



普通高等教育“十二五”机电类规划教材

精品力作



机床电气控制技术 (第2版)

鲁远栋 张明军 程艳婷 等编著

- 精品课程配套教材
- 采用国家最新标准
- 教学资源请登录华信教育资源网 (www.hxedu.com.cn) 免费获取



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

普通高等教育“十二五”机电类规划教材

机床电气控制技术

(第2版)

鲁远栋 张明军 程艳婷 等编著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书从机床电气自动控制的原理和应用出发,把握典型机床的电气自动控制系统的应用特点,讲解了相应的数控系统的原理。本书系统地介绍了常用低压电器、常用电动机的应用基础、电气控制的基本控制电路、CNC、各种电动机驱动器、可编程控制器以及典型机床的电气与 PLC 控制等内容。

本书特点:首先,基础知识讲解透彻,介绍了机床电气控制的基础知识、基本控制电路及控制系统等;其次,本书以机电控制为主线,系统全面地介绍机床电气控制的相关知识,对于学习机床电气控制及其具体应用有很大帮助。同时为教学需要,第 11 章进行典型的实验指导,便于教师教学与学生实践。

本书既可作为各类高等学校工业自动化、电气工程及自动化、机电一体化的专业教材,也可供有关工程技术人员参考使用,也是广大电工和技术人员的自学用书。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

机床电气控制技术/鲁远栋等编著. —2 版. —北京:电子工业出版社,2013.1
(普通高等教育“十二五”机电类规划教材)
ISBN 978-7-121-19022-3

I. ①机… II. ①鲁… III. ①机床—电气控制 IV. ①TG502.35

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 278239 号

责任编辑:刘 凡 特约编辑:王燕 刘丽丽

印 刷:

装 订:

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本:787×1 092 1/16 印张:21.5 字数:550 千字

印 次:2013 年 1 月第 1 次印刷

印 数:4 000 册 定价:49.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010) 88258888。

前 言

本书是根据全国高职教育协会专业指导委员会机电一体化专业教材的编写要求,按“一条主线,两个原则”的基本要求编写的。“一条主线”是指内容取舍始终围绕机床电气自动控制的应用主线,体现高职高专的应用性特点,又兼顾理论全面性地进行取材。“两个原则”一是体现以实例为核心,概念原理及元器件尽量结合图表和简单实例的原则;二是体现以学生为主体,系统而又循序渐进地进行讲述,并兼顾从简单到复杂的原则。在本书的编写形式、语言文字等方面,也充分考虑了学生的思维习惯,便于学生自学和复习。

本书从机床电气自动控制的原理和应用出发,把握典型机床的电气自动控制系统应用的特点并讲解了相应的数控系统的原理。本书系统地介绍了常用低压电器、常用电动机的应用基础、电气控制的基本控制电路、CNC、各种电动机驱动器、可编程控制器,以及典型机床的电气与 PLC 控制等内容。与其他同类的参考书相比,本书介绍理论知识更为全面、易懂,而且实验内容与理论知识配套,是一本很好的专业课辅导用书和自学参考用书。

本书特点

首先,基础知识讲解透彻,介绍了电气控制的基础知识、控制系统及各组成部分等;其次,本书最大特色是以机电控制为主线,书中系统而全面地介绍了机床电气控制相关知识,对于学习机床电气控制的具体应用有很大帮助。同时为教学需要,精心组织了一章具有代表性的实验指导,便于教师教学及学生实践。

组织结构

全书共 11 章。内容包括低压电器、常用电动机的应用基础,以及基本控制电路、CNC 和各种驱动器的简单介绍、可编程控制器,以及典型机床的电气与 PLC 控制等。为了体现重在应用的原则,使学生学有所用,本书在最后一章特地用整章篇幅对学生进行实训指导。本书的附录还提供了常用电器图形符号、常用电器文字符号和专业名词中英文对照等实用资料。

读者对象

本书由浅入深、系统性强;内容翔实、实用易懂,既适合作为各类高等学校工业自动化、电气工程及自动化、机电一体化等有关专业的辅导用书,也可供有关工程技术人员参考使用,同时也是广大从事和电气控制技术专业的电工和技术人员的很好的自学用书。

本书由鲁远栋、张明军、程艳婷等编著,其中程艳婷编写第 3 章部分内容、第 5~7 章,张明军编写第 8 章第 5 节、第 9~10 章、第 11 章部分内容,本书余下内容由鲁远栋、俞刚、黄雪峰编写。在此工作期间,谭连敏、焦向宾、赵志良、周玮、尚丽伟、王燕佳等老师和好友

给予编著者极大的支持和鼓励,在此表示衷心感谢!同时参与本书编写工作的人员还有邹素琼、钟晓林、王娟、胡静、杨龙、张成林、方明、王波、陈小军、雷晓、李军华、陈晓云,在此一并表示感谢。

配套服务

为机床电气控制技术读者和用户尽心服务,围绕相关技术、产品和项目市场,探讨应用与发展,发掘热点与重点;开展教学与培训。机床电气控制技术俱乐部 QQ: 183090495, E-mail: bojiakeji@tom.com, 欢迎机床电气控制技术爱好者和用户与作者联系。

由于作者水平有限,书中难免有不恰当的地方,恳请广大读者批评指正。

同时为了方便教师教学,还提供了本书的电子教案,相关电子教案请到华信教育资源网: www.hxedu.com.cn 下载。

编著者

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 机床电气自动控制系统的作用及发展趋势	2
1.1.1 机床电气自动控制系统的作用	2
1.1.2 机床电气自动控制系统的发展趋势	2
1.2 机床电气自动控制系统	6
1.2.1 电气控制系统的组成	6
1.2.2 机床电力拖动自动控制系统	7
1.3 课程内容要求	9
1.4 思考与练习	9
第 2 章 机床常用低压电器	10
2.1 低压电器的基本知识	11
2.1.1 低压电器的分类	11
2.1.2 常用低压电器	11
2.1.3 常用低压电器的发展	12
2.2 低压电器的基本结构	13
2.2.1 电磁机构	14
2.2.2 触点系统	15
2.2.3 灭弧系统	15
2.3 熔断器	17
2.3.1 熔断器的结构和分类	17
2.3.2 熔断器的主要参数	18
2.3.3 熔断器的类型选择	18
2.3.4 快速熔断器	19
2.4 低压隔离器	20
2.4.1 低压刀开关	20
2.4.2 熔断式刀开关	22
2.4.3 组合开关	23
2.5 主令电器	24
2.5.1 控制按钮	24
2.5.2 行程开关	26
2.5.3 万能转换开关	29
2.5.4 主令控制器	30
2.6 接触器	31
2.6.1 接触器的结构及工作原理	31
2.6.2 接触器的主要技术参数	32

2.6.3	常用接触器的主要技术数据	34
2.6.4	接触器选用原则	36
2.7	继电器	36
2.7.1	电磁式继电器	37
2.7.2	时间继电器	39
2.7.3	热继电器	43
2.7.4	速度继电器	46
2.8	低压断路器	47
2.8.1	低压断路器的结构及工作原理	47
2.8.2	低压断路器的常用类别	48
2.8.3	低压断路器的主要参数和技术数据	48
2.8.4	低压断路器的控制特性	50
2.8.5	低压断路器的选择及使用注意事项	50
2.9	主要电气元件故障诊断与维修	51
2.9.1	电磁式电器共性故障诊断与维修	51
2.9.2	常见电器故障诊断与维修	52
2.10	本章小结	55
2.11	思考与练习	56
第3章	常用电动机应用基础	57
3.1	直流电动机应用基础	58
3.1.1	直流电动机的基本结构及工作原理	58
3.1.2	直流电动机的基本方程	66
3.1.3	直流电动机的机械特性	68
3.1.4	直流电动机的电气控制原理	71
3.2	异步电动机应用基础	78
3.2.1	异步电动机的结构、类型及工作原理	79
3.2.2	三相异步电动机的机械特性	85
3.2.3	异步电动机的启动、调速及制动控制	92
3.3	步进电动机	98
3.3.1	步进电动机的工作原理	98
3.3.2	步进电动机的静态指标术语	100
3.3.3	步进电动机的应用	100
3.4	伺服电动机	100
3.4.1	直流伺服电动机	101
3.4.2	交流伺服电动机	102
3.5	本章小结	104
3.6	思考与练习	104
第4章	基本电气控制电路	105
4.1	控制电路的图形、文字符号及绘图原则	106

4.1.1	常用电器的图形符号和文字符号.....	106
4.1.2	电气控制线路原理图的绘图规则.....	106
4.1.3	电气控制图的分类	108
4.1.4	电气图阅读的基本方法.....	109
4.2	典型基本控制电路	110
4.2.1	点动与连续控制电路	110
4.2.2	正/反转控制电路	112
4.2.3	位置控制	115
4.2.4	其他控制电路	118
4.3	直流电动机的基本控制电路.....	121
4.3.1	直流电动机的励磁方式.....	121
4.3.2	他励直流电动机的启动控制.....	123
4.3.3	直流电动机的调速控制.....	125
4.3.4	他励直流电动机正/反转控制电路.....	131
4.3.5	直流电动机的制动控制.....	133
4.3.6	直流电动机的保护	135
4.4	三相交流异步电动机基本控制电路.....	135
4.4.1	三相鼠笼式电动机的启动控制.....	135
4.4.2	三相绕线式异步电动机降压启动控制.....	139
4.4.3	三相异步电动机的正/反转控制.....	142
4.4.4	三相异步电动机的制动控制.....	144
4.4.5	交流电动机多地及顺序控制.....	147
4.5	本章小结	149
4.6	思考与练习	149
第 5 章	计算机数控 (CNC) 系统.....	150
5.1	概述	151
5.1.1	数控机床电气控制系统的总体结构.....	151
5.1.2	CNC 系统的基本功能	151
5.2	数控系统的硬件	153
5.2.1	CNC 系统的硬件组成	153
5.2.2	CNC 系统各组成部分工作原理	154
5.3	数控系统的软件	158
5.3.1	CNC 系统的软件功能	158
5.3.2	CNC 系统软件功能的实现	158
5.3.3	CNC 系统的软件结构	161
5.4	本章小结	162
5.5	思考与练习	162
第 6 章	数控机床进给伺服系统	163
6.1	概述	164

6.1.1	数控机床伺服系统概述	164
6.1.2	数控机床伺服系统的分类	165
6.2	步进电动机的驱动控制	167
6.3	直流伺服电动机的驱动控制	171
6.4	交流伺服电动机的驱动控制	174
6.4.1	交流伺服系统简介	174
6.4.2	SPWM 变频控制器	174
6.4.3	交流伺服驱动器的信号连接	175
6.5	数控机床检测装置	176
6.5.1	光栅传感器	177
6.5.2	脉冲编码器	178
6.5.3	感应同步器	180
6.6	本章小结	183
6.7	思考与练习	183
第 7 章	数控机床主轴驱动及控制	184
7.1	概述	184
7.1.1	数控机床对主轴系统的要求	185
7.1.2	主轴系统的分类	186
7.2	主轴驱动器的工作原理	187
7.3	主轴分段无级调速及控制	190
7.3.1	概述	190
7.3.2	自动换挡的控制	191
7.3.3	齿轮自动换挡的操纵机构	192
7.4	主轴准停控制	193
7.4.1	概述	193
7.4.2	机械准停控制	194
7.4.3	电气准停控制	195
7.5	主轴驱动器与 CNC 的连接	198
7.6	本章小结	199
7.7	思考与练习	200
第 8 章	可编程控制器及其应用	201
8.1	PLC 的概述	202
8.1.1	PLC 的定义	202
8.1.2	PLC 的产生和发展	202
8.1.3	PLC 的特点和应用	204
8.1.4	PLC 的分类	206
8.2	PLC 的组成及工作原理	208
8.2.1	PLC 的基本组成	208
8.2.2	PLC 的工作原理	212

8.3	PLC 的指令系统	215
8.3.1	PLC 的编程语言	215
8.3.2	PLC 的基本指令	216
8.3.3	PLC 的功能指令	227
8.3.4	逻辑运算指令	231
8.3.5	传送指令	232
8.3.6	移位和循环移位指令	233
8.3.7	数据转换指令	236
8.3.8	编码和译码指令	237
8.4	PLC 的程序设计	238
8.4.1	软件设计概述	238
8.4.2	梯形图和语句表编程简介	240
8.4.3	PLC 应用程序编制举例	242
8.5	数控系统内置 PLC	246
8.5.1	数控系统内置 PLC 概述	246
8.5.2	FANUC 数控系统的内置 PLC	247
8.5.3	西门子 CNC 的内置 PLC	257
8.6	本章小结	260
8.7	思考与练习	260
第 9 章	典型机床电气控制	262
9.1	卧式车床电气与 PLC 控制	263
9.1.1	卧式车床主要结构	263
9.1.2	卧式车床的运动形式及控制要求	263
9.1.3	卧式车床电气原理图分析	264
9.2	卧式镗床电气与 PLC 控制	267
9.2.1	卧式镗床主要结构	268
9.2.2	卧式镗床的运动形式及控制要求	268
9.2.3	卧式镗床电气原理图分析	269
9.3	平面磨床电气控制	271
9.3.1	平面磨床主要结构	272
9.3.2	平面磨床的运动形式	272
9.3.3	平面磨床的电气与 PLC 控制	273
9.4	立式加工中心的电气与 PLC 控制	276
9.4.1	立式加工中心的结构	276
9.4.2	立式加工中心的运动形式及控制要求	277
9.4.3	立式加工中心的电气与 PLC 控制分析	278
9.5	本章小结	283
9.6	思考与练习	283
第 10 章	机床电气与 PLC 控制系统设计	284
10.1	机床电气控制系统设计的基本内容和一般原则	285

10.1.1	机床电气控制系统设计的基本内容	285
10.1.2	机床电气控制线路设计的一般原则	285
10.1.3	机床电气控制线路设计方法	286
10.2	机床进给系统设计	287
10.2.1	伺服电动机的基本选择	287
10.2.2	伺服进给系统的稳态设计	288
10.2.3	伺服进给系统的动态设计	294
10.3	机床电气控制系统工艺设计	298
10.3.1	机床电气设备总体配置设计	298
10.3.2	机床电气元件布置图的设计及电器部件接线图的绘制	298
10.3.3	清单汇总和说明书的编写	299
10.4	机床 PLC 控制系统设计	299
10.4.1	机床 PLC 控制系统设计的基本原则	300
10.4.2	机床 PLC 控制系统设计的基本内容	300
10.4.3	机床 PLC 控制系统设计的一般步骤	300
10.5	本章小结	301
10.6	思考与练习	302
第 11 章	机床电气与 PLC 控制的实践环节	303
11.1	基本实验	304
11.1.1	低压电器的认识实验	304
11.1.2	三相异步电动机 Y- Δ 降压启动及正/反转控制	306
11.1.3	三相异步电动机能耗制动控制	307
11.1.4	三相异步电动机变频调速控制	308
11.1.5	直流电动机的调速实验	309
11.1.6	可编程控制器的控制实验	311
11.1.7	步进电动机的调速控制实验	312
11.2	三相异步电动机的基本拆装实习	313
11.2.1	异步电动机的拆卸	313
11.2.2	电动机的装配	314
11.3	机床电气与 PLC 控制的综合设计部分	314
11.3.1	低压电器控制设计	314
11.3.2	用可编程控制器对异步电动机可逆运行控制实验	315
11.3.3	利用可编程控制器设计抢答器	317
11.3.4	人行道按钮控制交通灯程序设计实验	320
11.3.5	典型机床电气与 PLC 控制设计	321
附录 A	常用电器图形符号	323
附录 B	常用电器文字符号	327
附录 C	《机床电气控制技术》专业词汇中英文对照	329
参考文献		334

Chapter 1

第 1 章 绪 论

知识点

- 机床电气自动控制系统的作用
- 机床电气自动控制系统的发展趋势
- 电气控制系统的组成
- 机床电力拖动自动控制系统

本章导读

机床电气控制经历了一系列的发展阶段，如今到了比较完善和发达的阶段。了解机床电气控制的基本内容及发展概况，对学习机床电气控制课程有很大帮助，在开始学习机床电气控制原理之前，本章内容的介绍是让读者有一个整体上的把握和了解。

1.1 机床电气自动控制系统的作用及发展趋势

在数控机床高度发展的今天，机床电气控制程度越来越高，因此，机床电气控制的地位与作用也日益重要。机床电气自动控制的发展与电力拖动及电气自动控制的发展紧密相连。

1.1.1 机床电气自动控制系统的作用

过去，生产机械由工作机构、传动机构、原动机三部分组成。自从电气元件与计算机应用在机械上后，现代化生产机械已包含第四个组成部分——以电气为主的自动控制系统，它使机器的性能不断提高，使工作机构、传动机构的结构大为简化。

机床经过一百多年的发展，结构不断改进，性能不断提高，在很大程度上取决于电力拖动与电气控制系统的更新。电力拖动在速度调节方面具有无可比拟的优越性和发展前途，采用直流或交流无级调速电动机驱动机床，使结构复杂的变速箱变得十分简单，简化了机床结构，提高了效率和刚度，也提高了精度。近年研制成功并用于数控车床、铣床、加工中心机床的电动机——主轴部件，是将交流电动机转子直接安装在主轴上，使其具有宽广的无级调速范围，并且振动和噪声均较小。它完全代替了主轴变速齿轮箱，对机床结构与传动将产生革命性影响。

数控机床的控制任务是实现对主轴转速和进给量的控制，同时还要完成保护、冷却、照明等系统的控制。机床的电气自动控制系统就是用电气手段为机床提供动力，并实现上述控制任务的系统。

人们总是把电动机、传动机构，以及工作机构视为电力拖动部分，把为满足加工工艺要求，实现各个电动机的启动、制动、反转、调速的控制部分称为电气自动控制部分。

现代化机床综合应用了电气自动控制中的许多先进的科学技术成果，如计算技术、电子技术、自动控制理论、精密测量技术、传感技术等，特别是当今信息时代，微型计算机已广泛用于各行各业，机床是最早应用电子计算机的设备之一，早在1952年，美国麻省理工学院研制出世界上第一台数控机床，数控机床便在制造业，特别是在汽车、航空航天，以及军事工业中被广泛地应用。这些新的科学技术的应用，使机床电气设备不断实现现代化，从而提高了机床自动化程度和机床加工效率，扩大了工艺范围，缩短了新产品试制周期，加速产品更新换代。现代化机床还可提高产品加工质量，减轻工人劳动强度，降低产品成本等。近20年来出现的各种机电一体化产品、数控机床、机器人、柔性制造单元及系统等都是机床电气设备实现现代化的成果，总之，电气自动控制在数控机床中占有极其重要的地位。

1.1.2 机床电气自动控制系统的发展趋势

机床电气自动控制的发展与电力拖动和电气自动控制的发展紧密相联。

1. 机床电力拖动的发展与分类

20 世纪初期, 由于发明了电动机, 使得机床的拖动也发生了根本性的变革, 用电动机代替了蒸汽机。随着电动机的发展, 机床的电力拖动也步入了一个崭新的时代。

1) 成组拖动

19 世纪末, 交、直流电动机相继出现, 最初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。一台电动机经天轴 (或地轴) 由皮带传动给若干台机床工作。由于这种方式存在传动路线长、效率低、结构复杂、生产灵活性小、工作中极不安全等缺点, 目前已被淘汰。

2) 单电动机拖动

20 世纪 20 年代, 出现了单独拖动形式, 即由一台电动机拖动一台机床, 称为单电动机拖动。一台电动机拖动一台机床, 较之成组拖动简化了传动机构, 缩短了传动路径, 降低了能量传递中的损失, 提高了传动效率, 同时也充分利用电动机的调速性能, 并易于实现自动控制。随着生产的发展, 对机床运动控制的要求越来越高, 现在已很少采用单电机拖动。

3) 多电动机拖动

由于生产的发展, 机床的运动要求增多, 机床在结构上有所改变, 随着机床自动化程度的提高和重型机床的发展, 机床的相关技术要求提高, 出现了采用多台电动机驱动一台机床 (如铣床)、十余台电动机驱动一台重型机床 (如龙门刨床) 的拖动方式, 这样缩短了机床的传动链, 实现了各工作部件运动的自动化。当前重型机床、组合机床、数控机床、自动线等均采用多电动机拖动的方式。

采用多电动机拖动以后, 不但简化了机床的机械结构, 提高了传动效率, 各运动部件还能选择最合理的运动速度, 缩短了加工时间, 而且便于分别控制, 易于实现各运动部件的自动化, 提高机床整体的自动化程度。多电动机拖动已经成为现代机床基本的拖动方式。

4) 直/交流无级调速

由于电气无级调速具有可灵活选择最佳切削用量和简化机械传动结构等优点, 20 世纪 30 年代出现了交、直流电动机无级调速, 其中直流电动机无级调速系统至今还在重型机床上应用。20 世纪 60 年代以后, 大功率晶闸管的问世和变流技术的发展, 又出现了晶闸管直流电动机无级调速系统, 它较之前者, 具有效率高、动态响应快、占地面积小等优点。当前在数控机床、磨床及仿形等机床中已得到广泛应用。由于逆变技术的出现和高压大功率管的问世, 20 世纪 80 年代以来交流电动机无级调速系统有了迅速发展, 它利用改变交流电的频率等来实现电动机转速的无级调速。交流电动机无电刷与换向器, 较之直流电动机易于维护且寿命长, 是将来的主要发展方向。

2. 机床电气控制系统的分类

在机床调速控制技术的发展过程中, 电气控制技术也由手动方式逐步向自动控制方式发展。

1) 逻辑控制系统

逻辑控制系统又称开关量或断续控制系统。逻辑代数是理论基础,采用具有两个稳定工作状态的各种电器和电子器件构成各种逻辑控制系统,按自动化程度的不同可分为手动控制、自动控制两种。

(1) 手动控制:在电气控制的初期,大多采用电气开关、按钮等对机床电动机的启动、停止、反向等进行手动控制,现在砂轮机、台钻等动作简单的小型机床仍在采用。

(2) 自动控制:按其控制原理与采用电气元件的不同又可分为如下几类。

① 继电器接触器自动控制系统:多数通用机床至今仍采用继电器、接触器、按钮开关等电气元件组成的自动控制系统。它具有直观、易掌握、易维护等优点,但功耗大、体积大,并且改变控制顺序工作循环较为困难,如果要改变,需重新设计电路。

② 顺序控制器控制:由集成电路组成的顺序控制器具有程序变更容易、程序存储量大、通用性强等优点,广泛用于组合机床、自动线等。20世纪60年代末,又出现了具有运算功能和较大功率输出能力的可编程控制器,它是由大规模集成电路、电子开关、晶闸管等组成的专用微型电子计算机,用它可代替大量的继电器,并且功耗小、质量轻,目前已经广泛地运用在数控机床等设备中。

③ 可编程控制器控制:随着计算机技术的发展,又出现了以微型计算机为基础的,具有编程、存储、逻辑控制及数字运算功能的可编程控制器 PLC。PLC 的设计以工业控制为目标,接线简单、通用性强、编程简易、抗干扰能力强、工作可靠。它一问世即以其强大的生命力,大面积地占领传统的控制领域,PLC 的发展方式之一是微型、简易、价廉,以图取代传统的继电器控制;而它的另一个发展方向是大容量、高速、高性能,对大规模复杂控制系统进行综合控制。PLC 用于数控机床的外围辅助电气的控制,称为可编程序机床控制器。在很多数控系统中称为 PMC (Programmable Machine Tool Controller)。

④ 数字控制:20世纪中期,随着电子技术的发展,自动信息处理、数据处理,以及电子计算机的出现,给自动化技术带来了新的概念,用数字化信号对机床运动及其加工过程进行控制,推动了机床自动化的发展。也是在此期间,美国麻省理工学院研制出世界上第一台数控机床。它是由电子计算机按照预先编好的程序,对机床实行自动化的数字控制。数控机床既有专用机床生产率高的优点,又兼有通用机床工艺范围广、使用灵活的特点,并且还具有能自动加工复杂的成形表面、精度高等优点,因而它具有强大的生命力,发展前景广阔。

数控机床的控制系统最初是由硬件逻辑电路构成的专用数控装置 NC,但其成本昂贵,工作可靠性差,逻辑功能固定。随着电子计算机的发展,又出现了 DNC (Direct Numerical Control)、CNC (Computer Numerical Control)、MNC (Micro—Computer Numerical Control)、AC (Adaptive Control) 等数控系统。

2) 连续控制系统

对物理量(如电压、转速等)进行连续自动控制的系统,又称模拟控制系统,这类系统一般具有负反馈的闭环控制系统。常伴有功率放大的特点,并且精度高、功率大、抗干扰能力强。例如,直流电动机驱动机床主轴实现无级调速的系统,交、直流伺服电动机拖

动数控机床进给机构和工业机器人的系统均属连续控制系统。

3) 混合控制系统

同时采用数字控制和模拟控制的系统称为混合控制系统,数控机床、机器人的控制驱动系统多属于这类控制系统,数控机床由数字电子计算机进行控制,通过数模转换器和功率放大器等装置、驱动伺服电动机及主轴电动机带动机床执行机构产生所需的运动。

3. 机床电气自动控制系统的发展

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,从单一功能发展到多功能;在操作上,从紧张、繁重发展到轻巧自如。

在机床电气控制方面,最初采用手动控制,如少数容量小、动作单一的机床(小型台钻、砂轮机等),使用手动直接控制。后来由于切削工具、机床结构的改进,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,可通过改变开关状态或按下按钮等简单的操作来实现对机床各种运动的控制,如启停、反转、改变速度等的控制。它们的控制方法简单直接、工作稳定可靠、成本低,使机床自动化向前迈进了一大步。

随着生产的发展,机床对加工精度、生产效率提出更高的要求。继电器接触器系统的断续控制方式不能连续、准确地反映信号,很难达到精度的要求。后来又出现了各种可连续控制的控制器件,如电动机放大机、电子管及半导体放大器件,这样就相应地出现了连续控制的自动控制方式及自动控制系统,如电动机放大机控制系统、晶闸管控制系统等。

另一方面,由于继电器接触器控制装置接线固定、使用的单一性,难以适应复杂和程序可变的控制对象的需要。所以 20 世纪 60 年代初就出现了顺序控制器。它的初期是以继电器或触发器作为记忆元件的控制器,即通过编码、组合逻辑来改变程序,满足不同加工程序的需要。这样就使机床控制系统具有更大的灵活性和通用性。它的特点是通用性强、程序可变、编程容易、可靠性高、使用维护方便等。它被广泛应用于机械手、组合机床及生产自动线上,大大提高了机床自动化水平。

近年来,可编程序控制器(PLC)在工业过程自动化系统中应用日益广泛。可编程序控制器技术是以硬件接线的继电器接触器控制为基础的,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。它通过数字或者模拟信号的输入和输出满足各种类型机械控制的需要。可编程序控制器及有关外部设备,都按既易于与工业控制系统连成一整体,又易于扩充其功能的原则设计。可编程序控制器将成为生产机械设备中开关量控制的主要电气控制装置。

现代机床经 30 多年的迅速发展,品种日益增多,从现代工程控制论和计算技术中吸取了大量成果,从而发展了自动设计、自动管理、自动诊断、自动换刀、自动传送等机床自动化手段。提高机床的加工精度,也是当前机床发展的重要课题,目前正在发展以原子直径为单位的微细加工,又称超精度加工。这种加工技术开辟了新的加工领域,如激光加工、化学加工等,这样又扩大了机床的范畴。

在一般数控机床的基础上,近年来数控加工中心(MC)有了很大发展,它可以自动

选刀、换刀，自动连续地对各个加工面完成铣削、镗削、铰孔及攻螺纹等多工序加工。此外，机械手自动换加工件配合机床的自动加工也大大增加了工业自动化程度。改变了过去一小批量生产中一人、一机、一刀的局面，而把许多相关的分散工序集中在一起，形成一个以工件为中心的多工序自动加工机床。

自适应数控机床是一种按照加工过程所发生的变化，自动调整到最佳切削条件的数控机床。自适应数控机床在 20 世纪 60 年代在工业发达国家就有了正式产品，现已有自适应数控车床、铣床、磨床、钻床及电加工机床等。

用数字程序控制（NC）的机床，即数字控制机床。它综合了现代新技术，自动化程度也较高，但其控制是由硬件逻辑电路组组成的。这种控制灵活性差，因此，后来又出现了用计算机代替硬件逻辑电路的计算机数控（CNC）。由于这种控制灵活、通用性也强、工作可靠、控制系统又不太复杂，因而成为现代数控的基本形式。

在计算机数控发展的同时，计算机群控系统也在发展。由一台过程计算机直接控制几台、几十台的数控机床，这就出现了计算机群控系统，又称直接数控系统（DNC）。

机床自动化进一步发展，是联结生产中各个环节、实现传送各种物质材料的自动化。这就是把一群数控机床用自动传送联结起来，并在计算机统一控制之下形成一个管理和制造相结合的生产整体，它是数控机床、智能机器人、自动化仓库、自动检测与运输技术等新型高技术及计算机辅助设计、辅助制造、生产管理控制等软件技术高度发展的结果。这就是柔性制造系统（FMS）。

随着微电子技术的发展，由小型或微型计算机再加上通用或专用大规模集成电路组成的计算机数控装置（CNC）性能更为完善，几乎所有的机床品种都实现了数控化，出现了具有自动更换刀具功能的数控加工中心（MC），工件在一次装夹中可以完成多种工序的加工。绘图机械、坐标测量机、激光加工机、火焰切割机等设备也在数控技术领域得到了广泛的应用，并取得了良好的效果。自 20 世纪 70 年代以来，电气控制相继出现了直接数字控制（DDC）系统、柔性制造系统（FMS）、计算机集成制造系统（CIMS）、综合运用计算机辅助设计（CAD）、计算机辅助制造（CAM）、智能机器人、集散控制系统（DCS）、现场总线控制系统等多项高技术，形成了从产品设计与制造和生产管理的智能化生产的完整体系，将自动制造技术推进到更高的水平。

1.2 机床电气自动控制系统

机床要运行，一是需要动力，二是需要控制。现代机床的动力主要是由电动机来提供的，即由电动机来拖动机床的主轴和进给系统。机床的电气自动控制系统就是能够逻辑地处理具有控制编码或其他符号指令规定的程序，使机床实现对主轴转速和进给量的控制，按照要求加工零件，同时实现上述的各种保护、冷却、照明等系统的控制。

1.2.1 电气控制系统的组成

实现自动控制的手段多种多样，可以用电气的方法实现，也可以用机械、液压、气动

等方法实现。由于现代化的金属切削机床均采用交流或直流电动机作为原动机，因而电气自动控制是现代机床的主要控制手段。即使采用其他控制方法，也离不开电气自动控制的配合，而且电气自动控制程度越高，机床的加工性能、质量和效率也越高。

由此可见，电气自动控制对于现代机床、其他机械设备及生产过程，有着极其重要的作用。

通常，电气控制系统主要包括数控系统、伺服系统、电气操纵部分、机床强电控制系统（可编程序控制器 PLC 和继电器—接触器控制系统），如图 1-1 所示。

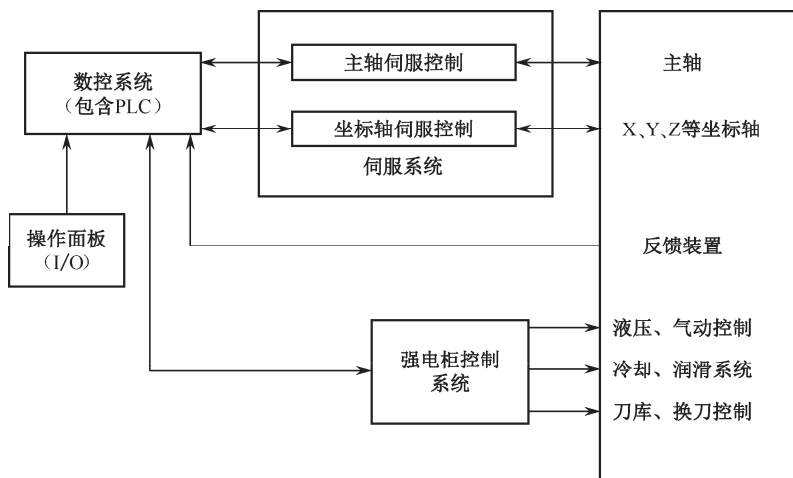


图 1-1 电气控制系统示意图

数控系统（CNC）是电气控制系统的核心。它负责自动处理数控加工程序，并将信息分类输出。一类是进给轴的位置控制，由数控系统控制的连续数字信息送到伺服系统；还有一类是机床运行的顺序控制，由 PLC 实现的开关量信息送到机床强电控制系统，进而实现辅助功能、主轴转速功能等控制。这两大类控制相互协调控制机床运转，实现机床的加工过程。

伺服系统由伺服驱动器和电机组成，分为主轴伺服系统和坐标轴伺服系统。主轴伺服系统负责主轴的转速控制、主轴定向等功能。坐标轴伺服系统负责机床个坐标轴的切削进给、伺服电动机转矩和转速控制等功能。

机床强电控制系统负责机床的辅助功能控制，此外，还对各种按钮、保护开关、行程限位开关等功能进行检测和控制。在机床运行过程中，PLC 在润滑、冷却、主轴换刀等系统逻辑控制中起着非常重要的作用。

开环的电气控制系统不需要反馈装置，只有在闭环系统中才使用反馈装置。反馈装置一般有两类：一类是反馈工作机械的实际移动量；另一类是反馈电动机的转动量间接反映工作机械的移动量。

1.2.2 机床电力拖动自动控制系统

生产机械一般是由三个基本部分组成的，即工作机构、传动机构和原动机。当原动机

为电动机时，也就是说由电动机通过传动机构带动工作机构进行工作时，这种拖动方式就称为电力拖动。

一般而言，机床电力拖动自动控制系统是将电能转换成机械能，是由使机器动作的电动机、电气控制装置，以及电动机和机床运动部件相互联系的传动机构组成的。该系统可以分为两部分：电力拖动部分（包括电动机及使电动机和机床相互联系起来的传动机构）和电气控制部分。人们把电动机及与电动机有关联的传动机构合并在一起视为电力拖动部分。把满足加工工艺要求使电动机启动、制动、反向、调速等电气控制和电气操纵部分视为电气控制部分，或为电气自动控制装置。

图 1-2 和图 1-3 所示为卧式车床及数控机床的示意图。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。交流拖动系统由于交流电动机结构简单、制造容易、造价低及容易维护等许多特点，在普通机床中占主导地位。直流电动机具有良好的启动、制动特性和调速性能，能在很宽的范围内进行平滑调速，所以对调速性能要求较高，20 世纪 80 年代以前对速度要求精确控制的机床都采用直流电动机拖动系统，但直流电动机的制造工艺复杂，生产成本较高，维护较困难，可靠性较差。由于 20 世纪 80 年代以来，高性能交流调速系统的出现使得在机床上采用交流拖动的调速系统也逐年增多，打破了过去交/直流在调速上的分开格局，目前高性能交流拖动系统已逐步取代直流拖动系统。

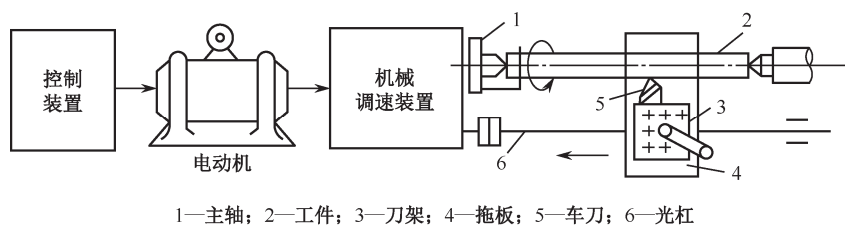


图 1-2 卧式车床加工示意图

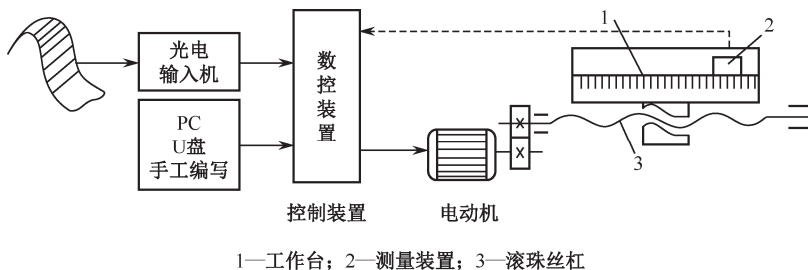


图 1-3 数控机床工作示意图

机床电气自动控制课程，就是研究解决机床电气控制有关问题，阐述机床电气控制原理、实际机床控制线路、机床电气控制线路的设计方法及常用电气元件的选择、交/直流调速系统，以及可编程控制器等。本书只涉及最基本、最典型的控制线路及控制实例。电气自动控制是各类机床的重要组成部分，因此，对机械制造专业及机床设计人员来说应该掌握机床电气控制基本原理和方法。

1.3 课程内容要求

本课程是一门综合性的主干课、专业课。对培养应用型的电气运行与控制专业高等职业教育人才具有重要作用。本课程是在学习了“电工基础”、“机械基础”之后，在进行了电工实训的基础上进行讲授的，以使具有较牢固的基础理论知识和初步的电工实践技能，为学习本课程打下基础。除了介绍机床的电气控制，本课程还简单介绍了《电动机学》、《电力拖动基础》等几门课程的相关内容，以便读者对相关知识进行了解。

本书先对机床电气的各个部分逐一介绍：常用低压电器元件、常用电动机、基本控制电路、CNC 相关知识、主轴、进给轴的驱动控制、可编程控制器等。再结合典型机床电气控制分析、机床电气与 PLC 设计、实验/实训。最终通过对本书的学习，读者能够具有典型生产机械控制电路的分析能力和对电气设备常见故障的分析能力及机床等设备电气设计能力，并力求能举一反三、触类旁通。

1.4 思考与练习

1. 机床电气自动控制研究的对象和基本内容是什么？
2. 什么是电力拖动？电力拖动经历了哪几个发展过程？
3. 机床调速系统如何分类？各调速系统的特点分别是什么？
4. 现代数控机床的发展特点是什么？
5. 什么是电气控制系统？电气控制系统由哪些部分组成？
6. 电气控制技术各个发展阶段的特点是什么？

Chapter 2

第 2 章 机床常用低压电器

知识点

- 低压电器的基本结构
- 开关电器
- 各种继电器的原理及应用
- 各种低压电器的文字符号、应用场合

本章导读

凡是能手动或自动接通和断开的电路及对电路或非电路现象能进行切换、控制、调节、变换、检测，以及保护的元件统称为电器。按工作电压高低，电器可分为高压电器和低压电器两大类。低压电器通常是指在交流 1 200V 及以下、直流 1 500V 及以下电路中使用的电器。在机床电气自动控制系统中，电气元件的工作很频繁，有时动作多达每小时几百次，所以对低压电气元件的基本要求：工作准确可靠、操作频率高、使用寿命长、体积质量小等。本章主要介绍机床常用低压电气元件的基本结构、工作原理、图形和文字符号、主要技术参数及其应用。

2.1 低压电器的基本知识

低压电器指的是在交流 1 200V 及以下和直流 1 500V 及以下电路中起通断、控制、保护、检测、变换和调节作用的元件或设备。根据不同条件,低压电器有不同的分类方法。低压电器的发展,取决于国民经济的发展和现代工业自动化发展的需要,以及新技术、新工艺、新材料研究与应用,目前,正朝着高性能、高可靠性、小型化、数模化、模块化、组合化和零部件通用化的方向发展。

2.1.1 低压电器的分类

1. 按电气元件所在的系统分类

按电器所在的系统可以分为低压配电电器和低压控制电器两类。

(1) 低压配电电器主要是用在低压电网或动力装置中,对电路和设备进行保护及通断、转换电源或负载的电器,如熔断器、刀开关等。

(2) 低压控制电器主要是用于低压电力拖动系统中,对电动机的运行进行控制、调节、检测和保护的电器,如接触器、继电器、主令按钮等。

2. 按电器动作的原理分类

按电器动作时的原理可以分为手动电器和自动电器两类。

(1) 手动电器是由人为操作发出动作指令,如刀开关、按钮等。

(2) 自动电器是由电磁吸力使电器自动完成动作指令,如接触器、继电器、电磁阀等。

3. 按电器在系统中的作用分类

按电器在系统中所起的作用可以分为控制电器、检测电器、运算电器、保护电器和执行电器。

(1) 控制电器是用于各种控制电路和控制系统中的电器,如接触器、继电器等。

(2) 检测电器是用于系统中反馈各种信号及发出各种信号的电器,如电磁感应器、行程开关等。

(3) 运算电器是用于把各种信号根据需要进行转换的电器,如中间继电器等。

(4) 保护电器是用于对电路、系统、设备及人身安全起保护作用的电器,如漏电断路器、熔断器、热继电器等。

(5) 执行电器是用于执行整个电路或系统的要求动作的电器,如电磁阀、电磁离合器等。

2.1.2 常用低压电器

本章将主要介绍以下常用低压电器的结构、原理、主要性能和参数、选用原则及市场上的常用型号。

(1) 熔断器: 插入式熔断器、螺旋式熔断器、有填料密封式熔断器、无填料密封式熔断器、快速熔断器、自复式熔断器。

(2) 低压隔离器: 低压刀开关、熔断器式刀开关、组合开关。

(3) 主令电器: 控制按钮、行程开关、接近开关、转换开关、主令控制器。

(4) 接触器: 交流接触器、直流接触器。

(5) 继电器: 电磁式继电器、时间继电器、热继电器、速度继电器。

(6) 低压断路器: 万能式断路器、装置式断路器、快速式断路器、限流式断路器。

2.1.3 常用低压电器的发展

1. 常用低压电器的发展概况

中国的低压电器工业, 从 1953 年起步至今, 经历了全面仿苏、自行设计、更新换代、技术引进、跟踪国外新产品等几个阶段。形成了比较完善的体系、品种、规格、性能。产量上基本满足中国国民经济的发展需要。在发展过程中主要有三代产品的形成。

第一代是从 20 世纪 60 年代到 70 年代初期。中国自行开发、研制、设计了系列产品, 以 CJ10、DZ10、DW10 为代表, 约 29 个系列。这代产品目前已经被淘汰, 但作为新中国第一批工业产品, 在中国低压配电系统和控制系统的发展过程中起了重要的作用, 也是中国工业建设全面开始的一个标志。

第二代是从 20 世纪 70 年代后期到 80 年代。中国的低压电器与国外先进技术相结合完成了更新换代的产品。在这期间主要产品有 CJ20、DZ20、DW15 等系列为代表的 56 个系列。引进国外技术的产品主要有德国 AEC 公司的 ME 系列, 国内型号为 DW17 系列; 德国西门子公司的 3WE 系列和 3TB 系列, 国内型号为 CJX3XIELIE 系列; 德国 ABB 公司的 B 系列; 法国 TE 公司的 LC1-D 系列, 国内型号为 CJX4 系列等。一共引进了 34 个系列。这批产品目前的市场占有率约为 50%, 随着新产品的不断出现, 市场占有率呈现下降趋势。这一时期的工业产品充分体现出改革开放后技术革新的思想。在自主开发的同时大量地引用了国外的先进设计制造技术, 全面快速地提升了中国低压电器产品的技术水平。

第三代是从 20 世纪 90 年代至今。这个阶段主要的思想是跟踪国外新技术、新产品并自行开发、研制产品。自行设计的产品主要是以 DW40、DW45、DZ40、DJ40、S 系列等为代表的 10 多个系列。引进国外的产品主要有法国施耐德公司的 M 系列, 德国 F-G 公司的 F 系列, 德国西门子公司的 3TE 系列等产品。

如今中国低压电器制造工业有了飞速发展, 新产品已经发展到 12 大类, 380 个系列, 1200 多个品种, 几万种规格, 随着几代人的努力, 很多引进的技术也实现了国产化。今后中国的低压电器制造将会有更好的发展。

2. 常用低压电器的发展前景

随着计算机技术的发展, 先进制造技术的引进, 低压电器产品从设计、制造到开发都受到了相应的影响。

1) 产品设计方面

现代计算机三维辅助设计技术的应用为产品设计提供了方便快捷的平台,从原始的手工平面制图到计算机立体图形的生成,使产品设计方式发生了质的变化。制造软件系统的引入,现代化的样机测试手段都使产品的生命过程从研发到成品完全通过计算机进行模拟,大大地缩短了产品设计、研发的周期。

2) 产品性能测试方面

低压电器专用计算机软件的广泛应用,使产品的性能在样品出现之前就得到测试。例如,应用 ANSYS 有限元分析软件可以进行触点灭弧系统和脱扣器的磁场分析,以及电器机壳的强度分析;应用 ADAMS 软件可进行操纵机构的动态特性分析等。

3) 产品的可靠性方面

随着低压电器系统的复杂化和大型化,系统元件越来越复杂,集成化程度越来越高,低压电器的可靠性显得越来越重要。可靠性的研究主要有以下几个方面:

- (1) 可靠性物理研究,即产品失效机理研究;
- (2) 可靠性指标与考核方法研究;
- (3) 可靠性实验装置研究;
- (4) 提高可靠性研究。

4) 产品新技术应用方面

随着新的灭弧系统和限流技术的应用,对低压开关电器提出了高性能和小型化的要求,因此,传统的灭弧技术已经不能满足要求。目前,国内外都致力于研究新的灭弧系统和限流技术,实现开关电器的“无飞弧”。

5) 产品网络化方面

随着计算机网络技术的发展应用,可通信的低压电器也应运而生。低压电器与上位机或中央控制计算机进行通信,为了实现双向通信,低压电器必须面向电子化、集成化、智能化及机电一体化方向发展。可编程控制器(PLC)可以说是这个方向的典型产品。目前低压电器通信采用的方案主要有带通信功能的接口电路;传统电器上派生或增加联网接口和通信接口;直接带计算机接口和通信接口功能的电器。

综上所述,传统低压电器的发展是朝着高性能、高可靠性、小型化、模块化、模/数化、组合化、零部件通用化、网络化的方向不断前进的。

2.2 低压电器的基本结构

从结构上看,低压电器一般都具有两个基本部分,即感测部分和执行部分。感测部分接收信号,并通过转换、放大该信号,使执行部分进行动作。感测部分大多是电磁机构,执行部分一般是触点。电磁执行机构在常用低压电器中应用极为普遍,很多自动控制的电器中都应用了电磁执行机构,如接触器、电磁继电器、电磁离合器、电磁阀等。了解了电磁执行机构的原理就能很快掌握电磁式电器的工作原理,或者说,电磁执行机构是电磁式

电器的基础。电磁执行机构主要由电磁机构、触点系统和灭弧系统三部分组成，并根据电磁感应原理工作。

2.2.1 电磁机构

1. 电磁机构的工作原理

电磁机构由动铁芯（衔铁）、静铁芯和电磁线圈三部分组成，其作用是将电磁能转换成机械能，产生电磁吸力带动触点动作，其工作原理如图 2-1 所示。衔铁和动触点相连，当电磁线圈通电时产生磁场，使衔铁和静铁芯磁化，并且相互吸引；衔铁带动动触点动作，使触点闭合接通电路；电磁线圈断电后，磁场消失，磁力也随之消失，这时在复位弹簧的作用下，衔铁复位，带动动触点与静触点分开，电路断开。

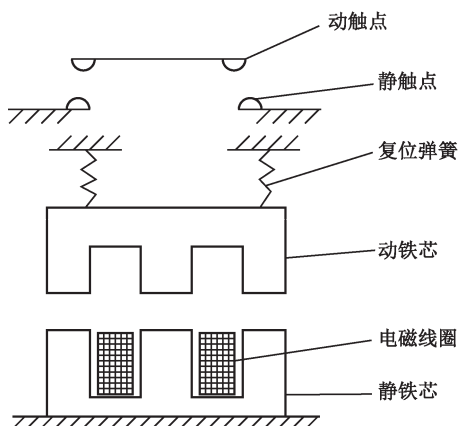


图 2-1 电磁机构示意图

2. 电磁机构的分类

电磁机构按照衔铁运动方式可以分为衔铁绕棱角转动拍合式（如图 2-2（a）所示）、衔铁绕轴转动拍合式（如图 2-2（b）所示）、衔铁直线运动螺管式（如图 2-2（c）所示）。

电磁机构按照电磁线圈所通电流的种类可以分为直流线圈和交流线圈两种。

电磁机构按照电磁铁芯形状可以分为 U 型和 E 型，如图 2-2 所示，其中图 2-2（a）中电磁机构为 U 型，图 2-2（b）、图 2-2（c）中电磁机构为 E 型。

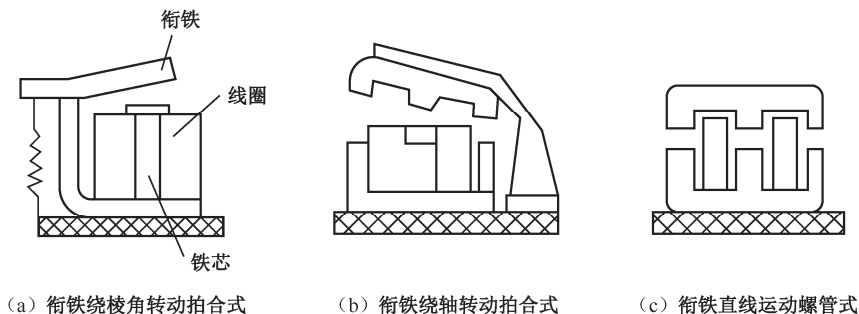


图 2-2 衔铁运动方式

2.2.2 触点系统

触点系统是执行部件，用来实现电路的接通或断开，有闭合状态、分断过程、断开状态三种工作状态。触点还有常开和常闭两种状态。当电磁线圈未通电，即衔铁没有动作时，触点处于断开状态的称为常开触点，又称动合触点；反之，当衔铁没有动作时，触点处于闭合状态，当衔铁动作吸合后，触点处于断开状态的触点称为常闭触点，又称动断触点。

触点按其所控制的电路可以分为主触点和辅助触点。主触点用于接通或断开主电路，允许通过较大的电流；辅助触点用于接通或断开控制电路，只能通过较小的电流。

触点按其形状不同可以分为桥式触点和指型触点。

触点按其接触形式不同可以分为点接触、面接触、线接触三种形式，如图 2-3 所示。

(1) 点接触：由两个半球形触点或一个半球形与一个平面形触点构成（如图 2-3 (a) 所示），常用的小电流电器，如接触器的辅助触点等均是这种形式。

(2) 面接触：是两个平面形的触点相结合（如图 2-3 (b) 所示），因接触面积大，所以允许较大的电流通过。但触点氧化性高、磨损严重，所以这种触点一般在接触表面上镶有合金。它多用于大容量接触器的触点。

(3) 线接触：它的接触区域是一条线，并且在接通、断开过程中有一个滚动的过程（如图 2-3 (c) 所示），这样可以自动清除触点表面的氧化物，保证了触点的良好接触。线接触多用于中容量的电器，如接触器的触点。

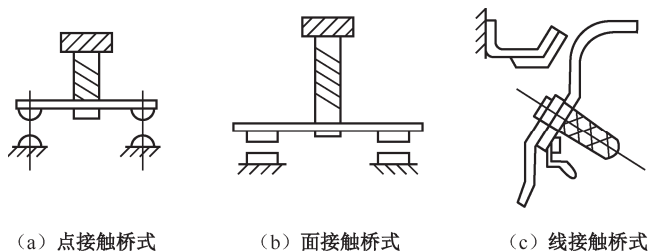


图 2-3 触点的结构形式

2.2.3 灭弧系统

1. 电弧产生与灭弧原理

动、静触点在分断过程中，由于瞬间的电荷密度极高，导致动、静触点间形成大量炽热的电荷流，产生弧光放电现象，即形成电弧。这种高温的电弧容易烧坏触点，降低其寿命，延迟电路切断时间，降低电器的工作可靠性，甚至可能导致事故。因此，在触点断开的瞬间应采取措施迅速灭弧。

根据电弧产生的原理可知，灭弧关键就在于抑制游离因素。因为弧隙中在气体游离的同时，还存在着正离子与自由电子的复合，电弧具有从密度高的地方向密度低的地方扩散的趋势，也有从温度高的地方向温度低的地方扩散的趋势，因此，加强抑制或除去游离因素，就能有效地熄灭电弧。直流电依靠拉长电弧和冷却电弧来灭弧；交流电由于有自然过零，所以在参数相同的情况下，交流电弧比直流电弧容易熄灭，其灭弧应发生在电流过零或接近过零点处。

2. 低压电器常用灭弧方法

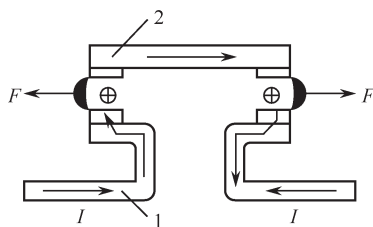
1) 电动力灭弧

电动力灭弧原理如图 2-4 所示。

这是一种桥式结构双断口触点，当触点打开时，在触点间产生电弧，电弧电流在两个电弧之间产生，如图 2-4 所示。磁场方向如图 2-4 所示，根据左手定则，电弧电流要受到一个指向外侧的电动力 F 的作用，使电弧向外运动并拉长，迅速穿越冷却介质加快冷却后熄灭。这种方法多用于交流电器的灭弧。常用的灭弧罩装置就是利用这个方法实现灭弧的。灭弧罩多用耐弧陶土、石棉水泥或其他耐弧塑料制成，它可以分隔各路电弧，使电弧迅速冷却。

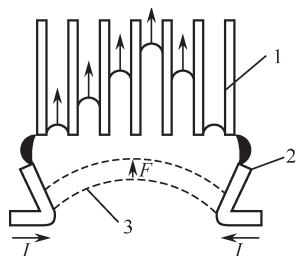
2) 金属栅片灭弧

金属栅片灭弧原理如图 2-5 所示，当触点断开时，产生的电弧在电动力的作用下被推入到一组金属栅片中，电弧被分割成很多段，栅片吸收电弧的热量，从而使电弧迅速冷却实现灭弧。这种原理应用于各种灭弧栅装置中，栅片由许多镀铜薄钢片组成，片间距 2~3mm，安放在触点上方的灭弧罩内。它常用于交流电器中灭弧。



1—静触点；2—动触点

图 2-4 电动力灭弧原理图

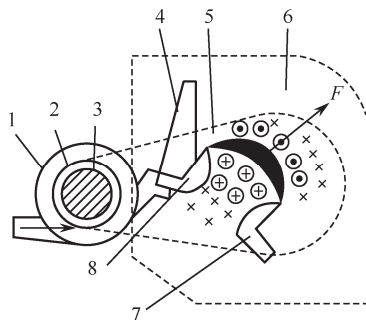


1—灭弧栅片；2—触点；3—电弧

图 2-5 金属栅片灭弧原理图

3) 磁吹灭弧

磁吹灭弧原理如图 2-6 所示，在触点电路中串入一个磁吹线圈，当触点断开产生电弧时，电弧电流产生的磁通方向如图 2-6 所示，根据左手定则，电弧电流要受到一个向上的电动力 F 作用，使电弧拉长冷却达到灭弧。这种灭弧方式是利用电流本身灭弧的，电弧电流越大，灭弧也越强，所以广泛应用于直流电器中。



1—磁吹线圈；2—绝缘套；3—铁芯；4—引弧角；5—导磁夹板；6—灭弧罩；7—动触点；8—静触点

图 2-6 磁吹灭弧原理图

2.3 熔断器

熔断器又称保险器（或保险丝），主要用于供电线路和电器设备的短路保护，有时也可作为严重过载保护。它的优点是体积小、动作快、简单经济，并且有限制短路电流的作用。它的缺点是易受到周围温度影响，工作不够稳定，容易在正常工作时发生一相熔断，造成电动机单相运行，使电动机烧毁。

2.3.1 熔断器的结构和分类

1. 熔断器的结构

熔断器在结构上主要由熔断管（或盖、座）、熔体及导电部件等部分组成，如图 2-7 所示。其中熔体是主要部分，它既是感测元件又是执行元件。熔断管一般由硬质纤维或瓷质绝缘材料制成半封闭式或封闭式管状外壳，熔体则装于其内。熔断管的作用是便于安装熔体和有利于熔体熔断时熄灭电弧。熔体（又称熔件）是由不同金属材料（铅锡合金、锌、铜或银）制成丝状、带状、片状或笼状，它串接于被保护电路中。熔断器的作用是当电路发生短路或严重过载故障时，通过熔体的电流使其发热，当达到熔化温度时熔体自行熔断，从而分断故障电路。显而易见，熔断器在电路中起短路保护和严重过载保护的作用。

2. 熔断器的分类

熔断器的种类很多，按结构来分有半封闭插入式、螺旋式、无填料密封管式和有填料密封管式，它们的外形如图 2-7 所示。按用途来分有一般工业用熔断器、半导体器件保护用快速熔断器和特殊熔断器（如具有两段保护特性的快慢动作熔断器、自复式熔断器）。

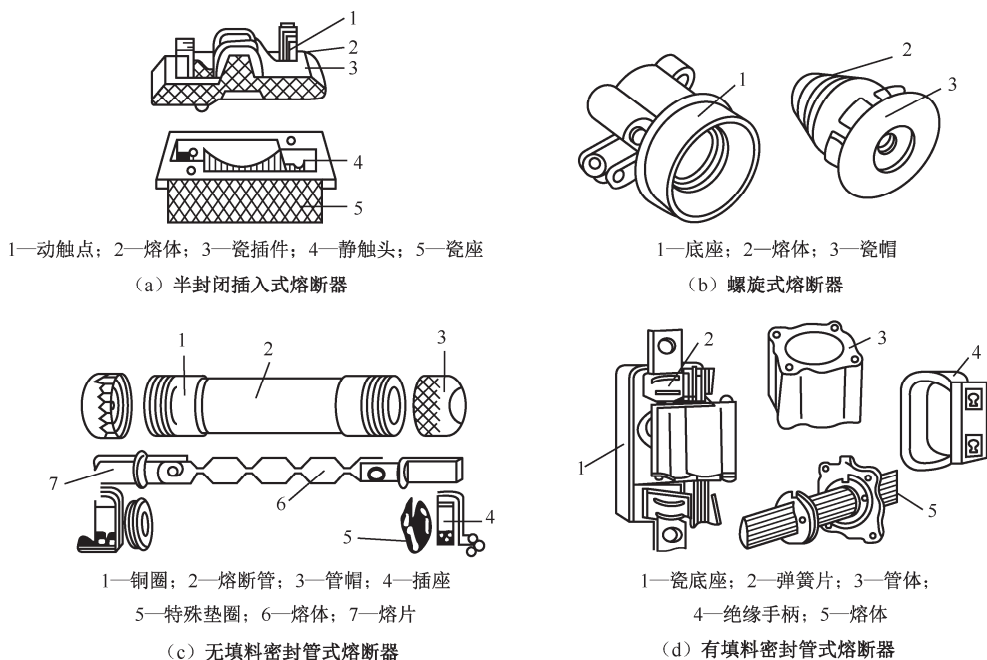


图 2-7 熔断器

2.3.2 熔断器的主要参数

1. 额定电压

额定电压是指熔断器长期工作时和分断后能够承受的电压，其值一般等于或大于电器设备的额定电压。

2. 额定电流

额定电流指熔断器长期工作时，设备部件温升不超过规定值时熔断器所能承受的电流。厂家为了减少熔断管额定电流的规格，熔断管的额定电流等级比较少，而熔体的额定电流等级比较多，也即在一个额定电流等级的熔断管内可以分装几个额定电流等级的熔体，但熔体的额定电流最大不能超过熔断管的额定电流。

3. 极限分断能力

极限分断能力是指熔断器在规定的额定电压和功率因数（或时间常数）的条件下，能分断的最大电流值，在电路中出现的最大电流值一般是指短路电流值。所以，极限分断能力也是反映了熔断器分断短路电流的能力。

4. 熔断电流

熔断电流是指通过熔体并使其熔化的最小电流。

2.3.3 熔断器的类型选择

选择熔断器的类型时，主要依据负载的保护特性和短路电流的大小。

用于保护照明和电动机的熔断器，一般是考虑它们的过载保护，这时，希望熔断器的熔化系数适当小些，所以，容量较小的照明线路和电动机宜采用熔体为铅锌合金的 RC1A 系列熔断器。

而大容量的照明线路和电动机，除过载保护外，还应考虑短路时的分断短路电流能力，若短路电流较小时，可采用熔体为锡质的 RC1A 系列或熔体为锌质的 RM10 系列熔断器。

用于车间低压供电线路的保护熔断器，一般是考虑短路时的分断能力，当短路电流较大时，宜采用具有高分断能力的 RL1 系列熔断器；当短路电流相当大时，宜采用有限流作用的 RT0 及 RT12 系列熔断器。RT0 系列有填料密封管式熔断器基本技术数据如表 2-1 所示。

表 2-1 RT0 系列有填料密封管式熔断器基本技术数据

型 号	额定电流/A	熔体额定电流/A	极限分断能力/kA	
			交流 380Vcos ϕ >0.1 时	直流 440VT>0.015s
RT0-50	50	5, 10, 15, 20, 30, 40, 50	50	25
RT0-100	100	30, 40, 50, 60, 80, 100		
RT0-200	200	80, 100, 120, 150, 200		
RT0-400	400	150, 200, 250, 300, 350, 400		
RT0-600	600	350, 400, 450, 500, 550, 600		
RT0-1000	1 000	700, 800, 900, 1 000		

表 2-4 RLS1 系列螺旋式快速熔断器基本技术数据

型 号	额定电压/V	额定电流/A	熔体额定电流/A	$\cos\phi<0.3$ 时极限分断能力/kA
RLS1-10	380	10	3, 5, 10	50
RLS1-50		50	15, 20, 25, 30, 40, 50	
RLS1-100		100	60, 80, 100	

2.4 低压隔离器

低压隔离器是一种结构比较简单，应用十分广泛的手动操作电器。低压隔离器的品种很多，主要有低压刀开关、熔断式刀开关和组合开关三种。它的主要作用是在电源切除后，将线路与电源明显的隔离开，以保障维修人员的安全，也可以用于不频繁的接通和分断空载电路或小电流电路中。

2.4.1 低压刀开关

1. 刀开关的分类和结构

刀开关是一种结构最简单、应用最广泛的手控低压电器。

刀开关按级数可分为单极、双极和三级；按结构可分为平板式和条架式；按操作方式可分为直接手柄操作式、杠杆操作机构式、旋转操作式和电动操作机构式。

常用塑壳刀开关的结构如图 2-8 所示，它主要由操作手柄、熔丝、触刀、触点座和底座组成。

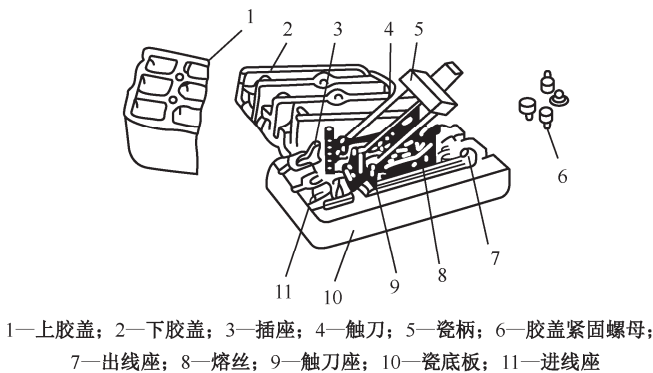


图 2-8 塑壳刀开关的结构图

塑壳使电弧不致飞出灼伤操作人员，防止极间电弧造成电源短路；熔丝起过载保护作用。

刀开关安装时应做到垂直安装，使闭合操作时的手柄操作方向从下向上合，断开操作时的手柄操作方向从上向下分，不允许平装或倒装。倒装时手柄有可能因自动下滑而引起误合闸，造成人身安全事故。接线时，应将电源线接在上端，负载接在熔丝下端。这样拉闸后刀开关与电源隔离，便于更换熔丝。

(a) 单极 (b) 双极 (c) 三极

图 2-9 刀开关的图形和文字符号

2. 刀开关的技术参数

有关刀开关的技术参数如下。

- (1) 额定电压：指在规定条件下，保护电器正常工作的电压值。
- (2) 额定电流：指在规定条件下，保证电器正常工作的电流值。
- (3) 通断能力：指在规定条件下，能在额定电压下接通和分断的电流值。
- (4) 动稳定电流：指在规定的使用 and 性能条件下，开关电路在闭合位置上所能承受的电流峰值。刀开关的动稳定电流为其额定电流的几十倍到几百倍，因为刀开关在闭合位置时，可能通过短路电流。
- (5) 热稳定电流：指在规定的使用 and 性能条件下，开关电路在指定的短时间内，于闭合位置上所能承载的电流。刀开关的热稳定电流也为额定电流的几十倍，理由同上。
- (6) 机械寿命：指开关电器在需要修理或更换机械零件前所能承受的无载操作次数。刀开关为不频繁操作电器，其机械寿命一般为 5 000~10 000 次。
- (7) 电寿命：指在规定的正常工作条件下，开关电器不需修理或更换零件的情况下，带负载操作次数。刀开关的电寿命一般为 500~1 000 次。

3. 刀开关的选用和技术数据

刀开关的额定电压应等于或大于电路额定电压，其额定电流应等于或稍大于电路工作电流。若用刀开关来控制电动机，则必须考虑电动机的启动电流比较大，应选用额定电流大一级的刀开关。此外刀开关的通断能力、动稳定电流之和、热稳定电流值等均应符合电路的要求。

刀开关的型号含义如图 2-10 所示。

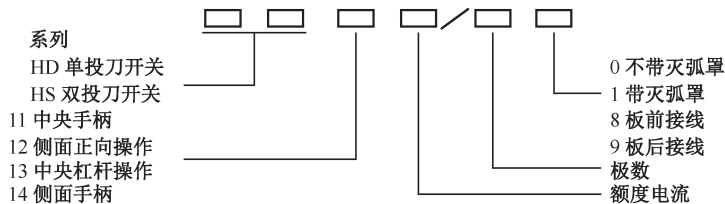


图 2-10 刀开关的型号含义

常用的 HK2 系列塑壳刀开关的技术数据如表 2-5 所示。

表 2-5 HK2 系列塑壳刀开关的技术数据

额定电压/V	额定电流/A	级数	熔体极限分断能力/A	控制最大电动机功率/kW	机械寿命/次	电寿命/次
200	10	2	500	1.1	10 000	2 000
	15		500	1.5		
	30		1 000	3.0		
330	15	3	500	2.2	10 000	2 000
	30		1 000	4.0		
	60		1 500	5.5		

2.4.2 熔断式刀开关

熔断式刀开关是由刀开关和熔断器组合而成的，具有熔断器和刀开关的基本性能。

熔断式刀开关用于交流频率 50Hz、电压至 600V 有高短路电流的配电电路和电动机电路中，作为电动机的保护和电源开关、隔离开关及应急开关，但一般不用于直接接通和分断单台电动机。常用的型号有 HR5、HR11 系列。HR5 熔断式刀开关中的熔断器为 NT 型低压高分断型熔断器。NT 型熔断器是中国从德国 AEG 公司引进的制造技术而生产的，其分断能力高达 100kA。HR5 型号产品可与国外同类产品替换。

熔断式刀开关的型号含义如图 2-11 所示。

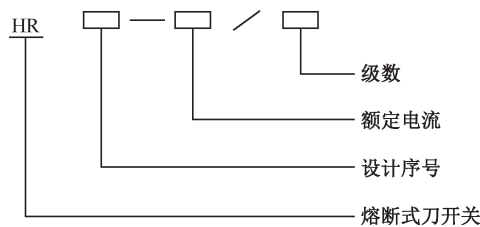


图 2-11 熔断式刀开关的型号含义

HR5 系列的熔断器带有撞击器时，任一级熔断体熔断后，撞击弹出，通过横杆触动装在底板的微动开关发出信号或切断接触器的控制回路，以实现缺相保护。HR5 系列熔断式刀开关的主要技术参数如表 2-6 所示。

表 2-6 HR5 系列熔断式刀开关的主要技术参数（电子）

额定绝缘电压/V	660			
额定工作电压/V	380		660	
约定的发热电流/A	100	200	400	630
配用熔体电流/A	4~160	80~250	125~400	315~630
	熔断器型号：RT（系列引进德国 AEG 公司 NT 型）			

• 23 •

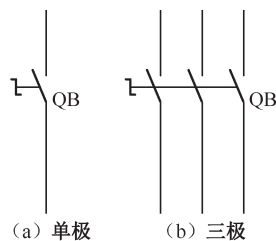


图 2-14 组合开关的图形、文字符号

HZ10 系列组合开关的技术数据如表 2-7 所示。

表 2-7 HZ10 系列组合开关的技术数据

型 号	额定电 压/V	额定 电流/A	级数	极限操作		可控制电动机最大		通 断 次 数			
				电流/A		容量和额定电流		AC cos ϕ		直流时间常数/s	
				接 通	分 断	容量/kW	额定电 流/A	≥0.8	≥0.3	≤0.0025	≤0.01
HZ10-10	DC 220 AC 380	6	单级	94	62	3	7	20 000	20 000	20 000	10 000
HZ10-25		10									
HZ10-60		25	2, 3								
HZ10-100		60									
		100									

2.5 主令电器

主令电器是用来接通和断开控制电路的低压电器，用于控制电力拖动系统中电动机的启动、停车、制动，以及调速等。主令电器可直接作用于控制电路，也可以通过电磁式电器间接作用于控制电路。

在控制电路中由于它是一种专门发布命令的电器，故称为主令电器。主令电器不允许分合主电路。

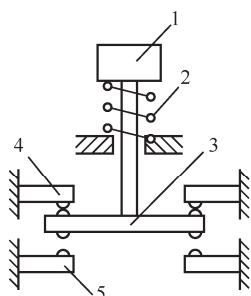
主令电器应用十分广泛，种类繁多，常用的有控制按钮、行程开关、万能转换开关和主令控制器等。

2.5.1 控制按钮

控制按钮简称按钮，是一种结构简单、使用广泛的手动主令电器，在控制电路中用做远距离手动控制电磁式电器，也可以用来转换各种信号电路和电器连锁电路等。

控制按钮结构如图 2-15 所示，它一般由按钮、复位弹簧、触点和外壳等部分组成。

控制按钮的图形和文字符号如图 2-16 所示。按钮中触点的形式和数量根据需要可以装配成 1 常开 1 常闭到 6 常开 6 常闭形式的各种组合。接线时，也可以只接常开或常闭触点。



1—按钮；2—复位弹簧；3—动触点；4—动断触点；5—动合触点

图 2-15 控制按钮结构示意图

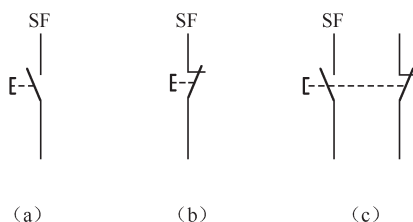


图 2-16 控制按钮的图形、文字符号

控制按钮的工作原理很简单，当按下按钮时，先断开常闭触点，而后接通常开触点。按钮释放后，在复位弹簧作用下使触点复位。

常用的按钮种类有 LA2、LA18、LA19 和 LA20 等系列，其型号含义如图 2-17 所示。

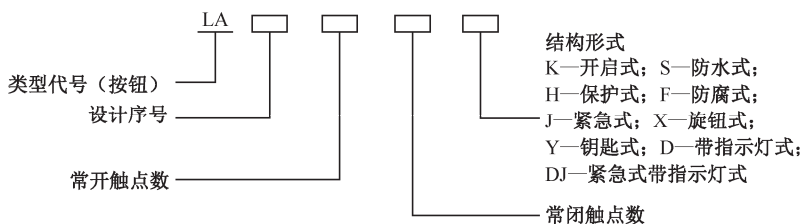


图 2-17 常用的按钮型号含义

控制按钮一般会做成单式（一个按钮）、复式（两个按钮）和三联式（三个按钮）的形式。为便于识别各个按钮的作用，避免误操作，通常在按钮上做出不同标志或涂以不同颜色，一般红色表示停止按钮，绿色或黑色表示启动按钮，黄色表示干预按钮等。

控制按钮按保护形式分为开启式、保护式、防水式和防腐式等。按结构形式可分为按钮式、紧急式、钥匙式、旋钮式和保护式五种，可根据使用场合和具体用途来选用。若将按钮的触点封闭于防爆装置中，还可构成防爆型按钮，适用于有爆炸危险、有轻微腐蚀性气体或蒸汽的环境，以及雨、雪和滴水的场合。因此，在矿山及化工部门广泛使用防爆型控制按钮。

2.5.2 行程开关

行程开关是指依照生产机械的行程发出命令，以控制其运行方向或行程长短的主令电器。若将行程开关安装于生产机械行程终点处以限制其行程，则称为限位开关或终点开关。

行程开关广泛应用于各类机床和起重机械的控制，以限制这些机械的行程。当生产机械运动到某一预定位置时，行程开关就通过机械可动部分的动作，将机械信号转换为电信号，以实现对生产机械的控制，限制它们的动作或位置，借此对生产机械予以必要的保护。

行程开关按其结构可以分为直动式、滚轮式和微动式三种。

1. 直动式行程开关

直动式行程开关的结构如图 2-18 所示。它的动作原理与按钮相同。其优点是结构简单、使用方便、经济性强。但它的缺点是触点分合速度取决于生产机械的移动速度，当移动速度低于 0.4m/min 时，触点分断太慢，易被电弧烧损。

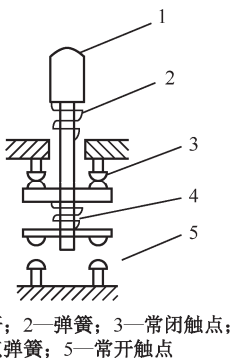


图 2-18 直动式行程开关的结构

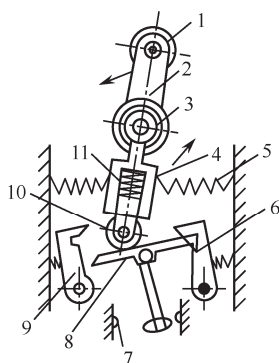
2. 滚轮式行程开关

滚轮式行程开关的结构原理如图 2-19 所示，它采用盘形弹簧机构可以完成瞬时动作。弥补了直动式行程开关的不足。

当滚轮 1 受到向左的机械力作用时，上转臂 2 向左下方转动，触点推杆 8 向右转动，并压缩右边弹簧 5，同时下面的小滚轮 10 也沿着触点推杆 8 向右滚动，滚轮滚动又压缩弹簧 5，当滚轮 10 滚动越过触点推杆 8 的中点时，盘形弹簧 3 和弹簧 11 都使触点推杆 8 迅速转动，从而使动触点迅速与右边静触点分开，并与左边静触点闭合，减少了电弧对触点的烧蚀，适用于低速动作的机械。

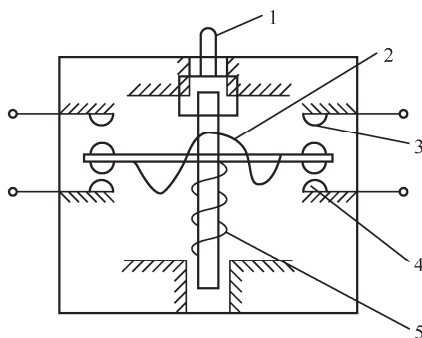
3. 微动式行程开关

微动式行程开关是行程非常小的瞬时动作行程开关，其特点是操作力小和操作行程短。微动式行程开关的结构原理如图 2-20 所示，当生产机械的行程比较小而作用力也很小时，可采用具有瞬时动作和微小行程的微动开关。



1—滚轮；2—上轮臂；3，5，11—弹簧；4—套架；
6，9—压板；7—触点；8—触点推杆；10—小滑轮；

图 2-19 滚轮式行程开关结构原理图



1—滚轮；2—弯片状弹簧；3—常开触点；4—常闭触点；5—复位弹簧

图 2-20 微动式行程开关结构原理图

微动式行程开关采用了弯片状弹簧的瞬动机构，当开关推杆在机械作用压下时，弓簧片产生变形，储存能量并产生位移，当达到临界点时，弹簧片连同桥式动触点瞬时动作。当外力失去后，推杆在弹簧片作用下迅速复位，触点恢复原状。由于采用瞬动机构，触点换接速度不受推杆压下速度的影响。

行程开关的图形、文字符号如图 2-21 所示。

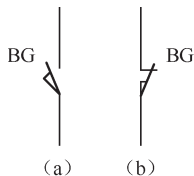


图 2-21 行程开关的图形、文字符号

常用的行程开关有直动式 LX1、JLXK1 系列；滚轮式有 LX2、JLXK2 系列；微动式有 LXW1-11、JLXK1-11 系列。

行程开关的型号含义如图 2-22 所示。

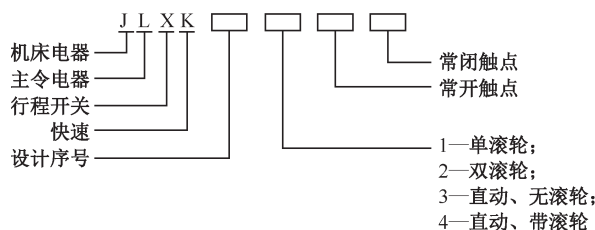


图 2-22 行程开关的型号含义

4. 接近开关

由于半导体元件的出现，产生了一种非接触式的行程开关，这就是接近开关。当生产机械接近它到一定距离范围之内时，它就能发出信号，以控制生产机械的位置或进行计数。当装在生产机械上的金属检测体（通常为铁磁件）接近感应头时，由于感应作用，使处于高频振荡器线圈磁场中的物体内部产生涡流及磁滞损耗，以致振荡回路因电阻增大、损耗增加而使振荡减弱，直至停止振荡。这时，晶体管开关器开始导通，并通过输出器（电磁式继电器）输出信号，从而起到控制作用。与行程开关比较，接近开关具有定位精度高、操作频率高、寿命长、耐冲击振荡、耐潮湿、能适应恶劣工作环境等优点，因此，在工业生产中逐渐得到推广应用。

接近开关是无触点行程开关，按工作原理来区分，有高频振荡型、电容型、感应电桥型、永久磁铁型、霍尔效应型等多种，其中以高频振荡型最为常用。高频振荡型接近开关由振荡、检波、整形和输出等电路组成，其工作原理如图 2-23 所示，当运动部件上的金属物体接近高频振荡器的检测物体（俗称感应头）时，由于该物体内部产生涡流损耗，使振荡回路等效电阻增大，能量损耗增大，使振荡减弱直至终止，开关输出控制信号。通常把接近开关刚好动作时感应头与检测物体之间的距离称为动作距离。

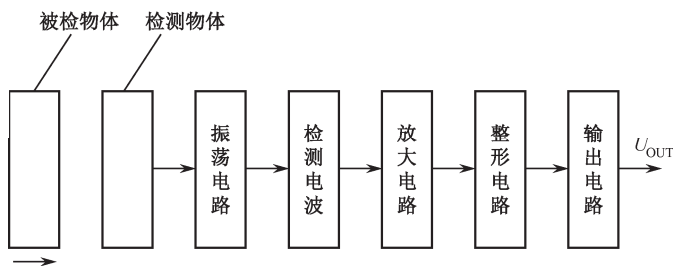


图 2-23 高频振荡型接近开关工作原理

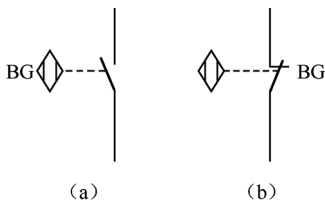


图 2-24 接近开关的图形、文字符号

常用的接近开关有 LJ1、LJ2 和 JXJ0 等系列。

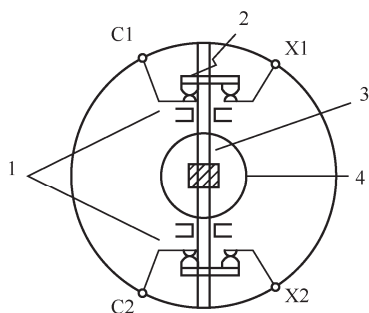
由于接近开关具有工作稳定可靠、使用寿命长、重复定位精度高、操作频率高、动作迅速等优点，在实际中使用越来越广泛。接近开关的图形、文字符号如图 2-24 所示。

2.5.3 万能转换开关

万能转换开关是由多组相同结构的触点组件叠装而成的多回路控制电器。它主要用于电气控制电路的转换、配电设备的远距离控制、电器测量仪表的转换和微电动机的控制，也可用于小功率鼠笼型异步电动机的启动、换向和变速。由于它能控制多个回路，适应复杂线路的要求，故有“万能转换开关”之称。

万能转换开关由操作机构、定位装置和触点等三部分组成。触点为双断点桥式结构，动触点设计成自动调整式以保证通断时的同步性。静触点装在触点座内。每个由胶木压制的触点座内可安装 2~3 对触点，并且每组触点上还有隔弧装置。定位装置采用滚轮卡棘轮辐射形结构，操作时滚轮与棘轮之间的摩擦为滚动摩擦，故所需操作力小，定位可靠，寿命长。此外，这种机构还起一定的速动作用，既有利于提高分断能力，又能加强触点系统动作的同步性。触点的通断由凸轮控制，为了适应不同的需要，手柄还能做成带信号灯的、钥匙形的等多种形式。

万能转换开关的结构原理如图 2-25 所示。



1—触点；2—触点弹簧；3—凸轮；4—转轴

图 2-25 万能转换开关的结构原理图

万能转换开关按手柄操作方式又分为自复式和定位式两种。自复式是指用手搬动手柄于某一位置后，当手松开后手柄自动返回原位。而定位式是指用手搬动手柄于某一位置后，当手松开后手柄就停留在该位置上。万能转换开关手柄的操作位置是以角度来表示的，不同型号的万能转换开关，其手柄有不同的操作位置。不同型号的万能转换开关，其手柄操作位置可从电器设备手册中万能转换开关的“定位特征表”中查找到。

万能转换开关的触点在电路图中的图形符号如图 2-26 所示。万能转换开关的文字符号用 SF 表示。由于万能转换开关的触点的分合状态是与操作手柄的位置有关的，所以，在电路图中除画出触点图形符号之外，还应有操作手柄位置与触点分合状态的表示方法。

万能转换开关的操作手柄位置与触点分合状态表示方法有两种：一种方法是在电路图中画虚线和画“·”的方法，如图 2-26（a）所示，即用虚线表示操作手柄的位置，用有无“·”符号表示触点的闭合和打开状态，例如，在触点图形符号下方的虚线位置上画“·”，则表示当操作手柄处于该位置时，该触点处于闭合状态；若在虚线位置上未画“·”时，

则表示该触点处于打开状态。另一种方法是，在电路图中既不画虚线也不画“·”，而是在触点图形符号上标出触点编号，再用接通表表示操作手柄于不同位置时的触点分合状态，如图 2-26 (b) 所示。在接通表中，用有“×”来表示操作手柄于不同位置时触点的闭合状态，若无“×”则表示操作手柄于不同位置时触点的断开状态。

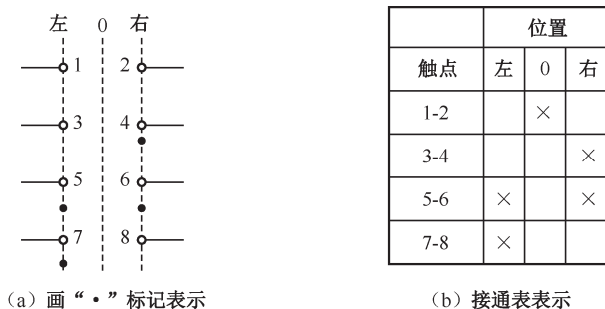


图 2-26 万能转换开关的图形符号

万能转换开关的型号含义如图 2-27 所示。

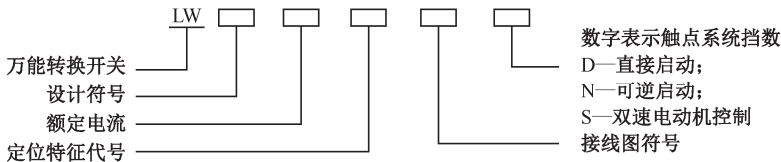


图 2-27 万能转换开关的型号含义

由于万能转换开关的通断能力不高，当用来直接控制电动机时，LW5 系列只能控制 5.5kW 及以下的小容量电动机，而 LW6 系列只能控制 2.2kW 及以下的小容量电动机。它们若用于可逆运行控制时，只有在电动机停车以后才允许反向启动。

2.5.4 主令控制器

主令控制器是用来较为频繁地转换复杂的多路控制电路的主令电器。它一般由触点、凸轮、定位机构、转轴、面板及支撑件等部分组成。其操作轻便，允许每小时接电次数较多，触点为双断点的桥式结构，适用于按顺序操作多个控制回路。

主令控制器的结构原理如图 2-28 所示。凸轮块 1 和 7 固定于方轴上，动触点 4 固定于能转动轴 6 转动的支杆 5 上，当操作主令控制器手柄转动时，带动凸轮块 1 和 7 转动，当凸轮块 7 达到推压小轮 8 的位置时，将使小轮带动支杆 5 转动轴 6 转动，使支杆张开，从而使触点断开。其他情况下，由于凸轮块离开小轮，触点是闭合的。这样，只要安装一串不同形状的凸轮块，就可获得按一定顺序动作的触点，若这些触点用来控制电路，便可获得按一定顺序动作的电路了。

从结构形式来看,主令控制器有两种类型:一种是凸轮调整式主令控制器,它的凸轮片上开有孔和槽,凸轮片的位置可根据给定的触点分合表进行调整;另一种是凸轮非调整式主令控制器,其凸轮不能调整,只能按触点分合表适当地排列组合。

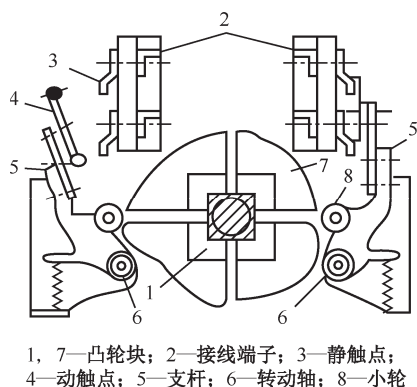


图 2-28 主令控制器的结构原理图

常用的主令控制器有 LK5 和 LK6 系列，其中 LK5 系列有直接手动操作、带减速器的机械操作与电动机驱动等三种形式的产品。而 LK6 系列是由同步电动机和齿轮减速器组成定时元件，此元件按预先规定的时间顺序，周期性地分合电路。

主令控制器主要用于轧钢及其他生产机械的电力拖动控制系统中，以及大型起重机的电力拖动系统对电动机的启动、制动和调速等，做远距离控制用。在电路图中主令控制器触点的图形符号及操作手柄在不同位置时的触点分合状态的表示方法与万能转换开关相类似。

2.6 接触器

接触器是用来接通或断开电动机或其他负载主电路的一种控制元件。它是利用电磁力来使开关打开或闭合的电器，适用于频繁操作（超过 1 500 次每小时），远距离控制大电流电路。根据主触点所接回路的电流种类，接触器分为直流接触器和交流接触器两种。它主要控制的对象有电动机、电炉、电灯、电焊机、电容器组等。

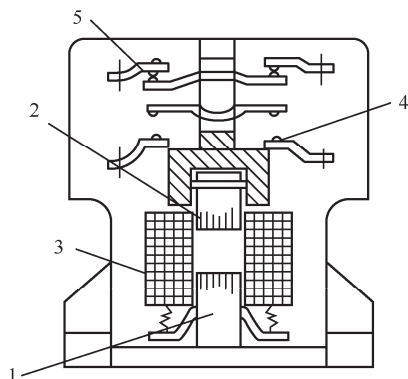
2.6.1 接触器的结构及工作原理

交流接触器的结构原理如图 2-29 所示。

它主要由以下几部分组成。

(1) 电磁机构：由电磁线圈、静铁芯、衔铁组成，作为最主要的部分，是接触器的执行机构。交流接触器的电磁系统采用交流电磁机构，当线圈中通电后，衔铁在电磁吸力的作用下，克服复位弹簧的反力与铁芯吸合，带动触点动作，从而接通或断开相应电路。当线圈断电后，动作过程与上述相反。

(2) 触点系统：根据用途不同，接触器的触点分为主触点和辅助触点。主触点可以通断电流较大的主电路，一般由三对动合触点组成；辅助触点用于通断小电流的控制电路，由动合和动断触点成对组成。



1—铁芯；2—衔铁；3—线圈；4—常开触点；5—常闭触点

图 2-29 交流接触器的结构原理图

(3) 灭弧装置：用来熄灭触点通断过程中产生的电弧，有磁吹式、栅片式、灭弧罩式等。

(4) 辅助触点：接在控制电路中，起信号元件的作用，参与电路中的逻辑运算。

(5) 反力装置：由释放弹簧和触点弹簧组成，当电磁线圈失电时，被吸合的衔铁在弹簧的作用下恢复原位。

(6) 支架和底座：用于接触器的固定和安装。

接触器的工作原理：当电磁线圈通电时，在铁芯中产生磁通，将衔铁吸合，主触点在衔铁带动下闭合，接通了主电路。与此同时，辅助触点的动合触点闭合，而动断触点断开。当电磁线圈失电或电压显著降低时，由于反力弹簧的作用，衔铁被释放，所有触点恢复常态。

直流接触器与交流接触器的工作原理相同，不同点在于直流接触器线圈通以直流电流，主触点接通或者切断直流主电路，而且在线圈中通以直流电，铁芯不会产生涡流和磁滞损耗，所以不会发热，因此，铁芯的材料与交流接触器不同。线圈的绕线也与交流接触器有所差别。直流接触器的外形如图 2-30 所示。

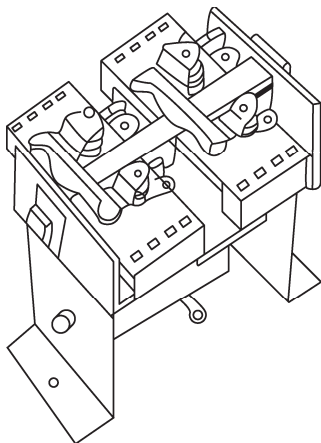


图 2-30 直流接触器的外形图

2.6.2 接触器的主要技术参数

1. 额定电压

额定电压是指主触点的额定工作电压，选用时必须使额定电压与所控电路的电压相符。交流继电器的额定电压一般为 220V、380V；直流继电器的额定电压一般为 220V、440V、660V 等。辅助触点的额定电压一般为交流 380V，直流 220V。

2. 额定电流

额定电流是指主触点的额定工作电流。它是在一定条件下（额定电压、使用类别、额定工作制、操作频率等）规定的，保证电器正常工作的电流值。若工作条件改变则额定电流也将发生变化。目前中国生产的接触器额定电流的范围为 6~4 000A。

3. 电磁线圈的额定电压

在接触器电磁线圈的铭牌上标有线圈的技术数据，其中包括线圈的额定电压。交流线圈的额定电压有 36V、127V、220V、380V；直流线圈的额定电压有 24V、48V、110V、220V、440V 等。

4. 触点数目

接触器的触点数目应能满足控制线路的要求。各种类型的接触器触点数目不同。交流接触器的主触点有 3 对（常开触点），一般有 4 对辅助触点（2 对常开，2 对常闭），辅助触点最多可达到 6 对（3 对常开，3 对常闭）。直流接触器主触点一般有 2 对（常开触点），辅助触点有 4 对（2 对常开，2 对常闭）。

5. 动作值

动作值是指接触器的吸合电压和释放电压。国家工业机械部关于接触器的标准规定：接触器在线圈额定电压 85%及以上时，应吸合可靠；释放电压不高于线圈额定电压的 70% 时，交流接触器不低于线圈额定电压的 10%，直流接触器不低于 5%。

6. 接通和分断能力

接通与分断能力是指接触器的主触点在规定的条件下能可靠地接通和分断的电流值。在此电流值下，接通和分断时，不应发生熔焊、飞弧和过分磨损等。接触器的接通和分断能力随着用途和控制对象的不同有很大的差别。

7. 机械寿命与电气寿命

接触器是频繁操作电器，应有较长的机械寿命和电气寿命。电气寿命与使用类别、负载电流的大小有关。

8. 操作频率

操作频率是指每小时允许的操作次数。目前，一般分为 300 次/小时、600 次/小时和 1 200 次/小时等，它也会影响电气寿命。因为操作频率影响灭弧装置的工作条件，对于交流接触器操作频率过高还会导致线圈和铁芯的温度升高，所以它也是一个重要的技术指标。

9. 额定工作制

接触器的工作制有四种：八小时工作制、不间断工作制、短时工作制及反复短时工作制。

2.6.3 常用接触器的主要技术数据

1. 交流接触器

交流接触器的型号及其代表意义如图 2-31 所示。

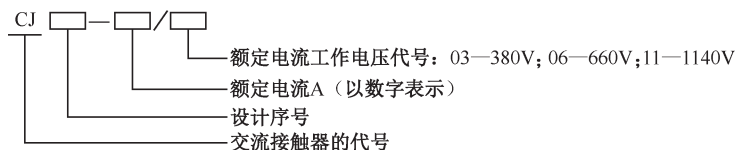


图 2-31 交流接触器的型号含义

常用的 CJ20 系列交流接触器的主要技术数据如表 2-8 所示。

表 2-8 CJ20 系列交流接触器的主要技术数据

型 号	约定发热 电流/A	额定工作 电流/A	额定工作 电压/V	外形尺寸/mm 宽×高×深	结构特性	机电寿命/万次操 作频率/（×1/h）
CJ20-10	10	10	220	44.5×67.5×107 $F \geq 10$	辅助触点 10A， 2 接通、2 分断 螺钉安装	1 000/100 1 200
		10	380			
		5.8	660			
CJ20-16	16	16	220	44.5×73×116.5 $F \geq 10$		
		16	380			
		13	660			
CJ20-25	32	25	220	52.5×90.5×122 $F \geq 10$	辅助触点 10A， 2 接通、2 分断 螺钉安装	1 000/100 1 200
		25	380			
		16	660			
CJ20-40	55	40	220	86.5×111.5×118 $F \geq 30$		
		40	380			
		25	660			
CJ20-63	80	63	220	116×142×146 $F \geq 60$	辅助触点 10A， 2 接通、2 分断 螺钉安装	600/120 1 200
		63	380			
		40	660			
CJ20-160	125	100	220	120×145×150 $F \geq 70$		
		100	380			
		63	660			
CJ20-160	200	160	220	146×187×178 $F \geq 80$		
		160	380			
		100	660			
CJ20-160/11		80	1 140	146×197×190		

续表

型 号	约定发热 电流/A	额定工作 电流/A	额定工作 电压/V	外形尺寸/mm 宽×高×深	结构特性	机电寿命/万次操 作频率/（×1/h）
CJ20-250	315	250	220	190×235×230 $F\geq 100$	辅助触点 16A， 其组合形式为 42、33、24 螺钉安装	300/60 600
		250	380			
CJ20-250/06		200	660			
CJ20-400	400	400	220	245×294×262 $F\geq 110$		
		400	380			
CJ20-400/06		250	660			
CJ20-630	630	630	220	245×294×272 $F\geq 120$		
		630	380			
CJ20-630/06	400	400	660	245×294×287 $F\geq 120$		
CJ20-630/11		400	1 140			

注：表中 F 为飞弧距离（前方）。

常用的德国西门子公司引进产品——3TB 系列交流接触器的技术数据如表 2-9 所示。

表 2-9 3TB 系列交流接触器的技术数据

型 号	约定 发热 电流/A	380V 时额 定工 作电 流/A	660V 时额 定工 作电 流/A	可控电动机 功率/kW		接触器 AC-3 使用类别下的 操作频率和电寿命/次		接触器 AC-4 使用 类别下电寿命数据		
								可控电动机 功率/kW		机电寿命 /次
				380V	660V	操作频率 750h ⁻¹	操作频率 1 200 h ⁻¹	380V	660V	操作频率 300h ⁻¹
3TB40	22	9	7.2	4	5.5	—	1.2×10 ⁶	1.4	2.4	2×10 ⁵
3TB41	22	12	9.5	5.5	7.5	—	1.2×10 ⁶	1.9	3.3	
3TB42	35	16	13.5	7.5	11	—	1.2×10 ⁶	3.5	6	
3TB43	35	22	13.5	11	11	—	1.2×10 ⁶	4	6.6	
3TB44	55	32	18	15	15	1.2×10 ⁶	—	7.5	11	

2. 直流接触器

直流接触器的型号及其代表意义如图 2-32 所示。

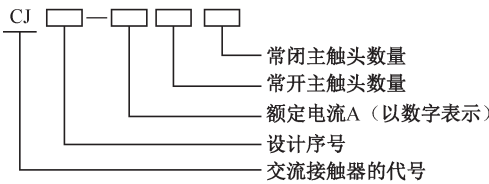


图 2-32 直流接触器的型号含义

常用的 CZ18 系列直流接触器的技术数据如表 2-10 所示。

表 2-10 CZ18 系列直流接触器的技术数据

型 号	约定发 热电流/A	额定电压/V	额定电流/A	外形尺寸/mm 宽×高×深	结构特征	机/电寿命/万次 操作频率/（次/h）
CZ18-40/10 CZ18-40/20	40	440	40	120×166×142 138×166×142	40A、80A 的辅 助触点为 6A，其 余规格为 10A，其 组合形式为 22 主触点组合形 式 10、20（160A 及以上仅有 10） B 形带绝缘底 板	500/50 1 200（其余） 600（160A）
CZ18-80/10 CZ18-80/20	80		80	138×185×160		
CZ18-160B/10 CZ18-160/10	160		160	142×323×304 142×273×229		
CZ18-315B/10 CZ18-315/10	315		315	148×366×349 148×325×269		300/30 600
CZ18-630B/10 CZ18-630/10	630		630	176×466×442 176×426×342		
CZ18-1000B/10 CZ18-1000/10	1 000		1 000	180×550×510 180×131×410		

2.6.4 接触器选用原则

- 在选用接触器时，应遵循以下原则：
- （1）接触器的额定电压大于等于主电路的额定电压。
 - （2）接触器线圈的额定电压必须与接入此线圈的控制电路的额定电压相等。
 - （3）接触器的额定电流等级按下列方法选择：按接触器设计时规定的使用类别使用时，接触器的额定电流应等于或稍大于负载额定电流；按照任务使用类别设计的接触器，用于重任务使用类别时，应降低容量使用；用于反复短时工作制的接触器，其额定电流应大于负载的等效发热电流。
 - （4）选择接触器的型号时，各系列接触器是按一定的使用类别设计的，应根据负载的情况选用。此外还应注意负载的工作制，用于长期工作时，应尽量选用银或银基合金触点的接触器，如 CJ20 系列等。
 - （5）接触器的触点数量和种类应满足主电路和控制电路的需要。

2.7 继电器

继电器是一种自动操纵远离设备的电器，广泛应用于自动控制系统、遥控、遥测系统、电力保护系统以及通信系统中，起着控制、检测、保护和调节的作用，是现代电器装置中最基本的器件之一。一般来说，继电器通过测量环节输入外部信号（如电压、电流等电量；或温度、压力、速度等非电量）并传递给中间机构，将它与设定值（整定值）进行比较，当达到整定值时（过量或欠量），中间机构就使执行机构产生输出动作，从而闭合或分断

电路，达到控制电路的目的。

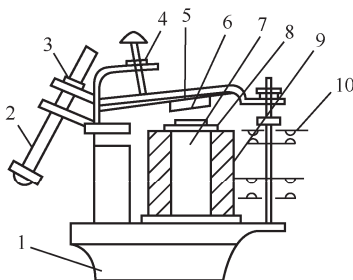
虽然继电器和接触器都是用来自动接通或断开电路，但是它们仍有许多不同之处。继电器可以对各种电量或非电量的变化做出反应，而接触器只有在一定的电压信号下动作；继电器可以用来切换小电流的控制电路，而接触器则用来控制大电流电路，因此，继电器的触点容量较小，并且无灭弧装置。

继电器用途广泛、种类繁多。按照用途可以分为控制继电器和保护继电器；按动作原理可以分为电磁式继电器、感应式继电器、电动式继电器、电子式继电器和热继电器；按输入信号的不同可以分为电压继电器、中间继电器、电流继电器、时间继电器、速度继电器等，其中电压继电器、电流继电器、中间继电器均为电磁式。

2.7.1 电磁式继电器

1. 电磁式继电器的结构与工作原理

电磁式继电器又称有触点继电器。它的结构和工作原理与电磁式接触器相似，也是由电磁机构、触点系统和释放弹簧等部分组成的，其结构如图 2-33 所示。由于继电器用于控制电路，所以电流比较小，不需要灭弧装置。它体积小，动作比较灵敏。



1—底座；2—反力弹簧；3，4—调节螺钉；5—非磁性垫片；
6—衔铁；7—铁芯；8—极靴；9—电磁线圈；10—触点系统

图 2-33 电磁式继电器结构图

1) 电磁机构

直流继电器的电磁机构为 U 形拍合式，铁芯和衔铁均由电工软铁制成。为了改变衔铁闭合后的气隙，在衔铁的内侧装有非磁性垫片，铁芯铸在铝基座上。

交流继电器的电磁机构有 U 形拍合式、E 形直动式、螺管式等多种形式。铁芯与衔铁均由硅钢片叠制而成，并且在铁芯柱端面上嵌有短路环。

2) 触点系统

继电器的触点为桥式结构，没有灭弧装置，有常开和常闭两种触点形式。

3) 调节装置

为改变继电器的动作参数，应具有改变继电器释放弹簧松紧程度的调节装置，以及改变衔铁打开后磁路气隙大小的调节装置。

电磁式继电器的图形符号、文字符号如图 2-34 所示。

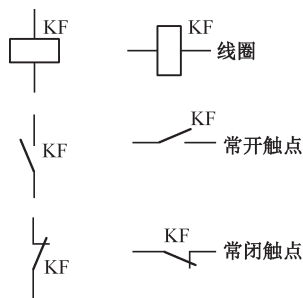


图 2-34 电磁式继电器的图形符号、文字符号图

2. 电流继电器

电流继电器是用来反映电流信号的元件。将电流继电器串联在控制电路中，线圈与负载相串联，用于检测电路中的电流的变化，通过与电流设定值的比较自动判断工作电流是否越限。这种继电器的线圈匝数少、线径粗、线圈上压降很小，不会影响负载电路中的电流。电流继电器又分为欠电流和过电流两种形式。

欠电流继电器的吸引电流为额定电流的 30%~65%，释放电流为额定电流的 10%~20%。因此，在电路正常工作时，其衔铁是吸合的。只有当电流降低到某一程度时，继电器释放，输出信号。

过电流继电器在电路正常工作时不动作，当电流超过某一整定值时才动作，整定范围通常为 1.1~4 倍额定电流。

在机床电气控制系统中，用得较多的电流继电器有 JL14、JL15、JT3、JT4、JT9 和 JT10 等型号。选用电流继电器时首先要注意线圈电压的等级和种类应与负载电路一致。另外，根据对负载的保护作用（是低电流还是过电流）来选用电流继电器的类型。最后，要根据控制电路的要求选触点的数量和类型（是常开还是常闭）。

3. 电压继电器

电压继电器是用来反映电压信号的元件。将电压继电器并联在控制电路中，线圈与负载并联，用于检测电路中的电压变化，通过与电压设定值相比较自动判断电压是否越限。从结构上电压继电器与电流继电器相似，不同的是电压继电器的线圈匝数多、线径细、阻抗大，以减少对负载电路的影响。电压继电器也分为欠（零）电压继电器和过电压继电器。

欠电压继电器在电压为额定值的 40%~70%时动作，零电压继电器是当电压降到额定值的 5%~25%时才动作，切断电路实现欠（零）压保护。

过电压继电器在电压为额定值的 1.05~1.2 倍时动作，实现电路的过压保护。

机床电气控制系统中，常用的电压继电器有 JT3、JT4 型。电压继电器的选用与电流继电器的方法类似，要注意线圈的电压种类和等级、保护作用、触点类型和数量。

4. 中间继电器

中间继电器实质上是电压继电器，但它的触点对数相对较多，触点容量较大，动作灵

活。一般来讲,中间继电器的触点容量与接触器的辅助触点差不多,其额定电流多数为 5A,对于电动机额定电流不超过 5A 的电气控制系统,也可以代替接触器来使用。

中间继电器的主要作用:当其他继电器的触点对数或触点容量不够时,可借助中间继电器来扩大它们的触点数和触点容量,起到中间转换的作用。

常用的中间继电器的型号有 JZ14、JZ15、JZ 和 JZ7。

2.7.2 时间继电器

时间继电器是指一种接收信号后,经过一定的延时才输出信号,实现触点延时接通或断开的控制电器。

时间继电器的延时方式有两种。通电延时:接收输入信号后延迟一定的时间,输出信号才发生变化;当输入信号消失后,输出瞬时复原。断电延时:接收输入信号时,瞬时产生相应的输出信号;当输入信号消失后,延迟一定的时间,输出才复原。

时间继电器的种类很多,常用的有电磁式、空气阻尼式、电动式、晶体管式等。重点介绍常用的电磁式时间继电器、空气阻尼式时间继电器和晶体管式时间继电器。

1. 直流电磁式时间继电器

直流电磁式时间继电器是在铁芯上增加一个阻尼铜套,带有阻尼铜套的铁芯结构如图 2-35 所示。

由电磁感应定律可知,在继电器通电、断电过程中铜套内将感生涡流,阻碍穿过铜套内的磁通变化,因而对原磁通起了阻尼作用。当继电器通电吸合时,由于衔铁处于释放位置,气隙大,磁阻大,磁通小,铜套阻尼作用也小,因此,铁芯吸合时的延时不显著,一般可忽略不计。当继电器断电时,磁通量的变化大,铜套的阻尼作用也大。因此,这种继电器仅用做断电延时,其延时动作触点有延时打开常开触点和延时闭合常闭触点两种。

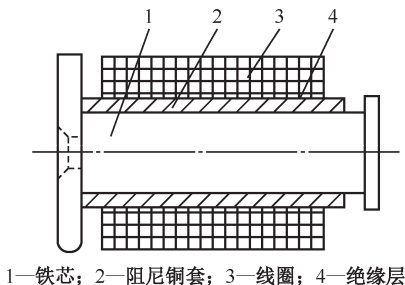


图 2-35 带有阻尼铜套的铁芯结构图

直流电磁式时间继电器的延时时间较短, JT 系列最长不超过 5s,而且准确度较低,一般只用于延时精度要求不高的场合。

直流电磁式时间继电器延时时间的长短可通过改变铁芯与衔铁间非磁性垫片的厚薄(粗调)或改变释放弹簧的松紧(细调)来调节。垫片厚则延时短,垫片薄则延时长。释放弹簧紧则延时短,释放弹簧松则延时长。

直流电磁式时间继电器 JT3 系列的技术数据如表 2-11 所示。

表 2-11 直流电磁式时间继电器 JT3 系列的技术数据

型 号	吸引线圈电压/V	触点组合及数量（常开、常闭）	延时/s	延时/s（短路线圈时）
JT3-□□/1	12, 24, 48	11, 02, 20, 03, 12, 21	0.3~0.9	0.2~1.5
JT3-□□/3			0.8~3.0	1~3.5
JT3-□□/5	110, 220, 440	04, 40, 22, 13, 31, 30	2.5~5.0	3~5.0

注：表中型号 JT3-□□ 之后的 1、3、5 表示延时类型（延时 1s，3s，5s）。

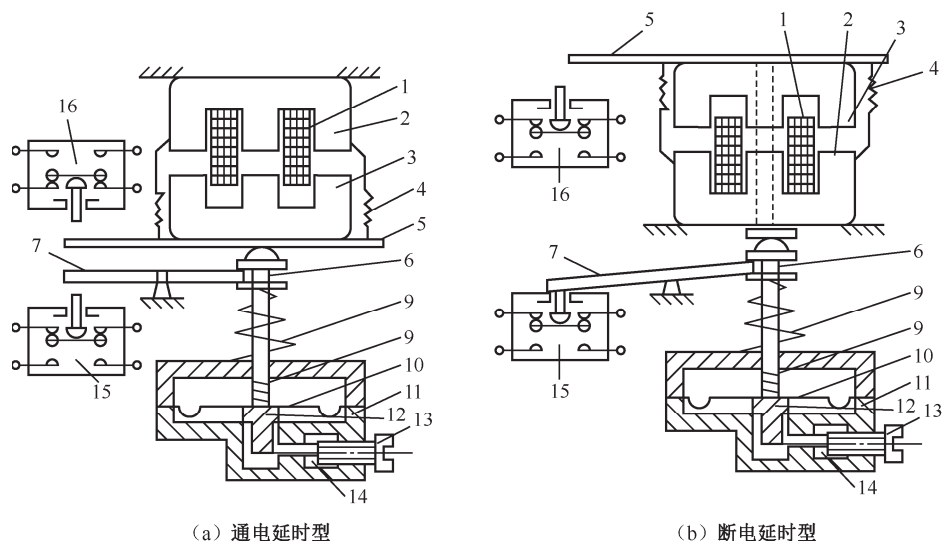
2. 空气阻尼式时间继电器

空气阻尼式时间继电器是通过空气阻尼作用实现延时的。它由电磁机构、延时机构和触点组成。

空气阻尼式时间继电器的电磁机构有交流、直流两种。

延时方式有通电延时型和断电延时型（改变电磁机构位置，将电磁铁翻转 180° 安装）。当动铁芯（衔铁）位于静铁芯和延时机构之间位置时为通电延时型；当静铁芯位于动铁芯和延时机构之间位置时为断电延时型。

以 JS7-A 系列时间继电器中的通电延时型为例，介绍空气阻尼时间继电器的工作原理，如图 2-36 所示。



1—线圈；2—铁芯；3—衔铁；4—反力弹簧；5—推板；6—活塞杆；7—杠杆；8—塔形弹簧；9—弱弹簧；10—橡皮膜；11—空气室壁；12—活塞；13—调节螺钉；14—进气孔；15、16—微动开关

图 2-36 JS7-A 系列空气阻尼时间继电器的工作原理图

由图 2-36 所示可知：当线圈 1 得电后衔铁（动铁芯）3 吸合，活塞杆 6 在塔形弹簧 8 作用下带动活塞 12 及橡皮膜 10 向上移动，橡皮膜下方空气室空气变得稀薄，形成负压，活塞杆只能缓慢移动，其移动速度由进气孔孔隙大小来决定。经一段延时后，活塞杆通过杠杆 7 压动微动开关 15，使其触点动作，起到通电延时作用。当线圈断电时，衔铁释放，橡皮膜下方空气室内的空气通过活塞肩部所形成的单向阀迅速地排出，使活塞杆、杠杆、微动开关等迅速复位。由线圈得电到触点动作的一段时间即为时间继电器的延时时间，其

大小可以通过调节螺钉 13 调节进气孔气隙大小来改变。断电延时型的结构、工作原理与通电延时型相似，只是电磁铁安装方向不同，即当衔铁吸合时推动活塞复位，排出空气。当衔铁释放时活塞杆在弹簧作用下使活塞向下移动，实现断电延时。在线圈通电和断电时，微动开关 16 在推板 5 的作用下都能瞬时动作，其触点即为时间继电器的瞬动触点。

JS7 系列空气阻尼式时间继电器技术数据如表 2-12 所示。

表 2-12 JS7 系列空气阻尼式时间继电器技术数据

型 号	吸引线圈电压/V	触点额定电压/V	触点额定电流/A	延时范围/s	延 时 触 点				瞬 动 触 点	
					通电延时		断电延时		常开	常闭
					常开	常闭	常开	常闭		
JS7-1A	24, 26, 110, 127, 220, 380, 420	380	5	均有 0.4~60 和 1.4~180 两种型号	1	1				
JS7-2A					1	1			1	1
JS7-3A							1	1		
JS7-4A							1	1	1	1

注：1. 表中型号 JS7 后面的 1~4A 是区别通电延时还是断电延时，以及带瞬动触点还是不带瞬动触点。

2. JS7-A 为改型产品，体积小。

空气阻尼式时间继电器的优点是结构简单、寿命长、价格低廉，还附有不延时的触点，所以应用较为广泛。缺点就是准确度低、延时误差大（10%~20%），因此，在要求延时精确度高的场合不宜采用。

3. 晶体管式时间继电器

晶体管式时间继电器具有延时范围广、体积小、精度高、调节方便及寿命长等优点，因此，得到广泛的应用。

晶体管时间继电器有很多种类型，下面以 JS20 系列中的单结晶体管通电延时电路为例进行介绍。单结晶体管通电延时电路如图 2-37 所示。全部电路由延时环节、鉴幅器、输出电路、电源和指示灯等五部分组成，如图 2-38 所示。电源的稳压部分由 R_1 和稳压管 VD_3 构成，供给延时和鉴幅，输出电路中的晶闸管 VT 和继电器 K 则由整流电源电路直接供电。电容 C_2 的充电回路有两条，一条是通过电阻 $R_{W1}+R_2$ ，另一条是通过由低阻值电阻 R_{W2} 、 R_4 、 R_5 组成的分压器经二极管 VD_2 向电容 C_2 提供的预充电路。

电路的工作原理：当接通电源后，经二极管 VD_1 整流、电容 C_1 滤波，以及稳压管 VD_3 稳压的直流电压通过 R_{W2} 、 R_4 、 VD_2 向电容 C_2 以极低的时间常数快速充电。与此同时，也通过 R_{W1} 和 R_2 向电容充电。电容 C_2 上电压在相当于 U_{R5} 预充电压的基础上按指数规律逐渐升高。当此电压大于单结晶体管的峰点电压 U_P 时，单结晶体管导通，输出电压脉冲触发晶闸管 VT。VT 导通后使继电器 K 吸合，除用其触点来接通或分断外电路外，还利用其另一常开触点将 C_2 短路，使之迅速放电，为下次使用做准备，此时氛指示灯 N 启辉。当切断电源时，K 释放，电路恢复原始状态，等待下次动作。

常用的晶体管时间继电器有 JSJ 系列、JSB 系列、JS14A 系列，还有带数字显示的时间继电器 JS14P、JS14S、JSS1 系列。国外有 ST 系列产品，是由集成电路构成的。JS20 系列的技术数据如表 2-13 所示。

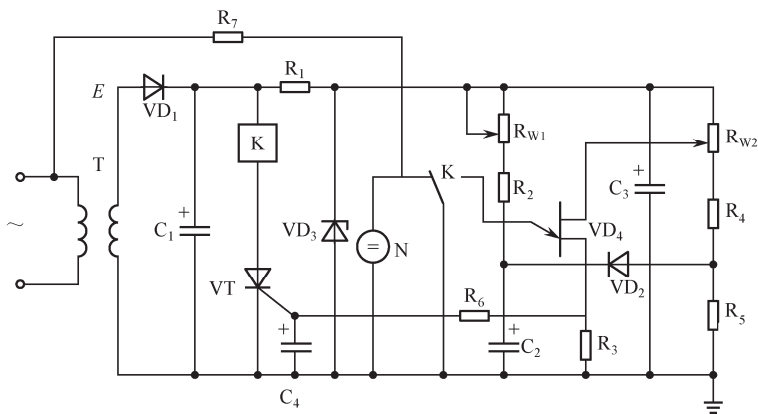


图 2-37 单晶体管通电延时电路

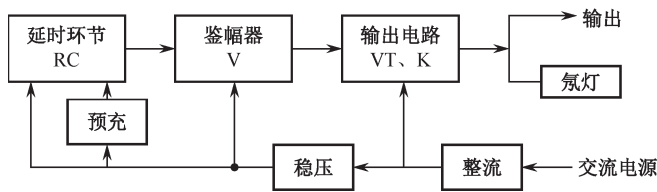


图 2-38 单晶体管时间继电器方框图

表 2-13 JS20 系列晶体管时间继电器技术数据

产 品 名 称	额定工作电压/V		延时等级/s
	交 流	直 流	
通电延时继电器	26, 110, 127, 220, 380	24, 48, 110	1, 5, 10, 30, 60, 120, 180, 240, 300, 600, 900
瞬动延时继电器	36, 110, 127, 220		1, 5, 10, 30, 60, 120, 180, 240, 300, 600
断电延时继电器	36, 110, 127, 220, 380		1, 5, 10, 30, 60, 120, 180

电路中表示时间继电器的图形符号如图 2-39 所示，文字符号为 KF。

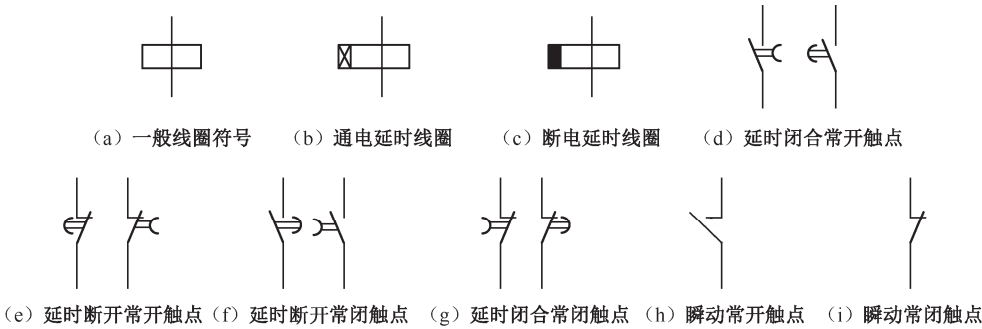


图 2-39 时间继电器的图形符号

2.7.3 热继电器

1. 热继电器的作用

在电力拖动控制系统中,当三相交流电动机出现长期带负荷欠电压下运行,长期过载运行及长期单相运行等不正常情况时,会导致电动机绕组严重过热乃至烧坏,为了充分发挥电动机的过载能力,保证电动机的正常启动和运转,而当电动机一旦出现长时间过载时又能自动切断电路,从而出现了能随过载程度而改变动作时间的电器,这就是热继电器。

显而易见,热继电器在电路中是做三相交流电动机的过载保护用的。但需注意,由于热继电器中发热元件有热惯性,在电路中不能做瞬时过载保护,更不能做短路保护,因此,它不同于过电流继电器和熔断器。

按相数来分,热继电器有单相、两相和三相共三种类型,每种类型按发热元件的额定电流分又有不同的规格和型号。三相热继电器常用做三相交流电动机的过载保护电器。按职能来分,三相热继电器又有不带断相保护和带断相保护两种类型。

2. 热继电器的工作原理

热继电器中产生热效应的发热元件,应串接于电动机电路中,这样,热继电器便能直接反映电动机的过载电流。热继电器的感测元件,一般采用双金属片。双金属片,就是将两种线膨胀系数不同的金属片以机械辗压的方法使之形成一体。膨胀系数较大的称为主动层,膨胀系数较小的称为被动层。双金属片受热后产生线膨胀,由于两层金属的线膨胀系数不同,且两层金属又紧密地结合在一起,因此,使得双金属片向被动层一侧弯曲,由双金属片弯曲产生的机械力便带动触点动作,这就是热继电器的基本工作原理。如图 2-40 所示。

双金属片的受热方式有 4 种,如图 2-41 所示,即直接受热式、间接受热式、复合受热式和电流互感器受热式。直接受热式是将双金属片当做发热元件,让电流直接通过它。间接受热式的发热元件由电阻丝或带制成,绕在双金属片上且与双金属片绝缘。复合受热式介于上述两种方式之间。电流互感器受热式的发热元件不直接串接于电动机电路,而是接在电流互感器的二次侧,这种方式多用于电动机电流比较大的场合,以减少通过发热元件的电流。

3. 三相式热继电器结构原理

三相式热继电器的结构原理如图 2-42 所示。发热元件 3 串接在电动机定子绕组中,电动机绕组电流即为流过热元件的电流。当电动机正常运行时,热元件产生的热量虽能使双金属片 2 弯曲,但还不足以使继电器动作;当电动机过载时,热元件产生的热量增大,使双金属片弯曲位移增大,经过一定时间后,双金属片弯曲到推动导板 4,并通过补偿双金属片 5 与推杆 14,将触点 9 和 6 分开,触点 9 和 6 为热继电器串于接触器线圈回路的常闭触点,断开后使接触器失电,接触器的常开触点断开电动机的电源以保护电动机。调节旋钮 11 是一个偏心轮,它与支撑架 12 构成一个杠杆,13 是一个压簧,转动偏心轮,改变它的半径即可改变补偿双金属片 5 与导板 4 的接触距离,因而达到调节整定动作电流的目的。

此外，靠调节复位螺钉 8 来改变常开触点 7 的位置使热继电器能工作在手动复位和自动复位两种工作状态。调试手动复位时，在故障排除后要按下复位按钮 10 才能使动触点 9 恢复与静触点 6 相接触的位置。

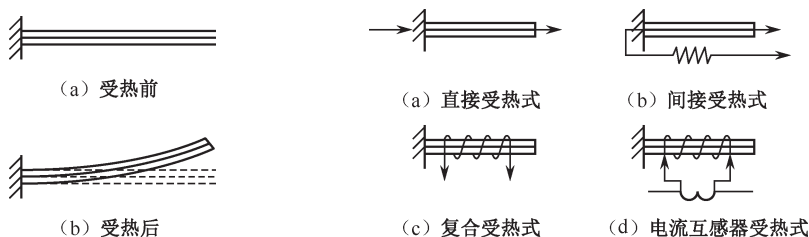


图 2-40 双金属片工作原理

图 2-41 双金属片的受热方式

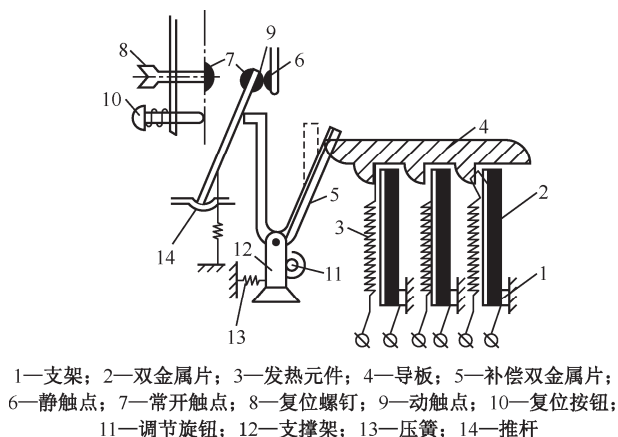


图 2-42 三相式热继电器的结构原理图

4. 热继电器的主要技术数据

在电气原理图中，热继电器的发热元件和触点的图形、文字符号如图 2-43 所示。

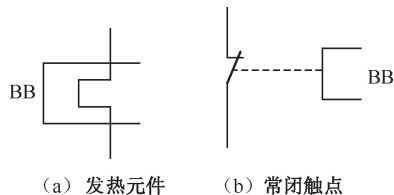


图 2-43 热继电器的图形、文字符号

热继电器在保护形式上分为二相保护和三相保护两类。二相保护式的热继电器内装有两个发热元件，分别串入三相电路中的两相，常用于三相电压和三相负载平衡的电路中，三相保护式热继电器内装有三个发热元件，分别串入三相电路中的每一相，其中任意一相过载，都会使热继电器动作，常用于三相电源严重不平衡或三相负载严重不平衡的场合。

三相交流电动机的过载保护均采用三相式热继电器，尤其是 JR16 和 JR20 系列三相式

热继电器在实际中得到广泛应用。这两种系列的热继电器按其职能分为带断相保护和不带断相保护两种类型。根据电动机绕组的接法，这两种类型的热继电器接入电动机定子电路的方式也不尽相同。在表 2-14 中给出了 JR16 系列热继电器的主要技术数据。

5. 热继电器的选用

热继电器选用是否得当，直接影响对电动机进行过载保护的可靠性。通常选用时应按电动机形式、工作环境、启动情况及负荷情况等几方面综合加以考虑。

表 2-14 JR16 系列热继电器技术数据

型 号	热继电器额定电流/A	发热元件规格			连接导线规格
		编号	额定电流/A	刻度电流调节范围/A	
JR16—20 3JR16—20/3D	20	1	0.35	0.25~0.3~0.35	4mm×4mm 单股塑料铜线
		2	0.5	0.32~0.4~0.5	
		3	0.72	0.45~0.6~0.72	
		4	1.1	0.68~0.9~1.1	
		5	1.6	1.0~1.3~1.6	
		6	2.4	1.5~2.0~2.4	
		7	3.5	2.2~2.8~3.5	
		8	5.0	3.2~4.0~5.0	
		9	7.2	4.5~6.0~7.2	
		10	11.0	6.8~9.0~11.0	
		11	16.0	10.0~13.0~16.0	
		12	22.0	14.0~18.0~22.0	
JR16—60 3JR16—60/3D	60	13	22.0	14.0~18.0~22.0	16mm×16mm 多股铜芯橡皮软线
		14	32.0	20.0~26.0~32.0	
		15	45.0	28.0~36.0~45.0	
		16	63.0	40.0~50.0~63.0	
JR16—150 3JR16—150/3D	150	17	63.0	40.0~50.0~63.0	35mm×35mm 多股铜芯橡皮软线
		18	85.0	53.0~70.0~85.0	
		19	120.0	75.0~100.0~120.0	
		20	160.0	100.0~130.0~160.0	

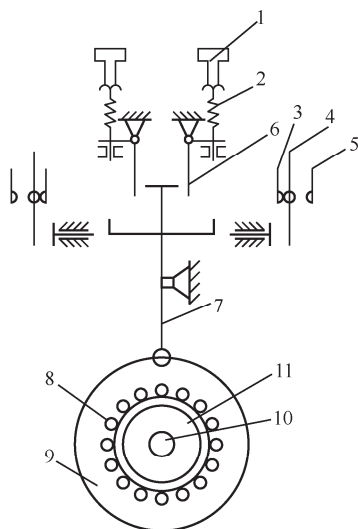
原则上热继电器的额定电流应按电动机的额定电流选择。对于过载能力较差的电动机，其配用的热继电器（主要是发热元件）的额定电流可适当小些。通常，选取热继电器的额定电流（实际上是选取发热元件的额定电流）为电动机额定电流的 60%~80%。

在不频繁启动场合，要保证热继电器在电动机的启动过程中不产生误动作。通常，当电动机启动电流为其额定电流 6 倍以下及启动时间不超过 6s 时，若很少连续启动，就可按电动机的额定电流选取热继电器。

当电动机为重复短时工作时，首先注意确定热继电器的允许操作频率。因为热继电器的操作频率是很有限的，如果用它保护操作频率较高的电动机，效果很不理想，有时甚至不能使用。

2.7.4 速度继电器

速度继电器主要用于笼型异步电动机的反接制动控制，又称反接制动继电器。它主要是依靠电磁感应原理实现触点动作的，因此，它的电磁系统与一般电磁式继电器的电磁系统是不同的，而与交流电动机的电磁系统相似，即由定子和转子组成其电磁系统。感应式速度继电器在结构上主要由定子、转子和触点三部分组成，如图 2-44 所示。



1—调节螺钉；2—反力弹簧；3—常闭触点；4—动触点；5—常开触点；
6—返回杠杆；7—杠杆；8—定子导体；9—定子；10—转轴；11—转子

图 2-44 速度继电器结构原理图

转子由永久磁铁制成，定子的结构与笼型电动机的定子相似，由硅钢片叠制而成，并装有笼型绕组。继电器轴 10 与电动机轴相连接，当电动机转动时，继电器的转子 11 随着一起转动，这样，永久磁铁的静止磁场就成了旋转磁场。当定子 9 内的笼型导体 8 因切割磁场而产生电势和电流时，导体与旋转磁场相互作用产生电磁转矩，于是定子跟着转子相应偏转。转子转速越高，定子导体内产生的电流越大，电磁转矩也就越大。当定子偏转到一定角度时，在杠杆 7 的作用下使常闭触点打开而常开触点闭合。在杠杆 7 推动触点的同时，也压缩相应的反力弹簧，其反作用力阻止了定子继续偏转。当电动机转速下降时，继电器的转子转速也随之下降，定子导体内产生的电流也相应地减少，因而使电磁转矩也相应减小。当继电器转子的转速下降到一定数值时，电磁转矩小于反力弹簧的反作用力矩，定子便返回到原来位置，使对应的触点恢复到原来状态。调节螺钉 1 的松紧，可以调节反力弹簧的反作用力，从而可以调节触点动作所需的转子转速。

常用的感应式速度继电器有 JY1 和 JF20 系列。JY1 系列能在 3 000r/min 以下可靠地工作；JFZ0-1 型适用于 300~1 000r/min，JFZ0-2 型适用于 1 000~3 600r/min；JFZ0 系列有两对常开、常闭触点。一般感应式速度继电器转轴在 120r/min 左右时触点即能正常工作。速度继电器的图形、文字符号如图 2-45 所示。

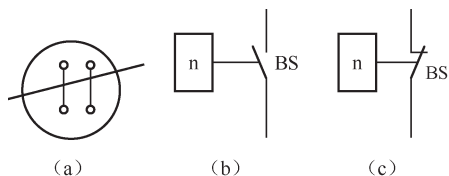


图 2-45 速度继电器的图形、文字符号

2.8 低压断路器

低压断路器又称自动空气开关（或自动开关）。它相当于闸刀开关、熔断器、热继电器和欠压继电器的组合体，是一种自动切断电路故障用的保护电器。低压断路器与接触器的不同点在于它允许切断短路电流，但不允许操作次数太多。

2.8.1 低压断路器的结构及工作原理

低压断路器的结构原理简图如图 2-46 所示。

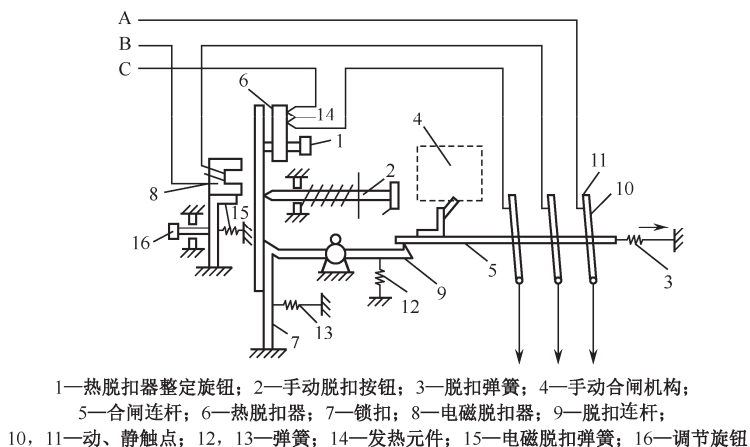


图 2-46 低压断路器的结构原理简图

手动合闸后，动、静触点闭合，脱扣连杆 9 被锁扣 7 的锁钩钩住，它又将合闸连杆 5 钩住，将触点保持在闭合状态。发热元件 14 与主电路串联，有电流流过时发出热量使热脱扣器 6 的下端向左弯曲，发生过载时热脱扣器 6 弯曲到将脱扣锁钩推离开脱扣连杆 9，从而松开合闸连 5 杆，动、静触点受弹簧 3 的作用而迅速分开。

电磁脱扣器 8 有一个匝数很少的线圈与主电路串联，发生短路时，它使铁芯脱扣器上部的吸力大于弹簧的反力，脱扣锁钩向左转动，最后也使触点断开。如果要求手动脱扣时，按下按钮 2 就可使触点断开。

脱扣器都可以对脱扣电流进行整定，这时只要改变热脱扣器所需要的弯曲程度和电磁脱扣器铁芯机构的气隙大小就可以了。热脱扣器和电磁脱扣器互相配合，热脱扣器担负主电路的过载保护，电磁脱扣器担负短路故障保护。当低压断路器由于过载而断开后，应等

待 2~3min 才能重新合闸，以使热脱扣器回复原位。

低压断路器的主要触点由耐压电弧合金（如银钨合金）制成，采用灭弧栅片加陶瓷罩来熄灭电弧。

低压断路器的图形、文字符号如图 2-47 所示。

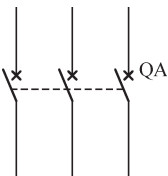


图 2-47 低压断路器的图形、文字符号

2.8.2 低压断路器的常用类别

目前，中国常用的低压断路器主要有以下几个类别。

1. 万能式低压断路器

万能式低压断路器又称敞开式低压断路器，具有绝缘衬底的框架结构底座，所有的构件组装在一起，用于配电网络的保护。其主要型号有 DW10 和 DW15 两个系列。

2. 装置式低压断路器

装置式低压断路器又称塑料外壳式低压断路器，是用模压绝缘材料制成封闭型外壳将所有构件组装在一起，用做配电网络的保护和电动机、照明电路及电热器等的控制开关。其主要型号有 DZ5、DZ10、DZ20 等系列。

3. 快速断路器

快速断路器具有快速电磁铁和强有力的灭弧装置，最快动作时间可在 0.02s 以内，用于半导体整流元件和整流装置的保护。其主要型号有 DS 系列。

4. 限流断路器

限流断路器利用短路电流产生巨大的吸力，使触点迅速断开，能在交流短路电流尚未达到峰值之前就把故障电路切断。用于短路电流相当大（高达 70kA）的电路中。主要型号有 DWX15 和 DZX10 两种系列。

另外，中国引进的国外断路器产品有德国的 ME 系列、SIEMENS 的 3WE 系列、日本的 AE、AH、TG 系列、法国的 C45、S060 系列、美国的 H 系列等。这些引进产品都有较高的技术经济指标，通过这些国外先进技术的引进，使中国断路器的技术水平达到了一个新的高度，为中国今后开发和完善新一代智能型的断路器打下了良好的基础。

2.8.3 低压断路器的主要参数和技术数据

低压断路器的主要参数有额定电压、额定电流、极数、脱扣器类型及其额定电流、整

低压断路器的主要技术参数有如下几项。

- 低压断路器的型号含义如图 2-48 所示。

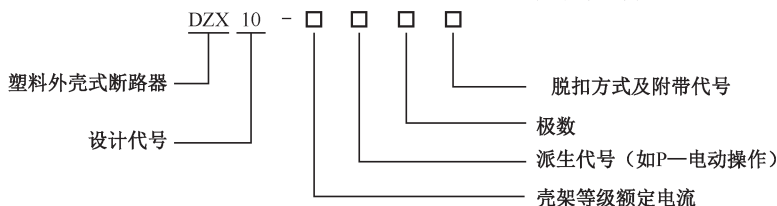


图 2-48 低压断路器的型号含义

下面给出 DZ15 系列和 DZX10 系列低压断路器的主要技术数据, 如表 2-15 和表 2-16 所示。

表 2-15 DZ15 系列塑料外壳式断路器的技术参数

型 号	壳架额定 电流/A	额定电 压/V	级 数	脱扣器额定 电流/A	额定短路通断 能力/kA	电器、机械 寿命/次
DZ15-40/1901	40	220	1	6, 10, 16, 20, 25, 32, 40	3 ($\cos\phi=0.9$)	15 000
DZ15-40/2901		380	2			
DZ15-40/3901			3			
DZ15-40/3902			3			
DZ15-40/4901			4			
DZ15-63/1901	63	220	1	10, 16, 20, 25,	5 ($\cos\phi=0.7$)	10 000
DZ15-63/2901		380	2	32, 40, 50, 63		
DZ15-63/3901			3			
DZ15-63/3902			3			
DZ15-63/4901			4			

表 2-16 DZX10 系列断路器的技术参数

型 号	级 数	脱扣器额定电流/A	附 件	
			欠电压（或分励）脱扣器	辅助触点
DZX10 -100/22	2	63, 80, 100	欠电压：AC 220, 380 分励：AC 220, 380 DC 24, 48, 110, 220	一开一闭 二开二闭
DZX10 -100/23	2			
DZX10 -100/32	3			
DZX10 -100/33	3			
DZX10 -200/22	2	100, 120, 140, 170, 200	欠电压：AC 220, 380 分励：AC 220, 380 DC 24, 48, 110, 220	二开二闭 四开四闭
DZX10 -200/23	2			
DZX10 -200/32	3			
DZX10 -200/33	3			
DZX10 -630/22	2	200, 250, 300, 350, 400, 500, 630		
DZX10 -630/23	2			
DZX10 -630/32	3			
DZX10 -630/33	3			

2.8.4 低压断路器的控制特性

1. 通断能力

通断能力是指在一定的实验条件下，自动开关能够接通和分断预期电流。常以最大的通断电流表示其极限通断能力。

2. 保护特性

(1) 过流保护特性：是指断路器的动作时间与动作电流的关系曲线。

(2) 欠电压保护特性：是指当主电路电压低于规定值时，自动开关应瞬时或短延时动作将电路分断。

(3) 漏电保护特性：是指当电路漏电电流超过规定值时，自动开关在规定时间内动作分断电路。

3. 分断时间

分断时间是指从开关电器的断开开始到燃弧结束的时间间隔。

2.8.5 低压断路器的选择及使用注意事项

1. 低压断路器的选择

低压断路器的额定电流和额定电压应大于或等于线路、设备的正常工作电压和工作电流。

(1) 低压断路器的极限通断能力应大于或等于电路最大短路电流。

(2) 欠电压脱扣器的额定电压等于线路的额定电压。

(3) 过电流脱扣器的额定电流大于或等于线路的最大负载电流。

使用低压断路器来实现短路保护比熔断器优越,因为当三相电路短路时,很可能只有一相的熔断器熔断,造成单相运行。对于低压断路器来说,只要造成短路都会使开关跳闸,将三相同时切断。低压断路器还有其他自动保护作用,但它结构复杂,操作频率低,价格较高,因此,适用于要求较高的场合,如电源总配电盘等。

2. 低压断路器使用时的注意事项

低压断路器投入使用时应先进行整定,按照要求整定热脱扣器和电磁脱扣器的动作电流,以后就不应随意旋动有关的螺钉和弹簧。

在安装低压断路器时应注意把来自电源的母线接到开关灭弧罩一侧的端子上,来自电器设备的母线接到另外一侧的端子上。

在正常情况下,每6个月应对开关进行一次检修、清除灰尘等。

发生开断短路事故的动作后,应立即对触点进行清理,检查有无熔坏,清除金属熔粒、粉尘等,特别要把散落在绝缘上的金属粉尘清除掉。

2.9 主要电气元件故障诊断与维修

各种低压电气元件,在正常状态下使用或运行,都存在自然磨损现象,有一定的机械寿命和电气寿命。操作不当、过载运行、日常失修等,都会加速电气元件的老化,缩短其使用寿命。

2.9.1 电磁式电器共性故障诊断与维护

一般电磁式电器,通常由触点系统、电磁系统和灭弧装置等组成,而触点系统和电磁系统是电磁式低压电器的共性元件,这部分元件经过长期使用或使用不当,可能会发生故障而影响电器的正常工作。

1. 触点的故障及维修

触点是有触点低压元件的主要部件,它担负着接通和分断电路的作用,也是电器中比较容易损坏的部件,触点常见的故障有触点过热、磨损和熔焊等。

1) 触点过热

造成触点过热的主要原因:触点接触压力不足;触点表面接触不良;触点表面被电弧灼伤烧毛等,这些原因都会使触点接触电阻增大,使触点过热。

解决方法:对于由于弹簧失去弹性而引起的触点压力不足,可通过重新调整弹簧压力或更新弹簧解决;对于触点表面的油垢、积垢或烧毛,可以用小刀刮去或用锉刀锉去。

2) 触点磨损

触点磨损有两种:一种是电器磨损,由触点间电弧或电火花的高温使触点金属气化和蒸发造成的;另一种是机械磨损,由触点闭合时的撞击、触点表面的相对滑动摩擦等造成。

解决办法：当触点磨损至原有厚度的 $2/3$ 或 $3/4$ 时应更换新触点。另外，超行程不符合规定时，也应更换新触点。若发现磨损过快，应查明原因。

3) 触点熔焊

动、静触点接触面在熔化后被焊在一起而断不开的现象，称为触点的熔焊。当触点闭合时，由于撞击和产生振动，在动、静触点间的小间隙中产生短电弧，电弧的高温使触点表面被灼烧甚至被烧熔，熔化的金属液便将动、静触点焊在一起。

发生触点熔焊的常见原因：触点选用不当，容量太小；负载电流太大；操作频率过高；触点弹簧损坏，使压力减小。

解决办法：更换新触点。

2. 电磁系统的故障及维修

电磁系统也是低压电气元件的主要部件，它主要用来产生电磁力的作用。它在电路中电压过高或电流过大时容易被烧坏。常见的故障包括衔铁、线圈的故障等。

1) 衔铁振动和噪声

产生振动和噪声的主要原因：短路环损坏或脱落；衔铁歪斜或铁芯端面有锈蚀、尘垢使动、静铁芯接触不良；反作用弹簧压力太大；活动部分机械卡阻而使衔铁不能完全吸合等。

2) 线圈过热或烧毁

线圈中流过的电流过大时，就会使线圈过热甚至烧毁。发生线圈电流过大的原因有以下几个方面：线圈匝间短路；衔铁与铁芯闭合后有间隙；操作频繁，超过了允许操作频率；外加电压高于线圈额定电压等。

3) 衔铁不释放

当线圈断电后，衔铁不释放，应立即断开电源开关，以免发生意外事故。

衔铁不释放的主要原因：触点熔焊在一起，铁芯剩磁太大；反作用弹簧力不足；活动部分机械卡阻；铁芯端面有油污等。上述原因都可能导致线圈断电后衔铁不能释放，触点不能复位等。

4) 衔铁不能吸合

当交流线圈接通电源后，衔铁不能吸合时，应立即断开电源，以免线圈被烧毁。

衔铁不能吸合的原因：线圈引出线脱落、断开或烧毁；电源电压过低；活动部分卡阻。

2.9.2 常见电器故障诊断与维修

1. 刀开关的常见故障与维修

刀开关的常见故障及维修如表 2-17 所示。

表 2-17 刀开关常见故障及维修

序 号	故 障 现 象	故 障 原 因	维 修 方 法
1	开关触点过热或熔焊	刀片、刀座烧毛 速断弹簧压力不足 刀片、刀座表面氧化 刀片动、静触点插入深度不够 带负荷启动大容量设备，大电流冲击 有短路电流	修磨动、静触点 调整放松螺母 清除表面氧化层 调整操作机构 避免违章操作 排除短路点
2	开关与导线接触部位过热	连接螺母松动，弹簧垫圈失效 螺栓过小 过渡接线因金属不同而发生电化学反应	紧固螺母，更换垫圈 更换螺栓 采用铜铝过渡线
3	开关合闸后缺相	静触点弹性消失或开口过大，闸刀与夹座未接触 熔丝熔断或虚接触 触点表面氧化或有尘垢 进出线氧化，造成接线柱接触不良	修整静触点 更换熔丝，拧紧连接熔丝的螺母 清洁触点表面氧化物 清除氧化层
4	铁壳开关操作手柄带电	电源进出线绝缘不良 碰壳或开关接地线接触不良	更换导线 紧固接地线

2. 按钮的常见故障与维修

按钮的常见故障及维修如表 2-18 所示。

表 2-18 按钮的常见故障及维修

序 号	故 障 现 象	故 障 原 因	维 修 方 法
1	按启动按钮时有麻电感觉	按钮帽的缝隙钻进了金属粉末或铁屑等 按钮防护金属外壳接触了带电导线	清扫按钮，给按钮罩一层塑料薄膜 检查按钮内部接线，清除碰壳
2	按停止按钮时不能断开电路	按钮非正常短路所致 铁屑、金属末或油污短接了动断触点 按钮盒胶木烧焦碳化	清扫触点 更换按钮
3	按停止按钮后，再按启动按钮，被控电路电器不动作	停止按钮的复位弹簧损坏 启动按钮动合触点氧化，接触不良	调换复位弹簧 清扫、打磨动、静触点

3. 接触器的故障诊断与维修

接触器使用寿命的长短，不仅取决于产品本身的技术性能，而且与使用维护是否符合要求有很大关系。运行部门应制定有关制度，对运行中的接触器进行定期保养，以延长其使用寿命和确保其安全。

接触器检查与维修项目如下。

(1) 外观检查：看接触器外观是否完整无损，各连接部分是否松动。

(2) 灭弧罩检查：取下灭弧罩，仔细察看有无破裂或严重烧损；灭弧罩内的栅片有无变形或松脱，栅孔或缝隙是否堵塞；清除灭弧室里的金属飞溅物和颗粒。

- (3) 触点检查：清除触点表面上烧毛的颗粒，检查触点磨损的程度，严重时应更换。
- (4) 铁芯的检查：对铁芯端面要定期擦拭，清除油垢，保持清洁；检查铁芯有无变形。
- (5) 线圈的检查：观察线圈外表是否因过热而变色；接线是否松脱，线圈骨架是否破碎。
- (6) 活动部件的检查：检查可动部件是否卡阻；坚固体是否松脱；缓冲件是否完整。
- 交流接触器的触点、电磁系统的故障及维修与前述的情况基本相同，除此之外，常见故障及维修如表 2-19 所示。

表 2-19 交流接触器的常见故障及维修

序 号	故 障 现 象	故 障 原 因	维 修 方 法
1	触点熔焊	操作频率过高或选用不当 负载侧短路 触点弹簧压力过小 触点表面有金属颗粒突起或异物 吸合过程中触点停滞在似接触非接触的位置上	降低操作频率或更换合适型号 排除短路故障、更换触点 调整触点弹簧压力 清除触点表面 清除停滞因素
2	触点断相	触点烧缺 压力弹簧失效 连接螺钉松脱	更换触点 更换压力弹簧片 拧紧松脱螺钉
3	相间短路	可逆转换接触器连锁失灵或误动作致使两台接触器投入运行而造成相间短路 接触器正/反转转换时间短而燃烧时间长 转换过程中发生弧光短路 尘埃堆积、潮湿、过热、使绝缘损坏或破碎	检查连锁保护 在控制电器中加中间环节或更换动作时间长的接触器 缩短维护周期 更换损坏部件
4	线圈损坏	空气潮湿、含有腐蚀性气体 机械方面碰坏 严重振动	换用特种绝缘漆线圈 对碰坏处进行修复 消除或减少振动
5	启动动作缓慢	极面间间隙过大 电器的底板不平 机械可动部分稍有卡阻	减小间隙 将电器装直 检查机械可动部分
6	短路环断裂	由于电压过高，线圈用错，弹簧断裂，以致磁铁作用时撞击过猛	检查并调换零件

4. 热继电器的故障诊断及维修

热继电器的检查与维修内容如下：

- (1) 检查负荷电流是否和热元件的额定值相配合。
- (2) 检查热继电器与外部连接点有无过热现象。
- (3) 检查与热继电器连接的导线截面是否满足要求，有无因发热而影响热元件正常工作的现象。
- (4) 检查继电器的运行环境温度有无变化，温度有无超过允许范围（-30℃~40℃）。
- (5) 检查热继电器动作情况是否正确。

(6) 检查热继电器周围环境温度与被保护设备周围环境温度差值, 若超过 $+25^{\circ}\text{C}$ 时, 应调换大一等级的热元件。

热继电器的常见故障有热元件烧坏、误动作和不动作, 常见故障及维修如表 2-20 所示。

表 2-20 热继电器常见故障及维修

序 号	故 障 现 象	故 障 原 因	维 修 方 法
1	误动作	整定值偏小 电动机启动时间过长 反复短时工作, 操作次数过高 强烈的冲击振动 连接的导线过细	合理调定整定值 从线路上采取措施, 启动过程中加热继电器短接 调换合理的热继电器 调换导线
2	不动作	整定值偏大 触点接触不良 热元件烧断或脱落 运动部分卡阻 导板脱出 连接导线太粗	调整整定值 清理触点表面 更换热元件或补焊 排除卡阻, 但不要随意调整 检查导板 调换导线
3	热元件烧坏	负载侧短路, 电流过大 反复短时工作, 操作次数过高 机械故障	排除短路故障及更换热元件 调换热继电器 排除机械故障及更换热元件

5. 熔断器的故障诊断与维修

熔断器一般熔体在小截面处熔断, 并且熔断部分较短, 这是由过负载引起的; 而大截面部分被熔化无遗、熔丝爆熔或熔断部分很长, 一般由短路引起。

熔断器的常见故障及维修如表 2-21 所示。

表 2-21 熔断器的常见故障及维修

序 号	故 障 现 象	故 障 原 因	维 修 方 法
1	误熔断	动、静触点, 触片与插座, 熔体与底座接触不良, 使接触部位过热 熔体氧化腐蚀或安装时有机械损伤, 使熔体截面变小, 电阻增加	整修动、静接触部位 更换熔体 加强通风
2	管体烧损、爆裂	熔管里的填料洒落或瓷插座的隔热物掉落	安装时要认真细心, 更换熔管
3	熔体未熔但电路不通	熔体两端接触不良	加固接触面

2.10 本章小结

本章主要介绍了机床中常用的低压电器, 介绍了大量的控制电器、保护电器, 以及执行电器。对每种电器的原理、结构、应用特点及要求做了详细的说明。在学习的过程中, 应着重掌握各电器的原理及特点, 知道各电器的使用场合及电器文字符号, 这对以后的学习有很大的帮助。

2.11 思考与练习

1. 组合开关、行程开关、按钮的用途分别是什么？
2. 单相交流电磁铁的铁芯上为什么要有短路环？三相交流电磁铁的铁芯上是否也要装短路环？为什么？
3. 交流电磁线圈误接入直流电源，直流电磁线圈误接入交流电源，会发生什么问题？
4. 交流接触器的主要用途是什么？试画出它们的图形符号和文字符号，交流接触器在使用过程中应注意哪些问题？
5. 简述热继电器的主要结构和工作原理。为什么热继电器不能对电路进行短路保护？
6. 是否可用过流继电器来做电动机的过载保护？为什么？
7. 常用时间继电器有哪几种？试画出各种时间继电器的线圈及触点的图形符号，并标注其含义。
8. 中间继电器的主要用途是什么？
9. 接触器的常见故障有哪些？如何检修？
10. 什么是欠压、失压保护？利用什么电器可以实现欠压、失压保护？

Chapter 3

第3章 常用电动机应用基础

知识点

- 直流电动机的原理及应用
- 异步电动机的原理
- 异步电动机的机械特性
- 步进电动机的原理
- 伺服电动机

本章导读

电动机可以分为交流电动机、直流电动机等。交流电动机又分为异步电动机和同步电动机，异步电动机又分为鼠笼式和绕线式两种形式。本章主要讲述直流电动机、异步交流电动机的基本结构、工作原理、机械特性、控制方法和步进电动机等控制电动机的原理及其应用，以及伺服电动机的结构原理等。

电动机的广泛应用使电气拖动领域的控制水平大大提高，随着生产的发展和科学技术的提高，电动机在国民经济建设中起着越来越重要的作用。

电动机是一种基于电磁感应定律实现能量转换的装置。它们用于机械能和电能之间的转换，电能形式的变换和信号的传递、变换。电动机的用途广泛，种类很多，按照电动机应用的电流种类，可以分为直流电动机和交流电动机。按照能量转换方式的种类，可以分为电动机、发电机、控制电机等。按照运动方式的不同，可以分为旋转电动机、静止电动机和直线电动机。

直流电动机、异步电动机等在电力拖动系统中主要作为机械负载的动力源来使用。此外，还有控制电机被用做转换和传递控制信号的控制元件。人们对控制电机的要求是它传递、转换信号的精确度、反应的灵敏度和运行的可靠性等。控制电机包括伺服电动机、测速发电机、旋转变压器和步进电动机等。其中步进电动机和伺服电动机在机床运行中不可或缺。

3.1 直流电动机应用基础

在工业企业发展当中，一般将机械能转换为直流电能的电动机称为直流发电机；将直流电能转换为机械能的电动机称为直流电动机。直流电动机具有很强的调速范围、较强的过载能力和较大的启动转矩等特点，广泛应用于对启动和调速要求较高的生产机械，如电力机车、内燃机车、工矿机车、城市电车、电梯、轧钢机等拖动电动机。

下面介绍直流电动机的工作原理和基本结构；分析直流电动机的磁路系统、电路系统和电磁过程；导出感应电势和电磁转矩的一般计算方法；得出直流电动机在不同运行状态的各种平衡方程式和运行特性。

3.1.1 直流电动机的基本结构及工作原理

直流电动机是直流发电机和直流电动机的总称。直流电动机具有可逆性，既可做直流发电机使用，也可做直流电动机使用。做直流发电机使用时，将机械能转换成直流电能输出；做直流电动机使用时，则将直流电能转换成机械能输出。

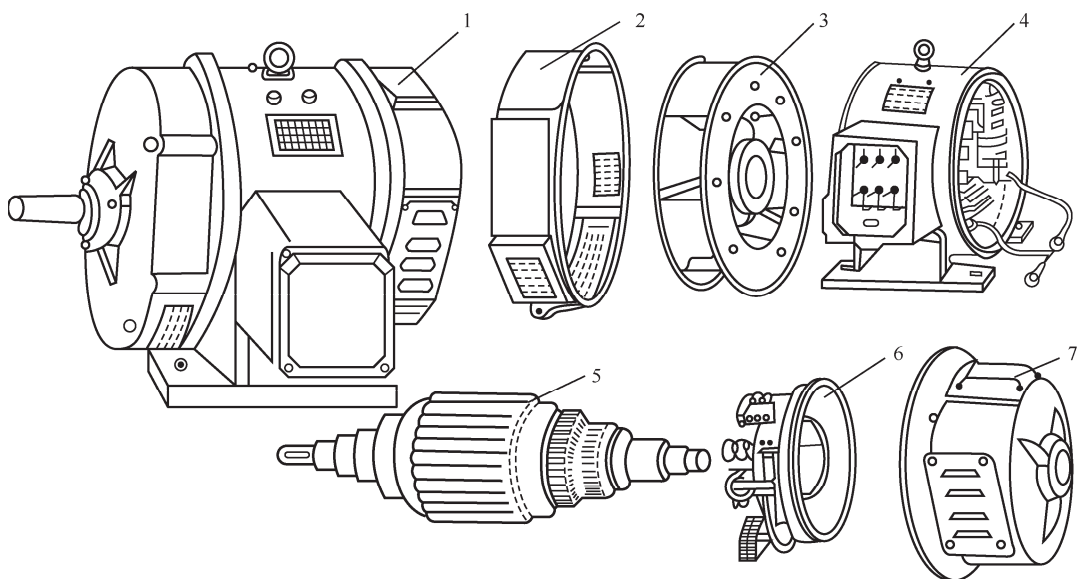
1. 直流电动机的基本结构

直流电动机由静止的定子和旋转的转子两大部分组成，在定子和转子之间有一定大小的间隙（称气隙），直流电动机基本结构图如图 3-1 所示。

1) 定子

直流电动机定子的作用是产生磁场和作为电动机的机械支撑。主要由机座、主磁极、换向极和电刷装置等组成。

（1）机座：机座起到机械支撑和导磁磁路两个作用。它既用来作为安装电动机所有零件的外壳，又是联系各磁极的导磁铁轭。机座的材料通常为铸钢件，也有采用钢板焊接而成的。



1—直流电动机总成；2—后端盖；3—通风机；4—定子总成；5—转子（电枢）总成；6—电刷装置；7—前端盖

图 3-1 直流电动机结构图

(2) 主磁极：主磁极是一个电磁铁，如图 3-2 所示，由主极铁芯和主极线圈两部分组成。主极铁芯一般用 1~1.5mm 厚的薄钢板冲片叠压后再用铆钉铆紧成一个整体。小型电动机的主极线圈用绝缘铜线（或铝线）绕制而成，大中型电动机主极线圈用扁铜线绕制，并进行绝缘处理，然后套在主极铁芯外面。整个主磁极用螺钉固定在机座内壁。

(3) 换向极：换向极又称附加极，它装在两个主极之间，用来改善直流电动机的换向。换向极由铁芯和线圈构成。换向极铁芯大多用整块钢加工而成。但在整流电源供电的大功率电动机中，为了更好地改善电动机换向，换向极铁芯也采用叠片结构。换向极线圈与主极线圈一样也是用圆铜线或扁铜线绕制而成，经绝缘处理后套在换向极铁芯上，最后用螺钉将换向极固定在机座内壁。

(4) 电刷装置：电刷装置的作用是通过电刷与换向器表面的滑动接触，把转动的电枢绕组与外电路相连起来。电刷装置一般由电刷、刷握、刷杆、刷杆座、绝缘杆等部分组成。电刷一般用石墨粉压制而成。电刷放在刷握内，用弹簧压紧在换向器上，刷握固定在刷杆上，刷杆装在刷杆座上，成为一个整体部件。

2) 转子

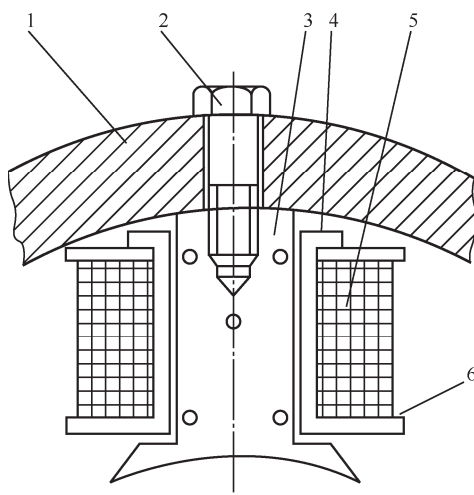
转子又称电枢，主要由转轴、电枢铁芯、电枢绕组和换向器等组成。

(1) 转轴：转轴的作用是用来传递转矩，一般用合金钢锻压而成。

(2) 电枢铁芯：电枢铁芯是电动机磁路的一部分，也是承受电磁力作用的部件。当电枢在磁场中旋转时，在电枢铁芯中将产生涡流和磁滞损耗，为了减小这些损耗的影响，电枢铁芯通常用 0.5mm 厚的电工钢片叠压而成。电枢铁芯固定在转子支架或转轴上。

(3) 电枢绕组：电枢绕组的作用是产生感应电势和通过电流产生电磁转矩，实现机电

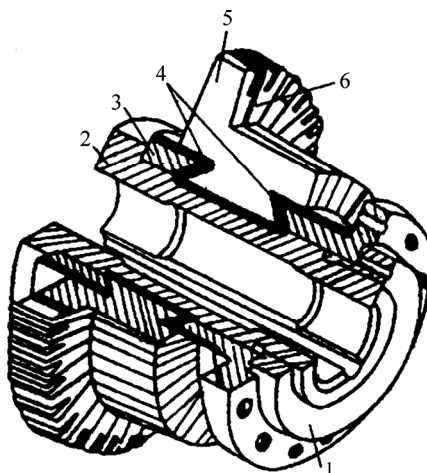
能量转换。电枢绕组通常都用圆形或矩形截面的导线绕制而成，再按一定规律嵌放在电枢槽内，上下层之间及电枢绕组与铁芯之间都要有很好的绝缘层。为了防止离心力将绕组甩出槽外，槽口处需用槽楔将绕组压紧，伸出槽外的绕组接部分用无纬玻璃丝带绑紧。



1—机座；2—主极螺钉；3—主极铁芯；4—框架；5—主极绕组；6—绝缘垫衬

图 3-2 主磁极

(4) 换向器：换向器的作用是机械整流，即在直流电动机中，它将外加的直流电流逆变成绕组内的交流电流；在直流发电机中，它将绕组内的交流电势整流成电刷两端的直流电势。换向器的结构如图 3-3 所示。换向器由许多换向片组成，换向片间用云母片绝缘。换向片凸起的一端称升高片，用于与电枢绕组端头相连，换向片下部做成燕尾形，利用换向器套筒、V 形压圈及螺旋压圈将换向片、云母片紧固成一个整体。在换向片与换向器套筒、压圈之间用 V 形云母环绝缘，最后将换向器压装在转轴上。



1—螺旋压圈；2—换向器套筒；3—V 形压圈；4—V 形云母环；5—换向铜片；6—云母片

图 3-3 换向器的结构

2. 直流电动机的结构模型

图 3-4 所示为一台直流电动机的工作原理示意图。N、S 为定子上固定不动的两个主磁极，主磁极可以采用永久磁铁，也可以采用电磁铁，在电磁铁的励磁线圈上通过方向不变的直流电流，便形成一定极性的磁极。

在两个主磁极 N、S 之间装有一个可以转动的、由铁磁材料制成的圆柱体，圆柱体表面嵌有一线圈（称为电枢绕组），线圈首末两端分别连接到两个弧形钢片（称为换向片）上。换向片之间用绝缘材料构成一整体，称为换向器，它固定在转轴上（但与转轴绝缘），随转轴一起转动，整个转动部分称为电枢。为了接通电枢内电路和外电路，在定子上装有两个固定不动的电刷 A 和 B，并压在换向器上与其滑动接触。

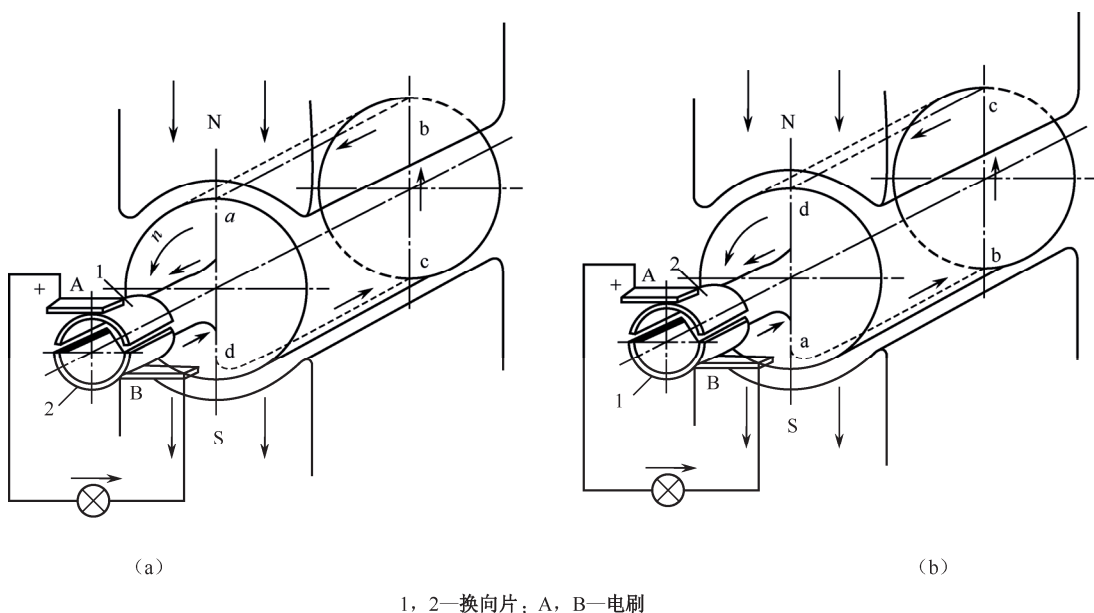


图 3-4 直流发电机工作原理

3. 直流发电机的工作原理

1) 感应电势的产生

当直流发电机的电枢被原动机拖动，并以恒速 v 逆时针方向旋转时，如图 3-4 (a) 所示，线圈两个有效边 ab 和 cd 将切割磁力线，而感应产生电势 e 。其方向用右手定则确定，导体 ab 位于 N 极下，导体 cd 位于 S 极下，产生电势方向分别为 $b \rightarrow a$ ， $d \rightarrow c$ 。若接通外电路，电流从换向片 1 \rightarrow A \rightarrow 负载 \rightarrow B \rightarrow 换向片 2。电流从电刷 A 流出，具有正极性，用“+”表示；从电刷 B 流入，具有负极性，用“-”表示。

当电枢转到 90° 时，线圈有效边 ab 和 cd 转到 N、S 极之间的几何中心线上，此处磁密为零，故这一瞬时感应电势为零。

当电枢转到 180° 时，导体 ab 和 cd 及换向片 1、2 位置互换，如图 3-4 (b) 所示。导

体 ab 位于 S 极下, 导体 cd 位于 N 极下, 线圈两个有效边产生的感应电势方向分别为 $a \rightarrow b$, $c \rightarrow d$, 电势方向恰与开始瞬时相反。外电路中流过的电流从换向片 $2 \rightarrow A \rightarrow$ 负载 $\rightarrow B \rightarrow$ 换向片 1 。由此可见, 电刷 A (B) 始终与转到 N (S) 极下的有效边所连接的换向片接触, 故电刷极性始终不变, A 为 “+”, B 为 “-”。

由以上分析可知, 线圈内部为一交变电势, 但电刷引出的电势方向始终不变, 为一单方向的直流电势。

2) 电势的波形

根据电磁感应定律, 每根导体产生的感应电势 e 为

$$e = B_x L v \quad (3-1)$$

式中 B_x ——导体所在位置的磁通密度 (T);

L ——导体切割磁力线的有效长度 (m);

v ——导体切割磁力线的线速度 (m/s)。

要想知道电势的波形, 先得找出磁密的波形, 已设电枢以恒速 v 旋转, L 在电动机中不变, 则 $e \propto B_x$, 即导体电势随时间的变化规律与气隙磁密的分布规律相同。设想将电枢从外圆某一点沿轴切开, 把圆周拉成一直线作为横坐标, 纵坐标表示磁密, 绘出的分布曲线如图 3-5 所示, 为一梯形波。由于 $e \propto B_x$, 电势波形与磁密波形可用同一曲线表示, 只需换一坐标即可得到线圈内部交变电势波形。

通过电刷和换向器的作用, 及时地将线圈内的交变电势转换成电刷两端单方向的直流电势, 如图 3-6 所示, 但它是一个大小在零和最大值之间变化的脉振电势。

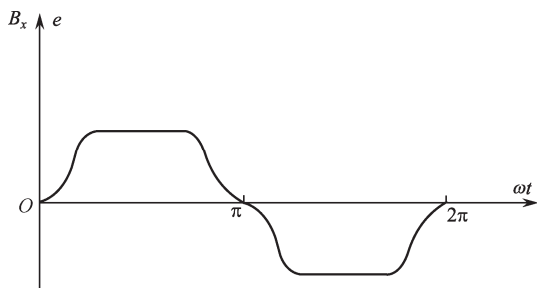


图 3-5 线圈内电势波形

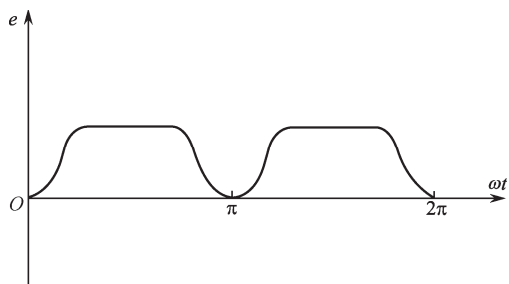


图 3-6 电刷两端的电势波形

对于如图 3-4 所示的直流发电机简单模型图, 由于电枢上只嵌放了一个线圈, 所以感应电势数值小, 波动大。为了减小电势的脉动, 实际发电机中, 电枢上放置许多线圈组成电枢绕组, 这些线圈均匀分布在电枢表面, 并按一定规律连接起来。图 3-7 表示一台两极直流发电机, 电枢上嵌有在空间互差 90° 的两个线圈产生的电势波形, 由图 3-7 可见, 其脉动程度大大减小了。实践证明, 若每极下的线圈边数大于 8, 电势脉动的幅值将小于 1%, 基本是一直流电势, 如图 3-8 所示。

3) 直流发电机产生的电磁转矩

当直流发电机电刷两端获得直流电势后, 若接上负载, 便有一电流流过线圈, 电流 i 与电势 e 的方向相同。同时, 载流导体在磁场中必然产生一电磁力 f , 其方向用左手定则

确定。电磁力对转轴形成一电磁转矩 T , T 与电枢旋转的方向相反, 起到了阻碍作用, 故称为阻转矩。直流发电机要维持发电状态, 原动机就必须向发电机输入机械能以克服电磁转矩 T , 正是这种不断的克服, 实现了将机械能转换成为电能。

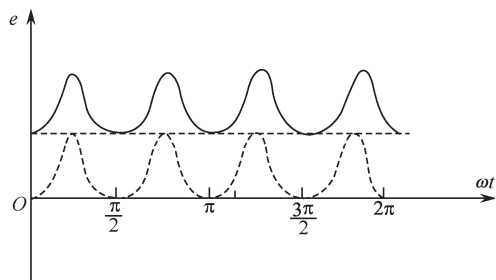


图 3-7 两个线圈换向后的电势波形

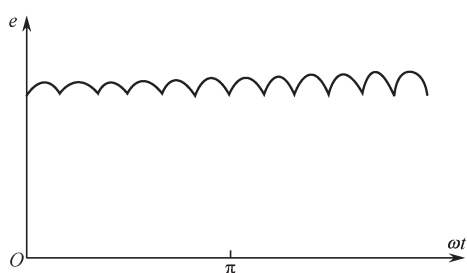


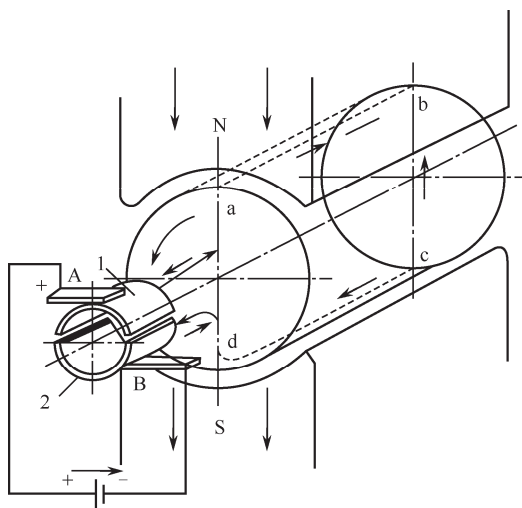
图 3-8 多个线圈电刷两端的电势波形

4. 直流电动机的工作原理

图 3-9 所示为两极直流电动机工作原理图。直流电动机结构与直流发电机相同, 不同的是电刷 A、B 外接一直流电源。瞬时电流的流向为 $+$ \rightarrow A \rightarrow 换向片 1 \rightarrow a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow d \rightarrow 换向片 2 \rightarrow B $\rightarrow -$ 。根据电磁力定律, 载流导体 ab、cd 都将受到电磁力 f 的作用, 其大小为

$$f = B_x Li \quad (3-2)$$

式中 i ——导体中流过的电流 (A)。



1, 2—换向片; A, B—电刷

图 3-9 直流电动机工作原理图

导体所受电磁力的方向可以用左手定则来确定, 在此时, ab 位于 N 极下, 受力方向从右向左, cd 位于 S 极下, 受力方向从左向右, 电磁力对转轴便形成一对电磁转矩 T 。在 T 的作用下, 电枢逆时针旋转起来。

当电枢转到 90° , 电刷不与换向片接触, 而与换向片间的绝缘片相接触, 此时线圈中

没有电流流过， $i=0$ ，故电磁转矩 $T=0$ 。但由于机械惯性的作用，电枢仍能转过一个角度，电刷 A、B 又将分别与换向片 2、1 接触。线圈中又有电流流过，此时，导体 ab、cd 中电流改变了方向，即为 $b \rightarrow a$ ， $d \rightarrow c$ ，且导体 ab 转到 S 极下，ab 所受的电磁力 f 方向从左向右，cd 转到 N 极下，cd 所受的电磁力方向从右向左。因此，线圈仍然受到逆时针方向电磁转矩的作用，电枢始终保持同一方向旋转。

在直流电动机中，电刷两端虽然加的是直流电源，但在电刷和换向器的作用下，线圈内部却变成了交流电，从而产生了单方向的电磁转矩，驱动电动机持续旋转。同时，旋转的线圈中也将感应产生电势 e ，其方向与线圈中电流方向相反，故称为反电势。直流电动机若要维持继续旋转，外加电压就必须高于反电势，才能不断地克服反电势而流入电流，正是这种不断克服，实现了将电能转换成为机械能。

由此可见，直流电动机具有可逆性，即一台直流电动机既可作发电机运行，也可作电动机运行。当输入机械转矩将机械能转换成电能时，电动机作发电机运行；当输入直流电流产生电磁转矩，将电能转换成机械能时，电动机作电动机运行。例如，电力机车在牵引工况时，牵引电动机作电动机运行，产生牵引力；在制动工况时，牵引电动机作发电机运行，将机车和列车的动能转换成电能，产生制动力对机车进行电气制动。

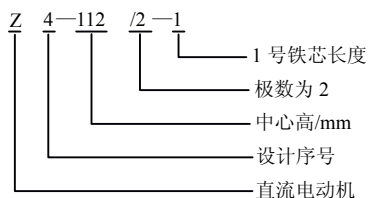
5. 直流电动机的额定值

每一台电动机都有一块铭牌，上面标注各种额定数据，简要介绍这台电动机的型号、规格、性能，是用户合理选择和正确使用电动机的依据。

根据国家标准要求设计和试验所得的一组反映电动机性能的数据，称为电动机的额定值。

1) 电动机型号

型号表明电动机的系列及主要特点。知道了电动机的型号，便可从相关手册及资料中查出该电动机的有关技术数据如下。



2) 额定功率 P_N

额定功率指电动机按规定的工作方式运行时，所能提供的输出功率。作为发电机额定功率是指接线端子处的输出功率；作为电动机额定功率是指电动机转轴的有效机械功率。单位为千瓦（kW）。额定功率、额定电压和额定电流的关系为

$$\text{发电机} \quad P_N = U_N I_N \quad (3-3)$$

$$\text{电动机} \quad P_N = U_N I_N \eta_N \quad (3-4)$$

式中 η_N ——额定效率。

3) 额定电压 U_N

额定电压指在额定输出时电动机接线端子间的电压。单位为伏（V）。

4) 额定电流 I_N

额定电流指电动机按照规定的工作方式运行时，电动机绕组允许流过的最大安全电流。单位为安（A）。

5) 额定转速 n_N

额定转速指电动机在额定电压、额定电流和额定输出功率时，电动机的旋转速度。单位为转/分（r/min）。

此外，还有工作方式、励磁方式、额定励磁电压、额定温升、额定效率等。

额定值是选用或使用电动机的主要依据，一般希望电动机按额定值运行。但实际上，电动机运行时的各种数据可能与额定值不同，它们由负载的大小来确定。若电动机的电流正好等于额定值，称为满载运行；若电动机的电流超过额定值，称为过载运行；若比额定值小得多，称为轻载运行。长期过载运行将使电动机过热，降低电动机寿命甚至损坏；长期轻载运行使电动机的容量不能充分利用。两种情况都将降低电动机的效率，都是不经济的。故在选择电动机时，应根据负载的要求，尽可能使电动机运行在额定值附近。

6. 直流电动机的励磁方式

1) 励磁方式

直流电动机采用的励磁绕组的供电方式。

2) 直流电动机种类

按励磁方式的不同分为以下几种类型。

(1) 他励电动机：电枢绕组与励磁绕组单独分开，有两个直流电源提供电能，如图 3-10 (a) 所示。

(2) 并励电动机：电枢绕组与励磁绕组并联联接，只有一个直流电源提供电能，如图 3-10 (b) 所示。

(3) 串励直流电动机：电枢绕组与励磁绕组串联联接，公用一个直流电源提供电能，如图 3-10 (c) 所示。

(4) 复励直流电动机：电枢绕组与励磁绕组既有串联又有并联，只有一个直流电源提供电能，如图 3-10 (d) 所示。

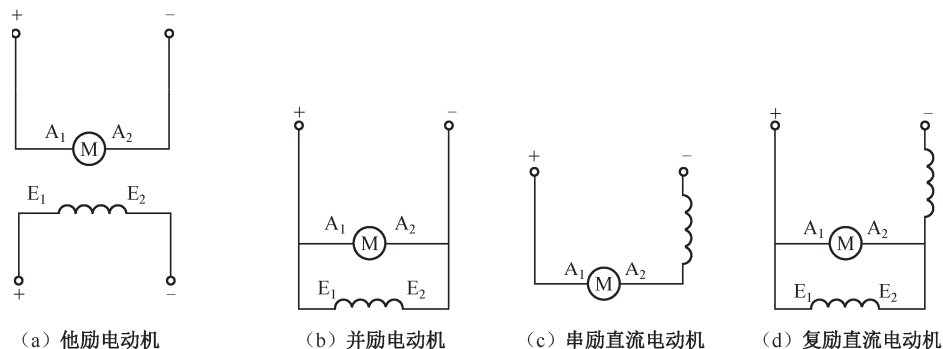


图 3-10 直流电动机的励磁方式

3.1.2 直流电动机的基本方程

从直流电动机可逆原理可知，无论是发电机还是电动机，在实现能量转换过程中，都伴有感应电势、电流、电磁转矩产生。电动机稳态运行时，即电动机的负载、励磁电流，以及转速达到稳定值时，各种电压、转矩和功率之间存在的平衡关系，称为电动机的平衡方程式。这些平衡关系应分别符合电学、力学及能量守恒定律。

1. 电势平衡方程式

无论是发电机还是电动机，当电枢旋转时，电枢绕组切割磁力线都产生感应电势，其大小为 $E_a = C_e \Phi n$ ，方向可用右手定则判定。在发电机里，电枢绕组接负载后，感应电势驱动电流流动，所以电枢电流与感应电势同方向，如图 3-11 所示；在电动机里，电枢绕组经电刷接外电源，外加电压是驱动电流流动的原因，所以电枢电流与电源电压同方向，此时，感应电势与电枢电流方向相反，称为反电势，如图 3-12 所示。

设 U 为直流电动机的端电压，取 U 、 E_a 、 I_a 的实际方向作为正方向，可得电枢回路的电势平衡方程式为

$$\text{发电机} \quad U = E_a - I_a R_a \quad (3-5)$$

$$\text{电动机} \quad U = E_a + I_a R_a \quad (3-6)$$

式中 R_a ——电枢回路总电阻，包括电枢回路中各串联绕组的电阻和电刷与换向器之间的接触电阻。

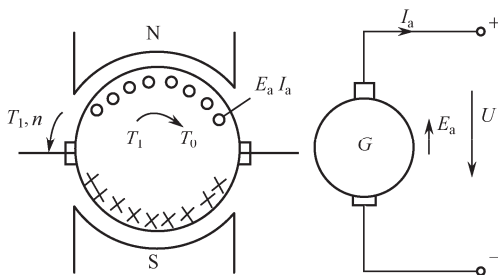


图 3-11 直流发电机的电势、转矩平衡关系图

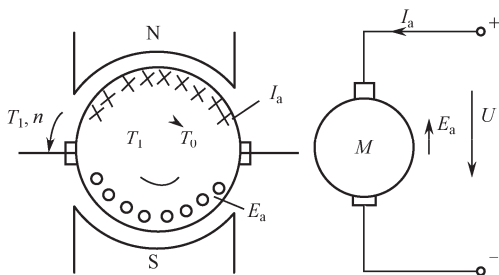


图 3-12 直流电动机的电势、转矩平衡关系

式 (3-5) 和式 (3-6) 适用于各种励磁方式的直流发电机和电动机，在计算时，要注意各种励磁方式中 R_a 所包含的内容不完全相同。

式 (3-5) 和式 (3-6) 表明，直流发电机和电动机在运行时都存在电枢电势 E_a 和端电压 U ，在发电机中， $E_a > U$ ，电枢电流 I_a 的方向与 E_a 的方向一致；在电动机中， $U > E_a$ ，电枢电流 I_a 的方向与 U 的方向一致， E_a 表现为反电势。

2. 转矩平衡方程

无论是发电机还是电动机，当电枢绕组有电流流过时，电枢电流和磁场相互作用产生电磁转矩，其大小为 $T = C_T \Phi I_a$ ，方向可用左手定则判定。在发电机里（见图 3-11），外加

转矩 T ；为驱动转矩使电枢旋转，电磁转矩 T 与 T_1 转向相反为阻力转矩，同时还存在电动机的空载阻力转矩 T_0 。在电动机里（见图 3-12），电磁转矩 T 使电枢转动为驱动转矩，与电动机转向相同，此时轴上的负载转矩 T_2 和 T_0 均为阻力转矩。

电动机的转速恒定时，加在电动机轴上的驱动转矩应与阻力转矩相等，所得转矩平衡方程式为

$$\text{发电机} \quad T_1 = T + T_0 \quad (3-7)$$

$$\text{电动机} \quad T = T_2 + T_0 \quad (3-8)$$

式 (3-7) 和式 (3-8) 表明，在电动机稳定运行时，电磁转矩和外转矩都同时存在并达到平衡。在发电机里， $T_1 > T$ ，作为驱动转矩的是外转矩 T_1 ，电动机的转向取决于 T_1 的方向，电磁转矩是阻力转矩，起平衡外转矩的作用；在电动机里， $T > T_2$ ，作为驱动转矩的是电磁转矩 T ，电动机的转向取决于 T 的方向，电磁转矩带动负载转动而达到平衡。

3. 功率平衡方程

电动机是实现能量转换的装置，因而功率是电动机运行中最基本的参数。电动机运行过程中，存在输入功率、输出功率和各种损耗，它们之间应满足能量守恒定律。

1) 电动机的损耗

(1) 铜耗 P_{Cu} ：铜损耗是由于电动机的各种绕组中流过电流而产生的电阻损耗，铜耗随负载而变化，又称可变损耗。

(2) 铁耗 P_{Fe} ：由于铁芯中的磁滞、涡流而产生的损耗。

(3) 机械损耗 P_{Ω} ：由于各种机械摩擦、通风而产生的损耗。铁耗和机械损耗在电动机空载时就存在，其大小与电动机负载无关，合称为空载损耗（又称不变损耗），用 P_0 表示，即

$$P_0 = P_{Fe} + P_{\Omega} \quad (3-9)$$

(4) 附加损耗 P_s ：产生附加损耗的原因很多，诸如电枢反应使气隙磁场畸变而引起铁耗的增加；电枢表面电流分布不均而引起铜耗的增加；均压电流造成的损耗等。 P_s 中一部分空载时已存在，另一部分随负载而变化。附加损耗一般不易计算，而估计为电动机输出功率的 0.5%~1%。

综上所述，电动机的总损耗 ΣP 为

$$\Sigma P = P_{Cu} + P_0 + P_s \quad (3-10)$$

2) 电磁功率

在电动机中，把通过电磁作用传递的功率称为电磁功率，用 P_M 表示。对发电机而言，输入机械功率 $P_1 = T\omega$ ，克服空载损耗后，其余部分转变为电磁功率，即

$$P_M = P_1 - P_0 \quad (3-11)$$

转换而来的电功率不能全部输出，必须克服电动机的铜耗 P_{Cu} 后才能供给负载，输出给负载的电功率 $P_2 = UI$ ，即

$$P_2 = P_M - P_{Cu} = UI \quad (3-12)$$

对电动机而言,输入的电功率为 $P_1 = UI$,此功率不能全部转换为机械功率,必须克服电动机本身的铜耗 P_{Cu} 后才能进行电磁转换,即

$$P_M = P_1 - P_{Cu} \quad (3-13)$$

转换而来的机械功率不能全部输出,必须克服电动机的空载损耗 P_0 后才能输出,其轴上的输出机械功率 $P_2 = T_2 \Omega$, 即

$$P_2 = P_M - P_0 = T_2 \Omega \quad (3-14)$$

电磁功率既可看成机械功率,又可看成电功率。从机械功率的角度看, P_M 是电磁转矩 T 和旋转角速度 ω 的乘积,即

$$P_M = T \omega \quad (3-15)$$

从电功率的角度看, P_M 是电枢电势 E_a 和电枢电流 I_a 的乘积,即

$$P_M = E_a I_a \quad (3-16)$$

根据能量守恒定律,两者相等,即

$$P_M = T \Omega = E_a I_a \quad (3-17)$$

因此,无论是发电机还是电动机,电磁功率均指电动机能够利用电磁感应原理进行能量转换的这部分功率,可以表示为机械功率的形式,也可以表示为电功率的形式。由于电磁功率具有这样的物理意义,所以,在实际计算中,经常把它作为从机械量计算电量或从电量计算机械量的桥梁。

3) 功率平衡方程式

电动机的输入功率为 P_1 , 输出功率为 P_2 , 总损耗为 ΣP 时, 根据能量守恒定律, 可得功率平衡方程式为

$$P_1 = P_2 + \Sigma P \quad (3-18)$$

4. 电动机的效率

电动机输出功率 P_2 输入功率 P_1 之比的百分数, 称为电动机的效率 η , 即

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - \Sigma P}{P_1} \times 100\% = \frac{P_2}{P_2 + \Sigma P} \times 100\% \quad (3-19)$$

直流电动机的基本方程式, 把电动机中电、磁、机械等物理量联系起来, 是分析直流电动机运行特性的基础。

3.1.3 直流电动机的机械特性

直流电动机的机械特性是在稳定运行情况下, 电动机的转速与电磁转矩之间的关系, 即 $n = f(T)$ 。机械特性可以分为固有机械特性和人为机械特性。在电力拖动系统中, 他励直流电动机应用比较广泛, 本节就研究它的机械特性。

1. 他励直流电动机机械特性方程式

机械特性方程式为

$$n = \frac{U}{C_e \Phi} - \frac{R}{C_e C_T \Phi^2} T \quad (3-20)$$

还可以写成为

$$n = n_0 - \beta T = n_0 - \Delta n \quad (3-21)$$

式中 n_0 ——理想空载转速 (r/min)。

$$n_0 = \frac{U}{C_e \Phi} \quad (3-22)$$

式中 β ——机械特性斜率。

$$\beta = \frac{R}{C_e C_T \Phi^2} \quad (3-23)$$

式中 Δn ——转速降 (r/min)。

$$\Delta n = \frac{R}{C_e C_T \Phi^2} T \quad (3-24)$$

2. 他励直流电动机的固有机械特性

当他励直流电动机的电源电压、磁通为额定值，电枢回路未接附加电阻 R 时的机械特性称为固有机械特性，其特性方程为

$$n = \frac{U_N}{C_e \Phi_N} - \frac{R_a}{C_e C_T \Phi_N^2} T \quad (3-25)$$

他励直流电动机的固有机械特性曲线如图 3-13 所示。

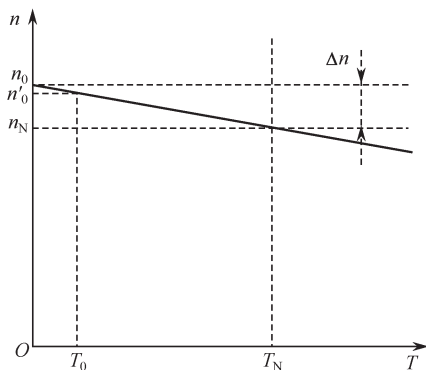


图 3-13 他励直流电动机的机械特性

如图 3-13 所示，由于电枢绕组的电阻 R_a 阻值很小，而 Φ_N 值大，因此， Δn 很小，固有机械特性为硬特性。其特点如下：

(1) 随着电磁转矩 T 的增大，转速 n 降低，其特性是略下斜的直线。

(2) 机械特性的斜率 $\beta = R_a / C_e C_T \Phi_N^2$ ，其值很小，特性较平。

(3) $\Delta n_N = n_0 - n_N$ ，为额定转速差。

(4) 当 $T = 0$ 时， $n = n_0 = U_N / C_e \Phi_N$ ，为理想空载转速，因为 T 是不可能为 0 的，电动机要旋转起来， T 必须要克服一定的摩擦力，所以 n_0 是理想化的状态。

3. 他励直流电动机的人为机械特性

人为地改变电动机气隙磁通 Φ 、电源电压 U 和电枢回路串联电阻 R 等参数，获得的机械特性即为人为机械特性。

1) 电枢回路串接电阻 R 时的人为特性

电枢加额定电压 U_N ，励磁磁通 $\Phi = \Phi_N$ ，电枢回路串入电阻 R_{pa} 后的人为机械特性方程为

$$n = \frac{U_N}{C_e \Phi_N} - \frac{R_a + R_{pa}}{C_e C_T \Phi_N^2} T \quad (3-26)$$

人为机械特性的特点如下：

(1) 理想空载转速 n_0 保持不变。

(2) 机械特性的斜率 β 随 R_{pa} 的增大而增大，特性曲线变软。

图 3-14 所示为不同 R_{pa} 时的一组人为机械特性曲线。

从图 3-14 中可以看出改变电阻 R 大小，可以使电动机的转速发生变化，因此，电枢回路串电阻可用于调速。

2) 改变电源电压时的人为机械特性

保持励磁磁通 $\Phi = \Phi_N$ ，电枢回路不串入电阻，只改变电枢电压大小及方向的人为机械特性方程为

$$n = \frac{U}{C_e \Phi_N} - \frac{R_a}{C_e C_T \Phi_N^2} T \quad (3-27)$$

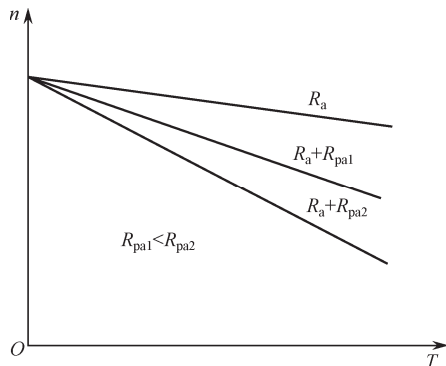


图 3-14 他励直流电动机电枢回路串电阻的人为机械特性

人为机械特性的特点如下：

(1) 理想空载转速 n_0 正比于电压 U ， U 下降时， n_0 成正比例减小。

(2) 特性曲线斜率 β 不变。

图 3-15 中调节电压的一组人为机械特性曲线，它是一组平行直线，因此，降低电源电压也可用于调速， U 越低，转速越低。

3) 改变磁通时的人为机械特性

人为机械特性方程式为

$$n = \frac{U_N}{C_e \Phi_N} - \frac{R_a}{C_e C_T \Phi_N^2} T \quad (3-28)$$

人为机械特性的特点如下：

(1) 理想空载转速与磁通成反比，减弱磁通 Φ ， n_0 升高。

(2) 斜率 β 与磁通二次方成反比，减弱磁通使斜率增大。

图 3-16 所示为一组减弱磁通的人为机械特性曲线，随着 Φ 减弱， n_0 升高，曲线斜率变大。若用于调速，则 Φ 越小，转速越高。

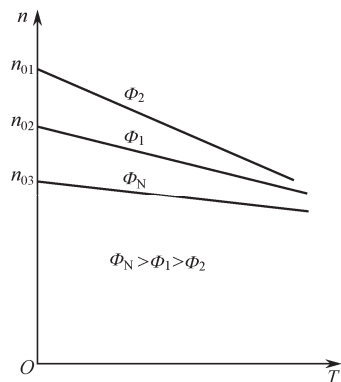
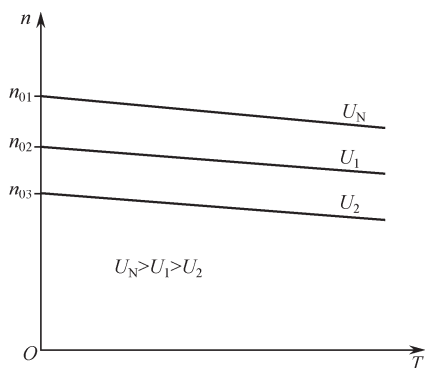


图 3-15 他励直流电动机降压的人为机械特性 图 3-16 他励直流电动机减弱磁通的人为机械特性曲线

3.1.4 直流电动机的电气控制原理

在电力拖动系统中，电动机是原动机，起主导作用。电动机的启动、调速和制动特性是衡量电动机运行性能的重要性能指标。下面就具体讲解直流电动机的电气控制。

1. 启动方法

直流电动机的启动方法主要有全压启动和降压启动两种。

1) 全压启动

全压启动：是在电动机磁场磁通为 Φ_N 情况下，在电动机电枢上直接加以额定电压的启动方式。

$$\text{启动电流 } I_{st} \text{ 为 } I_{st} = \frac{U_N}{R_a} \quad (3-29)$$

$$\text{启动转矩 } T_{st} \text{ 为 } T_{st} = C_T \Phi_N I_{st} \quad (3-30)$$

他励直流电动机不允许直接启动，因为他励直流电动机电枢电阻 R_a 阻值很小，额定电压下直接启动的启动电流很大，通常可达额定电流的 10~20 倍，启动转矩也很大。过大的启动电流引起电网电压下降，影响其他用电设备的正常工作，同时电动机自身的换向器产生剧烈的火花。而过大的启动转矩可能会使轴上受到不允许的机械冲击。所以全压启动只限于容量很小的直流电动机。

2) 减压启动

减压启动：是启动前将施加在电动机电枢两端的电源电压降低，以减小启动电流 I_{st} 的启动方式。

启动电流通常限制在 $(0.5 \sim 2)I_N$ 内，则启动电压应为

$$U_{st} = I_{st} R_a = (0.5 \sim 2) I_N R_a \quad (3-31)$$

3) 电枢回路串电阻启动

电枢回路串电阻启动：是电动机电源电压为额定值且恒定不变时，在电枢回路中串接一个启动电阻 R_{st} 的启动方式，此时 I_{st} 为

$$I_{st} = \frac{U_N}{R_a + R_{st}} \quad (3-32)$$

图 3-17 所示为他励直流电动机自动启动电路图。启动过程机械特性如图 3-18 所示。

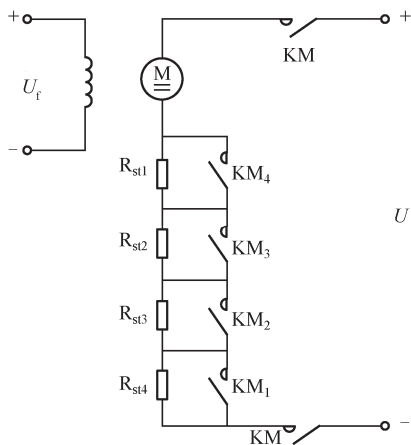


图 3-17 他励直流电动机自动启动电路图

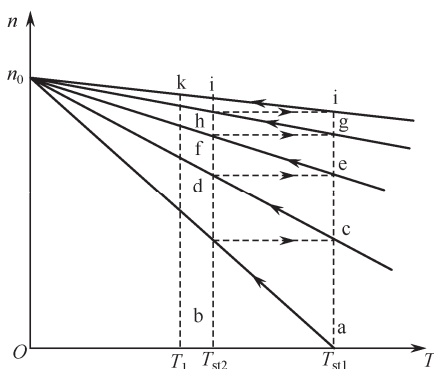


图 3-18 他励直流电动机启动过程机械特性

2. 他励直流电动机反转

直流电动机反转的方法有以下两种。

(1) 改变励磁电流方向：保持电枢两端电压极性不变，将电动机励磁绕组反接，使励磁电流反向，从而使磁通中方向改变。

(2) 改变电枢电流极性：保持励磁绕组电压极性不变，将电动机电枢绕组反接，电枢电流 I 即改变方向。

3. 他励直流电动机的制动

他励直流电动机的电气制动，是使电动机产生一个与旋转方向相反的电磁转矩，阻碍电动机转动。

常用的电气制动方法有能耗制动、反接制动和发电回馈制动。

1) 能耗制动

(1) 制动原理：能耗制动是把正处于电动机运行状态的他励直流电动机的电枢从电网上切除，并接到一个外加的制动电阻 R_{bk} 上构成闭合回路。其控制电路如图 3-19 所示。

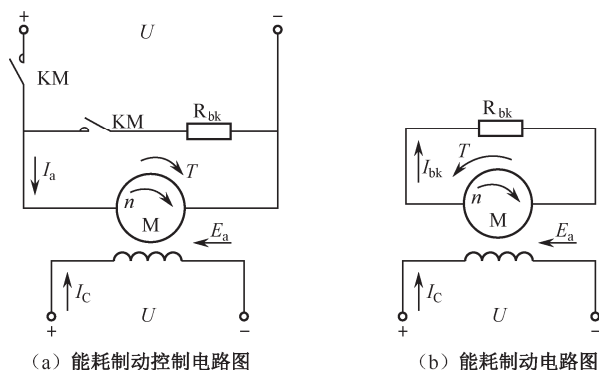


图 3-19 能耗制动控制电路图

能耗制动开始瞬间电动机电枢电流为

$$I_a = \frac{U - E_a}{R_a + R_{bk}} = -\frac{E_a}{R_a + R_{bk}} \quad (3-33)$$

在制动过程中，电动机把拖动系统的动能转变为电能并消耗在电枢回路的电阻上，故称为能耗制动。制动过程机械特性如图 3-20 所示。

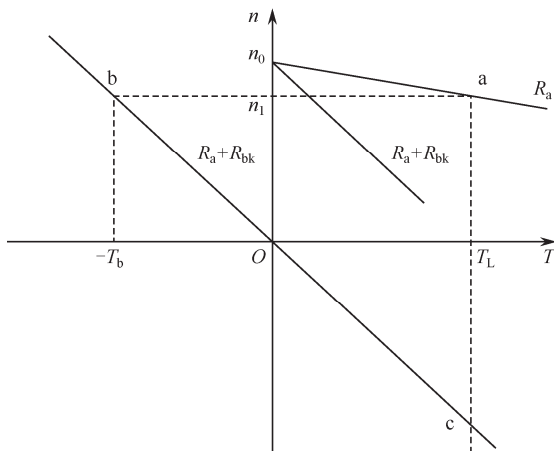


图 3-20 制动过程机械特性

(2) 机械特性：能耗制动的机械特性方程为

$$n = \frac{0}{C_e \Phi_N} - \frac{R_a + R_{bk}}{C_e C_T \Phi_N^2} T = -\frac{R_a + R_{bk}}{C_e C_T \Phi_N^2} T \quad (3-34)$$

2) 反接制动

反接制动有电枢反接制动和倒拉反接制动两种方式。

(1) 电枢反接制动。

① 制动原理：电枢反接制动是将电枢反接在电源上，同时电枢回路要串接制动电阻 R_{bk} 。控制电路如图 3-21 (a) 所示。

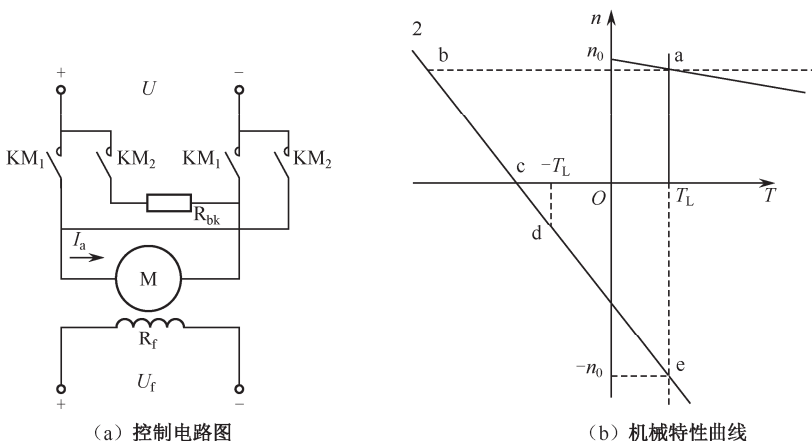


图 3-21 电枢反接制动

反接制动开始瞬间电动机电枢电流 I_a 为

$$I_a = \frac{-U_N - E_a}{R_a + R_{bk}} = -\frac{U_N + E_a}{R_a + R_{bk}} \quad (3-35)$$

② 机械特性：其机械特性曲线如 3-21 (b) 所示。

$$n = \frac{-U_N}{C_e \Phi_N} - \frac{R_a + R_{bk}}{C_e C_T \Phi_N^2} T = -n_0 - \frac{R_a + R_{bk}}{C_e C_T \Phi_N^2} T \quad (3-36)$$

(2) 倒拉反接制动。

① 制动原理：电动机运行在固有机械特性的 a 点下放重物时，电枢电路串入较大电阻 R_{bk} ，电动机转速因惯性不能突变，工作点过渡到对应的人为机械特性的 b 点上，此时电磁转矩 $T < T_L$ 电动机减速沿特性曲线下降至 c 点。在负载转矩的作用下转速 n 反向， E_a 为负值，电枢电流为正值，电磁转矩为正值与转速方向相反，电动机处于制动状态，称为倒拉反接制动。控制电路如图 3-22 (a) 所示。

② 机械特性：倒拉反接制动的机械特性方程式为

$$n = \frac{U_N}{C_e \Phi_N} - \frac{R_a + R_{bk}}{C_e C_T \Phi_N^2} T = n_0 - \frac{R_a + R_{bk}}{C_e C_T \Phi_N^2} T \text{ 或 } n = \frac{U_N - I_{bk}(R_a + R_{bk})}{C_e \Phi_N} \quad (3-37)$$

机械特性曲线如图 3-22 (b) 所示。

由特性曲线可知,倒拉反接制动下放重物的速度随串入电阻 R_{bk} 大小而异,制动电阻越大,特性越软,下放速度越快。

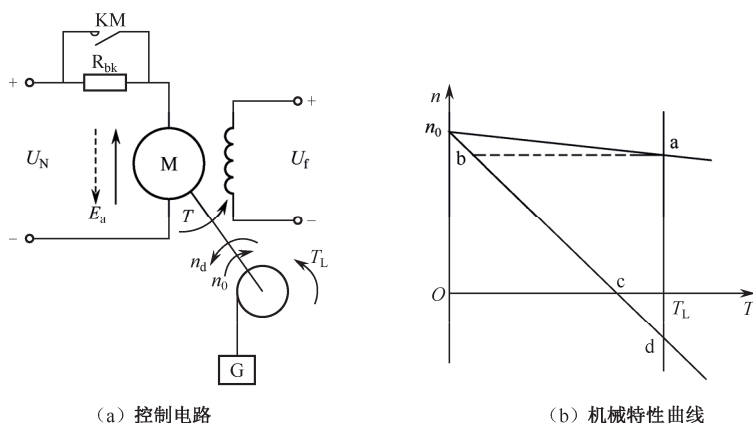


图 3-22 倒拉反接制动

综上所述,电动机进入倒拉反接制动状态必须有位能负载反拖电动机,同时电枢回路必须串入较大的电阻。此时位能负载转矩为拖动转矩,而电动机的电磁转矩是制动转矩,它抑制重物下放的速度,使其安全下放。

3) 发电回馈制动

当电动机转速高于理想空载转速,即 $n > n_0$ 时,电枢电动势 E_a 大于电枢电压 U ,电枢电流, $I_a = U - E_a / R_a < 0$,电磁转矩 T 为制动性质转矩,电动机向电源回馈电能,此时电动机运行状态称为发电回馈制动。

一般应用在位能负载高速下放和降低电枢电压调速等场合。

电动运行状态的电动机电枢电压突然降低时,人为机械特性向下平移,理想空载转速由 n_0 降到 n_{01} ,但因惯性电动机转速不能突变,使 $E_a > U$,致使电动机电枢电流 I_a 和电磁转矩 T 变为负值,电动机转速迅速下降。从特性 b 点至 n_{01} 点之间电动机处于发电回馈制动状态,如图 3-23 所示。

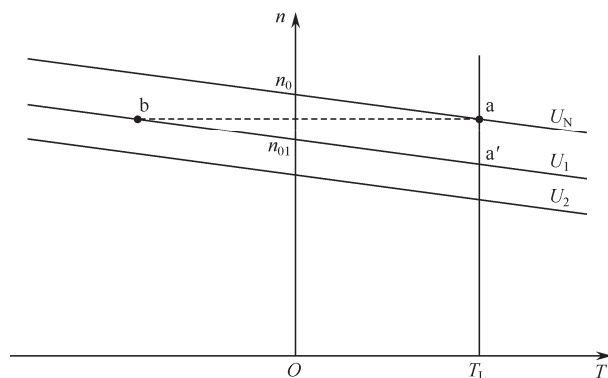


图 3-23 降压调速时的发电回馈制动机械特性

直流电动机的制动形式的比较和应用如表 3-1 所示。

表 3-1 直流电动机的制动形式的比较和应用

制动形式	优 点	缺 点	应 用 场 合
能耗制动	制动线路简单、平稳可靠，制动过程中不吸收电能，经济、安全 可以实现准确停车	制动效果随转速下降而成比例减少	应用与要求减速平稳的场合，如反抗性负载准确停车，还用于放下重物
反接制动	电枢反接制动转矩随转速变化较小，制动转矩较恒定，制动迅速稳定 倒拉反接制动的转速可以很低，安全性好	电枢反接制动有自动发转的可能性，在转速接近于零时，应及时切断电源 倒拉反接制动从电网吸收大量电能	电枢反接制动应用于频繁正/反转转换的电力拖动系统 倒拉反接制动不能用于停车、只能用于启动设备以较低的稳定转速下放重物的场合
发电回馈制动	制动简单可靠，不需要改变电动机接线 能量反馈到电网，比较经济	在转速大于额定转速时才能产生制动，应用范围较窄 不能实现停车	应用于位能负载的稳定高速下降场合 在降压和减弱磁通调速的过渡过程中可能出现这种制动情况

4. 他励直流电动机的调速

根据直流电动机的转速公式为

$$n = \frac{U - I_a(R + R_a)}{C_e \Phi} \quad (3-38)$$

可知，当电枢电流 I_a 不变时，只要电枢电压 U ，电枢回路中串入附加电阻 R 和励磁磁通 Φ 三个量中，只要任意一个量发生改变时，都会引起转速发生改变。因此，直流他励电动机的调速方法有电枢回路串电阻调速、降压调速、减弱磁通调速三种。

1) 改变电枢电路串联电阻的调速

保持电源电压和励磁磁通为额定值不变时，在电枢回路中串入不同的电阻时，电动机以不同的转速运行，电枢回路串接电阻 R_a 时的人为机械特性曲线如图 3-24 所示。电枢回路没有串入电阻时，工作点为自然机械特性曲线与负载特性的交点 a ，转速为 n_a 。在电枢回路中串入电阻 R_{pa1} 的瞬间，因转速和电动势不能突变，电枢电流相应的减小，工作点由 a 点过渡到 b 点，此时 $T_b > T_L$ ，工作点由 b 点沿串入电阻 R_{pa1} 的新机械特性下移，转速也随着下降，反电动势减小， I_a 和 T 逐渐增加，直至 c 点，当 $T_c = T_L$ 时，恢复转矩平衡，系统以新的较低的转速 n_c 稳定运行。同理，若在电枢回路中串入更大的电阻 R_{pa2} ，则系统的转速进一步下降。

电枢串电阻的特点如下：

- (1) 基速以下调速，并且串入电阻越大特性越软。
- (2) 有级调速，调速的平滑性差。
- (3) 调速电阻消耗的能量大，不经济。

(4) 电枢串电阻调速方法简单，设备投资少。因此，适用于小容量电动机调速，但调速电阻不能用启动变阻器代替。

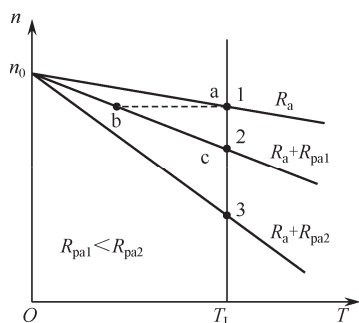


图 3-24 他励直流电动机电枢串电阻调速的机械特性

2) 降低电枢电压调速

保持励磁磁通 Φ 为额定值不变，电枢回路不串电阻，降低电枢电压 U 时，电动机将以较低的转速运行，降低电枢电压后的人为机械特性曲线如图 3-25 所示。电压逐渐下降时，工作点的变化情况是如图 3-25 的箭头方向所示，由 $a \rightarrow b \rightarrow c \cdots$

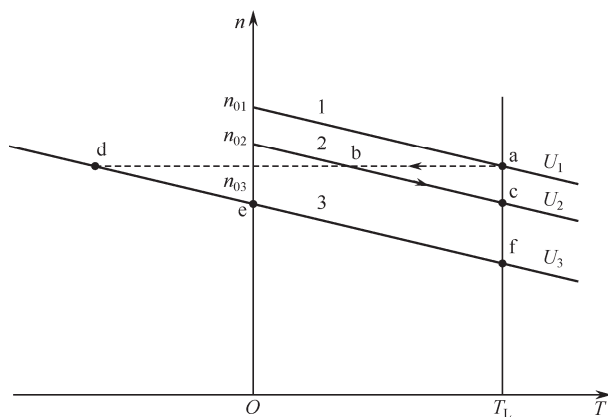


图 3-25 他励直流电动机降压启动的机械特性

降低电枢电压调速，需要有单独的可调压的直流电源，加在电枢上的电压不能超过额定电压，所以调速也只能低于额定转速的范围内调节，降低电枢电压时，电动机的机械特性硬度不变，因此，运行在低速范围内的稳定性较好。当电压连续可调时，可实现无极调速，调速平滑性较好。

降压调速的特点如下：

- (1) 调速性能稳定，调速范围广。
- (2) 调速平滑性好，可实现无级调速。
- (3) 损耗减小，调速经济性好。
- (4) 调压电源设备较复杂。

这种调速方法适用于对调速性能要求较高的设备，如造纸机、轧钢机等。

3) 减弱磁通调速

保持电枢电压不变，电枢回路中不串入电阻，减小电动机的励磁电流使励磁磁通降低，可是电动机的转速升高。减弱磁通调速的人为机械特性曲线如图 3-26 所示。如果忽略磁通变化的电磁过渡过程，则励磁电流逐级减小时，工作点变化由图 3-26 中 $a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow d \cdots$

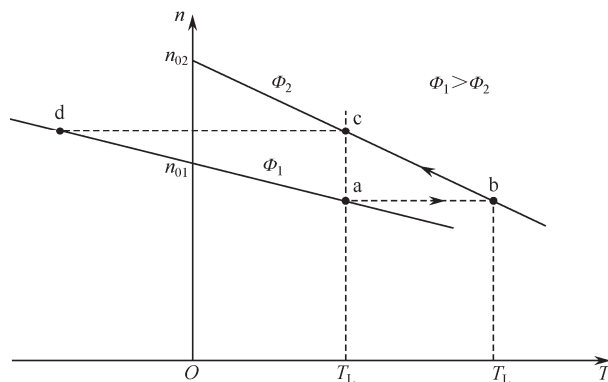


图 3-26 他励直流电动机减弱磁通调速的人为机械特性曲线

减弱磁通调速的特点如下：

- (1) 调速范围不大。
- (2) 调速平滑，可实现无极调速。
- (3) 能量损耗小。
- (4) 控制方便，控制设备投资少。

这种调速方法的缺点就是机械特性软，当磁通减弱相当多时，运行不稳定。

他励直流电动机调速性能和应用场合如表 3-2 所示。

表 3-2 直流他励电动机的调速性能和应用场合

调 速 方 法	调速范围 D (n_{\max}/n_{\min})	相对稳定性	平滑性	经 济 性	应 用
串电阻调速	在额定负载下 $D=2$ ， 轻载时 D 更小	差	差	调速设备投资少， 电能损耗大	对调速性能要求不高的场 合，适用于与恒转矩负载配合
降压调速	一般为 8 左右	好	好	调速设备投资大， 电能损耗小	对调速性能要求较高的场 合，适用于与恒转矩负载配合
减弱磁通调 速	一般为 1.2 左右，变磁 通电动机最大可达 4	较好	好	调速设备投资少， 电能损耗小	一般与降压调速配合使用， 适用于与恒转矩负载配合

3.2 异步电动机应用基础

异步电动机在工农业生产中得到了广泛的应用。例如，中小型轧钢设备、矿山机械、机床、起重机、鼓风机、水泵，以及脱粒、磨粉等农副产品用的加工机械，大多采用异步电动机拖动。与其他电动机相比，异步电动机具有结构简单、坚固耐用、使用方便、运行可靠、效率高、易于制造和维修、价格低廉等许多优点。但是，异步电动机的应用也有一

定的限制，这主要是由其调速性能差、功率因数低而引起的。

异步电动机是一种交流电动机，它可以是单相的，也可以是三相的，但它的转速和电网频率没有同步电动机那样严格不变的关系。本节将分别介绍三相异步电动机的基本结构、工作原理、运行特性。

3.2.1 异步电动机的结构、类型及工作原理

1. 三相异步电动机的基本结构

三相异步电动机由固定的定子和旋转的转子两个基本部分组成，转子装在定子内腔里，借助轴承被支撑在两个端盖上。

为保证转子能在定子内自由转动，定子和转子之间必须有一间隙，称为气隙。电动机的气隙是一个非常重要的参数，其大小及对称性对电动机的性能有很大影响。图 3-27 所示为三相鼠笼式异步电动机的组成部件。

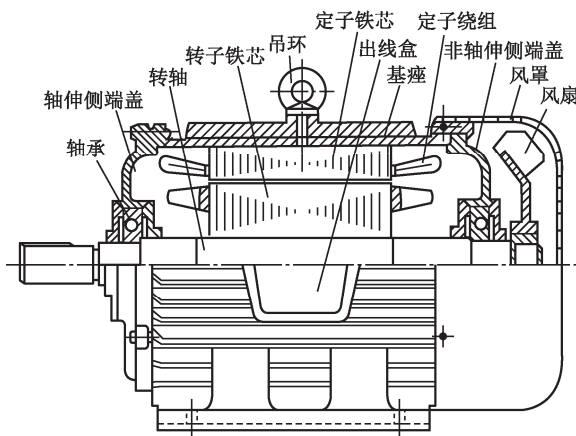


图 3-27 三相鼠笼式异步电动机的组成部件

1) 定子部分

定子部分由定子三相绕组、定子铁芯和机座组成。

定子三相绕组是异步电动机的电路部分，在异步电动机的运行中起着很重要的作用，定子三相绕组的结构是对称的，一般有 6 个出线端（ U_1 、 U_2 、 V_1 、 V_2 、 W_1 、 W_2 ）置于机座外侧的接线盒内，根据需要接成星形（ Y ）或三角形（ Δ ），如图 3-28 所示。

定子铁芯是异步电动机磁路的一部分，由于主磁场以同步转速相对定子旋转，为减小在铁芯中引起的损耗，铁芯采用 0.5mm 厚的高导磁电工钢片叠成，电工钢片两面涂有绝缘漆以减小铁芯的涡流损耗。中小型异步电动机定子铁芯一般采用整圆的冲片叠成，大型异步电动机的定子铁芯一般采用肩型冲片拼成。在每个冲片内圆上均匀地开槽，使叠装后的定子铁芯内圆均匀地形成许多形状相同的槽，用于嵌放定子绕组。槽的形状由电动机的容量、电压及绕组的形式而定。绕组的嵌放过程在电动机制造厂中称为下线。完成下线并进行浸漆处理后的铁芯与绕组成为一个整体一同固定在机座内。

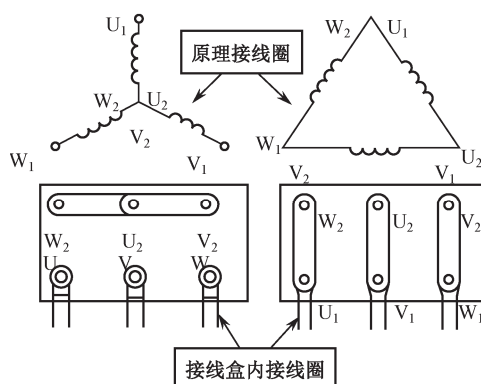


图 3-28 三相鼠笼式异步电动机出线端

机座又称机壳，它的主要作用是支撑定子铁芯，同时也承受整个电动机负载运行时产生的反作用力，运行时由于内部损耗所产生的热量也是通过机座向外散发。中小型电动机的机座一般采用铸铁制成。大型电动机因机身较大浇注不便，常用钢板焊接成型。

2) 转子

异步电动机的转子由转子铁芯、转子绕组及转轴组成。

转子铁芯也是电动机磁路的一部分，也是用电工钢片叠成。与定子铁芯冲片不同的是，转子铁芯冲片是在冲片的外圆上开槽，叠装后的转子铁芯外圆柱面上均匀地形成许多形状相同的槽，用于放置转子绕组。

转子绕组是异步电动机电路的另一部分，其作用为切割定子磁场，产生感应电势和电流，并在磁场作用下受力而使转子转动。其结构可分为鼠笼式转子绕组和绕线式转子绕组两种类型。这两种转子各自的主要特点是，鼠笼式转子：结构简单、制造方便、经济耐用；绕线式转子：结构复杂、价格贵，但转子回路可引入外加电阻来改善启动和调速性能。

鼠笼式转子绕组由置于转子槽中的导条和两端的端环构成。为节约用钢和提高生产率，小功率异步电动机的导条和端环一般都是用融化的铝液一次浇铸出来的；对于大功率的电动机，由于铸铝质量不易保证，常用铜条插入转子铁芯槽中，再在两端焊上端环。鼠笼式转子绕组自行闭合，不必由外界电源供电，其外形像一个鼠笼，故称鼠笼式转子，如图 3-29 所示。

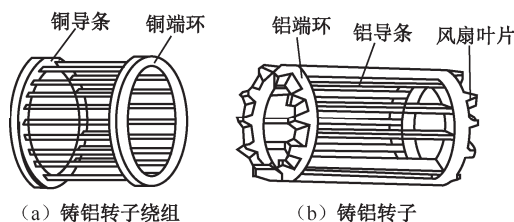


图 3-29 铸铝转子结构

鼠笼式转子绕组的各相均由单根导条组成，其感应电势不大，加之导条和铁芯叠片之间的接触电阻较大，所以无须专门把导条和铁芯用绝缘材料分开。

绕线式转子绕组是用绝缘导线组成,嵌放在转子铁芯槽内的三相对称绕组。三相一般为星形接法,三根引出线分别接到固定在转轴上并互相绝缘的三个集电环上,再通过安装在端盖上的电刷装置与集电环接触把电流引出来。这种转子的特点是可以通过集电环和电刷在转子回路中接入附加电阻,用于改善电动机的启动性能或调节电动机的转速。有的绕线转子异步电动机还装有一种电刷短路装置,当电动机启动完毕而又不需要调节转速时,移动手柄使电刷被举起而与集电环脱离接触,同时使三只集电环彼此短接起来,这样可以减少电刷与集电环间的磨损,提高运行可靠性。与鼠笼式转子比较,绕线转子的缺点是结构复杂、价格较贵、运行的可靠性也较差。因此,绕线转子异步电动机只用在要求启动电流小、启动转矩大或需要调节转速的场合,如用来拖动频繁启动的起重设备。

转轴是整个转子部件的安装基础,也是力和机械功率的传输部件,整个转子靠轴和轴承被支撑在定子铁芯内腔中。转轴一般由中碳钢或合金钢制成。

3) 气隙

异步电动机的气隙是很小的,中小型电动机一般为 $0.2\sim 2\text{mm}$ 。气隙越大,磁阻越大,要产生同样的磁场,就需要较大的励磁电流。由于气隙的存在,异步电动机的磁路磁阻远比变压器要大,因而异步电动机的励磁电流也比变压器的大得多。变压器的励磁电流约为额定电流的 3%,异步电动机的励磁电流约为额定电流的 30%。励磁电流是无功电流,因而励磁电流越大,功率因数越低。为提高异步电动机的功率因数,必须减少它的励磁电流,最有效的方法是尽可能缩短气隙长度。但是气隙过小会使装配困难,还有可能使定、转子在运行时发生摩擦或碰撞,因此,气隙的最小值由制造工艺及运行安全可靠等因素来决定。

4) 其他部件

(1) 端盖:安装在机座的两端,它的材料加工方法与机座相同,一般为铸铁件。端盖上的轴承室里安装了轴承来支撑转子,以使定子和转子得到较好的同心度,保证转子在定子内膛里正常运转。端盖除了起支撑作用外,还起着保护定、转子绕组的作用。

(2) 轴承:连接转动部分与不动部分,目前都采用滚动轴承以减少摩擦。

(3) 轴承端盖:保护轴承,使轴承内的润滑油不致溢出。

(4) 风扇:冷却电动机。

2. 异步电动机的分类

异步电动机按定子相数可分为三相、单相和两相异步电动机三类。除约 200W 以下的电动机多做成单相异步电动机外,现代动力用电动机大多数都为三相异步电动机。两相异步电动机主要用做微型控制电动机。

按照转子形式,异步电动机可分为鼠笼型转子和绕线型转子两大类。鼠笼转子又分为普通鼠笼转子、深槽型鼠笼转子和双鼠笼转子三种。三相绕线式异步电动机外形示意如图 3-30 所示。

根据机壳保护方式的不同,异步电动机可分为防护式、封闭式和防爆式等。

防护式异步电动机具有防止外界杂物落入电动机内的防护装置,一般在转轴上装有风扇,冷却空气进入电动机内部冷却定子绕组及定子铁芯后将热量带出来。JZ 系列电动机就是鼠笼式转子防护式异步电动机;JR 系列电动机是绕线转子防护式异步电动机。

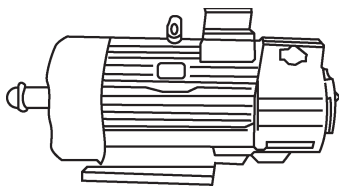


图 3-30 三相绕线式异步电动机外形

封闭式异步电动机的内部和外部的空气是隔开的。它的冷却是依靠装在机壳外面转轴上的风扇吹风，借机座上的散热片将电动机内部发散出来的热量带走。这种电动机主要用于尘埃较多的场所，如机床上使用的电动机。JOR 系列及 Y 系列电动机就属于这种类型。

防爆式异步电动机为全封闭式，它将内部与外界的易燃、易爆性气体隔离。这种电动机多用于有汽油、酒精、天然气、煤气等气体较多的地方，如矿井或某些化工厂等。

3. 异步电动机的铭牌和额定值

每台异步电动机机壳上都装有铭牌，它的运行额定值印刻在上面，如表 3-3 所示。

表 3-3 三相异步电动机铭牌

三相异步电动机			
型号 Y—112M—4		编 号	
4.0kW		8.8A	
380kV	1 440r/min	LW82dB	
接法△	防护等级 IP44	50Hz	45kg
标准编号	工作制 SI	B 级绝缘	年 月
电动机厂			

电动机按铭牌上所规定的条件运行时，就称为电动机的额定运行状态。根据国家标准规定，异步电动机的额定值主要有如下几项。

(1) 额定功率 P_N ：指电动机在制造厂（铭牌）所规定额定运行状态下运行时，轴端输出的机械功率，单位为 W 或 kW。

(2) 定子额定电压 U_N ：指电动机在额定状态下运行时，定子绕组应加的线电压，单位为 V 或 kV。

(3) 定子额定电流 I_N ：指电动机在额定电压下运行，输出额定功率时，流入定子绕组的电流，单位为 A。

对三相异步电动机，额定功率为

$$P_N = \sqrt{3} U_N I_N \eta_N \cos \varphi_N \quad (3-39)$$

式中 η_N ——额定运行时异步电动机的效率；

$\cos \varphi_N$ ——额定运行时异步电动机的功率因数。

(4) 额定转速 n_N ：指电动机在额定状态下运行时，转子的转速，单位为 r/min。

(5) 额定频率 f_N ：我国工频为 50Hz。

除上述数据外,铭牌上有时还标明定子相数和绕组接法、额定运行时电动机的功率因数、效率、温升及绝缘等级、定额等。对绕线转子异步电动机还标出定子的额定电压、转子开路时集电环间的转子电压和转子的额定电流等数据。下面对绕组接法、温升和定额作简要说明。

(1) 绕组接法:三相异步电动机的定子绕组可接成星形或三角形,视额定电压和电源电压的配合情况而定。例如,星形接法时额定电压为 380V,则改为三角形时就可用于 220V 的电源上。为了满足这种改接的需要,通常把三相绕组的 6 个端头都引到接线板上,以便于采用两种不同接法,如图 3-31 所示。

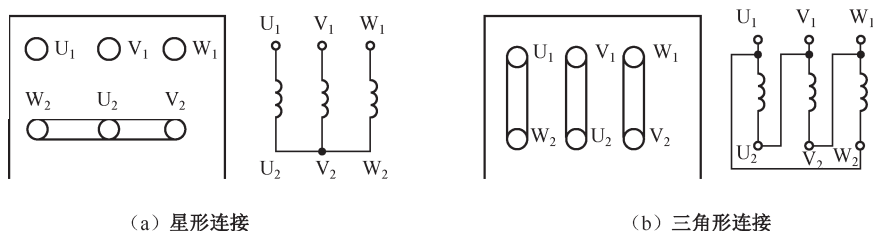


图 3-31 三相异步电动机的接线板

(2) 温升:指电动机按规定方式运行时,绕组容许的升高温度,即绕组的温度比周围空气温度高出的数值。容许温升的高低取决于电动机所使用的绝缘材料。例如, Y 系列电动机一般采用 B 级绝缘,其最高容许温度为 130°C ,如周围空气温度按 40°C 计算,并计入 10°C 的裕量,则 B 级绝缘的容许温升为 $130^{\circ}\text{C} - (40^{\circ}\text{C} + 10^{\circ}\text{C}) = 80^{\circ}\text{C}$ 。

(3) 定额:中国电动机的定额分为三类,即连续定额、短时定额和断续定额。连续定额是指电动机按铭牌规定的数据长期连续运行;短时定额和断续定额均属于间歇运行方式,即运行一段时间后就停止运行一段时间。可见,短时定额和断续定额方式下有一段时间电动机不发热,所以容量相同时这类电动机的体积可以做得小一些,或者连续定额的电动机用做短时定额或断续定额运行时,所带的负载可以超过铭牌上规定的数值。但是短时定额和断续定额的电动机不能按其容量作连续运行,否则会使电动机过热而损坏。

4. 三相异步电动机的工作原理

三相异步电动机工作原理示意图如图 3-32 (a) 所示,定子上的三相绕组接到三相交流电源上,转子绕组自成闭合回路。三相异步电动机的工作可分为如下三种情况。

1) 三相异步电动机作为电动机运行

三相异步电动机作为电动机运行是其最普遍的工作状态。三相电流流入三相定子绕组产生旋转磁势,并在气隙中产生相应的旋转磁场。旋转磁场也是以同步转速 n_1 在旋转。为了便于说明问题,在图 3-32 中用一对旋转的磁极来表示该旋转磁场。

当旋转磁场切割转子导体时,在其中产生感应电势,使转子导体中有电流流过。其方向可利用右手定则判断。转子电流与旋转磁场作用而产生电磁转矩,使转子以转速 n 旋转,从而把电能转换成机械能,作电动机运行。由左手定则判断可知转子方向与磁场旋转方向相同,如图 3-32 (b) 所示。

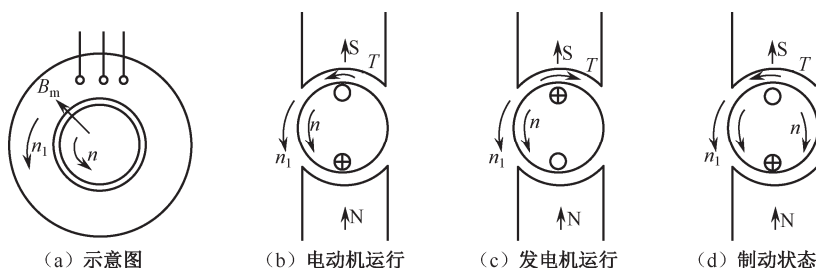


图 3-32 三相异步电动机工作原理

为了克服负载的阻力转矩，三相异步电动机的转速 n 总是略低于同步转速 n_1 ，以便使气隙中的旋转磁场能够切割转子导体而在其中产生感应电势和感应电流，从而能够产生足够的电磁转矩来拖动转子旋转。如果转子的转速与同步转速相等，转向又相同，则气隙旋转磁场与转子导体之间没有相对运动，因而转子导体中就不会产生感应电势和电流，电动机的电磁转矩也将为零。可见，异步电动机产生电磁转矩的必要条件是磁场的同步转速 n_1 和转子转速 n 不相等。

把同步转速 n_1 和转子转速 n 的差值称为转差，转差与同步转速 n_1 的比值称为转差率，转差率用 s 来表示，即

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} \quad (3-40)$$

转差率是异步电动机的一个基本变量，它可以表示异步电动机的各种不同运行状态。

(1) 在电动机刚启动时，转子转速 $n=0$ ，则 $s=1$ ，转子切割旋转磁场的相对速度最大，转子中的电势及电流也最大。如果电动机产生的电磁转矩足以克服机械负载的阻力转矩，转子就开始旋转，转速不断上升。

(2) 随着转子转速 n 的上升，转差率 s 减小，转子切割旋转磁场的相对速度减小，转子中的电势及电流也减小。在额定状态下，转差率 s 的数值通常都是很小的，中小型异步电动机的转差率约为 0.01~0.07，转子转速与同步转速相差并不很大。而空载时，因阻力矩很小，转子转速很高，转差率则更小，约为 0.004~0.007，可以认为转子转速近似等于同步转速。

(3) 假设 $n=n_1$ ，则转差率 $s=0$ ，此时转子导体不切割旋转磁场，转子中就没有感应电势及电流，也不产生电磁转矩。

可见，作电动机运行时，转速 n 在 $0 \sim n_1$ 的范围内变化，而转差率则在 $1 \sim 0$ 的范围内变化。

三相异步电动机的转速可用转差率来计算，即

$$n = (1-s)n_1 \quad (3-41)$$

2) 三相异步电动机作为发电机运行

若异步电动机的转轴上不是机械负载，而是用原动机拖动异步电动机转子以大于同步转速的速度与旋转磁场同方向旋转，如图 3-32 (c) 所示。此时，转子导体相对于旋转磁

场的运动方向与图 3-32 (b) 相反, 转子导体中的电势及电流也反向。由左手定则可知, 转子导体所产生的电磁转矩也与转子转向相反, 起着制动作用。为了克服电磁转矩的制动作用, 使转子能继续旋转下去, 并保持 $n > n_1$, 原动机就必须不断向电动机输入机械功率, 而电动机则把输入的机械功率转换为电功率输出给电网, 此时异步电动机成为发电机, 转差率 s 为负值。

3) 三相异步电动机在制动状态下运行

若在外力作用下使转子逆着旋转磁场方向转动, 如图 3-32 (d) 所示。比较图 3-32 (b) 和图 3-32 (d) 可见, 转子导体相对于磁场的运动方向与电动机运行状态相同, 故转子导体中的电势和电流方向仍与电动机状态相同, 作用在转子上的电磁转矩方向与旋转磁场方向一致, 但却与转子转向相反, 起了阻止转子旋转的作用, 故称为三相异步电动机的制动运行。在这种情况下, 既消耗原动机的机械功率, 同时也从电网吸收了电功率, 这两部分功率均变为三相异步电动机内部的损耗。制动运行时, 由于转子逆着磁场方向旋转, $n < 0$, 转差率 $s > 1$ 。

在电动机、发电机和制动三种运行状态下, 转子转速总是与旋转磁场转速 (同步转速 n_1) 不同, 因而称为异步电动机。又由于异步电动机的转子绕组并不直接与电源相接, 而是依靠电磁感应的原理来产生感应电势和电流, 从而产生电磁转矩使电动机旋转, 因而异步电动机又称感应电动机。

实际上, 异步电动机绝大多数都是作为电动机运行, 异步发电机的性能不如同步发电机优越, 因此, 仅用在特殊场合。制动运行往往是吊车等设备的一种特殊运行状态。

3.2.2 三相异步电动机的机械特性

1. 三相异步电动机的功率和转矩平衡关系

1) 三相异步电动机中功率、损耗的含义

电动机是机电能量转换的机械, 在能量转换过程中必然会有功率平衡关系及损耗。

当三相异步电动机接在电网上稳定运行时, 由电网供给的电功率称为三相异步电动机的输入功率 P_1 。

$$P_1 = 3U_1 I_1 \cos \varphi_1 \quad (3-42)$$

式中 U_1 ——三相异步电动机定子绕组相电压;

I_1 ——三相异步电动机定子绕组相电流;

φ_1 ——相电压 U_1 与相电流 I_1 之间的相位角;

$\cos \varphi_1$ ——三相异步电动机功率因数。

输入功率中的小部分将消耗于定子绕组的电阻上, 该部分称为定子绕组铜耗 P_{Cu1} 。

$$P_{Cu1} = 3I_1^2 R_1 \quad (3-43)$$

式中 R_1 ——三相异步电动机定子绕组相电阻。

输入功率的另外小部分将消耗于定子铁芯上, 该部分称为铁耗 P_{Fe} 。转子铁芯损耗可忽略不计。这是因为正常运行时, 三相异步电动机转子转速接近旋转磁场的同步转速, 转

差率 s 很小，转子铁芯中磁通变化的频率很小，再加上转子铁芯和定子铁芯都是用硅钢片造成，因而转子铁芯中铁耗很小。

输入功率减去定子铜耗和铁耗以后，余下的功率全部送入转子，这部分功率称为电磁功率 P_M 。

$$P_M = P_1 - P_{Cu1} - P_{Fe} \quad (3-44)$$

电磁功率是借助电磁感应作用通过气隙旋转磁场由定子传递到转子的。传递到转子的电磁功率部分将消耗于转子绕组中的电阻上，这部分功率称为转子绕组铜耗 P_{Cu2} 。

$$P_{Cu2} = 3I_2^2 R_2 \quad (3-45)$$

式中 I_2 ——三相异步电动机转子绕组相电流；

R_2 ——三相异步电动机转子绕组相电阻。

递到转子的电磁功率减去转子铜耗 P_{Cu2} 余下的功率，称为全机械功率 $P_{\text{全}}$ 。

$$P_{\text{全}} = P_M - P_{Cu2} \quad (3-46)$$

全机械功率实际上是传递到电动机转轴上的机械功率，它是转子绕组中的电流与旋转磁场相互作用产生电磁转矩，带动转子以转速 n 旋转时所对应的功率。

电动机转子转动时会产生轴承摩擦及风阻等阻力转矩，为克服此阻力转矩将消耗一部分功率，这部分功率称为机械损耗 P_{Ω} 。

定子及转子绕组中在流过电流时，除产生基波磁通外，还产生高次谐波磁通及其他漏磁通，这些磁通穿过导线、定子及转子铁芯、机座、端盖等金属部件时，感应出电势和电流并引起损耗，这部分称为杂散损耗 P_s 。杂散损耗的大小与气隙的大小、制造工艺等因素有关。

全机械功率减去机械损耗和杂散损耗以后就是三相异步电动机转轴上输出的机械功率 P_2 。用 $P_{\Omega+s}$ 表示机械损耗和杂散损耗之和，则

$$P_2 = P_{\text{全}} - P_{\Omega+s} \quad (3-47)$$

铁耗 P_{Fe} 、定子绕组铜耗 P_{Cu1} 、转子绕组铜耗 P_{Cu2} 都属于电磁损耗，这三项损耗主要与电动机的电磁负荷有关，即与电动机中的磁场强度、绕组中的电流大小、铁芯和绕组的几何尺寸等有关。机械损耗 P_{Ω} 主要与电动机的转速、摩擦系数等因素有关。以上四项损耗属于电动机的基本损耗。杂散损耗 P_s 的值很小，一般可以忽略不计。

2) 三相异步电动机的功率平衡关系

三相异步电动机从电网吸收电功率，从转轴上输出机械功率，其功率流程如图 3-33 所示。

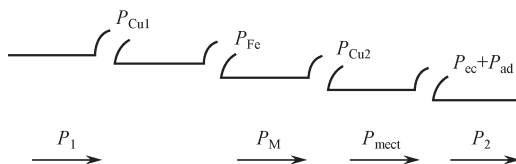


图 3-33 三相异步电动机功率流程图

从三相异步电动机功率流程图可见:

三相异步电动机的功率平衡方程为

$$P_1 = P_{\text{Cu1}} + P_{\text{Fe}} + P_{\text{Cu2}} + P_{\Omega+\text{S}} + P_2 = \Sigma P + P_2 \quad (3-48)$$

电动机的总损耗为

$$\Sigma P = P_{\text{Cu1}} + P_{\text{Fe}} + P_{\text{Cu2}} + P_{\Omega+\text{S}} \quad (3-49)$$

电磁功率为

$$P_{\text{M}} = P_{\text{Cu2}} + P_{\Omega+\text{S}} + P_2 \quad (3-50)$$

全机械功率为

$$P_{\text{全}} = P_{\Omega+\text{S}} + P_2 \quad (3-51)$$

除以上功率关系外,还可以证明,三相异步电动机的转子绕组铜耗与电磁功率之间存在着一一定的关系即转子绕组铜耗与电磁功率之比等于异步电动机的转差率,即

$$P_{\text{Cu2}} = s \cdot P_{\text{M}} \quad (3-52)$$

式(3-52)说明,转差率越大电磁功率中转变为转子铜耗的部分就越大。转子电阻越大时,转子的铜耗越大,因此,转差率也越大,转速超低。

根据三相异步电动机功率流程图和式(3-50)~式(3-52)可知,全机械功率与电磁功率之间的关系为

$$P_{\text{全}} = P_{\text{M}} - P_{\text{Cu2}} = (1-s)P_{\text{M}} \quad (3-53)$$

3) 三相异步电动机的转矩平衡方程

在三相异步电动机中,输入定子的电能转换为转子上的机械能是通过在转子绕组上产生由电磁力(载流导体在磁场中的受力)产生的电磁转矩使转子旋转而实现的。因此,电磁转矩是电动机中能量形态变换的基础。

对于已制造好的异步电动机,电磁转矩的大小与旋转磁场磁通的大小及转子电流大小密切相关。通过数学分析可知,电磁转矩 T 的大小与旋转磁场的每极磁通 Φ_{M} 及转子电流 I_2 成正比可用公式表示为

$$T = C_{\text{T}} \Phi_{\text{M}} I_2 \cos \varphi_2 \quad (3-54)$$

式中 C_{T} ——电动机常数;

$\cos \varphi_2$ ——转子的功率因数。

从动力学知道,作用在旋转体上的转矩等于旋转体的机械功率除以它的机械角速度。因此,在三相异步电动机的功率关系式 $P_{\text{全}} = P_{\Omega+\text{S}} + P_2$ 中,两边都除以转子的机械角速度 Ω ,便得到三相异步电动机的转矩平衡方程式,即

$$T = T_0 + T_2 \quad (3-55)$$

式(3-55)中,电磁转矩 $T = P_{\text{全}} / \Omega$,即在三相异步电动机中,转子转轴上的电磁转矩等于全机械功率除以转子机械角速度; $T_0 = P_{\Omega+\text{S}} / \Omega$ 为三相异步电动机的空载转矩,它等于机械损耗与杂散损耗之和除以转子机械角速度; $T_2 = P_2 / \Omega$ 为三相异步电动机的输出转矩,它等于输出功率除以转子机械角速度。

三相异步电动机的转矩平衡方程表明,电动机稳定运行时,电磁转矩减去空载转矩后,才是电动机转轴上的输出转矩。

由于全机械功率 $P_{\text{全}}=(1-s)P_{\text{M}}$, 转子的机械角速度 $\omega=(1-s)\omega_1$ 。 ω_1 为旋转磁场的同步角速度, 则可以得到, 即

$$T=\frac{P_{\text{全}}}{\omega}=\frac{P_{\text{M}}}{\omega_1} \quad (3-56)$$

式(3-56)说明,作用在转子上的电磁转矩与通过气隙旋转磁场传递到转子的电磁功率成正比。

电磁转矩既可以用转子的全机械功率除以转子的机械角速度来计算,也可以用电磁功率除以旋转磁场的同步角速度来计算。前者是从转子本身产生机械功率这一概念导出,由于转子本身的机械角速度为 ω , 所以 $T=P_{\text{全}}/\omega$ 。后者则是从旋转磁场对转子做功这一概念出发,由于旋转磁场以同步角速度 Ω_1 旋转,而旋转磁场为了带动转子旋转,通过气隙传到转子的总功率就是电磁功率,所以 $T=P_{\text{M}}/\omega_1$ 。

2. 三相异步电动机的运行特性

异步电动机从定子边吸取电能,从转子轴端输出机械能。从使用方面来说,机械负载需要它有一定的转矩和转速;从电网方面来说,要求电动机具有一定的效率、功率因数,并应限制其启动电流。为了保证电动机能够可靠、经济地运行,在设计和制造时必须保证电动机的性能满足国家标准所规定的技术指标。三相异步电动机的运行特性反映了一些重要技术指标的变化规律。

三相异步电动机的运行特性是指在额定电压及额定频率时,转速 n 、电磁转矩 T 、定子电流 I_1 、定子功率因数 $\cos\varphi_1$, 以及效率 η 随着输出功率 P_2 而变化的关系曲线。

1) 转速特性

三相异步电动机在额定电压及额定频率下,输出功率 P_2 变化时,转速 n 的变化曲线 $n=f(P_2)$ 称为转速特性。

空载时,输出功率 $P_2=0$, 转子电流很小,转子铜耗 P_{Cu2} 很小,转差率 $s\approx 0$, 转子转速接近同步转速。随着负载的增大,转速会略有下降,这样旋转磁场便以较大的转差 $\Delta n=n_1-n$ 切割转子导体,使转子导体中的感应电势及电流增加,而转子电流的增加,会产生较大的电磁转矩从而与机械负载的阻力转矩相平衡。转速特性 $n=f(P_2)$ 曲线形状如图 3-34 所示。

随着负载的增大,转子电流增大,转子铜耗及电磁功率也相应增大。但是,转子铜耗与转子电流的平方成正比,而电磁功率近似与转子电流的一次方成正比,转子铜耗比电磁功率增大的快。所以,随着负载的增大,转差率 $s=P_{\text{Cu2}}/P_{\text{M}}$ 也增大,即转速 n 稍有下降。对一般的三相异步电动机,为保证有较高的效率,转子铜耗 P_{Cu2} 不能过大,所以转差率 s 的数值很小。在额定负载时的转差率约为 $s_{\text{N}}=0.01\sim 0.07$ (其中小的数字对应于容量大的电动机),这表明额定转速仅比同步转速低 1%~7%。

2) 转矩特性

三相异步电动机在额定电压及额定频率下,当输出功率 P_2 变化时,电磁转矩 T 的变化曲线 $T=f(P_2)$ 称为转矩特性。

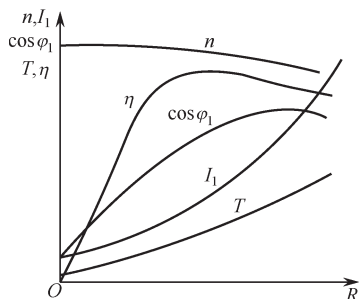


图 3-34 三相异步电动机的工作特性

由三相异步电动机的转矩平衡方程式可知, 即

$$T = T_0 + T_2 = T_0 + \frac{P_2}{\Omega} \quad (3-57)$$

从空载到额定负载之间, 空载转矩 T_0 可认为不变, 假设电动机的转速也不变, 则转矩特性 $T=f(P_2)$ 为一条直线。实际上, 随着 P_2 的增加, 电动机的转速略有下降, 所以, 转矩特性 $T=f(P_2)$ 是一条比直线略有上翘的曲线, 如图 3-34 所示。

3) 定子电流特性

三相异步电动机在额定电压及额定频率下, 输出功率 P_2 变化时, 定子电流 I_1 的变化曲线 $I_1=f(P_2)$ 称为定子电流特性。

空载运行时, 转子电流 $I_2 \approx 0$, 此时定子电流 I_1 几乎全部为励磁电流。励磁电流是定子电流中用来产生旋转磁场主磁通的电流分量。定子电流中的另一部分用来与转子电流相平衡称为定子电流有功分量。

当负载增加以后, 输出功率增大, 转子转速下降, 转子电流增加, 以产生足够的电磁转矩与负载转矩相平衡, 通过电磁感应, 定子电流也随着增加, 输入功率增大, 从而满足功率平衡方程的要求。定子电流特性 $I_1=f(P_2)$ 曲线形状如图 3-34 所示。

4) 功率因数特性

三相异步电动机在额定电压及额定频率下, 输出功率 P_2 变化时, 定子功率因数 $\cos \varphi_1$ 的变化规律曲线 $\cos \varphi_1 = f(P_2)$ 称为功率因数特性。

对电网来说, 三相异步电动机是一个电感性负载, 所以三相异步电动机的功率因数是滞后的。

空载运行时, 定子电流中的大部分是励磁电流, 由于励磁电流中的主要成分是无功的磁化电流, 所以空载时的功率因数很低, 通常 $\cos \varphi_0 < 0.2$ 。加上负载后, 由于要输出一定的机械功率, 因此, 定子电流中的有功分量增加, 电动机的功率因数逐渐提高。一般电动机在额定功率附近, 功率因数将达到最大数值, 额定功率因数 $\cos \varphi_N = 0.7 \sim 0.9$ 。功率因数特性 $\cos \varphi_1 = f(P_2)$ 曲线形状如图 3-34 所示。

5) 效率特性

三相异步电动机在额定电压及额定频率下, 输出功率 P_2 变化时, 效率 η 的变化规律曲线为

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \Sigma P} \quad (3-58)$$

空载时, 输出功率 $P_2=0$, 故 $\eta=0$ 。随着负载的增大, 输出功率逐步增大, 效率也相应增大。

异步电动机在运行过程中的转速及气隙磁通是近似不变的, 故机械损耗与定子铁耗之和基本上是常数, 称为不变损耗; 定、转子铜耗与电流平方成正比, 随电流的变化而变化, 称为可变损耗。如同变压器与直流电动机一样, 当不变损耗与可变损耗相等时, 出现最大效率。

出现最大效率后, 若负载继续增大, 电动机的效率就要下降, 效率特性 $\eta = f(P_2)$ 曲线形状如图 3-34 所示。

由于额定功率附近的功率因数和效率都比较高, 因此, 希望电动机在额定功率附近运行。如果电动机长时间在低负荷下运行, 由于此时的效率和功率因数都很低, 所以很不经济。因此, 选用电动机时, 应使电动机的机械容量与机械负载相匹配。

3. 三相异步电动机的机械特性

异步电动机输出机械功率主要表现在输出转矩和转速上, 因此, 转速或转差率是异步电动机的基本变量之一。当三相异步电动机的外加定子电压及频率不变, 转差率 s 变化时, 电磁转矩 T 的变化规律曲线 $T=f(s)$ 称为机械特性。通过数学分析, 可以得到用参数表示的电磁转矩 T 的计算公式为

$$T = \frac{3pU_1^2 r_2' / s}{2\pi f_1 [(r_1 + r_2' / s)^2 + (x_{1\sigma} + x_{2\sigma}')^2]} \quad (3-59)$$

式中 p ——极对数;

U_1 ——电动机相电压;

f_1 ——定子频率;

$r_1, x_{1\sigma}$ ——定子绕组的电阻和电抗;

$r_2', x_{2\sigma}'$ ——转子绕组的折算电阻和电抗。

当异步电动机的定子电压、频率及各参数都为定值时, 改变转差率 s 的大小, 根据式 (3-59) 可算出相应的电磁转矩 T , 做出机械特性 $T=f(s)$ 曲线, 如图 3-35 (a) 所示。

由图 3-35 (a) 可知, 当 $1>s>0$ 时, 电磁转矩和转子的转速都为正, 转子转速小于磁场的同步转速, 电动机处于电动机运行状态; 当 $s<0$ 时, 转子的转速为正, 转子转速大于磁场的同步转速, 电磁转矩为负, 电动机处于发电机运行状态; 当 $s>1$ 时, 转子的转速为负, 电磁转矩为正, 电动机处于制动运行状态。

通过机械特性曲线, 可以看到三相异步电动机具有以下一些特点。

(1) 在启动的瞬间, 即 $s=1$ 时的电磁转矩称为启动转矩。通过数学分析的方法可知, 电动机的启动电流很大, 但转子功率因数很小, 而 $T=C_T \Phi_M I_2 \cos \varphi_2$, 故启动转矩 T_{st} 并不大。

(2) 如果转子达到同步转速, 即 $s=0$, 则转子电流 $I_2=0$, 此时的电磁转矩 $T=0$ 。

(3) 当转差率 s 达到某一值时, 电磁转矩达到最大值, 称为最大转矩 T_m , 对应于此时的转差率称为临界转差率 s_m , 一般异步电动机的 $s_m=0.04\sim 0.14$ 。通过数学分析的方法可得

到临界转差率 s_m 和最大转矩 T_m 的数学表达式为

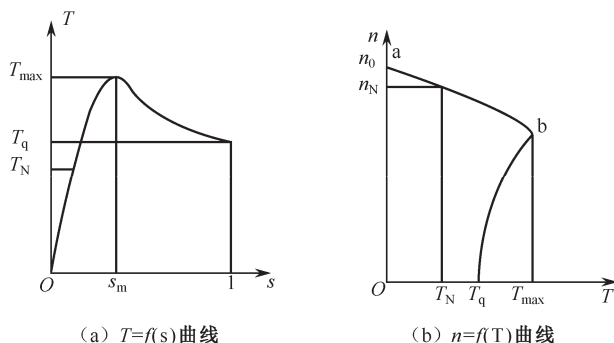


图 3-35 三相异步电动机的机械特性

$$s_m = \frac{r'_2}{\sqrt{r_1^2 + (x_{1\sigma} + x'_{2\sigma})^2}} \quad (3-60)$$

$$T_m = \frac{3pU_1^2}{4\pi f_1 \cdot [r_1 + \sqrt{r_1^2 + (x_{1\sigma} + x'_{2\sigma})^2}]} \quad (3-61)$$

可见，三相异步电动机的最大转矩与电网电压的平方成正比，最大转矩与转子电阻无关，临界转差率与 s_m 转子电阻成正比。

(4) 转子电阻对 $T=f(s)$ 曲线的影响：异步电动机转子回路中的电阻不同，其相应的机械特性 $T=f(s)$ 曲线的形状也不同，启动转矩的大小也不同。当 $s_m < 1$ 时，随着转子电阻的增加，启动转矩变大；要使启动转矩达到最大转矩 $s_m=1$ ，即

$$s_m = \frac{r'_2 + R'_{st}}{\sqrt{r_1^2 + (x_{1\sigma} + x'_{2\sigma})^2}} = 1 \quad (3-62)$$

此时在转子回路中应串入电阻的折算值为 $R'_{st} = \sqrt{r_1^2 + (x_{1\sigma} + x'_{2\sigma})^2} - r'_2$ 。若转子回路串入的电阻超过该值， $s_m > 1$ ，说明电动机的启动转矩变小。

(5) 对应于额定负载时的转矩称为额定转矩 T_n ，相应的转差率称为额定转差率 s_n 。

(6) 最大转矩与额定转矩之比，称为电动机的过载能力 K_m ，它是衡量电动机过载能力的一个重要指标。

$$K_m = \frac{T_m}{T_n} \quad (3-63)$$

一般三相异步电动机的过载能力 $K_m=2\sim 2.2$ 。

(7) 启动转矩与额定转矩之比，称为电动机启动转矩倍数 K_{st} 。

$$K_{st} = \frac{T_{st}}{T_n} \quad (3-64)$$

实际应用中，希望 K_{st} 尽量大一些为好，JO2 系列电动机的 $K_{st}=0.9\sim 2$ ，Y 系列电动机的 $K_{st}=1.8\sim 2.2$ 。

3.2.3 异步电动机的启动、调速及制动控制

因为各种生产机械经常要进行启动、调速和停车,所以作为原动机的异步电动机,其启动、调速和制动等性能的好坏对生产机械的运行有很大影响。

1. 三相异步电动机的启动

三相异步电动机的启动是指从电动机接入电网开始到达到正常运转为止的这一过程。一般衡量三相异步电动机启动性能的好坏,主要有如下四点:

- (1) 启动电流尽可能小;
- (2) 启动转矩要足够大;
- (3) 启动所需用的设备简单、经济、操作方便;
- (4) 启动过程中的功率损耗要尽量小。

异步电动机在启动时存在着两种矛盾:电动机的启动电流大,而供电线路承受冲击电流的能力有限;电动机的启动转矩小,而负载又要求有足够的转矩才能启动。在不同的情况下应采取不同的启动方法。

对于容量不大,又是在空载情况下启动的异步电动机,如一般机床上用的电动机,启动电流虽大,但在很短时间内就下降了,只要车间里许多机床不是同时启动,对供电线路不会造成太大影响。其启动转矩即使比电动机的额定转矩还小,只要是空载启动,也是够用的,转起来之后,仍能承担额定负载。因此,在这种情况下可以采用直接启动。

对于经常满载启动的电动机,如电梯、起重机等,当启动转矩小于负载转矩时,根本就转不起来,当然就无法工作了。对于几百千瓦以上的中、大容量电动机,额定电流就有几百安培,启动电流有数千安培,这样大的电流冲击一下,供电线路能否承受,那就要看电网和供电变压器的容量了。电动机的启动电流流过具有一定内阻抗的发电机、变压器和供电线路,总会造成电压的瞬时降低。变压器容量越小,内阻抗值就越大,启动电流引起的瞬时压降也越大。供电电压的瞬时降低,不仅会使这台要启动的电动机本身转不起来,而且在同一条供电母线上的其他设备也要受到冲击,电灯会变暗,数控设备失常,带着重载的电动机甚至会停下来。在这种情况下,变电所的欠电压保护可能会跳闸,造成停电事故。因此,大容量的异步电动机是不允许直接启动的。具体来讲,异步电动机的启动方法主要有以下四种:

1) 小容量电动机空载或轻载启动——直接启动

小容量电动机空载或轻载时,可以直接启动。直接启动就是将电动机定子绕组直接接到具有额定电压的电网上。这种启动方法的优点是操作和启动设备都简单。直接启动时电流较大,如果负载的惯量较大,启动时间可能较长。为了保证电动机启动时不引起太大的电网压降,电动机应满足下列经验公式的要求,即

$$\frac{I_{st}}{I_n} \leq \frac{3}{4} + \frac{\text{供电变压器的容量}}{4 \times \text{电动机额定容量}} \quad (3-65)$$

电动机能否采用直接启动方法,这不仅取决于电动机本身的容量大小,而且还与供电电网容量、供电线路长短、启动次数及其他用户的要求有关。

供电电网容量越大,允许直接启动的电动机容量也越大。电动机与供电变压器之间的距离越长,启动时线路电压降也越大,则电动机的端电压就越低,有可能使电动机转不起来,此种情况下应降低允许直接启动的电动机容量。频繁启动的电动机,通过同一台变压器供电到其他设备,如果都是动力用户,即都是电动机,则对允许直接启动的电动机容量的要求就放松一些,如果还有照明用户,以及其他对电源电压波动很敏感的用户,则对允许直接启动的电动机容量的要求就严格一些。

至于具体的规定,可查阅有关书籍或电工手册。通常以下两种情况可以采用直接启动:

- (1) 容量在 7.5kW 以下的三相异步电动机;
- (2) 电动机在启动瞬间造成的电网电压降不大于电压正常值的 10%,对于不经常启动的电动机可放宽到 15%。

2) 中、大容量电动机空载或轻载启动——降压启动

当电动机容量超过前面所述的要求时,就不能直接启动。在这种情况下,如果仍是空载或轻载启动,则启动时的主要问题就是启动电流大而电网允许的冲击电流有限。因此,必须降低启动电流。要降低启动电流,最有效的措施就是降压启动。

降压启动是指电动机在启动时降低加在定子绕组上的电压,启动结束后再加上额定电压运行。降压启动可以有效地降低电动机的启动电流,感应电动机的启动转矩和电压的关系为

$$T_{st} = \frac{1}{2\pi f_1} \frac{3pU_1^2 r_2'}{(r_1 + r_2')^2 + (x_{1\sigma} + x_{2\sigma}')^2} \quad (3-66)$$

由式(3-66)可见,感应电动机的启动转矩和电压的平方成正比,因此,降压启动时,电动机的启动转矩也相应降低,所以降压启动只适用于电动机空载或轻载启动。常用的降压启动方法有星/三角降压启动、自耦变压器降压启动、定子绕组串电阻或电抗降压启动、延边三角形降压启动。

3) 星/三角(Y/Δ)降压启动

星/三角降压启动是指在额定电压下运行时为三角形接法的电动机,在启动时采用星形接法从而使三相定子绕组所承受的每相电压降低为额定电压(电源线电压)的 $1/\sqrt{3}$ 倍。其原理如图 3-36 所示。

此种方法的最大优点是所需设备简单、价格低,因而获得了广泛的应用。由于此种方法只能用于正常运行时三相定子绕组为三角形接法的电动机,因此,我国生产的 JO2 及 Y 系列三相鼠笼式异步电动机,功率在 4kW 及以上者正常运行时都采用三角形接法。

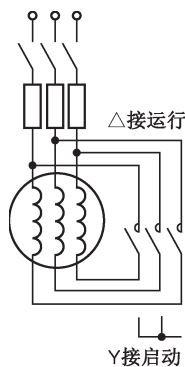


图 3-36 星/三角降压启动

4) 自耦变压器降压启动

自耦变压器降压启动又称启动补偿器启动,这种启动方法是利用自耦变压器来降低启

动时加在定子三相绕组上的电压,其原理线路图如图 3-37 所示,它由三相自耦变压器和控制开关等组成。

利用三相自耦变压器将电动机在启动过程中的端电压降低,以达到减小启动电流的目的。自耦变压器备有 40%、60%、80%等多种触头,使用时要根据电动机启动转矩的要求具体选择。

绕线式异步电动机转子绕组串入附加电阻后,既可以降低启动电流,又可以增大启动转矩。

这种启动方法的优点是可以按容许的启动电流和所需的启动转矩选择自耦变压器的变压比从而实现降压启动,而且不论电动机定子绕组采用星形接法还是三角形接法都可使用,缺点是投资较大、设备体积大。

2. 三相异步电动机的调速

三相异步电动机的调速是指用人为的方法来改变三相异步电动机的转速。异步电动机在结构简单、价格便宜、运行可靠、维护方便等方面优于直流电动机,在容量、电压、转速等级上也比直流电动机高,但在调速和控制性能上较直流电动机差。异步电动机的转速是可以调节的,但目前还没有找到调速范围广、精度高、动态性能好,而又价廉、可靠、能够完全取代直流电动机的交流调速系统,这在国际上也是令人瞩目的一个研究课题。

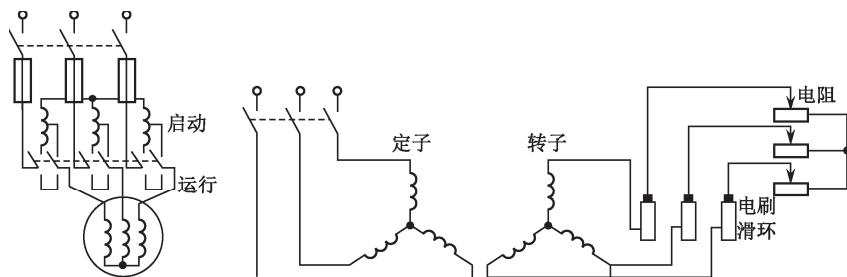


图 3-37 自耦变压器降压启动原理线路图

异步电动机的转速公式为

$$n = n_1(1-s) = \frac{60f_1}{p}(1-s) \quad (3-67)$$

由式(3-67)可见,异步电动机可通过改变定子绕组的极对数 p 、改变电源频率 f_1 和改变转差率 s 进行调速。

1) 变极调速

变极调速就是改变电动机定子绕组的极对数 p 来调速。从式(3-67)可见,如果电源频率 f_1 固定不变,只要改变电动机绕组的极对数 p ,则同步转速 n_1 和转子转速 n 也会随着改变。而且,电动机的同步转速 n_1 与极对数 p 成反比变化,如当 $f_1 = 50\text{Hz}$ 时,把极对数从 $p=1$ 变到 $p=2$,得到的同步转速将为 $n_1 = 3000\text{r/min}$ 和 $n_1 = 1500\text{r/min}$ 两种。

变极调速的异步电动机一般采用鼠笼式转子,因为鼠笼式转子的极对数能自动地随着

定子极对数的改变而改变,使定、转子磁场的极对数总是相等而产生平均电磁转矩。若为绕线型转子,则定子极对数改变时,转子绕组必须相应地改变接法以得到与定子相同的极对数,很不方便。

变极调速方法的优点:设备简单、运行可靠。缺点:不是平滑调速而是一级一级的分段式调速。

2) 变转差率调速

就是改变电动机的转差率 s 来调速。当恒转矩负载调速时,从电磁转矩关系式(3-59)可见,改变转差率 s 有如下几种方法:

- (1) 在转子回路串入电阻、电感或电容,以改变转子电阻 r_2' 或转子电抗 $x_{2\sigma}'$;
- (2) 改变定子绕组的端电压 U_1 ;
- (3) 在定子回路串入外加电阻或电抗,以改变 r_1 或 $x_{1\sigma}$ 。

改变转差率调速常用的方法是在转子回路中串电阻,其机械特性如图 3-38 所示。这种方法只适用于绕线转子异步电动机,在电动机转子回路中接入附加电阻后就可以改变电动机的特性曲线形状。假设在不同的转速时负载转矩 T_2 恒定不变,在转子回路未接入附加电阻时,电动机稳定在 a 点运行,这时电动机的电磁转矩刚好与负载转矩 T_2 相平衡,随着转子电阻的增大,电动机的稳定运行点逐渐向左移动(a—b—c—d),也就是说,随着转子电阻的增加,转差率 s 变大,电动机的转速降低。

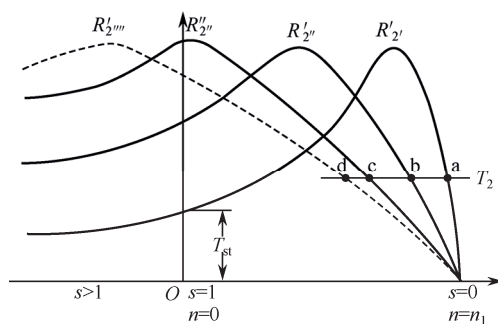


图 3-38 转子回路中串电阻调速的机械特性

这一方法的物理过程:在转子回路电阻增加的最初瞬间,由于惯性的缘故,转子转速还来不及改变,转子回路的感应电势仍维持原来的数值,因此,转子电流将随着转子回路电阻数值的增加而减少,电磁转矩也将下降,于是电动机开始减速。但随着转速的下降,转差率变大,转子回路的电势及电流将随着转差率的增大而重新回升,从而使电动机的电磁转矩又重新增大,直到与负载转矩重新平衡为止。

这种方法的缺点:转子回路中接入附加电阻后,将使转子铜耗增加,降低了电动机效率。但由于此法比较简单,在中小容量的电动机中还是用得比较多,如交流供电的桥式起重机电机大部分采用此法调速。

3) 变频调速

由前面的分析可知,对异步电动机而言,变极调速级数少,并且不能平滑调速,转子回路串联电阻改变转差率 s 调速则损耗较大。因此,虽然异步电动机与直流电动机相比较

有结构简单、成本低廉、坚固耐用等优点,但由于调速较困难而限制了它的使用,一般只能作接近恒速运行。然而,随着晶闸管提供一个频率可调的交流电源给异步电动机的基础产生,从而使能够平滑调节异步电动机转速的变频调速技术迅速发展。

变频调速就是改变供电电源的频率 f_1 来调速。当改变电源频率 f_1 时,旋转磁场的同步转速与电源频率成正比变化,于是转子转速也相应改变,达到调节转速的目的。异步电动机定子绕组电压平衡方程式为

$$U_1 \approx E_1 = 4.44 f_1 N_1 \Phi_M K_w \quad (3-68)$$

由式(3-68)可见,当降低交流电源频率 f_1 进行调速时。如果电源电压 U_1 不变,则磁通 Φ_M 将增加,使铁芯饱和,导致励磁电流和铁损耗增加,电动机温升将增加,这是不允许的;如果增大交流电源频率 f_1 进行调速,电源电压 U_1 不变,则磁通将减小,由式(3-54)可见,在转子电流 I_2 不变的情况下,电磁转矩 T 必然下降,电动机输出功率将下降。所以,变频调速时,总希望保持磁通 Φ_M 不变。因此,在调节交流电源频率 f_1 时、必须同时调节电源电压 U_1 ,并保持 U_1/f_1 为常数。

变频调速根据电动机输出性能的不同可分为如下3种:

- (1) 保持电动机过载能力不变的变频调速;
- (2) 保持电动机输出转矩不变的恒转矩变频调速;
- (3) 保持电动机输出功率不变的恒功率变频调速。

从调速范围、平滑性及调速过程中电动机的性能等方面来看,变频调速很优越,可以和直流电动机相媲美。但要使频率 f_1 和端电压 U_1 同时可调,需要一套专门的变频装置,使投入的设备增多、成本增大。

异步电动机的调速性能不如直流电动机的调速性能好。这是因为,异步电动机的运行特点就是在接近同步转速工作时(即转差率 s 较小时),机械性能较硬,效率和功率因数都较高。如果远低于同步转速(即转差率 s 较大时),各方面的性能都要变差。因此,改变转差率 s 不是理想的调速方法,而变极调速和变频调速又不像直流电动机改变电枢电压那样方便。

3. 三相异步电动机的反转和制动

1) 反转

三相异步电动机的旋转方向取决于定子旋转磁场的旋转方向,并且两者的方向相同。只要改变旋转磁场的方向,就能使三相异步电动机反转。因此,将三相接线端中的任意两相接线端对调,改变三相顺序,就改变了旋转磁场的方向,从而使三相异步电动机反转。

2) 制动

三相异步电动机的制动是指加上一个与电动机转向相反的转矩来使电动机迅速停转或限制电动机的转速。电动机在下述情况下运行时属于制动状态:一是在负载转矩为势能转矩的机械设备中使设备保持一定的运行速度(如起重机下放重物,电力机车下坡运行);二是在机械设备需要减速或停止转动时,电动机能实现减速或停止转动。

三相异步电动机的制动方法有两类：机械制动和电气制动。机械制动是利用机械装置（如电磁抱闸机构）来使电动机迅速停止转动，常用于起重机械设备上；电气制动是使异步电动机所产生的电磁转矩的方向和电动机转子的旋转方向相反，电气制动通常可分为反接制动、回馈制动和能耗制动。

（1）反接制动。在分析异步电动机工作原理时指出的制动状态（ $n < 0$ ， $s > 1$ ），此时转子的转向与定子旋转磁场的转向相反，实现反接制动可用下述两种方法。

① 正转反接：将正在电动机状态下运行的异步电动机的定子绕组三根供电线任意对调两根，则定子电流的相序改变，其相应的旋转磁场立即反转，从原来与转子转向一致变为与转子转向相反，于是电动机立即进入相当于 $s=2$ 时的制动状态。为了使反接时电流不致过大，若为绕线型异步电动机，反接时应在转子回路中串入附加电阻。当电动机转速下降至零时，必须立即切断定子电源，否则电动机将向相反方向旋转。

② 正接反转：当绕线型异步电动机拖动的起重机下放重物时，其运行状态便是正接反转制动。这时电动机定子接线仍按电动机运行时的接法（正接），而利用在转子回路串入较大电阻 R_t 来使转子反转。其原理和在转子回路串入电阻调速一样，当串入转子的电阻 R_t 逐步增至很大时，转子转速逐步减小至零，如图 3-39 中 a—b—c 所示。此时如果 R_t 继续增加，电磁转矩将小于总负载转矩（ $T_2 + T_0$ ），转子就开始反转（重物向下降落）而进入制动状态，当 R_t 增加到 R_{t3} 时，电动机稳定运行在 d 点，转差率 $s=1.2$ ，转子反转的速度为 $0.2n_1$ ，从而保证了重物以较低的均匀转速慢慢下降，而不致把重物损坏。显然，可调节 R_t 的大小来平滑控制重物下降的速度。

（2）回馈制动。当异步电动机作电动机运行时，如果由于外来因素，使转子加速到超过同步转速，则异步电动机进入回馈制动（发电机运行）状态。例如，前述的起重机放下重物时，如果仍按电动机状态运行，即转子转向和定子旋转磁场转向相同，则在电动机的电磁转矩和重物的重力产生的转矩共同作用下，重物以越来越快的速度下降，当转子转速由于重力的作用超过同步转速，即 $n > n_1$ 时，异步电动机就进入发电机制动状态运行，电磁转矩方向立即改变，一直到电磁转矩与重力转矩平衡时，转子转速及重物下降速度才稳定不变，使重物恒速下降。这时重物下降减少的位能转换为电能送给电动机所接的电网，因而称为回馈制动。

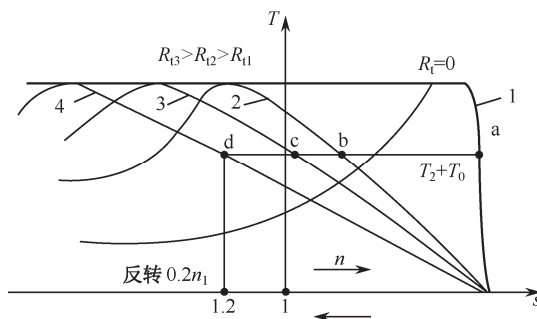


图 3-39 绕线型异步电动机正接反转的反接制动

回馈制动的优点是经济性能好，可将负载的机械能变为电能返回电网。缺点是应用范围窄，只有在电动机转速大于同步转速时才能实现。

(3) 能耗制动。如图 3-40 所示, 将正在运行中的异步电动机的定子绕组从电网断开, 而接到一个直流电源上, 由直流电流励磁在气隙中建立一个静止的磁场。于是, 从正在旋转的转子上来看此磁场将是向后旋转的, 因此, 由它感应于转子中的电流所产生的电磁转矩的方向应为向后转, 即对转子起制动作用。这种制动方法是利用转子旋转时的惯性, 使转子导体切割静止磁场而产生制动转矩, 把转子的动能消耗于转子回路的电阻上成为铜耗, 故称能耗制动。

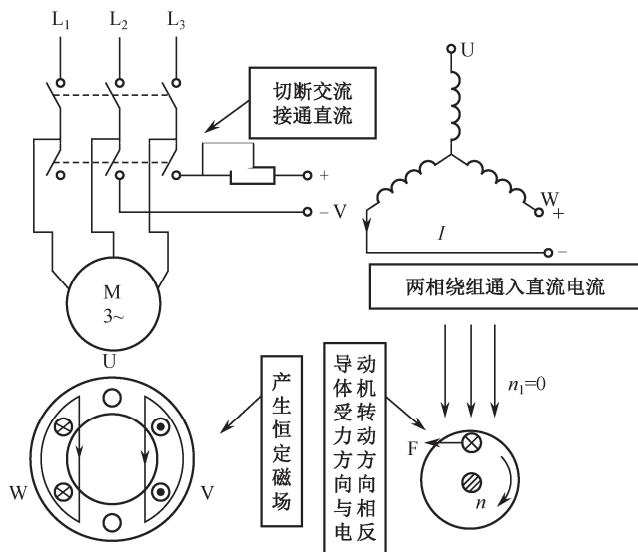


图 3-40 异步电动机的能耗制动

能耗制动的优点是制动力强、制动平稳、对电网影响小。缺点是需要一套直流电源装置, 而且制动转矩随着电动机转速的减小而减小, 不易制停。

3.3 步进电动机

步进电动机是一种把电脉冲转换成角位移的电动机。用专用的驱动电源向步进电动机供给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, 其角位移与脉冲数成正比, 电动机转速与脉冲频率成正比, 而且转速和转向与各相绕组的通电方式有关。

根据励磁方式的不同, 步进电动机分为反应式、永磁式和感应式 (混合式), 而反应式步进电动机应用较多, 下面以此为例来阐述步进电动机的原理。

3.3.1 步进电动机的工作原理

图 3-41 所示为一台三相六拍反应式步进电动机, 定子上有三对磁极, 每对磁极上绕有一相控制绕组, 转子有四个分布均匀的齿, 齿上没有绕组。

当 A 相控制绕组通电, 而 B 相和 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，在步进电动机中称为静转矩。在此转矩的作用下，使转子的齿 1 和齿 3 旋转到与 A 相绕组轴线相同的位置上，如图 3-41 (a) 所示，此时整个磁路的磁阻最小，此时转子只受到径向力的作用而反应转矩为零。如果 B 相通电，A 相和 C 相断电，那转子受到反应转矩作用而转动，使转子齿 2、齿 4 与定子极 B、B' 对齐，如图 3-41 (b) 所示，此时，转子在空间上逆时针转过的空间角为 30° ，即前进了一步，转过这个角称为步距角。如此，按顺序不断地接通和断开控制绕组，电动机便按一定的方向一步一步地转动，若按反向顺序通电，则电动机反向一步一步地转动。

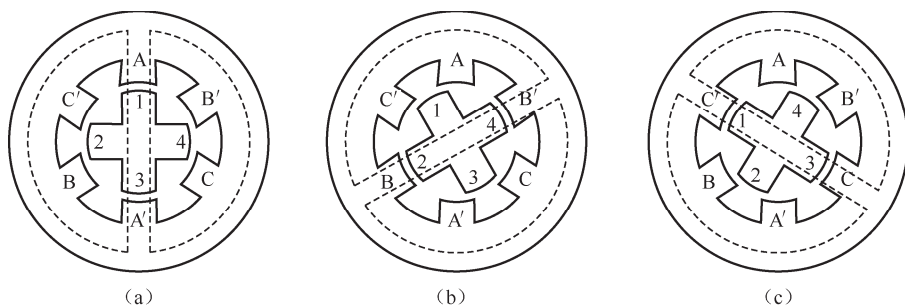


图 3-41 三相反映式步进电动机的工作原理图

在步进电动机中，控制绕组每改变一次通电方式，称为一拍，每一拍转子就转过一个步距角，上述的运行方式每次只有一个绕组单独通电，控制绕组每换接三次构成一个循环，故这种方式称为三相单三拍。若按 A—AB—B—BC—C—CA 顺序通电，每次循环需换接六次，故称为三相六拍，因单相通电和两相通电轮流进行，故又称三相单、双六拍。三相六拍运行方式的步距角是三相单三拍的一半，即为 15° 。

另外还有一种运行方式，按 AB—BC—CA 顺序通电，每次均有两个控制绕组通电，故称为三相双三拍，实际是三相六拍运行方式去掉单相绕组单独通电的状态，转子齿与定子磁极的相对位置与图 3-42 中一样或类似。不难分析，按三相双三拍方式运行时，其步距角与三相单三拍一样，都是 30° 。

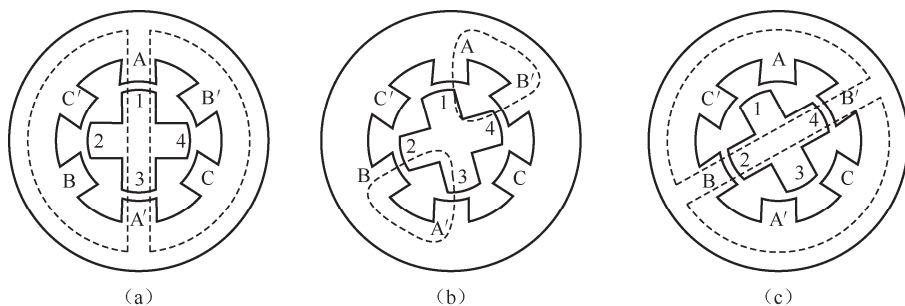


图 3-42 步进电动机的三相单、双六拍运行方式

由上面的分析可知，同一台步进电动机，其通电方式不同，步距角可能不一样，采用单、双拍通电方式，其步距角是单拍或双拍的一半。采用双极通电方式，其稳定性比单极要好。

3.3.2 步进电动机的静态指标术语

(1) 拍数: 完成一个磁场周期性变化所需脉冲数或导电状态, 用 n 表示, 或指电动机转过一个齿距角所需脉冲数。以四相电动机为例, 有四相四拍运行方式即 AB-BC-CD-DA-AB, 四相八拍运行方式即 A-AB-B-BC-C-CD-D-DA-A。

(2) 步距角: 对应一个脉冲信号, 电动机转子转过的角位移, 用 θ 表示。 $\theta=360^{\circ}/(\text{转子齿数运行拍数})$, 以常规二、四相, 转子齿数为 50 的电动机为例。四拍运行时步距角为 $\theta=360^{\circ}/(50 \times 4)=1.8^{\circ}$ (又称整步), 八拍运行时步距角为 $\theta=360^{\circ}/(50 \times 8)=0.9^{\circ}$ (又称半步)。

(3) 静转矩: 电动机在额定静态电作用下机不做旋转运动时, 电动机转轴的锁定力矩。此力矩是衡量电动机体积(几何尺寸)的标准, 与驱动电压及驱动电源等无关。

(4) 步距角精度: 步进电动机每转过一个步距角的实际值与理论值的误差。用百分比表示为误差/步距角 $\times 100\%$ 。不同运行拍数其值不同, 四拍运行时应在 5%之内, 八拍运行时应在 15%以内。

(5) 失步: 电动机运转时运转的步数, 不等于理论上的步数。

(6) 失调角: 转子齿轴线偏移定子齿轴线的角度。电动机运转必存在失调角, 由失调角产生的误差, 采用细分驱动是不能解决的。

(7) 最大空载启动频率: 电动机在某种驱动形式、额定电压及电流下, 在不加负载的情况下, 能够直接启动的最大频率。

(8) 最大空载的运行频率: 电动机在某种驱动形式, 额定电压及电流下, 电动机不带负载的最高转速频率。

(9) 运行矩频特性: 电动机在某种测试条件下测得运行中输出力矩与频率关系的曲线称为运行矩频特性, 这是电动机诸多动态曲线中最重要的, 也是电动机选择的根本依据。

3.3.3 步进电动机的应用

步进电动机是用脉冲信号控制的, 步距角和转速大小不受电压波动和负载变化的影响, 也不受各种环境条件诸如温度、压力、振动、冲击等影响, 而仅与脉冲频率成正比, 通过改变脉冲频率的高低可以大范围地调节电动机的转速, 并能实现快速启动、制动、反转, 而且有自锁的能力, 不需要机械制动装置, 不经减速器也可获得低速运行。它每转过一周的步数是固定的, 只要不丢步, 角位移误差不存在长期积累的情况, 主要用于数字控制系统中, 精度高, 运行可靠。如采用位置检测和速度反馈, 也可实现闭环控制。步进电动机已广泛地应用于数字控制系统中, 如数/模转换装置、数控机床、计算机外围设备、自动记录仪、钟表等之中, 另外在工业自动化生产线、印刷设备等中也有应用。

3.4 伺服电动机

伺服电动机又称执行电动机, 没有信号时电动机转子静止不动, 信号来到时, 转子立

即转动, 信号消失, 转子及时停止转动。在自动控制系统中, 它把所收到的电信号转换成电动机轴上的角位移或角速度输出, 以驱动控制对象。按照所使用的电流种类, 常用的伺服电动机分为两大类, 一种是直流伺服电动机; 另一种是交流伺服电动机。

3.4.1 直流伺服电动机

直流伺服电动机与普通的永磁式电动机在结构上基本相同, 工作原理也相似。不同的是, 直流伺服电动机的功率不大, 其磁极通常做成永磁的, 省去了励磁绕组。励磁方式均采用他励式。

直流伺服电动机工作时, 只要励磁绕组中有电流通过并且产生磁通, 当电枢绕组有电流通过时, 电枢电流就与磁通相互作用进而产生转矩, 伺服电动机便开始执行动作。如果这两个绕组中的一个断电, 电动机就立即停止转动。

改变电枢绕组电压和改变励磁电流是直流电动机的两种调速方式, 所以直流伺服电动机的控制方式为电枢控制和磁场控制。电枢控制方式下, 直流伺服电动机的机械特性和调节特性都是线性的, 并且与电枢电阻无关。磁场控制方式下, 直流伺服电动机的机械特性是线性的, 但是调节特性是非线性的, 而且在一定范围内每个转速对应多个信号系数。因此, 直流伺服电动机多采用电枢控制方式。

1. 直流伺服电动机的结构特点

小惯量直流伺服电动机通过减小电枢的转动惯量来提高力矩惯量比, 其转子为细长形, 光滑无槽的铁芯, 用绝缘的黏合剂直接将线圈固定在铁芯表面, 惯量较小。这种电动机的时间常数较小、低速运转稳定并且均匀、响应快、能频繁启动制动。但是过载能力低, 惯量小于机床相关运动部件的惯量, 所以需要配置减速机构才可以和机床运动部件的惯量相匹配, 也是因此增加了加工误差。在早期的数控机床上, 直流伺服电动机有较为广泛的应用。

宽调速直流伺服电动机是大惯量的直流伺服电动机, 它通过提高输出力矩来提高力矩惯量比。具体提高输出力矩的方法有两种, 一种是采用高性能的磁性材料来产生强磁场, 并且增加定子的磁极对数; 另一种是在相同的电枢电流和转子外径的前提下, 增多转子上的槽数和加大槽的面积。这样, 直流伺服电动机的电气时间常数和机械时间常数有所减小, 由此提高电动机的快速响应性。这种电动机的性能特点如下:

(1) 有较大的力矩惯量比, 快速性好。宽调速直流伺服电动机自身的惯量较大, 外部负载的惯量相对而言较小, 这就提高了抗干扰能力。这种伺服系统的调速与负载关系很小, 大大方便了对机床的安装调试。

(2) 调速范围宽。宽调速直流伺服电动机可以与高性能的伺服驱动器组成速度控制系统, 调速范围可以超过 1:10 000。

(3) 过载能力强, 转子热容量好。电动机可以过载运行几十分钟。

(4) 电动机低速运转时输出力矩大。宽调速直流伺服电动机可以与丝杠直接连接, 不需要齿轮等传动机构, 大大提高了机床的进给传动精度。

2. 直流伺服电动机的主要工作特性

直流伺服电动机的性能不能用简单的电压、电流等参数来描述，而需要用特定的曲线和参数来进行全面描述。这里以大惯量伺服直流电动机为例，来对直流伺服电动机的特性进行介绍。

如图 3-43 所示，直流伺服电动机的工作特性有三个区间。在瞬时工作区间，电动机只能在加减速时工作于该区间，也就是说只能在瞬时工作区间工作很短一段时间；在间断工作区间内，电动机根据其负载周期特性所决定的断电时间和允许工作时间间歇性工作；在连续工作区间内，电动机任意转矩转速下都可以长期连续工作。

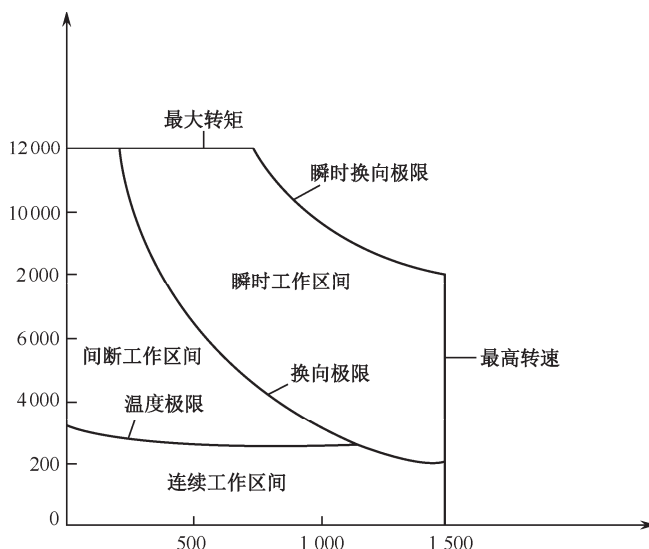


图 3-43 直流伺服电动机工作特性曲线

3.4.2 交流伺服电动机

1. 交流伺服电动机的结构和工作原理

交流伺服电动机的结构上类似于单相分相式异步电动机。其定子铁芯由冲有齿和槽的硅钢片叠压而成。定子槽中装有励磁绕组和控制绕组，它们的匝数可以相同，也可以不相同。伺服电动机的转子多为笼型绕组，与三相异步电动机的笼型转子完全一样。在对灵敏度要求较高的场合，也有铝制的转子呈杯子形状，称为杯形转子。这种电动机除了定子外，交流伺服电动机还有一个内定子，一般内定子上没有绕组，只是代替笼型转子铁芯作为磁路一部分，在内、外定子之间有一个装在转轴上的杯形转子。与直流伺服电动机相比，交流伺服电动机省去了机械换向器和电刷，因此，避免了机械磨损和换向火花的产生等问题。交流伺服电动机可以达到直流伺服电动机的调速性能。

交流伺服电动机的工作原理如图 3-44 所示。图 3-44 中 f 和 c 为定子上的两个绕组，它们相差 90° 电角度。绕组 f 由定值交流电压励磁，为励磁绕组；绕组 c 由伺服放大器供

电进行控制，称为控制绕组。其工作原理类似于单相分相式异步电动机。

交流伺服电动机在系统中运行时，励磁绕组接到交流电源上，因此，电机内部总存在一单相脉振磁场。在没有控制信号时，控制绕组上的控制电压为零，电动机无启动转矩，转子静止。在出现控制信号时，控制电压加在控制绕组上，就产生与励磁磁动势在空间垂直的脉振磁动势，气隙内形成一定大小，并按一定方向旋转的旋转磁场。因此，电动机有了启动转矩，转子就随着该旋转磁场旋转。这就是伺服电动机一有电信号，就随之动作的工作原理。

在自动控制系统中，伺服电动机是执行元件，不仅要求它在静止状态下随着控制电压信号而转动，而且要求它在受控转动后，控制信号电压消失，电动机能够及时停止转动。交流伺服电动机失控现象，即控制信号消失而交流伺服电动机仍然旋转的现象，被称为“自转”。显然这是不允许的。下面来分析怎样避免自转现象。

由异步电动机的机械特性可知，异步电动机最大转矩 T_m 对应的临界转差率 s_m ， s_m 满足为

$$s_m = \frac{r_2'}{\sqrt{r_2'^2 + (x_1 + x_2)^2}}$$

消除自转就是要消除与原转速方向一致的电磁转矩，并同时产生与原方向相反的电磁转矩，使电动机在 $U_c = 0$ 时停止转动。单相异步电动机的机械特性如图 3-45 所示。

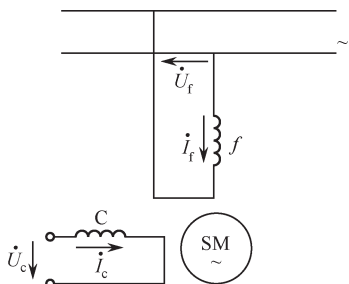


图 3-44 交流伺服电动机原理图

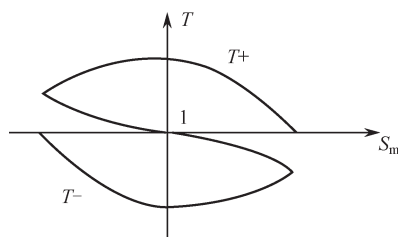


图 3-45 单相异步电动机的机械特性

由此可知，如果交流伺服电动机转子的电阻满足条件，使得 $s_m = 1$ ，那么电动机运行时，当控制电压 $U_c = 0$ ，便出现制动转矩。转子停转。所以消除电动机自转的方法就是将电动机的转子电阻满足 $s_m \geq 1$ ，则必须使

$$r_2' \geq \sqrt{r_2'^2 + (x_1 + x_2)^2}$$

从图 3-45 中还可以看出，增大转子电阻，在运行范围内，电动机的下降机械特性总是稳定的。因此，增大转子电阻，也扩大了交流伺服电动机的稳定运行范围。但是，转子电阻过大会降低电动机的启动转矩，影响其快速响应能力。

2. 交流伺服电动机的控制方法

伺服电动机不仅具有启动和停止的伺服性，而且其转速的大小和方向必须可以控制。对交流伺服电动机动作的控制，取决于控制绕组。控制电压的大小和相位决定了控制绕组磁动势的大小和方向，进而决定着旋转磁场的大小和方向，也就控制了电动机的转速和转向。交流伺服电动机的控制方法有如下有三种。

(1) 幅值控制: 保持电机控制电压 \dot{U}_c 的相位不变, 仅改变其幅值来进行控制的方法为幅值控制。

(2) 相位控制: 保持控制电压 \dot{U}_c 的幅值不变, 仅改变其相位来控制的方法为相位控制。

(3) 幅值-相位控制: 既改变控制电压 \dot{U}_c 的幅值, 又改变其相位来进行控制的方法为幅值-相位控制。

3.5 本章小结

本章主要介绍了常见电动机的原理及运行特性, 包括直流电动机的工作原理及机械特性, 异步电动机的工作原理及机械特性, 最后介绍了步进电动机的工作原理。在学习过程中要比较区分这三种常见电动机的工作原理及应用场合。

重点掌握直流电动机和异步电动机的机械特性, 以及由机械特性引出的包括启动、制动、正反转和调速控制。

步进电动机由于转速不受负载、电压波动的影响, 而只与控制电脉冲有关, 因此, 广泛用于对转速有较高要求的场合。

常用的伺服电动机包括直流伺服电动机和交流伺服电动机, 它们是数控机床的进给运动中不可或缺的执行部件。

3.6 思考与练习

1. 他励直流电动机为何通常不采用直接启动? 若直接启动, 将有何后果?
2. 有一并励直流电动机启动后发现转向与生产机械要求不符, 有哪些方法可改变其转向? 如果把电源极性对调, 能否改变其转向?
3. 直流电动机有哪些调速方法? 其机械特性是什么?
4. 他励直流电动机有几种电气制动的办法? 各种制动方法有何特点?
5. 如何使三相异步电动机反转?
6. 异步电动机如何调速? 各调速方法有何特点?
7. 异步电动机有哪些电气制动方法?
8. 什么是三相步进电动机的单三拍、六拍和双三拍工作方式?
9. 步进电动机有 80 个齿, 采用三相六拍工作方式, 求步进电动机的步距角。
10. 三相步进电动机如果断掉一根电源线能否启动? 为什么?
11. 什么是交流伺服电动机的“自转”现象? 如何克服这种现象?
12. 交流伺服电动机有哪些控制方式?
13. 直流伺服电动机的主要工作特性是什么?

Chapter 4

第 4 章 基本电气控制电路

知识点

- 电气控制电路的基础知识
- 典型基本控制电路
- 直流电动机的基本控制电路
- 三相交流异步电动机的基本控制电路

本章导读

基本电气控制系统是应用最早的控制系统，它是由主令电器、接触器、继电器和保护电器等按一定的生产机械工艺要求组成的控制系统。它具有结构简单、容易掌握、维护方便、价格低廉等优点。运用基本电气控制系统可以实现对直流电动机、三相交流异步电动机等的控制。机床的整个电气控制系统正是由简单基础的基本控制电路组成的，掌握这些基本环节是学习机床电气控制的基础。

根据不同的工业要求，对直流电动机和三相异步电动机的控制可以分成不同的基本环节，如启动、制动、调速、保护等。在本章中将进行一一介绍。学好这些控制电路对数控改造、数控系统的设计等方面都起着十分重要的作用。

4.1 控制电路的图形、文字符号及绘图原则

电气控制电路主要由各种电气元件(接触器、继电器、按钮、电阻等)和用电设备(电动机等)组成。为了设计、分析研究、安装维修时阅读方便,在绘制电气控制线路图必须使用国家统一规定的电气图形符号和文字符号,并且在绘制电气控制线路图时必须符合一定的绘图原则。

4.1.1 常用电器的图形符号和文字符号

在绘制电气线路图时,电气元件的图形符号和文字符号必须符合国家规定的标准。为了便于掌握先进技术和设备,便于国际交流和满足国际市场的需要,国家标准局参照国际电工委员会(IEC)和国际标准化组织(ISO)颁布的有关文件,制定了一系列我国电气设备有关国家标准。最近几年,有关电气图形符号和文字符号的国家标准变化较大。一些老的标准已经废止或有较大更改。目前和电气制图有关的主要国家标准有如下几项:

- (1) GB/T 4728 《电气简图用图形符号》;
 - (2) GB/T 5465 《电气设备用图形符号》;
 - (3) GB/T 20063 《简图用图形符号》;
 - (4) GB/T 5094 《工业系统、装置与设备以及工业产品—结构原则与参照代号》;
 - (5) GB/T 20939 《技术产品及技术产品文件结构原则字母代码—按项目用途和任务划分的主类和子类》;
 - (6) GB/T 6988 《电气技术用文件的编制》。
- 一些常用电气图所用的图形符号和一些常用电气设备文字符号请参见附录。

4.1.2 电气控制线路原理图的绘图规则

1. 电气控制线路表示方法

电气控制线路的表示方法一共有以下三种。

1) 电气原理图

电气原理图表示电气控制线路的工作原理,以及各电气元件的作用和相互关系。电气原理图一般分为主电路、辅助电路和控制电路三个部分。

(1) 主电路是电气控制线路中强电流通过的部分,是由电动机及其相连接的电气元件(如组合开关、接触器的主触点、热继电器的热元件、熔断器等)所组成的线路图。

(2) 辅助电路包括控照明电路、信号电路及保护电路。辅助电路中通过的电流较小。

(3) 控制电路是由按钮、接触器、继电器的吸引线圈和辅助触点及热继电器的触点等组成。这种线路能够清楚地表明电路的功能,对于分析电路的工作原理十分方便。

2) 电气布置图

电气布置图表示各种电气设备在机械设备和电气控制柜中的实际安装位置。各电气元

件的安装位置是由机械设备的结构和工作要求决定的,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,操作元件放在操作方便的地方,一般电气元件应放在控制柜内。

3) 电气安装接线图

电气安装接线图表示各电气设备之间实际接线情况。绘制接线图时应把各电气元件的各个部分(如触头与线圈)画在一起;文字符号、元件连接顺序、线路号码编制都必须与电气原理图一致。电气安装图和接线图常用于安装接线、检查维修和施工等。

2. 电气原理图的绘图规则

绘制电气原理图一般遵循下列规则:

(1) 原理图可以分为主电路、控制电路和辅助电路。主电路是从电源到电动机大电流通过的路径。控制电路是接触器和继电器线圈等小电流线路。辅助电路是信号、保护、测量等小电流线路。主电路用粗线画出,一般画在上方或左方。控制和辅助电路用细线画出,一般画在原理图的下方或右方。

(2) 主电路的电源电路绘成水平线,受电的动力装置(如电动机)及其保护电器支路,一般应垂直于电源电路标出。控制和辅助电路应垂直水平电源线。耗能元件(如线圈、电磁阀)应垂直连接在接地的水平电源线上。而控制触头、信号灯和报警元件应连在另一电源线的一边。

(3) 电气控制线路中所需的全部电气元件都应在图中表示出来,并且必须用国家规定的统一标准的图形符号和文字符号表示。

(4) 原理图中所有元器件和设备的可动部分均以自然状态绘出。如吸引线圈为未通电状态;二进制逻辑元件为置“0”时的状态;手柄是置于“0”位;设备为未受外力的作用的原始位置。

(5) 采用电气元件展开图的画法。同一电气元件的各部分可以不画在一起,但需用同一文字符号标出。若有多个同一种类的电气元件,可在文字符号后加上数字序号区分,如QA1、QA2。

(6) 在表达清楚的前提下,尽量减少线条,尽量避免交叉线的出现。两线交叉连接时需用黑色实心圆点表示,两线交叉不连接时需用空心圆圈表示。

(7) 原理图上应标注出各个电气电路的电压值、极性或频率及相数;某些元器件的特性;常用电气的操作方式和功能。

图4-1所示为拖动电动机与润滑泵电动机的连锁控制线路原理图。

3. 电气原理图的阅读方法

(1) 清楚电路中所用到的各个电气元件及其导电部件在电路中的位置。对于复杂的控制线路,应首先阅读电气元件目录表。

(2) 先看主电路,再看控制电路,最后看照明、信号指示及保护电路。

(3) 总体检查:化整为零,集零为整。

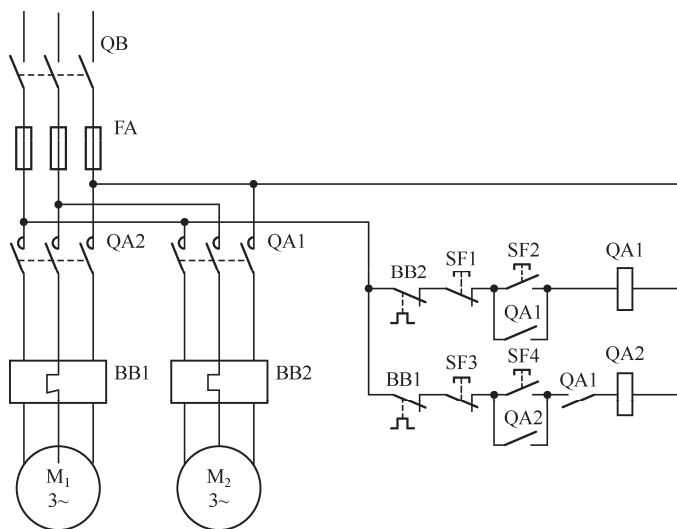


图 4-1 拖动电动机与润滑泵电动机的连锁控制线路原理图

4.1.3 电气控制图的分类

由于电气控制图描述的对象复杂，应用领域广泛，表达形式多种多样，因此，表示一项电气工程或一种电气装置的电气图有多种。它们以不同的表达方式反映工程问题的不同侧面，但又有一定的对应关系，有时需要对照起来阅读。按用途和表达方式的不同，电气图可以分为以下几种。

1. 电气系统图和框图

电气系统图和框图是用符号或带注释的框，概略地表示系统的组成、各组成部分相互关系及主要特征的图样，它比较集中地反映了所描述工程对象的规模。

2. 电气原理图

电气原理图是为了便于阅读和分析控制线路，根据简单、清晰的原则，以电气元件展开的形式绘制而成的图样。它包括所有电气元件的导线部分和接线端点，但并不按照电气元件的实际布置位置来绘制，也不反映电气元件的大小。其作用是便于详细的了解工作原理，指导系统或设备的安装、调试与维修。电气原理图是电气控制图中最重要的一类，也是识图的难点和重点。

3. 电气元件布置图

电气元件布置图主要是用来表明电气设备上所有电气元件的实际位置，为生产机械电气控制设备的制造、安装提供必要的资料。通常电气元件布置图与电气安装接线图组合在一起，既起到电气元件安装接线图的作用，又能清晰地表示出电气元件的布置情况。

4. 电气安装接线图

电气安装接线图是为了电气设备和电气元件的装配或电气故障的检修服务的。是用规定的图形符号,按各电气元件的相对位置绘制的实际接线图,清楚地表示了各电气元件的相对位置和彼此之间的电路连接。所以安装接线图不仅要把同一电器的各个部件画在一起,而且各个部件的布置要尽可能符合这个元件的实际情况,但对比例和尺寸没有严格要求。在安装接线图上不但要画出控制柜内部之间的电气连接,还要画出控制柜外部元件的连接。电气安装接线图中的回路标号是电气设备之间、电气元件之间、导线与导线之间的连接标记,它的文字符号和数字符号应与原理图中的标号一致。

5. 功能图

功能图是绘制电气原理图或其他有关图样的依据,是表示理想的电路关系而不涉及实际方法的一种图。

6. 电气元件明细表

电气元件明细表是把成套装置、设备中各组成元件(包括电动机)的名称、型号、规格、数量列成表格,供材料准备及维修使用。

4.1.4 电气图阅读的基本方法

电气控制系统图示由许多电气元件按照一定的要求连接而成的,可表达机床及生产机械电气控制系统的结构、原理等设计意图,因此,为便于电气元件和设备的安装、调整、使用和维护,必须能看懂其电气图,特别是电气原理图。下面主要介绍电气原理图的阅读方法。

在阅读电气原理图以前,必须对控制对象有所了解,尤其对机、电、液配合比较密切的生产机械,要搞清楚其全部传动过程,并按照“从左到右,从上到下”的顺序进行分析。

任何一台设备的电气控制线路,总是由主电路和控制电路两大部分组成,而控制电路又可分为若干基本控制线路或环节,如点动、正/反转、降压启动、制动、调速等。分析电路时,通常首先从主电路入手。

1. 主电路分析

分析主电路时,首先应了解设备各运行部件和机构采用了几台电动机拖动,然后按照顺序,从每台电动机的主电路中使用接触器的主触头的连接方式入手,可分析判断出主电路的工作方式,如电动机是否正/反转控制,是否采用了降压启动,是否有制动控制,是否有调速控制等。

2. 控制电路分析

分析完主电路后,再从主电路中寻找接触器主触头的文字符号,在控制电路中找出相对应的控制环节,根据设备对控制线路的要求和前面所学的各种基本控制线路的知识,按照顺序逐步深入了解各个具体的电路由哪些电器组成,它们相互间的联系及动作过程等,如果控制电路比较复杂,可将其分成几个部分来分析。

3. 辅助电路分析

辅助电路分析主要包括电源显示、工作状态显示、照明和故障报警等部分。这部分主要由控制电路中的元件控制，所以分析时，要对照控制电路进行分析。

4. 联锁和保护环节分析

任何机械生产设备对安全性和可靠性都提出了很高的要求，因此，控制线路设置有一系列电气保护和必要的电气联锁。分析联锁和保护环节可结合机械设备生产过程中的实际需求及主电路各电动机的互相配合过程进行。

5. 总体检查

经过“化整为零”的局部分析，理解每一个电路的工作原理及各部分之间的控制关系后，再采用“集零为整”的方法，检查各个控制线路，看是否有遗漏。特别要从整体角度去进一步检查和理解各控制环节之间的联系，以理解电路中每个电气元件的作用。

4.2 典型基本控制电路

4.2.1 点动与连续控制电路

1. 点动控制电路

按一下按钮电动机就动作，一松开按钮电动机就能停转的控制方式，称为电动机的点动控制。点动控制经常用于机床试车及进行机械调整等工作中。

最基本的点动控制电路如图 4-2 所示。主电路由刀开关 QB、熔断器 FA、接触器 QA 的主触点、热继电器 BB 的热元件及电动机 M 构成。控制电路由点动的动合按钮 SF（3-5）、接触器 QA 的线圈及热继电器的常闭触点 BB（1—3）构成。

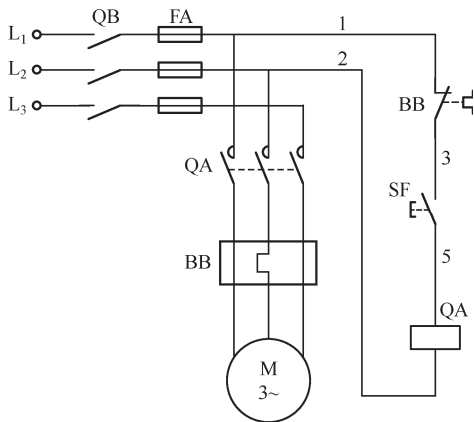


图 4-2 电动机的点动控制电路

电路工作过程如下：

合上电源开关 QB, 按下点动动合按钮 SF, 接触器 QA 得电吸合, 其主触点闭合, 电动机 M 得电启动运转。当松开点动动合按钮 SF 后, 点动按钮在反力弹簧的作用下复位断开, QA 失电释放, 其主触点断开, 使电动机 M 停止转动。

其工作过程用助记符表示为

$$\begin{aligned}\text{启动} \quad & \text{SF}^+ \rightarrow \text{QA}^+ \rightarrow \text{M}^+ \\ \text{停止} \quad & \text{SF} \rightarrow \text{QA}^- \rightarrow \text{M}^-\end{aligned}$$

2. 电动机的长动控制电路

机械设备长时间运转, 即电动机持续工作, 称为长动。电动机的长动控制电路如图 4-3 所示, 该电路的主电路与点动控制电路的主电路相同, 但在原来的控制电路基础上, 除增加一个动断按钮作电动机停车外, 还在动合按钮两端并联接触器的辅助动合触点, 称为自锁触点。电动机的长动控制与点动控制的最大区别就在于有无自锁。电路工作过程如下:

启动

$$\text{SF2}^+ \rightarrow \text{QA}^+ \rightarrow \begin{cases} \text{QA} \rightarrow \text{QA}(5-7)^+, \text{自锁} \\ \text{主触点闭合} \rightarrow \text{M}^+, \text{电动机 M 启动运转} \end{cases}$$

停止

$$\text{SF1}^\pm \rightarrow \text{QA}^+ \rightarrow \begin{cases} \text{QA} \rightarrow \text{QA}(5-7)^+, \text{解除自锁} \\ \text{主触点断开} \rightarrow \text{M}^-, \text{电动机 M 停止运转} \end{cases}$$

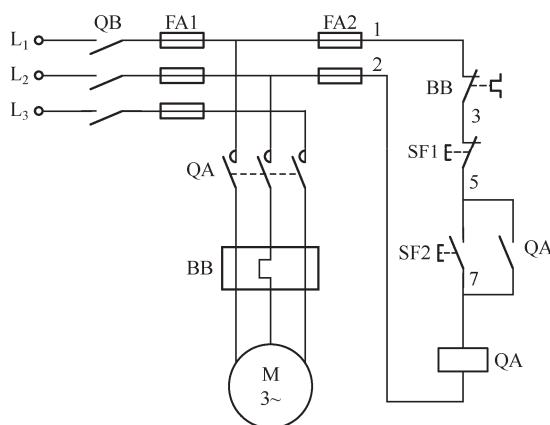


图 4-3 电动机长动控制电路

电路的保护环节如下:

(1) 短路保护。为了扩大保护范围, 熔断器通常安装在电源开关的下方, 熔断器 FA1、FA2 分别实现主电路和控制电路的短路保护。

(2) 过载保护。热继电器 BB 实现对电动机长期过载保护。由于热继电器的热惯性较大, 只有当电动机长期过载时, 热继电器 BB 热元件才能动作, 串联在控制电路中的 BB 的动断触点 BB (1—3) 才能断开, 切断 QA 线圈电路, 电动机停止转动。

(3) 电路的欠压和失压保护。当电源电压严重下降 (欠压) 或消失 (失压) 时, 接触

器或继电器的带电线圈由于吸力严重不足,将导致衔铁释放,所有触点复位,电动机停止转动。而当电源再次恢复正常或重新供电时,接触器不会自行得电吸合,只有操作人员再次按下启动按钮 SF2 后,电动机才能启动。这样,一方面防止电动机在电源电压严重下降时仍低压运行而烧毁电动机;另一方面也防止电压恢复时,电动机自行启动运转,造成设备和人身事故。因此,凡是具有自锁功能的控制电路都具有欠压和失压保护功能。

1) 用继电器进行选择连锁的点动与长动控制电路 1

图 4-4 (a)、(b) 所示为采用中间继电器 KF 实现点动与连续运行的控制电路。其中按钮 SF1 为停止按钮;按钮 SF2 为启动按钮,实现长动控制按钮;按钮 SF3 为点动控制按钮,实现点动控制。点动时,按下点动按钮 SF3→QA 得电吸合→其主触点闭合电动机 M 启动运转;松开按钮 SF3,则 QA 失电释放,电动机 M 停转,实现对电动机 M 的点动控制。连续运行时,按下启动按钮 SF2→中间继电器 KF 得电吸合,并通过其动合触点 KF (5—7) 自锁,其动合触点 KF (1—9) 闭合→QA 得电吸合并自锁→电动机 M 连续运行;停车时,按下 SF1, KF、QA 先后失电释放,电动机 M 停转。

2) 用继电器进行选择连锁的点动与长动控制电路 2

图 4-4 (a)、(c) 所示是采用中间继电器 KF 实现点动与长动的控制电路。其中按钮 SF1 为停止按钮;SF2 为点动按钮,实现点动控制;按钮 SF3 为启动按钮,实现长动控制。

点动时,按钮 SF2, KF 得电吸合,其动断触点 KF (9—13) 断开,切断 QA 的自锁回路,其动合触点 KF (9—11) 闭合,使 QA 得电吸合但不能自锁,QA 的主触点闭合,电动机启动运转,松开 SF2, KF、QA 相继失电释放,电动机停转,实现点动控制。

需要连续控制时,按下 SF₃,使 QA 得电吸合,由于 KF 未得电,其动断触点 KF (9—1) 闭合,因此,QA 的辅助动合触点 QA (13—11) 闭合,使 QA 自锁,QA 的主触点闭合,电动机启动运转。需停转时,按下 SF1,使 QA 失电释放,电动机停转。

4.2.2 正/反转控制电路

生产机械的运动部件往往要求实现正反两个方向的运行,如机床主轴正转和反转,起重吊钩的上升与下降,机床工作台的前进与后退等,这就要求拖动电动机能够正、反向运转。由电动机原理可知,将接至三相笼型感应电动机的三相交流电源进线中的任意两项对调,从而改变电动机定子旋转磁场方向,即可实现三相感应电动机的正、反向运转。按实现电动机三项电源进线中的任意两相对调所用设备不同,有倒顺开关控制和接触器互锁两种正/反转电路。

1. 倒顺转换开关正/反转控制电路

1) 倒顺转换开关正/反转控制电路 1

图 4-5 所示为倒顺转换开关控制电动机正/反向运转控制电路。

图 4-6 所示为倒顺转换开关 SF 工作原理示意图, L₁、L₂、L₃ 与电源进线相连接,而 U、V、W 与电动机定子绕组相连接。

(a) 主电路

(b) 用继电器实现选择性连锁电路1

(c) 用继电器实现选择性连锁电路2

当 SF 扳到下方位置，电动机进线端 U、V、W 直接与电源 L₁、L₂、L₃ 相接，在电源开关 QB 合上的情况下，电动机正向运转。当转换开关 SF 扳回到中间位置时，电动机断开三相电源，电动机停转。当转换开关 SF 扳至上方位置时，电动机的 U、V、W 端分别与三相电源的 L₃、L₂、L₁ 相连接，电动机实现了逆相序，反向运转。当 SF 扳回中间位置时，电动机停止运转。由于转换开关无灭弧装置，此电路仅适用于容量为 5.5kW 及以下的电动机。

2) 倒顺转换开关正/反转控制电路 2

图 4-7 所示的倒顺转换开关 SF 只做预选电动机的运转方向，而由按钮来控制接触器，再由接触器主触点来接通、断开电动机三相电源，实现电动机的启动与停止。因此，其控制电路为电动机单向运转的启动与停止控制电路。由于采用接触器控制，并且接入了热继电器，因此，该电路具有短路保护、长期过载和欠电压保护，而图 4-5 所示电路只具有短路保护。

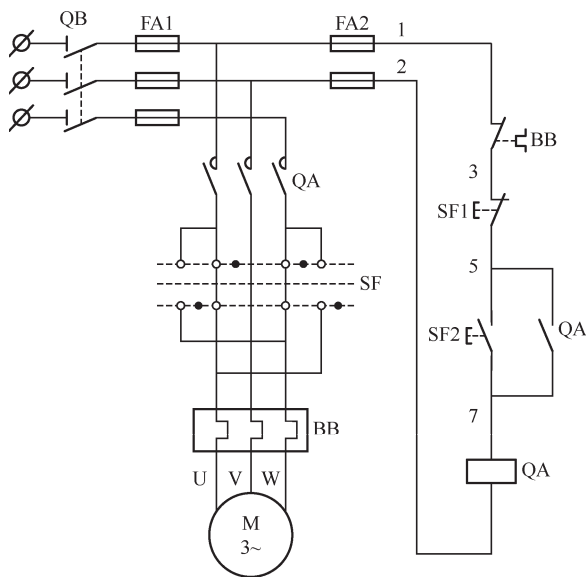


图 4-7 倒顺转换开关控制的电动机正、反向运转控制电路 2

2. 接触器互锁正/反转控制电路

电路如图 4-8 (a)、图 4-8 (b) 所示。控制电路中只使用 SF2、SF3 的动合触点进行启动控制，每个接触器除使用一个辅助动合触点进行自锁外，还将一个辅助动触点串接在相反转向的接触器线圈电路中，以进行联锁，防止电源短路。

电路工作过程如下。

合上开关 QB，接通电源。

(1) 正向启动：

$$SF2^+ \rightarrow QA1^+ \rightarrow \begin{cases} QA1(5-7)^+, \text{自锁} \\ \text{主触点闭合} \rightarrow M_{\text{正}}^+ \\ \overline{QA1}(11-13)^+ \rightarrow \text{对 } QA2 \text{ 实现连锁} \end{cases}$$

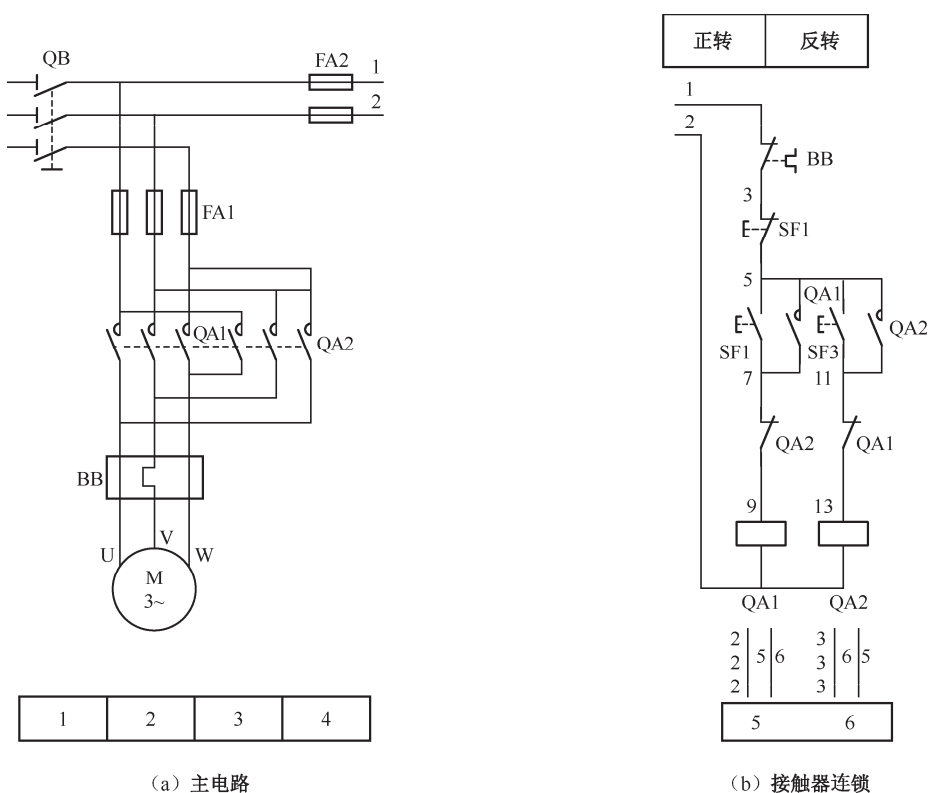


图 4-8 电动机正/反向运转控制电路

(2) 正向停止:

$$\begin{aligned}
 \text{SF1}^{\pm} \rightarrow \text{QA1}^{-} &\rightarrow \begin{cases} \text{QA1}(5-7)^{-} & \text{, 解除自锁} \\ \text{主触点断开} \rightarrow \text{M}_{\text{正}}^{-} \\ \overline{\text{QA1}}(11-13)^{-} & \rightarrow \text{为 QA2 得电做准备} \end{cases} \\
 \text{SF1}^{\pm} \rightarrow \text{QA1}^{-} &\rightarrow \begin{cases} \text{QA1}(5-7)^{-} & \text{, 解除自锁} \\ \text{主触点断开} \rightarrow \text{M}_{\text{正}}^{-} \\ \overline{\text{QA1}}(11-13)^{-} & \rightarrow \text{为 QA2 得电做准备} \end{cases}
 \end{aligned}$$

4.2.3 位置控制

位置控制又称为行程控制, 是利用生产机械运动部件运行到一定位置时由行程开关(位置开关)发出信号进行控制的。例如, 行车运动到终点位置自动停车; 工作台在指定区域内的自动往返移动, 都是由运动部件运动的位置或行程来控制的。位置控制以行程开关代替按钮用于实现对电动机的启停控制, 可分为限位断电、限位通电和自动往复循环控制等。

位置开关又称行程开关, 是用来限制机械运动行程的一种电器。它可将机械位置信号转换成电信号, 常用来做行程控制, 改变运动方向、定位、限位及安全保护之用。位置开

关与按钮相同，它们都是对控制电气发出接通或断开指令，不同之处在于，按钮是由人手动操作来完成，而位置开关是由与机械运动部件一起运动的“撞块”来完成的。

1) 外形结构

位置开关如图 4-9 所示，其文字符号为 BG。

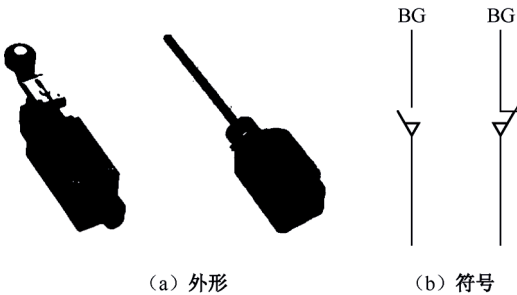


图 4-9 位置开关

当位置开关被运动机械的挡块（撞块）压合时，通过位置开关内部的传动杠杆使其动断触点先断开、动合触点后闭合。当机械部件上的挡块（撞块）移开时，有些位置开关的复位弹簧的弹力能使触点恢复到原来位置，另一些则需反向压下才能复位。

2) 型号含义

位置开关型号表示及含义如图 4-10 所示。

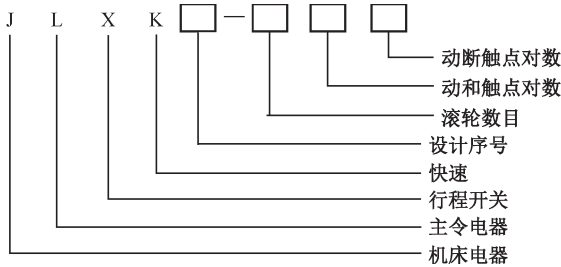


图 4-10 位置开关型号表示及含义

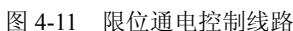
1. 限位通电控制电路

限位通电控制电路是指控制运动部件到达指定位置时接通某种操作。

限位通电控制线路如图 4-11 所示。这种控制是运动部件在电动机拖动下，达到预先指定的地点后能够自动接通的控制电路。其中图 4-11（a）所示为限位通电的点动控制线路。其工作原理：电动机拖动生产机械运动到指定位置时，撞块压下行程开关 BG，使接触器 QA 线圈通电，而产生新的控制操作。例如，加速、返回、延时后停车等。图 4-11（b）所示为限位通电的长动控制线路，这种控制线路使用在各种运动方向或形式中，起到转换作用。

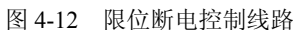
2. 限位断电控制电路

限位断电控制是指控制运动部件在到达指定位置时停止。



限位断电控制线路如图 4-12 所示。运动部件在电动机拖动下, 到达预先指定点即自动断电停车。电路工作原理:

其中: ΔS 是指运动一段距离达到指定位置。



这种控制线路常使用在行车或提升设备的行程终端保护上，以防止由于故障电动车无法停车而造成事故。

3. 自动往复循环控制电路

图 4-13 所示为自动往复循环控制线路及工作示意图。图中工作台在行程开关 BG1 和 BG2 之间自动往复运动，调节撞块 1 和 2 的位置，就可以调节工作行程往复的区域大小。如图 4-13 所示控制线路图中，设 QA1 为电动机向左运动接触器，QA2 为电动机向右运动接触器。自动往复循环控制线路工作原理：

工作台在 BG1 和 BG2 之间周而复始往复运动, 直到按下停止按钮 SF1 为止。

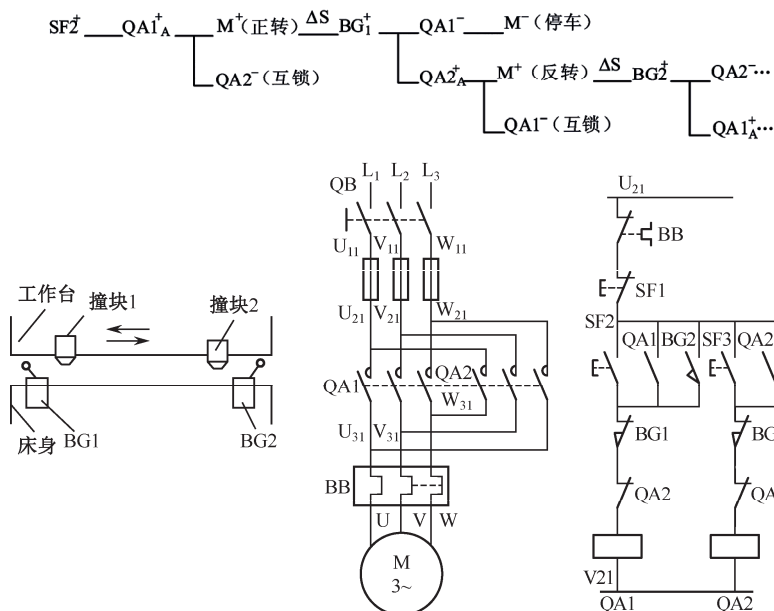


图 4-13 自动往复循环控制线路及工作示意图

4.2.4 其他控制电路

1. 多点控制

多点控制是为了操作方便，常要求能在多个地点对同一台设备进行启动和停止的控制。

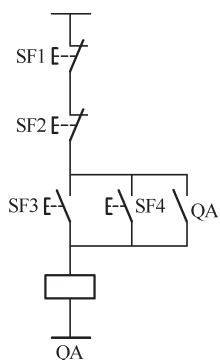


图 4-14 多点控制电路图

图 4-14 所示为多点控制电路图，启动按钮 SF3、SF4，停止按钮 SF1、SF2。启动按钮全部并联在自锁触点两端，按下任何一个都可以启动电动机。停止按钮全部串联在接触器线圈电路，按下任何一个都可以停止电动机的工作。

2. 顺序控制

许多生产机械对多台电动机的启动和停止有一定的要求，必须按预先设计好的次序先后启、停。这就要求几台电动机按一定顺序工作，这就是顺序控制。

图 4-15 所示为顺序控制线路图。图 4-15 (a) 所示为主电路，接触器 QA1 和 QA2 分别控制两台电动机 M_1 和 M_2 ，并且只有在 M_1 电动机启动后， M_2 电动机才能启动。图 4-15 (b) 所示的控制线路中， M_1 和 M_2 能同时停止。图 4-15 (c) 所示的控制线路中，电动机 M_1 和 M_2 可以单独停止。图 4-15 (d) 所示的控制线路中，电动机 M_2 停止后 M_1 才能停止。

3. 时间控制

时间控制通常是利用时间继电器来完成的，常用的时间继电器有通电延时型时间继电器和断电延时型时间继电器两大类。

1) 时间继电器

时间继电器又称延时继电器, 电气控制系统中起着时间控制作用, 当它的感测部分接收输入信号以后, 需经过一定的时间延时, 它的执行部分才会动作, 并输出控制信号。

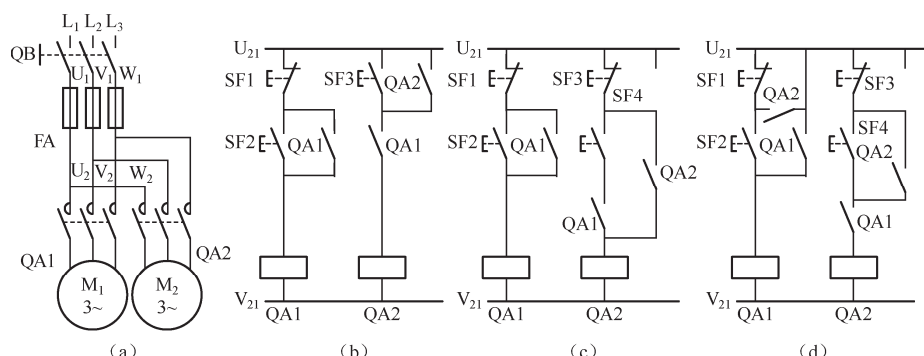


图 4-15 顺序控制线路

(1) 时间继电器的工作方式。时间继电器按延时方式来分类, 有通电延时型和断电延时型。通电延时型时间继电器在其感测部分接收到信号后, 开始延时, 一旦延时完毕, 就立即通过执行部分输出信号。当输入信号消失时, 继电器就立即复位。这种类型的时间继电器的动作情况可用如图 4-16 (a) 所示来说明, 图 4-16 中 T 即是延时时间。断电延时型与通电延时型相反, 断电延时型时间继电器在其感测部分接收到输入信号后, 执行部分立即动作, 但当输入信号消失后, 继电器必须经过一定的延时, 才能复位。继电器的动作情况如图 4-16 (b) 所示。

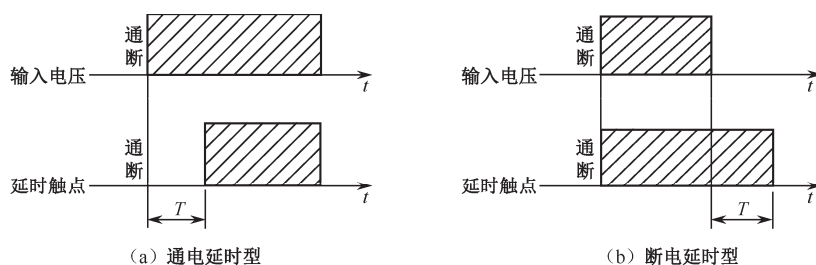


图 4-16 时间继电器延时工作方式

时间继电器在电气原理图中的图形符号如图 4-17 所示。其中文字符号为 KF。

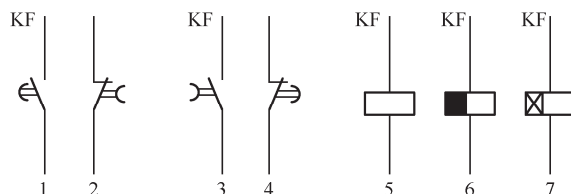


图 4-17 时间继电器的图形符号

(2) 常见的时间继电器。几种常见的时间继电器外形结构如图 4-18 所示。

(3) 型号含义。空气式时间继电器型号的表示方法及含义如图 4-19 所示。

2) 通电延时型时间继电器控制电路

图 4-20 所示为一通电延时型继电器控制线路图, 其中 KF 为时间继电器、QA 为接触器, 主电路略。

线路工作原理:

$$SF2^+ \rightarrow QA^+_{\text{自}} \rightarrow KF^+ \xrightarrow{\Delta t} QA^- \rightarrow KF^- \xrightarrow{\Delta t}$$



图 4-18 常见的时间继电器外形结构

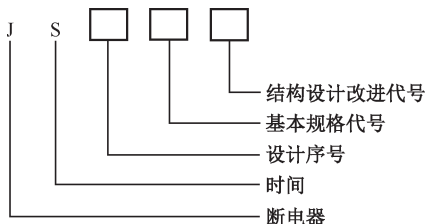


图 4-19 空气式时间继电器型号的表示方法及含义

可见, 按下启动按钮 SF2, 接触器 QA 线圈通电, 经过一段时间延时, 接触器 QA 线圈在 KF 控制下又断电。如果接触器 QA 动合触点控制一盏路灯, 则可以作为上、下楼梯的自动照明使用。

图 4-21 所示为另一通电延时型时间继电器控制线路。其中, 信号灯 HL 受中间继电器 KF 动合触点控制。

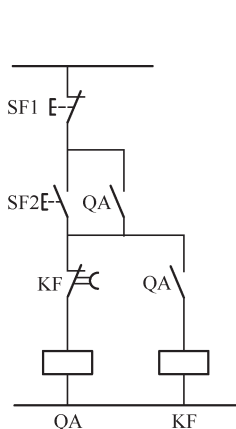


图 4-20 通电延时型时间继电器控制线路 1

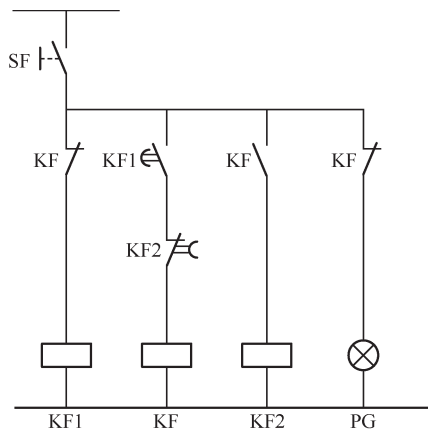
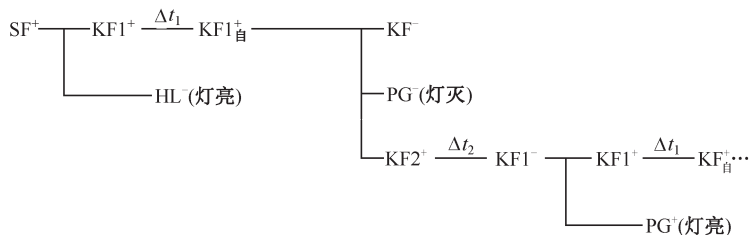


图 4-21 通电延时型时间继电器控制线路 2

线路工作原理如下:



可见, SF 接通电源后, 信号灯 PG 在两个时间继电器 KF1、KF2 控制下, 交替点亮和熄灭。调节 KF1 和 KF2 延时时间长短, 即可调解信号灯 PG 亮、灭时间长短。

3) 断电延时型时间继电器控制电路

图 4-22 所示为断电延时型时间继电器控制电路图。图 4-22 中时间继电器 KF 为断电延时型时间继电器, 其动合延时断开触点在 KF 线圈通电时立即闭合, KF 线圈断电时, 经延时后该触点断开。

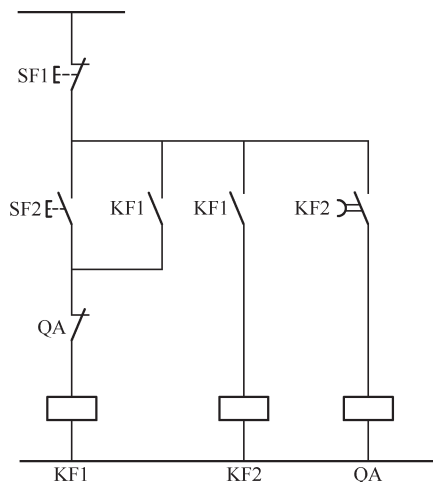


图 4-22 断电延时型时间继电器控制电路图

线路工作原理如下:

$$SF2^+ \rightarrow KF1^+ \rightarrow KF2^+ \rightarrow QA^+ \rightarrow KF1^- \rightarrow KF2^- \xrightarrow{\Delta t} QA^-$$

可见, 按下按钮 SF2, 接触器 QA 线圈通电, 经一段时间延时后又自行断电。在此电路中, 若将中间继电器 KF1 线圈上方的 QA 动断触点去除 (不连接该触点), 电路工作情况又会怎样? 请读者自行分析。

4.3 直流电动机的基本控制电路

4.3.1 直流电动机的励磁方式

直流电动机励磁绕组供电方式称为励磁方式。直流电动机励磁方式一般可分为他励式、并励式、积复励式、差复励式、串励式, 现介绍如下。

(1) 他励式: 他励式励磁绕组由其他电源供电, 其接线原理如图 4-23 (a) 所示。他励式电动机励磁磁势与电枢电流无关, 不受电枢回路影响。同时这种励磁方式具有较硬的外特性, 一般用于大型和精密直流电动机驱动系统中。永磁式直流电动机也归属这一类。

(2) 并励式: 电动机的励磁绕组和电枢由同一电源供电, 其接线原理如图 4-23 (b) 所示。并励方式优点是可以省略一个励磁电源, 但是一般用于恒压系统, 只以恒功率方式

调速, 由于励磁电压恒定, 磁场变阻器上损耗较大, 因此, 只用于中、小型直流电动机, 其外特性曲线与他励方式基本相同, 具有较硬外特性。

(3) 积复励: 除并励绕组外, 还接入一个与电枢回路相串联, 励磁磁势方向和并励绕组相同的少量串励绕组, 其接线原理如图 4-23 (c) 所示。这类电动机具有较大的启动转矩, 其外特性较软, 多用于启动转矩较大, 而负载变化较小的驱动系统中。除并励绕组可加上串励绕组构成积复励外, 有时为了同样的目的, 他励绕组加上串励绕组, 也可构成积复励方式, 因此, 还有并积复励和他积复励方式之分。由于积复励方式两个方向转速和运行特性不同, 因此, 不能用于可逆驱动系统中。

(4) 差复励: 除并励绕组外, 还接入一个励磁磁势方向和并励绕组相反的少量串励绕组, 其接线原理如图 4-23 (d) 所示, 这类电动机启动转矩小, 但是其外特性较平, 有时还出现上翘特性, 一般用于启动转矩小, 而要求转速较平稳的小型恒压驱动系统中, 这种励磁方式同样不能用于可逆驱动系统中。

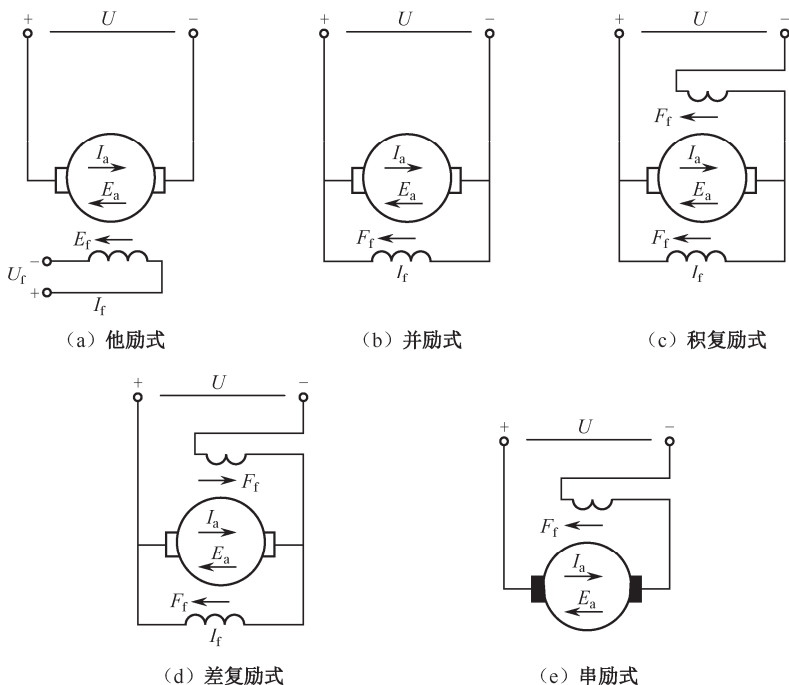


图 4-23 直流电动机的励磁方式

(5) 串励式: 其励磁绕组和电枢回路相串联, 如图 4-23 (e) 所示。这种电动机具有较大的启动转矩, 但其特性较软, 空载时将有极高的转速, 通常用于车辆牵引驱动系统中。串励电动机不能空载运行。

直流电动机的外特性和励磁方式密切相关, 采用不同励磁方式可以得到不同的外特性。如图 4-24 所示, 他励和并励电动机具有平的外特性, 称为硬特性; 积复励和串励电动机具有下垂的外特性, 称为软特性; 差复励电动机外特性是上翘的特性, 运行时容易出现不稳定情况。

4.3.2 他励直流电动机的启动控制

他励直流电动机的电枢绕组和励磁绕组需要两个直流电源分别进行供电。在他励直流电动机启动时,必须先给励磁绕组加上电压,然后才能给电枢加电压,否则会因为电枢回路没有反电动势平衡,使得电枢绕组中出现远远大于其额定值的电流,极易烧毁电动机。另外,除非电动机容量很小,否则不允许全压启动。因为刚启动瞬间转子转速为零,反电动势也为零,在额定电枢电压作用下,电枢电流可达到额定值的十几倍,会损坏电动机。他励直流电动机电枢电路串电阻减压启动是常用方法之一,在启动时,先串入电阻启动,然后随着启动过程的进行逐段短接启动电阻,直到启动完毕。

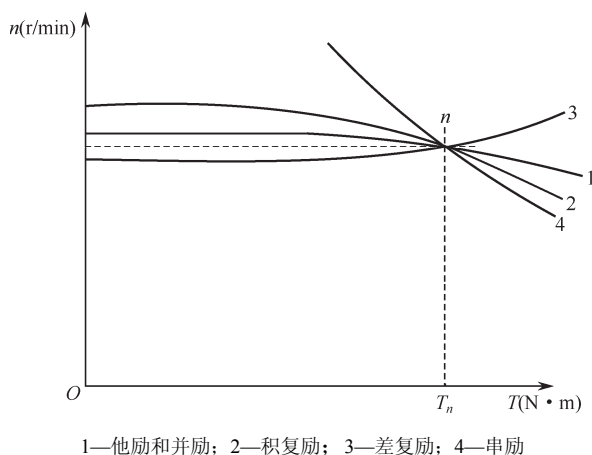


图 4-24 直流电动机的外特性

1. 他励直流电动机三端启动器减压启动电路

图 4-25 所示为他励直流电动机使用三端启动器工作原理图。图 4-25 中经开关 QB 给电枢绕组和励磁绕组供电,电枢绕组串联几段启动电阻,励磁绕组串入电磁铁线圈。

电路工作原理:合上 QB 后,把手柄从“0”位置转到“1”位置,他励直流电动机开始串入全部电阻启动,此时因串入电阻最多,故能够将启动电流限制在比额定工作电流略大一些的数值上。随着转速的上升,电枢电路中反电动势逐渐加大,这时,再把手柄依次转到位置 2、3、4 和 5,启动电阻被逐段短接,电动机的转速不断提高。当手柄达到位置 5 时,电动机电枢绕组处于全压运行状态,启动工作结束。在位置 5 上时,手柄被电磁铁吸附,即只有具备足够的励磁电流时,才能全压运行。这样,三端启动器还具有零励磁和欠励磁的保护功能。

利用接触器构成的他励直流电动机启动控制电路如图 4-26 所示。在电路中电枢电路串入电阻 RA1、RA2、RA3,接触器 QA1、QA2、QA3 的主触点分别将它们短接。

电路工作原理:按启动按钮 SF,接触器 QA 线圈获电 QA 自锁触点闭合,实现自锁。QA 串联在电枢电路常开触点闭合,电枢串入 RA1、RA2、RA3 后接入直流电源,开始减压启动。随着电动机转速从零开始上升,接触器 QA1 的两端电压 $U_{KM1} = E_a + (R_2 + R_3 + R_a)I_a$

也随之上升, 当 U_{KM_1} 达到接触器 QA1 动作值时, QA1 动作, 其常开触点闭合, 将启动电阻 RA1 短接。电动机转速继续上升, 随后 QA2、QA3 都先后达到动作值而得电动作, 其触点分别将电阻 RA2、RA3 短接, 电动机转速达到额定值, 电动机启动完毕, 进入正常全压运转。

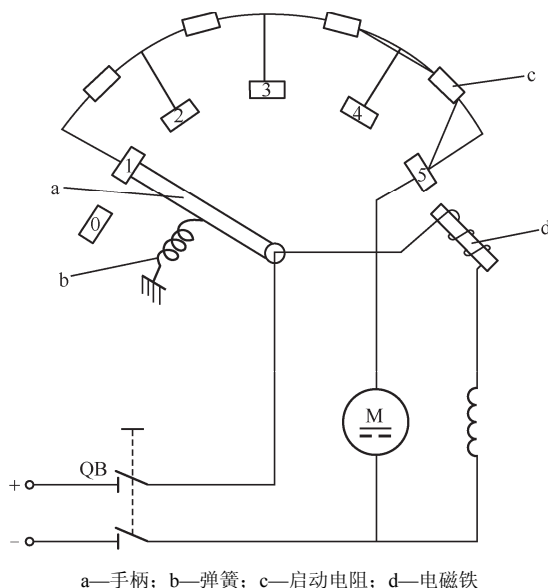


图 4-25 他励直流电动机使用三端启动器工作原理图

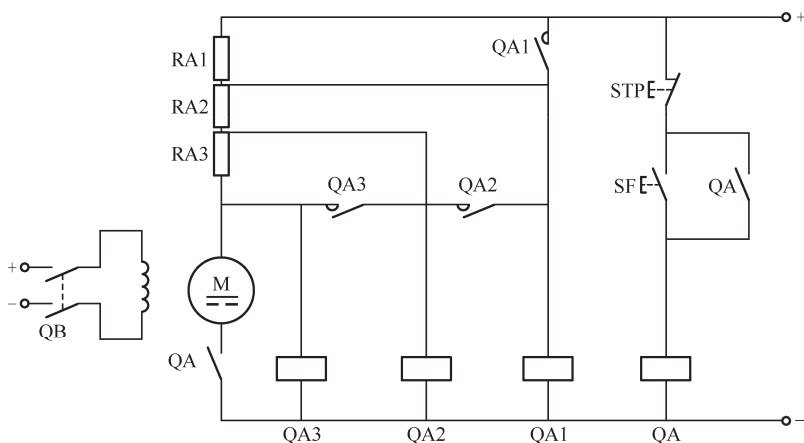


图 4-26 他励直流电动机启动控制电路

2. 他励直流电动机时间继电器减压启动电路

图 4-27 所示是利用接触器和时间继电器配合他励直流电动机电枢串电阻减压启动控制电路。图 4-27 中, KF1 和 KF2 为断电型时间继电器, 在开关 QB2 合上后 KF1 和 KF2 线圈就获电, 它们的常闭触点立即断开, 使接触器 QA2、QA3 线圈断电, 与电枢串联的电阻 RA1、RA2 串入电路进行减压启动。

电路工作原理：按启动按钮 SF，接触器 QA1 线圈获电，其自锁触点动作，实现自锁。QA1 串联在电枢电路的常开触点闭合，电动机电枢串电阻 RA1、RA2 启动。QA1 串联在时间继电器 KF1 和 KF2 线圈电路的常闭触点断开，KF1 和 KF2 断电，这两个时间继电器开始延时。KF1 整定时间比 KF2 整定时间短，所以 KF1 延时闭合的常闭触点先闭合，使接触器 QA2 线圈获电 QA2 常开触点闭合，启动电阻 R₂ 被短接。随转速的提高，KF2 的整定时间到，KF2 触点动作，QA3 线圈获电，QA3 的常开触点将启动电阻 RA1 短接，电动机全压运行。

如图 4-27 所示控制电路与图 4-26 所示控制电路比较，前者不受电网电压波动的影响，工作的可靠性较高，而且适用于较大功率直流电动机的控制；后者电路简单，所使用元器件的数量少。

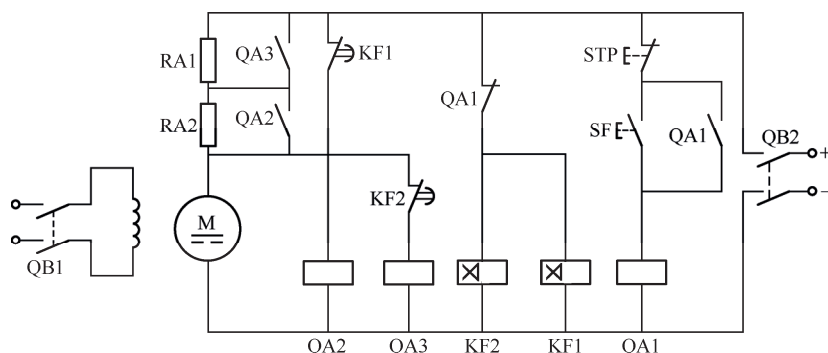


图 4-27 时间继电器控制他励直流电动机启动控制电路

4.3.3 直流电动机的调速控制

1. 电动机调速概论

1) 调速

调速就是在一定的负载下，根据生产工艺的要求，人为改变电动机的转速。

生产机械的速度调节可以用机械方法取得，但机械变速机构复杂。现代电力拖动中大多采用电气调速方法，即对拖动生产机械的电动机进行速度调节，其优点是可以简化机械结构，提高生产机械的传动效率，操作简便，调速性能好，能实现自动控制等。电动机的速度调节是人为的，而电动机由于转矩变化沿着某一机械特性的速度变化是电动机自动调节的，两者是有区别的。

2) 电动机调速性能的评价指标

(1) 调速范围：电动机调速时所能得到的最高转速与最低转速之比。

(2) 调速的平滑性：可由电动机在其调速范围内能得到的转速的数目（级数）来说明。所能得到的转速数目越多，相邻两个转速的差值越小，则调速的平滑性越好。若转速只能得到若干个跳跃的调节，称为有级调速；若在一定范围内可得到任意转速，称为无级调速。

(3) 调速的经济性：它包括调速设备的投资、电能的损耗、运转的费用等。

(4) 调速的稳定性：它由负载变化时转速的变化程度来衡量。电动机机械特性越硬，稳定性越高。

(5) 调速方向: 指所采用的调速方法是使转速比额定转速 (基本转速) 高的称为向上调速; 若是低的, 称为向下调速。

(6) 调速时允许的负载: 调速时, 不同的生产机械需要的功率和转矩是不同的。有的要求电动机在各种转速下都能输出同样的机械功率, 如金属切削机床, 要求在精加工小进刀量时工件转速要高, 粗加工大进刀量时转速要低。由于机械功率是由转矩与转速的乘积决定的, 因此, 要求电动机具有恒功率调速。另一类生产机械, 如起重机, 要求电动机在各种转速上都能输出同样的转矩, 即为恒转矩调速。

3) 直流电动机的调速方法

由直流电动机的机械特性方程为

$$n = \frac{U - I_a R_a}{C_E \Phi} = \frac{U}{C_E \Phi} - \frac{R_a}{C_E C_r \Phi^2} T \quad (4-1)$$

可知, 改变 R_a 、 Φ 、 U 中的任意一个参数都可以使转速 n 发生变化, 所以直流电动机的调速方法有三种。下面讨论并励 (他励) 电动机的调速方法。

2. 改变电枢电路电阻的调速

电路图如图 4-28 (a) 所示。保持电源电压 U 和励磁直流 I_f 为额定值, 在电枢电路中串联一个调速变阻器 R_c , 改变 R_c 来改变电枢电路的电阻值以改变电枢电流 I_a 进行调速。

采用这种调速方法, 机械特性方程改写为

$$n = \frac{U - (R_c + R_a) I_a}{C_E \Phi} = \frac{U}{C_E \Phi} - \frac{R_a + R_c}{C_E C_r \Phi^2} T \quad (4-2)$$

显然, 保持 U 、 Φ 不变, n_0 也不变, 调节 R_c 的大小即可改变转速 n 。

调速过程如下:

调速前, 设电动机带有额定负载 T_2 , 运行在对应的 $T = T_2 = T_N$ (略去 T_0) 的固有特性曲线上的 a 点 (如图 4-28 (b) 所示), 这时转速为 n_N , 电枢电流为 I_{aN} 。

当串入调速电阻 R_c 后, 电枢电流为

$$I_a = \frac{U - E_a}{R_a + R_c} = \frac{U - C_E \Phi n}{R_a + R_c} \quad (4-3)$$

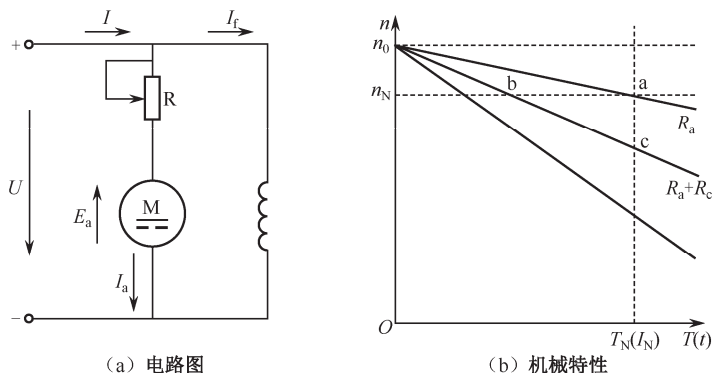


图 4-28 电枢串电阻调速

在把 R_c 增大的瞬间, 由于机械系统的惯性, 电动机转速来不及改变, 此刻电枢电流 I_a 随即减小, 因为磁通 Φ 不变, 必使电磁转矩 T 减小。这时运行点由固有特性 a 点过渡到人为特性的 b 点上。按假设条件 T_2 不变, 在 b 点电磁转矩 $T < T_2$, 电动机转速开始下降。

在转速下降的同时, 电动机反电动势 $E_a = C_E \Phi n$ 与转速 n 成正比减小, 使得电枢电流 I_a 又重新增大, 对应的电磁转矩也增大, 一直恢复到 $T = T_2 = T_N$ 为止, 转速不再下降, 恒定在人为特性曲线的 c 点上。

经过计算, 最后电动机的转速为

$$n = n_N \left(1 - \frac{R_a + R_c}{R_N} \right) \quad (4-4)$$

式中 $R_N = U_N / I_N$ 。

这种调速方法的性能和特点如下:

- (1) 串电阻调速方法是向下调速, 即只能在额定转速以下进行比较平滑的调节。
- (2) R_N 越大, 机械特性越软, 稳定性越差。特别是低速运行时, 稳定性更差, 当负载稍有增加, 电动机转速再降低就可能停转。
- (3) 由于电枢电流较大, R_c 损耗的电多, 调速的经济性差。
- (4) 调速时磁通 Φ 不变, 电动机允许通过的电流即额定电流是一定的, 在各种转速下, 电动机能输出相同的转矩, 故为恒转矩调速。适用于恒转矩负载。

这种调速方法缺点较多, 但由于调速简便, 可用于调速范围不大, 调速时间短的场合, 在起重和运输牵引中还得到了广泛应用。

3. 改变励磁磁通的调速

保持电源电压 U 为额定值, 在励磁电路中接入调速变阻器 R_c , 改变励磁电流 I_f 以改变磁通 Φ 进行调速, 故又称调磁调速。电路图如图 4-29 (a) 所示。

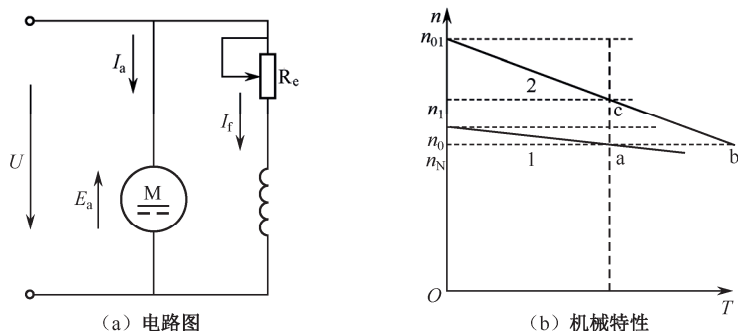


图 4-29 解调磁调速

由机械特性方程, 即:

$$n = \frac{U}{C_E \Phi} - \frac{R_a}{C_E C_T \Phi^2} T \quad (4-5)$$

如图 4-29 (b) 所示可见, 将磁通 Φ 减小时, n_0 升高, Δn 与 Φ^2 成反比, 所以磁通减小, 机械特性升高、变软。

调速的过程如下：

调速前，设电动机稳定运行在固有特性曲线 1 的 a 点上，当增加 R_c 减小磁通 Φ 时，电动机的反电动势 E_a 随之减小，虽减小不多，但由于电枢电阻 R_a 很小，所以电枢电流 I_a 增加很多。例如，某电动机 $U_N = 220V$ ， $E_N = C_E \Phi_N n_N = 200V$ ， $R_a = 0.5\Omega$ ，则电枢电流为

$$I_{aN} = \frac{U_N - E_N}{R_a} = \frac{220 - 200}{0.5} = 40$$

现将磁通减小 1/5，即减小为原来 $0.8\Phi_N$ ，并认为调速最初瞬间，由于惯性转速来不及改变，这时 $E_a = C_E \Phi_N n_N \times 0.8 = 200 \times 0.8 = 160V$ ，而

$$I_a = \frac{U_N - E_N \times 0.8}{0.5} = \frac{220 - 200 \times 0.8}{0.5} = 120$$

由于 I_a 增加的影响超过 Φ 减小的影响，使电磁转矩 $T = C_T \Phi I_a$ 还是增大。在这一瞬间运行点由 a 过渡到人为机械特性曲线 2 的 b 点上。由于 $T > T_2$ ，转速开始上升。

随着转速上升，反电动势 E_N 增大， I_a 和 T 随着减小，电磁转矩 T 沿着人为机械特性曲线从 b 点变化到 c 点时， $T_1 = T_N$ ，这时转速就稳定在 n_1 的数值上。

在新的稳定点 c 仍保持转矩不变。

$$T_1 = T_N \quad C_T \Phi_1 I_{a1} = C_T \Phi_N I_{aN}$$

电枢电流为

$$I_{a1} = \frac{\Phi_N}{\Phi_1} I_{aN}$$

电动机的理想空载转速为

$$n_0 = \frac{U_N}{C_E \Phi_N}, \quad n_{01} = \frac{U_N}{C_E \Phi_1} \quad (4-6)$$

故有 $n_{01} = \frac{\Phi_N}{\Phi_1} n_0$ 。

由于 $E_N = C_E \Phi_N n_N$ ， $E_1 = C_E \Phi_1 n_1$ ，所以：

$$\frac{n_1}{n_N} = \frac{E_1 / C_E \Phi_1}{E_N / C_E \Phi_N} = \frac{E_1 \Phi_N}{E_N \Phi_1} = \frac{(U - I_1 R_a) \Phi_N}{(U - I_N R_a) \Phi_1}, \quad n_1 \approx \frac{\Phi_N}{\Phi_1} n_N \quad (4-7)$$

这种调速方法的性能和特点如下：

(1) 由于 I_f 不能超过额定值，故只能将 I_f 减小（又称弱磁调速），转速向上调。只要均匀地改变 R_c ，可得到平滑的无级调速。

(2) I_f 减小后，机械特性硬度变化不大，稳定性较好。

(3) 由于 I_f 小，在 R_c 上耗能少，比较经济。 R_c 体积小，操作方便。

(4) 调速范围通常为 2:1，因转速过高，换向条件变坏。特殊设计的调速范围可达 4:1。

(5) 如保持电动机额定电流一定， Φ 减小时，允许输出的转矩将减小，但由于转速增加，输出功率 $P = T\omega$ 基本上没有变化，故为恒功率调速。

4. 改变电源电压的调速

采用这种调速方法时，电动机应采取他励方式，保持励磁不变，只改变电枢电路的电源电压，故称调压调速。电路图如图 4-30 (a) 所示。

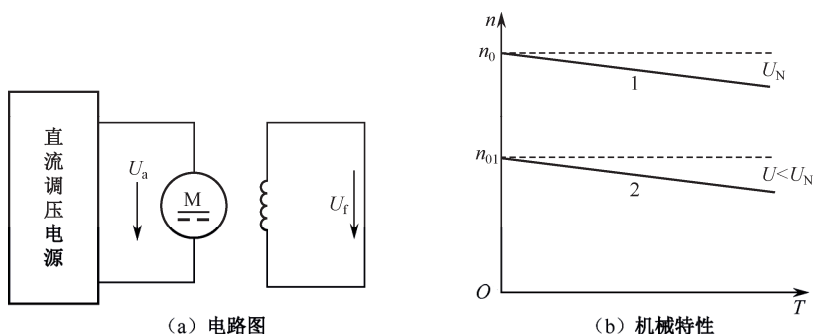


图 4-30 调压调速

由机械特性方程，即：

$$n = \frac{U}{C_E \Phi_N} - \frac{R_a}{C_E C_r \Phi_N^2} T \quad (4-8)$$

可以看出，当电枢电路端电压 U 改变时，理想空载转速 n_0 随 U 成正比变化，而转速降落 Δn 和特性曲线的斜率不变，因此，电动机在不同电压下的人为机械特性曲线是平行下移于固有机特性曲线的直线（见图 4-30（b））。

调速过程如下：

当磁通 Φ 保持不变时，减小电压 U ，由于转速不立即变化，反电动势 $E_a = C_E \Phi_N$ 也暂不变化，于是电枢电流 $I_a = (U - E_a) / R_a$ 变小，电磁转矩 $T = C_r \Phi I_a$ 变小。如负载转矩 T_2 不变，则 $T < T_2$ ，转速 n 下降，随之反电动势 E_a 减小， I_a 和 T 也随着增大，直到 $T = T_2$ 时为止，在比原转速低的转速上稳定运行。

这种调速方法的性能和特点如下：

- (1) 由于电枢电压不能超过额定值，故转速只能向下调速。
- (2) 电压降低后，机械特性硬度不变，稳定性较好。
- (3) 调速范围较大可达 (6~8): 1。可均匀调节电压，实现平滑的无级调速。
- (4) 调速时磁通未变，而额定电流是一定的，故电动机能输出的转矩是一定的，为恒转矩调速。

(5) 需要有专用的直流调压电源。过去采用的是直流发电机-电动机组的调速系统。系统是由一台直流发电机供电给直流电动机的电枢电路，而直流发电机和电动机的励磁绕组则由另一台较小容量的直流发电机（励磁机）供电。直流发电机和励磁机则由交流电动机拖动。该系统由于机组多、占地大、效率低、噪声高、费用大，已逐渐为晶闸管可控整流电源所替代。

5. 晶闸管调速系统简介

图 4-31 所示是晶闸管调速系统示意图。

直流电动机的电枢用晶闸管可控整流电源供电，励磁电路用晶闸管可控整流电源供电或用二极管整流电源供电。

在晶闸管可控调速系统中，电动机是控制对象，被调量是转速 n 。在系统中常采用负反馈控制，以减小转速降，提高机械特性硬度，提高调速范围。图 4-32 所示是具有转速负反馈的直流电动机调速系统的原理图。

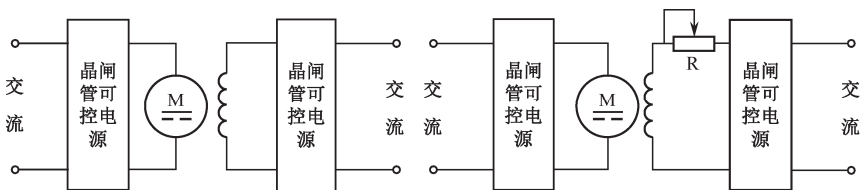


图 4-31 晶闸管调速系统示意图

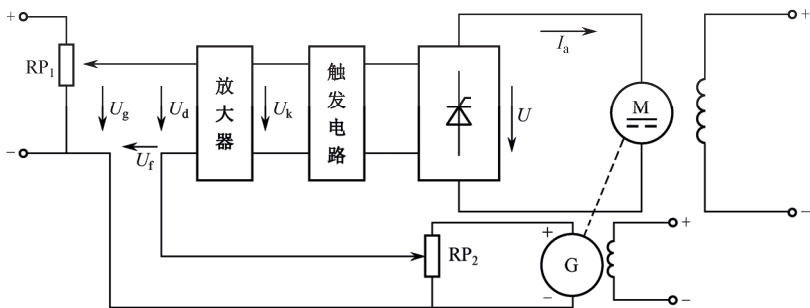


图 4-32 具有转速负反馈的直流电动机调速系统的原理图

直流测速发电机作为检测元件，它和电动机同轴相联或经变速器相联，它输出的电压与电动机转速成正比。把这个电压的一部分引回输入端作为反馈电压 U_f ，与由电位器 RP_1 调节的给定电压 U_g 相减，其差值 U_d 作为放大器的输入。这个速度反馈为负反馈（串联电压负反馈）。调节电位器 RP_1 改变 U_g ，改变 U_d ，最终改变晶闸管可控电源的输出电压 U 以改变电动机的转速 n 。这个系统的调节过程如下，例如：

负载 $\uparrow \rightarrow I_a \uparrow \rightarrow U \downarrow$ (可控电源内压降引起) $\rightarrow n \downarrow \rightarrow U_f \downarrow \rightarrow U_d \uparrow \rightarrow U \uparrow \rightarrow n \uparrow$

图 4-33 所示是直流电动机转速负反馈调速系统的电路图, 其工作情况请读者自己分析。

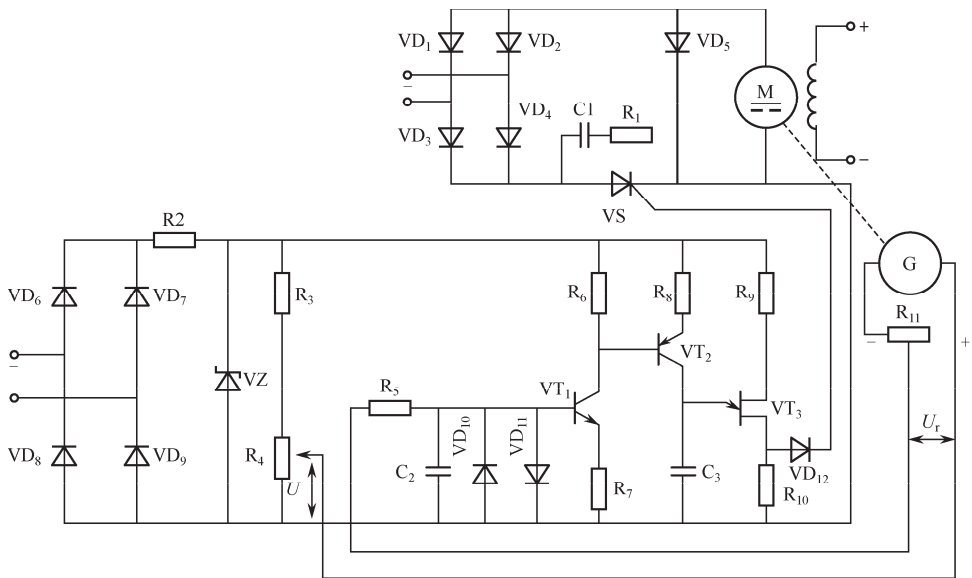


图 4-33 直流电动机转速负反馈调速系统的电路图

4.3.4 他励直流电动机正/反转控制电路

直流电动机正/反转控制有两种实现方法。一种是改变励磁电流的方向；另一种是改变电枢电流的方向。在实际应用中，改变励磁电流方向来改变电动机转向的方法使用较少，原因是励磁绕组的磁场在换向时要经过零点，极易引起电动机“飞车”，另外励磁绕组电感量较大，在换向时需要有一个放电过程。所以，通常都采用改变电枢电流方向的方法来控制直流电动机的正/反转。

1. 改变电枢电流方向的正/反转控制电路 1

图 4-34 所示为改变电枢电流方向控制他励直流电动机正/反转控制电路。图 4-34 中，电枢电路电源由接触器 QA1 和 QA2 主触点分别接入，但其方向相反，从而达到控制正/反转的目的。

电路工作原理：按正转按钮 SF1，接触器 QA1 线圈获电。QA1 自锁和互锁触点动作，实现对 QA1 线圈的自锁和对 QA2 线圈的互锁。电枢电路 QA1 主触点闭合，电流正向流入电枢绕组，电动机得电正向转动。

若要求电动机反转，应先按停止按钮 STP，然后再按反转按钮 SF2，接触器 QA2 线圈获电。QA2 自锁和互锁触点动作，实现对 QA2 线圈的自锁和对 QA1 线圈的互锁。电枢电路 QA2 主触点闭合，电流反向流入电枢绕组，电动机获电反向转动。

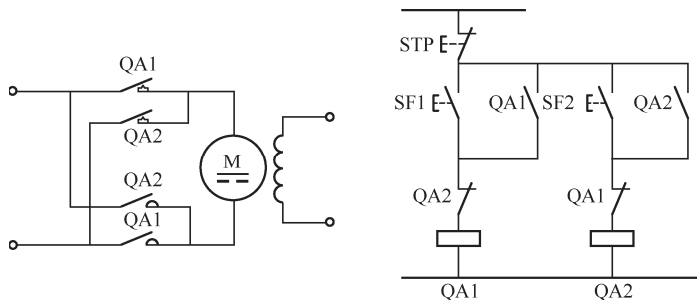


图 4-34 改变电枢电流方向控制他励直流电动机的正/反转控制电路

2. 改变电枢电流方向的正/反转控制电路 2

图 4-35 所示是利用行程开关控制的他励直流电动机改变电枢电流正/反转启动控制电路。图 4-35 中，接触器 QA1、QA2 控制电动机正/反转，接触器 QA3、QA4 短接电枢启动电阻，行程开关 BG1、BG2 可代替正/反转启动按钮 SF1、SF2，实现自动往返控制。时间继电器 KF1、KF2 控制启动时间，分段短接启动电阻 RA1、RA2、RA3 为放电电阻。KF3 为过电流继电器。KF4 为欠电流继电器。

电路工作原理：接通电源后，未按启动按钮前，当励磁线圈中通过足够大的电流时，欠电流继电器 KF4 获电动作，其常开触点闭合，使断电型时间继电器 KF1 线圈获电，KF1 常闭触点断开，接触器 QA3、QA4 线圈断电。

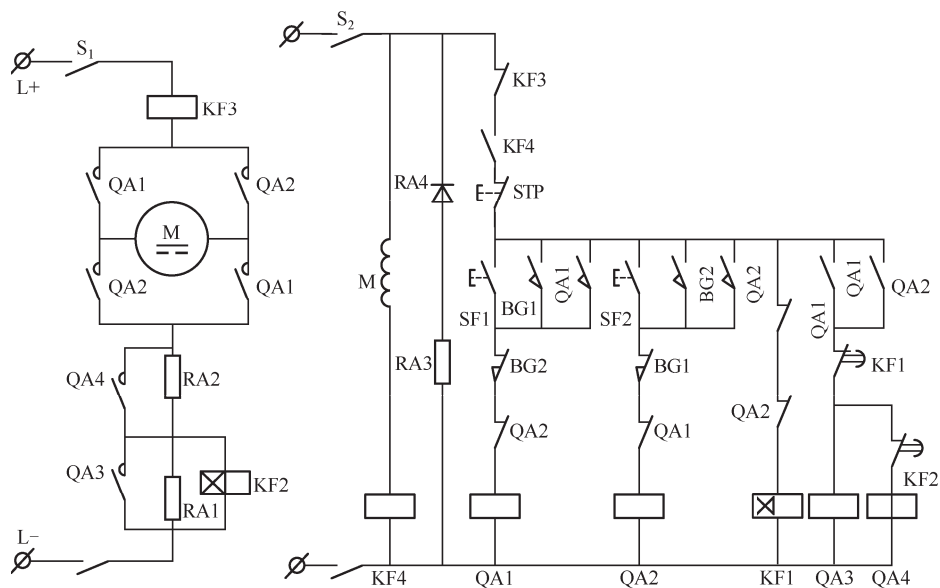


图 4-35 利用行程开关控制的他励直流电动机改变电枢电流方向的正/反转控制电路

按正转启动按钮 SF1, 接触器 QA1 线圈获电, QA1 自锁与互锁触点动作, 实现对 QA1 线圈的自锁和对接触器 QA2 线圈的互锁。另外, QA1 串联在 KF1 线圈电路的常闭触点断开, 时间继电器 KF1 开始延时。电枢电路 QA1 常开触点闭合, 直流电动机电枢电路串入电阻 RA1、RA2 启动。此时, RA1 两端并联的断电型时间继电器 KF2 线圈获电, 其常闭触点断开, 使接触器 QA4 线圈无法获电。

随着启动的进行, 转速不断提高, 经过 KF1 设置的时间后, KF1 延时闭合的常闭触点闭合, 因 QA1 线圈获电后其常开触点也闭合, 所以接触器 QA3 线圈获电。电枢电路中的 QA3 常开主触点闭合, 短接电阻 RA1 和时间继电器 KF2 线圈。RA1 被短接, 直流电动机转速进一步提高, 继续进行减压启动过程。时间继电器被短接, 相当于该线圈断电。KF2 延时闭合的常闭触点开始延时, 经过 KF2 设置时间值, 其触点闭合, 使接触器 QA4 线圈获电。电枢电路中的 QA4 常开主触点闭合, 电枢电路串联启动电阻 RA2 被短接。正转启动过程结束, 电动机电枢全压运行。其反转启动过程与此类似, 不再重述。

在图 4-35 中的电动机拖动机械设备运动, 在限位位置上压下行程开关 BG1, 其常闭触点断开, 使接触器 QA1 线圈断电, 其常开触点闭合, 接通接触器 QA2 线圈, 电枢电路中的 QA1 主触点断开, 正转停止; QA2 触点闭合, 反转开始。该电路由 BG1 和 BG2 组成自动往返控制, 电动机的正/反转是由 QA1 和 QA2 主触点闭合情况决定的。

过电流继电器 KF3 线圈串入电枢电路, 起过载保护和短路作用。过载 (或短路) 时, 过电流继电器因电枢电路电流过大而动作, 其常闭触点断开, 励磁和控制电路断电。二极管 RA4 和电阻 RA3 构成励磁绕组放电电路, 防止剩磁电流断电时产生过电压。欠电流继电器 KF4 线圈串联在励磁绕组中, 当励磁电流不足时, KF4 首先释放, 其常开触点恢复断开, 切断控制电路, 起到欠磁场保护作用。

3. 改变励磁电流方向的正/反转控制电路

改变励磁电流以改变直流电动机转向时，必须保持电枢电流方向不变，其控制电路如图 4-36 所示。图中 QA1、QA2 主触点的通断决定电流流入励磁绕组的方向，从而确定电动机的转向。

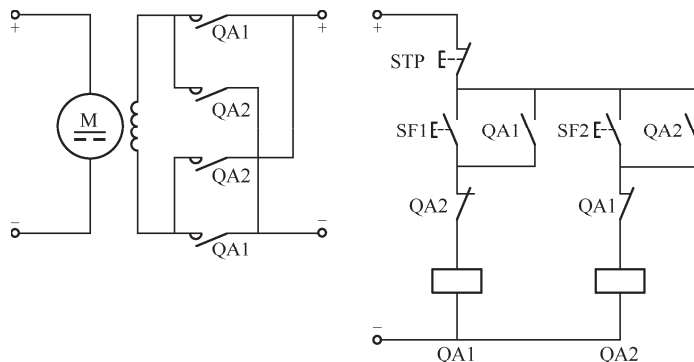


图 4-36 他励直流电动机接触器改变励磁电流方向的正/反转控制电路

4.3.5 直流电动机的制动控制

交流电动机一样，直流电动机也可以用来机械制动或电气制动。电气制动就是使电动机产生的电磁转矩与电动机旋转方向相反，使电动机转速迅速下降。电气制动的特点是产生的转矩大、易于控制、操作方便。他励直流电动机的电气制动方法有能耗制动和反接制动等。

1. 直流电动机外接电阻能耗制动控制电路

能耗制动是将正在运转的电动机电枢从电源上断开，串入外接能耗制动电阻后，再与电枢组成回路，并且维持原来的励磁电流，使机械系统的惯性动能转换成电能，消耗在电枢和外接电阻上，迫使电动机迅速停止转动。

直流电动机能耗制动控制电路如图 4-37 所示。电枢电路中的 QA2 常开触点，在能耗制动时，将制动电阻 RA 接入电路。

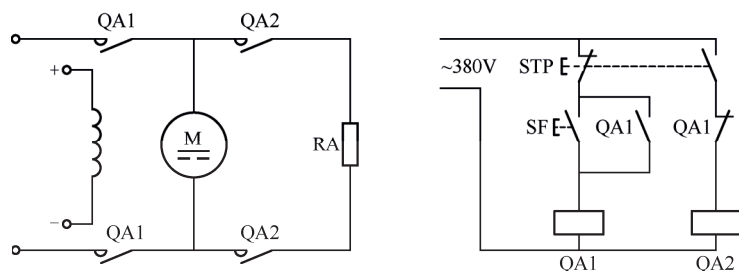


图 4-37 直流电动机能耗制动控制电路

电路工作原理：按启动按钮 SF，接通接触器 QA1 线圈。按制动按钮 STP 时，接触器 QA2 线圈获电，电枢电路中的电阻 RA 串入，直流电动机进入能耗制动状态。随着制动的进行，电动机减速。

能耗制动所串入制动电阻大小的选用很重要。若阻值选择较大，致使制动电流小、制动缓慢；若制动电阻选择较小，制动电流大，制动迅速，但其电流可能会超过电枢电路的允许值。一般情况下，按最大制动电流小于 2 倍额定电枢电流来选用制动电阻较合适。

能耗制动的优点是制动准确、平稳，能量消耗少。能耗制动的弱点是制动力矩小，制动速度不快。

2. 直流电动机接触器反接制动控制电路

反接制动工作原理与交流电动机反接制动原理基本一致。将正在运转的直流电动机的电枢两端突然反接，但仍然维持其励磁电流方向不变，电枢将产生反向力矩，强迫电动机迅速停转。

直流电动机单向反接制动电路如图 4-38 所示。图 4-38 中，接触器 QA1 控制电动机正常运转，接触器 QA2 控制电动机反接制动，电枢电路中 RA 为制动限流电阻，是为了降低过大的反接制动电流，因为此时电枢电路的电流值是由电枢电压和反电动势之和建立的。

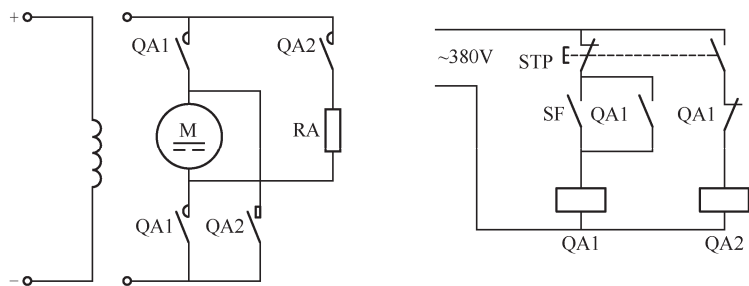


图 4-38 直流电动机接触器反接制动控制电路

电路工作原理：按启动按钮 ST，接触器 QA1 线圈获电，其自锁和互锁触点动作，分别对 QA1 线圈实现自锁和对接触器 QA2 线圈实现自锁。电枢电路中的 QA1 主触点闭合，电动机电枢接入电源，电动机运转。

按制动按钮 STP，其常闭触点先断开，使接触器 QA1 线圈断电，解除 QA1 的自锁和互锁，主电路中的 QA1 主触点断开，电动机电枢惯性旋转。STP 的常开触点后闭合，接触器 QA2 线圈获电，电枢电路中的 QA2 主触点闭合，电枢接入反方向电源，串入电阻进行反接制动。

反接制动必须在转速为零时切断制动电源，否则会引起电动机反向启动。因此，和异步电动机反接制动一样，采用与电枢同轴的速度继电器控制，这样制动的准确性比手动控制大为提高。另外反接制动过程中冲击强烈，极易损害传动零件。但反接制动的优点也十分明显，制动力矩大、制动速度快、电路简单、操作较方便。由于反接制动的这些特点，反接制动一般适用于不经常启动与制动的场合。

4.3.6 直流电动机的保护

直流电动机在启动、制动和短时过载时，电流会很大，应将其电流限制在允许过载的范围内。直流电动机的过载保护一般是利用过电流继电器来实现的。保护电路如图 4-39 所示，电枢电路串联过电流继电器 KF2。

电路工作原理：电动机负载正常时，过电流继电器中通过的电枢电流正常，KF2 不动作，其常闭触点保持闭合状态，控制电路能够正常工作。一旦发生过载情况，电枢电路的电流增大，当其值超过 KF2 的整定值时，过电流继电器 KF2 动作，它的常闭触点断开，切断控制电路，使电流电动机脱离电源，起到过载保护的作用。

直流电动机在正常运转状态下，如果励磁电路的电压下降较多或突然断电，会引起电动机的速度急剧上升，出现“飞车”现象。“飞车”现象一旦发生，会严重损坏电动机或机械设备。直流电动机防止失去励磁或励磁突然减弱的保护，是采用欠电流继电器来实现的，如图 4-39 所示。

图 4-39 中，励磁电路串联欠电流继电器 KF1，当励磁电流合适时，欠电流继电器吸合，其常开触点闭合，控制电路能够正常工作。当剩磁电流减小或为零时，欠电流继电器因电流过低而释放，其常开触点恢复断开状态，切断控制电路，使电动机脱离电源，起到励磁保护作用。

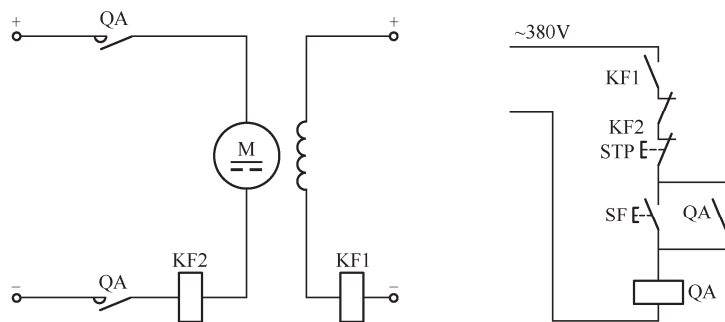


图 4-39 直流电动机过载保护和励磁保护电路

4.4. 三相交流异步电动机基本控制电路

4.4.1 三相鼠笼式电动机的启动控制

1. 直接启动控制电路

三相鼠笼式异步电动机有直接启动和降压启动两种方式。直接启动是一种简单、可靠、经济的启动方法，但三相鼠笼式异步电动机的直接启动电流 I_{st} 是其额定电流 I_N 的 4~7 倍，过大的 I_{st} 会造成电网电压显著下降，直接影响在同一电网工作的电动机，甚至使它们停转或无法启动，所以当三相鼠笼式异步电动机的参数满足下式时，可以采用直接启动，否则必须采用降压启动。

$$\frac{I_{st}}{I_N} \leq \frac{3}{4} + \frac{S}{4 \times P}$$

式中 I_{st} ——电动机的直接启动电流 (A);

I_N ——电动机的额定电流 (A);

S ——变压器容量 (kW);

P ——电动机额定功率 (kW)。

一般三相鼠笼异步电动机的容量在 10kW 以上时, 因启动电流过大, 通常采用降压启动。

1) 手动直接启动控制电路

对小型台钻、冷却泵、砂轮机和风扇等, 可用铁壳开关、胶盖闸刀开关, 直接控制三相鼠笼异步电动机启动和停止, 如图 4-40 所示。

也可采用转换开关和熔断器直接控制三相笼型异步电动机启动和停止, 如图 4-41 所示。

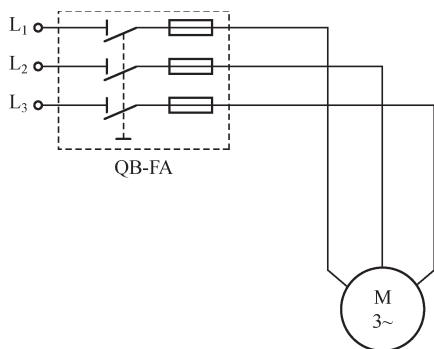


图 4-40 铁壳开关直接控制电动机

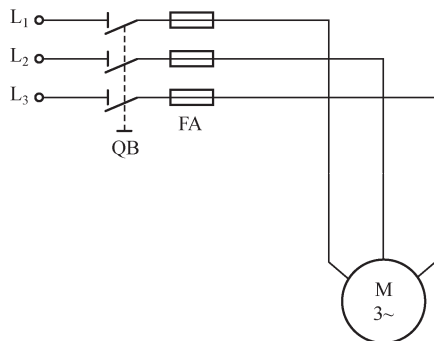


图 4-41 转换开关直接控制电动机

上述直接启动线路虽然所用电器少, 线路简单, 但在启动、停车频繁时, 使用这种手动控制方法既不方便, 也不安全, 操作劳动强度大, 还不能进行自动控制, 因此, 目前广泛采用按钮、接触器等电器来控制。

2) 接触器直接启动控制电路

对中小型普通车床的主电动机采用接触器直接控制其启动和停止, 如图 4-42 所示。

在如图 4-42 所示中, SF1 为停止按钮, SF2 为启动按钮。热继电器 BB 作过载保护, 熔断器 FA1、FA2 作短路保护。按下 SF2 按钮, 接触器线圈 QA 得电自锁, 其主触头闭合, 电动机启动。

按下 SF1 按钮时, QA 线圈断电, 切断电动机电源, 并消除自锁电路, 电动机停止。

2. 降压启动控制电路

降压启动, 是指利用启动设备或线路, 降低加在电动机定子绕组上的电压启动电动机, 以达到降低启动电流的目的。因为启动转矩与每相定子绕组所加电压的平方成正比, 所以降压启动的方法只适用于空载或轻载启动。并且当电动机启动到接近额定转速时, 为使电动机带动额定负载, 必须将加到电动机定子绕组的电压恢复到额定值。

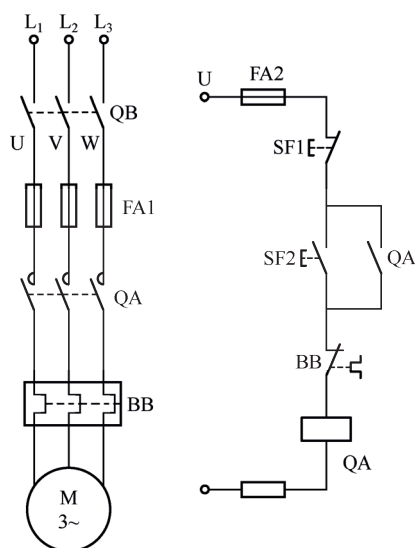


图 4-42 接触器直接启动和停止电动机

常用的降压启动有定子电路串电阻或电抗降压启动、 Y/Δ 降压启动、自耦变压器降压启动。

1) 定子电路串电阻降压启动控制电路

正常运行时定子绕组接成 Y 形连接的鼠笼式异步电动机，可采用定子串电阻或电抗降压启动。即在电动机启动时，在三相定子电路上串接电阻，使电动机定子绕组电压降低，启动结束后再将电阻短接，电动机在额定电压下正常运行。图 4-43 所示是定子电路串电阻降压启动控制线路。

启动过程如下：合上 QB，按下 SF2，QA1 线圈得电自锁，其常开主触点闭合，M 串 RA 启动，且使 KF 线圈得电。当 M 的转速 n 接近 n_N 时，到达 KF 的整定时间，其常开延时触点闭合，QA2 线圈得电自锁，QA2 的常闭辅助触点先打开，使 QA1 线圈失电，进而使 KF 失电，由于常开主触点 QA2 闭合，将 RA 短接，电动机全压运转。

此电路的优点是电动机全压运转时，只有 QA2 接触器的线圈通电。

降压启动电阻一般采用 ZX₁、ZX₂ 系列铸铁电阻，其阻值小、功率大，可允许通过较大的电流。

2) 星形/三角形 (Y/Δ) 降压启动控制电路

电动机启动时接成 Y 形，每相绕组所承受的电压为电源的相电压 (220V)，启动完毕后再自动换接成 Δ 形运行，此时每相绕组所承受的电压为电源的线电压 (380V)。

凡是正常运行时定子绕组接成三角形的笼型异步电动机，均可采用星形三角形的降压启动方法来限制启动电流。我国新设计的 Y 系列异步电动机，4kW 以上均为三角形接法。

图 4-44 所示是利用时间继电器在电动机启动过程中自动完成星形/三角形切换的启动控制电路。

由图 4-44 可看出，按下 SF2 后，QA1 线圈得电并自锁，同时 KF、QA3 线圈也得电，

QA1、QA3 主触头同时闭合,电动机 M 绕组接成星形,电动机降压启动。当 M 的 n 接近 n_N 时,到达 KF 延时整定时间,其延时动断触头断开,QA3 线圈断电,延时动合触头闭合,QA2 线圈得电,同时 KF 线圈也失电。这时,QA1、QA2 主触头处于闭合状态,电动机绕组转换为三角形连接,电动机全压运行。

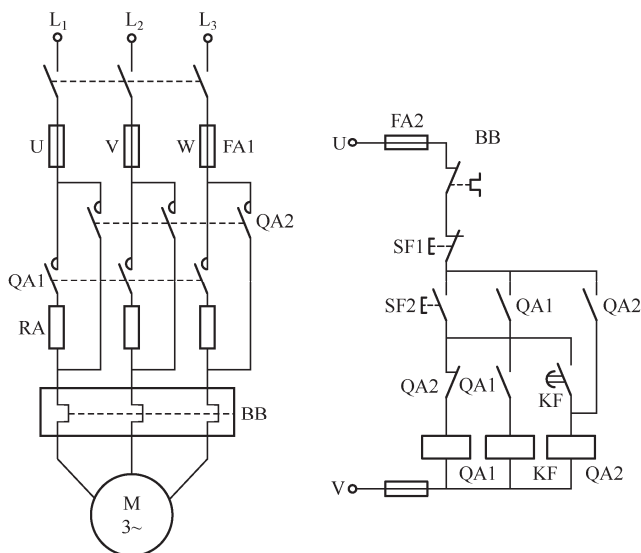


图 4-43 定子电路串电阻降压启动控制线路

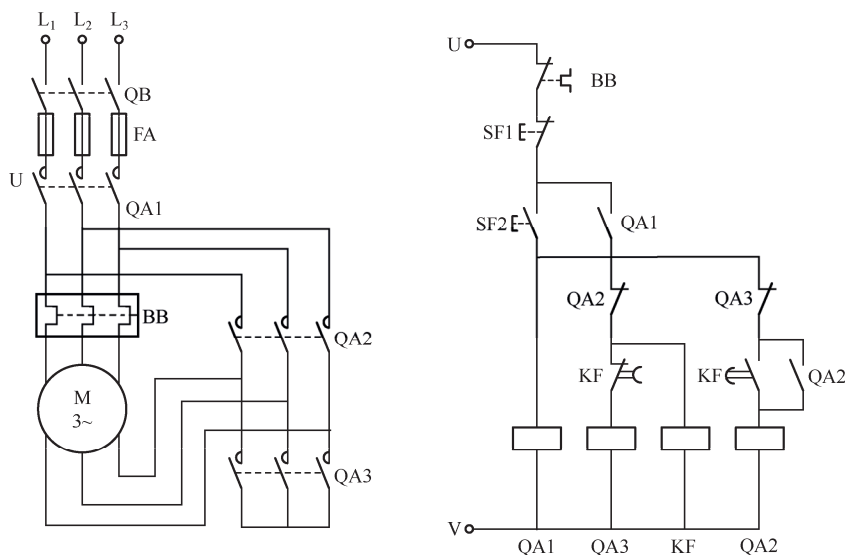


图 4-44 星形/三角形切换的启动控制电路

在图 6-5 中 QA2、QA3 辅助常闭触头,是为了防止 QA2、QA3 同时得电造成电源短路。即当 QA3 动作后,其常闭触头将 QA2 的线圈断开,可防止 QA2 再动作;同样当 QA2 动作后,其常闭触头将 QA3 的线圈断开,可防止 QA3 再动作。这种一个接触器得电动作时,其常闭辅助触头使另一个接触器不能得电动作的控制线路,称为互锁线路。

3) 自耦变压器降压启动

凡是正常运行时定子绕组接成Y形连接的鼠笼式异步电动机, 可用自耦变压器降压启动。M 启动时, 定子绕组加上自耦变压器的二次电压, 一旦启动完毕, 自耦变压器被断开, 定子绕组加上额定电压正常运行。

自耦变压器二次绕组有多个抽头, 能输出多种电源电压, 启动时产生多种启动转矩, 一般比Y/Δ启动时的启动转矩要大得多。自耦变压器价格较贵, 而且不允许频繁启动, 但仍是三相鼠笼式异步电动机最常用的一种降压启动装置。

图 4-45 所示为三相鼠笼式异步电动机自耦变压器降压启动主、控电路。

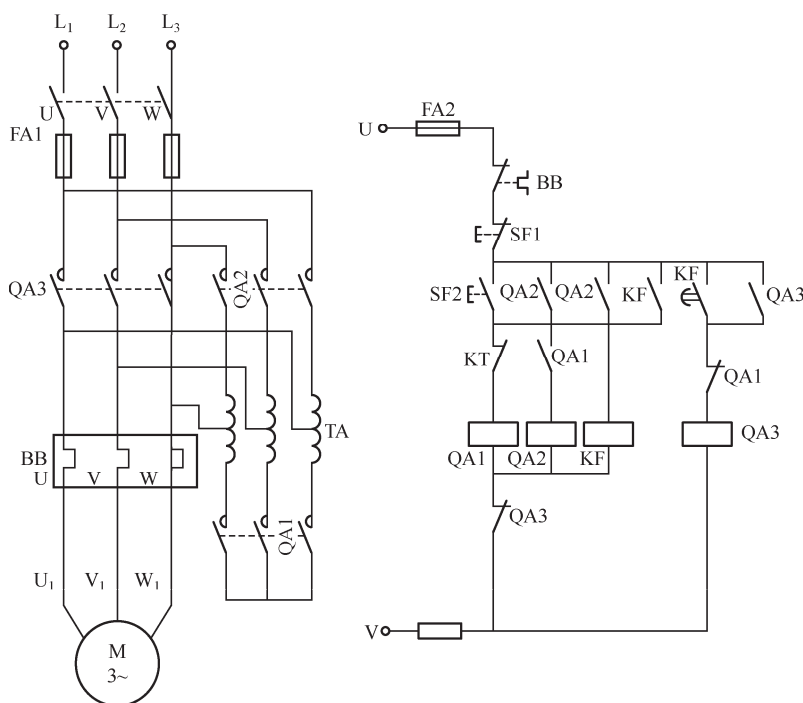


图 4-45 三相鼠笼式异步电动机自耦变压器降压启动主、控电路

4.4.2 三相绕线式异步电动机降压启动控制

与鼠笼式电动机不同, 绕线式电动机的转子回路可以通过滑环与外部电路连接, 在其转子回路串入电阻或电抗, 就可以限制启动电流, 同时也能增加转子功率因数和启动转矩。

1. 转子串电阻降压启动控制

绕线式异步电动机转子电路串入电阻启动, 一般是在转子回路串入多级电阻, 利用接触器的主触点分段切除, 使绕线式电动机的转速逐级提高, 最后达到额定转速而稳定运行。

1) 电流继电器控制绕线式异步电动机转子串电阻启动线路

图 4-46 所示为利用电流继电器控制绕线式异步电动机启动控制线路。主电路的转子回

路中串入电流继电器线圈, 根据转子回路电流的变化 (转子电流越小, 转子转速越高) 来分段短接启动电阻, 实现自动控制的降压启动过程。

图 4-46 中 KF1、KF2、KF3 为电流继电器, 它们的线圈串联在转子回路中, 由线圈中通过的电流大小决定触点动作顺序。KF1、KF2、KF3 三个电流继电器的吸合电流一致, 但释放电流不一致, KF1 最大, KF2 次之, KF3 最小。在启动瞬时, 转子转速为零, 转子电流最大, 三个电流继电器同时吸合, 随着转子转速的逐渐提高, 转子电流逐渐减小, 由于 KF1 整定值最大, 所以最早动作。然后随转子电流进一步减小, KF2、KF3 依次动作, 完成逐级切除电阻的工作, 线路工作原理:

$SF2^{\pm} \rightarrow QA4^{+} \rightarrow M^{+}$ (串 $RA1RA2RA3$ 并 $FK1^{+}, KF2^{+}, KF3^{+}$) $\xrightarrow{n_2 \uparrow, I_2 \downarrow} KF1^{-} \rightarrow QA1^{+}$
 (切除电阻 $RA1$) $\xrightarrow{n_2 \uparrow, I_2 \uparrow} KF2^{-} \rightarrow QA2^{+}$ (切除电阻 $RA2$) $\xrightarrow{n_2 \uparrow, I_2 \downarrow} KF3^{-} \rightarrow$
 $QA3^{+} \rightarrow$ (切除电阻 $RA3$) $\rightarrow M$ (正常运行)

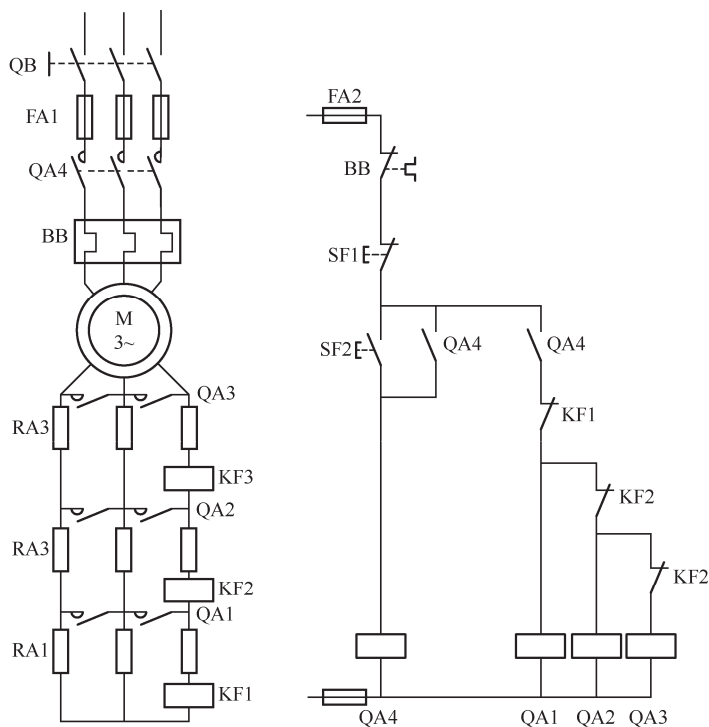


图 4-46 利用电流继电器控制绕线式异步电动机启动控制线路

2) 时间继电器控制绕线式异步电动机转子串电阻启动线路

利用时间继电器控制绕线式异步电动机转子串电阻三级启动线路如图 4-47 所示。图 4-47 中转子回路所串电阻分成三级, 并按星形方式连接。启动前, 启动电阻全部接入电路限流。在启动过程中, 随转子转速的不断上升, 由时间继电器 KF1、KF2、KF3 控制逐级短路启动电阻, 直至启动完毕, 启动电阻全部被短接, 电动机正常运行。线路工作原理:



时间继电器控制自动切除转子电阻的启动方法, 目前得到了较广泛的应用。在图 4-47 所示电路中, 接触器 $QA2$ 、 $QA3$ 、 $QA4$ 分别在时间继电器 $KF1$ 、 $KF2$ 、 $KF3$ 的控制下顺序短接启动电阻 $RA1$ 、 $RA2$ 、 $RA1$, 正常全压运行时, 只有 $QA1$ 和 $QA4$ 两个接触器的主触点闭合。这种工作方式称为按时间原则控制的转子串电阻降压启动控制线路。

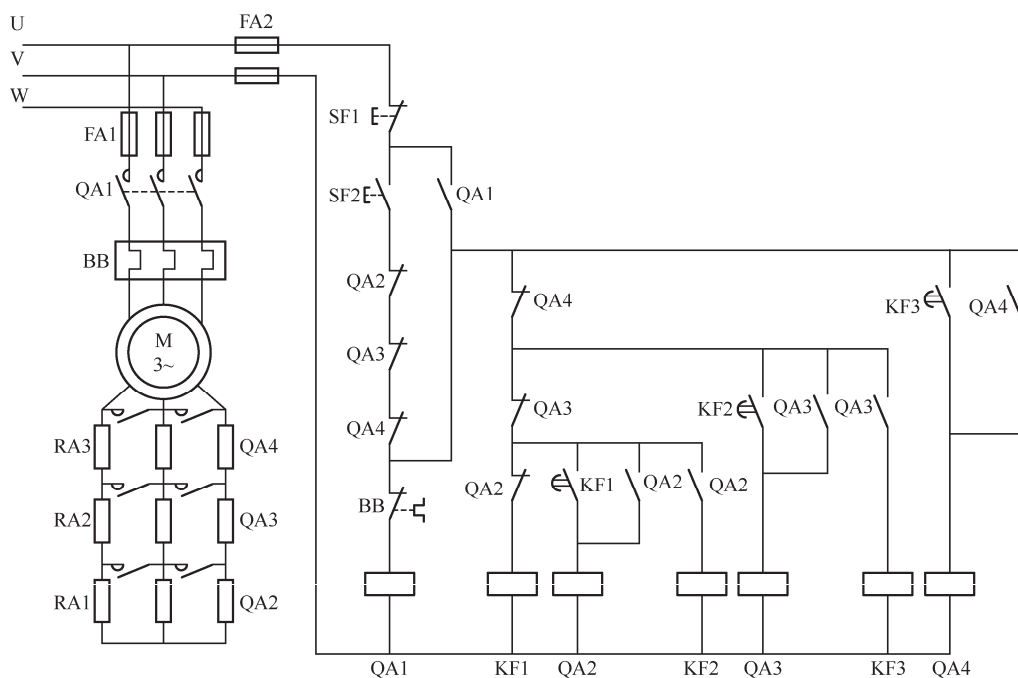


图 4-47 时间继电器控制转子串电阻启动线路

2. 转子串频敏变阻器启动控制

绕线式异步电动机串入转子电路内的电阻或阻抗, 如果能随启动过程的进行自动而又平滑地减小, 那就不需要逐段地切除电阻, 启动过程也就能平滑地进行了。频敏变阻器能够完成上述要求。它是一种随启动过程中转速的升高而阻抗值自动下降的器件。

绕线式异步电动机转子串频敏变阻器启动控制线路如图 4-48 所示。电动机转子电路接入按星形连接的频敏变阻器, 由接触器 $QA2$ 主触点在启动完毕时将其短接。

线路工作原理: 控制电路中有转换开关 SF , 可以选择自动控制还是手动控制的启动方式。 SF 置于“ A ”位置, 为自动控制启动; SF 置于“ M ”位置, 为手动控制启动。

自动控制 SF2[±] — QA1⁺_自 — M⁺（串频敏变阻器启动）
KF2⁺ $\xrightarrow{\Delta t}$ KF1⁺_自 — QA2⁺ — M⁺（切除频敏变阻器，正常运行）

手动控制 SF2[±] — QA1⁺_自 — M⁺（串频敏变阻器启动） $\xrightarrow{\Delta t}$ SF3[±] — KF1⁺_自 — QA2⁺ — M⁺（切除频敏变阻器，正常运行）

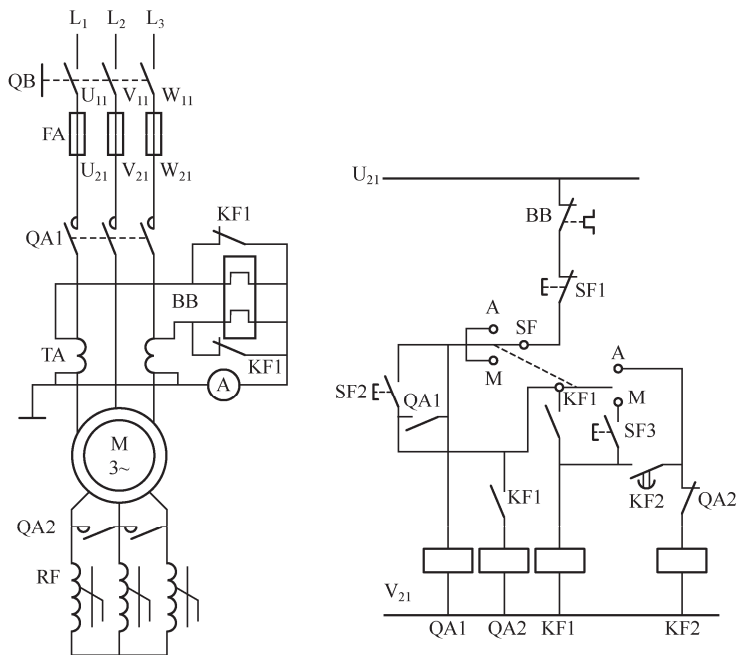


图 4-48 转子串频敏变阻器启动控制线路

4.4.3 三相异步电动机的正/反转控制

机床的工作部件常需要做两个相反方向的运动，大都靠电动机正/反转来实现。三相异步电动机正/反转的原理很简单，只要将三相电源中的任意两相对调，就可使电动机反向运转。

1. 开关控制的正/反转电路

倒顺开关是一种组合开关，图 4-49 所示为 HZ3-132 型倒顺开关工作原理示意图。倒顺开关有 6 个固定触头，其中 U_1 、 V_1 、 W_1 为一组，与电源进线相连，而 U 、 V 、 W 为另一组，与电动机定子绕组相连接。当开关手柄置于“顺转”位置时，动触片 S_1 、 S_2 、 S_3 分别将 $U-U_1$ 、 $V-V_1$ 、 $W-W_1$ 相连接，使电动机实现正转；当开关手柄位于“逆转”位置时，经动触片 S_1 、 S_2 、 S_3 分别将 $U-U_1$ 、 $V-W_1$ 、 $W-V_1$ 接通，使电动机实现反转；当手柄位于中间位置时，两组动触片均不与固定触头连接，电动机停止运转。

图 4-50 所示是用倒顺开关控制的电动机正/反转线路。它是利用倒顺开关来改变电动机相序, 预选电动机旋转方向, 而用接触器来接通和切断电源, 控制电动机的启动与停止。

倒顺开关正/反转控制线路虽然所用电器较少,线路也简单,但它是一种手动控制线路,

在频繁换向时,操作人员劳动强度大,操作不安全,所以这种线路一般用于控制额定电流10A、功率在3kW以下的小容量电动机。生产实践中更常用的是接触器正/反转控制线路。

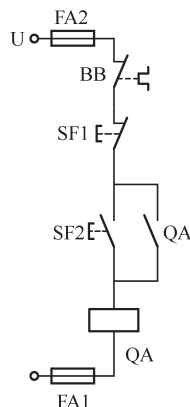
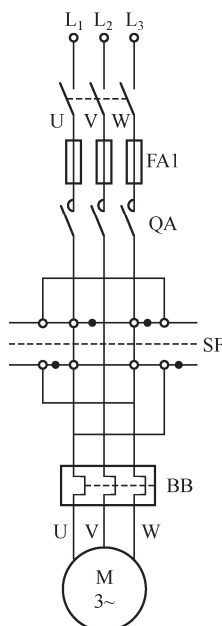
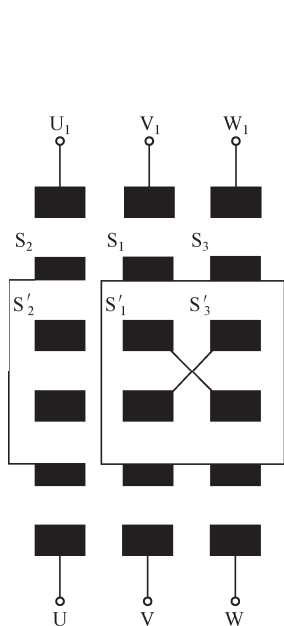


图 4-49 HZ3-132 倒顺开关工作原理示意图

图 4-50 用倒顺开关控制的正/反转线路图

2. 接触器控制的正/反转电路

如图 4-51 所示为接触器控制的正/反转线路。

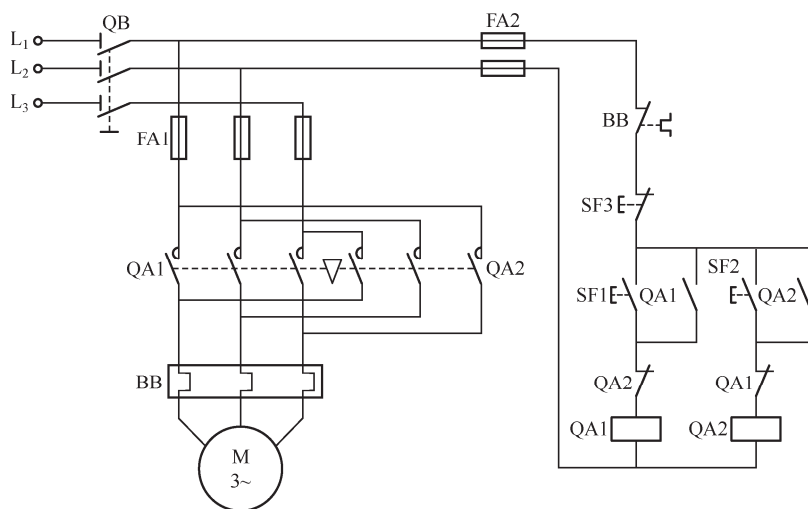


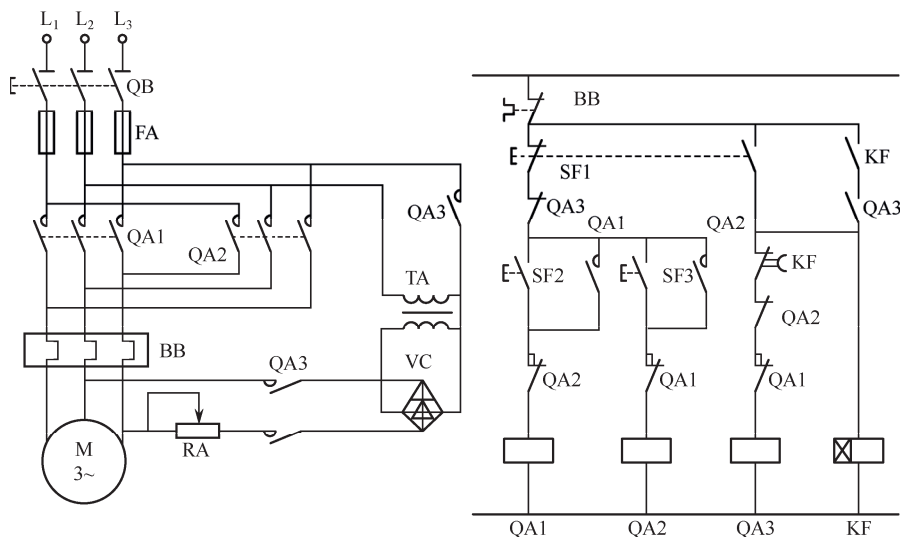
图 4-51 接触器控制正/反转线路

在主电路中,两个接触器 QA1、QA2 触点接法不同,故可改变电动机电源的相序,从而改变电动机转向。在控制电路中, SF1、SF2 分别为正/反控制按钮, SF3 为停止按钮。

还有一种采用复合按钮进行互锁的正/反转控制线路，但是却极不安全。首先是电动机在没有停止即反向运转，电动机必然要经过全压反接制动过程，制动电流可能损坏电动机和控制线路；其次是当接触器主触点被“焊死”或卡住，正转时按下反转按钮将发生严重的电源短路事故。

1) 按叶面积

按时间原则控制的可逆运



线路的串路工作原理如图 4.52 所示。

2) 按速度原则控制中略

图 4-54 所示是按速度原则

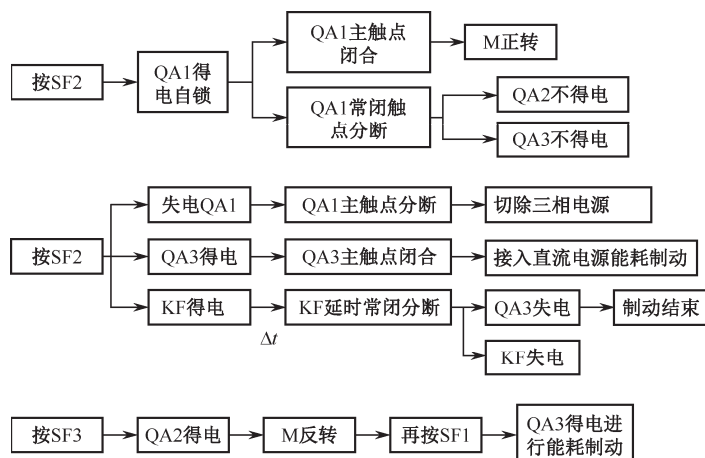


图 4-53 按时间原则控制线路的电路工作原理

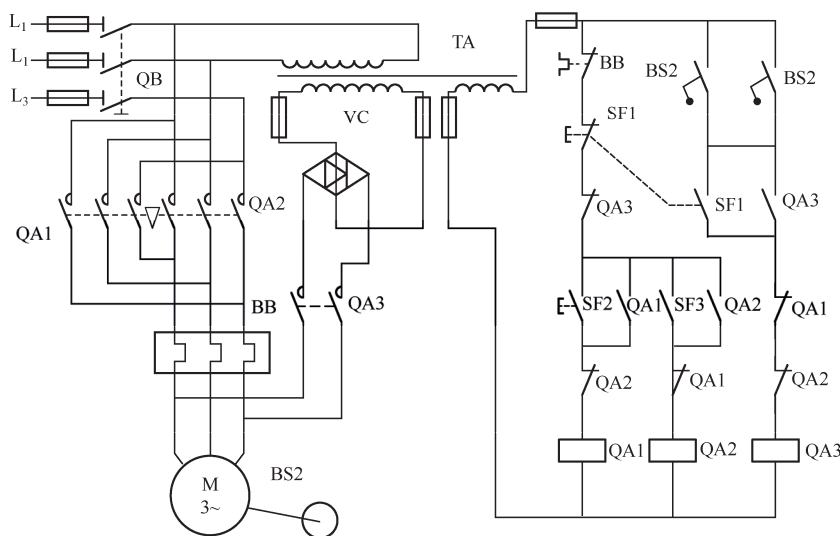


图 4-54 按速度原则控制的不可逆运行能耗制动控制线路

能耗制动作用的强弱与通入直流电的大小和电动机转速有关。在同样的转速下，直流电越大，制动作用越强，一般直流电为电动机空载电流的 3~4 倍。

对于负载转速比较稳定的生产机械，可采用时间控制的能耗制动。对于可通过传动系统改换负载转速或加工零件经常更换的生产机械，采用速度控制的能耗制动较为合适。

2. 反接制动

反接制动是利用改变电动机三相电源的相序，使定子绕组产生的旋转磁场反向旋转，在转子绕组上产生与转子旋转方向相反的制动转矩的一种制动方式。

当转子转速接近于零时，应切除三相电源，否则，电动机将会反向转动。这是电动机反接制动与反向转动控制的主要区别。

由于反接制动时，转子旋转方向与旋转磁场方向相反，两者的相对转速接近于 2 倍同

步转速，所以定子绕组中流过的制动电流相当于全压启动电流的 2 倍，为了限制这个大电流，对功率较大的电动机进行反接制动时必须在电路中串入电阻，以减小制动电流。

反接制动的关键在于电动机转速接近于零时，能自动切除电源。因此，采用速度继电器来检测电动机的转速，在 100r/min 以下时，使触点复位切除电源，比采用时间继电器要准确些。表 4-1 所示是能耗制动与反接制动的比较。

表 4-1 能耗制动与反接制动的比较

制 动 方 式	能 耗 制 动	反 接 制 动
制 动 特 点	制动平稳、准确，能量消耗小，制动力弱，制动转矩与转速成比例地减小，需要直流电源	制动力强，效果显著，制动过程有冲击，易损坏运动部件，能量消耗大，不易停在准确位置
适 用 场 合	要求制动平稳、准确的设备	不经常启动的设备

图 4-55 所示是单向反接制动控制线路。

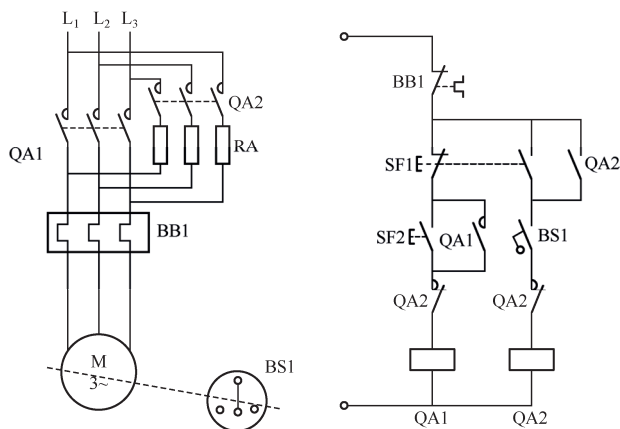
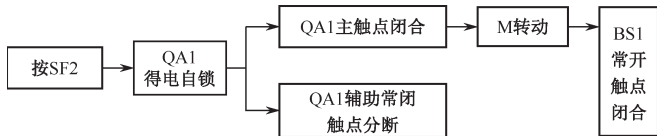
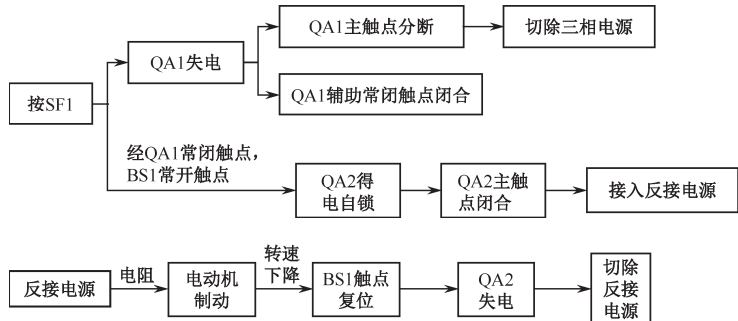


图 4-55 单向反接制动控制线路

电动机正常运转的工作原理如下：



电动机反接制动停车的工作原理如下：



4.4.5 交流电动机多地及顺序控制

交流电动机多地控制指的是在多个地点对电动机启动和停止的控制，而交流电动机的顺序控制指的是对电动机按一定的时间或先后顺序进行控制。

1. 多地控制电路

多地控制线路原理如图 4-56 所示。图 4-56 中主电路部分是一个单向正转电路，控制电路部分是一个在两地能分别启动和停止电动机的控制电路。在控制电路中，按钮 SF1、SF2 分别为甲、乙两地的停止按钮，按钮 SF3、SF4 分别为甲、乙两地的启动按钮，按钮 SF1 和 SF3 被安装在甲地，按钮 SF2 和 SF4 被安装在乙地。

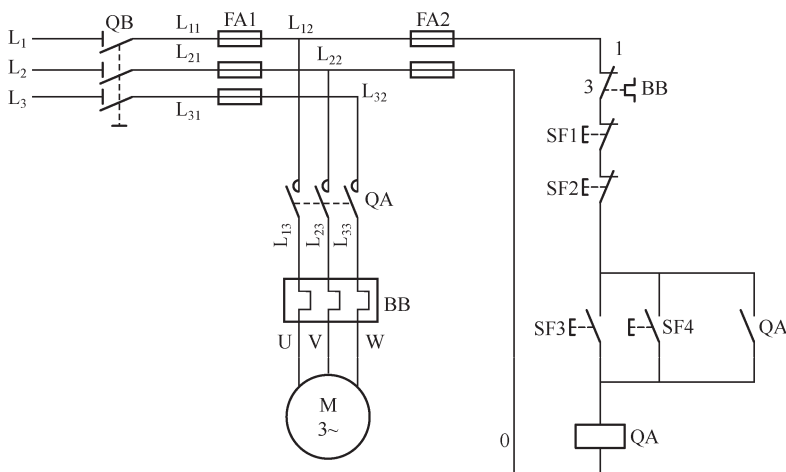


图 4-56 多地控制线路原理图

当需要电动机 M 启动运转时，在甲地或乙地按下电动机 M 的启动按钮 SF3 或 SF4，接触器 QA 线圈通电闭合并自锁，接触器 QA 主触头接通电动机 M 绕组电源，电动机 M 启动运转。在甲地或乙地按下停止按钮 SF1 或 SF2，接触器 QA 线圈失电释放，其主触点切断电动机 M 电源，电动机 M 停转。

2. 顺序控制电路

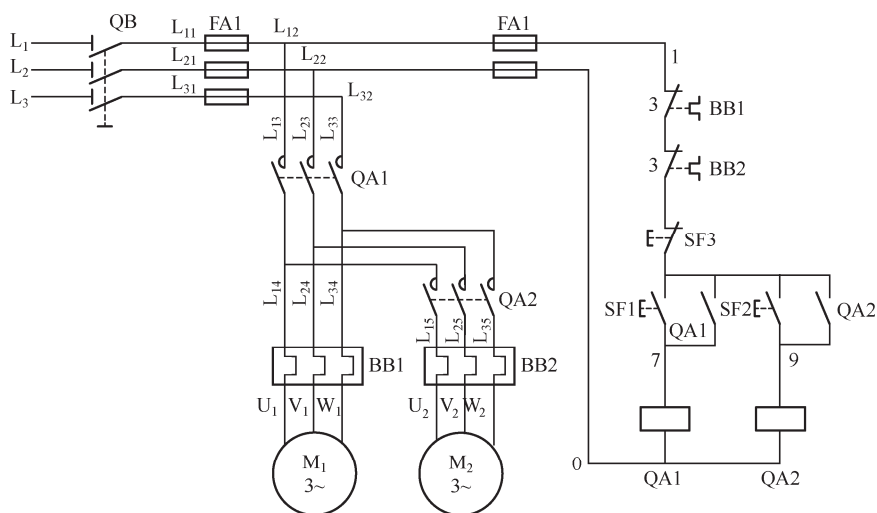
顺序控制线路有主电路顺序控制线路和控制电路顺序控制线路之分，其电路原理如图 4-57 所示。其中图 4-57 (a) 所示为主电路顺序控制线路原理。在图 4-57 (a) 中，电动机 M₁ 和 M₂ 分别由接触器 QA1 和 QA2 来进行控制。控制电动机 M₂ 的接触器 QA2 的主触头接在接触器 QA1 主触头的下面，所以只有当接触器 QA1 主触头闭合，电动机 M₁ 启动时，电动机 M₂ 才能启动运行，这就是主电路顺序控制。

具体控制如下：按下电动机 M₁ 的启动按钮 SF1，接触器 QA1 线圈通电闭合并自锁，其主触头接通电动机 M₁ 的电源，电动机 M₁ 启动运行，同时为电动机 M₂ 电源的接通做好了准备。然后，再按下电动机 M₂ 的启动按钮 SF2，接触器 QA2 通电闭合并自锁，主电路中接触器 QA2 主触点接通电动机 M₂ 的电源，电动机 M₂ 启动运转。按下停止按钮 SF3，

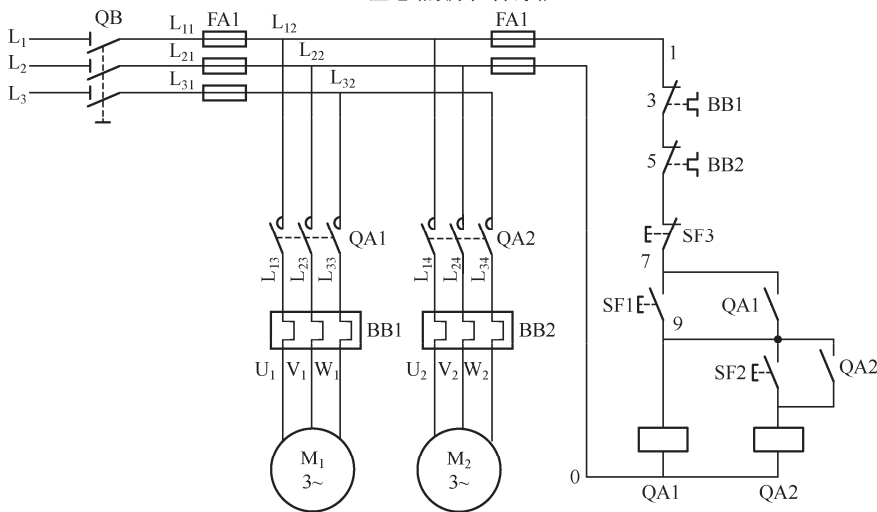
接触器 QA1、QA2 线圈同时失电, 电动机 M_1 、 M_2 停止运转。

图 4-57 (b) 所示为控制电路顺序控制线路原理。这种电路只有在接触器 QA1 通电闭合后, 接触器 QA2 才能通电闭合。

这样实现了控制电路的顺序控制, 具体控制如下: 按下电动机 M_1 启动按钮 SF₁, 接触器 QA1 线圈通电闭合, 接触器 QA1 在 7 号线与 9 号线间的常开触点闭合后一方面起到自锁作用, 另一方面则为接触器 QA2 线圈接通电源做好准备, 同时接触器 QA1 主触点接通了电动机 M_1 的电源, 电动机 M_1 启动运转, 然后按下电动机 M_2 的启动按钮 SF₂, 接触器 QA2 线圈得电闭合自锁, 其主触点接通电动机 M_2 的电源, 电动机 M_2 启动运转, 按下停止按钮 SF₃, 接触器 QA1、QA2 失电释放, 电动机 M_1 、 M_2 断电停止运转。



(a) 主电路顺序控制线路



(b) 控制电路顺序控制线路

图 4-57 顺序控制线路原理图

4.5 本章小结

本章讲述了电气控制线路的基础知识,包括电气线路中所用元件的符号表示,绘图的一般原则和方法等。还讲述了一些常用的典型基本控制线路,如点动与连续控制、正/反控制、位置控制等,以及直流电动机和三相交流异步点动机的启动、调速、正/反转、制动等方面的控制。

本章中讲述的基本电气控制电路,是机械设备电气控制系统包括机床电气控制系统中的基础。随着可编程控制器技术(PLC)、直流调速技术、交流调速技术的发展和数控技术的出现,已大大简化了机械设备的逻辑控制和电动机的控制,但这些基本电气控制电路仍在广泛的使用(例如,数控机床的冷却控制、刀架旋转控制等)。基本电气控制电路仍是机械设备电气控制系统中不可缺少的部分。

4.6 思考与练习

1. 什么是电气图中的图形符号和文字符号?它们是由什么构成?
2. 通电延时型、断电延时型时间继电器的区别是什么?
3. 试简述直流电动机几种励磁方式的特点。
4. 一台并励电动机其额定值如下: $P_N=100\text{kW}$, $I_N=511\text{A}$, $U_N=220\text{V}$, $n_N=1\,500\text{r/min}$, 电枢电阻 $R_a=0.04\Omega$, 电动机带动横转矩负载运行。现采用电枢串电阻方法将转速下调至 600r/min , 应串入 R_c 为多大?
5. 现有一台他励直流电动机,要求能实现手动启动、正/反转控制、反接制动和过载励磁保护,请设计出相应电路。
6. 试分析图 4-44 中时间继电器控制星形/三角形降压启动线路在时间继电器 KF 损坏(不动作)的情况下,该线路会发生什么现象?
7. 设计电动机 M_1 正/反转点动控制线路,要求能两地控制,双重互锁保护,最后用反接实现制动。

Chapter 5

第 5 章 计算机数控（CNC）系统

知识点

- 数控机床电气控制系统
- CNC 系统的基本功能
- CNC 系统的硬件组成及其工作原理
- CNC 系统的软件功能以及各功能的实现
- CNC 系统的软件结构

本章导读

CNC 系统是机床电气控制系统的重要组成部分，由硬件和软件两部分构成。硬件部分包括微处理器（CPU）、存储器、总线、I/O 接口等。CNC 系统的软件和硬件合理组合，控制输入、处理数据、插补运算和信息输出，控制执行部件按要求动作（各坐标轴的进给速度、方向和位移，主轴变速、换向和启停，换刀，冷却，润滑，工件的松开、夹紧），进而使数控机床加工出符合要求的工件。

5.1 概述

5.1.1 数控机床电气控制系统的总体结构

随着汽车、航空航天等行业的飞速发展，机械产品日益复杂，高速、高精加工已经成为制造技术的重要发展趋势。为了满足高速、高精的要求，数控系统、主轴和伺服驱动系统等成为机床的重要组成部分，数控机床应运而生。用数字控制技术对机床的运动及其加工过程进行自动控制的机床，称为数控机床。数控机床是自动化的集中体现，在电气控制部分，除了一般机床的电气控制线路外，还包括数控系统。图 5-1 所示为数控机床电气控制系统的总体结构框图。

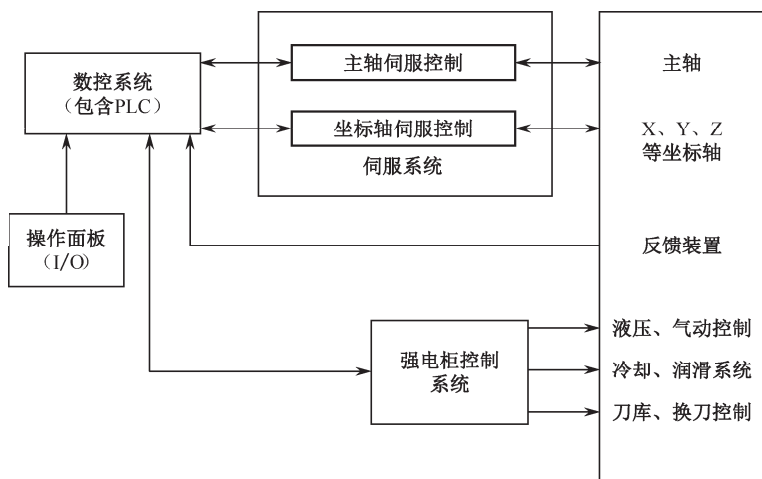


图 5-1 数控机床电气控制系统的总体结构框图

其中，数控系统是实现数字控制的重要装置，是机床的核心，机床动作的数字信号均由数控系统发出。驱动装置和机床电气控制装置位于数控系统和机床之间。

国家标准中把用计算机控制加工功能，实现数值控制定义为计算机数值控制（Computer Numerical Control, CNC），通常又称计算机数控。计算机数控系统是在硬件数控系统的基础上发展起来的，由硬件和软件两部分组成。它将软件和硬件合理地组合，控制输入、处理数据、插补运算和信息输出，控制执行部件，使数控机床按照一定的要求进行加工。CNC 系统包括微处理器（CPU）、存储器、总线、I/O 接口，以及相应的控制软件。CNC 系统的输入信号包括急停信号、超程检测信号、刀位信号、速度到达信号、松开到位、夹紧到位等。输出的信号包括各坐标轴的进给速度、方向和位移，还有主轴变速、换向和启停，换刀指令，冷却、润滑的控制，工件的松开、夹紧等。

5.1.2 CNC 系统的基本功能

CNC 系统的功能由大量的软件和硬件来实现，以满足机床各种复杂的控制要求。不同

厂家的 CNC 系统通常都包括以下基本功能:

1) 操作方式

CNC 的操作方式通常有自动、编辑、MDI、DNC、手动、手轮、回零等。

2) 运动控制

运动控制包含的内容有控制轴数和通道数、插补功能、进给速度控制、位移量控制等。

控制轴数和通道数是指 CNC 能对多少个进给轴进行控制,可以多少轴联动,例如,3 轴 3 联动、5 轴 4 联动等。通道数是指能同时执行加工任务的数量,如双通道就是可以同时两个不同的工件进行加工。

插补是指在一条已知的轨迹上进行数据点密集化,CNC 系统通过软件实现插补计算。实际上插补功能分为粗插补和精插补,粗插补中软件每次插补一个小线段,精插补是根据粗插补的结果,将小线段分为单个的脉冲输出。有直线插补、圆弧插补、空间曲线插补等多个插补方式。

进给速度控制是指根据加工要求,用指令指定机床的进给速度,包括切削进给速度和同步进给速度。切削进给速度以每分钟进给的毫米量来指定刀具切削进给速度,如 200mm/min,对于回转轴,就是每分进给的角度。同步进给速度以主轴每转进给的毫米量来指定刀具切削进给速度,如 0.05mm/r,指定同步进给速度的机床,主轴装有位置编码器,进给速度用于编写切削螺纹的加工程序。

位移量控制是指 CNC 根据指令控制机床对应轴执行指令的移动量。位移量的范围与机床结构设计有关,最小位移量通常为 $1\mu\text{m}$ 或 $0.1\mu\text{m}$ 。

3) 准备功能指令

又称 G 指令,用于指定机床的动作方式,如基本移动、程序暂停、刀具补偿、坐标设定、程序暂停、基准点返回、固定循环等指令。很多加工程序,如螺纹加工、钻孔、深孔钻削等,需要完成十分典型的循环动作,将这些循环动作预先编程存入系统的存储器内,用 G 代码编写指令,就形成了固定循环指令,这样可以大大简化编写的加工程序。

4) M 功能

用来指定主轴的启停和转向、切削液的开关、润滑的开启与关闭等。辅助功能一般是开关量的控制,用 M 指令代码进行指令。各个厂家的 CNC 系统设定的辅助功能有所差别,并且许多是自定义。

5) T 功能

用来选取加工所需刀具。包括选取的刀具种类和数量、自动换刀方式和刀具的编码方式。指令代码以 T 开头,T 后面数字代表刀具的编号。

6) S 功能

用来控制主轴转速。有模拟量控制和开关量控制之分。

7) 人机交互图形编程功能

通过计算机辅助编程,特别是根据工件图纸,CNC 系统自动计算交点、切点和圆心坐

标等，并自动生成加工程序的功能称为人机交互图形编程功能。它大大提高了编程效率。目前，很多 CNC 系统具备宏程序功能，这些功能使工作人员很快地进行工作。

8) 通信功能

CNC 系统的 RS-232 接口，满足了柔性制造系统(FMS)和计算机集成制造系统(CIMS)的需求。随着技术的发展，有的 CNC 系统通过制造自动化协议（MAP），与工厂的通信网络相连。目前 CNC 系统大都增加了以太网通信接口。

9) 自诊断功能

CNC 系统中设置有各种诊断程序，防止故障的发生，或者在故障发生后迅速查明故障类型和部位。这样可以减少停机时间。

5.2 数控系统的硬件

5.2.1 CNC 系统的硬件组成

CNC 系统的硬件主要由中央处理单元（CPU）、输入/输出（I/O）接口、存储器，以及起连接作用的总线组成。CNC 系统根据处理器的不同可分为单微处理器系统和多微处理器系统。

1. 单微处理器系统

单微处理器系统是指 CNC 系统有一个微处理器，它采用集中控制，分时处理各项任务的工作方式。单微处理器 CNC 系统基本框图如图 5-2 所示。

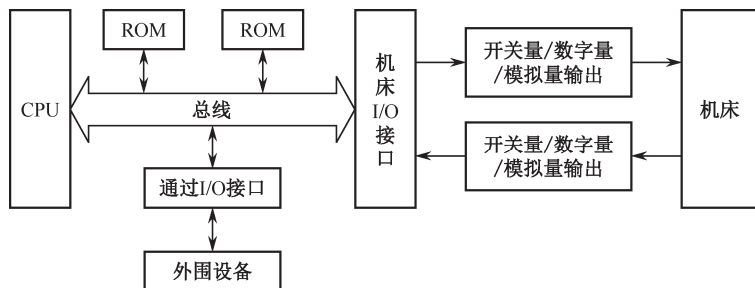


图 5-2 单微处理器 CNC 系统基本框图

1) 中央处理单元（Central Processing Unit, CPU）

CPU 是 CNC 系统的核心，它包括由大规模的集成电路来实现的微处理器和辅助电路。微处理器负责 CNC 系统的运算和管理功能，由运算器和控制器两部分组成。运算器完成数据的算术和逻辑运算。控制器将存储器中的指令取出、译码，并决定下一步的操作命令。

2) 输入/输出（I/O）接口

CNC 系统与各类外围设备及机床伺服控制机构之间通过 I/O 接口来连接。I/O 接口的功能包括提供数据缓冲、完成信息形式转换和完成 CNC 系统与受控制对象之间的信号隔离等。

I/O 接口分为数字量（开关量）接口和模拟量接口。数字量接口主要传输二进制形式

的数据。开关量输入/输出接口比较特殊,开关量输入接口的功能是把机床侧的开关信号转化为 CNC 侧的 TTL 电平信号。开关的闭合对应二进制的“1”,开关的断开对应二进制的“0”。开关量输出接口用于把控制机床动作的信号输出到机床强电柜,例如,电磁阀的开启和关闭。模拟量接口针对电压、电流等外部信息。模拟量输入接口对接收的电压、电流形式的模拟量进行 A/D 转换,送入 CNC 系统。模拟量输出接口将系统输出的数字量进行 D/A 转换,变为电压或者电流形式的模拟量。

3) 存储器

存储器是 CNC 系统的重要组成部分,它用来存放 CNC 系统的控制软件和零件加工程序。这些信息均以二进制的形式来存放。存储器的基本单元是二进制位(bit)。若干个位构成一个存储器字(word)。字长指的是一个字包含的二进制位数。字节(byte)是存储器的另一个重要单元。8 个二进制位组成一个字节。在计算机术语中,1K 为 2^{10} B, K 是衡量存储器容量的一个重要单位。例如,一个存储器的容量为 32KB,这意味着它可以存储 $2^{15}=32768$ B。

存储器一般分为只读存储器 ROM 和读写存储器 RAM,ROM 只能读出,不能写入,一般用来存放 CNC 软件代码。RAM 又称随机存取存储器,一般用于存放中间数据、各种系统变量和零件的加工程序。存储器与总线有着密切联系。

4) 总线

总线是 CNC 系统各个部件之间交换信息的传输线。CNC 系统的总线分为地址总线、控制总线和数据总线。当存储器被访问时,存储器从地址总线接收被访问的存储单元的地址并对其进行译码,再选中要访问的存储单元。控制总线传输的数据来决定是从存储器读出数据还是写入数据。最后,数据通过数据总线被读出或者被写入要访问的存储单元。

2. 多微处理器系统

多微处理器系统包含两个或者两个以上的处理器。在这样的 CNC 系统中,不同的处理器负责处理一部分功能,例如,输入零件加工程序、插补运算、数据预处理和伺服控制等功能可以由不同的微处理器负责。它们可以独立运行程序,也可以通过通信线路和共享存储器与其他处理器交换信息。多微处理器的 CNC 系统具有很好的扩展性和适应性,各个功能单元更换方便,使故障局限在某个功能单元,因此,对系统的整体影响降到最低。这些处理器共同协调工作,运算速度大大提高,可以更高效、精准地完成对机床的控制,适用于多轴控制的机床。目前,市场上已经有比较成熟的多微处理器 CNC 系统。图 5-3 所示为多微处理器 CNC 系统的结构框图。

5.2.2 CNC 系统各组成部分工作原理

1. CNC 系统中的 CPU

早期的 CNC 系统使用的 CPU 由中小规模的集成电路构成。现代的 CNC 系统全部使用微处理器来实现各个功能。CNC 系统中使用的 CPU 的微处理器包括三类:单片机、位片式逻辑芯片和通用微处理器。

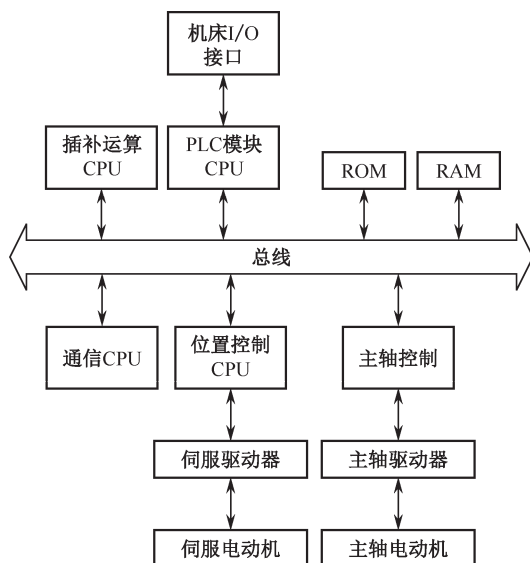


图 5-3 多微处理器 CNC 系统结构框图

1) 单片机

目前，市场上单片机多种多样，8051、ARM、MIPS 等都能够作为 CNC 系统的 CPU。根据具体的运用要求，一些单片机能够支持操作系统，如 ARM 系列中 ARM7200T 以上的芯片。

随着控制芯片的飞速发展，基于单片机的 CNC 系统具有多种功能，它们能够满足用户高标准的需求，也能够以很高的性价比制造出满足低端用户的产品。由此可见，采用单片机作为 CNC 系统的 CPU，能够比较充分的利用 CPU 和数控系统的各种资源，能够在很大程度上控制成本。

但是，使用单片机作为 CPU 的 CNC 系统也存在很多缺点，例如，延长了产品的开发周期，针对不同的控制功能要重新开发软件程序和硬件控制电路。

2) 位片式逻辑芯片

位片式逻辑芯片是一种大规模集成的逻辑电路，它使系统功能模块化，具有速度快、结构灵活、功能强等优点。位片式逻辑芯片只是一种逻辑器件，并非微处理器，但是它可以构成处理器，也可以构成其他控制系统。微处理器中，控制部分和处理部分集成在一个芯片中。在位片式逻辑芯片中，控制部分和处理部分分别处于若干功能模块上，各个模块再组成一个系统。例如，ALU 模块、进位逻辑模块、状态寄存器模块、总线接收发送模块等。将必要的模块芯片组合，就构成了完整的微处理器。

位片式逻辑芯片对数字系统的设计影响很大，发展很快，常见的有 AMD 公司的 Am2900 系列、摩托罗拉公司的 M10800 系列、Monolithic Memories 公司的 5700/6700 系列等。

3) 通用微处理器

单片机（即微控制器）、数字信号处理器（DSP）等应用于自动控制领域的处理器为专用微处理器。用于个人计算机、服务器、工作站等的处理器为通用微处理器，根据软件的不同，通用微处理器用于多个方面。通用微处理器和单片机、数字信号处理器基本的工作

原理相似,但各有特点。常用的通用微处理器有 8 位、16 位和 32 位的。世界上第一个通用微处理器是 1971 年英特尔公司开发的 4004。在此之后,逐渐出现了摩托罗拉公司的 M6800, Zilog 公司的 Z80 和英特尔公司的 8080、8085 等微处理器。这些都是 8 位处理器,其中 Z80 在我国数控改造方面应用最早、最广泛。

2. I/O 接口的工作原理

不仅是在 CNC 系统中,在任何计算机系统中,要处理数据和程序等信息,都要由输入设备提供,处理后的结果要通过输出设备输出。CPU 和 I/O 接口之间的数据传送方式常用的有无条件传送、查询传送、中断传送和 DMA 传送四种。

(1) 无条件传送适用于数码管、按钮等简单的设备。传送时可以认为设备总是处于就绪状态,CPU 对设备进行读取,通常读取的数据为简单的开关状态。这种传送方式要求设备必须处于准备好状态,不能用于复杂的机电设备。

(2) 查询传送方式在传送前 CPU 先查询外设的状态,外设状态为准备好则传送数据,否则,CPU 等待。如果有多个外设,CPU 按照一定顺序查询,先查询的设备优先进行数据传送。这种传送方式的特点是工作可靠,但是传送效率低。

(3) 中断传送是一种效率较高的传送方式,当设备需要传送数据时,向 CPU 发出中断请求,CPU 执行完当前指令后,转去执行中断处理程序,并保护现场和断点,中断处理后,返回继续执行原来的任务。在此传送方式下,CPU 可以同时管理多个设备,进行多任务处理,并且对设备的中断请求进行及时处理。中断请求是随机事件,从外设发出中断请求、CPU 完成当前任务、响应中断、保护现场,到响应外设,需要一定的延时。完成中断任务返回需要恢复现场,这些都占用了 CPU 的资源。对于要求更高的高速外设数据传送可以使用 DMA 传送。

(4) DMA 传送即直接存储器存取方式,这种传送方式下,存储器和外设间有一条高速数据通道,可以直接进行数据交换。传输过程直接由 DMA 控制器来实现,不需要 CPU 干预。在高速和频繁的数据传送场合,DMA 方式传送数据的效率高,也减轻了 CPU 的工作量。

在计算机系统中,通常使用大规模集成电路来实现这些访问功能。有些芯片可以集成实现 I/O 控制器和接口功能,如 CRT 控制器、磁盘控制器等。这样就大大简化了 I/O 子系统并提高了系统的可靠性。

CNC 系统中 I/O 接口除了实现常规的程序和数据的输入/输出、人机交互外,还要完成机床的控制和机床状态的监测。CNC 系统的 I/O 接口通常由标准的 I/O 接头与光电隔离和信息交换电路组成,图 5-4 所示为一种典型的输入/输出接口电路。

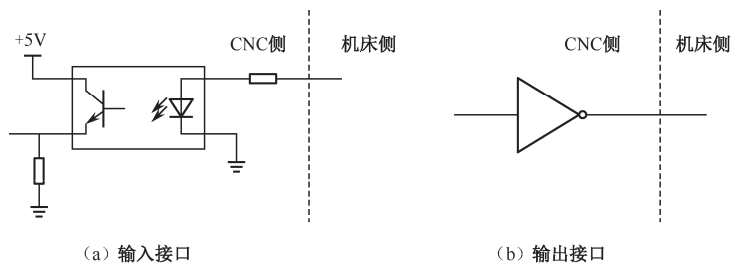


图 5-4 CNC I/O 接口电路

3. 存储器的工作原理

CNC 系统运行时, CPU 需要不断地访问存储器, 每执行一条指令, 都需要不止一次访问存储器。因此, 存储器的存取速度对系统的工作效率有着重要的意义。按照存取方式来分类, 存储器按照存取方式的分类图如图 5-5 所示。

CNC 系统的存储器由读写存储器 (RAM) 和只读存储器 (ROM) 两大部分。

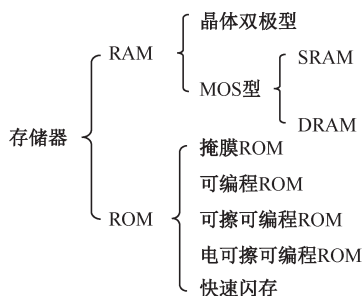


图 5-5 存储器的分类图

1) 读写存储器 (RAM)

RAM 的特点: 系统可以随时对存放在 RAM 中的数据 and 程序进行修改和存取, RAM 存储器可读可写。系统断电时, 存放在 RAM 中的数据和程序全部丢失, 无法恢复, 主要用于主存储器 and 高速缓冲存储器。按照工艺 RAM 分为晶体双极型和 MOS 型 (金属氧化物半导体)。晶体双极型 RAM 速度快, 存放时间只需 10~25ns, 但是集成度低, 功耗大, 一般应用于高速缓冲存储器。MOS 型又分为静态存储器 (SRAM) 和动态存储器 (DRAM)。DRAM 是破坏性读出, 读出信息的同时就破坏了存储的内容, 再者因为电容的泄露, 其信息不能长期保存, 需要根据存储内容周期性地对电容充电, 这就是刷新过程。DRAM 每隔 2~4ns 需要将所有存储单元刷新一次, 这个时间成为刷新周期。DRAM 的优点是集成度高、功耗低、存取速度快、价格低廉, 通常都用做计算机内的主存储器。SRAM 用基本触发器作为存储单元, 每六颗电子管组成一个位存储单元, 没有电容元件, 不需要不断充电就可以正常工作。SRAM 比一般的 DRAM 速度更快更稳定, 一般用做高速缓存。

2) 只读存储器 (ROM)

ROM 是一种线路简单的半导体电路, 在元件正常工作情况下, ROM 中存放的数据和程序永久保存, 而且不能进行修改。它的读取速度比 RAM 慢。根据组成元件, ROM 分为掩膜型只读存储器 (MASK ROM)、可编程只读存储器 (Programmable ROM, PROM)、可擦可编程只读存储器 (Erasable Programmable, EPROM)、电可擦可编程只读存储器 (Electrically Erasable Programmable, E²PROM) 和快闪存储器 (Flash Memory)。

掩膜 ROM 一旦制成, 信息便不能更改。一般用做原始数据的 ROM 或者 EPROM 的样本, 用于大量复制。掩膜 ROM 的成本较低。

PROM 可以由用户写入数据, 但是只可以写入一次。例如, 熔丝型的 PROM 中, 以熔丝烧断与否来表示二进制的 0 和 1。出厂时, 存储的内容全部为 1 或者全部为 0, 用户根据需要写入 0 或者写入 1。

EPROM 具有可擦除功能, 用户可以将写入的内容全部擦掉, 然后重新写入, 可以反复多次。将 EPROM 上的紫外线窗口对着紫外线光源照射即可擦除已经写入的信息。一般这个窗口用黑色胶纸遮盖, 以免阳光直射而擦除信息。

E²PROM 也具有可擦除功能, 不同的是它用电压来清除信息, 使用更为方便。它的擦除次数可达一万次。

闪存存在生活中最常见，常用的优盘就属于该类型。这种可以直接在主板机上修改内容，当电源关掉后数据不会丢失。它的缺点是写入速度较慢。

5.3 数控系统的软件

5.3.1 CNC 系统的软件功能

数控系统最大的一个特点是在硬件平台上，根据需求用软件来实现多种功能。随着计算机技术的飞速发展，数控系统的软件功能也越来越完善。用软件代替部分硬件，软件的特点是易于修改和补充，降低了成本，也提高了数控系统的可靠性和灵活性。随着电子技术的发展，硬件也显现出其优势，价格低廉、运行速度快。所以目前数控系统的设计会兼顾软件和硬件两方面的优势。

数控系统是以轴运动控制、传感器控制和离散点 I/O 逻辑控制为特征的自动化设备，一般将其软件功能分为管理功能和控制功能。管理功能主要负责系统资源管理、各个子任务的调度，负责信息的输入/输出、程序管理、诊断、显示等功能。控制功能主要负责数控系统的基本功能，包括译码、插补运算、位置控制、刀具补偿、I/O 逻辑控制，以及速度预处理等功能。CNC 系统软件功能框架如图 5-6 所示。

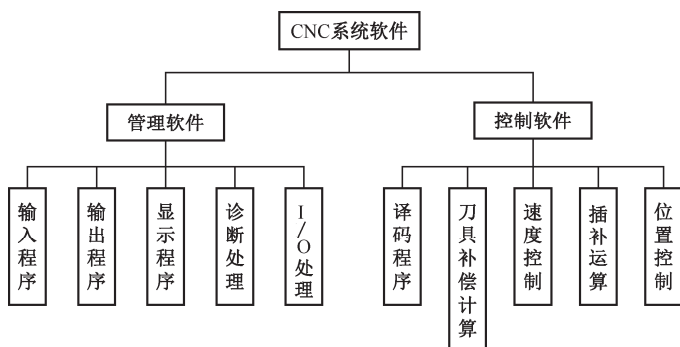


图 5-4 CNC 系统软件功能框架

5.3.2 CNC 系统软件功能的实现

CNC 系统是典型的实时多任务控制系统，它通过扩展控制软件来完成整个系统的功能。本节对其软件作进一步介绍，一般来讲，CNC 系统包括以下各项功能。

1. 系统总控制程序

CNC 系统上电后进入系统总控制程序，即 CNC 系统软件的主循环程序。其执行过程如下。

1) 初始化

CNC 系统上电或者复位时，进行初始化处理。初始化完成后，系统自检通过；再根据输入信号检测机床状态，如出现异常则报警，如没有异常则准备就绪，等待执行操作。

2) 接收命令

接收操作者的命令。如果没有命令，则循环等待。

3) 处理命令

分析接收到的命令，并启动执行该命令的相应程序。

4) 返回

处理命令后，返回到接收命令的环节，系统重新接收命令，或者处于等待接收命令状态。

2. 输入/输出程序

加工程序输入系统的方式多种多样，早期的数控系统是从纸带阅读器输入，误码现象比较普遍，现代数控系统已经很少采用这种方式。现代的 CNC 系统一般采用键盘输入，键盘输入的内容包括加工程序和 CNC 系统设置信息，如机床参数、刀具参数、零点偏置等。输入程序还可以通过 CNC 系统的存储器把加工程序送入缓冲区，以便加工零件时使用。还有一种输入方式为通信输入，现代的 CNC 系统大都配置了点对点通信接口，可以与计算机或者专用的编程器直接通信，进而实现数控加工程序和系统参数的传送。随着数控技术的发展，以太网接口也逐渐应用于数控系统的通信，称为分布式数控系统(DNC)、柔性制造系统(FMS)的基础设备。

输出程序的功能为将加工程序存入磁盘或者穿孔输出，以达到长期保存的目的。

3. 译码程序

输入的加工程序经过相应的缓冲器接收，加工进行时，译码程序从这里开始进行加工程序的译码。译码程序将加工程序翻译成 CNC 系统可以识别和使用的数据形式，并存放到译码结果缓冲器中。

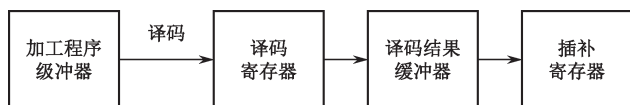


图 5-5 译码程序流程图

译码的过程就是译码程序将加工程序进行分析，发现可能的语法错误，没有错误就对程序段所产生的动作进行分析，并将其翻译成计算机可以识别的数据形式。零件加工程序包含了工艺信息、几何数据信息，以及辅助开关命令，译码程序就是将这些信息进行分类，分别送入译码结果缓冲器的各个存储单元中，为后续的操作做准备。

译码的过程包括代码识别和功能字翻译，代码识别判断出 G、M、S、T 等功能，功能字翻译根据代码识别的结果，将特征字送到相应的译码结果缓冲器中指定的单元，供执行时使用。

4. 插补运算

零件加工程序仅仅描述了零件外形曲线参数，如直线的起点和终点、圆弧的起点和终点、圆心位置、加工方向等。在实际加工过程中，CNC 系统根据建立的数学模型编制运算处理程序，使刀具运动轨迹在加工过程中实时地计算出满足加工要求的若干个中间点，这就是插补。常用的插补方法有逐点比较法、数字积分法等。通过插补运算程序，数控机床生成各轴运动的脉冲分配规律。

5. 位置控制

CNC 系统的位置控制是一个双闭环系统。内环为速度环，外环为位置环。位置控制系统由速度控制单元、位置控制模块、位置检测和反馈装置等构成。其中检测装置有脉冲编码器、光栅、感应同步器等。位置控制系统的结构图如图 5-8 所示。

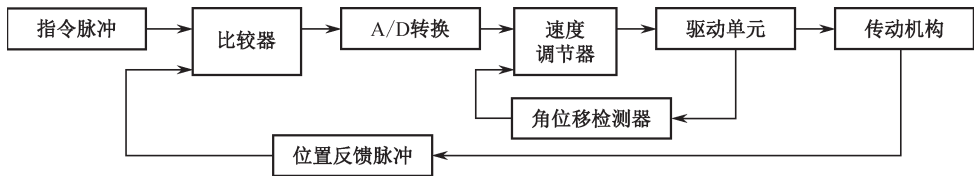


图 5-6 位置控制系统的结构图

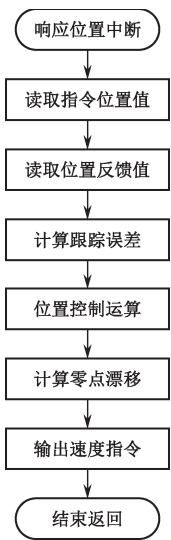


图 5-7 位置控制软件实现的流程图

在位置控制系统中，指令脉冲经过插补计算等处理，得到位置指令脉冲，位置指令脉冲一方面对伺服系统进行位置要求，如正、反向运动，另一方面对伺服系统进行速度要求，或者说是伺服系统进行速度稳定的要求。位置指令脉冲送到比较器中，与工作台的传动机构带动的光栅反馈回来的脉冲进行比较，得到一个偏差为数字量，经过 D/A 转换，就得到一个模拟量去控制速度调节器，这个模拟量是内环，也就是速度环的给定信号，用来控制电动机向减小偏差的方向旋转，直到偏差为零，电动机停止运行。这样传动机构的实际位置按照指令进行变化，到达指定位置。

CNC 系统中通过对各种插补运算进行软件编写，一般调用 CNC 系统中运动控制卡的底层函数来实现位置控制，运动控制卡提供了运动函数库，当软件进行编译时，该函数库可以处理与运动控制有关的各个细节。位置控制软件实现的流程图如图 5-9 所示。

6. 手动控制程序

为了应对各种可能出现的情况，CNC 系统可以实现手动操作，手动控制程序对操作面板和键盘发出的命令进行扫描，读取、分析输入信息，并进行处理。手动控制程序主要完成了手动状态下通过操作面板来控制动作的功能。

7. 系统自检程序

为了使系统故障隔离到最小范围，CNC 系统通过软件对系统运行情况进行监视，使 CPU 执行预防性诊断或加工程序预处理，来判断 CNC 系统各个功能的正确性，指出可能存在的故障。这个功能有助于操作人员及时发现故障，快速定位故障点，加快系统维修速度，提高系统可靠性。

8. 辅助功能和外部逻辑动作

辅助功能和外部逻辑动作控制一般是由 CNC 提供内置 PLC 功能, 机床厂家根据机床情况自行编写 PLC 的梯形图实现辅助功能和外部逻辑动作控制。CNC 内置 PLC 软件部分应定义各类 PLC 地址的作用和范围, 提供多种 PLC 基本指令和功能指令。还要编写 PLC 梯形图在 PC 机中的编辑软件, 并能实现通行。有的还需要能实现在 CNC 中监测 PLC 运行情况, 甚至修改编辑 PLC 梯形图。

5.3.3 CNC 系统的软件结构

CNC 系统是实时多任务计算机系统, 其软件系统包含了当今许多先进的计算机软件技术, 可以设计成不同的结构形式, 各个软件结构的管理方式、对任务的安排方式也不同。CNC 系统软件结构通常采用前后台软件结构和中断软件结构。

1. 前后台软件结构

在前后台软件结构的 CNC 系统中, 整个系统分为前台程序和后台程序。前台程序是一个实时中断程序, 它负责几乎所有的实时功能, 如插补、位置控制、辅助功能处理、机床相关逻辑和监控等与机床动作直接相关的功能。后台程序是一个循环执行程序, 主要负责准备工作和管理工作, 如输入、插补准备、译码、数据处理等对实时性要求不高的功能。后台程序又称背景程序。在后台程序不断循环运行过程中, 前台实时中断程序不断地定时插入, 如图 5-10 所示。前后台程序相互密切配合, 共同完成零件的加工任务。

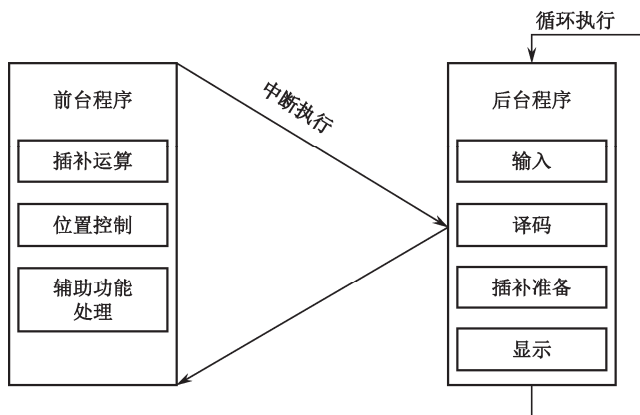


图 5-8 前后台程序运行关系

前后台型结构模式的实时性较差, 在前台程序和后台程序中没有优先级等级之分, 也没有抢占机制, 仅仅适用于控制功能比较简单的 CNC 系统。早期的数控系统常常采用这个结构。

2. 中断软件结构

中断软件结构的系统软件没有前后台之分, 除初始化程序之外, 根据 CNC 系统各个模块实时的要求, 把控制程序分别安排成不同级别的中断服务程序, 然后由中断管理系统

对各级中断服务程序进行调度管理。整个软件是一个多重中断系统，系统的管理功能通过各级中断服务程序之间的通信来实现。各个中断服务程序中，级别高的可以打断级别低的优先执行，中断服务程序优先级及其功能如表 5-1 所示，其中 0 级最低，7 级最高。

表 5-1 中断服务程序优先级及其功能

优 先 级	中 断 源	主 要 功 能
0	开机	系统初始化
1	主程序、硬件	显示、ROM 奇偶校验
2	软件定时	选择工作方式，预处理
3	软件定时	键盘、I/O、PLC 控制、M、S、T 处理
4	DMA	参数、数据存储器控制
5	软件定时	位置控制、插补运算、补偿
6	硬件时钟	监控、急停信号
7	硬件控制	键盘输入、通信口输入
8	硬件控制	纸带阅读
9	报警信号	报警
10	硬件控制	RAM 校验，电源断开

中断软件结构的优点是实时性好，实时性要求高的任务可以安排在优先级较高的中断服务程序中，优先执行。但是模块间的关系复杂，系统的扩充和维护较为困难。

5.4 本章小结

本章简单介绍了数控机床电气控制系统的重要组成部分——CNC 系统。CNC 系统的硬件和软件是支撑其工作的必要组成部分。硬件部分包括微处理器（CPU）、存储器、总线、I/O 接口。软件部分负责的功能主要有系统控制总程序、输入/输出程序、译码程序、插补程序、位置控制程序等。通过系统控制硬件与软件的合理配合，有序地管理数据的输入、处理，插补运算和信息输出，进一步控制执行部件的动作，使机床按要求有条不紊地工作，加工出合乎要求的工件。

5.5 思考与练习

1. 试简述 CNC 系统的硬件基本构成。
2. CNC 系统的存储器子系统如何实现的？
3. CNC 系统的软件功能有哪些？
4. 分别简述位置控制、插补运算和译码的软件实现过程。
5. CNC 系统的软件结构有哪些？各有什么优点和缺点？

Chapter 6

第 6 章 数控机床进给伺服系统

知识点

- 数控机床伺服系统
- 步进电动机的驱动控制
- 直流伺服电动机的驱动控制
- 交流伺服电动机的驱动控制
- 数控机床的各种检测装置

本章导读

数控机床的进给伺服系统是整个机床电气控制系统的执行部件，伺服系统的类型和性能决定了数控机床的定位精度、轮廓跟随精度、最高移动速度等许多性能。掌握各种伺服电动机的驱动控制，并了解一些检测装置是学习机床电气自动控制的重点。

6.1 概述

6.1.1 数控机床伺服系统概述

数控机床伺服系统是指以工作台、刀具或者主轴等移动部件的位置和速度为控制量的自动控制系统，又称随动系统。它接收 CNC 系统发出的进给位移量信息，经过转换、放大由伺服电动机带动传动机构，进而使加工部件直线或者旋转运动。

1. 伺服系统的组成

数控机床的伺服系统由驱动控制单元、执行单元（电动机）、反馈检测元件，以及比较环节等组成。图 6-1 所示为常见的一种伺服系统中的结构图。

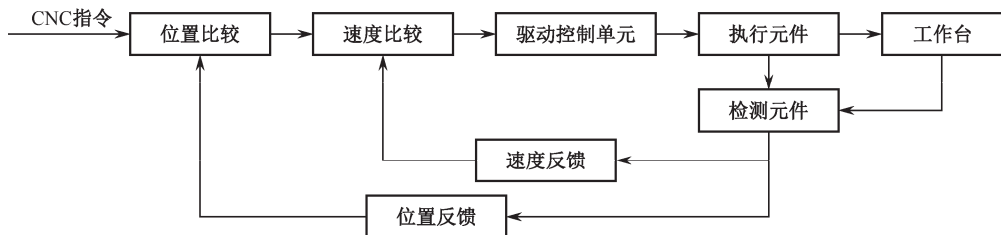


图 6-1 常见的一种伺服系统中的结构图

最外层为位置环，由调节控制模块、位置检测元件和反馈部分组成。中间为速度环，由速度比较调节器、速度检测元件和速度反馈部分组成。位置控制主要控制进给轴，不仅对单个进给轴运动的速度和位置有严格要求，在多轴联动时，还要求各个进给轴的运动相互配合，以保证加工精度和工件表面的光滑度。

2. 对伺服系统的基本要求

CNC 系统是整个机床电气控制系统的核心，用来发出控制指令，伺服系统是机械执行部件，最终实现准确的进给运动。伺服系统的类型和性能决定了数控机床的定位精度、轮廓跟随精度、最高移动速度等许多性能，对其基本要求如下。

1) 精度高

伺服系统的精度指的是输出量能复现输入量的精确程度，包括定位精度和轮廓加工精度。伺服系统必须具有比较好的静态特性和比较高的伺服刚度，才能达到满足要求的定位精度，定位精度允许偏差一般为 $0.01\sim 0.001\text{mm}$ ，甚至 $0.1\mu\text{m}$ 。伺服系统还应该具有良好的动态性能，来保证机床的轮廓加工精度。

2) 稳定性好

稳定性是指系统在给定输入或者在外界的干扰作用下，在短暂的调节过后，能达到新的或恢复到原来的平衡状态。伺服系统的稳定性直接影响加工的精度和加工件表面粗糙度。伺服系统要求有较强的抗干扰能力。

3) 快速响应

快速响应反映了伺服系统的跟踪精度, 为了保证加工精度和提高生产效率, 在启动、制动时, 要求伺服系统对信号的响应要快, 一般电动机转速从零到最高转速, 或者从最高转速到零的时间要小于 200ms, 但又要求超调量要小, 否则会影响加工质量。这两个方面是矛盾的, 实际运用中要采取一定的措施, 按照加工要求衡量选择。

4) 调速范围宽

调速范围 R_n 指机械要求电机能提供的最高转速 n_{\max} 和最低转速 n_{\min} 之比。即

$$R_n = \frac{n_{\max}}{n_{\min}}$$

由于数控机床的加工刀具、加工材料及加工工艺要求等各有不同, 伺服系统必须具有足够宽的调速范围, 通常要求进给系统工作在 0~30m/min 的速度范围内。

5) 低速大转矩

机床加工在低速时进行重切削, 这就要求伺服系统在低速时有较大的转矩输出。进给驱动系统属于恒转矩控制, 在整个速度范围内都保持同一转矩。主轴驱动系统在低速时为恒转矩控制, 以提供满足要求的转矩, 在高速时为恒功率控制, 以输出足够的功率。

伺服系统中的执行元件——伺服电动机的性能也十分重要, 除了应该具有高精度、反应快和大转矩等性能, 还要求伺服电动机能承受频繁地正反转、启动和制动, 从低速到高速范围内可以平滑运转、转矩波动小, 具有过载能力等要求。

6.1.2 数控机床伺服系统的分类

1. 按控制对象分类

数控机床伺服系统可分为进给伺服系统和主轴伺服系统, 本书按照这个分类方法来展开对伺服系统的介绍, 本章内容主要介绍进给伺服系统, 第7章主要介绍主轴伺服系统。

1) 进给伺服系统

进给伺服系统负责控制各个进给轴的运动, 有定位、轮廓跟踪功能, 进给伺服系统一般是位置伺服系统, 包括位置控制环和速度控制环, 是要求最高的伺服控制。

2) 主轴伺服系统

主轴伺服系统负责控制主轴旋转运动, 控制切削过程中的功率和转矩, 负责转速范围内的无级变速和转速调节。一般主轴伺服系统是速度控制系统。

2. 按执行元件分类

早期的机床多采用电液伺服系统, 发展至今, 现代机床基本全部采用电气伺服系统。

1) 电液伺服系统

电液伺服系统一般用电液伺服马达或者电液脉冲马达作为执行元件, 初期的数控机床, 驱动部件为液动机和液压缸。其优点是在低速也可以得到较高的力矩、反应快、速度

平稳、时间常数小和刚性好等。但是液压系统供油系统体积大，还有漏油、噪声大等缺点，所以逐渐被电气伺服系统代替。

2) 电气伺服系统

电气伺服系统的执行元件为伺服电动机（直流电动机、交流电动机和步进电动机），根据伺服电动机的种类它分为直流伺服系统、交流伺服系统和步进伺服系统三类。电气伺服系统的驱动部件为电力电子器件，操作方便、易维护、可靠性高。

直流伺服系统的广泛应用主要是从 20 世纪 70 年代到 80 年代中期。当时数控机床进给系统大都采用中小惯量和大惯量宽调速永磁直流伺服电动机，主轴系统多采用他励直流伺服电动机。由于电动机本身的惯量大，容易与机床的传动部件匹配，所以，构成的闭环系统在安装前调整好后，几乎不需要再进行调整，使用方便。直流电动机大都配有晶闸管全控或者半控桥驱动装置。中小惯量的电动机一般都有较高的额定转速和较低的惯量，应用时需要经过中间机械进行传动减速以达到增大转矩，与负载进行惯量匹配的目的。为了满足机床频繁启动、制动和快速定位的要求，出现了适用于直流中小惯量伺服电动机的大功率晶体管脉宽调制驱动装置。

20 世纪 80 年代后，交流电动机的材料、结构、控制理论等都有了很大的发展与突破，到目前交流伺服系统已经取代了直流伺服系统。交流伺服系统的优点是结构简单，适合恶劣的工作环境。此外，交流伺服电动机动态响应较好，转速高，并且容量大。交流伺服系统使用永磁同步伺服电动机（应用于进给伺服系统）和交流感应异步伺服电动机（应用于主轴伺服系统）。发展至今，交流伺服系统已经全数字化，伺服的数控功能、静动态补偿、控制模型等都由微处理器和控制软件高速实时地完成。

步进驱动系统在我国老式机床改造和经济型数控机床中起到了重要作用。步进驱动系统一般与脉冲增量插补算法配合。步进电动机有混合式和反应式两种，混合式的步进电动机输出力矩大、升速快、性能好，反应式的步进电动机价格较低。目前，出现了具有细分功能的步进驱动器，并且被广泛应用。

3. 按控制原理分类

按控制原理伺服系统可分为开环伺服系统、全闭环伺服系统和半闭环伺服系统。

1) 开环伺服系统

开环伺服系统只有前向控制通道，没有反馈回路，其结构图如图 6-2 所示。这种系统主要采用步进驱动器和步进电动机作为主要元件。开环伺服系统将指令脉冲信号转换为电动机的角度位移，以实现运动和定位控制。电动机转动的角度与指令脉冲的个数成正比，转速由指令脉冲的频率决定。开环伺服系统线路简单，因此，调试维修比较容易，设备投资较低，但是它的精度和速度较低，只能满足中、低档数控机床的要求。



图 6-2 开环伺服系统结构图

2) 全闭环伺服系统

全闭环伺服系统结构图如图 6-3 所示，它是一种误差控制随动系统。全闭环伺服系统中检测装置测出各个进给轴的实时位移或者速度，并将其反馈给 CNC 系统，与指令进行比较得出误差，CNC 系统发出指令控制机床向消除误差的方向运动。全闭环伺服系统中，检测装置直接从工作台等移动部件上获取位移、速度等信息，检测精度受机械传动机构的影响较小，而是取决于检测装置的精度，检测装置精度越高，反馈的各种数据越精确，各种误差的校正和补偿就越全面，进而系统的跟随精度和定位精度就越高。系统对机械传动机构并非没有要求，只有机械装置的精度高，才能保证各种非线性因素（间隙、摩擦特性、刚性等）的调解品质，进而保证系统的精度和速度。

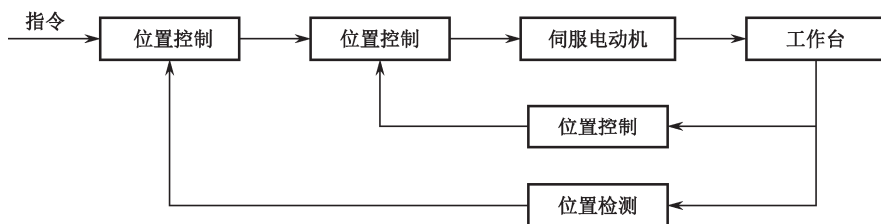


图 6-3 全闭环伺服系统结构图

3) 半闭环伺服系统

半闭环伺服系统的检测装置在电动机的轴上，通过电动机角位移的测量间接计算出工作台的位移，由于机械传动部分不在控制环中，所以可以精确稳定地控制电动机的角度。半闭环系统要求检测装置分辨率高，并要求机械传动部件精度高、间隙小，这样才可以满足机床的精度要求。半闭环伺服系统的精度没有全闭环伺服系统高，但是调试方便，所以在精度要求较低、小型的数控机床上应用广泛。半闭环伺服系统结构图如图 6-4 所示。

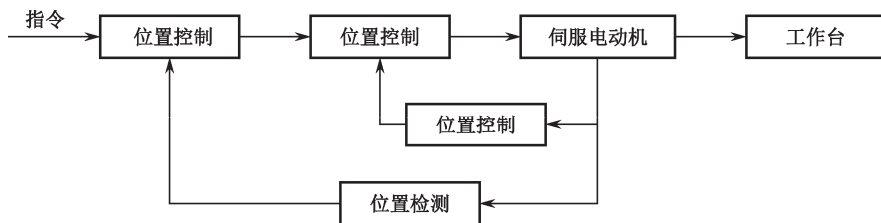


图 6-4 半闭环伺服系统结构图

6.2 步进电动机的驱动控制

步进电动机的驱动控制功能由步进驱动器完成。步进电动机的驱动器由环形分配器和功率放大器组成，主要功能是将 CNC 系统发出的脉冲信号和方向信号进行控制，使脉冲频率增大或者减小，然后按一定的配电方式循环送给步进电动机的各相绕组，来实现步进电动机的正、反向和加、减速旋转。

1. 环形分配器

环形分配器的功能是进行脉冲分配，它接收 CNC 系统插补器输出的指令脉冲，将这个单序列脉冲转换为步进电动机需要的多序列脉冲，然后送到功率放大器，使相应的定子绕组断电或者通电，以实现步进电动机的相应动作。环形分配器可以由硬件电路实现，也可以由软件实现。

1) 硬件环形分配器

硬件环形分配器分为 TTL 脉冲分配器和 CMOS 脉冲分配器。TTL 类型的脉冲分配器的基本构成是触发器和逻辑门，每个触发器发出一个序列脉冲，用来控制步进电动机相应定子绕组的通断电。因此，步进电动机有几相，就需要环形分配器转换几相序列脉冲，就需要设置几个触发器。图 6-5 所示为硬件环形分配器原理图。

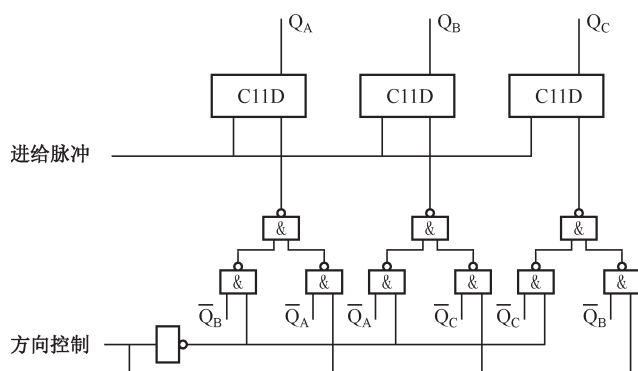


图 6-5 硬件环形分配器原理图

硬件环形分配器由集成电路的触发器、逻辑门等构成。图中是一个三相六拍的脉冲分配器，由三个 D 触发器和与非门组成。环形分配器的输出端 QA、QB 和 QC 分别控制电动机的三相绕组。当方向控制信号为“1”时，三相六拍的运行方式是“A→AB→B→BC→C→CA…”，转子按顺时针方向一步一步转动。反之，当方向控制信号为“0”时，三相六拍的运行方式是“CA→C→CB→B→BA→A…”，转子按逆时针方向一步一步转动。进给时环行分配器真值表如表 6-1 所示。

表 6-1 进给时环行分配器真值表

CP	DA	DB	DC	QA	QB	QC	通 电 相
0	1	1	0	1	0	0	A
1	0	1	0	1	1	0	AB
2	0	1	1	0	1	0	B
3	0	0	1	0	1	1	BC
4	1	0	1	0	0	1	C
5	1	0	0	1	0	1	CA
6	1	1	0	1	0	0	A

也可采用专用的芯片来实现脉冲分配。CMOS 脉冲分配器专用芯片 CH250 就是专为三相步进电动机设计的集成芯片。硬件环形分配器的缺点就是对不同相数、不同种类、不同分配方式的步进电动机都要重新设计硬件分配电路或者选用不同的 CMOS 芯片,显然很不方便。

2) 软件环形分配器

软件环形分配器的工作连接如图 6-6 所示。软件环形分配器的功能由 CNC 系统中的软件来完成, CNC 系统控制步进电动机各个绕组的通电、断电, 对不同相数、不同种类、不同分配方式的步进电动机只需要编制相应的控制程序, 将其存入 CNC 系统中即可。

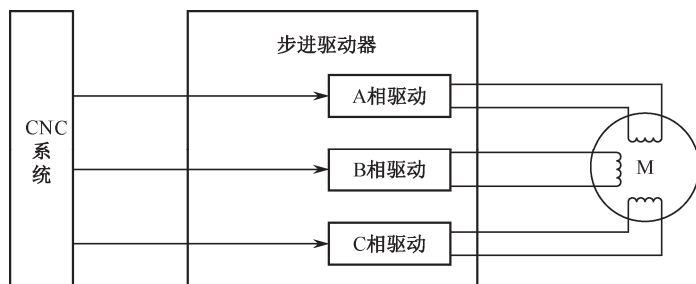


图 6-6 软件环形分配器连接图

2. 功率放大器

环形分配器输出的脉冲信号功率很小, 电压幅度只有 5 V 左右, 电流幅度为 mA 级, 因此, 要进行功率放大才能驱动步进电动机。功率放大器由前置放大器和大功率放大器两部分组成。前置放大器负责放大环形分配器送来的脉冲信号, 即进给控制信号, 并推动大功率驱动部分。前置放大器由若干级反相器、射极跟随器等组成。大功率放大器进一步将信号放大, 输出步进电动机各绕组所需电流。

功率放大器的质量直接影响步进电动机的性能。功率放大器的负载为步进电动机的绕组, 是强感性负载, 其中的电流不能突然发生变化, 相电流从零上升到额定电流和从额定电流下降到零, 都需要一段时间。延时将影响步进电动机的性能, 尤其是电动机在高速工作时, 输出转矩会急剧下降。对步进电动机驱动电路一般的要求如下:

- (1) 失真要小, 通电周期内能提供足够大的矩形波或接近矩形波的电流;
- (2) 具有截止期间释放电流的回路, 用来降低绕组两端的反电动势, 加快电流衰减;
- (3) 要求驱动电源效率高、功耗低;
- (4) 要求驱动电源运行可靠、稳定;
- (5) 要求驱动器的安装调试和维修方便。

常用的功率放大电路有单电压驱动、高低压驱动、恒流斩波驱动等。多采用大功率晶体管 (GTR)、场效应晶体管 (MOSFET) 或者可关断晶闸管 (GTO) 作为功率半导体元件。

1) 单电压驱动电路

单电压驱动电路是应用最早的功率放大电路, 原理图如图 6-7 所示。其中 L_1 、 L_2 和

L_3 是步进电动机的三相绕组，各项绕组均由相应的放大器驱动，三相放大器完全相同。工作时，脉冲信号输入各端，经过放大器后，输入信号电流放大。没有脉冲信号时，电动机绕组没有电流通过，电动机不转。

当第一个脉冲输入第一端，其中的两级三极管均饱和导通， L_1 有电流通过，电动机转动一步。第二个脉冲输入第二端， L_2 有电流通过，步进电动机再转动一步，同样，第三个脉冲输入第三端， L_3 得电，电动机再转一步。这样脉冲序列依次输入三端，三组放大器依次驱动电动机三相绕组，电动机一步一步转动，这里的工作方式称为三相单三拍。

这种电路的优点是电路简单、成本低，但是串接的电阻在工作时会产生大量热量，功耗较大，尤其在高频工作时对电源的正常工作极其不利。因此，它一般用在小功率、对运行频率要求不高的场合。

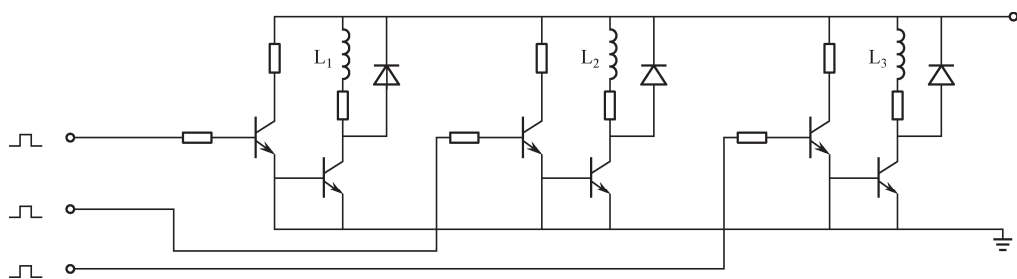


图 6-7 步进电动机单电压驱动电路

2) 高低压驱动电路

高低电压驱动方式是在单电压驱动方式的基础上，为解决单电压驱动的快速性问题而发展起来的一种供电驱动方式。图 6-8 所示是步进电动机一相绕组的高低电压驱动电路。

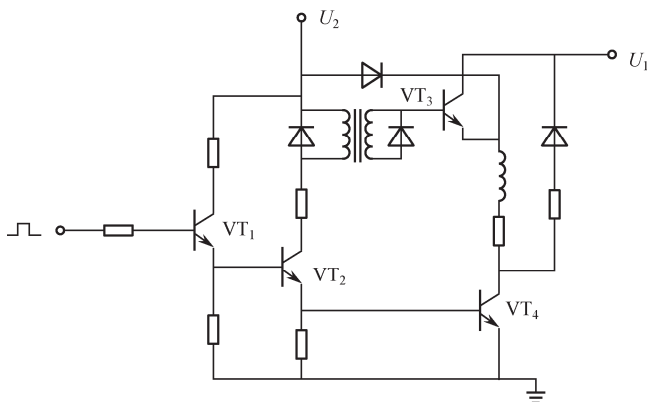


图 6-8 步进电动机一相绕组的高低电压驱动电路

其基本原理是在脉冲到来时，电动机绕组两端先加一较高电压，使绕组电流快速建立，之后改用低电压，以维持相电流的大小。电路无脉冲输入时， VT_1 、 VT_2 、 VT_3 和 VT_4 都截止，电动机绕组没有电流通过，电动机不转。有脉冲输入时， VT_1 、 VT_2 、 VT_3 和 VT_4 饱和导通，由截止状态到饱和状态期间，脉冲变压器的初级电流快速上升，变压器次级感应一

个电压,使得 VT_3 导通,这就产生一个高压 U_1 加到电动机绕组上,当 VT_2 进入稳压状态,变压器初级电流暂定,次级感应电压降低为零, VT_3 处于截止状态,这是低电压 U_2 加到绕组上,并维持绕组中的电流恒定。

这种驱动电路使电流波形得到很大改善,电动机的矩频特性良好,启动和运行频率都有很大提高,但是在高压工作结束,低压工作开始的衔接处,电动机的输出力矩有所下降。

3) 恒流斩波驱动电路

高低压驱动电路的高低压衔接处电流波形为凹形,为弥补这一缺陷,发展了恒流斩波驱动技术,确保步进电动机的电流恒定保持在额定值附近。图 6-9 所示为一种经典的恒流斩波驱动电路原理图。它是单极型驱动方式,充分利用电源电压,工作频率范围宽,在很大程度上改善了电流波形、矩频特性,并且不需要外接限流电阻,因此,功耗大大降低,提高了电源的工作效率。

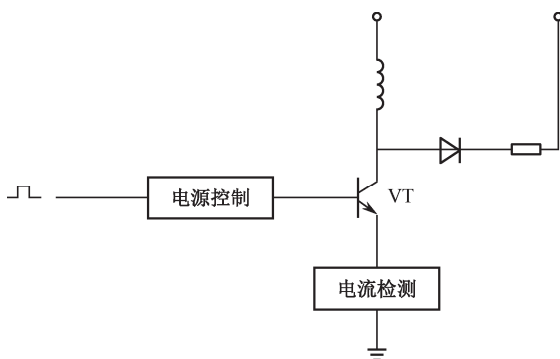


图 6-9 恒流斩波驱动电路原理图

随着电力电子技术、微处理器技术,以及微电子技术的飞速发展,步进驱动控制技术不断完善并且趋于成熟,步进驱动装置也发展成为模块化的驱动器。步进驱动器的结构和性能决定了步进电动机的运行品质,同一台步进电动机配合不同类型的步进驱动器,其性能会产生差异。对步进驱动器的设计和改进,也需要对步进电动机的结构和运行原理进行深入了解。随着步进驱动器的发展,使得步进电动机被广泛应用,也使得步进电动机和步进驱动器成为不可分割的整体。

6.3 直流伺服电动机的驱动控制

随着数控技术的发展,对驱动元件的要求越来越高,直流电动机的控制性能优异、线性特性良好,成为闭环和半闭环控制系统的最佳选择。特别是随着脉宽调制直流调速技术的发展及应用,直流电动机得到了广泛应用。于是,对直流伺服电动机驱动控制系统的研究十分重要。

根据直流电动机的机械特性可知,其调速方法如下:

- (1) 改变电动机电枢两端的电压;
- (2) 改变电动机磁场的大小;

（3）改变电动机电枢串联电阻的阻值。

数控机床的直流伺服系统大多采用永磁式直流电动机作为执行机构，常常采用控制电动机电枢电压的方法来控制电动机的转速和转矩。一般分为晶体管脉宽调制（PWM）直流伺服驱动系统和晶闸管（SCR）直流伺服驱动系统两大类。

1. 晶体管脉宽调制（PWM）直流伺服驱动器

脉宽调制装置利用大功率晶体管的开关特性来调制恒定电压的直流电源，将其电压按固定的频率进行接通和断开，斩成一定频率的方波电压，通过改变直流伺服电动机电枢电压的占空比，也就是通过对方波脉冲宽度的控制来改变平均电压的大小，进而控制电动机的转速。PWM 装置的工作原理如图 6-10 所示。

图 6-10 中，晶体管 VT 以一定的时间间隔进行重复的开关。假设 VT 导通一段时间 t_1 ，此时供电电源的电压加在电动机两端，电源向电动机提供能量，电动机储存能量。然后 VT 关断一段时间 t_2 ，此时电压加在 VT 上，切断了电源对电动机的供电，电枢回路的电压为零。但是，在 VT 导通期间电枢电感储存的能量通过续流二极管 VD 使得电动机有电流流过。这样，反复的导通和关断晶体管 VT，就得到波形为方波的电压波形。波形图如图 6-11 所示。

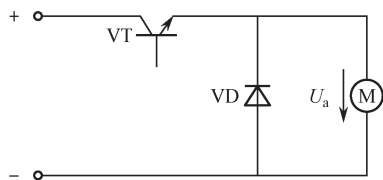


图 6-10 PWM 装置的工作原理图

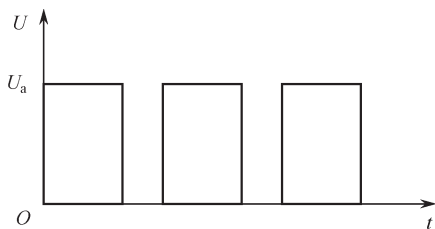


图 6-11 PWM 装置输出波形图

在 $t = t_1 + t_2$ 期间，电动机两端的平均电压为

$$U_a = \frac{t_1}{t_1 + t_2} U = \alpha U$$

其中，占空比为 $\alpha = \frac{t_1}{t_1 + t_2}$ ($0 \leq \alpha \leq 1$)； U_a 的范围在 $0 \sim U$ 之间，这时电动机只能在一个方向调速，如果需要电动机在正、反两个方向上进行调速，就要使用 H 型降压斩波电路，其工作原理如图 6-12 所示。

H 型降压斩波电路由四个大功率晶体管和四个续流二极管组成。其中 VT₁ 和 VT₄ 一组，VT₂ 和 VT₃ 一组，同一组的两个晶体管同时导通、同时关断，得到的波形如图 6-13 所示。需要注意的是同一桥臂上的晶体管（如 VT₁ 和 VT₃，VT₂ 和 VT₄）不能同时导通，必须保证两组晶体管是交替导通、关断的，否则会引起直流电源短路。H 型降压斩波电路中允许电流反向流通，以保证电枢中的电流是连续的。当电动机不转动时，电枢两端的瞬时电压也不为零，而是宽度相等的正负脉冲。

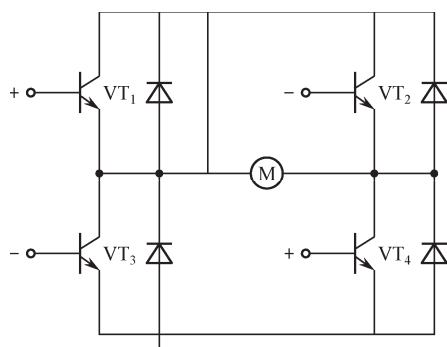


图 6-12 H 型降压斩波电路工作原理图

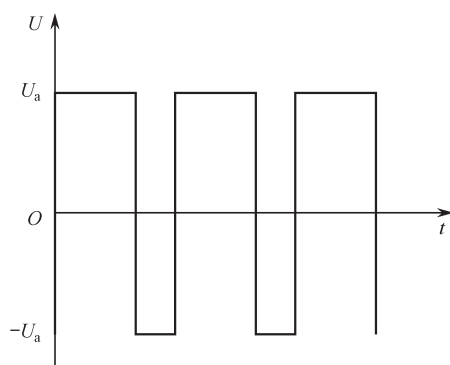


图 6-13 H 型降压斩波电路输出波形图

2. 晶闸管（SCR）直流伺服驱动器

晶闸管（SCR）直流伺服驱动方式的工作原理是通过调节晶闸管触发角来控制电动机电枢电压的大小，进而改变触发脉冲的相位，改变整流电压的大小，最终达到调速的目的。晶闸管直流调速系统分为可逆调速和不可逆调速两种。不可逆调速系统仅适用于不要求或不经常要求改变电动机转向的工作场合，在数控机床中，电动机需要频繁地进行正反转，并且需要进行快速启动、制动，所以一般采用可逆直流调速系统。

晶闸管直流伺服驱动器的主电路一般采用晶闸管三相全控桥式可逆整流电路，如图 6-14 所示。其中，VF 是正组变流器，VF 供电时，电动机正转。VR 是反组变流器，VR 供电时，电动机反转。VF 和 VR 分别由两套触发装置控制，可灵活地控制电动机可逆运转。

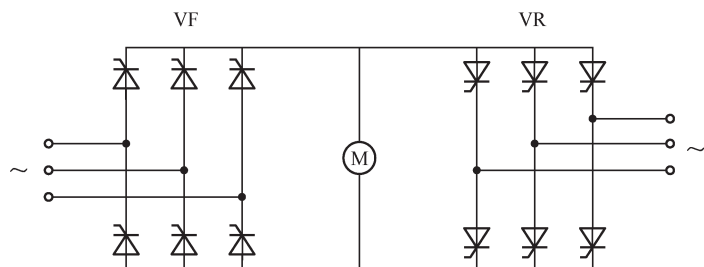


图 6-14 晶闸管三相全控桥式可逆整流电路

6.4 交流伺服电动机的驱动控制

近年来,随着电力电子技术、变频技术、传感器技术、电动机制造技术,以及现代控制理论等飞速的发展,以交流伺服电动机为执行元件的交流伺服系统已基本取代直流伺服系统。因此,对交流伺服电动机驱动控制的学习十分重要。

6.4.1 交流伺服系统简介

简单来讲,交流伺服系统由电气驱动控制系统和执行机构两部分组成。其中,电气驱动控制系统也就是交流伺服电动机的驱动系统,执行机构包括电动机和传动装置。

常用的交流伺服电动机有永磁同步电动机和感应式异步电动机两种。感应式异步电动机价格低廉、结构简单并且不需要特殊维护,但是其矢量控制比较复杂,并且低速运行时发热严重、效率低,所以还没有得到普遍应用。永磁同步电动机的驱动控制技术已经趋于成熟,低速性能优良,并且可以实现弱磁高速控制,调速范围宽,可以满足高性能的伺服驱动要求,是目前交流伺服系统的主流执行电动机。

交流伺服电动机的驱动系统是整个交流伺服系统的核心,包括速度控制单元和位置控制单元。现代的交流伺服驱动控制大都采用微处理器进行数字化控制,伺服驱动控制进入智能化阶段。其中,DSP以其特殊硬件结构和高速计算能力成为伺服驱动器的主流处理器。数字化控制能排除模拟电路中的非线性误差、零漂等影响,大大提高了交流伺服电动机的驱动控制性能。

目前,交流伺服驱动技术向着高度集成化、智能化、模块化和网络化的趋势发展。新一代的交流伺服驱动器产品用高度集成的多功能控制单元代替速度伺服模块和位置伺服模块。只需要设置系统参数,就可以改变驱动器的性能,既可以通过使用电动机本身的传感器来构成半闭环调节系统,也可以通过外部位置或者速度传感器来构成全闭环调节系统。现代的全数字化伺服驱动器通常都是智能型产品,具有参数记忆功能、故障自诊断功能,以及参数自整定功能等。为适应工业局域网技术的发展,伺服驱动器配置了串行通信接口和局域网接口。用电缆或者网线就可以将需要的伺服驱动单元与上位机连接,与CNC系统的通信由此也变得十分简便。

6.4.2 SPWM 变频控制器

永磁交流同步电动机的同步转速为

$$n = \frac{60f}{p}$$

式中 f ——电源电压频率;

P ——磁极对数。

由此可见,永磁交流同步电动机的同步转速和电源电压的频率存在严格的对应关系。

电源电压和频率不变时, 电动机的转速稳定不变。

1. 等效的 SPWM 波形

正弦波脉宽调制 (SPWM) 分为单极性脉宽调制和双极性脉宽调制, 它把一个正弦波分成 n 等份, 如图6-15所示。然后把每一等份的面积用同等面积的等高矩形脉冲波代替, 获得等幅不等宽的正负脉冲序列。

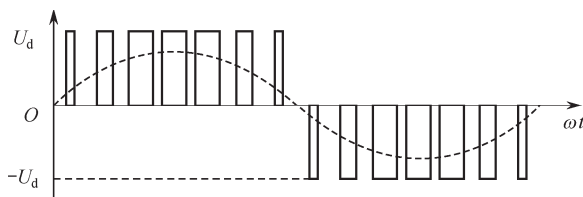


图 6-15 等效的 SPWM 波形

如果负载正弦波的幅值发生变化, 那么等效的各个等幅值矩形脉冲的宽度也发生相应改变, 这就是与正弦波等效的 SPWM 波形。

SPWM 调制的控制信号为正弦波参考信号, 对其要进行调制的三角波称为载波信号, 正弦波和三角波相交时, 通过对两者之间的电压大小进行比较, 来控制逆变器开关的通断, 从而得到一系列等幅不等宽的 SPWM 波, 其宽度根据正弦规律变化。

2. 三相 SPWM 电路

对于三相 SPWM 电路, 逆变电路必须产生相差 120° 的三相正弦脉宽调制波。因此, 必须有一个三相正弦波发生器产生频率、幅度可变且相位相差 120° 的三相正弦波作为参考信号。然后将其与三角波载波信号相比较, 产生三相脉宽调制波。

图 6-16 (a) 所示是 SPWM 变频器的主电路图。其中包括整流电路、滤波电路、控制电路和逆变电路。整流电路一般是单独的一个模块, 负责把电源的交流电转换为直流电。转换后电路电压会有波动, 这里采用滤波电路来抑制电压波动。最后, 逆变电路将直流电压转换为特定频率的交流电压。

6.4.3 交流伺服驱动器的信号连接

交流伺服驱动器与上位机的信号连接主要有两种方式: 一是通用信号连接, 使用外部脉冲或模拟电压对电动机转速位置进行控制; 二是通信总线连接。

使用通用信号连接时, 应注意上位机发出的脉冲形式或模拟电压范围与交流伺服驱动器能够接收的脉冲信号或模拟电压匹配, 并且交流伺服驱动器的其他信号如使能信号、报警输出信号等也需要和上位机对应的信号匹配。一般在 CNC 和交流伺服驱动器的说明书中都会对各个信号进行详细描述, 根据说明书就可以判断是否匹配和接线方式。

使用通信总线连接时, 通常上位机和交流伺服驱动器是同一商家的产品, 它们之间有固定的通信方式。上位机与交流伺服驱动器的信号连接实际就是通信的物理层连接, 这类情况连接线通常由生产厂家提供, 也可以根据说明书自己制作。

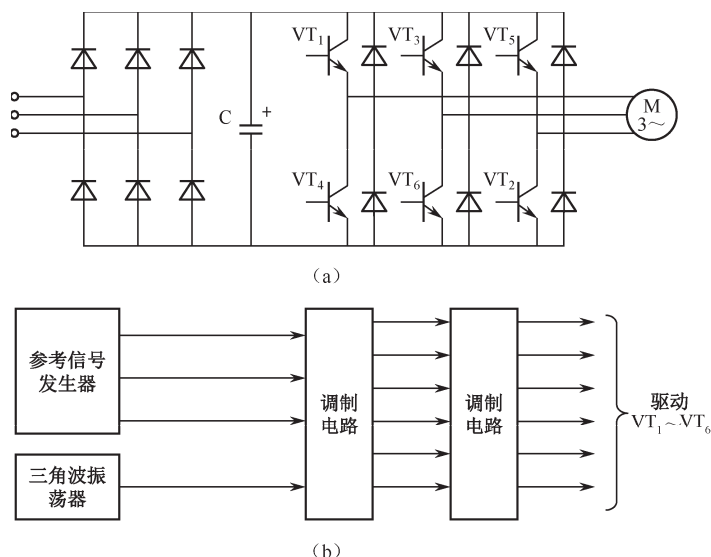


图 6-16 SPWM 变频器主电路与控制电路

6.5 数控机床检测装置

数控机床的检测装置通常安装在机床的工作台、旋转工作台、丝杠轴或电动机轴末端上，起着测量和反馈作用，是数控机床的重要组成部分。在闭环结构的控制系统中，检测装置把机床工作台的实际位移转变成电信号反馈给 CNC 系统，CNC 系统将其与设定的指令值进行比较，若存在偏差，CNC 系统控制机床执行部件向消除偏差的方向移动，直至偏差消除。数控机床对位移、速度以及加速度等物理量的测量精度是保证加工精度的基础，因此，检测装置对机床加工精度有很大影响。检测装置可以分辨出的最小测量值是分辨率，分辨率取决于检测元件和测量电路。

1. 数控机床对检测装置的要求

- (1) 工作可靠性好、抗干扰能力强；
- (2) 满足速度和精度要求；
- (3) 便于安装和维护，适用机床工作环境；
- (4) 成本低、寿命长。

2. 检测装置的分类

按照不同的标准检测装置的分类方法很多，以下列举部分分类方法：

- (1) 根据测量对象分为位移、速度和电流三类；
- (2) 根据测量方法分为增量式和绝对值式两种；
- (3) 根据检测信号可分为模拟式和数字式两种；
- (4) 根据信号转换方式分为光电效应、压电效应、光栅效应等。

在本章中简单介绍几种常用的检测装置。

6.5.1 光栅传感器

光栅传感器作为数控机床的位置检测元件，将机械位移或者模拟量转化为脉冲量反馈给 CNC 系统，是常用的位移或转角测量装置。光栅传感器为动态检测元件，按运动方式分为长光栅和圆光栅，长光栅用来测量直线位移，圆光栅用来测量角度位移。光栅传感器的特点是精度高、抗干扰能力强、适于动态测量，以及数字显示等，它的测量精度可以达到几微米，仅次于激光测量，可用于高精度数控机床的伺服系统中。

1. 光栅传感器的结构

光栅是利用光的投射和衍射现象制成的光电检测元件，由标尺光栅和光栅读数头等部分组成，作为完整的测量系统，还应该包括光栅数显表。一般标尺光栅固定在机床的工作台或者丝杠等活动部件上，光栅读数头安装在机床底座等固定部件上，二者随着工作台的运动而移动。光栅读数头中有一个指示光栅，当光栅读数头相对于标尺光栅移动时，指示光栅便在标尺光栅上相对移动。光栅读数头把光栅莫尔条纹变为电信号。当安装光栅时，标尺光栅和指示光栅的平行度及两者之间的间隙需要严格保证，一般取 0.05mm 或 0.1mm。

2. 光栅传感器工作原理

光栅尺用真空镀膜的方法在透明玻璃片或长条形金属镜面上制成均匀的密集线纹。长光栅中这些条纹相互平行，各条纹之间的距离相等，如图 6-17 所示。其中栅线的宽度为 x ，线间的宽度为 y ，一般情况下有 $x=y$ 。如果设 W 为栅距，那么 $W=x+y$ 。

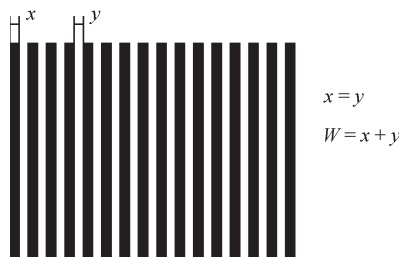


图 6-17 长光栅条纹

圆光栅中这些条纹是等栅距角的向心条纹。栅距和栅距角是决定光栅光学性质的基本参数。同一个光栅元件，其标尺光栅和指示光栅的线纹密度必须相同。

3. 莫尔条纹

将指示光栅和标尺光栅平行安装，并且它们刻痕之间有角度为 θ 的夹角，这时在光源的照射下，光栅上会形成明暗相间的条纹，这就是莫尔条纹。莫尔条纹是光栅非重合部分光线透过形成的，由一系列平行四边形图案组成，如图 6-18 所示。严格意义上，莫尔条纹的排列方向与两片光栅刻痕夹角的平分线相垂直。莫尔条纹中两条暗纹或者两条亮纹间的距离为莫尔条纹的宽度，即图 6-18 中的 B 。

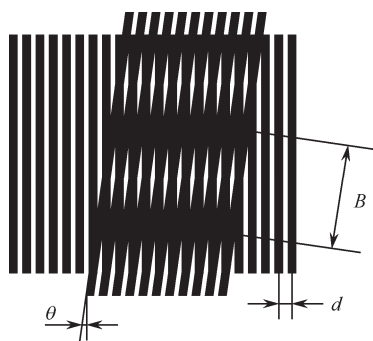


图 6-18 莫尔条纹

当指示光栅静止不动，标尺光栅左右平移时，莫尔条纹将沿着指示光栅的刻痕上下移动。因此，根据莫尔条纹的移动方向，就可以判断标尺光栅左右移动的方向。两片光栅相对移动一个栅距 W ，莫尔条纹移动一个条纹距离，莫尔条纹的变化规律近似正弦函数，变化周期与光栅相位位移的栅距数同步。

一般安装两个光电元件来辨别方向，光电元件距离为 $1/4$ 节距。当光栅移动时，得到相差 $1/4$ 周期的两个正弦波。光栅的移动方向决定了这两个正弦波的超前或者滞后。

在光栅刻痕夹角 θ 比较小的情况下，莫尔条纹宽度 B 、光栅栅距 W ，以及栅线角 θ 的关系为

$$B = \frac{W}{\sin \theta} \quad \text{或者} \quad B = \frac{W}{2 \sin \frac{\theta}{2}}$$

由于 θ 角很小，所以 $\sin \theta \approx \theta$ ，则

$$B = \frac{W}{\theta}$$

莫尔条纹有放大作用，设 K 为莫尔条纹的放大系数，标尺光栅移动一个栅距 W ，莫尔条纹移动的距离为 KW 。则

$$K = \frac{B}{W} \approx \frac{1}{\theta}$$

由此可以看出， θ 角越小，莫尔条纹放大的倍数越大，光栅位移就变成清晰的莫尔条纹移动。因此，用测量莫尔条纹的移动可以检测光栅的位移，进而实现灵敏度很高的位移测量。

6.5.2 脉冲编码器

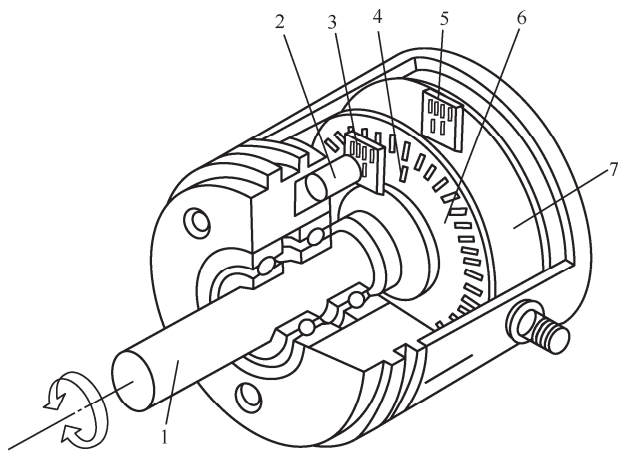
脉冲编码器是一种旋转式脉冲发生器，它把机械转角转变成电脉冲，用数字代码直接表示角位移和直线位移，是一种高精度、高可靠性和结构紧凑的位置检测装置。经过变换电路也可用于速度检测，可以用做速度检测装置。按照工作原理脉冲编码器可分为光电式、接触式和电磁感应式。按照运动方式可分为旋转型和直线型。按照检测得到的数据可分为绝对式和增量式。本节介绍几种常用的编码器。

数控机床中常用的增量式脉冲编码器有 1 024P/r、1 200P/r、2 500P/r 和 5 000P/r 等；随着伺服系统对速度和精度的高要求，绝对式编码器的使用也逐渐增多，绝对式编码器的品牌有多摩川、丹纳赫、海德汉等，编码器有多圈和单圈之分，编码器的位有 17 位、23 位、26 位等。

1. 增量式光电脉冲编码器

增量式光电编码器是数控机床中常用的检测装置，其结构图如图 6-19 所示。

光电脉冲编码器由光源 LED、光栏板、光电码盘、光敏元件和信号处理电路组成。光电码盘是一个圆光栅，光栏板有与光电码盘上相同的透光条纹。当圆光栅旋转时，光线通过光栏板和圆光栅产生明暗相间的三路莫尔条纹，同时光敏元件接收这些光信号，并将其转化为电信号 A、B 和 Z。其中 A、B 信号为计数脉冲，相位相差 90° ，如图 6-8 所示。当光电码盘正转，A 信号超前 B 信号 90° ，反转时 A 信号滞后 B 信号 90° ，CNC 和驱动器利用这个相位关系来判断电动机旋转方向。Z 信号称为一转信号或者零位脉冲，电动机每转一圈产生一个脉冲。此外，为了提高信号传输的抗干扰能力，A、B 信号设计成差分信号。CNC 和驱动器常常对上述信号进行倍频处理。以提高分辨率。例如，假设电动机转动一圈发出 2 500 个脉冲，信号经过四倍频处理后，可产生 10 000 个脉冲，如果电动机直接驱动的是 8mm 螺距的滚珠丝杠，那么工作台的直线分辨率由 0.003 2mm 提高到 0.000 8mm。



1—转轴；2—光源；3—光栏板；4—零标志槽；
5—光敏元件；6—光电码盘；7—信号处理电路板

图 6-19 增量式光电脉冲编码器

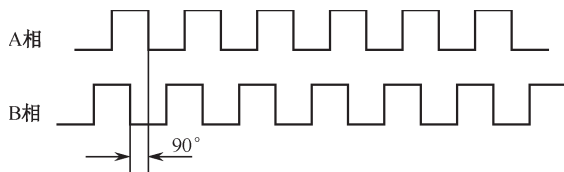


图 6-20 光电脉冲编码器输出波形

2. 绝对式旋转编码器

绝对式编码器有光电式码盘、接触式码盘和电磁式码盘。绝对式编码器通过读取编码盘上的图案来表示数值。图 6-21 所示为格雷码盘，其中空白的部分透光，用“0”表示；涂黑的部分不透光，用“1”表示。任何两个相邻的数码只有一位变化，便于消除非单值性误差。

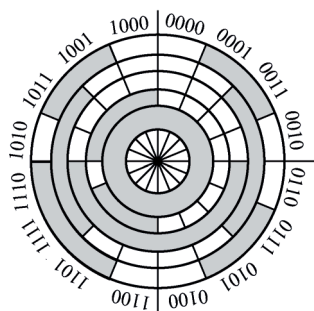


图 6-21 格雷码盘

图 6-22 所示是四位 BCD 码盘。它在不导电的集体上制成许多金属区使其导电，图 6-22 中空白部分为绝缘区，用“0”表示；涂黑部分为导电区，用“1”表示。以此组成二进制代码。图 6-22 中最里面一圈和各个导电部分连在一起，通过电刷和电阻接电源正极。当被测轴旋转，电刷和码盘的位置发生相对变化，如果电刷接触导电区，则为“1”；如果电刷接触的是绝缘区，则为“0”。由此得到“0”和“1”组成的 BCD 码。

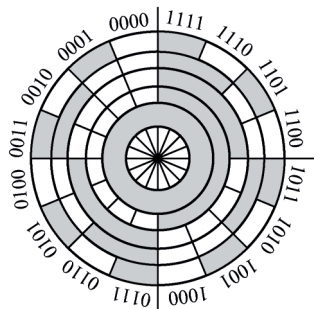


图 6-22 四位 BCD 码盘

BCD 码盘和格雷码盘的码道圈数是二进制的位数，高位在内，低位在外。如果是 n 位二进制码盘，就有 n 圈码道，并且圆周被均等地分为 2^n 份，也就是说有 2^n 个数据来表示旋转轴的不同位置，能够分辨的角度即为 $360^\circ/2^n$ ，分辨率为 $1/2^n$ 。由此可以看出， n 越大，可以分辨的角度就越小，测量的精度就越高。

6.5.3 感应同步器

感应同步器是一种利用电磁感应原理制成的位移测量装置。装置包含两个平面印刷

电路绕组，类似变压器的原边绕组和副边绕组，因此又称平面变压器。感应同步器按用途和结构可以分为直线式感应同步器和旋转式感应同步器。前者用于直线位移测量，后者用于角位移测量，工作原理相似。感应同步器测量精度和分辨率都比较高，抗干扰能力强，工作可靠，目前是数控设备上广泛采用的测量部件。

1. 感应同步器的结构

感应同步器的主要部件为定尺和滑尺，如图 6-23 所示，为直线式感应同步器的结构图。定尺和滑尺的基板均采用与机床热胀系数相近的材料制成。定尺和滑尺均用绝缘黏合剂将铜箔制成的平面绕组固定在基板上。定尺表面涂有切削液的保护层，滑尺表面有带绝缘层的铝箔，以避免静电感应。

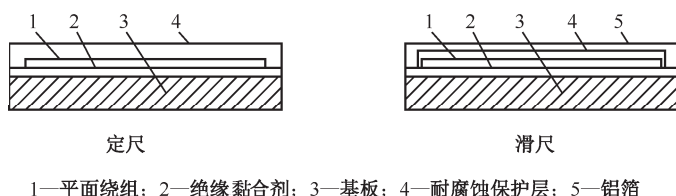


图 6-23 直线式感应同步器的结构图

直线式感应同步器平面绕组如图 6-24 所示。标准的感应同步器的定尺长为 250mm，绕组单向，均匀分布。滑尺长 100mm，有两组励磁绕组，一组正弦绕组，定义为 u_s ；一组余弦绕组，定义为 u_c 。滑尺绕组和定尺绕组的节距相同，都为 2mm，用 τ 表示。当正弦绕组与定尺绕组的线圈对齐，余弦绕组的每只线圈与定尺绕组的相应线圈相差 $1/4\tau$ ，也即 $\pi/2$ 相位角。

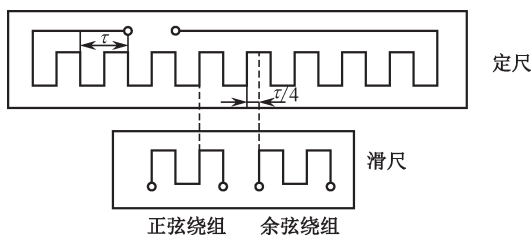


图 6-24 直线式感应同步器平面绕组示意图

2. 感应同步器工作原理

感应同步器中的定尺和滑尺分别安装在机床的床身和运动机构上，两者相互平行放置，间隙保持 0.2~0.3mm。定尺固定，滑尺可以移动，它们的绕组之间的相对位置如图 6-25 所示。

当滑尺的正弦绕组加正弦交流励磁电压时，绕组中产生励磁电流，并产生交变磁通。这个交变磁通与定尺的绕组耦合，则定尺绕组分别感应出频率相同的交流电压。在位置 1，滑尺绕组的正弦绕组与定尺绕组完全对应重合，通过正弦绕组的磁通最大，则感应电动势也最大，随着滑尺的逐渐移动，感应电动势越来越小。滑尺移动到位置 2 时，正弦绕组的感应电动势为零。在图 6-25 中位置 3，正弦绕组的磁通最大，电动势反相位并且

有效值最大，也就是说，这时的感应电动势与位置 1 相同但是极性相反。图 6-25 中位置 4，正弦绕组的感应电动势为零。滑尺继续移动到位置 5 时，又恢复初始状态，与位置 1 情况相同。

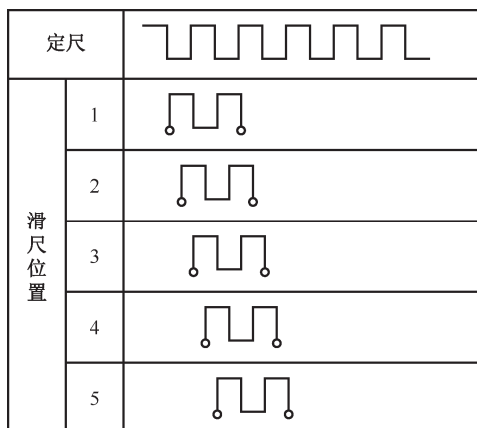


图 6-25 感应同步器工作原理

由上述分析可知，在定尺与滑尺相对移动过程中，感应电动势的大小和方向呈周期性变化，周期为一个节距或者两个节距，感应电动势的变化曲线为正弦函数。

根据励磁绕组的励磁供电方式的不同，感应同步器分为鉴相工作方式和鉴幅工作方式。

1) 鉴相工作方式

在滑尺的正弦绕组 s 和余弦绕组 c 分别通以频率相同、幅值相同，相位相差 $\pi/2$ 的励磁电压，即：

$$u_s = U_m \sin \omega t$$

$$u_c = U_m \cos \omega t$$

那么，在定尺绕组上的感应出的同频率的电压为

$$u_{d_1} = kU_m \cos \theta \sin \omega t$$

$$u_{d_2} = -kU_m \sin \theta \cos \omega t$$

式中 k ——电磁耦合系数；

θ ——滑尺励磁绕组相对于定尺绕组的空间相位角。

因为正弦、余弦绕组同时供电，所以定尺绕组上的感应电动势为

$$u_d = u_{d_1} + u_{d_2} = kU_m \cos \theta \sin \omega t - kU_m \sin \theta \cos \omega t = kU_m \sin(\omega t - \theta)$$

由此可见，在这种工作方式中，定尺感应电动势与相位角 θ 相关，也就是说定尺感应电动势与滑尺的位移量密切相关。通过鉴别定尺感应电压的相位即可测得滑尺的相对位移量。

2) 鉴幅工作方式

在滑尺的正弦绕组 s 和余弦绕组 c 分别通以频率相同、幅值相同，幅值不同的励磁电压，即：

$$u_s = U_s \sin \omega t = (U_m \sin \varphi) \sin \omega t$$

$$u_c = U_s \sin \omega t = (U_m \cos \varphi) \sin \omega t$$

那么，在定尺绕组中感应电动势为

$$\begin{aligned} u_d &= k(U_m \sin \varphi) \sin \omega t \cos \theta - k(U_m \cos \varphi) \sin \omega t \sin \theta \\ &= kU_m \sin \omega t (\sin \varphi \cos \theta - \cos \varphi \sin \theta) \\ &= kU_m \sin \omega t \sin(\varphi - \theta) \end{aligned}$$

由此可见，这种工作方式中，定尺绕组上的感应电压与励磁电压频率相同、相位相同，幅值 $kU_m \sin \omega t \sin(\varphi - \theta)$ 取决于 θ 。因此，可以通过检测 u_d 的幅值来测定机械位移。

6.6 本章小结

本章主要介绍了数控机床的进给伺服系统，它们是数控机床中的机械执行部件，最终实现准确的进给运动。伺服系统的类型和性能决定了数控机床的定位精度、轮廓跟随精度、最高移动速度等许多性能，是数控机床电气控制的重要组成部分。

数控机床伺服系统根据控制对象的不同，可分为进给伺服系统和主轴伺服系统，本章对伺服系统进行介绍，进给伺服系统负责控制各个进给轴的运动，有定位、轮廓跟踪功能，进给伺服系统一般是位置伺服系统，包括位置控制环和速度控制环，是要求最高的伺服控制。常用的伺服电动机有步进电动机、直流伺服电动机和交流伺服电动机，本章分别介绍了这几种伺服电动机的驱动控制。

本章还介绍了在数控机床中起着测量和反馈作用的几种检测装置，检测装置把机床工作台的实际位移转变成电信号反馈给 CNC 系统，CNC 系统控制机床执行部件向消除偏差的方向移动，直至偏差消除。检测装置的分辨率对机床加工精度的影响很大。

6.7 思考与练习

1. 数控机床伺服系统的组成部分有哪些？
2. 步进驱动器中常用的功率放大电路包括哪几种？各自的电路原理是什么？
3. 如果需要直流伺服电动机在正、反两个方向上进行调速，直流伺服驱动器应该采用哪种电路？试述其电路原理。
4. SPWM 变频控制器的理论依据是什么？
5. 试述光栅传感器的工作原理。
6. 增量式光电脉冲编码器的工作原理是什么？
7. 感应同步器的工作方式有哪几种？分别对其进行简单描述。

Chapter 7

第 7 章 数控机床主轴驱动及控制

知识点

- 主轴驱动系统的分类
- 主轴驱动器的工作原理
- 主轴分段无级调速
- 主轴准停控制

本章导读

数控机床的主轴伺服系统是整个数控电气控制系统中完成主运动的动力装置。主轴伺服驱动主轴电机通过传动机构实现刀具或工件的旋转控制，配合各进给轴的运动来实现刀具与工件的切削运动，加工出符合要求的零件。主轴的运动主要是旋转运动，主轴控制以启停、正反转、调速、准停等为主。

7.1 概述

前面提及数控机床的伺服系统可以分为进给伺服系统和主轴伺服系统。数控机床的主

轴伺服系统是整个数控电气控制系统中完成主运动的动力装置,包括主轴电动机、传动系统和主轴组件。主轴伺服驱动主轴电动机通过传动机构实现刀具或工件的旋转控制,配合各进给轴的运动来实现刀具与工件的切削运动,加工出符合要求的零件。数控机床的主轴驱动系统不同于进给驱动系统,主轴的运动主要是旋转运动,主轴控制以启停、正反转、调试、准停等为主。早期数控机床的主轴一般采用三相感应电动机配合多级齿轮变速箱来实现有级变速。随着对加工工艺和生产效率越来越高的要求,现代数控机床对主轴驱动的要求也越来越高,这种主轴驱动方式已经不能满足需要。

7.1.1 数控机床对主轴系统的要求

1. 调速范围宽并且可以实现无级调速

主轴系统应该有较宽的调速范围,以保证加工时选用合理的切削量,获得最佳的加工精度和表面质量。不同种类的机床对调速范围的要求也不同,具有自动换刀功能的数控加工中心为满足各种刀具、加工要求,对主轴调速的范围要求很高,主轴必须在较宽的转速范围内根据指令自动实现无级调速,并尽量减少传动机构,简化主轴箱。车削加工中心等通用性大、用途多的机床,要求主轴调速范围大,不仅有低速大转矩,还要有较高的转速。数控齿轮加工机床、为汽车制造专门设计的数控钻镗床等专用机床对调速范围的要求较低。还有的数控机床既要求能加工黑色金属,又要求能够加工有色金属,这就要求变速范围大,切削速度高。目前,主轴驱动系统的恒转矩调速范围已经达到 1:1 000,恒功率调速范围达到 1:30。

2. 具有良好的精度和刚度

数控机床的精度高,主轴转速也很高,这就要求主轴具有良好的精度和刚度。主轴的轴承类型、轴承配置方式、轴径尺寸,以及主轴组件的质量等都会对主轴的精度和刚度产生影响。为提高加工精度和刚度,齿轮的齿面应采用耐磨性材料,并采用斜齿轮传动,使传动平稳;采用带传动时应采用齿型带;在结构允许的前提下,应增加齿轮宽度,提高齿轮的重叠系数。

3. 具有良好的抗振性和热稳定性

加工时,电动机和传动部件都是热源,由持续切削、运动部件不平衡、加工余量不均匀,以及切削过程中的自振等原因引起冲击力和交变力,会使主轴产生振动,进而会影响表面粗糙度和加工精度,严重时甚至还会损坏主轴系统中的零件和刀具,影响其正常工作。加工过程中,主轴系统的发热可能使零部件产生热变形,降低主轴传动效率,影响零部件之间的相对位置精度和运动精度。低温升、热变形小是对主传动系统的重要要求。因此,主轴组件必须有较好的动平衡,较高的固有频率且要进行循环润滑,并且要保持合理的配合间隙。

4. 位置控制

主轴的旋转进给控制功能(即 C 轴功能)和准停控制功能可以满足加工中心自动换刀、螺纹切削、刚性攻丝和一些加工工艺的需要。

5. 四象限驱动

要求主轴在正、反转时都可以进行自动加速、减速控制，并且加、减速时间短。主轴系统除了应该具有四象限驱动能力外，有的数控机床还要求有丝杠和其他直线运动装置。例如，卧式数控铣镗床、卧式加工中心的W轴用来实现主轴的伸缩运动。

7.1.2 主轴系统的分类

主轴系统按变速的方式分为有级变速主轴系统、无级变速主轴系统和分段无级变速主轴系统。有级变速主轴系统多用于经济型数控机床，目前，多数数控机床采用无级变速主轴系统和分段无级变速主轴系统。

1. 有级变速主轴系统

有级变速主轴驱动系统的主轴电动机多为普通三相异步电动机，主轴的启停是由电气电路控制。有级变速主轴驱动系统的转速控制是通过改变电动机绕组接法（三角形变双星形）或改变齿轮变速箱传动比来实现。

2. 无级变速主轴系统

数控机床一般采用直流主轴驱动系统或者交流驱动系统来实现主轴的无级变速。直流主轴驱动系统常用于早期的数控机床。直流电动机存在电刷易磨损、恒功率调速范围窄、体积大、不易维护等缺点，交流电动机及其驱动器没有电刷，不会产生火花，使用寿命长，并且其性能已经达到直流驱动系统的水平，因此，交流主轴驱动系统逐渐代替直流驱动系统并被广泛应用。

但在使用一般的变频器调速时，交流电动机没有直流电动机的调速特性优异，因此需要采用矢量变频控制技术。目前，矢量变频是对交流电动机进行调速控制的理想方法，已经成为一项成熟的技术。矢量变频的基本思想是通过一系列坐标变换，把交流电动机模拟成为直流电动机来进行控制，这样就得到与直流电动机相近的调速性能。目前，大多数数控机床的主轴驱动系统是由鼠笼式交流异步电动机和矢量变频调速器构成的。

主轴电动机的工作特性曲线如图7-1所示。在恒转矩区域，电动机的功率随着转速的降低而减小，在恒功率区域，电动机的最大输出转矩随着主轴转速的增高而减小。三相异步电动机的调速特性为恒转矩调速范围大，而恒功率调速范围小。

3. 分段无级变速主轴系统

实际生产中，一般要求主轴电动机在低速运转时为恒转矩传动，在中、高速运转时为恒功率传动，并不需要整个变速范围都是恒功率。无级变速电动机的恒转矩变速范围满足数控机床所需的恒转矩变速范围，但是其恒功率变速范围却不能满足数控机床的需要。因此，一般在无级变速机构后串联一组齿轮变速组作为分级变速机构，以扩大电动机恒功率变速范围。

主轴系统按传动的方式分为变速齿轮传动主轴系统和带传动主轴系统。

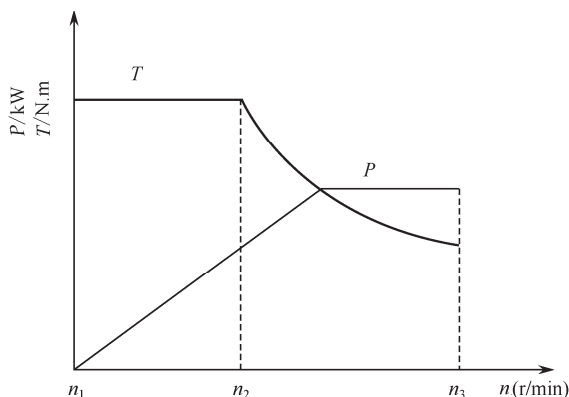


图 7-1 主轴电动机工作特性曲线

1) 变速齿轮传动主轴系统

这种配置方式在大、中型数控机床中应用较多，它通过少数几对齿轮传动降速，扩大变速范围，使之成为分段无级变速，确保低速时的转矩，以满足主轴输出转矩特性的要求。结构简图如图 7-2 所示。也有一些小型数控机床也采用变速齿轮的传动方式，以达到强力切削时所需要的转矩。

2) 带传动主轴系统

这种配置方式适用于高速低转矩的主轴，主要用于转速较高、变速范围较小、对转矩特性要求较低的小型数控机床。主轴电动机本身的调整就可以满足需求，省去齿轮变速可以避免由齿轮所引起的噪声和振动。常用同步齿型带。结构图如图 7-3 所示。这种结构有传动平稳、噪声小、传动效率和准确度高，便于维修保养，不需润滑等优点。

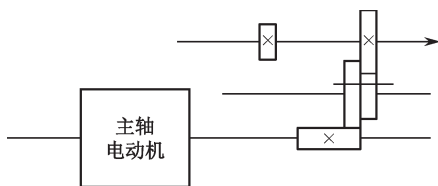


图 7-2 变速齿轮传动主轴系统结构简图

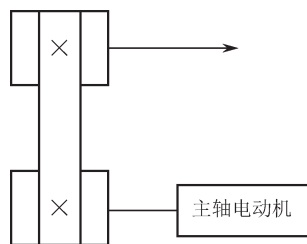


图 7-3 带传动主轴系统结构图

7.2 主轴驱动器的工作原理

数控机床所采用的不同类型的主轴电动机对应着不同类型的驱动器。直流电动机对应直流主轴驱动器。直流驱动器有可控硅和脉宽调制（PWM）调速两种形式。脉宽调制调速装置在对静态、动态性能要求高的数控机床进给驱动装置上的使用较为广泛，三相全控晶闸管调速装置适合大功率场合，因此，常用于直流主轴驱动器。目前，大多数数控机床都采用鼠笼式交流异步电动机和矢量变频调速器构成的主轴系统。如前面所述，交流电动机已经逐渐取代直流电动机，所以这里只对交流主轴驱动器的工作原理进行介绍。

交流主轴驱动器工作原理

在使用一般的变频器调速时，交流电动机没有直流电动机的调速性能优异，因此，需要采用矢量变换控制技术。矢量变换控制（Transvector Control）技术最早是在 1971 年由德国的 Felix Blaschke 等人提出，矢量变换控制技术的基本原理是以产生同样的旋转磁场为目的，把交流电动机模拟成为直流电动机来控制。这一技术完全不同于过去的交流电动机的控制技术，对交流电动机的调速实现了较为理想的控制，使交流电动机调速后的动态性能和机械性能与直流电动机的不相上下。

直流电动机之所以具有良好的控制性能，是因为其励磁绕组和电枢绕组相互独立，可以分别对励磁电流和电枢电流进行调节，直流电动机可以通过单独调节主磁场或电枢磁场进行调速。此外，直流电动机的主磁场和电枢磁场方向互相垂直。交流电动机中定子通以三相交流电产生旋转磁场，主磁场和转子电流磁场间的夹角与转子回路功率因数相关，交流电动机的电磁转矩不仅和气隙磁通、转子电流有关，还和交流电动机的转速有关，因此，交流电动机难以控制。如果交流电动机的负载电流和励磁电流能够分别进行控制，并且使其磁场方向在空间上垂直，就可以解决这个问题了。

矢量变换控制技术通过一系列坐标变换，将三相交流电转化为等效的、相互独立的励磁电流和电枢电流，使交流电动机可以像直流电动机一样，通过对等效的电枢绕组电流或者励磁绕组电流的控制，来控制转矩和励磁磁通。然后，再进行相反的变换，使等效的直流量转换为三相交流量，以便对三相交流电动机进行控制。这样，交流电动机的数学模型与直流电动机的十分相似，大大提高了交流电动机的调速性能。

1. 三相-二相变换（3/2）

三相-二相变换前后必须有同样的旋转磁动势，也就是说必须产生同样的旋转磁场。这个变换将三相交流电动机转换为等效的二相交流电动机。如图 7-4 所示中，U、V、W 为三相交流电动机的三个定子绕组，互相间隔为 120° 相位，分别通相差为 120° 的三相交流电 i_U 、 i_V 和 i_W ，定子绕组产生角速度为 ω 的旋转磁场。如果在空间位置相差 90° 的两相绕组 α 、 β 通以相差 90° 的平衡电流 i_α 、 i_β ，那么就可以产生与三相绕组的旋转磁场大小、转速都相同的空间旋转磁场。

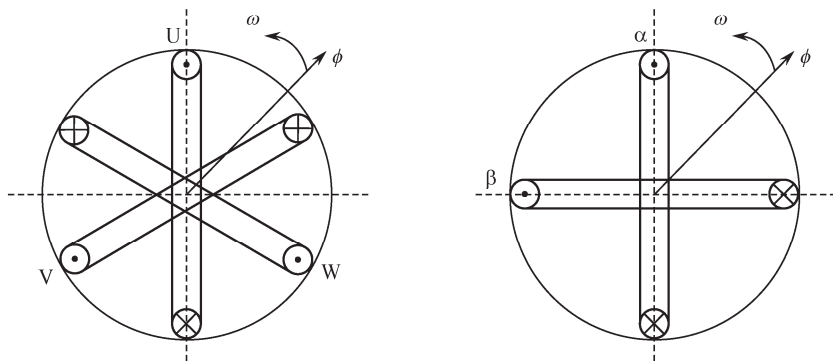


图 7-4 三相-二相变换

图 7-5 所示为三相绕组 U、V、W 和与之等效的两相绕组 α 、 β 各相磁通势矢量的空间位置。

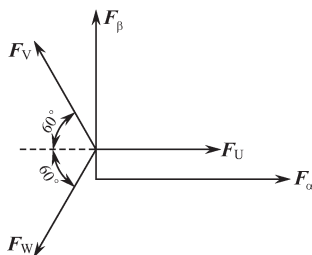


图 7-5 三相绕组和二相绕组磁通势矢量的空间位置

图中各个矢量仅表示空间位置，不表示其大小。各个磁动势的大小是随着时间变化的，满足一下公式，即：

$$F_{\alpha} = F_U - F_V \cos 60^{\circ} - F_W \cos 60^{\circ} = F_U - \frac{1}{2} F_V - \frac{1}{2} F_W$$

$$F_{\beta} = F_V \sin 60^{\circ} - F_W \sin 60^{\circ} = \frac{\sqrt{3}}{2} F_V - \frac{\sqrt{3}}{2} F_W$$

各自对应的电流为

$$i_{\alpha} = i_U - \frac{1}{2} i_V - \frac{1}{2} i_W$$

$$i_{\beta} = \frac{\sqrt{3}}{2} i_V - \frac{\sqrt{3}}{2} i_W$$

2. 矢量旋转变换 (V/R)

三相-二相变化之后，还需要将两相交流电动机变换为等效的直流电动机。两相电动机 α 、 β 绕组和直流电动机中励磁绕组、电枢绕组之间的变换属于矢量与标量的转换，是静止直角坐标系与旋转直角坐标系的转换，变换的条件是保证合成磁通势不变。如图 7-6 所示，直流电动机的励磁磁通势电枢磁通势正交。图 7-6 中， i_d 为励磁绕组中通过的励磁电流， i_q 为电枢绕组中通过的电枢电流，它们产生的合成磁通势为 Φ ，同步旋转角速度为 ω ，这样交流电动机就可以看做直流电动机。由图 7-6 可以看出， i_{α} 、 i_{β} 合成矢量 i_1 ， i_1 在合成磁通势水平方向和垂直方向的投影分别为 i_d 、 i_q 。它们之间的关系为

$$i_d = i_{\alpha} \cos \varphi + i_{\beta} \sin \varphi$$

$$i_q = -i_{\alpha} \sin \varphi + i_{\beta} \cos \varphi$$

3. 直角坐标-极坐标变换 (K/P)

图 7-6 中由 i_d 、 i_q 求得的 i_1 和 θ 为直角坐标-极坐标变换。直角坐标与极坐标之间关系为

$$i_1 = \sqrt{i_d^2 + i_q^2}$$

$$\tan \theta = i_q / i_d$$

因为 $|\tan \theta|$ 的范围很大 ($0 \sim \infty$)，所以常用下式表示 θ ：

$$\tan\left(\frac{\theta}{2}\right) = \frac{\sin \frac{\theta}{2}}{\cos \frac{\theta}{2}} = \frac{i_q}{i_l + i_d}$$

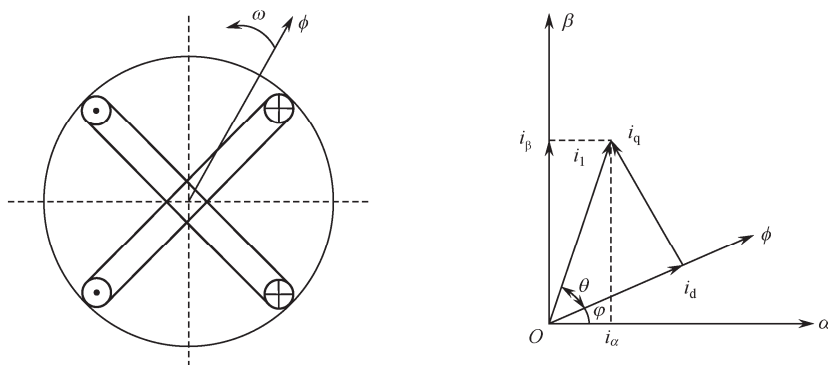


图 7-6 两相交流电动机和直流电动机的等效变换

7.3 主轴分段无级调速及控制

7.3.1 概述

CNC 对主轴驱动的控制通过以下三种方式：

(1) 主轴模拟电压输出端口输出 $0 \sim \pm 10V$ 的模拟电压到主轴驱动器，该电压的大小用来控制主轴电动机的转速，电压的正/负用来控制主轴电动机的旋转方向。

(2) 主轴模拟电压输出端口输出 $0 \sim 10V$ 的单极性模拟电压到主轴驱动器，电压的大小控制主轴电动机的转速，用正转、反转开关量信号来控制主轴电动机正/反转。

(3) 选择 CNC 输出的 12 位二进制码或者 2 位或 3 位 BCD 码开关量信号到主轴驱动器，控制主轴的转速。

这三种方法都可以实现主轴电动机的无级调速。对于数控车床、铣床、加工中心等通用型的数控机床，要求恒功率区域的变速范围尽可能大，切削要求低速大转矩。而采用无级调速，主轴低速段的输出转矩常常无法达到强力切削的要求。如果使用无级调速，就必须增加主轴电动机的功率，这样，主轴电动机与其驱动装置的体积、质量和成本势必要增加。因此，数控机床中采用齿轮变速和无级调速结合的方式，也就是分段无级调速方式。

图 7-7 所示分别为采用齿轮变速和不采用齿轮变速时主轴的输出特性曲线，可以看出，采用齿轮变速使低速时电动机的输出转矩变大，但同时降低了主轴电动机的最高转速。

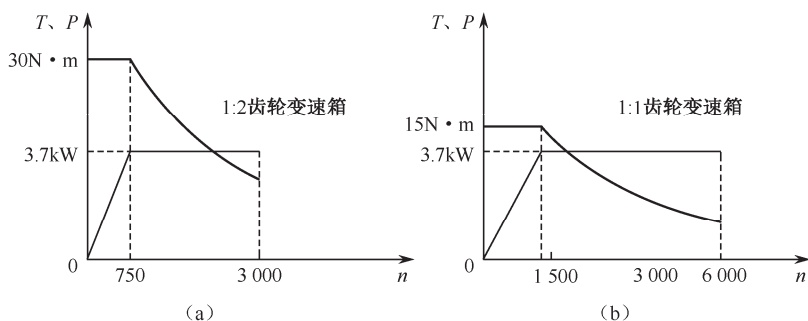


图 7-7 主轴输出特性曲线对比

7.3.2 自动换挡的控制

数控机床通常用 CNC 控制齿轮自动换挡, 满足低速转矩和主轴最大转速的要求。数控机床使用两挡就可以满足需求, 一般 CNC 会提供 2~4 挡变速功能。图 7-8 所示为主轴分段无级调速的结构示意图。

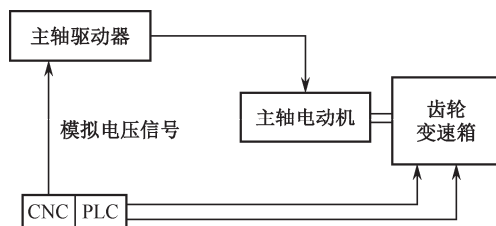


图 7-8 主轴分段无级调速的结构示意图

具体的换挡方式由可编程控制器来完成, 常常采用液压拨叉或者电磁离合器来带动不同齿轮的啮合。对变速时出现的顶齿现象, 数控机床采用由 CNC 控制主轴低速转动和脉动的方式来实现齿轮顺利啮合。变速时主轴电动机低速转动或脉动的速度可以通过 CNC 中的参数来设定。

图 7-9 所示为一般数控机床自动换挡的时序过程。

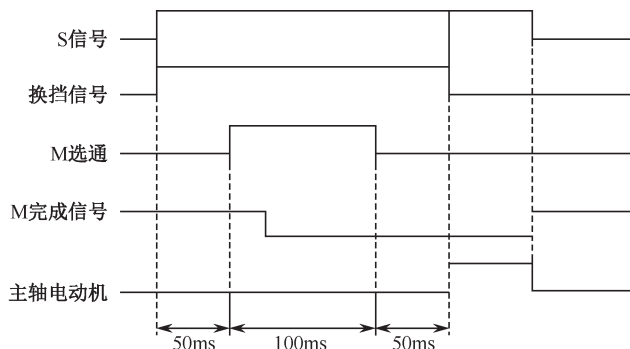


图 7-9 一般数控机床自动换挡的时序过程图

CNC 通过 M41-M44 代码进行齿轮变速，四挡分别对应的最高主轴转速由 CNC 系统参数来设定。当 CNC 读到 S 指令时，输出相应的 M 代码，并送到可编程控制器。50ms 后，M 代码稳定，读取的数据正确，CNC 发出 M 选通信号，命令 PLC 读取并执行 M 代码，M 选通信号持续 100ms。

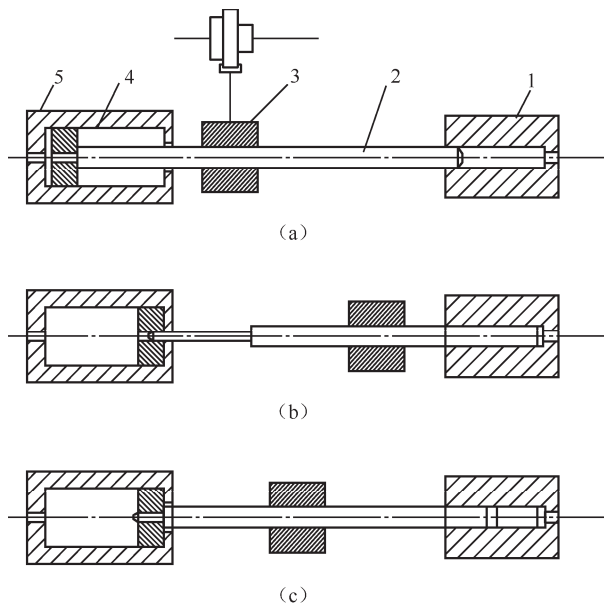
PLC 接收到信号后，M 完成信号失效。CNC 收到 M 代码正在执行的信息。PLC 对 M 代码进行译码并执行换挡。M 代码输出一段时间后，CNC 根据参数设置使主轴低速转动或者脉动，解决齿轮顶齿问题。

变速完成后，PLC 置 M 完成信号有效，CNC 接到变速完成信号，然后 CNC 根据参数设定的每挡主轴最高转速，输出相应的模拟电压，这时主轴转速为给定的 S 值。

7.3.3 齿轮自动换挡的操纵机构

1. 液压拨叉变速机构

液压拨叉是一种通过一个或几个液压缸来带动齿轮移动的机构。不同的通油方式可以使三联或者三联以上的齿轮块获得不同的变速位置。图 7-10 所示为三位液压拨叉的原理图，通过电磁阀改变通油方式可以获得三个位置。



1—液压缸；2—活塞杆；3—拨叉；4—套筒；5—液压缸

图 7-10 三位液压拨叉的原理图

在图 7-10 (a) 中，液压缸 1 通入压力油，而液压缸 5 卸压，这时活塞杆 2 带动拨叉 3 从右向左移动到极限位置，拨叉带动三联齿轮块移动到左端。图 7-10 (b) 中部分液压缸 5 通入压力油，而液压缸 1 卸压，此时活塞杆 2 和套筒 4 一起从左向右移动，套筒 4 碰到液压缸 5 的端部后，活塞杆继续右移直至极限位置。这时三联齿轮块被拨叉 3 移到右端。图 7-10 (c) 中液压缸 1 和 5 同时通入压力油，活塞杆两端的直径不同，使得右端

的推力大于左端，这样活塞杆 2 向左移动，而套筒 4 的左端面积与活塞杆 2 的左端面积之和大于活塞杆 2 的右端面积，这使得套筒 4 向右的推力大于活塞杆 2 向左的推力，于是，套筒 4 推向液压缸 5 的右端，活塞杆 2 紧靠套筒 4 的右端，拨叉 3 位于中间位置。

机床工作时每个齿轮的到位有检测元件来检测，检测信号有效即说明换挡完成。对于主轴无级变速的情况，可以采用 CNC 控制主轴电动机低速传动来预防液压拨叉顶齿问题，对于恒速交流电动机分段有级变速的情况，一般在传动机构上安装一个小型电动机或者液压马达来预防顶齿问题。

液压拨叉需要安装一套液压装置才可以工作，将电信号转换为电磁阀动作，再将液压油分别通入相应的液压缸，这就增加了装置的复杂性。

2. 电磁离合器

电磁离合器的工作原理是利用电磁效应来接通或者切断运动。它的优点是便于实现自动操作，并且有成熟的系列产品可供选用，因此，它是自动装置中常用的操纵元件。但是它存在体积大，磁通容易磁化机械零件等缺点。在数控机床主传动系统中，电磁离合器的使用简化了变速机构，各个传动轴上离合器的吸合与分离的不同组合，形成了不同的传动路线，实现了主轴的变速。

7.4 主轴准停控制

7.4.1 概述

主轴准停又称为主轴定向功能，即当主轴停止时，控制其停在固定的位置。主轴准停功能是加工中心数控机床的重要功能之一，用来实现自动换刀和精密加工的对刀、让刀。

例如，如图 7-11 所示，自动换刀的数控镗铣加工中心的切削转矩一般是通过刀杆的端面键来传递的，这要求主轴停止时准确定位于圆周上特定的角度。如图 7-12 所示中加工精镗孔后退刀或者加工阶梯孔时，为了防止刀具和直径小的阶梯孔碰撞或者拉毛已经加工的内孔表面，需要先让刀，再退刀，在这种情况下主轴也必须有准停功能。

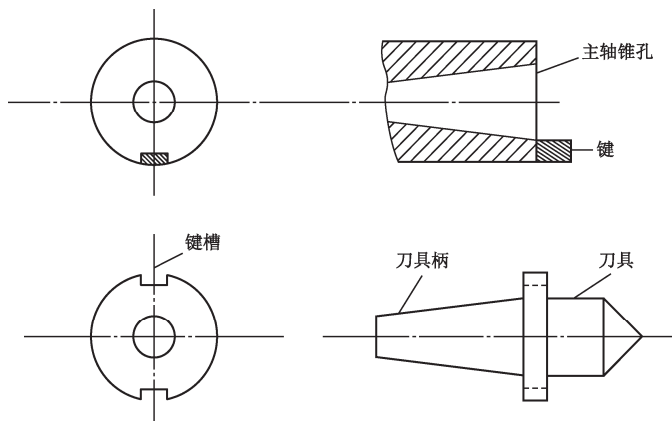


图 7-11 主轴准停换刀

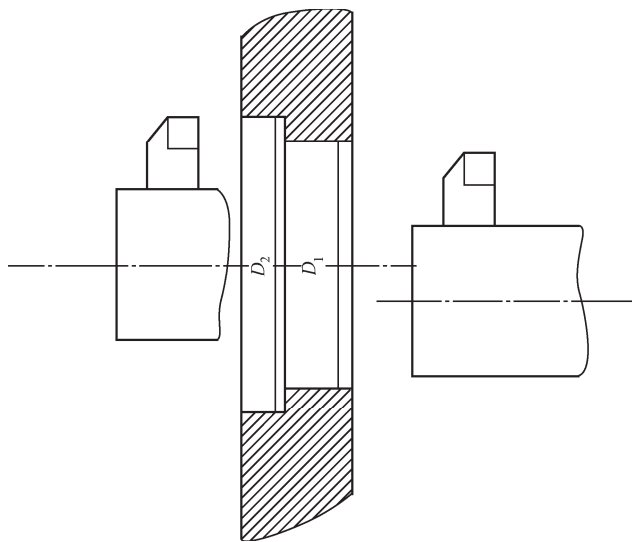


图 7-12 主轴准停镗背孔示意图

按照主轴准停控制的实现方式，通常主轴准停可分为机械准停与电气准停。

7.4.2 机械准停控制

图 7-13 所示为一种典型的机械准停装置——V 形槽定位盘准停结构。由带有 V 形槽的粗定位盘、精定位盘、定位液压缸、无触点接近开关等组成。

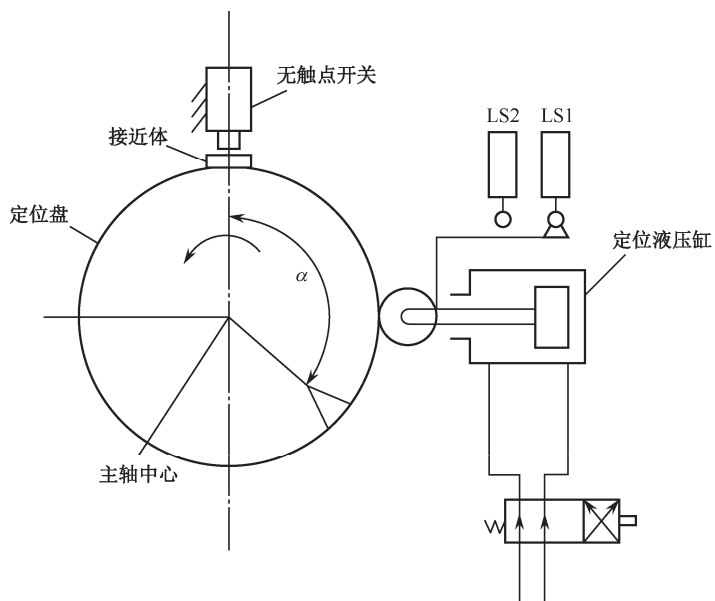


图 7-13 机械准停装置——V 形槽定位盘准停结构图

带有 V 形槽的定位盘装在主轴的尾端，与主轴端面的关系保持不变，以实现主轴定位位置的准停控制。当数控系统执行准停指令时，如果主轴处于旋转状态，首先主轴迅速减速至数控机床预先设定的低速（一般设定在 60~300r/min）旋转；如果主轴静止，主轴则加速至该设定速度。然后，当接近开关信号有效，CNC 检测到该信号后，主轴电动机立即停转并且断开主轴传动链，这时主轴电动机与主轴传动机构因为惯性继续空转。同时准停油缸右腔进油，定向活塞带动定位销伸出并压定位盘。定位销滚子在精定位盘上滚动，滚子与 V 形槽正对时，液压缸中的压力使定位销插入 V 形槽，LS2 准停到位信号有效，准停动作完成。这里 LS1 为非准停位置信号，LS2 为准停到位信号。在这种准停控制方式中，只有 LS2 有效，才能进行换刀等动作，只有 LS1 有效，主轴才能正常启动运转。它们有一定的逻辑互锁关系。

机械准停控制还可以通过其他方式来实现，但是基本原理都是一样的。

7.4.3 电气准停控制

机械准停控制方式多用于早期的数控机床，现在多采用电气准停控制。电气准停控制有以下优点。

1) 节约准停时间

数控机床的换刀时间是一项重要指标，换刀时间包括准停控制时间。采用电气准停控制，即便主轴在高速运转时，也可以快速定位去完成位置控制。

2) 机械结构简单，可靠性好

电气准停控制只需要在主轴旋转轴和固定部件上安装检测装置即可。由于简化了机械结构，省去了复杂的机械、开关、液压缸等装置，就避免了机械准停的机械冲击，因此，电气准停的可靠性好，且使用寿命也得到延长。

3) 性价比高

虽然电气准停附件也需要一定的费用，但由于简化了机械结构和强电逻辑控制，整体上的成本大大降低，性价比大大提高。

电气准停控制通常有以下三种方式。

1. 磁传感器主轴准停控制

图 7-14 所示为磁传感器主轴准停的控制结构图，磁传感器主轴准停控制是利用磁性传感器来检测定位的，由主轴驱动器自身完成。在主轴上安装磁发体，在磁发体 1~2 mm 处固定一个磁传感器，主轴即可具有磁传感器主轴准停功能。

主轴准停控制时序图如图 7-15 所示。当 CNC 执行 M19 指令时，向主轴驱动器发出主轴准停启动命令，主轴驱动器响应该命令，并立即使主轴减速至已经设定好的准停速度。当磁发体与磁传感器对准，主轴减速到某一爬行速度。当磁发体与磁传感器再次对准，主轴驱动器进入磁传感器作为反馈元件的位置闭环控制，准停位置为目标位置。主轴驱动器完成准停控制后，输出准停完成信号。CNC 接收到该信号后进行自动换刀或其他动作。磁传感器主轴准停装置是单角度准停。

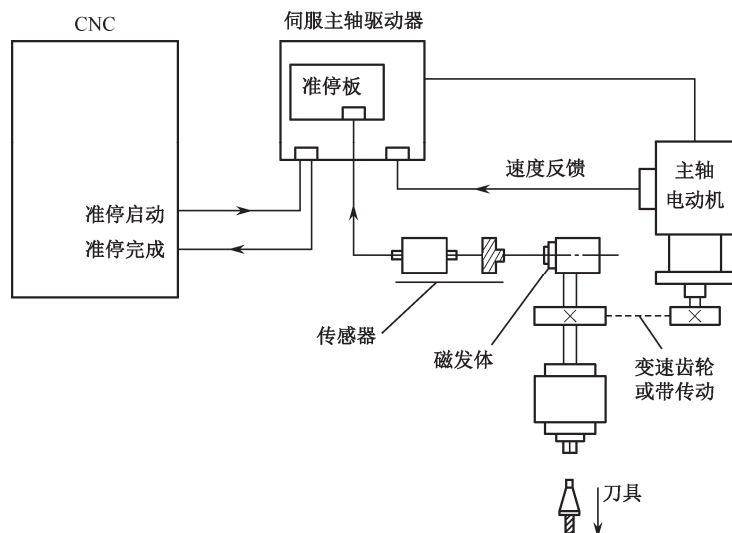


图 7-14 磁传感器准停的控制结构图

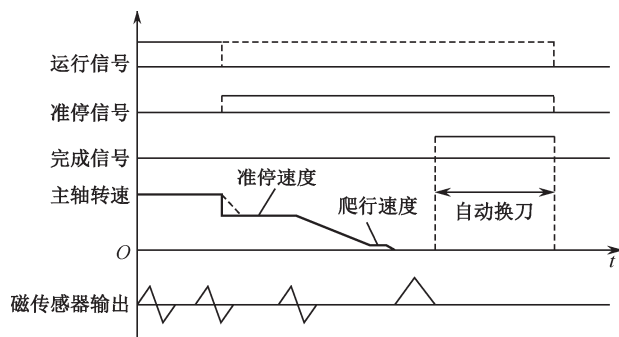


图 7-15 主轴准停控制时序图

2. 编码器主轴准停控制

这种准停控制方式也由主轴驱动器来完成，其结构如图 7-16 所示。CNC 只需要发出准停信号，主轴驱动器完成后向 CNC 回复准停完成信号。

编码器主轴准停控制由主轴电动机内置编码器或安装一个与主轴同步旋转的位置编码器来实现。如果采用内置编码器的话需要注意传动机构对主轴准停精度的影响。可以通过对主轴驱动器的设置，使主轴驱动处于位置控制或速度控制方式。编码器准停的控制步骤与传感器类似，不同的是采用编码器准停可以由指令随意设定准停角度，十分灵活。

编码器准停控制时序图如图 7-17 所示。

3. 数控系统准停控制

数控系统准停控制方式由 CNC 完成，控制结构图如图 7-18 所示。其原理与进给轴的位置控制原理相似。

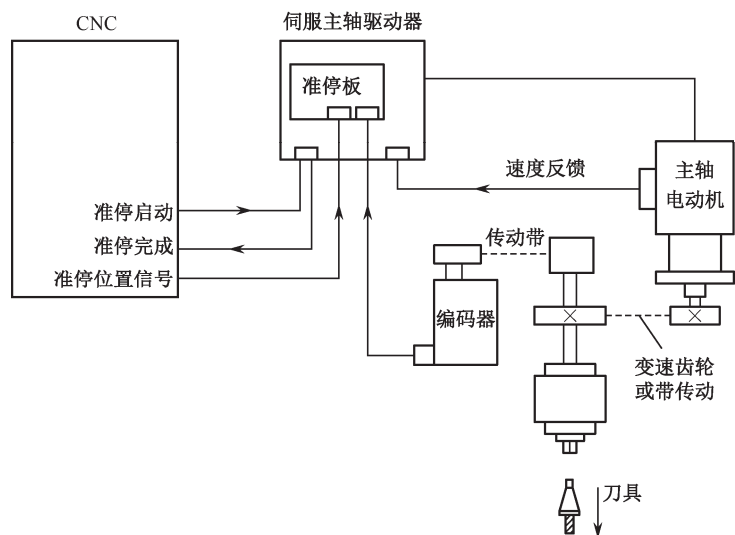


图 7-16 编码器主轴准停控制结构图

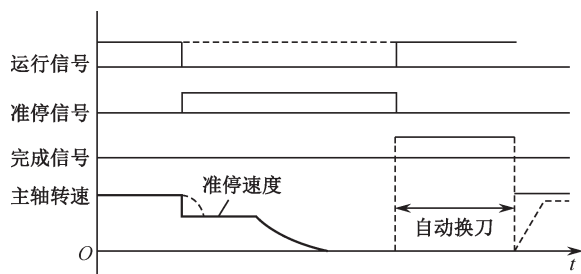


图 7-17 编码器准停控制时序图

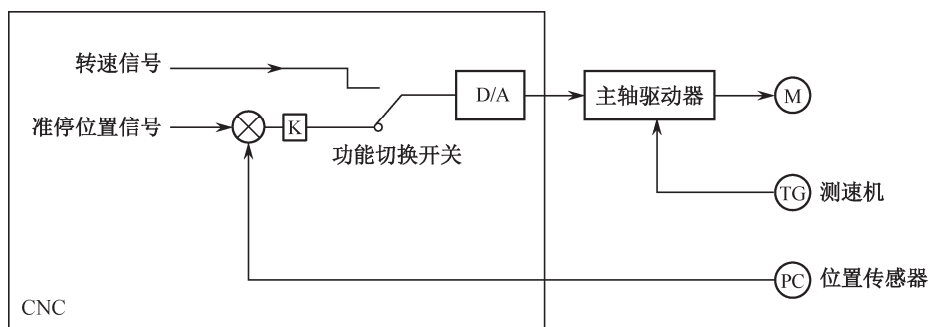


图 7-18 数控系统准停控制结构图

若采用这种准停控制方式，有以下要求：

(1) CNC 必须具有主轴闭环控制功能。

（2）主轴传动具有较高精度。一般用主轴电动机轴端编码器反馈信号给 CNC，构成位置闭环系统，因而有该要求。

（3）要求主轴驱动器具有伺服状态的功能。通常为避免冲击，主轴驱动采用软启动，这对主轴的位置闭环控制会产生不良影响。如果位置增益过低，则准停精度和刚度达不到要求；如果过高则会产生振荡。所以，主轴驱动需要进入伺服状态，使其特性与进给轴的伺服系统相近，才可以进行位置控制。

采用数控系统控制主轴准停，准停角度可以由数控系统设为任意值，在 M19 指令后用 S 值设定，因此，准停控制更加灵活方便。如果没有 S 指令，则主轴准停于相对零位脉冲 C 设定的位置。例如：

M03 S2000	主轴以 2 000 r/min 正转
M19	主轴准停于默认位置
M19 S50	主轴准停转至 50° 处
M03 S1500	主轴以 1 500 r/min 正转
M19 S300	主轴准停至 300° 处

执行 M19 时，CNC 将 M19 送入 PLC，经 PLC 处理，控制信号控制主轴电动机加速或减速到定向准停设定的速度运行，寻找主轴编码器零位脉冲 C，然后进入位置闭环控制系统，按照系统设定参数进行定位准停。

7.5 主轴驱动器与 CNC 的连接

主轴驱动器与 CNC 的连接同交流伺服驱动器与上位机的信号连接类似，也主要有两种方式：一是通用信号连接，使用外部脉冲或模拟电压对电动机转速、位置进行控制（多数情况采用模拟电压控制电动机转速，在刚性攻丝、CS 轴轮廓控制等情况才对电动机位置进行控制）；二是通信总线连接。

使用通用信号连接时，应注意 CNC 发出的脉冲形式或模拟电压范围与主轴驱动器能够接收的脉冲信号或模拟电压匹配，并且主轴驱动器的其他信号如使能信号、报警输出信号等也需要和 CNC 对应的信号匹配。一般在 CNC 和主轴驱动器的说明书中都会对各个信号进行详细描述，根据说明书就可以判断是否匹配和接线方式。

使用通信总线连接时，通常上位机和交流伺服驱动器是同一商家的产品，它们有自己的通信形式。CNC 与主轴驱动器的信号连接实际就是通信的物理层连接，这类情况的连接线通常由商家提供，也可以根据说明书自己制作。

图 7-19 所示为 GSK980TDb 配 DAP03 主轴驱动器的信号连接图。

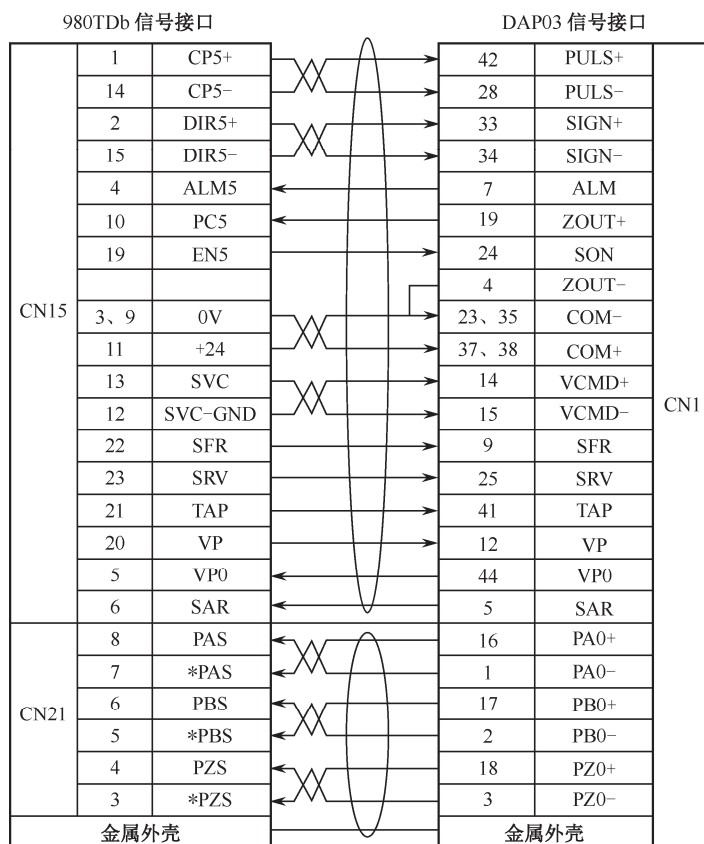


图 7-19 GSK980TDb 配 DAP03 主轴驱动器的信号连接图

7.6 本章小结

本章通过对数控机床主轴伺服系统的分析介绍,使读者了解到主轴驱动系统的作用、主轴驱动器的工作原理,以及主轴分段无级调速的控制和主轴准停控制。

数控机床的主轴伺服系统是整个数控电气控制系统中完成主运动的动力装置,包括主轴电动机、传动系统和主轴组件。主轴伺服驱动主轴电动机通过传动机构实现刀具或工件的旋转控制,配合各进给轴的运动来实现刀具与工件的切削运动,以加工出符合要求的零件。数控机床的主轴驱动系统不同于进给驱动系统,主轴的运动主要是旋转运动,主轴控制以调速和功率驱动为主。

数控机床所采用的不同类型的主轴电动机对应着不同类型的驱动器。目前,大多数数控机床都采用鼠笼式交流异步电动机和矢量变频调速器构成的主轴系统。数控机床中采用齿轮变速和无级调速结合的方式,也就是分段无级调速方式。主轴准停功能是加工中心数控机床的重要功能之一,用来实现自动换刀和精密加工的对刀、让刀。通常主轴准停可分为机械准停与电气准停。



7.7 思考与练习

1. 主轴驱动系统的分类有哪些？各自的特点是什么？
2. 试列出主轴驱动器与 CNC 连接的主要信号。
3. 简单描述交流主轴驱动器的工作原理。
4. 试述数控机床自动换挡的过程。
5. 主轴准停的方式有哪几种？

Chapter 8

第 8 章 可编程控制器及其应用

知识点

- 可编程控制器的定义、组成及工作原理
- 可编程控制器的指令系统
- 梯形图
- 可编程控制器的程序设计
- 数控系统内置 PLC

本章导读

可编程控制器（Programmable Controller，PLC）是以微处理器为基础，综合了计算机技术、半导体集成技术、自动控制技术、数字技术和通信网络技术发展起来的一种通用工业自动控制装置。它面向控制过程，面向用户。适应工业环境，操作方便，可靠性高。自从 1969 年第一台可编程控制器问世以来，目前，PLC 已经成为一种最重要、最普及、应用场合最多的工业控制器。本章主要介绍 PLC 的一般特性，包括它的结构、工作原理及工作方式，以及编程设计。并对数控系统内置 PLC 进行简单介绍。

8.1 PLC 的概述

可编程控制器是计算机编程系列中的一种，是为工业控制应用而设计制造的。早期的可编程控制器称为可编程逻辑控制器（Programmable Logic Controller，PLC），它主要用来代替继电器—接触器实现逻辑控制。随着技术的改进，这种装置的功能已经大大超过了逻辑控制的范围，因此，又称为可编程控制器，简称 PC。但是为了避免与个人计算机（Personal Computer）的简称混淆，所以将可编程控制器简称 PLC。

8.1.1 PLC 的定义

PLC 自问世以来，得到了迅猛发展。为了使其生产和发展标准化，美国电气制造商协会 NEMA（National Electrical Manufactory Association）经过四年的调查工作，于 1984 年首先将其正式命名为 PLC（Programmable Controller），并给 PLC 作了如下定义：

“PLC 是一个数字式的电子装置，它使用了可编程序的记忆体储存指令。用来执行诸如逻辑、顺序、计时、计数与演算等功能，并通过数字或类似的输入/输出模块，以控制各种机械或工作过程。一部数字电子计算机若是从事执行 PC 的功能，也被视为 PC，但不包括鼓式或类似的机械式顺序控制器。”

以后国际电工委员会（IEC）又先后颁布了 PLC 的标准草案第一稿、第二稿，并在 1987 年 2 月通过了对它的新定义：

“可编程控制器是一种数字运算操作的电子系统，专为在工业环境应用而设计的。它采用一类可编程的存储器，用于其内部存储程序，执行逻辑运算、顺序控制、定时、计数与算术操作等面向用户的指令，并通过数字或模拟式输入/输出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部设备，都是以与工业控制系统联成一个整体并能扩充其功能的原则而设计的。”

总之，可编程控制器是一台微型计算机，专为工业环境应用而设计制造的计算机。它具有丰富的输入/输出接口（I/O 接口），并且具有较强的驱动能力。但可编程控制器并不针对某一具体工业应用，在实际应用时，其硬件需根据实际需要进行选用配置，其软件需根据控制要求进行设计编制。

8.1.2 PLC 的产生和发展

1. PLC 的产生

在 20 世纪 60 年代，汽车生产流水线的自动控制系统基本上都是由继电器—接触器控制装置构成的。当时汽车的每一次改型都直接导致继电器—接触器控制装置的重新设计和安装。汽车型号更新的周期越来越短，继电器—接触器控制装置就需要经常地重新设计和安装，十分费时、费工、费料，甚至阻碍了更新周期的缩短。为了改变这一现状，美国通用汽车公司在 1969 年公开招标，要求用新的控制装置取代继电器控制装置，并提出了 10 项招标指标，即：

- (1) 编程方便, 现场可修改程序;
- (2) 维修方便, 采用模块化结构;
- (3) 可靠性高于继电器控制装置;
- (4) 体积小于继电器控制装置;
- (5) 数据可直接送入管理计算机;
- (6) 成本可与继电器控制装置竞争;
- (7) 输入可以是交流 115V;
- (8) 输出为交流 115V, 2A 以上, 能直接驱动电磁阀、接触器等;
- (9) 在扩展时, 原系统只要很小变更;
- (10) 用户程序存储器容量至少能扩展到 4KB。

1969 年, 美国数字设备公司 (DEC) 研制出第一台 PLC, 在美国通用汽车自动装配线上试用, 获得了成功, 很快在美国其他工业领域推广应用。到 1971 年, 已经成功地应用于食品、饮料、冶金、造纸等工业。这一新型工业控制装置的出现, 也受到了世界其他国家的高度重视。1971 年, 日本从美国引进了这项新技术, 很快研制出了日本的第一台 PLC。1973 年, 西欧国家也研制出他们的第一台 PLC。我国从 1974 年开始研制, 于 1977 年开始工业应用。

2. PLC 的发展

虽然 PLC 问世时间不长, 但随着微处理器的出现, 大规模、超大规模集成电路技术的迅速发展和数据通信技术的不断进步, PLC 也迅速发展, 其发展过程大致可分以下三个阶段。

1) 早期的 PLC (20 世纪 60 年代末至 70 年代中期)

早期的 PLC 一般称为可编程逻辑控制器。这时的 PLC 多少有点继电器控制装置的替代物的含义, 其主要功能只是执行原先由继电器完成的顺序控制、定时等。它在硬件上以准计算机的形式出现, 在 I/O 接口电路上作了改进以适应工业控制现场的要求。装置中的器件主要采用分立元件和中小规模集成电路, 存储器采用磁芯存储器。另外还采取了一些措施, 以提高其抗干扰的能力。在软件编程上, 采用广大电气工程技术人员所熟悉的继电器控制线路的方式——梯形图。因此, 早期 PLC 的性能要优于继电器控制装置, 其优点包括简单易懂、便于安装、体积小、能耗低、有故障指示、能重复使用等。其中 PLC 特有的编程语言——梯形图一直沿用至今。

2) 中期的 PLC (20 世纪 70 年代中期至 80 年代中后期)

在 20 世纪 70 年代, 微处理器的出现使 PLC 发生了巨大的变化。美国、日本、德国等一些厂家先后开始采用微处理器作为 PLC 的中央处理单元 (CPU), 使 PLC 的功能大大增强。在软件方面, 除了保持其原有的逻辑运算、计时、计数等功能以外, 还增加了算术运算、数据处理和传送、通信、自诊断等功能。在硬件方面, 除了保持其原有的开关模块以外, 还增加了模拟量模块、远程 I/O 模块、各种特殊功能模块, 并扩大了存储器的容量, 使各种逻辑线圈的数量增加, 还提供了一定数量的数据寄存器, 使 PLC 的应用范围得以扩大。

3) 近期的 PLC (20 世纪 80 年代中后期至今)

进入 20 世纪 80 年代中后期, 由于超大规模集成电路技术的迅速发展, 微处理器的市场价格大幅度下跌, 使得各种类型的 PLC 所采用的微处理器的档次普遍提高。而且, 为了进一步提高 PLC 的处理速度, 各制造厂商还纷纷研制开发了专用逻辑处理芯片。这样使得 PLC 软、硬件功能发生了巨大变化。

8.1.3 PLC 的特点和应用

1. PLC 的主要特点

现代工业生产过程是复杂多样的, 它们对控制的要求也各不相同, PLC 由于具备以下特点, 一经出现就受到了广大工程技术人员的欢迎。

1) 高可靠性

高可靠性是电气控制设备的关键性能。PLC 由于采用现代大规模集成电路技术, 采用严格的生产工艺制造, 内部电路采取了先进的抗干扰技术, 具有很高的可靠性。从 PLC 的机外电路来说, 使用 PLC 构成控制系统, 和同等规模的继电器接触器系统相比, 电气接线及开关节点已减少到数百甚至数千分之一, 故障也就大大降低。此外, PLC 带有硬件故障自我检测功能, 出现故障时可及时发出警报。在应用软件中, 应用者还可以编入外围器件的故障自诊断程序, 使系统中除 PLC 以外的电路及设备也获得故障自诊断保护。主要有以下几方面特点:

(1) 所有的 I/O 接口电路均采用光电隔离, 使工业现场的外电路与 PLC 内部电路之间电气上隔离;

(2) 各输入端均采用 RC 滤波器, 其滤波时间常数一般为 10~20 ms;

(3) 各模块均采用屏蔽措施, 以防止辐射干扰;

(4) 采用性能优良的开关电源;

(5) 对采用的器件进行严格的筛选;

(6) 良好的自诊断功能, 一旦电源或其他软、硬件发生异常情况, CPU 立即采取有效措施, 以防止故障扩大;

(7) 大型 PLC 还可以采用由双 CPU 构成冗余系统或有三个 CPU 构成表决系统, 使可靠性更进一步提高。

2) 丰富的 I/O 接口模块

PLC 针对不同的工业现场信号如交流或直流、开关量或模拟量、电压或电流、脉冲或电位、强电或弱电等, 有相应的 I/O 模块与工业现场器件或设备如按钮、行程开关、接近开关、传感器及变送器、电磁线圈、控制阀等直接连接。另外为了提高操作性能, 它还有多种人机对话的接口模块; 另外为了组成工业局部网络, 它还有多种通信联网的接口模块等。

3) 采用模块化结构

除了单元式的小型 PLC 以外, 绝大多数 PLC 均采用模块化结构。PLC 的各个部件,

包括 CPU、电源、I/O 接口等均采用模块化设计，由机架及电缆将各个模块连接起来，系统的规模和功能可根据用户的需要自行组合。

4) 编程简单易学

PLC 的编程大多采用类似于继电器—接触器控制线路的梯形图形式，不需要具备计算机的专门知识，因此，很容易被一般工程技术人员所理解和掌握。

梯形图语言的图形符号与表达方式和继电器电路图相当接近，只用 PLC 的少量开关量逻辑控制指令就可以方便地实现继电器电路的功能。为不熟悉电子电路、计算机原理和汇编语言的人使用计算机从事工业控制打开了方便之门。

5) 安装简单、维修方便

PLC 可以在各种工业环境下直接运行。使用时只需将现场的各种设备与 PLC 相应的 I/O 口端相连接，即可投入运行。各种模块上均有运行和故障指示装置，便于用户了解运行情况和查找故障。由于采用模块化结构，因此，一旦某模块发生故障，用户可以通过更换模块的方法，使系统迅速恢复运行。

6) 体积小、质量轻、能耗低

以超小型 PLC 为例，新近出产的品种其底部尺寸小于 100 mm，质量小于 150 g，功耗仅为数瓦。由于体积小，很容易装入机械内部，是实现机电一体化的理想控制设备。

2. PLC 的主要功能

随着 PLC 技术的不断发展，目前已能完成以下控制功能。

(1) 条件控制功能：条件控制（又称为逻辑控制或顺序控制）功能是指用 PLC 的与、或、非指令取代继电器触点的串联、并联及其他各种逻辑连接，进行开关控制。

(2) 定时、计数控制功能：定时、计数控制功能是指用 PLC 提供的定时器、计数器指令实现对某种操作的定时或计数控制，以取代时间继电器和计数继电器。

(3) 步进控制功能：步进控制功能是指用步进指令来实现在有多道工序的控制中，只有前一道工序完成后才能进行下一道工序操作的控制，以取代由硬件构成的步进控制器。

(4) 数据处理功能：数据处理功能是指 PLC 能进行数据传送、比较、移位、数制转换、算术运算与逻辑运算，以及编码和译码等操作。

(5) A/D 与 D/A 转换功能：A/D 与 D/A 转换功能是指通过 A/D、D/A 模块完成模拟量和数字量之间的转换。

(6) 运动控制功能：运动控制功能是指通过高速计数模块和位置控制模块等进行单轴或多轴运动控制。

(7) 过程控制功能：过程控制功能是指通过 PLC 的 PID 控制指令或模块实现对温度、压力、速度、流量等物理参数的闭环控制。

(8) 扩展功能：扩展功能是指通过连接输入/输出扩展单元（即 I/O 扩展单元）模块来增加输入/输出点数，也可通过附加各种智能单元及特殊功能单元来提高 PLC 的控制能力。

(9) 远程 I/O 功能：远程 I/O 功能是指通过远程 I/O 单元将分散在远距离的各种输入/输出设备与 PLC 主机相连接，进行远程控制，接收输入信号、传出输出信号。

（10）通信联网功能：通信联网功能是指通过 PLC 之间的联网、PLC 与上位计算机的连接等，实现远程 I/O 控制或数据交换，以完成较大规模的系统控制。

（11）监控功能：监控功能是指 PLC 能监视系统各部分的运行状态和进程，对系统中出现的异常情况进行报警和记录，甚至自动终止运行；也可在线调整、修改控制程序中的定时器、计数器等设定值或强制 I/O 状态。

3. PLC 的应用领域

目前，国内外 PLC 已广泛应用冶金、石油、化工、建材、机械制造、电力、汽车、轻工、环保及数码电子等各行各业，随着 PLC 性能价格比的不断提高，其应用领域不断扩大。从应用类型看，PLC 的应用大致可归纳为以下几个方面。

1) 开关量逻辑控制

利用 PLC 最基本的逻辑运算、定时、计数等功能实现逻辑控制，可以取代传统的继电器控制，用于单机控制、多机群控制、生产自动线控制等，例如，机床、注塑机、印刷机械、装配生产线、电镀流水线及电梯的控制等。这是 PLC 最基本也是最广泛的应用。

2) 运动控制

大多数 PLC 都有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。这一功能广泛用于各种机械设备，如对各种机床、装配机械、机器人等进行运动控制。

3) 过程控制

大、中型 PLC 都具有多路模拟量 I/O 模块和 PID 控制功能，有的小型 PLC 也具有模拟量输入/输出。所以 PLC 可实现模拟量控制，而且具有 PID 控制功能的 PLC 可构成闭环控制，用于过程控制。这一功能已广泛用于锅炉、反应堆、水处理、酿酒等过程控制。

4) 数据处理

现代的 PLC 都具有数学运算、数据传送、转换、排序和查表等功能，可进行数据的采集、分析和处理，同时可通过通信接口将这些数据传送给其他智能装置，如计算机数值控制（CNC）设备，进行处理。

5) 通信联网

PLC 的通信包括 PLC 与 PLC、PLC 与上位计算机、PLC 与其他智能设备之间的通信，PLC 系统与通用计算机可直接或通过通信处理单元、通信转换单元相连构成网络，以实现信息的交换，并可构成“集中管理、分散控制”的多级分布式控制系统，满足工厂自动化（FA）发展的需要。

8.1.4 PLC 的分类

PLC 产品种类繁多，其规格和性能也各不相同。对 PLC 的分类，通常根据其结构形式的不同、功能的差异和 I/O 点数的多少等进行大致分类。

1. 按结构形式分类

根据 PLC 的结构形式, 可将 PLC 分为整体式和模块式两类。

1) 整体式 PLC

整体式 PLC 是将电源、CPU、I/O 接口等部件都集中装在一个机箱内, 具有结构紧凑、体积小、价格低的特点。小型 PLC 一般采用这种整体式结构。整体式 PLC 由不同 I/O 点数的基本单元 (又称主机) 和扩展单元组成。基本单元内有 CPU、I/O 接口、与 I/O 扩展单元相连的扩展口, 以及与编程器或 EPROM 写入器相连的接口等。扩展单元内只有 I/O 接口和电源等, 没有 CPU。基本单元和扩展单元之间一般用扁平电缆连接。整体式 PLC 一般还可配备特殊功能单元, 如模拟量单元、位置控制单元等, 使其功能得以扩展。

2) 模块式 PLC

模块式 PLC 是将 PLC 各组成部分, 分别作为若干个单独的模块, 如 CPU 模块、I/O 模块、电源模块 (有的含在 CPU 模块中), 以及各种功能模块。模块式 PLC 由框架或基板和各种模块组成。模块装在框架或基板的插座上。这种模块式 PLC 的特点是配置灵活, 可根据需要选配不同规模的系统, 而且装配方便, 便于扩展和维修。大、中型 PLC 一般采用模块式结构。

还有一些 PLC 将整体式和模块式的特点结合起来, 构成叠装式 PLC。叠装式 PLC 的 CPU、电源、I/O 接口等也是各自独立的模块, 但它们之间是靠电缆进行连接, 并且各模块可以一层层地叠装。这样, 不但系统可以灵活配置, 还可做得体积小巧。

2. 按功能分类

根据 PLC 所具有的功能不同, 可将 PLC 分为低档、中档、高档三类。

1) 低档 PLC

具有逻辑运算、定时、计数、移位, 以及自诊断、监控等基本功能, 还可有少量模拟量输入/输出、算术运算、数据传送和比较、通信等功能。主要用于逻辑控制、顺序控制或少量模拟量控制的单机控制系统中。

2) 中档 PLC

除具有低档 PLC 的功能外, 还具有较强的模拟量输入/输出、算术运算、数据传送和比较、数制转换、远程 I/O、子程序、通信联网等功能。有些还增设中断控制、PID 控制等功能, 适用于复杂控制系统。

3) 高档 PLC

除具有中档机的功能外, 还增加了带符号算术运算、矩阵运算、位逻辑运算、平方根运算及其他特殊功能函数的运算、制表及表格传送功能等。高档 PLC 具有更强的通信联网功能, 可用于大规模过程控制或构成分布式网络控制系统, 实现工厂自动化。

3. 按 I/O 点数分类

根据 PLC 的 I/O 点数的多少, 可将 PLC 分为小型、中型和大型三类。

1) 小型 PLC

I/O 点数为 256 点以下的为小型 PLC。其中, I/O 点数小于 64 点的为超小型或微型 PLC。

2) 中型 PLC

I/O 点数为 256 点以上、2 048 点以下的为中型 PLC。

3) 大型 PLC

I/O 点数为 2 048 以上的为大型 PLC。其中, I/O 点数超过 8 192 点的为超大型 PLC。

在实际中, 一般 PLC 功能的强弱与其 I/O 点数的多少是相互关联的, 即 PLC 的功能越强, 其可配置的 I/O 点数越多。因此, 通常所说的小型、中型、大型 PLC, 除 I/O 点数不同外, 同时也表示其对应功能为低档、中档、高档。

8.2 PLC 的组成及工作原理

PLC 是微机技术和控制技术相结合的产物, 是一种以微处理器为核心的用于控制的特殊计算机, 因此, PLC 的基本组成与一般的微机系统类似。

8.2.1 PLC 的基本组成

PLC 的硬件主要由中央处理器 (CPU)、存储器、输入单元、输出单元、通信接口、扩展接口、电源等部分组成。其中, CPU 是 PLC 的核心, 输入单元与输出单元是连接现场输入/输出设备与 CPU 之间的接口电路, 通信接口用于与编程器、上位计算机等外设连接, 如图 8-1 所示。

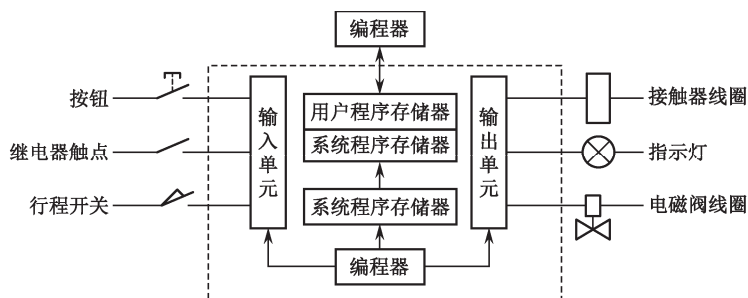


图 8-1 PLC 组成框图

1. 中央处理单元 (Central Processing Unit, CPU)

同一般的微机一样, CPU 是 PLC 的核心。PLC 中所配置的 CPU 随机型不同而不同, 常用有三类: 通用微处理器 (如 Z80、8086、80286 等)、单片微处理器 (如 8031、8096 等) 和位片式微处理器 (如 AMD29W 等)。小型 PLC 大多采用 8 位通用微处理器和单片微处理器; 中型 PLC 大多采用 16 位通用微处理器或单片微处理器; 大型 PLC 大多采用高速位片式微处理器。

目前,小型 PLC 为单 CPU 系统,而中、大型 PLC 则大多为双 CPU 系统,甚至有些 PLC 中多达 8 个 CPU。对于双 CPU 系统,其中一个为字处理器,一般采用 8 位或 16 位处理器;另一个为位处理器,采用由各厂家设计制造的专用芯片。字处理器为主处理器,用于执行编程器接口功能、监视内部定时器、监视扫描时间、处理字节指令,以及对系统总线和位处理器进行控制等;位处理器为从处理器,主要用于处理位操作指令和实现 PLC 编程语言向机器语言的转换。位处理器的采用,提高了 PLC 的速度,使 PLC 更好地满足实时控制要求。

在 PLC 中 CPU 按系统程序赋予的功能,指挥 PLC 有条不紊地进行工作,归纳起来主要有以下几个方面:

- (1) 接收从编程器输入的用户程序和数据。
- (2) 诊断电源、PLC 内部电路的工作故障和编程中的语法错误等。
- (3) 通过输入接口接收现场的状态或数据,并存入输入映像寄存器或数据寄存器中。
- (4) 从存储器逐条读取用户程序,经过解释后执行。
- (5) 根据执行的结果,更新有关标志位的状态和输出映像寄存器的内容,通过输出单元实现输出控制。有些 PLC 还具有制表打印或数据通信等功能。

2. 存储器 (Memory)

存储器主要有两种:一种是可读/写操作的随机存储器 RAM,另一种是只读存储器 ROM、PROM、EPROM 和 E²PROM。在 PLC 中,存储器主要用于存放系统程序、用户程序及工作数据。

系统程序是由 PLC 的制造厂家编写的,和 PLC 的硬件组成有关,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,提供 PLC 运行的平台。系统程序关系到 PLC 的性能,而且在 PLC 使用过程中不会变动,所以是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。

用户程序是随 PLC 的控制对象而定的,由用户根据对象生产工艺的控制要求而编写的应用程序。为了便于读出、检查和修改,用户程序一般存于 CMOS 静态 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,当用户程序经过运行正常,不需要改变,可将其固化在只读存储器 EPROM 中。现在有许多 PLC 直接采用 E²PROM 作为用户存储器。

工作数据是 PLC 运行过程中经常变化、经常存取的一些数据。存放在 RAM 中,以适应随机存取的要求。在 PLC 的工作数据存储区中,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而确定的。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。

由于系统程序及工作数据与用户无直接联系,所以在 PLC 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。当 PLC 提供的用户程序存储器容量不够用时,许多 PLC 还提供存储器扩展功能。

3. 输入/输出单元（Input/Output Unit）

输入/输出单元通常又称为 I/O 单元或 I/O 模块，是 PLC 与工业生产现场之间的连接部件。PLC 通过输入接口可以检测被控对象的各种数据，以这些数据作为 PLC 对被控对象进行控制的依据；同时 PLC 又通过输出接口将处理结果送给被控对象，以实现控制目的。

由于外部输入设备和输出设备所需的信号电平是多种多样的，而 PLC 内部 CPU 的处理信息只能是标准电平，所以 I/O 接口要实现这种转换。I/O 接口一般都具有光电隔离和滤波功能，以提高 PLC 的抗干扰能力。另外，I/O 接口上通常还有状态指示，工作状态直观，便于维护。

PLC 提供了多种操作电平和驱动能力的 I/O 接口，有各种各样功能的 I/O 接口供用户选用。I/O 接口的主要类型有数字量（开关量）输入、数字量（开关量）输出、模拟量输入、模拟量输出等。

常用的开关量输入接口按其使用的电源不同有三种类型：直流输入接口、交流输入接口和交/直流输入接口。其中直流输入方式接线电路如图 8-2 所示。

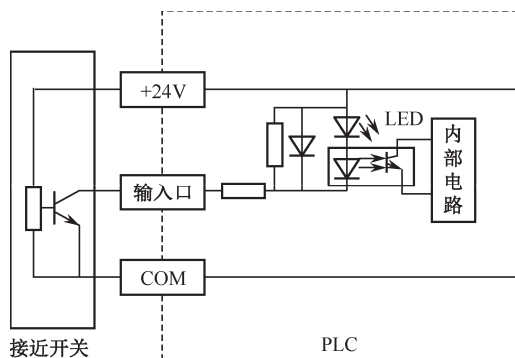


图 8-2 直流输入方式接线电路图

常用的开关量输出接口按输出开关器件不同有三种类型：继电器输出、晶体管输出和双向晶闸管输出，其基本电路如图 8-3 所示。继电器输出接口可驱动交流或直流负载，但其响应时间长，动作频率低；而晶体管输出和双向晶闸管输出接口的响应速度快，动作频率高，但前者只能用于驱动直流负载，后者只能用于交流负载。而晶体管和双向晶闸管输出接口的响应速度快，动作频率高，但前者只能用于驱动直流负载，如图 8-3（b）所示，后者只用于驱动交流负载，如图 8-3（c）所示。

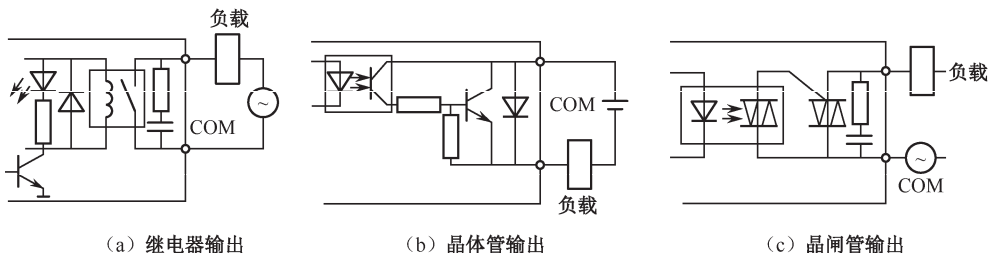


图 8-3 PLC 输出电路图

PLC 的 I/O 接口所能接收的输入/输出信号个数称为 PLC 输入/输出 (I/O) 点数。I/O 点数是选择 PLC 的重要依据之一。当系统的 I/O 点数不够时, 可通过 PLC 的 I/O 扩展接口对系统进行扩展。

4. 通信接口

PLC 配有各种通信接口, 这些通信接口一般都带有通信处理器。PLC 通过这些通信接口可与监视器、打印机、其他 PLC、计算机等设备实现通信。PLC 与打印机连接, 可将过程信息、系统参数等输出打印; 与监视器连接, 可将控制过程图像显示出来; 与其他 PLC 连接, 可组成多机系统或连成网络, 实现更大规模控制; 与计算机连接, 可组成多级分布式控制系统, 实现控制与管理相结合。

远程 I/O 系统也必须配备相应的通信接口模块。

5. 智能接口模块

智能接口模块是一独立的计算机系统, 它有自己的 CPU、系统程序、存储器及与 PLC 系统总线相连的接口。它作为 PLC 系统的一个模块, 通过总线与 PLC 相连, 进行数据交换, 并在 PLC 的协调管理下独立工作。

PLC 的智能接口模块种类很多, 如高速计数模块、闭环控制模块、运动控制模块、中断控制模块等。

6. 编程装置

编程装置的作用是输入、编辑、调试用户程序, 也可在线监控 PLC 内部状态和参数, 与 PLC 进行人/机对话。它是开发、应用、维护 PLC 不可缺少的工具。编程装置可以是专用编程器, 也可以是配有专用编程软件包的通用计算机系统。专用编程器是由 PLC 厂家生产, 专供该厂家生产的某些 PLC 产品使用, 它主要由键盘、显示器和外存储器接口等部件组成。专用编程器有简易编程器和智能编程器两类。

简易型编程器只能联机编程, 不能直接输入和编辑梯形图程序, 需将梯形图程序转化为指令表程序才能输入。简易编程器体积小、价格便宜, 它可以直接插在 PLC 的编程插座上, 或者用专用电缆与 PLC 相连, 以方便编程和调试。有些简易编程器带有存储盒, 可用来储存用户程序, 如三菱的 FX-20P-E 简易编程器。

智能编程器又称为图形编程器, 本质上它是一台专用便携式计算机, 如三菱的 GP—80FX—E 智能型编程器。它既可联机编程, 又可脱机编程。可直接输入和编辑梯形图程序, 使用更加直观、方便, 但价格较高, 操作也比较复杂。大多数智能编程器带有磁盘驱动器, 提供录音机接口和打印机接口。

7. 电源

PLC 配有开关电源, 以供内部电路使用。与普通电源相比, PLC 电源的稳定性好、抗干扰能力强, 对电网提供的电源稳定度要求不高, 一般允许电源电压在其额定值 $\pm 15\%$ 的范围内波动。许多 PLC 还向外提供直流 24V 稳压电源, 用于对外部传感器供电。

8. 其他外部设备

除了上面所述的部件和设备外，PLC 还有许多外部设备，如 EPROM 写入器、外存储器、人/机接口装置等。

EPROM 写入器是用来将用户程序固化到 EPROM 存储器中的一种 PLC 外部设备。为了使调试好的用户程序不易丢失，经常用 EPROM 写入器将 PLC 内 RAM 保存到 EPROM 中。

PLC 内部的半导体存储器称为内存储器。有时可用外部的磁带、磁盘和用半导体存储器做成的存储盒等来存储 PLC 的用户程序，这些存储器件称为外存储器。外存储器一般是通过编程器或其他智能模块提供的接口，实现与内存储器之间相互传送用户程序。

人/机接口装置是用来实现操作人员与 PLC 控制系统的对话。最简单、最普遍的人/机接口装置由安装在控制台上的按钮、转换开关、拨码开关、指示灯、LED 显示器、声光报警器等器件构成。对于 PLC 系统，还可采用半智能型 CRT 人/机接口装置和智能型终端人/机接口装置。半智能型 CRT 人/机接口装置可长期安装在控制台上，通过通信接口接收来自 PLC 的信息并在 CRT 上显示出来；而智能型终端人/机接口装置有自己的微处理器和存储器，能够与操作人员快速交换信息，并通过通信接口与 PLC 相连，也可作为独立的节点接入 PLC 网络。

8.2.2 PLC 的工作原理

1. PLC 的扫描工作原理

当 PLC 运行时，是通过执行反映控制要求的用户程序来完成控制任务的，需要执行众多的操作，但 CPU 不可能同时去执行多个操作，它只能按分时操作（串行工作）方式，每一次执行一个操作，按顺序逐个执行。由于 CPU 的运算处理速度很快，所以从宏观上来看，PLC 外部出现的结果似乎是同时（并行）完成的。这种串行工作过程称为 PLC 的扫描工作方式。

用扫描工作方式执用户程序时，扫描是从第一条程序开始，在无中断或跳转控制的情况下，按程序存储顺序的先后，逐条执行用户程序，直到程序结束。然后再从头开始扫描执行，周而复始重复运行。

PLC 的扫描工作方式与继电器—接触器控制的工作原理明显不同。继电器—接触器控制采用硬逻辑的并行工作方式，如果某个继电器的线圈通电或断电，那么该继电器的所有常开和常闭触点不论处在控制线路的哪个位置上，都会立即同时动作；而 PLC 采用扫描工作方式（串行工作方式），如果某个软继电器的线圈被接通或断开，其所有的触点不会立即动作，必须等扫描到该点时才会动作。但由于 PLC 的扫描速度快，通常 PLC 与继电器—接触器控制在 I/O 接口的处理结果上并没有什么差别。

2. PLC 的扫描工作过程

PLC 的扫描工作过程除了执用户程序外，在每次扫描工作过程中还要完成内部处理、通信服务工作。

如图 8-4 所示, 整个扫描工作过程包括内部处理、通信服务、输入采样、程序执行、输出刷新 5 个阶段。整个过程扫描执行一遍所需的时间称为扫描周期。扫描周期与 CPU 运行速度、PLC 硬件配置及用户程序长短有关, 典型值为 1~100 ms。

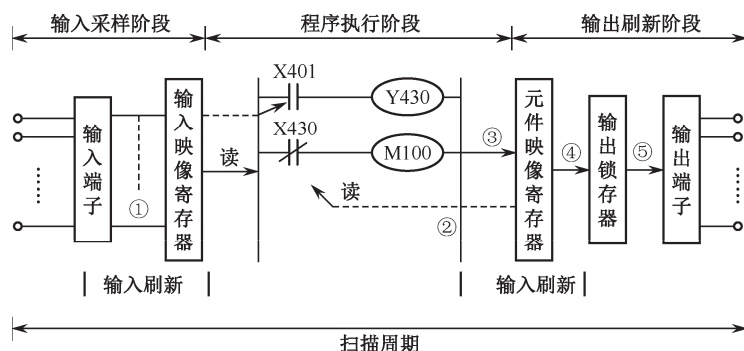


图 8-4 扫描过程示意图

在内部处理阶段, 进行 PLC 自检, 检查内部硬件是否正常, 对监视定时器 (WDT) 复位, 以及完成其他一些内部处理工作。

在通信服务阶段, PLC 与其他智能装置实现通信, 响应编程器输入的命令, 更新编程器的显示内容等。

当 PLC 处于停止 (STOP) 状态时, 只完成内部处理和通信服务工作。当 PLC 处于运行 (RUN) 状态时, 除完成内部处理和通信服务工作外, 还要完成输入采样、程序执行、输出刷新工作。

PLC 的扫描工作方式简单直观, 便于程序设计, 并为可靠运行提供了保障。当 PLC 扫描到的指令被执行后, 其结果马上被后面将要扫描到的指令所利用, 而且还可通过 CPU 内部设置的监视定时器来监视每次扫描是否超过规定时间, 避免由于 CPU 内部故障使程序执行进入死循环。

3. PLC 执行程序的过程及特点

PLC 执行程序的过程分为三个阶段, 即输入采样阶段、程序执行阶段、输出刷新阶段, 如图 8-5 所示。

1) 输入采样阶段

在输入采样阶段, PLC 以扫描工作方式按顺序对所有输入端的输入状态进行采样, 并存入输入映像寄存器中, 此时输入映像寄存器被刷新。接着进入程序处理阶段, 在程序执行阶段, 即使输入状态发生变化, 输入映像寄存器的内容也不会改变, 输入状态的变化只有在下一个扫描周期的输入采样阶段才能被采样到。

2) 程序执行阶段

在程序执行阶段, PLC 对程序按顺序进行扫描执行。若程序用梯形图来表示, 则总是按先上后下, 先左后右的顺序进行。当遇到程序跳转指令时, 则根据跳转条件是否满足来决定程序是否跳转。当指令中涉及输入、输出状态时, PLC 从输入映像寄存器和元件映像

寄存器中读出，根据用户程序进行运算，运算的结果再存入元件映像寄存器中。对于元件映像寄存器来说，其内容会随程序的执行而变化。

3) 输出刷新阶段

当所有程序执行完毕后，进入输出处理阶段。在这一阶段里，PLC 将输出映像寄存器中与输出有关的状态（输出继电器状态）转存到输出锁存器中，并通过一定方式输出，驱动外部负载。

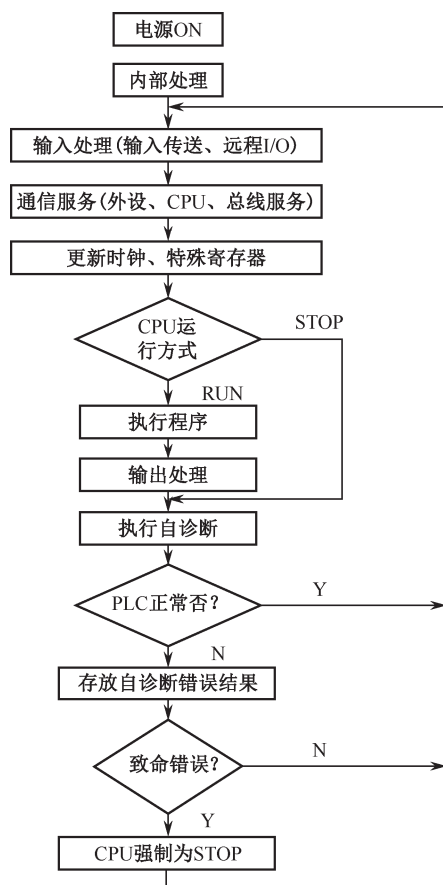


图 8-5 PLC 执行程序过程示意图

因此，PLC 在一个扫描周期内，对输入状态的采样只在输入采样阶段进行。当 PLC 进入程序执行阶段后输入端将被封锁，直到下一个扫描周期的输入采样阶段才对输入状态进行重新采样。这方式称为集中采样，即在一个扫描周期内，集中一段时间对输入状态进行采样。

在用户程序中如果对输出结果多次赋值，则最后一次有效。在一个扫描周期内，只在输出刷新阶段才将输出状态从输出映像寄存器中输出，对输出接口进行刷新。在其他阶段里输出状态一直保存在输出映像寄存器中，这种方式称为集中输出。

对于小型 PLC，其 I/O 点数较少，用户程序较短，一般采用集中采样、集中输出的工

作方式，虽然在一定程度上降低了系统的响应速度，但使 PLC 大多数工作时间与外部输入/输出设备隔离，从根本上提高了系统的抗干扰能力，增强了系统的可靠性。

而对于大中型 PLC，其 I/O 点数较多，控制功能强，用户程序较长，为提高系统响应速度，可以采用定期采样、定期输出方式，或中断输入、输出方式以及采用智能 I/O 接口等多种方式。

从上述分析可知，当 PLC 的输入端输入信号发生变化到 PLC 输出端对该输入变化做出反应，需要一段时间，这种现象称为 PLC 输入/输出响应滞后。对一般的工业控制，这种滞后是完全允许的。应该注意的是，这种响应滞后不仅是由于 PLC 扫描工作方式造成，更主要是 PLC 输入接口的滤波环节带来的输入延迟，以及输出接口中驱动器件的动作时间带来输出延迟，同时还与程序设计有关。滞后时间是设计 PLC 应用系统时应注意把握的一个参数。

8.3 PLC 的指令系统

PLC 的工作过程是依据一连串的控制指令来进行的，这些控制指令就是常说的编程语言。PLC 的编程语言一般有梯形图、语句表、功能块图和计算机高级语言等几种。S7—200 系列 PLC 指令有三种表达形式，即梯形图（LAD）、语句表（STL）和功能块图（FBD）。在实际应用中，一般采用梯形图编写 PLC 程序，因为梯形图是一种比较通用的图形编程语言，而不同类型的 PLC 的梯形图比较相似。语句表编写的程序则比较接近机器代码的文本型程序。三种语言中，语句表使用最广，保存、注释都比较方便。这里介绍的指令和编程都将以梯形图和语句表为主。

8.3.1 PLC 的编程语言

梯形图是一种图形语言，它沿用了继电器的触点和线圈等符号，是以继电器—接触器控制系统的电气原理图为基础演变而来的，易于初学者使用，图形表示易于理解，而且全世界通用。

PLC 的梯形图使用的内部继电器、定时器和计数器等都是通过软件来实现的，使用方便、修改灵活。如图 8-6 所示，该控制程序具有启动自锁、延时断开的功能。

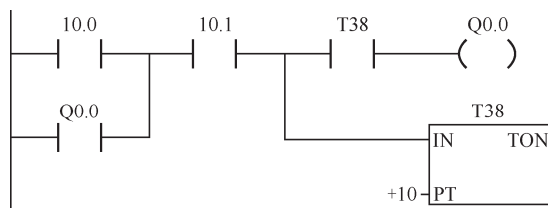


图 8-6 梯形图编程实例

语句表是通过指令助记符控制程序的，类似计算机汇编语言，它适合有经验的程序员。不同厂家的 PLC 所采用的指令集往往不同，所以，对于同一个梯形图，书写的语句表指令形式也不尽相同。

语句是用户程序的基本单元，每条语句都规定了 CPU 该如何动作，实现什么功能。PLC 的语句表由操作码和操作数构成。

操作码告诉 CPU 要执行的功能，操作数提供执行过程中所需的参数。应该注意的是，有的操作码是没有操作数的。

LD	I0.0
O	Q0.0
AN	I0.1
LPS	
AN	T38
=	Q0.0
LPP	
TON	T38,+10

图 8-7 语句表编程实例

与图 8-6 中相对应的语句表指令如图 8-7 所示。

功能块图又称为逻辑盒指令，它沿用了半导体逻辑电路的逻辑方框图，没有像梯形图中的触点和线圈，对每种功能都使用一个运算方法，其运算功能由方框图内的符号确定。控制逻辑常用“与”、“或”、“非”三种逻辑功能来表达，方框的左边为输入，右边为输出。

与图 8-6 相对应的功能块图如图 8-8 所示。

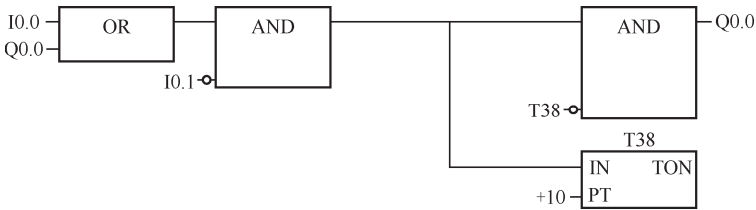


图 8-8 功能块图编程实例

8.3.2 PLC 的基本指令

1. 触点指令

1) 标准触点指令

标准触点分为标准常开触点和标准常闭触点。

标准常开触点的梯形图由标准常开触点及触点位地址 bit 构成；语句表形式由操作码“LD”和标准常开触点位地址 bit 构成。

标准常闭触点的梯形图由标准常闭触点及触点位地址 bit 构成；语句表形式由操作码“LDN”和标准常闭触点位地址 bit 构成。

标准触点的梯形图、语句表形式如图 8-9 所示。

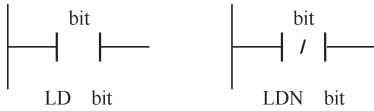


图 8-9 标准触点的梯形图、语句表形式

标准触点的功能：常开触点在其线圈不带电时是断开的，触点状态为 OFF 或 0，而其线圈带电时是闭合的，触点状态为 ON 或 1；常闭触点在其线圈不带电时是闭合的，触点状态为 ON 或 1，而其线圈带电时是断开的，触点状态为 OFF 或 0。在程序执行过程中，标准触点起开关作用。

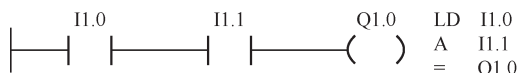


图 8-13 逻辑与操作指令

逻辑与操作指令的功能：逻辑与只有当两个触点的状态都是 1（ON）时才有输出，两者只要有一个 0（OFF），则无输出。

2) 逻辑或操作指令

梯形图由标准触点或立即触点并联构成；语句表形式由操作码“O”和触点的位地址构成，如图 8-14 所示。

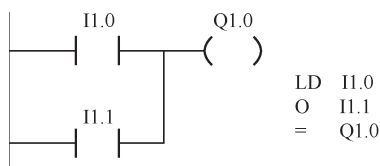


图 8-14 逻辑或操作指令

逻辑或操作指令的功能：逻辑或只要两个触点有一个 1（ON）就有输出，只有当两个触点都为 0（OFF）时才不输出。

3) 取非操作指令

取非操作指令的梯形图是在触点上加“NOT”字符构成；语句表形式由操作码“NOT”构成，本身没有操作数，只能和其他指令联合使用，如图 8-15 所示。

取非操作指令的功能：取非操作就是把输入操作数的状态取反后作为目标操作数输出。操作数为 1（ON）时，取非后就为 0（OFF），操作数为 0（OFF）时，取非后就为 1（ON）。

4. 置位操作指令

1) 置位（非立即）操作指令

其梯形图由置位线圈、置位线圈位地址及置位线圈数目 n 构成；语句表形式由置位操作码“S”、置位线圈位地址及置位线圈数目 n 构成，如图 8-16 所示。

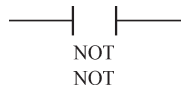


图 8-15 取非操作指令

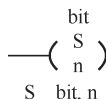


图 8-16 置位操作指令

置位操作指令的功能：当置位信号来临（1 或 ON）时，被置位的线圈置 1，即使置位信号变为 0 以后，被置位线圈的状态依然可以保持，直到其复位信号的到来。应当注意的是，线圈数目 n 是指被置位的线圈共有 n 个，从被指定的位地址 bit 开始。

2) 立即置位操作指令

其梯形图由立即置位线圈、立即置位线圈位地址及立即置位线圈数目 n 构成；语句表

立即置位操作指令的功能：用立即置位指令访问输出点时，从指令所指出的位地址 bit 开始的 n 个（最多为 128 个）物理输出点被立即置位，同时相应的输出映像寄存器的内容也被刷新。

1) 复位 (非立即) 操作指令

$$\text{SI} \xrightarrow{\text{bit}} \left(\begin{matrix} \text{SI} \\ n \end{matrix} \right) \text{SI bit, } n$$
$$\frac{\text{bit}}{R \text{ bit, } n} \left(\begin{matrix} R \\ n \end{matrix} \right)$$

图 8-18 复位操作指令

2) 立即复位操作指令

立即复位操作指令的功能：用立即复位指令访问输出点时，从指令所指出的位地址 bit 开始的 n 个（最多为 128 个）物理输出点被立即复位，同时相应的输出映像寄存器的内容被刷新。

1) 上微分操作指令

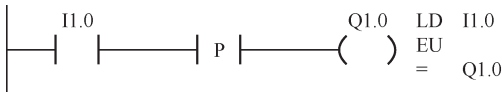
$$\text{RI} \text{ bit, } n \text{ } \left(\begin{array}{c} \text{RI} \\ n \end{array} \right) \text{ bit}$$


图 8-20 上微分操作指令

• 219 •

2) 下微分操作指令

其梯形图由常开触点加微分符“N”构成；语句表形式由上微分操作码“ED”构成，如图 8-21 所示。

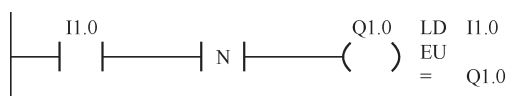


图 8-21 下微分操作指令

下微分操作指令的功能：下微分是指某个操作数由 1 变为 0 的过程，即出现下降沿的过程，下微分指令就是在这个下降沿上形成一个 ON、一个扫描周期的脉冲。同样，接受该脉冲控制的指令需写在这一脉冲出现的语句之后。

7. 串联、并联操作指令

1) 串联电路的并联操作指令

其梯形图由多个触点串联构成一条支路，再与一系列支路相互并联构成复杂电路；语句表形式是在两个“与”逻辑的语句后面用操作码“OLD”连接起来，表示这两个“与”逻辑之间是“或”的关系，如图 8-22 所示。

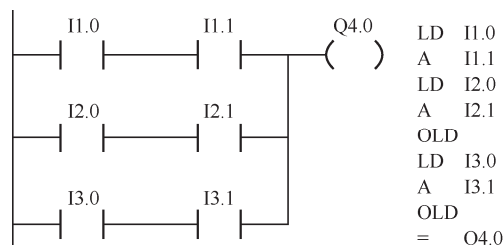


图 8-22 串联电路的并联操作指令

串联电路的并联操作指令的功能：串联电路的并联就是指多个串联电路之间又构成了“或”的逻辑关系，指令在执行时，先算出各支路的结果，再把这些结果进行“或”逻辑运算送到输出。

2) 并联电路的串联操作指令

其梯形图由多个触点并联构成一局部电路，再由一系列这样的局部电路相互串联构成复杂电路；语句表形式是在两个“或”逻辑语句后面用操作码“ALD”连接起来，表示这两个“或”逻辑之间是“与”的关系，如图 8-23 所示。

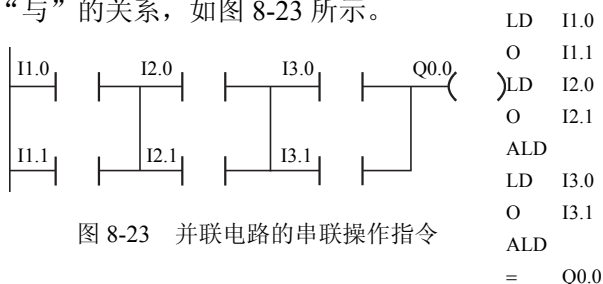


图 8-23 并联电路的串联操作指令

并联电路的串联操作指令的功能：并联电路的串联是指多个并联电路之间又构成了“与”的逻辑关系，指令在执行时，先算出各并联局部电路的结果，再把这些结果进行“与”逻辑运算送到输出。

8. 定时器指令

S7—200 可编程控制器提供了三种定时器，分别为接通延时定时器（TON）、带有记忆的接通延时定时器（TONR）及断开延时定时器（TOF）。这些定时器分布于 S7-200PLC 的 T 区。

1) 接通延时定时器（TON）

其梯形图由定时器标识符 TON、启动电平输入端 IN、时间设定输入端 PT 及定时器编号 Tn 构成；语句表形式由操作码“TON”、定时器编号 Tn 及时间设定值 PT 构成，如图 8-24 所示。

接通延时定时器（TON）的功能原理：当定时器的启动信号 IN 的状态为 0 时，定时器的当前值 SV=0，定时器 Tn 的状态也是 0（常开触点断开，常闭触点闭合），定时器没有工作。

当 Tn 的启动信号由 0 变为 1 时，定时器开始工作，每过一个时基时间，定时器的当前值 SV=SV+1，当定时器的当前值 SV 大于等于定时器的设定值 PT 时，定时器的延时时间到了，这时定时器的状态由 0 转换为 1，在定时器输出状态改变后，定时器继续计时，直到 SV=32 767（最大值）时，才停止计时，SV 将保持不变。只要 SV 大于等于 PT 值，定时器的状态就为 1，如果不满足这个条件，定时器的状态应为 0。

2) 带有记忆的接通延时定时器（TONR）

其梯形图由定时器标识符 TONR、启动电平输入端 IN、时间设定输入端 PT 及定时器编号 Tn 构成；语句表形式由操作码“TONR”、定时器编号 Tn 及时间设定值 PT 构成，如图 8-25 所示。

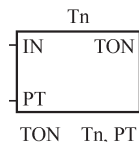


图 8-24 接通延时定时器（TON）

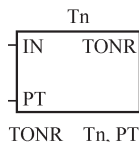


图 8-25 带有记忆的接通延时定时器（TONR）

带有记忆的接通延时定时器（TONR）的功能原理：此定时器的原理与接通延时定时器大体相同，当 IN 信号由 1 变为 0 时，则 SV 被复位（SV=0），Tn 状态也为 0。它们的不同之处在于，带有记忆接通延时定时器的 SV 值是可以记忆的。当 IN 从 0 变为 1 后，维持的时间不足以使得 SV 达到 PT 值时，IN 从 1 变为 0，这时 SV 可以保持，IN 再次从 0 变为 1 时，SV 在保持值的基础上累积，当 SV 等于大于 PT 值时，Tn 的状态仍可由 0 变为 1。

3) 断开延时定时器（TOF）

其梯形图由定时器标识符 TOF、启动电平输入端 IN、时间设定输入端 PT 及定时器编

号 T_n 构成；语句表形式由操作码“TOF”、定时器编号 T_n 及时间设定值 PT 构成，如图 8-26 所示。

断开延时定时器（TOF）的功能原理：当定时器的启动信号 IN 的状态为 1 时，定时器的当前值 $SV=0$ ，定时器 T_n 的状态也是 1，定时器没有工作。

当 T_n 的启动信号由 1 变为 0 时，定时器开始工作，每过一个时基时间，定时器的当前值 $SV=SV+1$ ，当定时器的当前值 SV 大于等于定时器的设定值 PT 时，定时器的延时时间到了，这时定时器的状态由 1 转换为 0，在定时器输出状态改变后，定时器停止计时， SV 将保持不变，定时器的状态就为 0。当 IN 信号由 0 变为 1 后， SV 被复位（ $SV=0$ ）， T_n 状态也变为 1。

9. 计数器指令

S7-200 可编程控制器提供了三种计数器，分别为增计数器（CTU）、减计数器（CTD）及增减计数器（CTUD）。这些计数器分布于 S7-200PLC 的 C 区。

1) 增计数器（CTU）

其梯形图由增计数器标识符 CTU、计数脉冲输入端 CU、增计数器复位信号输入端 R、增计数器的设定值 PV 和计数器编号 C_n 构成；语句表形式由增计数器操作码“CTU”、计数器编号 C_n 和增计数器的设定值 PV 构成，如图 8-27 所示。

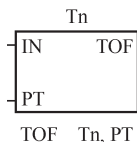


图 8-26 断开延时定时器（TOF）

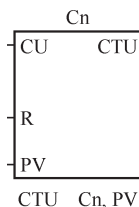


图 8-27 增计数器（CTU）

增计数器（CTU）的功能原理：R=1 时，当前值 $SV=0$ ， C_n 状态为 0；R=0 时，计数器开始计数。CU 端有一个输入脉冲上升沿到来，计数器的 $SV=SV+1$ ；当 $SV \geq PV$ 时， C_n 状态为 1，CU 端再有脉冲到来时， SV 继续累加，直到 $SV=32\ 767$ 时，停止计数；R=1 时，计数器复位， $SV=0$ ， C_n 状态为 0。

2) 减计数器（CTD）

其梯形图由减计数器标识符 CTD、计数脉冲输入端 CD、减计数器的装载输入端 LD、减计数器的设定值 PV 和计数器编号 C_n 构成；语句表形式由减计数器操作码“CTD”、计数器编号 C_n 和减计数器的设定值 PV 构成，如图 8-28 所示。

减计数器（CTD）的功能原理：LD=1 时，其计数器的设定值 PV 被装入计数器的当前值寄存器，此时 $SV=PV$ ， C_n 状态为 0；LD=0 时，计数器开始计数。CD 端有一个输入脉冲上升沿到来，计数器的 $SV=SV-1$ 。当 $SV=0$ 时， C_n 状态为 1，并停止计数；LD=1 时，再一次装入 PV 值之后， $SV=PV$ ，计数器复位， C_n 状态为 0。

3) 增减计数器 (CTUD)

其梯形图由增减计数器标识符 CTUD、增计数脉冲输入端 CU、减计数脉冲输入端 CD、增减计数器的复位端 R、增减计数器的设定值 PV 和计数器编号 Cn 构成；语句表形式由增减计数器操作码“CTUD”、计数器编号 Cn 和增减计数器的设定值 PV 构成，如图 8-29 所示。

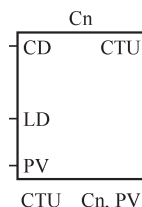


图 8-28 减计数器 (CTD)

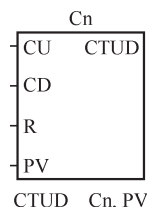


图 8-29 增减计数器 (CTUD)

增减计数器 (CTUD) 的功能原理：R=1 时，当前值 SV=0，Cn 状态为 0；R=0 时，计数器开始计数：当 CU 端有一个输入脉冲上升沿到来，计数器 SV=SV+1。当 SV≥PV 时，Cn 状态为 1，CU 端再有脉冲到来时，SV 继续累加，直到 SV=32 767 时，停止计数。当 CD 端有一个输入脉冲上升沿到来，计数器的 SV=SV-1。当 SV<PV 时，Cn 状态为 0，CD 端再有脉冲到来时，计数器的当前值仍不断地递减；R=1 时，计数器复位，SV=0，Cn 状态为 0。

10. 逻辑堆栈指令

S7-200PLC 使用一个 9 层的堆栈来处理所有的逻辑操作。堆栈是一组存放和取出数据的暂存单元，特点是“先进后出，后进先出”。每进行一次入栈操作，新值放入栈顶，栈底值丢失，而每进行一次出栈操作，栈顶值弹出，栈底值补进随机数。逻辑堆栈指令一般用来完成对触点的复杂连接。

西门子公司的系统手册把 ALD、OLD、LPS、LRD、LPP 和 LDS 等指令都归纳为逻辑堆栈指令，主要用语句表编程，使用梯形图或功能块图编程时，系统会自动插入相关的逻辑堆栈指令。ALD 和 OLD 前面已做介绍，这里只介绍其他四个指令。

1) 逻辑入栈指令 LPS

语句表形式为 LPS，不带操作数。执行该指令将复制栈顶的值并将这个值推入栈顶，原堆栈中各级栈值依次下压一级，栈底值将丢失。

2) 逻辑读栈指令 LRD

语句表形式为 LRD，不带操作数。执行该指令将把第二级栈的值复制到栈顶，堆栈没有入栈、出栈操作，只是栈顶的值被第二级栈的值覆盖。

3) 逻辑出栈指令 LPP

语句表形式为 LPP，不带操作数。执行该指令将把栈顶的值弹出，原堆栈各级栈值依次上弹一级，堆栈第二级的值成为新的栈顶值，而栈底值变为不确定数值。

4) 装入堆栈指令 LDS

语句表形式为 LDS n，操作数 n 表示第 n 级栈，范围是 0~8。执行该指令将复制堆栈中第 n 级的栈值到栈顶，原堆栈各级栈值依次下压一级，栈底值将丢失。

LPS、LRD、LPP 和 LDS 逻辑指令的堆栈操作过程如图 8-30 所示。

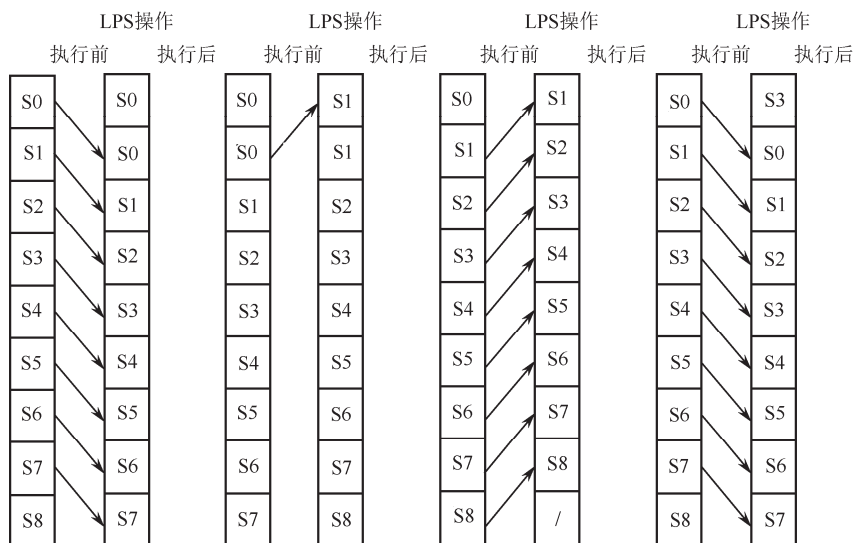


图 8-30 LPS、LRD、LPP 和 LDS 逻辑指令的堆栈操作过程（“/”表示不定值）

11. 比较操作指令

比较操作指令按操作数类型可分为字节比较、字比较、双字比较和实数比较。比较指令的梯形图由比较数 1 (IN1)、比较数 2 (IN2)、比较关系符和比较触点构成。其语句表形式由比较操作码(字节比较“LDB”、字比较“LDW”、双字比较“LDD”和实数比较“LDR”)、比较关系符、比较数 1 (IN1) 和比较数 2 (IN2) 构成。比较符有等于(=)、大于(>)、小于(<)、不等(<>)、大于等于(>=)、小于等于(<=)，相应的梯形图和语句表形式如图 8-31 所示。

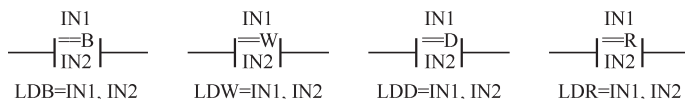


图 8-31 比较操作指令（比较符为“等于”时）

比较操作指令的功能：当比较数 1 (IN1) 和比较数 2 (IN2) 的关系符合比较符的条件时，比较触点闭合，后面的电路被接通。否则比较触点断开，后面的电路不接通。

操作数类型的范围如下。

(1) 字节比较 IN1/IN2: IB、QB、MB、SMB、VB、SB、LB、AC、常数、*VD、*AC、*LD。

(2) 字比较 IN1/IN2: IW、QW、MW、SMW、T、C、VW、LW、AIW、AC、常数、*VD、*AC、*LD。

(4) 实数比较 IN1/IN2: ID、QD、MD、SMD、VD、LD、AC、常数、*VD、*AC、*LD。

12. 空操作指令

空操作指令的梯形图由标识符 NOP 和 n 构成, 语句表形式由操作码 “NOP” 和操作数 n 构成, 如图 8-32 所示。

空操作指令的功能：本指令不作任何逻辑操作，故称为空操作，也不使用继电器，无须操作数。该指令应用于在程序中留出一个地址，以便调试程序时插入指令，还可用于微调扫描时间。操作数 n 的范围为 0~255。

13. 结束及暂停指令

结束指令的梯形图由结束条件和标识符 END 构成, 语句表形式由指令操作码“END”构成, 如图 8-33 所示。

结束指令的功能:可以根据前面的逻辑关系,终止用户主程序。此结束指令为有条件结束指令,可以用在主程序中使用,但是不能在子程序或中断程序中使用,STEP7-Micro/WIN32软件会自动在主程序结尾添加无条件结束语句。

暂停指令的梯形图由暂停条件和标识符 STOP 构成,语句表形式由指令操作码“STOP”构成,如图 8-34 所示。

暂停指令的功能: 暂停指令能够引起 CPU 方式发生变化, 从 RUN 到 STOP, 从而可以立即终止程序的执行。如果暂停指令在中断程序中执行, 那么该中断立即终止并且忽略所有挂起的中断, 继续扫描程序的剩余部分, 在本次扫描的最后完成 CPU 从 RUN 到 STOP 的转变。

14. 警戒时钟刷新指令

警戒时钟刷新指令又称为看门狗复位指令 (Watchdog Reset), 其梯形图由看门狗复位条件和标识符 WDR 构成, 语句表形式由操作码 “WDR” 构成, 如图 8-35 所示。

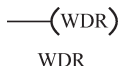
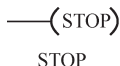
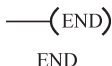
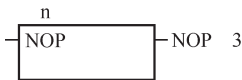


图 8-35 警戒时钟刷新指令

警戒时钟刷新指令的功能：允许 CPU 的看门狗定时器重新被触发，在没有看门狗错误的情况下就可以增加一次扫描所允许的时间。

使用 **WDR** 指令时要小心，因为如果用循环指令去阻止扫描完成或过度地延迟扫描完成时间，那么在终止本次扫描之前，下列操作过程将被禁止：通信（自由端口方式除外）；I/O 更新（立即 I/O 除外）；强制更新；SM 位更新（SM0、SM5、SM29 不能被更新）；运行时间诊断；扫描时间超过 25 s，10 ms 和 100 ms 定时器将不会正确累计时间；中断程序中的 **STOP** 指令。

15. 跳转和标号指令

在程序执行时，由于条件的不同，可能会产生一些分支，这时就需要用跳转操作来实现，跳转操作由跳转指令和标号指令两部分构成。

跳转指令的梯形图由跳转条件、标识符 **JMP** 和跳转标号 **n** 构成，语句表形式由操作码“**JMP**”和跳转标号 **n** 构成；标号指令的梯形图由标识符 **LBL** 和标号 **n** 构成，语句表形式由操作码“**LBL**”和标号 **n** 构成，如图 8-36 所示。

指令功能：跳转指令（**JMP**）可使程序流程转到同一程序中的具体标号（**n**）处，当这种跳转执行时，栈顶的值总是逻辑 1；标号指令（**LBL**）标记跳转目的地的位置（**n**），操作数 **n** 的范围为 0~255，数据类型 **WORD**。跳转和标号指令必须用在主程序、子程序或中断程序中，不能从主程序跳到子程序或中断程序，同样不能从子程序或中断程序跳出。

16. 子程序指令

子程序指令由子程序调用和返回指令两部分组成。

子程序调用指令的梯形图由子程序调用允许端 **EN**、子程序名构成，语句表形式由操作码“**CALL**”和子程序名构成；子程序返回指令的梯形图由子程序返回条件和返回标识符 **RET** 构成，语句表形式由操作码“**CRET**”构成，如图 8-37 所示。

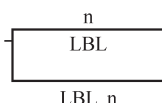
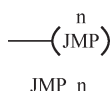


图 8-36 跳转和标号指令



图 8-37 子程序指令

子程序指令的功能：子程序调用指令把程序控制权交给子程序 **SBR_0**，可以带参数或不带参数。在 STEP7-Micro/WIN32 软件中，可以通过选择 **Edit>Insert> Subroutine** 加入一个子程序；子程序返回指令（**CRET**），根据该指令前面的逻辑关系决定是否终止子程序，执行完子程序以后控制程序回到子程序调用指令的下一条指令。

17. 循环指令

循环指令由 **FOR** 指令和 **NEXT** 指令两部分构成，**FOR** 和 **NEXT** 指令必须成对使用。

FOR 指令的梯形图由标识符 **FOR**、指令允许端 **EN**、循环起始值 **INIT**、循环终止值 **FINAL**、循环计数器 **INDX** 构成；语句表形式由操作码“**FOR**”、循环计数器 **INDX**、循环起始值 **INIT** 和循环终止值 **FINAL** 构成。

NEXT 指令的梯形图由标识符 **NEXT** 构成，语句表形式由操作码“**NEXT**”构成，如图 8-38 所示。

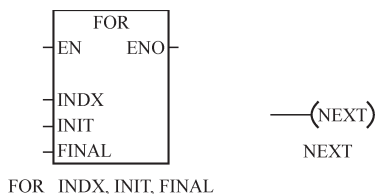


图 8-38 循环指令

FOR 指令和 NEXT 指令必须成对使用。FOR 标记循环的开始，NEXT 标记循环的结束并且置栈顶值为 1。必须给 FOR 指令指定当前循环计数值 (INDX)、初值 (INIT) 和终值 (FINAL)。

NEXT 指令标记循环的结束。

例如，给定初值（INIT）为 1，终值（FINAL）为 10，那么随着当前计数值（INDX）从 1 增加到 10，FOR 与 NEXT 之间的指令被执行 10 次。如果初值大于终值，那么循环体不被执行；每执行一次循环体，当前计数值增加 1，并且将其结果同终值作比较，如果大于终值，那么终止循环。

18. 顺序控制继电器指令

顺序控制继电器指令包括三条指令：顺控开始指令 SCR、顺控转换指令 SCRT 和顺控结束指令 SCRE。顺控程序段从 SCR 开始，到 SCRE 结束。

1) 顺控开始指令 (SCR)

其梯形图由标识符 SCR 和顺控继电器 S_n 构成；语句表形式由操作码“LSCR”和顺控继电器 S_n 构成，如图 8-39 所示。

顺控开始指令功能：当顺控继电器 $S_n=1$ 时，启动 SCR n 段的顺控程序，顺控程序从标记 SCR n 开始，到 SCRE 指令结束。在执行 SCR n 段顺控程序之前，一定要将 S_n 置位。

2) 顺控转换指令 (SCRT)

其梯形图由标识符 SCRT 和顺控继电器 S_n 构成; 语句表形式由操作码“SCRT”和顺控继电器 S_n 构成, 如图 8-40 所示。

顺控转换指令的功能：在执行 SCRE 之前，SCRT 指令确定下一个 SCR 位，即设定下一个 n 位。在执行 SCRT 指令时，就结束前一个 SCR 顺控程序段，而启动下一个 SCR 顺控程序段。

3) 顺控结束指令 (SCRE)

其梯形图由标识符 SCRE 构成；语句表形式由操作码“SCRE”构成，如图 8-41 所示。

顺控结束指令的功能：执行 SCRE 指令就是结束本 SCR_n 的顺控程序段。

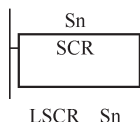


图 8-39 顺控开始指令

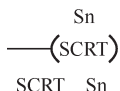


图 8-40 顺控转换指令

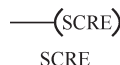


图 8-41 顺控结束指令

8.3.3 PLC 的功能指令

PLC 除了有丰富的逻辑指令外，还有丰富的功能指令。实际上，现在的 PLC 就是一个计算机控制系统。为了满足工业控制的要求，PLC 生产厂家为 PLC 增添了过程控制、数据处理和特殊功能的指令，这些指令统称为功能指令（Function Instruction），这些功能指令的出现，极大地拓宽了 PLC 的应用范围，增加了 PLC 编程的灵活性。

1. 加法指令（Add）

加法指令是对有符号数进行相加操作。

加法指令把两个输入端（IN1、IN2）指定的数相加，结果送到输出端（OUT）指定的存储单元中，包括整数加法、双整数加法和实数加法。它们对应的操作数数据类型分别是有符号整数（INT）、有符号双整数（DINT）和实数（REAL），如图 8-42 所示。

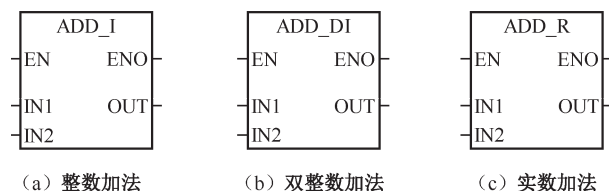


图 8-42 加法指令

执行加法操作时，将操作数 IN2 与 OUT 共用一个地址单元，因而在 STL 中是 $IN1 + OUT = OUT$ ；但在 LAD 中是 $IN1 + IN2 = OUT$ 。

2. 减法指令（Subtract）

减法指令是对有符号数进行相减操作。

减法指令把两个输入端（IN1、IN2）指定的数相减，结果送到输出端（OUT）指定的存储单元中去。它可以分为整数、双整数、实数减法指令。它们各自对应的操作数分别是有符号整数（INT）、有符号双整数（DINT）和实数（REAL），如图 8-43 所示。

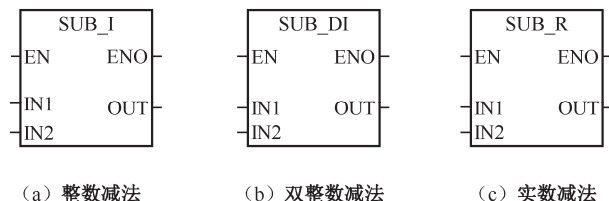


图 8-43 减法指令

执行减法操作时，将操作数 IN1 与 OUT 共用一个地址单元，因而在 STL 中是 $OUT - IN2 = OUT$ ；但在 LAD 中是 $IN1 - IN2 = OUT$ 。

3. 乘法指令

1) 一般乘法指令（Multiply）

一般乘法指令是对有符号数进行相乘运算，它包括整数乘法、双整数乘法和实数乘法。它们各自对应的操作数分别是有符号整数（INT）、有符号双整数（DINT）和实数（REAL），如图 8-44（a）所示（图中□处可为 I、DI 或 R）。

执行乘法操作时，将操作数 IN2 与 OUT 共用一个存储地址单元，因而在 STL 中是 $IN1 \times OUT = OUT$ ；但在 LAD 中是 $IN1 \times IN2 = OUT$ 。

2) 完全整数乘法 (Multiply Integer to Double Integer)

完全整数乘法是将两个单字长（16 位）的符号整数 IN1 和 IN2 相乘，产生一个 32 位双整数乘积，并送到输出端（OUT）指定的存储单元中去，如图 8-44（b）所示。

完全乘法指令输入数据类型为 INT，输出数据类型为 DINT。

执行完全乘法操作时，将操作数 IN2 和 OUT 的低 16 位共用一个存储地址单元。因而在 STL 中是 $IN1 \times OUT = OUT$ ；但在 LAD 中是 $IN1 \times IN2 = OUT$ 。

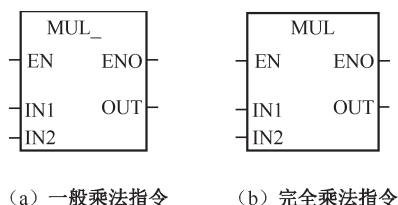


图 8-44 乘法指令和完全乘法指令

加法、减法、乘法指令影响的特殊存储器位: SM1.0 (零)、SM1.1 (溢出)、SM1.2 (负)。

4. 除法指令

1) 一般除法指令 (Divide)

一般除法指令是对有符号数进行相除操作。

一般除法指令将两个输入端（IN1、IN2）指定的数相除，结果送到输出端（OUT）指定的存储单元中去。

一般除法指令可以分为整数除法、双整数除法和实数除法指令。它们各自对应的操作数分别是有符号整数 (INT)、符号双整数 (DINT) 和实数 (REAL)，如图 8-45 (a) 所示 (图中□处可为 I、DI 或 R)。

执行一般除法操作时，将操作数 IN1 和 OUT 的低 16 位共用一个存储地址单元。因而在 STL 中是 $OUT/IN2=OUT$ ；但在 LAD 中是 $IN1/IN2=OUT$ 。

2) 完全除法指令 (Divide Integer to Double Integer)

完全除法指令将两个 16 位的符号整数相除，产生一个 32 位的结果，其中低 16 位为商，高 16 位为余数。

完全除法指令输入数据类型为 INT，输出数据类型为 DINT，如图 8-45（b）所示。

执行完全除法操作时，将操作数 IN1 与输出 OUT 的低 16 位用的是同地址单元。因而在 STL 中是 $OUT/IN2=OUT$ ；但在 LAD 中是 $IN1/IN2=OUT$ 。

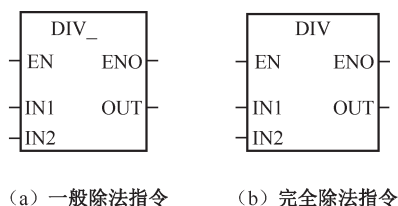


图 8-45 一般除法指令和完全除法指令

除法指令影响的特殊存储器位：SM1.0（零）、SM1.1（溢出）、SM1.2（负）、SM1.3（除数为0）。

5. 自增/自减指令

自增/自减指令即加1和减1指令，它是对无符号或者有符号整数进行自动加1或减1的操作，并把数据结果存放到输出单元（OUT），数据长度可以是字节、字或双字。其中字节增减是对无符号数操作。

1) 自增指令（Increment）

自增指令包括字节自增、字自增和双字自增指令。字节自增指令的输入/输出均为字节，字自增指令的输入/输出均为 INT，双字自增指令的输入/输出均为 DINT，如图 8-46（a）所示（图中□处可为 B、W、DW）。

执行自增指令操作时，将操作数 IN 和 OUT 共用一个地址单元，因而在 STL 中是 $OUT+1=OUT$ ；但在 LAD 中是 $IN+1=OUT$ 。

2) 自减指令（Decrement）

自减指令包括字节自减、字自减和双字自减指令。字节自减指令输入/输出均为字节，字自减指令输入/输出均为 INT，双字自减指令输入/输出均为 DINT，如图 8-46（b）所示（图中□处可为 B、W、DW）。

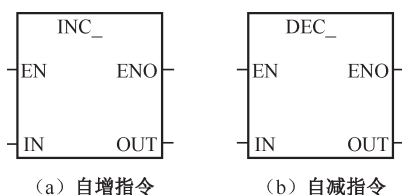


图 8-46 自增/自减指令

执行自减指令操作时，将操作数 IN 和 OUT 共用一个地址单元，因而在 STL 中是 $OUT-1=OUT$ ；但在 LAD 中是 $IN-1=OUT$ 。

字节自增和自减指令影响的特殊存储器位：SM1.0（零）、SM1.1（溢出）。

字、双字自增和自减指令影响的特殊存储器位：SM1.0（零）、SM1.1（溢出）、SM1.2（负）。

6. 数学函数指令

S7-200 PLC 的数学函数指令有平方根、自然对数、指数、正弦、余弦和正切，如图 8-47 所示。运算输入/输出数据均为实数（REAL），结果大于 32 位二进制数表示的范围时产生溢出。

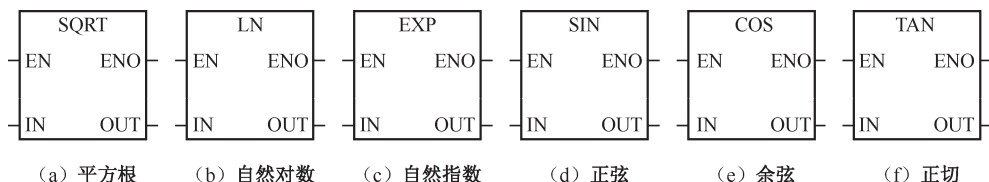


图 8-47 数学函数指令

1) 平方根 (Square Root) 指令

实数的开方指令 (SQRT)，把输入端 (IN) 的 32 位实数开方，得到 32 位实数结果，并把结果存放到输出端 (OUT) 指定的存储单元中去。

2) 自然对数 (Natural Logarithm) 指令

自然对数指令 (LN)，将输入端 (IN) 的 32 位实数取自然对数，结果存放到输出端 (OUT) 指定的存储单元中去。

求常数对数 ($\lg x$ ，即以 10 为底的对数) 时，只要将其自然对数 ($\ln x$) 除以 2.302 585 即可。

3) 自然指数 (Natural Exponential) 指令

自然指数指令 (EXP)，将输入端 (IN) 的 32 位实数取以 e 为底的指数，结果存放到输出端 (OUT) 指定的存储单元中去。

自然指数指令与自然对数指令相配对，即可完成以任何实数为底的指数运算。

例如：

$$5^3 = \text{EXP}(3 \times \ln 5) = 125; \sqrt[3]{125} = \text{EXP}((\ln 125)/3) = 5$$

4) 正弦 (sin)、余弦 (cos) 和正切 (tan) 指令

正弦、余弦、正切指令，对输入端 (IN) 指定的 32 位实数的弧度值取正弦、余弦和正切，结果存入输出端 (OUT) 指定的存储单元。

如果输入值为角度值，应将角度值转化为弧度值。方法是使用 MUL_R 指令，把角度值乘以 $\pi/180^\circ$ 即可。

数学功能指令影响的特殊存储器位：SM1.0 (零)、SM1.1 (溢出)、SM1.2 (负数)。

8.3.4 逻辑运算指令

逻辑运算对逻辑数 (无符号数) 进行处理，按照运算性质的不同，有逻辑与、逻辑或、逻辑异或和取反等。参与运算的操作数可以是字节、字或者双字。

1. 逻辑“与”运算指令 (Logic And)

逻辑“与”指令，对两个输入 (IN1、IN2) 的数据按位做“与”运算，结果存入 OUT。

逻辑“与”指令，按操作数的数据类型可分字节“与”、字“与”和双字“与”指令，如图 8-48 (a) 所示 (图中口处可为 B、W 或 DW)。

逻辑“与”运算把两个单字节长的输入逻辑数按位相“与”，得到一个字节的逻辑数。输入/输出的数据类型均为字节 (字或双字)。在 STL 中 OUT 和 IN2 使用同一个存储单元。

2. 逻辑“或”运算指令 (Logic Or)

逻辑“或”指令，对两个输入 (IN1、IN2) 的数据按位做“或”运算，结果存入 OUT。

逻辑“或”指令，按操作数的数据类型可分字节“或”、字“或”和双字“或”指令，如图 8-48 (b) 所示 (图中口处可为 B、W 或 DW)。

逻辑“或”运算把两个单字节长的输入逻辑数按位相“或”，得到一个字节的逻辑数。输入/输出的数据类型均为字节（字或双字）。在 STL 中 OUT 和 IN2 使用同一个存储单元。

3. 逻辑“异或”运算指令（Logic Exclusive Or）

逻辑“异或”指令，对两个输入（IN1、IN2）的数据按位做“异或”运算，结果存入 OUT。

逻辑“异或”指令，按操作数的数据类型可分字节“异或”、字“异或”和双字“异或”指令，如图 8-48（c）所示（图中□处可为 B、W 或 DW）。

逻辑“异或”运算把两个单字节长的输入逻辑数按位相“异或”，得到一个字节的逻辑数。输入/输出的数据类型均为字节（字或双字）。在 STL 中 OUT 和 IN2 使用同一个存储单元。

4. 取反指令（Logic Invert）

取反指令，对输入（IN）的数据按位取反，结果存入 OUT。

取反指令，按操作数的数据类型可分字节、字和双字取反，如图 8-48（d）所示（图中□处可为 B、W 或 DW）。

取反运算把一个单字节长的输入逻辑数按位取反，得到一个字节的逻辑数。输入/输出的数据类型均为字节（字或双字）。

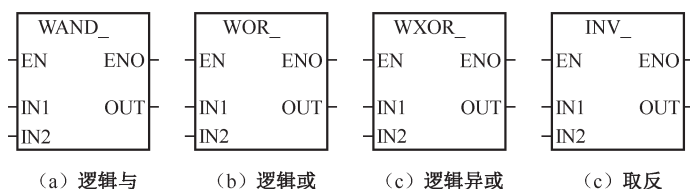


图 8-48 逻辑运算指令

8.3.5 传送指令

1. 数据传送指令（Move）

数据传送指令把输入（IN）指定的数据传送到输出（OUT），传送过程中数据值保持不变。数据传送指令按操作数的数据类型可以分为字节传送（MOVB）、字传送（MOVW）、双字传送（MOVD）和实数传送（MOVR）指令，如图 8-49 所示。

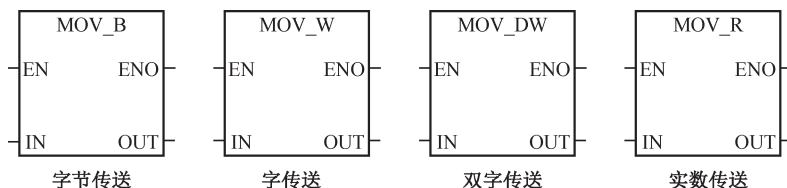


图 8-49 数据传送指令

2. 数据块传送指令 (Block Move)

数据块传送指令把从输入(IN)指定地址的 N 个连续字节、字、双字的内容传送到从输出(OUT)指定地址开始的 N 个连续字节、字、双字的存储单元中去。传送过程中各存储单元的内容不变。 N 的数据范围为 1~255。数据块传送指令按操作数的数据类型可以分为字节块传送(BMB)、字块传送(BMW)和双字块传送(BMD)指令,如图 8-50 所示。

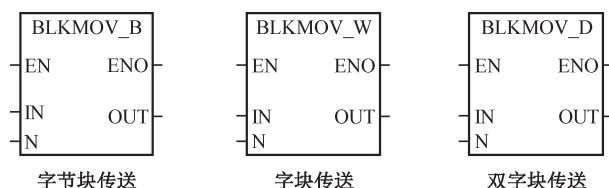


图 8-50 数据块传送指令

3. 传送字节立即读、写指令 (Move By Immediate)

传送字节立即读 (BIR) 指令, 读取输入端 (IN) 指定字节地址的物理输入点 (IB) 的值, 并写入输出端 (OUT) 指定字节地址的存储单元中。

传送字节立即写(BIW)指令,读取输入端(IN)指定字节地址的内容写入输出端(OUT)指定字节地址的物理输出点(OB)。

传送字节立即读、写指令如图 8-51 所示。传送字节立即读、写指令操作数数据类型为字节型 (BYTE)。

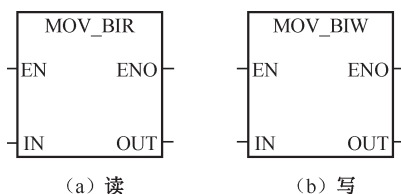


图 8-51 传送字节立即读、写指令

4. 字节交换指令 (Swap Bytes)

字节交换指令，把输入（IN）指定字的高字节内容与低字节内容互相交换。交换结果仍存放在输入（IN）指定的地址中。交换字节指令如图 8-52 所示。操作数数据类型为无符号整数型（WORD）。

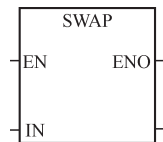


图 8-52 字节交换指令

8.3.6 移位和循环移位指令

该类指令包括左移和右移、左循环和右循环。在该类指令中，LAD 与 STL 指令格式中的缩写表示是不同的。移位和循环移位指令均为无符号数操作。

1. 移位指令（Shift）

该指令有左移和右移两种。根据所移位数的长度不同可以分为字节型、字型和双字型。移位数据存储单元的移出端与 SM1.1（溢出）相连，所以最后被移出的位放到 SM1.1 位存储单元。移位时，移出位进入 SM1.1，另一端自动补零。如在右移时，移位数据的最右端位移入 SM1.1，则左侧补 0。SM1.1 始终存放最后一次被移出的位，移位次数与移位数据的长度有关，如果所需移位次数大于移位数据的位数，则超出次数无效。如字左移时，若移位次数设定为 20，则指令实际执行结果只能移位 16 次，而不是设定值 20 次。如果移位操作使数据变为 0，则零存储器标志位（SM1.0）自动置位。

注意：移位指令在使用 LAD 编程时，OUT 可以是和 IN 不同的存储单元，但在使用 STL 编程时，因为只写一个操作数，所以实际上 OUT 就是移位后的 IN。

1) 右移指令

右移指令把输入端（IN）指定的数据右移 N 位，结果存入 OUT。

右移指令按操作数的数据类型可以分为字节、字、双字右移指令，如图 8-53 所示。

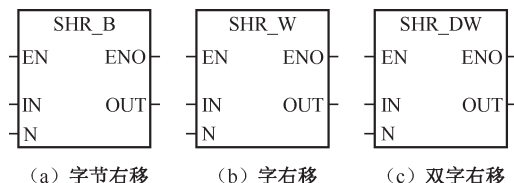


图 8-53 右移指令

2) 左移指令

左移指令把输入端（IN）指定的数据左移 N 位，结果存入 OUT。左移指令按操作数的数据类型可以分为字节、字、双字左移指令，如图 8-54 所示。

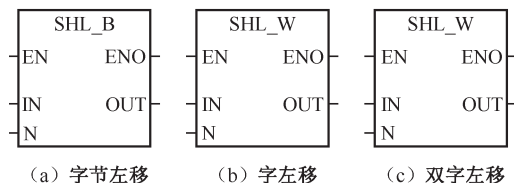


图 8-54 左移指令

字节、字和双字移位指令的实际最大可移动位数分别为 8、16、32。

2. 循环移位指令（Rotate）

循环移位指令包括循环左移和循环右移，循环移位位数的长度分别为字节、字或双字。循环数据存储单元的移出端与 SM1.1（溢出）相连，所以最后被移出的位放到 SM1.1 位存储单元。移位时，移出位进入 SM1.1，另一端自动补零。如在循环右移时，移位数据的最右端位移入最左端，同时又进入 SM1.1。SM1.1 始终存放最后一次被移出的位，移位次数

与移位数据的长度有关，如果所需移位次数大于移位数据的位数，则在执行循环之前，系统先对设定值取以数据长度为底的模，用小于数据长度的结果作为实际循环移位的次数。

1) 循环右移指令

循环右移指令把输入端（IN）指定的数据循环右移 N 位，结果存入 OUT。

循环右移指令按操作数的数据类型可以分为字节、字、双字循环右移指令，如图 8-55 所示。

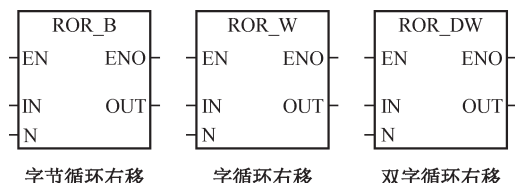


图 8-55 循环右移指令

2) 循环左移指令

循环左移指令把输入端（IN）指定的数据循环左移 N 位，结果存入 OUT。

循环左移指令按操作数的数据类型可以分为字节、字、双字循环左移指令，如图 8-56 所示。

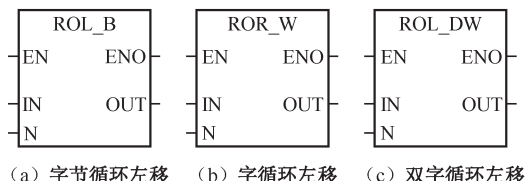


图 8-56 循环左移指令

执行循环移位后溢出位（SM1.1）的值就是最后一次循环移出位的值。如果移出位的结果是 0，零存储器位（SM1.0）就置位。移位和循环移位指令影响的特殊存储位：SM1.0（零）、SM1.1（溢出）。

3. 寄存器移位指令（Shift Register）

寄存器移位指令在梯形图中有 3 个数据输入端（见图 8-57），即 DATA 为数据输入，将该位的值移入移位寄存器；S_BIT 为移位寄存器的最低位端；N 指定移位寄存器的长度。每次使能输入有效时，在每个扫描周期内，整个移位寄存器移动一位。所以要用边沿跳变指令来控制使能端的状态，不然该指令就失去了应用的意义。

移位寄存器存储单元的移出端与 SM1.1（溢出）相连，所以最后被移出的位放在 SM1.1 位存储单元。移位时，移出位进入 SM1.1，另一端自动补上 DATA 移入位的值。

移位方向分为正向和反向移位。正向移位时长度 N 为正值，

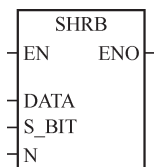


图 8-57 寄存器移位指令

移位是从最低字节的最低位（S_BIT）移入，从最高字节的最高位移出；反向移出时长度N为负值，移位是从最高字节的最高位移入，从最低字节的最低位（S_BIT）移出。

最高位的计算方法为 $[N \text{ 的绝对值} - 1 + (\text{S_BIT 的位号})] / 8$ ，余数即是最高位的位号，商与S_BIT的字节号之和即是最高位的字节号。

8.3.7 数据转换指令

可编程控制器中的主要数据类型包括字节、整数、双整数和实数。主要的码制有BCD码、ASCII码、十进制数和十六进制数。不同性质的指令对操作数的类型要求不同，因此，在指令使用之前需要将操作数转化成相应的类型，转换指令可以完成这样的任务。

1. BCD 码与整数的转换

BCD 码转换为整数指令（BCDI），将输入端（IN）指定的 BCD 码转换成整数，并将结果存放到输出端（OUT）指定的存储单元中去。输入数据的范围是 0~9 999（BCD 码）。

整数转换成 BCD 码指令（IBCD），将输入端（IN）指定的整数转换成 BCD 码，并将结果存放到输出端（OUT）指定的存储单元中去。输入数据的范围是 0~9 999。

图 8-58 所示是 BCD 码与整数的转换指令，它是无符号操作，指令影响的特殊存储器位：SM1.6（非法 BCD）。

2. 双字整数与实数的转换

双字整数与实数的转换指令如图 8-59 所示。

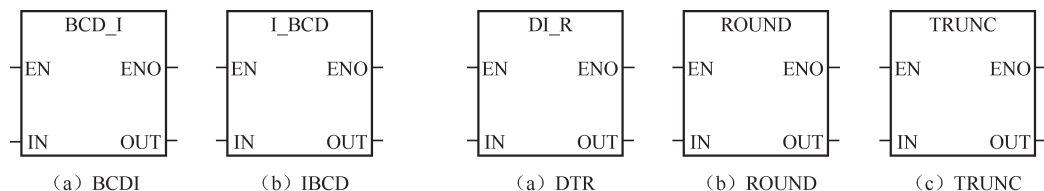


图 8-58 BCD 码与整数的转换指令

图 8-59 双整数与实数的转换指令

双字整数转化为实数指令（DTR），将输入端（IN）指定的 32 位有符号整数转换成 32 位实数，并将结果存放到输出端（OUT）指定的存储单元中去。

实数转化为双字整数指令可以分为四舍五入取整（ROUND）和舍去尾数后取整（TRUNC）指令。

ROUND 取整指令，将输入端（IN）指定的实数转换成有符号双字整数，并将结果存放到输出端（OUT）指定的存储单元中去。转换时实数的小数部分四舍五入。

TRUNC 取整指令，将输入端（IN）指定的 32 位实数舍去小数部分后，再转换成 32 位有符号双字整数，并将结果存放到输出端（OUT）指定的存储单元中去。

取整指令被转换的输入值应是有效的实数，如果实数的值太大，使输出无法表示，那么溢出位（SM1.1）被置位。

双整数与整数之间的转换指令如图 8-60 所示。

整数转化为双整数 (ITD) 指令, 把输入端 (IN) 的整数转换成双整数, 并存入 OUT。此时, 要进行符号扩展。

欲将整数转化为实数，可以先用 ITD 指令把整数转化为双整数，然后再用 DTR 指令把双整数转化为实数。

字节与整数的转换指令如图 8-61 所示。

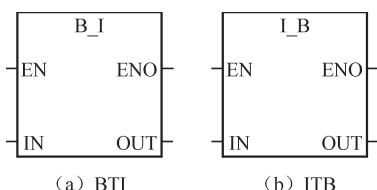


图 8-61 字节与整数的转换指令

整数转换成字节 (ITB) 指令，将输入端 (IN) 的无符号整数转换成一个字节型数据，并将结果存放到输出端 (OUT) 中去。被转换的值应是有效的整数，否则溢出位 (SM1.1) 被置位。

1. 编码指令 (Encode)

编码指令将字型输入数据 (IN) 的最低有效位 (值为 1 的位) 的位号输出到 OUT 所指定的字节单元的低 4 位, 即用半个字节来对一个字型数据 16 位中的“1”位有效位进行编码。输入数据类型为字, 输出的数据类型为字节。其指令格式如图 8-62 (a) 所示。

译码指令将字节型输入数据(IN)的低4位所表示的符号对OUT所指定的字单元的对应位置1,其他位不变,即对半个字节的编码进行译码,以选择一个字型。OUT为16位中的“1”位。

输入的数据类型为字节,输出数据类型为字。其指令格式如图 8-62 (b) 所示。

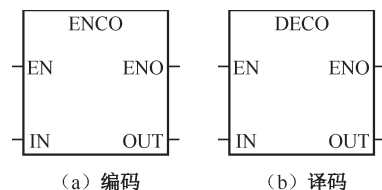


图 8-62 编码和译码指令

8.4 PLC 的程序设计

PLC 的程序设计通常采用梯形图设计法。梯形图类似电气控制图的形式，非常直观易懂，一般工程人员容易掌握，是 PLC 通用的程序设计方法。尽管各种 PLC 的指令系统、指令的助记符号不完全相同，但梯形图的设计方法基本相同。

PLC 编程也属于软件设计的范畴，所以这里先从软件设计的角度来总体阐明一下 PLC 的编程规范，再通过简单介绍梯形图和语句表两种常用的编程语言，使读者对 PLC 编程有个初步的认识。

8.4.1 软件设计概述

1. 软件设计的基本要求

软件设计的基本要求由 PLC 本身的特点，及其在工业控制中要求完成的具体控制功能决定的，软件设计的基本要求如下。

1) 紧密结合生产工艺

每个控制系统都是为了完成一定的生产过程控制而设计的。不同的生产工艺，具有不同的控制功能。哪怕是相同的生产过程，由于各设备的工艺参数不一样，控制实现的方式也就各不相同。可以说各种控制逻辑、运算都是由生产工艺决定的，所以程序设计人员都必须严格遵守生产工艺的具体要求来设计应用软件。

2) 熟悉控制系统的硬件结构

软件系统是由硬件系统决定的，不同系列的硬件系统，不可能采用同一种语言进行程序设计。即使相同的语言形式，其具体的指令也不一定相同。偶尔可以选择同一系列的 PLC，但由于型号或系统配置的不同，也要有不同的应用程序与之相对应，所以程序设计人员不能抛开硬件结构而单独地考虑软件，而应根据硬件系统而编制相应的应用程序。

3) 具备计算机和自动化两方面的知识

PLC 是以微处理器为核心的控制设备，无论是硬件还是软件都离不开计算机技术，控制系统的许多知识也是从计算机技术衍生出来的；同时，控制功能的实现也离不开自动控制技术，所以程序设计人员必须具备计算机和自动化控制两方面的知识。

2. 软件设计的基本原则

PLC 的软件设计是以系统要实现的工艺要求、硬件组成和操作方式等条件为依据来进行的，一般来说软件设计人员都要遵从以下几个基本原则：

(1) 设置了必要的参数后，对 CPU 外围设备的管理由系统自动完成。程序设计一般只需要考虑用户程序的设计。

(2) 要对输入/输出信号做统一操作，确定各个信号在一个扫描周期内的唯一状态，避免由同一个信号因状态的不同而引起的逻辑混乱。

(3) 由于 CPU 在每个周期内都固定进行某些窗口服务, 占用一定的机器时间, 所以周期时间不能无限制地缩短。

(4) 定时器的时间设定值不能小于周期扫描时间, 并且在定时器时间设定值不是平均周期时间的整数倍时, 可能会带来定时误差。

(5) 用户程序中如果多次对同一个参数进行赋值, 则只有最后一次操作有效, 前几次操作不影响实际输出。

以上几条是 PLC 程序设计的基本原则, 体现了 PLC 本身的特点及与其他控制设备的区别。在程序设计过程中, 编程人员应时刻牢记这几点。

3. 软件设计的基本内容

PLC 程序设计的基本内容一般来说包括参数表的定义、程序框图的绘制、程序清单的编制和程序说明书的编写四项内容。

1) 参数表的定义

参数表就是按照一定的格式对所设计系统的各个接口参数进行规定和整理出来的表格。PLC 编程所用的参数表所包含的内容基本相同, 一般由输入信号表、输出信号表、中间标志表和储存单元表构成。

输入/输出表要明显地标出模块的位置、信号端子号和信号的有效状态等; 中间标志表要给出信号地址、信号处理和信号的有效状态等; 存储单元表要含有信号地址和信号名称等。各个信号一般按信号地址从小到大的顺序排列。

总之, 参数表的定义尽量要便于使用, 尽可能详细易懂。

2) 程序框图的绘制

程序框图是根据工艺流程而绘制出来的控制过程方框图, 包括程序结构框图和控制功能框图。程序结构框图是全部应用程序中各功能单元的结构形式, 可以根据它去了解所有控制功能在整个程序中的位置; 而功能框图描述了某种控制在程序中的具体实现方法及它的控制信号流程。

绘制程序框图相当重要, 设计者可以根据程序框图编制实际的 control 程序, 而使用者也可以根据程序框图方便地阅读程序清单。所以, 设计程序时, 一般要求绘制程序框图。应先绘制程序结构框图, 再详细绘制各个控制功能框图, 实现各个控制功能。程序结构框图和功能框图二者缺一不可。

3) 程序清单的编制

可以说这一步是程序设计中最主要也是最重要的阶段, 程序清单编制的过程也就是各个控制功能具体实现的过程。设计者首先要根据 PLC 来选择相应的编程语言, 因为一般所选用的 PLC 不同, 其用于编程的指令系统也不同。选择了编程语言后, 就可以根据程序框图所规定的顺序和功能编写程序清单了。程序编制完后就可以对它进行调试, 直到符合工艺要求为止。

4) 程序说明书的编写

程序说明书是设计者对整个程序内容的注释性的综合说明,目的是为了更方便使用者了解其程序的基本结构和某些问题的处理方法。程序设计者需在说明书中大体阐释一下自己程序设计的依据、基本结构、各功能模块的原理,以及程序阅读方法和使用过程中应该注意的一些事项,此外还应该包含程序中所使用的注释符号、文字编写的含义和程序的测试情况。

一个好的程序说明书不但能帮助使用者学习和应用,也为将来的设备维修和改造带来了方便。

8.4.2 梯形图和语句表编程简介

在 PLC 中有多种可选的程序设计语言,包括梯形图、语句表、顺序功能流程图和功能块图等。

梯形图和语句表是 PLC 基本的程序设计语言,通常由一系列指令组成,用这些指令可以完成大多数简单的控制功能,如可以代替继电器、计数器、计时器完成顺序控制和逻辑控制等,通过扩展或增强指令集也能执行其他操作。

供 S7-200 使用的 STEP7-Micro/Win32 系列 PLC 支持 SIMATIC 和 IEC1131-3 两种基本类型的指令集, SIMATIC 是 PLC 专用的指令集,执行速度快,可使用梯形图、语句表、功能块图编程。IEC1131-3 是 PLC 编程语言标准, IEC1131-3 指令集中指令较少,只能使用梯形图和功能块图两种编程语言。SIMATIC 指令集的某些指令不是 IEC1131-3 中的标准指令。SIMATIC 指令和 IEC1131-3 中的标准指令系统并不兼容。

1. 梯形图编程

梯形图源于继电器逻辑控制系统的描述。在工业过程控制领域,电气技术人员对继电器逻辑控制技术较为熟悉,因此,由这种逻辑控制技术发展而来的梯形图受到了欢迎,并得到了广泛的应用。

梯形图与操作原理图相对应,具有直观性和对应性。与原有的继电器控制逻辑的不同点是,梯形图中的能流(Power Flow)不是实际意义的电流,内部的继电器也不是实际存在的继电器。因此,应用时需与原有继电器控制逻辑的有关概念区别对待。

在 PLC 的梯形图编程中,应用了两个基本概念,大家应该掌握。

(1) 软继电器的梯形图设计,主要是利用“软继电器”线圈的“吸—放”功能及触点的“通—断”功能来进行的。实际上, PLC 内部并没有继电器那样的实体,只有内部寄存器中每位触发器。根据计算机对信息的“存—取”原理来读出触发器的状态,或在一定条件下改变它的状态。对“软继电器”的线圈定义号只能有一个,而对它的触点状态,可作无数次的读出,既可常开又可常闭。

(2) 在梯形图中,并没有真实的电流流动。为了便于分析 PLC 的周期扫描原理及信息存储空间分布的规律,假想在梯形图中有“电流”流动,这就是“能流”。“能流”在梯形图中只能作单方向流动——从左向右流动,层次的变化只能先上后下。

梯形图的编程规则如下：

- (1) 每个继电器的线圈和它的触点均用同一编号，每个元件的触点使用时没有数量限制。
- (2) 梯形图每一行都是从左边开始，线圈接在最右边（线圈右边不允许再有接触点）。
- (3) 线圈不能直接接在左边母线上。
- (4) 在一个程序中，同一编号的线圈如果使用两次，称为双线圈输出，它很容易引起误操作，应尽量避免。

2. 语句表编程

语句表是用助记符来表达 PLC 的各种控制功能的。它类似于计算机的汇编语言，但又比汇编语言直观易懂，编程简单，因此，也是一种广泛应用的编程语言。它可以使用简易的编程器编程，但是比较抽象，一般与梯形图语言配合使用，互为补充。目前，大多数 PLC 都具有语句表编程功能，但是各个厂家生产的 PLC 所支持的语句表指令一般不相同，所以不能兼容。

对于语句表编程来说，语句是用户程序的基本单元，每条语句都规定了 CPU 该如何动作，实现什么功能。PLC 的语句表由操作码和操作数构成。

操作码告诉 CPU 要执行的功能，操作数提供执行过程中所需的参数。应该注意的是，有的操作码是没有操作数的。图 8-63 所示是语句表编程的一个例子。

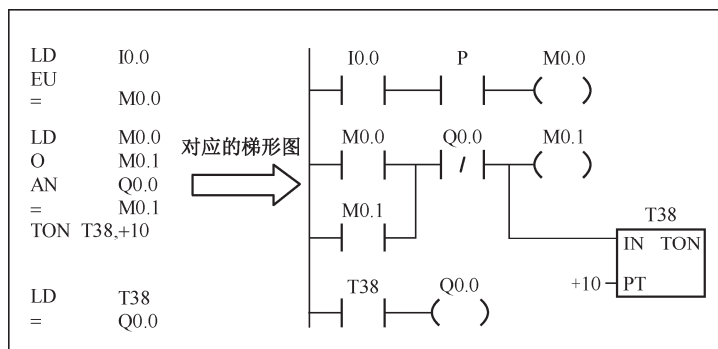


图 8-63 语句表编程举例

3. 梯形图与语句表编程的区别

利用 PLC 指令对梯形图编程时，可以把整个梯形图程序看成由许多的网络块组成，而每个网络块都始于左母线。所有的网络块组合在一起就是一个梯形图程序，这就是 S7-200PLC 编程的特点。

梯形图程序可以通过编程软件 STEP7-Mirco/Win 32 直接转换为语句表形式。在用语句表编程时，也允许以网络块（通过关键字 NETWORK）为单位进行编程。这种情况下，语句表程序与梯形图程序基本上是一一对应的，是可以通过软件互换的。但是，假设不是以每个独立的网络块为单位编程的，而是连续编写，那么通过编程软件 STEP7-Mirco/Win 32 是不能将梯形图程序和语句表程序相互转换的，这点一定要注意。

两种编程形式都很重要，大家一定都要掌握，特别是会手工把一个梯形图程序转换为语句表程序，这对于程序的理解很有帮助。

8.4.3 PLC 应用程序编制举例

1. 闪烁电路

闪烁效果为一个灯泡的发亮与熄灭，并且设定闪烁间隔为 1s。

采用 I0.0 外接灯泡电源开关 SB₁，Q0.0 外接驱动灯泡发光的继电器 KM。接通延时定时器采用时基为 100ms 的 T37 和 T38。

此电路的梯形图及语句表如图 8-64 所示。

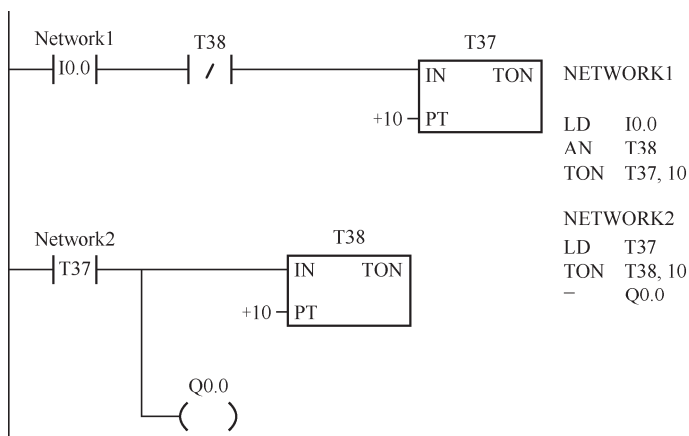


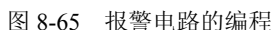
图 8-64 闪烁电路的梯形图及语句表

分析：接通电源开关 SB₁，常开触点 I0.0 闭合，由于 T37 和 T38 均为接通延时定时器，当启动信号 IN 为 0 时，定时器的状态也为 0，所以一开始常闭触点 T38 也闭合。紧接着定时器 T37 就开始计时，当计时到 1s 时，T37 由 0 变为 1 并保持不变，于是常开触点 T37 闭合，线圈 Q0.0 得电从而使灯泡发亮。

同时，定时器 T38 也开始计时，当计时到 1s 时，T38 由 0 变为 1 并保持不变，于是常闭触点 T38 断开，使得定时器 T37 复位，状态由 1 变为 0，常开触点 T37 断开，灯泡熄灭；同时也使得定时器 T38 复位，状态由 1 变为 0，常闭触点 T38 闭合，定时器 T37 由开始计时……如此反复，从而达到灯泡闪烁的目的。

2. 报警电路

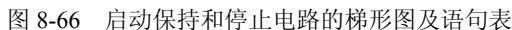
I0.0 外接报警启动信号，I0.1 外接报警复位按钮；输出 Q0.0 为报警蜂鸣器，Q0.1 为报警闪烁灯，闪烁效果为报警灯的亮与灭，间隔为 1s。此电路的梯形图及语句表如图 8-65 所示。



计数器 C3 的作用是, 当计数到 10 次后, 常闭触点 C3 断开, 警报停止 (蜂鸣器停止报警, 报警灯熄灭)。当然也可以通过复位按钮 (常闭触点 I0.1 断开) 解除警报。

采用 I0.1 外接启动按钮 SB₁, I0.2 外接停止按钮 SB₂, Q0.1 外接控制电动机的交流接触器 KM。

此电路的梯形图及语句表如图 8-66 所示。



分析：按一下启动按钮 SB_1 ，常开触点 $I0.1$ 闭合，使线圈 $Q0.1$ 得电，其常开触点 $Q0.1$ 闭合，维持线圈 $Q0.1$ 继续得电，从而使交流接触器 KM 通电，电动机运转。显然这个电路具有启动保持功能。

按一下停止按钮 SB_2 ，常闭触点 $I0.2$ 断开，使线圈 $Q0.1$ 断电，从而使交流接触器 KM 也断电，电动机停转。

4. 延时通断电路

$I0.0$ 接控制电路通断的按钮 SB_1 ，线圈 $Q0.0$ 接输出，如驱动一个灯泡。此电路的梯形图及语句表如图 8-67 所示。

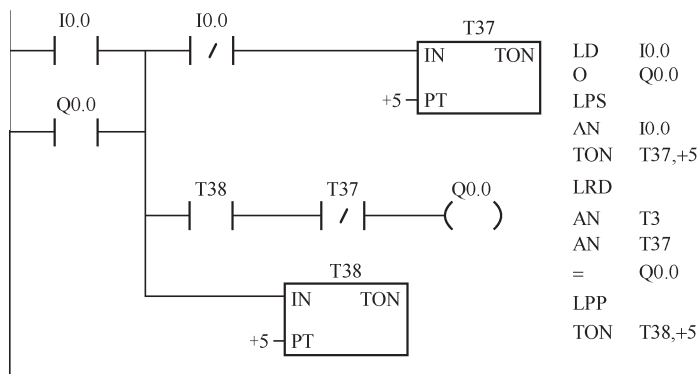


图 8-67 延时通断电路的梯形图及语句表

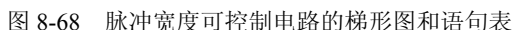
分析：接通按钮 SB_1 ，常开触点 $I0.0$ 闭合，常闭触点 $I0.0$ 断开，定时器 $T38$ 开始计时，0.5s 后， $T38$ 由 0 变为 1，并保持不变。常开触点 $T38$ 闭合，线圈 $Q0.0$ 得电，其常开触点 $Q0.0$ 闭合，维持线圈 $Q0.0$ 继续得电。从接通按钮 SB_1 到线圈 $Q0.0$ 得电，延时了 0.5s，故具有延时接通功能。

断开按钮 SB_1 ，常闭触点 $I0.0$ 闭合，定时器 $T37$ 开始计时，0.5s 后， $T37$ 由 0 变为 1，并保持不变，使得常闭触点 $T37$ 断开，线圈 $Q0.0$ 失电。从按钮 SB_1 断开到线圈 $Q0.0$ 失电，延时了 0.5s，故具有延时断开功能。

5. 脉冲宽度可控制电路

脉冲宽度可控制电路就是指在输入信号宽度不变的情况下，要求在每一个输入信号的上升沿产生一个宽度固定的脉冲，并且它的宽度可以调节，要求如果输入信号的两个上升沿之间的距离小于该脉冲宽度，则忽略输入信号的第二个上升沿。此电路的梯形图和语句表如图 8-68 所示。

分析：在程序中使用了上升沿脉冲指令即 S/R 指令。关键是找出 $Q0.0$ 的开启和关断条件，使其不论在 $I0.0$ 的宽度大于或小于 2s 时，都可以使 $Q0.0$ 的宽度为 2s。定时器 $T38$ 的计时输入逻辑在上升沿之间的距离小于该脉冲宽度时，对后产生的上升沿脉冲无效。 $T38$ 在计时到后产生一个信号复位 $Q0.0$ ，然后自己也复位，通过调节 $T38$ 的设定值就可以控制 $Q0.0$ 的宽度，该宽度不受 $I0.0$ 接通时间长短的影响。



S7-200PLC 提供的定时器最长时间一般不超过 1h,而在实际工程应用中,往往需要几个小时、几天甚至更长的时间进行定时控制,因此,很有必要自行设计长定时电路。

本例的长定时任务假设为在输入信号 I0.0 接通后, 经过 $5\frac{1}{3}$ h 后将输出置位。此电路的



分析：T38 每隔一分钟产生一个脉冲，可以认为是分钟计时器，C0 每小时产生一个脉冲，可以认为是小时计时器。当 5h 计时到时，C1 为 ON，这时 C2 再计时 20min，Q0.0 才为 ON，即总计时时间为 $5\frac{1}{3}$ h。初始化脉冲 SM0.1 和外部复位按钮 I0.1 对计数器起复位作用。

8.5 数控系统内置 PLC

8.5.1 数控系统内置 PLC 概述

数控系统是数控机床的控制核心。无论是传统封闭式体系结构的 CNC 系统，还是目前正广泛运用的开放式体系结构的 CNC 系统，其软件程序均由 NC 和内置 PLC（有的数控系统内置 PLC 又称 PMC）两大软件模块组成。在 CNC 系统出厂时，NC 基本软件的功能已经被定义并且安装完毕，用户（包括数控机床制造厂和数控机床使用人）是无法改动的。NC 软件主要用于实现：主轴运动控制、进给轴运动控制、界面显示、第一操作面板（MDI 操作面板）的管理、手轮信号的处理、主轴编码器信号的处理、加工程序的编辑和管理、串口/USB 口/网络接口的通信等数控系统通用功能。而数控系统内置 PLC 软件模块则是数控系统生产厂留给数控机床制造厂，根据不同机床的具体用途开发，用来实现数控系统通过内置 PLC 对数控机床顺序逻辑动作的控制。例如，第二操作面板（机床操作面板）的设置及管理，工作方式的切换及方式之间的互锁，自动换刀动作，主轴旋转控制，用户设定的内置 PLC 报警及处理等。

每个内置 PLC 程序都是作为数控系统的 CPU 执行整个运算控制过程中的一个处理步骤来定义的。CNC 系统运行时，它的 CPU 在执行 NC 程序管理的同时，以一定的时间间隔高速地读取内置 PLC 程序指令、执行指令并且刷新各种地址的状态，使得数控机床能够按照正确的顺序完成各个逻辑动作。

数控系统的内置 PLC 与通用 PLC 产品都属于可编程逻辑控制器，都具有类似的外部接线、控制功能和编程语言。它们的不同之处在于：

（1）通用 PLC 编程只需要控制自身的开关或模拟量的 I/O 点，而数控系统内置 PLC 的程序开发需要考虑与系统各轴运动、当前工作方式等的配合，也就是说需要考虑 NC-PMC 两大软件模块间的内部数据实时通信。

（2）数控系统内置 PLC 的程序作为数控系统主机程序的一部分，由数控系统主机来完成控制运算，而通用 PLC 产品拥有自己的主机。

（3）通用 PLC 产品从开关量逻辑控制到模拟量 PID 调节，在工业上都有广泛的应用范围，而数控系统内置 PLC 程序目前只限于在数控系统产品中的应用。

对数控机床电气设计人员来讲，数控系统是已经设计好的产品，数控系统的主机与主轴驱动系统、各进给轴驱动系统、界面显示、第一操作面板（MDI 操作面板）、通信接口、手轮等的硬件电路均为标准连接。NC 系统软件也作为标准件已经完成配置，并且在应用电路的设计上很规范。但是对于数控机床具体动作的逻辑控制，从 NC-内置 PLC 内部通信分析、

I/O 信号规划、内置 PLC 软件编制到数控机床的每个开关逻辑动作调试,才被认为是 CNC 系统产品在现场应用中的重点。在 CNC 系统生产厂家的系统软件基础平台上,对具体数控机床的动作要求和控制功能进行的内置 PLC 软件编写、开发,被称为数控系统的二次开发。

内置 PLC 软件开发的一般步骤如下。

(1) 熟悉数控机床控制电路的控制逻辑和动作顺序。在编写内置 PLC 软件程序之前,一定要充分了解数控机床的功能特点和结构,并尽可能多地收集同类数控机床的各个功能资料,结合其应用对象,设计出各个功能实现的方案,拟定内置 PLC 的控制逻辑。内置 PLC 的控制逻辑应该是严格、完善的,拟定的方案应该包括动作过程中所有的细节和条件,并分清动作过程中的充分条件、必要条件和辅助条件。同时还要兼顾数控机床操作人员的人身安全和数控机床设备安全的保护。

(2) 编写源程序。按照数控系统所要求的编程规则及内置 PLC 的扩展逻辑要求,编写内置 PLC 的源程序。

(3) 通过编译源程序。根据编译过程出现的错误信息提示,纠正梯形图中的语法错误。

(4) 通过 PLC 仿真器模拟运行源程序,在模拟运行中纠正控制逻辑错误。如与编程所预期的动作不一致,说明用户编写的梯形图逻辑有问题,需要回去修改。修改后再做模拟,直到模拟运行通过。

(5) 将调试通过的梯形图文件写入 CNC 主机。不同厂家 CNC 系统的内置 PLC 程序写入方法也不尽相同;采用的编程语言也各不相同,如西门子数控系统采用 STEP-7 语言,日本 FANUC 数控系统采用梯形图语言。

(6) 按照 CNC 提供的内置 PLC 资源情况,合理扩展和分配内置 PLC 的输入/输出信号。通常 CNC 系统的制造商都规划了内置 PLC 的最大输入、输出信号数量,基本都可以满足常规数控机床的控制功能要求。如果仍不能满足扩展功能的要求,可以继续增加扩展输入/输出信号数量,但必须在订货时给以说明。

数控机床是个高度自动化的控制系统,内置 PLC 的控制功能是实现自动化的充要条件,在分配内置 PLC 的输入/输出信号时,首先要考虑实现各个功能的控制需要及报警和安全功能设置;次要考虑辅助控制功能,如排屑电机启停和保护等。内置 PLC 的输入/输出信号应留下一定的裕量以便数控机床控制功能的扩展。

8.5.2 FANUC 数控系统的内置 PLC

1. FANUC 数控系统内置 PLC 概述

FANUC 数控系统的内置 PLC 通常又称 PMC。FANUC 系列的不同数控系统内置 PLC 有 PMC-L、PMC-M、PMC-P、PMC-SB7、PMC-SA1、PMC-SA3、PMC-SA5 等多种型号。PMC 的顺序程序一般使用梯形图编程并可以由编程装置转换成机器码并写入数控系统的 EPROM 中,当然,输入过程中有时需要借助于语句表或助记符输入。各种型号 PMC 的输入/输出信号容量及接线方法与通用 PLC 产品类似。

FANUC 系列 PMC 的指令系统由基本指令和功能指令构成。不同型号的 PMC 有完全

一样的指令系统,但功能指令的数目不同,提供给用户使用的最大程序存储空间也不同,必须在具体的 CNC 系统允许的程序步数和地址范围内使用。

FANUC 系列数控系统的 CNC、PMC 和机床电路之间的信号联系及地址分类示意图如图 8-70 所示。

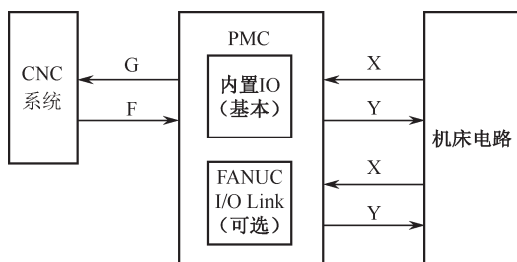


图 8-70 FANUC 系列数控系统 CNC、PMC 及机床电路之间的信号联系及地址分类示意图

在 FANUC 数控系统的 PMC 编程时,可以使用的地址类型如下。

1) PMC 的输入信号 X (机床电路输入→PMC)

PMC 的输入信号是来自机床电路的按钮、行程开关、转换开关、机床操作面板按键等的物理连接点,用符号 X、位和数单元地址数来表示。可以使用的 X 信号的数目随 CNC 型号有所不同,位数从 0~7。有的 CNC 个别 X 信号为固定用途,不可任意使用,这些 X 信号的使用应遵循具体 CNC 型号的规定。

例如,输入信号 X2.1 连接机床操作面板的 X+按键,则当机床操作面板的 X+按键被按下时,PMC 程序识别该信号的状态为“1”。同样,如果 X3.4 为某数控车床刀位信号 T1,当刀架旋转到 1 号刀位,X3.4 的状态变为“1”,PMC 可以立即获得该信号,判断刀架状态,进行换刀控制。

同普通 PLC 输入信号一样,一般来说用户可以自己分配和定义输入信号,但在 FANUC 系统 PMC 的使用中,有一些 X 信号的地址是固定的,在硬件设计和编程时必须接固定的输入信号。例如,X8.4 为紧急停止输入信号地址,X9.0~X9.4 为第 1~5 轴参考点返回减速信号地址,X4.7 为跳过信号输入地址等。

2) PMC 的输出信号 Y (PMC→机床电路)

PMC 的输入信号是用来向机床侧输出内置 PLC (PMC) 运行的执行结果,驱动具体的执行机构正确动作,例如,继电器、电磁阀、信号灯等,用符号 Y、单元地址数和位数来表示。可以使用的 Y 信号的数目随 CNC 型号有所不同,位数从 0~7,不能被任意使用的单元或位应遵循具体 CNC 型号的规定。例如,某数控加工中心 PMC 的输出信号 Y9.2 为主轴顺时针转输出信号,Y9.3 为主轴逆时针转输出信号,Y8.4 为主轴松刀输出信号等。

3) 从 PMC 发向 NC 的内部信号 G (PMC→NC)

NC 基本程序和 PMC 程序是两个软件模块,它们之间没有直接的物理连接,只有内部信号的连接。从 PMC 发向 NC 的内部信号地址用符号 G、位数和单元地址数表示。信号内容和地址是 CNC 系统设计时就确定下来的,只能按照定义编写 PMC 文件。从 PMC 发

向 NC 的 G 信号有很多, G 信号反应了 PMC 运行的结果, 这些 G 信号中有的反应机床的状态, 有的则是向 NC 发出一些请求。例如, G114.0~G114.4 为第 1~5 轴正向超程信号, G116.0~G116.4 为第 1~5 轴负向超程信号, 当 NC 接收这些信号中有一个或多个为“0”时, NC 即停止轴运动, 并且出现相应的超程报警。

4) 从 NC 发向 PMC 的内部信号 F (NC→PMC)

由 NC 发出的可供 PMC 读取使用的内部信号地址用符号 F、位数和单元地址数来表示。F 信号的内容和地址和 G 信号类似, 也是 CNC 系统设计时就确定下来的。从 NC 发向 PMC 的 F 信号有很多, 这些 F 信号反应了 NC 当前的运行状态, PMC 根据这些 F 信号的状态的不同, 运行的结果也有所不同。例如, F0.5 为自动运行启动中, 此信号向 PMC 通知自动运行处在启动中(动作中)的, PMC 可以根据这一信号的状态控制三色灯(机床运行状态指示灯)中的绿灯的状态。

5) PMC 中其他信号

R 信号、K 信号、D 信号、T 信号、C 信号等代表的信号类型如表 8-1 所示。

表 8-1 PMC 其他信号类型表

字 符	信 号 类 型
R	内部继电器
A	信息显示请求信号
C	计数器
K	保持型继电器
D	数据表
T	可变定时器
L	标号
P	子程序号

另外, PMC 顺序程序的设计从编制梯形图开始。梯形图由继电器触点和功能指令构成。梯形图所示的逻辑关系构成顺序程序。输入顺序程序的方法有两种: 一种输入方法使用助记符语言(LD、AND、OR 等 PMC 指令)。另一种方法使用继电器符号。通过使用相应的继电器触点、符号和功能指令符号输入顺序程序。在使用继电器符号方法是, 可以使用梯形图格式, 并且不用理解 PMC 指令格式即可进行编程。实际上, 即使顺序程序由梯形图方法输入, 在系统内部也被转换成相应的 PMC 指令。

2. FANUC 数控系统 PMC 的基本指令

在执行顺序程序时, 逻辑运算的中间结果存储在一个寄存器中, 这个寄存器由 9 位组成, 如图 8-71 所示。执行指令(RD 等)暂存运算中间结果时, 如图 8-71 所示, 将当前存储的状态向左移动一位压栈。相反, 执行指令(AND 等)取出操作结果是, 右移一位出栈。该寄存器按照堆栈原理工作, 即最后进入的最先被取出。

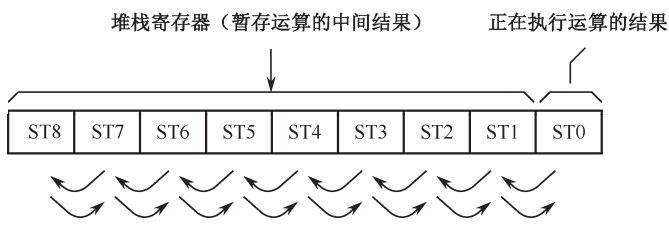


图 8-71 堆栈寄存器的操作顺序

FANUC 数控系统 PMC 的基本指令共有 14 个，表 8-2 所示为基本指令及其功能。

表 8-2 基本指令和功能

序 号	指 令	功 能
1	RD	读入指定的信号状态并设置为 ST0 中
2	RD.NOT	将读入的指定信号的逻辑状态取非后设置到 ST0 中
3	WRT	将逻辑运算结果（ST0 的状态）输出到指定的地址
4	WRT.NOT	将逻辑运算结果（ST0 的状态）取非后输出到指定的地址
5	AND	逻辑与
6	AND.NOT	将指定的信号状态取非后逻辑与
7	OR	逻辑或
8	OR.NOT	将指定的信号状态取非后逻辑或
9	RD.STK	将寄存器的内容左移 1 位，把指定地址的信号状态设到 ST0 中
10	RD.NOT.STK	将寄存器的内容左移 1 位，把指定地址的信号状态取非后设到 ST0 中
11	AND. STK	ST0 和 ST1 逻辑与后，堆栈寄存器右移 1 位
12	OR. STK	ST0 和 ST1 逻辑或后，堆栈寄存器右移 1 位
13	SET	ST0 和指定地址中的信号逻辑或后，将结果返回到指定地址中
14	RST	ST0 的状态取反后和指定地址中的信号逻辑与后，将结果返回到指定地址中

3. FANUC 数控系统 PMC 的功能指令

数控系统需要对数控机床所有的逻辑顺序进行控制，例如，冷却、刀库选择、机械手动作等。还需要对数控机床的设备安全进行保护，例如，电动机过载报警、刀位信号异常报警等。要实现这么多、这么复杂的功能，单单运用基本指令是很难实现的，这就需要功能指令，例如，译码、编码、计时器、计数器、子程序调用等。FANUC 数控系统配置的 PMC 根据信号的不同功能指令的数量也不同，表 8-3 所示为 PMC-SA3 的功能指令和处理过程。

表 8-3 功能指令和过程处理

序 号	指 令	处 理 过 程
1	END1	第一级顺序程序结束
2	END2	第二级顺序程序结束
3	TMR	定时器

续表

序 号	指 令	处 理 过 程
4	TMRB	固定定时器
5	TMRC	定时器
6	DEC	译码器
7	DECB	二进制译码
8	CTR	计数器
9	CTRC	计数器
10	ROT	选择控制
11	ROTB	二进制旋转控制
12	COD	代码转换
13	CODB	二进制代码转换
14	MOVE	逻辑乘数据传送
15	MOVOR	逻辑或后数据传送
16	MOVB	一字节数据传送
17	MOVW	两字节数据传送
18	MOVN	任意字节数据传送
19	COM	公共线控制
20	COME	公共线控制结束
21	JMP	跳转
22	JMPE	跳转结束
23	JMPB	标号跳转 1
24	JMPC	标号跳转 2
25	LBL	标号
26	PARI	奇偶校验
27	DCNV	数据转换
28	DCNVB	扩展数据交换
29	COMP	比较
30	COMPB	二进制数值比较
31	COIN	一致判断
32	DSCH	数据搜寻
33	DSCHB	二进制数据搜寻
34	XMOV	变址数据传送
35	XMOVB	二进制变址数据传送
36	ADD	加法运算
37	ADDB	二进制加法运算
38	SUB	减法运算
39	SUBB	二进制减法运算
40	MUL	乘法运算
41	MULB	二进制乘法运算

续表

序 号	指 令	处 理 过 程
42	DIV	除法运算
43	DIVB	二进制除法运算
44	NUME	定义常数
45	NUMEB	定义二进制常数
46	DISPB	扩展信息显示
47	EXIN	外部数据输入
48	AXLCTL	PLC 轴控制
49	WINDR	读 CNC 口数据
50	WINDW	写 CNC 窗口数据
51	MMC3R	读 MMC3 窗口数据
52	MMC3W	写 MMC3 窗口数据
53	MMCWR	读 MMC2 窗口数据
54	MMCWW	写 MMC2 窗口数据
55	DIFD	上升沿检测
56	DIFU	下降沿检测
57	EOR	异或
58	AND	逻辑乘
59	OR	逻辑或
60	NOT	逻辑非
61	END	梯形图程序结束
62	CALL	调用子程序
63	CALLU	无条件调用子程序
64	SP	子程序
65	SPE	子程序结束

功能指令一般是由控制条件、指令、参数和输出四个部分组成。由于指令的不同，可能不是所有功能指令都完全有这四个部分。控制条件对功能指令的执行、复位等进行控制，因功能指令的不同，控制条件的数量 and 意义都会不同。功能指令的参数可能是常数也可能是数据地址由功能指令决定，参数可以指定功能指令的执行方式、处理数据的存放地址等。功能指令的输出反应的意义也随指令的不同而不同，有的执行出错、有的执行结束等。

这里对 FANUC 数控系统 PMC 的部分功能指令做简单的说明。

1) 顺序程序结束指令

顺序程序结束指令有 END1（第一级顺序程序结束）、END2（第二级顺序程序结束），梯形图格式如图 8-72 和图 8-73 所示。

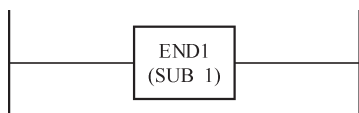


图 8-72 END1 梯形图格式

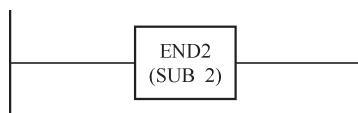


图 8-73 END2 梯形图格式

END1 在顺序程序中必须给出一次，可在第一级程序末尾，或当没有第一级程序时，排在第二级程序开头。END2 在第二级程序末尾给出。

第一级程序每 8ms 执行一次。可以处理一些要求响应快的短脉冲信号。例如，急停、跳转、超程等，不使用第一级程序时只编写 EDN1 指令。第二级程序每 $8 \times n$ ms 执行一次。 n 为第二级程序的分割数。在开始执行第二级程序时，PLC 会把二级程序分割成 n 份。每个 8ms 只执行一份。第一级与第二级程序的时间分割如图 8-74 所示。当最后分割数为 n 的二级程序执行完后，程序又从头开始执行。

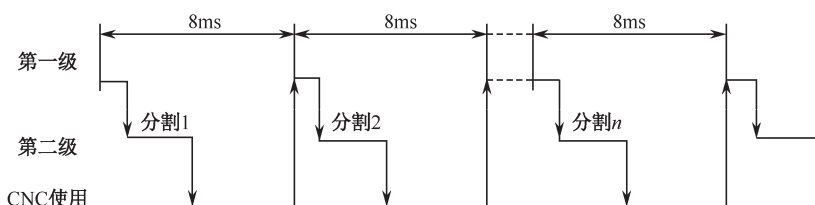


图 8-74 第一级与第二级程序的时间分割

2) 定时器指令

FANUC 数控系统 PMC 有三个定时器指令，一是 TMR 延时导通定时器，定时时间在使用定时器对应的 T 地址中设定；二是 TMRB 用做时间固定的延时导通定时器，定时时间在 PMC 程序中设定，不可改动；三是 TMRC 是用地址设定定时时间的延时导通定时器。

图 8-75 所示定时器是 TMR 功能指令使用示例。图中 TMR 指令使用的是 4 号定时器，定时使用在 4 号定时器对应的 T 地址中设置。控制条件 ACT 为中间继电器 R22.6，当 ACT 为“1”开始定时，经过设置的时间，继电器 T22.7 置“1”输出，当 ACT 为“0”时定时器复位。

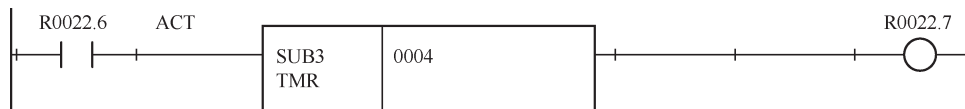


图 8-75 定时器 TMR 功能指令的使用示例

定时器 TMRB 功能指令的使用示例如图 8-76 所示。图中 TMRB 指令使用的是 1 号定时器，定时时间为 100ms，执行情况与 TMR 指令类似。控制条件 ACT 为 X13.0 为“1”时开始定时，100ms 后 R50.1 置“1”输出，X13.0 为“0”时定时器复位。

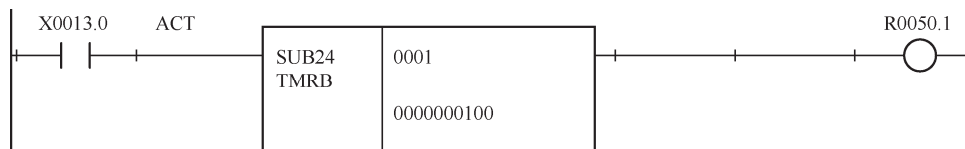


图 8-76 定时器 TMRB 功能指令的使用示例

定时器 TMRC 功能指令的使用示例如图 8-77 所示。图中 TMRC 参数“0001”是设定定时器的精度为 48ms，定时时间由 D10 中的数据设定，R100 开始的连续 4 个字节，作为

系统作业区，供定时器工作时使用。

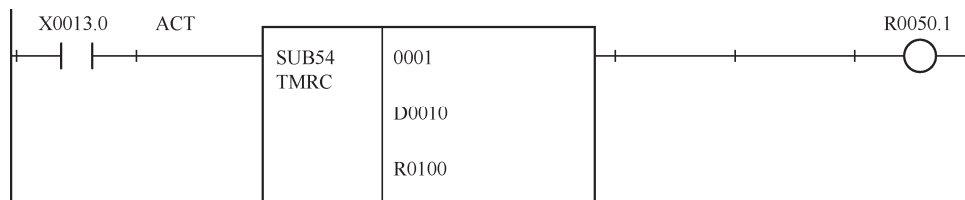


图 8-77 定时器 TMRC 功能指令的使用示例

3) 译码指令

FANUC 数控系统 PMC 的译码指令有 DEC 和 DECB，主要用于 M 功能和 T 功能的译码，这两个指令用法和功能类似。这里只对 DECB 进行介绍，DECB 可对 1、2、4 字节的二进制代码数据译码，所指的八位连续数据之一与代码数据一致时，对应的输出数据位为 1。不一致时，输出数据为 0。译码指令 DECB 的使用示例如图 8-78 所示。当控制条件 ACT 中 F7.0 为 1 时，执行译码。若 F10 中数据为 16，则 R2.0 置“1”；若 F10 中数据为 17，则 R2.1、R2.0 置“1”；连续 8 位以此类推。

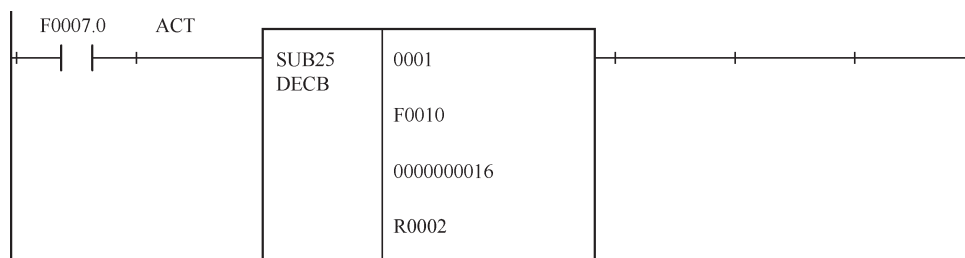


图 8-78 译码指令 DECB 功能指令的使用示例

4) 计数器指令

FANUC 数控系统 PMC 的计数器指令有 CRT、CRTC。计数器指令 CRT 的使用示例，如图 8-79 所示。这里使用的是 1 号计数器，预置值在 1 号计数器对应的 C 地址中设定。CRT 指令的控制条件有四个，共同控制指令的执行方式。若 CN0（图 8-79 中为 X15.0）=0 计数器的初始值由 0 开始；若 CN0=1 计数器的初始值由 1 开始。若 UPDOWN（图 8-79 中为 X15.1）=0 加计数器（初始值为 CN0 的设定）；若 UPDOWN=1 减计数器（初始值为计数器预置值）。ACT（图 8-79 中为 X15.3）为计数输入信号，ACT 出现一次上升沿，计数器计数一次，计数到后 Y13.0 置“1”输出。当计数到，ACT 再出现一次上升沿，计数器复位，Y13.0 置“0”，停止输出。若 RST（图 8-78 中为 X15.3）=0，计数器运行；若 RST=1，计数器计数值复位且输出位清零。

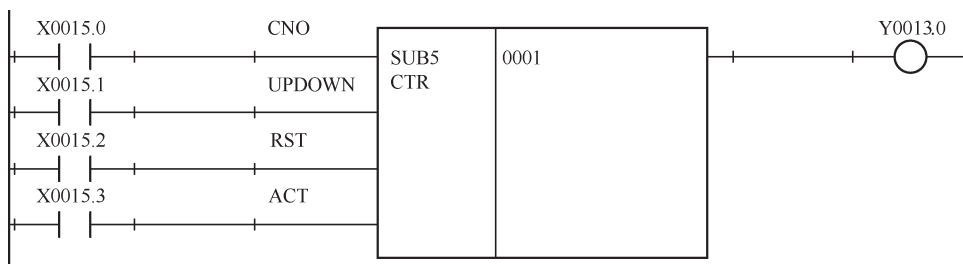


图 8-79 计数器 CTR 功能指令使用示例

5) 旋转控制指令

FANUC 数控系统 PMC 的旋转控制指令有 ROT、ROTB。旋转控制指令主要用于回转控制，如加工中心的刀库、数控车床的刀架等。根据总位置数，当前位置、目标位置得出旋转方向和转动的位置数。如图 8-80 所示为旋转控制指令 ROTB 的使用示例。ROTB 的参数有 5 个，图 8-80 中“0001”设定数据长度为 1B，D100 中数据为要进行旋转控制部件的总位置数，R23 中数据为旋转部件当前位置号，R28 中数据为旋转部件目标位置号，R30 为计算结果输出地址。ROTB 指令的控制条件也有 5 个。CNO=0 初始位置由 0 开始；CNO=1 初始位置由 1 开始。DIR=0 旋转方向固定为正向；DIR=1 进行旋转方向选择，旋转方向根据最短路径选择正负向。POS=0 根据目标位置计算结果；POS=1 根据目标前一位的计算结果。INC=0 时，计算的结果为位置数；INC=1 时，计算结果为步数。如要计算目标位置的前一位，指定 INC=0 和 POS=1。如要计算当前位置与目标位置之间的差距，指令 INC=1 和 POS=0。ACT=0 时，不执行 ROTB 指令；ACT=1 时，执行 ROTB 指令。R10.4 为旋转方向输出，R10.4 为“0”没有输出，表示旋转方向为正方向；R10.4 为“1”有输出，表示旋转方向为负方向。

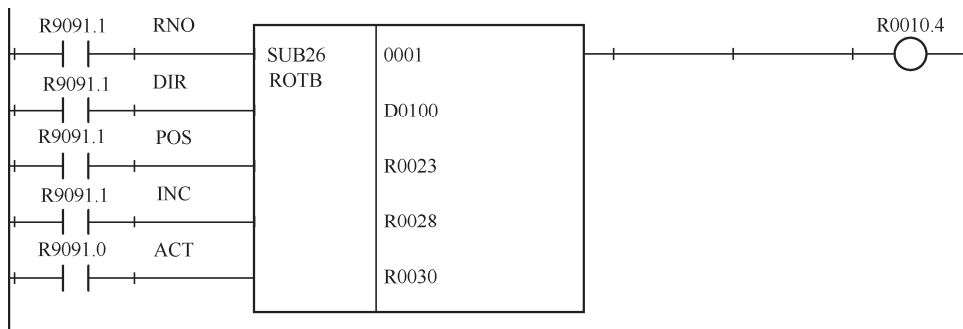


图 8-80 旋转控制指令 ROTB 的使用示例

6) 代码转换指令

FANUC 数控系统 PMC 的代码转换指令有 COD、CODB。代码转换指令必须有数据转换输入地址、转换数据表、数据转换输出地址。数据转换输入地址中数据为转换数据表内号，执行指令后将该表内号对应的转换数据表中的数据运输到数据转换输出地址中。图 8-81 所示转换指令 CODB 的使用示例。图 8-80 中“0002”设定数据长度为 2B，“0016”

设定数据容量为 16，R13 为数据转换输入地址，G10 为数据转换输出地址。CODB 指令的控制条件有两个，ACT=0 时，不执行 CODB 指令；ACT=1 时，执行 CODB 指令。RST=0 不复位；RST=1 将错误输出复位。图 8-81 中 R35.1 为错误输出，当执行代码转换出错时，R35.1 置“1”输出。图 8-81 中 CODB 指令下方的即是数据转换表。

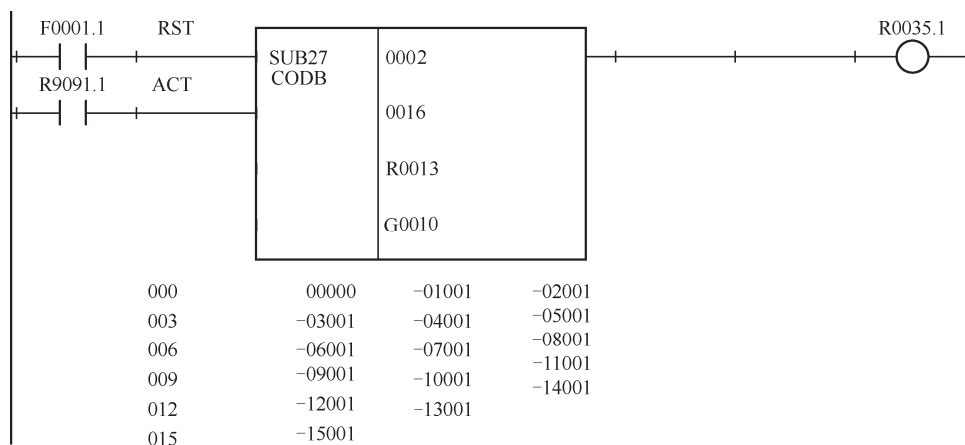


图 8-81 转换指令 CODB 的使用示例

7) 数据比较指令

FANUC 数控系统 PMC 数据比较指令有 COMP、COMPB。该类指令是将输入数值与比较数值进行大小比较，并输出比较结果。图 8-82 所示为数据比较指令 COMPB 的使用示例。图 8-82 中“1001”设定输入数据为地址，数据长度为 1B；D50 为输入数据；F26 为对比数据。COMPB 指令的控制条件 ACT 为 R9091.1。当 ACT=0 时，不执行指令；当 ACT=1 时，执行指令，对比 F26 和 D50 中的数据，比较结果在运算结果寄存器 R9000 中。若 F26=D50，则 R9000.0 置“1”；若 F26>D50 则 R9000.1 置“1”。

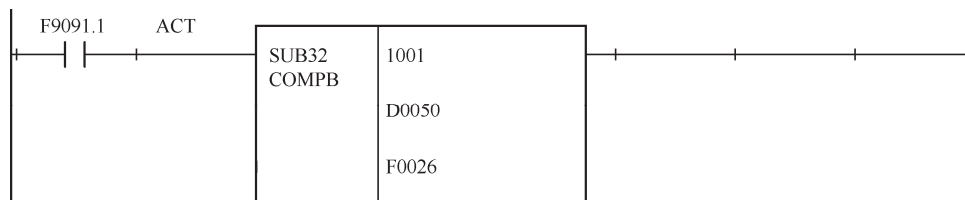


图 8-82 数据比较指令 COMPB 的使用示例

8) 一致性检测指令

FANUC 数控系统 PMC 一致性检测指令为 COIN。检测输入值与比较值是否一致。

图 8-83 为一致性检测指令 COIN 的使用示例。图 8-83 中“0001”设定用地址指定输入数据，R200 为输入数据地址，R300 为比较数据地址。控制条件有两个 BYT 和 ACT。BYT=0 处理数据为 BCD 两位；BYT=1 处理数据为 BCD 四位。ACT=0：不执行，输出不变；ACT=1：执行指令，根据结果改变输出。图 8-83 中若 R200=R300，则 R10.3 置“1”输出；若 R200≠R300，则 R10.3 置“0”没输出。

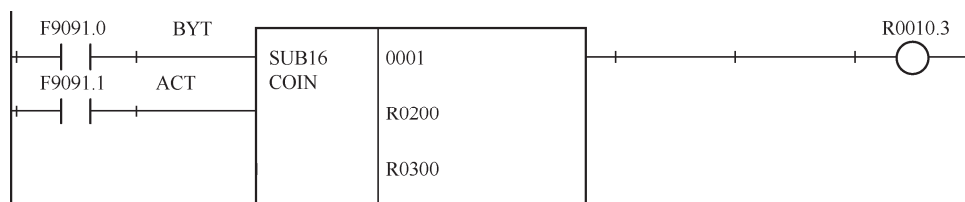


图 8-83 一致性检测指令 COIN 使用示例

9) 数据转送指令

FANUC 数控系统 PMC 数据传送指令有 MOV B、MOV W、MOV N，分别是传送单字节数据、双字节数据、任意字节数据。数据传送指令 MOV B 的使用示例如图 8-84 所示。当 ACT=0 时，不执行指令；当 ACT=1 时，执行指令，将 C7 中数据传送到 R24 中。

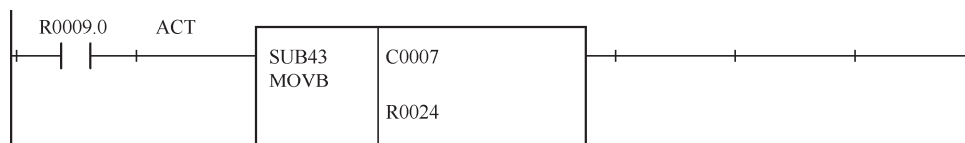


图 8-84 数据传送指令 MOV B 的使用示例

8.5.3 西门子 CNC 的内置 PLC

西门子公司生产一系列 CNC 产品，从经济型、普及型到高性能型，典型的产品有 802S、802C、802D/802D sl、810D、828D、840D。这些 CNC 产品的内置 PLC，都直接使用了西门子公司 PLC 产品的编程语言和结构，现在西门子 CNC 的内置 PLC 都采用了 S7 系列 PLC 的编辑语言。西门子 802D 数控系统是近几年来广泛用于数控车床、数控铣床，以及经济型加工中心上的数控系统。本节以 802D 数控系统为例，说明西门子数控系统内置 PLC 的编辑和使用方法。

1. SINUMERIK 802D sl 数控系统的组成连接

西门子 802D sl 数控系统硬件组成包括 PCU（CNC 操作面板）、NC 全键盘、MCP（机床控制面板）、伺服驱动功率模块、外设模块（外部输入/输出模块）、电源、电子手轮等。PCU 为 802D sl 数控系统的核心部件，将 NCK（数控核心）、PLC、HMI（人机界面）和通信任务集成在一起。SINUMERIK 802D sl 可以最多对 6 根轴进行数字化控制。这 6 根轴可以最多配置为 5 个 NC 轴和一个 PLC 轴。5 个 NC 轴中可以配置 2 个轴为主轴。802D sl 最多可以配三个外设模块 PP72/48 及两个电子手轮。SINUMERIK 802D sl 的连接图如图 8-85 所示。

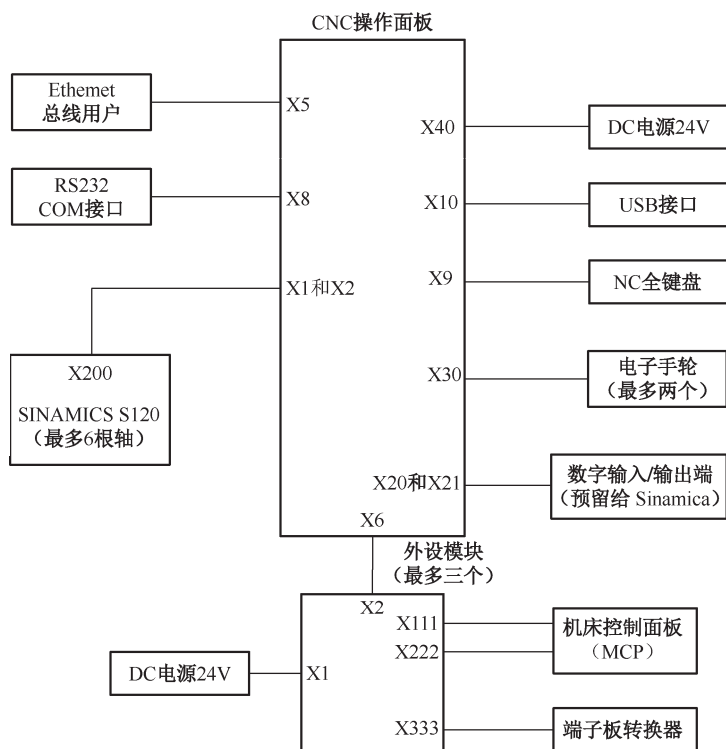


图 8-85 SINUMERIK 802D sl 连接图

2. SINUMERIK 802D sl 数控系统内置 PLC 地址分配

从图 8-85 可以看出，机床外部的输入输出信号主要包括机床电气控制信号和机床控制面板（MCP）。802D sl 数控系统内置 PLC 中机床控制信号的地址为 I（输入信号）和 Q（输出信号）。由于来自机床控制面板（MCP）的倍率开关、按键等信号没有通过 PLC 的 I 信号传入内置 PLC，而是通过数控系统专用接口输入。所以机床控制面板信号的状态只能先传送到 NCK，再通过 NCK 模块的只读信号 V 被内置 PLC 读取。802D sl 数控系统内置 PLC 还要和数控系统的 NCK 和 HMI 进行信息交换。802D sl 数控系统内置 PLC 采用接口变量 V 及相应的数据位的形式与 MCP、NCK 和 HMI 进行控制和状态信息的传送。SINUMERIK 802D sl 数控系统内部信号传递示意图如图 8-86 所示。

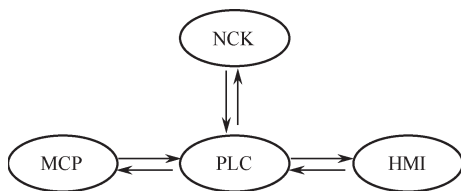


图 8-86 SINUMERIK 802D sl 数控系统内部信号传递示意图

SINUMERIK 802D sl 数控系统内置 PLC 还有一些其他地址类型：C（计数器）、T（定

时器) M (标志位)、SM (特殊标志位) 等。SINUMERIK 802D sl 数控系统内置 PLC 的地址类型如表 8-4 所示, 地址 V 组成如表 8-5 所示、SM (特殊标志位) 定义如表 8-6 所示。

表 8-4 SINUMERIK 802D sl 数控系统内置 PLC 的地址类型表

操作地址符号	说 明	范 围
V	数据	V14000000.0~V79999999.7
T	定时器	T0~T15（100ms）、T16~T39（10ms）
C	计数器	C0~C31
I	数字输入映像区	I0.0~I26.7
Q	数字输出映像区	Q0.0~Q17.7
M	标志位	M0.0~M255.7
SM	特殊标志位	M0.0~M0.6
AC	累加器	AC0...AC3

表 8-5 地址 V 组成表

类 型 标 记 (DB 号)	区 号 (通道/轴号)	分 区	分 支	询 址
10 (10~79)	00 (00~99)	0 (0~9)	000 (000~999)	地址描述 (8 位数字)

表 8-6 SM 特殊标志位定义表

SM 位	说 明
SM0.0	定义 1 信号
SM0.1	基本设定：第一次 PLC 循环“1”，后面循环“0”
SM0.2	缓冲的数据丢失：只适用于第一次 PLC 循环（“0”信号时数据不丢失，“1”信号时数据丢失）
SM0.3	重新启动：第一次 PLC 循环“1”，后面循环“0”
SM0.4	60s 周期的脉冲（占空比，30s“0”，30s“1”）
SM0.5	1s 周期的脉冲（占空比，0.5s“0”，0.5s“1”）
SM0.6	PLC 循环周期（交替循环“0”和循环“1”）

SINUMERIK 802D sl 数控系统内置 PLC 的 V 信号的简要说明如表 8-7 所示。

表 8-7 V 信号简要说明表

地 址 范 围	信息传送方向	传送主要内容
V10000000~V10000008	MCP→PLC	将来自 MCP 上按键信号以数据位的形式传送到 PLC，包括控制方式按键、NC 控制键、各轴点动控制键、倍率开关、用户选择键等
V11000000~V11000007	PLC→MCP	将 PLC 已确认的 MCP 按键信号返回给 MCP
V16000000~V16000007	PLC→HMI	将 PLC 程序触发的用户报警号送到 HMI，再由 HMI 根据已编好并下载到数控系统的报警文件将报警信息显示出来
V16002000	HMI→PLC	HMI 将进给保持、急停等重要有效报警响应传送到 PLC

续表

地址范围	信息传送方向	传送主要内容
V17000000~V17000003	HMI→PLC	将用户在 HMI 上选择的程序测试、空运行、快速倍率等信号传送到 PLC
V25000004~V25003020	NCK→PLC	将 NC 程序中 M、S、T、D、H 辅助功能指令信号传送到 PLC
V30000000~V30000002	PLC→NCK	将 PLC 确认的工作方式信号传送到 NCK 中

3. SINUMERIK 802D sl 数控系统内置 PLC 基本指令和功能指令

SINUMERIK 802D sl 数控系统内置 PLC 使用的基本指令和功能指令与本章前面所讲述的西门子 PLC S7 系列的基本指令和功能指令相同，PLC 的编写也类似，此处不再介绍。

8.6 本章小结

PLC 是一种专为工业环境下应用设计的电子系统，它主要由微处理器、输入/输出单元、存储器及各种接口组成，各部分之间通过总线连成一个整体。

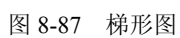
PLC 采用循环扫描的方式进行工作，整个过程分为五个阶段进行，即自诊断、与编程器的通信、输入采样、用户程序执行和输出刷新。各个阶段完成不同的任务，周而复始直至停机。

CNC 内置 PLC 是 CNC 软件的重要组成部分，利用 CNC 内置 PLC 可以实现数控机床的各种逻辑控制。本章重点介绍了 FANUC 和西门子 CNC 中的内置 PLC，通过对这两类 CNC 内置 PLC 的学习和掌握，其他厂家 CNC 的内置 PLC 可以很快学会和使用。

通过本章的学习要初步熟悉 PLC 的原理及编程，学会自己编制程序控制 PLC 的动作，本章以西门子 S7—200 系列的 PLC 编程为实例讲解，生动形象，在学习过程中要学会自己思考 PLC 的控制。

8.7 思考与练习

1. 简述可编程控制器的简称及定义。
2. PLC 主要由哪几部分组成，各有什么作用？
3. 试比较可编程控制器与继电器—接触器控制系统的优、缺点。
4. 简述 PLC 的工作过程。
5. 设计一个用 PLC 实现的三相步进电动机的正、反转控制的梯形图，要求有过载保护，并写出指令程序。
6. 有一台电动机，要求每当按下启动按钮，电动机运转 10s，停止 5s，重复执行 8 次操作，电动机自动停止，试画出梯形图，并写出指令程序。
7. 将图 8-87 的梯形图转化为指令程序。
8. 梯形图主要由哪几部分组成？用梯形图编程时应注意哪些问题？
9. FANUC 数控系统内置 PLC 的地址类型有哪些？作用分别是什么？
10. FANUC 数控系统内置 PLC 的功能指令 ROT 和 ROTB 有什么区别？编写 PLC 举例说明。



Chapter 9

第 9 章 典型机床电气控制

知识点

- CA6140 机床电气与 PLC 控制
- T68 机床电气与 PLC 控制
- M7120 机床电气与 PLC 控制
- 立式加工中心电气与 PLC 控制

本章导读

前面的章节分析了机床电气控制的基本环节并了解了 CNC、驱动器、PLC。对于一台机床只要根据它的控制要求,选用合适的 CNC、驱动器、控制环节,就可以实现机床设计的各个功能。

在这一章里将分析几种典型机床的电气与 PLC 控制,从而进一步掌握控制线路的组成,典型环节的动作逻辑及分析控制线路的方法。从中找出规律,逐步提高阅读电气原理图的能力,为独立设计打下基础。

9.1 卧式车床电气与 PLC 控制

卧式数控车床的用途十分广泛：可车外圆、车端面、切槽和切断、钻中心孔、钻孔、镗孔、铰孔、车各种螺纹、车内外圆锥面、车特殊面等。这种机床通用性强，适用于加工各种轴类、套筒类、轮盘类零件上的回转表面。卧式数控车床的种类和型号很多，不同机床厂的型号叫法也有所不同，多数是根据可加工工件的最大回转直径来确定型号。本节以 CA6140 型卧式车床（该车床使用的 CNC 为广州数控设备有限公司的 GSK 980TD_b，使用的伺服驱动器为 DA98B，使用的伺服电动机为 130SJT-M060D 和 130SJT-M100D）为例来介绍和分析卧式车床电气与 PLC 控制。

9.1.1 卧式车床主要结构

CA6140 型车床的外形如图 9-1 所示。组成机床的部件有床身、主轴变速箱、进给箱、溜板箱、挂轮变速机构、刀架、尾架、丝杠、光杠、右床腿、左床腿等。

CA6140 型车床的主轴中心线在床身导轨面上的高度（中心高）约为 200mm，所以，加工盘类零件的最大工件回转直径为 400mm；当加工轴类零件时，由于工件在溜板上通过而溜板的上平面位于床身导轨之上，因而刀架溜板上的最大车削直径受到限制，为 210mm。

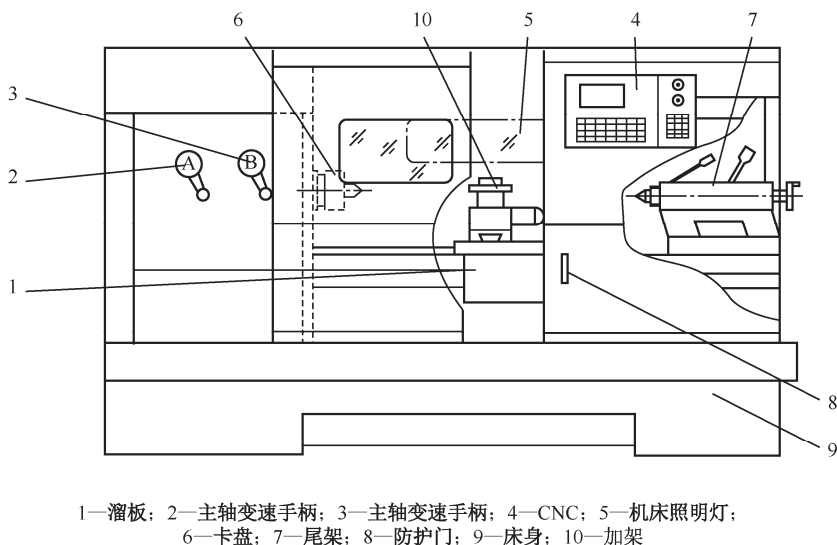


图 9-1 CA6140 型车床的外形示意图

9.1.2 卧式车床的运动形式及控制要求

1. 主运动和进给运动

卧式车床加工时，主运动是主轴通过卡盘带动工件旋转，它承受车削时的主要切削功

率；进给运动是溜板带动刀架移动，它使刀具移动，以切削金属。主轴电动机的动力由三角皮带、主轴变速箱传递到主轴，实现主轴的旋转。溜板移动是由两台进给伺服电动机或步进电动机带动。

主轴一般可以实行顺时针和逆时针两个方向旋转。主轴的转速一般是由主轴变速箱外的手柄调节。如主轴电动机是由变频器或主轴伺服驱动器来驱动，主轴的转速控制不需要主轴变速箱手动调节，通过改变指令可以实行主轴转速的无极调速。

另外，根据主轴电动机的容量，确定主轴电动机的启动和制动形式。

2. 辅助运动

CA6140 卧式车床的辅助运动是指刀架的旋转换刀、加工冷却、尾座的移动、工件的装卸。

刀架的旋转是由一台小三相异步电动机带动，可以正反两个反向旋转。整个换刀的动作逻辑是有 CNC 内置的 PLC 决定的。

冷却泵由一台电动机单方向旋转带动，实现刀具切削时的冷却。冷却泵电动机可直接启动，不需要正/反转、调速和制动。

尾座的移动和工件的装卸都是由人力操作。

9.1.3 卧式车床电气原理图分析

1. 主电路分析

CA6140 卧式车床的主电路部分电气原理图如图 9-2 所示。主电路中有三台三相异步电动机， M_1 为主轴电动机， M_2 为刀架电动机， M_3 为冷却泵电动机。除了这三台三相异步电动机之外，主电路还包括给 CNC 和伺服驱动器供电部分，在图 9-2 中没有详细画出。

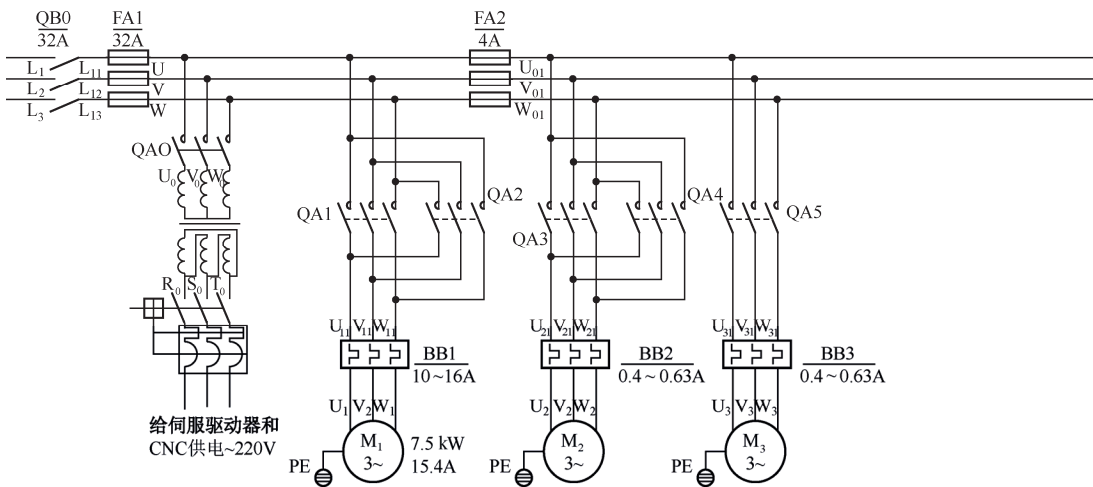


图 9-2 CA6140 卧式车床电气原理图主电路部分

三相交流 380V 电源通过转换开关 QB0 引入，FA1、FA2 起短路保护作用，BB1、BB2、BB3 分别对三个电动机起过载保护作用。QA1 和 QA2 控制主轴电动机正反转，QA3 和

QA4 控制刀架电动机正反转, QA5 控制水泵电动机的启动和停止。QA0 控制给隔离变压器输入端输入 380V 交流电, 隔离变压器输出的 220V 交流电经过一塑料外壳式断路器给伺服驱动器和 CNC 供电。

另外, 为防止电动机外壳漏电伤人, 电动机外壳均与地线连接。

2. 控制电路分析

CA6140 卧式车床的控制电路部分电气原理图如图 9-3 和图 9-4 所示。该车床的主要输入/输出信号有 M3 (主轴顺时针转)、M4 (主轴逆时针转)、M8 (冷却)、TL+ (刀架正转)、TL- (刀架反转)、T1 (1 号刀刀位信号)、T2 (2 号刀刀位信号)、T3 (3 号刀刀位信号)、T4 (4 号刀刀位信号)、ESP (急停信号)、DECX (X 轴回零减速信号)、DECZ (Z 轴回零减速信号)、ST (外接循环启动信号)。这些输入/输出信号的控制和处理都是由 CNC 或 CNC 内置的 PLC 完成。

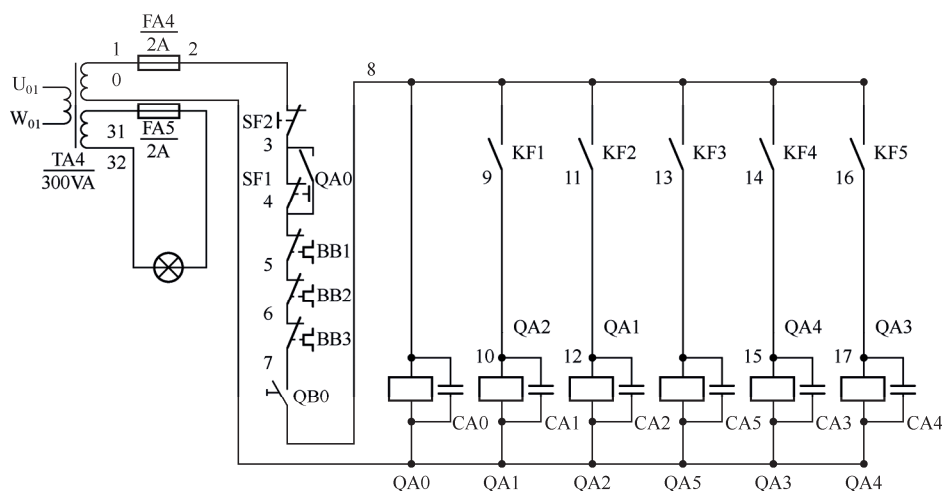


图 9-3 CA6140 卧式车床电气原理图控制电路部分 1

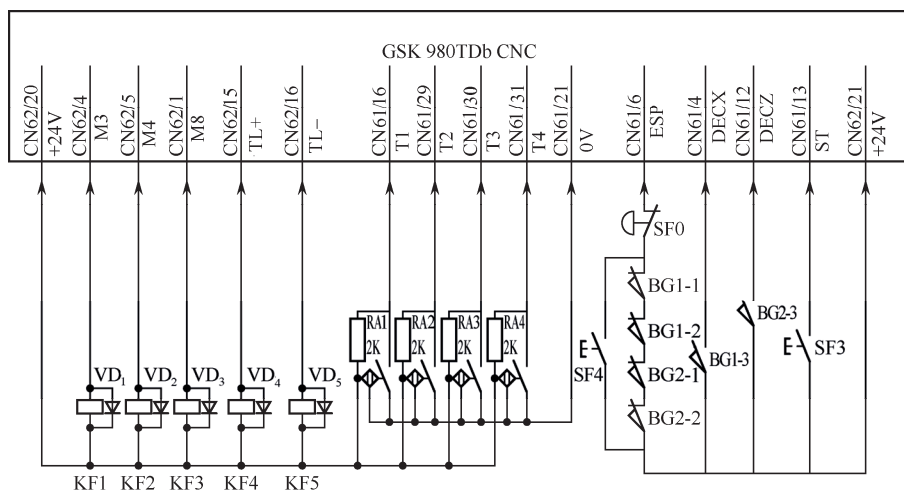


图 9-4 CA6140 卧式车床电气原理图控制电路部分 2

(1) 机床照明电路: 通过控制变压器 TA2 输出的 24V 交流电给机床照明灯供电, 采用熔断器 FA5 短路保护。

(2) 控制电路电源: 是通过控制变压器 TA2 输出的 110V 交流电压供电, 采用熔断器 FA4 作短路保护。

(3) 伺服驱动器和 CNC 供电控制: 旋转转换开关 QB0 三相 380V 交流电引入机床, 同时 QB0 的常开辅助触点闭合。按下按钮 SF1, 交流接触器 QA0 线圈得电, QA0 主触点闭合, QA0 辅助常开触点闭合形成自锁, 伺服驱动器和 CNC 得电。按下按钮 SF2, QA0 线圈断电, QA0 的主触点和辅助触点断开, 伺服驱动器和 CNC 断电, 自锁解除。

(4) 主轴电动机旋转控制: 当 CNC 输出主轴顺时针转信号, KF1 线圈得电, KF1 常开触点闭合后, QA1 线圈得电, QA1 主触点闭合, 主轴电动机开始顺时针旋转。当 CNC 输出主轴逆时针转信号, KF2 线圈得电, KF2 常开触点闭合后, QA2 线圈得电, QA2 主触点闭合, 主轴电动机开始逆时针旋转。当主轴顺时针转信号和主轴逆时针转信号都没有输出时, 主轴不旋转处于停止状态。

(5) 刀架电动机旋转控制: 当 CNC 输出刀架正转信号, KF4 线圈得电, KF4 常开触点闭合后, QA3 线圈得电, QA3 主触点闭合, 刀架电动机开始正转。当 CNC 输出刀架反信号, KF5 线圈得电, KF5 常开触点闭合后, QA4 线圈得电, QA4 主触点闭合, 刀架电动机开始反转。

(6) 换刀控制: 该车床的整个换刀过程是由 CNC 中的内置 PLC 控制的, 执行过程为 CNC 执行换刀指令→刀架正转信号输出, 刀架开始正转→接收到目标刀位的刀位信号→刀架正转信号停止输出, 延时设定的时间→刀架反正信号输出, 刀架反转并锁紧, 换刀结束。

(7) 冷却泵电动机控制: 当 CNC 输出冷却信号, KF3 线圈得电, KF3 常开触点闭合后, QA5 线圈得电, QA5 主触点闭合, 冷却泵电动机开始旋转。当 CNC 停止输出冷却信号或冷却信号没有输出时, KF3 线圈失电, KF3 常开触点断开, QA5 线圈失电, QA5 主触点断开, 冷却泵电动机停止旋转。

(8) 急停和限位控制: 该机床的急停按键(SF0)和限位的行程开关(BG1-1、BG1-2、BG2-1、BG2-2)都是使用常闭触点, 串联后接入到 CNC 急停信号中。当机床遇到紧急情况时, 按下急停按键, CNC 中急停信号与+24V 断开, CNC 出现急停报警。当问题解除, 复位急停按键后急停信号与+24V 导通, 按 CNC 中的复位键, 报警解除。当机床的一个轴超出行程压下限位开关, CNC 中急停信号与+24V 断开, CNC 出现急停报警。由于超程出现急停报警时, 可以按住 CNC 附件面板的超程解除按键(SF4)不放, 急停信号与+24V 导通, 复位取消急停报警后可以移动超程轴到行程范围内, 再松开超出解除按键。

(9) 回零减速控制: 该机床的回零减速信号(DECX、DECZ)都是使用的行程开关的常闭触点。CNC 执行回零时, 当对应的行程开关被压下, 回零减速信号与+24V 断开, 回零轴即开始减速运行。

(10) 外接循环启动控制: 当 CNC 处于自动方式下, 按下 CNC 附件面板的循环启动按键(SF3), 外接循环启动信号与+24V 导通, CNC 开始执行程序。

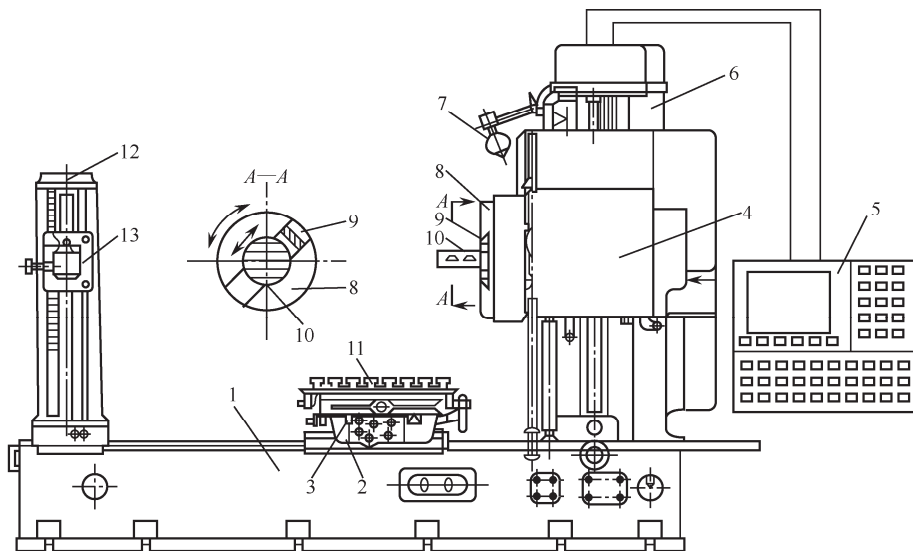
3. 保护和连锁电路分析

该机床电路中有较完整的保护设计：熔断器 FA 对主电路和控制电路起短路保护作用，热继电器 BB 对机床的三台三相异步电动机起过载保护作用，交流接触器 QA 和中间继电器 KF 起到失压保护作用。为避免电动机顺时针转和逆时针转控制的交流接触器同时得电导致电动机短路，该电路中进行了连锁设计，QA1 和 QA2 互锁，QA3 和 QA4 互锁。

9.2 卧式镗床电气与 PLC 控制

镗床是一种精密加工机床，主要用于孔的精加工。当加工的工件对孔的轴线要求严格的平行或垂直，相互间的距离也要求严格时，钻床就很难达到这些要求。而镗床自身刚性好，而且运动部件在导轨上的间隙小，并有附加支撑，所以能够满足这些孔的加工要求。镗床除了能完成镗孔加工，有些镗床还可以实现钻孔、扩孔、铰孔、车、铣等加工。这里以 T68 型镗床（该镗床使用的 CNC 为广州数控设备有限公司的 GSK 218M，使用的伺服驱动器为 DA01D，使用的伺服电动机为 175SJT-M180D 和 175SJT-M220D）为例进行介绍。

T68 型镗床属中型卧式镗床。T：镗床；6：卧式；8：镗轴直径为 85mm。图 9-5 所示是它的外形图。



1—床身；2—下溜板；3—上溜板；4—镗头架；5—CNC；6—前头柱；7—机床照明灯；8—平旋盘（花盘）；9—刀具溜板；10—主轴（镗轴）；11—回转工作台；12—后立柱；13—镗杆支撑架；

图 9-5 T68 型镗床外形图

9.2.1 卧式镗床主要结构

T68 卧式镗床的主要结构包括床身 1、前立柱 6、镗头架 4、后立柱 12、工作台(由上溜板 3、下溜板 2 和回转工作台 11 组成)。

(1) 床身: 卧式镗床的床身是由整体的铸件制成。

(2) 前立柱: 前立柱固定在床身的一端, 在前立柱的垂直导轨上装有镗头架 4, 可以上下移动。

(3) 镗头架: 镗头架中包含主轴(镗轴) 10、刀具溜板 9、平旋盘 8、主轴电动机及传动机构等。切削刀具安装在镗轴前端的锥孔中, 或装在平旋盘的刀具溜板上。在工作过程中, 镗轴一面旋转, 一面沿轴向做进给运动。平旋盘只能旋转, 装在它上的刀具溜板可在垂直于主轴轴线方向的径向做进给运动。在大部分工作情况下, 使用镗轴, 只有在用车刀切削端面才使用平旋盘。

(4) 后立柱: 后立柱上安装有尾架, 用来夹持在镗轴上的镗杆末端。尾架可以随镗头架同时升级, 并且保证其中心线和镗头架中心线在同一直线上。后立柱可在床身导轨上沿镗轴轴线方向作调整移动。

(5) 工作台: 由下溜板、上溜板和回转工作台三层组成。下溜板可在床身轨道上作纵向移动, 上溜板可在下溜板轨道上作横向移动, 回转工作台可在上溜板上转动。下溜板和上溜板的直线运动由两台交流伺服电动机驱动。回转工作台采用手动回转控制, 在 0° 、 90° 、 180° 、 270° 四个位置装有销钉定位, 保证可靠的定位精度。

9.2.2 卧式镗床的运动形式及控制要求

1. 运动形式

(1) 主运动: 镗轴的旋转运动和平旋盘的旋转运动。

(2) 进给运动: 镗轴的轴向进给、镗头架的垂直进给、工作台的横向进给与纵向进给。

(3) 辅助运动: 后立柱的纵向进给、尾架的垂直进给、回转工作台的回转。

2. 运动控制要求

镗床加工范围广、运动部件多、调速范围广, 对运动控制提出如下要求:

(1) 主轴具有较大的调速范围, 并且要求有足够的输出转矩。可以实现十几转到几千转的无级调速。

(2) 主轴能做正/反转和低速点动调整, 要求主轴电机实现正反转和点动控制。为主轴能迅速准确停车, 要求具有制动装置。

(3) 各进给轴足够的运行精度、运行平稳性、输出转矩。

9.2.3 卧式镗床电气原理图分析

1. 主电路分析

图 9-6 所示是 T68 型镗床电气原理图主电路部分。

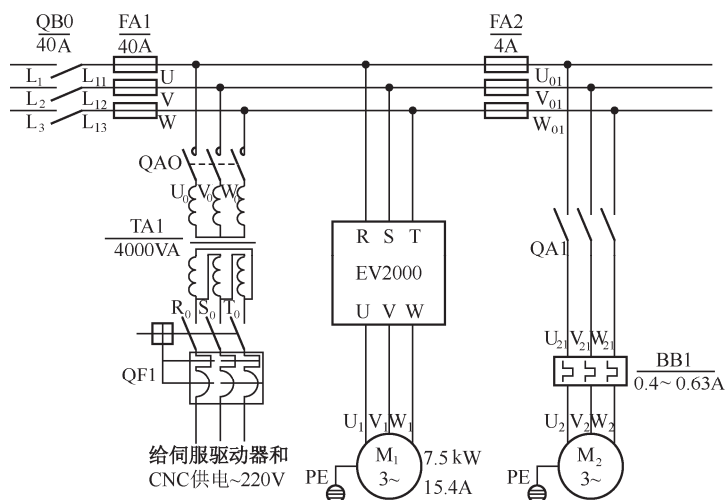


图 9-6 T68 型镗床电气原理图主电路部分

主电路中有两台三相异步电动机， M_1 为主轴电动机、 M_2 为冷却泵电动机。除了这两台三相异步电动机，主电路还包括给 CNC 和伺服驱动器供电部分，在图中没有详细画出。

三相交流 380V 电源通过转换开关 QB0 引入，FA1、FA2 起短路保护作用，BB1 对冷却泵电动机起过载保护作用。艾默生变频器 EV2000 控制主轴电动机旋转、停止等，并具有过载保护、过流保护、缺相保护、过压保护等多种保护功能。主轴电动机的制动采用能耗制动，在变频器中连接制动电阻，以消耗制动能量。QA1 控制水泵电动机的启动和停止。QA0 控制给隔离变压器输入端输入 380V 交流电，隔离变压器输出的 220V 交流电经过一塑料外壳式断路器给伺服驱动器和 CNC 供电。

另外，为防止电动机外壳漏电伤人，电动机外壳均与地线连接。

2. 控制电路分析

T68 卧式镗床的控制电路部分电气原理图如图 9-7 和 9-8 所示。该镗床的主要输入/输出信号有 M_3 (主轴顺时针转)、 M_4 (主轴逆时针转)、 M_8 (冷却)、ESP (急停信号)、DECX (X 轴回零减速信号)、DECY (Y 轴回零减速信号)、DECZ (Z 轴回零减速信号)、DEC4th (4th 轴回零减速信号)、ST (外接循环启动信号)。这些输入/输出信号的控制和处理都是由 CNC 或 CNC 内置的 PLC 完成。

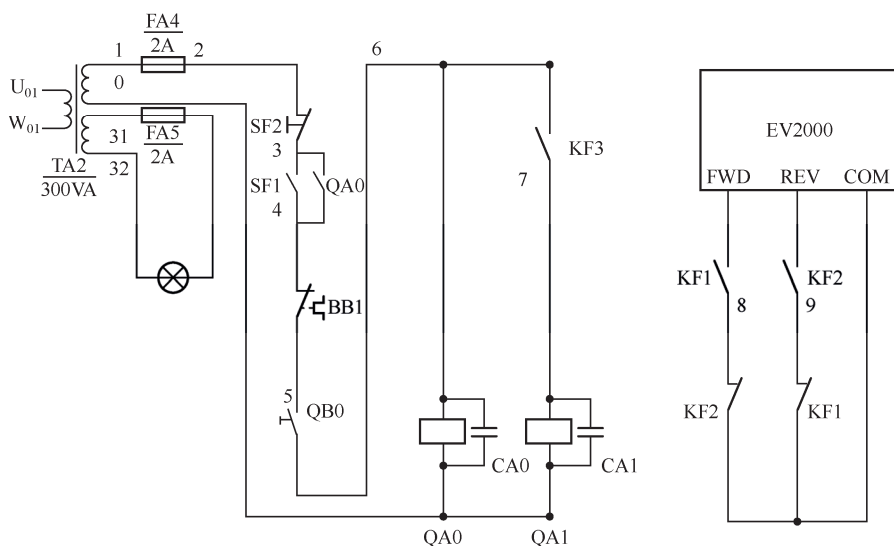


图 9-7 T68 镗床电气原理图控制电路部分 1

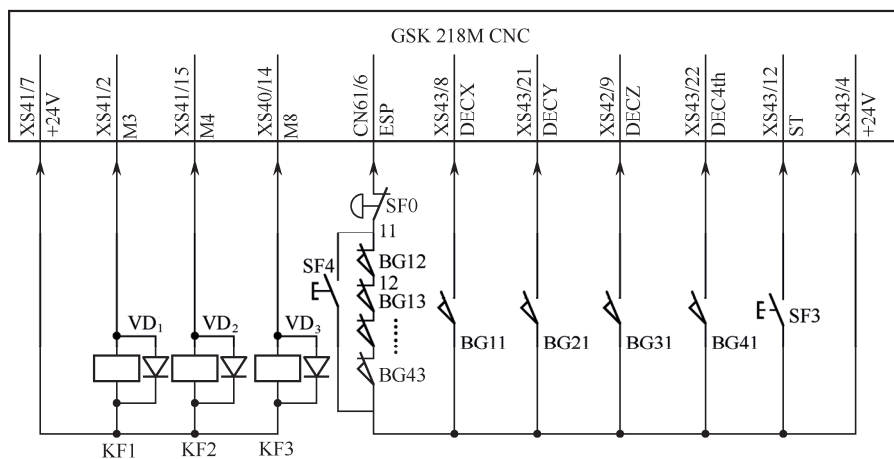


图 9-8 T68 镗床电气原理图控制电路部分 2

(1) 机床照明电路：通过控制变压器 TA2 输出的 24V 交流电给机床照明灯供电，采用熔断器 FA5 短路保护。

(2) 控制电路电源：通过控制变压器 TA2 输出的 110V 交流电压供电，采用熔断器 FA4 作短路保护。

(3) 伺服驱动器和 CNC 供电控制：旋转转换开关 QB0 三相 380V 交流电引入机床，同时 QB0 的常开辅助触点闭合。按下按钮 SF1，交流接触器 QA0 线圈得电，QA0 主触点闭合，QA0 辅助常开触点闭合形成自锁，伺服驱动器和 CNC 得电。按下按钮 SF2，QA0 线圈断电，QA0 的主触点和辅助触点断开，伺服驱动器和 CNC 断电，自锁解除。

(4) 主轴旋转控制：该机床的主轴采用变频器（艾默生 EV2000）驱动，通过 CNC 的输出信号实现对主轴电动机的正转、反转、停止、点动等控制。当 CNC 输出主轴顺时针

转信号, KF1 线圈得电, KF1 常开触点闭合后, 变频器的 FWD 端与 COM 端导通顺时针旋转有效, 主轴电动机开始顺时针旋转。当 CNC 输出主轴逆时针转信号, KF2 线圈得电, KF2 常开触点闭合后, 变频器的 REV 端与 COM 端导通逆时针转有效, 主轴电动机开始逆时针旋转。当主轴顺时针转信号和主轴逆时针转信号都没有输出时, 主轴不旋转处于停止状态。当按下 CNC 操作面板的“点动”按键, 主轴顺时针转信号有输出, 主轴以一定速度顺时针旋转, 当松开“点动”按键, 主轴停止旋转。

(5) 主轴转速控制: 该机床的主轴采用变频器驱动, 通过 CNC 主轴接口输出的模拟电压信号 (0~10V) 到变频器 CCI 接口中, 控制主轴的转速, 可以实现 1~6000r/min 的无级调速。

(6) 冷却泵电动机控制: 当 CNC 输出冷却信号, KF3 线圈得电, KF3 常开触点闭合后, QA1 线圈得电, QA1 主触点闭合, 冷却泵电动机开始旋转。当 CNC 停止输出冷却信号或冷却信号没有输出时, KF3 线圈失电, KF3 常开触点断开, QA1 线圈失电, QA5 主触点断开, 冷却泵电动机停止旋转。

(7) 急停和限位控制: 该机床的急停按键 (SF0) 和限位的行程开关 (BG12、BG13、BG22、BG23、BG32、BG33、BG42、BG43) 都是使用常闭触点, 并串联后接入到 CNC 急停信号中。当机床遇到紧急情况时, 按下急停按键, CNC 中急停信号与+24V 断开, CNC 出现急停报警。当问题解决, 复位急停按键后急停信号与+24V 导通, 按 CNC 中的复位键, 报警解除。当机床的一个轴超出行程压下限位开关, CNC 中急停信号与+24V 断开, CNC 出现急停报警。当由于超程出现急停报警时, 可以按住 CNC 附件面板的超程解除按键 (SF4) 不放, 急停信号与+24V 导通, 复位取消急停报警后可以移动超程轴到行程范围内, 再松开超出解除按键。

(8) 回零减速控制: 该机床的回零减速信号 (DECX、DECY、DECZ、DEC4th) 都是使用的行程开关的常闭触点。CNC 执行回零时, 当对应的行程开关被压下, 回零减速信号与+24V 断开, 回零轴即开始减速运行。

(9) 外接循环启动控制: 当 CNC 处于自动方式下, 按下 CNC 附件面板的循环启动按键 (SF3), 外接循环启动信号与+24V 导通, CNC 开始执行程序。

3. 综合分析

数控技术的应用不仅提高了机床的加工精度和加工效率, 而且大大简化了机床电气控制电路。很多复杂的控制逻辑由 CNC 的内置 PLC 处理, 大大减少了电气线路复杂程度, 方便机床电气部分的安装、维修, 并降低了故障的发生概率。

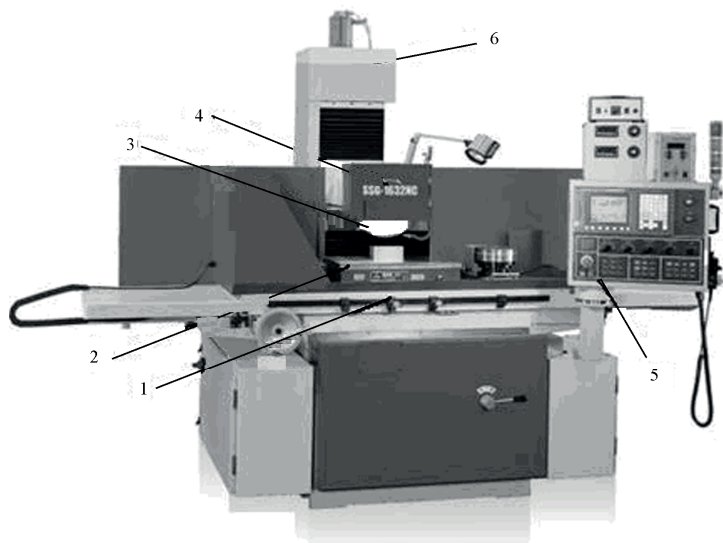
9.3 平面磨床电气控制

磨床是用砂轮、砂带、研磨剂、油石等作为工具对金属表面进行精加工的机床。磨床种类很多, 有平面磨床、外圆磨床、内圆磨床、导轨磨床、工具磨床、刀具刃具磨床及一些专用磨床, 如曲轴磨床、螺纹磨床、球面磨床和齿轮磨床等。本节以平面磨床为例进行介绍。

M7120 型平面磨床是用砂轮来磨削工件的平面，它的磨削精度和粗糙度都比较高，是应用较普遍的一种机床。M：磨床；7：平面磨床；1：卧轴矩台——砂轮主轴与地面平行；矩形工作台；20：工作台工作面宽 200mm。

9.3.1 平面磨床主要结构

图 9-9 所示是 M7120 平面磨床外形图。平面磨床主要由工作台、砂轮、立柱、CNC、砂轮箱等部分组成。



1—液压换向开关；2—电磁吸盘；3—砂轮；4—砂轮箱；
5—CNC；6—立柱导轨；7—工作灯；8—工作台

图 9-9 M7120 平面磨床外形图

工作台上装有电磁吸盘用来吸持工件，工作台可在床身导轨上往返（纵向）运动。砂轮可在床身上的横向导轨上作横向进给；砂轮箱可在立柱导轨上做垂直运动。

9.3.2 平面磨床的运动形式

1. 运动形式

- (1) 主运动：平面磨床的主运动是砂轮的旋转运动。
- (2) 纵向进给：平面磨床的纵向进给是工作台沿床身导轨的往复运动。
- (3) 横向进给：平面磨床的横向进给是砂轮箱的水平运动。
- (4) 垂直进给：平面磨床的垂直进给是砂轮箱沿立柱导轨的垂直运动。

2. 控制要求

(1) 平面磨床的主运动是砂轮的旋转，砂轮旋转方向固定、不需要调速且负载不大。使用三相异步电动机拖动，控制采取全压启动、不需调速和制动。

(2) 平面磨床的纵向运动为往复运动并且没有移动距离的精度要求, 故使用液压系统来驱动。机床工作台是在液压推动活塞杆的带动下往复运动的; 换向开关给 CNC 信号, CNC 的内置 PLC 处理控制输出信号改变油路实现往复运动的换向控制。平面磨床的横向进给和垂直进给有一定的移动距离精度要求, 故由交流伺服电动机拖动。

(3) 当加工工件为导磁材料时, 一般使用电磁吸盘吸持工件。只有当电磁吸盘的吸力足够大时, 才能启动液压泵电动机 M_1 和砂轮电动机 M_2 , 以防止吸力过小吸不住工件, 砂轮使工件高速飞出的事故电磁吸盘需有欠压保护。

(4) 冷却泵电动机只需单向旋转, 因容量不大, 采用全压启动。

(5) 电磁吸盘有去磁的控制环节。在电磁吸盘中通入反向直流小电流可以使工件去磁, 方便工件拆卸。

9.3.3 平面磨床的电气与 PLC 控制

1. 主电路分析

图 9-10 所示是 M7120 平面磨床电气原理图主电路部分。

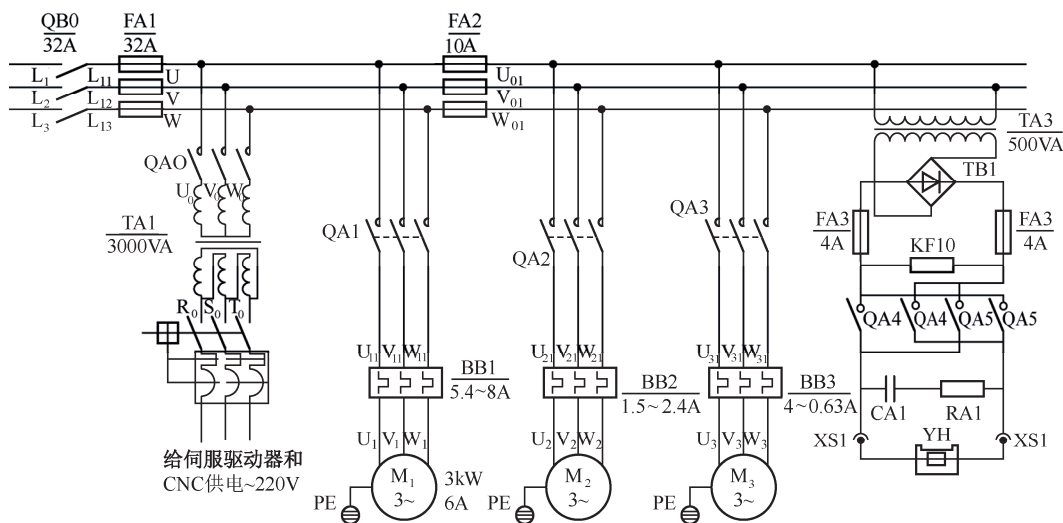


图 9-10 M7120 平面磨床电气原理图主电路部分

主电路中有三台三相异步电动机, M_1 为砂轮电动机, M_2 为液压泵电动机, M_3 为冷却泵电动机。除了这三台三相异步电动机, 主电路还包括电磁吸盘整流电路部分和给 CNC 和伺服驱动器供电部分, 在图中没有详细画出。

三相交流 380V 电源通过转换开关 QB0 引入, FA1、FA2、FA3 起短路保护作用, BB1、BB2、BB3 分别对砂轮电动机、液压泵电动机、冷却泵电动机起过载保护作用。QA1 控制砂轮电动机的启动和停止。QA2 控制液压泵电动机的启动和停止。QA3 控制冷却泵电动机的启动和停止。电磁吸盘整流部分由整流变压器 TA3 和桥式整流电路 TB1 组成, 提供 110V 直流电压。QA4 控制给隔离变压器输入端输入 380V 交流电, 隔离变压器输出的 220V 交流电经过一塑料外壳式断路器给伺服驱动器和 CNC 供电。

另外, 为防止电动机外壳漏电伤人, 电动机外壳均与地线连接。

2. 控制电路分析

M7120 平面磨床的控制电路部分电气原理图如图 9-11 和图 9-12 所示。该磨床的主要输入/输出信号有 GWK (砂轮电机旋转)、HPK (液压电机旋转)、RAK (冷却输出)、USE01 (向左移动输出)、USE02 (向右移动输出)、LHK (吸持工件输出)、ESP (急停信号)、DECY (Y 轴回零减速信号)、DECZ (Z 轴回零减速信号)、SCARER1 (工作台向左换向挡块输入信号)、SCARER2 (工作台向右换向挡块输入信号)、ST (外接循环启动信号)。

这些输入/输出信号的控制和处理都是由 CNC 或 CNC 内置的 PLC 完成。

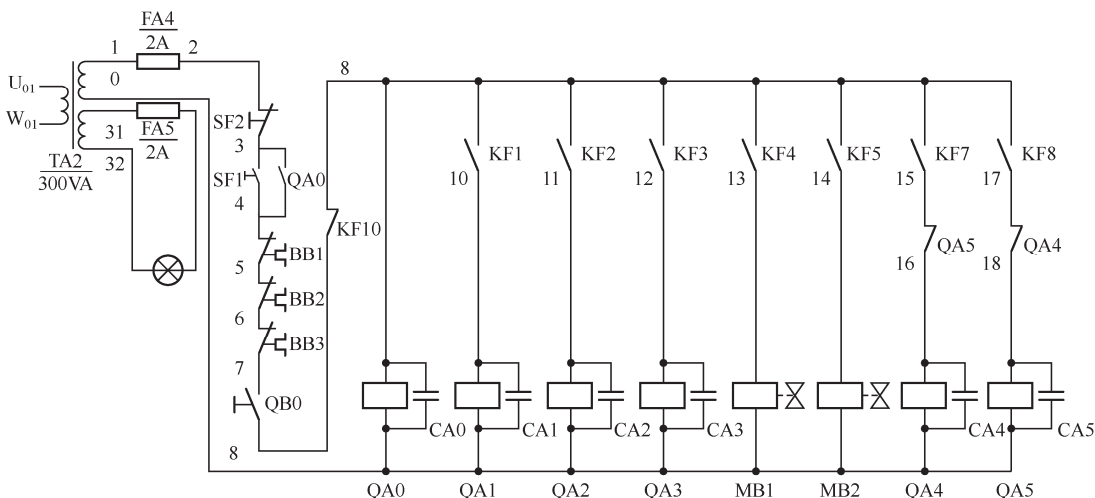


图 9-11 M7120 平面磨床电气原理图控制电路部分 1

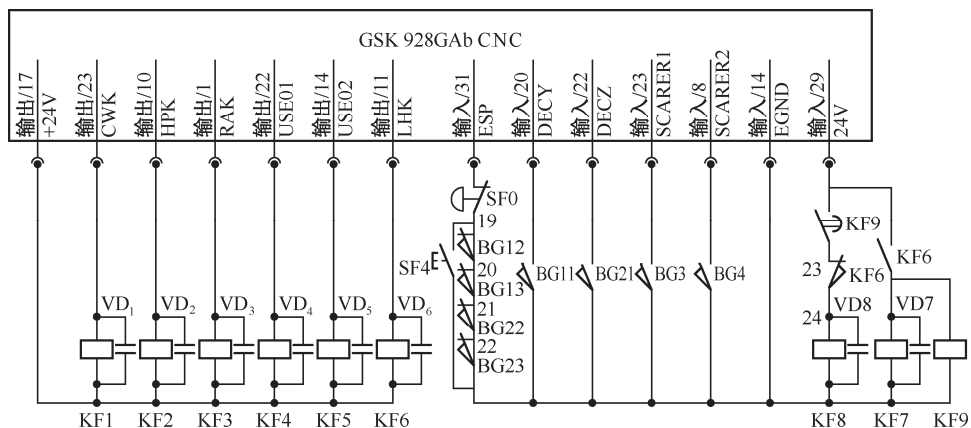


图 9-12 M7120 平面磨床电气原理图控制电路部分 2

(1) 机床照明电路: 通过控制变压器 TA2 输出的 24V 交流电给机床照明灯供电, 采用熔断器 FA5 作短路保护。

(2) 控制电路电源: 通过控制变压器 TA2 输出的 110V 交流电压供电, 采用熔断器 FA4 作短路保护。

(3) 伺服驱动器和 CNC 供电控制: 旋转转换开关 QB0 三相 380V 交流电引入机床, 同时 QB0 的常开辅助触点闭合。按下按钮 SF1, 交流接触器 QA0 线圈得电, QA0 主触点闭合, QA0 辅助常开触点闭合形成自锁, 伺服驱动器和 CNC 得电。按下按钮 SF2, QA0 线圈断电, QA0 的主触点和辅助触点断开, 伺服驱动器和 CNC 断电, 自锁解除。

(4) 砂轮电动机旋转控制: 当 CNC 输出砂轮电动机旋转信号, KF1 线圈得电, KF1 常开触点闭合后, QA1 线圈得电, QA1 主触点闭合, 砂轮电动机开始旋转。当砂轮电动机旋转信号没有输出时, 砂轮电动机停止旋转。

(5) 液压泵电动机旋转控制: 当 CNC 输出液压泵电动机旋转信号, KF2 线圈得电, KF2 常开触点闭合后, QA2 线圈得电, QA2 主触点闭合, 液压泵电动机开始旋转。当液压泵电动机旋转信号没有输出时, 液压泵电动机停止旋转。

(6) 电磁吸盘控制: 当 CNC 输出工件吸持信号, KF6 线圈得电, KF6 常开触点闭合、常闭触点断开。KF7 和 KF9 线圈得电, KF7 常开触点闭合, KF9 延时断开常开触点闭合。交流接触器 QA4 线圈得电, 主触点闭合。电磁吸盘充磁, 吸持工件, 此时直流电流回路为 TB 正极→FA3→QA4 主触点→XS1 插座→电磁线圈 YH→XS1 插座→QA4 主触点→FA3→TB 负极。

(7) 当 CNC 停止输出工件吸持信号, KF6 线圈断电, KF6 常开触点断开、常闭触点闭合。KF7 和 KF9 线圈断电, KF7 常开触点断开。KF8 线圈得电, KF8 常开触点闭合。交流接触器 QA5 线圈得电, QA5 主触点闭合。电磁吸盘去磁, 卸下工件, 此时直流电流回路为 TB 正极→FA3→QA5 主触点→XS1 插座→电磁线圈 YH→XS1 插座→QA5 主触点→FA3→TB 负极。当延时时间到 KF9 延时断开常开触点断开, KF8 线圈断电, QA5 线圈断电, 无电流流经电磁线圈 YH, 去磁结束。

(8) 工作台纵向运动控制: 液压电动机旋转后, CNC 输出向左移动信号, KF4 线圈得电, 常开触点闭合。电磁阀 MB1 得电动作, 改变油路, 推动工作台向左移动。当压下行程开关, 工作台向右换向挡块信号输入到 CNC 中, CNC 停止输出向左移动信号, 输出向右移动信号。KF4 线圈断电, 常开触点断开; KF5 线圈得电, 常开触点闭合。电磁阀 MB1 断电, 电磁阀 MB2 得电, 改变油路, 推动工作台向右移动。当压下行程开关, 工作台向左换向挡块信号输入到 CNC 中, CNC 停止输出向右移动信号, 输出向左移动信号, 如此往复。

(9) 冷却泵电动机控制: 当 CNC 输出冷却信号, KF3 线圈得电, KF3 常开触点闭合后, QA3 线圈得电, QA3 主触点闭合, 冷却泵电动机开始旋转。当 CNC 停止输出冷却信号或冷却信号没有输出时, KF3 线圈失电, KF3 常开触点断开, QA3 线圈失电, QA3 主触点断开, 冷却泵电动机停止旋转。

(10) 急停和限位控制: 该机床的急停按键 (SF0) 和限位的行程开关 (BG1-1、BG1-2、BG2-1、BG2-2) 都是使用常闭触点, 并串联后接入到 CNC 急停信号中。当机床遇到紧急情况时, 按下急停按键, CNC 中急停信号与 0V 断开, CNC 出现急停报警。当问题解除, 复位急停按键后急停信号与 0V 导通, 按 CNC 中的复位键, 报警解除。当机床的一个轴超

出行程压下限位开关，CNC 中急停信号与 0V 断开，CNC 出现急停报警。当由于超程出现急停报警时，可以按住 CNC 附件面板的超程解除按键（SF4）不放，急停信号与+24V 导通，复位取消急停报警后可以移动超程轴到行程范围内，再松开超出解除按键。

（11）回零减速控制：该机床的回零减速信号（DECY、DECZ）都是使用的行程开关的常闭触点。CNC 执行回零时，当对应的行程开关被压下，回零减速信号与 0V 断开，回零轴即开始减速运行。

（12）外接循环启动控制：当 CNC 处于自动方式下，按下 CNC 附件面板的循环启动按键（SF3），外接循环启动信号与 0V 导通，CNC 开始执行程序。

3. 保护和连锁电路分析

电磁吸盘线圈两端并联了保护部分有放电电阻和放电电容。由于电磁工作台线圈是一个大电感，当断电瞬间，在线圈中会产生较大的自感应电动势，若无放电电路，将损坏绝缘线圈及其他电气元件，故在线圈两端接有 RC 放电回路，以吸收线圈在断电瞬间释放出的磁场能量。

在电磁吸盘整流电路中接有欠电压继电器 KF10。当电压不足，电磁吸盘吸力不足时，KF10 常开触点断开，控制电路中交流 110V 断开，所有交流接触器线圈断电，平面磨床停止运动。

在交流接触器 QA4 和 QA5 线圈控制电路中分别串联了 QA5 和 QA4 的常闭触点，形成连锁。

9.4 立式加工中心的电气与 PLC 控制

加工中心是带有刀库和自动换刀装置，能够一次装夹连续对工件进行铣削、钻孔、镗孔、铰孔、攻丝等多工序加工的数控机床。加工中心一般可以实现三轴联动，有的可以实现四轴或五轴联动。加工中心与其他数控机床相比，主要特点是能够实现一次装夹完成多工序的加工。加工中心功能齐全，它大大减少了工件的装夹次数、测量和机床调整的时间。不仅提高了工件的加工精度，而且减少了工件的周转、搬运和存放时间，提高了机床的利用率。当要加工形状比较复杂并且精度要求高、品种更换频繁的工件时，加工中心的特点更明显。

加工中心按照布局形式可以分为卧式加工中心、立式加工中心、龙门式加工中心、万能加工中心。立式加工中心是比较常见的加工中心，本节以立式加工中心为例进行介绍。立式加工中心是指主轴中心线处于垂直状态的加工中心，结构大部分为固定立柱式，工作台为长方形。

9.4.1 立式加工中心的结构

图 9-13 所示是 VMC850B 立式加工中心外形结构图。立式加工中心主要由 5 部分组成。

（1）基础部件：它是立式加工中心的基础结构，由床身、工作台、导轨和立柱等结构

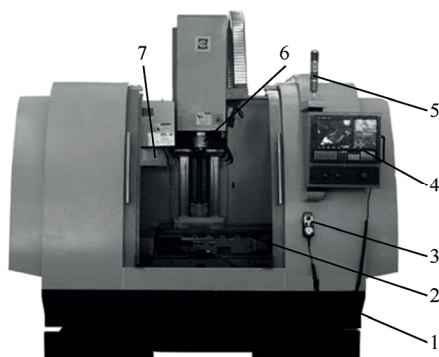
组成，主要承受立式加工中心的加工工件时的切削负载和静负荷，因此，要求基础部件有足够的刚性。加工中心的导轨可分为硬轨和线轨两种。

(2) 主轴部件：它是由主轴电动机、主轴箱、主轴、主轴编码器、轴承等组成。主轴电动机的旋转带动主轴及主轴上的刀具旋转进行切削。主轴电动机一般有主轴伺服驱动器或变频器驱动。

(3) 控制系统：由 CNC、伺服进给驱动器、附件操作面板等组成。对立式加工中心的伺服进给、主轴控制、自动换刀、辅助功能等进行控制。

(4) 自动换刀系统：主要由刀库组成。自动换刀系统一般由电动机和气压带动各动作的进行，实现主轴上刀具的切换。常见的刀库类型为圆盘式刀库和斗笠式刀库。

(5) 辅助装置：包括冷却、润滑、防护、气动、自动对刀仪和检测等部分。这些装置对加工中心提高加工效率，以及加工精度和可靠性提供保障发挥着重要作用。



1—床身；2—工作台；3—手持脉冲单元；

4—CNC；5—机床工作状态指示灯；6—主轴；7—刀库

图 9-13 VMC850B 立式加工中心外形结构图

9.4.2 立式加工中心的运动形式及控制要求

1. 运动形式

(1) 主运动：立式加工中心的主运动是主轴电动机带动主轴及主轴上刀具旋转。

(2) 进给运动：立式加工中心的进给运动是工作台在 X 轴和 Y 轴方向的运动及主轴在 Z 轴方向的运动。

2. 控制要求

(1) 主运动：立式加工中心加工工件类型和工序较多，主轴的转速要求几转到几千转的无级调速，并要求能够快速启停和正反转控制。要能够进行自动换刀，要求主轴能够实现准停。要能够进行刚性攻丝要求主轴电动机既能进行速度方式控制，又能进行位置方式控制。

(2) 进给运动：立式加工中心要求进给轴能够实现高精度的快速定位、高稳速精度、在运动过程中振动小。VMC850B 立式加工中心 X 轴和 Y 轴快速移动能达到 16m/min、Z 轴快速移动速度能达到 12m/min，定位精度 $\pm 0.008\text{mm}$ ，重复定位精度 $\pm 0.003\text{mm}$ 。

(3) 自动换刀控制：立式加工中心能够快速、准确地进行任意刀具的自动换刀。自动换刀是由 CNC 控制刀库、主轴、机械手联合动作实现换刀。刀库的种类有很多：圆盘式刀库、斗笠式刀库、链式刀库等。本节介绍的 VMC850B 立式加工中心是斗笠式刀库。

9.4.3 立式加工中心的电气与 PLC 控制分析

1. 主电路分析

图 9-14 所示是 VMC850B 立式加工中心电气原理图主电路部分。

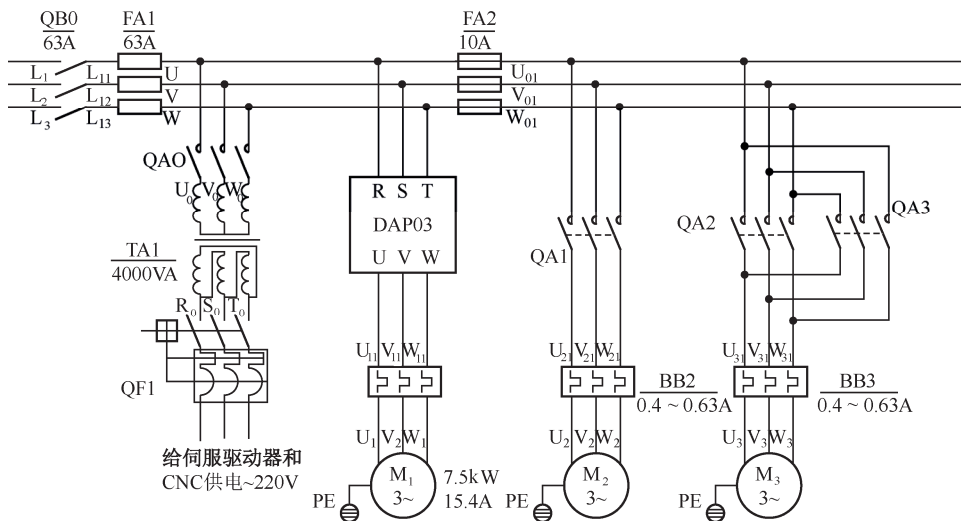


图 9-14 VMC850B 立式加工中心电气原理图主电路部分

主电路中有三台电动机， M_1 为交流主轴电动机， M_2 为冷却泵电动机， M_3 为刀库旋转电动机。除了这三台电动机，主电路还包括给 CNC 和伺服驱动器供电部分，在图中没有详细画出。

三相交流 380V 电源通过转换开关 QB0 引入，FA1、FA2 起短路保护作用，BB1、BB2 分别对冷却泵电动机、刀库旋转电动机起过载保护作用。QA1 控制冷却泵电动机的启动和停止。QA2 和 QA3 控制刀库旋转电动机的正反转。QA0 控制给隔离变压器输入端输入 380V 交流电，隔离变压器输出的 220V 交流电经过一塑料外壳式断路器给伺服驱动器和 CNC 供电。

另外，为防止电动机外壳漏电伤人，电动机外壳均与地线连接。

2. 控制电路分析

VMC850B 立式加工中心的主电路部分电气原理图如图 9-15 和图 9-16 所示。该立式加工中心的主要输入/输出信号有 DECX (X 轴回零减速信号)、DECY (Y 轴回零减速信号)、DECZ (Z 轴回零减速信号)、+LX/-LX/+LY/-LY/+LZ/-LZ (X 轴、Y 轴、Z 轴正向/负向硬限位信号)、AIRPRE.ALM (气压检测报警输入信号)、MGPLA.ALM (刀盘电动机过载输入信号)、TRLCK.I (松刀到位检测)、TCLCK.I (紧刀到位检测)、CKST (松紧刀

按钮)、TZER.I (刀库回零信号)、TCN.I (刀计数信号)、TFN.I (刀库前进到位)、TBK.I (刀库后退到位)、CLN.O (冷却输出)、MGFR.O (刀库前进)、MGBK.O (刀库后退)、TRL.M (松刀输出)、MGCW.O (刀库顺时针转)、MGCCW.O (刀库逆时针转)。这些输入/输出信号的控制和处理都是由 CNC 或 CNC 内置的 PLC 完成。

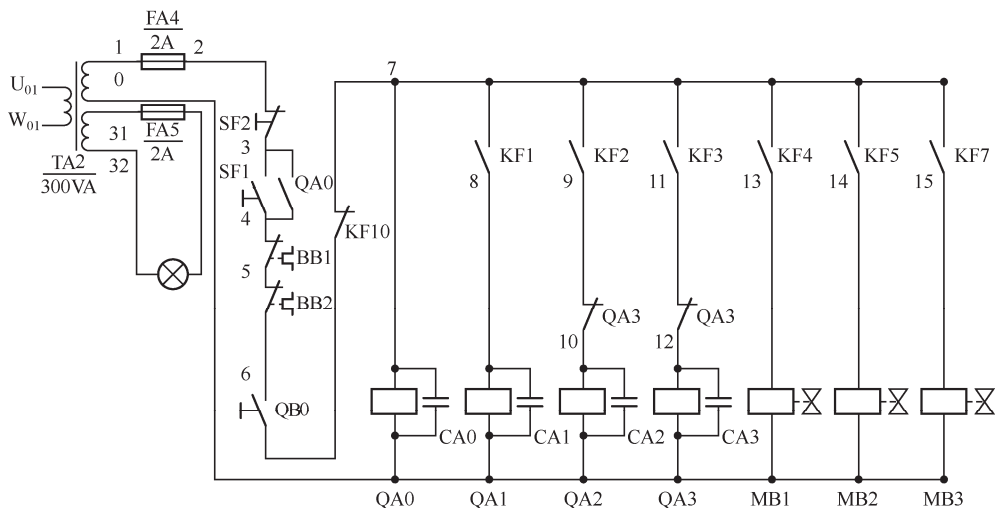


图 9-15 VMC850B 立式加工中心电气原理图控制电路部分 1

(1) 机床照明电路：通过控制变压器 TA2 输出的 24V 交流电给机床照明灯供电，采用熔断器 FA5 短路保护。

(2) 控制电路电源：是通过控制变压器 TA2 输出的 110V 交流电压供电，采用熔断器 FA4 作短路保护。

(3) 伺服驱动器和 CNC 供电控制：旋转转换开关 QB0 三相 380V 交流电引入机床，同时 QB0 的常开辅助触点闭合。按下按钮 SF1，交流接触器 QA0 线圈得电，QA0 主触点闭合，QA0 辅助常开触点闭合形成自锁，伺服驱动器和 CNC 得电。按下按钮 SF2，QA0 线圈断电，QA0 的主触点和辅助触点断开，伺服驱动器和 CNC 断电，自锁解除。

(4) 回零减速控制：该机床的回零减速信号 (DECX、DECY、DECZ) 都是使用的行程开关的常闭触点。CNC 执行回零时，当对应的行程开关被压下时，回零减速信号与 +24V 断开，回零轴即开始减速运行。

(5) 硬限位保护控制：该机床 X 轴、Y 轴、Z 轴正向/负向硬限位信号都是使用的行程开关的常闭触点。当某一行程开关被压下时，对应的硬限位信号与 +24V 断开，CNC 出现相应的硬限位报警，并停止机床各轴的移动。当出现硬限位报警时，在手动或手脉方式下，向报警轴的反方向移动，触点恢复闭合后复位，报警即取消。

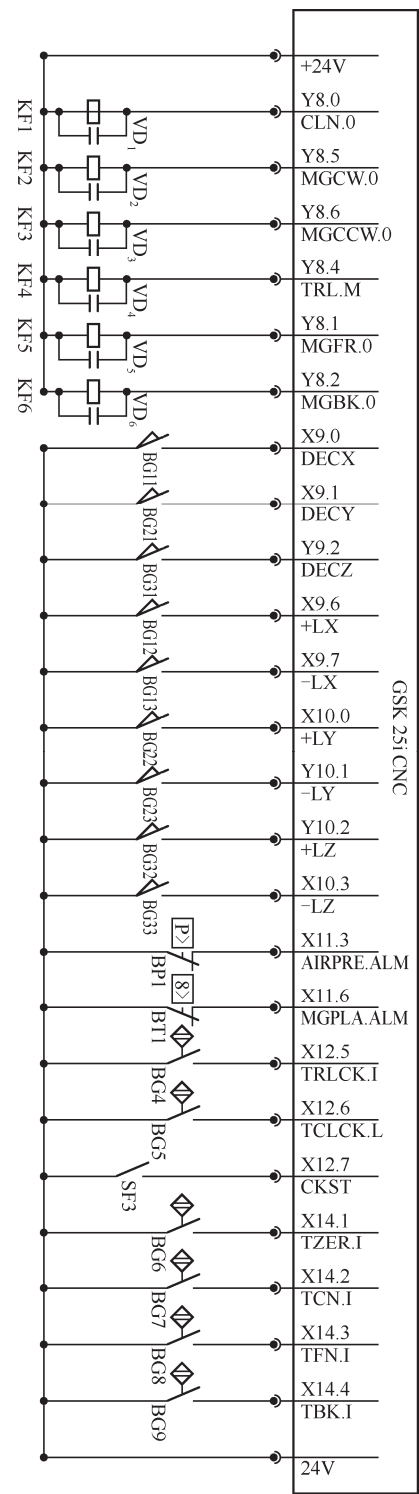


图 9-16 VMC850B 立式加工中心电气原理图图控制电路部分 2

(6) 松紧刀控制: 在紧刀状态下, 按下外接松紧刀按钮 (SF3) 或按下 CNC 操作面板的松紧刀按键或执行松刀指令, 松刀输出信号有输出, KF4 线圈得电, KF4 常开触点闭合。电磁阀 MB1 得电动作, 改变气路推动活塞向松刀方向移动, 当检测到松刀到位信号后松刀完成。在松刀状态下, 松开外接松紧刀按钮 (SF3) 或松开 CNC 操作面板的松紧刀按键或执行紧刀指令, 松刀输出信号停止输出, KF4 线圈失电, KF4 常开触点断开。电磁阀 MB1 失电, 改变气路推动活塞向紧刀方向移动, 当检测到紧刀到位信号后紧刀完成。

(7) 刀库前进/后退控制: 在刀库调试模式下, 按下 CNC 操作面板刀库前进按键, 刀库前行信号有输出, 刀库向主轴方向移动; 按下 CNC 操作面板刀库后退按键, 刀库后退信号有输出, 刀库向原位移动。在非调试模式下, 当满足条件时, 执行刀库前进指令, 刀库前进信号有输出, 刀库移动, 检测到刀库前进到位信号后, 指令执行完成; 执行刀库后退指令, 刀库后退信号有输出, 刀库移动, 检测到刀库后退到位信号后, 指令执行完成。当刀库前进信号有输出, KF5 线圈得电, 常开触点闭合。电磁阀 MB2 得电, 改变气路推动活塞, 刀库向靠近主轴方向移动。当刀库后退信号有输出, KF6 线圈得电, 常开触点闭合。电磁阀 MB3 得电, 改变气路推动活塞, 刀库向远离主轴方向移动。

(8) 刀盘旋转控制: 在刀库调试模式下, 按下操作面板刀盘顺时针转按键, 刀库顺时针转信号有输出, 刀盘顺时针旋转一个刀位后停止; 按下操作面板刀盘逆时针转按键, 刀库逆时针转信号有输出, 刀盘逆时针旋转一个刀位后停止。在非刀库调试模式下, 执行选刀指令, 根据当前刀号和目标刀号选择最短路径, 并计算需要经过多少个刀位。输出对应的刀盘旋转信号, 当刀位计数信号变化一定次数后, 停止刀盘旋转, 选刀完成。到刀盘顺时针旋转信号有输出, KF2 线圈得电, 常开触点闭合。交流接触器 QA2 线圈得电, 常开触点闭合、常闭触点断开, 刀盘电动机开始顺时针旋转。当刀盘逆时针旋转信号有输出, KF3 线圈得电, 常开触点闭合。交流接触器 QA3 线圈得电, 常开触点闭合、常闭触点断开, 刀盘电动机开始逆时针旋转。

(9) 自动换刀控制: 自动换刀动作流程图, 也是宏程序流程图如图 9-17 所示。

(10) 冷却泵电动机控制: 当 CNC 输出冷却信号, KF1 线圈得电, KF1 常开触点闭合后, QA1 线圈得电, QA1 主触点闭合, 冷却泵电动机开始旋转。当 CNC 停止输出冷却信号或冷却信号没有输出时, KF1 线圈失电, KF1 常开触点断开, QA1 线圈失电, QA1 主触点断开, 冷却泵电动机停止旋转。

3. 主轴控制分析

VMC850B 立式加工中心由交流主轴驱动器 DAP03 控制 7.5kW 交流主轴电动机。如图 9-18 所示, 为主轴部分连接示意图。三相交流 380V 电源从 R、S、T 端接入, P 和 B 连接制动电阻, U、V、W、PE 连接交流主轴电动机电机线, 接口 CN2 连接交流主轴电动机编码器, CN1 连接控制信号线。控制信号线连接 CNC 和交流主轴驱动器, 利用控制信号线中的信号能够实现 CNC 对主轴的控制, 如: 主轴的正反转控制、主轴转速控制、主轴准停等等; 同时还有反馈信号反馈到 CNC 中, 如: 主轴转速反馈、速度到达、准停完成等。

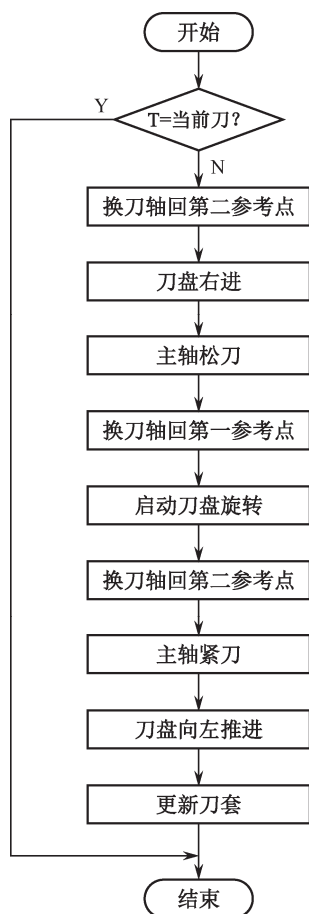


图 9-17 斗笠式刀库自动换刀动作流程图

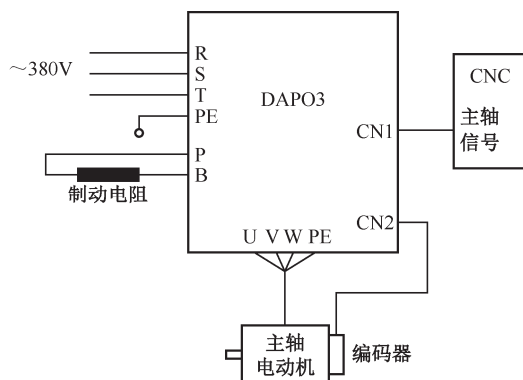


图 9-18 交流主轴驱动器 DAP03 主轴部分连接示意图

9.5 本章小结

本章通过几种典型机床的电气与 PLC 控制系统的分析和介绍,使读者了解各种电气控制线路的应用及一些典型机构的控制逻辑。进而掌握相关的机床电气与 PLC 控制系统的方法,提高了阅读电气控制线路图和故障分析的能力,同时也为设计一般电气控制线路打下基础。

分析数控机床的电气与 PLC 控制系统时,首先应对该机床的类型、使用的 CNC、进给轴拖动形式、主轴拖动形式、CNC 操作、进给轴伺服驱动器功能及操作、变频器或主轴伺服驱动器功能及操作、各部件的动作逻辑等有一般的了解。在此基础上,无论采用哪种读图法,都首先阅读主电路和执行元件电路,看其如何反应拖动特点及各电动机的控制和保护情况;然后再阅读控制电路,看控制线路是如何实现上述要求的。在分析控制线路时,可按控制功能的不同,划分成若干基本控制环节,逐一进行分析。在分析时,要逐一分析它们之间的相互连锁关系,最后再全面地看整个线路。所以,在分析控制电路时,可按“化整为零看线路,积零为整看全部”来进行,同时还要注意 CNC 内置 PLC 逻辑控制与机床电动机控制相结合。最后再阅读其他辅助电路。如果能进行现场教学,那么将更有助于增强实践和提高读图能力。

9.6 思考与练习

1. 试总结分析数控机床电气与 PLC 控制的一般步骤和方法?
2. 试分析 CA6140 的控制电路的保护环节有哪些?
3. 试分析 CA6140 的控制电路发生下列情况时的故障原因:
 - (1) 冷却泵电动机无法启动。
 - (2) 执行换刀操作,刀架一直旋转不能停止。
 - (3) 主轴可以顺时针旋转,无法逆时针旋转。
4. 本章中介绍的 T68 数控镗床的主轴控制是怎么实现的?有什么功能?
5. M7120 平面磨床中欠电压继电器的作用是什么?是否可以用电流继电器来代替?电路应如何连接?
6. 试设计立式加工中心工作状态指示灯(又称三色灯,红灯表示报警、黄灯表示准备就绪,绿灯表示加工中)控制电路及 PLC 逻辑。
7. 试分析斗笠式刀库,刀盘前进的条件是什么?
8. 试寻找资料了解圆盘式刀库换刀的动作过程,并画出圆盘式刀库换刀动作流程图。

Chapter 10

第 10 章 机床电气与 PLC 控制系统设计

知识点

- 机床电气和 PLC 设计的基本内容和原则
- 机床电力拖动方案确定原则和电动机选择方法
- 机床电气控制设计
- 机床 PLC 控制设计

本章导读

机床电气与 PLC 设计应满足机床对控制精度、控制方法、自动化程度的要求，并能便于操作和维护，设计还要与时俱进采用先进的技术和方法。

这一章的内容是前面各章节知识（电气控制、电动机原理、CNC、进给驱动系统、主轴驱动系统等）基础上的综合应用。经过本章的学习能掌握机床电气与 PLC 设计的基本知识，并能完成简单的设计或改造。读者还需在以后的课程设计、毕业设计或工作中逐步提高设计能力。

10.1 机床电气控制系统设计的基本内容和一般原则

10.1.1 机床电气控制系统设计的基本内容

机床电气控制系统设计的基本内容如下：

- (1) 制定机床电气控制系统设计的技术条件；
- (2) 选择合适的电力拖动系统和控制方案；
- (3) 选择合适的进给轴和主轴电动机的容量及型号；
- (4) 设计并绘制机床电气控制原理图；
- (5) 选择机床电气控制元件，形成电气元件明细表；
- (6) 绘制出机床进给轴电动机、主轴电动机、电气控制部件、执行电磁铁及检测装置的总布置图；
- (7) 设计机床电柜；
- (8) 绘制机床电气元件布局图和安装接线图；
- (9) 编写机床电气控制系统安装使用说明书；
- (10) 根据机床总体设计要求和电气控制系统的复杂程度，以上内容可以灵活增减，图纸和技术文件内容也可以灵活增减。

10.1.2 机床电气控制线路设计的一般原则

当机床进给轴和主轴电力拖动方式和控制方案都确定后，就可以对机床电气控制线路进行设计了。机床电气控制线路的设计可以看做是机床进给轴控制、主轴控制、各辅助功能和保护功能方案的具体实施，一般的设计原则有以下几点。

1. 最大限度地实现加工工艺和机床操作对电气控制系统线路的要求

控制线路是为工件的加工和整个机床操作服务的。在设计之前，要充分了解机床的操作使用、各种功能的实现形式和要求、机床的工作性能、机床的结构特点等，充分了解这些情况后，才可以设计出符合要求并且可以最大限度地实现加工工艺和机床操作对电气控制系统线路的要求的机床电气控制线路。

2. 在满足机床加工要求的前提下，尽量使控制线路简单经济

尽量选用经典的、标准的、常用的控制线路和环节。合理安排各电气元件的位置，尽量减少导线的数量、缩短导线的长度。尽量减少电气元件的品种、数量、规格，同一类元件尽量使用同一品牌元件。尽量减少触点以简化控制线路。尽量减少元件不必要的通电时间，使元件在不必要时断电，需要时通电，这样可以节约电能的同时延长电气元件的使用寿命。

3. 确保机床控制电路的可靠性和安全性

确保机床控制电路的可靠性和安全性，要选择牢固、可靠、抗干扰性好、动作时间短的电气元件。正确连接机床控制电路中的触点和线圈。在线路中尽量避免多个电气元件依次动作的情况和出现寄生电路。设计的电路能够适应使用环境的电网供电情况，根据使用环境的电网容量、电压、频率等合理设计机床控制电路。

4. 操作和维修应安全、方便

机床电气设计应力求使用安全、维修和操作方便。机床电路设计应有足够的安全保护设计及操作面板按键，尽量避免安全事故的发生。电气元件应留有备用触点，护套线中应留有备用线，接线端子排也应留有备用接线点，必要时应留有备用电气元件，以便检修、更改线路。

10.1.3 机床电气控制线路设计方法

机床电气控制线路的设计方法有两种：一种是经验设计法；一种是逻辑设计法。

1. 经验设计法

经验设计法是根据机床的功能要求直接设计控制线路。在具体的设计过程中常使用的方法有两个：一个是使用现有的典型电路和环节，进行组合拼接，实现功能要求；另一个是自行设计，根据需要随时增加电气元件和触点，最终满足功能要求。

经验设计法的一般步骤：先设计主电路，再设计辅助电路，最后反复审核电路是否满足设计要求和原则。主电路设计主要考虑机床电动机的启停、制动，驱动器、CNC 等的供电，以及电路的保护环节、电动机的保护环节。辅助电路设计主要考虑如何实现对各个电动机的控制，所有功能的实现方法，各控制环节的连锁要求，电路的安全、简单、可靠。

经验设计法的特点：

- (1) 容易掌握，使用广泛，但不易得到最佳方案。
- (2) 对设计有一定经验的要求，设计中可能存在考虑不周全的情况。
- (3) 设计出的控制电路往往不是最简单的电路。
- (4) 需要反复修改、模拟，所以设计速度慢。

2. 逻辑设计法

逻辑设计法是根据机床功能要求，利用逻辑代数的方法来分析、设计线路的方法。这种设计方法是先将机床控制线路中的交流接触器、中间继电器、时间继电器等线圈的通、断及触点的闭合、断开用逻辑变量表示，并根据机床功能要求将它们之间的关系用逻辑函数表达，然后运用逻辑函数基本运算法则和公式进行逻辑函数简化，根据最简式绘制相应机床控制电路，最后进一步对其进行检查和完善，得到需要的机床控制电路。

逻辑设计法比较科学，能够实现机床控制电路的最简化、控制电路更合理。但当设计

的机床控制系统比较复杂时,这种方法的工作量就比较大,显得比较繁琐。这就需要将复杂的系统分为若干个单元,每个单元单独设计后,再将单元电路组合起来,各尽其能。

10.2 机床进给系统设计

数控机床进给系统中使用最广泛的是伺服进给系统,伺服进给系统一般采用交流伺服驱动器配交流伺服电动机。伺服进给系统设计包括伺服电动机的基本选择、伺服进给系统进给系统稳态设计、伺服进给系统的动态设计等方面的内容。本节将介绍交流伺服进给驱动系统设计的一般方法和原则,内容中的理论计算方法可供其他应用参考。

10.2.1 伺服电动机的基本选择

为满足数控机床的高速、高精度的加工要求,进给系统的伺服电动机一般都采用高速、中小惯量的电动机。伺服电动机的选择包括确定电动机类型、额定转速、最高转速、额定转矩、最高转矩、加减速能力,以及安装形式等。其中,电动机类型、安装形式决定于数控机床机械设计的结果,一般由机械设计人员确定,转速、转矩与加减速性能则需要通过计算才能确定。

1. 电动机类型的选择

交流伺服驱动系统与电动机根据使用方式,可以分为通用型和与 CNC 配套的总线控制专用型两类。通用型交流伺服驱动器多采用外部脉冲或模拟电压输入指令来控制伺服电动机的位置与速度,即便采用总线控制技术,其总线与通信协议也是通用与开放的。对于半闭环或闭环的交流伺服进给系统,由于 CNC 与交流伺服驱动器的通讯总线、协议为专用,一般只能使用 CNC 生产厂家提供的专用伺服驱动器和电动机。

根据用途不同,伺服电动机分为用于高速驱动的小惯量伺服电动机和用于普通驱动的中惯量伺服电动机两类,前者可以达到的最高速度高,而后的驱动能力强。

根据性能的不同,伺服电动机有高性能型、普及型和经济型之分,它们所使用的磁性材料等存在较大不同,配套的电动机编码器不同,在加减速能力、调速范围、高速与低速输出特性、控制精度与价格等方面存在较大差别,在选择时应根据实际机床控制需要,综合考虑后确定。

伺服电动机的安装多为端面法兰连接,输出轴的形式有直轴(平轴)、直轴带键、锥轴带键等。伺服电动机还可以根据需要配备内置制动器。

2. 电动机转速的选择

由于伺服电动机的调速范围宽与调速性能好,可以满足绝大多数数控机床对进给传动系统的控制要求。因此,伺服电动机转速地选择相对比较简单,通常只需要根据机床情况选择电动机最高转速。

数控机床机械的快速移动速度、丝杠螺距与传动系统的减速比是决定伺服电机最高转速的三个因素,一旦进给传动系统设计完成,便可以直接计算出伺服电动机的最高转速。

【例 10-1】 某数控机床进给轴要求 X、Y 轴的快速运动速度为 48m/min，Z 轴的快速运动速度为 40m/min，三轴丝杆的螺距为 16mm，电动机与丝杆直接采用联轴器直接连接。

电动机的最高转速可以计算为

X、Y 轴：

$$n_m \geq \frac{48 \times 1000}{16} = 3\,000 \text{ r/min}$$

Z 轴：

$$n_m \geq \frac{40 \times 1000}{16} = 2\,500 \text{ r/min}$$

因此，可以选择最高转速为 3 000r/min 的伺服电动机（Z 轴也可以选择最高转速为 2 500r/min 的伺服电动机）。

3. 电动机其他参数的选择

1) 防护等级

防护等级是指电动机防止外部异物进入的等级，防护等级有统一的标准（IEC60034-1，我国标准号为 GB 4942.1—2006）。

防护等级标准中 IP 后的第 1 位数字为防止固体异物进入的等级，例如，2 代表可以防止长度 80mm、直径为 12mm 以上的固体物进入；4 代表可以防止直径 1mm 以上固体物进入；6 代表可以防止外物和灰尘侵入等。

IP 后的第 2 位数字为防止水溅的等级，例如，3 代表可以防止 60° 方向的水淋；4 代表可以防止任何方向的水淋；6 代表可以防止任何方向喷射的水浸入等。

伺服电动机和主轴电动机的防护等级一般可以达到 IP65~IP68，这些电动机对固体异物和灰尘完全密封，并可以防止水/油性液体的喷溅/喷雾，甚至短时浸没在水/油中。

2) 绝缘等级

电动机的绝缘等级是指电动绕组绝缘材料可以承受高温的等级，绝缘等级也有统一的标准（IEC60034-1），感应电动机常用的绝缘等级有 A、E、B、F、H 等，对应可以承受的温度分别为 105℃、120℃、130℃、155℃、180℃。

3) 安装形式

电动机的安装形式是指电动机与设备的连接方式，电动机一般由端面法兰或地脚与设备连接，有“卧式安装”与“立式安装”两种基本形式。在国际标准（IEC60034-7）中，卧式法兰安装的代号为 B5，卧式地脚安装的代号为 B3；立式法兰安装的代号为 V1（向下）与 V3（向上），立式地脚安装的代号为 V5（向下）与 V6（向上）。

10.2.2 伺服进给系统的稳态设计

伺服进给系统由伺服驱动器、伺服电动机、机械传动装置等部分组成，伺服驱动器通过电流环、速度环、位置环对整个伺服进给系统进行电气调节。正确设计机械传动装置和



选择伺服电动机与伺服进给系统的性能至关重要。

伺服进给系统设计包括稳态设计与动态设计两个方面,前者是根据负载转矩要求确定电动机连续输出转矩;后者是对系统的动态响应特性(如加减速时间、动态稳定性等)进行的分析与计算。

通常,伺服进给系统的稳态特性可以通过力学知识进行较为准确的计算。但是,由于伺服进给系统中存在一些非线性环节,对部分参数进行准确的分析与计算通常需要借助计算机和相关软件完成,分析和计算的结果还需要通过仿真等手段进行调整与优化,因此,要对其进行准确的描述是非常困难的,尽管如此,经典的分析理论与方法还是可以为伺服进给系统的正确设计提供很大帮助。

1. 电动机输出转矩的计算

伺服电动机连续输出转矩需要通过计算负载转矩后确定,在部分产品中,负载转矩确定电动机的静态转矩 M_s (Stall Torque) 可以表示连续输出转矩。计算在对应切削进给速度下的电动机输出转矩并使之大于负载转矩 M_L ; 或直接选择电动机在高速时的连续输出转矩 M_f 大于负载转矩 M_L 。

电动机负载转矩 M_L 的计算公式为

$$M_L = M_V + \sum M_R \pm M_G \quad (10-1)$$

式中 M_L ——电动机负载转矩 (N·m);

M_V ——切削加工力折算到电动机上的转矩 (N·m);

$\sum M_R$ ——摩擦阻力折算到电动机上的转矩 (N·m);

M_G ——运动部件重力折算到电动机上的转矩 (N·m)。

上述转矩 (M_V 、 $\sum M_R$ 、 M_G) 需要根据伺服进给系统的参数通过计算后确定。

1) 切削加工力转矩 M_V

电动机的转矩折算自切削力约等于切削加工过程中在运动方向上产生的轴向抗力,它与刀具形状与材料、工件材料、进给速度、主轴转速、切削深度、冷却润滑等因素有关,要十分准确地计算很困难。对于通用型数控机床,机床设计者常常先确定一个最大切削进给力指标 F_{VL} ,然后在此基础上计算出切削力所需电动机的转矩。

切削力折算到电动机的转矩计算公式为

$$M_V = \frac{F_{VL} h_{SP}}{2\pi i \eta_G \eta_{SM}} \quad (10-2)$$

式中 F_{VL} ——切削进给力 (N);

h_{SP} ——丝杠螺距 (m);

i ——减速比, $i = \frac{n_m}{n_{SP}}$;

η_G ——机械传动装置效率(见表 10-1),在电动机与丝杠直连时, i 与 η_G 均为 1;

η_{SM} ——滚珠丝杠螺母副的传动效率。

$$\eta_{SM} = \frac{\tan \varphi}{\tan(\varphi + \rho)} \quad (10-3)$$

φ ——螺旋角（°）。

$$\varphi = \arctan \frac{h_{SP}}{\pi d_{SP}}$$

式中 d_{SP} ——丝杠外径；

ρ ——与螺旋线断面形状有关的摩擦角。

若滚珠丝杠参数不详，可以取 $\eta_{SM} \approx 0.9 \sim 0.95$ 。

表 10-1 常用机械传动装置的效率

传动装置类型	传动效率 η
同步齿形带（单级）	0.95~0.97
齿轮传动（单级）	0.9~0.95
行星齿轮传动（单级/多级）	0.88~0.94
齿轮传动（多级）	0.8~0.88
摆线齿轮传动（单级）	0.85~0.9
谐波齿轮传动	0.8~0.9
蜗轮传动	0.7

2) 摩擦转矩 ΣM_R

伺服进给系统的摩擦转矩一般包括导轨摩擦转矩 M_{RF} 、丝杠支承轴承摩擦转矩 M_{RSL} 、防护罩摩擦转矩 M_{Abd} ，以及机械传动装置的摩擦阻力与滚珠丝杠摩擦阻力产生的转矩等。其中机械传动装置的摩擦阻力与滚珠丝杠摩擦阻力一般以传动效率的形式进行等效，其他的摩擦转矩分别通过计算得到。系统总摩擦转矩计算公式为

$$\Sigma M_R = \frac{M_{RF} + M_{Abd} + M_{RSL}}{i\eta_G} \quad (10-4)$$

(1) 导轨摩擦转矩 M_{RF} 。采用滚珠丝杠传动时，导轨摩擦力折算到电动机的摩擦转矩 M_{RF} 为

$$M_{RF} = \mu_F \frac{h_{sp}}{2\pi\eta_{SM}} [(m_W + m_T)g \cos \alpha + F_{VT} + F_{FU}] \quad (10-5)$$

式中 M_{RF} ——导轨摩擦转矩（N·m）；

F_{VT} ——切削力在垂直方向的分力（N）；

F_{FU} ——滚动导轨的预载荷（预紧力）（N），仅用于滚动导轨，其他形式导轨此项为0；

m_W ——工件质量（kg）；

m_T ——工作台质量（kg）；

g ——重力加速度， $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ ；

α ——倾斜角度（对于水平安装轴 $\alpha=0^\circ$ ，垂直安装轴 $\alpha=90^\circ$ ，其他情况取决于机床结构布局）；

μ_F ——与导轨形式有关的导轨摩擦系数，对于常见导轨如表 10-2 所示。

表 10-2 常用导轨的摩擦系数表

导 轨 类 型	摩 擦 系 数 μ_F
铸铁与铸铁	0.18
铸铁与环氧树脂	0.1
铸铁与聚四氟乙烯	0.06
圆柱滚珠滚动导轨	0.005~0.01
球滚珠滚动导轨	0.002~0.003

（2）防护罩摩擦转矩 M_{Abd} 。数控机床的导轨一般都安装有多级伸缩防护罩、风琴式防护罩、波纹管、金属螺旋罩等防护装置，其中最常用的是多级伸缩防护罩。

多级伸缩防护罩的摩擦阻力与宽度有关，根据相关数据，不同宽度防护罩所产生的阻力如表 10-3 所示。

表 10-3 多级伸缩防护罩产生的阻力

宽 度 范 围	摩 擦 阻 力 F_{Abd}
0~1m	180N/m
1~2m	220 N/m
2~3m	250N/m

防护罩产生的阻力折算到电动机的摩擦转矩 M_{Abd} 为

$$M_{Abd} = \frac{h_{SP}}{2\pi \times \eta_{SM}} \times F_{Abd} \quad (10-6)$$

（3）丝杠支承轴承摩擦转矩 M_{RSL} 。丝杠支承轴承摩擦转矩一般很小，通常可以忽略，但丝杠进行预紧（双端支承）时，需要考虑由预紧力引起的摩擦转矩增加。丝杠支承轴承所产生的摩擦转矩 M_{RSL} 的计算公式为

$$M_{RSL} = \mu_{SL} \times \frac{1}{2} d_{ML} (F_{aVL} + F_{aSP}) \quad (10-7)$$

式中 M_{RSL} ——丝杠支承轴承摩擦转矩（N·m）；

μ_{SL} ——支承轴承摩擦系数，一般为 0.003~0.005；

d_{ML} ——支承轴承平均直径（m）；

F_{aVL} ——支承轴承预紧力（N）；

F_{aSP} ——丝杠预紧力（N）。

轴承生产厂家提供的轴承资料中也会有支承轴承摩擦转矩数据，这时不需要再进计算。

3）运动部件重力转矩 M_G

运动部件重力转矩 M_G 只存在于倾斜轴（ $\sigma \neq 0$ ）或垂直轴，对于水平安装的轴则不需要考虑，运动部件重力转矩 M_G 的计算公式为

$$M_G = \frac{h_{SP}}{2\pi \times i \eta_{SM} \times \eta_G} (m_W + m_T) g \sin \alpha \quad (10-8)$$

各参数的意义同前面几个公式中的参数。

2. 电动机输出转矩的选择

前面介绍到，计算切削力 F_{VL} 折算到电动机的转矩是十分困难的，特别是对于通用型数控机床，由于加工情况多种多样，无法计算出切削力转矩，这时可以通过伺服进给系统对摩擦转矩的要求进行选择。

对于理想的伺服进给系统，电动机的静态转矩和摩擦转矩之间一般应满足如下关系：

$$0.005M_S \leq \Sigma MR \leq 0.1M_S \quad (10-9)$$

对于垂直或倾斜轴，由于运动部件重力转矩将持续产生电动机的热消耗，因此必须保证：

$$M_G + \Sigma M_R \leq (0.2 \sim 0.3)M_S \quad (10-10)$$

否则，应考虑增加平衡机构（如增加配重块）。

3. 伺服进给系统稳态设计实例

【例 10-2】 假设例 3-1 的立式加工中心主要参数如下，试初步选择伺服电机的规格。

X-Y 轴移动部件：工作台尺寸为 1 000mm×500mm，质量为 280kg；拖板等部件质量为 200kg；工作台载重最大 500 kg。

Z 移动部件：主电动机质量为 60kg，主轴及箱体、拖板质量为 120kg。

传动系统：X-Y-Z 滚珠丝杠规格 $\phi 40\text{mm} \times 16\text{mm}$ ，长度分别为 800mm、500mm、500mm，电动机直接连接，支承轴承的摩擦转矩为 0.4N·m。

导轨：35mm 宽执行滚动导轨，摩擦系数 $\mu_F = 0.002$ ，滑块预载荷 0.02C(838N)。

防护罩：堆积伸缩防护罩，X-Y 轴宽度为 450mm、300mm，Z 轴宽度为 250mm。

为了初步选择伺服电动机，可以先计算各轴的总摩擦转矩 ΣM_R ，计算时取 $\eta_{SM} = 0.97$ ，并假设切削力在 X-Y 平面垂直方向的分量为 900N，切削力在 X-Z 平面垂直方向的分量为 500N，各轴的计算值如下。

X 轴：

$$M_{RF} = 0.002 \times \frac{0.016}{2\pi \times 0.97} \left[(280 + 500) \times 9.81 \times \cos 0^\circ + 900 + 838 \times 4 \right] = 0.06 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$M_{Abd} = \frac{0.016}{2\pi \times 0.97} (0.45 \times 2) \times 180 = 0.43 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$M_{RSL} = 0.4 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$M_G = 0$$

$$\Sigma M_R = 0.89 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Y 轴：

$$M_{RF} = 0.002 \times \frac{0.016}{2\pi \times 0.97} \left[(280 + 500 + 200) \times 9.81 \times \cos 0^\circ + 900 + 838 \times 4 \right] = 0.07 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$M_{\text{Abd}} = \frac{0.016}{2\pi \times 0.97} \times (0.3 \times 2) \times 180 = 0.28 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$M_{\text{RSL}} = 0.4 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$M_{\text{G}} = 0$$

$$\Sigma M_{\text{R}} = 0.75 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Z 轴:

$$M_{\text{RF}} = 0.002 \times \frac{0.016}{2\pi \times 0.97} [(60 + 120) \times 9.81 \times \cos 90^\circ + 500 + 838 \times 4] = 0.02 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$M_{\text{Abd}} = \frac{0.016}{2\pi \times 0.97} \times (0.25 \times 2) \times 180 = 0.24 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$M_{\text{RSL}} = 0.4 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$\Sigma M_{\text{R}} = 0.66 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$M_{\text{G}} = \frac{0.016}{2\pi \times 0.97} (60 + 120) \times 9.81 \times \sin 90^\circ = 4.63 \text{ N} \cdot \text{m}$$

根据 $M_{\text{S}} = 10 \Sigma M_{\text{R}}$ 的要求, X-Y 轴的进给电动机可以初步选择为静态转矩为 $M_{\text{S}} \geq 9 \text{ N} \cdot \text{m}$ 的伺服电动机, 如安川 ΣV 系列的 SGMGV-20A ($M_{\text{S}} = 11.5 \text{ N} \cdot \text{m}$) 等; 根据 $M_{\text{G}} + \Sigma M_{\text{R}} \leq (0.2 \sim 0.3) M_{\text{S}}$ 的要求, 在没有平衡机构时, Z 轴的进给电动机可以初步选择静态转矩为 $M_{\text{S}} = 18 \sim 27 \text{ N} \cdot \text{m}$ 的伺服电动机, 如安川 ΣV 系列的 SGMGV-44A ($M_{\text{S}} = 28.4 \text{ N} \cdot \text{m}$) 等。

根据式 (10-1) 与式 (10-2), 可以推算出各轴实际可以达到的最大切削进给力为

$$F_{\text{VL}} = \frac{2\pi \times i \times \eta_{\text{G}} \times \eta_{\text{SM}}}{h_{\text{SP}}} \times M_{\text{V}} = \frac{2\pi \times i \times \eta_{\text{G}} \times \eta_{\text{SM}}}{h_{\text{SP}}} (M_{\text{L}} - \Sigma M_{\text{R}} \pm M_{\text{G}})$$

切削加工多为低速, 可取当 $M_{\text{S}} = M_{\text{L}}$ 进行计算, 即

X 轴:

$$F_{\text{VLX}} = \frac{2\pi \times 0.97}{0.016} (11.5 - 0.89) = 4\,041 \text{ N}$$

Y 轴:

$$F_{\text{VLY}} = \frac{2\pi \times 0.97}{0.016} (11.5 - 0.75) = 4\,094 \text{ N}$$

$$\text{Z 轴: } F_{\text{VLZ}} = \frac{2\pi \times 0.97}{0.016} (28.4 - 0.66 + 4.63) = 12\,330 \text{ N}$$

F_{VLZ} 的切削进给力方向与重力方向一致 (垂直向下)。

因此, 本机床可以将 X-Y 轴的最大切削进给力指标定为 4 000 N, Z 轴的切削进给力指标定为 12 000 N, 计算切削进给转矩为

$$M_{\text{VX}} = M_{\text{VY}} = \frac{0.016 \times 4\,000}{2\pi \times 0.97} = 10.5 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$M_{\text{VZ}} = \frac{0.016 \times 12\,000}{2\pi \times 0.97} - 4.63 = 26.9 \text{ N} \cdot \text{m}$$



10.2.3 伺服进给系统的动态设计

1. 伺服进给系统动态设计的基本要求

伺服进给系统对动态性能的要求主要有加减速时间短、瞬态响应过程平稳、抗扰能力强、系统稳定性好四个方面。这就要求机械传动装置、伺服系统驱动电动机的刚性足够大,机械传动系统的死区、电气调节回路的延时足够小。

由于伺服进给系统中的动态设计需要建立各部分的数学模型、构建系统框图、确定传递函数等,分析与计算过程都比较复杂;而且由于伺服进给系统中还包含非线性环节,要对其进行准确的分析比较困难,因此,在总体设计时通常只对电动机的惯量匹配、加减速能力进行简单的计算。各动态参数还需在机床调试阶段进行具体调整,可以进行人工调整或利用 CNC 软件自动完成。

如果在机械传动系统的设计都合理的情况下,对于伺服进给系统的机械传递部件采用直接连接或同步皮带、少量齿轮连接的场合,为了保证伺服进给系统具有良好的动态性能,伺服进给系统一般应满足如下两式,即

$$\begin{aligned} 0 < J_L < 3J_M \\ M_B &\approx 2M_S \end{aligned} \quad (10-11)$$

式中 J_L ——负载惯量 ($\text{kg}\cdot\text{m}^2$);
 J_M ——电动机转子惯量 ($\text{kg}\cdot\text{m}^2$);
 M_B ——电动机加减速转矩 ($\text{N}\cdot\text{m}$);
 M_S ——电动机静态输出转矩 ($\text{N}\cdot\text{m}$)。

2. 加减速能力的计算与要求

对于旋转运动系统,转矩平衡公式为

$$\begin{aligned} M_M &= M_L + M_B \\ M_B &= J_{\text{Ges}} \frac{d\omega}{dt} = J_{\text{Ges}} \frac{2\pi}{60} \cdot \frac{dn}{dt} \end{aligned} \quad (10-12)$$

式中 J_{Ges} ——系统总惯量 ($\text{kg}\cdot\text{m}^2$);
 M_M ——电动机输出转矩 ($\text{N}\cdot\text{m}$);
 M_L ——静态负载转矩 ($\text{N}\cdot\text{m}$),包括前述的摩擦转矩 ΣM_R 与重力产生的转矩 M_G ;
 M_B ——电动机加减速转矩 ($\text{N}\cdot\text{m}$);
 ω ——电动机角速度 (rad/s), $\omega = \frac{2\pi n}{60}$;
 n ——电动机转速 (r/min)。

采用线性加减速时 $\frac{dn}{dt}$ 恒定,假设从 0 加速到最大转速 n_m 的加速时间为 t_H ,则

$$M_B = J_{\text{Ges}} \frac{2\pi n_m}{60 t_H}$$

由此可见,当加速转矩 M_B 确定时,按照电动机转速的要求,其加速时间 t_H 的计算公

式为

$$t_H = J_{\text{Ges}} \frac{2\pi n_m}{60M_B} \quad (10-13)$$

另一方面, 根据机床的设计要求, 机床的加减速性能可以通过快速移动速度 v_m 和最大加速度 a_m 两个指标来衡量。当采用线性加减速, 并且加速度为 a_m 时, 由 0 加速到最大转速 v_m 的加速时间 t_a 为

$$t_a = \frac{v_m}{60a_m} \quad (10-14)$$

式 (10-14) 中, 快进移动速度 v_m 指标一般容易明确, 加速度 a_m 则需根据机床的实际性能来确定, 一般可以用表 10-4 中的数据作为参考。

表 10-4 机床推荐的加速度值

机 床 类 型	推荐加速度值 a_m
大型龙门、落地式机床	0.2~1 m/s ²
中型车床与铣床、加工中心	0.5~2 m/s ²
小型车床与铣床、加工中心	1~5 m/s ²
丝杠传动的高速加工机床	5~15 m/s ²
直线电动机传动的高速加工机床	10~40 m/s ²
铣床、加工中心上的回转轴	5~50 rad/s ²
机器人上的转臂	20~100 rad/s ²
高速机器人	200~500rad/s ²

表 10-4 的数据为机床的一般要求, 根据设计的需要, 可以在同一机床上的不同坐标轴使用不同的数据。例如, 对于立式机床的垂直轴 Z、卧式机床的垂直轴 Y, 由于重力的因素, 其加速度可以选择比推荐值略低的值。

显然, 由式 (10-13) 计算得到的 t_H 反映了伺服进给系统实际具备的加减速能力, 而由式 (10-14) 计算得到的 t_a 则是机床对加减速能力的要求, 因此, 伺服进给系统的加减速的设计准则为

$$t_H \leq t_a \quad (10-15)$$

3. 运动机构惯量的计算

要根据式 (10-13) 来计算伺服进给系统实际所具备的加减速能力时, 首先要确定总惯量 J_{Ges} 。在伺服电动机驱动滚珠丝杠的运动机构中, 系统总惯量由直线运动机构折算到电动机上的惯量和旋转运动机构惯量两部分组成。直线运动机构包括工作台、工件、工装夹具等; 旋转运动机构包括滚珠丝杠惯量 J_{SP} 、同步带轮的惯量、联轴器或齿轮和电动机本身的转子惯量 J_M 等, 各个惯量的计算方法如下。

1) 直线运动机构

对直线运动机构的工作台、工件、工装夹具等，惯量计算基本公式为

$$J_Z = m \left(\frac{h_{SP}}{2\pi} \right)^2 \quad (10-16)$$

式中 J_Z ——直线运动机构惯量 ($\text{kg}\cdot\text{m}^2$);

m ——运动机构质量 (kg);

h_{SP} ——丝杠螺距 (m)。

2) 旋转运动机构

在旋转运动机构中，电动机转子的惯量 J_M 可以从伺服电动机生产商家提供的电动机技术参数中查得；其他滚珠丝杠、同步带轮、联轴器或齿轮等大部分零件都可以通过如下实心圆柱体的惯量计算公式计算得到，即：

$$J_C = \frac{\pi\gamma}{32} D^4 L \quad (10-17)$$

式中 J_C ——圆柱体惯量 ($\text{kg}\cdot\text{m}^2$);

γ ——材料密度 (kg/m^3);

D ——实心圆柱体直径 (m);

L ——实心圆柱体长度 (m)。

对于钢制零件，代入密度后式 (10-17) 可以化简为如下公式，带入其他参数可进行惯量计算，即：

$$J_C = 0.77 \times 10^{-12} \times D^4 L \quad (10-18)$$

式中参数意义同上。

4. 动态设计实例

【例 10-3】 对于例 10-1 和例 10-2 中的机床，当其要求的 X-Y 轴最大运动速度为 48m/min、最大加速度要求为 5m/s^2 ，Z 轴的最大运动速度为 40m/min、最大加速度要求为 5m/s^2 时，且各轴联轴器惯量为 $0.3 \times 10^{-3} \text{kg} \cdot \text{m}^2$ ，机床的加减速能力计算如下。

X 轴：

直线运动机构的惯量： $J_{W+T} = (280 + 500) \times \left(\frac{0.016}{2\pi} \right)^2 \approx 5.05 \times 10^{-3} \text{kg} \cdot \text{m}^2$ ；

滚珠丝杠的惯量： $J_{SP} = 0.77 \times 10^{-12} \times 404 \times 800 = 1.57 \times 10^{-3} \text{kg} \cdot \text{m}^2$ ；

联轴器等机构的惯量： $J_{Gt} = 0.3 \times 10^{-3} \text{kg} \cdot \text{m}^2$ ；

负载总惯量： $J_L = 6.92 \times 10^{-3} \text{kg} \cdot \text{m}^2$ ；

SGMGV-20A 伺服电动机转子的惯量： $J_M = 2.6 \times 10^{-3} \text{kg} \cdot \text{m}^2$ ；

系统总惯量： $J_{Ges} = 9.52 \times 10^{-3} \text{kg} \cdot \text{m}^2$ 。

从伺服电动机加减速曲线可知，该电动机在最高转速 $n_m = 3000\text{r/min}$ 时的短时输出加速转矩 M_M 为 $25\text{N}\cdot\text{m}$ ，由【例 10-2】的计算结果可得

$$M_B = M_M - \sum M_R = 25 - 0.89 = 24.11\text{N}\cdot\text{m}$$

系统实际加速时间为

$$t_H = 9.52 \times 10^{-3} \times \frac{2\pi \times 3000}{60 \times 24.11} \approx 0.12s$$

系统设计要求的线性加减速能力为

$$t_a = \frac{48}{60 \times 5} \approx 0.16s$$

可以满足式 (10-11) 与式 (10-15) 的要求。

Y 轴:

$$\text{直线运动机构的惯量: } J_{W+T} = (280 + 500 + 200) \times \left(\frac{0.016}{2\pi} \right)^2 \approx 6.35 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2;$$

$$\text{滚珠丝杠的惯量: } J_{Sp} = 0.77 \times 10^{-12} \times 40^4 \times 500 = 0.98 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2;$$

$$\text{联轴器等部件的惯量: } J_{Gt} = 0.3 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2;$$

$$\text{负载总惯量: } J_L = 7.63 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2;$$

$$\text{伺服电动机转子的惯量: } J_M = 2.6 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2;$$

$$\text{系统总惯量: } J_{Ges} = 10.23 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2。$$

根据【例 10-2】的计算结果, 即:

$$M_B = M_M - \sum M_R = 25 - 0.75 = 24.25 \text{ N} \cdot \text{m}$$

系统实际加速时间为

$$t_H = 10.23 \times 10^{-3} \times \frac{2\pi \times 3000}{60 \times 24.25} \approx 0.132s$$

系统设计的加减速能力与 X 轴同, 同样可以满足式 (10-11) 与式 (10-15) 的要求。

Z 轴

$$\text{直线运动机构的惯量: } J_{W+T} = (60 + 120) \times \left(\frac{0.016}{2\pi} \right)^2 \approx 1.1 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2;$$

$$\text{滚珠丝杠的惯量: } J_{Sp} = 0.77 \times 10^{-12} \times 40^4 \times 500 = 0.98 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2;$$

$$\text{联轴器等机构的惯量: } J_{Gt} = 0.3 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2;$$

$$\text{负载总惯量: } J_L = 2.38 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2;$$

$$\text{SGMGV-44A 伺服电动机转子的惯量: } J_M = 6.75 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2;$$

$$\text{系统总惯量: } J_{Ges} = 9.13 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2。$$

由电动机加减速曲线可得, 该电动机在最高转速 $n_m = 3000 \text{ r/min}$ 时的短时输出加速转矩 M_M 为 $42 \text{ N} \cdot \text{m}$, 根据例 10-2 的计算结果, 即

$$M_B = M_M - \sum M_R - M_G = 42 - 0.66 - 4.63 = 36.71 \text{ N} \cdot \text{m}$$

系统实际可以达到的加速时间为

$$t_H = 9.13 \times 10^{-3} \times \frac{2\pi \times 3000}{60 \times 36.71} \approx 0.078s$$

系统设计要求的线性加减速能力为

$$t_a = \frac{40}{60 \times 5} \approx 0.13s$$

也可以满足式（10-11）与式（10-15）的要求。

10.3 机床电气控制系统工艺设计

在完成机床电气原理设计和电气元件选型后，接着进行机床电气控制的工艺设计，为了满足机床电气控制部分的制造和使用等要求，机床电气控制系统的工艺设计内容如下

- （1）机床电气控制设备的总装配图、总接线图；
- （2）机床电气控制各个部分的装配图和接线图，并需要列出各部分的元件清单等；
- （3）机床电气控制设备使用、维修说明。

10.3.1 机床电气设备总体配置设计

机床电气设备中各种电气元件和各种电动机根据各自的作用，都有一定的安装位置，在组成一个完整的机床电气控制系统时，需要划分组件，同时还要解决各组件之间、电气柜与被控制装置之间、电气柜之间的接线问题。

划分组件的原则如下：

- （1）功能类似的元件划分在一起；
- （2）强电与弱电元件分离分组，以减少干扰；
- （3）尽量减少组件之间的连线，将接线联系多的电气元件归为一组；
- （4）尽量美观，外形和重量相似的电气元件放在一组；
- （5）需要经常调整、维护及易损坏的元件放在一组，以便检查、调试。

电气控制系统的各部分及组件之间的接线方式主要有三种：

（1）采用接线端子，按照进出线的不同和电流大小选择接线端子规格。机床电气柜各种进出线大多采用这种方式；

（2）采用多孔接插件，这种方式便于拆卸和搬运。机床的水泵电动机、排屑电动机与机床电气柜的连接多采用这种方式；

（3）采用各种类型标准接插件。数控机床中 CNC、驱动器的接口常常采用标准接插件。

机床电气控制总体配置设计，在总装配图和总接线图中以示意的形式反映出各部件主要组件的位置分布及它们之间的接线方式和走线方式及使用管材要求。

总体设计应使整个系统紧凑、集中，同时还要兼顾操作者和机床安全、操作方便、运行可靠。总体配置设计是否合理直接影响到机床电气控制的稳定性，并影响机床电气控制系统的安装、调试、操作和维修是否方便。

10.3.2 机床电气元件布置图的设计及电器部件接线图的绘制

机床电气设备总体配置设计确定了各部件中组件的位置和接线，接下来就需要对各组件中的电气元件进行设计。机床电气元件设计图包括布置图、接线图、电气柜图。

机床电气元件布置图是根据机床电气控制原理图设计的，是电气元件按一定规则的组

合。机床电气元件布置图主要是标明机床中所有电气元件的位置。在设计电气元件布置图时应该注意以下几个问题：

- (1) 发热元件应安装在电器板上面，体积大、比较重的应安装在电器板下面；
- (2) 注意弱点信号的屏蔽层的连接，尽量将强弱电分开，避免外界干扰；
- (3) 需要经常调整、检测或易损坏的元件不易安装在过低或过高的位置；
- (4) 外形尺寸和结构相似或同一类元件应布置在一起以便于安装接线、故障检修；
- (5) 电气元件的布置不宜过密，同时注意要尽量整齐、美观。

机床电气部件接线图是机床中各电气元件的接线图，是为电气设备和电气元件的装配或电气故障的检修服务的，用规定的图形符号，按各电气元件的相对位置绘制的实际接线图，清楚地表示了各电气元件的相对位置和彼此之间的电路连接。绘制和设计接线图时应注意以下几个问题：

- (1) 接线图的绘制应符合国家标准 GB6988.5——1986《电气制图接线图和接线表》的规定；
- (2) 所有电气元件及接线标注应与电气原理图中的文字符号和接线号一致；
- (3) 同一电气元件的各个部分（线圈、触点等）必须画在一起，元件位置应与布置图中位置一致。

如果机床电气控制系统比较简单，电气元件可以附在机床机械内部；当机床电气控制系统比较复杂或由于生产操作需要时，需有独立的电气柜安放电气元件。机床电气柜的设计需要考虑总体尺寸、结构，并且便于安装、调速，同时还要注意电气柜内的通风散热。

10.3.3 清单汇总和说明书的编写

在机床电气控制原理和工艺设计完成后，应根据图纸，对机床需要的各类元件及材料进行综合统计，按类列出详细的清单。

机床电气控制系统使用说明书是机床调试、使用、维修过程中不可缺少的技术资料。机床电气控制系统使用说明书应包含的内容有机床电气控制系统设计的主要参数、机床电气控制系统各项技术指标的核算与评价、机床电气控制系统的调试方法、机床电气控制系统使用和维修的注意事项等。

10.4 机床 PLC 控制系统设计

进行 PLC 控制系统设计的前提是要对机床使用的 PLC 有一定的了解，包括：各类地址的范围用途、基本指令的使用、功能指令的使用等。当对机床使用 PLC 有一定了解并且明确机床各部分动作逻辑和控制过程后，可以根据机床 PLC 控制系统设计基本原则、基本内容和一般步骤进行机床 PLC 控制系统设计。

10.4.1 机床 PLC 控制系统设计的基本原则

目前，机床 PLC 控制系统多数都是利用 CNC 内置 PLC 完成对机床逻辑功能的控制。设计 PLC 控制系统时，应遵循以下原则：

（1）机床 PLC 控制系统应能够实现所有机床控制的要求。在机床 PLC 控制系统设计之前，应充分了解机床的使用情况，机床的所有控制要求，被控制对象的动作逻辑。还需掌握 CNC 内置 PLC 的地址类型、基本指令、功能指令等。

（2）机床 PLC 控制系统在满足机床控制要求的前提下，应尽量简单、设计思路清晰，便于修改。

（3）要保证机床在 PLC 控制系统控制下的安全性、可靠性。

（4）设计机床 PLC 控制系统时，PLC 与 NC 之间传递数据的地址一般已经由 CNC 定义，要按照定义设计。

10.4.2 机床 PLC 控制系统设计的基本内容

机床 PLC 控制系统设计的基本内容包括以下几点：

（1）制定机床 PLC 控制系统设计任务书、PLC 整体框架、流程图。根据机床控制要求，明确机床 PLC 控制系统的任务。结合控制要求，总体把握 PLC 复杂程度，制定框架和总流程图。

（2）分配输入/输出点。明确需要使用的输入/输出点，并确定各个点用于哪个功能控制。

（3）梯形图编写，是整个 PLC 控制系统设计的核心。根据流程图，运用 PLC 各功能指令进行梯形图的编写。当 PLC 控制系统比较复杂时，可以将整个 PLC 控制系统分成多个部分，每一部分独立编写。

（4）梯形图编写完成后，进行调试没有问题便可以编写技术文件、交付使用。

10.4.3 机床 PLC 控制系统设计的一般步骤

机床 PLC 控制系统设计的一般步骤如图 10-1 所示。

（1）掌握 CNC 内置 PLC 的梯形图编写方法。掌握 CNC 内置 PLC 的地址分配情况，各类地址的用途、数量。掌握基本指令和常用功能指令的使用，编写梯形图的技巧。熟练使用梯形图编辑软件，以及梯形图的传输方法。

（2）制定机床 PLC 控制系统任务书。根据机床控制要求，充分了解由 PLC 控制系统控制部分的动作逻辑后，制定机床 PLC 控制系统任务书。完成输入/输出信号的地址分配。

（3）根据机床 PLC 控制系统任务书绘制 PLC 控制系统流程图。如 PLC 控制系统比较复杂，在确定总流程图后，可以分块制定流程图，方便梯形图的编写。

（4）分配输入/输出信号。根据 PLC 控制系统的需要和 CNC 内置 PLC 的地址情况，合理分配输入/输出信号。

(5) 编写梯形图程序。根据机床 PLC 控制系统流程图,运用梯形图编辑软件编写梯形图程序。

(6) 调试梯形图程序。编写完成梯形图程序后,在不上机床的情况下调试。测试各个功能是否满足 PLC 控制系统任务书的要求,不满足则进行修改梯形图程序。

(7) 上机床调试梯形图程序。在不上机床的情况下调试完全满足机床 PLC 控制系统任务书要求后,将梯形图程序传入 CNC 中,在机床上调试所有功能。

(8) 编写机床 PLC 控制系统技术文件。

(9) 验收并交付使用。

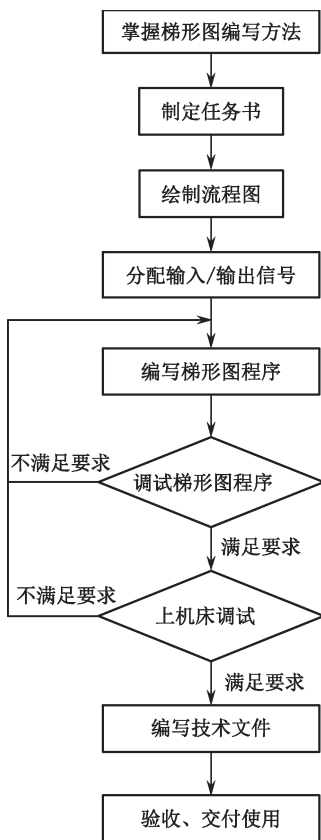


图 10-1 机床 PLC 控制系统设计的一般步骤

10.5 本章小结

本章在已学习了数控机床几个主要部件(CNC、伺服驱动、电动机、电气控制)原理和机床电气与 PLC 控制分析的基础上,介绍了数控机床电气与 PLC 控制设计的原则、方法、内容等。这一章内容主要包括机床电气控制设计、机床电气拖动电动机选择、机床 PLC 控制设计,是本书之前讲解内容的综合应用。

本章内容仅仅涉及到机床电气与 PLC 控制设计的一般内容、原则和方法,实际应用时

还要根据实际情况进行灵活变通。学习本章内容后，还需在以后的课程设计、毕业设计或工作中进行实践，才能完全掌握达到灵活运用的程度。

10.6 思考与练习

1. 机床电气控制设计的基本内容有哪些？
2. 机床电气控制的原则有哪些？
3. 伺服进给系统的稳态设计内容有哪些？并写出相关公式。
4. 伺服进给系统的动态设计内容有哪些？并写出相关公式。
5. 机床电气控制系统工艺设计有哪些内容？
6. 机床 PLC 控制系统设计的一般步骤是什么？

Chapter 11

第 11 章 机床电气与 PLC 控制的实践环节

知识点

- 低压电器
- 异步电动机调速
- 直流电动机调速
- 可编程控制器
- 机床电气与 PLC 控制设计

本章导读

本章通过基本实验、三相异步电动机的基本拆装实习、机床电气与 PLC 控制的综合设计三个部分将全书的主要知识点贯穿起来，便于更好地掌握所学知识，有很大的实践价值。

11.1 基本实验

11.1.1 低压电器的认识实验

1. 实验目的

- (1) 了解和熟悉各类低压电器结构、工作原理；
- (2) 认识低压电器的规格、型号及其意义；
- (3) 了解接触器等低压电器的动作与欠压保护；
- (4) 了解继电器保护特性的测试方法。

2. 实验器材

- (1) 热继电器（CJ10-10 线圈电压 220V）一个；
- (2) 交流接触器（JR16-20 调节范围 1.5~2.4A）一个；
- (3) 过电流继电器（JL18-6.3/11）一个；
- (4) 转换开关（HZ10-10/3）一个；
- (5) 倒顺开关（KO 3）一个；
- (6) 时间继电器（JS7）一个；
- (7) 速度继电器（JY1）一个；
- (8) 断路器单极、三极各一个；
- (9) 中间继电器（JZ7-44）一个；
- (10) 熔断器（RC、RL、RT 系列、）各一个，RL（2A、4A）各一个；
- (11) 按钮（LA2）两个；
- (12) 行程开关等一组；
- (13) 万用表（MF-500 型）一个；
- (14) 电工工具一套；
- (15) 自耦变压器；
- (16) 交流电流、电压表各一个；
- (17) 时钟一个。

3. 实验内容

- (1) 低压电器认识；
- (2) 低压电器调整。

4. 实验步骤

1) 低压电器认识

- (1) 详细观察各电器外部结构、使用方法；
- (2) 拆装几个常用电气元件，了解其内部结构与工作原理；

- (3) 观察各电器铭牌, 记录其型号、规格、参数, 了解其意义;
- (4) 模拟时间继电器线圈得电动作, 判断、测试瞬动触点、延时触点的通断。

2) 低压电器调整

实验电路如图 11-1 所示。

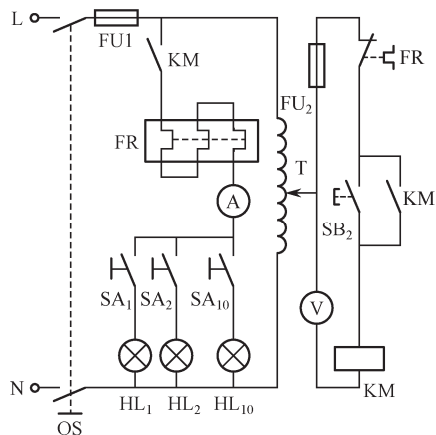


图 11-1 继电器保护特性、接触器动作电压测试电路图

测试接触器线圈动作电压:

(1) 合上 QS、SA1, 调节自耦变压器, 使输出电压为 220V, 按下启动按钮 SB2, 接触器动作, 灯箱灯 HL₁ 亮。

(2) 调节自耦变压器, 使电压表读数为 200V, 观察接触器是否继续动作, 灯是否继续发光; 调节自耦变压器, 使电压表读数为 180V, 观察接触器是否继续动作, 灯 HL₁ 是否继续发光。

(3) 继续慢慢调节自耦变压器, 使输出电压减少, 直至接触器释放, 灯 HL₁ 熄灭为止, 记录此时电压表读数。

(4) 再次按下启动按钮 SB₂, 观察接触器动作情况, 此时接触器应不动作。

(5) 继续按下启动按钮 SB₂ 不松开, 同时缓慢调节自耦变压器使输出电压逐渐升高, 升高到接触器动作、灯 HL₁ 发光为止。松开按钮 SB₂, 记录此时电压表读数。

(6) 热继电器保护特性测试

(7) 将热继电器刻度调到 2A, 调节自耦变压器至接触器线圈额定工作电压 220V。

(8) 合上灯箱开关 SA₁~SA₅, 按下启动按钮 SB₂, 灯亮。观察记录电流表读数 I , 记录灯箱连续工作时间, 即热继电器过载工作时间 t , 填入表 11-1 中。当热继电器冷却至室温, 继续下一步。

(9) 合上 SA₆, 按下启动按钮 SB₂, 记录电流表读数 I 、过载时间 t 。

(10) 待冷却至室温后, 分别再合上 SA₇~SA₁₀, 重复上述步骤, 记录电流表读数 I 、过载时间 t , 填入表 11-1 中。

表 11-1 热继电器过载工作时间表

<i>P</i>	400	500	600	700	800	900	1 000
<i>I</i>							
<i>t</i>							

5. 实验报告

- (1) 说明热继电器的工作原理。
- (2) 接触器的主要组成部分有哪些？

11.1.2 三相异步电动机Y-Δ降压启动及正/反转控制

1. 实验目的

- (1) 了解时间继电器的工作原理及其延时时间的调整；
- (2) 掌握三相异步电动机Y-Δ降压启动及正/反转控制线路工作原理及接线方法；
- (3) 加深理解鼠笼式电动机正/反转控制线路的工作原理。

2. 实验器材

- (1) 三相鼠笼式异步电动机一台；
- (2) 交流接触器两台；
- (3) 热继电器一台；
- (4) 按钮开关一个；
- (5) 负荷开关一个；
- (6) 万用表一个。

3. 实验步骤

(1) 按图 11-2 接线，先接主电路，但接触器 KM 主触点下部电路暂不连接，然后连接控制电路。

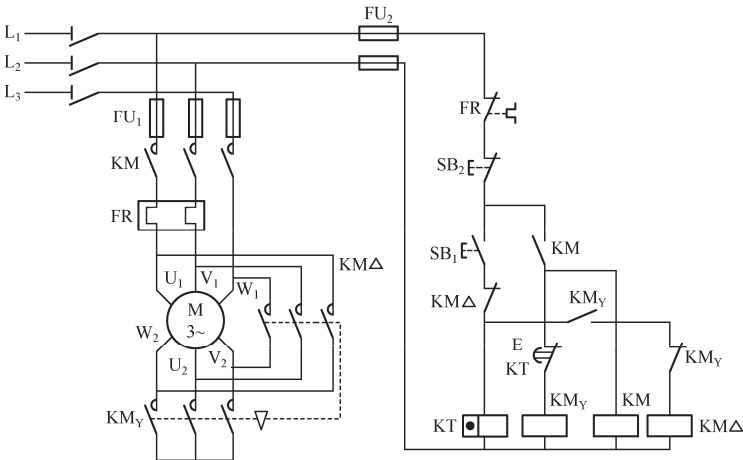


图 11-2 继电器-接触器控制电路

(2) 检查控制线路是否正确,按顺序依次接通实验台上的漏电保护开关,控制自动开关及负荷开关 QS。

(3) 操作启动按钮,观察各接触器继电器动作顺序是否正常,如出现故障拉开 QS,用万用表自行检查排除。

(4) 操作控制电动机启动和停止,调节时间继电器的延时长短。观察延时长短对启动过程影响。

(5) 调整时间继电器的延迟时间,重新操作,观察延时的作用及变化。

(6) 将接触器 KM 主触点下面的电路接好,按下启动按钮 SB₁,进行 Y- Δ 启动,根据电动机启动所用的时间,时间继电器整定时间调整到合适位置并记下整定时间。

(7) 按图 11-3 接线。

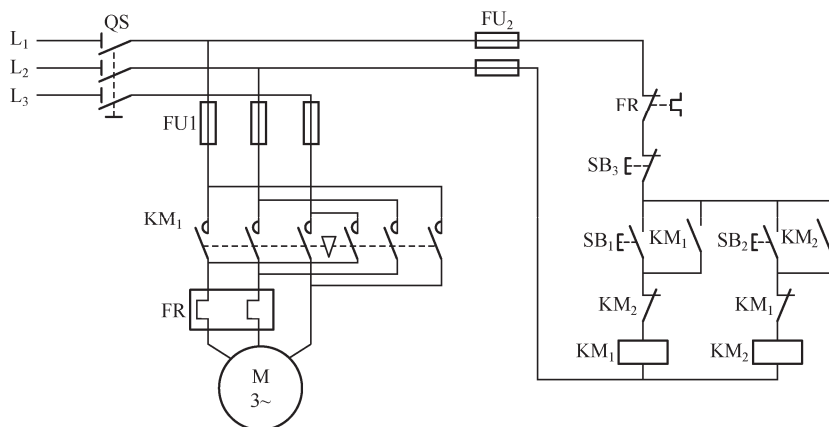


图 11-3 三相鼠笼式电动机

(8) 按下 SB₁ 使电动机转动,观察电动机旋转方向。

(9) 按下 SB₂ 验证互锁触点的作用,然后按 SB₁ 使电动机停转。

(10) 按下 SB₂ 使电动机重新启动,观察电动机的旋转方向。

4. 实验报告

(1) 分析实验中的故障原因,总结检查调试过程。

(2) 如果时间继电器的通电延时常开触点与常闭触点接反,电路工作状态如何?

11.1.3 三相异步电动机能耗制动控制

1. 实验目的

(1) 熟悉三相异步电动机能耗制动控制线路及接线方法;

(2) 了解三相异步电动机能耗制动的制动特点。

2. 实验器材

(1) MEE-1 型机床电器实验台一台;

- (2) MEE-1 型电动机实验台一台；
- (3) 连接导线若干；
- (4) 滑线变阻器 ($1\text{k}\Omega/150\text{W}$) 一个；
- (5) 直流稳压电源 ($24\sim 30\text{V}/3\text{A}$) 一台。

3. 实验内容及步骤

- (1) 将空气开关 (QF) 手柄位置置于“关”位置。
- (2) 按图 11-4 接线。接线应按照主回路、控制回路分步来接；接线尽可能整齐、清晰，便于检查。在连线时通过转动插头将插件自行锁紧，使接点牢固、可靠。
- (3) 实验中电动机采用星形接法。
- (4) 合上空气开关 QF，将稳压电源开关打开。
- (5) 将滑线变阻器调至阻值的 $1/3$ 处，按下启动按钮 SB_1 ，使电动机转动。按下按钮 SB_2 (注意要按到底)，观察制动效果如何？如制动效果不明显将滑线变阻器阻值逐步调小，重新试验，以达到制动效果较明显为宜。至于变阻器值不易过小，否则稳压电源会因过载而烧坏。
- (6) 实验结束，切断电源 (断开 QF)，再拆线，并将实验器材整理好。

4. 实验报告

- (1) 按下制动按钮 SB_2 时，如不按到底会出现什么情况？
- (2) 画出实验电路图，叙述电路工作原理和实验操作步骤。

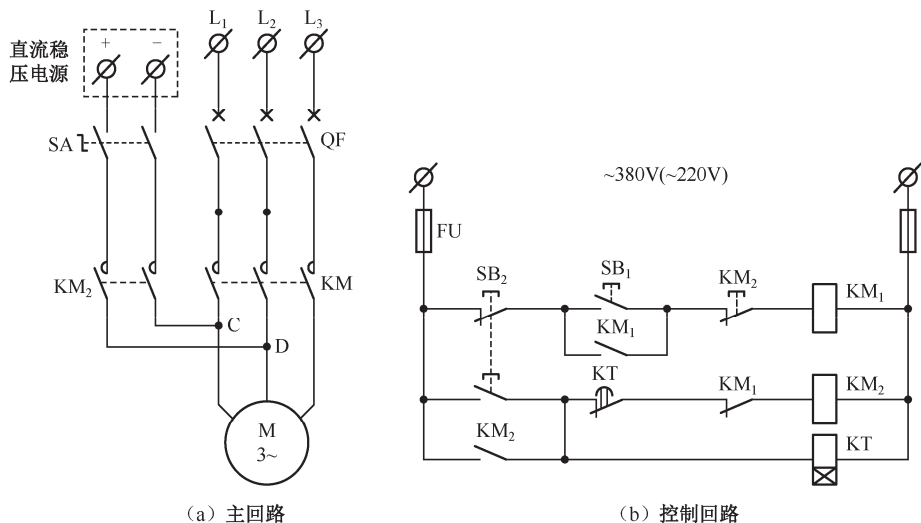


图 11-4 三相异步电动机能耗制动控制电路

11.1.4 三相异步电动机变频调速控制

1. 实验目的

- (1) 了解变频调速器的基本工作原理；

- (2) 掌握变频调速器的外特性；
- (3) 熟悉变频器的操作方法和控制。

2. 实验器材

- (1) MEL-I 型机床电器实验台；
- (2) N2-20I-M 型变频器；
- (3) 连接导线。

3. 实验步骤

- (1) 按图 11-5 接线。

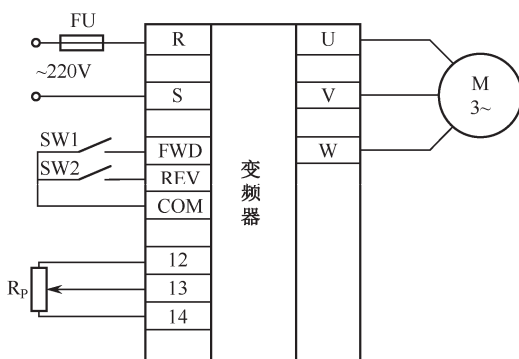


图 11-5 变频器电气接线原理图

- (2) 检查连线，经检查无误后，合上电源，此时变频器数码点亮。
- (3) 按 FUN 键，再按 $\uparrow\downarrow$ 键至 3，再按 READ 键，按 $\uparrow\downarrow$ 键把运转模式设置成 0000，表示运转为正转和反转，再按 ENTER 键，设置完成。
- (4) 按上一步骤同样的方法，把 FUN10 设置成 0，把 FUN11 设置为 1。
- (5) 按 RUN 键运行，待电动机运转平稳，调节变频器上的控制电压（电位器）旋钮，对电动机进行调速。
- (6) 欲使电动机反转，按下 REV 键即可，反转调速方法同上。
- (7) 按下 STOP 键，电动机停止转动。
- (8) 关掉电源。

4. 实验报告

画出实验电路图，阐述电路工作原理。

11.1.5 直流电动机的调速实验

1. 实验目的

掌握并励直流电动机调速特性。

2. 实验内容

1) 调速特性

(1) 观察电枢回路串电阻调速。

(2) 改变励磁电流调速：保持直流电动机电源电压不变、负载转矩 $T_2=$ 常数，测取 $n=f(I_f)$ 。

(2) 实验电路接线图

实验电路接线图如图 11-6 所示。

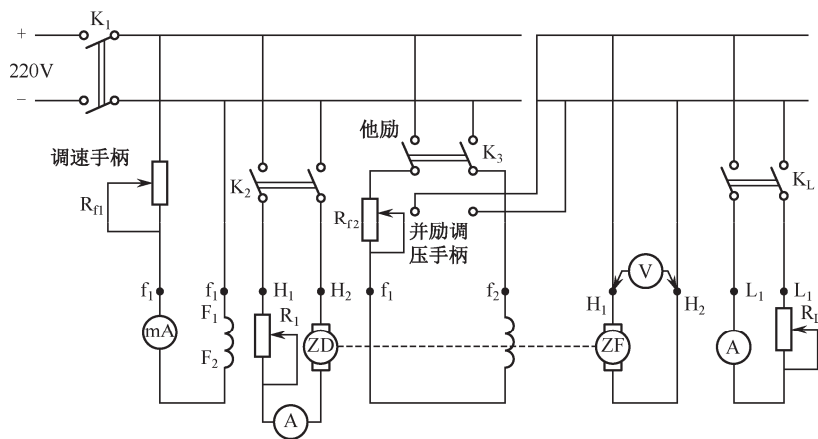


图 11-6 直流电动机的调速实验电路接线图

3. 实验步骤

(1) 将“调速”手柄逆时针调到底，“调压”手柄逆时针调到底， R_1 置于最大， K_1 、 K_2 、 K_3 、 K_L 断开。

(2) 合 K_1 ，再合 K_2 ，启动电动机后，将 R_1 切除，调节“调速”手柄使 $n=n_0=600\text{r/min}$ ，将 K_3 置于“他励”，调节“调压”手柄使发电机端电压 $U_2=220\text{V}$ ，合 K_L ，调节 R_L 和“调速”手柄，使发电机的负载电流 $I=0.5I_N=2.5\text{A}$ ，且转速 $n=n_0$ 以后，保持 I_{f1} 、 I_{f2} 不变，缓慢增加 R_1 ，观察转速的变化。

(3) 将 R_1 切除， R_L 置于最大， K_L 断开时，调节“调速”手柄，使转速 $n=n_0$ ，调节“调压”手柄，使直流发电机电枢电压 $U_2=220\text{V}$ ，合 K_L ，调节 R_L 、“调速”手柄，使发电机的负载电流 $I=0.5I_N$ 且 $n=n_0$ ，在 I_{f2} 不变时，缓慢顺时针调节“调速”手柄，使 I_{f1} 减小，同时调节 R_L ，使 $I=0.5I_N$ 保持不变，读取 I_{f1} 和 n ，直到转速增加到 $n=1.2n_N$ ，共记录 5~6 组数据于表 11-2 中。

表 11-2 I_{f1} 与 n 关系记录表

序 号	1	2	3	4	5	6
I_{f1}/A						
$n/\text{r/min}$						

4. 实验报告

- (1) 绘制并励直流电动机的调速特性 $n = f(I_f)$;
- (2) 简要分析电枢回路串电阻调速、励磁电流调速两种方法的优缺点。

11.1.6 可编程控制器的控制实验

1. 实验目的

- (1) 练习根据控制任务的要求设计 PC 控制电路和程序;
- (2) 练习模拟实验的组建和程序调试。

2. 实验内容

一条冷加工自动线上有一个钻孔动力头，该动力头的工作循环过程如图 11-7 所示，图 11-8 所示是钻孔动力头的工作时序图，图 11-9 所示是控制流程图。动力头在原位时，加启动命令后接通电磁 YV₁，动力头快进；碰到限位开关 SQ₁时接通电磁阀 YV₁ 和 YV₂，转为工进；碰到限位开关 SQ₂，停止进给；延时 10s 后接通电磁阀 YV₃，动力头快退原位停止。

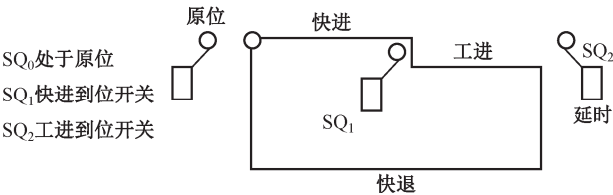


图 11-7 动力头的工作循环过程

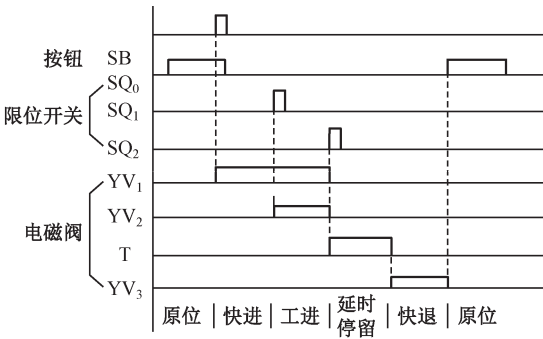


图 11-8 动力头的工作时序图

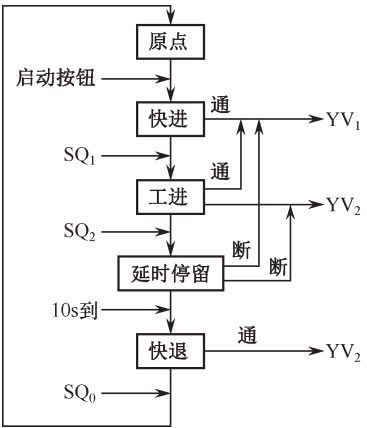


图 11-9 控制流程图

3. 实验步骤

- (1) 分配好输入/输出地址，画出 PC 外接线图。
- (2) 根据图 11-7 所示设计出梯形图，编制程序编码表。

- (3) 选定实验设备，画出用输入实验板进行模拟调试的实验接线图。
- (4) 接好实验线路，将程序输入 PC 并完成调试工作。

4. 实验报告

画出用输入实验板进行模拟调试的实验接线图、梯形图、编码表。

11.1.7 步进电动机的调速控制实验

1. 实验目的

- (1) 学会步进电动机的使用及控制方法；
- (2) 了解步进电动机的驱动装置；
- (3) 掌握步进电动机速度控制的方法。

2. 实验器材

- (1) 单轴步进电动机工作台模拟装置一台；
- (2) 稳压电源（或开关电源）24V，3A 一台；
- (3) 控制实验板一块；
- (4) 连接导线若干。

3. 实验步骤

- (1) 按图 11-10 所示连线。其中 U_{CC} 接 24V 直流电源（电源范围可在 12~36V 之间）。

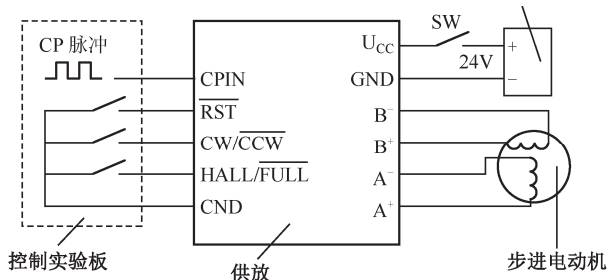


图 11-10 步进电动机的调速控制实验电气接线图

- (2) 步进电动机的两个绕组的两根线分别接驱动模块输出端 A^+ 、 A^- 、 B^+ 、 B^- 。
- (3) 驱动块的左边（如图 11-11 所示），分别接控制实验板的脉冲信号源和控制开关，控制开关 RST 、 CW/CCW 和 $HALL/FULL$ 等， $CPIN$ 接控制实验板的脉冲信号源。
- (4) 确认接线正确无误后，接通驱动电流 24V 和控制板电源，此时将 CP 脉冲调到 10Hz 左右，观察步进电动机运行情况。
- (5) 逐渐将 CP 脉冲频率调高，再观察步进电动机运行情况。
- (6) 拨动开关 CW/CCW ，观察步进电动机的正/反转情况。
- (7) 拨动开关 $HALL/FULL$ ，步进电动机将在半步及整步方式下运行，此时可观察出步进电动机运行的快慢过程。

(8) $\overline{\text{RST}}$ 开关信号若接通，则步进电动机停转。

⊕	+5V	Ucc	⊕
⊕	XP	步	⊕
⊕	CPOUT	进	⊕
⊕	CPIN	驱	⊕
⊕	$\overline{\text{RST}}$	B ⁻	⊕
⊕	CW/ $\overline{\text{CCW}}$	动	⊕
⊕	HALL/ $\overline{\text{FULL}}$	A ⁻	⊕
⊕	GND	A ⁺	⊕

图 11-11 步进驱动模块面板结构示意图

4. 实验报告

- (1) CW/ $\overline{\text{CCW}}$ 开关在什么情况下，步进电动机正转或反转。
- (2) HALL/ $\overline{\text{FULL}}$ 开关在什么情况下，步进电动机处于半步或整步运转状态。

11.2 三相异步电动机的基本拆装实习

11.2.1 异步电动机的拆卸

1. 实验目的

了解异步电动机的结构。

2. 实验器材

异步电动机。

3. 实验步骤

- (1) 电动机引线的拆装。拆线时应先切断电源。如果电动机的开关距离电动机较远，应把开关里的三个熔丝卸掉。打开接线盒，用验电笔验明接线柱上确实无电后，才可动手拆卸电动机引线，拆线时，每拆下一个线头，应做好标记，并随即用绝缘带包好，以防误合闸时造成短路或触电事故。
- (2) 对于绕线转子异步电动机来说，还应抬起或提出电刷。接线时，应按所做标记连接，引线接完后，应把电动机的外壳接地。
- (3) 卸下风扇罩。
- (4) 卸下风扇。
- (5) 卸下前轴承外盖和后端盖螺钉。
- (6) 垫上厚木板或铜棒，用手锤敲打轴端，使后端盖脱离机座。

(7) 将后端盖连同转子抽出机座。

(8) 卸下前端盖螺钉，用长木块顶住前端盖内部外缘，把前端盖打开。

4. 实验报告

分析拆卸过程中的注意事项。

11.2.2 电动机的装配

1. 实验目的

了解异步电动机的结构。

2. 实验器材

异步电动机。

3. 实验步骤

(1) 清除定子铁芯内径上的油膜、脏物等；

(2) 刮平剔净高出定子铁芯的槽契、绝缘纸等；

(3) 将机座、端盖、轴承盖的止口，以及转子表面擦干净；

(4) 用皮老虎或气筒，把定子绕组和机壳内部吹干净；

(5) 将轴承内盖的空腔部分填入润滑脂后套在转轴上，再将轴承套装在转轴上；

(6) 把非轴伸端的端盖（后端盖）及轴承外盖固定在转子上，再将转子装入定子，并将后端盖固定在机壳上；

(7) 装配前端及轴承外盖；

(8) 装配风扇及风扇罩。

4. 实验报告

分析装配过程中的注意事项。

11.3 机床电气与 PLC 控制的综合设计部分

11.3.1 低压电器控制设计

1. 实验目的

了解低压电器控制设计的基本原则。

2. 实验器材

根据设计线路，选择相应电气元件。

3. 实验内容

要求电动机 M_1 先启动，启动后，电动机 M_2 才可以启动， M_2 启动后经过一段延时，

M_1 自动停车，并且 M_1 单向运转， M_2 能实现正/反转，要有短路及过载保护。

4. 实验步骤

- (1) 根据设计线路连接实际电路。
- (2) 观察是否能实现预定功能。

5. 实验报告

简述低压电器控制线路设计的基本原则。

11.3.2 用可编程控制器对异步电动机可逆运行控制实验

1. 实验目的

- (1) 掌握三相异步电动机可逆（正/反转）控制电路的工作原理；
- (2) 学习设计一个应用可编程控制器的机电控制系统；
- (3) 学习用 STEP7-Micro/Win32 LAD 编辑器进行梯形图编程；
- (4) 学习如何将可编程控制器与外部设备进行正确接线。

2. 实验器材

- (1) 上位 PC 一台；
- (2) S7 200-CPU226 PLC 一套；
- (3) PC/PPI 编程电缆一根；
- (4) PLC 输入/输出模拟装置一套；
- (5) 导线若干；
- (6) 异步电动机模型一台，仅供演示用。

3. 实验内容

异步电动机可逆运行即正/反转的控制电路通常有“正-停-反”和“正-反-停”两种形式。前者用在不需要快速切换的场合，后者则用在需要快速（或直接）切换且系统机械转动惯量较小的场合。

图 11-12 所示为“正-停-反”的控制电路，控制过程如下：

电动机停止时，若按下正转按钮 SB_2 ，线圈 KM_1 得电保持，电动机开始正转，这时如果按下反转按钮 SB_3 ，没有作用，因为正反转已经互锁。

电动机停止时，若按下反转按钮 SB_3 ，线圈 KM_2 得电保持，电动机开始反转。同样，这时如果按下正转按钮 SB_2 ，没有作用。

按下停止按钮 SB_1 ，电动机停止运转。

要求大家根据电动机的控制要求编写相应的控制程序，并绘出程序设计框图。

输出信号有电动机停止按钮 SB_1 、正转按钮 SB_2 和反转按钮 SB_3 ；输出信号有继电器线圈 KM_1 和线圈 KM_2 ，如表 11-3 所示。

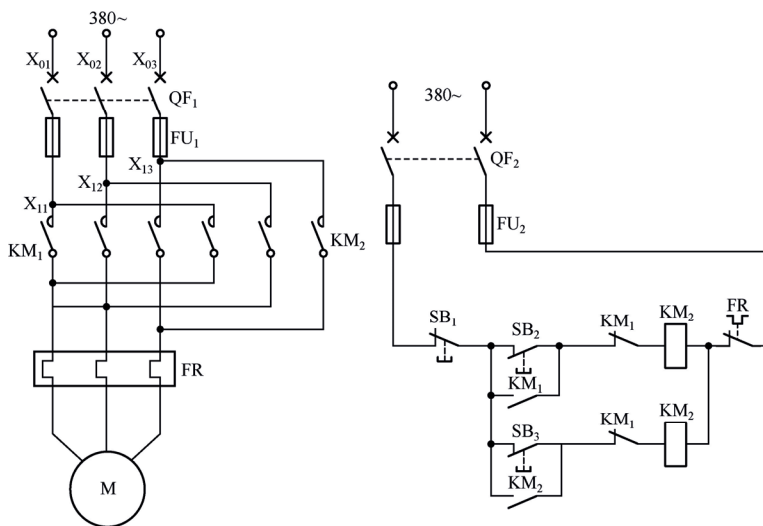


图 11-12 三相异步电动机“正-停-反”的控制电路

表 11-3 输出信号与输入信号

输入信号		输出信号	
停止按钮 SB0	I0.0	线圈 KM1	Q0.1
正转 SB1	I0.1	线圈 KM2	Q0.2
反转 SB2	I0.2		

参考的梯形图和语句表如图 11-13 所示。

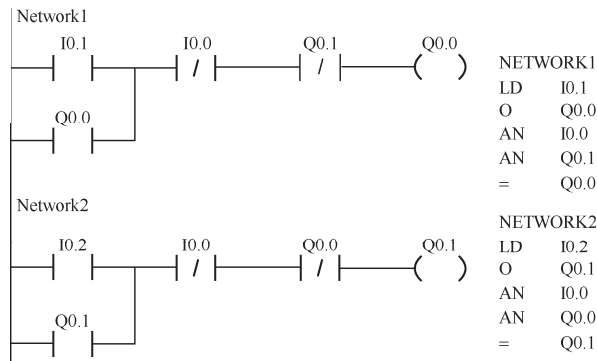


图 11-13 三相异步电动机可逆控制参考的梯形图和语句表

4. 实验步骤

- (1) 根据控制要求绘制程序设计框图。
- (2) 开上位机后，参照程序设计框图，编制梯形图程序。
- (3) 编译下载（下位机需上电）后，运行该程序。
- (4) 验证编制的程序是否符合设计要求。

5. 实验报告

- (1) 说明编程过程和实验过程，并说明电动机可逆控制的特点。
- (2) 绘出控制梯形图，最好标注说明。
- (3) 绘出 I/O 接线图。

11.3.3 利用可编程控制器设计抢答器

1. 实验目的

- (1) 学会用 PLC 构造一个抢答器系统；
- (2) 进一步熟练 SIMATIC 的基本指令。

2. 实验器材

- (1) 上位 PC 一台；
- (2) S7 200-CPU226 PLC 一套；
- (3) PC/PPI 编程电缆一根；
- (4) PLC 输入/输出模拟装置一套；
- (5) 导线若干；
- (6) 七段数码显示器，如图 11-14 所示；
- (7) 蜂鸣器一个；
- (8) 指示灯一只。

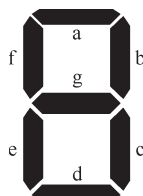


图 11-14 七段数码显示器图

3. 实验内容

四组抢答器的控制要求如下：

有 4 个抢答台，在主持人的主持下，参赛者通过抢先按下抢答按钮后，抢答开始并且有时间限制。最先按下按钮的由七段数码显示器显示该台台号，同时蜂鸣器发音提示，此后其他抢答无效。

如果在限制的时间内，参赛者均没有抢答，10s 后蜂鸣器发音提示，此后抢答无效；如果主持人未按下开始按钮之前，已有人按下抢答按钮，则属于违规，七段数码显示器将显示该台台号，同时，蜂鸣器发音提示，违规指示灯闪烁，其他按钮不起作用；各台号数字显示的清除，蜂鸣器发音，以及违规指示灯的闪烁的复位，都是通过主持人的复位按钮来实现的。

4. 实验步骤

1) 画程序设计框图

请根据抢答器的控制要求，画出相应的程序设计框图。

2) 建立输入/输出分配表

输入有主持人控制的抢答开始按钮、复位按钮，以及 4 个参赛者的抢答按钮，共 5 个输入信号；输出有蜂鸣器、违规指示灯和 7 段数码显示，共 9 个输出信号。a~g 是 7 段数码显示的 7 个信号如表 11-4 所示。

表 11-4 输入/输出分配表

输入 信号		输出 信号			
开始抢答 SB0	I0.0	a	Q0.1	g	Q0.7
1 号抢答 SB1	I0.1	b	Q0.2	蜂鸣器	Q0.0
2 号抢答 SB2	I0.2	c	Q0.3	违规指示灯	Q1.0
3 号抢答 SB3	I0.3	d	Q0.4		
4 号抢答 SB4	I0.4	e	Q0.5		
复位 SB5	I0.5	f	Q0.6		

3) 编制控制程序

利用 STEP7-Micro/Win32 软件的梯形图编辑器编写控制程序。I/O 信号参考输入/输出分配表，当然也可另外建立。

图 11-15 所示为该实验的控制程序，仅供读者参考。

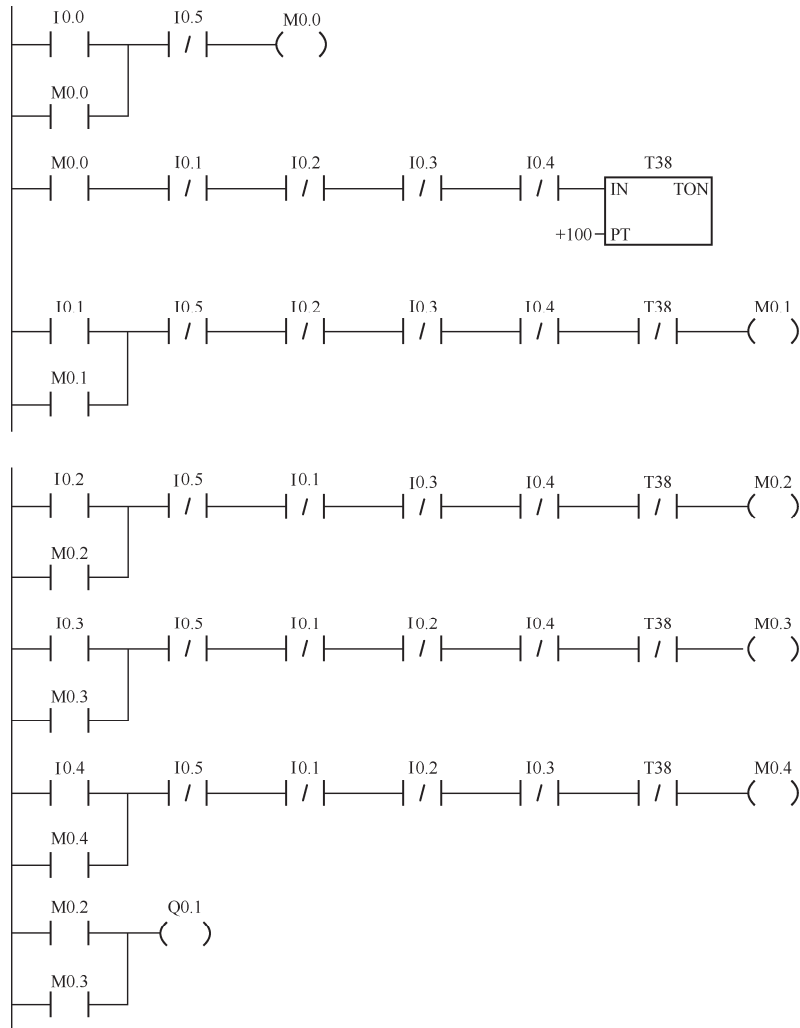


图 11-15 抢答器的控制程序

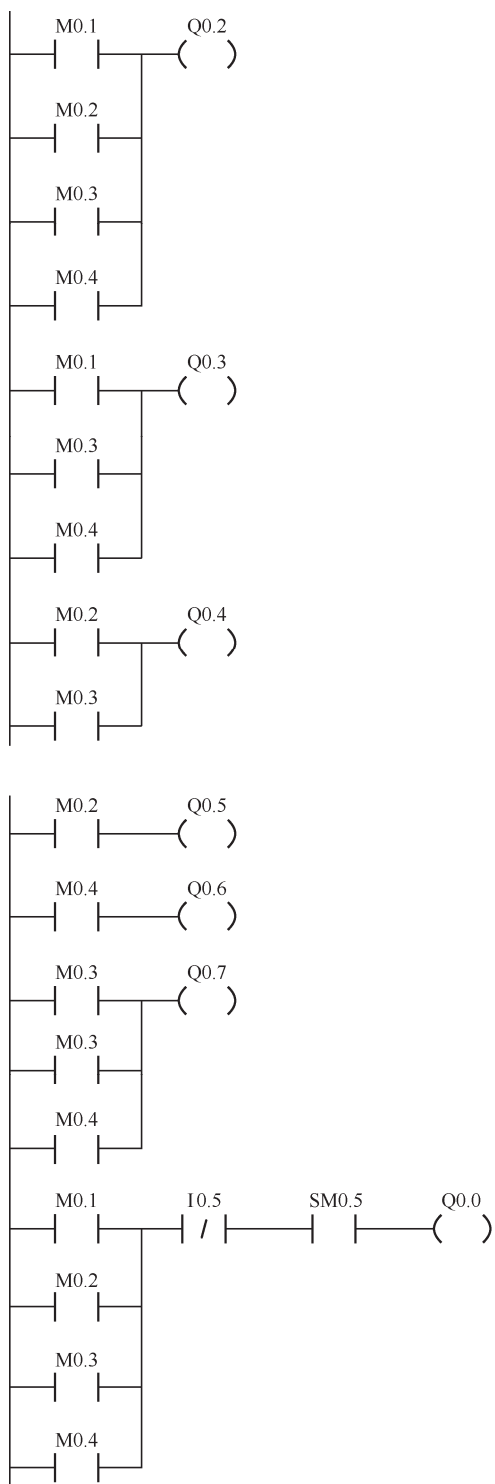


图 11-15 抢答器的控制程序（续）

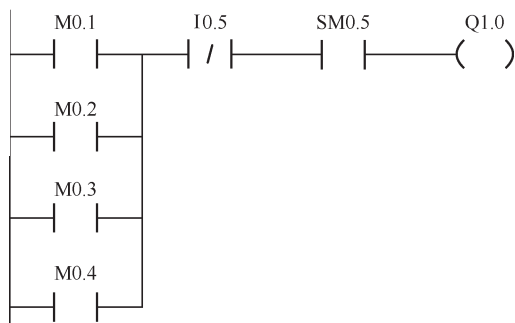


图 11-15 抢答器的控制程序（续）

5. 实验报告

- (1) 画程序设计框图。
- (2) 建立 I/O 分配表。
- (3) 列出程序清单，可用梯形图或语句表编写。
- (4) 和其他同学的程序比较，讨论各自程序的优缺点。

11.3.4 人行道按钮控制交通灯程序设计实验

1. 实验目的

- (1) 熟悉 SIMATIC 基本指令的功能和应用；
- (2) 掌握十字路口交通灯控制的编程和调试。

2. 实验器材

- (1) 上位 PC 一台；
- (2) S7-200 CPU226 PLC 一套；
- (3) PC/PPI 编程电缆一根；
- (4) PLC 输入/输出模拟装置一套；
- (5) 导线若干；
- (6) 红灯、黄灯和绿灯各 4 个，仅供演示用。

3. 实验内容

交通灯的控制要求如下：

当启动开关接通时，交通灯系统开始工作。先东西绿灯亮，再南北红灯亮。南北红灯亮维持 35s，在南北红灯亮的同时，东西绿灯也亮并维持 30s。到 30s 时，东西绿灯闪亮，闪亮周期为 1s（亮、灭各 0.5s）。绿灯闪亮 3s 后熄灭，东西黄灯亮，维持 2s，南北绿灯亮维持 20s。到 20s 时，南北绿灯闪亮 3s 后熄灭，南北黄灯亮，维持 2s，到 2s 时，南北黄灯灭，红灯亮，同时东西红灯灭，绿灯亮，进入第二周期的工作，如此反复地循环下去。

图 11-16 所示是十字路口交通灯的示意图。

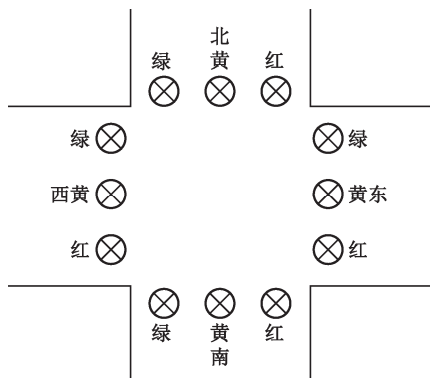


图 11-16 十字路口交通灯示意图

4. 实验步骤

- (1) 根据控制要求绘制程序设计框图。
- (2) 开上位机后，参照程序设计框图，编制梯形图程序。
- (3) 编译下载（下位机需上电）后，运行该程序。
- (4) 验证编制的程序是否符合设计要求。

5. 实验报告

- (1) 说明编程过程和实验过程，并说明交通灯控制的特点。
- (2) 绘出控制梯形图，最好标注说明。
- (3) 绘出 I/O 接线图。

11.3.5 典型机床电气与 PLC 控制设计

1. 实验目的

- (1) 实践第 10 章中的内容。
- (2) 学会机床电气控制设计、机床 PLC 设计、进给系统设计、电气工艺设计及机床设计技术文件的编写。

2. 实验器材及资料

- (1) 器材：计算机。
- (2) 资料：CNC 资料、伺服驱动器资料、伺服电动机资料、交流主轴驱动器资料、交流主轴电动机资料。

3. 实验步骤

- (1) 制定数控车床 CJK6032 电气与 PLC 控制设计任务书。
- (2) CJK6032 数控车床主轴系统采用 3.7kW 三相交流异步电动机，根据需要自行选择交流主轴驱动或变频器。

(3) CJK6032 数控车床进给系统采用交流伺服进给系统，电动机与丝杠直连，根据以下条件选择合适交流伺服电动机和交流伺服驱动器。X 轴、Z 轴快速移动速度分别为 18m/min 和 24m/min；丝杠螺距分别为 6mm 和 8mm，丝杠长度分别为 550mm 和 1500mm，丝杠外径都为 40mm；大拖板（Z 轴拖动）总质量为 45kg，小拖板（X 轴拖动）总质量为 25kg；导轨摩擦系数 $\mu_f=0.002$ ，滑块预载荷 0.02C(838N)；滚珠丝杠螺母副的传动效率为 0.95；最大切削力在 X 轴、Z 轴分量分别为 700N 和 1 000N；各轴联轴器惯量为 $0.3 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 。

(4) CJK6032 数控车床辅助功能同本书第 9 章中卧式车床电气与 PLC 控制分析中车床功能。

- (5) 选择合适的主轴驱动器或变频器；选择合适交流伺服电动机和交流伺服驱动器。
- (6) 根据功能要求选择合适的 CNC。
- (7) PLC 控制设计。
- (8) 绘制电气原理图，并列出元件清单。
- (9) 设计机床电柜和绘制机床电气元件布局图和安装接线图。
- (10) 编写技术文件。

5. 实验报告















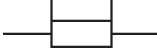








- (1) 写出进给轴交流伺服电动机选型计算过程。
- (2) 编写梯形图。
- (3) 绘制电气原理图。
- (4) 绘制机床电气元件布局图和安装接线图。

Appendix A

附录 A 常用电器图形符号

电路图是人们在工业企业生产过程中总结出来的一种识读语言。因此，看懂和掌握电路图就成为了相关技术人员的必要工具。下面列举了常用电器图形符号的各种表示方法。

表 A-1 常用电器图形符号

符号名称	图形符号	符号名称	图形符号
直流		压敏电阻	
直流 当上面符号容易引起混淆时用 此符号		电容器	 或 
交流		极性电容器	 或 
交直流		可变电容器 可调电容器	 
正极	+	电感器	
负极	-	带磁芯的电感器	
接地		分流器	
接机壳或接底板	 或 	N 型沟道结型场效应半导体管	
导线		P 型沟道结型场效应半导体管	
柔软导线		光电二极管	
端子	○	光电池	

续表

符号名称	图形符号	符号名称	图形符号
可拆卸的端子		三级晶体闸流管	
导线的交叉连接		半导体二极管	
导线的不连接		PNP 型半导体管	
电阻器		NPN 型半导体管	
可变电阻器 可调电阻器		电抗器、扼流圈	
滑动触点电位器		双绕组变压器	
预调电位器		交流接触器线圈	
具有固定插头的电阻		接触器常开触点	
中间继电器线圈		接触器常闭触点	
欠压继电器线圈		过流继电器线圈	
通电延时（缓吸）线圈		断电延时（缓放）线圈	
延时闭合常开触点		延时断开常开触点	
延时闭合常闭触点		延时断开常闭触点	
热继电器热元件		热继电器常闭触点	

续表

符号名称	图形符号	符号名称	图形符号
中间继电器常开触点		中间继电器常闭触点	
位置开关常开触点		位置开关常闭触点	
作双向机械操作的位置开关		常开按钮	
常闭按钮		复合按钮	
单极控制开关		三极控制开关	
隔离开关		三极隔离开关	
负荷开关		三极负荷开关	
断路器		三极断路器	
交流发电机		交流电动机	
三相鼠笼式异步电动机		三相绕线型异步电动机	
直流发电机		直流电动机	
直流伺服电动机		交流伺服电动机	
直流测速发电机		交流测速发电机	
步进电动机		他励直流电动机	
串励直流电动机		电流互感器 脉冲变压器	

续表

符号名称	图形符号	符号名称	图形符号
三相变压器 星形—三角形连接		电动机扩大机	
集电环或换向器上的电刷		原电池或蓄电池	
熔断器一般符号		熔断式开关	
熔断式隔离开关		火花间隙	
避雷器		电流表	
电压表		电度表	
电磁铁		电磁制动器	
电磁离合器		照明灯 信号灯	
控制电路用电源整流器		电 铃	
蜂鸣器		电喇叭	
脉宽调制器		放大器	

Appendix B

附录 B 常用电器文字符号

在电路图中常用一些文字符号来代表一些设备零件的名称，因此，看懂电路图中的文字符号所代表的元器件名称就很重要了。下面列出了一些常用电器文字符号所对应的含义。

表 B-1 常用电器文字符号

名 称	文字符号（BG/T5094—2003 GB/T20939—2007）	名 称	文字符号（BG/T5094—2003 GB/T20939—2007）
分离元件放大器	TF	电抗器	RA
晶体管放大器	TF	电动机	MA
集成电路放大器	TF	直流电动机	MA
自整角机旋转放大器	TF	交流电动机	MA
旋转放大器	TF	电流表	PG
电容器	CA	电压表	PG
热继电器	BB	电阻器	RA
熔断器	FA	控制开关	SF
旋转发电机	GA	选择开关	SF
同步发电机	GA	按钮开关	SF
异步发电机	GA	行程开关	BG
蓄电池	GB	三级隔离开关	QB
接触器	QA	单级开关	QB
继电器	KF	刀开关	QB
时间继电器	KF	电流互感器	BE
电压互感器	BE	电力互感器	TM
电磁铁	MB	信号灯	PG
电磁阀	MB	发电机	GA
接插器	XD	直流发电机	GA
照明灯	EA	交流发电机	GA
半导体二极管	RA		

表 B-2 常用辅助文字符号

名 称	文 字 符 号	名 称	文 字 符 号
交流	AC	直流	DC
自动	A 或 AUT	接地	E
加速	ACC	快速	F
附加	ADD	反馈	FB
可调	ADJ	正，向前	FW
制动	B 或 BRK	输入	IN
向后	BW	断开	OFF
控制	C	闭合	ON
延时	D	输出	OUT
数字	D	启动	ST

Appendix C

附录 C 《机床电气控制技术》 专业词汇中英文对照

Induction machine 感应式电动机
Horseshoe magnet 马蹄形磁铁
Magnetic field 磁场
Eddy current 涡流
Right-hand rule 右手定则
Left-hand rule 左手定则
Slip 转差率
Induction motor 感应电动机
Rotating magnetic field 旋转磁场
Winding 绕组
Stator 定子
Rotor 转子
Induced current 感生电流
Time-phase 时间相位
Exciting voltage 励磁电压
Slot 槽
Lamination 叠片
Laminated core 叠片铁芯
Short-circuiting ring 短路环
Squirrel cage 鼠笼
Rotor core 转子铁芯
Cast-aluminum rotor 铸铝转子

Bronze 青铜
Horsepower 马力
Random-wound 散绕
Insulation 绝缘
Ac motor 交流环电动机
End ring 端环
Alloy 合金
Coil winding 线圈绕组
Form-wound 模绕
Performance characteristic 工作特性
Frequency 频率
Revolutions per minute 转/分
Motoring 电动机驱动
Generating 发电
Per-unit value 标么值
Breakdown torque 极限转矩
Breakaway force 起步阻力
Overhauling 检修
Wind-driven generator 风动发电机
Revolutions per second 转/秒
Number of poles 极数
Speed-torque curve 转速力矩特性曲线

Plugging 反向制动
 Synchronous speed 同步转速
 Percentage 百分数
 Locked-rotor torque 锁定转子转矩
 Full-load torque 满载转矩
 Prime mover 原动机
 Inrush current 涌流
 Magnetizing reactance 磁化电抗
 Line-to-neutral 线与中性点间的
 Stator winding 定子绕组
 Leakage reactance 漏磁电抗
 No-load 空载
 Full load 满载
 Polyphase 多相（的）
 Iron-loss 铁损
 Complex impedance 复数阻抗
 Rotor resistance 转子电阻
 Leakage flux 漏磁通
 Locked-rotor 锁定转子
 Chopper circuit 斩波电路
 Separately excited 他励的
 Compounded 复励
 Dc motor 直流电动机
 Dc machine 直流电动机
 Speed regulation 速度调节
 Shunt 并励
 Series 串励
 Armature circuit 电枢电路
 Optical fiber 光纤
 Interoffice 局间的
 Waveguide 波导 波导管
 Bandwidth 带宽
 Light emitting diode 发光二极管
 Silica 硅石 二氧化硅
 Regeneration 再生，后反馈放大
 Coaxial 共轴的，同轴的
 High-performance 高性能的
 Carrier 载波

Mature 成熟的
 Single Side Band(SSB) 单边带
 Coupling capacitor 结合电容
 Propagate 传导 传播
 Modulator 调制器
 Demodulator 解调器
 Line trap 限波器
 Shunt 分路器
 Amplitude Modulation(AM) 调幅
 Frequency Shift Keying(FSK) 移频键控
 Tuner 调谐器
 Attenuate 衰减
 Incident 入射的
 Two-way configuration 二线制
 Generator voltage 发电机电压
 Dc generator 直流发电机
 Polyphase rectifier 多相整流器
 Boost 增压
 Time constant 时间常数
 Forward transfer function 正向传递函数
 Error signal 误差信号
 Regulator 调节器
 Stabilizing transformer 稳定变压器
 Time delay 延时
 Direct axis transient time constant 直轴瞬
 变时间常数
 Transient response 瞬态响应
 Solid state 固体
 Buck 补偿
 Operational calculus 算符演算
 Gain 增益
 Pole 极点
 Feedback signal 反馈信号
 Dynamic response 动态响应
 Voltage control system 电压控制系统
 Mismatch 失配
 Error detector 误差检测器
 Excitation system 励磁系统

Field current 励磁电流	Direct-current 直流
Transistor 晶体管	Time invariant 时不变的
High-gain 高增益	Self-inductor 自感
Boost-buck 升压去磁	Mutual-inductor 互感
Feedback system 反馈系统	The dielectric 电介质
Reactive power 无功功率	Storage battery 蓄电池
Feedback loop 反馈回路	E.m.f = electromotive fore 电动势
Automatic Voltage regulator(AVR) 自动电压调整器	Unidirectional current 单方向性电流
Reference Voltage 基准电压	Circuit diagram 电路图
Magnetic amplifier 磁放大器	Load characteristic 负载特性
Amplidyne 微场扩流发电机	Terminal voltage 端电压
Self-exciting 自励的	External characteristic 外特性
Limiter 限幅器	Conductance 电导
Manual control 手动控制	Volt-ampere characteristics 伏安特性
Block diagram 方框图	Carbon-filament lamp 碳丝灯泡
Linear zone 线性区	Ideal source 理想电源
Potential transformer 电压互感器	Internal resistance 内阻
Stabilization network 稳定网络	Active (passive) circuit elements 有(无)源电路元件
Stabilizer 稳定器	Leakage current 漏电流
Air-gap flux 气隙磁通	Circuit branch 支路
Saturation effect 饱和效应	P.D. = potential drop 电压降
Saturation curve 饱和曲线	Potential distribution 电位分布
Flux linkage 磁链	R.m.s values = root mean square values 均方根值
Per unit value 标么值	Effective values 有效值
Shunt field 并励磁场	Steady direct current 恒稳直流电
Magnetic circuit 磁路	Sinusoidal time function 正弦时间函数
Load-saturation curve 负载饱和曲线	Complex number 复数
Air-gap line 气隙磁化线	Cartesian coordinates 笛卡儿坐标系
Polyphase rectifier 多相整流器	Modulus 模
Circuit components 电路元件	Real part 实部
Circuit parameters 电路参数	Imaginary part 虚部
Electrical device 电气设备	Displacement current 位移电流
Electric energy 电能	Trigonometric transformations 瞬时值
Primary cell 原生电池	Epoch angle 初相角
Energy converter 电能转换器	Phase displacement 相位差
Conductor 导体	Signal amplifier 小信号放大器
Heating appliance 电热器	

Mid-frequency band 中频带
 Bipolar junction transistor (BJT) 双极性晶体管
 Field effect transistor (FET) 场效应管
 Electrode 电极 电焊条
 Polarity 极性
 Gain 增益
 Isolation 隔离 分离 绝缘 隔振
 Emitter 发射管 放射器 发射极
 Collector 集电极
 Base 基极
 Self-bias resistor 自偏置电阻
 Triangular symbol 三角符号
 Phase reversal 反相
 Infinite voltage gain 无穷大电压增益
 Feedback component 反馈元件
 Differentiation 微分
 Integration 积分下限
 Impedance 阻抗
 Fidelity 保真度
 Summing circuit 总和线路 反馈系统中的比较环节
 Oscillation 振荡
 Inverse 倒数
 Admittance 导纳
 Transformer 变压器
 Turns ratio 变比 匝比
 Ampere-turns 安匝（数）
 Mutual flux 交互（主）磁通
 Vector equation 向（相）量方程
 Power frequency 工频
 Capacitance effect 电容效应
 Induction machine 感应电动机
 Shunt excited 并励
 Series excited 串励
 Separately excited 他励
 Self excited 自励
 Field winding 磁场绕组 励磁绕组

Speed-torque characteristic 速度转矩特性
 Dynamic-state operation 动态运行
 Salient poles 凸极
 Excited by 励磁
 Field coils 励磁线圈
 Air-gap flux distribution 气隙磁通分布
 Direct axis 直轴
 Armature coil 电枢线圈
 Rotating commutator 旋转（整流子）换向器
 Commutator-brush combination 换向器—电刷总线
 Mechanical rectifier 机械式整流器
 Armature m.m.f. wave 电枢磁势波
 Geometrical position 几何位置
 Magnetic torque 电磁转矩
 Spatial waveform 空间波形
 Sinusoidal density wave 正弦磁密度
 External armature circuit 电枢外电路
 Instantaneous electric power 瞬时电功率
 Instantaneous mechanical power 瞬时机械功率
 Effects of saturation 饱和效应
 Reluctance 磁阻
 Power amplifier 功率放大器
 Compound generator 复励发电机
 Rheostat 变阻器
 Self excitation process 自励过程
 Commutation condition 换向状况
 Cumulatively compounded motor 积复励电动机
 Operating condition 运行状态
 Equivalent T circuit T 型等值电路
 Rotor (stator) winding 转子（定子绕组）
 Winding loss 绕组（铜）损耗
 Prime motor 原动机
 Active component 有功分量
 Reactive component 无功分量

Electromagnetic torque 电磁转矩
Retarding torque 制动转矩
Inductive component 感性(无功)分量
Abscissa axis 横坐标
Induction generator 感应发电机
Synchronous generator 同步发电机
Automatic station 无人值守电站
Hydropower station 水电站
Process of self excitation 自励过程
Auxiliary motor 辅助电动机
Technical specifications 技术条件
Voltage across the terminals 端电压
Steady state condition 瞬态 暂态
Reactive in respect to 相对……呈感性
Active in respect to 相对……呈阻性

Synchronous condenser 同步进相(调相)机
Coincide in phase with 与……同相
Synchronous reactance 同步电抗
Algebraic 代数的
Algorithmic 算法的
Bi-phase 双相的
Bilateral circuit 双向电路
Bi-motored 双马达的
Corridor 通路
Shunt displacement current 旁路位移电流
Leakage 泄漏
Lightning shielding 避雷
Harmonic 谐波的

参 考 文 献

- [1] 齐占庆. 机床电气自动控制 (第三版). 北京: 机械工业出版社, 1999.
- [2] 顾绳谷. 电机及拖动基础. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [3] 戴文进. 电机学. 北京: 清华大学出版社, 2008.
- [4] 廖兆荣. 机床电气自动控制. 北京: 化学工业出版社, 2003.
- [5] 杨克冲, 陈吉红. 数控机床电气控制. 武汉: 华中科技大学出版社, 2005.
- [6] 龚中华. 交流伺服驱动从原理到完全应用. 北京: 人民邮电出版社, 2010.
- [7] 田凤桐. 机电设备及其控制. 北京: 机械工业出版社, 1998.
- [8] 陈福安. 数控原理与系统. 北京: 人民邮电出版社, 2006.
- [9] 杨克冲, 陈吉红, 郑小年. 数控机床电气控制. 武汉: 华中科技大学出版社, 2005.
- [10] 王兆义. 可编程控制器教程. 北京: 机械工业出版社, 1993.

