

普通高等教育“十一五”规划教材
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUIHUA JIAOCAI



DIANQI KONGZHI JISHU
YU OUMULONG PLC

电气控制技术 与欧姆龙PLC

高万林 主编



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

普通高等教育“十一五”规划教材
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUIHUA JIAOCAI



DIANQI KONGZHI JISHU
YU OUMULONG PLC

电气控制技术与 欧姆龙PLC



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

内 容 提 要

本书为普通高等教育“十一五”规划教材。

全书共分为八章,详细介绍和讲解了电气控制技术与欧姆龙 PLC 的相关知识和应用。本书内容分为三部分:第一部分包括本书的前三章,主要讲解了继电接触控制系统的基础知识、控制电路及设计方法和实例;第二部分为本书的后五章,主要讲述欧姆龙系列可编程控制器控制系统的工作原理、设计编程方法和应用实例等;第三部分是本书的附录部分,包括实验指导书、部分指令表和本书的习题集。本书注重内容的精选,力求简明扼要、图文并茂、通俗易懂,在编排上由浅入深,方便了教学和自学。

本书可作为普通高等学校自动化、机械工程及其自动化等相关专业的本专科教材或辅导资料,也可作为相关技术人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

电气控制技术与欧姆龙 PLC / 高万林主编. —北京:中国电力出版社, 2010.9

普通高等教育“十一五”规划教材

ISBN 978-7-5123-0771-1

I. ①电… II. ①高… 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. ①TM921.5
②TP332.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 160052 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://jc.cepp.com.cn>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2010 年 9 月第一版 2010 年 9 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 14 印张 343 千字

定价 22.50 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

前 言

“电气控制技术与 PLC”课程是高等学校工程类专业的一门重要专业课。电气控制与 PLC 技术是综合了计算机技术、自动控制技术和通信技术等多门技术的一门综合性技术。随着生产的发展和科学技术的进步，电气控制与 PLC 技术应用的领域也不断扩大，不仅在传统的工业生产过程中发挥着不可替代的作用，而且在科学研究及其他很多领域也都扮演着越来越重要的角色。

电气控制与 PLC 起源于同一体系，只是发展的阶段不同，在理论和应用上是一脉相承的。电气控制技术是以用各类电动机为动力的传动装置与系统为对象，来实现生产过程自动化的控制技术。早期的电气控制技术以低压电器元件为基础，形成以继电—接触器为主的电气控制系统。后来出现的 PLC (Programmable Logic Controller, 可编程序控制器) 技术，以软件编程的方法实现控制功能，它正逐步取代传统的继电—接触控制系统，广泛应用于各个行业的控制中。

本书主要讲述电气控制技术与欧姆龙 PLC 的应用，欧姆龙 C 系列 PLC 是非常典型和常用的 PLC 系列之一，在很多领域都有较好的应用，并且其指令通用性强，因此我们以欧姆龙 C 系列 PLC 为蓝本来介绍 PLC 的相关知识。全书共分为三大部分，第一部分主要讲述电气控制技术的相关知识，包括本书第一、二、三章的内容，第一章电气控制的基础，讲述了常见低压电器的基本知识和应用；第二章基本电气控制电路，详细分析了几种典型控制电路环节；第三章电气控制装置设计，介绍了电气控制装置设计的基本原则和步骤并举例详述。第二部分为可编程控制器的介绍，以欧姆龙 C 系列 PLC 为主来介绍 PLC 的编程及应用，包括本书第四、五、六、七、八章的内容，首先介绍了 PLC 的基本知识，如 PLC 的产生、发展、编程语言、分类、结构、特点、工作原理与应用等；然后以欧姆龙 C 系列 PLC 为基础，对其系统组成、指令系统等内容进行了详细介绍；接着给出了几种常见 PLC 程序的设计方法并结合实例详细分析；最后给出了 PLC 控制系统设计的基本步骤和设计方法、设计过程。本书注重内容的精选，力求简明扼要、图文并茂、通俗易懂，在内容编排上循序渐进、由浅入深，方便了教学和自学。由于本课程的实践性较强，因此本书第三部分即附录部分也安排了电气控制技术与欧姆龙 PLC 课程对应的实验内容。同时在附录中安排了习题集，让学生在学完完成后通过大量的习题检查学习效果。

和同类教材相比较，本书主要有以下几个特点：

(1) 对传统电气控制系统的内容进行了增减，对其中最重要、最基础的知识进行了详细讲解，对过时或已经不常用的知识进行了略讲或删除。

(2) 给出并讲解了电气控制线路和可编程序控制器程序的设计方法、步骤和原则。

(3) 以经典欧姆龙 C 系列 PLC 为对象，全面详细地讲解了其系统组成、内部器件、指令系统和模块单元等内容，并结合大量设计实例来丰富和介绍欧姆龙 PLC 控制系统的设计和完成过程，讲解其基本指令、功能指令等的编程和用法。

(4) 附有详细的实验内容，以便读者更好地学习和实际操作，培养动手能力。

(5) 附有内容丰富的习题集，以强化对各章节知识的理解和掌握。

本书由中国农业大学信息与电气工程学院高万林教授任主编，兰波、李佩佩参与了本书的编写；全书由李佩佩统稿。本书初稿由兰波整理，方建卿、刘雪萍、袁昆、韩静等参与了本书文字和图片的录入与绘制，陈一飞参与了本书的审阅。

滕松林教授审阅了本书第一、二、三章，张光杰教授审阅了本书第四、五、六、七、八章，并提出了许多宝贵的意见和建议，在此表示衷心的感谢。

本书的出版得到了中国电力出版社和中国农业大学的大力资助和支持，在此深表感谢！由于编者水平有限，书中不足之处在所难免，敬请读者批评指正。

编者

2010年6月

目 录

| | |
|-------------------------------------|------------|
| 前言 | |
| 绪论 | 1 |
| 第一章 电气控制基础 | 3 |
| 第一节 低压电器基本知识 | 3 |
| 第二节 接触器 | 11 |
| 第三节 继电器 | 14 |
| 第四节 熔断器与热继电器 | 24 |
| 第五节 开关电器 | 31 |
| 第六节 电气控制线路的绘制原则 | 42 |
| 第二章 基本电气控制电路 | 48 |
| 第一节 异步电动机的起动控制电路 | 48 |
| 第二节 异步电动机的正反转控制电路 | 57 |
| 第三节 异步电动机的制动控制电路 | 59 |
| 第四节 异步电动机的其他基本控制电路 | 61 |
| 第三章 电气控制装置设计 | 70 |
| 第一节 电气控制系统设计的基本原则 | 70 |
| 第二节 电气控制装置的设计步骤与设计要点 | 71 |
| 第三节 设计举例 | 80 |
| 第四章 可编程序控制器概述 | 86 |
| 第一节 可编程序控制器基本结构和工作原理 | 86 |
| 第二节 可编程序控制器的特点、应用和发展 | 90 |
| 第三节 可编程序控制器的主要性能指标 | 91 |
| 第四节 可编程序控制器的编程语言及分类 | 92 |
| 第五章 欧姆龙 PLC C 系列 P 型机组成及指令系统 | 95 |
| 第一节 P 型机的硬件组成 | 95 |
| 第二节 P 型机的内部器件 | 97 |
| 第三节 P 型机的指令系统 | 99 |
| 第六章 欧姆龙 PLC C200H 组成及指令系统 | 114 |
| 第一节 C200H PLC 系统的组成 | 114 |
| 第二节 C200H PLC 的内部器件 | 115 |
| 第三节 C200H 的指令系统 | 117 |
| 第四节 C200H 的远程单元及标准模块 | 123 |
| 第七章 PLC 的程序设计方法 | 127 |
| 第一节 PLC 的编程方法与规则 | 127 |

| | |
|--------------------------------------|------------|
| 第二节 PLC 程序的设计方法..... | 136 |
| 第八章 PLC 控制系统设计的基本步骤和应用实例..... | 166 |
| 第一节 PLC 控制系统设计的基本步骤..... | 166 |
| 第二节 设计实例..... | 167 |
| 附录 A 实验指导书..... | 173 |
| 实验一 常用电器的认识实验..... | 173 |
| 实验二 三相异步电动机起、保、停、逆自动控制实验..... | 174 |
| 实验三 三相异步电动机起动和反转实验..... | 175 |
| 实验四 PLC 程序输入实验..... | 177 |
| 实验五 检查和运行程序实验..... | 179 |
| 实验六 用 PLC 实现电机起、停、逆模拟控制实验..... | 182 |
| 实验七 数据处理指令实验..... | 184 |
| 实验八 可编程序控制器安装与接线..... | 186 |
| 实验九 笼型电机无触点控制..... | 192 |
| 实验十 笼型电机 Y, D 降压起动..... | 193 |
| 附录 B C200H PLC 指令系统一览表..... | 196 |
| 附录 C 习题集..... | 197 |
| 参考文献..... | 218 |

绪 论

一、电气控制与可编程控制发展概况

“19世纪后期到20世纪中叶的第二次产业革命，从化工、电力和内燃机等工程技术的突破开始，使人类进入了电气化、原子能和航空航天时代，现代化的大生产普遍发展。20世纪下半叶，以信息技术为代表的第三次产业革命迅猛发展，使社会生产和消费从传统的机械化、工业化向自动化、智能化转变。科技转化为生产力的能力加强、速度加快，大大提高了社会生产力和劳动生产率。可以说，这100多年来，全世界所创造的生产力比以往所创造的全部生产力的总和还要多、还要大。”第二次产业革命的过程，可以说是以电机的发明为先导，以电能的广泛应用为标志的，人类历史上一次深刻的革命，列宁曾以共产主义就是苏维埃政权加电气化来高度评价电气化的作用，足见电气化所产生的重大历史影响。

电气控制技术是以用各类电动机为动力的传动装置与系统为对象，来实现生产过程自动化的控制技术。电气控制系统是其中的主干部分，在国民经济各行业中的许多部门得到广泛应用，是实现工业生产自动化的重要技术手段。

随着科学技术的不断发展、生产工艺的不断改进，特别是计算机技术的应用，新型控制策略的出现，电气控制技术在不断发展着。在控制方法上，从手动控制发展到自动控制；在控制功能上，从简单控制发展到智能化控制；在操作上，从笨重发展到信息化处理；在控制原理上，从单一的有触点硬接线继电—接触器控制系统发展到以微处理器或微计算机为中心的网络化自动控制系统。现代电气控制技术是综合应用了计算机技术、微电子技术、检测技术、自动控制技术、智能技术、通信技术、网络技术等先进的科学技术成果而发展起来的。

过去的电气控制技术以低压电器元件为基础，以传统的测试方式手段，形成了以继电—接触器为主的电气控制系统，用以控制电机的起动/制动、反向和调速，至今仍是许多生产机械设备广泛采用的基本电气控制形式，也是学习更先进电气控制系统的基础。它主要由继电器、接触器、按钮、行程开关等组成，由于其控制方式是断续的，故又称断续控制系统，具有结构简单、价格低廉、抗干扰能力强等优点。但由于这种控制系统采用固定接线方式，所以存在着控制灵活性差、动作频率低、触点易损坏和可靠性差等缺点。

20世纪60年代出现的可编程序控制器（Programmable Logic Controller, PLC），以微处理器为核心，以软件手段实现各种控制功能，其通用性强、可靠性高，能适应恶劣的工业环境，它具有指令系统简单、编程简便易学、体积小、维修工作少、现场连接安装方便等一系列优点，正逐步取代传统的继电器控制系统，广泛应用于冶金、采矿、机械制造、石油、化工、汽车、电力、造纸、纺织等各个行业的控制中。

在自动化领域，可编程控制器与CAD/CAM、工业机器人并称为工业自动化的三大支柱，其应用日益广泛。它以硬接线的继电—接触器控制为基础，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；可通过数字量或者模拟量的输入、输出满足各种类型机械控制的需要。可编程控制器及有关外部设备，均按既

易于与工业控制系统联成一个整体，又易于扩充其功能的原则设计。可编程控制器已成为生产机械设备中开关量控制的主要电气控制装置。

二、本课程的性质、主要内容与任务

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—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。当前 PLC 控制系统应用十分普遍，已经成为实现工业自动化的主要手段，把它作为教学重点是应该的。一方面，根据我国当前情况，继电—接触器控制系统仍然是机械设备最常用的电气控制方式，而且控制系统所用的低压电器正在向小型化、长寿命方面发展，出现了功能多样的电子式电器，使继电—接触器控制系统性能不断提高，因此它在今后的电气控制技术中仍然占有相当重要的地位。另一方面，PLC 是计算机技术与继电—接触器控制技术相结合的产物，PLC 的输入、输出仍然与低压电器密切相关，因此掌握继电—接触器控制技术也是学习 PLC 应用技术所必需的基础。

电动机调速技术和数控技术与电气控制技术的关系十分密切，可以说在电气控制技术的发展成熟过程中一定缺少不了这两种技术的发展，因为它们的内容十分丰富而且自成体系，另有专门课程介绍，本课程不再涉及。

本课程的目标是使学生掌握现代电气控制技术的实用技能，具体要求是：

- (1) 熟悉常用控制电器的结构原理、用途，了解其型号规格并能够正确使用。
- (2) 掌握继电—接触器控制线路的基本环节，能够独立分析电气控制线路的工作原理。
- (3) 熟悉典型设备电气控制系统，具有从事电气设备安装调试、维修管理等工作的基本技能。
- (4) 掌握 PLC 的基本原理及编程方法，能够根据工艺过程和控制要求进行系统设计和编制应用程序。
- (5) 具有基于 PLC 设计和改进一般机械设备电气控制线路的基本能力。

第一章 电气控制基础

第一节 低压电器基本知识

在我国经济建设和人民生活中，电能的应用越来越广泛。在工业、农业、交通、国防以及人民生活用电中，大多数采用低压供电。为了安全、可靠地使用电能，电路中就必须安装有各种起调节、分配、控制和保护作用的接触器、继电器等低压电器，即无论是低压供电系统还是控制生产过程的电力拖动控制系统，均由用途不同的各类低压电器组成。

一、低压电器的分类

我国现行标准将工作电压交流 1200V、直流 1500V 以下的电气线路中起通断、保护、控制或调节作用的电器称为低压电器。低压电器的种类繁多，工作原理各异，因而有不同的分类方法，下面介绍三种分类方式。

（一）按用途分类

按用途和控制对象不同，低压电器分为配电电器和控制电器。

1. 用于低压电力网的配电电器

这类低压电器主要用于低压供电系统，包括刀开关、转换开关、隔离开关、空气断路器和熔断器等。对配电电器的主要技术要求是断流能力强、限流效果好；在系统发生故障时保护动作准确，工作可靠；有足够的热稳定性和动稳定性。

2. 低压控制电器

这类电器主要用于电力拖动即自动控制系统，包括接触器、起动器和各种控制继电器等。对控制电器的主要技术要求是操作频率高、电气和机械寿命长、有相应的转换能力。

（二）按工作原理分类

按工作原理不同，低压电器分为电磁式电器和非电量控制电器。

1. 电磁式电器

这类电器是根据电磁感应原理进行工作的，它包括交直流接触器、电磁式继电器等。

2. 非电量控制电器

这类电器是以非电物理量作为控制量进行工作的，它包括按钮开关、行程开关、刀开关、热继电器、速度继电器等。

（三）按操作方式分类

按操作方式不同，低压电器分为自动电器和手动电器。

1. 自动电器

通过电磁（或压缩空气）做功来完成接通、分断、起动、反转和停止等动作的电器称为自动电器。常用的自动电器有接触器、继电器等。

2. 手动电器

通过人力做功来完成接通、分断、起动、反转和停止等动作的电器称为手动电器。常用的手动电器有刀开关、转换开关和主令电器等。

另外，低压电器按工作条件还可划分为一般工业电器、船用电器、化工电器、矿用电器、牵引电器及航空电器等几类。不同类型的低压电器，对其防护形式、耐潮湿、耐腐蚀、抗冲击等性能的要求不同。

二、电磁式低压电器的基本结构与工作原理

电磁式电器在低压电器中占有十分重要的地位，在电气控制系统中应用最为普遍。各种类型的电磁式电器主要由电磁机构和执行机构组成，电磁机构按其电源种类不同可分为交流和直流两种，执行机构通常包括触头和灭弧装置两部分。

(一) 电磁机构

电磁机构是电磁式继电器和接触器等低压电器的主要组成部件之一，其工作原理是将电能转换为机械能，从而带动触头动作。

1. 电磁机构的结构形式

电磁机构由吸引线圈（励磁线圈）和磁路两部分组成。其中，磁路包括铁心、铁轭、衔铁和空气隙。当吸引线圈通过一定的电流时，产生激励磁场及吸力，并通过气隙转换为机械能，从而带动衔铁运动使触头动作，以完成触头的断开和闭合，实现电路的分断和接通。

图 1-1 所示为几种常用电磁机构的结构形式，从常用铁心的衔铁运动形式上看，铁心主要可分为拍合式和直动式两大类。图 1-1 (a) 为衔铁沿棱角转动的拍合式铁心，其铁心材料由电工软铁制成，它广泛用于直流电器中；图 1-1 (b) 为衔铁沿轴转动的拍合式铁心，铁心形状有 E 形和 U 形两种，其铁心材料由硅钢片叠成，多用于触头容量较大的交流电器中；图 1-1 (c) 为衔铁直线运动的 E 形直动式铁心，它也是由硅钢片叠制而成的，多用于触头为中、小容量的交流接触器和继电器中。电磁线圈由漆包线绕制而成，当线圈中通过工作电流时产生足够的磁动势，从而在磁路中形成磁通，使衔铁获得足够的电磁力，克服反作用力而吸合。在交流电流产生的交变磁场中，为避免因磁通过零点造成衔铁的抖动，需在交流电器铁心的端部开槽，嵌入一铜短路环，使环内感应电流产生的磁通与环外磁通不同时过零，使电磁吸力 F 总是大于弹簧的反作用力，因而可以消除交流铁心的抖动。

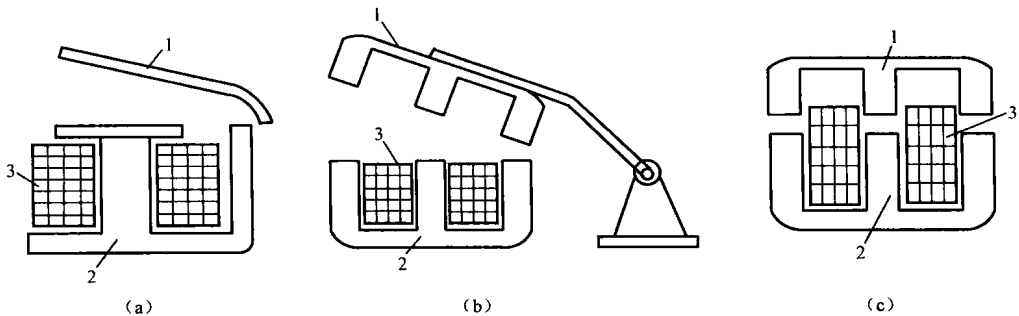


图 1-1 常用电磁机构的结构形式

(a) 衔铁沿棱角转动的拍合式铁心；(b) 衔铁沿轴转动的拍合式铁心；(c) 衔铁直线运动的 E 形直动式铁心

1—衔铁；2—铁心；3—吸引线圈

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不同, 又有串联线圈和并联线圈之分。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. 电磁机构的工作原理

电磁机构的工作特性常用吸力特性和反力特性来表述。

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 1-2 (a)、(b)、(c) 所示, 具体分析如下:

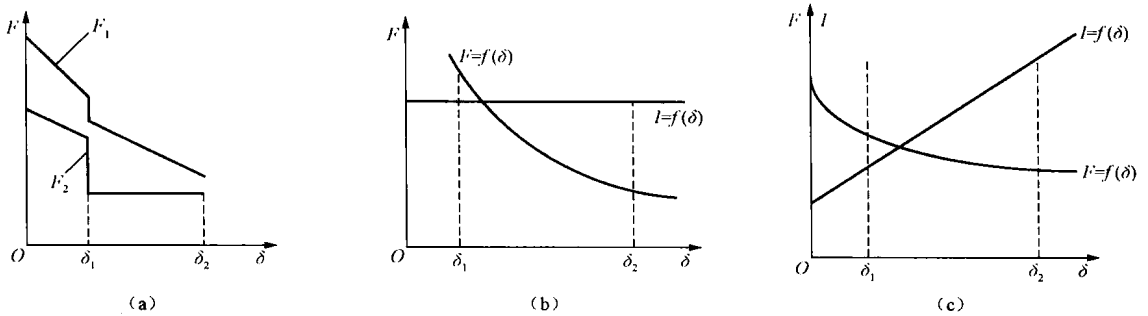


图 1-2 特性图

(a) 反力特性; (b) 直流电磁机构的吸力特性; (c) 交流吸力特性

(1) 反力特性。电磁机构上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

$$F_f = K_1 x \quad (1-1)$$

考虑到动合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 1-2 (a) 所示。其中 δ_1 为电磁机构的气隙的初始值, 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_1 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, 吸力的计算式为

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

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, 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:

当直流电磁机构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，根据磁路欧姆定律有

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

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 1-2 (b) 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，不会产生过电压。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 也为常数，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，分析如下：

令气隙中磁感应强度按正弦规律变化，有

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

交流电磁机构电磁吸力 $F(t)$ 的瞬时值为

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

式中的 $B = B_m / \sqrt{2}$ 为正弦量 $B(t)$ 的有效值。当 $t=0$ 时， $\cos 2\omega t = 1$ ，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，其在一周期

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 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, 即平均吸力也与气隙 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 1-2 (c) 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) 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。

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 所示。

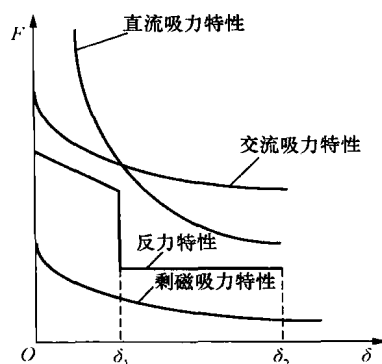


图 1-3 吸力特性和反力特性

(5) 交流电磁机构短路环的作用。由式 (1-9) 可知, 交流电磁机构电磁吸力是一个周期函数, 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 $2F_{av}$ 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, 衔铁又被释放。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。

为了避免衔铁震动, 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_1 , Φ_1 和 Φ_2 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。

(6) 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) 的关系成为电磁机构的输入—输出特性, 通常称为“极点特性”。

若将衔铁处于吸合位置记作 $y=1$, 释放位置记作 $y=0$ 。由前面分析知道, 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,其吸力小于反力,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。

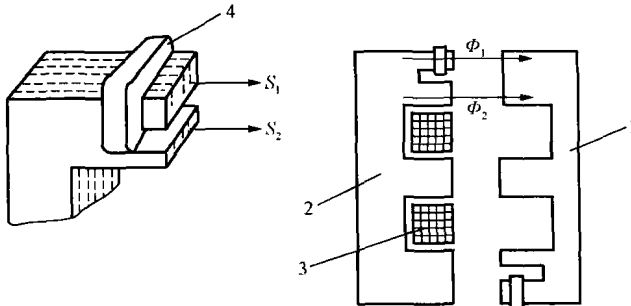


图 1-4 交流电磁铁的短路环

1—衔铁; 2—铁心; 3—线圈; 4—短路环

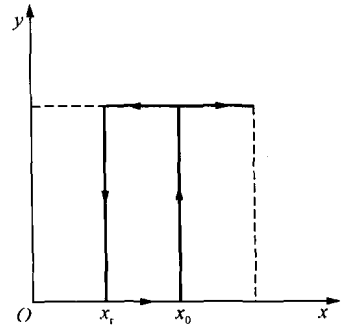


图 1-5 电磁机构的输入—输出特性

(二) 触头系统

触头的作用是接通或分断电路,因此要求触头要具有良好的接触性能。

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。

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,点接触式触头如图 1-6 (a) 所示。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,线接触式触头如图 1-6 (c) 所示。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,面接触式触头如图 1-6 (b) 所示。

触头的结构有桥式和指式两类。图 1-6 (a) 点接触式触头和图 1-6 (b) 面接触式触头属于桥式触头,而图 1-6 (c) 线接触式触头则属于指式触头。

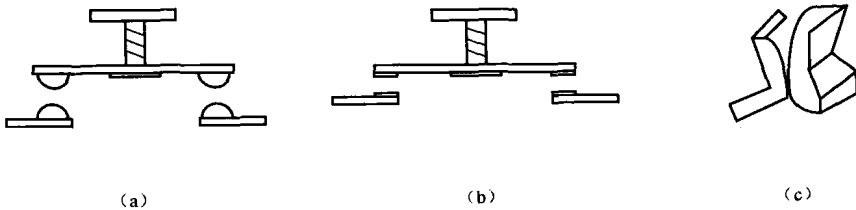


图 1-6 触头的结构形式

(a) 点接触式触头; (b) 面接触式触头; (c) 线接触式触头

2. 触头的接触电阻及减小方法

当动、静触头闭合后，不可能是完全紧密地接触，从微观看只是一些凸起点之间的有效接触，因此工作电流只流过这些相接触的凸起点，使有效导电面积减少，该区域的电阻远大于金属导体的电阻。这种由于动、静触头闭合时形成的电阻，称为接触电阻。接触电阻的存在，不仅会造成一定的电压损耗，还会使铜耗增加，造成触头温升超过允许值，导致触头表面的“膜电阻”进一步增加及相邻绝缘材料的老化，严重时可使触头熔焊，造成电气系统发生事故。因此，对各种电器的触头都规定了它的最高环境温度和允许温升。

为确保导电、导热性能良好，触头通常由铜、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。对于有些特殊用途的电器，如微型继电器和小容量的电器，其触头常采用银质材料，以减小接触电阻；对于大中容量的低压电器，在结构设计上采用滚动接触结构的触头，可将氧化膜去掉。

除此以外，触头在运行时还存在磨损。触头的磨损包括电磨损和机械磨损。电磨损是由于在通断过程中触头间的放电作用使触头材料发生物理性能和化学性能变化而引起的。电磨损是引起触头材料损耗的主要原因之一。机械磨损是由于机械作用使触头材料发生磨损和消耗。机械磨损的程度取决于材料硬度、触头压力及触头的滑动方式等。为了使接触电阻尽可能减小，应使触头接触得紧密一些；另外，在使用过程中尽量保持触头清洁，在有条件的情况下应定期清扫触头表面。

3. 触点的重要参数

(1) 额定电流：触点长期工作时所允许的最大电流。该值显然与触点的接触电阻、散热条件以及触点材料有关。其中，接触压力的调整尤为关键。如果触点的工作电流超过额定值，会发生冷焊，严重时会出现热熔焊，即烧结。这就要求触点材料的熔点高，如铂、钨。另外，铂合金的机械性能高，可加大接触压力，故大的额定电流开关常用铂合金作触点。一般触点常用铜合金制造，表面镀金，因为这样不但经济，而且基本上能满足上面提到的多重性能要求。

(2) 额定电压：触点断路后允许施加的最大电压。其具体要求是：①断路后两电极间不被击穿，即不能出现火花。这就要求断路后，两电极间有充分大的距离。②在断开过程中虽然允许产生火花，但绝不可产生电弧。这就要求机械系统能保证快速闭合和快速断开，以免在产生火花或电弧的电极距离内逗留时间过长，必要时增加一些装置用于灭弧。其中触点断开过程尤为危险。交流电压有助于熄灭电弧，因为在每一个电周期中，定有一次断流现象出现。

(3) 触点寿命：触点在额定条件下能正常使用的最多次数。触点寿命与触点的磨损有关，由前面可知，磨损一般分为机械磨损和电磨损。电磨损主要是“液桥磨损”（这种磨损在电源电压大于1V的情况下难以避免）、火花和“弱电弧”磨损，这主要因为多数灭弧装置需要在电弧产生后才能起作用。

(4) 灵敏度：单位时间内，触点允许开断的最高次数。此值由控制触点开断的机械系统决定。一般说来，触点的惯量和接触压力越小，则灵敏度越高，但相应的额定电流和额定电压就越低。

(三) 电弧的产生与灭弧的方法

1. 火花和电弧的产生

触点断开后，两触点间有间隙为 d 、压力为 p 的空气绝缘。如果对两触点施加过高的电

压，两触点间的气体就会被击穿并产生火花。

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，其值为 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，在强电场的作用下，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. 灭弧的基本方法

灭弧的基本方法有：

(1) 拉长电弧，从而降低电场强度。图 1-7 (a) 所示为靠电动力作用将电弧拉长使其易于熄灭。

(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。

(3) 将电弧挤入绝缘壁组成的窄缝中以冷却电弧。

(4) 将电弧分割成数段串联的短弧，每一短弧两边可看作一对电极，而每对电极间都有 150~250V 的绝缘强度，这就大大加强了触头间的绝缘强度，使触头间电压不足以达到电弧的燃烧电压。

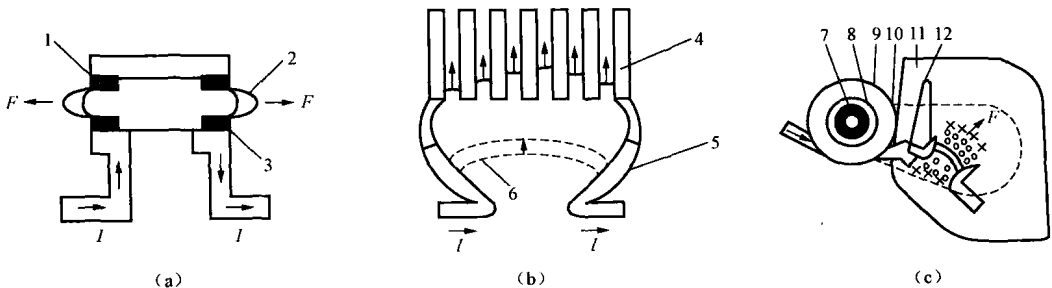


图 1-7 常用灭弧方法原理

(a) 电动力灭弧；(b) 栅片灭弧；(c) 磁吹式灭弧

1—动触点；2—电弧；3—静触点；4—灭弧栅片；5—触头；6—电弧；7—铁心；

8—绝缘管；9—吹弧线圈；10—导磁夹片；11—灭弧罩；12—熄弧角

3. 常用的灭弧装置

(1) 灭弧罩。灭弧罩通常用耐弧陶土、石棉水泥或耐弧塑料制成。其作用是能分隔电弧为多段，使各段弧长难以满足稳定条件，从而实现灭弧。另外，由于电弧与灭弧罩接触使电弧冷却，有助于灭弧。灭弧罩对交直流均有灭弧作用。

(2) 灭弧栅。灭弧栅由许多镀铜导磁钢片组成，片间距离为 2~3mm，安放在触点上方的灭弧罩内，如图 1-7 (b) 所示。主回路触点间一旦出现电弧，因电弧向导磁钢片内移动会减小系统磁阻，所以电弧必然受电磁力作用向栅片内移动。电弧一旦进入栅片就会被分割出许多串联短弧，形成不稳定系统被熄灭。即使短时不能熄灭，当交流电压过零后，由于栅片的屏蔽，电弧也无法重新点燃。它常用于交流灭弧。

(3) 磁吹灭弧装置。磁吹灭弧装置的工作原理，如图 1-7 (c) 所示。在触点主电路中串