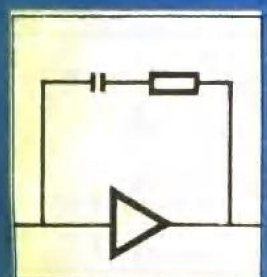
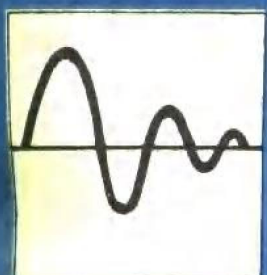
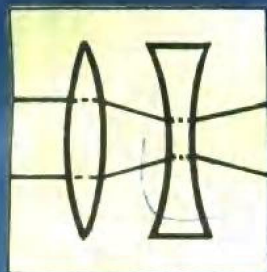


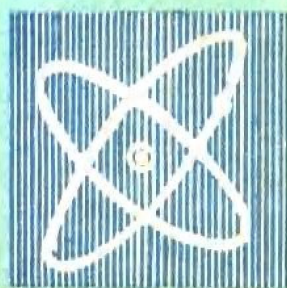
高等学校试用教材



电 器 学

理 论 基 础

福州大学张冠生 主编



机械工业出版社

电 器 学

理论基础

福州大学张冠生 主编

*

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第 117 号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

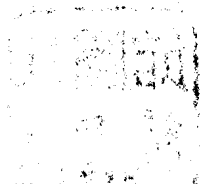
开本 $787 \times 1092 \frac{1}{16}$ · 印张 $26 \frac{1}{4}$ · 字数 643 千字

1980 年 11 月北京第一版 · 1980 年 11 月北京第一次印刷

印数 0,001—6,800 · 定价 2.70 元

*

统一书号: 15033 · 4899



前 言

本书是根据 1978 年 4 月在天津召开的高等院校一机部对口专业座谈会的精神以及 1978 年 6 月在山东泰安召开的全国高等院校电器专业教材会议上通过的电器学编写大纲编写的。

本书是电器专业的专业基础课，本书内容着重介绍电弧、电接触、电动力和电磁机构的基本理论，在讲清理论的基本规律和物理本质的基础上介绍它的计算方法。

为了达到循序渐进，在概论中通过介绍具体典型电器的结构原理引出与之相关的理论要点，在以后章节中再逐步深入地介绍基础理论的详细论证和计算方法。

本书除概论外，分为三篇十四章，主要介绍有触点开关电器的理论基础和计算方法，即：开关电器中的电弧理论和灭弧装置原理；电器的电接触理论；电器的电动力和发热计算；电磁机构的磁路、吸力和动作时间计算；永久磁铁与极化机构工作原理和计算方法特点；用电子计算机计算磁路和对电磁场进行数值计算。此外，本书还介绍交直流同时磁化的磁路（即磁放大器）的工作原理。各章之末都有小结，有关章节附有思考题与练习题。

考虑到电器的基本组成部分主要是执行部分和感测部分，执行的主要功能是通断，而开断的关键在于熄灭电弧，它是有触点开关电器的基本理论之一，故列为第一篇。触点接通过程中电接触和熔焊理论再加上电器载流元件的发热和电动力计算是第二篇的内容。第三篇是电磁机构的原理与计算，它是感测部分的理论基础，着重介绍电磁铁的基本理论和计算方法。考虑到磁放大器实质上是交直流同时磁化的磁路，故也列入第三篇。

本书不包括双金属机构及电器运动部分的撞击和阻尼理论以及机构学。这部分内容将在后继专业课程中进行介绍。

本书由福州大学张冠生教授主编，西安交通大学王季梅教授主审。概论和第十四章由福州大学张冠生同志执笔，第一、第二和第三章由西安交通大学尚振球同志执笔，第四和第十二章由河北工学院孟庆龙同志执笔，第五章和七、八、九、十、十一章由沈阳机电学院黄鼎同志执笔，第六和第十三章由河北工学院颜威利同志执笔。全稿由张冠生同志总辑其成。

书稿经 1979 年 4 月在厦门市召开的《电器学》教材审稿会审查通过。参加审稿会的有西安交通大学、华中工学院、河北工学院、沈阳机电学院、南京航空学院、浙江大学、湖南大学、上海电器科学研究所及厦门电气控制设备厂。

本书可作为高等院校电器专业的试用教材，也可作业余大学的教学参考书或工程技术人员的参考书。

最后，编者对主审人、西安交通大学王季梅教授对本书初稿和定稿全面的审阅校核化出了巨大的精力，表示最深切的谢意。

1979 年 7 月

主要符号表

A ——机械功;	I_{y0} ——有功电流;
B ——磁感应强度;	$I_{=}$ ——直流电流;
B_r ——剩磁感应强度;	I_{\sim} ——交流电流;
B_s ——饱和磁感应强度;	j ——电流密度;
C ——电容;	K_F ——反馈系数;
c ——弹簧刚度, 比热;	K_f ——返回系数;
d ——直径;	K_{if} ——介质恢复强度上升速度;
E ——电场强度;	K_p ——功率放大系数;
e ——电子电荷;	K_u ——电压放大系数;
F ——力;	K_i ——电流放大系数;
F_x ——吸力;	K_T ——综合散热系数;
F_c ——斥力;	l ——长度;
F_f ——反力;	m ——质量;
F_j ——接触压力;	N ——匝数;
F_0 ——触头初压力;	P ——功率, 气压;
F_z ——触头终压力;	p ——导体截面周长;
F_{pj} ——平均力;	p_r ——功率过载系数;
f ——频率, 电路振荡频率;	p_i ——电流过载系数;
G ——重量, 电导, 磁导;	Q ——热流, 热量;
G_l ——漏磁导;	R ——电阻;
G_{μ} ——铁心磁导;	R_b ——膜电阻;
G_{δ} ——气隙磁导;	R_h ——电弧电阻, 弧柱电阻;
G_g ——归化漏磁导;	R_j ——接触电阻;
g ——单位长度漏磁导;	R_m ——磁阻;
H ——磁场强度;	R_s ——剩余电阻, 收缩电阻;
H_c ——矫顽磁力;	R_T ——热阻;
$H_{=}$ ——直流磁场强度;	R_{μ} ——铁心磁阻;
H_{\sim} ——交流磁场强度;	r ——半径;
HB——材料布氏硬度;	r_h ——弧柱半径;
I, i ——电流;	S ——截面积, 散热面积;
I_c ——触发电流;	T ——时间常数, 热力学温度;
I_f ——释放电流;	T_h ——弧柱温度;
I_h, i_h ——电弧电流;	t ——时间;
I_k ——开断电流;	t_c ——触头时间;
I_m ——正弦电流幅值;	t_d ——运动时间;
I_0 ——生弧电流, 起始电流;	t_f ——释放时间;
I_w ——稳定电流;	t_{rh} ——燃弧时间;
I_{wg} ——无功电流;	t_{sh} ——熄弧时间;
I_x ——吸合电流;	t_x ——吸合时间;

- U, u ——电压;
 U_a ——阳极压降;
 U_c ——阴极压降;
 U_f ——释放电压;
 U_h, u_h ——电弧电压;
 U_{hfo} ——介质初始恢复强度;
 U_m ——交流电压幅值, 磁位差;
 U_0 ——生弧电压, 近极压降;
 U_{rh} ——燃弧尖峰;
 U_{xh} ——熄弧尖峰;
 U_z ——弧柱压降;
 U_δ ——气隙磁位差;
 U_ϕ ——相电压;
 u_{hf} ——恢复电压;
 u_{jf} ——介质恢复强度;
 V ——体积;
 v ——速度;
 W ——能量;
 W_m ——磁能;
 X ——电抗;
 X_m ——磁抗;
 X_μ ——铁心磁抗;
 Z ——电阻抗;
 Z_m ——磁阻抗;
 Z_μ ——铁心磁阻抗;
 α ——电阻温度系数;
 γ ——恢复电压振幅系数;
 δ ——气隙长度, 介质损耗角, 恢复电压振幅衰减系数;
 θ ——温度;
 θ_0 ——周围介质温度;
 λ ——导热系数;
 μ ——磁导率;
 μ_r ——相对磁导率;
 μ_0 ——真空磁导率;
 ρ ——电阻率, 密度;
 σ ——漏磁系数;
 τ ——温升, 电弧时间常数;
 τ_w ——稳定温升;
 Φ ——磁通;
 Φ_f ——释放磁通;
 Φ_l ——漏磁通;
 Φ_m ——交变磁通最大值;
 Φ_x ——吸合磁通;
 Φ_δ ——气隙磁通;
 Φ_μ ——铁心磁通;
 φ ——电压和电流的相角差;
 ψ ——磁链。

目 录

概论	1	§ 3-3 同步开关和混合式开关的 工作原理	132
§ 0-1 电器的定义和分类	1	第二篇 电器的电接触理论、 热计算和电动力计算	
§ 0-2 典型高低压电器的结构原理和 主要工作参数	2	第四章 电接触理论	136
一、电磁式继电器	3	§ 4-1 电接触的物理现象	136
二、接触器	5	§ 4-2 影响接触电阻的因素	141
三、低压自动开关	9	§ 4-3 触头的机械振动和熔焊	145
四、高压断路器	15	§ 4-4 触头的金属转移(腐蚀与磨损)	150
§ 0-3 电器学的主要理论范畴	17	§ 4-5 电接触材料	156
一、电磁机构理论	17	第五章 电器中的电动力计算	165
二、电接触理论	18	§ 5-1 电器中的电动现象	165
三、电弧理论	18	§ 5-2 载流系统的电动力计算	166
四、电器发热和电动力理论	19	§ 5-3 交流电流下的电动力	173
§ 0-4 电器在社会主义四个现代化中的 任务和作用	20	§ 5-4 触头间的电动力	178
§ 0-5 电器技术的发展简史及其展望	20	§ 5-5 电器的电动稳定性	182
§ 0-6 我国电器制造事业的发展及其 远景	24	第六章 电器的发热计算	185
第一篇 开关电器的电弧理论		§ 6-1 电器的允许温升	185
第一章 电弧的物理过程和基本特性	26	§ 6-2 电器的发热	188
§ 1-1 气体放电的物理基础	26	§ 6-3 电器的散热	192
§ 1-2 电弧的物理特性	37	§ 6-4 用牛顿公式计算稳态温升	195
§ 1-3 直流电弧的特性和熄灭原理	50	§ 6-5 用热传导方程计算载流导体的温升	197
§ 1-4 交流电弧的特性	61	§ 6-6 各种工作制下电器的热计算	202
§ 1-5 电弧的数学模型	69	§ 6-7 通过短路电流时导体的热计算和 电器的热稳定性	206
第二章 交流电弧的熄灭原理	74	§ 6-8 触头温升计算	209
§ 2-1 弧隙中的介质恢复过程	74	§ 6-9 线圈温升计算	213
§ 2-2 弧隙上的电压恢复过程	84	第三篇 电磁机构的原理与计算	
§ 2-3 交流电弧熄灭的条件、影响因素和 计算方法	99	第七章 电磁铁的基本特性	219
第三章 开关电器典型灭弧装置的 工作原理	112	§ 7-1 电磁铁的工作原理与典型结构	219
§ 3-1 低压开关电器典型灭弧装置的 工作原理	112	§ 7-2 磁场的基本概念和磁路基本定律	221
§ 3-2 高压开关电器典型灭弧装置的 工作原理	121	§ 7-3 磁性材料的特性及其数学表达式	223
		第八章 气隙磁导和磁路计算	226
		§ 8-1 气隙磁导计算	226
		§ 8-2 直流磁路的计算	232

VI

§ 8-3	交流磁路的计算	241	§ 12-3	气隙磁导计算	308
第九章	电磁铁的吸力计算和静特性	249	§ 12-4	电磁吸力的近似解法	312
§ 9-1	磁系统中的 $\psi = f(I)$ 和 $L = f(I)$ 曲线	249	§ 12-5	交流电磁系统复数运算	313
§ 9-2	能量转换与电磁吸力	250	§ 12-6	交流电磁铁辅助计算举例	319
§ 9-3	马克斯威尔公式计算电磁吸力	255	第十三章	磁场的数值计算方法	333
§ 9-4	电磁铁的吸力特性	256	§ 13-1	磁场的基本方程和边界条件	333
§ 9-5	吸力特性和反力特性的配合	261	§ 13-2	有限差分法	337
§ 9-6	交流电磁吸力与分磁环	263	§ 13-3	有限元素法	351
第十章	电磁铁的动特性	268	§ 13-4	电磁吸力的数值计算方法	366
§ 10-1	直流电磁铁的吸合时间特性	268	第十四章	交直流同时磁化的磁路 (磁放大器)	371
§ 10-2	直流电磁铁的释放时间特性	279	§ 14-1	概述	371
§ 10-3	直流电磁铁的动态吸力特性	283	§ 14-2	铁心交直流同时磁化过程及 磁化曲线	372
§ 10-4	交流电磁铁的时间特性	286	§ 14-3	简单磁放大器原理与线路	374
第十一章	永久磁铁与极化机构	289	§ 14-4	磁放大器的控制特性及其 图解求法	380
§ 11-1	永久磁铁的原理	289	§ 14-5	带位移与反馈绕组的磁放大器	385
§ 11-2	永久磁铁的磁路计算	291	§ 14-6	双拍式磁放大器一般介绍	388
§ 11-3	永磁材料及其参数	295	§ 14-7	理想磁放大器	391
§ 11-4	极化机构	297	§ 14-8	带反馈的理想磁放大器	402
第十二章	用电子计算机计算磁路	301	§ 14-9	自饱和磁放大器	404
§ 12-1	一般问题	301			
§ 12-2	磁化曲线处理方法	303			

概 论

§ 0-1 电器的定义和分类

什么叫电器？对电力网或电力电路实行通、断和操作转换者是电器；对电动机实行启动、停止、正转、反转完成控制任务者是电器；对电路负载、电工设备或电动机进行过载、过压、短路、断相等保护的电工器械也是电器；在电路中传递、变换、放大电的或非电的讯号达到自动检测和调节的电工器械也是电器。简言之，凡是根据外界指定讯号和要求，自动或手动接通和断开电路，断续或连续地改变电路参数实现对电路或非电对象切换、控制、保护、检测、变换和调节用的电气设备都是电器的范畴。

电器的用途广泛，职能多样，因而品种规格繁多，工作原理各异。有各种分类方法。

1. 按电器的工作职能，分为：

- (1) 手动操作电器——例如刀开关，隔离开关，按钮以及手动变阻器等；
- (2) 自动切换电器——例如高压断路器，低压自动开关等；
- (3) 自动控制电器——例如交流接触器，直流接触器，各种控制继电器等；
- (4) 起动调速电器——例如磁力起动器，星三角起动器，自耦补偿起动器，变阻器以及某些调速装置等；
- (5) 自动保护电器——例如保护继电器，熔断器，避雷器等；
- (6) 稳压与调压电器——例如自动调压器，自动稳压器及其装置；
- (7) 测量、放大与变换元件——例如传感器、磁放大器、高低压电流、电压互感器等；
- (8) 牵引与传动元件——例如各种操作和牵引电磁铁以及机械负载传动用电磁离合器等；

2. 按结构工艺和生产部门，电器可分为：

- (1) 高压开关电器——高压断路器，隔离开关，避雷器，电抗器，电压互感器，电流互感器等；
- (2) 低压开关电器——接触器，起动器，自动开关，熔断器，继电器，变阻器和主令电器等；
- (3) 自动电磁元件——阀用电磁铁，电磁离合器，磁放大器，磁性逻辑元件，微型继电器，传感器和自动电压调节器等；
- (4) 成套电器和自动化装置——高压成套开关屏，电力用自动化继电保护屏，低压开关柜，低压传动屏，半导体逻辑控制装置，顺序控制器和无触点自动化成套装置等。

3. 按元件与使用系统的关系，电器可分为：

- (1) 电力网系统用电器——例如高压断路器，高压熔断器，低压自动开关，低压熔断器以及电抗器和避雷器。除电抗器和避雷器外，对这类电器的主要技术 requirements 是通断能力强，限流效应好，动稳定和热稳定高，操作过电压低以及保护性能完善等；
- (2) 电力拖动自动控制系统用电器——例如接触器，起动器，继电器等。对这类电器的主要技术 requirements 是相应的转换能力，动作时间快，操作效率高，电气和机械寿命长等；

(3) 自动化通讯用弱电电器——微型继电器，舌簧管，磁性或晶体管逻辑元件等。对这类自动化元件，它的主要要求是动作时间快，灵敏度高，抗干扰能力强，特性误差小，寿命长和工作绝对可靠。

4. 根据使用场合和工作条件，电器可分为：

(1) 一般工业企业用电器——适用于大部分工业企业环境；

(2) 特殊工矿企业用电器——适用于矿山，冶金，化工等特殊环境，例如矿用防爆电器和化工用电器；

(3) 农用电器——适合农村环境而专门生产的电器；

(4) 热带用电器和高原用电器——适合于热带、亚热带地区以及高原山区而派生的电器；

(5) 牵引、船舶、航空等电器——例如船用电器，电气铁道用的牵引电器，航空电器以及汽车、拖拉机用电器等。

5. 根据电器执行机能和转换深度，分为：

(1) 有触点电器——电器通断的执行功能由触头来实现；

(2) 无触点电器——通断的执行功能不是由触头结构来实现而是根据开关元件输出讯号的高低电平来实现。

在执行通断任务的转换过程中，引入转换深度的概念

$$h = \frac{R_{DK}}{R_{JT}}$$

式中 R_{DK} ——断开或截止时执行电路的电阻值；

R_{JT} ——接通或导通时执行电路的电阻值。

对有触点电器， $h = 10^{10} \sim 10^{14}$ ；而无触点电器， $h = 10^4 \sim 10^7$ 。

(3) 混合式电器——有触点和无触点结合的电器，它的转换深度介乎二者之间。

§ 0-2 典型高低压电器的结构原理和主要工作参数

从系统的观点（电网系统或自动化拖动系统）看，一切高低压电器包括成套电器在内均是线路中的一个元件。从控制角度观察，电器必须具有输入和输出二大部分，在结构上具有感测器官和执行器官。感测器官接受输入讯号，经过检测比较作出判断，然后命令执行器官动作，输出讯号指令，实现控制目的。在有触点的自动电器中，感测部分大都是电磁机构系统，它是由动静铁心，线圈和弹簧组成。执行部分是触头灭弧系统，由动静触点、灭弧装置和导电部件组成。在非电磁式自动电器中，如热电器的感测器官是由双金属片，发热元件和弹簧跳跃机构部件组成，感测器官接受外界输入的过电流讯号，经过测量判断以后，执行器官的触头完成接通或断开电路的动作，输出相应的控制讯号，达到过载保护的目。就是结构最简单的熔断器，它也可以认为具有感测器官和执行器官二大基本组成部分，不过感测和执行器官统一于熔体而已。熔体串联于电路，根据熔体的结构参数量测动作电流，一旦线路电流达到或超过动作电流时，熔体熔断，输出执行指令，开断故障电路，达到保护目的。

电器结构的组成部分中除感测和执行器官外，尚有联系二者的传动件和机构部分，还有支承部件和躯壳外罩等，这些部件对具体电器都是必要和不可缺少的。人们强调感测器官和

执行器官是电器的最基本组成部分是为了突出重点，便于概括地掌握电器的结构原理。后面我们还可以看到，电器内部二大基本组成部分——感测和执行之间存在彼此矛盾，互相制约而又相辅相成的关系。某些电器感测器官特别发达，它的特性指标主要表征感测机能，例如继电器、变换器即是。某些电器执行器官特别发达，而完整的感测机能要依靠其它元件来辅助，例如高压断路器。也有感测机能和执行机能都比较发达的电器，例如低压自动开关和接触器。前者发达的感测机能表现为完备的保护特性，而发达的执行机能则表现为通断能力强，能切换大的短路电流。

下面我们介绍几个典型的高低电压电器的结构原理和主要工作参数，通过它们可初步认识电器结构的基本组成部分，了解感测和执行之间对立统一的辩证关系，掌握它们间的共同点和特殊点，介绍它们的结构性能和工作参数，指出它们的工作原理和相应的基础理论，从而为研究电器的理论创造条件。

一、电磁式继电器

继电器是电器的典型产品。它是一种具有跳跃输出特性传递讯号的电器。继电器的拉丁文原意是“驿站”，就是传递音讯的中继场所。继电器一开始就是和电讯联系在一起，1878年西电公司首先在电话上应用继电器。时至今日，继电器已广泛应用于控制和通讯领域，它的品种之多，数量之大，堪称电器之“王”。

继电器中以电磁式继电器最典型，下面我们对它进行简要的介绍。

前已述及，电器的基本组成部分为二，对电磁式继电器，它的感测部分是电磁铁和弹簧，它的执行部分是触头。图0-1示出了它的结构原理。图中的铁心柱1、轭铁2、衔铁3和线圈6组成了电磁系统。还有弹簧5也是电磁系统的一个组成部分，它既作为衔铁释放之用，也作为测量继电器动作值之用。弹簧的松紧强弱是可以调整的，它和电磁铁一起完成讯号感测的任务。图中7是继电器的触头， c_2c_0 是继电器的常闭触头（或称原合触头），当继电器未操作时，它处于闭合状态； c_1c_0 是常开触头（或称原分触头），当继电器未操作时，它处于打开或分离的状态，衔铁打开的间隙为 δ （铁心柱中心线方向），它的大小由止钉4限制。

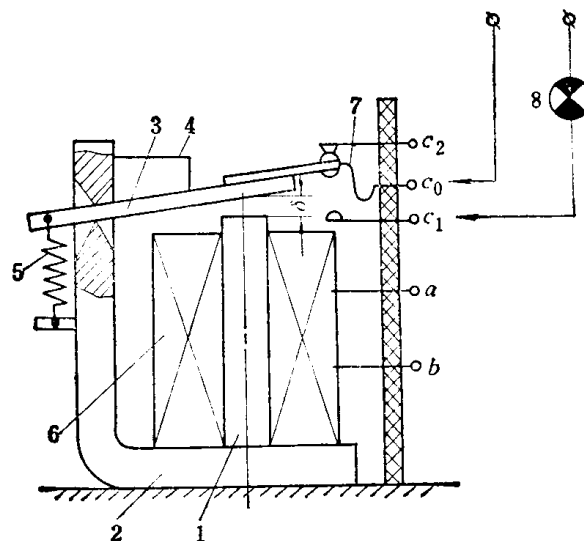


图0-1 电磁式继电器

电磁式继电器的工作原理很简单。在线圈二端 ab 上输入电流或电压讯号，线圈的激磁电流产生了磁场，磁感应强度在铁磁介质中具有较大数值，它的磁通大部沿铁芯柱、轭铁、衔铁和工作气隙 δ 闭合，在衔铁端面产生使 δ 缩小的电磁吸力。如果讯号强度达到动作值，衔铁的电磁吸力（矩）克服弹簧的阻力（矩），衔铁开始转动，带动触头完成执行任务，图中 c_0c_1 电路闭合， c_2c_0 断开，接在该回路内的讯号灯8发亮。衔铁一旦闭合，磁的状态发生变化，如果此时减小输入讯号使之略小于吸合时动作值，衔铁不会马上释放，只有当输入讯号小到相应的数值，衔铁才开始释放，带动动触头向上运动，已经闭合的常开触头 c_1c_0 重新

打开，讯号灯 8 熄灭。在实际控制线路中，继电器的触头常用来控制接触器的线圈或其它电器的线圈。

尽管线圈的输入讯号可以连续地变化（它的稳定工作点可以很多），但是触头的输出的稳定状态只有二个，即“通”与“断”，不可能既是“断开”又是“闭合”，即既是“断”，又是“通”。所有继电器的输出都是按照“通—断”或者“是—否”的循环而工作。图 0-2 示出了继电器的输入—输出特性。很明显，这是一种跳跃式的输出特性。

当电磁式继电器的输入讯号 x 从零连续增加到达衔铁开始吸合时的动作值 x_x （例如激磁电流产生的磁通使衔铁上的吸力

正好足够使之吸合），继电器的输出讯号立刻从 $y = 0$ 跳跃到 $y = y_m$ ，即常开触头从“断”到“通”，或者说从“低电平”输出到“高电平”输出。一旦触头闭合，如输入量 x 继续增大，输出讯号量 y 将不再起变化。当输入量 x 从某一大于 x_x 值下降到 x_f 时，继电器开始释放，常开触头断开（或常闭触头闭合）。动作值 x_x 和 x_f 的比例叫做返回系数（或称恢复系数），即

$$K_f = \frac{x_f}{x_x}$$

或者写成

$$K_f = \frac{x_x - \Delta x}{x_x} = 1 - \frac{\Delta x}{x_x}$$

由此可见，电磁式继电器的返回系数一般小于 1，它的值决定于 Δx 和 x_x 的比例。

继电器触头上输出的控制功率 P_c （即触头工作电压乘允许的最大通断电流）和线圈吸取的最小动作功率 P_0 之比叫做继电器的控制系数

$$K_c = \frac{P_c}{P_0}$$

继电器在规定负载条件下的最小动作功率 P_0 叫做继电器的灵敏度。

继电器从获得输入讯号起到触头完成动作止的时间，叫做吸合动作时间；从断开输入讯号起到触头完成动作止的时间，叫做释放时间。

以上叙述的动作值，返回系数，控制系数，灵敏度和动作时间都是继电器的主要参数。此外，继电器的特性必须保证动作值的可调性和重复使用的精度，还必须保证执行机能工作的可靠性。现代控制和通讯用继电器还要求有高的电气和机械寿命。

继电器触头是研究继电器工作可靠性的主要对象。触头的接触电阻，尤其是弱电流低电压下可靠接通，触头的磨损，触头的熔焊都有不少理论和实际课题需要研究。在保证触头工

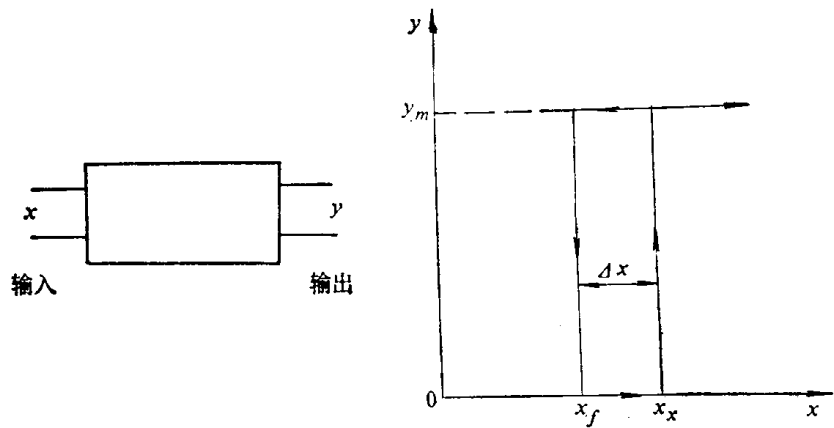


图0-2 继电器的输入—输出特性

作可靠性的前提下，如何降低电磁继电器的动作功率，提高其动作灵敏度和缩小磁系统的尺寸以达到继电器的小型化和微型化就需要研究电磁机构工作的物理过程及其设计计算。这些课题的理论基础将在本书有关章节中介绍。

图 0-1 所述继电器是电磁式结构原理。根据线圈的结构，它可以做成反映电流输入讯号的电磁式电流继电器，反映电压输入讯号的电磁式电压继电器，也可以做成放大控制系数和以增加输出讯号数为目的的电磁式中间继电器等。利用电磁阻尼原理，电磁式电压继电器可以获得动作延时（输出讯号落后于输入讯号一定的时间间隔）构成时间继电器。这种电流、电压、时间继电器的输入讯号的检测和输出讯号的传递也可以利用晶体管线路来实现。继电器的感测机能除利用电磁机构原理外，还利用其它原理，例如热、光、压力、速度、机械位移等。这些继电器分别称为热继电器、温度继电器、光继电器、压力继电器、速度继电器等。由此可见，继电器二大基本组成部分中以感测器官最为关键，可以认为是继电器的主导部分。感测器官的工作原理多种多样，继电器的命名大体上都是根据感测器官的工作原理。感测器官对继电器的特性参数，诸如灵敏度、动作精度（动作值的准确度）、动作时间、返回系数等影响很大。当然，继电器的执行器官——触头也很重要。触头的材料、压力、开距、超程等参数的选取也很关键。一方面，它直接决定了触头工作的可靠程度和电气寿命；另一方面又影响到感测部分的负担，影响它的灵敏度和结构的小型化。

随着电子器件的迅猛发展，无触点半导体继电器的应用将日趋广泛。这种继电器无运动部件，无触头，因而无电弧，无火花，无噪音，耐冲击振动并且具有高的灵敏度和长的机电寿命。这些都是明显的优点。但是它的弱点也不少，例如怕干扰、怕热、怕过流和怕过压等。这种继电器的动作时间快，消耗功率小，在需要快速、灵敏和长寿命的场合无疑是理想的。在半导体（晶体管或固体块）继电器中不完全都是无触点式。有些继电器采取混合式的形式，即它的感测器官采用晶体管而输出借助于有触点的高灵敏继电器（或舌簧管），以便获得多组转换回路的输出以及提高通断能力和转换深度。

无论有触点继电器还是无触点继电器，它们的发展方向大体上是插件式、组合式、多功能、通用化和小型化。

二、接触器

电磁接触器是一种适用于远距离频繁地接通和断开交直流主电路及大容量控制电路的自动控制电器。它的结构原理和电磁继电器相似，但具体结构型式却有较大差异。这是由接触器的职能决定的。众所周知，转换主电路时，触头上的电弧不仅延缓转换时间而且产生烧损，使接触不可靠。为此，接触器一般都装有专门的灭弧装置和较强的触头弹簧。这就是说，比之于继电器，接触器的执行机能大大加强了。

（1）直流接触器

图 0-3 是直流接触器的结构示意图。这是一种主触头采用转动式的单极结构。动触头支架固定于衔铁尾板上。衔铁 6 沿铁轭 8 的棱角 9 转动，克服了弹簧 5 的反力矩后带动主触头 2 闭合，或者在弹簧 5 的作用下使衔铁 6 释放和动触头 2 打开。因此弹簧 5 叫做释放弹簧或叫做开断弹簧。电磁铁的线圈 10 接通操作电源后，衔铁上便呈现吸力 F ，一旦这个吸力矩克服 5 的反力矩后，衔铁便开始闭合运动，与此同时动触头 2 向静触头 1 靠近直到接触，动静触头相遇后，触头弹簧 11 被压缩，同时呈现和弹簧 5 相似的反力矩，之后衔铁全部吸合沿铁心柱 7 中线到衔铁的气隙 δ 接近于零，弹簧 3 压缩到最终位置，主触头紧密接触，完成主

电路的接通任务。反之，线圈一旦失激或激磁电流过小（操作电压低引起），电磁吸力矩小于释放的反力矩，已经闭合的衔铁开始释放，同时主触头也随之开断主电路。这里的反力由释放弹簧 5 和触头弹簧 11 提供。每个主触头都有一个初压力值和终压力值。所谓初压力就是动静触头刚接触时动触头上呈现的压力，此时触头弹簧尚未压缩变形。至于终压力，乃是衔铁完全闭合而动静触头接触末了时动触头上呈现的压力，此时触头弹簧已被压缩。从动静触头接触起（衔铁尚未全部闭合）到触头支架运动毕（衔铁全部闭合）的行程叫做触头的超额行程。触头的超额行程简称超程，它是专为触头磨损后仍能可靠接触而设。

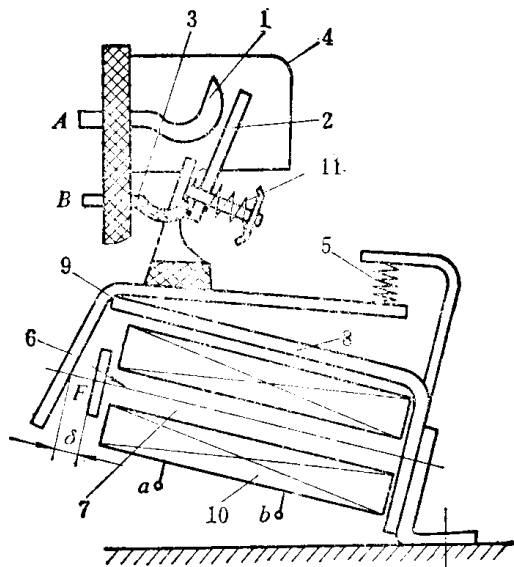


图0-3 直流接触器的结构示意图
 A—进线柱 B—出线柱 a、b—线圈端子
 1—静触头 2—动触头 3—软连接 4—灭弧罩
 5—释放弹簧 6—衔铁 7—铁心柱 8—磁轭
 9—棱角 10—线圈 11—触头弹簧

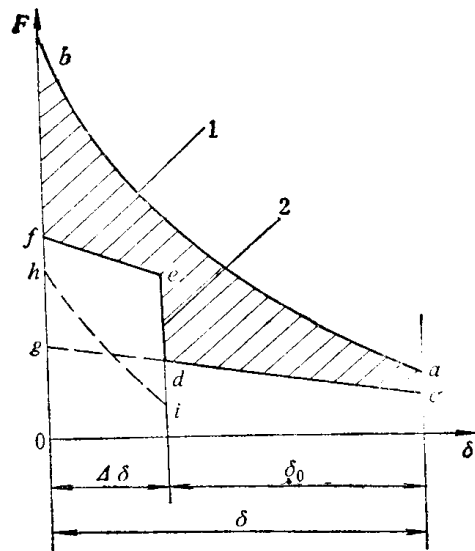


图0-4 直流接触器的吸力—反力特性
 δ_0 —和触头开距相应的衔铁行程 $\Delta\delta$ —和触头超程相应的衔铁行程 δ —衔铁总的行程

图 0-4 示出了直流接触器的吸力—反力特性及其配合的情况。图中曲线 ab 是衔铁上的吸力特性，即随着衔铁气隙 δ 的减小，电磁吸力 F 增大。 $cdef$ 折线表示阻力即反力特性，它是由 cdg 和 $defg$ 叠加而成。前者代表释放弹簧的阻力特性，后者是触头弹簧的阻力特性。 de 是接触器常开主触头的初压力， gf 则是终压力， $\Delta\delta$ 是和触头超程相应的衔铁气隙。 δ 是衔铁的行程。为了保证接触器的可靠闭合，电磁吸力特性 ab 必须高于 $cdef$ ，图中阴影区代表衔铁的运动能量，这个区域的大小必须妥为选择。它一方面决定了接触器的闭合时间，另一方面决定了衔铁与铁芯以及动静触头间闭合过程的撞击能量。如果电磁吸力特性过高将使动能 $\frac{1}{2}mv^2$ 过大，从而影响接触器的机械和电气寿命。图中 hi 是释放时的吸引特性。此时 $cdef$ “反力”特性转变为释放时的动力，迫使衔铁释放。图中 h 点是衔铁在闭合位置时线圈无激磁电流时的剩磁吸力，这个力一定要小于 of 开断力，否则衔铁和铁芯在分断操作时粘住不释放，在工作过程中往往酿成事故。

在转动式接触器结构中，实际上存在的是力矩和阻力矩（反力矩）特性即 $M = f(\alpha)$ ， α 是转角。有时为了分析方便，常转变为 $F = f(\delta)$ 的形式，如图 0-4 所示。此时电磁吸力随气隙的关系不变而把阻力矩都归算到铁心柱中心对应的衔铁处。

从以上特性配合中可以看出：*cdef* 实际上是接触器磁系统的负载机械特性，工作电压下的吸引磁力与零电压下的剩磁力的参数都要与之匹配，实质上就是接触器内部感测器官与执行器官互相联系、协调配合的依据。接触器额定电流大，额定电压高，相应的转换能力要求强，这就需要触头系统具有较大的开距和超程，需要较大的开断速度和较小的接触电阻。为此需要较大的触头弹簧和开断弹簧，从而使机械负载阻力特性提高。同时与它匹配的感测器官必须具有较大的线圈安匝数和较大的磁系统尺寸。

对直流接触器以采用转动式结构为多，触头材料一般是铜质。由于直流电弧较难熄灭所以主触头的灭弧问题很重要。图 0-3 中 4 是灭弧装置的示意。一般它是由磁吹线圈和窄缝的灭弧罩组成。关于磁吹和窄缝灭弧的原理将在第三章中介绍。

接触器结构上尚有联锁触头组。这些所谓辅触头大体上都做成标准组件。利用辅助触头可以控制其它电器的线圈激磁，使其它电器动作或者控制灯光音响等显示装置。

直流接触器的额定电压一般为 440 伏，亦可用于 660 伏，但电寿命要降低。它的额定电流为 20、40、100、160、250、400 和 600 安。激磁线圈的电压一般为 220 伏或 110 伏。接触器的特性指标是转换能力、操作频率、电气寿命和机械寿命。它们的具体数据可参阅有关技术标准或产品说明书。

(2) 交流接触器

交流接触器是通断交流主电路的接触器。由于交流主电路大都是三相式，所以交流接触器的触头结构以三极为主。至于接触器的磁系统结构则不仅有交流的，而且也有直流的。从交流接触器整体结构看，它分为转动式和直动式二大类型。图 0-5 示出了转动式交流接触器

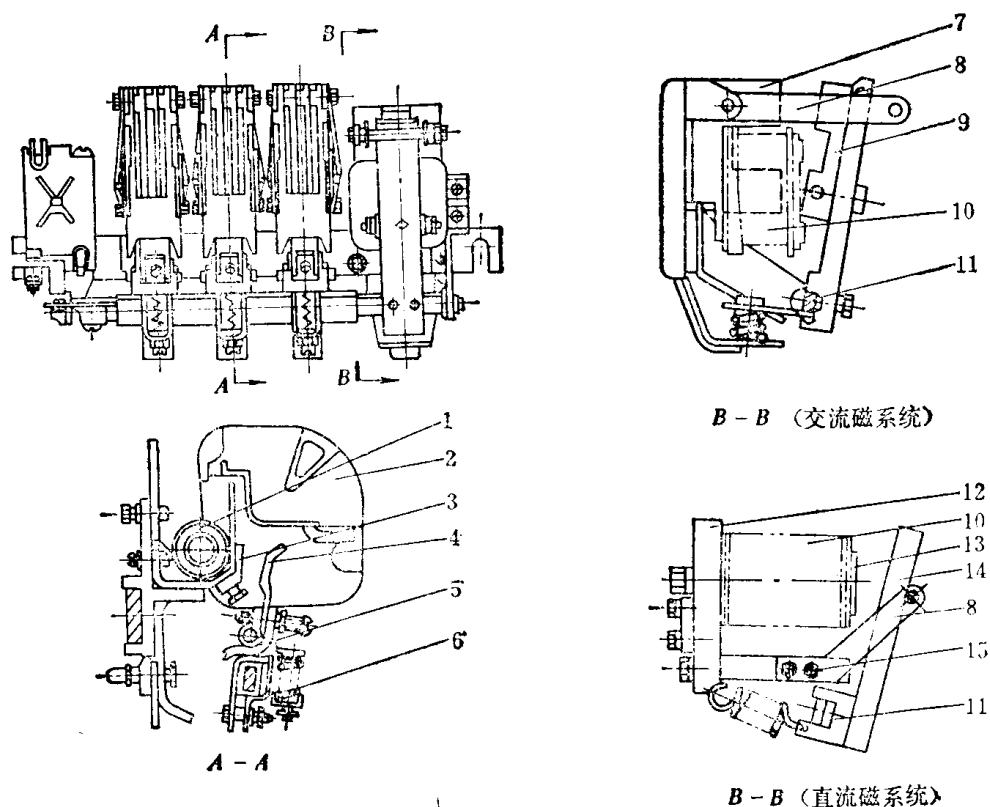


图0-5 转动式交流接触器结构

- 1—吹弧线圈 2—灭弧罩 3—主静触头 4—主动触头 5—软联接 6—触头弹簧 7—静铁心
8—停挡 9—动铁心 10—线圈 11—转轴 12—磁轭 13—铁心 14—衔铁 15—螺钉

结构。三个极的动触头及其支架（图中4、5、6）通过绝缘衬套而固定于转轴上，轴的右端和衔铁9的支架相联。当线圈接通操作电源衔铁吸合并带动转轴转动一个角度，与此同时，动触头向静触头靠拢并接通主电路。主触头的左边有盒式辅助触头组或称联锁触头组，它由转轴通过顶杆使之动作。转动式交流接触器的主触头和图0-3同，大都采用铜质材料。由于铜触头容易氧化，它的接触性能较差，所以结构上应使动静触头接触时要有些微滚动，以便把氧化膜擦去，获得可靠的接触性能。这种具有擦膜作用的转动式触头结构无论在交流接触器还是在直流感触器中都被普遍应用。转动式交流接触器的灭弧装置采用磁吹、窄缝和栅片等灭弧原理和转动式直流感触器相似，在结构上可以通过调节触头力臂和衔铁力臂，使吸力特性和反力特性获得良好的配合。

转动式接触器在结构上采用平面布置，生产上易于派生多极结构，使用上易于维护检修，这些都是优点，但是按装面积大，则是它的缺点。这种类型接触器比较适合于额定电流较大的等级，例如100安以上，它主要用于冶金、轧钢及起重运输等电器设备中。

图0-6示出了直动式交流接触器结构。它的主触头采用双断口灭弧方式，触头材料大都用银基合金（例如银—氧化镉）。这种接触器用塑料躯壳支持，结构的立体化和小型化是它的优点。过去在中小容量上采用这种结构，目前趋于向大容量发展。这种结构的接触器，它的静铁心往往采用弹性固定方式，缓冲消震性能好，无论触头或者铁心在碰撞时的振动程度大为减轻，因而电气和机械寿命都较高。由于结构上的不断改进和新材料、新工艺的应用，近二十年来这种结构类型的接触器的机械电气寿命提高了10倍，按装面积减小了25%。

交流接触器的额定电压目前主要是380伏，也有660伏和1140伏者，后者主要用于煤矿。电流等级从6安一直到600安。激磁线圈的电压：交流操作的一般为380伏，直流操作的一般为220伏。

(3) 真空接触器

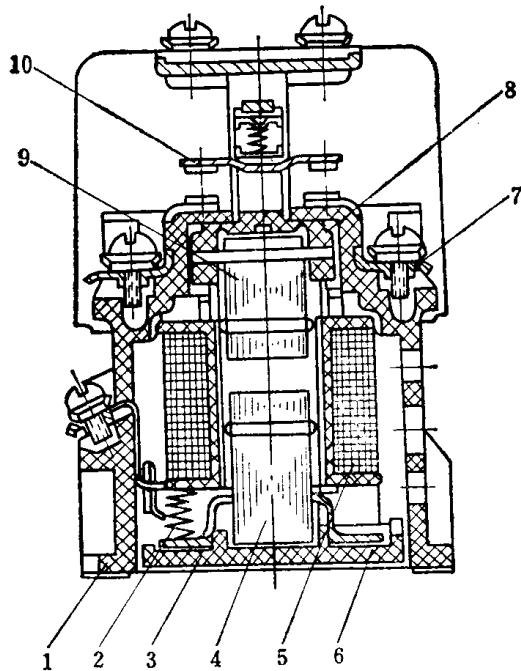


图0-6 直动式交流接触器

- 1—躯壳 2—弹簧 3—底板 4—静铁心
5—线圈 6—悬架 7—触头 8—触头支持件 9—衔铁 10—桥形触头

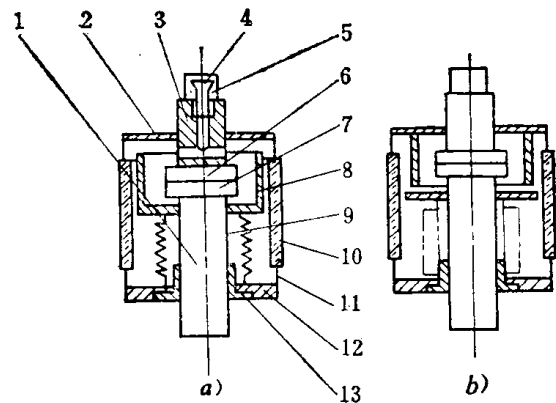


图0-7 真空接触器灭弧室

- 1—动导电杆 2—上法兰 3—静导电杆 4—排气管 5—保护帽 6—静触头 7—动触头 8—屏蔽罩 9—波纹管 10—外壳 11—封接圈 12—下法兰 13—导向套

所谓真空接触器，是一种动静触头密闭于真空泡中利用真空介质灭弧的电磁接触器。图 0-7 示出了真空接触器触头与灭弧室的一相结构。它的电磁操作机构还是放在大气中。真空灭弧室外形好像一只大型电子管，动静触头都密闭于一个绝缘外壳 10 中。所有装入外壳内的零件在装配前都经过除气处理并在封接后抽到 10^{-6} mmHg 高的真空度。外壳一般用致密材料例如铝组玻璃或高纯度氧化铝瓷制作。为了保证封接质量，封接圈 11 一般用“可伐”合金（铁、镍、钴合金）或无氧铜，它们与陶瓷、玻璃的热膨胀系数十分接近。动导电杆与动触头 7 固定于可以伸缩的波纹管 9 内。波纹管是一种起密闭作用的弹性元件，它在允许的弹性变形范围内伸缩时有足够的机械寿命。静触头 6 则直接固定于外壳。在动静触头与外壳之间装有金属屏蔽罩 8。它的作用是：一方面捕捉和冷凝开断时触头间隙中的少量金属蒸汽，确保高的分断能力；另一方面防止金属蒸汽凝结于玻璃或陶瓷外壳的内壁，确保绝缘强度，真空灭弧室中触头开断时没有气体电弧，只有少量的金属蒸汽电弧，它的介质恢复速度快，因而触头开距可做得很小（例如 1.2 千伏真空接触器的开距仅 1~2 mm），从而明显地减轻了感测器官的负担和接通时动静触头的碰撞程度。真空接触器由于触头电磨损小，和空气式相比，它的超程也较小，一般取 1~1.5 mm。它的触头压力为真空负压力和弹簧压力之和。真空负压力的大小与波纹管直径成比例，一般为 5~10 公斤。触头弹簧的压力比空气式为小。由于真空负压力有利于吸合，不利于开断，所以为使触头获得一定的分断速度，必须有相当大的开断弹簧，它比空气式要大。

真空接触器的主要优点是：分断能力高，电气和机械寿命长，允许的操作频率高，体积小、重量轻。由于密封，无喷弧，使组装的开关柜体积缩小，此外，它具有防爆，防腐蚀，防火等优良性能。

真空接触器的缺点是成本高和真空度长久保持比较困难。此外在使用中分断小电流感性负载时容易产生过电压。随着技术的进展，真空接触器的过电压问题、分断直流电路问题以及真空度的保持和简易测量等问题必将得到解决，真空接触器性能指标将越来越高，制造工艺将越来越完善，制造成本将逐步下降，从而获得进一步发展，将成为接触器的一个重要品种。

为了发展真空接触器（包括真空断路器）必须研究真空电弧的理论，研究它的灭弧装置和触头材料，这些理论基础问题将在 3、4 章中阐述。

我国目前生产的真空接触器有 ZN-6 型，它的额定电压为 6 千伏，额定电流为 300 和 600 安，额定电压下最大分断电流分别是 2500 和 5000 安，最大分断电流下开断次数为 30 次以上，电气寿命为 10 万次，机械寿命为 100 万次。

三、低压自动开关

低压电网配电设备中广泛使用各种类型的自动开关（又称自动空气断路器）。这种自动开关在正常情况下需要完成网路的切换操作，在过载和短路时能感测故障而自动地按照不同情况进行预定的保护。它也可以用来不频繁地起停电动机并对之保护。

自动开关的种类很多，结构也较其它低压电器复杂。但无论是哪一种结构的自动开关，一般都有感测元件、执行元件和中间传递元件。感测元件主要有过流脱扣器和欠压脱扣器，它们的功能是检测过流和低压讯号并进行保护，可以认为是不带触头的过流和欠压继电器。执行元件主要有触头系统、灭弧系统以及强力的开断弹簧。感测元件与执行元件是自动开关的核心部分，它的性能直接影响自动开关的指标，至于中间传递元件则是感测元件和执行元

件间的纽带，它由操作传动装置和自由脱扣机构组成。

为了便于说明自动开关的结构原理以及各元件的作用，首先介绍它的动作原理。图 0-8 中 1 是过电流脱扣器，在电路正常情况下，由脱扣器线圈产生的磁通不足，衔铁上电磁吸力

(力矩) 小于反力弹簧的阻力(力矩)，衔铁不动，脱扣钩子 3 处于闭锁状态，自动开关不动作；当电流过载或短路时，线圈的磁势剧增，衔铁的吸力增大，一旦该力大于反力，顶杆上翘，脱扣机构 3 解扣，主触头在强大的开断弹簧 8 作用下切断故障电流。图中 2 为欠电压脱扣器。当网路电压正常时，欠电压脱扣器的电压线圈产生足够的磁势，使衔铁处于闭合状态，只是在电压降低到规定值以下或者是电压消失时，衔铁上的吸力不足，在反力弹簧作用下，顶开脱扣机构 3 而使主触头开断。图中 4 是分励脱扣器，它类似于欠电压脱扣器，不过它是靠短时通电才动作的，至于欠电压脱扣器则是长期通电工作的。当需要远方操作开断主电路时，按钮 9

闭合，分励脱扣器线圈有电流，它的衔铁动作，钩子 3 和触头联动杆解扣，达到主电路开断目的。分励脱扣器也可由其它继电器触头来控制。

简单的传动装置和自由脱扣运动原理见图 0-9 所示。这是一种手传动装置。传动装置手柄 4 上的作用力，经过两个可折连杆 6 传到自动开关的动触头 5 上。这二个连杆在死点的位置时，其连接的轴销 2 处于死带内。图 9 a) 是触头完成了关合过程并处于闭合位置的情况。如果人手尚未离开手柄，过流脱扣器线圈 8 中存在短路电流，铁心 7 吸合并猛烈撞击二连杆 6，使之弯曲，轴销 2 上提，脱离死带位置。由于连杆曲折，自动开关的动触头在开断弹簧作用下迅速分离，完成自动分断任务。这就是图 b) 所示的情况。当重新关合时，必须将传动装置的手柄恢复到原来地位，使二连杆 6 重新伸直，轴销 2 又落到死带位置，然后再推手柄

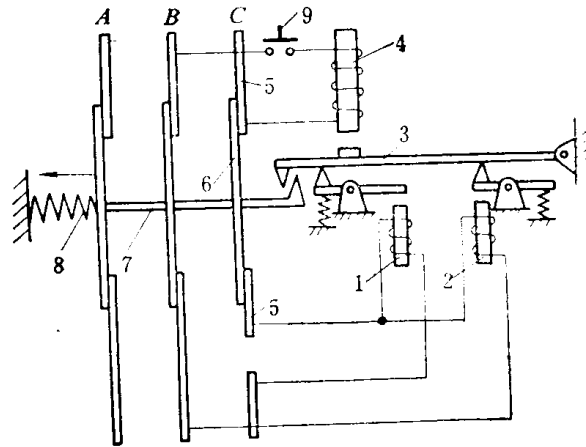


图0-8 自动开关动作原理简图

- 1—过流脱扣器 2—欠电压脱扣器 3—操作和脱扣机构
4—分励脱扣器 5—静触头 6—动触头 7—动触头联动杆
8—开断弹簧 9—按钮

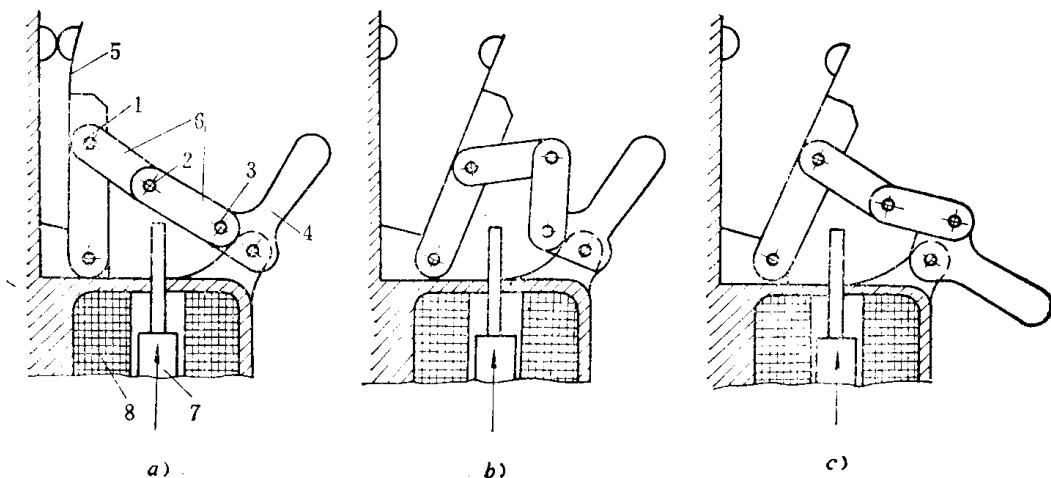


图0-9 传动装置与自由脱扣机构原理