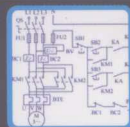




普通高等教育“十二五”机电类规划教材

精品推荐



电气控制系统设计

王得胜 韩红彪 主 编

刘法治 赵 华 副主编

- 精品课程配套教材
- 采用最新国家标准
- 配套习题、答案、课件等丰富资源
- 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

电气控制系统设计

王得胜 韩红彪 主 编
刘法治 赵 华 副主编

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书在介绍常用低压电器结构与工作原理、基本控制电路和典型控制电路的基础上,着重阐述了继电器-接触器控制系统的设计方法,讨论了可编程控制器的组成与工作原理、硬件和软件系统及其应用,最后介绍了变频调速的原理和设计要点。内容包括:绪论,常用低压电器,基本控制电路,典型电气控制系统分析,继电器-接触器控制系统设计,可编程控制器及其应用,电气调速系统与变频器等。

本书从设计电气控制系统的角度出发,既保留了传统的电气控制技术内容,又在详细介绍各种电器的性能、选用原则与方法的基础上,讲述先进的可编程控制器与应用技术,变频调速的原理与变频调速系统设计要点等,展现了电气控制技术与计算机技术互相融合、综合化和开放性的发展趋势,体现了实用性与先进性。

本书可作为高等学校机械设计制造及自动化、机电一体化等相关专业本科教材和应用型本科院校机械工程类专业的教材,也可作为从事电气控制系统设计的工程技术人员的学习和参考用书。

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

电气控制系统设计 / 王得胜, 韩红彪主编. —北京: 电子工业出版社, 2011.4

普通高等教育“十二五”机电类规划教材

ISBN 978-7-121-13168-4

I. ①电… II. ①王… ②韩… III. ①电气控制系统—系统设计—高等学校—教材 IV. ①TM921.5

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第050900号

责任编辑: 朱清江 特约编辑: 史 涛

印 刷: 北京市李史山胶印厂

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: 787×1092 1/16 印张: 19 字数: 500千字

印 次: 2011年4月第1次印刷

定 价: 36.00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

进入 21 世纪以来,虽然高校的教材大都能够反映新技术、新工艺和新成果,但在大学生总体知识结构的设计方面,仍然需要进行不断改革,以培养能够适应社会进步的创新型人才。就电气控制技术方面的教材而言,多数教材注重原理分析而对电气控制系统的结构设计不够重视,导致学生学完电气控制技术课程后,对电气控制系统的设计问题依然非常陌生,成绩优秀的同学,至多能够设计电气控制系统原理图,至于电气元件如何组装成实际的电气控制系统、如何接线等问题,则知之甚少。因此,如何结合机械工程类专业扎实的制图知识和设计能力的优势,加强电气控制系统设计方面的训练,使学生真正成为具有机电一体化知识的复合型创新人才,仍是教学改革中需要深入探索的实际问题,本书试图从教材改革的角度在这方面进行开拓。

与传统的电气控制技术教材相比,本书要加强电气控制系统设计方面的内容,比较详细地讲述继电器-接触器控制系统的设计方法,并结合实例系统地介绍设计步骤;为培养学生的创新能力,在深入讨论继电器-接触器控制系统的基础上,阐述可编程控制器(PLC)的组成与工作原理、性能特点,结合实际应用,较详细地讨论 PLC 控制系统的设计方法和设计过程,以及 PLC 控制系统与继电器-接触器控制系统的异同;概略地介绍变频调速的原理、变频器与变频调速系统设计要点,使学生学完本课程后,能够正确选用电气元件,设计电气控制系统原理图,同时结合机械工程知识,也能够设计电气控制系统接线图和电气柜(箱)结构,熟悉电气元件安装、接线和调试,从而加强学生对原理图与实际电气元件结构的认识与联系,培养学生的动手能力和创新能力。

基于以上理念,本书在编写过程中注重理论与实际相结合,元件工作原理、性能特点与基本控制电路相结合,基本控制电路与典型控制系统相结合,突出实用性,强调系统性,力求先进性。

全书共分 7 章。第 1 章绪论,介绍电气控制的作用、有关电气元件和电气控制系统原理图的基本知识;第 2 章常用低压电器,讲解继电器、接触器等低压电器的结构、工作原理和选用原则,典型应用电路等;第 3 章基本控制电路,讲解连锁控制电路中的启动与停止控制(自锁)电路、正反转控制电路、顺序控制电路和变化参量控制电路中按时间、速度、电流和行程等原则进行控制的电路;第 4 章典型电气控制系统分析,讲解分析电气控制系统的方法与步骤,并对普通车床、铣床和组合机床等典型设备的电气控制系统进行分析;第 5 章继电器-接触器控制系统设计,详细讲解继电器-接触器控制系统的设计方法,结合实例介绍设计步骤;第 6 章可编程控制器及其应用,讲解 PLC 控制系统的组成、性能特点与设计方法、步骤;第 7 章电气调速系统与变频器,介绍变频调速的原理与变频器调速系统的设计要点。

本书由河南理工大学王得胜、河南科技大学韩红彪主编,由河南理工大学王福忠教授主审。第 1 章由王得胜编写,第 2 章由韩红彪编写,第 3 章由河南科技学院刘法治编写,第 4 章由南阳理工学院赵华编写,第 5 章由河南理工大学童景琳编写,第 6 章第 1~5 节由南阳理工学院刘尚争编写,第 6 章第 6~7 节由河南理工大学张宏伟编写,第 7 章由河南理工大学张丽梅编写。全书由王得胜统稿、定稿。

由于编写时间所限,书中难免有疏漏和不妥之处,恳请读者批评指正。此外,感谢河南理工大学机械与动力学院对编写本书的大力支持;在本书编写过程中参阅了国内外多种同类教材和专著,在此特向其作者致谢。

编 者

目 录

第 1 章 绪论	(1)	2.3.3 按钮开关	(55)
1.1 电气控制系统的作用与发展概况	(1)	2.3.4 行程开关	(57)
1.1.1 电气控制系统在生产设 备中的作用	(1)	2.3.5 接近开关	(59)
1.1.2 电气控制技术的 发展概况	(2)	2.3.6 断路器	(61)
1.2 低压电器的基本知识	(4)	2.3.7 信号灯	(64)
1.2.1 低压电器的基本组成	(4)	习题与思考题	(65)
1.2.2 低压电器分类与 表示方法	(10)	第 3 章 基本控制电路	(67)
1.3 电气控制系统基本知识	(12)	3.1 概述	(67)
1.3.1 图形符号及文字符号	(12)	3.1.1 按控制功能分类	(67)
1.3.2 电气控制系统图的画法	(14)	3.1.2 按控制规律分类	(68)
1.3.3 电路图的阅读方法	(19)	3.2 三相笼型异步电动机的启动 控制电路	(68)
1.3.4 电气安装接线图的 阅读方法	(22)	3.2.1 正转控制电路	(69)
1.4 本课程的学习内容与学习方法	(24)	3.2.2 降压启动控制电路	(70)
1.4.1 本课程的学习内容	(24)	3.3 三相笼型异步电动机正反转 控制电路	(76)
1.4.2 本课程的学习方法	(25)	3.3.1 正反转控制电路	(76)
习题与思考题	(25)	3.3.2 行程控制电路	(78)
第 2 章 常用低压电器	(26)	3.4 三相笼型异步电动机制动 控制电路	(80)
2.1 接触器	(26)	3.4.1 机械制动控制电路	(80)
2.1.1 电磁接触器的工作原理与 技术参数	(27)	3.4.2 电气制动控制电路	(81)
2.1.2 电磁接触器的型号 与选用	(30)	3.5 双速异步电动机高低速控制电路	(84)
2.2 继电器	(33)	3.5.1 Δ -YY 双速异步电动机 定子绕组的连接	(85)
2.2.1 中间继电器	(33)	3.5.2 双速异步电动机手动变 速控制电路	(85)
2.2.2 热继电器	(36)	3.5.3 双速异步电动机自动 变速控制电路	(86)
2.2.3 时间继电器	(40)	3.6 机床液压系统的电气控制电路	(87)
2.2.4 速度继电器	(44)	3.6.1 机床中常用的液压元件	(87)
2.2.5 其他继电器	(45)	3.6.2 液压动力部件控制电路	(92)
2.3 其他常用电器	(49)	3.7 其他基本控制电路	(94)
2.3.1 低压开关	(49)	3.7.1 点动控制	(94)
2.3.2 熔断器	(53)	3.7.2 连锁与互锁	(95)

3.7.3 多点控制	(96)	5.1.3 继电器-接触器控制 系统设计的方法	(138)
习题与思考题	(97)	5.2 电动机的选用	(139)
第4章 典型电气控制系统分析	(98)	5.2.1 电动机类型、电压和额定 转速的选择	(140)
4.1 分析电气控制系统的方法与步骤	(98)	5.2.2 电动机额定功率的确定	(141)
4.2 普通车床的电气控制系统	(99)	5.3 继电器-接触器控制系统 设计举例	(146)
4.2.1 卧式车床结构和运动	(99)	5.3.1 电气原理图设计应注意的 技术问题	(146)
4.2.2 电力拖动特点与 控制要求	(100)	5.3.2 电气控制原理图的 设计步骤	(152)
4.2.3 电气控制系统分析	(100)	5.3.3 龙门刨床横梁升降电气 控制系统原理图设计	(153)
4.3 卧式铣床的电气控制系统	(103)	5.3.4 电气控制装置的 工艺设计	(163)
4.3.1 卧式铣床的主要 结构和运动	(103)	习题与思考题	(171)
4.3.2 电力拖动特点与 控制要求	(104)	第6章 可编程控制器及其应用	(173)
4.3.3 电气控制电路分析	(105)	6.1 概述	(173)
4.4 双面单工位液压传动组合 机床电气控制系统	(109)	6.1.1 PLC 的产生与发展	(173)
4.4.1 机床结构与运动	(110)	6.1.2 PLC 的特点及分类	(174)
4.4.2 电力拖动特点与 控制要求	(111)	6.1.3 PLC 的组成	(175)
4.4.3 电气控制系统分析	(111)	6.1.4 PLC 工作原理	(180)
4.5 起重机电气控制系统	(115)	6.2 FX _{2N} 系列 PLC 指令系统及 其编程方法	(182)
4.5.1 起重机的结构与运动	(115)	6.2.1 PLC 编程元件	(182)
4.5.2 电力拖动特点与 控制要求	(117)	6.2.2 PLC 编程语言	(188)
4.5.3 电气控制系统分析	(119)	6.2.3 PLC 的基本逻辑指令	(191)
4.6 数控机床控制系统简介	(127)	6.2.4 梯形图编程方法	(197)
4.6.1 概述	(127)	6.3 步进指令及其应用	(203)
4.6.2 计算机数控 (CNC) 系统	(129)	6.3.1 顺序控制原理	(203)
4.6.3 伺服控制系统	(131)	6.3.2 步进指令	(205)
习题与思考题	(135)	6.3.3 SFC 图与梯形图的转换	(206)
第5章 继电器-接触器控制系统设计	(137)	6.3.4 步进指令的应用	(208)
5.1 概述	(137)	6.4 功能指令及其应用	(214)
5.1.1 继电器-接触器控制 系统设计的内容	(137)	6.4.1 功能指令的基本格式	(214)
5.1.2 继电器-接触器控制 系统设计的原则	(138)	6.4.2 功能指令应用简介	(216)
		6.5 PLC 特殊功能模块	(229)

6.5.1 模拟量输入模块		7.1.2 直流调速系统	(269)
FX _{2N} -4AD	(229)	7.1.3 交流调速系统	(269)
6.5.2 模拟量输出模块		7.2 变频调速的原理与机械特性	(270)
FX _{2N} -4DA	(233)	7.2.1 变频调速的原理	(270)
6.5.3 高速计数模块		7.2.2 交流异步电动机变频 调速的机械特性	(271)
FX _{2N} -1HC	(236)	7.3 变频器及其性能参数	(273)
6.6 编程软件与应用	(236)	7.3.1 变频器的分类	(273)
6.6.1 GX Developer 编程软件	(237)	7.3.2 交-直-交变频器的 主电路结构	(275)
6.6.2 FX-GP/WIN-C 编程软件	(242)	7.3.3 变频器的控制 方式和特点	(276)
6.6.3 GPP 编程软件	(244)	7.3.4 变频器的性能参数	(277)
6.7 PLC 控制系统设计	(247)	7.4 变频调速系统设计要点	(280)
6.7.1 PLC 系统设计概述	(247)	7.4.1 变频调速系统设计的 步骤和硬件选用	(280)
6.7.2 主回路与控制回路设计	(249)	7.4.2 变频器的功能选择与 参数设定	(285)
6.7.3 PLC 的接口电路	(251)	7.4.3 变频器的控制与安装	(293)
6.7.4 PLC 安装与连接设计	(253)	习题与思考题	(297)
6.7.5 PLC 控制系统设计举例	(259)	参考文献	(298)
习题与思考题	(265)		
第 7 章 电气调速系统与变频器	(267)		
7.1 电气调速概述	(267)		
7.1.1 调速系统及其性能指标	(267)		

第1章 绪论

了解电气控制技术的基本内容和发展趋势,对掌握电气控制系统基本知识会有很大帮助。本章在论述电气控制系统在生产设备中的作用的的基础上,介绍电气控制技术的发展和电气控制系统的基本知识,目的是使读者对电气控制系统有一个整体上的了解和把握。

1.1 电气控制系统的作用与发展概况

1.1.1 电气控制系统在生产设备中的作用

随着生产机械自动化程度的不断提高,现代化的生产设备,特别是由若干设备组成的自动化生产系统,不仅有工作机构、传动机构和动力源等,而且一般还设计有自动控制系统。传统的自动控制系统相对比较简单,实现的功能也比较单一,主要是由继电器和接触器等低压电气元件构成的。例如,三相异步电动机的正反转控制,从电动机的工作原理可知,交换任意两相电源线均可使电动机改变转向,但如果采取人工“倒相”,不仅效率低,而且安全性差,在许多场合甚至难以实现。

如果设计如图 1.1.1 所示的异步电动机正反转控制系统,则只需进行简单操作就能够实现反转。图 1.1.1 中的 KM1 为正转接触器, KM2 为反转接触器。在主电路中, KM1 的主触点和 KM2 的主触点可分别接通电动机的正转和反转电路。显然, KM1 和 KM2 的主触点不能同时闭合,否则会引起电源短路。图中 QS 为隔离开关,熔断器 FU 起短路保护作用,热继电器 BTE 起过载保护作用。SB3 为停机按钮。

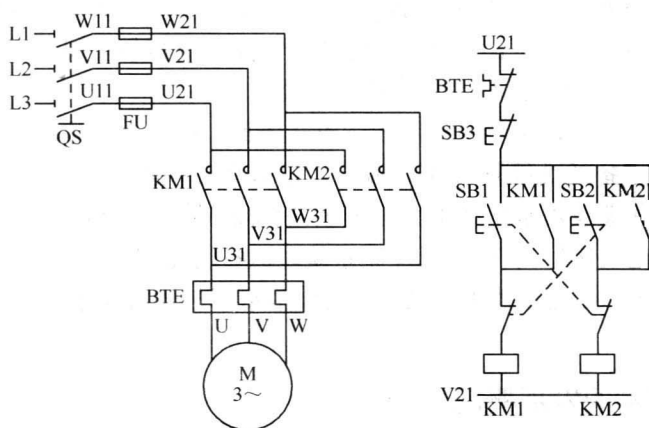


图 1.1.1 按钮正反转控制电路

在图 1.1.1 中使用了复合按钮 SB1 和 SB2, 它们有两组触点, 一组为动断触点(常闭触点), 另一组为动合触点(常开触点)。该电路中将动断触点接入对方线圈支路中, 这样, 只要按下按钮, 就自然切断了对方线圈支路, 从而实现了互锁。这种互锁是利用机械的方法来实现的, 称为机械互锁。按下正转启动按钮 SB1, SB1 的动断触点先打开, 实现对接触器 KM2 线圈的互锁; 其动合触点后闭合, 正转接触器 KM1 线圈得电, 其自锁触点和主触点都闭合, 分别实现自锁和接通电动机正转电源, 使电动机得电正转。

按下反转按钮 SB2, SB2 的动断触点先打开, 使正转接触器 KM1 线圈断电。在正转电源切断的同时, 正转自锁和正转对反转的互锁都解除。SB2 的动合触点后闭合, 接通反转接触器 KM2 线圈, 电动机实现反转。

按钮互锁正、反转控制电路可以从正转直接过渡到反转, 因为复合按钮两组触点动作情况是有先后次序的。按下时, 动断触点先断开, 动合触点后闭合; 松开时, 动合触点先恢复断开, 动断触点后恢复闭合。利用这种时间差, 可以实现从正转直接过渡到反转。

从这一简单的应用实例, 可以总结出电气控制系统在生产设备中的重要作用。

(1) 提高生产设备的自动化水平。就上例而言, 有了电气控制系统, 操作人员仅仅简单按一下按钮即可实现电动机自动换向, 避免了人工“倒相”的复杂操作过程。实际上, 对生产设备的许多动作, 都能通过电气控制实现自动化。如加工阶梯轴时, 刀具的纵向和横向进给, 工件的转向和转速控制, 进给的方向和速度的控制, 换刀和停机等动作, 在数控车床上均可通过数控程序实现自动控制, 而在普通车床上只能依靠操作工人来手工完成。

(2) 简化设备的机械结构。生产过程中的动作是由生产工艺决定的, 是必须要完成的。实现自动控制的方法是多种多样的, 可以用电气的方法来实现, 也可以用机械、液压、气动等方法来实现。但采用机械方法或其他方式时, 往往会导致设备的机械结构复杂化。如加工小型销轴类零件的 CM1107 型自动车床, 上下料、进给和机床的开停是依靠凸轮式机械控制系统完成的, 不仅需要增加以分配轴为核心的控制系统, 而且需要设计复杂的刀架, 以实现换刀和进给。由于刀架结构复杂, 因此使加工工件的尺寸受到限制。如果采用电气控制, 则其机械结构可以大大简化, 其加工的尺寸范围也可显著扩大。

(3) 实现远距离安全操作。许多生产设备是在高危险场所运行的, 如轧钢生产系统及各种化工生产系统; 有些电动机的电源电压比较高, 不宜工人近距离操作, 如煤矿井下使用的 660V 以上的高压电动机, 不允许人工合闸送电。通过电气控制很容易实现远距离安全操作, 不仅能够保证安全生产, 还有利于提高产品质量和生产效率。

当然, 电气控制系统在设备中的作用还远不止于此。在当今科技水平高度发达的时代, 电气控制技术既对生产设备的功能具有深刻影响, 还对其市场竞争力起着决定性的作用。对几乎所有的机电产品而言, 其技术水平在很大程度上是体现在电气控制系统的, 所谓的自动化、智能化, 本质上都是“电气化”, 没有电气控制系统, 这些功能都是难以实现的。许多机电产品, 无论是家用电器、汽车, 还是其他生产设备, 其技术水平与核心竞争力基本上都取决于其电气控制系统的水平。

1.1.2 电气控制技术的发展概况

电气控制技术与电力拖动有密切关系。概括地说, 电气控制技术经历了手动控制、继电器-接触器控制、顺序控制器控制、可编程控制器控制、数字控制、自适应控制、柔性制造系统(FMS)

和计算机集成控制系统等发展阶段。20 世纪初, 由于电动机的出现, 使得许多生产设备的拖动发生改变, 用电动机代替了蒸汽机, 最初用一台电动机经大轴(或地轴)由皮带传动驱动若干台生产设备, 因传动路线长、效率低、结构复杂, 后改用单电动机拖动。为解决电动机的开、停等问题, 电气控制技术随之产生。由于当时生产设备的调速多采用有级变速方式, 仅要求电气控制系统实现对开关量的控制即可, 这时的电气控制系统属于逻辑控制系统。20 世纪 30 年代, 电气无级调速方式在机床上得到应用。20 世纪 60 年代以后, 电气无级调速方式的应用范围逐步扩大, 随着对电气控制技术的研究不断深入, 出现了模拟量控制系统, 称为连续控制系统。由于逻辑控制系统和连续控制系统各有特点, 目前两类电气控制系统均获得广泛应用。

1. 逻辑控制系统

逻辑控制系统也称为开关量或断续控制系统, 其数学基础是逻辑代数, 一般采用具有两个稳定工作状态的电气元件构成控制系统。手动控制、继电器-接触器控制、顺序控制器控制、可编程控制器控制和数字控制等都是逻辑控制系统。手动控制是采用一些手动电器(如刀开关等)来控制执行电器。这种控制方式仅适合那些容量小、动作单一、不需要频繁操作的场合。继电器-接触器控制方式是采用继电器、接触器、位置开关和保护元件等来实现对控制对象的启动、停车、调速、制动、自动循环以及保护等控制。这种控制方式最初出现于 20 世纪 30 年代, 其优点是控制器件结构简单、价格低廉, 控制方式简单直接、工作可靠、易于维护, 得到了长期、广泛的应用。其缺点是接线固定, 不能满足工艺程序经常变动、控制要求比较复杂的系统的需求; 控制装置体积大、功耗大、控制速度慢; 属于有触点控制, 当控制过程比较复杂时, 可靠性低。

顺序控制器是继电器-接触器控制和电子技术相结合的控制装置, 它是通过组合逻辑元件插接或编程来实现继电器接触器控制的。它能根据生产需要改变控制程序, 又远比电子计算机结构简单, 而且价格低廉。但它的装置体积大, 功能也受到一定限制。随着大规模集成电路和微处理器技术的发展及应用, 上述控制技术也发生了根本性的变化。在 20 世纪 70 年代出现了将计算机的存储技术引入顺序控制器的新技术, 产生了新型工业控制器, 称为可编程序控制器(Programmable Logic Controller, PLC), 它兼备了计算机控制和继电器控制系统两方面的优点, 功耗小、重量轻, 目前在世界各国已作为一种标准化通用装置广泛应用于工业控制。

20 世纪 40 年代末, 为了适应中小批量机械加工生产自动化的需要, 人们应用电子技术、计算技术、现代控制理论、精密测量等近代科学成就, 成功研制出了数控机床。它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, 能实现自动加工复杂表面, 且精度较高, 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(Numerical Control, NC), 因其成本昂贵、工作可靠性差、逻辑功能固定, 后来研制成功直接数字控制(Direct Numerical Control, DNC)、计算机数控系统(Computer Numerical Control, CNC)、自适应控制系统(Adaptive Control, AC)等数控系统。随着技术的发展, 由单个机床的自动化逐渐发展为生产过程的综合自动化。由数控机床、工业机器人、自动搬运车、自动化检测和自动化仓库等组成的、由中心计算机控制的机械加工自动生产线称为柔性制造系统(Flexible Manufacturing System, FMS), 该系统能同时加工多种工件, 具有适应产品多变、使用灵活等优点, 是当前机械加工自动化发展的最高形式。电气控制技术在机床电气自动化水平不断提高的过程中也得到迅速发展。

2. 连续控制系统

对物理量（如位移、速度等）进行连续自动控制的系统，称为连续控制系统（或称模拟控制系统）。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等。这类系统的输出量能够按一定的准确度跟随输入量，一般是具有负反馈的闭环控制系统，常伴有功率放大，且具有精度高、功率大、抗干扰能力强等优点。

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和主轴电动机，带动机床执行机构产生所需的运动。从系统的控制结构看，数控机床的位置闭环系统可看做位置调节为外环、速度调节为内环的双闭环自动控制系统，其内部的实际工作过程是把位置控制输入转换成相应的速度给定信号后，再通过调速系统驱动伺服电动机，实现实际位移。数控机床的主运动要求调速性能比较高，因此要求伺服系统为高性能的宽调速系统。

1.2 低压电器的基本知识

电器是电气控制的重要元件，是所有电工器械的简称，凡是根据外界特定的信号和要求，自动或手动接通和断开电路，断续或连续改变电路参数，实现对电路或非电对象的切换、控制、保护、检测和调节作用的电气设备统称为电器。随着科学技术的飞速发展和自动化程度的不断提高，电器的应用范围日益扩大，品种不断增加。尤其是随着电子技术电器中的广泛应用，近年来出现了许多新型电器。按照我国现行标准规定，低压电器通常是指工作在交流 1200V 或直流 1500V 以下的电器。

1.2.1 低压电器的基本组成

常用低压电器有非自动切换电器和自动切换电器。前者主要靠外力来完成接通、切断等动作，如按钮、行程开关、刀开关和组合开关等；后者按照外来信号的变化或本身参数的变化自动完成切换功能，如接触器、自动开关等。此外，还有一般工业用电器、农用电器和其他场合用电器，或所谓有触点电器、无触点电器和混合电器等。无论是非自动切换电器还是自动切换

电器，都必须能够感受外界信号并做出相应的反应才能完成预定的功能，对于非自动切换电器多通过按钮或手柄感受外界信号，而自动切换电器多是利用电磁原理完成对电气电路或非电对象的切换、控制、检测、保护和指示等功能，故称为电磁式低压电器。

图 1.2.1 所示是交流接触器的工作原理示意图。图中复位弹簧、主触点、辅助触点、衔铁、线圈、铁芯和固定架等组成交流接触器。当按下按钮 SB1 时，交流接触器的线圈通电，产生电磁吸力使衔铁吸合，从而带动主触点和辅助触点闭

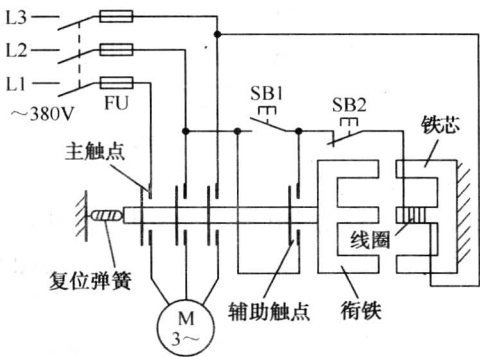


图 1.2.1 交流接触器工作原理示意图

合, 由于按钮 SB1 的动合触点与辅助触点是并联连接, 按钮 SB1 的动合触点在弹簧作用下弹起后, 辅助触点仍保持线圈处于通电状态, 故主触点也一直保持闭合状态, 从而使电动机保持通电工作状态。当按下按钮 SB2 时, 线圈断电, 电磁吸力消失, 在复位弹簧作用下, 衔铁和触点复位, 自动切断了电动机的电源, 电动机断电并停止工作。

从交流接触器的工作原理可知, 它属于自动切换电器, 一般由固定支架、电磁系统、触点和灭弧装置等几个基本组成部分。需要特别强调的是, 接触器的触点一般可分为主触点和辅助触点, 而且每种触点可能会有多对, 主触点一般要接入主电路中, 通过的电流比较大, 辅助触点要接入控制电路或辅助电路中, 通过的电流一般较小。图 1.2.2 所示是交流接触器的结构示意图。图中 1 为动触点, 2 为静触点, 3 为动铁芯 (衔铁), 4 为缓冲弹簧, 5 为短路环, 6 为线圈, 7 为静铁芯, 8 为垫毡, 9 为固定支架, 10 为弹簧, 11 为灭弧罩, 12 为触点压力片簧。可见, 接触器是一种结构比较复杂的低压电器。下面以接触器为例介绍其组成部分的结构及工作原理。

1. 电磁系统

电磁系统实质上是一种电磁铁, 是各种自动化电磁式电器的感测部分, 其作用是产生电磁吸力 (动力), 将电磁能转换成机械能, 带动触点实现闭合或断开。电磁系统一般由电磁线圈 (吸力线圈)、动铁芯 (衔铁) 和静铁芯等组成 (如图 1.2.2 中的 6、3 和 7)。电磁线圈是由带绝缘层的铜导线绕制在铁芯上, 铁芯由硅钢片叠压而成, 在铁芯上装有一个短路环, 其作用是减少交流接触器吸合时产生的振动和噪声, 故又称减振环, 其材料为铜、康铜或镍铬合金等。图 1.2.3 所示的是不同结构的电磁系统。图 (a)、(b)、(c) 和 (d) 为拍合式电磁铁, 其中图 (a) 和 (b) 的铁芯是螺管式结构, 其衔铁绕铁轭的棱角转动, 磨损较小, 铁芯用软铁制成, 适用于直流继电器和接触器; 图 (c) 和 (d) 的衔铁绕定轴转动, 用于交流接触器, 铁芯用硅钢片叠成, 图 (c) 的铁芯是 U 形结构, 图 (d) 的铁芯为双山形结构。图 (e)、(f) 和 (g) 为直动式电磁铁, 其衔铁在线圈内作直线运动, 多用于交流接触器和继电器, 其中图 (e) 和 (g) 的铁芯为单山形, 也可以做成螺管式结构, 图 (f) 的铁芯为双山形结构。

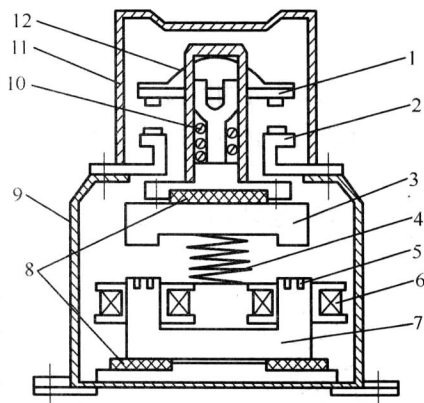


图 1.2.2 交流接触器结构示意图

线圈是电磁铁的心脏, 是产生磁力的装置, 按照通入线圈电源的种类不同, 可分为直流线圈和交流线圈。根据励磁的需要, 线圈与主电路可按串联或并联方式连接, 前者称为电流线圈, 后者称为电压线圈。电流线圈串接在主电路中, 电流较大, 常用扁铜条或粗铜线绕制, 匝数较少; 电压线圈并接在电源上, 匝数多, 阻抗大, 但电流较小, 常用绝缘较好的电磁线绕制。从结构上看, 线圈可分为有骨架式和无骨架式两种。交流电磁铁的线圈多为有骨架式, 而直流电磁铁的线圈则多是无骨架式结构。

电磁系统的工作特性常用吸力特性和反力特性来表征。电磁系统使衔铁吸合的力与气隙的关系曲线称为吸力特性, 电磁系统使衔铁释放 (复位) 的力与气隙的关系曲线称为反力特性。使衔铁释放的力一般有两种, 一是利用弹簧的反力 (如图 1.2.3 (b) 所示), 一种是利用衔铁

自身的重力（如图 1.2.3 (d) 所示）。弹簧力 F_k 与其变形 δ 成正比（变形 δ 一般与磁路中气隙有关），其大小为

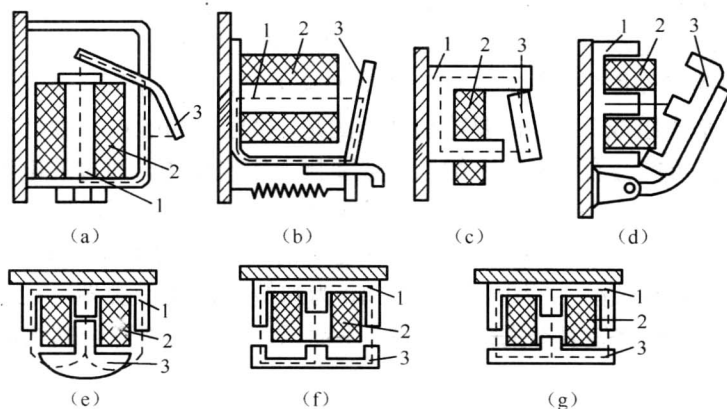


图 1.2.3 常用不同结构的电磁系统

1-铁芯；2-线圈；3-衔铁

$$F_k = k \cdot \delta \quad (1.2.1)$$

式中， k 为弹簧的刚度。

衔铁自身的重力 F_g 与磁路中的气隙无关，其大小为

$$F_g = G \quad (1.2.2)$$

式中， G 为衔铁的自重。

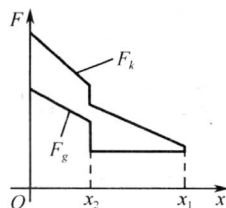


图 1.2.4 电磁系统反力特性

因为动合触点闭合时存在超行程机构的弹力作用，上述两种反力特性曲线如图 1.2.4 所示。其中 x_1 为电磁装置气隙的初始值， x_2 为动静触点开始接触时的气隙，反力特性在 x_2 处有突变。

电磁系统的电磁吸力可近似地按下式计算

$$F = \frac{B^2 S}{2\mu_0} \quad (1.2.3)$$

式中， B 为气隙中的磁感应强度，T； S 为磁极截面积， m^2 ； μ_0 为真空磁导率， H/m ； F 为电磁吸力，N。

当截面积为常数时，吸力 F 与气隙中的磁感应强度 B^2 成正比，也可以认为 F 与磁通 Φ^2 成正比。电磁系统的吸力特性反映了电磁吸力与气隙的关系。因激励电流的性质对吸力特性的影响很大，故对交、直流电磁系统的吸力特性讨论如下。

(1) 交、直流电磁系统的吸力特性。交流电磁系统激励线圈的阻抗主要取决于线圈的电阻（其值相对较小），故有

$$U \approx E = 4.44 f N \Phi, \quad \Phi = \frac{U}{4.44 f N} \quad (1.2.4)$$

式中， U 为线圈外加电压，V； E 为线圈感应电动势，V； f 为线圈外加电压的频率，Hz； Φ 为气隙磁通，Wb； N 为线圈匝数。

当频率 f 、匝数 N 和外加电压 U 都为常数时,由式 (1.2.4) 可知磁通 Φ 亦为常数。由式 (1.2.3) 又可知,此时电磁吸力 F 为常数 (因为交流激励时,电压、磁通都随时间作周期性变化,其电磁吸力也作周期变化。此处 F 为常数是指电磁吸力的幅值不变)。由于线圈外加电压 U 与气隙 x 无关,所以其吸力 F 也与气隙 x 的大小无关。实际上,考虑到漏磁通的影响,吸力 F 随气隙 x 的减小略有增加。交流电磁系统吸力特性如图 1.2.5 (a) 所示。

虽然交流电磁系统的气隙磁通 Φ 近似不变,但气隙磁阻随气隙 x 大小而变化。根据磁路定律 $\Phi = IN / R_m = IN / \mu_0 S / x$ (I 为激励线圈电流, A; R_m 为气隙磁阻, H^{-1}) 可知交流激励线圈的电流 I 与气隙 x 成正比。一般情况下, U 形交流电磁系统的激励线圈通电而衔铁尚未动作时,其电流达到吸合后额定电流的 5~6 倍,山形电磁系统则达到 10~15 倍。如果衔铁卡住不能吸合或频繁动作,交流激励线圈很可能被烧毁。所以在可靠性要求高或操作频繁的场所,一般不采用交流电磁系统。

直流电磁系统由直流电流激励。稳态时,磁路对电路无影响,所以可认为其激励电流不受气隙变化的影响,即其磁势 IN 不受气隙变化的影响。由式 (1.2.3)、(1.2.4) 和磁路定律可知,直流电磁系统的吸力 F 与气隙 x 的平方成反比,其吸力特性如图 1.2.5 (b) 所示,此图表明,衔铁闭合前后吸力变化很大,气隙越小,吸力越大。

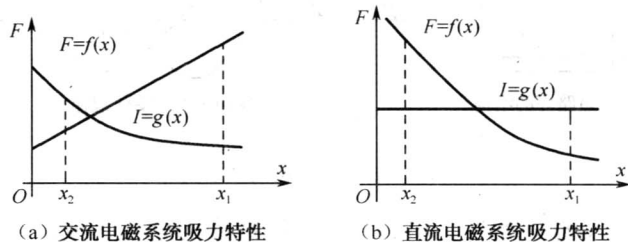


图 1.2.5 电磁系统吸力特性

由于衔铁闭合前后激励线圈的电流不变,所以直流电磁系统适合于动作频繁的场所,且吸合后电磁吸力大,工作可靠性高。需要指出的是,当直流激励线圈断电时,磁势 IN 将迅速接近于零,磁通随之急剧变化,会在线圈中产生很大的反电动势,其值可达到线圈额定电压的 10~20 倍,易使线圈因过电压而损坏。为减小此反电动势,可在激励线圈上并联一个放电电阻 R 。这样,在线圈断电时,该电阻与线圈形成一个放电电路,使储存于磁场中的能量转换成热能消耗在电阻上。为了降低过电压,电阻 R 的值应小些,但这又会导致长期工作时能量的损耗增大。为解决这一矛盾,可使电阻与一个二极管串联,使正常工作时放电电路不工作。通常,放电电阻的电阻值可取为线圈电阻的 6~8 倍。

由于铁磁物质有剩磁,它使电磁系统的激励线圈失电后仍有一定的磁性吸力存在。剩磁的吸力随气隙 x 的增大而减小,其变化规律如图 1.2.6 中曲线所示。

(2) 吸力特性与反力特性的配合。为保证电磁系统的衔铁吸合可靠,吸力都必须大于反力,但若过大则会影响电器的机械寿命。用吸力与反力特性图表示时,就是要使吸力特性在反力特性的上方。当切断电磁系统的激励电流以释放衔

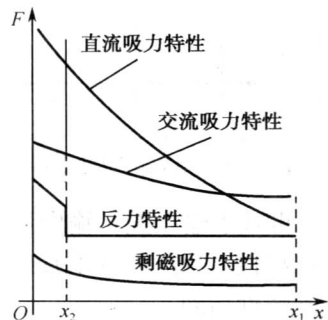


图 1.2.6 吸力特性与反力特性关系

铁时，其反力必须大于剩磁吸力，使衔铁可靠释放。可见，在吸力与反力特性图上，电磁系统的反力特性必须介于吸力特性和剩磁吸力特性之间，如图 1.2.6 所示。在实际使用中，常常调整反力弹簧或触点的初始压力以改变反力特性，使之与吸力特性有良好的配合。

对于单相交流电磁系统，由于交流磁通过零时吸力也为零，吸合后的衔铁在反力作用下会被拉开。磁通过零后吸力增大，当吸力大于反力时衔铁又吸合。这样，在交流电每周期内衔铁吸力要两次过零，使衔铁产生强烈振动和噪声，甚至使铁芯散开。为避免衔铁振动，可在铁芯端面上装一个铜制分磁环（或称短路环），如图 1.2.7 所示，其中图（a）为短路环的结构，图（b）为产生的磁通和吸力的变化规律曲线。当电磁系统的交变磁通穿过短路环所包围的截面 S_1 时，环中产生了涡流。根据电磁感应定律可知，此涡流产生的磁通 Φ_1 在相位上滞后于截面 S_2 中的磁通 Φ_2 。这样，铁芯中有两个相位不同的磁通 Φ_1 和 Φ_2 。电磁系统的吸力为它们产生的吸力 F_1 和 F_2 之和。只要此合力始终大于反力，衔铁的振动现象就可消除。

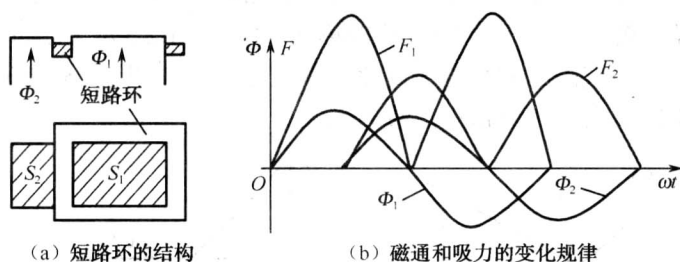


图 1.2.7 短路环结构与工作原理

（3）电磁系统的输入/输出特性。电磁系统激励线圈的电压（或电流）为其输入量，衔铁的位置为其输出量，衔铁位置与激励线圈的电压（或电流）的关系称为输入/输出特性。若以 x_o 代表电磁系统的输出量，并令衔铁处于吸合位置时 $x_o=1$ ，衔铁处于释放位置时 $x_o=0$ 。分析可知，当吸力特性处于反力特性上方时，衔铁被吸合；当吸力特性处于反力特性的下方时，衔铁被释放。若电磁系统的输入量用 x_i 表示，使吸力特性处于反力特性上方的最小输入量用 x_{ic} 表示，称为电磁系统的动作值，使吸力特性处于反力特性下方的最大输入量用 x_{ib} 表示，称为返回值。为使电器可靠工作，一般额定输入量 x_{ie} 应大于 x_{ic} 。

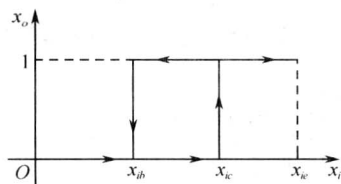


图 1.2.8 电磁系统输入/输出特性

电磁系统的输入/输出特性可用图 1.2.8 描述。当输入量 $x_i < x_{ic}$ 时衔铁不动作，输出量 $x_o=0$ ；当 $x_i=x_{ic}$ 时，衔铁吸合，输出量 x_o 从 $x_o=0$ 跳变为 $x_o=1$ ；进一步增大输入量使 $x_i > x_{ic}$ ，则输出量仍为 $x_o=1$ 。当输入量从 x_{ie} 减小的时候，在 $x_i > x_{ic}$ 的过程中虽然吸力特性向下降低，但因衔铁吸合状态下的吸力仍比反力大，所以衔铁不会释放，输出量 $x_o=1$ ；当 $x_i=x_{ib}$ 时，因吸力小于反力，所以衔铁释放，输出量由 $x_o=1$ 突变为 $x_o=0$ ；再减小输入量，输出量仍为 $x_o=0$ 。所以电磁系统的输入/输出特性为矩形曲线，一般称为继电特性。从图中可以看出，一般情况下 $x_{ic} \neq x_{ib}$ ，这是因为衔铁运动中存在摩擦以及电磁铁的磁滞特性所致。

2. 触点

触点是用来接通或断开电路的，其结构形式很多。按其接触形式分为点接触、线接触和面接触 3 种，如图 1.2.9 所示，其中图 (a) 为点接触，图 (b) 为线接触，图 (c) 为面接触。点接触允许通过的电流较小，常用于继电器电路或辅助触点。线接触和面接触允许通过的电流较大，常用于大电流场合，如刀开关、接触器的主触点等。为减小接触电阻，使接触更加可靠，需在触点间施加一定的压力。压力一般是靠反作用弹簧或触点本身的弹性变形而获得。

不同接触形式的触点结构形式图 1.2.10 所示，其中图 (a) 为采用点接触的桥式触点，图 (b) 为采用面接触的桥式触点，图 (c) 为采用线接触的指形触点。

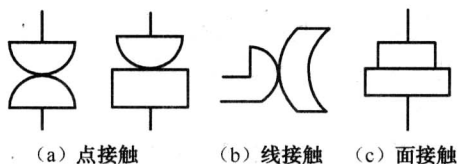


图 1.2.9 触点接触形式

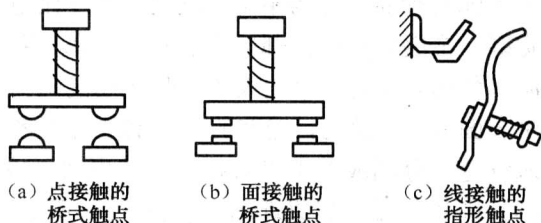


图 1.2.10 触点结构形式

3. 灭弧装置

触点接触前的瞬间，两触点间距离极小，电场强度极大，在高热和强电场作用下，触点金属体内部的自由电子从阴极表面逸出，飞向阳极，这些自由电子在电场中运动时撞击中性气体分子，使之激励和游离，产生正离子和电子，这些电子在强电场作用下继续向阳极移动时还要撞击其他中性分子。因此，在触头间隙中产生了大量的带电粒子，使气体导电形成了炽热的电子流，即电弧。电弧产生高温并发出强光，可将触点烧损，并使电路的切断时间延长，严重时会引起火灾或其他事故，因此必须采取灭弧措施。常用的灭弧装置及其工作原理如图 1.2.11 所示。

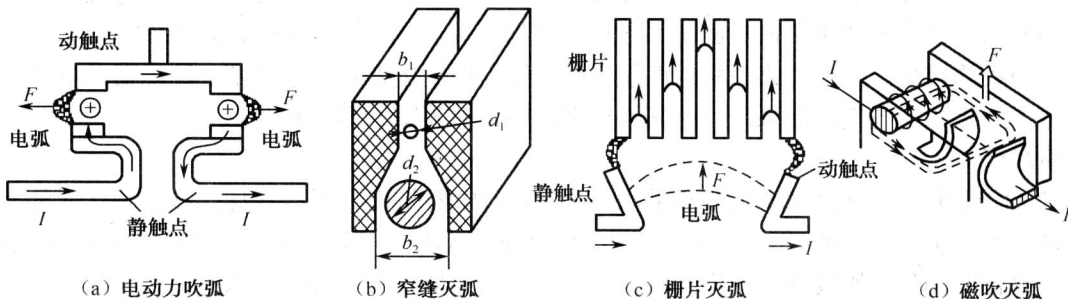


图 1.2.11 常用的灭弧装置及其工作原理

(1) 电动力吹弧。其原理如图 1.2.11 (a) 所示，它是利用桥式结构双断口触点系统进行

灭弧, 双断口就是在一个回路中有两个产生和断开电弧的间隙。一般用于交流接触器等交流电器。当触点打开时, 在断口中产生电弧。静触点和动触点在弧区内产生图中所示的磁场, 根据左手定则, 电弧电流要受到一个指向外侧的力 F 的作用而向外运动, 迅速离开触点而熄灭。电弧的这种运动, 一是会使电弧本身被拉长, 二是电弧穿越冷却介质时要受到较强的冷却作用, 这都有助于熄灭电弧。最主要的还是两断口处的每一电极近旁, 在交流过零时都能出现 150~250V 的介质绝缘强度。

(2) 窄缝灭弧。其原理如图 1.2.11 (b) 所示。由于磁吹灭弧装置一般都带有灭弧罩, 灭弧罩通常用耐弧陶土、石棉水泥或耐弧塑料制成。其作用有二, 一是引导电弧纵向吹出, 以此防止发生相间短路; 二是使电弧与灭弧罩的绝缘壁接触, 从而迅速冷却, 增强去游离作用, 迫使电弧熄火。灭弧罩的绝缘壁之间的缝隙可大可小, 凡是宽度比电弧直径小的缝 (图中缝宽 b_1 小于电弧直径 d_2) 称为窄缝; 反之, 宽度比电弧直径大的缝 (图中缝宽 b_2 大于电弧直径 d_2) 称为宽缝。窄缝将电弧的弧柱直径压缩 (如压缩为 d_1), 使电弧同缝壁紧密接触, 加强冷却和降低游离作用。同时, 也加大了电弧运动的阻力, 使其运动速度下降, 缝壁温度上升, 并在壁面产生表面放电。总之, 缝宽的大小需要综合考虑。也有采用数个窄缝的多纵缝灭弧罩, 将电弧引入纵缝, 分割成若干股直径较小的电弧, 以增强灭弧作用。

(3) 栅片灭弧。其原理图 1.2.11 (c) 所示。触点切断时产生的电弧在磁吹力和电动力作用下被拉长后, 推向一组静止的金属片, 这组金属片称为栅片, 它们彼此间是互相绝缘的, 电弧进入栅片后, 被分割成一段段串联的电弧, 每一栅片又相当于一个电极, 使每段短电弧的电压达不到燃弧电压。同时栅片还具有冷却作用, 致使电弧迅速熄灭。

(4) 磁吹灭弧。其原理图 1.2.11 (d) 所示。灭弧装置设有与触点串联的磁吹线圈, 电弧在磁吹线圈的作用下受力拉长, 逐渐吹离触点, 从而加速冷却而熄灭。

为了强化灭弧效果, 一般要同时采取几种灭弧装置。

1.2.2 低压电器分类与表示方法

1. 低压电器的分类

低压电器的品种规格繁多, 结构和工作原理各异, 因此可按多种方法进行分类。

(1) 按用途分为低压配电电器和低压控制电器。低压配电电器包括刀开关、转换开关、熔断器和断路器等, 主要用于低压配电系统中, 实现电能的输送和分配, 以及系统保护, 对其性能要求为动作准确、工作可靠、稳定性能良好。低压控制电器包括接触器、继电器及各种主令电器等, 主要用于电气控制系统, 对其性能要求为动作准确可靠、操作频率高、寿命长、体积小、质量轻。

(2) 按动作性质分为自动电器和手动电器。自动电器是依靠电器本身的参数变化或外来信号 (如电流、电压、温度、压力、速度和热量等) 而自动接通、切断电路或使电动机进行正转、反转及停止等动作, 如接触器及各种继电器等。手动电器是依靠外力或人工操作实现接通、切断电路, 如各种开关、按钮等。

(3) 按低压电器的工作原理分为有触点电器和无触点电器。有触点电器具有动触点和静触点, 利用触点的接触和分离来实现电路的通断。无触点电器没有触点, 主要利用晶体管的开关效应, 即导通或截止来实现电路的通断。