



普通高等教育电气工程与自动化(应用型)“十二五”规划教材

Study of electrical
appliances

电器学

◎ 郭凤仪 主 编
◎ 李 靖 副主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育电气工程与自动化（应用型）“十二五”规划教材

电 器 学

主 编 郭凤仪
副主编 李 靖
参 编 董 讷 王智勇 赵毅君
主 审 陈德桂



机械工业出版社

本书是普通高等教育电气工程与自动化(应用型)“十二五”规划教材,共分9章,主要介绍开关电器的基础理论、基本原理和基本计算方法,内容包括电器发热与电动力理论、电接触理论、电弧理论、电磁系统理论、电器的机构理论等,并针对当前智能电器与智能电网领域的研究热点问题进行了简要介绍。

本书从教学实际出发,注重学生实践能力的培养,可作为高等院校电气工程及其自动化专业及相关专业本科生教材,也可供高职高专院校有关专业人员及从事高低压电器设计、制造、试验和运行方面的人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电器学/郭凤仪主编. —北京:机械工业出版社,
2013.1

普通高等教育电气工程与自动化(应用型)“十二五”
规划教材

ISBN 978-7-111-40074-5

I. ①电… II. ①郭… 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(2012)第243625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:闫玥红 责任校对:陈秀丽

封面设计:张静 责任印制:张楠

北京京丰印刷厂印刷

2013年1月第1版·第1次印刷

184mm×260mm·17.75印张·438千字

标准书号:ISBN 978-7-111-40074-5

定价:36.00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

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010)68326294

机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010)88379649

机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010)88379203

封面无防伪标均为盗版

普通高等教育电气工程与自动化（应用型）“十二五”规划教材

编审委员会委员名单

主任委员：刘国荣

副主任委员：

张德江 梁景凯 张元 袁德成 焦斌

吕进 胡国文 刘启中 汤天浩 黄家善

钱平 王保家

委员（按姓氏笔画排序）：

丁元明 马修水 王再英 王军 叶树江

孙晓云 朱一纶 张立臣 李先允 李秀娟

李海富 杨宁 陈志新 周渊深 尚丽萍

罗文广 罗印升 罗兵 范立南 娄国焕

赵巧娥 项新建 徐建英 郭伟 高亮

韩成浩 蔡子亮 樊立萍 穆向阳

前 言

本书是普通高等教育电气工程与自动化(应用型)“十二五”规划教材,可作为高等院校电气工程及其自动化专业的教材,也可供高职高专院校有关专业人员及从事高低压电器设计、制造、试验和运行方面的人员参考。

本书以电器基础理论为主线,较为全面地讲述了电器发热理论、电动力理论、电弧理论、电接触理论和电磁机构理论。与同类教材相比,内容做了补充:增加了永磁磁路的计算原理;以高压断路器为例,介绍了开关电器的机械操动系统;同时,针对当前智能电器与智能电网领域的研究热点问题进行了简要介绍。

本书由辽宁工程技术大学郭凤仪主编,湖南工程学院李靖为副主编,西安交通大学陈德桂教授主审。全书共9章,郭凤仪编写第1章和5.10节,董讷编写第2、3、4章,王智勇编写第8、9章和附录,李靖编写第5章(5.10节除外),赵毅君编写第6、7章。全书由郭凤仪统稿。陈德桂教授在百忙之中仔细审阅了书稿,并提出许多宝贵意见及建议,在此表示诚挚的谢意。

本书引用、吸收了国内外同行在电器理论、智能电器以及智能电网等研究领域的许多学术成果,谨向他们表示深深的谢意和崇高的敬意。研究生郭志勇、刘明涛、刘志岭、赫广杰、王鑫、张建飞等承担了本书部分插图的绘制工作以及文字录入工作,在此表示感谢。

由于作者水平有限,书中难免存在不妥之处,敬请读者批评指正。

编 者

目 录

前言

第1章 绪论 1

1.1 电器的定义和分类 1

1.1.1 按电压高低和工艺结构特点 分类 1

1.1.2 按电器的执行机能分类 2

1.1.3 按电器的使用场合及工作条 件分类 2

1.1.4 按电器的用途分类 2

1.1.5 按电流种类分类 3

1.2 电器在电力系统中的作用 3

1.3 典型电器的基本原理 4

1.3.1 电磁式继电器 4

1.3.2 接触器 6

1.3.3 电器学的主要理论范畴 10

1.4 电器技术的发展现状及展望 10

1.5 中国电器制造业的发展概况 12

第2章 电器的发热理论 14

2.1 概述 14

2.2 电器的极限允许温升 14

2.2.1 表达形式 14

2.2.2 制定电器零部件极限允许温升 的原则 15

2.3 电器的热源 15

2.3.1 电阻损耗 15

2.3.2 铁磁损耗 17

2.3.3 介质损耗 18

2.4 电器中的热传递形式 19

2.4.1 热传导 19

2.4.2 热对流 22

2.4.3 热辐射 22

2.5 电器表面稳定温升计算——牛顿 公式 23

2.6 不同工作制下电器的热计算 25

2.6.1 长期工作制 25

2.6.2 短时工作制 26

2.6.3 反复短时工作制 28

2.7 电器典型部件的稳定温升分布 29

2.7.1 外包绝缘层的均匀截面导体 29

2.7.2 空心线圈 30

2.7.3 变截面导体 31

2.8 短路电流下的热计算和电器的热 稳定性 34

习题 36

第3章 电器的电动力理论 37

3.1 电器的电动力现象 37

3.1.1 两平行载流导体间的电动力 37

3.1.2 载流环形线圈或U形回路所受 的电动力 37

3.2 电动力的计算方法 38

3.2.1 毕奥-沙伐尔定律 38

3.2.2 能量平衡法 39

3.2.3 电动力的数值计算 40

3.2.4 回路因数与截面因数的基本 概念 41

3.2.5 电动力沿导线的分布 45

3.3 交流稳态电流下的电动力 46

3.3.1 单相交流下的电动力 46

3.3.2 三相交流下的电动力 47

3.4 短路电流下的电动力 49

3.4.1 单相系统短路时的电动力 49

3.4.2 三相系统短路时的电动力 51

3.5 电器的电动稳定性 52

习题 53

第4章 电弧的基本理论 54

4.1 概述 54

4.1.1 开关电弧的主要特征 54

4.1.2 电弧理论的发展史 54

4.2 气体放电的物理过程 55

4.2.1 电离和激励的概念 55

4.2.2 气体的电离方式 55

4.2.3 气体的消电离方式 56

4.2.4 气体放电的几个阶段 57

4.2.5 气体间隙的击穿理论 58

4.3 电弧的物理特征	59	5.1.5 电器对电接触的要求	94
4.3.1 开断电路时电弧的产生过程	59	5.2 接触电阻的理论和计算	94
4.3.2 电弧的组成以及各部分特性	60	5.2.1 接触电阻的定义及组成	94
4.3.3 弧柱的温度	62	5.2.2 接触电阻的分析	95
4.3.4 弧柱的直径	63	5.2.3 接触电阻的计算	97
4.3.5 电弧的弧根和斑点	64	5.3 影响接触电阻的主要因素和减小接触	
4.3.6 电弧的等离子流	64	电阻的措施	99
4.3.7 电弧的能量平衡	65	5.3.1 影响接触电阻的主要因素	99
4.4 直流电弧的特性和熄灭原理	66	5.3.2 减小接触电阻的措施	100
4.4.1 直流电弧的静态和动态伏安		5.4 ϕ - θ 理论和电接触处的接触电压	100
特性	66	5.4.1 ϕ - θ 的定义	100
4.4.2 直流电弧的熄灭原理	67	5.4.2 接触面导电斑点附近温度分布	
4.4.3 直流电弧的能量和燃弧时间	70	的定性分析	101
4.4.4 直流电弧熄灭时的过电压	71	5.4.3 ϕ - θ 理论分析的前提条件和	
4.5 交流电弧的特性	72	原理	101
4.5.1 交流电弧的伏安特性	72	5.4.4 接触导体稳定温升分布与接触	
4.5.2 电弧电压对交流电路电流的		点最高温升计算	103
影响	72	5.5 触头闭合过程的振动分析	105
4.5.3 交流电弧能量的计算	76	5.6 电器触头间电动斥力的计算	107
4.6 交流电弧的熄灭原理	77	5.7 触头的熔焊与焊接力	108
4.6.1 弧隙中的介质恢复过程	77	5.7.1 触头的熔焊	108
4.6.2 弧隙中的电压恢复过程	80	5.7.2 触头熔焊力的定义	109
4.6.3 交流电弧的熄灭条件	84	5.7.3 减小触头熔焊的常用方法	110
4.7 熄灭电弧的基本方法和基本装置	84	5.8 触头的质量转移和电弧侵蚀	110
4.7.1 简单开断灭弧	84	5.8.1 触头电磨损的定义及影响	
4.7.2 磁吹灭弧	84	因素	110
4.7.3 纵缝灭弧	85	5.8.2 电弧停滞现象对低压开关电器	
4.7.4 栅片灭弧	86	分断的影响	111
4.7.5 固体产气灭弧	86	5.9 电接触材料	112
4.7.6 石英砂灭弧	87	5.9.1 电器对电接触材料的性能	
4.7.7 油吹灭弧	87	要求	113
4.7.8 压缩空气灭弧	88	5.9.2 电接触材料的分类	113
4.7.9 六氟化硫(SF ₆)气体灭弧	88	5.9.3 电接触材料的制造方法	116
4.7.10 真空灭弧	89	5.10 滑动电接触理论	117
4.7.11 无弧分断	89	5.10.1 滑动电接触的磨损	118
习题	91	5.10.2 滑动电接触元件的润滑问题	119
第5章 电接触理论	92	5.10.3 滑动电接触的载流摩擦磨损	
5.1 电接触的分类和要求	92	特性	119
5.1.1 电接触的定义	92	5.10.4 滑动电接触材料	122
5.1.2 电接触的分类	92	习题	123
5.1.3 触头的分类	93	第6章 电磁铁的磁路计算	124
5.1.4 触头的有关工作参数和特性		6.1 电磁系统计算的基本原理	124
指标	93	6.1.1 电磁铁的结构和工作原理	124

6.1.2 电磁铁的分类	124	8.5.1 高压断路器触头的运动特性	216
6.1.3 磁路计算的基本定律	126	8.5.2 高压断路器机构的缓冲器	219
6.2 气隙磁导的计算	128	8.6 操动机构的出力特性及其与断路器	
6.2.1 数学解析法计算气隙磁导	128	负载特性的配合	223
6.2.2 分割磁场法计算气隙磁导	131	8.6.1 操动机构的出力特性	224
6.3 直流磁路的计算	137	8.6.2 断路器的负载特性	224
6.4 交流磁路的计算	140	8.6.3 操动机构与断路器的特性	
6.4.1 交流磁路的主要特点	141	配合	225
6.4.2 交流并联电磁铁磁路计算的		习题	227
任务和方法	142	第9章 智能电器与智能电网	228
6.4.3 交流磁路的计算步骤	144	9.1 智能电器的基本概念	228
6.5 永久磁铁的磁路计算	147	9.1.1 智能化是开关电器发展的必然	
习题	152	趋势	228
第7章 电磁铁的特性及设计	153	9.1.2 智能电器的物理描述	228
7.1 电磁铁的吸力计算	153	9.1.3 智能电器的功能	229
7.1.1 能量平衡法	153	9.1.4 智能电器的一般结构	230
7.1.2 麦克斯韦公式法	156	9.2 智能电器领域的研究热点及其发展	
7.1.3 交流电磁铁的吸力	157	趋势	234
7.2 吸力特性及其与反力特性的配合	160	9.3 智能电网简介	241
7.3 电磁铁的动态特性	163	9.3.1 什么是智能电网	242
7.3.1 直流电磁铁的吸合时间	163	9.3.2 为什么要建设智能电网	243
7.3.2 直流电磁铁的释放时间	166	9.3.3 智能电网的研究进展	244
7.3.3 影响直流电磁铁动作时间的		9.3.4 智能电网的技术领域	249
因素	167	习题	250
7.3.4 交流电磁铁的动作时间	168	附录 电器电磁场的有限元分析	251
7.4 直流电磁铁的设计与计算	168	一、电磁场的基本理论	251
7.5 交流电磁铁的设计与计算	180	(一) 麦克斯韦方程组	251
习题	189	(二) 标量磁位及其偏微分方程	255
第8章 电器的机构理论	190	(三) 磁矢位及其偏微分方程	256
8.1 高压断路器的结构及其工作原理	190	(四) 恒定电磁场的边界条件	257
8.2 高压断路器机械操动系统的基本		二、电磁场有限元法的基本原理	259
结构	192	(一) 有限元法的基本思想	259
8.3 高压断路器的操动机构	193	(二) 以能量变分为基础的等价变分	
8.3.1 高压断路器对操动机构的基		问题	260
本要求	193	(三) 有限元法的单元分析与总体	
8.3.2 操动机构的分类及其工作		合成	262
原理	195	(四) 有限元方程的求解	270
8.4 高压断路器的传动机构与提升		(五) 电磁场解后处理	270
机构	208	三、利用 ANSYS 求解电磁场问题	271
8.4.1 高压断路器的传动机构	208	(一) ANSYS 简介	271
8.4.2 高压断路器的触头提升机构	214	(二) ANSYS 的电磁场分析	272
8.5 高压断路器触头的运动特性和		参考文献	275
缓冲装置	216		

第 1 章 绪 论

1.1 电器的定义和分类

所谓电器就是指能够根据外界指定信号和要求，自动或手动接通和断开电路，断续或者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、变换和调节用的装置。例如：各类开关、起动器、熔断器等。简单来说，电器就是在电力系统发电、变电、输电、配电和用电中起重要作用的各种电气设备和器件；或者说，凡是靠电能驱动并完成某种功能的器件。

由于电器的用途广泛，品种规格繁多，所以分类方法也有许多种。

1.1.1 按电压高低和工艺结构特点分类

1. 高压电器

根据我国国家标准规定，额定电压在 3kV 以上的电器称为高压电器，主要包括：

(1) **高压开关电器** 主要用来合分正常工作电路与故障电路，或用来隔离高压电源。根据性能不同分为高压断路器、熔断器、负荷开关、隔离开关、接地开关等。

高压断路器能关合与开断正常情况下的各种负载电路，也能在线路中出现短路故障时关合和开断短路电流，而且还能实现自动重合闸的要求，它是开关电器中性能最为全面的一种电器。熔断器俗称保险，当线路中负荷电流超过一定限度或出现短路故障时能够自动熔断并断开电路。电路开断后，熔断器必须更换部件后才能再次使用。负荷开关只能在正常工作情况下关合和开断电路，不能开断短路电流。隔离开关用来隔离电路或电源，只能开断很小的电流，例如长度很短的母线空载电流，小容量的变压器的空载电流等。接地开关供高压与超高压线路检修电气设备时，为确保人身安全而进行接地用。接地开关也可用来人为地造成电力系统的接地短路，达到控制保护的目。

(2) **高压量测电器** 主要包括电流互感器和电压互感器。电流互感器用来测量高压线路中的电流，电压互感器用来测量高压线路中的电压，二者均供计量与继电保护使用。

(3) **高压限流与限压电器** 主要包括电抗器和避雷器、避雷针等。电抗器实质上就是一个电感线圈，用来限制故障时短路电流。避雷器和避雷针用来限制过电压，避雷器使电力系统中的各个电器设备免受大气过电压和内部操作过电压等的危害；避雷针可将周围的雷电引来并提前放电，将雷电电流通过自身的接地导体传向地面，避免所保护的建筑物遭受雷击。

2. 低压电器

根据我国国家标准规定，工作在额定电压交流 1200V 或直流 1500V 及以下电路中的电器设备属于低压电器。根据应用场所提出的不同要求可将低压电器分为低压配电电器和低压控制电器两大类：

(1) **低压配电电器** 主要用于配电电路,对电路进行保护以及通断、转换电源或负载的电器。例如:低压熔断器、负荷开关、低压断路器等。

(2) **低压控制电器** 主要用于控制受电设备,使其达到预期要求的工作状态的电器。例如:控制继电器、接触器等。

3. 自动电磁元件

自动电磁元件是靠电磁吸力或元件本身特性自动完成电路或磁路的执行和变换功能的器件。例如:微型继电器、阀用电磁铁、传感器、磁放大器、电磁离合器等。

4. 成套电器

成套电器即成套开关电器,是以开关设备为主体,将多种独立的电器元件组合在一起而构成的成套配电设备。例如:低压成套开关设备、高压开关柜、SF₆气体绝缘金属封闭开关设备(GIS)和预装式变电站。

1.1.2 按电器的执行机能分类

(1) **有触点电器** 电器通断电路的执行功能由触点来实现。例如有触点式的继电器、接触器等。

有触点电器的主要问题是通断过程的电弧和触头磨损,电气和机械寿命短。

(2) **无触点电器** 电器通断电路的执行功能不是由触点来实现,而是根据开关元件输出信号的高低电平来实现的。例如固态继电器、光电耦合器等。其特点为无弧通断电路、动作时间快、电寿命及机械寿命长、无噪声等。

无触点电路的主要问题是压降大和发热温升高。

(3) **混合式电器** 有触点和无触点混合的电器,如低压断路器采用半导体脱扣器,高压断路器应用微型计算机控制的智能断路器等。

1.1.3 按电器的使用场合及工作条件分类

(1) **一般工业企业用电器** 适用于大部分工业企业环境,无特殊要求。

(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等。

(3) **农用电器** 适合于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** 如船舶用电器、电气铁道用的牵引电器、航空电器以及汽车电器等。

1.1.4 按电器的用途分类

(1) **电力系统用电器** 如高压断路器、高压熔断器、电抗器、避雷器、低压断路器、低压熔断器等。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,动稳定性和热稳定性高、操作过电压低、保护性能完善等。

(2) **电力拖动自动控制系统用电器** 如接触器、起动机、控制继电器等。对这类电器的主要技术要求是有一定的通断能力、操作频率高、电气和机械寿命长。

(3) **自动化通信用弱电电器** 如微型继电器、舌簧管、磁性或晶体管逻辑器件等。对

这类电器的主要技术要求是动作时间短、灵敏度高、抗干扰能力强、特性误差小、寿命长、工作可靠等。

1.1.5 按电流种类分类

按电流种类，电器还可分为交流电器和直流电器。

另外有其他分类方法，这里不一一介绍了。

1.2 电器在电力系统中的作用

图 1-1 和图 1-2 为两种典型的电网线路，可以说明电器在电力系统或控制系统中的作用。

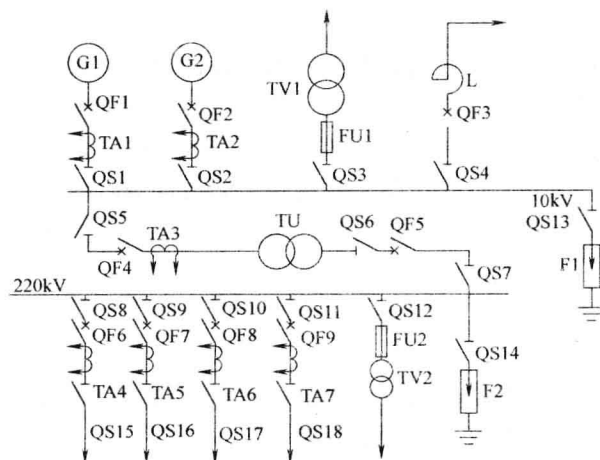


图 1-1 高压电网线路示意图

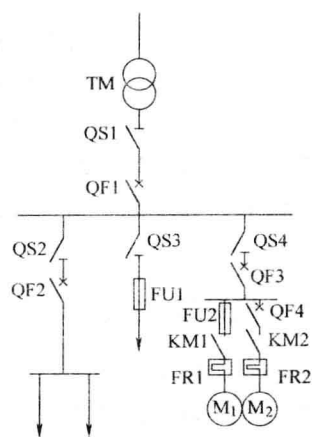


图 1-2 低压电网线路示意图

图 1-1 是高压电网线路。发电机 G1 (G2) 发出的电能经断路器 QF1 (QF2)、电流互感器 TA1 (TA2) 和隔离开关 QS1 (QS2) 输送到 10kV 母线上。此母线经隔离开关 QS3 和熔断器 FU1 接电压互感器 TV1，并经隔离开关 QS4、断路器 QF3 和电抗器 L 接向近处的电力传输线路。此外，10kV 母线还经隔离开关 QS5、断路器 QF4 及电流互感器 TA3 接向升压变压器 TU，后者又经断路器 QF5 及其两端的隔离开关 QS6 和 QS7 接到 220kV 母线上。与此母线连接的有：与熔断器 FU2 串联的电压互感器 TV2，通向电力传输线路的断路器 QF6 ~ QF9 和接在这些线路中的电流互感器 TA4 ~ TA7。所有这些线路均通过隔离开关 QS8 ~ QS12 接到 220kV 母线上。另外，10kV 及 220kV 母线还经隔离开关 QS13、QS14 接有避雷器 F1、F2。

图 1-2 是低压电网线路。高压电网输送来的电能经降压变压器 TM 变换为低压后，通过刀开关 QS1 和低压断路器 QF1 送到中央配电盘母线上，这段线路称为主电路，电能经刀开关 QS2、QS4 和断路器 QF2、QF3 接向动力配电盘的母线，或经刀开关 QS3 和熔断器 FU1 直接接向负载。两级母线之间的线路称为分支线路，接向负载的线路称为馈电线路。一条馈电线路经熔断器 FU2、接触器 KM1 和热继电器 FR1 接向负载电动机 M1，另一条馈电线路经断路器 QF4、接触器 KM2 和热继电器 FR2 接向负载电动机 M2。

1.3 典型电器的基本原理

从系统（电网系统或自动化拖动系统）的观点看，一切高低压电器，包括成套电器在内，均是线路中的一个元器件。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、灭弧装置和导电部分组成。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，达到过载保护的日的。

电器的结构组成部分中除感测和执行器官外，还有联系两者的传动件和机构部分、支撑部件和躯壳外罩等，这些部件对具体电器都是必要的和不可缺少的。一般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。

下面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理论基础，从而为研究电器的理论创造条件。

1.3.1 电磁式继电器

继电器是电器的典型产品，是一种具有跳跃输出特性的电器，广泛应用于控制和通信领域。继电器中以电磁式继电器最为典型，下面对它进行简要介绍。

电器一般由两部分组成，即感测部分和执行部分。对电磁式继电器，它的感测部分是电磁铁和弹簧，执行部分是触头，如图 1-3 所示。

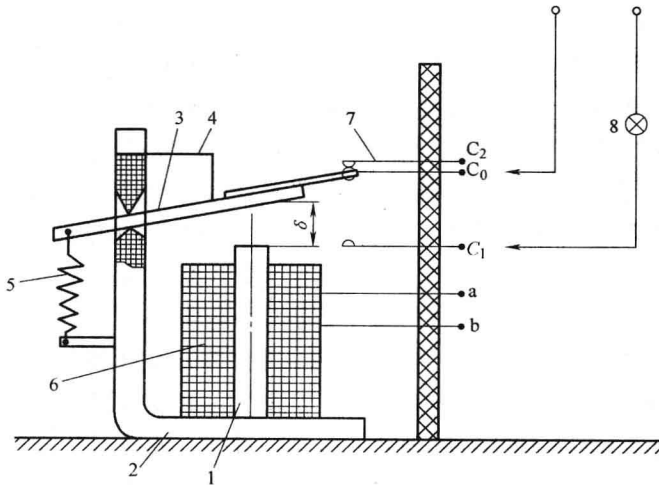


图 1-3 电磁式继电器

1—铁心柱 2—铁轭 3—衔铁 4—止钉 5—弹簧 6—线圈 7—触头 8—信号灯

图 1-3 中的铁心柱 1、铁轭 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，也作为调节和整定继电器动作值用。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_1C_2 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，它处于断开的状态，衔铁打开的间隙为 δ （铁心柱中心线的方向），它的大小由止钉 4 限制。

电磁式继电器的工作原理：在线圈两端 ab 上输入电流或电压信号，线圈的励磁电流产生磁场，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、铁轭、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，使常开触头 C_1C_0 闭合、使常闭触头 C_2C_0 断开，接在该回路内的信号灯 8 发亮。衔铁一旦闭合，磁路的状态发生变化，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，带动触头向上运动，已经闭合的常开触头 C_1C_0 重新打开，信号灯 8 熄灭。在实际控制线路中，继电器的触头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“通”又是“断”，所有的继电器的输出都是按照“通-断”或者“是-否”的循环而工作。图 1-4 所示为继电器的输入-输出特性。很明显，这是一种跳跃式的输出特性。

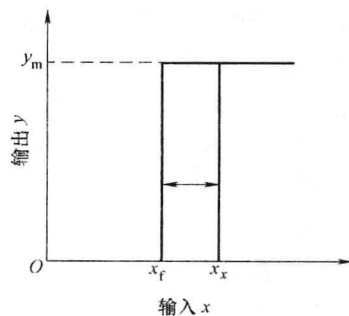


图 1-4 继电器的输入-输出特性

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 时，继电器的输出信号立刻从 $y = 0$ 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，若输入量 x 继续增大，则输出信号量 y 将不再变化。当输入量 x 从某一大于 x_x 的值下降到返回值 x_f 时，继电器开始释放，常开触头断开（或常闭触头闭合）。返回值 x_f 和动作值 x_x 的比值叫做返回系数（或称恢复系数），即

$$K_f = \frac{x_f}{x_x} \quad (1-1)$$

继电器触头上输出的控制功率 P_c （即触头工作电压乘以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 ，即

$$K_c = \frac{P_c}{P_0} \quad (1-2)$$

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。

继电器从获得输入信号起到触头完成动作为止的时间，叫做吸合动作时间；从断开输入信号起到触头完成动作为止的时间，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的可靠。

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、触头的熔焊都有大量的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电磁系统的尺寸，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。

1.3.2 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。这是由接触器的功能决定的。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 1-5 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 沿磁轭 7 的棱角 10 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 8 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 4 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 9 中线到衔铁的气隙 δ 接近于零，弹簧压缩到最终位置，主触头紧密接触，完成主电路的接通任务。反之，当线圈失去励磁或励磁电流过小（操作电压低），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 4 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，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程。超程是专为触头磨损后仍能可靠接触而设。

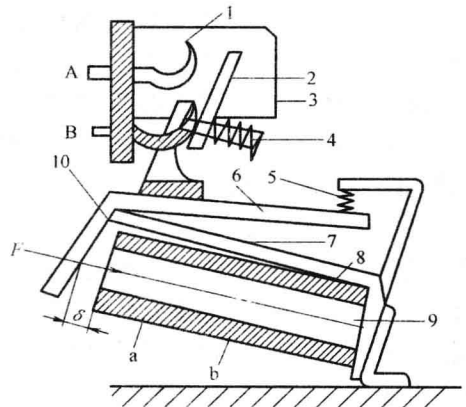


图 1-5 直直接触器的结构示意图
A—进线柱 B—出线柱 a, b—线圈端头
1—静触头 2—动触头 3—灭弧罩
4—触头弹簧 5—释放弹簧 6—衔铁
7—磁轭 8—线圈 9—铁心柱 10—棱角

呈现的压力，此时触头弹簧尚未压缩变形。至于终压力，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程。超程是专为触头磨损后仍能可靠接触而设。

图 1-6 示出了直直接触器的吸力-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（即气隙）。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善选择。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励磁电流时的剩磁吸力，剩磁吸力 Oh 一定要小于断开力 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。

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 1-6 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 1-5 中 3 是灭弧装置的示意。一般是由磁吹线圈和窄缝的灭弧罩组成。

接触器结构上尚有连锁触头组。这些所谓的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励磁，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 440V，亦可用于 660V，但电寿命要降低。它的额定电流为 20、40、100、160、250、400 和 600A。励磁线圈的电压一般为 220V 或 110V。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。图 1-7 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 的支架相连。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连锁触头组，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 1-5 相同，大多采用铜质材料。由于

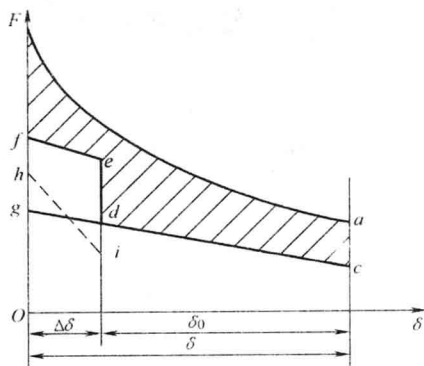


图 1-6 直流接触器的吸力-反力特性
 δ_0 —和触头开距相应的衔铁行程
 $\Delta\delta$ —和触头超程相应的衔铁行程
 δ —衔铁总的行程

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接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。和转动式直流接触器相似，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。

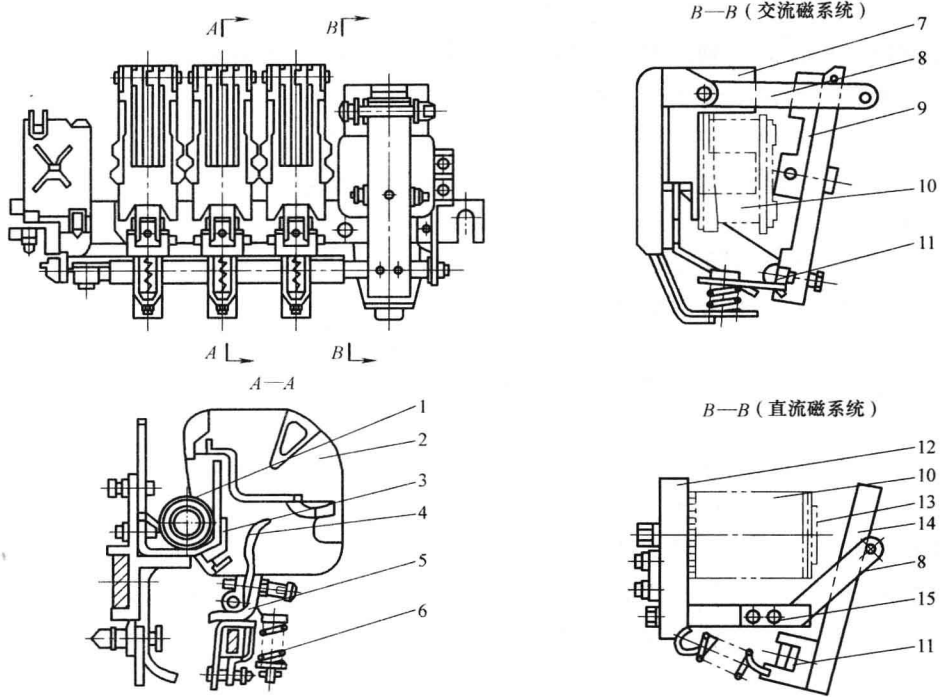


图 1-7 转动式交流接触器结构

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

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 100A 以上，它主要用于冶金、轧钢及起重运输等电器设备中。

图 1-8 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。过去在中小容量设备上采用这种结构，目前趋于向大容量设备发展。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 380V，也有 660V 和 1140V，后者主要用于煤矿。电流等级从 6A 一直到 600A，甚至更大。励磁线圈的电压，交流操作的一般为 380V，直流操作的一般为 220V。

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 1-9 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。装入外壳内的零件在装配前都经过除气处理并封接后抽到 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（钛、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。波纹管是一种起密封作用的弹性元件，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；另一方面阻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 1~2mm），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，和空气式的相比，它的超程也较小，一般取 1~1.5mm。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 50~100N。触头弹簧的压力比空气式的小。由于真空负压有利于吸合，不利于开断，为使触头获得一定的分断速度，必须有相当大的开断弹簧，它比空气式的要大。

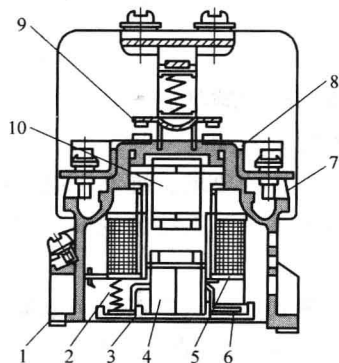


图 1-8 直动式交流接触器

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—桥形触头 10—衔铁

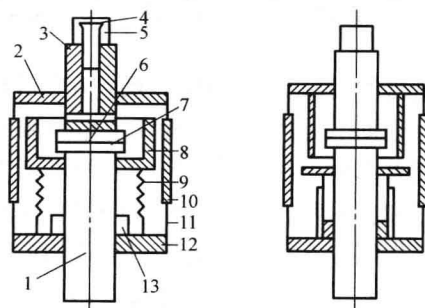


图 1-9 真空接触器灭弧室

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—绝缘外壳
11—封接圈 12—下法兰 13—导向套

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。

目前我国生产的真空接触器额定电压为 3.6kV、7.2kV、12kV 和 40.5kV，最大额定电流达到 630A，额定电压下最大分断电流为 6.3kA，最大分断电流下开断次数为 30 次以上，