

# 电气工程与 电力系统自动控制

刘小保◎著

延边大学出版社



# 电气工程与电力系统自动控制

刘小保 著

延边大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

电气工程与电力系统自动控制 / 刘小保著. -- 延吉:  
延边大学出版社, 2018.6

ISBN 978-7-5688-3808-5

I. ①电… II. ①刘… III. ①电气设备-自动控制②  
电力系统自动化-自动控制 IV. ①TM762②TM763

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 271684 号

电气工程与电力系统自动控制

刘小保 著

---

延边大学出版社出版发行  
(吉林省延吉市公园路 105 号)

三河兴达印务有限公司

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 18

字数 288 千字 印数 1-5000

2018 年 6 月第 1 版 2018 年 6 月第 1 次印刷

---

ISBN 978-7-5688-3808-5

定价 58.00 元

## 前言

电力系统是电能生产、变换、输送、分配、消费的各种设备，按照一定的技术和经济要求，有机组成的一个统一系统的总称。为了保证电力系统在统一的管理和监视下正常运行，适应电力系统规模和容量的不断扩大和系统结构、运行方式的变化；为了正确和及时地掌握每时每刻都在变化着的电力系统运行情况；为了协调和控制电力系统各组成部分的运行方式，实现电力系统运行优质、安全和经济的目标，必须应用现代控制理论、电子技术、计算技术、通信技术、图像显示技术等科学技术的最新成果来实现电力系统的自动控制。

近年来，机组的基础自动控制装置逐步实现智能化，例如微机化的调速装置、励磁调节器、同步系统等。多微机的分布式计算机控制系统的应用，使水电厂实现全厂的安全监视、自动发电控制和经济运行、自动电压控制、事故顺序记录和水库经济调度等综合功能。在梯级开发的水系，还可进行全梯级水电厂的集中调度和控制。随着自动控制水平的提高，一些中、小型水电厂将可以实现无人值班和中心调度所的远程监控。

本书对电气工程与电力系统自动控制的研究进行了系统的阐述，在内容设计上分有合，既注重电力系统自动化与智能技术知识体系的独立完整性，又将二者有机结合；在应用层面进行了系统研究，知识性、创新性都很强，形成了自己的特色。

编者

2018年4月

# contents 目录

<b>第一章 常用低压电器 .....</b>	<b>1</b>
第一节 概 述 .....	3
第二节 接触器 .....	19
第三节 电磁式继电器 .....	26
第四节 时间继电器 .....	31
第五节 热继电器 .....	38
第六节 速度继电器与干簧继电器 .....	40
第七节 可编程通用逻辑控制继电器 .....	42
第八节 主令电器 .....	42
第九节 熔断器 .....	52
第十节 刀开关与低压断路器 .....	55
<b>第二章 电气控制基本环节 .....</b>	<b>63</b>
第一节 电气控制线路的绘制原理 .....	65
第二节 电气控制电路基本控制规律 .....	68
第三节 三相异步电动机的启动控制 .....	76
第四节 三相异步电动机的制动控制 .....	84
第五节 三相异步电动机的调速控制 .....	88
第六节 电气控制系统常用控制规律及保护环节 .....	91

<b>第三章</b>	<b>典型生产机械的电气控制 .....</b>	<b>97</b>
第一节	CA6140车床控制电路 .....	99
第二节	M7120平面磨床控制电路 .....	104
第三节	Z3050摇臂钻床控制电路 .....	111
第四节	X62W万能铣床控制电路的安装与检修 .....	117
<b>第四章</b>	<b>电力系统自动化概述 .....</b>	<b>129</b>
第一节	电力系统自动化的重要性及其发展历程 .....	131
第二节	电力系统自动化的内容 .....	136
第三节	电力系统的运行状态及调度控制 .....	148
<b>第五章</b>	<b>电力系统调度自动化 .....</b>	<b>151</b>
第一节	电力系统调度自动化是如何实现的 .....	153
第二节	远动和信息传输设备的配置与功能 .....	156
第三节	调度计算机系统及人机联系设备 .....	161
第四节	电力系统的分层调度控制 .....	169
第五节	电力系统状态估计 .....	171
<b>第六章</b>	<b>电力系统频率和有功功率自动控制 .....</b>	<b>173</b>
第一节	电力系统频率和有功功率控制的必要性 .....	175
第二节	发电机组调速控制的基本原理 .....	177
第三节	机械液压调速器的基本原理 .....	178
第四节	模拟电气液压调速器 .....	180
第五节	数字电液调速器 .....	182

第六节	同步发电机组调速系统的数学模型 .....	188
第七节	电力系统频率和有功功率自动控制的基本原理 .....	191
第八节	联合电力系统的频率和有功功率控制 .....	192
第九节	电力系统自动调频方法和自动发电控制 .....	194
第十节	电力系统经济调度 .....	196

## **第七章 电力系统电压和无功功率自动控制 ..... 197**

第一节	电力系统电压和无功功率控制的必要性 .....	199
第二节	电力系统电压和无功功率控制 .....	201
第三节	同步发电机励磁控制系统的主要任务和对它的基本要求 ..	203
第四节	同步发电机的励磁自动控制系统 .....	207
第五节	比例式励磁自动控制的基本原理 .....	212
第六节	同步发电机励磁自动控制系统的静态特性 .....	217
第七节	同步发电机励磁自动控制系统的动态特性 .....	218
第八节	同步发电机微机励磁系统 .....	222

## **第八章 电力系统的安全控制 ..... 227**

第一节	概 述 .....	229
第二节	电力系统运行状态的安全分析 .....	233
第三节	电力系统正常运行时的安全控制 .....	235
第四节	电力系统紧急状态的控制 .....	236
第五节	电力系统恢复状态的控制 .....	238

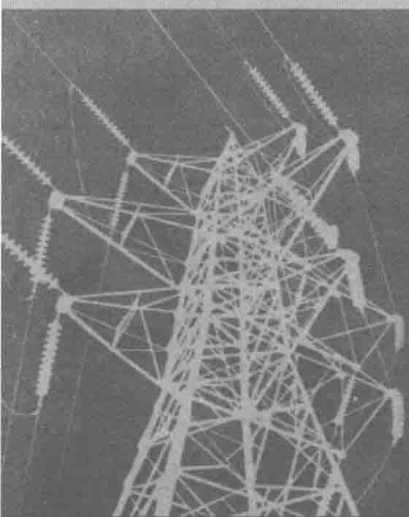
## **第九章 电力系统中断路器的控制.....241**

第一节	电力系统并列概述.....	243
第二节	自动准同期并列的基本原理.....	244
第三节	模拟式自动准同期装置.....	246
第四节	微机自动同期装置.....	247
第五节	自动低频减负荷.....	248

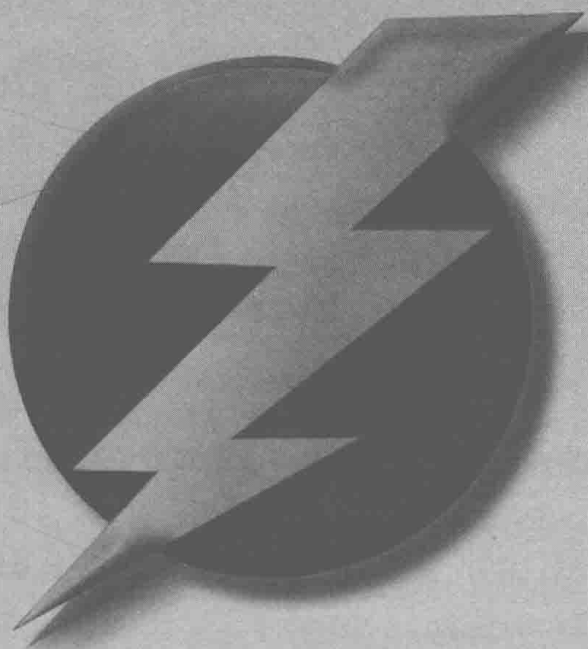
## **第十章 变电站和配电网自动化.....251**

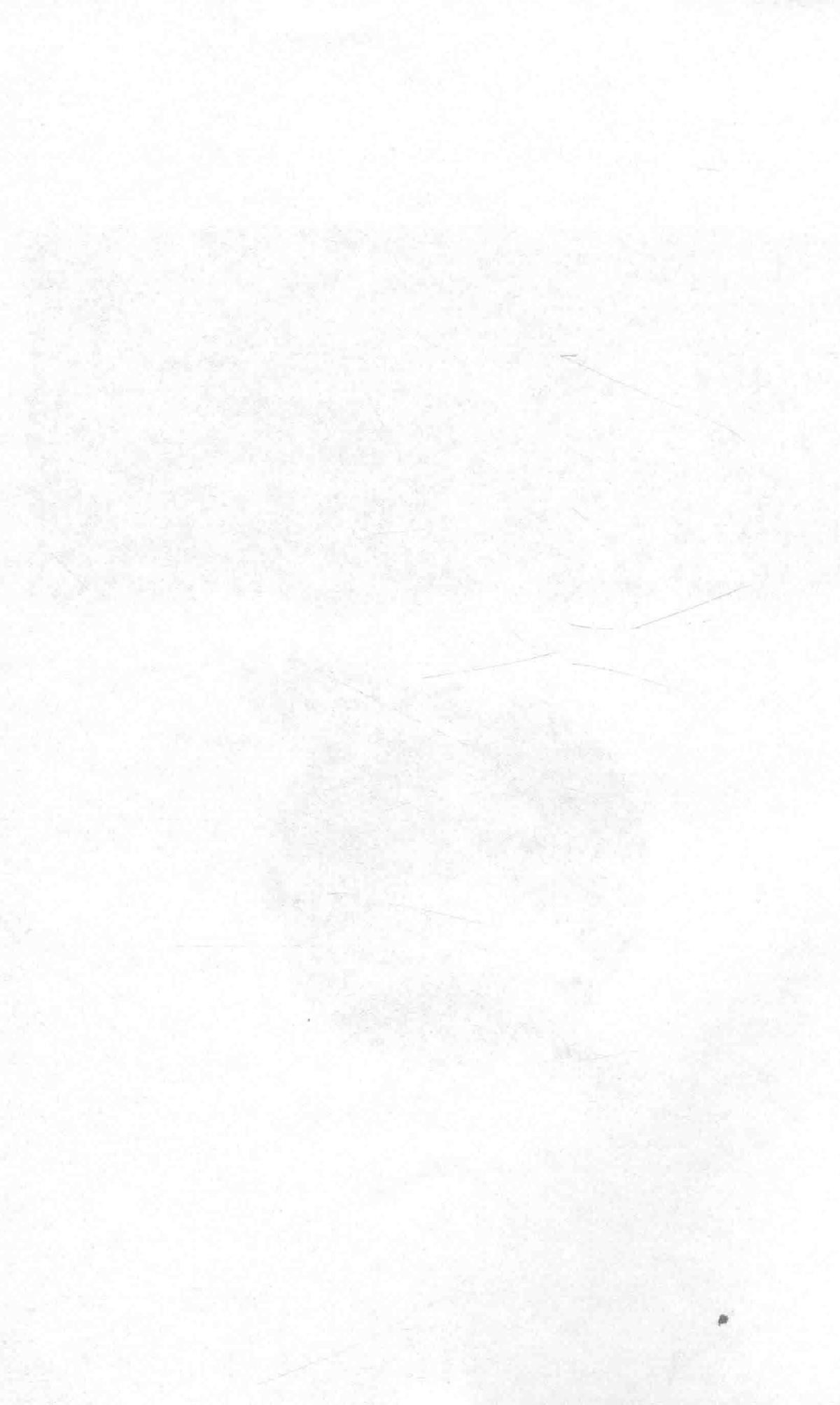
第一节	变电站自动化.....	253
第二节	变电站综合自动化.....	257
第三节	配电网的构成.....	262
第四节	配电网自动化.....	264
第五节	负荷控制.....	269
第六节	配电网综合自动化.....	272





# 第一章 常用低压电器







## 第一节 概述

电器是接通和断开电路或调节、控制和保护电路及电气设备用的电工器具。电器的用途广泛，功能多样，种类繁多，结构各异。下面是几种常用的电器分类。

### 一、低压电器的几种常用分类

#### (一) 按工作电压等级分类

##### 1. 高压电器

用于交流电压1200 V，直流电压1500 V以上电路中的电器，例如高压断路器、高压隔离开关、高压熔断器等。

##### 2. 低压电器

用于频率50 Hz（或60 Hz），交流电压为1200 V，直流电压1500 V及以下的电路中的电器，例如接触器、继电器等。

#### (二) 按动作原理分类

##### 1. 手动电器

用手或依靠机械力进行操作的电器，如手动开关、控制按钮、行程开关等。

##### 2. 自动电器

借助于电磁力或某个物理量的变化自动进行操作的电器，如接触器、继电器、电磁阀等。

#### (三) 按用途分类

##### 1. 控制电器

用于各种控制电路和控制系统的电器，例如接触器、继电器、电动机启动器等。

### 2. 主令电器

用于自动控制系统中发送动作指令的电器，例如按钮、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、保护继电器、避雷器等。

### 4. 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。

### 5. 配电电器

用于电能的输送和分配的电器，例如高压断路器、隔离开关、刀开关、自动空气开关等。

#### （四）按工作原理分类

##### 1. 电磁式电器

依据电磁感应原理来工作，如接触器、电磁式继电器等。

##### 2. 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。

## 二、低压电器的作用

低压电器能够依据操作信号或外界现场信号的要求，自动或手动改变电路的状态、参数，实现对电路或被控对象的控制、保护、测量、指示、调节。低压电器的作用有：

（1）控制作用。如电梯的上下移动、快慢速自动切换与自动停层等。

（2）保护作用。根据设备的特点，对设备、环境以及人身实行自动保护，如电机的过热保护，电网的短路保护、漏电保护等。

（3）测量作用。利用仪表及与之相适应的电器，对设备、电网或其他非电参数进行测量，如电流、电压、功率、转速、温度、湿度等。

（4）调节作用。低压电器可对一些电量和非电量进行调整，以满足用户的要求，如柴油机油门的调整、房间温湿度的调节、照明度的自动调节等。

（5）指示作用。利用低压电器的控制、保护等功能，检测出设备运行状况与电气电路工作情况，如绝缘监测、保护掉牌指示等。



(6) 转换作用。在用电设备之间转换或对低压电器、控制电路分时投入运行, 以实现功能切换, 如励磁装置手动与自动的转换, 供电的市电与自备电的切换等。

当然, 低压电器作用远不止这些, 随着科学技术的发展, 新功能、新设备会不断出现, 对低压配电电器要求是灭弧能力强、分断能力好, 热稳定性能好、限流准确等; 对低压控制电器, 则要求其动作可靠、操作频率高、寿命长并具有一定的负载能力。

常见低压电器的主要种类及用途见表1-1。

表1-1 常见低压电器的主要种类及用途

序号	类别	主要品种	用途
1	断路器	塑料外壳式断路器	主要用于电路的过负荷保护、短路、欠电压、漏电压保护, 也可用于不频繁接通和断开的电路
		框架式断路器	
		限流式断路器	
		漏电保护式断路器	
2	刀开关	直流快速断路器	主要用于电路的隔离, 有时也能分断负荷
		开关板用刀开关	
		负荷开关	
		熔断器式刀开关	
3	转换开关	组合开关	主要用于电源切换, 也可用于负荷通断或电路的切换
		换向开关	
4	主令电器	按钮	主要用于发布命令或程序控制
		限位开关	
		微动开关	
		接近开关	
5	接触器	万能转换开关	主要用于远距离频繁控制负荷, 切断带负荷电路
		交流接触器	
6	启动器	直流接触器	主要用于电动机的启动
		磁力启动器	
		星形—三角形启动器	
7	控制器	自耦减压启动器	主要用于控制回路的切换
		凸轮控制器	
		平面控制器	

续表

序号	类别	主要品种	用途
8	继电器	电流继电器	主要用于控制电路中，将被控量转换成控制电路所需电量或开关信号
		电压继电器	
		时间继电器	
		中间继电器	
		温度继电器	
		热继电器	
9	熔断器	有填料式熔断器	主要用于电路短路保护，也用于电路的过载保护
		无填料式熔断器	
		半封闭插入式熔断器	
		快速熔断器	
		自复熔断器	
10	电磁铁	制动电磁铁	主要用于起重、牵引、制动等地方
		起重电磁铁	
		牵引电磁铁	

对低压配电电器要求是灭弧能力强，分断能力好，热稳定性能好，限流准确等；对低压控制电器，则要求其动作可靠，操作频率高，寿命长并具有一定的负载能力。

### 三、电磁式低压电器基本结构

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

#### (一) 电磁机构

##### 1. 电磁机构的结构形式

电磁机构由吸引线圈、铁芯和衔铁组成。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，从而带动衔铁运动使触头动作，完成触头的断开和闭合，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。根据衔铁相对铁芯的运动方式，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。

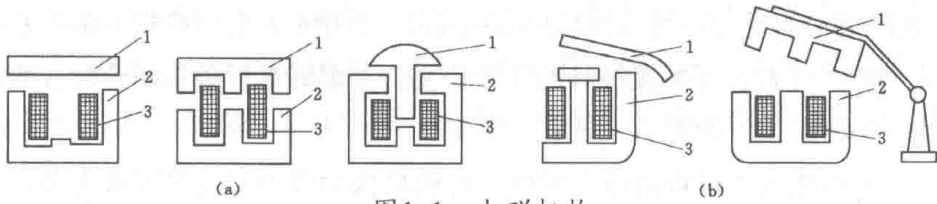


图1-1 电磁机构

(a) 直动式电磁机构; (b) 拍合式电磁机构

1——衔铁; 2——铁芯; 3——线圈

吸引线圈用以将电能转换为磁能，按吸引线圈通入电流性质不同，电磁机构分为直流电磁机构和交流电磁机构，其线圈称为直流电磁线圈和交流电磁线圈。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. 电磁机构工作原理

当吸引线圈通入电流后，产生磁场，磁通经铁芯、衔铁和工作气隙形成闭合回路，产生电磁吸力，将衔铁吸向铁芯。与此同时，衔铁还受到反作用弹簧的拉力，只有当电磁吸力大于弹簧反力时，衔铁才可靠地被铁芯吸住。而当吸引线圈断电时，电磁吸力消失，在弹簧作用下，衔铁与铁芯脱离，即衔铁释放。电磁机构的工作特性常用吸力特性和反力特性来表述。

当电磁机构吸引线圈通电后，铁芯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。

(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，由于弹簧的反力与其机械变形的位移量成正比，其反力特性可写成：

$$F = kx \quad (1-1)$$

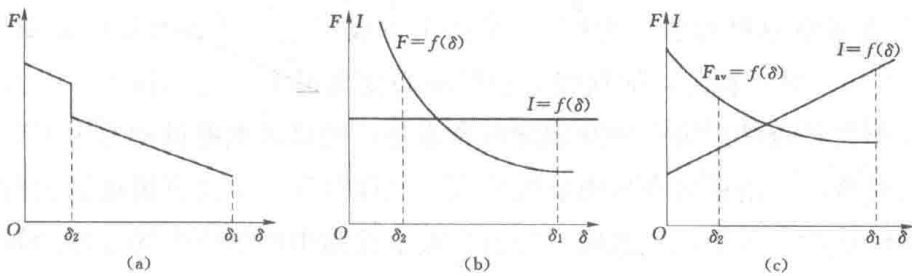


图1-2 电磁机构反力特性与吸力特性

(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

电磁机构的反力特性如图1-2 (a) 所示。其中 $\delta_1$ 为电磁机构气隙的初始值； $\delta_2$ 为动、静触头开始接触时的气隙长度。考虑到常开触头闭合时行程机构的弹力作用，反力特性在 $\delta_2$ 处有一突变。

(2) 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，当铁芯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： $F$ ——电磁机构衔铁所受的吸力，N；

$B$ ——气隙的磁感应强度，T；

$S$ ——吸力处端面积， $m^2$ 。

当端面积 $S$ 为常数时，吸力 $F$ 与 $B$ 成正比，也可以认为 $F$ 与磁通 $\Phi$ 的平方成正比，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指电磁吸力与气隙的相互关系。

直流电磁机构当直流励磁电流稳定时，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 $IN$ 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，则  $F \propto \frac{\Phi^2}{S}$

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

即直流电磁机构的吸力 $F$ 与气隙的平方成反比。其吸力特性如图1-2 (b) 所示。由此看出，衔铁吸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所，且衔铁吸合后电磁吸力大，工作可靠。但当直流电磁机构吸引线圈断电时，由于电磁感应，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，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，不致产生过电压。一般，放电电阻阻值取线圈直流电阻的6~8倍。

(3) 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

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

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

式中， $U$ ——线圈电压有效值，V；

$E$ ——线圈感应电动势，V；

$f$ ——线圈电压的频率，Hz；

$N$ ——线圈匝数；

$\Phi_m$ ——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 $\Phi_m$ 亦为常数，且电磁吸力 $F$ 的平均值 $F_{av}$ 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，现分析如下：

令气隙中磁感应强度按正弦规律变化

$$B(t) = B_m \sin \omega t \quad (1-8)$$

交流电磁机构电磁吸力的瞬时值

$$\begin{aligned} F(t) &= 4B^2(t)S \times 10^5 = 4B_m^2 S \times 10^5 \sin^2 \omega t \\ &= 2 \times 10^5 B_m^2 S (1 - \cos 2\omega t) \\ &= 4B^2 S (1 - \cos 2\omega t) \times 10^5 \\ &= 4B^2 S \times 10^5 - 4B^2 S \times 10^5 \cos 2\omega t \\ &= F_{-} - F_{\sim} \end{aligned} \quad (1-9)$$

式中， $B = B_m \sqrt{2}$  为正弦量 $B(t)$ 的有效值。当 $t=0$ ，则 $\cos 2\omega t=1$ ，于是 $F(t)=0$ 为最小值；当 $t=T/4$ 则 $\cos 2\omega t=-1$ ，于是 $F(t)=8B^2 S \times 10^5 = F_m$ 为最大值，在一周期内的平均值为

$$F_{av} = \frac{1}{T} \int_0^T F(t) dt = 4 \times 10^5 B^2 S \left[ \frac{1}{T} \int_0^T (1 - \cos 2\omega t) dt \right] = 4B^2 S \times 10^5 \quad (1-10)$$