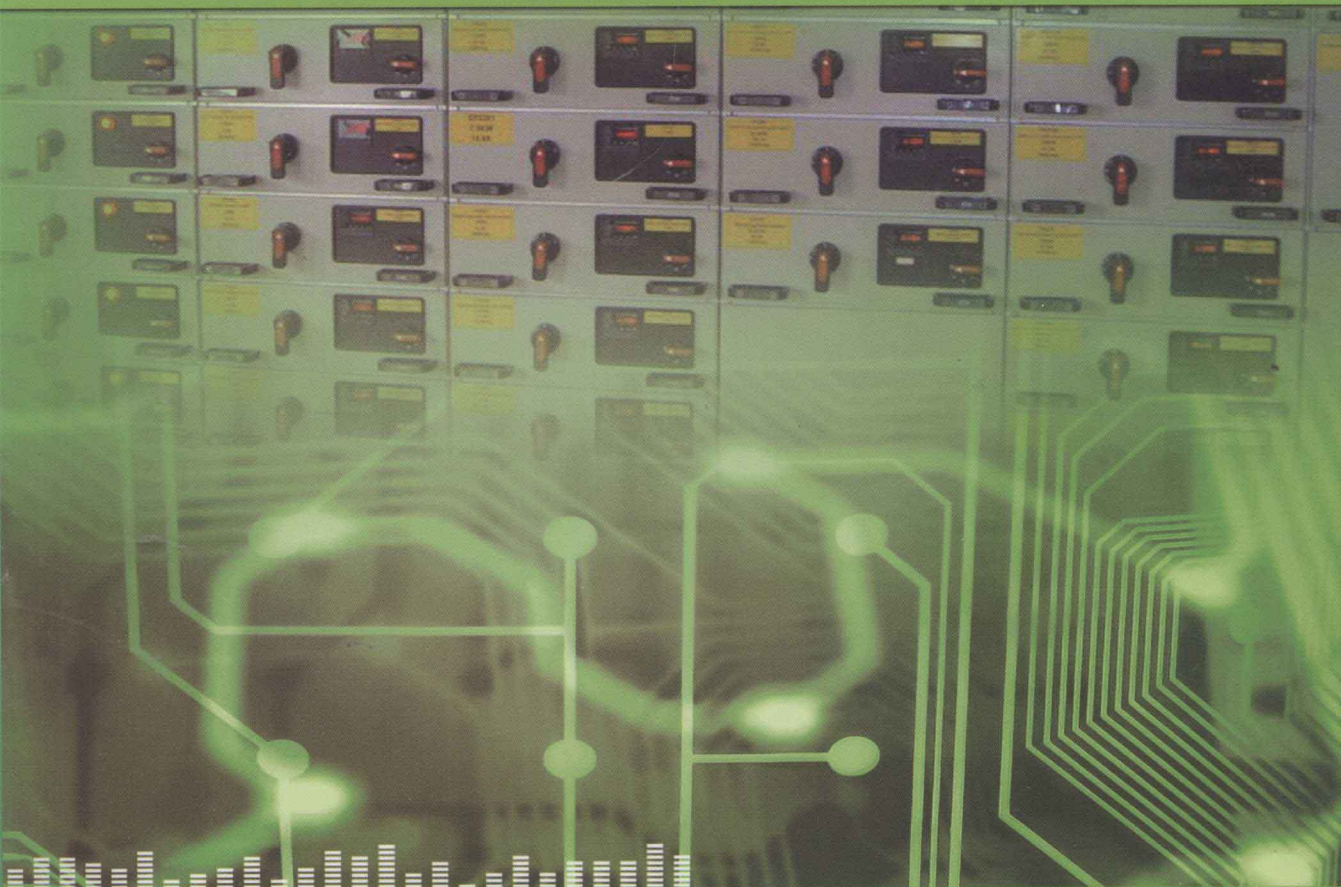


高等教育规划教材

电器学原理

曹云东 等编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

本书是一本关于电器理论学习的专业基础书籍,包括电器研究的主要理论范畴,全书共分11章:第1章绪论,介绍电器学发展情况;第2章介绍电器热源及热传输主要形式、发热计算理论;第3章介绍电器中不同工况下电动力计算的基本理论;第4~6章主要介绍电器电弧理论、电弧熄灭条件与原理以及电弧最新数学模型研究;第7章主要介绍电接触理论及应用;第8~10章主要介绍电器中电磁系统的计算理论、电磁吸力计算和电器中电磁场数值计算基础;第11章主要介绍电器试验研究的基本理论知识。

本书为高等学校电气工程及自动化专业的教材,也可供从事高、低压电器设计、制造和运行方面工作的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电器学原理/曹云东等编著. —北京:机械工业出版社,2012.3

普通高等教育规划教材

ISBN 978-7-111-36973-8

I. ①电… II. ①曹… III. ①电器学—高等学校—教材 IV. ①TM501

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第280181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:王雅新 责任编辑:王雅新

版式设计:石冉 责任校对:樊钟英

封面设计:赵颖喆 责任印制:杨曦

北京市朝阳展望印刷厂印刷

2012年5月第1版第1次印刷

184mm×260mm·19.75印张·487千字

标准书号:ISBN 978-7-111-36973-8

定价:39.80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

销售一部:(010) 68326294

销售二部:(010) 88379649

读者购书热线:(010) 88379203

门户网:<http://www.cmpbook.com>

教材网:<http://www.cmpedu.com>

封面无防伪标均为盗版

前 言

电器设备广泛应用于低压、高压、超高压及特高压等领域。随着我国电力事业及电网智能化的发展，对传统电器提出了更新、更高的要求。为适应当前高等教育发展、教学改革的需求，加强电器专业方向基础理论掌握、拓展知识内涵、适应专业发展，由沈阳工业大学、大连理工大学、河北工业大学和同济大学教师一起，在充分借鉴现有电器学理论和资料的基础上，共同编写《电器学原理》一书。

书中内容在充分考虑目前国内外电器发展现状的基础上，对传统电器理论的内容进行了简化和浓缩，对电弧、电器数值计算等内容进行了充实，希望对学习者能有更大帮助。

全书由沈阳工业大学曹云东教授主编。沈阳工业大学曹云东教授（第1、2、3章）、沈阳工业大学刘晓明教授（第4、6章）、大连理工大学董恩源副教授（第5章）、同济大学孔繁虹副教授（第7章）、沈阳工业大学孙鹏教授（第8章）、河北工业大学刘福贵教授（第9、10章）、大连理工大学王永兴副教授（第11章）参加本书编写。全书统稿、修改由曹云东教授完成。

大连理工大学邹积岩教授对本书进行了仔细审阅，提出了许多宝贵意见，在本书的编写过程中给予了大力支持和帮助。在此对邹积岩教授表示衷心的感谢。

沈阳工业大学王尔智老师、西安交通大学王季梅对本书的出版也给予了支持和关心。在本书出版过程中，还得到了赵志刚讲师、张闯讲师、李晓霞副教授、庞玲玲讲师以及王舒、赵兴海、矫长东、冷雪、李俐莹、立争博等研究生的大力帮助。在此对他们一并表示感谢。

由于编者水平有限，书中不足或错误之处，恳请读者给予批评指正。

编 者

目 录

前言

第1章 绪论 1

1.1 电器的定义和分类 1

1.2 典型电器的结构原理 3

1.2.1 电磁式继电器 3

1.2.2 接触器 5

1.3 电器学的主要理论范畴 8

1.3.1 电器发热和电动力理论 8

1.3.2 电弧理论 9

1.3.3 电接触理论 9

1.3.4 电磁机构理论 9

1.4 开关电器技术的发展简史 10

1.5 我国电器制造事业的发展 12

第2章 电器导体的热计算 14

2.1 电器中的热源 14

2.1.1 电阻损耗 14

2.1.2 铁磁损耗 17

2.1.3 介质损耗 18

2.2 电器中的散热形式 19

2.2.1 热传导 19

2.2.2 热对流 22

2.2.3 热辐射 23

2.3 电器的允许温升及电器热稳定性 24

2.3.1 电器的允许温升及相关标准 24

2.3.2 电器的热稳定性 31

2.4 电器表面稳定温升计算及分布 31

2.4.1 电器表面稳定温升计算—牛顿公式 31

2.4.2 电器典型部件的稳定温升分布 33

2.5 不同工作制下电器的热计算 37

2.5.1 长期工作制 37

2.5.2 短时工作制 39

2.5.3 反复短时工作制 41

2.6 短路电流下的热计算 42

思考题与习题 45

第3章 电器中的电动力计算 46

3.1 电器中的电动力 46

3.2 电器电动力计算基本理论 46

3.2.1 能量平衡法计算电动力 46

3.2.2 毕奥-萨伐尔定律计算电动力 47

3.3 电器中典型结构的电动力计算 48

3.3.1 导体回路对电动力的影响及回路因数 48

3.3.2 导体截面对电动力的影响及截面因数 51

3.3.3 载流导体与导磁体间的电动力 53

3.4 正弦交流下的电动力 56

3.4.1 单相正弦交流下的电动力 56

3.4.2 三相正弦交流下的电动力 57

3.5 短路电流下的电动力 59

3.5.1 单相短路时导体承受的电动力 59

3.5.2 三相对称短路时导体承受的电动力 61

3.6 电器的电动稳定性 61

思考题与习题 63

第4章 电弧基础理论 64

4.1 气体放电的物理基础 64

4.1.1 电离和激励 64

4.1.2 气体电离方式 65

4.1.3 气体消电离及其主要形式 67

4.1.4 气体放电的几个阶段 68

4.1.5 气体间隙的击穿理论 71

4.2 真空放电的物理基础 74

4.2.1 真空间隙的电击穿与真空绝缘破坏机理 74

4.2.2 真空击穿的主要影响因素 76

4.3 电弧物理特性	78	5.2.2 交流电弧的熄灭条件	124
4.3.1 电弧的产生	78	5.3 开关电器典型灭弧装置的	
4.3.2 电弧的伏安特性	79	工作原理	126
4.3.3 电弧外观	80	5.3.1 简单灭弧	126
4.3.4 电弧的组成	81	5.3.2 磁吹灭弧装置	127
4.3.5 弧柱温度	83	5.3.3 纵缝灭弧室	127
4.3.6 弧柱直径	83	5.3.4 栅片灭弧室	129
4.3.7 电弧的弧根和斑点	84	5.3.5 固体产气灭弧装置	131
4.3.8 电弧的等离子流	85	5.3.6 石英砂灭弧装置	132
4.3.9 电弧的能量平衡	86	5.3.7 油吹灭弧装置	132
4.4 直流电弧特性	89	5.3.8 压缩气体灭弧装置	134
4.5 交流电弧的介质恢复过程与		5.3.9 真空灭弧装置	135
电压恢复过程	91	5.4 提高灭弧装置开断能力的	
4.5.1 交流电弧的伏安特性	91	辅助方法	137
4.5.2 电弧电压对交流电路		5.4.1 弧隙两端并联低值电阻	138
电流的影响	93	5.4.2 附加同步开断装置	138
4.5.3 交流电弧能量的计算	96	5.4.3 机械与半导体混合式开关	139
4.6 交流电弧弧隙中的介质恢复	97	思考题与习题	140
4.6.1 弧隙中的介质恢复过程	97	第6章 开关电弧数学模型	141
4.6.2 开关电器弧隙的介质		6.1 电弧模型概述	141
恢复强度特性	100	6.2 气体介质电弧数学模型	143
4.7 交流电弧弧隙中的电压恢复		6.2.1 气体介质电弧数学模型	
过程	103	的分类	143
4.7.1 恢复电压组成部分和工频		6.2.2 黑盒模型	143
恢复电压	103	6.2.3 经典的电弧模型	144
4.7.2 理想弧隙时弧隙上的电压		6.2.4 两种用于 SF ₆ 断路器内	
恢复过程	106	的气体电弧模型	145
4.7.3 电弧参数对电压恢复		6.3 真空电弧数学模型	149
过程的影响	112	6.3.1 真空电弧的概述	149
思考题与习题	115	6.3.2 真空电弧数学模型概述	150
第5章 开关电弧的熄灭原理	116	6.3.3 真空电弧经典数学模型	151
5.1 直流电弧的熄灭原理	116	思考题与习题	152
5.1.1 直流电路中的电弧能量		第7章 电接触理论	153
和燃弧时间	116	7.1 概述	153
5.1.2 直流电弧的熄灭原理	117	7.1.1 电接触内表面的物理图景	153
5.1.3 直流电弧的熄灭方法	117	7.1.2 电接触的基本结构类型	154
5.1.4 电流转移原理	119	7.2 接触电阻	158
5.1.5 直流电弧开断时的过电压	122	7.2.1 接触电阻理论	158
5.2 交流电弧熄灭原理		7.2.2 接触电阻计算	159
和熄灭条件	123	7.2.3 接触电阻的影响因素	164
5.2.1 交流电弧的熄灭原理	123	7.3 接触导体升温	168

7.3.1 触头的发热	169	思考题与习题	232
7.3.2 接触电阻与接触电压降	172	第9章 电磁系统的吸力计算	234
7.4 触头间的电动力	174	9.1 磁场能量与电磁力的	
7.5 触头闭合过程的振动分析	176	基本关系	234
7.6 触头熔焊	179	9.1.1 磁场的能量	234
7.7 触头的质量转移和电磨损	182	9.1.2 能量转换与电磁力的	
7.8 电接触材料	188	普遍公式	235
7.8.1 触头材料的要求和分类	188	9.1.3 电磁能量的图解表示	237
7.8.2 触头材料的选用原则	192	9.1.4 计算电磁力的实用能量	
7.8.3 栓接触头材料的选用原则	194	公式	238
7.8.4 触头材料的发展趋势	196	9.1.5 对漏磁力的分析	239
思考题与习题	196	9.2 麦克斯韦电磁吸力公式	240
第8章 电磁系统磁路计算基础	198	9.2.1 麦克斯韦公式的导出	240
8.1 概述	198	9.2.2 麦克斯韦公式与能量	
8.1.1 电磁系统的典型结构和		平衡公式	242
基本特性	199	9.3 恒磁动势与恒磁链条件下的	
8.1.2 电磁系统计算的基本任务		吸力特性	242
及其计算方法	203	9.4 交流电磁系统电磁吸力的	
8.2 磁路的基本概念及磁路方程	204	特点与分磁环原理	245
8.2.1 磁路的基本概念	204	9.4.1 交流电磁系统电磁吸力	
8.2.2 磁路的基本定律及磁路		的特点	245
方程	204	9.4.2 分磁环的概念	245
8.2.3 拉普拉斯场量的对偶关系	205	9.4.3 分磁环工作的分析	246
8.3 气隙磁导计算	205	9.4.4 分磁环和磁极端面参数	
8.3.1 气隙的磁导定义	206	的设置	247
8.3.2 气隙磁导的计算方法	206	9.4.5 三相交流电磁系统的吸力	248
8.4 直流磁路计算	211	9.5 静态吸力特性与反力特性	
8.4.1 直流磁路特点及其求解方法	211	的配合	249
8.4.2 直流磁路方程的建立	212	9.6 动态吸力特性的分析计算	252
8.4.3 不计漏磁通的无分支		9.6.1 直流并励电磁系统的	
磁路计算	213	动态特性	252
8.4.4 考虑漏磁时的U形磁路	215	9.6.2 交流电磁系统的动态特性	260
8.4.5 复杂磁路的计算	217	思考题与习题	262
8.5 含有永久磁铁的磁路计算	222	第10章 电器中场的计算基础	264
8.5.1 永久磁铁的工作曲线	222	10.1 电器中电场计算基础及应用	264
8.5.2 永久磁铁的工作点及其		10.1.1 电器中的电场问题	264
等效处理	224	10.1.2 泊松方程的有限元	
8.6 交流磁路计算	227	离散格式	264
8.6.1 交流磁路的特点	227	10.1.3 空间单元分析	268
8.6.2 交流磁路的基本概念	228	10.1.4 代数方程的合成	271
8.6.3 交流磁路分析与计算	230	10.1.5 边界条件的处理	273

10.2 电器中磁场计算基础及 应用	275	11.1.2 温升的测量	292
10.2.1 电器中的磁场问题	275	11.2 动热稳定试验	295
10.2.2 三维静磁场矢量位有 限元分析	276	11.3 电器电弧试验	297
10.3 电器中温度场计算基础及 应用	283	11.3.1 电弧形态的观测	297
10.3.1 电器中的温度场问题	283	11.3.2 电弧等离子体参数的 诊断	298
10.3.2 热传导方程和边界条件	284	11.4 动作特性试验	298
10.3.3 稳态温度场有限元方法	286	11.4.1 低压电器的动作特性 试验	299
思考题与习题	290	11.4.2 高压开关的动作特性 试验	300
第11章 电器试验技术	291	11.5 电器的通断能力试验	300
11.1 电器温升试验	292	11.6 绝缘试验	304
11.1.1 温升试验的试验要求和 方法	292	思考题与习题	306
		参考文献	307

第1章 绪 论

1.1 电器的定义和分类

电器是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、设备和器件。例如用于分断或接通电路中工作电流或故障电流的断路器，调节电路参数的电阻器，用于切换多路电源或负载的转换开关，检测电压电流的电压互感器、电流互感器，用于保护线路的熔断器等都是典型的电器。

电器的用途广泛，种类繁多，样式规格不一。因此电器的分类方法也是多种多样的。

1. 按功能分类

- (1) 用于接通和分断电路的电器，如接触器、刀开关、负荷开关、隔离开关、断路器等。
- (2) 用于控制电路的电器，如电磁起动器、自耦减压起动器、变阻器、控制继电器等。
- (3) 用于切换电路的电器，如转换开关、主令电器等。
- (4) 用于检测电路系数的电器，如互感器、传感器等。
- (5) 用于保护电路的电器，如熔断器、保护继电器、避雷器等。

2. 按用途分类

- (1) 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、低压断路器等。
- (2) 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、电动机起动器等。
- (3) 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。
- (4) 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、各种保护继电器、避雷器等。
- (5) 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。

3. 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、行程开关等主令电器。
- (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、各种类型的继电器、电磁阀等。

4. 按电压等级分类

- (1) 低压电器，按功能可分为：
 - 1) 开关电器：接通和分断电路并有一定通断能力的电器，如转换开关、起动器、接触器等。
 - 2) 熔断器：分断过载或短路状态下电路的电器，如高分断能力熔断器、自复熔断

器等。

3) 继电器: 用于控制和保护的电器。

4) 电阻器和变阻器: 改变电路参数或将电能转换为热能的电器, 如起动电阻、调节电阻、起动变阻器和励磁变阻器等。

5) 调节器: 使电路中某些量保持不变或使其按预定方式变化的电器。

6) 电磁铁。

(2) 高压电器, 按功能可分为:

1) 开关电器: 主要有高压断路器、高压隔离开关、高压熔断器、高压负荷开关和接地断路器等。

2) 量测电器: 主要包括电压互感器、电流互感器。

3) 限电流限电压电器: 主要包括电抗器、避雷器等。

5. 按元件与使用系统的关系分类

(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, 限电流效应好, 动稳定性和热稳定性高, 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、磁性或晶体管逻辑器件等。对这类自动化器件, 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。

6. 按使用场合和工作条件分类

(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。

7. 按执行机能和转换深度分类

(1) 有触点电器: 电器通断的执行功能由触点来实现, 例如接触器、断路器等。

(2) 无触点电器: 电器通断的执行功能不是由触点结构来实现, 而是根据开关器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, 即

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

式中, R_{DK} 为断开或截止时执行电路的电阻值; R_{JT} 为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: 有触点和无触点电器结合而成的电器, 它的转换深度介于两者之间。例如用晶闸管与电磁式接触器组成的无电弧接触器等。

1.2 典型电器的结构原理

从整体结构上看, 电器通常都具有两个基本组成部分: 感测部分和执行部分。感测部分的作用是接收外界输入的信号, 通过转换、放大和判断作出有规律的反应, 然后命令执行部分动作; 执行部分则按照感测部分命令进行相应的动作, 从而实现接通、分断电路或其他相应的功能, 以达到控制电路的目的。对于大部分有触点电器, 电磁机构就是其感测部分, 一般由动静铁心、线圈和弹簧构成, 触点系统就是其执行部分; 对于非电磁式自动电器, 由于其工作原理各不相同, 相应的感测部分也各有差异, 但触点系统仍是其执行部分。例如热继电器, 其感测部分是由发热元器件、双金属片等组成的, 当接收到外界输入的过电流信号时, 感测部分进行检测作出反应, 然后使执行部分——触点动作, 完成分断电路的任务, 达到过载保护的目的。即便电器中结构最简单的熔断器, 也具有感测部分和执行部分两个基本组成部分, 只不过这两部分统一于熔体而已。熔体串联在电路中, 当电路中的电流大于熔断器的动作电流时, 熔体发出执行命令, 熔体熔断, 开断故障电流, 达到保护电路的作用。

在电器结构中, 除感测部分和执行部分两个基本组成外, 还有起联系作用的传动件和机构部分, 起支撑和保护作用的支撑部分和外壳等, 这些部分对具体电器都是必不可少的。这些部分对两大基本组成部分起辅助、补充的作用。为了便于掌握电器结构的原理, 我们的主要研究对象仍是感测部分和执行部分。对于不同的电器, 感测与执行这两部分并不都是平衡的, 某些电器感测部分强大, 而执行部分较弱, 如继电器、变换器。某些电器的执行部分强大, 而感测部分较弱, 如高压断路器, 其感测机能只能依靠其他器件来辅助。也有些电器两部分相对比较均衡, 如低压断路器, 它能够准确地检测到短路电流, 并快速动作, 分断电路, 其感测和执行部分都很强大。随着电器新技术的发展和电器智能化程度的提升, 具有融合强大感测功能的高分断能力电器将是电器发展的方向。

为了更好地学习电器基础理论, 下面通过几种典型电器的结构原理、工作过程、技术指标等分析, 实现电器理论的初步认识。

1.2.1 电磁式继电器

继电器是一种当输入量(电、磁、声、光、热)达到一定值时, 输出量将发生跳跃式变化的自动控制器件。继电器种类繁多, 原理各异, 下面以最典型的电磁式继电器为对象, 对其原理进行介绍。

电磁式继电器的基本组成部分有铁心、线圈、衔铁和触点等。图 1-1 所示为电磁式继电器的结构原理图。图中铁心、线圈、衔铁和轭铁组成了电磁系统。弹簧也是电磁系统的一个组成部分, 它的作用是释放衔铁, 同时也可以测量继电器的动作值。弹簧的松紧强弱是可以调节的, 它与电磁体配合起到信号检测的作用。图中 6 为动触点, 5 为静触

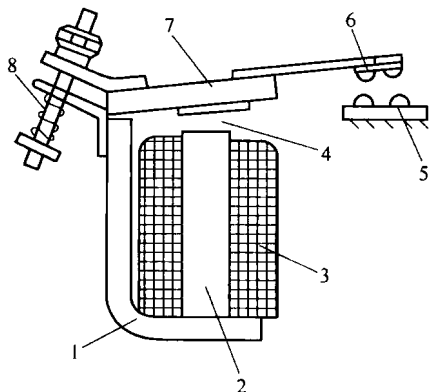


图 1-1 电磁式继电器的结构原理图

1—轭铁 2—铁心 3—线圈 4—气隙 5—静触点
6—动触点 7—衔铁 8—释放弹簧

点,在继电器未动作时,动静触点是分开状态,铁心与衔铁之间存在气隙。继电器的触点一般用于控制电路中,用来控制接触器或其他电器的线圈,对继电器触点的额定电流与转换能力的要求不高,因此继电器一般不采用灭弧系统,触点结构也比较简单,一般采用桥式触点,有常开、常闭两种形式。

当继电器线圈两端输入电流或电压信号时,线圈由于流过电流产生电磁效应,形成磁场,其磁通大部分沿铁心、轭铁、衔铁经工作气隙闭合,在工作气隙两侧形成电磁吸力。当输入电流较小时,气隙处的电磁吸力小于弹簧产生的反力,衔铁仍处于打开状态。当线圈的电流超过某一特定值时,吸力大于反力,衔铁闭合,带动触点闭合。当线圈电流减小时,衔铁不会立即释放,直到电流值降低到相应的数值时释放,动触点随衔铁一起打开。

由于继电器触点只有“闭合”和“断开”两个状态,当继电器的输入量大小变化时,其输出量只能有“通”和“断”两种。这样就可以得出继电器的输入与输出的关系,即继电特性,如图1-2所示。图中输入量用 x 表示,输出量用 y 表示。当输入量从零开始增加时,在 $x < x_x$ 的过程中,输出为低电平;当 $x = x_x$ 时衔铁吸合,触点闭合,输出由低电平跳跃至高电平;再增加 x 时,输出保持高电平不变。当输入量从某一大于 x_x 的值开始下降时,在 $x > x_f$ 的过程中,输出为高电平;当 x 降低到 x_f 时,衔铁释放,触点断开,输出由高电平跳跃至低电平;再减小 x 时,输出保持低电平不变。 x_x 称为动作值, x_f 称为返回值,返回值 x_f 和动作值 x_x 的比值称为返回系数 K_f ,即

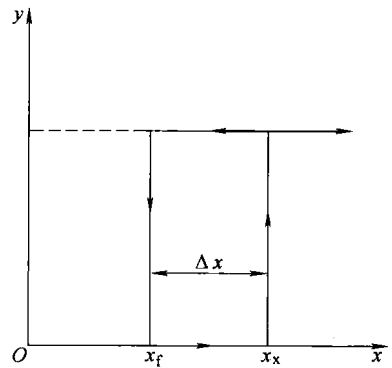


图1-2 继电器的输入-输出特性

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

电磁式继电器的返回系数取决于其功能,对于过电流(或过电压)继电器在额定参数下工作时,电磁式继电器的衔铁处于打开位置,当出现过电流(或过电压)时衔铁吸合,电流(或电压)降低到返回值时衔铁返回复位。对于过电流(或过电压)继电器,返回值小于动作值,所以返回系数小于1;对于欠电流(或欠电压)继电器在额定参数下工作时,衔铁处于吸合位置,当出现欠电流(或欠电压)时,衔铁动作打开,电流(或电压)恢复上升到返回值时复位吸合,其返回值大于动作值,所以返回系数大于1。

电磁式继电器的另一个重要参数是吸合时间和释放时间。吸合时间是指从线圈接受电信号到衔铁完全吸合所需的时间;释放时间是指从线圈失电到衔铁完全释放所需的时间。一般继电器的吸合时间与释放时间为0.05~0.15s,快速继电器为0.005~0.05s,它的大小影响继电器的操作频率。

以电磁式继电器的典型结构为基础,可以改造出多种不同功能的继电器。例如根据线圈的结构,可以做成反映电流输入信号的电磁式电流继电器和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电路来实现。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部分最为关键,可以认为是继电器的核心部分。继电器感测部分的工作原理多种多样,而继电器的命名多数都是基于感测部分的工作原理。感测部分对继电器的特性参数,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。触点的材料、压力、开距、超程等参数的选取对继电器性能同样有很大影响,触点的参数直接决定了触点工作的可靠程度和使用寿命。此外,触点的参数还会影响感测部分的负担,影响它的灵敏度和结构的小型化。

随着电子器件的发展,无触点半导体继电器的应用日趋广泛。半导体继电器与传统触点继电器相比,由于没有触点,不会产生触点间的电弧、火花,也不产生触点的振动和磨损,而且半导体继电器动作速度快得多,灵敏度更高,体积小,重量轻,寿命长,消耗功率小,控制系数高,这些优点都是触点继电器无法相比的。但同样半导体继电器也存在许多缺点,如存在抗干扰能力差,过载能力差,容易受温度变化影响,各种参数稳定性差,工作状态不便于观察,维修不够方便等。半导体继电器与触点继电器各有各的优缺点,为了充分发挥它们的长处,可以把它们结合起来使用,即半导体继电器作为感测部分,而触点继电器作为执行部分,这种结合体,又称为混合式继电器。随着微电子技术、光电子技术、智能控制技术等发展,出现了智能化多功能的组合式继电器,小型化、组合化、多功能化、智能化将是继电器乃至电器发展的主要趋势。

1.2.2 接触器

接触器是一种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。它的主要控制对象是电动机及其他电力负载,如电热器、照明灯、电焊机、电容器组等,具有控制容量大、过载能力强、寿命长等特点,应用广泛。由于接触器的作用是开断电流较大的主电路,因此在具体结构上与继电器相比有较大差异,所以接触器一般都装有专门的灭弧装置和较强的触点弹簧,使执行机构部分得到加强。

1. 交流接触器

交流接触器是通断交流主电路的接触器。由于交流主电路大多是三相式,所以交流接触器的触头结构以三极为主。

图 1-3 是交流接触器的典型结构示意图,其电磁系统由线圈、动铁心(衔铁)和静铁心组成。图中主触点、辅助常开触点和辅助常闭触点构成了接触器的触点系统。主触点用于开断主电路,通常为三对常开触点。主触点具有较高的机械强度和较大的热容量,触点材料为银-氧化镉,

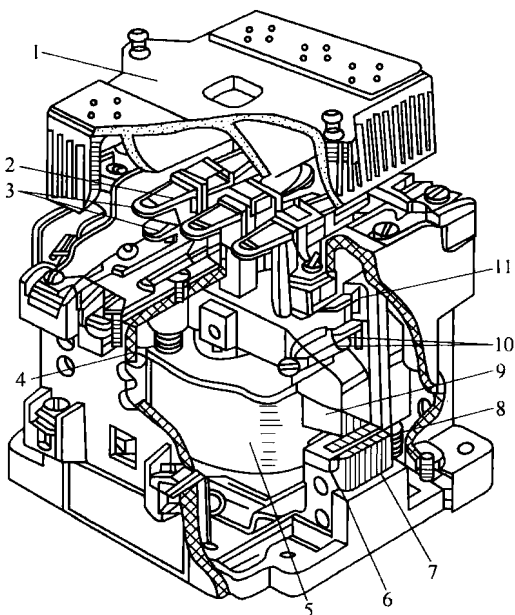


图 1-3 交流接触器的典型结构示意图

- 1—灭弧罩 2—触点压力弹簧片 3—主触点
4—反作用弹簧 5—线圈 6—短路环
7—静铁心 8—弹簧 9—动铁心
10—辅助常开触点 11—辅助常闭触点

这种材料具有较高的抗熔焊性和耐电腐蚀性,有利于提高接触器的电寿命。辅助触点多用于控制电路,一般有常开、常闭各两对。主触点的灭弧装置因电流等级而异,小电流时采用半封闭式灭弧罩或相间隔弧板,电流较大时采用半封闭式窄缝陶土灭弧罩、塑料灭弧罩等。

交流接触器的工作原理与电磁式继电器相似,线圈通电后,在铁心中产生磁通及电磁吸力。此电磁吸力克服弹簧反力使得衔铁吸合,带动触点机构作直线运动或转动,常闭触点打开,常开触点闭合。线圈失电或线圈两端电压显著降低时,电磁吸力小于弹簧反力,使得衔铁释放,触点系统复位。

2. 直流接触器

直流接触器是通断直流主电路的接触器。

图 1-4 为采用 U 形转动式电磁机构的直流接触器的结构示意图。图中直流接触器的铁心和衔铁均采用电工软铁,主触点采用指形触点,能够自动清除表面的氧化物。这种形式的触点开距比较大,触点反力比双断点小。由于直流电流没有过零点,熄弧比交流电流困难,所以直流接触器常用吹弧线圈进行磁吹熄弧,磁吹熄弧的原理是:当触点闭合通过电流时,吹弧线圈产生的磁通经铁制的增磁颊片在动、静触点间形成闭合路径。当触点断开时,电弧使电流延续流通,电弧与磁通相互作用,电动力使电弧向上运动,弧柱被拉长,同时弧柱进入灭弧罩内,电弧温度降低,电弧迅速熄灭。当电流增大时,吹弧线圈产生的磁通也增大,电动力也增强,吹弧作用增强。

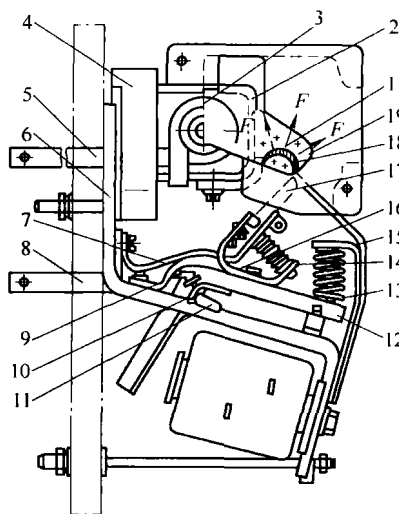


图 1-4 直流接触器的结构示意图

- 1—静触点 2—弧角 3—磁吹线圈 4—绝缘座 5—母线 6—铁轭 7—软连接 8—母线
9—压棱弹簧 10—压板 11—棱角 12—衔铁 13—释放弹簧 14—触点弹簧 15—弧角
16—动触点支架 17—动触点 18—电弧 19—磁吹线圈产生的磁通

直流接触器的工作原理是当电磁铁的线圈接通操作电源后,衔铁上便出现向左的电磁吸力,当这个吸力克服释放弹簧的反力矩后,衔铁开始闭合运动,与此同时动触点向静触点靠近,直到接触,动静触点相遇后,触点弹簧被压缩,同时呈现和释放弹簧相似的反力矩,之后衔铁全部吸合,铁心柱与衔铁间的气隙接近于零,弹簧压缩到最终位置,主触点紧密接触,主电路接通。反之,当线圈失去励磁或励磁电流过小时,电磁吸力小于释放的反力,处

于闭合状态的衔铁开始释放，同时主触点也随之分离，开断主电路。这时的反力由释放弹簧和触点弹簧提供。每个主触点都有一个初压力值和终压力值。所谓初压力是动静触点刚接触时动静触点上呈现的压力，此时触点弹簧尚未压缩变形。终压力是触点完全闭合而动静触点接触末时动静触点上呈现的压力，此时触点弹簧已被压缩。从动静触点接触起（衔铁尚未全部闭合）到触点支架运动停止（衔铁全部闭合）的行程叫做触点的超额行程。触点的超额行程简称超程，它是专为触点磨损后仍能可靠接触而设的。

图 1-5 所示为直流接触器的吸力-反力特性及其配合的情况。为了减小吸合时的动能，减轻衔铁与铁心以及动静触点闭合时的撞击，提高接触器的寿命，可以设计成吸力与反力特性相交，如图所示。图中 $\Delta\delta$ 是与触点超程相应的衔铁气隙， δ 是衔铁行程对应的气隙，曲线 abc 为电磁铁的吸力特性，可以看出，随着工作气隙 δ 的减小，电磁吸力 F 增大。折线 $a'dbefg$ 为反力特性，它是由 $a'dh$ 和 $dbefgh$ 叠加而成的。前者代表释放弹簧的反力，后者代表触点弹簧的反力。在动静触点未接触前，反力是释放弹簧的反力，在图中为 $a'd$ ，从触点接触到走完超程，反力由释放弹簧和触点弹簧共同作用，在图中为 $dbefg$ 。阴影部分 S_2 代表衔铁的动能， S_1 代表反力弹簧的弹性势能，由于 S_2 的面积大于 S_1 的面积，故衔铁可以依靠惯性冲过反力大于吸力的一段行程，并吸合到底，既可以快速闭合电路，又可以减轻机械冲击，达到了较好的吸、反力配合效果。

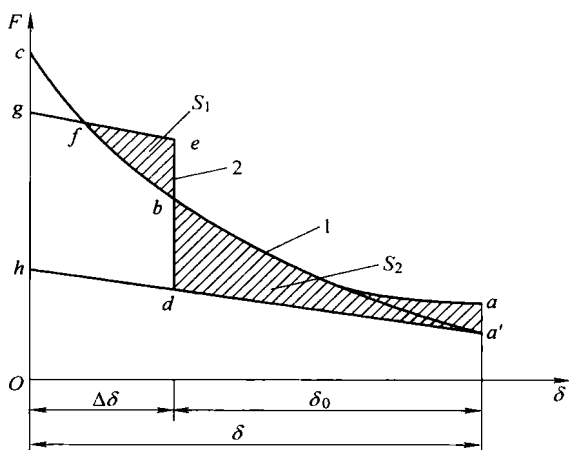


图 1-5 直流接触器的吸力-反力特性

从以上特性配合中可以看出： $a'dbefg$ 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部分与执行部分互相联系、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，这就需要触点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。为此需要较大的触点弹簧和开断弹簧，从而使机械负载阻力特性提高。同时与它匹配的电磁铁必须具有较大的线圈安匝数和较大的磁系统尺寸。

3. 真空接触器

在有爆炸和火灾危险的场合，如煤矿井下或化工厂等处，由于电磁式接触器工作时会产生电弧，因此不能够直接使用，而真空接触器却能适用于这些场合。

真空接触器是一种动、静触点密闭于真空泡中利用真空介质灭弧的接触器。图 1-6 所示为真空接触器的灭弧室结构。其中动触点与动导电杆焊接在一起，动导电杆、金属屏蔽罩、波纹管与下法兰焊接在一起。金属屏蔽罩的作用是在分断电流时，有效地凝结从触点间隙扩散出来的金属蒸气，以利于电弧熄灭，还可防止金属蒸气飞溅到绝缘外壳上，降低外壳内壁的绝缘强度。波纹管是一种起密闭作用的弹性器件，它在允许的弹性形变范围内伸缩时有足够的机械寿命。静触点和静导电杆焊接在一起，静导电杆经过屏蔽罩与上法兰相连。上下法兰盘间为玻璃或陶瓷外壳。从图中可以看到动、静触点均密封于玻璃外壳内，动触点可以在

波纹管内上下运动。

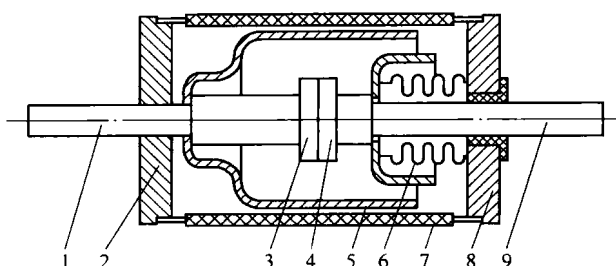


图 1-6 真空接触器的灭弧室结构

1—静导电杆 2—上法兰 3—静触点 4—动触点 5—屏蔽罩 6—波纹管 7—外壳 8—下法兰 9—动导电杆

真空灭弧室中的真空度通常在 $1.33 \times 10^{-4} \text{Pa}$ 以上，因此在灭弧室中基本没有气体分子存在，如果出现电子，在外加电压的加速下，穿过触点间隙时几乎不和气体分子发生碰撞，因此不会出现气体电弧。在分断电流时，触点间隙中会形成由金属蒸气组成的真空电弧，因真空介质具有很好的绝缘强度且具有很快的介质恢复速度，真空电弧能够快速熄灭。真空接触器具有很强的分断能力，例如对于交流 1.1kV 只需要 1~2mm 开距就可以可靠分断。触点的开距适当加大后，可用于开断更高的电压。真空电弧燃烧时间短，电弧能量小，因此，触点的烧损小，接触器的电寿命长。其触点开距很小，所以操作时的机械碰撞和磨损较小，机械寿命也很高。

真空接触器的特点是分断能力强，允许的操作频率较高，寿命长，无电弧外喷，体积小，重量轻，操作时噪声小，维修周期较长，其防火、防爆等优点使其适用于矿井、化工厂等特殊场合。但真空接触器在分断电流时会出现“截流过电压”现象，即在分断交流电流时，由于真空灭弧室的熄弧能力很强，电弧电流不是自然过零时切断，而是从电流的某一值突然降到零，由此而出现高的过电压。截流电压会危及电气设备的安全运行。

1.3 电器学的主要理论范畴

电器学是一门涉及领域宽广的学科，涉及理论知识广泛，掌握这些理论是理解电器的结构原理和进行电器设计的基础。电器学的主要理论范畴概括起来有以下几方面。

1.3.1 电器发热和电动力理论

电器在工作中会产生发热现象。触点、线圈等金属导体在电流通过时，产生电阻损耗；交流电路中，铁磁体等磁性材料在交变磁场的作用下，产生磁滞与涡流损耗；绝缘材料在交变电磁场的作用下，产生介质损耗。这三种损耗是电器中的主要热源，在大电流情况下，损耗导致的发热尤其明显。如果电器温度升高超过极限允许温度会导致金属材料的机械强度降低，触点氧化加剧，接触电阻增加，绝缘材料加速老化，介电强度下降等负面效果，不利于电器的可靠稳定工作。因而为了提高电器工作的可靠性和确定过载能力，对电器在不同工作制下，包括大电流（例如短路电流）下的发热和过载能力的计算是十分必要的，并且对于缩小电器体积，节约原材料，降低成本，延长使用寿命等方面也具有重大意义。

对各种不同几何形状载流体在不同空间和平面位置上进行电动力分析和计算也是电器设计的基础之一。当系统发生短路故障时,载流导体上会流过大的短路冲击电流,短路电流会使载流导体产生强大的电动力,容易对载流导体支持件产生变形甚至破坏。因此,电器的电动稳定性及电动力的计算是电器研究的重要内容。

1.3.2 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。触点间产生的电弧会延缓电路开断时间并烧损触点,降低其可靠性和使用寿命。但同时,电弧的产生同时也为线路中的电磁能提供了释放的空间,降低了线路开断时的过电压。电弧的作用有利有弊,但在有触点开关电器中是弊大于利,因此对电器电弧进行研究的主要目的是熄灭电弧。

电器电弧理论的内容广泛且复杂,电弧在不同开断介质中产生、发展和熄灭的全过程中的物理和化学变化涉及多个学科知识体系。其研究包括气体放电和击穿的物理过程,气体放电各阶段的放电形式,电离和消电离的物理过程,空间电荷分布和变化及弧柱中离子平衡的物理化学分析;电弧近极区和弧柱区的特性,电弧弧根和斑点,电弧直径和温度分布变化,电弧电位梯度以及电弧等离子体的模型研究和特性分析;交流和直流电弧不同的伏安特性和熄灭条件,电弧的静态伏安特性和动态伏安特性;交流电弧开断过程中的电压恢复和介质强度恢复过程等。由于电弧的复杂性,要正确地设计和优化灭弧室,必须对电弧进行深入的理论、实验和数值仿真研究。

1.3.3 电接触理论

电接触是指两个导体之间相互接触并实现导电的现象。电接触研究的内容主要是接触过渡区产生的各种物理、化学现象。研究的目的是使接触电阻小且稳定。

在有触点电器中,电接触体现在触点部分,触点工作的好坏直接影响开关电器的质量优劣,电接触理论的研究对提高触点的工作效率有重要作用。

电接触理论的主要内容是:电接触的产生、维持和消除过程中的物理、化学现象,如表面膜电阻的增值机理,接触电阻引起的温升、熔焊现象,电接触产生和消除过程中出现的触点材料侵蚀和转移,触点闭合过程中的振动、磨损现象等。研究接触电阻中收缩电阻和膜电阻的理论和计算,对影响接触电阻、温升、振动和磨损的因素进行分析,以达到合理选择触点材料和结构参数的目的,提高触点的可靠性和使用寿命。

1.3.4 电磁机构理论

电磁机构是自动化电磁电器的感测部分,在电器中起着十分重要的作用。它的理论基础不仅是一般意义上的磁路和电磁场,同时也是电磁—力—运动的综合理论。电器中电磁铁的结构形式很多,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。电磁机构中的磁场分布是复杂的,在理论计算方面有其特殊的规律性。

电磁机构的计算内容主要是正确得出电磁场的分布,围绕电磁力计算这个中心任务,研究衔铁在运动过程中磁场的变化以及确定电磁铁的吸力特性、反力特性和动特性,计算电磁—力—运动的综合的过渡过程,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

究动铁心与静铁心之间各种形状空气隙的磁导,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。近年来,随着计算机数值计算技术的发展,电器电磁场数值计算所需的时间和计算的精确度得到较大提高,使电磁机构理论与计算不断趋于完善。

发热和电动力理论、电弧理论、电接触理论以及电磁机构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。

电器是一门综合学科,电器产品是集多理论于一体并优化“加工”的作品。其理论是发展的理论,是不断充实、更新和完善的理论。随着科学技术的发展,电器的理论还有许多需要深入研究和发展的内容,例如:电弧的深入研究,直流电弧熄灭的研究,新材料的应用研究等,都有待进一步研究和完善。

1.4 开关电器技术的发展简史

19 世纪中叶,在电能刚刚发明的阶段,仅仅采用手动刀开关和熔断器就可以满足当时的控制和保护要求。刀开关在正常情况下起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保护的作用。之后开始使用直流电动机作为机械的动力传动,为了满足调速的需要又出现了控制器和磁场变阻器。由于电话的发明与使用,出现了电话继电器,电器开始由手动控制逐步变为自动控制。

20 世纪,随着三相交流输电线路的发明,电力的使用范围不断扩大,电网的容量也相应地不断增加,对供电电网运行与保护的要求也越来越高,因此发展电器技术成为历史的必然要求。随着电力拖动系统的发展,拖动所需要的电动机数量也不断增加,这就需要电器由手动操作进入自动的远距离和频繁操作阶段,为此发展了接触器、起动器和各种继电器等自动电器。电器基础理论逐步建立,电器在结构原理、材料、容量、性能与品种方面都有了一定的发展。

20 世纪 50 年代开始,世界上经济发达的国家进入经济快速发展的时期,用电负荷保持持续快速增长,一直持续到 20 世纪 70 年代中期。用电负荷的快速增长带动了发电机制造向更大型机组发展,使电网电压等级迅速向 330kV、345kV、400kV、500kV、765kV 发展。20 世纪 60 年代末,开始进行 1000kV 电压等级和 1500kV 电压等级的特高压输电工程的研究。随着电网电压等级的不断提升以及对大容量远距离输电的需求,电器设备都在不断提高更新中。例如高压断路器,20 世纪 40 年代,多油断路器占主体地位,其灭弧介质是变压器油,断路器的触头浸在油中,开断时,触头间产生电弧,油在电弧的高温(5000~13000K)作用下很快蒸发和分解,在电弧周围形成气泡,电弧在气泡内燃烧。灭弧室内压力增高,气体的介质强度恢复加快,达到灭弧的作用;其缺点是用油量多,消耗金属材料多,体积庞大,维修工作量大。多油断路器分、合闸速度低,动作时间长,开断电流小。20 世纪 50 年代,逐渐发展成以少油和空气断路器为主,少油断路器的触头和灭弧系统放置在装有少量绝缘油的绝缘筒中,其中绝缘油主要作为灭弧介质,只承受触头断开时断口之间的绝缘,不作为主要的绝缘介质。少油断路器的突出特点是结构简单,易于制造和维修、价格低、使用方便。与多油断路器相比,少油断路器体积小、重量轻、用油量少,能采用积木式组装成超高压少油断路器,并在电力系统中被广泛应用。少油断路器的缺点是燃弧时间长,动作较慢,检修周期短,维修工作量大,受单元断口的电压限制,发展特高压等级有困难,且油断路器普遍