



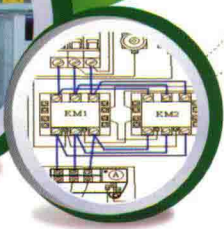
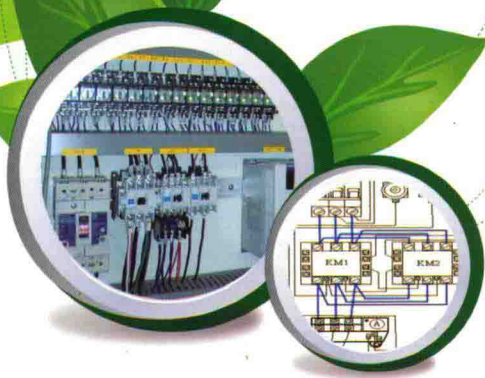
普通高等教育教学改革系列规划教材

电气控制与PLC及应用 (三菱FX系列)

刘祖其 刘 海 康桂花◎主 编

徐春霞 叶晓燕◎副主编

- 以实践操作培养为重点, 突出企业实际生产的需求
- 案例均来自企业实践, 贴近生活, 由浅入深, 由简单到复杂
- 通过编程训练使学生掌握电气控制与PLC的工程应用
- 提供免费的电子教学课件, 以方便教师教学



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

普通高等教育教学改革系列规划教材

电气控制与 PLC 及应用

（三菱 FX 系列）

主 编 刘祖其 刘 海 康桂花

副主编 徐春霞 叶晓燕

参 编 张龙音 梅 莉 贺代芳 魏晨华

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书从教学需要和工程实际出发,介绍了继电-接触器控制系统和 PLC 控制系统的工作原理、设计方法和工程应用。主要内容有常用低压电器、电子电器与智能电器、基本电气控制电路、电气控制系统的设计、PLC 基础知识、三菱 FX 系列 PLC、三菱 FX_{2N} 系列 PLC 的基本指令及编程、三菱 FX_{2N} 功能指令及应用、PLC 的工程应用及案例、编程训练共 10 章。

本书在保证传统知识点的基础上,增加了现代电气控制技术的新技术、新知识。

本书可作为普通高等学校和高等职业学校教学用书,适合作为电气工程及其自动化、工业自动化、电气自动化、电子信息工程及相近专业的教材,也可作为相关工程技术人员的参考书。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

电气控制与 PLC 及应用:三菱 FX 系列 / 刘祖其, 刘海, 康桂花主编. —北京: 电子工业出版社, 2016.8
ISBN 978-7-121-29105-0

I. ①电… II. ①刘… ②刘… ③康… III. ①电气控制—高等学校—教材②plc 技术—高等学校—教材
IV. ①TM571.2②TM571.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 136456 号

策划编辑: 王艳萍

责任编辑: 王艳萍

印 刷: 三河市华成印务有限公司

装 订: 三河市华成印务有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 787×1 092 1/16 印张: 18.5 字数: 473.6 千字

版 次: 2016 年 8 月第 1 版

印 次: 2016 年 8 月第 1 次印刷

印 数: 3 000 册 定价: 39.80 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888, 88258888。

质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式: wangyp@phei.com.cn

前 言

本书从教学需要和工程实际出发,介绍了继电—接触器控制系统和 PLC 控制系统的工作原理、设计方法和工程应用。主要内容有常用低压电器、电子电器与智能电器、基本的电气控制电路、电气控制系统的设计、PLC 基础知识、三菱 FX 系列 PLC、三菱 FX_{2N} 系列 PLC 的基本指令及编程、三菱 FX_{2N} 功能指令及应用、PLC 的工程应用及案例、编程训练共 10 章。

本书在保证传统知识点的基础上,增加了现代电气控制技术的新技术、新知识,新编了电子电器与现代智能电器及应用,PLC 在发电、供配电、新能源的应用,PLC 的工程应用及案例,详细介绍了 FX_{2N} 功能指令及应用,可根据专业或课时要求选修。

本书由四川城市职业学院刘祖其教授、中国五矿集团刘海博士、成都东软学院康桂花副教授为主编,克拉玛依职业技术学院徐春霞副教授、叶晓燕副教授为副主编,张龙音、梅莉、贺代芳、魏晨华参编。

本书可作为普通高等学校和高等职业学校教学用书,适合作为电气工程及其自动化、工业自动化、电气自动化、电子信息工程及相近专业的教材,有“*”符号的内容高职学生可选学或不学。本书也可作为相关工程技术人员的参考书。

本书配有免费的电子教学课件及习题答案,请有需要的教师登录华信教育资源网(www.hxedu.com.cn)免费注册后进行下载,如有问题请在网站留言或与电子工业出版社联系(E-mail: hxedu@phei.com.cn)。

由于编者水平有限,书中难免会有错误和不妥之处,恳请广大读者批评指正。

编 者

目 录

第 1 章 常用低压电器	(1)
1.1 低压电器概述	(1)
1.1.1 低压电器的分类	(1)
1.1.2 常用的低压电器介绍	(2)
1.1.3 常用低压电器的基本结构	(2)
1.2 接触器	(9)
1.2.1 交流接触器	(9)
1.2.2 直流接触器	(11)
1.2.3 接触器的型号和主要技术参数	(12)
1.2.4 常用接触器的选用	(13)
1.3 继电器	(14)
1.3.1 电磁式电流、电压、中间继电器	(14)
1.3.2 时间继电器	(17)
1.3.3 热继电器	(20)
1.3.4 速度继电器	(22)
*1.3.5 其他继电器	(23)
1.4 熔断器	(24)
1.4.1 熔断器的结构和工作原理	(24)
1.4.2 常用的低压熔断器	(25)
*1.4.3 熔断器的选择	(26)
1.5 主令电器	(27)
1.5.1 按钮	(27)
1.5.2 行程开关	(29)
*1.5.3 其他开关	(30)
1.6 低压断路器	(31)
1.6.1 低压断路器的结构和工作原理	(32)
1.6.2 低压断路器的选用	(33)
1.6.3 漏电保护器	(33)
1.7 低压开关	(34)
1.7.1 常用刀开关	(34)
1.7.2 组合开关	(36)
本章小结	(37)
习题与思考题	(37)

第2章 电子电器与智能电器	(39)
2.1 电子电器	(39)
2.1.1 电子电器的特点	(39)
2.1.2 电子电器的组成	(40)
2.1.3 电子式时间继电器	(41)
*2.1.4 固态继电器	(42)
*2.1.5 电子式电动机保护电路	(49)
2.1.6 接近开关	(50)
2.2 现代智能电器	(54)
2.2.1 智能电器定义与分类	(54)
2.2.2 智能电器组成	(55)
*2.2.3 常用典型智能电器	(57)
*2.2.4 智能电器及其应用	(58)
2.2.5 现代智能低压电器及发展趋势	(64)
本章小结	(65)
习题与思考题	(66)
第3章 基本电气控制电路	(67)
3.1 电气控制基础知识	(67)
3.1.1 电气控制系统图的图形符号和常用符号	(67)
*3.1.2 基本控制逻辑	(70)
3.1.3 电气图	(71)
3.2 三相笼型异步电动机的直接启动控制	(74)
3.2.1 直接启动控制电路	(74)
3.2.2 正、反转控制	(76)
3.3 三相笼型异步电动机的减压启动控制	(78)
3.3.1 定子电路串电阻减压启动控制	(78)
3.3.2 星形/三角形减压启动控制	(80)
3.3.3 自耦变压器减压启动控制	(81)
*3.3.4 延边三角形减压启动控制	(82)
3.4 三相笼型异步电动机的制动控制	(83)
3.4.1 反接制动控制	(83)
3.4.2 能耗制动控制	(85)
3.5 三相异步电动机的调速控制	(87)
3.5.1 双速电动机的控制	(87)
*3.5.2 三速电动机的控制	(88)
3.5.3 变频调速与变频器	(89)
*3.6 直流电动机控制电路	(92)
3.6.1 直流电动机的启动控制	(93)
3.6.2 直流电动机的正、反转控制电路	(94)

3.6.3	并励直流电动机的能耗制动	(94)
3.6.4	直流电动机调速控制电路	(95)
3.7	其他典型控制环节	(96)
3.7.1	多地点控制	(96)
3.7.2	顺序控制	(97)
3.7.3	自动循环控制	(98)
*3.8	软启动器及应用	(99)
3.8.1	软启动器概述	(99)
3.8.2	软启动器的控制功能	(101)
3.8.3	软启动器的应用	(102)
3.9	电气控制的保护环节	(103)
	本章小结	(104)
	习题与思考题	(105)
第4章	电气控制系统的设计	(107)
4.1	电气控制系统设计的基本内容	(107)
4.2	电气控制系统设计的一般步骤	(108)
4.3	电气控制系统设计的基本原则	(109)
*4.4	电气控制电路的逻辑设计	(115)
4.4.1	电气电路的逻辑表示	(115)
4.4.2	电气电路的化简	(117)
4.5	电气控制电路的设计案例	(119)
4.5.1	电气控制电路的一般设计方法	(119)
4.5.2	设计案例——往复运动电气控制电路	(120)
	本章小结	(121)
	习题与思考题	(122)
第5章	PLC 基础知识	(123)
5.1	PLC 定义与特点	(123)
5.2	PLC 的基本组成	(124)
5.2.1	PLC 的硬件组成	(124)
5.2.2	PLC 的软件组成	(126)
5.3	PLC 的工作原理	(127)
5.3.1	扫描工作方式	(127)
5.3.2	工作过程	(127)
5.4	PLC 的性能指标	(128)
5.5	PLC 的分类	(129)
5.6	PLC 的控制情况	(130)
5.7	PLC 的市场情况	(131)
5.8	PLC 的发展趋势	(131)
5.9	使用 PLC 应注意的问题	(132)

本章小结	(133)
习题与思考题	(133)
第6章 三菱FX系列PLC	(135)
6.1 三菱FX系列PLC简介	(135)
6.2 FX系列PLC的内部继电器	(136)
6.2.1 输入/输出点数	(136)
6.2.2 FX系列PLC的性能	(137)
6.2.3 输入/输出方式	(139)
6.3 FX系列PLC内部继电器的编号及功能	(140)
本章小结	(148)
习题与思考题	(148)
第7章 三菱FX_{2N}系列PLC的基本指令及编程	(149)
7.1 PLC编程语言概述	(149)
7.2 FX _{2N} 系列PLC的技术特点	(150)
7.3 FX _{2N} 系列PLC的基本指令	(151)
7.3.1 LD、LDI、OUT指令	(151)
7.3.2 AND、ANI指令	(152)
7.3.3 OR、ORI指令	(152)
7.3.4 ORB指令	(153)
7.3.5 ANB指令	(153)
7.3.6 MPS、MRD、MPP指令	(154)
7.3.7 SET、RST指令	(156)
7.3.8 PLS、PLF指令	(156)
7.3.9 MC、MCR指令	(157)
7.3.10 NOP指令	(159)
7.3.11 END指令	(160)
7.3.12 步进指令	(160)
7.3.13 其他基本指令	(162)
7.4 梯形图编程的基本规则	(162)
7.5 基本指令举例——三相异步电动机正、反转控制	(164)
本章小结	(167)
习题与思考题	(168)
第8章 三菱FX_{2N}系列PLC的功能指令及应用	(171)
8.1 程序流程控制指令(FNC00~FNC09)	(172)
8.2 数据传送与比较指令(FNC10~FNC19)	(176)
8.3 算术和逻辑运算指令(FNC20~FNC29)	(181)
*8.4 循环与移位指令(FNC30~FNC33)	(184)
*8.5 数据处理指令(FNC41~FNC49指令)	(188)
*8.6 高速处理指令(FNC50~FNC59)	(192)

*8.7 方便指令 (FNC60~FNC69)	(197)
*8.8 外部设备 I/O 指令 (FNC70~FNC79)	(202)
*8.9 外部设备 SER 指令 (FNC80~FNC89)	(207)
*8.10 浮点运算指令 (FNC110~FNC139)	(212)
*8.11 数据处理指令 (FNC140~FNC147)	(215)
*8.12 时钟运算指令 (FNC160~FNC179)	(216)
*8.13 外部 (格雷码) 变换指令 (FNC170~FNC179)	(218)
*8.14 触头比较指令 (FNC224~FNC246)	(219)
8.15 PLC 通信	(221)
8.15.1 串行接口	(221)
8.15.2 N:N 网络通信	(222)
8.15.3 CC-Link 网络	(223)
8.15.4 其他通信	(224)
本章小结	(225)
习题与思考题	(225)
第 9 章 PLC 的工程应用及案例	(227)
9.1 PLC 应用领域及类型	(227)
9.2 PLC 控制系统的设计原则	(227)
9.3 PLC 控制系统的硬件和软件设计	(228)
9.3.1 PLC 的硬件设计	(228)
9.3.2 PLC 的软件设计	(229)
9.4 PLC 程序设计方法	(230)
9.5 PLC 在电气控制电路中的应用及案例	(231)
9.5.1 两台电动机顺序启动联锁控制电路	(231)
9.5.2 自动限位控制电路	(232)
9.5.3 电动机 Y/ Δ 减压启动控制电路	(233)
9.5.4 自动循环控制	(234)
9.5.5 能耗制动控制	(235)
*9.6 PLC 在发电、供配电、新能源系统中的应用	(236)
9.6.1 PLC 在发电厂自动控制系统中的应用	(236)
9.6.2 PLC 在供配电自动控制系统中的应用	(238)
9.6.3 PLC 在新能源自动控制中的应用	(239)
9.6.4 几种常用电气软件简介及应用案例	(242)
本章小结	(243)
习题与思考题	(243)
第 10 章 PLC 编程训练	(245)
*10.1 PLC 编程软件	(245)
10.1.1 FX 系列 PLC 编程软件	(245)
10.1.2 GX Developer 编程软件	(254)

10.2	手持编程器编程	(259)
10.3	编程训练案例	(262)
10.3.1	三相异步电动机正、反转的 PLC 控制	(262)
10.3.2	电机的 PLC 自动控制	(263)
10.3.3	数码显示控制	(265)
10.3.4	步进电机的模拟控制	(268)
10.3.5	交通信号灯的自动控制	(270)
附录 A	三菱 FX _{2N} 系列 PLC 性能规格	(273)
附录 B	FX _{2N} 系列 PLC 常用基本逻辑指令表	(277)
附录 C	FX _{0S} 、FX _{0N} 、FX _{1S} 、FX _{1N} 、FX _{2N} (FX _{2NC})、FX _{3U} 系列 PLC 功能指令表	(279)
参考文献		(286)

第 1 章 常用低压电器

电器是工业、农业、科学现代化技术发展的重要元件，是组成电气成套设备的基础配套元件。生产过程的自动化控制离不开电力系统和电力拖动控制系统，它们之间的密切联系和相互配合已不能光靠机械的装置去完成，而必须更多地借助于电器。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，尤其是正在发展的智能电器在电气控制系统中将具有相当重要的地位。本章主要介绍常用的电磁式电器。

1.1 低压电器概述

根据外界特定信号自动或手动地接通或断开电路，实现对电路或非电对象控制的电工设备称做电器。电器对电能的生产、输送及分配与应用起着控制、检测、调节和保护的作用。

本书讲到电器和电气，要注意两者的区别。

电器：实物词，指有形器物，“开”和“关”是电器最基本、最典型的功能。电器是一种能控制电的工具。

电器按工作电压高低分高压电器和低压电器，按动作方式分自动切换电器和非自动切换电器；按执行功能分触头电器和无触头电器。

① 低压电器通常是指工作在交流电压 1200V 或直流电压 1500V 及以下的电路中，起通断、保护、控制或调节作用的电器产品，如接触器、继电器等。

低压电器是电力拖动自动控制系统的基本组成元件，电气技术人员必须熟练掌握低压电器的结构、原理，并能正确选用和维护。

② 工作在交流电压 1200V 或直流电压 1500V 以上的电路中的电器产品称做高压电器，如高压断路器、高压隔离开关、高压熔断器等。

电气：主要指电能传输及使用的途径。一是有直接的电的联系，每个电压等级内的所有设备通过导线、断路器或者隔离开关等，有直接的电的联系。二是没有电的直接联系，而是通过气隙内的磁场进行能量交换（传输），如变压器的各绕组之间，就是通过气隙联系的，电机定转子之间也都是通过气隙来联系的。

1.1.1 低压电器的分类

1. 按用途分类

(1) 控制电器：用于控制电动机的启动、制动、调速等动作，如开关电器、信号控制电器、接触器、继电器、电磁启动器、控制器等。

(2) 主令电器：用于自动控制系统中发送控制指令的电器，如主令开关、行程开关、按



钮、万能转换开关等。

(3) 保护电器: 用于保护电动机和生产机械, 使其安全运行, 如熔断器、电流继电器、热继电器、避雷器等。

(4) 配电电器: 用于电能的输送和分配, 如低压隔离器、断路器、刀开关等。

(5) 执行电器: 用于完成某种动作或传动功能, 如电磁离合器、电磁铁等。

2. 按工作原理分类

(1) 电磁式电器: 依据电磁感应原理工作的电器, 如直流接触器、交流接触器及各种电磁式继电器等。

(2) 非电量控制电器: 靠外力或某种非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。

3. 按执行机能分类

(1) 有触头电器: 利用触头的接触和分离来通断电路的电器, 如接触器、电磁阀、电磁离合器、刀开关、继电器等。

(2) 无触头电器: 利用电子电路发出检测信号, 达到执行指令并控制电路目的的电器, 如电子接近开关、电感式开关、电子式时间继电器等。

1.1.2 常用低压电器介绍

常用的低压电器包括以下几种。

(1) 接触器: 交流接触器、直流接触器。

(2) 继电器。

① 电磁式继电器: 包括电压继电器、电流继电器、中间继电器。

② 时间继电器: 包括直流电磁式继电器、空气阻尼式继电器、电动式继电器、电子式继电器。

③ 其他继电器: 包括热继电器、干簧继电器、速度继电器、温度继电器、压力继电器。

(3) 熔断器: 瓷插式熔断器、螺旋式熔断器、有填料封闭管式熔断器、无填料密闭管式熔断器、快速熔断器、自复式熔断器。

(4) 开关电器。

① 断路器: 包括框架式断路器、塑料外壳式断路器、快速直流限流式断路器、漏电保护器。

② 刀开关。

(5) 行程开关: 直动式行程开关、滚动式行程开关、微动式行程开关。

(6) 其他电器: 按钮、指示灯等。

1.1.3 常用低压电器的基本结构

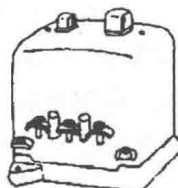
从结构上看, 低压电器一般都具有感测与执行两个基本组成部分。感测部分大都是电磁机构, 执行部分一般是触头。常用传统低压电器外形如图 1-1 所示。



(a) H21013型组合开关



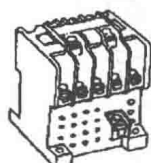
(b) H32型转换开关



(c) D25-20型自动开关



(d) RL型螺旋式熔断器



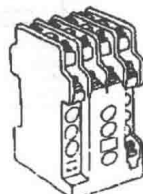
(e) CJ10-10型交流接触器



(f) CJ10-20型交流接触器



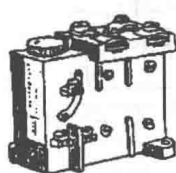
(g) 3TB型交流接触器



(h) J27型中间继电器



(i) JTX型中间继电器



(j) JRO型热继电器



(k) UA型热继电器



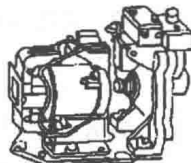
(l) JT4型过电流继电器



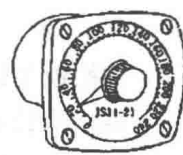
(m) JFZO型速度继电器



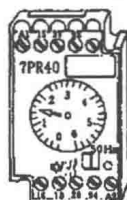
(n) JY1型速度继电器



(o) JS7型空气阻尼式时间继电器



(p) JS11型电动式时间继电器



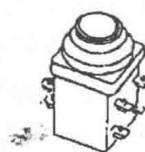
(q) TPR型电动式时间继电器



(r) JS14型晶体管式时间继电器



(s) LA19型按钮



(t) LA18型按钮



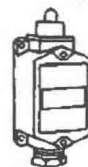
(u) LA10型按钮



(v) JLXK1-111型行程开关



(w) JLXK1-211型行程开关



(x) JLXK1-311型行程开关



(y) JLK1-411型行程开关



(z) X2-N型行程开关

图 1-1 常用传统低压电器外形



1. 电磁机构

电磁机构是各种电磁式电器的感测部分,它的主要作用是将电磁能转换为机械能,带动触头动作,完成接通或分断电路。电磁机构主要由吸引线圈、铁芯和衔铁等几部分组成。按动作方式,可分为绕轴转动式和直线运动式等,如图 1-2 所示。

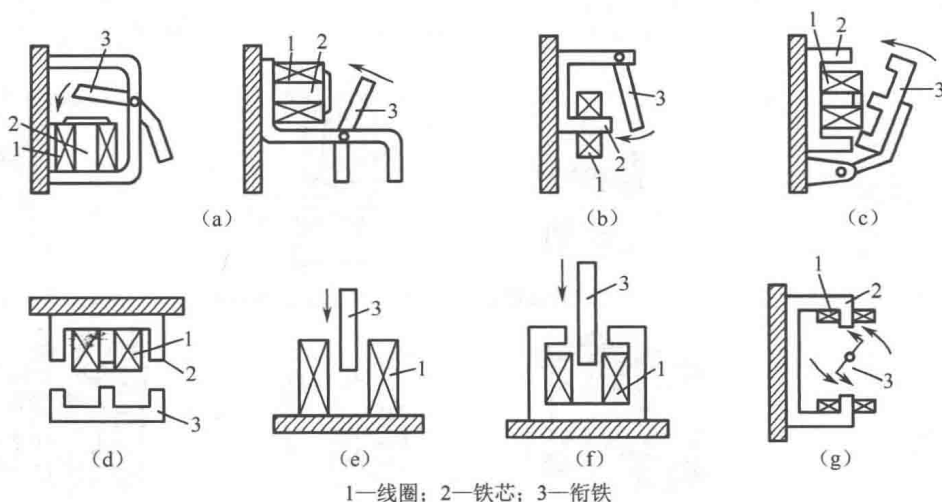


图 1-2 常用电磁机构的形式

(1) 按衔铁的运动方式分类。

根据磁路形状和衔铁运动方式,以及线圈接入电路的方式不同,电磁机构可分成多种形式和类型。不同形式和类型的电磁机构可构成不同类型的电磁式电器。

① U 形拍合式。

铁芯制成 U 形,而衔铁的一端绕棱角或转轴做拍合运动。图 1-2 (a) 中,铁芯一般用工程软铁制成而衔铁绕棱角运动,主要用于直流继电器和接触器。图 1-2 (b) 中铁芯一般用电工钢片叠成,而衔铁绕转轴转动,磨损较小,主要用于交电磁式低压电器中。

② E 形拍合式和 E 形直动式。

衔铁沿轴转动的拍合式铁芯,铁芯一般用硅钢片叠成,衔铁绕轴转动,常用于较大容量的交流接触器。图 1-2 (c) 所示,广泛用于 60A 及以上的交流接触器中。图 1-2 (d) 所示,广泛用于 40A 以下的中小容量的交流接触器和交流电压继电器、中间继电器及时间继电器中。

③ 空心螺管形式。

这种电磁机构只有线圈和圆柱形衔铁而无铁芯,衔铁在空心线圈内做直线运动,如图 1-2 (e) 所示,主要用于交流电流继电器和时间继电器中。

④ 螺管形式。

在空心线圈的外面罩着用导磁材料制成的外壳,而圆柱形衔铁在空心线圈内做直线运动,如图 1-2 (f) 所示,用于交流电流继电器中。

⑤ C 形式。

铁芯用电工钢片叠成 C 形,两个可串联或并联的线圈分别绕在铁芯开口处的铁芯柱上,衔铁为 Z 形转子,如图 1-2 (g) 所示,用于供电系统的电流继电器中。

(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,线径粗。

2. 电磁机构的工作原理

电磁机构的工作情况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,电磁机构的吸力特性随励磁电流种类(交流或直流)、线圈的连接方式(串联或并联)的不同而有所差异。

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。电磁机构反力特性阻力的大小与作用弹簧、摩擦阻力及衔铁重量有关。

下面分析吸力特性、反力特性和两者的配合关系。

(1) 电磁机构的吸力特性

当电磁铁线圈通电以后,铁芯吸引衔铁带动触头动作,从而接通或分断电路的力称为电磁吸力,电磁吸力是影响电磁式电器可靠工作的重要参数,电磁机构的吸力 F 可近似地按下式计算,即

$$F = B^2 S / 2\mu_0 = B^2 S 10^7 / 8\pi \quad (1-1)$$

式中 $\mu_0 = 0.4\pi \times 10^{-6} \text{ H/m}$ (空气导磁系数);

F ——电磁吸力 (N);

B ——气隙中磁感应强度 (T);

S ——磁铁截面积 (m^2)。

磁感应强度 B 与气隙宽度及外加电压大小有关。对于直流电磁铁,外加电压恒定,电磁吸力的大小只与气隙有关。对于交流电磁铁,由于外加正弦交流电压在气隙宽度一定时,其气隙磁感应强度也按正弦规律变化,即 $B = B_m \sin \omega t$, 所以吸力公式为

$$F = 10^7 S B_m^2 \sin^2 \omega t / 8\pi$$

电磁吸力也按正弦规律变化,最小值为零,最大值为

$$F_m = 10^7 S B_m^2 / 8\pi$$

电磁机构的吸力特性反映的是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。

对于具有电压线圈的交流电磁机构,设外加电压不变,交流吸引线圈的阻抗主要取决于线圈的电抗,忽略电阻和电阻压降,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

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

交流电磁机构激励线圈的阻抗主要取决于线圈的电抗,即

$$U \approx E = 4.44 f N \Phi \quad (1-3)$$

$$\Phi = \frac{U}{4.44 f N} \quad (1-4)$$

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。

当频率 f 、匝数 N 、外加电压 U 都为常数时,由式 (1-4) 知磁通 Φ 也为常数,由式 (1-2) 可知电磁吸力 F 为常数,这是因为交流励磁时,电压、磁通都随时间做周期性变化,其电磁吸力也做周期性变化,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。

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

$$\Phi = \frac{IN}{R_m} = \frac{IN}{\delta / \mu_0 S} = \frac{(IN)(\mu_0 S)}{\delta} \quad (1-5)$$

式中 N ——线圈匝数;

R_m ——磁阻 (Ω);

δ ——气隙长度 (mm);

S ——吸力处端面积 (m^2);

$\mu_0 = 0.4\pi \times 10^{-6} \text{ H/m}$ (空气导磁系数)。

由图 1-3 所示,交流电磁机构在吸合过程中,随着气隙的减小,磁阻也减小,线圈电感增大,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。对 U 形交流电磁机构,衔铁未动作时,电流可达吸合后额定电流的 5~6 倍,对 E 形电磁机构更是高达 10~15 倍。因此,在可靠性要求高或操作频繁的场所,一般不要采用交流电磁机构。

② 直流电磁机构的吸力特性。

对于具有电压线圈的直流电磁机构,因外加电压和线圈电阻不变,流过线圈的电流为常数,与磁路的气隙大小无关。根据磁路定律, F 与气隙 δ 的关系为

$$F = \frac{1}{2} IN \mu_0 S \frac{1}{\delta^2} \quad (1-6)$$

由式 (1-6) 可见,吸力 F 与气隙 δ^2 成反比,故吸力特性为二次曲线形状,如图 1-4 所示。它表明衔铁闭合前后吸力变化很大。

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

$$F \propto \Phi^2 \propto \left(\frac{1}{\delta} \right)^2 \quad (1-7)$$

即直流电磁机构的吸力 F 与气隙 δ 的二次方成反比。从吸力特性图 1-4 不难看出,衔铁闭合前后吸力变化很大,气隙越小,吸力越大。衔铁闭合前后激励线圈的电流不变,且吸合后电磁吸力大,工作可靠性高。因此,直流电磁机构适用于动作频繁的场所。

需要注意的是,当直流电磁机构的励磁线圈断电时,磁动势由 NI 急速变化接近于 0,电磁机构的磁通也发生相应的急速变化,在励磁线圈中将会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 倍,容易因过电压而损坏线圈。为减小反电动势,一般在激励线圈上并联一个放电电阻 R , R 值一般取线圈电阻的 6~8 倍,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。为使正常工作时放电电路不工作,要在电阻支路上串联一个二极管。

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,剩磁的吸力会随气隙 δ 的增大而减小。

由以上分析可以看出,交流电磁机构的吸力与气隙的大小无关。直流电磁机构的吸力与气隙的平方成反比,交流电磁机构吸力特性比直流电磁机构的吸力特性要陡。

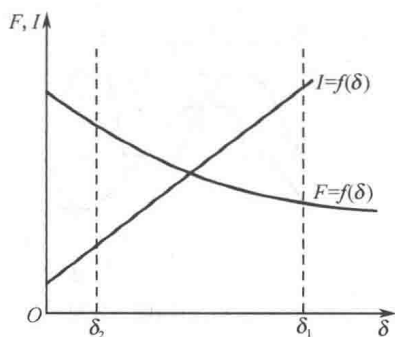


图 1-3 交流电磁机构吸力特性

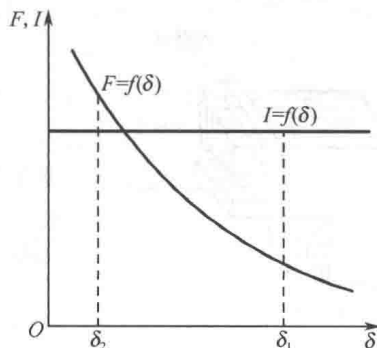
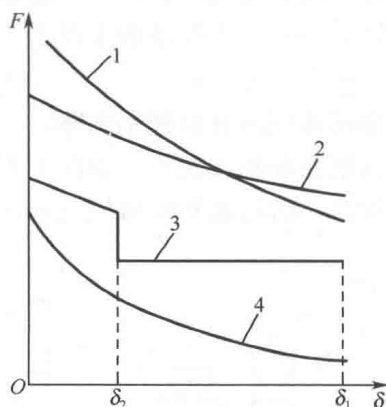


图 1-4 直流电磁机构的吸力特性

(2) 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: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 1-5 所示。



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

图 1-5 吸力特性和反力特性

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

(3) 工作原理

电磁机构的工作原理:当线圈通入电流后,将产生磁场,磁通经过铁芯,在衔铁和工作