



普通高等教育电气工程与自动化(应用型)“十二五”规划教材

Technology of Modern Electrical Control

现代电气 控制技术

◎ 任振辉 邵利敏 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育电气工程与自动化（应用型）“十二五”规划教材

现代电气控制技术

	任振辉	邵利敏	主 编
	赖指南	曾立华	副主编
闫爱青	李 猛	崔兴凯	参 编



机械工业出版社

本书从工程实际和教学需要出发,主要介绍了继电接触器控制系统和 PLC 控制系统的工作原理、设计方法和实际应用。主要内容为:介绍了最基本、常用的低压电器,及常用的新型电子器件和智能电器;对传统电气控制系统的内容进行了精简,重点介绍了继电接触器控制系统的基本控制环节、控制原则和设计方法等;以西门子公司的 S7-200 PLC 为例,系统介绍了 PLC 的工作原理及工程应用;讲解了软启动器和变频器的使用,简要介绍了组态软件和数控机床等的基本概念。

本书可作为高等学校电气信息类、自动化类、机械类等专业的教材,也可作为高职高专院校相关专业的教材,同时还适合从事电气控制的相关技术人员参考。

本书配有免费电子课件,欢迎选用本书作教材的老师发邮件到 jinacmp@163.com 索取,或登录 www.cmpedu.com 注册下载。

图书在版编目 (CIP) 数据

现代电气控制技术/任振辉等主编. —北京:机械工业出版社, 2012. 5
普通高等教育电气工程与自动化 (应用型) “十二五” 规划教材
ISBN 978-7-111-37771-9

I. ①现… II. ①任… 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 (2012) 第 047417 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: 吉 玲 责任编辑: 吉 玲 关晓飞 卢若薇
版式设计: 霍永明 责任校对: 张晓蓉
封面设计: 张 静 责任印制: 乔 宇
北京瑞德印刷有限公司印刷 (三河市胜利装订厂装订)
2012 年 6 月第 1 版第 1 次印刷
184mm×260mm·18 印张·445 千字
标准书号: ISBN 978-7-111-37771-9
定价: 35.00 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

普通高等教育电气工程与自动化（应用型）“十二五”规划教材

编审委员会委员名单

主任委员：刘国荣

副主任委员：

张德江 梁景凯 张 元 袁德成 焦 斌
吕 进 胡国文 刘启中 汤天浩 黄家善
钱 平 王保家

委 员（按姓氏笔画排序）：

丁元明 马修水 王再英 王 军 叶树江
孙晓云 朱一纶 张立臣 李先允 李秀娟
李海富 杨 宁 陈志新 周渊深 尚丽萍
罗文广 罗印升 罗 兵 范立南 娄国焕
赵巧娥 项新建 徐建英 郭 伟 高 亮
韩成浩 蔡子亮 樊立萍 穆向阳

前 言

电气控制技术是高等学校工程类专业的一门重要专业课，综合了计算机技术、自动控制技术和通信技术等多门技术。随着生产的发展和科学技术的进步，电气控制的应用领域不断扩大，已发展到了一定的程度，在工业生产过程和科学研究等领域扮演着越来越重要的角色。

本书体现了“以能力培养为核心，理论教学和实践教学相结合”的教学思路，注重对学生新技术应用能力和创新能力的培养。编写过程中，编者总结和吸收了兄弟院校教学改革的有益经验，删除了以往陈旧过时或不适用的内容，增补了新的知识和技术，修改了对一些问题的分析思路和解答方法，使之更适合组织教学和学生自学。编者对全书的内容和结构进行了精心的组织和安排：第1章主要介绍常用低压电器的结构、工作原理和使用方法等知识，根据电器发展情况，简单介绍了一些新型电子电器和智能电器；第2章首先讲解电气原理图的绘制与阅读方法，然后介绍三相笼型异步电动机的起动、正反转、制动、调速等基本控制电路，还讲解了软启动器和变频器的使用；第3章主要介绍电气控制电路分析与设计的内容、原则和方法等；第4章简单介绍 PLC 的产生、硬件结构和工作原理等基本概念；第5章介绍 S7-200 系列 PLC 的基础知识，包括硬件系统、外部接线、寻址方式和编程语言等；第6、7章介绍 S7-200 系列 PLC 的基本指令和功能指令；第8章介绍 PLC 应用系统的设计方法，同时讲解人机界面（HMI）、USS 协议、组态软件等内容；第9章简单介绍数控机床的概念；第10章介绍电气控制的可靠性。本书内容阐述循序渐进，结构合理严谨，概念准确，易读易懂。书中例题、习题丰富，图形、符号均采用最新国家标准。

本书由河北农业大学、湖南工程学院、太原电力高等专科学校、河北科技学院等院校共同完成。任振辉负责第1、4章的编写并统稿；邵利敏、崔兴凯负责第3、7章及第8章部分内容的编写；赖指南负责第5、6章的编写；曾立华、唐尧华负责第8章部分内容和第10章的编写；闫爱青负责第2章的编写；李猛负责第9章的编写。在编写过程中，作者借鉴和参考了很多资料，在此谨向文献作者致以衷心的感谢。哈尔滨工业大学（威海）的曲延滨教授任本书主审，对全书进行了认真、细致、详尽的审阅，提出了许多宝贵意见和建议，在此表示感谢；感谢机械工业出版社吉玲编辑对本书出版所付出的辛勤劳动！

由于编者水平有限，书中疏漏和不足之处在所难免，热忱欢迎选用本书作教材的同人和读者提出宝贵意见，并批评指正，编者联系邮箱：shaolm@126.com。

编 者

目 录

前言

第1章 常用低压电器 1

1.1 电器的分类 1

1.2 电磁式低压电器的基本结构和原理 2

1.2.1 触点 2

1.2.2 灭弧原理及灭弧装置 4

1.2.3 电磁机构 6

1.3 手动电器 10

1.3.1 刀开关 10

1.3.2 按钮 11

1.3.3 熔断器 12

1.3.4 转换开关 14

1.4 自动电器 16

1.4.1 断路器 16

1.4.2 接触器 17

1.4.3 继电器 19

1.4.4 行程开关 25

1.5 电子电器与智能电器 26

1.5.1 常用电子电器 26

1.5.2 智能电器 31

思考与练习 35

第2章 电气控制电路基础 36

2.1 电气原理图的绘制原则及阅读方法 36

2.1.1 电气原理图的绘制原则 36

2.1.2 电气原理图的阅读方法 37

2.2 电气控制电路的基本环节 38

2.2.1 点动和长动控制电路 38

2.2.2 多点控制电路 39

2.2.3 顺序控制电路 39

2.3 三相笼型异步电动机的起动控制 电路 40

2.3.1 直接起动控制电路 41

2.3.2 减压起动控制电路 41

2.3.3 软起动器 46

2.4 电动机的正反转控制电路 49

2.4.1 正反转控制电路 50

2.4.2 自动循环控制电路 51

2.5 电动机的制动控制电路 52

2.5.1 能耗制动控制电路 52

2.5.2 反接制动控制电路 54

2.6 电动机的速度控制电路 56

2.6.1 变极调速控制电路 57

2.6.2 变频器与变频调速 58

2.7 电液控制 68

2.7.1 电磁换向阀 68

2.7.2 液压力头控制电路 69

2.7.3 半自动车床刀架纵进、横进、 快退电液控制电路 70

2.8 电动机的保护 72

思考与练习 73

第3章 电气控制电路的分析与设计 74

3.1 卧式车床的电气控制电路 74

3.1.1 CW6163B 卧式车床的控制 电路 74

3.1.2 C650 卧式车床的电气控制电路 ... 76

3.2 电气控制系统设计基础 77

3.2.1 电气控制系统设计的基本内容 77

3.2.2 电力拖动方案的确定 79

3.2.3 电动机的选择 80

3.2.4 电气控制方案的确定 81

3.2.5 控制方式的选择 81

3.2.6 电气控制设计的基本原则 82

3.2.7 常用电气元件的选择 87

3.3 电气控制电路的经验设计 92

3.3.1 经验设计法的步骤和特点 92

3.3.2 控制电路电源的选择及主电路 设计 93

3.3.3 控制电路的设计规律 94

3.3.4 经验设计法设计举例 95

3.4 电气控制电路的逻辑设计 97

3.4.1 电气电路的逻辑表示 97

3.4.2 电气电路的化简 99

3.4.3 组合逻辑电路的设计 106

3.4.4 时序逻辑电路的设计 108

思考与练习	112	第 7 章 S7-200 系列 PLC 的功能指令	182
第 4 章 PLC 概述	114	7.1 程序控制类指令	182
4.1 PLC 的产生与发展	114	7.1.1 有条件结束指令	182
4.1.1 PLC 的产生	114	7.1.2 监控定时器复位指令	183
4.1.2 PLC 的发展	115	7.1.3 标号指令与跳转指令	183
4.2 PLC 的主要功能与特点	116	7.1.4 循环指令	184
4.2.1 PLC 的主要功能	116	7.2 数据处理类指令	184
4.2.2 PLC 的特点	116	7.2.1 数据传送指令	184
4.3 PLC 的分类与发展趋势	117	7.2.2 移位和循环移位指令	185
4.3.1 PLC 的分类	117	7.2.3 比较指令	187
4.3.2 PLC 的发展趋势	119	7.2.4 表功能指令	188
4.4 PLC 的硬件结构与工作原理	119	7.3 运算指令	190
4.4.1 PLC 的硬件结构	120	7.3.1 数学运算指令	190
4.4.2 PLC 的工作原理	121	7.3.2 逻辑运算指令	192
4.5 PLC 的基本性能指标	123	7.4 转换指令	193
思考与练习	124	7.4.1 数据类型转换指令	194
第 5 章 S7-200 系列 PLC 基础知识	125	7.4.2 编码和译码指令	194
5.1 硬件系统	125	7.4.3 段译码指令	195
5.2 PLC 的外部接线	134	7.4.4 ASCII 码转换指令	195
5.3 内部资源	137	7.4.5 字符串转换指令	196
5.4 I/O 地址分配	147	7.5 子程序	197
5.5 寻址方式	149	7.6 时钟指令	199
5.5.1 数据类型	149	7.7 中断	200
5.5.2 寻址的概念与目的	150	7.8 高速计数器指令	204
5.5.3 直接寻址	150	7.8.1 编码器	204
5.5.4 间接寻址	151	7.8.2 高速计数器的工作模式与输入 端口	205
5.6 编程语言	152	7.8.3 高速计数器指令	208
5.7 程序结构	155	7.8.4 高速计数器的程序设计	209
思考与练习	155	7.9 高速脉冲输出指令	210
第 6 章 S7-200 系列 PLC 的基本指令	157	思考与练习	211
6.1 S7-200 PLC 的基本逻辑指令	157	第 8 章 PLC 应用系统的设计	212
6.1.1 位逻辑指令	157	8.1 PLC 梯形图的编程原则	212
6.1.2 定时器指令	169	8.2 PLC 控制系统设计的原则和步骤	213
6.1.3 计数器指令	172	8.2.1 基本原则	213
6.2 典型模块的 PLC 程序设计	174	8.2.2 设计步骤	214
6.2.1 起保停电路	174	8.3 PLC 的程序设计方法	216
6.2.2 长延时电路	175	8.3.1 经验设计法	216
6.2.3 延时接通和延时断开电路	176	8.3.2 逻辑设计法	216
6.2.4 闪烁电路和单稳态电路	177	8.3.3 继电器控制电路转换为梯形 图法	216
6.2.5 顺序脉冲发生器	178		
思考与练习	179		

8.3.4 顺序控制设计法	217	9.3.2 数控机床对伺服系统的基本 要求	259
8.4 PLC 应用系统设计实例	219	9.3.3 伺服系统的分类	259
8.4.1 送料小车自动控制系统的的设计 ..	219	9.4 测量反馈系统	259
8.4.2 顺序启动控制系统	220	9.4.1 数控机床检测装置的分类	260
8.4.3 基于顺序功能图的程序设计	221	9.4.2 数控机床对检测装置的要求	260
8.4.4 交通信号灯控制系统的设计	222	9.4.3 数控检测装置的性能指标与 要求	260
8.5 人机界面及其使用	223	9.5 数控机床的发展趋势	260
8.6 PLC 网络与通信	231	第 10 章 电气控制的可靠性	263
8.6.1 S7-200 的通信协议	232	10.1 可靠性的基本概念	263
8.6.2 S7-200 通信网络的配置	233	10.1.1 可靠性的定义与重要性	263
8.6.3 PPI 网络的组成形式	235	10.1.2 固有可靠性和使用可靠性	263
8.6.4 网络指令及其应用	236	10.1.3 可修复产品和不可修复产品	263
8.6.5 自由端口指令及其应用	237	10.2 失效与可靠性特征量	264
8.6.6 USS 协议	241	10.2.1 失效率	264
8.7 变频器与 PLC	244	10.2.2 早期、偶然、耗损失效	264
8.7.1 使用 USS 协议专用指令的要求 ..	244	10.2.3 可靠度与可靠寿命	264
8.7.2 与变频器通信的时间要求	245	10.3 可靠性设计	265
8.7.3 使用 USS 协议指令的步骤	245	10.3.1 可靠性设计的内容	265
8.7.4 USS 协议指令	246	10.3.2 可靠性指标的制订	265
8.7.5 连接和设置 4 系列 MicroMaster 变频器	248	10.3.3 可靠性预测	266
8.8 PLC 与组态软件	250	10.3.4 可靠性分配	266
思考与练习	252	10.4 提高可靠性的途径	266
第 9 章 数控机床	253	10.4.1 电气控制系统方案的选择	266
9.1 概述	253	10.4.2 控制元件的选用	266
9.1.1 数控机床的概念	253	10.4.3 控制元件的工作环境	267
9.1.2 数控机床的组成	253	10.4.4 筛选和预防性更换	267
9.1.3 数控的概念	254	10.4.5 现场失效调查	268
9.1.4 数控技术的概念	254	10.4.6 提高 PLC 可靠性的措施	268
9.2 CNC 系统	255	思考与练习	272
9.2.1 CNC 系统的概念	255	附录	273
9.2.2 CNC 系统的主要功能	255	附录 A 常用电气设备图形符号及文字 符号一览表	273
9.2.3 CNC 系统的硬件构成	256	附录 B S7-200 的 SIMATIC 指令集	275
9.2.4 CNC 系统的软件构成	257	参考文献	280
9.3 伺服系统	258		
9.3.1 伺服系统的组成	258		

第 1 章 常用低压电器

电器主要指用于对电路进行接通、分断，对电路参数进行变换，以实现对电路或用电设备的控制、调节、切换、检测和保护等作用的电工装置、设备和元件。电器是现代工业过程自动化的重要元件，是组成电气成套设备的基础配套元件，在电力输配电和电力拖动自动控制等系统中有着极为广泛的应用。随着电子技术、自动控制技术和计算机应用技术的迅速发展，一些电气元件可能被电子电路所取代，但电气元件本身也在不断地发展，因此电气元件不会完全被取代，仍将具有相当重要的地位。

1.1 电器的分类

电器品种规格繁多，从不同的角度有不同的分类方法，通常有以下几种。

(1) 按工作电压等级分

低压电器：工作电压在交流 1200V 或直流 1500V 以下，起通断、保护、控制或调节作用的电器，如按钮、接触器、继电器等。其特点为：品种多、用量大、用途广。

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、高压隔离开关、高压熔断器等。

(2) 按动作原理分

手动电器：通过人的操作发出动作指令以完成接通、分断等动作的电器，如按钮、刀开关等。

自动电器：不需要人工操作，通过产生电磁吸力而自动完成动作指令的电器，如接触器、继电器、电磁换向阀等。

(3) 按用途分

主令电器：用于自动控制系统中发送控制指令的电器，如按钮、行程开关等。

控制电器：用于控制电路和系统的电器，如接触器、继电器等。

保护电器：用于保护用电设备和电路的电器，如熔断器、热继电器、避雷器等。

执行电器：用于传动或完成某种动作功能的电器，如电磁铁、电磁离合器等。

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、低压断路器等。

(4) 按工作原理分

电磁式电器：电器感测元件接收电流或电压等电量信号，依据电磁感应原理来工作的电器，如接触器、各种类型的电磁式继电器等。

非电量控制电器：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、温度继电器等。

电器的分类方法很多，且相互交叉。某一电器，按不同的分类方法可属于不同的种类。如工作电压为 380V 的交流接触器，按不同分类方法可分为低压电器、控制电器等。

1.2 电磁式低压电器的基本结构和原理

电磁式低压电器在电气控制电路中使用最多,其基本结构由触点系统和电磁机构组成。触点系统存在接触电阻和电弧的物理现象,对电器系统的安全运行影响较大;电磁机构的电磁吸力和反力是决定电器性能的主要因素之一。低压电器的主要技术性能指标与参数是在它们的基础上制定而成的。触点结构、电弧、灭弧装置及电磁吸力和反力等是研究电气元件结构和工作原理的基础。

1.2.1 触点

触点亦称触点,是电磁式低压电器的主要执行部分,起接通和断开被控电路的作用。有触点电气元件的基本功能靠触点来执行。因此,要求触点必须具有良好的导电和导热性能,通常用铜、银、镍及其合金材料制作而成,有时也在铜触点表面电镀锡、银或镍。触点能否正常工作,将直接影响电器的工作性能。

1. 电弧的产生

触点通常由动、静触点组合而成。两个触点之间的接触,从本质上来说是许多个点的接触。因此,在两个触点分开时,最终会出现只有一个点接触的现象。触点处于闭合状态时,触点间有电流流过,此时该接触点的电流密度可高达 $10^3 \sim 10^8 \text{ A/cm}^2$,致使触点金属熔化。触点的互相分离,形成熔化了的高温金属液桥,液桥一旦被拉断,触点将完全分开,在断口处产生电弧。如果随着触点的分离,电弧能够被熄灭,则相应的电路实现断开。

电弧实际上是触点间气体在强电场作用下产生的放电现象。电弧对电器的主要影响有:触点虽然打开,但由于电弧的存在,使要断开的电路仍处于接通状态;电弧温度高,严重时可使触点熔化;电弧向四周的喷射会使电器及周围物质损坏,甚至造成短路,引发火灾。因此,必须采取措施,以消灭或减少电弧。

电弧的产生主要经历强电场发射、撞击电离、热电子发射和气体热游离等4个过程。在触点分离的瞬间,动触点与静触点间间隙很小,触点间承受了电路几乎全部的压降,在触点间形成很高的电场强度,发射的自由电子在电场作用下向阳极加速运动。高速运动的电子撞击气体原子时产生撞击电离,电离出的电子在向阳极运动过程中再撞击其他原子。撞击电离的正离子则向阴极加速运动,撞在阴极上会使阴极温度逐渐升高,当达到一定温度时发生热电子发射,热发射的电子也参与撞击电离。这样,在触点间隙中形成了炽热的电子流,即为电弧。电弧一经形成,弧隙中将产生大量的热能,原子以很高的速度作不规则运动并相互剧烈撞击,使原子电离,这种因高温使原子撞击所产生的电离称为气体热游离。显然,电压越高、电流越大,则电弧功率越大、弧区温度越高、游离程度越高,电弧也越强。

应当指出,伴随着电离的进行也存在着消电离的现象。消电离主要是通过正、负带电质点的复合进行的。温度越低,带电质点运动越慢,越容易复合。

2. 触点的接通过程及电接触原理

有触点电器靠触点的闭合来实现控制电路的接通。通常情况下,触点的接触面积越大,其接触电阻越小,触点接通电路的性能也越好。因此,触点一般都选用电导率高的金属材料制作而成。但是,不管采用何种金属表面,即使光滑度再高,也不可能做成理想的光滑表

面。也就是说，两个金属接触面总会凹凸不平，只有少数的点能真正接触，因此，当触点接通电路时，实际的通电截面积很小。此外，金属在空气中有可能被氧化或硫化，使其表面生成氧化膜或硫化膜，且后者的电阻率要比金属本体大得多，势必造成触点接触处的电阻增大。为了减小损耗和降低温升，接触电阻应尽量小。

接触电阻的大小与触点材料电阻率、接触形式、接触压力、力学性能及表面状况等有关。为了使接触电阻尽可能小，一方面选用导电性好、耐磨性好的金属材料做触点，另外，尽量使触点接触紧密一些，使用过程中要定期清洁触点表面，保持触点清洁。

触点接通过程是“闭合—分离—再闭合”过程的反复。一般，触点通过弹簧机构来保证有一定的接触压力，从而使接触可靠。在触点闭合的瞬间，动触点撞击静触点，在反作用力作用下被反弹，动触点弹簧被压缩，一旦弹簧的张力大于该反作用力，则动触点又被推向静触点。这样，动、静触点又发生碰撞、反弹，但弹回的距离一次比一次小，直到触点完全闭合。

触点的机械振动会使触点表面产生电气磨损。一方面，触点弹跳时两触点间形成电弧，致使触点表面部分金属被熔化，接触过程中动、静触点间的相对滑动将带走熔化的金属；另一方面，熔化了金属可能蒸发或喷溅，金属蒸气又可能被气流或磁吹作用所冲走，使触点材料越来越少。当触点接触表面有熔化的金属时，一旦机械振动过程结束，熔化了金属便因失去电弧产生的大量热量而凝固，使动、静触点粘在一起不能分开，发生熔焊现象。电气磨损会缩短触点的使用期限，熔焊将造成电器无法正常工作。只有减少触点的振动，才能防止电气磨损等的发生。根据力学原理，适当增大触点弹簧的初压力、减小触点重量、降低触点的接通速度都可减少振动。

3. 触点的基本结构形式

(1) 触点的接触形式

触点的接触形式有点接触（如球面对球面、球面对平面等）、线接触（如圆柱对平面、圆柱对圆柱等）和面接触（如平面对平面）三种，如图 1-1 所示。

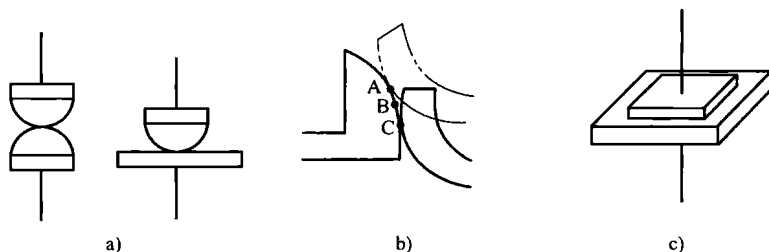


图 1-1 触点的三种接触形式
a) 点接触 b) 线接触 c) 面接触

三种接触形式中，点接触的接触点数最少，由两个半球形触点或一个半球与一个平面触点构成，常用于小电流的电器中，如接触器的辅助触点和继电器的触点。面接触的接触点最多，一般在接触表面上镶有合金，以减小触点的接触电阻和提高耐磨性，接触点允许通过较大的电流，多用于较大容量接触器的主触点。线接触的接触区域为一条直线，触点在通断过程中有滚动操作，如图 1-1b 所示，刚开始接触时，动、静触点在 A 点接触，靠弹簧的压力经 B 点滚到 C 点，而断开时运动方向则相反。这样，不仅可以清除触点表面的氧化膜，而

且由于触点长期工作在 C 点而不是易烧灼的 A 点,从而保证了触点的良好接触,这种滚动线接触适用于通电次数多、电流大的场合,多用于中等容量的触点,如接触器的主触点。

(2) 触点的结构形式

常用的继电器和接触器,触点的结构形式主要有单断点指式触点和双断点桥式触点。

图 1-1b 为单断点指式触点,该触点只有一个断口,多用于接触器的主触点。单断点指式触点的优点在于:采用铜或铜基合金触点材料,闭合、断开过程中有滚滑运动,能自动清除触点表面的氧化物,保证接触可靠;触点接触压力大,电动稳定性高;触点参数较易调节。缺点为:触点开距大,从而增大了电器体积;触点闭合时冲击能量大,并有软连接,不利于机械寿命的提高。

图 1-2 为双断点桥式触点的结构示意图,这种触点的优点是:具有两个有效灭弧区域,灭弧效果较好,小容量交流接触器或继电器采用这种触点利用两个断点增长了电弧长度,有利于熄弧;触点开距小,使电器结构紧凑,体积小;触点闭合时冲击能量小,无软连接,有利于提高机械寿命。缺点是:触点不能自动净化,触点材料必须用银或银基合金;每个触点的接触压力小,电动稳定性较低;触点参数不易调节。

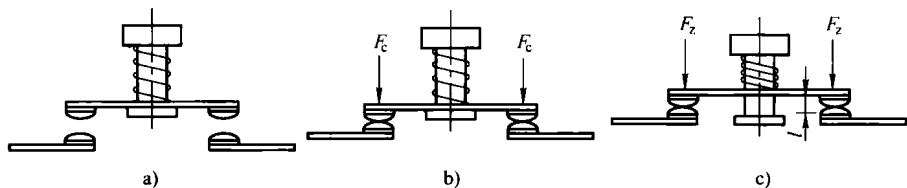


图 1-2 双断点桥式触点示意图

a) 初始位置 b) 刚刚接触位置 c) 最终闭合位置

(3) 触点的初压力、终压力和超行程

为了减小接触电阻、减弱触点接触点的振动,需要在触点间施加一定的压力,此压力一般由弹簧来产生。当动触点与静触点刚接触时,由于安装时动触点的弹簧已经被预先压缩了一段,因而产生有初压力 F_c ,如图 1-2b 所示。初压力的作用是削弱接触振动,可通过调节动触点弹簧的预压缩量来增减。触点闭合后弹簧在运动机构作用下被进一步压缩,运动机构运动终止时,弹簧产生的压力为终压力 F_z ,如图 1-2c 所示。终压力的作用是减小接触电阻。弹簧被进一步压缩的距离 l 称为触点的超行程,超行程越大终压力也越大。有了超行程,触点在被磨损的情况下仍具有一定的接触压力,从而能继续正常工作。当然,磨损严重时应及时更换触点。

1.2.2 灭弧原理及灭弧装置

触点在通断过程中将产生电弧,电弧会烧损触点,还可造成其他故障。电弧的存在不仅妨碍了电路及时可靠的分断,而且使触点受到磨损。为此,必须采取适当的措施,减少磨损,保护触点系统,以提高其分断能力,从而保证整个电器能够安全可靠地工作。

根据电弧产生的物理过程可知,要使电弧熄灭,应设法降低电弧区的温度和电场强度、加强消电离作用,当电离速度低于消电离速度时,电弧即逐渐熄灭。常用的灭弧方法有快速拉长电弧、切断或分隔电弧等。

1. 多断点灭弧

在交流继电器和接触器中常采用的桥式触点有两个断点。交流电路在过零后，假如一对断点处电弧重燃需要的电压为 150 ~ 250V，那么两对断点就需要 300 ~ 500V，若断点电压达不到此值，电弧过零后由于不能重燃而熄灭。

当采用双极或三极接触器控制某一电路时，可灵活地将两个或三个极串联起来作为一个触点使用，成为多断点触点，其灭弧效果将大大提高。

多断点灭弧方法效果较弱，故一般多用于小容量的交流继电器和接触器，不需再加设其他灭弧装置。

2. 磁吹式灭弧装置

磁吹式灭弧装置的原理是使电弧处于磁场中间，电磁场力“吹”长电弧，使其进入冷却介质，加速电弧冷却，促使电弧迅速熄灭。

图 1-3 是磁吹式灭弧装置的原理图。磁场由与触点电路串联的吹弧线圈产生，当电流逆时针流经吹弧线圈时，其产生的磁通经铁心和导磁颊片引向触点周围，触点周围的磁通方向为由纸面流入，如图中“x”符号所示。由左手定则知，电弧在吹弧线圈磁场中受到力 F 的作用，电弧向上运动，被拉长并被吹入灭弧罩中。熄弧角和静触点相连接，引导电弧向上运动，将热量传递给灭弧罩壁，促使电弧熄灭。

该灭弧装置利用电弧电流本身灭弧，电流越大，灭弧能力越强，且不受电路电流方向的影响（当电流方向改变时，磁场方向随之改变，但电弧受力方向保持不变），灭弧吹力大小在设计时可以控制，灭弧效果好，广泛应用于直流灭弧装置中。

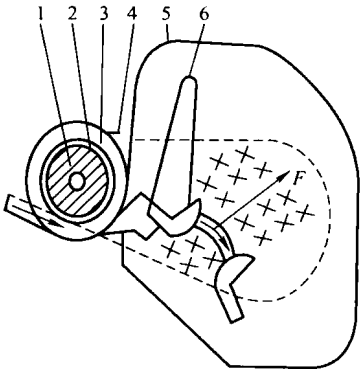


图 1-3 磁吹式灭弧装置

1—铁心 2—绝缘管 3—吹弧线圈
4—导磁颊片 5—灭弧罩 6—熄弧角

3. 灭弧栅

灭弧栅的原理图如图 1-4 所示。灭弧栅是一种很常用的交流灭弧装置，由许多镀铜薄钢片组成，片间距离为 2 ~ 3mm，安放在触点上方的灭弧罩内（图中未画出）。一旦有电弧产生，电弧周围产生磁场，导磁的钢片将电弧吸入栅片，电弧被栅片分割为许多串联的短电弧。交流电压过零时，电弧自然熄灭；电弧要重燃，两栅片间必须有 150 ~ 250V 电弧压降。这样一来，一方面电源电压不足以维持电弧，同时由于栅片的散热作用，电弧自然熄灭后很难重燃。

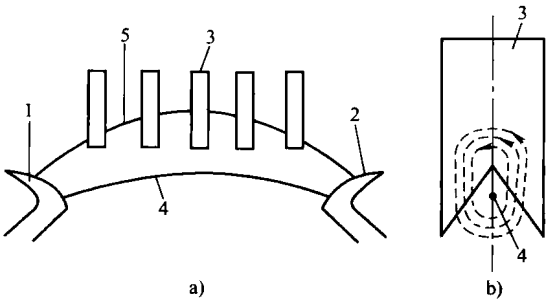


图 1-4 灭弧栅灭弧原理

a) 栅片灭弧原理 b) 电弧进入栅片的图形

1—静触点 2—动触点 3—灭弧栅片 4—长电弧 5—短电弧

注意：线圈的极性和触点的极性不要接反，否则将使电弧吹向内侧，烧坏电器。

4. 灭弧罩

磁吹式灭弧装置和灭弧栅都带有灭弧罩，它通常由陶土、石棉水泥或耐弧塑料制作而

成,其作用为:分隔各路电弧,防止发生短路;使电弧与灭弧罩的绝缘壁接触,进而使电弧迅速冷却而熄灭。

1.2.3 电磁机构

电磁机构是电磁式继电器和接触器等电器的主要组成部分之一,其工作原理是将电磁能转换为机械能,带动触点动作,从而完成电路的接通和分断功能。

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。吸引线圈通以一定的电压和电流后产生磁场及吸力,利用气隙将电磁能转换为机械能,从而带动衔铁运动,使触点动作,以完成触点的闭合和断开,控制电路的接通和分断。磁路包括铁心、铁轭、衔铁和空气隙。图1-5是几种常用电磁机构的结构形式示意图。

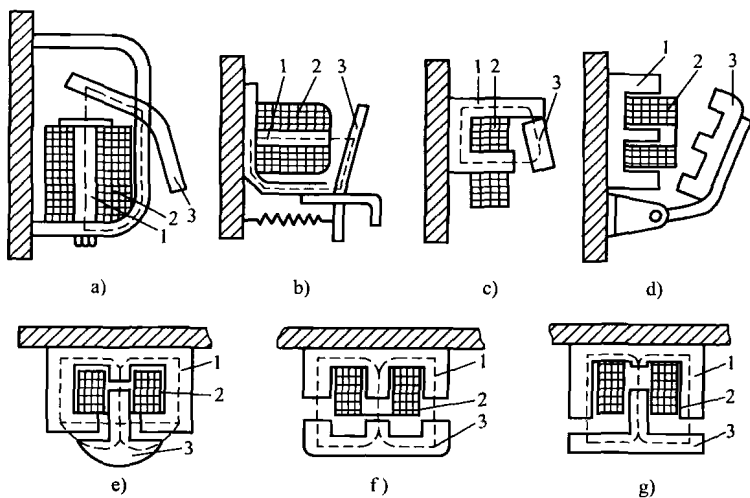


图1-5 常用电磁机构的结构形式示意图

1—铁心 2—线圈 3—衔铁

电磁机构可按衔铁的运动方式、磁系统的形状、通电的种类和线圈的连接方式等进行分类。

1) 按衔铁的运动方式分:

① 衔铁沿棱角转动的拍合式铁心,如图1-5a、b所示,铁心一般用电工软铁制成,衔铁绕铁轭的棱角转动,磨损较小,适用于直流继电器和接触器。

② 衔铁沿轴转动的拍合式铁心,如图1-5c、d所示,铁心一般用硅钢片叠成,衔铁绕轴转动,常用于较大容量的交流接触器。

③ 衔铁作直线运动的直动式铁心,如图1-5e、f、g所示,衔铁受磁力作用在线圈内成直线运动,较多用于中小容量的交流接触器和继电器中。

2) 按通电的种类,可分为交流电磁线圈和直流电磁线圈两种。

3) 按线圈的连接方式,可分为并联和串联两种。当线圈做成并联于电源工作的线圈时,称为电压线圈,匝数多,线径细;当线圈做成串联于电路工作的线圈时,称为电流线圈,匝数少,线径较粗。

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征。电磁机构使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一般有两种：一是弹簧的反力；二是衔铁自身的重力。弹簧的反力与其形变的位移 x 成正比，其反力特性可写成

$$F_{\text{反}1} = K_1 x \quad (1-1)$$

利用衔铁自重的反力与气隙大小无关，如果气隙方向与重力一致，如图 1-5e、f、g 所示那样，其反力特性可写成

$$F_{\text{反}2} = K_2 \quad (1-2)$$

考虑到常开触点闭合时超行程机构的弹力作用，上述两种反力特性曲线如图 1-6 所示。其中， δ_1 为电磁机构气隙的初始值； 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_2 处有一突变。

(2) 吸力特性

电磁机构的吸力特性与很多因素有关，当铁心与衔铁端面平行且气隙 δ 较小时，电磁吸力可近似地按下式求得：

$$F = 4 \times 10^5 B^2 S \quad (1-3)$$

式中 F ——电磁吸力 (N)；

B ——气隙的磁通密度 (T)；

S ——吸力处端面积 (m^2)。

当端面积 S 为常数时，吸力 F 与磁通密度的二次方 B^2 成正比，也可以认为 F 与磁通的二次方 Φ^2 成正比，即

$$F \propto \Phi^2 \quad (1-4)$$

电磁机构的吸力特性反映的是其电磁吸力与气隙的关系，励磁电流的种类不同其吸力特性也不一样，即交、直流电磁机构的电磁吸力特性不同。

1) 交流电磁机构的吸力特性。交流电磁机构激励线圈的阻抗主要取决于线圈的电抗（电阻相对很小），则

$$U \approx E = 4.44fN\Phi \quad (1-5)$$

$$\Phi = \frac{U}{4.44fN} \quad (1-6)$$

式中 U ——线圈电压 (V)；

E ——线圈感应电动势 (V)；

f ——线圈外加电压的频率 (Hz)；

Φ ——气隙磁通 (Wb)；

N ——线圈匝数。

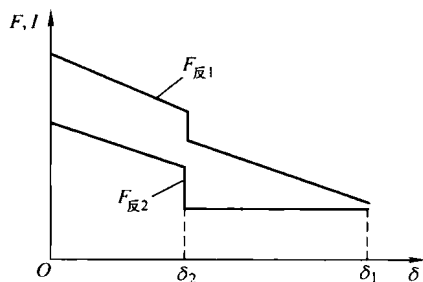


图 1-6 反力特性

当频率 f 、匝数 N 和外加电压 U 都为常数时，由式 (1-6) 知磁通 Φ 也为常数。此时，由式 (1-4) 可知电磁吸力 F 为常数，这是因为交流励磁时，电压、磁通都随时间作周期性变化，其电磁吸力也作周期性变化，此处 F 为常数是指电磁吸力的幅值不变。由于线圈外加电压 U 与气隙 δ 的变化无关，所以其吸力 F 也与气隙 δ 的大小无关。实际上，考虑到漏磁通的影响，吸力 F 随气隙 δ 的减小略有增加，其吸力特性如图 1-7 所示。

虽然交流电磁机构的气隙磁通 Φ 近似不变，但气隙磁阻随气隙长度 δ 而变化。

磁路定律为

$$\phi = \frac{IN}{R_m} = \frac{IN}{\delta/\mu_0 S} = \frac{(IN)(\mu_0 S)}{\delta} \quad (1-7)$$

式中 N ——线圈匝数；

R_m ——磁阻 (Ω)；

μ_0 ——真空磁导率；

δ ——气隙长度 (mm)；

S ——吸力处端面积 (m^2)。

由式 (1-7) 可知，交流激励线圈的电流 I 与气隙 δ 成正比，如图 1-7 所示。在吸合过程中，随着气隙的减小，磁阻减小，线圈电感增大，则电流逐渐减小。如果衔铁卡住不能吸合或者频繁动作，很可能因过电流而使交流激励线圈严重发热，甚至烧毁。一般，U 形交流电磁机构的激励线圈通电而衔铁尚未动作时，其电流可达吸合后额定电流的 5~6 倍，而 E 形电磁机构更是高达 10~15 倍。所以，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。

2) 直流电磁机构的吸力特性。直流电磁机构由直流电流励磁。稳态时，磁路对电路无影响，可认为励磁电流不受气隙变化的影响，即磁动势 NI 不受气隙变化的影响，可以表达为

$$F \propto \phi^2 \propto \left(\frac{1}{\delta}\right)^2 \quad (1-8)$$

即直流电磁机构的吸力 F 与气隙 δ 的二次方成反比，其吸力特性如图 1-8 所示。从图中不难看出，衔铁闭合前后吸力变化很大，气隙越小，吸力越大。

由于衔铁闭合前后激励线圈的电流不变，因此直流电磁机构适用于动作频繁的场所，且吸合后电磁吸力大，工作可靠性高。

需要指出的是，当直流电磁机构的励磁线圈断电时，磁动势由 NI 急速变为接近于 0，电磁机构的磁通也发生相应的急速变化，将会在励磁线圈中感生很大的反电动势，该反电动势可达线圈额定电压的 10~20

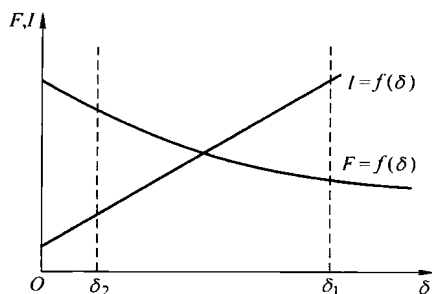


图 1-7 交流电磁机构的吸力特性

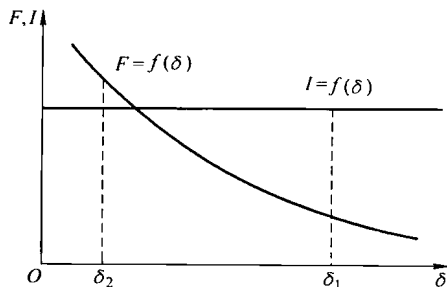


图 1-8 直流电磁机构的吸力特性

倍,易因过电压而损坏线圈。为减小此反电动势,通常可在激励线圈上并联一个放电电阻 R ,在线圈断电时,该电阻与线圈形成一个放电电路,使原先储存于磁场中的能量转换成热能而消耗在电阻上,不致产生过电压。从降低过电压的角度出发,电阻 R 应小一些,但这也可能导致长期工作时能量的损耗。为解决这个矛盾,可与电阻串联一个二极管,使正常工作时放电电路不工作,如图1-9所示。通常,放电电路的电阻值可取线圈电阻的6~8倍。

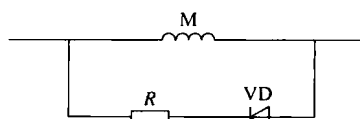


图 1-9 直流线圈的放电电路

3) 剩磁的吸力特性。由于铁磁物质有剩磁,它使电磁机构的激励线圈失电后仍有一定的磁性吸力存在,剩磁的吸力随气隙 δ 的增大而减小。

(3) 吸力特性与反力特性的配合

电磁机构欲使衔铁吸合,则在整个吸合过程中吸力应大于反力,但也不能过大,否则将会影响电器的机械寿命。如果反映在特性图上,就是要保证吸力特性在反力特性的上方。当切断电磁机构的激励电流以释放衔铁时,其反力必须大于剩磁吸力,才能保证衔铁可靠释放。吸力特性、反力特性与剩磁吸力特性之间的配合如图1-10所示。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。

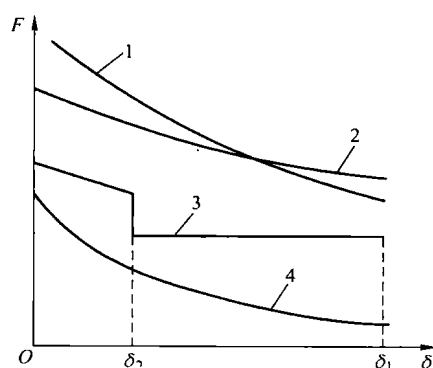


图 1-10 吸力特性和反力特性

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

在实际使用中,一般通过调整反力弹簧或触点初压力以改变反力特性,使之与吸力特性有良好的配合。

对于单相交流电磁机构,由于交流磁通过零时吸力也为零,吸合后的衔铁在反力作用下将被拉开;磁通过零后吸力增大,当吸力大于反力时衔铁又吸合。这样,在交流电每个周期内衔铁吸力要两次过零,使衔铁产生强烈的振动和噪声,甚至造成铁心松散。为避免衔铁振动,可在铁心端面上安装一个铜制的分磁环(或称短路环),如图1-11所示。当电磁机构的交变磁通穿过短路环所包围的截面 S_2 时,环中产生涡流,根据电磁感应

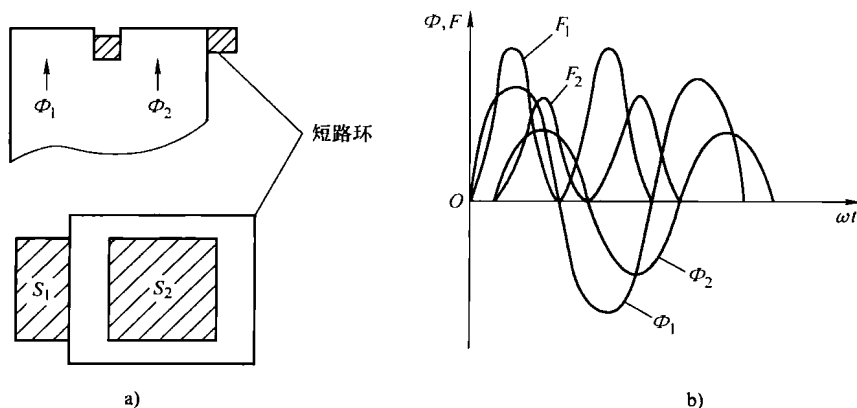


图 1-11 安装短路环后的磁通和电磁吸力分布示意图

a) 磁通示意图 b) 电磁吸力分布示意图