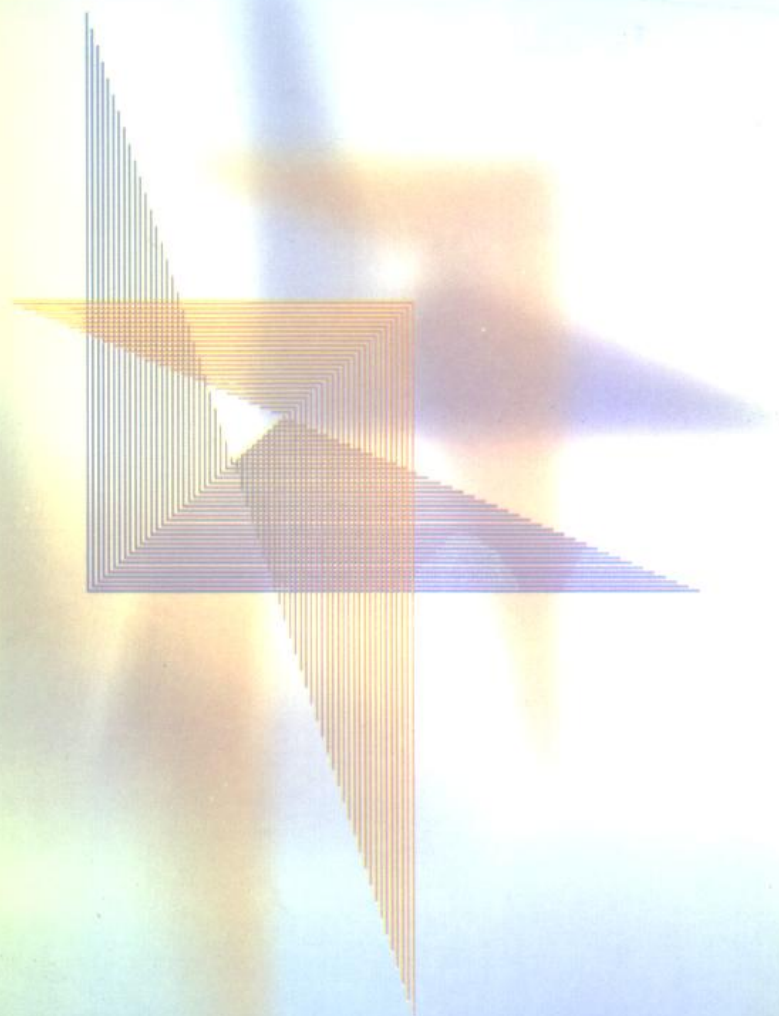


B 普通高等教育机电类规划教材

电 器 学

沈阳工业大学 夏天伟 合编
上海铁道大学 丁明道



机械工业出版社



普通高等教育机电类规划教材

电 器 学

沈阳工业大学 夏天伟
上海铁道大学 丁明道 合编



机械工业出版社

本书共分八章,书中主要介绍了电器有关发热与电力、电接触与电弧、电磁机构等理论基础,同时介绍了低压电器中的继电器、接触器、熔断器及低压断路器等的基本结构、工作原理、主要技术参数与要求,以及有关的设计选用方法,同时也介绍了高压电器中各种高压断路器、高压熔断器、隔离开关、高压互感器等的基本结构、工作原理、主要的技术参数与要求,最后介绍了典型的组合电器和成套电器的结构、工作原理与技术要求。读完全书将使读者对高、低压电器的理论、典型产品的结构、工作原理及系统的应用等有较深入的了解。

本书为高等工业学校电工及自动化类专业的教材,也可供从事高、低压电器设计、制造、试验和运行方面工作的工程技术人员参考。

电 器 学

沈阳工业大学 夏天伟 合编
上海铁道大学 丁明道

*
责任编辑:卢若薇 刘辉,版式设计:霍永明
封面设计:方 芬 责任校对:刘志文
责任印制:路 琳

*
机械工业出版社出版(北京市百万庄大街22号)
邮政编码:100037
(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)
中国建筑工业出版社密云印刷厂印刷
新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*
开本 $787 \times 1092^{1/16}$ ·印张 15·字数 363 千字
1999年5月第1版第1次印刷
印数 0001-1500 定价:22.50元

*
ISBN 7-111-06863-7/TM·761 (课)

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换
本社购书热线电话(010)68993821、68326677-2527

前 言

本书是根据高等工业学校电器专业“八五”教材编审出版计划，以及全国高等学校电工及自动化类专业“九五”教材建设规划的教学计划编写的。

为适应高等学校教学改革的要求，加强基础理论，拓宽知识面，实行模块式教学的需要，专业调整后，其他一部分专业要求讲授这门实际需要、知识面较广、理论基础知识相对“淡化”的电器学。为满足这种需要，在八五、九五两届教材规划中本书均被列入出版计划。

本书的主要内容包括四部分：电器理论基础、低压电器、高压电器及成套电器。由于学时较少，内容较多，取舍不当之处难免。

本书由沈阳工业大学夏天伟教授、上海铁道大学丁明道副教授合编。在“八五”期间即将交稿时，丁明道副教授不幸病逝，致使此书未能如期出版。丁明道副教授在前期做了大量工作，为使此项工作不致半途而废，此书又列入“九五”出版规划。夏天伟教授对全部书稿重新进行了编校及删改，使其内容尽量满足现行的教学计划。

全书共分三篇八章，其中绪论、第一、第二、第三及第七章由丁明道副教授编写；第四、第五、第六、第八章由夏天伟教授编写，全书的合成、修改由夏天伟教授完成。

本书为高等工业院校电工及自动化类专业的教材，也可供从事电器设计、制造、试验及运行方面工作的工程技术人员参考。

对审稿中给予巨大帮助的孟庆龙教授表示深切的谢意。

由于编者水平有限，书中定有错误和不妥之处，恳切希望读者给予批评指正。

编 者

目 录

前言			
绪论	1		
第一节	电器的用途与分类	1	
第二节	电器在电力系统中的作用	1	
第三节	电力系统对电器的要求、电器的主要参数及正常工作条件	3	
第四节	电器的发展过程和展望	4	
第五节	本课程的任务	5	
第一篇 电器的理论基础			
第一章	电器的发热与电动力	6	
第一节	电器中的基本热源	6	
第二节	电器的允许温度和温升	9	
第三节	电器的散热与综合散热系数	10	
第四节	电器的发热计算与牛顿公式	13	
第五节	电器的工作制及其发热计算	16	
第六节	短路时的发热过程和热稳定性	18	
第七节	电器中的电动力	20	
第八节	载流导体间的相互作用	20	
第九节	能量平衡法计算电动力	25	
第十节	交变电流下的电动力	27	
第十一节	短路电流下的电动力	29	
第十二节	电器的电动稳定性	31	
习题		33	
第二章	电接触与电弧理论	35	
第一节	电接触与触头	35	
第二节	电弧及其产生过程	36	
第三节	电弧的特性和方程	41	
第四节	直流电弧及其熄灭	43	
第五节	交流电弧及其熄灭	46	
第六节	灭弧装置	49	
第七节	触头的接触电阻	54	
第八节	闭合状态下的触头	56	
第九节	触头接通过程及其熔焊	59	
第十节	触头分断过程与其电侵蚀	61	
第十一节	栓接连接触头与接触导电膏	63	
第十二节	触头材料	65	
习题		67	
第三章	电磁机构理论	69	
第一节	电磁机构的种类和特性	69	
第二节	磁性材料及其基本特性	71	
第三节	电磁机构中的磁场及其路化	74	
第四节	磁路的基本定律和计算任务	77	
第五节	气隙磁导和磁导体磁阻的计算	79	
第六节	磁路的微分方程及其解	87	
第七节	不计漏磁时的磁路计算	89	
第八节	计及漏磁时的磁路计算	91	
第九节	交流磁路的计算	94	
第十节	电磁机构的吸力计算	97	
第十一节	交流电磁机构的电磁力与分磁环原理	100	
第十二节	静特性及其与机械反力特性的配合	103	
第十三节	电磁机构的动态特性	104	
第十四节	电磁机构的设计与换算	110	
习题		114	
参考文献		116	
第二篇 低压电器			
第四章	低压控制电器	123	
第一节	概述	123	
第二节	主令电器	123	
第三节	控制继电器	126	
第四节	低压接触器	138	
第五节	低压电动机起动器	146	
习题		150	
第五章	配电电器	152	
第一节	概述	152	

第二节	刀开关和负荷开关	152	第二节	接地开关	201
第三节	低压熔断器	155	第三节	高压负荷开关	203
第四节	低压断路器	160	第四节	高压熔断器	204
第五节	漏电保护开关和漏电保护断 路器	173	第五节	避雷器	207
习题		174	第六节	高压限流电抗器	209
参考文献		175	第七节	高压互感器	210
			习题		218
第三篇 高压电器			第八章	组合电器和成套电器	220
第六章	高压断路器	181	第一节	低压组合电器和成套电器	220
第一节	概述	181	第二节	高压成套电器	224
第二节	少油断路器	182	第三节	高压组合电器	226
第三节	真空断路器	188	习题		229
第四节	六氟化硫断路器	192	参考文献		230
第五节	断路器的操动机构	196	附录		231
习题		198	附录 A	直流电磁机构用材料的 磁化曲线	231
第七章	其他高压电器	199	附录 B	硅钢板的磁化曲线	232
第一节	隔离开关	199	附录 C	硅钢板的损耗曲线	233

绪 论

什么是电器？广义地说，凡属电气器具均可称为电器。但工业上所说的电器是指能够根据外界施加的信号或要求，自动或手动地接通和分断电路，断续或连续地改变电路参数，以实现电路或非电量对象的变换、检测、控制、保护、调节和传递信息用的电气器具。简言之，电器就是接通、分断电路或调节、控制和保护电路以及其中电气设备用的电工器件和装置。

第一节 电器的用途与分类

电器的用途非常广泛。无论工业、农业和交通运输业，还是科研、军事部门，都需要大量的各种各样的电器，用以对电力系统作通断、转换、调节、控制和保护；对电能实行分配；对电动机作过载、失压、欠压、断相和短路保护；对电信号或非电信号实行放大、变换和传递，以达到自动检测和控制的目的是。

具有如此广泛用途的电器，其品种规格必然较多、分类方法也很多。例如：

1) 按职能区分，有开关电器(如刀开关、隔离开关、高低压断路器等)、保护电器(熔断器、避雷器、保护继电器等)、控制电器(接触器、控制继电器和电磁铁等)和调节器(起动机、变阻器、电压调节器等)。

2) 按电压高低和结构工艺区分，有高压电器(高压断路器、电抗器、互感器等)、低压电器(低压断路器、接触器、熔断器、刀开关等)、自动电磁元件(各种继电器、传感器、逻辑元件等)、成套电器(高低压开关柜、自动化成套装置等)。

3) 按元件与系统的关系区分，有配电电器(高低压断路器、隔离开关与刀开关、熔断器等)、控制电器(接触器、继电器、起动机等)和弱电电器(微型继电器、逻辑元件等)。

4) 按操作方式区分，有手动电器(刀开关、隔离开关、主令电器等)和自动电器(高低压断路器、接触器等)。

5) 按使用场所和工作条件区分，有一般工业用电器、矿用及化工用防爆电器、船用电器、航空及航天用电器和牵引电器等。

此外，还有与电子器件相结合的智能化和机电一体化电器。

第二节 电器在电力系统中的作用

为实现电能的生产、传输、分配和应用，需要大量的各种各样的高低压电器元件。据统计，每增加 1000kW 发电能力，就需要一万台高压断路器和数倍于此数的其他高压电器，以及数以百万计的各种低压电器与之配套。为说明电器在电力系统或控制系统中的作用，下面介绍两种典型的电网线路。

图 0-1 是高压电网示意图。发电机 G1 和 G2 发出的电力经断路器 QF、电流互感器 TA 和

隔离开关 QS 输送到 10kV 的母线上。此母线经隔离开关和熔断器 FU 接一电压互感器 TV，并经隔离开关、断路器和电抗器 L 接向近处的电力传输线路。此外，10kV 母线还经隔离开关、断路器及电流互感器接向升压变压器 TU，后者又经断路器及其两端的隔离开关接到 220kV 母线上。与此母线联接的有：与熔断器串联着的电压互感器，通向电力传输线路的断路器和接在这些线路中的电流互感器。所有这些线路均通过隔离开关接到 220kV 母线上。另外，10kV 及 220kV 母线还经隔离开关接有避雷器 F。

断路器的作用在于在电力系统的正常工作条件下和故障条件下接通与开断电路。熔断器的用途是对线路及其中的设备提供过载和短路保护。隔离开关用于母线与其他高压电器之间建立必要的绝缘间隙，以保障维修时的人身安全。避雷器的用途是为高压线路提供过电压保护。电抗器用于限制短路电流，以减轻断路器等工作，并在出现短路故障时使母线电压能维持一定的水平。电压和电流互感器将高压侧的电压和电流变换为与它们成正比的低电压和小电流，便于安全测量，并为继电保护装置和自动控制线路提供信号。

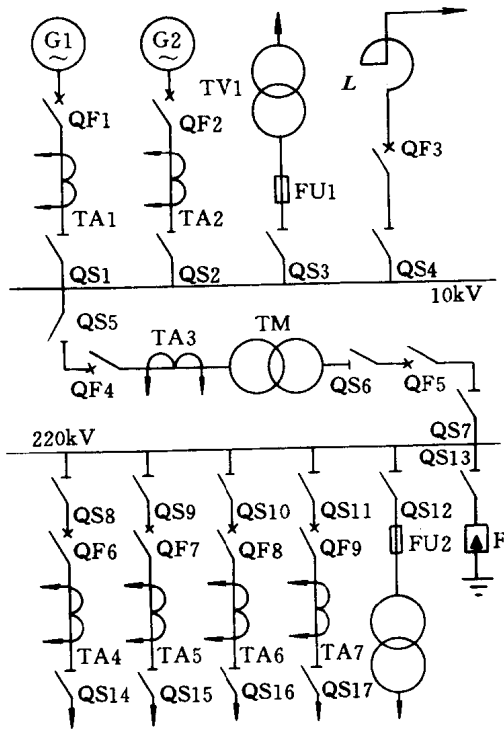


图 0-1 高压电网示意图

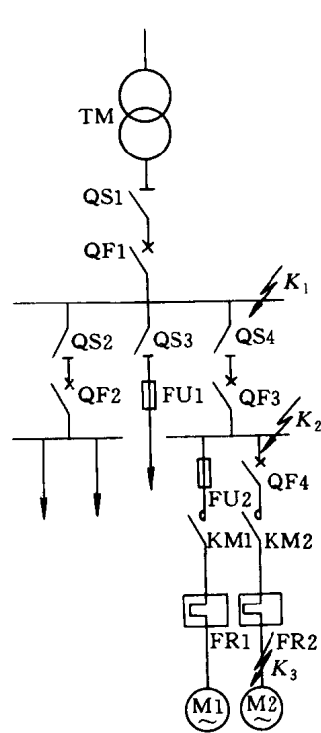


图 0-2 低压电网线路

图 0-2 是低压电网线路。高压电网输送来的电力经降压变压器 TM 变换为低压后，通过刀开关 QS 和低压断路器 QF 送到中央配电盘母线上。这段线路称为主电路，电能由此或经刀开关和断路器接向动力配电盘的母线，或经刀开关和熔断器 FU 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 M1，另一条馈电线路经断路器 QF4、接触器 KM2 和继电器 FR2 接向负载 M2。断路器是一种多功能的保护电器，当线路出现过载、短路、失压或欠压故障时，能自动切断故障线路。刀开关用于维修线路时隔离电源用，以保证维修时非故障

线路的安全进行。接触器用于正常工作条件下频繁地接通或分断线路，但不能分断短路电流。熔断器主要起过载及短路保护作用，热继电器主要用于电动机的过载保护。

低压线路中还要使用其他种类的电器，如各种控制继电器、主令电器、起动器及调节器等。它们在线路中起着不同的作用，以满足不同的要求。

第三节 电力系统对电器的要求、电器的主要参数及正常工作条件

根据工作电压的不同，电力系统有高压与低压之分。凡额定电压为 3kV 及以上的系统称为高压电力系统；而额定电压为交流 1200V 及以下和直流 1500V 及以下的系统称为低压电力系统。不同的电力系统对工作于其中的电器有不同的要求，这些要求又决定了电器的主要参数。在此，仅就一些共同性的要求加以叙述。

一、对电器的要求及表征这些要求的参数

电力系统对高低压电器的共同性要求有：

(1) 安全可靠的绝缘 电器应能长期耐受最高工作电压和短时耐受相应的大气过电压和操作过电压。在这些电压的作用下，电器的触头断口间、相间以及导电回路对地之间均不应发生闪络或击穿。表征电器绝缘性能的参数有额定电压、最高工作电压、工频试验电压和冲击试验电压等。

(2) 必要的载流能力 电器的载流件应允许长期通过额定电流、而其各部分的温升不超过标准规定的极限值；同时还应允许短时通过故障电流，既不致因其热效应使温度超过标准规定的极限值，又不致因其电动力效应使之遭到机械损伤。表征电器载流能力的参数有额定电流、热稳定电流和动稳定电流等。

(3) 较高的通断能力 除隔离开关外，一般的开关电器均应能可靠地接通和(或)分断额定电流及一定倍数的过载电流。其中断路器还应能可靠地接通和分断短路电流，有的还要求能满足重合闸的要求。经过这些操作后，触头和其他零部件均不应损坏，并能可靠地保持在接通或分断的位置上，且不发生熔焊及误动作等现象。表征电器通断能力的参数有接通电流、分断电流和通断电流(或容量等)。

(4) 良好的机械性能 电器的运动部件的特性必须符合要求，其同相触头的各断口以及异相触头的断口在分合时应满足同期性的要求。此外，整个电器的零部件经规定次数的机械操作后应不损坏，且无需更换，即有一定的机械寿命。

(5) 必要的电寿命 开关电器的触头在规定的条件下应能承受规定次数的通断循环而无需修理或更换零件，即具有一定的电寿命。

(6) 完善的保护功能 凡保护电器以及具备某些保护功能的电器，必须能准确地检测出故障状况，及时地作出判断并可靠地切除故障。至于本身不具备保护功能但具有切断故障电路能力的电器，在从保护继电器取得信号后，亦应能及时而可靠地切除故障。同时，为了充分利用各种电气设备的过载能力、缩小故障范围及保障供电的连续性，各类电器的保护功能还应能相互协调配合、实行有选择性地分断。

二、电器的正常工作条件

电器的正常工作条件有：

(1) 周围环境温度 此温度对电器的工作影响颇大。温度过低，作为电介质和润滑剂的各种油的粘度将上升，影响电器的正常动作和某些电气性能。温度过高，将使电器的载流能力降低，以及导致密封胶渗漏等。因此，对电器的周围环境温度必须在标准中加以限定。例如，高压电器的使用环境温度户外型为 $-30^{\circ}\text{C} \sim +40^{\circ}\text{C}$ ；户内型为 $-5 \sim +40^{\circ}\text{C}$ ；低压电器的使用环境温度为 $-5 \sim +40^{\circ}\text{C}$ ，而且日平均值不超过 $+35^{\circ}\text{C}$ 。若实际使用环境温度超过此范围，就必须按照标准或技术文件的规定采取相应措施，如减小负载电流和提高耐压试验电压等。

(2) 海拔高度 高海拔地区大气压低，使散热能力和耐压水平都降低。但随着海拔高度的升高，环境温度也会降低一些，故海拔高度主要影响耐压水平及灭弧能力。根据我国的地形和工业布局的情况，高压电器使用环境的海拔高度为 1000m，低压电器为 2000m。如果实际运行地点的海拔高度超过上述规定值，则应适当提高耐压试验电压及降低容量。

(3) 相对湿度 相对湿度高会导致电器产品中的金属零件锈蚀、绝缘件受潮以及涂覆层脱落，其后果是使电器绝缘水平降低和妨碍电器的正常动作。因此，标准中对电器工作环境的相对湿度作了限制，而且在超出限制范围时应采取相应的工艺措施。

(4) 其他条件 影响电器工作的其他条件尚有污染等级、振动、介质中是否含易燃易爆气体以及是否有风霜雨雪等天气条件。

在选择和使用各种电器时，只有了解其正常工作条件后，方能保证其安全可靠的运行。

第四节 电器的发展过程和展望

电器是伴随着电能生产而出现和发展的。19 世纪后半叶以来，电能逐渐取代自产业革命起便居于统治地位的工业动力—蒸汽，电动机也逐渐成为工业生产的原动机之一。因此，为电能生产、传输、分配和应用所需的各种电器亦应运而生了。当时，对电源(汽轮发电机组)的控制过程是沿袭蒸汽机的控制过程，即汽源—阀门—蒸汽机—工作机的控制过程。阀门具有“开汽”、“关汽”、调节蒸汽量的作用，有的还兼具保护作用。对电动机的控制过程则是电源—电器—电动机—工作机。其中的电器有起开关作用的刀开关、起调节作用的变阻器和起保护作用的熔断器，它们基本上都是用手操作的手动电器。

随着电网及电动机容量的日益增大，原始的电器已不能适应越来越高的要求。为满足自动控制的需要，出现了电磁操作的自动电器；为适应电网容量的发展，出现了采用各种灭弧介质和装置的断路器。同时，各种电器还由仅具开关、调节或保护作用发展到兼具控制、变换和检测作用，且由单件发展为组合或成套装置。

半导体元器件的问世和发展更促进了电器的发展：一方面的表现是灵敏度和适应性的提高，另一方面是有触点电器在某种程度上的消失——无触点化，同时还出现了智能型的产品。电真空技术和化学的发展也为电器的发展创造了物质基础。前者表现在真空断路器等的出现与推广；后者表现在新型绝缘材料的应用与 SF₆ 断路器及全封闭高压组合电器的出现、发展和推广上。

目前，国外已有 765kV 的高压输电系统及适用于此电压等级的高压电器，并已着手研究 1100~2000kV 超高压输电技术和装备。最近还出现了 1200kV 的六氟化硫全封闭组合电器。

这些高压电器的工作电流和分断电流分别达到 10kA 及 100kA 以上。在低压电器方面, 已有工作电流达 10kA 以上的配电电器和电气寿命达 $(1 \sim 3) \times 10^7$ 次的控制电器, 并在继续发展。

我国的电器工业是本世纪 50 年代从无到有, 从小到大, 从简单到复杂, 从沿海向内地发展起来的。从 50 年代末便逐渐地从仿制到自行设计。经过 40 多年的努力, 已建立了完整的科研、生产和实验体系。我国生产的电器产品不仅在许多方面已达到国际上 80 年代的水平, 而且除能满足国内需要外, 还有部分产品进入国际市场。在不久的将来, 我国的电器行业必将跻身于世界先进行列。

第五节 本课程的任务

本课程是为电类专业中非电器制造专业而设置的一门专业课, 其任务是学习各种电器的共性问题——电器的理论基础, 以及工业上常用的高压电器和低压电器的结构及工作原理。通过学习本课程应达到下列要求:

- 1) 了解电器中电流的热效应和电动力效应及其计算方法。
- 2) 了解电接触和电弧理论。
- 3) 了解电磁机构的原理及其计算方法。
- 4) 掌握低压电器主要产品的工作原理、结构、选择及应用。
- 5) 掌握高压电器主要产品的工作原理、结构、选择及应用。

第一篇 电器的理论基础

电器的工作原理是多种多样的，涉及的学科又十分宽广，所以电器理论基础内容很丰富。本篇要讨论的仅限于对各种电器较为重要的共性问题——电器的发热与电动力、电接触与电弧理论以及电磁机构理论。

第一章 电器的发热与电动力

各种电器都具有载流系统，其工作又毫无例外地伴随着热效应和电动力效应。在正常工作条件下它们不致影响电器的正常运行。若遇到短路故障，不论是热效应还是电动力效应均有可能破坏电器的工作，损坏电器，乃至引起灾害性事故。因此，对这类问题不可等闲视之。

本章主要讨论发热过程和载流体受到的电动力的计算方法，以及载流体在大电流下的热稳定性和电动稳定性的计算方法。

第一节 电器中的基本热源

当电器中的载流系统通过直流电流时，载流导体中损耗的能量便是电器的唯一热源[⊖]。若载流系统通过交变电流，则在交变电磁场作用下在铁磁体产生的铁损——磁滞损耗和涡流损耗，以及在绝缘体内产生的介质损耗也是电器的热源。至于机械摩擦等产生的热能，与前三类热源相比是较小的，常常可以不予考虑。因此，载流体中的能量损耗、铁损和电介质损耗就被称为电器的基本热源。

一、导体通过电流时的能量损耗

根据焦耳定律，当导体通过电流 I 时，其中的能量损耗为

$$W = \int_0^t I^2 R dt \quad (1-1)$$

式中 R ——导体的电阻；

t ——通电时间。

此公式既适用于直流，也适用于交流(如果将 I 理解为交流的有效值)。当导体的横截面和温度为恒值，即电流值和电阻值均不变时，式(1-1)将变为

$$W = I^2 R t \quad (1-2)$$

在直流情况下，导线的电阻为

[⊖] 广义地说，载流导体包含金属和非金属导体、电接触以及分断电路时产生的电弧。

$$R = \frac{\rho l}{A} \quad (1-3)$$

式中 A 、 l ——分别为导线的横截面积和长度；

ρ ——导线材料的电阻率，它是温度的函数，即

$$\rho = \rho_0 (1 + \alpha\theta + \beta\theta^2 + \gamma\theta^3 + \dots) \quad (1-4)$$

式中 ρ_0 ——导线材料在 0°C 时的电阻率；

α 、 β 、 γ ——均为电阻温度系数。

若在式(1-4)中只计及前两项，对于铜质导线，当 θ 为 300°C 、 200°C 及 100°C 时，误差分别为 1.8%、0.97% 和 0.32%；对于铝质导线，误差分别为 4.2%、2.4% 和 0.8%。因此，工程计算中常采用简化式

$$\rho = \rho_0 (1 + \alpha\theta) \quad (1-5)$$

当导线通以交变电流时，其中的能量损耗将增大，这是电流在导线内分布不均匀所致。

如图 1-1a、b 所示，当一正方形截面铜导体内通过工频正弦交变电流时，电流密度 J 和电流相位 φ 在截面内的分布是不均匀的。越接近导体表面，电流密度值越大(图中数字为实际电流密度与其平均值之比)，相位越超前(图中角度值是相对总电流密度的相位移)。这种现象称为集肤效应，它使导体的有效截面减小，使电阻值增大。

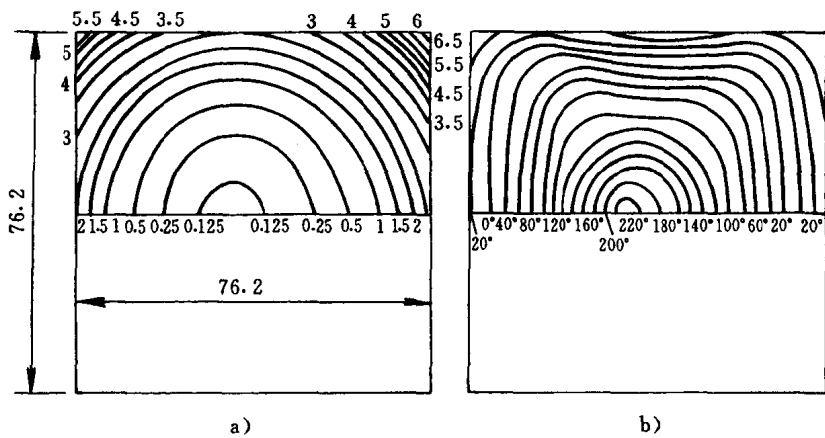


图 1-1 集肤效应对电流密度分布的影响

a) 电流密度的分布 b) 电流相位分布

当构成回路的二平行导线通过交变电流时，其磁场间的相互作用也会使导线截面内的电流密度分布不均匀(见图 1-2)。这种现象称为邻近效应。

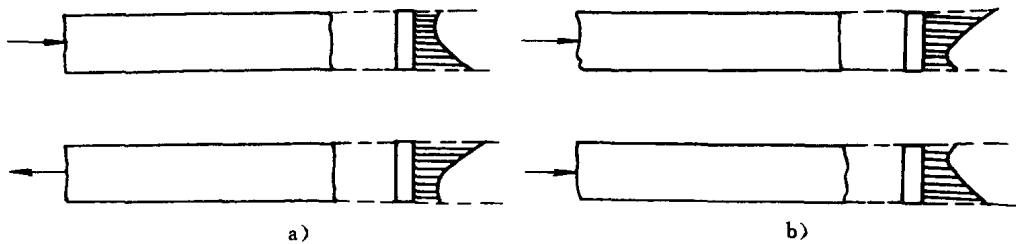


图 1-2 邻近效应对电流分布的影响

a) 两电流同向 b) 两电流异向

集肤效应与邻近效应的存在使同一导线在通过交变电流(若交变电流的有效值与直流电流值相等)时的损耗比通过直流电流时的大,换言之,即有了附加损耗。通过交变电流和通过直流时产生的损耗之比称为附加损耗系数 K_a , 它等于考虑集肤效应影响的系数 K_s 与考虑邻近效应影响的系数 K_n 之积:

$$K_a = K_s K_n \quad (1-6)$$

集肤效应系数可按式计算:

$$K_s = \frac{A}{p} \sqrt{\frac{2\pi f \mu}{\rho}} \quad (1-7)$$

式中 A 、 p ——导线的截面积及其周长;

f ——交变电流的频率;

ρ 、 μ ——导线材料的电阻率和磁导率。

导线截面的形状对 K_s 值影响颇大, 而式(1-7)又未反映, 故在实用上大都利用不同形状截面所做的诺模图来查取 K_s 值。这类图表可见于一些书籍及手册, 如文献[1.5、6、7、9]。集肤效应系数恒大于1。

邻近效应系数与电流的频率、导线间距和截面的形状及尺寸、电流的方向及相位等因素有关, 其值亦可从有关的书籍及手册中查得, 如文献[5、6、7、9、]。邻近效应系数值也大于1。但较薄的矩形母线宽边相对时, 邻近效应部分地补偿了集肤效应的影响, 故 K_n 值略小于1。

二、非载流铁磁质零部件的损耗

非载流铁磁质零部件在交变电磁场作用下产生的损耗称为铁损 P_{Fe} , 它包含磁滞损耗 P_n 和涡流损耗 P_e 两部分, 即

$$P_{Fe} = P_n + P_e \quad (1-8)$$

而

$$P_n = \begin{cases} \sigma_n \left(\frac{f}{100} B_m\right)^{1.6} \rho V & (B_m \leq 1T) \\ \sigma_e \left(\frac{f}{100} B_m\right)^2 \rho V & (B_m > 1T) \end{cases} \quad (1-9)$$

$$P_e = \sigma_e \left(\frac{f}{100} B_m\right)^2 \rho V \quad (1-10)$$

式中 f ——电源频率;

B_m ——铁磁件中磁感应的幅值;

ρ ——铁磁材料的密度;

V ——铁磁材料零部件的体积;

σ_n 、 σ_e ——磁滞损耗系数和涡流损耗系数, 其值与铁磁材料的品种规格有关, 一般由试验来确定。

铁损亦可从工厂提供的产品样本中查得。

三、电介质损耗

在交变电磁场中, 绝缘层内将出现电介质损耗

$$P_d = \omega CU^2 \tan \delta \quad (1-11)$$

式中 ω ——电压的角频率；
 C ——绝缘层的电容；
 U ——施加在绝缘件上的电压；
 $\tan \delta$ ——绝缘材料介质损耗角的正切。

介质损耗角与绝缘材料的品种规格、温度、环境状况以及处理工艺等有关。高频及高压技术所用绝缘材料的 $\tan \delta$ 值一般在 $10^{-4} \sim 10^{-3}$ 之间。这类数据亦可从有关资料中查得，如文献[1]等。

第二节 电器的允许温度和温升

电器中损耗的能量几乎全部直接转换为热能，其中一部分散失在周围介质中，另一部分则用以加热电器，使之升温。

金属载流体的温度超过某一极限值后，机械强度明显降低。如此，轻则发生形变，影响电器的正常工作；重则使电器损坏，以致影响其所在系统的工作。此外，与载流体联接或相邻的非载流体亦将不同程度地受损。这类现象在出现短路故障时尤甚。材料的机械强度开始明显降低的温度称为软化点，它不仅与材料品种有关，也与加热时间有关。例如，长期加热时，铜材的软化点为 $100 \sim 200^\circ\text{C}$ ；短暂加热时则可达 300°C （见图 1-3）。显然，电器中未绝缘的裸导体的极限允许温度应低于其软化点。

温度升高会加剧电器中电接触联接表面与其周围大气中某些气体间的化学反应，使接触面上生成氧化膜及其他膜层，增大接触电阻，并进一步使接触面温度再升高，形成恶性循环。因此，对电接触的温度也必须加以限制。

绝缘材料按其耐热能力分为 7 级（见表 1-1）。通常，绝缘材料的电阻随温度上升将按指数规律降低，而且因温度上升影响发生的老化是经常的和不可逆的，故绝缘材料在长期工作制下的极限允许温度同样要受到限制，即不得超过表 1-1 中所规定的极限温度。

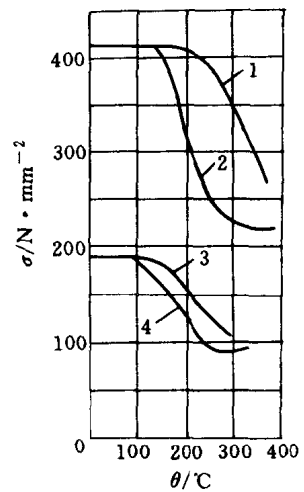


图 1-3 导体材料机械强度与温度的关系

1—加热时间为 10s 时的铜材
 2—长期加热时的铜材
 3—加热时间为 10s 时的铝材
 4—长期加热时的铝材

表 1-1 电气绝缘材料耐热等级

耐热等级	极限温度/°C	属该耐热等级的绝缘材料示例
Y	90	未浸渍的棉纱、丝、纸等材料或其组合物形成的绝缘结构
A	105	浸渍过或浸在液态电介质中的棉纱、丝及纸等材料或其组合物形成的绝缘结构
E	120	合成有机薄膜、合成有机磁漆等材料或其组合物形成的绝缘结构
B	130	以适当的树脂粘合或浸渍、涂覆后的云母、玻璃纤维、石棉等，以及其他无机材料、适当的有机材料或其组合物形成的绝缘结构
F	155	

(续)

耐热等级	极限温度/°C	属该耐热等级的绝缘材料示例
H	180	以硅有机树脂粘合、浸渍或涂覆后的云母、玻璃纤维及石棉等材料或其组合物形成的绝缘结构
C	> 180	以适当的树脂(如热稳定性特别优良的硅有机树脂)粘合、浸渍或涂覆后的云母、玻璃纤维等, 以及未经浸渍处理的云母、陶瓷、石英等材料或其组合物形成的绝缘结构(C级绝缘材料的极限温度应根据不同的物理、机械、化学和电气性能来确定)

尽管决定电器各类零部件工作性能的是它们的温度, 但考核电器的质量时却是以温升(即零部件温度与周围介质温度之差)作为指标。这是因为电器运行场所的环境温度因时因地而异, 故只能人为地规定一个统一的环境温度(我国规定为 35°C), 据此再规定允许的温升 τ , 以便考核。若令零部件的温度为 θ , 则有

$$\tau = \theta - 35 \quad (1-12)$$

我国的国家标准、部标准和企业标准中, 按电器不同零部件的工作特征, 对其允许温升都有详细的规定。

虽然在各类标准中对电器载流体于短时通过短路电流时的极限允许温度未作统一规定, 但多年来一直是以不超过表 1-2 规定为准则。

表 1-2 短路时的短时允许温度

载流部件		极限允许温度/°C			
		铜	黄铜	铝	钢
未绝缘导体		300	300	200	400
包绝缘导体	Y级	200	200	200	200
未绝缘导体	A级	250	250	200	250
包绝缘导体	B、C级	300	300	200	400

校核电器载流部件的热稳定性——电器能够短时承受短路电流的热效应而不致损坏的能力, 就是以表 1-2 中的数据为标准。至于主触头的短时极限允许温度则应限制在 200°C 以内, 弧触头以不发生触头熔焊为准。

第三节 电器的散热与综合散热系数

电器中损耗的能量转换为热能后, 有一部分是借传导、对流和热辐射三种方式散失到周围的介质中。

一、热传导

热能从物体的一部分向另一部分, 或从一物体向与之接触的另一物体传递的现象称为热传导, 它是借分子热运动而实现的。参与金属热传导过程的是自由电子, 它明显地加速了此过程。热传导是固态物质传热的主要方式, 温差的存在是热交换的充要条件。

两等温线的温差 $\Delta\theta$ 与等温线间距 Δn 之比的极限称为温度梯度, 即

$$\lim_{\Delta n \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta \theta}{\Delta n} \right) = \frac{\partial \theta}{\partial n} = \text{grad} \theta \quad (1-13)$$

在单位时间内通过垂直于热流方向单位面积的热量称为热流密度，即

$$q = \frac{Q}{At} \quad (1-14)$$

式中 Q ——热量；

A ——面积；

t ——时间。

热传导的基本定律——傅立叶定律确立了热流密度与温度梯度之间的关系：

$$q = -\lambda \text{grad} \theta \quad (1-15)$$

由于热量是向温度降低的方向扩散，而温度梯度则是指向温度升高的方向，故上式有一负号。式(1-15)中的比例系数 λ 称为热导率或导热系数，其单位为 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。它相当于沿热流方向单位长度上的温差为 1K 时在单位时间内通过单位面积的热量。各种物质有不同的热导率，且为其物理性质所决定。一般来说，热导率

$$\lambda = \lambda_0(1 + \beta_\lambda \theta) \quad (1-16)$$

式中 λ_0 ——发热体温度为 0°C 时的热导率；

θ ——发热体的温度；

β_λ ——热传导温度系数。

热导率值范围甚大，银为 425、铜为 390、铝为 210、黄铜为 85、某些气体为 0.006，其单位均为 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。这是由不同物质有不同的热传导过程所决定的。金属的 β_λ 值为负值。液体的 λ 值在 $0.07 \sim 0.7$ 之间，除水和甘油外，其 β_λ 值亦为负值。气体的 λ 值为 $0.006 \sim 0.6$ ，其 β_λ 值为正值。

二、对流

借液体或气体粒子的移动传输热能的现象称为对流。然而，对流总是与热传导并存，只是前者在直接毗邻发热体表面处才具有较大意义。对流转移动热量的过程与介质本身的转移互相联系，故只有在粒子能方便地移动的流体中才存在对流现象。影响对流的因素很多，其中包括粒子运动的本质和状态、介质的物理性质以及发热体的几何参数和状态。

载流体表面的散热大多以自由对流，即由热粒子与冷粒子的密度差引起的流体运动完成的。由于同发热体接触，空气被加热，其密度也减小了。两种粒子的密度差产生上升力，使热粒子上升，冷粒子则补充到热粒子的位置上。

流体运动有层流与紊流之分。作层流运动时，粒子与通道壁平行地运动；作紊流运动时，粒子则无序且杂乱无章地运动。然而，并非整层流体均作紊流运动，近通道壁处总有一薄层流体因其粘滞性而保留层流性质。此薄层内的热量靠热传导传递。层流厚度取决于流速，并因流速之增大而减小。

散热能力主要决定于边界层，因为此处温度变化最大(图 1-4)。热量传递过程随流体性质而异，直接影响此过程的因素有

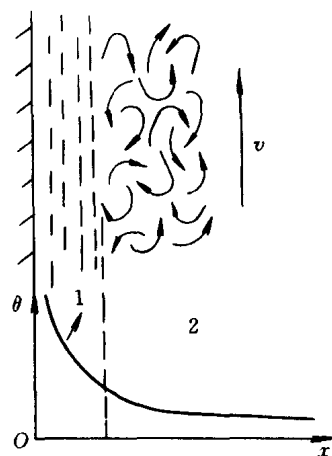


图 1-4 边界层的对流散热
1—层流区 2—紊流区