




21世纪普通高等教育规划教材

电器控制与 PLC控制技术

许琴 王淑英 主编

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



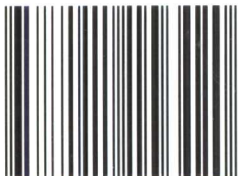
ISBN 7-111-15642-0/ TP·4081 (课)

策划编辑：贡克勤 / 封面设计：鞠杨

普通高等教育自动化专业规划教材及参考书目

● 电力拖动自动控制系统——运动控制系统 (第3版)	上海大学	陈伯时	主编
● 电力拖动自动控制系统习题例题集	浙江大学	董福亮	编
● 电力电子技术(第4版)	西安交通大学	王兆安 黄俊	主编
● 电机及拖动基础(上册)(第2版)	合肥工业大学	顾绳谷	主编
● 电机及拖动基础(下册)(第2版)	合肥工业大学	顾绳谷	主编
● 电机及拖动基础习题集与实验指导书	合肥工业大学	张松林	主编
● 电机原理及拖动(少学时)	东北大学	彭宏才	主编
● 电机学(多学时)	哈尔滨理工大学	汤蕴璆	编著
● 电机学(少学时)		史乃	
● 供电技术(第3版)	西安理工大学	余健明 苏文成	主编
● 自动控制理论(多学时)	北京轻工业学院	夏德铃	主编
● 自动控制理论实验和习题集	北京轻工业学院	夏德铃	主编
● 自动控制理论(少学时)	浙江大学	邵伯敬	主编
● 现代控制理论基础	合肥工业大学	王孝武	主编
● 微型计算机原理及应用 Intel 80X86 系列	西安交通大学	薛均义	主编
● 自动化系统计算机网络	清华大学	吴秋峰	主编
● 微型计算机控制技术	华中理工大学	赖寿宏	主编
● 微型计算机控制技术	华中理工大学	黄一夫	主编
● 过程控制工程(第2版)	东南大学	邵裕森 戴先中	主编
● 检测与转换技术(第3版)	吉林工业大学	常健生	主编
● 电器控制	安徽大学	李仁	主编
● 智能控制技术	浙江大学	韦巍	编
● 控制系统数字仿真与 CAD	哈尔滨工业大学	张晓华	主编
● 多媒体技术及应用	清华大学	吴秋峰	主编
● 过程控制与自动化仪表	西安理工大学	侯志林	主编
● 自动化专业英语教程		王宏文	主编
● 机械基础 (电气信息类)	东南大学	范思冲	编
● 信号分析与处理	浙江大学	赵光宙	编
● 逻辑与可编程控制系统	四川大学	舒勤	
● 电气控制系统设计基础与范例	四川大学	汪道辉	主编
● 电器控制与 PLC 控制技术	南昌科技大学	易泓可	主编
		许琴	主编
		王淑英	主编

ISBN 7-111-15642-0



9 787111 156420 >

定价：26.00 元

地址：北京市百万庄大街22号

联系电话：(010) 68326294

邮政编码：100037

网址：<http://www.cmpbook.com>

E-mail: online@cmpbook.com

21 世纪普通高等教育规划教材

电器控制与 PLC 控制技术

主编 许 蓼 王淑英
参编 王海萍 赵建光
主审 栗书贤 李全利



机械工业出版社

本书以电器控制与 PLC 控制为主线,分析了工厂电气控制设备的电气控制。电器控制技术与 PLC 控制技术两部分内容前后承接、相互呼应又相互独立。电器控制突出其控制原理和逻辑控制思路,加强工程实际电路的分析。PLC 控制以西门子 S7-200 系列的最新品种 CPU 22X 系列和日本三菱的 FX 系列为典型产品,突出了 PLC 的程序设计和应用系统设计。

本书主要内容有:常用低压电器、电气控制基本原理、典型设备电气控制电路分析、电气控制系统的设计、PLC 及其工作原理、S7-200 系列可编程序控制器、FX 系列可编程序控制器、可编程序控制器的程序设计、可编程序控制器应用系统设计和可编程序控制器的通信与通信网络等。

本书可作为高等工科院校电气工程及其自动化、机械工程及其自动化、电气技术、机电一体化及其相关专业的教材,也可作为高职高专、成人教育的教材,亦可供电气工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

电器控制与 PLC 控制技术/许蓼,王淑英主编.—北京:机械工业出版社,2005.1

21 世纪普通高等教育规划教材

ISBN 7-111-15642-0

I. 电... II. ①许...②王... III. ①电器控制—高等学校—教材②可编程序控制器—程序设计—高等学校—教材 IV. TM571

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 119836 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑、责任编辑:贡克勤 版式设计:冉晓华

责任校对:申春香 封面设计:鞠 杨 责任印制:石 冉

保定市印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2005 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

787mm×1092mm $\frac{1}{16}$ ·18.25 印张·448 千字

定价:26.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

本社购书热线电话 (010) 68993821、88379646

68326294、68320718

封面无防伪标均为盗版

前 言

本书是根据高等工科院校电气工程及其自动化、机械工程及其自动化、机电一体化、电气技术等专业的“电器控制与可编程序控制器应用技术”教改课程的教学大纲，结合 PLC 的实际应用和发展情况而编写的。全书理论结合实际，突出学生工程应用能力的训练和培养，便于组织教学和实践。在内容安排上电器控制与 PLC 控制两部分既相互联系，又相互独立，以利分别开设“电器控制技术”和“可编程序控制器应用技术”两门课程的院校的使用。

全书分为两部分，第一部分为电器控制技术，共四章。为培养学生熟练使用低压电器，掌握电气控制电路的基本环节，学会分析典型设备电气控制系统，培养设计电气控制系统的能力而讲授了常用低压电器、电气控制基本原理、典型设备电气控制电路分析、电气控制系统设计等内容。第二部分为可编程序控制器应用技术，共六章。选择了具有代表性和先进性的西门子 S7-200 系列、三菱 FX 系列 PLC 产品，讲授了可编程序控制器及其工作原理、S7-200 系列可编程序控制器、FX 系列可编程序控制器、可编程序控制器程序设计、可编程序控制器应用系统设计和可编程序控制器的通信和通信网络等内容，以培养学生应用 PLC 进行电气控制设计和编制控制程序的能力。

本书在教学使用过程中，可根据专业特点、课时多少进行删减，有的内容和应用实例可在学生实验、课程设计、毕业设计时作为参考。

本书由许廖、王淑英主编。参加编写的有：王海萍编写第一、二章，许廖编写第三、四、五章，赵建光编写第六、七章，王淑英编写第八、九、十章。

本书由栗书贤教授、李全利教授任主审，审阅中提出了许多宝贵意见和建议，深表谢意。在编写过程中参阅了多种同类教材和著作，特向其编、著者致谢！

由于编著水平有限，本书缺点和错误难免，恳请读者提出批评和指教。

编 者

目 录

前言

绪论	1
第一章 常用低压电器	3
第一节 低压电器基本知识	3
第二节 电磁式接触器	11
第三节 电磁式继电器	15
第四节 热继电器	22
第五节 熔断器	26
第六节 信号继电器	29
第七节 低压开关与低压断路器	33
第八节 常用电子式电器	41
习题	45
第二章 电气控制基本原理	47
第一节 电气控制系统图	47
第二节 电气控制电路基本控制规律	51
第三节 三相异步电动机的起动控制	55
第四节 三相异步电动机的制动控制	59
第五节 三相异步电动机的调速控制	62
第六节 直流电动机的电气控制	64
第七节 电气控制系统常用的保护环节	67
习题	69
第三章 典型设备电气控制电路分析	70
第一节 电气控制电路分析基础	70
第二节 Z3040 摇臂钻床电气控制电路分析	75
第三节 T68 卧式镗床电气控制电路分析	79
第四节 小型冷库电气控制电路分析	85
第五节 注塑机电气控制电路分析	88
第六节 交流双速信号控制电梯的电路分析	96
习题	115

第四章 电气控制系统设计	116
第一节 电气控制设计的原则、内容和程序	116
第二节 电力拖动方案的确定和电动机的选择	118
第三节 电气原理图设计的步骤与方法	120
第四节 电气控制工艺设计	132
习题	134
第五章 可编程序控制器及其工作原理	135
第一节 可编程序控制器概述	135
第二节 可编程序控制器的硬件组成	140
第三节 可编程序控制器的软件组成	144
第四节 可编程序控制器的工作原理	148
第五节 可编程序控制器的主要性能指标	151
习题	152
第六章 S7-200 系列可编程序控制器	153
第一节 S7-200 系列 PLC 的构成	153
第二节 S7-200 系列 PLC 内部元器件	156
第三节 S7-200 系列 PLC 的基本指令	162
第四节 S7-200 系列 PLC 功能指令	171
习题	183
第七章 FX 系列可编程序控制器	185
第一节 FX 系列 PLC 的内部软继电器的功能及编号	185
第二节 FX 系列 PLC 的基本指令	188
第三节 步进指令及编程方法	194
第四节 FX 系列 PLC 的功能指令及编程方法	200
习题	209
第八章 可编程序控制器的程序设计	211
第一节 梯形图的特点及绘制原则	211
第二节 PLC 程序设计方法	215
第三节 顺序控制设计方法中梯形图的编程方式	219
习题	229
第九章 可编程序控制器应用系统设计	231
第一节 PLC 应用系统设计的内容和步骤	231
第二节 PLC 的选择	232
第三节 节省 PLC 输入输出点数的方法	236

第四节 可编程序控制器在逻辑控制系统中的应用实例	239
习题	256
第十章 可编程序控制器联网通信	257
第一节 网络概述	257
第二节 S7-200 系列 CPU 与计算机设备的通信	260
第三节 S7-200 系列 PLC 自由口通信	265
第四节 网络通信运行	268
习题	272
附录	273
附录 A 低压电器产品型号编制方法	273
附录 B 电气图常用图形及文字符号一览表	275
附录 C S7-200 可编程序控制器寻址范围及特殊标志存储器	279
附录 D FX _{2N} 系列 PLC 功能指令	280
参考文献	283

绪 论

一、电气控制技术的发展概况

电气控制技术是随着科学技术的发展、生产工艺不断提出新的要求而不断发展的。从手动控制到自动控制，从简单的控制设备到复杂的自动控制系统，从有触点的硬接线控制系统到以计算机为中心的存储控制系统。现代电气控制技术已综合应用了计算机、自动控制、电子技术、自动检测等先进的科学技术成果。作为生产机械动力的电动机拖动，其拖动方式已由初期的一台电动机拖动多台设备，或由一台机床的多个动作由一台电动机拖动（即集中拖动），发展成为一台设备由一台电动机拖动，即单独拖动。后又发展成为一台设备的各运动部件采用多台电动机的多电动机拖动。

随着电力拖动方式的演变与发展，电力拖动的控制方式也由手动控制向自动控制方向发展。最初出现的是继电器接触器控制系统，它是由接触器、继电器、按钮、行程开关等组成的控制系统。这种控制具有使用的单一性，即一台控制装置是针对某一固定程序的设备而设计，当程序变更时，就需重新配线。而且这种控制的输入、输出信号只有通和断两种状态，这种控制是断续的，不能连续反映信号的变化，故称为断续控制。但这种系统具有结构简单、价格低廉、维护容易、抗干扰能力强的优点，至今仍是机床和其他许多机械设备广泛使用的基本电气控制方式，也是学习各种先进电气控制的基础。同时，这种断续控制由于采用固定的接线方式，存在灵活性差，触头易损坏，可靠性差，难以适应频繁操作的缺点。

为使控制系统获得更好的静态和动态特性，采用了反馈控制系统，它由连续控制元件组成，系统不仅能反映信号的通或断，而且能反映信号的大小和变化，称为连续控制系统，这种控制系统往往采用晶闸管作为控制元件故称为晶闸管控制系统。

20世纪60年代出现了一种能够根据生产需要，方便地改变控制程序的顺序控制器。它是通过组合逻辑元件的插接式编程来实现继电器接触器控制线路的控制装置，能满足程序经常改变的控制要求，这便使控制系统具有较大的灵活性和通用性。但由于仍采用硬件手段且装置体积大，功能也受到一定限制，故未得到广泛的应用。对于复杂的自动控制系统，固然可采用更为先进的计算机控制，但其掌握起来难度较大。随着大规模集成电路和微处理器的发展和应用，在20世纪70年代出现了用软件手段来实现各种控制功能、以微处理器为核心的新型工业控制器——可编程序控制器。它把计算机的功能完备，灵活性、通用性好等优点和继电器接触器控制系统的操作方便、价格低、简单易懂等优点结合起来，成为一种适应工业环境的通用控制装置，并独具一格地采用以继电器梯形图为基础的形象编程语言和模块化的软件结构，使编程方法和程序输入更加简便，使不熟悉计算机的人员也能很快掌握其使用技术。现在可编程序控制器已成为一种标准化通用设备普遍应用于工业控制，由最初的逻辑控制为主发展到能进行模拟量控制，具有数字运算、数据处理和通信联网等功能。现在可编程序控制器已成为电气自动化控制系统中应用最为广泛的控制装置。

数控技术是电气自动控制的重要分支，它综合了计算机、自动控制、伺服驱动系统、精密检测和新型机械结构等多方面的最新技术成就。最近20多年来，机电一体化，机、电、

光、仪一体化等交叉学科的发展,使数控技术得到了飞速的发展。在机械制造、电气控制及自动控制领域相继出现了直接数字(DDC)系统、柔性制造系统(FMS)、计算机集成制造系统(SIMS)、综合运用计算机辅助设计(CAD)、计算机辅助制造(CAM)、集散控制系统(DCS)、智能机器人和智能制造等高新技术。这些高新技术把整个自动控制和自动制造技术推动到了更高的水平。

由上可知,电气控制技术的发展是伴随着社会生产规模的扩大,生产水平的提高而前进的。电气控制技术的进步又促进了社会生产力的提高。随着微电子技术、电力电子技术、检测传感技术、机械制造技术的发展,21世纪电气控制技术必将给人类带来更加美好的明天。

二、本课程的性质和任务

本课程是一门实用性很强的专业课。主要内容是以电动机或其他执行电器为控制对象,介绍继电器接触器控制系统和可编程序控制器控制系统的工作原理、典型设备的电气控制系统和电气控制系统的设计方法。现在可编程序控制器应用越来越广泛,已成为实现工业自动化的重要手段。所以,本课程的重点是可编程序控制器控制系统,但这并不意味着继电器接触器控制系统就不重要了。首先,继电器接触器控制在小型电气控制系统中还普遍使用,而且它是组成电气控制系统的基础;其次,尽管可编程序控制器取代了继电器,但它取代的主要是逻辑控制部分,而电气控制系统中的信号采集和驱动输出部分仍要由电器元器件及控制电路来完成。所以对继电器接触器控制系统的学习仍是非常必要的,是基础的知识。本课程的目的是让学生掌握非常实用的工业控制技术以及培养和提高学生的实际应用和动手能力。

本课程的基本任务是:

- 1) 熟悉常用低压电器的结构原理、用途及型号,达到正确使用和选用的目的。
- 2) 熟练掌握电气控制电路的基本环节,具备阅读和分析电气控制电路的能力,使之能设计简单的电气控制电路,较好地掌握电气控制电路的简单设计法
- 3) 了解电气控制电路分析的方法和步骤,熟悉典型生产设备的电气控制电路的工作原理。
- 4) 熟悉可编程序控制器的基本工作原理及应用发展概况。
- 5) 熟练掌握可编程序控制器的基本指令系统和典型电路的编程,掌握可编程序控制器的程序设计方法。掌握和熟悉可编程序控制器功能指令的使用。
- 6) 了解可编程序控制器的网络和通信原理。
- 7) 了解可编程序控制器的实际应用程序的设计方法和步骤。

第一章 常用低压电器

低压电器是指工作在直流 1200V、交流 1500V 及以下的电路中，以实现对其或非电对象的控制、检测、保护、变换、调节等作用的电器。采用电磁原理构成的低压电器，称为电磁式低压电器；利用集成电路或电子元器件构成的低压电器，称为电子式低压电器；利用现代控制原理构成的低压电器，称为自动化电器、智能化电器或可通信电器等。

第一节 低压电器基本知识

一、低压电器的分类

低压电器种类繁多，功能多样，用途广泛，结构各异，工作原理也各不相同，按用途可分为以下几类。

（一）低压配电电器

用于供、配电系统中进行电能输送和分配的电器。如刀开关、低压断路器、熔断器等。对这类电器要求分断能力强，限流效果好，动稳定及热稳定性性能好。

（二）低压控制电器

用于各种控制电路和控制系统的电器。如转换开关、按钮、接触器、继电器、电磁阀、热继电器、熔断器、各种控制器等。对这类电器要求有一定的通断能力，操作频率高，电气和机械寿命长。

（三）低压主令电器

用于发送控制指令的电器。如按钮、主令开关、行程开关、主令控制器、转换开关等。对这类电器要求操作频率高，电器机械寿命长，抗冲击等。

（四）低压保护电器

用于对电路及用电设备进行保护的电器。如熔断器、热继电器、电压继电器、电流继电器等。对这类电器要求可靠性高，反应灵敏，具有一定的通断能力。

（五）低压执行电器

用于完成某种动作或传送功能的电器。如电磁铁、电磁离合器等。

上述电器还可按使用场合分为一般工业用电器、特殊工矿用电器、航空用电器、船舶用电器、建筑用电器、农用电器等；按操作方式分为手动电器和自动电器；按工作原理分为电磁式电器、非电量控制电器等，其中电磁式低压电器是传统低压电器中应用最广泛，结构最典型的一种。

低压电器产品型号类组代号见附录 A 低压电器产品的型号编制方法。

二、电磁式低压电器基本结构

从结构上看，电器一般都具有两个基本组成部分，即感受部分与执行部分。感受部分接受外界输入的信号，并通过转换、放大与判断作出有规律的反应，使执行部分动作，输出相应的指令，实现控制的目的。对于有触头的电磁式电器，感受部分是电磁机构，执行部分是

触头系统。

(一) 电磁机构

1. 电磁机构的结构型式

电磁机构由吸引线圈、铁心和衔铁组成。吸引线圈通以一定的电压和电流产生磁场及吸力，并通过气隙转换成机械能，从而带动衔铁运动使触头动作，完成触头的断开和闭合，实现电路的分断和接通。图 1-1 是几种常用电磁机构的结构型式，根据衔铁相对铁心的运动方式，电磁机构有直动式和拍合式，拍合式又有衔铁沿棱角转动和衔铁沿轴转动两种。

吸引线圈用以将电能转换为磁能，按通入电流种类不同可分为直流电磁线圈和交流电磁线圈，直流电磁线圈一般做成无骨架、高而薄的瘦高型，线圈与铁心直接接触，易于散热；交流电磁线圈由于铁心存在磁滞和涡流损耗，造成铁心发热，为此铁心与衔铁用硅钢片叠制而成，且为改善线圈和铁心的散热，线圈设有骨架，使铁心和线圈隔开，并将线圈做成短而厚的矮胖型。另外，根据线圈在电路中的连接方式，又有串联线圈和并联线圈。串联线圈采用粗导线、匝数少，其又称为电流线圈；并联线圈匝数多，线径较细，又称为电压线圈。

2. 电磁机构工作原理

电磁机构的工作特性常用吸力特性和反力特性来表述。

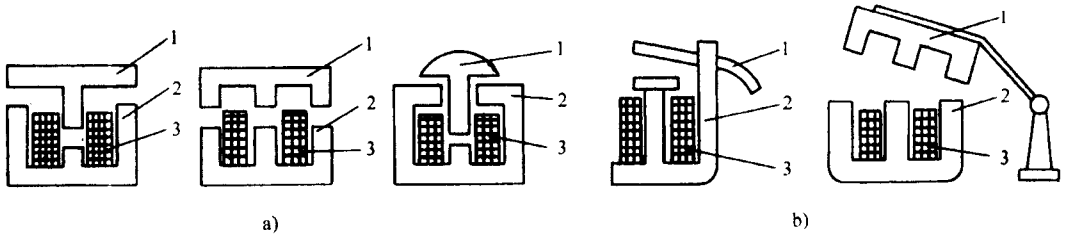


图 1-1 常用电磁机构的结构型式

a) 直动式电磁机构 b) 拍合式电磁机构

1—衔铁 2—铁心 3—线圈

当电磁机构吸引线圈通电后，铁心吸引衔铁吸合的力与气隙的关系曲线称为吸力特性。电磁机构使衔铁释放（复位）的力与气隙的关系曲线称为反力特性。电磁机构反力特性与吸力特性如图 1-2a 所示，具体分析如下：

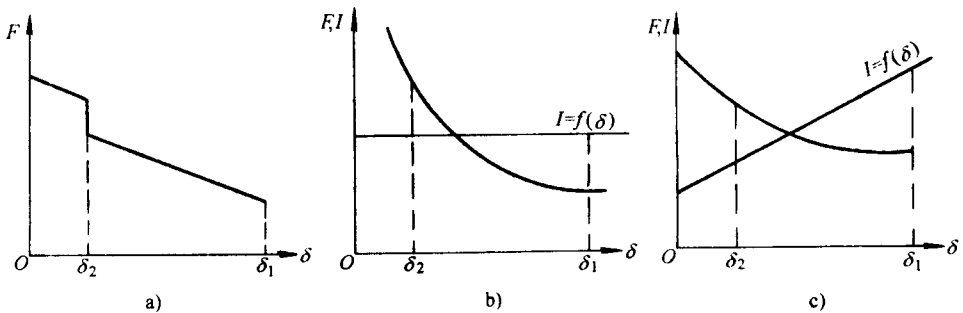


图 1-2 电磁机构反力特性与吸力特性

a) 反力特性 b) 直流电磁机构吸力特性 c) 交流电磁机构吸力特性

(1) 反力特性 电磁机构使衔铁释放的力大多是利用弹簧的反力，由于弹簧的反力与其

机械变形的位移量 x 成正比, 其反力特性可写成

$$F_{11} = K_1 x \quad (1-1)$$

考虑到常开触头闭合时超行程机构的弹力作用, 电磁机构反力特性如图 1-2a 所示。其中 δ_1 为电磁机构气隙的初始值; δ_2 为动、静触头开始接触时的气隙长度。由于超行程机构的弹力作用, 反力特性在 δ_2 处有一突变。

(2) 直流电磁机构的吸力特性 电磁机构的吸力与很多因素有关, 当铁心与衔铁端面互相平行, 且气隙较小时, 吸力可按式求得:

$$F = 4B^2 S \times 10^5 \quad (1-2)$$

式中 F ——电磁吸力 (N);

B ——气隙磁感应强度 (T);

S ——吸力处端面积 (m^2)。

当端面积 S 为常数时, 吸力 F 与 B^2 成正比, 也可以认为 F 与磁通 Φ^2 成正比, 与端面积 S 成反比, 即

$$F \propto \frac{\Phi^2}{S} \quad (1-3)$$

电磁机构的吸力特性是其电磁吸力与气隙的关系, 而励磁电流种类不同, 其吸力特性也不一样, 对于直流电磁机构的吸力特性分析如下:

直流电磁机构当直流励磁电流稳态时, 直流磁路对直流电路无影响, 所以励磁电流不受磁路气隙的影响, 即其磁动势 IN 不受磁路气隙的影响, 根据磁路欧姆定律:

$$\Phi = \frac{IN}{R_m} = \frac{IN}{\frac{\delta}{\mu_0 S}} = \frac{IN\mu_0 S}{\delta} \quad (1-4)$$

而电磁吸力 $F \propto \frac{\Phi^2}{S}$, 则

$$F \propto \Phi^2 \propto \left(\frac{1}{\delta}\right)^2 \quad (1-5)$$

即直流电磁机构的吸力 F 与气隙 δ 的平方成反比, 其吸力特性如图 1-2b 所示。由此看出, 衔铁闭合前后吸力变化很大, 气隙越小, 吸力越大。但衔铁吸合前后吸引线圈励磁电流不变, 故直流电磁机构适用于动作频繁的场所, 且衔铁吸合后电磁吸力大, 工作可靠。但当直流电磁机构吸引线圈断电时, 由于电磁感应, 将会在吸引线圈中产生很大反电动势, 其值可达线圈额定电压的十多倍, 将使线圈因过电压而损坏, 为此, 常在吸引线圈两端并联一个放电回路, 该回路由放电电阻与一个硅二极管组成, 正常励磁时, 因二极管处于截止状态, 放电回路不起作用, 而当吸引线圈断电时, 放电回路导通, 将原先储存在线圈中的磁场能量释放出来消耗在电阻上, 不致产生过电压。一般, 放电电阻阻值取线圈直流电阻的 6~8 倍。

(3) 交流电磁机构的吸力特性 交流电磁机构吸引线圈的电阻远比其感抗值要小, 则

$$U \approx E = 4.44 f \Phi_m N \quad (1-6)$$

$$\Phi_m = \frac{U}{4.44 f N} \quad (1-7)$$

式中 U ——线圈电压 (V);

E ——线圈感应电动势 (V);

f ——线圈电压的频率 (Hz);

N ——线圈匝数;

Φ_m ——气隙磁通最大值 (Wb)。

当外加电源电压 U 、频率 f 和线圈匝数 N 为常数时, 则气隙磁通 Φ_m 亦为常数, 而电磁吸力 F 平均值为常数。这是由于, 交流励磁时, 电压、磁通都随时间作正弦规律变化, 电磁吸力也作周期性变化, 现分析如下:

令气隙中磁感应强度按正弦规律变化

$$B(t) = B_m \sin \omega t \quad (1-8)$$

交流电磁机构电磁吸力 $F(t)$ 的瞬时值

$$\begin{aligned} F(t) &= 4B^2(t) S \times 10^5 = 4B_m^2 S \times 10^5 \sin^2 \omega t \\ &= 2 \times 10^5 B_m^2 S (1 - \cos 2\omega t) = 4B^2 S (1 - \cos 2\omega t) \times 10^5 \end{aligned} \quad (1-9)$$

式中的 $B = B_m / \sqrt{2}$ 为正弦量 $B(t)$ 的有效值。当 $t=0$, 则 $\cos 2\omega t = 1$, 于是 $F(t) = 0$ 为最小值; 当 $t = T/4$ 时, 则 $\cos 2\omega t = -1$, 于是 $F(t) = 8B^2 S \times 10^5 = F_m$ 为最大值, 在一周期内的平均值为

$$F_{av} = \frac{1}{T} \int_0^T F(t) dt = 4 \times 10^5 B^2 S \left[\frac{1}{T} \int_0^T (1 - \cos 2\omega t) dt \right] = 4B^2 S \times 10^5 \quad (1-10)$$

因此, 当 U 一定时, Φ_m 也一定, 不管有无气隙, Φ_m 都基本不变, 所以交流电磁机构电磁吸力平均值 F_{av} 基本不变, 即平均吸力亦与气隙 δ 的大小无关。实际上, 考虑到漏磁通的影响, 吸力平均值 F_{av} 随气隙 δ 的减小而略有增大, 其吸力特性如图 1-2c 所示。虽然交流电磁机构的气隙磁通 Φ_m 近似不变, 但气隙磁阻随气隙长度 δ 加大而增大, 所以交流励磁电流 I 与气隙长度成正比。一般 U 形交流电磁机构的励磁电流在线圈已通电但衔铁尚未动作时, 其电流可达衔铁吸合后额定电流的 5~6 倍; E 形电磁机构高达 10~15 倍额定电流, 若发生衔铁卡住不能吸合, 或衔铁频繁动作, 交流励磁线圈很可能因过电流而烧毁, 为此, 在可靠性要求高或操作频繁的场所, 一般不采用交流电磁机构。

(4) 剩磁的吸力特性 由于铁磁物质有剩磁, 它使电磁机构的励磁线圈断电后仍有一定的剩磁吸力存在, 剩磁吸力随气隙 δ 增大而减小。剩磁的吸力特性如图 1-3 曲线 4 所示。

(5) 吸力特性与反力特性的配合 电磁机构欲使衔铁吸合, 应在整个吸合过程中, 吸力都必须始终大于反力, 但也不宜过大, 否则会影响电器的机械寿命。这就要求吸力特性在反力特性的上方且尽可能靠近。在释放衔铁时, 其反力特性必须大于剩磁吸力特性, 这样才能保证衔铁的可靠释放。这就要求电磁机构的反力特性必须介于电磁吸力特性和剩磁吸力特性之间, 如图 1-3 所示。

(6) 交流电磁机构短路环的作用 交流电磁机构电磁吸力由式 (1-9) 可知, 它是一个周期函数, 该周期函数由直流分量和 2ω 频率的正弦分量组成。虽然交流电磁机构中的磁感

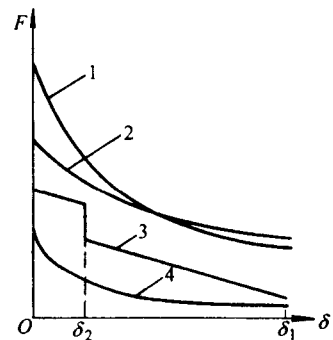


图 1-3 电磁机构吸力特性与反力特性的配合

1—直流吸力特性 2—交流吸力特性

3—反力特性 4—剩磁吸力特性

应强度是正、负交变的，但电磁吸力总是正的，它是在最大值为 $2F_{av}$ 和最小值为零的范围内脉动变化。因此在每一个周期内，必然有某一段时刻吸力小于反力，这时衔铁释放，而当吸力大于反力时，衔铁又被吸合。这样，在 $f=50\text{Hz}$ 时，电磁机构就出现了频率为 $2f$ 的持续抖动和撞击，发出噪声，并容易损坏铁心。

为了避免衔铁振动，通常在铁心端面开一小槽，在槽内嵌入铜质短路环，如图 1-4 所示。短路环把端面 S 分成两部分，即环内部分 S_1 与环外部分 S_2 ，短路环仅包围了磁路磁通 Φ 的一部分。这样，铁心端面处就有两个不同相位的磁通 Φ_1 和 Φ_2 ，它们分别产生电磁吸力 F_1 和 F_2 ，电磁机构的总吸力 F 将是 F_1 与 F_2 之和，只要总吸力始终大于反力，就能消除衔铁的振动。

3. 电磁机构的输入—输出特性

电磁机构的吸引线圈加上电压（或通入电流），产生电磁吸力，从而使衔铁吸合。因此，也可将线圈电压（或电流）作为输入量 x ，而将衔铁的位置作为输出量 y ，则电磁机构衔铁位置（吸合与释放）与吸引线圈的电压（或电流）的关系称为电磁机构的输入—输出特性，通常称为“继电特性”。

若将衔铁处于吸合位置记作 $y=1$ ，释放位置记作 $y=0$ 。由上分析可知，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下方时，衔铁被释放。若使吸力特性处于反力特性上方的最小输入量用 x_0 表示，称为电磁机构的动作值；使吸力特性处于反力特性下方的最大输入量用 x_r 表示，称为电磁机构的复归值。

电磁机构的输入—输出特性如图 1-5 所示，当输入量 $x < x_0$ 时衔铁不动作，其输出量 $y=0$ ；当 $x=x_0$ 时，衔铁吸合，输出量 y 从“0”跃变为“1”；再进一步增大输入量使 $x > x_0$ ，输出量仍为 $y=1$ 。当输入量 x 从 x_0 减小的时候，在 $x > x_r$ 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，衔铁不会释放，其输出量 $y=1$ 。当 $x=x_r$ 时，因吸力小于反力，衔铁才释放，输出量由“1”变为“0”；再减小输入量，输出量仍为“0”。所以，电磁机构的输入—输出特性或“继电特性”为一矩形曲线。动作值与复归值均为继电器的动作参数，电磁机构的继电特性是继电器的重要特性。

（二）触头系统

触头是电磁式电器的执行部分，起接通和分断电路的作用。因此，要求触头导电导热性能好，通常用铜、银、镍及其合金材料制成，有时也在铜触头表面电镀上锡、银或镍。对于一些特殊用途的电器如微型继电器和小容量的电器，触头采用银质材料制成。

触头闭合且有工作电流通过时的状态称为电接触状态，电接触状态时触头之间的电阻称为接触电阻，其大小直接影响电路工作情况。接触电阻较大，电流流过触头时造成较大的电压降，这对弱电控制系统影响较严重。同时电流流过触头时电阻损耗大，将使触头发热而致

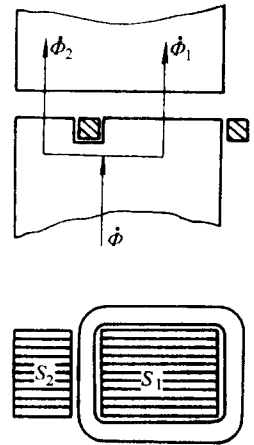


图 1-4 交流电磁机构短路环示意图

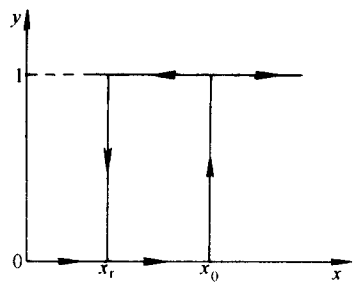


图 1-5 电磁机构的输入—输出特性

温度升高, 严重时可使触头熔焊, 这样既影响工作的可靠性, 又降低了触头的寿命。触头接触电阻大小主要与触头的接触形式、接触压力、触头材料及触头表面状况等有关。

(1) 触头的接触形式 触头的接触形式有点接触、线接触和面接触三种, 如图 1-6 所示。

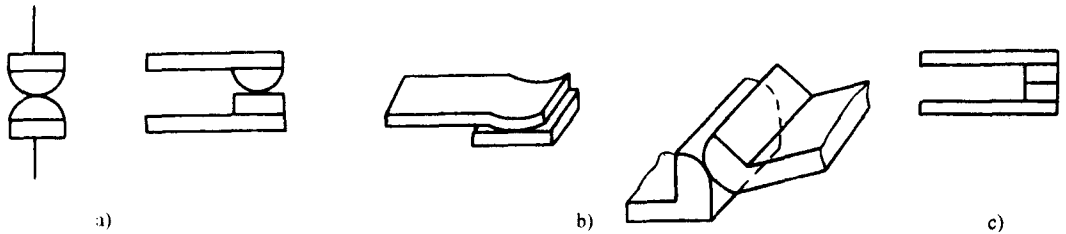


图 1-6 触头的接触形式

a) 点接触 b) 线接触 c) 面接触

点接触由两个半球形触头或一个半球形与一个平面形触头构成, 常用于小电流的电器中, 如接触器的辅助触头和继电器触头。线接触常做成指形触头结构, 它们的接触区是一条直线, 触头通、断过程是滚动接触并产生滚动摩擦, 适用于通电次数多、电流大的场合, 多用于中等容量电器。面接触触头一般在接触表面镶有合金, 允许通过较大电流, 中小容量的接触器的主触头多采用这种结构。

(2) 触头的结构形式 触头在接触时, 要求其接触电阻尽可能小, 为使触头接触更加紧密、减小接触电阻, 同时消除开始接触时产生的振动, 在触头上装有接触弹簧, 使触头刚刚接触时产生初压力, 随着触头闭合逐渐增大触头之间压力。

触头按其原始状态可分为常开触头和常闭触头。原始状态时 (吸引线圈未通电时), 触头断开, 线圈通电后闭合的触头叫常开触头 (动合触头)。原始状态触头闭合, 线圈通电后断开的触头叫常闭触头 (动断触头)。线圈断电后所有触头回复到原始状态。

按触头控制的电路可分为主触头和辅助触头。主触头用于接通或断开主电路, 允许通过较大的电流, 辅助触头用于接通或断开控制电路, 只允许通过较小的电流。

触头的结构形式如图 1-7 所示, 其主要有桥式触头和指形触头两种。

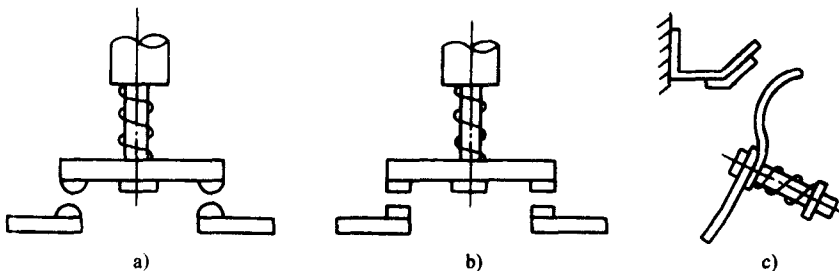


图 1-7 触头的结构形式

a) 点接触桥式触头 b) 面接触桥式触头 c) 线接触指形触头

桥式触头在接通与断开电路时由两个触头共同完成, 对灭弧有利, 这类结构触头的接触形式一般是点接触和面接触。指形触头在接通或断开时产生滚动摩擦, 能去掉触头表面的氧

化膜，从而减小触头的接触电阻。指形触头的接触形式一般采用线接触。

(3) 减小接触电阻的方法 首先，触头材料选用电阻率小的材料，使触头本身的电阻尽量减小；第二，增加触头的接触压力，一般在动触头上安装触头弹簧；第三，改善触头表面状况，尽量避免或减小触头表面氧化膜的形成，在使用过程中应尽量保持触头清洁。

(三) 电弧的产生与灭弧方法

1. 电弧的产生

在自然环境下通断电路时，如果被通断电路的电流（电压）超过某一数值时（根据触头材料的不同，其值约在 0.25~1A，12~20V 之间），在触头间隙中就会产生电弧。电弧实际上是触头间气体在强电场作用下产生的放电现象。这时触头间隙中的气体被游离产生大量的电子和离子，在强电场作用下，大量的带电粒子作定向运动，使绝缘的气体变成了导体。电流通过这个游离区时所消耗的电能转换为热能和光能，由于光和热的效应，产生高温并发出强光，使触头烧蚀，并使电路切断时间延长，甚至不能断开，造成严重事故。为此，必须采取措施熄灭或减小电弧。

2. 电弧产生的原因

电弧的产生主要经历四个物理过程：

(1) 强电场放射 触头在通电状态下开始分离时，其间隙很小，电路电压几乎全部降落在触头间很小的间隙上，使该处电场强度很高，此强电场将触头阴极表面的自由电子拉出到气隙中，使触头间隙的气体内存在较多的电子，这种现象称为强电场放射。

(2) 撞击电离 触头间的自由电子在电场作用下，向正极加速运动，经一定路程后获得足够大的动能，在其前进途中撞击气体原子，将气体原子分裂成电子和正离子。电子在向正极运动过程中将撞击其他原子，使触头间隙中气体电荷越来越多，这种现象称为撞击电离。

(3) 热电子发射 撞击电离产生的正离子向阴极运动，撞击在阴极上使阴极温度逐渐升高，并使阴极金属中电子动能增加，当阴极温度达到一定程度时，一部分电子有足够动能将从阴极表面逸出，再参与撞击电离。这种由于高温使电极发射电子的现象称为热电子发射。

(4) 高温游离 当电弧间隙中的气体温度升高时，气体分子热运动加快，当电弧温度达到或超过 3000℃ 时，气体分子发生强烈的不规则热运动并造成相互碰撞，使中性分子游离成为电子和正离子。这种因高温使分子撞击所产生的游离称为高温游离。

由上分析可知，在触头刚开始分断时，首先是强电场放射。当触头完全打开时，由于触头间距离增加，电场强度减弱，维持电弧存在主要靠热电子发射、撞击电离和高温游离，而其中又以高温游离作用最大。但是在气体分子电离的同时，也存在消电离作用。消电离是指正负带电粒子相互结合成为中性粒子。对于复合消电离只有在带电粒子运动速度较低时才有可能。因此冷却电弧，或将电弧挤入绝缘的窄缝里，迅速导出电弧内部热量，降低温度，减小离子的运动速度，以便加强复合过程。对于扩散消电离可降低弧柱周围的温度，或减小电弧直径，使电弧内部电子、离子的含量增加也可增加扩散消电离作用。

3. 灭弧的基本方法

为了灭弧，其基本方法有

- 1) 拉长电弧，从而降低电场强度。
- 2) 用电磁力使电弧在冷却介质中运动，降低弧柱周围的温度。