

普通高等院校电气信息类专业系列教材

电器学

■ 姜姍 周浩 魏颖◎主编

 北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

普通高等院校电气信息类专业系列教材

电 器 学

主 编 姜 姗 周 浩 魏 颖
副主编 孙 昕 孙 妍 贾 婷 张文静

 **北京理工大学出版社**
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 简 介

本书是电器理论学习的专业基础书籍,全书共分6章:第1章绪论,介绍电器学发展情况;第2章电器的发热与电动力,介绍其应用方面的计算;第3章电接触与电弧理论,分别介绍了直流电弧和交流电弧;第4章电磁系统的理论与特性,分别介绍了磁路计算、磁导计算和磁场能量等;第5章低压电器,介绍了主令电器、熔断器、断路器、接触器和起动机;第6章高压电器,介绍了高压断路器的基本功能、分类、性能以及真空断路器, SF₆ 断路器等。

本书为高等院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。

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

电器学 / 姜姗, 周浩, 魏颖主编. —北京: 北京理工大学出版社, 2021. 5 (2021. 6 重印)

ISBN 978-7-5682-9833-9

I. ①电… II. ①姜… ②周… ③魏… 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(2021)第 090264 号

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010)68914775(总编室)

(010)82562903(教材售后服务热线)

(010)68948351(其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 三河市华骏印务包装有限公司

开 本 / 787 毫米×1092 毫米 1/16

印 张 / 15

字 数 / 306 千字

版 次 / 2021 年 5 月第 1 版 2021 年 6 月第 2 次印刷

定 价 / 42.00 元

责任编辑 / 李 薇

责任校对 / 刘亚男

责任印制 / 李志强

图书出现印装质量问题, 请拨打售后服务热线, 本社负责调换

前 言

电器元件及设备作为电力系统和供、配电系统不可或缺的重要组成部分，广泛应用于工业、农业、国防、交通及人民生活等众多领域。随着我国国民经济的发展，各领域对电器产品的需求量不断增高，对其技术及经济指标的要求也不断提高。本书能够适应电器产品不断增长的趋势，满足广大从事电器研究、设计及应用的工程技术人员的需求，特别是高等院校电气专业及其他相关专业培养的面向 21 世纪应用型电气专业人才的需求。

本书系统地介绍了低压电器与高压电器涉及的基本理论和工程分析与计算方法，主要内容包括电器发热的分析与计算、电器电动力分析与计算、气体击穿及电弧理论、电器绝缘技术、开关电器的电弧及其熄灭原理、电接触理论、电磁系统的理论与特性、低压电器和高压断路器等。

本书引用了国内外同行在电器理论、智能电器和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。

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
2021 年 2 月

第 1 章 绪 论	(1)
1.1 电器的用途与分类	(1)
1.2 电器在电力系统中的作用	(2)
1.3 电器的主要参数和正常工作条件	(3)
1.4 电器学的主要理论范畴	(5)
1.5 电器的现状及发展	(5)
习题 1	(7)
第 2 章 电器的发热与电动力	(8)
2.1 概 述	(8)
2.2 电器的极限允许温升	(9)
2.3 电器的热源	(10)
2.4 电器的散热	(15)
2.5 电器表面稳定温升计算——牛顿公式	(17)
2.6 不同工作制下电器的热计算	(19)
2.7 短路时的发热过程和热稳定性	(25)
2.8 电器中的电动力	(27)
2.9 载流导体间的相互作用	(28)
2.10 能量平衡法计算电动力	(33)
2.11 交流稳态电流下的电动力	(34)
2.12 短路电流下的电动力	(39)
2.13 电器的电动稳定性	(42)
习题 2	(44)
第 3 章 电接触与电弧理论	(45)
3.1 概 述	(45)
3.2 开关电器开断电路时电弧的产生过程	(48)
3.3 电弧的基本物理特性	(49)
3.4 直流电弧的基本物理特性	(58)

3.5	直流电弧的熄灭原理	(64)
3.6	交流电弧及其熄灭	(69)
3.7	熄灭电弧的基本方法和基本装置	(73)
3.8	触头的接触电阻	(81)
3.9	触头接通过程及其熔焊	(83)
3.10	触头分断过程与电侵蚀	(86)
3.11	电接触材料	(89)
	习题3	(93)
第4章	电磁系统的理论与特性	(94)
4.1	概 述	(94)
4.2	磁路计算的基本定律	(95)
4.3	气隙磁导计算	(99)
4.4	直流磁路的计算	(106)
4.5	交流磁路的计算	(110)
4.6	永久磁铁的磁路计算	(117)
4.7	电磁系统的磁场能量	(124)
4.8	能量转换与电磁力的普遍公式	(127)
4.9	麦克斯韦电磁吸力公式	(130)
4.10	交流电磁系统吸力的特性与分磁环原理	(131)
4.11	电磁系统静态吸力特性与反力特性的配合	(135)
	习题4	(136)
第5章	低压电器	(138)
5.1	主令电器	(138)
5.2	熔断器	(143)
5.3	断路器	(152)
5.4	接触器	(160)
5.5	起动器	(164)
	习题5	(165)
第6章	高压电器	(167)
6.1	高压电器的基本功能	(167)
6.2	高压断路器的分类和发展状况	(169)
6.3	高压断路器的各种性能	(172)
6.4	真空断路器	(190)
6.5	SF ₆ 断路器	(196)
6.6	其他高压电器	(201)
	习题6	(230)
	参考文献	(231)



第 1 章

绪 论



1.1 电器的用途与分类

电器的用途非常广泛。无论是工业、农业和交通运输业，还是科研、军事领域，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。如在短路或严重过载时利用熔断作用而切断电路的保护电器的熔断器，利用电流热效应原理进行动作的一种保护电器、在电路中主要用于过载保护的热继电器及反映电路中电压变化的电压继电器等。电器的品种规格较多，分类方法也很多，具体如下。

(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、电磁铁等)和调节器(起动器、变阻器、电压调节器等)。

(2) 按电压高低区分，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)。

(3) 按结构工艺区分，有自动电磁元件(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)。

(4) 按元件与系统的关系区分，有配电器(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、起动器等)和弱电器(微型继电器、逻辑元件等)。

(5) 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)。

(6) 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。

1.2 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 1 000 kW 的发电能力，就需要 10 000 台高压断路器、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，下面介绍典型的电网线路，如图 1-1 所示。

图 1-1(a) 是高压电网示意图。发电机 G_1 和 G_2 发出的电能经断路器 QF、电流互感器 TA 和隔离开关 QS 输送到 10 kV 的母线上。此母线经隔离开关和熔断器 FU 连接电压互感器 TV，并经隔离开关、断路器和电抗器连接近处的电能传输线路。此外，10 kV 母线还经隔离开关、断路器及电流互感器连接升压变压器 TU，后者又经断路器及其两端的隔离开关连接到 220 kV 的母线上。与此母线连接的有：与熔断器串联着的电压互感器，通向电能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连接到 220 kV 母线上。另外，10 kV 及 220 kV 的母线还经隔离开关连接避雷器。

断路器的作用是在电力系统的正常工作条件下和故障条件下，分别接通与开断电路。熔断器的作用是对线路及其中的设备提供过载和短路保护。隔离开关的作用是在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。避雷器的作用是为高压线路提供过压保护。电抗器的作用是限制短路电流，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。

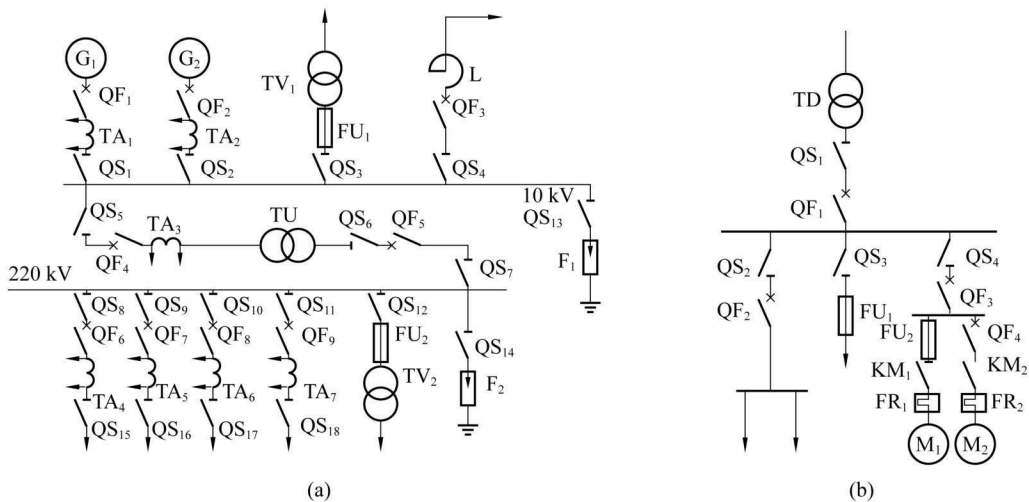


图 1-1 电网线路示意

(a) 高压电网；(b) 低压电网

图 1-1(b) 是低压电网线路示意图。高压电网输送来的电能经降压变压器 TD 转换为低压后，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连接动力配电盘的母线，或经刀开关和熔断器 FU 直接连接负载。两级母线之间的线路称为分支线路，连接负载的线路称为馈电线路。一条馈电线路经熔断器 FU_2 、接触器 KM_1 和热继电器 FR_1 连接负载 M_1 ，另一条馈电线路经断路器 QF_4 、接触器 KM_2 和继电器 FR_2 连接负载 M_2 。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，以保证维修时非故障线路的安全运行。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。

1.3 电器的主要参数和正常工作条件

根据工作电压的不同，电力系统有高压与低压之分。额定电压为 3 kV 及以上的系统称为高压电力系统，而额定电压为交流 1 200 V 及以下和直流 1 500 V 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，仅就一些共性的要求加以介绍。

1. 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性要求如下。

(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以额定电流、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，既不因其热效应使温度超过标准规定的极限值，又不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。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,且无须更换,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须修理或更换零件,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,在从保护继电器获得信号后,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。

2. 电器的正常工作条件

电器的正常工作条件如下。

(1)周围环境温度。当温度过低时,作为电介质和润滑剂的各种油的黏度将上升,影响电器的正常动作和某些电气性能。当温度过高时,电器的载流能力降低,也会导致密封胶渗漏等。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 $-30 \sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$,户内型为 $-5 \sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$;低压电器的使用环境温度为 $-5 \sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$,而且日平均不超过 $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。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,电器的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 $1\ 000\text{ m}$,低压电器为 $2\ 000\text{ m}$ 。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、绝缘件受潮和涂覆层脱落,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还有污染等级、振动、介质中是否含易燃易爆气体和是否有风霜雨雪天气等。

在选择和使用各种电器时,只有了解其正常的工作条件,才能保证其安全可靠地运行。

1.4 电器学的主要理论范畴

从前面的介绍可知，电器的工作原理多种多样，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。电器的理论基础是十分宽广的，但作为一个学科，电器学的理论范畴主要有以下 5 个方面。

1. 电器的发热理论

电器的发热理论的主要内容：电器的发热与冷却过程及热时间常数的概念；利用牛顿公式计算电器表面稳定温升；不同工作制下电器的热计算；电器的热稳定性等。

2. 电器的电动力理论

电器的电动力理论的主要内容：电动力的基本计算方法；单相正弦交流下电动力的计算；三相正弦交流下的电动力的计算；电器的电动稳定性等。

3. 电器的电弧理论

电器的电弧理论的主要内容：气体放电的物理过程；交直流电弧的特性和熄灭原理；基本的灭弧方法和装置等。

4. 电器的电接触理论

电器的电接触理论的主要内容：接触电阻、温升、振动、熔焊与侵蚀等重要现象的机理和计算问题；常用电接触材料等。

5. 电磁系统理论

电磁系统理论的主要内容：电磁系统计算的基本理论；气隙磁导的计算；交直流磁路的计算；电磁铁的特性及其与反力特性配合；电磁铁的设计方法等。

电器的基本理论还在不断充实、更新和发展之中。

1.5 电器的现状及发展

电器的发展是和电的广泛使用分不开的。强电领域和弱电领域都离不开电器。在强电领域，电器的控制对象可分为电网系统和电力拖动系统两大方面。

随着电网系统和电力拖动系统的不断发展,人们对电器提出了新的要求,既而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。

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必然趋势。近年来,低压电器在发展过程中出现了有触点与无触点结合的混合式电器,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,而无触点电器则与之相反。在同一执行机能中,有触点电器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。如果通断的过程由晶闸管无弧实现,而闭合、断开状态由触头来担当,就避免了晶闸管长期通电的发热问题,也解决了有触点电器的电弧问题。这种混合式接触器国外已有产品问世,国内也已经研制成功。

在电力网领域中,电器的发生和发展的演变过程相似。

在电器应用初期,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对过载和短路起保护作用。熔断器结构简单,但是只能一次操作;刀开关一般只能手动操作,不适宜远程操作,而且执行机能也弱,不能满足网络的要求。于是发展了执行机能和感测机能都较强的自动空气断路器。

20世纪50年代,随着低压电力网容量的扩大,短路电流从 10^4 A数量级增大到 10^5 A数量级。巨大的短路电流不仅使开关本身通断困难,还使串联在电网内的电工设备因热稳定和动稳定不足而受损。为了保证供电的可靠性,提高断流容量,低压电力网对配电器提出了限流要求,并随之研制出了限流熔断器和限流自动空气断路器。近年来,新的框架断路器和塑壳断路器不断推出,根据整个系统的需要,应同时考虑高指标、经济适用、缩小体积的要求,尽可能减小壳架规格,便于进行标准化设计。新开发的断路器均可带通信接口,可使系统达到最佳的配合,提高电网的安全性和可靠性。

进入21世纪以后,低压电器在技术上和功能上都有了很大的发展,各种继电器、接触器和断路器已经普遍采用了电子和智能控制。随着现代化设计技术、微机技术、微电子技术、计算机网络和数字通信技术的飞速发展,以及人工智能技术在低压电器中的应用,智能电器已经从简单的采用微机控制取代传统的继电控制功能的单一封闭装置,发展到具有完整的理论体系和多学科交叉的电器智能化系统。

对于高压电力网,由于电力系统对输变电的质量和可靠性要求提高,人们对高压设备的性能要求也越来越高。另外,由于基础理论、材料技术、生产设备和加工工艺的不断进步,高压开关设备的技术水平也有了长足的进步,并在许多方面突破了以往传统开关电器的概念,与几十年前相比,无论是在产品种类、结构形式、介质,还是在综合技术水平上都有很大差别。中华人民共和国成立之初,我国电压等级最高为220 kV,2009年1月,我国自主研发、设计和建设的首条1 000 kV特高压输电线路(晋东南—南阳—荆门)正式投运,成为世界上技术水平最高的电网之一。特高压工程的建设,也带动了电器行业整体

水平的提高。目前,高压电器正向着高压大容量、自能化、小型化、组合化、智能化和高可靠性方向发展。

随着电力系统工作电压的提高和输电容量的增加,出现了很多理论问题和技术问题。对短路而言,从经济性和可靠性的角度出发,都需要发展单元断口容量大、电压高的断路器。可见,对断路器的要求很高,多年来围绕高压断路器的许多问题,如灭弧方式、灭弧室结构、灭弧介质、开断性能及绝缘性能和操动机构等做了大量工作。高压断路器的结构演变主要就是灭弧原理与灭弧装置的变革,它经历了从多油灭弧到少油灭弧;从大压力压缩空气吹弧到负压力真空灭弧;从一般的空气、油气到 SF₆ 负电性气体灭弧等过程。不仅如此,自能式灭弧也是高压断路器的一个特点。自能式灭弧室就是最大限度地利用电弧自身的能量,使灭弧室建立起气吹熄弧所必需的压力,因而不需要操动机构提供很大的压缩功,自能式 SF₆ 断路器的操作功可降低为压气式的 20%。由于自能式断路器的操作功大大减小,可以采用低操作功的操纵机构(如弹簧操纵机构),这样,断路器的机械可靠性大大提高。另外,高压电器从户外式、户内式单独结构发展到 SF₆ 全封闭组合式结构,组合化后的进一步发展,一是在一次设备方面,如采用自能式断路器、设计新型隔离开关和接地开关等;二是在二次检测、控制设备和元件方面提高技术含量。电力设备是电网中非常重要的组成部分,为了满足智能电网和电力设备自身性能提高的需要,发展数字化电力设备已经成为趋势。这些都是高压电器技术发展的重要特点。

总而言之,由于电网系统和电力拖动系统的推动,电器产品和电器技术发展十分迅速。可以说,电器技术理论和电器产品结构正处于不断更新和全面提高的阶段。传统的有触点电器在结构原理,最佳结构设计和应用新材料、新工艺方面不断创新和完善,真空电器、半导体电器和其他新型器件,如微电子技术和电器结合的机电一体化电器或智能化电器也在发展中,单件电器向着组合化、成套化发展。分析电器发展史,展望今后的方向,对电器工业和电器科学技术的推进无疑是有益的。

习题1

1. 电器的定义是什么?
2. 电器的用途有哪些?
3. 电器的分类方式有哪些?
4. 电器的主要参数和正常工作条件有哪些?
5. 电器学的理论范畴包括什么?
6. 电器的现状是怎样的? 电器未来有什么前景?



第 2 章

电器的发热与电动力



2.1 概 述

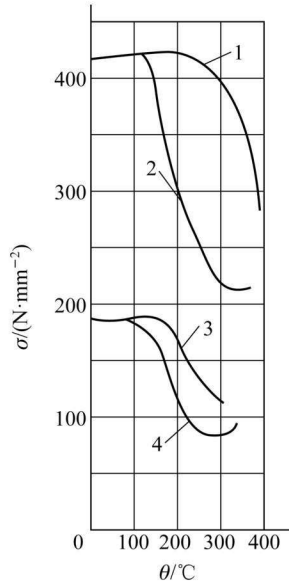
电器在工作时，电流通过导体并在导体中产生能量损耗。如果电器工作于交流线路，则由于交变电磁场作用，还会在铁磁体内产生涡流和磁滞损耗，并在绝缘体内产生介质损耗。所有这些损耗几乎全部转变为热能，一部分散失到周围介质中，一部分加热电器，使电器的温度升高。电器本身温度与周围环境温度之差称为电器的温升。我国国家标准规定，最高环境温度为 400 ℃。

如果电器的温升超过极限允许温升，将产生如下危害。

(1) 影响电器的机械性能。当金属材料的温度达到一定数值时，其机械强度会显著下降，如图 2-1 所示。材料的机械强度开始明显降低的温度称为软化温度，它不仅与材料有关，也与加热时间关。例如，裸铜导体在长期加热时的软化温度为 100 ~ 200 ℃，但当其处于短期加热的情况下时，它的软化温度会提高到 300 ℃左右。电器中裸导体的极限允许温度应小于材料的软化温度。

(2) 引起接触电阻剧烈增加，甚至发生熔焊。温度升高会加剧电器中电接触表面与其周围大气中某些气体之间的化学反应，使接触表面生成氧化膜及其他膜层，从而增大接触电阻，并进一步使接触表面的温度再次升高，形成恶性循环，最终导致接触表面发生熔焊。例如，当铜触头温度在 70 ℃以上时，接触电阻迅速增大。

(3) 导致绝缘材料的绝缘性能下降。当绝缘材料发热超过一定温度时，其介电强度将急剧下降，导致绝缘材料的绝缘性能下降，使材料逐渐变脆老化，甚至损坏。电器发热计算的目的是保证电器的温升不超过极限允许温升，这对于缩小电器的体积，节约原材料，降低成本，延长电器寿命等方面都具有指导意义。



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

图 2-1 导体材料机械强度与温度的关系

2.2 电器的极限允许温升

2.2.1 极限允许温升的表达形式

极限允许温升的表达式为

$$\text{极限允许温升} = \text{极限允许温度} - \text{起始温度 (周围环境温度)}$$

为了保证电器在工作年限内可靠工作，必须限制各种材料的发热温度，使其不超过一定的数值，这个温度就称为极限允许温度。

2.2.2 制订电器零部件极限允许温升的原则

制订电器零部件极限允许温升的原则如下：

- (1) 材料的机械强度及绝缘能力不受损害；
- (2) 电接触性能可靠。

从目前看，由于耐热能力高的绝缘材料不断出现，电器的极限允许温度较以前有所提升，但电接触的氧化又成为关键问题。我国标准将电气绝缘材料按耐热程度分为 7 级，其长期工作下的极限允许温度如表 2-1 所示。

表 2-1 电气绝缘材料的耐热分级

耐热等级	极限允许温度/℃	相当于该耐热等级的绝缘材料简述
Y	90	未浸渍过的棉纱、丝和纸等材料或组合物所组成的绝缘结构
A	105	浸渍过的或浸在液体电介质中的棉纱、丝和纸等材料或组合物所组成的绝缘结构
E	120	合成的有机薄膜、合成的有机磁漆等材料或其组合物所组成的绝缘结构
B	130	以合适的树脂黏合或浸渍、涂覆后的云母、玻璃纤维、石棉等，以及其他无机材料，合适的有机材料或其组合物所组成的绝缘结构
F	155	以合适的树脂黏合或浸渍、涂覆后的云母、玻璃纤维、石棉等，以及其他无机材料，合适的有机材料等
H	180	用硅有机树脂黏合的云母、玻璃纤维、石棉等材料
C	>180	以合适的树脂(如热稳定性特别优良的硅有机树脂)黏合或浸渍、涂覆后的云母、玻璃纤维、石棉等，以及未经浸渍处理的云母、陶瓷、石英等材料或其组合物所组成的绝缘结构(C级绝缘材料的极限允许温度应根据不同的物理、机械、化学和电气性能确定之)

2.3 电器的热源

电器的热源主要来自 3 个方面。

(1) 电流通过导体产生的电阻损耗。电阻可能的来源：导体的金属电阻、触点连接处的接触电阻、触头开断线路时出现的电弧电阻。

(2) 交流电器铁磁体内产生的涡流、磁滞损耗。

(3) 交流电器绝缘体内产生的介质损耗。

至于机械摩擦等产生的热能，与前 3 种热源相比是较小的，常常可以不予考虑。

2.3.1 电阻损耗

电流通过导体所产生的能量损耗称为电阻损耗(或称焦耳损耗)，其表达式为

$$P = K_f I^2 R \tag{2-1}$$

式中： K_f ——附加损耗系数。

K_f 是考虑交变电流趋肤效应和邻近效应对电阻的影响而引入的系数，即当导体中通过交变电流时，因趋肤效应和邻近效应而产生的附加损耗。附加损耗系数 K_f 为趋肤系数 K_j 和邻近系数 K_l 之积，即 $K_f = K_j K_l$ ，当导体中通过直流电时 $K_f = 1$ 。

趋肤效应是导体中通过交变电流时电流趋于表面的现象。图 2-2 所示为交变电流通过导体产生趋肤效应使导体内部电流分布不均匀的情况。阴影线所代表的导体截面中，导体内部(A 部分)相连的磁通为 Φ_1 和 Φ_2 ，导体外部(B 部分)相连的磁通仅为 Φ_2 。交变磁通在导体内感生反电动势，阻止原电流的流通，因中心部分反电动势比外表部分大，导致导体中心电流密度比外表部分小。

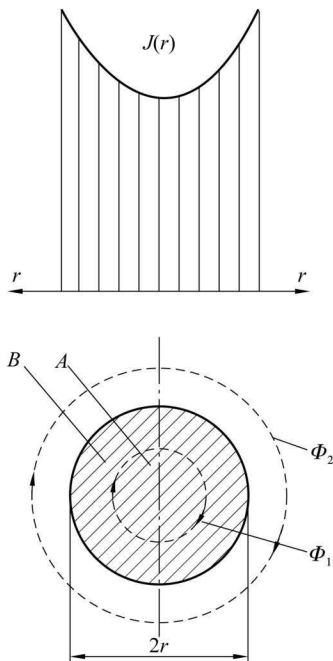


图 2-2 趋肤效应影响下导体内部电流密度的分布

趋肤效应可以用电磁波在导体内渗入的深度 b 来表示，即

$$b = \sqrt{\frac{\rho}{2\pi f\mu}} \quad (2-2)$$

式中： ρ ——导体材料的电阻率 ($\Omega \cdot m$)；

μ ——导体材料的磁导率 (H/m)；

f ——电流频率 (Hz)。

趋肤系数 K_j 的计算公式为

$$K_j = \frac{A}{L} \sqrt{\frac{2\pi f\mu}{\rho}} = \frac{A}{L} \cdot \frac{1}{b} \quad (2-3)$$

式中： A ——导体的截面积 (m^2)；

L ——导体的周长 (m)。

邻近效应是两相邻载流导体间磁场的相互作用使两导体内产生电流分布不均匀的现象。如果通过两相邻导体的电流方向相反，如图 2-3(a) 所示，则因一导体在另一导体相邻侧产生的磁场比非相邻侧产生的小，相邻侧感生的反电动势比非相邻侧小，故相邻侧的电流密度比非相邻侧的大；如果两相邻导体的电流方向相同，则相邻侧电流密度比非相邻