



普通高等教育电机与电器创新型规划教材

电器理论基础

DIANQI LILUN JICHU

许志红 编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育电机与电器创新型规划教材

电 器 理 论 基 础

许志红 编著
李震彪 主审



机 械 工 业 出 版 社

本书详细地论述了电器中的发热理论、电动力理论、电接触理论、电弧理论和电磁机构理论的基本概念、基本原理、分析计算方法,以及各种影响因素。在介绍基础理论的同时,增加了有限元温度场计算、触头弹跳分析、电器电极材料喷溅侵蚀计算、三维电磁场计算、电磁机构动态计算、零电流分断技术等相关内容,这些内容都是近年来电器研究中的热点问题。书中还介绍了电器技术的发展与电器的智能化。本书图文并茂、理论联系实际。

本书可作为高等学校电气工程及其自动化、自动化等专业的教材和教学参考书;也可作为电器专业研究生的教材和教学参考书。

本书对于从事电器设计、制造、试验、运行方面的工程技术人员具有一定的参考价值,也可以作为电气工程技术人员培训教材使用。

本书配有免费电子课件,欢迎选用本书作教材的老师发邮件到 jinaacmp@163.com 索取,或登录 www.cmpedu.com 注册下载。

图书在版编目(CIP)数据

电器理论基础/许志红编著. —北京:机械工业出版社, 2014. 1
普通高等教育电机与电器创新型规划教材
ISBN 978-7-111-44725-2

I. ①电… II. ①许… 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 (2013) 第 267738 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:吉玲 责任编辑:吉玲 卢若薇

版式设计:霍永明 责任校对:刘秀丽

封面设计:张静 责任印制:张楠

北京京丰印刷厂印刷

2014 年 2 月第 1 版·第 1 次印刷

184mm×260mm·17.75 印张·437 千字

标准书号:ISBN 978-7-111-44725-2

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

前 言

本书是在福州大学已故张冠生教授主编的《电器理论基础》教材基础上，结合本人20多年的教学经历和电器领域近年来的研究成果，整理编著而成。

由于新理论、新技术在电器领域里的广泛应用，使电器的研究进入了突飞猛进的阶段，传统的基础理论需要更新和补充。本书增加了有限元温度场计算、触头弹跳分析、电器电极材料喷溅侵蚀计算、三维电磁场计算、电磁机构动态计算、零电流分断技术等相关内容，这些内容可以作为本科生教材的提高部分，也可以作为电器专业研究生的教材使用。在基础理论部分，针对教学过程中学生的实际情况做了修改，简化了繁琐的公式推导，增加了解题步骤，书中还增加了图片的比重，使学生更加易于理解。

本书对于从事电器设计、制造、试验、运行方面的工程技术人员具有一定的参考价值。

在此，对张冠生教授表示深深的怀念和敬意。对我的家人表示深切的爱意。对我研究生团队的研究生们多年来所做的工作表示由衷的谢意。

由于时间紧迫，本人学术水平有限，书中难免出现错误，希望各位同行给出意见和建议，以便及时改正。有些参考资料，尤其是网上的参考资料没有一一标出，在此对各位同仁表示谢意和歉意。

最后对主审专家华中科技大学的李震彪教授表示最诚挚的感谢！

许志红

目 录

前言

第1章 概论 1

1.1 电器的定义和分类 1

1.1.1 电器的定义 1

1.1.2 电器的分类 1

1.2 典型电器的结构原理 5

1.2.1 断路器 5

1.2.2 接触器 8

1.2.3 继电器 12

1.3 电器研究的主要理论范畴 14

1.3.1 电磁机构理论 14

1.3.2 电弧理论 15

1.3.3 电接触理论 16

1.3.4 发热理论 16

1.3.5 电动力理论 17

1.4 电器技术的发展与展望 17

1.4.1 电器技术的发展 17

1.4.2 电器的智能化与智能电器 18

第2章 电器的发热理论 22

2.1 电器的发热现象 22

2.2 电器的散热 27

2.3 电器的允许温升 33

2.4 电器的稳定温升计算 35

2.5 典型电器的温升计算 38

2.6 不同工作制下电器的温升 40

2.7 电器的热稳定性 43

*2.8 采用有限元软件计算电器的 温升 45

2.8.1 交流电磁阀电磁热耦合计算 模型 47

2.8.2 实验验证与仿真分析 50

2.9 小结 52

2.10 思考题与习题 52

第3章 电器的电动力理论 54

3.1 电器中的电动力现象 54

3.2 电器中的电动力计算 55

3.2.1 比奥-沙伐定律计算电动力 56

3.2.2 能量平衡法计算电动力 57

3.3 典型导体间的电动力 58

3.3.1 采用比奥-沙伐定律计算 电动力 58

3.3.2 采用能量平衡原理计算电 动力 61

3.3.3 导体截面形状对电动力的 影响 62

3.4 交流电动力的计算 64

3.4.1 交流单相电动力的计算 64

3.4.2 交流三相电动力的计算 66

3.5 触头间的电动力 69

3.6 电器的电动稳定性 71

3.7 小结 73

3.8 思考题与习题 73

第4章 电器的电接触理论 75

4.1 电器中的电接触现象 75

4.1.1 电接触的分类 75

4.1.2 对电接触的主要要求 76

4.2 电接触表面的物理图景 76

4.3 接触电阻的理论与计算 78

4.3.1 收缩电阻 R_c 79

4.3.2 表面膜电阻 R_b 80

4.4 影响接触电阻的主要因素 83

4.4.1 材料性质 83

4.4.2 接触形式 86

4.4.3 接触压力 87

4.4.4 接触表面加工情况 89

4.5 接触区域的热效应 90

4.5.1 φ - θ 理论 90

4.5.2 $R_j(\theta)$ 特性 93

4.6 触头的振动与熔焊 94

4.6.1 触头的振动与弹跳 94

4.6.2 触头参数与触头弹跳 98

4.6.3 触头熔焊 100

4.7 触头的磨损与材料转移 104

*4.8 电机电极材料喷溅侵蚀的理论

计算 ^[18]	107	5.8 小结	181
4.8.1 喷溅产生的原因	107	5.9 思考题与习题	181
4.8.2 喷溅概率的影响因素	107	第6章 电器的电磁机构理论	183
4.8.3 喷溅模型	108	6.1 引言	183
4.9 小结	110	6.2 电磁场的基本概念与基本定律	184
4.10 思考题与习题	111	6.2.1 电磁感应定律	184
第5章 电器的电弧理论	112	6.2.2 自感与互感	185
5.1 引言	112	6.2.3 麦克斯韦方程	186
5.2 气体放电的物理基础	112	6.2.4 似稳电磁场	188
5.2.1 电离和激励	112	6.3 典型电磁系统的结构原理与基本特性	189
5.2.2 气体的电离方式	113	6.3.1 电磁系统的结构原理	189
5.2.3 气体的消电离方式	116	6.3.2 电磁系统的分类	190
5.2.4 气体的放电特性	118	6.3.3 电磁系统的基本特性	192
5.3 电弧的物理特性	121	6.4 磁路与磁导的计算	194
5.3.1 开断电路时电弧的产生过程	121	6.4.1 磁路的基本概念	194
5.3.2 电弧的近极区和弧柱区特性	122	6.4.2 气隙磁导的计算	198
5.3.3 电弧的温度	124	6.5 直流电磁系统的分析与计算	209
5.3.4 电弧的直径与斑点	126	6.5.1 直流磁路计算方程	210
5.3.5 电弧的能量	127	6.5.2 直流磁路中磁通的分布情况	211
5.4 直流电弧的特性与熄灭原理	130	6.5.3 直流磁路的计算	214
5.4.1 直流电弧的伏安特性	130	6.6 交流电磁系统的分析与计算	219
5.4.2 直流电弧的熄灭原理	132	6.6.1 交流磁路的特点	219
5.4.3 直流电弧的能量与熄弧过电压	134	6.6.2 等效正弦波法	221
5.5 交流电弧的特性与熄灭原理	137	6.6.3 交流磁路的计算	225
5.5.1 交流电弧的伏安特性	137	6.7 电磁系统的吸力计算与静特性	227
5.5.2 交流电弧对电路的影响	139	6.7.1 磁场的能量与吸力计算	227
5.5.3 交流电弧的介质恢复过程	144	6.7.2 能量转换与电磁吸力	229
5.5.4 交流电弧的电压恢复过程	150	6.7.3 麦克斯韦电磁吸力与静特性	235
5.5.5 交流电弧的熄灭条件	157	6.7.4 交流电磁系统的吸力特点与分磁环原理	239
5.6 开关电器典型灭弧装置的工作原理	159	*6.8 电磁系统的动态特性	243
5.6.1 简单开断	159	6.8.1 直流电磁系统的动态特性	243
5.6.2 磁吹灭弧	161	6.8.2 交流电磁系统的动态特性	250
5.6.3 栅片灭弧	162	6.8.3 采用“场”“路”结合的交流电磁系统的动态特性仿真	255
5.6.4 纵缝灭弧	164	6.9 含永久磁铁的磁路计算	266
5.6.5 熔断器	166	6.9.1 永久磁铁的工作点	266
5.6.6 真空灭弧	168	6.9.2 永久磁铁的等效处理	268
5.6.7 六氟化硫灭弧	172	6.9.3 永磁磁路的计算实例	270
*5.7 交流接触器零电流分断控制技术	174	6.10 小结	273
5.7.1 零电流分断控制原理分析	174	6.11 思考题与习题	274
5.7.2 零电流分断控制原理的实现	175	参考文献	277
5.7.3 零电流分断控制原理的实验研究	176		

第 1 章 概 论

随着科学技术的飞速发展，人们的生产、生活对电能的需求和依赖不断增大，承担电能传输和分配、用电设备保护与控制任务的电器产品越来越重要。而且，为了适应电网容量的不断增大及控制要求的不断提高，电气系统日益复杂化，对电器产品的性能与结构提出了更高的要求。同时，新技术、新材料、新工艺的不断涌现，也给电器产品的发展提供了良好的空间。由于电器在运行时存在着电、磁、光、热、力、机械等多种能量转换，这些转换规律大多是非线性的，许多现象又是一种瞬态过程，因此，使电器的理论分析、产品设计、性能检验等，都变得极为复杂。例如，在分析与设计电器产品时，除采用传统的电接触理论、电弧理论、发热与电动力理论、电磁机构理论等进行必要的理论推导、分析计算之外，还要使用大量的经验数据，即便这样，有时设计计算数据与产品实际性能仍然存在较大差异，需要反复修改和试验，导致开发性能优良、价格合理的电器产品周期长、资金投入大，设计十分困难。为了更好地对电器产品进行理论分析和设计，世界各国都十分重视电器理论的研究和发展。

1.1 电器的定义和分类

1.1.1 电器的定义

电器的定义是：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，以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。

电器可以完成以下任务：

- 1) 对电力系统或者电路实行通、断操作转换和电路参数变换。
- 2) 对电动机实行起动、停止、正转、反转、调速，完成控制任务。
- 3) 对电路负载和电工设备或电机设备等进行过载、过电压、欠电压、短路、断相、三相负载不平衡、接地等保护。
- 4) 在电路中传递、变换、放大电的或非电的信号，实现自动检测和参数自动调节的功能。

1.1.2 电器的分类

通常在交流电压 1200V、直流电压 1500V 及以下系统中用的电器称之为低压电器；反之，称为高压电器。电器的用途广泛、职能多样、品种规格繁多、工作原理各异，有多种分类方法。

1. 低压电器按工作职能分类

低压电器的应用量大面广。发电设备产生的电能 80% 以上是通过低压电器传输而消耗

的。虽然低压电器在电力系统中一般作为配套设备,但需求量巨大,据统计,每新增 1 万 kW 发电容量,约需要 6 万~8 万件低压设备与之配套。低压电器也广泛应用于国民经济各个行业,以及千家万户用电设备的控制与保护。

传统的低压电器,根据它在电路中所处的地位和作用可归纳为配电电器和控制电器。国外从 20 世纪 80 年代、我国从 20 世纪 90 年代开始,在低压终端用电系统中逐步发展了一批外形、结构、安装等具有共同特征并自成体系的低压电器,通常称为终端电器^[1]。

(1) 配电电器

1) 低压断路器:用作低压配电线路过载、短路或欠电压等保护,也可以作为不频繁接通和分断电路使用。剩余电流断路器兼有漏电保护功能。

主要品种有:万能式断路器、塑壳式断路器、剩余电流断路器、真空断路器、智能型断路器等。

2) 开关、隔离器、隔离开关、熔断器组合电器:主要用作配电系统隔离,以保证配电系统中其他电器设备维修时的安全。对开关类电器能接通、分断额定电流,对熔断器组合电器还具有短路和过载保护功能。

主要品种有:开关、隔离器、隔离开关、开关熔断器组、熔断器组合电器、隔离器熔断器组、隔离开关熔断器组、熔断器式开关、熔断器式隔离器、熔断器式隔离开关等。

3) 双电源转换开关电器:用于两路电源的转换,保证重要负载连续供电。在某些场合还需要具有过电流保护功能(如 CB 型产品)。

主要品种有:自动转换开关、手动转换开关、遥控转换开关、智能型双电源转换开关等。

4) 熔断器:用作低压配电线路或设备的短路保护与过载保护。

主要品种有:专职人员用螺旋式熔断器、非熟练人员用熔断器、半导体器件保护用熔断器(快速熔断器)。

(2) 控制电器

1) 接触器:主要用于频繁接通和分断电路,并与适当的热继电器或电子式过载继电器(电动机保护器)组合,以保护操作中可能发生过载的电路。

主要品种有:交流接触器、直流接触器、真空接触器、半导体接触器、智能型接触器等。

2) 起动器:主要用作各类交流电动机起动、停止、正反向控制。

主要品种有:全电压直接起动器、星—三角起动器、自耦减压起动器、变阻式起动器、半导体起动器、软起动器、智能型软起动器等。

3) 控制电路电器:主要用于接通、分断控制电路,以发出控制指令或用作程序控制。接近开关可作为检测元件并输出动作命令。

主要品种有:中间继电器、时间继电器、万能式转换开关、位置开关(行程开关)、按钮、主令控制器、接近开关等。

4) 控制器:主要用于电气控制设备中转换主电路或发电机励磁回路的接法,以达到电动机起动、换向和调速的目的。

主要品种有:凸轮控制器、平面控制器等。

5) 变阻器、电阻器:主要用作发电机调压及电动机平滑起动、调速,或改变电路参

数,变电能为热能之用。

主要品种有:励磁变阻器、起动变阻器、频敏变阻器、铁基合金电阻等。

6) 电磁铁:用于起重、操纵或牵引机械装置。

主要产品有:起重电磁铁、牵引电磁铁、制动电磁铁等。

7) 调整器:使发电机输出电压稳定在一定范围之内。

主要品种有:碳阻式调整器、磁放大器式调整器等。

8) 信号灯。

(3) 终端电器

1) 家用及类似用途电器:作为终端配电系统导线和家用电器过载和短路保护、漏电及人身触电保护。

主要品种有:小型断路器、模数化剩余电流断路器等。

2) 模数化熔断器组合电器:用于终端配电系统过载和短路保护。

主要产品有:模数化熔断器式隔离器、模数化开关熔断器、熔断体等。

3) 终端组合电器:作为终端用电系统配电、保护、控制,可以不频繁接通与分断电路。

主要产品有:非熟练人员用终端电器、熟练人员用终端组合电器等。

2. 低压电器的其他分类方法

(1) 按标准体系分类

1) 低压开关设备与控制设备:低压断路器,低压开关、隔离器、隔离开关及熔断器组合电器,机电式接触器和电动机起动器,机电式控制电路电器,交流半导体电动机控制器和起动器,控制与保护开关电器,接近开关,转换开关电器,设备用断路器等。

2) 家用和类似用途电器:家用和类似场所用过电流保护断路器(小型断路器),家用和类似用途的剩余电流断路器,家用和类似用途的带过电流保护的剩余电流断路器。

3) 低压熔断器:专职人员使用的熔断器,非熟练人员使用的熔断器,半导体设备保护用熔断器。

4) 低压浪涌保护器。

(2) 按动作方式分类

1) 机械动作电器:有触点电器,又可以分为自动切换电器和非自动切换电器。

2) 非机械动作电器:无触点电器(各种开关管、电力电子器件)。

3) 混合式电器:有触点与无触点相结合组成的电器。

(3) 按灭弧介质分类

1) 空气式电器:灭弧介质为空气,大部分的低压电器为空气式电器。

2) 真空电器:灭弧介质为真空。

(4) 按功能分类

1) 标准型。

2) 多功能型。

3) 智能型(含有通信模式和无通信模式)。

3. 高压电器的分类

对高压电器提出的主要要求为:能够开断短路故障;在大负载下能够长期工作,电气绝

缘不至迅速老化而降低使用寿命；耐高温；具有良好的电气绝缘性能；具有一定的热效应和电动效应等。按照用途，高压电器可以分为如下几类^[2]：

(1) 开关电器

用来关合和开断电路的电器，主要有高压断路器等。

1) 高压断路器：开断或者关合高压电路中的空载电流和负载电流，当系统发生故障时，通过继电保护装置切断过载电流和短路电流，具有完善的灭弧结构和足够的断流能力。

主要产品有：多油断路器、少油断路器、六氟化硫断路器（SF₆断路器）、真空断路器、压缩空气断路器等。

2) 高压隔离开关：是发电厂和变电站电气系统中重要的开关电器，需要与高压断路器配套使用。其主要功能是保证高压电器及其装置在检修工作时的安全，起到隔离电压的作用；不能用于切断、投入负载电流和开断短路电流，仅用作不产生强大电弧的切换操作，不具备灭弧能力。

3) 高压熔断器：在电路发生过载或短路时依靠熔体的熔断开断电路。按照安装条件和用途，可选择不同类型，如屋外跌落式、屋内式等。

4) 高压负荷开关：是一种功能介于高压断路器和高压隔离开关之间的电器，用来在正常工作或过载时关合和开断电路。高压负荷开关具有简单的灭弧装置，能够通断一定的负载电流和过载电流，不能开断短路电流。因此，其常与高压熔断器串联配合使用，借助熔断器来进行短路保护。

5) 接地开关：用于将回路接地的一种机械式开关装置。在异常条件（如短路）下，可在规定时间内承载规定的异常电流；在正常回路条件下，不要求承载电流。

(2) 限制电器

用来限制电路中电压和电流的电器，主要有电抗器等。

1) 电抗器：主要用来限制电路中的短路电流。某些型式的熔断器也有限制短路电流的作用。

2) 避雷器：一种释放过电压能量、限制过电压幅值的设备。当过电压出现时，避雷器两端子间的电压不超过规定值，使电气设备免受过电压损坏，过电压作用后，又能够使系统迅速恢复正常状态。

(3) 变换电器

用来变换电路中的电压和电流使之便于检测的电器，主要有电流和电压互感器等。

1) 电流互感器：用来变换电路中的电流，以便供电给测量仪表或继电器，并使之与高电压隔离。

2) 电压互感器：用来变换电路中的电压，以便供电给测量仪表或者继电器，并使之与高电压隔离。

(4) 组合电器

组合电器是将上述某几种电器，按一定的线路装配成一个整体的电器。

按照安装地点，高压电器可分为户内式（装在建筑物内部，不具有防风、雨、灰尘、露、冰和浓霜等性质）和户外式（装在露天，能够承受风、雨、灰尘、露、冰和浓霜等作用）。

按照极数，高压电器可分为三极式（三极在机械结构上联成整体或三极装在一个支架

上)和单极式(每极单独装在一个支架上)。

1.2 典型电器的结构原理

从系统观点看,所有高低压电器,包括成套电器和智能电器在内,均是电路中的一个元件。从控制角度看,电器必须具有输入和输出两大部分,即在结构上具有感测部分和执行部分。感测部分接收输入信号,经过检测比较做出判断,然后命令执行部分动作,输出指令信号,实现控制的目的。在传统的有触点自动电器中,感测部分大部分为电磁机构,执行部分大部分为触头系统。电器结构的组成部分中,除了感测部分和执行部分外,还有联系这两部分的传动机构部分,以及支撑部件和外壳等。

感测部分和执行部分之间彼此矛盾、相互制约、相辅相成。有的电器感测部分功能特别强,它的特征指标主要表征感测机能,如继电器、变换器等。有些电器执行部分功能特别强,而完整的感测机要依靠其他元件来辅佐,如高压断路器等。目前,随着智能化技术的飞速发展,感测部分的原理和功能有了较大的改善。低压断路器的感测部分和执行部分功能都比较强,具有完善的保护功能和较强的通断能力。

在低压供电系统中,断路器、接触器和继电器是大量采用的基础元件,下面介绍这三种常用电器的工作原理。

1.2.1 断路器

低压断路器俗称自动空气开关,是低压配电网络中的主要开关电器之一。断路器不仅可以接通和分断正常负载电流、电动机工作电流和过载电流,而且可以接通和分断短路电流。主要用在不太频繁操作的低压配电线路或开关柜中作为电源开关使用,对线路、电气设备及电动机等实行保护,以避免过电流、过载、短路、断相、漏电等故障,应用十分广泛。较高性能型万能式断路器带有三段式保护特性,并具有选择性保护功能。高性能型万能式断路器带有各种保护功能脱扣器,包括智能化脱扣器,可实现计算机联网通信等功能。低压断路器具有的多种功能,是以脱扣器或附件的形式实现的,根据用途不同,断路器可以配备不同的脱扣器或继电器。脱扣器是断路器本身的一个组成部分,而继电器(包括各种保护单元)则是通过与断路器操作机构相连的欠电压脱扣器或分励脱扣器的动作控制断路器^[3]。其作用是,不正常情况下自动切断电路,在故障排除以后又可以迅速恢复供电。智能化的断路器可以实现就地操作和远程控制,并实现配网自动化。

低压断路器有多种分类方式:

1) 按使用类别分:有选择型(保护装置参数可调)和非选择型(保护装置参数不可调),非选择型保护特性多用于支路保护,主干线路断路器则要求采用选择型,以满足电路内各种保护电器的选择性分断要求,把故障区域限制到最小范围。

2) 按结构型式分:有万能式(框架式)、塑壳式(装置式)和小型模数式。

3) 按灭弧介质分:有空气式和真空式(目前国产多为空气式)。根据采用的灭弧技术,断路器还可以分为零点灭弧式断路器和限流式断路器。在零点灭弧式断路器里,被触头拉开的电弧在交流电流自然过零时熄灭。限流式断路器的“限制电流”是指把峰值预期短路电流限制在一个较小的允许电流值。

- 4) 按操作方式分: 有手动操作、电动操作和弹簧储能机械操作。
- 5) 按极数分: 有单极、二极、三极和四极式。
- 6) 按安装方式分: 有固定式、插入式、抽屉式和嵌入式等。

目前, 人们习惯的分类方式是按结构型式进行的分类。根据断路器在电路中的不同用途, 断路器被分为配电用断路器、电动机保护用断路器和其他负载(如照明)用断路器等。低压断路器容量范围很大, 最小为 4A, 最大可达 5000A。

低压断路器广泛应用于低压配电系统各级馈出线、各种机械设备的电源控制和用电终端的控制和保护。低压断路器结构复杂, 一般含有触头系统、灭弧系统、脱扣装置、操作机构。智能断路器还含有智能控制单元, 技术含量高。

图 1-1 所示为智能断路器的结构分解。

低压断路器的基本工作原理如图 1-2 所示。

由图 1-1 可以看出, 低压断路器主要由以下几个部分组成:

1) 触头和灭弧系统: 这一部分是执行电路通断的主要部件。低压断路器的主触头一般是采用耐弧合金(如银钨合金)制成, 采用灭弧栅片灭弧, 每相触头系统被安装在绝缘小室内, 其上方是灭弧罩。主触头是由操作机构和自由脱扣机构操纵其通断的, 可用操作手柄操作, 也可由电磁机构远距离操作。触头系统用连杆与绝缘板的主轴连接, 从而完成闭合、断开的动作。每相触头系统为了降低电动斥力, 采用片状触头并联形式, 片状触头安装在触头支持上, 片状触头的一端用软连接与母线连接。断路器在闭合时, 主轴带动连杆使触头支持绕轴逆时针转动, 而片状触头在与触头接触后绕轴压缩弹簧, 产生足够的触头压力, 从而实现在正常情况下接通和分断工作电流, 在出现故障时快速及时地切断高达数十倍额定电流的故障电流。

2) 各种脱扣器和自由脱扣机构: 这一部分是感测部分和联动机构部分, 可实现各种保护功能。自由脱扣机构是一套连杆机构, 如图 1-2 所示, 当主触头 2 闭合时, 自由脱扣机构将主触头锁在合闸位置上。如果电路发生故障, 自由脱扣机构就在以下有关脱扣器的操作下动作, 使锁扣 4 打开, 由主触头分断电路。

过电流脱扣器 6 的线圈和热脱扣器 7 的热元件与主电路串联。当电路发生短路或严重过载时, 过电流脱扣器的衔铁吸合, 使锁扣动作, 从而带动主触头断开电路, 其动作特性具有瞬动特性或定时特性。断路器的过电流脱扣器分为瞬时脱扣器和复式脱扣器两种, 其中复式脱扣器即瞬时脱扣器和过载脱扣器的组合。当电路发生过载故障时, 热脱扣器的热元件受热弯曲推动锁扣 4 动作, 其动作特性具有反时限特性。由于双金属热元件需要一定的恢复时间, 因此在低压断路器因过载而断开之后, 需要 2~3min 才能重新合闸, 这也就是低压断路器不能够频繁进行通断的原因所在。过电流脱扣器和热脱扣器相互配合可以使断路器实现保护功能, 其中, 热脱扣器主要保护电路的一般性过载故障, 过电流脱扣器主要保护电路短路和严重过载故障。

欠电压失电压脱扣器 8 的线圈与电源并联。当电路发生欠电压或失电压故障时, 欠电压失电压脱扣器的衔铁释放, 使锁扣 4 动作。当电压低于 35% 额定电压时, 电路发生失电压故障, 电压在 35%~75% 额定电压之间时, 电路发生欠电压故障, 电压在 85%~110% 额定电压时, 保证主触头可靠闭合。

分励脱扣器 9 是用于远距离控制的, 可实现远方控制断路器切断电源。在正常工作时,

其线圈是断电的, 当需要远距离控制时, 按下起动按钮, 使线圈通电, 衔铁带动锁扣动作, 使主触头断开。

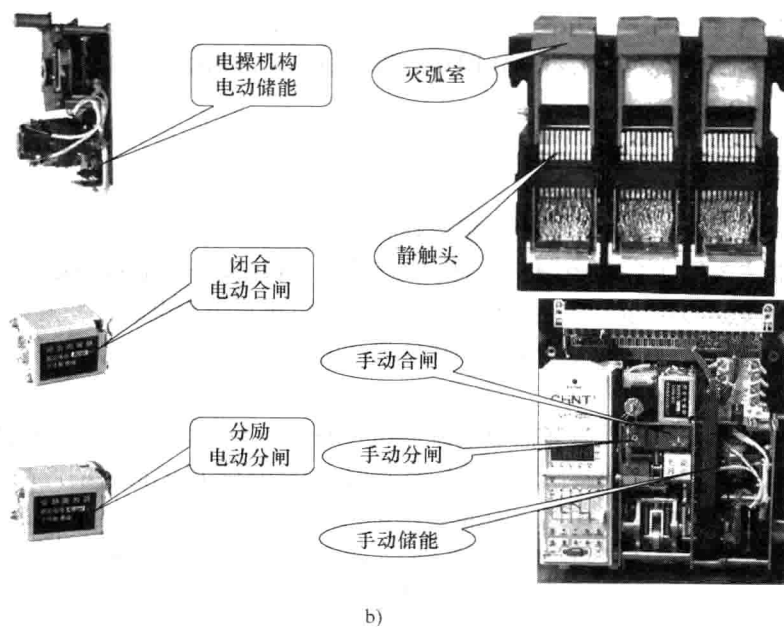
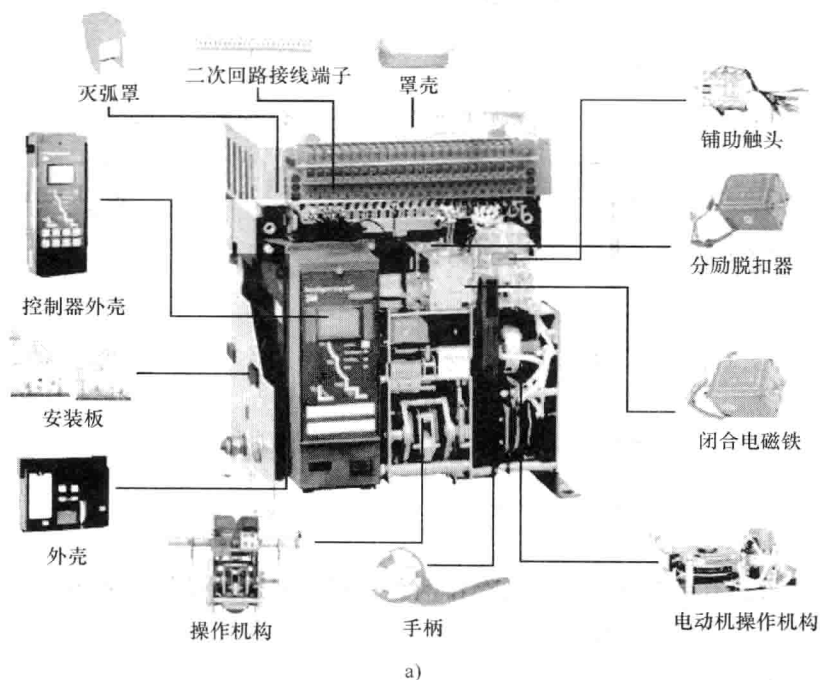


图 1-1 断路器结构分解

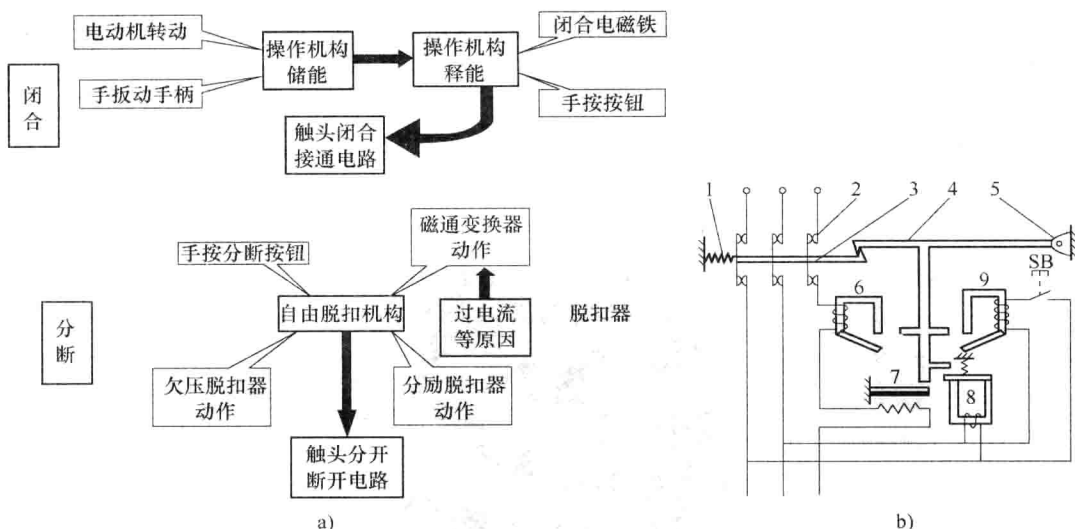


图 1-2 断路器自由脱扣机构工作原理示意图

1—分闸弹簧 2—主触头 3—传动杆 4—锁扣 5—轴 6—过电流脱扣器
7—热脱扣器 8—欠电压失电压脱扣器 9—分励脱扣器

断路器操作方式有手动操作和电动操作两种，断路器采用弹簧储能闭合（有预储能），闭合速度与电动或手动操作速度无关。

3) 控制单元：目前对于智能断路器来说，控制单元是最核心的一部分。控制器的功能及可靠性决定了断路器的应用水平和智能化程度。控制单元应具有过载、短路、接地/漏电、电流不平衡、过电压、欠电压、电压不平衡、过频、欠频、逆功率等故障保护功能，还应具有对电网节点的电流、电压、功率、频率、电能、谐波等参量的测量记录功能。当电力网络进行通信时，智能断路器在电力自动化网络的终端应能实现遥控、遥测、遥信、遥调等，并应支持多种通信协议。

1.2.2 接触器

接触器是一种适用于远距离频繁地接通和分断交直流主电路及大容量控制电路的自动控制电器。接触器主要用于自动控制交、直流电动机，电热设备，电容器组等，应用十分广泛。接触器具有较强的执行部分，大容量的主触头可以迅速熄灭电弧，并具有欠电压释放功能，用于低压交直流电路的空气接触器以其过载能力强、成本低等特点，一直是大量使用的电器产品。

进入新世纪以来，国内外著名低压电器公司纷纷推出新一代交、直流接触器系列产品。以交流接触器来说，新型交流接触器的共同特点是，在 100A 以上框架的产品中，其电磁机构普遍采用了智能控制电路，即通过引入微处理器实现闭环控制，以达到智能分合闸操作的目的。另外，智能控制电路还可通过反馈信号，调节吸力与反力的配合，使电磁机构吸合冲击力最小，减少触头振动，大幅度提高其电气寿命。

接触器有不同的分类方式。按操作方式分，有电磁式接触器、气动式接触器和电磁气动式接触器等；按灭弧介质分，有空气式接触器、油浸式接触器和真空接触器等；按主电路电

流种类分,有交流接触器、直流接触器、切换电容接触器等。另外,还有建筑用接触器、机械联锁(可逆)接触器和智能化接触器。建筑用接触器的外形结构与模数化小型断路器相似,可与模数化小型断路器一起安装在标准导轨上。

应用最广泛的是空气电磁式接触器,通常简称为交流接触器和直流接触器。

电磁式接触器由电磁系统、触头系统、灭弧系统、释放弹簧机构、辅助触头及基座组成。

1. 交流接触器

交流接触器是通断交流主电路的接触器。由于交流主电路大都是三相式,所以交流接触器的触头结构以三极为主。交流接触器的磁系统的结构不仅有交流电磁机构的,而且也有直流电磁机构和永磁电磁机构的。从交流接触器的整体结构看,它可分为转动式和直动式两大类型。交流接触器的额定电压目前主要是 380V、660V、1140V,高电压的主要用于矿山、油田等。电流等级为 6~800A,甚至更大。励磁线圈的电压,交流操作的一般为 380V、220V,直流操作的一般为 220V、48V,还有其他等级的直流操作电压。对一般工业企业用的交流接触器来说,AC3 型的电寿命达 120 万次,机械寿命达 1000 万次;AC4 型的电寿命可达 3 万次。

图 1-3 所示为常用交流接触器。其中,图 1-3a 为 CJ20 系列,是国内 20 世纪 80 年代开发的统一设计的接触器产品。CJ20 系列采用直动式双断点桥式触头结构,银氧化镉或银氧化锡作为触头材料,耐弧、耐磨损、抗熔焊。灭弧系统采用三种结构:40A 以上多采用多纵缝陶土灭弧罩,电弧能够迅速进入灭弧室内,增加了冷却面积,加强了灭弧效果;25A 以下采用带 U 形铁片的灭弧室,利用电弧电流通过 U 形铁片产生的磁场加快电弧运动,加快冷却和消电离;16A 以下接触器,不加装灭弧装置,利用双断点触头自然灭弧。图 1-3b 为 CJ19 系列,是切换电容器的专用接触器,专门用于低压无功补偿设备中投入或切除并联电容器组,改善系统的功率因数。切换电容器组接触器带有抑制浪涌装置,能有效地抑制接通电容器组时出现的合闸涌流和开断过电压。图 1-3c 为真空系列,它以真空为灭弧和绝缘介质,主触头密封在真空管内(真空灭弧室),触头分离后,触头间隙将产生由金属蒸气和其他带电粒子组成的真空电弧。真空介质具有很高的绝缘强度,介质恢复速度非常快,真空电弧的等离子体迅速向四周扩散,一般在第一次电流过零时就可以熄灭电弧(燃弧时间一般小于 10ms)。由于触头被密封在真空容器中,特别适合矿山、油田、建材、化工等领域易燃易爆的工作场合。

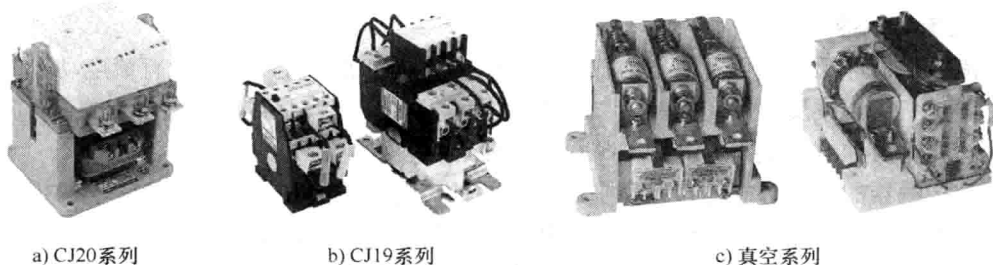


图 1-3 常用交流接触器

下面以最常见的电磁式接触器为例，来介绍交流接触器的动作原理。

图 1-4 所示为直动式交流接触器结构。

磁系统通过联动机构带动触头运动。线圈通电后，导磁体磁化，产生电磁吸力将衔铁（动铁心）吸向静铁心（铁心），衔铁带动联动机构使动触头与静触头闭合，联动机构同时带动置于两侧的辅助触头动作。线圈断电后，在反作用弹簧的作用下，衔铁被释放，同时使触头分断。

图 1-5 所示为转动式交流接触器结构。

转动式交流接触器的动作原理与直动式相同，只不过其铁心和触头系统均为绕轴转动的工作方式。

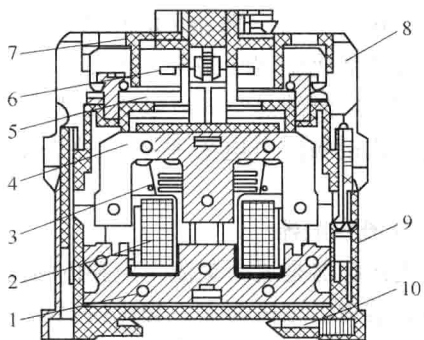


图 1-4 直动式交流接触器结构

- 1—铁心 2—线圈 3—反力弹簧 4—衔铁
5—静触头 6—动触头 7—灭弧室
8—外壳 9—底座 10—卡件

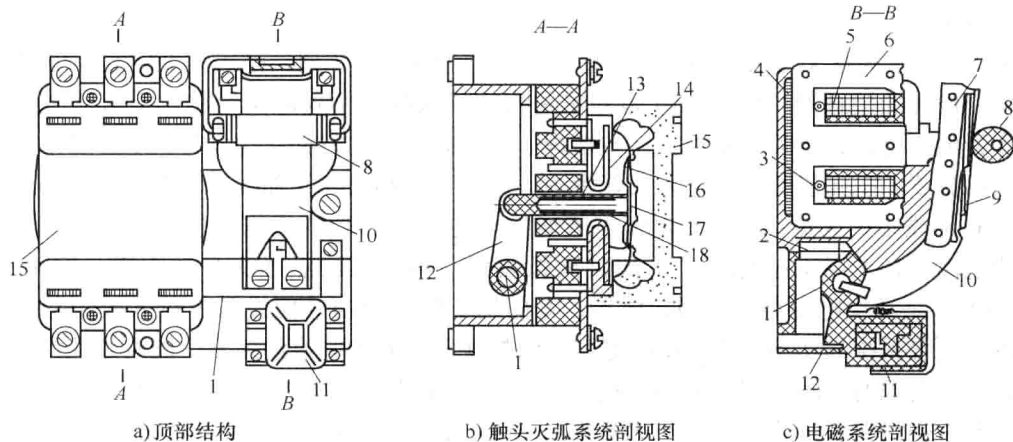


图 1-5 转动式交流接触器结构

- 1—轴 2—反力弹簧 3—缓冲弹簧 4—缓冲件 5—线圈 6—铁心 7—衔铁
8—停挡（缓冲件） 9、17—片状弹簧 10—支架 11—辅助触头 12—杠杆
13—动触头支架 14—静触头 15—灭弧室 16—动触头 18—触头弹簧

2. 直流接触器

直流接触器广泛应用于直流电力线路中，供远距离接通与分断电路及直流电动机的频繁起动、停止、反转或反接制动控制，以及电磁操作机构合闸线圈或频繁接通和断开电磁铁、电磁阀、离合器和电磁线圈等。图 1-6 所示为直流接触器外形图。

直流接触器的结构有立体布置和平面布置两种，电磁机构多采用绕棱角转动的拍合式结构。主触头采用双断点桥式结构或单断点转动式结构，有的产品是在交流接触器的基础上派生出来的，因此，直流接触器的工作原理与交流接触器基本相同。每个主触头都有一个初压力值和终压力值。所谓初压力就是指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)到触头支架运动完毕(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置的。从衔铁运动时刻起到动静触头接触的行程叫做触头开距,为了可靠断开规定容量电弧设定的最短距离。

图1-7所示为直流接触器静态吸反力特性及其配合的情况。

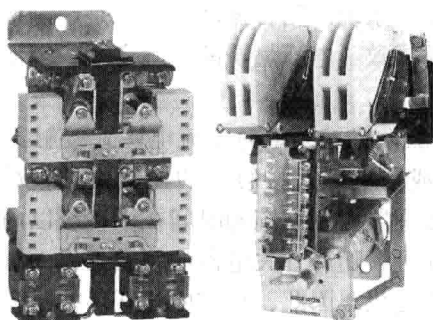


图1-6 直流接触器

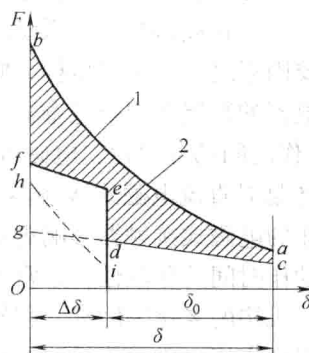


图1-7 直流接触器静态吸反力特性
及其配合的情况
1—吸力 2—反力

图1-7中,曲线 ab 是衔铁上的静态吸力特性(假设吸合过程非常缓慢,磁状态是稳定状态),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 def 叠加而成。前者代表释放弹簧的阻力特性,后者代表触头弹簧的阻力特性。 de 是接触器常开主触头的初压力, gf 是终压力; $\Delta\delta$ 是和触头超程相应的衔铁气隙, δ_0 是和触头开距相应的衔铁气隙, 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1-7中,阴影区代表衔铁的运动能量。这个区域的大小很重要,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

1-7中, hi 是释放时的吸力特性。此时 $cdef$ “反力”特性转变为释放时的动力,迫使衔铁释放; 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。

从以上特性配合的情况可以看出, $cdef$ 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,也就是说,应依据它使接触器内部感测部分与执行部分互相联系、协调配合。另外,接触器的额定电流大、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。这些特性说明,虽然静态吸力特性与反力特性的配合,可以作为接触器设计的重要特性参数,但是,能够真实反映接触器运动过程特性的是动态特性。因此,随着计算机技术和电器技术的发展,采用动态特性对电磁电器进行设计的研究正广泛展开。

3. 交流接触器和直流接触器的比较

从触头系统和电磁机构来看,交流接触器和直流接触器具有许多不同之处。