

高等学校教材

电器理论基础

(修订本)

福州大学 张冠生 主编

GAO DENG XUE
XIAO JIAO CAI

机械工业出版社

U_k, u_k ——电弧电压;
 U_{kfo} ——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_{rA} ——燃弧尖峰;
 U_{rk} ——熄弧尖峰;
 U_s ——弧柱压降;
 U_δ ——气隙磁位差;
 U_ϕ ——相电压;
 u_{hf} ——恢复电压;
 u_{if} ——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, 密度;
 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;
 A ——磁导;
 A_s ——漏磁导;
 A_δ ——气隙磁导;
 λ ——热导率, 单位长度漏磁导;
 μ ——磁导率;
 μ_r ——相对磁导率;
 μ_0 ——真空磁导率;
 ρ ——电阻率;
 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_m ——交变磁通最大值;
 Φ_s ——吸合磁通;
 Φ_σ ——漏磁通;
 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。

前 言

本书是在1980年出版的高等院校试用教材《电器学（理论基础）》的基础上，根据1983年5月原机械部高等院校电器专业教材编审小组制订的新教学计划和教学大纲，以及其修订的教学大纲重新修订的。

由于高等院校电器专业电器学（理论基础）课程的教学时数比原计划减少较多，本教材必须体现这一特点，再考虑原书第十三章“磁场数值计算方法”有后续选修课专门论述，原书第十二章“用电子计算机计算磁路”与“气隙磁导和磁路计算”的内容有重复，原书第十四章“交直流同时磁化的磁路（磁放大器）”考虑到是磁路的特例，故都予以撤消。因此，修订本对第三篇电磁系统的内容作了较大的精炼。

修订本在编排体系上作了一些调整。发热、电动力为第一篇，理由是后续两篇用到这方面的内容，必须先讲。电弧与电接触为第二篇，电磁系统为第三篇。

本书不包括双金属机构及电器运动部分的碰撞和阻尼理论以及机构学，这部分内容将在后续课程中介绍。本书不包括无触点电器的理论基础。

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。其中概论由张冠生教授执笔，第一、二、六章由华中理工大学程礼春教授执笔，第三、四、五章由西安交通大学尚振球副教授执笔，第七、八、九、十、十一章由南京航空学院孙雨施副教授和上海铁道学院丁明道副教授合作编写。张冠生教授总辑其成。

本书可作为高等院校电器专业的教材，也可供职工大学有关专业师生及从事电器设计、制造、试验和运行方面的工程技术人员参考。

最后，编者对主审人王季梅教授表示最深切的谢意。

主要符号表

A ——截面积, 散热面积;	K_F ——反馈系数;
B ——磁感应强度;	K_f ——返回系数;
B_r ——剩磁感应强度;	K_{ff} ——介质恢复强度上升速度;
B_s ——饱和磁感应强度;	K_P ——功率放大系数;
C ——电容;	K_u ——电压放大系数;
c ——弹簧刚度, 比热容;	K_i ——电流放大系数;
d ——直径;	K_T ——综合散热系数;
E ——电场强度;	l ——长度;
e ——电子电荷;	m ——质量;
F ——力;	N ——匝数;
F_x ——吸力;	P ——功率;
F_o ——斥力;	p ——导体截面周长, 压强;
F_f ——反力;	p_P ——功率过载系数;
F_j ——接触压力;	p_i ——电流过载系数;
F_0 ——触头初压力;	Q ——热流, 热量;
F_z ——触头终压力;	R ——电阻;
F_{pj} ——平均力;	R_0 ——膜电阻;
f ——频率, 电路振荡频率;	R_h ——电弧电阻, 弧柱电阻;
G ——电导;	R_j ——接触电阻;
H ——磁场强度;	R_m ——磁阻;
H_c ——矫顽磁力;	R_s ——剩余电阻, 收缩电阻;
$H_{=}$ ——直流磁场强度;	R_T ——热阻;
H_{-} ——交流磁场强度;	R_{μ} ——铁心磁阻;
HB ——材料布氏硬度;	r ——半径;
I, i ——电流;	r_h ——弧柱半径;
I_a ——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_A, i_A ——电弧电流;	t ——时间;
I_m ——正弦电流幅值;	t_c ——触发电时间;
I_o ——开断电流;	t_d ——运动时间;
I_P ——有功电流;	t_f ——释放时间;
I_Q ——无功电流;	t_{rA} ——燃弧时间;
I_w ——稳定电流;	t_{sh} ——熄弧时间;
I_x ——吸合电流;	t_x ——吸合时间;
I_0 ——生弧电流, 起始电流;	U, u ——电压;
I_{-} ——直流电流;	U_a ——阳极压降;
I_{-} ——交流电流;	U_c ——阴极压降;
J ——电流密度;	U_f ——释放电压;

目 录

主要符号表

概论	1
§ 0-1 电器的定义和分类	1
§ 0-2 典型电器的结构原理	2
§ 0-3 电器学的主要理论范畴	9
§ 0-4 电器技术的发展简史及其展望	11
§ 0-5 我国电器制造事业的发展及其 远景	12

第一篇 电器的发热与电动力

第一章 电器导体的发热计算	15
§ 1-1 电器的允许温升	15
§ 1-2 电器中的热源	17
§ 1-3 电器中的热传递形式	20
§ 1-4 电器表面稳定温升计算—— 牛顿公式	23
§ 1-5 不同工作制下电器的热计算	24
§ 1-6 电器典型部件的稳定温升分布	27
§ 1-7 短路电流下的热计算和电器的 热稳定性	32
小结	34
思考题	35
习题	35
第二章 电器中的电动力计算	36
§ 2-1 电器中的电动力现象	36
§ 2-2 计算电动力的基本方法和公式	36
§ 2-3 电器中典型导体系统的 电动力计算	38
§ 2-4 单相正弦交流下的电动力	44
§ 2-5 三相正弦交流下的电动力	46
§ 2-6 载流导体与导磁体间的电动力	50
§ 2-7 电器的电动稳定性	52
小结	54
思考题与习题	55

第二篇 电弧与电接触

第三章 电弧的基本特性	57
§ 3-1 气体放电的物理基础	57
§ 3-2 电弧的物理特性	66
§ 3-3 直流电弧的特性和熄灭原理	76
§ 3-4 交流电弧的特性	83
§ 3-5 麦也耳电弧数学模型简介	90
小结	93
思考题	94
第四章 交流电弧的熄灭原理	96
§ 4-1 弧隙中的介质恢复过程	96
§ 4-2 弧隙中的电压恢复过程	103
§ 4-3 交流电弧的熄灭条件和 计算方法	114
小结	119
思考题	119
第五章 开关电器典型灭弧装置的 工作原理	121
§ 5-1 开关电器典型灭弧装置的 工作原理	121
§ 5-2 提高灭弧装置开断能力的 辅助方法	140
小结	144
思考题	144
第六章 电接触理论	145
§ 6-1 概述	145
§ 6-2 电接触内表面的物理图景	145
§ 6-3 接触电阻的理论和计算	147
§ 6-4 $\varphi-\theta$ 理论和接触电压	154
§ 6-5 接触导体稳定温升分布与 接触点最高温升计算	158
§ 6-6 触头闭合过程的振动分析	159
§ 6-7 触头间的电动斥力	163
§ 6-8 触头熔焊与焊接力	164
§ 6-9 触头的质量转移和磨损	167

§ 6-10 触头材料简介	171
§ 6-11 电接触热过程数学模型简介	174
小结	176
思考题	177
习题	177

第三篇 电磁系统

第七章 电磁系统计算的基本原理	179
§ 7-1 概述	179
§ 7-2 电磁系统的典型结构和基本特性	179
§ 7-3 磁场的基本概念与基本定律	183
§ 7-4 磁场的若干性质	186
§ 7-5 磁路的基本概念	189
§ 7-6 电磁系统计算的基本任务与计算框图	192
小结	193
习题	194
第八章 气隙磁导计算	197
§ 8-1 概述	197
§ 8-2 解析法	198
§ 8-3 图解法	202
§ 8-4 磁场分割法	208
§ 8-5 磁导的实验研究	216
小结	217
习题	218
第九章 磁路分析与计算	220
§ 9-1 概述	220
§ 9-2 直流磁路方程	220
§ 9-3 不计漏磁通的无分支磁路	224
§ 9-4 考虑漏磁时的U形磁路	228
§ 9-5 复杂磁路的计算	232
§ 9-6 磁路方程的数值解法	237
§ 9-7 含永久磁铁磁路的计算	238
§ 9-8 交流磁路的特点	244

§ 9-9 等效正弦波法	246
§ 9-10 波形分析法	251
小结	258
习题	259

第十章 电磁系统的吸力计算与

静特性	261
§ 10-1 磁场的能量	261
§ 10-2 能量转换与电磁力的普遍公式	263
§ 10-3 麦克斯韦电磁吸力公式	268
§ 10-4 恒磁势与恒磁链条件下的吸力特性	271
§ 10-5 极化电磁系统的吸力特性	273
§ 10-6 交流电磁系统电磁吸力的特点与分磁环原理	277
§ 10-7 电磁吸力的数值计算	281
§ 10-8 静态吸力特性与反力特性的配合	281
小结	284
习题	285

第十一章 电磁系统动态特性的

分析计算	286
§ 11-1 概述	286
§ 11-2 直流电磁系统的吸合过程	288
§ 11-3 直流电磁系统的释放过程	298
§ 11-4 直流电磁系统动态特性的数值计算	302
§ 11-5 交流电磁系统的动态特性	306
小结	309
习题	309

附录一 磁性材料的基本特性	310
附录二 常用磁导计算公式	312
附录三 磁导的数值计算法	314
参考文献	320

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、放大电的或非电的信号达到自动检测和调节的电工器械也是电器。简言之，凡是根据外界指定信号和要求，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属电器的范畴。

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. 按工作职能，电器可分为

- (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，低压断路器等；
- (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——例如电磁起动器，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，高低压电流互感器，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，低压断路器熔断器，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——高压成套开关柜，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，低压断路器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要求是通断能力强，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要求是转换能力强, 动作时间快, 操作效率高, 电气和机械寿命长等;

(3) 自动化通信用弱电电器——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. 按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. 按执行机能和转换深度, 电器可分为

(1) 有触点电器——电器通断的执行功能由触点来实现;

(2) 无触点电器——通断的执行功能不是由触点结构来实现, 而是根据开关元件输出信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, $h = 10^{10} \sim 10^{14}$; 而对无触点电器, $h = 10^4 \sim 10^7$ 。

(3) 混合式电器——有触点和无触点结合的电器, 它的转换深度介乎两者之间。

§ 0-2 典型电器的结构原理

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两大部分, 在结构上具有感测器官和执行器官。感测器官接受输入信号, 经过检测比较作出判断, 然后命令执行器官动作, 输出指令信号, 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, 由动静触头、灭弧装置和导电部件组成。在非电磁式自动电器中, 如热继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信号, 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, 输出相应的控制信号, 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两大基本组成部分, 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, 当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，尚有联系两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的和不可缺少的。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，电器内部两大基本组成部分——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。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，例如低压断路器和接触器。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电器，通过它们可初步认识电器结构的基本组成部分，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信号的电器，广泛应用于控制和通信领域，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信号感测的任务。图中 7 是继电器的触头， c_2c_0 是继电器的常闭触头（或称动断触头），当继电器未操作时，它处于闭合状态； c_1c_0 是常开触头（或称动合触头），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。

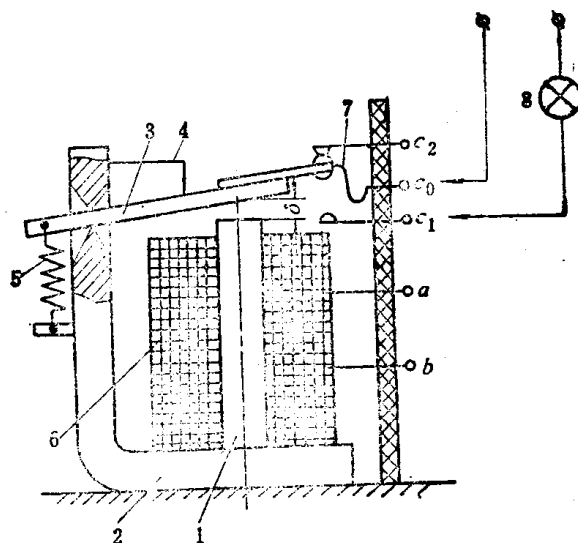


图0-1 电磁式继电器

电磁式继电器的工作原理很简单。在线圈两端 ab 上输入电流或电压信号，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，它的磁通大部分沿铁心柱、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。如果信号强度达到动作值，衔铁的电磁吸力（矩）克服弹簧的阻力（矩），衔铁开始转动，带动触点完成执行任务，图中 c_0c_1 电路闭合， c_2c_0 断开，接在该回路内的信号灯 8 发亮。衔铁一旦闭合，磁的状态发生变化，如果此时减小输入信号使之略小于吸合时动作值，衔铁不会马上释放，只有当输入信号小到相应的数值，衔铁才开始释放，带动动触点向上运动，已经闭合的常开触点 c_1c_0 重新打开，信号灯 8 熄灭。在实际控制线路中，继电器的触点常用来控制接触器的线圈或其他电器的线圈。

尽管线圈的输入信号可以连续地变化（它的稳定工作点可以很多），但是触头输出的稳

定状态只有两个，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“是一否”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信号 x 从零连续增加达到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），继电器的输出信号立刻从 $y = 0$ 跳跃到

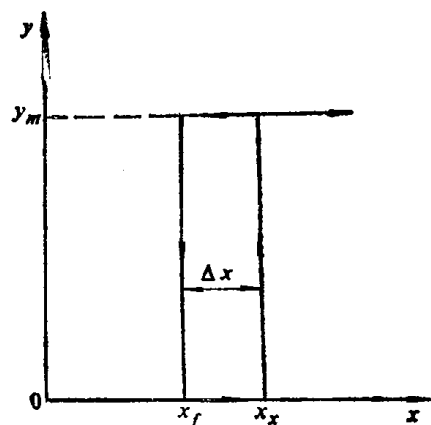


图0-2 继电器的输入—输出特性

$y = y_m$ ，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，输出信号量 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）。作动值 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。

继电器触点上输出的控制功率 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_a 之比叫做继电器的控制系数

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

继电器在规定负载条件下的最小动作功率 P_a 叫做继电器的灵敏度。

继电器从获得输入信号起到触头完成动作止的时间，叫做吸合动作时间；从断开输入信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。现代控制和通信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电磁机构的设计计算。这些课题的理论基础将在本书有关章节中介绍。

图0-1所述是电磁式继电器结构原理。根据线圈的结构，它可以做成反映电流输入信号的电磁式电流继电器，反映电压输入信号的电磁式电压继电器，也可以做成放大控制系数和

以增加输出信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(输出信号落后于输入信号一定的时间间隔)构成时间继电器。这种电流、电压、时间继电器的输入信号的检测和输出信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,还利用其他原理,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,继电器两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,继电器大体上都是根据感测器官的工作原理来命名的。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、无噪声、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。但是它的缺点也不少,例如怕干扰、怕热、怕过电流和怕过电压等。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 ,当这个吸力矩克服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,当线圈失去激磁或激磁电流过小(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。所谓初压力乃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,乃是触头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0-4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心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,剩磁吸力 oh 一定要小于开断力 of ,否则衔铁和铁心在分断操作时粘住不释放,在工作过程中往往酿成事故。

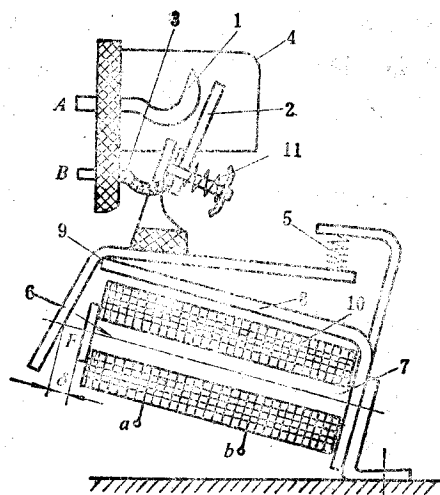


图0-3 直流接触器的结构示意图

A—进线柱 B—出线柱 a、b—线圈端头
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—楔角 10—线圈 11—触头弹簧

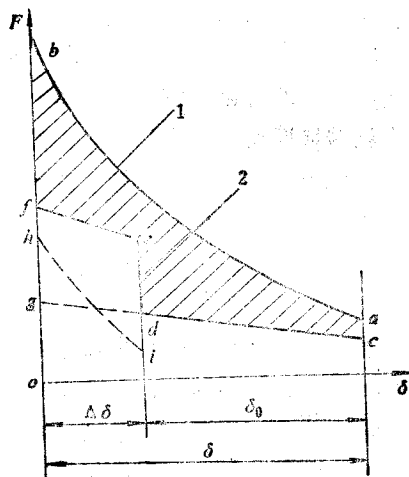


图0-4 直流接触器的吸力—反力特性

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

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,工作电压下的吸引电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。

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五章中介绍。

接触器结构上尚有联锁触头组。这些所谓辅助触头大体上都做成标准组件。利用辅助触头可以控制其他电器的线圈激磁，使其他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 V，亦可用于 660 V，但电寿命要降低。它的额定电流为 20、40、100、160、250、400 和 600 A。激磁线圈的电压一般为 220 V 或 110 V。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两大类型。图 0-5 示出了转动式交流接触器结构。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

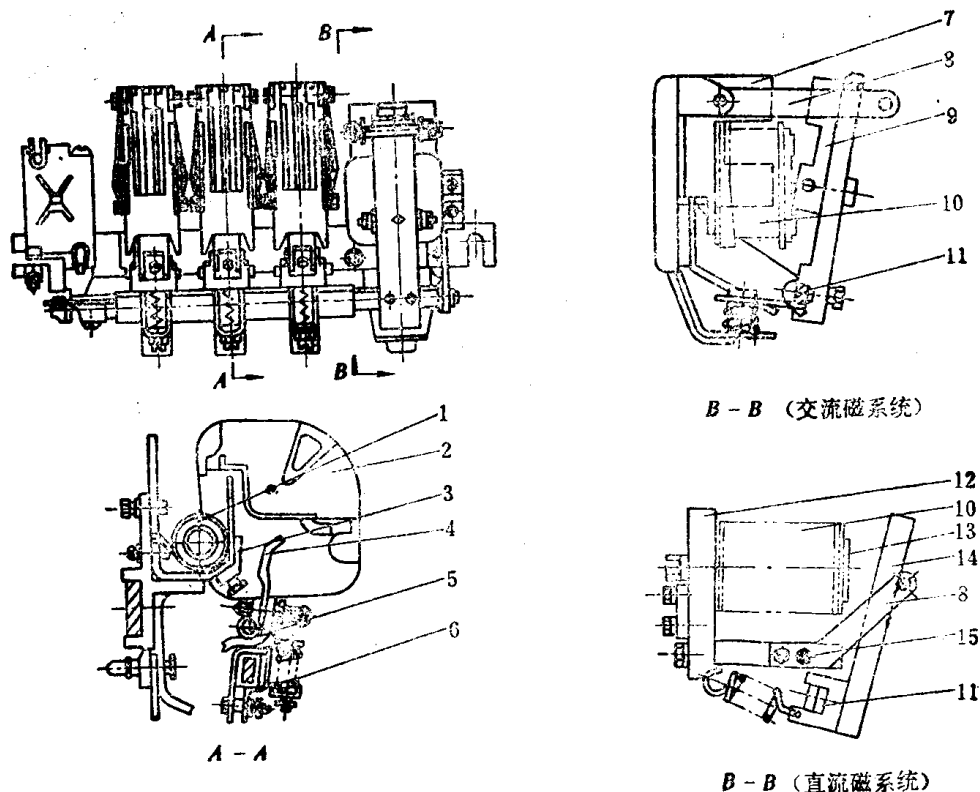


图0-5 转动式交流接触器结构

- 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—顶杆

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，但是安装面积大，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 A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，缓冲消振性能好，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20年来这种结构类型的接触器的机械电气寿命提高了10倍，安装面积减小了25%。

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

3. 真空接触器

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^{-4} Pa的真空度。外壳一般用致密材料，例如钼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

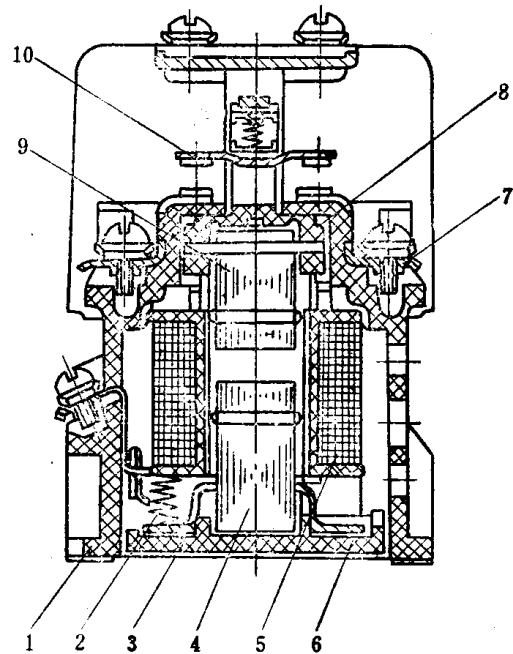


图0-6 直动式交流接触器

- 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

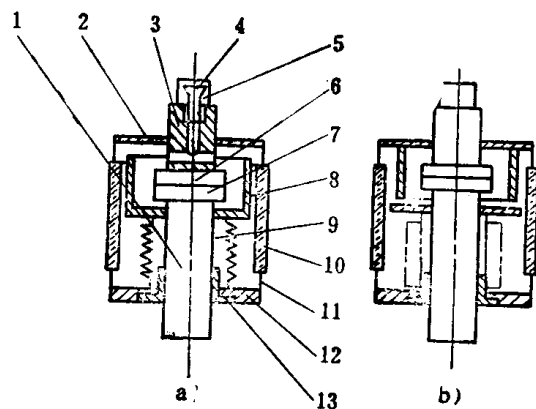


图0-7 真空接触器灭弧室

- 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

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气，确保高的分断能力；另一方面防止金属蒸气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，只有少量的金属蒸气电弧，它的介质恢复速度快，因而触头开距可做得很小（例如 1.2kV 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少，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 50~100 N。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。

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第五、六章中阐述。

目前我国生产的真空接触器额定电压为 6 kV 和 10 kV，额定电流为 300 A 和 600 A，额定电压下最大分断电流分别是 2500 A 和 5000 A，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。

§ 0-3 电器学的主要理论范畴

上面曾经指出，电器的工作原理是多种多样的。要掌握电器的结构原理及设计计算需要广泛的知识 and 相应的理论基础。电器的理论基础实际上是十分宽广的，但作为一个学科，电器学的主要内容即它的理论范畴有下列几个方面。

一、电磁机构理论

电磁机构是自动化电磁电器的感测部分，在电器中占有十分重要的位置。它的理论基础不仅是《电工基础》中的磁路和电磁场，而且是电磁—力—运动的综合理论。电器中电磁铁或电磁装置的结构型式很多，它既不同于变压器的静止铁心，又不同于旋转电机不变的均匀磁气隙，而是一种具有可动铁心和可变气隙的电磁装置。它的磁场图景是复杂的，在理论计算方面有自己的特殊规律。电磁机构计算内容主要是正确描绘电磁场的分布和正确处理带铁心电路的非直线性质，围绕电磁力计算这个中心任务，研究它的静态吸引特性和动态吸引特性，计算电磁—力—运动综合的过渡过程，确定各项电磁参数和电磁机构的动作时间。为此必须深入研究可动铁心与静止铁心之间各种形状的空气隙磁导，研究气隙磁通与漏磁通的分布规律，研究气隙磁位与铁心磁位的分配关系，这些都是交流和直流电磁机构的共同问题。由于磁场的分布性和铁心磁路的非线性，电磁机构中的电磁计算显得十分复杂，近年来，电子计算机的发展提供了运算工具，用电子计算机计算磁路或者直接对电磁场进行数值计算，节省了电磁计算所需的时间和提高了计算的精确程度，促进了电磁机构理论与计算趋于不断完善和成熟。

二、电接触理论

触头是电器的执行部分，是有触点电器的重要组成部分。触头工作的好坏直接影响开关电器的质量和特性指标。电接触理论是电器的基本理论之一。

电接触理论的主要内容是：电接触的物理—化学过程，它的热、电、磁以及金属变形等各种效应，接触电阻的物理化学本质及其计算，接触和离开过程中触头的腐蚀、磨损和金属迁移，触头在闭合操作过程中的振动、磨损和熔焊等。研究接触电阻中收缩电阻和膜电阻的理论和计算，有助于对影响接触电阻的各种因素分析，有助于对触头结构材料和结构参数（触头的压力、超程等）的正确选择，有助于触头的使用和维护。触头的熔焊有所谓“热”熔焊与“冷”熔焊之分。前者是在电弧或电火花作用下，触头局部金属斑点熔融粘焊，后者则是由分子粘附力引起的粘结。对热熔焊的消除，必须和电弧问题联系综合解决，而对冷熔焊则主要从触头材料和加工工艺方面解决。

三、电弧理论

电弧是有触点开关电器在分断过程中必然产生的物理现象。开关电器触头上电弧的存在不仅延缓了电路开断的时间，而且还灼伤触头表面，使之工作不可靠和缩短使用期限。这是一方面。另一方面，触头上的电弧也是线路中电磁能泄放的场所，由此减轻线路开断时的过电压。但总的来讲，电弧在开关电器中是弊多利少的，因此电器工作者研究电弧主要在于熄灭电弧。

电器中电弧理论的内容很广泛。触头分离时如何引弧，气体放电和击穿的物理过程，火花放电、辉光放电和弧光放电的界限和过程，电离和激励的概念，这些是生弧的物理基础。与电离的同时存在消电离的物理过程，弧柱中离子平衡的物理化学状态，电弧的直径、温度分布，电弧的弧根和斑点，电弧的等离子流，电弧电位梯度，这些都是弧柱方面的理论。近极区则有阴极正空间电荷、阳极负空间电荷、阴极压降和阳极压降方面的理论。为了研究熄弧的条件，必须把电路的参数和电弧的特性联系起来。电弧的特性有静态伏安特性和动态伏安特性。交流电弧过零时的物理过程反映为介质恢复和电压恢复。这里既有理论分析又有实际计算和测量问题。

四、电器发热和电动力理论

电器的导电部件如触头、母线和线圈都有电阻，因而都有损耗。此外，交流铁心有涡流磁滞损耗，在高电场下有介质内的损耗，所有这些损耗都是热源，由它们形成的温度场有时是很复杂的。在大电流情况下，不仅产生巨大热效应，而且还产生巨大的磁效应，使交流导电部件内部电流线分布不均匀，使相邻的交流母线在各自导体上的电流线分布不均匀，这就是集肤效应和邻近效应。一般来讲，由于集肤效应和邻近效应，载流体产生附加损耗，影响发热温升，从而降低了它的允许载流量。

为了提高电器的工作可靠性和确定过载能力，有必要研究电器在长期、短时和反复短时工作制下的发热冷却过程和过载能力计算。还要研究导电部件在大电流但作用时间极短（例如导线上存在短路电流）情况下，电器的发热温升计算，校验导体在短时温升下的可靠程度（即所谓热稳定性）。

对各种不同几何形状载流体在不同的空间和平面位置上进行电动力的分析和计算，这也是电器学的基础之一。众所周知，大的短路电流通过载流体所产生的强大的电动力，往往使载流体本身或载流体支持件变形甚至破损，这就是对电器提出电动稳定性要求的依据。

上面介绍的电磁机构理论、电接触理论、电弧理论以及发热和电动力理论是电器学的主要理论范畴。此外，电器的理论范畴中还包括机构运动学，电器运动部件的阻尼消振理论等。

作为无触点电器的理论基础，包括半导体、晶体管、晶闸管、磁性元件和其他光敏、压敏自动化元件的工作原理、线路设计和参数选择等方面。它依赖于电子学、半导体器件等普遍的基础理论，同时也有组成无触点电器元件后的特殊问题、特殊理论。

总之，电器的理论范畴还不是很固定的，还在不断地充实、更新、补充和发展中。电器的理论还有不完善之处和空白之处。不少电器的结构设计实际上是近似估算性质，缺乏成套的规格化的设计步骤和方法，也缺乏比较准确的数据和曲线。至于理论基础中某些物理现象的阐明、假设的验证、计算公式的严格推导，都有赖于今后的努力。

§ 0-4 电器技术的发展简史及其展望

电器的产生和发展是和电的发现和广泛使用分不开的。强电领域和弱电领域都需要电器。从强电领域看，根据电器所控制的对象有电网系统和电力拖动两大方面。

生产的发展使电网系统和电力拖动系统不断发展，它们对电器提出了新的要求，推动了电器的革新和提高，推动了电器结构性能的改进和新品种的问世，而性能优良的新型电器元件反过来又推动了系统的发展。因此系统和电器元件间存在着相互促进、相辅相成的关系。

电器的发展经历了从手动操作进到自动操作的过程，经历了从开关、调节和保护的作用发展到更多功能（例如控制、检测和变换等）的过程，经历了有触点电器发展到无触点电器的过程，经历了从单个元件发展到组合电器和成套装置的过程。

从手动控制到自动控制，从手动电器到自动电器，这是一个跃进。

近年来，由于生产效率的提高，对控制电器提出了新的要求：动作时间短，操作频率高，电气与机械寿命长，转换能力强，工作可靠和维护方便。在大型高速自动控制和调整的闭环系统中，传统的有触点电器不能满足或不能全面满足要求，于是无触点电器便应运而生。

正如从手动电器进入自动电器一样，从有触点电器发展到无触点电器也是电器发展的一个跃变。这种跃变是电器本身发展的必然趋势。

近年来，低压电器发展过程中出现了有触点与无触点结合的所谓混合式电器，例如混合式接触器和起动机。仔细分析无触点电器和有触点电器的优缺点，会发现无触点电器的固有弱点恰好是有触点电器的固有优点，有触点电器执行机能强而感测机能弱，而无触点则反之。在同一执行机能中，有触点的主要矛盾是通断过程的电弧和磨损，而无触点电器的主要矛盾往往是管子压降和发热。如果通断的极短过程由晶闸管无弧实现而闭合断开状态由触头来担当，这样就避免了晶闸管长期通电的发热问题，也解决了有触点的电弧问题。这种混合式接触器国外已有产品问世，国内已经研制成功。

上面谈的主要是电力拖动领域中电器的发展概况。在电力网领域中，电器的发生和发展的演变过程亦相类似。

电器应用初期，低压电力网广泛使用刀开关和熔断器。刀开关起正常情况下切换电路和隔离电路的作用，而熔断器则在故障情况下起过载和短路的保护作用。熔断器结构简单，但是只能一次操作；刀开关一般只能手动投入，不适宜远程操作，而且执行机能也弱，不能满