



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

工业电气控制技术

(第二版)

主 编 邓 力 余传祥
副主编 张 莲



科学出版社

“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

工业电气控制技术

(第二版)

主 编 邓 力 余传祥

副主编 张 莲

参 编 刘 帅 串 禾

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书第二版为“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材。本书以传统的继电器控制技术为基础,从典型的接触器-继电器控制线路出发,引出可编程控制器(PLC)在工业机械控制中的应用。全书共8章,主要内容有:电器的基本知识、常用电器、电气控制线路的基本控制环节、工业电器控制系统的设计、电气控制系统、可编程控制器、可编程序控制器在电气控制系统中的应用及软件使用和可编程控制器在数控机床中的应用及实例分析。

本书可作为普通高校本科电气信息类、机电类专业课程的教材,也可作为电气工程设计人员的技术参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

工业电气控制技术/邓力,余传祥主编. —2版. —北京:科学出版社,2013.8

“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

ISBN 978-7-03-124278-9

I. ①工… II. ①邓…②余… III. ①电气控制-高等学校-教材 IV. ①TM571.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 179537 号

责任编辑:余 江 张丽花/责任校对:胡小洁

责任印制:闫 磊/封面设计:迷底书装

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新科印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2007年8月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2013年8月第 二 版 印张:19 3/4

2013年8月第八次印刷 字数:486 000

定价:39.90 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

电气控制技术是以实现生产过程自动化为目的的控制技术。为了改善人们在生产和生活中的条件,大幅度提高全社会生产和再生产的效率,电气控制技术被广泛应用于各个工业部门以及各种需要动力的场合中。随着现代科学技术的飞速发展和高科技生产技术的广泛应用,工业电气控制技术也发生了根本性的变化,从传统的继电器控制技术已逐步过渡到可编程控制技术。可编程控制器(PLC)作为一种新型自动化控制装置,始终处于工业控制自动化领域的主战场,为各种各样的自动化控制设备提供非常可靠的控制方案。

本书第二版作为“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材,仍以传统的继电器控制技术为基础,从典型的电气控制线路的基本控制环节出发,使学生初步了解工厂电气控制的目的和要求;通过可编程控制器在工业电气控制中的应用,让学生掌握控制程序的编程方法,培养学生具有将 PLC 应用于实践的设计开发能力。在掌握典型工业机械设备的继电器控制系统的基础上,力求做到让学生既能熟练掌握最基本的继电器控制系统的分析设计方法,又能对现代最新电气控制技术有更多的了解,书中还增加了可编程控制器(PLC)编程软件介绍和 PLC 在数控机床应用中的典型实例。为使学生能更深入地了解电器的工作原理和构成方式,本书还加入了电接触和电弧理论知识介绍。为适应现代工业发展的需要,书中还对高压配电电器以及电子电器、智能电器等新型电器作了简单的介绍。

本书第 1 章电器的基本知识,着重介绍了电磁式电器的工作原理以及电接触理论和开关电弧理论(本章中有些内容是选学的,用小号字加以区分)。第 2 章讲述常用电器,在介绍了接触器、控制继电器、控制按钮、行程开关、转换开关、万能转换开关、熔断器、热继电器等传统低压电器后,还对高压配电电器、电子电器和智能电器作了简单的介绍。第 3 章电气控制线路的基本控制环节,重点介绍了三相鼠笼异步电动机直接启动和降压启动的几种典型控制电气原理图,并按照循序渐进的学习规律,从点动控制、连续运行控制、多地控制、顺序控制、正反转控制、行程控制到往返控制,逐步增加控制功能和完善控制电路的保护环节。同时还详细介绍了绕线式异步电动机的几种典型的启动控制线路,并引出了按时间控制原则和电流控制原则进行控制的设计方法。三相异步电动机的调速主要介绍了变极调速中 D-YY 两级调速控制原理和电气原理图。三相异步电动机的制动控制分别介绍了电磁抱闸制动、反接制动和能耗制动三种制动控制线路,并在控制线路中介绍了按速度原则控制的设计方法。在本章最后一节介绍了直流电动机的启动、正反转、调速和制动等典型控制环节的电气控制原理图。在第 4 章工业电气控制系统的设计中,介绍了电气控制线路设计的基本原则、基本程序、基本设计方法和电气控制系统的常规保护,并以 GB 4728—1984《电气图用图形符号》、GB 6988—1987《电气制图》和 GB 7159—1987《电气技术中的文字符号制定通则》的规定为标准,介绍了电气控制线路的绘制方法。第 5 章电气控制系统不仅对车床、铣床、镗床以及起重机的电气控制系统作了分析和介绍,还介绍了几种继电器-接触器控制线路的故障检查方法。第 6 章对可编程控制器的硬件配置和西门子 S7-200 PLC 的编程作了介绍。第 7 章在介绍 PLC 控制系统的基本设计步骤之后,对 PLC 在电动机的基本控制环节编程方法和程序实例进行了详细的讲解,为学习 PLC 奠定了工程应用基础;为了说明 PLC 功

用的强大和在工业控制领域中的应用广泛，还着重介绍了 PLC 在几种机床控制中的应用以及用 PLC 实现模拟量采集、机械手、供水塔、洗衣机、电梯、交通灯等控制；在本章的最后还介绍了 WinCC 组态软件以及编程软件 STEP7-Micro/WIN 的使用。第 8 章以 FANUC 数控系统为对象，介绍了数控机床中最常见的急停处理、工作方式选择、系统运行功能控制、速度倍率修调、手动进给、手轮进给、自动润滑、工作冷却等 PLC 编程实例，通过这些实例可以全面理解 PLC 在数控机床中的应用及数控机床 PLC 的编程方法。

本书由重庆大学吕厚余教授和刘和平教授主审，吕厚余教授和刘和平教授对本书提出了许多宝贵意见，在此我们表示诚挚的感谢。

本书由重庆大学邓力、余传祥任主编，重庆理工大学张莲任副主编。第 1、2、3 章由邓力编写，第 4、5 章由张莲编写，第 6 章由余传祥编写，第 7 章由重庆大学余传祥和申禾编写，第 8 章由四川职业技术学院刘帅编写。在本书的编写过程中，得到了科学出版社编辑的大力支持和帮助，在此我们表示衷心的感谢。

由于编者的水平有限，书中难免有疏漏和不足之处，敬请读者批评指正。

编 者

2013 年 5 月

目 录

前言

第 1 章 电器的基本知识	1
1.1 电器概述	1
1.1.1 电器的分类	1
1.1.2 电器产品的发展	2
1.1.3 新技术在电器设计和开发中的应用	4
1.2 电器的基本理论	5
1.2.1 电磁式电器的工作原理	5
1.2.2 电接触理论	11
1.2.3 开关电弧理论	20
本章小结	31
习题	31
第 2 章 常用电器	32
2.1 控制电器	32
2.1.1 接触器	32
2.1.2 控制继电器	35
2.2 主令电器	41
2.2.1 控制按钮和指示灯	41
2.2.2 行程开关	43
2.2.3 转换开关和万能转换开关	45
2.3 保护电器	47
2.3.1 熔断器	47
2.3.2 热继电器	50
2.3.3 漏电保护器	52
2.4 配电电器	53
2.4.1 低压配电电器	53
2.4.2 高压配电电器	57
2.5 新型电器	61
2.5.1 电子电器	61
2.5.2 智能电器	65
本章小结	67
习题	68
第 3 章 电气控制线路的基本控制环节	69
3.1 三相鼠笼式异步电动机启动控制	69
3.1.1 直接启动控制	69

3.1.2 降压启动控制	77
3.2 三相绕线式异步电动机启动控制	81
3.2.1 转子绕组串电阻启动控制	81
3.2.2 转子绕组串频敏变阻器启动控制	83
3.3 三相异步电动机调速控制	85
3.3.1 改变定子绕组接线变极对数的原理	85
3.3.2 D-YY 调速控制	86
3.4 三相异步电动机制动控制	87
3.4.1 电磁抱闸制动	87
3.4.2 反接制动控制	88
3.4.3 能耗制动控制	90
3.5 直流电动机控制线路	92
3.5.1 启动控制	93
3.5.2 正反转控制	94
3.5.3 调速控制	95
3.5.4 制动控制	96
本章小结	97
习题	97
第4章 工业电气控制系统的设计	99
4.1 电气控制线路设计的基本原则	99
4.1.1 满足生产机械和工艺对电气控制系统要求原则	99
4.1.2 控制线路力求简单、经济原则	99
4.1.3 保证电气控制电路工作的可靠性原则	101
4.1.4 保证电气控制电路工作的安全性原则	104
4.1.5 操作、维护、检修方便原则	106
4.2 电气控制线路设计的基本程序	107
4.2.1 拟定电气设计任务书	107
4.2.2 电力拖动方案的选择	107
4.2.3 电动机的选择	109
4.2.4 电气控制方案的确定	110
4.2.5 控制方式的选择	110
4.3 电气控制线路的设计方法	111
4.3.1 经验设计法	111
4.3.2 逻辑设计法	114
4.4 电气控制线路的绘制方法	121
4.4.1 常用的电气图形、文字符号	121
4.4.2 电气原理图的绘制	122
4.4.3 电器元件布置图	125
4.4.4 电气接线图的绘制	125
本章小结	126

习题	127
第 5 章 电气控制系统	128
5.1 车床电气控制系统	128
5.1.1 结构和工作要求	128
5.1.2 控制要求	129
5.1.3 电气控制电路	129
5.2 铣床电气控制系统	134
5.2.1 主要结构和运动方式	134
5.2.2 控制要求	135
5.2.3 电气控制电路	136
5.3 镗床电气控制系统	141
5.3.1 主要结构和运动方式	141
5.3.2 控制要求	142
5.3.3 电气控制电路	143
5.4 起重机电气控制系统	146
5.4.1 概述	146
5.4.2 15/3t 桥式起重机整机控制线路的分析	148
5.4.3 凸轮控制器控制线路	148
5.4.4 主令控制器控制线路	153
5.4.5 起重机电气控制中的保护设备	159
5.5 继电器-接触器控制线路故障分析与检查	162
5.5.1 电压测量法	162
5.5.2 电阻测量法	163
5.5.3 短接法	164
5.5.4 开路法	165
5.5.5 电流法	165
本章小结	165
习题	166
第 6 章 可编程控制器	167
6.1 概述	167
6.1.1 发展历史	167
6.1.2 性能特点	168
6.1.3 应用及发展趋势	170
6.2 可编程控制器的硬件配置	172
6.2.1 基本组成	172
6.2.2 分类	177
6.2.3 基本工作原理	178
6.2.4 性能指标	179
6.3 西门子 S7-200 系列可编程控制器简介	180
6.3.1 S7-200 系统的基本组成	180

6.3.2	S7-200 系列 PLC 的主要技术指标	182
6.4	可编程逻辑控制器程序设计	184
6.4.1	编程语言	184
6.4.2	S7-200 编程的基本概念	186
6.4.3	S7-200 的编程元件	187
6.4.4	S7-200 基本指令系统	193
6.4.5	梯形图设计方法	199
	本章小结	210
	习题	211
第 7 章	可编程序控制器在电气控制系统中的应用及软件使用	214
7.1	可编程序控制器控制系统设计的基本步骤	214
7.2	可编程序控制器在电机控制中的应用	215
7.2.1	异步电动机的降压启动控制	215
7.2.2	异步电动机的调速	216
7.2.3	步进电机的控制	220
7.3	可编程序控制器在机床控制系统中的应用	221
7.3.1	车床控制	221
7.3.2	铣、镗床控制	222
7.4	可编程序控制器在其他控制系统中的应用	225
7.4.1	机械手控制	225
7.4.2	模拟量采集	228
7.4.3	PLC 在楼宇自动化和家用电器中的应用	231
7.4.4	PLC 在交通灯控制中的应用	238
7.5	PLC 软件的使用	239
7.5.1	STEP7-Micro/WIN 编程软件的使用	239
7.5.2	WinCC 组态软件的介绍	246
	本章小结	247
	习题	247
第 8 章	可编程序控制器在数控机床中的应用	248
8.1	数控机床及其 PLC 概述	248
8.1.1	数控系统及数控机床	248
8.1.2	数控机床控制系统结构	248
8.1.3	PLC 在数控机床中的作用及应用形式	250
8.1.4	PLC 与数控系统及数控机床间的信息交换	251
8.2	FANUC 数控 PMC 简介	251
8.2.1	FANUC 数控 PMC 性能规格	252
8.2.2	FANUC 数控 PMC 编程地址	253
8.2.3	FANUC 数控 PMC 程序结构及执行原理	255
8.2.4	FANUC 数控 PMC 编程方法	257
8.3	FANUC PMC 编程实例	260

8.3.1 机床急停处理	261
8.3.2 数控机床工作方式选择编程	263
8.3.3 系统运行功能控制	265
8.3.4 速度倍率修调控制	272
8.3.5 手动进给控制	278
8.3.6 手轮进给控制	280
8.3.7 数控车床主轴换挡控制	284
8.3.8 用户报警信息显示	285
8.3.9 数控机床润滑控制	287
8.3.10 工件冷却控制	291
本章小结	295
习题	295
参考文献	297
附录 A 低压电器产品的型号	299
附录 B FANUC PMC 编程指令表	302

第 1 章 电器的基本知识

什么是电器？广义地说，凡是电气器具均可称为电器。但工业上所说的电器是指能依据操作信号或外界现场信号的要求，自动或手动接通或断开电路，连续或断续地改变电路参数，以实现电路或用电设备的切换、控制、保护、检测、变换和调节的元件、设备及电工装置。简而言之，电器就是一种能控制电的工具。按我国电工行业的习惯，电机和变压器属于生产和变换电能的机械，不包括在电器之列。

1.1 电器概述

1.1.1 电器的分类

电器是伴随着电能的生产和应用而产生的，电器对电能的生产、输送、分配与应用起着控制、调节、检测和保护的作用，它是输配电和用电系统可靠运行的基础和重要保证，在国民经济中，有着不可代替的地位和作用。如今电器已成为现代工业过程自动化的重要基础元件，是组成电气成套设备的基础配套元件。无论是在工业、农业和交通运输业，还是科研、军事部门都需要大量的各种各样的电器。具有如此广泛用途的电器，其品种规格和分类方法必然很多。

1. 按工作电压等级分

(1) 低压电器：工作电压在交流 1200V 或直流 1500V 以下的各种电器，如接触器、控制器、启动器、刀开关、自动开关、低压熔断器、继电器、电阻器、主令电器等。

(2) 高压电器：工作电压高于交流 1200V 或直流 1500V 的各种电器，如高压断路器、隔离开关、高压熔断器、避雷器等。

特别值得一提的是在用电过程中，必须注意电器安全，如果稍有麻痹或疏忽，就可能造成设备事故甚至造成严重的人身触电事故，或者引起火灾或爆炸，给国家和人民带来极大的损失。人们可根据场所特点，采用我国 GB 3805—1983 安全电压标准。安全电压是防止触电事故而采用特定电源供电的电压系列。标准规定的安全电压额定值为 42V、36V、24V、12V、6V，适用的情况为：

(1) 42V 可供有触电危险的场所使用，如手持式电动工具等的使用。

(2) 36V 可供在矿井、多导电粉尘等场所使用的行灯等使用。

(3) 24V、12V、6V 可供某些人体可能偶然触及的带电体的设备选用。

例如，为了确保人身安全，在大型锅炉、金属容器内工作时一定要使用 12V 或 6V 低压行灯；理发用的电推子，儿童的电动玩具都采用 12V 和 24V 的安全电压。注意 GB 3805—1983 安全电压标准的安全电压等级系列不适用于水下等特殊场所，也不适用于插入人体内部的带电医疗设备。

2. 按动作原理分

(1) 手动电器：需要人工直接操作才能完成指令任务的电器，如刀开关、控制按钮、控制器、转换开关等。

(2) 自动电器：不需要人工操作，而是按照电或非电信号自动完成指令任务的电器，如交直流接触器、继电器、高压断路器等。

3. 按用途分

(1) 控制电器：用于各种控制电路和控制系统的电器，如接触器、各种控制继电器、控制器、启动器等。

(2) 主令电器：用于自动控制系统中发送控制指令的电器，如控制按钮、行程开关、万能转换开关等。

(3) 保护电器：用于保护电路及用电设备的电器，如熔断器、热继电器、各种保护电器、避雷器等。

(4) 配电电器：用于电能的输送和分配的电器，如高压断路器、隔离开关、刀开关、断路器、自动开关等。

(5) 执行电器：用于完成某种动作或传动功能的电器，如电磁铁、电磁离合器等。

4. 按工作原理分

(1) 电磁式电器：依据电磁感应原理来工作的电器，如交直流接触器、各种电磁式继电器等。

(2) 非电量控制电器：电器的工作是依靠外力或某种非电物理量的变化而动作的电器，如刀开关、行程开关、按钮、速度继电器、压力继电器、温度继电器等。

5. 按电器的执行机构特点分

(1) 有触点电器：电器通断电路的功能由触点来实现，如刀开关、接触器等。

(2) 无触点电器：电器通断电路的功能不是通过机械接触，而是根据输出信号的高低实现的（半导体器件的开关效应，如可控硅的导通和阻断、三极管的饱和截止来实现电路的通断），如固态继电器、接近开关等。

1.1.2 电器产品的发展

1. 我国电器产品的发展历程

我国 20 世纪 50 年代以前几乎没有电器的制造业，因此目前我国的低压电器产品大致可分为三代。

20 世纪 60~70 年代：我国推出的第一代电器产品是在完全模仿苏联的基础上设计开发的，以交流接触器、断路器 CJ10、DZ10、DW10 为代表，如图 1.1 所示，它们为我国低压配电和控制系统的发展起到了开创作用。这一代产品的特点是结构尺寸大、材料消耗多、性

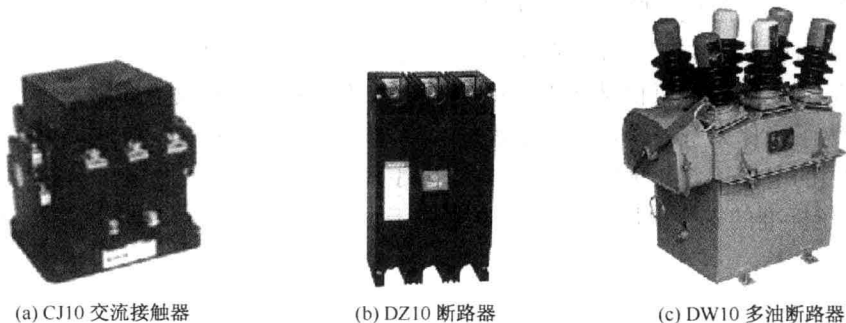


图 1.1 第一代电器

能指标不理想、品种规格不齐全，约有 29 个系列产品。总体技术性能相当于国外 50 年代水平，有的甚至是 40 年代的水平，第一代产品将逐步退出历史舞台。

20 世纪 70~80 年代：第二代产品以交流接触器、断路器 CJ20、DZ20、DW15 为代表共 56 个系列，如图 1.2 所示。第二代产品是更新换代和引进国外先进技术制造的，除了传统低压电器外，新型电器主要发展限流电器、真空电器、漏电电器、电子电器，其技术指标明显提高，保护特性较完善，体积缩小，结构上适应成套装置要求。这批产品总体技术性能水平相当于国外 70 年代末、80 年代初的水平，是我国低压电器的支柱产品。



图 1.2 第二代电器

20 世纪 90 年代：第三代产品是以交流接触器、断路器 CJ40、DZS、DW45 为代表的 10 多个系列，如图 1.3 所示。它们是我国跟踪国外新技术自行开发试制的，产品性能优良、工作可靠、体积小，具有电子化、智能化、组合化、模块化、多功能化等特点，其总体技术性能达到或接近国外 80 年代末、90 年代初水平。

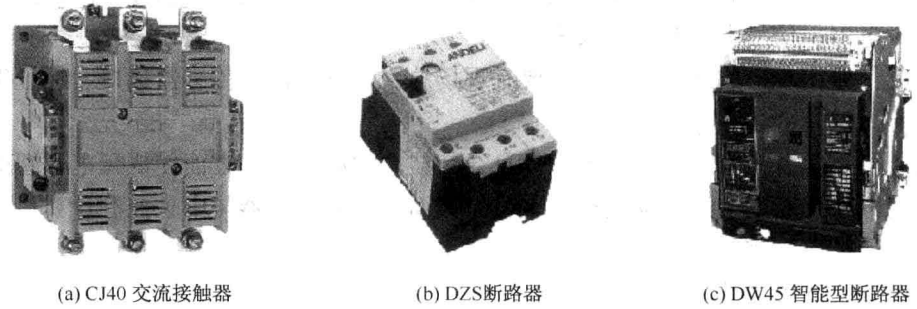


图 1.3 第三代电器

2. 电器产品的发展趋势

近年来，电器的设计、研制和开发进入了一个崭新的时代。传统的有触点电器在结构原理、最佳结构设计和应用新材料、新工艺方面不断创新和完善，真空电器、半导体电器、新型电器以及微电子技术和电器技术相结合的机电一体化电器也在开拓发展中。随着计算机信息网络的发展，低压配电系统和电动机控制已统一形成了智能化监控、保护与信息网络系统。一方面使低压电器具有智能化的功能，另一方面采用计算机网络控制的低压电器均要求能与中央控制计算机进行通信，为此，各种基于现场总线技术，具有通信功能的可通信电器应运而生，电器产品向着组合化、成套化和智能化发展。

1.1.3 新技术在电器设计和开发中的应用

1. 三维计算机辅助设计系统

三维计算机辅助设计系统集成设计、制造和分析于一体,设计者可在三维空间完成零部件设计和装配,实现设计与制造的自动化与优化,并在此基础上自动生成工程图纸。三维计算机辅助设计系统的应用不仅能大幅度缩短开发周期与开发费用,提高产品性能与缩小体积,它的辅助制造部分还能自动完成零件的模具设计和加工工艺,并生成相应的数控代码,直接带动数控机床。

三维计算机辅助设计系统的分析仿真部分可对产品进行应力分析、对产品的机构进行静态和动态特性分析,甚至能进行热场和电磁场的计算,并能通过分析使产品的设计达到优化,获得最佳的性能和最小的体积。

2. 低压电器专用计算机应用软件

为了完善和提高设计效率,除建立必需的数据、符号、标准元件库外,还需要一些专用分析、计算软件,如磁系统三维分析、计算软件包、电器开关特性的计算机模拟和仿真、低压电器合闸和分断过程动态仿真、电磁机构和触头运动过程动态仿真、电弧产生与熄灭过程的动态仿真、样机测试等软件包。

3. 计算机网络系统的应用

进入 20 世纪 90 年代,随着计算机通信网络的发展,低压电器与控制系统已形成了智能化监控、保护与信息网络。它由智能化电器、监控器、中央计算机包括可编程控制器(PLC)及网络元件四部分组成。

监控器:在网络中起参数测量、显示和某些保护功能,还具有通信接口的作用,代替了传统的指令电器、信号电器和测量仪表。

网络元件:用于形成通信网络,主要有现场总线、操作器与传感器接口、地址编码器及寻址单元等。

微处理器技术、计算机网络技术和信息通信技术的应用,一方面使低压电器智能化,提高了低压配电与控制系统的自动化程度;另一方面使智能化电器与中央控制计算机进行双向通信,使低压配电、控制系统的调度、操作和维护实现了四遥(遥控、遥信、遥测、遥调),提高了整个系统的可靠性。

4. 可靠性技术

随着低压配电和控制系统的大型化、复杂化,系统元件越来越多,一个元件故障可能会引发系统瘫痪。因此对电器的可靠性研究已成为一个重要工作。主要有以下几个方面:

(1) 可靠性物理研究,即产品失效机理研究。它对产品怎样失效及为什么失效的物理、化学过程进行研究,从而找出失效的真正原因,它是提高产品可靠性的基础性措施。

(2) 可靠性指标与考核方法研究。影响电器可靠性的因素很多,根据不同产品的使用场合及常见故障、早期故障,科学地确定可靠性指标,它是可靠性研究的核心问题。

(3) 可靠性实验装置研究。根据电器的可靠性指标及考核方法,研制相应的试验装置,它是提高电器可靠性的必备条件。

(4) 提高可靠性水平研究。根据可靠性考核中所暴露的问题,通过失效机理分析,提出改进措施,从而提高产品可靠性。

5. 新的灭弧系统和限流技术

由于电力系统发展的需要,对低压开关电器提出了高性能和小型化的要求,传统意义上的灭弧系统已不能满足对低压开关电器开断能力的要求。人们正致力于研究新的灭弧系统和限流技术,实现开关电器“无飞弧”。如采用一种三维磁场集中驱弧技术来提高塑壳断路器的开断性能;采用旋转式双断点的限流结构,并在前后级保护特性配合方面实现“能量匹配”以提高开关电器开断能力的概念;采用新的绝缘材料抑制由于电极的金属蒸气扩散至绝缘器壁上形成的金属粒子堆积层,加强对电弧的冷却作用;应用电力电子技术的电子灭弧装置实现无弧分断电路等。

国外从 20 世纪 90 年代后期就推出了智能化、可通信的第四代产品。如今我国低压电器也已进入第四代的开发,传统低压电器正朝着高性能、高可靠性、小型化、多功能、组合化、模块化、电子化、智能化和零部件通用化的方向发展。从 90 年代中期,我国低压电器产品的开发设计也开始逐步采用了计算机辅助设计、辅助制造和辅助分析。将电器技术与计算机网络技术相结合的各种可通信智能化电器、模数化终端组合电器及节能电器,也在研制开发、推广和应用和生产中。而且我国部分先进企业已经大量引进国外高精度数控模具加工设备,某些关键材料外国公司也已经在中国建厂生产,使得模具制造和电器产品的关键材料已不再是阻碍我国低压电器产品发展的主要因素,目前我国电器新产品已发展到 12 大类、380 个系列、1200 多个品种、几万种规格。

但是,由于目前我国研究和开发的投入仅为国外著名公司的 1%,因而迄今为止低压电器的设计仍未摆脱仿制为主的形式,属于原创性技术、具有自主知识产权的产品并不多。另一个阻碍我国低压电器产品发展的主要原因是零部件制造工艺、关键设备和生产过程在线检测设备与国外相比存在较大的差距。因此,随着国外大公司高性能产品逐步进入中国市场,我国第二代产品的市场占有率正在明显下降,第三代产品目前市场占有率还较低。但是随着自主开发的不断深入,在不久的将来我国电器产品与先进国家的差距势必会大大缩短并超过先进国家的水平。

1.2 电器的基本理论

电器在电力系统和传动系统中是线路的一个元件,从控制的角度看,电器应具有输入和输出部分,在结构上,电器一般由三个部分组成,即感测部分、判断部分和执行机构。感测部分接受外界输入的信号,通过转换、放大再由判断部分作出有规律的反应,使执行机构动作,输出相应的指令实现控制目的。

1.2.1 电磁式电器的工作原理

电磁式电器在电气自动控制电路中使用最多,对于有触头的电磁式电器,感测和判断部分大都是电磁机构,而执行机构则是触头。对于非电磁式的自动有触点式电器,感测和判断部分因其工作原理不同而各有差异,但执行机构仍为触头。

1. 感测和判断部分

电磁式电器的感测和判断部分就是电磁机构,其主要作用是将电磁能量转换为机械能量,带动触头工作,从而完成接通和分断电路。电磁机构由铁心、衔铁和吸引线圈组成。如图 1.4 所示。当在吸引线圈两端施加一定电压或通以一定电流时,在电磁机构的磁路产生磁

场，并通过气隙转换成机械能，当施加在衔铁上的电磁吸力大于电磁机构的反力时，衔铁就带动动触头运动，完成触头的闭合和断开，实现电路的接通和分断。

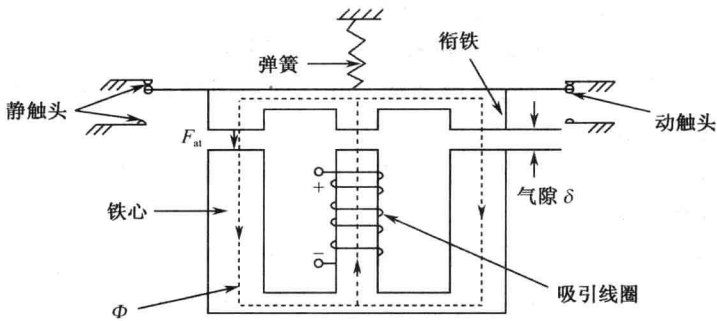


图 1.4 电磁式电器工作原理示意图

1) 电磁机构的工作特性

电磁吸力是影响电磁式电器可靠工作的一个重要参数。吸引线圈通电后就产生一定大小的磁通 Φ ，磁通的一部分经过电磁铁的铁心和衔铁形成闭合回路，此时衔铁被磁化产生电磁力，因为磁力线具有收缩能力，所以电磁力 F_{at} 的方向指向铁心，铁心吸引衔铁，如图 1.4 所示。

根据麦克斯韦电磁力计算公式可知，如果气隙中的磁场均匀分布，电磁吸力 F_{at} 的大小与气隙的截面积 S 及气隙中的磁感应强度 B 的平方成正比。即

$$F_{at} = \frac{SB^2}{2\mu_0} \tag{1.1}$$

式中，真空的磁导率 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ （非磁性材料的磁导率 $\mu \approx \mu_0$ ），代入式 (1.1)，得

$$F_{at} = \frac{10^7}{8\pi} SB^2 = \frac{10^7}{8\pi} \frac{\Phi^2}{S} \tag{1.2}$$

式中， F_{at} 为电磁吸力，单位 N； S 为铁心极面的截面积（吸力处端面积），单位 m^2 ； B 为气隙中电磁感应强度，单位 T； Φ 为气隙中磁通量，单位 Wb。

当端面面积 S 为常数时，电磁吸力与 B^2 或 Φ^2 成正比。电磁机构的工作特性常用吸力特性和反力特性来描述。电磁机构的吸引线圈通电后，铁心吸引衔铁的电磁吸力与气隙的关系曲线称为吸力特性。电磁机构使衔铁释放的力与气隙的关系曲线称为反力特性。

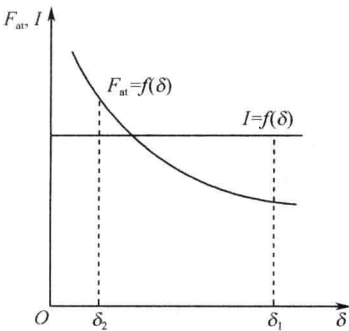


图 1.5 直流电磁机构的吸力特性

(1) 直流电磁铁的吸力特性。直流电磁铁电流 I 的大小只与所加电源电压 U 和线圈电阻 R 有关。在 U 和 R 不变时，励磁电流 I 恒定，不受磁路气隙 δ 的影响。电磁铁未吸合时，磁路中有空气隙 δ ，磁路中空气隙段的磁阻 $R_m = \frac{\delta}{\mu_0 S}$ 较大，所以磁通 $\Phi \approx \frac{IN}{R_m}$ （ N 为线圈匝数）较小，电磁吸力 F_{at} 也较小；电磁铁吸合时，气隙 δ 减小、磁路中的磁阻也减小，所以磁通增大，电磁吸力也增大。因此直流电磁铁在衔铁被吸合前后，其电磁吸力的大小不同，图 1.5 所示为直流电磁铁的吸力特性。在直流电磁铁吸合过程中，电磁吸力是

逐渐增加的，完全吸合时电磁吸力最大。要求可靠性高或频繁动作的控制系统常采用直流电磁机构。

在安匝数 IN 一定时，电磁吸力与气隙大小的平方成反比。显然，当气隙 δ 相同时，安匝数越大的电磁铁其电磁吸力越大。当然电磁线圈的励磁电压 U 的升高或降低，即励磁电流 I 的增大或减小，以及气隙的大小都将影响到电磁铁的吸力特性，从而影响电磁铁的工作。

(2) 交流电磁铁的吸力特性和短路环的作用。交流电磁铁的线圈电压是按正弦规律变化的，因而气隙中的电磁感应强度也按正弦规律变换。即

$$B = B_m \sin \omega t \quad (1.3)$$

将式 (1.3) 代入式 (1.2)，得到交流电磁铁吸力瞬时值的表达式

$$F_{at} = \frac{F_{atm}}{2} - \frac{F_{atm}}{2} \cos 2\omega t \quad (1.4)$$

式中， F_{atm} 为电磁吸力的最大值

$$F_{atm} = \frac{B_m^2 S}{2\mu_0} = \frac{10^7}{8\pi} B_m^2 S \quad (1.5)$$

所以，交流电磁铁电磁吸力的大小是随时间而变化的，交流电磁铁电磁吸力的大小取决于电流变化的一个周期内电磁吸力的平均值 F_0

$$\begin{aligned} F_0 &= \frac{1}{T} \int_0^T F_{at} dt = \frac{B_m^2 S}{4\mu_0} \\ &= \frac{\Phi_m^2}{4\mu_0 S} = \frac{F_{atm}}{2} \end{aligned} \quad (1.6)$$

由于交流电磁机构吸引线圈的电阻远远小于其感抗值，所以当励磁电压 U 、频率 f 和线圈匝数 N 不变时，交流电

磁铁的磁通最大值 $\Phi_m = \frac{U}{4.44fN}$ 几乎不变，也就是说，交流

电磁铁吸合前后 Φ_m 的值是不变的，故电磁力的平均值 F_0 也不变。考虑到漏磁的影响，其吸力随气隙的减小略有增加，交流电磁铁的吸力特性如图 1.6 所示。

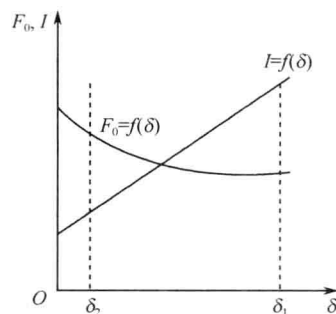


图 1.6 交流电磁机构的吸力特性

虽然交流电磁机构的气隙磁通最大值 Φ_m 近似不变，但气隙磁阻 R_m 要随气隙长度 δ 的加大成正比增加，因此交流励磁电流的大小也将随气隙长度 δ 成正比增大。所以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，其电流将比额定工作电流大得多，若发生衔铁卡住不能吸合或衔铁频繁动作，交流线圈将可能因过电流而烧毁，故在可靠性要求高或频繁操作的场合，一般不采用交流电磁机构。

由式 (1.4) 可知，交流电磁机构的电磁吸力大小随时间周期性变化，如图 1.7(a) 所示。当磁通为最大值时，电磁吸力也为最大值；当磁通为零时，电磁吸力也为零。在电磁吸力随时间周期性变化的过程中，当电磁力小于作用在衔铁上弹簧的反作用力时，衔铁从与铁心闭合处被拉开；当电磁吸力大于弹簧反作用力时，衔铁又被吸合。如此周而复始，使衔铁产生振动，发出噪声，同时还会使铁心的接触处有磨损，降低电磁铁的使用寿命。

为了消除衔铁振动，在电磁铁铁心的某一端装一短路铜环，如图 1.8 所示。短路环将铁心中的磁通分成两个部分，即不穿过短路环的 Φ_1 和穿过短路环的 Φ_2 。穿过短路环的 Φ_2 使铜环产生感应电动势和电流，感应电流产生的磁通又将阻止 Φ_2 变化，所以 Φ_2 滞后 Φ_1 。这