



普通高等教育“十一五”国家级规划教材
普通高等专科学校教育机电类规划教材
机械工业出版社精品教材

电气控制与PLC应用

● 许蓆 王淑英 编

第4版

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



赠电子课件

普通高等教育“十一五”国家级规划教材
普通高等专科教育机电类规划教材
机械工业出版社精品教材

电气控制与 PLC 应用

第 4 版

许 琴 王淑英 编



机械工业出版社

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材，也是普通高等专科教育机电类规划教材。

全书以电器控制与可编程序控制器控制为主线，以工厂电气控制设备电气控制为核心，阐述了电器控制与可编程序控制器控制在生产实际中的应用。书中抓住了电器控制与可编程序控制的内在联系，使其前后承接，相互呼应。前者突出了控制原理和逻辑控制思路，后者突出了程序设计和应用系统设计。

本次修订本着“抓住典型、突出重点、重在应用、不断更新”的原则进行。书中主要内容有常用低压电器，电气控制电路基本环节，典型设备电气控制电路分析，电气控制系统设计，可编程序控制器及其工作原理，FX₂系列可编程序控制器及指令系统，S7—200系列可编程序控制器，可编程序控制器的程序设计，以及可编程序控制器应用系统设计等。

本书可作为高职高专、成人教育电气自动化技术、机电一体化等机电类专业的教材，也可供电气工程人员自学参考。

为方便教师授课，本书特备有免费电子课件，凡选用本书作为授课教材的院校，均可来电索取，咨询电话：010-88379375，Email：cmpgaozhi@ sina.com。

图书在版编目（CIP）数据

电气控制与 PLC 应用/许蓼，王淑英编. —4 版. —北京：机械工业出版社，2009.1（2011.8 重印）

普通高等教育“十一五”国家级规划教材. 普通高等专科教育机电类规划教材. 机械工业出版社精品教材

ISBN 978-7-111-15438-9

I. 电… II. ①许…②王… III. ①电气控制—高等学校—教材②可编程序控制器—高等学校—教材 IV. TM921.5 TP332.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2009）第 213888 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：于宁 责任编辑：于宁 责任校对：刘志文

封面设计：马精明 责任印制：李妍

北京诚信伟业印刷有限公司印刷

2011 年 8 月第 4 版第 8 次印刷

184mm × 260mm · 18.5 印张 · 457 千字

34001—39000 册

标准书号：ISBN 978-7-111-15438-9

定价：29.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心：(010)88361066

门户网：<http://www.cmpbook.com>

销售一部：(010)68326294

教材网：<http://www.cmpedu.com>

销售二部：(010)88379649

读者购书热线：(010)88379203

封面无防伪标均为盗版

第4版前言

电气控制与可编程序控制器（PLC）是高职高专电气类、机电类专业中应用型的专业课。近年来，随着自动化技术的不断发展，PLC 逐渐代替复杂的电器及接线而成为控制设备的核心。为此，削弱电气控制中复杂的电路分析，加强 PLC 程序设计实为教学之需要。本书是对《电气控制与 PLC 应用》第3版的修订，是将继电器控制与 PLC 控制技术整合到一起的新型教材。

本书力图兼顾电器控制技术及可编程序控制器应用技术的教学重点，并使它们前后承接、相互呼应。本着结合工程实际、突出技术应用的原则，精选内容、突出应用、培养能力，吸取各校教改经验，做到通俗易懂，便于自学。本次修订对常用低压电器做了更加全面的介绍，反映了新型低压电器的应用，删除了继电器控制的交流电梯的内容，选用了应用更加广泛的 X62W 万能铣床的电气控制电路，增加了 PLC 控制的应用实例，加强了 S7—200 系列 PLC 功能指令的分析，使本书更具先进性、实用性。

本书内容分为两部分，共九章：前四章阐述了常用低压电器，电气控制电路的基本环节，典型生产机械（车、钻、镗、铣、起重机）电气控制电路分析和电气控制系统设计等基本教学内容；后五章介绍了 PLC 控制技术，选择了具有代表性的三菱 FX 系列、西门子 S7—200 系列 PLC 产品，详述了 PLC 的工作原理、FX₂ 系列 PLC、S7—200 系列 PLC、PLC 程序设计与 PLC 应用系统设计等内容，以培养学生应用 PLC 进行电气线路设计和控制软件编写的能力。

本书在教学使用过程中，并非全部内容都要讲解，可根据不同专业、课时多少进行删减，有些内容和实例可安排在电气实训、课程设计、毕业设计中进行。由于前后两部分内容之间既相互联系，又相互独立，可供分别开设“电器控制技术”及“可编程序控制器应用技术”两门课程的院校选用。

本书由河北机电职业技术学院许廖、王淑英编写。第一~五章由许廖编写，第六~九章由王淑英编写。

为方便教师授课，本书特备有免费电子课件，凡选用本书作为授课教材的院校，均可来电索取。咨询电话：010-88379375，Email：cmpgaozhi@ sina.com。

由于本书编者水平有限，编写时间仓促，书中疏漏及错误之处在所难免，恳请读者批评指正。

编者

第3版前言

电气控制与可编程序控制器（PLC）是高职高专电气类、机电类专业中应用型的专业课。近年来，随着自动化技术的不断发展，PLC 逐渐代替复杂的电器及接线而成为控制设备的核心。为此，削弱电气控制中复杂的电路分析，加强 PLC 程序设计实为教学之需要。本书是对 1996 年《工厂电气控制设备》第 2 版的一次全面修订，是将继电器控制与 PLC 控制技术整合到一起的新型教材。

本书力图兼顾电器控制技术及可编程序控制器应用技术的教学重点，并使它们前后承接、相互呼应。本着结合工程实际、突出技术应用的原则，精选内容、突出应用吸取各校教改经验，做到通俗易懂，便于自学。

本书分两部分共九章。前四章为培养学生熟练使用低压电器，掌握电气控制电路基本环节，分析典型设备电气控制系统，培养设计电气控制电路的能力，而讲授了常用低压电器，电气控制电路的基本环节，典型生产机械（车、钻、镗、铣、起重机、电梯）电气控制电路分析和电气控制系统设计等基本教学内容。后五章为 PLC 控制技术，选择了具有代表性的三菱 FX 系列、西门子 S7—200 系列 PLC 产品，讲授了 PLC 的工作原理、FX₂ 系列 PLC、S7—200 系列 PLC、PLC 程序设计与 PLC 应用系统设计等内容，以培养学生应用 PLC 进行电气线路设计和控制软件编写的能力。

本书在教学使用过程中，并非全部内容都要讲解，可根据不同专业、课时多少进行删减，有些内容和实例可安排在电气实训、课程设计、毕业设计中进行。由于前后两部分内容之间既相互联系，又相互独立，故也可供分别开设“电器控制技术”及“可编程序控制器应用技术”两门课程的院校选用。

本书由河北机电职业技术学院许蓼、王淑英编写。第一~五章由许蓼编写，第六~九章由王淑英在原赵明编写的第六、七、八章的基础上，根据当前 PLC 发展的现状，重新编写的。

为方便教师授课，本书特备有免费电子课件，凡选用本书作为教材的学校，均可来电索取（010-88379375）。电子教案由大连职业技术学院殷建国老师制作。

由于本书编者水平有限，编写时间仓促，书中疏漏及错误之处在所难免，恳请读者批评指正。

编者

目 录

第4版前言

第3版前言

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 12

第三节 电磁式继电器 17

第四节 时间继电器 23

第五节 热继电器 31

第六节 熔断器 35

第七节 低压断路器 40

第八节 主令电器 44

第九节 速度继电器与干簧继电器 53

习题 55

第二章 电气控制电路基本环节 57

第一节 电气控制系统图 57

第二节 电气控制电路基本控制规律 61

第三节 三相异步电动机的起动控制 67

第四节 三相异步电动机的制动控制 70

第五节 三相异步电动机的调速控制 74

第六节 直流电动机的电气控制 77

第七节 电气控制系统常用的
保护环节 81

习题 83

**第三章 典型设备电气控制
电路分析** 86

第一节 电气控制电路分析基础 86

第二节 Z3040型摇臂钻床电气控制
电路分析 91

第三节 T68型卧式镗床电气控制
电路分析 95

第四节 X62W型卧式铣床电气控制
电路分析 102

第五节 交流桥式起重机电气控制
电路分析 109

习题 120

第四章 电气控制系统设计 121

第一节 电气控制系统设计的原则、
内容和程序 121

第二节 电力拖动方案的确定和
电动机的选择 123

第三节 电气原理图设计的步骤与
方法 125

第四节 常用控制电器的选择 128

第五节 电气控制工艺设计 132

习题 135

**第五章 可编程序控制器及其
工作原理** 136

第一节 可编程序控制器概述 136

第二节 PLC控制与继电器控制的
比较 142

第三节 可编程序控制器的硬件
组成 143

第四节 可编程序控制器的软件
组成 148

第五节 可编程序控制器的工作
原理 152

习题 156

第六章 FX₂ 系列可编程序控制器**及指令系统** 157

- 第一节 FX₂ 系列可编程序控制器及其性能 157
- 第二节 FX₂ 系列 PLC 的基本指令 ... 165
- 第三节 FX₂ 系列 PLC 的步进指令及编程方法 172
- 第四节 FX₂ 系列 PLC 的功能指令及编程方法 178
- 习题 187

第七章 S7—200 系列可编程序控制器 189

- 第一节 S7—200 系列 PLC 的构成 ... 189
- 第二节 S7—200 系列 PLC 内部元器件 192
- 第三节 S7—200 系列 PLC 的基本指令 197
- 第四节 S7—200 系列 PLC 的功能指令 206
- 习题 217

第八章 可编程序控制器的程序设计 219

- 第一节 梯形图的特点及绘制原则 ... 219
- 第二节 PLC 程序设计方法 224
- 第三节 顺序控制设计方法中梯形图的编程方式 229

习题 238

第九章 可编程序控制器应用系统设计 241

- 第一节 PLC 应用系统设计的内容和步骤 241
- 第二节 PLC 的选择 242
- 第三节 节省 PLC 输入输出点数的方法 246
- 第四节 可编程序控制器在逻辑控制系统中的应用实例 249
- 第五节 可编程序控制器网络及通信 268
- 习题 276

附录 278

- 附录 A 低压电器产品型号编制方法 278
- 附录 B 电气简图用图形及文字符号一览表 280
- 附录 C FX₂ 系列 PLC 基本指令和功能指令 283
- 附录 D S7—200 可编程序控制器寻址范围及特殊标志存储器 285
- 附录 E S7—200 系列 PLC 有效编程范围 286

参考文献 289

绪 论

一、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 PLC 控制系统的工作原理、典型机械的电气控制线路以及电气控制系统的设计方法。现在 PLC 控制系统应用越来越普遍，已成为实现工业自动化的重要手段之一。所以本课程的重点是可编程序控制器，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，但它所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气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、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他们的实际应用和动手能力。

本课程的基本任务是：

1. 熟悉常用控制电器的结构原理、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，能设计简单的电气控制电路。
3. 熟悉 PLC 的基本工作原理及应用发展概况。
4. 熟练掌握 PLC 的基本指令系统和典型电路的编程，掌握 PLC 的程序设计方法，能够根据生产过程要求进行系统设计，编制应用程序。
5. 了解 PLC 的网络和通信原理。

二、电气控制技术的发展概况

随着科学技术的不断发展，生产工艺不断提出新的要求，电气控制技术经历了从手动控制到自动控制，从简单的控制设备到复杂的控制系统，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的转变。新的控制理论和新型电器及电子器件的出现，推动了电气控制技术不断发展。作为生产机械动力的电机拖动，初期的拖动方式为一台电动机拖动多台设备，或使一台机床的多个动作由一台电动机拖动，称为集中拖动。后随着生产机械功能增多和自动化程度的提高发展成为单独拖动，即一台设备由一台电动机单独拖动。为进一步简化机械传动机构，更好地满足设备各部分对机械特性的不同要求，又采用了多台电动机拖动，即设备的各运动部件分别采用不同的电动机拖动。

在电力拖动方式的演变过程中，电力拖动的控制方式由手动控制向自动控制发展。最初的自动控制系统是由接触器、继电器、按钮、行程开关等组成的继电器接触器控制系统。这种控制具有使用的单一性，即一台控制装置仅针对某一种固定程序的设备而设计，一旦程序变动，就得重新配线。而且这种控制的输入、输出信号只有通和断两种状态，因而这种控制是

断续的，不能连续反映信号的变化，故称为断续控制。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，也是学习先进电气控制的基础。这种控制系统的缺点是采用固定的接线方式，灵活性差，工作频率低，触点易损坏，可靠性差。

为了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，它是由连续控制元件组成，它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。用作连续控制的元件，以前采用的是电机扩大机和磁放大器，随着半导体器件和晶闸管的发展，采用了晶闸管作为控制元件的控制系统。

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或编程来实现继电器接触器控制线路的装置，能满足程序经常改变的控制要求，使控制系统具有较大的灵活性和通用性，但仍采用硬件手段且装置体积大，功能也受到一定限制。对于复杂的控制系统则采用计算机控制，但掌握难度较大。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，它把计算机的完备功能、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，是一种适应工业环境需要的通用控制装置，并独具风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方法简化，且使不熟悉计算机的人员也能很快掌握其使用技术。现在 PLC 已作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，PLC 已成为电气自动化控制系统中应用最为广泛的控制装置。

在机械加工工业方面，1952 年美国研制成第一台三坐标数控铣床，它综合应用了当时计算机、自动控制、伺服驱动、精密检测与新型机床结构等多方面的最新技术成就，成为一种新型的通用性很强的高效自动化机床，标志着机械制造技术进入了一个新阶段。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计算机数控装置（CNC）性能更加完善，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机床（MC），工件在一次装夹后可以完成多种工序的加工。

自 20 世纪 70 年代以来，电气控制相继出现了直接数字控制系统（DDC）、柔性制造系统（FMS）、计算机集成制造系统（CIMS）、智能机器人、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）、现场总线控制系统等高新技术，形成了从产品设计及制造和生产管理的智能化生产的完整系统，将自动化生产技术推进到更高的水平。

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繁荣的明天。

常用低压电器

低压电器是指工作在交流 1200V、直流 1500V 及以下的电路中，以实现对电路或非电对象的控制、检测、保护、变换、调节等作用的电器。利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，动稳定及热稳定性能好。

（二）低压控制电器

用于各种控制电路和控制系统中的电器。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，电气和机械寿命长，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某种功能的电器。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。我国编制的低压

电器产品型号适用于 12 大类产品：刀开关和转换开关、熔断器、断路器、控制器、接触器、起动器、控制继电器、主令电器、电阻器、变阻器、调整器和电磁铁等。并用字母 H、R、D、K、C、Q、J、L、Z、B、T、M 和 A 分别表示这 12 大类和其他电器产品。

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、放大与判断做出有规律的反应，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，电磁机构有直动式与拍合式，拍合式又有衔铁沿棱角转动和衔铁沿轴转动两种。

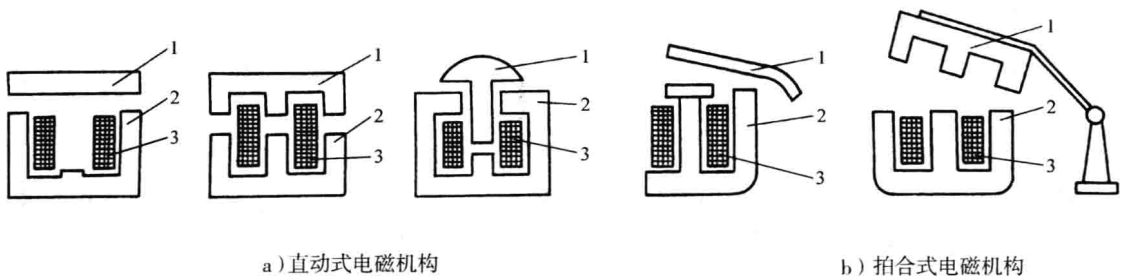


图 1-1 电磁机构

1—衔铁 2—铁心 3—线圈

吸引线圈用以将电能转换为磁能，按吸引线圈通入电流性质不同，电磁机构分为直流电磁机构和交流电磁机构，其线圈称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，易于线圈散热；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联接方式，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 当吸引线圈通入电流后，产生磁场，磁通经铁心、衔铁和工作气隙形成闭合回路，产生电磁吸力，将衔铁吸向铁心。与此同时，衔铁还受到反作用弹簧的拉力，只有当电磁吸力大于弹簧反力时，衔铁才可靠地被铁心吸住。而当吸引线圈断电时，电磁吸力消失，在弹簧作用下，衔铁与铁心脱离，即衔铁释放。电磁机构的工作特性常用吸力特性和反力特性来表述。

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。

(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

$$F = Kx \quad (1-1)$$

电磁机构的反力特性如图 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。考虑到常开触头闭合时超行程机构的弹力作用，反力特性在 δ_2 处有一突变。

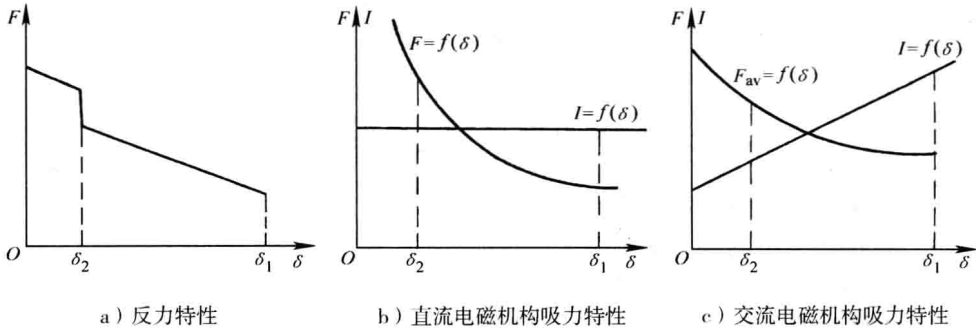


图 1-2 电磁机构反力特性与吸力特性

(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，吸力可按下式求得

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

式中 F ——电磁机构衔铁所受的吸力，单位为 N；

B ——气隙的磁感应强度，单位为 T；

S ——吸力处端面积，单位为 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指电磁吸力与气隙的相互关系。

直流电磁机构当直流励磁电流稳定时，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，衔铁吸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的反电动势，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，在忽略线圈电阻和漏磁情况下，线圈电压与磁通的关系为

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

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

式中 U ——线圈电压有效值，单位为 V；

E ——线圈感应电动势，单位为 V；

f ——线圈电压的频率，单位为 Hz；

N ——线圈匝数；

Φ_m ——气隙磁通最大值，单位为 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，且电磁吸力 F 的平均值 F_{av} 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

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

式中， $B = B_m / \sqrt{2}$ 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 $t=T/4$ 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

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

由上式可知，磁感应强度 $B(t)$ 虽按正弦规律变化，但其交流电磁吸力却是脉动的，且方向不变，并由两部分组成：一部分为平均吸力 F_{av} ，其值为瞬时吸力最大值的一半，即 $F_{\text{av}} = 4B^2 S \times 10^5$ ；另一部分为以两倍电源频率变化的交流分量 $F_{\text{~}} = 4B^2 S \times 10^5 \cos 2\omega t$ 。所以交流电磁机构电磁吸力随时间变化如图 1-3 所示。其吸力在 0 和最大值 $F_m = 8B^2 S \times 10^5$ 的范围内以两倍电源频率变化。

由以上分析可知，交流电磁机构具有以下特点：

1) $F(t)$ 是脉动的，在 50Hz 的工频下，1s 内有 100 次过零点，因而引起衔铁的振动，产生机械噪声和机械损坏，应加以克服。

2) 因 $U \approx 4.44fN\Phi_m$ ，当 U 一定时， Φ_m 也一定。不管有无气隙， Φ_m 基本不变。所以，交流电磁机构电磁吸力平均值基本不变，即平均吸力与气隙 δ 的大小无关。实际上，考虑到漏磁通的影响，吸力 F_m 随气隙 δ 的减少而略有增加，其吸力特性如图 1-2c 所示。

3) 交流电磁机构在衔铁未吸合时，磁路中因气隙磁阻较大，维持同样的磁通 Φ_m ，所需的励磁电流即线圈电流，比吸合后无气隙时所需的电流大得多。对于 U 形交流电磁机构的励磁电流在线圈已通电，但衔铁尚未动作时的电流为衔铁吸合后的额定电流的 5~6 倍；对于 E 型电磁机构则高达 10~15 倍。所以，交流电磁机构的线圈通电后，衔铁因卡住而不能吸合，或交流电磁机构频繁工作，都将因线圈励磁电流过大而烧坏线圈。

为此，交流电磁机构不适用于可靠性要求高与频繁操作的场合。

(4) 剩磁的吸力特性。由于铁磁物质存有剩磁，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 1-4 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 1-4 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 $2F_m$ 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 1-5 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

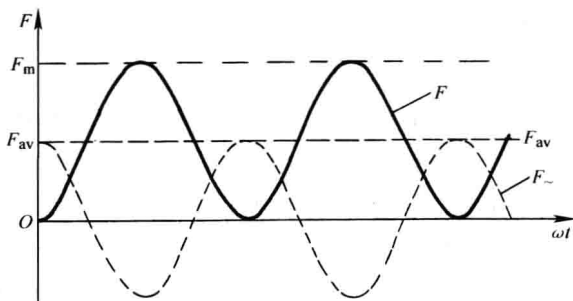


图 1-3 交流电磁机构电磁吸力随时间变化情况

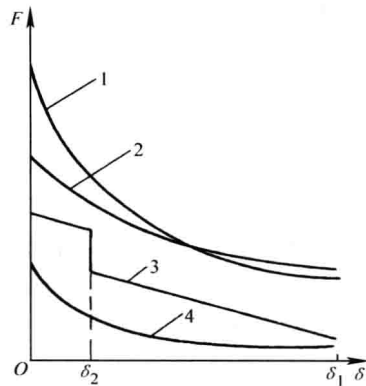


图 1-4 电磁机构吸力特性与反力特性的配合

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

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 ，而且这两个吸力之间也存在一定的相位差。这样，虽然这两部分电磁吸力各自都有到达零值的时候，但到零值的时刻已错开，二者的合力就大于零，只要总吸力始终大于反力，衔铁便被吸牢，也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 1-6 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，虽然吸力减小，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电磁式继电器的重要特性。

（二）触头系统

触头亦称触点，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。若接触电阻较大，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，将使触头发热导致温度升高，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 1-7 所示。

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

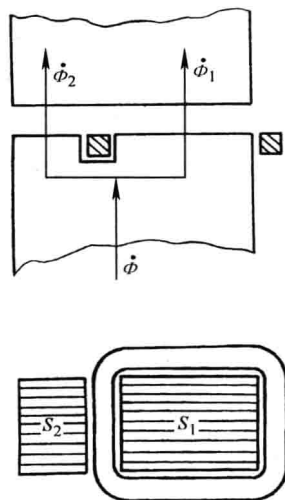


图 1-5 交流电磁机构短环路

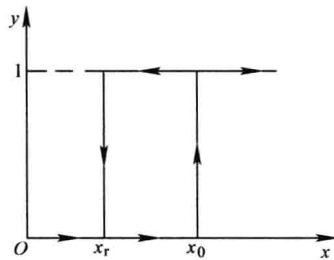


图 1-6 电磁机构的继电特性

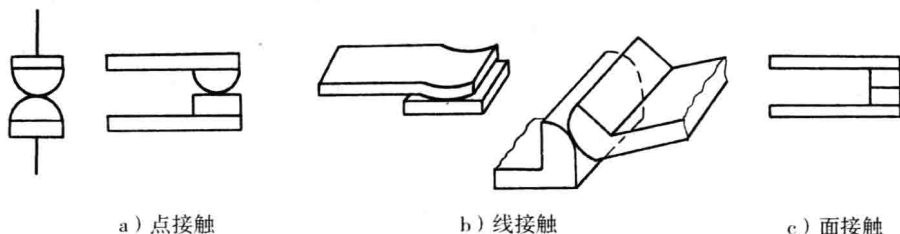


图 1-7 触头的接触形式

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以减小接触电阻，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互压力。

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）。原始状态闭合，线圈通电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，只能通过较小的电流。

触头的结构形式主要有桥式触头和指形触头，如图 1-8 所示。

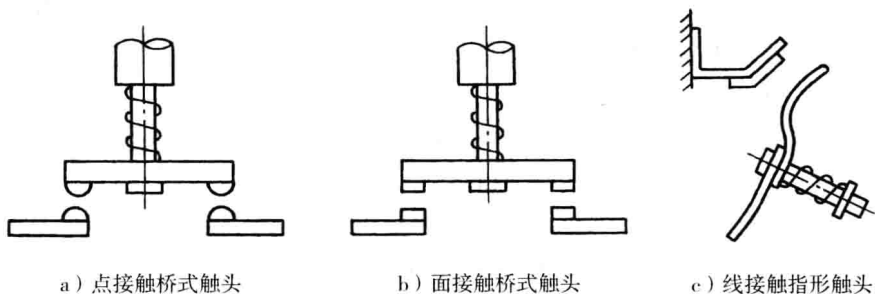


图 1-8 触头的结构形式

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系数小的材料，使触头本身的电阻尽量减小；其次增加触头的接触压力，一般在动触头上安装触头弹簧；再次改善触头表面状况，尽量避免或减小触头表面氧化膜形成，在使用过程中尽量保持触头清洁。

（三）电弧的产生和灭弧方法

1. 电弧的产生 在自然环境下开断电路时，如果被开断电路的电流（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 电弧产生的原因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，强电场将触头阴极表面的自由电子拉出到间隙中，使触头间隙的气体中存在较多的电子，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。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，使气体分子热运动速度加快，当电弧温度达到或超过 3000°C 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。

由以上分析可知，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，还存在消电离作用。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。同时，高度密集的高温离子和电子，要向周围密度小、温度低的介质表面扩散，使弧隙中的离子和电子浓度降低，电弧电流减小，使高温游离大为减弱。

3. 灭弧的基本方法 灭弧的基本方法有：

- 1) 快速拉长电弧，以降低电场强度，使电弧电压不足以维持电弧的燃烧，从而熄灭电弧。
- 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，使离子运动速度减慢，离子复合速度加快，从而使电弧熄灭。
- 3) 将电弧挤入绝缘壁组成的窄缝中以冷却电弧，加快离子复合速度，使电弧熄灭。
- 4) 将电弧分成许多串联的短弧，增加维持电弧所需的临界电压降。

交流电弧主要是电流过零点后如何防止重燃的问题，这使交流电弧比较容易熄灭；而直流电流没有过零的特性，产生的电弧相对不容易熄灭，因此一般还需附加其他灭弧措施。

4. 常用的灭弧装置 常用灭弧装置有：

1) 电动力吹弧。图 1-9 是一种桥式结构双断口触头，当触头断开电路时，在断口处产生电弧，电弧电流在两电弧之间产生图中所示的磁场，根据左手定则，电弧电流将受到指向外侧的电动力 F 的作

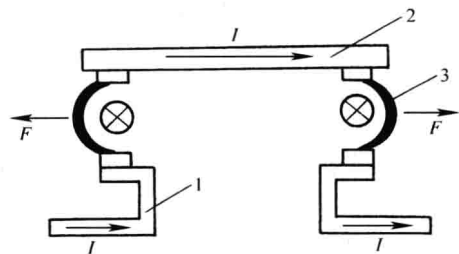


图 1-9 双断口电动力吹弧

1—静触头 2—动触头 3—电弧