万 m²。有雄厚的技术力量。采用本厂 7 项国家专利独有技术，创制了高精度、高动热稳定，功率因数广，多次级、全工况的 0.5~220kV 全系列电流电压互感器。

在 1984 年以来，产品连续获省、地、市优质产品奖，国家部优产品奖。1987 年被国家选送到瑞典参加国际发明展览。何见光厂长受到瑞典国王古尔卡塔夫亲自接见。1989 年又到联邦德国参加国际科技展览。1992 年获国家发明奖。1993 年列为广东省级重点新产品及国家级新产品。1994 年国家确认泰峰牌电流电压互感器为“中国公认名牌产品”。

主要产品

(1) 户外六氟化硫电流互感器系列，电压：66~220kV，电流比：75~5000/5 或 1A。具有运行安全，十年免维修，精度 0.2 级、0.2S 级，高动热稳定，无油不燃烧、不爆炸，局部放电量 2pC 以下，无介质损耗的特点。

(2) 户外电容式电压互感器系列，电压 110~220kV，它能避免因谐振产生过电压，运行安全可靠，有三个次级，精度 0.2 级，大容量（300VA），功率因数 0.3~0.5 或 0.8。可兼作载波通讯用。

(3) 环氧浇注电流电压互感器系列，电压 3~35kV，精度 0.2 级、0.2S 级，满足各种开关柜及电力计量单位安装使用，专为全国联合

设计的电能计量柜提供高精度、高动热稳定，多次级、全工况、功率因数广的高质量各种型号、规格的互感器。

(4) 油浸绝缘的电流电压互感器及计量箱系列，电压：3~35kV；电流：1~3000A。精度 0.2 级、0.2S 级，大爬距，高原、高湿防污型。

(5) 0.5、0.66 全系列的电流互感器，精度 0.2 级、0.2S 级。其中有 LMZ，LMZ4，LMK，LQZ，LM，LQK 等。

(6) 各种型号、规格的零序互感器系列。

(7) 环氧干式带铁心 3~10kV 电压三相电抗器系列。

(8) 触头盒、绝缘套管、绝缘子等附件。

(9) 标准用的 220kV 及以下各种规格的精密电流、电压互感器与比例标准，精度 0.00001~0.05 级，其中 110kV 工频电压比例标准自校系统，是目前国内最高等级的电压标准，供给全国各大网局及省区中试所作标准之用。

(10) 试验互感器误差用的成套校验装置，包括互感器校验仪，标准电流、电压互感器，电流、电压负载箱，升压器、升流器、操作控制台等。

(11) 交直流 0~220kV 升压器、耐压试验机；0~12000A 电流发生器。

(12) 环氧干式有铁心电抗器及环氧玻纤空心电抗器。

(13) SC 系列，低损耗，耐雷电冲击的 35kV 及以下树脂浇注干式电力变压器。

地址：广东省中山市东风镇

邮编：528425

电话：(0760) 2600981

传真：(0760) 3361891



河北省河间市新华线缆集团公司简介

河北省河间市新华线缆集团公司是机械工业部定点生产厂家,全国首批工业生产许可证发证单位,国家重点骨干企业。她的前身是河间市新华通讯电缆厂,始建于1985年。是乡镇集体企业,隶属企业局。公司占地面积239760m²,目前拥有七个分厂和一个分公司,建筑面积67000m²,固定资产1.8亿元。公司直属企业有:河北新华电缆厂、河间市交联电缆厂、河间市辐照交联电缆厂、河间市无氧铜材厂、河间市新华钢带厂、河北开明塑料有限公司。现有员工1065人,其中各类专业技术人员185人。该公司先后从芬兰、德国、瑞士、俄罗斯引进90年代世界先进水平的生产设备和检测设备。

主要产品:“乾通”牌VV、VLV、VV₂₂、VLV₂₂ 0.6~1kV电力电缆;ZR-VV0.6~1kV阻燃电力电缆;BV450~750V布电线;AV系列450~750V安装线;KVV₂₂系列450~750V控制电缆;JKV、JKLV0.6~1kV架空电缆;CVV/DA0.6~1kV船用电缆;YJV、YJLV、YJV₂₂、YJLV₂₂系列6~35kV交联电力电缆,JKV、JKLV系列6~10kV交联架空电力电缆,YJV、YJLV系列0.6~1kV低压辐照交联电力电缆,KJYV系列450~750V低压辐照交联控制电缆等十

多个系列5000余种规格。

名优产品:该公司生产的“乾通”牌电线电缆先后荣获“河北省优质产品奖”,1993年荣获“全国消费者信得过产品奖”,1994年荣获“河北省技术监督局免检产品”称号,1995年5月该公司生产的6~35kV交联聚乙烯绝缘电力电缆荣获“河北省科技成果证书”。

该公司产品由中国平安保险公司承担质量保险。凡购买该公司生产的“乾通”牌电线电缆,中国平安保险公司在保险期内依法承担因产品质量造成的下列赔偿责任:(1)产品本身的损失;(2)对用户及他人造成的人身伤害引起的赔偿责任;(3)对用户及他人财物造成损失引起的赔偿责任。该公司荣获“河北省百强乡镇企业”,“河北省优秀企业”1994年被农业部授予“全国最佳经济效益乡镇企业”。1995年该集团产值可达5亿元,利税8000万元。1997年产值可达10亿元,利税1.5亿元。

地址:河北省河间市故仙乡前埋村

邮编:062451

电话:(0317) 3871143、3871024

传真:(0317) 3871141、3871102

机械工业部大连组合机床研究所

机械工业部大连组合机床研究所,成立于1956年,占地面积9.2万m²,建筑面积7.5万m²,现有职工1385人,其中科技人员510人,固定资产3800余万元。

办所方针:面向市场,科研领先,技工贸一体,加速产品化、国际化。

技术发展方向:组合机床与自动化加工技术的精密、高效、柔性、可靠、综合、成套。

组合所精神:创业、创新、创优。

主要研究专业及产品:组合机床及其自动线、柔性制造单元及系统、加工中心、工业机器人、工业测量机、自动装配机(线)试验机、冷却装置及系统、排屑及处理系统、工业清洗机、数控系统、液压和润滑元件及系统、气动元件、通用部件等。

K63卧式加工中心是大连组合机床研究所按英国FMT公司FM100加工中心技术制造,具有FMT公

司生产许可证的产品。该机床全面引进其设计、制造、软件和质量保证方面的技术,适用于单机/单元/或联线使用,能满足多品种、不同批量、高效率的加工要求。能满足各种材料大功率高效切削要求。其特点为:

(1) 主轴采用RHP高精度轴承,其中心冷却液通道,可满足专门的刀具要求;

(2) X、Y、Z轴导轨用INA高精度滚动体与镶钢导轨组成,具有长期精度保持性和优良性能;

(3) 大流量冷却液处理系统,用于切削和冲洗零件;

(4) 加工区和机床有完整的防护罩。

地址:大连市西南路801号

邮编:116033

电话:(0411) 6653211

传真:(0411) 6641819



机械工业部机械科学研究院

机械工业部机械科学研究院是中国机械工业最大的科研开发机构，成立于1956年。主要从事机械工业共性技术、基础技术、高新技术及产品的研究开发，并兼有这一领域的管理职能。机械科学研究院包括院本部及院系统的哈尔滨焊接研究所、沈阳铸造研究所、郑州机械研究所、上海材料研究所、武汉材料保护研究所、北京机械工业自动化研究所、北京机电研究所。全院共有职工6700人，其中专业技术人员4300多人（高级工程师700多人）。

院本部在北京设有技术开发、技术监督、技术创新等三大科研体系。主要专业领域是：环保技术与装备、机械基础件工艺与装备、机场地面设备、包装与食品机械、条形码技术及装备、机械工业标准化、通用零部件及其检测精密计量与测试控制、质量与可靠性、核设备安全、工业工程及软科学等方面的科研、开发、经营及行业技术管理与服务工作。院本部职工近880人，其中技术人员620多人（高级工程师130人）。

机械院本部可为广大用户提供如下优质服务：

1. 科研攻关：新技术、新工艺、新设备、成套技术、生产线。

2. 技术转让：提供成熟的科技成果并用于生产。
3. 技术咨询：难题咨询、引进消化、企业诊断、需求预测。
4. 技术服务：工程数据库、测试检验、标准信息及文本、软件编制。
5. 质量认证：质量体系认证、产品安全认证。
6. 产品销售：新设备、新仪器、精密零件和元器件、机电一体化成套设备。如：旋转伸缩型旅客登机桥系列；高架型立体车库系列；电阻焊制罐生产线高、中、低速系列成套设备；环形件精密冷辗扩机；电解去毛刺加工机床；组合式清洗机；能除漆雾并治理苯废气的新型喷漆室；多功能测微仪（智能化长度测控系统）；油泵油嘴偶件综合参数全自动精密测量分选机；高精度非接触测量式轴承滚柱自动分选机；大型工件形位公差自动测试仪；污泥脱水成套设备及自动控制系统；污泥堆肥成套设备；高效系列电动除锈机具。

地址：北京首都体育馆南路二号

邮编：100044

电话：(010) 68340088

传真：(010) 68340825

上海电器股份有限公司第二机床电器厂

上海电器股份有限公司第二机床电器厂（原名公信电器厂）建于1939年，专业生产控制电器已有55年的历史，是机械工业部生产机床电器的定点厂家。该厂的固定资产（现价）已达1312.4万元，1993年生产量为352.35万件，销售额为5500万元，有进口大型精密机床186台，测试设备530台，厂占地面积为11646.4m²，建筑面积为14610.5m²，职工总人数为708人，科技人员为293人，其中高中级人员为63人。生产产品已达40个系列，251个品种，5725个规格，所有产品均已获得生产许可证，质优量大，能向客户提供特殊品种、规格的特殊订货。

我厂主要生产拽钮开关、行程开关、微动开关、接近开关、光电开关和电子式时间继电器。引进西门子公司LXP1(3SE3)系列行程开关荣获部优产品；LAY1系列拽钮开关荣获上海市优产品；并有引进西门子公司LXJ8(3SG)系列接近开关和引进法国柯赞公司LXW8(831330)、LXW9(831060)、LXW10(831600)、LXW11(831180)系列微动开关；还有新产品LAS1系列拽钮开关，安装尺寸为416.3mm²，外形有圆形、方形和矩形；操动型式有防护钮、符号钮、

自锁钮、钥匙钮、旋钮以及蜂鸣器等，适用于数控机床、设备、装置等电子电器的控制电路中；LXJ13系列电容式接近开关对磁性金属和非磁性金属具有相同的敏感度，可无接触地检测玻璃、陶瓷、木材、水、油、纸等，它的安装尺寸为M18×1和M30×1.5，有交流220V和直流24V，检测距离为10、15、20mm，输出形式为交流二线、直流四线制的PNP或NPN；LXW5-5系列微动开关是LXW5系列微动开关的并列系列，它具有金属外壳，故除全部适用LXW5系列的使用场合外，更适用于对外壳有一定强度及撞击要求的场合。

从1994年起，我厂和德国巴鲁夫(BALLUFF)公司合作，组装生产BNS系列行程、组合行程开关，BES系列接近开关和BOS系列光电开关。我厂热诚期望为广大的客户服务，为我国的机床电器改变面貌和赶上世界水平作出努力。

地址：上海金沙江路909号

邮编：200062

电话：(021) 52592990

电传：(021) 52518197



上海沪光仪器厂

上海沪光仪器厂创建于1951年,是机械部重点企业和上海市高新技术企业,国家二级计量单位,隶属上海仪表(集团)公司。

该厂是全国最早生产交流仪器的企业,50年代末,小厂立大志,成功地试制出国内第一台高压电桥。在中央及市有关领导的关心下,再次迁址扩建,工厂以崭新的容姿拔地而起。60年代研制成功精密电容电桥、变压器电桥和军工产品侦察雷达,向电子仪器拓展。70年代使阻抗测量仪器实现了数字化、自动化。80年代开发了LCR测量仪、直流稳压稳流电源、交流净化电源、工业检测仪器、医疗仪器和50万伏高压电桥,并引进美国开关电源。90年代初建成年产24万台开关电源的自动生产线,并开拓汽车电子、变频器等领域。

工厂现有职工555人,其中科技人员125人,占地面积6782m²,建筑面积11000m²。产品分四大类共100多种,其中38种获各级科技成果奖48项,2项中国专利,2项部优产品。

开关电源是引进美国LH研究公司的先进技术研

制而成的新型直流稳压电源,具有体积小、重量轻、效率高、规格全、抗电磁干扰强的特点和过压、欠压、过功率保护功能,广泛应用于工业自控、电气通信、文教科研、计算机等行业的仪器设备中。

主要产品: YJ104-015系列总功率15W,6种规格; YJ104-030系列总功率30W,6种规格; YJ118A/1-4系列总功率100W,60种规格,其中: YJ118A/1系列交流110V或220V输入; YJ118A/2系列交流110V或220V输入,绝缘强度2kV/min,特别适用于电力系统; YJ118A/3系列直流220V输入; YJ118A/4系列直流110V输入; YJ135-050系列总功率50W,4种规格; YJ135-100系列总功率100W,4种规格; YJ135-200系列总功率200W,6种规格; YJ135-250系列总功率250W,1种规格。

地址:上海市巨鹿路758号

邮编:200040

电话:(021)52476799


传真:(021)52476634

四川宜宾电机厂

本厂建于1965年,全民所有制企业。占地14万m²,建筑面积6万m²,现有职工800余人,科技人员130余人,各种加工设备300余台。具有35万kW中小型电动机的制造能力。是四川省生产三相异步电动机的骨干企业,也是全国定点生产专用派生系列电动机的主要生产厂之一。1989年获四川省先进企业称号。1990年主导产品获部优产品称号。1993年获四川省新技术开发实力百强企业称号。1993年获国家统计局中国500家最大电气机械及器材制造企业称号。

宜宾电机厂主要经营Y系列(IP44)及其派生系列三相异步电动机和25~450t·m塔式起重机专用系列三相异步电动机。

主要产品: YTLEJ塔吊力矩三相异步电动机; YTS塔吊起升三相异步电动机; YTEZ塔吊行走三相异步电动机; YTJ塔吊电缆卷筒三相异步电动机;

YTH塔吊回转三相异步电动机; YTC塔吊小车三相异步电动机; YTB塔吊液压泵三相异步电动机; Y系列(IP44)三相异步电动机; YEJ系列电磁制动三相异步电动机; YCT系列电磁调速三相异步电动机; YLJ、YLJZ系列力矩三相异步电动机; YD系列变极多速三相异步电动机; YH系列高转差率三相异步电动机; Y-F系列化工防腐型三相异步电动机; Y-系列户外及户防腐型三相异步电动机。

名优产品: YTLEJ塔吊力矩三相异步电动机获中国专利局实用新型专利(专利号为ZL9323846.1)。

YLJZ力矩三相异步电动机获中国专利局实用新型专利。

地址:四川省宜宾市盐坪坝

邮编:644008

电话:(0831)331924



厦门电机实业总公司

厦门电机实业总公司(厦门电机厂),国家二级企业,机电部中小型电机的定点企业。公司创建于1957年,现有员工近千名,专业技术人员占15%,具有一支较高素质的开发、制造及售后服务的队伍。固定资产净值2200万元,为技工贸相结合的外向型企业。年生产能力30万kW,年出口创汇近200万美元。产品实行“三包”,售后服务优良,畅销中国及欧洲、澳大利亚、新西兰、中东、东南亚及港澳等二十多个国家和地区,年出口量约占总产量的40%,为省、市机械行业出口创汇先进单位。

总公司地处厦门经济特区老市区黄金地带,占地面积5.77万m²,建筑面积4万m²。总公司正结合市政府厦禾路改造规划,分期实施厂区易地岛内枋湖新工业区技术改造,外引内联,将公司建成年出口创汇3000万美元的以各类电机、电器为主的电工行业出口基地,欢迎海内外客商前来联系洽谈投资合作,技术引进,商品贸易业务。

主营:1. 交流电动机及各类电机;2. 电工器材;3.

家用电器。

兼营:机械、电器、仪表及行业所需物资的进出口业务;合资合作及开展“三来一补”业务和技术咨询业务;金属材料,普通机械,电器器材,五金仪表,化工产品批发。

名优产品:部优鹰牌Y、C系列(H80~H280)三相电机;获国家经委“金龙奖”的鹰牌YB系列(H80~H180)隔爆型电机;具有国际先进水平的鹰牌JM JMF系列(250kg~1500kg)电动型、防火型、遥控型卷闸门电机(全国首创,独家出口);YSP系列三相抛光电机;YEJ、YED系列三相自制动电机,YD系列变极多速电机。

地址:厦门市厦禾路815号

邮编:361004

电话:(0592)2029440(总机),2023729、2022347
(经营部)

传真:(0592)2022698(总经办),2029450(进出口部)

烟台气动元件厂

烟台气动元件厂建于1973年,1975年被机械部定为生产气动元件的专业化工厂。经过20多年的自我完善、自我发展,其生产规模、生产能力已成倍增长,现已成为机械部重点企业和国家二级企业。1993年被国家计委和机械部确定为特定振兴企业。是一个隶属于烟台市机械局管辖的全民所有制企业。

烟台气动元件厂是一座美丽的花园式工厂,是一个适合现代化生产的好地方,在20多年的成长过程中,为发展我国的气动技术做出了巨大贡献,在全国早已驰名遐尔。工厂占地面积5.2万m²,建筑面积约2万m²,其技术力量雄厚,设备精良,现有主要加工设备中数控机床占21%,为提高产品质量打下了坚实基础。1985年工厂还引进了联邦德国海隆公司符合国际ISO标准气缸专有生产技术和关键设备。

主要产品:

烟台气动元件厂主导产品为各种气动元件、气控系统、气动控制柜、油缸、液压系统,同时还生产各种适合粉状、粒状物料自动计量与包装的包装机械。

气缸产品主要有普通往复气缸、摆动式气缸、自动往复气缸、气液阻尼缸、伺服气缸、无活塞杆气缸、缸阀开关一体化气缸、振动式气缸、气吊缸、销紧式气

缸、耐高温气缸、双活塞、双出杆等各式气缸。最大缸径500mm,最大行程6m。

气动阀产品有各种调压阀、节流阀、方向控制阀,有气控式、电控式、手动式、机控式等多种形式,最大螺纹口径2"。还有气源处理元件、附件、气源干燥设备、油雾器、滤清器各种软管,并能成套供应各类气动元件,油缸产品:中低压往复油缸,按日本标准生产的油缸、工程油缸等。

包装机械主要包装粉、粒状产品,包装重量小袋为100~750g/袋,大袋为20~50kg/袋,最高计量精度为±1%。

名优产品:气缸产品曾分获部优和国家级新产品称号。

技术服务:包括实地测绘、非标设计和依据用户需要设计、制造各种气控系统、气控柜、液压系统,及各种包装机械、包装自动线等。

地址:烟台市芝罘区楚凤四街4号

邮编:264002

电话:(0535)6532204、6536314、6536304、6532743

传真:(0535)6530206



中国机床总公司 (CNMTC)

中国机床总公司成立于1979年,是中国机电行业第一家实行内外贸结合、技工贸结合,集生产、技术、成套、服务于一体的经济实体。

中国机床总公司主要负责组织全国机床工具行业开拓国内外两个市场,从事机床、工具及其相关的机电产品、轻纺产品,化工原料及其制品,运输工具,土畜产品……的进出口贸易和国内营销业务,开展生产技术合作,提供机械工程项目技术设备成套服务,是中国机床工具行业最大的进出口技术设备成套专业公司。

中国机床总公司拥有50余个直属单位、分支机构和投资企业以及26个紧密联合企业,与一批科研设计院所、重点骨干企业建立了多渠道、多方位、多层次的联合,并与全国机床工具行业各个企业都有着密切联系,可以直接提供各种机床工具产品和成套设备,拥有稳定可靠的产品资源,中国机床总公司承担国家重点建设和技术改造项目的设备总承包任务,这些项目的实施为进口设备提供了重要用户。

中国机床总公司成立十五年来,始终致力于发展与世界各国(地区)的贸易往来与合作,已与80多个国家(地区)的客商建立了稳定的贸易合作关系,贸易伙伴不断增多,贸易额逐年增长,自1991年以来,一直跻身于全国最大500家外贸企业行列,在对外贸易活动中初步形成了“信息—开发—生产—经营—服务”一体化的新格局,公司的务实作风和周到服务在国内外同行中享有良好的信誉。中国机床总公司将一如既往,遵循“用户至上、信誉第一、真诚合作、共同发展”的经营方针,与海内外同行、各界朋友密切合作,为繁荣机床工具产品的国内外市场,竭诚努力,开拓前进。

地址:北京市安内胡同十九号

邮编:100007

电话:(010) 64032224

电传:210088 CNMTC CN

浙江省兰溪纺织机械厂

浙江省兰溪纺织机械厂建于1977年,是中国纺织总会和浙江省轻工业厅定点生产GD系列络、并、捻丝机配套生产企业。工厂现有职工800余人,其中工程技术人员47人,高中级职称有20人。占地面积6万多m²,其中生产建筑面积4.170万m²。现有固定资产原值1369万元,年铸造能力为灰铸铁件2400t,金加工能力150万工时。具有较完善的质量检测和质量保证体系以及一部分精密机械生产设备。产品行销国内28个省市自治区。工厂在淄博、成都、苏州、杭州、湖州、绍兴等地均设有经营部,并有专业售后服务队,是浙江省国营纺织机械企业中唯一荣获国家二级企业称号的纺织机械厂。

主要产品

(1) GD005型络丝机; GD163型倍捻机; GD001-145型络丝机; GD001-150型络丝倒筒两用机;

GD101A-94型并丝机; GD141-100型捻丝机、GD141A-120型捻丝机。

(2) LGD-100型、LGD-120型捻丝机。

(3) K091型捻丝机; K071型并丝机; K051型络丝机。

(4) GD141-100型锭子; LTB-82型、LTB-100型铝筒管、K091型锭子; 闪光测速仪。

名优产品: GD141-100型捻丝机系部优产品; GD141-100型锭杆系省优产品; LTB-100型铝筒管系省优产品。

地址:浙江省兰溪永进路4号

邮编:321100

电话:(05896) 822872 823561

传真:(05896) 825105



北京第一通用机械厂 (北京压缩机厂)

北京第一通用机械厂(北京压缩机厂)是机械部重点骨干企业之一。主要以生产大中型气体压缩机为主, 其有 30 多年的设计及生产经验, 可生产各种气体压缩机 180 余种, 其中包括: 冶金、机械、化工、建筑、轻

纺等行业空气动力用压缩机; 石油化工工艺流程用压缩机; 城建煤气站及石油天然气增压压缩机; 电站用压缩机; 科研用隔膜压缩机及单螺杆压缩机。

主要产品:

| 名称 | 产品型号 | 冷却方式 | 排气量 (m ³ /min) | 进气/排气压力 (MPa) | 电机功率 (kW) |
|---------------|------------------|------|------------------------------|------------------|--------------|
| 动力用空气压缩机 | 2D12-100/8 | 水冷 | 100 | 大气压/0.8 | 550 |
| | 2D12W-60/10 (无油) | 水冷 | 60 | 大气压/1 | 400 |
| | 2D8-60/8 | 水冷 | 60 | 大气压/0.8 | 350 |
| | L5.5-40/8 | 水冷 | 40 | 大气压/0.8 | 250 |
| | L5.5W-30/15 (无油) | 水冷 | 30 | 大气压/1.5 | 250 |
| | L5.5W-40/8 (无油) | 水冷 | 40 | 大气压/0.8 | 250 |
| | L5.5-20/25 | 水冷 | 20 | 大气压/2.5 | 250 |
| | 4L-20/8 | 水冷 | 20 | 大气压/0.8 | 132 |
| | 4LW-20/8 (无油) | 水冷 | 20 | 大气压/0.8 | 130 |
| | 4LW-44/2.5 (无油) | 水冷 | 44 | 大气压/0.25 | 132 |
| | 4LW-30/3 (无油) | 水冷 | 30 | 大气压/0.3 | 132 |
| 3LW-10/8 (无油) | 水冷 | 10 | 大气压/0.8 | 75 | |
| 煤气压缩机 | 2D12-230/1.5 | 水冷 | 230 | 常压/0.15 | 550 |
| | 2D12-150/3 | 水冷 | 150 | 常压/0.3 | 550 |
| | 2D5.5-120/1.5 | 水冷 | 120 | 常压/0.5 | 280 |
| | 2D5.5-80/1.5 | 水冷 | 80 | 常压/0.15 | 260 |
| | 4L-60/1.5 | 水冷 | 60 | 常压/0.15 | 160 |
| | 4L-44/1.5 | 水冷 | 44 | 常压/0.15 | 110 |

地址: 北京昌平沙河镇沙阳路 15 号

邮编: 102206

电话: (010) 69732273 69732284

传真: (010) 69732194

广州起重运输机械实业公司 (广州第二机械制造厂)

广州起重运输机械实业公司(广州第二机械制造厂)隶属于广州市机电局, 是机械工业部定点生产桥式起重机, 液压随车起重机的专业厂家, 持有国家颁发的桥式起重机和一、二、三类压力容器设计、制造许可证。是中国重型机械起重运输机械行业协会的理事单位。现有职工 800 人, 其中工程技术人员 75 人。占地面积 7.5 万 m², 厂房面积 3.5 万 m²。

本公司有 30 多年重型机械、液压工程设计制造的历史, 有一支对各类起重机、液压电梯设计、制造适应能力强的工程技术人员和技工队伍, 拥有配套齐全的铆焊、机加工、热处理、锻压、起重运输等设备和完善的计量、检测手段, 并建立了一套行之有效的产品质量保证、售后服务、运输安装体系。本公司生产的单、双梁桥式起重机均获机电部、广东省、广州市、中国重型机械制造起重运输机械行业优质产品证书, 质量可靠。

主要产品:

0.5~5t LX 型电动单梁悬挂式起重机、1~10t LDA 型电动单梁起重机、5~15t 抓斗电动双梁起重机、5~160t 电动双梁桥式起重机、冶金桥式起重机; 5~20t 电动葫芦双梁桥式起重机; 5~10t 抓斗、电磁盘、吊钩三用桥式起重机; 16~32t 吊钩、电磁盘挂梁二用桥式起重机; 3.2~12.5t 电动葫芦龙门起重机、四柱液压举升机、0.63~50t 液压客货电梯、各类带式输送机 and 各类港口机械。

名优产品: 电动单梁桥式起重机、电动双梁桥式起重机和 15t 重型液压载货电梯 (国内首创)。

地址: 广州市广园中路景泰坑

邮编: 510405

电话: (020) 86662003

(销售供应部电话: (020) 86677002)

传真: (020) 86677099

电挂: 0533



一版有关的编写人员

第7篇 电工基础与工业电子学

主编单位：浙江大学

编写单位：上海业余工业大学

主 编：罗守信

编写人：叶挺秀 周道宏 黄午阳 李龙森 唐冠宗 华美芳

第37篇 电力传动

主编单位：第一机械工业部天水电气传动研究所

主 编：赵卫东

编写人：杨士杰 李洁民 惠炳生 李远程

第55篇 自动控制基础理论

主编单位：哈尔滨工业大学

主 编：王子才

