

21 世纪全国应用型本科机械系列实用规划教材

机床电气控制技术

主 编	张万奎	
副主编	徐祖华	孙 晓
	罗雪莲	
参 编	杨福合	毛美姣
	陈 飞	
主 审	黎福海	

内 容 简 介

全书共分 8 章, 内容包括电动机的工作原理及特性、电动机的基本电气控制线路、金属切削机床电气控制线路、继电器-接触器控制线路设计基础、可编程控制器、变流技术基础、直流调速系统和交流调速系统。

本书从电动机的工作原理和基本特性入手, 介绍了电气元件在电力拖动自动控制系统中的应用, 课程体系新, 内容实用, 重点突出。

本书可作为机械设计制造及其自动化专业、机械电子工程专业本科生的教材, 也可作为高职高专相关专业的教材, 还可供从事机电一体化工作的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

机床电气控制技术/张万奎主编. —北京: 中国林业出版社; 北京大学出版社, 2006.8

(21 世纪全国应用型本科机械系列实用规划教材)

ISBN 7-5038-4433-7

I. 机… II. 张… III. 数控机床—电气控制—高等学校—教材 IV. TG659

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 076942 号

书 名: 机床电气控制技术

著作责任者: 张万奎 主编

策 划 编 辑: 李昱涛

责 任 编 辑: 郭穗娟 杜建玲

标 准 书 号: ISBN 7-5038-4433-7

出 版 者: 中国林业出版社(地址: 北京市西城区德内大街刘海胡同 7 号 邮编: 100009)

<http://www.cfph.com.cn> E-mail: cfphz@public.bta.net.cn

电话: 编辑部 66170109 营销中心: 66187711

北京大学出版社(地址: 北京市海淀区成府路 205 号 邮编: 100871)

<http://www.pup.cn> <http://www.pup6.com> E-mail: pup_6@163.com

电话: 邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62750667 出版部 62754962

印 刷 者:

发 行 者: 北京大学出版社 中国林业出版社

经 销 者: 新华书店

787 毫米×1092 毫米 16 开本 18.25 印张 417 千字

2006 年 8 月第 1 版 2006 年 8 月第 1 次印刷

定 价: 26.00 元

丛书总序

殷国富*

机械是人类生产和生活的基本工具要素之一，是人类物质文明最重要的一个组成部分。机械工业担负着向国民经济各部门，包括工业、农业和社会生活各个方面提供各种性能先进、使用安全可靠的技术装备的任务，在国家现代化建设中占有举足轻重的地位。20 世纪 80 年代以来，以微电子、信息、新材料、系统科学等为代表的新一代科学技术的发展及其在机械工程领域中的广泛渗透、应用和衍生，极大地拓展了机械产品设计制造活动的深度和广度，改变了现代制造业的产品设计方法、产品结构、生产方式、生产工艺和设备以及生产组织模式，产生了一大批新的机械设计制造方法和制造系统。这些机械方面的新方法和系统的主要技术特征表现在以下几个方面：

(1) 信息技术在机械行业的广泛渗透和应用，使得现代机电产品已不再是单纯的机械构件，而是由机械、电子、信息、计算机与自动控制等集成的机电一体化产品，其功能不仅限于加强、延伸或取代人的体力劳动，而且扩大到加强、延伸或取代人的某些感官功能与大脑功能。

(2) 随着设计手段的计算机化和数字化，CAD/CAM/CAE/PDM 集成技术和软件系统得到广泛使用，促进了产品创新设计、并行设计、快速设计、虚拟设计、智能设计、反求设计、广义优化设计、绿色产品设计、面向全寿命周期设计等现代设计理论和技术方法的不断发展。机械产品的设计不只是单纯追求某项性能指标的先进和高低，而是注重综合考虑质量、市场、价格、安全、美学、资源、环境等方面的影响。

(3) 传统机械制造技术在不断吸收电子、信息、材料、能源和现代管理等方面成果的基础上形成了先进制造技术，并将其综合应用于机械产品设计、制造、检测、管理、销售、使用、服务的机械产品制造全过程，以实现优质、高效、低耗、清洁、灵活的生产，提高对动态多变的市场的适应能力和竞争能力。

(4) 机械产品加工制造的精密化、快速化，制造过程的网络化、全球化得到很大的发展，涌现出 CIMS、并行工程、敏捷制造、绿色制造、网络制造、虚拟制造、智能制造、大规模定制等先进生产模式，制造装备和制造系统的柔性可与重组已成为 21 世纪制造技术的显著特征。

(5) 机械工程的理论基础不再局限于力学，制造过程的基础也不只是设计与制造经验及技艺的总结。今天的机械工程学科比以往任何时候都更紧密地依赖诸如现代数学、材料科学、微电子技术、计算机信息科学、生命科学、系统论与控制论等多门学科及其最新成就。

上述机械科学与工程技术特征和发展趋势表明，现代机械工程学科越来越多地体现着知识经济的特征。因此，加快培养适应我国国民经济建设所需要的高综合素质机械工程学科人才的意义十分重大、任务十分繁重。我们必须通过各种层次和形式的教育，培养出适应世界机械工业发展潮流与我国机械制造业实际需要的技术人才与管理人才，不断推动我国机械科学与工程技术进步。

为使机械工程学科毕业生的知识结构由较专、较深、适应性差向较通用、较广泛、适

*殷国富教授：现为教育部机械学科教学指导委员会委员，现任四川大学制造科学与工程学院院长

应性强方向转化,在教育部的领导与组织下,1998年对本科专业目录进行了第3次大的修订。调整后的机械大类专业变成4类8个专业,它们是:机械类4个专业(机械设计制造及其自动化、材料成型及控制工程、过程装备与控制、工业设计);仪器仪表类1个专业(测控技术与仪器);能源动力类2个专业(热能与动力工程、核工程与核技术);工程力学类1个专业(工程力学)。此外还提出了面向更宽的引导性专业,即机械工程及自动化。因此,建立现代“大机械、全过程、多学科”的观点,探讨机械科学与工程技术学科专业创新人才的培养模式,是高校从事制造学科教学的教育工作者的责任;建立培养富有创新能力人才的教学体系和教材资源环境,是我们努力的目标。

要达到这一目标,进行适应现代机械学科发展要求的教材建设是十分重要的基础工作之一。因此,组织编写出版面向大机械学科的一系列教材就显得很有意义和十分必要。北京大学出版社和中国林业出版社的领导和编辑们通过对国内大学机械工程学科教材实际情况的调研,在与众多专家学者讨论的基础上,决定面向机械工程学科类专业的学生出版一套系列教材,这是促进高校教学改革发展的重要决策。按照教材编审委员会的规划,本系列教材将逐步出版。

本系列教材是按照高等学校机械学科本科专业规范、培养方案和课程教学大纲的要求,合理定位,由长期在教学第一线从事教学工作的教师立足于21世纪机械工程学科发展的需要,以科学性、先进性、系统性和实用性为目标进行编写,以适应不同类型、不同层次的学校结合学校实际情况的需要。本系列教材编写的特色体现在以下几个方面:

(1) 关注全球机械科学与工程技术学科发展的大背景,建立现代大机械工程学科的新理念,拓宽理论基础和专业知识,特别是突出创造能力和创新意识。

(2) 重视强基础与宽专业知识面的要求。在保持较宽学科专业知识的前提下,在强化产品设计、制造、管理、市场、环境等基础理论方面,突出重点,进一步密切学科内各专业知识面之间的综合内在联系,尽快建立起系统性的知识体系结构。

(3) 学科交叉与综合的观念。现代力学、信息科学、生命科学、材料科学、系统科学等新兴学科与机械学科结合的内容在系列教材编写中得到一定的体现。

(4) 注重能力的培养,力求做到不断强化自我的自学能力、思维能力、创造性地解决问题的能力以及不断自我更新知识的能力,促进学生向着富有鲜明个性的方向发展。

总之,本系列教材注意了调整课程结构,加强学科基础,反映系列教材各门课程之间的联系和衔接,内容合理分配,既相互联系又避免不必要的重复,努力拓宽知识面,在培养学生的创新能力方面进行了初步的探索。当然,本系列教材还需要在内容的精选、音像电子课件、网络多媒体教学等方面进一步加强,使之能满足普通高等院校本科教学的需要,在众多的机械类教材中形成自己的特色。

最后,我要感谢参加本系列教材编著和审稿的各位老师所付出的大量卓有成效的辛勤劳动,也要感谢北京大学出版社和中国林业出版社的领导和编辑们对本系列教材的支持和编审工作。由于编写的时间紧、相互协调难度大等原因,本系列教材还存在一些不足和错漏。我相信,在使用本系列教材的教师和学生的关心和帮助下,不断改进和完善这套教材,使之在我国机械工程类学科专业的教学改革和课程体系建设中起到应有的促进作用。

《21世纪全国应用型本科犬机械系列实用规划教材》

专家编审委员会

名誉主任 胡正寰*

主任委员 殷国富

副主任委员 (按拼音排序)

戴冠军 江征风 李郝林 梅 宁 任乃飞

王述洋 杨化仁 张成忠 张新义

顾问 (按拼音排序)

傅水根 姜继海 孔祥东 陆国栋

陆启建 孙建东 张 金 赵松年

委员 (按拼音排序)

方 新 郭秀云 韩健海 洪 波

侯书林 胡如风 胡亚民 胡志勇

华 林 姜军生 李自光 刘仲国

柳舟通 毛 磊 孟宪颐 任建平

陶健民 田 勇 王亮申 王守城

魏 建 魏修亭 杨振中 袁根福

曾 忠 张伟强 郑竹林 周晓福

*胡正寰：北京科技大学教授，中国工程院机械与运载工程学部院士

《21世纪全国应用型本科机械系列实用规划教材》

参编学校名单（按拼音排序）

- | | | | |
|----|----------|----|------------|
| 1 | 安徽建筑工业学院 | 30 | 黄石理工学院 |
| 2 | 安徽科技学院 | 31 | 吉林工程技术师范学院 |
| 3 | 安徽农业大学 | 32 | 江苏大学 |
| 4 | 北华大学 | 33 | 九江学院 |
| 5 | 北京建筑工程学院 | 34 | 军事交通学院 |
| 6 | 北京联合大学 | 35 | 兰州理工大学 |
| 7 | 长春大学 | 36 | 辽宁工程技术大学 |
| 8 | 长沙理工大学 | 37 | 鲁东大学 |
| 9 | 重庆工学院 | 38 | 内蒙古工业大学 |
| 10 | 重庆交通学院 | 39 | 南华大学 |
| 11 | 德州学院 | 40 | 南昌航空工业学院 |
| 12 | 东北林业大学 | 41 | 青岛科技大学 |
| 13 | 东华理工学院 | 42 | 山东理工大学 |
| 14 | 福建工程学院 | 43 | 上海工程技术大学 |
| 15 | 甘肃农业大学 | 44 | 上海水产大学 |
| 16 | 桂林工学院 | 45 | 上海理工大学 |
| 17 | 河北大学 | 46 | 沈阳大学 |
| 18 | 河北建筑工程学院 | 47 | 四川农业大学 |
| 19 | 河北农业大学 | 48 | 潍坊学院 |
| 20 | 河南工业大学 | 49 | 武汉工业学院 |
| 21 | 河南科技学院 | 50 | 武汉科技大学 |
| 22 | 湖北汽车工业学院 | 51 | 武汉理工大学 |
| 23 | 湖南工程学院 | 52 | 湘潭大学 |
| 24 | 湖南工学院 | 53 | 徐州师范大学 |
| 25 | 湖南工业大学 | 54 | 郑州航空工业管理学院 |
| 26 | 湖南理工学院 | 55 | 中北大学 |
| 27 | 江西理工大学 | 56 | 中国农业大学 |
| 28 | 华北水利水电学院 | 57 | 中南林业科技大学 |
| 29 | 华东交通大学 | | |

目 录

概述	1	2.1.2 电气控制图	45
第 1 章 电动机的工作原理及特性	4	2.2 电动机的启动控制线路	47
1.1 直流电动机的工作原理及特征	4	2.3 电动机的启动控制线路	48
1.1.1 直流电动机的结构及 工作原理	4	2.3.1 电动机直接启动控制线路	48
1.1.2 直流电动机的分类	7	2.3.2 电动机降压启动控制线路	54
1.1.3 直流电动机的机械特性	7	2.4 电动机的制动控制线路	56
1.1.4 他励电动机的启动特性	12	2.4.1 电动机能耗制动控制线路	56
1.1.5 他励电动机的制动特性	13	2.4.2 电动机反接制动控制线路	57
1.1.6 他励电动机的调速特性	16	2.5 电动机变磁极对数的调速控制线路	58
1.2 三相异步电动机的工作原理及特征	18	2.5.1 双速电动机的连接方法	58
1.2.1 三相异步电动机的结构	18	2.5.2 双速电动机的控制线路	59
1.2.2 三相异步电动机的 工作原理	20	2.6 液压力滑台的电气控制线路	59
1.2.3 三相异步电动机的 电路分析	22	2.6.1 动力滑台的工作循环	59
1.2.4 三相异步电动机的 机械特性	26	2.6.2 具有一次工作进给的液压 动力滑台的电气控制线路	60
1.2.5 三相异步电动机的 启动特性	29	2.6.3 具有带延时的一次工作 进给的液压力滑台	63
1.2.6 三相异步电动机的 制动特性	33	思考题与习题	63
1.2.7 三相异步电动机的 调速特性	35	第 3 章 金属切削机床的电气 控制线路	66
1.3 控制电动机简介	37	3.1 卧式车床的电气控制线路	66
1.3.1 伺服电动机	37	3.1.1 卧式车床主要结构及运动 形式	66
1.3.2 步进电动机	39	3.1.2 卧式车床的工作特性	67
1.3.3 测速发电机	41	3.1.3 CM6132 型卧式车床电气 控制线路	68
思考题与习题	43	3.2 摇臂钻床的电气控制线路	70
第 2 章 电动机的基本电气控制线路	45	3.2.1 摇臂钻床主要结构及运动 形式	70
2.1 电气元件符号与电气图	45	3.2.2 摇臂钻床电气控制特点	71
2.1.1 电气符号	45	3.2.3 Z3040 型摇臂钻床电气 控制线路	73
		3.3 万能铣床的电气控制线路	75

3.3.1	铣床结构和运动方式.....	76	4.3.3	熔断器的选用.....	112
3.3.2	铣床的工作特点和要求.....	76	4.3.4	接触器的选用.....	113
3.3.3	X62W 型万能铣床的电气 控制线路.....	77	4.3.5	继电器的选用.....	114
3.3.4	X52K 型立式铣床电气控制 线路.....	81	4.3.6	控制变压器的选择.....	116
3.4	龙门刨床的电气控制线路.....	83	4.3.7	电动机的选择.....	116
3.4.1	龙门刨床工作特点和对电气 系统的要求.....	83	4.4	机床电气控制线路设计举例.....	119
3.4.2	龙门刨床的主传动系统.....	83		思考题与习题.....	123
3.4.3	工作台的控制线路.....	83	第 5 章 可编程控制器		125
3.4.4	横梁升降的控制线路.....	88	5.1	可编程控制器的产生、特点和 发展.....	125
3.4.5	刀架的电气控制.....	90	5.1.1	可编程控制器的产生和 定义.....	125
3.5	组合机床的电气控制线路.....	91	5.1.2	可编程控制器的特点和 分类.....	126
3.5.1	组合机床结构与工作循环.....	92	5.1.3	可编程控制器的应用范围 及其发展.....	128
3.5.2	液压动力滑台系统.....	93	5.1.4	可编程控制器与其他工业 控制系统的比较.....	130
3.5.3	两面加工组合机床电气 控制电路.....	94	5.2	可编程控制器的组成及工作原理.....	133
	思考题与习题.....	96	5.2.1	可编程控制器系统的组成.....	133
第 4 章 继电器-接触器控制线路 设计基础		98	5.2.2	可编程控制器的工作过程 与工作原理.....	139
4.1	电气设计的一般原则.....	98	5.2.3	可编程控制器的编程语言.....	141
4.1.1	机床电气设计的基本要求.....	98	5.3	可编程控制器内部等效继电器 电路.....	142
4.1.2	机床电气设计的基本内容.....	98	5.3.1	FX2N 系列可编程控制 器简介.....	142
4.1.3	电气设计的技术条件.....	99	5.3.2	FX2N 系列可编程控制器 的编程元件.....	145
4.1.4	电气传动形式的确定.....	99	5.4	可编程控制器编程和指令系统.....	150
4.1.5	控制方案的确定.....	101	5.4.1	FX2N 系列的基本逻辑 指令.....	150
4.2	电气控制线路设计.....	102	5.4.2	梯形图编程注意事项.....	157
4.2.1	电气控制线路设计遵循的 原则.....	102	5.4.3	FX2N 系列的步进梯形图 指令及编程方法.....	159
4.2.2	控制线路电源的选择及 动力线路设计.....	102	5.4.4	编程实例.....	162
4.2.3	控制线路的经验设计法.....	103	5.5	可编程控制器的应用.....	165
4.2.4	控制线路的逻辑设计法.....	105	5.5.1	可编程控制器控制系统设计	
4.2.5	电器布置图的绘制.....	106			
4.3	低压电器及电动机的选择.....	107			
4.3.1	电气元件选择的基本原则.....	107			
4.3.2	按钮、低压开关的选用.....	108			

的主要内容与方法.....165	7.2.6 单闭环无静差调速系统..... 214
5.5.2 可编程控制器控制系统	7.3 电压负反馈和电流正反馈自动
应用实例.....166	调速系统..... 216
思考题与习题.....169	7.3.1 带电流正反馈的电压负反馈
第6章 变流技术基础.....171	调速系统的组成..... 216
6.1 电力电子元件.....171	7.3.2 带电流正反馈的电压负反馈
6.1.1 晶闸管(SCR).....171	调速静特性..... 218
6.1.2 功率晶体管(GTR).....174	7.4 直流电动机双闭环调速系统..... 220
6.1.3 绝缘栅双极晶体管(IGBT).....174	7.4.1 双闭环调速系统的组成..... 220
6.1.4 电力电子器件的保护.....175	7.4.2 双闭环调速系统的静态
6.2 晶闸管可控整流电路.....176	特性..... 221
6.2.1 单相半波可控整流电路.....176	7.4.3 双闭环调速系统的动态
6.2.2 单相桥式可控整流电路.....178	特性..... 222
6.2.3 三相半波可控整流电路.....181	7.5 直流电动机可逆调速系统..... 225
6.2.4 三相桥式可控整流电路.....183	7.5.1 直流电动机可逆有环流
6.3 晶闸管触发电路.....184	调速系统..... 225
6.3.1 晶闸管对触发电路的要求.....184	7.5.2 逻辑无环流可逆调速系统..... 227
6.3.2 单结晶体管移相触发电路.....185	7.6 直流电动机的脉宽调制调速系统..... 230
6.4 逆变器.....188	7.6.1 直流脉宽调制电路的工作
6.4.1 有源逆变电路.....189	原理..... 230
6.4.2 无源逆变电路.....190	7.6.2 可逆脉宽调制调速系统..... 232
思考题与习题.....194	7.6.3 双闭环控制的脉宽调制调速
第7章 直流调速控制系统.....197	系统..... 233
7.1 机床的速度调节.....197	7.7 直流调速的应用..... 234
7.1.1 现代机床调速系统.....197	7.7.1 不可逆双闭环直流调速
7.1.2 现代机床控制技术.....198	系统..... 235
7.1.3 直流调速简介.....200	7.7.2 直流调速的微机控制系统..... 238
7.1.4 直流调速的发展趋势.....203	思考题与习题..... 241
7.2 转速负反馈自动调速系统.....203	第8章 交流调速控制系统..... 243
7.2.1 转速负反馈自动调速系统	8.1 电磁转差离合器调速系统..... 243
组成.....204	8.1.1 电磁转差离合器调速系统
7.2.2 直流调速系统的静态特性.....205	的组成和工作原理..... 243
7.2.3 直流调速系统的动态特性.....208	8.1.2 电磁转差离合器调速系统
7.2.4 转速闭环调速系统的基本	的机械特性..... 244
特性.....211	8.1.3 自动换极电磁转差离合器
7.2.5 带电流截止负反馈的单闭	调速系统..... 245
环调速系统.....211	8.2 绕线转子异步电动机串级调速
	系统..... 246

8.2.1 串级调速的基本原理.....	246	变频调速应用举例.....	262
8.2.2 串级调速系统的基本类型.....	248	8.3.5 矢量控制简介.....	263
8.2.3 双闭环控制的串级 调速系统.....	250	8.3.6 PLC 控制交流异步电动机 变频调速应用举例.....	267
8.3 笼型异步电动机变频调速系统.....	251	思考题与习题.....	272
8.3.1 交流异步电动机变频调速 基本原理.....	251	附录一 电气图形符号.....	273
8.3.2 变频与变压的实现 ——SPWM 调制波.....	253	附录二 电气文字符号.....	276
8.3.3 SPWM 脉冲的生成方法及 专用集成芯片 SA8282.....	257	参考文献.....	278
8.3.4 单片机控制交流异步电动机			

概 述

机床是制造业中的主要设备，机床的数量、质量及自动化水平直接影响到整个制造业的发展。20 世纪初电动机的发明，使机床的动力得到了根本的改变。在现代制造业中，为了实现机床生产过程自动化的要求，机床电气控制不仅包括拖动机床的电动机，而且包括一套电动机的控制系统。随着生产工艺的不断发展，对机床电气控制技术提出了越来越高的要求。比如，一些精密机床要求加工精度达百分之几毫米，甚至几微米；重型镗床为保证加工精度和控制粗糙度，要求在极慢的稳速下进给，也就是要求在很宽的范围内调速；为了提高效率，由数台或数十台机床组成的生产自动线，要求统一控制和管理。诸如此类的要求，都是通过电动机及其控制系统和机械传动装置来实现的。

1. 机床电力拖动系统的发展概况

机床是由电动机拖动运行的，这种拖动方式称为电力拖动。电力拖动系统可以分为两个部分：一个是电力拖动部分，包括电动机以及使电动机和机床相互联系起来的传动机构；另一个是电动机的电气控制部分。电力拖动系统主要分为直流拖动和交流拖动两大类。直流拖动是以直流电动机为动力，交流拖动是以交流电动机为动力。早在 19 世纪 30 年代就开始使用直流电动机拖动机床。直流电动机由于调速和启动性能优良，在机床调速领域直流拖动系统长期居于首位。但是，直流电动机结构复杂、维护困难，制造大容量、高转速和高电压的直流电动机也受到限制。交流电动机出现后，其中的三相异步电动机因结构简单、运行可靠、使用维护方便和价格便宜而被广泛应用于各种机床。随着电力电子技术的飞跃发展，交流调速技术迅速发展。三相笼型异步电动机的变频调速、三相绕线转子异步电动机的串级调速和无换向器电动机的调速技术在机床中获得了广泛应用。由于电动机不同，它们的控制系统也就不同。目前，交流拖动系统在机床中占主导地位。机床电力拖动系统的发展经历了成组拖动、单电动机拖动和多电动机拖动三个阶段。

1) 成组拖动

最初的拖动是由电动机直接代替蒸汽机，即由一台电动机拖动一组机床，称为成组拖动。所谓成组拖动，就是由一台电动机拖动一根天轴，然后再由天轴通过带轮和传送带分别拖动各台机床。这种拖动方式机构复杂，传递路径长，损耗大，生产效率低，劳动条件差，一旦电动机发生故障，将造成成组的机床停车，不适于现代化生产的需要。

2) 单电动机拖动

所谓单电动机拖动，就是用一台电动机拖动一台机床。这种拖动方式比成组拖动前进了一步，但是当一台机床的运动部件较多时，机械传动机构会十分复杂，而且还往往满足不了生产工艺上的要求，仍然不适于现代化生产的需要。

3) 多电动机拖动

所谓多电动机拖动，就是一台机床的每一个运动部件分别由一台专门的电动机拖动。例如，龙门刨床的刨台、左右垂直刀架、侧刀架、横梁及其夹紧机构，均分别由一台电动

机拖动。多电动机拖动方式不仅大大简化了机床的传动机构，而且控制灵活，为机床的自动化提供了有利条件。所以，现代化生产基本上都采用这种拖动方式。

2. 机床电气控制系统的发展概况

电气控制系统伴随着控制器件的发展而发展。大功率半导体器件、大规模集成电路、计算机控制技术、检测技术以及现代控制理论的发展，推动了机床电气控制技术的发展。主要表现为：在控制方法上，从手动操纵发展到自动控制；在控制功能上，从单一功能发展为多种功能；在实际操作上，从紧张繁重发展到轻松自如。机床电气控制系统的发展日新月异，它主要经历了以下四个阶段。

1) 继电器-接触器控制系统

最初的机床电气控制采用手动控制，如小型台钻等少数容量小、动作单一的机床，使用手动控制电器直接控制。后来由于切削工具、机床机构的改进，切削功率的增大，机床运动的增多，手动控制已不能满足要求，于是出现了以继电器-接触器为主的控制电器所组成的控制装置和控制系统。这种控制系统，可实现对机床的各种运动的控制，如启动、正反转、调速等的控制。这种控制方法简单直接，工作稳定可靠；但控制速度慢，控制精度差。

2) 连续控制方式及自动控制系统

20世纪30年代在龙门刨床上出现了电动机放大机控制，它使控制系统从继电器-接触器控制这种断续控制发展到连续控制，连续控制系统可随时检查控制对象的工作状态，并根据输出量与给定量的偏差对控制对象进行自动调整，它的快速性和控制精度都大大超过了最初的断续控制，并简化了控制系统，减少了电路中的触点，提高了工作的可靠性，使生产效率大为提高。40年代出现了磁放大器控制的自动控制系统，50年代又出现了水银整流器控制的自动控制系统。1958年美国通用电气公司生产出世界上第一支晶闸管(额定电流16A)，出现了晶闸管一直流电动机无级调速系统。晶闸管具有效率高、控制特性好、反应快、寿命长、可靠性高、维护容易、体积小、质量轻等优点，并正在向大容量方向发展。其后由于逆变技术的出现，高压大功率晶体管(GTR)、绝缘栅双极半导体管(IGBT)等新型电力电子器件的出现，从80年代开始，交流电动机无级调速系统有了迅速的发展。由于交流电动机无电刷与换向器，较之直流电动机易于维护，而且寿命长，因此，交流调速系统很有发展前途，用大功率晶体管逆变技术和脉宽调制技术(PWM)改变交流电的频率等实现电动机无级调速的系统在工业上正在得到广泛的应用。目前已出现了多种以多用芯片或DSP为核心的变频器调速系统，它使交流电动机的控制变得更简单，可靠性更高，拖动系统的性能更好。它们的出现为机床自动控制系统开辟了新纪元。

3) 可编程控制器(PLC)

随着数控技术和微型计算机的发展，出现了具有运算功能和较大功率输出能力的PLC，用它代替大量的继电器，可使硬件软件化。PLC技术是以硬接线的继电器接触控制为基础的，是继电器常规控制技术与微型计算机技术相结合的产物。它逐步发展为既有逻辑控制、计时、计数，又有运算、数据处理、模拟量调节、联网通信等功能的控制装置。PLC实际上是一台按开关量输入的工业控制用微型计算机。用它来替代继电器-接触器控制系统，提高了系统的可靠性和柔性，使控制技术产生了一个质的飞跃。20世纪90年代的大型PLC已

发展成不仅具有开关型逻辑控制、定时/计数、逻辑运算功能，还具有处理模拟量的 I/O、数字运算功能、通信功能，可构成分布式控制系统的控制器。因此，PLC 的应用越来越普及，越来越广泛。

PLC 可以通过数字量或者模拟量的输入和输出，满足各种类型生产机械控制的需要。PLC 及有关外部设备，都按照既易于与工业控制系统联成一体，又易于扩充其功能的原则设计。PLC 将成为包括机床在内的机械设备中开关量控制的主要电气控制装置。

4) 计算机数字控制系统

1952 年，美国麻省理工学院根据 John T. Parsons 的设想，首先把机械和电子技术结合在一起，制造出了具有信息存储和处理功能的新型机床——数控铣床。当时的计算机是第一代电子计算机，无法装入机床，只能是“灵魂”与“躯体”分家的数控机床。1958 年，Kerneg 公司和 Trecker 公司研制出了带有自动换刀机构的加工中心。1957 年集成触发器诞生，1958 年 RC 移相式振荡器集成电路面世，1964 年小规模集成电路出现，1966 年进入大规模集成电路的阶段，1977 年又跨进超大规模集成电路的新领域。单片机的出现，有力地推动了机电一体化的进程与实用化，真正实现了“灵魂”进入数控机床的“躯体”。

20 世纪 70 年代初，计算机数字控制(CNC)系统被应用于数控机床和加工中心，这不仅提高了自动化程度，而且提高了机床的通用性和加工效率，在生产上得到了广泛的应用。工业机器人的诞生，为实现机械加工全盘自动化创造了物质基础。20 世纪 80 年代以来，出现了由数控机床、工业机器人、自动搬运车等组成的统一由中心计算机控制的机械加工自动线——柔性制造系统(FMS)，它是实现自动化车间和自动化工厂的重要组成部分。机械制造自动化高级阶段是走向设计、制造一体化，即利用计算机辅助设计(CAD)与计算机辅助制造(CAM)形成产品设计和制造过程的完整系统，从产品构思和设计直至装配、试验和质量管理这一全过程实现自动化。为了实现制造过程的高效率、高柔性、高质量，研制计算机集成生产系统(CIMS)是人们今后的任务。

3. 课程的性质和任务

“机床电气控制技术”课程是机械设计制造及自动化专业、机械电子工程专业的一门必修的专业基础课，它是机电一体化人才知识结构的基础。

由于电力拖动控制装置和机床是一个不可分割的整体，所以“机床电气控制技术”课程的任务是使学生了解电力拖动的一般知识；熟悉电动机、低压电器的工作原理、特性、应用和选用方法；掌握机床电气原理图的读图方法，能够在生产现场分析和排除机床电气故障；掌握 PLC 用户程序的编程方法及其在机床上的应用；掌握常用的开环、闭环控制系统的工作原理、特点、性能及应用场所；了解最新电气控制技术在机床上的应用。

第 1 章 电动机的工作原理及特性

教学提示：本章从直流电动机的结构和工作原理入手，主要讨论他励直流电动机的固有机械特性及人为机械特性、启动特性、制动特性、调速特性。从交流电动机的工作原理和等效电路入手，主要讨论三相异步电动机的机械特性、启动特性、制动特性、调速特性。最后简单介绍了伺服电动机、步进电动机、测速发电机等控制电动机。

教学要求：要求掌握他励直流电动机和三相异步电动机的机械特性，特别是人工机械特性；它们启动、调速和制动的各种方法以及各种方法的优缺点和应用场合。了解异步电动机的基本结构和旋转磁场的产生，了解几种控制电动机的基本工作原理、主要运行特性及特点，以便正确地选用和使用。

1.1 直流电动机的工作原理及特征

直流电动机具有良好的启动性能和调速性能。到目前为止，虽然交流电动机的调速问题已经解决，但是在速度调节要求较高、正反转和启动制动频繁、多单元同步协调运转的机械设备上，仍然采用直流电动机拖动。

1.1.1 直流电动机的结构及工作原理

1. 直流电动机的结构

直流电动机有固定不动的部分和旋转的部分两部分组成，固定部分称为定子(磁极)，旋转部分称为转子(电枢)。其结构简图如图 1.1 所示。在直流电动机中，磁极部分被放在定子上，电枢部分被放在转子上。下面将介绍直流电动机的具体构造。

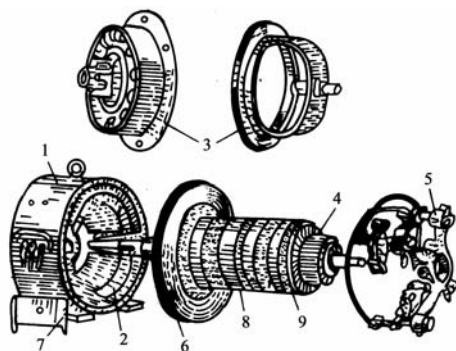


图 1.1 直流电动机结构简图

- 1—机座；2—励磁绕组；3—轴承端盖；4—换向器；5—电刷架；
6—风扇；7—主磁极；8—电枢铁心；9—电枢绕组

1) 定子

定子是电动机固定不动的部分。直流电动机的定子由主磁极、换向磁极、机座和轴承等组成。

(1) 主磁极。磁极是用来在电动机中产生磁场的。它分成极心和极掌两部分。极心上放置励磁绕组，极掌的作用是使电动机空气隙中磁感应强度的分布最为合适，并用来挡住励磁绕组。磁极是用钢片叠成的，固定在机座上。改变励磁电流的方向就可以改变主磁极的极性，也就改变了磁场的方向。

在小型直流电动机中，也有用永久磁铁作为磁极的。

(2) 换向磁极。简称换向极，它是位于主磁极之间的比较小的磁极，主要用于换向。

(3) 机座。用于固定主磁极和换向磁极，也是磁路的一部分。

(4) 轴承。用来支撑转子的转轴。

2) 转子

直流电动机的转子，它包括电枢铁心、电枢绕组、换向器、风扇等几部分。

(1) 电枢铁心。由硅钢片叠成，表面有许多均匀分布的槽。

(2) 电枢绕组。是由许多线圈按一定的规则连接起来的。绕组安放在电枢铁心槽内，线圈的端部与换向片的楔形铜片相连接。

(3) 换向器。由许多换向片组成，外表呈圆柱形，片与片之间用云母绝缘。

(4) 风扇等。

2. 直流电动机的工作原理

图 1.2 所示为直流电动机最简单的模型，电动机具有一对固定的磁极 N 和 S，通常是电磁铁，在两个磁极 N 和 S 之间，有一个可以转动的圆柱形铁心电枢，在电枢上缠有电枢绕组，为简单起见，假设绕组只有一匝线圈 $abcd$ 。线圈两端分别连在相互绝缘的换向片 A_1 和 A_2 上，换向片组成的圆柱体称为换向器，换向器跟随电枢转动。电刷 B_1 和 B_2 固定不动，紧紧压在换向片上，与外部电路相连。

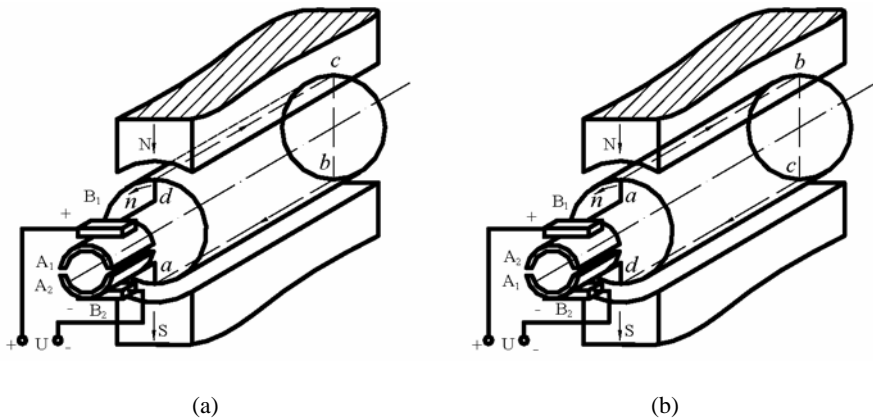


图 1.2 直流电动机工作原理图

直流电动机的工作原理如图 1.2(a)所示，将直流电源接入电刷 B_1 和 B_2 之间，在 N 极下的导体电流方向为 $d \rightarrow c$ ，在 S 极上的导体电流方向为 $b \rightarrow a$ 。对于导体 dc 来说，通电导

体处于磁场中,会受到电磁力的作用。根据电磁力定律,导体上的力大小为 $f = Bli$,方向由左手定则确定,可知在图示位置时,电磁力的方向为水平向左。同理,对于导体 ab 来说,也受到电磁力的作用,大小也为 $f = Bli$,方向为水平向右。因此,线圈 $abcd$ 受到逆时针方向的转矩作用,使电枢沿逆时针方向转动。当电动机转过 90° 时,线圈处于水平位置,线圈受到的转矩为零,但是,电动机有一定的转速,在惯性的作用下,电动机可以转过这个位置。当电动机转过 180° 时,如图 1.2 (b)所示,在 N 极下的导体为 ab ,在 S 极上的导体为 cd ,在换向器的作用下,线圈中的电流换向。对于导体 ab 来说,电流方向为 $a \rightarrow b$,受到的电磁力方向为水平向左;对于导体 cd 来说,电流方向为 $c \rightarrow d$,受到的电磁力方向为水平向右。因此,线圈仍受到逆时针方向的转矩作用,使电枢沿逆时针方向旋转。由此可见,换向器的作用是相当重要的,它可以改变线圈中的电流方向,从而保持线圈所受到的转矩方向不变,使电枢能连续旋转。

当电枢在磁场中旋转,切割磁力线时,根据电磁感应定律,在电枢中会产生感应电动势,其大小为 $\varepsilon = -Nd\Phi/dt$ 。方向由右手定则判断,它与外加电压或电流的方向相反,因此,通常称为反电动势 E 。在不同时刻,当线圈处于不同位置时,所通过的磁通 Φ 是不同的,磁通的变化率也是不同的。因此,反电动势 E 的大小是变化的,通常用它的平均值来表示,即

$$E = C_e \Phi n \quad (1-1)$$

式中: E ——反电动势(V);

C_e ——电动势常数,由电动机结构决定;

Φ ——一对磁极的磁通(WB);

n ——电动机的转速(r/min)。

电磁转矩 T 是指电动机正常运行时,带电的电枢绕组在磁场中受到电磁力作用所形成的总转矩。在不同位置,电枢绕组所受的电磁转矩方向相同,大小不同,通常用电磁转矩的平均值来进行计算

$$T = C_t \Phi I_a \quad (1-2)$$

式中: T ——电磁转矩(N·m);

C_t ——转矩常数,由电动机的结构决定, $C_t = 9.55C_e$;

I_a ——电枢电流(A)。

对于直流电动机来说,稳态运行时,作用在电动机轴上的转矩有三个:即电磁转矩 T ,空载损耗转矩 T_0 和负载转矩 T_L 。电磁转矩 T 是驱动转矩,能使电动机旋转,电磁转矩 T 应等于空载损耗转矩 T_0 和负载转矩 T_L 之和,即

$$T = T_0 + T_L \quad (1-3)$$

由于空载损耗转矩很小,电动机在稳定运行时,为简单起见,通常可以忽略不计,认为电磁转矩与负载转矩相等。当负载转矩发生波动时,电动机的转速 n 、反电动势 E 、电枢电流 I_a 以及电磁转矩 T 能自动进行调整,达到新的平衡。如负载减小时,电磁转矩大于负载转矩,电动机转速上升,反电动势随着转速的上升而增大,电枢电流则减小,电磁转矩减小。当电磁转矩减小到与负载转矩相等时,电动机达到新的平衡状态,此时,电动机以

高于原来的速度稳定运行。

1.1.2 直流电动机的分类

直流电动机必须具有一定强度的磁场。电动机的磁极一般由磁极铁心和励磁绕组组成。励磁绕组上通以直流电流时会产生励磁电动势，励磁电动势所形成的磁场就是直流电动机的磁场，也称为励磁磁场。按照励磁方式的不同，直流电动机可分为他励电动机、并励电动机、串励电动机和复励电动机四种，如图 1.3 所示。

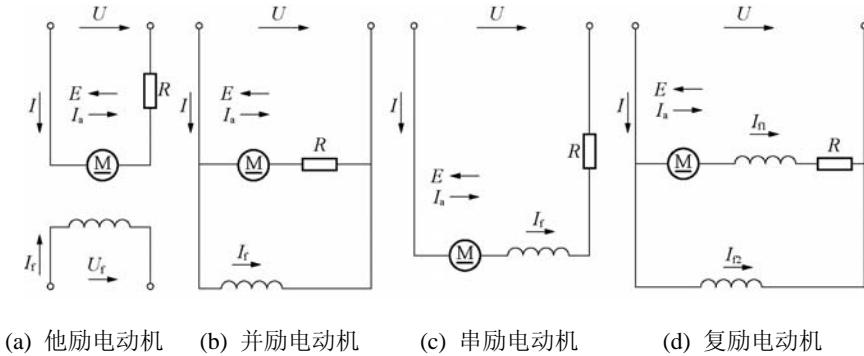


图 1.3 直流电动机的分类

他励电动机的励磁绕组由外电源 U_f 供电，励磁电流 I_f 不受电枢端电压 U 或电枢电流 I_a 的影响。并励电动机的励磁绕组与电枢绕组并联，由电枢端电压 U 供电，负载电流 I 分为励磁电流 I_f 和电枢电流 I_a ；串励电动机的励磁绕组与电枢绕组串联，励磁电流 I_f 即为电枢电流 I_a ；复励电动机的磁极上有两个励磁绕组，一个与电枢绕组串联，一个与电枢绕组并联。

1.1.3 直流电动机的机械特性

直流电动机的机械特性指的是当电动机的电枢端电压 U 、电枢电阻 R_a 、电枢上的外串电阻 R 及励磁电流 I_f 不变时，电动机的转速 n 与转矩 T 之间的关系，曲线 $n=f(T)$ 称为电动机的机械特性曲线。

直流电动机的机械特性与励磁方式有关，励磁方式不同的电动机，其机械特性是有区别的。他励和并励电动机比较常用，当他励电动机的励磁电源电压 U_f 取为电动机的电枢端电压 U 时，就成了一台并励电动机。可以说并励电动机是他励电动机的一种特例，两者的机械特性是相同的。下面以他励电动机为例来分析他励和并励电动机的机械特性。

1. 他励电动机的机械特性

由图 1.3(a) 可看出，他励电动机电枢回路的电压平衡方程式为

$$U = E + I_a(R_a + R) \quad (1-4)$$

由式(1-2)得

$$I_a = T / C_t \Phi \quad (1-5)$$

将式(1-1)和式(1-5)代入式(1-4)中并整理，得他励电动机机械特性曲线方程为

$$n = \frac{U}{C_e \Phi} - \frac{R_a + R}{C_e C_t \Phi^2} T = n_0 - \Delta n \quad (1-6)$$

当电枢端电压 U 、励磁电阻、励磁电流一定时，磁通 Φ 为一常数。由式(1-6)可看出，电动机的机械特性曲线为一条斜直线。随着电磁转矩 T 的增大，转速降低，如图 1.4 所示。

当电磁转矩 $T=0$ 、电枢端电压和励磁电流不变时，磁通 Φ 为一定值。 $n_0 = \frac{U}{C_e \Phi}$ 是电动机空载时的

转速。事实上，对于电动机来说，即使负载转矩为零，但由于空载损耗转矩的存在，电磁转矩 T 也不可能为零，因此，通常将 n_0 称为理想空载转速，点 $(0, n_0)$ 就称为理想空载点。

在式(1-6)中，转速降 $\Delta n = \frac{R_a + R}{C_e C_t \Phi^2} T$ ，当转速降

Δn 增加时，电磁转矩 T 增大，电枢电流 $I_a = \frac{U - E}{R_a + R}$

增大，在电阻 $(R_a + R)$ 上引起的压降增大；而电源电枢端电压不变，因此，反电动势 E 减小；所以，转速 $n = E / C_e \Phi$ 降低。

电动机的机械特性有固有机机械特性和人为机械特性两种。固有机机械特性是指在额定条件下，即电枢端电压为额定电压 $(U = U_N)$ ，励磁电流为额定励磁电流 $(I_f = I_{fN}$ 即磁通 $\Phi = \Phi_N$)，电枢电路中不外接任何电阻 $(R=0)$ 时的转速与转矩之间的关系。而人为机械特性则指改变电枢端电压 U 、励磁电流 I_f (即磁通 Φ) 和电枢电路中的电阻 R 时所得到的转速与转矩之间的关系。

1) 固有机机械特性

当 $I_f = I_{fN}$ ， $U = U_N$ ， $R = 0$ 时， $\Phi = \Phi_N$ ，由式(1-6)得他励电动机的固有机机械特性曲线方程为

$$n = \frac{U_N}{C_e \Phi_N} - \frac{R_a}{C_e C_t \Phi_N^2} T = n_{0N} - \Delta n_N \quad (1-7)$$

他励电动机的固有机机械特性曲线是一条直线，只需要确定其中的两个点即可确定这条直线。电动机的电枢电阻 R_a 可根据电动机的损耗来估算，通常认为电动机在额定负载下的铜耗 $I_a^2 R_a$ 为总损耗的 50%~75%。电动机铭牌上给出了电动机的额定功率 P_N 、额定电压 U_N 、额定电流 I_N 和额定转速 n_N 等，根据这些数据就能求出电动机的理想空载转速 n_0 、额定转矩 T_N 等。因此，他励电动机的固有机机械特性曲线可根据电动机的铭牌数据来绘制，一般用理想空载点 $(0, n_0)$ 和额定运行点 (T_N, n_N) 来确定。

【例 1.1】 一台他励电动机，其铭牌数据如下： $P_N = 12\text{kW}$ ， $U_N = 220\text{V}$ ， $I_N = 65\text{A}$ ， $n_N = 1000\text{r/min}$ 。试计算此电动机的固有机机械特性。

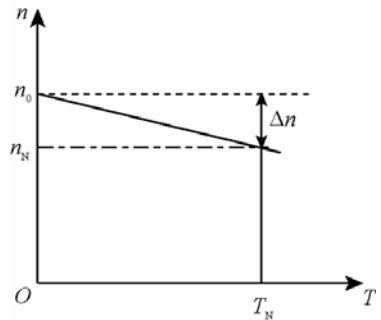


图 1.4 他励电动机机械特性曲线

解: 估算电枢电阻 R_a :

$$I_a^2 R_a = (I_N U_N - P_N)(0.5 \sim 0.75)$$

$$R_a = (65 \times 220 - 12000)(0.5 \sim 0.75) / 65^2 = 0.272 \sim 0.41(\Omega)$$

$$\text{取 } R_a = 0.35\Omega$$

求 $C_e \Phi_N$:

$$C_e \Phi_N = \frac{U_N - I_N R_a}{n_N} = \frac{(220 - 65 \times 0.35)}{1000} = 0.197$$

求理想空载转速 n_0 :

$$n_0 = U_N / C_e \Phi_N = 220 / 0.197 = 1116.8 (\text{r/min})$$

求额定转矩 T_N :

$$T_N = 9.550 P_N / n_N = 9550 \times 12 / 1000 = 114.6 (\text{N}\cdot\text{m})$$

绘出电动机的固有机械特性曲线如图 1.5 所示。其中, 理想空载点坐标(0, 1116.8); 额定工作点坐标(114.6, 1000)。

2) 人为机械特性

人为机械特性就是指式(1-6)他励电动机机械特性中电枢端电压 U 、磁通 Φ 不是额定值或电枢电路中接有外加电阻 R 时的机械特性, 又称人为特性。因此, 他励电动机有三种人为机械特性。

(1) 改变电枢端电压 U 时的人为机械特性。当 $I_f = I_{fN}$, $R=0$, 由式(1-6)可得改变电枢端电压 U 时的人为机械特性方程为

$$n = \frac{U}{C_e \Phi_N} - \frac{R_a}{C_e C_t \Phi_N^2} T = n_0 - \Delta n_N$$

(1-8)

由此可看出, 理想空载转速 n_0 与电枢端电压 U 成正比, 转速降 Δn 与电枢端电压 U 无关。因此, 改变电枢端电压 U 时的人为机械特性与固有机械特性相比, 是一些理想空载点不同, 而斜率相同的平行的直线, 并且随着电压的降低, 理想空载转速也降低。另外, 由于电动机电压不能超过额定电压, 只能在额定值以下改变电压的大小, 因此, 改变电枢端电压 U 的人为机械特性是一簇在固有机械特性以下并与之平行的直线, 如图 1.6 所示。

(2) 电枢回路中串入附加电阻 R 时的人为机械特性。当保持 $I_f = I_{fN}$, $U = U_N$, 在电枢回路中串入附加电阻 R 时, 由式(1-6)得电枢回路中串入附加电阻时的人为机械特性方程为

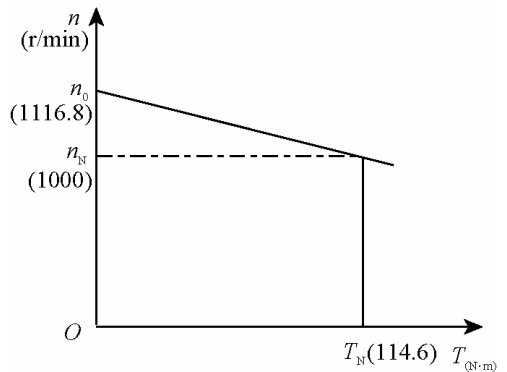


图 1.5 电动机的固有机械特性曲线

$$n = \frac{U_N}{C_e \Phi_N} - \frac{R_a + R}{C_e C_t \Phi_N^2} T = n_{0N} - \Delta n \quad (1-9)$$

该人为机械特性与固有机械特性相比，理想空载转速 n_0 不变，而转速降随着附加电阻的增大而增大。因此，其曲线是一簇过点 $(0, n_{0N})$ 的射线，附加电阻 R 越大，则射线的斜率越大，转速下降越大，如图 1.7 所示。

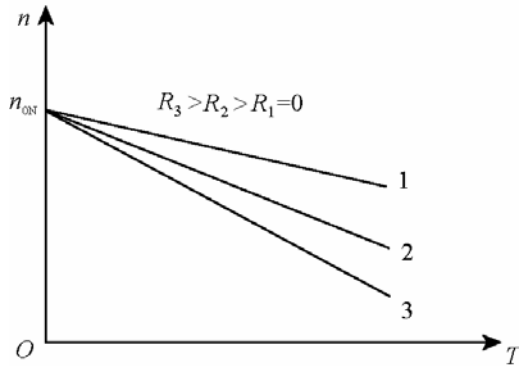
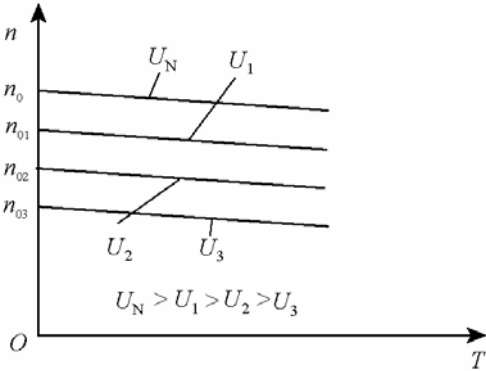


图 1.6 改变电枢电压 U 时的人为机械特性曲线 图 1.7 电枢回路串入电阻时的人为机械特性曲线

(3) 改变磁通 Φ 时的人为机械特性。在保持电枢端电压为额定电压 U_N ，电枢回路中不串入任何外接电阻 ($R=0$) 的情况下，改变励磁电流 I_f ，则磁通 Φ 也随之发生改变。由式(1-6)得改变磁通时的人为机械特性方程为

$$n = \frac{U_N}{C_e \Phi} - \frac{R_a}{C_e C_t \Phi^2} T = n_0 - \Delta n \quad (1-10)$$

由此可看出，改变磁通 Φ 时，理想空载转速和转速降都随着磁通的减小而增大，如图 1.8 所示，每条人为机械特性曲线都与固有机械特性曲线相交。一般来说，受励磁线圈发热和电动机磁饱和的限制，电动机的磁通 Φ 只能在额定磁通以下进行调节，因此，人为机械特性的理想空载点总在固有机械特性的理想空载点之上。如果励磁电流为零，从而导致磁通 Φ 为零，电动机的速度将会非常高，理论上可趋于无穷大，这种现象称为“飞车”，在实际中是绝不允许的。因此，他励电动机在启动前必须先通励磁电流，并且保证在运转过程中，励磁电流不为零，一般在运转过程中都设有“失磁”保护。

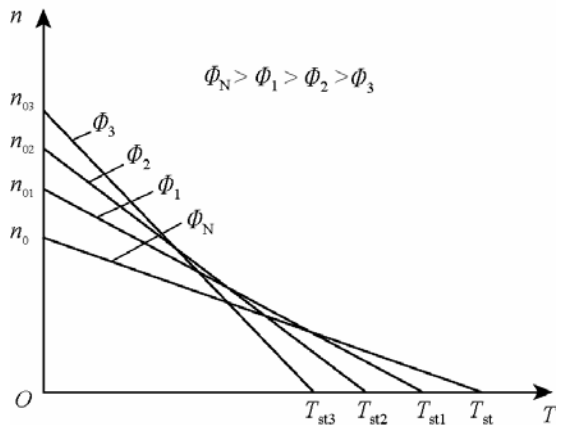


图 1.8 改变磁通 Φ 时的人为机械特性曲线

2. 串励电动机的机械特性

如图 1.3(c)所示, 串励电动机的电压平衡方程式为

$$U = E + I_a R_0 \quad (1-11)$$

式中, R_0 ——总电阻, 包括电枢电阻 R_a 、励磁绕组电阻 R_f 和附加电阻 R 。

将式(1-1)、式(1-5)代入式(1-11), 并整理得串励电动机的机械特性方程为

$$n = \frac{U}{C_e \Phi} - \frac{R_0}{C_e C_t \Phi^2} T = n_0 - \Delta n \quad (1-12)$$

串励电动机的励磁电流 I_f 就是它的电枢电流 I_a , 而电枢电流随着负载的变化而变化, 因此, 磁通 Φ 也会随着电枢电流 I_a 的变化而变化。串励电动机的机械特性可分两段来进行分析。

当负载较轻时, 电枢电流较小, 此时, 可近似认为磁通 Φ 与电枢电流成正比, 即 $\Phi = K I_a$, 其中, K 为比例常数。所以, 有

$$T = C_t \Phi I_a = C_t \Phi^2 / K$$

$$\text{即} \quad \Phi = \sqrt{TK / C_t} \quad (1-13)$$

将式(1-13)代入式(1-12)得

$$n = \frac{U}{C_e \sqrt{TK / C_t}} - \frac{R_0}{C_e K} = \frac{U}{K_1 \sqrt{T}} - \frac{R_0}{K_2} \quad (1-14)$$

式中, K_1 、 K_2 ——两个常数。

由此可看出, 在负载较轻的情况下, 当电枢端电压 U 不变时, 串励电动机的转速 n 与 \sqrt{T} 成反比, 其机械特性曲线如图 1.9 所示, 近似为双曲线的一条曲线。当负载转矩增加时, 转速下降很快, 转速 n 轴是它的渐近线, 它的理想空载转速 n_0 趋向于无穷大。当串励电动机空载时, 转速相当高, 这也可能造成“飞车”。因此, 串励电动机绝不允许空载运行, 也不允许用传送带传动, 以防传送带脱落。

当负载较重时, 电枢电流较大, 此时, 可认为磁路已经趋向饱和, 近似认为磁通 Φ 为常数, 此时的机械特性曲线近似为一条直线。

3. 复励电动机的机械特性

如图 1.3(d)所示, 复励电动机既有并励绕组, 又有串励绕组, 通常这两者所产生的磁通方向一致。复励电动机的机械特性介于并励和串励电动机之间, 同时具有这两者的特性。当并励绕组起主要作用时, 它的机械特性接近于并励电动机; 当串励绕组起主要作用时,

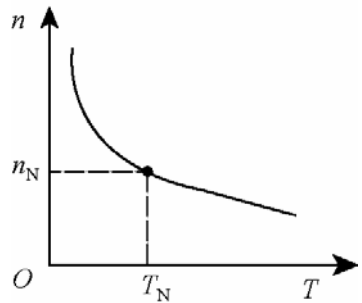


图 1.9 串励直流电动机的机械特性曲线

它的机械特性接近于串励电动机。有关复励电动机的机械特性在此不再作详细介绍。

1.1.4 他励电动机的启动特性

电动机接上电源,从静止状态转动并达到稳态运行状态的过程就是电动机的启动过程。对于电动机的启动一般有两个要求:一是启动转矩能够克服启动时的摩擦转矩和负载转矩,使电动机能转动起来;二是启动电流不能太大,以免对电源、电动机及生产机械产生有害的影响。

电动机刚启动时,转速为零,反电动势 E 为零,电枢回路中的外串电阻 R 也为零。由式(1-1)和式(1-4)可知,启动电流 I_{st} 为

$$I_{st} = U / R_a \quad (1-15)$$

电枢电阻 R_a 一般很小,因此启动电流 I_{st} 相当大,可达到额定电流的 10~20 倍。因此,除了小容量的他励电动机,一般是不允许将电动机直接接到额定电压的电源上启动的。他励电动机的启动方法有电枢回路中串电阻分级启动及降压启动两种。

1. 电枢回路中串电阻分级启动

在电枢回路中串入启动电阻 R_{st} 时,电动机启动电流 I_{st} 和启动转矩 T_{st} 分别为

$$I_{st} = \frac{U}{R_a + R_{st}} \quad (1-16)$$

$$T_{st} = C_t \Phi I_a \quad (1-17)$$

若启动电阻 R_{st} 越大,则启动电流越小,但启动电阻也不是越大越好。如图 1.10 所示为他励电动机电枢回路中串入电阻后的机械特性,可见,启动电阻越大,启动转矩越小,带负载能力越弱。当启动电阻为图 1.10(a)中的 R_{st2} 或图 1.10(b)中的 R_{st4} 时,电动机的启动转矩小于负载转矩 T_L ,电动机无法启动。在图 1.10(a)中,当电动机中串一级启动电阻 R_{st1} 时,电动机从 A 点启动,沿机械特性曲线向 B 点移动,速度不断上升。随着转速的升高,反电动势 E 不断增大,启动电流 I_{st} 逐步减小到 I_N ,启动转矩也逐步减小到额定转矩 T_N 。在 B 点时,切除启动电阻 R_{st1} ,机械特性由曲线 2 过渡到曲线 1 上,由于机械惯性的作用转速不能突变,因此,工作点由 B 平移到 C 点,然后再沿着固有机械特性曲线 1 移动,最后稳定运行在额定工作点 D。这种方法能限制启动电流,但是在从 B 点向 C 点切换的过程中,冲击电流相当大,另外,在启动过程中,启动转矩不断减小,整个启动过程中的平均启动转矩不大,启动快速性不好。

为了避免上述这些缺点,可以将启动电阻分级切除。如图 1.10(b)所示为分三级切除启动电阻。电动机从 A 点启动,沿着 $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow E \rightarrow F \rightarrow G \rightarrow H$ 移动,最后稳定运行在 H 点。这种启动方法不仅冲击电流小,且平均启动转矩大,启动过程快而平稳,但是所需要的控制设备也相应地增多,一般采用三级或四级分级启动。

2. 降压启动

由式(1-15)可知,启动电流与电枢端电压成正比。因此,电动机启动时,降低电枢端电压 U ,可以限制启动电流。然后,随着转速的升高,反电动势 E 增大,再逐渐提高电枢端

电压 U ，保证电枢电流 $I_a=(U-E)/R_a$ 小于允许的最大电流。当电压为 U_N 时，转速也升高到额定转速 n_N ，电动机稳定运行。

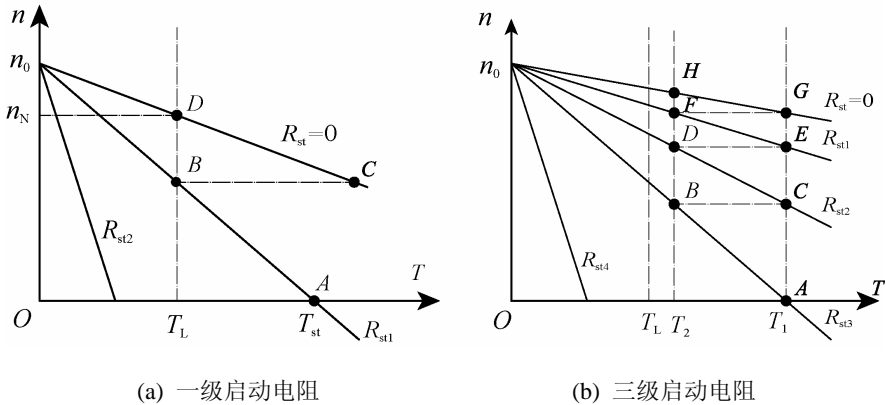


图 1.10 他励电动机电枢回路串电阻分级启动

降压启动的方法可以平滑地增加电源电压，使电枢电流始终保持在允许的最大值上。电动机始终以最大启动转矩启动，使启动过程一直处于最优运行状态。但是这种方法需要单独一套直流电源调节设备，投资比较大。

1.1.5 他励电动机的制动特性

电动机断电后，在摩擦力的作用下停车的过程叫自然停车。这种停车过程时间比较长，在生产过程中，为了提高生产效率、保证产品质量，一般要求能加快停车过程，实现准确停车等，这就要求采取一些措施使电动机能快速地从某一稳定速度开始减速到停转，这就是电动机的制动。电动机的制动还包括采取一些措施使电动机从高速降到低速运转，或者限制位能型负载在某一转速下稳定运转。电动机制动的关键是产生一个与电动机运转方向相反的阻转矩。他励电动机常用的制动方法有能耗制动、反接制动和回馈制动。

1. 能耗制动

电动机在电动状态运行时，断开电枢端电压 U ，在电枢两端串联一个附加电阻 R ，使电动机制动的方法称为能耗制动。

如图 1.11(a)所示，当开关打在 1 位置时，电动机正常工作。如果将开关打在 2 位置，如图 1.11(b)所示，电动机将从直流电源脱开，电动机与电阻 R 构成一个回路。由于惯性的作用，电动机仍然转动，电枢绕组上的感应电动势 $E = C_e \Phi n$ 仍然存在，且方向不变，从而在电阻与电动机回路中产生电流 I'_a ，方向与原电枢电流 I_a 方向相反。因此，电磁转矩 $T=C_t \Phi I'_a$ 与转速方向相反，电动机减速制动。此时，机械系统储存的机械能转变成电能，以热量的形式消耗在电阻上，能耗制动也因此而得名。

由图 1.16(b)可知，能耗制动时的电压平衡方程式为

$$E = I'_a (R + R_a)$$

又

$$E = C_e \Phi n, I_a' = \frac{T'}{C_t \Phi} = -\frac{T}{C_t \Phi}$$

因此，能耗制动时的机械特性为

$$n = -\frac{R + R_a}{C_e C_t \Phi^2} T \quad (1-18)$$

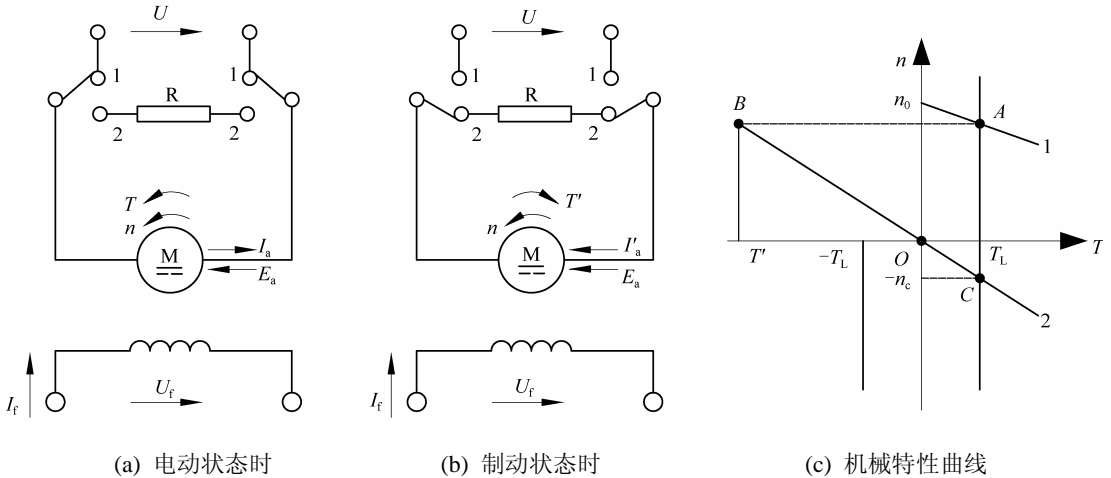


图 1.11 他励电动机能耗制动

所以，能耗制动时的机械特性曲线为一条过原点的直线，且位于第二、四象限内，如图 1.11(c)中直线 2 所示。正常工作时，电动机在 A 点稳定运行。制动时，工作点由电动状态时的特性曲线 1 过渡到制动状态时的特性曲线 2 上，工作点从 A 点平移到 B 点，此时电磁转矩为 T' ，方向与转速方向相反，起制动作用。电磁转矩 T' 使电动机减速运行，由 B 点向原点移动。当到达原点时，对于反抗型负载来说，负载为 $-T_L$ ，是制动转矩，电动机不会反方向运转；对于位能型负载来说，负载 T_L 为拖动转矩，它将带动电动机反方向运转，电磁转矩仍然起制动作用，最后，当电磁转矩与负载转矩平衡时，稳定运行在 C 点，以一定的速度 $-n_c$ 稳定运转。由式(1-18)可知，制动时的速度 n_c 与串入的电阻 R 的大小有关，电阻 R 阻值越大，则速度越大。能耗制动通常用在卷扬机等恒速下放重物的场合。

2. 反接制动

电动机运行在电动状态时，电枢端电压 U 与反电动势 E 的方向总是相反的。如果在外部条件下，改变电枢端电压 U 或反电动势 E 中任意一个的方向，使两者方向一致时，电动机的电磁转矩会改变方向，与转速方向相反，电动机处于制动状态，这种制动方法称为反接制动。根据改变的参数的不同，反接制动可以分为两种：通过改变电枢端电压 U 的方向所形成的制动称为电源反接制动；通过改变反电动势 E 的方向所形成的制动称为倒拉反接制动。由于反接制动时，电动机的电枢端电压与反电动势方向一致，电枢电流 I_a 比较大，因此通常在电枢回路中串入一个合适的限流电阻 R 来限制电枢中的电流 I_a 。

1) 电源反接制动

如图 1.12(a)所示，电动机工作在电动状态。如果将电源反接，如图 1.12(b)所示，则电枢电流反向 $I_a' = -I_a$ ，转速方向不变，因此反电动势 E 不变，则此时的电压平衡方程为

$$-U = E - I_a(R + R_a) \quad (1-19)$$

将式(1-1)、式(1-5)代入式(1-19)并整理得电源反接制动时的机械特性曲线方程为

$$n = \frac{-U}{C_e \Phi} - \frac{R + R_a}{C_e C_t \Phi^2} T \quad (1-20)$$

电动机电源反接制动时的机械特性曲线如图 1.12(c)中直线 2 所示, 其理想空载转速为 $-n_0$, 当工作点位于二、四象限时, 电动机处于制动状态。正常工作时, 电动机在 A 点稳定运行。电源反接制动时, 工作点由 A 点平移到曲线 2 上的 B 点, 在制动转矩与负载转矩的作用下, 转速迅速下降到零, 即工作点移到 C 点。此时, 如果电磁转矩大于负载转矩, 应该迅速断开电源, 否则的话, 电动机将反向启动, 最后以速度 n_D 稳定运行在 D 点。

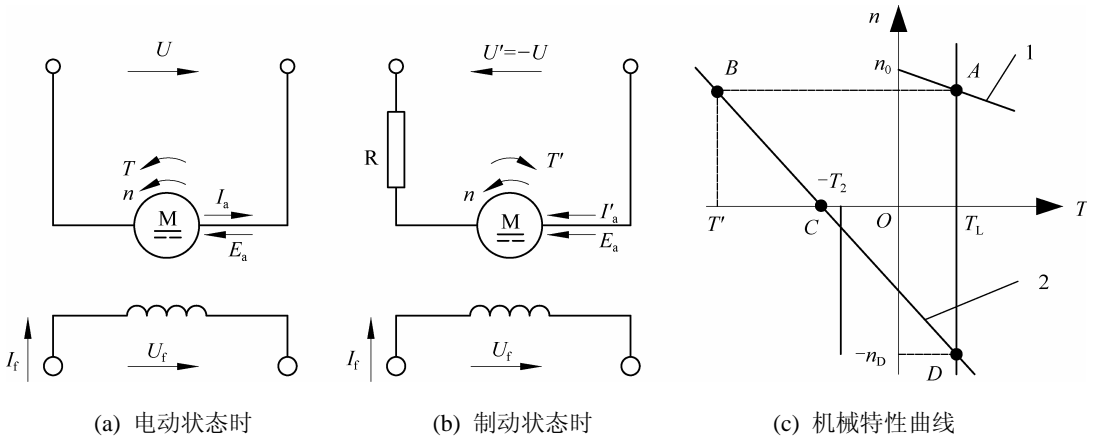


图 1.12 他励电动机电源反接制动

2) 倒拉反接制动

如图 1.13(a)所示, 当串入电阻 $R=0$ 时, 电动机处于电动状态, 电动机在图 1.13(b)中固有机械特性曲线 1 上的 A 点稳定运行。如果将电阻 R 串入电枢回路中, 则工作点将平移到人为机械特性曲线 2 上的 B 点, 此时, 电磁转矩小于负载转矩, 电动机减速。当速度减为零时, 如图中的 C 点, 反电动势为零, 但电枢电流不为零, 它会产生堵转转矩 T_{st} 。由于 T_{st} 小于负载转矩 T_L , 因此, 电动机会反方向运转, 工作状态进入第四象限, 速度反向, 电磁转矩起制动作用。此时, 反电动势和电源电压方向相同, 电枢电流 $I_a = (E+U)/(R_a+R)$ 增大, 电磁转矩增大。当电磁转矩增大到与负载转矩相等时, 电动机以速度 $-n_D$ 稳定运行在 D 点。这种靠改变反电动势方向, 从而使电动机进入制动状态的方法就是倒拉反接制动。通过调节电阻 R 的大小, 可以得到不同的下降速度, 电阻越大, 下降速度越大。

3) 回馈制动

电动机采取正常接线方法, 在外部条件下使电动机的实际工作转速 n 大于它的理想空载转速 n_0 时, 电动机产生的反电动势 E 大于电枢端电压 U , 此时, 电枢电流 I_a 的方向发生改变, 从而使电磁转矩 T 的方向改变, 电动机进入制动状态, 这种制动方式称为回馈制动。

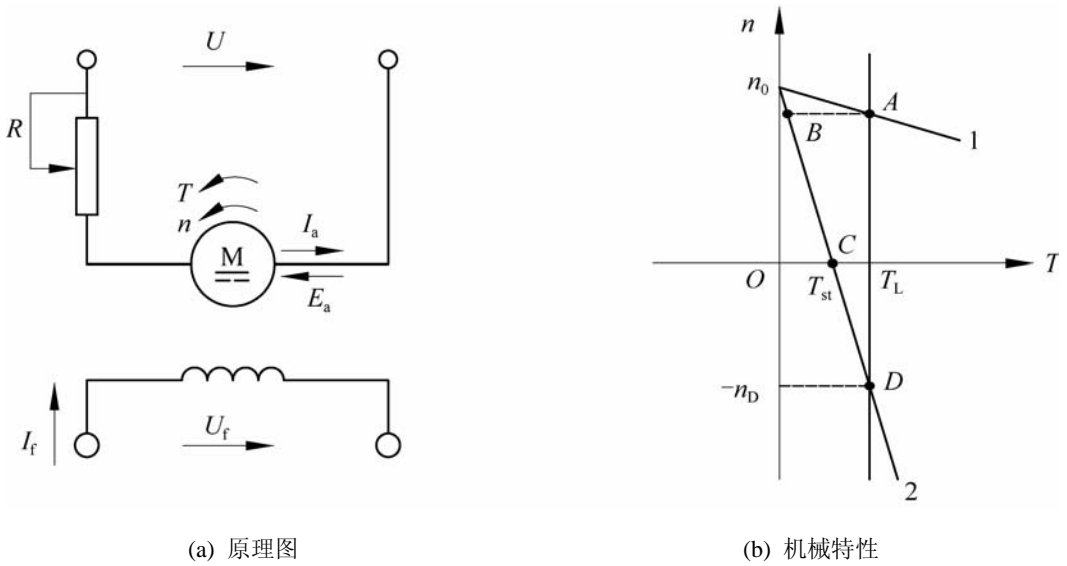


图 1.13 倒拉反接制动

1.1.6 他励电动机的调速特性

电动机拖动一定的负载运行时，转速由工作点决定。电动机的调速就是在负载一定的前提下，人为地改变电动机的参数，从而改变电动机的稳定工作点。速度变化与速度调节是有区别的：速度变化是指由于电动机负载转矩发生变化(增大或减小)，从而引起的电动机转速变化(下降或上升)，此时，电动机的机械特性曲线是不变的；而速度调节则是在负载不变的前提下，改变电动机的机械特性，使工作点发生变化。

由转速的计算式(1-6)可看出：在负载转矩一定时，改变电动机的电枢端电压 U 、磁通 Φ 及电枢电路中的外串电阻 R 都能改变电动机的机械特性，从而改变速度，相应的速度调节方法也有三种。

1. 改变电枢端电压 U 调速

前面已介绍，改变电枢端电压 U 时的人为机械特性曲线是一簇在固有机械特性以下并与之平行的直线，因此，速度的调节也只能在额定转速之下进行调节。

如图 1.14 所示，A 点为电动机的额定运行点，当电压由 U_N 降低到 U_1 时，电动机的人为机械特性曲线 2 为与固有机械特性曲线 1 平行，且过点 $(0, n_{01})$ 的直线，其中， $n_{01}=n_{0N}U_1/U_2$ 。而理想空载转速变为 $n_{01}=n_{0N}U_1/U_N$ 。因此，工作点由额定运行点 A 平行移到 B 点处，此时电磁转矩 T 小于负载转矩 T_L ，系统开始减速，反电动

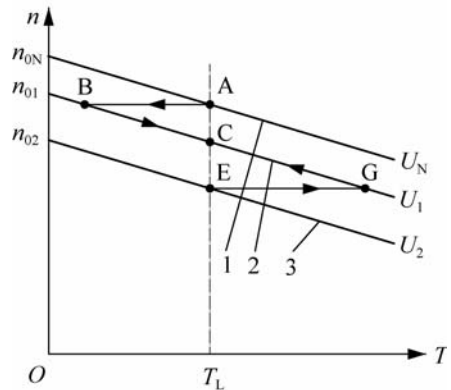


图 1.14 改变电枢端电压 U 调速($U_N > U_1 > U_2$)

势 E 减小, 电枢电流 I_a 增大, 电磁转矩 T 增大, 电动机的工作点沿着人为机械特性曲线从 B 点向 C 点移动。当到达 C 点时, 电磁转矩 T 与负载转矩 T_L 相等, 电动机在 C 点以速度 n_C 稳定运行, 速度降低。

同理, 当电枢端电压为 U_2 时, 人为机械特性为直线 3, 电动机稳定运行在 E 点。若此时升高电压到 U_1 , 则电动机的工作点将沿 E→G→C 移动, 最后稳定运行在 C 点, 速度升高。

由以上分析可看出, 电压变化越小, 速度变化也越小, 当电源电压连续变化时, 转速可以实现平滑无级调节。

2. 改变磁通 Φ 调速

电动机设计时, Φ_N 已接近饱和, 即使励磁电流增大很多, Φ_N 的增加也很小。因此, 改变磁通一般指在额定磁通 Φ_N 以下进行调节, 相应地调速方法又称为弱磁调速。如图 1.15 所示, 在一定的负载 T_L 下, 不同的磁通可得到不同的转速。当 $\Phi = \Phi_1$ 时, 电动机在 A 点稳定运行。当磁通由 Φ_1 降低到 Φ_2 时, 工作点由 A 点平移到 D 点, 然后, 沿特性曲线 2 向 E 点移动, 最后, 在 E 点处稳定运行, 速度升高。如果磁通由 Φ_1 上升到额定磁通 Φ_N 时, 工作点由 A 点平移到 B 点, 然后再沿特性曲线 3 移向 C 点, 最后, 在点 C 处稳定运行, 速度降低。

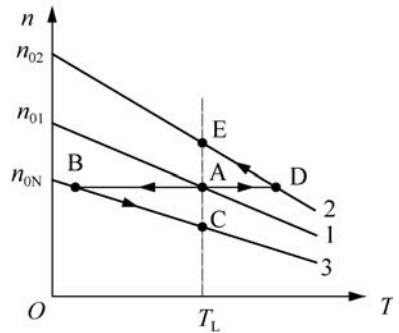


图 1.15 改变磁通 Φ 调速

由于弱磁调速在额定磁通以下调节, 因此, 速度也只能在额定转速之上进行调节, 而转速的升高是有限制的, 因此, 使用弱磁调速时的调速范围不大。另外, 降压调速只能在额定转速以下进行调节。因此, 通常把降压调速和弱磁调速两种方法结合使用, 以电动机的额定转速为基准, 在额定转速以下调节时, 通常使用降压调速, 而在额定转速以上调节时采用弱磁调速。

3. 改变电枢回路外串电阻 R 调速

当改变电枢回路的外串电阻时, 所得到的机械特性曲线为过点 $(0, n_0)$ 的一簇直线, 如图 1.16 所示。当电枢回路中无外串电阻时, 电动机工作在 A 点; 当电枢回路中串入电阻 R_1 时, 电动机从工作点 A 移到 E 后, 向 B 点移动, 最后稳定运行在 B 点。若串入的电阻分别为 R_2 、 R_3 时, 电动机分别稳定工作在 C、D 点。很明显, 改变电阻 R 的大小可调节电动机的速度, 且电阻越大, 速度越低。但这种调速方法存在一些缺点: 只能在额定转速以下进行调节; 电阻越大, 直线斜率越大, 速度变化率加大, 稳定度越低; 另外在空载或轻载时, 电动机所能实现的调速范围不大; 实现无级调速比较困难; 在调速电阻上要消耗大量的电能。因此, 这种调速方法目前已很少使用。

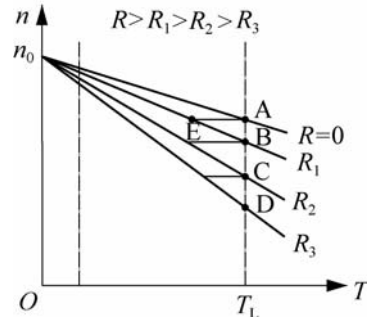


图 1.16 改变电枢回路外串电阻 R 调速

1.2 三相异步电动机的工作原理及特征

异步电动机的种类繁多，按电源相数可分为单相异步电动机和三相异步电动机；按转子结构可分为笼型和绕线转子异步电动机；按用途可分为一般用途的异步电动机和特殊用途的异步电动机等。本节所介绍的是电力拖动系统中应用最广泛的一般用途的三相异步电动机。

1.2.1 三相异步电动机的结构

图 1.17 是三相异步电动机的结构简图，它也由定子和转子两个基本部分组成，定子是静止不动的部分，转子是旋转部分。定子主要由定子铁心、定子绕组和机座三部分组成。定子铁心是电动机磁路的一部分，装在机座的内腔里。为了减小定子铁心的铁损耗，定子铁心通常用 0.5mm 厚的涂有绝缘漆的硅钢片冲压而成。在硅钢片的内圆上冲有一定形状的齿槽，槽内嵌放三相对称的定子绕组，它是异步电动机的定子电路部分。三相定子绕组的六个出线端通常都引到电动机机座的接线盒内，可按需要根据电网电压将三相绕组接成 Y 形或 Δ 形，如图 1.18 所示。定子三相绕组的连接方式由电源的线电压决定，当电动机电源线电压等于每相绕组的额定电压时，定子绕组应接成 Δ 形；当电源线电压为每相绕组额定电压的 $\sqrt{3}$ 倍时，定子绕组应接成 Y 形。机座就是电动机的外壳，主要用来固定和支撑定子铁心，材料一般选用铸铁。

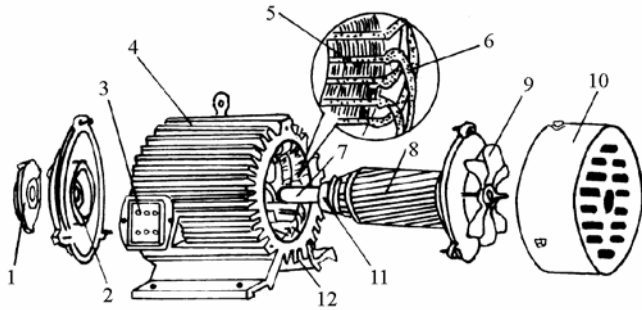


图 1.17 三相异步电动机的结构简图

- 1—轴承盖；2—端盖；3—接线盒；4—散热筋；5—定子铁心；6—定子绕组；
- 7—转轴；8—转子；9—风扇；10—罩；11—轴承；12—机座

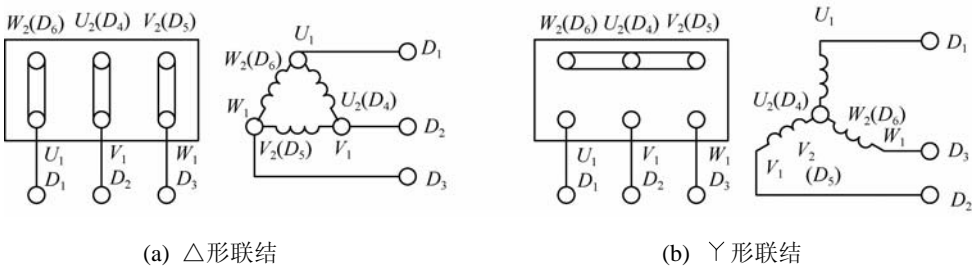


图 1.18 三相异步电动机定子绕组的连接方式

异步电动机的转子主要由转子铁心、转子绕组和转轴等组成。转子铁心也是电动机磁路的一部分，用来安装转子绕组，一般也是由 0.5mm 厚的冲有齿槽的硅钢片冲压而成的，固定在转轴上。转轴材料一般为中碳钢或合金钢，其作用是支撑转子铁心和传递转矩，要求有一定的强度和刚度。转子绕组的作用是产生感应电动势、流过电流并产生电磁转矩，它是异步电动机的转子电路部分。转子按结构不同可分为笼型和绕线转子两种，如图 1.19 所示。

笼型绕组由转子槽中的裸导条以及在铁心两端的端环组成，两个端环将所有转子导条短路，形成一个自行闭合的短路绕组。去掉铁心后，整个绕组的形状像鼠笼，如图 1.19(a)所示，故称为笼型绕组，具有这种绕组的转子称为笼型转子，具有这种转子的异步电动机，称为笼型异步电动机。中、小型异步电动机的笼型绕组采用铸铝液方式，将导条、端环、风扇叶片一起一次浇成，如图 1.19(b)所示，称为铸铝式转子。对于容量超过 100kW 的电动机，由于铸铝质量不易保证，常用钢条插入转子槽内，在两端焊上端环，如图 1.19(c)所示，称为铜条式转子。笼型转子结构简单，制造容易，价格便宜，运行可靠，因此应用比较广泛。

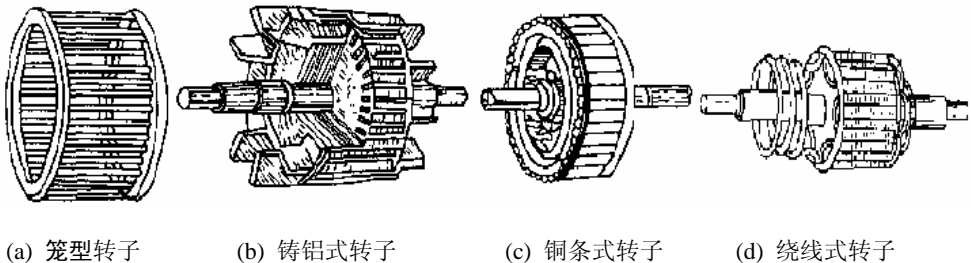


图 1.19 三相异步电动机转子结构示意图

绕线转子的绕组是由嵌放在转子槽内的绝缘导线构成的对称三相绕组，具有这种绕组的转子称为绕线转子，如图 1.19(d)所示，具有这种转子的异步电动机，称为绕线转子异步电动机。绕线转子绕组与定子绕组一样，也是三相对称绕组，转子三相绕组一般采用 Y 形连接，三相绕组的三个出线端分别与安装在转轴上并与转轴绝缘的三个集电环(简称滑环)相连，并通过安装在端盖上固定不动的电刷引出后，与外部电路(一般是变阻器)接通，如图 1.20 所示。

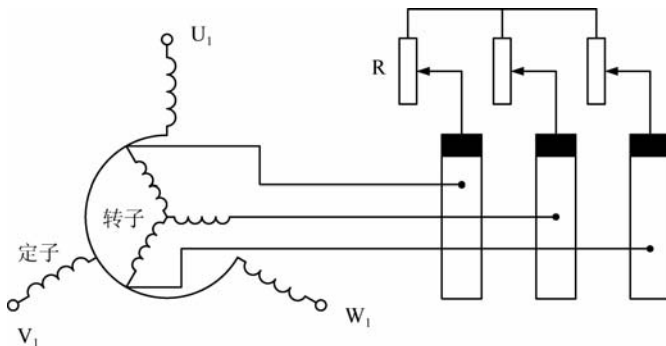


图 1.20 三相异步电动机转子绕组的接线

绕线转子的特点是在转子回路中可以接入附加电阻或其他控制设备，以便改善电动机的启动性能和调速性能。在电动机启动以后和不需要调速时转子三相绕组是被短接的。为

了减小电刷的磨损，中等容量以上的电动机还装有一种提刷装置，当移动提刷装置的手柄时，电刷被提起与集电环脱离接触，同时使三个集电环彼此短接起来，绕线转子异步电动机转子结构较复杂，价格较贵，一般用在对启动和调速性能有较高要求的场合。

1.2.2 三相异步电动机的工作原理

三相异步电动机的工作原理是建立在定子绕组内通入三相交流电流，从而使产生的旋转磁场与转子绕组内感应电流相互作用的基础之上的。

1. 旋转磁场

以定子绕组按Y形连接的三相异步电动机为例，为简单起见，假设每相绕组只有一匝线圈，分别放在定子内圆周的六个凹槽中，图 1.21 所示为三相异步电动机定子绕组示意图。

三相绕组 U_1U_2 、 V_1V_2 、 W_1W_2 在空间上互差 120° ，将 U_2 、 V_2 、 W_2 连接于一点， U_1 、 V_1 、 W_1 分别接三相交流电源，即为Y形连接。当定子三相对称绕组接对称的三相交流电源后，在三相绕组中会产生对称的三相交流电流，从而在每一相中产生自己的交变磁场，下面来分析三相电流所产生的合成磁场。为了研究方便，规定在定子绕组中，各相绕组从首端流入末端，即 U_1 流入 U_2 、 V_1 流入 V_2 、 W_1 流入 W_2 时的电流方向为正方向，取 U 相电流的初相位为零，则有

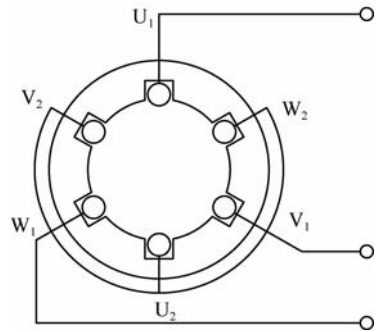


图 1.21 三相异步电动机定子绕组示意图

$$\begin{aligned}
 i_U &= I_m \sin \omega t \\
 i_V &= I_m \sin(\omega t - 120^\circ) \\
 i_W &= I_m \sin(\omega t - 240^\circ)
 \end{aligned}
 \tag{1-21}$$

当 $\omega t=0^\circ$ 时， $i_U=0$ ，U 相绕组中没有电流；

i_V 为负，电流从 V_2 流入，用 \oplus 表示，从 V_1 流出，用 \ominus 表示； i_W 为负，电流从 W_2 流入，从 W_1 流出，如图 1.22 (a) 所示。根据右手螺旋定则，可以得到此时电流的合成磁场如图中虚线所示。对于转子而言，磁力线由上方流进，为 N 极，从下方流出，为 S 级，此时产生的磁场是两极磁场，磁极对数 $p=1$ 。

当 $\omega t=120^\circ$ 时， i_U 为正，电流从 U_1 流入， U_2 流出； $i_V=0$ ，绕组中没有电流； i_W 为负，电流从 W_2 流入，从 W_1 流出，此时的合成磁场如图 1.22(b) 中虚线所示，合成磁场大小不变，方向沿顺时针方向旋转 120° 。

同理，可得到 $\omega t=240^\circ$ 、 360° 时的合成磁场如图 1.22 (c)、(d) 所示，合成磁场分别沿顺时针方向旋转 240° 和 360° 。

由此可以看出，定子绕组三相交流电流所产生的合成磁场是一个旋转磁场，当线圈匝数为一时，产生的是两极旋转磁场，磁极对数 $p=1$ ，电流变化一周时，合成磁场在空间上旋转一周，旋转的方向与电流相序一致。当电流相序为 $U \rightarrow V \rightarrow W \rightarrow U$ 时，合成磁场的旋转方向也为 $U \rightarrow V \rightarrow W \rightarrow U$ ，如图 1.22 中的顺时针方向。如果改变任意两相的相序，即将连接三相电源的定子绕组中的任意两根线对调，则可改变旋转磁场的方向。

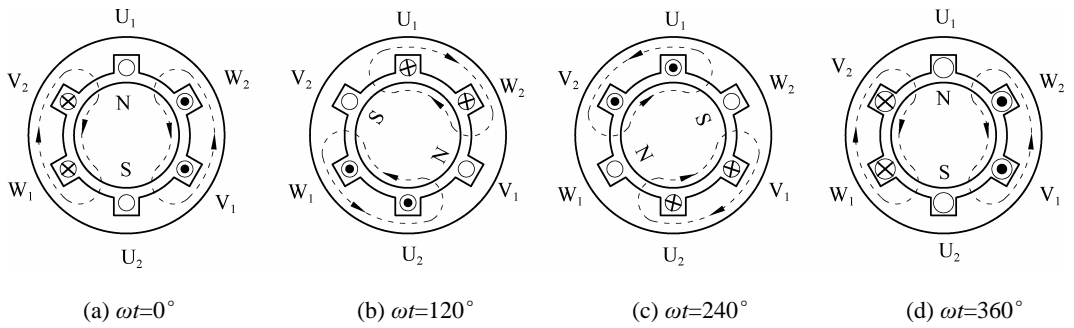


图 1.22 两极旋转磁场的形成

合成磁场产生的磁极对数与线匝的数量有关。如图 1.23 所示，当每相绕组由两匝线圈串联而成时，三相绕组应分别放在定子内圆周的 12 个凹槽中，接线方式如图 1.23(a)所示。当定子通入三相电流，在 $\omega t=0^\circ$ 时产生的磁场应该是四极磁场，磁极对数 $p=2$ 。同理，可以证明，当 $p=2$ ，电流变化一周时，合成磁场在空间上旋转 $1/2$ 周，即 180° 。

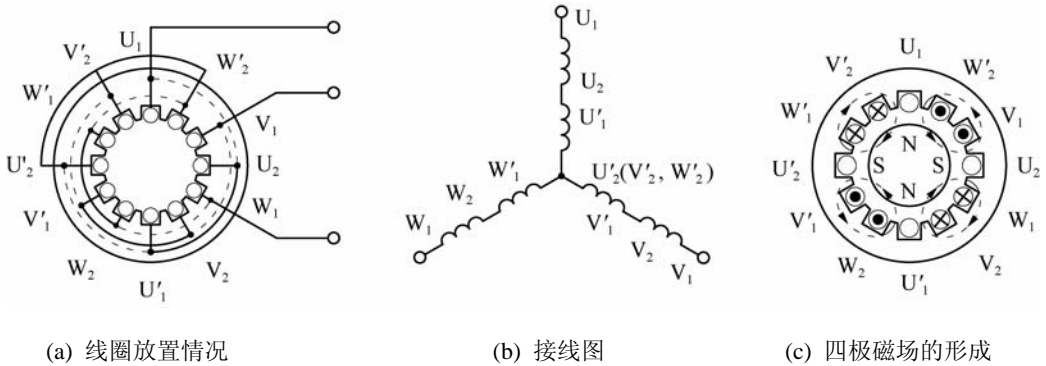


图 1.23 四极旋转磁场的形成

由以上分析可知，当磁极对数为 p ，电流频率为 f 时，电流每秒变化 f 周，此时，旋转磁场每秒转过 f/p 周。如果以 n_0 表示每分钟旋转磁场的速度，则有

$$n_0 = \frac{60f}{p} \text{ (r/min)} \quad (1-22)$$

通常称 n_0 为三相异步电动机的同步转速。

2. 工作原理

图 1.24 所示为三相异步电动机的工作原理简图，当定子产生同步转速为 n_0 的逆时针方向的旋转磁场时，相当于磁场不动，转子导体以速度 $-n_0$ 顺时针方向切割磁力线。转子导体切割磁力线时，在导体中产生感应电动势，

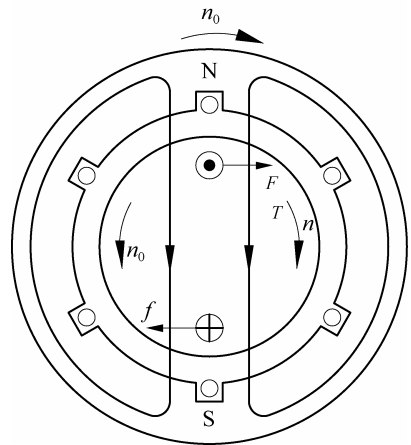


图 1.24 三相异步电动机工作原理简图

在转子绕组中产生感应电流。根据右手螺旋定则，可以确定图 1.24 中转子上半部导体中的感应电动势和感应电流的方向为由里向外穿出纸面，下半部导体中的感应电动势以及感应电流的方向为由外向里穿入纸面。由于转子感应电流的存在，根据安培力定律，转子在旋转磁场中会受到电磁力 f 的作用，其方向用左手螺旋定则确定。如图 1.24 所示，转子受到的电磁力对转轴产生了一个逆时针方向的电磁转矩 T 。在电磁转矩的作用下，转子随旋转磁场沿同样的方向以某一转速 n 旋转。如果转子拖动生产机械，则作用在转子上的电磁转矩将克服负载转矩而做功，电动机输出机械功率，从而实现机/电能量的变换。由于转子导体中的电动势和电流是导体切割旋转磁场的磁力线而感应出来的，因此三相异步电动机又叫感应电动机。

由于要克服负载转矩，异步电动机的转速 n 总是略低于同步转速 n_0 。同步转速 n_0 和转子转速 n 之差与同步转速 n_0 的比值称为转差率，用 s 表示，即

$$s = \frac{n_0 - n}{n_0} \quad (1-23)$$

转差率 s 是异步电动机的一个重要参数，它表示异步电动机各种不同的运行情况。在电动机启动时，转子转速 $n=0$ ，所以转差率 $s=1$ 。如果电动机所产生的电磁转矩足以克服机械负载转矩，转子开始旋转，且转速不断上升，转差率不断减小。假如所有阻力转矩(包括电动机本身的轴承摩擦等)全部为零，则称电动机处于理想空载状态，转子转速理论上可以上升到同步转速 n_0 ，转差率 $s=0$ 。事实上，这种情况是不可能存在的。因为如果转子的转速与同步转速相等，且转向相同，则转子与旋转磁场之间就不存在相对运动，转子导体也不切割磁力线，转子导体中也就没有感应电动势和感应电流，电动机的电磁转矩为零，转子不可能旋转。电动机速度与同步转速不可能达到同步，这也正是异步电动机称为“异步”的原因。在正常运动范围内，转差率的数值通常都是很小的。当电动机带额定负载时，转子转速与同步转速相差很小，转差率的取值一般为 0.01~0.06；而空载时，可以认为转子转速等于同步转速。

1.2.3 三相异步电动机的电路分析

三相异步电动机电路由定子电路和转子电路两部分组成，分别指定子绕组电路与转子绕组电路，其电磁关系与变压器相类似。

1. 定子、转子电路分析

假设定子和转子绕组的匝数分别为 N_1 、 N_2 。图 1.25 所示为三相异步电动机的一相等效电路图，其中， \dot{U}_1 为电源电压， \dot{E}_1 、 \dot{E}_2 分别为定子、转子的感应电动势， R_1 、 R_2 分别为定子、转子绕组的电阻， X_1 、 X_2 分别为定子、转子绕组的漏磁感抗。

对于定子电路来说，电压平衡方程式用复数表示为

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_1 R_1 + j \dot{I}_1 X_1 - \dot{E}_1 \quad (1-24)$$

对于定子电路来说，电阻 R_1 和漏磁感抗 X_1 通常比较小，两者上的电压降与电源电压 U_1 相比，可以忽略不计。因此，定子的感应电动势与电源电压几乎相等，即

$$\dot{U}_1 \approx -\dot{E}_1 \quad U_1 \approx E_1 \quad (1-25)$$

对于转子电路来说, 感应电动势与转子绕组上的电阻和漏磁感抗上的电压降之和相等, 即

$$\dot{E}_2 = \dot{I}_2 R_2 + j \dot{I}_2 X_2 \quad (1-26)$$

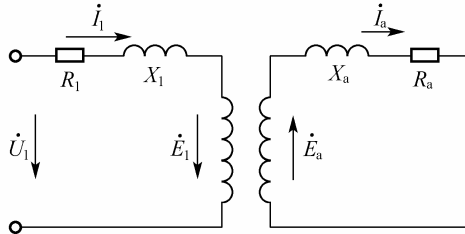


图 1.25 三相异步电动机的一相等效电路图

旋转磁场旋转时, 在每相中产生的磁场是按正弦规律变化的, 即 $\Phi = \Phi_m \sin \omega t$ 。其中, Φ_m 为通过每相绕组磁通的最大值, 在数值上等于旋转磁场的每极磁通 Φ 。因此, 定子每相绕组中的感应电动势为

$$e_1 = -N_1 \frac{d\Phi}{dt} \quad (1-27)$$

将 $\Phi = \Phi_m \sin \omega t$ 及 $\omega = 2\pi f_1$ 代入式(1-27), 并整理得

$$e_1 = -2N_1 \Phi_m \pi f_1 \cos \omega t$$

式中: f_1 —— 定子感应电动势 e_1 的频率。

其有效值为

$$E_1 = \frac{\sqrt{2}}{2} e_{1\max} = 4.44 f_1 N_1 \Phi \quad (1-28)$$

同理, 可计算转子电路感应电动势的有效值为

$$E_2 = 4.44 f_2 N_2 \Phi \quad (1-29)$$

式中: f_2 —— 转子感应电动势 e_2 的频率。

定子与旋转磁场之间的相对速度为 n_0 , 因此有

$$f_1 = pn_0 / 60 = f \quad (1-30)$$

式中: f —— 电源频率。

转子与旋转磁场之间的相对速度为 $n_0 - n$, 因此有

$$f_2 = \frac{p(n_0 - n)}{60} = \frac{pn_0}{60} \cdot \frac{(n_0 - n)}{n_0} = f_1 s \quad (1-31)$$

$$\text{即} \quad E_2 = 4.44sf_1N_2\Phi \quad (1-32)$$

转子的漏磁感抗为

$$X_2 = \omega_2 L_{L2} = 2\pi f_2 L_{L2} = 2\pi s f_1 L_{L2} \quad (1-33)$$

由此可看出, 转子的感应电动势 E_2 、频率 f_2 及漏磁感抗 X_2 都与转差率 s 有关, 即与转速 n 有关。 s 越大, E_2 、 f_2 和 X_2 越大。当转子不动, $n=0$, $s=1$ 时, 三者达到最大值

$$E_{2m} = 4.44f_1N_2\Phi \quad (1-34)$$

$$f_{2m} = f_1 \quad (1-35)$$

$$X_{2m} = 2\pi f_1 L_{L2} \quad (1-36)$$

转子旋转时, 有

$$E_2 = sE_{20} \quad (1-37)$$

$$f_2 = sf_1 \quad (1-38)$$

$$X_2 = sX_{20} \quad (1-39)$$

由式(1-26)可知, 转子电流为

$$I_2 = \frac{E_2}{\sqrt{R_2^2 + X_2^2}} = \frac{sE_{20}}{\sqrt{R_2^2 + (sX_{20})^2}} \quad (1-40)$$

由于漏磁感抗 X_2 的存在, 转子电流 I_2 在相位上比 E_2 要滞后 φ_2 角度。因此, 转子的功率因数为

$$\cos \varphi_2 = \frac{R_2}{\sqrt{R_2^2 + X_2^2}} = \frac{R_2}{\sqrt{R_2^2 + (sX_{20})^2}} \quad (1-41)$$

由式可看出, 转子电流 I_2 , 转子功率因数 $\cos \varphi_2$ 也与转差率 s 有关, 即与转速 n 有关。

【例 1.2】 一台四极的三相异步电动机, 电源频率 $f_1=50\text{Hz}$, 额定转速 $n_N=1440\text{r/min}$, 转子电阻 $R_2=0.02\ \Omega$, 转子电抗 $X_{20}=0.08\ \Omega$, 转子电动势 $E_{20}=20\text{V}$ 。试求: (1)电动机的同步转速 n_0 ; (2)电动机启动时的转子电流 I_{2st} ; (3)电动机在额定转速时转子电动势的频率 f_{2N} ; (4)电动机在额定转速时的转子电流 I_{2N} 。

解:

(1) 电动机的同步转速

$$n_0 = \frac{60f_1}{p} = \frac{60 \times 50}{2} = 1500(\text{r/min})$$

(2) 电动机启动时的转子电流

$$I_{2st} = \frac{E_{20}}{\sqrt{R_2^2 + X_{20}^2}} = \frac{20}{\sqrt{0.02^2 + 0.08^2}} = 242.5(\text{A})$$

(3) 在额定转速下, 电动机的转差率

$$s_N = \frac{n_0 - n_N}{n_0} = \frac{1500 - 1440}{1500} = 0.04$$

在额定转速时转子电动势的频率

$$f_{2N} = s_N f_1 = 0.04 \times 50 = 2\text{Hz}$$

(4) 电动机在额定转速时的转子电流

$$I_{2N} = \frac{s_N E_{20}}{\sqrt{R_2^2 + (s_N X_{20})^2}} = \frac{0.04 \times 20}{\sqrt{0.02^2 + (0.04 \times 0.08)^2}} = 40(\text{A})$$

2. 三相异步电动机的功率传递

三相异步电动机从电源输入到定子电路中的功率 P_1 为

$$P_1 = 3I_1 U_1 \cos \phi_1 \quad (1-42)$$

式中: I_1 —— 定子相电流;

U_1 —— 定子相电压;

$\cos \phi_1$ —— 定子的功率因数。

输入功率 P_1 和从定子电路通过旋转磁场输出到转子电路中的电功率 P 之间存在这样的关系:

$$P_1 = P + \Delta P_1 \quad (1-43)$$

式中: ΔP_1 —— 定子上的铜损及铁损。

电功率为

$$P = 3I_2 U_2 \cos \phi_2 \quad (1-44)$$

电功率 P 和输出功率 P_2 之间存在这样的关系:

$$P = P_2 + \Delta P_2 + \Delta P \quad (1-45)$$

式中: ΔP_2 —— 转子铜损和铁损, 铁损相当低, 一般可忽略不计;

ΔP —— 机械损失功率。

若忽略异步电动机在转子上的损耗及机械损失, 则有

$$P_2 = T_2 \omega \approx T \omega \quad (1-46)$$

式中: T —— 三相异步电动机的电磁转矩;

T_L —— 电动机轴上的输出功率。

电动机的效率 η 指的是输出功率与输入功率的比值, 即

$$\eta = P_2 / P_1 \quad (1-47)$$

3. 电磁转矩 T

异步电动机的电磁转矩 T 等于电功率 P 与转子相对于旋转磁场的角速度 ω_2 之比, 即

$$T = \frac{P}{\omega_2} = \frac{3I_2U_2 \cos \phi_2 p}{2\pi s f_1} \quad (1-48)$$

将式(1-34)、式(1-37)、式(1-40)代入式(1-48), 并整理得

$$T = \frac{3U_1^2 R_2 s p}{2\pi f_1 [R_2^2 + (sX_{20})^2]} \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^2 = \frac{KU_1^2 R_2}{R_2^2 + (sX_{20})^2} \quad (1-49)$$

式中: $K = \frac{3sp}{2\pi f_1} \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^2$ —— 与电动机结构参数及电源频率有关的常数。

由此可看出, 对于一台三相异步电动机, 当电源频率即定子频率一定时, 电动机的电磁转矩与电源电压的平方成正比, 同时与转子绕组的电抗及转差率有关。

1.2.4 三相异步电动机的机械特性

三相异步电动机机械特性指的是电源电压 U 、电源频率 f 及定、转子电路的外接电阻和电抗不变时, 转速 n 与电磁转矩 T 之间的函数关系。因为 $s=(n_0-n)/n_0$, 同步转速是一定值, 三相异步电动机的转速与转差率之间存在一一对应关系, 因此, 通常也把电磁转矩和转差率之间的函数关系称为异步电动机的机械特性曲线, $T=f(s)$ 和 $n=f(T)$ 都称为三相异步电动机的机械特性方程。与直流电动机一样, 它也有固有机械特性和人为机械特性之分。

1. 固有机械特性

三相异步电动机的固有机械特性指的是在额定电压和额定频率下, 定、转子电路中没有接入任何附加电阻及电抗时, 转速 n 和转矩 T 之间的函数关系。

由式(1-49)可知, 当电源电压、频率不变及定、转子电路中没有串入附加电阻及电抗时, 电磁转矩 T 只与转差率 s , 即转速 n 有关。对应于不同的转速 n , 有不同的转差率 s , 根据式(1-49)可算出相应的电磁转矩 T 。把 T 随 n 变化的关系用曲线描绘出来, 即得到异步电动机的固有机械特性曲线, 如图 1.26 所示。

异步电动机的固有机械特性曲线上有四个特殊点可以基本决定它的性能。

1) 启动点

对应这一点的转速 $n=0$, $s=1$, 电磁转矩为启动转矩 T_{st} , 其计算公式为

$$T_{st} = \frac{KR_2U_1^2}{R_2^2 + X_{2m}^2} \quad (1-50)$$

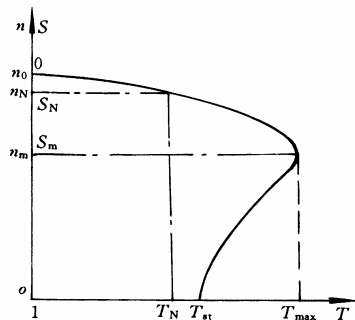


图 1.26 异步电动机的固有机械特性曲线

启动转矩反映电动机直接启动时的带负载能力。通常用启动转矩与额定转矩之比 $\lambda_{st}=T_{st}/T_N$ 来衡量异步电动机的启动能力。 λ_{st} 越大, 电动机的启动能力越强。此时的定子电流为启动电流, 用 I_{st} 表示, 一般为额定电流的 4~7 倍。

2) 额定工作点

这一点为异步电动机在额定条件下的工作点, 对应的电磁转矩为额定电磁转矩 T_N , 对应的转差率和转速分别称为额定转差率 s_N 和额定转速 n_N , 对应的电流为额定电流 I_N 。额定转矩和额定转差率分别为

$$T_N = \frac{9550P_N}{n_N} \quad (1-51)$$

$$s_N = \frac{n_0 - n_N}{n_0} \quad (1-52)$$

式中: P_N 、 n_N ——分别为额定功率和额定转速, 这两者都标注在电动机的铭牌上。

3) 最大电磁转矩点

这是电磁转矩最大的工作点, 相应的转矩称为最大转矩或临界转矩 T_{max} , 是电动机所能提供的极限转矩。对应的转差率为临界转差率 s_m , 临界转差率可由 $dT/ds=0$ 求得。即

$$s_m = R_2 / X_{2m} \quad (1-53)$$

将式(1-53)代入式(1-49)得最大转矩 T_{max} 为

$$T_{max} = \frac{KU_1^2}{2X_{2m}} \quad (1-54)$$

最大转矩是衡量异步电动机过载能力的一个重要参数。当异步电动机受到短时冲击载荷, 出现过载时, 只要负载小于电动机的最大转矩, 电动机仍能运转。冲击载荷消失后, 电动机能自动回到额定工作点稳定运行。通常用最大转矩与额定转矩之比 $\lambda_{st} = T_{st}/T_N$ 来衡量异步电动机的过载能力, λ_{st} 越大, 过载能力越强, λ_{st} 一般在 1.6~2.2 之间, 起重、冶金机械用的电动机过载能力较大, 可达 2~3。

4) 理想空载点

在理想空载点, 相应的转速为同步转速 n_0 , 转差率 $s=0$ 。事实上这一点是永远不可能达到的。

2. 人为机械特性

由式(1-49)可知, 当电动机结构固定时, 人为地改变某些参数, 如定子相电压 U_1 , 电源频率 f 即定子频率 f_1 , 转子电路中串联三相对称电阻及电抗、磁极对数 p 等时, 都能得到不同的机械特性, 这就是三相异步电动机的人为机械特性。

1) 改变定子相电压 U_1 时的人为机械特性

由式(1-22)、式(1-49)和式(1-53)可看出, 电磁转矩 T 与定子相电压 U_1 的平方成正比, 而同步转速 n_0 及临界转差率 s_m 与定子相电压 U_1 无关。因此, 由三相异步电动机的固有机械特性曲线, 可得到不同电压时的人为机械特性曲线如图 1.27 所示。很明显, 和固有机

特性曲线相比，改变电压时的人为机械特性曲线理想空载点不变，临界工作点所对应的转速不变，而转矩与电源电压的平方成正比；启动点所对应的转矩也与电源电压的平方成正比。三相异步电动机只能在额定电压以下进行工作，因此只有降低定子相电压时的人为机械特性曲线。降低电源电压或在定子电路中串联电阻或电抗时都能使定子相电压降低。

2) 改变电源频率 f_1 时的人为机械特性

改变电源频率时，同步转速、转矩、转差率等参数与频率之间存在如下关系： $n_0 \propto f_1$ ， $X_{2m} \propto f_1$ ， $T_{max}、T_{st} \propto 1/f_1^2$ ， $s_m \propto 1/f_1$ 。因此，当电源频率升高时，理想空载转速升高，临界转差率降低，所对应的临界转速升高，最大转矩和启动转矩降低。由固有机械特性所得的人为机械特性曲线如图 1.28 所示。

3) 转子电路串三相对称电阻 R 时的人为机械特性

在转子电路中串三相对称电阻 R 时，理想空载转速不变，临界转差率与电阻成正比，最大转矩不变，启动转矩与电阻近似成反比。由固有机械特性曲线，所得到的串不同转子电阻时所对应的人为机械特性曲线如图 1.29 所示。转子电阻 R 越大，临界转差率 s_m 越大，临界转速 n_m 越小，启动转矩 T_{st} 越小，理想空载转速 n_0 不变，最大转矩 T_{max} 不变。

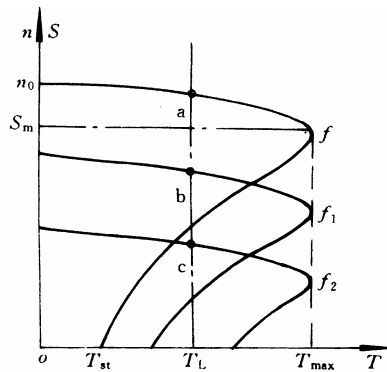
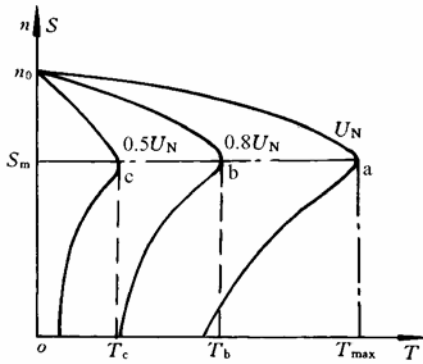


图 1.27 降低定子相电压时的人为机械特性曲线

图 1.28 改变电源频率时的人为机械特性曲线

4) 改变定子磁极对数 p 时的人为机械特性

一台三相异步电动机的磁极对数 p 是由其结构决定的。一般的三相异步电动机磁极对数是固定不变的，但有时为了满足生产机械的特定要求，常专门生产磁极对数可变的多速异步电动机，通常有双速、三速、四速异步电动机。

当改变磁极对数 p 时，同步转速 n_0 与 p 成反比，启动转矩和最大转矩与 p 成正比，临界转差率与 p 无关。由固有机械特性所得的人为机械特性曲线如图 1.30 所示。

3. 转矩的适用公式

对于电动机的使用者来说，无法知道电动机的某些参数，因此不能用式(1-49)来计算转矩。下面介绍一种简便的计算公式，即转矩实用公式，根据手册或产品目录中所给出的数据，应用该公式就可计算出某一转差率 s 时的转矩 T 。步骤如下：

1) 求临界转差率 s_m

$$s_m = s_N (\lambda_m + \sqrt{\lambda_m^2 - 1}) \tag{1-55}$$

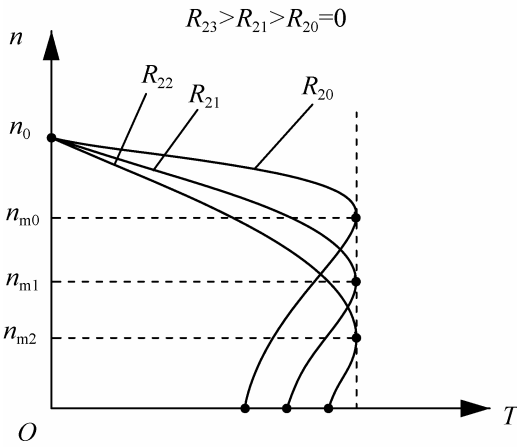


图 1.29 转子回路中串电阻 R 时的人为机械特性曲线

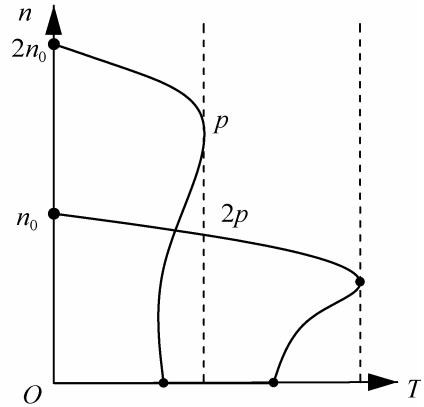


图 1.30 改变定子磁极对数 p 时的人为机械特性曲线

2) 求转差率为 s 时对应的转矩 T

$$T = 2T_{\max} / \left(\frac{s}{s_m} + \frac{s_m}{s} \right) \quad (1-56)$$

1.2.5 三相异步电动机的启动特性

三相异步电动机的启动和直流电动机一样，要求启动转矩尽可能大，而启动电流尽可能小。异步电动机在启动时，如果直接接入电网中，在启动的瞬间，由于转子与旋转磁场之间的相对速度非常大，在转子绕组中产生的感应电动势及感应电流也相当大，从而在定子绕组中产生很大的启动电流。一般来说，此时的启动电流为额定电流的 5~7 倍，这种直接启动的方法只适用于小容量电动机的启动；而对于中、大容量的电动机，通常必须采取措施来限制其启动电流。

笼型异步电动机的启动通常采用直接启动和降压启动两种方法。绕线转子异步电动机由于其转子绕组中可以串入电阻，一般采用转子串电阻分级启动或在转子回路中串频敏变阻器启动。

1. 笼型异步电动机的启动

1) 直接启动

直接启动就是利用刀开关或接触器把电动机的定子绕组直接接到具有额定电压的电源上，在额定电压下直接进行启动，如图 1.31 (a)所示。

这种启动方法的优点是操作和启动设备简单可靠，不需要附加启动设备。笼型异步电动机能否直接启动，主要取决于电动机容量与变压器容量之比。一般规定：用电单位如有独立的变压器，则在电动机启动频繁时，其容量小于变压器容量的 20%时允许直接启动；在电动机不经常启动时，其容量小于变压器容量的 30%时允许直接启动。如果没有独立的变压器(与照明共用)，通常采用经验公式来估算。

$$\frac{\text{启动电流}}{\text{额定电流}} \leq \frac{\text{电源总容量}}{4 \times \text{电动机功率}} + \frac{3}{4} \quad (1-57)$$

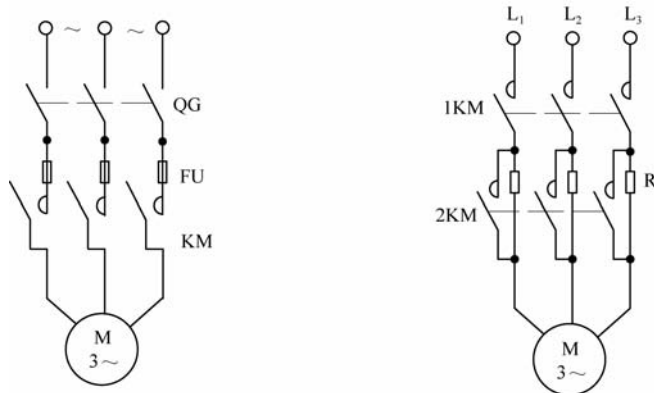
随着电力系统容量的不断增大，采用直接启动的笼型异步电动机日益增多，数百千瓦的异步电动机也常可以采用直接启动。

2) 降压启动

降压启动指的是启动时，降低定子电压 U_1 ，从而限制它的启动电流。由异步电动机的工作原理可知，启动电流 $I_{st} = N_2 I_2 / N_1 \propto U_1$ ，由式(1-50)可知启动转矩与定子电压 U_1 的平方成正比。当降低定子电压时，启动电流会下降，但启动转矩下降得更多，因此，降压启动的带负载能力较差，只适合于轻载启动。降压启动的方法很多，有在定子绕组中串联电阻或电抗器启动，Y—Δ换接降压启动，自耦变压器降压启动等。

(1) 定子绕组串联电阻或电抗器降压启动。这种降压启动方法的接线原理图如图 1.31 (b) 所示。启动时，1KM 接通，2KM 断开，在定子绕组电路中串入一个三相电阻器或电抗器 R ，使电动机启动时一部分电压降落在电阻或电抗器 R 上，于是加在电动机定子上的电压就低于电网电压，从而减小了启动电流。待电动机转速接近额定转速时，2KM 接通，将电阻器或电抗器短接，电动机在额定电压下正常运行。

由于电动机的转矩与电压的平方成正比，所以电动机的启动转矩较小；同时，如果采用串联电阻降压启动，则在电阻上的功率损耗较大，如采用串联电抗器降压启动，当 2KM 短接电抗器时，电抗器储存的能量将产生较大的短路电流。这种方法仅用于要求启动转矩不大，启动不太频繁，但要求平稳启动的中等容量的电动机。



(a) 异步电动机的直接启动 (b) 定子绕组串联电阻或电抗器的降压启动

图 1.31 笼型异步电动机的启动

(2) Y—Δ换接启动。Y—Δ换接启动的线路如图 1.32 所示。当 1KM 和 2KM 同时接通时，定子绕组为Δ，当 1KM 和 3KM 同时接通时，定子绕组为Y连接。电动机启动时，1KM、3KM 接通，采用Y连接，则实际加在定子绕组上的电压为相电压 U_1 ；当电动机速度上升到接近额定速度 n_N 时，1KM、2KM 接通，采用Δ连接，则实际加在定子绕组上的电压为电源线电压 $\sqrt{3}U_1$ ，相当于降低了电动机启动时加在定子绕组上的电压。

采用Y形连接启动时，定子绕组上的启动电流(线电流)与相电流相等， $I_{stY} = U_1 / Z$ 。直接

启动时定子绕组上的启动电流(线电流)是相电流的 $\sqrt{3}$ 倍,即 $I_{st\gamma}=\sqrt{3}U_1/Z$ 。由此可看出,采用 $\gamma-\Delta$ 降压启动时,启动电流为直接启动时的 $1/3$ 。启动转矩与电压的平方成正比,因此,采用 $\gamma-\Delta$ 降压启动时,启动转矩也为直接启动时的 $1/3$ 。由此可看出, $\gamma-\Delta$ 降压启动只适用于轻载或空载的场合,并只用于正常运行时为 Δ 连接的电动机。

(3) 自耦变压器降压启动。采用自耦变压器降压启动的接线如图 1.33 所示。T 为三相自耦变压器, N_1 为一次侧绕组线圈匝数, N_2 为二次侧绕组线圈匝数。启动时,1KM 断开,2KM、3KM 闭合,将自耦变压器接入电路,此时,加在一次侧上的是电源电压 U_1 ,而加在定子绕组上的电压为二次侧上的电压,即 $U_2=N_1U_1/N_2$ 。设 $K=N_1/N_2$,则 $U_2=KU_1$ 。当电动机速度升高到接近额定转速 n_N 时,断开 2KM、3KM,接通 1KM,电动机全压正常运转。

电动机定子绕组上的电流即为二次侧电流 $I_{st1}=KI_1$,其中, I_1 为正常启动时的电流。而电路中的启动电流则为自耦变压器一次侧上的电流, $I_{st}=KI_{st1}=K^2I_1$,即采用自耦变压器降压启动时,启动电流为直接启动时的 K^2 倍。启动转矩与电压平方成正比,为正常启动时的 K^2 倍。

由此可看出,采用自耦变压器降压启动与定子电路中串入电阻或电抗器启动相比较,在降低同样的电压时,所得到的启动转矩是一样的,但自耦变压器降压启动时的启动电流更小。因此,在相同启动电流的前提下,自耦变压器降压启动可获得更大的启动转矩,常用在要求启动转矩较大、容量较大的场合。但自耦变压器降压启动存在设备体积大、价格贵、维修不方便的缺点。

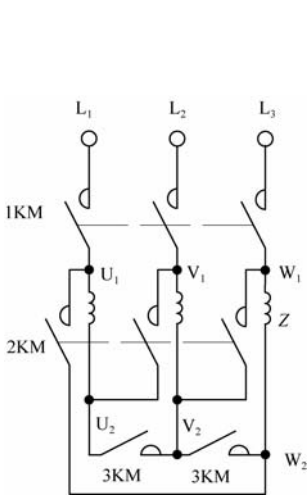


图 1.32 $\gamma-\Delta$ 降压启动的线路图

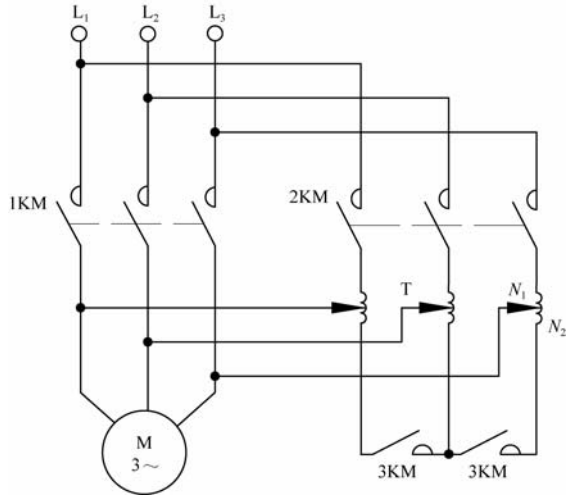


图 1.33 自耦变压器降压启动的接线图

2. 绕线转子异步电动机的启动

笼型异步电动机通常采用降压启动的办法,这种方法在限制启动电流的同时,更多地降低了启动转矩,因此,笼型异步电动机通常用在空载和轻载的场合,而对于大功率重载的情况,一般不能满足要求。绕线转子异步电动机由于其转子绕组中可以串入电阻,可以在限制启动电流的同时,获得较大的启动转矩,因此,其启动性能好,常用在大功率重载的场合。绕线转子异步电动机常用的启动方法有两种,转子回路中串电阻分级启动及转子

回路中串频敏变阻器启动。

1) 转子回路中串电阻分级启动

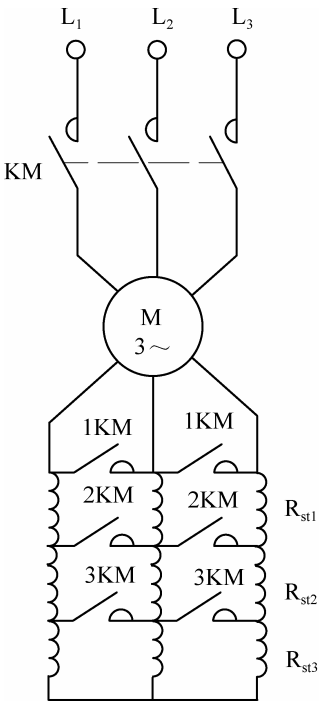
绕线转子异步电动机转子回路中串电阻分级启动的接线如图 1.34(a)所示。启动步骤如下。

(1) 启动时, KM 闭合, 1KM、2KM、3KM 断开, 启动电阻 R_{st1} 、 R_{st2} 、 R_{st3} 全部接入转子回路中, 其人为机械特性曲线如图 1.34 (b)中曲线 1 所示。由于启动转矩 T_{st1} 大于负载转矩 T_L , 电动机从启动点 A 开始在加速转矩的作用下升速。

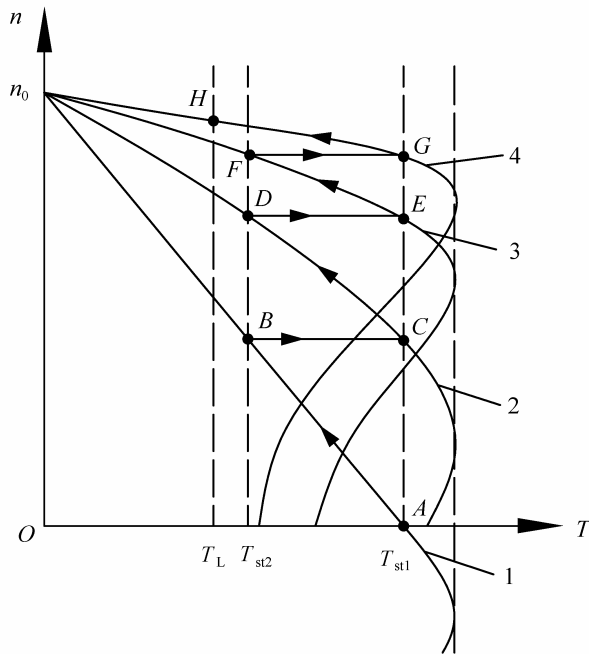
(2) 当电磁转矩减小到 T_{st2} 时, 即在工作点 B 处, 将 3KM 闭合, 短接启动电阻 R_{st3} , 启动电阻 R_{st1} 、 R_{st2} 接入转子回路中, 人为机械特性曲线如图 1.34 (b)中曲线 2 所示。由于机械惯性的作用, 转速不可能产生突变, 因此, 工作点从 B 点平移到曲线 2 上的 C 点, 然后, 电动机沿机械特性曲线 2 升速运行。

(3) 同理, 当电磁转矩减小到 T_{st2} 时, 即 C 点, 将 KM2 闭合, 启动电阻 R_{st1} 接入转子回路中, 人为机械特性如图 1.34 (b)中曲线 3 所示。工作点从 C 点移到 D 点, 再向 F 点运行。

(4) 当电磁转矩减小到 T_{st2} 时, 即 F 点, 将 1KM 闭合, 短接启动电阻 R_{st1} , 所有启动电阻都不接入转子回路中, 机械特性如图 1.34 (b)中固有机机械特性曲线 4 所示。工作点从 F 点平移到 G 点, 然后沿着固有机机械特性曲线从 G 点运行到额定工作点 H 点, 最终稳定运行在 H 点, 启动过程结束。



(a) 接线图



(b) 启动特性曲线

图 1.34 转子回路中串电阻分级启动

在速度不断升高的过程中,电磁转矩慢慢减小,加速度也慢慢减小。为了获得较大的加速度,使电动机能快速升高到额定转速 n_N ,缩短启动过程,绕线转子异步电动机的启动通常分多级进行,且级数越多,转子电流及电磁转矩冲击越小,启动越平稳;但随着级数的增多,需要的控制设备增加,维修也越困难,在实际应用中通常采用三级或四级启动。如果串入转子中的电阻能够在启动过程中,随着速度的升高而自动减小,当速度达到额定转速时,串入转子中的电阻为零的话,就可以达到既不需要控制设备,又能使启动平稳的效果,而转子回路中串频敏变阻器的启动方法就能满足这两方面的要求。

2) 转子回路中串频敏变阻器启动

频敏变阻器是一种特殊的变阻器,它由厚钢板叠成铁心,并在铁心上缠线圈而制成。绕组通常按 Y 连接。频敏变阻器的阻抗由转子电流的频率 f_2 决定,与频率 f_2 成正比,并与铁心的磁饱和程度有关。

绕线转子异步电动机在启动时,转速为零,转差率 $s=1$,频率 $f_2=sf_1=f_1$,因此阻抗大,启动电流很小。随着转速的升高,转差率 s 减小,频率 $f_2=sf_1$ 也减小,阻抗减小,相当于串电阻分级启动时切除了部分启动电阻。阻抗除了与频率有关之外,还受铁心磁饱和程度的影响。电动机启动时,磁路高饱和,且绕组匝数比较小,磁通密度幅值小,感抗与阻抗相比是很小的,因此,转子电路中的功率因数高,所以在启动过程中,启动转矩大。当电动机速度升高到额定转速时,转差率相当小,频率 f_2 相当小,阻抗近似为零,相当于切除了所有启动电阻。此时,可以使用控制设备将频敏变阻器短接,切除频敏变阻器,使电动机正常运行;也可以不采取任何措施,直接将频敏变阻器串联在转子电路中,也不会对电动机正常运转产生太大的影响。

1.2.6 三相异步电动机的制动特性

在本章第 1.1 节中已提到制动的概念,三相异步电动机和直流电动机一样,当电磁转矩 T 与转速 n 反向时,电动机处于制动状态,常用的制动方法也有反接制动、回馈制动和能耗制动三种。

1. 反接制动

1) 电源反接制动

三相异步电动机的反接制动也可分为电源反接制动和倒拉反接制动两种。电源反接制动是将加在定子绕组上的电源反接,从而改变旋转磁场的方向,使电磁转矩方向与转速方向相反。另外,为了加快制动速度,可同时在转子回路中串联附加电阻 R ,其机械特性曲线如图 1.35 所示。图中曲线 1 为正常运行时的机械特性曲线,曲线 2 为转子电路中串联电阻 R 时的机械特性曲线,曲线 3 为转子电路中串联电阻 R 且将电源反接时的机械特性曲线。

制动前,电动机稳定运行在 A 点。在制动瞬间,电阻串入转子回路中,且电源反接,因此,机械特性曲线从曲线 1 过渡到曲线 3 上,由于转速不能突变,电动机从额定运行点 A 平移到曲线 3 上的点 B,然后,在制动转矩(电磁转矩和负载转矩之和)的作用下迅速减速到零,即图中的点 C。如果不需要电动机反向运转的话,此时应该立即切断电源,否则,电动机在电磁转矩和负载转矩的作用下反向运转,直到到达点 D 时以反方向速度 $-n_2$ 稳定运行。

2) 倒拉反接制动

倒拉反接制动通常用来限制位能型负载的下降速度，通过在转子电路中串联附加电阻来实现。如图 1.36 所示，曲线 1 为正常运行时的机械特性，曲线 2 为倒拉反接制动时，转子电路中串联附加电阻时的机械特性曲线。制动前，电动机稳定运行在 A 点。当电阻串入转子电路中时，工作点从 A 点平移到 B 点，此时，电磁转矩与转速方向相同，电动机仍然处于电动状态。由于电磁转矩小于负载转矩，电动机迅速减速运行，当速度为零，即到达 C 点时，由于电磁转矩仍小于负载转矩，电动机将反方向运转，此时，电磁转矩方向与转速方向相反，电动机开始进入制动状态。最后，在电磁转矩和负载转矩的共同作用下，电动机以速度 $-n_2$ 稳定运行在 D 点。

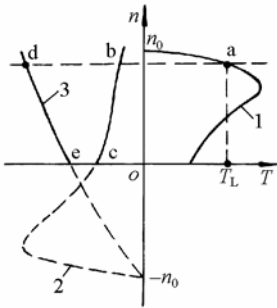


图 1.35 电源反接制动的机械特性曲线

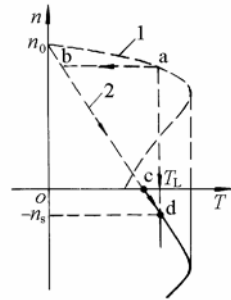


图 1.36 倒拉反接制动的机械特性曲线

2. 回馈制动

三相异步电动机在某些外部条件下，运行速度 n 高于同步转速 n_0 时，转差率 $s < 0$ ，转子导体切割旋转磁场的方向发生改变，所受的电磁转矩反向，电动机处于制动状态，这种制动方式称为回馈制动。此时的电动机处于发电状态，定子向电网反馈电功率。回馈制动时的机械特性是电动状态时的机械特性由第一象限(正转时)和第三象限(反转时)向第二象限和第四象限的延伸，如图 1.37 所示。

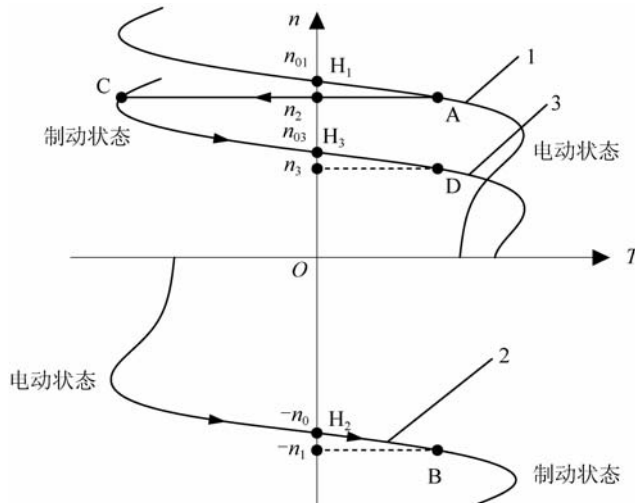


图 1.37 回馈制动的机械特性曲线

回馈制动常出现在以下两种情况中。一种是位能型负载下放重物时，在电磁转矩和负载转矩的共同作用下加速下放，如图中 1.37 曲线 2 的第三象限所示。当下放速度超过同步转速 $-n_0$ ，进入第四象限时，电磁转矩与转速方向相反，起制动作用，但由于负载转矩大于电磁转矩，电动机仍然加速下放，直到运行点移到 B 点，速度达到 $-n_1$ 时，负载转矩与电磁转矩平衡，电动机在两者的共同作用下稳定运行，匀速下放。

回馈制动的另一种情况是在外部条件作用下，电动机的同步转速发生变化。如图 1.37 所示，电动机在机械特性曲线 1 上的 A 点稳定运行，由于某种原因电动机的机械特性曲线变为曲线 3，同步转速由 n_{01} 降为 n_{03} 。由于速度不能突变，工作点从 A 点平移到 C 点， $n_2 > n_{03}$ ，相当于电动机在大于同步转速的速度下运行。因此，工作点沿着特性曲线 3 减速向理想空载点 H_3 运行。在这一过程中，电磁转矩方向与转速方向相反，电动机处于回馈制动状态。越过 H_3 点后，电磁转矩反向，此时电动机又回到电动状态，由于电磁转矩小于负载转矩，此时电动机仍然减速运行，直到最终以速度 n_3 稳定运行在 D 点。

3. 能耗制动

能耗制动的原理线路图一般如图 1.38(a)所示。进行能耗制动时，将运行的电动机切断电源(1KM 打开)的同时，立即向定子送入直流电流(2KM 闭合)产生恒定磁场，转子由于惯性继续旋转，切割磁场产生感应电动势和电流，从而产生与转子实际旋转方向相反的制动转矩，直到电动机转速为零(停车)，制动转矩也为零。因此能耗制动方法可使生产机械准确停车，也可用于低速匀速下放重物。

能耗制动时的机械特性曲线如图 1.38 (b)所示。制动时系统运行点从特性曲线 1 的 A 点平移至特性曲线 2 的 B 点，在制动转矩和负载转矩的共同作用下沿特性曲线 2 迅速减速，直至运行速度为零，此时转矩也为零(过原点)。所以能耗制动能准确停车，不过当电动机停止后应断开直流电源，否则会烧坏定子绕组。能耗制动的制动较平稳，但制动效果不如反接制动。

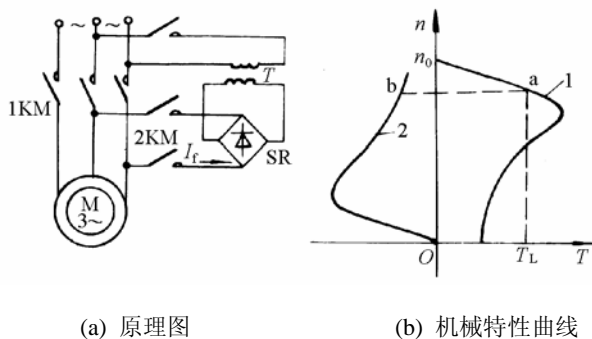


图 1.38 能耗制动

1.2.7 三相异步电动机的调速特性

三相异步电动机的转速为

$$n = n_0(1-s) = \frac{60f_1}{p}(1-s) \quad (1-58)$$

要调节异步电动机的速度，可通过改变其磁极对数 p 、电源频率 f 即定子频率 f_1 及转差率 s 来实现。相应的调速方法有改变磁极对数调速、降低定子电压调速、绕线转子异步电动机转子回路串电阻调速或串级调速和使用电磁转差离合器调速及变频调速等。

1. 改变磁极对数调速

电动机的磁极对数 p 与电动机的结构有关，它是通过改变定子绕组的接线方式来实现的。这种调速方法具有设备简单、运行可靠、效率高、机械特性好的优点，可以采用不同的接线方式得到恒转矩或恒功率的特性。但改变磁极对数调速不可能实现无级调速，并且能调节的速度越大，设备体积越大，价格越贵，因此，三相异步电动机一般只有两个或三个转速。

2. 降低定子电压调速

降低定子电压只能在额定转速以下进行。图 1.39 所示为降低定子电压调速时的人为机械特性曲线，图中的转矩与电压的平方成正比，且在最大转矩时的转差率不变。当电压降低时，转速下降，如对应电压为 U_1 、 U_2 、 U_3 ，则速度分别为 n_1 、 n_2 、 n_3 。当电压连续变化时，电动机可以实现无级调速。这种调速方法简单，调速设备价格便宜，通常使用晶闸管交流调压器或在定子电路中串联电抗器来实现，且体积小，质量轻，容易实现正反转和反接制动，但在转速降低的同时，转矩下降很快。如当电压小于 U_4 时，最大转矩小于负载转矩，电动机无法带动负载。因此，降低定子电压调速的方法调速范围很小。另外，转速越低，人为机械特性越软，在相同转矩变化的情况下，转速变化越大，如负载转矩稍有变化时，转速的变化相当大，运动不平稳。所以，降低定子电压调速通常用于对调速精度和调速范围要求不高的生产机械中，如简单的起重机械设备、泵类、风机等。

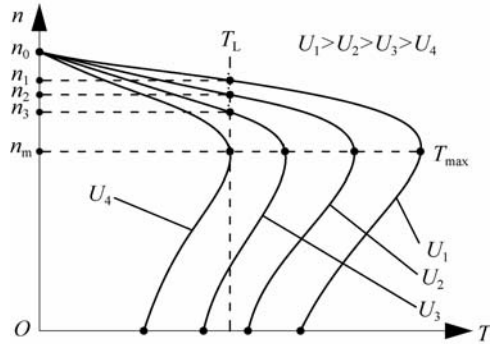


图 1.39 降低定子电压调速的人为机械特性曲线

3. 转子回路串电阻调速

转子回路串电阻调速只适用于绕线转子异步电动机，也只能在额定转速以下进行速度调节。图 1.40 所示为转子回路串电阻调速时的机械特性曲线，由于最大转矩不变，临界转差率随电阻的增大而增大。当电阻增大时，转速下降，如对应于图中的电阻 R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 ，相应的转速分别为 n_1 、 n_2 、 n_3 、 n_4 。这种调速方法属于恒转矩调速，一般采用金属电阻来实现，只能分级调速。转子回路串电阻调速设备简单可靠；但是在低速时同样存在机械特性软，运行平稳性不好的缺点，

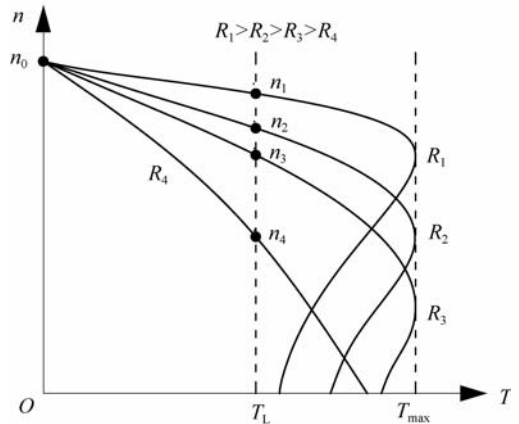


图 1.40 转子回路串电阻调速的机械特性曲线

且在转子回路上的电阻要损耗功率，损耗的功率与转差率的平方成正比，速度越低，功率损耗越大，效率越低。因此，转子回路串电阻调速通常用在对调速性能要求不高或重复短期运转的生产机械中。

4. 串级调速

串级调速是在异步电动机的转子回路中串联一个与转子电动势 E_2 同频率、同相位或反相位的附加电动势 E_{ad} ，通过改变附加电动势的大小来调节转速。

5. 变频调速

变频调速是通过改变定子电源电压的频率来改变三相异步电动机的同步转速，从而达到调节速度的目的。通常把定子的额定频率称为基频，在我国额定频率取工频 50Hz。变频调速有两种方式，一种为基频以下进行调节，一种为基频以上进行调节。异步电动机的变频调速是一种很好的调速方法，有关变频调速的详细内容将在第 8 章介绍。

1.3 控制电动机简介

控制电动机是在普通旋转电动机的基础上发展而来的，在本质上与普通旋转电动机并没有区别，只是两者的着重点不同：控制电动机主要用于对控制信号进行传递和变换，要求有较高的控制性能，如反应快、精度高、运行可靠等；而一般普通旋转电动机主要用于能量变换，要求有较高的性能指标。控制电动机在自动控制系统中通常作为执行元件、检测元件和解算元件，具有体积小、功率小(通常在几百瓦以下)等特点。

控制电动机按照在自动控制系统中的功能不同，可分为测量电动机、放大电动机、执行电动机和校正电动机四种。如伺服电动机通常在控制系统中作为执行元件，是一种执行电动机。

1.3.1 伺服电动机

伺服电动机在自动控制系统中作为执行元件，其作用是将输入的电信号转变为轴上的位移或速度输出。输入的电信号又称为控制信号，通过改变控制信号的大小和极性可以改变伺服电动机的转速与转向。根据使用电源的不同，伺服电动机可分为直流伺服电动机和交流伺服电动机两大类。直流伺服电动机输出功率较大，一般为 $1W \sim 600W$ ，有时甚至可以达到上千瓦；而交流伺服电动机输出功率较小，一般为 $0.1W \sim 100W$ 。

1. 直流伺服电动机

直流伺服电动机的结构和工作原理与普通的他励电动机相同，只不过直流伺服电动机转子做得比较细长，以减小转动惯量，从而能满足伺服电动机的快速性要求，输出功率比较小。

电磁式直流伺服电动机的接线如图 1.41(a)所示。当励磁绕组和电枢绕组都通过电流时，直流电动机便转动，当其中任意一个绕组断电时，电动机立即停转。因此，控制信号既可加到励磁绕组上，也可加到电枢绕组上，相应地控制方式也有两种，即磁场控制和电枢控

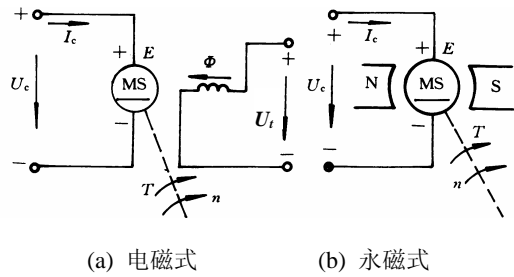


图 1.41 直流伺服电动机接线图

制。磁场控制通过改变磁通来进行，它的调节特性在某一范围不是单值函数，一个转速对应两个控制信号，因此通常情况下都采取电枢控制方式。

电枢控制直流伺服电动机的励磁绕组接在电压恒定的直流电源上 U_t ，电枢绕组接控制电压 U_c ，此时，直流伺服电动机与他励电动机的机械特性相同。电枢控制直流伺服电动机的机械特性是线性的，控制信号消失后，电动机停止转动，不存在“自转”现象，因而在自动控制系统中该种电动机是一种很好的执行元件。

2. 交流伺服电动机

1) 结构

交流伺服电动机的定子与异步电动机类似，转子主要有两种结构形式：笼型转子和非磁性空心杯转子。交流伺服电动机的笼型转子和三相异步电动机的笼型转子基本一样，不同之处是其导条采用高电阻率的导电材料制造，如青铜、黄铜等。另外，为了提高交流伺服电动机的快速响应性能，通常把笼型转子做得又细又长，以减小转子的转动惯量。非磁性空心杯转子交流伺服电动机有外定子和内定子两个定子。外定子铁心槽内安放有励磁绕组和控制绕组，而内定子一般不放绕组，仅作磁路的一部分。非磁性空心杯转子位于内外绕组之间，通常用非磁性材料(如铜、铝或铝合金)制成。非磁性空心杯转子的转动惯量很小，故电动机快速响应性能好，而且运转平稳平滑，无抖动现象，但由于使用内外定子，气隙较大，故励磁电流较大，体积也较大。

交流伺服电动机实际上就是一台两相异步电动机，只是交流伺服电动机的转子电阻大、转动惯量小，使伺服电动机具有宽广的调速范围、线性的机械特性、无“自转”现象和快速响应等性能，所以交流伺服电动机通常也叫两相交流伺服电动机。

2) 工作原理

如图 1.42 所示，电动机外定子上放有励磁绕组 W_f 和控制绕组 W_c ，分别接到交流励磁电源 \dot{U}_f 和控制电压 \dot{U}_c 上，两相绕组在空间上相差 90° 电角度，励磁电压和控制电压的频率相同。

当交流伺服电动机的励磁绕组和控制绕组分别接到励磁电压与控制电压上，且励磁电压与控制电压不同相位时，在两相绕组间会建立一个旋转磁场，转子切割旋转磁场产生感应电动势和感应电流。旋转磁场

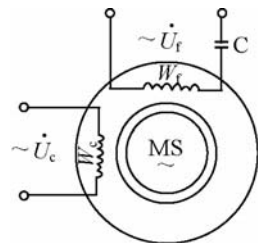


图 1.42 交流伺服电动机原理图

与转子中的感应电流相互作用，产生电磁力矩，使电动机转子转动。电动机的旋转方向与旋转磁场的方向相同，若要改变电动机旋转方向，则应将控制电压的相位改变 180° 。如果电动机参数与一般的异步电动机相同，那么当控制信号消失时，电动机转速虽然会有所下降，但电动机仍会旋转。交流伺服电动机在控制信号消失后仍继续旋转的现象被称为“自转”，这在实际应用中是不允许的，通常可以通过增加转子电阻的办法来消除“自转”的现象。增大转子电阻，不仅可以消除“自转”现象，还可以扩大交流伺服电动机的稳定运行范围；但转子电阻过大，会降低启动转矩，从而影响快速响应性能。

交流伺服电动机的控制方法有三种：幅值控制、相位控制、幅值-相位控制。生产中应用幅值控制的最多。

幅值控制通过改变控制电压 U_c 的大小来控制电动机转速，此时控制电压 U_c 与励磁电压 U_f 之间的相位差始终保持 90° 电角度。在一定的负载转矩下，控制电压越高，电动机的转速就越高；反之转速越低。

相位控制通过改变控制电压 U_c 的相位来实现对电动机转速和转向的控制，而控制电压的幅值保持不变。当控制电压 U_c 与励磁电压 U_f 之间的相位差为零时，电动机转速为零。这种控制方式一般很少采用。

幅值-相位控制的励磁绕组串联电容后再接到交流电源上，控制电压与电源同相位，但幅值可以调节。当控制电压的幅值改变时，通过转子绕组的耦合作用，使励磁绕组的电流也变化，从而使励磁绕组上的电压及电容上的电压改变，控制绕组与励磁绕组的相位差也随之改变，即改变控制电压的大小；控制电压与励磁电压之间的相位差也随之改变，从而改变电动机的转速。这种控制方式线路简单，不需要复杂的移相装置，只需电容进行分相，具有线路简单、成本低廉、输出功率较大的优点，因而成为使用最多的控制方式。

1.3.2 步进电动机

步进电动机也属于执行元件，是一种把电脉冲信号转换成角位移或直线位移的电动机。它必须采用专用的驱动电源，用于向步进电动机提供一系列并且有一定规律的电脉冲信号，每输入一个电脉冲，步进电动机就前进一步，步进电动机的角位移与脉冲数成正比，转速与电脉冲频率成正比，而且转速和转向与各相绕组的通电方式有关。

1. 结构及工作原理

1) 结构及分类

如图 1.43 所示为一台三相反应式步进电动机的结构简图，它分为定子和转子两个部分。定子具有分布均匀的六个磁极，磁极上装有绕组，两个相对的磁极组成一相。转子上具有均匀分布的四个凸齿，转子上没有绕组。A、B、C 为控制绕组，分别装在对应的磁极上。反应式步进电动机的定子相数用 m 表示，一般定子相数可以有二相，三相，四相，五相，六相，相应的定子磁极的个数就为 $2m$ ，每两个相对的磁极上套有该相

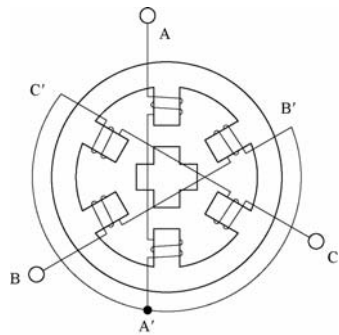


图 1.43 三相反应式步进电动机结构简图

绕组。转子齿数用 z 表示。在本图中，转子齿数 $z=4$ 。

根据工作原理的不同，步进电动机可分为反应式、永磁式、励磁式和感应子式(又叫混合式)。反应式转子本身没有励磁绕组，依靠定子绕组励磁后产生反应力矩，使转子转动；永磁式转子或定子一方用永久磁铁做成，另一方由软磁材料做成，永久磁铁产生的磁场与绕组轮流通电产生的磁场相互作用，使转子转动；励磁式的定子、转子上都有绕组，两者产生的电磁力矩使转子转动；感应子式兼具反应式和永磁式两种的特点，与反应式的区别是转子上有磁钢，它具有驱动电流小，效率高，过载能力强，控制精度高等优点，是目前最有发展前景的一种步进电动机。目前应用较多的是反应式步进电动机，下面以反应式步进电动机为例来阐述步进电动机的工作原理。

2) 工作原理

步进电动机的工作原理与电磁铁的工作原理相同，如图 1.44 所示。由环形分配器送来的脉冲信号，对定子绕组轮流通电。设相序为 $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow A$ 。当 A 相控制绕组通电，而 B、C 相不通电时，步进电动机的气隙磁场与 A 相绕组轴线重合，而磁力线总是力图从磁阻最小的路径通过，故电动机转子受到一个反应转矩(静转矩)的作用，在此转矩的作用下，转子的齿 1 和齿 3 旋转到与 A 相绕组轴线相同的位置上，如图 1.44(a)所示。此时整个磁路的磁阻最小，转子只受到径向力的作用，反应转矩为零，齿 1 和齿 3 固定在 AA' 下。然后 B 相通电，A、C 相断电，则转子受反应转矩作用而转动，转子齿 2 和齿 4 固定在磁极 BB' 下，如图 1.44(b)所示。此时，转子在空间上沿逆时针方向转过 30° ，转子前进一步，转子转过的这个角度叫作步距角 β 。同理，C 相通电时，转子转到图 1.44(c)所示位置；D 相通电时，转子会转到图 1.44(d)所示位置。此时，磁场旋转一周，电动机转子转过 90° ，相当于一个齿距角 τ (相邻齿间的角度)。如此按 $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow A$ 顺序不断地接通和断开控制绕组，电动机便按逆时针方向一步一步地转动；同理，若按 $A \rightarrow C \rightarrow B \rightarrow A$ 顺序不断地接通和断开控制绕组，则电动机按顺时针方向一步一步地转动。

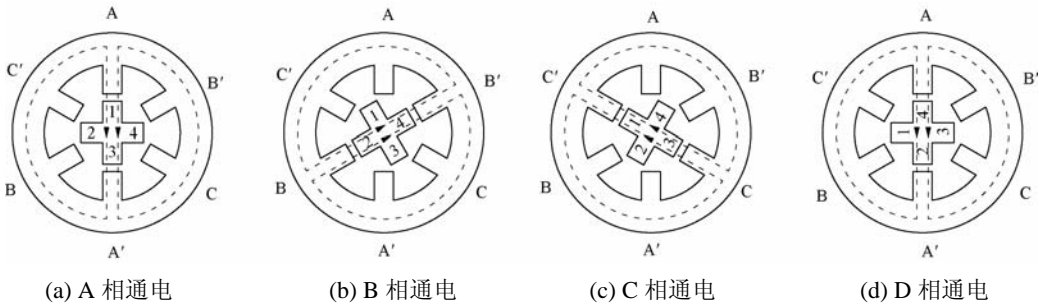


图 1.44 三相反应式步进电动机的工作原理图

3) 通电方式

控制绕组每改变一次通电方式，称为一拍，每一拍转子所转过的角度称为一个步距角 β 。步进电动机的通电方式有三种。对于三相反应式步进电动机来说，每次只有一相绕组单独通电，如 $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow A$ ，控制绕组每换接三次构成一个循环，这种方式称为三相单三拍；若每次有两相绕组同时通电，如 $AB \rightarrow BC \rightarrow CA \rightarrow AB$ ，每次循环换接三次，这种方式称为三相双三拍；若单相通电和两相通电轮流进行，如 $A \rightarrow AB \rightarrow B \rightarrow BC \rightarrow C \rightarrow CA \rightarrow A$ ，这种方式被称为三相六拍。

2. 小步距角步进电动机

步进电动机无论采用哪种通电方式，步距角都太大，无法满足生产中对精度的要求，在实际应用中一般采用小步距角的步进电动机。设转子齿数为 z ，定子相数为 m ，则齿距角和步距角 β 为

$$\tau = 360^\circ / z \quad \text{或} \quad \tau = 2\pi / z \quad (1-59)$$

$$\beta = \text{齿距} / \text{拍数(步数)} = \frac{360^\circ}{K m z} \quad \text{或} \quad \beta = \frac{2\pi}{K m z} \quad (1-60)$$

式中： K ——状态系数，对于单相轮流通电方式和双相轮流通电方式来说， $K=1$ ，而对于单双相轮流通电方式来说， $K=2$ 。

从式(1-59)可知，步距角与相数及齿数有关，要想获得小的步距角，必须增大相数或齿数。但是，相数越多，驱动电源就越复杂，并且成本也越高，一般的步进电动机被做成二相、三相、四相、五相或六相。因此，减小步距角的根本方法是增加转子齿数。

1.3.3 测速发电机

测速发电机是一种测量转速的微型发电机，输入的是转速，输出的是电压信号，通常要求测速发电机的输出电压与输入转速成正比。

测速发电机通常用作测速元件、校正元件或解算元件，与伺服电动机配合使用，广泛应用于各种速度控制或位置控制系统中。如在速度控制系统中，测速发电机将输出电压作为速度负反馈信号，与给定速度的参考电压进行比较，然后发出速度控制信号，从而调节伺服电动机的转速。在位置控制系统中，测速发电机的输出电压反馈到放大器端，作为校正元件，抑制速度的阻尼，从而控制位置控制系统的动态性能。在计算解答装置中，测速发电机常作为微分、积分元件。测速发电机有直流测速发电机和交流测速发电机两大类。

1) 直流测速发电机

按定子磁极的励磁方式分，直流测速发电机有电磁式和永磁式两种。电磁式测速发电机是一台微型的他励直流发电机，而永磁式测速发电机的磁极是永久磁铁。

直流测速发电机的工作原理与一般直流发电机相同，如图 1.45(a)所示为其接线图。

若磁场恒定，电枢电阻和负载电阻不变，则直流测速发电机的输出电压与输入转速成线性关系，理想的输出特性曲线是一条过原点的斜线，且负载电阻越小，斜率也越小，如图 1.45(b)所示。事实上，由于电枢反应有一定的去磁作用，温度变化时也会引起励磁绕组电阻发生变化，从而使磁通发生变化，因此，当转速上升到一定值后，电压会有所下降，实际的电压输出特性曲线如图中虚线所示。由于负载电阻越小，转速越高，电压下降越严重，因此，在精度要求高的场合，一般都选用大的负载电阻，且工作在低速范围。

2) 交流测速发电机

交流测速发电机分为同步测速发电机和异步测速发电机，在实际中应用较多的是异步测速发电机。交流异步测速发电机在结构上与交流伺服电动机相似，转子结构也有笼型和空心杯型，在自动控制系统中用得较多的是空心杯转子异步测速发电机。下面以空心杯转子异步测速发电机为例来说明交流测速发电机的工作原理及特性。

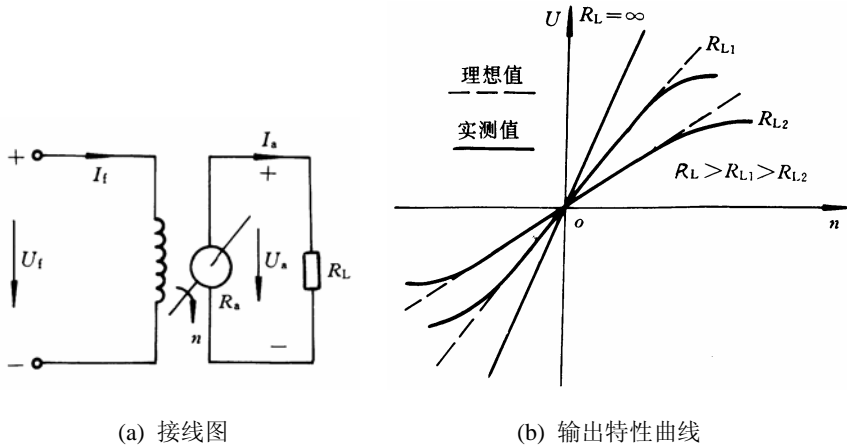


图 1.45 直流测速发电机的工作原理

空心杯转子异步测速发电机与交流伺服电动机一样，定子上有两个在空间上互差 90° 电角度的绕组，分别称为励磁绕组 W_f 和输出绕组 W_c ，如图 1.46 所示。

若转子静止不动，脉振磁通将在空心杯转子中感应出电动势及电流，它产生的合成磁场 Φ_1 方向应与脉振磁场相同，即在纵轴方向上。而输出绕组的横轴与纵轴垂直，因此，输出绕组上的电压为零，如图 1.46(a)所示。

当励磁绕组上接频率为 f_1 的交流电源时，在励磁绕组的纵轴上产生以 f_1 为频率脉振的磁通 $\Phi_1 = \Phi_{1m} \sin \omega t$ 。

若转子以速度 n 旋转，除了在横轴上产生电动势及电流外，转子旋转，切割纵轴磁通 Φ_1 ，在转子中会产生感应电动势 E_{2r} 及感应电流，其大小正比于 Φ_1 。当励磁电源不变时，脉振磁通 Φ 不变，感应电动势 E_{2r} 与转速成正比，感应电动势实际上就是交流异步测速发电机输出的空载电压 U_0 ，因而输出电压与转速成正比。

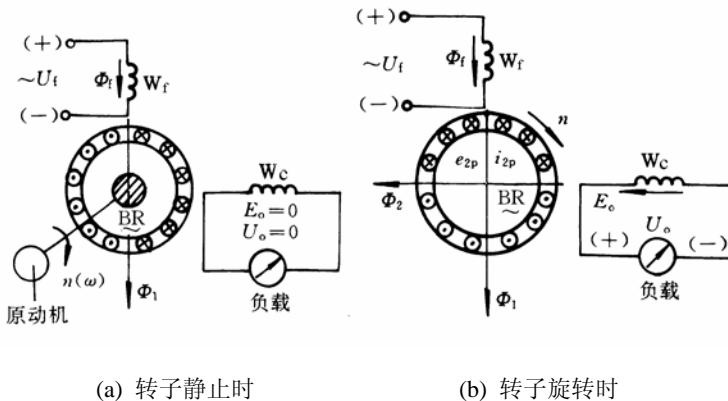


图 1.46 空心杯转子异步测速发电机原理图

思考题与习题

1. 如何分别改变直流串励电动机、并励电动机、复励电动机的转动方向?仅仅改变电源的正、负极性,能改变转向吗?

2. 一台直流并励电动机,如果电源电压 U 、励磁电流 I_f 和拖动的负载转矩 T_L 都不变,在电枢回路中串入适当电阻,则电枢电流会不会改变?电动机的输入功率和输出功率会不会变?

3. 改变励磁回路的电阻进行调速时,最高转速和最低转速有什么变化?

4. 三相异步电动机正在运行时,转子突然被卡住,这时电动机的电流会如何变化?对电动机有何影响?

5. 三相异步电动机断了一根电源线后,为什么不能启动?而在运行时断了一根线,为什么仍能继续转动?这两种情况对电动机将产生什么影响?

6. 三相异步电动机在相同电源电压下,满载和空载启动时,启动电流是否相同?启动转矩是否相同?

7. 异步电动机采用转子串联电阻启动时,所串电阻对启动转矩有何影响?

8. 电源电压下降对异步电动机的转速、额定电流、功率因数有什么影响?

9. 步进电动机技术数据中标的步距角有时为两个数,如步距 $1.5^\circ/3^\circ$ 。试问这是什么意思?

10. 交流测速发电机在理想情况下转子不动时有没有输出电压,转动后输出电压与转子转速成什么关系,为什么?

11. 对直流他励电动机启动有何要求,如何满足?

12. 如何改变直流他励电动机的机械特性,各有什么特点?

13. 一台直流他励电动机,其铭牌数据如下: $P_N=6.5\text{kW}$, $U_N=220\text{V}$, $I_N=65\text{A}$, $R_a=0.24\ \Omega$, $n_N=1500\text{r/min}$ 。试计算:

(1) 固有机械特性;

(2) 电枢串联电阻为 $1\ \Omega$ 时的人为机械特性;

(3) 励磁电压为 $U_N/2$ 时的人为机械特性;

(4) 磁通 $\Phi=\Phi_N/2$ 时的人为机械特性。

并绘出图形。

14. 一台直流他励电动机额定数据如下: $P_N=1.75\text{kW}$, $U_N=220\text{V}$, $I_N=40.2\text{A}$, $n_N=1500\text{r/min}$, 试计算:

(1) 50%额定负载时的转速;

(2) 转速为 1200 r/min 时的电枢电流值。

15. 一台直流他励电动机额定数据如下: $P_N=15\text{kW}$, $U_N=220\text{V}$, $I_N=90\text{A}$, $n_N=1500\text{r/min}$, $\eta_N=0.85$, $R_a=0.4\ \Omega$, $R_f=82.7\ \Omega$, 试计算:

(1) 额定电枢电流 I_N ;

(2) 电动机的额定输出转矩 T_N ;

(3) 励磁功率 P_f ;

(4) 在理想空载时的转速 n_0 。

16. 一台直流他励电动机额定数据如下: $P_N=10\text{kW}$, $U_N=220\text{V}$, $I_N=53\text{A}$, $R_a=0.4\ \Omega$, $n_N=1500\text{r/min}$, 若电枢电流不超过 $2I_N$, 试求两种情况下电枢各应串入多大的电阻?

17. 异步电动机拖动额定负载运行时, 电压下降对其有什么影响?

18. 异步电动机有哪几种制动方法, 各有什么优缺点?

19. 三相异步电动机的调速方法有哪几种, 各有什么特点?

20. 有一台四极三相异步电动机, 电源电压的频率是 50Hz , 满载时电动机的转差率为 0.1 , 求电动机的同步转速、转子转速和转子电流频率。

21. 有一台异步电动机, 其技术数据为: $P_N=10\text{kW}$, $U_N=220/380\text{V}$, $n_N=960\text{r/min}$, $I_N=12.8/7.2\text{A}$, $\eta_N=0.85$, $\cos\Phi_N=0.75$, $I_{st}/I_N=6$, $T_{st}/T_N=2$, $T_{max}/T_N=2$, 试计算:

(1) 线电压为 380V 时, 三相定子绕组应怎样接;

(2) 求 n_0 , p , s_N , T_N , T_{st} , T_{max} , I_{st} 。

22. 有一台异步电动机, 其技术数据为: $P_N=20\text{kW}$, $U_N=380\text{V}$, $n_N=1450\text{r/min}$, $\eta_N=0.85$, $\cos\Phi_N=0.8$, $I_{st}/I_N=6$, $T_{st}/T_N=2$, $T_{max}/T_N=2$, 采用 Δ 连接, 试计算:

(1) 当负载转矩为 $125\text{N}\cdot\text{m}$ 时, 在 $U=U_N$ 和 $U=0.8U_N$ 时, 电动机能否启动?

(2) 采用 $Y-\Delta$ 换接启动, 负载转矩为 $0.45T_N$, $0.35T_N$ 时, 电动机能否启动?

23. 步进电动机有哪些特点, 如何控制步进电动机输出的角位移或线位移量、转速或线速度?

24. 一台五相十拍运行的步进电动机, 转子齿数 $z=48$, 在 A 相绕组中测得电流频率为 600Hz , 计算:

(1) 步进电动机的步距角;

(2) 步进电动机的转速。

第2章 电动机的基本电气控制线路

教学提示：机床一般是由电动机来拖动的，电动机则是通过自动控制方式来进行控制的。由三相异步电动机拖动的交流拖动系统多数都采用继电器—接触器控制方式。电气控制线路是由各种有触点的接触器、继电器、按钮、行程开关等组成的，其作用是实现对电力拖动系统的启动、制动和调速等运行性能的控制，满足生产工艺要求，实现生产加工自动化。各种机床的加工对象和加工工艺要求不同，电气控制线路就不同，有比较简单的，也有相当复杂的。但任何复杂的电气控制线路，都是由一些比较简单的基本环节按需要组合而成的。

教学要求：本章介绍电动机的基本控制环节，要求学生掌握电动机的启动控制、点动控制、多地控制、正反转控制、顺序控制、反接制动控制线路；了解电动机的降压启动、能耗制动控制线路；了解双速电动机的控制和液压动力头的控制线路。

2.1 电气元件符号与电气图

电力拖动自动控制线路主要由各种低压电气元件和电动机组成。工作在直流 1200V、交流 1000V 及以下的电路中，用来对电能的产生、输送、分配和使用起开关、控制、保护和调节作用的电气设备称为低压电器。常用的低压电器分为 12 大类：刀开关和转换开关 H、熔断器 R、自动开关 D、控制器 K、接触器 C、启动器 Q、继电器 J、主令电器、电阻器 Z、变阻器 B、调整器 T 和电磁铁 M。

2.1.1 电气符号

为了设计、研究分析以及安装维修时阅读方便，在绘制电气图时，必须使用国家统一规定的电气图形符号和文字符号。电气符号的国家标准有两种，一种称为旧的国家标准，它是从电气元件的结构出发设计的，如 GB 312—1964，GB 314—1964、GB 315—1964。一种称为新的国家标准，它是从电气元件的功能出发设计的，如 GB/T 4728.1—1985，GB 4729.1—1989。目前统一规定使用与国际电工委员会(IEC)标准接轨的新的国家标准。

电动机和常用低压电器的电气图形符号和文字符号，见附录一和附录二。

2.1.2 电气控制图

机床电气控制图主要分为电气原理图、电气设备安装图和电气接线图等。本课程主要学习电气原理图。

1. 电气原理图

将各种电气元件用它们的图形符号和文字符号表示，并按动作顺序绘制的表明电气控制的图纸称为电气原理图。电气原理图表示电气控制的工作原理以及各电气元件的作用和相互关系，而不考虑各电气元件实际安装的位置和实际连线情况。电气原理图的绘制一般按以下规则进行。

(1) 电气控制线路图分为主电路和控制电路。一般主电路图在左侧，控制电路图在右侧。主电路和控制电路可以绘制在一张图纸上，也可以分开画。

(2) 同一个电气元件的各个部件用同一文字符号表示，可以画在图中的不同位置，或者不同的图纸上。

(3) 手柄、开关、触点等的位置和状态，均按没有通电、没有施加外力等原始状态画出。

(4) 各个电气元件的连接导线要编号，编号用国家标准的回路标号表示。

卧式车床主电动机启动控制的电气原理图如图 2.1 所示。

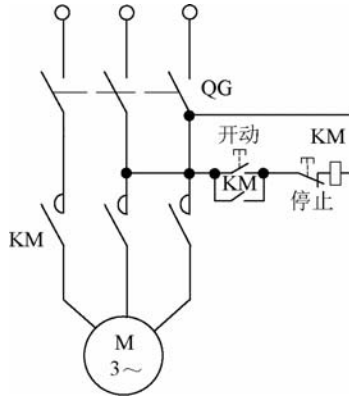


图 2.1 主电动机启动控制的电气原理图

2. 电气设备安装图

表示各种电气设备在机床和电气控制柜的实际安装位置的图纸称为电气设备安装图。各个电气元件的安装位置是由机床的结构和工作要求决定的，例如，电动机要和被拖动的机械部件放在一起，行程开关应放在要取得信号的地方，按钮应放在操作方便的地方，其他的电气元件一般都放在机床床身预留的电气控制柜中。

3. 电气接线图

表示各个电气设备之间实际接线情况的图纸称为电气接线图。绘制电气接线图时应把各个电气元件的各个部分画在一起，如交流接触器的线圈、主触点、辅助触点都画在一起；元件的连接顺序、元件的文字符号和回路标号都必须与电气原理图一致。

电气设备安装图和电气接线图是用于安装接线、现场施工和检查维修的。

为了便于读者阅读电气原理图或者拟定简单的电气原理图，下面介绍 C534J1 型立式车床中拖动工作台旋转的电动机简化了的电气原理线路图，如图 2.2 所示。

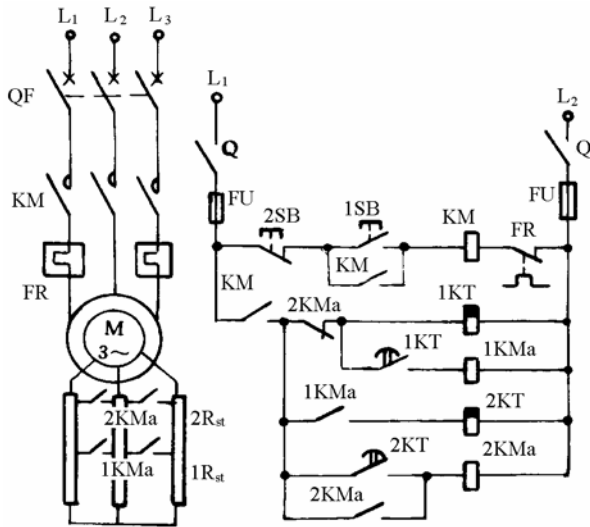


图 2.2 C534J1 型立式车床的电动机电气原理接线图

2.2 电动机的启动控制线路

(1) 在图 2.2 中，为了区别主电路与控制电路，在绘线路图时主电路(电动机、电器及连接线等)用粗线表示，而控制电路(电器及连接线等)用细线表示。通常习惯将主电路放在线路图的左边(或上部)，而将控制电路放在右边(或下部)。

(2) 控制线路中的电源线分列两边，各控制回路基本上按照各电气元件的动作顺序由上而下平行绘制(如图中 KM 动作后，1KT 再动作……)。

(3) 在原理图中各个电气元件并不按照它实际的布置情况绘在线路上，而是将同一电气元件的各部件分别绘在它们完成作用的地方(如图中 KM 的线圈和触点分得很散，三个主触点用来接通电动机，一个辅助触点用于自锁，另一个用于接通其他的控制电路)。

(4) 为区别控制线路中各电气元件的类型和作用，每个电气元件及它们的部件都用一定的图形符号表示，且给每个电气元件一个文字符号，属于同一个电气元件的各个部件(如接触器的线圈和触点)都用同一个文字符号表示，而作用相同的电气元件都用一定的数字序号表示(如图中 1KM_a 和 2KM_a 都是加速接触器)。

(5) 因为各个电气元件在不同的工作阶段分别作不同的动作，触点时闭时开，而在原理图内只能表示一种情况，因此，规定原理图中所有电气元件的触点均表示正常位置，即各种电器在线圈没有通电或机械尚未动作时的位置。如对于接触器和电磁式继电器为电磁铁未吸上的位置，对于行程开关、按钮等则为未压合的位置。

(6) 为了查线方便，在原理图中两条以上导线的电气连接处要打一圆点，且每个接点要标一个编号，这个编号就是回路标号，回路标号有国家标准。编号的原则是：在主电路中，每经过一个电气元件的部件，就要变一次标号，图 2.2 中，L₁、L₂、L₃ 经过三刀开关后，标号分别为 L₁₁、L₂₁、L₃₁；经过熔断器后，为 L₁₂、L₂₂、L₃₂；等。电动机定子端是 U，

V, W。在控制电路中,回路标号按国家标准规定用数字 1~99 标注,每经过一个电气元件的一个部件,就要变换一个标号。靠近左边电源线的用单数标注,靠近右边电源线的用双数标注,通常都是以电气元件的线圈或电阻作为单、双数的分界线,在图 2.2 中,单数 1、3、5 等都标在线圈左侧;而 2、4 等都标在线圈右侧。因此,电气元件的线圈或电阻在控制线路图的右边整齐地排成一列。

(7) 对具有循环运动的机构,应给出工作循环图,万能转换开关和行程开关应绘出动作顺序和动作位置。

2.3 电动机的启动控制线路

三相笼型异步电动机有直接启动和降压启动两种方式。第 1 章已经讲解了如何决定电动机的启动方式,这里只介绍电气控制线路如何满足各种启动要求。本章中电动机,如没有特别指明,都是指三相笼型异步电动机。

2.3.1 电动机直接启动控制线路

1. 直接启动控制线路和保护装置

1) 启动控制线路分析

图 2.3 是笼型异步电动机直接启动控制线路,只要在图 2.1 所示线路图中加上一些保护电器便成了生产机械中常用的“不反转的笼型异步电动机控制线路”,它是 C620 卧式车床主传动电动机的控制线路,包括一个接触器 KM、一个热继电器 FR 和一个双联按钮(启动按钮 1SB 和停止按钮 2SB)。图 2.3 中,QG 是三刀开关,FU 是熔断器。接触器的吸引线圈和一个动合辅助触点 KM 接在控制电路中,而它的三个动合主触点 KM 则接在主电路中。

该电路的工作过程如下:合上开关 QG(作启动准备),按下按钮 1SB,接触器 KM 的吸引线圈带电,衔铁被吸上,接触器 KM 主触点闭合,电动机便转起来,与此同时,辅助触点 KM 也闭合,将启动按钮 1SB 短接,这样当松开 1SB 时接触器仍旧有电。像这样利用电气自己的触点保持自己的线圈得电,从而保证长期工作的线路环节称为自锁环节。这种触点称为自锁触点。按下按钮 2SB, KM 的线圈断电,其主触点打开,电动机便停转,同时 KM 的辅助触点也打开,故松手后,2SB 虽仍闭合,但 KM 的线圈不能继续得电,从而保证了电动机不会自行启动,若使电动机再次工作,需再按 1SB。

为了避免电动机、控制电器等电气设备和整个生产机械、操作者受到不正常工作状态的有害影响,使工作更为可靠,自动控制线路必须具有完成各种保护作用的保护装置。

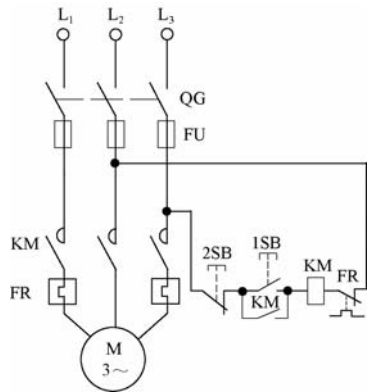


图 2.3 笼型异步电动机直接启动控制电路

2) 保护装置

(1) 短路电流保护装置。短路电流保护的作用在于防止电动机突然流过短路电流而引起电动机绕组、导线绝缘及机械上的严重损坏，或防止电源损坏。出现短路电流时，保护装置应立即可靠地使电动机与电源断开。常用的短路保护装置有熔断器、过电流继电器、自动开关等。

熔断器的规格一般根据线路的工作电压和额定电流来选择；对一般电路、直流电动机和线绕转子异步电动机的保护来说，熔断器是按它们的额定电流选择的。但对于笼型异步电动机，却不能这样。因为，笼型异步电动机直接启动时的启动电流为额定电流的5~7倍，按额定电流选择时，熔体将即刻熔断。因此，为了保证所选的熔断器既能起到短路保护的作用，又能免除启动电流的影响，一般按电动机额定电流的1.5~2.5倍来选择。

(2) 过载保护装置。所谓长期过载是指电动机带有比额定负载稍高一点(115%~125%)的负载长期运行，这样会使电动机等电气设备因发热而温度升高，甚至会超过设备所允许的温升而使电动机等电气设备的绝缘损坏，所以必须给予保护。

长期过载的保护装置目前使用得最多的是热继电器FR。在图2.3中，热继电器FR的发热元件串联在电动机的主回路中，而其触点则串联在控制电路接触器线圈的回路中。当电动机过载时，热继电器的热元件就发热，致使在控制电路内的动断触点断开，接触器线圈失电，触点断开，电动机停转。在重复短期工作的情况下，由于热继电器和电动机的特性很难一致，所以不采用热继电器，而选用过流继电器作过载保护。

(3) 零压(或欠电压)保护。零压或欠电压保护的作用在于防止因电源电压消失或降低而可能发生的不允许的故障。如在车间内常因某种原因造成变电所的开关跳闸，暂时停止供电，对于手控电器，此时若未拉开刀开关或转换开关，当电源重新供电时，电动机就会自行启动，将造成设备毁坏或人身伤害事故。但在图2.2所示的自动控制线路中，若电源暂停供电或电压降低时，接触器线圈就失电，触点断开，电动机失电而得到保护。当电源电压恢复时，不重按启动按钮，电动机就不会自动启动，这种保护称为零压(或欠压)保护。图2.3中是直接利用线路接触器作零压保护的。但当控制线路中采用主令控制器和转换开关时，必须要加零压保护装置，如零压继电器，否则线路无零压保护性能。

2. 正反转控制线路

1) 电动机正反转控制线路

许多机床的机械运动部件，根据工艺要求经常需要进行正反方向两种运动，如在车床上车削螺纹，采用电力拖动时可借助电动机的正反转来实现这两种运动。从异步电动机的工作原理可知，将异步电动机的供电三相交流电源的相序反接，就可以控制异步电动机做反向运动。更换相序的工作，需要使用两个接触器来完成。图2.4为电动机正反转控制线路。

图2.4中，图(a)所示的控制线路是这样实现正反转工作的：按下正转启动按钮FSB，正转接触器FKM得电并自锁，电动机正转。当需要电动机反转时，先按停止按钮SB，FKM失电，电动机停止。再按下反转启动按钮RSB，反转接触器RKM得电并自锁，电动机通入反相序的三相电源而反转。但图(a)线路有下述严重不足：若同时按下正向按钮FSB和反向按钮RSB，接触器将FKM和RKM同时接通，造成图中虚线所示的电源相间短路的严重事故。为避免产生上述事故，必须要加以保护，使其中任一接触器工作时，另一接触器即

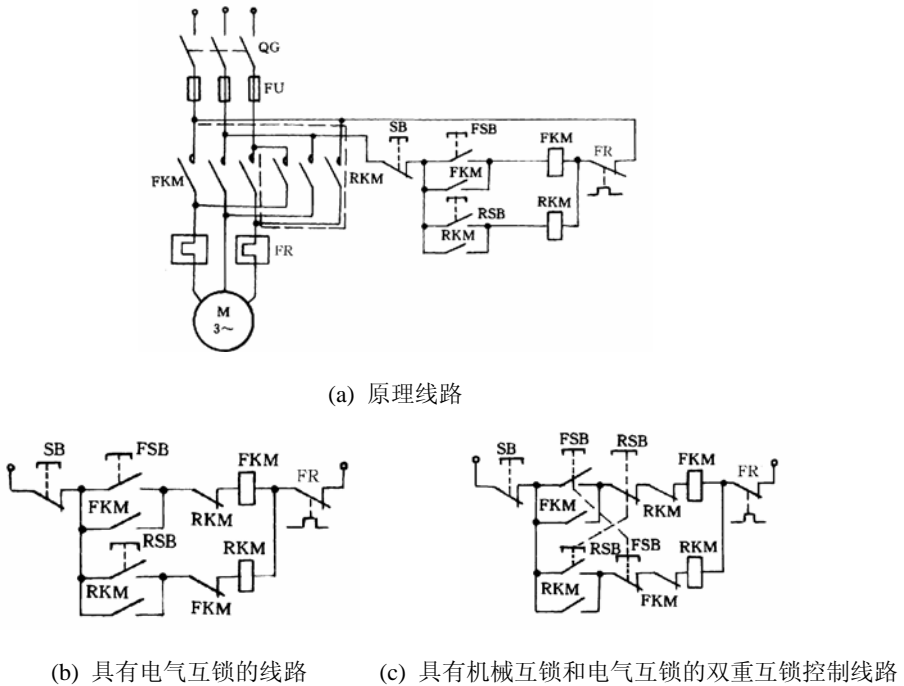


图 2.4 电动机正反转控制线路

失效不能工作，为此采用图(b)所示的电气互锁，也就是将一个接触器的动断触点串联在另一个接触器的线圈回路中。

在这里应该注意的是，交流接触器的触点是先断后合型的。也就是说，当接触器线圈得电吸合，动断触点先断开，动合触点后闭合；当接触器线圈失电断开，动合触点先断开，动断触点后闭合。尽管这里动作的先与后在时间上是非常短的，但毕竟还是有先有后。同学们可以在做实验时仔细观察，或者用起子(螺钉旋具的俗称)将接触器的动铁心闭合，就可以看清楚触点的动作顺序。

当按下正转启动按钮 FSB 后，正转接触器 FKM 动作，使电动机正转。FKM 的一个动断触点串联在接触器 RKM 线圈的控制回路内，它此时先断开，切断了接触器 RKM 线圈的回路，FKM 的一个动合触点后闭合实现自锁。若再按 RSB，接触器 RKM 受 FKM 的动断触点互锁不能动作，这样就防止了电源短路事故。当需要电动机反转时，按下图 2.4 中的停止按钮 SB，正转接触器 FKM 失电，电动机停止，FKM 的动断触点恢复，为反转作准备。再按下反转启动按钮 RSB，反转接触器 RKM 得电，电动机反转。

为进一步防止接触器通断时的飞弧短路，可利用先断后合型的复式按钮作为机械互锁。而在实际工作中常采用既有电气互锁，又有机械互锁的双重互锁控制线路，如图 2.4(c)所示。在按动按钮 FSB 的过程中，FSB 的动断触点先断开 RKM 的线圈回路，FSB 的动合触点后闭合，使 FKM 线圈得电并自锁，电动机正转。反转工作情况亦然。此线路是一个较完整的正反转自动控制线路，但该线路在电动机正转工作时，可不经停止，直接使电动机反转工作，这将对电动机和机床的机械部件造成比较大的冲击，使用时应引起注意。

2) 正反转自动循环控制线路

机床工作部件的往返自动循环，也可以通过控制拖动电动机的正反转来实现。例如万能铣床、龙门刨床的工作台的自动循环等。万能铣床的工作台应根据工作台的行程位置，自动地实现启动、停止、反向的控制，这就需要按行程进行自动控制，为了实现这种控制，就要有测量位移的元件——行程开关。

(1) 行程开关。行程开关有机械式和电子式两种，机械式又分为按钮式、滑轮式等，电子式有晶体管接近开关等。通常把放在终端位置用以限制生产机械极限行程的行程开关称为终端开关或限位开关。

(2) 自动循环控制线路。根据工艺的要求，万能铣床工作台的进给传动分为右传动和左传动两种循环工作制，如图 2.5 所示。工作台自动循环的控制线路如图 2.6 所示。

右循环——工作台以进刀工作速度向右运动，而后自动快速退回原处。

左循环——工作台以进刀工作速度向左运动，而后自动快速退回原处。

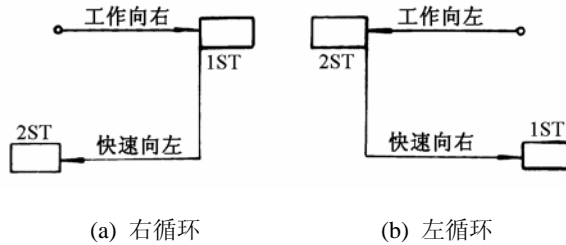


图 2.5 工作台的工作循环图

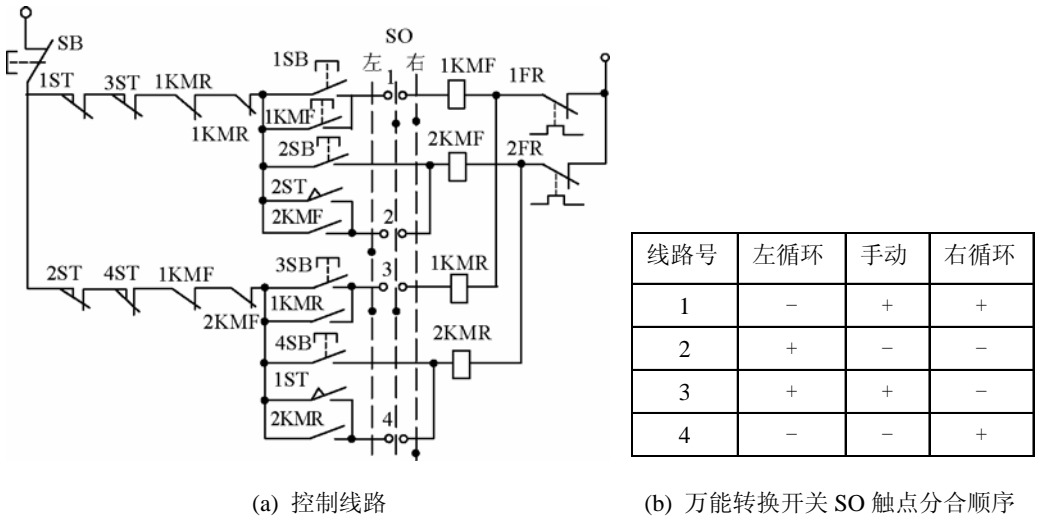


图 2.6 工作台自动循环的控制线路

由万能转换开关 SO 来进行两种循环的选择，当手柄处于中间位置时则为手动控制，不能自动往返。转换开关 SO 各触点的分合顺序如图 2.6(b)所示。在图 2.6(a)中，SO 虚线的条数表示转换开关的位置数，黑点的个数表示转换开关的触点数，一般一层一个触点，该万能转换开关是三个位置六个触点(六层)。怎样读懂图中转换开关 SO 触点的开合情况呢？当 SO 置于某个位置时，这个位置下所有黑点所对应的线路号触点全部接通，其余的触点

全部断开。例如，SO 在“左”位置时，左边这条虚线上有 2 个黑点，其对应的 2 号、3 号线路接通，其他线路不通。

工作台由两个电动机传动(主电路未示于线路中)，分别决定进刀速度与快速返回速度。图 2.6(a)所示控制线路的工作原理如下：若 SO 的手柄位于右循环时，线路号 1 与 4 的触点闭合。当按 1SB 时，接触器 1KMF 动作，相应的进刀电动机启动，工作台以进刀工作速度向右移动，当工作台上的挡块撞及行程开关 1ST 时，1KMF 失电，由于 1ST 的动合触点闭合，接通接触器 2KMR，因此，相应的快速移动电动机启动，工作台快速返回原处，在撞及 2ST 时使 2KMR 失电，工作台自动停止。左循环的工作情况与上述相同。

手动控制往返时，只需将转换开关手柄置于中间位置，按压相应的按钮，即得相应方向与速度的运动，按停止按钮时，工作台立即停止。

行程开关 3ST、4ST 用以限位保护，避免工作台超越最大允许的位置。它也是按行程控制的。图 2.6(a)中 2SB、4SB 分别为快速向右、向左按钮。

3. 点动控制线路

1) 点动控制

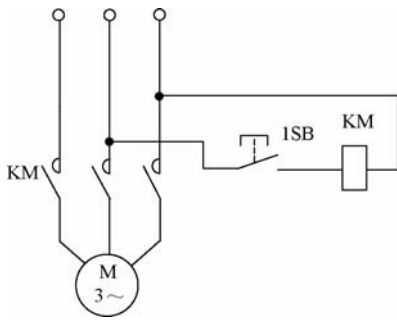
除电动机的长期工作状态外，生产机械还有一种调整工作状态，如摇臂钻床中摇臂的上下移动，镗床作加工准备时的对刀。在这一工作状态中对电动机的控制要求是一点一动，即按一次按钮动一下，连续按则连续动，不按则不动，这种动作常称为“点动”。图 2.7(a)所示是实现点动的最简单的控制线路，在此，只要不用自锁回路便可得到点动的动作。

2) 既能连续运动又能点动的控制线路

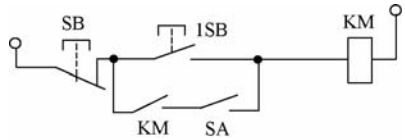
在实际工作中，有的机床既要求能点动工作，又要求能连续长期工作。图 2.7 (b)、图 2.7(c)，图 2.7(d)所示是能同时满足上述两个要求的线路。图 2.7(b)采用了选择开关 SA 用于选择工作状态，SA 打开时为点动工作，SA 闭合时为长期工作。但这个线路在操作时多了一个动作，工作人员使用时不太方便。

图 2.7(c)中采用两个按钮分别控制，当按动按钮 1SB 时，接触器 KM 得电，KM 的动合触点闭合，与复式按钮 2SB 的动断触点串联组成自锁电路，电动机长期工作。而按下点动按钮 2SB 时，接触器 KM 得电，电动机工作，同时，KM 的动合触点闭合；但是，当松开按钮 2SB 时，接触器 KM 失电，而接触器触点和复式按钮都是先断后合型的，在松开按钮的过程中，其动合触点先断开，动断触点后闭合，尽管这个先、后动作的时间很短，只是两对触点之间那点距离的弹簧恢复时间，毕竟还是有先后顺序的。因此，当接触器失电时，其动合触点先断开；按钮 2SB 的动合触点也是先断开，动断触点后闭合；等 2SB 的动断触点闭合时，接触器的动合触点已经断开，因而没有自锁功能，电动机停止运行。

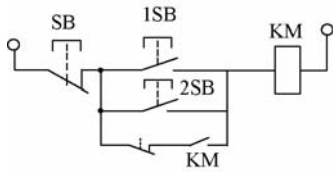
图 2.7(d)采用中间继电器 K 进行控制。按 1SB 时，K 接通并自锁，K 的动合触点动作使接触器 KM 得电并自锁，电动机长期工作。若按 2SB 时，接触器 KM 得电，但由于没有接通 K，所以不能将 KM 自锁，电动机仅能点动工作，且当电动机已经启动长期工作后，再按点动按钮 2SB，2SB 不能起作用。图 2.7(d)所示的线路多使用了一个继电器，成本高一些。实际中多采用图 2.7(c)，图 2.7(d)的线路，如国产立式车床 C534J1 的工作台就采用图 2.7(d)控制线路。



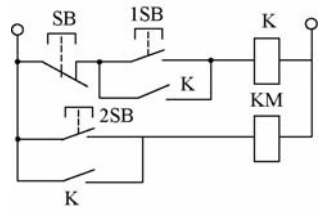
(a) 点动控制线路



(b) 既能点动又能连续运动的控制线路之一



(c) 既能点动又能连续运动的控制线路之二



(d) 既能点动又能连续运动的控制线路之三

图 2.7 电动机点动控制线路

4. 多点控制

对于大型机床，为了操作的方便，常常要求在两个或两个以上的地点都能进行操作。实现这种要求的线路如图 2.8 所示。即在各操作地点各安装一套按钮，其接线的组成原则是各启动按钮的动合触点并联，而各停止按钮的动断触点串联。在图 2.8 的两地两点控制线路中，只要按下按钮 1SB 或 2SB，KM 都可以得电，电动机都能够启动；按下 3SB 或 4SB，KM 都可以失电，电动机都能够停止。多点控制线路的接线如此类推。

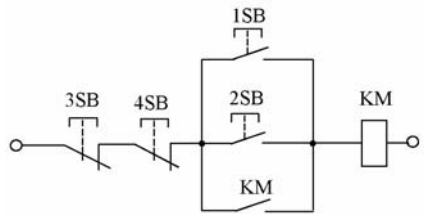


图 2.8 两地两点控制的线路

5. 多台电动机的顺序控制线路

目前，机床上已广泛采用多台电动机拖动，即在一台机床上采用几台、甚至十几台电动机拖动各个部件，而机床的各个运动部件之间是相互联系的，为实现复杂的工艺要求和保证可靠地工作，各部件常常需要按一定的顺序工作或联锁工作。使用机械方法来完成这项工作将使机构异常复杂，有时还不易实现，而采用继电器—接触器控制系统却极为简单。

1) 两台电动机顺序启动控制

机床主传动与润滑油泵传动间就是一种最常见的顺序控制。例如，当车床主轴工作时，首先要求在齿轮箱内有充分的润滑油；龙门刨床工作台移动时，导轨内也必须先有足够的润滑油。因此要求主传动电动机应该在润滑油泵工作后才准启动，这样两台电动机的顺序启动采用图 2.9(a)、图 2.9(b)所示的控制线路。它们均能实现电动机 1M 先启动，2M 才能启动；但是 1M、2M 是同时停止的。图 2.9(a)中的辅助触点 1KM 既起自锁，又起联锁的作

用；而图 2.9(b)中的一个 1KM 起自锁作用，另一个 1KM 起联锁作用。在图 2.9(a)中，按下启动按钮 1SB，接触器 1KM 得电，电动机 1M 启动；1KM 的动合触点闭合，一方面自锁，另一方面，为电动机 2M 的启动作准备，这种作用称为联锁。当需要 2M 工作时，只需按下按钮 2SB，2KM 得电并自锁，2M 运行。当电动机 1M 没有工作时，无论怎么按 2SB，2KM 都不能得电，2M 都不会启动，这就是顺序启动控制。图 2.9(b)的电路增加了电动机 2M 可以单独停止的环节。

2) 两台电动机顺序启动顺序停止的控制

有的机床中，不仅要求进给装置只有在主轴旋转后方能工作(避免刀具损坏)，而且要求停车时进给装置先停止，而后主轴才能停止。这种两台电动机顺序启动顺序停止的控制线路如图 2.9(c)所示。它能实现电动机 1M 先启动，而后 2M 才能启动；电动机 2M 先停止，而后 1M 才能停止。顺序启动时，按下 1SB，1KM 得电，电动机 1M 工作，1KM 的一个动合触点自锁，另一个动合触点联锁；到需要第二台电动机工作时，只要按下按钮 2SB，2KM 便得电并自锁，2M 启动工作，与控制第一台电动机停止的按钮 3SB 并联的 2KM 的另一个动合触点闭合，为两台电动机的顺序停止作准备。顺序停止时，因为 3SB 已经被闭合的 2KM 触点锁住，先按 3SB 不起作用；只有先按下按钮 4SB，2KM 失电，2M 才停止；2KM 两个动合触点断开，解除了对停止按钮 3SB 的锁定，在需要第一台电动机停止时，再按下 3SB，1KM 失电，1M 停止运行。

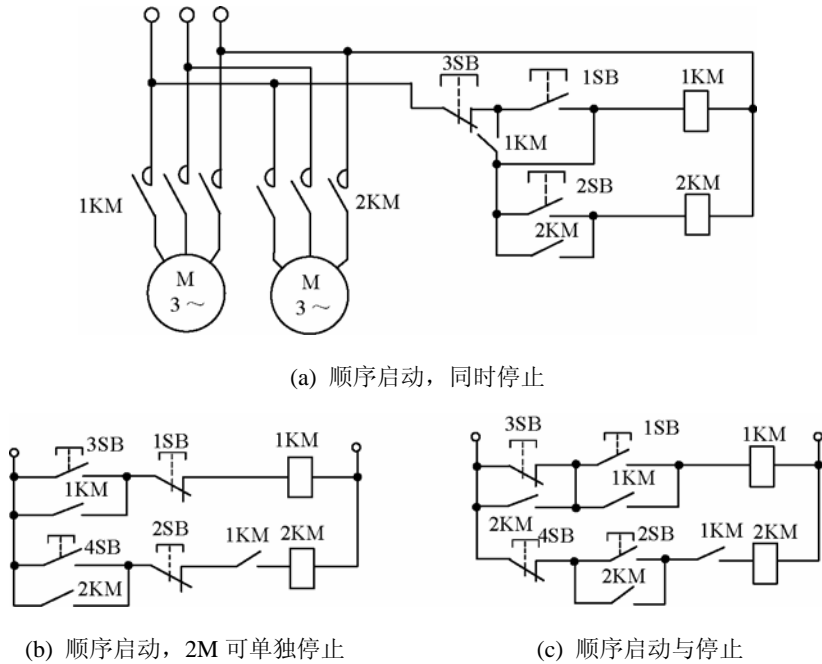


图 2.9 两台电动机的顺序控制线路

2.3.2 电动机降压启动控制线路

为限制异步电动机较大的启动电流对电网的影响，较大容量的笼型异步电动机一般都采用降压启动的方式启动。机床上常用的方法有 Y-Δ 降压启动和定子串电阻降压启动。

1. 电动机定子串电阻降压启动的自动控制线路

在电动机定子端串联电阻实行降压启动的方式,在电动机启动后,应该将启动电阻切除,使电动机处于全电压运行状态。图 2.10 所示线路为实现上述要求的按时间原则控制的一种自动控制线路。按时间原则控制是由反映时间长短的时间继电器配合交流接触器实现的。

在图 2.10 中,按下启动按钮 1SB,接触器线圈 1KM 立即动作,于是在电动机 M 的定子中串入电阻 R_{st} 降压启动,使启动电流下降;与此同时,1KM 的一个动合辅助触点自锁工作,另一个接通时间继电器 KT 的线圈,时间继电器开始延时,延时时间整定为 5s~7s,待电动机启动完了,延时结束,KT 的延时闭合动合触点闭合使接触器 2KM 得电,2KM 的动合主触点将启动电阻 R_{st} 短接,电动机全电压工作,这时 2KM 的动断辅助触点断开 1KM 线圈的回路,另一个动合触点使其自锁。1KM 失电后,时间继电器 KT 线圈也失电,也就是说,电动机在正常工作时,只有 2KM 吸合。这样既保证了工作可靠,又节约了电能。

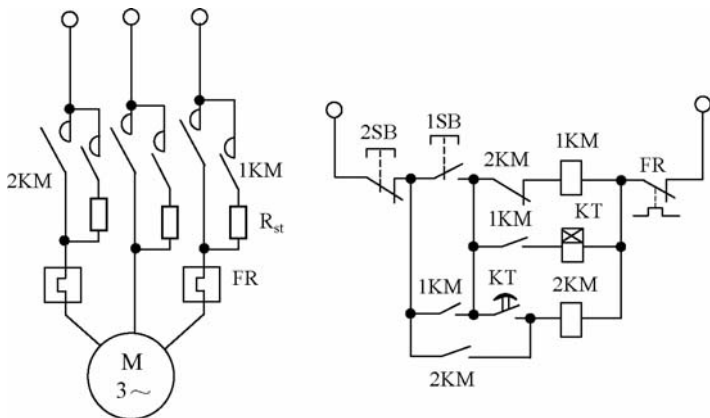


图 2.10 电动机定子串电阻降压启动控制线路

2. 电动机 Y- Δ 降压启动的自动控制线路

如果电动机定子绕组在正常工作时是作 Δ 连接的(即定子每相绕组额定电压等于电源线电压 380V),那么在启动时可先把定子绕组连接成 Y 形,再接入电源启动,此时每相绕组承受的是相电压 220V,从而实现了降压启动,等到电动机达到运行的转速时,再把定子绕组变换成 Δ 连接,使电动机全电压运行。容量较大的笼型异步电动机定子绕组都是作 Δ 连接的。图 2.11 所示线路为实现上述要求的按时间控制的一种自动控制线路。如 MQ1350 外圆磨床的砂轮电动机 M 就采用这种控制线路。

在图 2.11 中,按下启动按钮 1SB,KT、1KM、3KM 同时得电。工作过程是:1SB 接通后,时间继电器 KT 得电,KT 延时断开的动合触点瞬时闭合,使 1KM 得电,1KM 的动断触点先断开,使 2KM 不能得电;1KM 的两个动合主触点闭合,使定子绕组连接成 Y 形,一个动合辅助触点闭合使 3KM 得电,3KM 的动合主触点把电动机接上电源进行降压启动,其动合辅助触点自锁,动断触点使 KT 失电。经过 5s~7s 延时后,电动机已达到运行转速,此时 KT 的延时断开动合触点自动断开,使 1KM 失电,1KM 的动合主触点恢复断开,电动机 Y 形连接的星点打开;接着 2KM 得电,使电动机定子绕组由 Y 形换接成 Δ 连接,并加上全电压运行。图 2.11 中,3KM 为线路接触器,1KM 为 Y 形启动接触器,2KM 为 Δ 运行

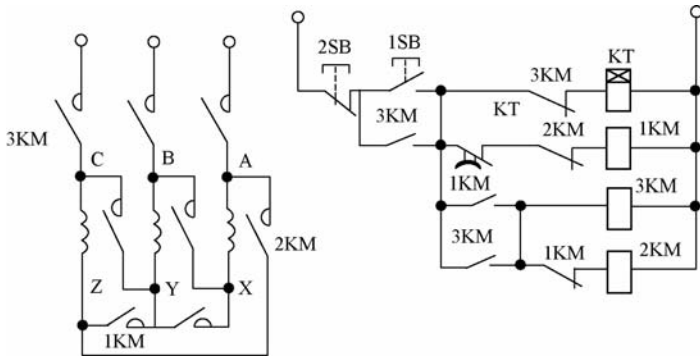


图 2.11 电动机 Y—Δ 降压启动控制线路

接触器。该控制线路在电动机正常运行时，时间继电器 KT 线圈不带电，节约了控制电路的电能。

2.4 电动机的制动控制线路

万能铣床、卧式镗床、组合机床等一些机床，都要求能迅速停止和准确定位。这就需要对电动机进行制动，强迫其立即停车。制动停车的方式有两大类，即机械制动和电气制动。机械制动采用机械抱闸或液压装置制动；电气制动实质上是使电动机产生一个与原来转子的转动方向相反的制动转矩。机床中常用的电气制动有能耗制动和反接制动。

2.4.1 电动机能耗制动控制线路

在笼型异步电动机能耗制动的过程中，要求电动机从三相交流电网断开后，立即在定子绕组任意两相间加上直流电源进行制动，而当制动结束时，要切除直流电源。图 2.12 所示线路为实现上述要求的按时间原则控制的自动控制线路。

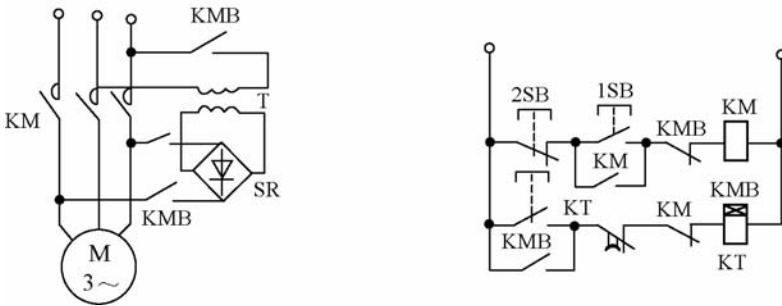


图 2.12 电动机能耗制动控制线路

在图 2.12 中，要电动机停车时，按下停止按钮 2SB，2SB 是复式按钮，它的动断触点先断开，使 KM 失电，将电动机从交流电网中切除，KM 的动断触点恢复；2SB 的动合触点后闭合，使时间继电器 KT 和制动接触器 KMB 的线圈同时得电，KMB 的动合触点将直流电源(经变压器 T 和固体整流器 SR 而获得)接入电动机定子绕组，使电动机进入能耗制动

状态；KMB 自锁，保证松开 2SB 后 KMB 暂时不致断电。而在 KMB 得电的同时，时间继电器开始延时，经过 3s 延时后，将其延时断开的动断触点断开，使 KMB 失电，将接入电动机定子的直流电源切除，且其自锁触点断开，KMB 将不会重新得电。此时，电动机已经停车。

2.4.2 电动机反接制动控制线路

由于电动机的启动或制动时间与负载力矩的大小等因素有关，因此，按时间原则控制电动机的启动或制动过程是不够准确的，在反接制动的情况下，甚至有使电动机反转的可能。为了准确地控制电动机的启动和制动，需要直接测量速度信号，再用此速度信号进行控制，这就产生了按速度原则控制的自动控制。

1. 速度继电器

电动机的反接制动由速度继电器配合接触器来实现。目前在机床上用得最多的是感应式速度继电器，其原理结构如图 2.13 所示。继电器的轴 1 和需控制速度的电动机轴相连接，在轴 1 上装有转子 2，它是一块永久磁铁，定子圆环 3 固定在另一套轴承上，此轴承则装在轴 1 上。圆环内部装有绕组 4，其结构与笼型异步电动机的转子绕组类似，故它的工作原理也与笼型异步电动机完全一样。当轴转动时，永久磁铁也一起转动，相当于一旋转磁场，在绕组 4 里感应出电动势和电流，使定子有和转子一起转动的趋势，于是杠杆 5 触动弹簧片 8 或 9，使触点系统 6 或 7 动作(视轴的旋转方向而定)。当转轴接近停止时，动触点跟着弹簧片恢复为原来的位置，与两个靠外边的静触点分开，而与靠内侧的静触点闭合。

机床上常用的感应式速度继电器有 JY1 型和 JFZO 型，JY1 型能在转速 3000r/min 以下可靠的工作。一般情况下，当转速大于 300r/min 以下时，速度继电器的触点就可靠动作；当转速小于 100r/min 以下时，触点就可靠恢复原状。调整弹簧片的拉力可以改变触点恢复原位时的转速，以达到准确的制动。

速度继电器的结构较为简单，价格便宜，但它只能反映转动的方向和是否停转或者说只能够反映一种速度(是转还是不转)，所以，仅广泛用在异步电动机的反接制动中。速度继电器又称为反接制动继电器。

所谓“反接”是指，将速度继电器与电动机转子同轴相连接，速度继电器的触点引入到电气控制线路中。

2. 电动机反接制动的自动控制线路

图 2.14 为按速度控制的交流异步电动机反接制动的自动控制线路。当按下启动按钮 1SB 后，KM 即得电使电动机旋转并自锁；KM 的动断触点断开，使制动接触器 KMB 不能得电。当电动机启动至一定转速时(大于 300r/min)，速度继电器 KS 可靠动作，将动合触点 KS 闭合，为 KMB 的通电，即为反接制动做好准备。需要电动机停止时，按下停止按钮 2SB，

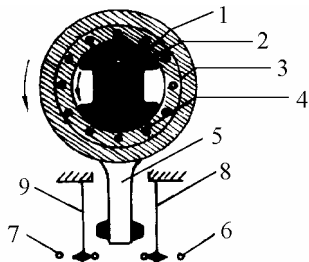


图 2.13 速度继电器原理结构图

- 1—轴；2—转子；3—定子；4—绕组；
5—杠杆；6、7—静触点；8、9—弹簧片

KM 失电，其动断触点闭合。由于速度继电器的动合触点在电动机启动过程中已经闭合，即便此时电动机已脱离电源，由于惯性其转速仍远远大于 300r/min，因此 KMB 得电，电动机三相绕组通入反相序的交流电源，实现反接制动，转速迅速下降。当转速接近于零时(小于 100r/min 时)，KS 的动合触点断开，KMB 失电，电动机处于爬行状态，电动机很快就停止了。

由于在反接制动时，电动机的反接电流很大，因此，反接制动过程中必须在电动机定子电路串入反接制动电阻 R_B ，如图 2.14 的主电路所示。

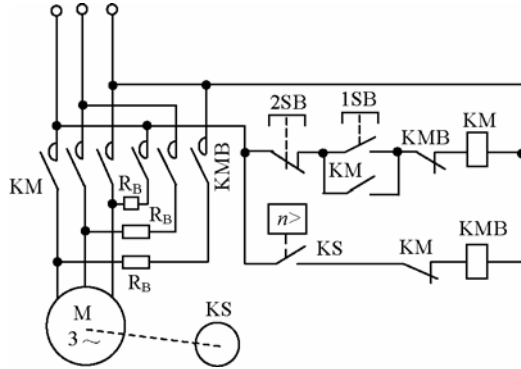


图 2.14 电动机反接制动控制线路

凡是电气控制线路图中有与电动机转子同轴连接的继电器，又在电动机定子回路接有电阻，一定采用了反接制动控制。

2.5 电动机变磁极对数的调速控制线路

三相异步电动机的调速方法主要有改变定子绕组的磁极对数、改变交流电的频率和改变转差率三种。多速电动机就是通过改变绕组的连接方法来改变磁极对数的。多速电动机能代替笨重的齿轮变速箱，满足只需要几种特定的转速的调速要求；而且在对启动性能没有较高要求的情况下，空载或轻载启动。多速电动机在中小型磨床中用得很普遍。

多速电动机有采用两套绕组的，也有采用一套绕组的。在倍极比(如 4/2、8/4 极等)双速电动机中用一套绕组，通过改变接线获得两个成倍的转速；在非倍极比二速(如 6/4、8/6 极等)、三速、四速电动机中采用两套绕组。这样使电动机体积大，用料多，制造复杂，成本高。采用一套绕组，通过改变电动机外接线的的方法，获得两种、三种、四种转速的电动机，称为单绕组多速电动机。单绕组双速电动机是最简单的多速电动机，常见的连接方式有 Δ/Y 和 Y/Y 两种。

2.5.1 双速电动机的连接方法

图 2.15(a)主电路所示电动机是双速电动机的 Δ/Y 连接。当接触器 1KM 得电，而 2KM、3KM 不得电时，电动机三相绕组成连接成 Δ ；当接触器 2KM、3KM 得电而 1KM 不得电时，绕组被已经闭合的 3KM 的两个主触点短接(成为双 Y 形的星点)，而三相绕组

的中间抽头接电源, 则电动机三相绕组接成 Y 形。从 Δ 连接改变为 Y 连接时, 其极对数减少了一半, 即 Δ 连接时为低速, 而 Y 连接时为高速。多速电动机可作高、低速变换。

2.5.2 双速电动机的控制线路

在这里介绍一种双速异步电动机变速的控制线路, 如图 2.15 所示, 通过转换开关 QB 手动控制来选取所需的转速。当需要低速时, 则将 QB 扳到“1”的位置, 再按下 1SB, 则 1KM 得电且自锁, 使电动机定子绕组连接成 Δ 并接入电网以低速运行。当需要高速时, 则将 QB 扳到“2”的位置, 再按下 2SB, 2KM 和 3KM 同时得电且自锁, 使电动机定子绕组连成 Y 形并接入电网以高速运行。需要停车时, 按下停止按钮 SB 即可。接触器 1KM 与 2KM(或 3KM)互锁, 使二者不会同时得电, 以避免产生电源短路等事故。

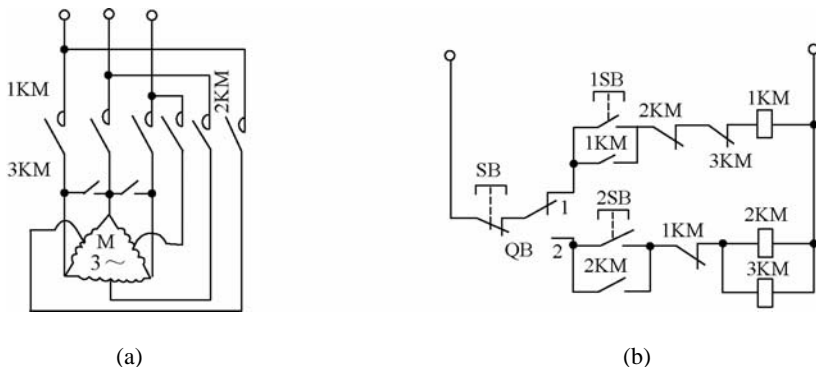


图 2.15 双速电动机变速控制线路

2.6 液压动力滑台的电气控制线路

液压传动系统容易获得很大的转矩, 运动传递平稳均匀, 准确可靠, 控制方便, 易于实现自动化。液压传动系统和电气控制系统相结合的电液控制系统在组合机床、自动化机床、生产自动线、数控机床等领域的应用越来越广泛。

2.6.1 动力滑台的工作循环

组合机床是由一些通用部件和少量专用部件组成的, 在组合机床上可完成钻孔、扩孔、铰孔、镗孔、攻螺纹、车削、铣削及精加工等工序, 一般采用多轴、多刀、多工序同时加工。

组合机床控制系统大多采用机械、电气、液压或气压传动相结合的控制方式, 其中电气控制起着重要作用。组合机床由一些通用部件组成, 组合机床的电气控制线路也是由通用部件的典型控制线路和一些基本控制环节所组成的。

1. 液压传动系统的组成

液压传动系统一般由四个部分组成。

- (1) 动力装置。包括液压泵等;
- (2) 执行机构。包括液压缸或液压电动机;

(3) 控制调节机构。包括换向阀、溢流阀、节流阀等；

(4) 辅助装置。包括油箱、油管、滤油器、压力计等。

换向阀在机床液压系统中用以改变液流方向，实现运动换向，接通或关断油路。在电液控制系统中，电磁换向阀就是利用电磁铁推动滑阀移动来控制液流流动方向的。

电磁换向阀的种类很多，分为二位二通、二位三通、二位四通、三位四通、三位五通等。电磁阀有交流电磁阀和直流电磁阀两种，以电磁铁所用电源种类而定。

2. 动力滑台的工作循环

组合机床的通用部件一般划分为：动力部件，如动力头和动力滑台；支承件，如滑座、床身、立柱和中间底座；输送部件，如回转分度工作台、回转鼓轮、自动线回转工作台和零件输送装置；控制部件，如液压元件、控制板、按钮台和电气挡板；其他部件，如排屑装置和润滑装置等。

组合机床上最主要的通用部件是动力头和动力滑台，它们是完成刀具切削运动和进给运动的部件。通常将能同时完成切削运动和进给运动的动力部件称为动力头，而将只能完成进给运动的动力部件称为动力滑台。动力滑台按结构分为机械动力滑台和液压力滑台两种。动力滑台可配置成卧式或立式的组合机床。动力滑台配置不同的控制线路，可完成多种自动工作循环，动力滑台的基本工作循环有以下六种。

- (1) 一次工作进给。快进—工进—快退；
- (2) 带延时的一次工作进给。快进—工进—延时停留——快退；
- (3) 双向工作进给。快进—工进—反向工进—快退；
- (4) 二次工作进给。快进—一次工进—二次工进—快退；
- (5) 跳跃进给。快进—工进—快进—工进—快退；
- (6) 分级进给。快进—工进—快退—快进—工进—快退，快进—工进—快退。

机械动力滑台由滑台、滑座和双电动机(快速及进给电动机)传动装置三部分组成，滑台的自动工作循环是通过传动装置将动力传递给丝杠来实现的。机械动力滑台有 JT4522、JT4532、JT4542 和 JT4552 系列。

液压力滑台由滑台、滑座和液压缸三部分组成。液压力滑台是利用压力油，使液压缸拖动滑台向前或向后运动的。滑台的自动工作循环是由电气控制液压系统来实现的。

2.6.2 具有一次工作进给的液压力滑台的电气控制线路

液压力滑台的自动工作循环是由电气控制线路控制液压系统来实现的。首先介绍液压系统图中的元件以及电磁铁的基本控制线路，然后再解读一下工作进给的液压力滑台的电气控制线路图。

1. 自动工作循环

液压力滑台的自动工作循环主要是一次工作进给。一次工作进给的自动工作循环是：快进—工进—快退。

2. 液压系统图中的元件

(1) 动力装置。液压泵 YB，图中带箭头表示为变量泵。液压泵由单方向运转的电动机 M 拖动；

(2) 执行机构。液压缸 YG，图中为单活塞杆油缸；

(3) 控制调节机构。电磁换向阀 1YV、2YV，其中，1YV 为三位五通电磁阀，2YV 为二位三通电磁阀，它们分别由电磁铁 1YA、2YA、3YA 推动滑阀移动来控制液流流动方向，节流阀 L；

(4) 辅助装置。过滤器 1U、2U，油箱，油管等。

3. 电磁铁的基本控制线路

容量大的电磁机构，由于电感大，电磁储能大，时间常数 $\tau=L/R$ 大，所以，线圈通电时，过渡过程时间长，动作慢，而线圈断电时，电流迅速降到零，线圈要产生很高的自感电动势，可能将线圈击穿，且在控制电器的触点间产生很强的电弧，使触点烧损，故在其控制线路中要采取措施，以缩短启动时的动作时间和防止断电时电感储能造成的危害。

(1) 小容量电磁铁可用中间继电器或接触器的辅助触点控制，如图 2.16 所示。由于电磁铁本身无记忆功能，所以，必须用继电器等来记忆其启动信号。

(2) 加快直流电磁铁启动过程的线路如图 2.17(a) 所示。它是通过电容器 C 在启动之初，瞬时地将串入的降压电阻 R_s 旁路的办法来加快电磁铁线圈电流的增长。如图 2.17(b) 所示，用二极管 VD 和电容器 C，在启动瞬时旁路降压电阻 R_s ，在线圈与电源断开时，接触器 KM 常闭触点闭合，电容器 C 经放电电阻 R_d 向电磁离合器 YC 线圈放电，给它反向励磁，则离合器消磁快，使从动盘释放得快，传动轴脱离得也快。

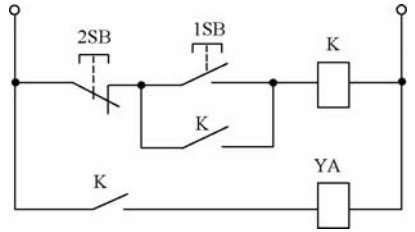


图 2.16 小容量电磁铁控制线路

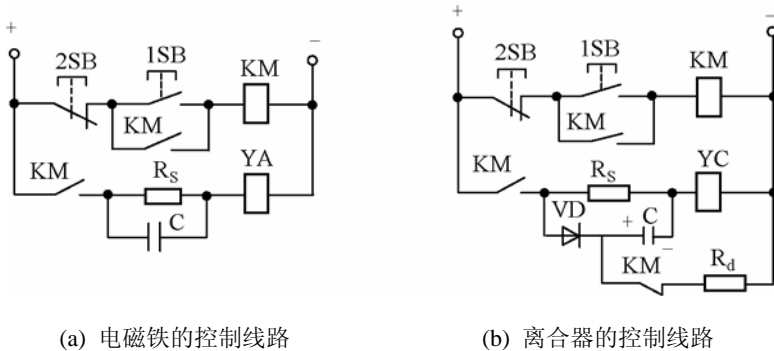
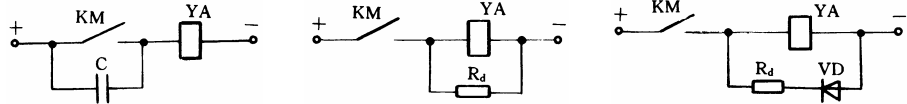


图 2.17 电磁铁加快启动过程的线路

(3) 电磁铁消磁线路。为了防止直流电磁铁线圈过电压和触点烧损，采用电磁铁消磁线路，如图 2.18(a) 所示。在接触器 KM 触点断开瞬间，用电容器 C 对触点旁路，使电磁铁 YA 的线圈电流逐渐降低，KM 触点两端电压逐渐升高，从而保护了线圈和触点。图 2.18(b) 和(c)所示是用放电电阻 R_d 防止电磁铁线圈过电压的放电回路。这两个电路简单而有效，放电电阻值一般选为 2~3 倍线圈电阻值。



(a) 接触器触点加旁路电容 (b) 电磁铁线圈的放电回路 (c) 电磁铁线圈的放电回路

图 2.18 电磁铁消磁线路

4. 一次工作进给的液压动力滑台的液压系统与电气控制线路

图 2.19 所示是一次工作进给的液压动力滑台的液压系统与电气控制图。其液压与电气控制的工作过程分析如下。

(1) 动力滑台原位停止。在图 2.19 中，动力滑台由液压缸 YG 带动，可作前后进给运动。当电磁铁 1YA、2YA、3YA 都断电时，电磁阀 1YV 处于中间位置，动力滑台停止不动。动力滑台在原位时，限位开关 1ST 由挡铁压动，1ST 的动合触点闭合，动断触点断开。

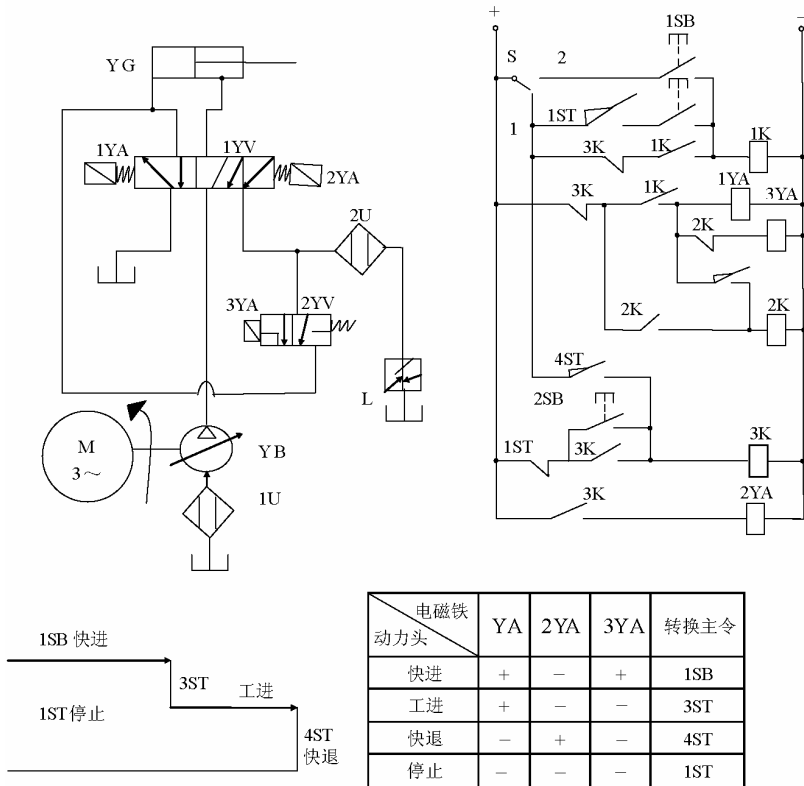


图 2.19 一次工作进给的液压动力滑台的液压系统与电气控制图

(2) 动力滑台快速进给。将转换开关 S 放在 1 位置，按下启动按钮 1SB。按钮 1SB 采用的是双复式按钮，是将两个单复式按钮组装在一起，它有两个启动按钮(动合触点)和两个停止按钮(动断触点)。例如，市场上出售的 LA2 按钮是单复式按钮；LA18、LA19 是双复式按钮，并带有指示灯。中间继电器 1K 线圈得电动作并自锁，它的另一个动合触点使电磁铁 1YA、3YA 通电。1YA 得电使三位五通电磁阀 1YV 的阀杆推向右端，3YA 通电使

二位三通阀的阀杆推向左端，液压缸 YG 拖动动力滑台向前快进。

(3) 动力滑台工作进给。在动力滑台快进过程中，当挡铁压动行程开关 3ST 时，其动合触点 3ST 闭合，使中间继电器 2K 得电动作，2K 的动断触点断开使电磁铁 3YA 失电，电磁阀 2YV 复位，油路中油的流量减小，动力滑台由快速进给自动转换为工作进给。由于 2K 自锁，因此 2K 线圈不会因挡铁松开 3ST 而失电。

(4) 动力滑台快退。当动力滑台工作进给到终点时，挡铁压动行程开关 4ST，4ST 的动合触点闭合，使继电器 3K 得电并自锁，3K 的动断触点打开，使电磁铁 1YA 失电，动力滑台停止工进；同时 3K 的一个动合触点闭合，使电磁铁 2YA 得电，电磁阀 1YV 阀杆向左移，使滑台快速退回。当动力滑台退回到原位时，1ST 被压动，1ST 的动断触点断开，使 3K 失电。此时电磁铁 1YA、2YA、3YA 都处于断电状态，动力滑台停在原位。

当动力滑台不在原位而需要快退时(此时 1ST 没有被压)，可按动按钮 2SB，使 3K 线圈得电，3K 的触点动作，使电磁铁 2YA 得电，滑台实现快退，一直退到原位压下 1ST，2YA 失电，滑台停止。

(5) 动力滑台点动调整。首先将转换开关 S 放在“2”位置，按下启动按钮 1SB，也可以接通 1K，使电磁铁 1YA、3YA 得电，动力滑台可向前快进。但由于 1K 不能自锁，因此松开 1SB 后，滑台立即停止，所以动力滑台可向前点动调整。

2.6.3 具有带延时的一次工作进给的液压动力滑台

在图 2.19 所示的控制线路基础上，增加一条延时线路，就可以得到具有带延时的一次工作进给的液压动力滑台的控制线路。

1. 自动工作循环

带延时的一次工作进给的液压动力滑台的自动工作循环是：快进—工进—延时停留—快退。

2. 电气控制线路

只要在图 2.19 的电气控制原理图中增加一个时间继电器，就可以得到具有带延时的一次工作进给的液压动力滑台的控制线路，延时停留时间一般整定为 1s~2s。具体做法是：在转换开关 S 的“1”位置向下的一条线与最右边的一条线(控制电源“-”端向下那条线)之间，加一条由行程开关 4ST 的动合触点和时间继电器 KT 线圈组成的电路；再将图 2.19 电气控制原理图部分中的行程开关 4ST 的动合触点换成时间继电器 KT 的延时闭合的动合触点。对于具有带延时的一次工作进给的液压动力滑台的控制线路，就让读者画出其电气控制原理图，并分析快进—工进—延时停留—快退的工作循环。

思考题与习题

1. 电动机中的短路保护和过载保护有何区别？
2. 为什么电动机要设有零压和欠电压保护？

3. “自锁”的含义是什么？试举例说明。
4. “互锁”的含义是什么？试举例说明。
5. 绘制电气原理图的原则主要有哪些？
6. 装有电气控制的机床，电动机由于过载而自动停车后，若立即按启动按钮则不能开车，这可能是什么原因？
7. 试画出与图 2.20 所示电气接线图相对应的电气原理图。

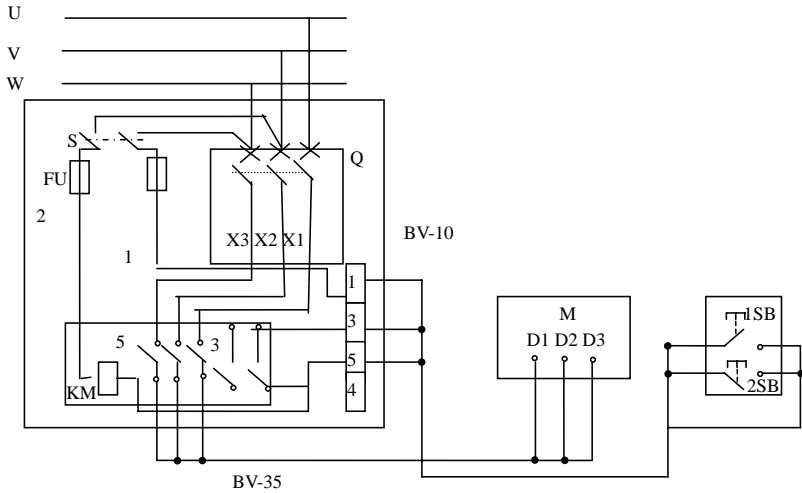


图 2.20 电气接线图

8. 试从接线、经济、安全、方便等方面来分析一下，如图 2.21 所示的电动机启动停止控制线路有什么问题。

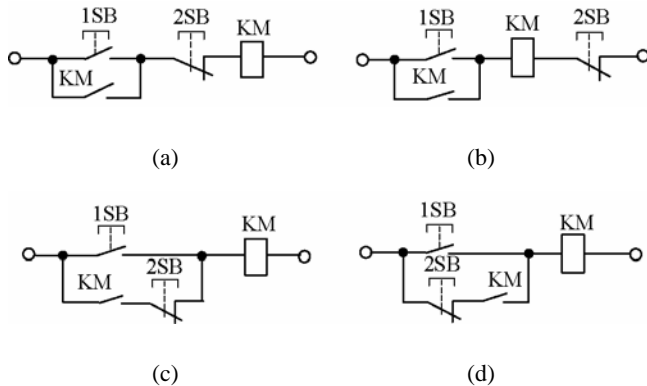


图 2.21 电动机启动停止控制线路

9. 试作出某机床主电动机控制线路图。要求：可正反转；可正向点动，两处启停；有短路保护和过载保护。
10. 要求三台电动机 1M、2M、3M 按一定顺序启动：即 1M 启动后，2M 才能启动；2M 启动后 3M 才能启动；停车时则同时停。试设计此控制线路。
11. 试设计两台笼型异步电动机的顺序启动停止控制线路。要求：1M、2M 能顺序启

动，并能同时或分别停止。

12. 容量较大的笼型异步电动机反接制动时电流较大，反接制动时需在定子回路中串入电阻，试按转速原则设计其控制线路。

13. 试设计一条自动运输线，其中有两台电动机，1M 拖动运输机，2M 拖动卸料机。要求：

- (1) 1M 先启动后，才允许 2M 启动；
- (2) 2M 先停止，经一段时间后 1M 才自动停止，且 2M 可以单独停止；
- (3) 两台电动机均有短路、长期过载保护。

14. 图 2.22 为机床自动间歇润滑的控制线路图，其中接触器 KM 为润滑油泵电动机启停用接触器(主电路未画出)，控制线路可使润滑油有规律地间歇工作。试分析此线路的工作原理，并说明开关 S 和按钮 SB 的作用。

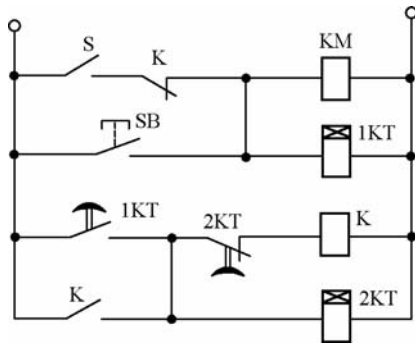


图 2.22 机床自动间歇润滑的控制线路图

15. 试设计一台异步电动机的控制线路。要求：

- (1) 能实现启、停的两地控制；
- (2) 能实现点动调整；
- (3) 能实现单方向的行程保护；
- (4) 要有短路和长期过载保护。

16. 为了限制点动调整时电动机的冲击电流，试设计电动机的电气控制线路。要求正常运行时为直接启动，而点动调整时需串入限流电阻。

17. 试设计 1M 和 2M 两台电动机顺序启、停的控制线路。要求：

- (1) 1M 启动后，2M 立即自动启动；
- (2) 1M 停止后，延时一段时间，2M 才自动停止；
- (3) 2M 能点动调整工作；
- (4) 两台电动机均有短路、长期过载保护。

18. 试设计某机床主轴电动机控制线路图。要求：

- (1) 可正反转，且可反接制动；
- (2) 正转可点动，可在两处控制启、停；
- (3) 有短路和长期过载保护；
- (4) 有安全工作照明及电源信号灯。

第3章 金属切削机床的电气控制线路

教学提示：电气控制系统是机床的重要组成部分。要能正确地安装、使用和维护机床，工程技术人员不仅要考虑机床的结构与传动方式，还要提出系统的控制方案。第2章我们学习了机床电气的基本控制环节，对于一台机床，设计人员只要能根据它的控制要求，正确地选用相应的控制环节，就能设计出机床的电气控制线路。

教学要求：要求学生了解和掌握卧式车床、摇臂钻床、万能铣床、龙门刨床和组合机床等典型机床的电气控制线路，从而进一步掌握电气控制线路的组成和典型控制环节的应用以及控制线路的分析方法，逐步提高读图的能力，为设计机床电气线路打下基础。

3.1 卧式车床的电气控制线路

电气控制系统是金属切削机床的重要组成部分，在机械设备中起着神经中枢的作用。通过它对电动机的控制，能驱动生产机械，实现各种运行状态，达到加工生产的目的。不同的生产机械设备，或者同类型的机床设备，由于各自的工作方式、工艺要求不同，其电气控制系统也不尽相同。

分析金属切削机床的电气控制电路，尤其需要注意以下几个方面。

(1) 了解金属切削机床的主要结构、运动方式、主要技术性能，液压气压传动系统的工作原理，机械设备对电气控制系统的要求。

(2) 分析主电路，了解各电动机的用途、传动方案、采用的控制方法及其工作状态。

(3) 了解各主令电器(如操作手柄、开关、按钮等)在电路中的功能和操作方式，以及由哪些电路环节实现保护、联锁、信号指示和照明等电路控制。

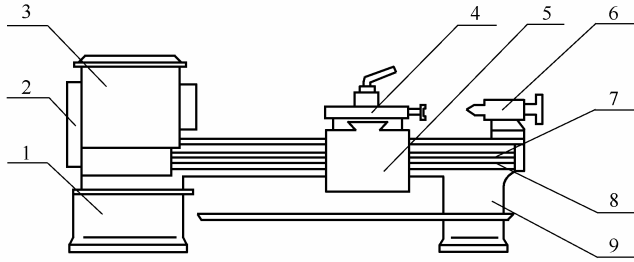
(4) 能按工艺过程、工作方式，分析整个控制电路，能分块分区域总结出控制电路的功能、规律、信号的走向。

总之，任何一个复杂的电气控制系统，按其功能要求都是由一些基本控制环节构成的，因此分析电路时应先按功能将电路分解成基本功能环节(即化整为零)，然后再一个对一个对基本功能环节进行分析，最后根据系统总功能，再积零为整，理解整个电气控制系统。

卧式车床是车床中应用最广泛的一种，它可以完成车削外圆内孔、端面、钻孔、铰孔、切槽切断、螺纹及成形表面等加工工序。车床在加工工件时，随着工件材料和材质的不同，需选择合适的主轴转速及进给速度，提供主轴的正反转，以及切削时对刀具的冷却润滑功能等，这些都需要控制电路发挥作用。

3.1.1 卧式车床主要结构及运动形式

卧式车床由主轴箱、交换齿轮箱、进给箱、溜板箱、尾座、溜板与刀架、光杆、丝杆和床身等部件组成，如图3.1所示。



1—进给箱；2—交换齿轮箱；3—主轴变速箱；4—溜板与刀架；
5—溜板箱；6—尾座；7—丝杆；8—光杆；9—床身

图 3.1 普通车床的结构示意图

在车削加工中，工件旋转为主运动，它由主轴通过卡盘或顶尖带动，由控制电路实现其正反转。在车削加工时，根据被加工零件的材料性能、车刀材料、零件尺寸精度要求、加工方式及冷却条件等来选择切削速度，这就要求车床主轴能在较大范围内变速，对于普通车床，调速比一般应大于 70。通常车削工作过程中，一般不要求反转，但对于一些特殊的加工需要则使用，如加工螺纹，为避免乱扣，需反转退刀，再进刀继续加工。

车床的进给运动是刀架的纵向与横向直线运动，其运动方式有手动与机动控制两种。车削螺纹时，工件的旋转速度与刀具的进给速度应有严格的比例关系。车床纵、横两个方向的进给运动是由主轴箱的输出轴，经交换齿轮箱、进给箱、光杆传入溜板箱而获得的。车床的辅助运动为溜板箱的快速移动、尾座的移动和工件的夹紧与松开。

3.1.2 卧式车床的工作特性

卧式车床的工作特性与电力拖动控制要求如下。

(1) 通常车削加工近似于恒功率负载，同时考虑经济性、工作可靠性等因素，主拖动电动机选用笼型异步电动机。

(2) 为了满足车削加工调速范围大的要求，车床主轴主要采用机械变速方法，但在较大型车床上也采用电动机变极调速的方法，进行速度分挡。

(3) 车削螺纹时，要求主轴能正、反向旋转，对于小型车床采用控制电动机正、反转来实现，这样可大大简化机械结构。对于较大型的车床，直接控制电动机正、反转时，为了避免对电网的冲击，同时便于平滑过渡加工过程，很多都采用了机械传动方法来实现主轴正、反转，如采用摩擦离合器、多片式电磁离合器等。

(4) 车削螺纹时，刀架移动与主轴旋转运动之间必须保持正确的比例关系，故主运动和进给运动只由一台电动机拖动，它们之间通过一系列齿轮传动来实现配合。

(5) 主电动机的启动与停止。当主电动机功率小于 5kW 且电网容量满足要求的情况下，可控制电动机直接启动，否则应采用降压启动的控制方法。

(6) 较大型车床溜板是由一台可以正、反向旋转的电动机单独拖动的。这样可以有效减轻工人的劳动强度，提高机械加工的效率。

(7) 车削加工中，为防止刀具和工件的温度过高，延长刀具使用寿命，提高加工质量，

车床都附有一台冷却泵电动机，只需单方向旋转，且只在主轴电动机启动加工时，方可选择启动与否，主轴电动机停止时它也应停止。当加工铸件或高速切削钢件时，不能采用冷却液，以保护机床与刀具，因此，冷却泵驱动电动机还应设有单独操作的控制开关。

(8) 必要的保护环节、连锁环节、照明和信号电路。

3.1.3 CM6132 型卧式车床电气控制线路

CM6132 型卧式车床是一种加工精度较好的普通车床，应用非常广泛。其电气控制电路如图 3.2 所示。图中主要的控制部分包括以下四个。

1. 主轴电动机控制

当电源开关部分的断路器 QF 合上后，机床的控制部分和工作部分引入了电源。

(1) 主轴电动机正、反向旋转控制。 M_1 为主轴电动机，功率为 3kW，它拖动车床的主运动和进给运动，通过操作转换开关 SA_1 于向上或向下位置，使接触器 KM_1 或 KM_2 线圈得电，主触点分别接通电动机定子绕组的正或反电源相序而实现正、反向旋转控制。转换开关 SA_1 触点动作见表 3-1。

表 3-1 转换开关 SA_1 触点动作表

触点	操作手柄位置		
	向上	中间	向下
$SA_{1-1}(1-2)$	—	+	—
$SA_{1-2}(2-5)$	+	—	—
$SA_{1-3}(2-7)$	—	—	+

(2) 主轴电动机的停机制动控制。主轴制动控制采用电磁离合器机械制动方法。主轴停机时，将开关 SA_1 扳到中间位置， SA_{1-1} 接通、 SA_{1-2} 断开，同时 SA_4 接通使得 YC 得电为制动做准备。当接触器 KM_1 或 KM_2 线圈失电，它们的常开触点断开，主轴电动机 M_1 停转，同时它们的常闭触点返回，使制动电磁离合器线圈得电，此时时间继电器 KT 线圈虽也断电，但其断电延时打开的常开触点尚未断开，从而整流桥 VC 整流电路接通，对电磁离合器 YC 提供直流电实现制动，在 KT 延时断开触点打开时，切断整流桥电路，则 YC 线圈失电，制动结束。

(3) 主轴的变速控制。主轴的变速是利用液压机构操纵两组拨叉进行速度改变的。变速时只需转动变速手柄，将液压变速阀转到相应的位置，使得两组拨叉都移到相应的位置进行位置定位，并压动微动开关 SQ_1 和 SQ_2 ， HL_2 灯亮，表示变速完成。若滑移齿尚未啮合好，则 HL_2 灯不亮，此时应操作 SA_1 于向上或向下位置，接通 KM_1 或 KM_2 ，使主轴稍许转动，让齿轮正常啮合， HL_2 灯亮，说明变速结束，可进行正常工作启动。

2. 冷却泵电动机控制

M_2 是冷却泵电动机，功率为 0.125kW，单向旋转，由转换开关 SA_2 手动操作控制。 M_2 电动机的电源接在 KM_1 、 KM_2 主触点之后，实现了冷却泵电动机应在主轴电动机启动之后才能启动的顺序启动控制要求。

3. 液压泵电动机控制

M_3 是拖动液压泵的电动机，功率为 0.12kW，单向旋转，提供主轴变速装置和润滑的用料。因为电动机容量小，采用转换开关 SA_{1-1} 控制中间继电器 KA 实现控制。液压泵电动机的启动、停止通过自动开关控制。

4. 联锁、保护环节、信号与照明电路控制

(1) 联锁环节。接触器 KM_1 、 KM_2 ，常闭触点实现正、反向电气互锁，同时实现启动工作与停机制动互锁。利用转换开关 SA_1 机械定位，实现正、反转及启动与停机的机械联锁。

(2) 保护环节。通过自动开关 QF，实现主轴电动机的短路、过载保护。熔断器 FU_1 实现对电动机 M_2 的短路保护，熔断器 FU_2 实现对电动机 M_3 的短路保护，熔断器 FU_3 实现对控制电路及变压器的短路保护，熔断器 FU_4 实现照明电路的短路保护，熔断器 FU_5 实现直流电路的短路保护。热继电器 KR_1 实现电动机 M_2 的过载保护，热继电器 KR_2 实现电动机 M_3 的过载保护。转换开关 SA_1 与继电器 KA 实现零位、零压保护。

(3) 信号显示电路。信号灯 HL_1 为电源指示灯； HL_2 为主轴变速完成指示灯，变速完成时 SQ_1 、 SQ_2 压合， HL_2 灯亮。

(4) 照明电路。通过转换开关 SA_3 控制 EL 照明电路，照明电路具有一定的独立性。

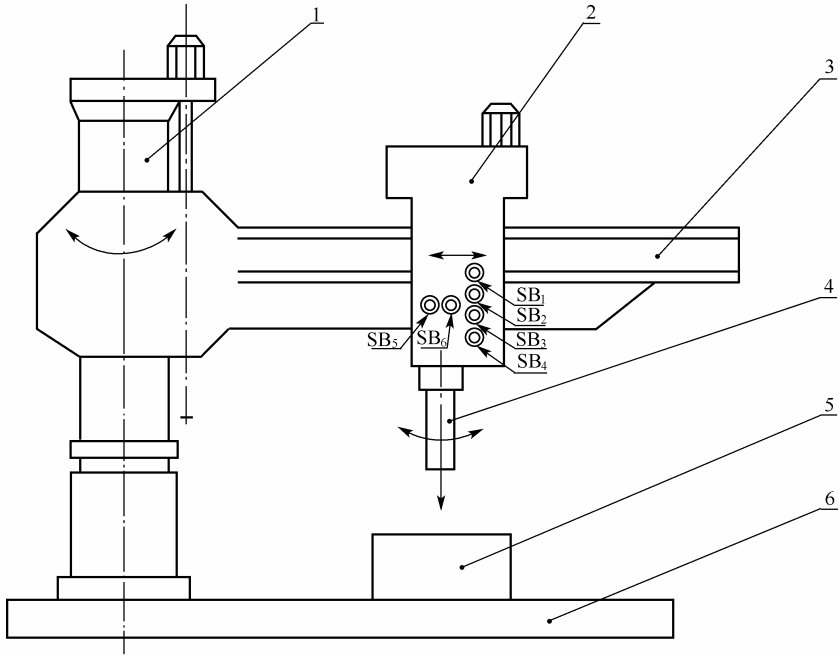
3.2 摇臂钻床的电气控制线路

钻床为孔加工机床，按其结构形式不同，有立式钻床、卧式钻床、深孔钻床、多轴钻床及摇臂钻床等。摇臂钻床是机械加工中常见的机床，它适用于单件或批量生产中带有多孔的零件的加工。Z3040 型摇臂钻床即为常见的一种摇臂钻床。摇臂钻床主要的运动包括：主运动，即主轴的旋转运动及进给运动；辅助运动，即摇臂沿外立柱的垂直移动，主轴箱沿摇臂的径向移动及摇臂与外立柱一起相对于内立柱的回转运动，后两者为手动。另外还需考虑主轴箱、摇臂、内外立柱的夹紧和松开。

由于摇臂钻床运动部件较多，常采用多电动机拖动。Z3040 型摇臂钻床结构示意图如图 3.3 所示。主轴箱上的四个按钮依次为主电动机停止、启动按钮，摇臂上升、下降按钮，分别对应原理图中 SB_1 、 SB_2 ， SB_3 、 SB_4 。主轴箱转盘上的两个按钮为立柱、主轴箱的松开按钮及夹紧按钮，对应原理图中 SB_5 、 SB_6 。转盘为主轴箱左右移动手柄，操纵杆则操纵主轴的垂直移动，两者均为手动。主轴也可机动进给。

3.2.1 摇臂钻床主要结构及运动形式

如图 3.3 所示 Z3040 型摇臂钻床有四台工作电动机，一般采用笼型异步电动机，其中， M_1 为主电动机：控制主轴旋转运动和进给运动，单向旋转，用机械变换完成加工螺纹所需的正、反向； M_2 为摇臂升降电动机：控制摇臂升降运动，双向旋转； M_3 为液压泵电动机：控制摇臂夹紧、放松，主油箱及外立柱相对内立柱的夹紧与放松，双向旋转； M_4 为冷却泵电动机：手动控制，单向旋转。



1—内外立柱；2—主轴箱；3—摇臂；4—主轴；5—工作台；6—底座；
SB₁—主电动机停止按钮；SB₂—主电动机启动按钮；SB₃—摇臂上升按钮；
SB₄—摇臂下降按钮；SB₅—松开按钮；SB₆—夹紧按钮

图 3.3 Z3040 型摇臂钻床结构示意图

主电动机由 KM₁ 接触器控制，SB₂、SB₁ 为启动和停止按钮。当自动开关 QF 接通电源后，按下 SB₂ 按钮时，KM₁ 接触器得电并自锁，主电动机 M₁ 启动旋转。按下停止按钮 SB₁，KM₁ 断电，M₁ 电动机停止。内立柱固定在底座的一端，外立柱套在内立柱上，并可绕内立柱回转 360°。摇臂的一端为套筒，它套在外立柱上，借助升降丝杆的正、反向旋转可沿外立柱作上下移动。由于升降丝杆与外立柱构成一体，而升降螺母则固定在摇臂上，所以摇臂只能与外立柱一起绕内立柱回转。主轴箱是一个复合部件，它由主传动电动机、主轴和主轴传动机构、进给和变速机构以及机床的操作机构等部分组成。主轴箱安装于摇臂的水平导轨上，可以通过手轮操作使主轴箱沿摇臂水平导轨移动。

钻削加工时，主轴旋转为主运动，而主轴的直线移动为进给运动。当进行钻孔工作时钻头一面作旋转运动，一面作纵向进给运动。此时，主轴箱应通过夹紧装置紧固在摇臂的水平导轨上，摇臂与外立柱也应通过夹紧装置紧固在内立柱上。摇臂钻床的辅助运动有：摇臂沿外立柱作上下移动、主轴箱沿摇臂水平导轨作长度方向移动、摇臂与外立柱一起绕内立柱的回转运动。

3.2.2 摇臂钻床电气控制特点

摇臂钻床的工作特性与电力拖动控制要求如下。

(1) 一般为了简化机床传动装置的结构，常采用多电动机拖动。

(2) 主轴的旋转运动、纵向进给运动及其变速机构均通过主轴箱的一台异步电动机进行拖动。

(3) 为了适应多种加工方式的要求，主轴的旋转与进给运动均有较大的调速范围，一般情况下由机械变速机构实现，有时采用可变极调速的笼型异步电动机来简化变速箱的结构设计。

(4) 加工螺纹时，要求主轴能正、反向旋转，若采用机械方法来实现，则拖动主轴的电动机只需单向旋转，否则也需要设计正反转控制电路。

(5) 摇臂的升降由升降电动机拖动，要求电动机能正、反向旋转，一般采用笼型异步电动机配合正反转控制电路实现。

(6) 内外立柱、主轴箱与摇臂的夹紧与松开，有采用手柄机械操作、电气—机械装置、电气—液压装置、电气—液压—机械装置等控制方法。Z3040 型摇臂钻床采用电动机带动液压泵，通过夹紧机构实现。其夹紧与松开是通过控制电动机的正、反转，送出不同流向的压力油，推动活塞、带动菱形块动作来实现的。因此拖动液压泵的电动机要求能正、反向旋转。

(7) 摇臂钻床主油箱、立柱的夹紧与松开由一条油路控制，且能同时动作。而摇臂的夹紧、松开是与摇臂升降工作连成一体，由另一条油路控制，根据钻床工作要求，通过控制电磁铁操纵两条油路，使其中一条处于工作状态。夹紧机构液压系统原理如图 3.4 所示。由于主轴箱和立柱的夹紧、松开动作是点动操作的，因此液压泵电动机能采用点动控制。

(8) 根据加工的不同需要，操作者可以手动操作冷却泵电动机作单向旋转。

(9) 机床必须有相对独立的安全照明和信号指示电路。

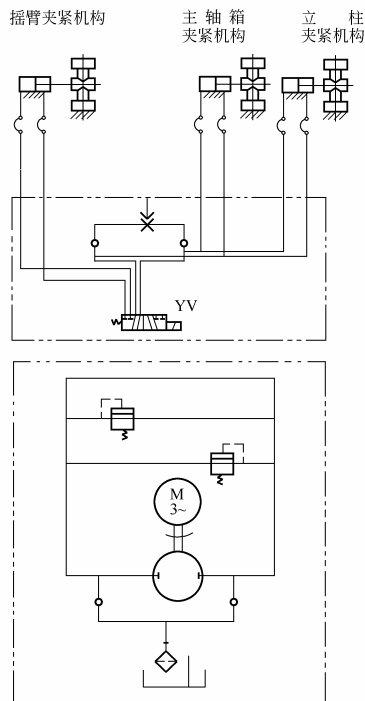


图 3.4 夹紧机构液压系统原理图

3.2.3 Z3040 型摇臂钻床电气控制线路

Z3040 型摇臂钻床的电器大部分安装在摇臂后面的壁龛内。主轴电动机安装在主轴箱上方，摇臂升降电动机安装在立柱上方，液压泵电动机安装在摇臂后面电气盒下部，冷却泵电动机安装在底座上。该机床采用先进的液压技术，有两套液压控制系统，一套由主轴电动机拖动齿轮泵输送压力油，通过操纵机构实现主轴正、反转，停车制动，空挡、预选与变速；另一套由液压泵电动机拖动液压泵输送压力油，实现摇臂的夹紧与松开、主轴箱和立柱的夹紧与松开。

Z3040 型摇臂钻床电气控制电路如图 3.5 所示。图中 M_1 为主轴电动机， M_2 为摇臂升降电动机， M_3 为液压泵电动机， M_4 为冷却泵电动机， Q 为总电源控制开关。

(1) 主轴电动机控制。主轴电动机 M_1 为单向旋转，由按钮 SB_1 、 SB_2 和接触器 KM_1 实现启动和停止控制。主轴的正、反转则由电动机 M_1 拖动齿轮泵送出压力油，通过液压系统操纵机构，配合正、反转摩擦离合器驱动主轴实现。

(2) 摇臂升降控制。摇臂钻床在加工时，要求摇臂处于夹紧状态，这样才能保证加工精度。但在摇臂需要升降时，又要求摇臂处于松开状态，否则电动机负载大，机械磨损严重，无法升降工作。摇臂上升或下降时，其动作过程是，随着升降指令发出，先使摇臂与外立柱处于松开状态，而后上升或下降，待升降到位时，要自行重新夹紧。由于松开与夹紧工作是由液压系统实现的，因此，升降控制必须与松紧机构液压系统紧密配合。

M_2 为升降电动机，由按钮 SB_3 、 SB_4 点动控制接触器 KM_2 、 KM_3 接通或断开，使 M_2 电动机正、反向旋转，拖动摇臂上升或下降移动。

M_3 为液压泵电动机，通过接触器 KM_4 、 KM_5 接通或断开，使 M_3 电动机正向带动双向液压泵送出压力油，经二位六通阀至摇臂夹紧机构实现夹紧与松开。

下面以摇臂上升为例简述动作过程：按下按钮 SB_3 ，时间继电器 KT 线圈通电，瞬时常开触点(13-14)闭合，接触器 KM_4 线圈得电，液压泵电动机 M_3 启动旋转带动液压泵送出压力油，同时断电延时断开的 KT 常开触点(1-17)闭合，使电磁阀 YV 线圈得电，液压泵输出的压力油经二位六通阀进入摇臂夹紧机构的松开油腔，推动活塞和菱形块，将摇臂松开。同时，活塞杆通过弹簧片压上行程开关 SQ_2 发出摇臂已松开信号。此时， SQ_1 触点(6-13)断开，使接触器 KM_4 线圈断电，液压泵电动机 M_3 停转，油路单向阀保压，摇臂处于松开状态。与此同时， SQ_2 触点(6-7)闭合，接触器 KM_2 线圈得电，升降电动机 M_2 得电启动旋转，带动摇臂上升，待摇臂上升至所需位置时，松开按钮 SB_3 ， KM_2 线圈断电， M_2 电动机停转，摇臂停止上升。同时 KT 线圈也断电， KT 常闭触点(17-18)瞬时闭合，而其延时断开的常开触点(1-17)仍未打开，使电磁阀 YV 继续得电，同时接触器 KM_5 线圈得电，液压泵电动机 M_3 反转，反向送出压力油，经二位六通阀反方向推动活塞和菱形块，将摇臂夹紧。 KT 延时打开触点，经过 1~3s 延时后断开，同时活塞杆通过弹簧压下行程开关 SQ_3 ，使触点 SQ_3 (1-17)也断开，电磁阀 YV 、 KM_5 线圈断电。液压泵电动机 M_3 停转，摇臂上升后重新夹紧过程结束。行程开关 SQ_2 为摇臂松开信号开关，行程开关 SQ_3 为摇臂夹紧信号开关。当瞬间操作 SB_3 或 SB_4 时，使 KM_4 得电摇臂开始松开后放开 SB_3 或 SB_4 时，若 KM_4 过早断电，可能造成摇臂处于半松开状态。有了 KT 延时断开常开触点(1-17)后，则在 KT 线圈断电 1~3s 内触点仍处于闭合状态，使 KM_5 线圈得电，液压泵电动机 M_3 反向旋转，使摇臂重新夹紧，直到延时时间到， KT 触点(1-17)断开， SQ_3 动作， KM_5 断电为止，这样就保证了摇臂在加工工件前总是处于夹紧状态。

(3) 夹紧、松开控制。Z3040型摇臂钻床除了上述摇臂上升下降过程需要夹紧、松开控制外，主轴箱和立柱也需要松开、夹紧控制。从液压系统中看出，主轴箱和立柱的松开、夹紧是同时进行的。

当按下松开按钮 SB_5 ，接触器 KM_4 线圈得电，液压泵电动机 M_3 正转，拖动液压泵送出压力油，经二位六通阀，进入主轴箱与立柱的松开液压缸推动活塞和菱形块，使主轴箱与立柱实现松开。此时由于 YV 不得电，压力油不会进入摇臂松开活塞，摇臂仍处于夹紧状态。当主轴箱与立柱松开时，行程开关 SQ_4 不受压，触点(101-102)闭合，指示灯 HL_1 亮，表示主轴箱与立柱处于松开状态，可以手动操作主轴箱在摇臂的水平导轨上移动至适当位置。同时推动摇臂(套在内立柱上)使外立柱绕内立柱旋转至适当的位置，按下夹紧按钮 SB_6 ，接触器 KM_5 线圈得电， M_3 电动机反转，拖动液压泵送出反向压力油至夹紧液压缸，使主轴箱和立柱夹紧。同时行程开关 SQ_4 压下，触点(101-102)断开， HL_1 暗，而触点(101-103)闭合， HL_2 亮，指示主轴箱与立柱处于夹紧状态，可以进行钻削加工。

(4) 冷却泵电动机控制。冷却泵电动机容量小(0.125kW)，由 SA_1 开关控制单向旋转。

(5) 联锁、保护环节。电路中利用 SQ_2 实现摇臂松开到位，开始升降的联锁控制；利用 SQ_3 ，实现摇臂完全夹紧的联锁控制；通过 KT 延时断开的常开触点实现摇臂松开后自动夹紧的联锁控制。摇臂升降除了可用按钮 SB_4 、 SB_3 的机械互锁外，还采用 KM_2 、 KM_3 电气互锁的双重互锁控制。主轴箱与立柱进行松开、夹紧工作时，为保证压力油不供给摇臂夹紧油路，可通过 SB_5 、 SB_6 常闭触点切断 YV 线圈电路，达到联锁的目的。

电路利用熔断器 FU_1 作为总电路和电动机 M_1 、 M_4 的短路保护；利用熔断器 FU_2 作为电动机 M_2 、 M_3 及控制变压器 T 一次侧的短路保护；利用热继电器 KR_1 作为电动机 M_1 的过载保护；利用 KR_2 作为电动机 M_3 的过载保护；利用组合行程开关 SQ_1 作为摇臂上升、下降的极限位置保护， SQ_1 有两对常闭触点，当摇臂上升、下降至极限位置时，相应触点动作，切断与其对应的上升、下降接触器(KM_2 、 KM_3)，使电动机 M_2 停止转动，摇臂停止升降，实现升降极限位置保护，电路中失电压或欠电压保护由各接触器实现。

(6) 照明与信号指示电路。通过控制变压器 T 降压提供照明灯 EL 安全电压，由 SA_2 开关操作。熔断器 FU_3 作为短路保护。

当主轴电动机工作时， KM_1 触点(101-104)接通，指示灯 HL_3 亮，表示主轴工作。

当主轴箱、立柱处于夹紧状态时， SQ_4 触点(101-103)接通， HL_2 亮。主轴箱、立柱处于松开状态， SQ_4 触点(101-102)接通， HL_1 亮。

3.3 万能铣床的电气控制线路

在金属切削机床中，铣床的数量占有非常大的比例。铣床可用来加工平面、斜面、沟槽等。铣床装上分度头后，可以铣切直齿轮和螺旋面；若装上回转工作台，可铣切凸轮和弧形槽。

以常用的立式铣床和卧式铣床来说，刀具(铣刀)的旋转运动称为主运动，工件(工作台)的移动或进给箱的移动称为进给运动，辅助运动有工作台的快速移动及工作台的旋转运动。

主运动与进给运动没有比例协调的要求，为缩短传动链和便于分别控制，大多数铣床将主轴和工作台分别用单独的电动机拖动。对于中小型铣床来说，一般用普通三相异步电动机拖动。

3.3.1 铣床结构和运动方式

X62W 型铣床主要由底座、床身、悬梁、刀杆支脚、升降工作台组成。铣削加工时，铣刀安装在刀杆上，铣刀的旋转运动为主运动。工件安装在工作台上，且可随工作作纵向进给运动，可沿滑座导轨作横向进给运动，还可随升降台作垂直方向进给运动。因此，工件在工作台上能实现三个方向的进给运动。为了减少工件向刀具接近或离开的时间，三个方向的进给运动都配有快速移动装置。X62W 式铣床还配有立铣头和回转工作台以扩大铣床的加工范围。

3.3.2 铣床的工作特点和要求

铣削加工方式有逆铣与顺铣。顺铣时，铣刀正向安装，要求主轴电动机正向旋转；逆铣时因加工需要，铣刀需反向安装，同时要求主轴电动机反向旋转。当铣削方向确定后，在铣削加工过程中则不需要改变旋转方向。因此，对主轴电动机的控制要求是在加工之前选择好转向(正向或反向)，而后启动加工。铣刀是一种多刃刀具，其切削过程是断续的，负载随时间波动，造成电动机拖动的不平衡。为了减小负载波动的影响，在主轴上采用飞轮以增加惯量，这样又造成主轴在停车时的惯性大，故停车时间较长，影响生产效率。为了实现快速停车的目的，主轴都采用了制动停车方式。

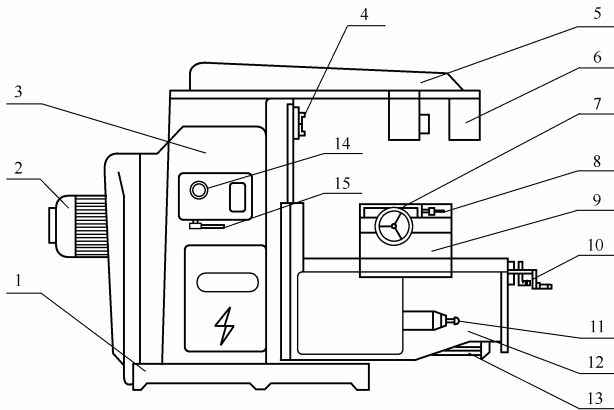
铣削时根据工件的加工要求，有纵向、横向和垂直三个方向的进给运动，由一台电动机拖动。进给运动的方向，是通过操作选择运动方向的手柄与开关，配合进给拖动电动机的正、反转来实现的。为了保证铣床、刀具的安全，在铣削加工时只允许工件作一个方向的进给运动。在使用回转工作台加工时，不允许工件作纵向、横向和垂直方向的进给运动。为此，各向进给运动之间应具有联锁环节。铣削加工中，为了提高停车位置的准确性，也可采用制动方法。

铣床主运动和进给运动间没有比例协调的要求，但从机械结构的合理性考虑，应采用两台电动机单独拖动。在铣削加工中，为了不使工件与铣刀碰撞而造成事故，要求进给运动一定要在铣刀旋转后才能进行，铣刀停止旋转，进给运动就应该停止或二者同时停止。因此，要求进给运动电动机与主轴电动机之间要有可靠的联锁。

为了适应各种不同的铣削加工要求，铣床主轴及进给运动都应具有一定的调速范围。为了使齿轮在变速时易于相互啮合，要求主轴电动机和进给拖动电动机都应具有变速冲动控制电路。

为了使操作者能在铣床的正面、侧面方便地操作，对主轴的启动、停止，工作台进给运动选向及快速移动等的控制，设置了多地点控制方案。为保证加工质量和机床设备的安全，要求控制系统中应具有较完善的联锁保护环节。

在铣削加工中，根据不同的工件材料，也为了延长刀具寿命和提高加工质量，需要用切削液对工件刀具进行冷却润滑，但有时没采用，而采用转换开关控制冷却泵电动机单向旋转。此外，还应配有安全照明电路。



- 1—底座；2—主轴电动机；3—床身；4—主轴；5—悬梁；6—刀杆挂脚；7—工作台；
8—工作台左右进给操作手柄；9—滑座；10—工作台前后、上下操作手柄；
11—进给变速手柄及变速盘；12—升降工作台；13—进给电动机；
14—主轴变速盘；15—主轴变速手柄

图 3.6 卧式万能铣床外形结构图

3.3.3 X62W 型万能铣床的电气控制线路

万能铣床的机械操纵与电气控制配合得非常紧密，其结构图如图 3.6 所示。X62W 型卧式万能铣床同样也是机电控制研究的一个典型。这种机床控制线路有以下特点。

(1) 电气控制线路与机械配合相当紧密，因此分析中要详细了解机械结构与电气控制的关系，但机械结构相对比较复杂。

(2) 控制线路中设置了变速冲动控制，从而使变速顺利进行。

(3) 采用多地控制，操作方便。

(4) 具有完善的电气联锁，并具有短路、零压、过载及超行程限位保护环节。X62W 型万能铣床电气控制电路图如图 3.7 所示。

1. 主轴电动机控制

图 3.7 中 M_1 为主轴拖动电动机，它的旋转方向通过转换开关 SA_5 预设来确定。转换开关 SA_5 触点动作见表 3-2。主轴电动机的启动、停止由接触器 KM_1 控制，接触器 KM_2 及电阻 R 和速度继电器 KV 组成停止反接制动控制。

表 3-2 转换开关 SA_5 触点动作表

触点	线端标号	操作手柄位置		
		顺铣	停止	逆铣
SA_{5-1}	$U_{11}-W_{11}$	—	—	+
SA_{5-2}	$U_{21}-U_{11}$	+	—	—
SA_{5-3}	$W_{21}-W_{11}$	+	—	—
SA_{5-4}	$W_{21}-U_{11}$	—	—	+

(1) 主轴电动机启动。接通电源开关 Q，选择主轴电动机转动方向，操作转换开关 SA₅ 于所需的位置。主轴电动机启动、停止分别由装于工作台上与床身上的控制按钮 SB₁、SB₂ 和 SB₃、SB₄ 实现多地控制。按下按钮 SB₁ 或 SB₂，接触器 KM₁ 得电，主触点闭合并自锁，主轴电动机按预选方向启动，带动主轴、铣刀旋转，同时速度继电器 KV 常开触点闭合，为停止反接制动作准备。

(2) 主轴电动机停止。按下停止按钮 SB₃ 或 SB₄。接触器 KM₁ 失电，切断正序电源，同时接触器 KM₂ 得电，电动机串电阻实现反接制动，当主轴电动机转速低于 120r/min 时，KV 触点断开，KM₂ 断电，电动机反接制动结束。停机操作时应注意在按下 SB₃ 或 SB₄ 时要按到底，否则反接制动电路未接入，电动机只能实现自然停止。如果按下按钮时间太短，反接制动的的时间也会很短，则制动效果差，因此，操作时要在主轴快停转时再松开按钮。

(3) 主轴的变速冲动。主轴的变速采用圆孔盘式结构，变速时操作变速手柄在拉出或推回过程中短时触动冲动开关 SQ₇，主轴电动机的变速由冲动控制实现。

主轴处于停转状态时，操作变速手柄，触动冲动开关 SQ₇ 使接触器 KM₂ 瞬时得电，电动机定子串电阻冲动一下，带动齿轮转动一下，以便于齿轮啮合，完成变速。

主轴已启动工作时，要变速同样需操作变速手柄，操作时也触动冲动开关 SQ₇，使接触器 KM₁ 失电，KM₂ 得电瞬间进行反接制动，使主轴转速迅速下降，以便于在低速下齿轮啮合。完成变速后，应重新按启动按钮，主轴电动机转动继续工作。主轴在变速操作时，以较快速度将手柄推入啮合位置，因为 SQ₇ 的瞬动是通过手柄上凸轮的一次接触达到的，如果推入动作缓慢，则凸轮与 SQ₇ 接触时间延长，会使主轴电动机转速过高，从而使齿轮啮合不上，甚至损坏齿轮。

2. 工作台进给运动控制

工作台的进给运动需在主轴启动之后进行。接触器 KM₁ 常开触点(11-12)闭合，接通进给控制电源。工作台的左、右、前、后、上、下方向的进给运动均由进给拖动电动机 M₂ 驱动，通过 M₂ 电动机的正、反转及机械结构的联合动作，来实现六个方向的进给运动。控制工作台运动的电路是与左、右机械操作手柄联动的行程开关 SQ₁、SQ₂ 及与前、后、上、下操作手柄联动的行程开关 SQ₃、SQ₄ 复合控制。这时回转工作台开关 SA₁ 在断开位置，即 SA₁ 触点(17-18)和(12-22)接通，触点(22-19)断开，进给电动机通过工作台方向操作手柄进行控制。回转工作台开关 SA₁ 动作见表 3-3。

表 3-3 回转工作台开关 SA₁ 动作表

开 关	线 端 标 号	操作手柄位置	
		回转工作台工作	回转工作台不工作
SA ₁₋₁	17-18	—	+
SA ₁₋₂	22-19	+	—
SA ₁₋₃	12-22	—	+

(1) 工作台的左、右(纵向)进给运动。工作台的左、右进给运动由工作台前面的纵向操作手柄控制。当将操作手柄扳到向右位置时，行程开关 SQ₁ 压合，其常开触点(18-19)接通，

常闭触点(25-17)断开,此时,控制电源经触点(12-15-16-17-18-19)接通接触器 KM_3 ,使 KM_3 吸合,主触点接通电动机 M_2 正序电源, M_2 正向旋转,工作台作向右进给运动。同理,当将操作手柄扳到向左位置时,行程开关 SQ_2 压合,工作台向左进给运动。若将手柄置于中间位置, SQ_1 、 SQ_2 复原, KM_3 、 KM_4 均不吸合,工作台停止左右方向运动。

(2) 工作台前后(横向)进给运动和上下(垂直)进给运动。工作台的前后及上下进给运动,共用一套操作手柄控制,手柄有五个控制位置,处于中间位置为原始状态,进给离合器处于脱开状态,行程开关 SQ_3 、 SQ_4 均被复位,工作台不运动。当操作向前、向后手柄时,通过机械装置连接前、后进给离合器。当操作向上、向下手柄时,连接上、下进给离合器。同时,使 SQ_3 或 SQ_4 压合接通,电动机 M_2 正向或反向旋转,带动工作台作前后、上下进给运动。

工作台向前和向下进给运动的电气控制电路相同。当将操作手柄扳到向前或向下位置时,压合行程开关 SQ_3 ,使其常闭触点断开,常开触点闭合,控制电源经触点(12-22-25-17-18-19)接通 KM_3 线圈, KM_3 吸合,进给电动机 M_2 正向旋转并通过机械联动将前、后进给离合器或上、下进给离合器接入,使工作台作向前或向下方向的进给运动。

工作台向后和向上进给运动也共用一套电气控制装置。当将操作手柄扳到向后或向上位置时,压合行程开关 SQ_4 ,进给电动机反向旋转。使工作台作向后或向上方向进给运动电路的工作过程与前面分析类似。

(3) 回转工作台的工作。回转工作台的回转运动由进给电动机 M_2 经传动机构驱动。在使用时,首先必须将回转工作台转换开关 SA_1 扳至“接通”位置,即回转工作台的工作位置。此时, SA_1 的触点(12-22)、(17-18)断开,触点(22-19)接通,这样就切断了铣床工作台的进给运动控制回路,工作台就不能作左、右、前、后和上、下方向的进给运动。回转工作台的控制电路中,控制电源经触点(12-15-16-17-25-22-19)接通接触器 KM_3 线圈回路,使电动机 M_2 带动回转工作台作回转运动。由于 KM_4 线圈回路被切断,所以进给电动机仅能以正向旋转。因此,回转工作台只能按一个方向作回转运动。

(4) 进给变速冲动。进给变速冲动与主轴变速冲动一样,为了便于变速时齿轮的正确啮合,电气控制上没有进给变速冲动电路。但进给变速时不允许工作台作任何方向的运动。

变速时,先将变速手柄拉出,使齿轮脱离啮合,然后转动变速盘至所选择的进给速度挡,最后推入变速手柄。在推入变速手柄时,应先将手柄向极端位置拉一下,使行程开关 SQ_6 被压合一次,其常闭触点(12-15)断开,常开触点(15-19)接通,控制电源经触点(12-22-25-17-16-15-19)接通接触器 KM_5 ,进给电动机 M_2 作瞬时转动,便于齿轮啮合。

(5) 工作台快速移动。铣床工作台除能实现进给运动外,还可进行快速移动,并可通

过方向控制手柄配合快速移动按钮 SB_5 或 SB_6 进行操作。当工作台已在某方向进给,此时按下快速进给按钮 SB_5 或 SB_6 使接触器 KM_5 通电,接通快速移动电磁铁 YA ,使衔铁吸合,经丝杆将进给传动链中的摩擦离合器合上,减少中间传动装置,工作台按原进给运动方向实现快速移动。当放开快速移动按钮 SB_5 或 SB_6 时,接触器 KM_5 电磁铁 YA 线圈相继断电。衔铁释放,摩擦离合器脱开,快速移动结束,工作台仍按原进给运动速度和原进给运动方向继续进给。所以工作台的快速移动是点动控制。工作台的快速移动也可以在主轴电动机停转情况下进行。这时应将主轴换向开关 SA 扳向“停止”位置,然后按下按钮 SB_1 或 SB_2 ,使接触器 KM_1 通电并自锁,操纵工作台手柄,

使进给电动机 M_2 启动旋转。再按下快速移动按钮 SB_5 或 SB_6 ，工作台便可在主轴不旋转的情况下实现快速移动。

3. 冷却泵电动机的控制与照明电路

冷却泵电动机 M_3 通常在铣削时由转换开关 SA_3 操作。当转换开关扳至“接通”位置时，触点 $SA_3(3-4)$ 闭合，接触器 KM_6 通电， M_3 启动旋转，拖动冷却泵送出冷却液。

机床的局部照明由变压器 T_2 输出 24V 安全电压，由开关 SA_4 控制照明灯 EL。

4. 控制电路的联锁与保护

铣床的运动较多，电气控制电路较复杂，为了保证刀具、工件和机床能够安全可靠地进行工作，控制电路应具有完善的联锁与保护。

(1) 主运动与进给运动的顺序联锁。进给运动电气控制电路接在主轴电动机接触器 KM_1 触点(11-12)之后，这就保证了在主轴电动机 M_1 启动后，进给电动机 M_2 才可启动，主轴电动机 M_1 停止时，进给电动机 M_2 应立即停止。

(2) 工作台 6 个进给运动方向间的联锁。工作台左、右、前、后及上、下 6 个方向进给运动分别由两套机械机构操作，即纵向进给操纵手柄、横向与垂直进给操纵手柄操作。而铣削加工时只许一个方向的进给运动，为了避免误操作，该机床采用了机械操作手柄和行程开关相配合的方法，来实现 6 个方向进给运动的联锁。

(3) 回转工作台工作与 6 个方向进给运动间的联锁。回转工作台工作时不允许 6 个方向进给运动的任一个进给运动。电路中除了通过 SA_1 开关定位联锁外，还必须使控制电路通过 SQ_1 、 SQ_2 、 SQ_3 、 SQ_4 的常闭触点实现电气联锁。

(4) 进给变速冲动不允许工作台任何方向的进给运动联锁。变速冲动时， SQ_6 动作触点(12-15)断开，触点(15-19)接通，因此，控制电源必须经过 $SA_{1.3}$ 触点(即回转工作台不工作)和 SQ_1 、 SQ_2 、 SQ_3 、 SQ_4 四个常闭触点(即工作台 6 个方向均无进给运动)，才能实现进给变速冲动。

(5) 保护环节。主电路、控制电路和照明电路都具有短路保护。6 个方向进给运动的终端限位保护，是由各自的限位挡铁来碰撞操作手柄，使其返回中间位置以切断控制电路来实现的。

三台电动机的过载保护，分别由热继电器 KR_1 、 KR_2 、 KR_3 实现。为了确保刀具与工件的安全，要求主轴电动机、冷却泵电动机过载时，除两台电动机停转外，进给运动也应停止，否则会撞坏刀具与工件，因此， KR_1 、 KR_3 应串联在相对位置的控制电路中。当进给电动机过载时，则要求进给运动先停止，允许刀具空转一会儿，再由操作人员全部停车。因此， KR_2 的常闭触点只串联在进给运动控制支路中。

3.3.4 X52K 型立式铣床电气控制线路

图 3.8 所示为 X52K 型立式铣床电气控制线路。X52K 型立式铣床的电气控制与 X62W 型卧式铣床的电气控制相比较，主轴停机采用能耗制动的控制方法，工作台快速移动可以在主轴电动机未启动情况下进行，X52K 型立式升降台铣床采用三台电动机，即主轴电动机 ZD、进给电动机 GD 和冷却泵电动机 LD，其主要控制电路与 X62W 型铣床类似。

3.4 龙门刨床的电气控制线路

龙门刨床是用来加工各种平面、斜面及槽的大型机床。刨床的工作台作往复循环运动，在前进行程时进行切削加工，返回行程时不切削，而以较高的速度返回，以减少空行程时间。为适应刨床生产的工艺要求，大型龙门刨床都具有较复杂的电气控制线路。

3.4.1 龙门刨床工作特点和对电气系统的要求

(1) 工作台有较宽的调速范围，以便加工时能选择最合适的切削速度。

(2) 工作台能按照需要实现自动的往复运动，并使返回速度高于切削速度。

(3) 高速切削时，为了减小对刀具的冲击，应使刀具慢速切入工件，然后再增加到规定的速度。在前进与返回行程的末尾，工作台能自动减速，以避免工件边缘崩裂，同时可减小返回冲程和对电动机、机械的冲击。

(4) 工作台在换向、减速等过渡过程中应迅速、平稳。

(5) 具有必要的限位、联锁保护环节，保证刨床安全运行。

因为龙门刨床控制电路比较复杂，下面按功能将其分成以下几个部分，分别介绍。

3.4.2 龙门刨床的主传动系统

龙门刨床的主传动系统，最早采用交流异步电动机拖动工作台并实现正、反转的方案，也有采用交流电动机通过液压系统实现正、反转的方案。20世纪60年代开始使用直流发电机-电动机组的拖动方案。这种方案又分为两类：一类是用自励放大机控制并改变发电机励磁进行调速的方案，如国产B210、B215型龙门刨床；另一类是采用交磁放大机控制并改变发电机励磁进行调速的方案，如国产A系列龙门刨床。目前使用较多的是晶闸管直接供电给直流电动机(SCR-M)来拖动工作台方案的龙门刨床系列化产品。

3.4.3 工作台的控制线路

工作台控制电路应满足步进、步退、前进、后退、减速、换向等各种动作要求。

1. 行程开关的作用

工作台自动循环是由装在床身侧面的六个行程开关来控制的。行程开关的工作情况如图3.9所示。在自动工作过程中各个制子碰撞各自的行程开关，前进限位制子A碰撞前进减速限位开关 ST_1 ，然后制子B碰撞前进换向开关 ST_2 ，工作台经过一段越位后开始后退。后退开始时，制子B使 ST_2 复位，然后制子A使 ST_1 复位。在后退快结束时，制子C碰撞后退减速开关 ST_4 ，然后制子D碰撞后退换向开关 ST_3 ，同样经过一段越位后，后退换成前进。制子D将 ST_3 复位，然后制子C使 ST_4 复位，如此反复循环工作下去。

前进时如果由于 ST_2 动作失效不起作用，制子在碰撞安全限位开关 SL_1 后，使工作台停止，以防止工作台因 ST_2 失效而冲出去。 SL_2 是后退安全限位开关。

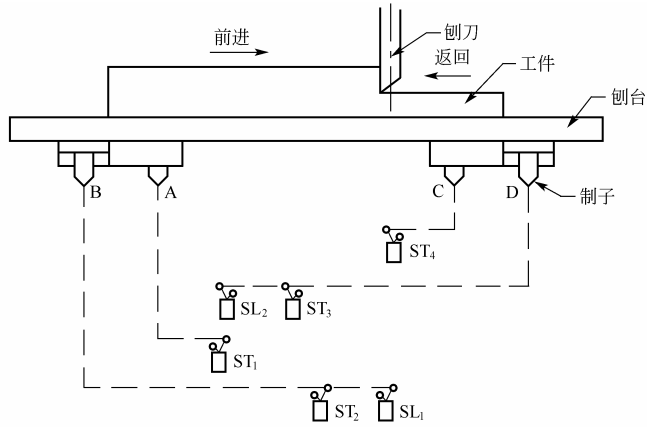


图 3.9 行程开关工作图

在工作中为了避免因行程开关不在零位而使制子被撞坏(如图 3.10 所示为工作台前进方向,而前进减速开关因不在零位,导致制子被 ST_1 撞坏),一般都是在安装试车时,先将在行程开关拨在零位,然后进行步进、步退试验,调试正常后,再使工作台自动工作。

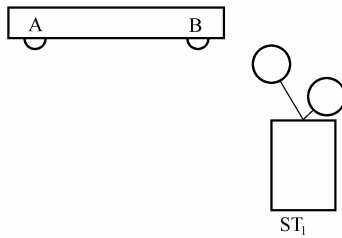


图 3.10 行程开关不在零位而使制子被撞坏

制子 A、B 间距和 C、D 间距均是可调的。在高速挡工作时,由于工作台动能大,因而减速制子 A 放于反向制子 B 前方 250mm 处,低速挡工作时将其距离减小,避免低速行程太长,降低了生产率。制子 A 与 B 或 C 与 D 间的距离范围见表 3-4。

表 3-4 制子 A 与 B 或 C 与 D 间的距离范围

挡位	速度/(m/min)		制子 A 与 B 或 C 与 D 间的距离/mm
	B1010A B1012A B2010A B2012A	B101A B201A	
低速挡	≤ 25	≤ 20	0
	45	40	0~50
高速挡	≤ 40	≤ 0	0~50
	50~70	50~70	150~250
	80~90	70~80	250~300

高、低速挡的选择根据加工条件来决定。如果加工余量大,工件材料硬,选用低速挡;若加工余量小,工件材料较软,工作台的拉力不会超过高速挡所允许的范围,则选用高速

挡,提高工作台的切削速度与返回速度,以达到较高的生产率。

2. 步进、步退控制电路

工作台控制电路如图 3.11 所示,当按下步进按钮 SB_8 时,由于常开触点 $KM\Delta(101-103)$ 在电动机正常运行时是接通的,故 K_Q 线圈通电。其过程是: $101 \rightarrow KM\Delta(101-103) \rightarrow KA_F(103-105) \rightarrow SB_{10}(105-107) \rightarrow ST_{2-1}(107-109) \rightarrow SB_{11}(109-111) \rightarrow SB_8(111-113) \rightarrow K_H(113-115) \rightarrow K_Q$ 线圈(115-102)→102。直流电动机以步进速度带动工作台前进。由于无自锁触点,按钮松开后,工作台就停止前进。步退电路同理。操作时如果行程开关 ST_2 、 ST_3 没有复位,是接不通此电路的。

3. 润滑泵控制电路

工作台运行时需加以润滑,所以工作台在开动前必须先开动润滑泵,否则工作台强行工作是非常危险的。在操纵台上润滑泵控制开关 SA_7 有两个工作位置,当工作台不工作而需要润滑泵时,将 SA_7 打在“连续”位置;工作台自动工作时打在“自动”位置, SA_7 拨到“连续”或“自动”其中一个位置上, K_{MRB} 线圈均能通电,润滑泵电动机工作,液压泵上油,至一定压力时压力继电器 K_{PL} 常开触点(129-131)闭合,为工作台自动工作作好准备。

4. 工作台自动循环工作

刀具切入工件之前减速的目的,是为了减小刀具在切入时所承受的冲击,延长刀具的使用寿命,这种切入方式称为慢速切入。刀具切入工件后再加速到规定的切削速度。刀具切出工件之前减速的目的,是为了防止工件边缘的崩裂。刀具返回过程中不切削工件,为提高生产率,反向时直接加速到高速返回速度。返回行程再反向到工作速度之前,为了减小反向时的越位和对传动机构的冲击,还要求刀具具有一个减速过程。

工作台自动循环工作主要是借助于行程开关来实现的。假定横梁已夹紧,液压泵已开动,直流电动机已励磁。当按下前进按钮 SB_9 时,中间继电器 K_I 吸合, K_I 的常开触点(107-129 之间的触点)自锁。由于 SB_9 是一个复合按钮, 111-131 之间的触点接通时, 119-121 之间的触点断开,因而中间继电器 K_H 不能吸合。因 111-113 之间的触点闭合,故中间继电器 K_Q 吸合,接通了调速电位器的直流电源,工作台就加速到前进调速手柄所指定的速度并以此速度前进。又由于继电器 K_Q 吸合,故 K_{2H} 线圈失电,拾刀电磁铁断电,刀具放下。工作台在后退结束位置时(图 3.11),制子 D 使 ST_{3-1} 闭合,中间继电器 K_{IQ} 得电,使进刀接触器得电,进刀电动机正转,开始进刀。同时,由于 K_{IQ} 得电, 161 与 163 之间触点闭合, ST_{4-1} 闭合,转换开关 SA_6 手柄已置在低速切入状态(157-161 之间触点闭合),继电器 K_J 得电,刀架低速前进。当前进至制子 D 使 ST_{3-1} 断开, K_{IQ} 失电,进刀电动机停止,刀架停止进给,刀架开始低速切入。前进至行程结束前,制子 A 碰撞前进减速行程开关 ST_1 , ST_{1-1} 闭合(129-159),使继电器 K_J 得电,工作台前进减速。直到制子 B 碰撞前进换向行程开关 ST_2 , ST_{2-1} 断开,中间继电器 K_Q 失电,为后退作好准备。同时 K_Q 的常闭触点(123-125)闭合,且 ST_{3-1} 已经合上,使继电器 K_H 得电,继电器 K_J 失电,低速运动完毕。 K_H 的常开触点闭合,使得拾刀线圈通过拾刀转换开关和接触器后得电,执行正确的拾刀动作,此时又因改变了给定电压的极性,电动机从制动停止到反向启动,工作台加速到后退调速手柄所指定的速度向后行驶。制子 B(图 3.11)使 ST_2 吸合,中间继电器 K_{IH} 得电,接触器得电,进刀机构复

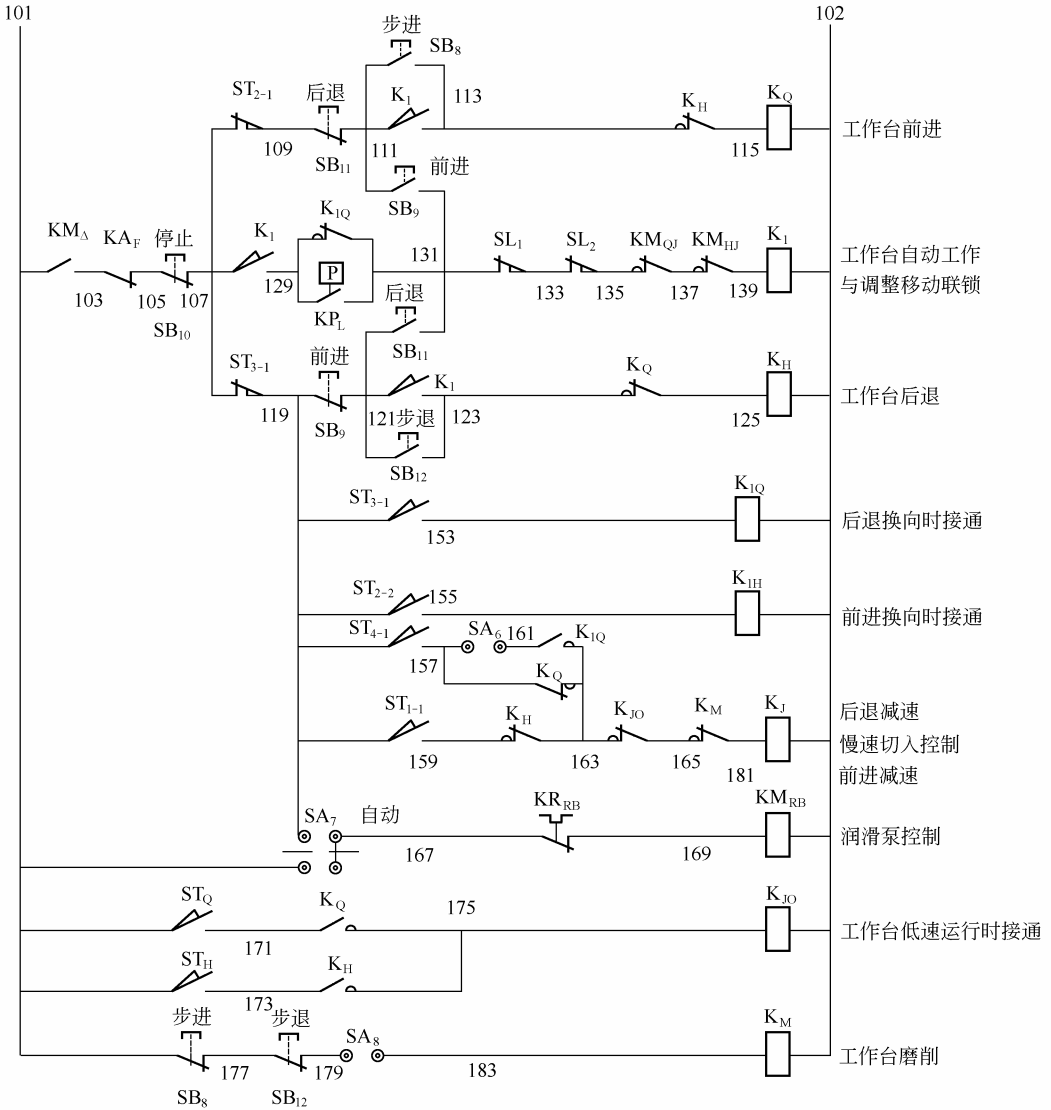


图 3.11 工作台控制电路图

位，且后退至制子 B，使 ST_{2-1} 复位； ST_{2-2} 断开，进刀机构复位停止。 ST_{2-1} 吸合，但常闭触点 K_H (113-115) 断开， K_Q 仍失电，继续后退，制子 A(图 3.11)使 ST_1 复位，仍继续后退。

后退行程结束前，制子 C 碰撞后退减速行程开关 ST_4 ； ST_{4-1} 闭合(129-157)，经过 K_Q 常闭触点(157-163)，又使 K_J 得电，工作台减速后退。工作台后退至制子 D 碰撞后退换向行程开关 ST_3 ； ST_{3-2} 触点(107-119)断开，使后退继电器 K_H 失电，为前进作好准备。同时 ST_{3-2} 触点(129-153)闭合，使 K_{1Q} 得电，刀架电动机通过相应的接触器驱动后动作，刀架开始进给。 K_H 失电后，其常闭触点(113-115)闭合，因 ST_{2-1} 已经闭合，故中间继电器 K_Q 得电，工作台转入前进。同时抬刀电动机失电，停止抬刀。进刀电动机 M 的转动时间决定于越位行程开关的位置。由于制子 D 碰撞行程开关 ST_3 ，而工作台有一段越位，经过这段越位后，

K_Q 得电使工作台前进, 制子 D 又使 ST_3 复位。复位后 ST_{3-2} 断开, K_{IQ} 失电, 刀架电动机停止转动。进刀多少由进刀机构完成。制子 D 和 C 将限位开关 ST_3 、 ST_4 依次复位, 到此工作台就完成了第一次的往复运动。以下过程重复, 自动进行循环工作。

如果要求工作台停止运行, 按停止按钮 SB_{10} , 断开工作台控制电路, 使继电器 K_I 失电, K_Q 和继电器 K_J 、相关减速继电器也相继失电, 工作台便迅速制动停车。表 3-5 表示工作台行程减速开关与行程换向开关工作情况。

表 3-5 工作台行程减速开关与行程换向开关工作情况表

状态 触点	前进行程					后退行程				
	ST_{1-1}	-	-	-	+	+	+	-	-	-
ST_{1-2}	+	+	+	-	-	-	+	+	+	+
ST_{2-1}	+	+	+	+	-	+	+	+	+	+
ST_{2-2}	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-
ST_{4-1}	+	-	-	-	-	-	-	-	+	+
ST_{4-2}	-	+	+	+	+	+	+	+	-	-
ST_{3-1}	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-
ST_{3-2}	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+

注: +表示触点接通; -表示触点断开。

5. 慢速切入, 低速运行, 磨削控制电路

(1) 以较高速度切削时, 为了保护刀具, 需要慢速切入。这时将操纵台上慢速切入开关 SA_6 拨在“通”的位置上, 触点(157-161)接通, 因后退变前进时常开触点 K_{IQ} (161-163)是闭合的, 因而 K_J 线圈通电, 所以反向以后减速前进, 至 ST_3 复位后, K_{IQ} 线圈断电, K_J 线圈断电, 工作台以切削速度前进。

(2) 当前进或后退速度调速手柄拨在“低速”位置时, 该低速位置约在直流电动机转速为 200r/min, 工作台速度 11m/min 左右处, ST_Q (101-171)或 ST_H (101-173)接通, 使 K_{JO} 线圈通电。这时常闭触点 K_{JO} (163-165)断开, 减速接触器无法接通, 于是工作台在低速工作时没有减速动作。

(3) 工作台需要进行磨削时, 将操纵台上 SA_8 拨到“磨削”位置, 这时触点(179-183)接通, 继电器 K_M 吸合, 触点 K_M (201-203)断开, 使直流分压回路中接入了一个分压电阻, 给定电压大大减小, 工作台以磨削速度(1m/min)磨削。整个工作台此时采用了电流正反馈和典型负反馈的双闭环控制, 保证了工作台不会因切削量的变化而发生较大的运动变化, 保证了加工效率和加工精度。

K_M 常闭触点(165-181)断开, 故磨削时也不减速。步进按钮 SB_8 、步退按钮 SB_{12} 串联在 K_M 线圈电路中, 为的是调整断开电路。

6. 保护环节控制线路

在 K_1 线圈回路中, 接有 $K_{M_{QJ}}$ (135-237)、 $K_{M_{HH}}$ (137-139)常闭触点, 用于在横梁调整时, 保证工作台自动循环电路不能接通。如果换向时换向开关(ST_2 或 ST_3)失效, 制子就会碰撞 SL_1 或 SL_2 , 使 K_1 线圈断电, 工作台停止, 防止工作台冲出去。

若由于一时疏忽, 忘记把 SA_7 放在零位, 或热继电器 $K_{R_{RB}}$ 动作, 则压力继电器 K_{P_L} (129-131)断开, 工作台仍可前进, 但在后退结束时, ST_{3-1} (119-153)闭合, K_{I_Q} 线圈通电, K_{I_Q} 常闭触点(129-131)断开, 使 K_1 线圈断电, 保证工作台在后退结束时停止。设置这个保护环节是因为若切削过程中发生故障而突然停止, 会造成刀具损坏以及影响加工工件表面的粗糙度。因此发生故障后让它在后退结束时停止。

在常用的龙门刨床的电动机组启动控制线路中, 其触点 K_M (705-713)、 K_1 (713-725)、 K_{I_Q} (715-711)支路的作用也是使工作台在后退结束时停止。工作台自动工作时热继电器 $K_{R_{FB}}$ 、 K_{R_B} 、 K_{R_A} 中任一个动作时, 由于触点 K_1 (713-715)在自动工作时是闭合的, 只有在后退结束时, K_{I_Q} (715-711)才断开, 因此保证了主电动机只有在工作台后退结束才能停转。

7. 工作台的自动工作

工作台自动工作时, 应能够在预定位置上自动换向; 在由前进变为后退及由后退变为前进之前工作台降低速度; 当刀具切入工件后, 工作台速度达到工作速度, 而返回时则要快速返回。

为了限制工作台的速度, 在调速手柄内有触点, 当选定的工作速度超过 $15\text{m}/\text{min}$ 时, 触点闭合, 为减速接触器的接通作好准备。

3.4.4 横梁升降的控制线路

横梁的夹紧结构示意图如图 3.12 所示, 相应的横梁控制电路如图 3.13 所示。横梁在移动(上升或下降)时工作台不得运动, 同时先使横梁放松, 待上升或下降到所需位置后自动夹紧。

1. 横梁放松

常闭触点 K_1 (101-345)只在工作台停止运动时才闭合, 只有在此种情况下才能操作横梁

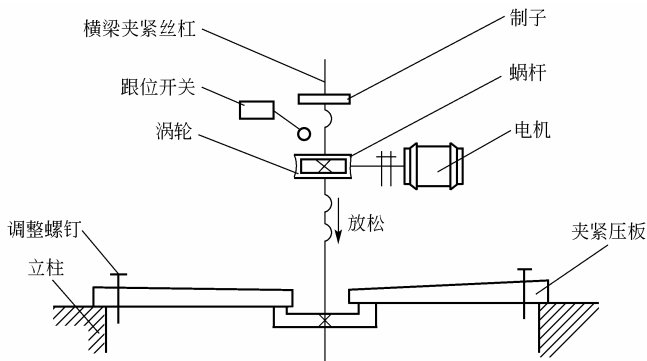


图 3.12 横梁夹紧结构示意图

电路。横梁上升时按下按钮 SB_6 ，则 K_{JOH} 线圈得电，它的常开触点(621-623)闭合，使 KM_{HJ} 线圈得电。横梁松紧电动机 M_1 工作，横梁放松。横梁放松时控制限位开关制子在放松方向移动，到一定程度使 ST_6 动作， ST_{6-2} (101-621)断开， KM_{HJ} 线圈断电，横梁放松完毕。

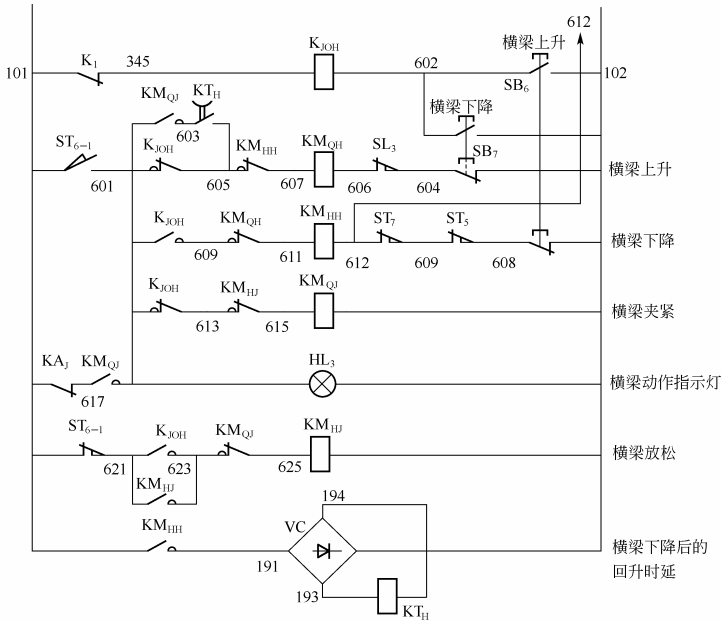


图 3.13 横梁控制电路图

2. 横梁上升

横梁放松后， ST_{6-1} (101-601)接通，由于 K_{JOH} 常开触点(601-605)已经闭合，所以 KM_{QH} 线圈通电，横梁升降电动机 M_2 动作，横梁上升，横梁动作指示灯 HL_3 亮。当横梁移动至需要位置时，松开按钮 SB_6 ， K_{JOH} 线圈断电，横梁升降电动机 M_2 停止工作。限位开关 SL_3 是防止横梁上升至极限位置时与龙门顶相撞的限位开关。

横梁上升至需要位置后 K_{JOH} 断电，它的常闭触点(601-613)闭合，又因 KM_{HJ} 常闭触点(613-615)已经吸合，故 KM_{QJ} 线圈通电，横梁松紧电动机 M_1 动作，将横梁逐步夹紧。夹紧过程中， ST_6 逐步复位，到一定程度， ST_{6-1} 断开， ST_{6-2} 闭合，为以后横梁放松作好准备。此时 KM_{QJ} 线圈经常闭触点 KA_J (101-617)与常开触点 KM_{QJ} (617-601)继续供电，横梁继续夹紧，因而电动机 M_1 中电流增大，通过 KA_J 线圈的电流也增大，当电流增加到所整定的数值时， KA_J 动作。常闭触点 KA_J (101-617)断开， KM_{QJ} 线圈断电，横梁夹紧完毕，指示灯 HL_3 熄灭。

控制电路还能保证操作者在横梁放松尚未完毕时，松开按钮也能再夹紧。虽然松开 SB_6 (或 SB_7)后， K_{JOH} 线圈断电，但 KM_{HJ} 线圈通过自锁触点 KM_{HJ} (621-623)仍能继得得电，继续放松，放松后既不上升[常开触点 K_{JOH} (601-605)断开]，也不下降[常开触点 K_{JOH} (601-609)断开]，而 KM_{QJ} 线圈通过 $ST_{6-1} \rightarrow K_{JOH}$ (601-613) \rightarrow KM_{HJ} (613-615)通电，进行夹紧。

3. 横梁下降与回升电路

当按下横梁下降按钮 SB₇ 时，同样首先将横梁放松，然后下降，到需要位置时松开按钮。这时除了夹紧电动机开始工作外，还有满足机械加工需要的横梁稍许回升的动作。这个动作是由时间继电器 KT_H 来完成的，当横梁下降时，常开触点 KM_{HH}(101-191)闭合，通过整流器件 VC 整流，KT_H 线圈通电，延时开启常开触点 KT_H(603-605)闭合。由于触点 KM_{QJ}(601-603)是断开的，同时触点 K_{JOH}(601-605)也是断开的，故 KM_{QH} 线圈不能通电。当横梁下降完毕，开始横梁夹紧时，常开触点 KM_{QJ}(601-603)闭合，在 KT_H 线圈断电瞬间，延时开启常开触点 KT_H(603-605)还是接通的，这时 KM_{QH} 线圈通电，横梁回升，回升时间取决于 KT_H 延时的长短。延时完毕后，KM_{QH} 线圈断电，横梁回升完毕，然后继续进行夹紧至 KA_J 动作后为止(见图 3.13)。

3.4.5 刀架的电气控制

B210 型龙门刨床有左侧刀架、右侧刀架和垂直刀架，它们都由单独的电动机带动，刀架的控制线路能实现刀架的快速移动与自动进给。刀架控制电路如图 3.14 所示，它是通过控制变压器 T₃ 将 380V 变成 127V 供电的。

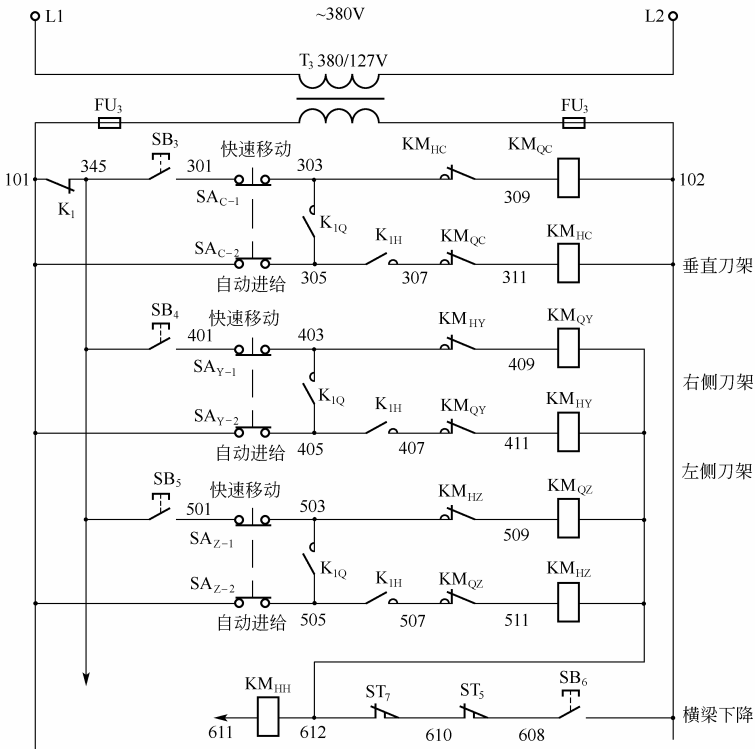


图 3.14 刀架控制电路图

1. 垂直刀架控制电路

垂直刀架有两个,每个刀架有快速移动和自动进给两种工作状态,每种工作状态又包括左右两个方向的水平进刀和上下两个方向的垂直进刀等动作。它们都是由一个垂直刀架电动机来完成的。

调整时触点 $K_1(101-345)$ 是闭合的,快速移动与自动进给选择手柄放在快速移动位置时, $SA_{C-1}(301-303)$ 是接通的。刀架运动方向选择手柄放在所需要的方向位置后,在按钮板操纵 SB_3 就可使 KM_{QC} 线圈通电,垂直刀架电动机就按着所需要的方向作快速移动。因为电路中无自锁触点,所以手松开按钮,电动机就停止转动。快速移动时,电动机朝一个方向运动。刀架运动方向通过机械方式来控制。

自动工作时,快速移动与自动进给选择手柄放在自动进给位置,此时 SA_{C-2} 接通, SA_{C-1} 断开。自动工作时,常闭触点 $K_1(101-345)$ 是断开的,以保证工作台自动工作时不能进行快速移动。操纵按钮 SB_3 此时也不起作用。当工作台由后退变前进时,常开触点 $K_{1Q}(303-305)$ 闭合, KM_{QC} 线圈通过 $SA_{C-2} \rightarrow K_{1Q}(303-305) \rightarrow KM_{HC}(303-309)$ 而得电,电动机转动,刀架进刀。当前进变后退时,常开触点 $K_{1H}(305-307)$ 闭合, KM_{HC} 线圈通过 $SA_{C-2} \rightarrow K_{1H}(305-307) \rightarrow KM_{QC}(307-311)$ 而得电。电动机反转使进刀机构复位,准备下一次进刀。

2. 左右侧刀架控制电路

左右侧刀架的工作情况基本和垂直刀架相似,不同的是左右侧刀架只能上、下两个方向移动。另外,左右侧刀架的线路是经过 ST_7 、 ST_5 、 SB_6 接在 102 点上(图 3.16)。 ST_7 和 ST_5 是刀架与横梁的限位开关,当开动左右侧刀架向上运动时,碰到横梁上限位开关 ST_7 、 ST_5 ,就自动使刀架电动机停止转动,避免刀架与横梁碰撞。

3.5 组合机床的电气控制线路

组合机床通常是采用多刀、多面、多工序、多工位同时加工,由通用部件和专用部件组成的工序集中的高效率专用机床。它的电气控制电路是将各个部件的工作组合成一个统一的循环系统。在组合机床上可以完成钻孔、扩孔、铰孔、镗孔、攻螺纹、车削、铣削及磨削等工序。组合机床主要用于大批量生产。

组合机床的通用部件有:动力部件,如动力头和动力滑台;支承部件,如滑座、床身、立柱和中间底座;输送部件,如回转分度工作台、回转鼓轮、自动线回转工作台及零件输送装置;控制部件,如液压元件、控制板、按钮台及电气挡铁;其他部件,如机械扳手;排屑装置和润滑装置等。通用部件已标准化、系列化和通用化。

组合机床的控制系统大多采用机械、液压或气动、电气相结合的控制方式。其中,电气控制又起着中枢连接作用。因此,应注意分析组合机床电气控制系统与机械、液压或气动部分的相互关系。

组合机床组成部件不是一成不变的,它将随着生产力的向前发展而不断更新,因此与其相适应的电气控制线路也随着更新换代,目前主要有以下两种:

1. 机械动力滑台控制线路

机械动力滑台和液动力滑台都是完成进给运动的动力部件，两者区别仅在于进给的驱动方式不同。动力滑台与动力头相比较，前者配置成的组合机床较动力头更为灵活。在动力头上只能安装多轴箱，而动力滑台还可安装各种切削头组成的动力头，用来组成卧式、立式组合机床，以完成钻、扩、铰、镗、刮端面、倒角、铣削和攻螺纹等工序，安装分级进给装置后，也可用来钻深孔。一般机械动力滑台由滑台、机械滑座及双电动机(快速电动机和进给电动机)传动装置三部分组成。滑台进给运动的自动循环是通过传动装置将动力传递给丝杆来实现的。

2. 液动力滑台控制线路

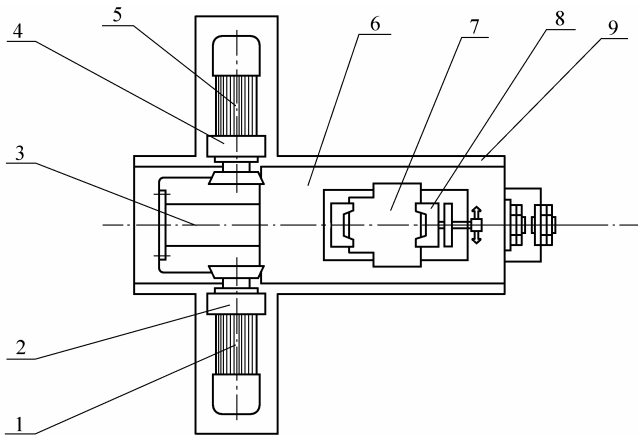
液动力滑台与机械动力滑台在结构上的区别在于：液动力滑台的进给运动是借助压力油通入液压缸的前腔和后腔来实现的。液动力滑台由滑台、滑座及液压缸三部分组成，液压缸驱动滑台在滑座上移动。液动力滑台也具有前面机械动力滑台的典型自动工作循环过程，它是通过电气控制线路控制液压系统来实现的。滑台的工进速度是通过调整节流调速阀进行无级调速的。电气控制一般采用行程原则、时间原则控制及压力控制方式。

组合机床电气控制系统总的特点，是它的基本电路可根据通用部件的典型控制电路和一些基本控制环节组成，再按加工、操作要求以及自动循环过程，无须或只要作少量修改综合而成。

下面以采用一个液动力滑台和两个铣削动力头实现两面加工的组合机床电气控制电路为例进行分析。

3.5.1 组合机床结构与工作循环

组合机床由底座、床身、液动力滑台、铣削动力头、液压站等通用部件以及有关的专用部件组成，如图 3.15 所示。组合机床的工作循环如图 3.16 所示。



1——左电动机；2——左变速箱；3——液压缸；4——右变速箱；
5——右电动机；6——滑台；7——工件；8——夹具；9——机座

图 3.15 组合机床结构示意图

表 3-6 元件动作表

工 步	YV ₁	YV ₂	KP
原位	—	—	—
快进	+	—	—
工进	+	—	—
死挡铁停留	+	—	-/+
快退	—	+	—

液压系统工作过程如下。

(1) 快速趋进。液压泵电动机启动后,按 SB₃ 按钮发出滑台快速移动信号,电磁铁 YV₁ 得电,三位五通电磁阀Ⅳ向右移,控制油路开通,控制三位五通液控换向阀Ⅲ向右移,接通工作油路,压力油经过行程阀进入液压缸Ⅱ大腔,而小腔内回油经过阀Ⅲ、阀Ⅺ、阀Ⅵ再进入液压缸Ⅰ大腔,液压缸体、滑台、工件获得向前快速移动。

(2) 工作进给。滑台快速移动到工件接近铣削动力头时,滑台上的挡铁压下行程阀Ⅵ,切断压力油通路,此时压力油只能通过调速阀Ⅴ进入液压缸大腔,减少进油量,降低滑台移动速度,滑台转为工作进给。此时由于负载增加,工作油路油压升高,顺序阀Ⅷ打开,液压缸小腔的回油不再经单向阀Ⅺ流入液压缸大腔,而是经顺序阀Ⅷ流回油箱。

(3) 死挡铁停留。液压动力滑台工作进给结束时(铣削加工结束),滑台撞上死挡铁,停止前进,但油路仍处于工作进给状态,液压缸大腔内继续进油,至使油压升高,压力继电器 KP 动作。

(4) 快速回退停于原位。死挡铁停留,压力继电器 KP 动作,其常闭触点打开,使电磁铁 YV₁ 失电, KP 常开触点闭合,电磁铁 YV₂ 得电,阀Ⅳ左移,控制油控制阀Ⅲ左移,工作压力油直接进入液压缸小腔,使液压缸体、滑台、工件迅速退回。同时大腔内的回油经单向阀Ⅶ、阀Ⅲ无阻挡地流回油箱。工作台快速退回至原位时,压下原位行程开关,电磁铁 YV₂ 失电,在弹簧作用下,液控换向阀处于中间状态,切断工作油路,系统中各元件均恢复原位状态,滑台停于原位,一个工作循环结束。

3.5.3 两面加工组合机床电气控制电路

如图 3.18 所示为两面加工组合机床电气控制电路。

1. 电力拖动自动控制要求

(1) 两台铣削动力头分别由两台笼型异步电动机拖动,单向旋转,无须电气变速和停机制动控制,但要求铣刀能进行点动对刀。

(2) 液压泵电动机单向旋转,机床完成一次半自动工作循环后,液压泵电动机不停机,当按下总停机按钮时才停机。

(3) 加工到终点,动力头完全停止后,滑台才能快速退回。

(4) 液压动力滑台前进、后退能点动调整。

(5) 电磁铁 YV₁、YV₂ 采用直流供电。

(6) 机床具有照明、保护和调整环节。

2. 电动机控制电路

M_1 为液压泵电动机, 操作按钮 SB_2 或 SB_1 , 使 KM_1 得电或失电, 控制电动机启动或停止。机床所有的操作都必须在液压泵电动机启动以后进行。 SA_1 为机床半自动工作与调整工作的选择开关。 SA_1 开关置于“ A ”位置时机床实现半自动工作, 左、右铣削动力头的电动机 M_2 与 M_3 分别由滑台移动到位, 压下行程开关 SQ_2 与 SQ_3 使 KM_2 、 KM_3 得电并自锁, M_2 、 M_3 分别启动工作。加工到终点时, 滑台压下终点行程开关 SQ_4 , 使 KM_2 、 KM_3 断电, 两动力头停转。

3. 液压动力滑台控制

液压泵电动机 M_1 启动工作后, 按下按钮 SB_3 , 继电器 KA_1 得电并自锁, 电磁铁 YV_1 得电, 控制液压动力滑台快速趋进, 至滑台压下行程阀, 滑台转为工作进给速度进给。工作进给至终点, 死挡铁停留, 进油路油压升高, 到压力继电器 KP 动作。 KA_1 失电, 电磁铁 YV_1 失电, 同时 KA_2 得电, 电磁铁 YV_2 得电, 滑台快速退回到原位, 压下原位行程开关 SQ_1 , KA_2 失电, YV_2 失电, 滑台停在原位, 一个工作循环结束。

4. 照明电路

机床照明灯 EL 通过控制变压器 T_1 降压为 $24V$, 由开关 SA_2 控制。

5. 保护与调整环节

7194 熔断器 FU_1 用于对电动机 M_1 , 变压器 T_1 、 T_2 一次侧进行短路保护, FU_2 用于对电动机 M_2 、 M_3 进行短路保护, FU_3 用于对控制电路短路保护, FU_4 用于对照明电路短路保护, FU_5 用于对电磁铁线圈电路短路保护。

三台电动机的过载保护分别由 KR_1 、 KR_2 、 KR_3 热继电器实现, 为了保护刀具与工件安全, 当其中一台电动机过载时, 要求其其余两台电动机均应停止工作。因此, 热继电器的常闭触点均应接在控制电路的总电路中。

组合机床是由通用部件和专用部件组成的。组合机床在整机的安装、调试过程中, 希望各部件能灵活方便地进行单独调试, 而不影响其他部件。因此控制电路应具有对自动加工与调整工作状态的控制作用。

左、右动力头调整点动对刀时, 通过操作转换开关 SA_1 于调整位置 M , 分别按下按钮 SB_7 、 SB_8 , 实现左、右动力头点动对刀的调整。

液动力滑台前进、后退的调整是将 SA_1 开关置于 M 位置, 切断 KM_2 、 KM_3 线圈电路, 使滑台移动到 SQ_2 、 SQ_3 位置时, 左、右铣削动力头不应启动工作来实现的。按下点动按钮 SB_5 、 SB_6 分别使 KA_1 、 KA_2 得电, 获得滑台前进与后退的点动调整工作。

思考题与习题

1. 卧式车床的工作特性是什么?
2. 卧式车床冷却泵的电气控制特点是什么? 如何实现?

3. 摇臂钻床的电气控制特点是什么？
4. 摇臂钻床的升降控制是如何实现的？
5. 铣床的工作特性和要求有哪些？
6. 结合 X62W 型铣床的电路图，说明铣床的工作过程。
7. 龙门刨床主拖动要求有什么样的速度特性，为什么？
8. 分析龙门刨床刨台前进与后退的控制方法，各种运动速度的自动转换过程，以及在自动循环中，前进和后退的速度是如何调节的，步进、步退速度又是如何调节的。
9. 在加工中发现刨台后退越位过大，应如何调节？
10. 为了消除停车爬行，在龙门刨床控制线路中采取了哪些措施？
11. 说明龙门刨床横梁升降的控制过程。
12. 龙门刨床工作中的自动进刀、抬刀控制是如何实现的？进刀、抬刀动作与工作台运动的配合关系是什么？
13. 龙门刨床电气控制线路中采用了哪些保护环节？有哪些连锁关系？
14. 组合机床电气控制特点有哪些？
15. 简述组合机床液压动力滑台系统的工作过程。

第4章 继电器—接触器控制线路设计基础

教学提示：机床一般都是由机械与电气两大部分组成的，设计一台机床，首先要明确该机床的技术要求，拟订总体技术方案。机床的电气设计是机床设计的重要组成部分，机床的电气设计应满足机床的总体技术方案要求。机床电气设计涉及的内容很广泛，主要是设计电气原理图，正确选择低压控制电器及编制电气元件一览表等。

教学要求：要求学生了解机床电气设计的基本内容，重点掌握继电器—接触器控制线路设计的一般规律及设计方法，还要求学生掌握普通机床电气原理图设计的一般方法，能正确选择电动机、接触器、继电器、熔断器和主令电器等低压控制电器。

4.1 电气设计的一般原则

4.1.1 机床电气设计的基本要求

(1) 熟悉所设计机床(设备)的总体技术要求及工作过程，弄清其他系统对电气控制系统的技术要求。

(2) 了解所设计机床(设备)的现场工作条件、电源及测量仪表种类等情况。

(3) 依据总体技术要求，通过技术经济分析，选择出最佳的传动方案和控制方案。

(4) 设计机构简单、技术先进、工作可靠、维护方便、经济耐用的电气控制电路，进行模拟试验，验证其能满足所设计机床的工艺要求。

(5) 保证使用安全，贯彻执行最新的国家标准。

4.1.2 机床电气设计的基本内容

(1) 拟订电气设计的技术条件(任务书)。

(2) 选择并确定电气传动形式与控制方案。

(3) 确定电动机容量。

(4) 设计电气控制原理图。

(5) 选择电气元件，制定电动机和电气元件明细表。

(6) 画出电动机、执行电磁铁、电气控制部件以及检测元件的总布置图。

(7) 设计电气柜、操作台、电气安装板以及非标准电器和专用安装零件。

(8) 绘制装配图和接线图。

(9) 编写设计计算说明书和使用说明书。

根据机械设备的总体技术要求和电气系统的复杂程度不同，以上步骤可增可减，某些图纸和技术文件也可适当合并或增删。

4.1.3 电气设计的技术条件

电气设计的技术条件通常是以设计技术任务书的形式表达的,它是整个电气设计的依据。在任务书中,除了需简要说明所设计的机械设备的型号、用途、工艺过程、技术性能、传动参数以及现场工作条件外还必须说明以下几点:

(1) 用户供电电网的种类(直流或交流)、电压、频率及容量。

(2) 有关电气传动的基本特性,如运动部件的数量和用途、负载特性、调速范围和平滑性,电动机的启动、反向和制动的要求等。

(3) 有关电气控制的特性,如电气控制的基本方式,自动工作循环的组成,自动控制的动作程序,电气保护及联锁条件等。

(4) 有关操作方面的要求,如操作台的布置,操作按钮的设置和作用,测量仪表的种类以及显示、报警和照明要求等。

(5) 机床主要电气设备(如电动机、执行电器和行程开关等)的布置草图。

电气设计的技术条件,是由参与设计的各方面人员根据所设计机械设备的总体技术要求共同讨论拟订的。

4.1.4 电气传动形式的确定

电气传动形式的确定是电气设计的主要内容之一,也是以后各部分设计内容的基础和先决条件。

1. 传动形式

单电动机拖动:指用一台电动机拖动一台生产机械,通过机械传动链将动力传送到每个工作机构。但当一台指生产机械的运动部件较多时,这种拖动方式的机械传动机构十分复杂。

多电动机拖动:指一台设备由多台电动机分别驱动各个工作机构。例如,数控机床,除必需的内在联系外,主轴、每个刀架、工作台及其他辅助运动机构,都分别由单独的电动机驱动。这种拖动方式不仅大大简化了生产机械的传动机构,而且控制灵活,为生产机械的自动化提供了有利的条件,所以,现代化机械传动机构基本上采用这种拖动形式。

2. 调速性能

金属切削机床的主运动和进给运动,起吊设备、机械手的某些运动机构,以及要求具有快速平稳的动态性能和准确定位的设备(如龙门刨床、镗床、数控机床等),都要求一定的调速范围。为了达到一定的调速范围,可采用齿轮变速箱、液压调速装置、双速或多速电动机以及电气的无级调速传动方案。在选择调速方案时,可参考以下几点。

重型或大型设备:主运动及进给运动,应尽可能采用电气无级调速。这有利于简化机械结构,缩小齿轮箱体积,降低制造成本,提高机床利用率。

精密机械设备:坐标镗床、精密磨床、数控机床以及某些精密机械手,为了保证加工精度和动作的准确性,且便于自动控制,也应采取电气无级调速方案。

电气无级调速,一般应用较先进的晶闸管一直流电动机调速系统。但直流电动机与交流电动机相比,体积大、造价高、维护困难。因此,随着交流调速技术的发展,通过全面经济技术指标分析,可以考虑选用交流调速系统。

一般中、小型设备,如普通机床没有特殊要求时,可选用经济、简单、可靠的三相笼型异步电动机,配以适当级数的齿轮变速箱。为了简化结构,扩大调速范围,也可采用双速或多速的笼型异步电动机。

在选用三相笼型异步电动机的额定转速时,应满足工艺条件要求,选用二极(极对数 $P=1$)的(同步转速 3000 r/min)、四极(极对数 $P=2$)的(同步转速 1500 r/min)或更低的同步转速,以简化机械传动链,降低齿轮变速箱的制造成本。

3. 负载特性

不同机械设备的各个工作机构,具有各不相同的载数特性 $T=f(n)$, $P=f(n)$ 。如机床的主运动为恒功率负载,而进给运动为恒转矩负载。

在选择电动机调速方案时,要使电动机的调速特性与负载特性相适应,以使电动机得到充分合理的应用。例如:双速笼型异步电动机,当定子绕组由 Δ 连接改接成双星形连接时,转速增加一倍,功率却增加很少,因此它适用于恒功率传动。对于低速为 Y 形连接的双速电动机改接成 YY 形连接后,转速和功率都增加一倍,而电动机所输出的转矩却保持不变,适用于恒转矩传动。他励直流电动机的调磁调速属于恒功率调速,而调压调速则属于恒转矩调速。

4. 启动、制动和反向要求

一般说来,由电动机完成机床的启动、制动和反向要比机械方法简单、容易,因此机床主轴的启动、停止、正反转运动和调速操作,只要条件允许最好由电动机完成。

机床主运动传动系统的启动转矩一般都比较小,因此,原则上可采用任何一种启动方式。对于机床的辅助运动,在启动时往往要克服较大的静转矩,所以在必要时也可选用大启动转矩的电动机,或采用增大启动转矩的措施。另外,还要考虑电网容量。对于电网容量不大而启动电流较大的电动机一定要采取限制启动电流的措施,如在定子电路中串入电阻或电抗器降压启动等,以免电网电压波动较大而造成事故。

传动电动机是否需要制动,应视机械设备工作循环的长短而定。对于某些高速高效金属切削机床,为了便于测量和装卸工件或者更换刀具,宜采用电动机制动。如果对于制动的性能无特殊要求而电动机又不需反转时,则采用反接制动可使线路简化。在要求制动平稳、准确,即在制动过程中不允许有反转可能性时,则宜采用能耗制动方式。在起吊运输设备中也常采用具有联锁保护功能的电磁机械制动(俗称电磁抱闸),有些场合也采用再生发电制动(反馈制动)。

电动机的频繁启动、反向或制动会增加过渡过程中的能量损耗,从而导致电动机过热。因此,在这种情况下,必须限制电动机的启动或制动电流,或者在选择电动机的类型时加以考虑。如龙门刨床、电梯等设备常要求启动、制动、反向快速而平稳。有些机械手、数控机床、坐标镗床除要求启动、制动、反向快速而平稳外,还要求准确定位。这类高动态性能的设备需采用反馈控制系统、步进电动机系统、交流或直流伺服系统以及其他较复杂的控制手段来满足上述要求。

5. 结构要求

电动机的结构形式应当与机械结构的要求相匹配。应用凸缘或内连式电动机可以在一

定程度上改善机械结构。考虑到现场环境, 可选用防护式、封闭式、防腐式甚至是防爆式的电动机结构形式。

4.1.5 控制方案的确定

随着近代电子技术、计算技术、自动控制、精密测量以及机械结构与工艺的发展, 机床等各种机械设备的控制方式发生了深刻的变革, 各种新型控制系统不断出现, 可供选用的控制方案也越来越多。因此, 合理选择电气控制方案是简便、可靠、经济地实现工艺要求的重要步骤。

控制方案的确定与上述传动形式的选择紧密相关。在选择传动形式时, 要预先考虑到如何实现控制; 而选择控制方案时, 一定要在传动形式选择之后才能进行。

选择控制方案要遵循以下三条原则。

1. 控制方式应与设备通用化和专用化的程度相适应

以金属切削机床为例, 对于一般普通机床和专用机床, 其工作程序往往是固定的, 使用中并不需要经常改变原有的程序。因此, 可采用继电器—接触器控制系统, 将控制线路在结构上接成固定式的。

对于万能机床, 为了适应不同工艺过程的需要, 其工作程序往往需要在一定范围内加以更改, 在这种情况下, 宜采用可编程序控制器。

可编程序控制器在机械制造行业的应用已有很大发展, 它是介于继电器—接触器控制系统的固定接线控制装置与电子计算机控制装置之间一种新型通用控制器。应用可编程序控制器可以大大缩短机床、自动线、机械手的电气设计、安装和调试周期, 并且可使工作程序易于变更。因此, 采用可编程序控制器可使控制器系统具有较大的灵活性和较强的控制功能, 故在设计时应尽量予以选用。

微处理机现已进入机床、自动线、机械手的控制领域, 而且发展速度异常迅猛。微处理机在控制功能、灵活性、可靠性和体积小巧等方面已显示出了突出的优越性, 因此应引起每个电气设计者的密切关注。

随着电子技术的发展, 数字程序控制系统在机床上的应用越来越广泛, 已经出现了数控机床。数控机床有较高的生产率、较短的生产周期、较高的加工精度, 能够加工普通机床根本加工不了的复杂曲面零件, 有着广泛的发展前景。

2. 控制系统的工作方式应在经济、安全的前提下最大限度地满足工艺要求

作为控制方案, 应考虑采用自动循环或半自动循环、手动调整、动作程序的变更、控制系统的检测, 各个运动部件之间的联锁、各种保护、故障诊断、信号指示、照明以及操作方便等问题。

3. 控制线路的电源

当控制系统所用电器的数量较多时, 可采用直流低压供电。这样, 可节省安装空间, 便于与无触点元件连接, 动作平稳, 检修操作安全等。在电气制线路比较简单、电器元件不多的情况下, 应尽可能用主回路电源作为控制回路电源, 即可直接用交流 380V 或 220V, 简化供电所用设备。对于比较复杂的控制线路, 控制线路应采用控制电源变压器, 将控制电压由

交流 380V 或 220V 降至 110V 或 48V、24V 等, 这是从安全角度考虑的, 一般机床照明电路为 36V 以下电源。一般这些不同的电压等级, 都是由一个控制变压器实现的。直流控制线路多用 220V 或 110V 电源。电源对于直流电磁铁、电磁离合器, 常用 24V 直流电源供电。

4.2 电气控制线路设计

电气控制线路的设计是在前述的传动形式及控制方案选择的基础上进行的, 其中, 电气原理图的设计是机床电气设计中的一个重要环节。

4.2.1 电气控制线路设计遵循的原则

- (1) 应最大限度地满足生产机械的工艺要求。
- (2) 力求控制线路安全、可靠、简单、经济。
- (3) 合理选择各种电气元件。
- (4) 便于操作和维修, 符合人机关系。

4.2.2 控制线路电源的选择及动力线路设计

1. 控制线路电源的选择

可根据经验和有关手册进行选择。表 4-1 列出了机床控制线路常用的电源电压。

表 4-1 机床控制线路常用的电源电压

控制线路的类型	常用的电压值/V		电源设备
交流电力传动的控制系统中控制线路较简单	交 流	380、220	直接采用动力电源
交流电力传动的控制系统中控制线路较复杂		220、110	采用控制变压器
照明及信号指示线路		48、36、24、6	采用电源变压器
直流电力传动的控制线路	直 流	220、110	整流器
直流电磁铁及离合器的控制线路		24	整流器

2. 动力线路的设计

对于三相笼型异步电动机, 主要问题是根据工艺要求来选择动力线路电动机的启动、制动、正反转控制及动力线路的保护环节。设计时主要应注意以下问题。

(1) 确定电动机是全压启动还是降压启动。对于小容量的电动机, 当其容量不超过供电变压器容量的 20% 时, 一般可采用直接启动, 也可以根据经验公式进行判断。全压启动的条件为

$$\frac{I_{st}}{I_N} \leq \frac{3}{4} + \frac{S_{N.B}}{4P_N} \quad (4-1)$$

式中: I_{st} ——电动机全压启动电流(A);

I_N ——电动机额定电流(A);

P_N ——电动机额定功率(kW);

$S_{N.B}$ ——电源变压器额定容量(kVA)。

(2) 对于正反转控制方式,应防止误操作而引起的电源相间短路,必须在控制线路中采取互锁保护的措施。

(3) 必须注意动力线路中的熔断器保护、过载保护、过流保护及其他安全保护等元器件的选择与设置。

(4) 动力线路与控制线路应保持严格的对应关系。

4.2.3 控制线路的经验设计法

1. 经验设计法的基本步骤

(1) 收集分析国内外现有同类设备的相关资料,使所设计的控制系统合理,满足设计要求。

(2) 控制线路设计。一般的机床电气控制线路设计包括主电路、控制电路和辅助电路等的设计。

首先进行主电路设计:主要是考虑从电源到执行元件(例如电动机)之间的线路设计。

然后进行控制电路设计:主要考虑如何满足电动机的各种运动功能及生产工艺要求,包括实现加工过程自动化或半自动化的控制等,也就是完成正确地“选择”和有机地“组合”的任务。

最后考虑如何完善整个控制电路的设计、各种保护、联锁以及信号、照明等辅助电路的设计。

(3) 全面检查所设计电路,有条件时,可以进行模拟试验,以进一步完善设计。

(4) 合理选择各电气元件。

2. 经验设计法的基本特点

(1) 设计过程是逐步完善的,一般不易获得最佳的设计方案。但该方法简单易行,应用很广。

(2) 需反复修改,这样会影响设计速度。

(3) 需要一定的经验,设计中往往会因考虑不周而影响电路的可靠性。

(4) 一般需要进行模拟试验。

3. 提高经验设计法可靠性的注意事项

(1) 应尽量避免许多电器依次动作才能接通另一个电器的现象。如图 4.1 所示,图(a)中继电器 1K 得电动作后,2K 才动作,而后 3K 才能接通得电。因此 3K 的动作要通过 1K 和 2K 两个继电器的动作;但图(b)中 3K 的动作只需 1K 继电器动作,而且只需经过一对触点,工作可靠。

(2) 设计线路时,应正确连接电器的线圈。

① 在设计控制线路时,电器线圈的一端应接在电源的同一端,如图 4.2(a)所示,继电器、接触器以及其他电器的线圈一端统一接在电源的同一侧,使所有电器的触点在电源的另一侧。这样当某一电器的触点发生短路故障时,不至于引起电源短路,同时安装接线也

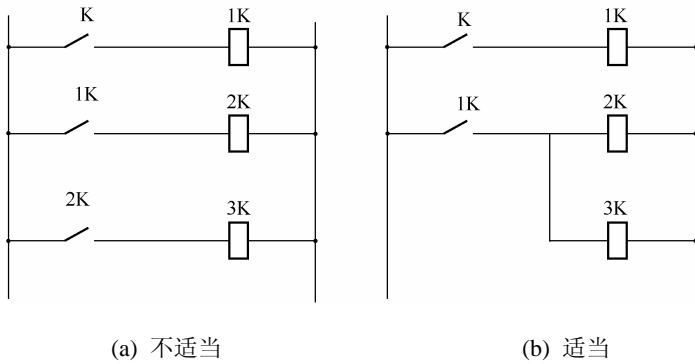


图 4.1 触点的合理使用

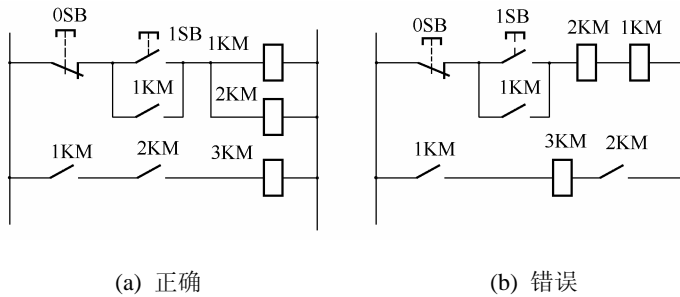


图 4.2 电器线圈的连接

方便。

② 交流电器线圈不能串联使用。两个交流电器的线圈串联使用，一个线圈最多得到 1/2 的电源电压，又由于吸合的时间不尽相同，只要有一个电器吸合动作，它的线圈上的电压降也就增大，从而使另一电器得不到所需要的动作电压。如图 4.2(b)所示，1KM 与 2KM 串联是错误的。

③ 在控制线路中应尽量减少电器触点数量。在控制线路中，应尽量减少触点，以提高线路的可靠性。在简化、合并触点过程中，主要着眼点应放在同类性质触点的合并，或一个触点能完成的动作，不用两个触点。在简化过程中应注意触点的额定电流是否允许，也应考虑对其他回路的影响。在图 4.3 中，列举了一些触点简化的例子。

④ 在设计控制线路时，应尽量减少连接导线的数量与长度。如图 4.4(c)、图 4.4(d)是不适当的接线方法，而图 4.4(a)、图 4.4(b)是适当的接线方法。因为按钮在按钮站(或操作台)，电器在电器柜里，在图 4.4(a)中向按钮站的实际引线是三条，而图 4.4(c)中则是四条。至于图 4.4(b)、图 4.4(d)考虑到 1SB 与 3SB 和 2SB 与 4SB 分别两地操作，则图 4.4(b)就比图 4.4(d)少用了连接导线。

⑤ 在设计控制线路时应考虑各种联锁关系，以及电气系统具有的各种电气保护措施，例如过载、短路、欠压、零位、限位等保护措施。

⑥ 在设计控制线路时也应考虑有关操纵、故障检查、检测仪表、信号指示、报警以及照明等要求。

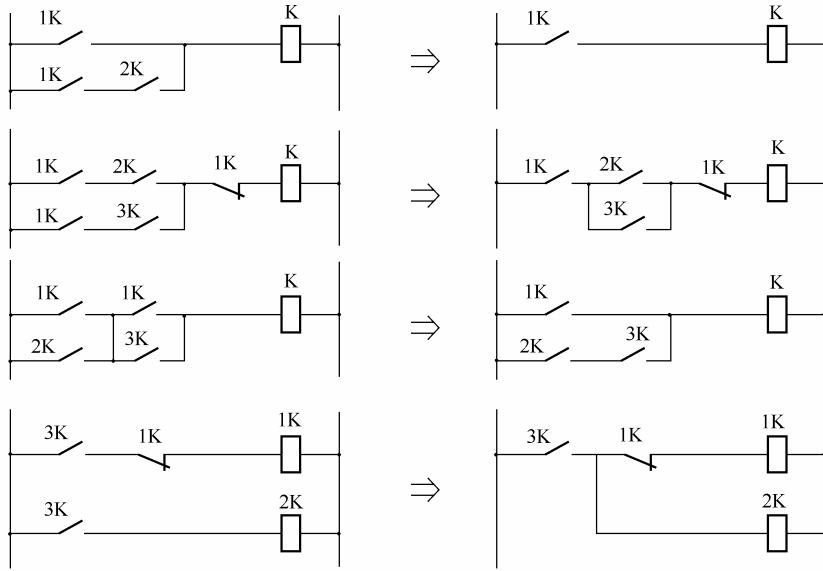


图 4.3 触点的简化与合并

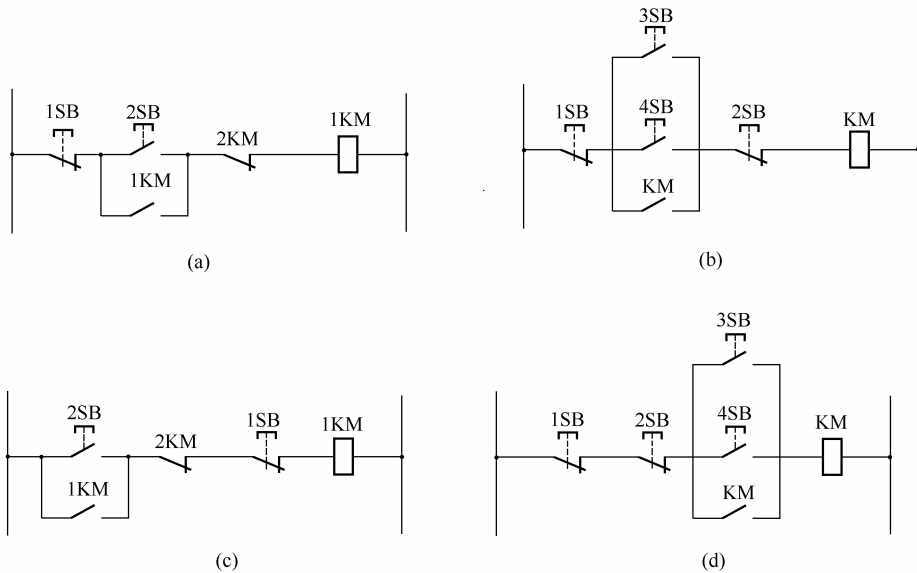


图 4.4 电器元件的合理接线

4.2.4 控制线路的逻辑设计法

1. 逻辑设计法的基本概念

逻辑设计法，主要是根据生产工艺的要求(工作循环、液压系统图等)，将控制线路中的接触器、继电器线圈的通电与断电，触点的闭合与断开，以及主令元件的接通和断开等看成逻辑变量，并将这些逻辑变量关系表示为逻辑函数的关系式，再运用逻辑函数基本公式和运算规律，对逻辑函数式进行简化，然后根据简化的逻辑函数式画出相应的线路原理图，最后

再进一步检查、化简和完善，以期获得既满足工艺要求，又经济合理的最佳设计方案。

2. 逻辑设计法的一般步骤

(1) 按工艺要求作出工作循环图。

(2) 确定执行元件与检测元件，并作出执行元件节拍表和检测元件状态表。

(3) 根据检测元件状态表写出各程序的特征数，并确定分组，设置中间记忆元件，使各分组所有程序能区分开。

(4) 列写中间记忆元件开关逻辑函数及其执行元件动作逻辑函数表达式，并画出相应的电路图。

(5) 对按逻辑函数表达式画出的控制电路进行检查、化简和完善。

逻辑设计法与经验设计法相比，采用逻辑设计法设计的电路较为合理，能节省所用元件的数量，能获得某逻辑功能的最简电路，但逻辑设计法整个设计过程较复杂，对于一些复杂的控制要求，还必须设计许多新的条件，同时对电路竞争问题也较难处理。因此，在一般的电器控制线路设计中，逻辑设计法仅作为经验设计法的辅助和补充。

4.2.5 电器布置图的绘制

1. 电器布置原则

(1) 体积大和较重的电器应安装在控制板的下面。

(2) 安装发热元件时，必须注意电柜内所有元件的温升应保持在它们的允许极限内，对散热量很大的元件，必须隔开安装，必要时可采用风冷措施。

(3) 为提高电子设备的抗干扰能力，除采取接参考电位电路或公共连接等措施外，还必须把灵敏的元件分开、屏蔽或分开屏蔽。

(4) 元件的安排必须遵守规定的间隔和爬电距离，并考虑有关的维修条件，经常需要维护检修操作调整的电器，安装位置要适中。

(5) 尽量把外形尺寸相同的电气元件安装在一起，以利于安装和补充加工，布置要适当、匀称、整齐、美观。

2. 常用配线方式

(1) 根据机床电器布置位置，绘制机床内部接线图。对于简单的电气系统，可直接画出两个元件之间的连线；对于复杂的电气系统，接线关系采用符号标准，不直接画出两元件之间的连线。

(2) 分线盒进线和出线的接线关系要表示清楚，接线板的线号要排列清晰，且便于查找及配线施工。常用的配线方式见表 4-2。

表 4-2 常用配线方式

配线方式	使用场合	优点	缺点	所需人员
板前配线	用于电气系统比较简单，电气元件较少的情况，对控制板或配电箱进行配线	直观；便于查找线路；维护、检修方便	工艺较复杂；需要熟练技术工人；走线占地面积大；导线用量大	只需一个配线工

(续)

配线方式	使用场合	优点	缺点	所需人员
板后交叉配线	用于电气系统比较复杂, 电气元件较多的情况, 对控制板或配电箱进行配线	外观排列整齐美观; 省导线, 走线面积小; 结构紧凑; 施工方便; 工艺性较好	需要增加穿线板结构; 仅适于小批量生产	配线、查找需两人
行线槽配线	各种场合均适用	便于施工、走线查找, 维护、检修方便; 工艺性好, 配线操作容易; 可用软导线配线; 适于大批量生产	增加行线槽结构; 走线占地面积较大, 导线用量较多	只需一个配线工

3. 电气元件位置图的绘制

电气元件位置图上必须明确电气元件(如接线板、插接件、部件和组件等)的安装位置。其代号必须与有关电路图和清单上所用的代号一致, 并注明有关接线安装的技术条件。电气元件位置图一般还应留出为改进设计所需要的空间及导线槽(管)的位置。

4. 检查与试验

- (1) 各种需要的技术文件是否齐全, 是否无差错。
- (2) 各种安全保障措施是否安全。
- (3) 控制电路能否满足机床操作的各种功能。
- (4) 各个电气元件安装是否正确和牢靠。

(5) 按规定做绝缘试验、耐压试验、保护导线连续性试验、机床的空载例行试验及机床的负载形式试验。

4.3 低压电器及电动机的选择

电气控制系统是由各电气元件组成的, 一个大型的自动控制系统所需电气元件有几千个、甚至几万个。所以, 如何正确选用好电气元件, 对电气控制系统的设计是很重要的。

4.3.1 电气元件选择的基本原则

选择电气元件时应考虑以下几点。

(1) 根据对控制元件功能的要求, 确定电气元件类型。如继电器与接触器, 当元件用于通、断功率较大的主电路时, 应选交流接触器; 若元件用于切换功率较小的电路(如控制电路)时, 则应选择中间继电器; 若伴有延时要求时, 则应选用时间继电器。

(2) 根据电气控制的电压、电流及功率的大小来确定元件的规格, 满足元器件的负载能力及使用寿命。

(3) 掌握元器件预期的工作环境及供应情况, 如防油、防尘、货源等。

(4) 为了保证一定的可靠性, 采用相应的降额系数, 并进行一些必要的计算和校核。

4.3.2 按钮、低压开关的选用

1. 按钮

按钮通常是用来短间接通或断开小电流控制电路的开关。

目前按钮在结构上有多种形式：旋钮式——手动旋转进行操作；指示灯式——按钮内装入了信号指示灯；紧急式——装有蘑菇形旋帽，用于紧急操作；等等。一般来说，停止按钮采用红色。

按钮主要根据所需要的触点数、使用场合及颜色来选择。目前，在机床中常用的按钮为 LA 系列，见表 4-3。

表 4-3 LA 系列按钮

型号	额定电压/V	额定电流/A	触点数		按钮数	按钮颜色	结构形式
			动合	动断			
LA2	500	5	1	1	1	黑、红、绿	开启式
LA4—2K	500	5	2	2	2	黑、红、绿、红	开启式
LA4—2H			2	2	2	黑、红、绿、红	保护式
LA4—3H			3	3	3	黑、红、绿	保护式
LA8—1			500	5	2	2	1
LA10—1	500	5	1	1	1	黑、红或绿	开启式
LA2—A	500	5	1	1	1	红(蘑菇形)	
LA18—22	500	5	2	2	1	红、绿、黑或白	元件
LA18—44			4	4			
LA18—66			6	6			
LA18—22J	500	5	2	2	1	红	元件(紧急式)
LA18—44J			4	4			
LA18—66J			6	6			
LA18—22X2	500	5	2	2	1	黑	元件(旋钮式)
LA18—44X			4	4			
LA18—22X3			2	2			
LA18—66X			6	6			
LA18—22Y	500	5	2	2	1		元件(钥匙式)
LA18—66Y			6	6			
LA19—11	500	5	1	1	1	红、黄、蓝、白或绿；红(紧急式)	元件
LA19—11J			1	1			
LA19—11D			1	1			
LA19—11JD			1	1			

2. 低压开关

低压开关主要包括如下几种。

1) 刀开关

刀开关主要用于接通或切断长期工作设备的电源。一般刀开关的额定电压不超过

500V, 额定电流为 10A 到上千安多种等级。有些刀开关附有熔断器。不带熔断器式刀开关主要有 HD 型及 HS 型, 带熔断器式刀开关有 HK、HR3 系列等。表 4-4 列出了 HR3 系列刀开关的主要技术参数。

表 4-4 HR3 系列刀开关的主要技术参数

型号	额定电压/V	额定电流/A	断流容量/A	极数	结构方式
HR3—100/31	交流 380	100	25000	3	前操作 前检修
HR3—200/31		200			
HR3—400/31		400			
HR3—600/31		600			
HR3—100/32		100			前操作 后检修
HR3—200/32		200			
HR3—400/32		400			
HR3—600/32		600			
HR3—100/33		100			前操作 前检修
HR3—200/33		200			
HR3—400/33		400			
HR3—600/33		600			
HR3—100/34		100			前操作 前检修
HR3—200/34		200			
HR3—400/34		400			
HR3—600/34		600			
HR3—100/21	直流 440	100		2	前操作 前检修
HR3—200/21		200			
HR3—400/21		400			
HR3—600/21		600			
HR3—100/22		100			前操作 后检修
HR3—200/22		200			
HR3—400/22		400			
HR3—600/22		600			

刀开关主要根据电源种类、电压等级、电动机容量、所需极数及使用场所来选择。

2) 组合开关

组合开关主要是作为电源引入开关, 所以也称电源隔离开关。它可以启停 5kW 以下的异步电动机, 但每小时的接通次数不宜超过 10 次, 开关的额定电流一般取电动机额定电流的 1.5~2.5 倍。

组合开关主要根据电源种类、电压等级、所需触点数及电动机容量进行选用。常用的组合开关为 HZ—10 系列, 额定电流有 10A、25A、60A 和 100A 四种, 适用于交流电压 380V 以下, 直流电压 220V 以下的电气设备中。表 4-5 列出了组合开关的主要技术参数。

表 4-5 组合开关的主要技术参数

型 号	额定电流/A	极数	DC 220V 最大分断电流/A	AC 380V 最大分断电流/A	外形尺寸(mm×mm×mm)
HZ2—10/3	10	3	10	6	63.6×67×89
HZ1—25/3	25	3	25	15	100×106×120.5
HZ2—60/3	60	3	60	35	100×106×150.5

3) 限位开关(行程开关)

限位开关是依据生产机械运动的行程位置而动作的小电流开关。它的选用主要根据机械位置对开关形式的要求,对触点数目、电压种类、电压与电流等级的要求来确定。机床常用的有 LX2 型、LX19 型、JLXK1 型、LXW11 型和 JLXK—111 型微动开关等。对于要求动作快、灵敏度高的行程控制,可采用接近开关。接近开关也称为无触点限位开关,它是通过运动部件引起的电磁场变化而动作的。接近开关寿命长、可靠性好,但精度和价格不如限位开关。表 4-6 列出了 JLXK1 系列限位开关的主要技术参数。

表 4-6 JLXK1 系列限位开关的主要技术参数

基本型号	传动结构	复位方式	动作力/N	触点对数	
				动合	动断
JLXK1—11	单轮防护式	自动复位	>10		
JLXK1—111M	单轮密封式	自动复位		1	1
JLXK1—211	双轮防护式	非自动复位	>15	额定电压/V	
JLXK1—211M	双轮密封式	非自动复位		AC	DC
JLXK1—311	直动防护式	自动复位	>20	500	440
JLXK1—311M	直动密封式	自动复位		额定电流/A	
JLXK1—411	直动滚轮防护式	自动复位	>20	5	
JLXK1—411M	直动滚轮密封式	自动复位		操作频率	1200 次/h

4) 自动开关

自动开关又称自动空气断路器。自动开关在机床上应用得很广泛。这是因为自动开关既能接通或分断正常工作电流,也能自动分断过载或短路电流,分断能力强,有欠压和过载短路保护作用。

选择自动开关应考虑其主要技术参数:额定电压、额定电流和允许切断的极限电流等。自动开关脱扣器的额定电流应等于或大于负载允许的长期平均电流;自动开关的极限分断能力要大于,至少要等于电路最大短路电流;自动开关脱扣器电流整定应按下面的原则:欠电压脱扣器额定电压应等于主电路额定电压;热脱扣器的整定电流应与被控对象(负载)额定电流相等;电磁脱扣器的瞬时脱扣整定电流应大于负载正常工作时的尖峰电流;保护电动机时,电磁脱扣器的瞬时脱扣整定电流为电动机启动电流的 1.7 倍。

机床常用的自动开关有 DW 系列、DZ 系列等,表 4-7 列出了其主要技术参数。

4.3.3 熔断器的选用

熔断器对电气设备的电流起过载延时和短路瞬时保护作用。熔断器的种类很多，其结构也不同，主要有插入式、螺旋式、填料封闭管式等。机床电气线路中常用的是 RL1 系列，其技术参数列于表 4-8 中。

表 4-8 RL1 系列熔断器的技术参数

型 号	熔断器额定电流/A	熔体额定电流等级/A	AC 380V 时极限分断能力/ (A, 有效值)
RL1—15	15	2、4、5、6、10、15	2000
RL1—60	60	20、25、30、35、40、50、60	5000
RL1—100	100	60、80、100	
RL1—200	200	100、125、150、200	

熔断器的主要元件是熔体(熔丝或熔片)。每一种电流等级的熔断器都可选配多种不同电流的熔体，如 RL1—100 型有 60A、80A、100A 三种熔体电流等级。

选择熔断器，实际上主要是选择种类、额定电压、熔断器额定电流等级及熔体的额定电流。而熔体电流是选择熔断器的关键，熔体的选择又与负载性质有关。一般可按两种方法选用。

(1) 负载较平稳，无尖峰电流，如照明、信号、电阻炉等，按额定电流来选用，即

$$I_R \geq I \quad (4-2)$$

式中： I_R ——熔体额定电流；

I ——负载工作电流。

(2) 负载有尖峰电流，如异步电动机，其启动电流为额定电流的 4~7 倍。这样就不能按其额定电流来选，应采用经验计算方法选用。

对单台长期工作(不经常启动)的电动机，可用式(4-3)来选择：

$$I_R = (1.5 \sim 2.5)I_{ed} \quad \text{或} \quad I_R = \frac{I_{st}}{2.5} \quad (4-3)$$

式中： I_{ed} ——电动机的额定电流；

I_{st} ——异步电动机启动电流。

对于频繁启动的电动机，式(4-3)系数应增为 3~3.5。

对于多台电动机长期共用一个熔断器保护的情况，则用式(4-4)来选择：

$$I_R \geq (1.5 \sim 2.5)I_{e\max} + \sum I_{ed} \quad (4-4)$$

式中： $I_{e\max}$ ——容量最大的电动机的额定电流；

$\sum I_{ed}$ ——除容量最大的电动机之外，其余电动机额定电流之和。

也可用下式(4-5)选择：

$$I_R = \frac{I_m}{2.5} \quad (4-5)$$

式中： I_m ——可能出现的最大电流。

如果几台电动机不能同时启动，则 I_m 为容量最大的电动机的启动电流，加上其他各电动机的额定电流，即

$$I_R \geq \frac{I_m}{2.5} = \frac{(7I_{e\max} + \sum I_{ed})}{2.5} \quad (4-6)$$

4.3.4 接触器的选用

接触器用于带有负载主电路的自动接通或切断，分交流和直流两类，机床中应用最多的是交流接触器。

选择接触器主要考虑以下技术参数。

- (1) 电源种类：交流或直流。
- (2) 主触点额定电压、额定电流。
- (3) 辅助触点种类、数量及触点额定电流。
- (4) 电磁线圈的电源种类、频率和额定电压。
- (5) 额定操作频率(次/h)，即允许的每小时接通的最多的次数。

主触点额定电流一般是根据电动机容量 P_d 来计算，即

$$I_c \geq \frac{P_d \times 10^3}{KU_d} \quad (4-7)$$

式中： K ——经验常数，一般取 1~1.4；

P_d ——电动机功率(kW)；

U_d ——电动机额定线电压(V)；

I_c ——接触器主触点额定电流(A)。

机床常用的是 CJ10 系列交流接触器，它的基本技术参数见表 4-9。

表 4-9 CJ10 系列交流接触器的基本技术参数

型 号	额定电流/A		额定操作频率/ (次/h)	可控电动机最大容量/kW		
	主触点	辅助触点		220V	380V	500V
CJ10—5	5	5	600	1.2	2.2	2.2
CJ10—10	10	5	600	2.2	4	4
CJ10—20	20	5	600	5.5	10	10
CJ10—40	40	5	600	11	20	20
CJ10—60	60	5	600	17	30	30
CJ10—100	100	5	600	30	50	50
CJ10—150	150	5	600	43	75	75

4.3.5 继电器的选用

1. 热继电器的选用

热继电器用于电动机的过载保护。热继电器的选择主要是根据电动机的额定电流来确定其型号与规格。热继电器元件的额定电流 I_{RT} 应接近或略大于电动机的额定电流 I_{ed} ，即

$$I_{RT} = (0.95 \sim 1.05)I_{ed} \quad (4-8)$$

在一般情况下，可选用两相结构的热继电器，对在电网电压严重不平衡，工作环境恶劣条件下工作的电动机，可选用三相结构的热继电器，对于三角形接线的电动机，为了实现断相保护，则可选用带断相保护装置的热继电器。

如遇到下列情况，选择的热继电器的整定电流要比电动机额定电流高一些，以便进行保护。

- (1) 电动机负载惯性转矩非常大，启动时间长。
- (2) 电动机所带动的设备，不允许任意停电。
- (3) 电动机拖动的为冲击性负载，如冲床、剪床等设备。

常用的热继电器有 JR1、JR2、JR0、JR16 等系列。JR16B 系列双金属片式热继电器，他电流整定范围广，并有温度补偿装置，适用于长期工作或间歇工作的交流电动机的过载保护，而且具有断相运转保护装置。JR16B 系列是由 JR0 改进而来的。该系列产品用来代替 JR0 的三极和带断相保护的热继电器。JR16B 系列热继电器的基本技术参数见表 4-10。

表 4-10 JR16B 系列热继电器的基本技术参数

型 号	额定电流/A	热元件等级	
		热元件额定电流/A	刻度电流调节范围/A
JR16B—20/3 JR16B—20/3D	20	0.35	0.25~0.35
		0.5	0.32~0.50
		0.72	0.45~0.72
		1.1	0.68~1.1
		1.6	1.0~1.6
		2.4	1.5~2.4
		3.5	2.2~3.5
		5	3.2~5
		7.2	4.5~7.2
		11	6.8~11
JR16B—60/3 JR16B—60/3D	60	22	14~22
		32	20~32
		45	28~45
		63	40~63

(续)

型 号	额定电流/A	热元件等级	
		热元件额定电流/A	刻度电流调节范围/A
JR16B—150/3 JR16B—150/3D	150	63	40~63
		85	53~85
		120	75~120
		160	100~160

2. 中间继电器的选用

中间继电器在电路中主要起信号传递与转换作用,用它可实现多路控制,并可将小功率的控制信号转换为大容量的触点动作,以驱动电气执行元件工作。中间继电器触点多,可以扩充其他电器的控制作用。选用中间继电器的主要依据是控制电路的电压等级,同时还要考虑触点的数量、种类及容量满足控制线路的要求。

机床上常用的中间继电器有JZ7系列、JZ8系列两种。JZ8系列为交、直流两用的继电器。其基本技术参数见表4-11。

表4-11 JZ7、JZ8系列中间继电器的基本技术参数

型 号	线圈参数			触点参数			动作时间/s	操作频率/(次/h)
	额定电压/V		消耗功率	触点数	最大断开容量			
	AC	DC			感性负载	阻性负载		
JZ7—44	12、24、36、 48、110、 127、220、 380、420、 440、500		12VA	4开4闭	感性负载 $\cos \phi = 0.4$ $L/R = 5\text{ms}$ AC 380V, 5A AC 500V, 3.5A DC 220V, 0.5A	阻性负载 AC 380V, 5A AC 500V, 3.5A DC 220V, 1A		1200
JZ7—62				6开2闭				
JZ7—80				8开				
JZ8—□□ $\frac{J}{Z}/\square$ JZ8—□□ $\frac{J}{Z}s/\square$ JZ8—□□ $\frac{J}{Z}D/\square$	110、127、 220、380		交流 10VA 直流 7.5W	6开2闭 4开4闭 2开6闭			0.05	2000

注: □□可代26, 44和62。

3. 时间继电器的选用

时间继电器是机床控制线路中常用电器之一。它的类型有:电磁式、空气阻尼式、电动式及电子式等。应用较多的是空气阻尼式时间继电器,它的特点是工作可靠,结构简单,延时整定范围较宽(可达0.4s~180s)。其型号有JS7—A, JS16系列。JS7—A系列时间继电器的技术参数见表4-12。

时间继电器的选择，主要考虑控制电路所需要的延时触点的延时方式、延时范围及瞬时触点的数目，同时也要注意线圈电压等级能否满足控制电路的要求。

表 4-12 JS7—A 型时间继电器

	触点容量		延时触点数目				不延时触点数量		线圈电压/V	延时整定范围/s	操作频率/(次/h)
	电压/V	额定电流/A	线圈通电后延时		线圈断电后延时		动合	动断			
			动合	动断	动合	动断					
JS7—1A	380	5	1	1					36、110、127、220、380、440	0.4~60 0.4~180 (误差为-10%~+10%)	600
JS7—2A	380	5	1	1			1	1			
JS7—3A	380	5			1	1					
JS7—4A	380	5			1	1	1	1			

4.3.6 控制变压器的选择

当机床的控制电器较多，线路又比较复杂时，最好采用经变压器降压的控制电源，以提高工作的可靠性。

控制变压器的容量，可根据以下两个条件选择。

(1) 根据控制电路在最大工作负载时所需要的功率进行选择，以保证变压器在长期工作时不至于超过允许温升。

$$P_b \geq K_b \sum P_{xc} \tag{4-9}$$

式中： P_b ——变压器所需的容量(VA)；

$\sum P_{xc}$ ——控制电路在最大负载时的电器所需要的功率(VA)，对于交流电器， P_{xc} 应取该电器的吸持功率；

K_b ——变压器的储备系数，一般取 1.1~1.25。

(2) 变压器的容量应能保证部分已吸合的电器在启动其他电器时，仍能可靠地保持吸合，同时又能保证将要启动的电器也能启动吸合。此时 P_b 按式(4-10)计算：

$$P_b \geq 0.6 \sum P_{xc} + 1.5 \sum P_{st} \tag{4-10}$$

式中： $\sum P_{st}$ ——所有同时启动的电磁铁在启动时所需要的总功率(VA)。

式(4-10)中的 $\sum P_{xc}$ 应当按启动时已经吸合的电器进行计算。

变压器所需容量，应由以上式(4-9)、式(4-10)中所算出的最大容量决定。

4.3.7 电动机的选择

正确选择电动机具有重要意义。合理地选择电动机是指从驱动机床的具体对象、加工

规范,也就是要从机床的使用条件出发,即从经济、合理、安全等多方面考虑,使电动机能够安全可靠地运行。

1. 机床用电动机容量的选择

根据机床的负载功率(例如切削功率)就可选择电动机的容量。然而机床的负载是经常变化的,而每个负载的工作时间也不尽相同,这就产生了使电动机功率如何最经济地满足机床负载功率的问题。机床电力拖动系统一般分为主拖动及进给拖动。

1) 机床主拖动电动机容量选择

多数机床负载情况比较复杂,切削用量变化很大,尤其是通用机床负载种类更多,不易准确地确定其负载情况。因此通常采用调查统计类比或采用分析与计算相结合的方法来确定电动机的功率。

(1) 调查统计类比法。在确定电动机功率前,首先要进行广泛的调查研究,分析确定所需要的切削用量,然后用已确定的较常用切削用量的最大值,在同类同规格的机床上进行切削实验并测出电动机的输出功率,以此测出的功率为依据,再考虑机床最大负载情况,以及采用先进切削方法及新工艺等,类比国内外同类机床电动机的功率,最后确定所设计的机床电动机功率,并以此选择电动机。这种方法有实用价值,且以切削实验为基础进行分析类比,符合实际情况。

目前我国机床设计制造部门,往往采用这种方法来选择电动机容量,即对机床主拖动电动机进行实测、分析,找出电动机容量与机床主要数据的关系,以这种关系作为选择电动机容量的依据。

卧式车床主电动机的功率:

$$P = 36.5D^{1.54} \quad (4-11)$$

式中: P ——主拖动电动机功率(kW);

D ——工件最大直径(m)。

立式车床主电动机的功率:

$$P = 20D^{0.88} \quad (4-12)$$

式中: D ——工件最大直径(m)。

摇臂钻床主电动机的功率:

$$P = 0.0646D^{1.19} \quad (4-13)$$

式中: D ——最大钻孔直径(mm)。

卧式镗床主电动机的功率:

$$P = 0.0046D^{1.7} \quad (4-14)$$

式中: D ——镗杆直径(mm)。

龙门铣床主电动机的功率:

$$P = \frac{1}{166} B^{1.15} \quad (4-15)$$

式中： B ——工作台宽度(mm)。

(2) 分析与算法。可根据机床总体设计中对机械传动功率的要求，确定机床拖动用电动机功率。即知道机械传动的功率，可计算出所需电动机的功率：

$$P = \frac{P_1}{\eta_1 \eta_2} \quad (4-16)$$

式中： P ——电动机功率；

P_1 ——机械传动轴上的功率；

η_1 ——生产机械效率；

η_2 ——电动机与生产机械之间的传动效率。

$$P = \frac{P_1}{\eta_{\text{总}}}; \quad \eta_{\text{总}} = \eta_1 \eta_2 \quad (4-17)$$

式中： $\eta_{\text{总}}$ ——机床总效率，一般主运动为回转运动的机床取 0.7~0.85；主运动为往复运动的机床取 0.6~0.7(结构简单的取大值，复杂的取小值)。

计算出的电动机功率，仅仅是初步确定的数据，还要根据实际情况，进行分析，对电动机进行校验，最后确定其容量。

2) 机床进给运动电动机容量选择

机床进给运动的功率也是由有效功率和功率损失两部分组成的。一般进给运动的有效功率都是比较小的，如通用车床进给有效功率仅为主运动功率的 0.0015~0.0025，铣床为 0.015~0.0025，但由于进给机构传动效率很低，实际需要的进给功率，车床、钻床的有效功率为主运动功率的 0.03~0.05，而铣床则为 0.2~0.25。一般地，机床进给运动传动效率为 0.15~0.2，甚至还低。

车床和钻床，当主运动和进给运动采用同一电动机时，只计算主运动电动机功率即可。对主运动和进给运动没有严格内在联系的机床，如铣床，为了使用方便和减少电能的消耗，进给运动一般采用单独电动机传动，该电动机除传动进给外还传动工作台的快速移动。由于快速移动所需的功率比进给大得多，因此电动机功率常常是由快速移动的需要而决定的。

2. 电动机转速和结构形式的选择

电动机功率的确定是选择电动机的关键，但也要对转速、使用电压等级及结构形式等项目进行选择。

异步电动机由于结构简单坚固、维修方便、造价低廉，因此在机床中使用最为广泛。

电动机的转速越低则体积越大，价格也越高，功率因数和效率也就越低，因此电动机的转速要根据机械的要求和传动装置的具体情况加以选定。异步电动机的同步转速有 3000r/min、1500r/min、1000r/min、750r/min、600r/min 等几种，这是由电动机磁极对数的不同决定的。电动机转子转速由于存在着转差率，一般比同步转速低 2%~5%。一般情况下，可选用同步转速为 1500r/min 的电动机，因为这个转速下的电动机适应性较强，而且功率因数和效率也较高。若电动机的转速与该机械的转速不一致，可选取转速稍高的电动机通过机械变速装置使其一致。

异步电动机的电压等级为 380V。当要求宽范围而平滑的无级调速时,可采用交流变频调速或直流调速。

一般来说,金属切削机床都采用通用系列的普通电动机。电动机的结构形式按其安装位置的不同可分为卧式(轴为水平)、立式(轴为垂直)等。为了使拖动系统更加紧凑,电动机应尽可能地靠近机床的相应工作部位。如立铣、龙门铣、立式钻床等机床的主轴都是垂直于机床工作台的,这时选用垂直安装的立式电动机,就不需要锥齿轮等机构来改变转动轴线的方向。又如装入式电动机,电动机的机座是床身的一部分,它安装在床身的内部。

在选择电动机时,也应考虑机床的转动条件。对易产生悬浮飞扬的铁屑或废料,或冷却液、工业用水等有损于绝缘的介质能侵入电动机的场合,选用封闭式结构较为适宜。煤油冷却切削刀具的机床或加工易燃合金材料的机床应选用防爆式电动机。按机床电气设备通用技术条件的规定,机床应采用全封闭扇冷式电动机。机床上推荐使用防护等级段低的 IP₄₄ 交流电动机。在某些场合下,还必须强迫通风。

Y 系列三相异步电动机是机床上常用的三相异步电动机。

Y 系列电动机是全封闭自扇冷式笼型三相异步电动机,是全国统一设计的新的基本系列,是我国取代 JO₂ 系列的更新换代产品,安装尺寸和功率等级完全符合 IEC 标准和 DIN42673 标准。本系列采用 B 级绝缘,外壳防护等级为 IP₄₄,冷却方式为 IC0.141。

YD 系列三相异步电动机的功率等级和安装尺寸与国外同类型先进产品相当,因而具有互换性,便于机床配套出口。

4.4 机床电气控制线路设计举例

以 CW6163 型卧式车床的电气控制线路设计过程为例,介绍机床电气控制线路的设计方法。

1. 机床电气传动的特点及控制要求

(1) 机床主运动和进给运动由电动机 1M 集中传动,主轴运动的正反向(满足螺纹加工要求)是通过两组摩擦片离合器完成的。

(2) 主轴制动采用液压制动器。

(3) 刀架快速移动由单独的快速电动机 3M 拖动。

(4) 冷却泵由电动机 2M 拖动。

(5) 进给运动的纵向左右运动、横向前后运动以及快速移动都集中由一个手柄操纵。

电动机型号如下。

主电动机 1M: Y160M—4	11kW	380V	23.0A	1460r/min
冷却泵电动机 2M: JCB—22	0.125 kW	380V	0.43A	2790r/min
快速移动电动机 3M: JO2—21—4	1.1kW	380V	2.67A	1410r/min

2. 电气控制线路设计

(1) 主回路设计。根据电气传动的要求,由接触器 1KM、2KM、3KM 分别控制电动机 1M、2M 及 3M,如图 4.5 所示。

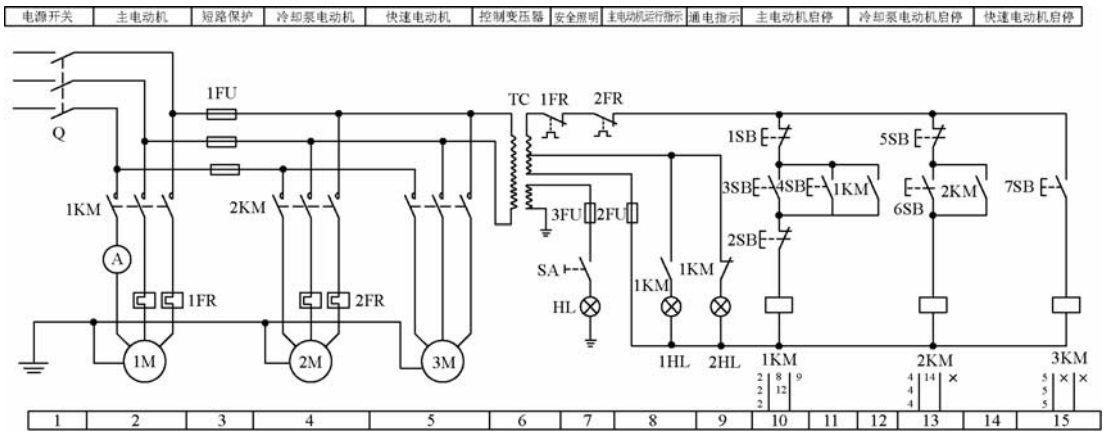


图 4.5 CW6163 型卧式车床电气原理图

机床的三相电源由电源引入开关 Q 引入。主电动机 1M 的过载保护，由热继电器 1FR 实现，它的短路保护可由机床的前一级配电箱中的熔断器充任。冷却泵电动机 2M 的过载保护，由热继电器 2FR 实现。快速移动电动机 3M 由于是短时工作，不设过载保护。电动机 2M、3M 设有短路保护熔断器 1FU。

(2) 控制电路设计。考虑到操作方便，主电动机 1M 可在操作板上和刀架上分别设启动和停止按钮 1SB、2SB、3SB、4SB 进行操纵，如图 4.5 所示。接触器 1KM 与控制按钮组成自锁的起停控制线路。

冷却泵电动机 2M 由 5SB、6SB 进行起停操作，装在操作板上。

快速电动机 3M 工作时间短，为了操作灵活由按钮 7SB 与接触器 3KM 组成点动控制线路，如图 4.5 所示。

(3) 信号指示与照明电路。可设电源指示灯 2HL(绿色)，在电源开关 Q 接通后，立即发光显示，表示机床电气线路已处于供电状态；设指示灯 1HL(红色)表示主电动机运行。这两个指示灯可由接触器 1KM 的动合和动断两对辅助触点进行切换通电显示，如图 4.5 所示。

在操作板上设有交流电流表 A，它串联在电动机主回路中(图 4.5)，用以指示机床的工作电流。这样可根据电动机工作情况调整切削用量使主电动机尽量满载运行，提高生产率，并能提高电动机功率因数。

设照明灯 HL 为安全照明(36V 安全电压)。

(4) 控制电路电源。考虑安全可靠及满足照明指示灯的要求，控制线路电压为 127V，照明电压为 36V，指示灯电压为 6.3V。

(5) 绘制电气原理图。根据各局部线路之间的相互关系和电气保护线路，完成电气原理图，如图 4.5 所示。

3. 选择电气元件

(1) 电源引入开关 Q。Q 主要作为电源隔离开关用，并不用它来直接启停电动机，可按电动机额定电流来选。中、小型机床常用组合开关，选用 HZ10—25/3 型，额定电流为 25A，为三极组合开关。

(2) 热继电器 1FR、2FR。主电动机 1M 额定电流为 23.0A，1FR 应选用 JR0—40 型热

继电器,热元件电流为 25A,整定电流调节范围为 16~25A,工作时将额定电流调整为 23.0A。

同理,2FR 应选用 JR10—10 型热继电器,选用 1 号元件,整定电流调节范围是 0.40~0.64A,整定在 0.43A。

(3) 熔断器 1FU、2FU、3FU。1FU 是对 2M、3M 两台电动机进行保护的熔断器,其熔体电流为

$$I_R \geq \frac{2.67 \times 7 + 0.43}{2.5} = 7.6\text{A}$$

可选用 RL1—15 型熔断器,配 10A 的熔体。

2FU、3FU 选用 RL1—15 型熔断器,配 2A 的熔体。

(4) 接触器 1KM、2KM、3KM。接触器 1KM,根据主电动机 1M 的额定电流 $I_e=23.0\text{A}$,控制回路电源为 127V,需主触点三对,动合辅助触点两对,动断辅助触点一对等情况,选用 CJ10—40 型接触器,电磁线圈电压为 127V。

由于 2M、3M 电动机额定电流很小,2KM、3KM 可选用 JZ7—44 型交流中间继电器,其线圈电压为 127V,触点电流为 5A,可完全满足要求,对小容量的电动机常用中间继电器充任接触器。

(5) 控制变压器 TC。变压器最大负载时 1KM、2KM 及 3KM 同时工作,根据式(4-9)和表 4-13 得

$$P_b \geq K_b \sum P_{xc} = 1.2 \times (12 \times 2 + 3.3)\text{VA} = 32.76\text{VA}$$

由式(4-11)得

$$P_b = 0.6 \sum P_{xc} + 1.5 \sum P_{st} = 0.6 \times (12 \times 2 + 3.3) + 1.5 \times 12\text{VA} = 34.38\text{VA}$$

可知变压器容量应大于 32.76VA。考虑到照明灯等其他电器容量,可选用 BK—100 型变压器,电压等级为 380V/127-36-6.3V,可满足辅助回路的各种电压需要。

其他各元件的选用见表 4-13。

4. 制定电气元件明细表

电气元件明细表要注明各元器件的型号、规格及数量等,见表 4-13。

表 4-13 CW6163 型卧式车床电气元件表

符 号	名 称	型 号	规 格	数量
1M	异步电动机	Y160M—4	11kW 380V 1460r/min	1
2M	冷却泵电动机	JCB—22	0.125kW 380V 2790r/min	1
3M	异步电动机	JO2—21—4	1.1kW 380V 1410r/min	1
Q	组合开关	HZ10—25/13	三极 500V 25A	1
1KM	交流接触器	CJ10—40	40A 线圈电压 127V	1
2KM、3KM	交流中间继电器	JZ7—44	5A 线圈电压 127V	2
1FR	热继电器	JR0—40	额定电流 25A 整定电流 19.9A	1

(续)

符 号	名 称	型 号	规 格	数 量
2FR	热继电器	JR10—10	热元件 1 号 整定电流 0.43A	1
1FU	熔断器	RL1—15	500V 熔体 10A	3
2FU、3FU	熔断器	RL1—15	500V 熔体 2A	2
TC	控制变压器	BK—100	100VA 380V/127-36-6.3V	1
3SB、4SB、6SB	控制按钮	LA10	黑色	3
1SB、2SB、5SB	控制按钮	LA10	红色	3
7SB	控制按钮	LA9		1
1HL、2HL	指示信号灯	ZSD—0	6.3V 绿色 1 红色 1	2
A	交流电流表	62T2	0~50A 直接接入	1

5. 绘制电气接线图

机床的电气接线图是根据电气原理图及各电气设备安装的布置图来绘制的。安装电气设备或检查线路故障都要依据电气接线图。电气接线图要表示出各电气元件的相对位置及各元件的相互接线关系，因此要求电气接线图中各电气元件的相对位置与实际安装的位置一致，并且同一个电气的所有元件画在一起，还要求各电气元件的文字符号与原理图一致。对各部分线路之间接线和对外部接线都应通过端子板进行，而且应该注明外部接线的去向。

为了看图方便，对导线走向一致的多根导线合并画成单线，可在元件的接线端标明接线的编号和去向。

接线图还应标明接线用导线的种类和规格，以及穿管的管子型号、规格尺寸。成束的接线应说明接线根数及其接线号，如图 4.6 所示。

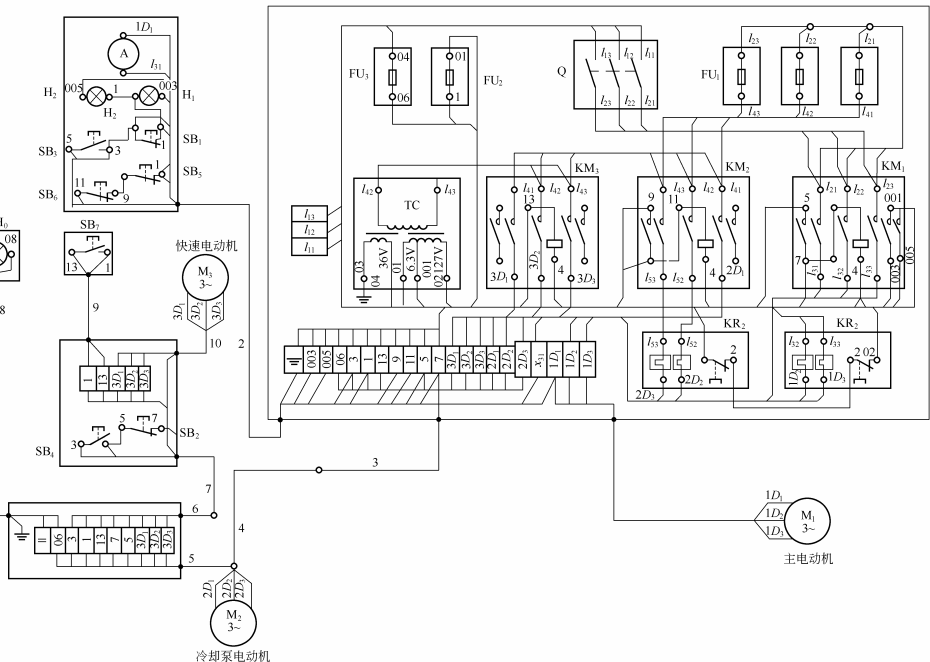


图 4.6 CW6163 型卧式车床电气接线图

思考题与习题

1. 机床电气设计应包括哪些内容?
2. 简化下列各线路(见图 4.7)。

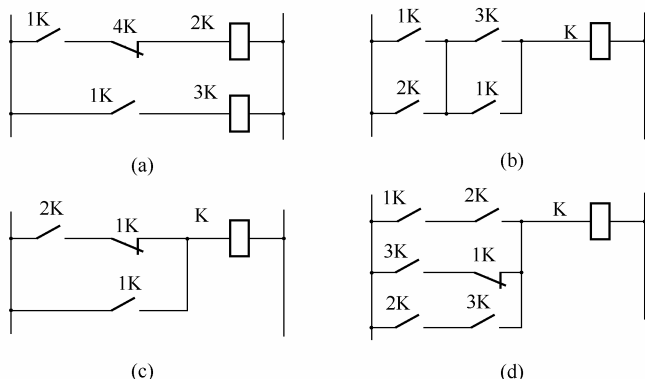


图 4.7 触点未简化的线路图

3. 空气式时间继电器有哪些类型的延时触点?各如何选择?
4. 一台车床的主电动机用接触器实现启动控制,电动机的额定功率为 7.5kW,额定电压为 380V,额定电流为 14.9A。试选择控制用交流接触器、短路保护用熔断器、过载保护用热继电器和电源开关。
5. 起重机械设备电动机的过载保护用什么低压电器来实现?可不可以用热继电器?
6. 电动机的选择包括哪些内容?
7. 选择电动机的容量主要考虑哪些因素?
8. 电动机有哪几种工作方式?当电动机的实际工作方式与铭牌上标注的工作方式不一致时,应注意哪些问题?
9. 一台室外使用的电动机,在春、夏、秋、冬四季其实际允许使用的容量是否相同?为什么?
10. 设计 MQ8260A 型曲轴磨床的电气控制线路图。
磨床电气传动总体方案如下:
 - (1) 砂轮由电动机 1M 传动,单向旋转磨削;
 - (2) 冷却泵电动机 2M 的启、停与砂轮同步:砂轮电动机启动,冷却泵电动机停止;砂轮电动机停止,冷却泵电动机启动;
 - (3) 头架卡盘由电动机 3M 单向传动运转,并可点动调整;
 - (4) 液压泵电动机 4M,首先启动,液压泵工作后,其余各电动机方可启动,液压泵润滑于机床工作始终;
 - (5) 工作台由电动机 5M 传动,拖动台面在限定行程内左右移动;
 - (6) 任何一台电动机过载发热,整个控制回路断电,所有电动机全部停转。

根据总体方案，已确定各传动电动机型号和额定参数见表 4-14。

表 4-14 电动机型号及额定参数

名称	电动机型号	额定功率/kW	额定电压/V	额定转速/(r/min)
1M	Y132M—4	7.5	380	1440
2M	DB—25A	0.12	380	3000
3M	Y90L—6	1.1	380	910
4M	A02—8014/B14	0.55	380	1400
5M	A02—8014/B14	0.55	380	1400

第 5 章 可编程控制器

教学提示：可编程控制器(PLC)是微机技术与继电器常规控制技术相结合的产物，是一种以微处理器为核心的数字控制专用计算机，能在工业现场可靠地进行各种工业控制。可编程控制器与其他类型的控制器相比，最突出的特点是使用方便、工作可靠。它可以进行开关量的控制和模拟量的控制；目前广泛应用于机械、冶金、化工、纺织等行业。

教学要求：要求学生了解可编程控制器的发展概况，然后在阐述可编程控制器的结构、工作原理、特点和用途的基础上，重点分析 FX2N 小型可编程控制器的指令系统、编程方法以及应用实例；要求学生掌握可编程控制器的指令系统、编程方法和开发步骤。

5.1 可编程控制器的产生、特点和发展

5.1.1 可编程控制器的产生和定义

1. 可编程控制器的产生

众所周知，传统的继电器—接触器控制具有结构简单、易于掌握、价格低廉等优点，在早期工业生产领域中应用非常广泛。然而，这些控制系统有着本身难以克服的缺点：控制装置体积偏大、动作速度较慢、耗电多、功能有限等，特别是传统的继电器接—触器控制系统是依靠硬件连线构成的，接线非常复杂，如果生产工艺或者控制对象发生变化，必须对原有的接线、原有的硬件系统进行改变。这些缺点使得传统的继电器—接触器控制系统的通用性和灵活性较差，无法适应现阶段社会工业生产下产品更新速度快、生产工艺改动频繁的需求。

20 世纪 60 年代，美国通用汽车公司为了适应汽车型号不断翻新的需要，对生产线上的控制设备提出了新的要求，为此研制了第一台可编程控制器。将其应用于生产线上，通过改变存储指令的方法来改变生产线的控制流程，从而提供了继电器控制系统无法比拟的灵活性。但这一时期它主要是代替继电器系统完成顺序控制，虽然也采用了计算机的设计思想，但实际上只能进行序逻辑运算，故称为可编程逻辑控制器，简称 PLC(Programmable Logical Controller)。

进入 20 世纪 80 年代，随着微电子技术和计算机技术的发展，可编程控制器的功能已远远超出逻辑控制、顺序控制的范围，可以进行模拟量控制、位置控制等，特别是远程通信功能的实现，易于实现柔性加工和制造系统，因此将其称为可编程控制器(Programmable Controller)，也用 PLC 来表示。可编程控制器已成为现代工业控制的三大支柱(可编程控制器、工业机器人和 CAD/CAM)之一。

2. 可编程控制器的定义

可编程控制器一直在发展中，因此直到目前为止，人们还未能对其下最后的定义。

美国电气制造商协会 NEMA(National Electrical Manufacturers Association)在 1980 年给可编程控制器作了如下的定义：“可编程控制器是一个数字式的电子装置，它使用了可编程序的记忆存储指令，来执行诸如逻辑、顺序、计时、计数和演算等功能，并通过数字或模拟的输入和输出，来控制各种机械或生产过程。一部数字电子计算机若是用来执行可编程控制器的功能者，亦被视为可编程控制器但不包括鼓式或机械式顺序控制器。”

国际电工委员会(IEC)对可编程控制器的定义是：“可编程控制器是一种数字运算操作的电子系统，专为在工业环境下应用而设计。它采用了可编程序的存储器，用来在其内部存储执行逻辑运算、顺序控制、定时、计数和算术操作等面向用户的指令，并通过数字式或模拟式的输入/输出(I/O)，控制各种类型的机械或生产过程。可编程控制器及其有关外围设备，都按易于工业系统连成一个整体，易于扩充其功能的原则设计。”

此定义强调了可编程控制器是“数字运算操作的电子系统”，即它也是一种计算机。它是“专为在工业环境下应用而设计”的计算机。这种工业计算机采用“面向用户的指令”，因此编程方便。它能完成逻辑运算、顺序控制、定时、计数和算术操作，它还具有“数字量或模拟量的输入/输出控制”的能力，并且非常容易与“工业控制系统连成一体”，易于“扩充”。

定义还强调了可编程控制器直接应用于工业环境，因此，它须具有很强的抗干扰能力、广泛的适应能力和应用范围。这也是区别于一般微机控制系统的一个重要特征。应该强调的是，可编程控制器与以往所讲的鼓式、机械式的顺序控制器在“可编程序”方面有质的区别。由于可编程控制器引入了微处理器及半导体存储器等新一代电子器件，并用规定的指令进行编程，所以能灵活地修改，即用软件方式来实现“可编程序”的目的。

5.1.2 可编程控制器的特点和分类

1. 可编程控制器的特点

1) 可靠性高、抗干扰能力强

工业生产一般对控制设备的可靠性有很高的要求，要能够在恶劣的环境中可靠地工作，控制设备应具有很强的抗干扰能力。微型计算机虽有很强的功能，但一般其抗干扰能力差，不能在恶劣的环境(如电磁干扰、电源电压波动、机械振动、温度变化等)中可靠地工作。而可编程控制器是专为工业控制设计的，在设计和制造过程中采取了多层次抗干扰的硬、软件措施，因此，它能在上述恶劣的工业环境中可靠地工作。目前各生产厂家生产的可编程控制器，其平均无故障时间都大大超过了 IEC 规定的 10 万小时(折合为 4166 天，约 11 年)。而且为了适应特殊场合的需要，有的可编程控制器生产商还采用了冗余设计和差异设计，进一步提高了其可靠性。

与继电器-接触器控制相比，采用可编程控制器后，大量的开关动作由无触点的电子线路来完成，用软件程序代替了继电器间的繁杂连线，既方便灵活，又大大提高了可靠性。

2) 控制系统结构简单、通用性强

可编程控制器是一种存储程序控制器，其输入和输出设备与继电器—接触器控制系统

类似，但它们可直接连接在可编程控制器的输入/输出端。例如对开关量的输入，可将无源触点开关接到可编程控制器的输入端，而可编程控制器的输出端有很强的驱动能力，可直接驱动接触器和电磁阀等执行元件。

由于可编程控制器是采用软件编程来实现控制功能的，对同一控制对象，当控制要求改变需改变控制系统的功能时，不必改变可编程控制器的硬件设备，只需相应改编软件程序即可。当同一台可编程控制器用于不同的控制对象时，也只是输入/输出设备不同，应用软件不同。因此说可编程控制器有很好的通用性。

3) 编程简单、实用、维护方便

编程简单是可控编程器优于微机的另一特点。可编程控制器的设计宗旨之一是方便、实用，目前大多数的可编程控制器均可采用与实际电路接线图非常接近的梯形图编程(Ladder Programming)。这种编程语言形象直观，易于掌握，具有一定电工和工艺知识的人短时间内就能学会。而且可编程控制器具有故障检测、自诊断等功能，能及时地查出自身的故障并报警显示，使操作人员能迅速检查、判断、排除故障，维修十分方便。

4) 组合方便、功能强、应用范围广

现代的可编程控制器不仅具有逻辑运算、定时、计数、步进等功能，而且还能完成模/数(A/D)、数/模(D/A)转换，数字运算和数据处理以及通信联网、生产过程控制等。可编程控制器产品具有多种扩展单元，可方便地适应各种工业控制中不同输入/输出点数及不同输入/输出方式的系统。它既可用于开关量控制，又可用于模拟量控制；既可用于单机控制，又可组成多级控制；既可控制简单系统，又可控制复杂系统。因此，可编程控制器的应用范围很广。

5) 体积小、质量轻、功耗低

可编程控制器采用了半导体集成电路，外形尺寸很小，质量轻，同时功耗也很低，空载功耗约 1.2W。一台收录机大小的可编程控制器具有相当于三个 1.8m 高的继电器柜的功能。由于它的结构紧凑，抗干扰能力强，可很方便地将其装入机械设备内部。因此说可编程控制器是实现机电一体化较理想的控制设备。

目前可编程控制器的价格还比较高，工作速度较计算机慢，并且高、中档可编程控制器的使用还要求操作者具备一定的计算机专业知识，而随着其性能价格比不断地提高和使用越来越方便，在工业生产上的应用将更加普及。

2. 可编程控制器的分类

1) 按硬件的结构类型分类

可编程控制器发展很快，目前全世界有几百家工厂正在生产几千种不同型号的可编程控制器。为了便于在工业现场安装、便于扩展、方便接线，其的结构与普通计算机有很大区别。通常从组成结构形式上将其分为两类：一类是一体化整体式，另一类是结构化模块式。

(1) 整体式结构。从结构上看，早期的可编程控制器是把 CPU、RAM、ROM、I/O(输入/输出)接口及与编程器或 EPROM 写入器相连的接口、输入/输出端子、电源、指示灯等都装配在一起的整体装置。一个箱体就是一个完整的可编程控制器。它的特点是结构紧凑、体积小、成本低、安装方便，缺点是输入/输出点数是固定的，不一定能适合具体控制现场

的需要。这类产品有 OMRON 公司的 C20P、C40P、C60P，三菱公司的 F1 系列，东芝公司的 EX20/40 系列等。

(2) 模块式结构。模块式结构又叫积木式。这种结构形式的特点是把可编程控制器的每个工作单元都制成独立的模块，如 CPU 模块、输入模块、输出模块、电源模块、通信模块等。另外，机器上有一块带有插槽的母板，实质上就是计算机总线。把这些模块按控制系统需要选取后，都插到母板上，就构成了一个完整的可编程控制器。这种结构的特点是系统构成非常灵活，安装、扩展、维修都很方便，缺点是体积比较大。常见产品有 OMRON 公司的 C200H、C1000H、C2000H，西门子公司的 S5-115U、S7-300、S7-400 系列等。

2) 按应用规模及功能分类

为了适应不同工业生产过程中的应用要求，可编程控制器能够处理的输入/输出信号数是不一样的。一般将一路信号叫做一个点，将输入点数和输出点数的总和称为机器的点。按照点数的多少，可将其分为超小(微)、小、中、大、超大五种类型。

(1) 超小(微)型可编程控制器。输入/输出点数小于 64 点，内存容量为 256B~1 KB。

(2) 小型可编程控制器。输入/输出点数为 65~128 点，内存容量为 1KB~3.6 KB。

超小型及小型可编程控制器在结构上一般是一体化整体式的，主要用于中等容量的开关量控制，具有逻辑运算、定时、计数、顺序控制和通信等功能。

(3) 中型可编程控制器。输入/输出点数范围为 129~512 点，内存容量为 3.6KB~13 KB。

中型可编程控制器除具有小型、超小型可编程控制器的功能外，还增加了数据处理能力，适用于小规模的综合控制系统。

(4) 大型可编程控制器。输入/输出点数范围为 513~896 点，内存容量为 13KB 以上。

(5) 超大型可编程控制器。输入/输出点数为 896 点以上，内存容量进一步扩展。

上述划分方式并不十分严格，也不是一成不变的。随着可编程序控制器的不断发展，划分标准已有过多次的修改。

可编程控制器还可以按功能分为低档机、中档机和高档机。低档机以逻辑运算为主，具有定时、计数、移位等功能。中档机一般有整数及浮点运算、数制转换、PID(Proportional Integral Derivative)调节、中断控制及联网功能，可用于复杂的逻辑运算及闭环控制场合。高档机具有更强的数字处理能力，可进行矩阵运算、函数运算，完成数据管理工作，有更强的通信能力，可以和其他计算机构成分布式生产过程综合控制管理系统。

可编程控制器的按功能划分及按点数规模划分是有一定联系的。一般来说，大型机、超大型机都是高档机。机型和机器的结构形式及内部存储器的容量一般也有一定的联系，大型机一般都是模块式机，都有很大的内存容量。

5.1.3 可编程控制器的应用范围及其发展

1. 可编程控制器的应用范围

随着可编程控制器功能的不断完善，性能价格比的不断提高，其应用面也越来越广。目前，可编程控制器在国内外已广泛应用于钢铁、采矿、水泥、石油、化工、电子、机械制造、汽车、船舶、装卸、造纸、纺织、环保、娱乐等各行各业。其应用领域通常可分为如下五种。

1) 顺序控制

这是当今可编程控制器最广泛的应用领域，它取代了传统的继电器顺序控制。具体来说，其已应用于单机控制、多机群控制、生产自动线控制，例如，注塑机、印刷机械、订书机械、切纸机械、组合机床、磨床、装配生产线、包装生产线、电镀流水线及电梯控制等。

2) 运动控制

可编程控制器制造商目前已提供了拖动步进电动机或伺服电动机的单轴或多轴位置控制模块。在多数情况下，它把描述目标位置的数据传送给模块，模块移动一轴或数轴到目标位置，当每个轴移动时，位置控制模块保持适当的速度和加速度，确保运动平滑。

运动的编程可用可编程控制器的编程语言完成，通过编程器输入。操作员用手动方式把轴移动到某个目标位置，模块就得知了位置和运动参数，之后可用编辑程序来改变速度和加速度等运动参数，使运动平滑。

相对来说，位置控制模块比计算机数字控制(CNC)装置体积更小、价格更低、速度更快、操作更方便。

3) 过程控制

可编程控制器能控制大量的物理参数，例如温度、压力、速度和流量等。PID 模块的提供使其具有闭环控制功能，即具有 PID 控制能力的可编程控制器可用于过程控制。当控制过程中某个变量出现偏差时，PID 控制算法会计算出正确的输出，把变量保持在设定值上。

4) 数据处理

在机械加工中，出现了把支持顺序控制的可编程控制器和 CNC 设备紧密结合的趋向。著名的日本 FANUC 公司推出的 System10、System11、System12 系列，已将 CNC 功能作为可编程控制器的一部分。为了实现其和 CNC 设备之间内部数据自由传递，该公司采用了窗口软件。通过窗口软件，用户可以独自编程，由可编程控制器送至 CNC 设备使用。同样，美国通用公司的 CNC 设备新机种也使用了具有数据处理的可编程控制器。东芝的 TOSNUC600 也将 CNC 和可编程控制器组合在一起，预计今后几年 CNC 系统将变成以可编程控制器为主体的控制和管理系统。

5) 通信和联网

为了适应国外近几年来兴起的工厂自动化(FA)系统、柔性制造系统(FMS)及集散系统等发展的需要，首先，必须发展可编程控制器之间、可编程控制器和上级计算机之间的通信功能。作为实时控制系统，不仅可编程控制器数据通信速率要求高，而且要考虑出现停电、故障时的对策等。日本富士电动机公司开发的 MICREX-F 系列就是一例，其处理器多达 16 台，输入/输出点数达 3200 点。可编程控制器之间、可编程控制器和上级计算机之间都采用光纤通信，多级传递。输入/输出模块按功能各自放置在生产现场分散控制，然后采用网络连接构成集中管理信息的分布式网络系统。

2. 可编程控制器的发展

目前，可编程控制器正朝着以下几个方向发展。

1) 向高速度、大容量方向发展

为了提高可编程控制器的处理能力，要求其具有更好的响应速度和更大的存储容量。

目前有的可编程控制器的扫描速度可达 0.1ms/K 步左右。其的扫描速度已成为很重要的一个性能指标。

在存储容量方面，有的可编程控制器最高可达几十兆字节。为了扩大存储容量，有的公司已使用了磁泡存储器或硬盘。

2) 向超大型、超小型两个方向发展

当前中小型可编程控制器比较多，为了适应市场的多种需要，今后其要向多品种方向发展，特别是向超大型和超小型两个方向发展。

现已有输入/输出点数达 14336 点的超大型可编程控制器，它使用 32 位微处理器，多个 CPU 并行工作和大容量存储器，功能强。

小型可编程控制器由整体式结构向小型模块化结构发展，使配置更加灵活，为了市场需要已开发出了各种简易、经济的超小(微)型可编程控制器，最小配置的输入/输出点数为 8~16 点，以适应单机及小型自动控制的需要，如三菱公司 α 系列可编程控制器、西门子的 LOGO 系列可编程控制器。

3) 大力开发智能模块，加强联网与通信能力

为满足各种控制系统的要求，不断开发出许多功能模块，如高速计数模块、温度控制模块、远程输入/输出模块、通信和人机接口模块等。这些带中央处理器和存储器的智能输入/输出模块，既扩展了可编程控制器功能，使用又灵活方便，扩大了其应用的范围。

加强可编程控制器联网与通信的能力，是其技术进步的潮流。可编程控制器的联网与通信方式有两类：相互之间联网通信，各可编程控制器生产厂家都有自己的专有联网手段；可编程控制器与计算机之间的联网通信，一般其都有专用通信模块与计算机通信。

为了加强联网与通信能力，可编程控制器生产厂家之间也在协商制定通用的通信标准，以构成更大的网络系统。

4) 增强外部故障的检测与处理能力

根据统计资料：在可编程控制器控制系统的故障中，中央处理器占 5%，输入/输出接口占 15%，输入设备占 45%，输出设备占 30%，线路占 5%。前两项共 20% 故障属于可编程控制器的内部故障，可通过其本身的软、硬件实现检测、处理；而其余 80% 的故障属于可编程控制器的外部故障。可编程控制器生产厂家都致力于研制、发展用于检测外部故障的专用智能模块，进一步提高系统的可靠性。

5) 编程语言多样化

在可编程控制器系统结构不断发展的同时，可编程控制器的编程语言也越来越丰富，功能也不断提高。除了大多数可编程控制器使用的梯形图语言外，为了适应各种控制要求，出现了面向顺序控制的步进编程语言、面向过程控制的流程图语言、与计算机兼容的高级语言(BASIC、C 语言等)等。多种编程语言的并存、互补与发展是其进步的一种趋势。

可编程控制器总的发展趋势是：功能越来越强，使用越来越方便，而性能价格比又不断地提高。因此说，其发展方兴未艾，前景十分可观。

5.1.4 可编程控制器与其他工业控制系统的比较

1. 可编程控制器与继电器控制的区别

在可编程控制器的编程语言中，梯形图是使用最为广泛的语言。通过可编程控制器的

指令系统将梯形图变成其能接收的程序，由编程器将程序输入到可编程控制器的用户存储区中去。

可编程控制器的梯形图与继电器控制线路图十分相似，主要原因是其梯形图的发明大致上沿用了继电器控制的电路元件符号，仅个别地方有些不同。同时，信号的输入/输出形式及控制功能也是相同的，但可编程控制器的控制与继电器的控制还是有很多不同之处，主要表现在以下几方面。

1) 控制逻辑

继电器控制逻辑采用硬接线逻辑，利用继电器机械触点的串联或并联及延时继电器的滞后动作等组合成控制逻辑，其接线多而复杂、体积大、功耗大，一旦系统构成后想再改变或增加功能都很困难。另外，继电器触点数目有限，每只有4~8对触点，因此灵活性和扩展性很差。而可编程控制器采用存储器逻辑，其控制逻辑以程序方式存储在内存中，要改变控制逻辑，只需改变程序，故称为“软接线”，其接线少、体积小，而且，可编程控制器中软继电器的触点数在理论上无限制，因此灵活性和扩展性很好。可编程控制器由中大规模集成电路组成，功耗小。

2) 工作方式

当电源接通时，继电器控制线路中各继电器都处于受约束状态，即该吸合的都应吸合，不该吸合的都因受某种条件限制不能吸合。而可编程控制器的控制逻辑中，各继电器都处于周期性循环扫描接通之中，从宏观上看，每个继电器受制约接通的时间是短暂的。

3) 控制速度

继电器控制逻辑依靠触点的机械动作实现控制，工作频率低。触点的开闭动作一般在几十毫秒数量级。另外，机械触点还会出现抖动问题。而可编程控制器是由程序指令控制半导体电路来实现控制，速度极快，一般一条用户指令执行时间在微秒数量级。可编程控制器内部还有严格的同步，不会出现抖动问题。

4) 限时控制

继电器控制逻辑利用时间继电器的滞后动作进行限时控制。时间继电器一般分为空气阻尼式、电磁式、半导体式等，其定时精度不高，且有定时时间易受环境湿度和温度变化的影响，调整时间困难等问题。有些特殊的时间继电器结构复杂、不便维护。可编程控制器使用半导体集成电路作为定时器，时基脉冲由晶体振荡器产生，精度相当高，且定时时间不受环境影响，定时范围一般从0.001s到若干分钟甚至更长。用户可根据需要在程序中设定定时值，然后由软件和硬件计数器来控制定时时间。

5) 计数限制

可编程控制器能实现计数功能，而继电器控制逻辑一般不具备计数功能。

6) 设计和施工

使用继电器控制逻辑完成一项控制工程，其设计、施工、调试必须依次进行，周期长，而且维修困难，工程越大此问题就越突出。而用可编程控制器完成一项控制工程，在系统设计完成以后，现场施工和控制逻辑的设计(包括梯形图设计)可以同时进行，周期短，且调试和维修都很方便。

7) 可靠性和可维护性

继电器控制逻辑使用了大量的机械触点，连线也多。触点开闭时会受到电弧的损坏，

并有机械磨损, 寿命短, 因此可靠性和可维护性差。而可编程控制器采用微电子技术, 大量的开关动作由无触点的半导体电路来完成, 它体积小、寿命长、可靠性高。可编程控制器还配有自检和监督功能, 能检查出自身的故障, 并随时显示给操作人员, 还能动态地监视控制程序的执行情况, 为现场调试和维护提供了方便。

8) 价格

继电器控制逻辑使用机械开关、继电器和接触器, 价格比较低; 而可编程控制器使用中大规模集成电路, 价格比较高。

从以上几个方面的比较可知, 可编程控制器在性能上比继电器控制逻辑优异, 特别是可靠性高、设计施工周期短、调试修改方便, 而且体积小、功耗低、使用维护方便, 但价格高于继电器控制系统。从系统的性能价格比而言, 可编程控制器具有很大的优势。

2. 可编程控制器与微型计算机系统的区别

简言之, 微型计算机是通用的专用机, 而可编程控制器则是专用的通用机。

从微型计算机的应用范围来说, 微型计算机是通用机, 而可编程控制器是专用机。微型计算机是在以往计算机与大规模集成电路的基础上发展起来的, 其最大特征是运算快、功能强、应用范围广。例如, 近代科学计算, 科学管理和工业控制等都离不开它。所以说, 微型计算机是通用计算机, 而可编程控制器是一种为适应工业控制环境而设计的专用计算机。选对应的模块便可适用于各种工业控制系统。而用户只需改变用户程序即可满足工业控制系统的具体控制要求。如果采用微型计算机作为某一设备的控制器, 就必须根据实际需要考察抗干扰问题和硬件软件设计, 以适应设备控制的专门需要。这样, 势必要把通用的微型计算机转化为具有特殊功能的控制器而成为一台专用机。

可编程控制器与微型计算机的主要差异及各自的特点主要表现为以下几个方面。

1) 应用范围

微型计算机除了应用于控制领域外, 还大量用于科学计算、数据处理、计算机通信等方面; 而可编程控制器主要用于工业控制。

2) 使用环境

微型计算机对环境要求较高, 一般要在干扰小、具有一定的温度和湿度要求的机房内使用; 可编程控制器则适用于工业现场环境。

3) 输入/输出

微型计算机系统的输入/输出设备与主机之间采用微电联系, 一般不需要电气隔离; 而可编程控制器一般控制强电设备, 需要电气隔离, 输入/输出均用光电耦合, 输出还采用继电器、晶闸管或大功率晶体管进行功率放大。

4) 程序设计

微型计算机具有丰富的程序设计语言, 如汇编语言、FORTRAN 语言、COBOL 语言、PASCAL 语言和 C 语言等, 其语句多、语法关系复杂, 要求使用者必须具有一定水平的计算机硬件知识和软件知识; 而可编程控制器提供给用户的编程语句数量少, 逻辑简单, 易于学习和掌握。

5) 系统功能

微型计算机系统一般配有较强的系统软件, 例如操作系统, 能进行设备管理、文件管

理、存储器管理等，它还配有许多应用软件，以方便用户；而可编程控制器一般只有简单的监控程序，能完成故障检查、用户程序的输入和修改、用户程序的执行与监视。

6) 运算速度和存储容量

微型计算机运算速度快，一般为微秒量级，因有大量的系统软件和应用软件，故存储容量大；而可编程控制器因接口的响应速度慢而影响数据处理速度，一般可编程控制器接口响应速度为 2 ms，巡回检测速度为 8 ms/KB，可编程控制器的软件少，所编程序也简短，故内存容量小。

7) 价格

从以上几个方面的比较可知，可编程控制器是一种用于工业自动化控制的专用微型计算机系统，结构简单，抗干扰能力强，价格也比一般的微型计算机系统低。

5.2 可编程控制器的组成及工作原理

5.2.1 可编程控制器系统的组成

可编程控制器的基本组成与一般的微机系统类似，是一种以微处理器为核心的、面向工业控制的特殊计算机。其基本组成包括硬件系统与软件系统两部分。小型可编程控制器的硬件系统组成如图 5.1 所示。

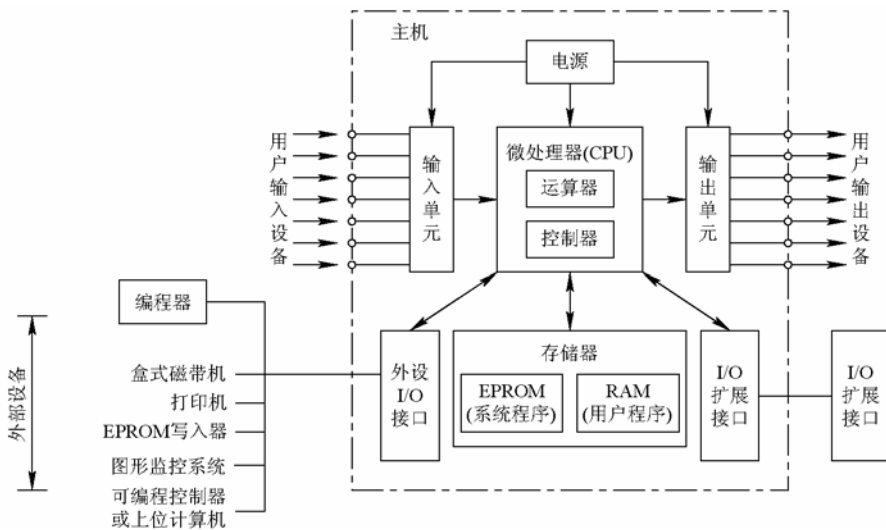


图 5.1 小型可编程控制器硬件系统结构示意图

1. 中央处理单元(CPU)

中央处理单元(Central Processing Unit, CPU)。CPU 是可编程控制器的核心部分，它包括微处理器和控制接口电路。微处理器是可编程控制器的运算控制中心，由它实现逻辑运算，协调控制系统内部各部分的工作。它的运行是按照系统程序所赋予的任务进行的。CPU 的具体作用如下：

(1) 接收并存储编程器或其他外设输入的用户程序或数据。

- (2) 诊断电源、可编程控制器内部电路故障和编程中的语法错误等。
- (3) 按扫描方式接收来自输入单元的数据和各状态信息，并存入相应的数据存储区。
- (4) 逐条读取并执行存储器中的用户程序，并将运算结果存入存储器中。
- (5) 根据运算结果，更新有关标志位和输出内容，通过输出接口实现控制、制表打印或数据通信等功能。

2. 存储器

存储器是可编程控制器存放系统程序、用户程序和运行数据的单元。

1) 系统程序存储器

系统程序存储器用来存放系统程序。系统程序完成系统诊断、命令解释、功能子程序调用、管理、逻辑运算、通信及各种参数设定等功能。系统程序是由可编程控制器的制造厂家编写的，在可编程控制器使用过程中不会变动，直接关系到可编程控制器的性能。系统程序由制造厂家直接固化在只读存储器 ROM、PROM 或 EPROM 中，用户不能访问和修改。

2) 用户程序存储器

用户程序存储器主要用来存放用户根据控制对象生产工艺及控制的要求而编制的应用程序，它是由可编程控制器控制对象的要求而定的。由于用户程序需要经常改动、调试，为了便于读出、检查和修改，用户程序一般存于可读写的 RAM 中，用锂电池作为后备电源，以保证掉电时不会丢失信息。为了防止干扰对 RAM 中程序的破坏，当用户程序经过调试运行正常、不需要改变后，可将其固化在 EPROM 中。现在有许多可编程控制器直接采用 EEPROM 或 FLASH ROM 作为用户存储器。

3) 工作数据存储器

工作数据存储器用来存放可编程控制器运行过程中经常变化、经常存取的一些数据。它们存放在 RAM 中，以适应随机存取的要求。

在可编程控制器的工作数据存储器中，设有存放输入/输出继电器、辅助继电器、定时器、计数器等逻辑器件的存储区，这些器件的状态都是由用户程序的初始设置和运行情况确定的。根据需要，部分数据在掉电时用后备电池维持其现有的状态，这部分在掉电时可保存数据的存储区域称为保持数据区。

在可编程控制器产品样本或使用手册中所列存储器的形式及容量是指用户程序存储器。

有时可编程控制器提供的用户程序存储器容量不够用，因而许多可编程控制器还提供有存储器扩展功能。

3. 输入/输出接口

输入/输出接口通常也称输入/输出单元或输入/输出模块，是可编程控制器与工业生产现场之间的连接通道。

输入单元接受操作命令和现场的状态信息，如控制按钮、限位开关、继电器触点、行程开关、接近开关等信号，并通过滤波电路、光电隔离和电平转换将这些信号转换成 CPU 能够接收和处理的信号。

输出单元将 CPU 送出的开关状态控制信号通过输出电路的光电隔离，以继电器触点形

式、集电极开路的晶体管形式或晶闸管形式，辅以外部功率电源，将状态控制信号放大转换成现场所需要的强电信号输出，以驱动继电器、接触器电磁阀等执行元件。

为适应工业过程现场对不同输入/输出信号的匹配要求，可编程控制器配置了各种类型的输入/输出单元。其中常用的有以下几种类型：

(1) 开关量输入单元。它的作用是把现场各种开关信号变成可编程控制器内部处理的标准信号。开关量输入单元按照输入端的电源类型不同，分为直流输入单元和交流输入单元，分别如图 5.2 和图 5.3 所示。

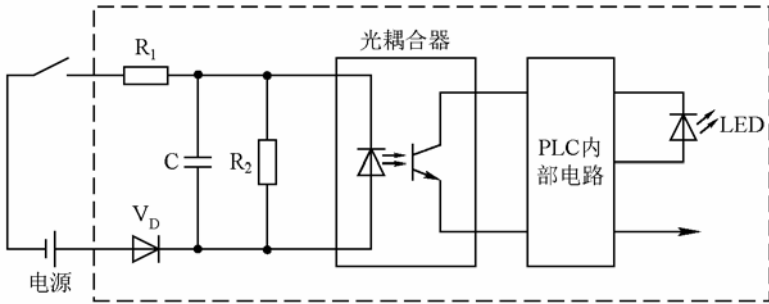


图 5.2 直流开关量输入单元

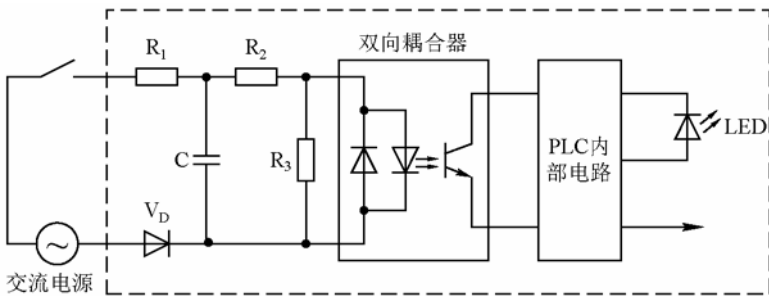


图 5.3 交流开关量输入单元

在直流开关量输入单元中，电阻 R_1 与 R_2 构成分压器，电阻 R_2 与电容 C 组成阻容滤波；二极管用于防止反极性电压输入，发光二极管(LED)指示输入状态；光耦合器隔离输入电路与可编程控制器内部电路的电气连接，并使外部信号通过光耦合器变成内部电路接收的标准信号。当外部开关闭合后，外部直流电压经过电阻分压和阻容滤波后加到光耦合器的发光二极管上，经光耦合，光敏晶体管接收光信号，并输出一个对内部电路来说接通的信号，输出端的发光二极管点亮，指示现场开关闭合。

在交流开关量输入单元中，电阻 R_2 与 R_3 构成分压器；电阻 R_1 为限流电阻，电容 C 为滤波电容；双向光耦合器起整流和隔离双重作用，双向发光二极管用作状态指示。其工作原理和直流开关量输入单元基本相同，仅在正反向时与导通的双向光耦合器不同。

(2) 开关量输出单元。它的作用是把可编程控制器的内部信号转换成现场执行机构的各种开关信号。按照现场执行机构使用的电源类型的不同，开关量输出单元可分为直流输出单元(晶体管输出方式或继电器触点输出方式)和交流输出单元(晶闸管输出方式或继电器触点输出方式)。

在继电器输出方式中，继电器作为开关器件，同时又是隔离器件。发光二极管构成输出状态显示器。当可编程控制器输出一个接通信号时，内部电路使继电器线圈 K 通电，继电器触点闭合使负载回路的负载 L 接通得电，VD 作为续流二极管用于消除线圈的反电动势，同时状态指示发光二极管导通点亮。根据负载的需要，负载回路的电源既可选用交流电源，也可选用直流电源。

特别应指出的是，由于继电器模式具有实际断点，可以从物理上切断所控制的回路，同时这种模式既适合于直流情况又适合于交流情况，因此在开关频率不太高的情况下是首选的输出控制方案。图 5.4 给出了这种输出方案的原理图。

其特点是：响应速度慢、动作频率低，可驱动交流或直流负载。

在晶体管输出方式中，采用光敏晶体管作为开关器件。当可编程控制器输出一个接通信号时，内部电路使光耦合器的发光二极管得电发光，光敏晶体管受光导通后，晶体管导通，相应负载 L 得电，如图 5.5 所示。

其特点是：响应速度快、动作频率高，只能用于驱动直流负载。

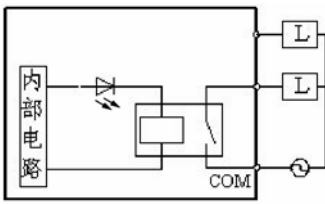


图 5.4 继电器输出原理图

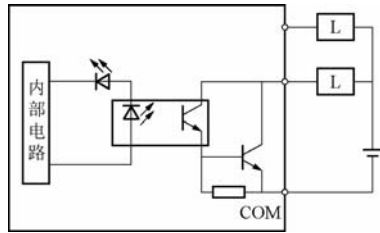


图 5.5 晶体管输出原理图

在晶闸管输出方式中，采用光耦合式双向晶闸管作为开关器件，因此它同时又是隔离器件。当可编程控制器输出一个接通信号时，内部电路使固态继电器内输入电路中的发光二极管导通，通过光耦合使输出回路的双向晶闸管导通，负载得电，如图 5.6 所示。

其特点是：响应速度快、动作频率高，只能用于驱动交流负载。

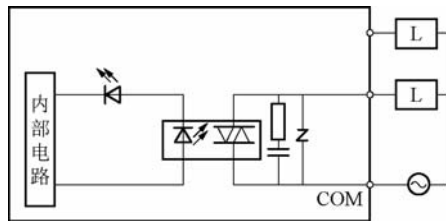


图 5.6 晶闸管输出原理图

(3) 模拟量输入单元。模拟量输入在过程控制中的应用很广，如常用的温度、压力、速度、流量、酸碱度、位移的各种工业检测都是对应于电压、电流的模拟量值，再通过一定运算(PID)后，控制生产过程达到一定的目的。模拟量输入电平大多是从传感器通过变换后得到的，模拟量的输入信号为 4 mA~20 mA 的电流信号或 1~5 V、-10~10 V、0~10 V 的直流电压信号。输入模块接收这种模拟信号之后，把它转换成二进制数字信号，送给 CPU 进行处理，因此模拟量输入模块又叫 A/D 转换输入模块。总之，模拟量输入单元的作用是把现场连续变化的模拟量标准信号转换成可编程控制器内部处理的、由若干位表示的数字

信号。模拟量输入单元一般由滤波、A/D 转换器、光耦合器隔离等部分组成。其原理框图如图 5.7 所示。

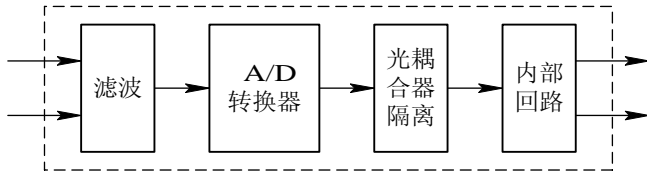


图 5.7 模拟量输入单元原理框图

模拟量输入单元设有电压信号和电流信号输入端。输入信号通过滤波、运算放大器的放大和量程变换，转换成 A/D 转换器能够接收的电压范围，经过 A/D 转换器后的数字量信号，再经光耦合器隔离后进入可编程控制器的内部电路。根据 A/D 转换的分辨率不同，模拟量输入单元能提供 8 位、10 位、12 位或 16 位等精度的各种位数的数字量信号并传送给可编程控制器以进行处理。

模拟量的输入点数可以是 2~8 点，对于不同模拟量输入单元类型，输入点数不同。对多通道的模拟量输入单元，通常设置多路转换开关进行通道的切换，而在输出端应设置信号的寄存器。为了适应工业生产过程的控制要求，对模拟量输入单元采取了必要的防电磁干扰措施，例如，光耦合器隔离、阻容滤波等。为了防止其他信号的影响，也采取了设置反向二极管或熔丝管等措施。这些措施为可编程控制器可靠地工作提供了保证。

(4) 模拟量输出单元：它的作用是把可编程控制器运算处理后的若干位数字量信号转换成相应的模拟量信号然后输出，以满足生产过程现场连续信号的控制要求。模拟量输出单元一般由光耦合器隔离、D/A 转换器和信号转换等部分组成，其原理框图如图 5.8 所示。

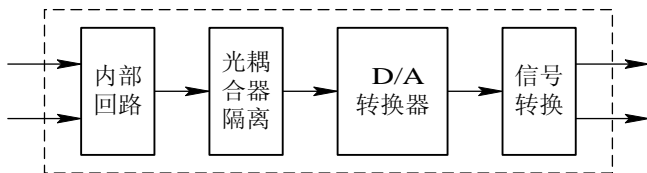


图 5.8 模拟量输出单元原理框图

模拟量输出模块的作用是将 CPU 的二进制数字信号转换成 4mA~20mA 的电流输出信号或 0~10V、1~5V 的电压输出信号，以提供给执行机构。因此模拟量输出模块又叫 D/A 转换输出模块。可编程控制器输出的若干位数字量信号由内部电路送至光耦合器的输入端，光耦合器输出端输出的数字信号进入 D/A 转换器，转换后的模拟量直流电压信号经运算放大器放大后驱动输出。

通常，模拟量输出单元还设有直流电流信号输出端供用户选用。根据实际要求的数字信号的不同分辨率，模拟量输出单元采用的 D/A 转换器有 8 位、10 位、12 位等几种不同的精度。

(5) 智能输入/输出单元：为了满足可编程控制器在复杂工业生产过程中的应用，可编程控制器的制造厂商除了提供上述基本的开关量和模拟量输入/输出单元外，还提供了智能输入/输出单元，以适应生产过程控制的要求。智能输入/输出单元是一个独立的自治系统，

它具有与可编程控制器主机相似的硬件系统,也是由 CPU、存储器、输入/输出单元和外部设备接口单元等部分,通过内部系统总线连接组成的。智能输入/输出单元在自身的系统程序管理下,对工业生产过程现场的信号进行检测、处理和控制在,并通过外部设备接口与可编程控制器主机的输入/输出扩展接口的连接来实现与主机的通信。可编程控制器主机在其运行的每个扫描周期中与智能输入/输出单元进行一次信息交换,以便能对现场信号进行综合处理。智能输入/输出单元不依赖主机的运行方式而独立运行,一方面使可编程控制器能够通过智能输入/输出单元来处理快速变化的现场信号,另一方面也使可编程控制器能够处理更多的任务。

为适应不同的控制要求,智能输入/输出单元也有不同的类型。例如高速脉冲计数器智能单元,它专门对工业现场的高速脉冲信号进行计数,并把累计值传送给可编程控制器主机进行处理。如果不用高速脉冲计数智能单元,而用主机的输入/输出单元来进行计数操作,则计数速度要受主机扫描速度的影响。当高速脉冲信号的宽度小于主机的扫描周期时,会发生部分计数脉冲丢失的情况。因此,用一般的可编程控制器不能正确地进行高速脉冲信号的计数。使用高速脉冲计数智能单元后,由于它脱离主机的扫描周期而独立进行计数操作,而主机仅在每个扫描周期内读出高速脉冲计数智能单元的计数值,因此,可编程控制器系统能正确地对高速脉冲信号进行计数处理。

PID 调节智能单元也是一种智能单元,它能独立完成工业生产过程控制中一个或几个闭环控制回路的 PID 调节。特别是 PID 调节控制软件是由智能单元来执行的,而主机系统仅周期性地把调整参数和设定值传递给 PID 调节智能单元。这样就使主机从繁琐的输入/输出操作、复杂的运算处理中解脱出来,从而在其扫描周期内能够处理更多的其他任务。

为了适应生产过程对温度检测的要求,一些制造企业也提供了可以直接与热电偶或热电阻连接的温度传感器输入智能单元,它通过信号转换、A/D 转换、光耦合等电路将模拟量的热电动势或电阻信号转换为可编程控制器的内部数字量信号。对热电偶的冷端补偿、热电阻的非线性处理等也在该智能单元中实现。不同热电偶和热电阻的分度数是通过对在该单元上的选择开关来确定的。

智能输入/输出单元还有位置控制智能单元、阀门控制智能单元等类型。智能输入/输出单元为可编程控制器的功能扩展和性能提高提供了极为有利的条件。随着智能输入/输出单元品种的增加,可编程控制器的应用领域将越来越广泛,可编程控制器的主机最终将变为一个中央信息处理机,对与之相连的各种智能输入/输出单元的信息进行综合处理。

4. 输入/输出扩展接口

输入/输出扩展接口是 可编程控制器主机为了扩展输入/输出点数和类型的部件,输入/输出扩展单元、远程输入/输出扩展单元、智能输入/输出单元等都通过它与主机相连。输入/输出扩展接口有并行接口、串行接口等多种形式。

5. 外设输入/输出接口

外设输入/输出接口是 可编程控制器主机实现人机对话、机机对话的通道。通过它可编程控制器可以和编程器、彩色图形显示器、打印机等外部设备相连,也可以与其他可编程控制器或上位计算机连接。外设输入/输出接口一般是 RS-232C、RS-422 或 RS-485 串行通信接口,该接口的功能是进行数据的转换,通信格式的识别,数据传输的出错检验,信号

电平的转换等。对于一些小型可编程控制器，外设输入/输出接口中还有与专用编程器连接的并行数据接口。

6. 电源

电源单元是编程控制器的电源供给部分。它的作用是把外部供应的电源变换成系统内部各单元所需的电源，有的电源单元还向外提供直流电源，供与开关量输入单元连接的现场电源开关使用。电源单元还包括掉电保护电路和后备电池电源，以保持 RAM 在外部电源断电后存储的内容不丢失。可编程控制器的电源一般采用开关电源，其特点是输入电压范围宽，体积小，质量轻，效率高，抗干扰性能好。

5.2.2 可编程控制器的工作过程与工作原理

1. 可编程控制器的工作方式

可编程控制器采用的是周期性循环扫描的工作方式，它实际上是一种存储程序控制器。用户首先要根据某一具体的要求编制好程序，然后将其输入到可编程控制器的用户程序存储器中。用户程序由若干条指令组成，指令在存储器中按步序号顺序排列。可编程控制器运行工作时，CPU 对用户程序作周期性循环扫描，在无跳转指令的情况下，CPU 从第一条指令开始顺序逐条地执行用户程序，直到用户程序结束，然后又返回第一条指令，开始新一轮扫描。在每次扫描过程中，还要完成对输入信号的采集和对输出状态的刷新等工作。

可编程控制器就是这样周而复始地重复上述的扫描循环，可编程控制器循环扫描过程如图 5.9 所示。

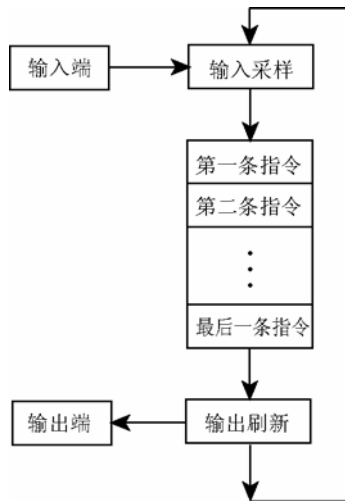


图 5.9 可编程控制器循环扫描过程示意图

2. 可编程控制器的工作过程

可编程控制器的工作过程分为输入采样、程序执行、输出刷新三个阶段。可编程控制器的工作过程是按这三个阶段进行周期性循环扫描的，如图 5.10 所示。

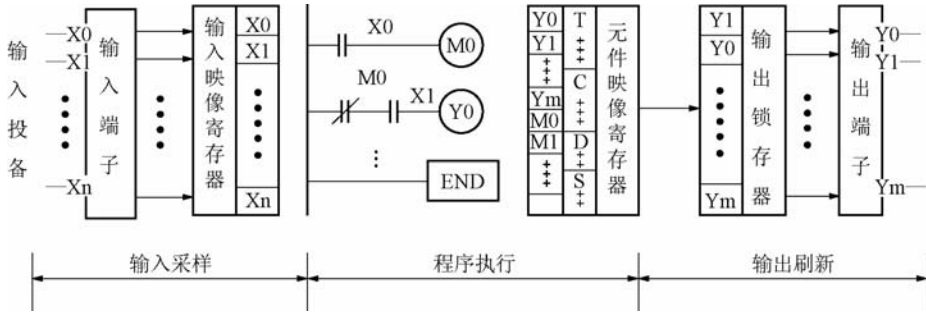


图 5.10 可编程控制器的工作过程

1) 输入采样阶段

可编程控制器在输入采样阶段，首先按顺序采样所有的输入端子，并将输入点的状态或输入数据存入内存中各对应的输入映像寄存器，即输入刷新，随即关闭输入端口，接着进入程序执行阶段。在程序执行阶段，即使输入状态有变化，输入映像寄存器的内容也不会改变。输入信号变化了的状态只能在下一个扫描周期的输入采样阶段被读入。

2) 程序执行阶段

在程序执行阶段可编程控制器对用户程序顺序扫描，在扫描每一条指令时，所需的输入状态(条件)可从输入映像寄存器中读出，从元件映像寄存器读出当前的输出状态然后按程序进行相应的逻辑运算，运算结果再存入元件映像寄存器中。所以对每一个元件(可编程控制器内部的输出软继电器)来说，元件映像寄存器的内容会随着程序的执行过程而变化。

3) 输出刷新阶段

当所有指令执行完毕，元件映像寄存器中所有输出继电器的状态(接通/断开)，在输出刷新阶段转存到输出锁存器并通过一定的方式输出，驱动外部负载，这才是可编程控制器的实际输出。

经过这三个阶段，即完成一个扫描周期。对一般小型可编程控制器，输入/输出点数少，采用的就是这种集中采样、集中输出的扫描工作方式。由于这种方式在每一个扫描周期中，只对输入状态采样一次，对输出刷新一次，在一定程度上降低了系统的响应速度，即存在着输入/输出的滞后现象。但其从根本上提高了系统的抗干扰能力，系统的可靠性增强。一般可编程控制器的响应延迟只有几毫秒、几十毫秒，这对一般的工业系统来说是无关紧要的。

3. 可编程控制器对输入/输出的处理规则

根据上述可编程控制器的工作过程的特点，可总结出可编程控制器对输入/输出的处理规则。如图 5.11 所示。

- (1) 输入映像寄存器的数据，取决于输入端子上各输入点在上一个刷新期间的状态。
- (2) 输出元件映像寄存器的内容由程序中输出指令的执行结果决定。
- (3) 输出锁存器中的数据，由上一个工作周期输出刷新阶段的输出映像寄存器的数据确定。
- (4) 输出端子上各输出端的 ON/OFF 状态，由输出锁存器的内容确定。
- (5) 程序执行中所需的输入/输出状态，由输入映像寄存器和输出映像寄存器读出。

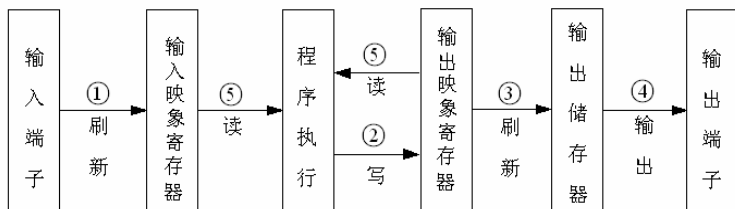


图 5.11 输入/输出的处理规则

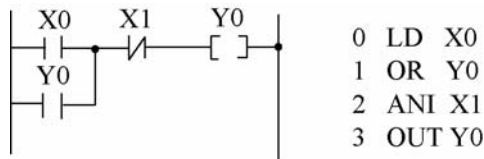
5.2.3 可编程控制器的编程语言

可编程控制器为用户提供了完整的编程语言，以适应编制用户程序的需要。可编程控制器提供的编程语言通常有以下几种：梯形图、指令表、顺序功能流程图和功能块图。

1. 梯形图(LAD)

梯形图编程语言是从继电器控制系统原理图的基础上演变而来的。可编程控制器的梯形图与继电器控制系统梯形图的基本思想是一致的，只是在使用符号和表达方式上有一定区别。

图 5.12 (a)所示是一个典型的梯形图。左、右两条垂直的线称作母线。母线之间是触点的逻辑连接和线圈的输出。



(a) 梯形图

(b) 指令表

图 5.12 梯形图

梯形图的一个关键概念是“能流”(Power Flow)。图 5.12(a)中，把左边的母线假想为电源“相线”，右边的母线假想为电源“零线”。如果有“能流”从左至右流向线圈，则线圈被激励；如果没有“能流”，则线圈未被激励。“能流”只能通过被激励(ON)的常开触点和未被激励(OFF)的常闭触点自左向右流，不会通过触点自右向左流。

引入“能流”的概念，仅仅是为了和继电器—接触器控制系统相比较，以对梯形图有一个深入的认识，其实“能流”在梯形图中是不存在的。

有的可编程控制器的梯形图有两根母线，但大部分可编程控制器现在只保留左边的母线。在梯形图中，触点代表逻辑“输入”条件，如开关、按钮、内部条件等；线圈通常代表逻辑“输出”结果，如灯、电动机接触器、中间继电器等。

2. 指令表(STL)

指令表编程语言类似于计算机中的助记符语言，它是可编程控制器最基础的编程语言。所谓指令表编程，是用一个或几个容易记忆的字符来代表可编程控制器的某种操作功能，

如图 5.12(b)所示。具体指令的说明将在后面的章节进行详细的介绍。

一般来说，指令表编程适合于熟悉可编程控制器和有经验的程序员使用。

3. 顺序功能流程图(SFC)

顺序功能流程图编程是一种图形化的编程方法，又称功能图。使用它可以对具有并发、选择等复杂结构的系统进行编程，许多可编程控制器都提供了用于顺序功能流程图编程的指令。目前，IEC 也正在实施并发展这种语言的编程标准。

4. 功能块图(FBD)

利用功能块图可以查看到普通逻辑门图形一类的逻辑盒指令。它没有梯形图编程器中的触点和线圈，但有与之等价的指令，这些指令是作为盒指令出现的，程序逻辑由这些盒指令之间的连接决定。也就是说，一个指令(例如，AND 盒)的输出可以用来允许另一条指令(例如，定时器)，这样可以建立所需要的控制逻辑。这样的连接思路可以解决范围广泛的逻辑问题。功能块图编程语言有利于程序流的跟踪，但在目前使用较少。

5.3 可编程控制器内部等效继电器电路

目前，我国应用的小型可编程控制器品种繁多，各有特色，本章将以目前较为常用的日本三菱公司的 FX2N 系列小型可编程控制器为例进行介绍。

5.3.1 FX2N 系列可编程控制器简介

FX2N 系列可编程控制器是日本三菱公司继 F1、F2 系列可编程控制器之后推出的产品。它采用整体式结构，按功能可分为基本单元、扩展单元、扩展模块及特殊适配器四种类型产品。基本单元内有 CPU、存储器、I/O、电源等，是一个完整的可编程控制器，可以单独使用。

1. FX2N 系列的型号说明

FX2N 系列的型号说明如图 5.13 所示。

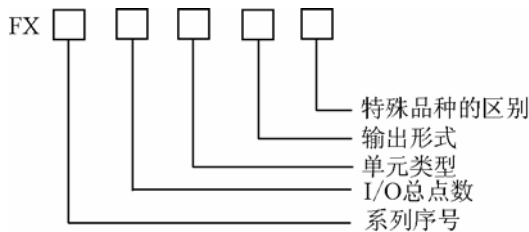


图 5.13 FX2N 系列的型号名称组成示意图

系列序号 0、2、0N、2C、1S、1N、2N、1NC、2NC

输入/输出点数 10~256

单元类型 M: 基本单元

E: 扩展单元(I/O 混合)

EX: 扩展输入单元(模块)

EY: 扩展输出单元(模块)

输出形式 R: 继电器输出

T: 晶体管输出

S: 晶闸管输出

特殊品种区别 D: DC 电源, DC 输入

A: AC 电源, AC 输入

H: 大电流输出扩展单元

V: 立式端子排的扩展单元

C: 接插口 I/O 方式

F: 输入滤波器 1ms 的扩展单元

L: TFL 输入型扩展单元

S: 独立端子(无公共端)扩展单元

例如 FX2N—32MT—D 表示 FX2N 系列, 32 个 I/O 点基本单位, 晶体管输出, 使用直流电源, 24V 直流输出型。

2. FX2N 系列的硬件配置

FX2N 系列可编程控制器的硬件包括基本单元、扩展单元(Extension Unit)、扩展模块(Extension Module)、模拟量 I/O 单元、各种特殊功能模块(Special Function Unit)及外部设备等。FX2N 系列可编程控制器吸取了整体式和模块式可编程控制器的优点, 各单元间采用叠装式连接。

FX2N 系列的基本单元、扩展单元、扩展模块、特殊功能模块, 分别见表 5-1、表 5-2、表 5-3、表 5-4。

表 5-1 FX2N 系列的基本单元

型 号			输入 点数	输出 点数	扩展模块可用点数
继电器输出	晶闸管输出	晶体管输出			
FX2N—16MR—001	FX2N—16MS	FX2N—16MT	8	8	24~32
FX2N—32MR—001	FX2N—32MS	FX2N—32MT	16	16	24~32
FX2N—48MR—001	FX2N—48MS	FX2N—48MT	24	24	48~64
FX2N—64MR—001	FX2N—64MS	FX2N—64MT	32	32	48~64
FX2N—80MR—001	FX2N—80MS	FX2N—80MT	40	40	48~64
FX2N—128MR—001		FX2N—128MT	64	64	48~64

表 5-2 FX2N 系列的扩展单元

型 号	总输入/输出点数	输 入			输 出	
		点数	DC 电压	类型	数目	类型
FX2N—32ER	32	16	24V	漏型	16	继电器

(续)

型 号	总输入/输出点数	输 入			输 出	
		点数	DC 电压	类型	数目	类型
FX2N—32ET	32	16	24V	漏型	16	晶体管
FX2N—48ER	48	24	24V	漏型	24	继电器
FX2N—48ET	48	24	24V	漏型	24	晶体管
FX2N—48ER—D	48	24	24V	漏型	24	继电器(DC)
FX2N—48ET—D	48	24	24V	漏型	24	继电器(DC)

表 5-3 FX2N 系列的扩展模块

型 号	总输入/输出点数	输 入			输 出	
		点数	电压	类型	点数	类型
FX2N—16EX	16	16	DC24V	漏型		
FX2N—16EYT	16				16	晶体管
FX2N—16EYR	16				16	继电器

表 5-4 FX2N 系列的特殊功能模块

型 号	功 能 说 明
FX2N—4AD	4 通道 12 位模拟量输入模块
FX2N—4AD-PT	供 PT-100 温度传感器用的 4 通道 12 位模拟量输入模块
FX2N—4AD—TC	供热电偶温度传感器用的 4 通道 12 位模拟量输入模块
FX2N—4DA	4 通道 12 位模拟量输出模块
FX2N—3A	2 通道输入、1 通道输出的 8 位模拟量模块
FX2N—1HC	2 相 50Hz 的 1 通道高速计数器
FX2N—1PG	脉冲输出模块
FX2N—10GM	有 4 点通用输入、6 点通用输出的 1 轴定位单元
FX—20GM 和 E—20GM	2 轴定位单元，内置 EEPROM
FX2N—1RM—SET	可编程凸轮控制单元
FX2N—232—BD	RS-232C 通信用功能扩展板
FX2N—232IF	RS-232C 通信用功能模块
FX2N—422—BD	RS-422 通信用功能扩展板
FX—485PLC—IF—SET	RS-232C/485 变换接口
FX2N—485—BD	RS-485C 通信用功能扩展板
FX—16NP/NT	MELSECNET/MINI 接口模块
FX2N—8AV—BD	模拟量设定功能扩展板

5.3.2 FX2N 系列可编程控制器的编程元件

可编程控制器在软件设计中需要各种各样的逻辑器件和运算器件，称之为编程元件。它们用于完成程序所赋予的逻辑运算、算术运算、定时、计数等。这些编程元件与硬件继电器类似，具有线圈和常开/常闭触点，为了区别通常称可编程控制器的编程元件为软元件。从编程者的角度看，可以不管这些软元件的物理实现，而只注重其功能，像在继电器电路中一样使用。每种软元件根据其功能都被赋予一个名称并用一定的字母表示，如输入继电器 X、输出继电器 Y、定时器 T、计数器 C、辅助继电器 M、状态继电器 S、数据寄存器 D 等。当有多个同类软元件时，在字母的后面用数字编号，以便区分。其中输入继电器和输出继电器用八进制数字编号，其他均采用十进制数字编号。

1. 输入继电器(X)

输入继电器与输入端相连，是专门用来接收 PLC 外部开关信号的元件。可编程控制器通过输入接口将外部输入信号状态(接通时为“1”，断开时为“0”)读入，并存储在输入映像寄存器中。如图 5.14 所示为输入继电器 X1 的等效电路。

输入继电器线圈由外部输入信号所驱动，只有当外部信号接通时，对应的输入继电器才得电，不能用指令来驱动，所以在程序中只见其触点而不可能出现其线圈。由于输入继电器为输入映像寄存器中的状态，所以其触点的使用次数不限。另外输入继电器的触点只能用于内部编程，而无法驱动外部负载。

FX 系列可编程控制器的输入继电器以八进制进行编号，FX2N 系列输入继电器的编号范围为 X000~X267。需要注意的是，基本单元输入继电器的编号是固定的，扩展单元和扩展模块按与基本单元最靠近开始顺序进行编号。例如：基本单元 FX2N—64MR 的输入继电器编号为 X000~X037，如果接有扩展单元或扩展模块，则扩展的输入继电器从 X040 开始编号。

2. 输出继电器(Y)

输出继电器用来将可编程控制器内部信号输出并传送给外部负载(用户输出设备)。输出继电器线圈由可编程控制器内部程序的指令驱动，线圈状态传送给输出单元，再由输出单元对应的硬触点来驱动外部负载。如图 5.15 所示为输出继电器 Y0 的等效电路。

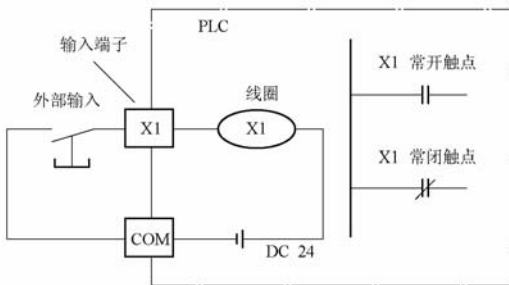


图 5.14 输入继电器 X1 的等效电路

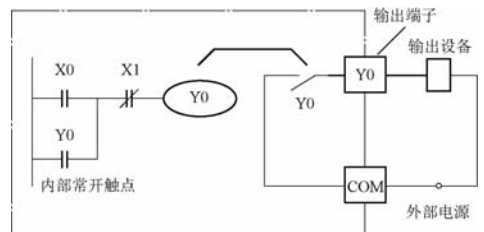


图 5.15 输出继电器 Y0 的等效电路

每个输出继电器在输出单元中都对应有一个常开硬触点，但在程序中供编程的输

出继电器，不管是常开还是常闭触点，都可以无数次使用。

FX 系列可编程控制器的输出继电器也是八进制编号，其中 FX2N 系列编号范围为 Y000~Y267。与输入继电器一样，基本单元的输出继电器编号是固定的，扩展单元和扩展模块的编号也是按与基本单元最靠近开始，顺序进行编号。

在实际使用中，输入继电器、输出继电器的数量，要看具体系统的配置情况而定。

3. 辅助继电器(M)

可编程控制器内有很多的辅助继电器，其线圈与输出继电器一样，由可编程控制器内各软元件的触点驱动。辅助继电器也称中间继电器，没有向外的任何联系，只供内部编程使用。它的电子常开/常闭触点使用次数不受限制。但是，这些触点不能直接驱动外部负载，外部负载的驱动必须通过输出继电器来实现。在 FX2N 系列中普遍采用 M0~M499，共 500 点辅助继电器，其地址按十进制编号。

在逻辑运算中经常需要一些中间继电器作为辅助运算用，这些器件往往用作状态暂存、移位等运算。另外，辅助继电器还具有一些特殊功能。下面是几种常见的辅助继电器。

1) 通用辅助继电器 M0~M499(500 点)

通用辅助继电器按十进制地址编号(在 FX 型可编程控制器中除了输入/输出继电器外，其他所有器件都是十进制编号)。

2) 断电保持辅助继电器 M500~M1023(524 点)

可编程控制器在运行时若发生停电，输出继电器和通用辅助继电器全部成为断开状态。上电后，除了可编程控制器运行时被外部输入信号接通的以外，其他仍继电器断开。不少控制系统要求保持断电瞬间状态。断电保持辅助继电器就是用于此场合的，断电保持是由可编程控制器内锂电池支持的。

3) 特殊辅助继电器 M8000~M8255(256 点)

可编程控制器内有 256 个特殊辅助继电器，这些特殊辅助继电器各自具有特定的功能，通常分为下面两大类。

(1) 只能利用其触点的特殊辅助继电器。线圈由可编程控制器自动驱动，用户只可以利用其触点。例如：

M8000 为运行监控用，PLC 运行时 M8000 接通；

M8002 为仅在运行开始瞬间接通的初始脉冲特殊辅助继电器；

M8012 为产生 100ms 时钟脉冲的特殊辅助继电器。

(2) 可驱动线圈型特殊辅助继电器。用户激励线圈后，可编程控制器作特定动作。例如：

M8030 为锂电池电压指示灯特殊辅助继电器，当锂电池电压跌落时，M8030 动作，指示灯亮，提醒维修人员赶快调换锂电池；

M8033 为 PLC 停止时输出保持辅助继电器；

M8034 为禁止全部输出特殊辅助继电器；

M8039 为定时扫描特殊辅助继电器。

需要说明的是，未定义的特殊辅助继电器可在用户程序中使用。辅助继电器的常开/常闭触点在 PLC 内可无限次地使用。

4. 状态器(S)

状态器是构成状态转移图的重要器件，它与后述的步进顺控指令配合使用。通常，状态器有下面五种类型：

- (1) 初始状态器 S0~S9，共 10 点。
- (2) 回零状态器 S10~S19，共 10 点。
- (3) 通用状态器 S20~S499，共 480 点。
- (4) 保持状态器 S500~S899，共 400 点。
- (5) 报警用状态器 S900~S999，共 100 点，这 100 个状态器器件可用作外部故障诊断输出。

S0~S499 没有断电保持功能，但是用程序可以将它们设定为有断点保持功能的状态。状态器的常开/常闭触点在可编程控制器内可以使用，且使用次数不限。不用步进顺控指令时，状态器 S 可以作为辅助继电器 M 在程序中使用。此外，每一个状态继电器还提供一个步进触点，称为 STL 触点，在步进控制的梯形图中使用。

5. 定时器(T)

在可编程控制器内的定时器是根据时钟脉冲的累积形式，当所计时间达到设定值时，其输出触点动作，时钟脉冲有 1ms、10ms、100ms。定时器可以用用户程序存储器内的常数 K 作为设定值，也可以用数据寄存器的内容作为设定值。在后一种情况下，一般使用有掉电保护功能的数据寄存器。即使如此，若备用电池电压降低时，定时器或计数器往往会发生错误动作。

定时器通道范围如下：

100ms 定时器 T0~T199，共 200 点，设定值为 0.1~3276.7 秒；

10ms 定时器 T200~T245，共 46 点，设定值为 0.01~327.67s；

1ms 积算定时器 T245~T249，共 4 点，设定值为 0.001~32.767s；

100ms 积算定时器 T250~T255，共 6 点，设定值为 0.1~3276.7s；

定时器指令符号及应用如图 5.16 所示。

当定时器线圈 T200 的驱动输入 X000 接通时，T200 的当前值计数器对 10ms 的时钟脉冲进行累积计数。当前值与设定值 K123 相等时，定时器的输出触点动作，即输出触点是在驱动线圈后的 1.23s ($10 \times 123\text{ms} = 1.23\text{s}$) 时才动作。当 T200 触点吸合后，Y000 就有输出。当驱动输入 X000 断开或发生停电时，定时器复位，输出触点也复位。

每个定时器只有一个输入，它与常规定时器一样，线圈通电时开始计时；断电时自动复位，不保存中间数值。定时器有两个数据寄存器，一个为设定值寄存器，另一个为现时值寄存器，编程时由用户设定累积值。

如果是积算定时器，它的指令符号及应用如图 5.17 所示。

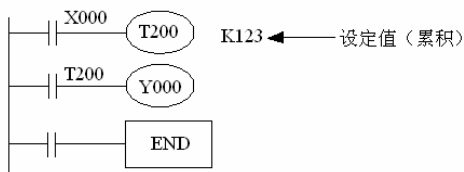


图 5.16 定时器指令符号及应用

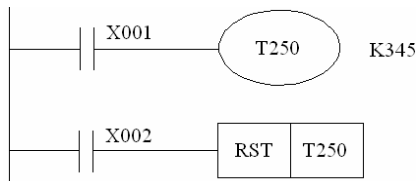


图 5.17 积算定时器的指令符号及应用

定时器线圈 T250 的驱动输入 X001 接通时, T250 的当前值计数器对 100 ms 的时钟脉冲进行累积计数。当该值与设定值 K345 相等时, 定时器的输出触点动作(100ms×345=34.5s)。当复位输入 X002 接通时, 定时器复位, 输出触点也复位。

6. 计数器(C)

FX2N 系列中的 16 位增计数器, 是 16 位二进制加法计数器。它在计数信号的上升沿进行计数, 有两个输入, 一个用于复位, 一个用于计数。每一个计数脉冲上升沿使原来的数值减 1, 当现时值减到零时停止计数, 同时触点闭合, 直到复位控制信号的上升沿输入时, 触点才断开, 设定值又写入, 又进入计数状态。其设定值在 K1~K32767 范围内有效。

设定值 K0 与 K1 含义相同, 即在第一次计数时, 其输出触点就动作。

计数器分为通用计数器和掉电保持用计数器。通用计数器的通道号: C0 ~C99, 共 100 点。掉电保持用计数器的通道号: C100~C199, 共 100 点。

通用与掉电保持用的计数器点数分配, 可随参数设置而随意更改。计数器的应用如图 5.18 所示。

由计数器输入 X011 每次驱动 C0 线圈时, 计数器的当前值加 1。当第 10 次执行线圈指令时, 计数器 C0 的输出触点即动作。之后即使计数器输入 X011 再动作, 计数器的当前值也保持不变。

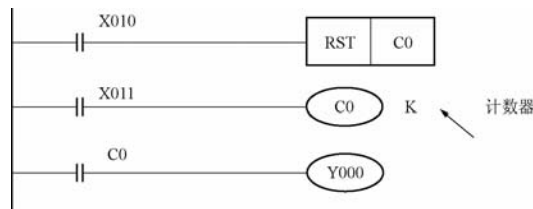


图 5.18 计数器的应用

当复位输入 X010 接通(ON)时, 执行 RST 指令, 计数器的当前值为 0, 输出触点复位。应注意的是, 计数器 C100~C199 即使发生停电, 当前值与输出触点的动作状态或复位状态也能保持。

7. 数据寄存器(D)

数据寄存器是计算机必不可少的元件, 用于存放各种数据。FX2N 系列中每一个数据寄存器都是 16bit(最高位为正、负符号位), 也可用两个数据寄存器合并起来存储 32bit 数据(最高位为正、负符号位)。数据寄存器有通用数据寄存器、保持数据寄存器、特殊数据寄存器和文件寄存器。

(1) 通用数据寄存器。通道分配 D0~D199, 共 200 点。

只要不写入其他数据, 已写入的数据不会变化。但是, 由 RUN→STOP 时, 全部数据均清零(若特殊辅助继电器 M8033 已被驱动, 则数据不被清零)。

(2) 保持数据寄存器。通道分配 D200~D511, 共 312 点, 或 D200~D999, 共 800 点(由机器的具体型号定)。

保持数据寄存器基本上同通用数据寄存器, 除非改写, 否则原有数据不会丢失, 不论电源接通与否, 可编程控制器运行与否, 其内容也不变化。

(3) 特殊数据寄存器。通道分配 D8000~D8255, 共 256 点。

特殊数据寄存器用于可编程控制器内各种元件的运行监视。未定义的特殊数据寄存器, 用户不能使用。例如:

D8000——WDT 定时器定时参数(初始值 200ms)

D8001——CPU 型号

D8020——X0~X7 输入滤波时间(初始值 10ms)

D8030——1 号模拟电位器的数值

D8031——2 号模拟电位器的数值

具体可参见可编程控制器使用手册, 不再一一介绍。

(4) 文件寄存器。通道分配 D1000~D2999, 共 2000 点。

文件寄存器是在用户程序存储器(RAM、EEPROM、EPROM)内的一个存储区, 以 500 点为一个单位, 最多可在参数设置时到 2000 点, 用于存放大量数据的专用数据寄存器。例如, 用于存放采集数据、统计计算数据、多组控制参数等。

文件寄存器用外部设备口进行写入操作。在可编程控制器运行时, 可用 BMOV 指令将数据读到通用数据寄存器中, 但是不能用指令将数据写入文件寄存器。用 BMOV 指令将数据写入 RAM 后, 再从 RAM 中读出。将数据写入 EEPROM 盒时, 需要花费一定的时间。

8. 变址寄存器(V/Z)

FX2N 系列可编程控制器有 V0~V7 和 Z0~Z7 共 16 个变址寄存器, 它们都是 16 位的寄存器。变址寄存器实际上是一种特殊用途的数据寄存器, 其作用相当于微型计算机中的变址寄存器, 用于改变元件的编号(变址), 例如 V0=5, 则执行 D20V0 时, 被执行的编号为 D25(D20+5)。变址寄存器可以像其他数据寄存器一样进行读写, 需要进行 32 位操作时, 可将 V、Z 串联使用(Z 为低位, V 为高位)。

9. 指针(P、I)

在 FX 系列中, 指针用来指示分支指令的跳转目标和中断程序的入口标号。它分为分支用指针和中断用指针。包括定时中断指针和记数中断指针。

1) 分支用指针(P0~P127)

FX2N 系列有 P0~P127 共 128 点分支用指针。分支用指针用来指示跳转指令(CJ)的跳转目标或子程序调用指令(CALL)调用子程序的入口地址。

如图 5.19 所示, 当 X1 常开触点接通时, 执行跳转指令 CJ P0, PLC 跳到标号为 P0 处之后的程序去执行。

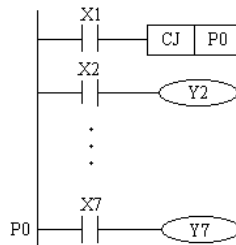


图 5.19 分支用指针

2) 中断用指针(I0□□~I8□□)

中断用指针用来指示某一中断程序的入口位置。执行中断后如遇到 IRET(中断返回)指令, 则返回主程序。中断用指针有以下三种类型。

(1) 输入中断用指针(I00□~I50□)。共 6 点, 用来指示由特定输入端的输入信号而产生中断的中断服务程序的入口位置, 这类中断不受 PLC 扫描周期的影响, 可以及时处理外界信息。输入中断用指针的编号格式如图 5.20 所示。

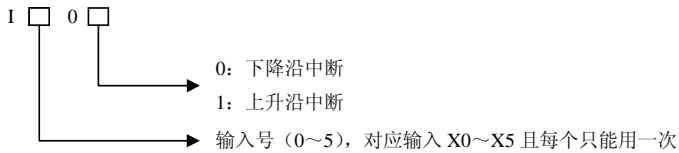


图 5.20 输入中断用指针的编号格式

例如: I101 为当输入 X1 从 OFF→ON 变化时, 执行以 I101 为标号后面的中断程序, 并根据 IRET 指令返回。

(2) 定时器中断用指针(I6□□~I8□□)。共 3 点, 用来指示周期定时中断的中断服务程序的入口位置, 这类中断用可编程控制器以指定的周期定时执行中断服务程序, 定时循环处理某些任务。处理的时间不受可编程控制器扫描周期的限制。□□表示定时范围, 可在 10~99ms 中选取。

(3) 计数器中断用指针(I010~I060)。共 6 点, 用于可编程控制器内置的高速计数器中, 根据高速计数器的计数当前值与计数设定值的关系确定是否执行中断服务程序。它常用于利用高速计数器优先处理计数结果的场合。

10. 常数(K、H)

K 是表示十进制数的符号, 主要用来指定定时器或计数器的设定值及应用功能指令操作数中的数值; H 是表示十六进制数的符号, 主要用来表示应用功能指令的操作数值。例如 20 用十进制表示为 K20, 用十六进制则表示为 H14。

5.4 可编程控制器编程和指令系统

5.4.1 FX2N 系列的基本逻辑指令

基本逻辑指令是可编程控制器中最基本的编程语言, 掌握了它也就初步掌握了可编程控制器的使用方法, 各种型号的可编程控制器的基本逻辑指令都大同小异。现在我们针对 FX2N 系列, 逐条学习其指令的功能和使用方法。每条指令及其应用实例都以梯形图和语句表两种编程语言对照说明。

1. 输入/输出指令(LD/LDI/OUT)

LD: 取指令, 表示读入一个与母线相连的常开触点指令, 即常开触点逻辑运算起始。
LDI(Load Inverse): 取反指令, 表示读入一个与母线相连的常闭触点指令, 即常闭触点逻辑运算起始。
OUT: 线圈驱动指令, 也叫输出指令。图 5.21 所示梯形图与指令表表示了上述

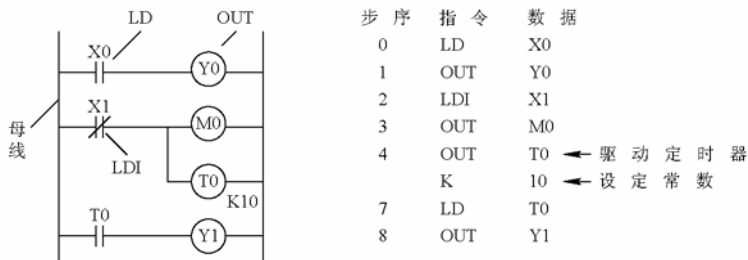


图 5.21 LD、LDI、OUT 指令的使用说明

指令的基本用法。

LD、LDI 两条指令的目标元件是 X、Y、M、S、T、C，用于将触点接到母线上。可以与后述的 ANB、ORB 指令配合，用于分支起点。

OUT 是驱动线圈的输出指令，它的目标元件是 Y、M、S、T、C，输入继电器 X 不能使用。OUT 指令可以连续使用多次。

对定时器的定时线圈使用 OUT 指令后，必须设定常数 K，图 5.21 中 K 为 10，对应的延时时间为 1 s。因为 T0~T199 为 0.1 s (100 ms) 定时器，设定值范围为 0.1~3276.7 s，定时最小单位为 0.1 s，K=10，则对应定时时间为 10×0.1 s；如 K 改为 100，则对应定时时间为 100×0.1 s。

对计数器的计数线圈使用 OUT 指令后，也必须设定常数 K，K 表示计数器设定次数。

2. 触点串联指令 AND、ANI

AND：与指令，用于单个常开触点的串联。

ANI(And Inverse)：与非指令，用于单个常闭触点的串联。

AND 与 ANI 都是程序步指令，它们串联触点的个数没有限制，也就是说，这两条指令可以多次重复使用。AND、ANI 指令的使用说明如图 5.22 所示。这两条指令的目标元件为 X、Y、M、S、T、C。

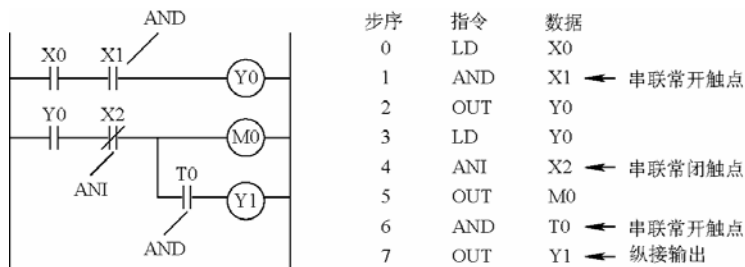


图 5.22 AND、ANI 指令的使用说明

3. 触点并联指令 OR、ORI

OR：或指令，用于单个常开触点的并联。

ORI(OR Inverse)：或非指令，用于单个常闭触点的并联。

OR 与 ORI 指令都是程序步指令，它们的目标元件是 X、Y、M、S、T、C。对这两种

指令的使用作如下说明：

- (1) OR、ORI 指令用于单个触点的并联连接。
 - (2) 两个以上触点串联连接电路块并联连接时，要用后述的 ORB 指令。
- OR、ORI 指令的使用说明如图 5.23 所示。



图 5.23 OR、ORI 指令的使用说明

4. 串联电路块的并联连接指令 ORB

两个或两个以上触点串联连接的电路叫串联电路块。对串联电路块并联连接时，有如下的说明：

- (1) 分支开始用 LD、LDI 指令，分支终点用 ORB 指令。
- (2) ORB 指令为无目标元件指令，为一个程序步；它不表示触点，可以看成电路块之间的一段连接线。

ORB 指令简称或块指令。ORB 指令的使用说明如图 5.24 所示。

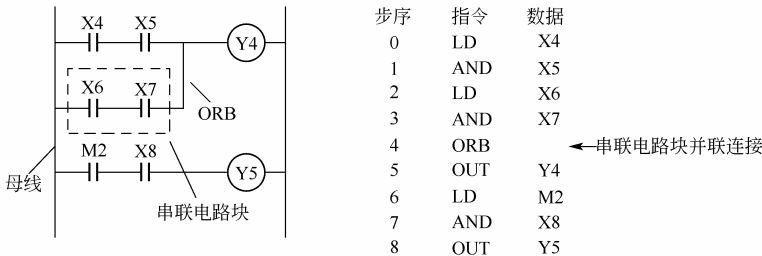


图 5.24 ORB 指令的使用说明之一

ORB 指令的使用方法有两种：一种是在要并联的每个串联电路块后加 ORB 指令，详见图 5.25(b)所示语句表；另一种是集中使用 ORB 指令，详见图 5.25(c)所示语句表。对于前者分散使用 ORB 指令时，并联电路的个数没有限制，但对于后者集中使用 ORB 指令时，这种电路块并联的个数不能超过八个(即重复使用 LD、LDI 指令的次数限制在八次以下)。

5. 并联电路块的串联连接指令 ANB

两个或两个以上触点并联的电路称为并联电路块，分支电路并联电路块与前面电路串联连接时，应使用 ANB 指令。在使用时应注意以下几点：

- (1) 分支的起点用 LD、LDI 指令，并联电路块结束后，使用 ANB 指令与前面电路串联。

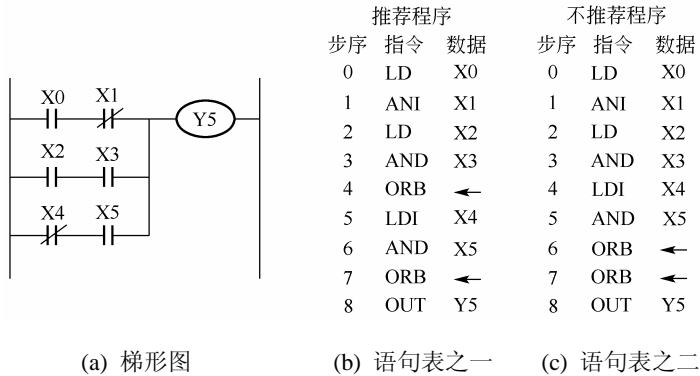


图 5.25 ORB 指令的使用说明之二

(2) ANB 指令简称与块指令，ANB 也无操作目标元件，是一个程序步指令。ANB 指令的使用说明如图 5.26 所示。

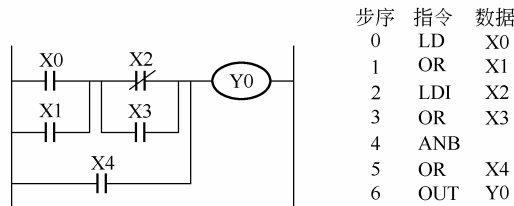


图 5.26 ANB 指令的使用说明

(3) 当并联的串联电路块大于等于 3 时，有两种编程方法，但最好对串联电路块逐块连接，对每一电路块使用 ANB 指令，ANB 使用次数无限制。ANB 指令虽然也可连续使用，但重复使用 LD、LDI 指令的次数限制在八次以下。图 5.27 是 ORB、ANB 指令的使用说明。编程时，首先要找出并联电路块和串联电路块，然后正确使用这两条指令。

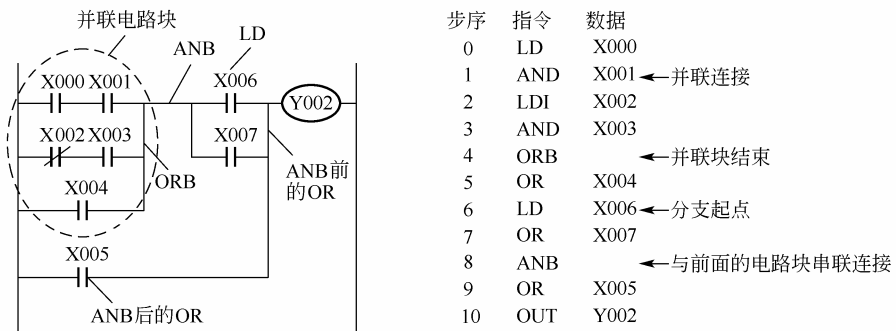


图 5.27 ORB、ANB 指令的使用说明

6. 多重输出指令 MPS、MPD、MPP

MPS 为进栈指令，MRD 为读栈指令，MPP 为出栈指令。

可编程控制器中有 11 个存储运算中间结果的存储器，称为栈存储器。进栈指令 MPS 用于将运算中间结果存入栈存储器，使用一次 MPS 指令，该时刻的运算结果就压入栈存储

器第一级，再使用一次 MPS 指令，当时的运算结果压入栈的第一级，先压入的数据依次向栈的下一级推移。

出栈指令 MPP 用于将存入栈存储器的各数据依次上移，最上级数据读出后就从栈内消失。

读栈指令 MRD 是存入栈存储器最上级的最新数据的读出专用指令，栈内的数据不发生上、下移。

这组指令都是没有数据(操作元件号)的指令，可将触点先存储，因此用于多重输出电路。MPS、MRD、MPP 指令的使用说明如图 5.28 所示。

MPS、MRD、MPP 指令在使用中应注意以下几点：

- (1) MPS、MRD、MPP 指令用于多重输出电路。
- (2) MPS 与 MPP 指令必须配对使用。
- (3) MPS 与 MPP 指令连续使用必须少于 11 次。

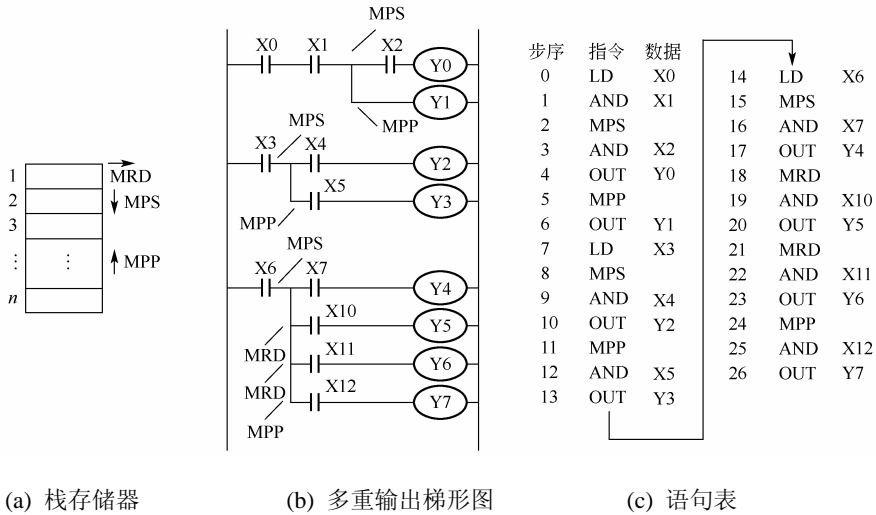


图 5.28 栈存储器与多重输出指令

7. 主控及主控复位指令 MC、MCR

MC 为主控指令，用于公共串联触点的连接。MCR 叫主控复位指令，即 MC 的复位指令。在编程时，经常遇到多个线圈同时受一个或一组触点控制的情况。如果在每个线圈的控制电路中都串入同样的触点，则将多占用存储单元，应用主控指令可以解决这一问题。使用主控指令的触点称为主控触点，它在梯形图中与一般的触点垂直。它们是与母线相连的常开触点，是控制一组电路的总开关。MC、MCR 指令的使用说明如图 5.29 所示。

MC 指令是三程序步，MCR 指令是二程序步，两条指令的操作目标元件是 Y、M，但不允许使用特殊辅助继电器 M。

当图 5.29 中的 X0 接通时，执行 MC 与 MCR 之间的指令；当输入条件断开时，不执行 MC 与 MCR 之间的指令。此时，非积算定时器和用 OUT 指令驱动的元素复位，积算定时器、计数器、用 SET/RST 指令驱动的元素保持当前的状态。使用 MC 指令后，母线移到主控触点的后面，与主控触点相连的触点必须用 LD 或 LDI 指令。MCR 指令使母线回到原

来的位置。在 MC 指令区内再使用 MC 指令称为嵌套，嵌套级 N 的编号(0~7)顺次增大，返回时用 MCR 指令，从大的嵌套级开始解除。

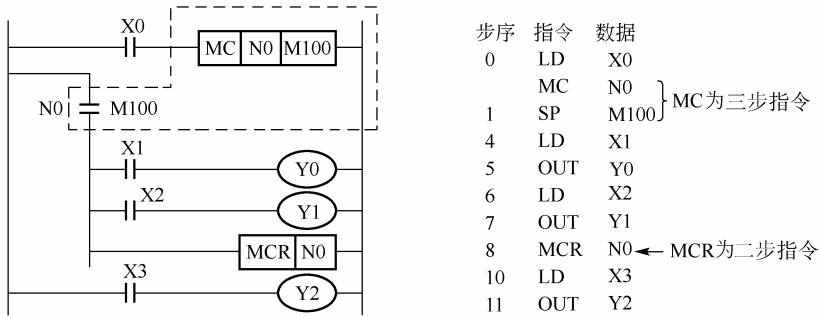
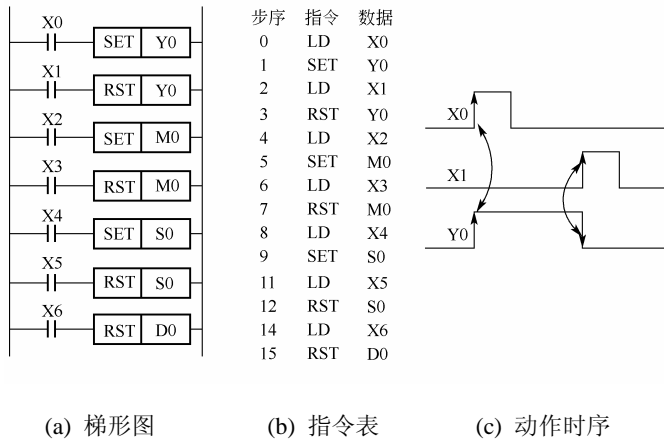


图 5.29 MC、MCR 指令的使用说明

8. 置位与复位指令 SET、RST

SET 为置位指令，其功能是使元件置位，并保持直至复位为止。RST 为复位指令，使元件复位并保持，直至置位为止。SET、RST 指令的使用说明如图 5.30 所示。由波形图可见，X0 接通后，即使再变成断开，Y0 也保持接通。X1 接通后，即使再变成断开，Y0 也将保持断开。SET 指令的操作目标元件为 Y、M、S。而 RST 指令的操作目标元件为 Y、M、S、D、V、Z、T、C。对同一编程元件，如例中 Y0、M0、S0 等，SET、RST 指令可以多次使用，且不限使用顺序，以最后执行者有效。



(a) 梯形图 (b) 指令表 (c) 动作时序

图 5.30 SET、RST 指令的使用说明

RST 指令可以对定时器、计数器、数据寄存器、变址寄存器的内容清零，还可用来复位积算定时器 T246~T255 和计数器。现举一个 RST 复位指令用于计数器、定时器的例子，如图 5.31 所示。当 X0 接通时，输出触点 T246 复位，定时器的当前值也成为 0。输入继电器 X1 接通期间，T246 接收 1ms 时钟脉冲并计数，计到 1234 时 Y0 动作。32 位计数器 C200 根据 M8200 的开、关状态进行递加或递减计数，它对 X4 触点的开关数计数。输出触点的

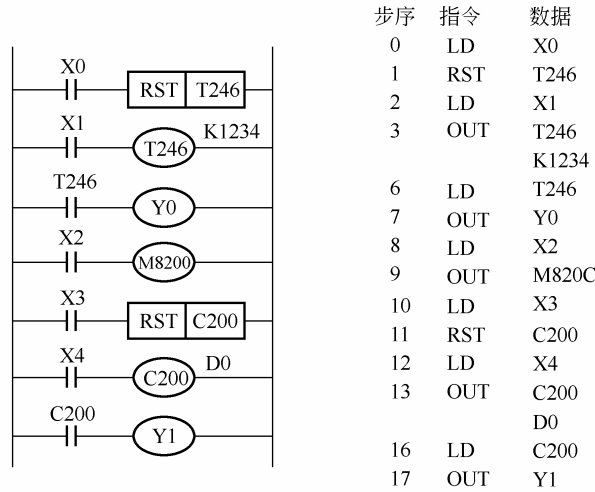


图 5.31 RST 复位指令用于计数器、定时器的使用说明

置位或复位取决于计数方向及是否达到 D1、D0 中所存的设定值。输入继电器 X3 接通后，输出触点复位，计数器 C200 当前值清零。

9. 脉冲输出指令 PLS、PLF

PLS 指令在输入信号上升沿产生脉冲输出，而 PLF 指令在输入信号下降沿产生脉冲输出。这两条指令都是二程序步，它们的目标元件是 Y 和 M，但特殊辅助继电器不能作为目标元件。

PLS、PLF 指令的使用说明如图 5.32 所示。使用 PLS 指令，元件 Y、M 仅在驱动输入接通后的一个扫描周期内动作(置 1)，即 PLS 指令使 M0 产生一个扫描周期脉冲，而使用 PLF 指令，元件 Y、M 仅在驱动输入断开后的一个扫描周期内动作；PLF 指令使元件 M1 产生一个扫描周期脉冲。

10. 空操作指令 NOP

NOP 指令是一条无动作、无目标的程序步指令。PLC 的编程器一般都有指令的插入和删除功能，在程序中一般很少使用 NOP 指令。执行完清除用户存储器的操作后，用户存储器的内容全部变为 NOP 指令。

11. 程序结束指令 END

END 是一条无目标元件的程序步指令。PLC 反复进行输入处理、程序运算、输出处理，若在程序最后写入 END 指令，则 END 以后的程序不再执行，直接进行输出处理。在程序调试过程中，按段插入 END 指令，可以顺序扩大对各程序段动作的检查。采用 END 指令将程序划分为若干段，在确认处于前面电路块的动作正确无误之后，依次删去 END 以后的指令。要注意的是，在执行 END 指令时，也刷新了监视时钟。

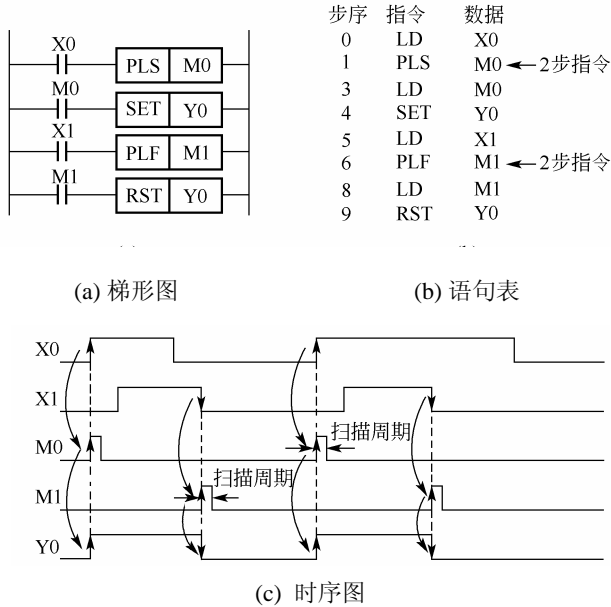


图 5.32 PLS、PLF 指令的使用说明

5.4.2 梯形图编程注意事项

1. 水平不垂直

梯形图的触点应画在水平线上，不能画在垂直线上。如图 5.33 所示，图(a)中触点 3 被画在垂直线上，就很难正确识别它与其他触点的关系，以及对输出线圈的控制方向。因此，根据自上而下、自左至右的原则，应将图(a)改画成图(b)的形式。

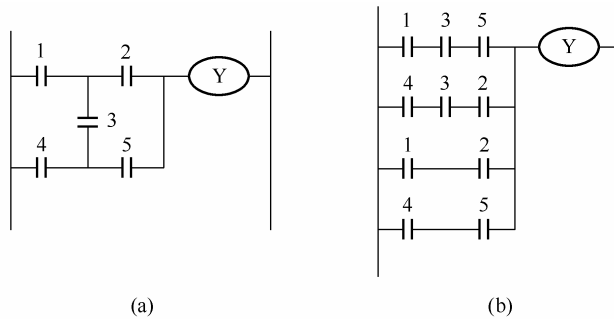
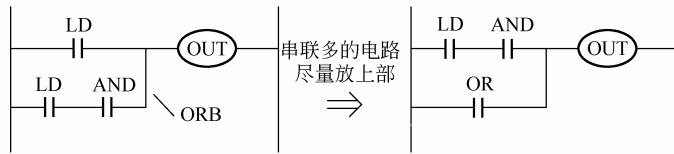


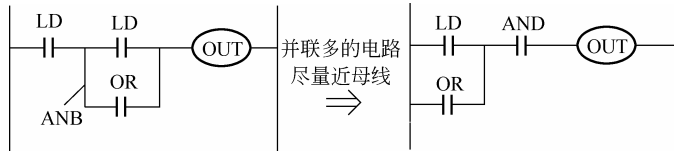
图 5.33 梯形图画法之一

2. 多上串左

串联电路相并联时，应将触点最多的串联回路放在梯形图最上面。并联电路相串联时，应将触点最多的并联回路放在梯形图的最左边。这种安排程序简洁、语句也少，如图 5.34 所示。



(a) 串联多的电路尽量放上部

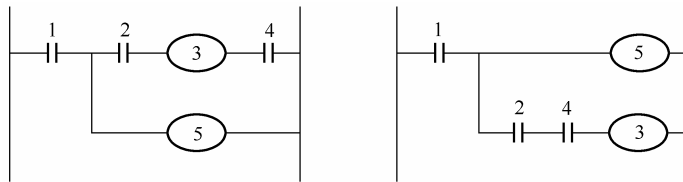


(b) 并联多的电路尽量靠近母线

图 5.34 梯形图画法之二

3. 线图右边无触点

不能将触点画在线圈右边，只能在触点的右边接线圈，如图 5.35 所示。



(a) 不正确

(b) 正确

图 5.35 梯形图画法之三

4. 双线圈输出不可用

如果在同一程序中一元件的线圈使用两次或多次，则称为双线圈输出。这时前面的输出无效，只有最后一次才有效，如图 5.36 所示。一般不应出现双线圈输出。

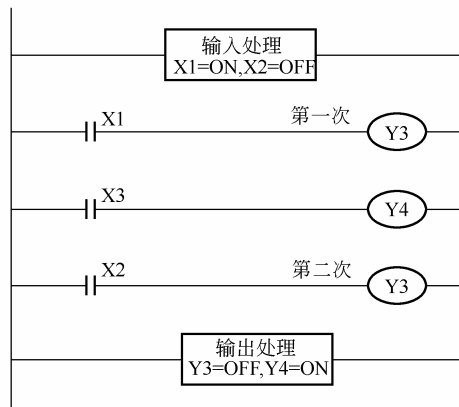


图 5.36 双线圈输出

5.4.3 FX2N 系列的步进梯形图指令及编程方法

1. 功能图

功能图又称功能表图(Function Chart)或称做状态转移图(SFC 图),它是描述控制系统的控制过程、功能和特性的一种图形。功能图不涉及所描述控制功能的具体技术,是一种通用的技术语言,可用于进一步设计和不同专业的人员之间进行技术交流。流程图中的每一步,可用一个状态来表示,如图 5.37(a)所示。

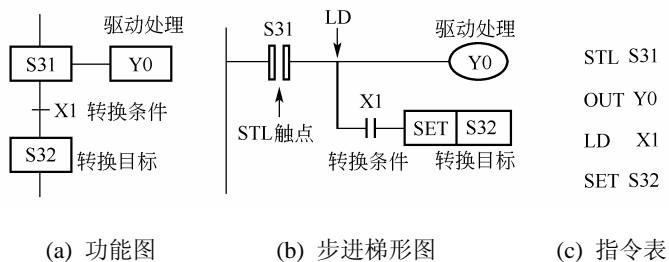


图 5.37 功能图与步进梯形图

状态可提供以下三种功能。

- (1) 驱动负载。状态可以驱动 M、Y、T、S 等线圈。可以直接驱动和用置位 SET 指令驱动,也可以通过触点联锁条件来驱动。例如,当状态 S31 置位后,它可以直接驱动 Y0。
- (2) 指定转移的目的地。状态转移的目的地由连接状态之间的线段指定,线段所指向的状态即为指定转移的目的地。例如, S31 转移的目的地为 S32。
- (3) 给出转移条件。状态转移的条件用连接两状态之间的线段上的短线来表示。当转移条件得到满足时,转移的状态被置位,而转移前的状态(转移源)自动复位。例如图 5.37(b)中,当 X1 动合触点瞬间闭合时,状态 S31 将转移到 S32,这时 S32 被置位而 S31 自动复位, S31 的输出 Y0 也自动停止。

状态的转移条件可以是单一的,也可以是多个元件的串、并联组合。如图 5.38 所示。

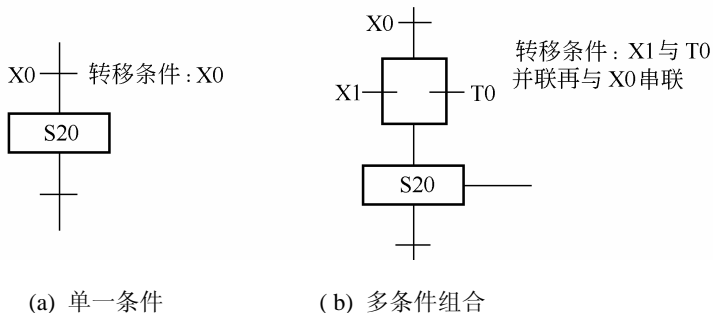


图 5.38 状态的转移条件

PLC 厂家有专门用于编制顺控程序的指令和编程元件。FX2N 系列可编程控制器用于功能图的状态元件见表 5-5。

表 5-5 FX2N 系列可编程控制器用于状态转移图的状态元件

类别	元件编号	个数	用途及特点
初始状态	S0~S9	10	用作状态转移图的初始状态
返回状态	S10~S19	10	多运行模式控制中, 用作返回原点的状态
一般状态	S20~S499	480	用作状态转移图的中间状态
掉电保持状态	S500~S899	400	具有停电保持功能, 停电恢复后需继续执行的情况可用这些状态元件
信号报警状态	S900~S999	100	用作报警元件使用

2. 步进梯形图指令 STL/RET

STL(Step Ladder): 步进梯形指令, 用于步进触点的编程。

RET(Return): 步进返回指令, 用于步进结束时返回原母线。

用步进梯形图编制语句表的要点如下。

(1) 对 STL 触点要用 STL 指令, 而不能用 LD 指令。不相邻的状态转移用 OUT 指令。

(2) STL 指令有建立子母线的功能, 与 STL 触点直接连接的线圈用 OUT/SET 指令。对于通过触点连接的线圈, 应在触点开始处使用 LD/LDI 指令。如图 5.37(b)、(c)所示。

(3) STL 指令仅仅对状态器有效, 但状态器也可以作为 LD、LDI 及 AND 等指令的目标元件。也就是说, 状态器不作为步进指令的目标元件时, 具有一般辅助继电器的功能。

(4) 步进程序结束时要写入 RET 指令。步进返回 RET 指令表明步进开始指令结束, 子母线返回到主母线。

(5) 同一元件的线圈在不同的 STL 触点后可以多次使用, 但同一定时器不能在相邻的状态中使用。在同一程序段中, 同一状态器也只能使用一次。

3. 多分支状态转移图的处理

在状态转移图中, 存在多种工作顺序的状态流程图叫做分支、汇合流程图。分支、汇合流程又分为选择性分支和并行分支两种。

1) 选择性分支、汇合流程及其编程方法

选择性分支流程就是根据具体条件从多个分支中选择某一支执行, 其他的分支不执行。如图 5.39(a)所示。

从图中可以看出, 该状态转移图有两个分支, S21 为分支状态, 根据分支条件 X1、X4 不同状态选择执行分支中的一支。当 X1 为 ON 时进入状态 S22; 当 X4 为 ON 时进入状态 S24。X1、X2 不能同时为 ON。S26 为汇合状态, 可以由 X3、X6 任一状态驱动。

分支程序的编程原则是先集中处理分支, 然后再集中处理汇合状态。针对分支状态编程时, 先进行驱动处理(OUT Y1), 然后按照 S22、S24 的顺序进行处理; 汇合状态编程前依次对 S22、S23、S24、S25 状态进行输出处理编程, 然后按顺序从 S23、S25 向汇合状态 S26 转移编程。如图 5.39(b)、(c)所示。

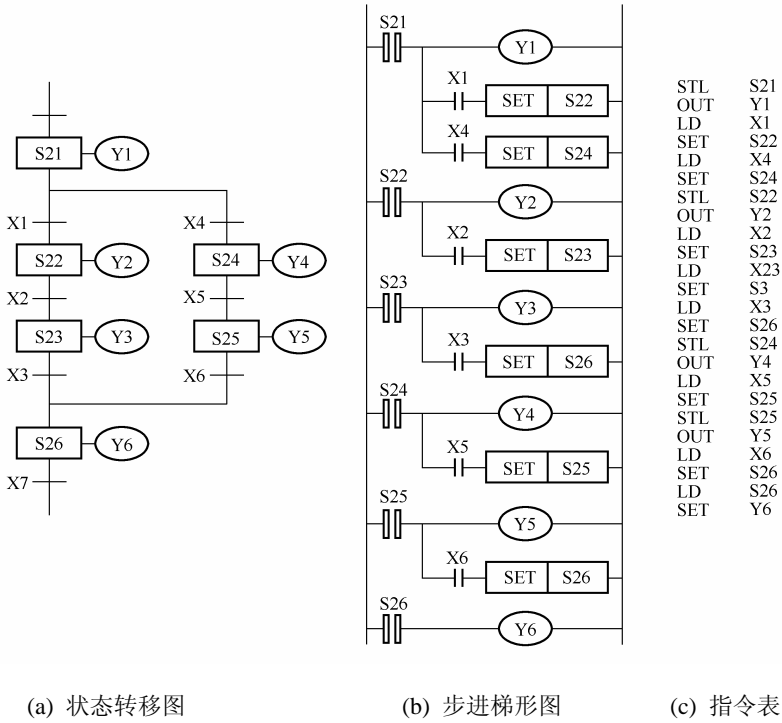


图 5.39 可选择的分支与汇合

2) 并行分支与汇合流程及其编程方法

并行分支就是满足条件后使多个分支同时执行，如图 5.40(a)所示。

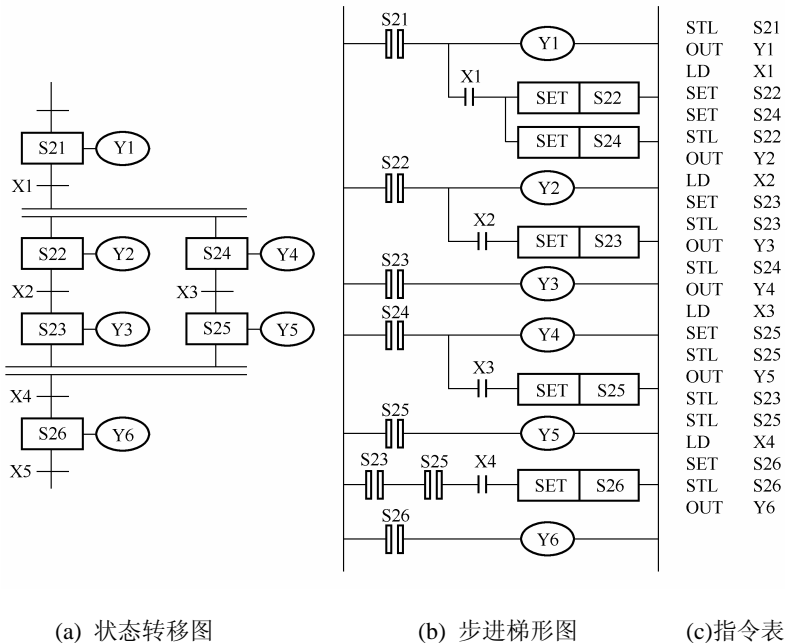


图 5.40 并行分支与汇合

并行分支的编程原则是先集中进行并行分支处理，再集中进行汇合处理。当转换条件 X1 接通时，由状态器 S21 分两路同时进入状态器 S22 和 S24，以后系统的两个分支并行工作，图 5.40(a)中水平双线强调的是并行工作，实际上与一般状态编程一样，先进行驱动处理，然后进行转换处理，从左到右依次进行。当两个分支都处理完毕后，S23、S25 同时接通，转换条件 X4 也接通时，S26 接通，同时 S23、S25 自动复位。多条分支汇合在一起，实际上是 STL 指令连续使用(在梯形图上是 STL 触点串联)。STL 指令最多可连续使用八次，即最多允许八条并行分支汇合在一起。其步进梯形图及指令表编程方法如图 5.40 (b)、(c) 所示。

5.4.4 编程实例

1. 三相异步电动机启/停控制

三相异步电动机的主电路如图 5.41(a)所示，其 PLC 的输入/输出接线图如图 5.41(b)所示，启动按钮 1SB 接在 X0，停止按钮 2SB 接在 X1，交流接触器 1KM 接于 Y0。根据要求编制的梯形图如图 5.41(c)所示。

三相异步电动机的启/停控制过程如下：当按下启动按钮 1SB 时，X0 接通，由于 2SB 没有按下，所以 X1 常闭触点保持接通，Y0 输出，接触器 1KM 线圈通电主触点闭合，电动机全电压启动，同时 Y0 的常开触点闭合保持 Y0 线圈输出实现自锁。需要停止时，按下停止按钮 2SB 时 X1 常闭触点断开，接触器 1KM 线圈断电主触点断开，电动机断电停车。

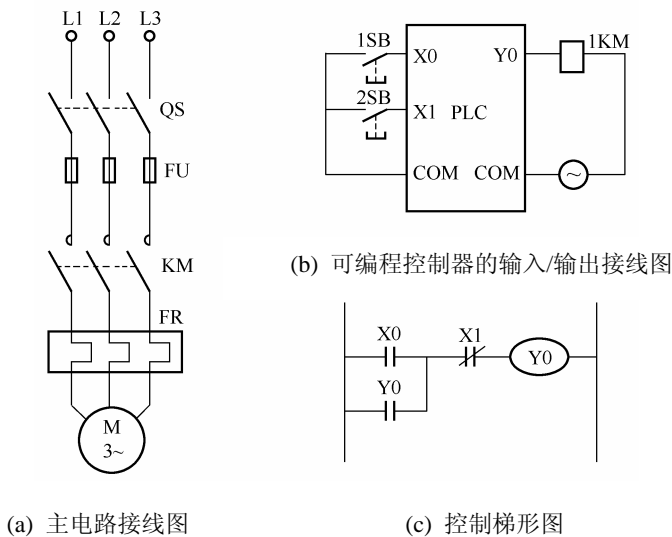


图 5.41 三相异步电动机的启停控制

2. 三相异步电动机正/反转控制

三相异步电动机的主电路如图 5.42(a)所示，其可编程控制器的输入/输出接线图如图 5.42(b)所示。正转按钮 1SB 接在 X0，停止按钮 2SB 接在 X1，反转按钮接在 X3，交流接触器 1KM 接于 Y0，交流接触器 2KM 接于 Y1。根据要求编制的梯形图如图 5.42(c)所示。

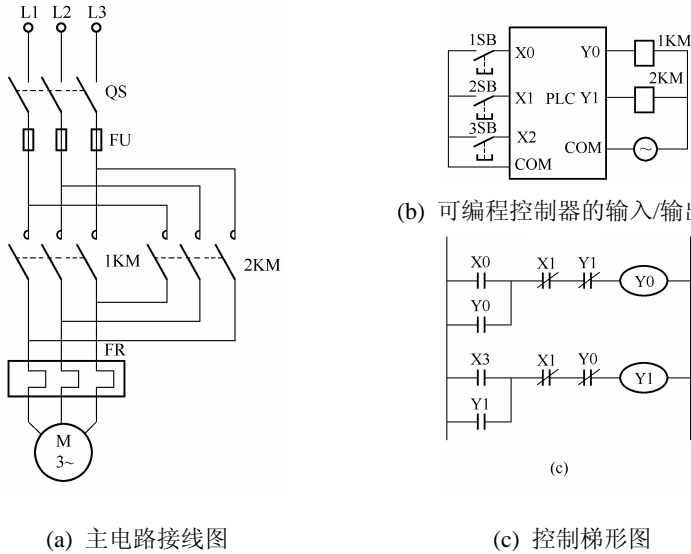


图 5.42 三相异步电动机的正转—停—反转控制

当按下正转按钮 1SB 时 X0 接通，由于 2SB 没有按下，所以 X1 常闭触点保持接通，同时因为输出继电器 Y1 没有输出，其常闭触点保持闭合，所以 Y0 输出，接触器 1KM 线圈通电主触点闭合，电动机正向启动，同时 Y0 的常开触点闭合保持 Y0 线圈输出实现自锁。Y0 的输出使其常闭触点断开从而阻止接触器 2KM 得电，实现互锁，防止因为 1KM、2KM 主触点同时闭合引起电源短路。

要反转时，先按下停止按钮 2SB，X1 常闭触点断开，输出继电器线圈 Y0 失电，接触器 1KM 断电，其主触点断开。当按下反转按钮 2SB 时 X1 接通，由于 X1 常闭触点闭合，同时因为输出继电器 Y0 没有输出，其常闭触点保持闭合，所以 Y1 输出，接触器 2KM 线圈通电主触点闭合，电动机反向启动，同时 Y1 的常开触点闭合保持 Y1 线圈输出实现自锁。Y1 的输出使其常闭触点断开从而阻止接触器 1KM 得电，实现互锁。

本例中采用的是电动机正转—停—反转控制，读者可自行编制电动机正转、反转直接切换的控制程序，而不需要改动硬件接线。

3. 台车往返控制

台车自动往返系统工况示意图如图 5.43 所示。某生产过程的控制工艺要求如下。

(1) 按下启动按钮 SB，台车电动机 M 正转，台车前进，碰到限位开关 SQ1 后，台车电动机 M 反转，台车后退。

(2) 台车后退碰到限位开关 SQ2 后，台车电动机 M 停转，台车停车，停 5s，第二次前进，碰到限位开关 SQ3，再次后退。

(3) 当后退再次碰到限位开关 SQ2 时，台车停止(或者继续下一个循环)。

根据上文表述可知，本系统虽然硬件比较简单，只有四个输入量和两个输出(输入/输出分配在图 5.43 中已表示)，但是其控制过程却比较复杂，尤其是 SQ1、SQ2 在两次被压下时起的作用不一样，采用基本梯形图编程实现比较困难，故采用步进梯形指令编制控制程序。

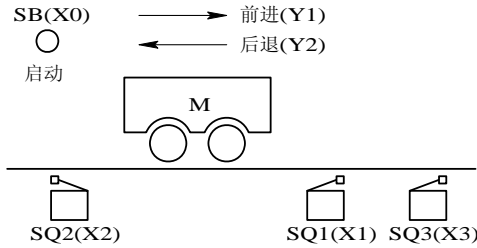


图 5.43 台车自动往返系统工况示意图

根据系统功能，整个系统动作分为初始状态、前进(工序一)、后退(工序二)、延时(工序三)、再前进(工序四)、再后退(工序五)五个状态，绘出台车流程图的状态转移图如图 5.44(a)所示。

在初始状态下，按下前进启动按钮 SB(X0 动合触点闭合)，则小车由初始状态转移到前进步，驱动对应的输出继电器 Y1，当小车前进至前限位 SQ1 时(X1 动合触点闭合)，则由工序一转移到工序二，驱动对应的输出继电器 Y2，小车后退。当后退至限位 SQ2 时(X2 动合触点闭合)，则由工序二转移到工序三，驱动对应的输出继电器 Y01，启动定时器开始计时 5s。5s 后定时器常开触点闭合，则由工序三转移到工序四，再次前进。当小车前进至前限位 SQ2 时(X3 动合触点闭合)，则由工序四转移到工序五，开始后退。当后退至限位 SQ2 时(X2 动合触点闭合)，则由工序五转到初始状态，等待再次按下启动按钮进行下一轮循环。

根据状态转移图绘制的步进梯形图如图 5.44(b)所示。

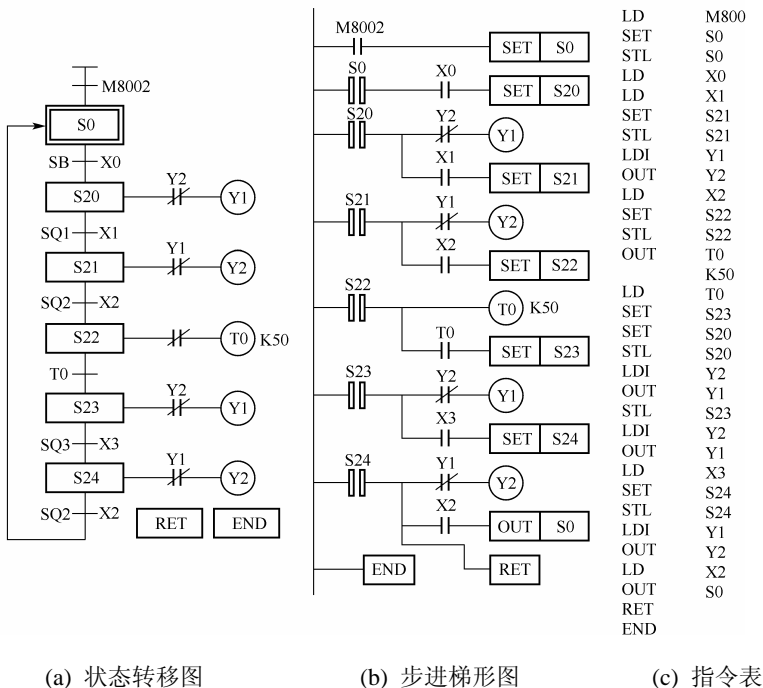


图 5.44 台车自动往返系统控制

5.5 可编程控制器的应用

5.5.1 可编程控制器控制系统设计的主要内容与方法

1. 可编程控制器控制系统设计的基本原则

在设计可编程控制器控制系统时，应遵循以下基本原则。

1) 最大限度地满足控制要求

充分发挥可编程控制器功能，最大限度地满足被控对象的控制要求，是设计中最重要的一条原则。设计人员要深入现场进行调查研究，收集资料。同时要注意和现场工程管理和技术人员及操作人员紧密配合，共同解决重点问题和疑难问题。

2) 保证系统安全可靠

保证可编程控制器控制系统能够长期安全、可靠、稳定运行，是设计控制系统的重要原则。

3) 力求简单、经济、使用与维修方便

在满足控制要求的前提下，一方面要注意不断扩大工程的效益，另一方面也要注意不断降低工程的成本，不宜盲目追求自动化和高指标。

4) 适应发展的需要

适当考虑到今后控制系统发展和完善的需要。

2. 可编程控制器控制系统设计的步骤

1) 分析被控对象并提出控制要求

详细分析被控对象的工艺过程及工作特点，了解被控对象机、电、液之间的配合，提出被控对象对可编程控制器控制系统的控制要求，确定控制方案，拟订设计任务书。

2) 确定输入/输出设备

根据系统的控制要求，确定系统所需的全部输入设备(如：按钮、位置开关、转换开关及各种传感器等)和输出设备(如：接触器、电磁阀、信号指示灯及其他执行器等)，从而确定与可编程控制器有关的输入/输出设备，以确定可编程控制器的输入/输出点数。

3) 选择可编程控制器

选择可编程控制器包括对可编程控制器的机型、容量、输入/输出模块、电源等的选择。

可编程控制器机型选择的基本原则是在满足功能要求及保证可靠、维护方便的前提下，力争最佳的性能价格比。选择时除了考虑产品的结构形式、安装方式、功能与速度要求、稳定性要求外，还应主要考虑以下几点。

(1) 输入/输出点数的选择。在满足控制要求的前提下力争使用的输入/输出点最少。一般需要加上 10%~15% 的裕量。

(2) 存储容量的选择。存储容量大小不仅与可编程控制器系统的功能有关，还与功能实现的方法、程序编写水平有关。一个有经验的程序员和一个初学者，在完成同一复杂功能时，其程序量可能相差 25% 之多。

在输入/输出点数确定的基础上，按公式存储容量(B)=开关量输入/输出点数×10+模拟量输入/输出通道数×100 估算存储容量后，再加 20%~30% 的裕量。在存储容量选择的

同时，在注意对存储器类型的选择。

(3) 机型尽量统一。机型统一可方便备品备件的采购和管理；有利于技术力量的培训和技术水平的提高，外部设备通用，资源可共享，易于联网通信。

4) 分配输入/输出点并设计可编程控制器外围硬件线路

分配输入/输出点：画出可编程控制器的输入/输出点与输入/输出设备的连接图或对应关系表。

可编程控制器外围硬件线路：画出系统其他部分的电气线路图，包括主电路和未进入可编程控制器的控制电路等。

由可编程控制器的输入/输出连接图和可编程控制器外围电气线路图组成系统的电气原理图。到此为止系统的硬件电气线路已经确定。

5) 程序设计及模拟调试

程序设计包括控制程序，初始化程序，检测、故障诊断和显示等程序，保护和连锁程序等的设计。

根据产生现场信号的方式不同，模拟调试有硬件模拟法和软件模拟法两种形式。

6) 硬件实施

硬件实施包括：设计控制柜和操作台等部分的电气布置图及安装接线图；设计系统各部分之间的电气互连图；根据施工图纸进行现场接线，并进行详细检查。

由于程序设计与硬件实施可同时进行，因此可编程控制器控制系统的设计周期可大大缩短。

7) 联机调试

联机调试是将通过模拟调试的程序进一步进行在线统调。联机调试过程应循序渐进，从可编程控制器只连接输入设备、再连接输出设备、再接上实际负载等逐步进行调试。如不符合要求，则对硬件和程序作调整。通常只需修改部分程序即可。

全部调试完毕后，将程序交付试运行。经过一段时间运行，如果工作正常、程序不需要修改，应将程序固化到 EPROM 中，以防程序丢失。

8) 整理和编写技术文件

技术文件包括设计说明书、硬件原理图、安装接线图、电气元件明细表、可编程控制器程序以及使用说明书等。

5.5.2 可编程控制器控制系统应用实例

1. 工艺要求及动作流程

某搬运机械手将物体由某点搬运到传送带上，如图 5.45 所示。

搬运机械手的动作要求如下。

(1) 当工人将工件放在传送点时，0S_Q 压下，表明有工件需要传送。

(2) 只要传送点一有工件，机械手手臂先下降(B 缸动作)至下限位(4S_Q 压下)，将其抓取(C 缸动作)。1s 后机械手上升(B 缸复位)至上限位(3S_Q 压下)，机械手左移(A 缸动作)至传送点上方(1S_Q 压下)，机械手臂再次下降(C 缸复位)后放开工件，1s 后机械手上升后右移(A 缸复位)至原点(2S_Q 压下)。

(3) 当机械手放下工件(5S_Q 被压下)上升至上限位点后，传动带电动机 M 启动，开始

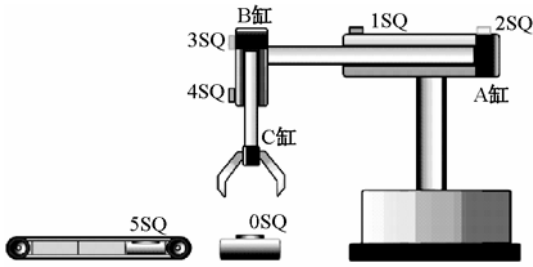


图 5.45 搬运机械手示意图

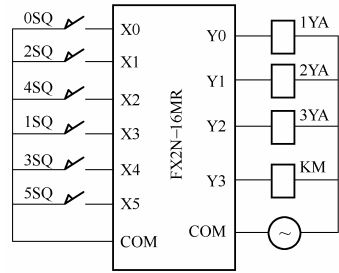


图 5.46 可编程控制器硬件接线图

传送工件，2s 后自动停止。机械手需在工件运走后才能下降将工件放下，否则需要等待。

2. 可编程控制器选型

本系统有输入信号六个，输出信号三个，均为开关量。根据输入/输出点数、类型及控制要求，同时考虑到维护、改造和经济性等诸多因素，可以选择 FX2N-16MR，这样共有八个输入点、八个输出点，可以满足控制要求。

3. 输入/输出点地址编号及硬件接线

将输入信号、输出信号按功能类型分配，与可编程控制器的输入/输出端一一对应连接，如图 5.46 所示。

4. 软件编制

根据系统要求可知，当系统开始运行时，机械手是在原点位置，用启动脉冲 M8002 直接使程序进入等待状态，M0 常开触点闭合。当有工件需要传送时，X0 常开触点闭合，系统进入下降状态，开始执行系统要求的功能。

当有工件在传送带上而且机械手已经到达上限位点时，启动传送带开始传送。传送带传输工件与机械手动作可以同时工作。

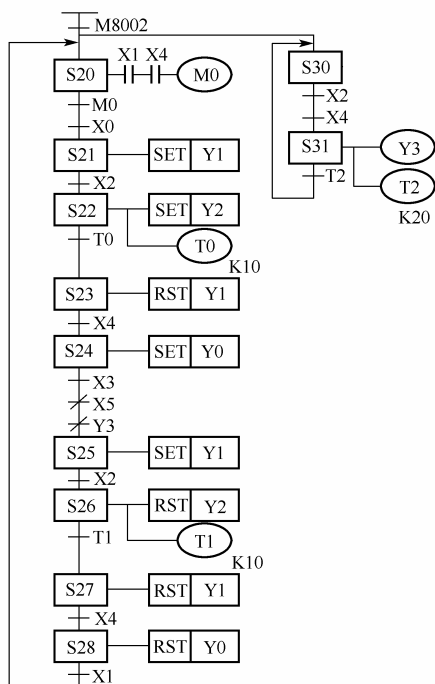
绘制的状态转移图如图 5.47(a)所示，步进梯形图如图 5.47(b)所示。根据步进梯形图写出的指令表见表 5-6。

表 5-6 系统指令表

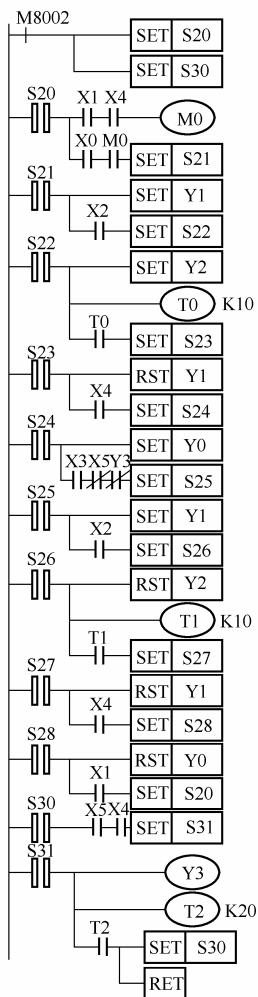
步序	指令	步序	指令	步序	指令	步序	指令
0	LD M8002	16	OUT T0	32	LD X2	48	STL S30
1	SET S20	17	K10	33	SET S26	49	LD X5
2	SET S30	18	LD T0	34	STL S26	50	AND X4
3	STL S20	19	SET S23	35	RST Y2	51	SET S31
4	LD X1	20	STL S23	36	OUT T1	52	STL S31
5	AND X4	21	RST Y1	37	K10	53	OUT Y3
6	OUT M0	22	LD X4	38	LD T1	54	OUT T2
7	LD X0	23	SET S24	39	SET S27	55	K20
8	AND M0	24	STL S24	40	STL S27	56	LD T2
9	SET S21	25	SET Y0	41	RST Y1	57	SET S30

(续)

步序	指令	步序	指令	步序	指令	步序	指令
10	STL S21	26	LD X3	42	LD X4	58	RET
11	SET Y1	27	ANI X5	43	SET S28	59	END
12	LD X2	28	ANI Y3	44	STL S28		
13	SET S22	29	SET S25	45	RST Y0		
14	STL S22	30	STL S25	46	LD X1		
15	SET Y2	31	SET Y1	47	SET S20		



(a) 状态转移图



(b) 步进梯形图

图 5.47 系统状态转移图和步进梯形图

思考题与习题

1. PLC 对输入信号的脉冲频率及宽度是否有要求？为什么？
2. 数字量输出模块有哪几种类型？它们各有什么特点？
3. 与继电器控制系统相比较，可编程控制器系统有哪些优点？
4. 为什么说可编程控制器是通用的工业控制计算机？和一般的计算机系统相比，PLC 有哪些特点？
5. FX2N 系列的 PLC 共有基本指令各自的功能是什么？
6. STL 指令与 LD 指令有何区别？请举例说明。
7. 说明状态编程思想的特点及应用场合。
8. 试述可编程控制器的特点。
9. 构成可编程控制器的主要部件有哪几个？各部分主要作用是什么？
10. 简述可编程控制器的工作方式和工作过程。
11. 列举 FX2N 系列可编程控制器常用的软元件。
12. 绘制梯形图的原则是什么？
13. 举例说明可编程控制器中定时器的使用方法。
14. 一台电动机要求在按下启动按钮后，电动机运行 40s，停 5s，重复三次后，电动机自动停止。试设计硬件线路图并编写梯形图控制程序。要求有手动停机按钮和过载保护。
15. 写出图 5.48 所示梯形图对应的语句表。

初始状态时某压力机的冲压头停在上面，限位开关 X2 为 ON，按下启动按钮 X0，输出继电器 Y0 控制的电磁阀线圈通电，冲压头下行。压到工件后压力升高，压力继电器动作，使输入继电器 X1 变为 ON，用 T0 保压延时 5s 后，Y0 为 OFF，Y1 为 ON，上行电磁阀线圈通电，冲压头上行。返回到初始位置时碰到限位开关 X2，系统回到初始状态，Y1 为 OFF，冲压头停止运行。画出控制系统的顺序功能图。

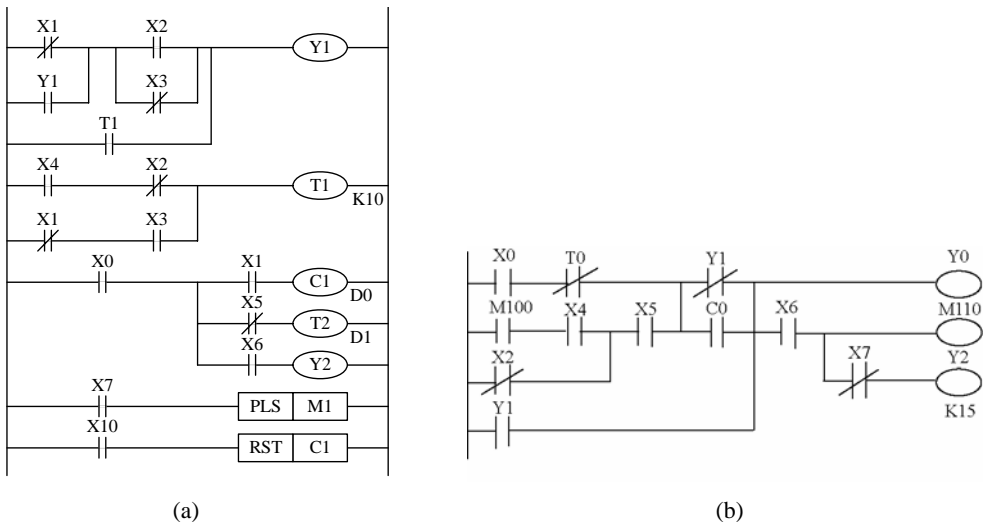


图 5.48 梯形图

16. 有一小车运行过程如图 5.49 所示。小车原位在后退终端，当小车压下后限位开关 SQ1 时，按下启动按钮 SB，小车前进，当运行至料斗下方时，前限位开关 SQ2 动作，此时打开料斗给小车加料，延时 8s 后关闭料斗，小车后退返回，SQ1 动作时，打开小车底门卸料，6s 后结束，完成一次动作。如此循环。请用状态编程思想设计其状态转移图。

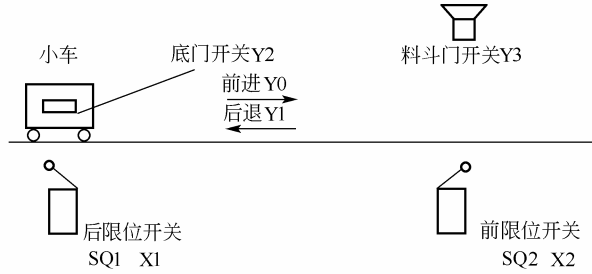


图 5.49 小车运行过程

第 6 章 变流技术基础

教学提示：半导体器件目前正向两个方面发展：向集成电路方面发展，形成微电子学；向电力半导体器件方面发展，形成电力电子学。电力电子学的任务是利用电力半导体器件和线路来实现电功率的变换和控制。晶闸管(SCR)是 1958 年出现，在 20 世纪 60 年代发展起来的一种新型电力半导体器件，晶闸管的出现起到了弱电控制与强电输出之间的桥梁作用。晶闸管的出现到现在不到 50 年，由于它有一系列的优点，应用非常普遍。

教学要求：本章要求学生掌握晶闸管的基本工作原理、伏安特性和保护措施；掌握单相可控整流电路和三相可控整流电路的工作原理及其特点；了解单结晶体管移相触发电路的基本工作原理；了解逆变器的工作原理及控制。

6.1 电力电子元件

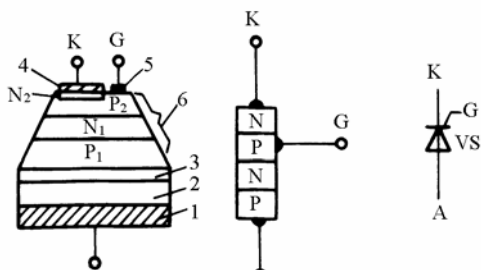
6.1.1 晶闸管(SCR)

1. 晶闸管的结构和符号

晶闸管是在半导体二极管、三极管之后，于 1958 年出现的一种新型的大功率半导体器件，它是一种可控制的硅整流元件，俗称可控硅。

晶闸管分为螺栓形和平板形两种。螺栓形带有螺栓的一端是阳极 A，可与散热器固定，另一端的粗引线是阴极 K，细线是控制极(又称门极)G，这种结构更换元件很方便，用于 100A 以下的元件。平板形，中间的金属环是控制极 G，离控制极远的一面是阳极 A，近的一面是阴极 K，这种结构散热效果比较好，用于 200A 以上的元件。

晶闸管是由四层半导体构成的。图 6.1(a)所示为螺栓形晶闸管的内部结构，它由单晶硅薄片 P₁、N₁、P₂、N₂ 四层半导体材料叠成，形成三个 PN 结。图 6.1(b)和(c)所示分别为其示意图和表示符号。



2. 晶闸管的工作原理

根据晶闸管的内部结构，可以把它等效地看成是两只晶体管的组合，其中，一只为PNP型晶体管VT₁，另一只为NPN型晶体管VT₂，中间的PN结为两管共用，如图 6.2 所示。

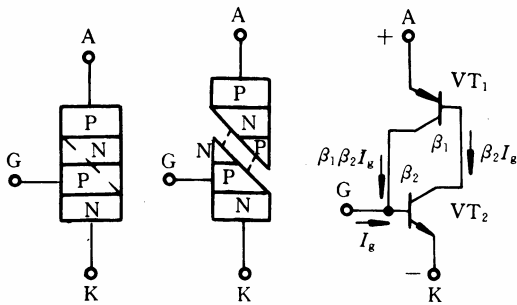


图 6.2 晶闸管的工作原理

当晶闸管的阳极与阴极之间加上正向电压时，VT₁和VT₂都承受正向电压，如果在控制极上加一个对阴极为正的电压，就有控制电流 I_g 流过，它就是VT₂的基极电流 I_{b2} 。经过VT₂的放大，在VT₂的集电极产生电流 $I_{c2} = \beta_2 I_{b2} = \beta_2 I_g$ ，而这个 I_{c2} 又恰恰是VT₁的基极电流 I_{b1} ，该电流再经过VT₁的放大作用，便得到VT₁的集电极电流 $I_{c1} = \beta_1 I_{b1} = \beta_1 \beta_2 I_g$ 。由于VT₁的集电极和VT₂的基极是接在一起的，所以这个电流又流入VT₂的基极，再次放大。如此循环下去，形成了强烈的正反馈，即 $I_g = I_{b2} \rightarrow I_{c2} = \beta_2 I_{b2} = I_{b1} \rightarrow I_{c1} = \beta_1 \beta_2 I_g$ ，直至元件全部导通为止。这个导通过程是在极短的时间内完成的，一般不超过几微秒，称为“触发导通过程”。在晶闸管导通后，VT₂的基极始终有比控制电流 I_g 大得多的电流流过，因此，晶闸管一经导通，控制极即使去掉控制电压，晶闸管仍可保持导通。

当晶闸管阳极与阴极间加反向电压时，VT₁和VT₂便都处于反向电压作用下，它们都没有放大作用，这时即使加入控制电压，导通过程也不可能产生。如果起始时，控制电压没加入或极性接反，由于不可能产生起始的 I_g ，这时即使阳极加上正向电压，晶闸管也不能导通。

3. 晶闸管的伏安特性

晶闸管的阳极电压与阳极电流的关系，称为晶闸管的伏安特性，其曲线表示如图 6.3 所示。晶闸管的阳极与阴极间加上正向电压时，在晶闸管控制极开路($I_g=0$)情况下，开始元件中只有很小的电流流过，晶闸管阳极与阴极间表现出很大的电阻，处于截止状态。当阳极电压上升到某一数值时，晶闸管突然由阻断状态转化为导通状态。这时的阳极电压称为断态不重复峰值电压(U_{DSM})，即正向转折电压(U_{BO})。导通后，元件中流过较大的电流，其值主要由负载决定。在减小阳极电源电压或增加负载电阻时，阳极电流随之减小，当阳极电流小于维持电流 I_H 时，晶闸管便从导通状态转化为阻断状态。由图 6.2 可看出，晶闸管

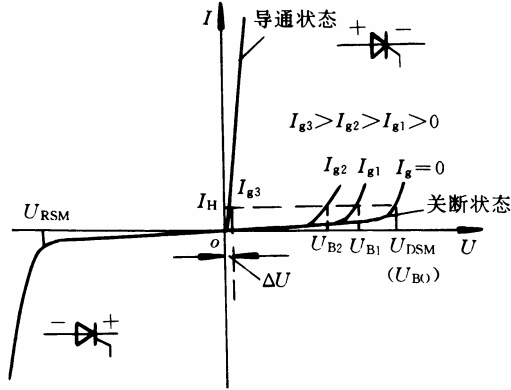


图 6.3 晶闸管伏安特性曲线

在晶闸管阳极与阴极间加上反向电压时，开始晶闸管处于反向阻断状态，只有很小的反向漏电流流过。当反向电压增大到某一数值时，反向漏电流急剧增大，这时，所对应的电压称为反向不重复峰值电压(U_{RSM})，或称反向转折(击穿)电压(U_{BR})。可见，晶闸管的反向伏安特性与二极管反向特性类似。

4. 晶闸管的主要参数

为了正确选用晶闸管器件，不仅需要了解晶闸管的伏安特性，而且必须要掌握晶闸管的主要参数。

1) 额定电压：正、反向重复峰值电压 U_{DRM} 、 U_{RRM}

正、反向重复峰值电压是指在控制极断路的条件下，可以重复加在晶闸管两端的正向或反向峰值电压，其数值规定比正向转折电压或反向击穿电压小 100V。由于瞬时过电压也会使晶闸管遭到破坏，因而选用时，额定电压应为正常工作峰值电压的 2~3 倍，作为安全系数。

2) 额定电流：通态平均电流 I_T

在环境温度不大于 40℃和标准散热及全导通的条件下，晶闸管元件可以连续通过的工频正弦半波电流(在一个周期内)的平均值，称为额定通态平均电流 I_T ，简称为额定电流。需要指出的是，晶闸管的发热主要是由通过它的电流有效值决定的。

正弦半波电流的平均值

$$I_T = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} I_m \sin \omega t d(\omega t) = \frac{I_m}{\pi}$$

而正弦半波电流的有效值

$$I_e = \sqrt{\frac{1}{2} \int_0^{\pi} I_m^2 \sin^2 \omega t d(\omega t)} = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$$

可见,晶闸管允许正向通过的电流有效值 I_c 和它的额定通态平均电流 I_T 之间的数量关系为 $I_c=1.57I_T$ 。例如,对于一个额定电流 I_T 为100A的晶闸管,其允许通过的电流有效值为157A。

由于晶闸管的电流过载能力比电动机、电器小得多,为确保安全可靠地工作,在选用晶闸管通态平均电流时,根据实际最大电流计算后还要乘以1.5~2倍,使其有一定的电流裕量。

3) 维持电流 I_H

在规定的环境温度和控制极断路时,维持元件继续导通的最小电流称维持电流 I_H 。一般为几十毫安,其数值与元件的温度成反比,在120℃时的维持电流约为25℃时的一半。当晶闸管的正向电流小于这个电流时,晶闸管将自动关断。

4) 擎住电流 I_L

擎住电流是晶闸管刚从断态转入通态并移去触发信号后,能维持导通所需的最小电流。对同一个晶闸管来说,一般 I_L 为 I_H 的2~4倍。

6.1.2 功率晶体管(GTR)

功率晶体管通常用于开关状态。当功率晶体管饱和导通时,其正向压降为0.3V~0.8V,而晶闸管一般为1V左右。因此,功率晶体管中的功率损耗比同样功率等级的晶闸管低得多。同时,当功率晶体管基极电流消失,或反向时,功率晶体管立即截止,即具有自关断能力,因而实际上不存在关断问题,也不需要昂贵而复杂的换相电路。另外,功率晶体管能在较高的频率下工作。因此,功率晶体管在变流技术中应用越来越广泛。自20世纪80年代以来,在中、小功率范围内取代晶闸管的,主要是功率晶体管。

现有的功率晶体管的电压和电流额定值还没有晶闸管那么高,单只功率晶体管器件安全使用的最大定额为1400V和400A。而且功率晶体管不具备承受浪涌电流的能力,允许的电流变化率低。同时,要保持功率晶体管处于导通状态,需要连续通过基极电流。在强电流器件中,基极-集电极电流增益只有十倍至几十倍,因此,为了保持器件处于导通状态,基极电路中的功率损耗相当大。目前,已生产出功率晶体管集成组合器件,一种是单片达林顿(Darlington)晶体管,一种是由几个达林顿晶体管构成的功率晶体管模块。功率晶体管组合器件使其基极驱动电流大大减小,它已在直流脉宽调速和交流矢量控制的PWM调速中得到广泛应用。为了更进一步减小驱动电流和提高开关速度,在20世纪70年代末又出现了电压驱动的快速型功率晶体管,适合于高频功率变换器。

目前,功率晶体管主要应用于直传动、开关式稳压电源和逆变系统中。

6.1.3 绝缘栅双极晶体管(IGBT)

IGBT也是三端器件,具有栅极G、集电极C和发射极E。它是一种场控器件,其导通和关断是由栅极与发射极之间的电压决定的。当栅极与发射极之间的电压大于其开启电压时,IGBT导通;当栅极与发射极之间施加反向电压或不加信号时,IGBT关断。

IGBT是1982年试制成功的,1986年开始生产。擎住效应曾经是限制IGBT电流容量

间断电源(UPS), 感应加热装置, 空调、电子炉、烹调器等家用电器的控制。

6.1.4 电力电子器件的保护

在电力电子电路中除了要求电力电子元件参数选择合适之外, 采用合适的过电流保护、过电压保护也是非常必要的。

1. 晶闸管的过电流保护

晶闸管电路发生过电流的主要原因是: 负载端短路或过载; 电路中某一晶闸管击穿损坏而短路, 造成其他元件的过电流; 触发电路工作不正常或受干扰, 使晶闸管误触发引起过电流。晶闸管器件允许在一个较短的时间内承受一定的过电流, 过电流保护就是为当发生过电流时, 在允许的时间内切断过电流电路, 防止元件被过电流产生的高温烧坏的目的而设置的功能。

晶闸管元件的过电流保护措施主要有以下三种。

1) 设置快速熔断器

快速熔断器在电路中可以接在交流输入端或直流输出端或与晶闸管串联, 如图 6.4 所示。

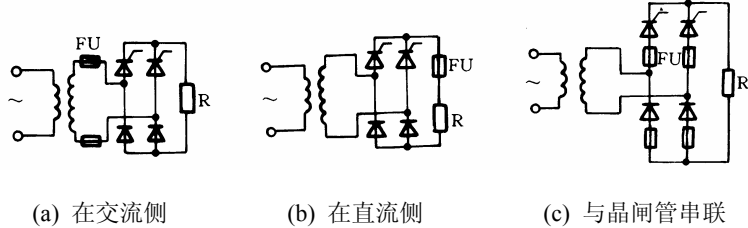


图 6.4 快速熔断器作过电流保护

2) 装设过流继电器及快速开关

在直流侧装设过流继电器, 或在交流侧经电流互感器装设过流继电器, 均可以保护晶闸管器件。

3) 整流触发脉冲移相保护

当整流端负载出现严重过载或短路时, 利用过电流信号, 把晶闸管器件的触发脉冲相后移, 使晶闸管的导通角减小或者停止触发, 这对于过载或短路开始时浪涌电流不大的情况是适用的。

以上所述保护措施在一个装置中可以选用其中一项也可以选用几项。

2. 晶闸管的过电压保护

晶闸管元件的过电压能力极差, 当元件承受的反向电压超过其反向击穿电压时, 即使时间极短, 也会使元件反向击穿损坏, 因此, 必须考虑过电压保护。

产生过电压主要是由电源变压器一次侧的开断与接通、直流侧负载电感的切断、快速

所示，还可与晶闸管并联，用以保护晶闸管本身免受过高电压损坏。

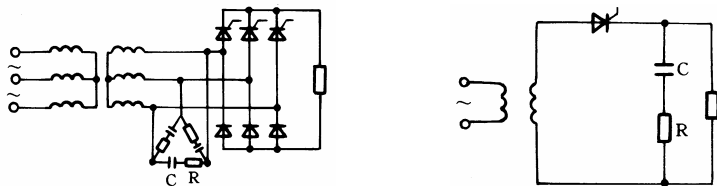


图 6.5 交流侧阻容电路过电压保护 图 6.6 直流侧阻容电路过电压保护

硒堆就是成组串联的硒整流片。虽然硒堆较阻容元件体积大、成本高，但它有较大的吸收过电压能力，因此，较广泛地应用于容量较大的电路中。

金属氧化物压敏电阻的体积小，伏安特性曲线很陡，它对浪涌过电压抑制能力很强，反应也快，是一种比较好的过电压保护元件，完全可以用来取代硒堆。

硒堆和压敏电阻在晶闸管电路中的接法与阻容保护装置大体相同，只是在交流侧常接成 Y 形。

6.2 晶闸管可控整流电路

由晶闸管组成的可控整流电路,可以很方便地把交流电变成大小可调的直流电，具有体积小、质量轻、效率高及控制灵活等优点，应用非常广泛。可控整流电路依照所用交流电源的相数和电路的结构，可分为单相半波、单相桥式、三相半波、三相桥式等。

6.2.1 单相半波可控整流电路

1. 带电阻性负载的单相半波可控整流电路

图 6.7 绘出了单相半波可控整流电路带电阻性负载时的电路图，以及电压、电流波形图。阳极电压由负变正的过零点称为自然换向点，过该点二极管自然导通。触发脉冲发出的时刻与自然换向点之间的夹角定义为控制角。图 6.7 中， α 为控制角， θ 为导通角。控制角 α 总是滞后于自然换向点，因此又称为滞后角。导通角 θ 是晶闸管在一个周期时间内导通的电角度。对单相半波可控整流而言， α 的移相范围是 $0 \sim \pi$ ，而对应的 θ 的变化范围为 $\pi \sim 0$ 。由图 6.7 可见， $\alpha + \theta = \pi$ 。

当不加触发脉冲信号时晶闸管不导通，电源电压全部加于晶闸管上面，负载上电压为零(忽略漏电流)。这时，晶闸管承受的最高正、反向电压为整流变压器二次侧交流电压的最大值 $\sqrt{2} U_2$ 。当 $\omega t = \alpha (0 < \alpha < \pi)$ 时，晶闸管上电压为正，当控制极加上触发脉冲信号时，晶闸管触发导通，电源电压将全部加于负载上(忽略晶闸管的管压降)。当 $\omega t = \pi$ 时，电源电压从正变为零，晶闸管内流过的电流小于维持电流而关断，之后，晶闸管就承受电源的反向电压。直至下个周期触发脉冲再次加到控制极上时，晶闸管重新导通，改变 α 的大小可

输出电压平均值的大小可由式(6-1)求得

$$U_d = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} \sqrt{2}U_2 \sin \omega t d(\omega t) = 0.45U_2 \frac{1 + \cos \alpha}{2} \quad (6-1)$$

负载电流平均值的大小由欧姆定律决定，其值为

$$I_d = \frac{U_d}{R} \quad (6-2)$$

2. 带感性负载的单相半波可控整流电路

感抗 ωL 和电阻 R 的大小相比不可忽略的负载称为感性负载。这类负载有：各种电动机的励磁线圈、整流输出接电抗器的负载等。可控整流电路带感性负载时的工作情况与电阻性负载有很大不同，为了便于分析，把电感与电阻分开，如图6.8所示。

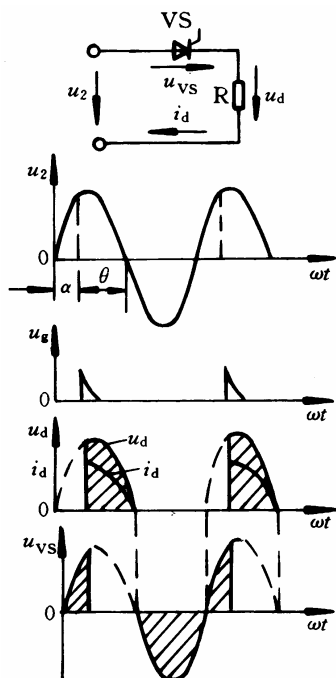


图 6.7 带电阻性负载的单相半波整流电路

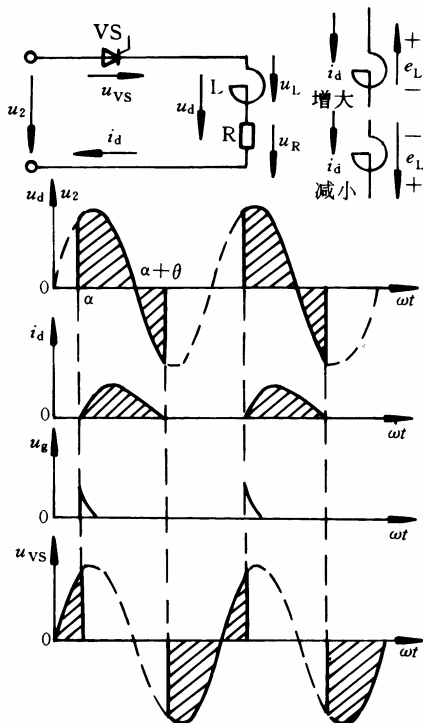


图 6.8 带感性负载的单相半波整流电路

由于电感具有阻碍电流变化的作用，当电流上升时，电感两端的自感电动势 e_L 阻碍电流的上升，所以，晶闸管触发导通时，电流要从零逐渐上升，随着电流的上升，自感电动势逐渐减小，这时在电感中便储存了磁场能量。当电源电压下降以及过零变负时，电感中电流在变小的过程中又由于自感效应，产生方向与上述相反的自感电动势 e_L 来阻碍电流减

由此可见，在单相半波可控整流电路中，当负载为感性时，晶闸管的导通角 θ 将大于 $\pi - \alpha$ ，也就是说，在电源电压为负时仍然可能继续导通。负载电感越大，导通角 θ 越大，每个周期中负载上的负电压所占的比重就越大，输出电压和输出电流的平均值也就越小。所以，单相半波可控整流电路用于大感性负载时，如果不采取措施，负载上就得不到所需要的电压和电流。

3. 续流二极管的作用

为了提高大电感负载时的单相半波可控整流电路整流输出平均电压，可以采取使电源的负电压不加载于负载上，如可在负载两端并联一只二极管VD，如图6.9所示。当晶闸管导通时，若电源电压为正，二极管VD不导通，负载上电压波形与不加二极管VD时相同，当电源电压变负时，VD导通，负载上由电感维持的电流流经二极管，此二极管称为续流二极管。续流二极管导通时，晶闸管承受反压自行关断，没有电流流回电源，负载两端电压仅为续流二极管管压降，接近于零，此时，由电感释放出的能量消耗在电阻上。有了续流二极管，输出电压 u_d 与 α 的关系也与式(6-1)一样。但负载电流的波形与电阻性负载时有很大不同，如图6.9所示。负载电流 i_d 在晶闸管导通期间由电源提供，而当晶闸管关断时，则由电感通过续流二极管来提供。当 $\omega L \geq R$ 时，电流的脉动很小，所以，这时电流波形可以近似地看成是一条平行于横轴的直线。

若负载电流的平均值为 I_d ，则流过晶闸管的电流平均值与流过续流二极管的电流平均值分别为

$$I_{dVT} = \frac{\theta}{2\pi} I_d \quad (6-3)$$

$$I_{dVD} = \frac{\theta}{2\pi} I_d \quad (6-4)$$

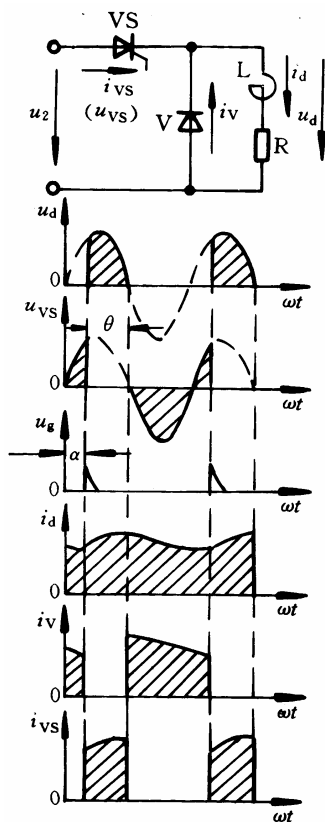


图 6.9 有续流二极管的波形图

6.2.2 单相桥式可控整流电路

1. 单相半控桥式整流电路

在不可控单相桥式整流电路中，把其中两只二极管换成晶闸管就组成了半控桥式整流电路，如图6.10所示。这种电路在中小电流容量场合应用很广，它的工作原理如下：当电源1端为正的某一时刻，触发晶闸管VT₁，电流途经图中实线箭头所示。这时VT₂及VD₁均

源波形与电压波形相似。晶闸管在 $\omega t = \alpha$ 时触发导通，当电源电压过零变负时，电流降到零，晶闸管关断。输出电压平均值 U_d 与控制角 α 的关系为

$$U_d = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} \sqrt{2} U_2 \sin \omega t d(\omega t) = 0.9 U_2 \frac{1 + \cos \alpha}{2} \quad (6-5)$$

在桥式整流电路中，元器件承受的最大反向电压是电源电压的峰值。

2) 电感性负载

如图 6.11 所示的单相半控桥式整流电路在电感性负载时也采用加接续流二极管的措施。有了续流二极管，当电源电压降到零时，负载电流流经续流二极管，晶闸管因电流为零而关断，不会出现失控现象。

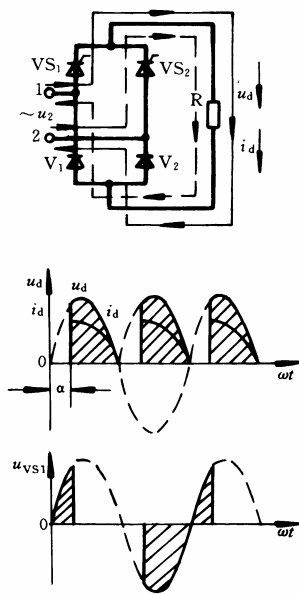


图 6.10 单相半控桥式电路带电阻性负载

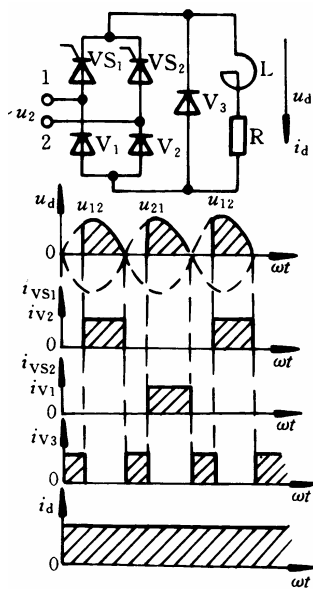


图 6.11 单相半控桥式电路带电感性负载

若晶闸管的导通角为 θ ，流过每只晶闸管的平均电流为 $\frac{\theta}{2\pi} I_d$ ，流过续流二极管的平均

电流为 $\frac{\pi - \theta}{\pi} I_d$ (导通角 θ 的单位为弧度，用 rad 表示)。

3) 反电动势负载

当整流电路输出接有反电动势负载时，只有当电源电压的瞬时值大于反电动势，同时又有触发脉冲时，晶闸管才能导通，整流电路才有电流输出。在晶闸管关断的时间内，负载上保留原有的反电动势。桥式整流电路接反电动势负载时，输出电压、电流波形如图 6.12 所示。负载两端的电压平均值比电阻性负载时高。例如，直接由电网 220V 电压经桥式整

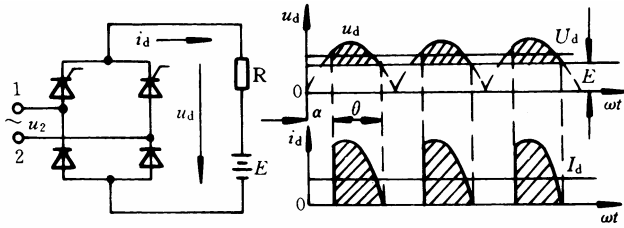


图 6.12 单相半控桥式电路带反电动势负载

当整流输出直接加于反电动势负载时，输出平均电流为 $I_d = (U_d - E)/R$ 。其中， $(U_d - E)$ 即图 6.12 中斜线阴影部分的面积对一周期取平均值。因为导通角小，导电时间短，回路电阻小，所以，电流的幅值与平均值的比值相当大，晶闸管器件工作条件差，晶闸管必须降低电流定额使用。另外，对于直流电动机来说换向器换向电流大，易产生火花，对于电源则因电流有效值大，要求的容量也大，因此，对于大容量电动机或蓄电池负载，常常串联电抗器，用以平滑电流的脉动，如图 6.13 所示。

2. 单相全控桥式整流电路

单相全控桥式整流电路如图 6.14 所示。把半控桥中的两只二极管用两只晶闸管代替即构成全控桥。带电阻性负载时，电路的工作情况与半控桥没有什么区别，晶闸管的控制角移相范围也是 $0 \sim \pi$ ，输出平均电压、电流的计算公式也与半控桥相同，所不同的仅是全控桥每半个周期要求触发两只晶闸管。带电感性负载且没有续流二极管的情况下，输出电压的瞬时值会出现负值，其波形如图 6.14 所示。这时输出电压平均值为

$$U_d = 0.9 U_2 \cos \alpha \quad (0 \leq \alpha \leq \pi/2) \quad (6-6)$$

在全控桥中元件承受的最大正、反向电压是交流电压 u_2 的峰值。

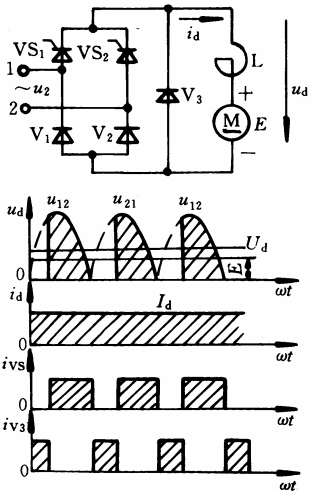
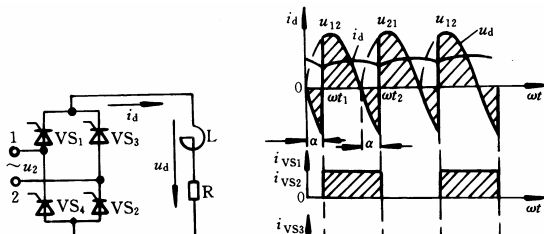


图 6.13 反电动势负载串联电抗器并续流二极管时的电压电流波形



在一般电阻性负载的情况下，由于本线路不比半控桥整流优越，但比半控桥线路复杂，所以，一般采用半控桥线路。全控桥电路主要用于电动机需要正/反转的逆变电路中。

【例 6.1】 一台小型电阻炉，需要可调的直流电源供电，调节范围：电压 $U_o=0\sim 180\text{V}$ ，电流 $I_o=0\sim 10\text{A}$ 。现采用单相半控桥式整流电路，求最大电压和电流的有效值，并选择整流元件。

解： 在本例中可以不用整流变压器，将电阻炉直接接到 220V 的交流电源上。

负载电阻 $R_L=U_o/I_o=180/10=18\ \Omega$

交流电流有效值 $I=U/R_L=220/18=12.2\text{A}$

交流电压峰值 $U_m=1.414U_o=1.414\times 220=311\text{V}$

额定电压取大于 $2U_m=622\text{V}$

流过晶闸管和整流二极管的平均电流

$$I_{V1}=I_V=I_o/2=10/2=5\text{A}$$

额定电流取 $2I_V=2\times 5=10\text{A}$

晶闸管选择 KP-10/700

二极管选择 2CZ-10/400

6.2.3 三相半波可控整流电路

1. 电阻性负载

三相半波可控整流带电阻性负载的电路图如图 6.15 所示。整流变压器一次侧连接成三角形，给三次和三次倍数的谐波提供通路；二次侧连接成星形，有个公共零点“0”，所以也叫三相零式电路。晶闸管向负载电阻 R 供给直流电流，改变触发脉冲的相位即可以获得大小可调的直流电压。

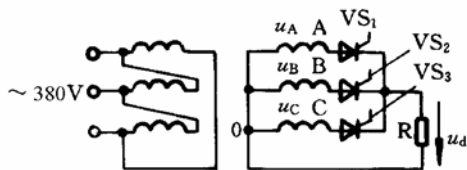


图 6.15 三相半波可控整流电路带电阻性负载

三相电源电压的波形如图 6.16 所示，在这里是以相电压来分析。交流电压在正半波的两个交点 1、2、3 分别为三个晶闸管的自然换相点。可以看出，对于 VT_1 、 VT_2 、 VT_3 ，只有在 1、2、3 点之后对应于该元器件承受正向电压期间来触发脉冲，该晶闸管才能触发导通，对三相可控整流而言，控制角 α 就是从自然换相点算起的。当晶闸管没有触发信号时，晶闸管可能承受的最大反向电压为线电压的峰值，即 $\sqrt{6}U_2$ 。现按不同控制角 α 分下列三种情况进行讨论。

晶闸管的导通角为 $2\pi/3$ ，要求触发脉冲间隔也为 $2\pi/3$ 。从这里可以看出，当三只晶闸管共阴极连接时，哪一相电压最高，触发脉冲来到时，与那一相相连接的晶闸管就导通，这只管子导通后将使其他管子承受反压而处于阻断状态。电阻性负载时，电流波形与电压波形相似。

(2) 当 $0 < \alpha \leq \pi/6$ 时，图 6.17 所示为 $\alpha = \pi/6$ 时的输出电压波形图。 u_A 使 VT₁ 上电压为正，若在 t_1 时刻对 VT₁ 控制极加触发脉冲，VT₁ 就立即导通，而且在 u_A 为正时维持导通。直到 t_2 时刻，对 VT₂ 控制极加了触发脉冲，VT₂ 在 u_B 正向阳极电压作用下导通，迫使 VT₁ 承受反向电压而关断。同理，到 t_3 时刻由于 VT₃ 导通而迫使 VT₂ 关断，依次类推。在一个周期内三相轮流导通，负载上得到脉动直流电压 u_d ，其波形是连续的。电流波形与电压波形相似，这时，每只晶闸管导通角为 120° ，负载上电压平均值与 α 的关系为 (U_2 为二次侧相电压有效值)

$$U_d = \frac{1}{2\pi/3} \int_{(\pi/6+\alpha)}^{(5\pi/6+\alpha)} \sqrt{2}U_2 \sin \omega t d(\omega t) = 1.17U_2 \cos \alpha \quad (6-7)$$

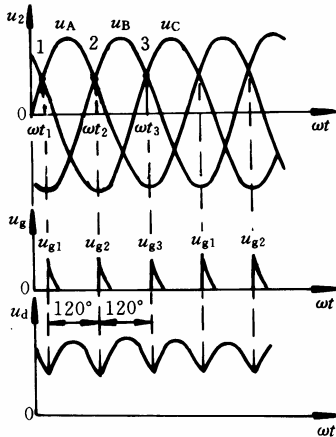


图 6.16 三相半波整流电路电压波形 ($\alpha = 0$)

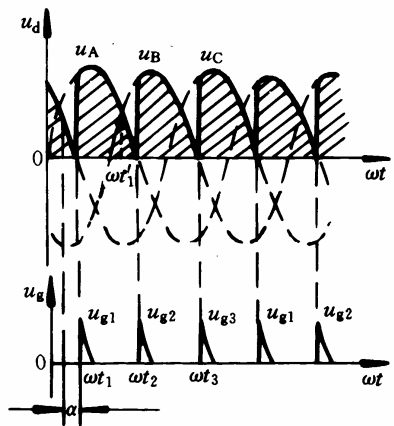


图 6.17 三相半波可控整流电路波形 ($\alpha = \pi/6$)

(3) 当 $\alpha > \pi/6$ 时，三相仍轮流导通，但是，负载上电压的波形是断续的。所以，三相半波可控整流电路，其 α 的移相范围为 $0 \sim 5\pi/6$ 。

总之，三相半波可控整流电路在带电阻性负载情况下，当 α 在 $0 \sim 5\pi/6$ 内移相时，输出平均电压由最大值 $1.17U_2$ 下降到零，输出电流的平均值为 $I_d = U_d/R$ ，流过每只晶闸管器件的电流平均值为 $I_d/3$ 。

2. 电感性负载

带电感性负载的情况如图 6.18 所示。在 VT₁ 导通时，电源电压 u_A 加到负载上，当 $t=t_1$ 时， $u_A=0$ ，由于自感电动势的作用，电流的变化将落后于电压的变化，所以 $t=t_1$ 时负载电流 i_d 并不为零。若由感 L 足够大，VT₁ 一直导通至 t_2 时刻，当 VT₂ 控制极来触发脉冲，使 VT₂ 导通

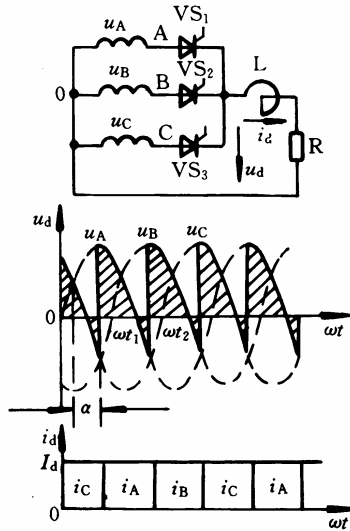


图 6.18 三相半波可控整流电路带感性负载的主电路 and 波形

6.2.4 三相桥式可控整流电路

图 6.15 所示三相半波可控整流电路中，三只晶闸管的阴极是接在一起的，这种整流电路叫共阴极组的整流电路，如果把三只晶闸管的阳极接在一起，则称为三相共阳极组整流电路。把这两组可控整流电路串联起来，这时，负载上的输出电压等于共阴极组和共阳极组的输出电压之和。若将变压器的两组二次绕组共用一个绕组，如图 6.19 所示，这就是三相桥式全控整流电路。其中，晶闸管 VT_1 、 VT_3 、 VT_5 组成共阴极组，晶闸管 VT_2 、 VT_4 、 VT_6 组成共阳极组。晶闸管器件的编号是按导电顺序进行编制的。

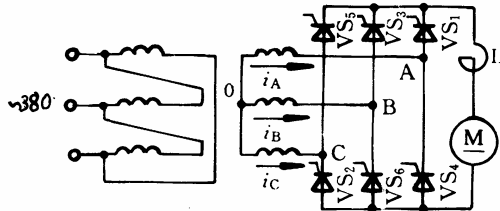


图 6.19 三相桥式可控整流电路

在工业应用中，三相桥式全控整流电路一般带反电动势负载，如直流电动机的电枢。在与电动机连接时总是串联一定的电感，以减小电流的脉动和保证电流连续，这时负载的性质可以看作是电感性的。在电感性负载的情况下，如果对共阴极组及共阳极组晶闸管同时进行控制，控制角为 α ，那么，由于三相全控桥式整流电路就是两组三相半波可控整流电路的串联，因此，整流电压 U_d 应比式(6-7)大 1 倍，即 $U_d = 2.34 U_2 \cos \alpha$ ($0 \leq \alpha < \pi/3$ ，电流连续时)。

某一相电压较其他两相为负，同时又有触发脉冲，该相的晶闸管就触发导通。因此，在 t_1 时刻，A相电压较正，B相电压为负，如果给 VT_1 、 VT_6 触发脉冲，则 VT_1 、 VT_6 导通，电流从A相经 VT_1 、负载和 VT_6 回到B相，A相电流为正，B相电流为负(电流为负表示电流的真实方向与图上所标正方向相反)。在 t_2 时刻，A相电压还是较正，但C相电压开始比B相电压更负了，如果在 t_2 时刻给 VT_1 、 VT_2 触发脉冲，则 VT_1 将维持导通，且 VT_2 导通。 VT_2 导通使 VT_6 因承受反向电压而关断，电流从A相经 VT_1 、负载和 VT_2 回到C相，A相电流为正，C相电流为负。在 t_3 时刻，C相电压仍较负，B相电压开始比A相电压为正，如在 t_3 时刻给 VT_2 、 VT_3 触发脉冲，则 VT_2 维持导通。且 VT_3 导通， VT_3 导通使 VT_1 因承受反向电压而关断，电流从B相经 VT_3 、负载、 VT_2 回到C相，B相电流为正，C相电流为负。依次类推，在 $t_4 \sim t_5$ 时间内 VT_3 、 VT_4 导通， $t_5 \sim t_6$ 时间内 VT_4 、 VT_5 导通， $t_6 \sim t_7$ 时间内 VT_5 、 VT_6 导通， $t_7 \sim t_8$ 时间内又是 VT_1 和 VT_6 导通。各相电流如图 6.20(b)所示。这时整流输出电压最高，对共阴极组而言，其输出电压波形是电压波形正半周的包络线，对共阳极组而言，其输出电压波形是电压波形负半周的包络线，三相桥式全控整流电路输出电压数值上等于共阴极组与共阳极组输出电压之和。图 6.20(d)示出了这时的输出电压波形。当控制角 α 移相控制时，输出电压的波形和平均值将随之发生变化。

三相桥式可控整流电路，各项指标都好，在要求一定输出电压的情况下，元器件承受的峰值电压最低，最适合于大功率高压电路。

6.3 晶闸管触发电路

晶闸管在阳极加上正向电压后，还必须在控制极与阴极之间加上正向控制电压即触发电压，器件才能从截止转化为导通。触发电路根据晶闸管的通/断状况可以分为移相触发和过零触发两类。移相触发就是改变晶闸管每周期导通的起始点，即控制角的大小，以达到改变输出电压、功率的目的。这里只讨论应用较广泛的单结晶体管移相触发电路。

6.3.1 晶闸管对触发电路的要求

由于同一型号的晶闸管控制极特性的分散性很大，为了保证晶闸管的可靠触发，晶闸管对触发电路有一定的要求。概括起来有如下几点：

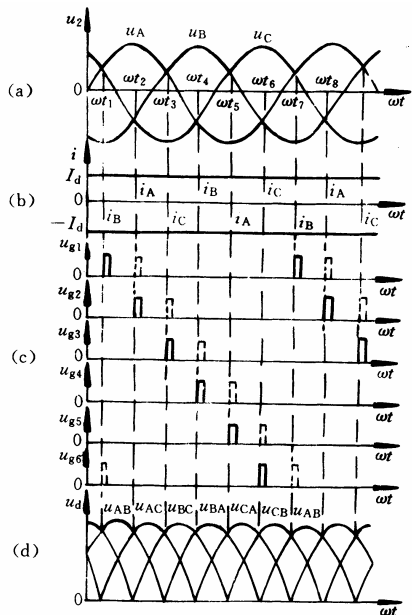


图 6.20 三相桥式全控整流电路电压、电流、触发脉冲波形($\alpha = 0^\circ$ 时)

电感，电流上升比较慢，那么，触发脉冲的宽度还应该增大。

(3) 不触发时，触发电路的输出电压应该小于 0.15V，为了提高抗干扰能力，避免误触发，必要时可在控制极上加上一个 1~2V 的负偏压(就是在控制极上加一个对阴极为负的电电压)。

(4) 触发脉冲的前沿要陡，前沿最好在 10μs 以下，否则将会因温度、电压等因素的变化而造成晶闸管的触发时间前后不一致。

(5) 在晶闸管整流等移相控制的触发电路中，触发脉冲应该和主电路同步，脉冲发出的时间应该能够平稳地前后移动(移相)，移相的范围要足够宽。

6.3.2 单结晶体管移相触发电路

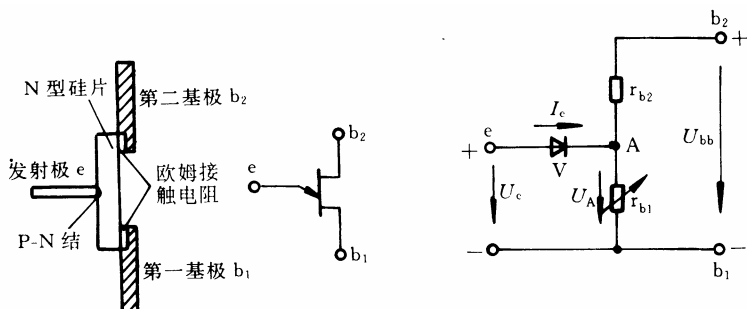
由单结晶体管组成的触发电路，具有线路简单、可靠、前沿陡、抗干扰能力强、能量损耗小、温度补偿性能好等优点。所以，在额定电流 50A 及以下晶闸管组成的单相可控整流电路和三相半控桥式整流电路中得到广泛的应用。

1. 单结晶体管

单结晶体管是一种特殊的半导体器件，它有三个电极，即一个发射极和两个基极，故又叫双基极二极管。它的外形与普通晶体管相似，但特性与晶体管不同，其结构如图 6.21(a)所示。在N型硅半导体基片的一侧引出两个基极， b_1 为第一基极， b_2 为第二基极，在硅片的另一侧用合金或扩散法掺入P型杂质，引出发射极e。因为，发射极e与 b_1 和 b_2 之间是一个PN结，所以，相当于一只二极管。单结晶体管的图形符号和等效电路如图 6.21(b)和(c)所示。两个基极之间是硅片本身的电阻，呈纯电阻性。等效电路中的 r_{b1} 为第一基极与发射极之间的电阻； r_{b2} 为第二基极与发射极之间的电阻。如果两个基极间加入一定电压 U_{bb} ，则A点电压为

$$U_A = \frac{r_{b1}}{r_{b1} + r_{b2}} U_{bb} = \eta U_{bb} \quad (6-8)$$

式中： η ——单结晶体管的分压比，它是一个很重要的参数，其数值与管子的结构有关，一般在 0.3~0.9 之间。



当发射极 e 上外加的正向电压 U_e 小于 U_A 时, 由于PN结承受反向电压, 故发射极只有极小的反向电流, 这时, r_{b2} 呈现很大的阻值; 当 $U_e=U_A$ 时, $I_e=0$; 随着 U_e 的继续增加, I_e 开始大于零, 这时, PN结虽然处于正向偏压, 但由于硅二极管本身有一定的正向压降 U_D (一般为 $0.7V$), 因此, 在 $U_e-U_A < U_D$ 时, I_e 不会有显著的增加, 这时单结晶体管处于截止状态, 这一区域称为截止区, 如图6.22所示。

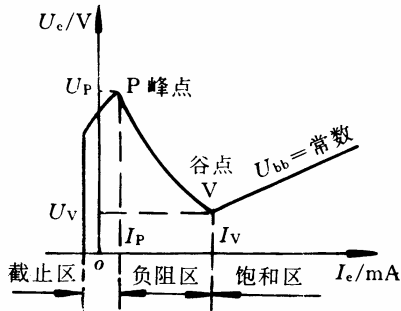


图 6.22 单结晶体管特性曲线

当 $U_e=U_A+U_D$ 时, 由于PN结承受了正向电压, e 对 b_1 开始导通, 随着发射极电流 I_e 的增加, PN结沿电场方向朝N型硅片注入大量空穴型载流子到第一基极 b_1 与电子复合, 于是 r_{b1} 迅速减小。由于 r_{b1} 的减小, 促使 U_A 降低, 导致 I_e 进一步增大, 而 I_e 的增大, 又使 r_{b1} 进一步减小, 促使 U_A 急剧下降。因此, 随着 I_e 的增加, U_e 不断下降, 呈现出负阻特性。开始出现负阻特性的点P称为峰点, 该点的电压和电流称为峰点电压 U_p 和峰点电流 I_p 。随着 I_e 的不断增大, 当 U_e 下降到某一点V时, r_{b1} 便不再有显著变化, U_e 也不再继续下降, 而是随着 I_e 按线性关系增加, 点V称为谷点, 该点的电压和电流称为谷点电压 U_v 和谷点电流 I_v , 对应于由峰点P至谷点V的负阻特性段称为负阻区, 谷点以后的线段称为饱和区。当 $U_e < U_v$ 时, 发射极与第一基极间便恢复截止。

国产单结晶体管的型号主要有BT31、BT32、BT33、BT35系列(其中B表示半导体, T表示特种管, 3表示三个电极, 后面一个数字表示耗散功率100mW、200mW、300mW或500mW)。此外还有5S1、5S2等系列单结晶体管。

2. 单结晶体管的自激振荡电路

利用单结晶体管的负阻特性和RC充放电特性, 可组成自激振荡电路, 如图6.23(a)所示。设在接通电源前, 电容C上的电压为零, 当合上电源开关S时, 电源E一方面通过 R_1 、 R_2 加于单晶体管的 b_1 和 b_2 上, 同时又通过充电电阻R向电容C充电, 电压 U_e 便按指数曲线逐渐升高。在 U_e 较小时, 发射极电流极小, 单晶体管的发射极 e 和第一基极 b_1 之间处于截止状态; 当电容两端的电压 u_C 充电到单晶体管的峰点电压 U_p 时, e 和 b_1 间由截止变为导通, 电容C通过发射极 e 与第一基极 b_1 迅速向电阻 R_1 放电, 由于 R_1 阻值较小(一般只有 $50\Omega \sim 100\Omega$), 而导通后 e 与 b_1 之间的电阻更小, 因此, 电容C的放电速度很快, 于是在 R_1 上得到

上形成锯齿波电压, 在 R_1 上则形成脉冲电压, 如图 6.23(b)所示。这就是单结晶体管自激振荡(又称张弛振荡)电路的工作原理。

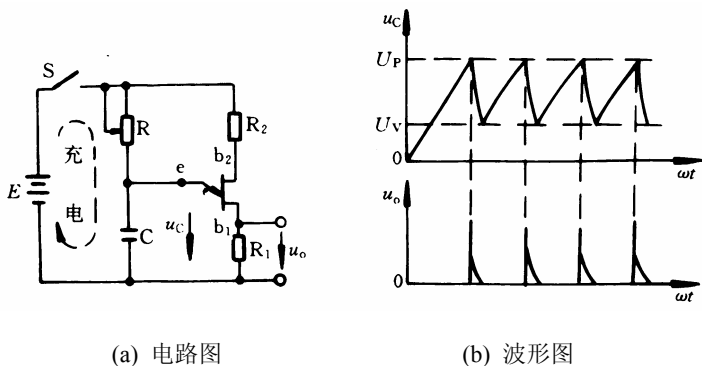


图 6.23 单结晶体管的自激振荡电路

电阻 R_1 两端输出尖峰脉冲电压 u_o 的振荡周期 T , 主要由电容 C 的充电时间常数(RC)所决定, 近似等于电容两端的电压 u_c 由零充电到峰点电压 U_p 所需的时间, T 与 R 、 C 、 η 的关系为

$$T = RC \ln \frac{1}{1 - \eta} \quad (6-9)$$

在电阻 R_1 两端输出的脉冲宽度, 主要决定于电容的放电时间常数($R_1 C$)。一般电容 C 的选用范围为 $0.1 \mu\text{F} \sim 1 \mu\text{F}$, R_1 的范围为 $50 \Omega \sim 100 \Omega$, 故可得到数十微秒的脉冲宽度。

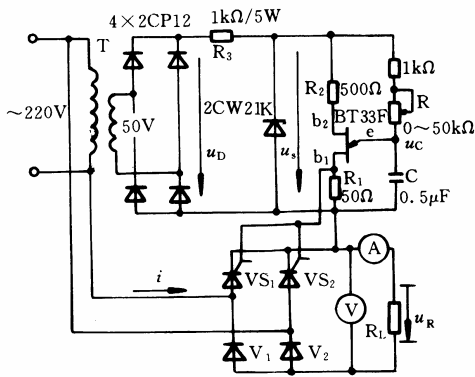
图 6.23 中的 R_2 用以补偿温度对峰点电压 U_p 的影响。当温度变化时, 单结晶体管中PN结电压降 U_D 随温度升高而降低, 因而峰点电压 $U_p = \eta U_{bb} + U_D$ 将随之变化。另外第一基极与第二基极之间的电阻 $r_{b1} + r_{b2}$ 随温度升高而增加, 流过其电阻的电流将减小。接入 R_2 后, 则其上的电压降因流过它的电流的减小而减小, 这样加到管子上的电压 U_{bb} 将增加, 从而补偿了 U_D 的降低, 使 $U_p = \eta U_{bb} + U_D$ 基本上保持不变, 从而使振荡的周期(或频率)得到稳定。一般 R_2 取 $200 \Omega \sim 500 \Omega$ 。

3. 单结晶体管触发电路

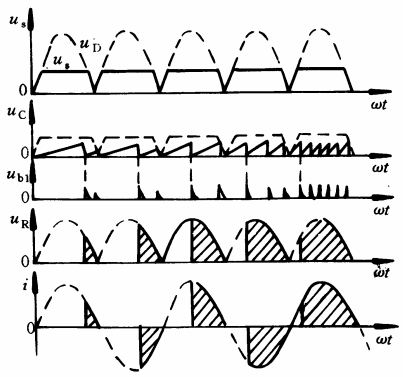
图 6.23 所示的单结晶体管振荡电路, 不能直接用来作晶闸管的触发电路, 因为, 晶闸管的主电路是接在交流电源上的, 二者不能同步。实际应用的晶闸管触发电路, 必须使触发脉冲与主电路电压同步, 要求在晶闸管承受正向电压的半周内, 控制极获得第一个正向触发脉冲的时刻都相同, 否则, 由于每个正半周的控制角不同, 输出电压就会忽大忽小的波动。为此, 在电源电压正半周经过零点时, 触发电路的电容 C 必须把电全部放掉, 在下一个正半周再重新从零开始充电, 只有这样才能确保每次正半周第一个触发脉冲出现的时间都相等。

路，则每当电源电压过零时， b_1 - b_2 之间电压也降到零。 e - b_1 之间导通，电容 C 上的电压通过 e - b_1 及 R_1 回路很快地放掉，使电容每次均能从零开始充电，从而获得与主电路的同步。

触发电路每周期工作两个循环，每次发出的第一个脉冲同时送到两只晶闸管的控制极，但只能使其中承受正向电压的晶闸管导通。第一个脉冲发出后，振荡电路仍在工作，电容继续充电和放电，可能发出第二个或第三个或更多的脉冲，如图 6.24(b)所示。但由于晶闸管已因第一个脉冲触发而导通，所以，后面的脉冲就不起作用了。当电压过零反向时，晶闸管将自行关断。移相控制时只要改变 R ，就可以改变电容电压 u_C 上升到 U_b 的时间，亦即改变电容开始放电产生脉冲使晶闸管触发导通的时刻，从而达到移相的目的。图 6.24(b)所示为进行移相时，不同控制角 α 的电压和电流波形。



(a) 电路图



(b) 波形图

图 6.24 单相半控桥式整流电路和触发电路

由于 R 的数值是有一定限制的，所以，其移相范围受到一定的限制，同时，由于同步电压为梯形波，梯形电压的两侧使 U_{bb} 太小，满足不了输出脉冲的幅值要求，从而，也限制了移相范围，所以，这种电路的移相范围一般在 $5\pi/6$ 左右。在单晶体管耐压允许的条件下，提高电源电压的幅值使梯形波两侧更陡，可以增大移相范围，一般同步电源电压在 50V 以上。

在实际应用中，单晶体管的触发电路还有其他许多接线方式。例如，用 PNP 型晶体管集电极-发射极之间的等效电阻代替图 6.24 中的电位器 RP ，控制晶体管的基极电流可以实现自动移相控制。还可以用脉冲变压器的一次绕组替代图 6.24 中的脉冲输出电阻 R_1 ，使触发脉冲经整形后输出。

6.4 逆变器

在有些场合需要将交流电变为直流电，这就是前面研究的整流电路；在另一些场合则需要将直流电变为交流电，这个过程称为逆变。同一套装置既可实现整流，又可实现逆变，

变器通常用于变频器、交流电动机的变频调速等方面。

6.4.1 有源逆变电路

常用的变流器，一侧联系着交流电源，另一侧联系着直流电源。为此，“整流”与“逆变”用交流一周期平均电能的流向来定义。即“整流”是指电能由交流侧传送到直流侧；“逆变”是“整流”的逆过程，电能由直流侧传送到交流侧。现以三相半波逆变电路为例来说明有源逆变的工作原理。

1. 整流状态($0^\circ < \alpha < \pi/2$)

三相半波可控整流电路工作于整流状态，其电路及电压波形如图 6.25(a)所示。整流输出电压为

$$u_d = E + I_d R + L \frac{di_d}{dt} \quad (6-10)$$

$$U_d = E + I_d R \quad (6-11)$$

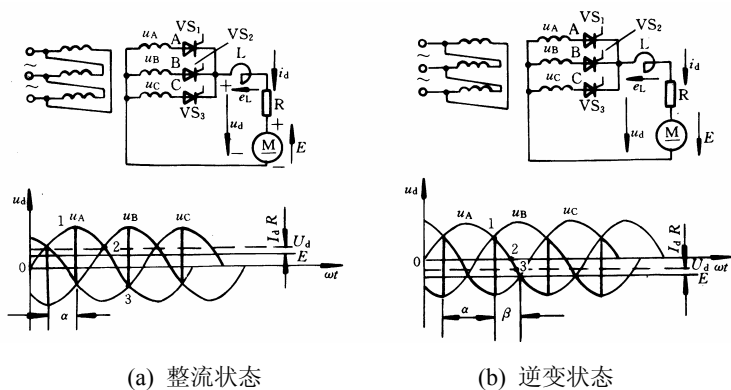


图 6.25 三相半波可控整流电路的整流与逆变

设 $\alpha = \pi/3$ ，电路工作于整流状态，在 ωt_1 时刻触发 VT_1 使之导通，忽略管压降时， $u_d = u_A$ ，在 1~2 区间， $u_d > U_d$ ，感应电动势 e_L 的极性是左正右负，电感储存能量。到 2 点时， $u_d = U_d$ ， i_d 达最大值。过 2 点后， $u_d < U_d$ ，此时，感应电动势极性为左负右正，将储存的能量释放，在 $u_d < E$ 时仍能维持 VT_1 继续导通直到 ωt_3 时刻触发 VT_2 导通为止。依次触发 VT_2 ， VT_3 。在一周期中 u_d 波形如图 6.25(a) 所示。由 u_d 波形可知在一周期中波形的正面积大于负面积，故平均值 $U_d > 0$ 。电源相电压极性在整流工作一周期中大部分是左负右正，流过变压器二次绕组的电流是由低电位流向高电位，所以，一周期中整流电路(交流电源)总是输出能量，工作于整流状态。流过直流电动机电枢的电流是由高电位流向低电位，电动机吸收电能工作于电动状态。

2. 逆变状态($\pi/2 < \alpha < \pi$)

量。在 2~3 区间 $u_d < 0$ ，但 $|u_d| < |U_d|$ ，电感及交流电网吸收能量，电动机输出能量。到 3 点， $u_d = U_d$ ， i_d 达最大值。过 3 点后， $|u_d| > |U_d|$ ，电流 i_d 减小，感应电动势 e_L 的极性为左负右正，电感释放能量，电动机输出能量，交流侧电流由高电位流向低电位是吸收能量，电感释放能量维持 VT₁ 继续导通，直到 VT₂ 触发导通为止。依次触发 VT₂ 及 VT₃，输出电压 u_d 波形如图 6.25(b) 所示。 u_d 波形负面积大于正面积，故输出电压平均值 $U_d < 0$ ，一周期中变流器总是吸收能量(交流电网吸收能量)，直流电动机电枢电流由低电位到高电位是输出能量，因此，就完成了将直流电变成交流电回送到电网的有源逆变过程。整流电路工作于逆变状态，电动机工作于发电状态(制动状态)。

由此可见，要使电路工作于逆变状态，必须使 U_d 及 E 的极性与整流状态相反，并且要求 $|E| \geq |U_d|$ 。只有满足这个条件才能将直流侧电能反送到交流电网实现有源逆变。为便于计算，对于逆变电路引入逆变角 β 。在图 6.25(b) 中，电源电压负半波的交点就是 $\beta = 0$ 的计算起点，因此，逆变角 β 是超前角，它与控制角 α 的关系是： $\alpha + \beta = \pi$ 。

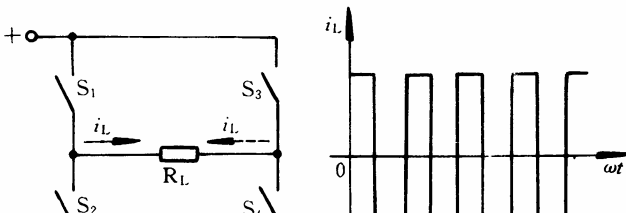
对于三相半波逆变电路，有 $U_d = -1.17U_2 \cos \beta$ 。当 $\beta = 0$ 时， $U_d = U_{dmax}$ ； $\beta = \pi/2$ ， $U_d = 0$ 。为使逆变电路工作可靠，防止逆变失败，除了选用可靠的触发器以便不丢失脉冲之外，同时对触发脉冲的最小逆变角有严格的限制，一般取 $\beta_{min} = \pi/6$ ，所以，逆变电路 β 角变化范围是： $\pi/6 \leq \beta < \pi/2$ 。

6.4.2 无源逆变电路

1. 无源逆变电路的工作原理

1) 无源逆变器的简单工作原理

无源逆变器能把直流电变成交流电的原理，可以用图 6.26 所示的开关电路来说明。当开关 S_1 、 S_4 闭合，而开关 S_2 、 S_3 断开时，电流从电源正极经 S_1 、负载 R_L 、 S_4 ，回到电源负极，负载电流方向如图中实线箭头所示，经过一定时间间隔，将开关 S_3 、 S_2 闭合并同时将开关 S_1 、 S_4 打开，则电流从电源正极经过 S_3 、负载 R_L 、 S_2 ，回到电源负极，负载电流方向如图中虚线箭头所示。如果以相等的时间间隔交替地闭合和断开开关 S_1 、 S_4 和 S_3 、 S_2 ，则在负载上获得图 6.26(b) 所示的交流电。交流电的频率取决于两组开关在每秒内闭合和断开的次数，即改变两组开关每秒内闭合和断开的次数，就可改变输出电压的频率，这就是它的变频作用。很明显，要得到较高频率的交流电，利用有触点开关是不可能做到的，必须采用半导体开关才能实现。



2) 单相晶闸管桥式逆变器

图 6.27(a)所示为单相桥式逆变器基本电路图。从图中看出,如果 VT_1 导通,图中A点相对于负极N点来说为正,即 $U_{AN}=U_d$;如果 VT_3 导通时,图中B点相对于负极N点为正,即 $U_{BN}=U_d$ 。当 VT_1 关断而 VT_2 导通时,A点电位为负,当关断 VT_3 而触发导通 VT_4 时,B点电位为负。因此,周期性地导通和断开 VT_1 和 VT_2 就会产生如图 6.27(b)所示的一系列正脉冲电压 U_{AN} ,同样周期性地导通和关断 VT_3 和 VT_4 ,则会产生如图 6.27(c)所示的一系列正脉冲电压 U_{BN} 。现在如果把两组晶闸管 VT_1 、 VT_4 和 VT_3 、 VT_2 交替导通和关断(π 电角度时间),那么,在负载上就会得到如图 6.27 (d)所示的电压 U_{AB} 。

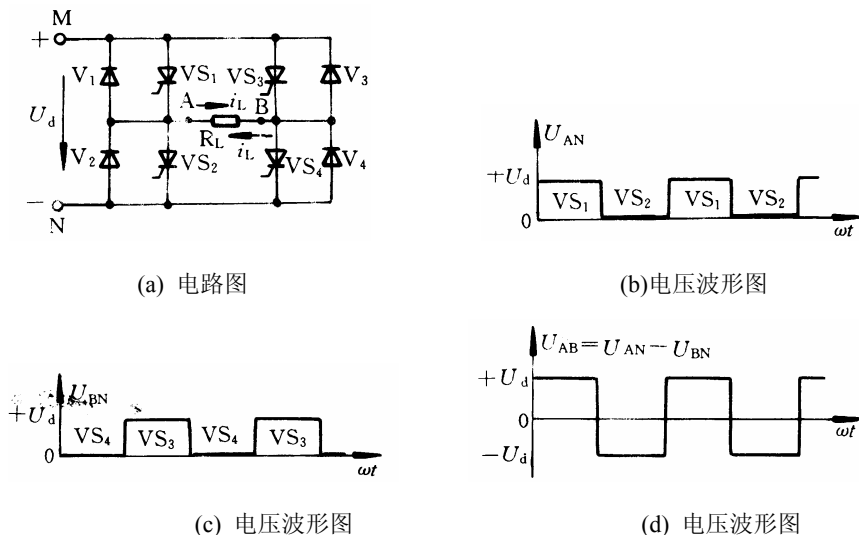


图 6.27 单相桥式逆变器基本电路图

负载可能为电阻性或电感性,当负载为纯电阻性时,负载电流 i_L 的波形与负载电压波形完全相同。如果为电感性负载,电流波形将滞后逆变器输出电压波形一个角度。电路中的二极管有两个作用:一是起反馈作用,即把负载中的无功能量反馈回直流电源,二是防止逆变器的输出峰值过分地超过直流电源电压,以维持输出电压为恒定值。

2. 单相无源逆变器的电压控制

1) 控制逆变器的输入直流电压

如果电源为交流,则可以通过可控整流电路,把交流变成可调的直流输入到逆变器,从而控制逆变器的输出交流电压。这在交一直一交变频器中较常用。

若为直流电源,则可利用直流变成交流,控制逆变器或斩波器来改变直流输入电压的大小。这些方法的缺点是逆变器输出交流电压波形的谐波成分随着输出电压的减少而增加。

6.27 中, 如果 VT_1 和 VT_4 在上半周内导通, 而 VT_2 和 VT_3 在下半周导通, 结果得到图 6.27(d)所示的输出电压波形。如果改变 VT_3 和 VT_4 相对于 VT_1 和 VT_2 的触发角之间的相位关系(如延迟 $\pi/2$), 则可得到图 6.28 所示的电压波形。从波形图看出, 若使延迟角从 0 变到 π , 将可以使逆变器的输出电压从零变到最大值。在逆变器输出电压的每一个周期内, 每一只晶闸管只有一次换相, 因此, 变换损耗可减小到最小。

由图 6.28 可以明显看出, 当输出脉冲宽度减小(即输出电压减小)时, 输出电压波形的谐波分量会随着增加, 当基波减小到最大值的 20%时, 三次、五次、七次谐波几乎和基波值相等, 因此这是它的最主要的缺点。采用脉宽调制的办法可以解决这个问题。

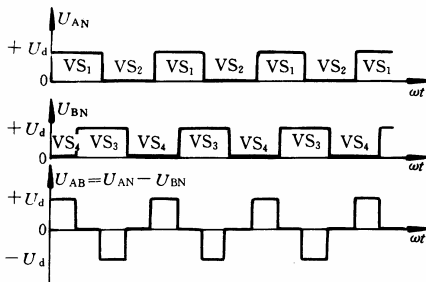


图 6.28 脉宽控制电压波形

(2) 脉冲宽度调制(PWM)。对于图 6.27(a)所示电路, 如果使 VT_1 与 VT_4 , VT_2 与 VT_3 通过高频调制控制, 能在半个周期内重复导通和关断 N 次, 则其输出电压波形为一系列被调制的矩形脉冲(称载波), 如图 6.29(b)所示(这时 $N=5$)。逆变器输出电压的幅值是通过改变脉冲总导通时间与总关断时间的比率来控制的, 有两种基本的方法: 第一种方法是维持恒定的脉冲宽度而改变每一半周期内的脉冲数; 第二种方法是改变脉宽, 而维持每一半周期内的脉冲数不变。

为了实现频率、电压协调控制(即保持 U/f 不变), 应使脉冲重复的频率随输出电压成比例地变化。比如当频率降低时, 每半周包含的等宽脉冲数不变(以保持半周内总的脉冲面积不变), 而各脉冲宽度间的间隔加大了, 因此, 输出电压降低了。但上述方法并没有改善逆变器输出电压波形, 谐波分量没有得到抑制。

为了使逆变器输出电压波形接近正弦波, 可以使半周内多个脉冲的宽度(亦即晶闸管或晶体管导通的时间), 以接近正弦的规律变化, 即使半周内多个脉冲的宽度由小到最大, 然后再由大变小, 其电压波形如图 6.30 所示。这就大大减小了高次谐波的成分。

由以上分析可看出, PWM 逆变器不仅可以使输入端采用不可控的硅整流器也能实现既调频又调压, 而且可以使输出电压的波形得到改善, 因此, 是一种比较理想的变频调压方式。随着快速晶闸管和晶体管器件及逻辑技术的发展, 这种方案应用得越来越广泛。

3. 无源逆变器的换相(换流)

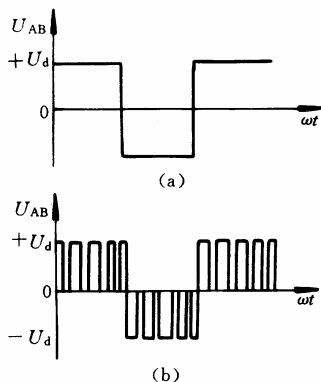


图 6.29 PWM 逆变器输出电压波形

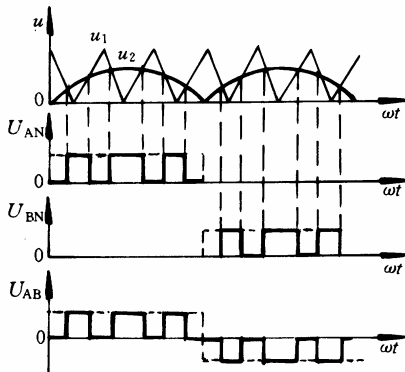
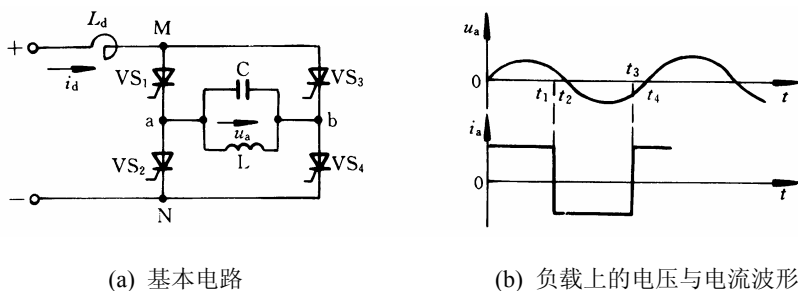


图 6.30 输出正弦电压波形

采取措施，则晶闸管一旦触发导通后就关断不了。也就是说，无源逆变与可控整流、有源逆变不同，怎样关断晶闸管是研究的主要问题。

晶闸管换流主要有负载换流和强迫换流方式。下面以图 6.31(a)所示的并联桥式逆变器为例说明其换流过程。



(a) 基本电路

(b) 负载上的电压与电流波形

图 6.31 并联桥式逆变器

图 6.31(a)中逆变器的负载是由电感 L 和补偿电容 C 组成的并联谐振回路， L_d 为限流电抗器。逆变器的换流过程如图 6.32 所示。假设先使晶闸管 VT_1 和 VT_4 导通，如图 6.32(a)所示，电流从 a 点流向 LC 并联谐振回路， LC 谐振回路受激励而产生谐振，振荡电压 u_a 为正弦波。 u_a 既是电容 C 的端电压，也是负载电压，其电压波形如图 6.31(b)所示。若在电压 u_a 过零前 u_a 为正(电容左“+”右“-”)的 t_1 时刻，加触发电压触发晶闸管 VT_3 和 VT_2 ，则形成四只晶闸管同时导通的状态，但是，由于晶闸管 VT_3 和 VT_2 的导通，电容的电压分别作用在晶闸管 VT_1 和 VT_4 上，使晶闸管 VT_1 和 VT_4 承受反向电压而迅速关断，于是电流由 b 流向 LC 振荡回路， i_a 为负值，如图 6.32(b)所示。若在 u_a 过零前 u_a 为负(电容左端为“-”，右端为“+”)的 t_3 时刻(t_3 和 t_1 相隔半个周期)，触发管 VT_1 和 VT_4 则又形成四只晶闸管同时导通的状态。如图 6.32(c)所示，同理，由于晶闸管 VT_1 和 VT_4 的导通，电容的电压分别作用在晶闸管 VT_3 和 VT_2 上，使晶闸管 VT_2 和 VT_3 承受反向电压而迅速关断，又只有晶闸管 VT_1 和 VT_4 导通，这样就完成

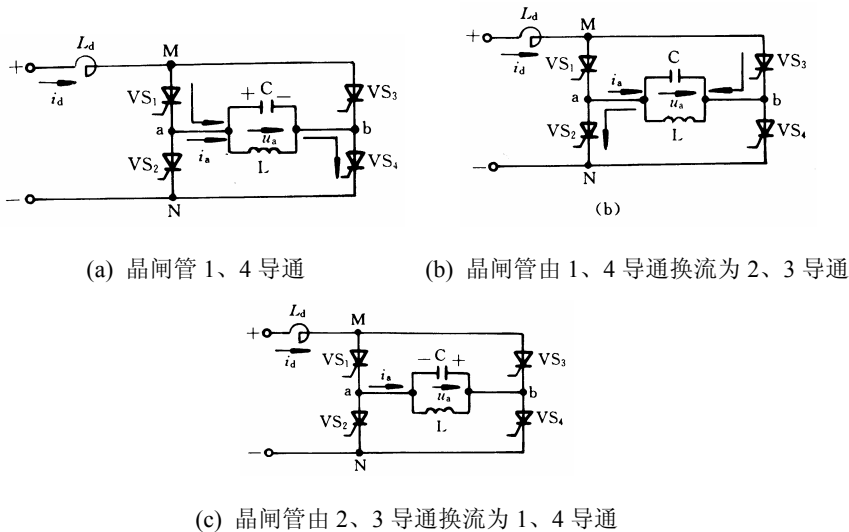


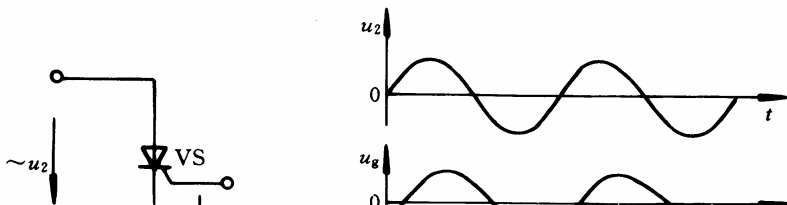
图 6.32 逆变器的换流过程

从以上分析可以看出，在四只晶闸管同时导通的换流期间，M和N两点间近似为短路状态，可能电流很大。为了解决这个矛盾，在回路中接入限流电抗器 L_d ，由于 L_d 上的电流不能突变，加上换流时间一般是很短的，因此，保持了负载电流 i_d 的恒定。

逆变器的换流过程必须在电容电压过零之前适当时刻进行，同时，触发电压的频率必须和 LC 并联谐振回路的频率相同，因此，要求触发回路采取相应的措施来保证。

思考题与习题

1. 晶闸管的导通条件是什么？导通后流过晶闸管的电流决定于什么？晶闸管由导通转变为截止的条件是什么？截止后它所承受的电压大小决定于什么？
2. 在晶闸管的控制极加入几十毫安的小电流，可以控制阳极几十、几百安的大电流，它与用较小的基极电流控制较大的集电极电流有什么不同？晶闸管能否和晶体管一样构成放大器？
3. 试画出图 6.33 中负载电阻 R 上的电压波形和晶闸管上的电压波形。



4. 如图 6.34 所示, 试问:

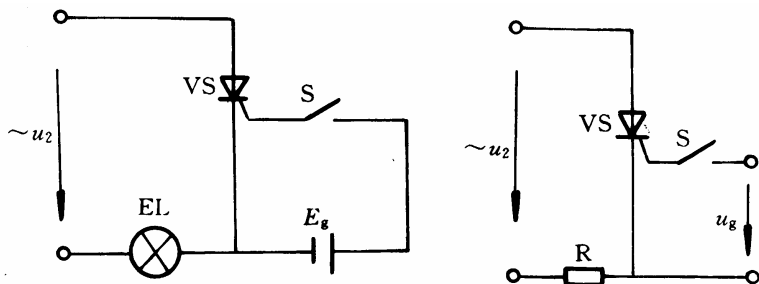


图 6.34

- (1) 在开关 S 闭合前灯泡亮不亮? 为什么?
- (2) 在开关 S 闭合后灯泡亮不亮? 为什么?
- (3) 再把开关 S 断开后灯泡亮不亮? 为什么?

5. 如图 6.35 所示, 若在 t_1 时刻合上开关 S, t_2 时刻断开开关 S, 试画出负载电阻 R 上的电压波形和晶闸管上的电压波形。

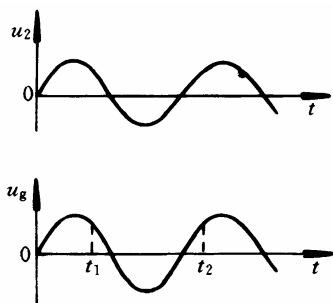


图 6.35

6. 晶闸管的主要参数有哪些?
7. 如何用万用表粗测晶闸管的好坏?
8. 晶闸管的控制角和导通角是何含义?

9. 有一单相半波可控整流电路, 其交流电源电压 $U_2=220\text{V}$, 负载电阻 $R_L=10\Omega$, 试求: 输出电压平均值 U_d 的调节范围, 当 $\alpha = \pi/3$ 时, 输出电压平均值 U_d 、电流平均值 I_d 为多少? 并选晶闸管。

10. 续流二极管有何作用? 为什么? 若不注意把它的极性接反了会产生什么后果?

11. 试画出单相半波可控整流电路带不同性质负荷时, 晶闸管的电流波形与电压波形。

12. 有一电阻性负载, 需要直流电压 $U_d = 60\text{V}$ 、电流 $I_d = 30\text{A}$ 供电, 若采用单相半波可控整流电路, 直接接在 220V 交流电网上, 求晶闸管的导通角。

画出此时负载侧的电压波形图。

15. 三相半波可控整流电路带电阻性负载，由于控制系统故障，A相的触发脉冲丢失，试画出控制角 $\alpha = 0$ 时的整流电压波形。

16. 单结晶体管自激振荡电路的振荡频率是由什么决定的？

17. 为什么晶闸管的触发脉冲必须与主电路电压同步？

18. 在单结晶体管触发电路中，改变电阻R的大小为什么能实现移相？移相的目的是什么？

19. 实现有源逆变的条件有哪些？

20. 试述单相桥式逆变器的工作原理。逆变器的换流过程是怎样进行的？

21. 晶闸管器件的过电压、过电流保护方法有哪些？

第7章 直流调速控制系统

教学提示：随着电力半导体器件的发展，机电传动与控制系统也有了比较快的发展。机床拖动系统主要有直流拖动系统与交流拖动系统两大类，采用直流电动机的称为直流拖动系统。由于直流电动机启动、制动性能良好，控制过程简捷方便，易于在很宽的范围内实现平滑调速，因此在各种需要高性能可控的过渡过程、速度可调的生产机械，如金属切削机床直流拖动系统得到广泛应用。

教学要求：本章要求学生了解自动调速系统的组成和调速性能指标的基础上，掌握自动调速系统中各个基本环节、各种反馈环节的作用及特点；掌握常用的自动调速系统的原理、特点与适用场所，正确选择和使用直流调速控制系统。

7.1 机床的速度调节

在满足加工精度与表面粗糙度的情况下，对于不同的刀具和不同的加工材料，应该选择最合理的加工速度，以便提高机床的工作效率。另外，机床的进给速度、刀架调整等辅助工作均需要运动速度的相应变化。为了保证机床能够在不同速度下正常工作，机床拖动系统必须具备速度调节功能。由此可见，调速系统是现代机床电气控制系统的重要组成部分。

7.1.1 现代机床调速系统

现代机床调速系统的分类方法较多，按照调速装置的主体，分为机械调速与电气调速；按照速度是否连续可调，分为有级调速与无级调速；按照电动机驱动电源的类型，分为直流调速与交流调速；等。历史上最早出现的电动机是直流电动机，它的调速原理和控制设备都很简单。但是和同等功率的笼型异步电动机相比，直流电动机价格偏高，电刷与换向器装置需要经常维修，运行可靠性相对较差。因此，进入单电动机拖动时期，首先应用到机床上的是笼型异步电动机而不是直流电动机。但在一些要求宽调速、启动与制动、正/反转特别频繁，以及对过渡过程有特殊要求的场合一般选择直流电动机。

1. 机械有级调速系统

在机械有级调速系统中，电动机一般采用不调速的笼型异步电动机，通过改变齿轮变速箱的变速比来实现速度调节。负载转矩通过机械传动机构传到电动机轴上，电动机轴上的转矩只是负载转矩的传动比的数倍，因此可以选择转矩较小的交流电动机。但是，该调速方式使机械系统变得复杂，影响了机床的加工精度。在普通的车床、钻床、铣床等加工精度要求不高的场合，一般采用此类调速系统。

2. 电气—机械有级调速系统

在电气—机械有级调速系统中，用多速笼型异步电动机代替不能调速的笼型异步电动机。

机, 以便简化机械传动机构。多速电动机一般采用双速电动机(例如, 中、小型镗床的主拖动系统多采用双速异步电动机), 少数机床采用三速、四速电动机。

3. 交、直流无级调速系统

交、直流无级调速系统是通过直接改变电动机转速, 来实现机床工作机构转速的无级调节的拖动系统。这种调速系统满足机床的主运动和进给运动均有调速要求的场合, 具有调速范围宽、可以实现平滑调速、调速精度高、控制灵活等优点, 还可能取消或大大简化电动机与机械运动部件之间的齿轮变速箱, 简化机械传动机构, 因而广泛应用于机床的主拖动和进给拖动系统中。

7.1.2 现代机床控制技术

1. 控制系统简介

所谓控制就是按照预先给定的目标, 改变系统行为或性能的方法学。控制系统是依靠调节能量输入的方法, 使某些物理量受到控制的一类系统。通常, 控制系统由控制器、受控对象(也称为过程)、反馈测量装置以及比较器等部分组成。控制器的主要作用是按照预定的控制规律调节能量输入, 使得系统产生所希望的输出。在一般情况下, 受控对象包括功率放大器、执行机构、减速器、负载以及内反馈回路等。反馈测量装置由传感器测量单元组成, 它用于检测输出变量, 并将其转换为相应的电信号反馈到系统的输入端。比较器用来求取输入变量与反馈变量的差值, 作为误差信号送给控制器, 以实现闭环(反馈)控制。

控制系统可以从各种不同的角度进行分类。

(1) 按照有无反馈测量装置, 控制系统可以分为开环控制系统和闭环控制系统。开环控制系统是没有输出反馈的一类控制系统。这种系统的输入直接供给控制器, 并通过控制器对受控对象产生控制作用。开环控制系统的主要优点是简单、经济、容易维修以及价格便宜。它的主要缺点是精度低, 对环境变化和干扰十分敏感。闭环控制系统也称反馈控制系统, 采用反馈原理将系统输出的全部或部分负反馈到输入端。输入信号与反馈信号比较后的差值(叫做误差信号)供给控制器, 再调节受控对象的输出。闭环控制系统与开环控制系统相比, 具有精度高、动态性能好、抗干扰能力强等优点。它的主要缺点是结构比较复杂、价格比较昂贵等。

(2) 按照闭环控制系统中控制器结构, 闭环控制系统可以分为串联的反馈控制系统、串并联反馈控制系统以及复合控制系统等。

(3) 按照信号处理技术, 控制系统可以分为模拟控制系统和数字控制系统。以可编程控制器(PLC)为核心的控制系统称为 PLC 的控制系统, 采用微处理机作为控制器的控制系统称为计算机(或微机)控制系统。

2. 现代机床控制技术

随着电力电子技术、微电子技术、微机控制技术在电动机调速控制中的应用, 现代机床控制技术逐渐成为集信息技术、微电子技术与工作机械于一体的机电一体化技术, 机床电气控制技术也由手动控制向自动控制方向发展。

1) PLC 控制系统

PLC 实质上是一种专用的控制计算机，它的作用是代替传统的继电器—接触器系统。PLC 是专为工业控制设计的，具有编程简单、接线方便、抗干扰能力强、可靠性高等优点，尤其是模糊控制、自适应控制等扩展模块能够满足现代工业控制的要求，能够有效替代传统的继电器-接触器控制系统。目前，PLC 控制系统广泛应用于组合机床、数控机床、自动生产线等自动化操作或制造过程的控制。

2) 微机控制系统

随着微处理器技术的发展，现在许多机电控制系统都采用微处理器直接作为控制器，负责采集信号、运算控制规律以及产生控制指令等。通常情况下，受控机械系统是连续的物理过程，而微机控制器处理离散的数字信号，二者之间必须通过采样器和数据保持器连接起来。受控过程输出的连续时间信号以周期性时间间隔采样，并转换为数字信号送入微机，微机运算控制规律后产生的数字控制指令，经过数据保持器转换为分段连续的时间信号，控制受控对象。继电器-接触器控制系统、PLC 控制系统、微机控制系统之间的比较见表 7-1。

表 7-1 继电器-接触器控制系统、PLC 控制系统、微机控制系统之间的比较

项目	继电器-接触器控制系统	PLC 控制系统	微机控制系统
功能	用大量继电器布线逻辑实现顺序控制	用程序可以实现各种复杂控制	用程序可以实现各种复杂控制，功能最强
改变控制内容	改变硬件接线逻辑、工作量大	修改程序较简单	修改程序、技术难度较大
工作方式	顺序控制	顺序扫描	中断处理、响应最快
接口	直接与生产设备连接	直接与生产设备连接	要设计专门的接口
环境适应性	环境差，会降低可靠性和寿命	可适应一般工业生产现场环境	要求有较好的环境
抗干扰性	能抗一般电磁干扰	一般不用专门考虑抗干扰问题	要专门设计抗干扰措施，否则易受干扰
维护	定期更换继电器，维修费时	现场检查、维修方便	技术难度较高
系统开发	图样多、安装接线工作量大、调试周期长	设计容易、安装方便、调试周期短	系统设计较复杂、调试难度大、需要有专门计算机知识
系统开发	图样多、安装接线工作量大、调试周期长	设计容易、安装方便、调试周期短	系统设计较复杂、调试难度大、需要有专门计算机知识
通用性	一般是专用	较好，适应面广	要进行软、硬件改造才能作其他用
硬件成本	少于 30 个继电器的系统成本低	比微机系统高	一般比 PLC 低

3) 计算机集成制造系统

计算机群控系统是由一台计算机控制多台数控机床，又称为直接数控系统。20 世纪 90 年代以后，柔性制造系统(FMS)逐步取代直接数控系统，FMS 是由一中心计算机控制的机

械加工自动线，是由数控机床、工业机器人、自动搬运车、自动化检测、自动化仓库组成的高技术产物。

FMS 与计算机辅助设计 CAD、计算机辅助制造 CAM、计算机辅助质量检测 CAQ 及计算机信息管理系统，构成了计算机集成制造系统 CIMS，它是当前机械加工自动化发展的最高形式。在电气自动控制技术迅速发展的进程中，机床电气自动化也将被不断推向新的高峰。

7.1.3 直流调速简介

1. 直流调速方法

所谓直流调速，是指对直流电动机的速度进行控制。对电动机的转速，不仅要求能够实现调节，而且要求调节的范围宽广，调速过程平滑，调节的方法要简单、经济。由于直流电动机电枢磁通和励磁磁通相互间没有耦合，可对电枢电流和励磁电流分别实行控制，因此直流电动机调速时易获得良好的控制性能以及快速的动态响应性能，在变速传动领域中得到广泛的应用。

由第 1 章直流电动机转速方程式(1-6)可知，直流调速方法有以下四种。

1) 降压调速

电枢供电电压 U_d 下降时，电动机转速下降。这种调速方法的优点主要有以下几个：

- (1) 可以实现无级调速，平滑性很好；
- (2) 由于机械特性斜率不变，相对稳定性较好；
- (3) 可以调节至较低的转速，因此调速范围较广；
- (4) 调速过程能量损耗较小。

由于电动机绕组绝缘限制，电枢电压一般不允许超过额定电压 U_N 运行，因此这种调速方法只能在额定转速以下进行调节。当负载转矩一定时，电枢电流能保持一定而不随转速变化，这种调速方法适合于恒转矩负载，故调压调速属于恒转矩调速的范畴，适用于额定转速以下一定范围内的无级调速的场合。

2) 变阻调速

在一定的外加电压下，增加串联于电枢回路的调速电阻 R_Σ 时，电动机机械特性的斜率将随之增大，电动机和负载的机械特性的交点将逐步下移，电动机的转速 n 下降。这种调速方法的缺点如下：

- (1) 由于所串联电阻所需的截面大，只能分较少的档次调节，调速的平滑性差；
- (2) 低速时，特性较软，稳定性较差；
- (3) 轻载时调速效果不大；
- (4) 因为电枢电流不变，电阻功率损耗与电阻成正比，转速越低，需串入的电阻越大，电阻损耗越大，效率越低；

(5) 考虑到上述因素，电动机的转速不宜调节得太低，因此也就限制了调速范围，一般 D : 2~3。但是，这种调速方法具有设备简单、操作方便的优点，适于作短时调速，在小功率有级调速的场合中得到广泛的应用。

3) 弱磁调速

励磁磁通下降(弱磁)，则电动机转速上升。这种调速方法的主要缺点是：调速只能在额定转速以上范围进行，若转速调得过高，则因励磁过弱和电枢电流过大，换向将变差，

还可能会出现转速不稳定现象,同时转速升高又受到换向和机械强度的限制,因此调速范围不广,只能适用于额定转速以上的小范围内无级调速场合。普通电动机调速范围 $D: 1.2 \sim 2$, 特殊设计可达到 $D: 3 \sim 4$ 。

4) 调压调磁调速

互相协调地改变电枢电压与励磁磁通,使弱磁调速与降压调速的优点互补,可以获得较宽的无级调速范围。

2. 直流调速的性能指标

直流调速的性能指标包括稳态性能指标与动态性能指标。其中,稳态性能指标主要有静差、静差率、调速范围等,动态性能指标主要有随动性能指标、抗干扰性能指标等。

1) 静差和静差率

调速系统的静差,是指理想空载转速与额定负载转速之间的差值。调速系统的静差率是指静差与理想空载转速的比值,它反映了电动机转速的稳定程度。静差率越小,负载扰动引起的转速变化率就越小,转速的相对稳定性越好。

$$s = \frac{n_0 - n_N}{n_0} = \frac{\Delta n}{n_0} \times 100\% \quad (7-1)$$

式中: $\Delta n = n_0 - n_N$ ——静差;

n_0 ——理想空载转速;

n_N ——额定负载转速。

实际应用过程中,应该注意机械特性硬度与静差率的区别,同一机械特性,在不同转速下机械特性硬度可以是相同的,而静差率却不相同。如图 7.1 所示,图中的机械特性硬度一样,静差 Δn 不变,而静差率 s 却不同。

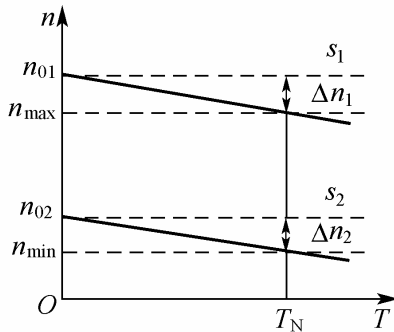


图 7.1 不同转速下的静差率 s 与调速范围 D 的定义

由于 $n_{01} > n_{02}$, 所以 $s_2 > s_1$ 。由此可见,速度越低,静差率越大。

为了保证加工对象的加工质量,调速时要求静差率小于规定的数值,例如卧式车床要求 $s \leq 0.3$,龙门刨床主拖动系统要求 $s \leq 0.1$ 。静差率 s 过大,将导致被加工工件表面质量降低。因此,在实际应用过程中必须用 s_2 来校验静差率。 s_2 满足,则 s_1 必定满足,这样在整个调速范围内均能满足静差率要求。在采用电枢回路降压调速时,为了保证静差率不超

过规定的指标，转速不能调得过低。

在弱磁调速时，静差率可能变化。如果电动机拖动恒功率负载，转速升高后，静差率将保持自然机械特性时的值不变。如果电动机拖动恒转矩负载，从固有机械特性开始，通过减弱磁通向上调速时，静差率将会变大。

2) 调速范围

在图 7.1 中，电动机在额定负载下进行调速时，在满足静差率要求的前提下，所能达到的最高转速与最低转速之比称为调速范围，用 D 表示。

$$D = \frac{n_{\max}}{n_{\min}} = \frac{n_{\max} s_{\max}}{\Delta n (1 - s_{\max})} \quad (7-2)$$

式中： n_{\max} ——额定负载下的最高转速(即 n_N)；

n_{\min} ——额定负载下的最低转速；

s_{\max} ——最大允许静差率。

D 越大，调速范围越宽。对于直流调速系统，为了进一步扩大调速范围 D ，在 n_N 已经给定，静差率指标必须小于 s_{\max} 时，应该设法提高机械特性的硬度，减小静差 Δn 。如果在调速系统中引入反馈控制构成闭环控制系统，则需要提高系统机械特性的硬度，减小静差 Δn ，才能够扩大调速范围 D 。因为额定负载下的最低转速 n_{\min} 受到生产设备允许的最大静差率 s_{\max} 的限制，所以这两个性能指标是相互制约的。表 7-2 中列出了一般机床主传动和进给传动的调速范围。

表 7-2 部分机床的调速范围

机床类型	D (主运动)	D (进给运动)
普通车床	20~50	50~200
立式车床	40~60	40~80
中型和重型车床	40~100	50~150
数控车床	100 以上	1000 以上
摇臂钻床	20~100	5~40
铣床	20~60	25~60
中型卧式镗床	25~60	30~150
中、小型龙门刨床	4~10	10~150
大型龙门刨床	10~30	10~150

3) 随动性能指标

随动性能指标是指控制系统对阶跃扰动响应时转速、电流等参数的上升时间 t_r 、峰值时间 t_p 、调节时间 t_s 、超调量 σ 等阶跃响应性能指标。

4) 抗干扰性能指标

动态速降 Δn_{\max} ，是指控制系统对阶跃扰动响应的动态最大速度降。

恢复时间 t_v ，是指从阶跃扰动开始，直到输出达到新的稳定状态对应的误差允许范围所需的时间，即过渡过程时间。

在阶跃扰动下, 动态速降 Δn_{\max} 越小, 恢复时间 t_v 越短, 则控制系统抗干扰能力越强。

7.1.4 直流调速的发展趋势

近 30 多年来, 由于以下三个方面的原因, 电力拖动控制系统获得了迅猛发展。其一是控制理论的发展, 出现了最优控制、自适应控制、智能控制等, 相对应的拖动控制系统也在实践中逐步形成。其二是电力电子器件的发展, 带来了拖动控制系统组成结构的重大变化。过去采用电动机发电机组来实现直流电动机的平滑调速, 在 20 世纪 50 年代又出现了水银整流器静止变流装置; 到了 60 年代, 出现了晶闸管整流装置, 不仅在经济性和可靠性上有所提高, 而且在技术性能上也显示了很大的优越性。另外, 集成运算放大器和众多的电子模块的出现, 促进了控制系统结构的不断变化。其三是 80 年代计算机技术和通信技术的发展, 开创了电力拖动控制系统数字化控制的新纪元。8~32 位单片机、DSP、PLD 等的相继出现并应用于电力拖动控制系统, 使系统的结构更加简单, 功能更强, 可靠性更高。

由于直流电动机具有良好的机械特性, 能在大范围内平滑调速、启动、制动和正/反转等, 目前在传动领域中仍占重要的地位。现急需在以下三个方面提高我国直流电动机控制装置的水平。

(1) 提高传动的单机容量。由于存在换向问题, 直流电动机极限容量与转速乘积被限制在 $10^6 \text{ kW} \cdot \text{r}/\text{min}$, 我国低速直流电动机控制装置现有容量为 7000kW, 国外则早已制成 14500kW 的传动装置。

(2) 提高电力电子器件与控制单元的生产水平。目前国内的传动装置普遍使用小规模集成运算放大器和组件, 触发装置甚至还是用分离元件, 国外的装置则已实现完全数字化, 采用 16 位或 32 位微机, 具有数字触发、数字 PID、故障自诊断、参数自寻优、状态监视、保护及自复原等各种功能。

(3) 加强传动控制装置的功能, 进一步提高可靠性, 形成标准模块化的结构, 使设计、维护更加方便。

从传动系统来讲, 虽然近几年来交流电动机调速技术迅猛发展, 在许多方面正向直流电动机调速技术领域扩展, 但是直流传动控制系统的一些理论仍然是交流传动的基础。对于直流传动系统来说, 它也在不断地更新和发展, 如完全数字化的控制装置已成功地用于生产。以微机作为控制系统的核心部件, 并具有控制、检测、监视、故障诊断及故障处理等多功能的电气传动系统正在形成和不断地完善。

7.2 转速负反馈自动调速系统

最简单的直流电动机不可逆调速系统是开环调速系统。直流电动机的励磁一般采用单独整流桥供电, 即电动机工作在他励工作方式, 以此保持主磁通的基本恒定。直流电动机的电枢由可控整流器供电, 改变电枢电压可实现转速的调节。由于开环调速系统调速精度差, 只能适用于调速要求不高的场合。为了保证一定的调速精度, 可采用转速负反馈构成单闭环直流调速系统。

7.2.1 转速负反馈自动调速系统组成

在直流电动机模拟控制系统中，常采用的测速元件为直流测速发电机。转速检测电路如图 7.2 所示。直流测速发电机和直流电动机同轴连接，输出电压与电动机转速成正比，经电阻 R_1 、 R_2 分压后，在电阻上形成转速反馈信号 U_{fn} ，如图 7.2(a)所示。此时 U_{fn} 携带有纹波，可能影响控制的精度。为了削弱直流测速发电机的纹波电压，以及振动带来的多种杂波信号，可将其上的电压经过一个如图 7.2(b)所示的低通滤波器后，生成转速反馈信号 U_{fn} 。对于微机控制系统，可将 U_{fn} 经过 A/D 转换电路转换为数字量送入微机，也可以采用光电编码器，通过微机采集规定时间内光电编码器产生的脉冲个数，经相关公式计算后得到转速信号。

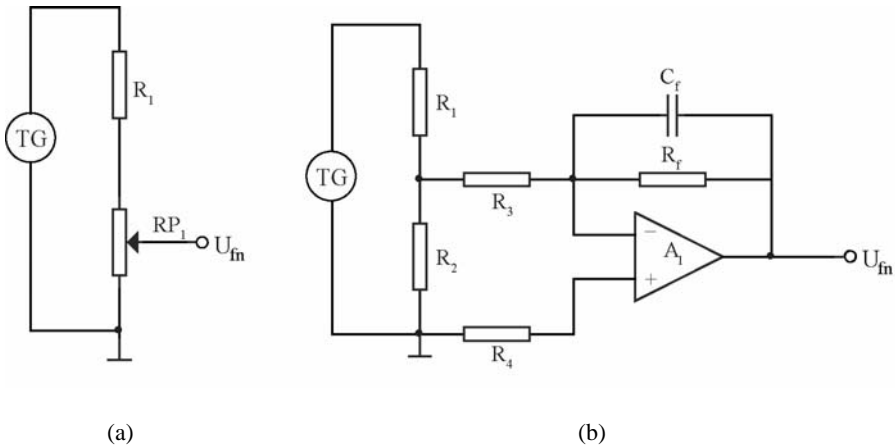


图 7.2 转速检测电路

由晶闸管整流装置供电的负反馈直流调速系统电路原理图如图 7.3 所示。

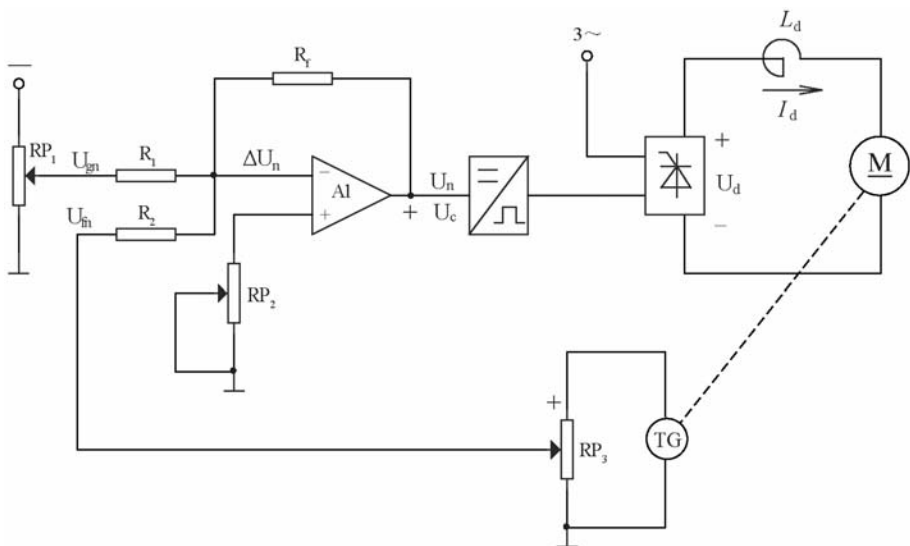


图 7.3 直流调速系统电路原理图

利用与直流电动机同轴连接的测速发电机, 得到和转速成正比的正反馈电压 U_{fn} , U_{fn} 与转速给定值 U_{gn} 比较后, 得到转速偏差电压 ΔU_n 。 ΔU_n 经过线性放大器输出 U_n , 此时 U_n 与产生触发晶闸管装置的电压 U_c 相等, 晶闸管装置输出可控电压 U_d , 用于控制电动机的转速。当平波电抗 L_d 满足式(7-3)时, 电枢电流连续, 不会发生断流现象。

$$L \geq \frac{\sqrt{2}U}{I_{Ldmin}\omega} \left[\frac{m}{\pi} \sin \frac{\pi}{m} - \cos \frac{\pi}{m} \right] \sin \alpha \quad (7-3)$$

式中: U ——交流电源电压的有效值;

I_{Ldmin} ——最小负载对应的电枢电流;

ω ——交流电源的角频率;

m ——每个周期的换流次数, 单相桥式整流, $m=2$, 三相半波与三相桥式整流, $m=3$;

α ——晶闸管触发角, 考虑 L_d 留有一定的裕度时, 可取 $\sin \alpha = 1$ 。

7.2.2 直流调速系统的静态特性

1. 各环节传递函数

在不影响控制精度的情况下, 为了简化传递函数, 假设如下:

- ① 各典型环节, 输入与输出之间为线性关系;
- ② 直流调速系统工作在电流连续段;
- ③ 忽略晶闸管整流装置和电抗器的内阻。

根据以上的假设条件, 可以得到直流调速系统各环节传递函数的系数。

(1) 放大器的比例放大系数 K_n

$$K_n = \frac{U_n}{\Delta U_n} = \frac{U_n}{U_{gn} - U_{fn}} \quad (7-4)$$

(2) 触发装置与晶闸管整流装置的电压放大系数 K_v

$$K_v = \frac{U_d}{U_n} \quad (7-5)$$

(3) 速度反馈系数 α

$$\alpha = \frac{U_{fn}}{n} \quad (7-6)$$

(4) 直流电动机静态时输入/输出关系

$$n = \frac{U_d - I_d R_\Sigma}{C_e \Phi} = \frac{U_d - I_d R_\Sigma}{K_e} \quad (7-7)$$

式中: $K_e = C_e \Phi$ ——直流电动机电动势常数。

2. 单闭环直流调速系统静态特性

根据直流调速系统各环节的传递函数, 可以画出直流调速系统的静态结构图, 如图 7.4

所示。对于线性系统，利用叠加原理将给定电压 U_{gn} 和扰动作用 $-I_d R_\Sigma$ 分别单独作用，求得相对应的输出量再进行叠加，可求出直流调速系统的静态方程。

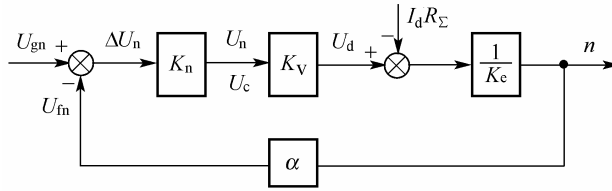


图 7.4 直流调速系统静态结构

(1) 给定电压 U_{gn} 单独作用下的转速 n_1 。 U_{gn} 单独作用下的静态结构图如图 7.5 所示。

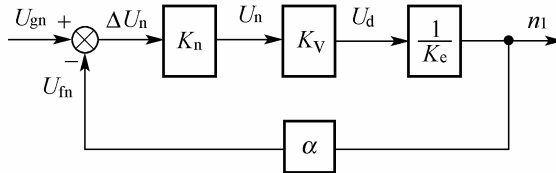


图 7.5 U_{gn} 单独作用下的静态结构

$$\begin{aligned}
 n_1 &= \frac{K_n K_v \frac{1}{K_e}}{1 + \alpha K_n K_v \frac{1}{K_e}} \cdot U_{gn} \\
 &= \frac{K_n K_v}{K_e (1 + K)} \cdot U_{gn} \\
 &= n_{Ob}
 \end{aligned} \tag{7-8}$$

式中： $K = \frac{\alpha K_n K_v}{K_e}$ —— K 为转速闭环控制系统的开环放大系数，即转速反馈回路增益；

$n_{Ob} = \frac{K_n K_v}{K_e (1 + K)} \cdot U_{gn}$ ，转速闭环控制系统理想空载转速。

(2) $-I_d R_\Sigma$ 单独作用下的转速 n_2 。 $-I_d R_\Sigma$ 单独作用下的静态结构图如图 7.6 所示。

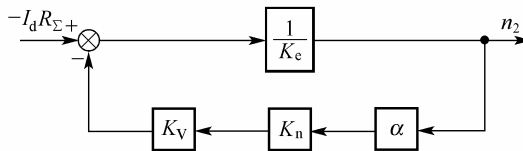


图 7.6 $-I_d R_\Sigma$ 单独作用下的静态结构

$$\begin{aligned}
 n_2 &= \frac{\frac{1}{K_e}}{1 + \alpha K_n K_v \frac{1}{K_e}} \cdot (-I_d R_\Sigma) \\
 &= \frac{-I_d R_\Sigma}{K_e (1 + K)} \\
 &= -\Delta n_b
 \end{aligned} \tag{7-9}$$

式中, $\Delta n_b = \frac{I_d R_\Sigma}{K_e (1 + K)}$ ——速度闭环控制系统的静态转速降。

(3) 给定电压 U_{gn} 和 $-I_d R_\Sigma$ 共同作用下的转速 n 。

$$n = n_1 + n_2 = \frac{K_n K_v U_{gn}}{K_e (1 + K)} - \frac{I_d R_\Sigma}{K_e (1 + K)} = n_{Ob} - \Delta n_b \tag{7-10}$$

3. 直流调速系统开环静态特性

在图 7.4 中, 断开速度反馈回路, 即 $\alpha = 0$, 通过式(7-10)可以导出开环时的机械特性。

$$n = \frac{K_n K_v U_{gn}}{K_e} - \frac{I_d R_\Sigma}{K_e} = n_{Ok} - \Delta n_k \tag{7-11}$$

式中: $n_{Ok} = \frac{K_n K_v U_{gn}}{K_e}$ ——开环系统的理想空载转速;

$\Delta n_k = \frac{I_d R_\Sigma}{K_e}$ ——开环系统的静态转速降。

4. 直流调速系统开环与闭环静特性比较

根据式(7-10)和式(7-11), 比较开环与闭环静特性中理想空载转速和静态转速降, 不难看出以下结论。

(1) 闭环静特性硬。在相同的负载扰动的情况下, 两者的转速降之比为

$$\frac{\Delta n_k}{\Delta n_b} = \frac{\frac{I_d R_\Sigma}{K_e}}{\frac{I_d R_\Sigma}{K_e (1 + K)}} = 1 + K \tag{7-12}$$

此时, 开环系统转速降是闭环系统转速降的 $(1 + K)$ 倍。

(2) 闭环系统静差率小。当开环系统和闭环系统的空载转速相同, 即 $n_{Ob} = n_{Ok}$ 时, 两者的静差率之比为

$$\frac{s_k}{s_b} = \frac{\Delta n_k / n_{Ok}}{\Delta n_b / n_{Ob}} = \frac{\Delta n_k}{\Delta n_b} = 1 + K \tag{7-13}$$

此时, 开环系统静差率是闭环系统静差率的 $(1 + K)$ 倍;

(3) 闭环系统调速范围大。当闭环与开环系统静差率一定时, 闭环系统调速范围比开

环系统调速范围之比为

$$\frac{D_b}{D_k} = \frac{\frac{n_{O_{max}} \cdot s}{\Delta n_b(1+s)}}{\frac{n_{O_{max}} \cdot s}{\Delta n_k(1+s)}} = \frac{\Delta n_k}{\Delta n_b} = 1 + K \quad (7-14)$$

此时，闭环系统调速范围是开环系统调速范围的(1+K)倍。

7.2.3 直流调速系统的动态特性

1. 直流调速系统的动态结构

为了定量分析速度闭环控制系统的动态品质和稳定性，必须首先求得该系统各环节的传递函数，以便建立相应的动态数学模型。

1) 他励直流电动机的传递函数

根据第 1 章直流电动机的相关内容，他励直流电动机的动态特性由式(7-15)来描述。

$$\begin{cases} U_a(t) = E_a(t) + i_a(t)R_a + L_a \frac{di_a(t)}{dt} \\ E_a(t) = C_e \Phi n(t) \\ T(t) = C_t \Phi i_a(t) \\ T(t) = T_L(t) + J_0 \frac{d\omega(t)}{dt} = T_L + J \frac{dn(t)}{dt} \end{cases} \quad (7-15)$$

式中： $T_L(t)$ ——直流电动机阻抗转矩与负载转矩之和；

J ——转动惯量($N \cdot m \cdot s \cdot \min / r$)，它和常用的转动惯量 J_0 ($N \cdot m \cdot s^2 / \text{rad}$)的关系为

$$J = \frac{\pi}{30} J_0。$$

将式(7-15)拉氏变换后，得到式(7-16)：

$$\begin{cases} U_a(s) = E_a(s) + I_a(s)R_a + L_a s I_a(s) \\ E_a(s) = C_e \Phi n(s) \\ T(s) = C_t \Phi I_a(s) \\ T(s) = T_L(s) + J s n(s) \end{cases} \quad (7-16)$$

由式(7-16)，引入电枢回路放大倍数 $K_a=1/R_a$ ，电枢回路电磁时间常数 $T_a=L_a/R_a$ ，机电时间常数 $T_m = JR_a / C_e C_t \Phi^2$ ，可以画出如图 7.7 所示的他励直流电动机精确模型传递函数框图。

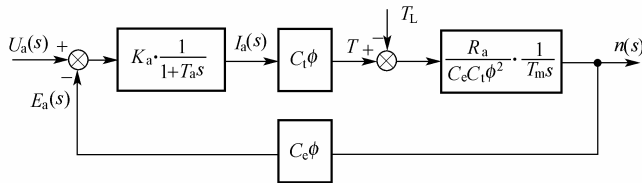


图 7.7 他励直流电动机精确模型传递函数框图

在建立直流电动机模型时,综合考虑了机电与电磁的过渡过程,因而相应的动态结构图是一个带反馈的闭环二阶系统。其中,转速与电枢电压之间的传递函数为

$$W_m(s) = \frac{n(s)}{U_a(s)} = \frac{1/K_e}{T_m T_a s^2 + T_m s + 1} \quad (7-17)$$

转速与负载转矩之间的传递函数为

$$\frac{n(s)}{-T_L(s)} = \frac{T_m(1+T_a s)/J}{T_m T_a s^2 + T_m s + 1} \quad (7-18)$$

电枢电压与电枢电流之间的传递函数为

$$\frac{i_a(s)}{u_a(s)} = \frac{K_a T_m s}{T_m T_a s^2 + T_m s + 1} \quad (7-19)$$

2) 晶闸管触发与整流装置的传动函数

由于可控整流桥在一个晶闸管触发后到另一个晶闸管触发之间有一个失控期,在这个失控期内晶闸管整流桥对控制信号不能及时响应,于是采用一个小时间常数 T_V 近似表征时间上的滞后现象。由此得出晶闸管触发与整流装置的输入/输出函数关系为

$$U_d = K_V U_{c(t-T_V)} \quad (7-20)$$

式中: K_V ——晶闸管整流装置的放大倍数。

应用拉氏变换位移定理,晶闸管触发与整流装置的传动函数为

$$W_V(s) = \frac{U_d(s)}{U_c(s)} = K_V e^{-T_V s} \quad (7-21)$$

将 $e^{-T_V s}$ 按照泰勒级数展开,则式(7-21)变为

$$W_V(s) = \frac{K_V}{1 + T_V s + \frac{1}{2!} T_V^2 s^2 + \dots} \approx \frac{K_V}{1 + T_V s} \quad (7-22)$$

3) 测速反馈回路的传递函数

如果测速回路采用电阻分压取样电路,那么测速反馈回路的传递函数为

$$H(s) = \frac{U_{fn}(s)}{n(s)} = \alpha \quad (7-23)$$

鉴于转速不能突变,为了防止信号干扰,有时在测速反馈回路加入电容滤波,这种情况下的传递函数为

$$H(s) = \frac{U_{fn}(s)}{n(s)} = \frac{\alpha}{1 + T_{fn} s} \quad (7-24)$$

式中: T_{fn} ——速度反馈回路的滤波时间常数。

4) 比例控制器的传递函数

$$W_n(s) = \frac{U_n(s)}{\Delta U_n(s)} = K_n \tag{7-25}$$

通过以上各环节的传递函数，得出如图 7.8 所示的速度负反馈调速系统的动态结构图。

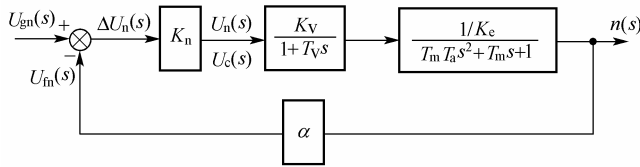


图 7.8 速度负反馈调速系统的动态结构图

2. 系统稳定性分析

速度负反馈闭环调速系统的传递函数为

$$\begin{aligned} W_b(s) &= \frac{n(s)}{U_{gn}(s)} = \frac{\frac{K_n K_V / K_e}{(1 + T_V s)(T_m T_a s^2 + T_m s + 1)}}{1 + \frac{K_n K_V / K_e}{(1 + T_V s)(T_m T_a s^2 + T_m s + 1)} \cdot \alpha} \\ &= \frac{K_n K_V / K_e}{(1 + T_V s)(T_m T_a s^2 + T_m s + 1) + K} \\ &= \frac{\frac{K_n K_V / K_e}{1 + K}}{\frac{T_m T_a T_V}{1 + K} s^3 + \frac{T_m (T_a + T_V)}{1 + K} s^2 + \frac{T_m + T_V}{1 + K} s + 1} \end{aligned} \tag{7-26}$$

由式(7-26)得出速度负反馈闭环调速系统的特征方程为

$$\frac{T_m T_a T_V}{1 + K} s^3 + \frac{T_m (T_a + T_V)}{1 + K} s^2 + \frac{T_m + T_V}{1 + K} s + 1 = 0 \tag{7-27}$$

其通式为

$$a_0 s^3 + a_1 s^2 + a_2 s + a_3 = 0 \tag{7-28}$$

三阶系统稳定的充要条件是

$$\begin{cases} a_0 > 0, & a_1 > 0, & a_2 > 0, & a_3 > 0 \\ a_1 a_2 - a_0 a_3 > 0 \end{cases} \tag{7-29}$$

由式(7-27)可知： $a_0 \sim a_3$ 均大于零，故控制系统稳定的条件只有

$$\frac{T_m (T_a + T_V)}{1 + K} \cdot \frac{(T_m + T_V)}{1 + K} > \frac{T_m T_a T_V}{1 + K}$$

整理后得到

$$K < \frac{T_m}{T_V} + \frac{T_V}{T_a} + \frac{T_a}{T_m} \tag{7-30}$$

式(7-30)表明，在系统参数 T_m 、 T_V 、 T_a 确定的前提下，从动态稳定性考虑，闭环系统

的开环放大系统 K 必须满足式(7-30)。 K 超过此值, 系统将会不稳定。在设计的过程中, 首先按照静态调速指标确定 K 的值, 然后按照动态稳定性进行校验。如果两者发生冲突, 只能采取动态校正实施改造。

7.2.4 转速闭环调速系统的基本特性

单闭环直流调速系统属于最基本的反馈控制系统, 具有反馈控制的基本规律, 其基本特征如下。

(1) 速度调节器采用比例调节器时控制系统有静差。由式(7-12)~式(7-14)可知, 开环放大系数 K 值对闭环系统稳态性能影响很大, K 值越大, 稳态性能越好。但是, 只要速度调节器采用比例调节器, 负载时式(7-9)不可能为零, 即稳态速度降只能减小, 而不能消除。另外, 当实际转速与 U_{gn} 对应的理想空载转速存在偏差时, 控制系统自动调节以减少偏差, 故带比例速度调节器控制系统也称为有偏差调节系统。

(2) 控制系统绝对服从给定输入。给定输入 U_{gn} 也称参考输入量, 是与速度反馈信号相比较的量。给定输入的微弱变化, 直接引起 ΔU_n 的变化, 从而导致输出量——转速的变化, 即改变给定输入就是在调节转速。如果给定输入的电源出现不应有的波动, 控制系统无法判断是正常调速还是扰动, 只能当作正常的调速来处理, 转速随着电源的波动而改变。

(3) 抗扰动的能力差。所谓扰动是指闭环系统中给定输入 U_{gn} 不变时, 所有引起输出量变化的因素。

在单闭环直流调速系统中, 放大器放大系数的漂移、交流电源电压波动、负载的变化、直流电动机励磁电流变化等前向通道上的扰动, 控制系统均能够检测出来并通过反馈控制, 减少此类扰动对稳态转速的影响。但是, 对于反馈通道中的扰动, 控制系统却无法抑制。如测速发电机的励磁变化或其输出电压中的换向波纹以及定子和转子间的偏心距, 都会给系统带来周期性的干扰。所以, 高精度的调速系统必须具有高精度的检测装置。

7.2.5 带电流截止负反馈的单闭环调速系统

1) 采用电流截止负反馈的原因

单闭环直流调速系统只是解决了转速调节问题, 它还存在严重的缺陷。因为生产机械通常要求快速启动和制动, 当系统输入给定电压 U_{gn} 采取突加的方式时, 由于电动机与负载的机械惯性, 转速不可能突变, 造成转速反馈电压大大滞后于给定电压的变化, 启动时转速反馈电压 $U_n=0$, 结果使偏差电压 ΔU_n 几乎是稳态工作值的 $(1+K)$ 倍。由于晶闸管触发和整流装置, 以及放大器的时间常数(惯性)都较小, 输出响应快, 整流装置输出电压 U_d 很快达到最高值, 直流电动机全电压启动。如果没有限流措施, 启动电流 I_{st} 过高, 会产生很大的冲击, 不仅对电动机换向不利, 而且会损坏晶闸管(晶闸管承受过载能力较差)。

此外, 有些工作机械可能会遇到堵转的情况。例如, 轧钢机的轨道电动机遇到钢材被卡住, 挖土机运行时碰到坚硬的石块等。由于闭环系统的静特性很硬, 如果没有限流措施, 与电动机启动过程一样, 电枢电流将大大超过允许值, 单纯依靠过流继电器或熔断器保护, 将导致控制系统无法正常工作。

为了解决反馈闭环调速系统的启动和堵转时电流过大的问题, 系统中必须有自动限制电枢电流过大的环节。根据反馈控制原理, 在启动和堵转时考虑引入电流负反馈, 以保证

电枢电流不超过允许值，而正常运行时电流负反馈被取消以保持较好的静特性硬度，否则静特性将变得太软而无法工作。这种当电流大到一定程度才出现的电流负反馈，称为电流截止负反馈，简称截流反馈。

2) 电流截止负反馈环节

电流截止负反馈环节如图 7.9 所示。在单闭环调速系统的基础上，引入电流检测及其反馈环节就可以构成电流反馈回路，实现电流闭环反馈。为了能够在电枢电流大到一定程度才投入电流截止负反馈，在系统中引入截止环节，它由电流信号检测与电压比较两部分构成。

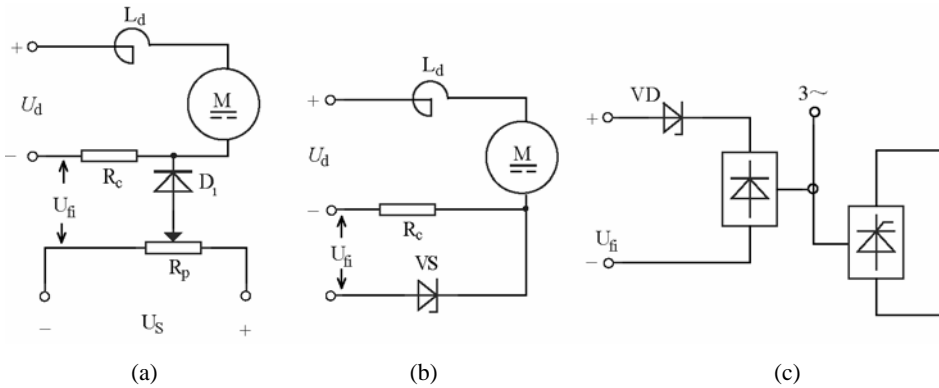


图 7.9 截流负反馈环节

在图 7.9(a)与图 7.9(b)中，通过串联在电枢回路的小阻值 R_c ，将电枢电流 I_d 转换为检测信号 $U_{jc}=I_dR_c$ ；图 7.9 (c)中，由三相(或二相)交流电流互感器将三相交流电流变成交流电压，经整流后得到与电枢电流成正比的电流检测信号 U_{jc} ，为了表达的方便，令 $U_{jc}=I_dR_c$ 。设 I_{dj} 为临界的截止电流，当电枢电流大于 I_{dj} 时，将电流负反馈信号 U_{fi} 加到放大器的输入端，而当电流小于 I_{dj} 时，将电流负反馈切断。为了实现此作用，需要引入比较电压 U_{bj} ，图 7.9(a)利用独立的直流电源作比较电压，用电位器调压。图 7.9(b)与(c)利用稳压管的击穿电压 U_w 作为比较电压，即 $U_{bj}=U_w$ 。负载时当电枢电流 $I_d > I_{dj}$ ，电流检测信号 $U_{jc} > U_{bj}$ ，稳压管反向击穿，允许电流负反馈信号 U_{fi} 通过， $\Delta U = U_{gn} - U_{fn} - U_{fi}$ 减小，从而迫使晶闸管整流装置输出电压迅速减小，电动机电枢电流随之下降。当电枢电流下降到 I_{dj} 以下时， $U_{jc} < U_{bj}$ ，电流反馈截止。

3) 带电流截止负反馈环节的单闭环调速系统的静特性

电流截止负反馈环节的输入/输出特性如图 7.10 所示。当 $(U_{jc}-U_{bj})$ 为负值时，输出为零，构成非线性环节；当输入信号 $(U_{jc}-U_{bj})$ 为正值时，输入与输出相等，构成线性环节。

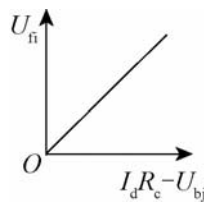


图 7.10 电流截止负反馈的输入/输出特性

在转速闭环调速系统的基础上引入电流截止负反馈环节，就可构成带有电流截止负反馈的单闭环调速系统。结合图 7.4，并考虑电流截止负反馈环节，就可得到带电流截止负反馈的单闭环调速系统的静态结构图，如图 7.11 所示。

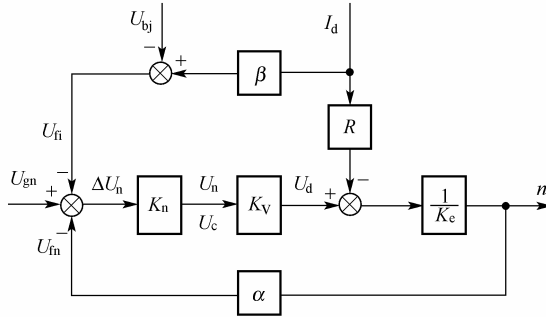


图 7.11 带电流截止负反馈的单闭环调速系统的静态结构图

当 $I_d < I_{dj}$ 时，电流负反馈截至，系统只有速度负反馈起作用，转速表达式见式(7-10)。

当 $I_d > I_{dj}$ 时，在电流负反馈的作用下，转速方程式为

$$\begin{aligned} n &= \frac{K_n K_v U_{gn}}{K_e (1 + K)} - \frac{K_n K_v (\beta I_d - U_{bj})}{K_e (1 + K)} - \frac{I_d R_\Sigma}{K_e (1 + K)} \\ &= \frac{K_n K_v (U_{gn} + U_{bj})}{K_e (1 + K)} - \frac{K_n K_v \beta + R_\Sigma}{K_e (1 + K)} I_d \\ &= n'_0 - \Delta n' \end{aligned} \quad (7-31)$$

式中： n'_0 ——电流截止负反馈环节投入时对应的理想空载转速；

$\Delta n'$ ——电流截止负反馈环节投入时对应的转速降。

通过分析式(7-10)与式(7-31)得到如图 7.12 所示的带电流截止负反馈环节的单闭环调速系统的静态输出特性。此时电流截止负反馈环节的作用相当于在电枢回路串入一个大电阻 $R' = K_n K_v \beta$ 。随着负载增大，电动机转速急剧下降，直至堵转。故而 BC 段对应的静态特性常被称为“挖土机特性”。

带电流截止负反馈环节的单闭环调速系统比较好地解决了负载限流问题，但对于启动过程而言，它所能维持最大电流的时间有限(与电枢回路时间常数有关)，影响了控制系统

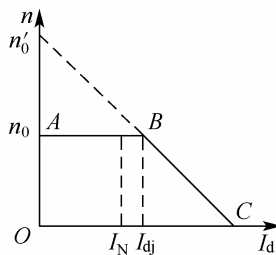


图 7.12 带电流截止负反馈的单闭环调速系统的静态特性

的动、静态特性。所以该系统只适用于小容量，且对启动特性要求不高的场合。

7.2.6 单闭环无静差调速系统

对于单闭环调速系统，以电动机启动为例，当系统输入量阶跃变化时，由于电动机惯性较大，对应的机电时间常数远大于电磁时间常数，电动机转速为零，导致 ΔU_n 值过大，晶闸管整流器输出的电压值达到最大值 U_{domax} (此时导通角为零)，电动机电枢回路的反电动势 $E_a=0$ ，电枢电流通常达到额定电流的五倍以上，导致电动机保护电路的快速动作，切断电枢电源，甚至烧毁晶闸管整流电路，电动机无法正常启动。因此，希望 U_{gn} 阶跃变化时， ΔU_n 能够随时间逐步增加，即不是通过简单的比例控制器将 ΔU_n 转换为 U_n ，而是采用一个比例积分 PI 调节器，保证启动过程的顺利进行。

1) 速度 PI 调节器

速度 PI 调节器电路如图 7.13 所示。在集成运放的电路中串入一个电容 C_f 和电阻 R_f 构成 PI 调节器。一般情况下， R_1 、 R_2 的取值为 $20\text{k}\Omega$ ， C_A 为滤波电容，与 R_1 一起构成缓冲电路(为了便于分析，在本节中暂时不考虑该缓冲电路)。 R_f 的取值由比例系数 K_n 决定， C_f 的取值由速度 PI 环节的时间常数 τ_n 决定。由电路原理的相关知识不难求出 PI 调节器的传递函数

$$G(s)=K_n(1+\frac{1}{\tau_n})=K_n\frac{1+\tau_n}{\tau_n} \quad (7-32)$$

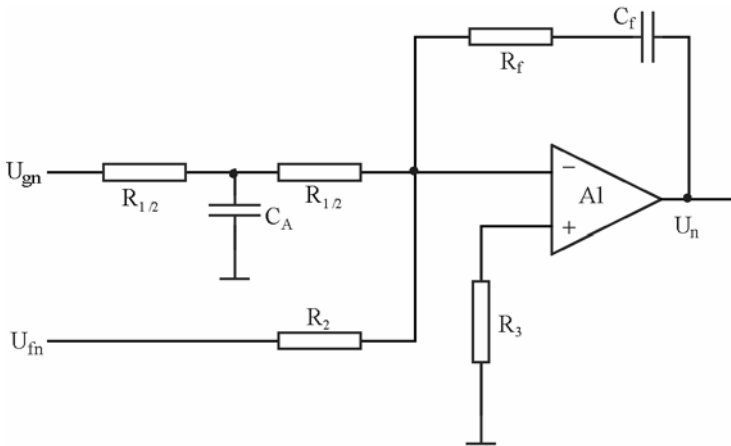


图 7.13 速度 PI 调节器电路

2) 单闭环无静差调速系统的工作原理

将图 7.3 中比例控制器替换为速度 PI 调节器，便得到单闭环无静差调速电路的原理图，如图 7.14 所示。结合图 7.8 得到单闭环无静差调速系统的动态结构图，如图 7.15 所示。

将相应的参数代入图 7.15 所示的动态结构图中，利用仿真工具(如 MATLAB)得到图 7.16 所示的动态过程。在图 7.16 (a)中，启动过程对应的启动电流较大，需要采取一定的措施；在图 7.16(b)中，单闭环无静差调速系统在阶跃负载扰动的作用下，转速 n 首先下降，导致 PI 调节器输入 ΔU_n 与输出 U_n 增大，电枢电流变大，转速增加，经过 2~3 次振荡后转速稳定恢复到扰动发生前的值，电枢端电压增大，使电枢电流增大，以便产生大的电磁转矩维

持转矩平衡。由于单闭环无静差调速系统在阶跃输入的作用下，存在一定的稳态误差，称为有差系数，式(7.14)表明该系统为一个 O 型系统。PI 调节器能够将阶跃输入信号转化为斜坡信号从而构成如图 7.13 所示的一阶无静差系统，即阶跃输入信号时无静态误差，斜坡输入信号时有一定的静态速度误差。

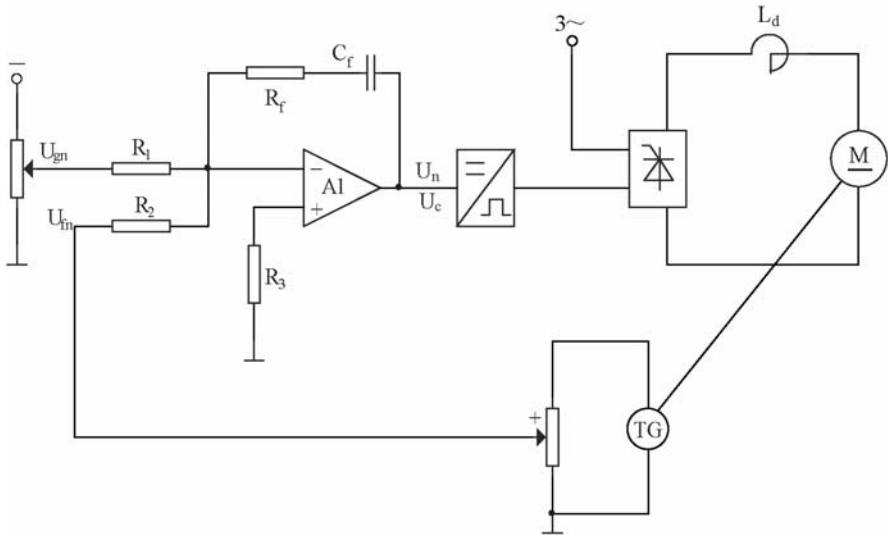


图 7.14 单闭环无静差调速电路的原理图

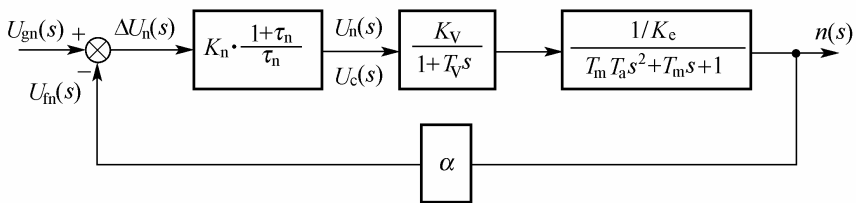
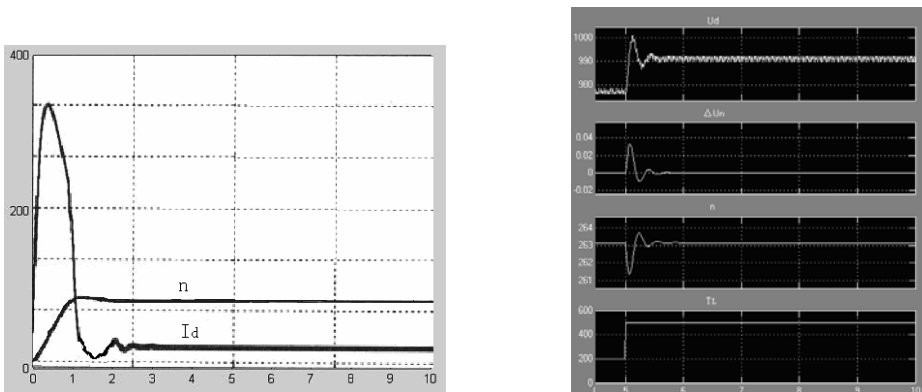


图 7.15 单闭环无静差调速系统的动态电路结构图



(a) 启动时的动态过程

(b) 阶跃转矩扰动时的动态过程

图 7.16 单闭环无静差调速系统的动态过程

在负载扰动下的动态速度降是调速系统的一个非常重要的动态指标。有的机械设备(如连轧机)除了有静态精度要求外,还有动态精度要求。如果超过了这些指标,不但影响产品质量,而且严重时会造成事故。因此,在系统设计与调试时,必须同时关注静、动态指标。

7.3 电压负反馈和电流正反馈自动调速系统

转速负反馈单闭环直流调速系统具有较好的调速性能,但是系统需要装设测速发电机检测转速的实时值。这样一方面增加了控制成本,另一方面需要占用一定的空间,且需要直流电动机两端出轴。因此,对于调速范围较小($D \leq 10$),最大静差率 $s_{\max} < 0.1$ 的场合,可通过检测电枢电压,构建电压负反馈替代速度负反馈。为了避免出现电压负反馈引起静态特性变差的现象,在调速系统中加入电流正反馈,以此构成电压负反馈与电流正反馈的直流调速系统。

7.3.1 带电流正反馈的电压负反馈调速系统的组成

1. 系统组成

电压负反馈与电流正反馈的直流调速系统原理图如图 7.17 所示。

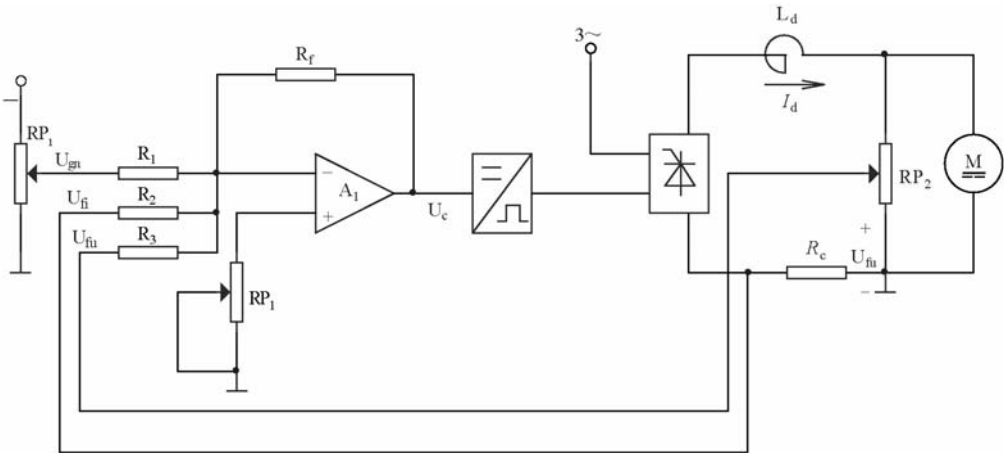


图 7.17 电压负反馈与电流正反馈的直流调速系统原理图

该系统由控制对象、传感器、控制器和执行器四部分组成。其中,电流传感器检测电枢电流,输出 U_{fi} ;电压传感器检测电枢端电压,输出 U_{fi} 。 U_{fi} 与 U_{gn} 的极性相同,称为电流正反馈; U_{fi} 与 U_{gn} 的极性相反,称为电压负反馈。

2. 电枢电流检测

为了满足电流检测(或者电流保护)的要求,一般采用以下三种方法检测直流电动机的电枢电流。

1) 电阻采样

图 7.9 是通过直接检测的方式获得电流反馈值 U_{fi} ，即在电枢回路串入小电阻 R_c ，利用其上的电压降 $R_c i_d$ 作为电流反馈信号。电阻 R_c 的主要优点是反应速度快，缺点是其发热有可能影响其他控制元件的正常工作，不适用于 20kW 以上的直流电动机。另外，随着温度的增加， R_c 电阻值的变化必然引起测量误差，从而影响控制系统的精度。

对微机控制而言，一般需要实现强、弱电隔离。如果电枢电流方向不变，可选择光电隔离的电流检测方式，如图 7.18 所示。利用运算放大器 A_1 提高电流检测的灵敏度，利用运算放大器 A_2 和光耦合器 V_2 提高电流检测的线性度， U_{fi} 经过 A/D 转换送给微机实现控制。如果电枢电流的方向变化，可采用霍尔电流传感器。

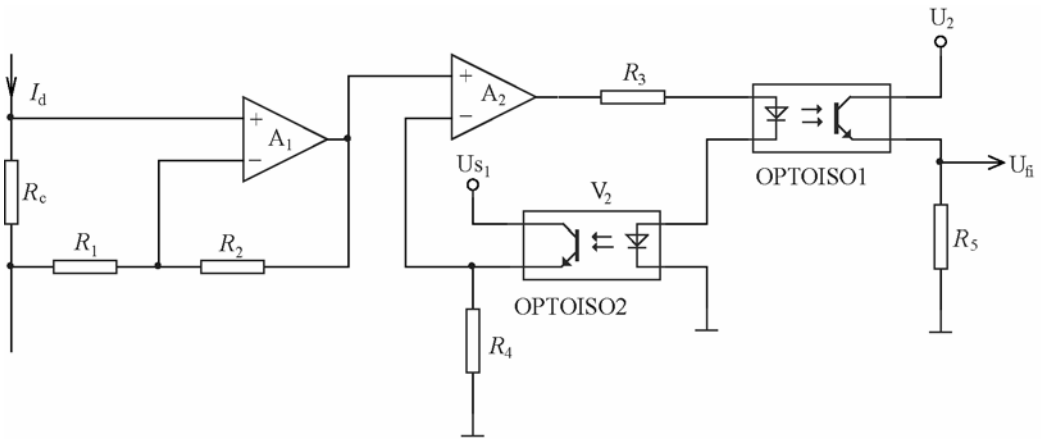


图 7.18 带光电隔离的电流检测

2) 霍尔(电流)传感器

霍尔式传感器按被测量的性质可分成电量型和非电量型两大类。电量型又有电流型、电压型两类，电流型霍尔式传感器主要有直测式和磁补偿式两种；非电量型按用途又可分为开关型(用于控制)和线性型(用于测量)两大类。直测式电流型霍尔式传感器主要用于电动机控制、变频调速、整流器、数控机床等许多测量精度要求不高的场合。磁补偿式电流型霍尔式传感器由一次侧电路、聚磁环、霍尔器件、二次绕组和放大电路几部分组成，电流回路所产生的磁场被二次绕组产生的磁场平衡，使霍尔器件始终处于零磁通的工作状态。由于其响应速度极快，故能达到很高的测量精度，主要应用于高精度的电流检测中。

由于霍尔电流传感器体积小、测量精度高、线性度好、响应快、灵敏度高、输出幅度大、温度漂移小、实现了强弱电的完全隔离等诸多优点，且对电源稳定性要求不高，故在各种电量、非电量检测及工业过程自动控制等许多领域得到了越来越广泛的应用。

3) 交流电流互感器

利用交流电流互感器，可获得与直流电动机电枢电流成正比的晶闸管整流装置交流侧的电流，取样电路如图 7.19 所示。交流电流互感器二次侧经桥式整流、分压后获得 U_{fi} 。如果 U_{fi} 为负反馈信号，则 A 点接地；如果 U_{fi} 为正反馈信号，则 B 点接地。

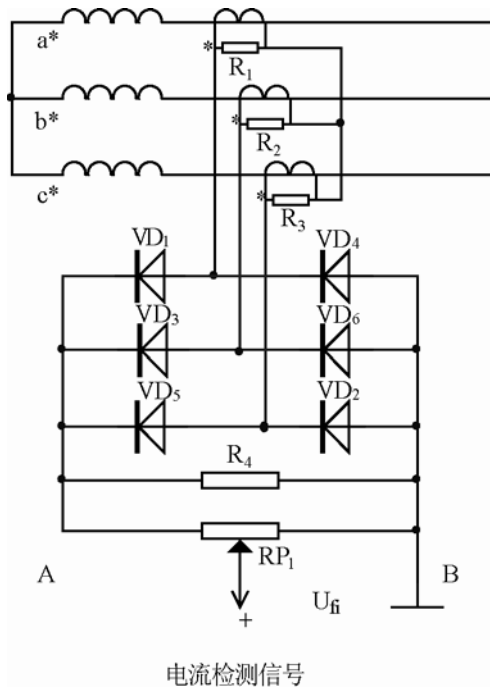


图 7.19 交流电流互感器取样电路

3. 电枢电压检测

直流电动机电枢电压检测和电流检测非常相似,可采用电阻分压采样、霍尔电压传感器、电压互感器三种方式,检测输出量 U_{fi} 作为反馈量,电压检测电路可参考图 7.18、图 7.19。

7.3.2 带电流正反馈的电压负反馈调速静特性

1. 电压负反馈调速系统静特性

电压负反馈调速系统静态电路结构图如图 7.20 所示。控制系统主电路的电阻由晶闸管整流装置内阻(包括平波电抗器内阻) R_r 与电枢电阻 R_a 构成,反馈电压 $U_{fi}=\gamma U_d$, 其中 γ 称为电压反馈系数。利用结构图运算规则,电压负反馈对应的静态转速方程为

$$\begin{aligned}
 n &= \frac{K_n K_v U_{gn}}{K_e (1+K)} - \frac{R_r}{K_e (1+K)} \cdot I_d - \frac{R_a}{K_e} \cdot I_d \\
 &= n_0 - \Delta n_1 - \Delta n_2
 \end{aligned}
 \tag{7-33}$$

式中: $K = K_n K_v \gamma$ ——电压反馈回路增益;

$\Delta n_1 = \frac{R_r}{K_e (1+K)} \cdot I_d$ ——由晶闸管整流装置内阻 R_r 引起的静态转速降;

$\Delta n_2 = \frac{R_a}{K_e} \cdot I_d$ ——由电枢电阻 R_a 引起的静态转速降。

与式(7-7)比较不难发现,由 R_a 引起的静态转速降与开环控制一致,即 Δn_2 没有受到电压负反馈的制约,对系统静特性的影响依然较大。为了减小静态转速降,提高系统调速性

能，在电压负反馈的基础上引入电流正反馈。

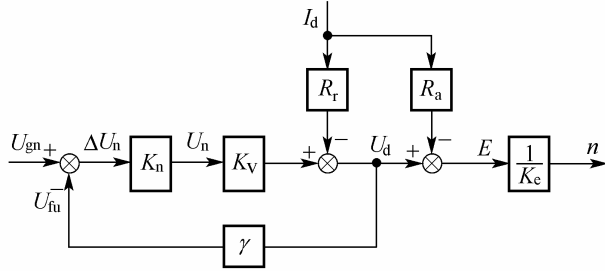


图 7.20 电压负反馈调速系统静态电路结构图

2. 电流正反馈调速系统静特性

带电流正反馈的电压负反馈调速系统的静态电路结构如图 7.21 所示。在调速系统输入端增加了同极性的反馈量，由此可以导出带电流正反馈的电压负反馈调速系统静态转速方程

$$\begin{aligned}
 n &= \frac{K_n K_v U_{gn}}{K_e (1 + K)} - \frac{R_r}{K_e (1 + K)} \cdot I_d - \frac{R_a}{K_e} \cdot I_d + \frac{K_n K_v \beta}{K_e (1 + K)} \cdot I_d \\
 &= n_0 - \Delta n_1 - \Delta n_2 + \Delta n_3
 \end{aligned}
 \tag{7-34}$$

式中：\$\beta\$——电流反馈系数；

\$\Delta n_3\$——电流正反馈补偿的静态转速降。

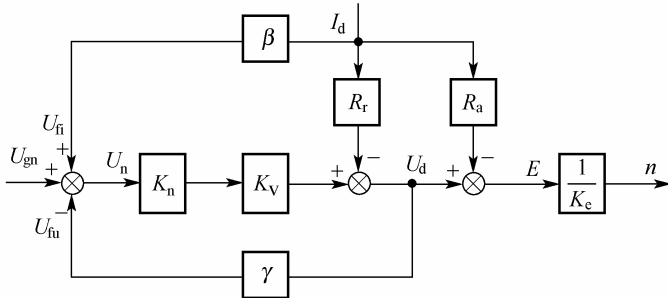


图 7.21 带电流正反馈的电压负反馈调速系统的静态电路结构图

根据式(7-34)，当负载增加时，电枢电流 \$I_d\$ 增大，\$R_r\$ 与 \$R_a\$ 引起的静态转速降 \$\Delta n_1 + \Delta n_2\$ 变大，而电流正反馈的补偿值 \$\Delta n_3\$ 增加。因此，只要选择合适的电流反馈系数 \$\beta\$，便能够在一定的条件下实现全补偿，即 \$\Delta n_3 - \Delta n_1 - \Delta n_2 = 0\$，从而导出全补偿时的 \$\beta\$ 取值

$$\beta = \frac{R_r + (1 + K)R_a}{K_n K_v} = \beta_0
 \tag{7-35}$$

式中：\$\beta_0\$——全补偿系数。

因为电流正反馈环节只能对负载扰动进行补偿，且补充效果依赖于环境状况，事实上它隶属于“补偿控制”，并不属于真正意义上的“反馈控制”，因此电流正反馈又称为电流正向前馈。

事实上, 由于全补偿系数 β_0 受制于 R_r 与 R_a , 当温度变化时, R_r 、 R_a 的值发生漂移, β_0 并不是恒定的常数。而电流反馈系数 β 由电路的结构决定, 不能实时调节。当 $\beta > \beta_0$ 时, 称为过补偿, 直流电动机机械特性曲线上翘, 控制系统处于不稳定运行状态。当 $\beta < \beta_0$ 时, 称为欠补偿, 存在静态转速降 (Δn 的值较小), 控制系统处于稳定状态。因此, 带电流正反馈的电压负反馈调速系统只能选择欠补偿工作方式。

当电动机处于启动(或者堵转)状态时, 由式(7-34)可得

$$I_d = \frac{K_n K_V U_{gn}}{R_r + (1 + K)R_a - K_n K_V \beta} \quad (7-36)$$

此时, 电枢电流 I_d 急剧增加, 甚至远远大于电枢额定电流值。因此, 在选用带电流正反馈的电压负反馈调速方式时, 应对电动机采取相应的保护措施限制电枢电流, 防止过载、过电流等对电动机的损坏。

7.4 直流电动机双闭环调速系统

带速度 PI 调节器的直流调速系统, 正常运行时较好地解决了系统静、动态之间的矛盾, 但是在电动机启动、制动、突加负载等情况下, 不能够有效地控制电枢电流的动态波形, 电动机动态响应速度并不理想, 引起电枢电流急剧增加, 从而导致电动机换向恶化, 甚至损坏晶闸管装置。为了解决此类问题, 最佳途径是采用速度、电流双闭环控制。

7.4.1 双闭环调速系统的组成

采用电流截止 PI 调节器的单闭环调速系统在保证系统稳定的条件下, 可以实现转速的无静差, 也可利用电流截止负反馈来限制给定值突然变化时引起的冲击电流, 但是动态性能并不理想, 电枢电流和电磁转矩维持允许的最大值, 故不能充分利用电动机的过载能力获得最大的动态响应速度。另外, 一个 PI 调节器可实现正常负载的速度调节和过载时的电流调节, 无法获得速度调节与电流调节均最优的控制器参数, 即难以保证速度与电流两种调节过程都具有良好的动态品质。

为了改善系统的静态特性, 避免速度与电流输入值的突变给系统带来的冲击, 直流调速系统设置了两个 PI 调节器, 二者串联连接, 构成双闭环调速系统, 如图 7.22 所示。观察闭环反馈的结构可知, 电流调节环为内环, 转速调节环为外环。电流调节环由电流调节器 (ACR)、晶闸管移相触发器 (CF)、晶闸管整流器和电动机电枢回路组成。ASR 的输出 U_n 作为电流调节器 (ACR) 的给定信号。 U_n 与电流反馈信号 U_i 比较后, 将差值送入 ACR, 经过 PI 处理, ACR 的输出移相电压 U_c , 通过 CF 控制晶闸管整流器的输出电压 U_d , 在 U_d 的作用下电动机的电枢电流和电磁转矩将相应地发生改变。速度环由 ASR、电流调节环组成。 U_{gn} 作为 ASR 的给定信号, U_{gn} 与电动机同轴连接的测速发电机输出的速度反馈信号 U_{fn} 比较后, 将差值送入 ASR, 经过 PI 处理, 转速调节器的输出移相电压 U_n , 作为 ACR 的给定信号, 通过电流调节环控制作用调节电枢电流 I_d 和电磁转矩 T , 最终达到调速的目的。

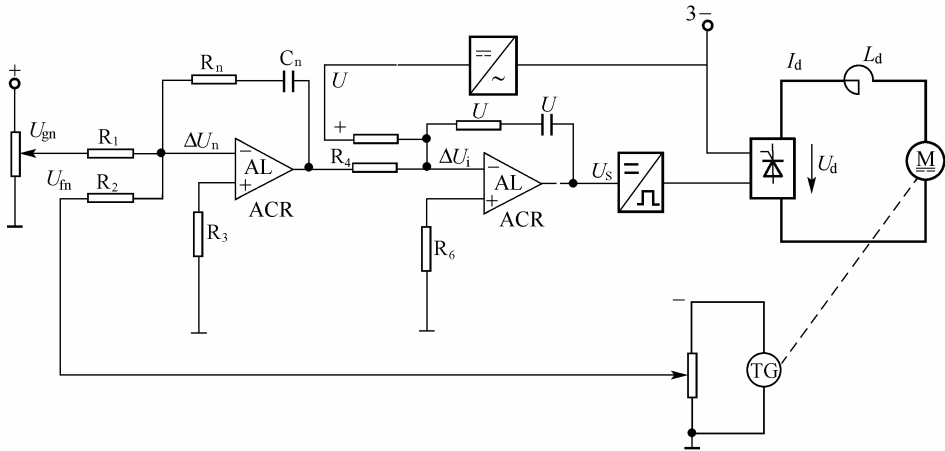


图 7.22 双闭环调速系统原理图

由于速度 PI 调节器的限幅作用，ASR 输出的饱和电压 U_{nmax} 大小取决于系统对最大加速度的要求和直流电枢的过载能力，同时决定了 ACR 输入电压的最大值，即限制了晶闸管整流电路输出的最大电压值 U_{dmax} 。

7.4.2 双闭环调速系统的静态特性

双闭环调速系统的静态电路结构如图 7.23 所示。系统正常运行时 ACR 不会达到饱和状态，即 $\Delta U_i = 0$ ，电流无静差，因此在分析系统静态特性时，只需要讨论 ASR 的不饱和与饱和两种情况。

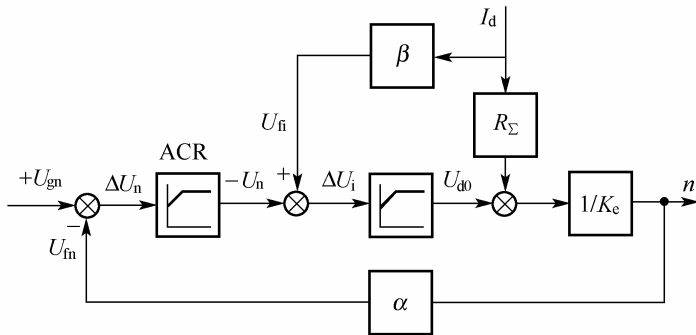


图 7.23 双闭环调速系统静态电路结构图

系统处于正常负载运行状况时，电枢电流一般不大于额定值，即 $I_d < I_{dmax}$ ，ASR 处于不饱和状态，即 ΔU_n ，速度无静差。ASR 起辅助作用，保证了系统具有硬的机械特性。

当负载增大，电枢电流达到 I_{dmax} 后，转速下降， ΔU_n 增大，使 ASR 饱和，转速调节环呈开环状态，双闭环系统变成电流无静差的单闭环系统，系统稳定时电枢电流最大值不超过 I_{dmax} ，起到过流保护作用。

7.4.3 双闭环调速系统的动态特性

1. 双闭环调速系统的动态结构图

(1) 双闭环调速系统的动态电路结构图如图 7.24 所示, 为了便于分析, 直流电动机中采用简化模型。图 7.24 中的电流调节环由以下四个部分组成。

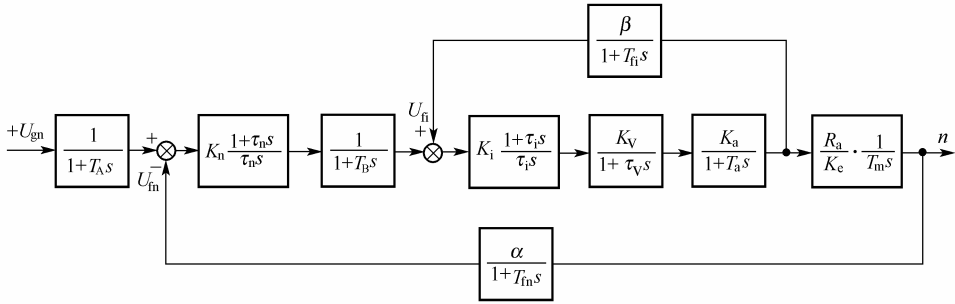


图 7.24 双闭环调速系统的动态电路结构图

① $K_i \frac{1 + \tau_i s}{\tau_i s}$ 环节: 代表电流 PI 调节器[可参考式(7-32)], 其中 K_i 为放大系数, τ_i 为电流 PI 环节时间常数。

② $\frac{K_v}{1 + \tau_v s}$ 环节: 代表晶闸管整流装置。

③ $\frac{K_a}{1 + T_a s}$ 环节: 代表电枢回路, 为一个惯性环节。由于电枢回路平波电抗 L_d 的存在,

电枢回路时间常数 T_a 较大, 为几十至几百毫秒。

④ $\frac{\beta}{1 + T_{fi} s}$ 环节: 对应电流反馈回路的传递函数(没有滤波电容则直接用 β 表示), T_{fi}

为电流反馈回路的滤波时间常数, 其值较小, 一般为几毫秒。

(2) 转速调节外环由电流调节环和以下四个部分组成。

① $\frac{1}{1 + T_A s}$: 对应速度输入端滤波(缓冲)环节, 目的在于减小给定突变时, 转速调节过

程中可能出现的超调量, 如果给定输入不可能发生阶跃突变, 则可省略该环节。

② $K_n \frac{1 + \tau_n s}{\tau_n s}$: 代表速度 PI 调节器。

③ $\frac{1}{1 + T_B s}$: 对应电流环输入端的滤波(缓冲)环节。

④ $\frac{\alpha}{1 + T_{fn} s}$: 对应速度反馈回路的传递函数(没有滤波电容则直接用 α 表示), T_{fn} 为速度

反馈回路的滤波时间常数, 其值较小, 一般为几毫秒。

调速系统性能的优劣, 一般用静态性能和动态性能的好坏综合评定。前面已经分析了双闭环调速系统的静态特性, 下面将分别讨论双闭环调速系统的突加给定时的动态跟随性

能和突加扰动时的动态抗干扰性能。

2. 双闭环调速系统的动态跟随性能

下面以直流电动机启动时的过渡过程说明双闭环调速系统动态跟随性能。

双闭环调速系统启动时的过渡过程如图 7.25 所示。速度调节器经历了不饱和、饱和与退出饱和三个阶段，整个过渡过程相应地被分为电流上升阶段、恒流转速直线上升阶段、速度调节阶段。

1) 电流上升阶段

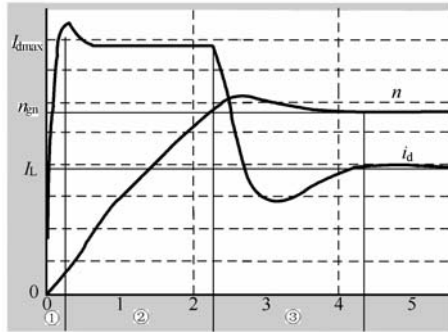


图 7.25 双闭环调速系统启动时的过渡过程

在系统输入端突加给定电压 U_{gn} 时，由于电动机的转动惯量影响，转速 $n=0$ ，转速反馈电压 $U_{fn}=0$ 。这样速度调节器中输入信号和反馈信号的差值 $\Delta U_n = U_{gn}$ 相当大，经速度 PI 调节器的放大作用后，输出将达到 ST 的饱和限幅值 U_{nmax} ， U_{nmax} 便是电流调节器的最大输入信号。使晶闸管整流桥的移相角前移，整流输出电压增加，于是电枢电流急剧上升，电动机电磁转矩 T 随之迅速增大，电动机很快启动起来。由于电流 PI 调节器经过优化设计后，电流反馈回路的等效时间常数比较小，电枢电流的增长很快就会达到速度调节器输出限定值 I_{dmax} （通常就是电枢回路和晶闸管所允许的最大电流），于是就进入下一阶段——恒流转速直线上升阶段。

2) 恒流转速直线上升阶段

由于电枢电流已达到了限定值 I_{dmax} ， U_{fi} 和 U_n 维持平衡，整流桥的移相角保持在某一数值上。随着转速的升高，电动机的反电动势将增大，根据直流电动机电压方程式，电枢电流 I_d 稍微下降。但是，只要 I_d 有所下降，电流反馈信号也将变小，速度调节器的输入信号差值 ΔU_i 就会增加，速度调节器的输出 U_c 也将随之上升，通过控制整流桥的移相角，使电枢电流又回到 I_{dmax} 。 I_d 保持在 I_{dmax} 的过程一直要继续到电动机的转速接近给定值时为止，然后转入转速调节阶段。在转速直线上升阶段，由于实际转速一直小于给定值，速度调节器始终处于饱和输出状态，实际上系统中只有速度调节器在起作用，使电动机始终以最大转矩加速，转速直线上升。

3) 转速调节阶段

当电动机转速达到给定值时起开始进入转速调节阶段。这时，电动机的转速达到并超过了给定值，使转速反馈电压 $U_{fn} > U_{gn}$ ， $\Delta U_n < 0$ ，速度调节器将退出饱和， U_n 值减小。 U_n 的减小，导致了电枢电流下降，电动机的电磁转矩也将下降。当电磁转矩小于负载转矩

时，电动机减速，回到转速给定值。此时速度调节器的输入为零，即 $\Delta U_n = 0$ 。由于采用 PI 调节器，通过积分作用， $U_n \neq 0$ ，即速度调节器的给定输入不等于零，这样 U_c 、 U_d 均保持某一数值，保证了电动机稳定运行于和给定信号相对应的转速。

3. 双闭环调速系统的动态抗干扰性能

对于直流双闭环调速系统而言，电网电压扰动和负载扰动是两个主扰动，如果系统能够有效地抑制动态转速降，缩短恢复时间，则说明系统具有较强的动态抗干扰能力。

1) 电网电压扰动

交流电网电压波动(假设此时负载转矩不变)，直接影响晶闸管输出电压 U_d ，引起电动机电枢电流波动。由于电流调节环运行于不饱和状态， $\Delta U_i \neq 0$ ，电流环马上起调节作用，维持电流的恒定。

2) 负载扰动

负载扰动，双闭环调速系统动态波形图如图 7.26 所示。负载突然增加时，转矩平衡被破坏，电磁转矩小于负载转矩，转速 n 下降，转速反馈信号 U_{fn} 下降， $U_{fn} < U_{gn}$ ， ΔU_n 出现正偏差，经过速度调节器使 U_n 的绝对值增大，经过电流调节器使 U_c 增加，整流桥移相角前移， U_d 增加，电枢电流 I_d 增大。经过一、二次振荡，电枢电流上升至新的静态特性工作点，转速回到原来值。

由此可见，负载扰动作用在转速调节环内，通过速度调节器产生抗干扰作用，对电流调节器而言，需要具有良好的跟随性能。

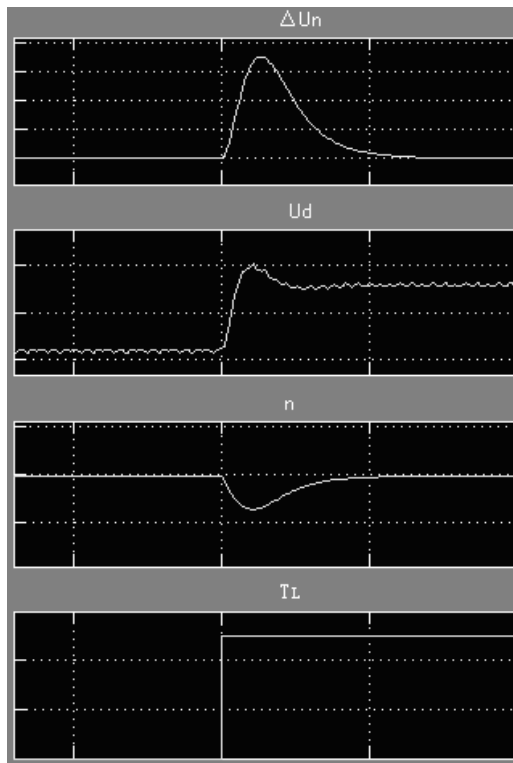


图 7.26 双闭环调速系统负载突变时的动态波形图

综上所述，速度调节器和电流调节器的作用可归纳如下。

速度调节器的主要作用为：系统稳定时，速度调节器控制转速跟随 U_{gn} 的变化，实现静态无转差；速度调节器输出限幅值决定了允许的电枢电流最大值，电流调节环进行恒流控制；对负载扰动起抗干扰作用。

电流调节器的主要作用为：启动时，保证电动机获得最大启动电流，使控制系统具有良好的动态特性；直流电动机出现过载等故障时，电流调节器输出限幅值决定了电枢电流最大值，起到安全保护作用，故障消失后系统自动恢复正常工作状态；对电网电压扰动起抗干扰作用。

7.5 直流电动机可逆调速系统

在生产实践中，有许多场合要求直流电动机不仅能够调速，而且能快速四象限运行——正、反向电动与正、反向制动。例如，龙门刨床工作台要求不断在正向电动、正向快速制动、反向电动与反向快速制动四个状态间频繁地依次切换，最佳选择是采用可逆调速系统。本节主要讨论有环流与逻辑无环流两种晶闸管可逆调速系统，可逆脉宽调制调速系统将在下一节中介绍。

7.5.1 直流电动机可逆有环流调速系统

1. 直流电动机可逆调速系统的主电路

根据第1章的相关内容，要改变直流电动机的转向，必须改变电动机电磁转矩的方向。由直流电动机电磁转矩的基本方程式(1-2)可知，电磁转矩的方向由电枢电流 I_a 和主磁通 Φ 的方向决定，改变主磁通 Φ (励磁电流)或者改变电枢电流的方向(两者只能选其一)，才能改变电动机电磁转矩的方向。由于励磁回路时间常数较大，直接影响系统的快速性，且改变励磁电流方向时易出现“飞车”现象，故现在主要采用改变电枢电流的方向和大小实现可逆调速。鉴于励磁回路的功率远远小于电枢回路的功率，对于快速反应性能要求不高、转向切换不频繁的大容量直流可逆系统，如卷扬机、矿井提升机、电力机车等可考虑采用励磁绕组极性反接的可逆调速系统。

由于晶闸管整流器只允许电流单向流动，为了改变电枢电流方向，采用两组可控整流桥构成可逆调速电路，分别提供两个方向的电枢电流。两组可控整流桥连接方式有交叉连接法和反并联(反极性并联)接法，这两种接法对应的电路从本质而言没有多大差别，目前应用较多的是采用同一交流电源向两组可控整流桥供电的反并联电路，其主电路如图 7.27 所示。

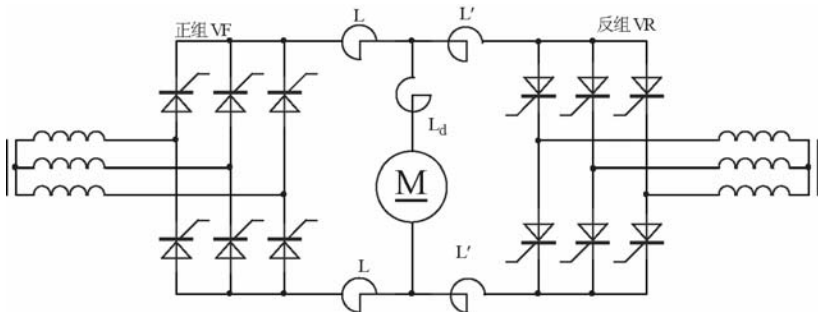


图 7.27 晶闸管反并联连接的直流可逆调速系统的主电路

2. 可逆调速系统的环流

所谓环流是指不经过直流电动机(或其他负载), 直接在两组整流桥之间流通的电流。在可逆调速系统中, 环流具有两重性。一方面利用小环流作为晶闸管的基本负载, 即使电动机工作在空载或轻载状态时, 晶闸管装置仍然能工作在电流连续区, 减少了电流断续引起的非线性现象对系统静、动态性能的影响; 同时可以消除电流反向过程中的死区, 加快反向时的过渡过程。另一方面环流明显增加了晶闸管的负担, 浪费了有功功率, 环流太大时甚至会损坏晶闸管。

环流可分为静态环流和动态环流两大类。所谓静态环流, 是指可逆系统中晶闸管装置在一定的控制角下稳定工作时所出现的环流, 它可分为脉动环流与直流环流。所谓动态环流, 是指晶闸管触发相位突然改变时, 系统处于过渡过程时出现的环流, 因而系统稳定运行时不存在动态环流。

1) 直流环流及其抑制

如果控制正组晶闸管 V_F 与反组晶闸管 V_R 均处于整流状态, 如图 7.28 所示。 V_F 与 V_R 的输出电压 U_{dof} 与 U_{dor} 正极与负极相连, 势必造成直流电源短路, 产生的短路电流称为直流环流 I_c , 直流环流 I_c 的平均值的表达式为

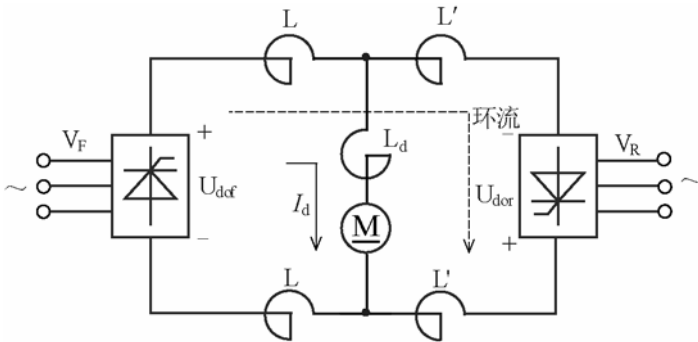


图 7.28 直流环流示意图

$$I_c = \frac{U_{dof} + U_{dor}}{2R_V} \quad (7-37)$$

当 V_F 工作于整流状态, V_R 工作于逆变状态时, U_{dof} 极性不变而 U_{dor} 极性改变, 此时直流环流 I_c 平均值的表达式为

$$I_c = \frac{U_{dof} - U_{dor}}{2R_V} \quad (7-38)$$

比较式(7-37)与式(7-38)不难发现, 式(7-38)中等式右边的分子部分明显减少。当 $U_{dor} < U_{dof}$ 时, 仍然存在直流环流, 此时 $\alpha < \beta$; 当 $U_{dor} = U_{dof}$ 时, $I_c = 0$, 完全消除环流, 此时 $\alpha \geq \beta$ 。

在实际的应用过程中, 为了方便控制, 按照 $\alpha = \beta$ 的条件控制两组晶闸管装置, 以便消除直流环流。同时为了防止发生逆变颠覆事故, 一般取 $\alpha_{\min} = \beta_{\min} = 30^\circ$ 。

2) 脉动环流及其抑制

由于晶闸管输出的瞬时电压是脉动的，采用 $\alpha=\beta$ 配合控制器工作时， U_{dof} 与 U_{dor} 虽然平均值相等，但瞬时值并不相等，从而产生瞬时电压差 $\Delta U_{do}=U_{dof}-U_{dor}$ ，引起瞬时脉动环流 i_c ，显然 ΔU_{do} 是时间 t 与晶闸管控制角 $\alpha(\beta)$ 的函数。

瞬时脉动环流始终存在，需要采取措施进行抑制。最有效的方法是在环流回路中串入电抗器，利用电抗器的限流作用削弱瞬时脉动环流。因而该电抗器被称之为环流电抗器或均衡电抗器，如图 7.28 中的 L 、 L' 。

3. 有环流的可逆调速系统的控制电路

目前的环流可逆调速系统主要有 $\alpha=\beta$ 配合控制调速系统与可控环流控制调速系统两种类型。这两种类型的主电路相似，均采用三相全桥式反并联可逆线路的主电路形式，设置四个环流电抗器，同时设置一个平波电抗器 L_d 避免环流电抗器流过较大的负载电流而饱和。

$\alpha=\beta$ 配合控制系统的瞬时脉动环流自然存在，故而又称为自然环流系统。 $\alpha=\beta$ 配合控制调速系统原理图如图 7.29 所示。

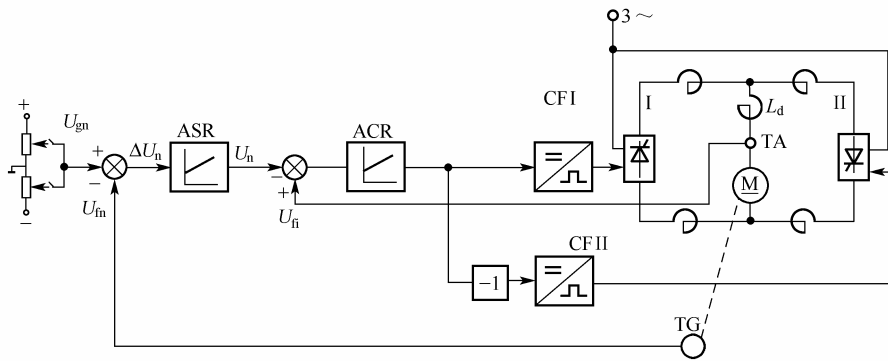


图 7.29 $\alpha=\beta$ 配合控制调速系统原理图

7.5.2 逻辑无环流可逆调速系统

1. 逻辑无环流可逆调速系统的控制电路

逻辑无环流可逆调速系统的原理图如图 7.30 所示。其主电路采用晶闸管整流桥反并联，为抑制电枢电流的脉动和保证电流连续性，电枢回路串入平波电抗器。控制回路采用典型的双闭环系统，ACR I、ACR II 分别控制正组 CF I 与反组 CF II。逻辑装置 LJ 的作用是根据给定信号的极性和主电路的状态决定对正、反组触发脉冲实行开放和封锁控制，以及在何时进行切换从而达到无环流的目的。当系统要求有正的电枢电流时，逻辑装置 LJ 开放正组触发脉冲 CF I，使正组晶闸管装置 I 工作；封锁反组触发脉冲 CF II，使反组晶闸管装置 II 停止工作。当系统要求有负的电枢电流时，逻辑装置 LJ 开放反组触发脉冲 CF II，使反组晶闸管装置 II 工作；封锁正组触发脉冲 CF I，使正组晶闸管装置 I 停止工作。

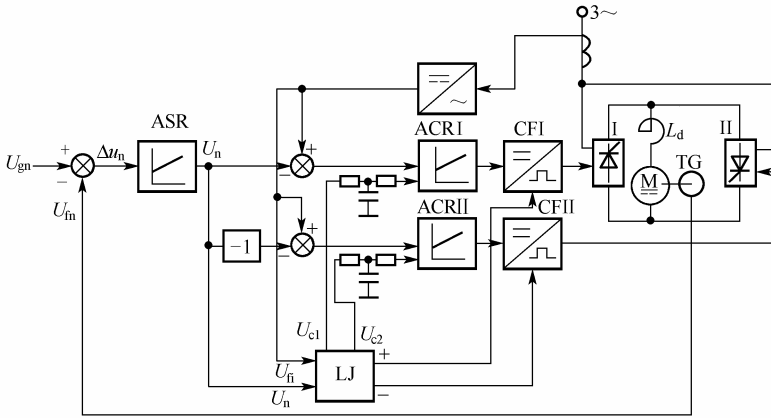


图 7.30 逻辑无环流可逆调速系统的原理图

2. 调速系统对逻辑装置的要求

为了保证调速系统的正常工作，无环流可逆调速系统对逻辑装置 LJ 的具体要求如下：

- (1) 任何时候只允许一组晶闸管整流桥有触发脉冲，以避免产生环流。
- (2) 两组晶闸管整流桥进行切换的充要条件是电流给定信号改变极性且零电流检测器发出零电流信号后，才能发出逻辑切换指令。
- (3) 系统工作时，只有当整流桥断流并且确定关断后，才能封锁其脉冲，以防止发生逆变颠覆现象。
- (4) 任何一组整流桥在开放时，其触发相位应该与电动机电枢电动势相适应，避免电流冲击。

3. 逻辑装置电路

为了实现以上功能，逻辑装置由信号检测、逻辑判断、延时逻辑保护与输出四部分组成，基本电路如图 7.31 所示。

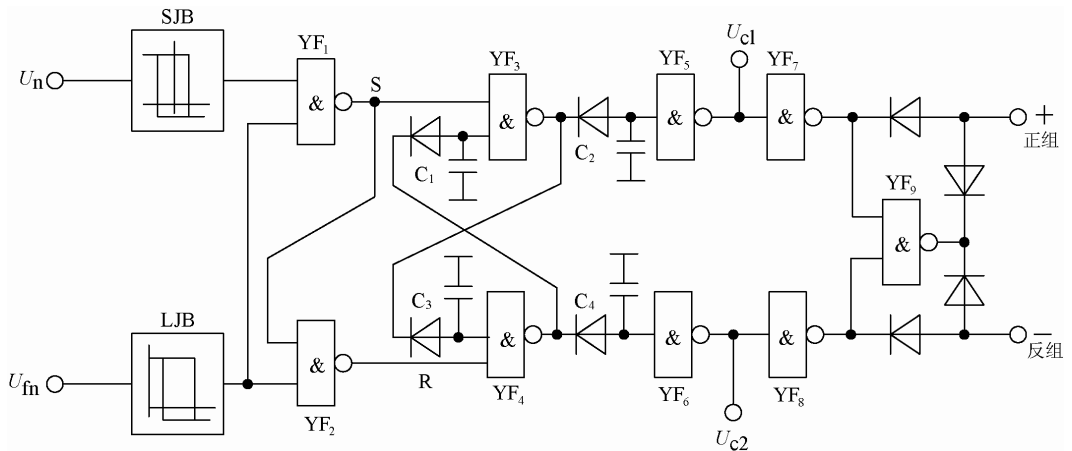


图 7.31 无环流可逆调速系统的逻辑电路示意图

1) 信号检测电路

信号检测部分设置有两个电平检测器——转矩极性鉴别器(SJB)和零电流检测器(LJB)。转矩极性检测器转矩极性鉴别器采用具有正反馈的电平检测器,根据 U_n 极性判定电动机转矩的极性。例如正向给定转速大于实际转速时,要求电动机正向加速,需要正向的电磁转矩。此时正的给定电压 $U_{gn} > U_{fn}$, $\Delta U_n > 0$, 经过 ST 的反相, $U_n < 0$, SJB 输出为高电平“1”,通过逻辑判断,使正组整流桥开放,反组整流桥封锁,满足正向加速的需要。其他三种电动机运行方式与此类似。

零电流检测器采用带偏置电压的具有正反馈的电平检测器,用来检测电枢电压是否为零。当电枢电流 I_d 为零($U_n=0$)时,零电流检测器输出高电平“1”,否则输出低电平“0”。

2) 逻辑判断电路

逻辑判断电路由四个与非门 $YF_1 \sim YF_4$ 组成,主要任务是根据转矩极性鉴别器输出状态和零电流电平检测器的输出状态,正确地判断控制系统是否切换。如果切换,逻辑判断电路发出逻辑切换指令。设系统起初没有工作,主回路电流为零,零电流检测器输出为“1”。这时 YF_1 开放,它的输出完全决定于转矩极性鉴别器的信号。若是此时电动机要求正向启动,由于速度调节器输出的信号 U_n 为负,转矩极性鉴别器输出为“1”,经过逻辑运算后 YF_3 的输出变为“1”, YF_4 的输出为“0”。于是开放正组整流桥、封锁反组整流桥,电动机正向启动。当电枢电流上升后,零电流检测器的输出变为“0”,关闭 YF_1 ,即使 U_n 的极性受干扰的影响变化也不会影响后面逻辑电路的电平。逻辑判断电路依靠本身的记忆功能维持其输出状态不变,一直保持正组开放、反组封锁,使电动机在由给定电压所规定的转速下稳定正向运行。

3) 延时电路

延时电路的作用是根据逻辑判断电路发出逻辑切换指令后设置封锁等待时间和开放等待时间两段延时,目的是防止一组整流桥开始投入时,另一组整流桥处于整流状态而引起冲击电流。延时电路可以采用与非门、电阻、电容等组成,如图 7.31 中的 C_2 、 C_4 、 YF_5 、 YF_6 等。延时电路的具体工作过程如下:在反组整流桥开放以前在电流调节器的输入端加上一个从逻辑电路中引来的延迟控制信号的电压 U_{c2} ,使反组整流桥的触发脉冲相位后移至 $\beta = \beta_{\min}$,进入待逆变状态(因为此时反组整流桥脉冲被封锁,桥路并没有工作)。一旦逻辑线路状态翻转,反组整流桥的触发脉冲的封锁解除,虽然 U_{c2} 电压消失,但是在电流调节器输入端 T 形阻容电路的延时作用下,延时信号电压不会立即消失,而是逐渐下降,使反组桥首先工作于逆变状态,其 β 角由 β_{\min} 逐渐增大,与电动机反电动势相对顶的反组桥电压逐渐降低,电枢电流平稳上升,从而避免电流冲击。在正组整流桥开放以前,图 7.30 中用于正组整流桥延迟控制的 U_{c1} 的工作过程与 U_{c2} 相似,在此不再重复。

4) 逻辑保护输出电路

逻辑保护输出电路是逻辑装置的输出部分,正组和反组触发信号反相,从而确保了正组整流桥和反组整流桥的触发脉冲不会同时开放。逻辑保护输出电路由四个二极管和与非门 YF_7 、 YF_8 、 YF_9 所组成,当逻辑电路的两个输出皆为“1”时, YF_9 输出将变为“0”,使两个输出端均变成低电位,同时封锁两组整流桥,防止产生环流。

4. 逻辑无环流可逆调速系统的优、缺点

逻辑无环流调速系统的主要优点:采用逻辑装置后,省去了限制环流的电抗器;由于

没有环流造成的损耗，节约了变压器和晶闸管整流装置的容量，特别适合于大容量的直流可逆调速系统；能够预防逆变颠覆等换流时存在的问题，发生事故的概率低于有环流系统，因而可靠性高。

逻辑无环流可逆调速系统的主要缺点是逻辑延时电路产生的电流换向死区，影响了调速系统切换过程的快速性。

7.6 直流电动机的脉宽调制调速系统

前面介绍的直流调速系统，主要采用模拟控制技术。随着电力电子技术和微机技术的发展，数字化控制成为电动机控制的总体趋势，脉宽调制技术属于数字控制的范畴。脉宽调制调速系统与晶闸管调速系统相比较，具有以下优点：开关频率高，滤波装置小，电动机容易连续，谐波小，直流电动机损耗发热小；调速范围宽，可达 1：10000，且低速运行稳定；响应速度快，动态抗干扰能力强；控制电路简单，系统效率高；采用不可控整流，功率因数高，对电网谐波污染小等。

直流脉宽调制调速又称直流斩波调速，是在直流电源电压基本不变的情况下利用电子开关的通/断，将直流电压变成连续的电压脉冲列，通过控制电压的占空比，调节直流电动机电枢端的平均电压值和极性，从而实现系统平滑调速的方式。

7.6.1 直流脉宽调制电路的工作原理

将直流电变为另一种固定电压或可调电压的直流电的装置，也称直接直流——直流变换器。直流脉宽调制的种类较多，包括六种基本电路：降压斩波电路、升压斩波电路、升降压斩波电路、Cuk 斩波电路、Sepic 斩波电路和 Zeta 斩波电路。其中，前两种是最基本的电路。下面以降压斩波电路为例说明直流脉宽调制的基本工作原理。

降压斩波电路的原理图如图 7.32(a)所示。VD₁ 为续流二极管，串联在电枢回路的 L_d 为平波电抗器，起到减小电流的脉动和电枢电流连续的作用。

由图 7.32(b)中基极与射极间的电压 U_{be} 波形可知，在 $t=0$ 时驱动 VT 导通，电源向电动

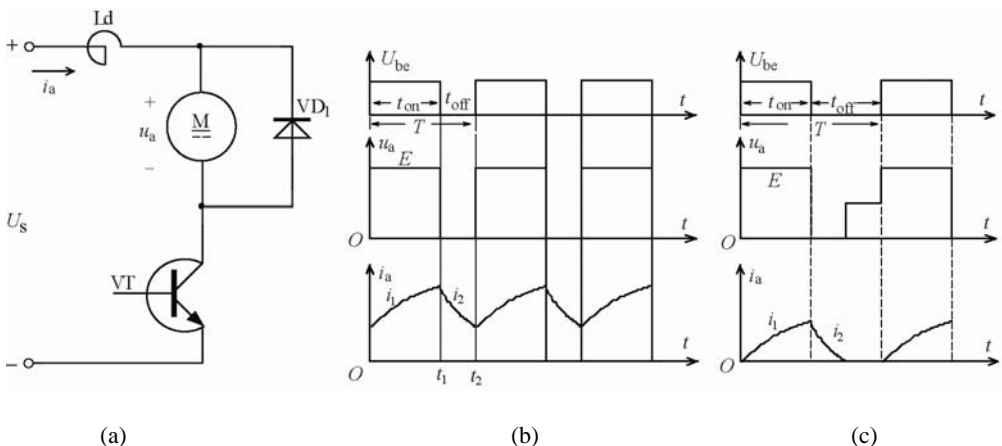


图 7.32 降压斩波电路的原理图和工作波形图

机电枢供电。电枢电压 $U_a=U_s$ ，电枢电流 i_a 按指数曲线上升。当 $t=t_1$ 时刻 VT 关断，电枢电流经 VD 续流， U_a 近似为零，负载电流按指数曲线下降。下一个周期重复上述过程。当电路工作于稳态时，电枢电流在一个周期的初值与终值相等。 U_a 的平均值为

$$U_a = \frac{t_{\text{on}}}{t_{\text{off}}} \cdot U_s = \alpha U_s \quad (7-39)$$

式中： α ——脉宽调制波形的占空比，改变 α 便可改变电枢电压。

如果电枢回路的电感(L_d+L_a)值较小， i_a 在图 7.32(c)所示的 t_2 时刻衰减至零，便出现断流现象。由于电枢电动势的存在，电枢电压的平均值增大，电动机转速明显增加，使直流电动机的机械特性明显变软。为了避免这种现象的发生，应该合理选择 L_d 的值。

1. 不带制动功能的直流脉宽调制

直流电动机脉宽调制调速系统因是否要求可逆运行，是否要求制动等因素而有所不同。脉宽调制可分为可逆与不可逆两大类。可逆脉宽调制又分为单极性、双极性和受制单极性等多种形式。

当直流电动机只需要单方向旋转时，可采用驱动单个开关器件实现斩波调速的控制电路，其结构示意图如图 7.32 所示。(为了表达的一致性，本节中开关器件采用晶体管 VT 表示。)

单相(或三相)交流经过整流、滤波得到电压基本不变的直流电源。根据控制要求，控制器生成相应的脉宽调制信号，由驱动电路驱动晶体管、IGBT、MOSFET 等功率开关器件导通或截止。功率开关管有串联在电动机下方(靠近电源地，简称低侧)与串联在电动机上方(靠近电源正极，简称高侧)两种接线方式，相对应的驱动方法有所不同，高侧驱动一般需要附加电平提升电路，故目前常采用低侧驱动方式。

2. 带制动功能的直流脉宽调制

当电枢电流采用二极管续流时，时间较长，损耗较大，因此对有制动要求的场合，一般采用图 7.33 所示的带制动功能的直流电动机脉宽调制电路。考虑工艺原因，二极管 VD_1 、 VD_2 是否需要外接视具体情况而定。如 DMOS 管与二极管一起自动生成，故而不相应外接。断开 VT_1 停止对电动机供电，同时 VT_2 连续导通，电动机电枢经 VT_2 短接实现对电动机的快速制动。如果单独控制 VT_2 ，使其不是连续导通，而是脉宽调制，则可实现直流电动机的软制动。

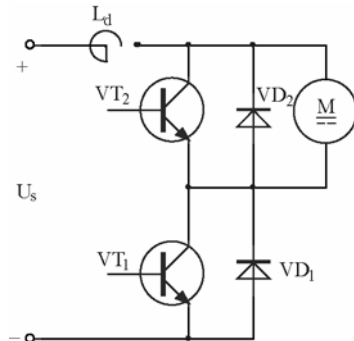


图 7.33 带制动功能的直流电动机脉宽调制电路

7.6.2 可逆脉宽调制调速系统

直流电动机可逆脉宽调制调速系统结构示意图如图 7.34 所示,是由四个功率开关管组成的 H 桥电路(又称全桥电路)。根据开关管控制方法的不同, H 桥电路可分为单极性脉宽调制和双极性脉宽调制两种控制方式。

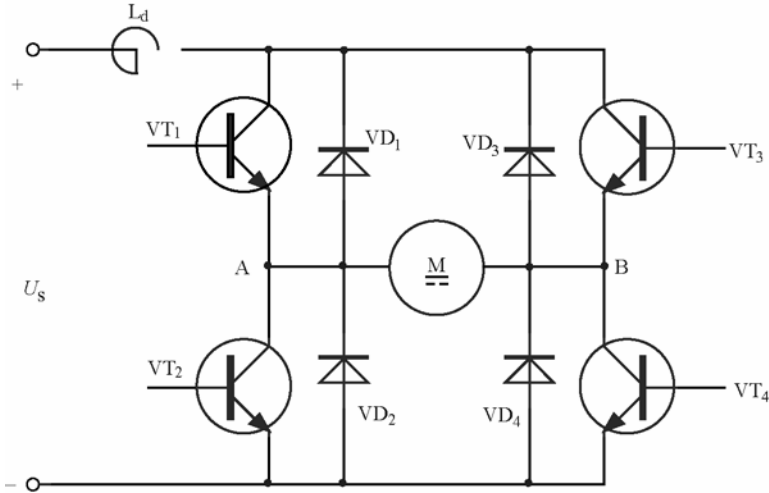


图 7.34 直流电动机可逆脉宽调制调速系统结构示意图

1. 单极性脉宽调制方式

单极性脉宽调制时,控制系统生成电压 U_A 的极性是通过一个控制电压 U_c 来改变的。控制电压 U_c 为正时, VT_1 和 VT_2 交替导通,而 VT_3 一直关断, VT_4 一直导通,这时输入到电动机的电压总是 A 端为正、B 端为负,呈现单方向的极性。反之,控制电压 U_c 为负时, VT_3 和 VT_4 交替导通,而 VT_1 一直关断, VT_2 一直导通,即可得到极性相反的输出。

2. 双极性脉宽调制方式

双极性脉宽调制的电路与单极性脉宽调制对应的电路相同(见图 7.34),区别在于控制方式。双极性控制时,四个电力晶体管被分为两组:一组为 VT_1 与 VT_4 ,另一组为 VT_2 与 VT_3 ,两组晶体管相互交替导通,即 $U_{b1}=U_{b4}$ 、 $U_{b2}=U_{b3}=-u_{b1}$ 。当控制信号分别为 $U_c>0$ 、 $U_c=0$ 、 $U_c<0$ 时,晶体管基极信号波形、H 桥输出电压、电流波形如图 7.35 所示。在图 7.35 (a)中, $U_c>0$, VT_1 、 VT_4 导通, VT_2 、 VT_3 关断, $U_{AB}=U_s$, 电枢电流(负载电流)线性增长,电动机处于电动状态;当 VT_1 、 VT_4 关断时,电枢电流经 VD_2 、 VD_3 续流, $U_{AB}=-U_s$, 电枢电流下降,电动机仍然处于电动状态, VT_2 、 VT_3 中并无电流通过。由于占空比大于 0.5, 输出电压的平均值大于零,电动机工作于第一象限。对于图 7.35(c), $U_c<0$, 输出电压、电流的平均值小于零,电动机工作于第三象限,运行于反转电动状态。

当电动机运行于正转制动状态时,则输出电压大于零,电流小于零,电动机工作于第四象限;同理,当电动机运行于反转制动状态时,电动机工作于第二象限。

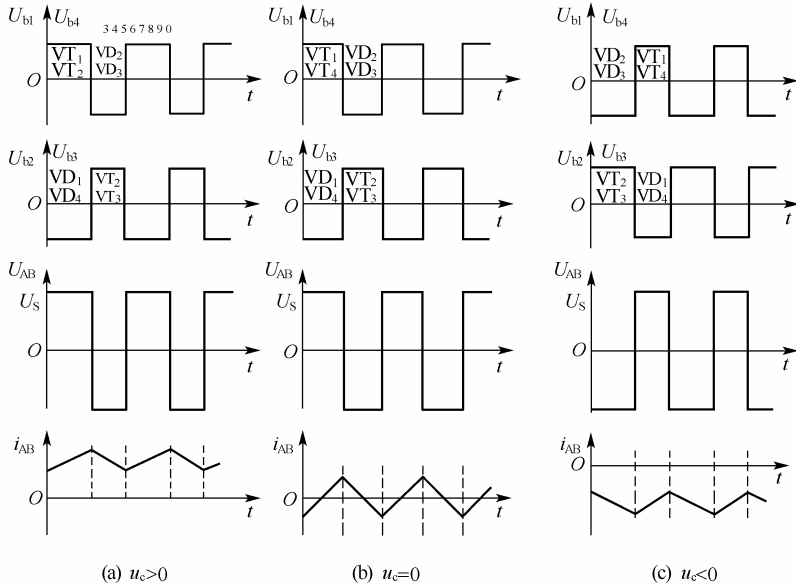


图 7.35 双极性脉宽调制的波形

3. 单极性脉宽调制和双极性脉宽调制方式的比较

双极性脉宽调制方式与单极性脉宽调制方式相比具有以下特点。

(1) 双极性脉宽调制方式控制简单，只要改变 t_1 位置就能将输出电压从 $+U_s$ 变到 $-U_s$ 。单极性脉宽调制方式中需要改变晶体管的工作方式。

(2) 双极性脉宽调制输出电压比较小时，每个晶体管的驱动电压脉冲 U_b 仍然比较宽，能保证电动机低速运转的平稳性。而单极性脉宽调制方式在输出电压比较小时晶体管的驱动电压脉冲 U_b 变窄，窄到一定程度往往就不能保证晶体管的可靠导通，从而影响电动机低速运转的平稳性。因此用单极性脉宽调制方式时电动机的低速运行性能不如采用双极性脉宽调制方式时好。

(3) 双极性脉宽调制方式输出平均电压等于零时，电枢回路中存在的交变电流增加了电动机的损耗，但它所产生的高频微振能起到动力润滑的作用，有利于克服机械静摩擦。而单极性脉宽调制方式在输出电压平均值为零时电枢回路中没有电流，不产生损耗，也没有动力润滑作用。

(4) 双极性脉宽调制方式四个晶体管都处在开关状态，开关损耗比较大，而单极性脉宽调制方式中只有两个晶体管工作在连续的开关状态，开关损耗要小些。

7.6.3 双闭环控制的脉宽调制调速系统

采用模拟控制的双闭环直流脉宽调制调速系统原理框图如图 7.36 所示，属于脉宽调速系统特有的部分有脉宽调制器 MT、调制波发生器 TF、逻辑延时电路 LY、PWM 开关电路、晶体管基极驱动电路 QD、瞬时动作的限流保护电路 LJB 等。采用数字控制的双闭环直流脉宽调速系统将在 7.7 节中进行阐述。

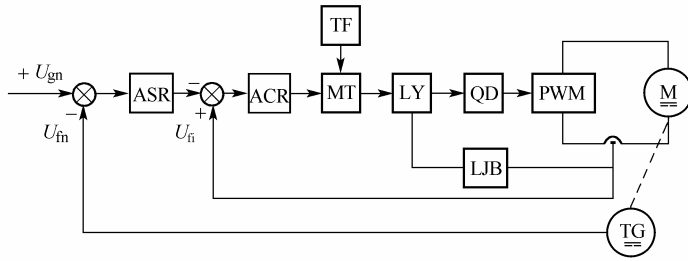


图 7.36 采用模拟控制的双闭环直流脉宽调制调速系统原理框图

1. 脉宽调制器 MT

脉宽调制器是将控制信号(电压)变换为与之成比例的脉宽可调的脉冲电压的装置。其种类很多，常见的有锯齿波脉宽调制器、三角波脉宽调制器等。如图 7.37 所示为由运算放大器和三个输入信号组成的电压比较器电路。

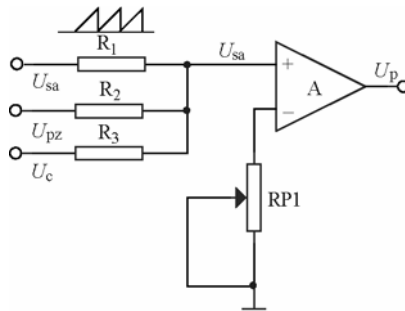


图 7.37 电压比较器电路

在电压比较器的输入端，控制电压 U_c 与锯齿波信号 U_{jc} 相加，则比较器的输出端得到一个宽度与 U_c 成正比例的脉冲电压 U_p 。而偏移电压 U_{pz} 的作用是当 $U_c=0$ 时，使比较器的输出端得到一个正、负半周脉宽相等的脉冲电压 U_p ；当 $U_c>0$ 时，则输出正半周比负半周宽的脉冲电压 U_p ；当 $U_c<0$ 时，则输出负半周比正半周宽的脉冲电压 U_p 。改变 U_c 的大小，即可改变脉冲电压 U_p 的占空比；改变 U_c 的极性，即可改变电枢平均电压的极性，也就改变了电动机的转向。

2. 逻辑延时电路

逻辑延时电路是为保护 PWM 变换器的直流电源 U_s 而设置的，保证同一桥臂的上、下两只开关管不会同时导通，避免直流电源 U_s 短路造成的事故。

7.7 直流调速的应用

在机床电气控制系统中，经常采用各种反馈环节来实现转速的稳定，扩大调速范围。根据控制系统的技术参数与相关要求，可选择单闭环调速控制、电压负反馈和电流正反馈调速控制、双闭环调速控制等控制电路。主电路可采用晶闸管整流装置实现调压调速，也

可采用电力电子开关元件实现脉宽调制调压调速。下面以晶闸管不可逆双闭环直流调速系统和直流电动机调速系统的微机控制(数字控制)为例,说明直流调速系统的结构、工作过程及其应用。

7.7.1 不可逆双闭环直流调速系统

不可逆双闭环直流调速系统的主电路与控制电路如图 7.38、图 7.39 所示。该装置主要用于 10kW 以上的直流调速。

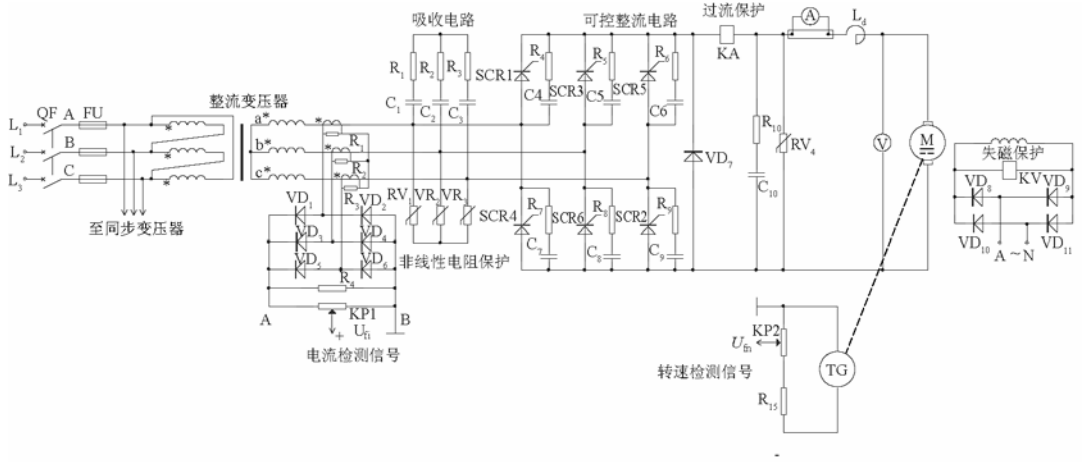
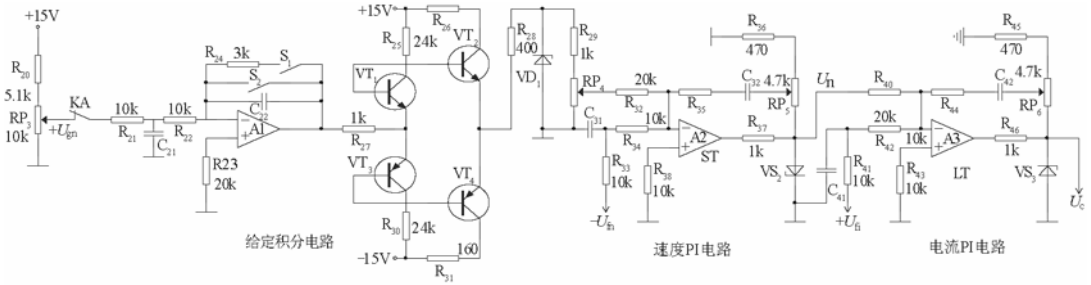


图 7.38 不可逆双闭环直流调速系统的主电路



电路。对双闭环直流调速系统而言,一般选择全控整流方式。在选择晶闸管的型号时,必须考虑实际承受的最大峰值电压、负载电压、安全裕度等因素。

电动机的励磁回路常采用不可控的整流桥。

2) 检测电路

检测电路包括电流传感器及电流反馈变换器、测速发电机及其转速反馈变换器。

利用交流电流传感器取样晶闸管整流装置交流侧的电流,经过整流电阻分压获得电流反馈信号 U_{fi} 。采用直流测速发电机检测转速的实时值,通过电阻分压取样获得电压反馈信号 U_{fn} 。检测电路的相关内容详见 7.2 节。

3) 保护电路

保护电路主要由过流保护、过电压保护、失磁保护等构成。

(1) 过流保护。过流保护方式较多,其中限流保护措施由反馈控制电路实现。快速熔断器、继电器控制方式最为简单,但精度不高。例如,采用比较电路将检测电流值与参考值(电流允许最大值)进行比较,产生过流信号控制相关电路。另外还可以将电流检测值经过 A/D 转换,送给微机(单片机、DSP 等)进行处理实现相应的控制。

(2) 过电压保护。交流侧过电压保护常采用阻容保护,电路有两种连接方法: Δ 连接和 Y 连接。R、C 阻容保护 Δ 连接时,电容器的电容量小但耐压要求高;阻容保护 Y 连接时,电容器的电容量大,耐压要求低,电阻值也小。通常增大 C 能降低作用到晶闸管上的过电压,但过大的 C 值不仅增大体积,而且使 R 的功耗增大,并使晶闸管导通时的 di/dt 上升;增大电阻 R 有利于抑制振荡,但过大的 R 不仅使抑制振荡的作用不大,反而降低了电容抑制 Ldi/dt 的效果,并使 R 的功耗增大,所以一般希望 R 小一些($5\Omega \sim 100\Omega$)。为了降低电阻的温度,电阻功率应选电阻上可消耗功率值的 2 倍左右。

直流侧过电压保护可采用阻容保护和压敏电阻保护。采用阻容保护时容易影响系统的快速反应性能,并且会造成 di/dt 加大。因此一般只采用压敏电阻作过电压保护。

图 7.38 中 $R_1 \sim R_3$ 、 $C_1 \sim C_3$ 构成 Y 连接的阻容吸收电路(也可以 Δ 连接)主要用于交流侧的过电压。Y 连接(或 Δ 连接)的 VRI 构成非线性电阻保护,采用的元件主要有压敏电阻与硒堆。 R_{10} 、 C_{10} 、 VR_2 组成直流侧过流保护,目前只用压敏电阻作过压保护,避免阻容保护影响系统的快速性,并可能会造成 di/dt 加大的影响。 $R_4 \sim R_9$ 、 $C_4 \sim C_9$ 构成的阻容电路,能够有效地抑制晶闸管关断过电压。

(3) 失磁保护。当直流电动机运行时,励磁回路的励磁电压突然消失或者减小至允许范围之外时,励磁电流产生的励磁磁通将大幅度地下降,容易引发“飞车”现象而损坏直流电动机,图 7.38 中利用欠压保护继电器 KV 进行失磁保护。当励磁绕组端电压小于继电器 KV 的设定值时,继电器 KV 动作,产生欠电压保护信号使接触器 KM 线圈失电,接触器 KM 主触点断开恢复常态,从而切断晶闸管交流侧的电源,直流电动机电枢绕组断电迫使电动机停止旋转。

2. 控制电路

控制电路由给定积分电路、速度 PI 调节器 ASR、电流 PI 调节器 ACR 三部分组成。

给定积分电路工作过程如下:外加转速给定参考电压 U_{gn} 到给定积分电路的输入端,经给定积分电路处理后,将 U_{gn} 阶跃变化的电压信号,变成按固定斜率变化的控制电压 U'_{gn} 。

给定积分电路的主要目的是缓冲 U_{gn} 突变对控制电路的影响，同时削弱 U_{gn} 中谐波干扰信号。给定积分电路中配置开关 S_1 作比例调节用，配置开关 S_2 可与图 7.38 中的脉冲封锁控制开关 S_2 为联动开关作系统异常工作封锁保护用，配有 KA 作运行过载保护开关用。给定积分电路对应的简化电路在经过一个适当的电容滤波电路后，送给速度调节器的输入端，但在功能上没有图 7.38 完善。

给定积分输出电压信号与速度反馈信号 U_{fn} 叠加后送给 A_2 ，经 ASR 处理后输出电压 U_n ， U_n 作为 ACR 的电流给定信号，与电流反馈信号 U_{fi} 叠加后，送给 A_3 ，经过 ACR 处理后，输出控制信号 U_c ，再将 U_c 送到移相触发电路。在图 7.39 中， ASR 对应的电路中 R_{35} 、 C_{32} 的取值是根据电动机的参数以及速度环三阶优化的结果而获得的；同样 ACR 对应的电路中 R_{44} 、 C_{42} 的取值是根据电动机的参数以及电流环二阶优化的结果而获得的。

3. 移相触发电路

移相触发电路可由同步变压器模块和三相晶闸管触发模块构成，也可由同步变压器和三个单相晶闸管触发模块组成。前者对应电路简单，是目前常用的晶闸管触发方式，故下面只介绍前者对应的电路，如图 7.40 所示。

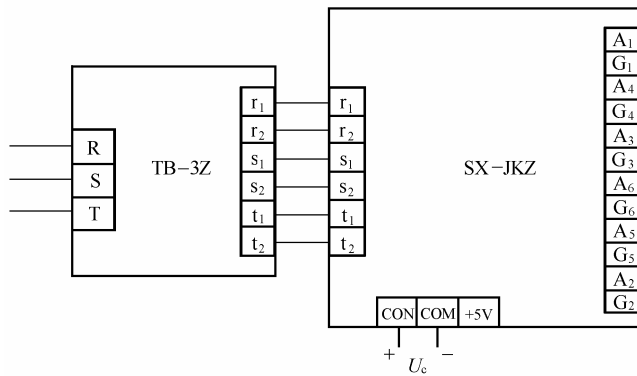


图 7.40 晶闸管触发电路

为了能够对整流电路输出的直流电压进行控制，必须用触发电路来控制晶闸管的导通时间，所以触发电路是可控整流电路中十分重要的一个组成部分。

图 7.40 中，触发电路采用三相全控整流移相触发器模块 $SX-JKZ$ 。三相移相触发器模块系列内部集三相电位检测、移相电路、控制电路和触发电路于一体，在三相同步变压器模块支持下，在 $0\sim 5V$ DC 信号 U_c 的作用下，达到输出多路移相触发角可控的晶闸管强触发脉冲，以实现移相调压的目的，即实现无级调压控制。三相移相触发器模块 $SX-JKZ$ 采用触发方式触发晶闸管，为提高控制系统的静态指标，使系统在合闸上电时不致瞬间导通一下，三相移相触发器模块的阴极 A 接到对应的 RC 吸收回路的中点，而不是通常脉冲变压器触发晶闸管的门极和阴极。由于 $SX-JKZ$ 的弱电和强电部分完全电隔离，增加了系统的抗干扰性。

使用时，必须注意整流电路中交流侧三相进线和晶闸管整流装置、同步变压器及三相触发器电路之间的相序应严格对应，否则系统不能正常工作。

7.7.2 直流调速的微机控制系统

在直流电动机调速系统中，有晶闸管可控整流调速和脉宽调制(PWM)调速两种主要形式，它们可以采用模拟控制也可采用微机数字控制。下面将从控制系统基本电路讨论这两种直流电动机调速的微机控制。

1. 晶闸管一直流电动机可逆调速系统的微机控制

晶闸管一直流电动机可逆调速系统的微机控制系统原理框图如图 7.41 所示。该系统由三大部分构成：主电路、微机控制单元和脉冲功率放大电路。图中虚线框所示的各功能方块均由 80C51 单片机构成的数字控制系统硬、软件来实现。

1) 主电路

主电路由反并联的两组三相晶闸管全控整流桥 I、整流桥 II 构成，实现直流电动机四象限可逆运行。速度检测元件采用直流测速发电机，电流检测元件采用交流电流互感器。

2) 微机控制单元

图 7.41 对应的控制系统为典型的双闭环系统。速度反馈信号取自同轴直流测速发电机 TG，转速信号 U_{fn} 首先经过 A/D 转换、再经过数字滤波后变为数字量的速度反馈信号 D_{fn} 。利用交流电流互感器测取与电枢电流 I_d 成正比的晶闸管整流器电源侧的交流电流，经整流后获得电流反馈信号 I_{fi} ，再经过 A/D 转换和数字滤波后得到电流数字量反馈信号 D_{fi} 。

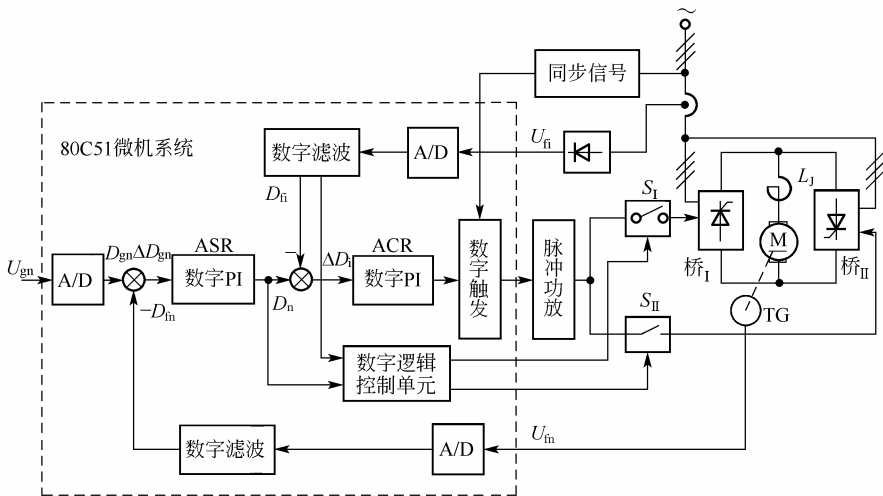


图 7.41 微机控制晶闸管一直流电动机可逆调速系统

80C51 单片机构成的数字控制部分完成调速系统的逻辑无环流可逆运行控制、速度及电流的闭环 PID 调节和两组可控整流器的数字触发功能。系统的控制过程如下：速度的数字给定 D_{gn} 和速度的数字反馈量 D_{fn} 比较后得误差信号 ΔD_n ，经速度数字 PID 运算后输出 D_n 。 D_n 作为电流环的数字给定值，与电流的数字反馈量 D_{fi} 比较后得误差信号 ΔD_i ，经电流数字 PID 运算后输出 D_c ， D_c 为数字触发器的脉冲移相给定信号。 D_c 经数字触发控制生成相应移相角为 α 的晶闸管触发脉冲，经功率放大和逻辑开关控制后送至相应的晶闸管整流桥，实现直流电动机正/反转运行控制。

由于本系统采用逻辑无环流的可逆控制,和模拟控制中的逻辑装置一样,本系统设置数字逻辑控制单元。数字逻辑控制单元以速度调节器输出量 D_n 的正、负来判别调速系统所需转矩的极性,决定哪个桥工作以及相应的工作状态;用电流反馈信号 D_i 的大小来判别系统主电路电流是否为零,从而决定桥 I 与桥 II 间切换的时间,再通过对电子开关 S_1 、 S_2 的控制,确定开放和封锁哪组整流桥。

3) 脉冲功率放大电路

脉冲功率放大电路的主要目的是将微机控制单元输出的脉冲控制信号进行放大,满足晶闸管门极触发的相关要求。该电路可采用《模拟电子技术》中常见的晶体管放大电路,也可采用放大电路集成模块。

2. 直流电动机可逆脉宽调速系统的微机控制

直流电动机可逆脉宽调速的微机控制系统原理框图如图 7.42 所示,该系统由三大部分构成:主电路、微机控制单元和驱动电路。

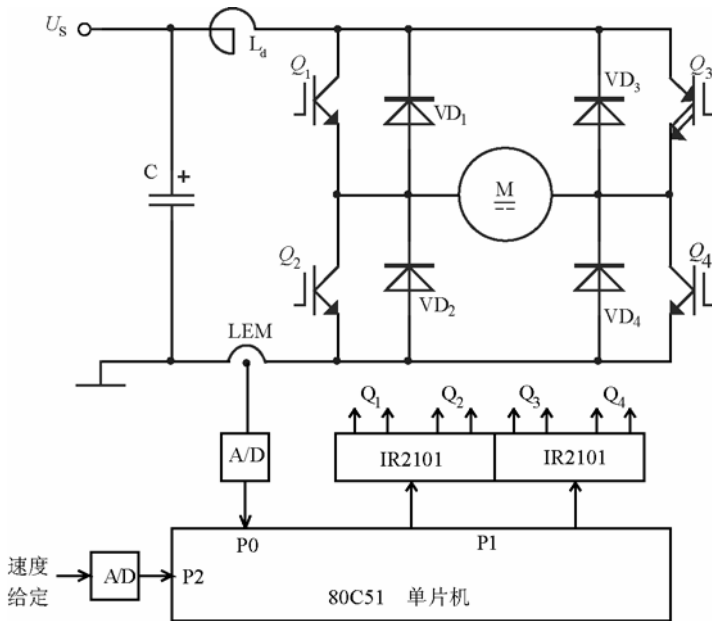


图 7.42 直流电动机可逆脉宽调速的微机控制系统原理框图

1) 主电路

主电路由四个功率开关管 IGBT(也可采用其他的电力电子开关器件)构成 H 型桥式电路,与各 IGBT 反并联的 $VD_1 \sim VD_4$ 为续流二极管,可实现直流电动机四象限可逆运行。速度检测元件采用直流测速发电机,电流检测元件采用 LEM 霍尔电流传感器。

2) 微机控制单元

可逆脉宽调速系统的微机控制单元与图 7.41 中虚线框内的结构类似,也是一个电流、速度 PID 双闭环系统,速度给定经 A/D 转换后送入微机(也可由键盘等单片机外设或者上位机直接输入),速度反馈信号由测速发电机 TG 输出的速度电压经 A/D 转换后引入微机;电流反馈采用 LEM 霍尔电流传感器对电枢电流采样,经 A/D 转换后送入微机。双闭环调

节控制的结果是电流调节输出信号 U_c ， U_c 反映了所需电枢电压 U_{AB} 的占空比 ρ 。

在编写软件程序时，定时器的选择和使用应该注意以下几点。

(1) 根据开关器件的开关频率合理选择电流采样周期和速度采样周期，选择合适的定时器。

(2) 定频调宽调制时，可将电流调节器输出 D_c 通过表格查询方法获得定时时间 t_1 、 $T-t_1$ 。

(3) 定时器的中断服务程序主要完成速度和电流的控制。速度环中断服务程序实现速度的 PI 调节，产生电流给定信号；电流环中断服务程序实现电流的 PI 调节，产生定时时间常数。

3) 驱动电路

图 7.42 中， $VT_1 \sim VT_4$ 为各 IGBT 的基极驱动信号，它们将 80C51 单片机 PI 接口输出的基极驱动信号加以隔离和放大，输出一定功率的门极电压 $U_{g1} \sim U_{g4}$ ，按照双极性方式(或者单极性方式)控制各 IGBT 的通、断，实现直流电动机四象限可逆运行。根据开关元件的功率要求，驱动电路可以由四个单驱模块如 TLP250、EXB840 等构成，也可以由两驱模块如 IR2101 等构成，如图 7.43 所示。

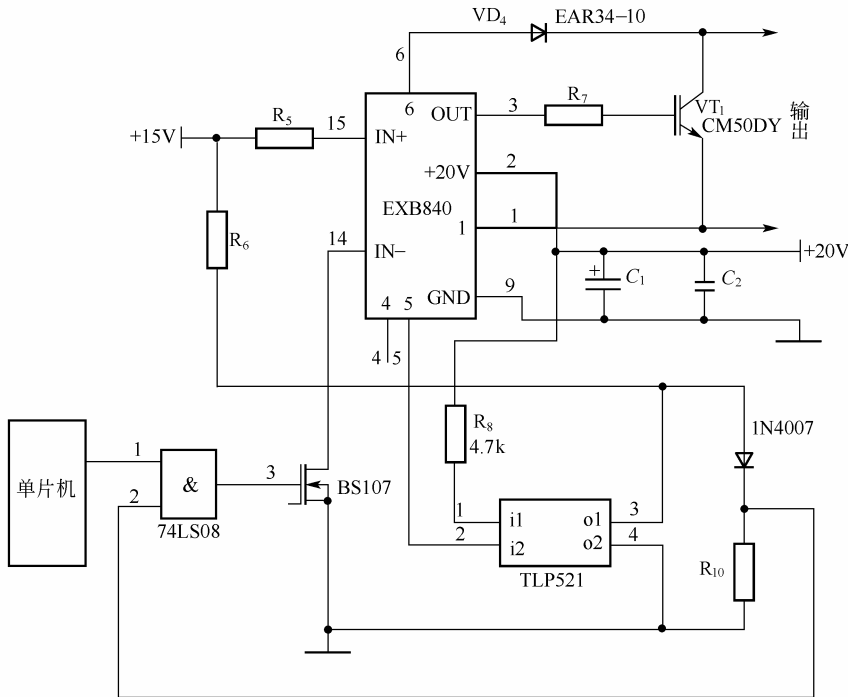


图 7.43 IGBT 的驱动电路及保护电路

保护电路的工作原理如下：当过流保护输出脚 5 过流时，与 5 脚相连的光耦合器 TLP521-1 立即导通，与门的 2 脚电平被拉低，从而关断 PWM 信号的输入，对 IGBT 形成保护作用。

4) 可逆脉宽调速系统的仿真

微机控制的直流电动机可逆脉宽调速系统的仿真图形如图 7.44 所示。

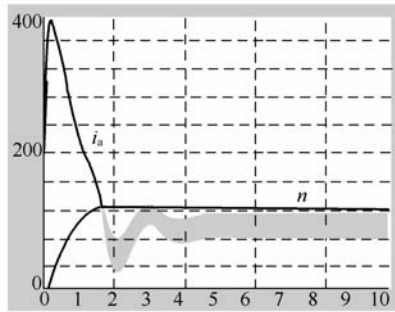


图 7.44 可逆脉宽调速系统的仿真图形

调速系统启动对应的过渡过程中, 由于转速的给定值不大, 电枢电流上升阶段维持的时间较小(没有超过电枢电流允许的最大值), 随着转速的增加, 电枢电动势增大, 电枢电流下降。当直流电动机转速稳定后, H 桥在 PWM 驱动信号的控制下, 电枢电流 i_a 并不是一个恒定值, 而是在一定的范围内波动, 图 7.44 中“带状”的电枢电流波形与实际工作情况相符。

思考题与习题

1. 调速范围和静差率的内涵是什么? 调速范围、静态转速降以及最小静差率之间有何关系?

2. 在直流电动机开环调速系统中, 为什么会产生静态转速降? 在加入速度负反馈环节后, 为什么能够减小静态转速降?

3. 截流环节的主要作用是什么? 实现电流截止负反馈的方法有哪些?

4. 在带截流环节的转速负反馈调速系统中, 如果截止比较电压发生变化, 对调速系统的静特性有何影响?

5. 为什么速度调节器采用比例积分控制电路后能够实现调速系统无静差? 有静差调速系统和无静差调速系统各有什么特点?

6. 电流正反馈的主要作用是什么? 为什么说电流正反馈不是真正意义上的反馈控制?

7. 电压负反馈和转速负反馈之间有何区别?

8. 某精密机床主拖动系统采用晶闸管直流调速系统, 电动机参数为: 额定功率 $P_N=6\text{kW}$, 额定电流 $I_N=26\text{A}$, 额定转速 $n_N=1450\text{r/min}$, $U_d=230\text{V}$, $R_s=1.4\Omega$, $s\leq 5\%$, $D=15$, 弱磁调速时 $n_{N\max}=1800\text{r/min}$, $n_{\min}=120\text{r/min}$, 电动机转矩常数 $C_T=1.4\text{N}\cdot\text{mA}^{-1}$, 电枢时间常数 $T_a=0.2\text{s}$, 整流器失控时间 $T_V=0.01\text{s}$, 试选用合适的调速方案和控制方式, 并确定调速系统各个环节的参数。

9. 不可逆调速与可逆调速之间有何差异?

10. 在转速、电流双闭环调速系统中, 速度调节器的主要作用是什么? 当电网电压出现波动和负载扰动时, 哪个调节器起主要调节作用?

11. 双闭环调速系统稳定运行时, 速度调节器和电流调节器的输入偏差各是多少? 它们的输出电压对应于哪种状态的数值? 为什么?

12. 改变双闭环调速系统电动机的转速, 需要调节什么参数? 能否通过改变速度调节

器的放大倍数来实现？改变堵转电流需要调节什么参数？

13. 晶闸管可逆调速系统中,有哪几种环流? 它们是怎样产生的? 各自有哪些优、缺点?

14. 有环流系统和无环流系统各有什么优、缺点?

15. 逻辑无环流可逆调速系统切换的条件是什么? 为什么设置开放延时和封锁延时?

16. 简述 PWM 型直流调速系统的基本工作原理。PWM 型直流调速系统的开关频率是否越大越好? 为什么?

17. PWM 型直流调速系统中, 单极性调制和双极性调制的主要区别是什么?

18. 为什么 PWM 型直流调速系统比晶闸管调速系统能够获得更好的动态特性?

19. 数字控制调速系统与模拟控制调速系统相比具有哪些优点?

20. 简述 80C51 单片机全数字直流调速系统的工作原理。

第 8 章 交流调速控制系统

教学提示：长期以来，在电动机调速领域中，直流调速方案一直占主要地位。20 世纪 70 年代以来，大规模集成电路和计算机控制技术的发展，加上现代控制理论向电气传动领域的渗透，为交流调速系统的进一步发展创造了有利条件。在实际应用中，交流调速不仅具有优良的调速性能，而且能节约能源，减少维护费用，节约占地面积。

教学要求：本章介绍三种交流电动机的调速控制系统——电磁转差离合器调速系统、绕线转子异步电动机串级调速系统和笼型异步电动机变频调速系统。要求学生掌握交流调速系统的基本原理与类型；了解交流电动机调速系统的基本组成、特性、特点以及适用场合。

8.1 电磁转差离合器调速系统

异步电动机利用电磁转差离合器进行调速，可以获得均匀平滑的调速特性，即无级调速特性。电磁转差离合器调速系统是将异步电动机转轴和生产机械转轴做软性连接以传递功率的一种装置。这种调速系统以其装置简单、运行可靠等优点，广泛应用于工业生产中。

电磁转差离合器调速系统，是由笼型异步电动机、电磁转差离合器及控制装置组合而成。为改善其运行特性，常加上测速反馈以形成反馈控制系统。笼型异步电动机作为原动机以恒速带动电磁离合器的电枢转动，通过对电磁离合器励磁电流的控制实现对其磁极的速度调节。

8.1.1 电磁转差离合器调速系统的组成和工作原理

电磁转差离合器调速系统的原理结构示意图如图 8.1 所示。

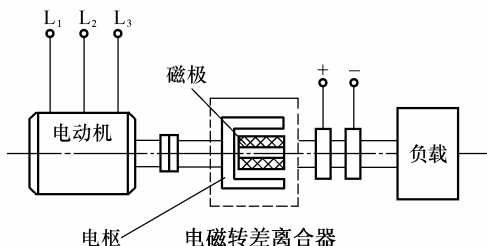


图 8.1 电磁转差离合器调速系统原理结构示意图

它主要包括笼型异步电动机、电磁转差离合器和控制装置三部分。

控制装置目前普遍采用晶闸管单相全波或桥式电路，通过改变晶闸管的控制角，可以方便地改变输出直流电压的大小。

电磁转差离合器由电枢和磁极两部分组成，这两部分没有机械联系，都能自由旋转。电枢是用铸钢做成的圆筒形结构，用联轴器异步电动机做硬性连接，由电动机带动旋转，

称为主动部分。磁极部分由铁心和励磁绕组两部分组成，绕组可通过集电环和电刷接到一般直流电源或晶闸管整流电源上。磁极部分通过联轴器和生产机械做硬性连接，称为从动部分。

当电动机带着电枢旋转时，切割磁极的磁感应线，于是在电枢内感应出涡流，涡流再与磁极相互作用产生转矩，推动磁极跟随电枢旋转，从而带动生产机械转动。由此看出，电磁转差离合器的工作原理与异步电动机相似，磁极和电枢的转速不能相同，如果相同，电枢就不会切割磁感应线产生涡流，也就不会产生带动生产机械旋转的转矩。这就好像异步电动机的转子导体和定子旋转磁场的作用一样，必须要有这个“转差”才能工作。同样，当磁极中不通以励磁电流时，磁极没有磁通，电枢不会产生涡流，不能产生转矩，磁极和生产机械也就不会转动，这相当于接在从动轴上的生产机械与主动轴“分离”；而一旦通上励磁电流，磁极就会转动，相当于生产机械与主动轴“接合”，从而起到离合器的作用。因为这种“分离”与“接合”都是通过电磁作用产生的，故称为电磁转差离合器。将它与异步电动机合起来可称为滑差电动机。必须指出，电磁转差离合器本身并不是一个原动机，它只是一种传递功率的装置。

从动轴的转速(即生产机械转速)大小取决于磁极与电枢耦合力的作用，即取决于励磁电流的大小，同时也与从动轴的负载大小有关。当负载一定时，减小励磁电流，将使磁场的磁通减小，因此磁极与电枢“转差”被迫增大，这样才能产生比较大的涡流，以便获得同样大小的转矩，使负载稳定在比较低的转速下运行。所以，通过调节励磁绕组的电流，就可以调节生产机械的转速。

8.1.2 电磁转差离合器调速系统的机械特性

电磁转差离合器调速系统的机械特性，是指调速系统的从动轴上的转矩与转速的关系。在不加反馈控制时，调速系统的机械特性就是电磁转差离合器的机械特性。由于电磁转差离合器的工作原理与异步电动机相似(前者是由直流电产生的静止空间脉动磁场与电枢的作用产生电磁转矩，后者是由三相交流电产生的交变旋转磁场与转子的作用产生电磁转矩)，而改变电磁转差离合器的励磁电流相当于异步电动机改变定子供电电压，所以它们两者的调速特性也相似。图 8.2 所示为电磁转差离合器的机械特性，其中 n 为从动轴转速， T 为从动轴转矩。当从动部分的转轴带有一定的负载转矩时，励磁电流的大小便决定了转速的高低。励磁电流越大，转速越高；反之，励磁电流越小，转速越低。

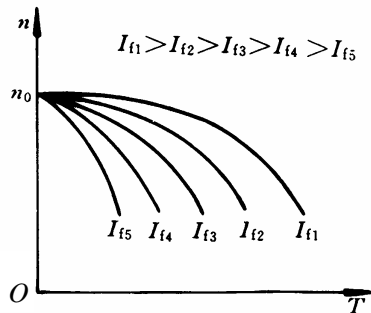


图 8.2 电磁转差离合器的机械特性

如果励磁电流太小，磁通太弱，产生的转矩太小，从动轴转动不起来，就会失控；在一定的磁场下，如果负载过大，从动轴转速太低，也会形成从动部分跟不上主动部分而失控。因此，电磁转差离合器应避免工作在失控区。

从图 8.2 可以看出，电磁转差离合器机械特性较软，稳定性较差，因此在工程实践中，常常采用带转速负反馈的闭环调速系统提高机械特性的硬度。

8.1.3 自动换极电磁转差离合器调速系统

图 8.3 所示为能够自动换极的电磁转差离合器调速系统。其中异步电动机为 4/8 极双速电动机。当 1KM 线圈通电时，电动机定子绕组为三角形连接；当 2KM、3KM 线圈通电时，电动机定子绕组双星形连接。当电磁转差离合器从动部分的转速高于 600r/min 时，则电动机定子绕组采用双星形接线；当电磁离合器从动部分的转速低于 600r/min 时，则电动机定子绕组采用三角形接线。电磁转差离合器的励磁电流是由单结晶体管触发的单相半控桥式整流电路提供的，调节电阻 RP 可以改变励磁电流的大小，也就改变了生产机械的转速。为了使电动机变极时，其转向维持不变，在具体接线时，将 2U、2V 对调。

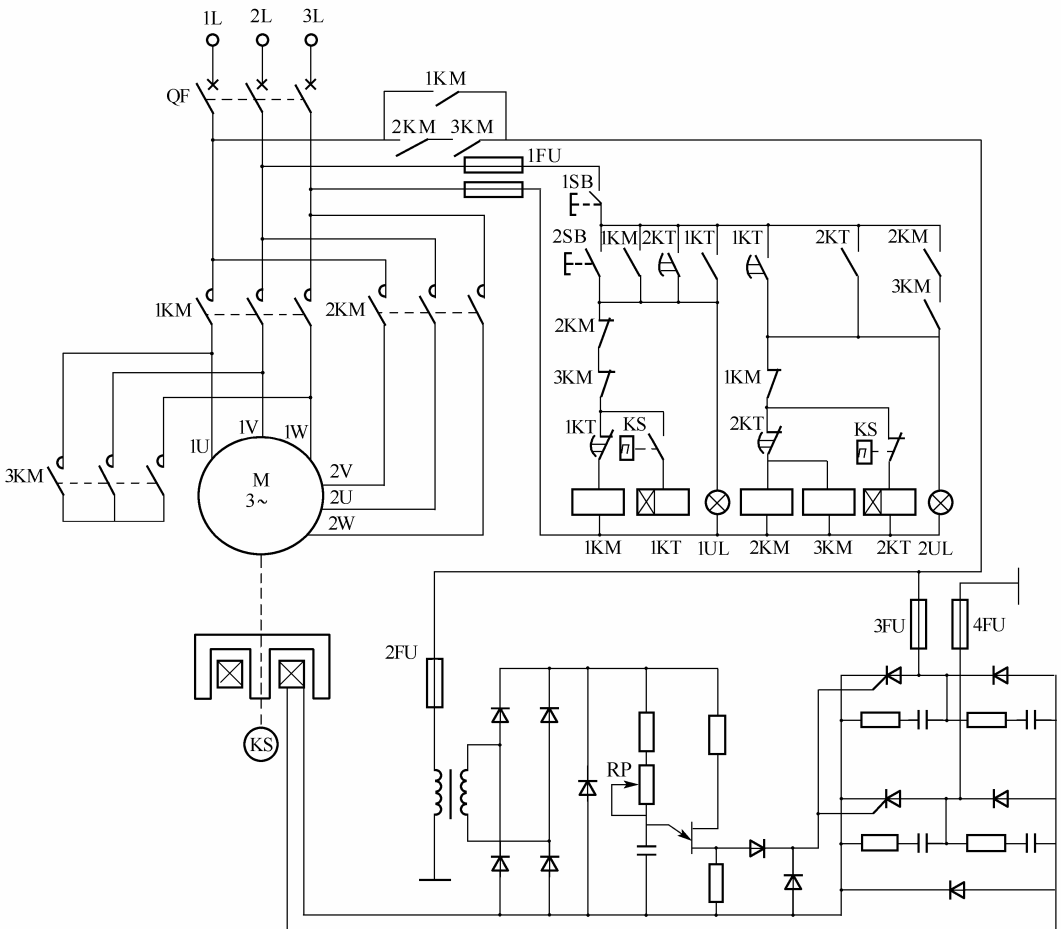


图 8.3 自动换极的电磁转差离合器调速系统

控制线路的工作过程如下:

合上自动开关 QF, 按下启动按钮 2SB, 接触器 1KM 线圈通电并自锁, 1KM 的主触点闭合, 将电动机的定子绕组接成三角形, 电动机低速启动运行, 电磁转差离合器的主动部分在它的拖动下一起运行, 同时信号灯 1HL 亮。同时 1KM 动合触点闭合, 使晶闸管调压线路的触发部分和可控桥部分获得单相交流电源, 从而使励磁绕组通过直流电源。调节电阻 RP 为某一适当值, 励磁绕组流过一个直流电流, 于是电磁转差离合器从动部分开始跟随主动部分一起旋转。在此可以通过调节电阻 RP 使从动部分所带负载稳定在所需要的转速上。在此调节过程中, 若转速升高到 600r/min 以上时, 安装在从动部分转轴上的速度继电器 KS 的动合触点闭合, 使时间继电器 1KT 线圈通电并自锁。当 1KT 的整定时间到达时, 其延时断开的动断触点断开使 1KM 线圈断电, 同时其延时闭合的动合触点闭合, 使接触器 2KM、3KM 线圈通电并自锁, 电动机定子绕组由三角形联接转为双星形联接, 同时 1KT 线圈断电, 为下次工作做准备。

如果电动机运行在定子绕组双星形联接时, 根据工艺要求, 调节励磁电流使转速下降到 600r/min 以下时, 速度继电器 KS 的动断触点复位, 使时间继电器 2KT 线圈通电并自锁。当 2KT 的整定时间到达时, 其延时断开的动断触点使接触器 2KM、3KM 的线圈断电, 其延时闭合的动合触点闭合使 1KM 线圈通电并自锁, 电动机定子绕组由双星形联接转为三角形联接, 同时 2KT 线圈断电, 为下次工作做准备。

当需要负载停止运行时, 首先将励磁电流减为零, 然后按下停止按钮 1SB, 使 1KM、2KM、3KM 线圈都断电, 切断电动机定子电源。

8.2 绕线转子异步电动机串级调速系统

前述绕线转子异步电动机转子串电阻调速, 实质上是将一部分转子电功率消耗在附加电阻上, 使其实际输出机械功率减小, 从而使一定负载转矩下的电动机转速下降。因此这种调速方法的缺点是损耗大、效率低, 低速时机械特性较软, 调速不平滑。

中等容量以上的绕线转子异步电动机采用的是与其他电动机或电子设备串级连接以实现平滑调速, 称为串级调速。串级调速完全克服了转子串电阻调速的缺点, 它具有高效率、无级平滑调速、较硬的低速机械特性等优点。

8.2.1 串级调速的基本原理

异步电动机的串级调速, 就是在电动机转子回路中串入与转子电动势 E_2 同频率的附加电动势 E_{add} , 如图 8.4 所示。通过改变 E_{add} 的幅值大小和相位来实现调速。电动机在低速运转时, 转子中的转差功率只是小部分消耗在转子电阻上, 大部分被串入的附加电动势所吸收, 再利用产生附加电动势的装置, 设法把所吸收的这部分转差功率回馈入电网(或再送回电动机轴上输出), 这样使电动机在低速运转时仍具有较高的效率。

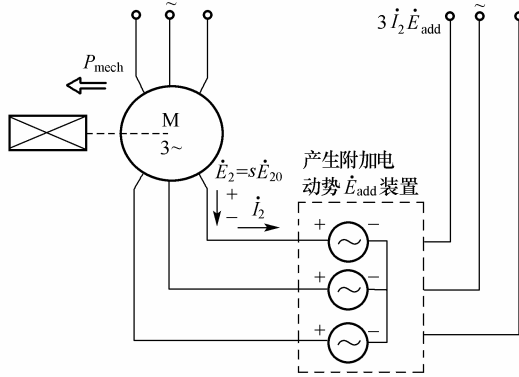


图 8.4 串级调速原理图

当 $E_{\text{add}}=0$ 时, 电动机工作在自然机械特性上。若这时拖动恒转矩负载, 电动机转速便在接近额定值稳定运行的状态, 此时转子电流 I_2 为

$$I_2 = \frac{s\dot{E}_{20}}{\sqrt{R_2^2 + (s\dot{X}_{20})^2}} \quad (8-1)$$

式中: \dot{E}_{20} —— 当 $s=1$ 时, 转子开路电动势;

\dot{X}_{20} —— 当 $s=1$ 时, 转子绕组每相漏电抗;

R_2 —— 转子回路每相电阻。

当在转子回路中串入与 E_2 频率相同、相位相反的附加电动势 \dot{E}_{add} 时, 此时转子电流 \dot{i}_2 为

$$\dot{i}_2 = \frac{s\dot{E}_{20} - \dot{E}_{\text{add}}}{\sqrt{R_2^2 + (s\dot{X}_{20})^2}} \quad (8-2)$$

转子合成电动势的减小, 引起转子电流 I_2 的减小, 电动机产生的电磁转矩 $T=C_t X_m I_2 \cos\varphi_2$ 相应减小, 使电动机的电磁转矩小于负载转矩, 稳定运行条件被破坏, 迫使电动机降速。随着转速的减小, 转差率 s 升高, 由式(8-2)可知, 转子电流 I_2 回升, 电动机电磁转矩 T 相应回升。直到电动机转速降低至某值, I_2 回升到使电动机转矩复原到与负载转矩又相等时, 减速过程结束, 电动机稳定运行在低于原值的某一转速上。这就是低于同步速度方向调速的原理, 称为次同步串级调速。串入的 E_{add} 越大, 电动机的稳态转速就越低。

当在转子回路中串入与 \dot{E}_2 频率相同、相位相同的附加电动势 \dot{E}_{add} 时, 则转子电流 \dot{i}_2 为

$$\dot{i}_2 = \frac{s\dot{E}_{20} + \dot{E}_{\text{add}}}{\sqrt{R_2^2 + (s\dot{X}_{20})^2}} \quad (8-3)$$

转子合成电动势增大, 则转子电流 I_2 和电动机产生的电磁转矩 T_e 相应增大, 使电动机的电磁转矩大于负载转矩, 稳定运行条件被破坏, 迫使电动机加速, 转差率 s 减小。由式(8-3)可知, 随着 s 值减小, 转子电流 \dot{i}_2 减小, 电动机电磁转矩 T_e 相应下降。直到电动机转速升高

至某值， i_2 减小到使电动机转矩复原到与负载转矩又相等时，加速过程结束。若串入的 \dot{E}_{add} 足够大，就会使 $s < 0$ ，电动机稳定运行在高于同步转速的某一转速上。这就是高于同步速度方向调速的原理，称为超同步串级调速。串入的 \dot{E}_{add} 越大，电动机的转速就越高。

8.2.2 串级调速系统的基本类型

串级调速系统的核心环节是产生交流附加电动势 \dot{E}_{add} 的装置。由于异步电动机转子电动势 E_2 的频率是随转速而变化的，这样要求 \dot{E}_{add} 也随转速而变，即 \dot{E}_{add} 装置应是频率和幅值可调的三相变频器，并且这种变频器还要对功率的传递实现可逆，故装置复杂，费用高。目前，国内外广泛应用的是转子回路中串入直流附加电动势 \dot{E}_{add} 的方案，以避免随着转速的不同而改变 \dot{E}_{add} 的频率。如图 8.5 所示，在转子绕组端接入一个不可控的整流器，将转子感应电动势 $s\dot{E}_{20}$ 整流为直流电压，串级调速用的附加电动势 \dot{E}_{add} 也为直流电压，两者叠加来实现调速。这样组成的串级调速系统主回路及其控制线路大大简化。由于转子电路采用了不可控整流电路，所以转差功率只能从转子流向产生 \dot{E}_{add} 的装置，再回馈到电网。采用直流附加反电动势的调速原理与前述的采用交流附加电动势调速的分析完全相同。

在图 8.5 所示的串级调速系统中，电动机只能工作在电动机状态下，无法实现高于同步速的向上调速，所以通常把这类在转子中利用直流附加电动势 \dot{E}_{add} 来实现调速的系统称为低同步串级调速系统。

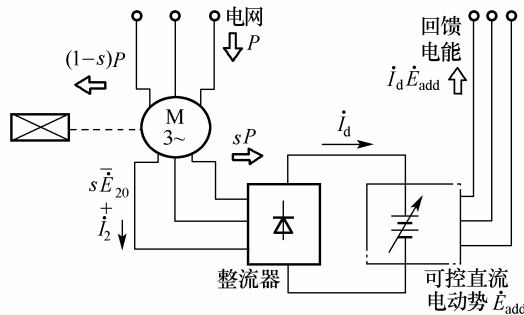


图 8.5 采用直流附加电动势 \dot{E}_{add} 的串级调速系统

根据串级调速异步电动机转子回路中直流附加电动势 \dot{E}_{add} 获得的方法不同，可将串级调速系统分为以下三种基本类型。

1. 电动机串级调速调速(电气串级)

图 8.6 所示为电动机串级调速系统。直流附加电动势 \dot{E}_{add} 就是他励直流电动机 M 的反电动势 E_f ，改变直流电动机励磁电流大小，即可改变 \dot{E}_{add} 的大小，从而可实现交流主电动机 M 转速的调节。励磁电流越大， \dot{E}_{add} 越大，主电动机的稳定转速就越低。直流电动机 M 与交流异步电动机 TD(也可用同步电动机)同轴硬性连接。从功率的传递关系看，直流电动机 M 吸收转子整流器输出的转子功率作电动状态运转，倒拖交流异步电动机 TD 作再生发

电状态运转，从而将转子转差功率回馈入电网。

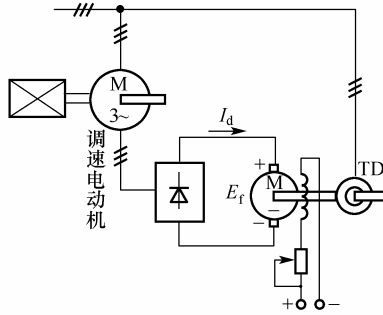


图 8.6 电动机串级调速系统

2. 晶闸管串级调速系统

图 8.7 所示为晶闸管串级调速系统。该系统用晶闸管全控整流电路获得 \dot{E}_{add} ，要求整流电路长期工作在有源逆变状态，即逆变角 $\beta \leq 90^\circ$ ，改变 β 的大小即可改变 \dot{E}_{add} 的大小。不可控转子整流器输出的转差功率是利用晶闸管组成的有源逆变电路回馈入电网。

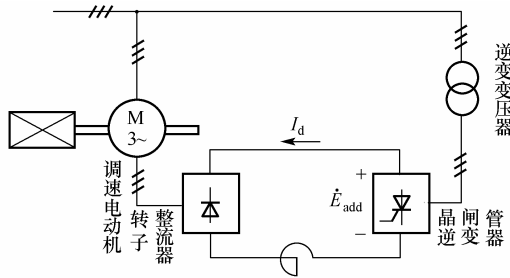


图 8.7 晶闸管串级调速系统

随着大功率晶闸管变流技术的飞速发展，晶闸管串级调速系统显示出极大的优越性，已成为低同步串级调速系统的典型方案。

3. 机械串级调速系统

机械串级调速系统如图 8.8 所示。该系统用他励直流电动机旋转时的反电动势作为附加直流电动势 \dot{E}_{add} 。改变直流电动机励磁电流大小，即可改变 \dot{E}_{add} 的大小，从而实现交流主电动机的调速。

当不计电动机的各种损耗时，主电动机从电网吸收的功率为 P ，主电动机直接输送给负载的机械功率为 $P(1-s)$ ，另一部分转差功率 sP 经转子整流器送给直流电动机。由于直流电动机与调速电动机同轴硬性连接，直流电动机吸收的转差功率 sP 转变为轴上的机械功率又送给负载，这相当于在负载轴上增加了一个拖动转矩，从而很好地利用了转差功率。这样串级调速系统在低速运转时，负载得到的机械功率总和为

$$P(1-s) + sP = \text{常值}$$

机械串级调速系统的固有恒功率调速特性，能在低速时产生较大转矩，适用于低速重

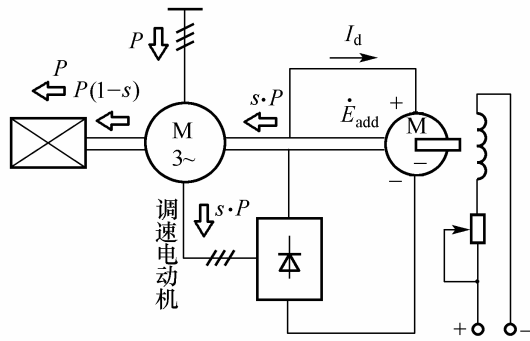


图 8.8 机械串级调速系统

负载转矩的场合。但因为转速较低时，直流电动机不能产生足够的 E_{add} ，所以这种串级调速系统调速范围不大，通常在 2:1 以内。

8.2.3 双闭环控制的串级调速系统

对于调速精度和动态调速性能要求较高的场合，可采用闭环控制的串级调速。与直流调速系统一样，此类闭环控制的串级调速通常采用转速外环和电流内环的双闭环串级调速系统。

双闭环串级调速系统的构成如图 8.9 所示。其结构与双闭环直流调速系统相似。图中 ASR 为速度调节器，ACR 为电流调节器，TG 为测速发电机，TA 为电流互感器，GT 为触发器，为实现系统的无静差调节，ASR、ACR 一般均为 PI 调节器。

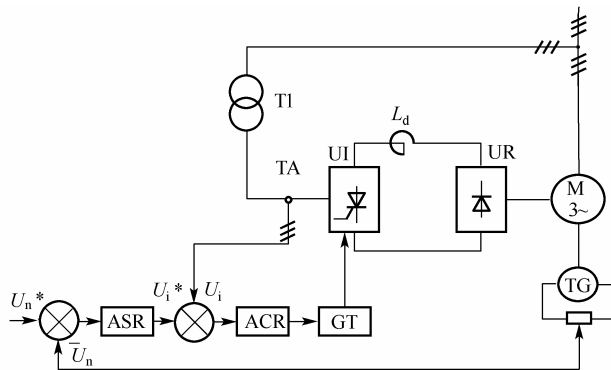


图 8.9 双闭环串级调速系统

改变转速给定值 U_n ，即可实现调速。ACR 输出电压为零时，应整定触发脉冲使 β 为最小值。为防止逆变器逆变失败，一般取 $\beta_{min}=30^\circ$ 。随着 ACR 输出电压的增加， β 角向 90° 方向变化。当 ACR 输出电压为上限幅值时，应整定逆变角最大值 β_{max} 为 90° 。

双闭环串级调速系统的工作原理与直流不可逆系统一样，具有静态稳速与动态恒流作用，所不同的是它的控制作用都是通过转子回路实现的。值得注意的是，由于次同步串级调速不能产生电气制动转矩，故减速过程只能通过负载转矩自由降落，与不可逆调速系统相类似。

8.3 笼型异步电动机变频调速系统

变频调速是通过改变电动机定子供电频率来改变同步转速，从而实现交流电动机调速的一种方法。变频调速的调速范围宽、平滑性好，具有优良的动、静态特性，是一种理想的高效率、高性能的调速手段。

8.3.1 交流异步电动机变频调速基本原理

1. 问题的提出

交流异步电动机的转速可由式(8-4)表示：

$$n = \frac{60f}{p}(1-s) \quad (8-4)$$

式中： n ——电动机的转速(r/min)；

f ——电源频率(Hz)；

p ——电动机磁极对数；

s ——电动机转差率。

由式(8-4)可见，影响电动机转速的因素有：电动机磁极对数 p ，转差率 s 和电源频率 f 。其中，若能连续地改变异步电动机的电源频率 f ，就可以平滑地改变电动机的同步转速和相应的电动机转速，从而实现交流异步电动机的无级调速，这就是变频调速的基本原理。

2. 变频与变压

在异步电动机调速时，一个重要因素是希望保持每极磁通 Φ 不变。因为，任何电动机中，电磁转矩的大小都与转子电流和磁通的乘积成正比，电动机允许电流的大小要受到发热的限制，是不能增大的，如果磁通减小，必将使电磁转矩减小，电动机的带负载能力也就减小，所以，磁通不能减小；另外，磁通增大，将使电动机的磁路饱和，励磁电流急剧增加，导致绕组过发热，功率因数降低。

根据电动机学理论，三相异步电动机的定子绕组的感应电动势是定子绕组切割旋转磁场磁力线的结果，其有效值计算如下：

$$E = Kf\Phi \quad (8-5)$$

式中： K ——与电动机结构有关的常数；

Φ ——磁通。

由式(8-5)可见，保持 Φ 不变的准确方法就是使反电动势 E 与频率 f 同步升、降。即满足

$$\frac{E}{f} = K\Phi = \text{常数} \quad (8-6)$$

由于 E 的大小无法从外部加以控制，所以，根据电源电压与反电动势相平衡($U \approx E_r$)

的特点，作为一种变通手段，保持主磁通 Φ 不变的方法是：使电压 U 与频率 f 同步下降来近似地代替反电动势 E 与频率 f 的同步下降，则得

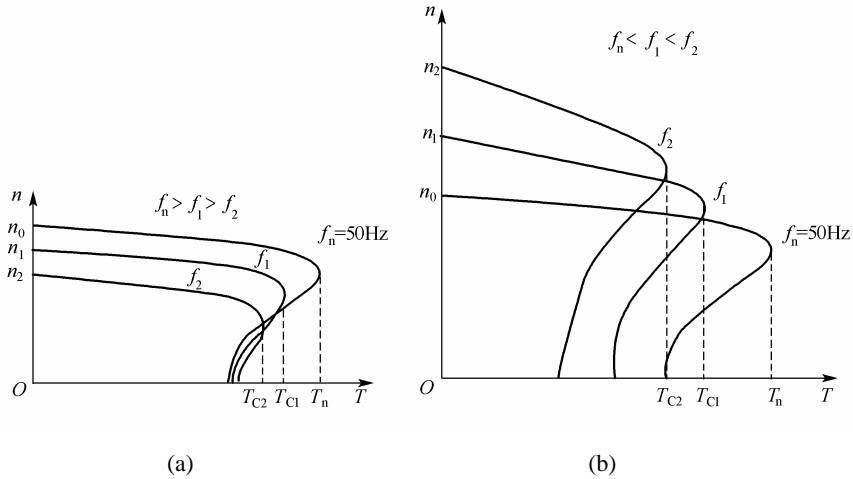
$$\frac{U}{f} = K\Phi = \text{常数}$$

所以，变频的同时也必须变压，这就是 VVVF(Variable Voltage Variable Frequency)。

3. 变频后的机械特性及其补偿

1) 变频后电动机的机械特性

满足 $U/f=\text{常数}$ 时，变频后电动机的机械特性如图 8.10 所示。



(a) 电动机向低于额定转速方向调速时的机械特性 (b) 电动机向高于额定转速方向调速时的机械特性

图 8.10 调速后的机械特性

从图 8.10 中可以看到，当电动机向低于额定转速方向调速时，如图(a)所示，曲线近似平行地下降。这说明，减速后的电动机仍然保持原来较硬的机械特性，但是电动机的临界转矩却随着电动机转速的下降而逐渐减小，这就造成了电动机带负载能力的下降。这样的机械特性难以和直流调速系统相比。

低频时临界转矩减小的原因为：从根本上说，这是用 $U/f=\text{常数}$ 近似代替 $E/f=\text{常数}$ 的结果。从能量传递的角度看，因为 f 下降引起 U 成正比下降，输入功率 P_1 也成正比下降。但 I_1 等于额定电流不变，所以 $I_1^2 R_1$ (铜损) 也不变；定子侧铁损变化不大，故损耗功率几乎不变。于是，传递到转子的电磁功率 P_m 的下降比例大于输入功率 P_1 的下降比例，临界转矩 T_C 也随之减少。从电动势平衡的角度看， f 下降引起 U 成正比下降，因为 I_1 不变，所以阻抗压降 ΔU 基本不变，而反电动势 E 所占比例则逐渐减小。从而，当 $U/f=\text{常数}$ 时，比值 E/f 实际上是随 f 的下降而减小的，主磁通 Φ 也随之减小。所以，电动机的临界转矩 T_C 也随之减小。

当电动机向高于额定转速方向调速时，如图 8.10(b)所示，不仅临界转矩曲线下降，而且其工作段的斜率开始增大，使机械特性变软。

造成这种现象的原因是：当频率 f 升高时，电源电压不能相应地升高。这是因为电动机绕组的绝缘强度限制了电源电压不能超过电动机的额定电压，所以磁通 Φ 将随着频率 f 的升高而反比例下降，而磁通的下降使电动机的转矩下降，造成电动机的机械特性变软。

2) V/F 转矩补偿法

变频后机械特性的下降将使电动机带负载能力减弱，影响交流电动机变频调速的使用。一种简单的解决方法是采用 V/F 转矩补偿法。

V/F 转矩补偿法的原理是：当频率下降时，适当提高 U/f 的比值，以补偿 ΔU 所占比例增大的影响，从而保持磁通 Φ 恒定，使电动机转矩回升。这种方法称为转矩补偿法，也叫转矩提升法，这种调整临界转矩的方法称 V/F 转矩补偿法。

注意，V/F 转矩补偿法只能补偿向低于额定转速方向调速时的机械特性，而对于高于额定转速方向调速时的机械特性不能补偿。

通常，变频器提供多条比值不同的 V/F 线，供用户根据不同机械的具体情况进行选择，如图 8.11 所示。

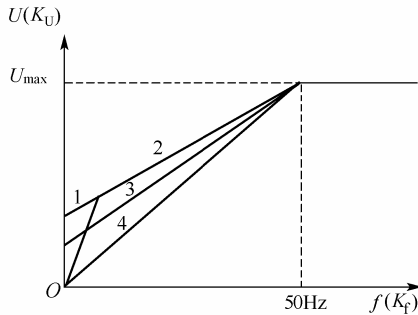


图 8.11 通用变频器提供的 V/F 线图

4. 变频调速系统中变频器的类型

变频调速实质上是向交流异步电动机提供一个频率可控的电源，能实现这一功能的装置称为变频器。变频调速系统中的变频器一般可分为交-交变频器与交-直-交变频器两种。交-交变频器又称直接变频器或周波变换器，它直接将电网的交流电变成电压和频率都可调的交流电输出。交-直-交变频器又称间接变频器，它是将交流电先经可控整流器变成幅值可变的直流电压(整流)，然后再将此直流电压经逆变器变成频率可调的交流输出(逆变)。变频器由两部分组成：主电路和控制电路。其中主电路通常采用交-直-交方式，包括整流器和逆变器；控制电路是向主电路提供多种控制信号的回路，包括决定 V/F 特性的频率电压运算回路、主回路的电压/电流检测回路、电动机的转速检测回路、根据运算回路的结果生成相应 PWM 脉冲并进行隔离和放大的 PWM 生成及驱动回路、变频器和电动机的保护回路。

8.3.2 变频与变压的实现——SPWM 调制波

要实现 VVVF，可以考虑的方法有 PAM(脉幅调制)和 PWM(脉宽调制)。PAM 控制的原理是在频率下降的同时，使直流电压也随之下降。实施 PAM 要同时控制整流和逆变两

个部分，两个部分之间的协调比较困难，故线路比较复杂。PWM 控制是通过调节脉冲宽度和各脉冲间的“占空比”来调节平均电压。PWM 的优点是不必控制直流侧，因而大大简化了电路。但是，电流的谐波分量将是很大的。如果脉冲宽度和占空比的大小按正弦规律分布的话，便是正弦脉宽调制(SPWM)，如图 8.12 所示。这样的波称为正弦脉宽调制波。SPWM 的显著优点是：由于电动机的绕组具有电感性，因此，尽管电压是由一系列脉冲构成的，但通入电动机的电流却十分逼近于正弦波，谐波成分大为减小，可以得到基本满意的驱动效果。

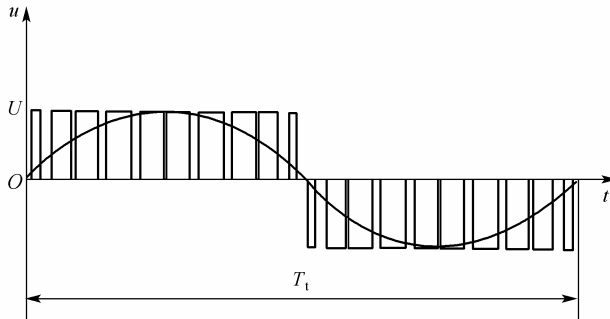


图 8.12 SPWM 波形

1. SPWM 的产生原理

产生 SPWM 波的原理是：用一组等腰三角形波与一个正弦波进行比较，如图 8.13 所示，其相交的时刻(即交点)作为开关管“开”或“关”的时刻。

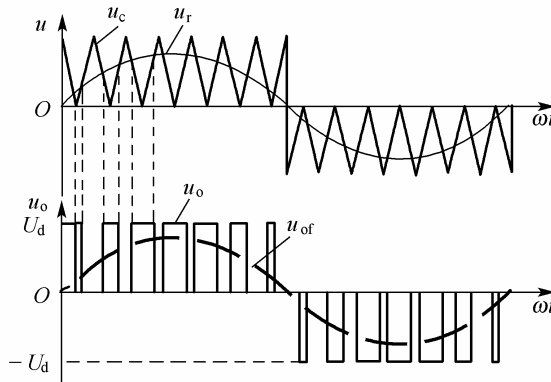


图 8.13 SPWM 波生成方法

将这组等腰三角形波称为载波；而正弦波则称为调制波。调制波的频率和幅值是可控的。如图 8.13 所示，改变调制波的频率，就可以改变输出电源的频率，从而改变电动机的转速；改变调制波的幅值，也就改变了调制波与载波的交点，使输出脉冲系统的宽度发生变化，从而改变了输出电压。

对三相逆变开关管生成 SPWM 波的控制可以有两种方式，一种是单极性控制，另一种是双极性控制。

采用单极性控制时，每半个周期内，逆变桥的同一桥臂的上、下两只逆变开关管中，只有一只逆变开关管按图 8.13 的规律反复通/断，而另一只逆变开关管始终关断；在另外半个周期内，两只逆变开关管的工作状态正好相反。图 8.13 为单极性 PWM 控制方式(单相桥逆变)波形，在 u_r 和 u_c 的交点时刻控制 IGBT 的通/断。

采用双极性控制时，每全部周期内，逆变桥同一桥臂的上、下两只逆变开关管交替开通与关断，形成互补的工作方式。图 8.14 为 SPWM 变频器电路原理图，其逆变器为三相桥式 PWM 逆变电路。图 8.15 为三相桥式 PWM 逆变电路输出双极性波形。

图 8.14 中，1V~6V 是逆变器的 6 个功率开关器件(可为 GTO、GTR、MOSFET、IGBT

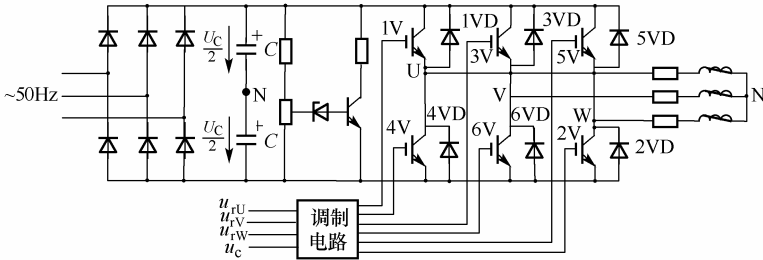


图 8.14 SPWM 变频器电路原理图

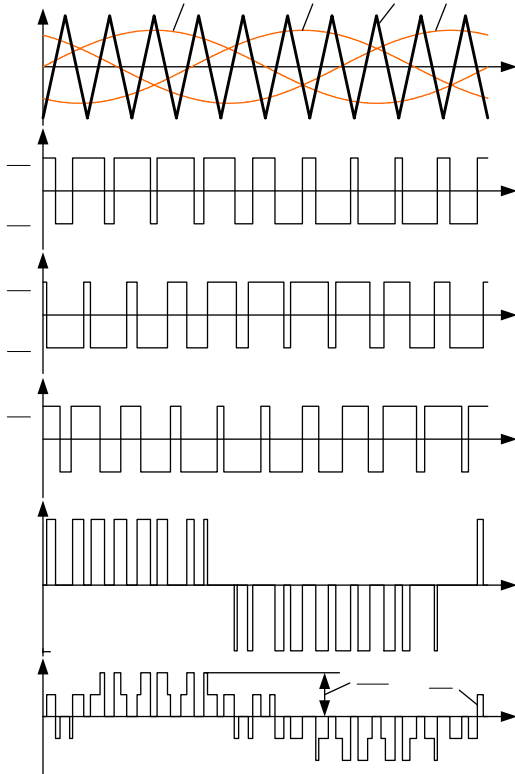


图 8.15 三相桥式 PWM 逆变电路输出双极性波形

中的任何一种, 此处以 IGBT 为例), $1VD \sim 6VD$ 为用于处理无功功率反馈的二极管, 其功能是: 为电动机绕组的无功电流返回直流电路时提供通路; 在降速过程中, 为电动机的再生电能反馈至直流电路提供通路; 为电路的寄生电感在逆变过程中释放能量提供通路。C 为滤波电容。整个逆变器由三相整流器提供的恒值直流电压 U_d 供电。一组三相对称的正弦参考电压信号 u_{rU} 、 u_{rV} 、 u_{rW} 通过调制电路产生三相 SPWM 脉冲序列波 u_{UN} 、 u_{VN} 、 u_{WN} , 如图 8.15 所示。它们分别是各桥臂按对应的调制波与载波交点所决定的时间, 进行“开”与“关”所产生的输出波形。其波值正、负交替, 这就是所谓双极性, 其中上臂开关管产生正脉冲, 下臂开关管产生负脉冲。它们的最大幅值是 $\pm U_d/2$ 。同样三相相电压波形的相位也互差 120° 。 u_{UV} 为线电压, 它是由相电压合成的 ($u_{UV} = u'_{UV} - u_{VN}$, 同理也可得到 $u_{VW} = u'_{VN} - u_{WN}$, $u_{WU} = u'_{WN} - u_{UN}$)。线电压是单极性的。

2. SPWM 波的调制方式

在 SPWM 逆变器中, 载波电压频率 f_c 与参考波电压频率 (即逆变器的输出频率) f_r 之比 $N = f_c / f_r$ 称为载波比, 也称调制比。根据载波比的变化与否, SPWM 调制方式可分为同步调制方式、异步调制方式和分段同步调制方式。

1) 同步调制方式

载波比 N 等于常数时称为同步调制方式。

同步调制方式在逆变器输出电压每个周期内所采用的载波电压数目是固定的, 因而所产生的 SPWM 脉冲数是一定的。其优点是在逆变器输出频率变化的整个范围内, 皆可保持输出波形的正、负半波完全对称, 只有奇次谐波存在。而且能严格保证逆变器输出三相波形之间具有 120° 相位移的对称关系。缺点是: 当逆变器输出频率很低时, 每个周期内的 SPWM 脉冲数很少, 低频谐波分量较大, 使负载电动机产生转矩脉动和噪声。

2) 异步调制方式

为消除上述同步调制方式的缺点, 可以采用异步调制方式, 即在逆变器的整个变频范围内, 载波比 N 不是一个常数。一般在改变参考频率 f_r 时保持三角波频率 f_c 不变, 因而提高了低频时的载波比, 这样逆变器输出电压在每个周期内的 SPWM 脉冲数可随输出频率的降低而增加, 相应地可减少负载电动机的转矩脉动与噪声, 改善了调速系统的低频工作特性。但异步调制方式在改善低频工作性能的同时, 又失去了同步调制的优点。当载波比 N 随着输出频率的降低而连续变化时, 它不可能总是 3 的倍数, 势必使输出电压波形及其相位都发生变化, 难以保持三相输出的对称性, 因而引起电动机工作不平稳。

3) 分段同步调制方式

实际应用中, 多采用分段同步调制方式, 它集同步和异步调制方式之所长, 而克服了两者的不足。在一定频率范围内采用同步调制, 以保持输出波形对称的优点, 而在低频运行时, 使载波比有级地增大, 以采纳异步调制的长处, 这就是分段同步调制方式。具体地说, 把整个变步范围划分为若干频段, 在每个频段内都维持 N 恒定, 而对不同的频段取不同的 N 值, 频率低时, N 值取大些。采用分段同步调制方式, 需要增加调制脉冲切换电路, 从而增加控制电路的复杂性。

8.3.3 SPWM 脉冲的生成方法及专用集成芯片 SA8282

生成 SPWM 脉冲的方法有很多,大致可以分为三类:一是完全由模拟电路生成,二是由数字电路生成,三是由模拟与数字电路相结合生成。

采用模拟电路来生成 SPWM 脉冲,原理简单、速度快,不像数字电路采用软件计算需要一定的时间。这种方法的缺点是所需硬件较多,且有温漂现象,会影响精度,降低系统的性能,而且不够灵活,改变参数和调试比较复杂。

采用数字电路的 SPWM 逆变器,可采用以软件为基础的控制模式。它是按照不同的数字模型用计算机算出各切换点并将其存入内存,然后通过查表及必要的计算生成 PWM 波,因此数字电路方法受内存影响较大,且与系统精度之间存在着矛盾。普通单片机完成上述计算任务负担很重。

近年来,一些厂商推出了专用于生成三相或单相 SPWM 波控制信号的大规模集成电路芯片,如 HEF4752、SLE4520、SA4828、SA8282 等。采用这样的集成电路芯片,可以大大减轻计算机的负担,使计算机可以空出大量时间用于检测和监控。下面介绍 SA8282 三相 SPWM 波控制芯片的原理和编程。

SA8282 是英国 MITEL 公司生产的全数字化三相 PWM 发生器,它频率范围宽、精度高,并可与微处理器进行接口,同时能够完成外围控制功能,因而可实现智能化。

1. 功能特点

1) SA8282 主要特点

(1) 全数字化。SA8282 与微处理器连接,适用于 Intel 和 Motorola 两种总线接口,编程简捷、方便。全数字化的脉冲输出有很高的精度和温度稳定性。

(2) 工作方式灵活。SA8282 有六个标准的 TTL 电平输出,用来驱动逆变器的六个功率开关器件。它直接通过软件设定载波频率、调制频率、调制比、最小脉宽、死区时间等工作参数,无须任何外接电路,节约了硬件成本。

(3) 工作频率范围宽,精度高,载波频率可调。当时钟频率为 12.5MHz 时,则载波频率最高可达 24kHz,输出调制频率最高可达 4kHz,输出频率的分辨率可达 12 位字长。

2) 引脚说明

SA8282 有两种封装形式:28 脚双列直插式封装(见图 8.16)与扁平小外形封装。

(1) 输入类引脚。AD0~AD7:8 位地址与数据复用总线,用于从微处理器接收地址与数据信息。

\overline{WR} (R/ \overline{W})、RD(DS)、ALE(AS):此三个引脚为 Intel(Motorola)控制模式;SA8282 在工作时可自动适应 Intel 或 Motorola 控制模式,当 ALE(AS)引脚变为高电平时,SA8282 内部检测电路将自动锁存 \overline{RD} (DS)线上的状态,如果检测结果为低电平,则采用 Motorola 控制模式;如果检测结果为高电平,则采用 Intel 控制模式。控制总线 WR、RD、ALE 采用 Intel 控制模式,R/ \overline{W} 、DS、AS 采用 Motorola 控制模式;

SET TRIP:关断触发信号输入端,当输入为高时,TRIP 及六个 PWM 输出端将被迅速锁存在低电平状态,且只有在 RST 复位时才能解除。

\overline{RST} :复位端,低电平有效;

\overline{CS} : 片选输入端, 该控制线可使 SA8282 与其他外围接口芯片共享同一组总线。

CLOCK: 时钟信号输入端。

U_{DD} : +5V 偏置电源。

U_{SS} : 接地端。

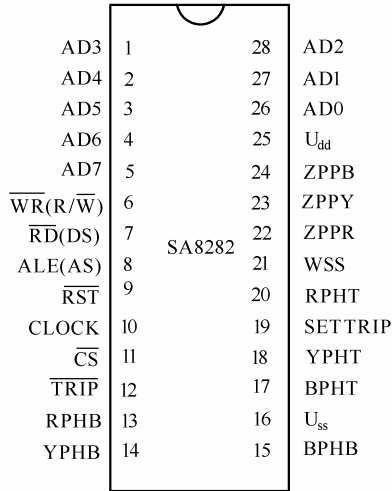


图 8.16 SA8282 引脚图

(2) 输出类引脚。RPHT、RPHB、YPHT、YPHB、BPHT、BPHB: 标准 TTL 电平输出端口(即 PWM 驱动信号端), 可分别驱动三相逆变器的六个功率开关器件。

TRIP: 输出封锁状态指示端, 用于表明输出是否被锁存, 低电平有效。

WSS: 波形采样同步端口。

ZPPB、ZPPY、ZPPR: 分别是三相信号的零相位脉冲输出端。

2. SA8282 内部结构及工作原理

图 8.17 为 SA8282 内部结构框图, 主要包括三个部分。

1) 接收并存储微处理器初始化命令和控制命令部分

该部分由总线控制、地址/数据总线、暂存器 R0~R2、虚拟寄存器 R3~R4 及 24 位初始化寄存器和 24 位控制寄存器构成。该部分在工作时应首先进行初始化(从微处理器向初始化寄存器和控制寄存器输入控制字进行系统参数设置), 然后由微处理器向两个 24 位寄存器输入命令字, 这两个寄存器分别被称为初始化寄存器和控制寄存器。由于总线的数据宽度被限制在 8 位字长, 因此要想把数据送到一个 24 位寄存器, 应先分三次分别送到三个暂存寄存器 R0、R1、R2 中。而数据由暂存寄存器 R0、R1、R2 送到初始化寄存器或控制寄存器是通过虚拟寄存器 R3、R4 的送数写指令来实现的, R3、R4 实际上不存在, 它们只在指令中出现。向 R3 送数的写指令用于将数据从 R0、R1、R2 传送到控制寄存器, 而向 R4 送数的写指令则可将数据从 R0、R1、R2 传送到初始化寄存器。

2) 从内部 ROM 读取及产生 PWM 调制波形部分

它由地址发生器、波形 ROM 及相位和控制逻辑所构成。由于调制波在 90°、180°、

270° 对称, 所以波形 ROM 中仅存 0° ~ 90° 的波形瞬时值, SA8282 根据地址发生器的信号直接从波形 ROM 中读取波形数据, 然后通过相位控制逻辑, 把它组成 0° ~ 360° 的完整波形和三相波形, 而不需要微处理器的帮助。

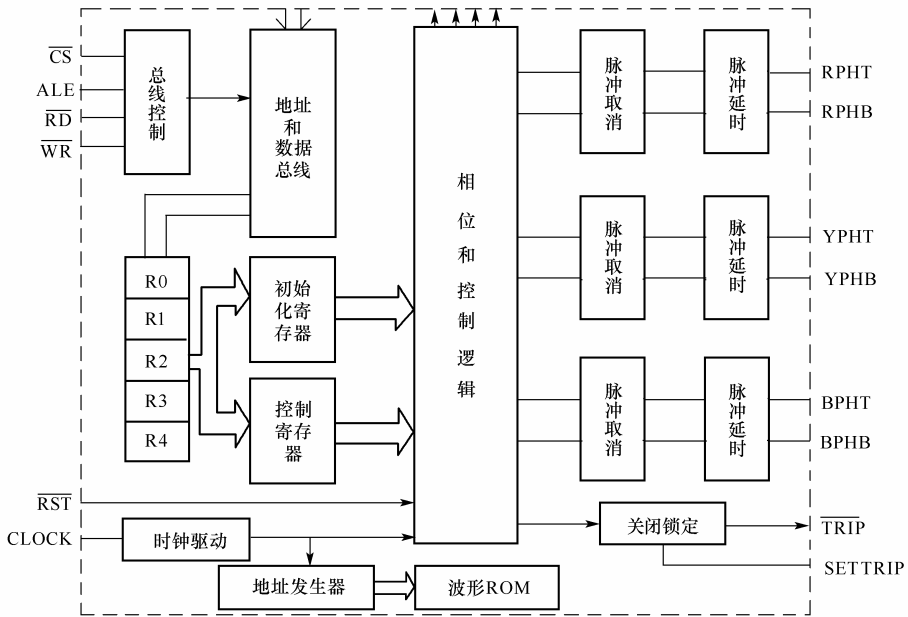


图 8.17 SA8282 内部结构框图

3) 三相输出控制电路

SA8282 中的每相输出控制电路均由脉冲取消和脉冲延时电路构成。脉冲取消电路用于去掉脉冲宽度小于取消时间的脉冲, 以保证最小输出脉冲宽度大于器件的开关周期。脉冲延时电路可保证死区间隔, 其作用是在改变任一相中两个开关器件的状态时提供一个较短的延迟时间, 以使这段时间里的两个开关都处于关状态, 从而防止在转换瞬间桥臂开关器件出现共通(两个开关在状态转换期间造成直通短路)现象。

3. SA8282 的编程

编程前, 微处理器应先向 SA8282 的两个 24 位寄存器输入命令字, 这两个寄存器为初始化寄存器和控制寄存器。命令字先被送到三个暂存寄存器 R0、R1、R2 中, 通过向虚拟寄存器 R3、R4 送数的写指令来实现把 R0、R1、R2 中的数据写入初始化寄存器和控制寄存器, 向 R3 中写指令使命令字写到控制寄存器, 向 R4 中写指令使命令字写到初始化寄存器。各寄存器的地址见表 8-1。初始化寄存器命令字格式见表 8-2, 控制寄存器命令字格式见表 8-3。

表 8-1 各寄存器的地址

AD2	AD1	AD0	寄存器
0	0	0	R0
0	0	1	R1

(续)

AD2	AD1	AD0	寄存器
0	1	0	R2
0	1	1	R3
1	0	0	R4

表 8-2 初始化寄存器命令字格式

R0	OR	PDT6	PDT5	PDT4	PDT3	PDT2	PDT1	PDT0
R1	FRS2	FRS1	FRS0	×	×	CFS2	CFS1	CFS0
R2	×	×	PDY5	PDY4	PDY3	PDY2	PDY1	PDY0

表 8-3 控制寄存器命令字格式

R0	PFS7	PSF6	PFS5	PFS4	PFS3	PFS2	PFS1	PFS0
R1	F/R	OM	INH	×	PFS11	PFS10	PFS9	PFS8
R2	AMP7	AMP6	AMP5	AMP4	AMP3	AMP2	AMP1	AMP0

1) 初始化编程

初始化用来设定电动机和逆变器有关的基本参数。它包括载波频率的设定、调制波频率范围的设定、脉冲延迟时间的设定、最小脉冲删除时间的设定等。

(1) 载波频率的设定。载波频率计算公式为

$$f_i = f_k / (512n)$$

式中： f_k ——SA8282 的时钟频率，设 $f_k=6\text{MHz}$ 。

f_i ——载波频率，设 $f_i=5\text{kHz}$ 。

n ——与设定值有关的整数， $n=f_k/(512f_i)=2.34$ ，取整数为 $n=2$ 。

n 对应初始化寄存器命令字 R1 中的 CFS2~CFS0 位，CFS2~CFS0 位的二进制值与 n 的十进制值的对应关系见表 8-4。

表 8-4 CFS2~CFS0 位的二进制值与 n 的十进制值的对应关系

CFS2~CFS0	101	100	011	010	001	000
n	32	16	8	4	2	1

当 $n=2$ 时，则 CFS2~CFS0=001。

(2) 调制波频率范围的设定。调制波频率范围计算公式为

$$f_p = f_i \times M / 384$$

式中： f_p ——调制频率范围，设 $f_p=50\text{Hz}$ ；

M ——与设定值有关的整数， $M=384 \times f_p / f_i=3.84$ ，取整数后为 $M=4$ 。

M 对应初始化寄存器命令字 R1 中的 FRS2~FRS0 位，FRS2~FRS0 位的二进制值与 M 的十进制值的对应关系见表 8-5。

表 8-5 FRS2~FRS0 位的二进制值与 M 的十进制值的对应关系

FRS2~FRS0	110	101	100	011	010	001	000
M	64	32	16	8	4	2	1

当 $M=4$ 时, 有 $FRS2\sim FR S0=010$ 。

(3) 脉冲延迟时间的设定。脉冲延迟时间的计算公式为

$$T_p=K/(512f_i)$$

式中: T_p ——延迟时间, 设 $T_p=3\mu s$;

K ——与设定值有关的整数, $K=512 T_p f_i=3\mu s \times 512 \times 5kHz=7.680$ 。取整数后为 $K=7$ 。

K 对应初始化寄存器命令字 R2 中的 PDY5~PDY0 位, PDY5~PDY0 位的二进制值与 K 的十进制值的关系为 $64-K$ 的值转换为二进制数即为 PDY5~PDY0 位的二进制值。当 $K=7$ 时, 有 $64-K=64-7=57$, 即 PDY5~PDY0=111001。

(4) 最小脉冲删除时间的设定。最小脉冲删除时间的计算公式为

$$T_d=A/(512 f_i)$$

式中: T_d ——最小脉冲删除时间, 设 $T_d=6\mu s$;

A ——与设定值有关的整数, $A=512 T_d f_i=512 \times 6\mu s \times 5kHz=15.36$, 取整数后为 $A=15$ 。

A 对应初始化寄存器命令字 R0 中的 PDT6~PDT0 位, PDT6~PDT0 位的二进制值与 A 的十进制值的关系为: $128-A$ 的值转换为二进制数即为 PDT6~PDT0 位的二进制值。当 $A=15$ 时, 有 $128-A=128-15=113$, 即 PDT6~PDT0=1110001。

2) 控制寄存器的编程

控制寄存器的编程内容包括: 调制波频率的选择(调速)、调制波幅值的选择(调压)、正/反转选择、输出禁止位控制、计数器复位控制、把关[定时]器选择、软复位控制。

(1) 调制波频率的选择(调速)。调制波频率的计算公式为

$$f_r=f_p \times Z/4096$$

式中: f_r ——调制波频率;

f_p ——调制频率范围;

Z ——与设定值有关的整数, $Z=4096 f_r / f_p$, Z 所对应的二进制值即为控制字寄存器命令字 R0、R1 中的 PFS11~PFS0 位的二进制值。

(2) 调制波幅值的选择(调压)。调制波幅值的选择指通过改变调制波幅值来改变输出电压有效值, 达到变频同时变压的目的。输出电压的改变要根据 U/f 曲线, 随频率变化进行相应的变化。

调制波幅值的计算公式为

$$K_U=n_A \times 100/255$$

式中: K_U ——调压比, 根据 U/f 变化曲线决定 K_U 值;

n_A ——与设定值有关的整数，则 $n_A = 255 K_U / 100$ 。

n_A 所对应的二进制值即为控制字寄存器命令字 R2 中的 AMP7~AMP0 位的二进制值。

(3) 正/反转选择。正/反转选择位 F/R 控制三相 PWM 输出相序。当 F/R=0 时，电动机正转，输出相序为 R—Y—B。当 F/R=1 时，电动机反转，输出相序为 B—R—Y。正/反转期间输出波形连续。

(4) 输出禁止位控制。输出禁止位 INH。当 INH=0 时，关断所有 SPWM 的信号输出。

(5) 计数器复位控制。计数器复位位 CR。当 CR=0 时，使内部的相计数器为 0° (R 相)。

(6) 过调压控制。过调压控制位 OM。当 OM=1 时，选择过调压。

8.3.4 单片机控制交流异步电动机变频调速应用举例

1. 系统组成

系统的组成如图 8.18 所示，主要包括主电路和控制电路。若主电路由三相桥式整流电路、滤波保护电路及逆变电路组成，为交—直—交变换方式。控制电路由存储器、单片机、A/D 转换芯片、SA8282 及 SPWM 波驱动电路组成。控制电路用来产生 SPWM 波，其中 A/D 转换芯片用来把频率给定值转换为数字量。

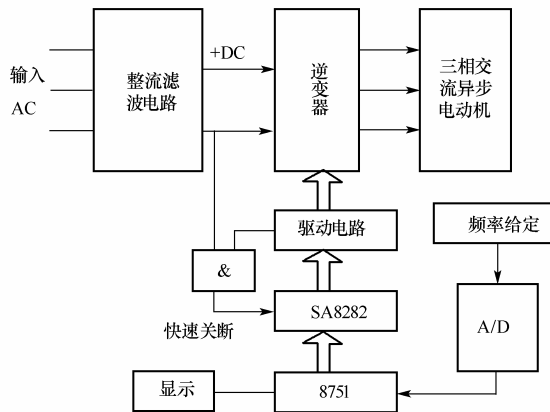


图 8.18 微机控制 SPWM 变频调速系统组成框图

2. SA8282 与单片机的接口电路

SA8282 与单片机的接口电路如图 8.19 所示。如前所述，SA8282 芯片可以与多种不同种类单片机接口，本例中选用 Intel 公司的 8751 单片机。通过 8751 的 P0 接口与 SA8282 的 AD 接口相连，提供 8 位数据和低 8 位地址。SA8282 芯片中的地址锁存器可以锁存来自 8751 的低 8 位地址，从而将 AD 接口输入的地址和数据分开。SA8282 的地址锁存器由 8751 的 ALE 信号控制。此外连接的控制信号还有读、写信号。SA8282 的片选信号用 8751 的 P2.7 引脚来控制，这样 SA8282 的五个寄存器 R0~R4 的地址为 0000H~0004H。

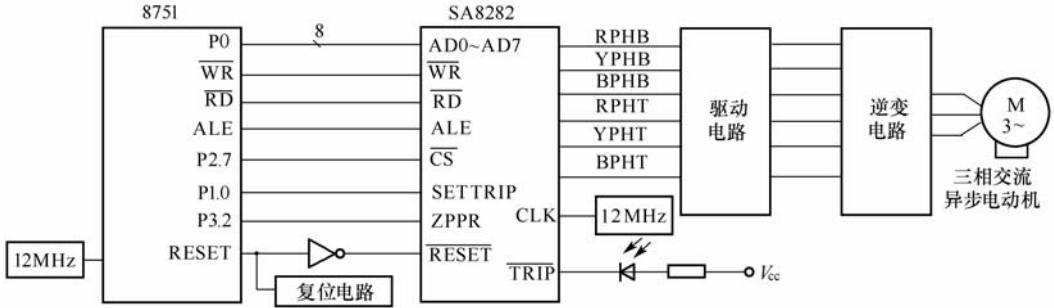


图 8.19 SA8282 与单片机的接口电路

SA8282 的 SET TRIP 引脚接 8751 的 P1.0，使单片机能够在异常情况下封锁 SA8282 的输出。ZPPR 引脚接 8751 的 P3.2(INT0)，测量调制波的频率，用于显示。SA8282 的 TRIP 引脚接一只发光二极管，当 SA8282 的输出被封锁时，发光二极管亮，用来指示封锁状态。SA8282R 的六个输出引脚 RPHT、YPHT、BPHT、RPHB、YPHB、BPHB 分别通过各自的驱动电路来驱动逆变桥的六只开关管。

3. 系统软件设计

本系统为开环控制系统。系统程序包括主程序和中断子程序，如图 8.20 所示。系统主程序主要进行单片机的初始化处理、SA8282 各个初始化命令字及各控制命令字的传送、频率给定值的 A/D 转换处理、根据给定频率进行速度计算，以及故障保护处理。为了显示调制波频率，必须测量 ZPPR 引脚输出脉冲的周期，其周期的倒数就是调制波频率。测量 ZPPR 引脚输出脉冲周期的方法是：利用 ZPPR 输出脉冲的下降沿触发 INT0 中断，这时计算两个 ZPPR 引脚输出脉冲下降沿的时间间隔。此时间间隔可用定时器 T0 求得(初值为 00H)。但因为调制波频率较低，周期较长，可能会出现周期大于 16 位的 T0 所能定时的最长时间，因此，不要利用定时器 T0 的溢出中断。在 T0 每次中断时，给一个指示器加 1，加 1 的结果存入 RAM 某个单元中。图 8.20 所示系统要用两个中断(T0 和 INT0)来显示调制波频率。

8.3.5 矢量控制简介

1. 对直流电动机的思考

8.3.1 节介绍了交流电动机变频变压调速后的机械特性有不足之处，这使我们又想起了直流电动机的优良机械特性。能不能使交流电动机调速后的机械特性像直流电动机那样呢？矢量控制法给了我们一个肯定的答案。

任何电动机的电磁转矩都是由主磁场和电枢磁场相互作用产生的。因此为了弄清交流异步电动机的调速性能为什么不如直流电动机，现将交流异步电动机和直流电动机的磁场情况进行比较。

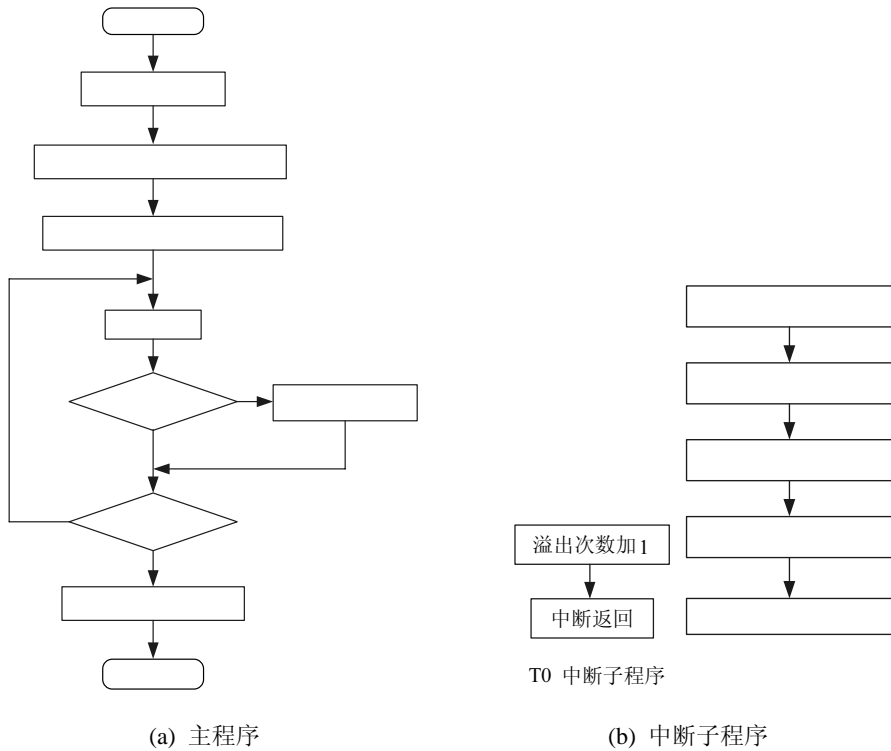


图 8.20 系统程序流程图

直流电动机：有两个互相垂直的磁场(主磁场和电枢磁场)；产生两个磁场的电路是互相独立的；在这两个互相独立的磁场中，只需调节其中之一即可进行调速。

交流电动机：主磁场和电枢磁场的夹角与功率有关；产生两个磁场的电路都在定子电路内，无法将它们分开；不能单独调节其中某一磁场进行调速。

2. 矢量控制的基本思想

矢量控制的基本思想是：仿照直流电动机的调速特点，使异步电动机的转速也能通过控制两个互相垂直的直流磁场来进行调节。那么需要知道交流旋转磁场的产生方法及如何将其变换为两个互相垂直的直流磁场。

1) 产生旋转磁场的方法

(1) 三相旋转磁场的产生。将相位上互差 $2\pi/3$ 的三相交流电流[见图 8.21(b)]通入在空间位置上互差 $2\pi/3$ 电度角的三相绕组 A、B、C[见图 8.21(a)]后，其合成磁场如图 8.22 所示。由图可见，随着时间的变化，合成磁场的轴线也在旋转，电流交变一个周期，磁场也旋转一周。该三相合成磁场称为三相旋转磁场。

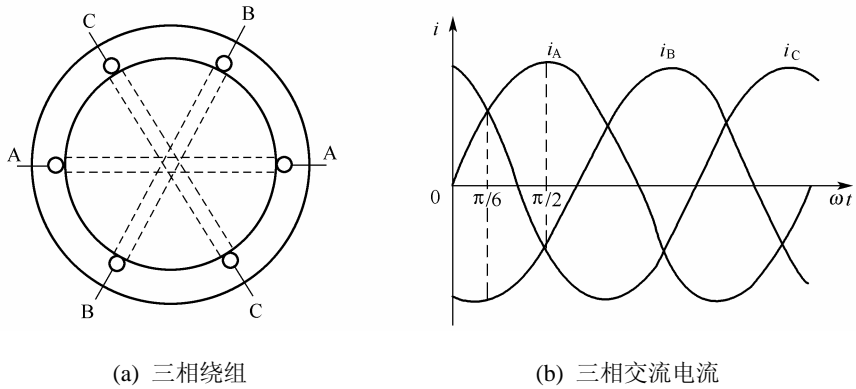


图 8.21 三相绕组与三相交流电流

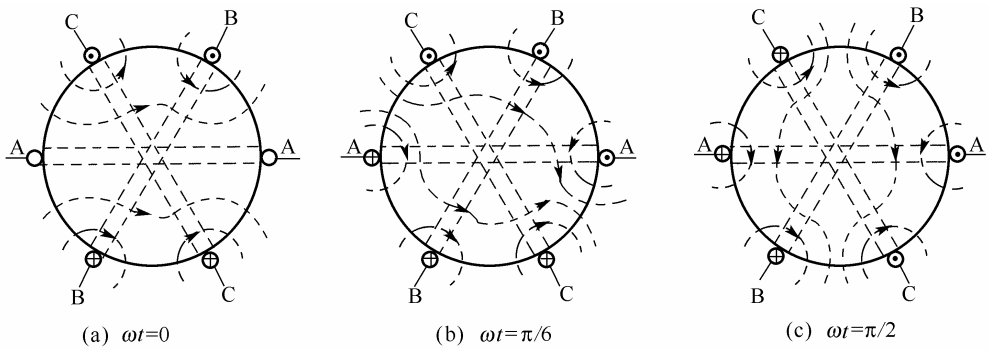


图 8.22 三相合成磁场

(2) 二相旋转磁场的产生。将相位上互差 $\pi/2$ 的二相交流电流[见图 8.23 (b)]通入在空间位置上互差 $\pi/2$ 电度角的二相固定绕组 α 、 β [见图 8.23(a)]后, 其合成磁场如图 8.24 所示。由图可见, 二相合成磁场具有与三相旋转磁场完全相同的特点。

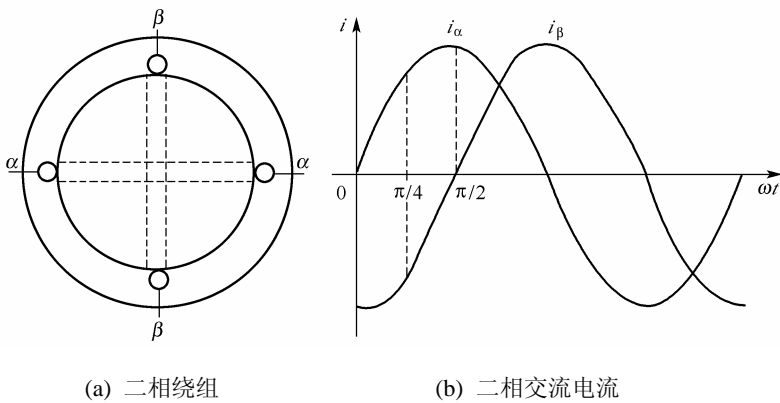


图 8.23 二相绕组与二相交流电流

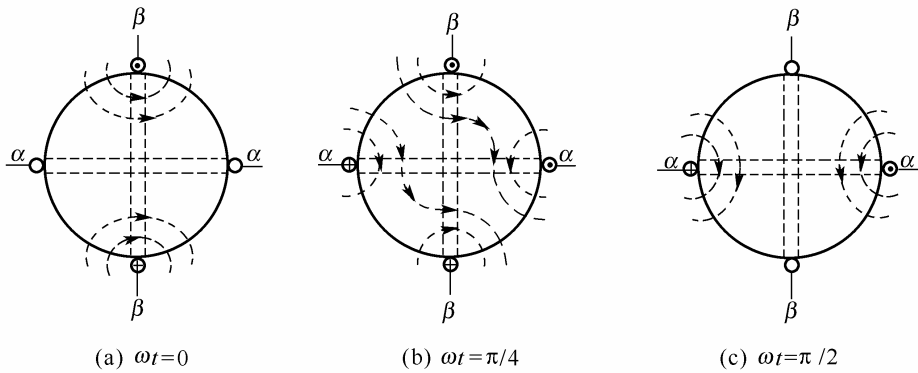


图 8.24 二相合成磁场

(3) 旋转体产生的旋转磁场。在图 8.25(a)所示的旋转体上，放置一个直流绕组 M。M 内通入直流电流，这样它将产生一个恒定的磁场。这个恒定磁场是不旋转的。但当旋转体旋转时，恒定磁场也随之旋转，在空间上形成一个旋转磁场。由于该磁场是借助于机械运动得到的，所以也称其为机械旋转磁场。

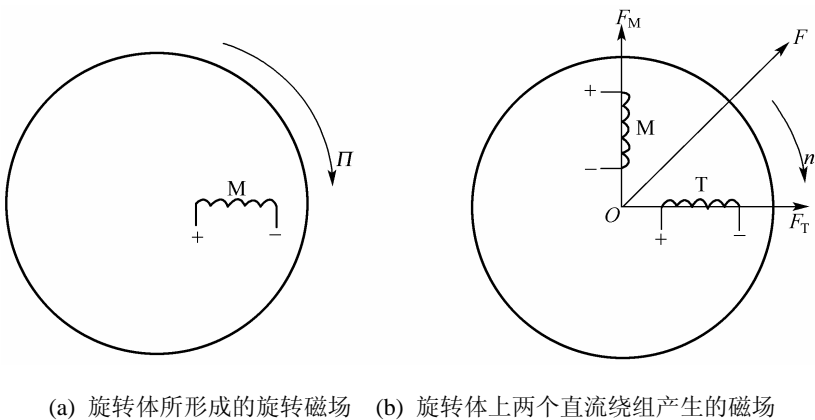


图 8.25 机械旋转磁场

如果旋转体上放置两个互相垂直的直流绕组 M、T，则当给这两个绕组分别通入直流电流时，它们的合成磁场仍然是恒定磁场。

同样，当旋转体旋转时，该合成磁场也随之旋转，称其为机械旋转直流合成磁场，如图 8.25(b)所示。而且，如果调节两路直流电流 I_M 、 I_T 中的任何一路时，机械旋转直流合成磁场的磁感应强度也得到了调整。

2) 旋转磁场可进行等效变换

如果上述三种方法产生的旋转磁场完全相同(磁相对数相同，磁感应强度相等，转速一样)，则认为这时的三相磁场系统、二相磁场系统和旋转直流磁场系统是等效的。这三种旋转磁场之间，可进行等效变换。而二相旋转磁场在三种磁场之间进行等效变换时可起“桥梁”作用，说明如下：

在三相绕组中，任何一相电流所产生的磁通，必将穿过另外两相，即三相绕组相互间存在着磁耦合。但在二相绕组中，由于两个绕组在空间上处于垂直状态，任一相电流所产

生的磁通，并不穿过另一相。因此，二相绕组相互间不存在磁耦合。

三相旋转磁场和二相旋转磁场之间由于都是多相交变磁场的合成结果，故相互间较易变换，称为 3/2 变换或 2/3 变换。其中，当进行 3/2 变换时，原来存在着磁耦合的三相绕组被变换成没有磁耦合的二相绕组了，即绕组间的磁耦合被解除了，故也称为解耦变换。

二相旋转磁场和直流旋转磁场由于都由两个互相正交的磁场构成，绕组间没有磁耦合，相互间也较易变换，故称为交/直变换或直/交变换。

而在三相旋转磁场和直流旋转磁场之间，要进行直接变换就比较困难了。

3) 矢量控制的原理框图

矢量控制的基本原理可用图 8.26 所示的框图表示。将用于控制交流调速的给定信号变换成类似于直流电动机磁场系统的控制信号，也就是说，假想有两个互相垂直的直流绕组同处于一个旋转体上，两个绕组中分别独立地通入由给定信号分解而得的励磁电流信号 i_M 和转矩电流信号 i_T ，并把 i_M 、 i_T 作为基本控制信号，通过直/交变换，将 i_M 、 i_T 变换成两相交流信号 i_α 、 i_β ，又经 2/3 变换，得到三相交流的控制信号 i_A 、 i_B 、 i_C ，去控制逆变电路。

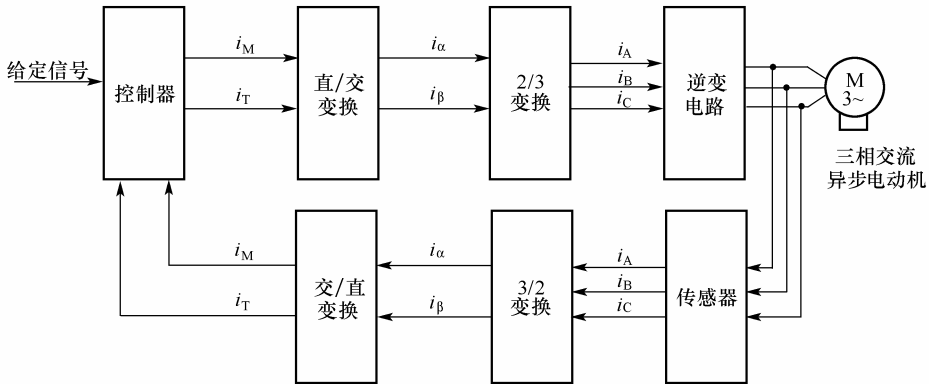


图 8.26 矢量控制的原理框图

电流反馈信号经 3/2 变换成两相交流信号，然后经过交/直变换，转换成两相互垂直的直流信号，反馈到控制端，用来修正基本控制信号 i_M 、 i_T 。

给定信号的改变，使直流磁场之一(转矩分量)得到调整，从而获得了和直流电动机相似的调速特性。

8.3.6 PLC 控制交流异步电动机变频调速应用举例

通用变频器自 20 世纪 80 年代进入实际应用以来，主要以交流电动机节能应用为主。近年来，大规模集成电路 32 位数据处理器和矢量控制理论的应用，使得通用变频器的性能得到了很大提高，正在取代直流调速器而成为传动系统的主流。下面以交流变频调速电梯 PLC 控制系统为例，介绍采用 PLC 控制变频调速系统，实现电流、速度、位移三闭环控制。

1. 电梯 PLC 控制系统硬件构成

电梯 PLC 控制系统硬件由轿厢操纵盘、厅门信号、PLC、变频调速系统构成。控制系统结构图如图 8.27 所示。图中变频器只完成调速功能，而逻辑控制部分是由 PLC 完成的。

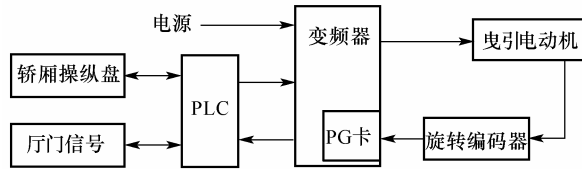


图 8.27 控制系统结构图

PLC 负责处理各种信号的逻辑关系，从而向变频器发出起停信号，同时变频器也将本身的工作状态输送给 PLC，形成双向联络关系。控制系统还配置了与电动机同轴连接的旋转编码器及 PG 卡(又称编码器连接板)，用于速度检测及反馈，形成速度闭环和位置闭环。此外控制系统还必须配置制动电阻，当电梯减速运行时，电动机处于再生发电状态，向变频器回馈电能，抑制直流电压升高。

电梯为四层办公楼用的交流电梯，经过分析可知系统输入信号为 26 个，包括保护、工作状态选择、开/关门控制、位置检测、呼梯、速度控制等；输出信号为 21 个，包括开/关门、上行、下行、控制变频器信号、报警器、指示灯等。根据以上情况选择三菱 FX2N-64MR PLC。

变频器选用安川 616G5 CIMR-G5A 4022 通用变频器，技术特性为：可直接控制交流异步电动机的电流，使电动机保持较高的输出转矩；适用于各种应用场合，在低速下可实现平稳启动并且极其精确的运行；它的自动调整功能可使各种电动机达到高性能的控制；它将 V/f 控制、矢量控制、闭环 V/f 控制、闭环矢量控制四种控制方式融为一体，其中闭环矢量控制最适合电梯控制要求。

旋转编码器与主电动机同轴连接，通过 PG 卡对电动机测速和反馈电梯的位置。该电梯选用 Omron 公司的 1024 脉动增量式光电脉冲旋转编码器。此旋转编码器与电动机同轴连接，产生 A、B 两相脉冲。当 A 相脉冲超前于 B 相脉冲 90° 时，认为电动机处于正转状态；当 A 相脉冲滞后于 B 相脉冲 90° 时，认为电动机处于反转状态。根据 A、B 相脉冲的相序，可判断电动机的转向。根据 A、B 脉冲的频率(或周期)可测得电动机的转速。若以 A、B 相脉冲的前沿或后沿产生计数脉冲，可以形成代表正向位移和反向位移的脉冲序列。旋转编码器将此脉冲输出给 PG 卡，PG 卡再将此反馈信号送给变频器，以便进行运算调节。

2. 电梯的工作过程

电梯一次完整的运行过程，就是曳引电动机从启动、匀速运行到减速停车的过程。PLC 接收来自操作面板和呼梯盒的召唤信号、轿厢和门系统的功能信号以及井道和变频器的状态信号，经程序判断与运算后实现电梯的集选控制，PLC 在输出显示和监控信号的同时向变频器发出运行方向、启动、加速、减速、运行和制动停梯信号。

当曳引电动机正转反转控制及高速控制信号有效时，电动机从 $0\sim 50\text{Hz}$ 开始启动，启动时间在 3s 左右，然后维持 50Hz 的频率一直运行，完成启动及运行段的工作。当换速信号到来后，PLC 撤销高速信号，同时输出爬行信号，此时爬行的输出频率为 6Hz。从 50Hz 到 6Hz 的减速过程在 3s 之内完成，当达到 6Hz 频率时电梯停止减速，并以此频率爬行。当平层信号到来后，PLC 撤销爬行信号，同时发出停梯信号，此时电动机从 6Hz 减速到 0Hz，电梯停梯。正常情况下，在整个启动、运行、减速、爬行段内，变频器的零速输出点一直是闭合的，减至 0Hz 之后，零速输出点断开，通过 PLC 抱闸及自动开门。

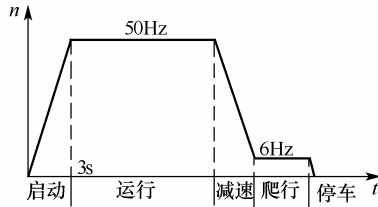


图 8.28 电梯运行曲线

电梯运行曲线如图 8.28 所示。

图 8.28 中运行曲线可通过变频器进行设置，也可通过配置运行曲线输入板设置。本系统采用变频器进行参数设置：令 C1-01=3s，设置加速启动时间为 3s；令 C1-02=3s，设置减速时间为 3s；令 D1-02=50Hz，设置快车运行频率；令 D1-03=6Hz，设置爬行频率。

3. 电梯运行中位置信号的检测

作为一种载人工具，在位势负载下，除要求其安全可靠还必须运行平稳、乘坐舒适、停靠准确。采用变频器调速双闭环控制可基本满足以上要求。在不增加硬件电路的基础上，利用现有的旋转编码器在构成速度闭环的同时，也可构成位置闭环控制。

脉冲编码器的输出一般为 A 和 A 非、B 和 B 非两对差动信号，可用于位置和速度测量。A 和 A 非、B 和 B 非四个方波被引入 PG 卡，经辨向和乘以倍率后，变成代表位移的测量脉冲，引入 PLC 高速计数端，进行位置控制。

本系统采用相对计数方式进行位置测量。运行前通过编程方式将各信号，如换速点位置、平层点位置、制动停车点位置等所对应的脉冲数，分别存入相应的内存单元，在电梯运行过程中，通过旋转编码器检测、软件实时计算以下信号：电梯所在层楼位置、换速点位置、平层点位置，进行楼层计数、发出换速信号和平层信号。

电梯运行中位移的计算式为： $H=SI$

式中： I ——累计脉冲数；

H ——电梯位移。

S 为脉冲当量。

$$S = \pi \lambda D / P \rho$$

式中： D ——曳引轮直径；

ρ ——PG 卡的分频比；

λ ——减速器的减速比；

P ——旋转编码器每转对应的脉冲数。

选 $\lambda=1/32$ ， $D=580\text{mm}$ ， $n_{\text{ed}}=1450\text{r/min}$ ， $P=1024$ ， $\rho=1/18$ ，代入 $S = \pi \lambda D / P \rho$ 得 $S=1.00\text{mm/脉冲}$ 。

设楼层的高度为 4m，则各楼层平层点的脉冲数为：1 楼为 0，2 楼为 4000，3 楼为 8000，4 楼为 12000。

设换速点距楼层为 1.6m，则各楼层换速点的脉冲数为

上升：1 楼至 2 楼为 2400，2 楼至 3 楼为 6400，3 楼至 4 楼为 10400；

下降：4 楼至 3 楼为 9600，3 楼至 2 楼为 5600，2 楼至 1 楼为 1600。

4. 软件设计

系统软件根据运行要求及保护要求共分为 14 个功能程序块：初始化、外呼、内选、自动开关电梯、平层、层楼计数及显示、超时基驶回基站、上行、下行、换速、开/关门、报警、相序更正、优先服务。根据电梯运行的要求，作出其运行流程的工作循环如图 8.29 所示。

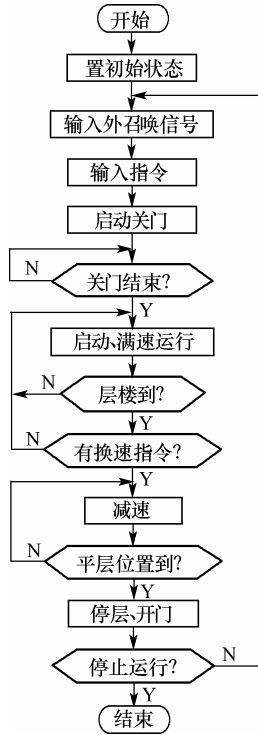


图 8.29 电梯运行流程的工作循环图

电梯在有外呼信号或内选信号时，处于服务状态(为服务信号)。当在一定的时间内没有服务信号时，电梯自动驶回基站，下面着重介绍程序初始化、换速、楼层计数及平层的程序及工作过程。

1) 程序初始化

将各楼层平层点对应的脉冲数及换速点对应的脉冲数写入 PLC 数据寄存器 D(停电保持)。数据寄存器分配如下。

平层点：0→D200，4000→D201，8000→D202，12000→D203；

换速点：2400→D204，6400→D205，10400→D206，9600→D207，5600→D210，1600→D211。

2) 换速

用 PLC 的高速计数器对 PG 卡的输出脉冲进行计数，当高速计数器的计数值与换速点对应的脉冲数相等，且目的层有有效的选层信号或呼梯信号时，发出换速信号，电梯转入爬行阶段。换速程序流程如图 8.30 所示。

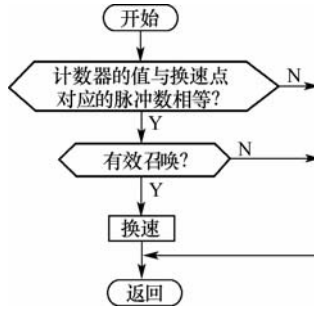


图 8.30 换速程序流程图

3) 楼层计数

当轿厢到达各楼层计数点时，楼层数加 1 或减 1。为防止计数脉冲高电平期间反复计数，采用楼层计数信号上升沿触发楼层计数。楼层计数程序流程如图 8.31 所示。

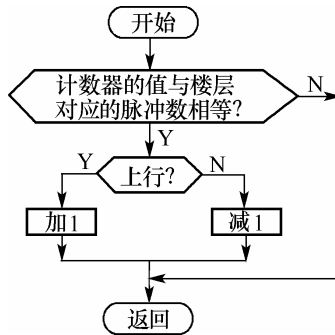


图 8.31 楼层计数程序流程图

4) 平层

当高速计数器的计数值与平层点的计数脉冲相等时，发出平层信号，电梯平层。平层程序流程如图 8.32 所示。

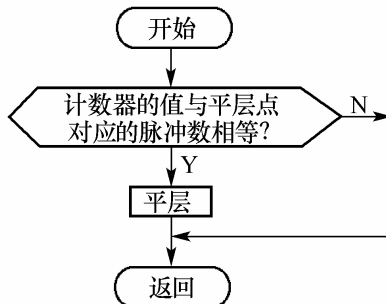


图 8.32 平层程序流程图

思考题与习题

1. 电磁转差离合器调速系统由哪几部分组成？
2. 如何调节电磁转差离合器调速系统的转速？
3. 电磁转差离合器调速系统的调速特性怎样？
4. 什么叫绕线转子异步电动机的串级调速？试述串级调速的基本原理。
5. 绕线转子异步电动机的串级调速有哪几种类型？各有什么特点？
6. 变频调速时，为什么要维持恒磁通控制？恒磁通控制的条件是什么？
7. 指出电压型变频器和电流型变频器各自的特点。为什么电压型变频器没有再生制动能力？
8. 试述整流器、逆变器、变频器与变频调速系统之间的区别。
9. 异步电动机的变频调速有几种控制方式？其特点如何？
10. 试说明风机、泵类负载采用变频调速系统的节电原理。
11. 试举出你所知道的异步电动机变频调速系统的应用实例，说明其特点。
12. 变频变压调速时，载波频率如何选择？
13. 交流电动机变频变压调速后的机械特性有哪些不足？怎样改进？
14. 在 V/F 控制方式中，以恒压频比控制代替恒电动势频比控制的适用场合是什么？如何实现恒转矩负载大范围的调速？
15. 参考图 8.15，画出线电压 u_{vw} 的波形图。
16. 试述异步电动机采用矢量变换的基本思想，并分析矢量变换控制方法的优缺点。
17. 设 SA8282 时钟频率为 4MHz，调制波频率范围为 0~60Hz，载波频率为 1kHz，延迟时间为 4 μ s，实际脉冲删除时间为 7 μ s，各相电压幅值分别控制，硬件连接如图 8.19 所示。试设计 SA8282 初始化程序。

表 4-7 DW、DZ 系列自动开关的主要技术参数

型 号	脱扣器额定 电流 I_H /A	电磁式脱扣器 可调范围	保护特性			极限通断能力			寿命/次			
			长延时动作 可调范围	短延时动作 可调范围	瞬时动作 可调范围	短延时	瞬时		机械 寿命	电寿命		
							有效值	峰值				
DW10—200	100~200	$(1\sim 3)I_H$			$(1\sim 3)I_H$		10000		20000	5000		
DW10—400	100~400						15000					
DW10—600	500~600						20000					
DW10—1000	400~1000						30000		10000	2500		
DW10—1500	1500						40000					
DW10—2500	1000~2500						5000		1250			
DW10—4000	2000~4000											
DZ10—100	15~100	$10I_H$	$1.1I_H < 2h$ 不动	$10I_H$			DC 12000	AC 12000	10000	5000		
DZ10—250	100~250	$(3\sim 10)I_H$	$1.1I_H < 1h$ 动				$(1\sim 3)I_H$	DC 20000	AC 30000	8000	4000	
DZ10—600	200~600		$1.1I_H < 3h$ 不动	DC 25000	AC 50000	7000		2000				
			$1.45I_H < 1h$ 动									
DWX15—200	100~200	$(0.64\sim 12)I_H$	$1.2I_H < 20min$ 不动 $1.5I_H < 3min$ 动	$10I_H$ $12I_H$			50000		20000	10000		
DWX15—400	300~400						70000		10000	5000		
DWX15—600	300~600											
DW15—200	100~200			$(3\sim 10)I_H$ 延 时 0.2s		$(10\sim 12)I_H$ $(8\sim 20)I_H$	$20I_H$		20000		20000	10000
DW15—400	300~400								25000		10000	5000
DW15—600	300~600								30000			
DW15—1000	600~1000											
				$(3\sim 10)I_H$ 延	$(1\sim 3)I_H$							

前 言

本书在内容安排上,突出应用特点,强化工程背景,体现专业特色。单独设置第1章介绍电动机的工作原理、机械特性及其工程应用;将可编程控制器提到自动调速系统之前介绍,在第7章、第8章增加了基于单片机或基于PLC的自动调速系统。本课程教学学时约50学时,各个学校和专业可根据具体情况自行确定学时。各章教学学时分配如下表,仅供参考。

序号	课题	建议学时
0	概述	1
1	电动机的工作原理及特性	5
2	电动机的基本电气控制线路	6
3	金属切削机床的电气控制线路	6
4	继电器-接触器控制线路设计基础	4
5	可编程控制器	6
6	变流技术基础	6
7	直流调速控制系统	8
8	交流调速控制系统	8

本书由张万奎教授任主编,徐祖华、孙晓和罗雪莲任副主编。张万奎教授提出了编写大纲并进行了统稿。参加本书编写工作的有湖南理工学院张万奎(概述、第2章、第6章)、湘潭大学毛美姣(第1章)、湖南工业大学孙晓(第3章)、中南林业科技大学陈飞(第4章)、中北大学杨福合(第5章)、南华大学徐祖华(第7章)、湖南工学院罗雪莲(第8章)。

本书由湖南大学黎福海教授主审。主审审阅了全部书稿,提出了许多宝贵的修改意见,编者在此深表谢意。本书在编写过程中,参考了大量相关教材和资料,在此对这些教材和资料的作者谨致深切的感谢。在本书的出版过程中,还得到了北京大学出版社和中国林业出版社的大力支持和帮助,在此也一并表示衷心的感谢。

由于编者水平、时间有限,书中定然存在欠妥之处,恳请读者批评指正。

编 者

2006年2月

电源开关	主轴电动机		冷却泵电动机	液压泵电动机	启动、停止	正转	反转	制动延时	变压器	电源指示	变速指示	照明	主轴制动
	正转	反转											

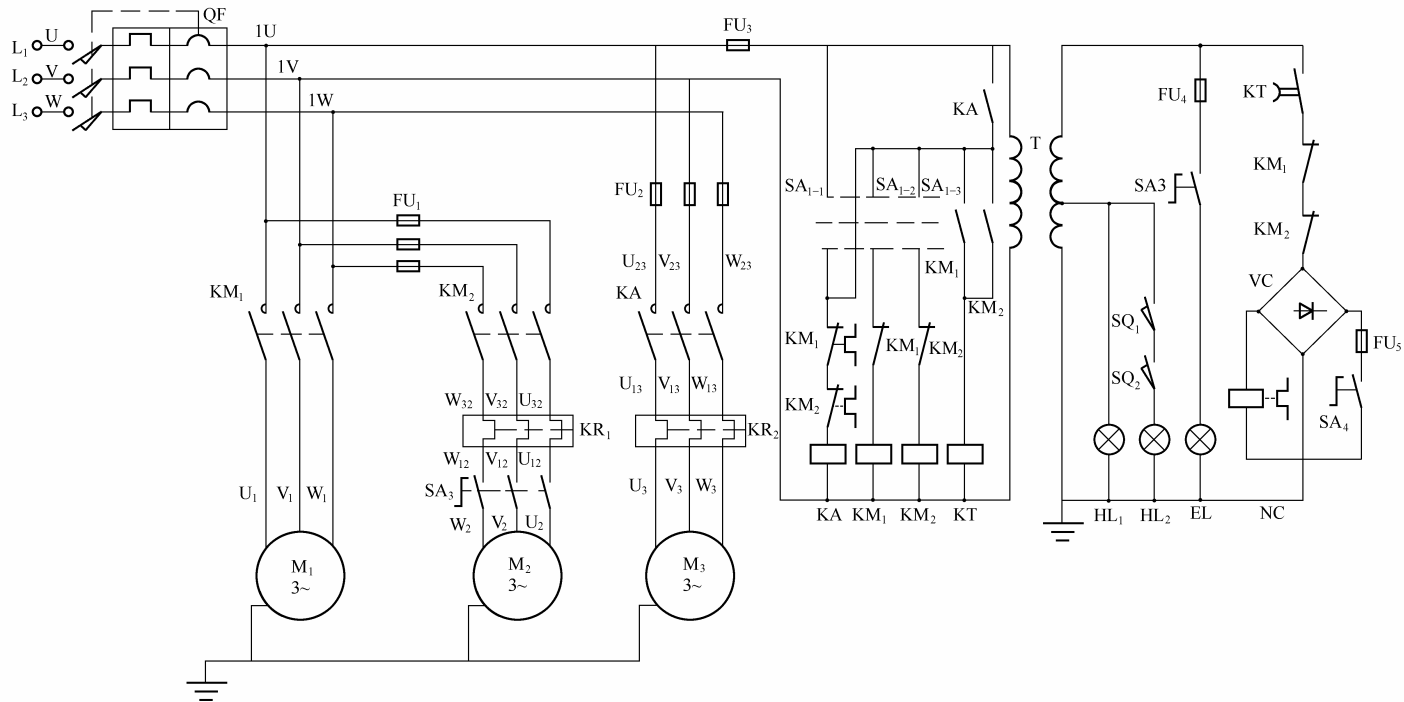
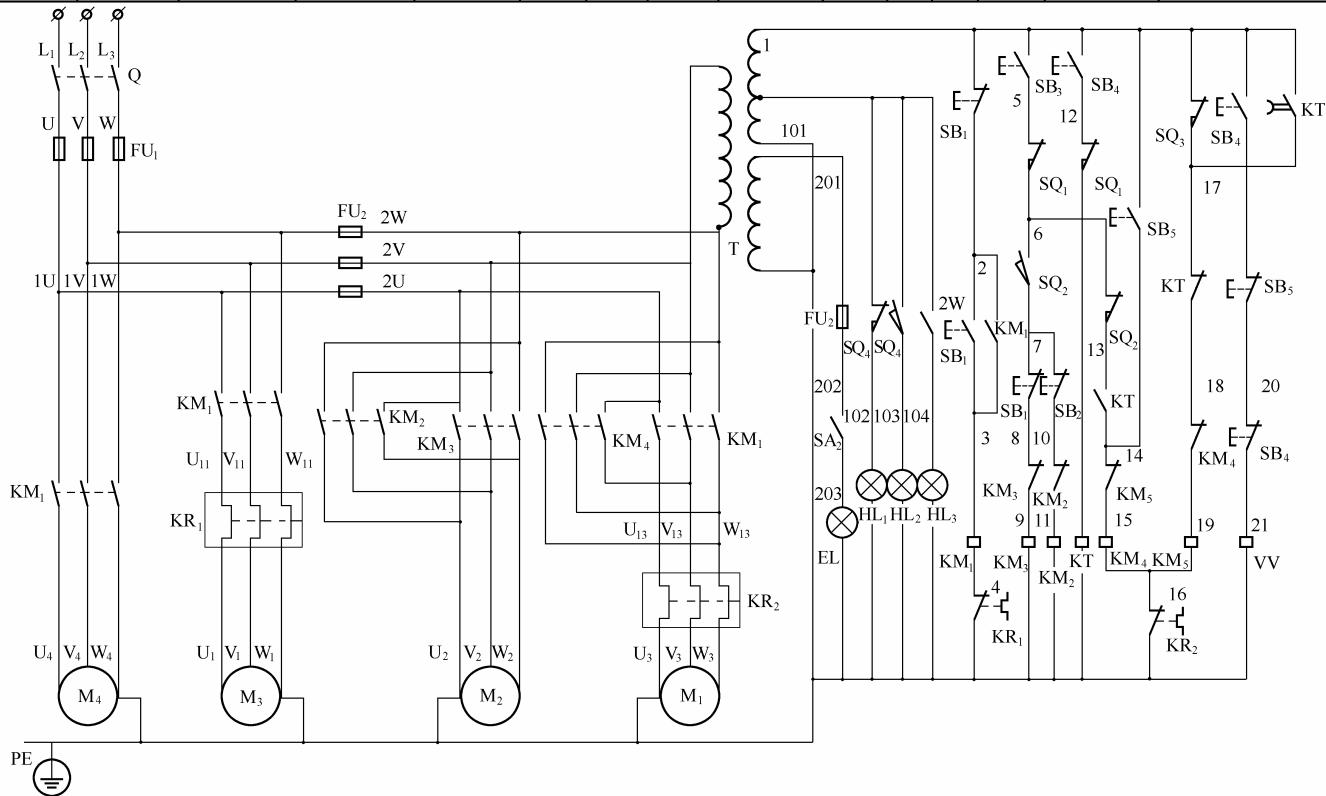
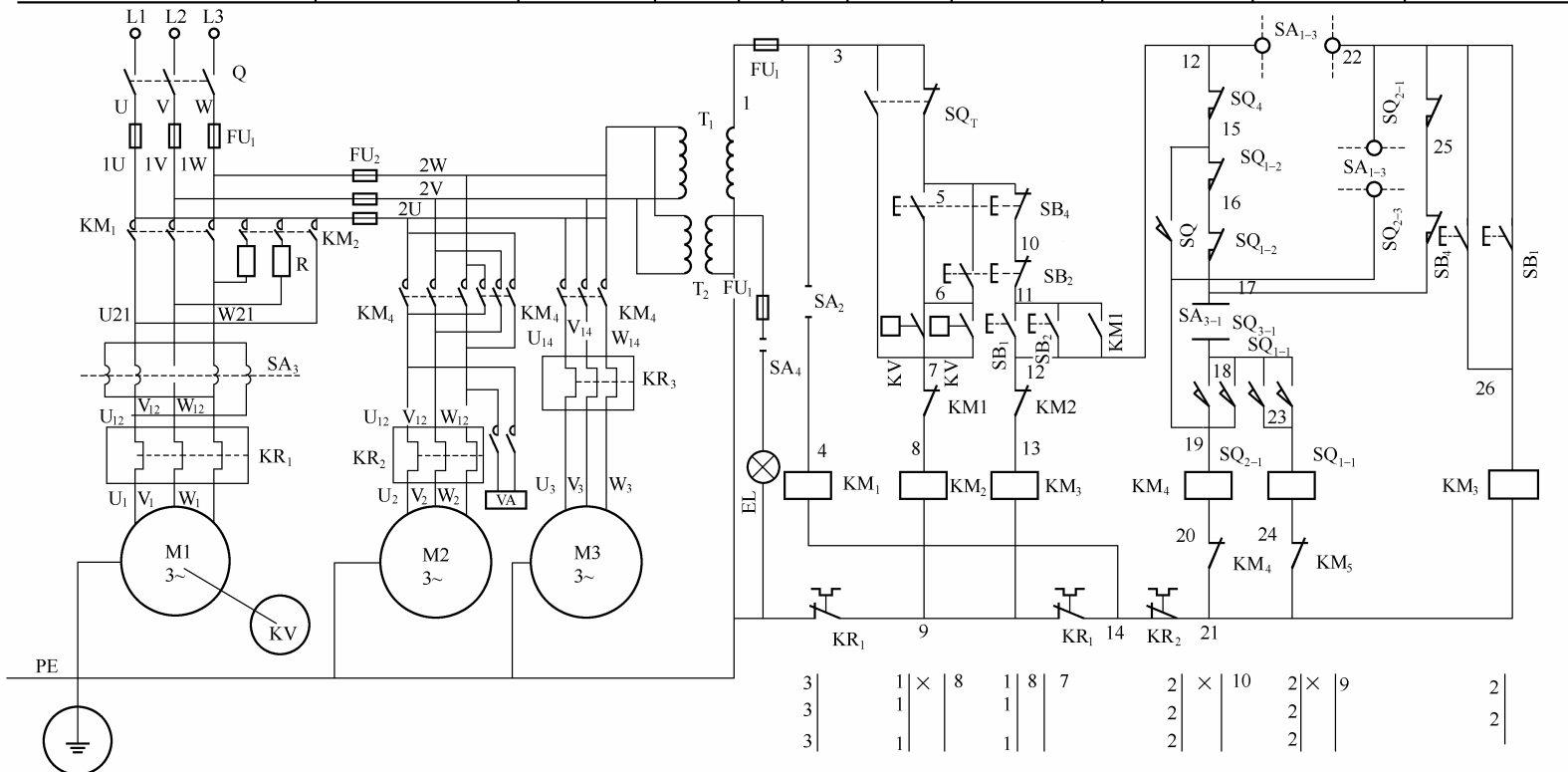


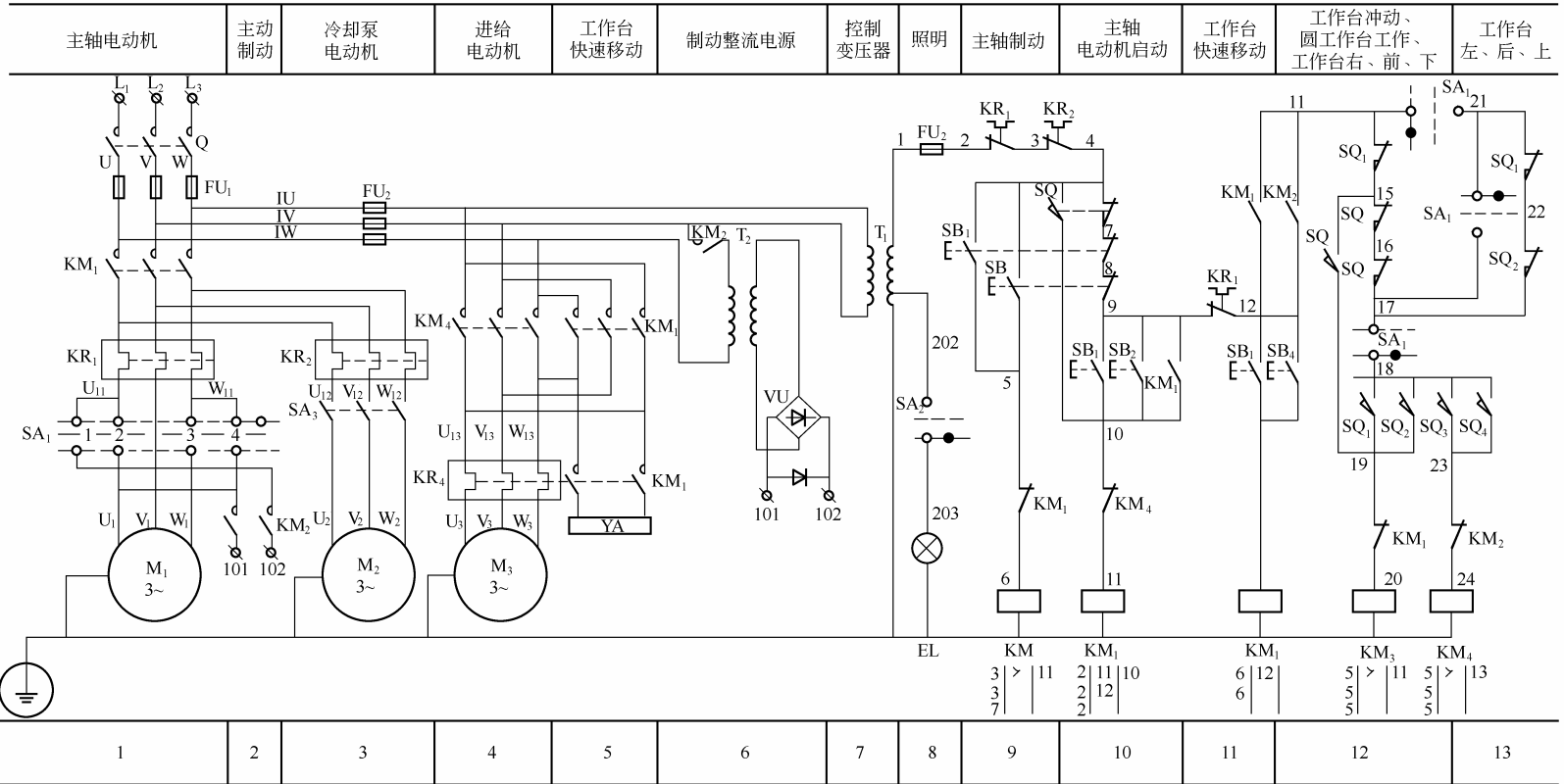
图 3.2 CM6132 型卧式车床电气控制电路图

电源冷却泵 电动机	主轴 电动机	摇臂升降 电动机	液压泵 电动机	变压器 照明	松开 指示	夹紧 指标	主轴 工作	主轴	上升	下降	延时	松开	夹紧	摇臂松紧
--------------	-----------	-------------	------------	-----------	----------	----------	----------	----	----	----	----	----	----	------

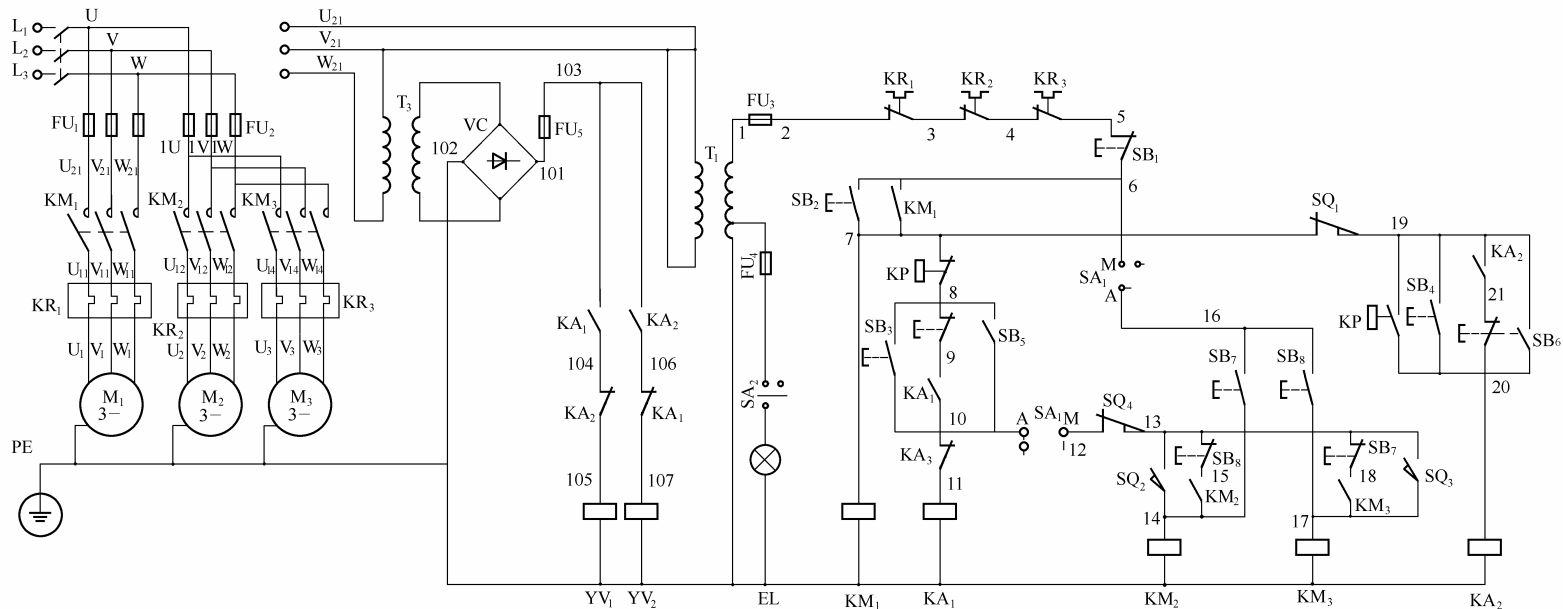


电源主轴电动机	工作台电动机	冷却泵电动机	变压器	照明灯	冷却泵	主 轴		进 给		快速
						制动冲动	起 动	右前下圆冲起	左 右 下	





电源	液压泵电动机	左动力头电动机	右动力头电动机	整流变压器	直流电源	滑台前进	滑台退回	变压器	照明	控制液压泵电动机	控制滑台前进	控制左铣削动力头电动机	控制右铣削动力头电动机	控制滑头退回
----	--------	---------	---------	-------	------	------	------	-----	----	----------	--------	-------------	-------------	--------



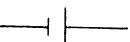
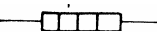















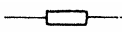



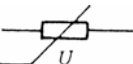
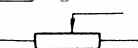
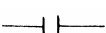
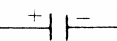



1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----

图 3.18 两面加工组合机床电气控制电路图

附录一 电气图形符号

本附录是根据国家标准 GB 4728—1984 和 GB 4728—1985 而编，但它只是本书所用到的常用图形符号。为了使读者阅读和使用方便，本表中还特将 GB 312—1964 所规定的旧符号列出。

名称	新符号	旧符号	名称	新符号	旧符号
导线的连接	•	(同新符号)	带磁心的电感器		(同新符号)
端子	○	(同新符号)	有两个抽头的电感器		(同新符号)
可拆卸的端子	∅	(同新符号)	原民池或蓄电池		(同新符号)
导线的连接	T 或 T	(同新符号)	加热元件		
导线的多线连接	⊥ 或 ⊥	(同新符号)	直流发电机		
导线的多线连接	⊥ 或 ⊥	(同新符号)	直流电动机		
导线的不连接	⊥	(同新符号)	交流电动机		
直流	—	(同新符号)	直线电动机		
交流	~	(同新符号)	步进电动机		(同新符号)
交直流		(同新符号)	电机的换向绕组或补偿绕组		(同新符号)
接地		(同新符号)	串励或他励绕组		(同新符号)
接机壳或接底板		(同新符号)	并励或他励绕组		(同新符号)
电阻器		(同新符号)	三相笼型异步电动机		(同新符号)
可调电阻器		(同新符号)	异步电动机转子		(同新符号)
压敏电阻器		(同新符号)			
滑动触点电位器		(同新符号)			
电容器		(同新符号)			
极性电容器					

(续)

名称	新符号	旧符号	名称	新符号	旧符号
自耦变压器		(同新符号)	动断(常闭)触点		
电抗器/扼流圈			先断后合的转换触点		
双绕组变压器			中间断开的双向转换触点		
电流互感器/脉冲变压器		(同新符号)	多极开关(单线表示)		
三相变压器 (星形-三角形联结)		(同新符号)	多极开关(多线表示)		
三相自耦变压器 (星形联结)		(同新符号)	断路器(自动开关)		
整流器			接触器 (常开主触点)		
桥式全波整流器			接触器 (常闭主触点)		
逆变器			延时闭合的动合触点		
动合触点(常开)			延时断开的动合触点		
过电流继电器线圈		(同新符号)	半导体二极管		
欠电压继电器线圈		(同新符号)	单向击窗二极管 (稳压二极管)		
电磁铁线圈		(同新符号)	双向击穿三极管 (双向稳压二极管) (齐纳效应)		
			晶闸管(反向阻)		

(续)

名称	新符号	旧符号	名称	新符号	旧符号
发光二极管			或门		
光敏二极管			非门		
光电半导体管 (PNP 型)		(同新符号)	与非门		
PNP 型半导体管			或非门		
NPN 型半导体管			高增益差分 放大器(运算放 大器)		
单结晶体管			电压跟随器		
与门					

附录二 电气文字符号

名 称	代 号	名 称	代 号
放大器	A	电阻、电阻器	R
调节器	A	电位器	RP
电流调节器	ACR	热敏电阻	RT
晶体管放大器	AD	控制电路的开关	S
速度调节器	ASR	选择开关	SA
自整角机	B	按钮	SB
位置变换器	BQ	主令控制器	SL
测速发电机	BR	万能转换开关	SO
电容器	C	行程开关	ST
照明灯	EL	终端开关	STL
热继电器	FR	变压器	T
熔断器	FU	电流互感器	TA
同步发电机	GS	控制电路电源变压器	TC
声音指示器	HA	照明变压器	TI
指示灯	HL	脉冲变压器	TP
接触器、继电器	K	整流变压器	TR
中间继电器	K	同步变压器	TS
交流继电器	KA	电压互感器	TV
接触器	KM	变流器	U
过电流继电器	KOC	二极管	V,VD
极化继电器	KP	晶闸管	VS
速度继电器	KS	晶体管	VT
时间继电器	KT	单结晶体管	VU
电压继电器	KV	稳压管	VZ
电感器、电抗器	L	绕组	W
平波电抗器	LF	控制绕组	WC
电动机	M	励磁绕组	WF
同步电动机	MS	插头	XP

(续)

名 称	代 号	名 称	代 号
电压表	PV(V)	电磁离合器	YC
电力电路的开关器件	Q	电磁卡盘、电磁吸盘	YH
转换开关	QB	电磁阀	YV
断路器	QF	滤波器	Z
电源开关	QG		

参 考 文 献

- [1] 孙训方, 方孝淑, 关来泰. 材料力学(第4版). 北京: 高等教育出版社, 2002.
- [2] 顾绳谷. 电机及拖动基础. 北京: 机械工业出版社, 1998.
- [3] 齐占庆. 机床电气控制技术. 第3版. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- [4] 陈伯时. 电力拖动自动控制系统. 北京: 机械工业出版社, 1996.
- [5] 王光铨. 机床电力拖动与控制. 北京: 机械工业出版社, 1997.
- [6] 王正茂. 电机学. 西安: 西安交通大学出版社, 2000.
- [7] 吴浩烈. 电机及电力拖动基础. 重庆: 重庆大学出版社, 1996.
- [8] 陈隆昌. 控制电机. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2000.
- [9] 邓星钟. 机电传动与控制. 第3版. 武汉: 华中科技大学出版社, 2001.
- [10] 程宪平. 机电传动与控制. 第2版. 武汉: 华中科技大学出版社, 2003.
- [11] 陈伯时. 电力拖动与自动控制系统. 第3版. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [12] 杨玉娟. 机床电气控制. 北京: 机械工业出版社, 1988.
- [13] 方承远. 工厂电气控制技术. 北京: 机械工业出版社, 1992.
- [14] 李恩林. 龙门刨床自动控制. 北京: 科学出版社, 1980.
- [15] 陈远龄. 机床电气自动控制. 重庆: 重庆大学出版社, 2000.
- [16] 焦振学. 机床电气控制技术. 北京: 北京理工大学出版社, 1992.
- [17] 项毅. 机床电气控制. 南京: 东南大学出版社, 2003.
- [18] 编写组编. 机床设计手册(第5册). 电力传动及控制系统设计. 北京: 机械工业出版社, 1976.
- [19] 编写组编. 机械设计手册(第9篇). 电动机和常用低压电器. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- [20] 许大中, 贺益康. 电机控制. 杭州: 浙江大学出版社, 2002.
- [21] 倪忠远. 直流调速系统. 北京: 机械工业出版社, 1996.
- [22] 姚樵耕, 俞文根. 电气自动控制. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [23] 廖兆荣. 电气自动控制. 北京: 化学工业出版社, 2003.