

# 目 录

<b>第一章 绪论</b> .....	(1)
第一节 机械电子学与机电一体化 .....	(1)
第二节 机电一体化产品发展及应用概况 .....	(1)
第三节 机电一体化设计应用 .....	(3)
<b>第二章 机电一体化系统</b> .....	(5)
第一节 机电一体化系统概述 .....	(5)
第二节 机电一体化设计 .....	(14)
<b>第三章 机电一体化与微型计算机</b> .....	(25)
第一节 微型计算机与微机系统 .....	(25)
第二节 Z80 指令系统 .....	(33)
第三节 汇编语言及程序设计 .....	(37)
第四节 单片微机原理 .....	(39)
第五节 可编程序控制器 (PC) .....	(49)
<b>第四章 微型计算机接口及信息输入/输出设备</b> .....	(60)
第一节 概述 .....	(60)
第二节 I/O 控制方式及程序设计 .....	(60)
第三节 微机 I/O 接口及器件 .....	(63)
第四节 I/O 接口的标准化 .....	(70)
第五节 设备接口电路 .....	(72)
第六节 常用信息输入/输出设备及接口 .....	(76)
<b>第五章 传感器及接口</b> .....	(85)
第一节 传感器的原理及应用 .....	(85)
第二节 传感器与计算机接口 .....	(96)
第三节 常用位移检测装置 .....	(106)
<b>第六章 执行器及控制</b> .....	(115)
第一节 执行器概述 .....	(115)
第二节 步进电机及其驱动 .....	(117)
第三节 直流伺服电机及控制 .....	(127)
第四节 交流伺服电机及控制 .....	(137)
第五节 电磁阀及液、气动元件 .....	(148)
第六节 离合器及驱动 .....	(155)
<b>第七章 机电一体化系统与控制理论</b> .....	(160)
第一节 控制理论概述 .....	(160)

第二节	控制系统的数学模型·····	(162)
第三节	系统分析·····	(175)
第四节	系统设计·····	(195)
第五节	离散系统·····	(200)
<b>第八章</b>	<b>机电一体化常用机械零部件设计·····</b>	<b>(217)</b>
第一节	机电一体化系统中主要机械特性与参数·····	(217)
第二节	常用机械传动参数转化计算·····	(224)
第三节	挠性联轴器·····	(226)
第四节	伺服机构齿轮传动设计·····	(229)
第五节	精密回转分度定位装置·····	(235)
第六节	滚珠丝杠传动设计·····	(239)
<b>第九章</b>	<b>机电一体化技术应用实例·····</b>	<b>(245)</b>
第一节	缝纫机的机电一体化·····	(245)
第二节	电子钟表的机电一体化·····	(253)
第三节	微机控制的卧式制袋充填包装机·····	(258)
第四节	微机控制的车床·····	(261)
第五节	造纸机纸页定量及水分的计算机控制·····	(272)
第六节	微机控制工业机器人·····	(278)
<b>附录</b>	<b>·····</b>	<b>(288)</b>
(一)	常用集成电路的引脚及功能图·····	(288)
(二)	常用微处理器及单片机·····	(306)
(三)	二进制和十六进制表示法·····	(311)
(四)	ASC I 码字符表·····	(313)
(五)	Z80 指令表·····	(313)
(六)	MCS-51 系列单片机指令表·····	(322)
<b>参考文献</b>	<b>·····</b>	<b>(326)</b>

# 第一章 绪 论

## 第一节 机械电子学与机电一体化

第二次世界大战以来,科学技术的发展经历了数次革命,1975~1985年是以微处理机的生产和广泛使用为标志,而最近10年是以软件开发和大规模产业化为标志。科学技术发展的一个鲜明特征是日益求助于多学科融合解决各种问题,这就是当代科学技术综合化的发展趋势。作为传统工业之一的机械工业,在这场新技术革命的冲击下,其产品结构也发生了质的变化。

随着微电子技术的发展,传统的机械技术正与微电子技术、信息技术相结合,出现了大量技术密集型新产品。这就导致了将机械技术与电子技术通过信息融为一体的机电一体化技术的产生,出现了机械电子学(mechatronics)。“mechatronics”这个词最早是在日本开始使用的英语复合词。它由机械学(mechanics)和电子学(electronics)两词复合而成。从工程学角度来看,机电一体化技术是微电子学、机械学、控制工程、计算技术等多学科综合发展的产物,是利用多学科方法对机械产品与制造系统进行设计的一种集成技术。以此为手段开发的机电一体化产品或系统,使机械工业的技术结构、产品功能和构成、生产方式和管理体系都发生巨大变化。广义地讲,机电一体化代表着先进的集成制造技术和设计、工艺水平。较狭义地从设计方法学的角度看,机电一体化设计也常称为带微处理器的机械设计。

目前,机电一体化的原理和应用正在向深度和广度发展。作为高新技术的一部分,它对新产品的开发、产业的技术改造、促进技术经济的发展正在起着越来越大的作用。

## 第二节 机电一体化产品发展及应用概况

使产品机电一体化,首先是为了扩大功能、实现高性能或实现自动化、无人化。扩大功能的例子如图1-1所示。图a)是实现两固定位置A、P之间的工件搬运,用抓、放动作和简单的重复性的程序控制就可完成。这时必须不断地把新的工件放在A位置上。但实际上经常如图b)所示,工件是堆放的。这样在取工件过程中,A位置依次变为B、C...位置,所以用原来的简单程序控制就不行了,这时就可利用较复杂的电子控制。

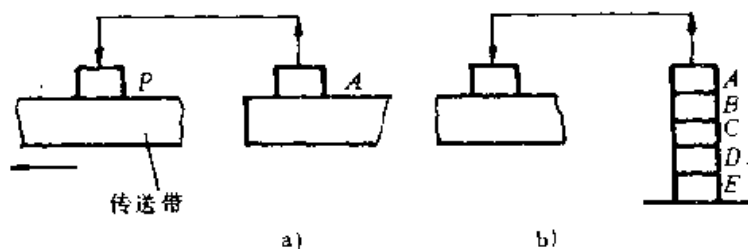


图1-1 工件搬运方式

对机械结构来说,图1-1a)情况的动作包括有定距离的上下运动和180°的反复旋转动作(这里不考虑机械手的开闭动

作)。一种简单的设计方案是利用直动气缸和摆动气缸的组合。但变成图 b) 情况后, 由于要依次改变直动气缸行程, 故必须能使直动气缸在一系列中间位置停止。这种气缸虽已开发, 但当停止精度要求高时则有困难。为此可考虑用丝杠送进或带关节的机械手(图 1-2)。当采用感应电机驱动丝杠送进时, 就要使用离合器和制动器, 方法虽可行, 但定位精度差, 小型化也有困难。较理想的方法是采用步进电机等控制电机, 控制方法就变成把各停止位置的坐标值和停止顺序编入控制器的程序, 并按程序动作。作为机电一体化典型产品的工业机器人, 可以认为就是经过这样的设想而产生的。但是为了能展开这种设想, 变成完美的产品, 只有在机械技术与微电子技术充分结合, 即机电一体化技术发展后才能实现。

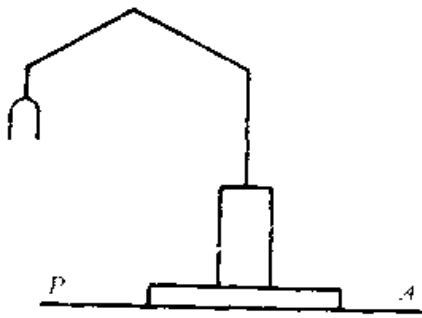


图 1-2 机器人机构设想

作为提高产品性能的一个典型例子就是钟表的机电一体化。传统的机械钟表结构与电子元器件、大规模集成电路相结合, 产生了石英振荡式电子钟表, 从而使钟表的计时精度和走时持续时间大幅度提高, 更利于实现小型化和大幅度降低成本。

1952 年美国麻省理工学院研制成功的第一台数控铣床是机械与电子技术结合的最早产品。自 1971 年发明了微处理机以后, 微电子技术产品不断涌现并迅速实用化, 至今已开发了一大批机电一体化技术产品。

如各类数控机床、柔性制造系统、机器人、现代化电讯设备、办公室机械、智能仪表、电子钟表、电子玩具等。机电一体化的应用和影响几乎已遍及传统机械制造业的各个领域。

机电一体化产品的主要优点有: ①具有记忆、运算、控制、信息处理等功能, 从而达到产品的高性能、多功能化和智能化。②结构简化, 使产品向着轻、薄、细、巧的方向迅速发展。易采用标准化、模块化的方法进行设计、制造。③可以根据负荷及运行情况进行调整与控制, 具有节能的特点。④可具有自动监视、诊断及某些智能, 使安全可靠性和大幅度提高。

总之, 通过机电结合、软件硬件结合及互补, 能获得传统机械产品难以实现的高精度、高性能。机电一体化技术也使机械工业自动化取得突破性的成效, 如多品种、中小批量的生产能够实现自动化, 这在过去是难以实现的。大批大量生产也增加了柔性, 产品质量得到保证, 精度得到提高。

从机电结合的程度来看, 机电一体化产品大致可分为如下几类: ①典型的机电一体化产品。这类产品机与电有机地融为一体, 具有较完整的结构。如各类数控机床、工业机器人、柔性生产系统、彩色复印机、自动绘图机、电子自动售货机、磁盘存储器等。这些产品属于机电一体化的高级形式。它们单靠机械或电子是无法或很难实现的, 机械与电子一旦分离, 整机即无法运行。②机械产品中的一部分控制功能和机构用电子装置代替。这类产品如打印机、电脑缝纫机、机电一体化照相机、带微机控制或数字显示的各种机械设备等。③以微电子装置代替原设备的信息处理机构。这类产品如指针式石英电子表、全电子式电话交换机、带微处理器的各种仪表、电机调速装置等。

### 第三节 机电一体化设计应用

在机电一体化产品设计中，成为设计主体的大多是机械系统设计技术人员。系统各组成部分所使用的零部件，因为多由专业工厂制造，所以设计人员较以往更多使用各种标准件、通用件和外购件。初看起来设计似乎简单了，但实际上决非如此，而是要求设计人员更充分具备掌握各种元器件、零部件商品的特性，并加以评价、选定和正确组成装置的能力。

图 1-3 给出一个简单的机电一体化设计应用实例。图示为常用的  $xy$  工作台。由于  $x$  工作台与  $y$  工作台设计方法相同，故省去  $y$  工作台。

该工作台主要组成部分是平台、滚珠丝杠、齿轮、步进电机及控制器，其中滚珠丝杠和步进电机是外购件。步进电机的励磁方式和驱动方式有多种，方法不同其动特性也不同。各种方式的深入研究虽由电气专门技术人员承担，但机械系统的技术人员也必须了解各种方式的特性。显然，设计时机电之间存在不可分割的关系，需要两者的密切配合。

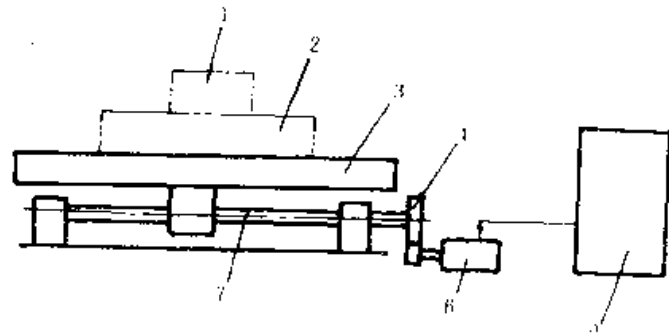


图 1-3  $xy$  工作台设计实例

1—工件 2— $y$  工作台 3— $x$  工作台 4 传动齿轮  
5—控制器 6—驱动电机（步进电机） 7—滚珠丝杠

设计时首先要做的工作是明确设计要求。设计要求通常有机械的、电气的及综合性的。因此第一步先考虑总体性能参数方面的问题。对  $xy$  工作台的要求多为重复准确定位。这时设计要求的主要参数指标为定位精度和重复时间。由于重复动作为间歇运动，因此电机要频繁起停，加速度特性就成为必须考虑的重要问题，同时还应考虑振动和噪声。

设计的下一步是机械总体结构的初步确定及工作台和平台上夹具等的设计，这些与一般机械设计差别不大。

然后是滚珠丝杠和电机选择。滚珠丝杠的选择必须考虑其载荷和由转速变化引起的振动。按载荷可计算驱动滚珠丝杠所需的转矩，但必须要考虑到加速（或减速）转矩。加减速转矩大小随加减速时间而变化。加减速时间除可在设计要求中规定外，一般是根据电机特性来确定的。因此，必须求出包括工作台、丝杠、传动齿轮等在内的系统总惯量，并利用电机的各种特性曲线进行计算和校核。电机的选择，经常是根据使用经验，一开始就确定电机种类和控制方式。控制用电机除步进电机外，还有直流伺服电机、交流伺服电机、直线电机等。

在选择步进电机时，必须考虑的电机特性主要有：①矩角特性。指步进电机在励磁状态下，转角与转矩的关系。对静止状态下的角度误差要求较高时，必须弄清这种关系，同时还要考虑负载摩擦力矩。②矩频特性。指电机转矩与响应频率的关系，如图 1-4 所示。

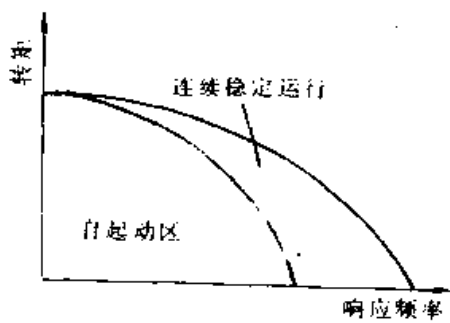


图 1-4 步进电机矩频特性

它包括起动矩频特性与连续运行矩频特性。前者形成图中所示自启动区；后者形成图中所示连续稳定运行区。在自启动区内，可以瞬时起动、停止或反转。但在连续稳定运行区内使用时，开始要在自启动区内起动，然后逐渐增加速度，使电机最后保持在连续稳定运行区。③惯频特性。由于步进电机的旋转是步进式的，因此电机特性随转动惯量大小的变化而变化。转动惯量大时起动频率小，自启动区变窄，在连续稳定运行区使用时，加、减速时间变长。

另外，还必须预先考虑电机抗振性、抗噪声方法，可采用诸如电子阻尼器、惯性阻尼器、摩擦阻尼器、磁阻尼器等。也应注意齿轮、丝杠的传动间隙与安装问题。

当然，该设计还应包括控制器的选择（设计）及控制软件的设计。

由上可见，机电一体化产品的设计及应用要求机械系统设计人员必须具备机械学、电子学、计算机、控制理论等多方面知识，既要熟悉硬件、也要熟悉软件，要从系统工程和系统设计的角度分析和考虑问题。同样，电气系统设计人员也不能只停留于电路设计上，也需要有机械学的知识，也要向系统设计技术人员的方向发展。

本书从系统的观点出发，分别介绍机电一体化系统各组成部分及接口，与环境的信息交换等，力求突出与传统机械设计内容和方法上的不同之处，从应用的角度将当前机电一体化技术中常用的元器件、机械结构等有机地结合在一起系统讲述，并给出一些机电一体化技术在不同领域的应用实例，其目的是使读者对机电一体化技术有一个全面、系统的了解，并获得初步的应用知识和设计能力。

## 第二章 机电一体化系统

对于一个机电一体的产品或设备，应将它作为一个系统来研究。一体化的思想，即意味着要以系统的、整体的思想考虑许多综合性技术问题。例如一台多关节工业机器人，就存在着各运动部件之间的力耦合；各运动轴伺服系统的干扰和相互影响；控制和执行机构之间响应速度匹配，机器人与外围设备的连接以及与主机、辅机同步协调运动和机器人防护安全连锁等问题。这些问题即构成了工业机器人的系统技术问题。显然，应当用系统工程和系统设计的概念来解决机电一体化系统的工程问题和设计应用问题。

### 第一节 机电一体化系统概述

#### 一、系统的概念

系统最简单的定义是指一些部件有机的集合，用以实现统一的目的。系统工程是为使系统达到最佳功能，而对系统的组成部件、组织构造、信息传递、控制机构等进行分析、设计、优化的技术。

在系统工程中，系统被看作是由各种不同结构和功能的分系统组成的一个紧密联系的整体。而且，任何系统通常都有若干个目的，对每个系统，协调这些目的方法也各不相同。系统工程的方法就是根据这些目的，探讨使系统整体的功能达到最优化，使构成的系统发挥出最大的效能。

对于任一系统，总存在一个外部环境。一般把直接对象（机械、装置或系统本身）称为内部系统，把环境称为外部系统。外部系统对内部系统的作用，称为输入，包括对内部系统的各种要求与约束，如电压、电流、力、位移、功能、尺寸、经费等。而内部系统对外部系统的作用，称为输出，如电压、电流、位移、速度、各种效应等。输入、输出可能是单个的，也可能是多个的。

无论一个怎样复杂的系统，总是可以将其分解为若干分系统，以便于分析综合。且这种分解可根据需要在若干个层次上进行。如按大系统→系统→分系统→单元部件→元件这样逐级分解。

系统大体可有如下一些分类：

(1) 线性系统和非线性系统 如果系统的数学模型方程是线性的，就称为线性系统；反之，用非线性方程表示的系统，称为非线性系统。

(2) 常参量（定常）系统和变参量（时变）系统 系统元件参量不随时间变化的称定常系统；若参量随时间变化则是时变系统。

(3) 静态系统和动态系统 一般说来，系统在任何时刻的输出量取决于输入量的全部过去值。但在一些特殊系统中，在任一时刻 $t$ 的输出量仅仅依赖于时刻 $t$ 的输入量，而与输入量的过去值无关，则称该系统为静态系统或无记忆系统；反之，若结果变量的数

值还依赖于原因变量过去的数值，则称为动态系统或有记忆系统。

(4) 连续时间系统和离散时间系统 若系统中的输入、输出变量都是用时间函数描述的，则称为连续时间系统；若输入、输出变量都是在一些离散的瞬间上确定的，则称为离散时间系统。在离散系统中，处理的是时间序列而不是时间函数。

## 二、系统的输入、输出

### (一) 系统的输入

系统输入包括有控制变量和环境变量两种，大致可分为信号输入和功率输入。信号输入主要与信息控制的特性有关，要考虑的是它的波形和输入的时间。而功率输入则主要与它的能量或物质的特性有关，要考虑的是能量的大小和效率。

系统的环境变量输入是不依赖于设计人员的，而是由外部系统或环境决定的。设计时主要关心对系统产生干扰的外部条件，如温度、压力、湿度、振动和冲击等，系统的其他输入则可由设计人员选择，并可将它们作为系统内部信号使用。

信号输入和功率输入的一般物理量大致包括有：

外部信号输入和外部干扰信号；

电网、能源和过程的干扰；

系统内部的通信和信息的信号输入；

中间信号变量与过程变量；

控制信号输入；

控制的功率源输入；

控制的干扰输入等。

下面给出有关输入特性的常用术语。

#### 1. 关于模拟信号输入

(1) 增益或灵敏度 指某个量与表示该量的信号大小之比或倍数。如伏/度、相角/米。

(2) 精度 指信号的指示值与真值之差。

(3) 不作用范围 指有输入而无响应的范围。

(4) 饱和 指输出对输入之比的界限值，达到此界限值时，输入即使增大，输出也不产生相应的变化。

(5) 线性 指输出对输入的关系呈正比的程度。

(6) 最大和最小振幅 指所能得到的最大和最小的信号幅度。

#### 2. 关于数字信号输入

(1) 代码 指用等效的符号表示的接收信号的组合。如二进制代码、ASCII 码、BCD 码、字母表、十进制数等。

(2) 重复频率或速度 指传送信号的媒介或载波的最高频率或速度。如 100kHz 或每秒 200 位。

(3) 信号当量 指用二进制码的“1”和“0”表示的状态。如“1”=5V，“0”=0V。

#### 3. 关于功率输入



(1) 一次功率的性质 指系统的一次动力源的能量形态。如普通电网、柴油发电机、化学电池等的性质。

(2) 功率大小或功率电平 指平均功率、最大功率和短时间内有限功率的大小。如功率为电功率，则具有电压和电流的性质（直流或交流）。

(3) 动态响应 指当负载急剧变化时，功率输入变化的大小和持续时间所表示的一种特性。也就是当负载阶跃变化时的过渡响应。也可用频率响应或带宽表示。

(4) 可靠性和寿命 可用可靠度、平均故障时间等表示。

#### 4. 关于外部干扰和噪声

(1) 机械摩擦 指静摩擦或作为速度函数的粘性摩擦和库仑摩擦。

(2) 非平衡力或力矩 指非对称的重量分布、偏离重心方向的作用力、惯性力等。

(3) 功率源的变化 能对相邻设备产生影响的功率或信号的电压、速度、压力、流量等的变化。

(4) 信号信噪比 指信号大小对噪音大小的比值。它是描述相对于某些信号最大值（或平均值）存在多大不必要信息（即噪声）的一个重要概念。所谓噪声是指在电路或传输系统中本身产生的或从外部混入的、不需要的或有害的分量。

### (二) 系统的输出

系统的输出按功能可包括有：信号与信息；功率、能量和物质；干扰和噪声。有关概念叙述如下。

#### 1. 理想的输出

它是用来说明所需要的输出的特性、规格和性能。理想输出可有电压、电流、速度、位置、温度、压力、带宽等。

#### 2. 误差

误差指理想输出与实际输出之差。

#### 3. 信号输出

输出信号的形式有模拟式、数字式或混合式，有用绝对值表示的或用增量值表示的。有关输出信号特性的术语与前述输入信号的一样。

#### 4. 功率或动力输出

此种输出中应明确功率的表示方法及性质。如使用电压时用直流电、交流电和功率电平。

#### 5. 外部干扰和噪声

有关输出的外部干扰和噪声的术语与前述输入信号的一样。

## 三、系统设计

### (一) 系统设计特点

对一复杂系统（如机电一体化系统）的设计，必须考虑到系统工程学和系统设计的方法。

系统设计的特点首先是具有综合性。它把内部系统和外部系统综合起来考虑。首先确定内部系统的要求，称为外部设计；然后再进行内部系统的设计，称为内部设计。这

种综合的方法就是从各种角度探讨问题的实质，研究将要设计的机械或装置在系统综合中所占的位置和受干扰的程度，明确以何种目的建造系统和应该满足什么样的要求和规格，即评价指标。

在系统设计中，分解的概念极其重要。设计一个复杂系统，首先应把系统分解成许多分系统，建立各分系统的数学模型，然后综合成为宏观模型，最后再进行最优化设计。如何分解才好呢？首先要考虑的是便于后面的综合工作。分解处应是选择分系统之间关联尽可能少的地方，以将各种结合关系较为密切的单元分为若干组。分解的结果可用线图（如信号流程图等）表达出来，并可借助各种理论和方法（如网络理论）建立系统方程、数学模型。

实现系统设计必须掌握系统分析的方法。也就是把作为对象系统的结构、功能、可靠性、价值等建立数学模型，求出各参数影响与要求，对只表示分系统之间的相互关系，不涉及分系统内部的模型，称之为宏（观）模型；而将各分系统先进行精确的数学公式化，然后再将它们集中起来表示整体的特性，称之为微（观）模型。系统线图表示即是宏模型；应用基本物理定律建立的各种数学模型则是微模型。

系统设计的又一重要特征是进行系统的均衡设计。系统是元件的有机结合。高精元件的组合，可以构成好的系统。但组合不好，也可能构成性能低劣的系统。其例子在机械设计与生产中累见不鲜。这就是由于设计者只注重元件设计，而缺少综合化、系统化的概念。均衡设计就是要恰当地选择元件，以构成性能优异的系统。即使是性能一般的元件，但只要从系统出发组合得恰当，也可能构成良好的系统。当然，当系统基本元件数量很大时，综合时其组合的方法几乎是无限多的，从中选出最佳组合是十分困难的。因此产生了许多系统的优化方法，以获得相对最佳的设计结果。

处理好系统中各分系统、单元（部件）之间的连接关系，即处理好接口问题，也是系统设计中要考虑的重要方面。有关接口的概念，将在第五章详述。

## （二）系统设计步骤

进行系统设计的大致步骤如图 2-1 所示。

有关内容说明如下。

### 1. 目的分析

首先对系统的目的或任务进行定量分析，即将系统的目的、任务直接地或间接地变

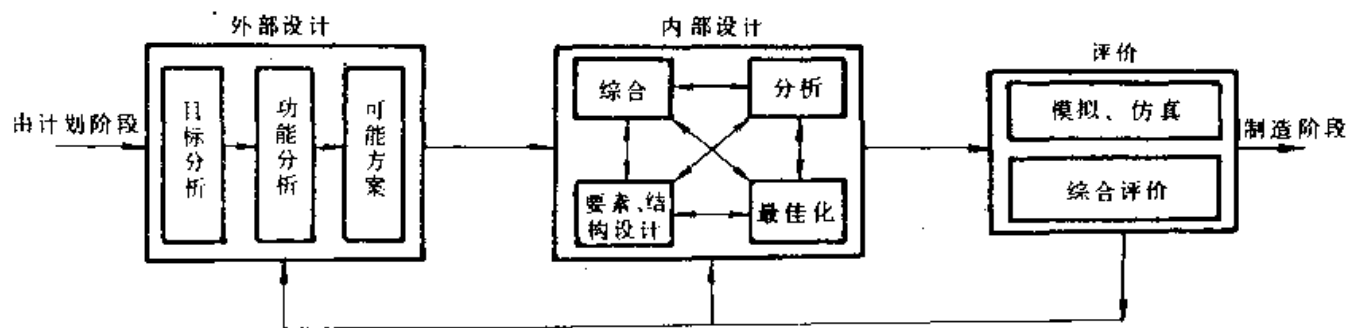


图 2-1 系统设计的步骤

换成定量关系，再对环境作出定量，即将环境（外界干扰等）和约束条件变换成定量关系。

## 2. 系统分析

(1) 系统框图 将系统进行分解以后，考虑到各部分之间的输入、输出联系，即可利用框图方法来表达系统。图 2-2 给出了一般的系统框图表示。当系统分成若干分系统或部件时，各分系统和部件也可用类似的框图表示。

例如一个机电一体化系统可具有主功能、控制功能、动力功能、结构功能等。它们分别由计算机、传感器、动力源、执行机构等部件来实现。

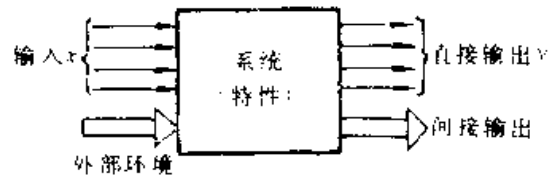


图 2-2 系统框图表示

现。图 2-3 即表示其功能框图。

一个复杂系统的结构框图可用图 2-4 所示的分级形式表示。

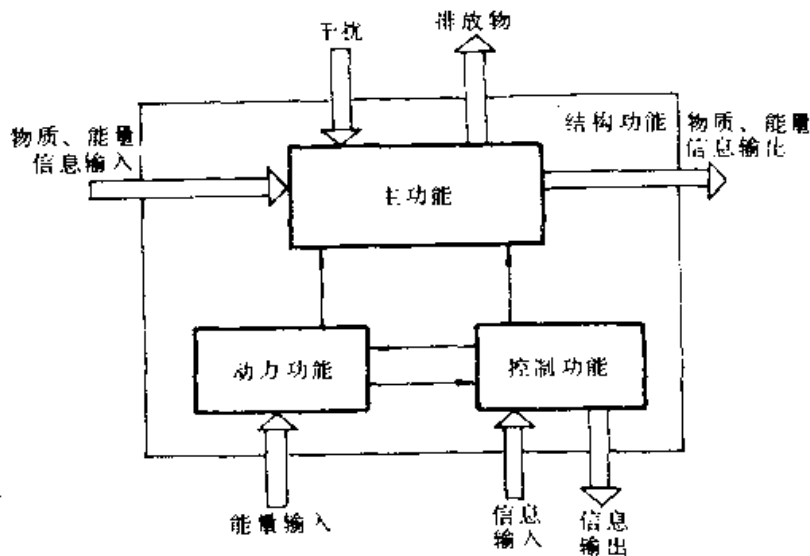


图 2-3 机电一体化系统功能框图

(2) 系统数学模型 设系统的目的或输出为  $y$ ，其输入为  $x_1, x_2, \dots, x_m$ 。由于分系统的目的是用来实现整个系统的任务，故一些分系统的输出可看作是另一些分系统的输入。如果将目的分析得到的环境和约束条件设为  $a_1, a_2, \dots, a_n$ ，则它们是系统的间接输入量。此外，在系统

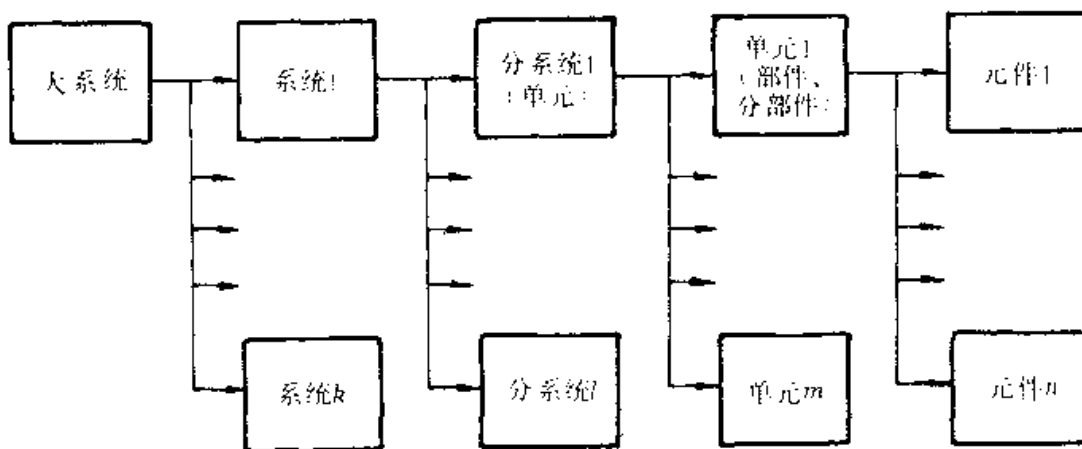


图 2-4 系统的结构框图

的动态性能或特性中,还必须说明系统对于时间  $t$  的状态和响应。于是系统的输出可表示为

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_m, a_1, a_2, \dots, a_n, t)$$

为描述系统的定量关系,必须知道以下几点: ①输出  $y$  的性质。②输入  $x$  和  $a$  的性质。③函数  $f$  的形式。④描述输出、输入和函数  $f$  随时间变化的关系。这样即可获得系统动态特性的数学表达式,即数学模型。数学模型的建立,在对系统无经验的情况下,一般应从元件这一级逐渐积累起来,然后再将各元件的数学模型联系起来构成系统的数学模型。

作为数学模型的例子,如一个在力  $f$  作用下的质量  $M$  [图 2-5a]。用牛顿定律可给出这个系统的充分精确的数学模型:  $f = M \frac{d^2x}{dt^2}$ 。若再考虑外部粘性摩擦阻尼(阻尼系数  $B$ ), 则有:  $f = M \frac{d^2x}{dt^2} + B \frac{dx}{dt}$ 。它反映了输出位移  $x(t)$  与输入量  $f(t)$  的关系。

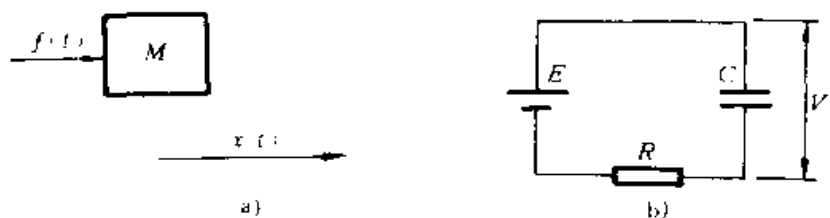


图 2-5 数学模型实例

又如一个用电源充电的  $RC$  电路 [图 2-5b]。输出电压  $V_c$  与输入电源电动势  $E$  可有关系式  $V_c = E(1 - e^{-\frac{t}{RC}})$ , 此即是该电路数学模型。

### 3. 系统最佳化

系统优化设计是以数学优化理论为基础,在满足给定约束条件的前提下,合理地选择设计变量,以获得一定意义上的最佳设计。

系统的数学模型通常很复杂。按已定量的系统目的和系统输出  $y$ ,可以作出系统的目标函数。然后选择优化计算方法、编制计算机程序、优选设计方案、对照设计要求进行评价。反复这样的过程,直至找到最优方案。常用的优化计算方法有线性规划、非线性规划、几何规划等。

### 4. 系统仿真

根据分析结果,并经各方案分析对比,最后作出系统数学模型。为确定其完善与否,还应进行相当于系统运行的试验。对小型系统,通过实物的制作、实验、测试即可评价系统;对于大型系统,先作出实物再进行运行实验是不现实的。这时可以利用仿真方法。即根据目标要求以一定的精度来模拟对象的某一部分和某个动作以及整个系统。这需要利用电子计算机把系统的数学模型程序输入,并输入系统运用的许多随时间变化的输入数据、环境和约束条件的输入数据、有关不确定因素的数据等的仿真程序,结果就可获

得随时间变化的输出数据或曲线。将它与系统的目的相比较，或与预先规定的系统评价标准或评价函数相比较，就可以实现不用实物系统而进行系统的评价。

经过对模型的简化和改进而获得的最后方案确定后，就可以将系统实物化，把各种功能置换成实际物理系统和部件，从而提出设计任务书和进行设计制作。

有关优化设计和系统仿真的详细内容和方法可参见有关资料。

#### 四、机电一体化系统的组成与特点

##### 1. 机电一体化系统的组成

可以认为机电一体化技术是通过信息技术将机械技术与电子技术融为一体，构成最佳系统。从广义来讲，即是在机械技术中从各方面引进“信息”，使机械和信息相结合，而不是将机械技术与电子技术简单地叠加。

按机电一体化系统的功能要求，其结构组成（分系统）基本上分为五大部分，即动力源、计算机、检测器（传感器）、执行器和机械装置。这里计算机是广义的，包括微处理器、微机系统、PC（可编程序控制器）、专用控制器、专用控制芯片等。这五部分构成机电一体化系统的内部系统，其关系如图 2-6 所示。图中的连线即表示各部分之间的接口。如果再考虑到外部系统，则还包括有人机信息交换的接口设备及外部环境的干扰。

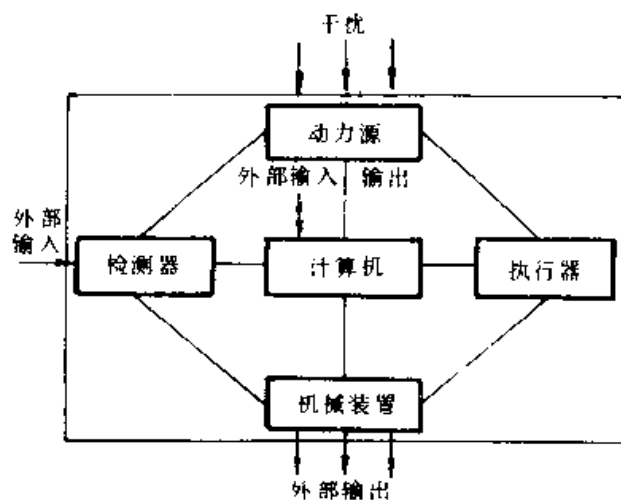


图 2-6 机电一体化系统

从功能上可以这样来理解，即在一般情况下，一个机电一体化系统输入物质、能源、信息，对它们进行若干加工后再输出要求的物质、能源、信息。其中信息处理能力的获得即依赖于计算机，而传统的机械技术，主要是在以物质和能源为对象的系统中发挥作用。如机床是一种物质加工系统，发动机则是一种能源转换系统。机电一体化技术则将信息结合于内部，如机器人事先存入程序（信息输入），工作中根据外来光、声信息判断而进行控制动作（输出）。

另外，一个机电一体化系统也可由上述五部分中的一部分组成。如计算机及显示、传感器、机械装置可组成一个手动数显系统；由动力源、计算机、执行电机及机械装置可组成一个开环数控系统。

从结构上看，机电一体化系统各组成部分也在出现复合一体化的情况。如复合的多功能传感器、执行器和检测器装成一体的带编码器的伺服电机、将执行器及其控制机装成一体的伺服执行装置等。

总之，机械和电子无论在结构型式上，还是在内容和功能上已更紧密地融合在一起。

##### 2. 机电一体化系统中的信息处理

具有很强的信息加工、处理能力，是机电一体化系统的一大特点。下面综合介绍机

电一体化系统中信息处理过程。各部分详细内容则在有关章节介绍。

图 2-7 示出信息处理的流程图。如图所示，外界（人）将有关系统的各种控制信息、要求、算法等，通常以程序的形式经各种输入设备（如光电阅读机、键盘、编程器等）输入计算机，使系统从软件上具备了信息处理能力。系统开始工作时，从检测器获得的信息通过输入接口转换成数字数据输入计算机。计算机对这些输入信息进行特性补偿处理和运算处理后，便得到“已处理信息”。通过格式处理便可将其变成显示、记录信息。然后送至信息输出设备接口。如果系统要用作控制，则根据“已处理信息”再产生控制信息后送至执行控制元件的输出接口。计算机信息的 4 个主要处理过程是：

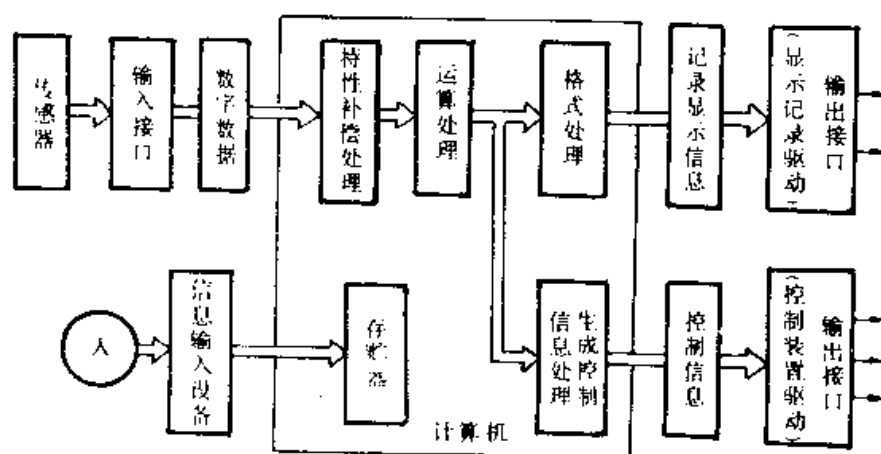


图 2-7 信息处理流程

(1) 特性补偿处理 由于传感器的输入输出特性是各种各样的，再加上环境干扰，所获得的信息通常要经过硬件或软件的方法来进行恰当的处理（如线性化），以获得对计算机可用的形式。

(2) 运算处理 对外界输入的信息及检测器送出的信息通常要进行某些运算，从而得到新的有用信息。如对流速进行积分运算得到总流量；对速度信息求差分得到加速度；通过求频度分布、均值及分散度等可得到有用的统计信息等。有时采用各种频谱分析、时间序列的相关分析及多元相关分析等高级处理，就可以进行一些单纯用传感器方法所不能实现的信息检测。

(3) 格式处理 根据使用的目的需将要记录、显示的信息进行加工处理，以便适应所采用的输出设备的要求。如使用行式打印机时，将数值信息转换成实数形式或定点数形式，打印时进行对位与清零，加标题栏和注释等，使打印出的信息格式便于阅读。再如送七段发光管显示或 CRT 显示的信息，也必须进行相应的格式处理。

(4) 控制信息生成处理 机电一体化系统要实现物质、能量和信息转换处理，必须要完成许多控制动作。控制信息生成处理就是以特性补偿处理和运算处理的数值为依据，按预先确定的算法产生控制所需要的信息。根据系统用途的不同，控制信息生成方法可以是恒值控制、程序控制、伺服控制、最佳控制等各种控制方法。

## 五、接 口

### 1. 接口的概念

对于一个系统，各分系统相互之间，各部件相互之间，必须有一定的可靠的结合关系。这些关系中，有静态结合关系、动态结合关系和相互干扰关系，统称为接口。

机电一体化系统的接口就是一种进行物质、能量和信息交换的互相连接的“边界区”。它具有存贮（缓冲暂存）、转换和服务功能。一般接口由两部分组成：物质、能量、信息的输入/输出部分和转换调整部分。按其转换、调整的功能情况可将接口划分为如下4种：

(1) 零接口 不进行任何转换调整，照原样将输入连接到输出的接口称为零接口，如传导管、电缆、接线柱、刚性联轴器等。

(2) 被动接口 只用接受部分进行转换调整的接口称为被动接口，如减速器、变压器、可变电阻器等。

(3) 能动接口 包含有能动部分（如放大、光隔离、信息处理转换等）的接口称为能动接口，如电磁离合器、放大器、光耦合器、数/模、模/数转换器等。

(4) 智能接口 包含有微处理器、可编程控制器或能适应情况改变接口条件的可编程接口称智能接口。如各种可编程序接口芯片 CTC、PIO、8155 等。此种接口还可具有各种自动选择、自动调整、自诊断等功能。

### 2. 接口条件

接口应满足以下条件，否则不能连接。

逻辑上满足软件的约束限制条件，即接口硬件与软件应协调。

机械上满足输入/输出结合部分的几何形状、尺寸、配合一致。

电气上满足电源、电压等级和频率一致，阻抗匹配恰当。

环境上要对环境温度、湿度、磁场、振动、尘埃等有防护能力，适应周围环境。

在机电一体化技术中，接口是一个重要环节，具体内容将在各有关章节讲述。这里一般地介绍几种接口形态：电气接口、机械接口、电气-机械接口。

### 3. 电气接口

电气接口是指具有不同功能的设备（部分）之间的相互连接的规格、相互连接电路的形式、品质、功能和利用于这些电路的信号形式等。也称为接口电路。接口电路中通常要考虑到阻抗匹配、电平转换、速度匹配等问题。

### 4. 机械接口

机械接口指具有不同功能的机械（部件）之间相互连接的规格（包括形状、尺寸、精度等），相互结合的机械元件的形式、品质、功能和用这些机械元件传递的力（力矩）、速度（转速）、负载或机械阻抗和机械的干扰条件。

### 5. 电气-机械接口

电气-机械接口可以认为是在接口中有将电量变换为机械量的电气-机械变换器，或反之，有将机械量变换为电量的机械-电气变换器。常见的这些变换器如滑动电阻、测速发电机、码盘、电磁铁、离合器等。在电气-机械接口中，有能量转换和传输效率的问题。

阻抗匹配问题，信息的传输和变换问题等。

一些具体的变换器将在后面有关传感器和执行器的章节中介绍。

## 第二节 机电一体化设计

机电一体化技术涉及面广，综合性强，它包括机械技术、传感技术、驱动技术、信息处理技术、接口技术等。本节主要从总体设计的角度，对机电一体化产品的设计与传统机械设计相比所具有的一些设计特点与方法进行介绍。

### 一、机电一体化设计的特点

#### (一) 机电一体化方案设计方面

##### 1. “柔性”自动化方案的应用

从设计方案看，以“柔性”自动化方案取代“刚性”自动化方案的水平，随着机电一体化技术的发展在不断提高。

如设计一个直线运动的三点定位装置，要求作直线往复运动的滑台在起点、终点及一中间位置能进行停止控制，可作出多种设计方案。图 2-8 列举了 4 种。方案 a) 采用凸轮驱动，因为有复杂的机械传动链，精度低，运动要求改变时难以调节。这是一种典型的“刚性”自动化方案。方案 b) 采用气缸（油缸）驱动，位置控制用挡铁。它的力传递与控制分开了。若利用 PC 还可进行不太复杂的顺序控制，是初级的机电一体化方案。方案 c) 用普通电机直接驱动，行程开关定位。这也是一种半“柔性”方案，精度较低。方

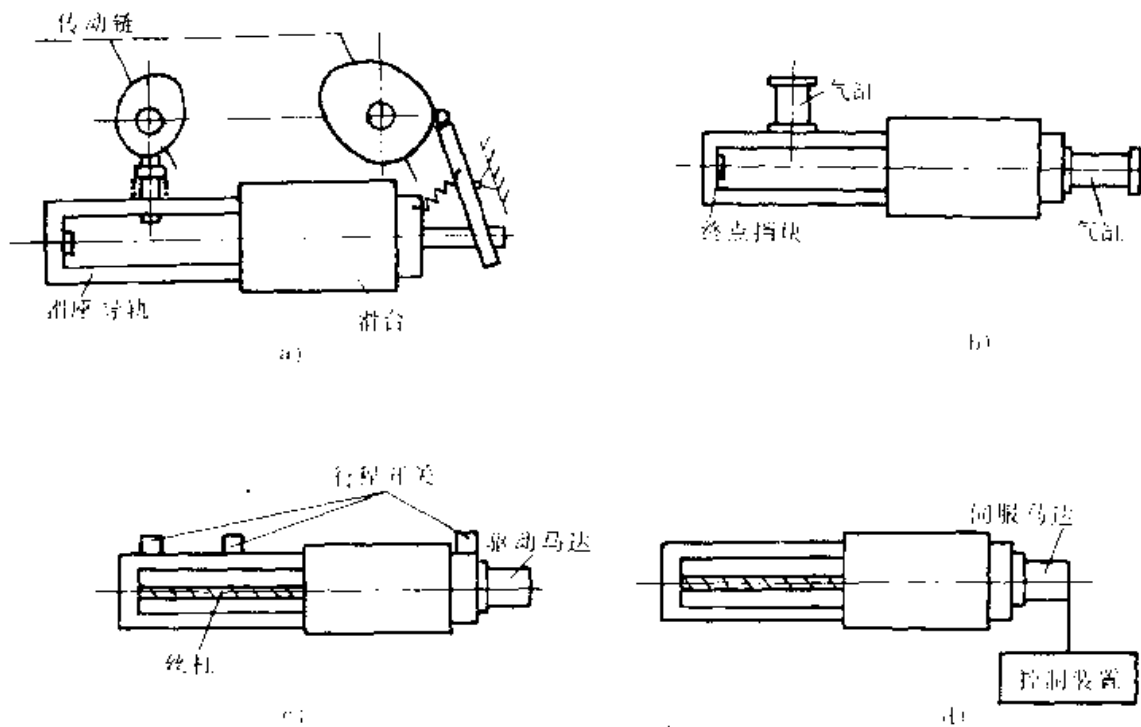


图 2-8 自动化方案的考虑



案 d) 采用伺服电机驱动。其力的传递与控制分开, 机械装置简单, 利用电子控制装置可以进行复杂的运动控制以满足不同的运动及定位要求, 速度高、定位精度高, 是一种典型的机电一体化方案, 实现了“柔性”自动化。

## 2. 高性能电子化元器件与微电子器件的采用

机电一体化产品中的一些元、部件应尽量采用电子(电气)化元件或结构, 利于简化机械结构, 方便控制, 获得高性能。除采用作为核心的微处理器和各种集成电路外, 还采用许多高性能元器件。如用高性能伺服电机代替普通电机, 无触点开关代替行程挡铁, 电子固态继电器代替普通继电器, 快速电磁离合器代替纯机械式离合器以及应用各种电传感器等。

一个典型的例子是石英电子表, 它用体积小、寿命长、输出电压稳定的银电池和锂电池代替了传统的机械发条作为动力源, 并用石英振荡器代替机械摆轮, 使计时精度可达日差 $\pm 0.2\sim 0.02s$ , 走时持续时间可达数年, 这是机械表难以达到的。

## 3. 恰当地进行机电结合及硬件软件结合

(1) 硬件软件的考虑 在机电一体化系统中, 哪些功能用硬件实现, 哪些功能用软件(程序)实现是进行方案设计时应考虑的一个重要问题。这对系统的性能、经济成本有显著影响。值得注意的是, 一个机电一体化产品的各种技术要求, 在很大程度上体现在软件之中。

以机床微机数控系统为例。要实现数控机床的轮廓轨迹控制, 其必不可少的一个重要功能是插补功能, 用以实现对各坐标的进给脉冲分配, 其实时性很强。实现插补功能就有硬件插补、软件插补、软硬件结合插补等多种方案。采用软件插补方案能更放手地进行数学处理, 实现各种插补运算方案, 特别是一些需要较多运算的方法, 如多种二次曲线的插补、高次曲线的插补运算。同时软件插补可经过较多的运算步骤而实现较高的插补精度。若用硬件实现, 费用必然增加。但由于微机受字长与速度的限制, 当进给速度要求较高时, 完全用软件插补则不能满足要求。如当进给速度为 $6m/min$ , 脉冲当量为 $0.01mm$ 时, 最高脉冲频率为 $10000/s$ 。进行一次插补运算时间只有 $100\mu s$ , 这对完成插补运算是远远不够的。为解决快速问题, 可采用硬件插补。即配合普通微机可设计一块或几块专用大规模集成电路芯片, 组成高速运算线路或高速脉冲分配线路(专用插补器)。

还有一种软硬件结合解决插补精度与速度的办法。即将插补分为粗插补与细插补。计算机软件每次插补计算一个线段, 即粗插补, 则可减轻软件插补的负担。接口硬件电路再根据粗插补的结果, 将小线段分成单个脉冲输出, 即为细插补, 以保证插补精度。此法会增加硬件成本。考虑到满足性能要求, 在软件研制成本和硬件成本之间进行合理的安排是必要的。

(2) 机电功能互补的考虑 随着机械精度要求的提高, 机械制造的成本显著增加, 仅仅依靠机械本身的加工精度和结构来实现高精度要求及多样化的功能要求几乎是不可能的。这时若采用电子技术、软件技术来补充则方便得多。例如丝杠螺母传动间隙、刀具安装误差与刀具磨损等问题在机床加工中用纯机械办法很难解决。但若使机床数控系统软件具有自动间隙补偿及刀具补偿功能, 则问题迎刃而解。有许多特殊的功能要求, 如

液压伺服阀中液体的可压缩性补偿，压力流量特性的补偿等也只有通过电子硬件或软件的方法解决。

#### 4. 机器装置轻型、小型化

机电一体化产品中的机械本体部分，在不降低刚度的情况下，应尽可能减轻重量，降低功耗。在材料方面从目前以钢铁为主发展到大量采用非金属复合材料。在结构方面打破传统的设计方法，做到体小、量轻。只有这样才能改善控制性能，获得高功能和高可靠性。

### (二) 机械传动设计方面

机电一体化产品的传动设计具有一些与普通机械传动设计不同的考虑。

#### 1. 通常采用分离驱动源的传动方式，传动链不全是刚性结合

采用分离传动方式通常可以省去许多机械传动件，如齿轮、轴等，且空间配置方便灵活，可大幅度提高设计自由度，增加柔性，有利于提高传动精度和性能。图 2-9 示出两种不同的传动链结构示意图。

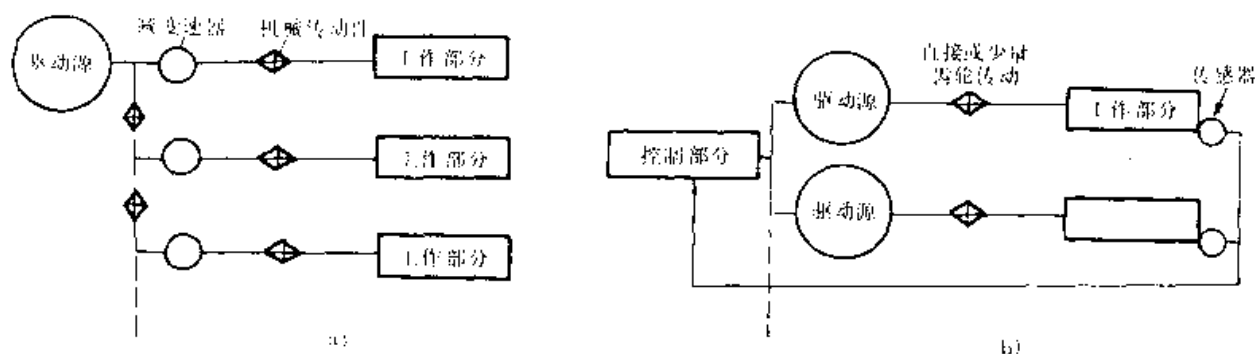


图 2-9 传动链结构示意图

a) 单纯机械传动结构 b) 分离驱动源的传动结构

如普通车床为实现刀具纵向、横向走刀运动，一般传动路线为：主电机→主轴箱→挂轮箱→进给箱→光杠→溜板箱→齿轮齿条机构（或丝杠螺母机构）→纵向进给（横向进给）。由这种纯机械传动结构实现各种运动转换和刀具的复杂轨迹是十分困难的。机电一体化的数控车床则不同。纵横进给各采用单独电机驱动，且与主轴运动脱开刚性连系。传动路线为：纵向驱动电机→丝杠螺母机构→纵向进给；横向驱动电机→丝杠螺母机构→横向进给。这样只要控制两个独立电机就容易实现复杂运动要求，且传动链大为缩短，传动精度及系统刚度明显提高，有利于实现模块化、部件化、通用化设计。

#### 2. 信息处理功能的分离

将信息处理功能从机械中分离出来而由计算机实现，才有可能实现机电一体化系统的信息功能。

如图 2-8a) 中的凸轮，除传力外，在设计制作时就要将有关运动规律要求的信息存贮于凸轮曲线中，以实现从动件的各种运动要求。当采用机电一体化设计方案时，不用凸轮，其运动信息则通过控制系统的硬件和软件来存贮处理，成为控制程序。

再如一个机械传动链，由齿轮、皮带、链、轴等组成的“刚性”链除传递动力（功率）外，关键还要实现一定的传动比以获得一定的速度（转速）。此传动比即是一种信息。图 2-10 表示出几种传动链方案对比。图 a) 所示方法传动比的改变不方便（如用交换齿轮）。但若采用控制转换不同的电磁离合器 [图 b)]，或直接控制伺服电机变速 [图 c)]，则是将传动比的转换从机械结构中抽出由控制装置（计算机）实现。传动链也就成为“柔性”的。

3. 传动参数（运动参数、动力参数）要满足一些特殊要求

如脉冲当量、最大加速能力、惯量匹配、伺服电机工作特性等参数的确定常需按某些特殊要求考虑。

这方面典型的例子如齿轮传动比的设计，通常要考虑满足最大加速能力，以使系统获得最佳控制性能。

### (三) 设计方法特点

#### 1. 机电一体化机械装置功能要求

广义的机电一体化机械装置应具有的基本功能有如下几方面：

(1) 构造功能 这是将系统的结构元件配置于所要求的空间位置，并保持结构元件的功能。如机床床身、照相机机身、印刷线路板、仪表板等具有的功能。

#### (2) 力（动力）的转换、传递功能

这一般是指力和力矩的放大、传递、力转换成力矩或力矩转换成力。这方面的例子如各种机械传动、变速箱、无级变速器、油缸、千斤顶等。

(3) 移动物体的功能 即将物体依一定轨迹移至要求的位置并定位的功能。这是机电一体化系统中非常重要的功能。如机床的刀具进给装置、装配机械手、集成电路导线焊接装置、印刷机送纸机构等所完成的功能。这主要是通过各种执行机构及精密定位机构实现。

(4) 信息控制功能 即信息检测、处理、控制、执行等所必须的功能。如光电编码器、测速发电机、继电器、照相机自动对焦机构、磁带驱动行走机构等所具备的功能。

#### 2. 基本设计方法与过程

为实现上述各项功能，机电一体化产品对机械装置提出了更高的要求。除传统的设计要求，如运动规律、轨迹、强度、刚度等外，还对动态特性，如快速响应性、定位精度、稳定性等也提出了要求。

从设计方法上来讲，随着对产品的可靠性、高速度与自动化要求的提高，对一个机

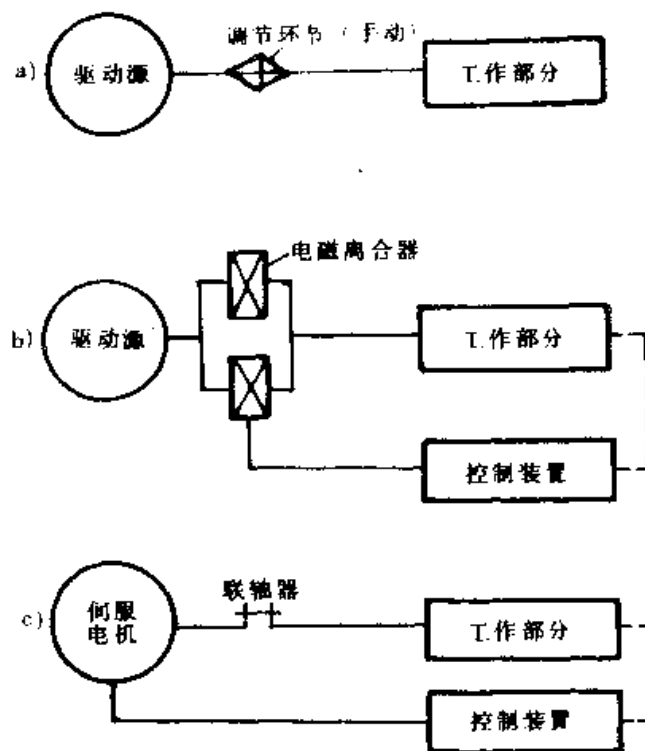


图 2-10 传动链方案比较

a) 刚性传动链 b) 半柔性传动链 c) 柔性传动链

电一体化系统的设计，已不能只用静态的经典方法，而必须考虑其动态特性，即系统由一个稳态过渡到另一个新的稳态的过程的特性。例如只靠提高系统的静态刚度对增加机器的抗振能力几乎不起什么作用，重要的是要考虑到零、部件的外形、尺寸、特别是合理布局。也只有考虑动态特性，才能使机器进一步减轻重量。从现代设计方法角度来看，即是要进行动态分析设计，使系统具有良好的快速响应性、准确性、稳定性和抗干扰能力。对机械系统来说，其结构和参数的设计则应尽量满足无间隙、低摩擦、低惯量、高刚度、高谐振频率、恰当的阻尼比等要求。

机电一体化系统动态分析设计的理论基础是控制理论，这将在第七章详细讲述。

从系统的观点来看，机电一体化产品的设计除要完成传统的以机械制图为主的设计工作外，还要将许多新的概念如“系统”、“干扰”、“信息”、“接口”、“逻辑”、“反馈”、“可靠性”等在设计中表现出来。在方法上常用系统动态设计计算、逻辑设计分析、软件仿真、可靠性设计等。其结果除了机械

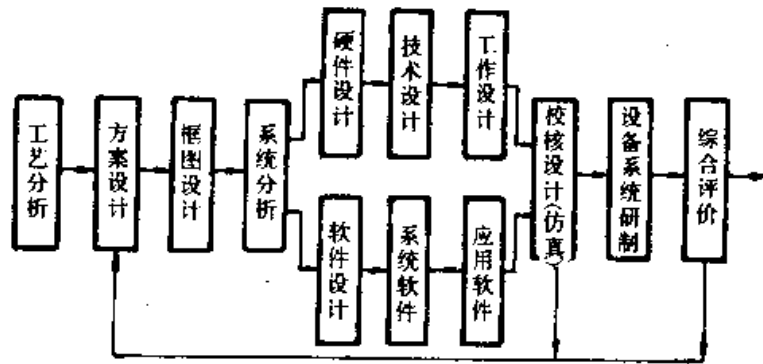


图 2-11 机电一体化设计过程

与电气的硬件图纸外，还有诸如功能框图、流程框图、逻辑框图、软件程序等。其设计过程也区别于传统的所谓“三段设计”。图 2-11 给出了机电一体化设计过程的示意框图。

## 二、机电一体化产品有关设计参数指标与评定

机电一体化产品与传统机械相比，除一般的设计参数指标如功率、生产率、节拍、加工精度等以外，还有一些表征其特点的参数指标，典型的如脉冲当量、定位精度、系统增益、分辨率、柔性系数、可靠性等。它们对机电一体化系统的评价十分重要。

### (一) 脉冲当量 (最小设定单位)

在机电一体化自动机械中，为实现移动物体的运动轨迹和精确定位要求，通常采用数字控制伺服系统。脉冲当量则是数字位置伺服系统中的主要设计参数之一。它指的是伺服系统中一个输出、输入或检测脉冲对应于移动部件的坐标移动距离。脉冲当量是脉冲分配计算最小单位，通常按定位精度要求选定。此外，脉冲当量还与系统刚度、快速响应性等密切相关。一般当这些性能要求高时，脉冲当量应取小值。通常对一般精度可取 0.01mm/脉冲，高精度时可取 0.001~0.005mm/脉冲。

脉冲当量的大小可通过对机械传动机构的恰当设计来获得不同值。某些常用设计计算方法可参见第八章有关内容。

### (二) 定位精度

机电一体化系统中的移动工作部件，如数控机床工作台、机器人手臂等，由于是采用自动定位的方式工作，必须考虑一项重要的精度指标，即定位精度指标。定位精度是

一个综合性能指标，它的高低直接影响到系统的静态精度和动态精度。影响定位精度的因素很多，可以说与系统的各组成部分均有关，如测量传感系统（测量精度）、伺服驱动系统（控制系统定位精度）、各机械零部件相互几何关系（几何参数精度）等。此外还与环境有关，如要求稳定的环境温度、规定的负载、较短的测定时间等。

### 1. 数控机床的定位精度

对于数控机床的定位精度，目前已有较科学的规范，便于统一对定位精度进行综合评定。如美国的 NMTBA（美国全国机床制造商协会标准），西德的 VDI（西德的德国工程师协会标准）技术规范及我国的行业标准 JB4369-86 等。它们的实质都是通过多次定位后作出定位误差曲线，以  $3\sigma$  规则进行数据处理，从而全面地反映出系统误差和随机误差。下面以我国机械工业部标准 JB4369-86 为例，说明数控卧式车床定位精度。

(1) 重复定位精度 规定轴线长度小于或等于 2m 时，可按每米最少 5 个和全长不少于 5 个均匀分布的目标位置进行多次定位测定。

测定时溜板或滑板从一个固定基准点正向快速进给向目标位置定位，重复 5 次。在位置  $P_j$  处测得 5 个位置偏差  $X_{1j}\uparrow$ 、 $X_{2j}\uparrow$ 、…… $X_{5j}\uparrow$ ；反向在位置  $P_j$  处又测得 5 个位置偏差  $X_{1j}\downarrow$ 、 $X_{2j}\downarrow$ 、…… $X_{5j}\downarrow$ 。

数据处理：

#### ① 平均位置偏差

$$\bar{X}_j\uparrow = (X_{1j}\uparrow + \dots + X_{5j}\uparrow) / 5$$

$$\bar{X}_j\downarrow = (X_{1j}\downarrow + \dots + X_{5j}\downarrow) / 5$$

#### ② 标准偏差

$$S_j\uparrow = \sqrt{\frac{1}{4} \sum_{i=1}^5 (X_{ij}\uparrow - \bar{X}_j\uparrow)^2}$$

$$S_j\downarrow = \sqrt{\frac{1}{4} \sum_{i=1}^5 (X_{ij}\downarrow - \bar{X}_j\downarrow)^2}$$

#### ③ 重复定位精度

$$6S_j\uparrow \text{ 或 } 6S_j\downarrow$$

轴线的重复定位精度为各目标位置上重复定位精度的最大值。

上面的定义可由图 2-12 加以说明。图中  $P_j$  为定位目标位置，由定位实际值测得的位置偏差，基本上是以某一平均值  $\bar{X}_j$  为中心形成的正态分布。偏差的算术平均值  $\bar{X}_j$  反映出机床拖板移动定位的系统误差，而利用标准偏差  $S_j$  按  $3\sigma$  规则求得的重复定位精度  $6S_j$ ，则反映出随机误差的大小。

(2) 定位精度 其测定方法与重复定位精度相同。定义轴线的定位精度  $A$  是在轴线上规定长度内，任意位置的  $(\bar{X}_j + 3S_j)$  最大值与任意位置的  $(\bar{X}_j - 3S_j)$  最小值的差值来确定。

即

$$A = (\bar{X}_j + 3S_j)_{\max} - (\bar{X}_j - 3S_j)_{\min}$$

上面的定义可由图 2-13 加以说明。

在测定轴线的全行程上取一系列定位目标位置  $P_j$  ( $j=1, 2, \dots$ ), 对每一目标位置再进行多次重复定位, 测出每一点的算术平均值  $\bar{X}_j$  和标准偏差  $S_j$  (相应分散度为  $3S_j$ )。然后在轴线全行程上作出一条定位误差离散带。取离散带上下极限误差之差, 即离散带的宽度  $A$  作为全轴线的定位精度。

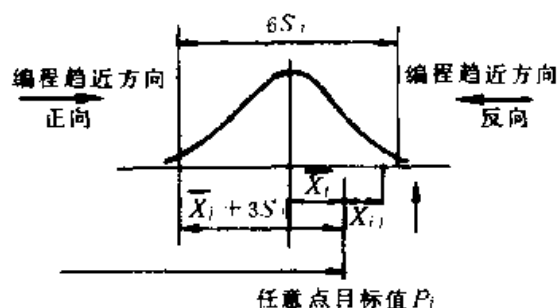


图 2-12 某点的定位精度

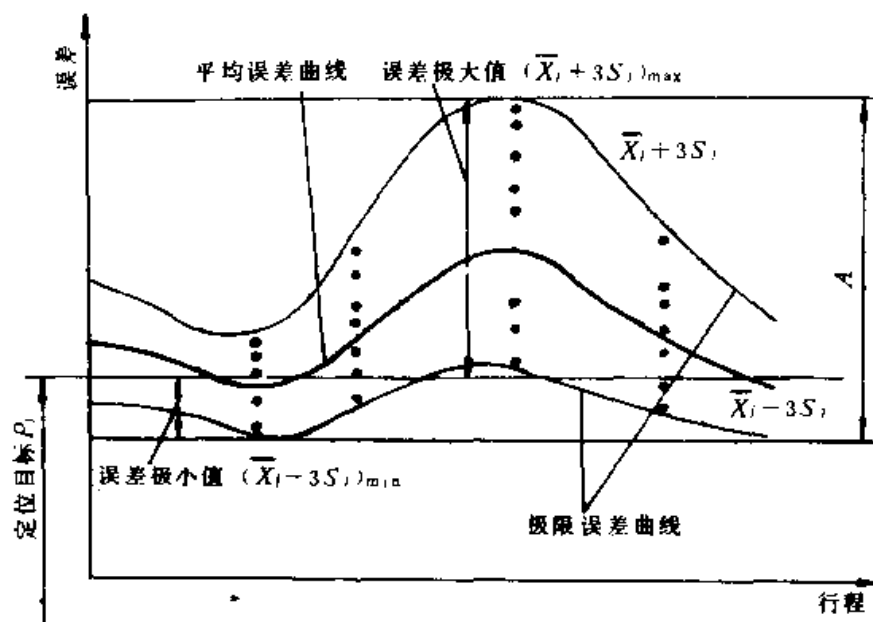


图 2-13 定位精度

定位精度和重复定位精度可按单向趋近或双向趋近进行测定。按双向趋近确定的定位精度中包含有进给系统间隙等失动和变形的影响。

## 2. 一般的机电一体化机械移动部件的定位精度

对于一般的移动部件的定位精度目前虽无明确的规范, 但由于在实质上数控机床定位精度具有代表性, 故也可采用类似的方法。

例如目前广泛应用的数字显示测量装置 (如光栅、感应同步器等位置测量显示装置), 也是一个机电一体化系统。此系统的工作过程实际上也是一种定位过程。当测量装置的移动部件从一个位置移至另一位置进行测量时, 就要在起点和终点进行准确定位才能实现对行程的测量。显然, 系统的测量精度也是由定位精度来衡量。可按上述方法多次重复定位作出误差曲线, 从而求得系统测量精度。

## (三) 柔性和自动化程度

### 1. 柔性

机电一体化系统通常都是自动化程度很高的系统，在设计时应考虑对其柔性的评价问题。一般来说，机电一体化系统在转换调整过程中的适应过程是很快的，要求转换适应时间尽可能短。在考虑到系统的工作时间的长短后，可定义反映机电一体化系统柔性的柔性系数  $F$ ：

$$F = \frac{T_z}{T_x + T_z}$$

式中  $T_x$ ——系统的工作时间

$T_z$ ——系统的适应时间

## 2. 自动化程度

在研究开发机电一体化系统时，总希望获得尽可能高的自动化程度，也就是使系统在最有效的状态下自动工作，从而提高效率，改善产品质量、降低成本、减轻劳动强度，最终获得综合的最佳效果。自动化程度即是用来表示系统在工作过程中，需要人工参与的程度。对自动化程度的评价可用自动化程度系数作为直接评价指标。

在机器的一个工作循环内，除包括工作运动外，还包括一些辅助操作，如工作循环的启停、装卸料、执行器位置调整等。在一个工作循环之外，经若干工作循环后，也还有些辅助操作，如更换工具、输入程序、机器运动重新调整、润滑维修等。在此考虑机器产品的自动化，主要指辅助操作的自动化。

设  $t_f$  为工作循环内辅助操作时间，其中有  $n$  种是自动操作， $m$  种是人工操作，设  $t_w$  为工作循环外辅助操作时间，其中有  $p$  种是自动操作， $q$  种是人工操作。则自动化程度系数  $K_z$  的计算公式如下：

$$K_z = \frac{\sum t_{fi} + \sum t_{wk}/n}{\sum t_{fj} + \sum t_{wl}/n + \sum t_{fi} + \sum t_{wk}/n}$$

式中  $\sum t_{fi}$ ——循环内能实现自动化的辅助操作时间总和 ( $i=1, 2, \dots, n$ )

$\sum t_{fj}$ ——循环内由人工操作的辅助操作时间总和 ( $j=1, 2, \dots, m$ )

$\sum t_{wk}/n$ ——循环外在  $n$  次循环后能实现自动化的辅助操作时间总和 ( $k=1, 2, \dots, p$ ,  $n=1, 2, \dots$ )

$\sum t_{wl}/n$ ——循环外在  $n$  次循环后由人工操作的辅助操作时间总和 ( $l=1, 2, \dots, q$ )

## (四) 可靠性

机电一体化系统要发挥应有作用，首先要能可靠地工作。在设计一个新系统或产品时，要想得到最佳方案，必须考虑可靠性问题。

### 1. 可靠性定义

所谓可靠性，指产品在规定的条件下和规定的时间内，完成规定功能的能力。

规定的条件是指产品所处的环境条件，使用条件及工作方式。如温度、湿度、振动、电源、干扰强度和操作规程等。规定的条件不同，产品的可靠性也不同。规定的功能是由产品的各项性能技术指标来体现的。如产品不能完成规定的功能，就称为失效。

可靠性的概念，包含有产品的无故障性和耐久性两方面的含义。无故障性是产品在某一时期内，连续不断地保持其工作能力的性能。耐久性指的是产品在整个使用期限内

和规定的维修条件下,保持其工作能力的性能。

产品的可靠性是一个与许多因素都有关的综合性质量指标。它既决定于产品通过设计、制造、检验所具有的内在质量,又为产品的使用、维护条件所左右。

## 2. 评价可靠性的主要指标

产品的可靠性往往与一些随机现象有关。因此评价机电一体化产品可靠性的各种指标都具有概率性质。通常,产品的无故障性指标可以用可靠度、平均无故障工作时间或故障率等表示,而耐久性指标可以用耐久性系数、有效度或技术利用系数表示。许多机电一体化产品的可靠性评价指标已规范化,有相应的标准给定。下面列举几个常用的指标。

(1) 可靠度  $R(t)$  设  $N_0$  个产品中,每过一段时间就有一些失效。在时刻  $t_1$  失效了  $\Delta N_1$  个,从  $t_1$  至  $t_2$ ,又失效了  $\Delta N_2$  个,则经过  $m$  个时间间隔后,总失效产品数为  $N_m$

$$N_m = \sum_{i=1}^m \Delta N_i$$

失效产品在产品总数中所占比例为  $F_m$

$$F_m = \frac{N_m}{N_0}$$

当时间间隔取值很小时,则可用时间的连续函数表达时刻  $t$  产品的失效概率为

$$F(t) = \frac{N(t)}{N_0} = \int_0^{N(t)} \frac{1}{N_0} dN(t) = \int_0^t \frac{1}{N_0} \frac{dN(t)}{dt} dt$$

式中  $N(t)$  为时刻  $t$  失效产品累积数,

$$\text{令 } f(t) = \frac{1}{N_0} \cdot \frac{dN(t)}{dt}$$

$$\text{则有 } F(t) = \int_0^t f(t) dt$$

式中  $f(t)$  称为失效密度函数。

$$\text{设 } N_1(t) = N_0 - N(t)$$

表示还在完好工作的产品数,

$$\text{令 } R(t) = \frac{N_1(t)}{N_0}$$

$$\text{则 } R(t) = \frac{N_0 - N(t)}{N_0} = 1 - F(t) \quad [0 \leq R(t) \leq 1]$$

$R(t)$  即表示可靠工作的产品百分数随时间的变化值,称为产品的可靠度。显然可靠度与失效概率应满足关系式

$$R(t) + F(t) = 1$$

(2) 失效率(故障率)  $\lambda(t)$  失效率  $\lambda(t)$  定义为



$$\lambda(t) = \frac{\frac{dN(t)}{dt}}{N_0(t)}$$

失效率表示在单位时间内失效的产品数与完好产品数的比值，即表示产品工作到时刻  $t$  后，单位时间内失效的概率。

失效率与可靠度的关系为

$$R(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt}$$

(3) 平均无故障时间(平均寿命)  $m$  由前述知，到时刻  $t_1$  时有  $\Delta N_1$  个产品失效。则在  $N_0$  个产品中，就平均有  $\Delta N_1$  个可工作到  $t_1$  时刻，有  $\Delta N_2$  个可工作到  $t_2$  时刻……。因此可有每个产品的平均无故障工作时间  $m$

$$m = \frac{(\Delta N_1 t_1 + \Delta N_2 t_2 + \dots + \Delta N_n t_n)}{N_0} = \sum_{i=1}^n t_i \frac{\Delta N_i}{N_0}$$

当  $n \rightarrow \infty$ ，每段时间间隔  $\Delta t \rightarrow 0$  时

$$\frac{\Delta N_i}{N_0} \rightarrow \frac{1}{N_0} dN(t) = f(t) dt$$

故有

$$m = \int_0^{\infty} t \cdot f(t) dt$$

(4) 有效度(固有可用度)  $A$  实际应用的机电一体化产品或装置通常都是可维修的。设产品的平均修理时间为  $MITR$ ，它是设备的不能工作时间。把产品的平均无故障时间  $m$  看作产品的可能工作时间，记为  $MTBF$ ，则可用可能工作时间与总时间之比来作为评价产品的工作耐久性指标之一，

$$A = \frac{MTBF}{MTBF + MITR}$$

式中  $A$  —— 有效度

$MTBF$  —— 平均无故障工作时间

$MITR$  —— 平均修理时间

有效度反映出在产品的整个使用期限内，当用于恢复工作能力所消费的时间(费用)的总值越少时，产品的工作耐久性就越高。

图 2-14 给出了有关可靠性指标的函数曲线。

### 3. 抗干扰能力

机电一体化产品中，环境噪声、电噪声的干扰是产生元、器件失效或数据传输、处理错误，从而影响系统可靠性的最常见和最主要的因素。因此，使机电一体化系统具有高的抗干扰能力是十分重要的。而采取各种措施消除干扰的影响，则是保证产品可靠性的重要内容之一。

在机电一体化产品中，其控制器大量采用的是各种微电子集成芯片，元器件的可靠性非常高。平均无故障工作时间在 10000h 以上。引起故障的原因多半不在元器件本身，

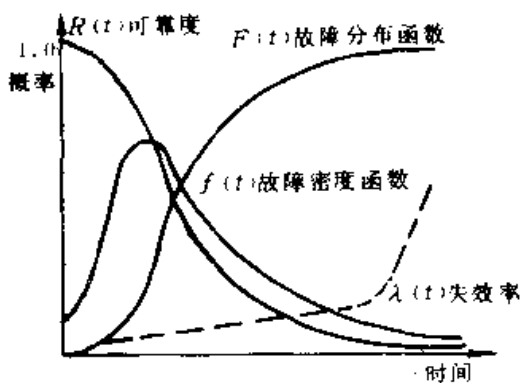


图 2-14 有关可靠性函数曲线

而在于系统设计制造和装置工艺中的各种抗干扰措施不足。

通常,干扰进入控制装置的渠道有多种,主要的干扰源有:

(1) 供电干扰 这通常是从交流供电网络传来的干扰信号。这些干扰信号主要来源于附近大容量用电设备的负载变化和启停时产生的电压波动。

(2) 强电干扰 驱动电路中的强电元件,如电磁铁、继电器等感性负载,断电时会产生过电压和冲击电流。这些干扰信号不仅影响

驱动电路本身,还通过电磁感应干扰其他信号电路,通过输入/输出接口进入控制器。

(3) 接地干扰 如果接地不当,由于不同位置的接地点不可能具有完全相同的电位,则会形成接地回路。或由于各设备负载不平衡,过载或漏电等原因,可能在设备间形成电位差。这些都会引起接地干扰。

(4) 幅射干扰 当控制系统附近存在磁场、电场或电磁波辐射源,就可能通过感应直接干扰系统中各设备和导线,使其中产生电平变化,或干扰脉冲。

(5) 机械干扰 机电一体化系统中的机械部件的运动变化、冲击、振动或机械负载的变化,通过执行器、传感器也会对系统的工作产生干扰。如经常通过继电器接点、按钮、开关、光电器件等引入抖动干扰信号。

针对上述各种干扰可以采取各种抗干扰措施,其中既有针对各种干扰源的性质和部位的措施,也有从整体系统出发而采取的措施。限于篇幅,在此不再具体介绍。

对于抗干扰能力的评定,不同的产品根据其产品特点和使用工作条件,可作出相应的规定,有些已形成标准。例如对机床数字控制装置有如下一些规定:

交流电网变化考验。用人工改变交流电网 380V、220V 变化  $\pm 10\%$  时,连续运行 2h 无故障。

稳压电源变电压试验。将直流稳压电源变化  $\pm 5\%$  时,在最不利的组合条件下运行 2h 无故障。

抗干扰试验。人工制造下列干扰时运行无故障:用交流接触器启停 5~10kW 电机;使用电焊机焊接;开关电风扇、插拔电烙铁、使用手电钻等。当数控装置与机床联动后,不受机床各类按钮和开关的干扰。

数控装置与机床联动试验。

# 第三章 机电一体化与微型计算机

## 第一节 微型计算机与微机系统

### 一、概 述

机电一体化的发展和微电子学,特别是微型计算机的发展和普及应用分不开的。微机除了可用作机电一体化设备的信息处理外,在自动化过程中作为逻辑控制也正扮演着越来越重要的角色。

#### 1. 电子计算机中信息的表示方法

计算机内部的程序、数据和各种字符等均以二进制的数码来表示,也即是信息编码。二进制数码的每一位只有两种状态,或者是0或者是1。这是计算机中的信息单位,称为位(bit)。为了标准化,国际上已通用一些二进制信息编码。如ASC II代码(美国国家信息交换用标准代码)、数控机床的ISO代码(国际标准代码)、EIA代码(美国电子工业协会标准)等。本书附录(四)给出了ASC II代码表。

设有  $m+1$  位的二进制数:

$$x_m x_{m-1} \cdots x_2 x_1 x_0$$

转换成常用的十进制数时,可用下式计算:

$$N = 2^m x_m + 2^{m-1} x_{m-1} + \cdots + 2^2 x_2 + 2^1 x_1 + x_0$$

用二进制表示的数码,位数太多,使用记忆很不方便,因此往往用十六进制来表示。十六进制的表示方法为:0~9数字以后,用A、B、C、D、E、F来表示。十六进制与二进制的转换很方便。例如将二进制数010001111011转换成十六进制数:

$$\begin{array}{ccc} \underline{0100} & \underline{0111} & \underline{1011} \\ 4 & 7 & B \end{array}$$

即十六进制的47B。为了区别起见,将十六进制的数码后加一个字母“H”,即47H。有关二进制、十六进制的表示方法,在附录(三)给出详细说明。

通常计算机是以一个字节(bite)作为一个单位来进行运算和处理的。如Z80CPU就是以8位字长作为一个字节来处理信息的,此即是8位机。此外,还有16位机、32位机。字长越长,计算机运算速度越快,性能越高。

#### 2. 微型计算机的组成

微型计算机主要有运算器、控制器、存贮器、输入设备、输出设备五部分组成,如图3-1。

(1) 运算器 它是计算机对各种代码信息进行处理(包括算术运算和逻辑运算)的

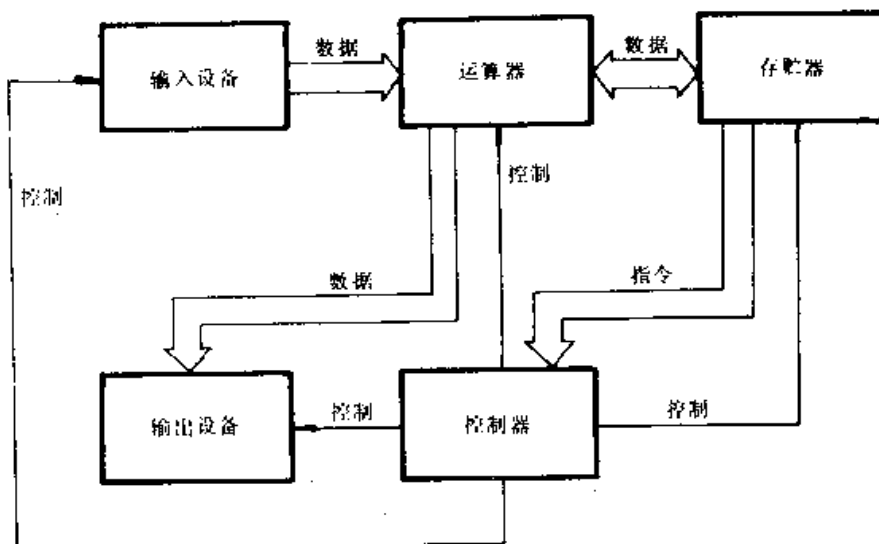


图 3-1 微型计算机的组成及结构

主要部件，由寄存器、加法器、移位器及一些控制电路组成。

(2) 控制器 它是计算机的总指挥部，由它发出控制命令，实现计算机各部分之间的有机联系以及使计算机处理过程能自动协调一致地进行。控制器由时序电路和一些逻辑电路组成。

(3) 存储器 它是用以存放运算程序、原始数据、中间结果的设备。分为内存贮器和外存贮器两大类。在微机中，内存贮器一般为半导体存储器，外存贮器有磁带、软磁盘和硬磁盘等。

(4) 输入设备 用以输入原始数据和各种程序的设备，这都是以二进制数或二进制代码的形式输入计算机。微型计算机常用的输入设备有键盘、光电阅读机、A/D 转换器等。

(5) 输出设备 它用于将计算机的运算结果以数字、字符、图形等形式表达出来。常用的输出设备有显示终端、打印机、数码管、D/A 转换器等。

### 3. 微型计算机的定义

(1) 微处理器 (Microprocessor) 一般指由一片或几片大规模集成电路芯片组成的中央处理单元，通常简称为 CPU。它包括运算器和控制器两大部分，由寄存器、累加器、算术逻辑运算部件、控制部件、程序计数器、内部总线、时钟电路等组成。

附录 (二) 给出了一些常用微处理器。

(2) 微型计算机 (Microcomputer) 以微处理器为中心，加上存储器、I/O 接口电路等，构成一台完整的微型计算机。如果全部集成在一块芯片上，则称为单片微型计算机 (简称单片机)；如果由若干片组装在一块印刷电路板上，则叫做单板微型计算机 (简称单板机)。

(3) 微型计算机系统 (Microcomputer System) 以微型计算机为基础，加上外围设备、电源、系统软件等，组成能独立工作的完整计算机，称为微型计算机系统。系统软

件主要包括：操作系统、诊断程序、汇编程序、高级语言、编辑程序等。

在机电一体化系统中所用的微型计算机，其型式可以是多种多样的。如微处理器、单板机、单片机、完整的微机系统、专用控制器、专用控制芯片、可编程序控制器（PC）等。

## 二、微型计算机的结构特点

### 1. 外部结构特点

在微型计算机中，CPU、存贮器、I/O 接口之间信息的传递是通过公共的总线进行的。根据它们传递信息的功能不同，总线分为地址总线、数据总线和控制总线。

(1) 地址总线 用来直接指定存贮器中所存信息的单元地址和 I/O 设备接口电路的编码地址。因为地址总信息是由 CPU 发出的，所以地址总线是单向传递信息的，这种单向性体现了 CPU 的控制中心性。8 位地址总线可寻址的最大存储器地址空间为  $2^8 = 256$  个单元，16 位地址总线则为  $2^{16} = 65536$  个单元，常称 64k 单元。

(2) 数据总线 用来实现 CPU、存贮器、I/O 接口之间的数据交换。所以，数据总线总是双向传递信息，并具有三态功能。数据总线的三种状态：读、写、悬浮高阻是由 CPU 发出读、写、总线请求允许信号来控制的。

(3) 控制总线 用于传递控制数据输入/输出操作的信号。一般每根总线都有其确定的功能，有的传递 CPU 发出的控制作用信号；有的则传递外围设备对 CPU 的控制信号，这些信号有：读/写、中断请求、I/O 请求等。

### 2. 内部结构特点

(1) CPU 微处理器内部采用单总线结构，即内部所有单元的电路都挂在内部总线上，它们之间的信息传递都经由内部总线。由于分时使用总线，不会引起信息冲突、抢占总线的问题。这样做是为了减少内部引线所占用的面积，以便在有限的芯片面积上集成更多的电路，提高芯片的集成度。当然，由于在任一时刻都只有一个内部单元电路占用内部总线，使得 CPU 的运行速度受到影响。

(2) 存贮器 在存贮器中，不同的存贮单元是由地址编号来区别的。地址码由 CPU 通过地址总线发来，经译码电路找到确定的单元，然后通过数据总线向该单元进行读出或写入。地址译码通常有两种方式：单译码和双译码。单译码又称字结构，由字线（x 线）选择某个字，由位线（y 线）选择字的某一位。双译码又称复合结构，地址译码器分为 x 译码器和 y 译码器，分别控制存贮体矩阵的行和列，然后由行选择和列选择共同确定地址。采用这种方法后，译码输出线可以大大减少，例如，对于 1024 个单元的存储体，单译码需要 1024 条，而双译码只需要 64 条。

(3) I/O 接口 微型计算机中通常使用的一些 I/O 接口是一些标准化的通用接口，一个接口芯片具有多种用途，利用编制程序的方法具体确定接口的工作方式、功能和工作状态等，以适应不同要求的各种外部设备。I/O 接口的这种“可塑性”使它能很好地起到 CPU 与外部设备之间的接口作用。

## 三、CPU 的结构

典型的 CPU 结构框图如图 3-2。它分为三大部分：算术逻辑运算部件、控制逻辑部

件和寄存器部件，它们都挂在内部总线 BUS 上。CPU 对外的引出端分为地址总线 A-BUS、数据总线 D-BUS 和控制总线 C-BUS。

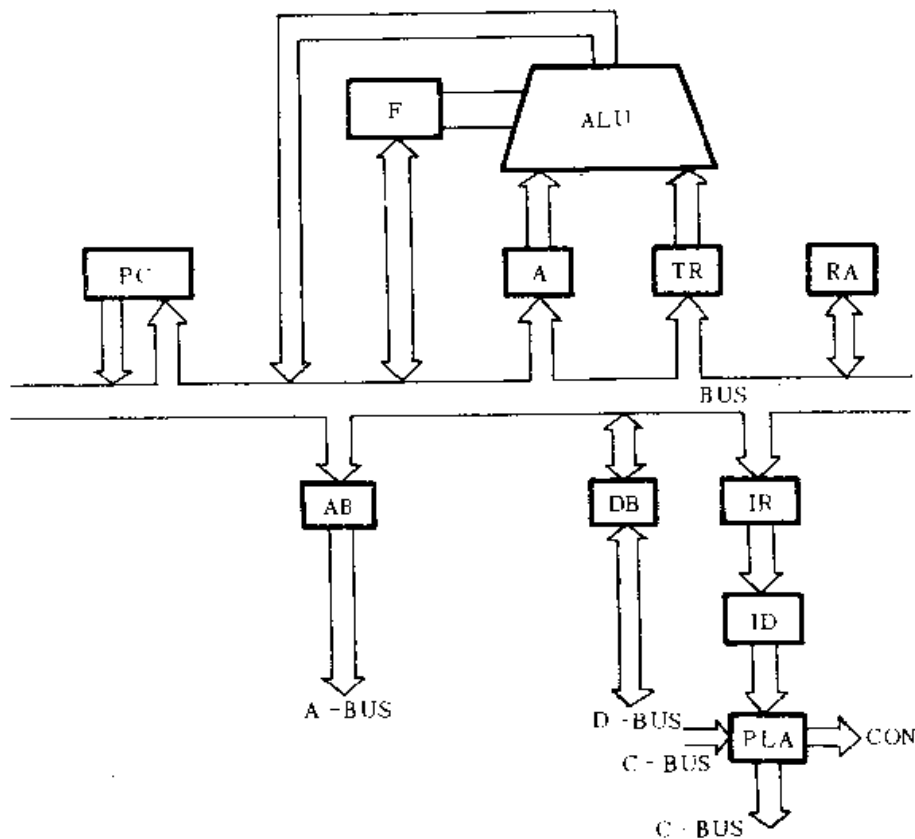


图 3-2 典型 CPU 的结构框图

### 1. 算术逻辑运算部件 ALU

算术逻辑运算部件 ALU 是微型计算机中执行算术运算和逻辑运算的主要部件，是计算机五大部件之一——运算器的主要组成部分。它有两个输入端和两个输出端。一个输入端与累加器 A 相连，另一个输入端与暂存寄存器 TR 相连。来自 CPU 内部数据寄存器 DR 或内部寄存器阵列 RA 的操作数，都要先送到这两个寄存器中，然后才能由 CPU 实行相应的操作。ALU 的一个输出端与内部总线 BUS 相连，以便把处理的结果通过总线送回到累加器 A 中。另一个输出端与状态标志寄存器 F 相连。ALU 每次操作后，通过对处理结果的判断，设置 F 相应的位，来代表计算机所处的某种状态。因此，计算机每执行完一条指令后所处的状态，都可以由状态标志寄存器来体现、来表征。ALU 所能完成的算术运算和逻辑运算典型功能如表 3-1 所示，不同的功能由方式控制端 M 和功能控制端  $S_0$ 、 $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$  的不同状态的组合来确定。方式控制端 M 控制 ALU 执行算术运算还是逻辑运算，功能控制端  $S_0$ 、 $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$  的不同组合控制 ALU 执行何种算术/逻辑运算。M 和 S 信号来自 CPU 的内部控制 CON 信号。

表 3-1

ALU 的算术/逻辑运算功能

M	S <sub>3</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>1</sub>	S <sub>0</sub>	功 能	说 明
0	0	0	0	0	全“0” $\rightarrow A$	清 零
0	0	0	0	1	$A \rightarrow A$	传送 A
0	0	0	1	0	$\bar{A} \rightarrow A$	求反
0	0	0	1	1	全“1” $\rightarrow A$	置位
0	0	1	0	0	$TR \rightarrow A$	传送 TR
0	0	1	0	1	$A \oplus TR \rightarrow A$	异或
0	0	1	1	0	$A \odot TR \rightarrow A$	同或
0	0	1	1	1	$\overline{TR} \rightarrow A$	求 TR 的反
0	1	0	0	0	$A \cap TR \rightarrow A$	与
0	1	1	0	1	$A \cup TR \rightarrow A$	或
1	0	0	0	1	$A+1 \rightarrow A$	加 1
1	0	0	1	0	$\bar{A}+1 \rightarrow A$	求补
1	0	0	1	1	$TR+1 \rightarrow A$	TR 加 1
1	0	1	0	0	$TR-1 \rightarrow A$	减
1	0	1	0	1	$TR+A \rightarrow A$	加
1	0	1	1	0	$TR+\bar{A} \rightarrow A$	TR 加 A 的反

## 2. 寄存器部件

(1) 累加器 A 它是微型计算机中使用最频繁的关键寄存器。在微型计算机中，许多操作都与累加器有关。由于算术/逻辑运算部件 ALU 是一个纯粹的运算部件，本身没有寄存功能，因此，凡是通过 ALU 进行算术/逻辑运算的操作，操作数之一必是累加器 A，而且经过 ALU 运算后的结果也必须首先通过内部 BUS 送到 A 中去，才能再执行其他操作转送到其他单元（例如寄存器、存储器、I/O 接口等）中去。

(2) 程序计数器 PC 它是专门用于存放将要读取的指令所在地址的一个专用寄存器。程序计数器具有计数和接收信息两种功能。当程序顺序执行时，程序计数器不断地自动进行加 1 计数，以便按顺序给出下条将要执行的指令所存的地址；当程序非顺序执行，即发生转移时，程序计数器接收转移地址，从而 CPU 能找到转移后要执行的命令。

(3) 状态标志寄存器 F F 用于保存计算机执行完一条指令后，计算机所处状态的有关信息。执行程序时，也可以通过对这些状态的测试，即对计算机所处状态的判断，来决定程序下一步的走向——是否需要转移或分支等。不同型号的微处理器所设置的状态标志可能不同，一般来讲，微型计算机常有下述一些状态标志：进位标志 C、辅助进位标志 A<sub>c</sub>、符号标志 S、全零标志 Z、溢出标志 V、奇偶校验标志 P 和减法标志 N 等。

(4) 地址缓冲寄存器 AB 和数据缓冲寄存器 DB 这两个缓冲寄存器的作用是协调

CPU 同存储器或 I/O 接口电路之间在运行速度、工作周期等方面所存在的差异,以保证地址信息和数据信息的正确传送。CPU 发送的地址信息,首先送到地址缓冲寄存器 AB 中暂时保存,CPU 接着进行另外的操作,由 AB 来等待存储器或 I/O 接口接收地址信息。对于数据信息的输入和输出,由数据缓冲寄存器 DB 起中间缓冲作用,所以 DB 是双向的。

(5) 暂存寄存器 TR 它的作用是把 ALU 的输入数据与内部总线 BUS 隔离。因为 ALU 的两个输入,一个来自累加器 A,另一个来自其他寄存器或存储器,需要通过 BUS 送回累加器 A,如果没有 TR,则会引起 ALU 的输入与输出同时出现在 BUS 上的混乱情况,所以要设置一个 TR,暂存 ALU 的输入数据。

(6) 寄存器阵列 RA 它一般包括:由若干个通用寄存器组成的通用寄存器组、堆栈指针 SP、变址寄存器、中断页地址寄存器 I 和存储器刷新寄存器 R。它作为微处理器内部的小容量高速存储器,其作用是暂时寄存运算中的一些中间结果,以减少对存储器的频繁访问,从而提高整个机器的运算速度。

(7) 指令寄存器 IR 它用于寄存正要被执行的命令。指令从程序存储器中取出后,首先送到指令寄存器 IR 中,然后将指令中的操作码送到指令译码器译码并产生相应的内部或外部控制信号。指令中的操作数,一般为参加运算的数据所存放的地址,被送到地址缓冲寄存器,然后找到相应的单元,将数据取出参加运算。

### 3. 控制逻辑部件

控制逻辑部件的作用是使微型计算机各部件能按一定的时间节拍协调一致地工作。它给 ALU、I/O 接口、存储器发送同步信号,控制 CPU 按一定的顺序进行指令读取、译码并执行等一步步操作,并发出相应的外部控制信号与外界通信。控制逻辑部件主要由指令译码器 ID 和可编程序逻辑阵列 PLA 组成,它和指令寄存器 IR、程序计数器 PC 等一起构成了微型计算机的五大部件之一——控制器。

(1) 指令译码器 ID ID 接收指令寄存器 IR 传来的指令中的操作码,将它译码,产生相应的控制信息。

(2) 可编程序逻辑阵列 PLA PLA 接收指令译码器 ID 送来的指令操作码信息以及各种状态测试信息、外部设备送来的请求信号、响应信号等,发出各种内部控制信号 CON 和外部控制信号。外部控制信号通过控制总线 C-BUS 送出,去控制存储器或 I/O 接口。在微型计算机中,输入的外部控制信号有:准备就绪信号 READY、保持请求信号 HOLD、中断请求信号 INT、复位信号 RESET 等。输出的外部控制信号有:保持响应信号 HLDA、中断响应信号 INTA、地址锁存有效信号 ALE、读信号 RD、写信号 WR、I/O 接口与存储器选择信号 IO/ $\bar{M}$  等。

## 四、存储器的结构

### 1. RAM 的结构

微型计算机中所使用的 RAM,除了由基本的存储电路构成存储体外,通常还要有一些外围电路,才能正常地工作。典型 RAM 的结构框图如图 3-3。

(1) 地址译码器 存储单元是按地址来选择的,存储器对 CPU 发来的地址信号必须



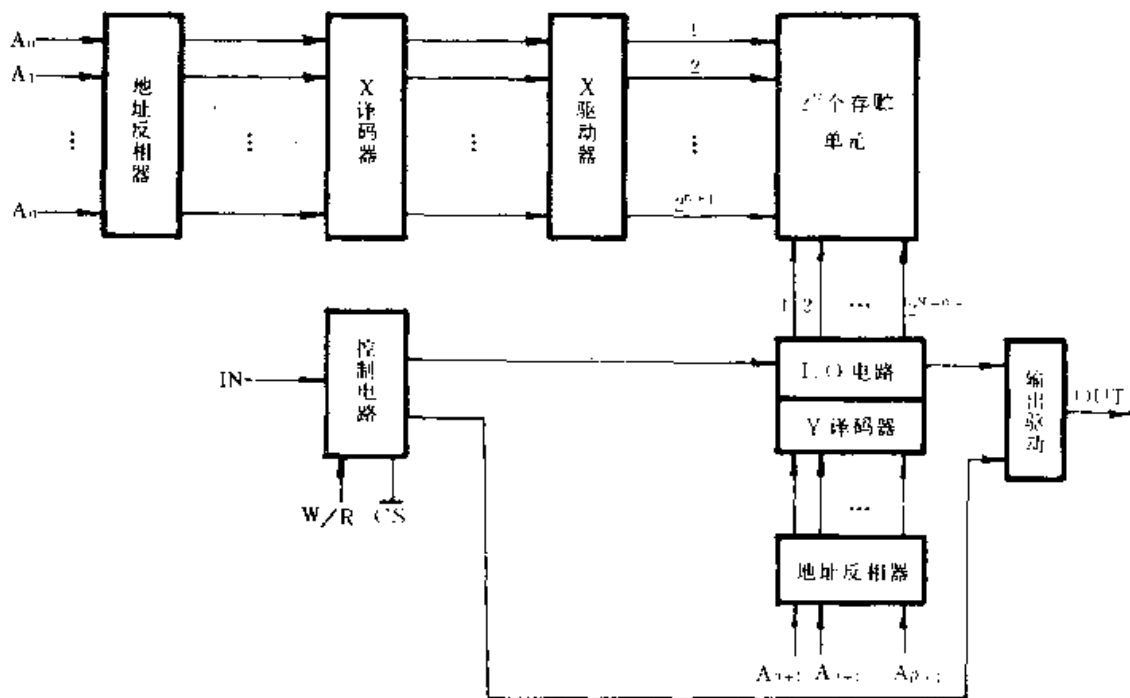


图 3-3 典型 RAM 结构图

经过译码，才能找到所要选择的单元。地址译码分为字结构和复合结构两种方式。前者适用于小容量存储器，需要较多的字线；后者可减少选择线，但每根选择线的负载较大，需加驱动器。

(2) I/O 电路 用于控制选中单元的数据流动方向——读出还是写入，并具有放大作用。

(3) 片选控制端  $\overline{CS}$  由于每一存储器芯片容量有限，微型计算机中的 RAM 由多片构成。在地址选择时，首先选片，然后才能选择片中的某一单元，只有当  $\overline{CS}$  端信号有效时，对该片上的存储单元读/写操作才有效。

(4) 三态输出缓冲器 在 RAM 中设置三态输出缓冲器，使数据的输出受到读信号的控制。另外，读信号是否有效还由  $\overline{CS}$  信号控制。因此，数据输出又受  $\overline{CS}$  信号控制，从而可使多片 RAM 的数据输出线并联挂在数据总线上。

## 2. ROM 的结构

ROM 有掩膜 ROM、PROM、EPROM、EAPROM、E<sup>2</sup>PROM 等多种形式。在微型计算机中所使用的 ROM，典型结构框图如图 3-4，它除了用基本的存储电路构成存储体外，通常也包括一些外围电路，如地址译码器、读取控制电路、片选逻辑、编程/校验逻辑、三态输出缓冲器等，它们的作用和 RAM 中的外围电路作用类似。

附录（一）中给出了一些常用的存储器芯片。

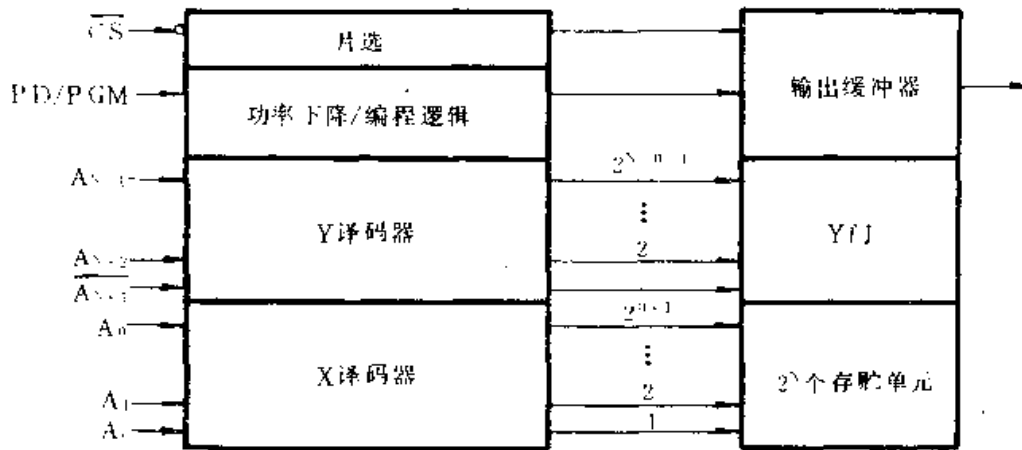


图 3-4 典型 ROM 结构图

### 五、I/O 接口的结构

I/O 接口是微型计算机中沟通 CPU 与外部设备不可缺少的重要部件。由于外部设备的运行速度、数据格式、工作方式、电平等均不统一，一般来讲，都不和 CPU 相兼容，所以要有 I/O 接口起信息转换和协调的作用。典型的 I/O 接口结构框图如图 3-5，它由控制寄存器、状态寄存器、数据输入寄存器和数据输出寄存器等组成。

#### 1. 数据寄存器

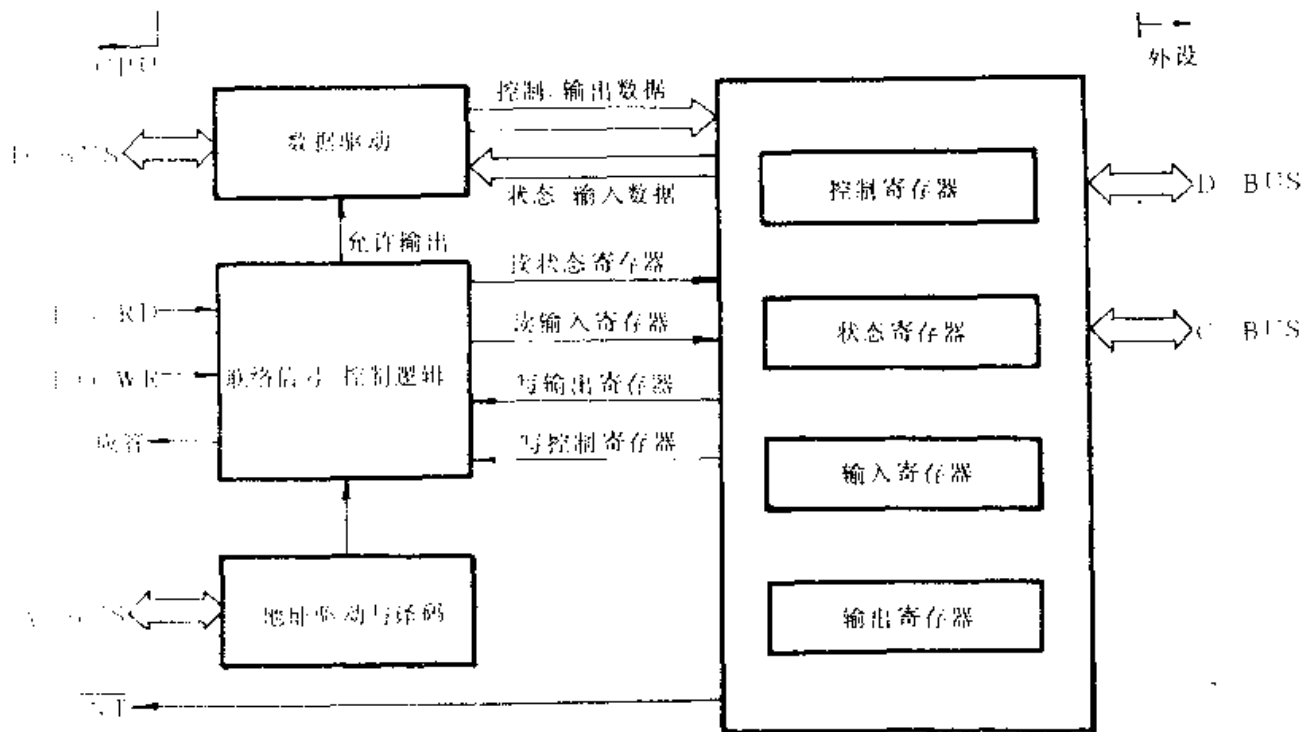


图 3-5 典型 I/O 接口的结构框图

数据寄存器主要起缓冲作用，以协调 CPU 与外设在运行速度和数据格式上的不一致。数据输入寄存器将外设来的数据暂存起来，待 CPU 发来读输入寄存器信号时，由 CPU 将数据取走；数据输出寄存器在写输出寄存器信号的控制下，将 CPU 传送来的数据暂存起来，等待外设取走。

### 2. 控制寄存器

控制寄存器存放 CPU 发来的控制命令（控制字）和其他信息，这些控制字一般用来说明（定义）I/O 接口的工作方式、指定（设置）某些参数等。

### 3. 状态寄存器

状态寄存器用以存放外设现行的状态信息，供 CPU 判断并作相应处理。

一般来讲，I/O 接口还有数据总线驱动器、地址总线缓冲器、译码器、联络控制逻辑等外围电路。

## 第二节 Z80 指令系统

对于每一种型号的微型计算机，能执行什么样的指令、能执行多少种不同的指令、怎样表示操作码、具有什么样的寻址方式等，都有各自不同的规定。用机器语言或汇编语言来编制程序，必须对所使用的计算机的指令系统十分熟悉，才能根据应用要求，编写出合理的应用程序。所以说，指令系统是微型计算机编程软件的基础。

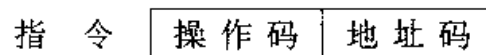
由于 Z80 单板机是国内目前较多使用的微型计算机，并且它的结构简单，功能齐全，用途较广，在微机中有一定的代表性，所以本节以 Z80 的指令系统为例来分析。

### 一、指令与指令格式

指令就是控制计算机进行各种操作和运算的代码型式的命令，是用二进制数码表示的一种信息。不同计算机具有不同的指令编码规律。一台计算机具有的一套（若干条）代码指令就是该机的指令系统。

#### 1. 指令格式

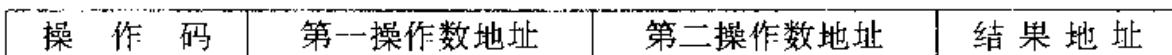
一条指令代码由操作码和地址码组成。即：



操作码规定进行何种操作，地址码指明进行操作的数据在哪里取，操作结果又存放何处。

#### 2. 指令的地址码

地址码一般包括三段：



按其段数多少，指令可分为：

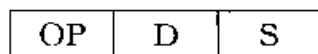
#### (1) 三地址指令



其中 OP——操作码 S——源地址 D——终地址

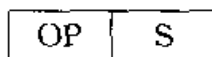
完成操作 (S<sub>1</sub>) OP (S<sub>2</sub>) → D

(2) 双地址指令



完成操作 (S) OP (D) → D

(3) 单地址指令



完成操作 (A) OP (S) → A

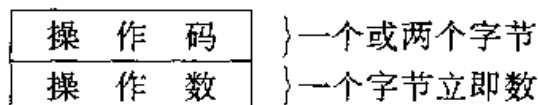
其中 A——累加器

## 二、寻址方式

通常微型计算机的微处理器总是和存储器一起使用的。作为一个程序都需要把指令及数据预先按次序存在存储器中。操作指令一般包括操作指令码和操作数。而所谓寻址方式即是操作指令如何取得操作数的方式，包含的寻址方式越多，则表明微处理器的指令处理功能越强。Z80 的寻址方式一共有 10 种，下面分别说明。

### 1. 立即寻址

立即寻址方式中，指令的操作数直接跟在操作码后面，占一个字节，常称为立即数。其指令格式为：

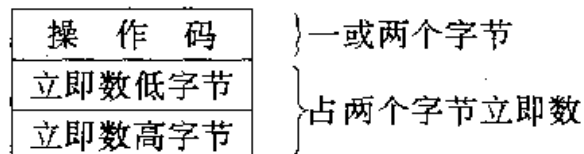


例如指令：LD A, 36H 表示将 36H 这个立即数装入累加器 A。

立即寻址方式，主要用来为指定的寄存器或存储单元装数或完成常数的算术运算。

### 2. 立即扩充寻址

这种寻址方式和立即寻址方式相似，只是操作数为十六位立即数，占两个字节。指令的格式为：



例如指令：LD HL, 2040H 表示将 16 位立即数 2040H 送入到寄存器对 HL 中去，其中高字节存入 H，低字节存入 L。

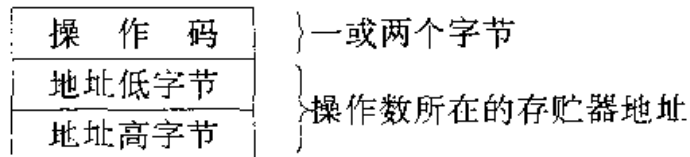
### 3. 寄存器寻址

这种寻址方式指定编程模型中的一个寄存器中的内容为操作数。

例如：ADD A, B 指令，表示累加器 A 的内容和寄存器 B 的内容相加，加后存回累加器 A。

### 4. 扩充寻址

扩充寻址又称为直接寻址，它的特点是在指令操作码后面紧跟着操作数存储单元的地址。由于存储器地址为 16 位，占两个字节，可以寻址 64k 存储器中的任一单元。指令格式为：



例如：LD A, (2080H) 指令，表示将存贮器 2080H 地址单元的内容 XXH 取到累加器 A 中。

### 5. 寄存器间接寻址

寄存器间接寻址方式指令指定某一对寄存器 (HL、DE 或 BC) 的内容作为操作数在存贮器单元的地址指针。

例如：指令 ADD A, (HL) 表示累加器 A 的内容加上以 HL 寄存器内容 (16 位) 为地址的对应存贮器单元内容 YYH 后，再存回累加器 A。

### 6. 变址寻址

变址寻址方式具有很强的功能。它的特点是操作数所在的存贮器实际地址由两部分地址数据合成。基本地址由变址寄存器 IX 或 IY 的内容决定，在指令操作码后面紧跟一个地址偏移量 (单字节)，而两者相加后获得一个 16 位的实际地址，该地址指向操作数所在的存贮器单元。

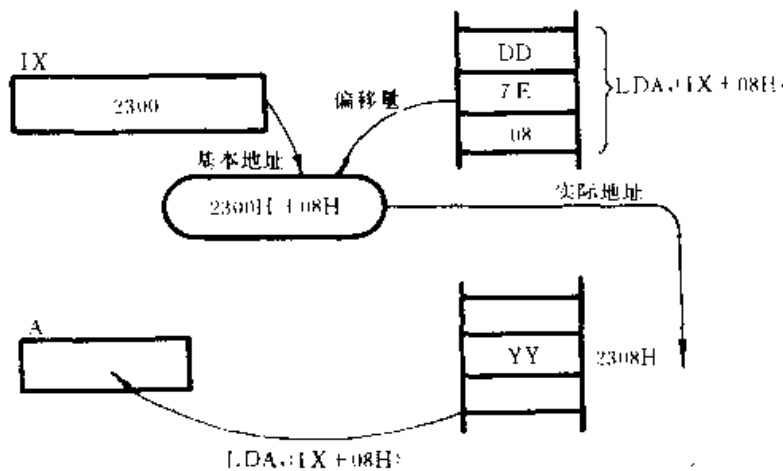


图 3-6 变址寻址示意图

例如：指令 LD A, (IX + 08) 表示用变址寻址方式取数据 YYH 到累加器 A 中，指令格式与取数操作见图 3-6。

### 7. 隐含寻址

隐含寻址方式指令操作数没有明显指明，但指令本身隐含着操作数所在的寄存器。

例如：指令 EXX 表示 BC、DE、HL 寄存器或存贮器对的内容与 BC'、DE'、HL' 寄存器对的内容进行交换。

寄存器对的内容进行交换。

以上 7 种寻址方式中操作数均为寄存器或存贮器的内容，而且以单字节或双字节作为数据处理的单位。

### 8. 位寻址

位寻址与上述寻址方式不同，指令操作对象是字节中的某一位，而不是整个字节。

例如：指令 SET 2, B 即表示对 B 寄存器内容中的 D2 位的内容置 1。

### 9. 零页寻址

这是一种程序转移的寻址方式。通过指令的执行，程序转向存贮器地址 0000H~00FFH (零页面) 范围内的 8 个地址入口。使用零页面寻址方式的指令称为重新启动指令。

例如：RST P 指令的格式与对应的程序入口地址如表 3-2 所示。

表 3-2

指令操作码  $11NNN111$  对应入口地址表

N	N	N	入口地址	P (H)
0	0	0	0000H	00
0	0	1	0008H	08
0	1	0	0010H	10
0	1	1	0018H	18
1	0	0	0020H	20
1	0	1	0028H	28
1	1	0	0030H	30
1	1	1	0038H	38

### 10. 相对寻址

相对寻址是应用较多的程序转移寻址方式，它以 PC 中的内容为基本地址，而在指令中的第二个字节存放相对转移量。相对转移量和基本地址相加后构成程序转移地址。相对转移量以补码形式装入，当转移量为正数（01~7FH）时，PC 增量，程序向存储器高地址方向转移。当转移量为负数（80H~FFH）时，PC 减量，程序向存储器低地址方向转移。

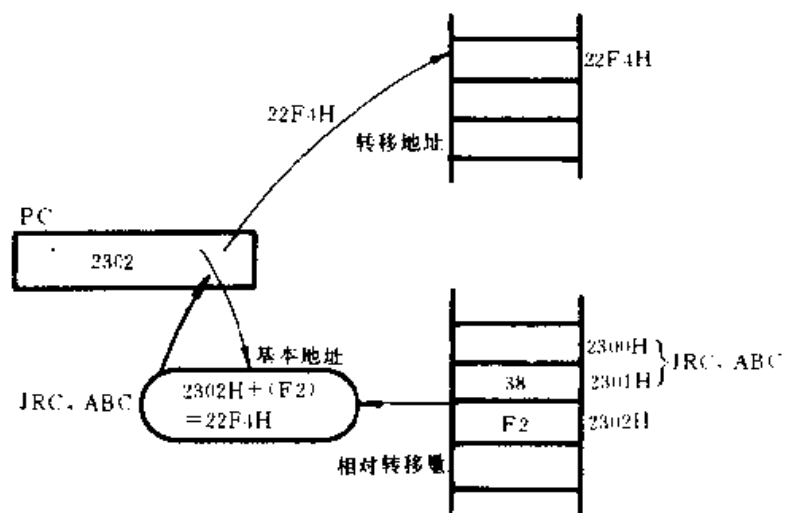


图 3-7 相对寻址示意图

例如：指令 JRC, ABC

以相对寻址方式执行，在执行完 JR 指令后，使程序转移到标号为 ABC 的入口地址。指令格式和转移方式见图 3-7。

## 三、Z80 指令

Z80 指令系统共有 158 条指令。若按指令进行操作的特点来分，可分成四大类。

### 1. 数据传送指令

大多数 Z80 指令的操作是将数据在寄存器、存储器和外设内部或三者之间进行传送。这类指令不改变操作数，只是将操作数由一处传送到另一处，这种指令占 Z80 指令的大多数。

### 2. 数据操作指令

这类指令包括一些算术运算、逻辑运算和循环、位移等指令，经过操作和运算后，结

果不同于参与操作的数。

### 3. 程序控制指令

这一类指令既不传送数据，也不对操作数进行加工，它的功能只是改变程序执行的顺序和方向。

### 4. CPU 控制指令和位控制指令

CPU 控制指令的数量很少，它们的功能是使 CPU 暂停或空操作以及改变 CPU 内的一些触发器的状态等。

限于篇幅，不再对各条指令进行赘述。在附录（五）中给出了完整的 Z80 指令表供学习参考。

## 第三节 汇编语言及程序设计

上一节介绍的 Z80 指令系统，在机器中是用二进制编码表示和存贮的，这样的编码就称为机器指令或机器码，用这种机器指令形式所编成的程序就称为机器语言程序。机器码不易懂，不好记忆，易出错，这些都给编制程序带来了很大的困难。微机系统使用的各种高级语言易学，应用方便，通用性强，程序也较短，但是必须经过编译才能执行。而一般的编译程序要占 16k~32k 的内容，要求机器的内存容量大，同时执行的时间比机器语言大约要长 50%~300%，这在实时控制中则是一个突出的问题。为解决这些问题，目前在控制系统中常采用汇编语言。

### 一、汇编语言

汇编语言就是用字母数字符号来表示指令、寄存器、数据和存贮地址，并在程序中使用它们来代替二进制数。用汇编语言编制的程序称为源程序。但是，计算机只认得机器语言，用汇编语言编写的源程序只有经过汇编程序翻译成机器语言的程序——目标程序才能执行，这个翻译过程就称为汇编。

下面介绍汇编语言的语法规则。

#### 1. 字段结构

一般汇编语言语句分四个字段：

标号：	操作码	操作数	注解
-----	-----	-----	----

例如：ADDMOR: LD A, (DE); 被加数低字节送 A

(1) 标号 用于指令所在位置的代号或某些伪指令的操作数。如上例冒号前的 ADDMOR。标号不是每一行都必需的，它可以是一个不多于 6 个字符的字符串，第一个字符必须是大写英文字母，一般以冒号结束，也可不跟冒号。下面这些字符给寄存器用，不能作为标号：A、B、C、D、E、H、L、R、IX、IY、SP、PC、AF、BC、DE、HL。下面这些字符留给分支条件用，也不能作为标号：C、NC、Z、M、P、PE、PO。此外，所有 Z80 指令的操作码（助记符）和下面介绍的伪指令码均不得作为标号。

(2) 操作码 是汇编程序每一行必需的部分。它可以是 Z80 的指令、伪指令和宏指令。操作码与操作数的分隔，一般是一个空格。

(3) 操作数 是用逗号分隔的一个或两个值。操作数可以是数字，一个表达式或用标号及寄存器名字表示的操作数的地点。如 LD2000, TIME.2000 及 TIME 就是指令 LD 的两个操作数。

(4) 注解 此段是程序设计者对该行指令的说明，必须由“;”号开始。汇编程序对此部分是不予理会的。

## 2. 利用机器汇编程序

汇编的方法有两种，一种是人工汇编，烦琐易错；另一种是机器汇编，即利用软件——“汇编程序”来完成汇编工作。

为了用户方便，每种汇编程序基本都给出了用户程序符号表、源程序查错、错误语句和错误性质。应用时，只须注意汇编程序的约定就行了。

## 3. 伪指令

除前述用于完成某项操作的指令外，对汇编程序还需要一些用于告诉汇编程序如何进行汇编的指令。它们不控制计算机的操作，不产生机器代码，只为汇编程序所识别，这类指令称为伪指令。系统的伪指令很多，可查阅有关手册，常用的有下面几种。

(1) 汇编起始地址说明伪指令 ORG 其一般形式为： ORG nn

其中 nn 是 16 位二进制数，即为地址值。此语句总是出现在每段源程序或数据块的开始部分，它说明此语句后面的程序或数据块的起始地址。在汇编时由 nn 确定第一条指令（或第一个数据）的地址，指令（或数据）就连续放在以后的地址内，直到遇到另外一个 ORG nn 语句时为止。

(2) 定义字节伪指令 DB 或 DEFB 其一般形式为：〈标号〉 DB 〈项或项表〉 其中项或项表是指一个字节，或用逗号分开的字节串，或以引号括起来的字符串。此指令的功能是把项或项表的数值（字符则用它的 ASCII 码）存入从标号开始的连续单元中。

(3) 定义字伪指令 DW 或 DEFW 其一般形式为：〈标号〉 DW 〈项或项表〉 DW 的功能与 DB 的功能基本上相似，两者的区别在于 DB 的项是一个字节，DW 的项是一个字（规定为两个字节，亦即一个字为 16 位二进制数）。所以，DW 主要用来定义地址，并把两个字节中的高位放在后面的单元中。

(4) 名字说明伪指令 EQU 其一般形式为：〈标号〉 EQU 〈项〉 该指令的功能使两边的两个量等值。如：

```
AREA1: EQU 1000H
```

即给符号地址 AREA1 赋以地址 1000H。

但是，使用 EQU 语句给一个标号赋值后，那么它在整个源程序中的值即是固定的，不能更改。若要更改就得使用伪指令 DL。

## 二、汇编语言程序设计方法

程序设计是一项技巧性很强的工作，要想熟练地编程，使所编的程序既能实现所要求的目标，又编得简单，执行起来又快捷，除了可参阅有关编程技巧的书籍外，最主要的是要通过反复实践，才能熟能生巧。本节仅介绍算法与框图两个基本概念。

### 1. 算法



编写程序的第一步就是要订出总的计划，确定解决问题的操作步骤或运算次序，这种解决问题的操作步骤或计算称为算法。算法具有以下五个性质：

- (1) 有限性 一个算法在经过有限步数后必须结束。
- (2) 确切性 算法的每一步必须有精确的定义，不能含糊。
- (3) 输入 一个算法可以要求（或不要求）对某些初始量加以说明。
- (4) 输出 一个算法具有一个或几个输出，完全和输入量及算法本身特点有关。
- (5) 有效性 一个算法当具有可以预计而且有用的结果。

例：两个 16 位二进制的求和问题。

设将两个 16 进制数 NA 和 NB 相加，结果放到 LOCA 和 LOCA+1 两单元中。步骤如下：

- (1) 加数 NA 送寄存器对 BC 中： $BC \leftarrow NA$
  - (2) 被加数 NB 送 HL 中： $HL \leftarrow NB$
  - (3) BC 与 HL 内容相加，结果存 HL： $HL \leftarrow HL + BC$
  - (4) HL 内容存至 LOCA 及 LOCA+1 单元中： $(LOCA+1) \leftarrow H, LOCA \leftarrow L$
- 若加上对 NA, NB 的赋值，计算结果便确定了。

## 2. 框图

框图又称流程图。对于一个复杂的算法，并不是都能用数学公式表达的，这时可用框图进行图解表示，既直观又利于编制程序，是汇编语言程序设计十分重要的一步。

一般可将框图分成三级：

(1) 概念级框图（系统框图、粗框图） 用来确定本程序“做什么？”。

(2) 算法级框图（综合框图） 用来确定“这些工作如何去做？”，即给出具体步骤。

(3) 指令级框图（详细框图） 用来详细确定这些工作是如何实施操作的。这里的“操作”指对应的为数很少的指令。

框图的有关符号表示如图 3-8 所示。

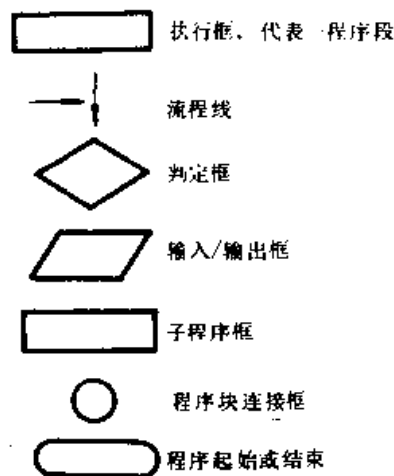


图 3-8 程序框图符号

## 第四节 单片微机原理

单片微机 (single-chip microcomputer) 是把微型计算机主要部分都集成在一块芯片上的单芯片微机。由于其高度集成化，缩短了系统内的信号传送距离，优化了结构配置，大大地提高了系统的可靠性及运行速度，同时它的指令系统又很适合于工业控制的要求，所以单片机在机电一体化技术中得到广泛的应用。

本节以 MCS-51 系列单片机为例，简要介绍单片机的硬件结构、指令系统和开发方法。最后为便于选用单片机，介绍一些单片机的其他内藏功能。至于单片机的实际开发，

尚需参考其他有关文献和资料。

## 一、单片机的硬件结构

所谓单片机就是把微型计算机的各组成单元，如中央处理器（CPU），程序存贮器（ROM），数据存贮器（RAM）和各种输入输出接口（I/O）集成到一块芯片上。与常用的单板机相比，单板机是由若干不同逻辑功能的集成芯片，通过在印刷电路板上的连线，将它们连接起来，组成一台微型计算机，与外围设备的接口，则通过标准引线，例如 S-100 总线连接。而单片机已将不同逻辑功能的几大部件都集成在一块芯片中，因此从结构上看，它们都挂靠在内部总线上。采用这种结构可减少片内连线的数量，从而提高集成度。所以，从直观上可将单片机看成单板机的微型化和集成化产物。从内部结构看，它本身就是个完整的计算机，从外部看，它又是一个专用的控制部件，也就是说，它又可看成诸如电机控制、温度控制等控制电路的一个控制元件。

下面以 MCS-51 系列单片机为例，围绕其特点简要介绍单片机的结构原理。

MCS-51 系列单片机是美国 Intel 公司继 MCS-48 之后推出的产品，在我国有较多的用户，单片机和开发工具都易于购入。它包括 8051、8052、8031、8032 与内藏 EP-ROM（电可编程、紫外线可擦）的 8751 开发芯片，和 HC-MOS 芯片 8DC51，其性能示于表 3-3。图 3-9 给出 MCS-51 单片机内部结构框图和引脚分配图。

表 3-3 MCS-51 系列单片机性能表

项 目		8051	8031	8052	8032	80C51	
特 性	工作电压 (V)	4.5~5.5	4.5~5.5	4.5~5.5	4.5~5.5	4~6	
	消耗电流	工作 (mA)	125	125	175	175	40
		静态 ( $\mu$ A)	20000	20000			50
	执行时间 ( $\mu$ s)	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	
工作温度 ( $^{\circ}$ C)		0~70	0~70	0~70	0~70	0~70	
功 能	ROM 容量 (k 字节)	4	—	8	—	4	
	RAM 容量 (字节)	128	128	256	256	192	
	扩张内存 (k 字节)	64	64	64	64	64	
	输入输出兼用口 (I/O)	32	32	32	32	32	
	定时/计数器	16 位 $\times$ 2	16 位 $\times$ 2	16 位 $\times$ 2	16 位 $\times$ 2	16 位 $\times$ 2	
外部中断		2	2	2	2	2	
内部中断		3	3	4	4	3	
串行输入输出		异步或同步	异步或同步	异步或同步	异步或同步	异步或同步	
其 他	封装	40DIP	40DIP	40DIP	40DIP	40DIP	
	工艺	HMOS	HMOS	HMOS	HMOS	HC-MOS	
	开发芯片	EP-ROM 内藏 8751	EP-ROM 内藏 8751			EP-ROM 内藏 87C51	

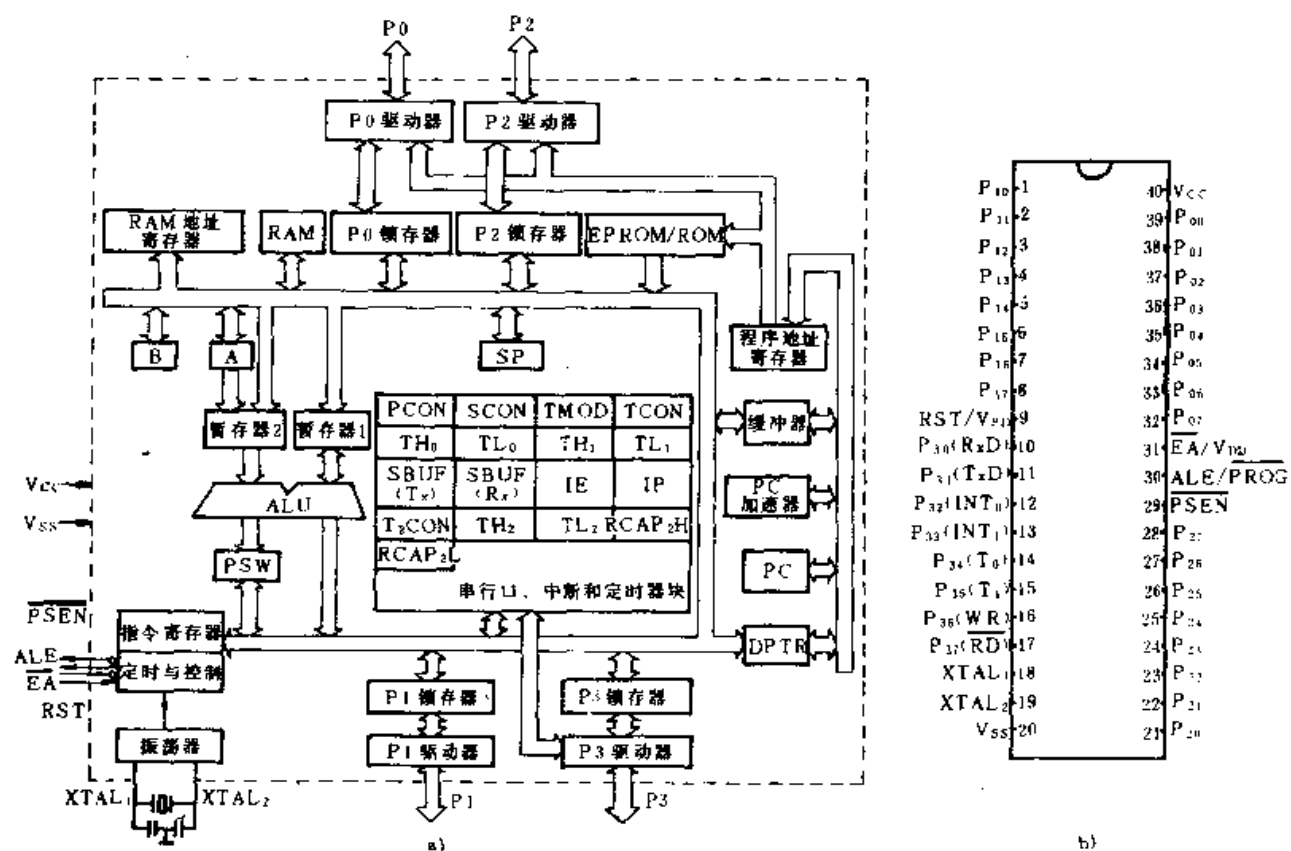


图 3-9 MCS-51 单片机  
a) 内部结构框图 b) 引脚分配图

## 1. CPU

MCS-51 系列单片机的 CPU 可以分为运算器和控制器二部分。运算器功能部件包括算术逻辑运算部件 ALU、累加器 A、寄存器 B、暂存器 TR、程序计数器 PC、程序状态字寄存器 PSW、堆栈指针 SP、数据指针寄存器 DPTR 以及按位操作的位处理器等。控制器功能部件包括指令寄存器、指令译码器、控制逻辑阵列 PLA 等。

与 Z80 相比，MCS-51 系列单片机的累加器 A 在数据传送、逻辑操作等方面的核心作用受到了削弱，数据可以在片内直接/间接地址的存储器之间直接传送而不必经过累加器 A。直接地址的存储器也可和常量直接进行逻辑运算。

## 2. 存储器

存储器也分为数据存储器 (RAM) 和程序存储器 (ROM)。整个存储器的映象如图 3-10。RAM 和 ROM 的地址空间重叠，由不同的控制信号选通。

RAM 用于暂存程序执行过程中需要经常存取的一些数据。MCS-51 片内数据存储器分为一个 256 个字节 (或 128 字节) 的内部数据 RAM 地址空间 (00H~FFH) 和一个 128 字节的特殊功能寄存器地址空间 (80H~FFH)。为了解决 RAM 区 80H~FFH 与特殊功能寄存器地址空间重叠的问题，在指令中对二者采用不同的寻址方式，即特殊功能寄存

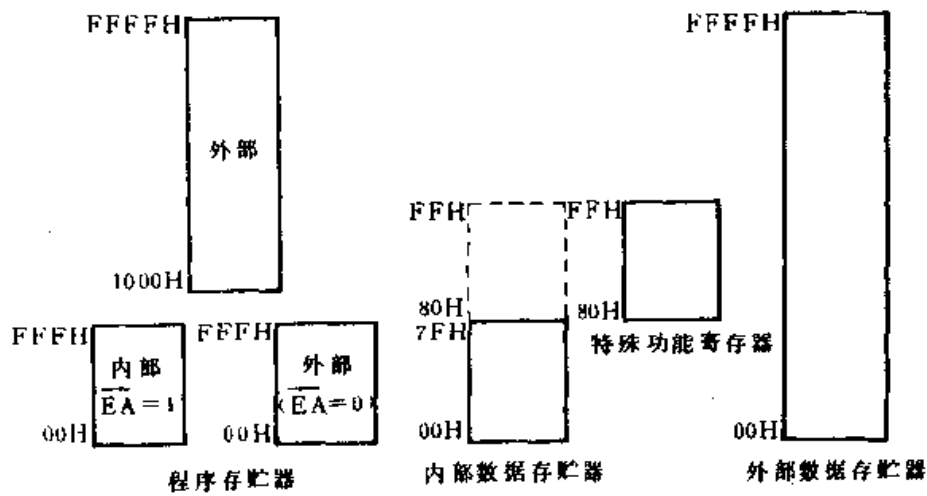


图 3-10 存储器映象

器只能用直接寻址方式，而 RAM 区 80H~FFH 单元只能用间接寻址方式。把物理上分散在片内各处的具有某种特定功能的一些寄存器，组织在特殊功能寄存器的地址空间中，使用统一的直接寻址方式访问，这是 MCS-51 系列单片机的一个重要特点。它使单片机许多不同功能的实现，在指令形式上变得极其简单和统一，减少了指令的种类和数量。

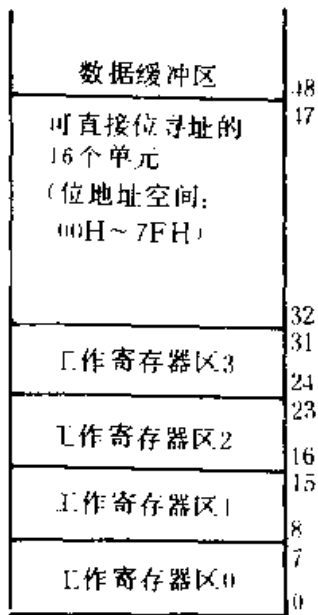


图 3-11 内部数据存储器结构

内部数据存储器的结构示于图 3-11 中，它包括有四个工作寄存器（0~3），每个工作寄存器占 8 个单元，另外还有 16 个单元允许直接进行位寻址。位地址 00H~7FH 依次与内部数据存储器地址为 20H (32)~7FH (47) 的单元从低位到高位相对应。例如位地址 00H~07H 依次对应于地址单元 20H 的 0~7 位，位地址 08H~0FH 依次对应于地址单元 21H 的 0~7 位。其余为数据缓冲区。

8051、8751、8031 有 21 个特殊功能寄存器，8052、8032 有 26 个特殊功能寄存器。它们大致可分为算术运算寄存器、指针寄存器、并行 I/O 口、串行 I/O 口、中断系统和定时器六类。各特殊功能寄存器的映象示于表 3-4。其中 P<sub>0</sub>~P<sub>3</sub>、TCON、SCON、T<sub>2</sub>CON、IE、IP、PSW、A、B 寄存器（它们的地址可被 8 整除）允许直接位寻址。位地址项中的位地址依次与地址单元的 0~7 位相对应。

当在片 RAM 空间不够时可以扩展外部数据存储器。允许扩展的外部数据存储器地址空间可达 64k。

表 3-4

特殊功能寄存器映象

符 号	名 称	地址 (十六进)	位地址 (十六进)	符 号	名 称	地址 (十六进)	位地址 (十六进)
B	寄存器	FO	FO~F7	SCON	串行控制/状态寄存器	98	98~9F
A	累加器	EO	EO~E7	P <sub>1</sub>	口 1	90	90~97
PSW	程序状态字寄存器	DO	DO~D7	TH <sub>1</sub>	定时器 1 高 8 位	8D	
TH <sub>2</sub>	定时器 2 高 8 位	CD		TH <sub>0</sub>	定时器 0 高 8 位	8C	
TL <sub>2</sub>	定时器 2 低 8 位	CC		TL <sub>1</sub>	定时器 1 低 8 位	8B	
PCAP <sub>2</sub> H	定时器 2 陷阱寄存器高 8 位	CB		TL <sub>0</sub>	定时器 0 低 8 位	8A	
PCAP <sub>2</sub> L	定时器 2 陷阱寄存器低 8 位	CA		TMOD	定时器方式寄存器	89	
T <sub>2</sub> CON	定时器 2 控制寄存器	C8	C8~CF	TCON	定时器控制寄存器	88	88~8F
IP	中断优先级控制寄存器	B8	B8~BF	PCON	电源控制寄存器	87	
P3	口 3	BO	BO~B7	DPH	数据指针高 8 位	83	
IE	中断允许控制寄存器	A8	A8~AF	DPL	数据指针低 8 位	82	
P <sub>2</sub>	口 2	AO	AO~A7	SP	堆栈指针	81	
SBUF	串行数据缓冲器	99		PO	口 1	80	80~87

程序存储器主要用于存放程序及一些常数。MCS-51 系列单片机的 16 位程序计数器 PC 和 16 根地址总线使其具有 64k 程序存储器寻址能力。8031、8032 因无片内程序存储器只能从外接程序存储器取指。8051、(8052)/8751 片内 ROM/EPROM 占据了最低的 4k (8k) 地址, 故当 PC 在 0~4k (8k) 范围内时, 可以从内部或外部程序存储器取指, 而当 PC 超出这一范围时, 将自动从外接程序存储器取指。

### 3. 并行 I/O 口

MCS-51 系列单片机的 32 根 I/O 线分为四个并行口 (P0~P3), 每一根 I/O 线都能独立地用作输入或输出。P0 口受内部控制信号的控制, 可以有地址 (低 8 位) / 数据总线和 I/O 口两种工作状态。P1 口只有 I/O 口一种工作状态。P2 口受内部控制信号控制, 可以有地址 (高 8 位) 总线和 I/O 口两种工作状态。P3 口除用作一般 I/O 口外, 每一根线都可执行与口功能无关的第二种输入/输出功能。并行 I/O 口有较强的驱动能力, P0 口能驱动 8 个 LSTTL, P1~P3 可以驱动 3 个 LSTTL。

### 4. 串行 I/O 口

串行数据通讯方式, 大体可分为同步式和异步式。同步式串行通讯除数据的串行输入和输出端外, 还有定时器专用的输入和输出端与之同步, 进行数据的传送。这种方式, 由于数据的传送和定时器同步, 传送速度比异步串行通讯高。它主要用于外带移位寄存器扩展 I/O 的情形以及象 LCD (发光二极管) 显示和 CRT (阴极射线管) 显示之类需要串行输入输出外设的情形。异步式通讯只用数据线传送由开始位到末了位之间的一定长的数据。用于具有外部通讯功能的打印机、中西文处理机以及多机通讯等。

MCS-51 系列单片机的串行 I/O 口可提供同步或异步工作方式。其中异步工作方式

又可分为三种方式。方式 0 为同步通讯方式,方式 1 为波特率(串行口每秒钟发送或接收的位数)可变的 8 位异步通讯方式,可与有标准串行接口的设备相接,方式 2 为固定波特率的 9 位异步通讯方式,用于多机通讯等,方式 3 为波特率可变的 9 位异步通讯方式。

## 5. 中断

MCS-51 系列单片机有 5/6 个中断源。它们可以是外部中断请求信号  $\overline{INT_0}$  和  $\overline{INT_1}$ , 定时器的溢出或串行口发送/接收完一帧信号后所引起的。也可通过软件对定时器控制寄存器 TCON 或串行控制/状态寄存器 SCON 置位产生中断,其效果和硬件置位一样。用软件人为地产生中断正是 MCS-51 系列单片机的又一大特点。

## 二、单片机的指令系统

指令系统是控制计算机进行指定操作的编码。与 Z80 指令系统相同,MCS-51 系列单片机的指令系统也具有机器语言和汇编语言二级形式。汇编语言的程序必须经过汇编,变成机器语言指令序列才能执行。汇编语言形式上同样由标号段、操作码段、操作数段、注释段组成。与 Z80 指令系统相比,MCS-51 单片机指令系统的一个重要特点是把体现单片机各种功能的寄存器组织在统一的特殊功能寄存器地址空间中,用直接寻址或直接位寻址的办法实现单片机各种操作,使指令系统显得规整、简洁、易理解,也使指令系统功能更强、更有效。

MCS-51 系列单片机操作数的寻址方法有:

(1) 寄存器寻址 它允许访问所选到的四组工作寄存器区中任一组的  $R_0 \sim R_7$ , 以及累加器 A、寄存器 B、乘除法寄存器 AB 和数据指针 DPTR。

(2) 直接寻址 它提供了访问存贮器映象字节形式的特殊功能寄存器(地址:  $80H \sim FFH$ ) 的唯一途径,也可访问片内 RAM 的 128 个字节 ( $00H \sim 7FH$ )。

(3) 直接位寻址 它可寻址片内 RAM 的 16 个字节(地址:  $20H \sim 2FH$ ) 的每一位(位地址:  $00H \sim 7FH$ ),位地址的排列从地址  $20H$  的最低位至地址  $2FH$  的最高位依次排列。

(4) 寄存器间接寻址 它使用所选定的一个工作寄存器区的  $R_0/R_1$  的内容或使用堆栈指针的内容来访问片内 RAM ( $00H \sim 0FFH$ )。也用于访问外部数据存贮器,这时如用  $R_0/R_1$ , 则可访问 256 字节块(页)中的某一单元,块(页)号能由  $P_2$  口的内容事先选定;如用 16 位数据指针 DPTR,则可访问全部 64k 外部数据存贮器地址空间的任一单元。寄存器间接寻址可用于汇编时单元地址并不明确,在运行时才能明确的场合。

(5) 立即寻址 它允许在指令中使用常数,它作为指令一部分存放在程序存贮器中。

(6) 变址寻址 它把基址寄存器(PC 或 DPTR)和变址(偏移量)寄存器 A(无符号数)相加来形成操作数的地址。

(7) 相对寻址 在条件转移指令中,给定的是偏移量。指令执行时,下一条指令程序计数器 PC 的内容作为基址,加上指令中给定的相对偏移量(补码),得到所需要的转移地址。

MCS-51 系列单片机指令系统共有 111 条指令,其中单字节指令 49 条,双字节指令 45 条,三字节指令 17 条。按其功能大致可分为数据传送指令、算术运算指令、逻辑运算

指令、控制转移类指令和位操作指令 [参见书末附录 (六)]。为便于阅读和使用这些指令，将指令中所用到的符号及其含义说明如下：

A	累加器
AB	乘除法的寄存器对
addr	程序存储器地址
B	乘除寄存器
bit	可直接位寻址的位
$\overline{\text{bit}}$	可直接位寻址的位的反
C	进位标志
D	半字节 (4 位)
data	立即数
DIRECT	直接数据单元地址
PC	程序计数器
PSW	程序状态字寄存器
rel	相对地址
$R_j$	寄存器间接寻址的寄存器 ( $j=0, 1$ )
$R_r$	工作寄存器 ( $r=0\sim 7$ )
SP	堆栈指针
X	外部数据存储器
#	立即数前缀
@	寄存器间接寻址前缀
\$	程序计数器的当前值
(X)	X 的内容
( (X) )	X 的内容为址的单元的内容
→	送入

有了 Z80 指令系统的知识，了解 MCS-51 系列单片机的结构和操作数寻址方式，查阅附录 (六) 的指令附表，即可阅读和编制一些简单的程序。

例 1 编制 2 位十进制减法，即两个 2 位 BCD 码数相减的子程序。

由于没有十进制减法指令，也没有十进制减法调整指令，所以先将减数进行十进制求补，使减法变成加法，然后用十进制加法调整指令来调整运算结果，所得到的是十进制补码形式的差值。当  $C=1$ ，表示差值为正，得到的结果就是差值 (BCD 码)；当  $C=0$ ，表示差值为负，需经十进制求补后才得到差值的绝对值 (BCD 码)。设被减数在  $R_2$  中，减数在  $R_3$  中，差值返回  $R_2$ 。

程序清单如下：

```
BCDSUB: CLR  C; 进位标志 C 位清零
        MOV  A, #09AH
        SUBB A, R3
        ADD  A, R2
```

```

    DA    A
    MOV  R2, A
    JC   POSI
NEGA:  MOV  A, #09AH
    SUBB A, R3
    MOV  R2, A
    :
POSI:

```

### 三、单片机的开发环境

单片机的开发过程分为制定设计任务书、硬件开发、软件开发和编制使用说明书几个阶段。下面仅就软件开发环境加以说明。

如图 3-12 所示，首先进行系统设计。即把整个软件系统划分成若干级模块，每一级又有若干模块，规定每个数据在哪个模块中进行什么样的处理，以确定各个模块的开发任务，表示成易于理解的图表。

然后进入单个模块的设计阶段，其作用是把系统设计中规定的各个模块的任务进行细致的分析描述，画出流程图。

在单个模块开发阶段要完成该模块的编程、汇编和调试。编程、汇编可以在编译、连接程序的支持下用高级语言在通用计算机上进行。编译、连接程序的作用是把高级语言程序翻译并生成单片机的机器语言。也可以用汇编语言编程，经汇编程序把汇编语言翻译成机器语言，不过速度要慢得多。为了提高单片机的运行速度，生成高质量的机器语言，并且考虑到编程效率，往往同时采用高级语言和汇编语言编程。用通用计算机生成单片机机器语的汇编过程叫交叉汇编。不难看出，支持交叉汇编的除了屏幕编辑软件外，还要有专用的编译、连接、汇编软件。

经编程、汇编得到机器语程序后，都得进行调试，检测每个动作、各输入输出口的信号是否符合要求。调试一般要使用专门开发工具进行在线仿真调试。也可以通过专门的软件按需要检测各寄存器的状态进行模拟调试，但这样做速度要慢得多。

系统调试阶段包括连接各个模块、系统调试和资料整理。

最后根据生产规模或送集成电路生产厂家在 ROM（在片 ROM 或外接 ROM）掩膜工序装入程序或由用户自行写入 PROM（可写 ROM）或 EPROM（可写可擦 ROM）中。

下面简单介绍面向 MCS-51 系列单片机用户的简易开发工具 DVCC51-Ⅰ。它是装有 8051 系列单片机的单板机，在外接程序存储器中装有监控程序，配有键盘和小型显示窗口，相当于一个通用计算机。它可以用于 8031 或 8751 单片机的仿真调试和程序写入。它和 IBM-PC 或其兼容机通过串行接口 RS232C 可以连接成开发系统。汇编语言级的编程和汇编由该开发工具提供的编辑和交叉汇编软件实现。汇编后的机器码通过 RS232C 接口由微机送入 DVCC51-Ⅱ 的仿真 RAM 中。调试时，将 DVCC51-Ⅰ 的 CPU 仿真插头插入目标机的 8031/8751 插座，用开发系统的 CPU 取代用户目标机的 CPU，使目标机在开发工具的控制下，运行 DVCC51-Ⅰ 仿真 RAM 中的用户程序，进行在线仿真。程序的修



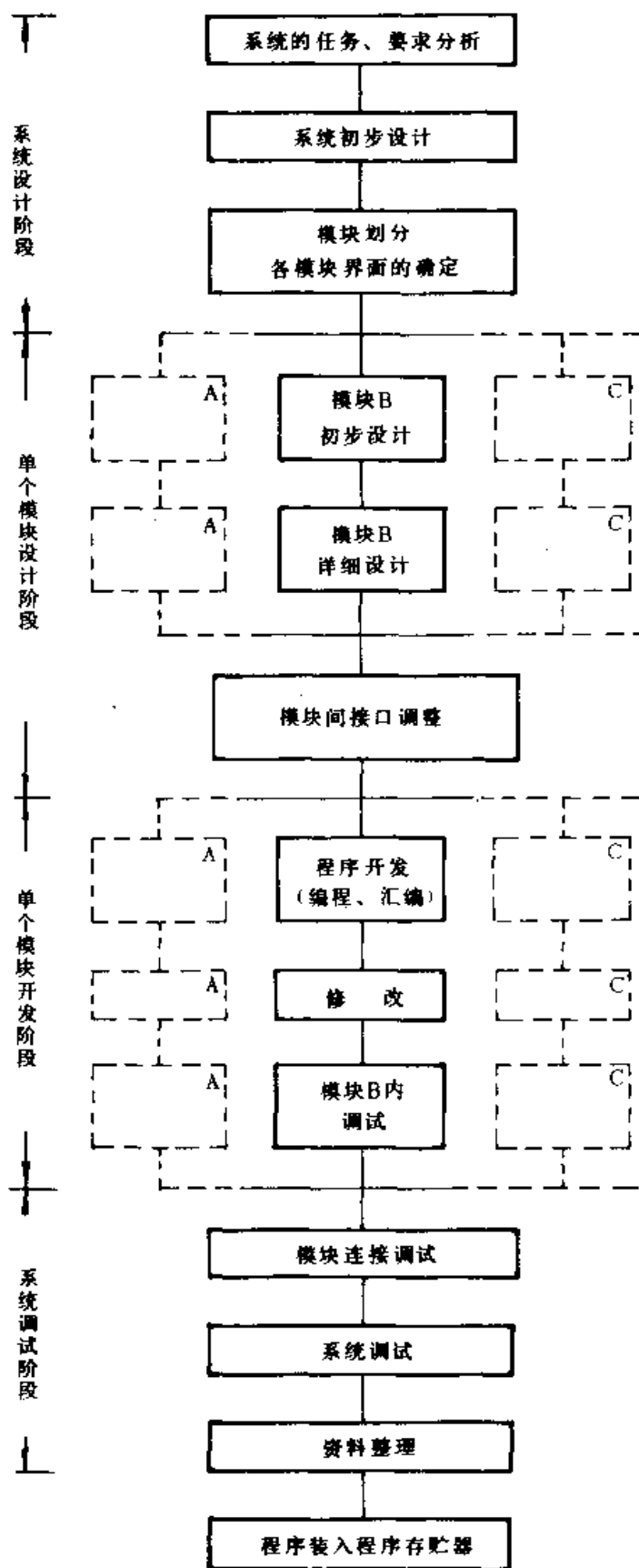


图 3-12 软件开发过程

改在微机上进行。确认程序调试正确无误后，再把 DVCC51- I 的 I/O 插头插入 EPROM 写入器的输入插座上，把 RAM 中的用户程序写入插在写入器上的 EPROM 芯片中，这些芯片可以是 EPROM 2716、2732、2764 或单片机 8751 的 EPROM。图 3-13 示出了用 DVCC51- I 开发目标机软件的方法。

#### 四、单片机其他功能简介

单片机的种类很多，功能也各不相同。除了前面介绍的 MCS-51 系列单片机所具有的并行 I/O、串行 I/O、中断等功能外，有些单片机还具有下述某些功能。了解这些功能，对于选择使用单片机有重要的作用。

##### 1. 模拟信号输入口

允许输入模拟信号的接口有交零检测口、比较输入口和 A/D 变换输入口。最通用的是 A/D 变换口，不过很多情况下，有了交零检测口和比较输入口就够用了。

图 3-14a) 示出了一种交零检测口的例子。单片机是日本 NEC 公司的  $\mu$ PD7811，电路由自偏压式高增益放大器构成，只要在输入端接上电容就可以检测输入信号的变化，产生数字脉冲。具有该功能的 8 位单片机较少， $\mu$ PD7811/7814，MN18781 (松下) 等内藏有这种功能。该功能主要用于交流电源输入的同步控制、产生与电源同步的时钟等。图 3-14b) 是与交流同步、向

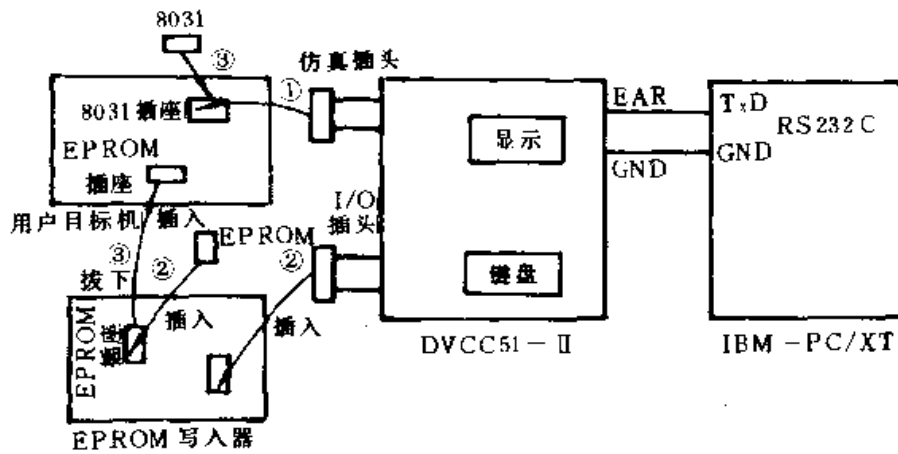


图 3-13 用 DVCC51- I 开发软件的方法

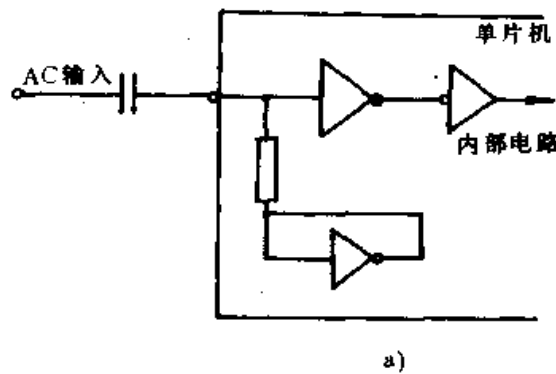
负载提供电源的三端双向可控硅开关电路的实例。

比较器输入口不必通过 A/D 变换即可输入模拟信号，用于需要按模拟信号的电平进行控制的情况。内藏比较器的单片机如  $\mu$ PD7808/7809 (NEC)，M50957/959 (三菱)，MN18781 (松下)。因其内部模拟电压可由程序设定，故可起到 A/D 变换的作用。但变换速度慢。

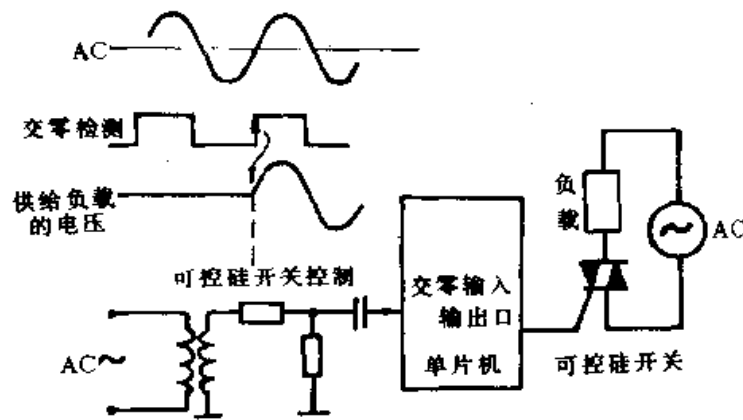
A/D 变换输入口用于输入各种传感器的模拟信号。单片机使用的是逐次比较式 A/D 变换。现在 A/D 变换速度越来越高，M50940 (三菱) 中是  $72\mu\text{s}$  (主频:  $1\text{MHz}$ )，MB89710 (富士通) 是  $56\mu\text{s}$  (主频:  $8\text{MHz}$ )，TMP90C840 (东芝) 是  $19\mu\text{s}$  (主频:  $10\text{MHz}$ )。

## 2. 模拟信号输出

模拟信号有两种输出方法，一是经 D/A 变换后直接输出模拟信号，一是作为串行信



a)



b)

图 3-14 交零检测口及应用

a) 交零检测口 b) 与交流同步向负载提供电源的开关电路

号，输出 PWM（脉冲宽度调制）信号。

具有模拟信号输出的单片机很多，输出 PWM 信号的如 MB89713/89T713（富士通），M50746/753/754/941/954 等，内藏 D/A 的如 M50744/746/963/964（三菱），MN18882 等。D/A 变换采用加权平均法。

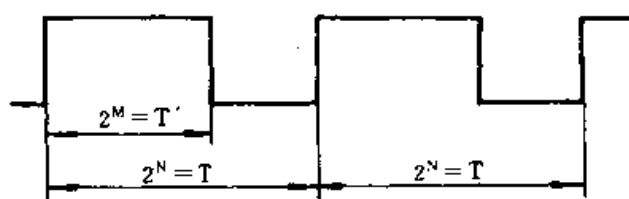


图 3-15 PWM 输出波形

PMN 输出信号如图 3-15 所示，输出周期信号的占空比的变化与数字量成正比。将该信号通过低通滤波器即可变换成模拟量。因脉冲宽度由时钟频率和数字量决定，变换精度高。

### 3. 电动机控制接口

电机控制方法因电机种类而不同，在 OA（办公自动化）设备、通讯

设备、机床进给机构控制中，步进电机用得不少。步进电机控制需要几相不同相位的信号。使用低速的 CPU，由软件实现时，不能并行完成别的工作。为此，有的单片机内藏了电机控制功能。例如，TMP90C 840（东芝）、M50734（三菱）、 $\mu$ PD78210/220/224（NEC）都配备了步进电机控制口。就性能来说，前二者是作为硬件的控制口，与此相反，NEC 的单片机配备的是高速实时口。

作为直流电机控制，可利用前述的 PWM 输出口。图 3-16 是用 PWM 输出进行直流电机控制的一例。

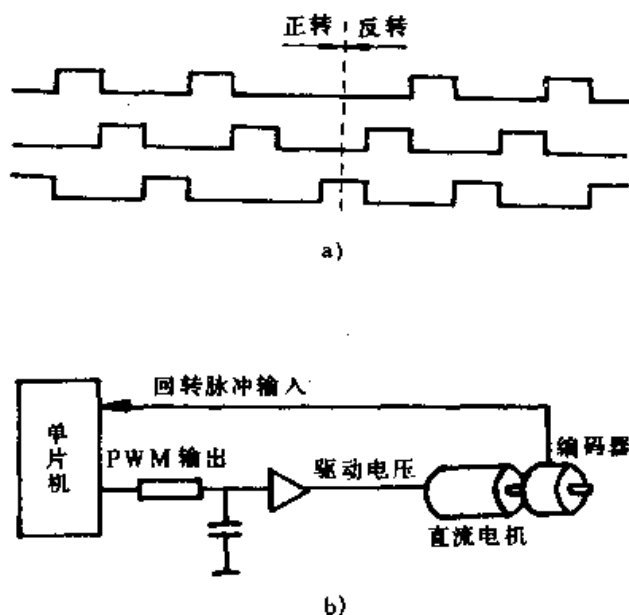


图 3-16 用单片机进行电机控制

## 第五节 可编程序控制器 (PC)

### 一、概 述

在机电一体化系统中，有相当一部分控制功能是顺序逻辑控制。顺序控制最早是由继电器系统来实现的，许多机械设备至今仍使用继电器控制。因为这种硬布线逻辑的控制方式通用性差、故障率高，对于大规模、复杂的控制系统来说，无论在造价方面还是在系统可靠性方面都不能令人满意。50 年代和 60 年代，人们曾研制出插销板式、三极管和二极管矩阵式的顺序控制器。但随着计算机的微型化和迅速普及，以微处理器为中心

的可编程序控制器很快取代了其他类型，而成为当今工业控制器的主流。

可编程序控制器简称 PC (Programmable Controller)，是微机技术与继电器常规控制概念相结合的产物。PC 应用灵活，操作方便，具有标准化的硬件和软件设计。它不仅具有控制、运算、监视、诊断和报警功能，还具有通讯和分级控制功能、打印制表和输出显示功能、测试和存贮保护功能等；既可完成顺序控制又可进行闭环回路控制，还可实现数据处理和简单的生产事务管理。

目前国内使用较多的 PC 产品有日本三菱 (MITSUBISHI) 公司的 F 系列、A 系列 PC，日本日立 (HITACHI) 公司的 E 系列、D 系列 PC 和英国通用电气 (GE) 公司的系列 1、3、6 型 PC 等。

## 二、PC 的硬件结构及工作原理

### (一) PC 的硬件结构

PC 的硬件构成与微机装置类似。以日本三菱公司的小型 F 系列 PC 为例，主要硬件构成框图如图 3-17 所示。

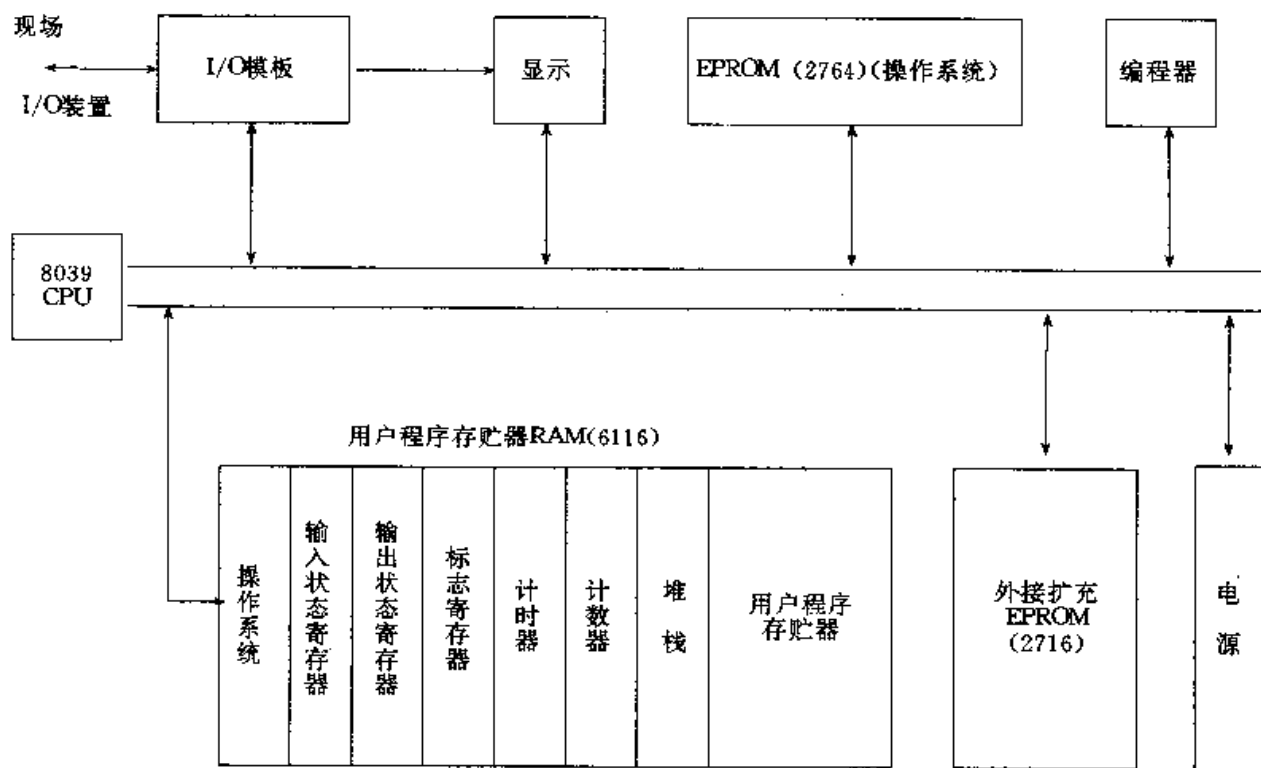


图 3-17 F 系列 PC 主要硬件构成框图

PC 配有系统程序存储器 and 用户程序存储器。产品样本或使用说明书中所列存储器及其容量是指用户程序存储器而言的。与微机不同，PC 的用户存储器通常以字 (16 位/字) 为单位来表示存储容量。PC 提供了各种操作电平和驱动能力的 I/O 模板及各种用途的 I/O 功能模板供用户选用。通常 I/O 模板还具有 I/O 状态显示和 I/O 接线端子排。编程器用于用户程序的编制、编辑、调试和监视，还可通过其键盘去调用和显示 PC 的一些

内部状态和系统参数。编程器分为简易型和智能型两类，其键盘采用梯形图语言键符或命令语句助记键符。PC 的内部电路由开关式稳压电源供电。有些 PC 还可为现场检测装置提供隔离的直流电源。为了驱动现场执行机构，用户必须按所选 I/O 模板的操作电平和负载能力提供相应的用户电源。除图 3-1 所示的主要硬件外，用户可根据需要配设其他的外部设备。

## (二) PC 的工作原理

### 1. 扫描

PC 按分时操作原理执行众多的任务，这种分时操作借助于 CPU 启动扫描来完成。通过扫描 PC 可完成各输入点的状态采集或输入数据采集、用户程序逻辑解算、各输出点的状态更新、编程器键入响应和显示更新、CPU 自检和复位扫描监视用定时器、响应调用强迫 I/O 的键入等功能。PC 的扫描既可按固定的顺序进行，也可按用户程序所指定的可变顺序进行。

### 2. I/O 接线和 I/O 信号的处理

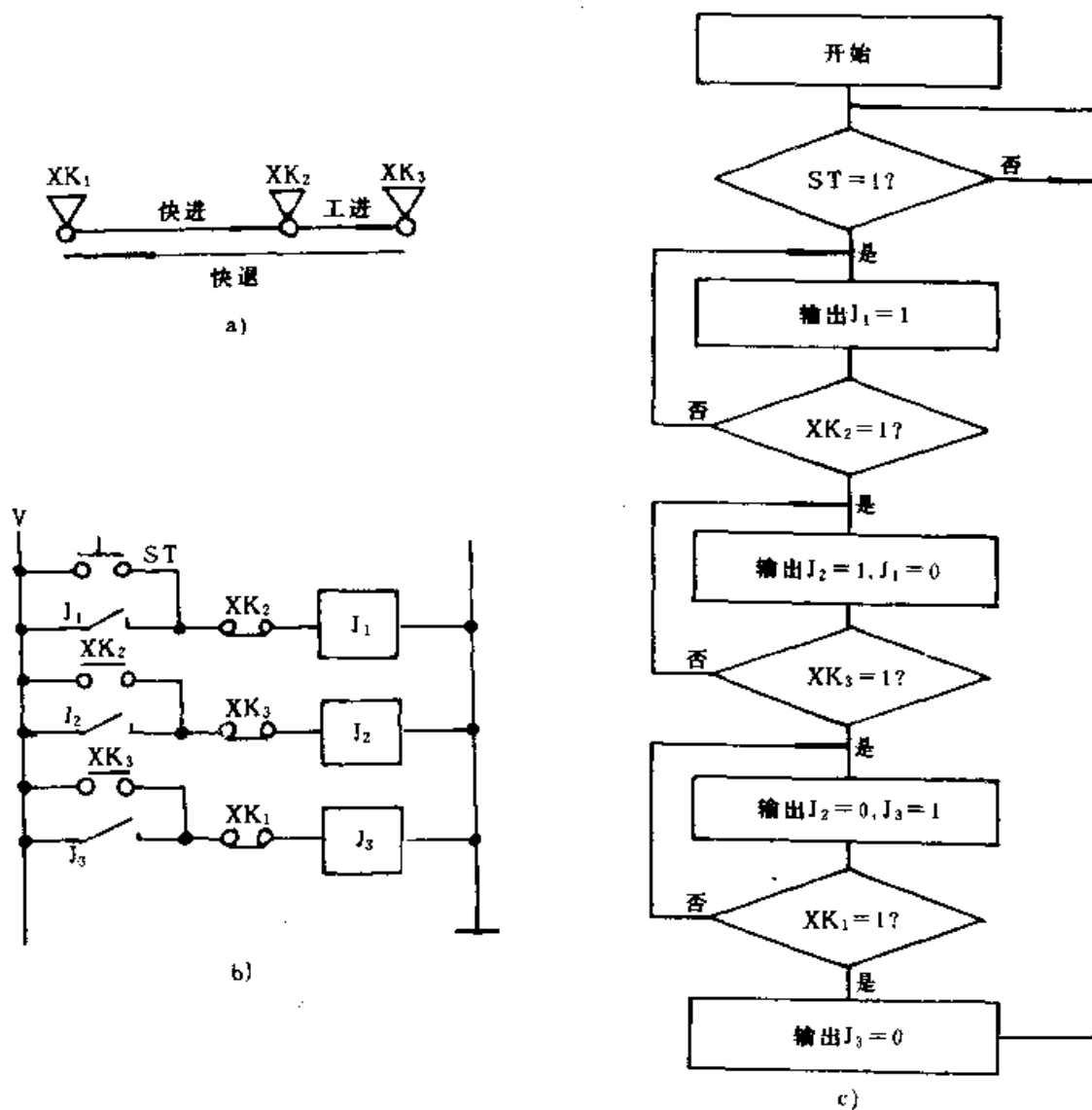


图 3-18 机床加工顺序控制

a) 加工顺序 b) 继电器控制系统 c) 程序流程

I/O 模板的面板上有用户电源连接端子和 I/O 接线端子。以 8 点 I/O 模板为例，它可连接 8 个输入点或 8 个输出点。将各种开关或执行元件的相应端子分别用导线引出，一端接入 I/O 模板的相应输入或输出端子上，另一端相互连接，接到模板的公共端子上，从而实现现场 I/O 与 PC 的连接。

各现场 I/O 状态由 PC 对 I/O 模板的扫描分别存入输入状态表和取自输出状态表。PC 周而复始地快速扫描，I/O 状态表的内容不断更新。用户逻辑的解算和输出控制是根据状态表的相应状态，而不是该 I/O 点的实时状态。I/O 状态表是存贮器的一部分。

### 3. PC 的运行和执行用户程序

用户程序是用户根据需要自行编制的程序。设有一机床的加工顺序如图 3-18a) 所示。XK<sub>1</sub>、XK<sub>2</sub>、XK<sub>3</sub> 是三个行程开关，刀具快进、工进、快退后完成一个工作循环。若采用继电器系统实现这一顺序控制，可以有多种方案。图 3-18b) 所示为其中一种，J<sub>1</sub>、J<sub>2</sub>、J<sub>3</sub> 是控制刀具快进、工进、快退的继电器。如果将上述控制方案画成程序流程图，如图 2-18c)，并将此流程图编制成用户程序，PC 投入运行后，便可代替继电器系统的硬布线逻辑控制方式完成这一机床加工的顺序控制。由于 PC 的控制逻辑是由软件决定的，当需要改变控制逻辑时，就不需要改变线路，只需改写程序即可。

将现场 I/O 装置与 PC 连接完毕并编制和调试好用户程序后，将 PC 接到测试工作方式，检查无误后投入运行。PC 先通过自检，再根据从各 I/O 读取的状态和数据开始扫描用户程序。每次扫描都要对相应的 I/O 模板访问一次，并执行一些内部处理功能，如响应编程器的键入、更新显示、与外部设备通讯、检查存贮器的保持功能等。若出现异常，PC 停止运行，并使各输出点处于断开状态。

## 三、PC 的软件简介及程序编制

### (一) PC 软件简介

PC 的程序由系统程序和用户程序组成。系统程序包括监控程序、模块化应用功能子程序以及指令解释和子程序调用的管理程序等。通常系统程序由 PC 生产厂家提供，并驻留在 PROM 或 EPROM 里，不能由用户直接存取。

用户程序是现场信号处理的全部指令和安排。在复杂的应用场合下，为使用户程序编制得简单清晰，可按功能、结构或使用目的将用户程序划分成各个程序模块，以便于调试、修改和查错。小型 PC 的用户程序基本上不分段，而是顺序编制的。

为了满足广大电气操作维修人员的传统习惯和掌握能力，通常 PC 不采用微机的编程语言，而采用继电器接点梯形图、命令语句表等编程语言表达式。语句是用户程序的基础单元，每条语句表示经 CPU 的一条指令。与微机的指令表达式类似，PC 的语句也是由操作码和操作数组成。操作码即编程命令，表示 CPU 要完成的操作功能，例如各种运算及定时、计数、移位等功能。操作数用来指明被操作信息的地址。

### (二) 编程命令及操作数的指定

#### 1. 操作数分配举例

表 3-5 说明了 GE-3 型 PC 各编程元素的操作数分配原则。

表 3-5

GE-3 型 PC 操作数的分配原则

操 作 数	说 明
0000~0617	可指定 400 个 I/O 继电器
4000~4457	可指定 304 个内部继电器
7000~7077	64 个停电保持内部继电器
9000~9177	128 步移位寄存器
500~677	128 个字节的数据寄存器
200~377	128 个计时器/计数器

表中“继电器”是一种编程用的形象术语，它的通断表示了存储器内相应位的状态。该位为“1”态，则“继电器”线圈通电；为“0”态则断电。“继电器”线圈在程序编制中只能引用一次，但其接点可以无限引用，既可常开也可常闭。“继电器”又分输入/输出“继电器”和内部“继电器”。前者的数量与 PC 的 I/O 容量对应，在编程中可直接用作输入/输出的逻辑构成和输出控制用。后者只为满足编程中的逻辑关系而引用，其输出线圈不能用作输出控制。表中操作数均为八进制数。

知道了操作数分配原则，便可方便地编制用户程序。各编程元素操作数的正确指定，为 CPU 按各编程语句的要求去完成输入扫描、逻辑解算和输出控制提供了依据。例如编程语句

```
AND 4015
```

表示将第 14 号非停电保持的内部继电器的位状态与累加器的先前内容进行“与”操作。

## 2. 编程命令及其功用

PC 的系统程序设计决定了该类 PC 的性能及其编程命令的功用。现以 GE-1 小型 PC 为例，介绍其基本编程命令及功用。GE-1 的基本指令有 12 种，它们的指令代码、名称、功能如表 3-6 所示。

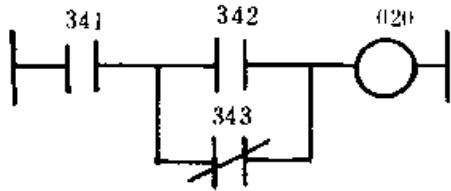
表 3-6

GE-1 型 PC 的基本指令表

指令代码	名 称	功 能 说 明
STR	读取位状态	把操作数所指定地址内数据读入累加器
AND	与	把操作数所指定地址内数据与累加器先前的内容进行“与”操作
OR	或	把操作数所指定地址内数据与累加器先前的内容进行“或”操作
NOT	非	把操作数所指定地址内数据进行“取反”操作
TMR	计时	启动该计时器后，要经过预先设定的时间才会继续执行下面的程序
CNT	计数	启动该计数器后，要等它计满了预定的数才继续执行后面的程序
OUT	输出	把累加器中的数据输出到操作数所指定的地址内
SR	移位	使移位寄存器移位
SET	锁存设定	使锁存继电器置位
RST	锁存复位	使锁存继电器复位
MCS	主控线设定	主控开始
MCR	主控线撤消	(与 MCS 成对使用) 主控结束

下面举例说明相应的梯形图符号及应用。

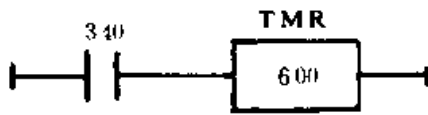
(1) 与取线路 (AND STR CIRCUIT)



编程命令	操作数
STR	341
STR	342
OR NOT	343
AND STR	
OUT	020

说明：“继电器”342的接点“或”343接点的“非”再“与”341的接点后，输出到“继电器”020的线圈。命令 AND STR 表示两个以上的逻辑组进行串联编程，属压入/弹出堆栈的操作语句。

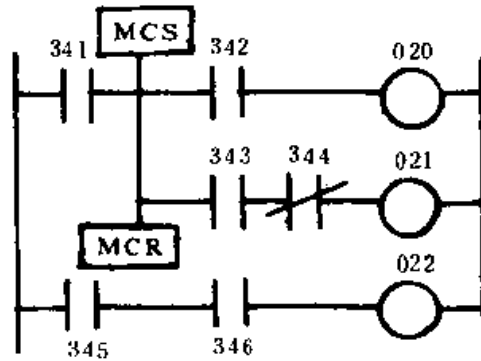
(2) 时间器线路 (TIMER CIRCUIT)



编程命令	操作数
STR	340
OUT	600

说明：340 输出控制 600 时间器。

(3) 主控线设定线路 (MCS, MCR CIRCUIT)



程序			
1:	STR	341	2: MCS
3:	STR	342	4: OUT 020
5:	STR	343	6: AND NOT 344
7:	OUT	021	8: MCR
9:	STR	345	10: AND 346
11:	OUT	022	

说明：当“继电器”341的接点吸合时，即操作数 341 所指定地址为“1”态时，执行 MCS~MCR 间的程序，否则直接运行第 9 条程序。

(三) 编程举例

图 3-19 为某台二工位钻、攻组合机床的运动示意图。它的自动循环工作过程为：

按下启动按钮，凸轮电机转→工作台到 I 工位，夹具夹紧→冷却开，钻孔滑台进→钻孔滑台退，工作台移位→工作台到 II 工位，攻丝滑台进→滑台到，攻丝电机正转→制动 0.3s→反转→攻丝滑台退→延时 5s→工作台移向 I 工位（进入下一循环）

表 3-7 是该机床的工步转换表。其中 XK<sub>1</sub>~XK<sub>8</sub> 为行程开关；1C~5C 为控制动力头主轴电机和冷却泵电机的接触器；DT<sub>1</sub>~DT<sub>4</sub> 为电磁阀电磁铁；DL<sub>1</sub> 为攻丝电机制动电源继电器；TMR 为 PC 内部定时器；(1) 是激励信号， $\frac{(0)}{1}$  或  $\frac{(1)}{0}$  是短激励信号。

两滑台由凸轮控制进退。当钻孔滑台进到预定钻深后退离工件表面时，XK<sub>2</sub> 的常闭触点由断开重新闭合，此时工作台移到 II 工位。攻丝滑台在凸轮的驱使下移动，使丝锥压



表 3-7 机床工步转换表

序 号	元 件	输 入										输 出												
		XK <sub>1</sub>	XK <sub>2</sub>	XK <sub>3</sub>	XK <sub>4</sub>	XK <sub>5</sub>	XK <sub>6</sub>	XK <sub>7</sub>	XK <sub>8</sub>	XK <sub>9</sub>	TMR	TMR	RS	1C	2C	3C	4C	5C	DT <sub>1</sub>	DT <sub>2</sub>	DT <sub>3</sub>	DT <sub>4</sub>	DL <sub>1</sub>	XD <sub>1</sub>
	工 步	001	002	003	004	005	006	007	010	600	601		020	021	022	023	024	025	026	027	030	031	033	
	机床各部在原位	0	1	0	0	0	1	1	1			352 1												+
0	按 AQ <sub>1</sub> 凸轮电机转											340 1		+				+			+			
1	工作台到 I 工位, 夹具夹紧	0 1	1	0	0	0	1	1	(1)			341 1		+				+			+			
2	钻孔滑台进退, 冷却开	1	(0) 1	0	0	0	1	1	1			342 1		+	+			+			+			
3	钻孔台到原位, 工作台移位	1	(1)	0	0	0	1	1	0			343 1		+	+			+			+			
4	工作台到 I 工位, 攻丝台进	1	1	(1)	0	0	1		0			344 1		+	+			+			+			
5	攻丝台终点, 工作台正转	1	1	1	(1)	0		0	0			345 1		+	+		+				+			
6	攻丝头终点, 制动 0.3s	1	1	1	1	(1)	0	0	0			346 1		+	+		+				+		+	
7	延时到, 工作台反转	1	1	1	1	1	0	0	0	(1)		347 1		+	+		+				+			
8	动力头到原位, 攻丝台退	1 0	1	1	1	0	(1)	0	0			350 1		+	+			+			+		+	
9	攻丝台原位, 延时 5s	0	1	1	0	0	1	(1)	0			351 1		+	+						+			
10	延时到, 工作台移位	0	1	1	0	0	1	1	0		(1)	352 1		+	+									+

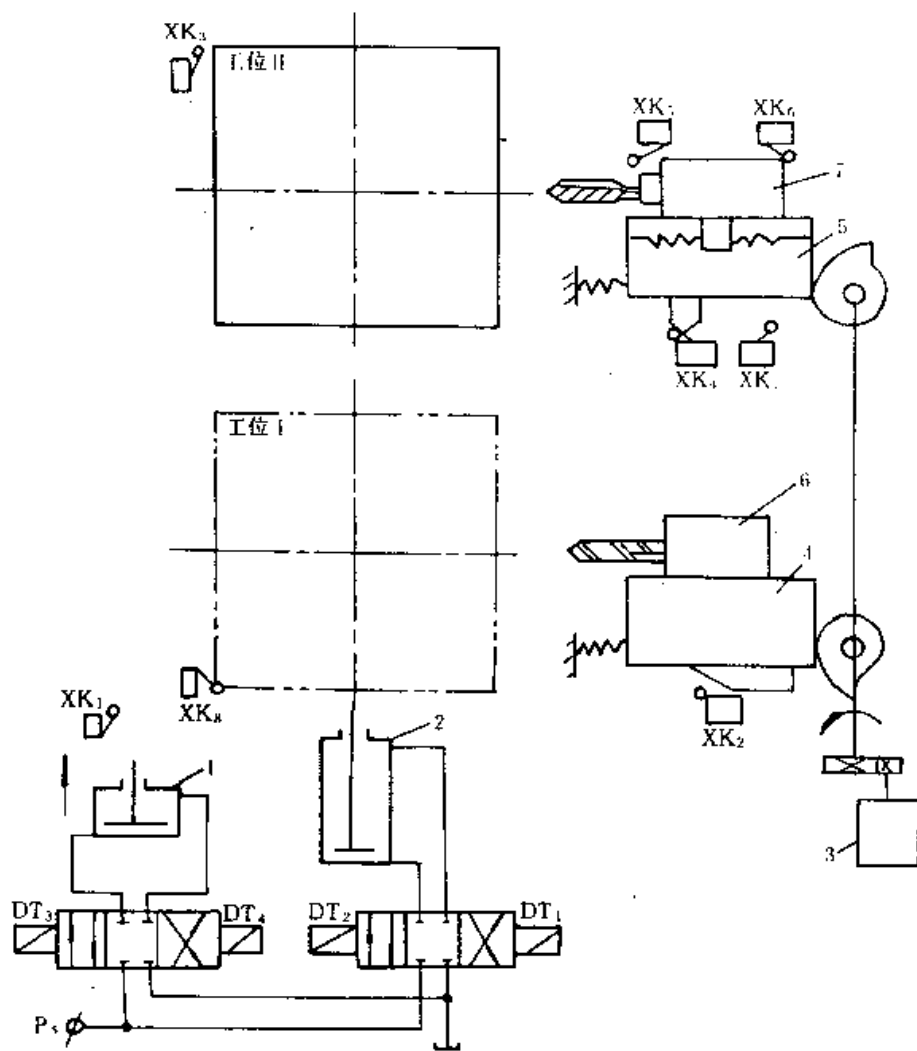


图 3-19 机床运动示意图

1—夹紧油缸 2—工作台移动油缸 3—凸轮电机 4—钻孔滑台  
5—攻丝滑台 6—钻孔动力头 7—攻丝电机

到工件表面， $XK_4$  闭合，令攻丝电机正转。丝锥在攻丝工作时，自动把动力头推向前进。直至攻到螺纹深度后， $XK_5$  闭合，即使电机迅速制动。经 0.3s，再使攻丝电机反转，攻丝头自动退回，当  $XK_6$  发出已退回信号，滑台也退回原位。延时 5s 后，工作台移到 I 工位。

现采用 GE-1 小型可编程序控制器控制机床的工作循环。GE-1 有输入/输出继电器 112 个，地址自 000 开始；锁存继电器（属内部继电器）32 个，地址自 340 开始；计时/计数器 64 个，地址自 600 开始。现场 I/O 装置与 PC 的连接如图 3-20 所示。

应用 PC 有许多种编程方法，这里介绍常用的一种——锁存顺序控制。这种编程方法的实质是把输入的激励信号全部当作短激励信号来处理，将其存入控制器的记忆元件中。当某一顺序的激励信号输入时，就用记忆元件存起来，并转换控制顺序。

图 3-21 是采用锁存顺序控制的方法画出的 PC 逻辑图，图中 1~50 为锁存转换逻辑，51~84 为输出程序。输出程序采用了“或门”输出的方法，结合机床工步转换表能够很

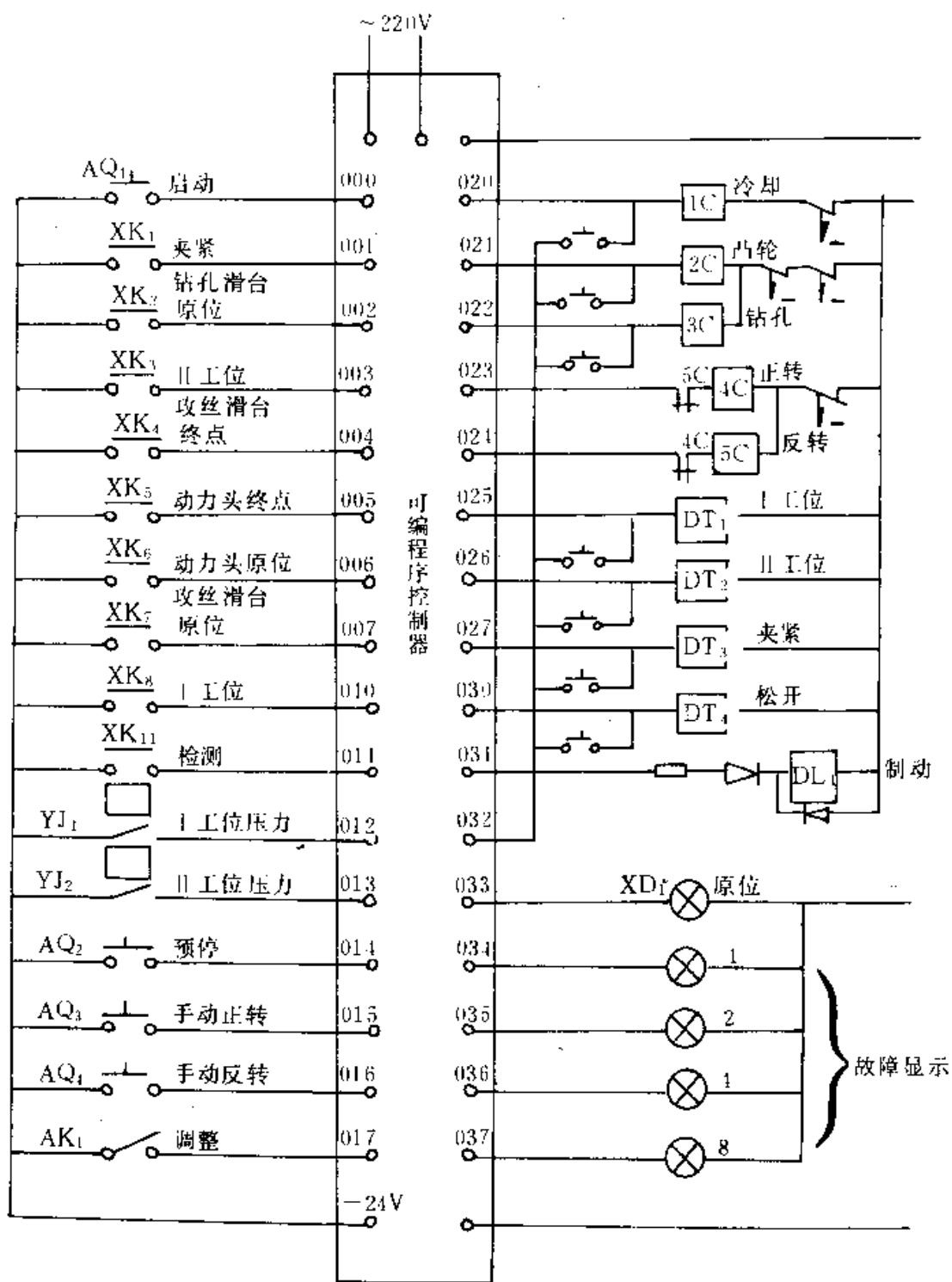


图 3-20 PC 接线图

容易地画出输出程序对应的逻辑图。为了理解锁存转换逻辑部分，先来了解一下PC的工作过程。

PC 是以扫描方式工作的，扫描从第一条指令开始。先将 010 和 001 的状态进行“与”操作后给 341 置位。若  $XK_6$  闭合、 $XK_1$  开启，则 341 置“1”，否则仍为“0”。然后

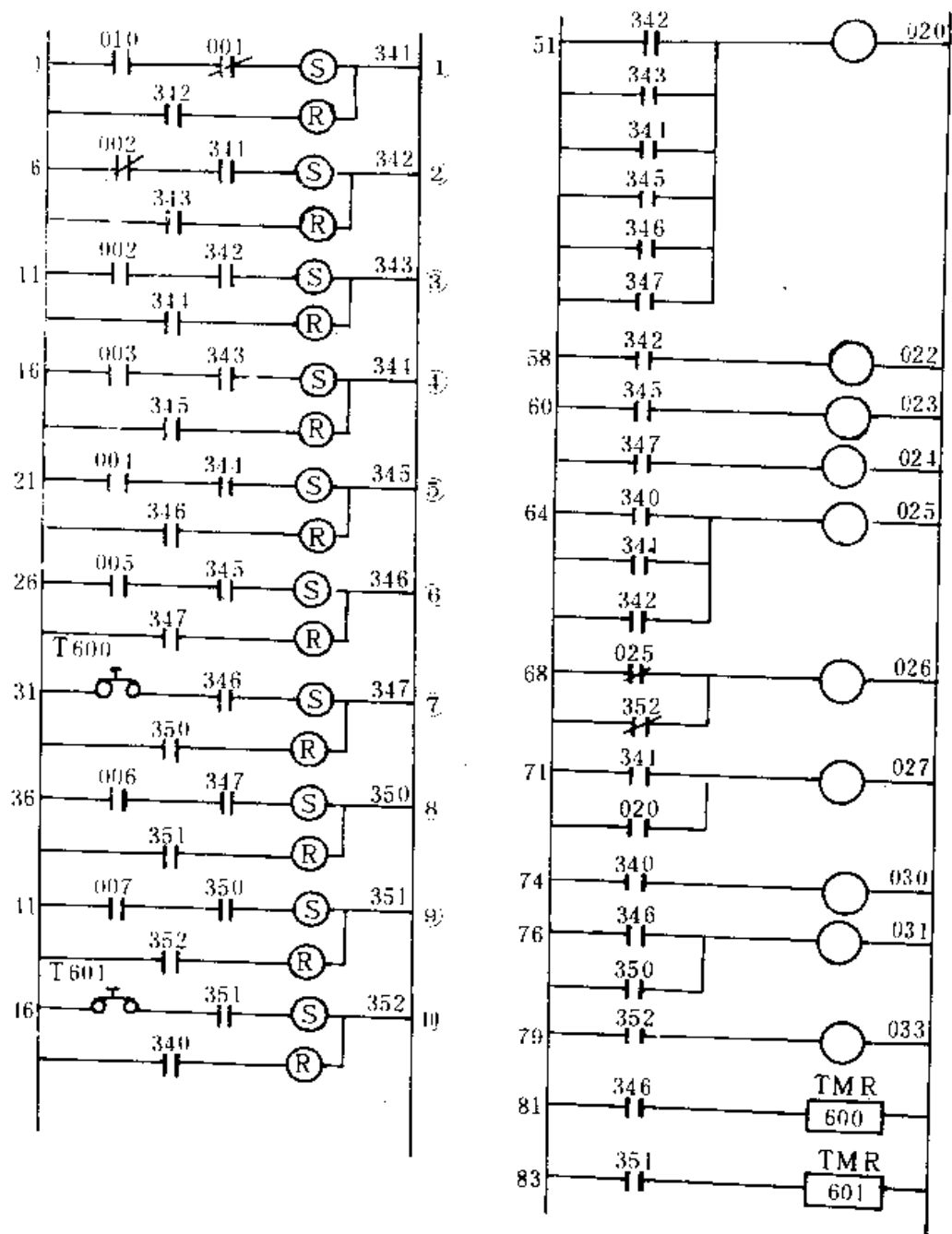


图 3-21 PC 逻辑图

检查 342 的状态。如果 342 为“1”，则将 341 复位；342 为“0”，则 341 仍保持原来的状态。以下②~⑩各段的运算过程均和①段相同。将这 6 个段和机床工步表对应起来观察，可以发现“STR”的信号均为表中的激励信号。而每次都和由上一段置位的“继电器”相“与”，表示上一工步完成后，才允许下一工步进行。

PC 扫描完第①工步后，扫描第②工步。尽管 341 已置位，但  $XK_2$  是“1”，所以第②工步无响应。同理，第③~⑩都不能反应。在 PC 扫描到 71~73 条指令时，027 输出，DT<sub>3</sub> 通电，夹具夹紧。 $XK_2$  的常闭触点断开时，由于 341 仍为“1”，使 342 置位，同时 341 复

位。PC 扫描到 51~57 条指令时，020 输出，接通 1C。PC 扫描到 58~59 条指令时，022 输出，接通 3C。

当机床运行到第⑥工步时，由于 XK<sub>3</sub> 的闭合，使 346 置位。PC 扫描到 81 条程序时，时间器启动工作。计时未到时，PC 停留在工步⑥不断扫描，直至 T600 发出时间到信号，才开始进入⑦，同时 346 复位，计时停止。

熟悉了 PC 的逻辑图之后，用 PC 编程语句按逻辑图的顺序，自上而下、自左至右进行编程。详细程序如下：

1: STR	010	2: ANDNOT	001	3: SET	341
4: STR	342	5: RST	341	6: STRNOT	002
7: AND	341	8: SET	342	9: STR	343
10: RST	342	11: STR	002	12: AND	342
13: SET	343	14: STR	344	15: RST	343
16: STR	003	17: AND	343	18: SET	344
19: STR	345	20: RST	344	21: STR	004
22: AND	344	23: SET	345	24: STR	346
25: RST	345	26: STR	005	27: AND	345
28: SET	346	29: STR	347	30: RST	346
31: STR TMR	600	32: AND	346	33: SET	347
34: STR	350	35: RST	347	36: STR	006
37: AND	347	38: SET	350	39: STR	351
40: RST	350	41: STR	007	42: AND	350
43: SET	351	44: STR	352	45: RST	351
46: STR TMR	601	47: AND	351	48: SET	352
49: STR	340	50: RST	352	51: STR	342
52: OR	343	53: OR	344	54: OR	345
55: OR	346	56: OR	347	57: OUT	020
58: STR	342	59: OUT	022	60: STR	345
61: OUT	023	62: STR	347	63: OUT	024
64: STR	340	65: OR	341	66: OR	342
67: OUT	025	68: STR NOT	025	69: OR NOT	352
70: OUT	026	70: STR	341	72: OR	020
73: OUT	027	74: STR	340	75: OUT	030
76: STR	346	77: OR	350	78: OUT	031
79: STR	352	80: OUT	033	81: STR	346
82: OUT	600	83: STR	351	84: OUT	601

## 第四章 微型计算机接口及信息 输入/输出设备

### 第一节 概 述

在第一章中已介绍过有关接口的基本概念。机电一体化系统中的计算机与外设（如传感器、执行器、动力源、机械本体、与人的信息交换设备等）之间的连接和信息交换是通过接口来实现的。应注意，接口功能的实现除硬件电路外，还应包括相应的接口软件（驱动程序）。通常是这两者的结合来完成接口任务。

在此将计算机与外设连接的接口称作输入/输出（或 I/O）接口。其主要功能是：

(1) 信息转换 把外设输入给计算机的信息转换成计算机所能接受的格式。反之，也把计算机的输出信息转换成外设所能接受的格式。

(2) 信息交换 在计算机和外设之间交换信息。

(3) 传输速度匹配 协调计算机与外设在时间上的差异。其方式有同步控制方式和异步控制方式。前者是微处理器与外设各自有独立定时信号，根据相互配合信号实现数据传输；后者是微处理器与外设用同一定时信号，即接口操作与微处理器节拍同步。

(4) 缓冲 在计算机与外设之间对传输速度缓冲以及进行信号电平的转换。

一般外设都是经过各自接口接到计算机的总线上的。外设端口地址由地址总线低八位  $A_0 \sim A_7$  指定。数据由 8 条双向数据总线传送。由  $\overline{M}_1$ 、 $\overline{IORQ}$ 、 $\overline{RD}$ 、 $\overline{WR}$  四个控制信号组合起来控制传输和中断响应。

随着计算机与外设品种的日益增多，要求开发接口电路并向标准化方向发展。目前已采用了标准接口总线，即把设备间的数据形式作为接口标准的一部分来规定。

接口的获得有两条途径：一是采用标准接口芯片，直接或适当修改后使用。二是按需要自行设计专用接口，此时应根据标准接口总线提供的规范和设备特点设计。

书末附录（一）列出了一些在接口电路中常用的集成电路芯片（包括引脚及功能图）。

### 第二节 I/O 控制方式及程序设计

计算机与外设之间传送信息的控制方式常用的有两类：程序控制方式和数据通道方式。

#### 一、程序控制方式

这种方式是用计算机的输入/输出指令来控制外设。此时总线在软件管理之下，由 CPU 实现对外设的控制。它应具有以下功能：

- (1) 给外设发出操作命令。
- (2) 接受和测定外设状态信息。
- (3) 从 CPU 输出数据至外设。
- (4) 从外设输入数据至 CPU。

程序控制方式分三种实现方法：

### (一) 无条件传送方式

这是一种不考虑外设状态，只要设定的时间一到，由 CPU 执行 I/O 指令立即进行数据传送的方式。

这种传送方式，硬件和软件都很简单，但是，实现这种传送方式是有前提的，即当 CPU 执行输入指令时，外设的数据必须是“准备好”的；而当 CPU 执行 OUT 指令时，外设必须是“空闲”的，否则就会出错。

### (二) 查询传送方式

在这种方式中，CPU 每当执行 I/O 操作之前，都必须对外设的状态进行检测，查看其是否准备好，如果已经准备好，则进行 I/O 操作；如果还没有准备好，则 CPU 继续反复查询，直到它确实查到外设已经处于准备好状态时，再发出 I/O 指令进行输入输出数据传送。其流程图见图 4-1。

查询传送方式的优点是能较好地协调 CPU 与外设之间的定时差别，并且接口硬件较少。其主要缺点是传送效率不高，CPU 大部分时间花费在查询外设的状态上，白白地等待外设准备好，而不能干别的事情。当然，如果 CPU 只为一个外设服务时，那就无所谓了。所以这种输入输出方式仍常在小的系统中使用。

### (三) 程序中中断传送方式

为了提高 CPU 的利用率，可利用中断方式来传送数据。下面以打印机为例，来说明采用中断方式传送数据的过程。平时 CPU 不进行查询，而是照旧执行原来的（与传送无关的）程序（称主程序）；当打印机打印好一个字符后，通过接口电路向 CPU 提出中断申请，若 CPU 响应，则暂时中断自己的主程序，转而去为打印机服务，即输出一个新的数据至打印机的数据端口（称为执行中断服务子程序），让打印机自己慢慢地去打印，而 CPU 又回去继续快速地执行原来的主程序，直至打印机又有要求服务的中断申请来到，CPU 再去响应，这样就省去了 CPU 反复查询外设状态的等待时间，这种工作方式就称为中断处理方式。

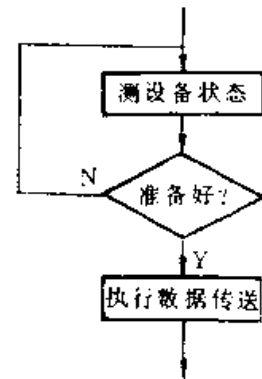


图 4-1 查询方式流程图

CPU 转到中断服务子程序的过程与调用子程序的过程非常相似，所不同的是前者由外设提出申请，转向子程序；后者是由程序员安排 CALL 指令去转向子程序。

采用中断方式避免了查询等待时间，CPU 可以不顾外部设备而去做其他很多事情（执行主程序），仅当外部设备请求中断时，才转去为其服务（如传送数据），而这种服务时间是较短的，因此就大大提高了 CPU 的利用率。从宏观上看，CPU 和外设是并行工作的，即数据的输入输出和 CPU 的数据处理是同时进行的。

## 二、数据通道方式

在上述中断处理方式中,数据的传送仍由 CPU 通过执行许多指令(包括将断点推入堆栈、保护现场等)来进行的,通常传送一个字节约需要几十微秒。但在要求数据传送速率较高的情况下,如在高速数据采集系统和磁盘操作、CRT 显示中,要求在  $2\sim 3\mu\text{s}$  内传送一个字节,上述传送方式就不再适用。

为此,可采用数据通道传送方式,也称直接存储器存取(DMA)方式。它是利用硬件(DMA 控制器),使数据在外设与内存之间直接进行传送,而不通过 CPU 程序的介入。所以,这是一种有效的快速传送方式,其工作原理见图 4-2。

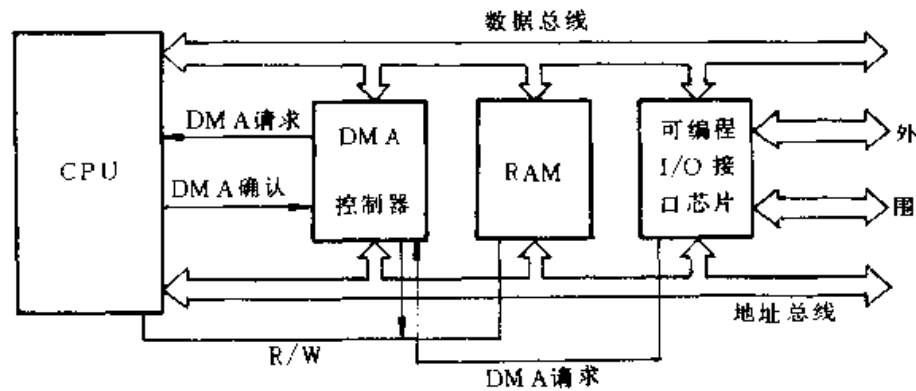


图 4-2 DMA 系统工作原理

一般地说,执行 DMA 数据传送的步骤如下:

(1) 外设通过其相应的 DMA 控制器,经过 DMA 请求线向 CPU 发出 DMA 请求,即向 CPU 发出总线请求 ( $\overline{\text{BUSRQ}}$ ) 信号。

(2) CPU 接受到 DMA 请求信号后,通过 DMA 响应线向 DMA 控制器给出“DMA 响应”的回答信号,即 CPU 送出总线响应 ( $\overline{\text{BUSAK}}$ ) 信号。然后,由 DMA 控制器及相应的外围设备来驱动和控制系统总线,进入 DMA 工作方式。

(3) DMA 控制器把“DMA 响应”信号送到外围设备和存储器,发出可传送数据的通知。

(4) 在接到“DMA 响应”信号后,DMA 控制器把自己的逻辑电路接入系统总线,并在地址总线上发出所要访问的存储器起始地址;在读写控制线上发出“读出”或“写入”命令,开始实现 DMA 传送过程。

(5) 每传送一个字节的数,使 DMA 控制器中的地址寄存器加 1,从而指向下次要传送数据的地址;同时使字节计数器减 1,如此进行下去,直至字节计数器的值减到零为止,说明数据已经传送完毕,用这个零信号产生一个 DMA 结束信号,使 CPU 恢复正常的工作。



### 第三节 微机 I/O 接口及器件

实现接口逻辑需要许多数字器件。随着微处理器的出现，也出现了许多标准的大规模集成电路接口器件，以此为核心再加上适当外围逻辑，可使接口电路设计大为简化。

微机的 I/O 接口器件通常包括有各类通用和专用接口芯片。

#### 一、一般 I/O 接口电路设计

一般接口电路由端口号指定电路、输入端口、输出端口及中断电路等几部分组成。

##### (一) 端口号指定电路

端口号指定电路即是外设口地址译码电路，是产生指定输入端口或输出端口号信号的电路。为获得该信号，只要将外部 I/O 总线的地址总线的低八位  $A_0 \sim A_7$  进行译码即可。

利用端口指定信号和  $\overline{IORQ}$ 、 $\overline{RO}$  信号相与便得输入端口读信号；和  $\overline{IORQ}$ 、 $\overline{WR}$  信号相与便得输出端口写信号。图 4-3 为一利用一个三-八译码器 74LS138 组成的小型端口号指定电路的例子。

图中，地址总线  $A_0$  和  $A_1$  没有参加译码，三-八译码器的每根输出线均对应四个地址。这种译码方式特别适合于 Z80CTC、Z80PIO 的连接，三-八译码器的输出作为 Z80CTC 或 Z80PIO 的片选信号，地址总线  $A_0$  和  $A_1$  直接与 Z80CTC、或 Z80PIO 相连，这样可确定 Z80CTC 四个通道或 Z80PIO 四个端口的地址号。

##### (二) 标准输入端口

输入端口是输入外设与 CPU 之间的接口，它有两种工作方式。其一是将外设产生的数据在 CPU 认为合适的时间读入，而与外设操作情况无关，不需外设的响应信号，是无应答式通信联络，可称为电平型。其二是将外设处于特殊状态时的数据读入 CPU，要有应答信号作为通信联络的标志，可称为联络型。这种方式能保证工作速度相差很大的系统可靠地交换数据。

##### 1. 电平型标准输入端口

电平型标准输入端口有两种工作方式：

(1) 利用三态缓冲器直接传送。如图 4-4a) 所示，采用三态缓冲器芯片 74LS244。该电路由前述端口号指定电路产生的译码器输出信号与  $\overline{IORQ}$ 、 $\overline{RD}$  相或形成的信号驱动。当译码器输出信号、 $\overline{IORQ}$ 、 $\overline{RD}$  信号均有效时，该端将外设产生的数据 ( $ID_0 \sim ID_7$ ) 作为信

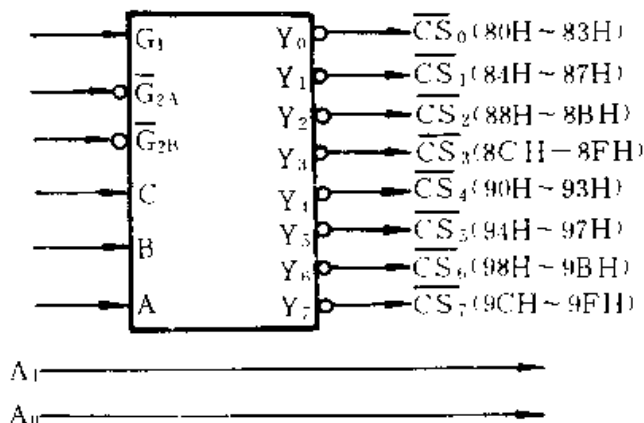


图 4-3 端口号指定电路

号输出  $D_0 \sim D_7$  输出给 CPU 外部数据总线。其余时间此端口的八条输出线  $D_0 \sim D_7$  呈高阻状态。此方式的特点是在  $\overline{I/O\overline{R}}$  (如图示) 有效期间  $D_0 \sim D_7$  随  $ID_0 \sim ID_7$  内容的变化而变化, 它只适用于外设产生的数据变化很慢的情况, 否则可能引入错误信息。

(2) 利用锁存器作输入端口。如图 4-4b) 所示。使用 74LS374 芯片。其内部有 8 位上升沿触发的触发器和控制该触发器输出的 8 位三态缓冲器。只有在  $\overline{O\overline{U\overline{T}}}$  端有效期间触发器内容才输出给输出线  $1Q \sim 8Q$ , 其他时间输出线  $1Q \sim 8Q$  为高阻状态。该集成电路用 CLOCK 信号的上升沿输入线  $1D \sim 8D$  的内容取入触发器。在  $\overline{I/O\overline{R}}$  的下降沿,  $CLOCK = 1$ ,  $ID_0 \sim ID_8$  被锁入在芯片 74LS374 的 D 触发器中, 不再随  $ID_0 \sim ID_8$  变化, 此时  $\overline{O\overline{U\overline{T}}}$  端也有效, 锁存在 D 触发器中的数据  $ID_0 \sim ID_7$  作为  $D_0 \sim D_7$  输出给 CPU 外部数据总线, 从而可防止引入错误信息。

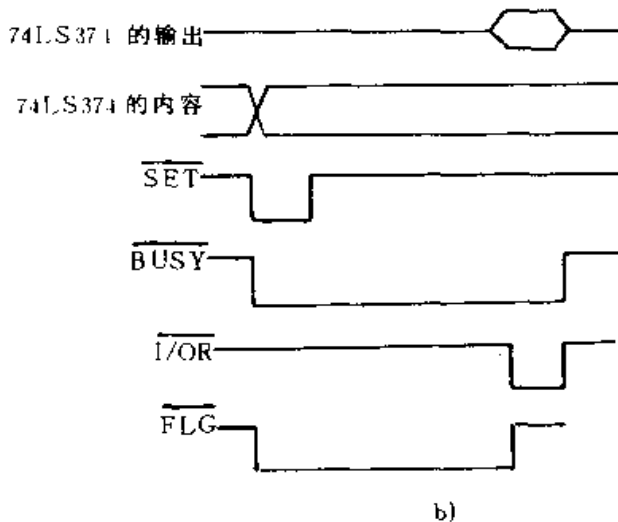
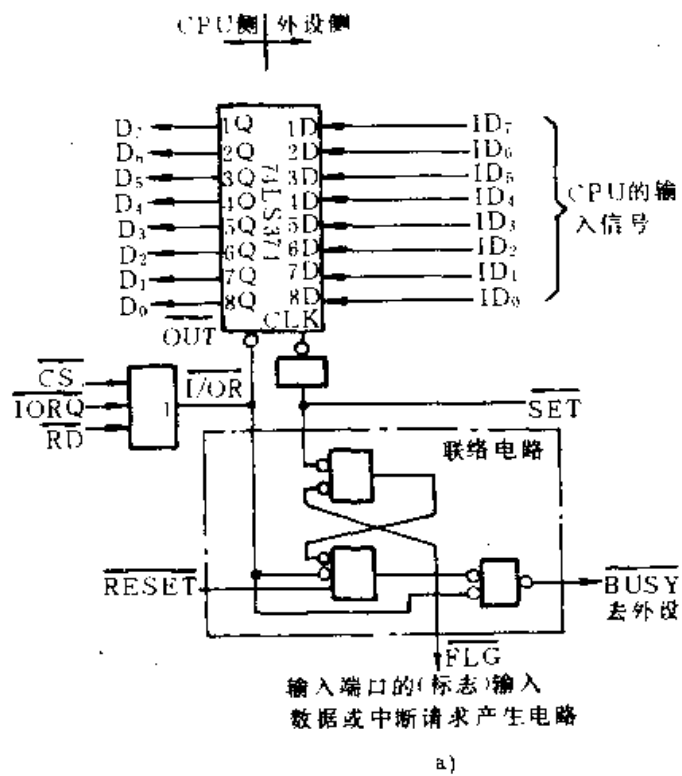


图 4-5 联络型标准输入端口  
a) 端口电路 b) 联络时序

整个操作过程与联络型输入端口本质上相同。

#### (四) 中断电路

中断电路的作用是寻找中断源和确定中断优先级。微型机一般有一个或多个引线作为中断线使用。常用单线中断，多个设备用“或”逻辑连在一起接到 CPU 的一条中断线上。CPU 一旦接到中断请求，就以硬件或软件方式询问各设备以确定哪个外设请求中断，询问顺序反映各设备的中断优先等级。图 4-7 表示外设接口内的中断逻辑。

当外设提出中断申请时（如由定时器发出），首先使接口电路内中断信号触发器置“1”，当中断允许输入 IEI 为高电平时，通过  $\overline{INT}$  向 CPU 发出可屏蔽中断请求。一旦响应，

接受。RESET 信号在系统启动时使 R-S 触发器复位。

这种联络型操作好象数据发送端和接受端相互“握手”故联络电路又称“握手电路”（handshake）。

#### (三) 标准输出端口

输出端口也分电平型和联络型两类，其组成如图 4-6 所示。整个图表示联络型，去掉联络电路即是电平型。

##### 1. 电平型输出端口

图中 74LS374 芯片 8D 锁存器的输入线 1D~8D 与外部 I/O 总线的  $D_0 \sim D_7$  连接。输出线 1Q~8Q 作为  $0D_0 \sim 0D_7$  与外设连接。通过  $\overline{I/\overline{O}W}$  信号的下降沿将  $D_0 \sim D_7$  的内容取入芯片内，并按原样从  $0D_0 \sim 0D_7$  输出。

##### 2. 联络型输出端口

联络型输出端口的时序如图 4-6b) 所示。

当  $\overline{I/\overline{O}W}$  信号对 74LS374 进行写操作时，将 R-S 触发器置位，使  $\overline{RDY}$  有效。这样通知外设它所要接受的输出数据已准备好，外设就去取  $0D_0 \sim 0D_7$  的内容。取完后发出  $\overline{STB}$  信号使 R-S 触发器复位，且使  $\overline{RDY}$  无效。

CPU 经过其他电平型输入端口对  $\overline{FLG}$  标志进行测试，以判断外设是否已处于可接受数据状态（对应于  $\overline{RDY}$  无效， $\overline{FLG}$  有效，可接受数据）或将  $\overline{FLG}$  送入中断请求电路也可。

CPU发出  $\overline{M}_1$  和  $\overline{IORQ}$  两信号，使接口电路产生四个动作：①使中断信号触发器置“0”，结束请求信号  $\overline{INT}$ 。②使中断服务触发器置“1”。③将中断服务子程序入口地址通过数据线传给CPU。④使中断允许输出  $\overline{IEO}$  变为低电平。

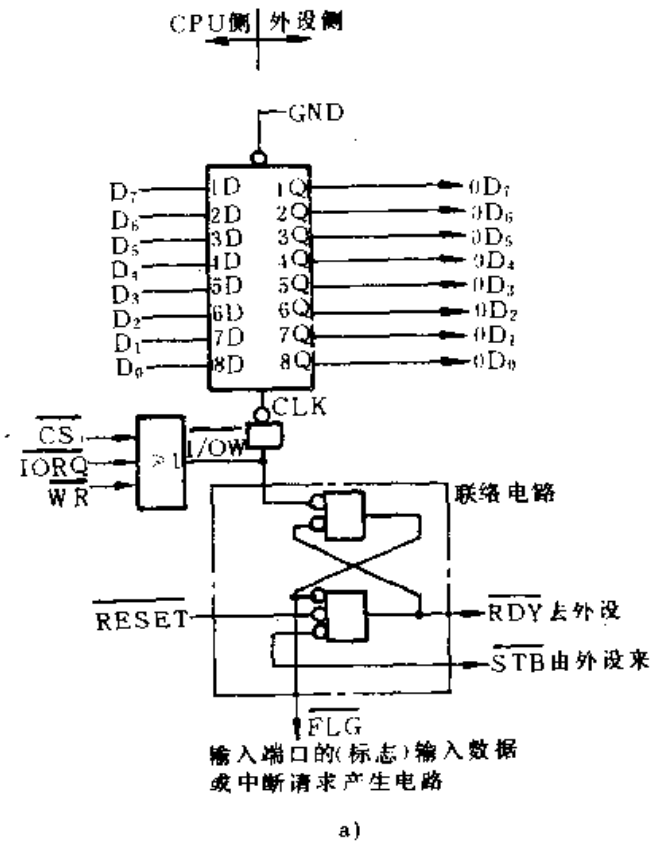
图 4-8 为中断请求响应的一种链式结构示意图。这是利用  $\overline{IEI}$  与  $\overline{IEO}$  信号的串联起来解决中断优先级排队问题。外设 1 的  $\overline{IEI}$  固定接 +5V，它的输出  $\overline{IEO}$ ，作为外设 2 的输入  $\overline{IEI}_2$ ……显然当外设 1 响应中断时，使  $\overline{IEO}_1$  即  $\overline{IEI}_2$  变为低电平。这就使外设 2 及以后的其他外设均不可能发出中断请求信号  $\overline{INT}$ 。中断级别从左向右逐渐变低。

## 二、可编程 I/O 接口

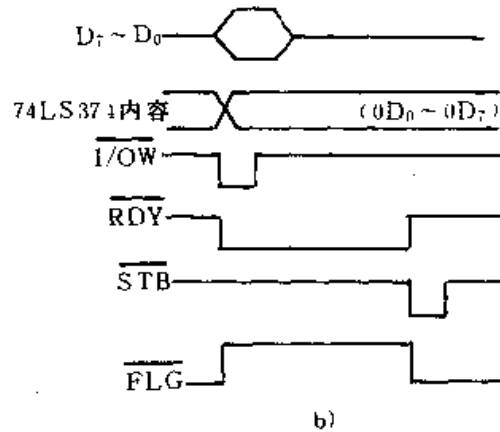
可编程接口芯片是一种通用的接口大规模集成电路。计算机厂家提供了很多种类，可大大减轻用户对接口的设计制作任务。

所谓可编程是指接口芯片的功能、操作方式和接口条件可用程序来设定和改变。用程序设置了相应的控制字后就使一个通用可编程接口成为适应特定需要的 I/O 接口。这种接口可以说是一种智能接口。

Z80 常用的可编程接口芯片有计数器/定时器 CTC、可编程并行输入/输出接口芯片 PIO、串行输入/输出控制器 SIO；Intel 8080/8085 系列常用的可编程接口芯片有通用并行输入/输出接口 8255-PPI、可编程通



a)



b)

图 4-6 标准输出端口

a) 标准输出端口 b) 输出端口联络时序

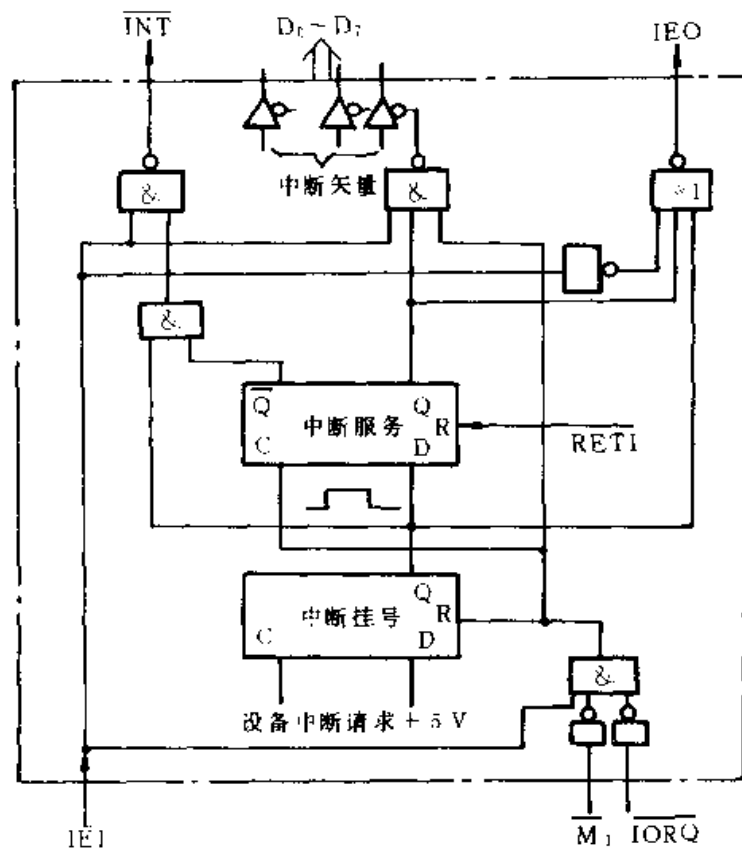


图 4-7 外设接口中断逻辑

8 位并行 I/O 口有 3 个：A 口、B 口、C 口。它的内部逻辑又分为 A、B 两组控制电路：A 组控制电路控制端口 A 和端口 C 的上半部 ( $PC_7-PC_4$ )；B 组控制电路控制端口 B 和端口 C 的下半部 ( $PC_3-PC_0$ )。各端口可按程序指定进行输入或输出。图 4-9 给出 8255 的组成框图。附录 (一) 中给出了 8255 的引脚配置。各引脚的功能和信号线的连接方法简述如下：

$D_0 \sim D_7$  作为数据输入/输出用，与 CPU 数据总线相连。RESET 为复位信号线，高电平有效，在与 CPU 的  $\overline{RESET}$  相连时，中间须加非门 74LS04 转换电平。 $\overline{RD}$ 、 $\overline{WR}$  各与 CPU 的  $\overline{RD}$ 、 $\overline{WR}$  (与  $\overline{IORQ}$  或  $\overline{MREQ}$  一起) 连接。 $A_0$  与  $A_1$  为端口地址输入

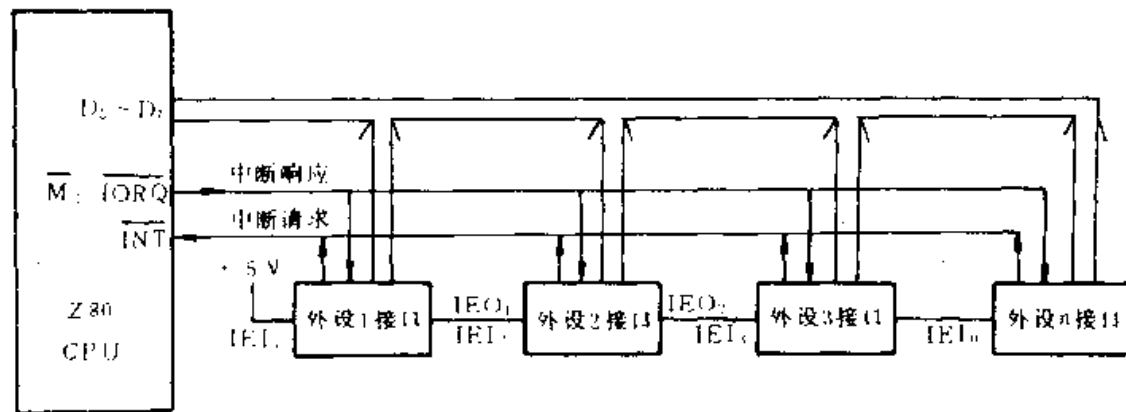


图 4-8 中断请求响应示意图

线，最好与 CPU 地址总线  $A_0$ 、 $A_1$  相连。 $\overline{CS}$  为片选线，其连接方法与存储器类似。 $PA_0 \sim PA_7$ ， $PB_0 \sim PB_7$ ， $PC_0 \sim PC_7$  为与外设联接的 I/O 线。由指定的控制字来规定各端口的工作状态。参见图 4-10。

各端口的工作方式有以下三种：

方式 0——基本的输入/输出，

方式 1——控制信号、状态信号的输入和输出，

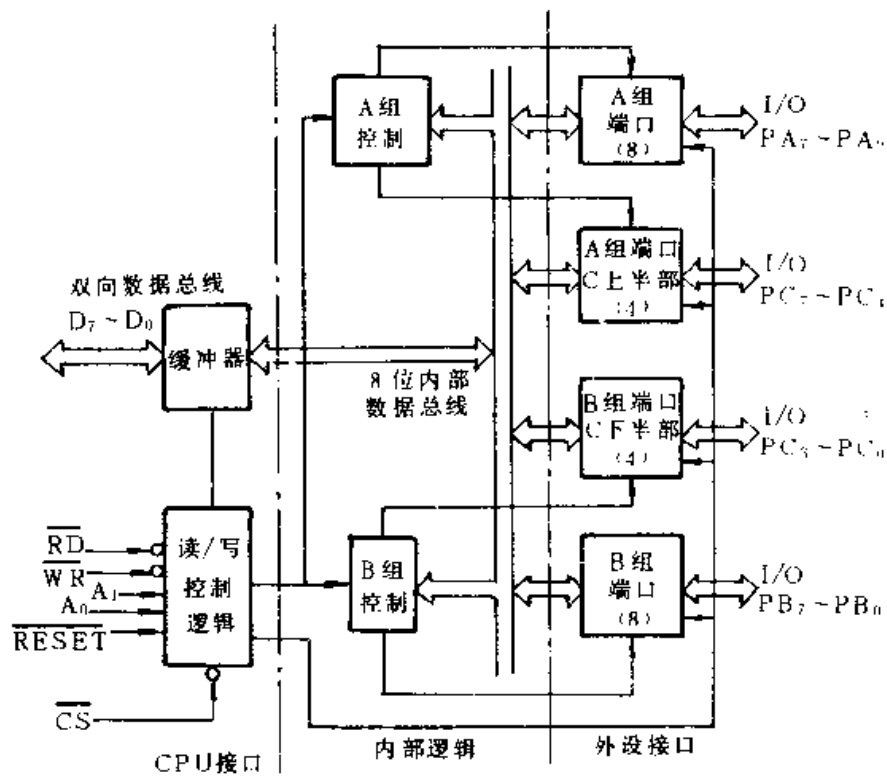


图 4-9 8255 组成框图

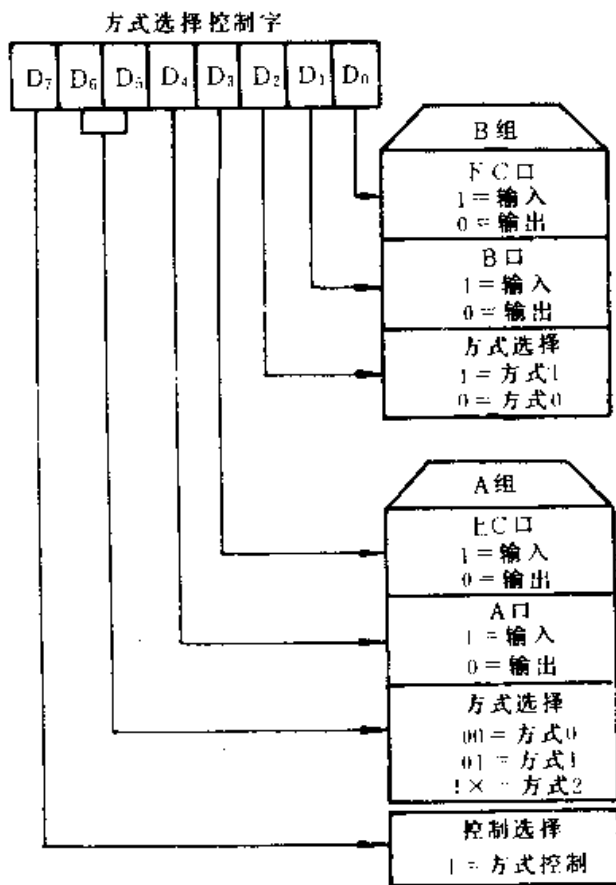


图 4-10 8255 的控制字

方式 2——双向数据传送。

控制字是一个 8 位数据。其最高位  $D_7$  为“1”时，表示进行方式选择。此时，由  $D_2$  位的“0”或“1”来选择 B 组的工作方式；而由  $D_5$  和  $D_6$  的组合来选择 A 组的工作方式。控制字的  $D_7$  为“0”时表示对端口 C 的数据进行置位或复位。即端口 C 的 8 位中的任一位，均可用一条输出指令使其（分别）置位（置“1”）或复位（置“0”）。实现此功能的控制字如图 4-11 所示。此字由其  $D_1 \sim D_3$  的组合来选择端口的位置， $D_6$  位表示对选定的位置“0”或置“1”。

限于篇幅，对有关各种芯片的详细应用方法不再赘述，读者可参阅各种微型计算机的资料。

### 三、可编程通信接口

一个计算机系统除配置并行 I/O 接

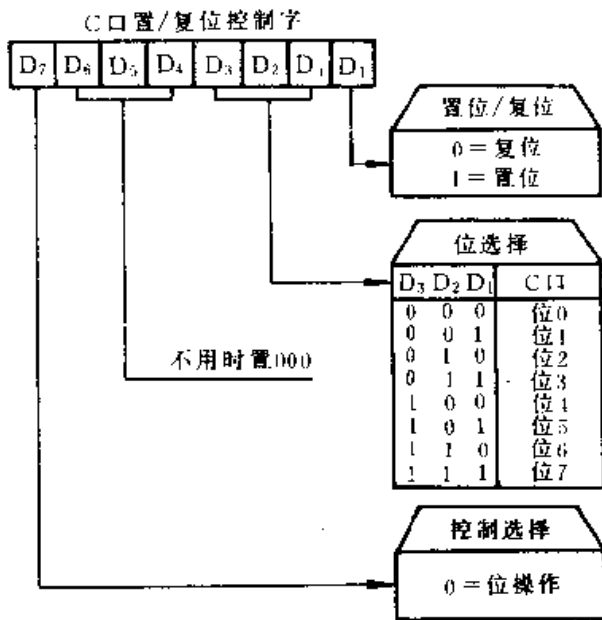


图 4-11 8255C 端口按位置位/复位控制字

口外，经常还要配置串行输入/输出通信接口，以便于使用串行打印机，CRT 显示终端等，且可通过串行数据总线与远程终端设备进行通信。

串行 I/O 通信接口包括：通用异步收发器 UART，通用同步收发器 USRT，通用异步/同步收发器 USART。UART 能将异步串行格式输入数据变成并行输出，也能将并行输入变成异步串行输出；USRT 完成同步并行与同步串行格式的转换；USART 能处理同步串行与异步串行两种方式。

### (一) 数据传送格式

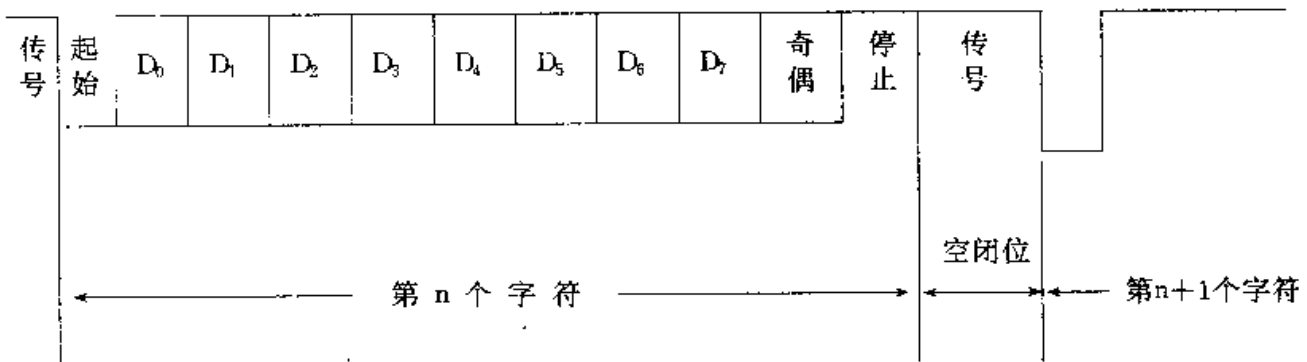
#### 1. 异步串行格式

异步数据传送时，必须有两项规定：波特率和字符格式。

波特率（数据传送速率）以波特数表示，指的是每秒串行传送的二进制代码位数。它是衡量传输通道频宽的指标。

异步串行传送数据格式指传送按字符一个个进行。

字符格式如下：



数据格式可由程序指定。代码未开始前，串行线上是零电位，称传号位。起始位用来启动接收系统时钟，使与接收的字符建立同步关系。中间数位由低位到高位。奇偶位用来校验数据发送的正确性，可有可无。停止位用作为字符同步的最后一个校验。在相邻字符之间是空闲位，其间隔可任意长。异步格式的基本特征是它处理实时数据的能力，无空闲位的可获得最大传输速率。

为实现对所接收数据同步，使用一个周期为  $T_c$  的外部时钟。设  $T_d$  为一个字符位所占时间

一般有：
$$T_d = K T_c \quad (\text{典型值 } K=6)$$

且 
$$T_d = 1/\text{波特率}$$

如数据传送速率为 120 字符/s，每字符有 10 个数据位，则波特率为 1200 波特。

## 2. UART 接口

UART 接口由接收器、发送器、控制器三部分组成，如图 4-12 所示。

接收器用来接收串行输入及时钟输入，并提供 8 位并行输出。发送器接收 8 位并行输入及时钟并提供串行输出。控制器接收 CPU 的控制信号并执行所给命令。输出端提供状态信号和控制信号。进行串→并变换时，例如 UART 左边输入一串数据从右至左为 10001000，则在右边输出一并行 8 位数据 10001000。时钟信号与串行信号同步，半周期对应一位的时间。当 UART 进行并→串变换时，UART 应将 CPU 来的 8 位并行数据增加起始位、停止位及奇偶位才能发送。串→并时这几位应删去。

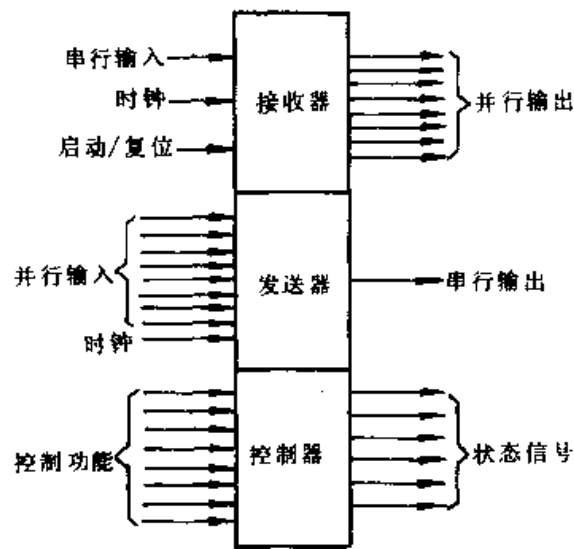


图 4-12 UART 组成部件

### (二) Z80SIO 可编程通信接口芯片

SIO 是一可编程接口器件，它有两个独立的全双工通道（全双工为同时发送和接收），也可用于半双工状态（接收和发送不同时）。其串行输入输出方式可用程序加以选择，包括异步方式、同步方式、外同步方式和串行数据连接控制方式。

有关 Z80SIO 芯片的内部结构与使用方法读者可参阅有关微型计算机资料。

## 第四节 I/O 接口的标准化

在第二章曾介绍了总线的一般概念及在构成微机系统时的作用。本节将介绍常用的计算机标准接口总线。

### 一、总线与接口标准

总线是一些信号线的集合，是微型机各功能模块间、各器件间和微机系统与外部设备之间的标准信息通路，借以使微机内部、系统与系统之间，实现信息交换、数据传输和通信工作。总线是微机系统中最重要组件之一。所谓接口标准即是标准接口总线。采用了接口标准，使得控制系统的模块化设计制造得以实现。每一个模块，即标准的印刷电路插件，可以完成系统的一个或几个功能，将不同的模块通过一个公共的底板灵活地组合起来（底板上包含了微机总线的所有信号线）即构成所需的不同的控制系统。总线结构系统的模块化即可巧妙而合理地将一个较复杂的系统进行分解，方便了系统的设计、制造、调试和维修，能迅速地改进系统性能，适应机电一体化技术发展的需要。

标准接口总线分两大类：①串行总线。这是通过两根线（一根接收，一根发送）在组件与系统之间一位接一位地传送信息。对长距离通信必须使用此方法以节省电缆费用。



②并行总线。它是通过一组信号线同时传送所有信息位。当距离短或要求高速传输速率时使用。

在串行和并行系统内，数据传输又分为同步和异步两种：①同步方式。指被传送数据与定时信号或控制脉冲同步。在并行同步系统中，一个选通或控制脉冲与数据一起并行传送。在串行同步系统中，以时钟速率作为基准。②异步方式。在发送和接收之间不用同步信号，而依靠联络电路以“握手”的方式进行操作。对并行异步系统，需加二根联络线用作实现“握手”操作；而串行异步系统中，则用字符的起始位和停止位实现异步“握手”。

目前常用的标准接口总线有 STD, S-100, 多总线, RS-232C 等。

## 二、STD 标准总线

STD 总线全称为工业控制标准总线，是 1978 年美国普洛公司研制的面向工业控制的 8 位微机总线。

STD 总线与其他总线相比，其规模最小，设计较为周到，适应性好，具有如下特点：

### （一）高性能与高可靠性

为提高运算速度、驱动能力和可靠性，STD 总线产品的每块模板在功能分布上采用了模块式方法。使各种信号流和数据流经过尽可能短的平行路径，56 根引线的布局也较为合理，使数据线与控制线分开，从而提高了运行速度，减少信号干扰。

### （二）模块化小板结构

所有模块标准尺寸为 165.1mm×114.3mm，与其他总线相比，尺寸最小，易实现高度模块化。

### （三）开放兼容式总线结构

STD 总线所有的信号线都有明确含义，且具有较大的通用性，可和所有 8 位机兼容。目前 16 位、32 位和全 CMOS 微处理系列的 STD 总线模板都已开发。一些新产品如 8088CPU 模板可以组成多达 16 个 CPU 的主从式或多主式的多处理机系统；还有将磁盘操作系统移置的 STD-DOS 系统，可以与各种微型机如 IBM-PC 连用。

该总线已列入国际 IEEE 标准中 (IEEE-P96)。

STD 总线共有 56 根，分成 5 组：

1. 6 根逻辑电源线 (1-6 脚)
2. 8 根双向数据线 (7-14 脚)
3. 16 根地址线 (15-30 脚)
4. 22 根控制线 (31-52 脚)
5. 4 根辅助电源线 (53-56 脚)

## 三、S-100 总线标准

S-100 总线是连接 CPU 存储器 and I/O 装置的系统并行总线，它是 IEEE 作为标准草案推荐的微型机总线，使用得最早和最广泛。

S-100 总线的插件板共有 100 根引线，每面 50 根，包括输入/输出数据线 16 根，地

址线 16 根，控制线 38 根。其他还有电源线、地线和备用线。

目前国内常用的一些单板机如 TD801 就使用 S-100 总线。

#### 四、RS-232C

RS-232C 是一种串行异步数据传送标准。对计算机的图象显示设备、打印机等是一个较好的标准，还适合通过电话线与调制解调器一起使用，完成数据的远距离通信。RS-232C 最大传送速度为  $2 \times 10^4$  bit/s。

在微机系统中，它既用于系统与系统间的通信，也用于系统与终端设备之间的通信。

### 第五节 设备接口电路

应用微机连接外设时，仅仅有 I/O 接口芯片一般还不能直接与控制对象联接，还常用附加的设备（机器）接口电路将设备与 I/O 接口芯片连接起来。设备接口电路的主要功能有：

(1) 进行电平转换与功率放大 一般微机 I/O 接口芯片都是 TTL 电平，但控制设备则不一定是。另外，在大负载时还需进行功率放大。

(2) 进行抗干扰隔离 为防止噪声引起了动作可使用光电耦合器、脉冲变压器或继电器等把微机系统和控制设备在电气上加以隔离。

(3) 进行模数 A/D 或数模 D/A 转换 当外设的检测信号和控制信号采用模拟量时，在微机系统与外设之间必须进行 A/D 和 D/A 转换电路，以满足微机的数字信号要求。

(4) 信号传输要求 信号在传输中，由于衰减、噪音与反射等，会产生畸变。为此要求根据信号类别及传输线情况采取一定措施。

设备接口电路随对象特性的不同，差异很大，还不能实现统一的标准，一般要用户自行设计，有一些通用芯片可供选用。在机电一体化系统中，设备接口电路与传感器、执行元件等密切相关。

设备接口电路随对特性的不同，可分为四种类型：①开关量输入接口电路。②开关量输出接口电路。③模拟量输入接口电路。④模拟量输出接口电路。下面对这种四种接口电路逐一进行介绍。

#### 一、开关量输入接口电路

当外部控制设备有按钮，继电器和接近开关接点等信号（称为开关量输入信号）输入微型机系统时，要通过开关量输入接口电路将接点的通断动作转换为微机所能接受的 TTL 电平通断信号。

图 4-13 为典型的开关量输入接口电路原理图。其工作原理是：当开关量信号输入端  $U_i$  产生由低电平到高电平（即有开关量信号输入）的跳变时，通过开关量输入接口电路，就会在 Z80PIO 的输入端  $PA_0$  上产生由低电平到高电平的跳变。 $PA_0$  上的这一上跳信号可以引起 Z80PIO 向 CPU 发中断申请信号，以请求 CPU 处理这一开关量信号即为外设

服务。

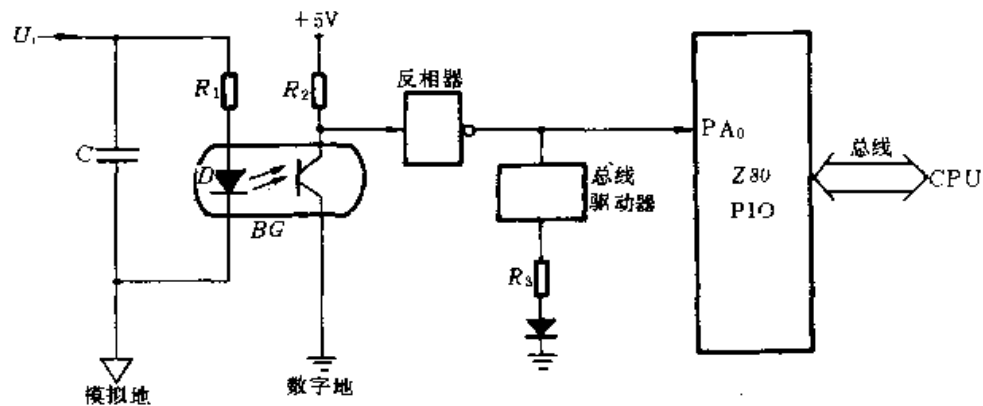


图 4-13 开关量输入接口电路

图中接点的输入信号在高电平时一般用 +12V 或 +24V，电压太低时抗干扰能力弱，太高时又会超过接点的允许电压。

光电隔离管 BG 的作用是使输入外设与计算机不共地，减少外设干扰信号对计算机的影响。

发光二极管 D 用于监视开关量输入信号。当输入信号为低电平时，发光二极管 D 灭。当输入信号为高电平时，发光二极管 D 亮。

总线驱动器用于对发光二极管驱动。反相器输出的信号为 TTL 电平，该信号一方面输给 Z80PIO，另一方面输给发光二极管 D。但这个信号不足以使发光二极管发光，必须经总线驱动器进行电流放大。

## 二、开关量输出接口电路

开关量输出接口电路将 CPU 装置输出的 TTL 电平转换成控制继电器、指示灯等所需要的接点输出信号，图 4-14 是常用开关量输出接口电路原理图。

图 a) 中，当来自 CPU 装置（数据锁存器或 Z80PIO 接口芯片）的信号由低电平变为高电平时，经开关量输出接口电路，使继电器 J 通电吸合。

光电隔离管 BG 的作用与开关量输入接口电路中的相同。

功率晶体管  $T_2$ 、 $T_3$  用于功率放大驱动继电器吸合。

二极管 D 用于旁路继电器由通到断时产生的反电势。

图 b) 中开关量输出接口电路采用由光电耦合器和双向可控硅器件组成的固态继电器 (SSR)。这是一种新型集成化的无触点继电器，在机电一体化技术中广泛应用。这种继电器可直接来自 CPU 装置的 TTL 电平驱动，可控制 0.5~25A 交流电流的通断，也可用于控制直流电源的通断。其形式有直流/直流和直流/交流两种。

## 三、模拟量输入接口电路

在一个控制系统中，如果由传感器等送来的信息是模拟量信号（如电压、温度、角

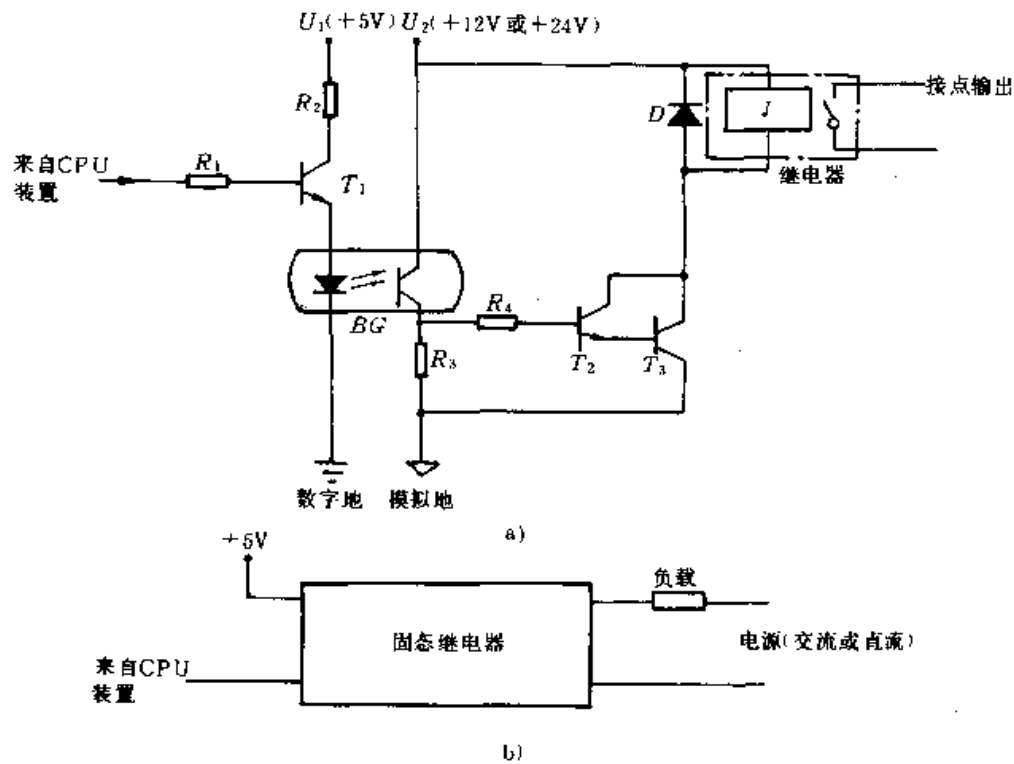


图 4-14 开关量输出接口电路

a) 一般继电器输出 b) 固态继电器输出

度等) 而不是计算机所需要的数字量信号时, 就需要设置 A/D 转换器, 它接受传感器的模拟信号, 并将其转换成数字量信号, 由计算机接收。图 4-15 为典型的模拟量输入接口电路原理图。它在微处理器的控制下, 完成模拟输入信号数据的采集任务。

多路的模拟输入信号 (一般有 8 路、16 路、32 路或 64 路输入) 送入模拟输入多路

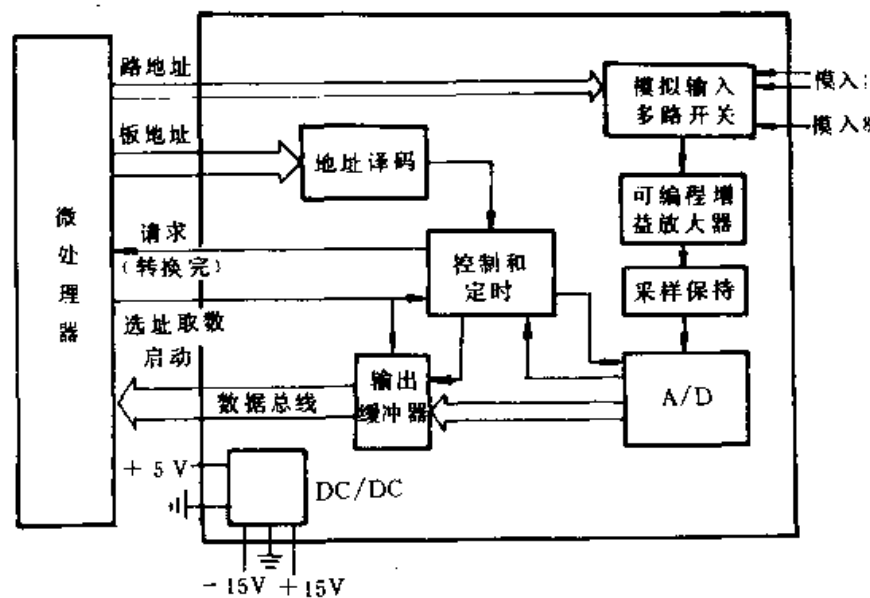


图 4-15 模拟量输入接口电路

开关，用微处理器地址总线的低位部分指定多路开关选择哪一路输入。对输入信号的采集常使用三种操作状态：①重复单路；②顺序输入扫描；③随机采样。

输入信号通过多路开关后，送到可编程增益放大器，将输入信号放大，以便转换。它的增益（放大倍数）可用编程序指定。采样保持电路使输模拟量在 A/D 转换时，维持其直流电平不变。A/D 转换器将模拟电压变成数字量，一般可变为 8 位或 12 位二进制数（有关 A/D 转换器的详细工作原理可参阅第五章有关内容）。转换完后，A/D 转换器将数字量送到输出缓冲器，再经微处理器的数据总线，送到微处理器内，当采样数据是 12 位、而数据总线是 8 位时，须分为两个字节输入到微处理器。

微处理器要转换某路模拟信号时，向控制和定时电路发出启动信号，A/D 转换器即可进行转换，一旦转换结束，向微处理器发一中断请求信号，微处理器发出选址取数后将数据取走。选址取数信号一般和启动信号为同一信号。即取数结束信号就是下一点转换的启动信号。

为使电源稳定，这种接口电路都采用直流/直流（DC/DC）变换电路。

在实际使用中，有些问题要引起足够的重视。例如模拟信号对噪声特别敏感，要采用屏蔽、绝缘等进行专门防护。模拟信号和数字信号虽然都是弱信号，但为防止噪声串入模拟信号，也要在线路上将两者分离。数字信号的发送与接收，应使用双绞线。在微型机系统与设备接口用长线连接时，由于噪声源和配线间的电磁感应和静电感应，在接口电缆上也会产生噪声，为此接口连接时可采取如下措施：

- (1) 把连接电缆与可以预料到的噪声源（如强电线、断路器、交流电机等）分隔。
- (2) 传输线使用抗噪声能力强的双绞线，其他线应保证靠近驱动端和接收端接地。
- (3) 将传输线进行静电屏蔽，屏蔽层只在一端接地。
- (4) 逻辑电路的接地与模拟电路的接地分别配线，为防止形成接地电流，要在一端接地。
- (5) 在负载上装设干扰抑制线路。

#### 四、模拟量输出接口电路

外围控制装置有的要求用模拟信号进行控制，此时就要设 D/A 转换器，把计算机输出的数字量信号转换为模拟量信号。

图 4-16 为一模拟量输出接口电路原理图。

图中采用 DAC0832D/A 转换芯片。输入锁存端 ILE 在系统中一般常用来接受某信号的控制端，达到禁止数据写入芯片或允许数据写入芯片的目的。图中 ILE 端接 +5V 电源，使芯片处于允许输入锁存状态。 $\overline{WR}$  端连接的是输入输出请求  $\overline{IORQ}$  和写信号  $\overline{WR}$ 、 $\overline{CS}$  片选端接地址总线  $A_7 \sim A_0$  的译码器输出端。图中，当  $A_7 \sim A_0$  为 20H 时，选中  $\overline{CS}$ （即  $\overline{CS} = 0$ ）。

图中 D/A 转换器的输出过一个运放电路把电流输出转换为电压输出。输出电压  $V_{OUT}$  与输入数字量之间的关系如下：

$$V_{OUT} = \frac{R_{IL}}{256} \cdot \frac{V_{REF}}{R_{REF}} \cdot N$$

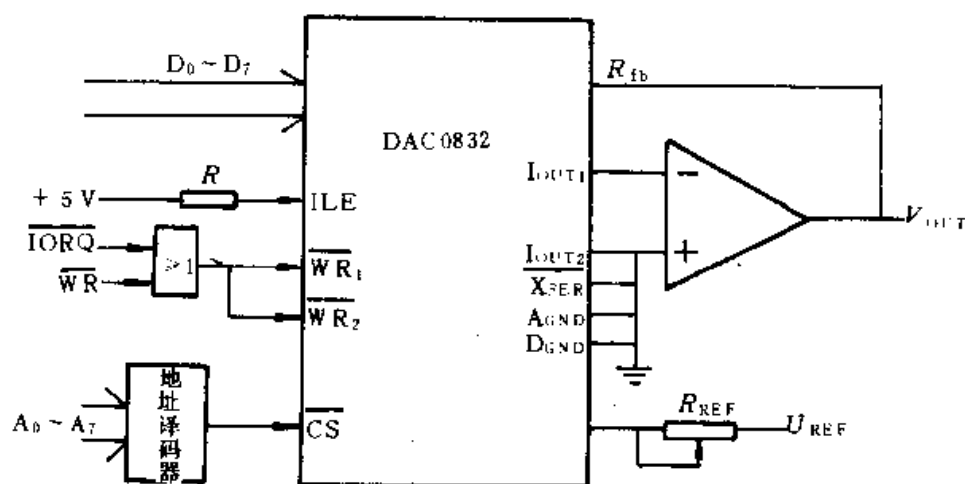


图 4-16 模拟量输出接口电路

式中  $V_{REF}$ ——参考电压  
 $R_{fb}$ ——反馈电阻  
 $N$ ——输入数字量（十进制）

负号表示输出电压  $V_{OUT}$  与参考电压  $V_{REF}$  反相，通过改变  $V_{REF}$ 、 $R_{REF}$  和  $R_{fb}$  都可以改变  $V_{OUT}$  的输出范围。

## 第六节 常用信息输入/输出设备及接口

一个机电一体化系统要输入信息，对之加工后还有信息输出。信息的输入/输出除通过传感器检测元件外，还要通过各种信息输入/输出设备来完成，从而实现人机信息交换。在机电一体化设备中常用的信息输入/输出设备有光电输入机、键盘输入设备、CRT 显示、七段发光管显示、打印机等。

### 一、光电输入设备及接口

#### （一）穿孔纸带及光电输入机

纸带信息是一种机械式记录的信息。常用纸带有 25.4mm 宽与 17.5mm 宽两种。除一个同步孔外，前一种每排可穿 8 个信息孔，称为八单位纸带。后一种每排可穿 5 个信息孔，称五单位纸带。图 4-17a) 即为八单位纸带，其信息内容如图右侧所示。纸带上有孔为“1”，无孔为“0”。从右到左可形成由低至高共 8 位的二进制代码。一排孔构成一个字符，代码形式可有 ASCII 码、ISO 码、EIA 码等。按一定规则将其顺序排列起来的字符代码就组成程序信息。同步小孔的作用是产生同步脉冲。

光电输入机是一种广泛使用的穿孔纸带程序输入设备。它利用光穿过有孔纸带、照射到纸带另一边的一排光敏元件上。有孔时输出一大的电流（亮电流）；无孔时输出最小

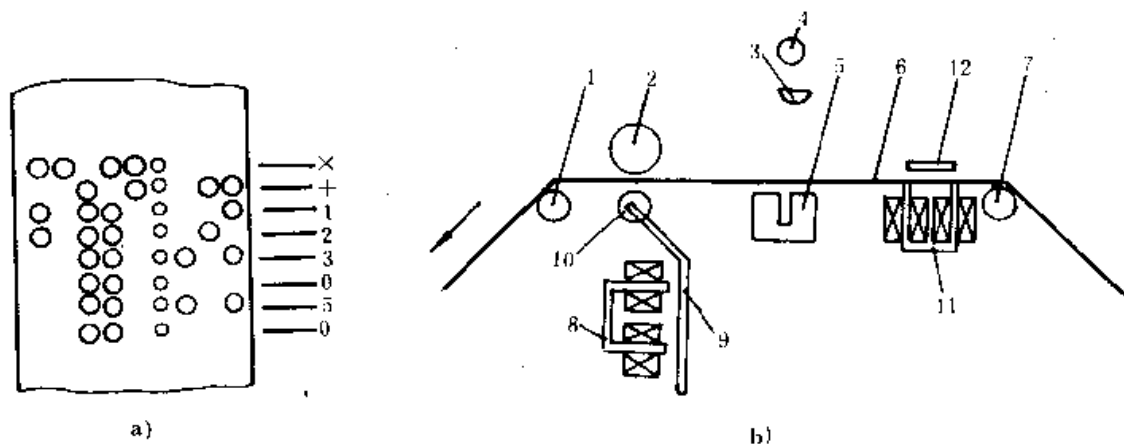


图 4-17 光电输入机纸带信息和结构原理

a) 纸带信息 b) 结构原理

- 1—导向轮 2—主动轮 3—聚光透镜 4—灯泡 5—光电管 6—穿孔纸带 7—导向轮  
8—起动电磁铁 9—起动衔铁 10—压轮 11—制动电磁铁 12—制动衔铁

电流（暗电流）。这样就将纸带穿孔信息转换成光敏元件的电流脉冲信号输出，此输出是一种钟形脉冲，须经放大整形后才能输出标准宽度与幅度的脉冲信号，然后在同步脉冲控制下送进计算机输入寄存器。

图 4-17b) 是光电输入机结构原理。纸带下方的 5 为一排共 9 个光电管，分别与纸带 8 个信息孔及同步孔对齐。灯泡 4 通过透镜 3 将平行光投到一排孔上。起动光电输入机后，制动电磁铁 11 释放，松开制动衔铁 12，同时起动电磁铁 8 吸合，通过衔铁 9 使压轮 10 将纸带压向主动轮 2，于是纸带前进，一排排地读数。当遇到终止字符即一个程序段读完时，电磁铁 8 释放，11 吸合，纸带停止前进。读取速度一般为 200~300 行/s。

## (二) 纸带输入机的设备接口及信息传送

纸带输入设备接口是一设备控制器。它位于计算机标准接口电路和设备之间。计算机操作命令通过它变成控制信号控制阅读操作。由读出器输出的脉冲信号还须经控制器校验电路进行校验。正确代码通过标准接口传送至处理器，若有错则置错误标志，通过计算机进行错误处理。

该控制器主要由代码缓冲器、同步、代码校验等组成，如图 4-18 所示。

代码缓冲寄存器寄存由纸读出的信息，从同步孔输出的同步信号用来选通控制中的数据传送通道。但一排孔信息的读出，错误检查，设备完成状态的设置，需要一系列的控制脉冲信号（同步信号序列）。这是同步信号  $M_t$  经过一系列延迟线路得到的。此序列与走带操作始终同步。图中同步信号有： $M_{t_1}$ ——把光电输入的代码信息送到代码缓冲寄存器； $M_{t_2}$ ——检验脉冲，将缓冲寄存器代码在校验电路中校验。按方法的不同， $M_{t_1}$  个数可能不同； $M_{t_2}$ ——设备完成信号，表示一排孔信息已稳定地送入缓冲寄存器，置 I/D 接口为完成状态，准备好接受下一排孔信息。

纸带输入机与处理器交换信息的传送方式，纸带输入设备信息传送速率与产生信息

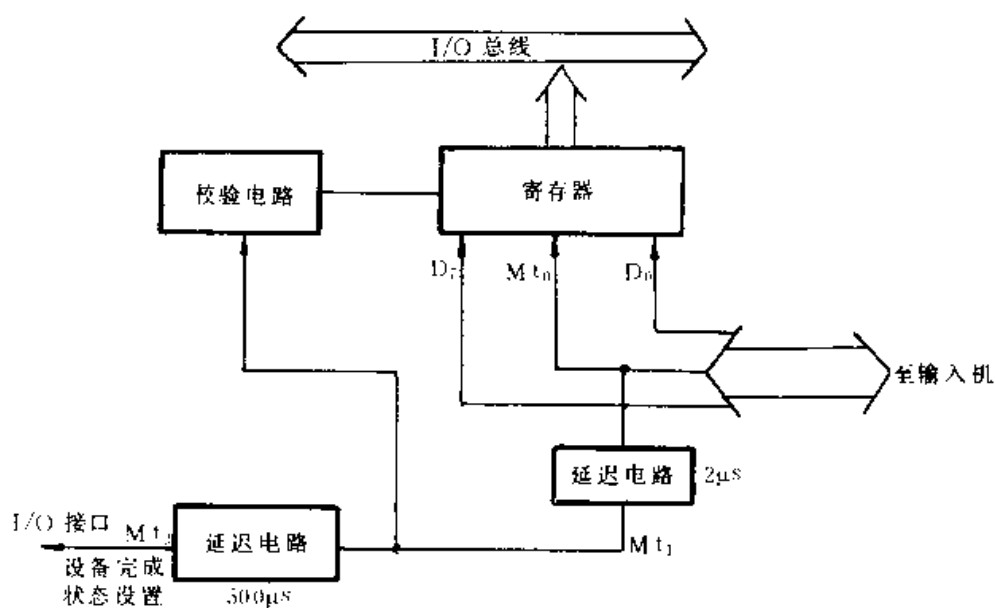


图 4-18 输入机设备控制器

的特殊要求及处理器管理方法有关。目前信息速率可达 2000 符号/s，即每 500 $\mu$ s 就要请求与处理器交换一次信息。其次，输入字符有直接写入存贮器的，也有要通过装配程序对字符装配后再写入存贮器的。按此特点，纸带输入设备最好采用中断方式和处理器交换信息。不过中断优先级应比其他低速设备高。

## 二、键盘输入设备与接口

键盘是微型机常用的一种输入设备，是手动数据输入 (MDI) 方式的主要工具。它不仅可向计算机输入程序和数据，并可方便地进行编辑修改，且可向计算机发出操作命令，用于控制程序起停、外设协同动作等，实现人机对话。

目前常用两种键盘：全编码键盘和非编码键盘。全编码键盘能自动给出按键的 ASCII 编码，它有一套逻辑电路用来自动检测键盘按键。此种键盘成本高，用于硬件费用不占主要地位或系统要求一个复杂的键盘时。

微机系统中用得最多的是较便宜的非编码键盘。下面以常用的 6 $\times$ 5 单板微机的键盘为例讲解其接口硬件及软件。

### (一) 键盘与 CPU 的硬件接口

单板微机的键盘组成如图 4-19 所示，共 28 个键，其中有 16 个数字键和 12 个命令键。

图 4-20 给出了此键盘

PROG	LOAD	DUMP	BP	
MEM	PORT	REG	REG	
7	8	#	A	NEXT
4	5	6	B	MON
1	2	3	C	STEP
0	F	E	D	EXEC

图 4-19 键盘的组成



与 CPU 硬件接口，它是通过一片输入接口芯片 74LS273 和一片输出接口芯片 74LS244 实现的。74LS273 是作为键盘行的开放或禁止提供控制信号，其输入端与 CPU 数据总线相连。片选信号  $\overline{\text{DIGTLATCH}}$  作为 CP 脉冲完成输入数据锁存，对应口地址 8CH。片选信号  $\overline{\text{DIGTLATCH}}$  作为 CP 脉冲完成输入数据锁存，对应口地址 8CH。

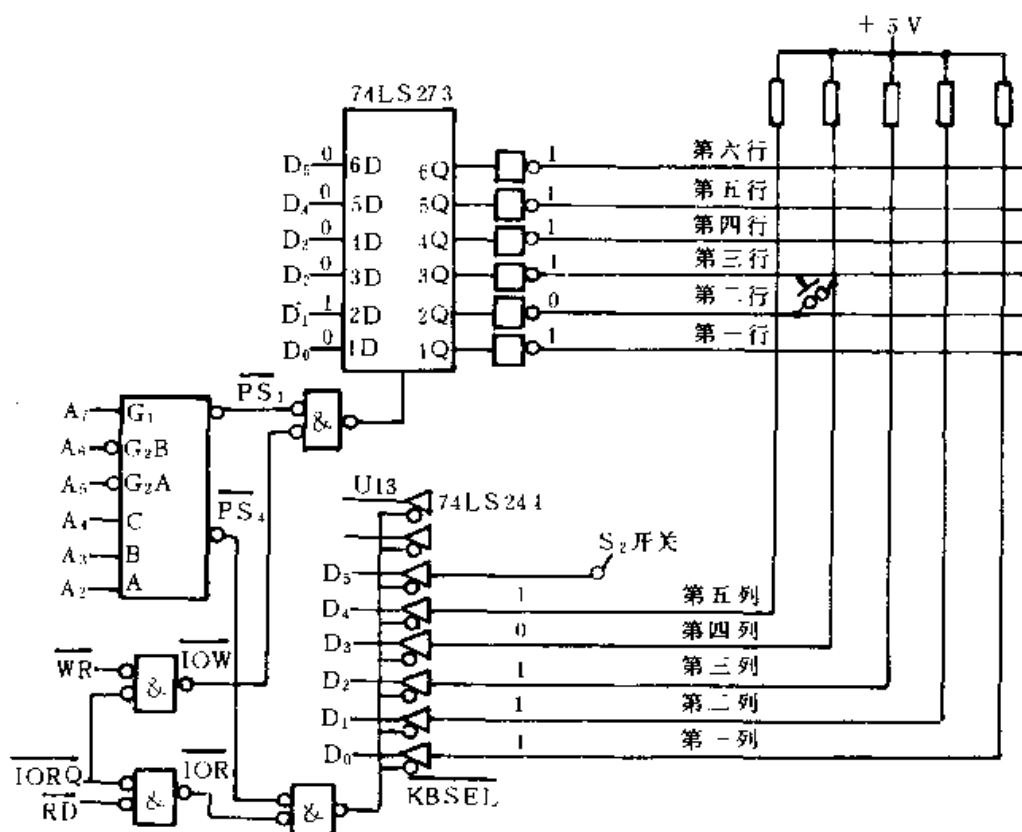


图 4-20 键盘与 CPU 硬件接口

以图中键 2 为例，它在第二行，要使第二行开放，74LS273 芯片的 2Q 必为 1，其余为 0，则加在 74LS273 芯片的代码为 00000010B (02H)，将此称为行码。行码某位为 0，相应行被禁止，为 1 则相应行开放。开放第二行的程序指令为：

```
LDA, 02H
OUT (8CH), A
```

74LS244 是向 CPU 提供键盘列信息 (列码) 的接口芯片。其输入端与键盘列线相连，输出端与 CPU 数据总线相连。对应口地址为 90H，片选信号  $\overline{\text{KBSEL}}$  将 74LS244 三态门打开，CPU 即读入列码，用指令：IN A, (90H)。列码某列为 0 表示相应列线有键合上，为 1 则无键合上。图中键 2 合上，其余无键合上时列码为 XXX10111 (高三位与键盘无关)。

计算机如何判断有无键合上？合上的是哪个键？该键含义是什么？这些问题是靠软件即键盘程序来解决的。

## (二) 键盘程序

在此对图 4-20 所示的硬件的键盘程序进行分析, 按类似步骤, 读者可自行设计所需键盘程序。

键盘程序应能完成如下的任务

(1) 判断有无键合上 从 74LS273 芯片输出一个行码 3FH, 即命令所有行开放, 然后读列码, 只要列码不是 1FH, 就表示有键合上。

(2) 键识别 采用逐行扫描的方法, 向 74LS273 逐行输出行码 01H, 02H, ……., 每输出一次, 通过 74LS244 读一次列码。若读出列码为 1FH, 表示无键合上。继续向下行扫描, 若有键合上即得到相应列码。例如图中键 2 合上, 则程序扫描到第二行时即找到合上的键。行码为 02H, 列码为 17H。

(3) 译键码 要确定合上的键的含义, 需进行键译码。通常是采用查键值表的方法来完成。此列是利用查到的行码、列码形成“关键字”, 通过“关键字”键值表。有关内容列于表 4-1 中。

表 4-1 键 值 表

表内的地址	存储单元的内容 (组合特征码)	对应的键值	键的行码	键的列码
KYTBL+0	OFF	; 0	01	0
+1	OEF	; 1	02	0
+2	OF7	; 2	03	1
+3	OFB	; 3	02	1
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
+10	O0E	; 10 (EXEC)	01	1E
+11	OFE	; 11 (STEP)	02	1E
+12	OEE	; 12 (MON)	04	1E
+13	ODE	; 13 (NEXT)	08	1E
+14	OCD	; 14 (REG)	10	1D
+15	OCB	; 15 (REG)	10	1B
+16	OC7	; 16 (PORT)	10	17
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

键值表首址为 KYTBL。“关键字”形成方法: ①求行数: 行码逐次右移, 全零时移位次数即为行数。②求行数码。③行数码左移四次, 低四位补 0。④移位结果与列码相加得“关键字”。例如键 2 的行码为 02H, 列码为 17H, 特征码(关键字)为 F7H, 按 F7H 查键值表, 查表次数为 3, 故键值为 2 (查表次数减 1)。

(4) 键值分类 通常可将键分为数值键、字符键与命令键几类。区别的方法是对键值大小分类。如例中数字键值 < 10H, 命令键值 ≥ 10H。

(5) 转键处理程序 根据查到的分类键值, 分别转入不同的键处理程序入口地址。

有关键盘处理的具体程序, 读者可参阅有关微型计算机书籍。

在实际应用中，目前已可选用一些具有较强功能的可编程键盘接口芯片，如附录（一）给出的 8279 可编程键盘显示器接口芯片，这给键盘接口的设计应用带来很大方便。

### 三、CRT 显示器及接口

#### （一）光栅扫描成像

CRT 显示通常采用光栅扫描成像的方法进行图像处理。其原理如图 4-21 所示。按视像信号改变其强度的电子束在水平与垂直偏转信号作用下，以一帧 262.5 行（隔行扫描方式，每帧 525 行）的方式形成扫描的光栅。行扫描重复频率为 15750Hz 左右。帧频为 60Hz（或 50Hz）。在行扫描时间内，由于部分时间要用于空程，故实际显示时间是  $64\mu\text{s}$  周期中的  $45.7\mu\text{s}$ 。若每行要显示 64 个字符，每字符占用的时间约  $710\mu\text{s}$ 。这就要求显示存贮器的取数时间满足此范围。另外要字符稳定显示，还应按帧频 60Hz 再生。视频信号的定时图如图 4-21b) 所示。扫描速度根据外来同步信号调节。

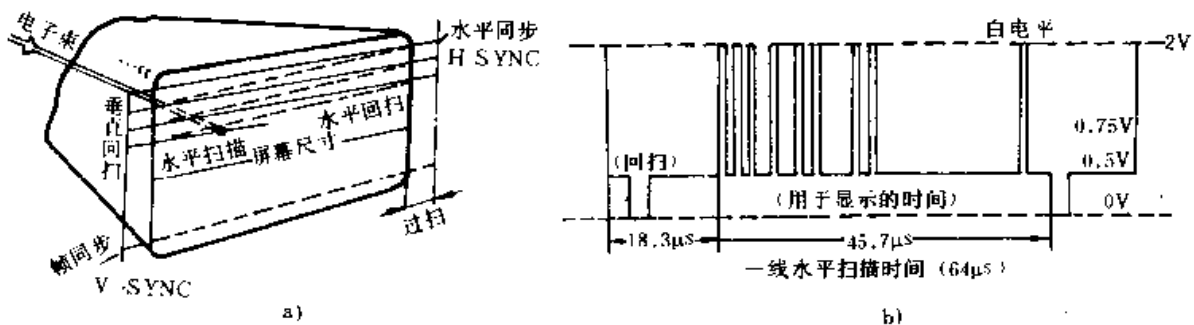


图 4-21 光栅扫描成像示意图

a) 光栅扫描 b) 定时图

#### （二）图形图像的输出

计算机在处理图像信息时有多种算法，以点阵图像的概念为例，可将图形看成点的集合，计算机在内部存贮器上定义一个具有  $M \times N$  个方格（像素）的虚拟画面。每个像素都规定一信息来表现其图形。如一个像素对应存贮器一位，则每个像素可有两种信息（黑和白）。又如一像素对应存贮器  $K$  位，则每一像素可有  $2^K$  种信息。这  $2^K$  种信息在单色显示时对应于深浅（亮度）；在彩色显示时对应于颜色（色调、亮度）。因此一个虚拟画面所需的存贮容量位数为  $S = M \times N \times K$ 。由于计算机以字节为单位处理， $S$  常表示为字节数。即应 CRT 显示图像时，其视频存贮器（即虚拟画面存贮器）的容量与分辨率（ $M$ 、 $N$  值）有关。

用计算机向 CRT 输出图像的过程如图 4-22 所示。

对输出装置控制器的要求是要使输出显示平面上的位置与虚拟画面上的信息位置（如存贮器地址）一致，即在 CRT 光栅扫描时应与对虚拟画面的扫描同步。

#### （三）字符的输出

要在显示屏上以点阵方式对字符进行扫描显示时，即要用像点组成字符。正如上述图形图像的情况，要有一个字形点阵的存贮器即字符发生器（通常用 ROM）。字符的

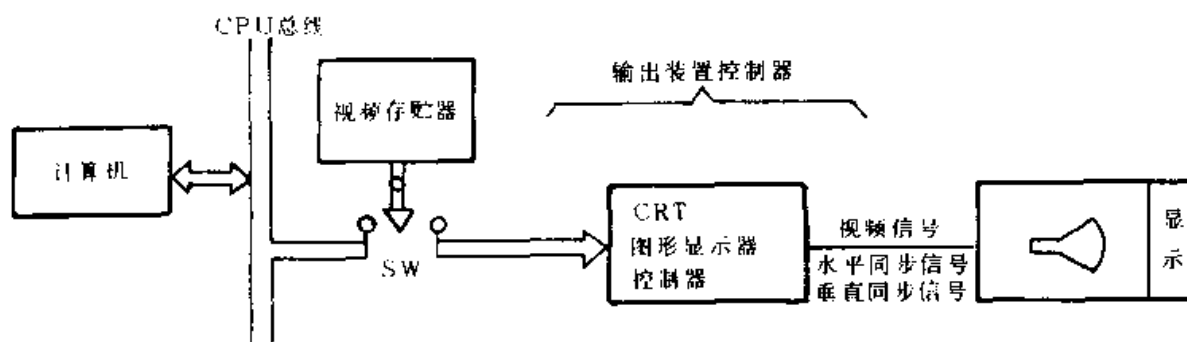


图 4-22 计算机向 CRT 输出图像

ASCII 码从显示用存储器 RAM 中读出，送至字符发生器作为选择对应该字符的字形存储单元地址。一个 ROM 字符发生器通常存储有若干个可供显示的字符点阵信息（如 MCM6575 有 128 个存储字符）。

通常字形点阵有  $5 \times 7$  方式，加上周围空白点，形成  $7 \times 10$  ( $7 \times 9$ ) 方式。 $5 \times 7$  字符点阵的产生原理如图 4-23 所示。

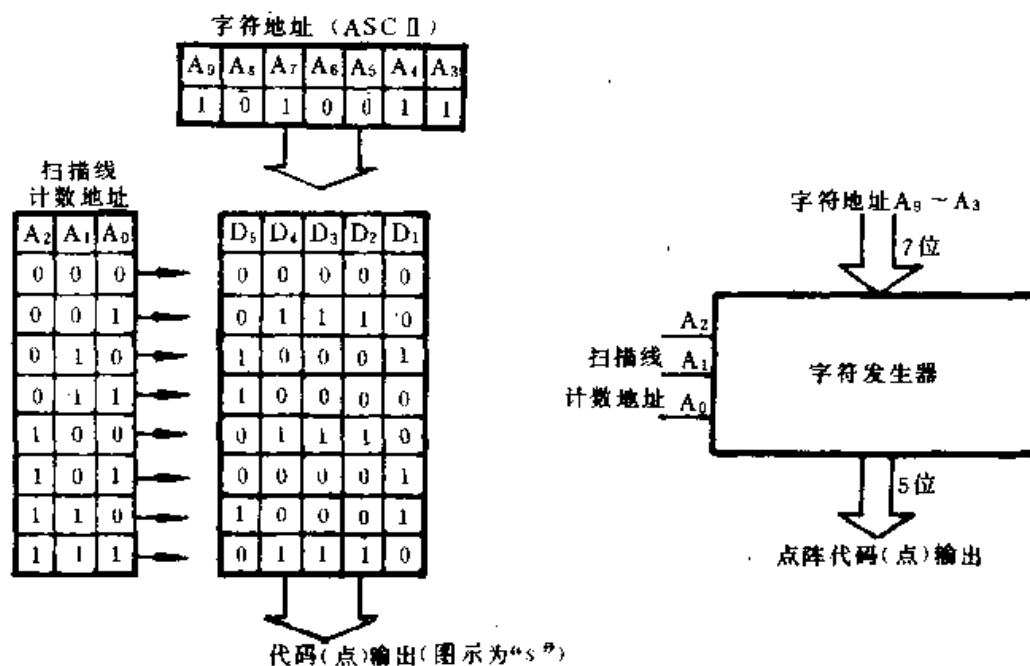


图 4-23 字符 (点阵) 产生原理

一个字符发生器 ROM 区存放一个字符点阵，它需要 5 列  $\times$  8 行共 40 个存储位。按字符的 ASCII 码作为地址放在 ROM 中。产生字符图像时按水平扫描方式的要求，以下列顺序（假定每行 64 个字符）：第 1 字的第一线，第 2 字的第一线，……，第 64 字第一线；第 1 字第 2 线，……，第 64 字第 2 线；第 1 字第 8 线……，第 64 字第 8 线。

通常一个字符的 ASCII 码用 7 位二进制数表示，故每个字符的 ASCII 码可作为存放

字符像点的 ROM 中高 7 位地址 ( $A_9 \sim A_3$ )。如图 4-23 中字符“s”的 ASCII 码为 1010011, 此即是存放“s”像点地址 (字符发生地址) 的  $A_9 \sim A_3$ , 而低 3 位 ( $A_2 \sim A_0$ ) 则对应水平扫描一行中的线计数值。

为能在屏幕上显示各种不同的字符, 并使一帧字符不断再生 (再生频率即帧频), 需有一显示存储器 RAM。其数据存贮的方式是, 每一要显示的字符在显示存储器中都有单独的一个存贮位置和地址。存储器的数据输出就是字符发生器的输入地址。当电子束扫描屏幕时, 显示存储器即向字符发生器的输入端提供屏幕对应位置的数据。这时由一显示计数器对显示存储器进行选址, 以保证和显示器扫描同步。而为能在显示存储器的适当位置存入我们想显示存贮的数据, 则是通过 CPU 来完成的。这时显示存储器应由 CPU 的地址总线选址。利用一个多路转换器即可实现对 CPU 选址和显示计数器选址的转换。

由字符发生器送出的字符点阵数据, 最后还需转变成串行信号与同步信号, 最终形成帧频输出。

#### 四、七段发光管显示器及接口

##### (一) 原理及接口电路

在显示装置中, 七段发光管显示器最便宜, 应用最广泛, 可用来显示十进制数、十六进制数及部分英文字母。显示器由七段发光二极管组成 (有的在右下角带一小数点), 如图 4-24a) 所示。各段依次记为 a、b、c、d、e、f、g。为使之发光, 工作中每段都要加上一驱动电路。图 4-24b) 表示出七段发光管显示器的接口电路。它是通过 74LS273 锁存器作为输出接口芯片, 七个输出端  $Q_0 \sim Q_6$  分别经驱动电路接到 a~g 七个发光管。需哪一段发亮, 可通过一个数字量输出来控制, 这叫“选段”。七个发光管采用共阴极接法 (或共阳极接法) 时, 阴极接“0”, 驱动器输出为“1”, 点亮发光管; 阴极接“1”时, 则各段都不能发光。这叫“位选”。通常显示器要由若干个 (位) 七段发光管组成, “位选”即用来选择哪一位亮, 哪一位不亮。

显示一个十进制数字时, 相应的用一个 8 位字节的代码表示。表 4-2 给出了数字 0~9 的代码表示。

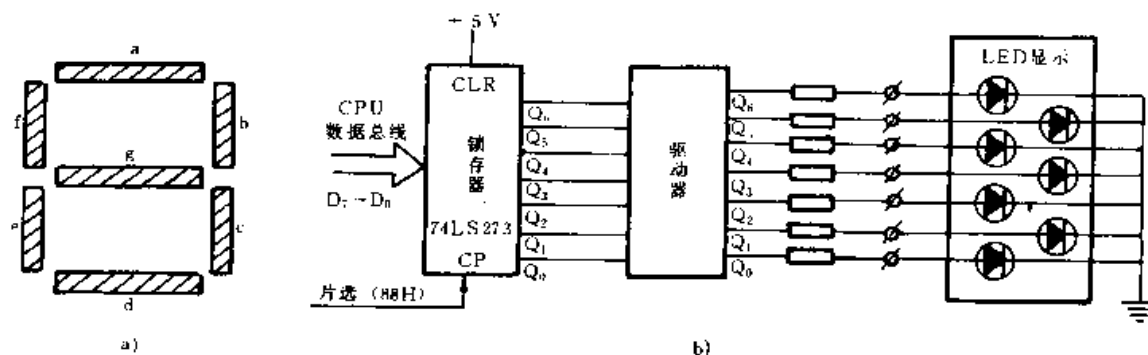


图 4-24 七段发光管显示器工作原理  
a) 七段发光管显示 b) 七段发光管显示接口电路

表 4-2

七段发光显示代码

十进制数字	七位数字状态							十六进制码表示
	g	f	e	d	c	b	a	
0	0	1	1	1	1	1	1	3F
1	0	0	0	0	1	1	0	06
2	1	0	1	1	0	1	1	5B
3	1	0	0	1	1	1	1	4F
4	1	1	0	0	1	1	0	66
5	1	1	0	1	1	0	1	6D
6	1	1	1	1	1	0	1	7D
7	0	0	0	0	1	1	1	07
8	1	1	1	1	1	1	1	7F
9	1	1	0	0	1	1	1	G7

七段发光显示的译码可以采用硬件方法，如摩托罗拉公司生产的 MC14495 芯片包括全部锁存、译码及驱动功能。另外，译码工作也可由软件来完成。下面给出用软件方法实现显示的驱动程序。

### (二) 驱动程序

以显示十进制数字为例。将表 4-2 所示之代码表存在 SSEQ 为起始地址的 RAM 工作单元。现若将显示缓冲区单元 2040H 内容存入 2042H 单元并送显示，当 2040H 中不是十进制数则清除，显示“空白”。程序如下：

```

LD B, 00H;           置“空白”码
LD A, (2040H);      取要显示数据
CP 10D;             是十进制数吗?
JR NC, DONE;       否，存显示“空白”码
LD L, A;            求查表偏移量
LD H, 00H;
LD DE SSEG;         取代码表首址
ADD HL, DE;         求查表地址
LD B, (HL);         从表中取出七段显示代码
DONE LD A, B
LD (2042H), A
OUT (88H), A;       送显示，88H 为端口地址
HALT
七段代码表：
                                ORG 2100H
SSEG: DB 3FH, 06H, 5BH, 4FH, 66H,
DB 6DH, 7DH, 07H, 7FH, 67H, END

```

## 第五章 传感器及接口

传感器是机电一体化产品中不可缺少的重要组成部分之一，它的作用如同人体各种感官，起监视、测量周围事物发生的变化作用。

传感器把被测物理量（绝大多数为非电量）检测出来，转换成与之相对应的其他易于测量的物理量（大多数为电量）。随后，这个信息被传送给信息处理部分进行判断、运算、存贮、进而控制被测量。传感器输出信息正确与否将直接影响整个系统的工作，因此，传感器的正确选择和应用十分重要。

传感器输出的信息大多数为模拟量，作为信息处理设备的微型计算机只能接收数字量信息。这样，传感器一般不能或很少能直接与计算机连接，它们之间需要设置必要的计算机输入接口。这个接口的任务主要有：传感器输出信息的预处理（如放大、调制、整形等）；模拟量与数字量的转换（如 A/D 转换器）；计算机接口等。如图 5-1 所示。

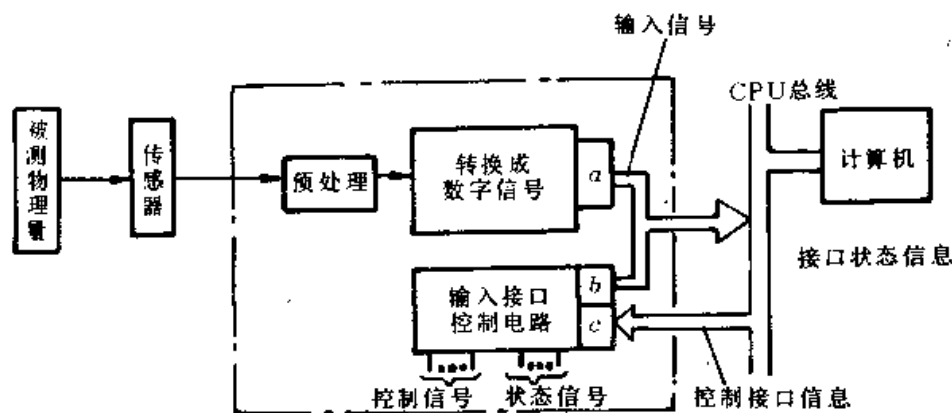


图 5-1 传感器与输入接口

### 第一节 传感器的原理及应用

#### 一、传感器分类

目前，传感器的种类繁多。从使用的角度看，常有两种分类方法：一是按传感器的输入量（被测参数）分类，二是按传感器的输出量分类。前者便于使用者根据被测对象的被测参数选择所需要的传感器；后者对传感器的研究与制造者来说，便于根据它们的机理进行研究，并便于研究它们在机电一体化系统中与微机的接口。下面介绍这两种分类。

#### （一）按被测参数分类

##### 1. 热工参数

如温度、压力、流量、液位等。

## 2. 机械量参数

如位移、力、速度、加速度、转速、重量、尺寸等。

## 3. 物性参数

如密度、酸碱度、浓度、粘度、混合物成分含量等。

## 4. 状态量参数

如颜色、透明度、裂纹、缺陷、泄漏、磨损等。

### (二) 按输出信息分类

#### 1. 开关式

开关式分有触点式及无触点式两种。

#### 2. 模拟电量式

模拟电量式有脉冲式及电续式两种。脉冲式包括有脉冲重复频率式、脉冲峰值式、脉冲宽度式、脉冲间隔式；电续式包括有电阻变化式以及电压、电流、电感、电容、频率、相位等物理量变化式。

#### 3. 数字电量式

数字电量式如脉冲数式及编码式等。

## 二、常用传感器的工作原理及应用

下面按输出信息分类法介绍几种常用传感器的工作原理及应用中应注意的问题。

### (一) 开关式传感器

开关式传感器应用很广泛，尤其在位置检测方面。其检测精度可从毫米级直到微米级。检测方法有接触式与非接触式。

#### 1. 开关式传感器的原理特性

开关式传感器的原理特性及实用特性如图 5-2 所示。

在图 5-2a) 中，当输入量达到门限电平时，应马上从关状态转换成开状态。但由于传感器输入信号中总会叠加噪声，使输入量不稳定，即输入量在门限电平左右变化时可

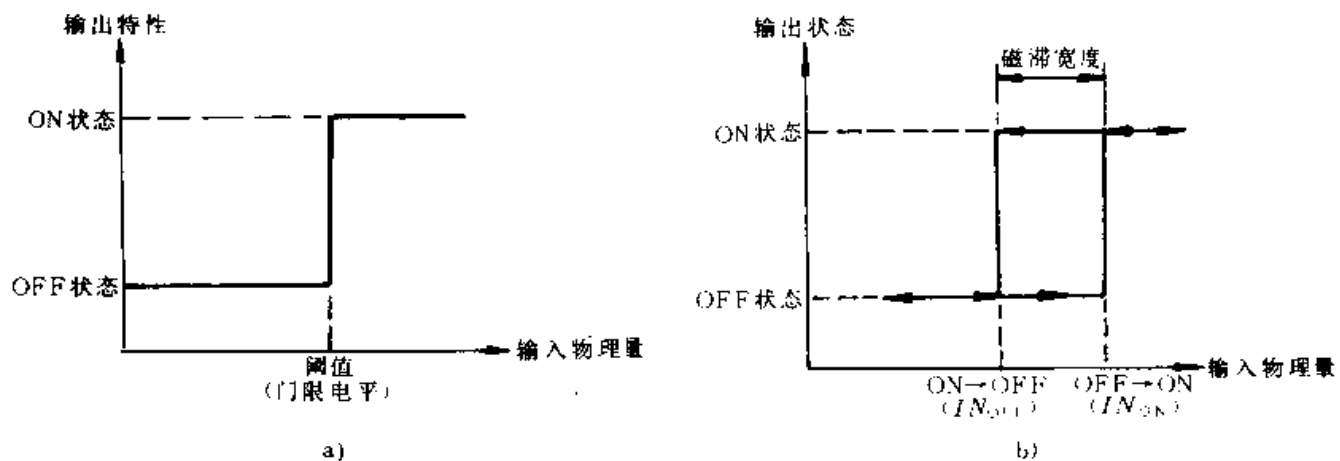


图 5-2 开关式传感器的原理特性

a) 原理特性 b) 实用特性



能引起输出状态的不稳定。为此，应采用图 5-2b) 所示的实用特性（具有磁滞宽度），传感器才能正常工作。但应注意两点：一是应满足  $IN_{OFF} < IN_{ON}$ （这里  $IN_{ON}$  为输出状态从断到通时的输入阈值， $IN_{OFF}$  为输出状态从通到断时的输入阈值）；二是磁滞宽度（瞬动宽度）的值应大于噪声成分，但太大又会使传感器的响应精度下降。

## 2. 接触式开关传感器

这种传感器如常用的按钮开关、行程开关，各种带触点的自动开关等，它们实际上就是高精度微型开关。其特点是结构简单、价格低、易小型化、能测量出微小位移量，但同时存在故障率高、容易产生噪声干扰的缺点。应用中要注意两点：

(1) 接点特性问题 在图 5-3 中左边为常开触点，右边为常闭触点。对常开式接点，移动接点  $s$  与  $b$  脱开后应马上与  $a$  结合，但触点切换时存在接点  $s$  瞬间完全断开状态（即与  $a$ 、 $b$  均不结合，如左中图所示），对常闭式则存在移动接点  $s$  瞬间完全连接状态（右中图），这些都使输出不稳定。

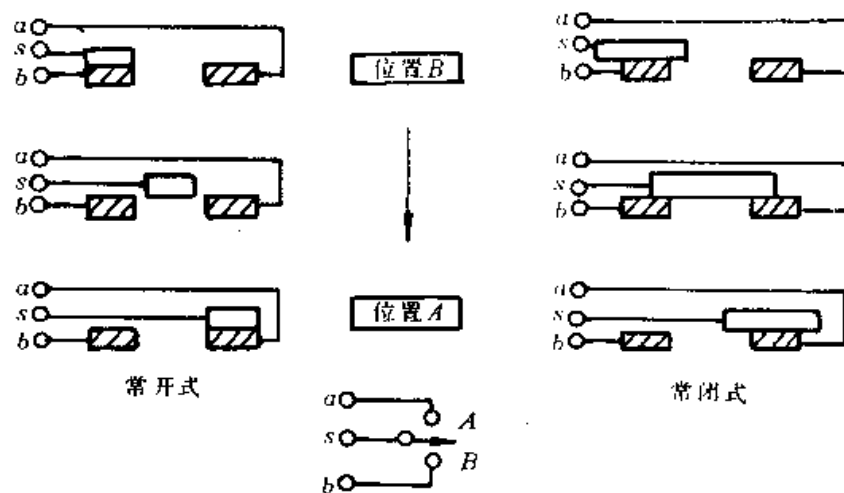


图 5-3 接触式开关传感器

(2) 触点抖动问题 触点式开关传感器或多或少地存在着触点抖动问题。抖动时间有长有短，一般从几十微秒到几十毫秒。抖动结果也使输出瞬间不稳定。解决此问题可用硬件方法（图 5-4 所示），也可用软件方法。

最简单的软件方法是写进一段延时子程序。下面给出一个延时 20ms 子程序：

```

D20MS:  LD  HL, 08FFH
D20MS1: DEC  L
        JR  NZ, D20MS1--$
        DEC H
        JR  NZ, D20MS1--$
        RET
    
```

还可用更复杂的一些软件程序来消除触点抖动。方法是连续两次判断传感器的输出值，若一致，便认为正确；若不一致，再重复进行三次同样的输入操作，三次内容都不

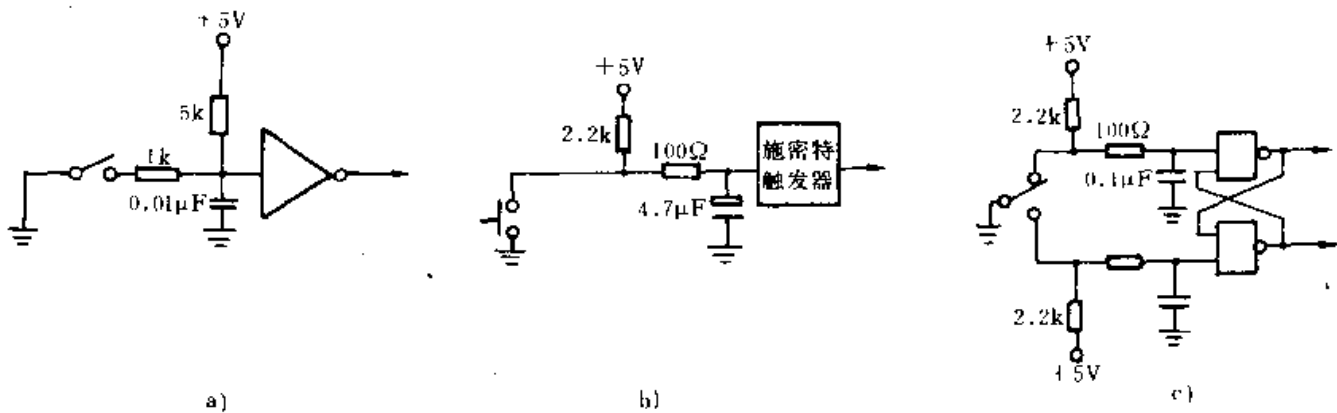


图 5-4 触点抖动消除电路

a) 采用滤波器 b) 采用斯密特触发器 c) 采用双稳态电路

一致，就判为错误。

### 3. 无触点式开关传感器

无触点式开关传感器能克服上述有触点所引起的问题，故应用越来越多。其特点除可小型化、精度高外，其可靠性也大大得到改善，且寿命长、响应快。常用的接近开关、光电开关均属此类。其型式按检测方式、特性和功能来分，有高频振荡式、静电电容式、光电断续器、霍尔效应式等。下面介绍几种。

(1) 高频振荡式（接近开关） 它的原理框图如图 5-5a) 所示。这种开关的输出电路有两种状态：有输出信号和无输出信号。

在检测部分有检测线圈，检测对象为金属物。当开关接近金属物时，检测线圈的电感发生变化，使振荡回路停振，输出从有到无。

若检测对象为非金属物时可用静电电容式。

(2) 光电断续器（光电开关） 它的电路原理如图 5-5b) 所示。电路左边为一光电二极管，（通常为红外发光二极管），当电路中有电流通过时，光电二极管发光，通过狭缝照射到右边的光敏三极管。光敏三极管与普通三极管相似，当集电极  $c$  与基极  $b$  之间的 P-N 结附近受到光敏二极管发出的光照后，产生光电流（相当于一般三极管的基极电流）。若光电流足够大，则三极管  $c-e$  结由断变开。当狭缝有障碍物阻挡时，光线不能通过，右边电路由开变断。

光电断续器把发光器件与受光器件封在一块内构成一体化，故具有小型化，检测精度高、可靠性高的优点。

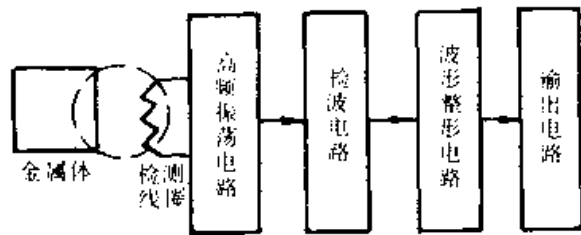
(3) 霍尔效应式 这种开关利用霍尔元件的霍尔效应制成。霍尔元件是一种磁电转换元件。霍尔元件的输出电势  $V_H$  受两个因素影响：一是垂直于元件的磁感应强度  $B$ ；一是输入端电流  $i$  的大小。

$$V_H = KiBsina$$

式中  $K$ ——霍尔常数

$\alpha$ ——电流与磁场方向的夹角

在图 5-5c) 中，霍尔电势加在三极管基极，当其足够大时，右边电路开通。当磁场

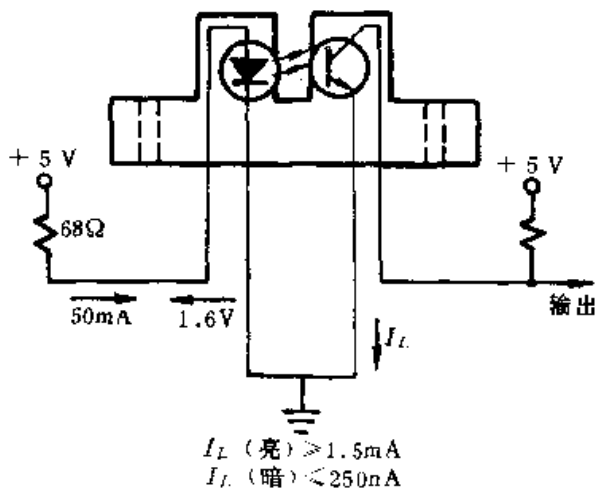


中放进障碍物，使  $B$  大小发生变化（例如  $B$  下降），霍尔电势下降，电路由通变断。

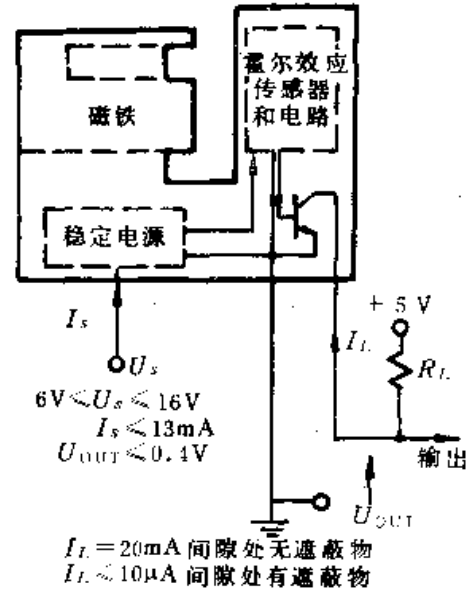
由于霍尔元件具有简单、小型化、无触点、寿命长、动态范围大、频率响应宽等特点，目前被广泛地应用于检测装置中。

#### 4. 开关传感器与 CPU 的连接

通常使用可编程接口芯片能方便地实现各种开关与 CPU 的连接。现举一按钮开关的



b)



c)

图 5-5 无触点式开关

a) 接近开关 b) 光电开关 c) 霍尔开关

例子加以说明。

图 5-6 是开关与 Z80CPU 接口的电路图，利用 PIO 作为接口芯片。它的一位作缓冲器，当开关按下，PIO 的相应输入位便接地。其上拉电阻保证按钮未被按下时输入位被置 1。

为保存开关状态，设置一存贮单元（如 0040H），使按下按钮时该单元置零，未按下时置 1。可设计如下接口程序：

```
LD A, 4FH;      使 PIOA 口为输入
OUT (82H), A;  82H 为 PIOA 口地址
LD HL, 40H;    存贮单元清零
LD (HL), 0
IN A, (80H);   读入开关状态
```

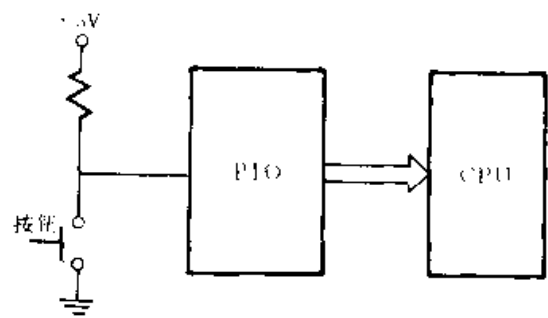


图 5-6 开关与 CPU 的连接

AND MASK;       屏蔽其他位  
 JR Z, DONE;     开关合下, 转 DONE  
 INC (HL);        开关未合下, 存贮单元置 1

DONE: HALT

## (二) 模拟脉冲式传感器

这种传感器为模拟量输入, 脉冲量输出, 即脉冲的某一物理量, 如峰值、宽度等按模拟输入量的大小成比例变化。

### 1. 脉冲峰值式传感器

在每次被测物理量输入到传感器时, 就产生一个脉冲信号。该信号的峰值与被测物理量的值成比例。此输出模拟量可经保持电路、A/D 转换器后进入计算机。

### 2. 脉冲宽度式传感器

此种传感器输出脉冲宽度与输入量成比例。

### 3. 脉冲间隔式传感器

传感器输出两个脉冲, 二者之间的时间间隔与输入量成比例。例如用超声波测厚或探伤时, 一定频率的脉冲信号传给换能器 (第一个脉冲), 当所发出的超声波射入被测试样后遇到内部缺陷时, 反射回一个超声波, 再经换能器转成电脉冲 (第二个脉冲)。这两个脉冲信号之间时间间隔大小与缺陷深度有关, 其关系为

$$d = \frac{ct}{2}$$

式中  $d$ ——深度

$c$ ——超声波在被测材料中的传播速度

$t$ ——两脉冲时间间隔

应注意, 以上这些传感器的输出信息仍为模拟量, 需要变成数字量时可对输出脉冲用时钟进行计数。即输出量为脉冲的有关时间信息可转换成峰值信息再通过 A/D 转换器变成数字量。

## (三) 模拟连续式传感器

模拟连续式传感器有着极其广泛的应用, 按其转换参数的不同有许多种类。常用的有电阻式、电感式、电容式、压电式、热电偶等。下面重点介绍几种。

### 1. 电阻电位计式传感器

电阻电位计的结构一般是在一个电阻元件上装一个滑动触头。触头的运动可以是直线的、回转的或多圈回转 (触头沿螺旋线运动) 的, 如图 5-7 所示。这种传感器可用来测量线位移和角位移。线位移的行程可从 2.5~500mm, 角位移的范围可自 10°至几十圈。电阻元件可以是一根光滑的导线, 或把导线绕制成各种形状。现在还有用导电塑料代替线绕式电阻电位计的。导电塑料电位计分辨率高, 使用寿命长, 富于高速跟踪性。

电阻电位计电气特性可由可变电阻来表征。如图 5-7 中所示, 通常在 AB 两点间加恒定的电压, 从 C 点来观测电压值。设电阻值为  $R$ , AB 间的电压为  $V_{AB}$ , C 点输出电压为  $V_c$ , 对应于电位计的线位移  $x$  的电阻值为

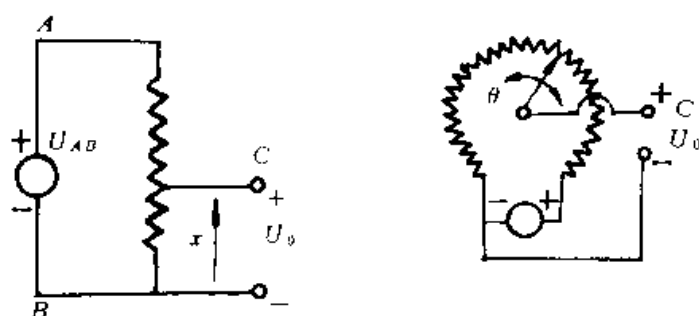


图 5-7 电阻电位计式传感器

$$r(x) = kx$$

式中  $k$  为常数。

若电阻元件的电阻是线性变化的，则空载输出电压  $V_0$  将如实地反映出线位移  $x$  或角位移  $\theta$ ，有关系式

$$V_0 = \frac{kx}{R} V_{AB}$$

但在一般实用情况下，电位

计的输出端连接在具有输入阻抗  $R_m$  的放大器上，如图 5-8a) 所示，此时电路有关系式

$$\frac{V_0}{V_{AB}} = \frac{1}{\frac{L}{x} + \frac{R}{R_m} (1 - \frac{x}{L})}$$

可见与理想的线性分压比有了差距， $V_0$  与  $x$  之间的关系是非线性的。如图 5-8b) 所示，只有在空载条件下， $R_m = \infty$ ，则可得到

$$\frac{V_0}{V_{AB}} = \frac{x}{L}$$

放大器的输入阻抗越小，在电位计中点附近产生的差距变得越大。故在一般情况下，电位计的电阻值要选下级输入电阻的 1/10 以下。

电位计的分辨率要受到电阻元件构造的影响。在一根光滑导线上可以得出连续的电阻变化，但一般绕线电阻元件的电阻变化是不连续的。当接触电刷从一圈绕线移动到下一圈时，电阻值产生阶跃式的变化。所以，这种现象导致因电阻元件结构的尺寸不同而限制了分辨率。一般直线电位计分辨率可达 0.025~0.05mm。单圈回转电位计可达角分率为 (3~6) /  $D$  度 ( $D$  为电位计直径 mm)。

另外，由于电源电压高，因功耗而引起发热的关系，在选择电阻值时应考虑电位计

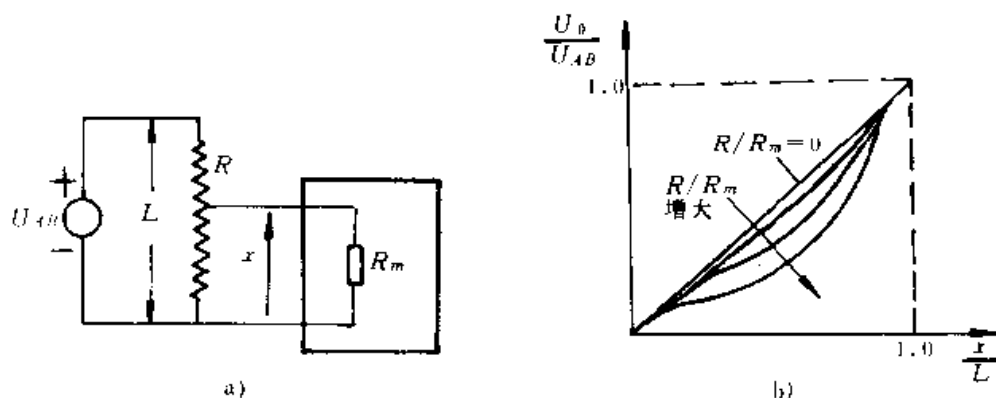


图 5-8 电位计的负载影响

a) 电位计与负载的连接 b) 电位计与负载匹配特性曲线

的容许功率，从而避免发热引起的问题。

## 2. 应变片

应变片是一种利用元件的变形检测力、压力、力矩、振动等待测参数的传感器。它不仅能检测出直接应力和压力（拉力），还能测出其他的一些物理量，例如把位移或温度等转换成变形即可测量。应变片的使用非常方便。

最早使用的金属应变片是利用电阻丝伸长或缩短会改变电阻值的原理，只要求得电阻值的变化，即可求得相应变形的位移量，从而求得力或其他物理量。

设金属导线长度为  $L$ ，横截面积为  $S$ ，导线电阻率为  $\rho$ ，则导线电阻为

$$R = \rho \frac{L}{S}$$

当导线在长的方向受拉伸力作用改变  $\Delta L$  时，其相对变形量为  $\epsilon = \Delta L/L$ ，考虑到相应地截面积会缩小  $\Delta S$ ，电阻率会增加  $\Delta \rho$ ，最后可求得电阻值的变化率  $\Delta R/R$ ：

$$\frac{\Delta R}{R} = K_0 \epsilon, \text{ 或 } \epsilon = \frac{1}{K_0} \cdot \frac{\Delta R}{R}$$

式中， $K_0$  称为应变因数，由金属的性质决定，是一常数。此式即是应变片的作用原理。

应变片如图 5-9 所示，它是在绝缘体的薄基片上镀上数十微米厚的电阻丝。这种应变片价格低廉，且各种图形皆可制作，但应变因数只有 2 左右。这是由于金属丝电阻的变化主要是由几何尺寸的变化引起的，灵敏度低。而利用半导体材料的压阻效应制成的半导体应变片，其电阻的变化主要是由电阻率  $\rho$  的变化而引起，灵敏度要比普通金属丝应变片高几十到一百多倍。应变因数可达 100 左右。半导体应变片是目前应用广、发展快的一种固态传感器。

使用时，先要把应变片贴在被测物体的适当位置上，对其进行变形量的检测，然后求出应力。检测时要组成桥式电路，将变形转换成电压输出。图 5-10 所示为应力测定的基本电路。图中若电阻取  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$ 、 $R_4$ ，输入电压取  $E_i$ ，则桥路输出电压  $E_0$  为

$$E_0 = \frac{R_1 R_4 - R_2 R_3}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} E_i$$

如果  $R_1$  规定为应变片电阻，由于变形引起阻值变化  $\Delta R_1$ ，此时输出电压应为

$$E_0 = \frac{(R_1 + \Delta R_1) R_4 - R_2 R_3}{(R_1 + \Delta R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} E_i$$

若取  $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$ ，则

$$E_0 = \frac{\Delta R}{4R} \propto \epsilon E_i$$

因此， $R_1$  ( $R$ ) 有一个小变化，则输出电压就按与变形成比例的关系变化。

图 5-11 示出一个用应变片构成转矩传感器的例子。转矩的大小可以通过测量传动轴的变形而求得。一般情况下，由于轴是旋转的，须使用滑环或无接触的方法来传递测量

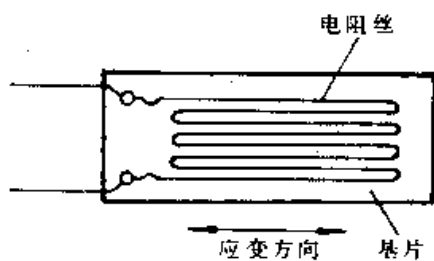


图 5-9 金属丝应变片

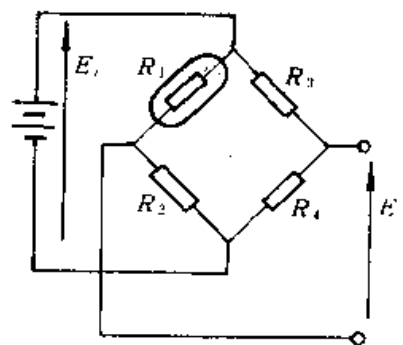


图 5-10 电桥

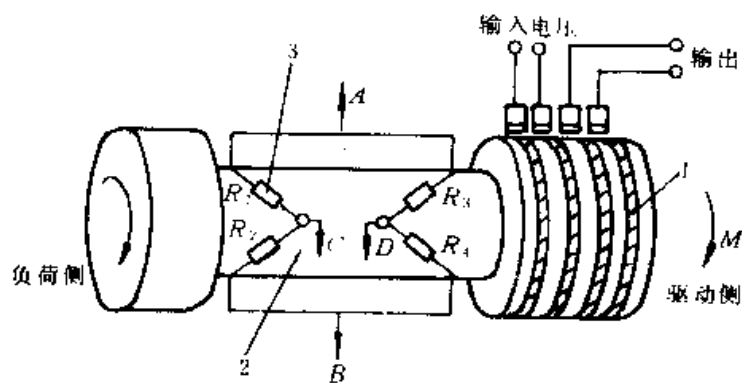


图 5-11 转矩传感器  
1—滑环 2—传动轴 3—应变片

信号。图示是用 2 枚应变片来检测传动轴上两个方向的形变，恒压信号与输出信号通过滑环来传输。在驱动侧加上转矩  $M$ ，则在相差  $45^\circ$  粘贴的应变片中， $R_1R_4$  受拉伸力作用，而  $R_2R_3$  受压缩力作用。此时在  $A、B$  两端加上电压，则  $C、D$  两端可获得比例于转矩的输出电压。

转矩的测量在诸如电机的最佳控制、机器人手与臂等作业控制、机器人手的指力控制、工

具驱动控制中是不可缺少的。

#### (四) 数字脉冲式及数字编码式传感器

##### 1. 数字脉冲式传感器

这种传感器的输出仍是脉冲信号，但这里关心的是脉冲个数而不是脉冲的峰值和宽度。此种传感器常在数字比较系统中作计数检测之用。光电盘是一种常见的数字脉冲式传感器。

光电盘的结构原理如图 5-12 所示。它即是常用的光电脉冲发生器。在一个圆盘的靠近边缘处作有间距相等的透光缝隙。圆盘的材料常用光学玻璃，简易情况下也有用金属的。在盘的两边分别装光源与光敏元件，当圆盘随工作轴转动时，每转过一个缝隙就产生一次光线的明暗变化，经光敏元件变成一次电信号的强弱变化，再经放大、整形，就得到形状为方波的脉冲输出信号。输出的脉冲数正比于转轴的转角。通常，光电盘作成每转输出不同脉冲数的不同规格以供选用。另外，也

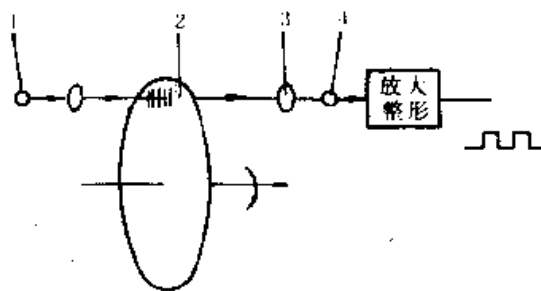


图 5-12 光电盘原理图  
1—光源 2—光电盘 3—透镜 4—光敏元件

可在工作轴与光电盘之间设计适当传动比的传动，对应于工作轴的一定转角，可获得不同的脉冲数，以适应检测系统不同的要求。

为了判别旋转方向，可采用两组光电转换装置，它们的空间相对位置，保证它们产生的光电信号在相位上相差  $1/4$  周期。图 5-13 给出鉴向环节的方框图及波形图。正转时光敏元件 2 感光比光敏元件 1 超前 ( $1/4$  周期)，此时与门  $Y_1$  有输出，使加减控制触发器置“1”，可逆计数器的加法母线为高电位。同时  $Y_1$  输出的脉冲又从或门送至可逆计数器的计数输入端，从而实现加法计数。反转时光敏元件 1 比光敏元件 2 超前感光，与门  $Y_2$  有输出，则使可逆计数计作减法计数。

光电盘的测量属于增量式测量法。

## 2. 数字编码式传感器

这种传感器最大的优点是输出本身就是数字码形式，可直接与计算机联接，常用于长度、角度位置的测量。图 5-14 示出这种传感器的编码盘和编码板。当编码盘（板）转动或移动时，利用传感元件如光敏管、光电池、接触电刷等即可读出相应的数字代码。

图 5-14 给出的是接触电刷式编码器，黑色为导电区，白色为绝缘区。如果接触电刷不动，码盘（板）转动或移动就可输出相应的二进制代码。

为获得高的分辨能力，可采用光电式编码器。其移动式可分辨到  $1\mu\text{m}$ ，转动式可分辨到  $\mu\text{rad}$ 。光电式编码器的光电系统工作原理与上述光电盘类似。

无论接触式还是光电式，在使用时都应注意扫描同步问题。即当各位的探测装置在

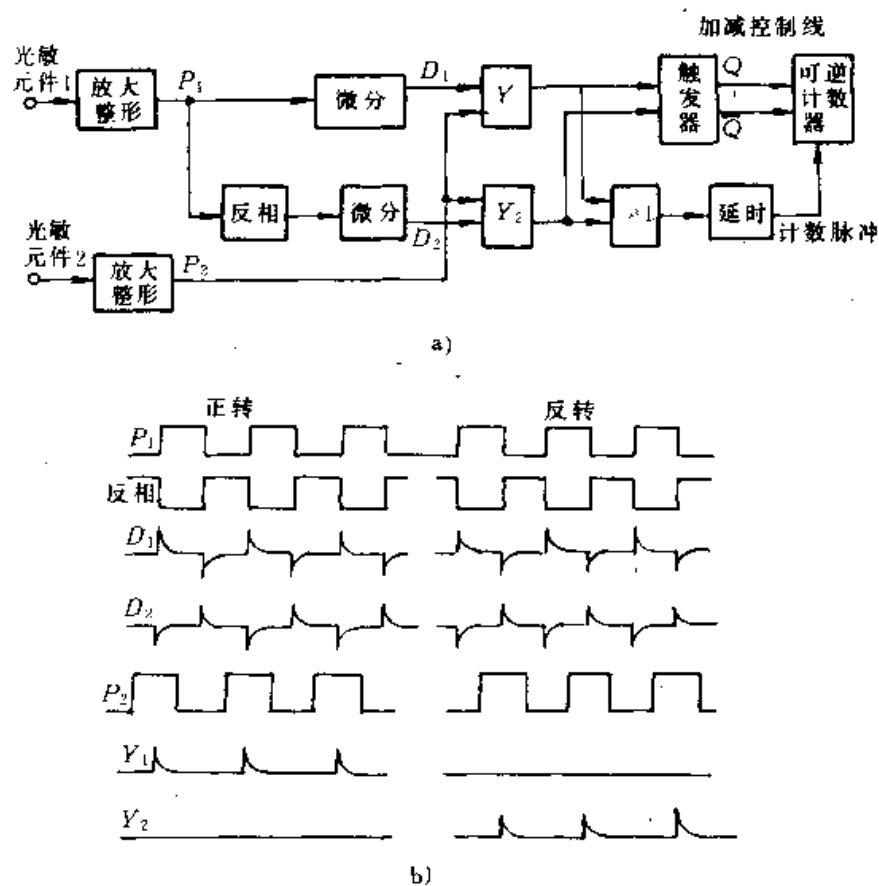


图 5-13 光电盘鉴向原理

a) 鉴向环节逻辑电路框图 b) 波形图



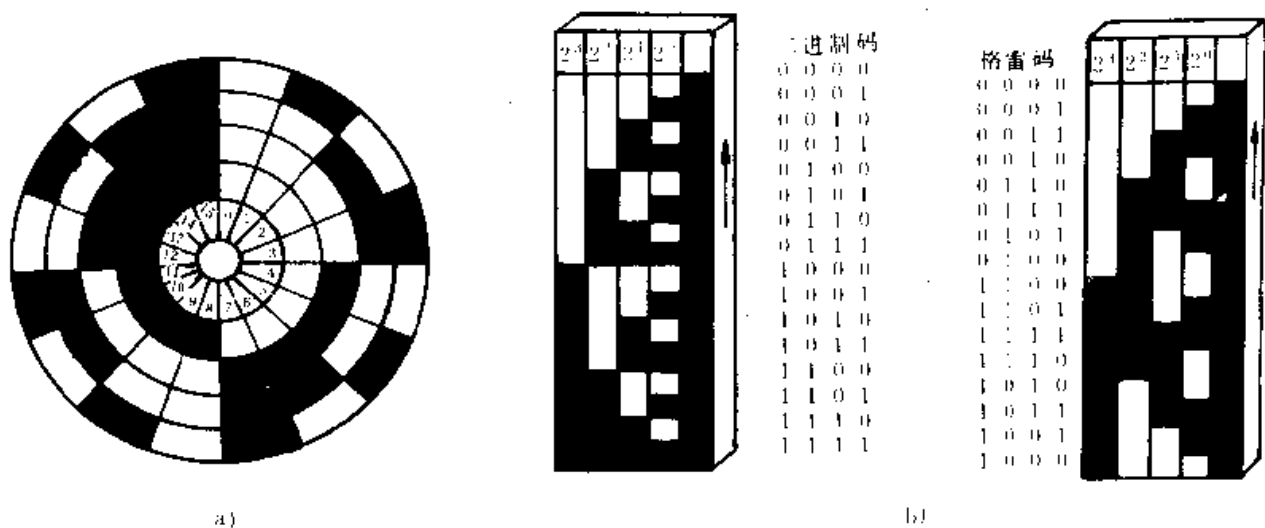


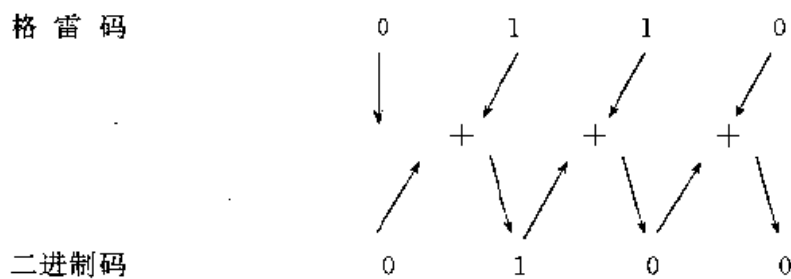
图 5-14 数字式编码器  
a) 编码盘 b) 编码板

各码道上扫描时，只有同步变化时，才能得到正确读数，否则会产生误差。特别是当扫描过程有两个以上码道变化时更容易出错。如图 5-14b) 左图中二进制码板代表  $2^2$  比特的阴影区域稍微上移，则第 8 行到第 9 行码板读数不是由 0111 到 1000，而可能错为由 0111 到 0011。为解决此问题，对接触式码板可增加电刷数目，并将电刷排成“V”字形，同时配上相应的扫描逻辑电路。对于光电式可采用格雷码板 [图 5-14b) 右图所示]。这样在同一瞬时只有一个数位发生变化，从而避免扫描时出现错误。

但格雷码直接计数有困难，需将格雷码转换成二进制码，然后再转换成二——十进制。

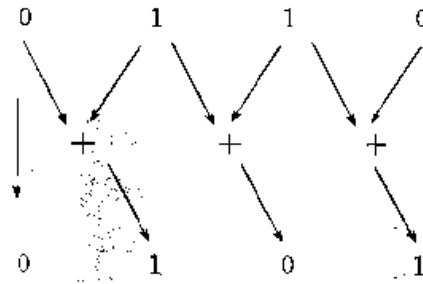
利用逻辑门电路，可以很方便地进行代码转换。

从格雷码转换为二进制码的规则如下：保持最高位不变，然后从高位开始进行二进制加法，向低位逐步进行，每次将加的结果与后一位相加，结果即为二进制码。例如格雷码为 0110，转换后为二进制的 0100。



二进制码变格雷码的规则为：最高位不变，将高位与其后一位进行二进制加法，从高位到低位逐位进行即可。例如二进制码为 0110 转换后格雷码为 0101。

二进制码



## 第二节 传感器与计算机接口

本节主要讨论传感器与计算机的连接问题，亦即计算机输入接口问题。

### 一、输入接口组成与功能

比较完整的输入接口如图 5-1 点划线框内所示。从图中可看出，接口在传感器与计算机信息传递过程中起着重要的桥梁作用。传感器输出信息经预处理后大多数还必须在接口内作进一步信息处理，才能满足计算机对输入数字量信息的要求。

综合第一节所述，传感器输出信号经预处理后可有五种形式：

- (1) 模拟电压信息；
- (2) 脉冲信息；
- (3) 频率信息；
- (4) 相位信息；
- (5) 数字量信息。

对这些输出信息的处理方法有：

对脉冲（数）信息通过计数器或可逆计数器即可变为数字量信息；

对频率信息可通过数字频率计转换成数字信息；

对相位信息可通过鉴相器转换成模拟电压，再经 A/D 转换而成为数字信息；

对数字编码信息，由于已是数字化的，只需进行代码转换即可。例如格雷码转换成二进制码；

对模拟量信息，一般都要通过 A/D 转换后方能与计算机连接。

通过处理转换后所获得的数字量信息，经过输入端口  $a$  即送入计算机。

接口内还有一套控制系统，如图 5-1 中“输入接口控制电路”是按计算机的读取要求执行操作的电路。电路根据计算机的指令数据产生输入接口控制信号。同时，该电路还将接口的状态信号集中处理形成状态信息，再通过输入端口  $b$  送往计算机。

另外，输入接口还应包括驱动硬件工作的软件（驱动程序）。

通常上述输入接口是一种智能接口，可实现如下功能：

- (1) 量程转换功能 如可编程增益放大器能根据量程不同自动变换增益。
- (2) 选择功能 如用多路开关可达到一个输入接口处理多个传感器。

(3) 传感器检查、校准、修正功能 如传感器输出对环境温度变化比较敏感,为消除环境温度变化的影响,可以在传感器附近再装一个测温元件,所得温度信息也输入接口,以便对传感器输出加以修正。

(4) 自动调整零点功能。

(5) 接口的自诊断功能。

## 二、连续模拟信号的输入接口

一个典型的模拟量实时控制系统计算机输入接口组成框图如图 5-15 所示。

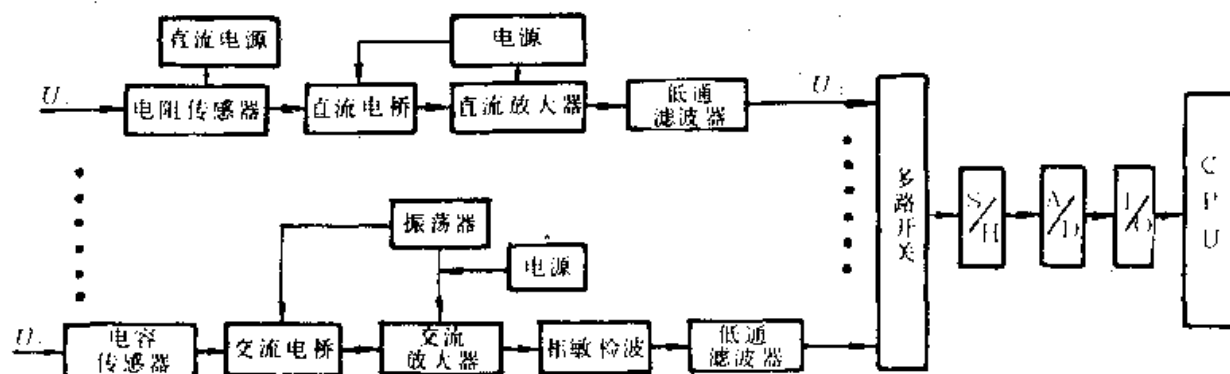


图 5-15 连续模拟信号输入接口组成

### (一) 接口组成

#### 1. 电桥

电桥是测量系统广泛使用的一种电路。它可把传感器电阻、电感、电容变化转换成电压或电流的变化。电桥分为直流电桥和交流电桥,按连接方式又可分为单桥、双桥、全桥。

#### 2. 放大器

由于大多数传感器所产生的电信号是低电平、小功率的,因此常常需要放大器进行放大电平、功率以推动其他电路或器件,作进一步的模拟处理和数字处理。目前广泛应用运算放大器制成电压放大器、仪用放大器、隔离放大器以及可编程放大器等。

#### 3. 多路开关

当处理多个检测和控制现场信号时,往往只用一个 A/D 转换器即可。但如何逐个分时输入 A/D 转换器,则需要用多路开关来解决;反之,计算机将处理后的信息要按一定顺序输出到不同控制回路,这个“一到多”的问题则需要用反多路开关来解决。计算机的输入接口是“多到一”的结合,需要应用前者。

#### 4. 采样保持器 (S/H)

对连续信号进行数字化前(即进入 A/D 转换之前),首先要对连续信号进行离散取值,即所谓采样。但离散采样瞬时值仍是模拟量,随后再用 A/D 转换变成数字量。但 A/D 转换需要一定时间,为保证 A/D 转换过程中被测参数不变,不致影响转换精度,需对每个瞬时采样值进行一定时间的短暂保持。另外在多模拟量输出系统中,需要分时工作,这样对每个单系统也需保持输出短暂不变。能够完成以上工作的电路叫采样保持器,简

称为 S/H。

在使用 S/H 时要注意采样频率至少应大于被测信号频谱中最高频率的两倍，即要符合所谓的采样定理，否则会出现假信息。

## (二) 带宽处理与低通滤波器

从图 5-15 可看出，模拟信号在数字化前需要滤波，即进行带宽处理。它的作用有两个：一是只让传感器输出信号中需要的频率成分通过，其他频率成分衰减掉，根据需要可选用不同用途的滤波器；二是要符合采样定理，避免获得假信息。

具有选频功能的滤波器按选频的范围可分为低通、高通、带通三种；按电路分为有源、无源两种；按元件分为 RC、LC、RLC 三种；按信号性质分为模拟、数字两种。以上列举的都是属于电气的，还有非电类型的滤波器如机械式、液压式、声学式等，它们在某些特定场合也能提供所需的滤波作用。通常遇到的测试信号大多数是电信号，频率

较低，所以多用电类型的低通滤波器。下面对模拟及数字低通滤波器进行简要介绍。

### 1. 模拟低通滤波器

理想的低通滤波器特性如图 5-16a) 实线所示。图中  $T_s$  为采样频率。根据采样定理，理想滤波器的截止频率为  $1/2T_s$ ，即被测信号频率低于  $1/2T_s$  是安全的。但是这种锐截止的滤波特性是任何实际的滤波器都做不到的。图 a) 虚线所示为一般实际滤波特性，可看出，若仍定  $1/2T_s$  是截止频率，这时通过率已很低。通常可近似定  $1/2 \times 1/2T_s$  为截止频率。因为随后还要进行数字化，其数字化的位数对截止频率有直接影响，如是十位二进制数，则截止频率应小于  $2^{-10} \times 1/2 \times 1/2T_s$ ，这点应予以注意。

最简单的无源模拟低通滤波器就是一级 RC 电路，如图 5-16b) 所示。若取  $R = 1M\Omega$ ， $C = 1\mu F$ ，则时间常数  $RC = 1s$ 。如果被测信号频率为  $0.001Hz$ ，这时 C 有足够时间充放电，即输出电压  $V_c \approx V$ （即通过率近似为 1）；当信号频率高达  $1000Hz$ ，则电容跟不上信号变化， $V_c \approx 0$ 。以上情况也可从图 5-16b) 所示的幅频特性得出相同的结论。图 5-16c) 表示出 RC 滤波器的对数幅频特性（虚线为精确特性，实线为

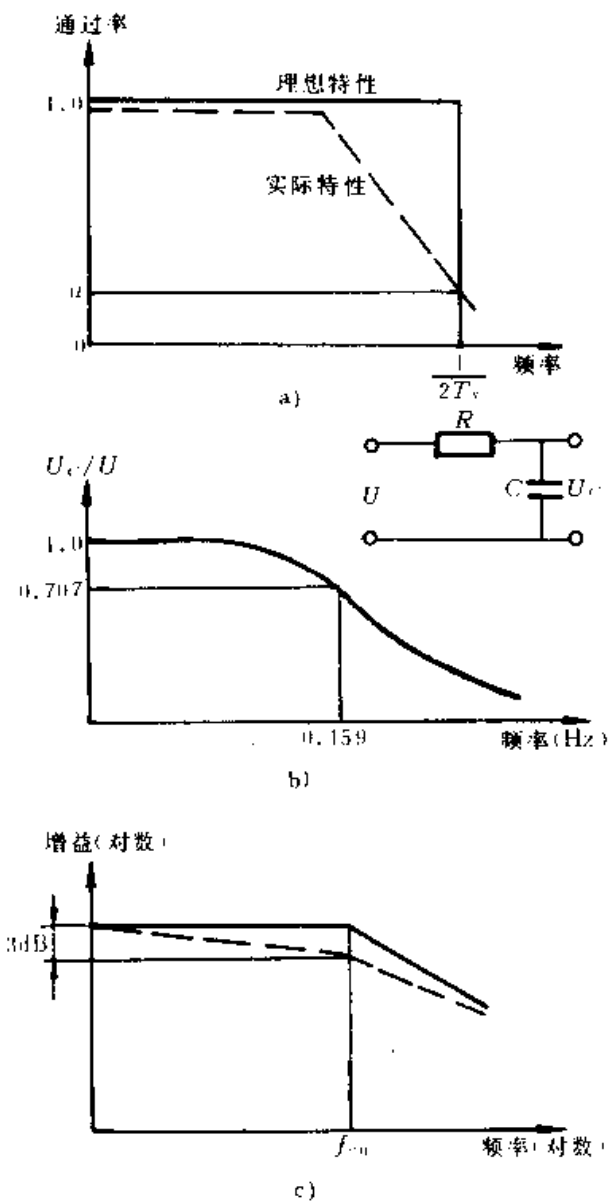


图 5-16 模拟低通滤波器

a) 特性曲线 b) RC 滤波器 c) RC 滤波器幅频特性

渐近线特性), 与图 a) 的实际特性完全相似。图 c) 中  $f_{co}$  称为截止频率,  $f_{co} = \frac{1}{2\pi RC}$ ,  $f_{co}$  对应的增益只下降 3dB, 即通过率只降低到原来的 0.707。

上述一级 RC 滤波器幅值比随频率的衰减相当平缓, 如果想使滤波特性曲线截止段的锐度增加 (即更加接近理想特性), 可以增加滤波级数, 即采用多级 RC 滤波器。如果采用多级 LC 滤波器则效果更好。当选用由运算放大器组成的有源滤波时, 滤波效果也很好, 这方面可参考有关资料。

## 2. 数字低通滤波器

目前数字技术发展很快, 只要是可能的而且是经济的, 就可用数字电子器件来代替模拟电子器件。这个总趋势的一个表现就是数字滤波技术的应用十分普遍。数字滤波法实际上可以复现所有传统模拟滤波器的功能, 而且还能产生一些模拟滤波法所不能达到的有用的结果, 如频率很低的信号也能滤波。它还具有一般数字系统的优点, 即精度高、稳定性好, 同时对采样值的干扰小, 并可通过软件来调整系统特性, 不用增加任何硬件即可达到多通道共用。

数字滤波实际上是一种算法。通过这种算法, 一个被采样的作为输入量的信号 (第一个数字序列) 将被变换为输出量的第二个数字序列。此算法可相应于模拟滤波器的滤波作用。输出的数字序列可用计算机作进一步数字处理, 或者复原模拟信号。有关数字滤波理论和方法有专著讲述, 这里只介绍一个简单例子。

图 5-17a) 示出 RC 低通滤波器的方框图。输入为阶跃信号, 经滤波后成为逐渐衰减的曲线, 图 5-17b) 所示是利用数值积分法将图 a) 的模拟系统的微分方程 ( $\tau \dot{y} + y = x$ ) 转换为差分方程, 就能求得 RC 低通滤波器的数字形式:

$$N_o(nT) = N_o[(n-1)T] + \frac{T}{\tau} \{N_i[(n-1)T] - N_o[(n-1)T]\}$$

这里, 数字系统的采样间隔为 T (s),  $N_o(nT)$  和  $N_i(nT)$  则为输出和输入的数字序列, 且只在离散的时间点上, 如 T、2T、3T、... 上来计算它们, 其滤波效果从两图比较来看完全一致。

### (三) A/D 转换器与 D/A 转换器

如前所述, 传感器输出信号大多数为模拟量 (A), 而微型计算机只能接收数字量 (D), 因而被测量进入计算机前必须进行 A/D 转换。同样, 微机处理后的数字量输出一般也不能直接传给被控的执行元件, 因为大多数执行元件只能接收模拟量, 这就需要进行 D/A 转换。

目前, A/D、D/A 转换器基本都有各种现成的集成芯片, 根据不同使用要求供选择应用, 十分方便。有关它们的输入条件、技术指标的知识可查阅有关资料。下面只在简单介绍转换原理基础上着重讲述芯片与 CPU 的连接及驱动程序。

#### 1. D/A 转换器

D/A 转换器大多数为电流输出形式 (如 DAC0832、AD7522 芯片), 有的内设放大器, 直接输出电压信号 (如 AD558、AD7224 芯片)。电压输出方式有单极性和双极性两种。D/A 转换的位数分为 8 位、10 位、12 位等。

(1) D/A 转换器原理 D/A 转换器基本有两种型式: 一是权电阻解码网络; 一是

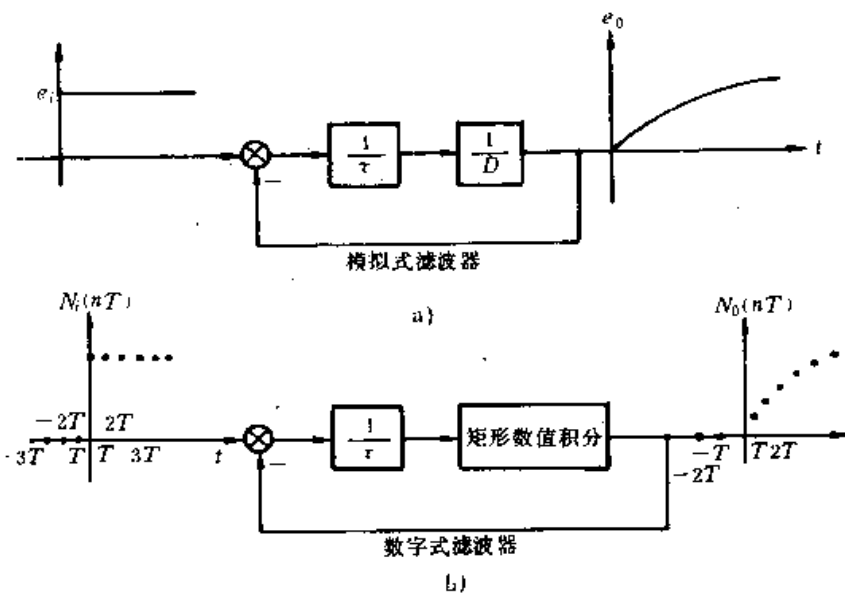


图 5-17 数字式低通滤波器

a) 模拟式滤波器方框图 b) 数字式滤波器方框图

R—2R 梯形解码网络。目前集成电路 D/A 转换器大都采用后者。

R—2R 梯形解码网络的原理电路如图 5-18a) 所示。整个电路由若干个相同的电路环节组成，每个环节有两个电阻和一个开关。开关 D 是按二进制“位”进行控制的。当该位为“1”时开关与电源接通，为高电位；当该位为“0”时与地接通，为低电位。图中共有 4 个开关，代表输入数字量不同位， $D_0$  为最低位， $D_3$  为最高位。在图 5-18b) 中示出各开关在取不同值时的电路结构及各电路的电流大小，即：

①  $D_3=D_2=D_1=D_0=0, D_3=1$ ，输出  $V_0$  值为

$$V_0 = 3R \cdot \frac{i_3}{2} = 3R \cdot \frac{2V_R/3}{2R} = \frac{1}{2}V_R$$

②  $D_3=D_1=D_0=0, D_2=1$

$$V_0 = \frac{1}{4}V_R$$

③  $D_3=D_2=D_0=0, D_1=1$

$$V_0 = \frac{1}{8}V_R$$

④  $D_3=D_2=D_1=0, D_0=1$

$$V_0 = \frac{1}{16}V_R$$

这样，4 位 R—2R 梯形 D/A 网络模拟输出  $V_0$  的计算公式为

$$V_0 = \left( \frac{1}{2}D_3 + \frac{1}{4}D_2 + \frac{1}{8}D_1 + \frac{1}{16}D_0 \right) V_R$$

推广到  $n$  位，输出的公式为

$$V_0 = \left( \frac{1}{2}D_{n-1} + \frac{1}{4}D_{n-2} + \dots + \frac{1}{2^n}D_0 \right) V_R$$

(2) D/A 转换集成芯片

图 5-19a) 为 DAC0832D/A 转换集成芯片功能示意图。它是双列直插式 8 位片，专门用于直接和 8080、Z80 等微处理器相连接。

片中用一个  $R-2R$  梯形网络实现 D/A 转换。两个 8 位数据锁存器可用于双缓冲工作方式。这样可在输出的同时，采集下一个数字，以提高转换速度。

各管脚功能如下：

CS——片选；ILE——允许输入锁存， $WR_1$ ——写信号 1；将数据写入输入寄存器， $WR_2$ ——写信号 2；用以将输入寄存器中的数据传送到 8 位 DAC 寄存器锁存；XFER——传送控制信号控制  $WR_2$ ； $DI_0 \sim DI_7$ ——8 位数字量输入； $I_{OUT1}$ ——DAC 电流输出 1； $I_{OUT2}$ ——DAC 电流输出 2，有  $I_{OUT1} + I_{OUT2} = \text{常数}$ ； $R_{fb}$ ——反馈电阻，作为外部直流放大器的分路反馈电阻， $V_{REF}$ ——参数电压输入； $V_{CC}$ ——数字电源电压；AGND——模拟量地；DGND——数字电路地。

(3) CPU 与 DAC 芯片接口及驱动程序 图 5-19b) 表示 DAC0832 与可编程 I/O 芯片 PIO 连接的框图。

Z80PIO 为最常用的 8 位微机可编程并行 I/O 接口芯片之一。它具有两个独立的 8 位 I/O 端口 (A 口和 B 口) 与外设进行信息交换。并具有中断优先权链式电路，可快速地响应中断并自动提供 8 位中断矢量。通过对相应端口的控制寄存器写入控制字，可选择每个端口工作在下面 4 种不同的操作方式：

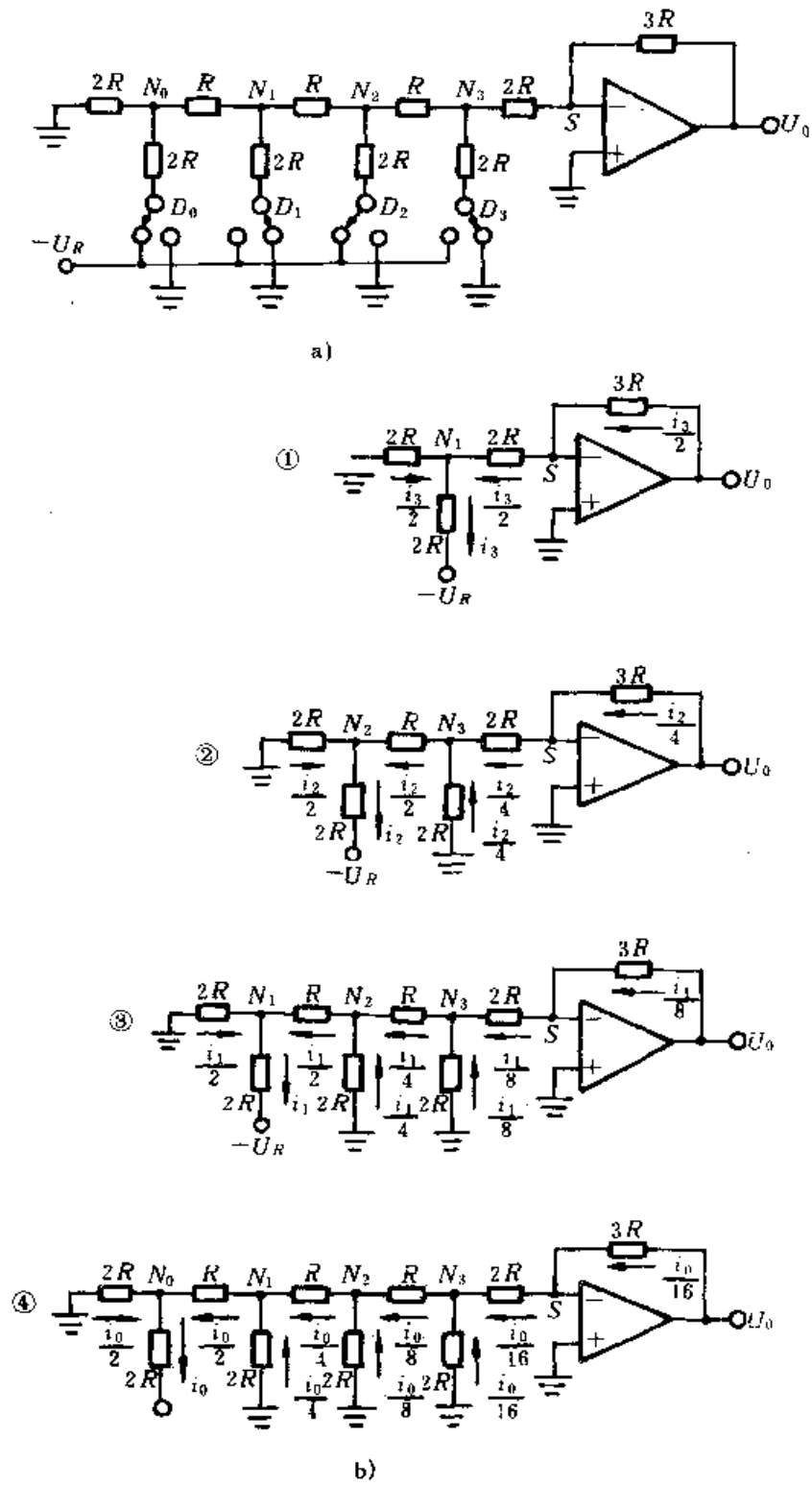
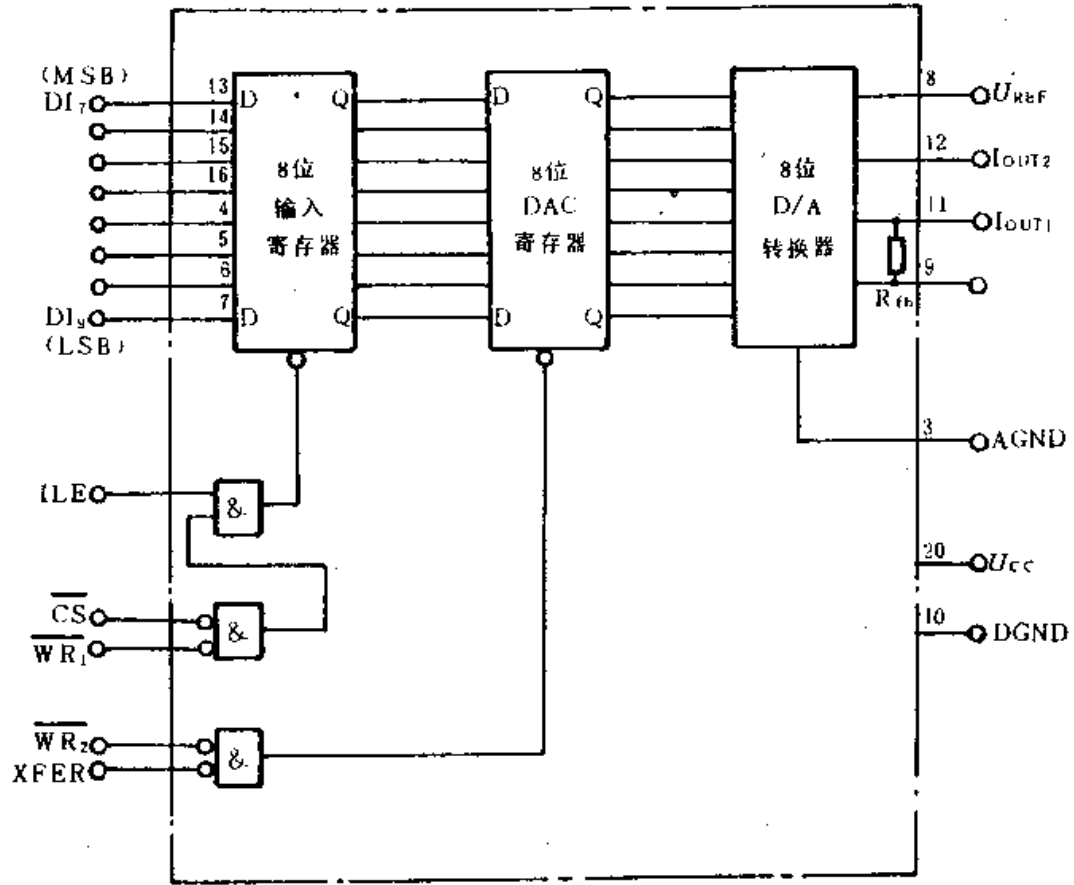
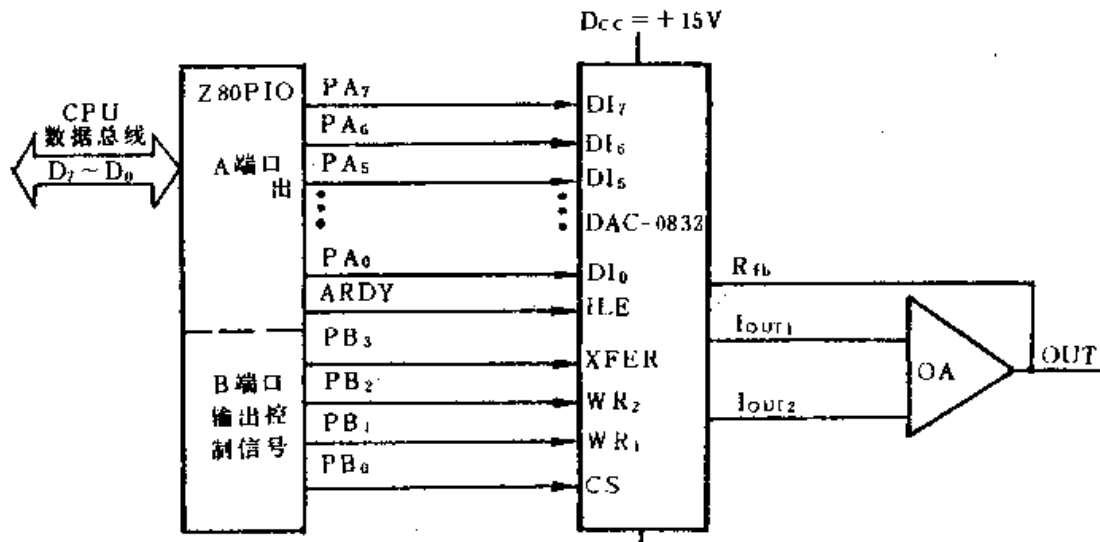


图 5-18  $R-2R$  梯形解码网络

a) 原理图 b) 转换计算



a)



b)

图 5-19 DAC0832 芯片  
a) 功能框图 b) 与 CPU 连接



- ① 字节输出（输出方式）——方式 0；
- ② 字节输入（输入方式）——方式 1；
- ③ 字节输入/输出（双向方式）——方式 2（只有端口 A 可以选用）；
- ④ 位输入/输出（位控方式）——方式 3。

现按图 5-19b) 的连接, DAC0832 将存储器中的数据通过数据总线送到 PIO 的 A 口, 而控制信号通过 PIO 的 B 口去控制 DAC0832, 以将 A 口的数据转换为模拟量, 再经放大器 OA 输出。

驱动程序（接口软件）框图如图 5-20 所示。

设 PIOA 口地址为 80H, 作为数据输出口（方式 0）, 口地址 82H 是 A 口控制寄存器, B 口地址为 81H, 作为 DAC 控制信号输出口（方式 3）, 83H 是 B 口控制寄存器, 源程序如下:

```
LD      A, 0FH; 设置 A 口为输出方式
OUT     (82H), A
LD      A, CFH; 设置 B 口为位控方式
OUT     (83H), A
LD      A, F0H
OUT     (83H), A
LD      A, (HL); 取得数据
OUT     (80H), A; 发送数据
LD      A, 04H; 发出“装入”控制信号
OUT     (81H), A
LD      A, 07H; 恢复“装入”控制线
OUT     (81H), A
HALT
```

## 2. A/D 转换器

A/D 转换器 (ADC) 就是将模拟输入量相对模拟参考量转换成数字量输出。

A/D 转换方法常有计数器式、逐次逼近式、双积分式、并行、串—并行等。计数器方式线路简单, 转换速度比较慢, 现在很少采用。双积分方式转换精度高, 多用于数据采集系统及要求精度比较高的场合, 如 5G14433 ( $3\frac{1}{2}$  位)、AD7555 ( $4\frac{1}{2}$  位或  $5\frac{1}{2}$  位) 芯片等。并行及串—并行转换速度快, 多用于要求快速转换的系统中。而逐次逼近方式既照顾了速度, 又具有一定精度, 目前应用最多。

A/D 转换器位数有 8 位、10 位、12 位和 16 位等。位数越多, 其分辨率和精度越高, 价格也越贵。就结构来分, 有单独 A/D 转换器如 ADC0801, AD673; 有的则带有多路开关

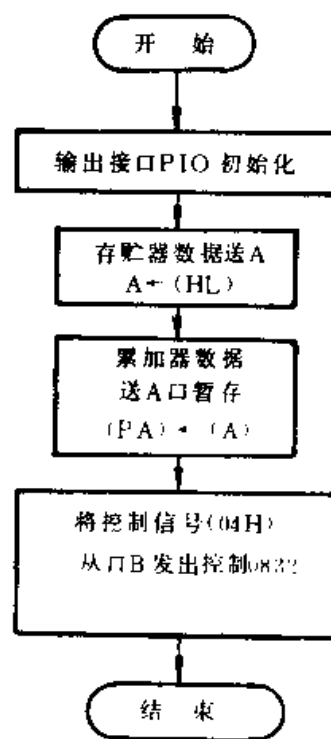


图 5-20 DAC 驱动程序框图

如 ADC0809, AD7581 (均带有 8 位多路开关), 而 AD363 则带有 16 路多路开关, 还带有数据放大器、S/H、12 位 A/D。下面以 ADC0809 为例介绍逐次逼近式 A/D 转换原理及与 CPU 的连接和驱动程序。

(1) A/D 转换器工作原理 图 5-21 示出逐次逼近法 A/D 转换原理。

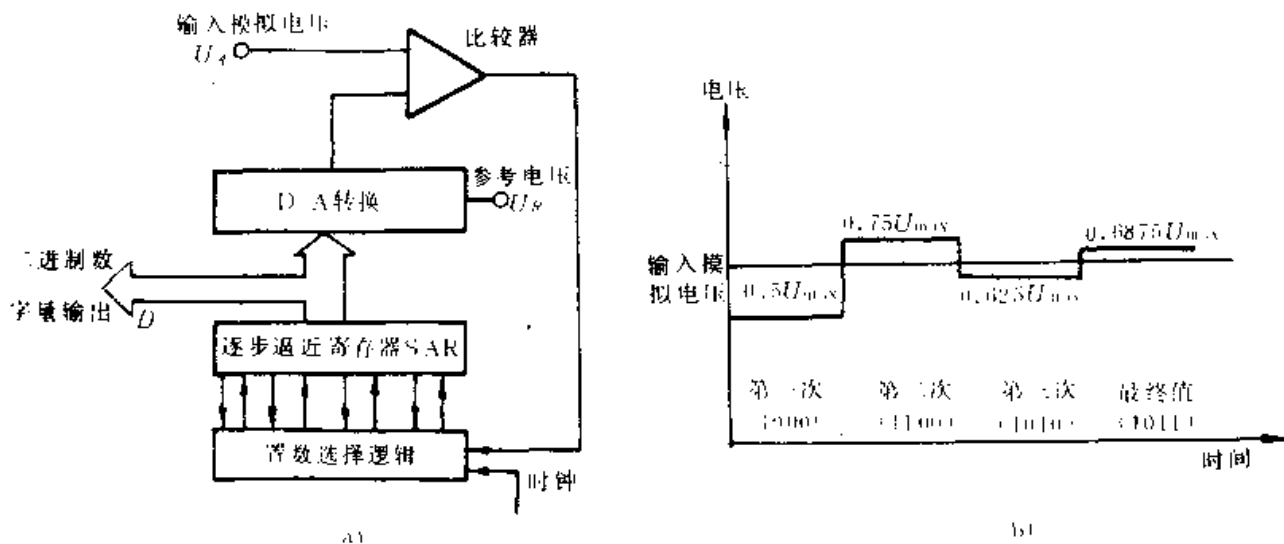


图 5-21 逐次逼近法 A/D 转换原理  
a) 转换电路框图 b) 4 位逐次逼近原理

模拟输入电压  $V_A$  与 D/A 的输出模拟电压作比较, 但送给 D/A 的是逐次逼近寄存器 SAR 的输出值。若 SAR 是一个 4 位寄存器, 最初使  $D_3$  置 1 (即为 1000), D/A 输出量为满量程的  $\frac{8}{16}$ , 即  $V_{max}$  的一半与  $V_A$  比较, 若  $V_A$  大, 则加大 D/A 输出, 可再置  $D_2$  位为 1, SAR 变为 1100 (12), D/A 输出为  $\frac{12}{16} = 0.75V_{max}$ , 将此值与  $V_A$  比较, 若  $V_A$  小, 说明  $V_A$  值在  $0.5 \sim 0.75V_{max}$  之间, 这时  $D_2$  变为 0 使  $D_1 = 1$ 。SAR 变为 1010 (10), 即令  $\frac{10}{16} = 0.625V_{max}$  与  $V_A$  比较, 若  $V_A$  大则让 SAR 变为 1011 (13), 即  $0.6875V_{max}$  与  $V_A$  比较……, 所得到的数字量输出逐渐接近  $V_A$  的真值。位数越高, 逼近值精度就越高。

(2) 典型 ADC 芯片 图 5-22 右边示出 ADC0809 八位单片 A/D 转换芯片示意图。它利用逐次逼近法进行 8 位 A/D 转换, 其组成部分包括有: 8 路模拟开关, 这是一个 8 路单端模拟信号输入的多路开关, 通过 ADDA、ADDB、ADDC 三端地址译码选通 8 路中的一个进行 A/D 转换; D/A 转换器, 由  $256R-2R$  梯形网络实现 D/A 转换; 还有逐次逼近寄存器 SAR 和比较器。

芯片各引脚功能:

- START——启动转换信号, 用来启动 A/D 转换;
- ALE——允许地址输入, 用来选择输入模拟量、地址信号输入;
- EOC——转换结束信号, 可接至 CPU 中断请求 INT 上;

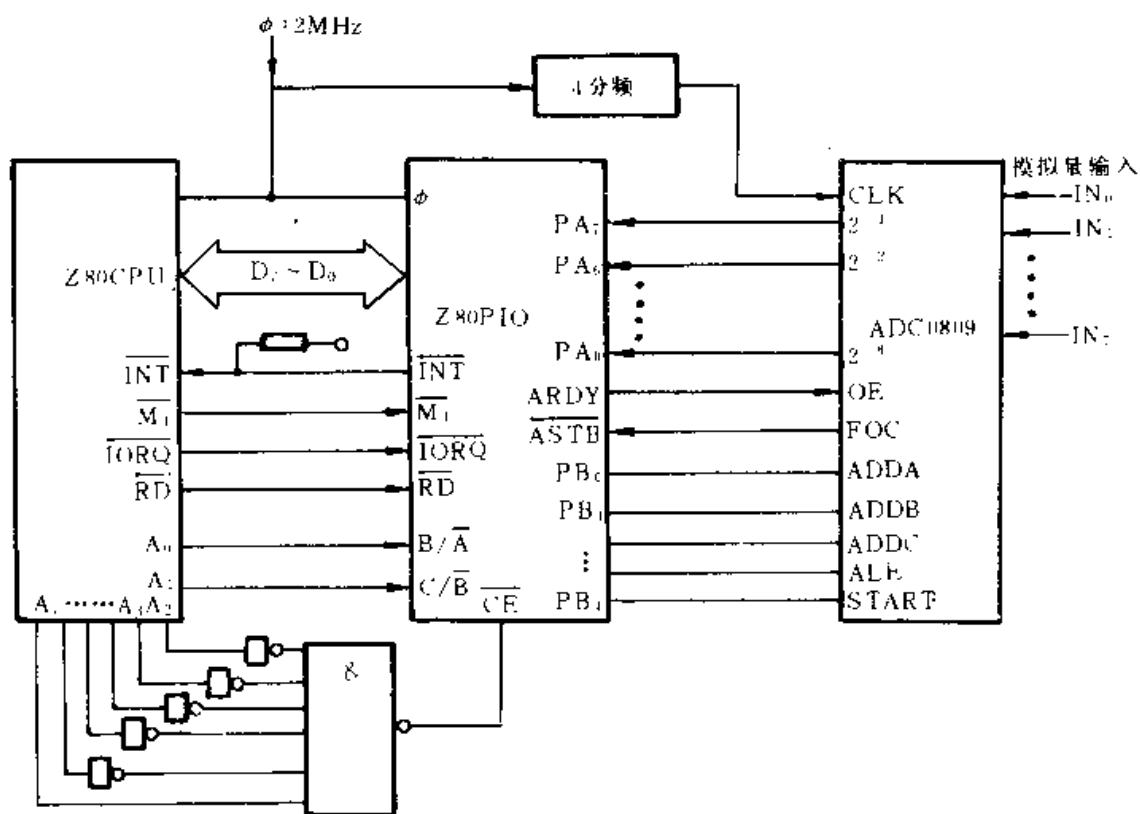


图 5-22 ADC 与 CPU 接口

OE——允许输出信号，无效时数据输出线呈高阻状态；

ADDA、ADDB、ADDC——模拟量输入通道选择地址码。

(3) ADC 与 CPU 接口及驱动程序 图 5-22 给出 ADC0809 通过 Z80PIO 与 CPU 接口的框图。接口的功能是巡回检测 8 个通道 IN<sub>0</sub>~IN<sub>7</sub> 的模拟量输入。数据传送用中断方式。驱动程序为：

```

START: LD B, 08H; 设置采样路数
      LD IX, 2201H; 设存贮器首址
      LD C, F8H; 设置采样指针
      LD A, 20H; 设中断矢量 2030H
      LD I, A
      LD A, 30H
      OUT (82H), A
      LD A, 4FH; 设 A 口工作方式输入
      OUT (82H), A
      LD A, 87H; A 口开放中断
      OUT (82H), A
      LD A, CFH; 置 B 口为位控方式
  
```

```

        OUT (83H), A
        LD A, 0FH; 关闭采样地址
        OUT (81H), A
        IM2 ; 置中断方式 2
        EI; 开中断
        IN A, (80H); 空读一次
LOOP:   LD A, C; 送采样指针
        OUT (81H), A
        OR A, 10H; 启动转换 (置 START 脚)
        OUT (81H), A
        HALT; 等待转换完毕中断
        DJNZ LOOP; 循环采样 8 次

```

#### 中断地址表

```

2030H: 32; 中断服务程序首址低 8 位
        20; 中断服务程序首址高 8 位
        中断服务程序: ORG 2032
INTPG: INA, (80H); 从 A 口读取数据 (A/D 转换后的第一次为空读数据)
        LD (IX+0), A; 存数据
        INC C; 采样指针地址加 1
        EI
        RETI

```

### 第三节 常用位移检测装置

机电一体化系统中，对机械位移进行检测后再进行反馈控制是经常遇到的问题，所以位移传感器的应用是很广泛的。

位移传感器是一大类传感器，传统的位移传感器种类很多，它们都是依照不同的物理效应制成的，使用者根据系统的不同要求可以方便地选择应用。随着高新技术的飞跃发展，对传感器的要求不断提高，也不断地出现性能更为优良的新型位移传感器。本节主要介绍常用的一些位移传感器，也对近年来出现的新型位移传感器作简要介绍。

#### 一、位移传感器分类

根据位移的特征，可将位移传感器分为线位移传感器和角位移传感器，线位移是指机构沿着某一条直线移动的距离；角位移是指机构绕着某一定点转动的角度。根据传感器变换原理又可分为电位计式、差动变压器、感应同步器、光栅、旋转变压器、光电码盘等。具体分类见表 5-1。其中电位计式和电阻应变式前面已作了详细介绍。下面简要介绍几种其他常用位移传感器。

表 5-1

位移传感器的分类与特性

分 类	测量范围 (mm)							精度		
	$10^{-4}$	$10^{-3}$	$10^{-2}$	$10^{-1}$	1	$10^2$	$10^3$		$10^4$	$10^5$
模 拟 式	电位计式				_____					0.5%~1.0%
	电阻应变式			_____						2%
	电容式 (变极距型)			_____						2%~0.5%
	电容式 (变面积型)			_____						0.3 ( $\mu\text{m}$ )
	差动电感式			_____						3%
	差动变压器			_____						2% 0.2%~0.5%
	涡流式			_____						3%
	光电式				_____					1%
	霍尔元件式			_____						0.5%
数 字 式	光栅									3 ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )
	感应同步器									2.5 ( $\mu\text{m}$ ) / 250 (mm)
	磁栅									5 ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )

## 二、差动变压器

这种传感器的工作原理是利用线圈间的互感作用, 将位移转换成感应电势的变化。在图 5-23 中, 当初级线圈  $W_1$  输入交流电流  $i_1$  时, 次级线圈  $W_2$  产生感应电动势  $e_n$ ,

则

$$e_n = -M \frac{di_1}{dt}$$

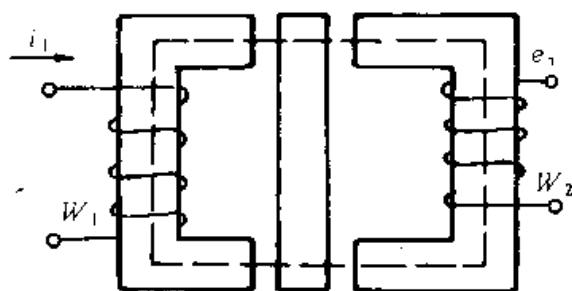


图 5-23 互感现象

式中  $M$  为比例系数, 称为互感, 其大小与两线圈相对位置及周围介质的导磁能力等因素有关, 它表明两线圈的耦合程度。

这种传感器实质就是一个变压器, 所不同的是把中间铁芯和位移连在一起, 从而使互感与位移成一定的关系。由于常常采用两个次级线圈组成差动式, 故称之为差动变压器式传感器。应用较多的螺管形差动变压器如图 5-24a) 所示。位移  $x$  与圆柱形铁芯连接, 主线圈  $W$  加上交流电压, 次级  $W_1$  与  $W_2$  反

极性串联, 如图 5-24b) 所示。当铁芯在中心位置时,  $e_1 = e_2$ , 输出电压  $e_0 = 0$ ; 铁芯向上运动时,  $e_1 > e_2$ ; 向下运动时,  $e_1 < e_2$ 。偏离中心位置越大,  $e_0$  越大。输出特性如图 5-24c) 所示。

当铁芯上下移动, 互感变化, 可通过相敏检波判别位移方向和大小。当用于小位移测量时, 传感器输出的弱信号需经放大器放大。在测量大位移时, 有时可不用放大器。另

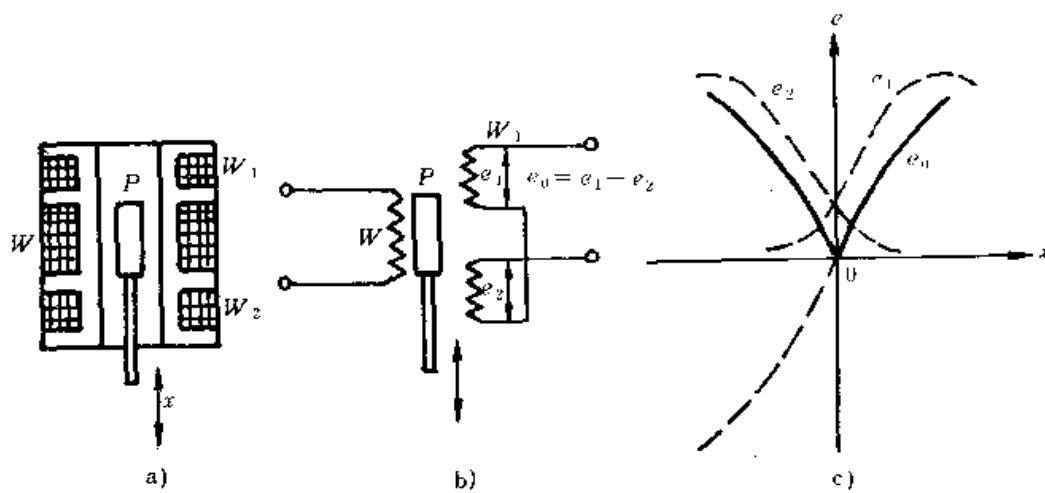


图 5-24 螺管形差动变压器  
a) 结构示意图 b) 工作原理 c) 输出特性

外当铁芯在中间位置时，次级输出要求为零。但由于结构的不对称等原因，使得输出电压不为零，即存在所谓“残余电压”。为消除此电压的影响，通常可在测量电路中采取补偿措施。如利用电位器组成平衡电路。使用前，调节电位器，使仪表输出为零。

差动变压器线圈中间部分线性较好，这段长度约为线圈架全长的  $1/10 \sim 1/4$ 。为扩大量程范围，可增加线圈架长度，并把线圈绕均匀。

这种传感器测量精度高、线性范围大、稳定性好、使用方便，除能用来测量位移外，还可测量压力、重量等参数。

### 三、旋转变压器

旋转变压器是一种输出电压随转子转角变化的角位移测量装置。图 5-25 示出正、余弦旋转变压器原理图。当激磁绕组以一定频率（如 500Hz）的交流电压激磁时，输出绕组的电压幅值与转子转角成正弦、余弦函数关系。也可以改变连接方法，使输出电压与转子在一定范围内成正比例关系。

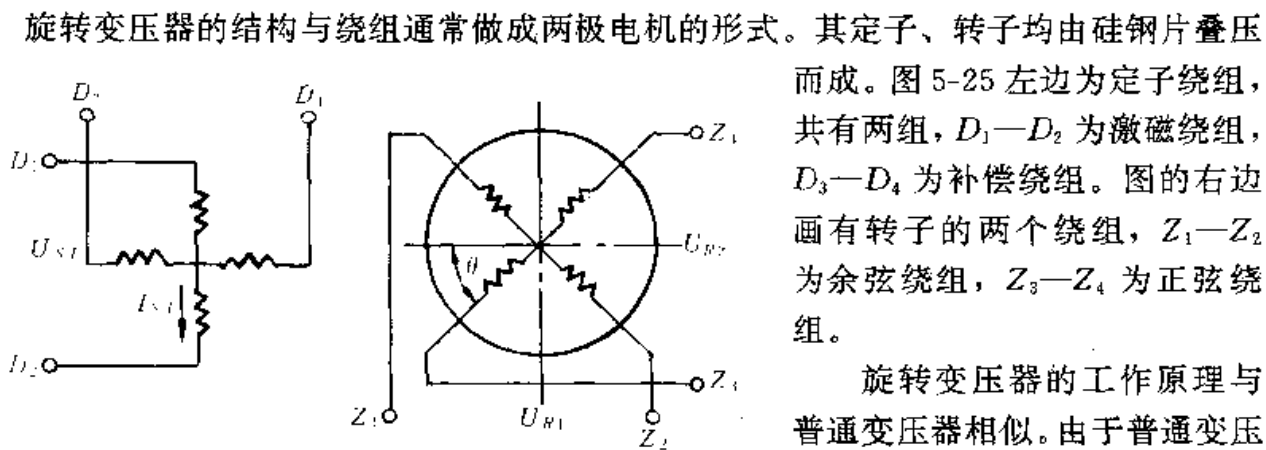


图 5-25 正、余弦旋转变压器原理图

旋转变压器的结构与绕组通常做成两极电机的形式。其定子、转子均由硅钢片叠压而成。图 5-25 左边为定子绕组，共有两组， $D_1-D_2$  为激磁绕组， $D_3-D_4$  为补偿绕组。图的右边画有转子的两个绕组， $Z_1-Z_2$  为余弦绕组， $Z_3-Z_4$  为正弦绕组。

旋转变压器的工作原理与普通变压器相似。由于普通变压器的输入、输出两个绕组的位置

是固定的，所以输出电压与输入电压之比为常数。而旋转变压器由于其输入、输出绕组分别固定在定子和转子上，所以输出电压大小与转子位置有关。在图 5-25 中，当  $D_3$ 、 $D_4$  开路， $D_1$ — $D_2$  加一交流激磁电压  $V_{s1}$ ，则该绕组中有电流  $I_{s1}$  通过，因而产生一个交变磁通  $\Phi$ ，在转子的余弦绕组和正弦绕组上分别感应出电压，其大小与转子转角  $\theta$  的余弦或正弦成正比，即

$$\begin{aligned} V_{R1} &= K_u \cdot V_{s1} \cdot \cos\theta \quad (\text{V}) \\ V_{R2} &= -k_u \cdot V_{s1} \cdot \sin\theta \quad (\text{V}) \end{aligned}$$

式中  $K_u$ ——旋转变压器的变压比， $K_u = N_1/N_2$

$N_1$ 、 $N_2$ ——转子、定子绕组匝数

$V_{s1}$ ——定子绕组的激磁电压

可见输出电势是角位移的函数，此装置能作为测量角位移的传感器。

实际应用时，因输出电压不止一次通过零点（转换点），故需要模拟量输出时需加进相敏检波。若需要数字量输出时，检波整形后用计数器即可得到。

#### 四、感应同步器

感应同步器属于数字式传感器。数字式传感器用途广泛，其中用于位移检测较多，尤其是用于行程比较大的数字仪表、数控设备和精密机械中。也用于测量凸轮、齿轮、丝杠等，还可用于测速度、加速度、振动、爬行等。

数字式传感器种类很多。主要有光栅、感应同步器、磁栅、激光干涉仪、光电码盘等。下面用感应同步器为代表进行介绍。

感应同步器是根据电磁感应的原理制成的，主要用来检测位移量。可分两大类：一是用于直线位移测量的直线感应同步器；一是用于转角测量的旋转式感应同步器。两者基本工作原理相同。

感应同步器为非接触式电磁元件，具有适应能力强、精度高、维护简单、寿命长、响应频率高、读数方便、抗干扰能力强以及测量范围广（可测长度达数十米）等优点，因而应用广泛。

##### （一）感应同步器的结构

感应同步器是由定尺和滑尺（或定尺和转尺）组成。

图 5-26a) 为标准直线感应同步器外形图。定尺一般每块长为 250mm，其上连续绕组的周期为 2mm，定尺绕组和滑尺绕组面对面安装，间距为 0.25mm。

定尺与滑尺均用钢板做基体，用绝缘粘合剂将铜箔贴在基体上，用照相腐蚀的方法制成绕组。定尺为一组连续绕组，节距 2mm 的精度必须保证，否则将直接影响测量精度。滑尺上也为连续绕组，且分成正弦和余弦绕组两部分，这两部分相对定尺绕组错开 1/4 节距，如图 5-26b) 所示。

旋转式感应同步器又称圆感应同步器。其上有一定尺和一转尺。两尺上的绕组安排与直线式相同，不同的是绕组沿圆周分布。

##### （二）感应同步器工作原理

根据电磁感应原理，将激磁电压送入滑尺绕组后，在定尺绕组中则有感应电势产生，

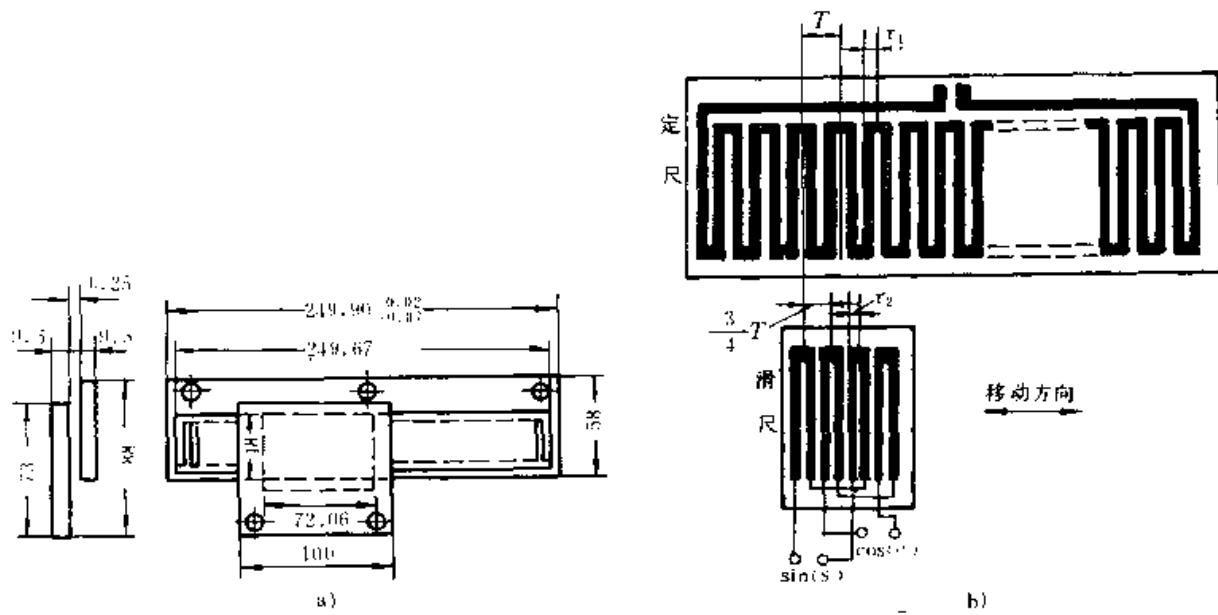


图 5-26 直线式感应同步器  
a) 外形结构 b) 绕组分布

它的幅值或相位是滑、定两尺相对位置的函数，它们之间有着严格的正、余弦对应关系。

感应同步器作直线位移测量时，根据其滑尺激磁绕组供电电压形式的不同，分为鉴相测量方式和鉴幅测量方式两种。

### 1. 鉴相式

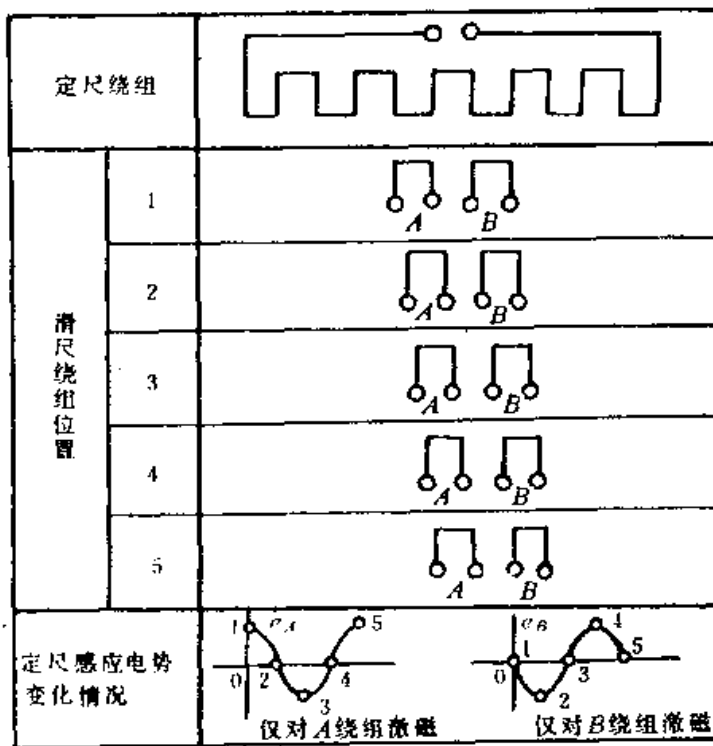


图 5-27 滑尺绕组位置与定尺感应电势

所谓鉴相式就是根据感应电势的相位变化来鉴别位移量。

如果将滑尺的正弦和余弦绕组分别供给一个幅值、频率相等但两者相位相差  $90^\circ$  的激磁电压，即  $V_A = V_m \sin \omega t$ ,  $V_B = V_m \cos \omega t$ ，则定子上的绕组由于电磁感应作用产生与激磁电压同频率的交变感应电势。当滑尺相对定尺运动时，绕组间的相互位置改变，通过定尺绕组的磁通改变，感应电势也随着发生变化。其关系如图 5-27 所示。

当对绕组 A 通入交流激磁电压  $V_A$  时，绕组中有电流通过，因而在绕组周围产生磁场。当滑尺移到图 5-27 位置 1 时，定尺和滑尺两绕组完全重合，磁通量最大，定尺感应



电势  $e_A$  也最大。滑尺右移，磁通量减小，感应电势逐渐下降。当滑尺右移了  $1/4$  节距，即图中位置 2 时，感应电势为零。滑尺继续右移，反向感应电势逐渐增大，当到达位置 3 时 ( $1/2$  节距)，产生负向最大感应电势。到位置 4 时 ( $3/4$  节距)，感应电势又为零。当移动到一个节距、即位置 5 时，又与位置 1 情况相同。由此可见，滑尺相对定尺移动一个节距，定尺绕组感应电势  $e_A$  变化一个周期，波形为余弦曲线，即

$$e_A = K V_A \cos \varphi$$

式中  $V_A$ ——滑尺绕组  $A$  的激磁电压

$K$ ——滑尺和定尺的电磁耦合系数

$\varphi$ ——对应于滑尺和定尺相对位移的折算角，当相对位移为一个节距时， $\varphi = 360^\circ$

同理，当仅对绕组  $B$  通以交变激磁电压  $V_B$  时，定尺感应电势如图 5-27 右下图所示，实际上是一个正弦曲线，即

$$e_B = -K V_B \sin \Phi$$

若对两个绕组同时通以激磁电压，则滑尺移动时，定尺上所感应的总电势为

$$\begin{aligned} e &= e_A + e_B \\ &= K V_A \cos \varphi - K V_B \sin \varphi \end{aligned}$$

又因  $V_A = V_m \sin \omega t$ ； $V_B = V_m \cos \omega t$ ，代入上式得

$$\begin{aligned} e &= K V_m \sin \omega t \cos \varphi - K V_m \cos \omega t \sin \varphi \\ &= K V_m \sin (\omega t - \varphi) \end{aligned}$$

若  $K$  不变， $V_m$  不变，感应电势只与相角  $\varphi$  有关（移动一个节距时  $\varphi = 2\pi$ ）。设绕组节距为  $W$ ，滑尺和定尺的相对位移为  $L$ ，则

$$2\pi : W = \varphi : L$$

所以

$$\varphi = \frac{2\pi}{W} L$$

当  $W$  一定时， $\varphi$  与  $L$  成正比。因此，只要测得感应电势的相角  $\Phi$ ，就可求出运动部件的位移。

## 2. 鉴幅式

鉴幅测量方式是给感应同步器滑尺  $A$ 、 $B$  两绕组分别通以频率、相位相同，幅值不同的交流激磁电压，即

$$\begin{aligned} V_A &= V_s \sin \omega t \\ V_B &= V_c \sin \omega t \end{aligned} \quad \text{这里 } V_s \neq V_c$$

假设定尺绕组与滑尺绕组交在某一个  $\varphi$  角的相对位置上（即在一定的节距位置上），则根据叠加原理，定尺绕组上的感应电势为

$$e = K V_s \sin \omega t \cos \varphi - K V_c \sin \omega t \sin \varphi$$

由于  $V_s$ 、 $V_c$  是由专门设计的环节控制的，使它们分别按系统给定的电相角成正弦、余

弦规律变化，即

$$V_s = V_m \sin \theta$$

$$V_c = V_m \cos \theta$$

代入上式得

$$\begin{aligned} e &= KV_m \sin \omega t (\sin \theta \cos \varphi - \sin \varphi \cos \theta) \\ &= KV_m \sin \omega t \sin (\theta - \varphi) \end{aligned}$$

式中  $\theta$ ——幅值变化电相角， $\theta = \frac{2\pi}{W}x$

$x$ ——两尺相对位移

$KV_m \sin (\theta - \varphi)$ ——感应电势幅值

可见，输出电势  $e$  是感应电势幅值的函数，实际是电相角  $\theta$  的函数，而  $\theta$  又是相对位移的函数，即以输出电势可测得位移的大小。

### (三) 感应同步器的测量电路

感应同步器随工作原理不同，其测量电路也不同。下面以鉴相型测量电路（图 5-28）为例说明感应同步器测量系统工作原理。

整个测量系统分三个部分：

#### 1. 位移—移相变换环节（图中第 I 部分）

这部分的主要作用是把感应同步器机械位移转换为相位移。

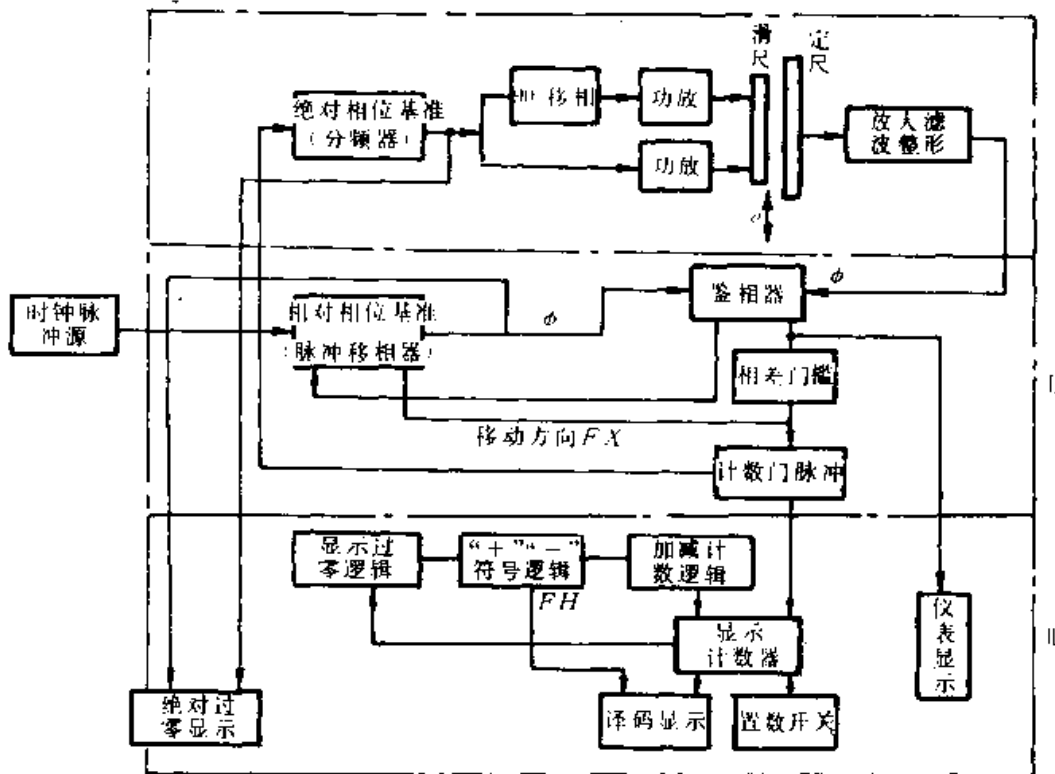


图 5-28 鉴相型测量系统原理框图

I—移相变换环节 II—A/D 转换环节 III—计数显示环节

这部分的时钟脉冲源产生的时钟脉冲经绝对相位基准（分频器）分频后，再经过  $90^\circ$  移相、功率放大后输出两路信号：一路为正弦信号；一路为余弦信号。此两路信号用作滑尺的激磁电压。

当滑尺沿定尺移动时，因为  $\varphi = \frac{2\pi}{W}L$ ，故感应电势相角  $\varphi$  是由感应同步器的相对位置所决定的。在定尺上所产生的感应电势经放大，滤波、整形后送鉴相器，进入下一环节。

### 2. $\Delta/D$ 转换环节（图中第Ⅱ部分）

这部分主要功能是把  $\varphi$  的变化（模拟量）转换为数字量。

本部分的核心是鉴相器。它用两个输出去控制相对相位基准输出的加法脉冲电路，使其输出波形产生相移，移相的方向是力图使鉴相器两个输入量之间的相位差  $\Delta\varphi \rightarrow 0$ ，亦即使  $\varphi$  跟随  $\varphi$  变化。鉴相器两个输出信号为：一个是两相位差的绝对值  $\Delta\varphi = \varphi - \varphi'$ ，另一个是输出  $F_x$  即移动方向，用以控制计数器做加或减法运算。这里  $\varphi$  为相位环节产生的相移， $\varphi'$  为相对相位基准，静态时二者相等。每当滑尺沿定尺相对移动时，相角  $\varphi$  发生变化，故鉴相器有输出，相差阈值也有输出，使相对相位基准加（或减）一个脉冲，同时把与之相等的脉冲数通过计数脉冲输出到计数显示部分，则此数字就代表位移量。

### 3. 计数及显示环节（图中第Ⅲ部分）

这部分主要作用是将数字化的脉冲数进行累加并显示。

图中显示计数器是用来累加上一环节来的门脉冲并判断脉冲的正负。为此，该电路设有显示过零、“+”、“-”符号以及加减计数等逻辑电路。过零显示电路的作用是所有数字显示均为零时，输出为“1”。“+”、“-”符号电路的作用是正向运动显示过零时，应显示“+”号；反向运动显示过零时，则应显示“-”号。加减计数电路的作用是当显示为“+”符号时，正向运动应加计数，反向运动时应减计数；当显示为“-”符号时则相反。

下面再介绍一些新型位移传感器。

## 五、直流差动变压器

以前，大多数传感器都采用分立型，即敏感元件与放大电路（或测量电路）分开。如前面讲到的差动变压器即是如此。随着半导体集成技术的发展，现在已经把敏感元件与信号处理电路制作在一起，从而使检测及信号处理一体化，不但尺寸减小了，而且响应快、稳定性好。

所谓直流差动变压器（DCDT），它可以直接用直流激励电源供电，并把振荡器（由直流电变交流电所必须）、解调器、传感器本身以及低通滤波器、输出放大器都应用微电子技术大大缩小了体积而装入传感器壳体内。成品外形尺寸为： $D \approx 25\text{mm}$ ， $L \approx 35\text{mm}$ 。

## 六、光纤位移传感器

近年来，光电传感器发展很快，尤其随着光纤、激光技术的发展，制成了许多新型位移传感器如光纤位移传感器、激光干涉仪、光子位移传感器等非接触式传感器。图 5-29 示出光纤位移传感器的工作原理及特性。

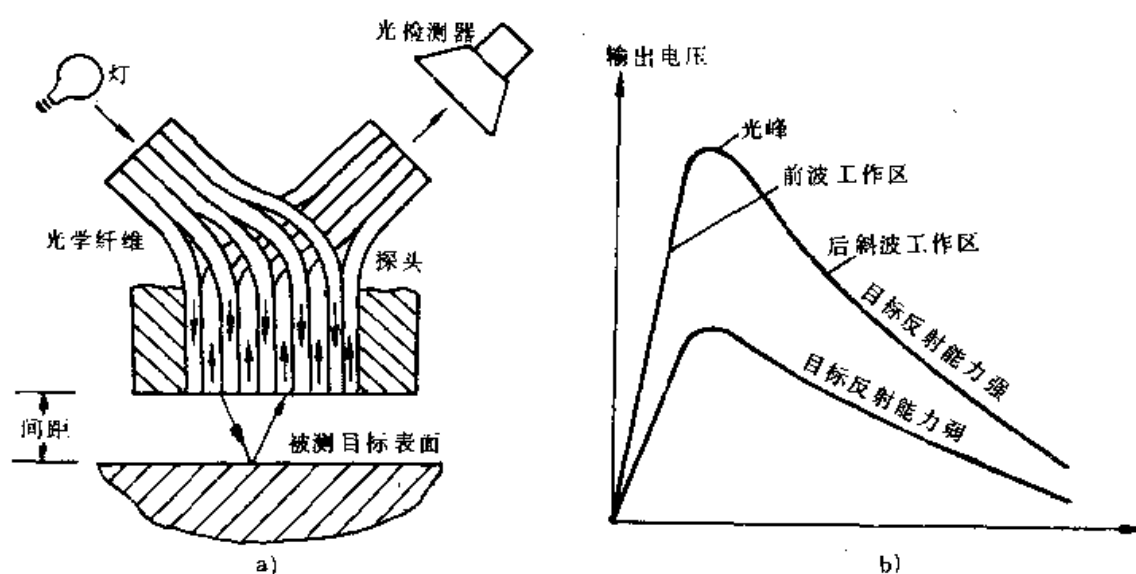


图 5-29 光纤位移传感器  
a) 结构原理 b) 输出特性

光纤位移传感器是利用纤维光学原理来测量位移。使用比较简单的光学/电子装置，其量程由数十纳米至几毫米。所用的光纤探头由直径为 0.51~7.6mm、长为 76mm 的几百条构成一束的光学纤维组成。其中每一条光纤的直径为零点零几毫米。如图 a) 所示，光纤束延伸 0.3~1m，引到电子装置的底座，然后分成相等的两束，一束（发射光纤）放在面对光源处，因而可把光传到探头端部，在这里光线被射出并由被测目标反射回来。虽然高反射率的目标能产生更大的输出，但即使是比较暗淡的表面也能进行测量。反射光由另一束光纤（接收光纤）收集，再传到电子装置，并在一个配用的光检测器上聚焦。光检测器的电子线路便会产生与探头和目标物之间的间距有关的直流输出。为了尽量减小相邻各条光纤之间的相互干扰，各条光纤都做成芯线/包层结构，并用折射率不同的两种玻璃来获得光纤内的全反射。

图 5-29b) 示出光纤传感器的输出特性。共有两个工作区：前坡工作区和后斜坡工作区。在间距为零时，没有光线能从发射光纤传出，因而输出为零。当间距增大时，被测目标表面有更多部分受到照射，因而反射增大，从而得到非常灵敏和几乎为线性的测量范围（前坡工作区）。随着间距增加，整个被测目标表面最后都受到照射，从而产生峰值输出。由于被测目标所受到的照射量，以及传感器对反射光的收集将大体按平方反比规律而减小，因而超过此峰值点的间距增加将导致传感器响应的减小。后坡工作区对测量也有用，但线性和灵敏度稍差。

工作在前坡工作区的标准探头（发射光纤和接收光纤在光纤束中随机排列）的典型特性如下：灵敏度为 63mV/ $\mu\text{m}$ ；线性  $\pm 1\%$ ；工作范围 0.025~0.1mm；静态分辨率 0.025 $\mu\text{m}$ ；从直流到 50kHz 频响特性平直度为  $\pm 3\text{dB}$ ；满刻度输出为直流 0~10V；输出信号的纹波为 50mV（峰-峰值）。

## 第六章 执行器及控制

### 第一节 执行器概述

执行器技术是机电一体化基本技术之一。虽然执行器的功率可大到几万千瓦，小到1W以下，但从控制角度来看，执行器主要有三个作用：

- (1) 怎样高效率地给负载提供动力；
- (2) 怎样正确控制动力产生装置产生的力或运动；
- (3) 怎样快速地实现对动力产生装置的控制。

随着机电一体化技术的进步，执行器技术近年来得到了迅速的发展。作为其发展的原因，从技术上来说，主要是：

- (1) 电动机、气缸、油马达等动力产生装置的发展；
- (2) 功率半导体器件、空气阀、油压阀等能量变换控制装置的进步；
- (3) 产生执行器指令信号的运算控制装置的发展。

执行器的基本构成示于图 6-1。如图所示，执行器一般由能源、运算控制装置、能量变换控制装置和动力产生装置构成。按照动力产生装置的种类，执行器大致可分为电气式、气压式和油压式。

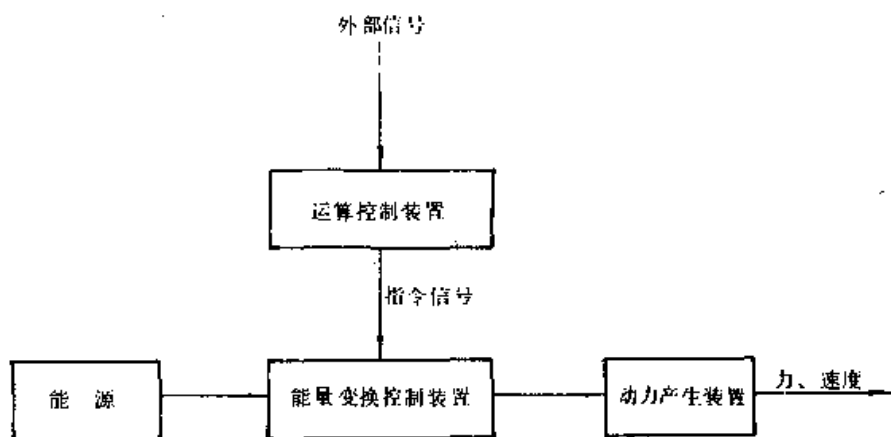


图 6-1 执行器的基本构成

电气式执行器的能源通常是工业电源，通过可控硅、功率晶体管等构成的电力变换装置产生电力，供给电动机，由电动机产生所需要的力和运动。

气压式执行器和油压式执行器的能源分别是压缩空气源和油压源，通过控制阀变换成可控制的能量，由气缸或油压马达（油缸）产生所需要的力和运动。

执行器的运算控制装置用以产生控制指令，大多采用电子装置。过去用得较多的是

以运算放大器为中心的模拟式运算控制装置。现在在机电一体化系统中，以微机为中心的数字化运算控制装置用得越来越多。

与执行器密切相关的有传感器和动力运动传递机构。传感器用以检测执行器及其负载是否实现所要求的动作，传感器输出的检测信号反馈给运算控制装置。执行器中，作为被检测信号主要是位置、速度、力、加速度等，但很多情况下还要检测诸如电压、电流等电气量。动力运动传递机构有离合器、制动器、齿轮等，其作用是把动力产生装置的输出传递给负载。

电气式、气压式、油压式三种执行器中，电气式执行器近年来得到了尤为迅速的发展。电气式执行器是以电机控制技术为基础的。一般来说，电动机虽然能把电能转换为机械能，但电动机本身缺少控制能力，只有从电力变换控制装置获得被控制的电力后，才能实现控制的目的。支持这种电力变换装置的是功率电子技术。也可以说功率电子技术的飞速发展促进了电气式执行器性能的显著提高。通常的配电系统，其频率、电压几乎是一定的，因此可从配电系统直接得到自身控制的电力。例如电灯的亮度，通用电机的转速，不必附加别的控制，几乎是保持不变的，这些都是利用了配电系统的这一性质。但是，电气式执行器动力产生装置的输入电力，其频率、电压与通常的配电系统不同。为要得到需要的频率、电压、电流或要进行更高精度控制时，必须应用功率电子技术实现电力变换控制。

电力变换和控制技术经历了电动发电机、磁放大器、水银整流器等多次变迁，现在是由以可控硅、功率晶体管为中心的功率半导体器件来实现。也就是说，由于近年来功率半导体器件的显著进步，可将电力变换成任意的电压、电流和频率。图 6-2 是以半导体电力变换装置为中心的电气式执行器的系统结构图。

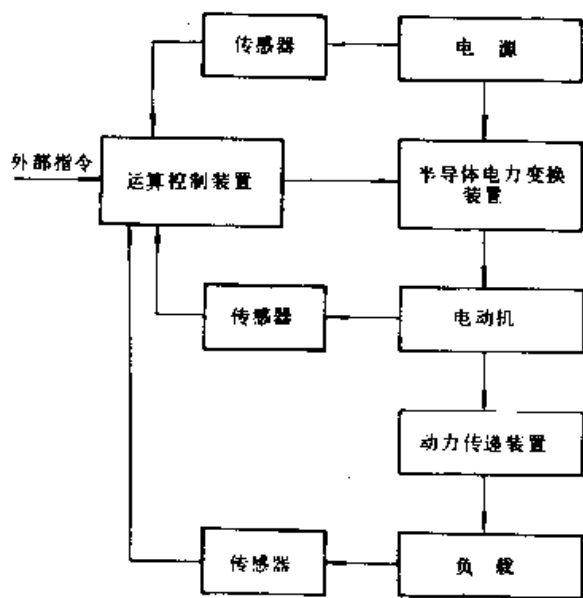


图 6-2 电气式执行器系统结构图

在功率电子器件方面，随着可控硅向着大容量、高速化发展的同时，对电机控制来说，起重要作用的是 GTO (Gate Turn Off; 可关断晶闸管)、功率晶体管和功率场效应管的高性能化。

在运算控制装置中，过去一直采用模拟运算器，随着 LSI 技术的进步，微处理器正在得到广泛应用。这样一来，使执行器成为数字控制系统，实现了用程序驱动，提高了控制系统的灵活性，并使其成本大幅度降低。

如前所述，电气式执行器是以电动机的控制技术为基础的。伺服电动机有直流电动机、交流电动机和步进电动机。直流伺服电动机响应速度快、可控性好，用于高精度伺服系统中。伺服交流电动机有感应电动机和同步电动机。同步电动机主要用于机床进给

机构，而感应电动机主要用于机床主轴驱动等。由于交流电机控制技术的发展，采用向

量控制的感应电动机也完全可以取代直流机用于位置、速度伺服系统。步进电动机主要用于办公自动化(OA)机械、计算机终端设备、测试装置等小型伺服系统。功率步进电机也常用于一些需较大功率的场合,如中、小型数控机床伺服进给驱动。

## 第二节 步进电机及其驱动

从1957年开始,步进电机作为数控系统的执行器受到广泛重视。直到现在,由于步进电机的微机控制容易实现,作为小型伺服电机,还相当普遍地使用着。

### 一、步进电机的工作原理

步进电机按励磁方式分为反应式(也称变磁阻式)、永磁式和感应子式。反应式又分为单段的和多段的。用得最多的是单段反应式。下面讨论的就是这种步进电动机。

图6-3是一种三相反应式步进电机的示意图。它的定子、转子是用硅钢片或其他软磁材料制成的。定子的极对数称做“相”。步进电机可做成三相、四相、五相或六相的,个别也有做成八相或更多相数的。定子每对极上绕有一相绕组,转子上没有绕组。当A相绕组通以直流电时,定、转子间的气隙磁场与A相绕组轴线相重合,转子受磁场作用便产生了转矩。转子旋转到其轴线与A相绕组轴线一致时,转子上只受径向力而无切向力,其转矩为零。或者说定、转子的相对位置力图取最大磁导位置。在这个位置上,转子有自锁能力。如果由A相绕组通电,换接到B相绕组通电,转子就要转到其轴线与B相绕组轴线重合的位置,转子在空间转过了 $60^\circ$ ,也称做前进了一步,这个角度叫做步距角 $\theta_s$ 。按A-B-C-A顺序通电,转子就沿顺时针方向一步步旋转。从一相通电换接到另一相通电,叫做一拍。每一拍转子就旋转一个步距角。三相依次通电的运行方式叫做三相单三拍运行。A、B相同时通电(二相励磁)时,转子轴线力图与A、B相合成磁场轴线一致。按

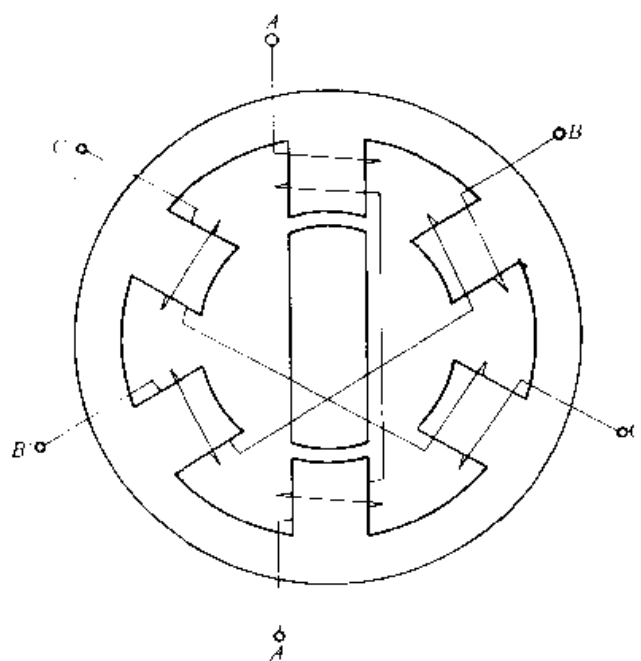


图6-3 三相反应式步进电机示意图

AB-BC-CA-AB顺序通电,转子每前进一步也是 $60^\circ$ ,这种运行方式叫三相双三拍。按A-AB-B-BC-C-CA-A方式通电叫做三相六拍运行方式,其步距角为 $30^\circ$ 。换接电源的频率越高,转子就转得越快。但是这种结构的步进电机的步距角太大,不能适应一般用途。

图6-4仍然是一种三相反应式步进电机。不过其定子磁极上增加了小齿,转子做成多极的。定、转子的齿距相同。它们的齿数要适当配合,使得当一对极下(图中A相)定、转子齿一一对正时,下一相(B相)绕组下的定、转子齿错开齿距 $t$ 的 $1/m$ ( $m$ 为相数);再下一相(C相)绕组下定、转子齿错开 $2t/m$ ,并

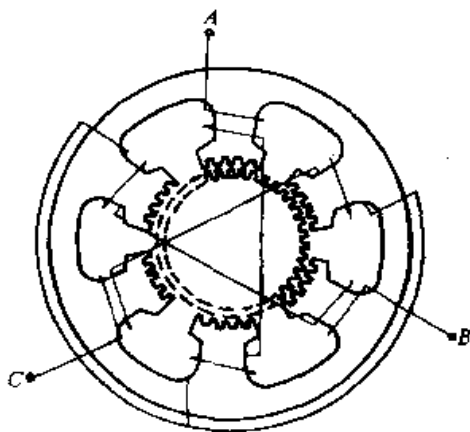


图 6-4 三相反应式步进电机

依次类推。在定子磁场作用下，由于转子力图取得最大磁导位置，所以每一拍转子转过相当  $t/m$ （齿距的  $1/m$ ）的步距角  $\theta_b$ 。

$$\theta_b = \frac{360^\circ}{NZ_R} \quad (6-1)$$

式中  $Z_R$ ——转子齿数

$N$ ——转子转过一个齿距的运行拍数

例如，对图 6-4 所示电机来说， $Z_R=40$ ，三相单三拍运行时  $N=m=3$ ，三相六拍运行时  $N=2m=6$ ， $\theta_b$  分别是  $3^\circ$  和  $1.5^\circ$ 。

控制绕组通电状态以  $N$  拍（一般  $N=m$  或  $2m$ ）为一个循环，转子则以  $N\theta_b$  角度（相当一个齿距）为一个周期。所以，转子齿数相当于一般旋转电机的极对数，因此电角度为空间角度的  $Z_R$  倍。用电角度表示的步距角  $\theta_{be}$  为

$$\theta_{be} = \frac{2\pi}{N} \text{ (rad)} \quad (6-2)$$

步进电机的转速  $n$  由下式表示：

$$n = \frac{60f}{Z_R N} \text{ (r/min)} \quad (6-3)$$

式中  $f$ ——脉冲频率 (Hz)

不难看出，齿数越多，相数越多，步距角越小。

## 二、步进电机的特性

### 1. 静态特性

所谓静态特性是指一相或几相绕组通直流电时的特性。主要是指步进电机的矩角特性。一个齿距角用电角度表示为  $360^\circ$ ，单相通电时，若定子齿与转子齿相对位置如图 6-5a) 所示， $\theta_s$  表示转子齿中心线与定子齿中心线偏离的电角度，称为失调角。所谓矩角特性是指在不改变通电状态的情况下，步进电机静转矩与转子失调角的关系。矩角特性曲线大致为正弦曲线 [图 6-5b)]。  $\theta_s=0$  时转矩为零，称为初始平衡位置。

### 2. 动态特性

步进电机的动态特性主要包括起动转矩  $T_s$ 、自然振动频率  $f_0$  等。

(1) 起动转矩  $T_s$  是指在规定电源条件下，从静止状态突然起动并能不失步运行所能带动的最大负载转矩。显然，它与起动时的频率有关。

(2) 自然振动频率  $f_0$  是指在不阻尼情况下，当通电状态换接后，转子围绕初始稳定平衡位置作自然振动的频率。

### 3. 运行性能



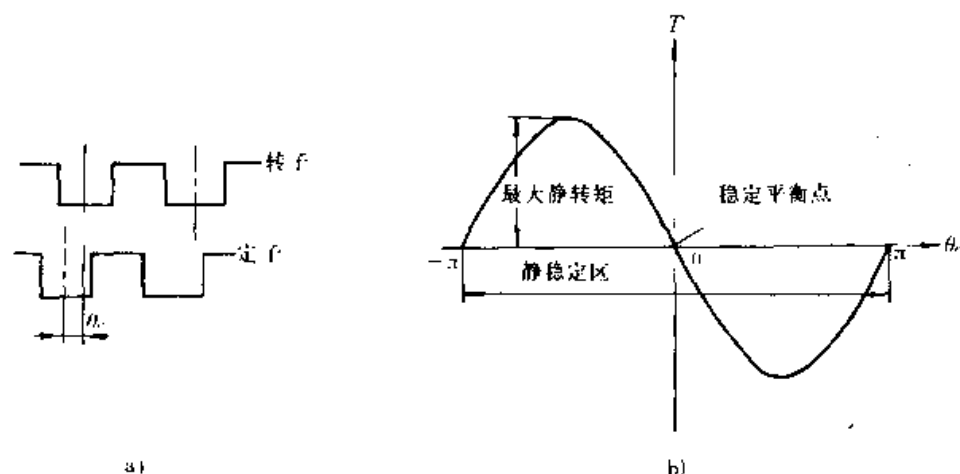


图 6-5 步进电机的静态特性  
a) 失调角 b) 矩角特性

- (1) 最大静转矩  $T_{jmax}$  矩角特性中的最大转矩值。它表示步进电机承受负载的能力。
- (2) 起动频率  $f_q$  步进电机能够不失步起动的最高脉冲频率。所谓失步是转子前进的步数不等于脉冲数。失步包括丢步和越步。显然，起动频率与负载转矩和惯量有关。
- (3) 运行频率  $f_r$  步进电机起动后，当脉冲频率连续上升时，能不失步运行的最高频率。显然，运行频率也与电机的负载转矩有关。
- (4) 运行转矩  $T_r$  电机起动后不失步运行所能提供的最大转矩。

图 6-6 中实线是步进电机的起动转矩与频率的关系曲线，称为起动矩频特性曲线。由图可见，转动惯量越大，同频率的起动转矩越小。虚线表示运行转矩和频率的关系曲线，称为运行矩频特性。严格说来，转动惯量对运行矩频特性也有影响，但不象对起动矩频特性那样影响显著。

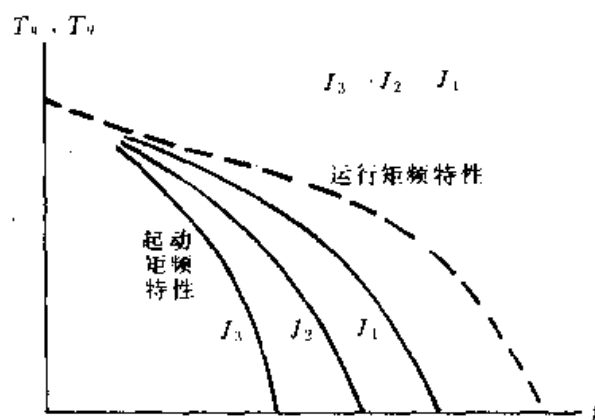
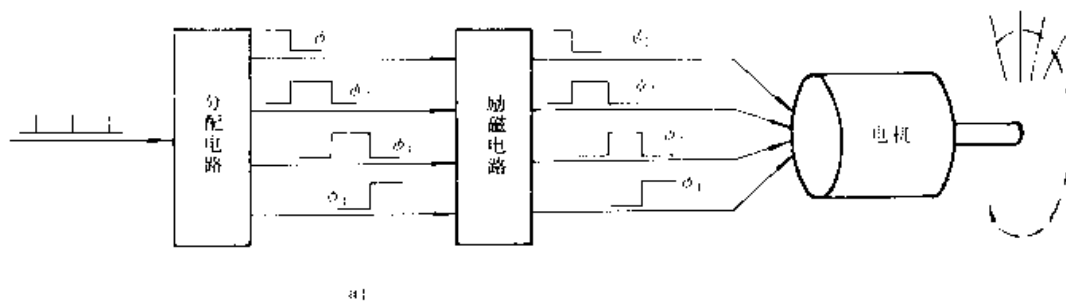


图 6-6 步进电机矩频特性曲线

### 三、步进电机的驱动和微机控制

图 6-7 是步进电机驱动系统的示意图。它可以分为两部分，一部分是从分配电路到电机 [图 6-7a)]，另一部分是输入控制电路 [图 6-7b)]。分配电路可以是由门电路组成，也可以是专用集成电路芯片。其作用是使电机各相线圈按一定顺序励磁。它有两个输入端，一个是表示转向的正/反转输入端，另一个是脉冲输入端。当给脉冲输入端输入脉冲时，分配电路就输出使步进电机旋转一个步距角的脉冲。分配电路的结构因相数、励磁方式而不同。输入控制电路的作用是一收到使电机步进一次的脉冲命令，就以适当的脉冲间



隔输出需要个数的脉冲，并把它们送入分配电路。当用微机进行步进电机控制时，分配电路、输入控制电路都可以用微机取代，而且只要改变一下程序，就可以改变励磁方式和脉冲时间间隔。

给电机提供电力的控制电路称为励磁电路或驱动电路。步进电机的励磁电路多式多样，按电源数目一般分为单电压供电方式和双电压供电方式。

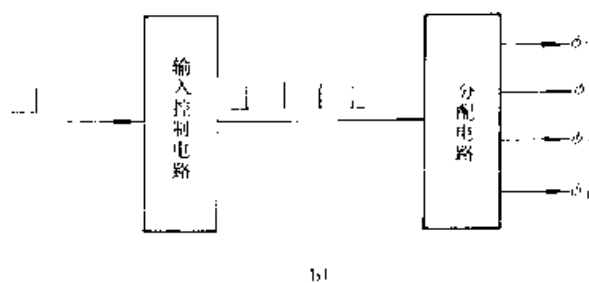


图 6-7 步进电机驱动系统示意图  
a) 从分配电路到电机 b) 输入控制电路

单电压供电方式如图 6-8a) 所示。来自分配器的信号经电流放大后加到功率晶体管

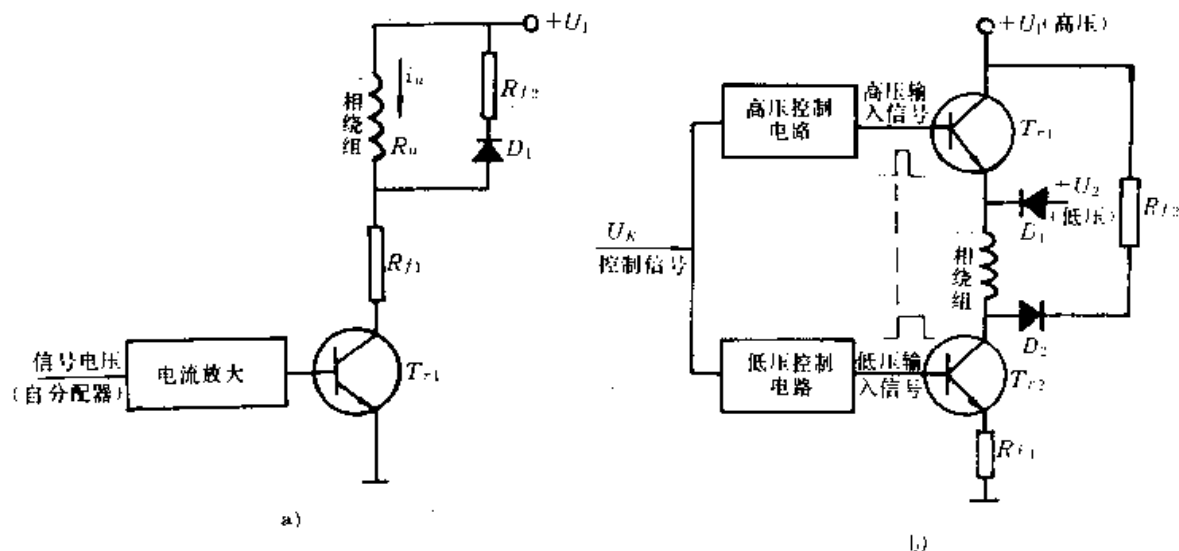


图 6-8 步进电机的励磁电路  
a) 单电压供电方式 b) 双电压供电方式

$T_{r1}$  的基极。 $T_{r1}$  与步进电机的一相绕组串联。 $T_{r1}$  导通即绕组通电。二极管  $D_1$  用作放电保护，以防绕组电流过大。电阻  $R_{f1}$ 、 $R_{f2}$  的作用是缩短充放电过程，使脉冲前后沿变陡。由于  $R_f$  耗能大，此方式只适于小型步进电机。

双电压供电方式如图 6-8b) 所示。当分配器送出控制信号  $U_k$  时， $T_{r1}$  及  $T_{r2}$  导通，在高电压电源  $U_1$  作用下，二极管  $D_1$  截止，绕组电流迅速上升，形成前沿很陡的电流波形，当电流达到稳定值的 1~2 倍时，利用定时电路或电流检测等措施，使  $T_{r1}$  截止， $T_{r2}$  仍导通。这时，绕组就改由低压电源  $U_2$  经二极管  $D_1$  供电。一旦分配器输出信号电压消失， $T_{r2}$  截止，绕组感应电势经二极管  $D_2$  及电阻  $R_{f2}$  放电，电流迅速下降。 $R_{f2}$  的作用是缩短放电

时间常数,  $R_{f1}$  用于平衡绕组电流。这种供电方式的优点是显著改善了电机的矩频特性, 增加了起动和运行频率。

下面以开环控制为例, 说明步进电机的驱动和微机控制。

当采用分配电路时, 微机的输出接口和逻辑电路的连接如图 6-9 所示。直接把输出口的第 0 位接到分配器的脉冲输入端。设分配电路的正/反转输入端为低电位, 反时针方向运转。

励磁顺序如表 6-1。表中的 ‘1’ 为高电平, 这对应着励磁电路的功率管导通, 使该相励磁。‘0’ 表示低电平, 意味着该相不励磁。表中的 “开始” 表示重置状态。从表 6-1 可知, 总有两相被同时励磁。四相电机单相励磁方式用得很少。

首先, 使微机产生如图 6-10a) 或 b) 所示的脉冲列, 把它加到分配器的脉冲输入端, 设分配器的正/反转输入端事先已加上了高电平 (顺时针) 或低电平 (逆时针)。程序框图示于图 6-10c)。要使电机只运转有限个步距角时, 只需先把步距数送入寄存器, 每运行一步, 寄存器次数减 1, 直至步距数为零。

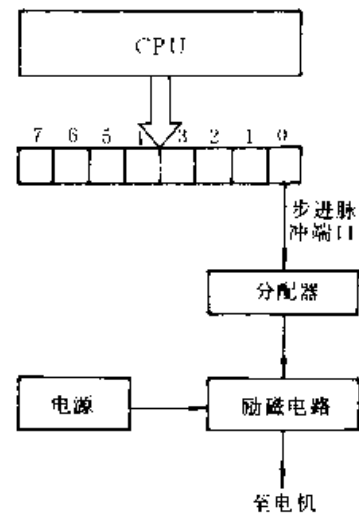


图 6-9 步进电机的微机驱动

表 6-1 四相双四拍运行励磁顺序

顺序	开始	1	2	3	4	5
$\varphi_1$	0	1	1	0	0	1
$\varphi_2$	0	0	1	1	0	0
$\varphi_3$	1	0	0	1	1	0
$\varphi_4$	1	1	0	0	1	1

让微机实现分配器的功能也很容易。仍以四相电机为例, 只需把累加器中二进数的内容左循环移位或右循环移位即可 (表 6-2)。表中 (a) 是四相双四拍运行励磁顺序, 先把二进制数 00110011 放入累加器, 每左移一次就得到下次的內容。如图 6-11 所示, 使用输出口的下四位或上四位, 作为电机的励磁信号。表中 (b) 是四相单四拍运行励磁。(c) 是四相八拍运行励磁, 这时输出口的奇数位或偶数位用于电机励磁电路的输入信号。

通过改变移位方向可以实现回转方向的改变。

表 6-2 用循环移位实现分配器功能

(a) 四相双四拍	(b) 四相单四拍	(c) 四相八拍
00110011	00010001	00000111
01100110	00100010	00001110
11001100	01000100	00011100
10011001	10001000	00111000
00110011	00010001	01110000
01100110	00100010	11100000
11001100	01000100	11000001
10011001	10001000	10000011

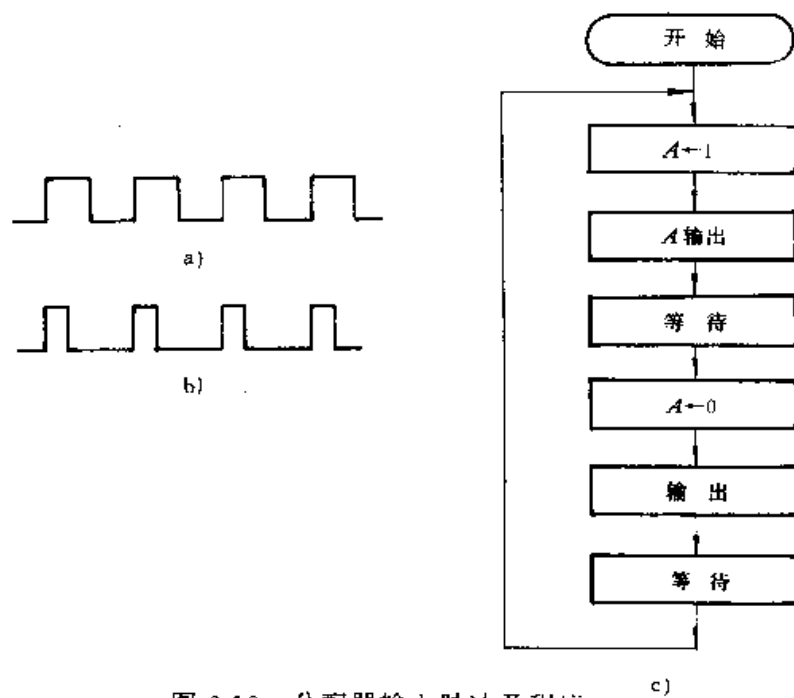


图 6-10 分配器输入脉冲及程序  
a)、b) 两种输入脉冲列 c) 产生脉冲列程序框图

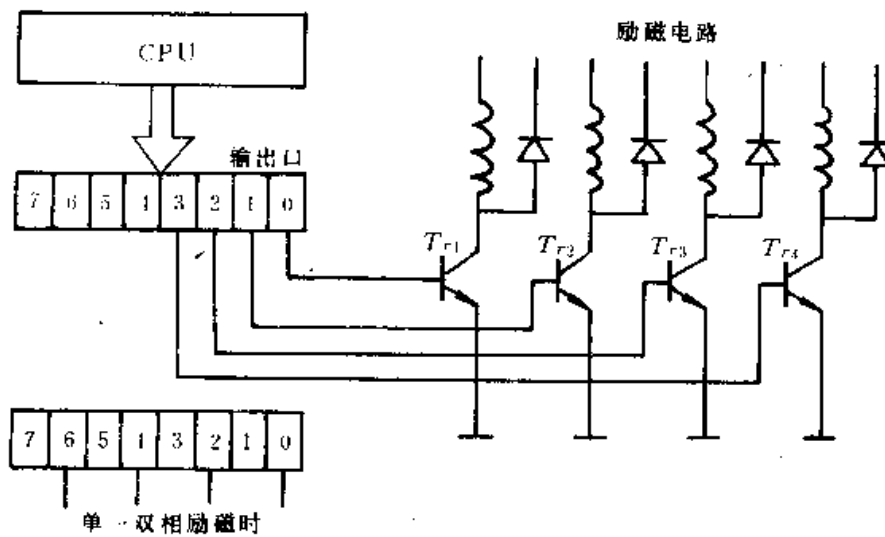


图 6-11 输出口和励磁电路的连接

#### 四、步进电机的加减速运转

通过改变脉冲间隔可以实现步进电机的加、减速运转。这在起动、停止时使用。

首先介绍加速运行时脉冲间隔的确定。图 6-12a) 表示等加速时速度指令和脉冲间隔的关系。图中的脉冲序列按顺序依次编号为  $0^{\#}$ ,  $1^{\#}$ ,  $2^{\#}$ , ……。步进电机的速度用每秒

的脉冲数（步距数）表示，单位为 Hz。

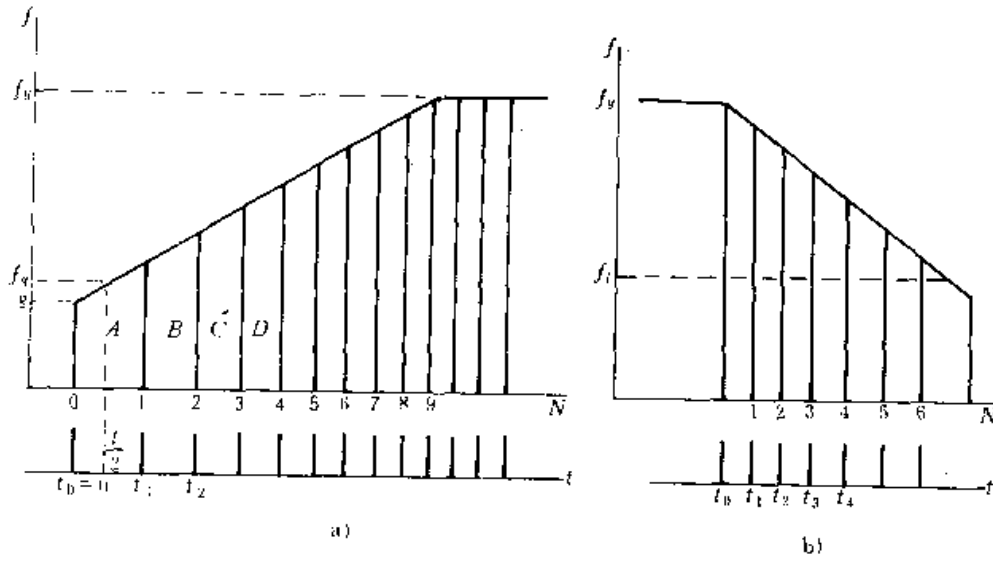


图 6-12 加减速的速度指令和脉冲间隔

a) 匀加速时 b) 匀减速时

图中梯形面积  $A, B, C, D$  全应等于一个步距，即各梯形面积等于 1（位移等于速度与时间之积）。匀加速运行时速度可表示为

$$f = g + \beta t \quad (6-4)$$

其中  $f$ ——速度 (Hz)

$$g = f_0 - \frac{\beta}{2f_0} \quad (\text{Hz}) \quad (6-5)$$

$f_0$ ——起动频率 (Hz)

$\beta$ ——加速度 (Hz/s)

由于当  $t$  等于  $t_m$  时，总面积为  $m$  个步距，故

$$\frac{t_m}{2} [g + (g + \beta t_m)] = m \quad (6-6)$$

式中，以  $t$  等于零为时间原点。由此可得关于  $t_m$  的方程式

$$\beta t_m^2 + 2gt_m - 2m = 0 \quad (6-7)$$

解之，可求得脉冲时间  $t_m$

$$t_m = (-g + \sqrt{g^2 + 2m\beta}) / \beta \quad (6-8)$$

脉冲间隔  $\Delta t_m$

$$\begin{aligned} \Delta t_m &= t_m - t_{m-1} \\ &= \frac{1}{\beta} (\sqrt{g^2 + 2m\beta} - \sqrt{g^2 + 2(m-1)\beta}) \end{aligned}$$

$$= \frac{2}{\sqrt{g^2 + 2m\beta} + \sqrt{g^2 + 2(m-1)\beta}} \quad (6-9)$$

从加速运行到匀速运行，程序上可以有两种考虑方法。

一种方法是一开始就给定  $f_y$ 、 $\beta$  和匀速运行时的运行速度  $f_s$ ，按上式逐一计算  $\Delta t_2$ ， $\Delta t_3$ ，……，设  $m=M$  时

$$\frac{1}{\Delta t_m} \geq f_y \quad (6-10)$$

则令

$$\Delta t_m = \frac{1}{f_y} \quad (6-11)$$

另一种方法是事先设定从第  $M$  个脉冲（按脉冲编号为  $M-1$ ）开始进入匀速运行，按式

$$\beta = \frac{2(f_y^2 - f_q^2)}{\sqrt{(2M-3)^2 + (f_y/f_q)^2 - 1} + (2M-3)} \quad (6-12)$$

确定加速度  $\beta$ ，然后按式 (6-9) 计算各  $\Delta t_m$ 。从式 (6-4) 可得

$$f_y = g + \beta t_{M-1} \quad (6-13)$$

从式 (6-8) 可得

$$\beta t_{M-1} = \sqrt{g^2 + 2(M-1)\beta} - g \quad (6-14)$$

将式 (6-14) 代入式 (6-13) 可得

$$\beta = \frac{f_y^2 - g^2}{2(M-1)} \quad (6-15)$$

将式 (6-5) 代入上式，即得  $\beta$  的二次方程，解之得

$$\beta = 2f_q^2 \left[ \sqrt{(2M-3)^2 + (f_y^2 - f_q^2)/f_q^2} - (2M-3) \right] \quad (6-16)$$

式 (6-12) 和式 (6-16) 在数学上是等价的，不过式 (6-12) 用计算机运算时误差较小。

同样的方法可用于计算减速时的脉冲间隔。一般地，减速时加速度的绝对值可比加速时取大些。即要停止时的脉冲间隔比起动时的脉冲间隔可取得更小。

图 6-12b) 表示从匀速运行开始减速，经匀减速运动，在第  $N$  个脉冲时停止。这时的加速度仿式 (6-12) 可得

$$\gamma = \frac{2(f_s^2 - f_i^2)}{\sqrt{(2N-1)^2 + (f_s/f_i)^2 - 1} + (2N-1)} \quad (6-17)$$

式中  $\gamma$ ——减速运行时的加速度绝对值

$f_y$ ——匀速运行速度

$f_i$ ——停止时的速度

$N$ ——最后一个脉冲的编号

脉冲间隔由下式给出:

$$\Delta t_{d-n} = \frac{2}{\sqrt{g^2 + 2(N-n)\gamma} + \sqrt{g^2 + 2(N-n-1)\gamma}} \quad (6-18)$$

$$\begin{aligned} \text{式中} \quad g &= f_i - \frac{\gamma}{2f_i} \\ n &= 1 \sim N \end{aligned} \quad (6-19)$$

也可由下式计算:

$$\Delta t_{d+n} = \frac{2}{\sqrt{f_y^2 - 2n\gamma} + \sqrt{f_y^2 - 2(n-1)\gamma}} \quad (6-20)$$

为了确定脉冲间隔, 必须事先确定起动频率  $f_q$  和加速度  $\beta$ 。为确定  $f_q$ , 必须知道起动转矩范围。图 6-13 表示起动转矩、运行转矩和电机转速的关系, 纵坐标为转矩, 横坐标为脉冲频率。例如, 负载转矩为 0.2 N·m 时, 起动速度不得大于 400 Hz。值得注意的是, 起动转矩也与负载的转动惯量有关。

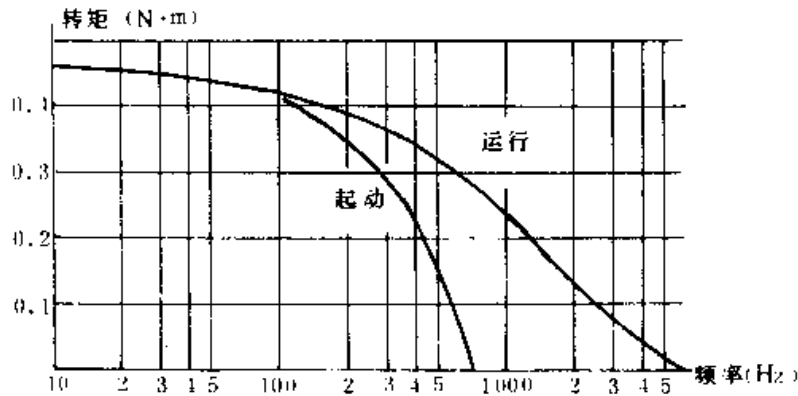


图 6-13 步进电机矩频特性一例

$\beta$  与加速惯性负载的能力和起动转矩特性有关。经过时间  $\Delta t$ , 把惯性  $J$  从  $f_q$  加速到  $f_y$  所需的电机转矩由下式给出:

$$T_M = \frac{J}{\Delta t} (f_y - f_q) \cdot \frac{\pi\theta_b}{180} + T_L \quad (6-21)$$

式中  $T_M$ ——电机转矩 (N·m)

$\theta_b$ ——步距角度 (°)

$J$ ——转动惯量 (kg·m<sup>2</sup>)

$T_L$ ——负载转矩 (N·m)

例1 要使步距角为 $1.8^\circ$ 的步进电机在 $0.02\text{s}$ 的时间内从 $400\text{Hz}$ 加速到 $2000\text{Hz}$ ,求所需的电机转矩。设静载荷为 $0.05\text{N}\cdot\text{m}$ ,负载和电机的转动惯量为 $10^{-4}\text{kg}\cdot\text{m}^2$ 。

$$\begin{aligned} \text{解: } T_M &= \frac{10^{-4}}{0.02} (2000-400) \frac{3.14}{180} \times 1.8 + 0.05 \\ &= 0.0942 + 0.05 = 0.1442 \approx 0.14 \text{ (N}\cdot\text{m)} \end{aligned}$$

实际上,运行转矩在 $400\sim 2000\text{Hz}$ 的频率内不会是常数,大体上是随频率的提高而降低。另外,由于直到 $2000\text{Hz}$ 的范围内,运行转矩都在 $0.14\text{N}\cdot\text{m}$ 以上,故可认为加速是可能的。

例2 以 $500\text{Hz}$ 的速度起动,正常运行速度是 $1500\text{Hz}$ ,想要从第10个脉冲进入正常运转,计算脉冲时间和脉冲间隔。

解:将 $M=10$ ,  $f_0=500$ ,  $f_s=1500$ 代入式(6-12),求得

$$\beta = \frac{2(1500^2 - 500^2)}{\sqrt{17^2 + 3^2 - 1} + 17} = 116844 \text{ (s}^{-2}\text{)}$$

从式(6-5)求得

$$g = 383.156 \text{ (s}^{-1}\text{)}$$

从式(6-8)求得脉冲时间

$$t_m = \frac{\sqrt{383.156^2 + 2 \times 116844 \times m} - 383.156}{116844}$$

式中

$$m = 1 \sim 9$$

另外

$$t_m = t_{m-1} + \frac{1}{1500} \quad (m \geq 10)$$

从式(6-9)可求得脉冲间隔

$$\begin{aligned} \Delta t_m &= 2 \times \left[ \sqrt{383.156^2 + 2 \times 116844 \times m} \right. \\ &\quad \left. + \sqrt{383.156^2 + 2 \times 116844 \times (m-1)} \right]^{-1} \quad (m = 1 \sim 9) \end{aligned}$$

$$\Delta t_m = \frac{1}{1500} \quad (m \geq 10)$$

计算结果如表6-3,其中 $t_0=0\text{s}$ 。

表6-3 脉冲时间和脉冲间隔计算结果

$m$	脉冲时间 $t_m/\text{ms}$	脉冲间隔 $\Delta t_m/\text{ms}$	备注
1	2.000	2.000	$\Delta t_1 = 1/500$
2	3.4280	1.4280	
3	4.6014	1.1734	
4	5.6214	1.0200	



续表

$m$	脉冲时间 $t_m/\text{ms}$	脉冲间隔 $\Delta t_m/\text{ms}$	备注
5	6.5360	0.9146	
6	7.3723	0.8363	
7	8.1476	0.7753	
8	8.8735	0.7259	
9	9.5584	0.6849	
10	10.2251	0.6667	$\Delta t_{10} = \frac{1}{1500}$

步进电机的起动停止过程除了采用上述匀加（减）速之外，还有以加减速时间为最短作为目标函数，优化设计脉冲间隔的方法。

### 第三节 直流伺服电机及控制

#### 一、概 述

所谓伺服电机可以理解为为了忠实地执行频繁变化的位置或速度指令而设计的电动机。它不同于通常的驱动电动机。对于伺服电动机要求其响应速度快。为此，它必须具有能以大的加速度进行起动、停止的能力。为了得到大的加速度，要求伺服电动机既要转矩大，同时还要转子转动惯量小。

直流电动机能很好满足上述要求，一直作为精密伺服电机使用着。直流伺服电机控制可以分为电枢控制和励磁控制。

直流电机的伺服系统可以分为利用电机本身特性（多为开环）的伺服系统和利用附加测速装置的伺服系统。

利用 PLL（锁相环）控制，可以得到极稳定的转速，用于高性能的恒速控制。通过分频器或频率合成器，又可得到多级变速或无级调速。

为了减小电机本身和驱动电路的电力消耗，PWM（脉冲宽度调制）控制用得也很普遍。

直流电机的位置控制方法有两种。一种是利用直流电机响应速度快的特点，通过急剧加、减速进行位置控制；二是使直流电机在到达目标位置之前停止，然后利用步进动作接近目标位置。

#### 二、直流伺服电机速度控制原理

直流伺服电机实质上就是一台他励式直流电动机，其结构与普通小型直流电动机相同，可分为永磁式和电磁式两种。永磁式直流伺服电动机的磁极由永久磁铁制成，我国生产的 SY 系列直流伺服电动机就属这种结构。电磁式直流伺服电机，在磁极铁芯上套有磁极绕组，我国生产的 SZ 系列直流伺服电机就属这种结构。

直流伺服电机的速度控制可用图 6-14 来说明。图中，当励磁电路未达到饱和时，有下述关系：

$$e_a = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + K i_f \omega \quad (6-22)$$

$$e_f = R_f i_f + L_f \frac{di_f}{dt} \quad (6-23)$$

$$\tau = K i_f i_a \quad (6-24)$$

式中  $e_a, e_f$ ——电枢电压和励磁电压  
 $i_a, i_f$ ——电枢电流和励磁电流  
 $R_a, L_a$ ——电枢电路的电阻和电感  
 $R_f, L_f$ ——励磁电路电阻和电感  
 $k, \omega$ ——扭矩常数和电机转速  
 $\tau$ ——电机产生的扭矩

式 (6-22) ~ (6-24) 是瞬时值的表达式, 稳定状态时, 可以用

$$E_a = e_a, I_a = i_a \quad (6-25)$$

$$E_f = e_f, I_f = i_f, \Omega = \omega$$

记述。

式中  $E_a, I_a$ ——稳定状态时的电枢电压和电流  
 $E_f, I_f$ ——稳定状态时的励磁电压和电流  
 $\Omega$ ——稳定转速

则式 (6-22) ~ (6-24) 变成

$$E_a = R_a I_a + K I_f \Omega \quad (6-26)$$

$$E_f = R_f I_f \quad (6-27)$$

$$T = K I_f I_a \quad (6-28)$$

式中  $T$ ——稳定状态的输出扭矩  
 电机的转速从式 (6-26) 可得

$$\Omega = \frac{E_a - R_a I_a}{K I_f} = \Omega_0 \left(1 - \frac{R_a I_a}{E_a}\right) \quad (6-29)$$

式中  $\Omega_0 = \frac{E_a}{K I_f}$  (6-30)

称为电机的空载速度。

从式 (6-30) 可知, 由于空载速度  $\Omega_0$  是电枢电压  $E_a$  和励磁电流  $I_f$  的函数, 所以直流电机的调速方法可以有两种, 一种是改变电枢电压的电枢控制法, 一种是改变励磁电流的励磁控制法。

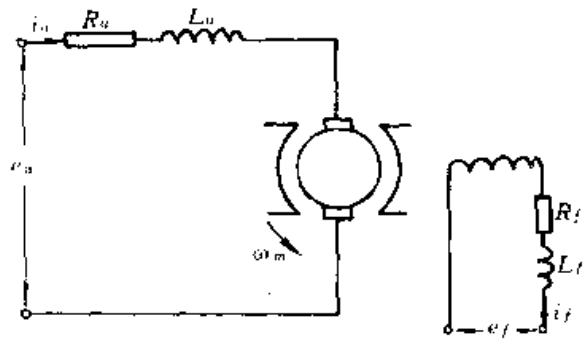


图 6-14 直流电机的等效电路

从式(6-30)可知,  $\Omega_0$  与  $E_a$  成正比, 即空载时的速度特性曲线为过原点的直线。从式(6-28)和(6-29)可以得到有负载时的速度转矩特性曲线(图6-15)。若忽略电枢的反作用时, 如实线所示。随着负载转矩的增加, 电枢电流产生的磁场显著削弱了励磁磁场, 使速度转矩曲线上升, 如图中虚线所示。

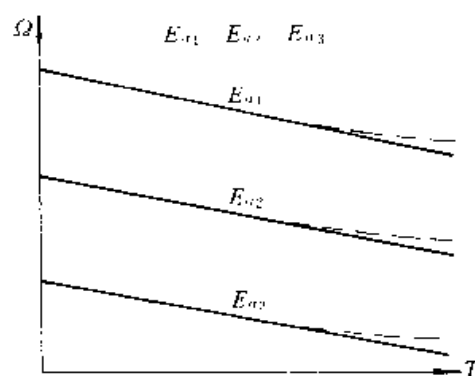


图 6-15 直流电机速度转矩特性

进行励磁控制时, 从式(6-30)可知, 电机的空载速度和励磁电流成反比, 但实际上存在着速度的上限和下限。另外, 由于励磁线圈匝数多、电感大, 对应励磁电压的变化, 电流变化慢, 即响应速度慢。所以, 在对响应速度、精度要求较高的直流电机控制时, 几乎都采用电枢控制。励磁控制只作为辅助方法被采用。另外, 近年来由于永磁技术的进步, 较小容量的小型电机, 采用永磁式, 以简化结构。这种永磁式电机不能进行励磁控制。

### 三、利用电机本身特性进行直流电机转速控制

诸如小型音响等设备, 用小型直流电机进行控制时, 除要求控制的稳定性外, 还要求成本低廉。现在广泛采用的电桥伺服方式(也称电子调速器方式)和比例电流控制方式都是利用电机本身特性检测转速、进行控制的, 由于不需要另外的转速检测手段, 经济性好。

#### 1. 用电桥伺服系统进行转速控制

直流电机可以用电枢电阻  $R_a$  和反电动势  $E_c$  等效。图 6-16a) 是包含电机在内的电桥电路。当电桥平衡, 即

$$R_1 : R_2 = R_3 : R_a \quad (6-31)$$

时, 电机停止, 电桥的输出电压  $E_{ab}$  为零。电机转动时, 就会产生与其转速成正比的反电动势  $E_c$ , 电桥输出电压  $E_{ab}$  与  $E_c$  成正比。

图 6-16b) 是电桥伺服系统的结构原理图。因为电动机的转速与反电动势  $E_c$  成正比, 要得到希望的电机转速, 必须设法按希望的转速设定反电动势  $E_c$ 。这由图 6-16b) 中转速设定的基准电压  $E_R$  来实现。电桥平衡时  $R_1 : R_2 = R_3 : R_a$ , 在  $R_1 : R_2$  边上, 按图示的极性增设基准电压  $E_R$ 。如果能自动调整电源电压, 使  $E_{ab} = 0$ , 则

$$E_c = E_R (R_1 + R_2) / R_1 \quad (6-32)$$

用  $E_R$  就可以设定  $E_c$ 、即转速  $N$ 。

#### 2. 用比例电流控制实现转速控制

电动机的输入电流由负载转矩的大小决定, 而电枢电阻  $R_a$  上的电压决定了转速的大小。所以, 通过电枢压降的补偿, 就可得到稳定的转速。这种控制方式称作比例电流控制, 方法简单, 适用于要求不太高的电机转速控制中。

图 6-17 是其基本原理图。在该电路中, 若忽略三极管  $T_2$  基极—发射极间电压  $V_{BE2}$ ,

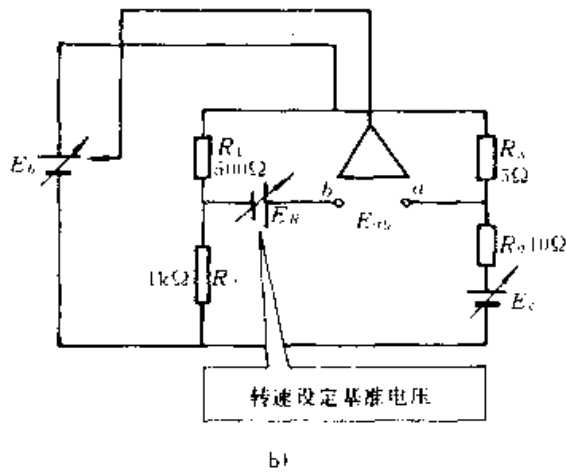
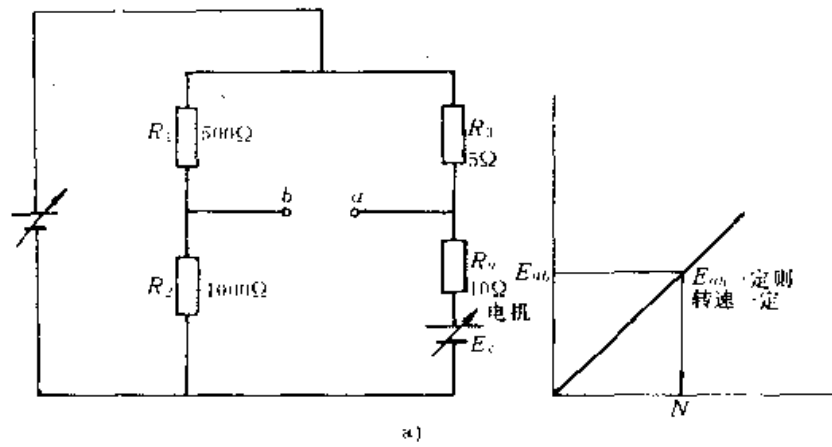


图 6-16 电桥伺服系统  
a) 电桥电路 b) 结构原理

减小的部分，又因  $E_{RT}$  提高了加于电机上的电压而得到补偿，使  $E_c$  不变，仍能保持转速

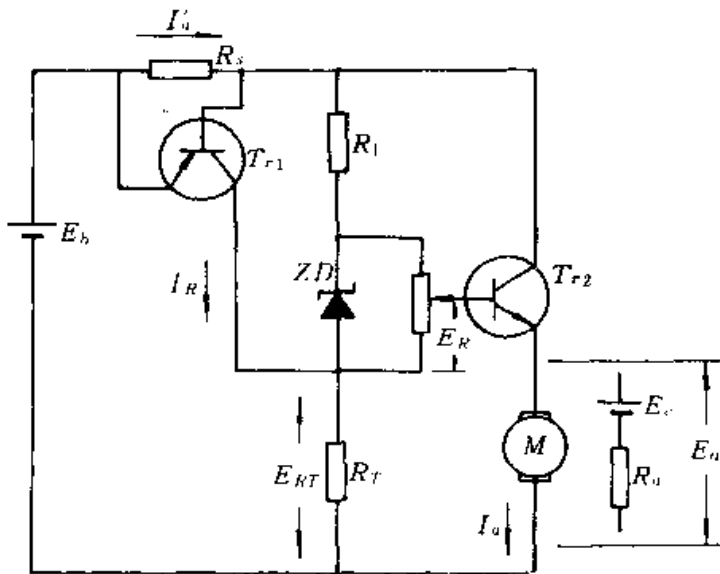


图 6-17 比例控制基本原理

则加于电机上的电压  $E_a$  由下式给出：

$$E_a = E_R + E_{RT} \quad (6-33)$$

三极管  $T_{r1}$  用以检测流向电动机的电流  $I_a$ ，根据  $R_3$  的压降  $I_a R_3$  的大小就可对集电极电流  $I_R$  进行比例控制。

电机一加上负载，其电流  $I_a$  增加，转速降低。但是  $I_a$  的增加引起  $R_3$  上的电压降也增加， $T_{r1}$  的集电极电流  $I_R$  也成比例地增加，电阻  $R_T$  的电压降  $E_{RT}$  就要变大。因此，如果设计时使  $R_T$  的压降  $E_{RT}$  和电机内的压降  $I_a R_a$  相等，即使给电机加上负载，由于电机内压降  $I_a R_a$  的增加使  $E_c$

减小的部分，又因  $E_{RT}$  提高了加于电机上的电压而得到补偿，使  $E_c$  不变，仍能保持转速的稳定。若令  $E_{RT} = I_a R_a$ ，则  $E_R = E_c$ ，电机的转速即可由  $E_R$  设定。 $E_c$  的值一般作为电机的铭牌值，以单位速度的电压值给出。

#### 四、利用附加测速装置的伺服系统

电桥伺服系统和比例控制伺服系统结构简单，成本低廉，但转速稳定性较差，波动约为 3%~5%，特别不适合温度变化的情况。为进一步提高转速的稳定性，就要利用附加测速装置构成伺服系统。

直流电机的测速装置可以是直流测速发电机或频率发电机，也可

以是编码器。利用直流测速发电机的伺服系统转速稳定性可达1%左右。当要求转速稳定性更高时,就需使用频率发电机或编码器构成伺服驱动系统。

### 1. 用直流测速发电机构成的伺服系统

图 6-18a) 是用直流测速发电机构成的伺服系统的基本电路。

直流发电机的输出电压  $E_N$  基本上与转速成正比。令与转速成正比的设定电压为  $E_s$ 。伺服系统的作用是把  $E_N$  与  $E_s$  进行比较并使之相等。这样,只要  $E_s$  是稳定的,就可以实现高稳定性的转速控制。若转速降低,即  $E_s > E_N$ ,则比较放大器的输出变大,反馈电路的作用使电机的转速提高。当  $E_s < E_N$  时,反馈电路的作用是使转速降低,以保持  $E_s = E_N$ ,即保证转速的稳定性。

### 2. 用频率发电机或编码器构成的伺服系统

用直流发电机构成的伺服系统,转速稳定性可达1%

左右。当要求转速稳定性更高时,就要采用频率发电机或编码器进行转速检测和 PLL (Phase Locked Loop: 锁相环) 控制等更高级的控制技术。

检测电机转速的理想方法是把转速本身作为频率来检测。这是因为转速 (r/min) 和频率 (Hz) 量纲相同,不会产生信号处理的误差。把转速作为频率检测的装置有交流测速发电机或频率发电机、编码器等。它们的输出都是频率。

图 6-18b) 是用频率发电机 (FG) 构成的伺服系统的基本原理图。其特点是增加了  $F-V$  (频率-电压) 变换部分。它的作用是得到与输入频率成正比的直流电压的输出。图 6-19 是  $F-V$  变换的基本组成。从频率发电机或编码器得到的频率输出经施密特电路整形后,输入给单触发多谐振荡器,变换成一定的脉冲宽度。这时,触发脉冲宽度设定得比

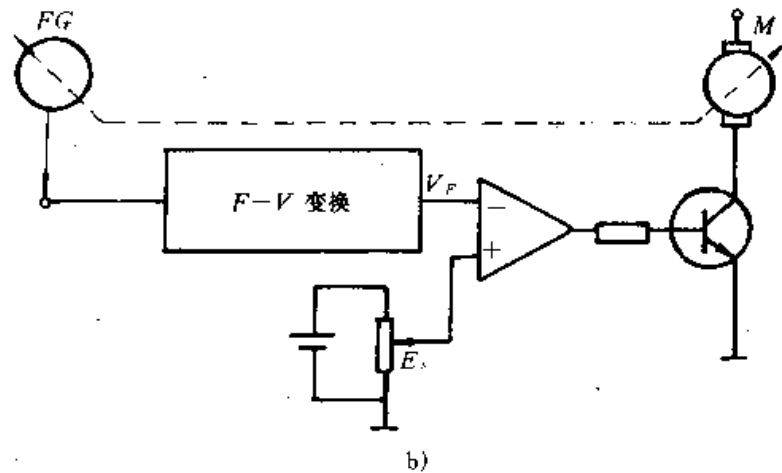
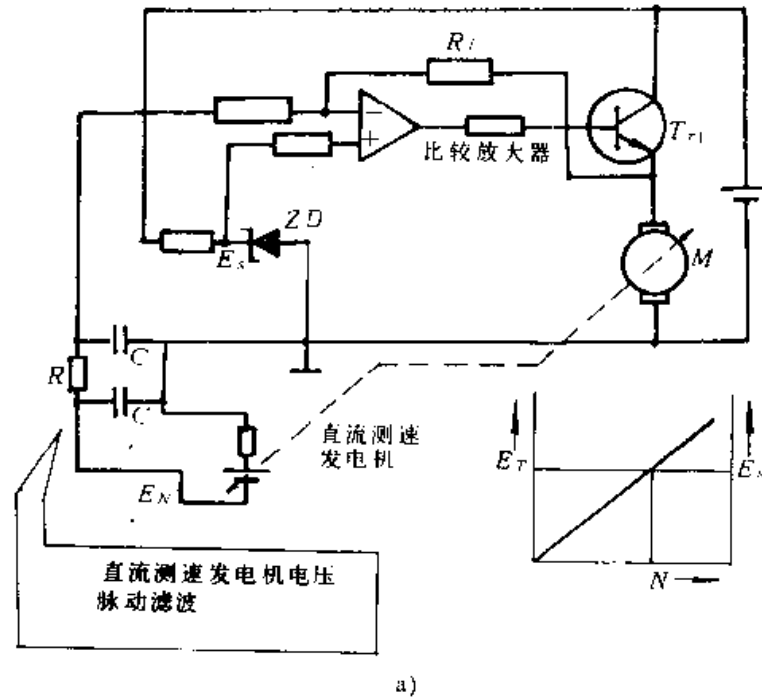


图 6-18 用附加测速装置的伺服系统  
a) 直流发电机测速 b) 频率发电机测速

最大输入频率的周期略小些。只要能稳定地控制触发脉冲，其积分电压（低通滤波后）就与输入频率成正比。

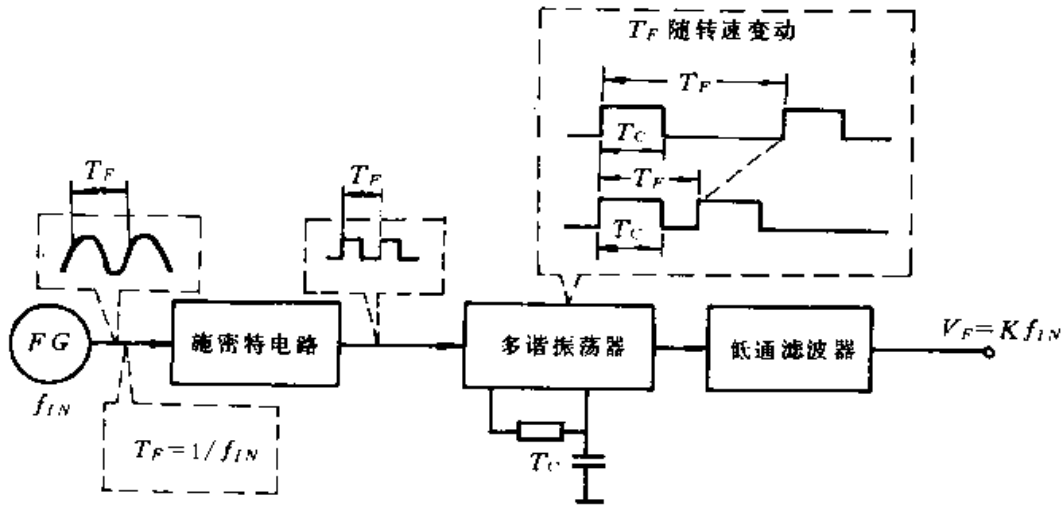


图 6-19 F-V 变换的基本组成

### 五、PLL 控制

为了得到更稳定的转速，把转速检测、比较控制进行数字化处理是 PLL 控制的基本思想。图 6-20 是其基本组成。

图 6-20a) 是模拟比例控制，b) 是 PLL 控制。二者的区别在于转速设定的物理量是模拟电压还是频率，电机控制是采用模拟电压的比较还是频率（相位）的比较。通过 PLL 控制可以实现数字控制。如设计合理的话，这种控制方式可望达到石英振子的稳定性 ( $10^{-5} \sim 10^{-7}$ )。

PLL 常用于收音机、频率合成器中。用于电机控制的 PLL 与一般的 PLL 不同之处在于积分电路后面没有电压控制振荡器。而电机控制中的交流发电机、频率发电机、编码

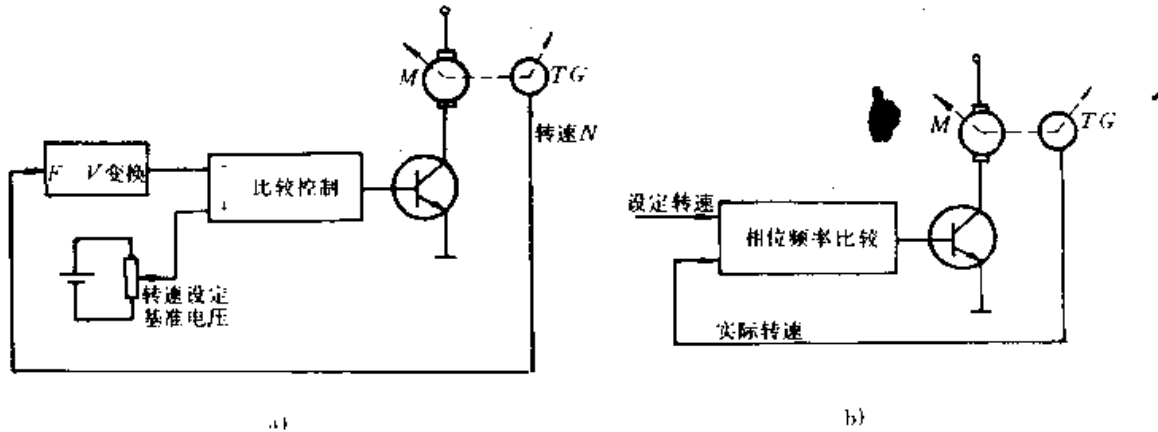


图 6-20 模拟比例控制与 PLL 控制

a) 模拟比例控制 b) PLL 控制

器等起着电压控制振荡器的作用。作为电机控制用集成电路，可以使用电机控制专用 PLL IC。

PLL 控制是使基准频率的相位和要比较的频率相位一致的控制系统。二者之间的相位一致意味着频率必然一致。因此，应用 PLL 控制，就是使连接在电动机上的交流发电机（或频率发电机、编码器等）产生的频率和基准振荡器一致，即保证电机按基准振荡器频率运行的控制。只要基准振荡器频率是稳定的，电机转速就也是稳定的。

为了得到不同的转速，可以使用分频器进行分频，得到不同的基准频率。另外还可以通过频率合成器得到希望的基准频率，实现转速的多级控制或无级控制。

## 六、PWM (Pulse Width Modulation) 控制

当要求电机输出转矩大时，电机本身和驱动电路耗电也大。因此，大功率电机的实际控制电路中，如何减小电力消耗就成了一个重要的问题。为此采用 PWM（脉冲宽度调制）控制。现在，由于许多新型单片机内藏 PWM 功能，可以直接用于直流伺服电机控制，所以，PWM 控制在中小型电机中也得到广泛应用。下面简述 PWM 控制的原理。

上 6-21a) 是把电机作为三极管的负载，给三极管加上一个宽度较宽的脉冲时的情况。一加上脉冲，电机开始转动，经  $t_1$ s 后达到额定转速。这时流经电机的电流  $I_a$  的变化

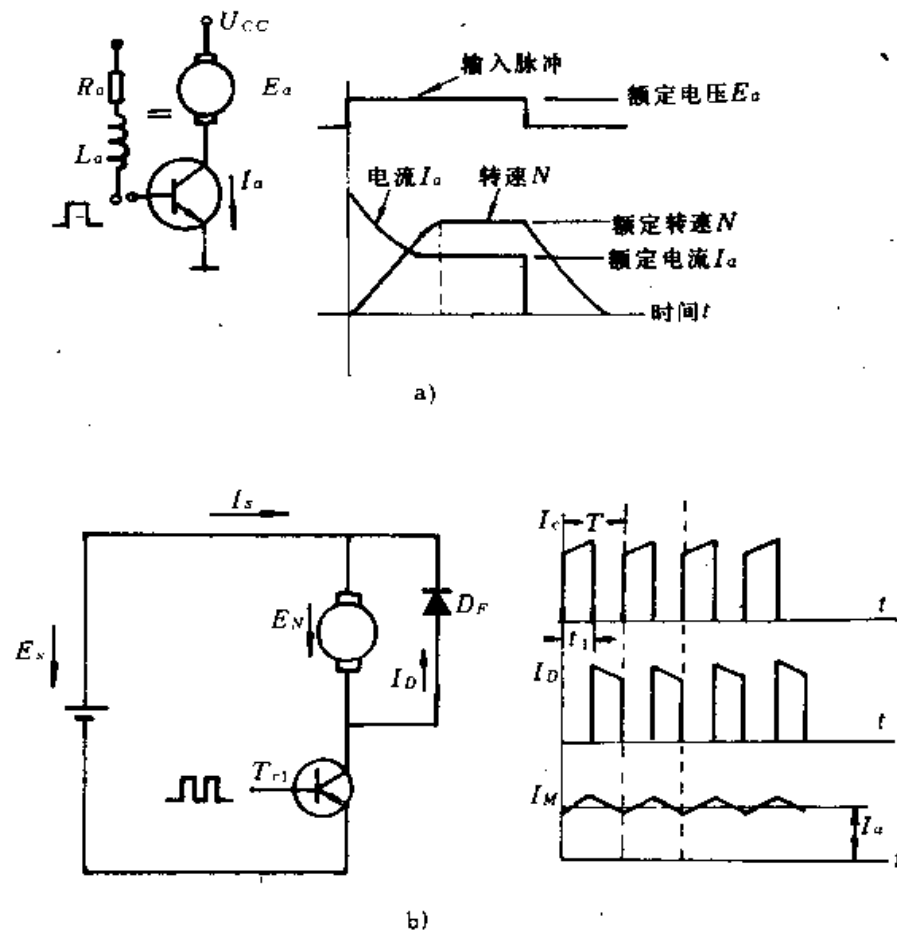


图 6-21 PWM 控制原理

a) 直流电机的脉冲驱动 b) 开关控制的原理

情况如图。输入脉冲一消失，电机转速逐步下降直至停止，这是由于电机本身的惯性所致。应用电机具有惯性这一点，就可以靠三极管驱动电路减小电力消耗。也就是说，当脉冲消失，三极管截止时，依靠惯性，电动机还可转动。

图 6-21b) 所示的是给三极管输入脉冲列，设脉冲列的周期为  $T$ ，三极管  $T_{r1}$  的导通时间为  $t_1$ ，在时间  $t_1$  内流经电机的电流为  $I_M$  (等于  $I_r$ )。然后， $T_{r1}$  截止，若  $T_{r1}$  的负载是电阻，则当  $T_{r1}$  截止时不会有电流流过。但是，电机的电感较大，可以积蓄能量。当把二极管  $D_F$  如图并联到电机上，当  $T_{r1}$  截止时，积蓄的能量就要通过二极管形成闭合回路，电机上就有电流  $I_D$  流过。

图 6-21b) 所示电路有两个优点：一是由于二极管的作用，可以重新利用电机积蓄的能量；二是三极管的开关（集电极-发射极间电流饱和）作用，使三极管本身消耗的电能非常小，利用开关方式驱动电机比起以往驱动方式，电力消耗大大降低。

实际电机控制电路往往也采用 PLL+PWM 控制，既减小了电力消耗，又提高了转速稳定性。

## 七、直流电机的位置伺服系统

直流电机的位置控制方法，一是通过电机急剧地加速和减速进行，一是在到达目标位置前停止，然后靠步进动作接近目标位置。现在，随着伺服电机性能的提高，前一种方法用得越来越普遍。

作为位置控制用电机，除了与速度控制用电机相同的要求，即电气、机械时间常数小（响应快），惯性小外，还要求转矩常数大，以及正/反转时转矩-速度特性相一致（图 6-22）。

图 6-23 是现在广泛使用的位置控制伺服系统的组成示意。这里使用的是小型伺服电机中用得最广的永磁式直流电机。该系统由偏差计数器、D/A 转换器、直流电源、伺服放大器和电机组成。电机轴上连接有用于位置检测的脉冲发生器 PG（如光学编码器等）和用于速度检测的测速发电机 TG。下面简要介绍各部分的作用和位置控制的原理。

### 1. 偏差计数器

偏差计数器是把用数字信号给出的位置指令值和位置检测的信号值进行比较，首先计算偏差（从指令值中减去检测值），再计算出作为偏差函数的速度指令值并输出。这项工作可由微机完成。

可用下面的方法根据位置偏差计算速度指令。

事先把偏差区域分成几部分，例如分成图 6-24a) 所示的四个区域。

(1) 大偏差区域（远离目标位置） 位于该区域时，电机起动后，加速到最大速度，

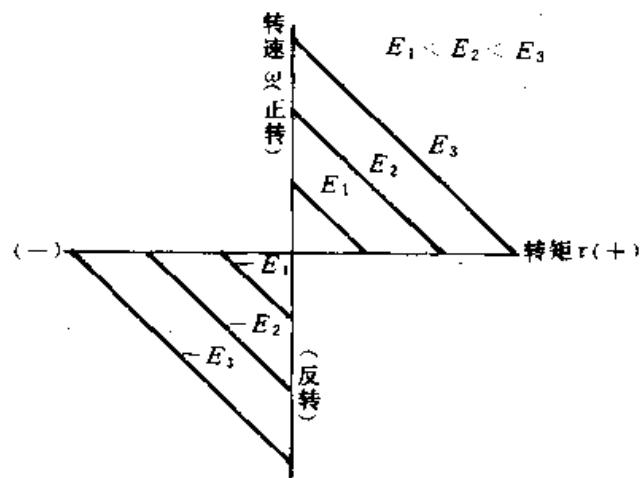


图 6-22 位置控制电机的  $\tau-\omega$  特性



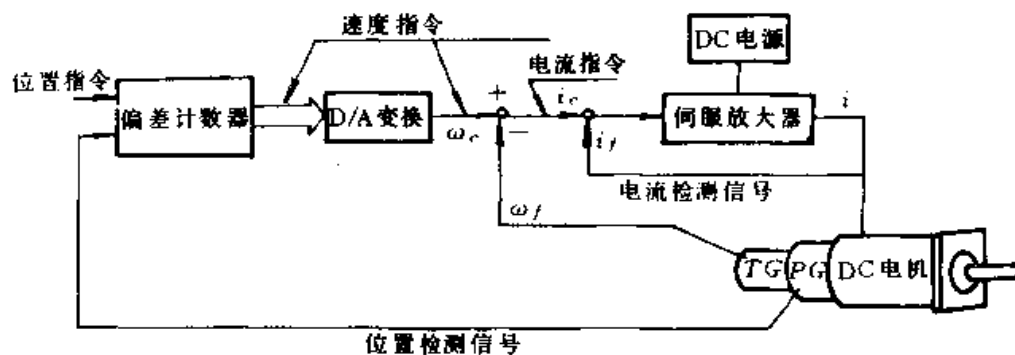


图 6-23 位置控制伺服系统

并以该速度进行恒速控制。

(2) 中偏差区域 (离目标位置较近) 该区域是减速区域, 速度指令  $w_c$  由下式给出:

$$w_c = \sqrt{2\beta\epsilon} \quad (6-34)$$

式中  $\beta$ ——减速度

$\epsilon$ ——偏差

$\beta$  由伺服放大器和电机的额定电流, 电机和负载的转动惯量来决定。

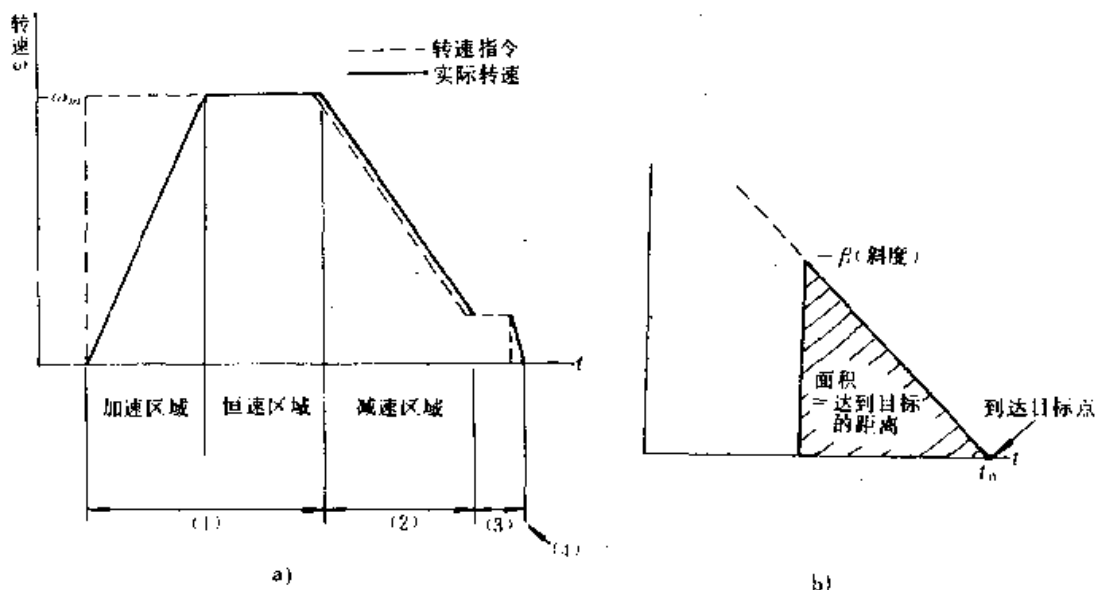


图 6-24 偏差区域划分和转速决定

a) 偏差区域 b) 转速决定

如图 6-24b) 所示, 当电机以减速度  $\beta$  减速时, 在  $t$  时刻的转速  $\omega$  为

$$\omega = (t_0 - t) \beta \quad (6-35)$$

式中  $t_0$ ——到达目标位置的时刻

另外, 根据三角形面积的公式, 偏差  $\epsilon$  为

$$\epsilon = \frac{\beta}{2} (t_0 - t)^2 \quad (6-36)$$

将式 (6-36) 代入式 (6-35), 即得式 (6-34)。

减速度  $\beta$  可由下面的运动方程决定:

$$\begin{aligned} \tau &= (J_M + J_L) \frac{d\omega}{dt} \\ &= (J_M + J_L) \beta \end{aligned} \quad (6-37)$$

式中  $\tau$ ——电机产生的转矩

$J_M$ ——电机转子的转动惯量

$J_L$ ——换算到电机轴上的负载转动惯量

而

$$\tau = K i \quad (6-38)$$

式中  $K$ ——转矩常数, 单位电流的转矩

$i$ ——流经电机的电流

$K$  代表电机本身的特性, 而流经电机的电流  $i$  由伺服放大器允许的电流和不致使电机磁场减弱的允许电流范围决定。

(3) 靠近目标位置 以随时都能停止的恒速进行控制 (当然, 若能以 (2) 的方式减速直达目标位置最好)。

(4) 停止位置 在停止点产生定位力矩。

## 2. D/A 变换

后面的信号处理以模拟量为主, 故要把数字量的速度指令值变换成模拟量。

## 3. 速度反馈

为了得到稳定的控制 (定位时不产生振荡), 在进行位置控制时, 使用了速度反馈。它是把测速发电机 (TG) 产生的与速度成正比的电压作为反馈量 (记为  $w_f$ ) 和速度指令相减, 输出与  $(w_c - w_f)$  成正比的电流指令值。

## 4. 电流反馈

将伺服放大器输出的驱动电流  $i_f$  和电流指令值  $i_c$  进行比较, 如果  $(i_c - i_f)$  为正, 则伺服放大器输出电压升高, 使  $i_f$  增加; 如果  $(i_c - i_f)$  为负, 则伺服放大器输出电压下降,  $i_f$  减小。

## 5. 伺服放大器

这是向电机供给电流的装置。可以是把功率晶体管作为放大器使用的线性伺服装置, 也可以是用双极型晶体管或 MOS 场效应管作开关的 PWM 伺服装置等。

直流伺服电机尽管有转子转动惯量小、响应速度快、可以得到大的瞬时转矩等优点, 但也存在着维护困难的缺点。这是因为直流电机一般要用电刷和换向器进行电流换向, 使用寿命低, 特别是在恶劣环境中使用时。此外, 直流电机转子绕组产生的热量相当大, 这会使线圈本身和绝缘体的温度升高, 要采取强制风冷或其他散热措施。所以随着功率半导体技术和微电子技术的进步, 交流伺服电动机用得越来越普遍。

## 第四节 交流伺服电机及控制

### 一、概 述

与直流伺服电机相比，交流伺服电机具有结构坚固、容易维护、适应一切安装环境以及转子惯量可以设计得很小，能够承受高速旋转等许多直流电机所没有的优点。所以，交流电机的伺服驱动技术也随着电子元件和微电子技术的发展而迅速发展起来。

交流电机种类很多，但宜用作伺服电机的主要是笼型感应电机和永磁式同步电机。

笼型感应伺服电机又分为二相伺服机和多相（多为三相）伺服机。

二相笼型感应电机伺服电路简单，但有电机效率低、力矩有振动和响应性慢等缺点。由于在我国还有应用，本节仍做简要介绍。

三相笼型感应电机的控制方法主要有三种，即转差频率控制、矢量控制和电压-频率比控制。后者多用于开环速度控制，前二者可用于位置、速度控制。

关于永磁式同步电动机，本节将简要介绍一种典型的伺服驱动方式。

### 二、交流电动机的结构

#### 1. 感应电动机

感应电动机的原理示于图 6-25。因其转子由短路环和铜棒构成，形为笼状，故名为笼型感应电动机。通过由定子绕组感应到转子导体的电流和旋转磁场的相互作用，以小于旋转磁场速度的转速旋转。

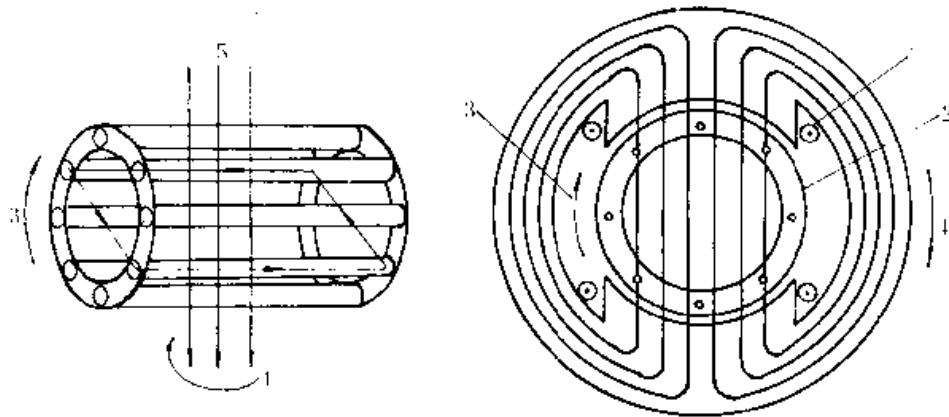


图 6-25 感应电机的结构

1—励磁绕组 2—笼形转子 3—转子旋转方向 4—旋转磁场方向 5—主磁通

电机空载时，以与交流电源频率同步的转速旋转，谓同步转速，用  $n_0$  表示。

$$n_0 = \frac{60f}{P} = \frac{120f}{P} \quad (r/min) \quad (6-39)$$

式中  $f$ ——电枢电流频率，也称一次频率

$P$ ——极对数

$P$ ——极数 ( $P=2p$ )

这时, 因为转子导体与磁通同步旋转, 转子导体中没有电流流过, 因此电枢电流仅仅是产生磁通所必须的励磁电流。

若在电机轴上加负载, 转子转速  $n$  将小于  $n_0$ , 转子导体以  $(n_0-n)$  的速度切割旋转磁场, 这时转子转速可表示为

$$n = (1-s) n_0 \text{ (r/min)} \quad (6-40)$$

式中  $s$ ——转差率

显然

$$s = \frac{n_0 - n}{n_0} \quad (6-41)$$

## 2. 永磁式同步电动机

永磁式同步电机的特点是转子用永磁材料制成, 在定子上装有绕组, 以产生旋转磁场 (后者与感应电机相同)。也就是说, 直流电机中, 电枢是转子, 而交流电机中, 电枢是定子。

## 三、交流伺服电机的控制方式

交流伺服电机的控制方式按控制的物理量, 可以分为电压控制和电流控制。

电压控制的控制对象是加在电机上的电压。例如二相笼型感应电机的伺服系统即属此类。电压控制又可分为幅值控制、相位控制和幅相控制 (即同时控制电压的幅值和相位)。

电流控制是直接控制流过电机的电流。

感应电机的电压-频率比控制, 转差频率控制和矢量控制均可采用电压控制或电流控制。

电压控制的优点是速度控制范围大; 可以进行制动控制。缺点是由于转子输入功率与转矩成正比, 恒转矩负载时, 因转矩与速度无关, 故转子损失与转差率  $s$  成正比。即随着转速的降低, 能量损耗增加, 效率降低。另外, 与电流控制相比, 传递函数阶数高一阶。阶数高时, 为了使伺服系统稳定, 就要牺牲响应特性, 由此导致响应速度慢、力矩有振动等缺点。

此外, 交流伺服电机的控制方式也和直流电机控制一样, 可以分为开环控制和闭环控制。如感应电机的电压-频率比控制一般做成开环控制, 而转差频率控制和矢量控制则为闭环控制。

## 四、交流电机驱动用逆变器

所谓逆变器是把直流逆变为不同频率交流的装置, 在交流电机控制系统中, 它被用作驱动电源。逆变器按功能分为电压型逆变器和电流型逆变器。电压型逆变器用以控制交流电机的端电压, 电流型逆变器用以直接控制交流电机的电流。逆变器按其电压或电

流控制方式又可分为 PWM（脉冲宽度调制）型逆变器和 PAM（脉冲幅度调制）型逆变器。按电压和电流波形可以分为矩形波逆变器和正弦波逆变器。当然还可按逆变器中使用的功率半导体器件等进行分类。

图 6-26a) 和 b) 分别示出了一种典型的电流型逆变器和电压型逆变器的基本电路。

由于电压型逆变器本身具有调节电压的功能，在把交流变直流的整流部分可以采用二极管整流器 [图 6-26b) 中的  $D_1 \sim D_6$ ]，为了得到脉动小的恒压电源，需要使用滤波电容器。另外，将逆变器各支路的功率晶体管 ( $S_1 \sim S_6$ ) 与续流二极管 ( $FD_1 \sim FD_6$ ) 反向连接，以便在交流电机端子上得到与负载无关的逆变器开关元件产生的幅值不变的矩形波电压。

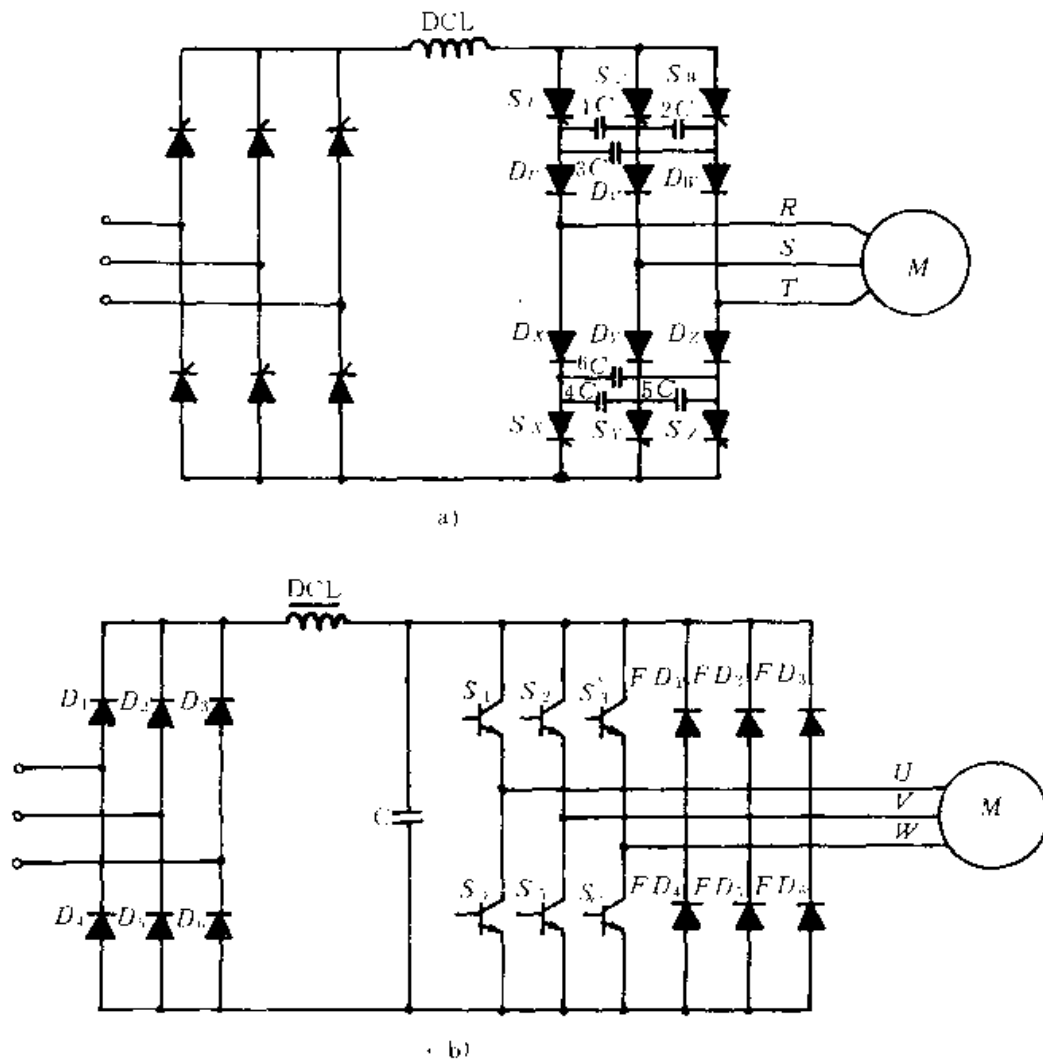


图 6-26 逆变器基本电路

a) 电流型逆变器 b) 电压型逆变器

为了更好地理解电压型逆变器的工作原理，把图 6-26b) 中的功率晶体管的开关作用用理想的机械开关来代替，如图 6-27a) 所示，其电压波形示于图 6-27b)。6 个开关间隔  $60^\circ$  导通  $180^\circ$ ，其通电顺序是  $U \rightarrow Z \rightarrow V \rightarrow X \rightarrow W \rightarrow Y$ 。

电压波形  $V_{u-0}$ ,  $V_{v-0}$ ,  $V_{w-0}$  是电机端子上  $U$ 、 $V$ 、 $W$  与直流电源假想的中性点  $0$  之间

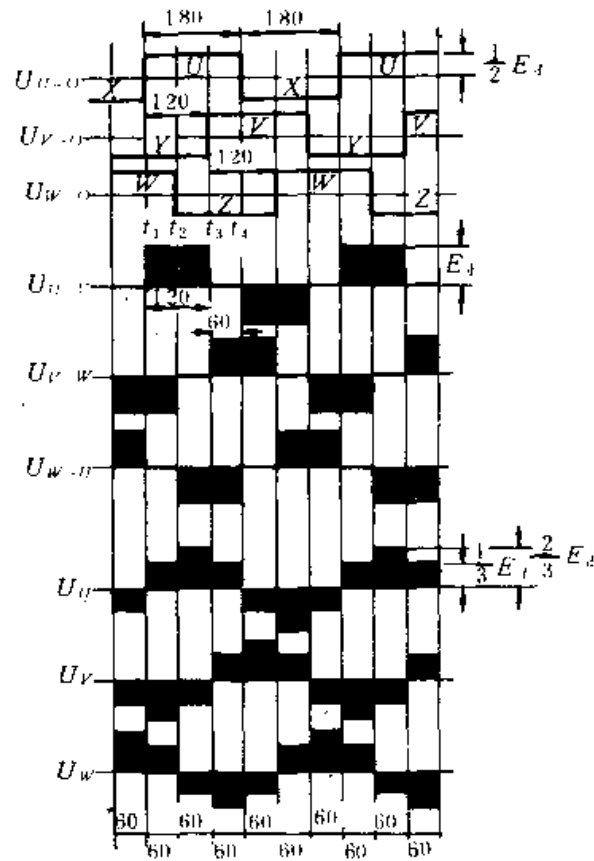
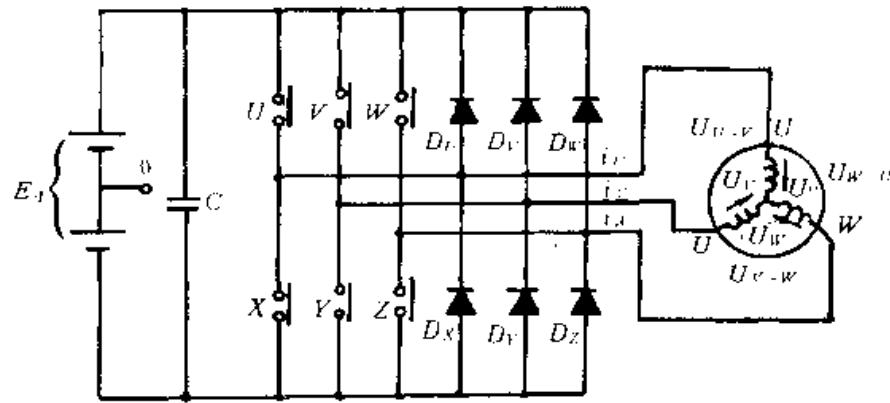


图 6-27 电压型逆变器的工作原理  
a) 简化电路 b) 电压波形

的电压；电压波形  $V_{u-v}$ ,  $V_{v-w}$ ,  $V_{w-u}$  为电机的线电压； $V_u$ 、 $V_v$ 、 $V_w$  表示电机的相电压。

例如， $t_1-t_2$  期间由于开关  $U$ 、 $W$  和  $Y$  闭合而导通，所以出现波峰值为  $E_d/2$  的  $V_{u-o}$ 、 $V_{w-o}$  和  $(-E_d/2)$  的  $V_{v-o}$ 。电机的线电压  $e_{u-v}$  由于是  $V_{u-o}$  与  $V_{v-o}$  之电压差，故其波峰值为  $E_d$ 。另外， $e_{v-w}$  其波峰值为负的  $E_d$ ，而  $e_{w-u}$  为零。此时的电流从电机的  $V$  相、 $W$  相线圈流入，从  $U$  相线圈流出，故  $U$  相电压  $V_U$  波峰值为  $E_d/3$ ，而  $V$  相电压  $V_v$  为  $2E_d/3$  的方波电压。其他期间的相电压也可同样求得。在相电压的作用下，相电流是包含有高次

谐波的近似正弦波，这是由于反电动势存在的结果。

电压型逆变器由于在直流电路中连接了一只大容量的电容器，使直流电源输出阻抗很低，加在电机上的电压基本上不受负载变动的影 响，可以看成恒压源，有利于交流电机的稳定运行。而且一台逆变器可以同时带动多台交流电机运行。

另一方面，在需要再生运转的场合下，直流电路上若不安装能量回收电路（发电机制动电阻或整流器的逆并连接），则直流电压上升。另外，由于直流电路上连接着大容量的电容器，所以整流器内的电流控制困难。由于电容器上有大的能量蓄积，在负载短路或元件损坏时有大的电流放出，难于进行过载保护。这是电压型逆变器的缺点。

电流型逆变器本身不能对输出电压或电流进行调节，故要用可变电源为其输入。图 6-26a) 是通过可控硅整流器对其电压或电流进行相位控制，用直流电抗器 DCL 来平滑电流波形的。它可以看成是恒流源。该电路是串联二极管相间换流的逆变器电路，是最常用的逆变器电路之一。它由 6 个晶闸管  $S_u$ 、 $S_v$ 、 $S_w$ 、 $S_x$ 、 $S_y$ 、 $S_z$  和 6 个二极管  $D_u$ 、 $D_v$ 、 $D_w$ 、 $D_x$ 、 $D_y$ 、 $D_z$  以及 6 个换流电容  $1C$ 、 $2C$ 、 $3C$ 、 $4C$ 、 $5C$ 、 $6C$  所组成。对于晶闸管，只要在控制极上加入触发信号，就很容易使它导通。但要关断它，就必须先把电流降为零，再加反压，且加反压的时间不得小于晶闸管特性所决定的关断时间。如图 6-28a) 所示，加触发信号后，各晶闸管以  $60^\circ$  相位差，按  $S_u$ 、 $S_z$ 、 $S_v$ 、 $S_x$ 、 $S_w$ 、 $S_y$  的次序相继导通  $120^\circ$ ，则其输出相电流是宽  $120^\circ$  的矩形波。而输出电压却近似于正弦波。

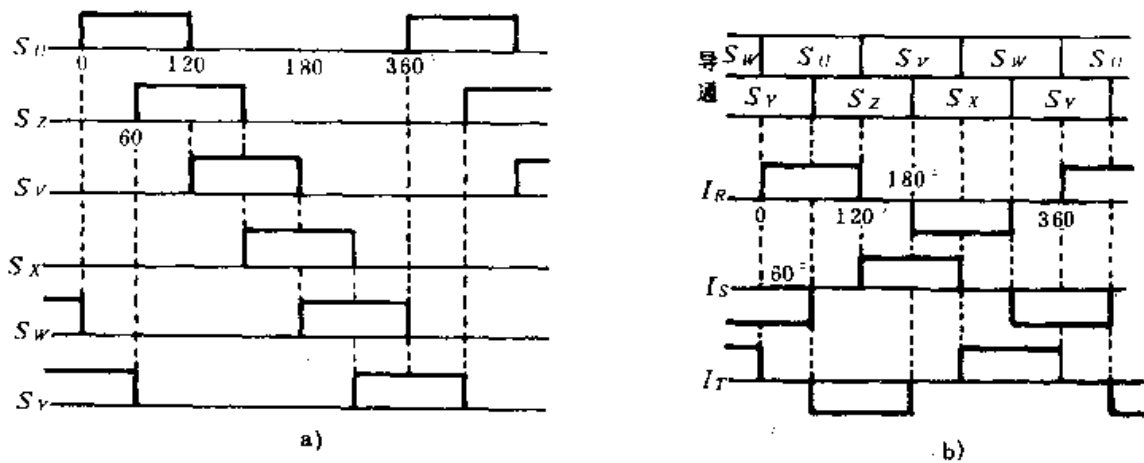


图 6-28 电流型逆变器电压、电流波形

a) 控制极触发信号 b) 相电流波形

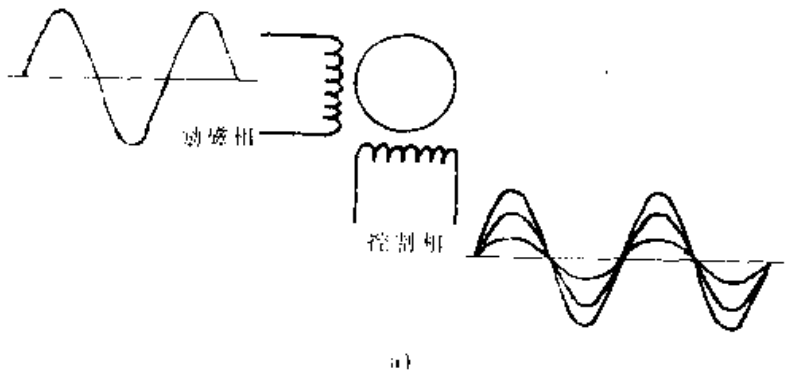
电流型逆变器借助逆变器的频率控制和可控硅整流器的相位控制，易于实现正转、反转、电动、再生制动四象限运行的控制。采用电流型逆变器进行频繁的快速、反向运行，特别是单机的加减速运行控制，比使用电压型逆变器性能优越。电流型逆变器控制的是输出电流的瞬时值，并适于可逆运行，故控制性能和保护性能好。此外还具有结构简单、可靠、经济性好、体积小、运行效率高等特点。

## 五、感应电机的控制

笼型感应电机的伺服机分为二相伺服机和三相伺服机。二相感应电机的伺服控制在 国外已被直流伺服电机和步进电机所取代，三相感应电机的转差频率控制，电压-频率比控制，矢量控制已成为感应电机伺服控制的主流。对于小型感应电机，因矢量控制系统复杂，目前矢量控制还用得不多。

### 1. 二相感应电机的控制

二相感应电机原理如图 6-29a) 所示。与普通笼型感应电机不同，其转子为高电阻的导体。在绕组中的一相（称励磁相）加上一定幅值的交流电压，调节另一相（称控制相）的电压，即可得到如图 6-29b) 所示的速度转矩特性。在一定转矩下，转速的控制是通过改变控制相电压幅值的大小来实现的。图中  $k$  是控制相与励磁相电压幅值之比。这是幅值控制。显然， $k$  越大，相同负载下电机的转速越高。



除了幅值控制之外，保持两相电压幅值不变，通过改变两相电压的相位差，也可得到类似图 6-29b) 的曲线簇，谓之相位控制。

此外，还可同时改变控制电压相对励磁电压的幅值和相位来达到控制的目的，谓之幅相控制。

### 2. 感应电机的转差频率控制

作为伺服感应电机，除二相感应电机外，几乎都采用三相感应电机。所谓转差频率控制和电压-频率比控制都是对三相伺服感应电机而言。

转差频率控制是以平均转矩为控制对象的。图 6-30a) 是常用的由电流型逆变器驱动的转差频率控制的基本构成。所谓转差频率控制是一种闭环控制方法即检测出感应电机的旋转圆频率  $\omega_m$  并进行反馈，将反馈的  $\omega_m$  和给定的转差频率  $\omega_s$  相加（再生时是相减），以决定定子电流圆频率  $\omega$ 。 $\omega_s$  可用下式表达：

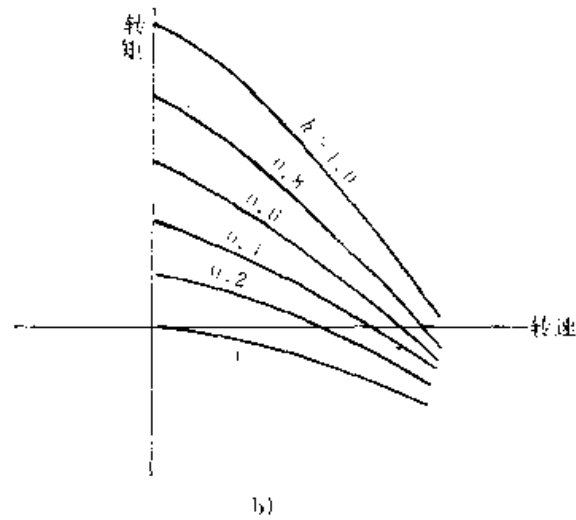


图 6-29 二相伺服机原理和转矩特性  
a) 原理 b) 转矩特性



$$\omega_s = s\omega_0$$

式中  $\omega_s$ ——转差频率  
 $s$ ——转差率  
 $\omega_0$ ——同步转速时对应的圆频率

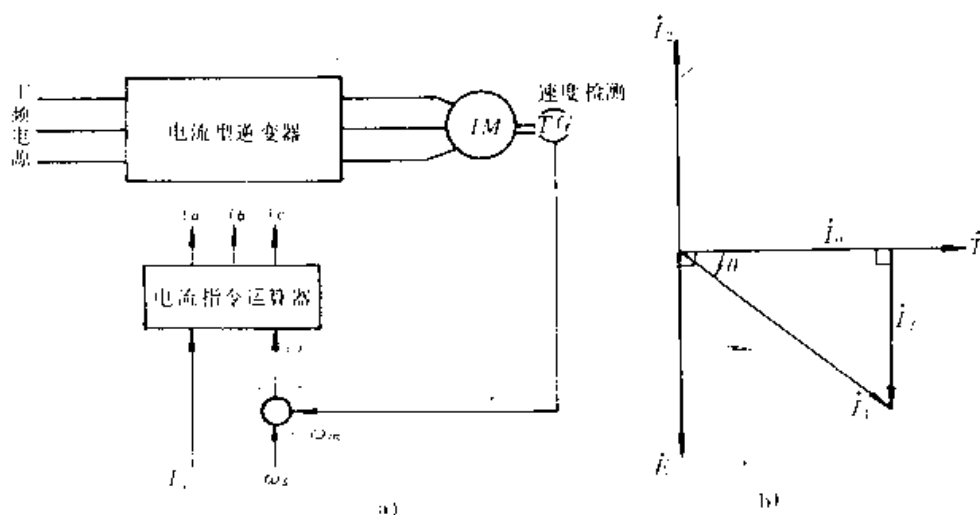


图 6-30 转差频率控制原理  
a) 基本构成 b) 相量图

转差频率控制又分为转差频率固定控制和转差频率可变控制两种。前者转差频率为常数，即把定值转差频率进行相加；而后者是控制转差频率的大小，以得到与之相适应的定子电流。电机的速度控制是通过控制定子电流的大小（图中的基波有效值  $I_1$ ）来实现的。

不难看出，这里的转差频率控制是控制定子电流  $I_1$ （电流的频率和幅值），属电流控制。而定子电压则是由被控的定子电流  $I_1$  决定。

通过分析可知，定子电流  $I_1$  可以分解成两个正交矢量  $I_0$  和  $I_T$  [图 6-30b)]。即

$$I_1 = I_0 + I_T$$

式中  $I_0$ ——相当于直流电机的励磁电流

$I_T$ ——相当于直流电机的电枢电流

把  $I_0$  称为定子电流矢量  $I_1$  的励磁分量， $I_T$  称为  $I_1$  的力矩分量，平均力矩  $T$  与该图中  $I_1$ 、 $I_0$  和  $I_T$  所围成的面积成正比。设  $I_T$  与  $I_0$  的夹角为  $\theta$ ，而  $\text{tg}\theta$  与转差频率  $\omega_s$  成正比。也就是说，励磁力量  $I_0$  和力矩分量  $I_T$  在定子电流  $I_1$  中所占的比例是由转差频率  $\omega_s$  决定的。因此控制转差频率就可以得到各种不同的运行特性。

转差频率为常数时，平均力矩与定子电流有效值的平方 ( $I_1^2$ ) 成正比。由于转差频率不变意味着图 6-30b) 中的  $\theta$  角固定不变，故当力矩变化，即定子电流有效值  $I_1$  变化时，励磁分量  $I_0$  也同时变化。当伺服电机为实现急剧的加、减速运行，需要流过的电流比额定电流大得多时，则会出现磁通饱和，得不到所需的力矩。所以在需要进行急剧加、减

速运行和位置伺服时，不宜采用转差频率为常数的控制。可变转差频率控制即根据所需力矩或定子电流有效值的大小改变转差频率  $\omega_s$ ，也就是改变图 6-30b) 中的角度  $\theta$ ，即使定子电流有效值很大，也可避免磁通饱和，提高电机效率。

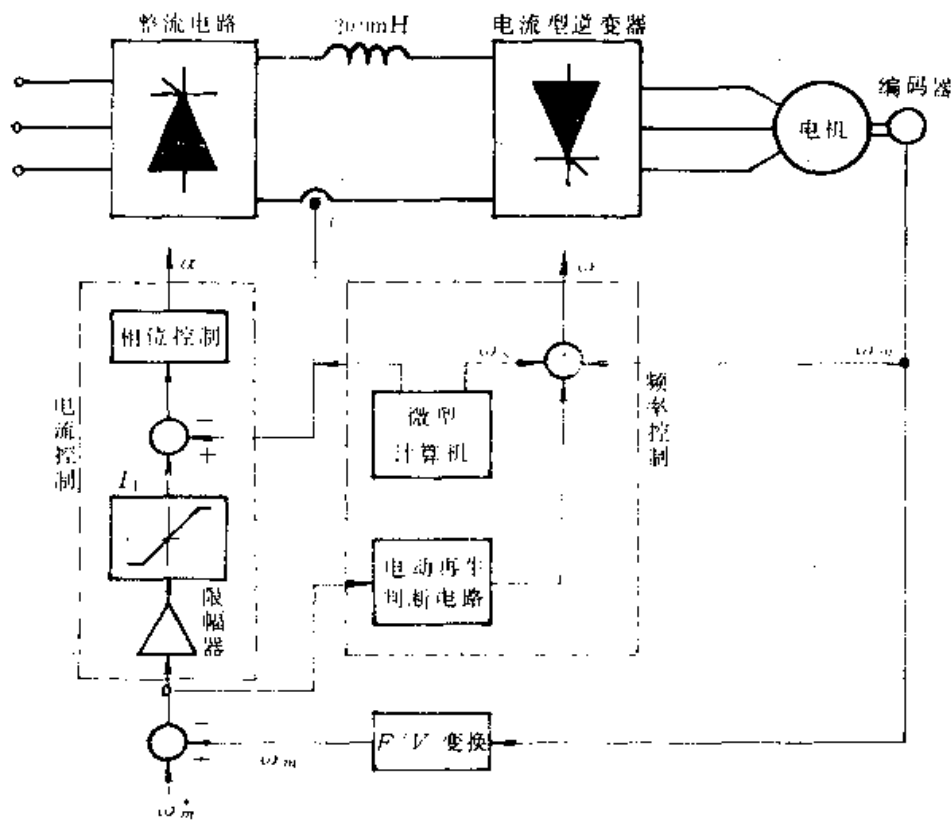


图 6-31 感应电机转差频率控制系统举例

图 6-31 是用电流型逆变器驱动的感应电机的转差频率控制系统。控制电路分为两部分，即控制感应电机定子电流幅值的电流控制系统和在转速圆频率  $\omega_m$  上加上转差圆频率  $\omega_s$  来控制定子电流圆频率  $\omega$  的控制系统。这里，电流控制系统是由模拟电路构成的，频率控制系统是由数字电路构成的。微型计算机根据输入的直流电流，决定转差频率，并转换为数字量输出。为了提高计算精度， $\omega_m$  和  $\omega_s$  的相加（或相减）是用数字量进行的。被检测的转速圆频率  $\omega_m$  经频率-电压 (F/V) 变换成模拟量与指令转速圆频率  $\omega_m^*$  相比较。由于速度给定信号呈阶跃变化，为使输出频率能按照负载电动机的转矩特性和机械系统惯量之间的关系所决定的加、减速率改变，图中的限幅器电路把给定的阶跃速度信号转换为斜坡函数，输出瞬时的定子电流有效值。整流电路的作用是把交流变为直流，并对负载电机的交流功率进行控制。它可由三相全控桥式电路组成，改变控制角  $\alpha$ ，则输出直流电压就发生变化。为了控制逆变器的输出功率，对于自工频电源向电机提供功率的电动状态来说，控制角  $\alpha$  在  $0^\circ \sim 90^\circ$  范围内变化，而对自负载电机向工频电源回馈能量的再生发电状态来说，则在  $90^\circ \sim 180^\circ$  范围内调整  $\alpha$  角。图中，把限幅器电路输出的定子电流有效值与实测值进行比较，以决定控制角  $\alpha$ ，实现对电流的控制。

如上所述，转差频率控制是以感应电机的平均力矩为控制对象的。此后出现的转差频率式矢量控制则对转差频率控制加以发展，以瞬时力矩为控制对象，使得响应速度更快，完全可以取代直流电机进行转速和位置控制。关于感应电机的矢量控制，可以参阅有关文献。

### 3. 感应电机的 $V/f$ (电压-频率比) 控制

所谓  $V/f$  控制就是使逆变器输出电压和输出频率的比值保持恒定的控制方式。

通过分析可知，用感应电机的气隙感应电势和定子频率比 ( $E_0/f$ ) 表示的电机转矩特性如图 5-32a) 所示。如果按照  $E_0/f$  为常数控制，最大转矩  $T_{max}$  保持恒定，而与速度变化无关，低速时转矩也不会减小。但在实际中，气隙电势  $E_0$  不易检测，只好控制定子电压  $V$ ，采用使  $V/f$  保持常数的控制方法。但是，按照  $V/f$  恒定进行控制，由于定子电阻压降的影响，其转矩特性将变成如图 6-32b)。不过，通过在低速区对定子端电压进行补偿，便可得到与图 6-32a) 接近的转矩特性。该特性表明， $V/f$  控制也能适用于恒转矩负载。 $V/f$  为常数的控制，可以采用电压型逆变器，也可以采用电流型逆变器驱动。图 6-33 示出了用电流型逆变器驱动的  $V/f$  控制系统。

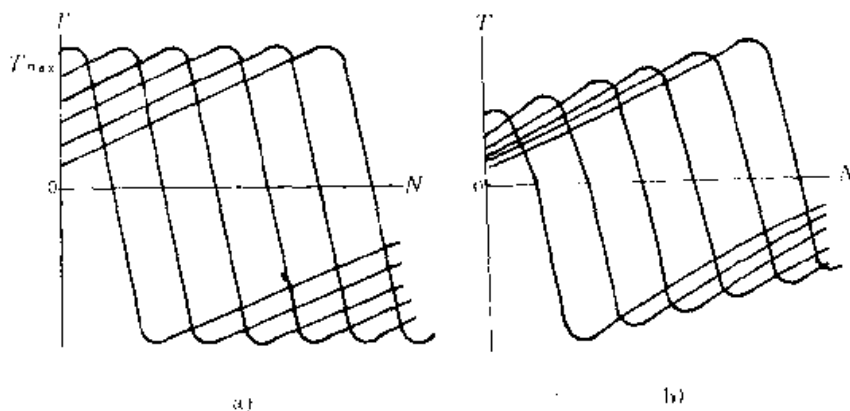


图 6-32 感应电机的转矩特性  
a)  $E_0/f$  为常数时 b)  $V/f$  为常数时

控制电路是由若干个环节组成，它们的功能可解释如下。

- (1) 速度给定器 速度给定器用以设定逆变器输出电压和频率基准信号。
- (2) 加减速限制电路 它的作用与图 6-28 中限幅器电路相同。即把速度给定器给定的阶跃速度信号转换为斜坡函数。
- (3) 绝对值运算器 在四象限运行时，加、减速限制电路的输出信号的极性，随负载电动机的转向正、负改变。有必要采用绝对值运算器，将该信号变换为极性单一的电压和频率的基准信号。
- (4) 振荡器 振荡器接收到绝对值运算器的输出频率指定信号后，便产生频率为输出频率  $6n$  倍的振荡脉冲 ( $n$  为整数)。之所以把振荡脉冲设定为  $6n$  倍，是因为逆变器电路晶闸管每隔  $1/6n$  周期便导通。
- (5) 分频器 将振荡器的振荡脉冲，相应地分配到各自的晶闸管，以决定各晶闸管导通与否。

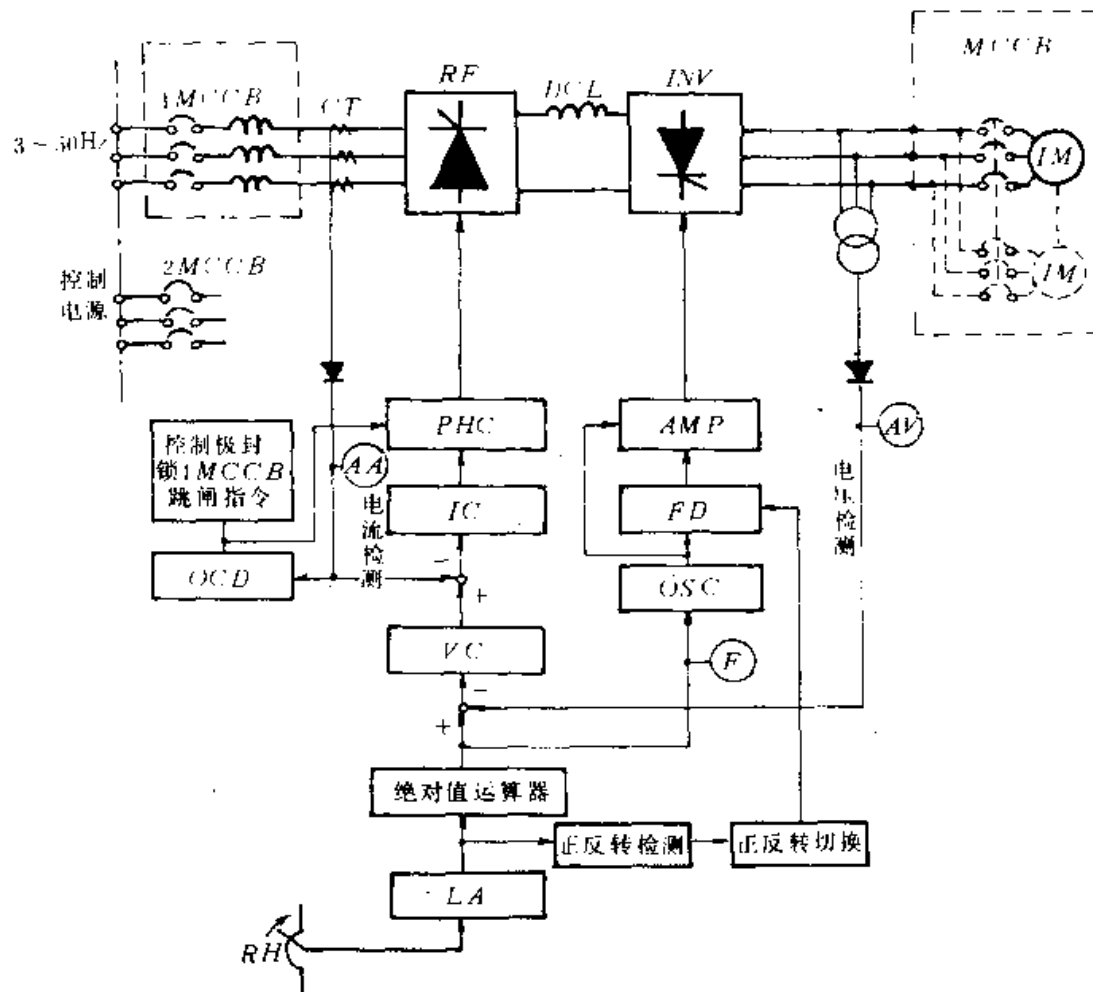


图 6-33 V/f 控制的电流逆变器型调速系统

RF—整流器 INV—逆变器 OCD—过电流检测 PHC—相位控制  
 IC—电流控制 VC—电压控制 LA—加减速限制电路  
 AMP—脉冲放大器 OSC—振荡器 FD—分频器 RH—速度指定

(6) 脉冲放大电路 为把各自的控制极触发信号送往由分频器所决定的晶闸管，可用振荡器的振荡脉冲来调制分频器的输出脉冲。调制后的信号经放大、脉冲变压器隔离，作为控制极触发信号，送往逆变器电路各晶闸管。

(7) 电压检测和电压控制 逆变器输出电压为闭环控制，所以用电压检测电路检测输出电压，然后在电压调节器上，将检测信号与输出电压的给定值比较，以实现自动控制。电压调节器的输出，将是逆变器输出电流的给定信号。

(8) 电流检测和电流控制 逆变器输出电流和输入电流总是相等的，由于逆变器输出电流是可变频率，电流检测复杂，故在整流器的输入端进行电流检测。在电流调节器上，将检测信号与输出电流的给定信号比较，以实现自动控制。

(9) 移相电路 用以确定整流器 RF 控制角  $\alpha$  的大小，并形成触发信号。根据整流器 RF 交流输入电压的相位和电流调节器输出信号的组合，决定整流器 RF 各晶闸管的触发

时序。

(10) 正反转检测和正反转切换电路 用以判断加、减速限制电路输出信号的极性，然后控制正、反转切换电路。正、反转切换电路的作用是通过切换逆变器晶闸管导通次序切换其输出的相序，改变电机转向。若将逆变器输出频率变为零，并使特定的两晶闸管导通，还可对电机实行直流制动。

$V/f$  控制电流型逆变器伺服系统的特点是：①可实行电机的并联运行，这是由于输出频率是开环控制，允许几台电机同时起动或同速运行。②便于四象限运行，仅切换控制极触发信号即可更换转向，适用于频繁加减速及正反转运行。③在负载突变或繁重使用情况下，也能稳定运行，调速范围广，这是因为电流控制为闭环控制，输出电流控制稳定，响应性好。④易于制动，可使负载电机实现直流制动，若与再生制动配合，易于实现快速停止和定点停止。⑤可靠性和保护性能好。

与转差频率控制电流逆变器伺服系统相比，由于  $V/f$  控制系统的转速控制是开环控制，结构简单，几乎无需按电机特性进行调整，但控制精度低于前者。

## 六、永磁式同步电机的控制

同步电机的驱动系统可以是电压型逆变器，也可以是电流型逆变器。但用电流型逆

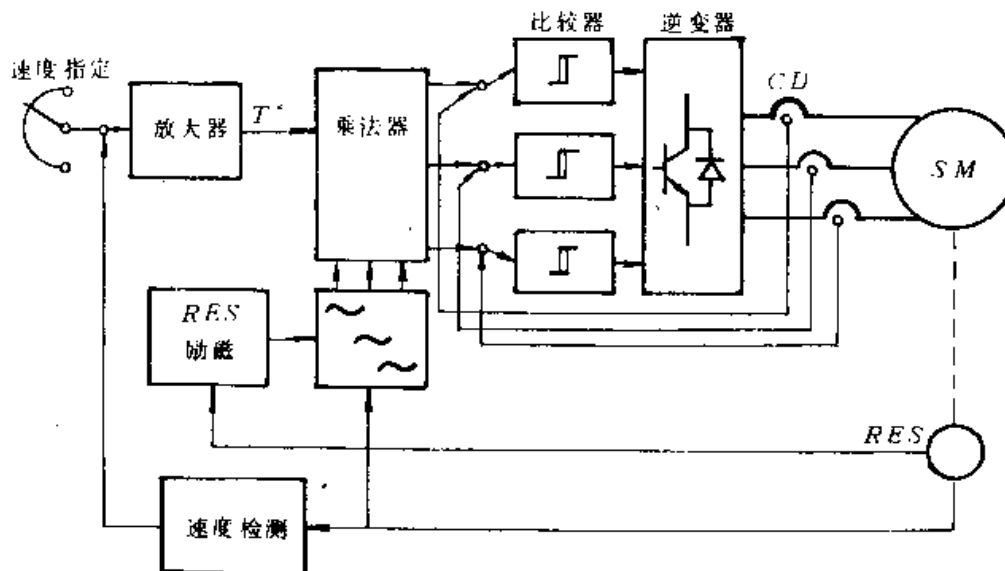


图 6-34 同步电机伺服系统  
RES—旋转变压器 CD—电流检测器

变器调速运行时，如显示出电流源特性，端电压的相位会经常波动，容易使同步机产生振荡，可使用锁相环控制，使之成为电压源特性，实际中也常用这种控制方式使多台同步机同速运行。如果将 PWM 电压型逆变器用于同步电机的调速，不仅可以使功率因数接近于 1，而且可以通过电流控制，使流过的电流接近正弦波。这样，在低速情况下，也能做到平稳运行，作为伺服驱动系统，其性能不亚于直流伺服系统。

图 6-34 是同步电机伺服系统的典型电路。速度给定值与速度检测值进行比较放大，作为转矩基准值  $T^*$ 。将直接连在同步电机上的旋转变压器的输出进行同步整流，形成与转角对应的正弦波。再与转矩基准值  $T^*$  相乘，得到三相电流的基准值。电流基准值与电流检测器检测的实际值相比较，作为电压信号输入给比较器，比较器的另一端输入一定频率的三角波信号，比较器的输出则为被正弦波调制的 PWM 信号，用它作为电压型逆变器的控制信号(图 6-35)。加在同步电机上的电压为 PWM 信号，其电流波形近似为正弦波。

使用永磁式同步电机实现高速响应，其控制电路要比感应电机的矢量控制电路简单得多。此外，由于没有电刷，因此，与直流电机相比，它有如下优点：一是堵转状态下的过载能力增加；二是几乎不用维修。

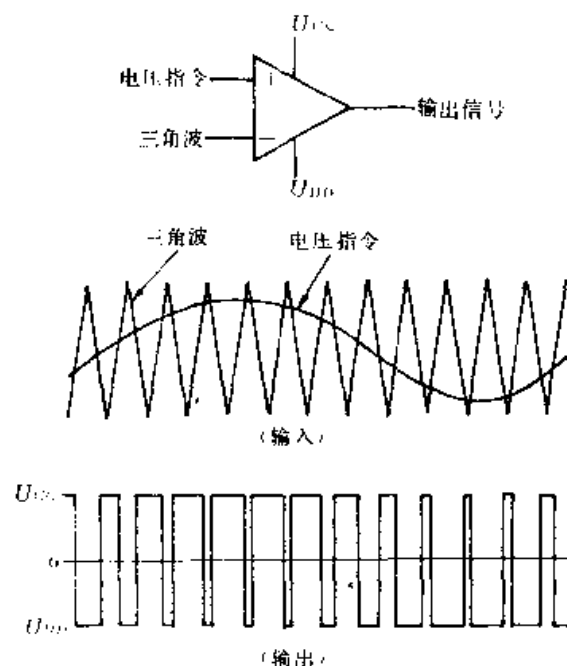


图 6-35 PWM 信号产生原理

## 第五节 电磁阀及液、气动元件

电磁阀在机电一体化系统中被当作电气-机械接口使用，而各种液、气动缸及马达则作为机电一体化系统中重要的执行器。有关各类液、气动马达及一般油缸、气缸的工作原理与设计，在各种液压传动与气压传动书籍中介绍较多，此处不再讲述。本节主要介绍几种作为液压、气动执行元件控制接口的电磁阀，如电液伺服阀、电液比例阀等。

### 一、普通电磁阀

普通电磁阀可将电气系统与机械系统联系起来，它在温度控制、空调系统、医疗器械、发酵装置、数控机床、工业机器人、工业检测等方面都得到了广泛的应用。特别是近年来在工业自动化方面，它已成为不可缺少的一个重要组成部分。

#### (一) 普通电磁阀的组成、工作原理和分类

普通电磁阀大体上由电磁铁和主阀两部分组成。它以电磁铁的电磁作用力使主阀芯换向，从而实现流体（气体、液体）通路的通断或切换。如图 6-36 所示。

普通电磁阀品种繁多，按它的工作介质可分为空气压用、液体用、真空用等；按其工作位置和通路数的多少可分为二位二通、二位三通、二位四通、三位四通、三位五通等。二位电磁阀的工作状态有常闭和常通两种，三位电磁阀则具有中间封闭、中间泄漏、中间加压等多种中位机能。电磁阀的工作方式有直动式和先导式；按所配用电磁铁的结构形式它又可分为干式和湿式两类，每一类又有交流型、直流型等几种。另外，普通电磁阀还有多种不同的通径和不同的最高工作压力。

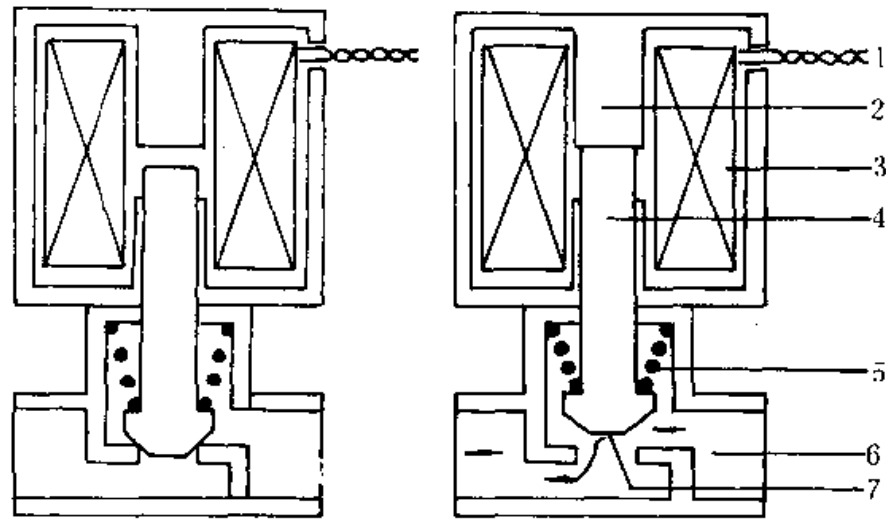


图 6-36 普通电磁阀

1—线圈引出线 2—固定铁芯 3—线圈 4—可动铁芯 5—弹簧 6—流体 7—阀芯

## (二) 普通电磁阀用电磁铁

干式阀用电磁铁的电磁铁部分和阀体能分开，更换电磁铁容易。电磁铁工作间隙介质为空气。湿式阀用电磁铁的可动铁芯在油液中运动，因此与干式电磁铁相比，具有切换冲击和噪声小、散热快、寿命长、可靠性好等优点。

交流电磁铁一般用 220V、50Hz 的电源，直流电磁铁常用电压为 24V。电源电压太高，电磁铁线圈容易发热烧坏；电压太低，吸力小，影响电磁阀的工作可靠性。交、直流电磁铁的特点比较如表 6-4 所列。

表 6-4 交、直流电磁铁的特点

交流电磁铁	直流电磁铁
不需要特殊电源	需要专门的直流电源或整流装置
感性负载，温升时吸力变化较小	电阻性负载，温升时吸力下降较大
通电后立即产生额定吸力	滞后约 0.5s 才达到额定吸力
断电后吸力很快消失	滞后约 0.1s 吸力才消失
吸力特性近于双曲线	吸力特性平缓
铁芯材料用硅钢片，货源多	铁芯材料用纯铁，货源少
多数为冲压件，适于批量生产	机加工量大，精度要求较高
阀芯卡住时，线圈容易烧坏	阀芯卡住时，不会烧坏线圈
体积大、寿命低、工作可靠性差	体积小、寿命长、工作可靠

## 二、电液伺服阀

电液伺服阀既是电液转换元件，也是功率放大元件，它能将输入的小功率电模拟信

号转换为大功率的液压能（流量、压力）输出，在电液伺服系统中将电气部分与液压部分连接起来，实现电液信号的转换与放大。

### （一）电液伺服阀的组成、分类和工作原理

电液伺服阀通常由力矩马达（或力马达）、液压控制阀、反馈（或力平衡）机构三部分组成。

电液伺服阀按输出液压信号的不同，可分为流量伺服阀和压力伺服阀；按液压控制阀的级数可分为单级、二级、三级伺服阀；按前置级液压控制阀的型式可分为喷嘴挡板式、射流管式、滑阀式、偏转射流式等；按功率级的反馈型式可分为力反馈、直接反馈、电反馈、压力反馈、流量反馈、动压反馈等。

下面以双喷嘴挡板式力反馈两级电液流量伺服阀为例，说明电液伺服阀的工作原理。

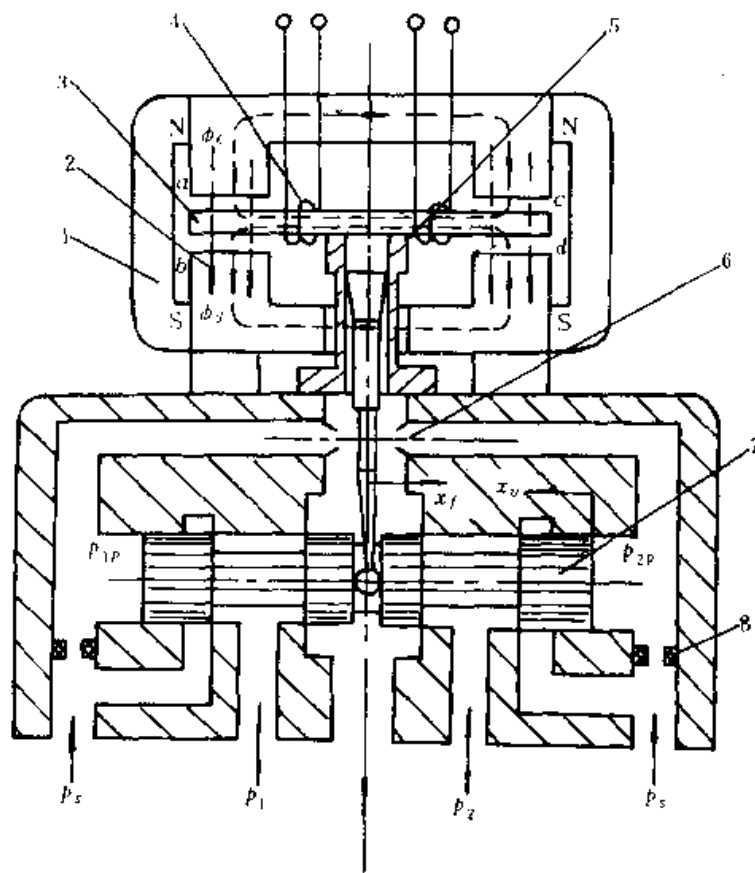


图 6-37 电液伺服阀工作原理图

- 1—永久磁铁 2—导磁体 3—衔铁 4—线圈  
5—弹簧管 6—喷嘴 7—滑阀 8—固定节流孔

图 6-37 是这种阀的工作原理图。这种伺服阀通常采用桥型永磁式力矩马达。薄壁弹簧管支承衔铁挡板组件，并作为喷嘴挡板液压控制阀的液压密封。反馈杆从衔铁挡板组件中伸出，其端部小球插入滑阀阀芯中间的槽内，构成阀芯对力矩马达的力反馈。当力矩马达的线圈无信号电流输入时，衔铁由弹簧管支承在上下导磁体的中间位置，永久磁铁在 4 个气隙中产生的极化磁通  $\phi_m$  是相同的，力矩马达无力矩输出。此时，挡板处于两个喷嘴的中间位置， $p_{1p} = p_{2p}$ ，滑阀阀芯也处于中间位置，伺服阀无液压信号输出。若有信号电流输入到力矩马达的线圈时，产生控制磁通  $\phi_c$ ，其大小和方向由信号电流决定。如图，在气隙 b、c 中， $\phi_c$  与  $\phi_m$  方向相同；而在气隙 a、d 中， $\phi_c$  与  $\phi_m$  方向相反。因此，b、c 中的合成磁通大于 a、d 中的合成磁通，在衔铁上产生逆时针方向的磁力矩，使衔铁挡板组件绕弹簧管支承旋转。同时使挡板向右偏转，喷嘴挡板的右间隙减小、左间隙增大，控制压力  $p_{1p} < p_{2p}$ ，滑阀阀芯左移。阀芯带动反馈杆端部小球左移，使反馈杆产生弹性变形，对衔铁挡板组件产生一顺时针方向的反力矩。当作用于衔铁挡板组件上的磁力矩与弹簧管反力矩、反馈杆反力矩等诸力矩达到平衡时，滑阀停止运动，取得一个平衡位置，并有相应的流量输出。力矩马达的输出力矩、挡板位移、滑阀位移都依次与输入信号电流成比例



地变化，在负载压差一定时，阀的输出流量也与信号电流成正比。当输入信号电流反向时，阀的输出流量也反向。所以这是一种电液流量伺服阀。由于滑阀位置是通过反馈杆变形力反馈到衔铁上使诸力矩平衡所决定的，所以称为力反馈式。又因为采用了两级液压放大，前置级采用了喷嘴挡板式，所以称其为喷嘴挡板式力反馈两级电液流量伺服阀。它是最常用的一种形式。

## (二) 特性及主要性能指标

电液伺服阀是电液伺服系统的关键部件，其特性对整个系统的性能影响很大。电液伺服阀的技术性能可由四方面的具体内容来表示：电气性能，液压性能，工作性能，环境条件及受环境影响的性能。图 6-38 为其工作性能曲线，由性能曲线可以确定出伺服阀的各项工作性能指标：线性度、对称度、分辨率、滞环、压力增益、内漏、频率响应等。

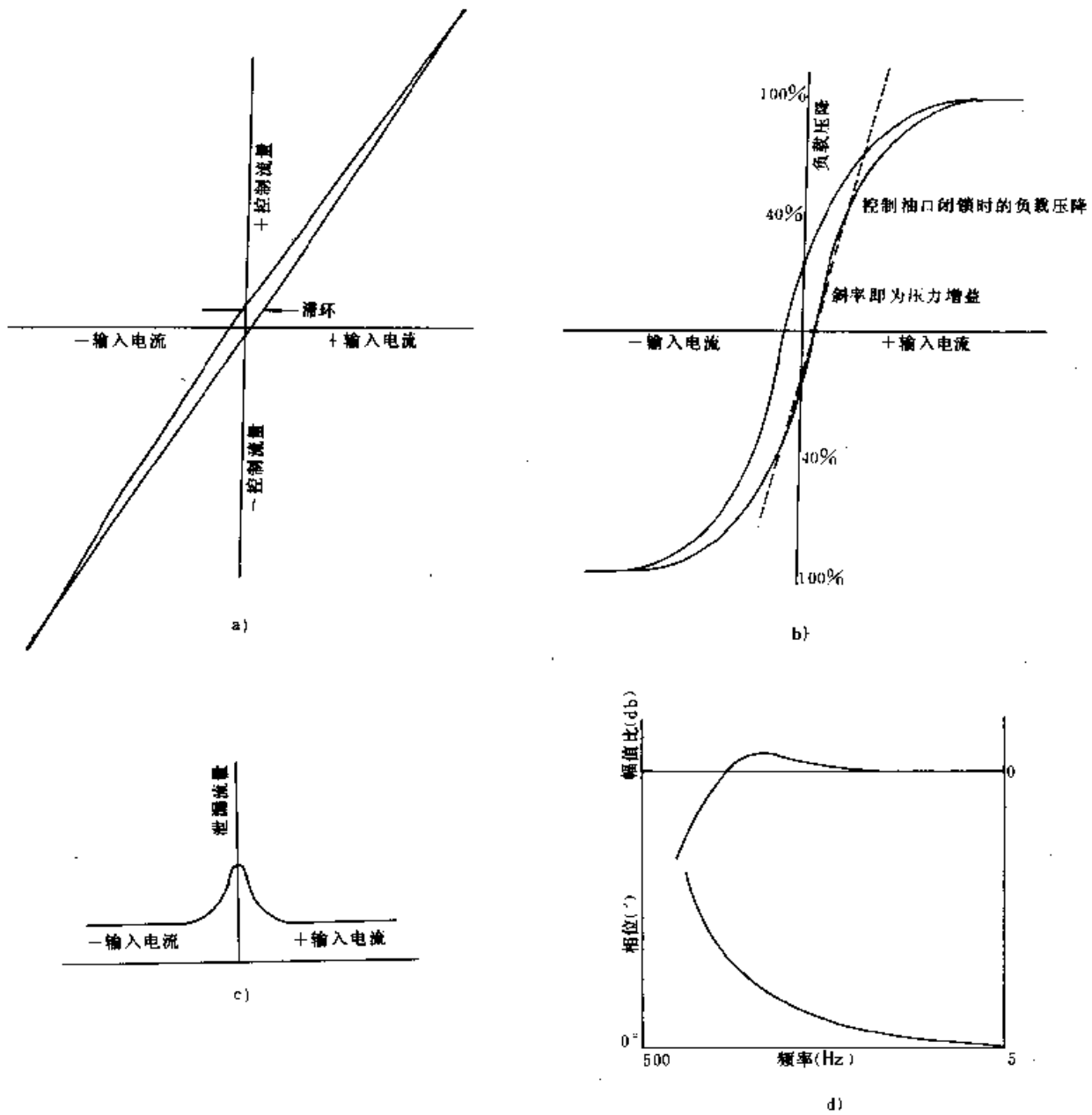


图 6-38 电液伺服阀的工作性能曲线

线性度——流量（压力）曲线的直线性。

对称度——两极性流量（压力）增益的一致程度。

分辨率——使阀的输出流量（压力）发生变化所需的输入电流最小增量。取其最大值与额定电流之比，以百分数表示。

滞环——产生相同的流量（压力）往和返的输入电流之差的最大值。

压力增益——压力曲线的斜率。

内漏——负载流量为零时，从供油口到回油口的总流量，以 L/min 为单位。

频率响应——当恒幅正弦输入电流在某一频率范围内变化时，压力、流量与输入电流的复数比。频率响应常以幅值为  $-3\text{dB}$  和相角为  $-90^\circ$  时所对应的频率来度量，分别称为幅频宽与相频宽。

零偏——为使阀处于零位所需的输入电流，以对额定电流的百分比表示。

重叠——滑阀处于零位时，固定节流边与可动节流边之间的轴向相对位置关系。

### （三）应用

由于电液伺服阀具有体积小、结构紧凑、功率放大系数高、线性度好、死区小、灵敏度高、动态性能好等优点，它已被广泛地应用于工业设备、航空航天及军用领域的各种电液位置、速度、力伺服系统中。

在选择电液伺服阀时应注意，阀的工作压力、额定流量和动态响应等性能必须满足系统的使用要求。使用中要注意油的过滤及油路的清洗。喷嘴挡板式伺服阀过滤精度为  $10\mu\text{m}$ ；液压油可用 22 号透平油或 YH10 液压油；油温控制在  $30\sim 45^\circ\text{C}$ 。

## 三、电液比例阀

比例阀是介于普通液压阀和电液伺服阀之间的一种液压阀。它可以接受电信号的指令，连续地控制液压系统的压力、流量等参数，使之与输入电信号成比例地变化。与普通液压阀相比，它能大大提高液压系统的控制水平；与电液伺服阀相比，虽然它的性能有些逊色，但是结构简单，成本低。在许多应用场合里，比例阀是不可缺少的。

### （一）电液比例阀的组成、分类和工作原理

电液比例阀由比例电磁铁和液压阀两部分组成，前者将电控制器输入的电信号按比例地、连续地转换为机械力和位移输出，后者接受这种机械力和位移之后，按比例地、连续地输出压力或流量。

电液比例阀根据输出液压信号的不同可以分为 4 类：电液比例压力阀、电液比例流量阀、电液比例换向阀和电液比例复合阀。其中前两类为单参数控制，后两类为多参数控制。

下面以电液比例压力阀为例介绍比例阀的工作原理。

常见的比例压力阀有比例溢流阀和比例减压阀。比例溢流阀有直动式与先导式两种；比例减压阀有二通式和三通式。

直动式比例溢流阀如图 6-39 所示。用行程控制比例电磁铁取代普通直动式溢流阀中的调压手轮。这种比例电磁铁是为改善阀的性能而开发的，差动变压器提供电反馈，使电磁铁的行程更准确。由于行程控制比例电磁铁输出位移，即弹簧座的位置与输入电信

号成正比，因而压力设定值也与输入电信号成正比。

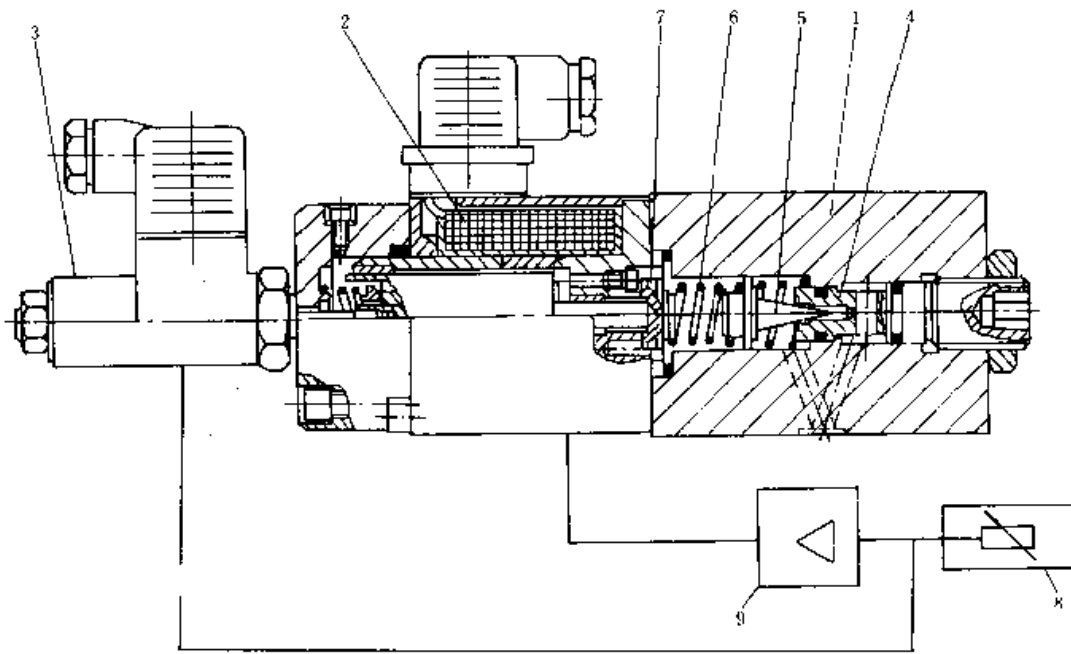


图 6-39 直动式比例溢流阀

1—阀体 2—比例电磁铁 3—差动变压器 4—阀座 5—阀芯  
6—调压弹簧 7—弹簧座 8—电位器 9—带信号/反馈比较器的控制放大器

对于使用压力较高的场合，可采用先导式比例溢流阀，它由比例压力先导阀和主阀两部分组成。其先导阀部分相当于一个直动式比例溢流阀。

比例调速阀是在普通调速阀的基础上，将手调装置改装成比例电磁铁而成。它能用电信号成比例地控制油液的流量而与压力变化无关。如果将其与单向阀并联，则可组成电液比例单向调速阀。

比例方向阀属于多参数控制比例阀，它既可以控制油液的流动方向，又可以控制流量的大小。

### (二) 电液比例阀的应用

电液比例阀主要用于没有反馈的回路，在有些场合，如进行位置控制或需要提高系统的性能时，电液比例阀也可用于闭环系统中。比例阀可用于实现遥控、代替开关阀、控制变量泵、控制重物的加速度和减速度、实现负载补偿等。使用比例阀可以减少系统中元件数量，简化系统。

比例阀在使用中应注意工作油温需控制在  $25\sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，推荐油液粘度为  $20\sim 100\text{mm}^2/\text{s}$ ，要求过滤精度为  $10\mu\text{m}$ 。

## 四、电液数字阀

### (一) 概述

用数字信息直接控制的阀，称为电液数字控制阀，简称数字阀。数字阀与伺服阀、比

例阀相比，具有结构简单、工艺性好、价格低廉、抗污染能力强、重复性好、工作稳定可靠、功耗小等优点。数字阀可以直接与计算机接口，不需要 D/A 转换器。在微机实时控制的电液系统中，它部分取代了比例阀和伺服阀的工作，为计算机在液压领域中的应用开拓了新的方向。电液数字阀已在塑料注射机、压铸机、运输线、机床、飞行控制系统等方面得到了应用，具有广阔的应用前景。

用数字量进行控制的方法有许多种，其中用得最多的是脉宽调制 (PWM) 和由脉数调制 (PNM) 演变而来的增量控制法。增量式数字阀虽比较成熟，但这种结构与步进电机直接组成的数控液压马达和液压缸之间还各有所长。脉宽调制式数字阀控制的流量不宜太大，适合于较小的流量或作为先导级使用。

数字阀是各国正在进行开发的新型液压控制阀。国外以日本、美国、德国、英国、加拿大较为领先。国内一些单位也在进行数字阀的研究工作，并有了一定进展，但要实现应用和推广，还需进一步的努力。

### (二) 数字阀控制系统的工作原理和组成

增量式数字阀是用步进电机作电-机械转换器的阀。这种阀的技术较成熟，应用较广泛，国外已有系列产品。图 6-40 是增量式数字阀控制的电液系统方框图。由计算机发出

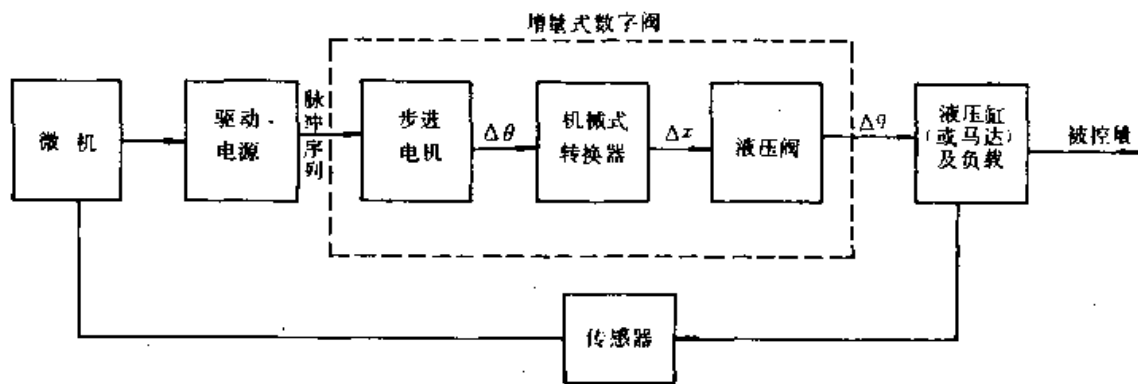


图 6-40 增量式数字阀控制系统方框图

需要的脉冲序列，经驱动电源放大后使步进电机按信号动作。步进电机转动时，带动凸轮或螺纹等机构使转角  $\Delta\theta$  转换为位移量  $\Delta x$ ，从而带动液压阀阀芯移动一定的距离。因此，根据步进电机原有的位置和走的步数，可得到数字阀的开度。这种根据脉数信号 (PNM)，使步进电机在原有步数的基础上增加或减少一些步数以达到控制目的的方法称为增量法。用这种方法控制的阀称为增量式数字阀。

脉宽调制 (PWM) 式数字阀控制系统工作时，由计算机根据控制要求发出相应的脉冲信号，经脉宽调制放大器将脉冲信号放大送给高速开关数字阀，以开启时间的长短来控制流量。目前国内外对脉宽调制式数字阀都很重视，已取得不少成果，预期今后将逐步有产品问世。

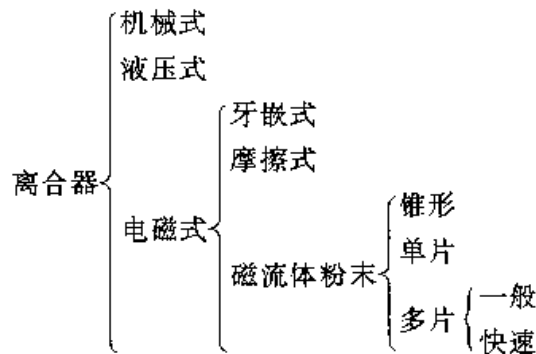
## 第六节 离合器及驱动

### 一、概 述

离合器的作用是利用较小的输入信号和输入功率，控制按一定速度转动的输入轴（驱动轴）和输出轴（从动轴）的耦合程度来进行工作。按工作方式离合器可分成：开关型——其耦合程度或为零，或为最大；连续型——其耦合程度随输入的大小连续变化。

离合器的主要优点有：①可以传递很大范围的间断性转矩，最大可达上千牛米。②输入电信号小，故前级放大器功率小。③加速度可达几十万弧度/秒<sup>2</sup>，因此可用于电机无法实现的加速度的场合。④快速离合器可有较高的响应频率，达15~20Hz。⑤离合器通常具有安全保护能力，安装使用灵活方便。所以，离合器在自动化设备中应用广泛，除作为一般开/关执行器外，也经常用于响应频率要求较高的驱动中，如数控、仿形等驱动。

离合器按其结构可分成如下类别：



### 二、电磁摩擦离合器

#### 1. 结构

一般电磁摩擦离合器结构如图6-41所示。当激磁线圈通电时，其固定电磁铁部分吸引可动铁芯使之与摩擦板接触压紧，从而使主动轴带动从动轴一起旋转。电流断开后，通过弹簧使铁芯与电磁铁脱离。

电磁离合器按使用条件分干式和湿式；按导电方式则分有滑环式和无滑环式。一般可根据不同要求选用标准通用的离合器，不合需要时才设计专用的。

#### 2. 电磁离合器设计

电磁离合器设计主要是计算电磁铁的几何尺寸和电气参数。

电磁铁设计时主要应考虑转矩要求。计算时仅按普通电机全负载转矩是不够的，而应按总负载转矩的150%~300%进行。下面以平板形单片摩擦、Π

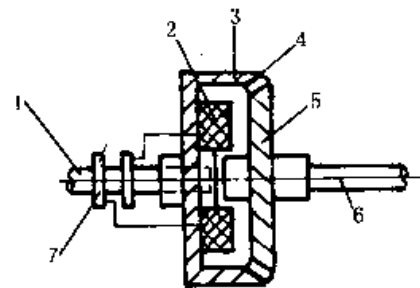


图6-41 电磁摩擦离合器

1—主动轴 2—线圈 3—轭铁 4—摩擦板  
5—可动铁芯 6—从动轴 7—滑环

形直流电磁铁计算为例，说明计算步骤。

设所需转矩为  $M$  ( $\text{N} \cdot \text{m}$ )，则电磁铁牵引力应为

$$F = \frac{M}{\mu r} \quad (\text{N}) \quad (6-42)$$

式中  $r$ ——摩擦板平均半径 ( $\text{m}$ )

$\mu$ ——摩擦板摩擦因数

由于 II 形直流电磁铁的空气隙可看作两个气隙的串联，故有

$$F = \frac{2 \times 10^7}{8\pi} B_g^2 \cdot S \quad (\text{N}) \quad (6-43)$$

式中  $B_g$ ——气隙的磁通密度 ( $\text{T}$ )，约取 0.95

$S$ ——气隙部位的截面积 ( $\text{m}^2$ )

设铁芯的磁势为气隙的 20%，可有总磁势

$$NI = \frac{2B_g x}{\mu_0} \times 1.2 \times 10^3 \quad (\text{A}) \quad (6-44)$$

式中  $N$ ——线圈匝数

$I$ ——激磁电流 ( $\text{A}$ )

$\mu_0$ ——空气磁导率，取  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$

$x$ ——空气隙长度 ( $\text{m}$ )，一般取为 0.0001~0.0003

式 (6-42)、(6-43)、(6-44) 给出了有关电磁铁几何尺寸与电气参数的计算公式。

摩擦板材料常用石棉橡胶或铜基、铁基粉末冶金制品，其摩擦因数约为 0.3~0.4。也有采用金属材料如灰铸铁、钢的，虽摩擦因数较小，但耐磨性好。

### 3. 应用特性

图 6-42a) 表示出此种电磁摩擦离合器的牵引力-行程特性。图 b) 则为其速度-转矩特性。

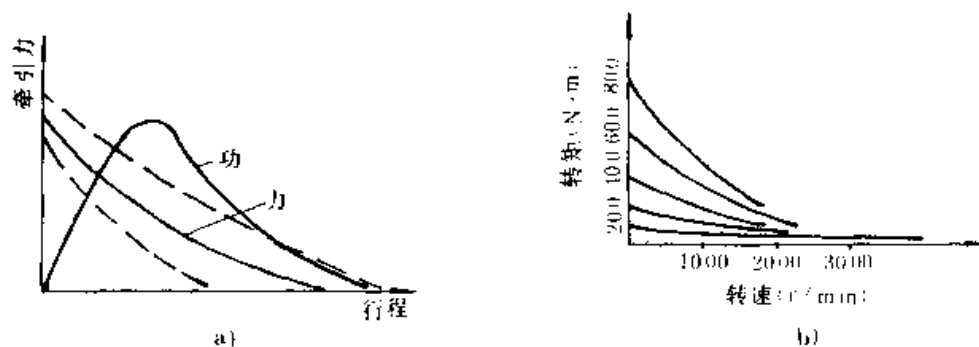


图 6-42 电磁离合器工作特性

a) 牵引力-行程特性 b) 速度-转矩特性

### 4. 快速电磁摩擦离合器

快速电磁离合器由于其动作频率高达 15~20Hz，故在数控、仿形、自动定位等对动

作时间及频率有较高要求的传动中作为执行元件而得到较多应用，其结构如图 6-43 所示。主要由铁芯、线圈、衔铁、弹簧片、摩擦片，连接子等组成。为达到快速动作的目的，在其设计和驱动电路上具有一定特点。

(1) 结构设计特点 摩擦片为干式，并布置在线圈之外，使磁力线不穿过摩擦片。衔铁采用特殊材料做成的梅花片状弹簧支承连接，无运动摩擦，易于实现高频反复动作。结构材料一般选用强度较好的钢材，不像一般离合器用硅钢或纯铁，从而能减小频繁机械动作引起的变形。

(2) 快速驱动电路 为减少机械和电气时间常数，快速电磁离合器在使用中必须配以高性能的驱动电路，这也是机电结合获得高性能的一个例子。

快速电磁离合器驱动是采用一种过激磁电路，在刚开始通电时，能提供过载的电流。图 6-44 为驱动电路图。图中  $R$  为离合器线圈电阻， $R_1$  为串联可变电阻， $R_2$  为保护电阻， $Z$  为整流二极管， $C$  为电容器。离合器本身工作电压为 24V。通电时以  $R_1$  作为加速电阻（因电气时间常数  $t_{\text{电}} = \frac{L}{R}$ ，电阻增大会使  $t_{\text{电}}$  下降），并提高初始供电电压一倍（为 48V）。这样可使衔铁动作时间和接通时间大为减小。断电时通过  $RC$  产生振荡使之迅速退磁。其中  $R_2$  可使断电时间减小。但  $R_2$  太小会使断电时反电势太大，一般取  $R_2 = 5 \sim 10R$ 。并联电容  $C$  用以抑制反电势。三极管是为了保证线圈电感向电容充电的速度，不使断开时间受影响。

表 6-5 列出了国产快速电磁离合器有关技术参数。

表 6-5 快速电磁离合器技术参数

项 目	型号	
	DLMK—2.5	DLMK—5
额定动力矩/N·m	25	50
空转力矩/N·m	0.2	0.35
接通时间/s	0.08	0.12
断开时间/s	0.025	0.04
线圈额定电压/V	24	24
线圈导线直径/m	0.00035	0.00038
线圈匝数	980	960
线圈电阻/ $\Omega$	30	28
消耗功率/W	19.2	20.6
摩擦片允许最大相对转速/ $r \cdot \text{min}^{-1}$	3500	3000
质量/kg	2	3

### 5. 离合器使用安装特点

离合器使用时的安装设计应注意下面一些问题。

(1) 离合器安装位置 摩擦片需经常调整更换，故应将离合器设置在装拆方便之处。

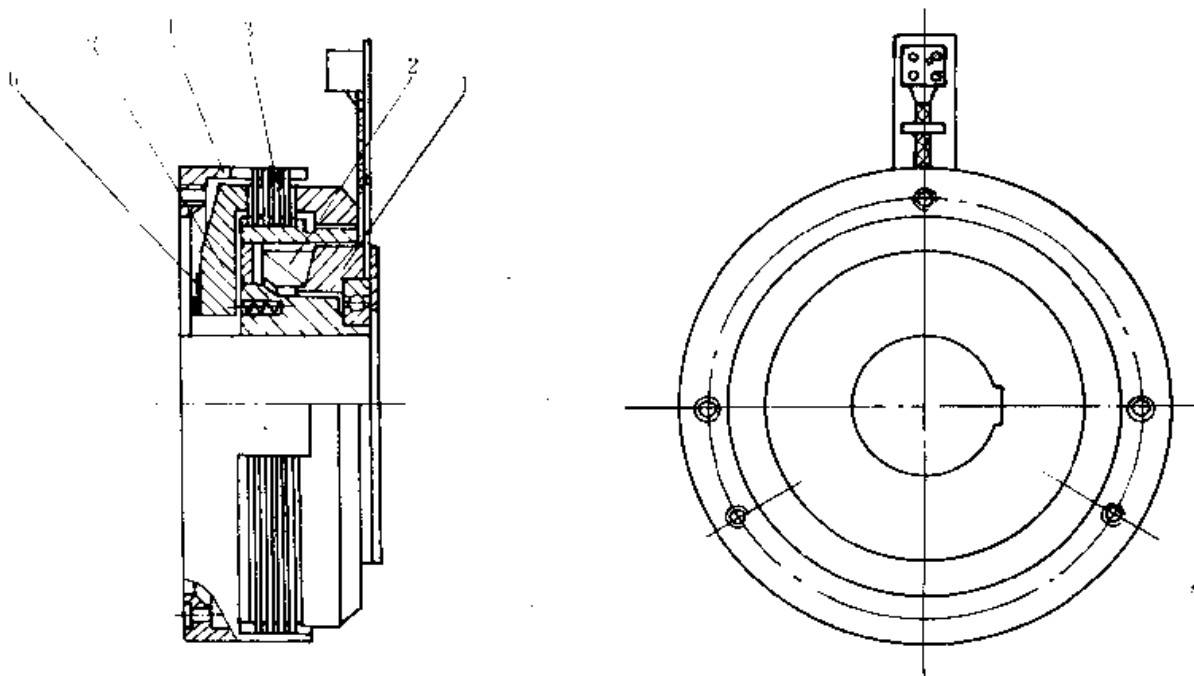


图 6-43 快速电磁离合器结构

1—铁芯 2—线圈 3—摩擦片 4—连接子 5—衔铁 6—弹簧片

干式摩擦片因不能带润滑油，故离合器与齿轮箱应分隔开，并有隔油措施。

(2) 合理设计传动比及选择离合器主从边 离合器加速负荷的时间可用下式表示：

$$\tau_c = \frac{0.1Jn}{M_c - M_L} \quad (6-45)$$

若加速负荷较轻，可近似认为离合器达到额定力矩后，其加速起动也就结束，则可有

$$\tau_c = \sqrt{\frac{Jn\tau_b}{5M_b}} \quad (6-46)$$

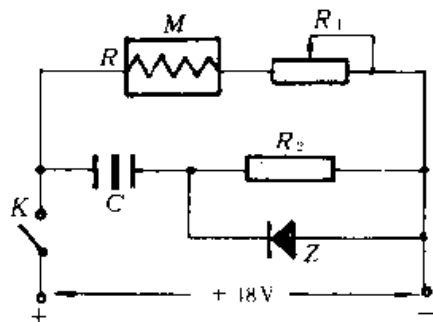


图 6-44 快速电磁离合器驱动电路

式中  $\tau_c$ ——离合器加速时间 (s)

$J$ ——折算到被动侧的等效转动惯量 ( $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ )

$n$ ——安装轴的转速 (r/min)

$M_c$ ——离合器动力矩 ( $\text{N} \cdot \text{m}$ )

$M_L$ ——起动时负荷力矩 ( $\text{N} \cdot \text{m}$ )

$\tau_b$ ——离合器力矩上升时间 (衔铁吸引时间) (s)

$M_b$ ——离合器升高到 80% 时的动力矩 ( $\text{N} \cdot \text{m}$ )

由式 (6-46) 可见，为使加速时间  $\tau_c$  减小，离合器从动侧转动惯量应尽量减小。设



计时可采取如下措施：安装位置应使转动惯量较大的离合器磁轭部分保持旋向不变，经常换向启停的应是惯量较小的衔铁部分；当负载侧系统转动惯量很大时，应选择适当的减速传动比以获得较小的等效转动惯量。这些措施对其他类型的离合器同样适用。

### 三、其他种类离合器

#### 1. 磁流体离合器（磁粉离合器）

磁流体离合器的工作原理是在两个可相对转动的铁轮中放入磁性粉末或它与硅油的混合物。当激磁线圈加上磁场时，它就失去流动性而粘接起来，并利用剪切阻力来增强两铁轮间的结合度，从而传递力矩。由于对激磁电流容易控制，因此可对离合器平滑地进行线性控制。通常在需要作连续动作的离合时使用。

#### 2. 磁滞离合器

磁滞离合器的工作原理是在输入轴的线圈流过直流电流，使设在输出轴上的磁滞损耗大的强磁性材料的环磁化，并由其磁性吸力产生磁滞转矩。此种离合器由于没有摩擦部分，所以寿命长、并能适应冲击载荷。它可作为耦合度随输入大小而连续变化的连续动作型离合器使用，也可作制动器。但其放大率较小，约为5~20。

此外还有如涡流离合器、晶体离合器、电动型离合器等多种离合器型式，在此不再逐一叙述。

## 第七章 机电一体化系统与控制理论

### 第一节 控制理论概述

前面，已经介绍了机电一体化系统中各种设备和元器件的工作原理及其应用。在工程实际中，这些设备和元器件不是独立存在的，而是相互联系，构成一个有机的整体，也就是构成一个完整的系统以适应一定的工作要求。下面，以几个简单的控制系统为例，说明控制系统的构成。

#### 一、数控位移伺服系统

数控伺服系统是一个非常典型的机电一体化控制系统，图 7-1 是一个数控位移伺服系统的简化原理图。在这个系统中，直流伺服电机通过齿轮副带动丝杠旋转，使工作台移动。直流伺服电机的转速受电机输入电压  $V_m$  控制。工作台位移距离由位移传感器检测，得到数字信号  $P_L$ ，送入计算机与指令位移信号  $P_r$  相比较，得到偏差信号  $P_e$ ，即  $P_e = P_r - P_L$ 。信号  $P_e$  经 D/A 转换和信号放大后，由数字信号变为模拟电压信号  $V_c$ ， $V_c$  与速度检测器给出的与电机速度成正比的电压  $V_g$  相减后，得到控制电压信号  $V_a$ ， $V_a$  经功率放大则为伺服电机输入电压  $V_m$ 。这样，就构成了带有速度反馈的位移伺服控制系统。这里，速度反馈是为了改善系统的动态特性，这将在后面章节详细说明。从原理上说，仅有位移反馈，无速度反馈，系统仍可工作。这时， $V_m$  仅受信号  $P_e$  的影响。当给定一个指令位移值  $P_r$  时，开始由于工作台位置离指定位置相距很远， $P_e$  较大， $V_c$  较大， $V_m$  也较大，伺服电机转速较高，工作台快速移动。随着工作台位移加大； $P_L$  加大， $P_r$  不变，则  $P_e$  减小，因此， $V_m$  减小，伺服电机速度减慢，直至  $P_e = 0$  时， $V_m = 0$ ，伺服电机停止转动，工作台停止移动，固定在某一个与  $P_r$  相应的位置上。若指令信号  $P_r$  不断变化，则工作台的位置也会跟随  $P_r$  的变化而变化。

#### 二、废水酸度控制系统

废水酸度控制系统的原理如图 7-2 所示。此系统用于使排出的工业废水酸度保持一定。酸性工业废水流入管道，在管道中部设有混合器，混合器上有一个装有石灰的容器，石灰进入混合器的排放量受电机转速控制，而电机转速受到其输入电压的控制。输入电压  $V(t)$  由酸度控制器根据实测出水 pH 值与给定的 pH 值之差决定。当实际酸度大于要求酸度时，加大石灰排放量，使其酸度降低，反之，则减少石灰排放量。这样就可以保持排出的废水酸度在要求范围内。

可以把以上两个控制系统抽象为图 7-3 所示的框图。实际上，对任何一个控制系统，都可以给出类似的框图。

对于数控位移伺服系统，输入是指定的位移，输出是工作台实际位移，控制过程是

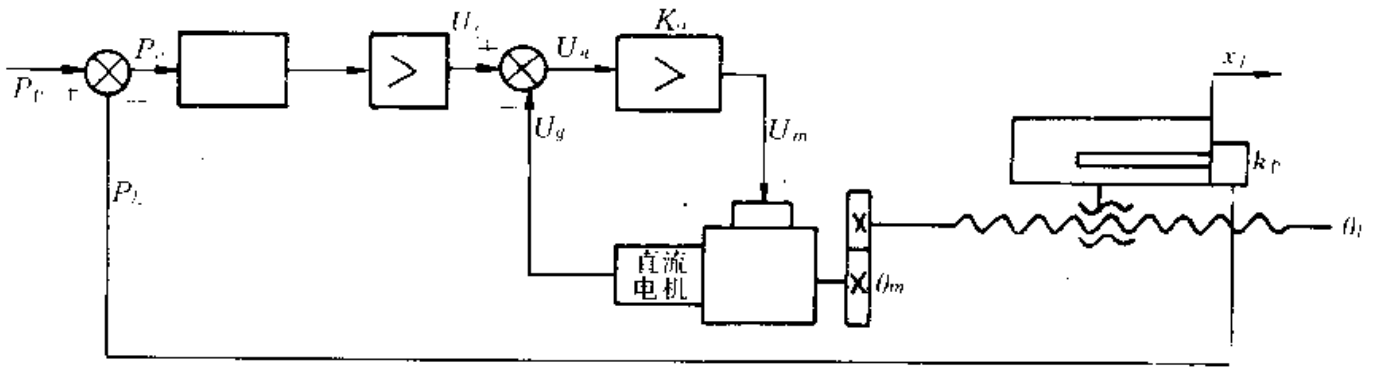


图 7-1 数控位移伺服系统

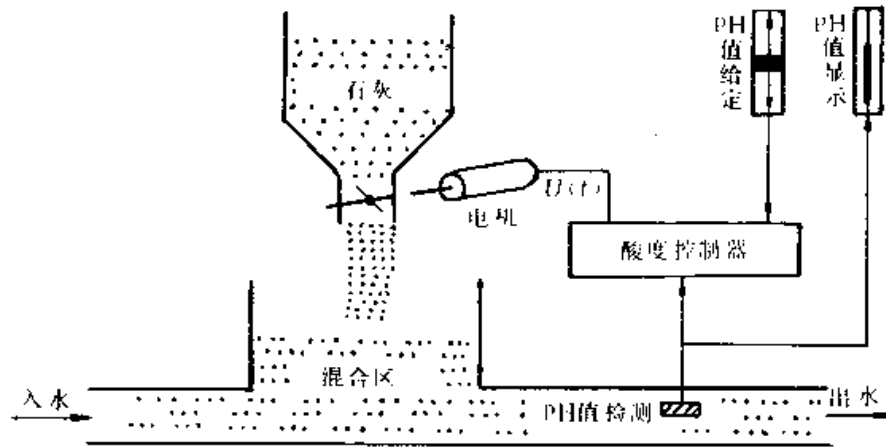


图 7-2 废水酸度控制系统

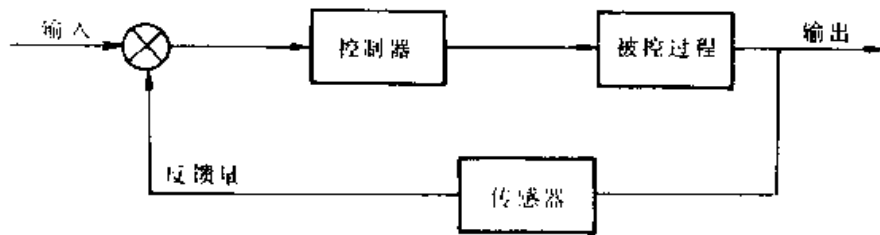


图 7-3 控制系统原理框图

电机及机械传动系统。反馈环节是位移传感器，控制器是数字计算机。而对于酸度控制系统，输入量是指定的酸度值，输出为实际出水酸度值，控制过程是石灰排放设备与酸碱中和反应过程，反馈环节是酸度测定计。控制器可以是一种专门仪器，也可以是计算机。以上两个实例中各变量的物理性质有着根本的不同，但作为一个控制系统的构成原

理却是类似的。这样对于实际中千姿百态的各种控制系统，有可能用一种普遍的理论和方法对其性质进行分析，从而找出对其进行改进，或使其工作在最佳状态的途径。

控制理论所包含的内容是很多的，但概括起来主要有两个方面：系统分析和系统设计。所谓系统分析，是指怎样对一个已知系统的性能进行分析，而系统性能，则包括稳定性，快速性和准确性等几个方面。所谓系统设计，是指对于一定的被控系统，怎样设计控制器使整个系统性能得到改进或达到最佳。

## 第二节 控制系统的数学模型

### 一、数学模型的基本概念

前面，通过简单的控制系统实例，对工程实际中的控制系统有了定性的了解，而要对其性能作出定量分析，首先必须建立系统的数学模型。那么，什么是系统的数学模型呢？笼统地说，系统中输入、输出及各变量之间的相互关系，它们所遵循的一组数学方程式就是系统的数学模型。通常各变量均为时间的函数，它们之间的数学关系，要用一组微分方程来表示。要对系统进行分析，实质上就是对表征这个系统的数学方程式求解。由此可见，一个系统数学模型的建立，是能够正确地分析这个系统的最重要的前提。

### 二、传递函数的概念

为了分析方便，对于线性连续系统（即可用线性微分方程组表示的系统），常常用传递函数作为系统的数学模型。传递函数是建立在拉氏变换基础上的。拉氏变换可以将关于时间  $t$  的微分方程转化成关于算子“ $s$ ”的代数方程，这给分析和运算带来许多方便。

何谓传递函数？传递函数定义为“当初始条件为 0 时，输出量与输入量的拉氏变换之比。设某一系统，输入量用  $r(t)$  表示，输出量用  $c(t)$  表示，系统微分方程的标准形式为：

$$\begin{aligned} a_0 \frac{d^n c(t)}{dt^n} + a_1 \frac{d^{n-1} c(t)}{dt^{n-1}} + \dots + a_{n-1} \frac{dc(t)}{dt} + a_n c(t) \\ = b_0 \frac{d^m r(t)}{dt^m} + b_1 \frac{d^{m-1} r(t)}{dt^{m-1}} + \dots + b_{m-1} \frac{dr(t)}{dt} + b_m r(t) \end{aligned} \quad (7-1)$$

根据拉氏变换的性质，有：

$$\begin{array}{ll} L [c(t)] = C(s) & L [r(t)] = R(s) \\ L [c'(t)] = sC(s) + c(0) & L [r'(t)] = s \cdot R(s) + r(0) \\ L [c''(t)] = s^2 C(s) + c(0) & L [r''(t)] = s^2 R(s) + r(0) \\ + c'(0) \dots & + r'(0) \dots \\ L [c^{(n)}(t)] = s^n C(s) + c(0) + c'(0) & L [r^{(m)}(t)] = s^m R(s) + r(0) + r'(0) \\ + \dots + c^{(n-1)}(0) & \dots + r^{(m-1)}(0) \end{array}$$

若初始条件全部为 0，即：

$$r(0) = 0, r'(0) = 0 \dots r^{(n-1)}(0) = 0;$$

$$c(0) = 0, c'(0) = 0 \cdots \cdots c^{n-1}(0) = 0$$

对式 (7-1) 等号两端分别进行拉氏变换则有： $a_0 s^n C(s) + a_1 s^{n-1} C(s) + \cdots + a_n C(s) = b_0 s^m R(s) + b_1 s^{m-1} R(s) + \cdots + b_m R(s)$

根据定义，输出量  $c(t)$  与输入量  $r(t)$  之间的传递函数为：

$$G(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{b_0 s^m + b_1 s^{m-1} + b_2 s^{m-2} + \cdots + b_m}{a_0 s^n + a_1 s^{n-1} + a_2 s^{n-2} + \cdots + a_n}$$

由此可见，系统传递函数  $G(s)$  依赖于系统的微分方程，它与系统微分方程是相互对应的。因此，系统的微分方程和传递函数都可以作为系统的数学模型。通过反拉氏变换，可以由传递函数求出微分方程的解：

$$\begin{aligned} \therefore G(s) &= \frac{C(s)}{R(s)} \\ \therefore C(s) &= G(s) \cdot R(s) \\ c(t) &= L^{-1}[C(s)] = L^{-1}[G(s) \cdot R(s)] \end{aligned}$$

### 三、典型环节的数学模型

对于一个复杂的控制系统，要建立它的数学模型，一般相当繁复和困难。一个系统通常由机械的、电气的、或其他类型的典型环节组合而成，因此其数学模型也是这些典型环节的数学模型的组合。因此，下面先研究一些常见的典型环节的数学模型。

建立数学模型有许多方法，最基本的是两种。一种是基于物理定律的推理法，另一种则是基于实验数据的辨识法。这里，仅介绍推理法。

#### 1. 机械平移系统

如图 7-4a) 所示的机械平移机构，都可以抽象成如图 7-4b) 所示的机械平移系统。

图 7-4 中，由丝杠到工作台之间的连接部分是刚体，但其刚度不是无穷大，在推动负载的过程中，会有一定弹性变形。因此，在研究系统动态特性时，要把它抽象成一个弹簧。导轨摩擦力  $F_f$  可以视为一粘性摩擦力，因此把它抽象为一个粘性阻尼器。作用于  $M$  上的力有弹性力  $F_1$  和阻尼力  $F_f$ 。其中

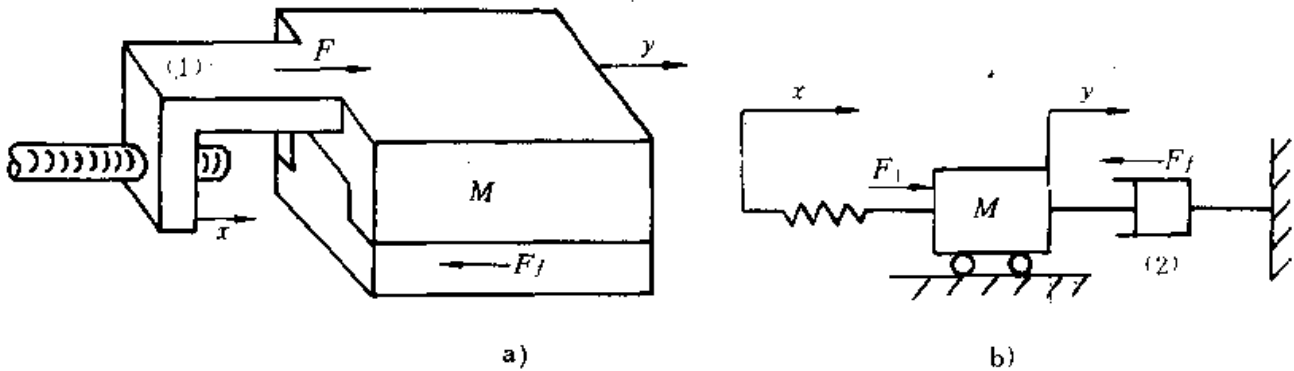


图 7-4 机械平移系统

a) 机械平移机构 b) 机械平移系统简图

$$F_1 = k [x(t) - y(t)]$$

式中  $k$ ——弹簧的弹性系数

$$F_f = B \cdot \frac{dy}{dt}$$

式中  $B$ ——粘性阻尼系数

根据牛顿第二定律，有

$$F_1 - F_f = M \cdot \frac{d^2y}{dt^2}$$

所以有

$$k [x(t) - y(t)] - B \cdot \frac{dy}{dt} = M \cdot \frac{d^2y}{dt^2}$$

经整理有

$$\frac{M}{k} \cdot \frac{d^2y(t)}{dt^2} + \frac{B}{k} \cdot \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = x(t)$$

上式两端进行拉氏变换有

$$\frac{M}{k} s^2 Y(s) + \frac{B}{k} s Y(s) + Y(s) = Z(s)$$

以连接杆左端位移  $x(t)$  为输入，以质量  $M$  的位移  $y(t)$  为输出的机械平移系统传递函数

$$G(s) = \frac{Y(s)}{Z(s)} = \frac{1}{\frac{M}{k} s^2 + \frac{B}{k} s + 1}$$

## 2. 机械转动系统

图 7-5 为机械转动系统示意。

设传动轴扭转刚度为  $k$ ，作用于负载的转矩

$$T = k(\theta_1 - \theta_2)$$

设轴承摩擦为粘性摩擦， $B$  为粘性摩擦系数，摩擦力矩

$$T_f = B \cdot \frac{d\theta_2}{dt}$$

根据牛顿定律，有

$$T - T_f = J \frac{d^2\theta_2}{dt^2}$$

式中  $J$ ——轴上所有部件的转动惯量

即

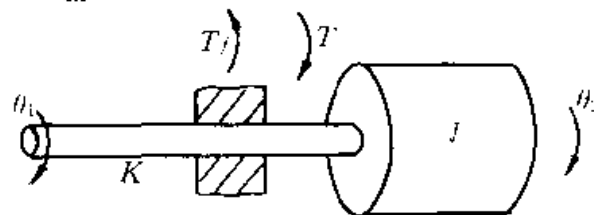


图 7-5 机械转动系统

$$k(\theta_1 - \theta_2) - B \cdot \frac{d\theta_2}{dt} = J \frac{d^2\theta_2}{dt^2}$$

以  $\theta_1$  为输入,  $\theta_2$  为输出的系统传递函数

$$G(s) = \frac{\theta_2(s)}{\theta_1(s)} = \frac{1}{\frac{J}{k}s^2 + \frac{B}{k}s + 1}$$

### 3. L-R-C 电路

图 7-6 为电感、电阻、电容串联电路。

图中:

- $e_i$ ——电路两端电压 (V)
- $e_o$ ——电容两端电压 (V)
- $i$ ——电路中流过的电流 (A)
- $R$ ——电阻 ( $\Omega$ )
- $L$ ——电感 (H)
- $C$ ——电容 (F)

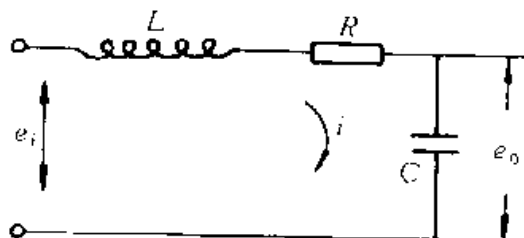


图 7-6 L-R-C 电路

根据克希霍夫定律及电工学基本知识有

$$e_i - L \cdot \frac{di}{dt} - R \cdot i - \frac{1}{C} \int_0^t i dt = 0$$

$$e_o = \frac{1}{C} \int_0^t i dt$$

对以上二式两端分别进行拉氏变换有

$$E_i(s) = LsI(s) + R \cdot I(s) + \frac{1}{C} \frac{1}{s} I(s)$$

$$E_o(s) = \frac{1}{C} \frac{1}{s} I(s)$$

以  $e_i$  为输入, 以  $e_o$  为输出的传递函数为

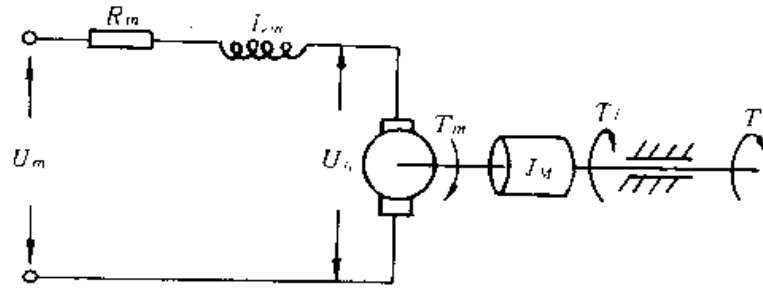
$$\begin{aligned} G(s) &= \frac{E_o(s)}{E_i(s)} = \frac{\frac{1}{C} \frac{1}{s} I(s)}{LsI(s) + RI(s) + \frac{1}{C} \frac{1}{s} I(s)} \\ &= \frac{1}{LCs^2 + RCs + 1} \end{aligned}$$

### 4. 直流伺服电机

图 7-7 为直流伺服电机原理图。

- 图中
- $R_m$ ——电机绕组电阻
  - $V_m$ ——电机输入电压
  - $J_m$ ——电机轴转动惯量

- $T$ ——负载转矩
- $i_m$ ——电机绕组电流
- $L_m$ ——电机绕组电感
- $V_b$ ——电机反电势
- $T_m$ ——电机输出转矩
- $T_f$ ——摩擦转矩
- $\theta_m$ ——电机转角



根据克希霍夫定律有

图 7-7 直流伺服电机原理图

$$L_m \cdot \frac{di_m}{dt} + R_m \cdot i_m + V_b = U_m$$

式中，反电势  $V_b$  与电机的角速度  $\frac{d\theta}{dt}$  成正比，比例系数为  $k_v$ ，即

$$V_b = k_v \cdot \frac{d\theta}{dt}$$

电机输出转矩  $T_m$  与电机电流  $i_m$  成正比，比例系数为  $k$ ，则有

$$T_m = k \cdot i_m$$

设摩擦转矩为粘性摩擦，阻尼系数为  $k_f$ ，则有

$$T_f = k_f \cdot \frac{d\theta_m}{dt}$$

根据牛顿定律，电机转矩平衡方程为：

$$T_m - T_f - T = J_m \cdot \frac{d^2\theta_m}{dt^2}$$

将以上二式代入，可以得到如下微分方程组

$$\begin{cases} L_m \cdot \frac{di_m}{dt} + R_m \cdot i_m + k_v \cdot \frac{d\theta_m}{dt} = U_m \\ J_m \frac{d^2\theta_m}{dt^2} + k_f \frac{d\theta_m}{dt} = k \cdot i_m - T \end{cases} \quad (7-2)$$

(7-3)

式中，负载力矩  $T$  由电机所驱动负载决定， $T$  是一个变量。当  $T=0$  时，以电机输入电压  $V_m$  为输入，以电机转角  $\theta_m$  为输出的系统传递函数为：

$$G(s) = \frac{\theta_m(s)}{V_m(s)} = \frac{k}{s [L_m J_m s^2 + (L_m k_f + R_m J) s + (R_m k_f + k \cdot k_v)]}$$

### 5. 机械传动链

如图 7-8 所示的机械传动链由齿轮传动和丝杠螺母传动组成。

图中  $k_1, k_2$ ——轴 I 及轴 II 的扭转刚度



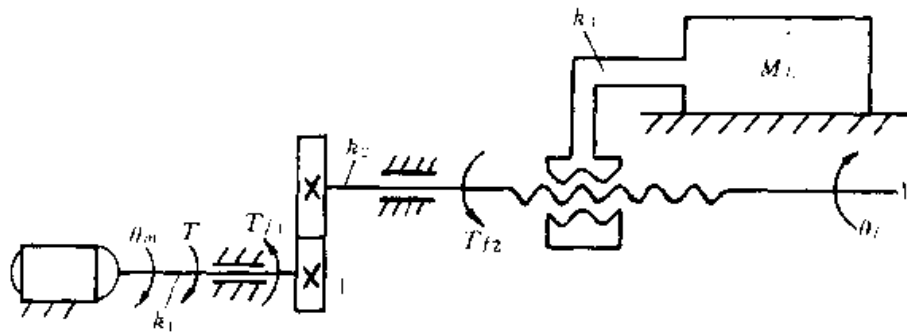


图 7-8 机械传动链

$T_{f1} T_{f2}$ ——轴 I 及轴 II 的摩擦转矩

$k_3$ ——工作台推杆刚度

$\theta_L$ ——丝杠转角

$\theta_m$ ——传动链输入转角

$x_L$ ——工作台位移

$T$ ——传动链输入扭矩

$T_L$ ——轴 II 驱动力矩

首先，引入等效刚度的概念。若考虑到各传动轴的弹性变形，每个传动轴的输入转角与输出转角之间都有一定差别。对于许多轴组成的机械传动链，其数学模型的推导和计算都因此变得十分复杂。为了计算方便，我们可以仅对其中一个轴列出力矩平衡方程式，将其余各轴的刚性都折合到这根轴的刚性系数上来计算。例如，对图示的传动链，我们仅对丝杠轴列出力矩平衡方程，这时，丝杠轴的等效刚度

$$k_1 = \frac{1}{\frac{1}{k_1 i^2} + \frac{1}{k_3 \cdot (L/2\pi)^2} + \frac{1}{k_2}}$$

(等效刚度的公式推导请参见第八章第一节)。由上式可见，等效刚度  $k_L$  小于这根轴的真实刚度  $k_2$ ，

式中

$i$ ——齿轮传动比， $i = \frac{Z_2}{Z_1}$

$L$ ——丝杠导程

同样道理，还可给出等效转动惯量

$$J_L = J_1 i^2 + J_2 + M \cdot \left(\frac{1}{2\pi}\right)^2$$

和等效阻尼系数

$$f_L = f_1 i^2 + f_2 + f_3 \left(\frac{1}{2\pi}\right)^2$$

式中,  $J_1, J_2$  分别为轴 I、轴 II 的转动惯量,  $M$  为工作台质量,  $f_1, f_2$  分别为轴 I、轴 II 的粘性摩擦系数,  $f_3$  为工作台移动时的粘性摩擦系数。根据牛顿定律, 轴 II 的力矩平衡方程如下:

$$T - f_L \frac{d\theta_L}{dt} = J_L \frac{d^2\theta_L}{dt^2}$$

式中  $T = k_L \left( \frac{1}{i} \theta_m - \theta_L \right)$

又因  $\theta_L = \frac{\theta_L}{2\pi} \cdot L$

经整理, 以上二式联立, 有:

$$k_L \theta_m = J_L \frac{2\pi i}{L} \frac{d^2 x_L}{dt^2} + f_L \frac{2\pi i}{L} \frac{dx_L}{dt} + k_L \cdot \frac{2\pi i}{L} x_L$$

这样, 以  $\theta_m$  为输入, 以  $x_L$  为输出的系统传递函数

$$G(s) = \frac{Z_L(s)}{\theta_m(s)} = \frac{k_L}{\frac{2\pi i}{L} J_L s^2 + \frac{2\pi i}{L} f_L s + \frac{2\pi i}{L} k_L}$$

$$= \frac{L}{2\pi i} \frac{k_L}{J_L s^2 + f_L s + k_L}$$

#### 四、方框图

上面给出了几个典型环节的数学模型。尽管只是比较简单的系统, 其数学模型的建立已相当复杂。为了比较简单、明确地显示出系统中各变量之间的相互关系, 常常采用方框图这种有效的表示方法。

##### 1. 方框图单元

(1) 基本单元 图 7-9 为方框图的基本单元。方框图基本单元由一个方框和两个箭头组成。指向方框的箭头表示输入, 向外指出的箭头表示输出。图 7-9 中,  $r(t)$  为输入信号, 它是时间的函数,  $R(s)$  为其拉氏变换。 $c(t)$  为输出信号,  $C(s)$  为其拉氏变换。用方框来表示输入与输出的传递函数, 有

$$C(s) = R(s) \cdot G(s)$$

(2) 相加点 图 7-10 为方框图的相加点。其含义为:  $Z_3(s) = Z_1(s) - Z_2(s)$ 。箭头顶端的正负号表示此信号的正负。

##### 2. 方框图的联结

系统中各环节的方框图之间的联结可以归纳为以下几种:

(1) 串联 若环节 1 的输出恰为环节 2 的输入, 则称环节 1 与环节 2 串联, 如图 7-11a) 所示。不难看出, 这时

$$C(s) = R(s) \cdot G_1(s) \cdot G_2(s)$$

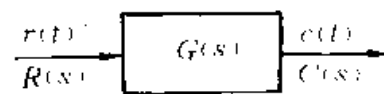


图 7-9 方框图基本单元

总传递函数

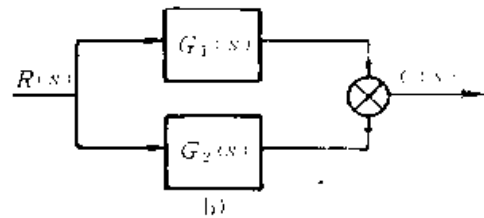
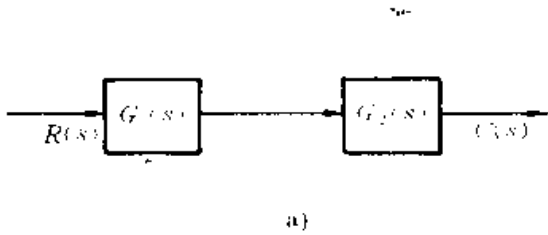
$$G(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = G_1(s) \cdot G_2(s)$$

(2) 并联 几个环节输入相同, 输出相加(减), 则称这几个环节并联, 如图 7-11b) 所示。

这时,  $C(s) = R(s) \cdot [G_1(s) + G_2(s)]$

总传递函数

$$G(s) = G_1(s) + G_2(s)$$



(3) 反馈联结 反馈是指系统某环节的输入量全部或部分地通过返回的传递函数送到输入端, 又重新送入系统。反馈量与输入量相加称为正反馈; 反馈量与输入量相减称为负反馈。如图 7-11c) 所示。带有反馈的系统被称为闭环系统。定义  $G(s)$  为前向传递函数;  $H(s)$  为反馈传递函数;  $G(s) \cdot H(s)$  为开环传递函数。一个闭环系统的总传递函数被称为闭环传递函数。用  $G_B(s)$  表示, 即:

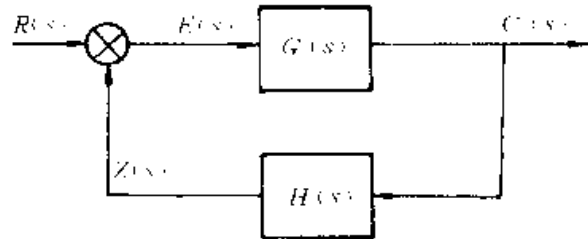


图 7-11 方框图的联结  
a) 串联 b) 并联 c) 反馈

$$G_B(s) = \frac{C(s)}{R(s)}$$

由图可知:

$$C(s) = E(s) \cdot G(s)$$

$$E(s) = R(s) - Z(s) = R(s) - C(s) \cdot H(s)$$

∴

$$C(s) = R(s) \cdot G(s) - C(s) \cdot H(s) \cdot G(s)$$

$$C(s) = R(s) \frac{G(s)}{1 + G(s)H(s)}$$

$$G_B(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G(s)}{1 + G(s)H(s)} \quad (7-4)$$

### 3. 方框图简化

图 7-12 给出了方框图等效变换的规则, 应用这些规则, 可以对一个复杂的方框图进行简化。

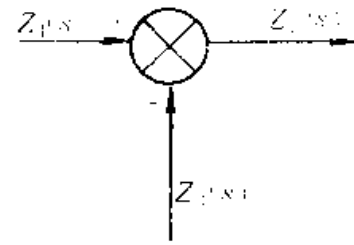


图 7-10 相加点

	原方框图	等效方框图
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		

	原方框图	等效方框图
8		
9		
10		
11		
12		
13		

图 7-12 方框图等效变换规则

## 五、系统数学模型举例——数控伺服系统数学模型

数控伺服系统的原理如图 7-1 所示。这个系统由伺服电机、机械传动、反馈传感器及放大器等几个典型环节组成。利用前面已经给出的各典型环节的数学模型，可以得到整个系统的数学模型。

对于直流伺服电机，式 (7-2)、(7-3) 有：

$$V_m = L_m \cdot \frac{di_m}{dt} + R_m \cdot i_m + k_v \cdot \frac{d\theta_m}{dt} \quad (7-5)$$

$$k \cdot i_m = J_m \frac{d^2\theta_m}{dt^2} + f_m \frac{d\theta_m}{dt} + T \quad (7-6)$$

在数控伺服系统中，作用于电机的负载力矩

$$T = \frac{T_L}{i} \quad (7-7)$$

式中  $i$ ——齿轮传动比

$$T_L = k_L \left( \frac{1}{i} \theta_m - \frac{2\pi}{L} x_L \right) \quad (7-8)$$

将式 (7-7)、(7-8) 代入式 (7-6) 并对式 (7-5)、(7-6) 进行拉氏变换，有

$$V_m(s) = L_m(s) I_m(s) + R_m I_m(s) + k_v s \theta_m(s) \quad (7-9)$$

$$k I_m(s) = J_m s^2 \theta_m(s) + f_m s \theta_m(s) + \frac{k_L}{i^2} \theta_m(s) - \frac{k_L 2\pi}{i \cdot L} x_L(s) \quad (7-10)$$

式 (7-8) 可以写成

$$I_m(s) = \frac{V_m(s) - k_v s \theta_m(s)}{L_m s + R_m} \quad (7-11)$$

式 (7-9) 可以写成

$$s \theta_m(s) = \frac{k I_m(s) - \frac{k_L}{i} \left[ \frac{\theta_m(s)}{i} - \frac{2\pi}{L} Z_L(s) \right]}{J_m s + f_m} \quad (7-12)$$

根据机械传动链数学模型分析可知

$$Z_L(s) = \theta_m(s) \cdot \frac{L}{2\pi i s^2 + f_L/J_L s + k_L/J_L} \quad (7-13)$$

由原理图还可得到：

$$V_m(s) = [V_c(s) - V_g(s)] \cdot k_a \quad (7-14)$$

$$V_c(s) = [P_p(s) - P_L(s)] \cdot k_1 \quad (7-15)$$

$$V_g(s) = k_f \cdot s \theta_m(s) \quad (7-16)$$

$$P_L(s) = k_p \cdot Z_L(s) \quad (7-17)$$

由公式 (7-11) 到 (7-17)，即可给出数控伺服系统的方框图，如图 7-13a) 所示。

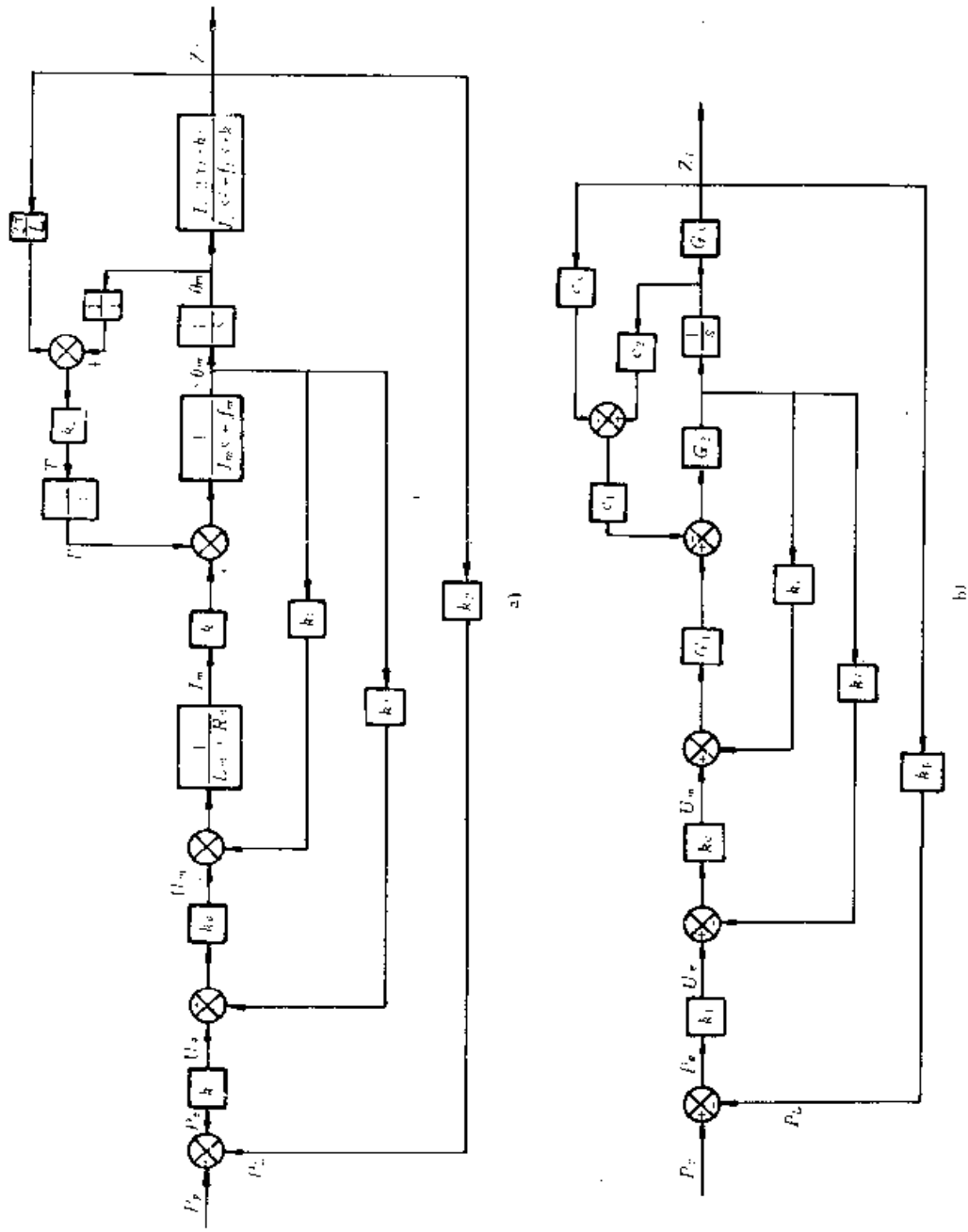


图 7-13 数控伺服系统  
 a) 系统方框图      b) 简化方框图

下面，对以上系统方框图进行简化。

设 
$$G_1 = \frac{k}{L_m s + R_m} \quad (7-18)$$

$$G_2 = \frac{1}{J_m s + f_m} \quad (7-19)$$

$$G_3 = \frac{c_2}{c_3} \cdot \frac{k_L}{J_L s^2 + f_L s + k_L} \quad (7-20)$$

式中 
$$c_2 = \frac{1}{i}$$

$$c_3 = \frac{2\pi}{L}$$

又令 
$$c_1 = \frac{k_L}{i}$$

图 7-13a) 可以简化成图 7-13b) 的形式。根据图 7-12 给出的等效变换规则，对以上框图进行逐步简化，图 7-14 给出了其简化过程。图中

$$G_4 = \frac{G_2}{1 + G_2 \cdot \frac{c_1}{s} (c_2 - c_3 G_3)} \quad (7-21)$$

将公式 (7-17) 至 (7-21) 代入图 7-14 所示的简化框图，可以推导出整个系统的传递函数表达式。显然，这是一个高阶系统。它的闭环传递函数的分母上  $s$  的阶数高达 6 阶。在工程实际中，常常可以根据实际情况，对某些次要因素予以忽略，使系统的阶数降低，从而简化分析和运算。例如本系统中，当负载较小时，可以认为  $J_L \approx 0$ ； $f_L \approx 0$ ，这时， $G_3 = \frac{c_2}{c_3} G_4 = G_2$ 。电机功率较大时，可以认为电感  $L_m \approx 0$ ，于是有  $G_1 = \frac{k}{R_m}$ 。这样，图 7-14 框图中的

$$\frac{G_1 G_4}{1 + G_1 G_4 k_v} = \frac{\frac{k}{R_m} \cdot G_2}{1 + \frac{k}{R_m} \cdot G_2 \cdot k_v} = \frac{k'_1}{s + k'_2}$$

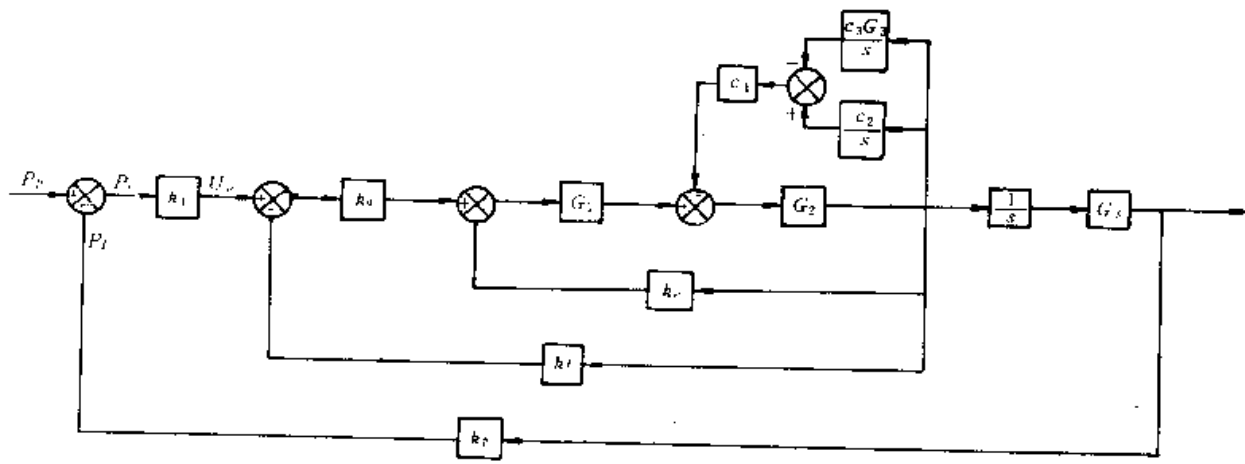
式中 
$$k'_1 = \frac{k}{R_m J_m}$$

$$k'_2 = \frac{f_m + \frac{k}{R_m} \cdot k_e}{J_m}$$

令 
$$k'_3 = \frac{c_2}{c_3}$$

则得到图 7-15 给出的框图。

根据式 (7-4) 可得数控伺服系统的闭环传递函数



a) 7/6

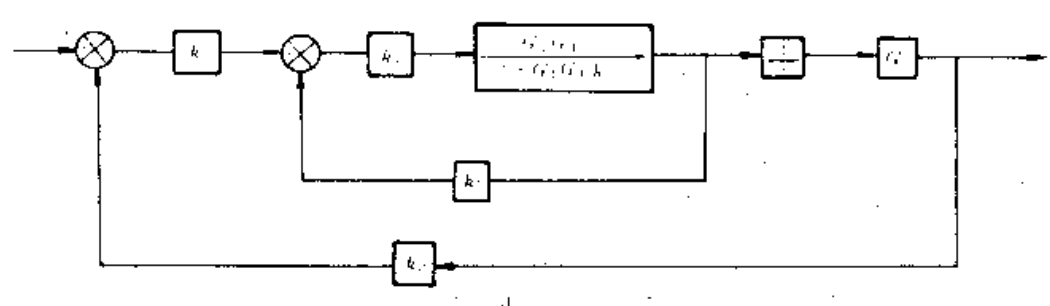
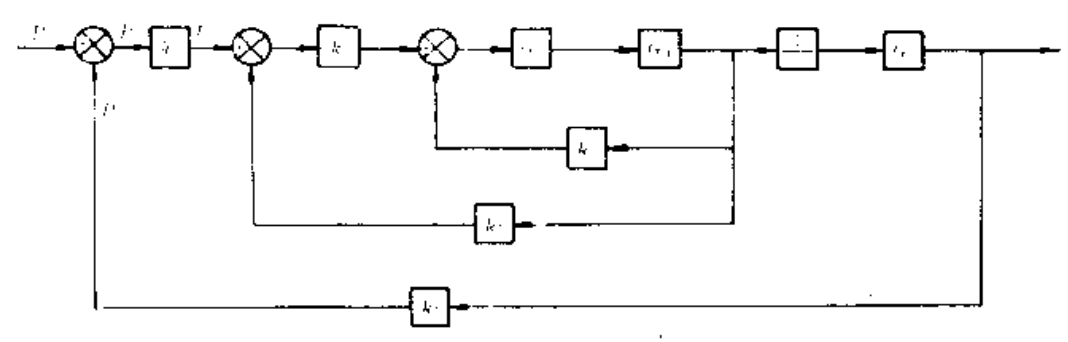
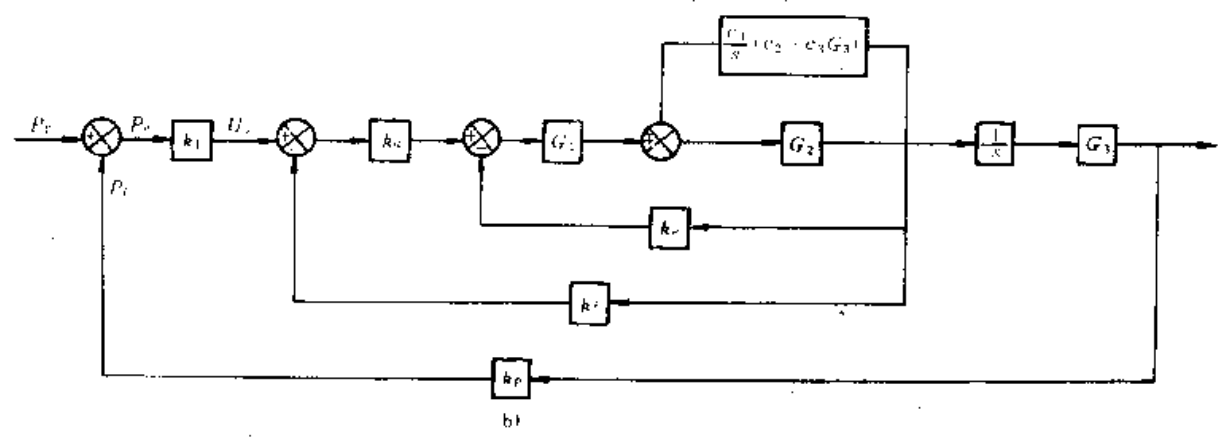


图 7-14 数控伺服系统框图简化过程



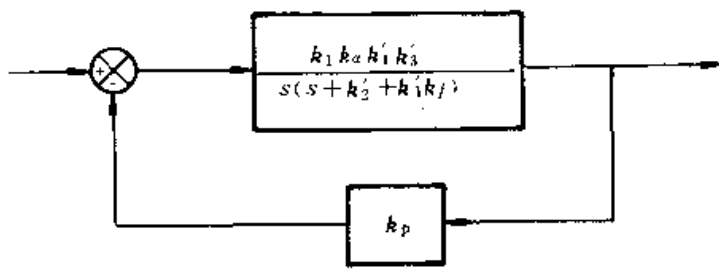


图 7-15 数控伺服系统简化框图

$$G_B(s) = \frac{\frac{k_1 k_a k'_1 k'_3}{s(s+k'_2+k_1 k'_f)}}{1 + \frac{k_1 k_a k'_1 k'_3}{s(s+k'_2+k_1 k'_f)} \cdot k_p}$$

$$= \frac{k_1 k_a k'_1 k'_3}{s^2 + (k'_2 + k'_1 k'_f)s + k_1 k_a k'_1 k'_3 k_p} \quad (7-22)$$

至此，可以认为，这就是数控伺服系统的输入量与输出量之间的数学表达式。

### 第三节 系统分析

#### 一、时间响应分析

系统的时间响应，是指当输入量发生变化时，系统的输出量随时间变化的规律。下面先介绍几种典型的输入信号，然后介绍不同的系统对这些典型输入信号的响应。最后，由这些时间响应，对系统的性能做出分析和评价。

##### 1. 典型输入信号

下列信号常被用作系统分析的典型输入信号：

(1) 阶跃信号 图 7-16a) 所示为阶跃信号，其数学表达式为：

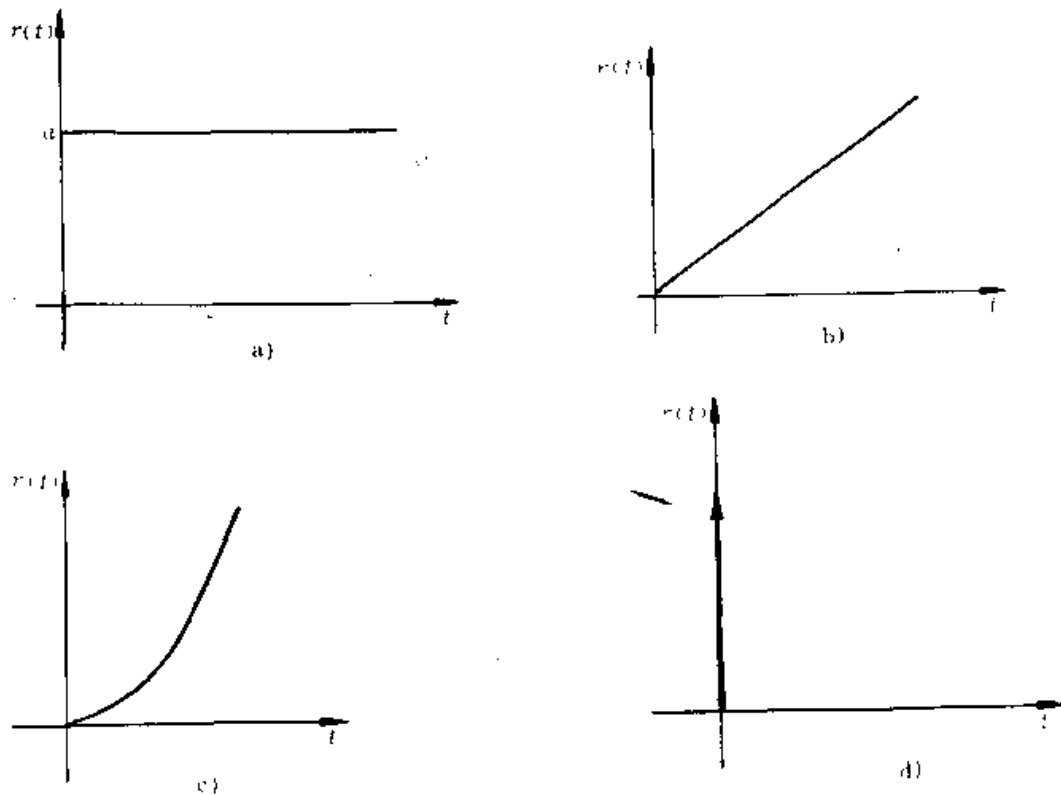


图 7-16 各种典型输入信号

a) 阶跃信号 b) 斜坡信号 c) 加速度信号 d) 脉冲信号

$$r(t) = 0 \quad t < 0$$

$$r(t) = a \quad t \geq 0 \quad (a \text{ 为常数})$$

当  $a=1$  时, 称其为单位阶跃信号。

(2) 斜坡信号 如图 7-16b) 所示, 其数学表达式为

$$r(t) = k \cdot t \quad (k \text{ 为常数})$$

当  $k=1$  时, 称其为单位斜坡信号。

(3) 加速度信号 如图 7-16c) 所示, 其数学表达式为

$$r(t) = kt^2 \quad (k \text{ 为常数})$$

(4) 脉冲信号 图 7-16d) 所示为理想的脉冲信号, 其数学表达式为

$$\begin{cases} r(t) = 0 & t > 0 \text{ 或 } t < 0 \\ r(t) = \infty & t = 0 \\ \int_{-\infty}^{\infty} r(t) \cdot dt = c & (c \text{ 为常数}) \end{cases}$$

当  $c=1$  时, 称其为单位脉冲信号。在实际中, 不可能得到这种理想的脉冲信号, 常用如图 7-17a) 所示的方波脉冲和图 b) 所示的三角脉冲来代替。

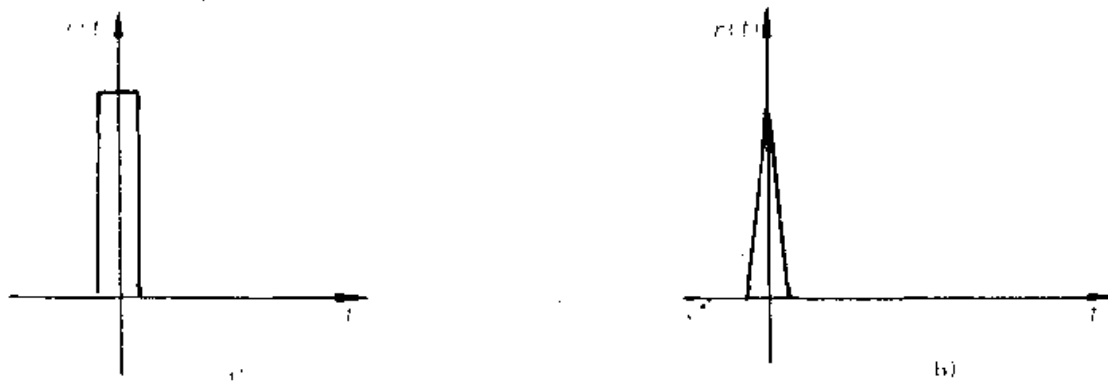


图 7-17 方波脉冲和三角脉冲  
a) 方波脉冲 b) 三角脉冲

## 2. 一阶系统的时间响应

所谓系统的阶数, 是指传递函数分母上  $s$  的最高次数。须注意, 在讨论系统时间响应时, 传递函数是指系统闭环传递函数。

图 7-18a) 所示为一个一阶单位反馈系统, 即它的反馈传递函数  $H(s) = 1$ , 其闭环传递函数为:  $G(s) = \frac{1}{Ts+1}$  如图 7-18b) 所示。

(1) 一阶系统的单位阶跃响应 单位阶跃信号:  $r(t) = 1$  作为输入信号, 其拉氏变换

$$R(s) = \frac{1}{s}$$

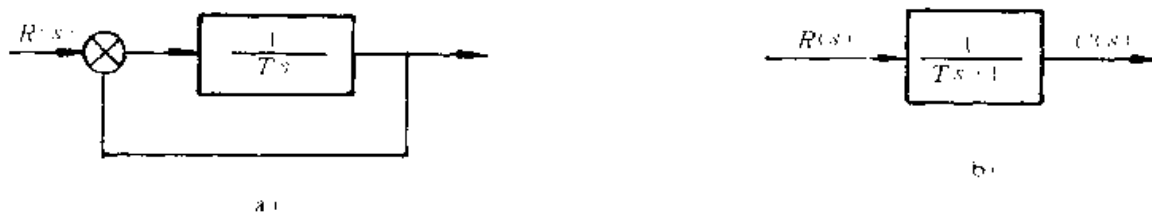


图 7-18 一阶系统

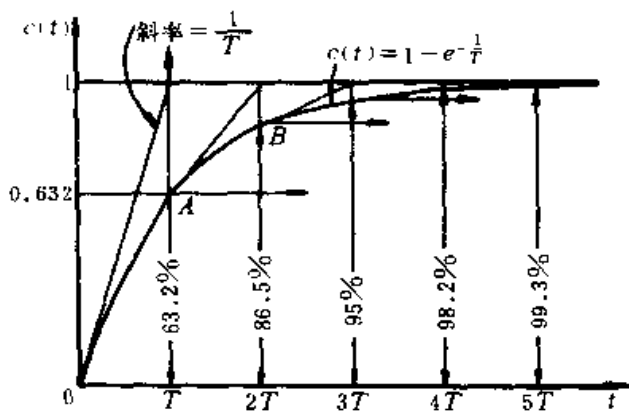


图 7-19 一阶系统单位阶跃响应

如图 7-19 所示,这是一条指数曲线。当  $t=0$  时,  $c(t)=0$ ; 当  $t \rightarrow \infty$  时,  $c(t) \rightarrow 1$ ; 即当时间无限延长时, 输出  $c(t)$  将趋向于与输入  $r(t)$  重合。当  $t=T$  时,  $c(t)=0.632$ , 即输出信号的幅度达到输入信号幅度的 63.2%。  $T$  称为时间常数。

对于一阶系统

$$\therefore G(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{1}{Ts + 1}$$

$$\begin{aligned} \therefore C(s) &= R(s) \cdot G(s) = \frac{1}{Ts + 1} \cdot \frac{1}{s} \\ &= \frac{1}{s} - \frac{T}{Ts + 1} \end{aligned}$$

$$c(t) = L^{-1}[C(s)] = 1 - e^{-\frac{t}{T}} \quad (7-23)$$

如图 7-19 所示,这是一条指数曲线。当  $t=0$  时,  $c(t)=0$ ; 当  $t \rightarrow \infty$  时,  $c(t) \rightarrow 1$ ; 即当时间无限延长时, 输出  $c(t)$  将趋向于与输入  $r(t)$  重合。

(2) 一阶系统单位斜坡响应 单位斜坡

信号  $r(t)=t, R(s)=\frac{1}{s^2}$ , 对于一阶系统有

$$C(s) = \frac{1}{Ts + 1} \cdot \frac{1}{s^2} = \frac{1}{s^2} - \frac{T}{s} + \frac{T^2}{Ts + 1}$$

$$c(t) = L^{-1}C(s) = t - T + Te^{-\frac{t}{T}} \quad (7-24)$$

如图 7-20 所示,  $c(t)$  上升的速度是变化的。开始较慢, 随时间推移, 上升速度加快, 直至与输入信号上升速度相等, 但输出  $c(t)$  永远不可能赶上或超过输入信号。当  $t \rightarrow \infty$  时,  $c(t)$  与  $r(t)$  之间保持一个常量误差  $T$ 。

3. 二阶系统的时间响应

二阶传递函数在各种控制系统的数学模型中占据着十分重要的地位, 这是由于二阶

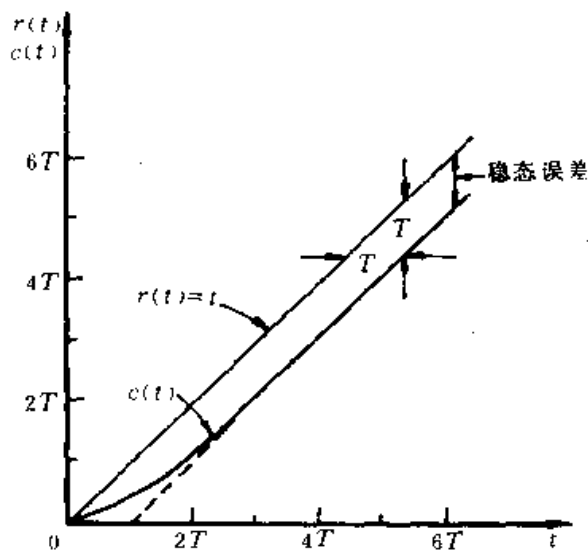


图 7-20 一阶系统单位斜坡响应

系统的时间响应能够体现动态过程的所有特征。许多实际的控制系统可以用二阶传递函数来描述, 而有些高阶系统也常可用一个适当的二阶传递函数来近似地进行描述。

二阶单位反馈系统如图 7-21a) 所示, 其闭环传递函数如图 7-21b) 所示。

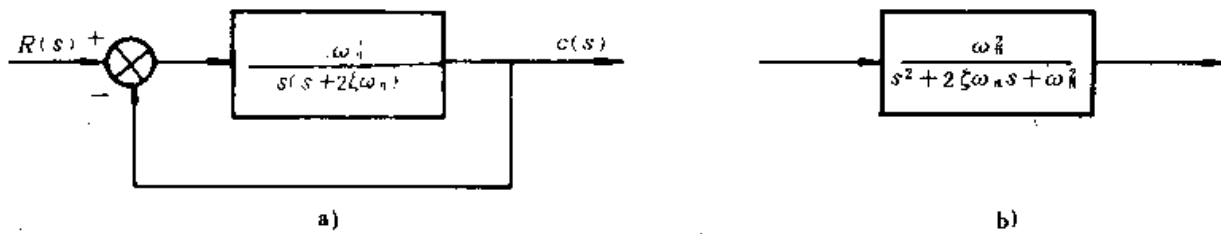


图 7-21 二阶系统

二阶系统的闭环传递函数通常写成标准形式

$$G(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (7-25)$$

图 7-4 所示的机械平移系统

$$G(s) = \frac{1}{\frac{M}{k}s^2 + \frac{B}{k}s + 1}$$

令 
$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{M}}, \quad \zeta = \frac{1}{2} \frac{B}{\sqrt{Mk}}$$

则可以改写成上述标准形式。这里,  $\zeta$  称为系统的阻尼比,  $\omega_n$  称为无阻尼自然频率。

下面以二阶系统单位阶跃响应为例进行分析。

当  $r(t)$  为单位阶跃信号时, 有  $R(s) = \frac{1}{s}$

这时 
$$C(s) = G(s) \cdot R(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \cdot \frac{1}{s} \quad (7-26)$$

输出信号 
$$c(t) = L^{-1}C(s) = L^{-1} \left[ \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \cdot \frac{1}{s} \right]$$

$c(t)$  的形态完全取决于  $\zeta$ 、 $\omega_n$  这两个参数, 下面分三种情况来讨论。

① 欠阻尼 ( $0 < \zeta < 1$ ) 此时可得到系统输出

$$c(t) = 1 - e^{-\zeta\omega_n t} \left( \cos\omega_{dt} + \frac{\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} \sin\omega_{dt} \right) \quad (7-27)$$

式中  $\omega_d = \omega_n \sqrt{1-\zeta^2}$  —— 系统阻尼自然频率

为方便分析, 设  $\sqrt{1-\zeta^2} = \sin\varphi$ ;  $\zeta = \cos\varphi$ , 则可有

$$c(t) = 1 - e^{-\zeta\omega_n t} \cdot \frac{1}{\sqrt{1-\zeta^2}} \sin(\omega_{dt} + \varphi) \quad (7-28)$$

欠阻尼二阶系统单位阶跃响应曲线如图 7-22 所示。它是一条振幅按  $e^{-\zeta\omega_n t}$  衰减的正弦振荡曲线, 其振幅衰减的速度取决于  $\zeta\omega_n$ ,  $\zeta\omega_n$  越大, 则衰减越快。当  $\zeta\omega_n = 0$  时,  $c(t)$

成为一条等幅振荡的正弦曲线。

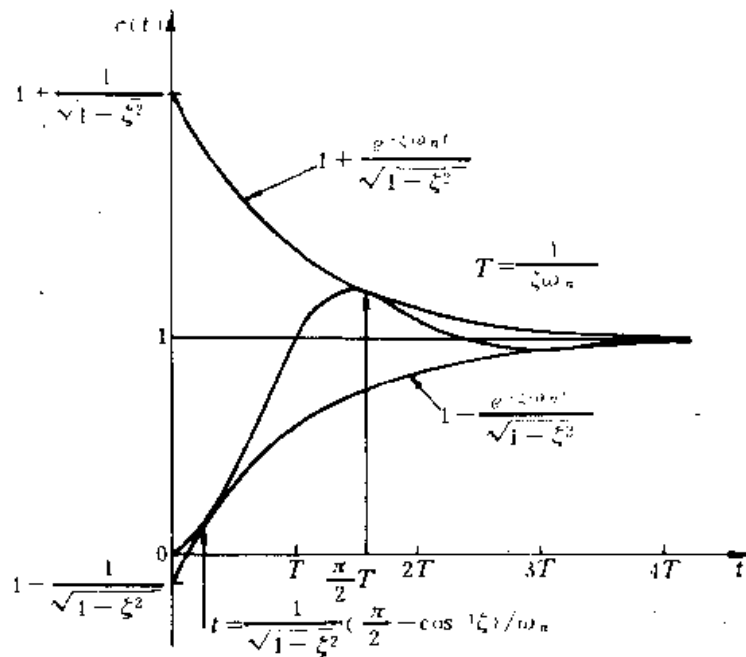


图 7-22 欠阻尼二阶系统单位阶跃响应

②临界阻尼 ( $\zeta=1$ ) 可求得系统输出

$$c(t) = 1 - e^{-\omega_n t} (1 + \omega_n t) \quad (7-29)$$

其响应曲线如图 7-23 中  $\zeta=1.0$  曲线所示。这是一条指数曲线与直线的组合，它不出现振荡现象。

③过阻尼 ( $\zeta>1$ ) 可求得

$$c(t) = 1 + \frac{\omega_n}{2\sqrt{\zeta^2-1}} \left( \frac{e^{s_1 t}}{-s_1} - \frac{e^{s_2 t}}{-s_2} \right) \quad (7-30)$$

式中

$$s_1 = (-\zeta - \sqrt{\zeta^2-1})\omega_n$$

$$s_2 = (-\zeta + \sqrt{\zeta^2-1})\omega_n$$

这时， $c(t)$  为包含两个衰减速度不同的指数项的曲线，显然，曲线形状受绝对值较小的特征根  $s_2$  的支配。

综合三种不同情况， $\zeta$  不同的一组二阶系统单位阶跃响应曲线示于图 7-23 中。

#### 4. 系统时间响应指标

系统结构参数不同，对同一输入的时间响应就不同。一般对于随动系统来说，总是希望系统输出能够又准又稳地跟随输入的变化。怎样衡量系统的这种性能呢？时间响应指标，便是一种尺度。系统时间响应指标，是以单位阶跃响应给出的。图 7-24 为一单位阶跃响应曲线。

(1) 上升时间  $t_r$  上升时间  $t_r$  定义为：响应曲线从 0 上升到 100% 所需要的时间（用

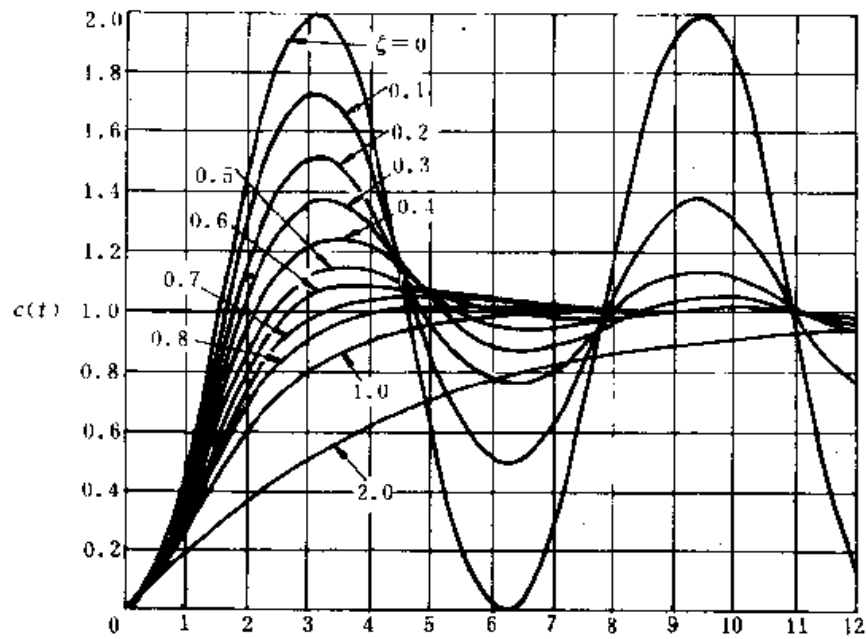


图 7-23 阻尼系数不同的二阶系统单位阶跃响应

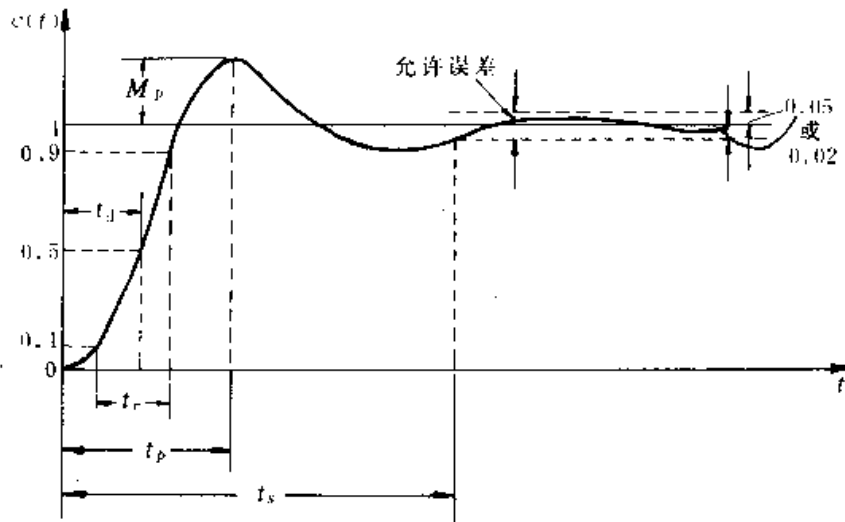


图 7-24 时间响应指标

于欠阻尼系统) 或从 10% 上升到 90% 所需要的时间 (用于过阻尼系统)。

对于二阶系统:

$$t_r = \frac{1}{\omega_d} \text{tg}^{-1} \left( -\frac{\sqrt{1-\zeta^2}}{\zeta} \right) \quad (7-31)$$

(2) 峰值时间  $t_p$  峰值时间  $t_p$  定义为: 响应曲线达到第一个峰值所需要的时间。

对于二阶系统

$$t_p = \frac{\pi}{\omega_d} \quad (7-32)$$

(3) 最大超调量  $\sigma_p$  最大超调量  $\sigma_p$  定义为从稳态值到最大峰值的距离。  
对于二阶系统

$$\sigma_p = e^{-\left(\frac{\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}}\right) \pi} \quad (7-33)$$

(4) 调整时间  $t_s$   $t_s$  定义为系统振幅衰减到稳态值的 2% 或 5% 所需要的时间 (对于非振荡系统则为响应曲线到达稳定值 95% 或 98% 所需时间)。

对于二阶系统

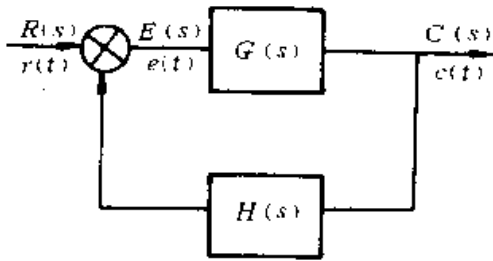
$$t_s = 4 \frac{1}{\zeta \omega_n} \quad (7-34)$$

由上述可知, 当  $\zeta$  减小时,  $t_s$  将减小, 即系统的快速性改善。然而由于  $\zeta$  减小, 超调量  $\sigma_p$  将加大, 系统稳定性降低。快速性和稳定性常常是矛盾的, 因此需要在二者之间权衡和折衷。一般二阶系统当  $\zeta=0.7$  左右时, 可以兼顾二者。所以一般取  $0.5 < \zeta < 0.8$ 。

## 二、系统误差分析

系统误差分析, 是要对系统的精确性给予认识和评价, 但这里, 只涉及稳态误差。

一个如图 7-25 所示的闭环控制系统, 误差信号  $e(t)$  是系统输入信号  $r(t)$  与反馈信号之差, 而所谓稳态误差是指系统处于稳态时, 即  $t \rightarrow \infty$  时,  $e(t)$  的值。稳态误差



$$e_{ss} = \lim_{t \rightarrow \infty} e(t)$$

由图 7-25 可知:

图 7-25 闭环控制系统

$$E(s) = R(s) - C(s)H(s) = \frac{R(s)}{1 + G(s)H(s)} \quad (7-35)$$

利用拉氏变换的终值定理, 可以较简便地得到  $e_{ss}$  的值:

$$e_{ss} = \lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = \lim_{s \rightarrow 0} sE(s) = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{SR(s)}{HG(s)H(s)}$$

式中  $G(s)$ 、 $H(s)$  为系统的开环传递函数。一般系统开环传递函数具有如下形式:

$$G(s)H(s) = \frac{k (T_{a1}s+1) (T_{a2}s+1) \cdots (T_{am}s+1)}{s^N (T_{b1}s+1) (T_{b2}s+1) \cdots (T_{bp}s+1)}$$

当  $N=0$  时, 称此系统为 0 型系统。当  $N=1$  时, 称此系统为 I 型系统……依此类推。实际中, 高于 II 型的系统很少见。下面将会看到, 系统的稳态误差与系统的“型”号有直接关系, 即与系统开环传递函数所含积分环节的次数有直接关系。

先看 0 型系统：

对单位阶跃输入， $R(s) = \frac{1}{s}$ ，由式 (7-35)

$$e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{sR(s)}{HG(s)H(s)} = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{s \cdot \frac{1}{s}}{1 + \frac{k(T_{a1}s + 1)(T_{a2}s + 1) \cdots (T_{am}s + 1)}{(T_{b1}s + 1)(T_{b2}s + 1) \cdots (T_{bp}s + 1)}}$$

$$= \frac{1}{1+k}$$

对于单位斜坡输入， $R(s) = \frac{1}{s^2}$  则

$$e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{sR(s)}{HG(s)H(s)} = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{s \cdot \frac{1}{s^2}}{1 + \frac{k(T_{a1}s + 1)(T_{a2}s + 1) \cdots (T_{am}s + 1)}{(T_{b1}s + 1)(T_{b2}s + 1) \cdots (T_{bp}s + 1)}}$$

$$= \infty$$

对于加速度输入， $R(s) = \frac{1}{s^3}$  用同样方法可知

$$e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{s \cdot \frac{1}{s^3}}{1 + \frac{k(T_{a1}s + 1)(T_{a2}s + 1) \cdots (T_{am}s + 1)}{(T_{b1}s + 1)(T_{b2}s + 1) \cdots (T_{bp}s + 1)}}$$

$$= \infty$$

同法可求得 I 型系统、II 型系统对三种不同输入的稳态误差。

表 7-1 给出了 3 种不同类型系统对于 3 种不同输入的稳态误差之归纳。

表 7-1 系统稳态误差

系统类型	阶跃输入	斜坡输入	加速度输入
0 型系统	$\frac{1}{1+k}$	$\infty$	$\infty$
I 型系统	0	$\frac{1}{k}$	$\infty$
II 型系统	0	0	$\frac{1}{k}$

由表可见，系统型号越大，则跟踪输入信号的能力越强。而 0 型系统对于阶跃输入、I 型系统对于斜坡输入和 II 型系统对于加速度输入的稳态误差都为—常数，其数值都与开环传递函数放大倍数  $k$ （称其为开环增益）有关， $k$  越大，则稳态误差越小。

### 三、系统频率响应分析

前面已对系统的时间响应分析作了介绍。进行时域分析的基本方法是求解微分方程，这种方法物理概念比较直观，容易理解。然而随着系统阶数的增高，求解微分方程的难度和工作量急剧增大。而且由微分方程的解，虽然可以知道系统性能的优劣，却很难直接得到如何对系统进行改进的有效信息。本节将要介绍的频率响应分析，可以弥补这种不足。



所谓系统的频率响应,是指当系统的输入为正弦信号时,系统输出对于输入响应。由富里埃变换可知,任何一个时间函数都可以看作是许多不同频率的正弦信号的叠加。对于线性系统,系统对于一个时间函数的响应也就是对组成这个时间函数的各个不同频率的正弦信号响应的叠加。如果一个系统对于任何频率的正弦信号都能较好的跟随,那么可以想象,系统就可以较好地跟随一个时间函数。反之,若系统对于某些频率的信号不能很好地跟随,比如一个系统对频率较高的正弦信号有振幅衰减现象,则系统对于时间域变化较快的信号反应不灵敏。由此看来,系统的频率响应与时间响应之间存在着内在的对应关系,因此可以通过研究系统的频率特性来揭示系统的动态特性。

### 1. 频率响应与频率特性

对于用图 7-9 所示的系统,若  $r(t) = A \cdot \sin \omega t$  则系统的稳态输出为:

$$c(t) = B \sin(\omega t + \varphi) \quad (7-36)$$

其中

$$B = A \cdot |G(j\omega)| \quad (7-37)$$

$$\varphi = \angle G(j\omega) \quad (7-38)$$

式 (7-36) ~ (7-38) 为系统的频率响应表达式。其含义为:一个线性系统,若其输入为一个正弦信号,其输出也是一个同频率的正弦信号,但输出信号的幅值与相位通常与输入信号不同,它们取决于系统传递函数  $G(s)$  在  $s = j\omega$  时的复变数  $G(j\omega)$ 。

$$\frac{B}{A} = |G(j\omega)|$$

即输入、输出的幅值比为  $G(j\omega)$  的模。输入与输出的相位差:

$$\varphi = \angle G(j\omega)$$

为  $G(j\omega)$  的幅角。 $G(j\omega)$  称为系统的正弦传递函数。当输入正弦信号的频率  $\omega$  发生变化时,正弦传递函数的幅值和幅角都发生变化,即正弦传递函数是角频率  $\omega$  的函数。其中  $|G(j\omega)|$  随  $\omega$  变化表示输出和输入之间幅值比随  $\omega$  变化的情况称为幅频特性; $\angle G(j\omega)$  随  $\omega$  变化的情况表示输出信号与输入信号之间的相位差随  $\omega$  变化的情况称为相频特性,二者总称为频率特性。这样,在已知传递函数  $G(S)$  时,可以很容易地将  $S = j\omega$  代入,得到系统的频率特性  $G(j\omega)$ 。

### 2. 频率特性的几何图象

通过频率特性的图象,可以用作图法对系统进行分析。

常用的频率特性几何作图法有两种:

(1) 幅相频率特性图 (Nyquist 图) 频率特性  $G(j\omega)$  为一复变数,可以写成模与幅角的形式,也可以写成实部与虚部的形式

$$\begin{aligned} G(j\omega) &= |G(j\omega)| e^{j\varphi(\omega)} \\ &= R_r[G(j\omega)] + jI_m[G(j\omega)] \end{aligned}$$

式中  $R_r$  意为实部,  $I_m$  意为虚部。如图 7-26 所示,对应一个  $\omega$ , 可以给出一个点,其模为  $|G(j\omega)|$ , 幅角为  $\varphi(\omega) = \angle G(j\omega)$  或者其实部为  $R_r[G(j\omega)]$ , 虚部为  $I_m[G(j\omega)]$ 。将  $\omega = 0 \sim \infty$  的各个点连接起来,便可得到  $G(j\omega)$  的幅相频率特性图,又称极坐标图和奈

魁斯特 (Nyquist) 图。

例如：若  $G(s) = \frac{1}{Ts+1}$ ，则  $G(j\omega) = \frac{1}{T(j\omega) + 1}$

其幅相频率特性图如图 7-27 所示。

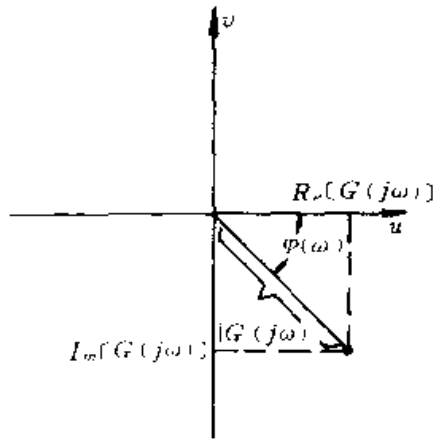


图 7-26 幅相频率特性图

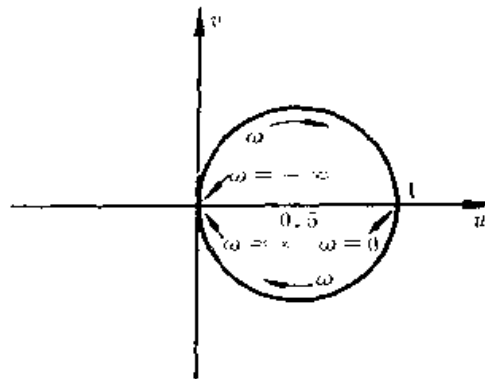


图 7-27 一阶系统幅相频率特性图

(2) 对数频率特性图 (Bode 图) Bode 图将频率特性的幅频特性和相频特性分别表示成对于  $\omega$  的两条曲线。其横坐标以  $\log \omega$  分度，幅频特性的纵坐标以  $20 \log |G(j\omega)|$  均匀分度，用  $L(\omega) = 20 \log |G(j\omega)|$  表示，单位为 dB。相频特性纵坐标则按  $G(j\omega)$  的幅角  $\varphi(\omega) = \angle G(j\omega)$  均匀分度，单位为度。须注意，虽然 Bode 图横坐标以  $\log \omega$  分度，但习惯上，标出的刻度值不是  $\log \omega$  的值，而是真数  $\omega$  的值。用 Bode 图表示频率特性有如下优点：

① 可将串联环节幅值的乘、除化为对数坐标幅值的加、减，因而简化了计算与作图过程。

② 可用近似方法作图，先分段用直线作出对数幅频特性曲线，再对一些个别的线段进行修正，就可得到较准确的对数幅频特性图，这给作图带来很大方便。

③ 先分别作出各个环节的 Bode 图，然后用叠加方法得出系统的 Bode 图，并由此可以看出各个环节对系统总特性的影响。

(3) 典型环节的 Bode 图 下面通过对几种典型环节 Bode 图的介绍，以便掌握 Bode 图作图法并了解其特点。

① 比例环节 比例环节的传递函数为

$$G(s) = K$$

$k$  为一常数。所以幅频特性  $|G(j\omega)| = K$ ，相频特性  $\angle G(j\omega) = 0^\circ$ 。可见，幅频特性和相频特性均为常数，其值与  $\omega$  无关。对数幅频特性  $20 \log |G(j\omega)| = 20 \log K$ ，其曲线为一水平线，分贝数为  $20 \log K$ ，设  $K=10$ ，其曲线如图 7-28 所示。图中幅频特性坐标值为  $20 \log 10 = 20 \text{dB}$ ，而相位恒为零。 $K$  值改变时，只是幅频曲线上、下移动，而对数相频特性曲线不变。

② 积分环节

$$G(s) = \frac{1}{s}, \therefore G(j\omega) = \frac{1}{j\omega}$$

$$|G(j\omega)| = \frac{1}{\omega} \quad \angle G(j\omega) = -90^\circ$$

可见，幅值与  $\omega$  成反比，而相位为常值。对数幅频特性为

$$20\log |G(j\omega)| = 20\log \frac{1}{\omega} = -20\log \omega$$

由于横坐标以  $\log \omega$  均匀分度，所以  $-20\log \omega$  将是一条直线，且当  $\omega=1$  时， $20\log |G(j\omega)| = 0$  dB，幅频特性曲线经过点 (1, 0)；当  $\omega=10$  时， $20\log |G(j\omega)| = -20$  dB 幅频特性曲线经过点 (10, -20)。

可见，每当频率增加 10 倍时，对数幅频特性就下降 20 dB，故积分环节的对数幅频特性曲线如图 7-29 所示，是一条过点 (1, 0) 的直线，其斜率为  $-20\text{dB/dec}$  (dec 表示 10 倍频程，即横坐标的频率由  $\omega$  增加到  $10\omega$ )。

积分环节的对数相频特性与  $\omega$  无关，是一条过点 (0,  $-90^\circ$ ) 的平行于横轴的直线。

### ③ 微分环节

$$\begin{aligned} G(s) &= s, & G(j\omega) &= j\omega \\ |G(j\omega)| &= \omega & \angle G(j\omega) &= 90^\circ \\ 20\log |G(j\omega)| &= 20\log \omega \end{aligned}$$

当  $\omega=1$  时，对数幅频特性  $20\log |G(j\omega)| = 0$  dB

可见，微分环节的对数幅频特性是过点 (1, 0)，而斜率为  $20\text{dB/dec}$  的直线。见图 7-30 微分环节对数相频特性是过点 (0,  $90^\circ$ ) 且平行于横轴的直线，这说明微分环节输出正弦信号的相位总是超前输入正弦信号  $90^\circ$ 。

### ④ 惯性环节

$$G(s) = \frac{1}{Ts+1} \quad G(j\omega) = \frac{1}{1+jT\omega}$$

如令： $\omega_T = \frac{1}{T}$  有

$$G(j\omega) = \frac{1}{1+j\frac{\omega}{\omega_T}} = \frac{\omega_T}{\omega_T+j\omega}$$

幅频特性

$$|G(j\omega)| = \frac{\omega_T}{\sqrt{\omega_T^2 + \omega^2}}; \quad \text{相频特性 } \angle G(j\omega) = -\arctg \frac{\omega}{\omega_T}$$

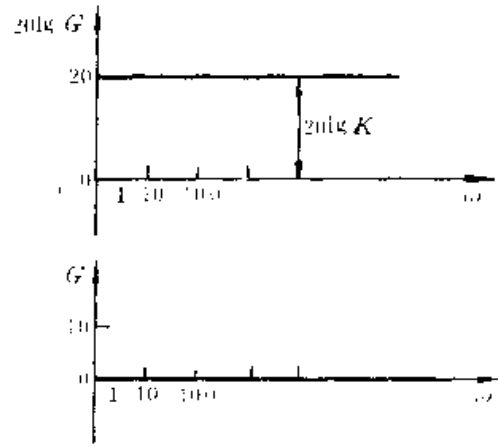


图 7-28 比例环节 Bode 图

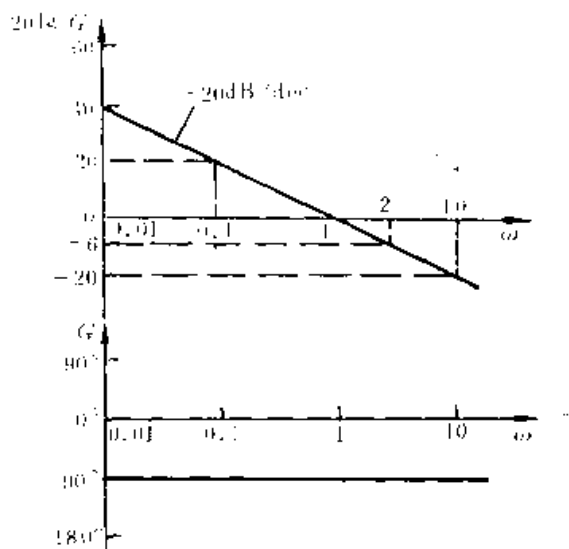


图 7-29 积分环节 Bode 图

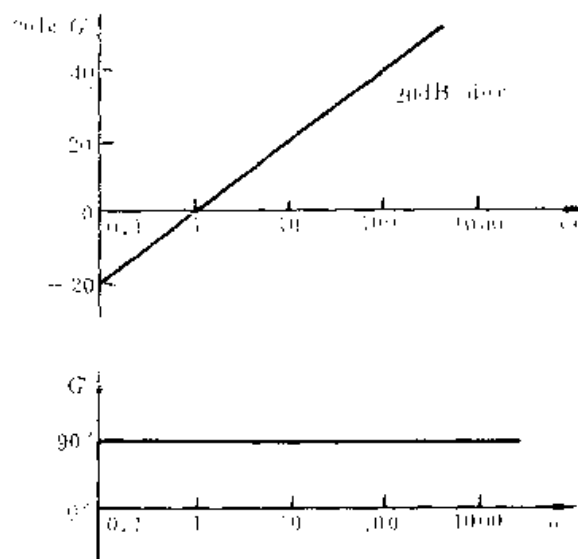


图 7-30 微分环节 Bode 图

对数幅频特性为

$$20 \log |G(j\omega)| = 20 \log \omega_T - 20 \log \sqrt{\omega_T^2 + \omega^2}$$

当  $\omega \ll \omega_T$  时, 对数幅频特性

$$20 \log |G(j\omega)| \approx 20 \log \omega_T - 20 \log \omega_T = 0$$

参见图 7-31, 对数幅频特性在低频段近似为 0 dB 水平线, 它始于点  $(\omega_T, 0)$ , 0 dB 水平线称为低频渐近线。

当  $\omega \gg \omega_T$  时, 对数幅频特性

$$20 \log |G(j\omega)| \approx 20 \log \omega_T - 20 \log \omega$$

这是一条直线, 当  $\omega = \omega_T$  时,

$$20 \log |G(j\omega)| = 20 \log \omega_T - 20 \log \omega_T = 0$$

所以, 对数幅频特性在高频段近似为一条直线, 它始于  $(\omega_T, 0)$  点, 斜率为  $-20 \text{ dB/dec}$ , 此线称为高频渐近线。显然,  $\omega_T$  是低频渐近线与高频渐近线的交点处的频率, 称为转角频率。

如图 7-31 中幅频特性曲线所示, 惯性环节有低通滤波器的特性。当输入频率  $\omega > \omega_T$  时, 其输出幅值很快衰减, 即滤掉了信号的高频部分, 在低频段, 输出能较准确地反映输入。

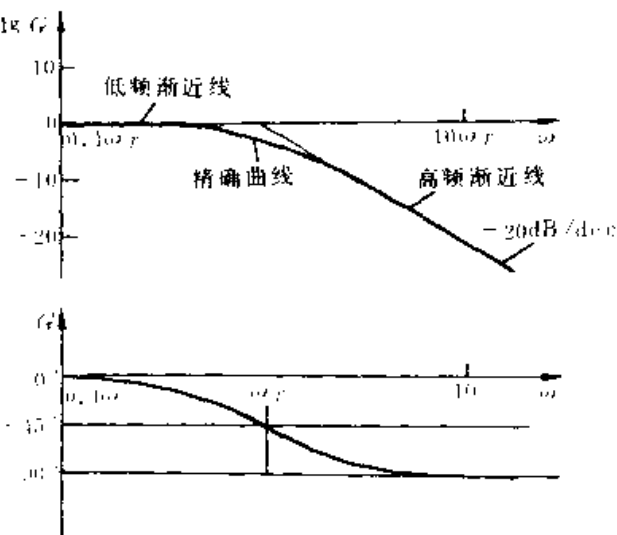


图 7-31 惯性环节 Bode 图

惯性环节相频特性取值如下:

当  $\omega=0$  时,  $\angle G(j\omega)=0^\circ$

当  $\omega=\omega_T$  时,  $\angle G(j\omega)=-45^\circ$

当  $\omega=\infty$  时,  $\angle G(j\omega)=-90^\circ$

由图 7-31 知, 对数相频特性对称于点  $(\omega_T, -45^\circ)$ 。而且在  $\omega < 0.1\omega_T$  时,  $\angle G(j\omega) \rightarrow -0^\circ$ , 在  $\omega \geq 10\omega_T$  时,  $\angle G(j\omega) \rightarrow -90^\circ$ 。

⑤ 一阶微分环节

$$G(s) = Ts + 1 \quad G(j\omega) = \frac{\omega_T + j\omega}{\omega_T} \quad (\omega_T = \frac{1}{T})$$

幅频特性

$$|G(j\omega)| = \frac{\sqrt{\omega_T^2 + \omega^2}}{\omega_T}$$

相频特性

$$\angle G(j\omega) = \arctg \frac{\omega}{\omega_T}$$

对数幅频特性为

$$20 \log |G(j\omega)| = 20 \log \sqrt{\omega_T^2 + \omega^2} - 20 \log \omega_T$$

当  $\omega \ll \omega_T$  时,  $20 \log |G(j\omega)| \approx 20 \log \omega_T - 20 \log \omega_T = 0 \text{dB}$  即低频渐近线是 0dB 水平线;

当  $\omega \gg \omega_T$  时,  $20 \log |G(j\omega)| \approx 20 \log \omega - 20 \log \omega_T$ , 即高频渐近线为一一直线, 其始于点  $(\omega_T, 0)$  斜率为 20dB/dec,  $\omega_T$  为转角频率。如图 7-32 所示。

一阶微分环节的对数相频特性取值如下:

当  $\omega=0$  时,  $\angle G(j\omega)=0^\circ$

当  $\omega=\omega_T$  时,  $\angle G(j\omega)=45^\circ$

当  $\omega=\infty$  时,  $\angle G(j\omega)=90^\circ$

⑥ 振荡环节

$$G(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}$$

$$G(j\omega) = \frac{\omega_n^2}{-\omega^2 + j2\zeta\omega_n\omega + \omega_n^2}$$

令  $\lambda = \frac{\omega}{\omega_n}$ , 得  $G(j\omega) = \frac{1}{(1-\lambda^2) + j2\zeta\lambda}$

于是有幅频特性和相频特性分别为:

$$|G(j\omega)| = \frac{1}{\sqrt{(1-\lambda^2)^2 + 4\zeta^2\lambda^2}} \quad (7-39)$$

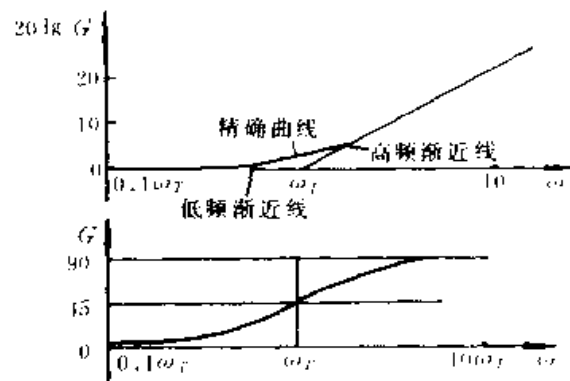


图 7-32 一阶微分环节 Bode 图

$$\angle G(j\omega) = -\operatorname{arctg} \frac{2\zeta\lambda}{1-\lambda^2} \quad (7-40)$$

对数幅频特性为：

$$20\log |G(j\omega)| = -20\log \sqrt{(1-\lambda^2)^2 + 4\zeta^2\lambda^2}$$

当  $\omega \ll \omega_n$  ( $\lambda \approx 0$ ) 时,  $20\log |G(j\omega)| \approx 0\text{dB}$ , 即低频渐近线为  $0\text{dB}$  水平线。

当  $\omega \gg \omega_n$  ( $\lambda \gg 1$ ) 时, 与  $\lambda^4$  相比,  $1$  和  $4\zeta^2\lambda^2$  均可忽略, 有

$$20\log |G(j\omega)| \approx -20\log \lambda^2 = -40\log \lambda = -40\log \omega + 40\log \omega_n$$

当  $\omega = \omega_n$  时,  $20\log |G(j\omega_n)| = 0\text{dB}$ 。所以, 高频渐近线为一直线, 始于点  $(1, 0)$ , 斜率为  $-40\text{dB/dec}$ 。如图 7-33 所示。

由图可知, 振荡环节的渐近线是由一段  $0\text{dB}$  水平线和一条起始于点  $(1, 0)$  (此时横坐标为  $\frac{\omega}{\omega_n}$ )、斜率为  $-40\text{dB/dec}$  的直线组成的。

由式(7-39)可知, 振荡环节的对数幅频特性的精确曲线不仅与  $\lambda$  有关, 还与  $\zeta$  有关。

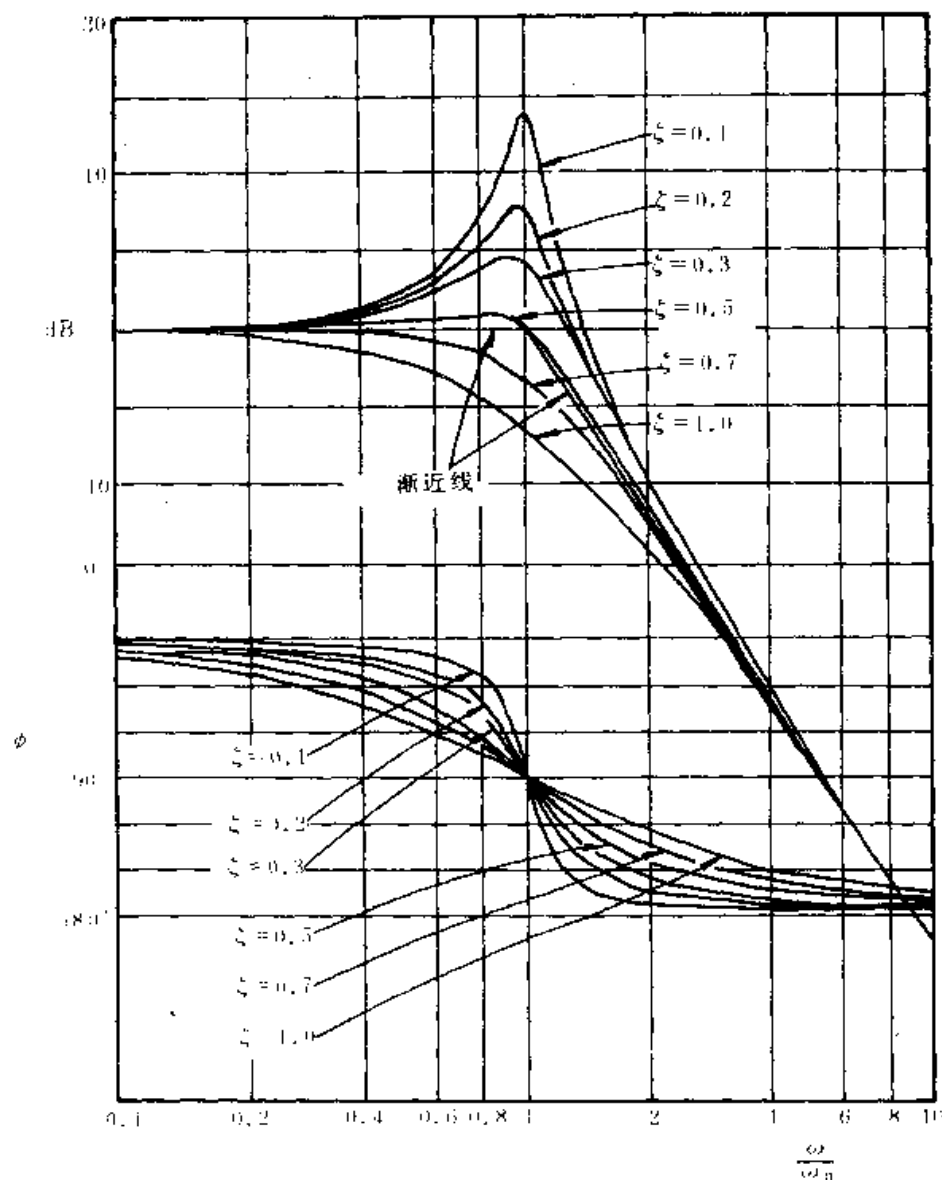


图 7-33 振荡环节 Bode 图

振荡环节的相频特性：

当  $\omega=0$  时， $\angle G(j\omega)=0^\circ$

当  $\omega=\omega_n$  时， $\angle G(j\omega)=-90^\circ$

当  $\omega=\infty$  时， $\angle G(j\omega)=-180^\circ$

点  $(1, -90^\circ)$  是相频特性的对称点。

### 3. 频率特性指标及其与时间响应的关系

由系统的频率特性进行系统的分析与设计是工程上常用的方法。在许多工程应用中，需要研究一个系统对某种时间信号的响应，而不是对于正弦信号的响应。这就需要由系统频率特性的某些指标与时间响应之间的关系，根据频率特性曲线，对系统的时间响应特性做出估计。

(1) 闭环频率特性指标及其与时间响应的关系 图 7-34 为一闭环传递函数的对数幅频特性曲线。

①零频值  $A(0)$  它表示频率接近零时，系统输出幅值与输入幅值之比。在频率极低时，对单位反馈系统（即反馈传递函数  $H(s)=1$ ）而言， $A(0)$  越接近 1，则系统稳态误差越小。

②谐振频率  $\omega_r$  及相对谐振峰  $M_r$  由图可见，谐振频率  $\omega_r$  系统幅频特性最大值所对应的频率。相对谐振峰

$$M_r = \frac{A_{\max}}{A_0}$$

为频率特性最大值与零频值之比。由图 7-33 可知， $A_{\max}$  大、对应于  $\zeta$  小。而由图 7-23 知， $\zeta$  越小，系统时间响应超调量  $\zeta_p$  大，稳定性越不好。由此可见，当  $M_r$  较大时，系统时间响应的稳定性较差。一般希望  $M_r < 1.4$ ，这时，系统阶跃响应的  $\sigma_p < 25\%$ 。

③截止频率  $\omega_b$  和带宽 一般规定当  $A(\omega)$  由  $A(0)$  下降 3dB 时所对应的频率为系统截止频率  $\omega_b$ 。频率  $0 \sim \omega_b$  范围称为系统带宽。它表示超出此频率后，输出幅值就急剧衰减，跟不上输入，形成系统的截止状态。可以证明，带宽越大，时间响应的快速性越好，即过渡过程上升时间越小。

### (2) 开环频率特性与时间响应

①稳态误差 对于 0 型系统，其开环频率特性如图 7-35 所示。

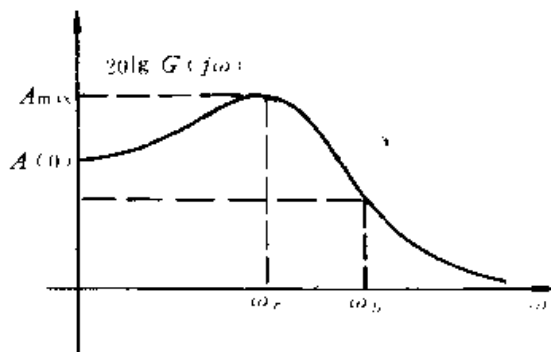


图 7-34 闭环频率特性指标

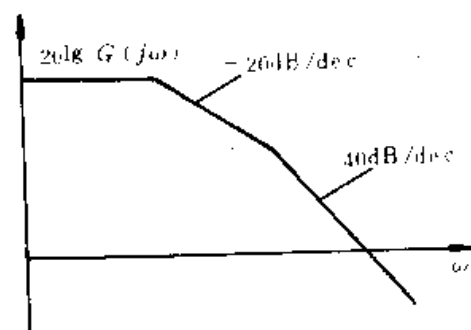


图 7-35 0 型系统开环频率特性

$$\lim_{\omega \rightarrow 0} |G(j\omega)H(j\omega)| = K_p$$

而 0 型系统对于单位阶跃输入的稳态误差

$$e_{ss} = \frac{1}{1+K_p}$$

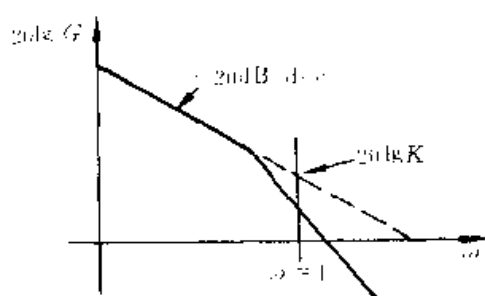


图 7-36 I 型系统开环幅频特性

因此, 可由曲线上  $\omega \rightarrow 0$  时,  $20\lg K_p$  得到  $e_{ss}$ 。

I 型系统的开环幅频特性如图 7-36 所示。

由图可见, I 型系统对数幅频特性起始段为斜率是一  $20\text{dB/dec}$  的直线。此直线或其延长线与  $\omega=1$  直线的

交点的幅值为  $20\lg K_p$ 。而 I 型系统对于斜坡输入的稳态误差

$$e_{ss} = \frac{1}{K_v}$$

读者可自行推导上述结论, 并可以推出对于 II 型系统, 怎样由其对数幅频特性求出 II 型系统对加速度输入的稳态误差。

② 穿越频率  $\omega_c$ : 图 7-37 为某系统开环频率特性图。幅频曲线穿过横轴的频率称为穿越频率  $\omega_c$ 。由分析可知, 对于二阶系统, 当  $0 \leq \zeta \leq 0.6$  时, 用  $\omega_c$  来代替无阻尼自然频率  $\omega_n$  的误差小于 9%, 故  $\omega_c$  对时间响应的的影响与  $\omega_n$  对时间响应的的影响是很接近的。即当阻尼系数  $\zeta$  一定时,  $\omega_c$  越大则时间响应越快, 它与时间响应指标  $t_r$ 、 $t_s$  有对应关系。

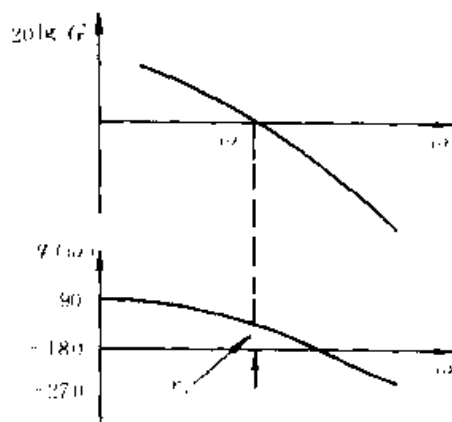


图 7-37 系统开环频率特性

③ 相位裕量  $r_c$ : 系统在穿越频率上的相角与  $-180^\circ$  的差值被称为相位裕量。如图 7-37 所示, 此时  $r_c > 0$ ,  $r_c$  的大小, 表征系统稳定性的优劣, 它与时间响应指标超调量  $\sigma_p$  有对应关系,  $r_c$  越大则  $\sigma_p$  越小, 稳定性越好。  $r_c$  越小, 则系统稳定性越差。当  $r_c < 0$  时, 系统不稳定。

#### 四、系统稳定性分析

##### 1. 稳定性分析的基本出发点

系统的稳定性是这样定义的: 如果系统处于平衡工作状态, 由于受到内部或外部的扰动, 其输出量偏离原来的工作状态, 当扰动消除后, 经过足够长的时间, 系统仍能回到原来的平衡状态, 则称系统是稳定的。反之, 如果系统输出因扰动所造成的偏差越来越大, 即使扰动消除, 也不能回到原平衡状态, 则称系统不稳定。

一个线性控制系统可以用如下的微分方程来描述: 设输入量为  $r(t)$ , 输出量为  $c(t)$

$$a_n \frac{d^n c(t)}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} c(t)}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{dc(t)}{dt} + a_0 c(t)$$



$$= b_n \frac{d^m r(t)}{dt^m} + b_{n-1} \frac{d^{m-1} r(t)}{dt^{m-1}} + \dots + b_1 \frac{dr(t)}{dt} + b_0 r(t) \quad (7-41)$$

由于稳定性研究是研究扰动输入消除后的系统状况，只需研究齐次方程

$$a_n \frac{d^n c(t)}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} c(t)}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{dc(t)}{dt} + a_0 c(t) = 0$$

的通解。它的特征方程为：

$$a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0 = 0$$

假如特征方程的根： $s_1 s_2 \dots s_n$  相异，则有

$$c(t) = \sum_{i=1}^n c_i e^{s_i t} \quad (7-42)$$

式中， $c_i$  是常数，它们取决于初始条件。特征方程的几个根  $s_1 s_2 \dots s_n$ ，可以是实数，也可以是复数。由式 (7-42) 可知，只有当特征方程的所有根  $s_i$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ) 为负实数或者是具有负实部的复数时， $c(t)$  才可能随时间  $t$  的加大而最后衰减至零，它们所对应的系统才是稳定的。由式 (7-41) 可以给出系统传递函数

$$G(s) = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_1 s + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0}$$

上述系统特征方程的根正是传递函数的极点（极点定义为使传递函数分母为零的点）。于是可以得出结论：系统稳定的充要条件是：系统特征方程的根或传递函数的极点全部位于复平面的左半平面（即为负实数或具有负实部的复数）。对于特征方程有重根的情况，可以证明，上述结论仍然成立。

## 2. 稳定性分析方法

根据以上基本出发点，判定系统稳定性有许多方法。一种方法是求出系统的所有极点，然后进行分析。这种方法直观，物理意义明确，但其缺点在于对高阶系统运算复杂，且即使求出极点，如不能满足要求，也无法给出对系统进行改进的途径。另一种方法则是不求系统极点的具体数值，仅分析极点是否位于左半平面。奈魁斯特判据（简称奈氏判据）就属于后一种方法。

由 H·Nyquist 于 1932 年提出的稳定判据在 1940 年以后得到了广泛的应用。虽然这个判据所提出的判别闭环系统稳定性的充要条件仍然以特征方程  $1+G(s)H(s)=0$  的根，即闭环系统的极点全部具有负实部为基础，但是它将函数  $1+G(s)H(s)$  与开环频率特性  $G_k(j\omega)=G(j\omega)H(j\omega)$  联系起来，从而将系统特性由复域引入频域来分析。具体地说，它是通过  $G_k(j\omega)$  的奈魁斯特图或 Bode 图，利用图解法来判明闭环系统稳定性的，故可说是一种几何判据。

奈氏判据分析系统稳定性，不仅方法比较简便，而且还能提出系统稳定储备——相对稳定性，以及指出进一步提高和改善系统动态性能，包括稳定性的途径。由于以上优点，奈氏判据得到了广泛的应用。

由于篇幅所限，这里仅给出奈氏判据的结论，不予推导。

奈氏判据可叙述为：

一个单回路反馈系统，其闭环传递函数在右半  $s$  平面的极点数  $z$  可以用其开环传递函数在右半  $s$  平面极点数  $p$  和开环幅相频率特性曲线包围  $(-1, j0)$  点的圈数  $N$  来决定，其关系式为

$$Z = P - 2N \quad (7-43)$$

当  $Z=0$  时，系统是稳定的。式中  $N$  为当  $\omega$  由零至无穷大变化时，开环系统频率特性  $G(j\omega)H(j\omega)$  的幅相图曲线包围  $(-1, j0)$  点的圈数。包围方向以逆时针为正。

例 若反馈系统的开环传递函数为

$$G(s)H(s) = \frac{20}{(3s+1)(2s+1)(s+1)}$$

试用奈氏判据判定其稳定性。

解：用逐点描迹法给出开环系统幅相频率特性示于图 7-38。由图可见，当  $\omega=0 \rightarrow \infty$  时， $G(j\omega)H(j\omega)$  的幅相曲线顺时针绕  $(-1, j0)$  点一周，所以  $N=-1$ 。由  $G(s)H(s)$  表达式知  $P=0$ 。由式 (7-43) 有

$$Z = 0 - 2(-1) = 2$$

因此可知此系统有 2 个闭环极点位于右半  $s$  平面，系统是不稳定的。

### 3. 对数频率稳定判据

为了应用奈氏判据判别闭环系统的稳定性，必须先画出开环幅相频率特性图。但由于幅相频率特性图作图比较复杂，而对数频率特性作图较简便，所以我们希望用奈氏判据通过对数频率特性进行稳定性分析。事实上，这是完全可以做到的。使用对数频率特性的奈氏判据称为对数频率稳定判据或仍称奈氏判据。

先介绍“穿越”的概念。在  $|G(j\omega)H(j\omega)| > 1$  即  $L(\omega) > 0$  的区间内， $\angle G(j\omega)H(j\omega)$  曲线自下向上通过  $-180^\circ$  水平线为正穿越，而自上向下通过  $-180^\circ$  水平线为负穿越。如图 7-39 中  $A$  点为负穿越， $B$  点为正穿越，而  $C$  点不算穿越，因为这时  $|G(j\omega)H(j\omega)| < 1$ 。

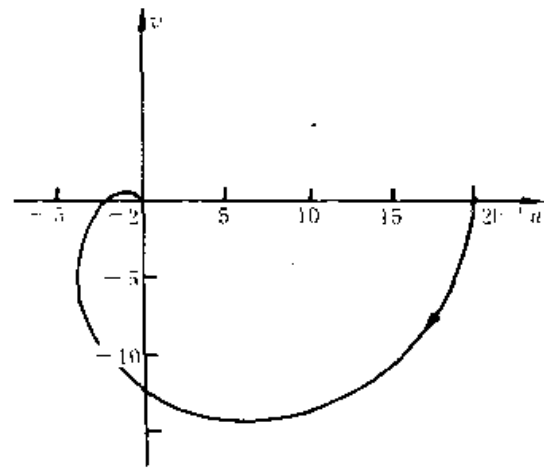


图 7-38 某系统开环幅相频率特性图

对数频率稳定判据可叙述为：若在对数幅频特性的正值区间，对数相频特性曲线对  $-180^\circ$  线的正穿越数与负穿越数之差为  $N$ ，而开环传递函数在右半  $s$  平面的极点个数为  $P$ ，则闭环系统在右半  $s$  平面的极点个数为

$$Z = P - 2N$$

当  $Z=0$  时，闭环系统是稳定的。

例 若系统开环传递函数为

$$G(s)H(s) = \frac{500(s+1)(0.5s+1)}{s(10s+1)(5s+1)(0.1s+1)(0.025s+1)}$$

试用奈氏判据判别闭环系统的稳定性。

解：本系统阶数较高，画幅相图比较困难，但画对数频率特性容易些，其对数频率特性图如图 7-39 所示。

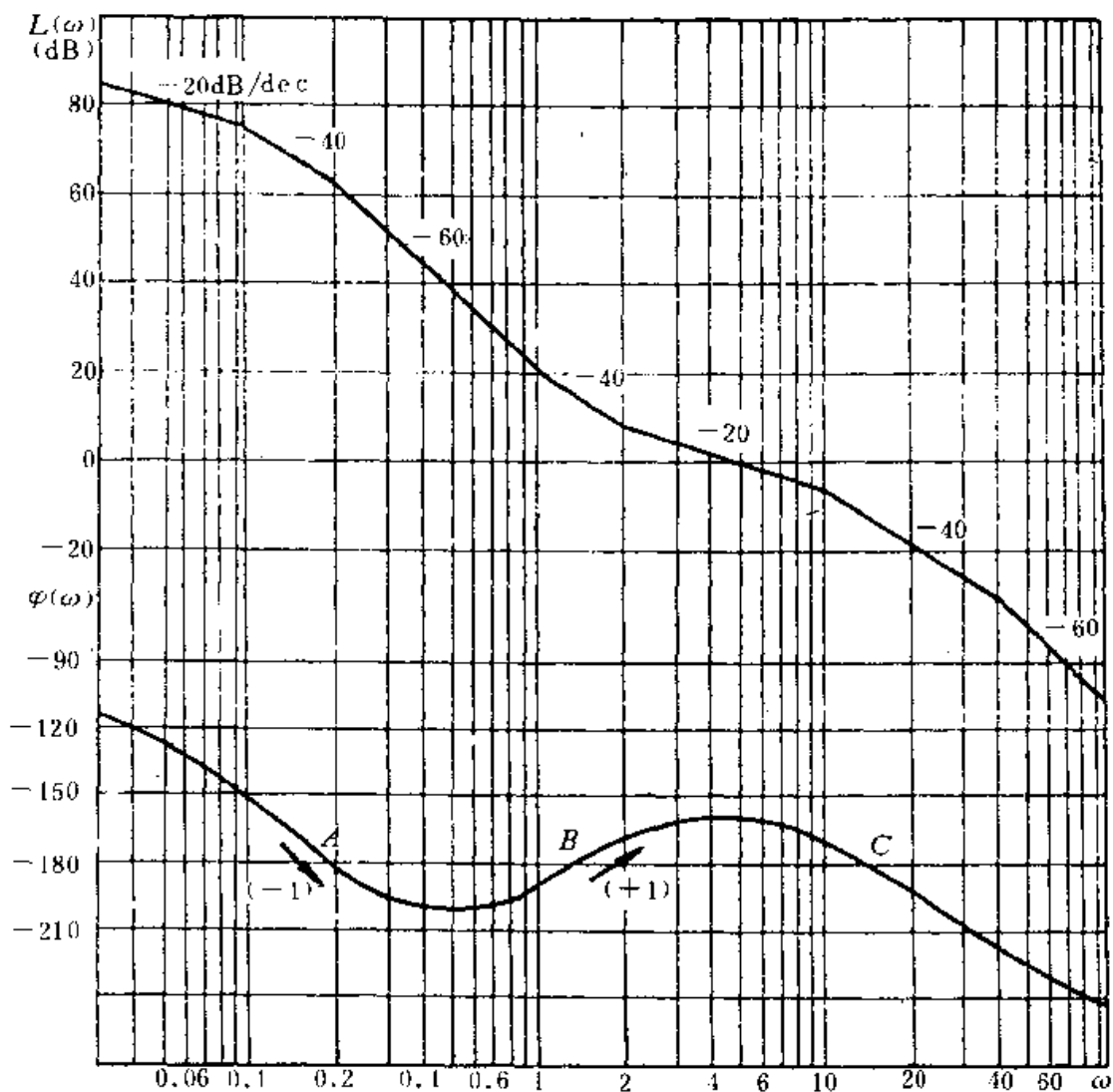


图 7-39 高阶系统对数频率特性图

由图可知，在  $\omega < 5 \text{ 1/s}$  时， $|G(j\omega)H(j\omega)| > 1$ ， $\angle G(j\omega)H(j\omega)$  的曲线在  $\omega = 0.18 \text{ 1/s}$  时，自上向下穿过  $-180^\circ$  线，负穿越一次，在  $\omega = 1.3 \text{ 1/s}$  时，自下向上穿越  $-180^\circ$  线，正穿越一次，故  $N = 1 - 1 = 0$ ，由传递函数可知  $P = 0$ 。根据奈氏判据有：

$$Z = P - 2N = 0 - 0 = 0$$

所以，闭环系统是稳定的。

### 五、系统分析举例——数控伺服系统分析

如图 7-1 所示的数控伺服系统及其简化后的框图(图 7-15)，系统的开环传递函数为：

$$G_k = \frac{k_1 k_a k'_1 k'_3 k_p}{s (s + k'_2 k'_1 k_f)} = \frac{k_s}{s (Ts + 1)} \quad (7-44)$$

式中

$$k_s = \frac{k_1 k_a k'_1 k'_3 k_p}{k'_2 k'_1 k_f}, \quad T = \frac{1}{k'_2 k'_1 k_f}$$

其开环频率特性的 Bode 图有如图 7-40 所示的形式。

### 1. 误差分析

由式 (7-44) 知, 此系统为 I 型系统, 对于阶跃输入的稳态误差为零。对于斜坡输入, 即当输入为一等速变化的信号时, 其稳态误差为  $\frac{1}{k_s}$ 。由此可知,  $k_s$  越大, 则系统的跟随误差越小输出越精确。

### 2. 时间响应分析

系统的闭环传递函数为

$$\begin{aligned} G_B(s) &= \frac{k_1 k_a k'_1 k'_3}{s^2 + (k'_2 k'_1 k_f) s + k_1 k_a k'_1 k'_3 k_p} \\ &= \frac{1}{k_p} \cdot \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \end{aligned}$$

这里:  $\omega_n = \sqrt{k_1 k_a k'_1 k'_3 k_p}$ ,  $\zeta = \frac{k'_2 k'_1 k_f}{2 \sqrt{k_1 k_a k'_1 k'_3 k_p}}$

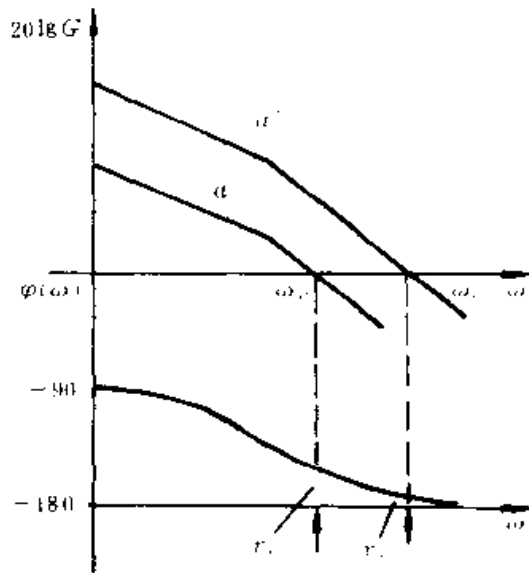


图 7-40 数控伺服系统开环频率特性图

由式 (7-31) 及 (7-34) 可知, 当  $\omega_n$  加大时, 系统响应可以加快。本系统中, 使位置反馈系数  $k_p$  增大, 可使  $\omega_n$  增加, 从而提高响应速度。但是由于  $k_p$  的增大, 会使  $\zeta$  减小, 从而使稳定性下降。使速度反馈系数  $k_f$  增大, 则可增大  $\zeta$ , 提高稳定性。

### 3. 稳定性分析

由图 7-40, 可对系统稳定性作出分析。如前所述, 要使系统跟随等速变化的输入信号的稳态误差小, 必须使  $k_s$  加大。从 Bode 图上看, 当  $k_s$  增大时, 相频特性不变, 但幅频特性曲线向上平移, 如图示  $a \rightarrow a'$ 。这时, 幅值穿越频率  $\omega_c$  向右移动, 相位移定裕量随之减小, 系统稳定性降低。因此精确性要求受到稳定性的限制。要使  $k_s$  增大时, 仍有一定稳定裕量, 只有使  $T$  也改变, 从而改变幅频及相频特性曲线的形状。已知  $T = \frac{1}{k'_2 k'_1 k_f}$ , 对于带有速度反馈的数控伺服系统, 可以通过调整速度反馈系数  $k_f$  来达此目的。这正是引入速度反馈的原因。这个问题将在后面的“反馈校正”一节中给予较详细的说明。

以上对数控伺服系统的分析, 只是较为粗略的半定量分析。实际上, 要对一个系统进行分析, 应当给出所有参数, 作出较为精确的频率特性图, 从而作出定量分析。在计算机普及使用的今天, 用计算机对系统进行分析和仿真, 则更为必要。

## 第四节 系统设计

### 一、基本控制器

一般工程控制系统，如图 7-41 所示，其前向传递函数可以分成两部分，一部分为被控对象或被控过程，其传递函数  $G_p(s)$  是固定的，称为不可变部分。另一部分则为控制器，其传递函数为  $G_c(s)$ 。控制器可以由工程技术人员根据系统的性能要求进行设计。控制器的作用，是根据输入信号  $e(t)$  产生一定的控制信号  $m(t)$ 。不同的控制器有不同的控制作用，产生不同的控制效果。

常见的控制器有以下几种：

(1) 继电器型控制器（开关控制）

$$m(t) = \begin{cases} M_1 & (e(t) > 0) \\ M_2 & (e(t) < 0) \end{cases}$$

(2) 比例控制器（P 控制器）

$$m(t) = k_p e(t)$$

$$G_c(s) = \frac{M(s)}{E(s)} = k_p$$

(3) 积分控制器（I 控制器）

$$m(t) = k_i \int_0^t e(t) dt$$

$$G_c(s) = \frac{M(s)}{E(s)} = k_i \frac{1}{s}$$

(4) 比例加积分控制器

$$m(t) = k_p e(t) + \frac{k_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt$$

$$G_c(s) = \frac{M(s)}{E(s)} = \frac{k_p(T_i s + 1)}{T_i s}$$

(5) 比例加微分控制器（P-D 控制）

$$m(t) = k_p e(t) + k_p T_d \frac{de(t)}{dt}$$

$$G_c(s) = \frac{M(s)}{E(s)} = k_p(1 + T_d s)$$

(6) 比例加积分加微分控制器（P-I-D 控制）

$$m(t) = k_p e(t) + \frac{k_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt + k_p T_d \frac{de(t)}{dt}$$

$$G_c(s) = \frac{M(s)}{E(s)} = \frac{k_p(1 + T_i s + T_i T_d s^2)}{T_i s}$$

控制器可以由电气元件组成，也可由电子元件组成，还可以由液压或气动元件组成。

1. 比例控制器

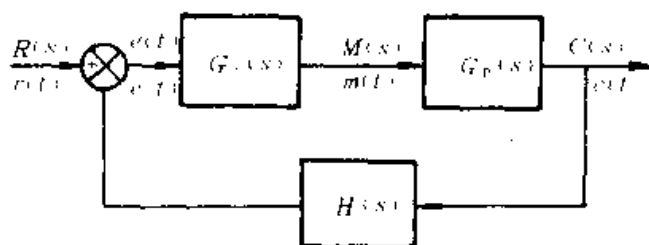


图 7-41 工程控制系统框图

比例控制器是一种最简单、最常用的控制器，其输出  $m(t)$  与误差输入  $e(t)$  成比例，通常它是一个增益可调的放大器。比例系数  $k_p$  即为放大倍数，改变  $k_p$ ，可以改变整个系统的开环增益，从而改变系统的稳态误差，并会引起系统稳定性的变化。

### 2. 积分控制器

由误差分析可知，若某一系统的开环传递函数为 0 型，它对阶跃输入响应就会有稳态误差。这时，若采用积分控制器，则可以使稳态误差得以消除。

### 3. 比例加积分控制器

一个有扰动  $N(s)$  存在的系统如图 7-42 所示。

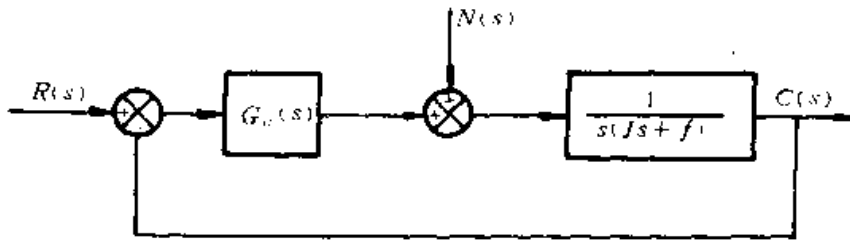


图 7-42 带有扰动的系统框图

只有当系统输出  $c(t)$  对于阶跃扰动输入  $n(t)$  的响应在一定的时间以后减至最小，即

$$\lim_{T \rightarrow \infty} c(t) = c_{ss} = 0$$

这样，系统才具备抗干扰能力。

当采用比例加积分控制器时，

$$G_c(s) = k_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} \right)$$

系统以  $N(s)$  为输入， $C(s)$  为输出的闭环传递函数为

$$G_B(s) = \frac{C(s)}{N(s)} = \frac{s}{Js^3 + fs^2 + k_p s + \frac{k_p}{T_i}}$$

若干扰输入  $n(t)$  为一幅度为  $T_n$  的阶跃信号则  $N(s) = \frac{T_n}{s}$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} c(t) = \lim_{s \rightarrow 0} s \cdot C(s) = \lim_{s \rightarrow 0} s \cdot \frac{s}{Js^3 + fs^2 + k_p s + \frac{k_p}{T_i}} \cdot \frac{T_n}{s} = 0$$

由此可见，当控制器采用比例加积分控制时，可以消除由于干扰造成的系统稳态误差。

### 4. 比例加微分控制器

当采用比例加微分控制器时，其中的微分控制作用能反映出误差信号的变化率，在误差信号本身尚未变得很大之前，由于误差信号的变化率较大，可产生有效的修正作用，这样，微分控制使误差信号提前，从而引进一早期的修正作用，有助于增加系统稳定性。

由于微分控制是按照误差信号的变化率进行工作，而不是依据误差本身，所以微分控制器不能单独使用，它总是与比例控制器或比例加积分控制器一起使用。

图 7-43a) 所示，为一纯惯性负载系统，当采用比例控制器时， $G_c(s) = k_p$ ，系统闭环传递函数

$$G_B(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{k_p}{Js^2 + k_p}$$

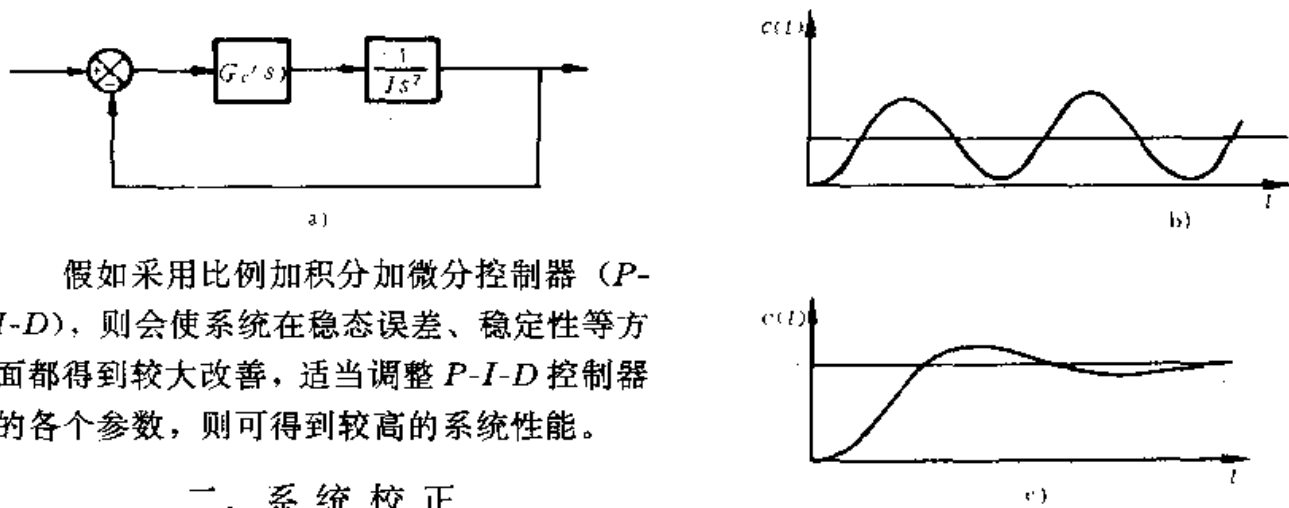
因为， $Js^2 + k_p = 0$  的根实部为零，即系统闭环极点处于坐标轴上，为临界稳定状态，所以其对于阶跃输入的响应为无限的等幅振荡，如图 7-43b) 所示，这种响应特性是我们所不希望的。但当采用比例加微分控制器时

$$G_c(s) = k_p(1 + T_d \cdot s)$$

则系统闭环传递函数

$$G_B(s) = \frac{k_p(1 + T_d \cdot s)}{Js^2 + k_p T_d s + k_p}$$

当  $J, k_p, T_d$  均为正值时，可知闭环极点全部位于左半  $s$  平面。系统是稳定的，其对单位阶跃输入的响应曲线将如图 7-43c) 所示，稳定性有显著改进。



假如采用比例加积分加微分控制器 (P-I-D)，则会使系统在稳态误差、稳定性等方面都得到较大改善，适当调整 P-I-D 控制器的各个参数，则可得到较高的系统性能。

## 二、系统校正

### 1. 校正的基本概念

工程实际对系统的性能提出了各种要求，在对系统性能要求不高时，一般通过调整控制器的可调参数，就可以满足性能要求。但当对系统性能要求较高时，仅靠调整参数仍不能满足性能要求，就需要在系统中加入校正环节，改变系统的频率特性，从而提高系统性能。因此，设计合适的校正装置，是系统设计不可缺少的工作。

校正方案有两种，一种是将校正环节串联在系统的前向通路中，称为串联校正，如图 7-44 所示。图中  $G_D(s)$ ， $H(s)$ ，分别为校正前的系统前向传递函数和反馈传递函数， $G_c(s)$  则为校正环节的传递函数。

图 7-43 纯惯性负载系统

a) 系统框图

b) 采用比例控制器时系统阶跃响应

c) 采用比例加微分控制器时系统阶跃响应

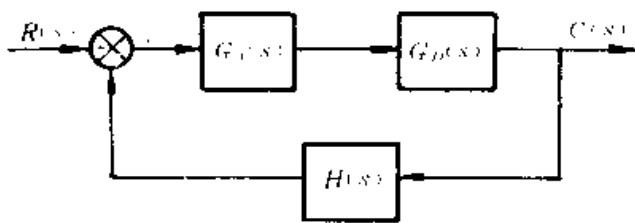


图 7-44 串联校正系统框图

另一种方案是将校正装置接在局部反馈回路中，如图 7-45 所示，称为反馈校正。图中， $G_1(s)$ 、 $G_2(s)$ 、 $G_3(s)$  为校正前系统的前向传递函数， $H(s)$  为校正前的反馈传递函数， $H_a(s)$  为校正环节的传递函数。

## 2. 常用校正装置及其特性

最常用的校正装置是电子装置，

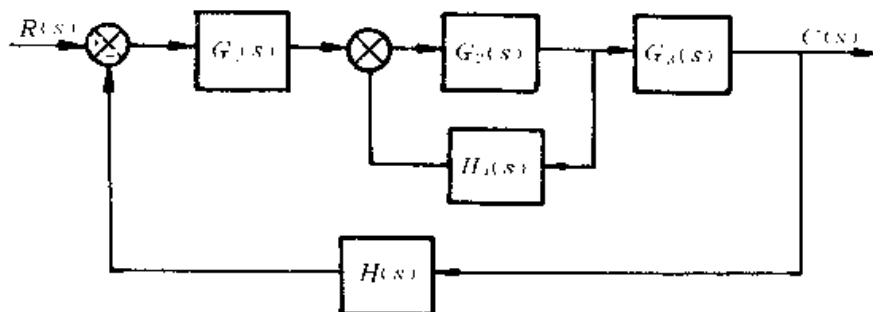


图 7-45 反馈校正系统框图

可以由阻容元件组成无源校正网络，也可由运算放大器组成有源校正网络。在此只讨论各种校正装置的传递函数及特性。

(1) 超前校正环节 超前校正环节的传递函数为

$$G_a(s) = \frac{\alpha Ts + 1}{Ts + 1} \quad \alpha > 1$$

其 Bode 图如图 7-46 所示。

由图可知，超前校正环节在二转折频率  $\omega_1 = \frac{1}{\alpha T}$  和  $\omega_2 = \frac{1}{T}$  之间，其相位角超前，在  $\omega_1$

和  $\omega_2$  之间的几何中心  $\omega_m = \frac{1}{\sqrt{\alpha T}}$  处，其相角取得最大值：

$$\varphi_{\max} = \sin^{-1} \frac{\alpha - 1}{\alpha + 1}$$

超前校正可改善系统的稳定性和过渡过程指标。

(2) 滞后校正环节

$$G_a(s) = \frac{\beta Ts + 1}{Ts + 1} \quad \beta < 1$$

其 Bode 图如图 7-47 所示。

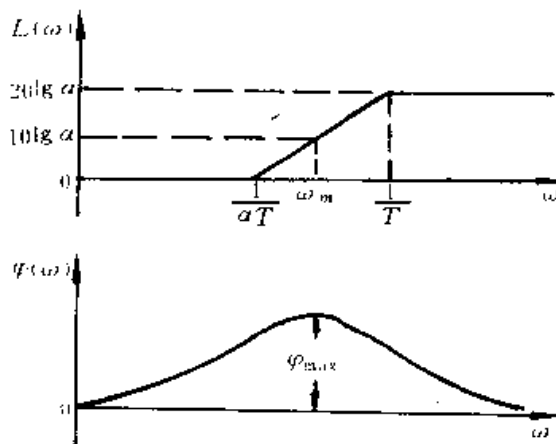


图 7-46 超前校正环节 Bode 图



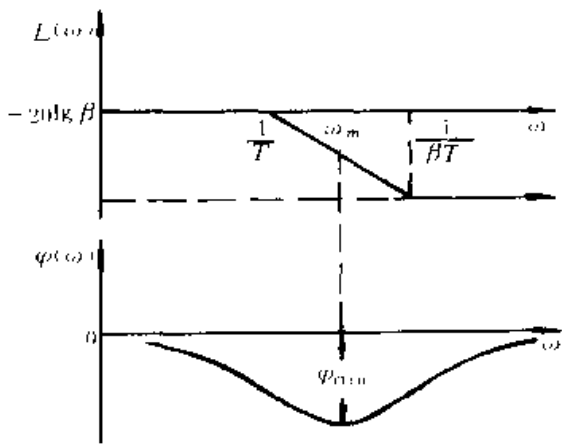


图 7-47 滞后校正环节 Bode 图

由图可知，在二转折频率  $\omega_1 = \frac{1}{T}$  和  $\omega_2 = \frac{1}{\beta T}$  之间，相角滞后，并在  $\omega_m = \frac{1}{\sqrt{\beta T}}$  处，有最大滞后

$$\varphi_{\min} = -\sin^{-1} \frac{\beta-1}{\beta+1}$$

在高频率  $\omega > \frac{1}{\beta T}$  后，其幅频特性衰减了  $20 \log \frac{1}{\beta}$ 。利用滞后校正环节的幅值衰减特性，可以改善系统的性能，提高系统的稳定性。

### (3) 滞后-超前校正环节

$$G_a(s) = \frac{(T_1s+1)(T_2s+1)}{(\frac{T_1}{\gamma}s+1)(\gamma T_2s+1)} \quad \gamma > 1$$

其 Bode 图如图 7-48 所示。由图可见，滞后-超前环节兼有滞后环节和超前环节的特性。

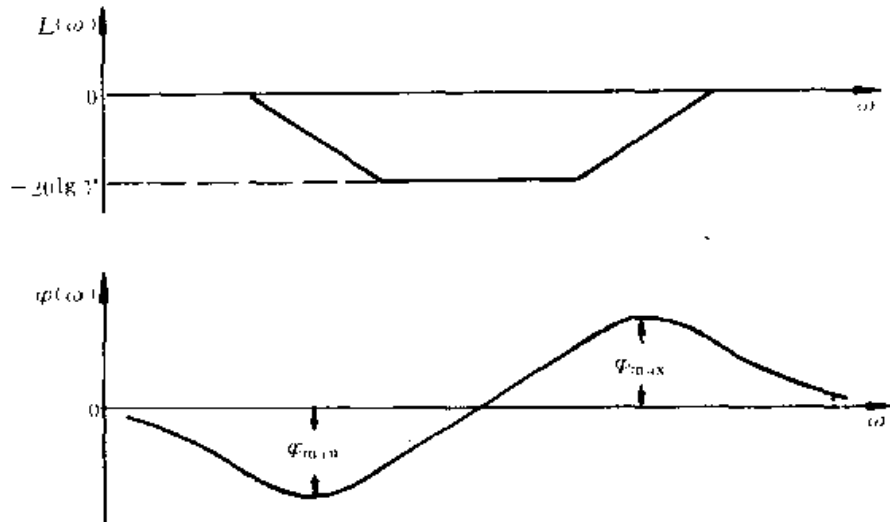


图 7-48 滞后超前校正环节

### 3. 串联校正方法

按所用校正环节的不同，串联校正方法包括有串联超前校正、串联滞后校正、串联滞后-超前校正等几种。其具体设计方法请参阅有关书籍。

### 4. 反馈校正

反馈校正是一种十分有效的改善系统性能的方法，其校正步骤，比串联校正复杂一些。具体设计步骤，请参阅其他有关书籍，这里仅举一例，说明反馈校正的概念与效果。

本章第二节给出的数控伺服系统就是用反馈校正来改善系统性能的。图 7-1 所示的数控伺服系统图若不加速度反馈时，其框图如图 7-49a) 所示。

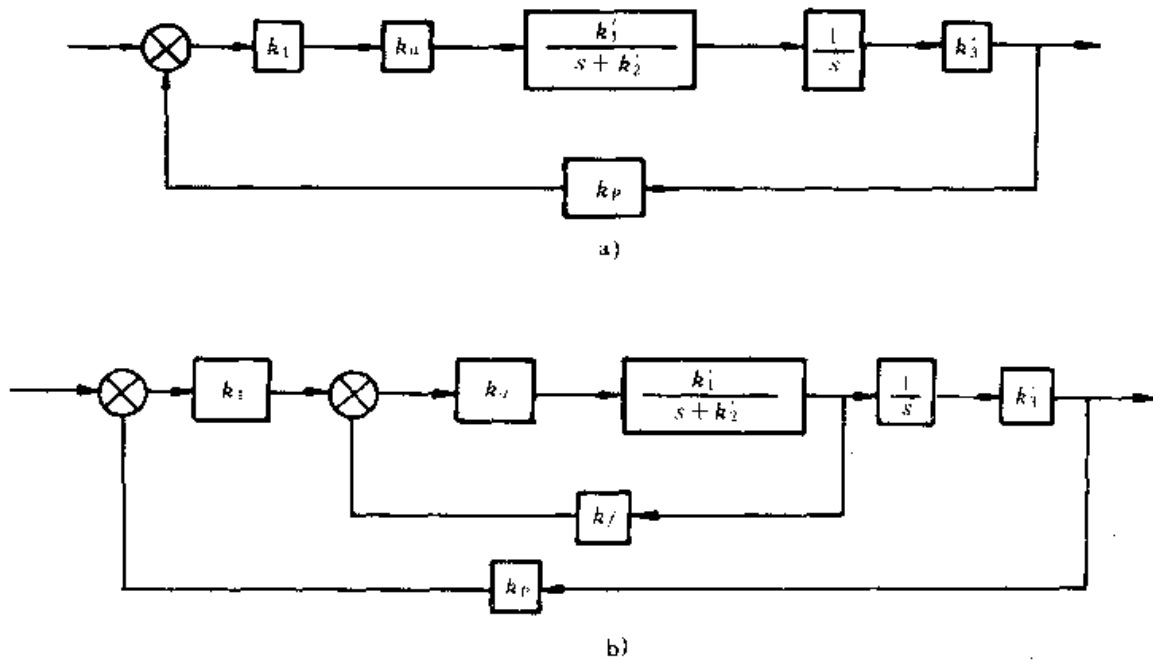


图 7-49 数控伺服系统框图

a) 无速度反馈 b) 有速度反馈

假设  $k_p=1$ ，未加速度反馈的系统开环传递函数为

$$G_0(s) = \frac{k_1 k_a k_1' k_3' / k_2'}{s \left( \frac{1}{k_2'} s + 1 \right)}$$

若根据所要求的稳态误差指标  $c_1 = \frac{1}{15}$ ，则需要系统开环增益  $k_1 k_a k_1' k_3' / k_2' = 15$ ，如果  $k_2' = 2$  则有

$$G_0(s) = \frac{15}{s(0.5s+1)}$$

可以画出未加速度反馈前系统的开环 Bode 图如图 7-50 中实线所示。由图可知，此时系统穿越频率  $\omega_c = 5.2 \text{ 1/s}$ ，相位稳定裕量  $r_c = 20^\circ$ 。显然，稳定性较差。

加上速度反馈校正后系统框图如图 7-49b) 所示。取反馈校正系数  $k_f = 10.07$ ，并适当地调整放大倍数  $k_a$ ，使开环增益仍为 15，则可得到经速度反馈校正后的系统开环传递函数

$$G_k(s) = \frac{15}{s(0.14s+1)}$$

其 Bode 图如图 7-50 中虚线所示。由图可见，校正后，由于开环增益仍为 15，可满足稳态误差要求，且此时  $\omega'_c = 10 \text{ 1/s}$ ，相位稳定裕量是  $r_c = 38^\circ$ ，系统的性能得到了有效的改善。

## 第五节 离散系统

由于计算机工作特点是只能接受和处理时间离散的数码，其输出量也是阶梯状的高

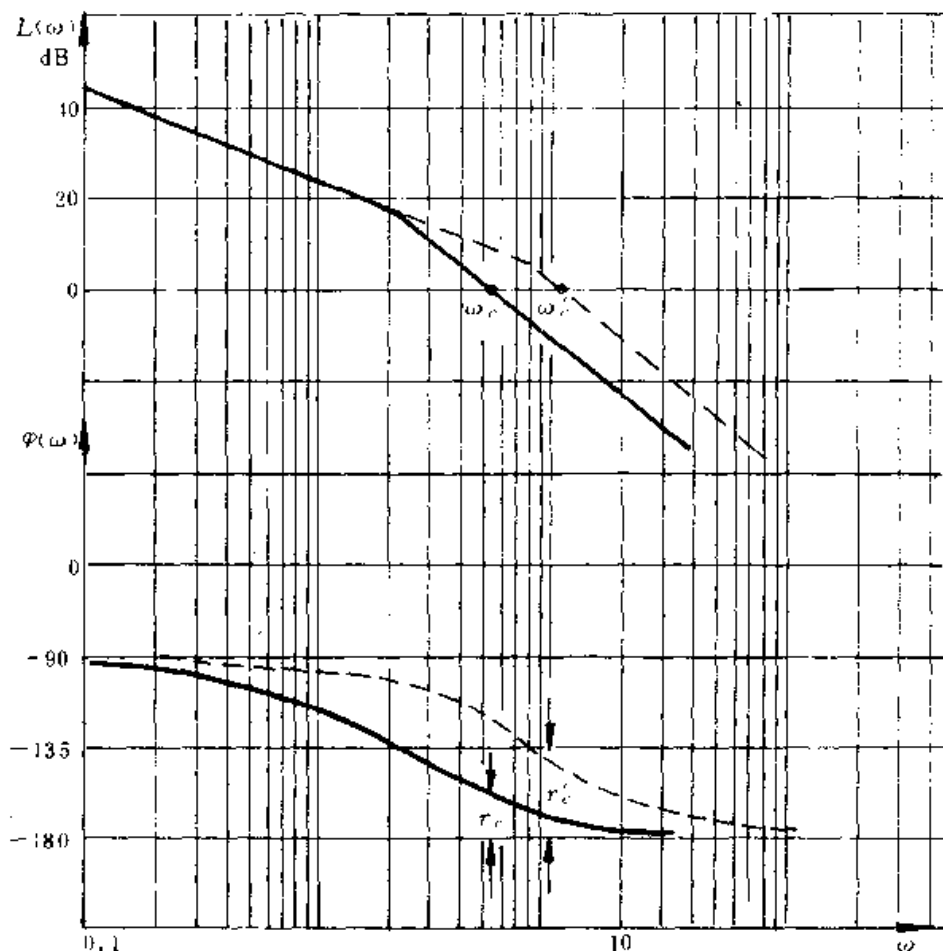


图 7-50 数控伺服系统校正前后 Bode 图

散时间信号，因此，对于带计算机的控制系统，如机电一体化系统，通常要用离散系统的理论和方法来建立系统数学模型和进行系统分析及系统设计。

### 一、离散系统数学模型

图 7-51 所示为一计算机控制的电机系统示意图。电机的输入电压由计算机输出信号经放大后产生。计算机的输出信号是如图 7-52a) 所示的阶梯状信号，即在一个采样间隔内，信号电平保持恒定。可以给出以输入电压  $V(t)$  为输入，以电机转角  $\theta(t)$  为输出的系统数学模型。

假设电机绕组的电感和电阻可以忽略，负载很小视为空载，电机轴惯性也忽略不计，则有：

$$\frac{d\theta(t)}{dt} = k \cdot V(t) \quad (7-45)$$

假设  $t=0$  时，  $\theta(0) = \theta_0$



图 7-51 电机计算机控制系统示意图

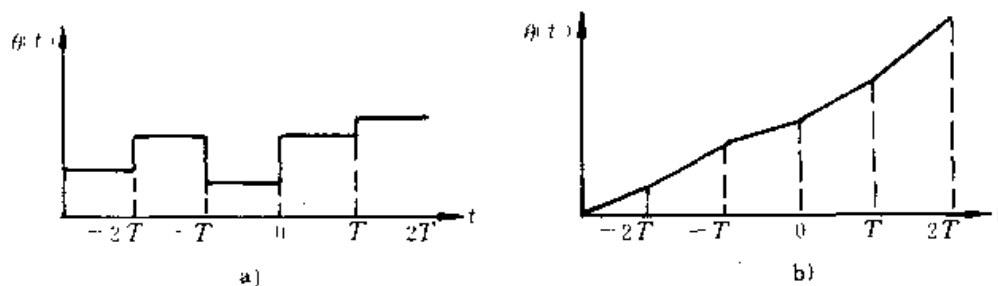


图 7-52 系统输入及输出信号

$0 \leq t < T$  时,  $V(t) = V_0$ ,  $T$  为采样周期。

将式 (7-45) 两端积分则有

$$\theta(t) = \int_{-\infty}^t k \cdot V(t) dt = \int_{-\infty}^0 k \cdot V(t) dt + \int_0^t k \cdot V(t) dt$$

当  $t = T$  时有:

$$\theta(T) = \int_{-\infty}^0 k \cdot V(t) dt + \int_0^T k \cdot V(t) dt = \theta_0 + \int_0^T k \cdot V(t) dt$$

因为在  $0 \leq t < T$  时,  $V(t) = V_0$  是一个常量, 因此有

$$\theta(T) = \theta_0 + k \cdot V_0 T$$

为简明起见, 下面将任一变量  $x(t)$  在  $t = nT$  的值  $x(nT)$  表示为  $x_n$ 。如本例中,  $\theta(nT) = \theta_n$ ,  $V(nT) = V_n$ ;  $\theta[(n-1)T] = \theta_{n-1}$ ,  $V[(n-1)T] = V_{n-1}$ 。由于初始值可在任意时刻取得, 上式可以写成如下的一般形式:

$$\theta_n = \theta_{n-1} + kT \cdot V_{n-1} \quad (7-46)$$

式 (7-46) 便是图 7-51 所示离散系统的数学模型。显然, 这是一个差分方程。事实上, 此系统输出信号  $\theta(t)$  如图 7-52b) 所示, 式 (7-46) 只能给出其在采样时刻  $t = 0, T, 2T, \dots$  时的值。需要说明的是, 在对连续系统进行计算机仿真计算时, 也要用差分方程来近似地代替微分方程, 求出系统各变量的数值解。在那种情况下, 用时间离散信号近似地代替连续信号, 是有误差的。且随着采样周期的加大, 误差增大。然而在计算机控制系统中, 以上所建立的数学模型是精确的而不是近似的, 这是因为系统的输入, 确实是如图 7-52a) 所示的那种在一个采样周期内保持恒定的离散信号。因此, 本章中所讨论的所有理论, 都是在输入信号在一个采样周期内保持恒定的前提之下进行。

上面已给出了一个积分环节的差分方程, 下面继续给出几个典型环节的数学模型。

### 1. 二次积分环节

由上例可看出, 已知连续系统的微分方程, 就可以给出相应的离散系统的差分方程, 而不必考虑系统本身物理性质的不同。

二次积分环节微分方程为

$$\frac{dy(t)}{dt} = k \cdot x(t) \quad (7-47)$$

在  $t=0$  时,  $y(t) = y_0, \dot{y}(t) = \dot{y}_0$

$$0 \leq t < T \text{ 时, } x(t) = x_0$$

对式 (7-47) 积分一次有

$$\frac{dy(t)}{dt} = \dot{y}(t) = kx_0t + \dot{y}_0$$

再积分一次有

$$y(t) = \frac{kx_0}{2}t^2 + \dot{y}_0t + y_0$$

当  $t=T$  时:

$$y(T) = \frac{kx_0}{2}T^2 + \dot{y}_0T + y_0$$

$$\dot{y}(T) = kx_0T + \dot{y}_0$$

写成一般形式:

$$y_n = y_{n-1} + T\dot{y}_{n-1} + \frac{kT^2}{2} \cdot x_{n-1} \quad (7-48)$$

$$\dot{y}_n = \dot{y}_{n-1} + kTx_{n-1} \quad (7-49)$$

为消去  $\dot{y}_n$ , 将方程 (7-49) 后移一个时间间隔:

$$\dot{y}_{n-1} = \dot{y}_{n-2} + kTx_{n-2} \quad (7-50)$$

将式 (7-50) 代入式 (7-48) 可得:

$$\dot{y}_{n-1} = \frac{1}{T}y_n - \frac{1}{T}y_{n-1} - \frac{kT}{2}x_{n-1} \quad (7-51)$$

将式 (7-51) 再后移一个时间间隔, 有:

$$\dot{y}_{n-2} = \frac{1}{T}y_{n-1} - \frac{1}{T}y_{n-2} - \frac{kT}{2}x_{n-2} \quad (7-52)$$

将式 (7-51)、(7-52) 代入式 (7-50) 有:

$$\frac{1}{T}y_n - \frac{1}{T}y_{n-1} - \frac{kT}{2}x_{n-1} = \frac{1}{T}y_{n-1} - \frac{1}{T}y_{n-2} - \frac{kT}{2}x_{n-2} + kTx_{n-2}$$

将上式简化, 有:

$$y_n = 2y_{n-1} - y_{n-2} + \frac{kT^2}{2}x_{n-1} + \frac{kT^2}{2}x_{n-2} \quad (7-53)$$

式 (7-53) 即为二次积分环节的差分方程。

## 2. 延迟过程

在许多控制过程中, 当输入信号加入后, 其输出端要隔一定的时间才复现输入信号, 这种现象叫作延迟。如图 7-53 所示。

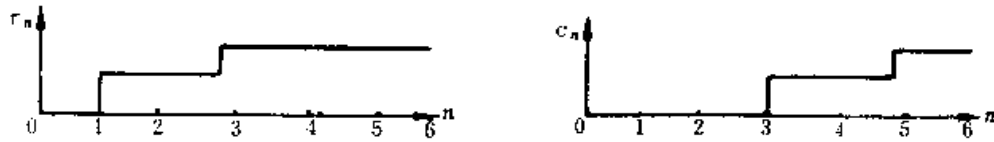


图 7-53 延迟过程

由图可见，输出比输入延迟了两个采样间隔，除此时间延迟外，输出与输入相同。图 7-53 所示的延迟过程写成差分方程为：

$$y_n = x_{n-2}$$

一般的有

$$y_n = x_{n-d} \quad (7-54)$$

$d$  为延迟的采样间隔数。

一些常用典型环节的差分方程由表 7-2 给出，在建立离散系统数学模型时，可以利用此表，直接给出差分方程。

## 二、基本的数字控制器

一般的闭环控制系统有如图 7-54 所示的形式。在连续系统中，控制器一般由模拟电路或其他控制仪表构成，而在计算机控制中，控制器却是用某种控制算法构成的。在控制过程中，计算机要完成如下的工作：

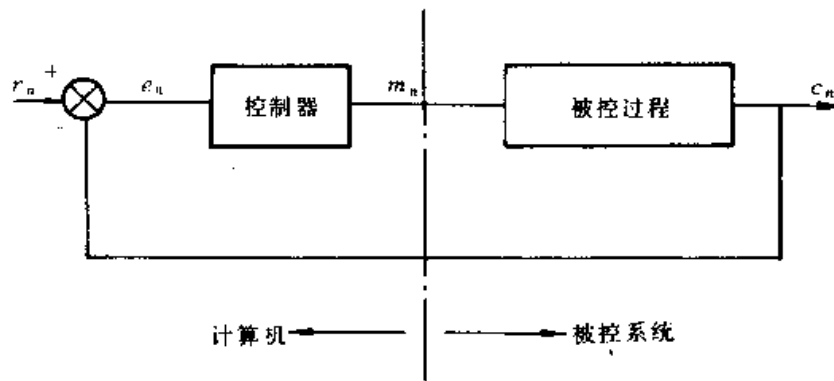


图 7-54 闭环控制系统结构

- (1) 得到系统输出的采样值。
- (2) 计算误差值：

$$e_n = r_n - c_n$$

- (3) 采用一定的控制算法计算合适的控制量  $m_n$ 。

表 7-2 常用典型环节的微分方程、差分方程及传递函数对照表

微分方程	差分方程 (采样间隔 $T$ )	传递函数 $\frac{Y_n}{X_n}$
1. $y(t) = kx(t-D)$	$y_n = kx_{n-d}$ ( $d = D/T$ )	$kB^d$
2. $\frac{dy(t)}{dt} = kx(t)$	$y_n = y_{n-1} + kTx_{n-1}$	$\frac{kTB}{1-B}$
3. $\tau \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = kx(t)$	$y_n = e^{-T/\tau} y_{n-1} + k(1 - e^{-T/\tau}) x_{n-1}$	$\frac{k(1 - e^{-T/\tau})B}{1 - e^{-T/\tau}B}$
4. $\frac{d^2y(t)}{dt^2} = kx(t)$	$y_n = 2y_{n-1} - y_{n-2} + \frac{kT^2}{2} x_{n-1} + \frac{kT^2}{2} x_{n-2}$	$\frac{kT^2B(1+B)}{(1-B)^2}$
5. $\tau \frac{d^2y(t)}{dt^2} + \frac{dy(t)}{dt} = kx(t)$	$y_n = a_1 y_{n-1} + a_2 y_{n-2} + b_1 x_{n-1} + b_2 x_{n-2}$ $a_1 = 1 + e^{-T/\tau}$ $a_2 = -e^{-T/\tau}$ $b_1 = k[T - \tau] - e^{-T/\tau}$ $b_2 = -k[Te^{-T/\tau} - \tau(1 - e^{-T/\tau})]$	$\frac{b_1 B + b_2 B^2}{1 - a_1 B - a_2 B^2}$
6. $\frac{1}{\omega_n^2} \frac{d^2y(t)}{dt^2} + 2\zeta \frac{dy(t)}{\omega_n dt} + y(t) = kx(t)$	$y_n = a_1 y_{n-1} + a_2 y_{n-2} + b_1 x_{n-1} + b_2 x_{n-2}$	$\frac{b_1 B + b_2 B^2}{1 - a_1 B - a_2 B^2}$
a. $\zeta > 1$ (过阻尼)	$a_1 = e^{p_1 T} + e^{p_2 T}$ $a_2 = -e^{(p_1 + p_2)T}$ $b_1 = k \left[ 1 + \frac{p_2 e^{p_1 T} - p_1 e^{p_2 T}}{p_1 - p_2} \right]$ $b_2 = k \left[ \frac{e^{(p_1 + p_2)T} - p_1 e^{p_1 T}}{p_1 - p_2} \right]$ $p_1 = -\zeta \omega_n + \omega_n \sqrt{\zeta^2 - 1}$ $p_2 = -\zeta \omega_n - \omega_n \sqrt{\zeta^2 - 1}$	
b. $\zeta = 1$ (临界阻尼)	$a_1 = 2e^{-\omega_n T}$ $a_2 = -e^{-2\omega_n T}$ $b_1 = k(1 - e^{-\omega_n T} - \omega_n T e^{-\omega_n T})$ $b_2 = k e^{-\omega_n T}(e^{-\omega_n T} + \omega_n T - 1)$ $a_1 = 2e^{-\zeta \omega_n T} \cos \omega_d T$ $a_2 = -e^{-2\zeta \omega_n T}$	
c. $\zeta < 1$ (欠阻尼)	$b_1 = k \left( 1 - \frac{\zeta \omega_n}{\omega_d} e^{-\zeta \omega_n T} \sin \omega_d T - e^{-\zeta \omega_n T} \cos \omega_d T \right)$ $b_2 = k e^{-\zeta \omega_n T} \left( e^{-\zeta \omega_n T} + \frac{\zeta \omega_n}{\omega_d} \sin \omega_d T - \cos \omega_d T \right)$ $\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}$	

(4) 输出  $m_n$  至被控过程。

在第四节中已经介绍了控制器的基本概念，下面将介绍怎样用计算机的控制算法实现控制器的控制作用。

在计算机控制中，各种控制算法都写成如下的标准形式：

$$m_n = m_{n-1} + k_0 e_n + k_1 e_{n-1} + k_2 e_{n-2} + \dots \quad (7-55)$$

### 1. 比例控制

比例控制是最简单的一种控制器，其数学表达式为

$$m(t) = k_p e(t)$$

这里， $k_p$  为比例常数，表示成差分方程则有

$$m_n = k_p e_n$$

为表示成式 (7-55) 给出的标准形式，向前移动一个时间间隔有

$$\begin{aligned} m_{n-1} &= k_p e_{n-1} \\ \Delta m_{np} &= m_n - m_{n-1} = k_p e_n - k_p e_{n-1} \end{aligned} \quad (7-56)$$

$$\begin{aligned} m_{np} &= m_{n-1} + \Delta m_{np} \\ m_{np} &= m_{n-1} + k_p e_n - k_p e_{n-1} \quad (\text{下标 } p \text{ 表示比例控制}) \end{aligned} \quad (7-57)$$

### 2. 积分控制

数学表达式为

$$m(t) = k_i \int_0^t e(\tau) d\tau$$

式中  $k_i$  为积分控制系数。根据向后积分原则，对于  $t = n \cdot T$  ( $T$  为采样周期)

$$\int_0^t e(\tau) d\tau \approx \sum_{j=1}^n T \cdot e_j$$

所以

$$m_n = k_i \sum_{j=1}^n T e_j = k_i \sum_{j=1}^n T \cdot e_j + k_i T e_n$$

$$m_{n-1} = k_i \sum_{j=1}^{n-1} T \cdot e_j$$

$$\Delta m_{ni} = k_i T e_n \quad (\text{下标 } I \text{ 表示积分控制}) \quad (7-58)$$

$$m_{ni} = m_{n-1} + k_i T e_n \quad (7-59)$$

### 3. 微分控制

连续数学表达式为

$$m(t) = k_d \cdot \frac{de(t)}{dt}$$

式中  $k_d$  为微分控制常数。

由向后微分近似



$$\frac{de(t)}{dt} \approx \frac{e_n - e_{n-1}}{T}$$

$$m_n = k_d \left( \frac{e_n - e_{n-1}}{T} \right)$$

$$m_{n-1} = k_d \frac{e_{n-1} - e_{n-2}}{T}$$

$$\Delta m_{nd} = \frac{k_d}{T} (e_n - 2e_{n-1} + e_{n-2}) \quad (7-60)$$

$$m_{nd} = m_{n-1} + \frac{k_d}{T} (e_n - 2e_{n-1} + e_{n-2}) \quad (7-61)$$

#### 4. 比例加积分加微分控制

其连续数学表达式为

$$m(t) = k_p e(t) + k_i \int_0^t e(t) dt + k_d \frac{de(t)}{dt}$$

由式 (7-57) ~ (7-59) 有:

$$m_n = m_{n-1} + \Delta m_n \quad (7-62)$$

$$\Delta m_n = \Delta m_{np} + \Delta m_{ni} + \Delta m_{nd} \quad (7-63)$$

将式 (7-56)、(7-58)、(7-60) 代入式 (7-63) 有:

$$\Delta m_n = k_0 e_n + k_1 e_{n-1} + k_2 e_{n-2} \quad (7-64)$$

式中

$$k_0 = k_p + k_i T + \frac{k_d}{T}$$

$$k_1 = -k_p - 2 \frac{k_d}{T}$$

$$k_2 = \frac{k_d}{T}$$

最后有:

$$m_n = m_{n-1} + k_0 e_n + k_1 e_{n-1} + k_2 e_{n-2} \quad (7-65)$$

### 三、传递函数及方框图

#### 1. 后移算子 $B$ 的定义

$$B y_n = y_{n-1}$$

$$B^2 y_n = y_{n-2}$$

$$B^j y_n = y_{n-j}$$

对于差分方程:

$$a_0 y_n + a_1 y_{n-1} + \dots + a_m y_{n-m} = b_1 x_{n-1} + b_2 x_{n-2} + \dots + b_m x_{n-m}$$

有:

$$a_0 y_n + a_1 B y_n + a_2 B^2 y_n + \dots + a_m B^m y_n = b_1 B x_n + b_2 B^2 x_n + \dots + b_m B^m x_n$$

#### 2. 传递函数的定义

$$G(B) = \frac{y_n}{x_n} = \frac{b_1 B + b_2 B^2 + \dots + b_m B^m}{a_0 + a_1 B + a_2 B^2 + \dots + b_m B^m}$$

对于图 7-54 所示的闭环控制系统，设控制器传递函数：

$$G_c(B) = \frac{m_n}{e_n}$$

被控系统的传递函数：

$$G_p(B) = \frac{c_n}{m_n}$$

系统有图 7-55 所示形式。

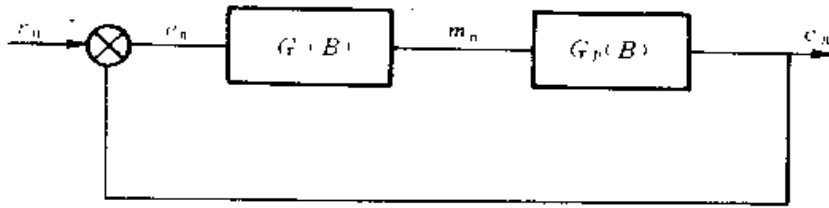


图 7-55 离散系统框图

系统闭环传递函数则为

$$G_B = \frac{c_n}{r_n}$$

$$\therefore c_n = G_p(B) \cdot m_n; \quad m_n = G_c(B) \cdot e_n$$

$$e_n = r_n - c_n$$

$$\therefore c_n = G_p(B) \cdot G_c(B) \cdot (r_n - c_n)$$

$$c_n + G_p(B)G_c(B)c_n = G_p(B) \cdot G_c(B) \cdot r_n$$

$$\text{即} \quad G(B) = \frac{c_n}{r_n} = \frac{G_c(B) \cdot G_p(B)}{1 + G_c(B) \cdot G_p(B)} \quad (7-66)$$

$$\text{例如：当} \quad G_c(B) = \frac{1.5 - B}{1 - B}; \quad G_p(B) = \frac{B}{1 - B} \text{时，}$$

$$G(B) = \frac{\frac{(1.5 - B) \cdot B}{(1 - B)(1 - B)}}{1 + \frac{(1.5 - B) \cdot B}{(1 - B)(1 - B)}} = \frac{(1.5 - B) \cdot B}{1 - 0.5B}$$

由式 (7-66) 可知：

$$c_n = G(B) \cdot r_n$$

$$\therefore c_n = \frac{(1.5 - B) \cdot B}{1 - 0.5B} \cdot r_n$$

$$(1 - 0.5B)c_n = 1.5Br_n - B^2r_n$$

根据  $B$  算子的定义，可以由上式写出闭环系统的差分方程：

$$c_n - 0.5c_{n-1} = 1.5r_{n-1} - r_{n-2}$$

与连续系统的传递函数类似，离散系统的传递函数为分析和设计离散系统提供了一个有力的工具。应用  $B$  算子，可以将控制器和被控系统用同一种数学模型表示，为系统分析提供了极大的方便。但须注意，用  $B$  算子形成传递函数，任一环节的输入都必须是如图 7-52 所示的那种阶梯状时间信号，即在一个采样周期内，输入信号为常值。否则，将出现错误。

例 一台由计算机控制的直流电机驱动转台位置控制系统原理如图 7-56 所示，试给出系统传递函数。

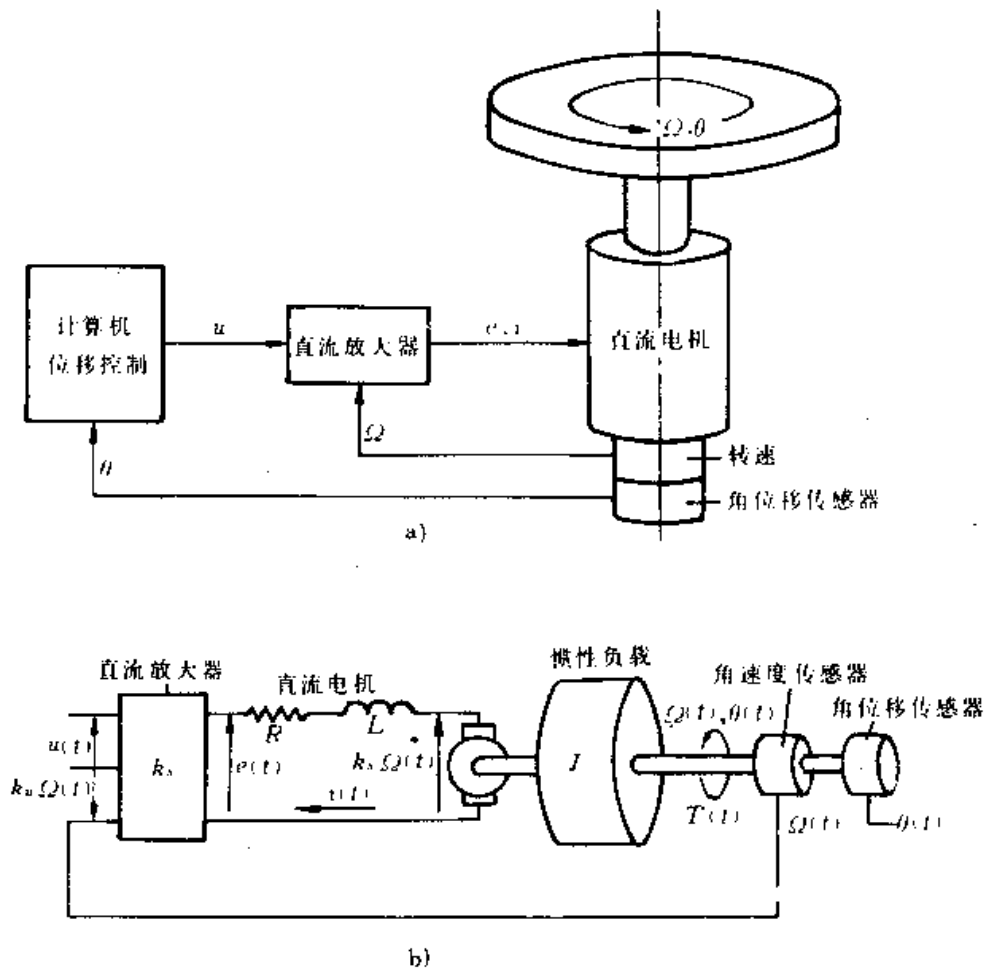


图 7-56 转台位置控制系统原理图

图中，各变量含义如下：

- $V(t)$  —— 直流放大器输入电压
- $e(t)$  —— 直流电机输入电压
- $i(t)$  —— 电机电流
- $T(t)$  —— 电机输出扭矩
- $\Omega(t)$  —— 电机及转台转速
- $\theta(t)$  —— 电机及转台转角位移

各参数含义及量值如下:

$k_a$ ——直流放大器放大倍数 (119)

$R$ ——电枢电阻 ( $1.67\Omega$ )

$L$ ——电枢电感 ( $1.6 \times 10^{-3}\text{H}$ )

$k_e$ ——反电势常数 ( $4.32 \times 10^{-2}\text{V/rad}$ )

$k_t$ ——扭矩系数 ( $4.2 \times 10^{-2}\text{N} \cdot \text{m/A}$ )

$J$ ——电机及转台转动惯量 ( $36.6 \times 10^{-5}\text{kg} \cdot \text{m}^2$ )

$k_v$ ——转速反馈系数 ( $2.52 \times 10^{-2}\text{V/rad}$ )

解 对于此系统, 认为电机负载为纯惯性负载时, 系统各变量之间微分方程组如下:

$$\begin{cases} e(t) = R \cdot i(t) + L \cdot \frac{di(t)}{dt} + k_e \Omega(t) \\ T(t) = k_t \cdot i(t) \\ J \frac{d\Omega(t)}{dt} = T(t) \\ \Omega(t) = \frac{d\theta(t)}{dt} \\ e(t) = k_a [V(t) - k_v \Omega(t)] \end{cases}$$

联立这 5 个微分方程, 可得出转台角速度  $\Omega(t)$  与直流放大器输入电压  $V(t)$  之间的微分方程:

$$\frac{LJ}{(k_e + k_a k_v) k_t} \frac{d^2 \Omega(t)}{dt^2} + \frac{RT}{(k_e + k_a k_v) k_t} \frac{d\Omega(t)}{dt} + \Omega(t) = \frac{k_a}{k_e + k_a k_v} V(t)$$

将各参数的值代入, 有:

$$4.582 \times 10^{-6} \frac{d^2 \Omega(t)}{dt^2} + 4.782 \times 10^{-3} \frac{d\Omega(t)}{dt} + \Omega(t) = 39.12V(t) \quad (7-67)$$

当采样周期  $T=0.002\text{s}$  时, 由表 7-2 可查得传递函数:

$$\frac{\Omega_n}{V_n} = \frac{8.922B + 4.459B^2}{1 - 0.782B + 0.124B^2}$$

以上给出了转台的转速  $\Omega_n$  与放大器输入电压  $V_n$  之间的传递函数。要控制转台的转角位移, 必须引入位置反馈, 使系统成为如图 7-57 所示的位移反馈控制系统。

图中  $\theta_m$  为指令位移输入, 现在需要给出转角位移  $\theta_n$  与指令输入  $\theta_m$  之间的传递函数。或许会有读者认为, 可以用下面的方法, 给出其传递函数:

$$\because \frac{d\theta}{dt} = \Omega(t)$$

设  $G_2(B) = \frac{\theta_n}{\Omega_n}$ , 由表 7-2 可得到

$$G_2(B) = \frac{\theta_n}{\Omega_n} = \frac{0.002B}{1-B}$$

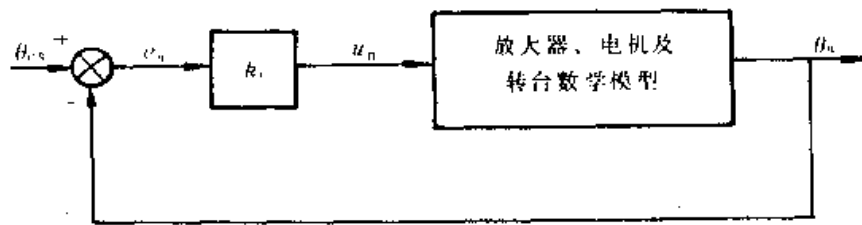


图 7-57 位移反馈控制系统框图

参照连续系统中环节串联，可得系统框图如图 7-58a) 所示。

必须指出，这种做法是错误的。因为图中第二个环节的输入量  $\Omega_n$  是一个连续量，而不是如图 7-52 所示的那种在采样间隔内保持恒定的信号。正确的做法如下：

将  $\Omega(t) = \frac{d\theta}{dt}$  代入式 (7-67) 有：

$$4.582 \times 10^{-6} \frac{d^3\theta}{dt} + 4.782 \times 10^{-3} \frac{d^2\theta}{dt} + \frac{d\theta}{dt} = 39.12V(t) \quad (7-68)$$

由表 7-2 无法直接查到对应式 (7-68) 的传递函数。可以做如下变换：

$$\frac{\theta(s)}{V(s)} = \frac{39.12}{4.582 \times 10^{-1}s^3 + 4.782 \times 10^{-3}s^2 + s}$$

将上式右端展开成部分分式和，有：

$$\frac{\theta(s)}{V(s)} = \frac{0.03219}{0.001325s+1} + \frac{-0.2193}{0.003459s+1} + \frac{39.12}{s}$$

设

$$\theta_1(s) = \frac{0.03219}{0.001325s+1} \cdot V(s), \quad \theta_2(s) = \frac{-0.2193}{0.003459s+1} \cdot V(s), \quad \theta_3(s) = \frac{1}{s} \cdot V(s)$$

有

$$\theta(s) = \theta_1(s) + \theta_2(s) + \theta_3(s)$$

$$\theta(t) = \theta_1(t) + \theta_2(t) + \theta_3(t)$$

而

$$0.01325 \frac{d\theta_1(t)}{dt} + \theta_1(t) = 0.03219V(t)$$

$$-0.003459 \frac{d\theta_2(t)}{dt} + \theta_2(t) = -0.2193V(t)$$

$$\frac{d\theta_3(t)}{dt} = 39.12V(t)$$

由表 7-2 可查出

$$\frac{\theta_{1n}}{V_n} = \frac{0.02508B}{1 - 0.2211B}$$

$$\frac{\theta_{2n}}{V_n} = \frac{-0.09631B}{1 - 0.5609B}$$

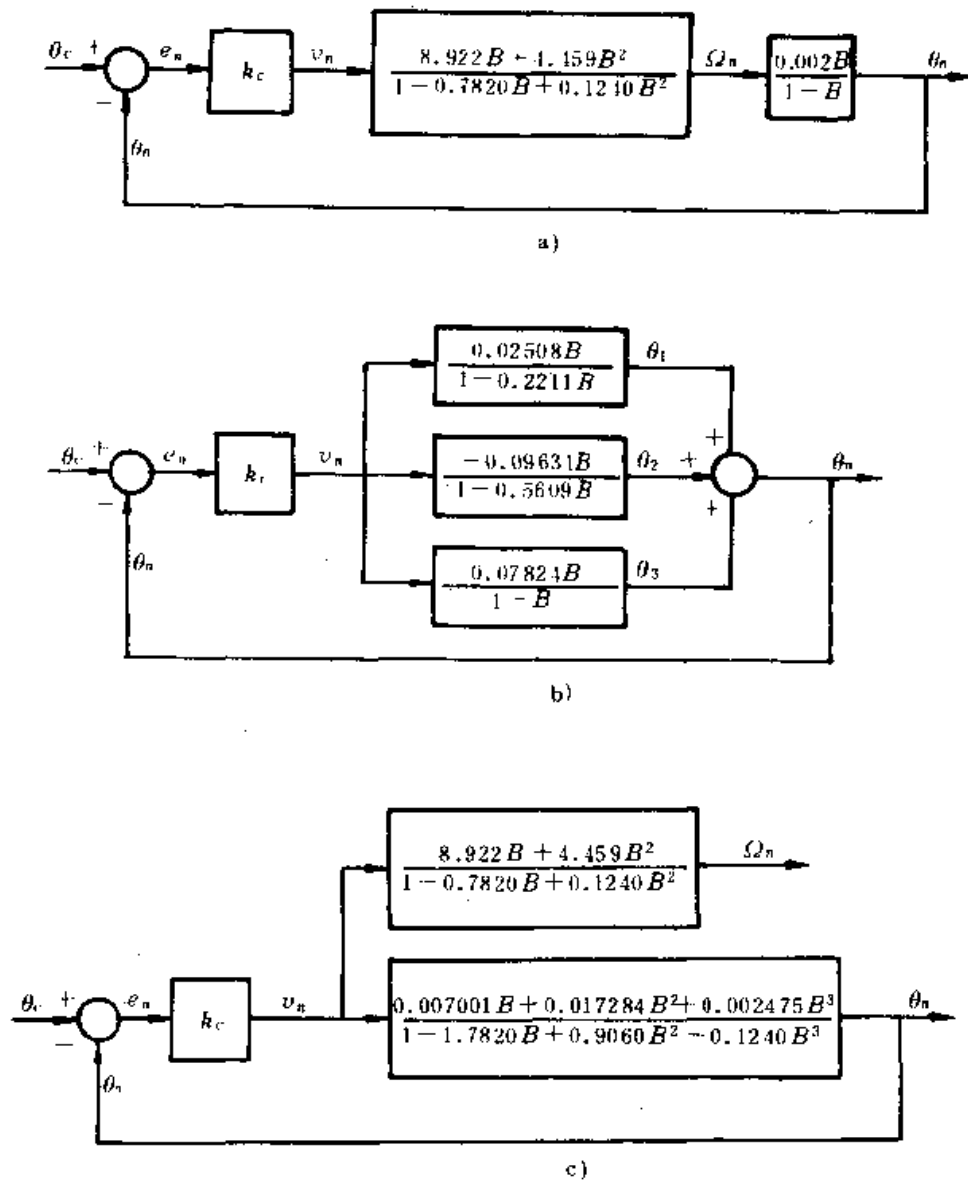


图 7-58 计算机控制转台角位移系统框图  
a) 错误框图 b) 正确框图 c) 简化框图

$$\frac{\theta_{3n}}{V_n} = \frac{0.07824B}{1 - B}$$

而  $\theta_n = \theta_{1n} + \theta_{2n} + \theta_{3n}$ , 于是, 系统的框图如图 7-58b) 所示。化简后框图如图 7-58c) 所示。

根据式 (7-66) 可得系统闭环传递函数

$$\frac{\theta_n}{\theta_{cn}} = \frac{k_c(0.007001B + 0.01784B^2 + 0.002475B^3)}{1 - (1.7820 - 0.007001k_c)B + 8(0.9060 + 0.007284k_c)B^2 - (0.1240 - 0.002475k_c)B^3} \quad (7-69)$$

#### 四、离散系统稳定性判别

由式 (7-66) 可有闭环系统特征方程

$$1 + G_c(B) G_p(B) = 0$$

若 
$$G_c(B) \cdot G_p(B) = \frac{N(B)}{D(B)}$$

则 
$$1 + G_c(B) \cdot G_p(B) = \frac{D(B) + N(B)}{D(B)}$$

特征方程成为

$$D(B) + N(B) = 0$$

系统稳定的充要条件是特征方程的所有根

$$|r_i| > 1 \quad i=1, 2, \dots, k$$

例如式 (7-69) 给出的系统闭环传递函数, 当  $k_c=0.8$  时, 特征方程为:

$$1 - 1.776B + 0.9198B^2 - 0.1220B^3 = 0$$

特征根为:

$$r_1 = 1.08, r_2 = 1.54, r_3 = 4.92$$

三个特征根的模均大于 1, 因此系统稳定。

当  $k_c=14.0$  时, 读者可自行证明系统是不稳定的。

#### 五、系统响应

与连续系统类似, 可以根据离散系统的传递函数, 给出其对一些典型输入信号的输出响应, 从而对系统性能做出分析与比较。

##### 1. 输入信号

首先应指出, 计算机只能接受从一个连续函数的离散采样而产生的数的序列。为此, 需要引入单位采样和发生函数的概念。

(1) 单位采样 定义在起始点 ( $t=0$ ), 其值大小为 1 的采样用  $s_n$  表示, 如图 7-59a) 所示, 其数学表达式

$$s_n = \begin{cases} 1 & n=0 \\ 0 & n \neq 0 \end{cases}$$

将采样时间后移, 可以定义  $n=k$  时的单位采样

$$s_{n-k} = \begin{cases} 1 & n=k \\ 0 & n \neq k \end{cases}$$

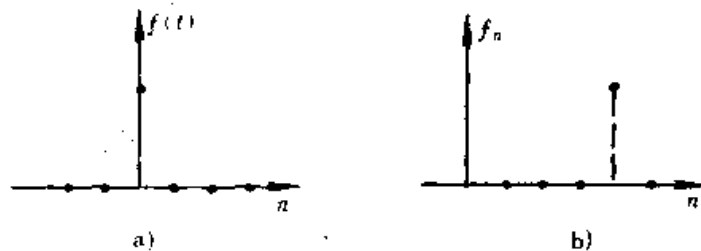


图 7-59 单位采样



图 7-60 单位阶跃信号及其采样序列

如图 7-59b) 所示。显然有

$$s_{n-k} = B^k s_n \quad (7-70)$$

(2) 发生函数 在  $n=k$  处, 大小为  $A_k$  的函数  $f$  的采样可以由下式表示:

$$f_k = A_k \cdot s_{n-k} = A_k B^k s_n \quad (7-71)$$

由此可见, 任何连续函数的采样序列均可由以上单位采样的前后移动, 成比例扩大或缩小等形式的改变之后叠加起来予以表示, 称之为发生函数。下面给出几个典型输入信号的发生函数。

①单位阶跃信号 如图 7-60 所示的单位阶跃信号可表示为:

$$\begin{aligned} f_n &= s_n + s_{n-1} + s_{n-2} + \dots \\ &= s_n + B s_n + B^2 s_n + \dots \\ &= (1 + B + B^2 + B^3 + \dots) s_n \\ &= \frac{1}{1-B} s_n \end{aligned} \quad (7-72)$$

②脉冲信号 如图 7-61 所示的方波脉冲信号, 可以看成两个阶跃信号的合成: 一个

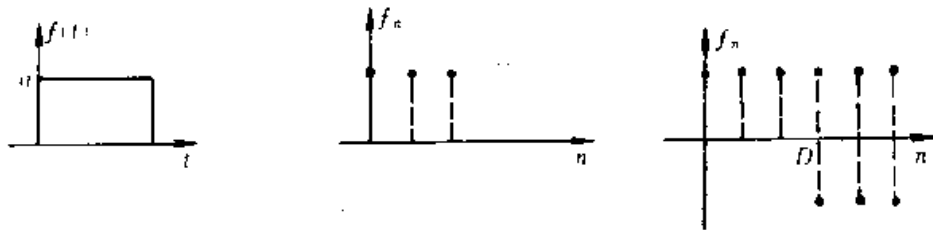


图 7-61 方波脉冲信号及采样序列

为从 0 点开始, 幅值为  $A$  的正阶跃信号, 一个为从  $D$  点开始, 幅值为  $-A$  的负阶跃信号, 因此, 其发生函数为:

$$\begin{aligned} f_n &= A(1 + B + B^2 + \dots) s_n + (-A) B^a (1 + B + B^2 + \dots) s_n \\ &= A \left( \frac{1}{1-B} - \frac{B^a}{1-B} \right) s_n = A \cdot \frac{1 - B^a}{1 - B} s_n \end{aligned} \quad (7-73)$$

式中  $a = \frac{D}{T}$ ,  $T$  为采样周期

## 2. 系统响应

按式 (7-66), 对任一输入信号  $r_n$ , 设其发生函数为  $F(B) \cdot s_n$  则有:

$$G_n = G(B) \cdot r_n = G(B) \cdot F(B) \cdot s_n$$

图 7-62 为某系统方框图, 下面以

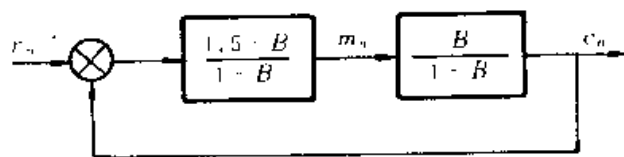


图 7-62 某系统方框图



此为例，给出求系统响应的方法：

已知输入  $r_n$  为单位阶跃函数，求输出  $c_n$ ：

$$\begin{aligned} \therefore G(B) &= \frac{\frac{1.5-B}{1-B} \cdot \frac{B}{1-B}}{1 + \frac{1.5-B}{1-B} \cdot \frac{B}{1-B}} = \frac{B(1.5-B)}{1-0.5B} \\ r_n &= \frac{1}{1-B} s_n = F(B) \cdot s_n \quad F(B) = \frac{1}{1-B} \\ \therefore c_n &= G(B) \cdot F(B) \cdot s_n \\ &= \frac{B(1.5-B)}{(1-0.5B)(1-B)} \cdot s_n = \frac{1.5B - B^2}{1 - 1.5B + 0.5B^2} \cdot s_n \end{aligned}$$

利用长除法可得：

$$\begin{array}{r} 1 - 1.5B + 0.5B^2 \overline{) 1.5B + 1.25B^2 + 1.125B^3 + \dots} \\ \underline{1.5B - 2.25B^2 + 0.75B^3} \phantom{+ \dots} \\ 1.25B^2 - 0.75B^3 \phantom{+ \dots} \\ \underline{1.25B^2 - 1.875B^3 + 0.625B^4} \\ 1.125B^3 - 0.625B^4 \phantom{+ \dots} \end{array}$$

$$\therefore c_n = (1.5B + 1.25B^2 + 1.25B^3 + \dots) s_n$$

## 六、控制器设计

在图 7-54 所示的计算机闭环控制系统中，控制器的控制作用是由计算机控制算法实现的，系统品质的优劣在很大程度上取决于控制器、亦即控制算法的设计。下面，简要介绍根据系统的品质要求设计控制器的方法。

现根据给定的输入与输出关系，设计控制器。

设计者若希望输入与输出之间符合一个所要求的的关系，即：

$$\frac{c_n}{r_n} = G_d(B)$$

这时， $G_d(B)$  则为一个规定的传递函数。

因为 
$$\frac{c_n}{r_n} = \frac{G_c(B) G_p(B)}{1 + G_c(B) G_p(B)}$$

联立以上二式，有：

$$G_c(B) = \frac{G_d(B)}{G_p(B) [1 - G_d(B)]} \quad (7-74)$$

例 某被控过程为一积分环节，即有

$$\frac{dc(t)}{dt} = k_p \cdot m(t), \text{ 若要求输出为输入的一步延迟, 即 } c_n = r_{n-1} \text{ 或 } \frac{c_n}{r_n} = B, \text{ 试设计控}$$

制器  $G_c(B)$ 。

解：由表 7-2，有

$$\frac{c_n}{m_n} = \frac{k_p T B}{1-B} = G_p(B)$$

已知  $G_d(B) = B$  由式

$$G_c(B) = \frac{B}{\frac{k_p T B}{1-B} \cdot (1-B)} = \frac{1}{k_p T}$$

即

$$\frac{m_n}{e_n} = \frac{1}{k_p T}$$

控制算法  $m_n = \frac{1}{k_p T} \cdot e_n$  为一比例控制。

当然也可根据其他要求，如按给定的误差——输入关系来设计控制器，这里不再一一详述。

## 第八章 机电一体化常用机械零部件设计

机电一体化系统要求有快速响应性、高的精度和稳定性。而系统中的机械零部件的各种机械特性对系统静态与动态性能影响很大。为此，在系统的各机械零部件设计中，无论是结构还是参数选择，应尽可能考虑到无间隙、低摩擦、低惯量、高刚度、高谐振及恰当的阻尼比。本章给出有关常用机械参数的计算及介绍一些常用典型机械零部件的设计方法。

### 第一节 机电一体化系统中主要机械特性与参数

在机械系统的分析中，质量、弹簧及阻尼这三个理想的机械元件代表了机械系统各组成部分的本质。另外，机械系统中的有关负载、驱动力、间隙、死区等也直接影响系统的品质。下面按不同的运动形态，对其有关特性与参数进行讲述。

#### 一、质量与转动惯量

##### 1. 质量

任何机械系统的零部件都是由具有质量的物质组成的。质量可看成元件贮存平动动能的性能参数。物体质量可用下式计算：

$$m = \frac{W}{g} \quad (8-1)$$

式中  $m$ ——物体质量 (kg)

$W$ ——物体重力 (N)

$g$ ——重力加速度 ( $\text{m/s}^2$ )

设作用于质量  $m$  上的力为  $F$ ，根据牛顿第二定律有

$$F = m \cdot a(t) = m \frac{d^2x(t)}{dt^2} = m \frac{dv(t)}{dt}$$

式中  $x(t)$ ——位移

$v(t)$ ——速度

$a(t)$ ——加速度

##### 2. 转动惯量

转动惯量是元件贮存转动动能的一种特性参数。一个给定元件的转动惯量取决于转轴周围的几何形状及其密度。对由质量组成的连续物体，其转动惯量为

$$J = \int r^2 dm$$

式中  $r$  为元质量  $dm$  的回转半径。机械中应用最多的绕其中心轴旋转的圆柱形或圆盘形物体，其转动惯量为

$$J = \frac{1}{2}mr^2 \quad (8-2)$$

式中  $m$  —— 圆盘或圆柱体的质量

$r$  —— 圆盘或圆柱体的半径

通过计算可知，圆盘或圆柱形旋转物体的转动惯量与其半径（直径）的四次方成正比，与其厚度（长度）的一次方成正比。

设作用于转动惯量  $J$  上的转矩为  $M$ ，则有

$$M = J \frac{d^2\theta(t)}{dt^2} = J \frac{d\omega(t)}{dt}$$

式中  $\theta(t)$  —— 转角

$\omega(t)$  —— 角速度

## 二、线性弹簧与刚度

在机械元件上作用一个稳态力后，便产生一个稳定的变形。这种柔性便是弹簧的基本特性。理想的纯弹簧可以看成是一个零质量的机械元件，它是贮能元件。一个弹簧可以是实际的弹簧零件，也可以是材料的弹性。虽然一切弹簧都有某种程度的非线性，然而当变形量较小时，弹簧的变形与所受的力可近似地认为是线性关系。

对于平动弹簧，可有如下关系 [图 8-1a)]：

$$F(t) = K x(t) \quad (8-3)$$

式中  $F(t)$  —— 弹簧所受的力

$x(t)$  —— 弹簧的变形

$K$  —— 弹簧刚度（弹簧常数）

对于扭转弹簧，类似地也有关系式 [见图 8-1b)]

$$M(t) = K\theta(t) \quad (8-4)$$

式中  $M(t)$  —— 弹簧所受的扭矩

$\theta(t)$  —— 弹簧的角度变形

$K$  —— 弹簧扭转刚度（单位角位移的转矩）

质量、转动惯量、刚度会影响到系统的各项误差，如跟踪误差、静态误差、死区误差等，并决定了系统的固有频率。

## 三、固有频率计算

对于一个弹簧质量系统，固有频率是一个对系统品质和性能有很大影响的重要特性参数。下面给出一些常

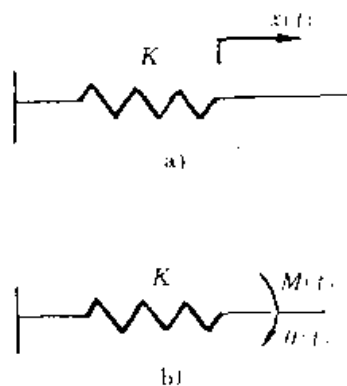
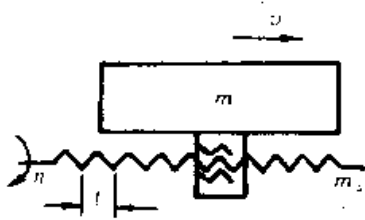


图 8-1 线性弹簧示意图  
a) 平动弹簧 b) 扭转弹簧

用机械系统固有频率的计算公式。

1. 丝杠传动系统的拉压固有频率

如图 8-2 所示的传动结构型式，以丝杠螺母机构实现移动部件的直线位移，则系统的拉压固有频率  $\omega_n$  为



$$\omega_n = \sqrt{\frac{K_0}{m}} \quad (\text{rad/s}) \quad (\text{不计丝杠质量}) \quad (8-5)$$

图 8-2 丝杠传动系统 或

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K_0}{m + \frac{m_s}{3}}} \quad (\text{rad/s}) \quad (\text{不计丝杠质量}) \quad (8-6)$$

式中  $K_0$ ——丝杠传动综合拉压刚度 (N/m) (其计算参看第五节)

$m$ ——移动部件质量 (kg)

$m_s$ ——丝杠质量 (kg)

2. 轴系的扭转固有频率

如图 8-3 所示结构型式，以轴驱动负载惯量转动。则系统的扭转固有频率  $\omega_n$  为

$$\omega_n = \sqrt{\frac{C_\theta}{J + \frac{J_c}{3}}} \quad (\text{rad/s}) \quad (8-7)$$

式中  $C_\theta$ ——轴的扭转刚度 (N·m/rad)

$J_c$ ——轴的转动惯量 (kg·m<sup>2</sup>)

$J$ ——被驱动件转动惯量 (kg·m<sup>2</sup>)

3. 双自由度系统固有频率

例如具有两条进给传动链或带配重的移动部件即是双自由度系统，示意如图 8-4。可

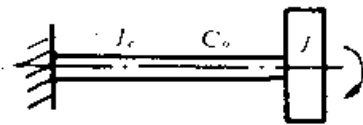


图 8-3 旋转轴系



图 8-4 双自由度系统

求得系统综合固有频率  $\omega_n$  为

$$\omega_n^2 = \frac{1}{2} \left[ \omega_1^2 + \omega_2^2 \left( 1 + \frac{m_2}{m_1} \right) \right] \mp \frac{1}{2} \sqrt{\left[ \omega_1^2 + \omega_2^2 \left( 1 + \frac{m_2}{m_1} \right) \right]^2 - 4\omega_1^2\omega_2^2} \quad (8-8)$$

式中

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{K_1}{m_1}}$$

$$\omega_2 = \sqrt{\frac{K_2}{m_2}}$$

$m_1$ 、 $m_2$ ——两个移动部件质量 (kg)

$K_1$ 、 $K_2$ ——两个对应的拉压刚度 (N/m)

正负号表示固有频率的两个值。

#### 4. 液压驱动系统固有频率

对于用油马达驱动的液压驱动系统,如图 8-5a) 所示。可求得其固有频率为

$$\omega_n = \sqrt{\frac{4\beta_e D_M^2 \times 10^{-5}}{V_0 J_r}} \quad (\text{rad/s}) \quad (8-9)$$

式中  $\beta_e$  ——油的体积弹性模数,一般等于  $7 \times 10^8$  (N/m<sup>2</sup>)

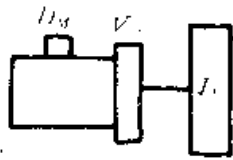
$D_M$  ——油马达排量 (m<sup>3</sup>/rad)

$V_0$  ——油马达与阀的总体积 (m<sup>3</sup>)

$J_r$  ——油马达惯量与折算到马达轴上负载惯量之和 (kg·m<sup>2</sup>)

对用油缸驱动的液压驱动系统,如图 8-5b) 所示。其

固有频率为

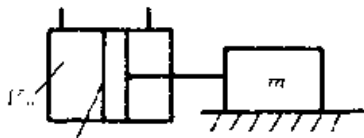


a)

$$\omega_n = \sqrt{\frac{4\beta_e A^2 \times 10^{-5}}{V_0 M}} \quad (\text{rad/s}) \quad (8-10)$$

式中  $A$  ——油缸活塞面积 (m<sup>2</sup>)

$V_0$  ——油缸总体积 (m<sup>3</sup>)



b)

图 8-5 液压驱动系统

a) 油马达驱动 b) 油缸驱动

## 四、摩 擦

### 1. 摩擦的基本类型

两物体间只要有相对运动或有运动的趋势,就有摩擦力存在。在物理系统中,摩擦力经常是非线性的。摩擦力的特性一般取决于摩擦表面的成分、结构、表面间的压力、相对速度等多种因素。通常可将摩擦力分为三种基本类型,即粘性摩擦、静摩擦和库仑摩擦。

(1) 粘性摩擦 粘性摩擦力代表一种阻滞力,它正比于相对速度。当物体以一般速度通过液体或气体时就会出现粘性摩擦。粘性摩擦可用图 8-6 所示的阻尼器来表示。

粘性摩擦的数学表达式是

$$F(t) = B \frac{dx(t)}{dt}$$

式中  $F(t)$  ——粘性摩擦力

$B$  ——粘性摩擦因数

$x(t)$  ——位移

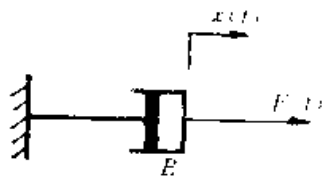


图 8-6 代表粘性摩擦的阻尼器

力。

图 8-7a) 表示出粘性摩擦力与速度间的函数关系

(2) 静摩擦 静摩擦是一种力图阻止运动开始的阻滞力。

静摩擦力可用下式表示：

$$F(t) = \pm(F_s)_{v=0}$$

该式表示只有当物体静止 [ $v = \dot{x}(t) = 0$ ] 并有运动趋势

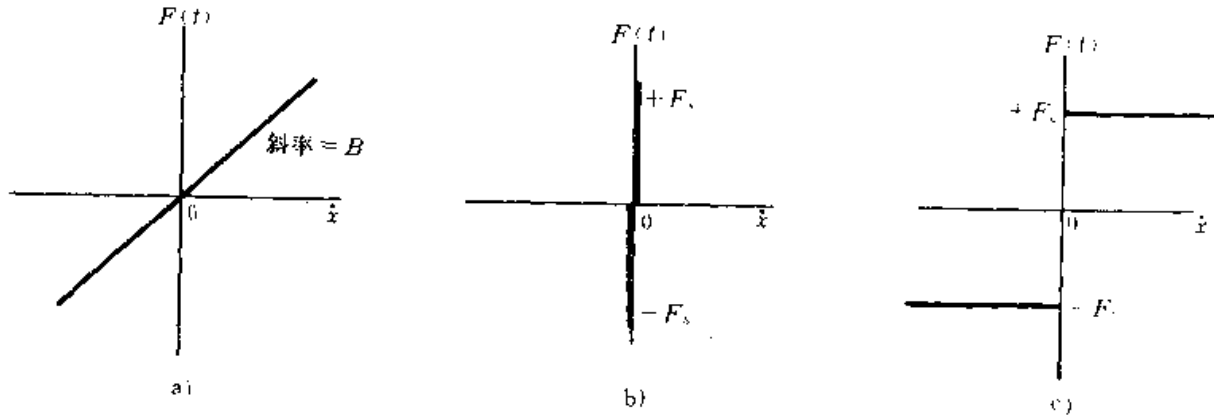


图 8-7 摩擦力的函数关系

a) 粘性摩擦 b) 静摩擦 c) 库仑摩擦

时才有静摩擦力存在，其大小为  $F_s$ ，最大值发生在开始运动的瞬间，其符号取决于速度的起始方向。图 8-7b) 表示出静摩擦力与速度的关系曲线。当运动一开始，静摩擦即消失而代之以其他形式的摩擦力。

(3) 库仑摩擦 库仑摩擦力是一种大小与速度无关的恒值阻滞力，其符号随速度方向的改变而改变。当两种相互接触的材料或物体作相对滑动时，便出现库仑摩擦。

库仑摩擦的数学关系式是

$$F(t) = F_c \text{sign} \dot{x}(t) = F_c \frac{\dot{x}(t)}{|\dot{x}(t)|}$$

式中  $F(t)$  —— 库仑摩擦力

$F_c$  —— 库仑摩擦因数

$\text{sign} \dot{x}(t)$  —— 速度的符号

库仑摩擦与速度的关系曲线表示于图 8-7c)。

以上三种摩擦都可推广应用于转动情况。

## 2. 摩擦的影响

摩擦对系统的工作特性有很大影响，它会导致伺服系统的静态误差和动态误差，并会引起驱动系统在低速时爬行。

(1) 摩擦对系统误差的影响，以位置伺服系统为例，由于有静摩擦力，当驱动力

(力矩)施加后,移动部件并不立即移动,即系统有输入位移或转角后,系统并无输出的位移或转角。从而产生由静摩擦引起的死区误差:

$$\delta_f = \frac{F_0}{K_0}$$

式中  $\delta_f$ ——摩擦变形引起的死区误差

$F_0$ ——静摩擦力

$K_0$ ——折算至移动部件的综合拉压刚度

粘性摩擦系数  $B$  会影响系统的阻尼比(如二阶系统阻尼比  $\zeta = B/2\sqrt{mK_0}$ ),对系统的振荡产生阻尼作用,  $B$  大可提高系统的稳定性,但会使输出响应变慢,即影响系统的动态误差。一般应取恰当的阻尼比值,如二阶系统设计中取  $\zeta = 0.4 \sim 0.8$ ,以兼顾快速性与稳定性的要求。

库仑摩擦的影响是使输入的有效值减小,从而减小输出位移的超调和振荡,但同时也使系统具有稳态误差。图 8-8 给出输入为单位阶跃时具有库仑摩擦的系统的三种输出位移的典型阶跃响应曲线。当输出速度达到零时,误差信号使电机产生的驱动力不足以克服库仑摩擦力,输出位置将停在  $(1 - \frac{F_c}{K})$  和  $(1 + \frac{F_c}{K})$  的范围内。

(2)摩擦引起的低速爬行 系统在低速运行时,可能出现时启时停,时快时慢的不平稳运动,即爬行现象。产生爬行的原因主要是由于摩擦系数的非线性和运动部件刚性不足。运动开始时,系统需克服静摩擦的滞阻作用才能起动。一旦运动开始,摩擦系数降低,维持运动所需驱动力迅速减小,负载由于惯性和迅速释放能量所导致的弹簧效应而向前滑行。当驱动力小于摩擦力时运动又将停止。

爬行现象十分有害。因此,减小静、动摩擦力之差及滑动面的摩擦阻力十分重要,另外还可考虑采用一些特殊的摩擦材料。

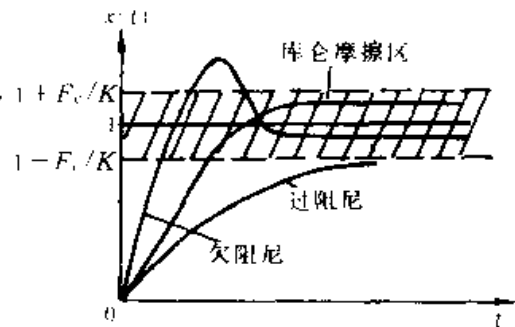


图 8-8 具有库仑摩擦系统的典型阶跃响应

## 五、间隙和死区

在齿轮传动、丝杠螺母传动或其他类似传动中,通常存在有传动间隙。间隙的存在会使运动反向时产生死区和回差,并会使系统产生不希望有的振荡和不稳定性。图 8-9 所示是输入和输出构件之间的间隙和死区的物理模型。当不考虑输入、输出构件的惯性和摩擦时,其输入、输出关系具有图 8-10 所示的滞环特性。

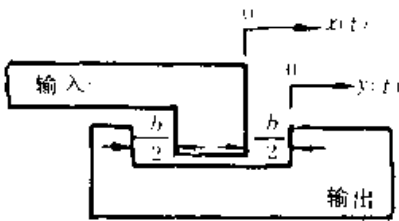


图 8-9 间隙的物理模型

一般,实际的带有间隙的机械耦合的动态特性,取决于输出构件的惯量与摩擦的相对比值。当输出构件惯量比输入构件惯量小得多时,运动主要由摩擦控制。



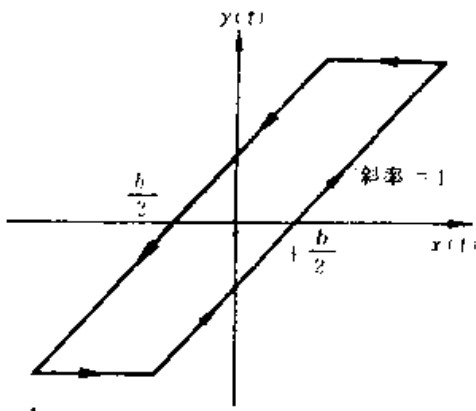


图 8-10 不考虑输出惯量的间隙特性

这意味着只要两构件不接触，输出构件就不会运动。当输入构件接触推动输出构件时，两者一起移动，直至输入构件反向。然后，输出构件停止运动，直到间隙消除。设输入位移按正弦规律变化，且输入构件初始位置处在间隙的中间，建立坐标轴  $x(t)$ 、 $y(t)$  如图 8-9 中所示。运动开始时，输入与输出构件在右侧接触，故有  $x(0) = 0$ ， $y(0) = \frac{-b}{2}$ 。图 8-11 给出了输入与输出构件的位移和速度曲线。

另一种极端情况是，输出构件受到的摩擦小到可忽略时，则其惯量就成为运动状态的决

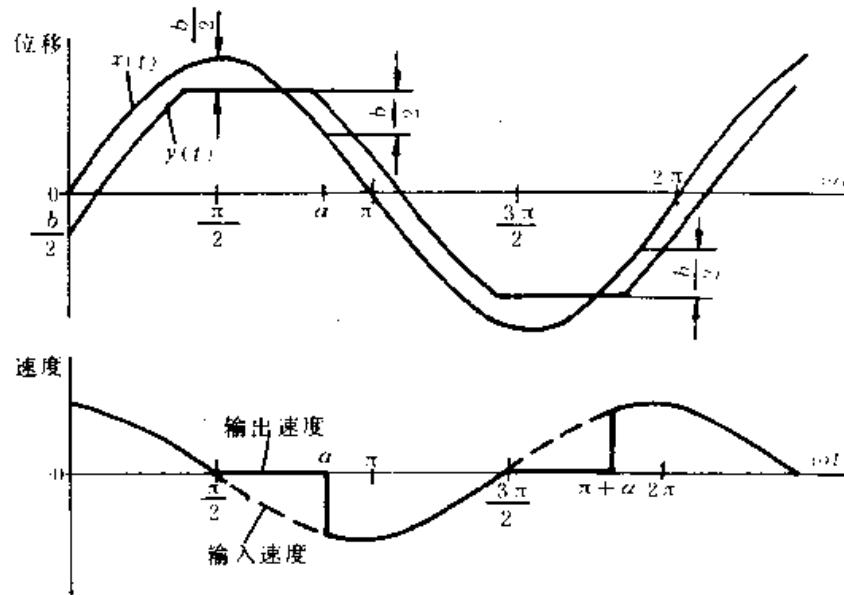


图 8-11 摩擦为主正弦输入时的间隙特性

定因素。图 8-12 给出此种情况  $F$  的输出、输入位移和速度曲线。坐标系与初始条件与前一种情况相同，这时当输入构件越过间隙后保持与输出构件相接触，驱动输出构件一起运动。当输入构件的速度变到零时（图中  $\frac{\pi}{2}$  处），输出构件并不立即停止运动，而是与输入构件脱离接触并以从输入构件那里获得的最大速度等速滑动。当输出构件相对于输入构件的移动距离等于间隙总宽度时（图中  $\alpha$  处），它将在输入构件的另一侧被阻。这时输出构件再次获得输入构件的速度而反向运动。

事实上，具有间隙的机械耦合输出构件总是既有摩擦又有惯性。故输出曲线应处于图 8-11 和图 8-12 之间的情况。

总之，输出位移相对输入位移产生了动态滞后，幅值也有所变化，这使系统有产生

振荡的倾向而不稳定。摩擦所产生的阻尼有助于消除间隙引起的自振荡。

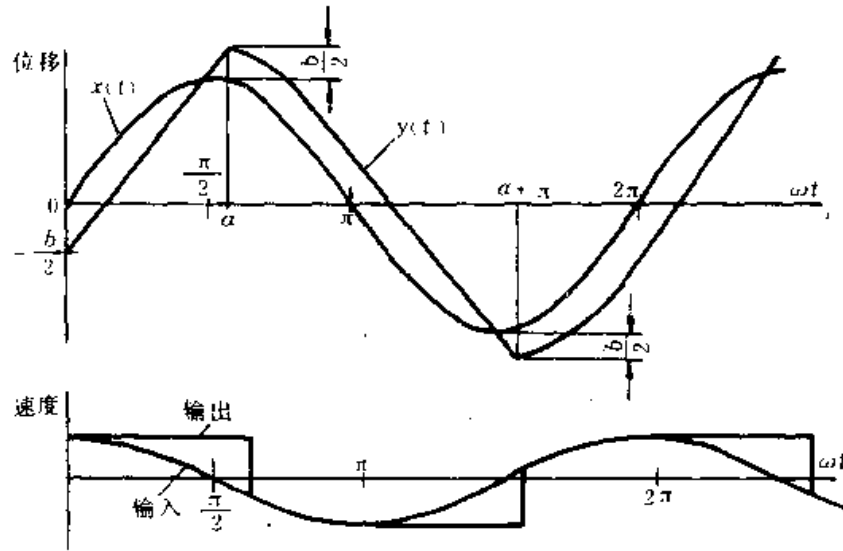


图 8-12 惯量为主正弦输入时的间隙特性

## 第二节 常用机械传动参数转化计算

机电一体化系统中常用的机械传动形式有许多，如齿轮传动、齿轮齿条传动、丝杠螺母传动、带传动、链传动、杠杆系统等。为便于列出系统的特性方程，通常是将系统中部分的参数折算到某一特定构件上。下面分别给出有关质量、惯量、摩擦因数等机械参数的转化计算，并引出等效转动惯量、等效摩擦因数的概念。

### 一、齿轮传动

图 8-13 给出一对齿轮啮合的传动示意图。输入力矩为  $M$ ，负载转矩为  $M_2$ ，齿轮 1、齿轮 2 的传递转矩分别为  $M_1$ 、 $M_2$ ；库仑摩擦转矩为  $M_{c1}$ 、 $M_{c2}$ ；转动惯量为  $J_1$ 、 $J_2$ ；粘性摩擦因数为  $B_1$ 、 $B_2$ ；齿轮齿数为  $Z_1$ 、 $Z_2$ ，转速  $n_1$ 、 $n_2$ ，传动比  $i = Z_1/Z_2 = n_2/n_1$ ，角位移为  $\theta_1$ 、 $\theta_2$ 。假设齿轮传动刚性无穷大（即不考虑间隙和弹性变形）。对齿轮 1 列出转矩方程为

$$M(t) = J_1 \ddot{\theta}_1 + B_1 \dot{\theta}_1 + M_{c1} \text{sign} \dot{\theta}_1 + M_1(t)$$

对齿轮 2 列出转矩方程为

$$M_2(t) = J_2 \ddot{\theta}_2 + B_2 \dot{\theta}_2 + M_{c2} \text{sign} \dot{\theta}_2 + M_L$$

利用关系  $M_1/M_2 = \theta_2/\theta_1 = Z_1/Z_2 = i$ ，代入  $M_2 = M_1/i$ ， $\theta_2 = \theta_1 \cdot i$ ， $\text{sign} \dot{\theta}_2 = \text{sign} \dot{\theta}_1$ ，消去中间变量  $M_1(t)$ ， $M_2(t)$  和

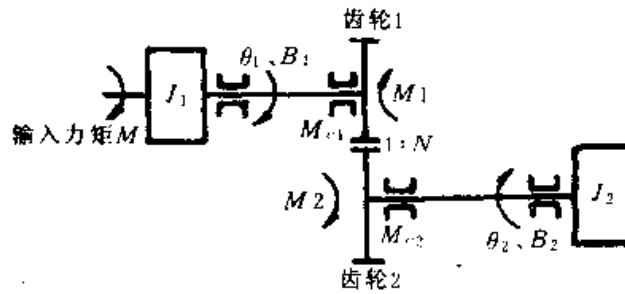


图 8-13 齿轮组

$\theta_2$ , 最后可得

$$M(t) = (J_1 + J_2 i^2) \ddot{\theta}_1 + (B_1 + B_2 i^2) \dot{\theta}_1 + (M_{c1} + M_{c2} i) \text{sign} \dot{\theta}_1 + M_L i$$

由此可定义一对齿轮传动的等效转动惯量  $J$ 、等效粘性摩擦系数  $B$  及等效库仑摩擦力矩  $M_F$  如下:

$$J = J_1 + J_2 i^2$$

$$B = B_1 + B_2 i^2$$

$$M_F = M_{c1} + M_{c2} i$$

从而可将上述系统的力矩方程简写为

$$M(t) = J \ddot{\theta}_1 + B \dot{\theta}_1 + M_F \text{sign} \dot{\theta}_1 + M_L i$$

对于多轴齿轮传动, 如图 8-14 所示, 与上述类似, 也可进行有关转化计算。设 1 轴

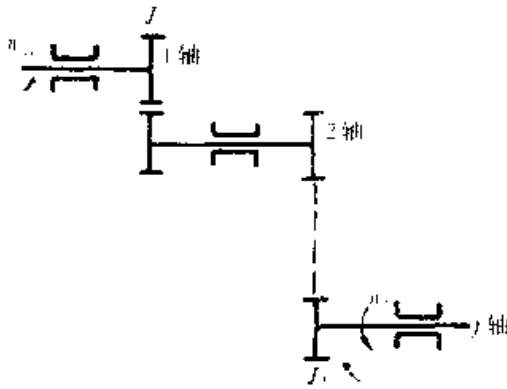


图 8-14 多轴齿轮组

至  $j$  轴的转速各为  $n_1$ 、 $n_2$ 、 $\dots$ 、 $n_j$ ; 转动惯量为  $J_1$ 、 $J_2$ 、 $\dots$ 、 $J_j$ ; 粘性摩擦系数为  $B_1$ 、 $B_2$ 、 $\dots$ 、 $B_j$ ; 库仑摩擦力矩为  $M_{c1}$ 、 $M_{c2}$ 、 $\dots$ 、 $M_{cj}$ ; 1 轴至  $j$  轴传动比  $i_{j-1} = n_j/n_1$ 。则  $j$  轴折算 (转化) 到 1 轴的有关参数分别为:

折算转动惯量

$$(J_j)_1 = J_j \cdot \left(\frac{n_j}{n_1}\right)^2 = J_j \cdot i_{j-1}^2 \quad (8-11)$$

折算粘性摩擦系数

$$(B_j)_1 = B_j \cdot \left(\frac{n_j}{n_1}\right)^2 = B_j \cdot i_{j-1}^2 \quad (8-12)$$

折算库仑摩擦力矩

$$(M_{cj})_1 = M_{cj} \cdot \left(\frac{n_j}{n_1}\right) = M_{cj} \cdot i_{j-1} \quad (8-13)$$

一般地说, 对有  $m$  个轴的齿轮系, 转化至第  $k$  轴的有关参数分别为:

等效转动惯量

$$[J]_k = \sum_{j=1}^m J_j \left(\frac{n_j}{n_k}\right)^2 \quad (8-14)$$

等效粘性摩擦系数

$$[B]_k = \sum_{j=1}^m B_j \left(\frac{n_j}{n_k}\right)^2 \quad (8-15)$$

等效库仑摩擦力矩

$$[M_c]_k = \sum_{j=1}^m M_{c_j} \left( \frac{n_j}{n_k} \right) \quad (8-16)$$

## 二、丝杆螺母传动

图 8-2 给出用丝杠螺母传动实现物体直线运动的简图。设  $M$  为移动物体质量 (kg),  $v$  为移动速度 (m/s),  $n$  为转化轴 (丝杠) 的转速 (r/min),  $t$  为丝杠螺距 (m), 由能量守恒可求得移动物体至丝杠的转化转动惯量 ( $J_w$ ) 为

$$(J)_w = M \left( \frac{30v}{\pi n} \right)^2 = M \left( \frac{t}{2\pi} \right)^2 \quad (\text{kg} \cdot \text{m}^2) \quad (8-17)$$

## 三、带传动、链传动、齿轮齿条传动

图 8-15 给出通过带或链传动 [图 8-15a)] 以及齿轮齿条传动 [图 8-15b)], 将转动变为直线运动的简图。直线运动物体质量为  $M$  (kg); 驱动轮半径  $r$  (m), 如果忽略带 (链) 的惯量, 则转化至驱动轮上的等效转动惯量为

$$J = Mr^2 \quad (\text{kg} \cdot \text{m}^2) \quad (8-18)$$

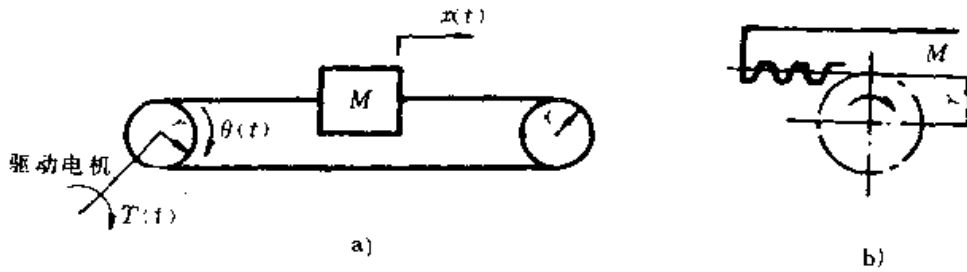


图 8-15 转动变直线运动的传动系统  
a) 带或链传动 b) 齿轮齿条传动

## 第三节 挠性联轴器

### 一、挠性联轴器原理与结构

为实现伺服驱动电机与传动轴之间的无间隙联接传动并提高传动刚度, 通常不采用一般的刚性联轴器或弹性联轴器, 而用一种特殊的所谓挠性联轴器, 如图 8-16 所示。它是采用锥形夹紧环 (锥环) 6 传递扭矩, 无反向间隙。工作时螺钉通过压圈 1 施加轴向力, 由于锥环间的楔紧作用, 内外环分别产生径向弹性变形, 消除配合间隙并产生接触压力以在轴和联轴套 2 之间传递扭矩。为能补偿同轴度及垂直度误差及安装误差, 柔性片 4 分

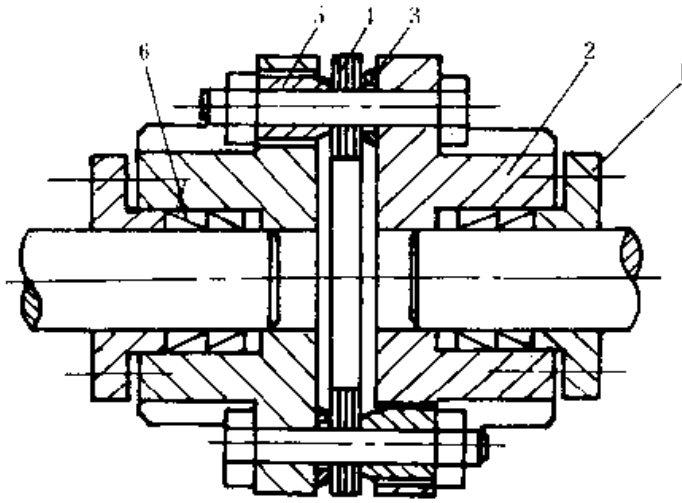


图 8-16 挠性联轴器

- 1—压圈 2—联轴套 3—球面垫圈  
4—柔性片 5—螺钉 6—锥环

锥环名义宽度  $L$ ，按下式计算后取整数：

$$L = \frac{D - d - 2a_1}{2 \operatorname{tg} \beta} \quad (\text{mm}) \quad (8-19)$$

式中  $a_1$ ——锥环薄边最小厚度，取  $a_1 = 0.2 \sim 0.5 \text{ mm}$

锥环宽度  $l$ ，按下式计算：

$$l = L - \frac{\Delta_{1\max} + \Delta_{2\max} + \delta}{2 \operatorname{tg} \beta} - a \quad (\text{mm}) \quad (8-20)$$

式中  $\Delta_{1\max}$ ——外环与孔最大配合间隙 (mm)

$\Delta_{2\max}$ ——内环与轴最大配合间隙 (mm)

$\delta$ ——夹紧时的最大过盈量 (mm)

$a$ ——夹紧时内外环端面错开量，通常取  $a = 0.4 \sim 0.8$  (mm)

当结构型式为轮毂和空心轴时，夹紧时的最大过盈

别用螺钉 5 和球面垫圈 3 与两边的联轴套相连，通过柔性片在两联轴套之间传递扭矩。柔性片材料为不锈钢，每片厚 0.25mm。

## 二、锥环设计计算

锥环是挠性联轴器中最主要的零件。下面给出其设计计算要点。

### 1. 锥环几何尺寸计算

锥环几何尺寸如图 8-17 所示，其内环直径  $d$  由轴直径确定。

外环直径  $D$ ：取  $D = (1.13 \sim 1.22) d$  (mm)， $d$  较小时取较大系数。

锥度角  $\beta$ ：其大小应保证不自锁，即  $\beta > 2\varphi$ ， $\varphi$  为摩擦角。

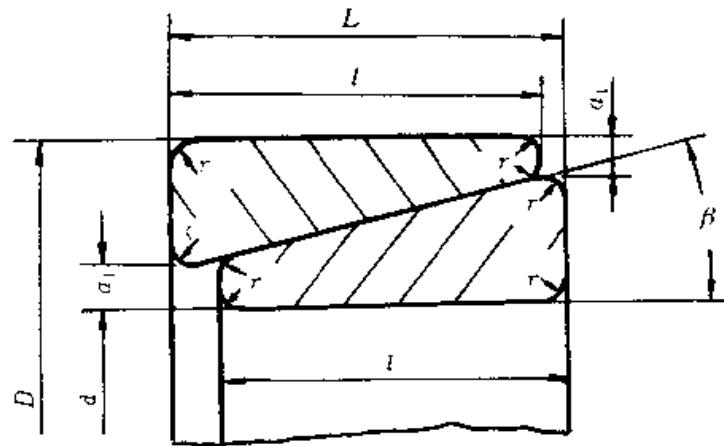


图 8-17 锥环几何尺寸

量  $\delta$  可按下式计算:

$$\delta = \frac{2pd}{E} \left( \frac{D_e^2 + D^2}{D_e^2 - D^2} + \frac{d^2 + d_i^2}{d^2 - d_i^2} \right) \quad (\text{mm})$$

式中  $E$ ——锥环材料弹性模量 (Pa)

$p$ ——内环内壁上的接触压力 (Pa)

$D_e$ ——轮毂外径 (mm)

$d_i$ ——空心轴内径 (mm)

圆角半径  $r$ ; 通常取  $r=0.1\sim 0.3$  (mm)

## 2. 验算承载能力

(1) 主要承受扭矩时 用下式验算许用扭矩:

$$[M_n] = CM_0 [p] \geq KM_n \quad (8-21)$$

式中  $M_n$ ——工作扭矩 (N·m)

$K$ ——动载系数, 一般取  $K \geq 5$

$[p]$ ——许用接触压力, 取  $[p] = (10\sim 15) \times 10^7$  (Pa)

$M_0$ ——锥环每单位接触压力所传递的扭矩 (N·m/Pa), 可按下式计算:  $M_0 = 0.5 \pi d^2 l \mu \times 10^{-6}$ , 式中  $\mu$  为摩擦因数,  $d$  为内环直径 (mm),  $l$  为锥环宽度 (mm)

$C$ ——与锥环组数  $n$  有关的系数, 可按下式计算:

$$C = \frac{1-g^n}{1-g}$$

式中常数  $n$  一般取为 2,  $g$  为轴向力传递系数, 按下式计算:

$$g = \frac{\text{tg}\beta}{\text{tg}\beta + 2\mu}$$

(2) 主要承受轴向力时 可用下式验算许用轴向力:

$$[F_n] = CF_0 [p] \geq KQ \quad (8-22)$$

式中  $Q$ ——承受的轴向力 (N)

$F_0$ ——锥环每单位接触压力能承受的轴向力 (N/Pa), 可用下式计算:  $F_0 = \pi d l \mu \times 10^{-6}$

(3) 同时承受扭矩和轴向力时 应满足下式:

$$CF_0 [p] \geq K \sqrt{\left( \frac{2M_n}{d} \right)^2 + Q^2} \quad (8-23)$$

## 3. 确定压紧锥环的轴向力

压紧锥环所需的轴向力  $P$  可按下式计算:

$$P = P_0 + F_1 p \quad (8-24)$$

式中  $P_0$ ——消除内环与轴、外环与孔的配合间隙所需的初始轴向力 (N)，可按下式计算：

$$P_0 = \pi E l \operatorname{tg}(\beta + \varphi) \frac{D-d}{D+d} \Delta_{\max} \times 10$$

式中  $\Delta_{\max}$ ——为外环与孔、内环与轴的最大配合间隙的较大者 (mm)

$F_1$ ——锥环产生每单位接触压力所需的轴向力 (N/Pa)，按下式计算：

$$F_1 = \pi d l (\operatorname{tg} \beta + 2\mu) \times 10^6$$

$p$ ——内环内壁上的接触压力 (Pa)

设计时为使压紧锥环轴向力主要用于产生有用的接触压力，锥环不能太厚；受强度限制亦不能太薄。一般限制  $1.1d \leq D \leq 1.3d$ 。

#### 第四节 伺服机构齿轮传动设计

机电一体化系统中常用的伺服驱动齿轮传动，除要进行一般的齿轮传动设计外，其传动比的设计还需满足脉冲当量的要求，并需按最大加速能力及最小惯量的要求进行设计，从而获得最佳的控制性能。

##### 一、单级齿轮传动比分析与计算

###### (一) 按最大加速能力设计齿轮传动比

如图 8-18 所示结构。假定电机驱动转矩和负载力矩平衡，则下式成立：

$$(T_M - J_M \cdot \epsilon_M) N \eta = T_L + J_L \cdot \epsilon_L$$

式中  $T_M$ ——电机驱动转矩

$T_L$ ——负载力矩

$J_M$ ——电机转动惯量

$J_L$ ——负载转动惯量

$\epsilon_M$ ——电机角加速度

$\epsilon_L$ ——负载角加速度

$N$ ——齿数比 (假定主动轮为 1)

$\eta$ ——齿轮传动效率

利用关系  $\epsilon_M = N \epsilon_L$ ，并设  $\eta = 1$ ，且不考虑外加负载力矩及摩擦力矩，即取  $T_L = 0$ ，则上式化为

$$(T_M - J_M N \epsilon_L) N = J_L \epsilon_L$$

解得

$$\epsilon_L = \frac{N T_M}{J_L + N^2 J_M} \quad (8-25)$$

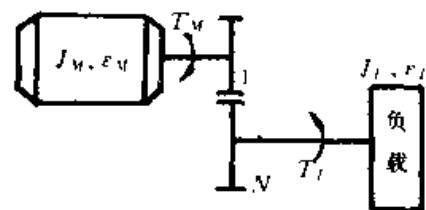


图 8-18 伺服机构单级齿轮传动

式 (8-25) 的右边, 分子可视为一个驱动转矩  $T$ ,  $T = NT_M$ ; 分母可视为一个转动惯量  $J$ ,  $J = J_L + N^2 J_M$ 。  $T$  和  $J$  都是  $N$  的函数。若将  $N$  作为参变量, 则有方程组

$$\begin{cases} T = NT_M \\ J = J_L + N^2 J_M \end{cases}$$

这是一曲线的参数方程。以  $J$  为横坐标,  $T$  为纵坐标, 作出曲线如图 8-19a) 所示。曲线上每一点对应于一个  $\epsilon_L$  值, 记为

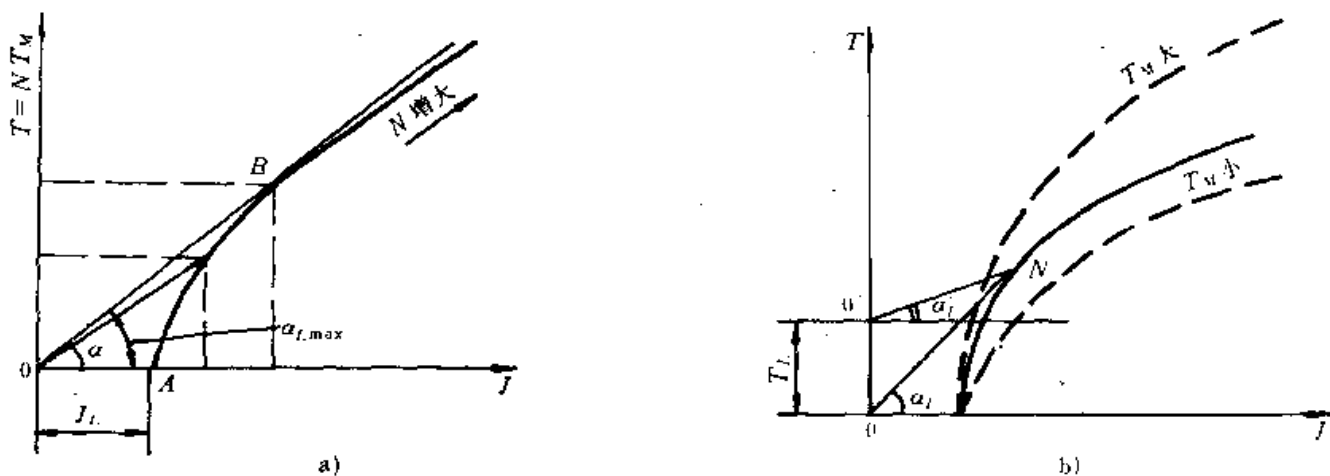


图 8-19 驱动转矩-转动惯量对齿数比的关系曲线

a) 不考虑负载力矩时 b) 考虑负载力矩时

$$(\epsilon_L)_N = \frac{T}{J} = \frac{NT_M}{J_L + N^2 J_M} = \tan \alpha_L$$

显然  $N=0$  时得图中  $A$  点,  $N \rightarrow \infty$  时, 曲线无限延伸。 $\epsilon_L$  的最大值即  $\alpha_L$  最大时的正切值。该  $\alpha_{L,max}$  可由原点  $O$  作曲线的切线  $OB$  而得。

将式 (8-25) 对  $N$  求导数

$$\frac{d}{dN} \left( \frac{NT_M}{J_L + N^2 J_M} \right) = \frac{(J_L + N^2 J_M) T_M - 2NJ_M \cdot NT_M}{(J_L + N^2 J_M)^2} = \frac{T_M (J_L - N^2 J_M)}{(J_L + N^2 J_M)^2}$$

令其为零, 求得极值点应满足条件:

$$J_M = \frac{J_L}{N^2}$$

或

$$J_M = (J_L)_M \quad (8-26)$$

$(J_L)_M$  为折算到电机轴上的负载转动惯量。

满足上式时, 在理想情况下可获得最大加速度。转化到电机轴来看, 即是负载的转动惯量与电机的转动惯量相等的时候。

若考虑到负载力矩  $T_L$ , 则  $T = NT_M - T_L$ , 对应于前述曲线上一点  $N$ 。其相应的加速



度值应为纵轴上一向上移动了  $T_L$  距离的点  $O'$  与  $N$  点连线的斜率。如图 8-19b) 所示。可见有负载  $T_L$  后相应的  $\epsilon_L$  减小。另由图也可看出  $\epsilon_L$  值随  $T_M$  的加大而加大。

由图 8-19a) 还可看出, 当  $N$  小于  $N_{最佳}$  (对应于使  $\epsilon_L$  取最大值的点  $B$ ) 时, 随  $N$  的减小, 加速度急剧下降。而当  $N$  大于  $N_{最佳}$  时, 随  $N$  的增加, 加速度基本上很快收敛于一定值。为此齿轮传动比  $i$  应满足

$$i \leq i_{max} = \sqrt{\frac{J_M}{J_L}} \quad (8-27)$$

显然, 为获得大的加速度或快速响应性能, 应采用较大的驱动力矩。通常驱动力矩取负载转矩的 3 倍以上, 多至十多倍。另外, 应提高齿轮传动效率, 减少负载摩擦力矩。适当加大齿数比  $N$ , 可以获得相当接近于加速度最大值的结果。但为保持速度足够,  $N$  亦不能过大。

### (二) 按给定脉冲当量或伺服电机确定传动比

对于开环系统, 当系统的脉冲当量及电机每脉冲转角 (步距角) 已确定时, 则可计算相应的传动比。

当采用丝杠螺母传动的伺服传动系统时 (如图 8-20 所示), 可用以下计算公式计算齿轮传动比:

$$i = \frac{360\delta}{\theta t} \quad (\theta \text{ 单位为度时}) \quad (8-28)$$

或 
$$i = \frac{2\pi\delta}{\theta t} \quad (\theta \text{ 单位为弧度时})$$

式中  $i$ ——齿轮传动比,  $i = Z_1/Z_2$

$\delta$ ——脉冲当量 (mm/pulse)

$t$ ——丝杠螺距 (mm)

$\theta$ ——伺服系统每一脉冲对应伺服电机转角 (度或 rad)

对于闭环系统, 若采用丝杠螺母传动时, 则按伺服驱动电机的额定速度或转矩所要求的移动部件的速度或负载转矩计算传动比。可用如下计算公式:

$$i = \frac{n_{max} \cdot t}{v_{max}} \quad (8-29)$$

式中  $n_{max}$ ——伺服电机额定转速 (r/min)

$t$ ——选定的丝杠螺距 (mm)

$v_{max}$ ——最大移动速度 (mm/min)

按以上有关公式确定传动比时, 还需进行惯量方面的验算, 以保证折算到电机轴上的负载惯量不能过大, 以及获得最大加速能力。可按以下公式验算:

$$\text{对开环} \quad J_L \cdot i^2 \leq J_H$$

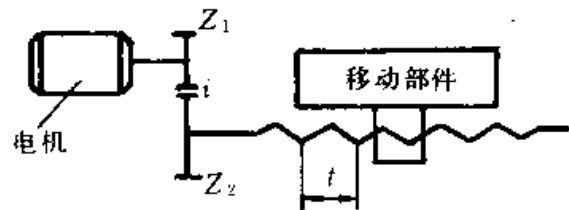


图 8-20 采用丝杠螺母传动的伺服系统

$$(J_L)_M \leq J_M$$

对闭环

$$\frac{1}{4} \leq \frac{(J_L)_M}{J_M} \leq 1$$

液压马达驱动时

$$\frac{(J_L)_M}{J_M} \leq 4$$

式中  $J_M$ ——马达转子转动惯量

$(J_L)_M$ ——折算到马达轴上的负载惯量

$J_H$ ——马达允许的负载惯量

设计时一般需改变有关参数，按上述公式及要求反复试算。为能获得最佳结果，还可采用优化的方法进行设计。

## 二、多级减速齿轮系的设计

### (一) 各级传动比的计算

从式(8-25)可看出，加速度是与转动惯量成反比的。对伺服系统来说，减小旋转部分的转动惯量是齿轮设计必须考虑的重要方面。采用多级齿轮传动时，各级传动比的确定即以此为原则。

设有一  $P$  级减速齿轮系如图 8-21 所示。为简化分析，设各小齿轮转动惯量同为  $J_0$ ，各级大齿轮转动惯量分别为  $J_1, J_2, \dots, J_P$ 。轴的转动惯量不计，且各齿轮厚度相等。当总齿数比  $N$  确定后，现考虑如何计算各级齿数比  $n_1, n_2, \dots, n_P$ 。

对各级大齿轮转动惯量有

$$\frac{J_1}{J_0} = \frac{D_1^4}{D_0^4} = n_1^4$$

即  $J_1 = n_1^4 \cdot J_0$

同理  $J_2 = n_2^4 \cdot J_0$

.....

$$J_P = n_P^4 \cdot J_0$$

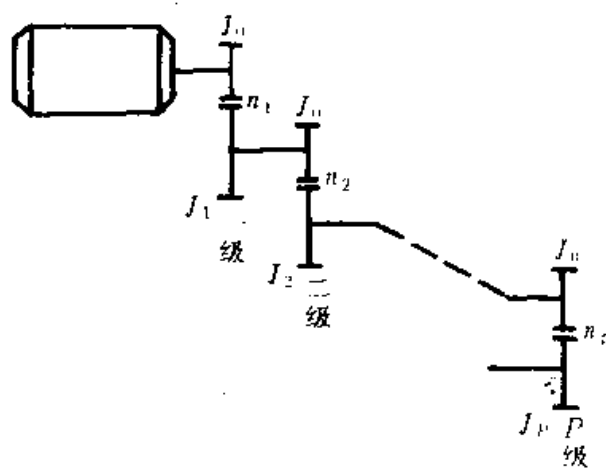


图 8-21  $P$  级齿轮系

第  $i$  级齿轮至电机轴的转化转动惯量为

$$(J_i)_M = \frac{J_i}{n_1^2 \cdot n_2^2 \cdot \dots \cdot n_i^2}$$

#### 1. 二级减速齿轮系计算

先计算二级齿轮系等效转动惯量  $J_{T_2}$

$$\begin{aligned}
 J_{T_2} &= J_0 + \frac{1}{n_1^2}(J_1 + J_0) + \frac{1}{n_1^2 \cdot n_2^2} \cdot J_2 \\
 &= J_0 + \frac{1}{n_1^2}(n_1^4 \cdot J_0 + J_0) + \frac{1}{n_1^2 \cdot n_2^2} \cdot n_1^4 \cdot J_0 \\
 &= J_0 \left( 1 + n_1^2 + \frac{1}{n_1^2} + \frac{n_2^2}{n_1^2} \right)
 \end{aligned}$$

考虑到  $N = n_1 \cdot n_2$ , 现求  $J_{T_2}$  取得极值 (此处为最小值) 的条件。  
上式对  $n_1$  求偏导得

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial J_{T_2}}{\partial n_1} &= J_0 \left[ 2n_1 + \frac{-2}{n_1^3} + \frac{n_1^4 \cdot 2n_2 \left( \frac{-N}{n_1^2} \right) - 2n_1 \cdot n_2^2}{n_1^4} \right] \\
 &= J_0 \left( \frac{2n_1^4 - 2 - 4n_2^2}{n_1^3} \right)
 \end{aligned}$$

令  
得

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial J_{T_2}}{\partial n_1} &= 0 \\
 2n_1^4 - 2 - 4n_2^2 &= 0
 \end{aligned}$$

$$\therefore n_2 = \left( \frac{n_1^4 - 1}{2} \right)^{\frac{1}{2}}$$

当  $n_1^4 \gg 1$  时得

$$n_2 = \frac{n_1^2}{\sqrt{2}} \tag{8-30}$$

代入  $N = n_1 \cdot n_2$ , 可求得

$$\begin{cases} n_1 = \sqrt[5]{2N^2} \\ n_2 = \sqrt{\frac{N^4}{2}} \end{cases}$$

只要满足式 (8-30), 转动惯量 (至第二级) 最小。

## 2. 多级减速齿轮系计算

可将以上关于二级的结果推广至第  $i$  级齿轮  $J_i$  的情况, 这时若各相邻级之间均满足式 (8-30) 的关系时, 则可得整个轮系转动惯量最小。这时应有

$$\begin{aligned}
 n_2 &= \frac{n_1^2}{\sqrt{2}} \\
 n_3 &= \frac{n_2^2}{\sqrt{2}} = \frac{n_1^{2^2}}{\sqrt{2} \cdot 2^1} \\
 n_4 &= \frac{n_3^2}{\sqrt{2}} = \frac{n_1^{2^3}}{\sqrt{2} \cdot 2^{(1+2)}} \\
 &\dots\dots \\
 n_i &= \frac{n_{i-1}^2}{\sqrt{2}} = \frac{n_1^{2^{(i-1)}}}{\sqrt{2} \cdot 2^{(1+2+2^2+\dots+2^{i-3})}}
 \end{aligned}$$

$$= \frac{n_1^{2^{(G-1)}}}{\sqrt{2} \cdot 2^{(2^{G-2}-1)}}$$

即

$$n_i = \frac{n_1^{2^{(G-1)}}}{\sqrt{2} \cdot 2^{(2^{i-2}-1)}} \quad (8-31)$$

对图 8-21 所示齿轮系，令总齿数比

$$N = n_1 \cdot n_2 \cdots n_i \cdots n_P$$

将  $n_i$  各值以式 (8-31) 代入得

$$N = \frac{n_1^{(2^P-1)}}{2^{(\frac{2^P-P-1}{2})}}$$

从而求得

$$n_1 = 2^{\left[ \frac{2^P-P-1}{2(2^P-1)} \right]} \cdot N^{\left( \frac{1}{2^P-1} \right)}$$

再将此  $n_1$  代入式 (8-31)，经化简最后可得

$$n_i = \sqrt{2} \cdot \left( \frac{N}{2^{\frac{P}{2}}} \right)^{\frac{2^{(G-1)}}{2^P-1}} \quad (8-32)$$

按式 (8-32) 即可计算齿轮系各级降速比。

### (二) 多级降速齿轮系级数的选择

若以级数  $P$  作为参数，每选定一个  $P$  值时，可求得相应的总转动惯量：

$$J_T = J_0 \cdot f(n_1, n_2, \cdots, n_P) = J_0 \cdot g(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$$

如  $P=2$ ，即有

$$\begin{aligned} J_{T_2} &= J_0 \left( 1 + n_1^2 + \frac{1}{n_1^2} + \frac{n_2^2}{n_1^2} \right) \\ &= J_0 \left( 1 + n_1^2 + \frac{1}{n_1^2} + \frac{N^2}{n_1^4} \right) \end{aligned}$$

代入  $n_1 = \sqrt[3]{2N^2}$ ，得

$$\begin{aligned} J_{T_2} &= J_0 \left( 1 + \sqrt[3]{2N^2} + \frac{1}{\sqrt[3]{2N^2}} + \frac{N^2}{\sqrt[3]{4N^4}} \right) \\ &= J_0 \cdot g(\text{kg} \cdot \text{m}^2) \end{aligned}$$

即  $\frac{J_T}{J_0}$  是  $N$  函数，可作出函数曲线如图 8-22（取对数坐标）。

由图可见， $P=4$  以后再增加级数时对减小齿轮系的转动惯量作用就不大了，反而由于级数增多使传动间隙加大，误差增加，结构复杂。

## 三、齿 轮 箱

当电机或液压马达用在伺服驱动时，可与普通滚珠丝杠直联，或通过不变换的减速

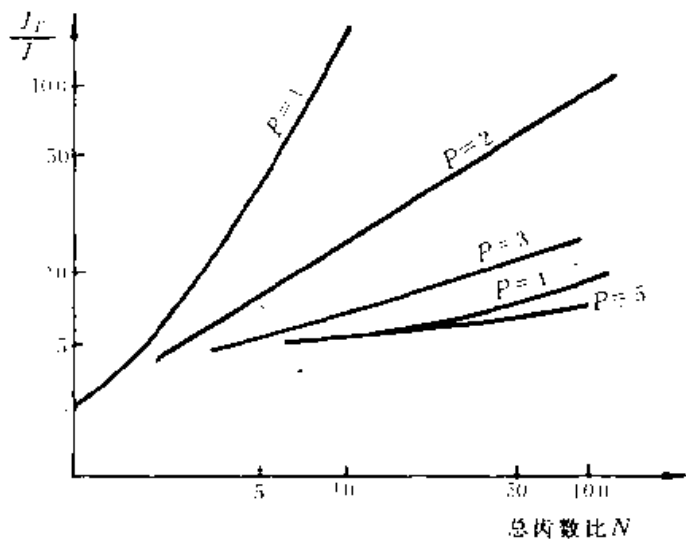


图 8-22 总惯量随齿数比的变化曲线

齿轮系来驱动。在一些较大型的机械装置中，由于慢速与快速差别很大，也可用有离合器变速的齿轮箱。

齿轮传动或齿轮箱的结构设计必须考虑采用可消除传动间隙的可调结构，实例如图 8-23 所示。

传动齿轮通常采用直齿并进行高精度加工。为减小噪声，有时也用斜齿轮。锥齿轮由于有轴向推力，难以保持小间隙，使用较少。蜗轮传动因效率低，刚度难以提高，易发生轴偏、卡住等问题，故不采用。

一般考虑将高速齿轮的厚度做

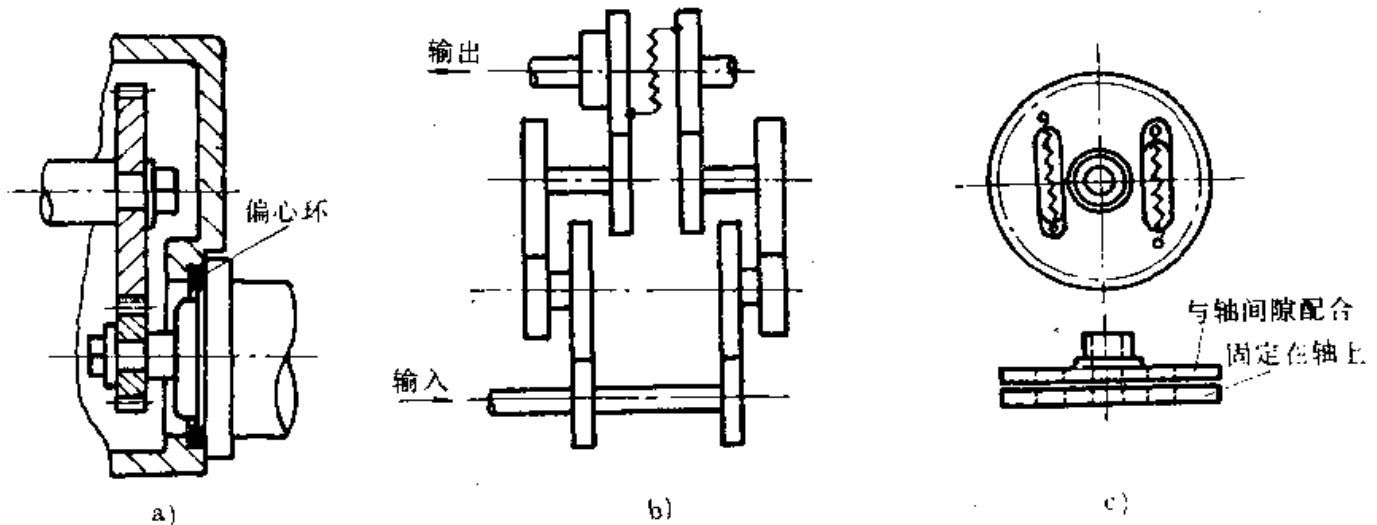


图 8-23 消除齿轮传动间隙结构

a) 用偏心环调节 b) 用齿轮系的方法 c) 采用双片齿轮结构

得比低速齿轮的厚度小，以减小转动惯量。另外还应注意，齿轮安装轴承座孔中心距的加工精度，各部分配合的选择，止推轴承的刚度等都应有较高的要求。

## 第五节 精密回转分度定位装置

在各类自动机械中，广泛应用间歇回转分度机构，典型的如槽轮机构及各种凸轮机构等。但由于受运动间隙的限制，其定位精度不易提高，且分度数受限制较大。目前在机电一体化设备如数控机床、加工中心上广泛应用的多齿盘分度定位装置、钢球分度定位装置，则能实现较复杂要求的分度运动和高精度的定位要求。

## 一、多齿盘分度定位装置

### (一) 工作原理与特点

多齿盘(俗称鼠牙盘)分度定位装置由两个齿数和齿形相同的端面齿盘对合而成,如图 8-24 所示。通常,一个齿盘固定不动,另一个齿盘与分度回转部件固连。分度时,动齿盘抬起,与定齿盘脱开,然后转位。当转至要求位置后,动齿盘落下与定齿盘啮合并压紧。其转位可用手动、液压、气动、电动等机构实现,定位夹紧可用螺旋、凸轮、液压、气动等机构完成。

多齿盘装置可自动定心并获得很高的定位精度(通常可达 $\pm 3''$ ),且定位精度不受轴承间隙和正反转、齿面磨损等因素的影响;承载能力强,刚性好;齿数的所有因数都可作为分度工位数,且容易得到不等分分度。

### (二) 设计计算

设计多齿盘装置的主要依据是分度工位数、定位精度、结构位置大小和工作载荷。

转化到齿盘上的工作载荷(参见图 8-24)有扭矩  $M_n$ 、倾覆力矩  $M_r$ 、轴向力  $F_a$ 、径向力  $F_r$ 。

#### 1. 结构参数

多齿盘的结构参数主要有齿形角、齿数、齿盘直径、模数、齿根槽宽和槽深等(见图 8-25)

(1) 齿形角  $\gamma$  由图 8-25 可知,当齿面间隙  $EF$  一定时,齿形角  $\gamma$  越小,  $EG$  越小,即定位精度越高。但  $\gamma$  过小会削弱齿部刚性。通常取  $\gamma = 60^\circ, 90^\circ$

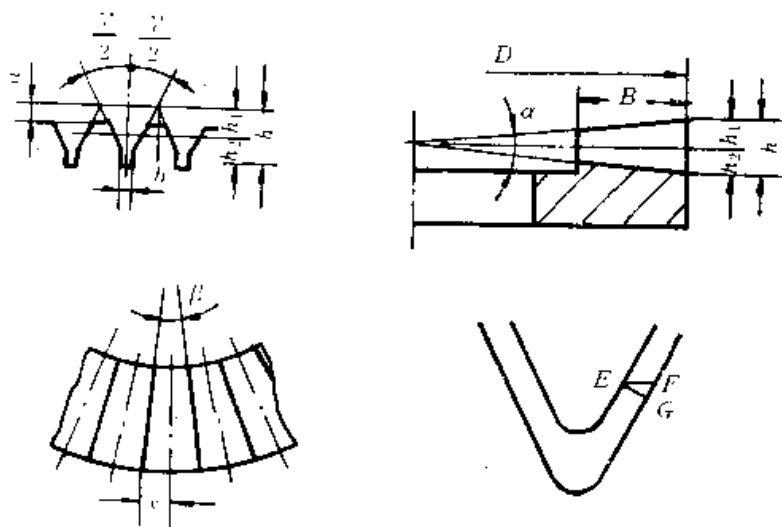


图 8-25 多齿盘几何参数

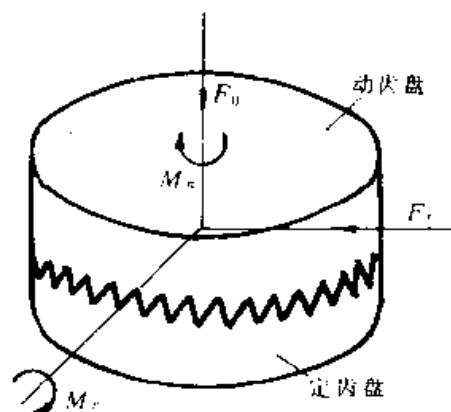


图 8-24 多齿盘原理

(2) 齿数  $Z$  齿数应是分度工位数的倍数,或所有需要的工位数的最小公倍数。齿数越多,分度精度越高,但加工越困难。目前最多齿数达 1440 个。

(3) 齿盘直径  $D$  齿盘直径  $D$  可参考表 8-1 按扭矩  $M_n$  估算。一般  $D$  宜取大些,以提高定位精度和稳定性。

表 8-1

齿盘外径、齿宽和许用扭矩

外径 $D/\text{mm}$	100~200	200~300	300~500	500~800	800~1200
齿宽 $B/\text{mm}$	8~12	10~20	15~25	20~30	25~40
许用扭矩 $[M_n]/\text{N}\cdot\text{m}$	1500~8700	7600~35000	25000~80000	67000~270000	205000~700000

(4) 模数  $m$  齿盘的模数  $m=D/Z$ , 它仅起到表示齿形大小的作用, 不需选取标准值。 $m$  的常用范围为 2~6mm。

(5) 齿宽  $B$  齿宽按载荷大小选取, 一般为 8~25mm, 可参见表 8-1。  $B$  太大不利于提高分度定位精度。

(6) 齿根槽宽  $b$  一般取  $b\approx 0.8\sim 1\text{mm}$ 。

其他有关几何参数按图 8-25 所示计算如下:

$$\beta = \frac{360^\circ}{Z}$$

$$y = \frac{D}{2} \sin \frac{\beta}{2} = \frac{D}{2} \sin \frac{180^\circ}{Z}$$

$$h = \frac{y}{\text{tg} \frac{\gamma}{2}} = \frac{D}{2 \text{tg} \frac{\gamma}{2}} \cdot \sin \frac{180^\circ}{Z}$$

$$h_1 = h_2 = h/2$$

$$\text{tg} \frac{\alpha}{2} = \frac{h}{D}$$

## 2. 夹紧力计算

夹紧力应保证在最大工作载荷下仍能保持两齿盘的紧密啮合。但过大的夹紧力会引起齿盘变形。

夹紧力  $W$  可按下式计算

$$W = S \left[ \frac{2M_n}{D} \text{tg} \left( \frac{\beta}{2} - \rho \right) + \frac{2M_r}{D} + F_r \text{tg} \left( \frac{\beta}{2} - \rho \right) \pm F_o \right] \quad (8-33)$$

式中  $W$ ——夹紧力 (N)

$M_n$ ——齿盘承受的扭矩 (N·m)

$M_r$ ——齿盘承受的倾覆力矩 (N·m)

$F_r$ ——齿盘承受的径向力 (在啮合节平面内) (N)

$F_o$ ——齿盘承受的轴向力 (N), 方向与  $W$  同向时, 式中取“-”号, 与  $W$  反向时, 取“+”号

$D$ ——齿盘直径 (m)

$\beta$ ——齿形角 ( $^\circ$ )

$\rho$ ——摩擦角 ( $^\circ$ ), 一般取  $\rho=5^\circ\sim 6^\circ$

$S$ ——安全系数, 一般取  $S=1\sim 1.5$

### 3. 验算齿面挤压应力

齿面挤压应力的验算用下式：

$$\sigma = S_s \frac{\frac{2M_a}{D} + \frac{2M_r}{D} + F_r + W \operatorname{ctg} \frac{\beta}{2}}{Z' B h_0} \leq [\sigma] \quad (8-34)$$

式中  $\sigma$ ——齿面挤压应力 (Pa)

$Z'$ ——计算齿数,  $Z' \approx 0.5Z$

$B$ ——齿宽 (m)

$h_0$ ——齿的啮合高度 (m)

$W$ ——夹紧力 (N)

$S_s$ ——安全系数, 一般取  $S_s = 1.3$

$[\sigma]$ ——许用挤压应力 (Pa), 齿面未淬硬的取  $[\sigma] = 2 \times 10^7$ , 齿面淬硬的取  $[\sigma] = 4 \times 10^7$

## 二、钢球分度定位装置

### (一) 工作原理和特点

钢球分度工作原理与多齿盘相同, 不同的只是用两圈钢球代替两个齿盘。图 8-26 是钢球分度定位装置结构简图。它由一对球盘 A、B 组成。每个球盘由定位环、钢球和压紧环构成。两球盘的钢球数相等。按钢球的分布直径, 有等径型和不等径型两种型式。

钢球分度定位装置的定位刚性好, 结构简单, 工艺性好。径向回转精度较高, 分度精度略低于多齿分度盘, 但承载能力较小, 只适用于工作载荷不大的场合。

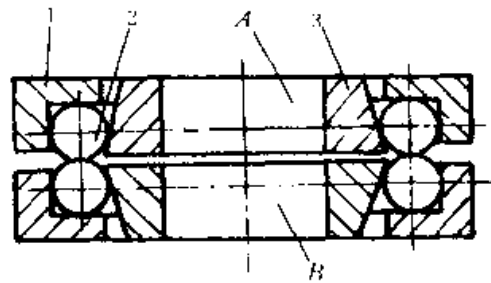


图 8-26 钢球定位装置简图  
1—定位环 2—钢球 3—压紧环

### (二) 结构设计

#### 1. 钢球分布直径 $D$

根据结构尽量选取较大值。

#### 2. 钢球数 $N$

钢球分度盘中每圈钢球数常取 48~144 个。相应的分度角值为  $7^\circ 30' \sim 2^\circ 30'$ 。在满足分度数要求的情况下, 钢球数不宜过大。

#### 3. 钢球直径 $d$

钢球直径  $d$  可利用如下关系式计算：

$$d = D \sin \frac{\pi}{N}$$

设计时根据最小分度值选择钢球直径  $d$ , 计算  $N$  和  $D$  值。钢球直径一般为 6~22mm。对钢球尺寸精度和形状精度应严格控制。



## 第六节 滚珠丝杠传动设计

### 一、滚珠丝杠副的工作原理及特点

滚珠丝杠副结构如图 8-27 所示。它是在具有磨成圆弧形螺旋槽的丝杠螺母间装有滚珠作为中间传动元件，以减少摩擦和传动间隙。为防止滚珠掉出，在螺母的螺旋槽两端设有挡珠器，并通过循环回路，使滚珠循环流动。滚珠丝杠副具有如下特点：

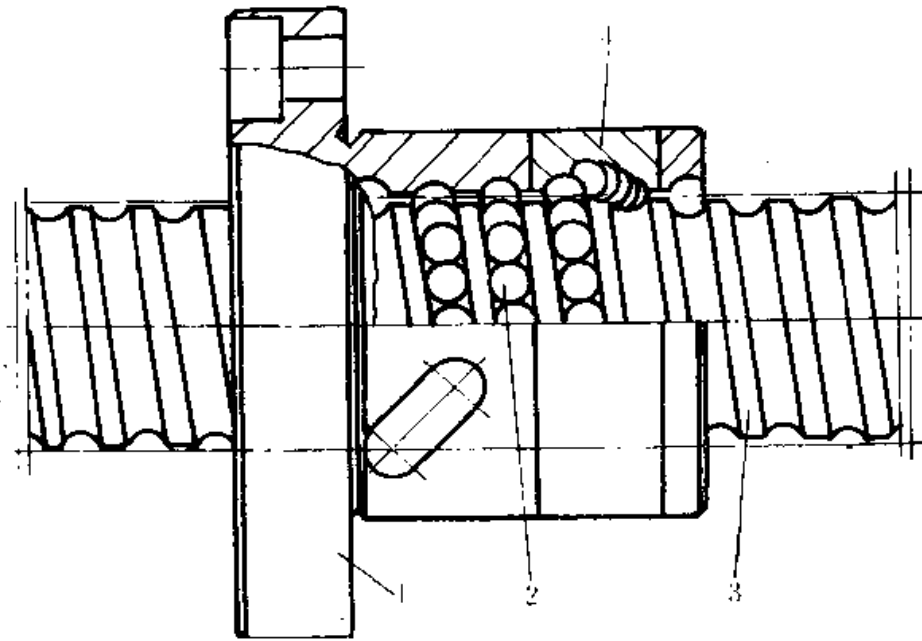


图 8-27 滚珠丝杠副结构

1—螺母 2—滚珠 3—丝杠 4—循环装置（反向器）

(1) 传动效率高 传动效率  $\eta$  可达 0.92~0.96。与一般丝杠传动相比，功率消耗只有其 1/4~1/3。

(2) 可预紧以消除间隙，从而消除反向死区并提高传动刚性。

(3) 运动平稳、无爬行、传动精度高、寿命长。

(4) 有可逆性。即丝杠与螺母均可作主动件。

(5) 制造工艺复杂，成本较高。

(6) 不能自锁。特别对垂直式丝杠传动，常需加制动装置。

由于滚珠丝杠副的优越性能，它在机电一体化产品中得到广泛应用。目前滚珠丝杠副已有相应的标准。

### 二、滚珠丝杠副的几何参数与结构型式

#### (一) 滚珠丝杠副的几何参数

滚珠丝杠副的主要几何参数有（参见图 8-28）：

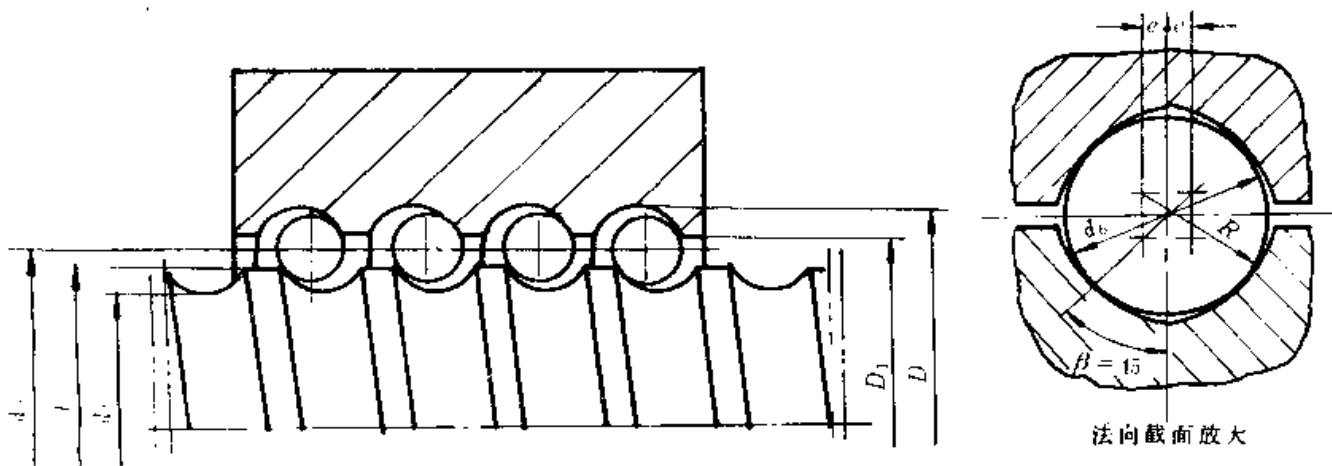


图 8-28 滚珠丝杠副的主要几何参数

公称直径  $d_0$ : 滚珠与螺纹滚道在理论接触角状态时包络滚珠球心的理想圆柱直径。它是滚珠丝杠副的特征尺寸, 与承载能力有关。

基本导程  $L_0$ : 丝杠相对于螺母旋转  $2\pi$  弧度时, 螺母上基准点的轴向位移。

接触角  $\beta$ : 在螺纹滚道法向剖面内滚珠球心与滚道接触点的连线和螺纹轴线的垂直线之间的夹角。理想接触角  $\beta=45^\circ$ 。

此外还有丝杠螺纹大径  $d$ 、小径  $d_1$ 、螺纹全长  $L$ 、滚珠直径  $d_0$ 、螺母螺纹大径  $D$ 、小径  $D_1$ 、滚道圆弧偏心距  $e$ 、滚道圆弧半径  $R$  等参数。

### (二) 滚珠丝杠副结构型式

按滚珠丝杠副螺纹滚道的形状可分单圆弧型面和双圆弧型面两种。

按滚珠循环方式可将滚珠丝杠副分为内循环及外循环两类。

所谓外循环方式, 是在螺母的外圆柱面上开有螺旋槽, 在螺母内部装上挡珠器, 挡珠器舌部切断螺母螺纹滚道, 迫使滚珠流入通向螺旋槽的孔中而循环流动。所谓内循环方式, 是在螺母外侧孔中装了一个接通相邻滚道的反向器, 迫使滚珠越过丝杠齿顶而进入相邻滚道。在一个螺母上装有多多个反向器, 各反相器相互错开一个角度。图 8-27 所示即是内循环方式的滚珠丝杠副。

内循环方式结构紧凑, 适于各种高灵敏度、高刚度的精密定位系统。外循环方式工艺性较好, 可用于重负载、大导程、多头螺纹中。

## 三、滚珠丝杠副的设计计算

### (一) 强度计算

设计滚珠丝杠副时, 首先要确定公称直径  $d_0$ 、基本导程  $L_0$ 、滚珠直径  $d_0$ 。参数的选择应保证滚珠丝杠副在一定的轴向负荷作用下, 经一定时间运转后不产生点蚀现象。此负荷的最大值称为最大动负荷。设计时可采用与滚动轴承计算相似的方法。

最大动负荷按下式计算:

$$Q = \sqrt[3]{L P f_u f_H} \quad (8-35)$$

式中  $Q$ ——最大动负荷 (N)

$P$ ——工作负荷 (N)

$f_u$ ——运转因数, 考虑冲击振动影响的因数,  $f_u$  的值见表 8-2

$f_H$ ——硬度因数, 其值见表 8-3

$L$ ——寿命, 以  $10^6$  转为 1, 可按下列式计算:

$$L = \frac{60nT}{10^6}$$

式中  $n$  为丝杠转速 (r/min),  $T$  为使用寿命时间 (h)

表 8-2 运转因数值

运转状态	运转因数 $f_u$
无冲击圆滑运转	1.0~1.2
一般运转	1.2~1.5
有冲击的运转	1.5~2.5

表 8-3 硬度因数值

硬度 (HRC)	60	57.5	55	52.5	50	47.5	45	42.5	40	30	25
硬度因数 $f_H$	1.0	1.1	1.2	1.4	2.0	2.5	3.3	4.5	5.0	10	15

如工作负荷  $P$  和转速  $n$  在工作时是变化的, 则应计算平均负荷和平均转速。

根据求得的动负荷值, 即可从滚珠丝杠标准系列中初选所需型号而确定几何参数。

## (二) 刚度计算

滚珠丝杠传动刚度对系统性能、精度等影响很大, 并随负载、支承方式的变化而变化。

### 1. 滚珠丝杠的支承方式

滚珠丝杠传动可有下列多种支承方式:

(1) 一端止推轴承 [图 8-29a)] 此种支承型式一端悬空, 故承载能力小, 轴向刚度低, 只适用于短丝杠。

(2) 一端止推轴承, 另一端向心轴承 [图 8-29b)] 这时应将止推轴承远离热源及丝杠上常用段。

(3) 两端止推轴承 [图 8-29c)] 此型式可对丝杠施加预紧拉力, 刚度好, 但对热变形敏感。

(4) 两端止推轴承及向心球轴承 [图 8-29d)] 此型式在施加预紧拉力后刚度最好。且可使丝杠的温度变形转化为止推轴承的预紧力。

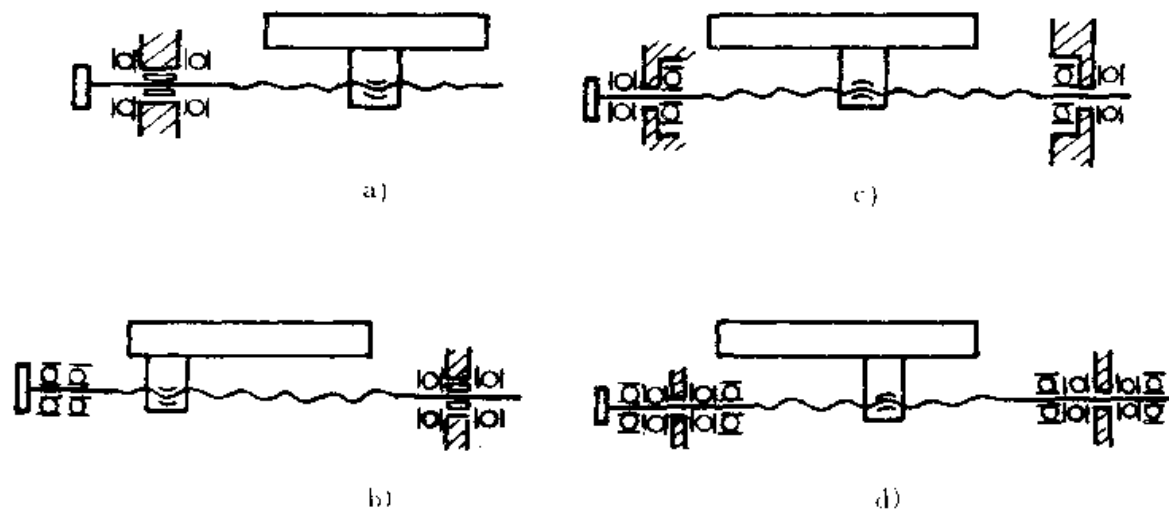


图 8-29 滚珠丝杠的支承方式

- a) 一端装止推轴承 b) 一端装止推轴承，另一端装向心球轴承  
c) 两端装止推轴承 d) 两端装止推轴承及向心球轴承

## 2. 传动刚度计算

滚珠丝杠传动刚度主要由丝杠拉压刚度、丝杠螺母间接触刚度及轴承和轴承座的支承刚度组成。通常三部分各占 1/3。丝杠扭转刚度通常很大，可以忽略。

(1) 轴承刚度  $K_B$  不同类型轴承轴向接触刚度可查阅有关资料。

(2) 滚珠丝杠螺母副的轴向接触刚度  $K_N$  也可查阅有关资料，得到接触变形后再计算刚度。

(3) 丝杠拉压刚度  $K_\Delta$  如图 8-30 所示丝杠支承简图，当一端轴向支承时 [图 a)]，计算公式为

$$K_\Delta = \frac{\pi d^2 E}{4l} \cdot \frac{1}{n} \quad (\text{N/m}) \quad (8-36)$$

当两端轴向支承时 [图 (b)]，计算公式为

$$\begin{aligned} K_\Delta &= \frac{\pi d^2 E}{4L} \left( \frac{1}{l} + \frac{1}{L-l} \right) \\ &= \frac{\pi d^2 E}{4L} \cdot \frac{1}{n(1-n)} \quad (\text{N/m}) \end{aligned} \quad (8-37)$$

式中  $d$ ——丝杠中径 (m)

$E$ ——弹性模量，取  $E=2.1 \times 10^{11}$  (Pa)

$l$ ——受力点到支承端距离 (m)

$n$ ——行程比， $n=l/L$

$L$ ——总行程 (m)

由计算公式可知， $K_\Delta$  随螺母在不同位置而变化。可求得两端支承时的最小刚度（当

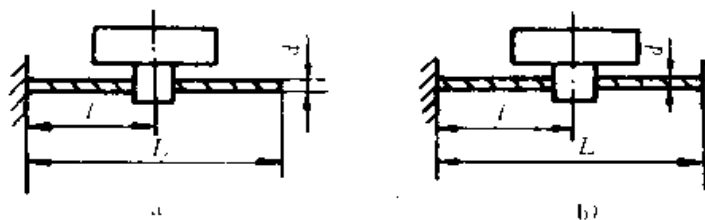


图 8-30 滚珠丝杠副传动刚度计算

a) 一端轴向支承 b) 两端轴向支承

$n=0.5$  时) 为  $K_{\Delta\min} = \pi d^2 E / L$ ; 而一端支承时的最小刚度 (当  $n=1$  时) 为  $K_{\Delta\min} = \pi d^2 E / 4L$ 。可见前者比后者大四倍。

(4) 螺母座刚度  $K_{NR}$  及轴承座刚度  $K_{BR}$  一般很难计算。它应包括各零件本身的刚度及各零件间的接触刚度。可用简化方法计算。

由以上求得各部分刚度值，

最后可求得滚珠丝杠传动综合拉压刚度  $K_0$ ：

$$\frac{1}{K_0} = \frac{1}{K_B} + \frac{1}{K_{BR}} + \frac{1}{K_{\Delta}} + \frac{1}{K_N} + \frac{1}{K_{NR}} \quad (8-38)$$

应注意，当有轴承预紧力时， $K_B$  应取 2 倍值。

### (三) 提高滚珠丝杠传动刚度的措施

#### 1. 消除滚珠丝杠螺母副间隙及施加预紧力

滚珠丝杠副轴向间隙是当承受负载时在滚珠与滚道型面接触点的弹性变形所引起的螺母位移和丝杠螺母原有间隙的总和。为消除轴向间隙就必须把弹性变形量限制在最小范围内。通常用预紧力产生预拉伸变形以减小弹性变形引起的位移。其方法是采用双螺母结构或单螺母变导程结构。

(1) 双螺母方式 常用的双螺母消除轴向间隙的方式有以下几种：

垫片调隙式：其方法是用螺钉连接两个螺母的凸缘与螺母套筒，而在凸缘与套筒之间加垫片。调整垫片厚度使一个螺母相对于套筒，也即相对于另一螺母产生一定的轴向位移，即可达到消除轴向间隙和产生预紧力的目的，此法简单，刚性好，但调整不太方便。

螺纹调隙式：此法是在双螺母中的一个的外端制有凸缘，另一个无凸缘的螺母则通过的两个圆螺母使其并紧在螺母套筒上。此种结构调整方便。

齿差调隙式：此法结构较复杂，但可实现精密微调。

(2) 单螺母变导程自预紧方式 结构如图 8-31 所示。它是在螺母体内的两列循环的滚珠链之间，使内螺纹滚道在轴向产生一个  $\Delta L_0$  的导程变化量，从而使两列滚珠在轴向错位实现预紧。此法结构最简单，尺寸最紧凑。但在使用中不能随时调整，适于中等载荷。

对滚珠丝杠螺母副所施加的预紧力，应能保证运行时受负载后无间隙出现。通常要求预紧力数值应大于最大轴向负荷的  $1/3$ 。另外还需考虑预紧后引起的附加摩擦力矩带来的效率和寿命问题。预紧后的效率可用下式求得：

$$\eta = \frac{\eta_0}{1 + \frac{1}{n_0} (1 - \eta_0^2)}$$

式中  $\eta$ ——预紧后的效率  
 $\eta_0$ ——未预紧时效率  
 $n_0$ ——预紧系数，可按式计算

$$n_0 = \frac{\text{轴向负载 } P_t}{\text{预紧力 } P_0}$$

在  $n_0 > 3$  后 (即  $P_0 < \frac{1}{3} P_t$ )， $\eta$  增长很慢，  
 所以一般取  $P_0 \approx \frac{1}{3} P_t$ 。

## 2. 滚珠丝杠预拉伸

利用两端止推支承方式，对滚珠丝杠施加预紧力获得预拉伸，可以提高丝杠拉压刚度，轴承及轴承座刚度以及补偿丝杠的热变形。预紧力的确定应从以下几方面考虑。

(1) 应使丝杠在最大轴向载荷作用下，在受力方向上仍保持受拉状态。为此，预紧力应大于最大轴向力的 0.35 倍。

(2) 丝杠的热变形应能得到补偿。丝杠的热变形为：

$$\Delta l = \alpha l \Delta t$$

式中  $\Delta l$ ——丝杠的热变形 (m)  
 $\alpha$ ——丝杠热膨胀系数，对于合金钢， $\alpha = 1.1 \times 10^{-5}$  (1/C°)  
 $l$ ——丝杠长度 (m)  
 $\Delta t$ ——温差 (C°)，对恒温条件时取  $\Delta t = 2 \sim 3$  (C°)

丝杠预拉伸后引起的伸长变形为

$$\Delta l = \frac{P_0 l}{AE} = \frac{4P_0 l}{\pi d_1^3 E} \quad (\text{m})$$

式中  $P_0$ ——预紧力 (N)  
 $l$ ——丝杠长度 (m)  
 $A$ ——丝杠截面积 (m<sup>2</sup>)  
 $d_1$ ——丝杠螺纹底径 (m)  
 $E$ ——弹性模量，取  $E = 2.1 \times 10^{11}$  (Pa)

令以上两变形量相等，最后可求得所需预紧力为

$$P_0 = \frac{\pi d_1^3}{4} E \alpha \Delta t \approx 1.813 \times 10^5 d_1^3 \Delta t \quad (\text{N}) \quad (8-39)$$

(3) 考虑轴承允许的动载荷。在校核轴承时，必须考虑所施加的预紧力。

## (四) 稳定性计算

丝杠受轴向载荷 (压力) 后的稳定性，可以按材料力学中有关公式校核计算。

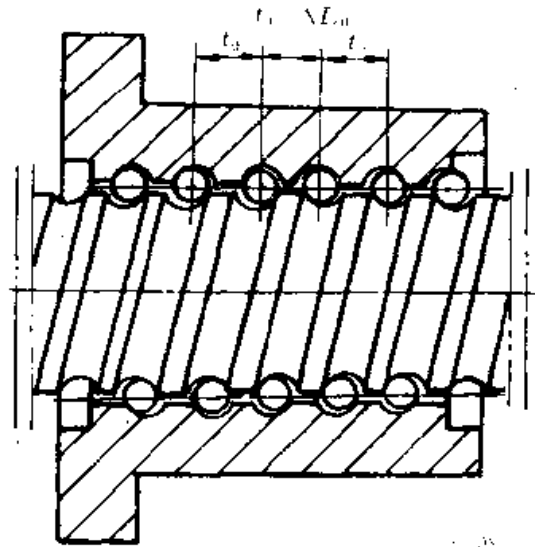


图 8-31 单螺母变导程结构

## 第九章 机电一体化技术应用实例

### 第一节 缝纫机的机电一体化

#### 一、概 述

多年来一直由机械技术占统治地位的缝纫机领域，自 1975 年以来引入了电子技术。从此缝纫机开始进入了电脑控制的机电一体化时代。

电脑（微机控制）缝纫机具有机构简单、工作稳定、功能多、自动化程度高、操作简便及噪声小等特点。在电脑缝纫机中，机械零件可减少数百种。其存储器可存贮大量缝纫针迹、花样等信息，多达数百种，故能方便地进行各种缝纫刺绣，并能自动改变缝纫图案，进行图案的放大缩小。还可以实现自动穿线，按设计式样换针换线、自动控制缝纫速度，有的还可具有显示器显示出工作与出错信息，进行会话式操作。电脑缝纫机的出现为服装生产的全自动化奠定了基础。

下面以日本フラザ公司所开发的 BAS-400 工业缝纫机为例子，对机电一体化技术在缝纫机中的应用进行介绍。

该机主要用于对多种原材料完成自动刺绣，以微处理器进行四轴数控，其主要特征和规格如下：

#### 1. 缝纫机的主要特征

(1) 易于掌握使用 该机采用了键盘式操作。要完成的刺绣的有关信息以打字机键盘的方式输入，开发了相应的字符图案处理软件，使刺绣工作变得简单。

数据的编辑、校正全部采用数显。数据库使用软磁盘，可方便地进行从字母到汉字等各种字符类别的选择。

采用单头刺绣机型式，具有断线自动停机功能。

(2) 具有很强的编辑功能 可绣字符图案的大小可在  $5\sim 99\text{mm}^2$  内任选。

不管所绣字符的大小，线的密度能自动保持一定。

可以使  $x$  轴、 $y$  轴反向。

可以自由选择字符按横排或纵排排列。

可在数据输入时自动地将针置位于中间。

可自动计算各字符尺寸。

#### 2. 缝纫机的主要规格（参见表 9-1）

所用电机规格如下：

主轴直流伺服电机为二极永磁型，扭矩  $0.28\text{N}\cdot\text{m}$ ，转速  $3000\text{r}/\text{min}$ ，功率  $90\text{W}$ 。

$x$ - $y$  轴驱动电机为步进电机，步距角  $1.8^\circ$ ，保持力矩  $0.8\text{N}\cdot\text{m}$ ，2-2 相励磁。

针摆电机为步进电机，步距角  $1.8^\circ$ ，保持力矩  $0.5\text{N}\cdot\text{m}$ ，2-2 相励磁。

表 9-1

BAS-400 工业缝纫机主要规格

使用缝纫机	LE2-B860
缝口形成	单针交叉缝纫
缝纫速度	最高 1000 (stroke/min)
交叉宽度/mm	0~12
工作台移动范围/mm	100×100
电源电压/V	AC100
驱动电机	直流电机、步进电机
机械尺寸/mm	长×宽×高=740×950×800

## 二、主要技术问题

本机考虑解决的是各独立字符图案的刺绣。有下面一些主要技术问题。

### (一) 缝纫机与 $x-y$ 工作台的位置关系

一般情况下缝纫机头和  $x-y$  工作台成直角布置，形成缝口如图 9-1a) 所示。这样则难以表达出字符横向笔划。分析手工刺绣，通常缝口向右下倾斜  $20^\circ\sim 30^\circ$ ，如图 9-1b) 所示。因此本机将缝纫机头对  $x-y$  工作台置成向右下倾斜  $30^\circ$ 。

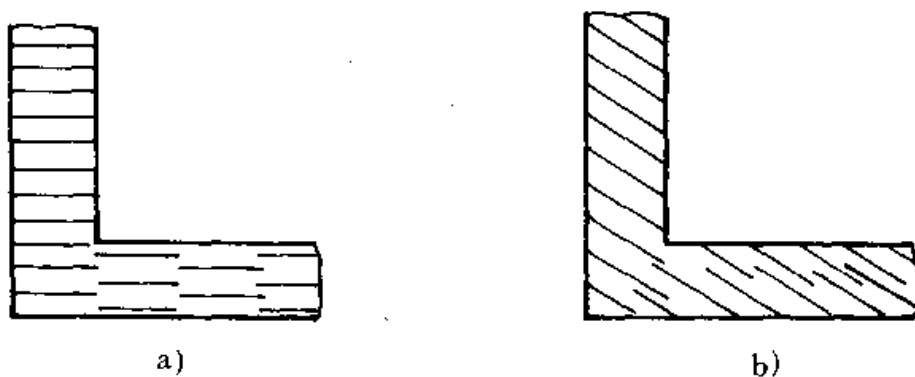


图 9-1 缝口示意图

a) 机头与工作台直角布置 b) 机头与工作台倾斜布置

### (二) $x-y$ 工作台移动的最小设定单位

刺绣的字符，特别是汉字字符，经常使用行书体，有相当圆滑的曲线形状。为能表达这一点，先看一下当对应于一脉冲有不同的分辨率（在此即是驱动  $x-y$  工作台步进电机脉冲当量）时是什么情况。通常提花机刺绣时相当于每脉冲  $0.2\text{mm}$ ，曲线就不能很好地表现出来。图 9-2 是从原点  $O$  起走半径为  $1\pm 0.1\text{mm}$  的圆弧时的可能轨迹的例子。由于只能选择纵坐标与横坐标为  $0.2\text{mm}$  的倍数，故只能作出 9 条斜线，各终点偏离圆弧较远。如果各轴的分辨率为  $0.05\text{mm}$ ，则可作出的斜线就大大增加了，各斜线终点离圆弧的偏离量也显著减小，刺绣质量明显提高，可较好地表达出曲线形状。



因此,为提高精度,就应有较小的最小设定单位。

### (三) 最小设定单位和最高速度

从理论上讲,最小设定单位无论多么小,移动一定的距离时总需一定时间。如按每脉冲 0.05mm 移动 1mm 的距离,需 20 个脉冲。若按每脉冲 0.2mm 移动 1mm 则需 5 个脉冲。后者一脉冲作功量较大,需要较大的电机。当脉冲频率一定时,最小设定单位越大,移动速度就越高。

显然,如果刺绣图案只通过  $x-y$  工作台的移动来进行,缝制速度就相当慢。为提高缝制速度,采用了针同时作横向摆动的方法。 $x-y$  工作台每次移动一根线的间距 (0.2mm) 即可。

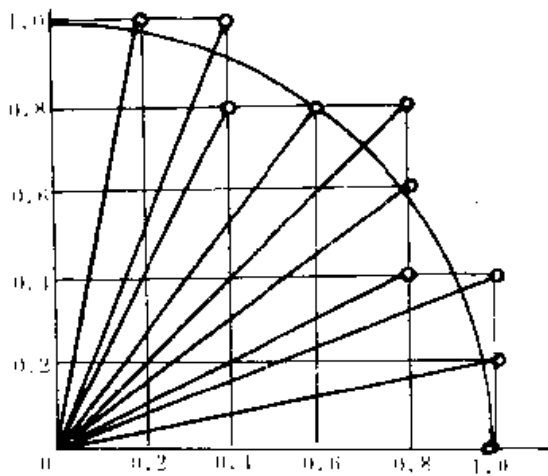


图 9-2 曲线的刺绣

针摆动的幅度也不会急剧变化,一般容易实现。

### (四) 放大缩小字符时线密度的保持

设标准字符尺寸为  $10\text{mm}^2$ , 平均线密度为 5 根/mm。字符放大时的情况如图 9-3 所示。显然,为保持刺绣的线密度不变,需要插补进新的针迹。图中  $(n-1)$ 、 $n$ 、 $(n+1)$  为标准字符时线的位置。当字符放大成 2 倍后,针应按  $A_{n-1} \rightarrow B_{n-1} \rightarrow A_n$  的中点  $P_1 \rightarrow B_{n-1}$  和  $B_n$  的中点  $Q_1 \rightarrow A_n \rightarrow B_n \rightarrow P_2 \rightarrow Q_2 \rightarrow A_{n+1} \rightarrow B_{n+1} \dots$  的顺序移动。故需计算点  $P_1$ ,  $Q_1$ ,  $P_2$ ,  $Q_2$  的坐标。

放大率较小时,因为平均线密度为 5 根/mm,一般适当选择间距为 0.2 或 0.5mm。

当字符要缩小时,由于线密度这时会变大,则应当作出适当的间隔。

字符数据以  $10\text{mm}^2$  的标准尺寸被存贮于软磁盘中。根据操作面板的每一文字字符调出数据,存入 RAM 中。主要数据有针的中心轨迹的移动量,针摆动值的变化量。应按一根根的线记录下来。

当只是改变纵或横的放大率时,由于不能保持线的倾角为  $30^\circ$ ,故这种情况下不进行针的摆动,仅仅由工作台的移动进行刺绣。当然,这样缝制速度就慢了。

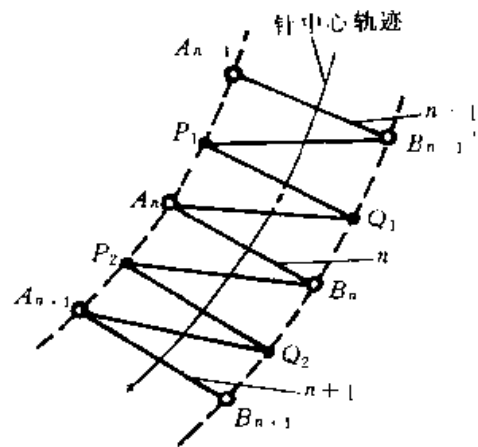


图 9-3 字符放大时针迹插补

## 三、系统概要和机构

该机系统是四轴同时控制的一个数控系统。它一方面监视检测使针进行上下运动的电机(主轴电机)的回转,从而对  $x-y$  工作台(两个坐标)及针的摆动完成间断运动的

控制。另当缝制完成时或断线紧急停车时，在使主轴电机停转的同时应使针总是停于上死点的位置。为实现所要求的四轴控制，采用了一个微处理器芯片作为CPU；另外为完成字符数据的编辑也使用了一个CPU。字符数据存储于软盘中，当有键盘输入时则调出。这两个CPU独立使用但又有相互应答信号。整机硬件组成如图9-4所示。

### (一) 主轴电机和主轴结构

缝纫动作的完成是靠针的上下运动，这是由主轴电机驱动来实现的。对此运动速度的控制不是关键。缝纫开始时，头三针由于速度增长很快，有可能将线抽掉，因此缝纫开始时的引线应有足够的长度。其后用尽可能高的速度缝纫。在结束缝纫之前的最后的三针应进行减速

主轴结构布置如图9-5所示，主轴电机直接安装于主轴之上，即采用了直接传动。主轴电机是装有脉冲编码器的直流伺服电机。主轴上装有带轮，供对针微调时手动用，其轮幅带有风扇叶片，以冷却主轴电机。另外在下部还有卷取底线的电机及为防止线偏斜的限位开关（图中未示出）。

### (二) 针的上下运动和x-y工作台的移动

针的上下运动相对于工作台的轨迹大致上像正弦波。当针在布以上时（正弦波正的

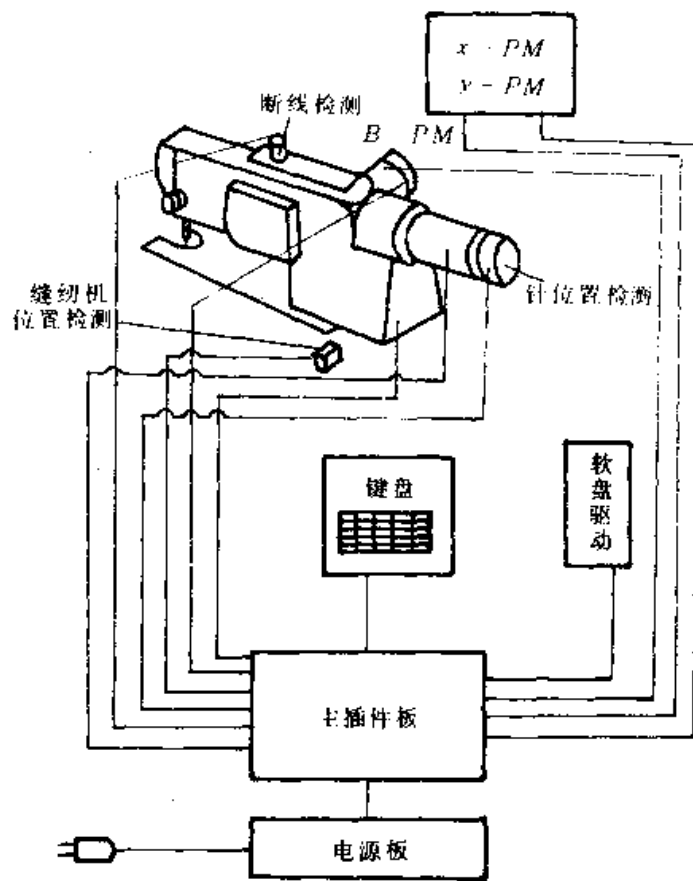


图 9-4 整机硬件组成框图

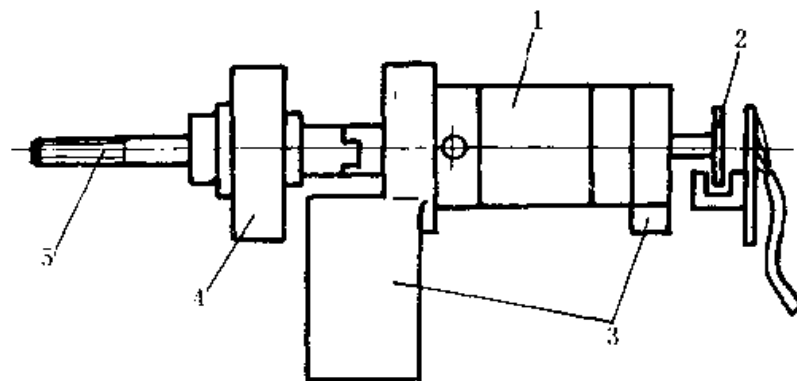


图 9-5 主轴结构示意图

1—主轴电机 2—脉冲编码器 3—支座 4—带轮 5—连接螺纹

部分),  $x$ - $y$  工作台可进行移动; 当针在布上穿过时(正弦波负的部分), 工作台不能进行移动。否则针就会被折断, 损坏布面而不能缝纫。图 9-6 示出针位置的变化情况。

$x$ - $y$  工作台驱动采用了两台步进电机。电机每转 200 个脉冲。传动丝杠螺距为 10mm。电机与丝杠直联 ( $x$  轴) 或用 1/1 齿轮传动 ( $y$  轴)。脉冲当量为 0.05mm/脉冲。为使运动平稳,  $y$  轴具有两根并列的驱动轴, 这两轴由带有张紧轮的同步皮带传动。机架采用铸铝制成的整体结构以保证各孔轴的位置精度要求。图 9-7 是  $x$ - $y$  工作台结构示意图。

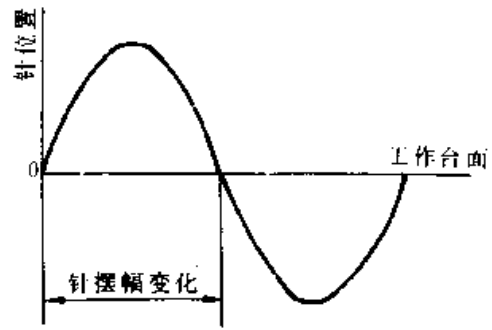


图 9-6 针位置的变化

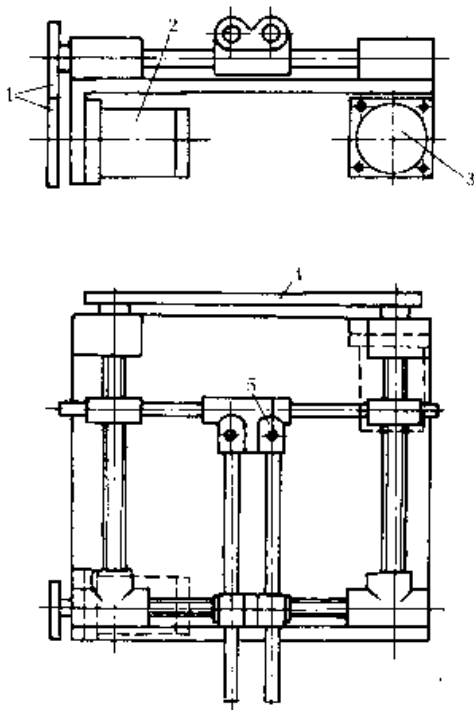


图 9-7  $x$ - $y$  工作台结构

- 1 齿轮 2- $x$  轴步进电机 3- $y$  轴步进电机
- 4 同步反带 5-工作台安装面

### (三) 针的摆动

对于普通手工刺绣缝纫机, 使用时是用手或脚控制改变针摆动幅度的, 本机则采用了步进电机来控制。图 9-8 简单表示出从电机到针的传动结构。

步进电机步距角  $1.8^\circ$ , 每转 200 个脉冲。每一脉冲使针的摆幅增或减 0.1mm。最大摆幅可达 12mm。只需给电机 60 个脉冲就相当于朝一个方向使摆幅改变 6mm。电机 1 与针摆动轴 2 用齿轮传动连接, 再通过扇形齿轮实现摆幅的调节。当棱圆形的针摆动凸轮 3 回转时, 使叉形杆 4 绕其回转轴 5 摆动。摆动量经增幅传递至针上, 从而实现所要求摆幅的摆动。

## 四、从字符图形到电机指令的形成原理

### (一) 刺绣原图和字符数据

图 9-9a) 表示出被刺绣图形的一部分。它是从刺绣图形中分割出的一个四角形单元块。该图的轮廓由刺绣直线插补充满。轮廓和插补直线之间的偏差量按将单元块分割为 0.1mm 以下考虑。单元块分为两类, 即缝纫单元块及非缝纫的进给单元块。对一个要进行刺绣的字符图形, 都分成若干个小的单元块, 单元块的四边则可近似看作由直线组成。图 9-9b) 所示为分成一个进给单元块和两个缝纫单元块的情况。

表 9-2 表示出应在软磁盘中存入的字符数据的形式。它包括进给单元块各顶点坐标, 各缝纫单元块下面的分隔线两端点的坐标, 均以增量值来表示。还有对每个缝纫单元块之内必须刺绣的针数以 COUNT 指令预先设定。

表 9-2 表示出应在软磁盘中存入的字符数据的形式。它包括进给单元块各顶点坐标, 各缝纫单元块下面的分隔线两端点的坐标, 均以增量值来表示。还有对每个缝纫单元块之内必须刺绣的针数以 COUNT 指令预先设定。

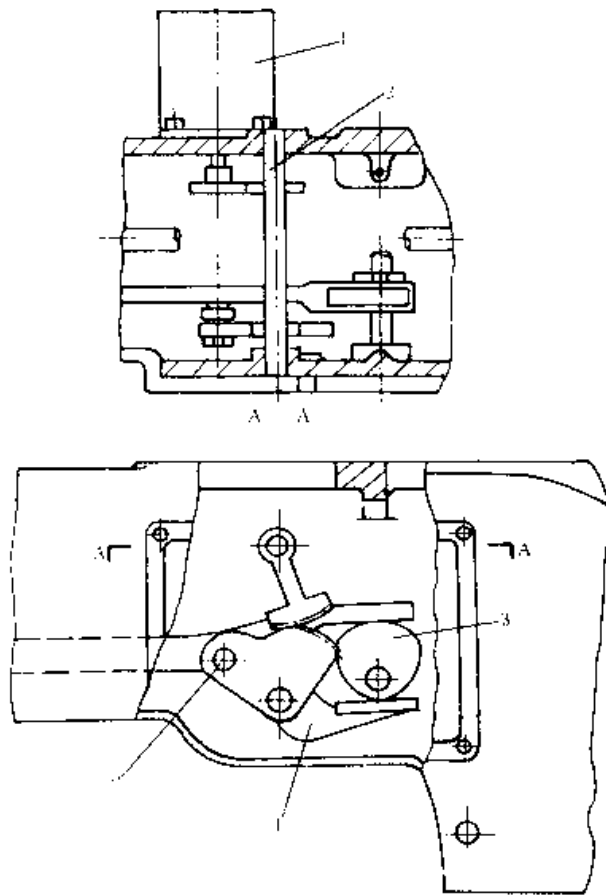
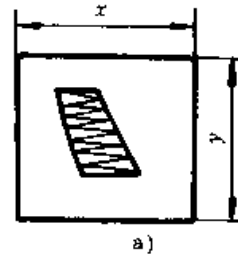
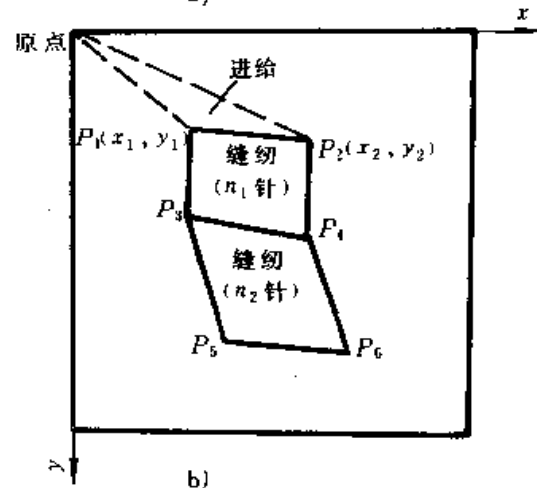


图 9-8 针摆动的传动结构

1—步进电机 2—针摆动轴  
3—针摆动凸轮 4—叉形杆 5—回转轴



a)



b)

图 9-9 刺绣原图

a) 被刺绣图形的一部分 b) 单元块的分割

表 9-2

字符数据形式

代 码		说 明
字符图形代码		
尺寸 x	尺寸 y	字符尺寸
FEED	$x_1 - 0$	进给单元 FEED 缝纫数据
FEED	$y_1 - 0$	
FEED	$x_2 - x_1$	
FEED	$y_2 - y_1$	
COUNT	$n_1$	FEED 刺绣针数
STITCH1	$x_3 - x_2$	缝纫单元 SITTC1 缝纫数据
STITCH1	$y_3 - y_2$	
STITCH1	$x_4 - x_3$	
STITCH1	$y_4 - y_3$	
COUNT	$n_2$	STITCH1 刺绣针数

续表

代 码		说 明
字符图形代码		
尺寸 x	尺寸 y	字符尺寸
STITCH2	$x_5 - x_4$	缝纫单元 STITCH2 缝纫数据
STITCH2	$y_5 - y_4$	
STITCH2	$x_6 - x_5$	
STITCH2	$y_6 - y_5$	
COUNT	$n_3$	STITCH2 刺绣针数
结束代码		

## (二) 电机指令形成

从软盘读出的预先存好的字符数据，经过对各单元块进行坐标变换及由编辑数据（放大、缩小、线密度、配列、反转）进行修正后，产生各个步进电机相应的指令（符号、移动量）。

图 9-10a) 表示出一个三轴控制生成的单元块。针杆的中心在分隔线的中心连线上依次送进一个按针数等分的距离。针的摆动，其振幅每次仅改变相邻两分隔线长度差的一半。这样即可逐步完成单元块的刺绣。当缝纫单元块不能构成图示形式的四边形时，本机受结构限制难以实现这种三轴控制。这时则不采用针的摆动而仅用坐标工作台的移动来实现刺绣。此即是一种二轴控制单元块，如图 9-10b) 所示。其实现方法是按各自的针数分割两边的轮廓线，将其分点交叉连接，针杆则按连线移动。

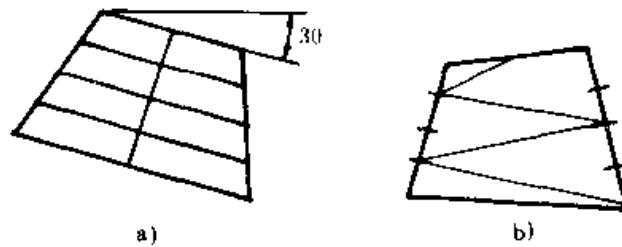


图 9-10 单元块的形成

a) 三轴控制单元块 b) 二轴控制单元块

缝纫机头和  $x$ - $y$  工作台相互倾斜  $30^\circ$ ，三轴控制单元块的轨迹亦向右下倾斜  $30^\circ$ ，其摆动受结构限制应在  $12\text{mm}$  以下。

## 五、软件介绍

微机软件的主要部分由主程序和中断处理程序构成。电源接通后，首先开始执行主程序。

### (一) 主程序

主程序开始后先进行输入输出及存储器 (RAM) 初始化 (清零、预置等)。然后在数显上即表示出“请转动电机”。操作者将相应的主轴电机的带轮转动，这样即得到与主轴电机相连的位置检测器 (96 等分的旋转编码器) 的原点信号。此信号送至控制电机运转的主 CPU。而主 CPU 就开始输出相应的针位置信号，亦即针是在布的上或下面的状

态信号。另外也开始输出自动地使主轴电机转动的状态信号。采用这种启动方法是为操作者的安全及考虑在刺绣范围内布的安装等情况。

此后，按针摆动步进电机（B轴）的检测器的信号，B轴步进电机转动回到原点，并使针杆处于摆动的中间位置，将针摆动置于非状态。在此期间，键盘上的指示灯（4个发光二极管和32个字符的荧光指示灯）全部亮，使操作者可相应地进行检查。

上述初始化设定全部结束后，程序就能够通过键输入及主轴中断进入主循环。由于主轴的失控危害很大，故作为重要的监视项目。

主循环能按起动标志状态使3个按优先级排队的处理程序启动，这采用了简单的监控程序形式。键选通中断产生后，“键处理”程序的启动标志被设置。然后即可依次执行“键处理”、“面积检查”及“指令计算”处理程序，各有关标志在前一处理程序执行后被设置。图9-11表示出主程序流程图。

### （二）中断处理程序

中断请求线路具有6个优先级的中断请求及相应的中断标志线路。各中断请求线路在存储器中具有相应的中断服务入口地址。

CPU接受中断后，即在相应中断级的中断入口地址执行所写入的中断处理程序。这时应当断开中断标志，执行EI指令（开中断指令）。

下面列出6个中断请求信号及其产生原因。

#### 1. 定时器检查

在等待有关“动作终了”等信号时，由于硬件的故障干扰而使程序可能进入无限循环。为避免失去控制，产生对超定时器时间的中断信号。

#### 2. 缝纫机数据

由于针位置检测器（编码器）的不良、驱动回路不良或电机超载等情况，不能对缝纫机各电机可靠控制时，驱动电机用的CPU可产生中断信号。

#### 3. 键选通

这是由于按键输入产生的中断信号。输入的键数据送入缓冲存储后，设置“键处理”程序启动标志。

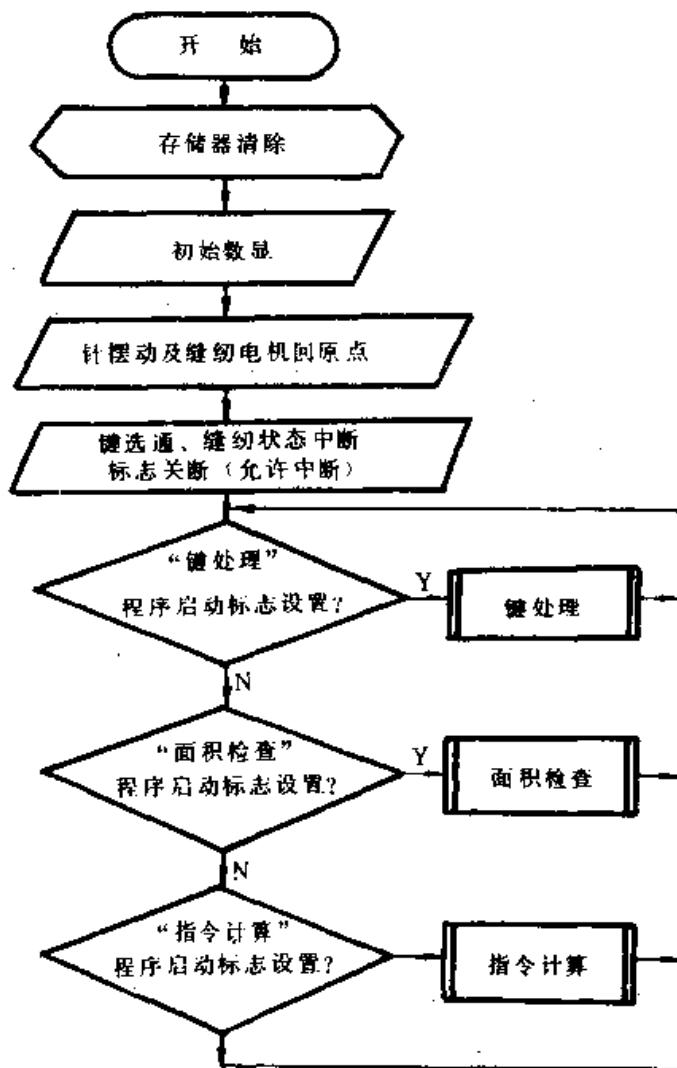


图 9-11 主程序流程图

缝制过程中，为能处理紧急情况，还设置了不可屏蔽的紧急停止按钮。

#### 4. 针位置

主轴电机驱动时，由针位置检测编码器产生表示针在布上、布下的状态信号。在针从布下到布上时，这个信号的上升沿即产生一个中断信号。由此中断信号定时，控制 3 个步进电机进行驱动。

#### 5. 步进电机停止运动

在选通三个步进电机进给脉冲的信号期间内，由最后的断开控制信号产生中断信号。由于该信号的定时 3 个步进电机的驱动结束。

#### 6. 断线脉冲

断线检测装置是一个在圆周上开有多个孔的圆盘，在这个圆盘的轴上装着线卷，缝制时圆盘同时转动。装上光源与光电管后由于圆盘间断地遮断光线而产生脉冲信号，这就成为中断信号。

该机软件除上述的主程序和中断处理程序外，还具有错误显示、自诊断、数据编辑等功能，不再一一介绍。有关步进电机的驱动程序可参见第六章。

## 第二节 电子钟表的机电一体化

### 一、概 述

钟表的发展历史是追求走时更准确、体形更小型的发展的历史。传统的机械钟表与电子学、电子元件、大规模集成电路相结合，出现了石英振荡式电子钟表。这即是典型的机电一体化技术的应用，它给钟表带来了重大的革新。其进步表现在：时间精度和持续时间大幅度提高，可靠性明显提高而免去了维修，能实现小型、薄型化，便利制造和商品出售的服务。

石英电子表起初有模拟（指针）式，其后是用液晶显示的数字式手表，至今已发展成模拟和数字复合的复合式石英表。

### 二、电子表与机械表构成比较

在此对石英电子表与机械表的基本构成、性能作一些对比，并对电子表的基本工作原理作一些介绍。

#### （一）机械表的基本构成

完成机械表运动的基本构成，可由图 9-12 概括地说明。

##### 1. 动力系统

动力系统指的是驱动钟表的能源。便携式钟表采用机械发条；大型钟采用发条或重锤。

##### 2. 传递系统

传递系统由增速轮系构成。其作用是将动力缓慢地传给控制系统。

##### 3. 控制系统

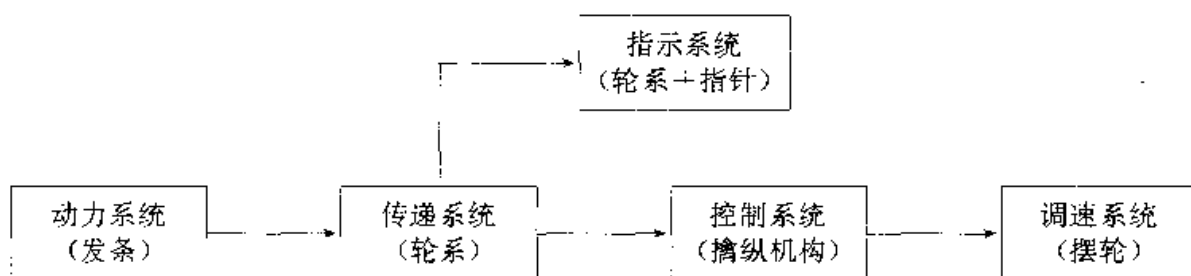


图 9-12 机械表基本构成

在机械表中，控制系统即是擒纵机构。它一边将轮系的回转运动变换成往复运动，一边向调速机构供给能量。同时担负着使调速机构有规则地以正确的周期使轮系回转的作用。

#### 4. 调速系统

这是指便携钟表的摆轮或大型钟的振子。是获得计时精度的关键。

#### 5. 指示系统

指示系统由时、分、秒针及有关轮系组成。

### (二) 指针式石英电子钟表的基本构成与工作原理

指针式石英电子表以电池为能源，以石英振荡器的谐振频率为频率基准，通过 CMOS 集成电路驱动步进电机，从而带动了一系列齿轮，最后用指针表示时间。

指针式石英电子表的基本构成如图 9-13a) 所示，工作原理图如图 9-13b) 所示。

#### 1. 动力系统

这是指电子表的能源，主要是银电池与锂电池。这类电池具有体积电容量密度高，输出电压稳定，贮存性能优良三个特点。使用寿命一般 2~3 年，长可达 5 年，不用维修更换。而机械表发条上满持续时间一般为 40h。

#### 2. 调速系统（时间标准源）

电子表的时间标准源即石英振荡器。它是利用石英晶体的压电效应与电子振荡回路组合而成，能得到极其稳定的振动。一般在电路板上装有石英振子、CMOS 集成电路和微调电容器。

石英振子是由物理性能非常稳定的人造二氧化硅单晶体制成。一般采用频率为 32768Hz。用石英振子作时间标准源，使时间精度显著提高。一般月差为几秒至 20s，高精度的年差为几秒至 20s。而机械表的调速机械摆轮，由于摆轮加工误差，与擒纵机构交换能量时产生的振动周期误差，摆轮的惯性矩和游丝的弹性系数受温度的影响以及带在手腕上受振动和冲击的影响等都使其振动周期受影响，时间误差一天就达数十秒。

集成电路采用功耗低、开启电压低、集成度高的 CMOS 集成电路。电路中包括有：① 激振回路。使石英振子持续振动。② 分频回路。将石英振子的振动分频为 1Hz（或 0.5Hz）。③ 驱动回路。用以对分频信号进行整形放大，产生使步进电机回转的输出信号。图 9-14 给出了指针式石英电子表基本逻辑图。图中  $F_1$  是反相器，它与石英振子、微调电容  $C_g$  等组成石英振荡器、产生 32768Hz 的方波。反相器  $F_2$  和  $F_3$  组成缓冲器，将振荡器与后面



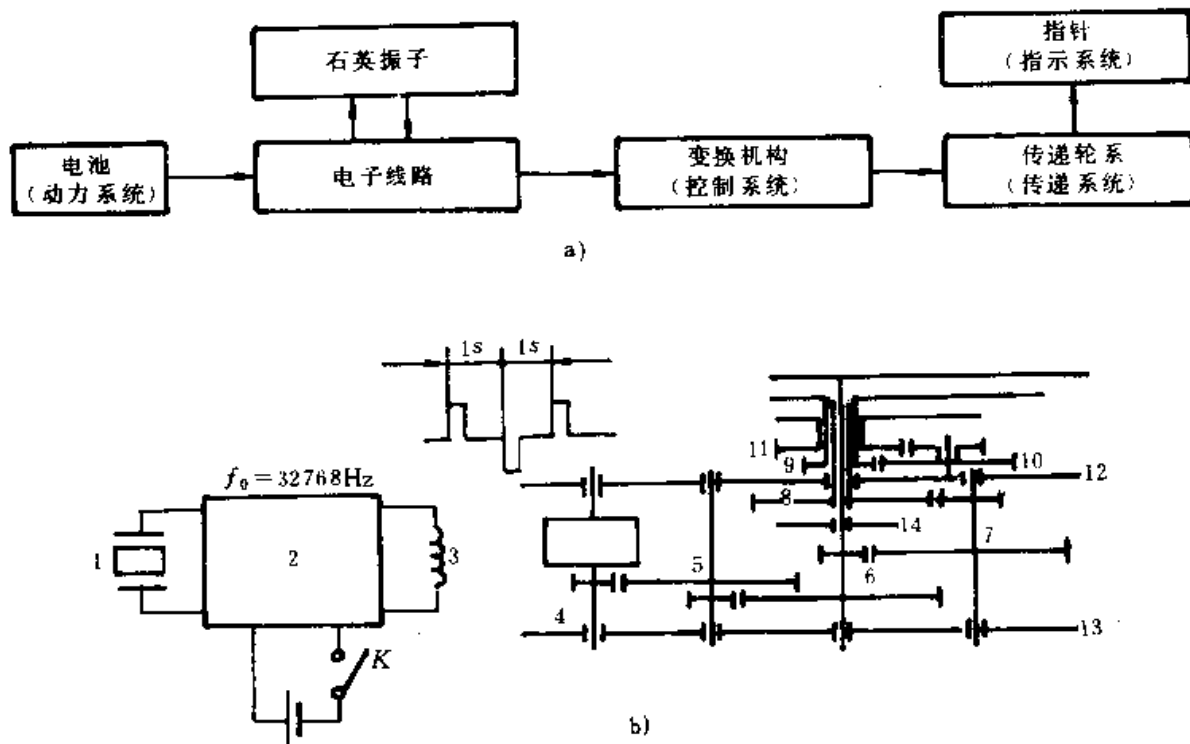


图 9-13 指针式石英表的基本构成与原理图

a) 基本构成 b) 工作原理图

- 1—石英振子 2—集成电路 3—电机线圈 4—转子部件  
 5—秒过轮部件 6—秒轮部件 7—分过轮部件 8—中心轮部件  
 9—分轮 10—跨轮部件 11—时轮 12—主夹板 13—上夹板 14—中夹板

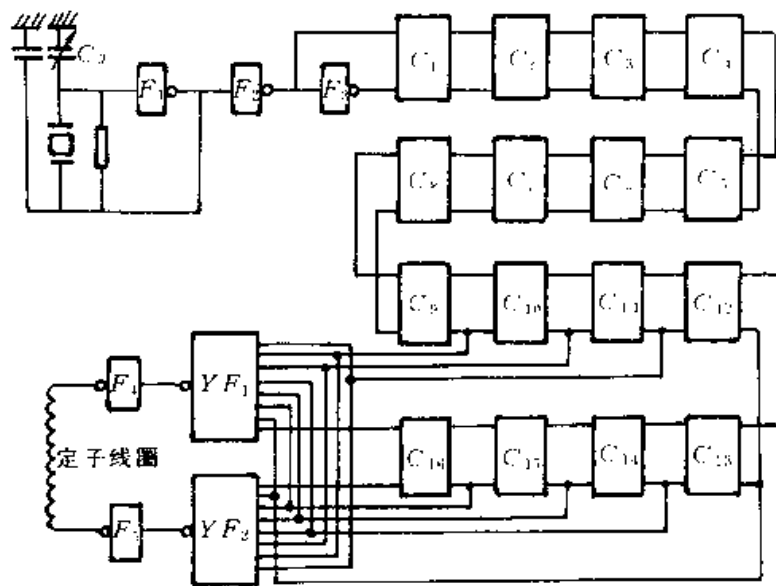


图 9-14 指针式石英电子表基本逻辑图

的分频回路隔开，以防止负载（分频器）状态的变化影响振荡回路。 $C_1$  至  $C_{16}$  是 16 级二分频器（或 15 级）构成分频回路，以将振荡器的信号最后分频成为 0.5Hz（或 1Hz）的脉冲信号。 $YF_1$  和  $YF_2$  组成窄脉冲形成电路，将分频回路输出的占空系数为 50% 的脉冲信号转换成脉宽为 7.8ms 的窄脉冲，以减少步进电机的功耗。

### 3. 控制系统

在这里控制系统的含义是指执行器件二极步进电

机。从集成电路来的脉冲使其回转，从而最后使指针走动。它是一个小型高效的电-机变换器。

作为机械表控制系统的擒纵机构，其机械结构复杂，加工精度要求高，需要高的调整技术。而电子表用的步进电机结构简单耐久，易于控制，起动迅速（1/100s），效率高，便于小型化设计安装，易于大量生产。

#### 4. 传递系统

指针式电子表的传递系统与机械表无大差别，亦由轮系组成。但由于石英表动力源不同于机械表，轮系所承受的负荷减少了一个数量级。如分针轮的回转扭矩上满发条时约  $0.98\text{mN}\cdot\text{m}$ ，24h 后约  $0.78\text{mN}\cdot\text{m}$ 。而石英表只有在日期和星期变换时才需较大扭矩，约是  $0.049\text{mN}\cdot\text{m}$ 。

### 三、石英电子表用电机

由于手表的薄型、小型化要求，其驱动电机的尺寸必须受到严格限制。为获得长的持续时间，驱动电机和集成电路应当是低能耗。现在所用 CMOS 集成电路耗电已达到  $0.15\mu\text{W}$  的水平。而所用的步进电机采用了适应控制方式后耗电水平已达  $0.7\mu\text{W}$ 。

下面介绍一下电子表用低耗电步进电机的工作原理。

#### （一）石英电子表用步进电机结构

图 9-15 示出典型的石英电子表用步进电机的结构。其转子采用价格较低、磁能积较高的钐钴钢制成，只有一对磁极。定子材料为高导磁率的坡莫合金，做成小横断面的整体式结构。在定子上装入转子的孔的内圆周面上开有两个凹坑，以形成定子与转子间的不均匀气隙。当定子线圈无电流通过时，定子就会停留在磁阻最小的平衡位置上。当有脉冲电流通过线圈时，由于定子磁场与转子磁场相互作用，推动转子旋转  $180^\circ$  至新的平衡位置，下一个脉冲与上一个脉冲极性相反，使转子又会向前转过  $180^\circ$ 。由于定子连接部分的厚度仅  $0.1\text{mm}$ ，在线圈中只需流过微小的电流，连接部分就磁饱和了。通过改变定子孔内凹坑的大小，就可改变转子的静止扭矩。改变凹坑的位置角度就可改变转子的静止位置。

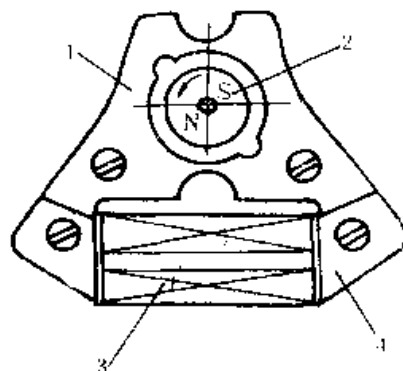


图 9-15 电子表用步进电机

1—定子 2—转子  
3—定子线圈 4—线圈架

#### （二）电机的低能耗驱动

电子表步进电机的驱动可采用一种适应控制方式来获得电机的低能耗。其方法是将驱动脉冲分成为正常驱动脉冲  $P_1$  和校正驱动脉冲  $P_2$ 。正常驱动脉冲  $P_1$  是每隔 1s 进行驱动电机的一个脉冲（在此设脉冲频率为 1Hz）。其脉冲宽度可自动调节改变。校正驱动脉冲  $P_2$  是在使用正常驱动脉冲而转子仍不回转时输出。它决定了最大输出扭矩。图 9-16 表示出  $P_1$  和  $P_2$  的时序，这时步进电机按下面的两个规则被驱动：

规则① 以脉冲  $P_1$  驱动电机之后，检测转子的转动位移，如果检测回路判断为不回

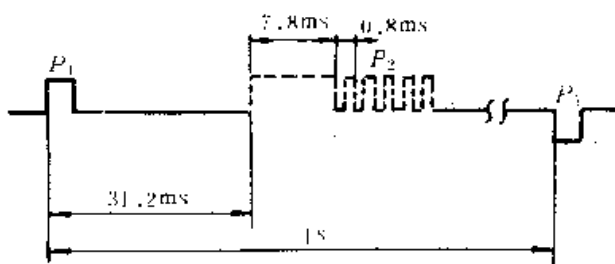


图 9-16 步进电机驱动脉冲定时图

转，则立刻再加以校正脉冲  $P_2$  驱动转子，并使下一秒钟的脉冲宽度自动地相应增加。

规则② 每隔  $N_s$  (如 128s),  $P_1$  的脉冲宽度强制地被减小。

图 9-17 的流程图表示出规则①和规则②的内容。该流程图的动作反复操作。对应于步进电机负载的大小，自动地增减脉冲  $P_1$  的宽度，电机则自然而然地以最小驱动脉冲宽度 (最小驱动功率) 而转动。这即成为一种适应控制方式。

为实现上述控制，能自动进行回转与否的检测十分重要。这可以通过对电机线圈中电流波形的检测来实现。通常将检测电路做在 CMOS 集成电路内。

#### 四、液晶显示石英电子表

液晶显示石英电子表的基本工作原理与指针式石英电子表大致相同，不同的只是最后在显示器件上以数字形式显示出时间。它完全取消了齿轮和机械传动装置，成为全电子表，把手表的发展推向一个新阶段。

目前数字式电子表的显示器件主要有发光二极管和液晶显示两种，前者的优点是可见光显示，但功耗大，因此在电池能源有限的情况下不能采用常显示方式。而后者功耗极小，能实现常显示方式。故目前生产的大多是液晶显示石英电子表。

数字式石英电子表电路中的振荡回路部分与指针式的基本相同，其不同在于用计数器来进行计时和计历。一般采用由  $D$  触发器构成的二进制计数器，对振荡回路产生的脉冲进行计数，再通过由组合门电路构成的译码器将二进制编码转换成七段数字显示器的代码。最后通过驱动器将译码器的信号变成幅度

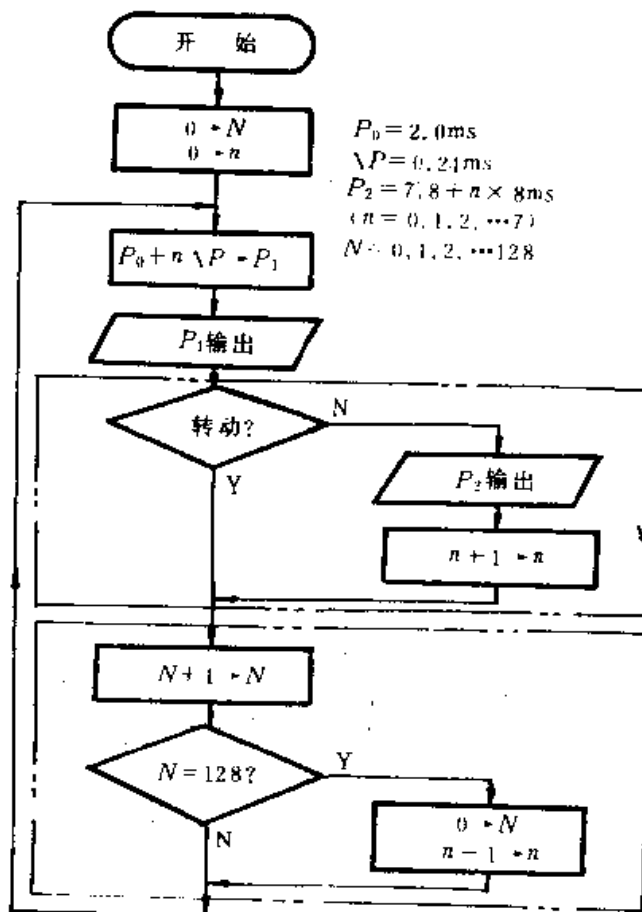


图 9-17 步进电机适应控制流程图

为 3V、频率为 32Hz 的脉冲，去控制液晶显示器件。

数字式石英电子表最大的特点是易于实现多功能化。尤其是随着 CMOS 大规模集成电路的发展，功能正在不断增加，除时、分、秒、月、日、星期等基本功能外，已有带秒表、闹表、世界时、计算器、电子音乐等多功能的数字式电子表。此外，还有能测血压、脉搏、体温的保健手表，以及口语报时、词汇显示、存入信息（如存入银行帐号、电话号码）等特殊功能的手表。总之，手表功能已大大超出了计时的范围。

### 第三节 微机控制的卧式制袋充填包装机

#### 一、概 述

随着食品行业等的多样化社会需求的日益增长，包装行业中多品种、少批量的生产所占比重愈来愈大，从而对包装机械的自动化提出了愈来愈高的要求。用户希望包装机械行业能研制出多功能、多适应性的包装机，以减少性能单一的包装机的数量。机电一体化技术为较好地解决这个问题开辟了一条重要途径。本节即以带微机的卧式制袋充填包装机为例，对这方面的开发工作进行一些介绍。

带微机的卧式制袋充填包装机的工艺流程如图 9-18 所示。从卷形的包装材料（塑料薄膜）上拉下薄膜使之成型为筒状。同时被包装物（块状）从另一边由链条传动装置送入后被包裹于其中，随后在筒的中心部位由纵封辊进行连续热封。再送至横封器依次将各袋热封并同时切断。包装成品由传送带送出。包装袋印刷位置的控制（横封切断位置应与印刷图案位置吻合）是由电子与机械装置联合完成的。

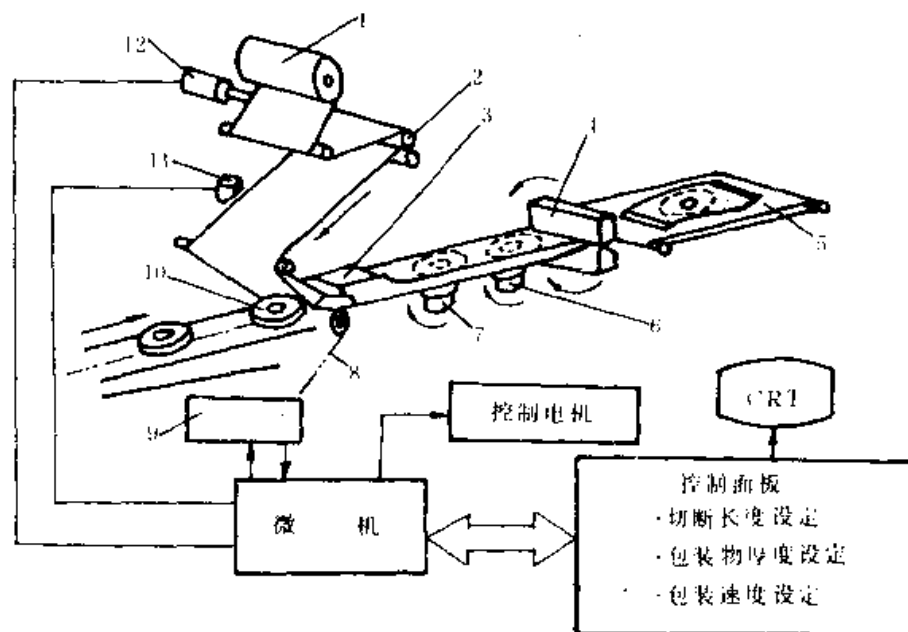


图 9-18 微机卧式制袋充填包装机工艺流程图

- 1—薄膜 2—输出辊 3—制袋器 4—横封器 5—传送带 6—纵封器  
7—送进辊 8—链条 9—光电传感器 10—包装物 11—传感器 12—编码器

只要能方便地实现对包装袋长度和宽度的快速调整，以适应包装物大小的变化，就可使机器具有多用性能。除了对食品，还能对药品、工业品、百货等实现包装。另外与一些附件、设备等组合还可实现充气包装、收缩包装等。机电一体化技术即可方便地实现对包装的长度、宽度、印刷色标对合、横封器位置等的自动快速调整，以满足多用性的要求。

## 二、机构组成

图 9-19 表示出一种带微机的卧式制袋充填包装机的机构组成。

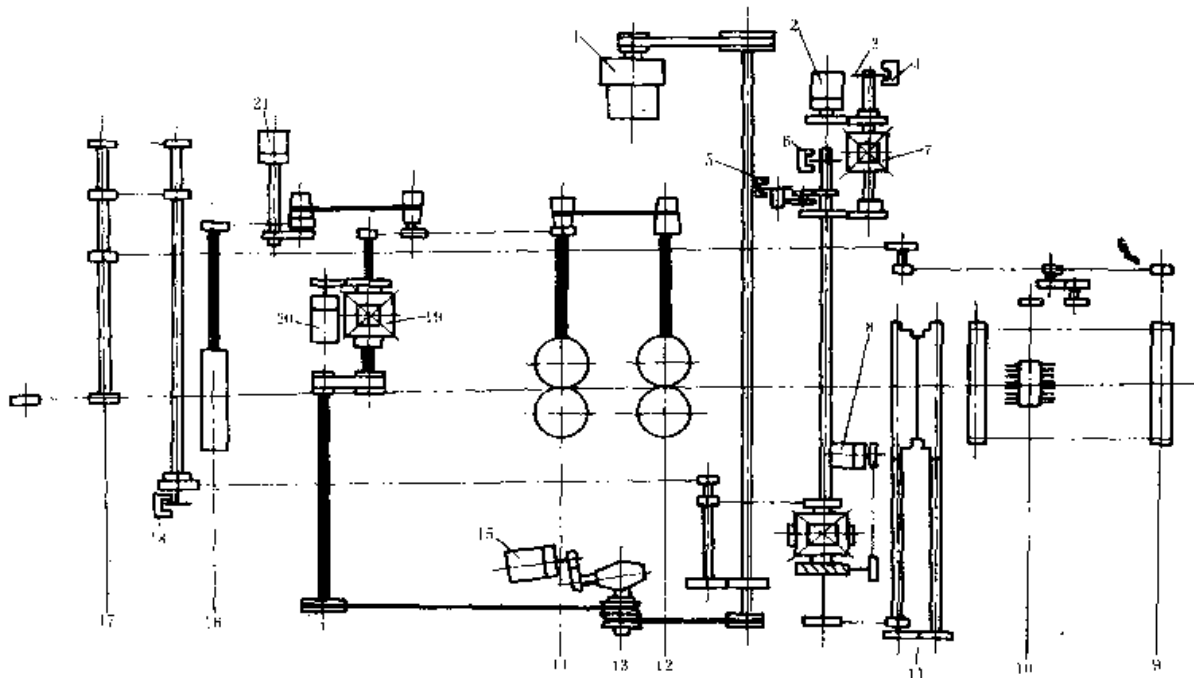


图 9-19 微机控制卧式制袋充填包装机机构组成

- 1—主电机 2、8、15、20—控制电机 3—同步凸轮 4、5、6、18—光电开关  
 7—同步凸轮差动装置 9—输出传送带 10—输出刷 11—横封器  
 12—纵封辊 13—变速带轮 14—送进辊 16—包装材料输出辊  
 17—传送带驱动轴 19—薄膜送进校正差动装置 21—旋转编码器

主电机驱动系统分成两部分。一是包装材料传动系统；二是包装物及横封器传动系统。前者在图中用粗黑线表示。

包装物输入由链条传动实现。在一定的间隔上装有托送板配件，以将包装物按一定间距隔开并导入制袋器的包装材料中。同时横封器在两包装物间隔处进行热封并切断。这就要求输入端的托送板与横封器的回转同步，即送入一个包装物就进行一次横封。

对包装材料传动系统应能方便地实现包装袋长度（剪断长度）的调整。这由设计在该驱动系统中的无级变速装置来实现，调整范围通常为 1/5。另外，由于塑料薄膜在输送过程中易拉伸变形，故以送进辊 14 为基准，设置了能对包装材料输出辊 16 及纵封辊 12

进给量进行微调的机构（变速皮带装置）。

横封器 11 进行热封时的瞬时速度可能与包装材料的输送线速度不一致，为此可设计相应的不等速机构以进行热封速度的调整（图中未示出）。

### 三、微机控制部件

本机主要以自动改变包装袋剪切长度而进行必要的调整为目的，而设有微机控制系统。并用 CRT 显示，能进行会话式操作，使不熟练操作者也能在 2min 左右完成改变包装规格的工作。包装袋宽度只需用制袋器的调整手柄调整制导板就可方便地实现改变。微机控制系统实现以下主要调整功能。

#### 1. 剪断节距（包装袋长度）调整

在操作面板的长度设定按键上设定必要数字（通常是包装材料上印刷商标的节距），就能通过图 9-19 中的控制电机 15 进行变速。相对于横封器转动一周，通过送进辊 14 送进一个所需包装袋的长度。由旋转编码器 21 可进行长度计数并显示，达到设定值后调整动作停止。在此期间可以进行更换新的包装材料的作业。

#### 2. 包装物的高度设定

一般说来都是以包装材料的切割长度作为计算基础并将其数值化。当受包装物高度影响时，其结果应进行必要的修正。当包装物高度（厚度）变大时，包装袋会成为立体形状，而在热封时，袋又变成扁平形。显然这时所需送进的材料长度要比无包装物厚度时要大一些。为了方便，将长度值按高度修正后仍用切割长度设定键输入。

#### 3. 横封器周速的调整

包装材料的输送速度必须与横封器啮合热封时的瞬时速度相等。但由于横封器的直径尺寸是固定的，回转周期按包装物的输入速度也不能任意改变。故当包装袋长度、即薄膜送进速度改变时，可用一特殊的不等速机构调整啮合瞬时的周速，例如用偏心链轮机构，调整其偏心即可。

#### 4. 印刷色标的对合

为使包装袋的商标图案处于正确位置而不致在图案处进行热封切断，通常在薄膜上印有节距为一个袋长的色标，利用光电系统进行识别控制。

相对于图 9-19 中的同步凸轮 3 的光电开关 4，假定图 9-18 中的色标信号传感器检出的信号与之重合，这时认为图案被控制于正确位置上，但若色标图案提前通过，则需要负方向的调整，若滞后通过，则需正方向的调整。这种调整，由控制电机 15 和通过差动装置传动的控制电机 20 的正反转控制来完成。另外，同步凸轮 3 的设定位置也可以通过控制电机 2 来自动给定。

#### 5. 横封器的角度调整

包装物输入传送带上由托送板按一定的间隔送入制袋器中，然后热封切断。相对于托送板，必须给定横封器一个确定的位置（角度）。从托送板进入制袋器之处到横封器中心的长度尺寸是固定的。那么将这个尺寸除以剪断节距后所得之余数换算成角度值（以一个节距的长度相当于  $360^\circ$  进行换算），则有关系式

$$\theta = \frac{L-r}{L} \times 360$$

式中  $\theta$ ——横封器起始角度 ( $^{\circ}$ )

$L$ ——剪断节距 (mm)

$r$ ——余数 (mm)

若还同时考虑包装品高度, 则可用下式计算  $\theta$  值:

$$\theta = \left( \frac{L-r}{L} - \frac{h}{L} - \frac{12}{L} \right) \times 360 \text{ (}^{\circ}\text{)}$$

式中  $h$ ——包装品高度 (mm)

横封器的起始角度  $\theta$  可以自动按设定值调整。图 9-19 中的光电开关 18 用来检测输送带托送板的位置, 用光电开关 6 检测横封器的原点, 光电开关 5 的位置则按计算出的角度值  $\theta$  调整。然后用控制电机 8 驱动, 使横封器获得所需的起始角度。

#### 6. 自检功能

由于本机采用了微机控制和 CRT 显示, 对工作过程中的故障如色标不对合、包装材料跑偏等可实现自动检测后停机, 以利排除。当然这需要采用较多的传感元件和电机。

## 第四节 微机控制的车床

### 一、概 述

自 80 年代起, 我国开始了微机控制车床的研制和应用, 目前已有多种型号的微机控制车床问世, 总的可分为两大类:

一种是全功能数控车床, 由机床主机配备成套控制柜, 多采用闭环系统, 具有功能强、精度好、效率高、运行稳定可靠的优点。它适合于高精度、高难度的零件加工, 但价格较贵。

另一种具有车床基本功能的微机控制车床称普及型也称经济型。这种车床在我国发展的种类比较多, 基本是以较简单的微机 (单板机等) 加上适当的接口电路、驱动电路组成控制柜, 多采用开环控制。具有车床的基本功能, 能满足用户的特殊要求、效率高、维修简单方便、价格低廉、特别适合普及推广。其缺点是加工精度略低, 功能不够完备。

CWK6140 微控车床由 TP801 单板机、脉冲发生器、脉冲分配器、步进电机功率放大器。大功率步进电机、机床传动机构及 C6140 车床整套系统组成, 属具有基本功能的经济型微控车床。该车床能加工内外圆的任意台阶轴、任意曲面或任意球面, 具有自动、手动、单程序、单脉冲、定量手动进给等功能。

图 9-20 是 CWK6140 微控车床开环控制系统框图。要加工零件的程序以机器码的形式存贮在 TP801 的 RAM 或 EPROM 区, 而直线圆弧插补运算公式则直接写入了 TP801 的监控程序中。启动单板机后, 监控程序自动到 RAM 或 EPROM 中取出要加工的零件程序, 并根据其线型的特征转入直线或圆弧的插补程序, 同时控制脉冲发生器向进给方

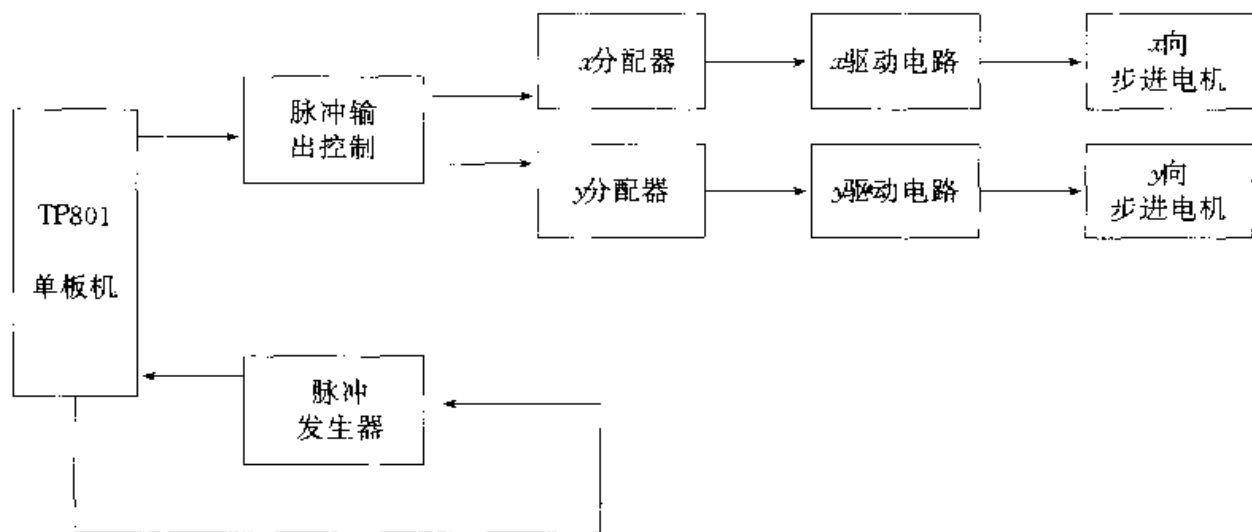


图 9-20 微控车床开环控制系统框图

向的脉冲分配器输出脉冲，CPU 将脉冲发生器送的脉冲数与给定脉冲数相减；步进电机经传动机构带动刀架按分配器输出的脉冲数位移。当步进电机进给的脉冲数等于程序给定的脉冲数时，单板机立即停止本程序的加工，而自动转入取下一程序数值并继续控制加工。当整个零件全部加工完成后，微机回到监控，等待重新启动以重复上述过程。这就是该微控车床开环系统的基本工作过程。

## 二、微机控制车床的硬件结构

### (一) TP801 单板机控制车床接口电路

单板机控制车床的接口部分主要由脉冲发生器、脉冲输出控制电路、步进电机分配器组成，如图 9-21 所示。

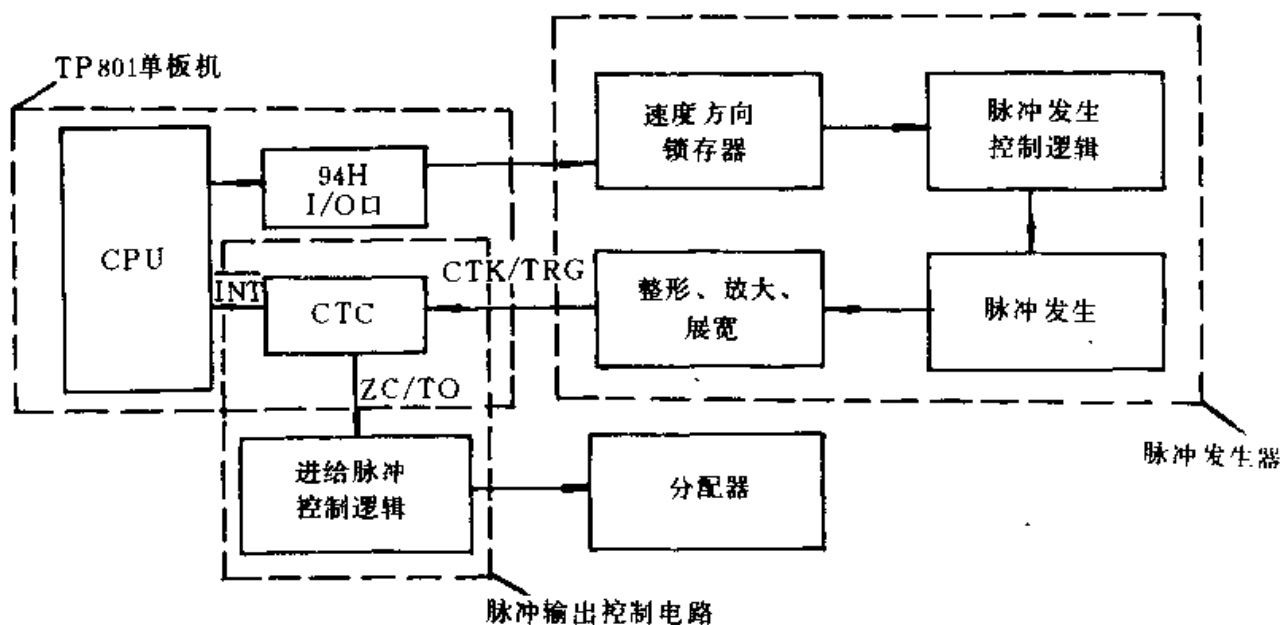


图 9-21 单板机控制车床接口电路框图



### 1. 进给脉冲发生器

(1) 脉冲发生器与单板机的联接 进给脉冲是否产生, 频率如何变化, 进给方向如何, 都必须根据零件加工中的实际需要而控制, 而零件加工程序是存贮于微机内存中的。当程序要求沿着某一方向 ( $\pm x, \pm y$ ) 产生一定频率的进给脉冲时, 可利用单板机原未使用的 94HI/O 口输出信号。速度和方向控制信号在 CPU 控制下以数据的形式由数据总线送到 94 口, 指令完成后数据脉冲即消失。但速度和方向信号要控制一个完整的加工过程, 因此采用一片 74LS273 作为 94 口的速度方向锁存器, 用以锁存由数据总线送来的速度和方向控制指令, 具体线路见图 9-22a)。

车床中方向有 4 种:  $\pm x, \pm y$ 。微控车床设计时, 根据数控车床多年加工实践, 设定了  $v_1, v_2, v_3, v_4$  4 种能在不同范围内无级调速的自动进给速度和  $v_5$  一种手动进给速度。为节省硬件电路, 将方向和速度信号的输出共用一个 94 口, 低 4 位控制速度, 高 4 位控制方向。速度方向与 74LS273 对应关系见表 9-3。如加工要求速度  $v_3$ 、方向  $+x$  时, 只要执行

```
LD    A, 14H
OUT   (94H), A
```

两条指令, 便可将速度  $v_3$ 、方向  $+x$  输出到 94 口的 74LS273 中锁存起来, 一直保持到加工完成。

表 9-3 74LS273 与速度方向对应表

273 输出	$D_7$	$D_6$	$D_5$	$D_4$	$D_3$	$D_2$	$D_1$	$D_0$
表示符	-y	+y	-x	+x	$v_4$	$v_3$	$v_2$	$v_1$
16 进制数	80	40	20	10	8	4	2	1

由于微机只向 94 口写入数据, 根据 TP801 原外设地址分配表, 94 口的片选条件应为  $\overline{IOW}=0$  且  $\overline{P_{ss}}=0$  时, 94 口才能选中。

#### (2) 脉冲发生控制逻辑电路

①方向控制电路 方向控制信号输出到分配器的控制端和脉冲输出控制端。方向应具备自动和手动功能, 由开关 SK 控制, 自动和手动互锁。方向控制电路如图 9-22b) 所示。

②速度控制电路 有  $v_1 \sim v_4$  4 种能在不同范围内无级调速的自动进给速度、 $v_5$  一种手动速度。SK 为自动或手动控制开关,  $SK=1, \overline{SK}=0$  时, 接通自动。电路如图 9-22c) 所示, 输出电压  $T_K$  的逻辑式可写为:

$$T_K = T_{P1} + T_{P2} + T_{P3} + T_{P4} + T_{P5}$$

$T_K$  是能在一定范围内改变的线性电压, 通过调整  $R_w$  可调  $T_K$  的高低。例如, 当要求以  $v_2$  范围内的速度进行自动进给时,  $SK=1$ , 计算机送出  $v_2$  指令后,  $U_{S2}$  为高电位,  $T_{P2}$  点的电位完全由  $U_{P2}$  点的电位决定,  $U_{P2}$  点的电位则可由  $R_{w2}$  来调节; 由于  $v_1, v_3, v_4$  没能选中,  $U_{S1}, U_{S3}, U_{S4}$  为 0,  $T_{P1}, T_{P3}, T_{P4}$  都为低电位; 由于  $SK=1, U_{S5}$  为 0,  $T_{P5}$  也为低电位。因此,  $T_K = T_{P2}$ , 其大小可由  $R_{w2}$  调节。

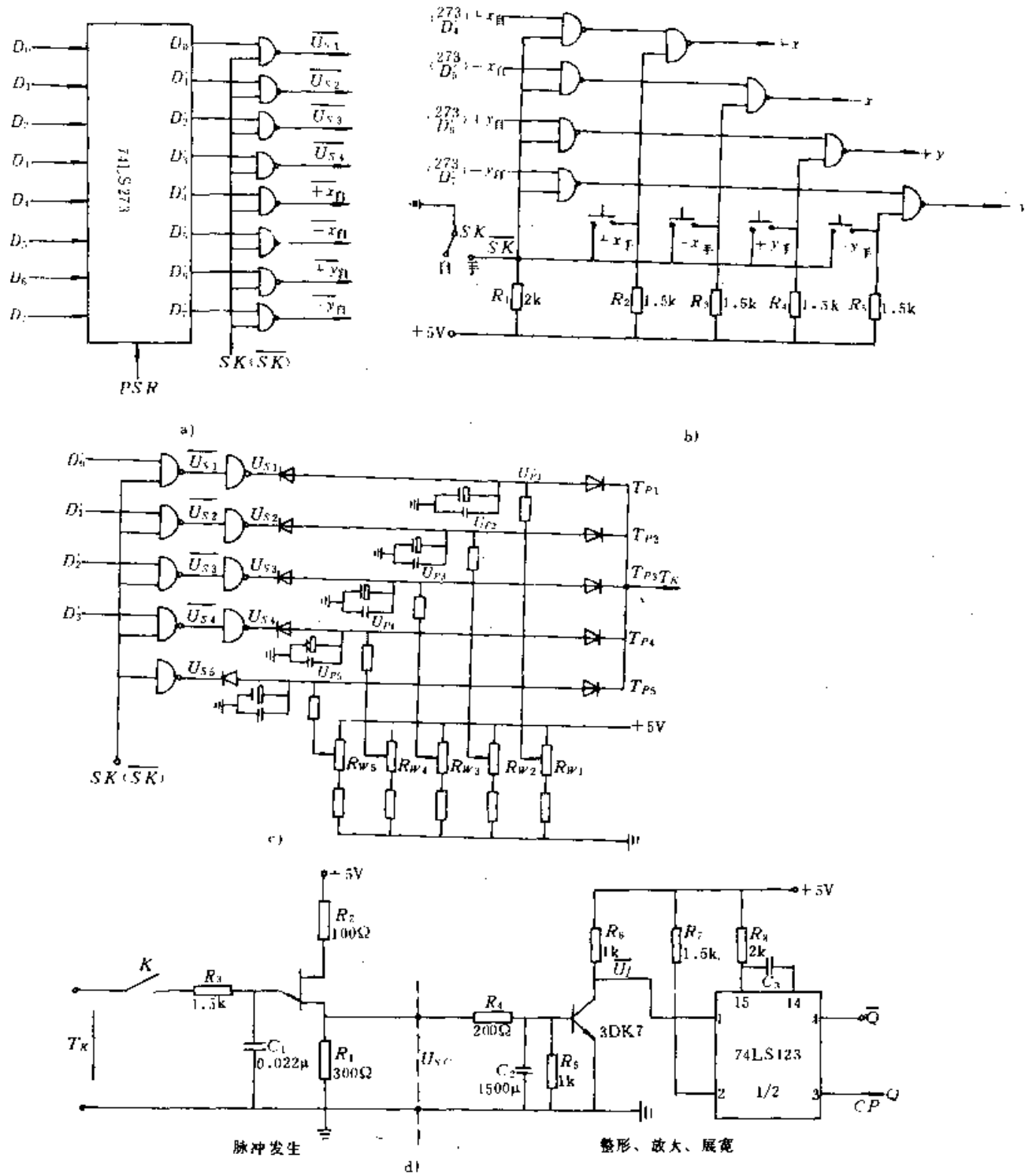


图 9-22 进给脉冲发生器电路

- a) 速度方向数据锁存 b) 方向控制电路  
c) 速度控制电路 d) 进给脉冲发生电路

(3) 脉冲发生和放大、整形、展宽电路如图 9-22d) 所示, 脉冲发生电路事实上是电压/频率转换电路,  $T_K$  的改变可控制进给脉冲发生的频率, 从而实现进给速度的调整。

## 2. 进给脉冲输出电路

由进给脉冲发生器产生的进给脉冲是不能直接送到分配器去的，因为进给脉冲是否输出，取决于程序的给定脉冲数是否达到，而进给脉冲是送到  $x$  分配器还是  $y$  分配器则取决于 94 口送来的方向，进给脉冲输出电路的作用就是将进给脉冲根据程序的要求送到相应的分配器。图 9-23 为进给脉冲输出电路，图中  $CP_{\#}$  表示经单板机计数后并经  $\frac{1}{2}$  74123 展宽的脉冲； $CP_{\#}$  为去分配器的脉冲； $x_{CP}$  和  $y_{CP}$  则分别为去  $x$  和  $y$  分配器的脉冲。

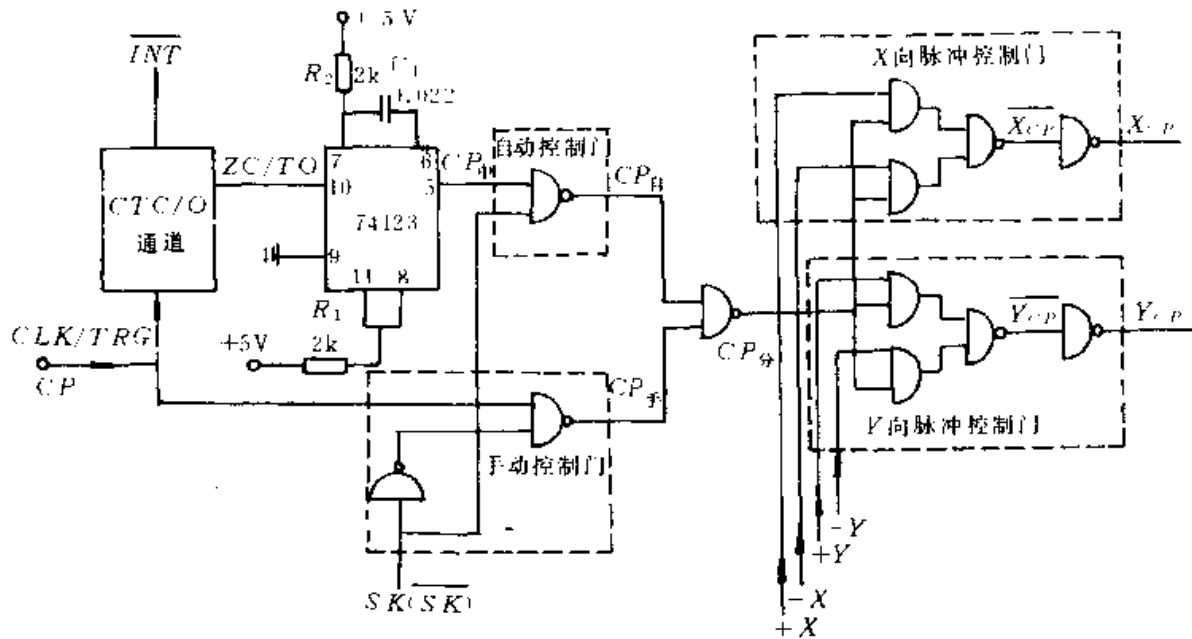


图 9-23 进给脉冲输出电路

关于步进电机的原理、结构、特性、驱动电路及分配器等内容已在有关章节中进行了详细介绍，此处不再赘述。

### (二) 微机控制车床进给运动传动系统

#### 1. 微控车床与普通车床进给运动传动系统的主要区别

(1) 微控车床车刀的进给运动是由步进电机驱动的、纵横丝杠都经联轴节与步进电机相连。普通车床的进给齿轮箱、溜板箱、光杠、操作杆等对于微控车床来说都是不需要的。

(2) 微控车床无挂轮架系统，主运动和进给运动通过主轴脉冲发生器相互联系，以加工螺纹及特形面。微机从脉冲发生器那里获得主轴旋转的方向和速度后，向步进电机发出相应的指令，步进电机驱动车刀随主轴的运动而运动。

#### 2. 对微控车床进给运动传动系统的要求

(1) 运动学要求 在程序控制下，步进电机每转一个步距角  $\theta$ ，刀具就相应地移动一定的距离  $T$ ，即要求电机轴与工作丝杠之间有一定的速比关系。 $T$  又称脉冲当量，刀具的位移  $S$  等于脉冲当量  $T$  与脉冲数  $P$  的乘积。

(2) 动力学要求 进给运动传动系统设计时，除要保证足够的静刚度外，还要考虑

动态特性。质量轻而刚度大的机床，才能具有良好的快速响应性。此外，摩擦、间隙、爬行都对机床动态性能有不利影响。

(3) 传动精度和灵敏度方面的要求 微控车床无检测反馈部分，故刀具实际移动量和指令值若有偏差，就会造成加工误差。因此，对传动装置，除零部件本身的精度要求较高外，尚需采用一系列的措施来满足传动精度和灵敏度等方面的要求。

### 3. 微控车床进给运动传动系统设计要点

(1) 采用齿轮减速以得到必要的速比并提高控制精度。电机轴与丝杠的联系可分为直联式和加消隙齿轮减速式两种。前者结构简单，传动链短，误差小；后者除可得到必要的速比外，还可提高传动精度。脉冲当量由下式计算：

$$T = t i \theta \cdot \frac{1}{2\pi} \quad (\text{m/r})$$

式中  $t$ ——丝杠螺距 (m)

$\theta$ ——步距角 (rad/r)

$i$ ——减速比

可以看出：减小  $i$ ，可减小  $T$ ，从而提高控制精度。

(2) 采用滚珠丝杠，提高传动精度和传动效率，减少摩擦阻力。并采用双螺母结构预紧，消除螺母的螺纹间隙，提高精度。在对旧车床进行改造的情况下，若仍采用原有的梯形丝杠以降低成本，则必须将螺母改为可调间隙的开合螺母并选用力矩大的电机以克服梯形丝杠比滚珠丝杠间隙大、摩擦阻力大的弊病。

(3) 采取措施减小无效运动。“无效运动”是指命令位置没有达到的情况，主要是由传动齿轮间隙、传动轴的扭转或机床构件变形引起的。实际上，总的无效运动是这些因素的综合。可以通过采用消隙齿轮、消除联轴节在扭转方向上的间隙、消除轴承与轴承座的间隙及丝杠与螺母间的游隙、减小机床构件的扭转和变形、减轻溜板的摩擦等措施来减小无效运动。另外，通过微机软件来实现间隙和齿隙的补偿，也是减小无效运动的有效措施。

## 三、微机控制车床的软件设计

以 TP801 单板机为主机的 CWK6140 微控车床软件包括监控程序和加工程序。监控程序是一种低级的计算机管理程序，用于管理和协调单板机各部分的工作。一般监控程序都是在出厂时，由厂家将其写入 EPROM 只读存储器中。在 CWK6140 的微机控制中，对原 TP801 的监控程序进行了重新改写，保留了原监控程序中经常使用的部分，增加了控制车床必不可少的插补程序等，并对监控程序的顺序和地址重新进行了排列。加工程序是根据加工零件的图纸尺寸和毛坯尺寸，按照计算机要求的格式，写出的加工顺序、每次切削的进给量及切削速度的程序。加工程序一定要按照微控车床使用说明中的计算机代码要求来编写，否则将无法正常运行。

以下着重介绍 CWK6140 监控程序中的插补程序设计。

### (一) 逐点比较法插补原理

数控机床按刀具的运动方式分类，基本上有三种：点位控制系统，点位直线控制系

统和轮廓控制系统。该微控车床属于轮廓控制系统。

完成轮廓控制的加工方法主要三种：逐点比较法，脉冲数字相乘法 and 数字积分法。逐点比较法能对任意的直线、斜线和圆弧进行插补运算，而且占用的硬件少，是目前使用较多的一种方法。

逐点比较法也叫代数运算法。其基本思路是每走一步和前一步的比一比，再算一算，根据偏差值决定下一步进给的方向，从而控制刀具的移动轨迹，将工件加工成一定的轮廓形状。每次只允许在一个轴上进给一步，由于方向不断改变，进给速度又比较快，所以在加工斜线和圆弧时，看起来就象两个方向同时进给一样。

### 1. 直、斜线插补原理

对于平行于某一轴的直线，加工中进给方向是不变的。只要每进一步、总步数减一，减到总步数为零时，本程序加工完成。当需要沿倾斜方向沿直线进刀时，情况则不同。

以斜线的起点作为坐标原点，平面斜线都可归到  $x$ 、 $y$  坐标平面的 4 个象限中。现以图 9-24 所示的第一象限的斜线来分析逐点比较法直线插补原理及插补公式。

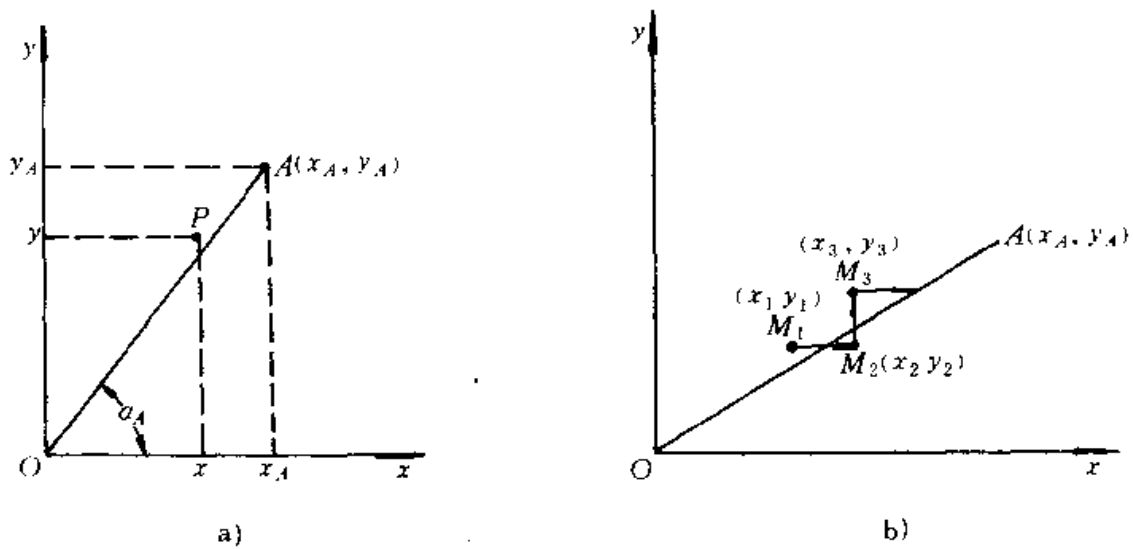


图 9-24 第一象限直线插补  
a) 偏差值计算 b) 直线插补原理

如图 9-24a) 所示， $OA$  斜线方程为

$$\operatorname{tg} \alpha_A = \frac{y_A}{x_A}$$

如果坐标平面上有一点  $P$ ，从坐标原点到  $P$  点联一斜线  $OP$ ，其方程为

$$\operatorname{tg} \alpha_P = \frac{y}{x}$$

若  $P$  点位于  $OA$  线的上方，则有

$$\operatorname{tg} \alpha_P > \operatorname{tg} \alpha_A$$

$$\frac{y}{x} > \frac{y_A}{x_A}, \quad y \cdot x_A > y_A \cdot x$$

若  $P$  点位于  $OA$  线上, 则有

$$\operatorname{tg} \alpha_P = \operatorname{tg} \alpha_A$$

$$\frac{y}{x} = \frac{y_A}{x_A}, \quad y \cdot x_A = y_A \cdot x$$

若  $P$  点位于  $OA$  线下方, 则有

$$\operatorname{tg} \alpha_P < \operatorname{tg} \alpha_A$$

$$\frac{y}{x} < \frac{y_A}{x_A}, \quad y \cdot x_A < y_A \cdot x$$

如果令  $F = y \cdot x_A - y_A \cdot x$ , 则

$F > 0$ ,  $P$  点在  $OA$  线上方;

$F = 0$ ,  $P$  点在  $OA$  线上;

$F < 0$ ,  $P$  点在  $OA$  线下方。

$F$  称为偏差值。设加工要求刀具移动轨迹为  $OA$  斜线, 如图 9-24b) 所示, 而在某一时刻加工到了  $M_1$  点  $(x_1, y_1)$ 。由于  $M_1$  点在  $OA$  线上方, 则

$$F_1 = y_1 \cdot x_A - y_A \cdot x_1 > 0$$

为使刀具沿着  $OA$  线前进, 向  $+x$  方向进一步到  $M_2$  点  $(x_2, y_2)$ ,  $M_2$  点的偏差值为

$$F_2 = y_2 \cdot x_A - y_A \cdot x_2 = y_1 \cdot x_A - y_A \cdot (x_1 + 1) = F_1 - y_A$$

设  $F_2 < 0$ , 那么, 应沿  $+y$  进一步到达  $M_3$  点  $(x_3, y_3)$ ,  $M_3$  点的偏差值为

$$F_3 = y_3 \cdot x_A - y_A \cdot x_3 = (y_2 + 1) \cdot x_A - y_A \cdot x_2 = F_2 + x_A$$

从偏差值推导中, 可以看出: 偏差值的计算只用到前一点偏差值和终点坐标值, 加工中间的坐标值不必计算。

如果将偏差值等于零归到大于零一类, 并按上述推导方法推导其他各象限斜线偏差值, 则可得到各象限斜线偏差公式。表 9-4 列出了斜线偏差公式和进给方向。

表 9-4 斜线偏差公式及进给方向表

象 限		一象限	二象限	三象限	四象限
$F \geq 0$	方向	$+x$	$+y$	$-x$	$-y$
	判别式	$F_2 = F_1 - y_A$	$F_2 = F_1 + x_A$	$F_2 = F_1 + y_A$	$F_2 = F_1 - x_A$
$F < 0$	方向	$+y$	$-x$	$-y$	$+x$
	判别式	$F_2 = F_1 + x_A$	$F_2 = F_1 + y_A$	$F_2 = F_1 - x_A$	$F_2 = F_1 - y_A$

表中,  $F_1$  为前一步偏差值;  $F_2$  为本次进给后的偏差值, 决定下次进给的方向;  $x_A$  和  $y_A$  为斜线终点坐标值。

## 2. 圆弧插补原理

圆弧加工时是以坐标原点作为圆弧的圆心，以加工点  $M$  到圆心的距离和圆弧的半径  $R$  相比来反映加工的偏差。如图 9-25a) 所示。

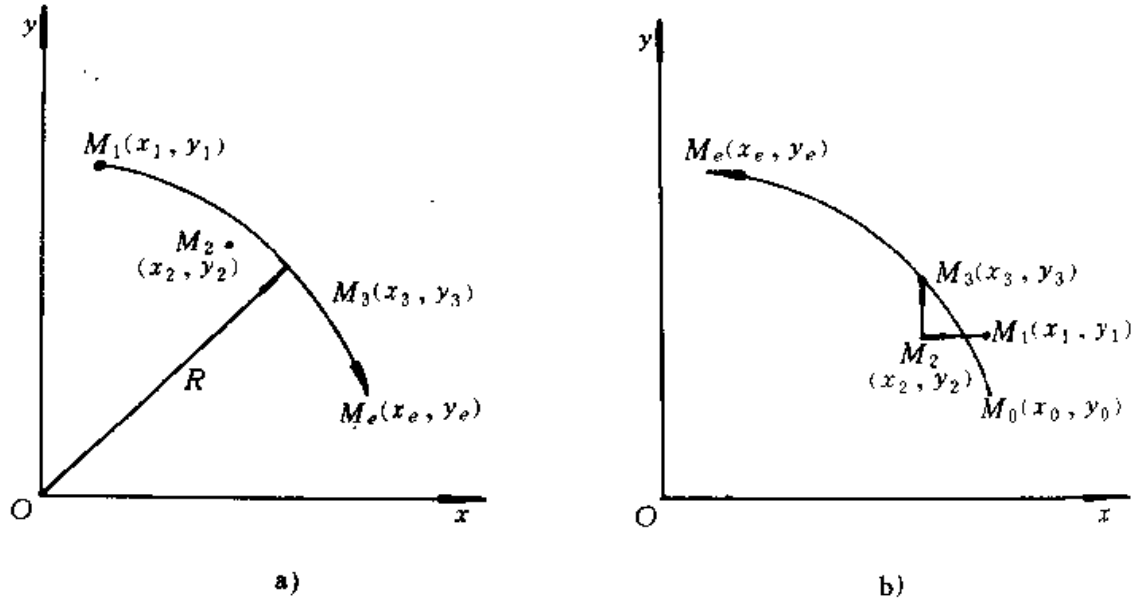


图 9-25 第一象限的圆弧插补

a) 偏差计算 b) 圆弧插补原理

圆心在坐标原点的圆的方程为

$$x^2 + y^2 = R^2 \quad \text{即} \quad x^2 + y^2 - R^2 = 0$$

若某点  $M_1$  在圆上，则  $F_1 = x_1^2 + y_1^2 - R^2 = 0$

若某点  $M_2$  在圆内，则  $F_2 = x_2^2 + y_2^2 - R^2 < 0$

若某点  $M_3$  在圆外，则  $F_3 = x_3^2 + y_3^2 - R^2 > 0$

根据  $F \geq 0$  或  $F < 0$  可判断出点  $M$  在圆的什么位置。上述偏差值公式，因需做平方运算，很不方便。如能找出相邻两偏差值间的数量关系，用递推法求新偏差，将会简化计算。

设某一时刻加工到  $M_1$  点  $(x_1, y_1)$ ，如图 9-25b) 所示，偏差值  $F_1 > 0$ ，应向  $-x$  进一步才能靠近圆，到  $M_2$  点  $(x_2, y_2)$ ， $F_2$  为

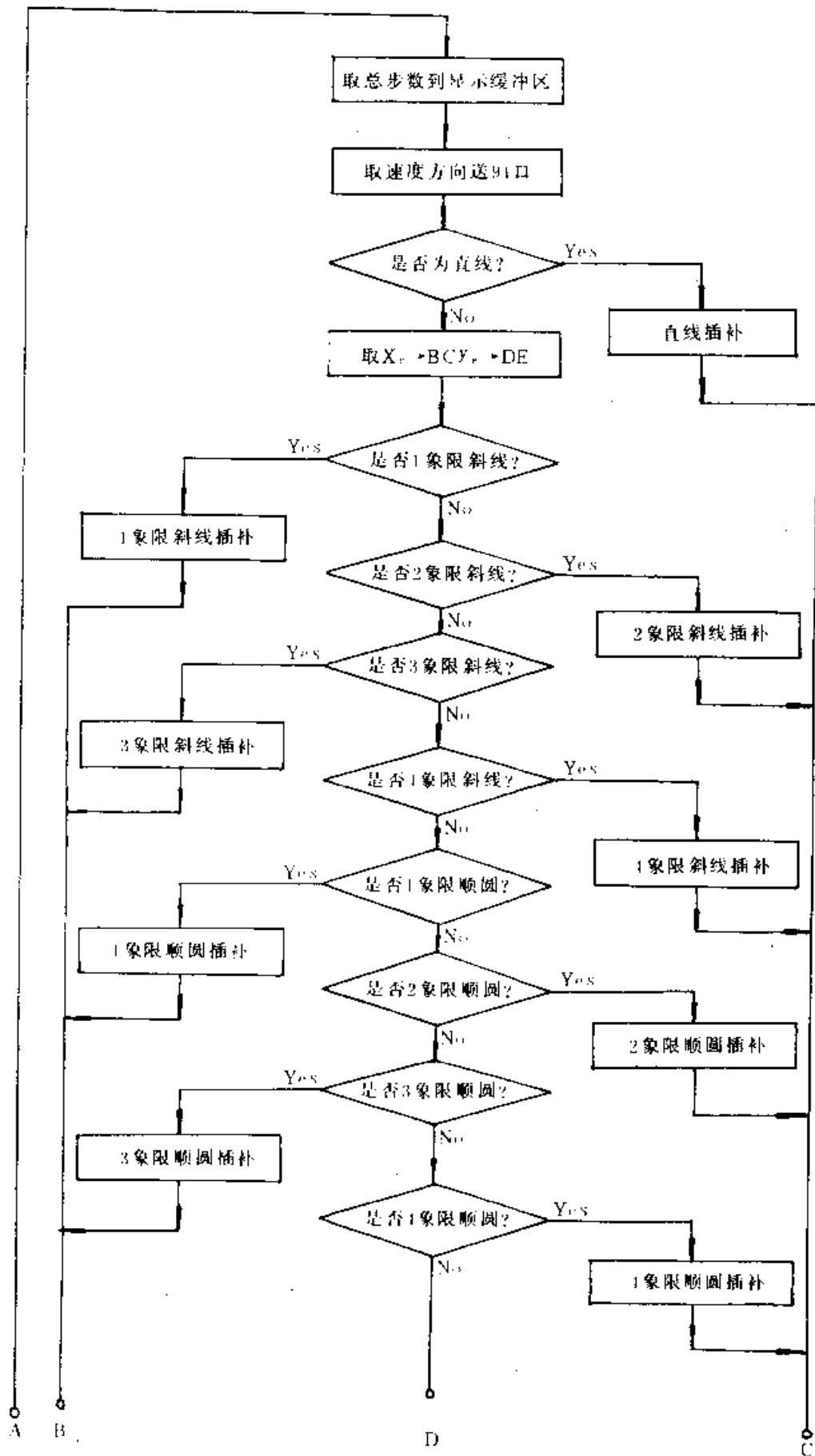
$$F_2 = (x_1 - 1)^2 + y_1^2 - R^2 = F_1 - 2x_1 + 1$$

设  $F_2 < 0$ ，应向  $+y$  进一步到  $M_3$  点  $(x_3, y_3)$ ， $F_3$  为

$$F_3 = x_2^2 + (y_2 + 1)^2 - R^2 = F_2 + 2y_2 + 1$$

由推导可以看出：新偏差值与前一步的偏差值和前一步的坐标值有关。每次进给后，不仅要计算新偏差值，还要计算进给后的新坐标值。

不同象限的顺时针方向和逆时针方向的圆，其进给方向和偏差值公式不同。根据图





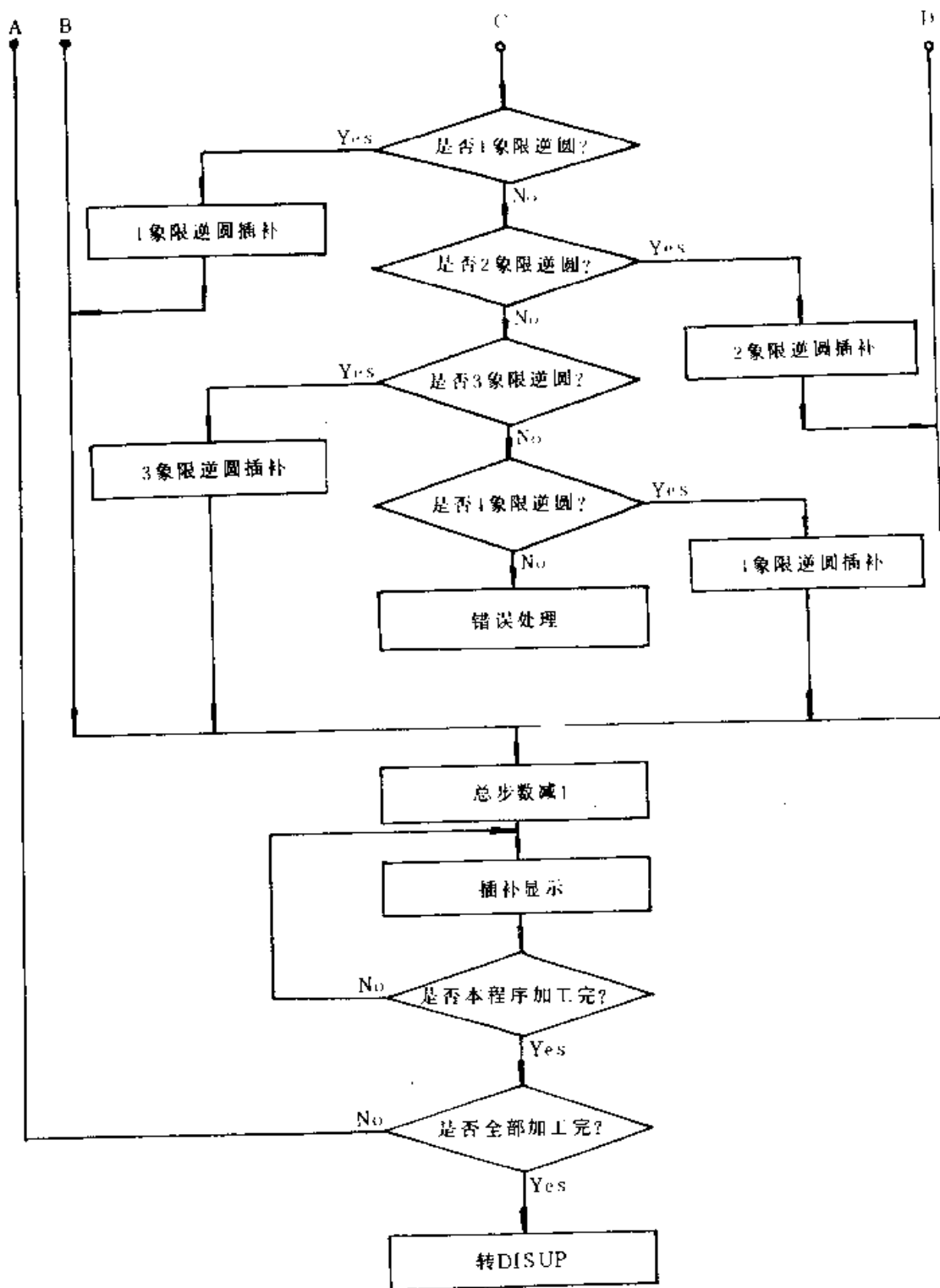


图 9-26 插补程序框图

9-25b) 第一象限逆圆的推导方法，将第一到四象限在顺圆和逆圆的偏差判别式、进给方向和新坐标计算式列于表 9-5。

## (二) 插补程序的总体设计

逐点比较法能完成对直线、斜线和圆弧的插补加工，同样也可以完成能用直线和圆弧逼近的任意曲线加工。

插补程序只有逐点比较法公式是不够的，如何判断程序是否加工完、如何实现连续加工等问题都应在插补程序中解决。根据切削加工的要求，插补程序应由取数判断部分、总步数减一和终点判别部分、总步数显示部分和逐点比较法公式等组成。插补程序的框图如图 9-26 所示。

表 9-5 顺圆、逆圆偏差值公式表

			一象限	二象限	三象限	四象限
顺 圆	$F \geq 0$	方向 偏差公式 新坐标	$-y$ $F_2 = F_1 - 2y_1 + 1$ $y_2 = y_1 - 1$	$+x$ $F_2 = F_1 + 2x_1 + 1$ $x_2 = x_1 + 1$	$+y$ $F_2 = F_1 + 2y_1 + 1$ $y_2 = y_1 + 1$	$-x$ $F_2 = F_1 - 2x_1 + 1$ $x_2 = x_1 - 1$
	$F < 0$	方向 偏差公式 新坐标	$+x$ $F_2 = F_1 + 2x_1 + 1$ $x_2 = x_1 + 1$	$+y$ $F_2 = F_1 + 2y_1 + 1$ $y_2 = y_1 + 1$	$-x$ $F_2 = F_1 - 2x_1 + 1$ $x_2 = x_1 - 1$	$-y$ $F_2 = F_1 - 2y_1 + 1$ $y_2 = y_1 - 1$
逆 圆	$F \geq 0$	方向 偏差公式 新坐标	$-x$ $F_2 = F_1 - 2x_1 + 1$ $x_2 = x_1 - 1$	$-y$ $F_2 = F_1 - 2y_1 + 1$ $y_2 = y_1 - 1$	$+x$ $F_2 = F_1 + 2x_1 + 1$ $x_2 = x_1 + 1$	$+y$ $F_2 = F_1 + 2y_1 + 1$ $y_2 = y_1 + 1$
	$F < 0$	方向 偏差公式 新坐标	$+y$ $F_2 = F_1 + 2y_1 + 1$ $y_2 = y_1 + 1$	$-x$ $F_2 = F_1 - 2x_1 + 1$ $x_2 = x_1 - 1$	$-y$ $F_2 = F_1 - 2y_1 + 1$ $y_2 = y_1 - 1$	$+x$ $F_2 = F_1 + 2x_1 + 1$ $x_2 = x_1 + 1$

## 第五节 造纸机纸页定量及水分的计算机控制

纸页的定量和水分是造纸过程中纸张质量的重要指标。过去一直沿用抽样检验、人工调整的方法来控制质量。由于测试不连续，也由于生产过程的滞后，使调整不及时，因此很难保证产品质量的稳定、一致。

70 年代以来，随着计算机技术的广泛应用，国外几乎所有的造纸机上都安装和使用了计算机，实现了纸页定量及水分自动控制功能。我国从日本、美国、德国等国引进了这种自控系统，取得了良好的经济效益。同时，我国浙江大学等高校及科研单位，也在国内研究开发了适合中国国情的纸页定量及水分自动控制系统。对许多老纸机进行了机电一体化技术改造，取得可喜成果。本节主要从控制理论的角度对这种系统的工作原理及控制效果进行介绍。

### 一、系统工作原理

纸页定量及水分自动控制系统原理如图 9-27 所示。系统的控制量有两个，一个是纸页定量 ( $\text{g}/\text{m}^2$ )，另一个是纸张的水分含量 (%)。系统中，通过控制纸料的流量来控制纸页定量，通过控制烘缸的蒸汽压力来控制纸张的水分。

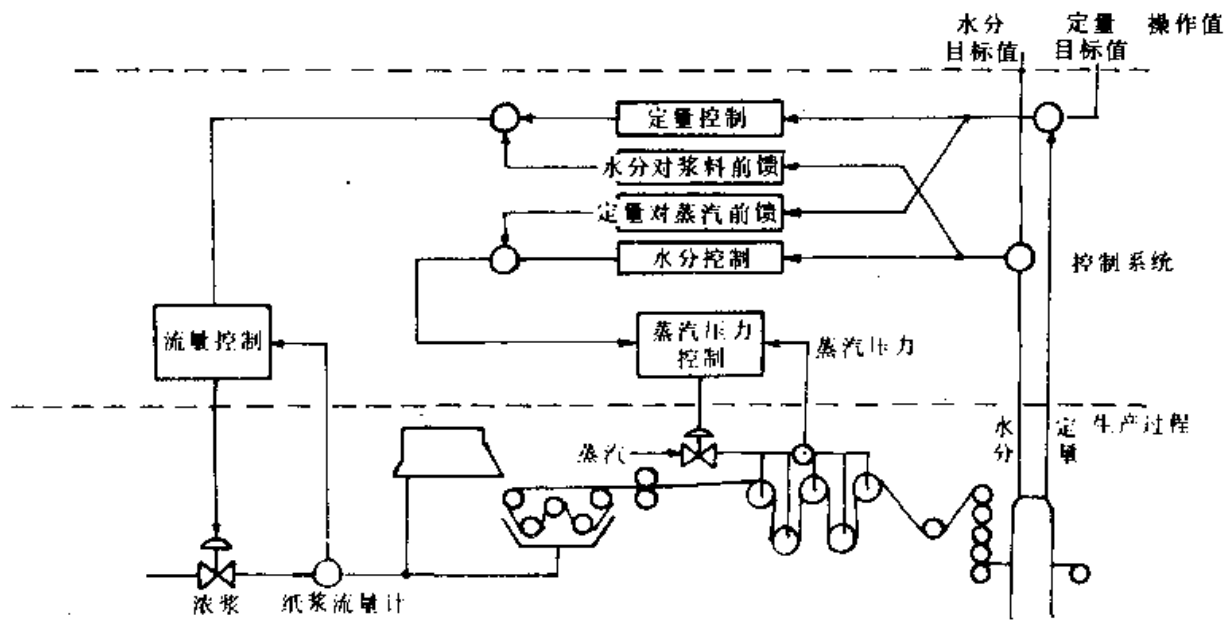


图 9-27 纸页定量及水分控制系统原理图

纸页的定量用  $\beta$  射线测量仪测量，其工作原理是这样的：当  $\beta$  射线穿过纸页时，其  $\beta$  粒子流将会减弱，在仪器所设置的电离室中，吸收射线的变化会引起电离电流的变化，经过变送器，变为电压输出。其公式如下：

$$I = I_0 e^{-\mu \rho x}$$

- 式中  $I$ ——射线穿过纸页后变送器输出值  
 $I_0$ ——射线不穿过纸页时变送器输出值  
 $\mu$ ——质量吸收常数  
 $\rho$ ——纸页密度  
 $x$ ——纸页厚度

因为  $I_0$  和  $\mu$  是常数，因此， $I$  是  $\rho x$  的函数，而  $\rho x$  正是纸页定量 ( $\text{g}/\text{m}^2$ )。

水分的测量是通过红外水分传感器进行的，其工作原理为：水分对某种波长的红外线吸收较大，当这种波长的红外线穿过纸页时，射线强度减弱。而水分对另外某些波长的红外线则不吸收。水分传感器发出两种不同波长的红外射线，一种射线的波长是水分容易吸收的，而另一种则不是。将两种射线穿过纸页，若纸的水分含量为 0，则穿过纸页后，两种射线强度相等，若纸页含水分，则两种射线能量强度产生差别。经光电转换后，可以得到与水分含量成正比的输出电压。

如图 9-28 所示，定量测量与水分测量仪器固定在一个 C 型扫描架上，C 形扫描架可横向移动，纸张在 C 形扫描架中间纵向通过，这样，就可以对纸页全幅进行定量及水分的测量。按照一定周期，将两个量的采样值送入计算机，经过计算，得到平均值，然后根据定量和水分的测量值及输入的目标值，按照一定的控制算法，计算出当前的控制量，

由计算机将此信号输出到被控制的执行元件。

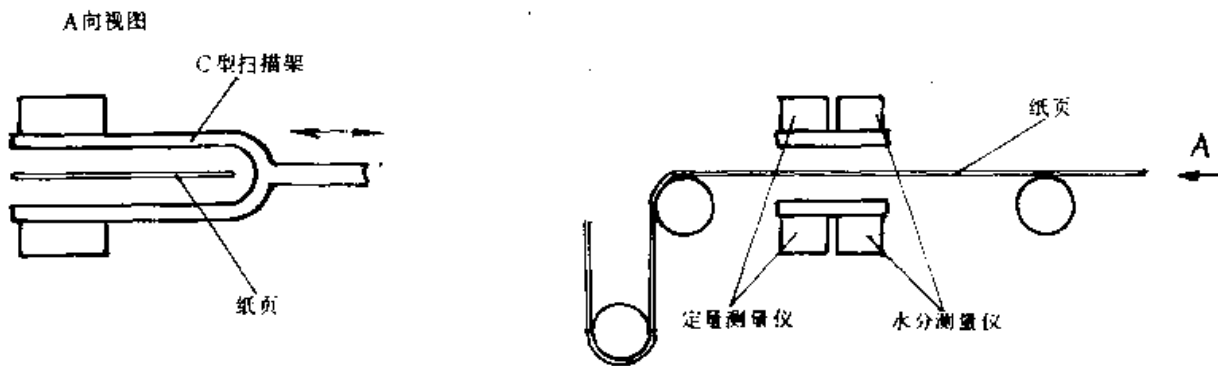


图 9-28 C 型扫描架

例如，定量控制算法输出控制量去控制纸料控制阀门，从而控制纸料流量。若纸的定量测量值大于所要求的定量目标值时，则使浆门关小，使纸料流量降低，反之则将阀门开大，流量加大。水分控制与此原理相同。当水分实测值高于目标值时，则输出控制信号将烘缸蒸汽气压调整阀门的压力升高，使烘缸蒸汽压力升高，反之则使压力降低。

本系统采用了串级控制方法。由图 9-27 可见，纸料流量控制和烘缸压力控制都有局部反馈控制。这样可以改善整个控制系统的性能。这两个局部反馈控制可以采用计算机控制，也可以采用常规仪表实现 PID 调节。国内的许多纸机自动控制系统，就是采用了常规仪表实现流量与压力的局部反馈控制，而整个系统的闭环控制采用计算机控制。

除此之外，由图 9-27 还可以看到，系统中还有两个前馈控制环节，这实际上是水分与定量之间的解耦控制。这是因为，此系统是一个多变量系统，两个被控量，即纸页定量和水分之间不是相互独立的，而是存在某种耦合作用。实验表明，当改变纸料的流量从而改变纸页定量时，烘箱蒸汽压力不变，纸张水分也会发生变化；而当改变蒸汽压力时，纸页定量也发生变化。为了解除它们之间的这种耦合作用，需要进行解耦控制，即用解耦算法根据蒸汽压力计算出对于纸页定量的前馈控制量及根据浓浆流量计算出对蒸汽压力前馈控制量，从而保证控制质量。

## 二、系统的数学模型

控制系统方框图如图 9-29 所示。

图中  $r_A$ ——纸页定量输入目标值

$r_B$ ——水分输入目标值

$G_{CA}$ ——纸页定量控制算法

$G_{CB}$ ——水分控制算法

$C_A$ ——纸页定量输出值

$C_B$ ——水分输出值

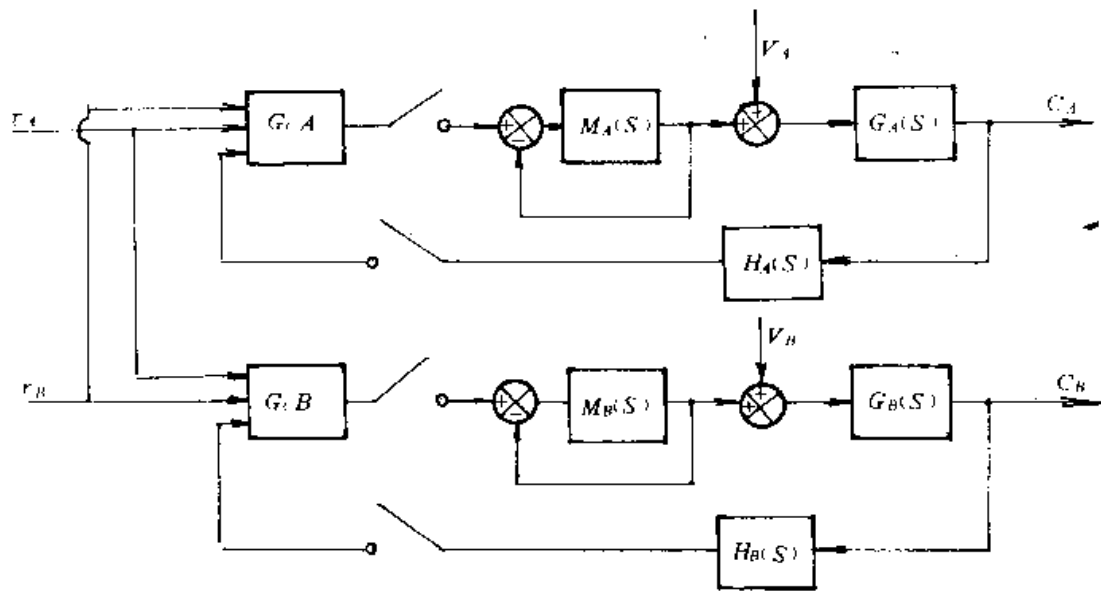


图 9-29 纸页定量及水分控制系统方框图

$G_A(S)$ ——以纸页定量为输出，纸料流量为输入的被控过程传递函数

$G_B(S)$ ——以纸张水份含量为输出，以烘缸压力为输入的被控过程传递函数

$H_A(S)$ ——纸页定量传感器的传递函数

$H_B(S)$ ——水分传感器的传递函数

$M_A(S)$ ——浓浆流量控制阀传递函数

$M_B(S)$ ——蒸汽压力控制阀传递函数

$V_A$ ——系统对纸页定量的干扰输入

$V_B$ ——系统对水分的干扰输入

计算机控制的任务，是根据系统要求确定控制算法  $G_{CA}$ 、 $G_{CB}$ 。

要确定  $G_{CA}$ 、 $G_{CB}$ ，首先应建立系统的数学模型，一般认为  $G_A(S)$ 、 $G_B(S)$  均为具有时间滞后的一阶惯性环节，其数学模型分别为：

$$G_A(S) = \frac{K_A}{1-T_A S} e^{-\tau_A S}$$

$$G_B(S) = \frac{K_B}{1-T_B S} e^{-\tau_B S}$$

式中，时间常数  $T_A$ 、 $T_B$ ，时间滞后  $\tau_A$ 、 $\tau_B$  及比例常数  $K_A$ 、 $K_B$  分别可由实验确定。

纸料流量控制阀的数学模型  $M_A(S)$  和烘缸压力控制阀的数学模型  $M_B(S)$  及纸张定量测量装置的数学模型  $H_A(S)$ ，水分测量装置的数学模型  $H_B(S)$  也需根据具体所采用的元件或仪器经分析或实验确定。

控制算法则要根据某种控制原则进行设计，例如，根据最小方差原则，即使系统在

干扰信号  $V_A$ 、 $V_B$  作用下的输出量  $C_A$ 、 $C_B$  与各自目标值  $r_A$ 、 $r_B$  的方差  $E(C_A - r_A)^2$ 、 $E(C_B - r_B)^2$  取得最小的原则，设计控制算法。除此之外，还应将解耦算法考虑在内。

在控制中，由于两个变量的响应特性不同，对两个变量的外部干扰信号的周期不同，因此，通常控制周期与采样周期不同，两个变量的控制周期也不同，应根据纸机的实际滞后时间与时间常数分别确定。当然，各个控制周期应是扫描周期的整倍数。

### 三、控制功能与特点

不同的系统，控制功能和特点不尽相同，这里，仅举两例，说明其功能与特点。

#### (一) 美国 Measurex2002 系统

该系统控制功能与特点如下：

- (1) 定量和水分的控制节省纤维，改善产品质量和提高产量。
- (2) 定量和水分的控制改善了由定量和水分引起的对所有纸页参数的影响。
- (3) 变送器快速扫描可使控制更加精确。
- (4) 直接数字控制能自动补偿执行器的静摩擦、间隙等造成的非线性。
- (5) 采用计算机控制还可对生产过程中的许多参数进行控制，例如，自动调整纸机车速，用水分控制对烘干部的非线性进行补偿。
- (6) 解耦控制消除了定量与水分之间的相互影响。
- (7) 调整方便，指令较简单，用户易接受。
- (8) 软件编制允许用户在线改变控制方案，可对如下控制进行选择：
  - ①对于纸料流量进行前馈控制，以补偿纸料浓度的变化。
  - ②对于多管流浆箱，按比例分配纸料流量。
  - ③对于多段烘缸组或在上下烘缸之间按比例分配或保持蒸汽压力。
  - ④断纸前后，自动调整烘干部蒸汽压力，以节省能源。

#### (二) 国内研制的系统

浙江大学与民丰造纸厂 1984 年用国产仪表研制成功的我国第一套纸张定量水分控制系统具有如下功能：

- (1) 开机后实现脱机—联动无扰动切换。
- (2) 根据过程控制要求，对各工艺参数进行采样、合理性检验和数字滤波处理。
- (3) 及时发现断纸情况，通过屏幕显示和声响报警，并根据工艺要求作出相应处理。
- (4) 具有检测仪表的自诊断功能。检测仪表出错时，能自动报警。与此同时，限制错误采样值进入计算机。
- (5) 实现对定量、水分的全幅图形显示和全幅平均值显示及控制。
- (6) 通过键盘响应，灵活显示各图形及参数。
- (7) 实现对生产过程几项主要消耗指标和产量的累计，并通过键盘响应随时打印报表。
- (8) 通过键盘完成修改控制参数，实现对工艺过程的跟踪以及其他显示、打印要求。

### 四、控制效果

纸页定量、水分自动控制系统，无论是从国外引进的，还是国内自行开发的，均取

得了令人满意的控制效果和经济效益。

美国 Measurex2002 系统在我国几家造纸厂中安装、使用所得到的效果如表 9-6 所示。

表 9-6 Measurex2002 系统应用效果

项 目	佳木斯造纸厂 3 号纸机			吉林造纸厂 3 号纸机			青州造纸厂纸机		
	空转	控制后	改善	空转	控制后	改善	空转	控制后	改善
定量控制结果									
纸卷数目	114	50		231	125		53	39	
纸卷平均定量 (g/m <sup>2</sup> )	80.04	80.03	-0.01	51.26	50.99	-0.27	81.94	81.63	-0.31
纸卷平均 2σ 波动 (g/m <sup>2</sup> )	±5.09	±0.66	87.03%	±2.01	±0.20	90.05%	±7.98	±0.41	94.86%
每卷纸 2σ 波动 (g/m <sup>2</sup> )	±2.25	±0.86	61.78%	±0.96	±0.40	58.33%	±3.83	±0.84	78.07%
水分控制结果									
纸卷数目	114	47		231	125		53	39	
纸卷平均水分 (%)	10.41	11.92	+1.51	9.44	8.51	-0.93	6.97	8.02	+1.05
纸卷平均 2σ 波动 (%)	±2.61	±0.43	83.52	1.42	0.08	94.37	3.70	0.22	94.05
每卷纸 2σ 波动 (%)	±2.76	±0.80	71.01	0.55	0.23	58.18	2.02	0.54	73.27

浙江民丰造纸厂的纸页定量、水分自动控制系统运行对比结果如表 9-7、9-8 所示。

表 9-7 定量控制结果

项 目	盲目运行	控制运行	改 善
纸卷数目	50	47	
纸卷平均定量 (g/m <sup>2</sup> )	59.398	58.55	-0.848
纸卷平均 2σ 波动 (g/m <sup>2</sup> )	±3.524	±0.5	85.8%
每卷内 2σ 波动 (g/m <sup>2</sup> )	±0.962	±0.226	76.5%

表 9-8 经济效益对比

项 目	控制前	控制后
小时产量 (kg)	975.89	970.89
吨纸耗浆 (kg)	919.51	907.35
吨纸耗汽量 (t)	3.68	2.679

数字表明,吨纸耗浆量降低了 1.32%,吨纸耗汽量降低 27.2%,仅由于节约纤维和蒸汽,每年可降低成本 21.7 万元。由此可见,系统运行实现了提高产品质量、降低消耗、改善劳动条件的目标。

## 第六节 微机控制工业机器人

### 一、概 述

60年代诞生的第一代工业机器人，内装各种型式的专用控制器，很难说是机电一体化产品。随着控制器逐步被计算机取代，到70年代后期装上了微机，从而产生了第二代工业机器人，这时才称得上是机电一体化产品。随着机电一体化技术的发展，工业机器人开始迅速地普及。

通常将程序可变的、独立的、自动化的抓取搬运装置称为工业机器人。当然，广义地讲，应当是具有人的某些功能的，甚至具有一定智能的机械才能称得上是机器人。这样的机器人无论从其结构和控制来讲都是十分复杂的。但在工业生产中，自动实现一些不太复杂的、具有重复性的操作的情况是经常遇到的，如完成搬运、焊接、喷漆、装卸料、机器零件装配、包装等操作。这就为较简单的重复型工业机器人的应用开辟了更广泛的领域。

利用类似于数控机床多轴数控的原理（本章第四节作了介绍）研制成的所谓数控机器人，可看作是智能机器人的前身，是一种重复型机器人。这种重复型机器人通过示教内存一系列的操作内容，然后通过再现而自动地重复进行工作。一般认为，具有若干检测装置，能根据检测结果变更工作程序，采取其他适应动作的也包括在重复型机器人之列。

一个工业机器人的组成包括有：机械装置，如机械手（机械手臂、手爪等）、传动机构、支架等；用以实现信息输入输出、处理存贮、控制等的计算机；执行器和传感器。

工业机器人各种动作的实现应包括下列内容：

(1) 示教 示教就是使机器人记忆要求进行的操作。示教必须由人进行，可以用高级的直接的方法；也可用编排输入程序的间接的方法。示教方法越简单，自动化程度越高。

(2) 存贮 存贮是将示教的信息保存一个必要的时期。存贮容量决定机器人能完成的操作的复杂程度。

(3) 再现 再现是指根据需要 will 将存贮的信息读出，向执行机构发出具体的指令。再现水平越高，机器人对工作的适应性就越强。

(4) 操作 操作是指按照再现中发出的指令进行实际的机械手的动作。这时需要有相应的执行器、传动装置和定位装置等。它们决定了工作速度和精度。

按运动方式的不同，一般工业机器人可分为三种型式：直角坐标型、多关节型、圆柱坐标型。

(1) 直角坐标型 如图 9-30a) 所示， $x$ 、 $y$ 、 $z$  三轴各自做直线运动，位置数据的运算处理比较容易。

(2) 多关节型 如图 9-30b) 所示，机器人基本上进行以关节轴为中心的旋转运动，对位置数据的运算处理较复杂，控制也较复杂。但其运动类似人的手臂，动作灵活，工



作范围大，通用性强。

(3) 圆柱坐标型 如图 9-30c) 所示，将直角坐标型的  $x$  轴的直线移动改变成旋转运动。其结构比较紧凑简单，占地面积小而活动范围大。应用比较广泛。

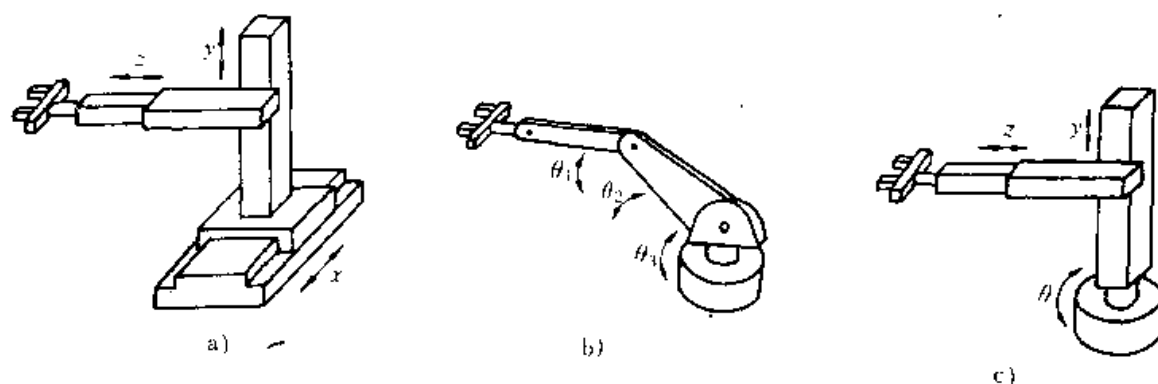


图 9-30 工业机器人的型式

a) 直角坐标型 b) 多关节型 c) 圆柱坐标型

下面以日本九州工业大学研制的较简单的装配机器人 KAM 为例，简要介绍一个圆柱坐标型的、可实现三轴数控的微机控制工业机器人的工作原理及具体结构。

## 二、装配机器人 KAM 的硬件结构

### 1. 系统组成

KAM 装配机器人系统的组成如图 9-31 所示。这是一个开环控制系统，结构比较简单。使用的微型计算机为 NEC PC8001，将直角坐标数据输入后，转换成三个坐标轴方向 ( $z, r, \theta$ ) 的脉冲数，并经 I/O 接口送出脉冲给步进电机接口（专用步进电机控制器），从而驱动步进电机使 KAM 动作。

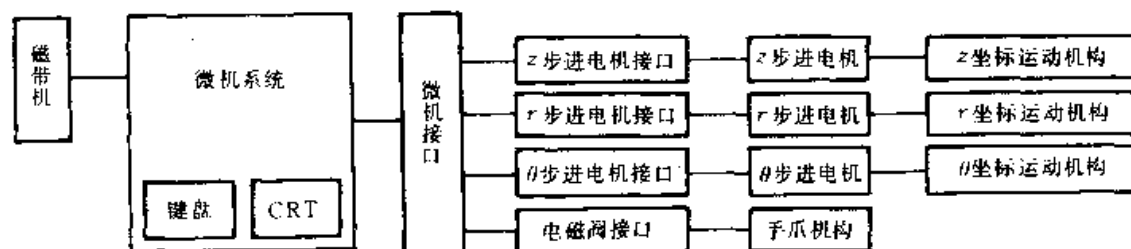


图 9-31 KAM 的系统组成框图

通过微机系统的键盘和 CRT 显示器，可以用人机对话的方式进行示教、操作。该系统可以完成输入数据、编辑、打印、原点设定、手动操纵、按设定直角坐标自动定位（点位方式）。进一步开发软件可以实现连续轨迹控制及较高级的示教再现方式。

坐标的输入，转换，脉冲数及频率的计算均用 BASIC 程序完成。要求高速处理的三

轴联动控制和加减速控制等用汇编语言程序完成。输入数据的保存是用盒式磁带收录机。

## 2. KAM 的机械结构

装配机器人 KAM 的机械结构如图 9-32 所示。高度为 400mm，臂长为 500mm。可作上下 ( $z$ )、前后 ( $r$ ) 和回转 ( $\theta$ ) 运动，属圆柱坐标型机器人。 $z$ 、 $r$ 、 $\theta$  方向可进行三轴联动控制。 $z$  轴和  $r$  轴的传动是通过步进电机带动滚珠螺母，使滚珠丝杆沿轴向移动。 $\theta$  轴是通过步进电机经蜗杆蜗轮传动后使之转动。手爪的开闭是用电磁阀 ON/OFF 控制压缩空气来实现的。

$z$  方向采用了间隙和摩擦阻力很小的滚珠直线圆柱导轨。KAM 除体积较大的传动箱为铝制品外，其余均由 45 钢制成。

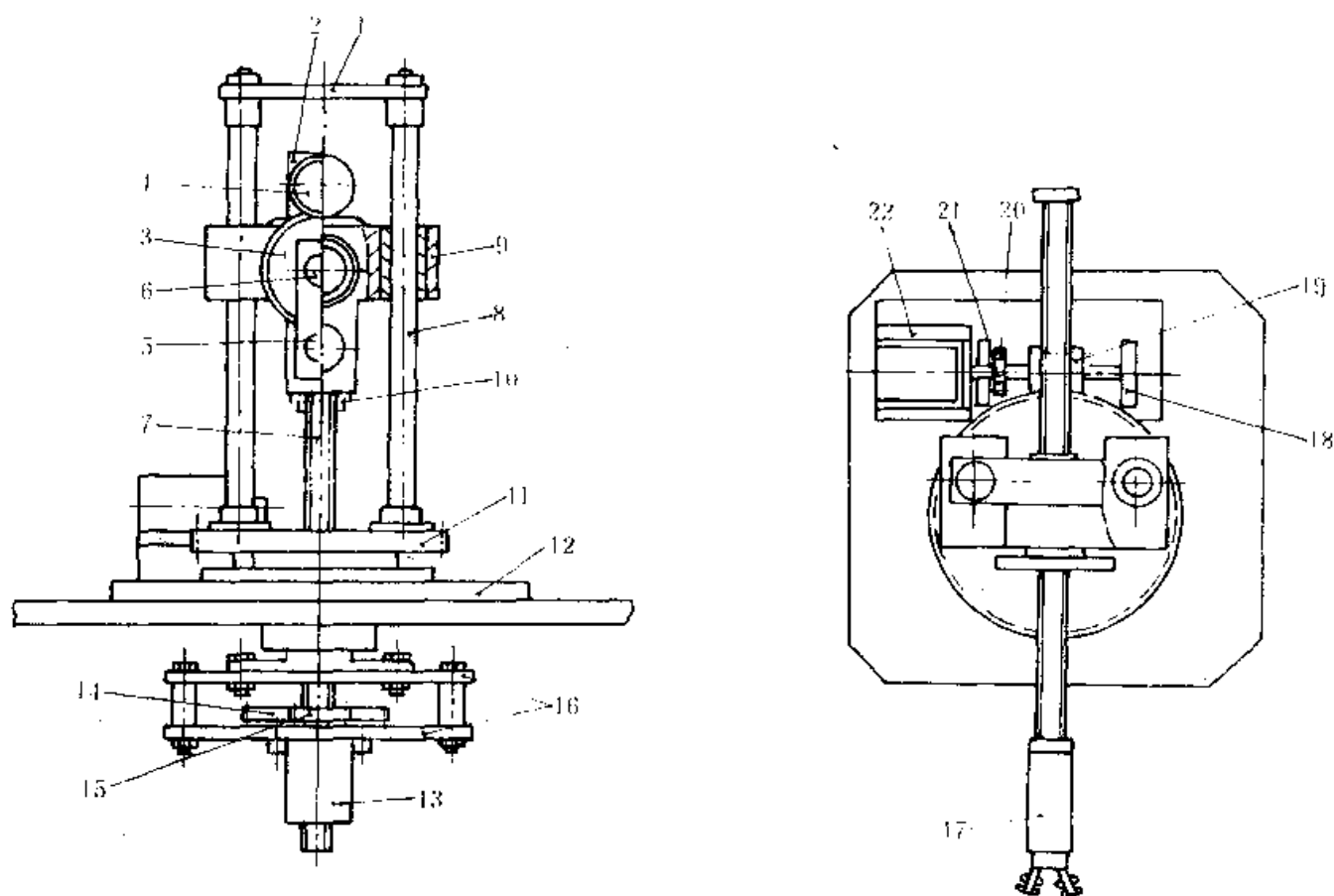


图 9-32 KAM 的机械结构

- 1— $z$  方向导轨挡板 2— $r$  方向电机安装台 3—减速齿轮 4— $r$  方向直联齿轮  
 5— $r$  方向导轨 6— $r$  方向滚珠丝杆 7— $z$  方向滚珠丝杆 8— $z$  方向导轨  
 9—传动箱 10— $z$  方向丝杆支座 11—蜗轮 12—装配底板 13—支座  
 14— $z$  方向进给齿轮 15— $z$  方向直联齿轮 16— $z$  轴进给支板 17—爪部  
 18—轴承座 19—蜗杆 20—中间齿轮 21— $\theta$  方向直联齿 22— $\theta$  方向电机安装台

### 三、I/O 接口

#### 1. 微机接口

微机的 I/O 接口使用两个 8255 可编程接口芯片 (8255 芯片的较详细介绍可见第三章)。根据程序指令进行数据的 I/O、状态信号的输入和控制信号的输出等操作。8255 的三种工作方式的选择是通过向芯片中的控制寄存器写入一个 8 位控制字来进行的。

一片 8255 共有 4 个通道地址：端口 A、B、C 和控制字寄存器各有一个地址。当 8255 与 CPU 连接时， $A_0$ 、 $A_1$ 、 $\overline{CS}$ 、 $\overline{RD}$  和  $\overline{WR}$  这 5 个信号配合使用可对这 4 个通道地址进行寻址并进行不同的操作。这 5 个信号组合所实现的功能如表 9-9 所示。 $A_2 \sim A_7$  用来得到片

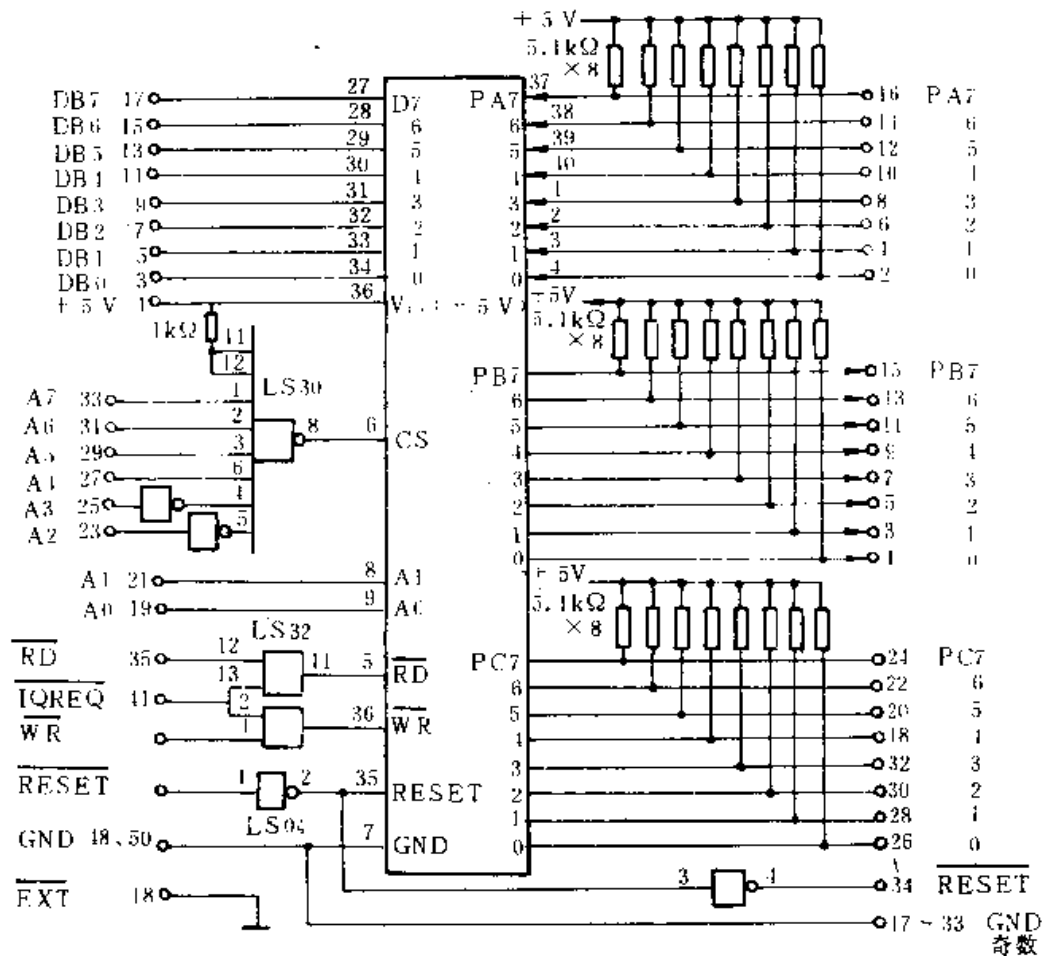


图 9-33 8255 接线电路图

选  $\overline{CS}$ 。图 9-33 给出第一个芯片 8255 的电路图。对第一个芯片， $A_2$  和  $A_3$  通过“非”门送入与非门。如当  $A_2, A_3$  为“0”， $A_4 \sim A_7$  为“1”时，则  $\overline{CS}$  为 0，第一个芯片被选中。而对第二个芯片， $A_3$  不经过非门，故  $A_3$  为“0”， $A_2, A_4 \sim A_7$  为 1 时，第二个芯片被选通。

表 9-9

8255 通道选择和基本操作表

A <sub>1</sub>	A <sub>0</sub>	R $\bar{D}$	WR	$\bar{CS}$	操 作	
0	0	0	1	0	端口 A→数据总线	输入 (读)
0	1	0	1	0	端口 B→数据总线	
1	0	0	1	0	端口 C→数据总线	
0	0	1	0	0	数据总线→端口 A	输出 (写)
0	1	1	0	0	数据总线→端口 B	
1	0	1	0	0	数据总线→端口 C	
1	1	1	0	0	数据总线→控制字寄存器	
1	1	0	1	0	禁止	断开
x	x	x	x	1	数据总线: 高阻抗	
x	x	1	1	0		

根据上述, 将№. 1 和№. 2 两片 8255 的端口地址总结如表 9-10 所示。这样, 选片指令为:

表 9-10

I/O 接口地址表

通 道	I/O 地址	
	№. 1	№. 2
A 端口	F0	F4
B 端口	F1	F5
C 端口	F2	F6
控制字寄存器	F3	F7

OUT F3H, A; 向第一片 8255 送控制字

OUT F7H, A; 向第二片 8255 送控制字

各端口进行数据输入或输出时指令为:

IN/OUT F0H~F2H; 8255№. 1

IN/OUT F4H~F6H; 8255№. 2

现将 8255№. 2 各端口全部用作输出, 各引脚连线如表 9-11 所示。此时的控制字应为 80H (10000000)。

表 9-11

8255№. 2 端口的分配

端 口	控 制 信 号
端口 A	
A0	r 步进电机控制器 C <sub>k</sub>
A1	θ 步进电机控制器 C <sub>k</sub>
A2	z 步进电机控制器 C <sub>k</sub>
A3~A7	未使用

续表

端 口	控 制 信 号
端口 B	
B0	$r$ 步进电机控制器 $U/D$
B1	$\theta$ 步进电机控制器 $U/D$
B2	$z$ 步进电机控制器 $U/D$
B3~B7	未使用
端口 C	
C0	爪部的 ON/OFF
C1~C7	未使用

## 2. 步进电机及驱动控制器

驱动 KAM 的步进电机为日本三洋电气会社的 103Z710-1 型。其规格如表 9-12 所示。

表 9-12 步进电机的规格

外 径	56.4mm
全 长	82.5mm
质 量	1.1kg
转子惯量	2408 · cm <sup>2</sup>
最大静扭矩	61N · cm
步距角	1.8°

为简化硬件电路，采用专用芯片 PMM8713 进行步进电机的驱动控制。图 9-34 为 PMM8713 的引脚图。图 9-35 为步进电机驱动电路。电机采用 1~2 相励磁方式，每脉冲转角为 0.9°。

## 四、KAM 的控制程序及操作简介

控制程序用 BASIC 和汇编语言写成。图 9-36 给出主程序流程图。首先初始化。设定

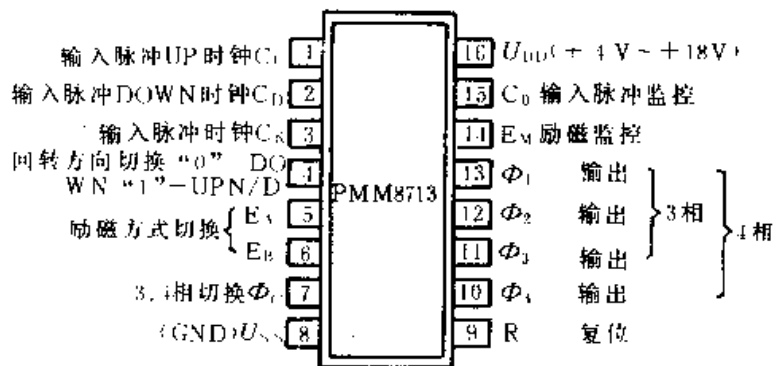


图 9-34 PMM8713 引脚图

控制字，即将 80H 送至控制寄存器(地址 F7H)。其次是定义与数据编号对应的坐标、爪部状态、脉冲数和频率序列等。然后定义 USR 函数。此函数是用来从 BASIC 程序调用汇编语言程序的。所以汇编语言程序起始位置要预先指定。为了设置原点和驱动 KAM，定义了 SET 子程序和 PULSE 子程序。最后是进行

人机对话,选择执行方式。一共有 0-ADJ、DATA、EDIT、SAVE、LOAD、RUN 6 种方式。当 KAM 与计算机联机后,按执行键,则 CRT 上则显示如图 9-37 所示方式选择状态的内容。按 1~6 数字键就进入相应的方式,执行相应的子程序后,再返回方式选择状态。下面简要说明这 6 种方式。

### 1. 0-ADJ 方式

0-ADJ 方式可以将爪部当前位置作为起始原点。可将输入的直角坐标值转换成圆柱坐标值。此时还可进行手动操作:按下微机键盘的相应数字键就可使 KAM 的爪部作  $\pm x$ 、 $\pm y$ 、 $\pm z$  方向的移动及爪部的 ON/OFF。动作对应关系如表 9-13 所示。当相同的键按住不放时, KAM 的动作就连续地进行。若 SHIFT 键同时按下时,可使动作速度放慢便于定位。手动操作是靠使用 SET 子程序实现。按下 STOP 键后,退出 SET 子程序。

### 2. DATA 方式

进入 DATA 方式后,可输入直角坐标系的相对移动量  $x$ 、 $y$ 、 $z$  和指定爪部状态。数据输入完后返回方式选择状态。

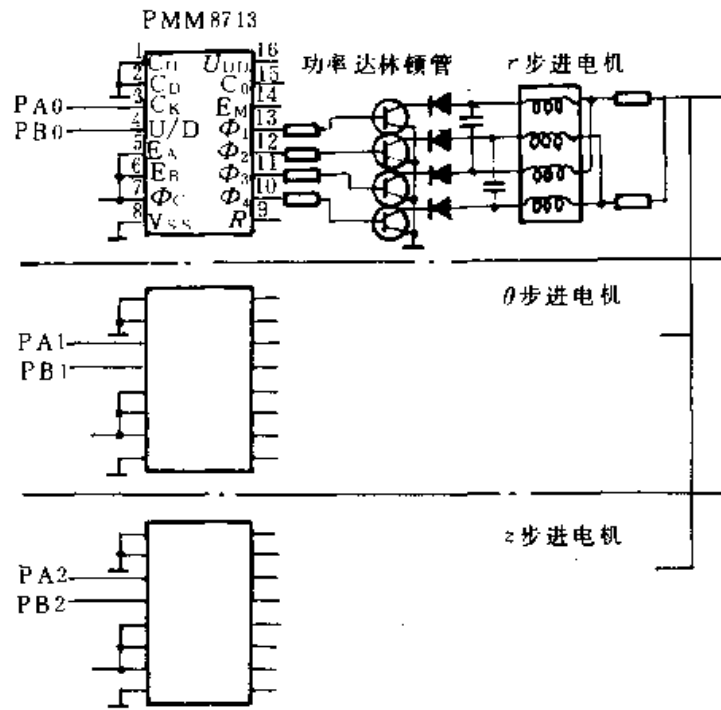


图 9-35 步进电机驱动电路

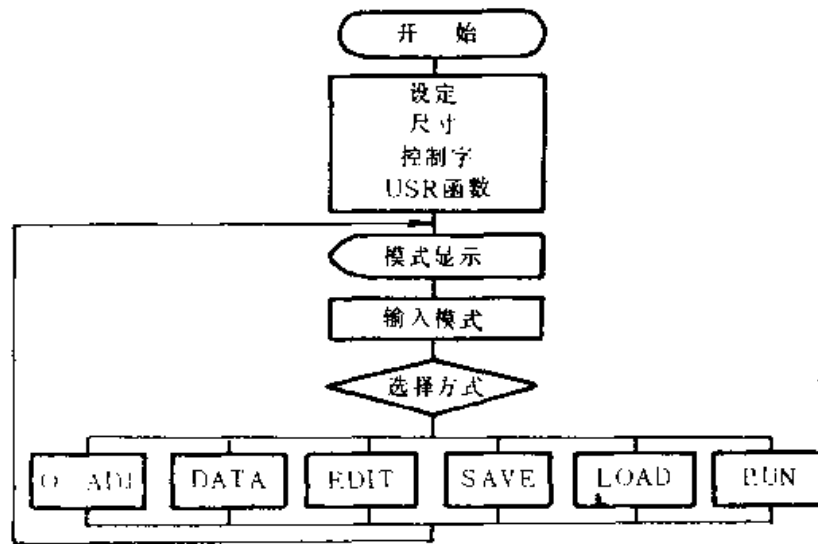


图 9-36 主程序框图

```

* * * KAM-2 CONTROL SYSTEM * * *
* 1. 0-ADJ *
* 2. INPUT DATA *
* 3. EDIT *
* 4. SAVE *
* 5. LOAD *
* 6. RUN *
* * * * * * * * * * * * * *

```

图 9-37 方式选择状态的显示

表 9-13 移动方向与按键的关系

方 向	键
+x	8
-x	5
+y	4
-y	6
+z	2
-z	*
爪部 ON	1
OFF	3
STOP	STOP

### 3. EDIT 方式

此方式用于输入数据的显示、打印、改错。共有 d、p、c、r 四种命令，按下相应的按键即可执行。按 d 键显示输入数据；按 p 键打印数据；按 c 键修改输入的错误；按 r 键退出 EDIT 方式，返回方式选择状态。

### 4. SAVE 方式

此方式可将 DATA 方式输入的数据保存于盒式磁带中。

### 5. LOAD 方式

此方式可将 SAVE 方式写入磁带的內容读入计算机内存。

### 6. RUN 方式

通过 RUN 方式实现 KAM 机器人的再现和操作。图 9-38 给出一个简单的流程图。首先，将爪部相对于起始原点的绝对坐标 (AX, AY, AZ) 作为 (0, 0, 0)。其次，通过一个子程序 CALCULATE PULSE 计算脉冲数和频率。再通过按键选择执行 s、t、0、00 和 r 五种命令。

(1) 子程序 CALCULATE PULSE 此子程序流程图如图 9-39 所示。首先将

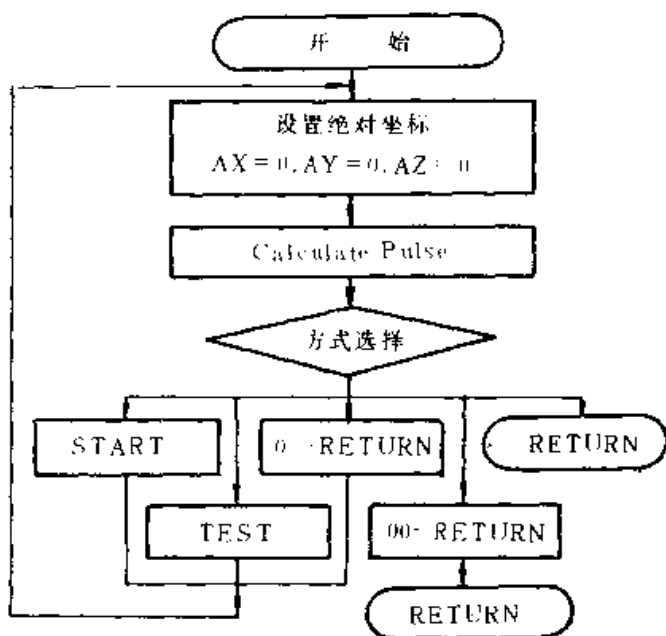


图 9-38 RUN 方式的流程图

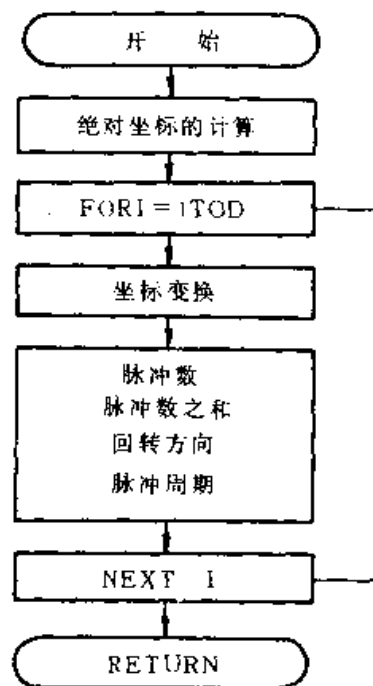


图 9-39 CALCULATE PULSE 子程序流程图

输入的直角坐标相对移动量  $x, y, z$ , 即相对坐标值  $\Delta x, \Delta y, \Delta z$  转换为绝对坐标值。用 0-ADJ 方式决定爪部的起始位置  $P_0 (x_0, y_0, z_0)$ ,  $x_0, y_0, z_0$  为  $P_0$  点的绝对坐标。用下面公式即可求出手爪顺次各移动点  $P_0, P_1, P_2, \dots, P_{i-1}, P_i, \dots$  的绝对坐标:

$$\begin{cases} x_i = x_{i-1} + \Delta x_i \\ y_i = y_{i-1} + \Delta y_i \\ z_i = z_{i-1} + \Delta z_i \end{cases}$$

式中  $\Delta x_i, \Delta y_i, \Delta z_i$  —— 从  $P_{i-1}$  点移到  $P_i$  点的相对坐标增量。

然后将直角坐标变换成圆柱坐标, 用下面公式求出圆柱坐标系中  $P_i$  的相对坐标增量  $\Delta r_i, \Delta \theta_i$  和  $\Delta z_i$ :

$$\begin{cases} \Delta r_i = \sqrt{x_i^2 + y_i^2} - \sqrt{x_{i-1}^2 + y_{i-1}^2} \\ \Delta \theta_i = \arctg\left(\frac{y_i}{x_i}\right) - \arctg\left(\frac{y_{i-1}}{x_{i-1}}\right) \\ \Delta z_i = \Delta z_i \end{cases}$$

根据传动参数可求得各坐标有关脉冲当量的参数:  $r$  坐标 1mm/160 脉冲;  $z$  坐标 1mm/320 脉冲;  $\theta$  坐标 1rad/13751 脉冲。据此即可求出各坐标移动的脉冲数  $P_r, P_\theta, P_z$ 。 $\Delta r, \Delta \theta, \Delta z$  的符号则决定了电机的回转方向。

$P_r, P_\theta, P_z$  之和用于终点判别。

对于点位控制方式, 按三轴移动时间相等可求出向各坐标轴输出脉冲的周期  $T_r, T_\theta,$



$T_x$ 。

(2) s、t、0、00、r 命令 执行 s 命令即实现机器人手爪自动地从起始点  $P_0$  按预先设定的点  $P_1$ 、 $P_2$ ……移动。s 命令的流程主要包括有起点设定，各定位点坐标参数（如上述的脉冲数  $P_r$ 、 $P_\theta$ 、 $P_x$ ，周期  $T_r$ 、 $T_\theta$ 、 $T_x$  等）的存贮，插补运算（对于连续轨迹控制），加减速计算，脉冲分配，终点判别等。这部分子程序实时性较强，用汇编语言程序写成。

t 命令与 s 命令大致相同，但 t 命令时是使 KAM 的动作一步一步地进行。当 KAM 完成一个定位点的移动后，按一下空格键后才进行向下一点的移动。

0 命令是用于选择好 RUN 方式后使爪部返回原点位置。

00 命令与 0 命令相似，不过是返回到 0-ADJ 方式选定的爪部原点位置。

r 命令执行后，即退出 RUN 方式，返回方式选择状态。

# 附 录

## (一) 常用集成电路的引脚及功能图

各功能表中的符号意义

H=高电平 (稳态)

L=低电平 (稳态)

↑ = 低到高跳变

↓ = 高到低跳变

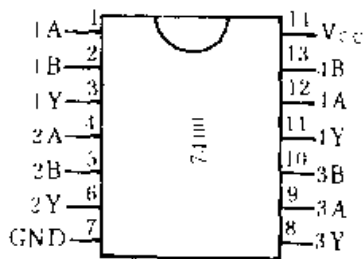
× = 无关 (包括跳变)

Z = 三态输出的关态 (高阻抗)

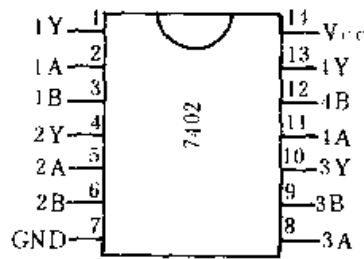
$Q_0$  = 在指定的稳态输入条件建立之前 Q 的电平

$\bar{Q}_1$  = 在指定的稳态输入条件建立之前  $\bar{Q}$  的电平或  $Q_0$  的补

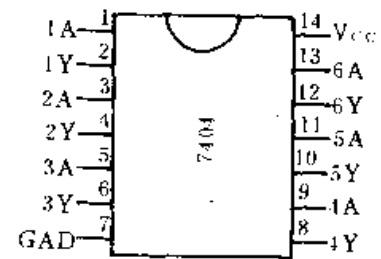
$H^*$  = 此状态不稳定



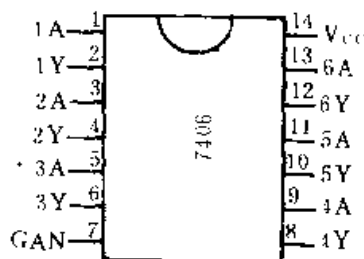
附图 1-1 7400 四 2 输入与非门



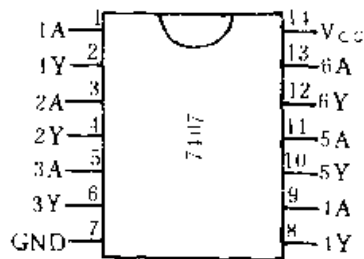
附图 1-2 7402 四 2 输入或非门



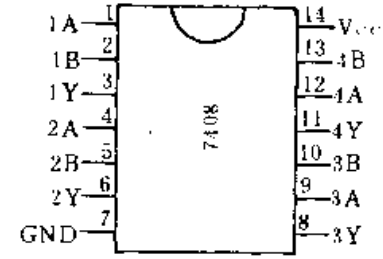
附图 1-3 7404 六倒相器



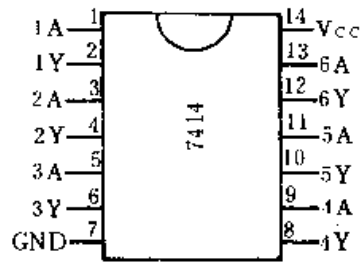
附图 1-4 7406 集电极开路高压输出的六倒相器



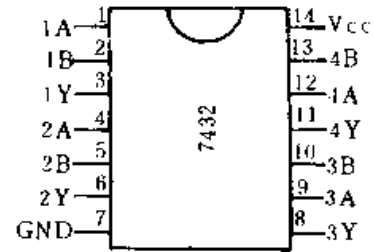
附图 1-5 7407 集电极开路高压输出的六缓冲器



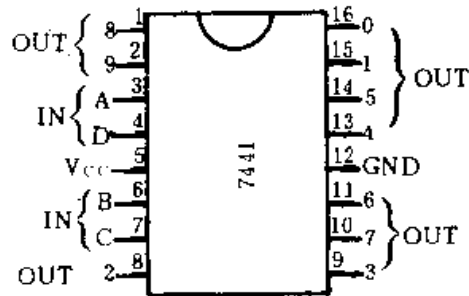
附图 1-6 7408 四 2 输入与门



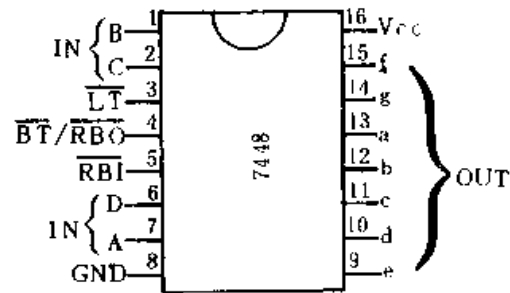
附图 1-7 7414 六倒相器 (施密特触发)



附图 1-8 7432 四 2 输入或门



附图 1-9 7441 BCD-十进制译码器/驱动器



附图 1-10 7448 BCD-七段译码器/驱动器

功 能 表

十进数 或功能	输 入						$\overline{\text{BI}}/\text{RBO}$	输 出						
	LT	$\overline{\text{RBI}}$	D	C	B	A		a	b	c	d	e	f	g
0	H	H	L	L	L	L	H	H	H	H	H	H	H	L
1	H	X	L	L	L	H	H	L	H	H	L	L	L	L
2	H	X	L	L	H	L	H	H	H	L	H	L	L	H
3	H	X	L	L	H	H	H	H	H	H	L	L	L	H
4	H	X	L	H	L	L	H	L	H	H	L	L	H	H
5	H	X	L	H	L	H	H	H	H	L	H	L	H	H
6	H	X	L	H	H	L	H	L	L	H	H	H	H	H
7	H	X	L	H	H	H	H	H	H	H	L	L	L	L
8	H	X	H	L	L	L	H	H	H	H	H	H	H	H
9	H	X	H	L	L	H	H	H	H	H	L	L	H	H
10	H	X	H	L	H	L	H	L	L	L	H	H	L	H
11	H	X	H	L	H	H	H	L	L	H	H	L	L	H
12	H	X	H	H	L	L	H	L	H	L	L	L	H	H
13	H	X	H	H	L	H	H	H	L	L	L	H	L	H
14	H	X	H	H	H	L	H	L	L	L	H	H	H	H
15	H	X	H	H	H	H	H	L	L	L	L	L	L	L
BI	X	X	X	X	X	X	L	L	L	L	L	L	L	L
RBI	H	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L
LT	L	X	X	X	X	X	H	H	H	H	H	H	H	H

功 能 表

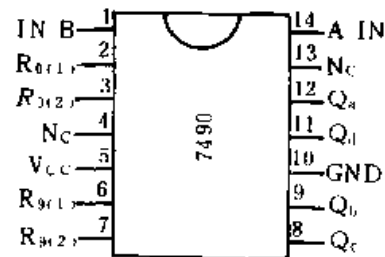
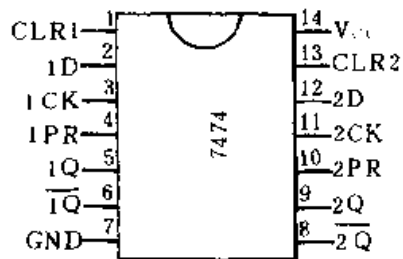
输 入				输 出	
PR	CLR	CK	D	Q	$\bar{Q}$
L	H	X	X	H	L
H	L	X	X	L	H
L	L	X	X	H <sup>z</sup>	H <sup>z</sup>
H	H	↑	H	H	L
H	H	↑	L	L	H
H	H	L	X	Q <sub>0</sub>	$\bar{Q}_0$

8421 码十进制计数序列

计 数	输 出			
	Q <sub>D</sub>	Q <sub>C</sub>	Q <sub>B</sub>	Q <sub>A</sub>
0	L	L	L	L
1	L	L	L	H
2	L	L	H	L
3	L	L	H	H
4	L	H	L	L
5	L	H	L	H
6	L	H	H	L
7	L	H	H	H
8	H	L	L	L
9	H	L	L	H

5421 码十进制计数序列

计 数	输 出			
	Q <sub>A</sub>	Q <sub>D</sub>	Q <sub>C</sub>	Q <sub>B</sub>
0	L	L	L	L
1	L	L	L	H
2	L	L	H	L
3	L	L	H	H
4	L	H	L	L
5	H	L	L	L
6	H	L	L	H
7	H	L	H	L
8	H	L	H	H
9	H	H	L	L



附图 1-11 7474 双 D 型正沿触发器 (带预置和清除)

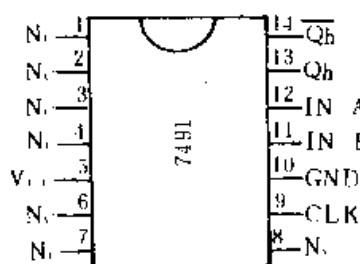
附图 1-12 7490 十进制计数器

复位/计数功能表

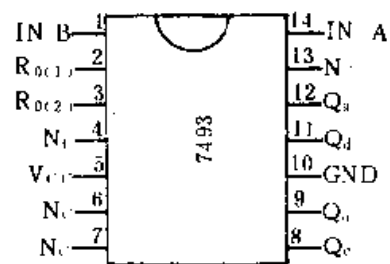
复 位 输 入				输 出			
R <sub>0(1)</sub>	R <sub>0(2)</sub>	R <sub>9(1)</sub>	R <sub>9(2)</sub>	Q <sub>D</sub>	Q <sub>C</sub>	Q <sub>B</sub>	Q <sub>A</sub>
H	H	L	X	L	L	L	L
H	H	X	L	L	L	L	L
X	X	H	H	H	L	L	H
X	L	X	L				计数
L	X	L	X				计数
L	X	X	L				计数
X	L	L	X				计数

### 功 能 表

输入 AT <sub>t<sub>a</sub></sub>		输出 AT <sub>t<sub>a</sub>+8</sub>	
A	B	Q <sub>H</sub>	$\bar{Q}_H$
H	H	H	L
L	X	L	H
X	L	L	H



附图 1-13 7491 八位移位寄存器



附图 1-14 7493 四位二进制计数器计数序列

复位输入		输 出			
R <sub>0(1)</sub>	Q <sub>0(2)</sub>	Q <sub>D</sub>	Q <sub>C</sub>	Q <sub>B</sub>	Q <sub>A</sub>
H	H	L	L	L	L
L	X	计数			
X	L	计数			

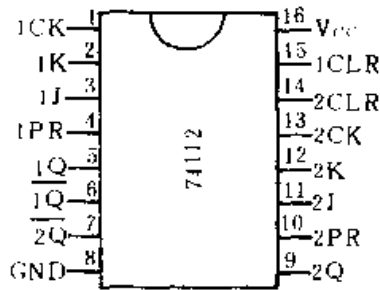
### 功 能 表

输 入			输 出		工 作	
R <sub>0</sub>	C <sub>K</sub>		Q <sub>A</sub>	QBQCQD		
	A	B	脉冲数			
L	相对于 Q <sub>A</sub> 的 C <sub>K</sub>	对于 Q <sub>B</sub> 至 Q <sub>C</sub> 的 C <sub>K</sub>	0	L	LLL	计数器
			1	H	HLL	
			2	L	LHL	
			3		HHL	
			4		LLH	
			5		HLH	
			6		LHH	
			7		HHH	
			8		LLL	
H	X	X	—	L	LLL	清除

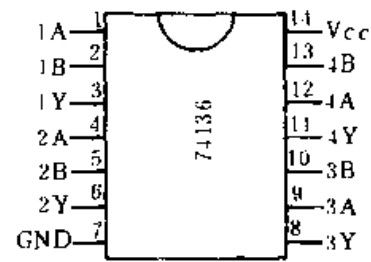
计数	输 出			
	Q <sub>D</sub>	Q <sub>C</sub>	Q <sub>B</sub>	Q <sub>A</sub>
0	L	L	L	L
1	L	L	L	H
2	L	L	H	L
3	L	L	H	H
4	L	H	L	L
5	L	H	L	H
6	L	H	H	L
7	L	H	H	H
8	H	L	L	L
9	H	L	L	H
10	H	L	H	L
11	H	L	H	H
12	H	H	L	L
13	H	H	L	H
14	H	H	H	L
15	H	H	H	H

功 能 表

输 入					输 出	
$\overline{PR}$	$\overline{CLR}$	CK	J	K	Q	$\overline{Q}$
L	H	X	X	X	H	L
H	L	X	X	X	L	H
L	L	X	X	X	H <sup>z</sup>	H <sup>z</sup>
H	H	↓	L	L	Q <sub>0</sub>	$\overline{Q}_0$
H	H	∨	H	L	H	L
H	H	∨	L	H	L	H
H	H	↓	H	H	触发	
H	H	H	X	X	Q <sub>0</sub>	$\overline{Q}_0$



附图 1-15 74112 双 J-K 触发器 (带预置与清除)

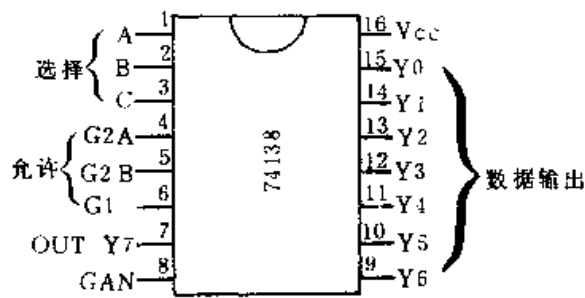


附图 1-16 74136 四异或门

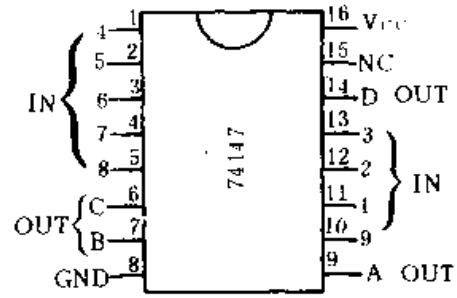
功 能 表

输 入		输 出										
允许	选择											
G1	$\overline{Q2}$ *	C	B	A	Y0	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6	Y7
X	H	X	X	X	H	H	H	H	H	H	H	H
L	X	X	X	X	H	H	H	H	H	H	H	H
H	L	L	L	L	L	H	H	H	H	H	H	H
H	L	L	L	H	H	L	H	H	H	H	H	H
H	L	L	H	L	H	H	L	H	H	H	H	H
H	L	L	H	H	H	H	H	L	H	H	H	H
H	L	H	L	L	H	H	H	H	L	H	H	H
H	L	H	L	H	H	H	H	H	H	L	H	H
H	L	H	H	L	H	H	H	H	H	H	L	H
H	L	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	L

\*  $\overline{G2} = \overline{G2A} + \overline{G2B}$



附图 1-17 74138 3-8 线-译码器/多路转换器



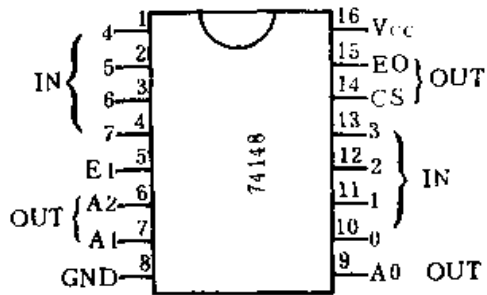
附图 1-18 74147 10-4 线优先编码器

功 能 表

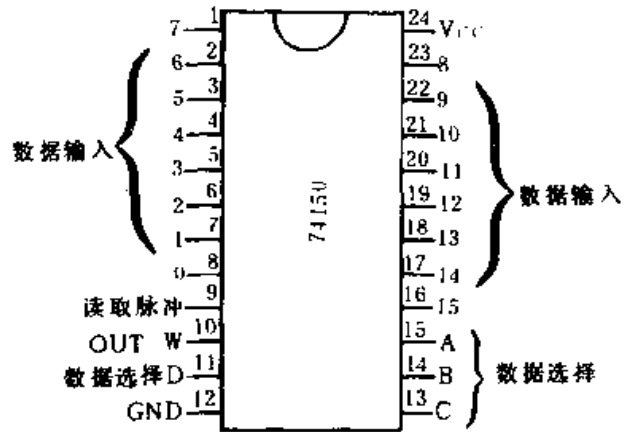
输 入									输 出			
A	2	3	4	5	6	7	8	9	0	D	C	B
H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H
X	X	X	X	X	X	X	X	L	L	H	H	L
X	X	X	X	X	X	X	L	H	L	H	H	H
X	X	X	X	X	X	L	H	H	H	L	L	L
X	X	X	X	L	H	H	H	H	H	L	L	H
X	X	X	L	H	H	H	H	H	H	L	H	H
X	X	L	H	H	H	H	H	H	H	H	L	L
X	L	H	H	H	H	H	H	H	H	H	L	H
L	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	L

功 能 表

输 入									输 出				
EI	0	1	2	3	4	5	6	7	A1	A2	A0	GS	EO
H	X	X	X	X	X	X	X	X	H	H	H	H	H
L	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	L
L	X	X	X	X	X	X	X	L	L	L	L	L	H
L	X	X	X	X	X	X	L	H	L	L	H	L	H
L	X	X	X	X	L	H	H	H	L	H	H	L	H
L	X	X	X	L	H	H	H	H	H	L	L	L	H
L	X	X	L	H	H	H	H	H	H	L	H	L	H
L	X	L	H	H	H	H	H	H	H	H	L	L	H
L	L	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	L	H



附图 1-19 74148 8-3 线优先编码器



附图 1-20 74150 16 选 1 数据选择器

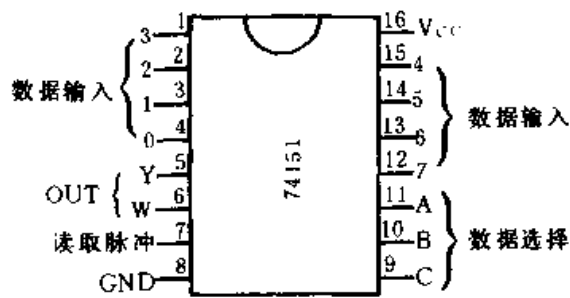
功 能 表

输 入				读取脉冲 $\bar{G}$	输出 W
选 择					
D	C	B	A		
X	X	X	X	H	H
L	L	L	L	L	$\bar{E}_0$
L	L	L	H	L	$\bar{E}_1$
L	L	H	L	L	$\bar{E}_2$
L	L	H	H	L	$\bar{E}_3$
L	H	L	L	L	$\bar{E}_4$
L	H	L	H	L	$\bar{E}_5$
L	H	H	L	L	$\bar{E}_6$
L	H	H	H	L	$\bar{E}_7$
H	L	L	L	L	$\bar{E}_8$
H	L	L	H	L	$\bar{E}_9$
H	L	H	L	L	$\bar{E}_{10}$
H	L	H	H	L	$\bar{E}_{11}$
H	H	L	L	L	$\bar{E}_{12}$
H	H	L	H	L	$\bar{E}_{13}$
H	H	H	L	L	$\bar{E}_{14}$
H	H	H	H	L	$\bar{E}_{15}$

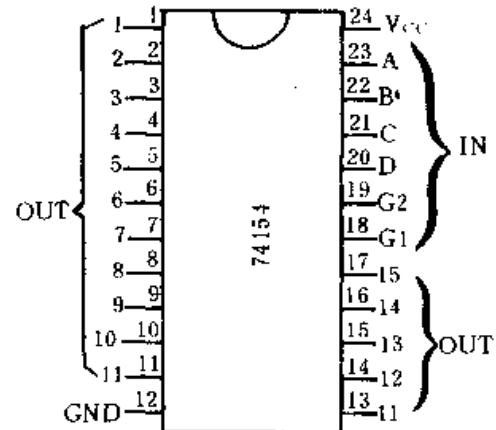


功 能 表

输 入			输 出		
选 择			读取脉冲 $\bar{G}$	Y	W
C	B	A			
X	X	X	H	L	H
L	L	L	L	D0	$\bar{D}0$
L	L	H	L	D1	$\bar{D}1$
L	H	L	L	D2	$\bar{D}2$
L	H	H	L	D3	$\bar{D}3$
H	L	L	L	D4	$\bar{D}4$
H	L	H	L	D5	$\bar{D}5$
H	H	L	L	D6	$\bar{D}6$
H	H	H	L	D7	$\bar{D}7$



附图 1-21 74151 8选1数据选择器



附图 1-22 74154 4-16线多路分配器

功 能 表

输 入					输 出																	
$\bar{G}1$	$\bar{G}2$	D	C	B	A	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
L	L	L	L	L	L	L	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H
L	L	L	L	L	H	H	L	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H
L	L	L	L	H	L	H	H	L	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H
L	L	L	L	H	H	H	H	L	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H
L	L	L	H	L	L	H	H	H	L	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H
L	L	L	H	L	H	H	H	H	L	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H
L	L	L	H	H	L	H	H	H	H	L	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H

续表

输入					输出																	
$\bar{G}1$	$\bar{G}2$	D	C	B	A	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
L	L	L	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	L	H	H	H	H	H	H	H	H	H
L	L	H	L	L	H	H	H	H	H	H	H	H	H	L	H	H	H	H	H	H	H	H
L	L	H	L	L	H	H	H	H	H	H	H	H	H	L	H	H	H	H	H	H	H	H
L	L	H	L	H	L	H	H	H	H	H	H	H	H	H	L	H	H	H	H	H	H	H
L	L	H	L	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	L	H	H	H	H	H	H
L	L	H	H	H	L	L	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	L	H	H	H	H	H
L	L	H	H	L	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	L	H	H	H	H
L	L	H	H	H	L	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	L	H	H	H
L	L	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	L
L	H	X	X	X	X	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H
H	L	X	X	X	X	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H
H	H	X	X	X	X	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H

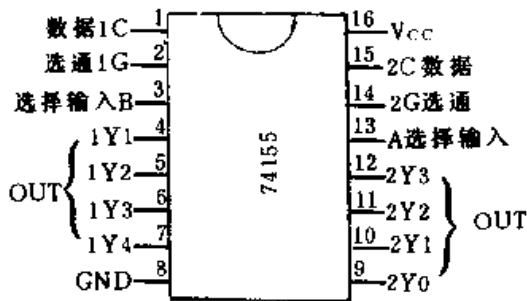
功能表 2线-4线译码器或1线-4线多路分配器

输入				输出			
选择		选通	数据	1Y0	1Y1	1Y2	1Y3
B	A	$1\bar{G}$	1C				
X	X	H	X	H	H	H	H
L	L	L	H	L	H	H	H
L	H	L	H	H	L	H	H
H	L	L	H	H	H	L	H
H	H	L	H	H	H	H	L
X	X	X	L	H	H	H	H

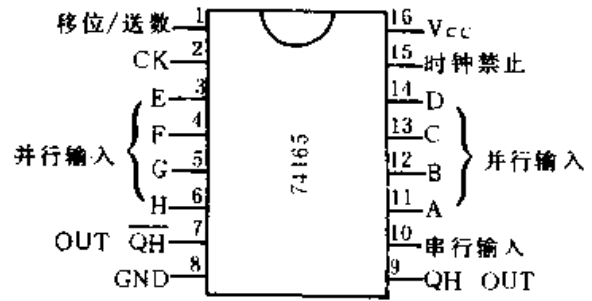
输入				输出			
选择		选通	数据	2Y0	2Y1	2Y2	2Y3
B	A	$2\bar{G}$	2C				
X	X	H	X	H	H	H	H
L	L	L	L	L	H	H	H
L	H	L	L	H	L	H	H
H	L	L	L	H	H	L	H
H	H	L	L	H	H	H	L
X	X	X	H	H	H	H	H

3线-8线译码器或1线-8多路分配器

输入				O 输出 UTS							
选择		选通或数据		(0)	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
C	B	A	$\bar{G}$	2Y0	2Y1	2Y2	2Y3	1Y0	1Y1	1Y2	1Y3
X	X	X	H	H	H	H	H	H	H	H	H
L	L	L	L	L	H	H	H	H	H	H	H
L	L	H	L	H	L	H	H	H	H	H	H
L	H	L	L	H	H	L	H	H	H	H	H
L	H	H	L	H	H	H	L	H	H	H	H
H	L	L	L	H	H	H	H	L	H	H	H
H	L	H	L	H	H	H	H	H	L	H	H
H	H	L	L	H	H	H	H	H	H	L	H
H	H	H	L	H	H	H	H	H	H	H	L



附图 1-23 74155 双 2-4 线多路分配器

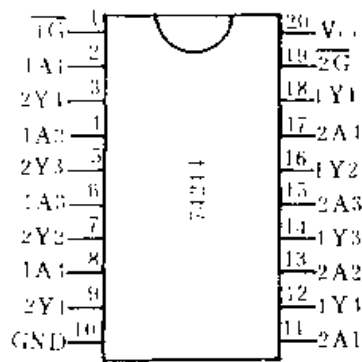


附图 1-24 74165 带补码输出的并行输入 8 位移位寄存器

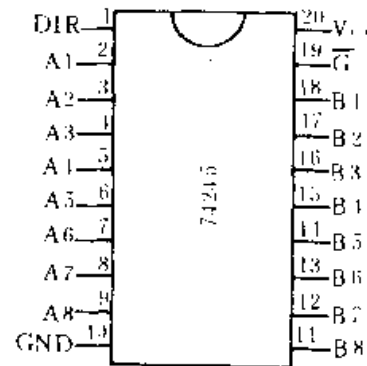
功能表

输入					内输出		输出
移位/送数	时钟禁止	CK	串行	并行	$O_A$	$O_B$	$Q_H$
				A...H			
L	X	X	X	a...h	a	b	h
H	L	L	X	X	$Q_{A_0}$	$Q_{B_0}$	$Q_{H_0}$
H	L	↑	H	X	H	$Q_{A_0}$	$Q_{Gn}$
H	L	↑	L	X	L	$Q_{A_0}$	$Q_{Gn}$
H	H	X	X	X	$Q_{A_0}$	$Q_{B_0}$	$Q_{H_0}$

当 CK=L 期间, 若使 CK 禁止为 H 电平, 则数据移动 1 位并被保持  
若 CK=H 电平的期间, 就这样保持



附图 1-25 74244 八总线三态缓冲器



附图 1-26 74245 八总线三态输出收发器

功 能 表

允许 $\bar{G}$	方向控制 DIR	操 作
L	L	B 数据到 A 总线
L	H	A 数据到 B 总线
H	X	隔 离

功 能 表

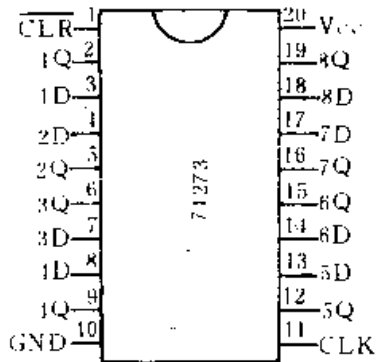
输 入			输 出
清除 $\overline{CLR}$	时钟 $\overline{CLK}$	D	Q
L	X	X	L
H	↑	H	H
H	↑	L	L
H	L	X	$Q_0$

功 能 表

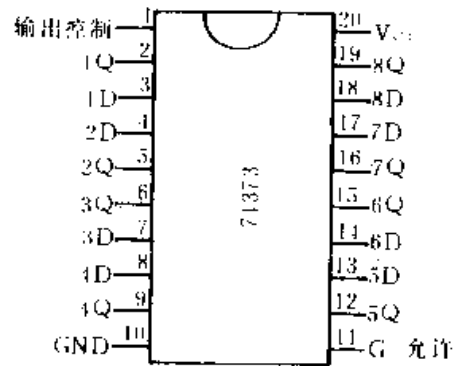
输出控制	允许 G	D	输出
L	H	H	H
L	H	L	L
L	L	X	$Q_0$
H	X	X	Z

功 能 表

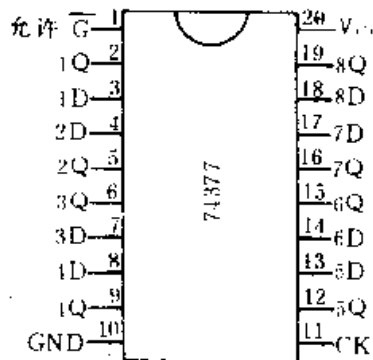
输 入			输 出	
$\bar{G}$	时钟	数据 D	Q	$\bar{Q}$
H	X	X	$Q_0$	$\bar{Q}_0$
L	↑	H	H	L
L	↑	L	L	H
X	L	X	$Q_0$	$\bar{Q}_0$



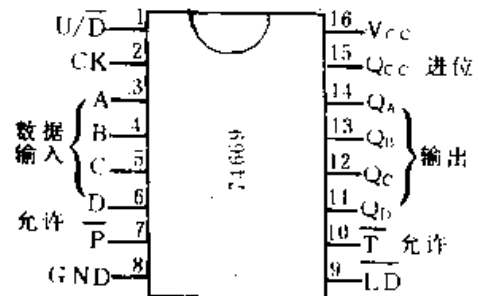
附图 1-27 74273 八 D 触发器 (带清除端)



附图 1-28 74373 三态输出八 D 锁存器



附图 1-29 74377 八 D 触发器 (带允许端)



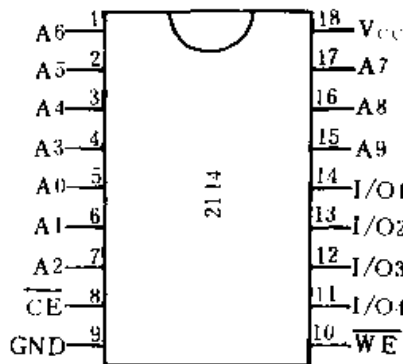
附图 1-30 74669 四位同步加/减二进制计数器

功 能 表

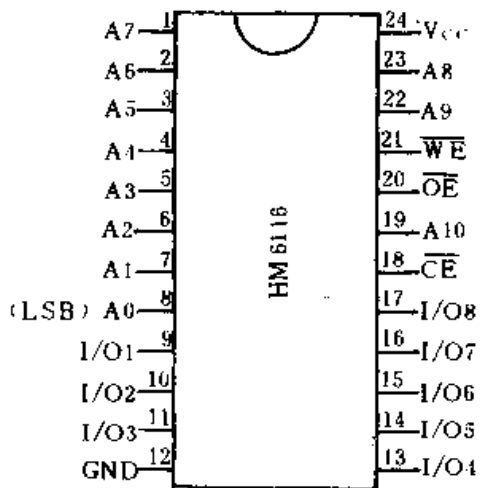
输 入		I/O	工作方式
$\overline{CE}$	$\overline{WE}$		
H	X	高阻态	非选择
L	L	L	写“L”
L	L	H	写“H”
L	H	数据出	读

功 能 表

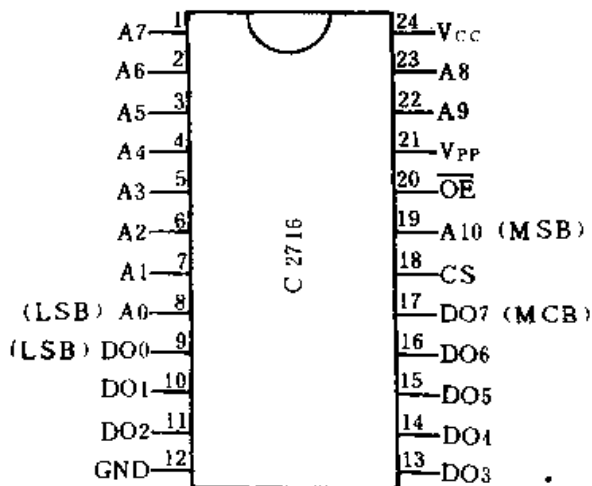
输 入			I/O		工作方式
$\overline{CE}$	$\overline{WE}$	$\overline{OE}$	数据入	数据出	
H	X	X	X	高阻态	非选择
L	H	L	高阻态	数据出	读
L	L	H	数据入	高阻态	写
L	L	L	数据入	高阻态	写
L	H	H	X	高阻态	选择



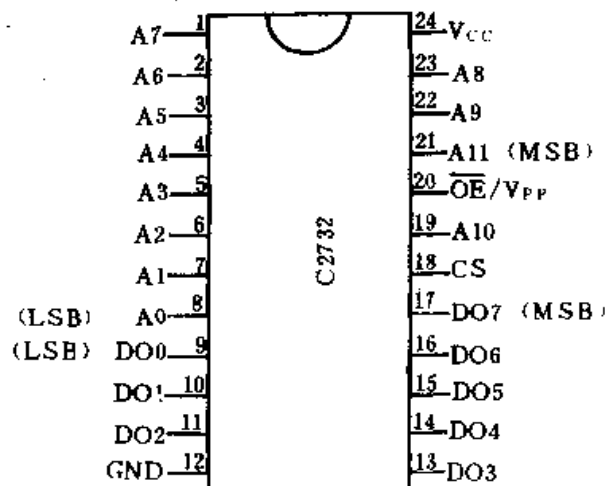
附图 1-31 2114 4KNMOS 静态 RAM



附图 1-32 HM6116 16KCMOS 静态 RAM



附图 1-33 C2716 16KNMOS UV-EPROM



附图 1-34 C2732 32KNMOS UV-EPROM

功 能 表

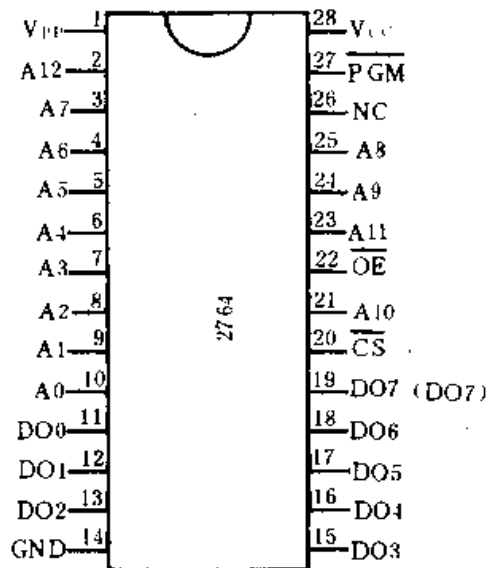
$\overline{CS}$	工作方式
H	非选择
L	读

功 能 表

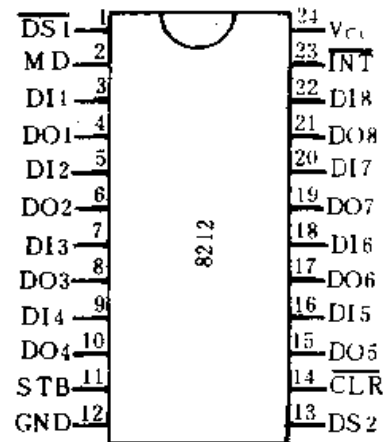
$\overline{CS}$	$\overline{OE}/V_{PP}$	数据出	工作方式
H	X	高阻态	非选择
L	H	高阻态	非选择
L	L	数据出	读

### 功 能 表

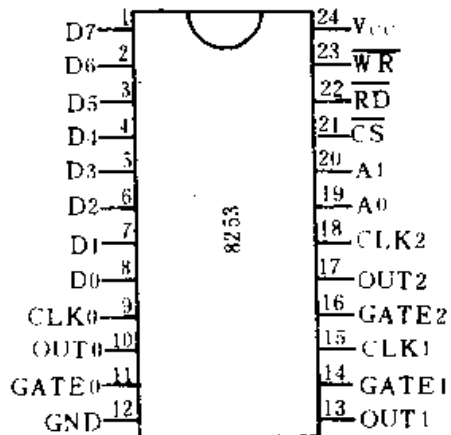
输 入		数据出	工作方式
OE	CS/PGM		
X	H	高阻态	非选择
H	X	高阻态	非选择
L	L	数据出	读



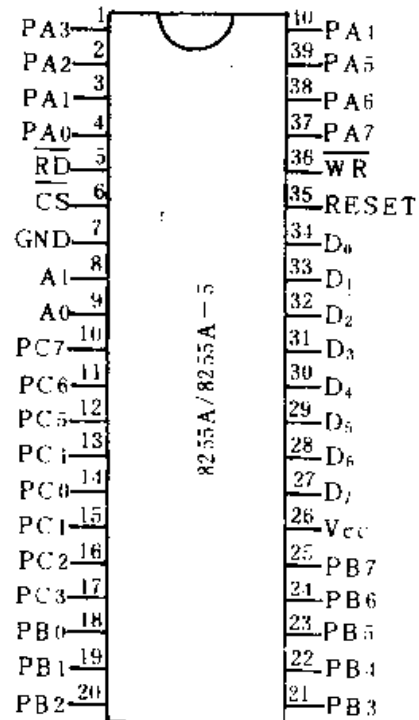
附图 1-35 2764 64kN MOSUV-EPROM



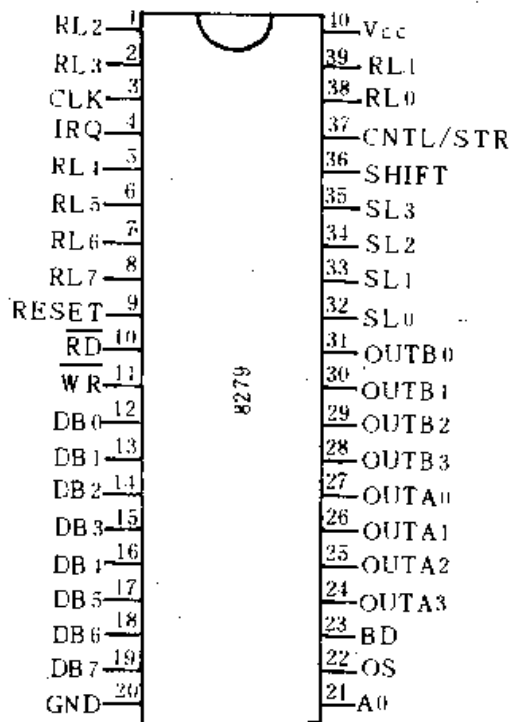
附图 1-36 8212 8位 I/O 接口



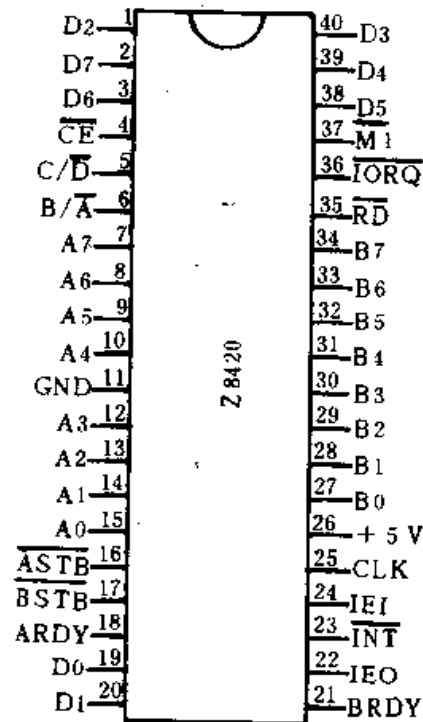
附图 1-37 8253 可编程计时器



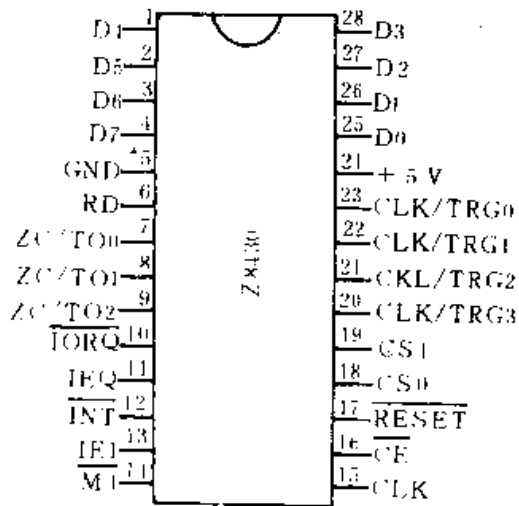
附图 1-38 8255A 可编程外设接口



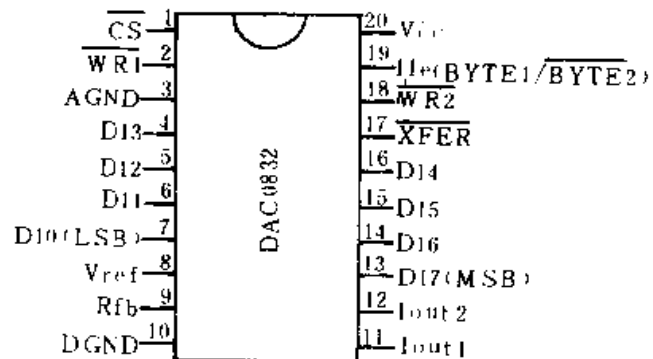
附图 1-39 8279 可编程键盘/显示器接口



附图 1-40 Z80PIO 并行 I/O 控制器

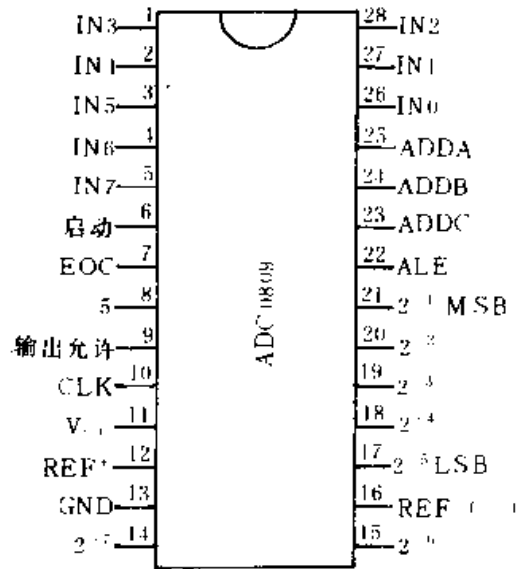


附图 1-41 Z80CTC 计数定时器

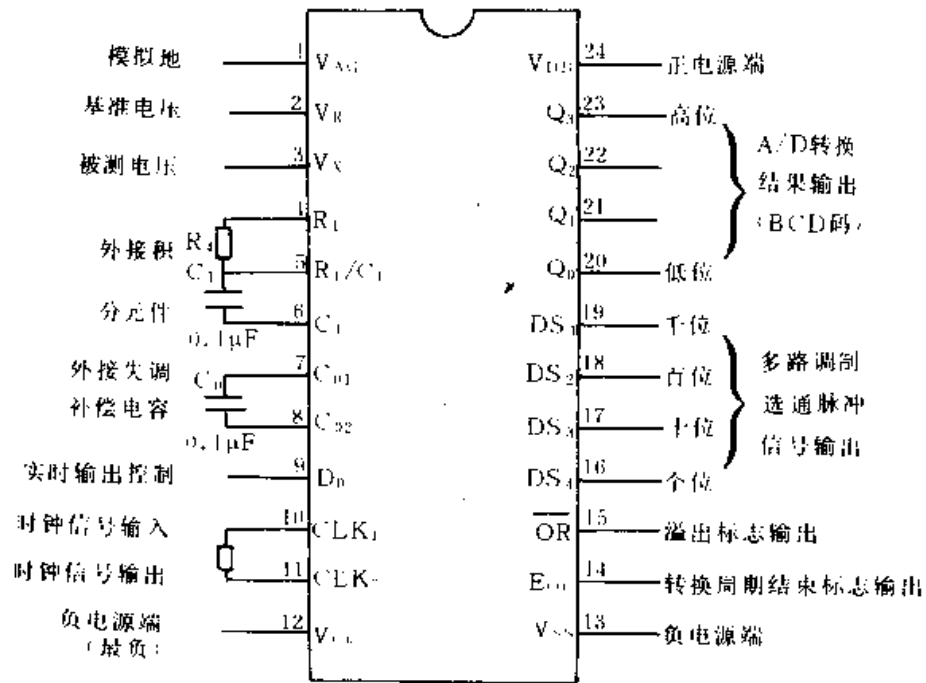


附图 1-42 DAC 0832 8位 D-A 转换器

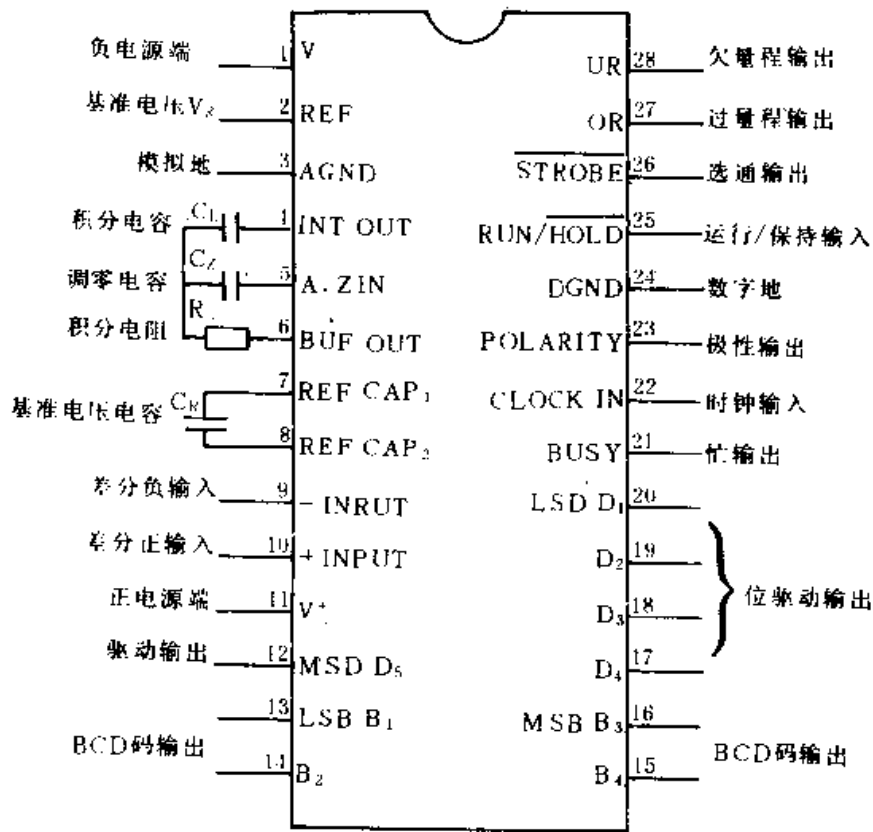




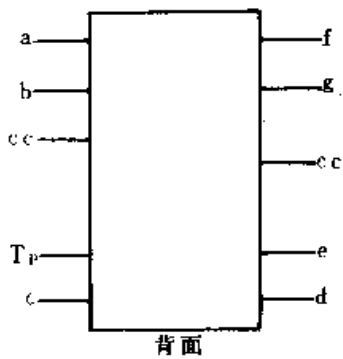
附图 1-43 ADC 0809 8 位 A-D 转换器



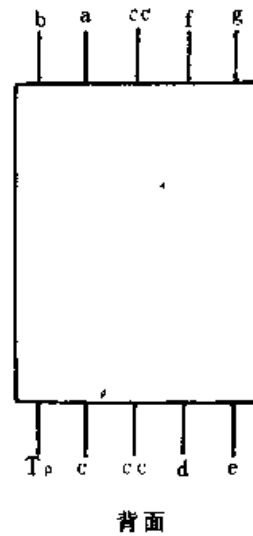
附图 1-44 5G14433  $3\frac{1}{2}$  位 A-D 转换器



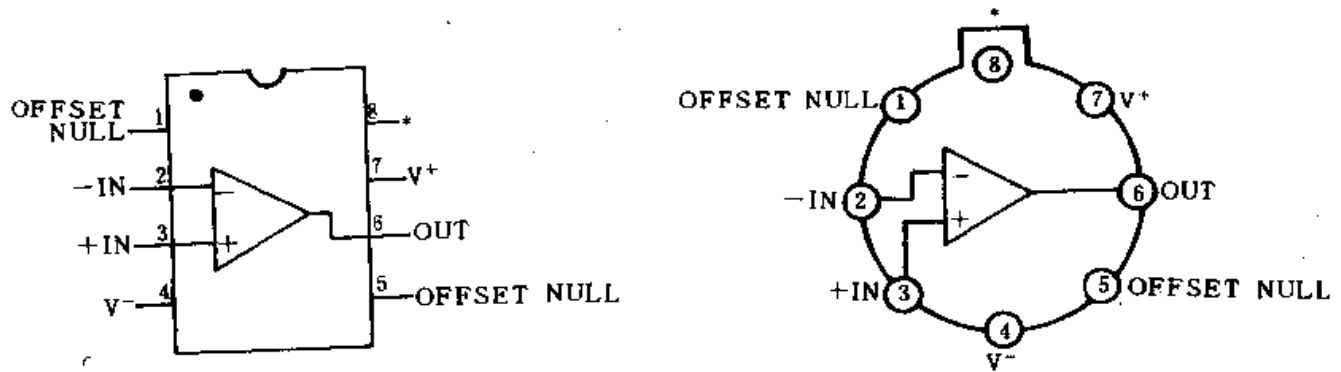
附图 1-45 TSC7135 4  $\frac{1}{2}$  位 A-D 转换器



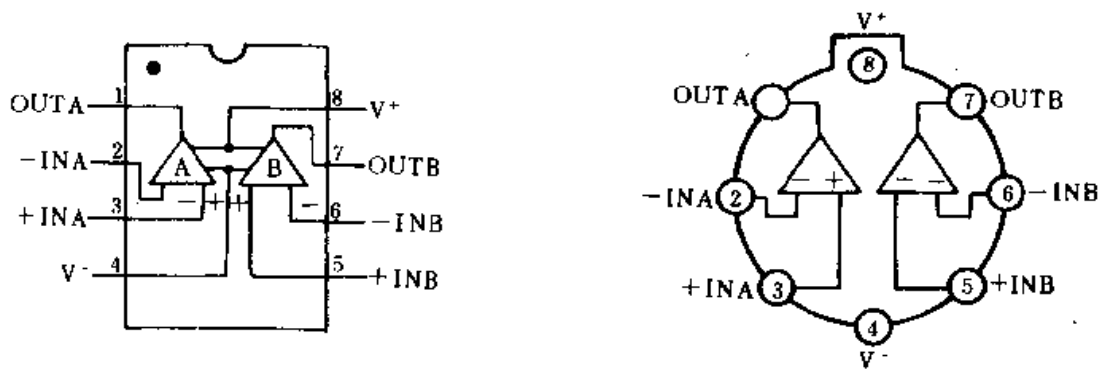
附图 1-46 LED 显示器 LT315R (共阴极)



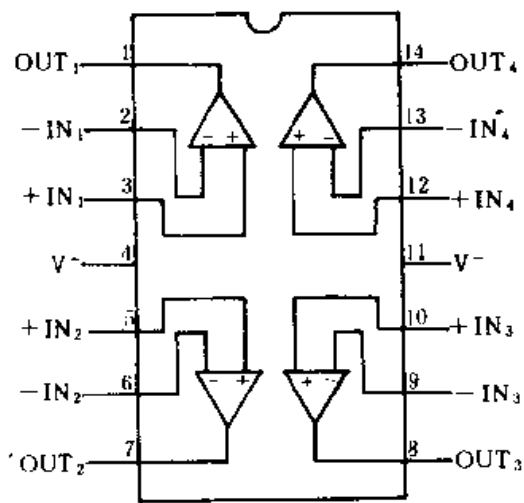
附图 1-47 LED 显示器 61801A (共阴极)



附图 1-48 LM741CN 单运放

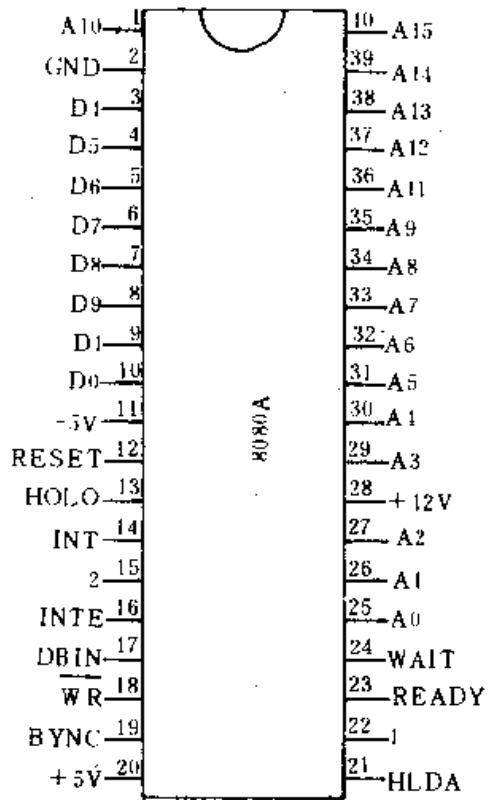


附图 1-49 LM358N 双运放

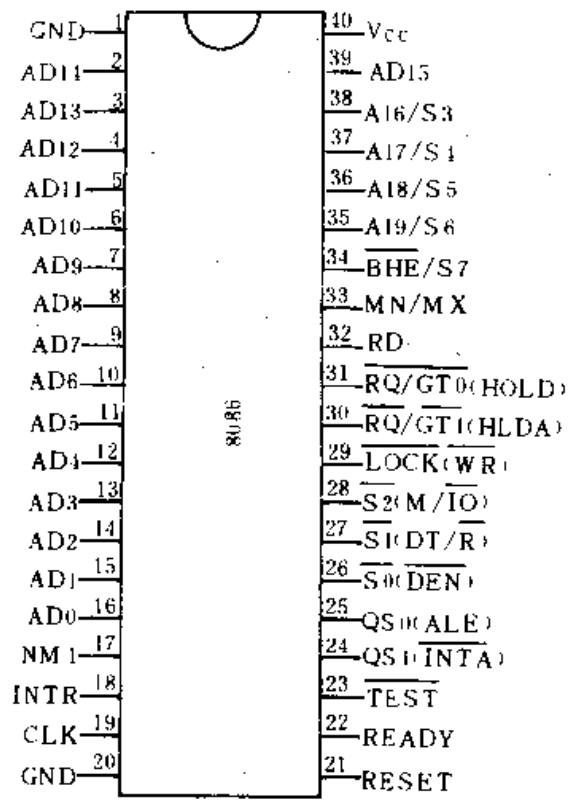


附图 1-50 LM324N 四运放

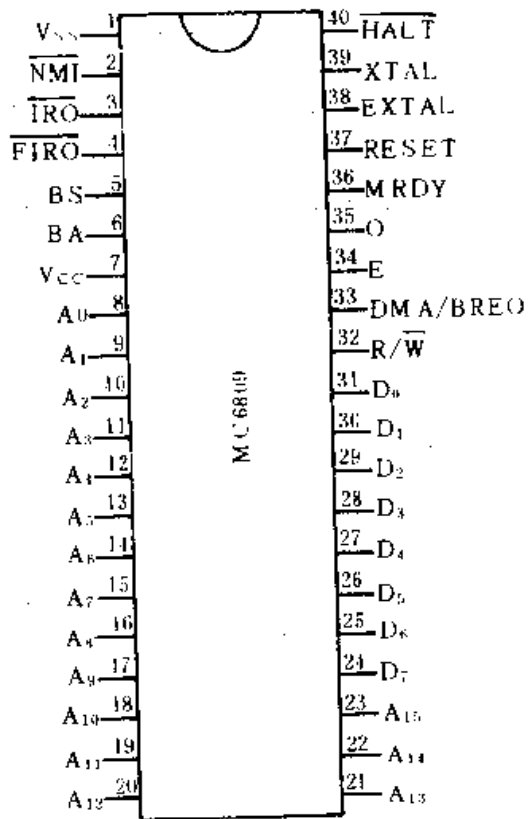
(二) 常用微处理器及单片机



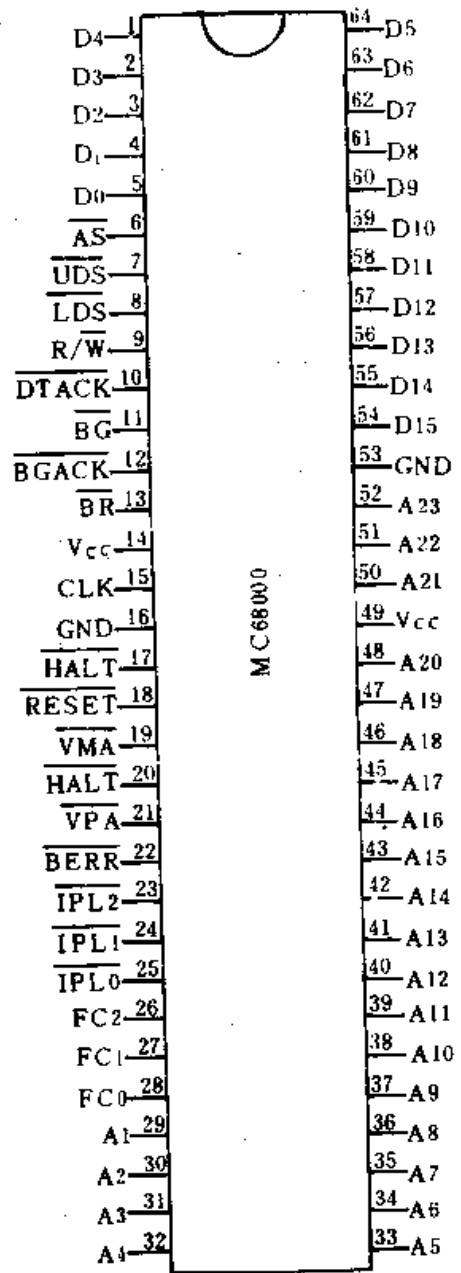
附图 2-1 8080A 8 位微处理器



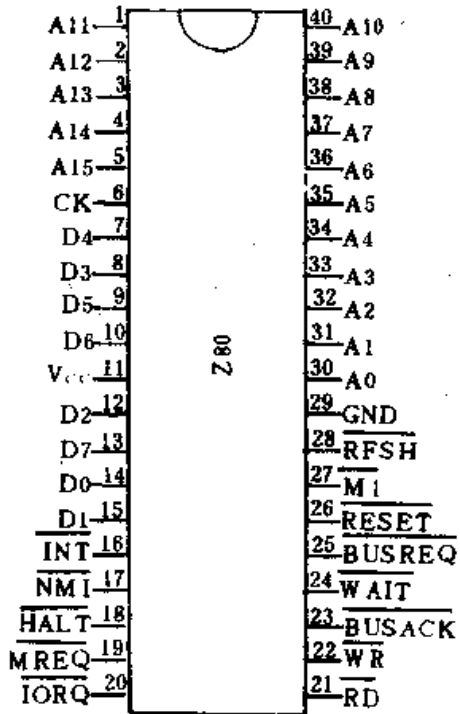
附图 2-2 8086 16 位 HMOS 微处理器



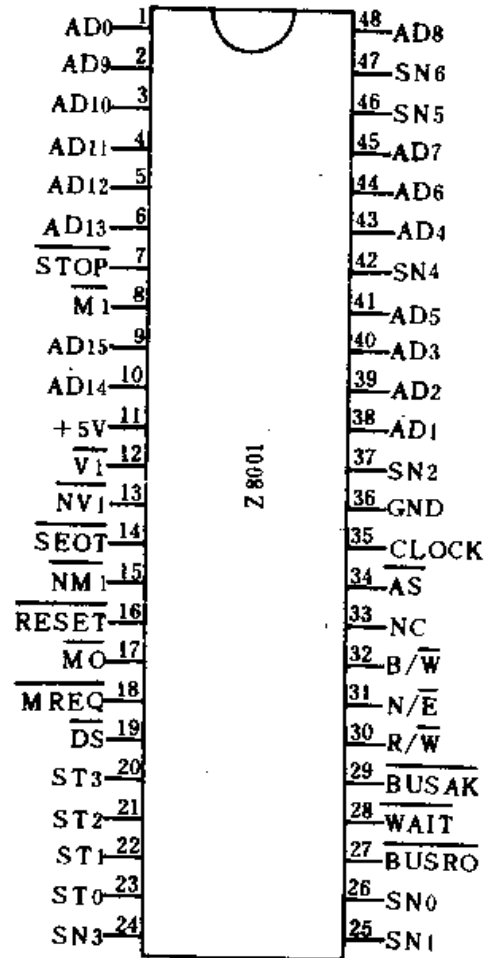
附圖 2-3 MC6809 8 位微處理器



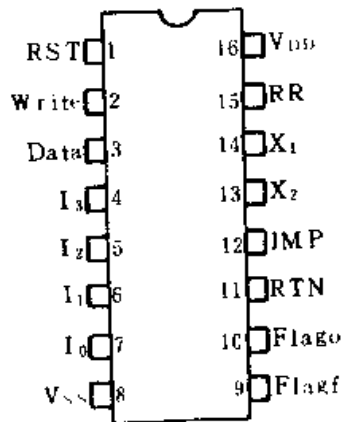
附圖 2-4 MC68000 16 位 HMOS 微處理器



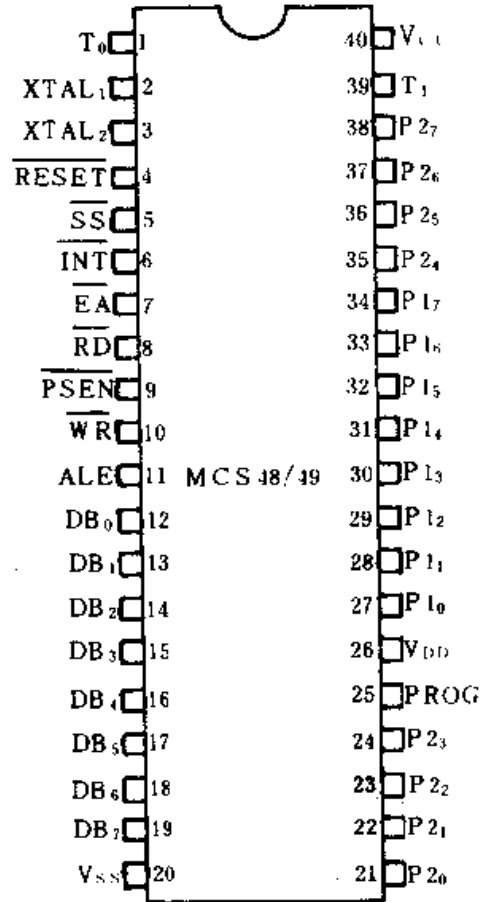
附图 2-5 Z80 8 位微处理器



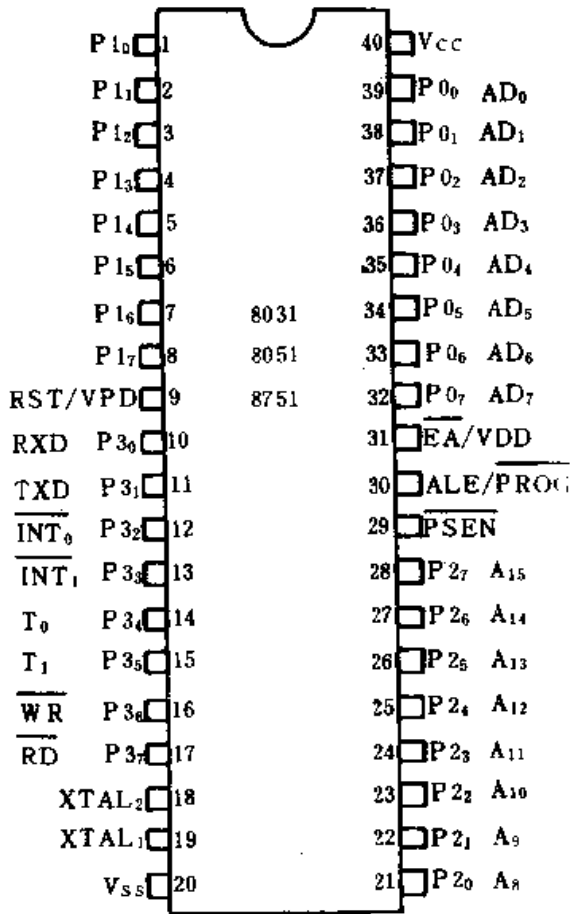
附图 2-6 Z8001 16 位微处理器



附图 2-7 MC14500 1位微处理器



附图 2-8 MCS-48 单片机

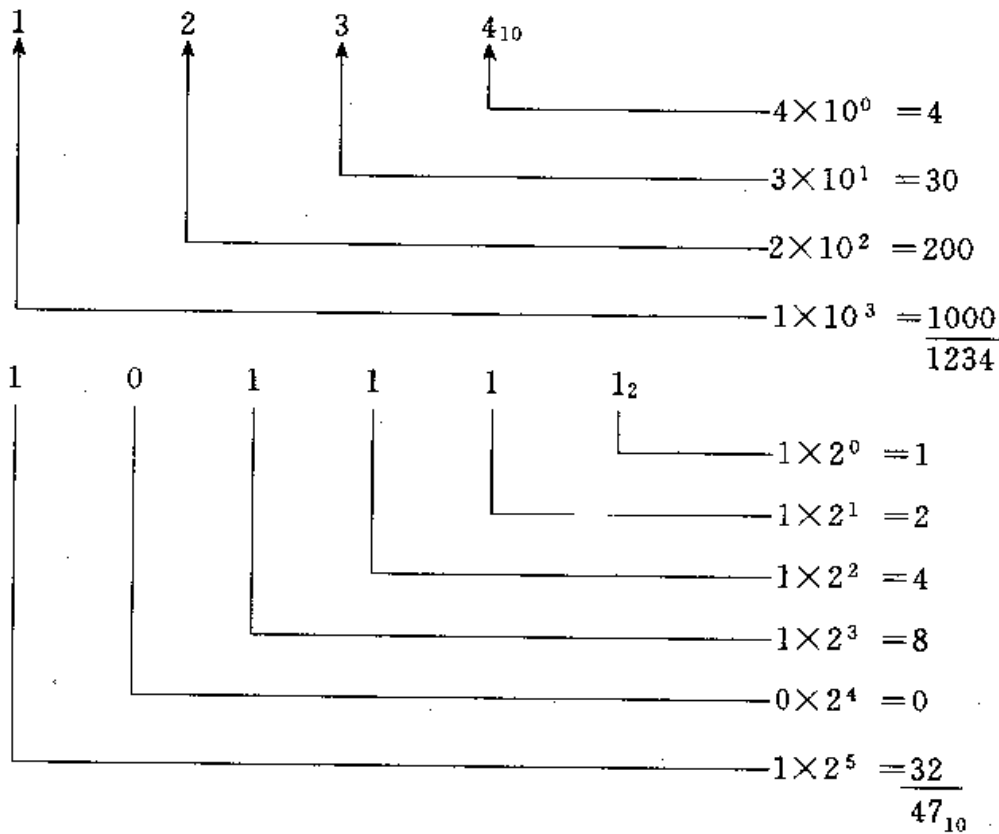


附图 2-9 MCS-51 单片机

### (三) 二进制和十六进制表示法

#### 1. 二进制数表示法

在二进制数制中位权的用法与十进制相似：

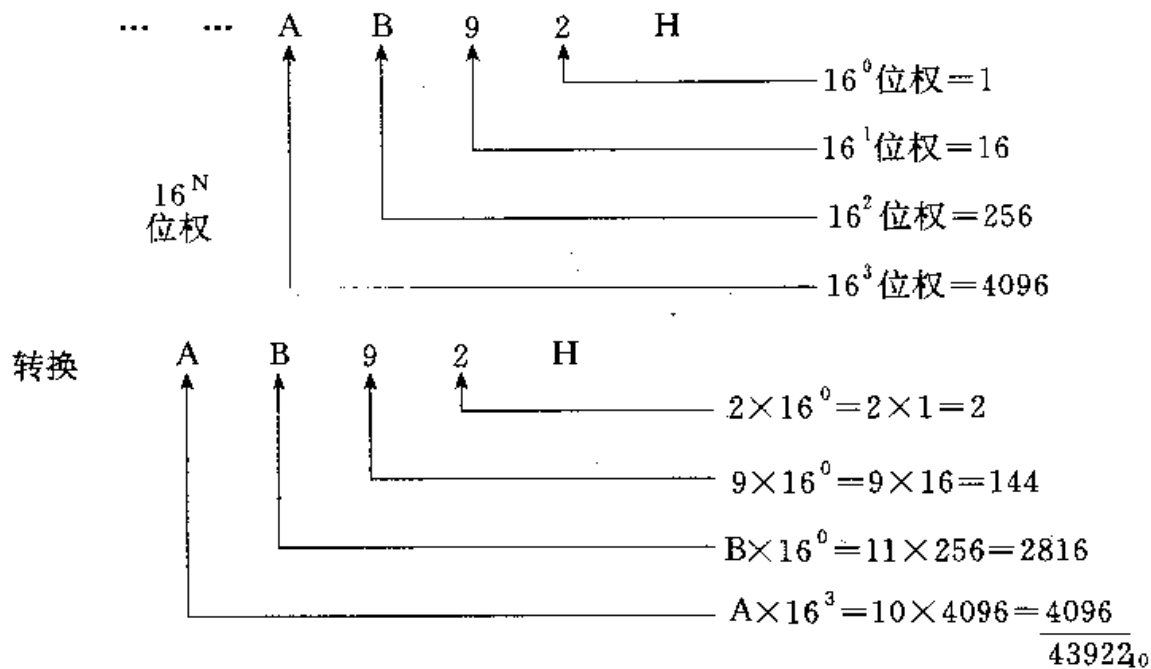


#### 2. 十六进制数表示法

十进制	二进制	十六进制
0	0000	0
1	0001	1
2	0010	2
3	0011	3
4	0100	4
5	0101	5
6	0110	6
7	0111	7
8	1000	8
9	1001	9
10	1010	A
11	1011	B
12	1100	C
13	1101	D
14	1110	E
15	1111	F

#### 3. 十六进制数转换成十进制

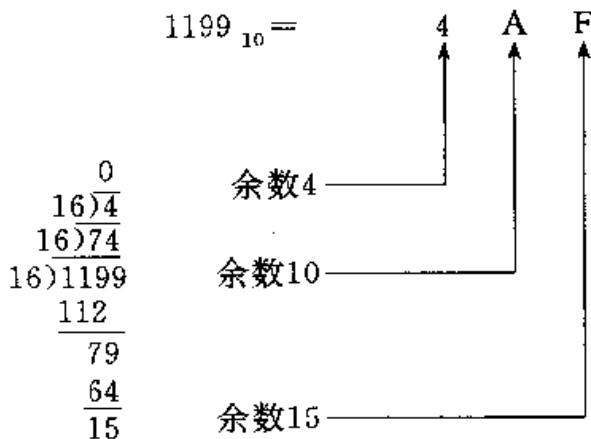




转换步骤:

- (1) 每个十六进制数乘上各位的位权。
- (2) 全部相加后得到对应的十进制数。

#### 4. 十进制数转换成十六进制



1. 十进制数除16。
2. 保存余数
3. 重复到商数为零
4. 以逆序排列余数得到对应的十六进制数

#### 5. 十六进制数的加减表

	操 作 数 2															
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	A	B	C	D	E	F
0	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	A	B	C	D	E	F
1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	A	B	C	D	E	F	10
2	2	3	4	5	6	7	8	9	A	B	C	D	E	F	10	11
3	3	4	5	6	7	8	9	A	B	C	D	E	F	10	11	12
4	4	5	6	7	8	9	A	B	C	D	E	F	10	11	12	13
5	5	6	7	8	9	A	B	C	D	E	F	10	11	12	13	14
6	6	7	8	9	A	B	C	D	E	F	10	11	12	13	14	15
7	7	8	9	A	B	C	D	E	F	10	11	12	13	14	15	16

续表

		操作数 2															
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	A	B	C	D	E	F
操作数 1	8	8	9	A	B	C	D	E	F	10	11	12	13	14	15	16	17
	9	9	A	B	C	D	E	F	10	11	12	13	14	15	16	17	18
	A	A	B	C	D	E	F	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
	B	B	C	D	E	F	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	1A
	C	C	D	E	F	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	1A	1B
	D	D	E	F	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	1A	1B	1C
	E	E	F	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	1A	1B	1C	1D
	F	F	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	1A	1B	1C	1D	1E

说明：1. 操作数 1 和操作数 2 相加，和数在表中两数垂直线交点上找。若和数为两位数，则两位代表进位。

2. 当表中一个操作数减去操作数 1，则差值在操作数 2 的对应列中去找。

#### (四) ASCII 码字符表

ASCII (美国标准信息交换码) 字符码

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	A	B	C	D	E	F
0NUL	SOH	STX	ETX	EOT	ENQ	ACK	BEL	BS	HT	LF	VT	FF	CR	SO	SI
1DLE	DC1	DC2	DC3	DC4	NAK	SYN	ETB	CAN	EM	SUB	ESC	FS	GS	RS	US
2SP	!	"	#	\$	%	&	'	(	)	*	+	,	-	.	/
30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	:	;	<	=	>	?
4@	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
5P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	[	\	]	^	_
6·	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o
7p	q	r	s	t	u	v	w	x	y	z	{		}	~	DEL

#### (五) Z80 指令表

八位传送类

指令符号	意义	标志						操作码			字节数 B	周期 M	时钟 T	说明
		C	Z	P/N	S	N	H	76	543	210				
LD r, r'	$r \leftarrow r'$							01	r	r'	1	1	4	$rr'$
LD r, n	$r \leftarrow n$							00	r	110	2	2	7	000 B 001 C
LD r, (HL)	$r \leftarrow (HL)$							01	r	110	1	2	7	010 D
LD r, (IX+d)	$r \leftarrow (IX+d)$							11	011	101	3	5	19	011 E 100 H 101 L
LD r, (IY+d)	$r \leftarrow (IY+d)$							11	111	101	3	5	19	110 (HL) 111 A
LD (HL), r	$(HL) \leftarrow r$							01	110	r	1	2	7	
LD (IX+d), r	$(IX+d) \leftarrow r$							01	011	101	3	5	19	
LD (IY+d), r	$(IY+d) \leftarrow r$							01	110	r	3	5	19	
LD (HL), n	$(HL) \leftarrow n$							00	110	110	2	3	10	

续表

指令符号	意义	标志						操作码			字节数 B	周期 M	时钟 T	说明
		C	Z	P/N	S	N	H	76	543	210				
LD (IX+d), n	(IX+d) ← n							11 00 ← d → ← n →	011 110	101 110	4	5	19	
LD (IY+d), n	(IY+d) ← n							11 00 ← d → ← n →	111 110	101 110	4	5	19	
LDA, (BC)	A ← (BC)							00	001	010	1	2	3	
LDA, (DE)	A ← (DE)							00	011	010	1	2	7	
LDA, (nn)	A ← (nn)							00 ← n → ← n →	111 n	010 →	3	4	13	
LD (BC), A	(BC) ← A							00	000	010	1	2	7	↑表示受 影响
LD (DE), A	(DE) ← A							00	010	010	1	2	7	
LD (nn), A	(nn) ← A							00 ← n → ← n →	110 n	010 →	3	4	13	
LDA, I	A ← I		↑ ↓	IFF	↑ ↓	0	0	11 01	101 010	101 111	2	2	9	
LDA, R	A ← R		↑ ↓	IFF	↑ ↓	0	0	11 01	101 011	101 111	2	2	9	
LDI, A	I ← A							11 01	101 000	101 111	2	2	9	
LDR, A	R ← A							11 01	101 001	101 111	2	2	9	
PUSH qq	(SP-2) ← qq <sub>L</sub> (SP-1) ← qq <sub>H</sub> SP ← SP-2							11	qq0	101	1	3	11	
PUSH IX	(SP-2) ← IX <sub>L</sub> (SP-1) ← IX <sub>H</sub> SP ← SP-2							11 11	011 100	101 101	2	4	15	
PUSH IY	(SP-2) ← IY <sub>L</sub> (SP-1) ← IY <sub>H</sub> SP ← SP-2							11 11	111 100	101 101	2	4	15	qq
POP qq	qq <sub>H</sub> ← (SP+1) qq <sub>L</sub> ← (SP) SP ← SP+2							11	qq0	001	1	3	10	00 BC 01 DE 10 HL 11 AF
POP IX	IX <sub>H</sub> ← (SP+1) IX <sub>L</sub> ← (SP) SP ← SP+2							11 11	011 100	101 001	2	4	14	
POP IY	IY <sub>H</sub> ← (SP+1) IY <sub>L</sub> ← (SP) SP ← SP+2							11 11	111 100	101 001	2	4	14	

十六位传送类

指令符号	意义	标志						操作码			字节数 B	周期 M	时钟 T	说明			
		C	Z	P/V	S	N	H	76	543	210							
LDdd, nn	dd ← nn							00	dd0	001	3	3	10	dd	BC DE HL SP		
								←	n	→						00	BC
								←	n	→						01	DE
								←	n	→						10	HL
LDIX, nn	IX ← nn							11	011	101	4	4	14	11	SP		
									00	100	001						
								←	n	→							
								←	n	→							
LDIY, nn	IY ← nn							11	111	101	4	4	14				
								0	100	001							
								←	n	→							
								←	n	→							
LDHL, (nn)	H ← (nn+1) L ← (nn)							00	101	010	3	5	16				
								←	n	→							
								←	n	→							
LDIX, (nn)	IXH ← (nn+1) IXL ← (nn)							11	011	101	4	5	20				
								00	101	010							
								←	n	→							
								←	n	→							
LDIY, (nn)	IYH ← (nn+1) IYL ← (nn)							11	111	101	4	6	20				
								00	101	010							
								←	n	→							
								←	n	→							
LD (nn), dd	(nn+1) ← ddH (nn) ← ddL							11	101	101	4	6	20				
								01	dd0	011							
								←	n	→							
								←	n	→							
LD (nn), HL	(nn+1) ← H (nn) ← H							00	100	010	3	5	16				
								←	n	→							
								←	n	→							
LD (nn), IX	(nn+1) ← IXH (nn) ← IXL							11	011	101	4	5	20				
								00	100	010							
								←	n	→							
								←	n	→							
LD (nn), IY	(nn+1) ← IYH (nn) ← IYL							11	111	101	4	6	20				
								00	100	010							
								←	n	→							
								←	n	→							
LDdd, (nn)	ddH ← (nn+1) ddL ← (nn)							11	101	101	4	6	20				
								00	dd1	011							
								←	n	→							
								←	n	→							
LDSP, HL	SP ← HL							11	111	101	1	1	6				
LDSP, IX	SP ← IX							11	011	101	2	2	10				
									11	111	001						
LDSP, IY	SP ← IY							11	111	101	2	2	10				
								11	100	001							

交换、数据块传送和查找类

指令符号	意义	标志						操作码			字节数 B	周期 H	时钟 T	说明
		C	Z	P/V	S	N	H	76	543	210				
EZ DE, HL	DE ↔ HL							11	101	011	1	1	4	
EX AF, AF'	AF ↔ AF'							00	001	000	1	1	4	
EXX	BC ↔ BC' DE ↔ DE' HL ↔ HL'							11	011	001	1	1	4	
EX(SP), HL	H ↔ (SP+1), L → (SP)							11	100	011	1	5	19	
EX(SP), IX	IX <sub>H</sub> ↔ (SP+1)							11	011	101	2	6	23	
	IX <sub>L</sub> ↔ (SP)							11	100	011				
EX(SP), IY	IY <sub>H</sub> ↔ (SP+1)							11	111	101	2	6	23	
	IY <sub>L</sub> ↔ (SP)							11	100	011				
LDI	(DE) ↔ (HL) DE ← DE+1 HL ← HL+1 BC ← BC-1			↑1		0	0	11	101	101	2	4	16	
LDIR	(DE) ← (HL)			0		0	0	11	101	101	2	5	21	BC ≠ 0 BC = 0
	DE ← DE+1							10	110	000	2	4	16	
	HC ← HC+1													
	BC ← BC-1 重复至 BC=0													
LDD	(DE) ← (HL)			↓2		0	0	11	101	101	2	4	16	
	DE ← DE-1							10	101	000				
	HL ← HC-1													
	BC ← BC-1													
LDDR	(DE) ← (HL)			0		0	0	11	101	101	2	5	21	BC ≠ 0 BC = 0
	DE ← DE-1							10	111	000	2	4	16	
	HL ← HL-1													
	BC ← BC-1 重复至 BC=0													
CPI	A - (HL)		↑2	↑1	↑	1	↑	11	101	101	2	4	16	
	HL ← HL+1							10	100	001				
	BC ← BC-1													
CPIR	A - (HL)		↑2	↑1	↑	1	↑	11	101	101	2	5	21	BC ≠ 0 且 A ≠ (HL) BC = 0 或 A = (HL)
	HL ← HL+1							10	110	001	2	4	16	
	BC ← BC-1													
	重复至 A = (HL) 或 BC = 0													
CPD	A - (HL)		↑2	↑1	↑	1	↑	11	101	101	2	4	16	
	HL ← HL-1							10	101	001				
	BC ← BC-1													
CPDR	A - (HL)		↑2	↑1	↑	1	↑	11	101	101	2	5	21	BC ≠ 0 且 A ≠ (HL) BC = 0 或 A = (HL)
	HL ← HL-1							10	111	001	2	4	16	
	BC ← BC-1													
	重复至 BC=0 或 A = (HL)													

1. BC-1=0 时 P/V=0, 否则 P/V=1

2. A=(HL) 时 Z=1, 否则 Z=0

八位算术运算和逻辑运算类

指令符号	意义	标志						操作码			字节数 B	周期 M	时钟 T	说明	
		C	Z	P/V	S	N	H	76	543	210					
ADD r	$A \leftarrow A+r$	↑	↑	V	↑	0	↑	10	000	r	1	1	4	r	
ADDn	$A \leftarrow A+n$	↑	↑	V	↑	0	↑	11	000	110	2	2	7	000 001 010 011 100 101 110 111	B C D E H L (HL) A
								←	n	→					
ADD(HL)	$A \leftarrow A+(HL)$	↑	↑	V	↑	0	↑	10	000	110	1	2	7		
ADD(IX+d)	$A \leftarrow A+(IX+d)$	↑	↑	V	↑	0	↑	11	011	101	3	5	19		
								10	000	110					
								←	d	→					
ADD(IY+d)	$A \leftarrow A+(IY+d)$	↑	↑	V	↑	0	↑	11	111	101	3	5	10	S是r,n(HL) (IX+d) (IY+d)之一	
								10	000	110					
								←	d	→					
ADC S	$A \leftarrow A+S+cy$	↑	↑	V	↑	0	↑		001					S是r,n(HL) (IX+d) (IY+d)之一	
SUB S	$A \leftarrow A-S$	↑	↑	V	↑	1	↑		001						
SBC S	$A \leftarrow A-S-cy$	↑	↑	V	↑	1	↑		011						
AND S	$A \leftarrow A \wedge S$	0	↑	P	↑	0	0		100						
OR S	$A \leftarrow A \vee S$	0	↑	P	↑	0	0		110						
XOR S	$A \leftarrow A \oplus S$	0	↑	P	↑	0	0		101						
CP S	$A-S$	↑	↑	V	↑	1	↑		111						
INC r	$r \leftarrow r+1$		↑	V	↑	0	↑	00	r		1	1	4		
INC (HL)	$(HL) \leftarrow (HL)+1$		↑	V	↑	0	↑	00	010	100	1	3	11		
INC(IX+d)	$(IX+d) \leftarrow (IX+d)+1$		↑	V	↑	0	↑	11	011	101	3	6	23		
								00	110	100					
								←	d	→					
INC(IY+d)	$(IY+d) \leftarrow (IY+d)+1$		↑	V	↑	0	↑	11	111	111	3	6	23	d是r,(HL), (IX+d)或 (IY+d)之一 同INC	
								00	110	100					
								←	d	→					
DEC d			↑	V	↑	1	↑			101					

十六位算术运算类

指令符号	意义	标志						操作码			字节数 B	周期 M	时钟 T	说明	
		C	Z	P/V	S	N	H	76	543	210					
ADD HL,SS	HL←HL+SS	↑ ↓				0	↑ ↓ <sup>1)</sup>	00	SS1	001	1	3	11	SS	
ADC HL,SS	HL→HL+SS+cy	↑ ↓	↑ ↓	V	↑ ↓	0	↑ ↓ <sup>1)</sup>	11 01	101 SS1	101 010	2	4	15	00 01 10 11	BC DE HL SP
SBC HL,SS	HL←HL-SS-cy	↑ ↓	↑ ↓	V	↑ ↓	1	↑ ↓ <sup>1)</sup>	11 01	101 SS1	101 010	2	4	15		
ADD IY,PP	IY←IY+PP	↑ ↓				0	↑ ↓ <sup>1)</sup>	11 00	011 PP1	101 001	2	4	15	PP	
ADD IY,rr	IY←IY+rr	↑ ↓				0	↑ ↓ <sup>1)</sup>	11 00	111 111	101 001	2	4	15	00 01 10 11	BC DE IX XP
INC SS	SS←SS+1							00	SS0	011	1	1	6		
INC IX	IX←IX+1							11 00	011 100	101 011	2	2	10		
INC IY	IY←IY+1							11 00	111 100	101 011	2	2	10	rr	BC DE IY SP
DEC SS	SS←SS-1							00	SS1	011	1	1	6		
DEC IX	IX←IX-1							11 00	011 101	101 011	2	2	10		
DEC IY	IY←IY-1							11 00	111 101	101 011	2	2	10		

1)加法时是第十一位,产生的进位,减法时是从第十二位的借位。

通用运算和控制类

指令符号	意义	标志						操作码			字节数 B	周期 M	时钟 T	说明	
		C	Z	P/V	S	N	H	76	543	210					
DAA	十进调整	↑ ↓	↑ ↓	P	↑ ↓		↑ ↓	00	100	111	1	1	4		
CPL	A← $\bar{A}$					1	1	00	101	111	1	1	4		
NEG	A←0-A			V		1		11 01	101 000	101 100	2	2	8		×表示不定
CCF	cy← $\bar{cy}$	↑ ↓				0	×	00	111	111	1	1	4		
SCF	cy←1	1				0	0	00	110	111	1	1	4		
NOP								00	000	000	1	1	4		
HALT								01	110	110	1	1	4		
DI	IFF←0							11	110	011	1	1	4		
EI	IFF←1							11	111	011	1	1	4		
IM0	置0中断方式							11 01	101 000	101 110	2	2	8		
IM1	置1中断方式							11 01	101 010	101 110	2	2	8		
IM2	置2中断方式							11 01	101 011	101 110	2	2	8		

循环和移位指令类

指令符号	意义	标志						操作码			字节数 B	周期 M	时钟 T	说明
		C	Z	P/V	S	N	H	76	543	210				
RLC A		↑				0	0	00	000	111	1	1	4	A 循环左移
RL A		↑				0	0	00	010	111	1	1	4	ACY 循环左移
RRC A		↑				0	0	00	001	111	1	1	4	A 循环右移
RR A		↑				0	0	00	011	111	1	1	4	ACY 循环右移
RLC r		↑	↑	P	↑	0	0	00	000	r	2	2	8	r
RLC (HL)		↑	↑	P	↑	0	0	00	000	110	2	4	15	000 B 001 C 010 D 011 E 100 H 101 L 110 (HL) 111 A
RLC (IX+d)		↑	↑	P	↑	0	0	11 11 ← c →	011 001 c	101 011 →	4	6	23	
RLC (IY+d)		↑	↑	P	↑	0	0	11 11 ← d →	111 001 d	101 011 →	4	6	23	
RLS		↑	↑	P	↑	0	0	11 00	001 010	011 S				
RRC S		↑	↑	P	↑	0	0	11 00	001 001	011 S				
RR S		↑	↑	P	↑	0	0	11 00	001 011	011 S				
SLA S		↑	↑	P	↑	0	0	11 00	001 100	011 S				
SRA S		↑	↑	P	↑	0	0	11 00	001 101	011 S				
SRL S		↑	↑	P	↑	0	0	11 00	001 111	011 S				
RLD		↑	↑	P	↑	0	0	11 01	101 101	101 111	2	5	18	数字循环左移
RRD		↑	↑	P	↑	0	0	11 01	101 100	101 111	2	5	18	数字循环右移



位置 1、位置 0 和位测试类

指令符号	意义	标志						操作码			字节数 B	周期 M	时钟 T	说明	
		C	Z	P/N	S	N	H	76	543	210					
BIT b,r	$Z \leftarrow r_b$		↑ ↓	×	×	0	1	11 01	001 b	011 r	2	2	8	r	
BIT b,(HL)	$Z \leftarrow \overline{(HL)}_b$		↑ ↓	×	×	0	1	11 01	001 b	011 110	2	3	12	000 001 010 011 100 101 110 111	B C D E H L (HL) A
BIT b,(IX+b)	$Z \leftarrow \overline{(IX+d)}_b$		↑ ↓	×	×	0	1	11 11 ←	011 001 d	101 011 →	4	5	20		
BIT b,(IY+d)	$Z \leftarrow \overline{(IY+d)}_b$		↑ ↓	×	×	0	1	11 11 ←	111 001 d	101 011 →	4	5	20		
SET b,r	$r_b \leftarrow 1$							11 11	001 b	011 r	2	2	8	b	
SET b,(HL)	$(HL)_b \leftarrow 1$							11 11	001 b	011 110	2	4	15	000 001 010 011 100 101 110 111	0 1 2 3 4 5 6 7
SET b,(IX+d)	$(IX+d)_b \leftarrow 1$							11 11 ←	011 001 d	101 101 →	4	6	23		
SET b,(IY+d)	$(IY+d)_b \leftarrow 1$							11 11 ←	111 001 d	101 011 →	4	6	23		
RES b,r	$r_b \leftarrow 0$							11 10	001 b	011 110	2	2	8		
RES b,(HL)	$(HL)_b \leftarrow 0$							11 10	001 b	011 110	2	4	15		
RES b,(IX+d)	$(IX+d)_b \leftarrow 0$							11 11 ←	011 001 d	101 011 →	4	6	23		
RES b,(IY+d)	$(IY+d)_b \leftarrow 0$							11 11 ←	111 001 d	101 011 →	4	6	23		

转移、转子和返回类

指令符号	意 义	标 志						操作码			字节数 B	周期 M	时钟 T	说 明	
		C	Z	P/V	S	N	H	76	543	210					
JP nn	PC←nn							11 000 011	3	3	10				
								← n →							
								← n →							
JP CC,nn	条件成立 PC←nn 否则 PC←PC+3							11 cc 010	3	3	10	000	NZ		
								← n →				001	Z		
								← n →				010	NC		
												011	C		
												100	PO		
												101	PE		
												110	P		
												111	M		
JR e	PC←PC+e							00 011 000	2	3	12				
								← e-2 →							
JR C,e	C=0,PC←PC+2 C=1,PC←PC+e							00 111 000	2	2	7				
								← e-2 →	2	3	12				
JR NC,e	C=1,PC←PC+2 C=0,PC←PC+e							00 110 000	2	2	7				
								← e-2 →	2	3	12				
JRZ,e	Z=0,PC←PC+2 Z=1,PC←PC+e							00 101 000	2	2	7				
								← e-2 →	2	3	12				
JR NZ,e	Z=1,PC←PC+2 z=0,PC←PC+e							00 100 000	2	2	7				
								← e-2 →	2	3	12				
JP(HL)	PC←(HL)							11 101 001	1	1	4				
JP(IX)	PC←IX							11 011 101	2	2	8				
								11 101 001							
JP(IY)	PC←IY							11 111 101	2	2	8				
								11 101 001							
DJNZ e	B←B-1 B=0 PC←PC+2 B≠0 PC←PC+e							00 010 000	2	2	8				
								← e-2 →	2	3	13				
CALL nn	(SP-2)←PCH (SP-1)←PC PC←nn SP←SP-2							11 001 101	3	5	17				
								← n →							
								← n →							
CALL cc nn	条件成立 CALL nn 否则 PC←PC+3							11 CC 100	3	5	17	t	P		
								← n →				000	00H		
								← n →	3	3	10	001	08H		
												010	10H		
												011	18H		
												100	20H		
												101	28H		
												110	30H		
												111	38H		
RET	PC <sub>L</sub> ←(SP) PC <sub>H</sub> ←(SP+1) SP←SP+2							11 001 001	1	3	10				
RET cc	条件成立 RET 否则 PC←PC+1							11 CC 000	1	1	5				
RETI	从中断子程序返回							11 101 101	2	4	14				
								01 001 101							
RETN	从非屏蔽中断返回							11 101 101	2	4	14				
								01 000 101							
RST P	(SP-1)←PC <sub>H</sub> (SP-2)←PC <sub>L</sub> SP←SP-2 PC <sub>H</sub> ←0 PC <sub>L</sub> ←P							11 t 111	1	3	11				

### 输入输出类

指令符号	意义	标志						操作码 76 543 210	字节 数 B	周期 M	时钟 T	说明
		C	Z	P/V	S	N	H					
IN A, (n)	A ← (n)							11 011 011 → n →	2	3	10	n → A <sub>0</sub> ~A <sub>7</sub> A → A <sub>8</sub> ~A <sub>15</sub>
IN r, (C)	r ← (C)		↑	P	↑	0	↑	11 101 101 01 y 000	2	3	11	C → A <sub>0</sub> ~A <sub>7</sub> B → A <sub>8</sub> ~A <sub>15</sub>
INI	(HL) ← (C) B ← B-1 LH ← HL-1		↑	×	×	1	×	11 101 101 10 100 010	2	4	15	C → A <sub>0</sub> ~A <sub>7</sub> B → A <sub>8</sub> ~A <sub>15</sub> B ≠ 0 至 B = 0
INIR	(HL) ← (C) B ← B-1 HL ← HL-1 重复至 B=0		1	×	×	1	×	11 101 101 10 110 010	2 2	5 4	20 15	C → A <sub>0</sub> ~A <sub>7</sub> B → A <sub>8</sub> ~A <sub>15</sub> B ≠ 0 至 B = 0
IND	(HL) ← (C) B ← B-1 HL ← HL-1		↑	×	×	1	×	11 101 101 10 101 010	2	4	15	C → A <sub>0</sub> ~A <sub>7</sub> B → A <sub>8</sub> ~A <sub>15</sub> B ≠ 0 至 B = 0
INDR	(HL) ← (C) B ← B-1 HL ← HL-1 重复至 B=0		1	×	×	1	×	11 101 101 10 111 010	2 2	5 4	20 15	C → A <sub>0</sub> ~A <sub>7</sub> B → A <sub>8</sub> ~A <sub>15</sub> B ≠ 0 至 B = 0
OUT(n), A	(n) ← A							11 010 011 ← n →	2	3	11	n → A <sub>0</sub> ~A <sub>7</sub> A → A <sub>8</sub> ~A <sub>15</sub>
OUT(C), r	(C) ← r							11 101 101 01 r 001	2	3	12	C → A <sub>0</sub> ~A <sub>7</sub> B → A <sub>8</sub> ~A <sub>15</sub>
OUTI	(C) ← (HL) B ← B-1 HL ← HL+1		↑	×	×	1	×	11 101 101 10 100 011	2	4	15	C → A <sub>0</sub> ~A <sub>7</sub> B → A <sub>8</sub> ~A <sub>15</sub> B ≠ 0 至 B = 0
OTIR	(C) ← (HL) B ← B-1 HL ← HL+1 重复至 B=0		1	×	×	1	×	11 101 101 10 110 011	2 2	5 4	10 15	C → A <sub>0</sub> ~A <sub>7</sub> B → A <sub>8</sub> ~A <sub>15</sub> B ≠ 0 至 B = 0
OUTD	(C) ← (HL) B ← B-1 HL ← HL-1		↑	×	×	1	×	11 101 101 10 101 011	2	4	15	C → A <sub>0</sub> ~A <sub>7</sub> B → A <sub>8</sub> ~A <sub>15</sub> B ≠ 0 至 B = 0
OTDR	(C) ← (HL) B ← B-1 HL ← HL-1 重复至 B=0		1	×	×	1	×	11 101 101 10 111 011	2 2	5 4	20 15	C → A <sub>0</sub> ~A <sub>7</sub> B → A <sub>8</sub> ~A <sub>15</sub> B ≠ 0 至 B = 0

1. B-1=0 时 Z=1 否则 Z=0

#### (六) MCS-51 系列单片机指令表

助记符	操作数	代码
ACALL	addr 11	* 1 addr7~0
ADD	A, Rn	28~2F
ADD	A, direct	25 direct
ADD	A, @Ri	26~27
ADD	A, #data	24 data
ADDC	A, Rn	38~3F
ADDC	A, direct	35 direct

ADDC	A, @Ri	36~37
ADDC	A, #data	34 data
AJMP	addr 11	$\Delta 1$ addr7~0
ANL	A, Rn	58~5F
ANL	A, direct	55 direct
ANL	A, @Ri	56~57
ANL	A, #data	54 data
ANL	direct, A	52 direct
ANL	direct, #data	53 direct data
CJNE	A, direct, rel	B5 direct, rel
CJNE	A, #data, rel	B4 data, rel
CJNE	Rn, #data, .el	B8~BF data, rel
CJNE	@Ri, #data, rel	B6~B7 data, rel
CLR	A	E4
CLR	C	C3
CLR	bit	C2bit
CPL	A	F4
CPL	C	B3
CPL	bit	B2 bit
DA	A	D4
DEC	A	14
DEC	Rn	18~1F
DEC	direct	15direct
DEC	@Ri	16~17
DIV	AB	84
DJNZ	Rn, rel	D8~DF rel
DJNZ	direct, rel	D5 direct rel
INC	A	04
INC	Rn	08~0F
INC	direct	05 direct
INC	@Ri	06~07
INC	DPTR	A3
JB	bit, rel	20 bit rel
JBC	bit, rel	10 bit rel
JC	rel	40 rel
JMP	@A+DPTR	73
JNB	,bit, rel	30 bit rel
JNC	rel	50 rel

JNZ	rel	70 rel
JZ	rel	60 rel
LCALL	addr 16	12 addr15~8 addr7~0
LJMP	addr16	02 addr15~8 addr6~0
MOV	A,Rn	E8~EF
MOV	A,direct	E5 direct
MOV	A,@Ri	E6~E7
MOV	A,#data	74data
MOV	Rn,A	F8~FF
MOV	Rn,direct	A8~FF direct
MOV	Rn,#data	78~7F data
MOV	direct,A	F5 direct
MOV	direct,Rn	88~8F direct
MOV	direct,direct	85 direct direct
MOV	direct,@Ri	86~87direct
MOV	direct,#data	75 direct data
MOV	@Ri,A	F6~F7
MOV	@Ri,direct	A6~A7 direct
MOV	@Ri,#data	76~77data
MOV	C,bit	A2 bit
MOV	bit,C	92 bit
MOV	DPTR,#data16	90data15~8 data7~0
MOVC	A,@A+DPTR	93
MOVC	A,@A+PC	83
MDVX	A,@Ri	E2~E3
MOVX	A,@DPTR	E0
MOVX	@Ri,A	F2~F3
MOVX	@DPTR,A	F0
MUL	AB	A4
NOP		00
ORL	A,Rn	48~4F
ORL	A,direct	45direct
ORL	A,@Ri	46~47
ORL	A,#data	44data
ORL	direct,A	42 direct
ORL	direct,#data	43direct,data
ORL	C,bit	72 bit
ORL	C,/bit	A0 bit

POP	direct	D0 direct
PUSH	direct	C0 direct
RET		22
RETI		32
RL	A	23
RLC	A	33
RR	A	03
RRC	A	13
SETB	C	D3
SETB	bit	D2 bit
SJMP	rel	80 rel
SUBB	A, Rn	98~9F
SUBB	A, direct	95 direct
SUBB	A, @Ri	96~97
SUBB	A, #data	94 data
SWAP	A	C4
XCH	A, Rn	C8~CF
XCH	A, direct	C5 direct
XCH	A, @Ri	C6~C7
XCHD	A, @Ri	D6~D7
XRL	A, Rn	68~6F
XRL	A, direct	65 direct
XRL	A, @Ri	66~67
XRL	A, #data	64 data
XRL	direct, A	62 direct
XRL	direct, #data	63 direct data

注: \* = a<sub>10</sub>a<sub>9</sub>a<sub>8</sub>1

Δ = a<sub>10</sub>a<sub>9</sub>a<sub>8</sub>0

## 参 考 文 献

- [1] 上海市电气自动化研究所·机床的数字控制与计算机应用·机械工业出版社, 1982
- [2] 陈瑜编著·机电一体化技术·机械工业出版社, 1987
- [3] 谢寄石著·机电系统动力学·国防工业出版社, 1989
- [4] 杨叔子、杨克冲主编·机械工程控制基础·华中工学院出版社, 1984
- [5] 周明德等编著·微型计算机接口电路及应用·清华大学出版社, 1991
- [6] 王长胤等编·微型计算机原理及其应用·湖北科学技术出版社, 1984
- [7] 林其骏主编·微机控制机械系统设计·上海科学技术出版社, 1991
- [8] 机床设计手册编写组编·机床设计手册 3·机械工业出版社, 1986
- [9] 卢金鼎编著·机电一体化设计基础·西北轻工业学院, 1989
- [10] 村田裕·微型计算机与传感器的接口技术·国防工业出版社, 1986
- [11] 箱守京次郎等·机械电子学·上海科学技术出版社, 1986
- [12] メカトロニクス直支元为机械设计技术(特集)·(日)机械设计 Vol. 28, No. 1 Jan, 1984
- [13] メカトロ要素技術の设计(特集), 日《机械设计》Vol. 28, No. 3 Mar, 1984
- [14] 谷腰欣司 DCモータの制御回路设计·CQ 出版社, 1986
- [15] サーボモータのマイコン制御技術·日《自动化技术》Vol. 13, No. 12 工业调查会