



普通高等教育“十二五”规划教材

电气与可编程控制技术

高万林 陈一飞 主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



普通高等教育“十二五”规划教材

电气与可编程控制技术

主编 高万林 陈一飞

编写 李佩佩

主审 张光杰 滕松林



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书结合作者多年的教学经验和工程实践,立足于新形势下培养大学生具备工程应用技术与能力而编写。内容上根据发展的先后顺序对传统的继电器接触器控制系统和可编程序控制系统分别进行了详细的介绍,其中包括对基本工作原理、设计方法与实际应用的讲解。继电器接触器控制系统部分主要介绍了常用低压电器的基本结构、工作原理与技术指标,并适当增加了最新常用电器的介绍。对电气控制系统中三相异步电动机的启动、制动以及运行中的基本控制环节,典型电气控制系统分析与设计原则和要点等也作了讲解。可编程序控制系统部分为本书的后半部分。首先对可编程控制器、编程语言、基本结构及其工作原理进行了简单介绍;其次分别介绍了西门子 S7-200 系列、三菱 FX_{2N} 系列、欧姆龙 C 系列可编程控制器的基本指令、编程方法和常规应用等基本知识,内容丰富,详略得当。同时本书适当介绍了智能控制以及基于 PLC 的特殊控制,如模糊控制、PID 控制、变频控制等。本书的实验部分是以西门子系列 PLC 为基础进行讲解的,编程软件介绍的是针对西门子 S7-200 PLC 开发的编程软件。本书各章后均配有习题及本章小结,便于学生对各章知识的总结和掌握。另外,附录中收录了相关实验指导。

本书可作为电气工程及其自动化、自动化、机械工程及其自动化、机电一体化等专业及其他相关专业的教材或辅导资料,也可供电气控制技术相关领域工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电气与可编程控制技术/高万林,陈一飞主编. —北京:中国电力出版社,2012.7

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-5123-3335-2

I. ①电… II. ①高… III. ①电气控制器—高等学校—教材②可编程序控制器—高等学校—教材 IV. ①TM571.2②TM571.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 169916 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 http://www.cepp.sgcc.com.cn)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2013 年 2 月第一版 2013 年 2 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 21 印张 514 千字

定价 36.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪
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

电气控制与 PLC (Programmable Logic Controller, 可编程序控制器) 技术是综合了机电控制计算机技术、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, 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 可编程控制是控制系统发展的两个不同的阶段, 但在理论和应用上是一脉相承的。早期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 技术, 以软件编程的方法实现许多工业控制功能, 应用更加方便灵活。从控制功能的实现上, 它正逐步取代传统的继电接触器控制系统, 广泛应用于各个行业的控制系统中。

“电气与可编程控制技术”是高等工程控制类专业的一门重要专业课, 也是极具实践意义的一门实用类课程, 较好地学习和掌握这门课程对相关专业的学生控制技能的提高及就业是十分关键的。本书主要有以下几点特色:

- (1) 以西门子 S7-200 系列 PLC 为重点讲解 PLC 相关知识, 并对其他系列 PLC 如欧姆龙、三菱等也作了简要介绍, 涵盖全面, 重点突出, 实用性强。
- (2) 采用了最新标准的电气图形及文字符号。
- (3) 加入了大量的实物图片, 更加清楚、直观, 便于读者更好地认识和理解。
- (4) 每章后均设有本章小结, 便于读者从整体上把握本章内容。
- (5) 结合编者的工程控制经验列举了一些实例, 并配有丰富的习题和实验。

本书共分为九章, 其中第一、二、三章主要讲述传统电气控制系统部分, 即我们常说的继电接触器控制系统, 其中包括常见低压电器及几种最新电器的介绍, 三相异步电动机启动、制动及运行中的基本控制环节, 以及典型电气控制系统分析与设计原则等内容。后六章主要讲述的是可编程序控制系统即 PLC 控制技术基本知识, 第四章概括介绍了可编程序控制器 PLC 的基本知识, 主要从 PLC 的产生与发展、分类、功能、特点、编程语言、结构分析及工作原理等方面来讲; 第五到第七章分别介绍了西门子 S7-200 系列、三菱 FX_{2N} 系列以及欧姆龙 C 系列 PLC 的基本知识, 对其指令、编程、应用等知识进行了讲解, 其中重点介绍了西门子 S7-200 系列 PLC 的编程与实验; 本书第八章为 PLC 控制系统的综合设计和应用, 重点讲解了 PLC 控制系统的设计步骤和内容, 并从不同角度进行了举例分析, 对一些典型控制的实现及应用的例子进行了完整的讲解, 给出了 PLC 在实际工程中的安装及保护技术, 条理清晰、实用性强; 最后一章则主要介绍了西门子 S7-200 系列 PLC 配套的编程软件及编程操作, 为实验部分做准备。

全书注重内容的精选, 力求简明扼要、图文并茂、通俗易懂, 在编排上循序渐进、由浅入深, 各章最后均配有本章小结与配套习题, 加强了读者对各章内容的理解和掌握, 方便了教学和自学。另外, 本书最后附录部分收录了相关实验指导, 包括继电接触器控制实验与 PLC 编程及控制实验两部分, 同时附有程序清单。本书教学内容可根据课时要求做适当

删减。

本书可作为高等学校电气工程及其自动化、自动化、机械工程及其自动化、机电一体化等相关专业的本、专科教材或辅导资料，也可供相关工程技术人员参考使用。

本书由中国农业大学信息与电气工程学院高万林、陈一飞两位教授共同担任主编，其中高万林教授主要编写第一、二、三、四、七章；陈一飞教授主要编写第五、六、八章，并整理附录；李佩佩负责第九章的调试与编写；全书由陈一飞、李佩佩统稿。张光杰、滕松林两位教授进行了本书的审稿工作。袁昆、宋菲菲、朱苗苗、罗冕均、张伟、刘军博、刘米亮等参与了本书文字和图片的录入与绘制，齐凯、刘柏成对本书部分 PLC 程序进行了校对与调试。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



目 录

前言	
绪论	1
第一章 电气控制基础	3
第一节 低压电器的基本知识	3
第二节 接触器	10
第三节 继电器	12
第四节 熔断器与热继电器	20
第五节 开关电器	24
第六节 变频调速及变频器	37
第七节 电气控制线路的绘制及分析	50
本章小结	58
习题	59
第二章 基本电气控制电路	61
第一节 异步电动机的启动控制电路	61
第二节 异步电动机的正反转控制电路	65
第三节 异步电动机的制动控制电路	67
第四节 异步电动机的其他基本控制电路	69
本章小结	71
习题	72
第三章 电气控制系统分析与设计	74
第一节 电气控制系统分析	74
第二节 电气控制系统的设计原则与设计要点	79
第三节 设计举例	87
本章小结	93
习题	93
第四章 可编程序控制器	95
第一节 概述	95
第二节 PLC 的编程语言	99
第三节 PLC 的硬件结构及工作原理	102
本章小结	110
习题	111
第五章 西门子 S7-200 PLC 基础知识	112
第一节 概述	112
第二节 S7-200 PLC 基本指令	125

第三节 S7-200 PLC 编程初步	160
本章小结	170
习题	171
第六章 三菱 FX_{2N} 系列可编程控制器及其基本指令的应用	174
第一节 三菱 FX _{2N} 系列可编程控制器	174
第二节 FX _{2N} 系列可编程控制器软组件及功能	179
第三节 FX _{2N} 系列可编程控制器的基本指令及应用	190
第四节 FX _{2N} PLC 的应用举例	206
本章小结	209
习题	210
第七章 OMRON 公司 C 系列 PLC 基础知识	212
第一节 P 型机硬件系统特点	212
第二节 P 型机内部系统特点	213
第三节 P 型机的基本指令系统	214
本章小结	224
习题	224
第八章 PLC 控制系统的综合设计和应用	227
第一节 PLC 控制系统设计步骤及内容	227
第二节 基于 PLC 的顺序控制系统	229
第三节 基于 PLC 和变频器结合的调速控制系统	236
第四节 基于 PLC 的智能控制系统	242
第五节 基于 PLC 的现场总线控制系统	264
第六节 PLC 在实际工程应用中的安装技术及保护	271
本章小结	274
习题	275
第九章 编程软件及其应用	277
第一节 编程软件的初步使用	277
第二节 编程软件主要功能介绍	280
第三节 编程及调试	287
本章小结	296
附录 A 继电接触器控制实验	297
实验一 三相交流异步电动机的一般控制	297
实验二 三相交流异步电动机顺序控制设计与实现	298
附录 B PLC 编程实验	300
实验一 与或非逻辑功能实验	300
实验二 定时器/计数器功能实验	301
实验三 三相异步电动机的星—三角换接启动控制	303
实验四 LED 数码显示控制	306
实验五 装配流水线的模拟控制	310

实验六	十字路口交通灯控制的模拟·····	316
实验七	天塔之光·····	319
实验八	水塔水位控制的模拟·····	322
实验九	液体混合装置控制的模拟·····	324
参考文献	·····	328



绪 论

一、电气控制与可编程控制概况

早期的电气控制技术是针对工业领域以各类电动机为动力、以传动装置为对象来实现生产过程自动化的控制技术。随着自动控制技术的不断发展,电气控制技术的外延不断扩展,其主干部分电气控制系统在国民经济各行业中得到了广泛应用,是实现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与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;在控制系统构成上,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;在控制原理上实现了人工智能控制。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、智能控制技术、通信技术、网络技术 etc 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,以传统的测试方式为手段,形成了以继电器、接触器为主的电气控制系统,用以控制电机的启/制动、反转和调速,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,具有结构简单、价格低廉、抗干扰能力强等优点,至今仍是机床和许多机械设备中广泛采用的基本电气控制形式。由于这种控制系统是采用固定接线方式,所以存在着控制灵活性差、动作频率低、触点易损坏、可靠性差及高耗能等缺点。

纵观以电机为主要控制对象的电气控制系统,其开关量控制手段是最常用的。基于此,20 世纪 60 年代出现了可编程序逻辑控制器(Programmable Logic Controller, PLC)。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,具有指令系统简单、编程简便易学、易于掌握,体积小、维修工作少、现场连接安装方便等一系列优点,在控制系统的实现上正逐步取代传统的继电接触器控制系统。以 PLC 为控制核心的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、建筑、造纸、纺织等各个行业的自动控制中。

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、定时控制,又有运算、数据处理、模拟量调节、网络控制及通信等功能的控制装置及系统。通过数字量或者模拟量的输入、输出来满足各种类型机电控制的需要。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,故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核心装置。

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技术类课程。主要内容是以电动机或其他执行电器为控

制对象，基于继电接触器和 PLC 搭建的控制系统。本课程主要讲解它们的工作原理、典型电气控制线路的分析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控制的主要手段，并作为教学重点。但是任何以 PLC 为核心的控制系统，其实现还是离不开常用的低压电器，其控制输出大部分还是通过继电器、接触器来完成的。同时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、长寿命发展，出现了功能多样的新型的电子式电器，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。因此掌握继电接触器控制技术也是学习 PLC 应用控制技术所必需的基础。

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，本课程不再深入涉及。

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构成环节，能够独立分析电气控制线路的工作原理，并具备独立设计典型设备电气控制系统的基本技能。
- (3) 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的控制功能的设计和编制、调试应用程序。
- (4) 培养具有基于 PLC 设计和改进一般机械设备电气控制系统的基本能力。



第一章 电气控制基础

第一节 低压电器的基本知识

在工业、农业、交通、建筑、国防以及人民生活的方方面面，大多采用低压供电。为了安全、可靠地使用电能，电路中必须安装低压电器，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，均是由用途不同的各类低压电器组成的。

一、低压电器的分类

我国现行标准将工作在交流电压 1200V、直流电压 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。以下介绍三种分类方式。

（一）按用途分类

按用途和控制对象可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（也称配电系统），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

这类电器主要用于终端用电控制（即自动控制）系统，包括接触器、启动器和各种控制继电器、执行电器、信号电器等。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

按工作原理可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、电磁式继电器电磁阀等。

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、接地开关、热继电器、速度继电器等。

（三）按操作方式分类

按操作方式可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、启动、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

通过人力来完成接通、分断、启动、反转和停止等动作的电器称为手动电器。常用的手动电器有各种按钮、转换开关和其他主令电器等。

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、矿用防爆电器、牵引电器及航空电器等专用类别，对不同类型低压电器的防护形式、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特性

电磁式电器在低压电器中占有十分重要的地位。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

电磁机构是电磁式低压电器的主要组成部件之一，其工作原理是将电磁能转换为机械能，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，进而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形式，从常用铁心的衔铁运动形式上看，铁心主要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，嵌入一个铜短路环，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。

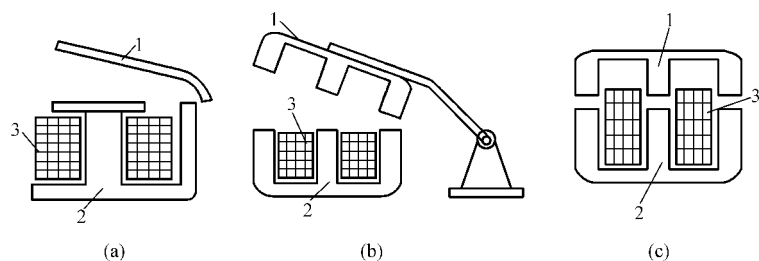


图 1-1 常用的磁路结构

(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，按通入电流种类的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，会造成铁心发热，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。接触器额定电流越大，其外形也相应加大。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，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. 电磁机构的工作特性

电磁机构的工作特性常用吸力特性和反力特性来表述。

铁心吸引衔铁的吸力是与它们之间的气隙有关的。当电磁机构的吸引线圈通电后，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 所示，具体分析如下。

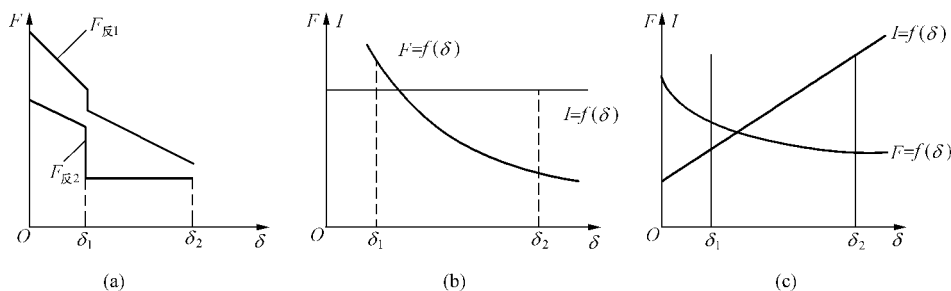


图 1-2 特性图

(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

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

式中 F_f ——弹簧反力，N；

K_1 ——弹簧弹性系数；

x ——弹簧机械变形的位移量，cm。

考虑到动合触点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、静触点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) 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 (1-2) 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，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。

1) 直流电磁机构的吸力特性。当直流电磁机构直流励磁电流处于稳态时, 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:

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

式中 I ——励磁电流, A;

N ——线圈匝数;

μ_0 ——磁导率, H/m;

δ ——磁路气隙, m;

R_m ——气隙磁阻, Ω 。

而电磁吸力 $F \propto \frac{\Phi^2}{S}$, 则

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

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合, 且衔铁吸合后电磁吸力大, 工作可靠。当直流电磁机构吸引线圈断电时, 由于电磁感应, 瞬间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串联组成。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, 在反向感应电势作用下, 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。

2) 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, 电压平衡方程为

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

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

式中 U ——线圈端电压, 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, 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 的加大而增大, 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发热而烧毁。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。

(3) 吸力特性与反力特性的配合。电磁机构欲使衔铁吸合，在整个吸合过程中，应使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。

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 所示。

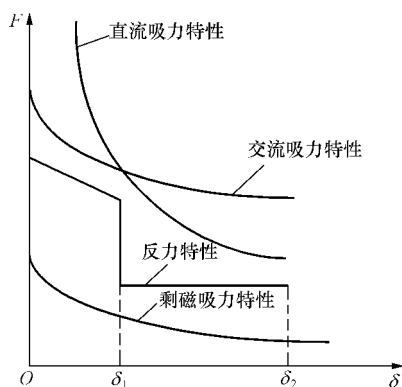


图 1-3 吸力特性和反力特性

(4) 交流电磁机构短路环的作用。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，它是在最大值和最小值为零的范围内脉动变化的。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。

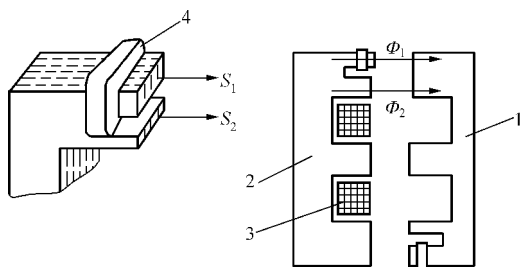


图 1-4 交流电磁铁的短路环

1—衔铁；2—铁心；3—线圈；4—短路环

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 ，在相位上 Φ_1 滞后 Φ_2 ， 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 是 F_1 与 F_2 之和。只要总吸力始终大于反力，就能消除衔铁的震动。

(5) 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 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（也称“继电器特性”）。

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

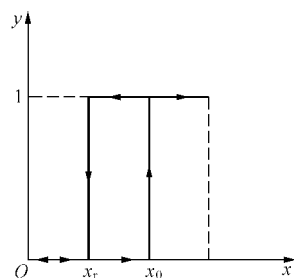


图 1-5 电磁机构的输入—输出特性

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 y 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—输出特性为一矩形曲线。

(二) 触头系统

触头的作用是接通或分断被控电路, 因此要求触头要具有良好的接触性能和导电性能。

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 3 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型触头构成, 由于接触面积小, 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, 他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的过程, 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。

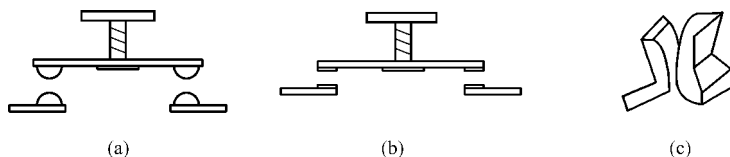


图 1-6 触头的结构形式

(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, 故该触头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。由于接触电阻的存在, 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, 使电气系统发生事故。因此, 规定了各种电器的触头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, 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的变化而引起的。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的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和打磨触头表面。

(三) 电弧的产生与灭弧的方法

1. 火花和电弧的产生

电弧实际上是一种气体放电现象。如果对两触点施加过高的电压，当两触点脱离接触的瞬间，它们之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，其值在 $0.25 \sim 1\text{A}$ ， $12 \sim 20\text{V}$ 之间），在触头间隙中就会产生电弧。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

为了灭弧，其基本方法有：

(1) 拉长电弧，从而降低电场强度。图 1-7 (a) 所示即为靠电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 $150 \sim 250\text{V}$ 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。

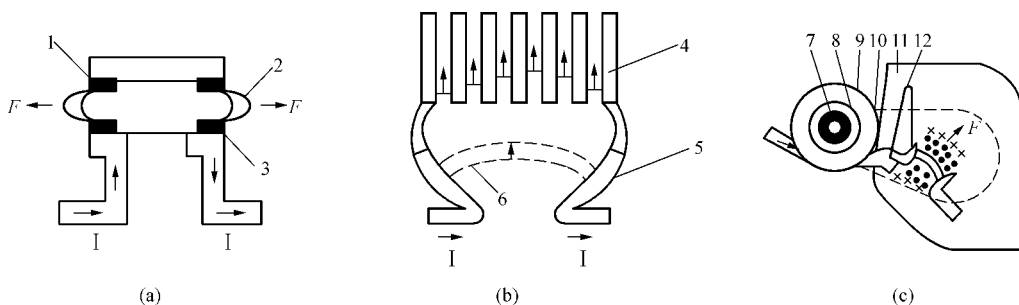


图 1-7 常用灭弧方法原理

(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。其作用是能把电弧分隔为多段，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 $2 \sim 3\text{mm}$ ，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