



职业教育机电类规划教材

第3版

工厂电气控制设备

许蓼 许欣 编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



职业教育机电类规划教材

工厂电气控制设备

第3版

许蓆 许欣 编



机械工业出版社

本书主要内容有常用低压电器, 继电—接触器控制电路基本环节, 常用机床、桥式起重机的电气控制, 可编程序控制器及其工作原理, FX₂ 系列可编程序控制器编程元件及指令系统, 可编程序控制器在逻辑控制系统中的应用等。

本书内容丰富, 重点突出, 新内容较多, 实用性强, 对工厂电气控制设备的运行、维修、常见故障分析以及电器元件的选择进行了讨论, 突出实践技能的培养。

本书为职业教育机电类专业及相关专业的教材, 也可用作电气从业人员和电工培训教材或自学用书, 亦可供有关专业师生、从事现场工作的工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

工厂电气控制设备/许蓼, 许欣编. —3 版. —北京:
机械工业出版社, 2009. 9
职业教育机电类规划教材
ISBN 978 - 7 - 111 - 27646 - 3

I. 工… II. ①许…②许… III. 工厂—电气控制装置—
专业学校—教材 IV. TM571. 2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 117013 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: 高 倩 责任编辑: 张值胜

版式设计: 霍永明 责任校对: 魏俊云

封面设计: 鞠 杨 责任印制: 乔 宇

北京京丰印刷厂印刷

2009 年 8 月第 3 版 · 第 1 次印刷

184mm × 260mm · 15.25 印张 · 1 插页 · 374 千字

0 001—3 000 册

标准书号: ISBN 978 - 7 - 111 - 27646 - 3

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

销售服务热线电话: (010) 68326294

购书热线电话: (010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话: (010) 88379182

封面无防伪标均为盗版

第3版前言

本书自出版以来,受到各校师生和广大读者的支持和青睐,曾在2000年进行了修订。随着电气控制技术的快速发展,工厂电气控制设备采用了一些新技术、新器件,尤其是变频器、可编程序控制器的广泛应用,更使电气控制技术达到新的水平。作为培养生产和社会实践一线岗位所需高素质劳动者和技能型人才的职业教育教材,更应紧跟科学技术的发展,不断反映新技术在生产实际中的应用。为此,再次对本书进行修订。

本书将工厂电气控制设备分为继电—接触器控制系统和可编程序控制器控制系统两大类:前者是一线岗位必备的知识和技能,同时也是后者的基础;后者经过40多年的发展,在工业自动化、生产过程控制、机电一体化、机械制造等方面的应用已非常广泛。本次修订注意了两者的关系和内在联系,做到两者份量适中、合理过渡、有机融合、前呼后应,并力求反映以下特点:

1. 内容合理。从第1版仅介绍可编程序控制器,到第2版可编程序控制器控制系统部分占全书25%,再到本次可编程序控制器控制系统内容占全书的40%。这不仅反映了可编程序控制器应用的发展态势,也符合目前生产一线岗位对可编程序控制器相关知识和技能的要求。

2. 抓住典型。工厂电气控制设备多种多样,可编程序控制器产品也有很多种类,本书以典型机床和桥式起重机电气控制系统为例进行继电—接触器控制系统分析;

以三菱FX₂系列可编程序控制器为典型机型,对小型机的指令系统与编程方法作了较为详细的介绍,以期能够举一反三、触类旁通。

3. 突出重点。继电—接触器控制系统以基本控制环节为重点,可编程序控制器控制系统以编程方法为重点,抓住重点便可带动全局。

4. 重在应用。全书按照由浅入深、淡化理论、结合实际、加强应用的原则编写。全书对多种生产设备电气控制系统进行了分析,列举了大量应用实例,文字简练、通俗易懂、便于教学和自学。

全书共七章。内容包括:常用低压电器,继电—接触器控制电路基本环节,常用机床的电气控制,桥式起重机的电气控制,可编程序控制器及其工作原理,FX₂系列可编程序控制器编程元件及指令系统,可编程序控制器在逻辑控制系统中的应用。

本书为职业教育机电类专业及相关专业教材,也可用作电气从业人员和电工培训教材或自学用书。

本书由河北机电职业技术学院许蓼、北京北广科技股份有限公司许欣编写。

由于编者水平有限,书中难免存在缺点和错误,恳请广大读者批评指正。

编 者
2009年5月

第2版前言

中等专业学校试用教材《工厂电气控制设备》自1991年出版以来,受到各校师生的支持与帮助。随着科学技术的发展,工厂的电气设备采用了一些新技术、新器件,原有的工厂电气控制设备课程的教材已不适应当前工厂的电控现状,应予修订。在广泛征求各校意见并对工厂现状进行调研的基础上,重新编写了本教材。

全书突出了以下两个特点:

一是新:大量收集了更新换代及引进的低压控制电器产品;对电梯作了较为详尽的介绍;详尽地讲述了可编程序控制器。这些都增加了新的内容,另外在工厂电气控制设备上更换了新的型号,全书大部分内容以新的面貌出现。

二是实用:比较全面地提供了新的低压电器的型号和技术参数;对工厂各种电气控制设备的故障及排除方法进行了分析;对电气控制电路的设计方法及施工设计、安装、调整、维修等内容作了全面介绍。对培养学生实践技能具有可操作性,对提高设计与实践技能将起较大作用。

本书共九章。内容包括:常用低压电器,继电接触器控制电路基本环节,常用机床的电气控制,组合机床的电气控制,桥式起重机与交流电梯的电气控制、继电接触器控制系统设计,A系列龙门刨床电气控制,可编程序控制器的结构、基本原理及编程方法,可编程序控制器程序设计与应用设计等。

本书为中等专业学校工业自动化专业的教材,也可作为职业学校和电工培训用的教材,亦可供有关专业师生、从事现场工作的工程技术人员参考。

本书由河北省机电学校许寥编写。

本书由上海大学丁元杰教授主审。在此对本书作出较大贡献的申鸿光、连赛英、薛少初等同志表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,缺点和错误难免,恳请读者提出宝贵意见。

编 者
2000年2月

第1版前言

本书是根据原国家机械工业委员会教育局1987年5月制定的中等专业学校工业企业电气化专业教学计划与《工厂电气控制设备》课程教学大纲编写的。

本书以一般工厂常用典型电气控制设备及其基础知识为重点,阐述并分析了常用低压电器、继电—接触器控制电路基本环节,机床、组合机床及起重运输设备、可编程序控制器及应用、电气放大机自动调速系统基本环节、A系列龙门刨床电气设备等。本书适当增加了继电—接触器控制系统的设计内容,以提高学生对继电—接触器控制系统的设计能力;从交流电梯电气控制典型环节入手,介绍了电梯的结构、电气控制和各种保护;介绍了一种新型工业自动控制装置可编程序控制器,以适应工业发展、技术进步的需要。

全书共9章。内容包括:常用低压电器,继电—接触器控制电路基本环节,常用机床的电气控制,组合机床的电气控制,起重运输设备的电气控制,继电—接触器控制系统的设计,可编程序控制器的应用,电机放大机自动调速系统的基本环节,A系列龙门刨床电气设备等。

本书为中等专业学校工业企业电气化专业的教材,也可供有关专业师生、从事现场工作的工程技术人员参考。

本书由河北省机电学校许寥主编。参加本书编写的有常州机械学校薛少初(编写第一、七章),福建机电学校连赛英(编写第二、四章),其余由许寥编写。

本书由上海大学工学院丁元杰副教授主审。参加讨论与审稿的有申鸿光、罗智英、肖乐恩、王彻、陈达昭、李海青等同志。编者根据审稿意见作了修改,罗智英、肖乐恩两同志提供了部分习题,在定稿过程中赵明同志帮助进行了审定。对于上述同志的支持和帮助,在此表示衷心的感谢。

由于编者水平所限,本书难免存在缺点和错误,恳望读者提出批评和指教。

编 者
1990年6月

目 录

第3版前言	
第2版前言	
第1版前言	
绪论	1
第一章 常用低压电器	3
第一节 常用低压电器基本知识	3
第二节 熔断器	11
第三节 热继电器	15
第四节 电磁式接触器	19
第五节 电磁式电压、电流继电器	24
第六节 时间继电器与速度继电器	33
第七节 低压断路器	41
第八节 主令电器	45
习题	55
第二章 继电—接触器控制电路基本环节	57
第一节 电气图	57
第二节 三相笼型异步电动机直接起动控制电路	62
第三节 三相笼型异步电动机减压起动控制电路	68
第四节 三相绕线转子异步电动机起动控制电路	77
第五节 三相异步电动机电气制动控制电路	82
第六节 三相异步电动机调速控制电路	88
第七节 直流电动机的控制电路	89
习题	93
第三章 常用机床的电气控制	96
第一节 车床的电气控制	96
第二节 磨床的电气控制	99
第三节 摇臂钻床的电气控制	104
第四节 铣床的电气控制	109
第五节 镗床的电气控制	119
习题	125
第四章 桥式起重机的电气控制	126
第一节 桥式起重机概述	126
第二节 提升机构的电气控制	130
第三节 起重机的保护	137
第四节 20/5t 交流桥式起重机电气控制分析	139
习题	142
第五章 可编程序控制器及其工作原理	143
第一节 可编程序控制器概述	143
第二节 可编程序控制器的组成及各部分功能	147
第三节 可编程序控制器的编程语言	150
第四节 可编程序控制器的工作原理	153
习题	156
第六章 FX ₂ 系列 PLC 编程元件及指令系统	157
第一节 FX ₂ 系列 PLC 系统结构及性能	157
第二节 FX ₂ 系列 PLC 的编程元件	160
第三节 FX ₂ 系列 PLC 的基本指令	166
第四节 常用基本环节的编程	174
第五节 FX ₂ 系列 PLC 的步进指令及编程方法	180
第六节 FX ₂ 系列 PLC 的功能指令及编程方法	187
习题	196
第七章 可编程序控制器在逻辑控制系统中的应用	198
第一节 PLC 程序设计方法	198
第二节 PLC 在逻辑控制系统中的简单应用	200
第三节 PLC 在工业自动生产线中的应用	207
第四节 PLC 在机床中的应用	213
第五节 PLC 在机械手控制系统中的应用	221
习题	226
附录	228

附录 A 低压电器产品型号编制方法	228	附录 C FX ₂ 系列 PLC 基本指令和	
附录 B 电气图常用图形及文字符号		功能指令	233
一览表	230	参考文献	235

绪 论

工厂设备类型多样,大多用电动机来拖动,即电力拖动。电力拖动一般采用各种控制系统来实现,按控制方式可分为断续控制系统、连续控制系统和计算机控制系统。本书以前两种控制系统及其设备为主,同时对在集成电路、计算机技术基础上发展起来的新型工业自动化控制装置——可程序控制器,作了较为详尽的介绍。

一、电力拖动控制方式的发展

19 世纪末,在生产机械的拖动系统中,电动机逐渐代替了蒸汽机,出现了电力拖动。在其初期,常以一台电动机拖动多台设备或一台机床的多个运动部件,称为集中拖动。随着生产的不断发展,在 20 世纪 20 年代,电力拖动由集中拖动发展为单独拖动。为了进一步简化机械传动机构,更好地满足生产机械各运动部件的不同拖动要求,在 20 世纪 30 年代出现了多电动机拖动,即生产机械各运动部件分别采用不同的电动机拖动。这种多电动机拖动简化了生产机械的结构,使其工作性能日趋完善,更为重要的是为生产机械的自动化控制创造了良好条件。此外,自动检测技术的迅猛发展也对电气自动控制技术的发展起促进作用。

最初的自动控制是用数量不多的继电器、接触器及保护元件组成的继电—接触器控制系统。这种控制系统具有使用上的单一性,即一台控制装置只适用于某一固定程序的设备,若程序发生变动,必须重新接线。而且这种控制系统的输入、输出信号只有通和断两种状态,是断续的,不能连续反映信号的变化,故称为断续控制系统。

为了使控制系统获得更好的静态与动态特性,完成更复杂的控制任务,常采用反馈控制系统。反馈控制系统由连续控制元器件组成,它不仅能反映信号的通与断,而且能反映信号的大小和变化。这种由连续控制元件组成的反馈控制系统,称为连续控制系统。用作连续控制的元器件有电机扩大机、磁放大器、晶闸管等,尤其是晶闸管连续控制系统的应用越来越广泛。

20 世纪 60 年代出现了一种能够根据生产需要,灵活地改变控制程序的顺序控制器,使控制系统具有了较大的灵活性和通用性,但这种顺序控制器仍采用硬件手段实现,装置体积大,功能也受到一定限制。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——可程序控制器。它不仅充分利用微处理器的优点来满足各种工业领域的实时控制要求,同时也照顾到目前电气操作维护人员的技能和习惯,摒弃了微处理器常用的计算机编程语言的表达形式,独具风格地形成一套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,使用户编制的程序清晰直观、方便易学,且调试和查错容易。目前已作为一种标准化通用设备普遍应用于工业控制。

随着计算机技术的发展,20 世纪 40 年代末,出现了数控机床,它根据计算机按照预先编好的程序,实现机床自动化数字控制。随着价格便宜的微型计算机的出现,数控机床得到了很快的发展,先后出现了硬件逻辑电路构成的专用数控装置 NC、小型计算机控制的数控系统 CNC、计算机群控系统 DNC、自适应控制系统 AC、微型计算机数控系统 MNC,近年来还出现了柔性制造系统 FMS。而最新发展起来的以数控机床为基本单元的计算机集成制造

系统，即 CIMS，可以实现无人自动化工厂的自动生产。

在工业发达国家，可编程序控制器、机器人和数控机床已成为现代控制的三大支柱。

二、课程的性质和任务

本课程是一门实践性强的主要专业课，是在学习了“电机原理”、“电力拖动基础”，并进行了电工劳动实践的基础上讲授的，以使學生具有较牢固的基础理论知识和较强的感性认识。

本课程的基本任务是：

1. 熟悉常用低压电器的基本结构、工作原理、用途及型号意义，能正确使用和选用。
2. 熟练掌握电气控制电路的基本环节，具有分析一般电气控制电路的能力。
3. 掌握典型生产机械电气控制电路的工作原理和故障分析知识。
4. 具有改进一般生产机械电气控制电路的电气设计和施工能力。
5. 掌握可编程序控制器梯形图设计、编程方法和程序设计，并能进行一般应用程序设计。

本课程除课堂教学外，还有实验、现场教学、课程设计、生产实习与实训、毕业设计等实践性教学环节。通过学习使学生不仅掌握电气技术人员所必备的基本理论知识，而且还具有维修电工电气安装、调试和排除故障的能力；具有一般生产机械电气控制设备改造的能力。学习时一定要理论联系实际，勤动手、善动脑，不断提高分析能力和实践动手能力，才能获得最佳效果。

第一章 常用低压电器

凡用于交流电压 1200V 及以下、直流电压 1500V 及以下，在由供电系统和用电设备等组成的电路中，起通断、保护、控制、检测、变换和调节用的电器统称为低压电器。在低压供电系统与电力拖动自动控制系统中，广泛使用着各种类型的低压电器。低压电器的特点是：品种多、用量大、用途广。

第一节 常用低压电器基本知识

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。按不同的分类方式，可以分为不同的类型，通常按用途、操作方式、工作原理、使用场合的不同，低压电器可分为以下几类。

1. 按用途分类

(1) 低压配电电器 用在低压供、配电系统中进行电能输送和分配的电器，如刀开关、转换开关、低压断路器、熔断器等。对这类电器要求分断能力强，限流效果和保护性能好，有良好的动稳定及热稳定性。

(2) 低压控制电器 用在电力拖动控制系统中的电器，如接触器、控制继电器、起动器、控制器、主令电器等。对这类电器的要求为具有一定的通断能力，操作频率高，电气和机械寿命长。

2. 按操作方式分类

(1) 自动电器 通过电磁或气动机构动作来完成接通、分断、起动和停止等动作的电器。主要有接触器、继电器、断路器等。

(2) 手动电器 依靠人力来完成接通、分断、起动和停止等动作的电器。主要有刀开关、转换开关和主令电器等。

3. 按工作原理分类

(1) 电磁式电器 该电器的感测元件接受的是电流或电压等电量信号。

(2) 非电量控制电器 该电器的感测元件接受的是热量、温度、转速、机械力等非电量信号。

4. 按使用场合分类

有一般工业用电器、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。

低压电器产品多种多样，不同类型产品用不同型号表示，其型号类组代号见附录 A 低压电器产品型号编制方法。我国编制的低压电器产品型号适用于 13 大类产品：刀开关、转换开关、熔断器、断路器、控制器、接触器、起动器、控制断路器、主令电器、电阻器、变阻器、调整器、电磁铁和其他电器等，并用字母 H、R、D、K、C、Q、J、L、Z、B、T、M

和 A 分别表示这 13 大类电器产品。

二、电磁式低压电器的结构与工作原理

从结构上看,低压电器一般都具有两个基本组成部分,即感测部分与执行部分。感测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,输出相应的指令,驱动执行部分动作,实现控制的目的。对于有触头的电磁式低压电器,感测部分是电磁机构,执行部分是触头系统。

1. 基本机构

(1) 电磁机构

1) 电磁机构的结构型式。电磁机构由线圈、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,使衔铁在电磁吸力作用下产生机械位移并吸合,从而带动触头动作,以实现触头的断开和闭合,控制电路的分断和接通。图 1-1 所示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不同,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。

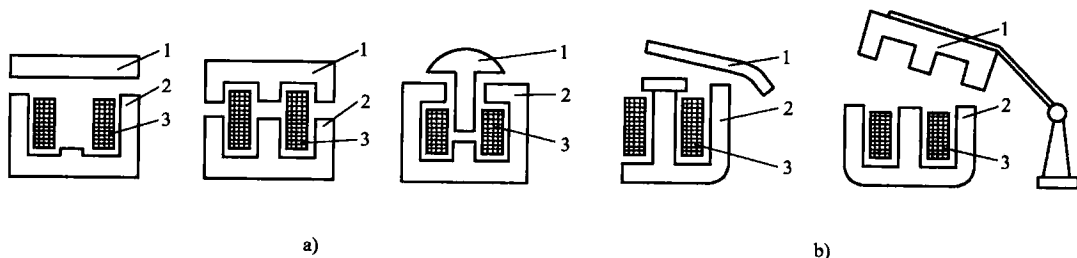


图 1-1 几种常用电磁机构的结构型式

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

2) 线圈。线圈用以将电能转换为磁能,按线圈通入电流的性质不同,电磁机构分为直流电磁机构和交流电磁机构,相应线圈称为直流线圈和交流线圈。直流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,将铁心和线圈隔开,并将线圈做成短而厚的矮胖型。另外,根据在电路中的连接方式不同,线圈又分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) 触头系统 触头亦称触点,是电磁式低压电器的执行部分,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低压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。触头能否正常工作,将直接影响整个低压电器的工作性能。

1) 电接触与接触电阻。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的工作情况。接触电阻较大,电流流过触头时将造成较大的电压降,这将对弱电控制系统产生较大影响。同时由于电阻损耗电能,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。触头接触电阻的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。

2) 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 1-2 所示。

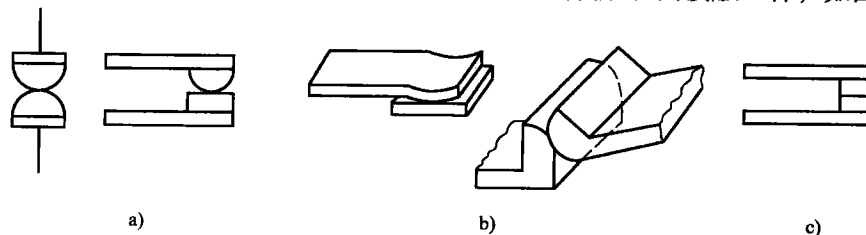


图 1-2 触头的接触形式

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、断为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,多用于中等容量的电器。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。

3) 触头的结构形式。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,在触头上装有触头弹簧,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。

触头按其原始状态不同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)。原始状态时闭合,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。

按触头控制的电路不同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 1-3 所示。

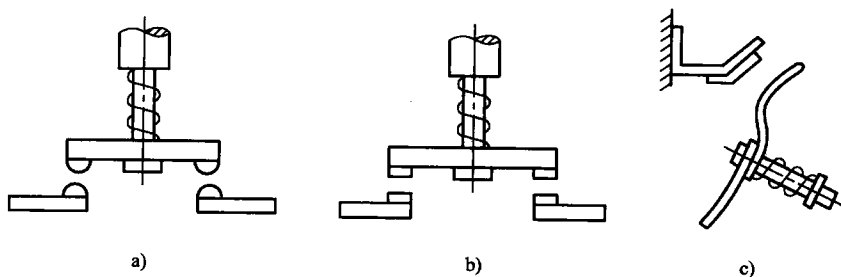


图 1-3 触头的结构形式

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,能除掉触头表面的氧化膜,从而减小触头的接触电阻,一般采用线接触。

4) 减小接触电阻的方法。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；增加触头的接触压力，一般在动触头上安装触头弹簧；改善触头表面状况，尽量避免或减少触头表面氧化膜的形成，在使用过程中尽量保持触头清洁。

2. 电磁机构工作原理

(1) 电磁机构反力特性与吸力特性 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，衔铁还受到弹簧的反作用拉力，只有当电磁吸力大于弹簧反作用拉力时，衔铁才可靠地被铁心吸住。而当线圈断电时，电磁吸力消失，衔铁在弹簧作用下与铁心脱离，即衔铁释放。电磁机构的工作特性常用反力特性和吸力特性来表述，如图 1-4 所示。

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。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。

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 F 与其机械变形的位移量 δ 成正比，故其反力特性可写成

$$F_n = K_1 X \quad (1-1)$$

考虑了常开触头闭合时超行程机构的弹力作用后，弹簧的反力特性曲线如图 1-4a 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。

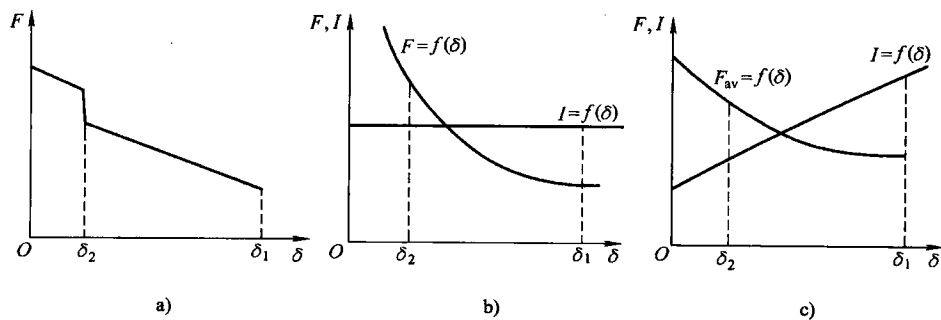


图 1-4 电磁机构反力特性与吸力特性

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

2) 吸力特性。直流电磁机构和交流电磁机构的吸力特性分别如图 1-4b、c 所示。

① 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 为电磁机构衔铁所受的吸力 (N)； B 为气隙中的磁感应强度 (T)； S 为吸力处端面积 (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

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

直流电磁机构当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。由此看出, 衔铁闭合前后吸力变化很大, 气隙越小、吸力越大。但衔铁吸合前后线圈励磁电流不变, 且衔铁吸合后电磁吸力大, 工作可靠, 故直流电磁机构适用于动作频繁的场合。但当直流电磁机构线圈断电时, 由于电磁感应, 线圈中将会产生很大的反电势, 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, 常在线圈两端并联一个放电电阻与一个硅二极管, 形成一个放电回路。正常励磁时, 因二极管处于截止状态, 放电回路不起作用; 而当线圈断电时, 放电回路导通, 将原先贮存在线圈中的磁场能量释放出来消耗在电阻上, 不至于产生过电压。一般情况下, 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。交流电磁机构线圈的电阻值远比其感抗值要小, 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 为线圈电压 (V); E 为线圈感应电势 (V); f 为线圈电压的频率 (Hz); N 为线圈匝数; Φ_m 为气隙磁通最大值 (Wb)。

当线圈电压 U 、频率 f 和线圈匝数 N 为常数时, 气隙磁通 Φ_m 亦为常数。当交流励磁时, 电压、磁通都随时间作正弦规律变化, 电磁吸力也相应的作周期性变化。

经分析可知, 交流磁感应强度 B 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} , 其值为最大吸力的一半, 即 $F_{av} = 4B^2 S \times 10^5$; 另一部分为以两倍电源频率变化的交流分量 $F_- = 4B^2 S \times 10^5 \cos 2\omega t$ 。所以交流电磁机构电磁吸力

$F = F_{av} - F_-$ 随时间变化情况如图 1-5 所示。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。

由上分析可知, 交流电磁机构的吸力特性具有以下特点:

$F(t)$ 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, 产生机构噪声和机械损坏, 应加以克服; 因 $U = 4.44fN\Phi_m$, 当 U 一定时, Φ_m 也一定, 也就是不管有无气隙, Φ_m 基本不变, 所以交流电磁机构吸力平均值基本不变, 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, 平均吸力 F_{av} 随气隙 δ 的减少而略有增加);

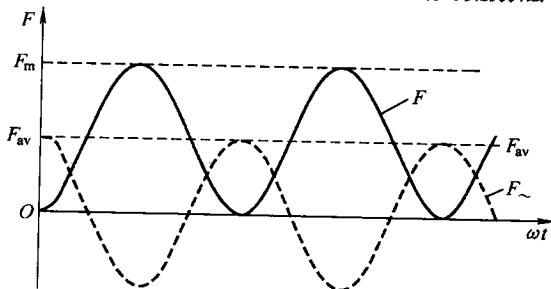


图 1-5 交流电磁机构电磁吸力随时间变化情况

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(线圈电流)比吸合后无气隙时所需的电流大得多。对于U形交流电磁机构来说,衔铁尚未动作时的励磁电流为衔铁吸合后的额定电流的5~6倍;对于E形电磁机构则高达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合断,都将因励磁电流过大而烧坏线圈。所以交流电磁机构不适用于可靠性要求高与操作频繁的场所。

③剩磁的吸力特性。铁磁物质存有剩磁,导致电磁机构的励磁线圈断电后仍有一定的剩磁吸力,剩磁吸力随气隙 δ 增大而减小,其特性如图1-6中曲线4所示。

3) 吸力特性与反力特性的配合。电磁机构如欲使衔铁吸合,则应在整个吸合过程中,吸力都大于反力,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二者尽可能靠近。在释放衔铁时,电磁机构的反力必须大于剩磁吸力,这样才能保证衔铁可靠释放,即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1-6所示。

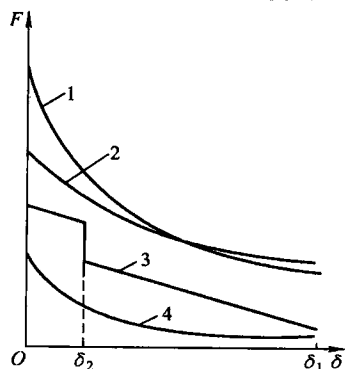


图1-6 电磁机构吸力特性与反力特性的配合

- 1—直流电磁机构吸力特性
2—交流电磁机构吸力特性
3—反力特性 4—剩磁吸力特性

(2) 交流电磁机构短路环的作用 交流电磁机构的电磁吸力是一个周期函数,该周期函数由直流分量和频率为 $2f$ 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,它在最大值 $2F_m$ 和最小值0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,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1-7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,铁心端面处就有二个不同相位的磁通 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。

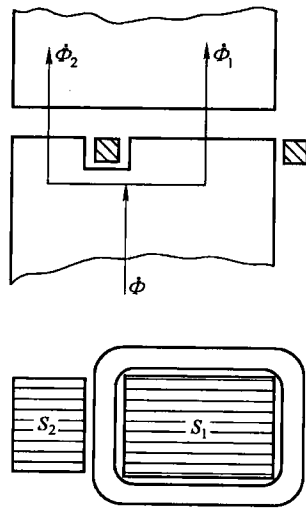


图1-7 交流电磁机构短路环

(3) 电磁机构的输入—输出特性 电磁机构的线圈加上电压(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 ,这样电磁机构衔铁位置(吸合与释放)与线圈电压(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 $y=1$,处于释放位置记作 $y=0$ 。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。将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; 将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 1-8 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, 衔铁被吸合, 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, 衔铁不会被释放, 其输出量 $y = 1$ 。当 $x = x_r$ 时, 因吸力小于反力, 衔铁被释放, 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。

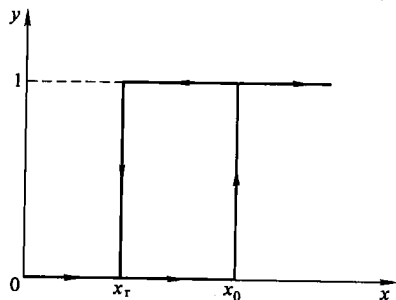


图 1-8 电磁机构的继电特性

3. 电弧的产生和灭弧方法

(1) 电弧的产生过程 触头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 (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) 电弧的产生原因 电弧产生的原因主要经历 4 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又撞击其他原子, 使触头间隙中的气体电荷越来越多, 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, 一部分电子将有足够动能从阴极表面逸出, 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时, 气体分子热运动速度加快, 当电弧温度达到或超过 3000℃ 时, 气体分子进行强烈的不规则热运动并相互碰撞, 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撞击电离, 热电子发射和高温游离, 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复合成为中性粒子。对于消电离只有在带电粒子运动速度较低时才有可能。