

华东交通大学教材（专著）出版基金资助项目

电器技术及控制

（第2版）

杨丰萍 李中奇 彭伟发 编著

西南交通大学出版社

· 成 都 ·

前 言

本书是“华东交通大学教材（专著）出版基金资助项目”资助教材，是作为具有铁路特色的电气工程专业的一门重要专业课的教材来编写的。为了使学生的就业面更广，既可以在铁路行业也可以在其他行业就业，本书涉及的知识点较多，包括电器学、常用电器、机车电器、电器的控制线路等知识，另外还有实验和课程设计部分，以培养学生发现问题、分析问题和解决问题的能力。可作为高等学校，特别是具有铁路背景的高等学校电气工程专业的教材，并可供从事电器生产和电气技术工作的工程技术人员参考。

本书力求理论联系实际，紧跟电器及其控制系统的发展趋势，在详细介绍电器基本理论知识的同时，将我国近年生产的电力机车新型电器，特别是大功率和谐型机车的新型电器收纳其中，强调针对性、实用性。全书起点适当、重点突出、难点分散，非常便利教学和自学；各章之间的组合采用积木式的结构，既可一脉相承，融为一体，也可分章独立，特别适合不同学时和不同层次各类读者学习。

本书由华东交通大学杨丰萍教授、李中奇教授和彭伟发讲师编著，书中第1章~第6章由杨丰萍教授编写；绪论、第7章、第10章由李中奇教授编写；第8章和第9章由彭伟发讲师编写。编写中保留了首版的思路和章节，修改了原来的小错误，删除了机车电气控制系统应用实例分析这一章，增加了某些低压电器如机车上会用到的电磁阀，更新了一些机车电器，增加了计算实例，采用了更好的控制线路图。编者在编写本书的过程中，得到领导、同事及研究生的大力支持和帮助，在此表示衷心的感谢！编写中参考了大量文献和资料，在此对有关单位和作者致谢！

本书作为高等学校电气类、自动化类以及机电类专业教材，使用课时范围可以在32~64学时，教师可根据实际情况选择教学、调整教学任务要求，进行教学内容的组织。

由于编者水平有限，书中不妥或错误之处在所难免，敬请广大师生和读者批评指正。

编 者

2022年5月

目 录

绪 论	1
0.1 电器的功能和分类.....	1
0.2 牵引电器的作用与分类.....	2
0.3 开关量自动控制系统.....	3
0.4 电器的发展方向	4
第 1 章 电器的热计算基础.....	7
1.1 电器的基本热源	7
1.2 电器的允许温度和温升.....	10
1.3 电器的散热及综合散热系数	13
1.4 热计算的基本原理.....	18
1.5 电器的发热工作制.....	20
1.6 短路时的发热过程.....	24
习题与思考题	25
第 2 章 电器电动力计算基础.....	27
2.1 概 述.....	27
2.2 计算电动力的两种基本方法	28
2.3 正弦电流产生的电动力.....	33
2.4 短路电流产生的电动力.....	35
2.5 电器的电动稳定性.....	37
习题与思考题	39
第 3 章 电弧理论及灭弧装置.....	40
3.1 电弧的形成过程	40
3.2 开断电路时电弧的产生、燃烧与熄灭.....	44
3.3 电弧的电位分布和特性.....	46
3.4 直流电弧的燃烧与熄灭.....	48
3.5 交流电弧及熄灭	51
3.6 灭弧装置	55
习题与思考题	58

第 4 章 电接触	60
4.1 电接触与触头	60
4.2 触头接触电阻及其影响因素	62
4.3 触头的发热及热稳定性	66
4.4 触头的电动力及电动稳定性	68
4.5 触头的电侵蚀	69
4.6 触头的振动与熔焊	71
4.7 触头材料	73
习题与思考题	76
第 5 章 电磁机构理论	77
5.1 概 述	77
5.2 磁场与磁路	78
5.3 气隙磁导的计算	83
5.4 不计漏磁时无分支直流磁路计算	91
5.5 交流磁路计算	93
5.6 电磁吸力计算	97
5.7 交流电磁机构的电磁力与分磁环原理	100
5.8 电磁机构静态特性	102
5.9 电磁机构的动态特性	104
习题与思考题	108
第 6 章 常用低压电器	109
6.1 概 述	109
6.2 刀开关	110
6.3 熔断器	112
6.4 低压断路器	115
6.5 接触器	120
6.6 继电器	126
6.7 主令电器	142
6.8 电磁阀	148
6.9 智能控制电器	153
习题与思考题	160
第 7 章 牵引电器	162
7.1 概 述	162
7.2 受电弓	164

7.3	空气主断路器	170
7.4	真空断路器和接地开关	176
7.5	司机控制器	183
7.6	电空阀	189
7.7	电空接触器	191
7.8	交-直流电磁接触器	193
7.9	扳键开关	197
7.10	避雷器	200
7.11	高压连接器	201
	习题与思考题	204
第 8 章	电器控制典型环节及应用实例分析	205
8.1	电气控制电路中常用的图形及文字符号、绘图准则、读图方法	205
8.2	电器控制系统的基本环节	217
8.3	三相交流异步电动机控制线路	230
8.4	电器控制系统在机床等设备的应用实例分析	246
	习题与思考题	258
第 9 章	电气控制系统设计	261
9.1	电气控制系统设计的基本内容	261
9.2	电气控制系统设计的基本原则	262
9.3	电力拖动电动机的选择	270
9.4	常用控制电器及保护电器的计算与选择	274
9.5	电气控制系统设计方法	280
9.6	电气控制系统的工艺设计	288
	习题与思考题	292
第 10 章	电气控制实验与课程设计	294
10.1	用电安全	294
10.2	电气控制系统的安装与调试	295
10.3	电气控制系统的故障分析与处理	298
10.4	电气控制系统实验	299
10.5	电气控制系统课程设计	312
	参考文献	331

绪 论

0.1 电器的功能和分类

0.1.1 电器的功能

电器是一种能根据外界的信号和要求，手动或自动地接通、断开电路，断续或连续地改变电路参数，以实现电路或非电对象的切换、控制、保护、检测、交换和调节用的电气设备。

简单地说，电器是用电的一种控制工具。控制作用就是自动或手动接通或断开电路，使电路中的电流“通”或“断”，“通”也称为“开”，“断”也称为“关”。因此“开”和“关”是电器最基本、最典型的功能。

0.1.2 电器的分类

电器的种类很多，分类方法也各不相同，下面介绍的是一般常见的电器分类方法。

1. 按工作职能分类

- (1) 手动操作电器：刀开关、转换开关、控制按钮等。
- (2) 自动控制电器：自动开关、接触器、继电器等。
- (3) 其他电器：起动与调速电器、稳压与调压电器、牵引与传动电器、检测与变换电器等。

2. 按电压高低分类

- (1) 低压电器（交流 1200 V 或直流 1500 V 以下）：如低压断路器、刀开关、转换开关、接触器、起动器、控制器、继电器、低压熔断器、电阻器、变阻器、主令电器等。
- (2) 高压电器（高于交流 1200 V 或直流 1500 V）：如高压断路器、隔离开关、负荷开关、接地断路器、高压熔断器、高压互感器、避雷器、高压电抗器等。

3. 按电器配置分类

- (1) 单个电器。
- (2) 成套电器和自动化装置：如高压开关柜、低压开关柜、自动化继电保护屏、可编程程序控制器、半导体逻辑控制装置、无触点自动化成套装置。

4. 按电器有无触点分类

- (1) 无触点电器：电器通断电路的执行功能由触头来实现的电器。
- (2) 有触点电器：电器通断的执行功能不是由触头来实现的，而是根据开关元件输出信

号的高低电平来实现，如晶闸管。其特点是无弧通断电路、动作时间快、电寿命和机械寿命长、无噪声等。

无触点电器目前还不能完全切断电流，不如有触点电器那样对电源起隔离作用。对此，须引入转换深度的概念。所谓转换深度就是断开（或截止）时执行电路的电阻值与接通（或导通）时执行电路的电阻值之比，可用 h 表示。有触点电器 h 为 $10^{10} \sim 10^{14}$ ，而无触点电器 h 约 $10^4 \sim 10^7$ 。

（3）混合式电器：无触点和有触点相结合相辅相成的电器新品种，它有着广阔的发展前途，如低压断路器采用半导体脱钩器，高压断路器应用微型计算机控制的智能断路器等。

5. 按应用系统分类

（1）电力系统用的电器：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、电动稳定性和热稳定性高，操作过电压低和保护性能完善等。

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

（3）通信电路系统用的电器：如微型继电器、舌簧管、磁性或晶体管逻辑元件等。对这类电器的主要技术要求是作用时间快、灵敏度高、抗干扰能力强、特性误差小、寿命长和工作可靠等。

6. 按应用场合分类

（1）一般工业用电器：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：适用于农村工作环境而专门生产的电器。

（4）其他场合用电器：如航空、船舶、铁路牵引等使用的电器。

0.2 牵引电器的作用与分类

牵引电器是电传动机车车辆上所用的受流器、高压和低压断路器、熔断器、互感器、电抗器、电阻和变阻器、牵引-制动转换开关、反向器、接触器、继电器、司机控制器等电气设备。

0.2.1 牵引电器的作用

牵引电器用以对牵引电动机、牵引发电机、电力传动装置、柴油机以及其他辅助电动机和机械等进行切换、控制、检测、调节和保护，使电传动机车车辆上的各种机组能正常和协调地工作，确保安全地完成运输任务。

0.2.2 牵引电器的分类

根据其特殊情况，牵引电器有以下特有的分类方法：

(1) 按电力机车电器所接入的电路可分为：① 主电路电器——使用在电力机车主电路中的电器。如受电弓、主断路器、高压连接器、高压互感器、避雷器和转换开关等。② 辅助电路电器——使用在电力机车辅助电路中的电器。如接触器、自动开关、刀开关等。③ 控制电路电器——使用在电力机车控制电路中的电器。如司机控制器、继电器、按钮开关、转换开关等。

(2) 按电器在电力机车中的用途可分为：① 控制电器——用于对电力机车上牵引设备进行切换、调节的电器。如司机控制器、接触器、继电器、按钮开关、转换开关、刀开关等。② 保护电器——用于保护电力机车上电气设备不受过电压、过电流及保护其他设备不受损害的电器。如避雷器、自动开关、熔断器、接地及过载继电器、风压及风速继电器、油流继电器等。③ 检测电器——用于与其他设备配套，检测电力机车各电路电压、电流及机车运行速度等的电器。如互感器、传感器等。

受流器——用于电力机车从接触电网上取得电能的电器。如受电弓。

(3) 按电流种类可分为直流电器、交流电器。

(4) 按电路电压高低可分为高压电器、低压电器。

(5) 按传动方式可分为手动电器、电磁式电器、电空传动电器、机械传动电器和电动机传动电器。

(6) 按执行机构可分为有触点电器、无触点电器和混合式电器。

0.3 开关量自动控制系统

0.3.1 开关量自动控制系统按开关元件分类

(1) 有接点逻辑元件系统：即通常所说的继电-接触式自动控制系统。

(2) 无接点逻辑元件系统：由分立元件的逻辑电路组成的控制系统。

(3) 数字集成电路控制系统：由工业中常用的 HTL, CMOS 和 PMOS 等逻辑族的数字集成电路逻辑门组成的控制系统。这种控制系统往往不能独立组成开关量自动控制系统，而常常出现在顺序控制的逻辑运算和控制部分。

0.3.2 开关量自动控制系统按程序特征分类

(1) 固定（死）程序系统：控制系统的工步顺序、间隔和内容固定不变的系统，如继电-接触式控制系统。

(2) 可变（活）程序系统：指当加工工艺或生产过程经常需要改变时，控制系统的工步顺序、间隔和内容很容易随之改变以满足新的工艺要求。这种可以灵活地变更程序的系统称为活程序或可变程序系统，实现活程序控制的理想工具便是顺序控制器。

在工业自动控制技术中，按照预先规定的程序或条件，对控制过程各阶段按顺序地进行自动控制的方式叫作顺序控制。所谓顺序，就是控制过程中由逻辑功能所决定的信息传递与

转换所具有的次序。一般说来，所有的开关量自动控制系统都具有顺序控制的特性。但是，各类开关量自动控制系统并不都称为顺序控制器，顺序控制器一般指用于顺序控制生产过程的、并且可以变更程序内容或备有存储程序的数字或模拟式的自动控制装置。顺序控制器属于活程序系统，而继电—接触式控制系统则是死程序系统，所以它不叫顺序控制器，

在计算机已出现并在工业中得到广泛应用的今天，可编程序控制器仍然得到迅速的发展，很快占领了从继电器固定逻辑控制到计算机之间的开关量自动控制领域。这是由于可编程序控制器有着显著优点。其主要特点是：编制程序和改变程序方便，通用性和灵活性强，原理简单易懂，工作比较稳定可靠，使用和维修方便，装置体积小，造价低，设计和制造周期短，容易做到规范化、系列化，便于批量生产。

0.4 电器的发展方向

近年来，随着计算机、电子学、电弧等离子物理、信息和网络以及材料科学的发展，使得低压电器的发展更迅速便捷、更先进、更全面，主要体现在以下几个方面。

0.4.1 电器的智能化

1. 智能电器的定义

关于智能电器的定义或阐释已有很多，如：智能电器是指能自动适应电网、环境及控制要求的变化，始终处于最佳运行工况的电器。这里从构成智能电器的核心部件及其功能出发，给出智能电器的定义：智能电器是以微控制器/微处理器为核心，除具有传统电器的切换、控制、保护、检测、变换和调节功能外，还具有显示、外部故障和内部故障诊断与记忆、运算与处理以及与外界通信等功能的电子装置。智能电器的核心部件为微控制器/微处理器，与传统电器相比，智能电器的功能有“质”的飞跃；智能电器是电子装置，而传统电器是电气设备；具有现场总线接口以实现可通信/网络化是现代智能电器的重要特征和主要发展趋势。

2. 智能电器的关键技术

(1) 电子技术。运用电子器件设计和制造某种特定功能的电路以解决实际问题的科学，包括信息电子技术和电力电子技术两大分支。

(2) 微处理器及其接口技术。微处理器及其接口技术主要包括微处理机/微控制器的硬结构，指令系统、中断系统、定时器/计数器、串行口、程序、数据存储器扩展，I/O 接口的扩展设计技术，D/A、A/D 的接口设计技术。

(3) 检测与转换技术。检测技术是人们为了检测对象所包含的信息进行定性了解和定量掌握所采取的一系列技术措施，它对多种参数进行长期动态检测，加强故障预防，可采用计算机处理检测信息，进行分析、判断，采取相应措施。

(4) 数字信号处理技术。数字信号处理技术是指数字信号处理理论的应用实现技术，它以数字信号处理理论、硬件技术、软件技术为基础组成，研究数字信号处理算法及其实现方法，数字信号处理技术主要涵盖了数字滤波器的原理、构成与设计，信号的描述及其分类，

连续时间信号的采样，信号的分解等方面。

(5) 现场总线技术。现场总线是当今 3C 技术，即通信、计算机、控制技术发展的结合点，是电气工程与自动化领域技术发展的热点之一。具备系统的开放性、互可操作性与互用性、现场设备的智能化与功能自治性、对现场环境的适应性的优点。现场总线具有适应了供配电系统向智能化、网络化、分散化发展的趋势，呈现了强大的生命力，其应用正日益增长。

(6) 高级语言编程技术/数据库技术。在构建智能供配电系统等现场总线系统时需用到数据库技术/高级语言编程技术。换言之，在当代科学技术的背景下，计算机技术在电气产业得到了越来越多的应用。

3. 智能电器发展趋势

(1) 智能电器市场化。将智能电器制成相对独立的通用性产品，使其适用范围不仅限于开关、保护作用。随着 CPU 技术不断进步和发展，20 世纪末，一些著名的大公司纷纷推出新一代的智能型可通信的低压断路器，比如施耐德公司 (Schneider) 的 C65N 3P C6A。西门子公司推出的 SENTRONWL/VI 较以前的产品也有了很大的提高。在网络连接方面，具有 Profibus-DP、CubicleBUS、以太网、RS-232C 等多种总线接口 (Cubicle-BUS 为断路器内部数据总线) 的智能电器产品也都值得一提。

(2) 智能电器的通信。电器结合当前的嵌入式系统，采用微处理器，具有很强的适应性和可升级性，基于现场总线的智能电器数据通信技术，为企业搭建信息数据平台，实现智能电器的通信。现在一些主要断路器大多采用协议转接方法对以太网进行支持。DeviceNet 是一种基于 CAN 的开放的现场总线标准。DeviceNet 协议最基本的功能是在设备及其相应的控制器之间进行数据交换。因此，这种通信是基于面向连接的 (点对点或多点传送) 通信模型建立的。这样，DeviceNet 既可以工作在主从模式，也可以工作在多主模式。

(3) 智能电器模块化。模块式结构给产品设计、制造及市场适应能力带来了许多好处，诸如降低产品设计、制造和新产品开发的复杂性，增强了功能扩展，维护更加方便。例如 SCHNEIDER 公司的 Masterpact 系列断路器支持 Modbus 和 BatiBUS，同时还提供用于连接 ofibus 和以太网的外置网络模块，这些有前瞻性的产品都预示了电器未来的发展方向。

0.4.2 设计与开发手段的现代化

由于市场竞争，目前国内外一些电器工厂正致力于产品开发手段的现代化，以缩短产品开发周期，提高产品质量，降低成本。产品开发手段的现代化主要体现在以下两个方面：① 三维计算机辅助设计与制作软件系统的引进；② 电器通断特性的计算机仿真技术及其发展。

随着计算机技术的发展，电器产品的计算机辅助设计正从二维转向三维，标志着辅助设计技术进入了一个新阶段。传统的二维设计软件仅能解决计算机制图问题，而三维设计系统集成设计、制造和分析于一体，让设计者在三维空间内完成零部件的设计和装配，并在此基础上自动生成图纸，完成零部件的自动加工工艺并生成相应的代码，实现了设计与制造的自动化和优化。

目前，国外一些著名的电气公司已广泛采用三维设计系统来开发产品，如德国的金钟-默勒公司、日本的三菱公司等。20 世纪 90 年代初首先由常熟开关厂依靠 UG 三维设计系统开发

CMI 系列高分断性能的塑壳断路器获得成功，从而带动国内其他生产厂家纷纷引进这种新技术。目前该技术已在国内不少工厂开花结果。

0.4.3 环保材料的广泛使用

随着工农业的发展，环境保护问题日趋严重，这对大量使用的低压电器提出了新的要求。如低压电器中几乎 80% 的材料是塑料，塑料常作为低压电器的外壳使用，对这些材料来说，一方面要保证长的寿命和电器本身的工作可靠性，还应考虑环保要求，即无污染，并且可以回收。再如，长期以来，由于银氧化镉 AgCdO 有较好的耐电弧腐蚀能力，因而在低压电器中作为控制电器的触点材料得到了广泛的应用。但由于 AgCdO 材料有毒，近年来，从环保要求出发，人们以 AgSnO_2 代替 AgCdO 。由于新型材料的采用和推广，使得低压电器在其应用的过程中更可靠、更环保。

0.4.4 结构设计的模块化、组合化、模数化和零部件通用化

当前低压电器在结构设计上广泛采用模块化、组合化、模数化和零部件通用化。模块化使电器制造过程大为简便，通过不同模块积木式的组合，使电器可获得不同的附加功能。组合化使不同功能的电器组合在一起，有利于使电器结构紧凑，减少线路中所需元件品种，并使保护特性得到良好配合。模数化使电器外形尺寸规范化，便于安装和组合。不同额定值或不同类型电器实行零部件通用化，对制造厂家来说，将大大减少产品开发和生产的费用，对用户来说，也便于维修和减少零部件的库存量。

第 1 章 电器的热计算基础

1.1 电器的基本热源

电器在工作过程中，电流通过导体产生电阻损耗，铁磁体在交变磁场作用下产生磁滞和涡流损耗，绝缘体在交变电场作用下产生介质损耗。损耗变换为热能使电器发热，称为电器的基本热源。至于机械摩擦、撞击损耗等产生的热源，与基本热源相比是较小的，常常不予考虑。

1.1.1 导体通过电流时的电阻损耗

根据楞茨-焦耳定律，当导体通过电流 I 时，电阻损耗为：

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

式中 R ——导体电阻 (Ω)；

t ——通电时间 (s)。

此公式既适用于直流，也适用于交流（将 I 理解为交流的有效值）。当电流和电阻均不变时，则：

$$W = I^2 R t = I^2 \rho \frac{l}{S} t \quad (\text{J}) \quad (1-2)$$

式中 ρ ——导体材料的电阻率 ($\Omega \cdot \text{m}$)；

l ——导体长度 (m)；

S ——导体截面积 (m^2)。

通常导体电阻随温度升高而增加，即：

$$R = R_0 (1 + \alpha \theta + \beta \theta^2 + \dots) \quad (1-3)$$

式中 R_0 ——在 0°C 时的导体电阻 (Ω)；

α 、 β ——电阻温度系数。

电阻损耗功率为：

$$P = \frac{W}{t} = I^2 R \quad (\text{W}) \quad (1-4)$$

1. 集肤效应

当导线通以交流时，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 1-1 所示，因为交流电流通过导体建立交流磁通，导体中心部分 (A 部分) 匝链的磁通为 Φ 和

Φ_2 ，导体表面（B 部分）匝链的磁通仅为 Φ_2 ，较其表面部分多，交变磁通感应电势和电流用以阻止原电流流通，因而使导体中心部分电流密度减小，导体表面部分电流密度增大，产生所谓集肤效应。

交流电流通过导体时，单位长度的电阻损耗功率为：

$$P_N = \int_S j^2 \rho dS = I_N^2 R_N \quad (\text{W/m}) \quad (1-5)$$

式中 j ——实际电流密度 (A/m^2)；

I_N ——交流电流有效值 (A)；

R_N ——导体单位长度交流等效电阻 (Ω/m)。

直流电流通过导体时（电流密度分布均匀）单位长度的电阻损耗功率为：

$$P_S = j_S^2 \rho S = I_S^2 R_S \quad (\text{W/m}) \quad (1-6)$$

式中 j_S ——直流电流密度 (A/m^2)，它分布均匀；

I_S ——直流电流 (A)，为便于比较，取其值与交流电流有效值相同；

R_S ——导体单位长度直流电阻 (Ω/m)。

集肤效应的强弱可用集肤效应系数来衡量。集肤效应系数是指 P_N 与 P_S 之比，即：

$$K_j = \frac{P_N}{P_S} = \frac{\int_S j^2 \rho dS}{j_S^2 \rho S} = \frac{I_N^2 R_N}{I_S^2 R_S} = \frac{R_N}{R_S} \quad (1-7)$$

导体集肤效应越强，有效截面积越小，等效电阻越大，集肤效应系数也越大。集肤效应系数恒大于 1。

2. 邻近效应

当两导体平行且靠得较近时，导体中的交流电流建立的交流磁通彼此耦合，使导体截面上的电流分布不均，这种现象称为邻近效应。如图 1-2 (a) 所示，如果两相邻导体中的电流方向相同，则因一导体在另一导体相邻侧产生的磁场比非相邻侧的大，相邻侧感生的反电势也比非相邻侧的大，故相邻侧的电流密度比非相邻侧的小。如图 1-2 (b) 所示，若两导体电流方向相反，相邻侧电流密度必比非相邻侧的大。

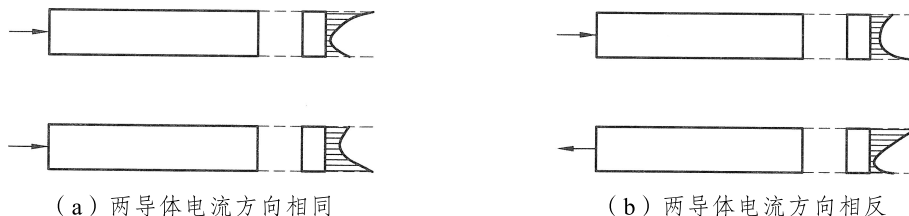


图 1-2 邻近效应对电流分布的影响

邻近效应的强弱也可用邻近效应系数 K_l 来衡量。邻近效应系数也是指 P_N 与 P_S 之比， P_N 为仅考虑邻近效应时，交流电流通过单位长度的导体电阻损耗功率； P_S 为直流电流通过导体时，单位长度的电阻损耗功率。

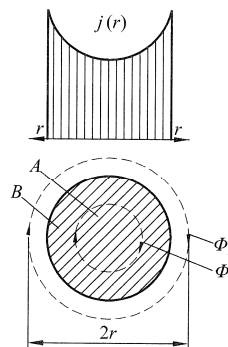


图 1-1 集肤效应影响下导体内部电流密度的分布

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，其值亦可以从有关的书籍及手册中查得。邻近效应系数值通常也大于 1，但较薄的矩形母线宽边相对时，邻近效应部分补偿了集肤效应的影响，改善了电流的分布，故 K_l 值略小于 1。

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，也就是有了附加损耗，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_f ，交流附加损耗系数是集肤效应系数与邻近效应系数的乘积，即：

$$K_f = K_j K_l \quad (1-8)$$

集肤效应和邻近效应使电流分布不均，导体有效截面面积减小，有效电阻增大。因此，附加损耗系数 K_f 总是大于 1。所以计算交流电流通过导体所产生的电阻损耗功率，其量值为：

$$P = K_f I^2 R \quad (\text{W}) \quad (1-9)$$

1.1.2 磁滞、涡流损耗

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

$$P_{Fe} = P_n + P_e \quad (1-10)$$

其中

$$P_n = K_n \left(\frac{f}{100} B_m \right)^{1.6} \rho V \quad (B_m \leq 1 \text{T}) \quad (1-11)$$

或

$$P_n = K_n \left(\frac{f}{100} B_m \right)^2 \rho V \quad (B_m > 1 \text{T})$$

$$P_e = K_e \left(\frac{f}{100} B_m \right)^2 \rho V \quad (1-12)$$

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 ——铁磁质零部件的体积，

K_n 、 K_e ——磁质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。

准确计算铁损是非常复杂的，通常进行近似估算。铁损也可从工厂提供的产品样品中查得。

1.1.3 电介质损耗

电介质在交变电场作用下的损耗功率 P_d 为：

$$P_d = 2\pi f C U^2 \tan \delta \quad (1-13)$$

式中 C ——电介质的电容；

U ——施加在电介质上的电压；

δ ——电介质的介质损耗角。

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。 $\tan \delta$ 是电介质材料的重要特性和参数。高频及高压技术所用绝缘材料的 $\tan \delta$ 值一般在 $10^{-3} \sim 10^{-4}$ 之间。这类数据亦可从有关资料中查得。 $\tan \delta$ 大的材料，介质损耗也大，理论上 $\tan \delta$ 按下式计算：

$$\tan \delta = R_i / X_C = R_i \omega C \quad (1-14)$$

式中 R_i ——绝缘电阻；

X_C ——容抗， $X_C = \frac{1}{\omega C}$ 。

在低压电器中，电压 U 很低，电介质中的电场强度不大，电介质损耗很小，通常不考虑。

在高压电器中，电压 U 很高，电介质中的电场强度很大，必须考虑电介质损耗及其产生的热量，以免引起过热而使绝缘老化加速，甚至引起热击穿而损坏。

1.2 电器的允许温度和温升

电器在运行中会产生各种损耗，大部分会转变为热能，其中一部分散发到周围介质，另一部分加热电器的零部件，使其温度升高。

金属载流体的温度超过某一极限值后，其机械强度明显下降。如此，轻则发生形变，影响电器的正常工作；重则使电器损坏，进而影响电器所在系统的工作。材料的机械强度开始明显降低的温度点称为软化点，它不仅与材料品种有关，而且与加热时间的长短有关。图 1-3 所示为导体材料机械强度 σ 与温度 θ 的关系，其中曲线 1 为冷拉铜线迅速加热 10 s 时的 $\sigma = f(\theta)$ 曲线，曲线 2 是冷拉铜线缓慢加热 2 h 的变化规律。由两曲线可知，缓慢加热时铜的软化点在 $100 \sim 200^\circ\text{C}$ ，而迅速加热时可达 300°C 。这说明迅速加热、发热时间很短时，电器零部件的发热温度极限比缓慢加热、发热持续时间很长时要高得多。因此，通常规定短路故障时电器零部件的发热温度极限比正常负载时要高得多。图 1-3 中曲线 3 表示铝线迅速加热 10 s 时的机械强度 σ 随温度 θ 的变化规律，曲线 4 表示铝线缓慢加热 2 h 的机械强度 σ 随温度 θ 的变化规律。

温度升高会加剧电接触连接表面和周围大气中某些气体间的化学反应，生成氧化膜和其他膜层，会引起接触电阻增加，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。

绝缘材料温度过高、发热持续时间过长会迅速老化，缩短使用寿命，甚至使介质损耗增加，发热更厉害，导致其介电强度下降，严重时引起击穿而损坏。故绝缘材料的极限允许温度同样要受到限制。根据 JB794—66 将电气绝缘材料按耐热程度分为 7 级，其长期工作下的

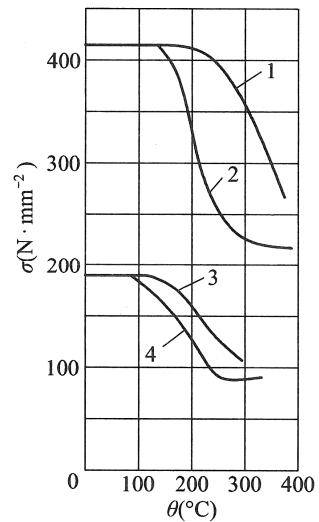


图 1-3 $\sigma = f(\theta)$ 特性曲线

极限允许温度见表 1-1，材料在该温度下能工作 2000 h 而不致损坏。

表 1-1 电气绝缘材料的耐热等级

耐热等级	极限温度 $\theta/^\circ\text{C}$	材料举例
Y	90	未浸渍过的棉纱、丝、绝缘纸板等
A	105	浸渍处理过的（或浸在油中的）棉纱、丝、绝缘纸板等，Q 牌号漆包线
E	120	合成的有机薄膜、有机磁漆等材料，QQ、QA、QH 牌号漆包线
B	130	以合适的树脂黏合或浸渍、涂覆后的云母、玻璃纤维、石棉以及其他无机材料，合适的有机材料等，QZ 牌号漆包线
F	155	以耐热高于 B 级 25°C 的树脂黏合或浸渍的云母、玻璃纤维、石棉以及其他无机材料、合适的有机材料等，QZY 牌号漆包线
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有硅有机树脂）黏合或浸、涂覆后的云母、玻璃纤维等，以及未经浸渍处理的云母、陶瓷、石英等无机材料和聚四氟乙烯、聚酰亚胺薄膜，QY、QXY 牌号漆包线（C 级绝缘材料的极限温度应根据不同的物理、机械、化学和电气性能确定之）

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作为指标。温升 τ 是指零部件温度 θ 与周围介质温度 θ_0 之差，即

$$\tau = \theta - \theta_0 \quad (1-15)$$

我国的国家标准、部颁标准和企业标准中，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。

极限允许温升（温度）分为两类：一类是电器长期运行时的极限允许温升及间断长期或反复短时工作制时的极限允许温升。在 GB1497—85 中规定了低压电器部件的极限允许温升，其值如表 1-2 所示，其中线圈在空气中的极限允许温升是按年平均温度为 20°C 使用条件下推荐，其余零部件的极限允许温升是按周围空气温度上限不超过 40°C 来确定的。

表 1-2 低压电器零部件的极限允许温升

部件及材料		极限允许温升/ $^\circ\text{C}$
触头	铜	不间断工作制 45 其他工作制 65
	银或镶银片 其他金属或陶冶合金	以不损害相邻部件为限 由所有金属性质决定
	裸铜 裸黄铜 钢（或黄铜）、镀锡 铜（或黄铜）、镀银或镀镍 铝、镀锡 铝、镀银	60 65 65 70 55 60
接线端子		

续表

部件及材料			极限允许温升/°C
线圈	无绝缘裸导线		以不损害相邻部件为限
	A 级绝缘		85
	E 级绝缘		100
	B 级绝缘		110
	F 级绝缘		135
	H 级绝缘		160
易近部件	操作手柄	金属	15
		非金属	25
	可触及但不握持部件	金属	30
		非金属	40
	正常操作时不触及部件	金属	40
		非金属	50
其他	油中所有部件		65
	油的上部		60
	与绝缘材料接触的金属部件		以不引起绝缘材料损害为限
	起弹簧作用的部件		以不伤害弹簧性为限
	电阻元件		由所用材料决定

另一类是电器在短时通过短路电流时，其载流导体在短时发热条件下的极限允许温度，其值可以比长期工作时的极限允许温度高些。虽然在各类标准中对电器载流体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 1-3 规定为准则。

表 1-3 短路时短时极限允许温度

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

校核电器载流体部件的热稳定性——电器能够短时承受短路电流的热效应而不致损坏的能力，就是以不超过表 1-3 所规定的温度极限为准。

电器零部件工作时的温度应不超过其规定的温度极限，否则会降低工作可靠性，缩短使用寿命，甚至会烧损而导致严重故障。但各零部件的工作温度也不应过低，因为温度过低说明没有充分利用，导致电器体积大、耗材多、成本高。因此，热计算对于缩小体积、减轻重量、节省材料、降低成本以及提高工作可靠性、延长使用寿命等方面都具有重要意义。

1.3 电器的散热及综合散热系数

电器中损耗的能量转换为热能后，有一部分散失到周围的介质中。电器的散热方式有热传导、对流和辐射。发热和散热同时存在于工作的电器中。热计算的目的是充分利用材料而又不使电器及其零部件过热。既要减少损耗和发热，又要增强散热。

1.3.1 热传导

热传导是发热体的热量由较热部分向较冷部分传播，或由发热体向与它接触的物体传播。热传导是固体传热的主要方式，也可在气体和液体中进行。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

$$\lim_{\Delta n \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta\theta}{\Delta n} \right) = \frac{d\theta}{dn} \quad (1-16)$$

根据傅里叶定律， dt 时间沿等温面 S 的法向 n 经热传导传播的热量 dQ 与该面积 S 及温度梯度成正比，即：

$$dQ = -\lambda S \frac{d\theta}{dn} dt \quad (1-17)$$

式中 λ ——传热系数或热导率。

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，故式（1-17）中有一负号。

单位时间通过等温面 S 的热量称为热流，用 ϕ 表示，则

$$\phi = \frac{dQ}{dt} = -\lambda S \frac{d\theta}{dn} \quad (1-18)$$

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，用 ϕ_0 表示即

$$\phi_0 = \frac{1}{S} \frac{dQ}{dt} = -\lambda \frac{d\theta}{dn} \quad (1-19)$$

热导率 λ 表示物体的传热能力，其单位为 $W/(m \cdot ^\circ C)$ 。它相当于沿热流方向单位长度上的温差为 $1^\circ C$ 时，在单位时间内通过单位面积的热量。一般来说，热导率会随温度而变化：

$$\lambda = \lambda_0(1 + \beta_\lambda \theta) \quad (1-20)$$

式中 λ_0 ——发热体温度为 $0^\circ C$ 时的热导率；

θ ——发热体的温度；

β_λ ——热传导温度系数。

热导率与物体材料的性质、结构、容积、重量、温度、压力、湿度等许多因素有关，其值范围很广，由试验所得的大致数据如表 1-4 所示。一般说来，金属的传热系数最大，非金属次之，液体和气体最小。

表 1-4 物质的热导率 λ

材料名称	λ / [W / (m·°C)]	材料名称	λ / [W / (m·°C)]
胶纸板	0.14	石棉板	0.74
电工纸板	0.18	铜	392
变压器油	0.13	银	420
浸油电工纸板	0.26	铝	204
棉织物 (未浸)	0.07	硅铝合金	160
棉织物 (浸漆)	0.11	钨	160
棉织物 (浸油)	0.09	黄铜	102
瓷	1.05	铸铁	50
玻璃钢	0.40	钢	46

现列举厚度为 δ 的无穷大单板的热传导做最简单的热传导计算实例。如图 1-4 所示,单板的面积为 S , 厚度为 δ , 左侧温度为 θ_1 , 右侧温度为 θ_2 , 并且 $\theta_1 > \theta_2$, 根据式 (1-19), 单位时间内通过单位等温面的热流密度 Φ_0 为:

$$\Phi_0 = \frac{1}{S} \cdot \frac{dQ}{dt} = -\lambda \frac{d\theta}{dn} = -\lambda \frac{d\theta}{dx} \quad (1-21)$$

式 (1-21) 移项积分得:

$$\theta = -\frac{\Phi_0}{\lambda} x + C \quad (1-22)$$

式中, C 为积分常数, 由边界条件确定, 即: 当 $x = 0$ 时, $\theta = \theta_1$, 则 $C = \theta_1$ 。

当 $x = \delta$ 时, $\theta = \theta_2$, 代入上式得:

$$\theta_1 - \theta_2 = \frac{\Phi_0}{\lambda} \delta \quad (1-23)$$

在无穷大平面的简单情况下, 温度 θ 沿厚度 δ 的变化是线性的。

通过 S 面的热流 $\Phi = \Phi_0 S$, 由式 (1-23) 得:

$$\theta_1 - \theta_2 = \frac{\Phi_0 S}{\lambda S} \delta = \Phi \frac{\delta}{\lambda S} = \Phi R_T \quad (1-24)$$

即 $\tau = \Phi R_T \quad (1-25)$

其中, $R_T = \frac{\delta}{\lambda S}$ 为热阻。

式 (1-25) 为热传导公式, 与电学中欧姆定律有类似之处, 而且通过与电学比较, 热传导现象中的各个量都可以在电学中找出对应量来, 热参数与电参数的对照表参见表 1-5, 以便将电路计算方法用来计算发热问题。

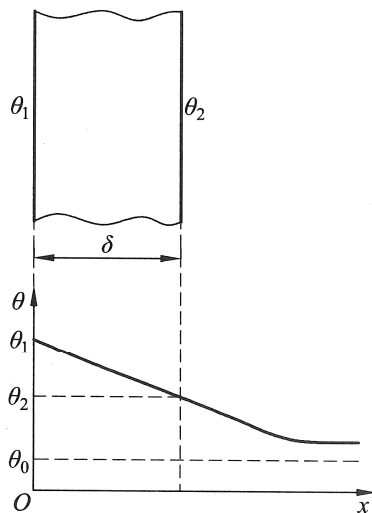


图 1-4 平板的温度曲线

表 1-5 热参数与电参数对照表

电参数	热参数
电量 $dQ = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \varphi}{\partial n} S dt$	热量 $dQ_T = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \theta}{\partial n} S dt$
电流 $I = \frac{dQ}{dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \varphi}{\partial n} S$	热流 $I = -\frac{dQ_T}{dt} = -\lambda \frac{\partial \theta}{\partial n} S$
电流密度 $J = \frac{I}{S} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \varphi}{\partial n}$	热流密度 $\Phi_0 = \frac{\Phi}{S} = -\lambda \frac{\partial \theta}{\partial n}$
电导率 $\gamma = \frac{1}{\rho}$	热导率 λ
电位差 $U = \varphi_1 - \varphi_2$	温差 $\tau = \theta_1 - \theta_2$
欧姆定律 $I = \frac{U}{R} = U \frac{S}{\rho l}$	热流欧姆定律 $\Phi = \frac{\tau}{R_T} = \tau \cdot \frac{\lambda S}{\delta}$
均质等截面导体电阻 $R = \rho \frac{l}{S}$	均质平板 $R_T = \frac{1}{\lambda} \frac{\delta}{S}$

在电学中电阻可以串联或并联，同样，在热学中热阻也可以串联或并联。假设无穷大平板由多块厚度不同的平板叠成，则总热阻为各板热阻的串联，总热阻为：

$$R_T = \sum_{i=1}^{i=k} R_{Ti} = \sum_{i=1}^{i=k} \frac{\delta_i}{\lambda_i S_i} \quad (1-26)$$

如图 1-5 所示，热流量 Φ 通过材料不同、厚度不同的三块平板时， R_T 总热阻为

$$R_T = R_{T1} + R_{T2} + R_{T3} = \frac{\delta_1}{\lambda_1 S_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2 S_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3 S_3} \quad (1-27)$$

式中 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ ——平板 1、2、3 的热导率；
 S_1, S_2, S_3 ——平板 1、2、3 的截面面积。

总的温差 τ 可以用热阻串联的方法求得：

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 + \tau_3 = \Phi(R_{T1} + R_{T2} + R_{T3}) = \Phi R_T \quad (1-28)$$

在电学中常用电路图进行分析计算，同样，在热学中也可采用热路图进行分析计算。如图 1-6 所示，电路图与热路图可以进行互相比。图 1-5 中热流量 Φ 由热源发出，顺序通过三块平板，相应地绘出热路图，图中定流热源与三个串联的热阻 (R_{T1}, R_{T2}, R_{T3}) 相连接，从此热路图中可求出三块平板的温度 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ ，而 θ_4 为周围环境的温度。其计算式如下：

$$\left. \begin{aligned} \theta_1 &= \theta_2 + \Phi R_{T1} \\ \theta_2 &= \theta_3 + \Phi R_{T2} \\ \theta_3 &= \theta_4 + \Phi R_{T3} \end{aligned} \right\} \quad (1-29)$$

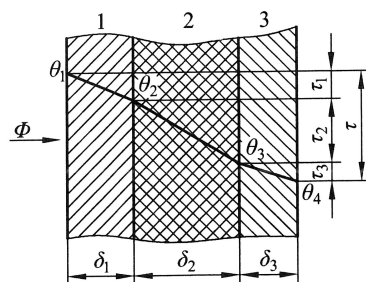


图 1-5 热阻的串联

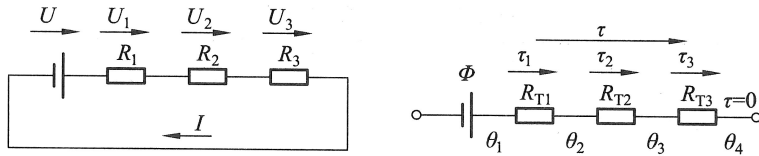


图 1-6 电路与热路

1.3.2 对流

对流是借助流体（气体或液体）的运动而传递热量，热量的转移和流体本身转移结合在一起。根据流体流动的原因，对流分为自然对流和强迫对流。自然对流是由热粒子与冷粒子的密度引起的流体运动产生的。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。强迫对流是在外力作用下强迫流体运动，带走发热体的热量。

对流的热量传递过程随流体性质而异，直接影响此过程的因素有热导率、比热容、密度和黏滞系数等。计算对流散热通常采用下列经验公式：

$$dQ = \alpha(\theta - \theta_0)Sdt = \alpha\tau Sdt \quad (1-30)$$

式中 dQ ——在 dt 时间内以对流方式散出的热量；

θ 、 θ_0 ——发热体和周围介质的温度；

S ——散热面的面积；

α ——对流散热系数。

对流散热过程很复杂，影响它的因素又很多，故 α 值一般以实验方式确定，亦可借经验公式计算。

1.3.3 辐射

热传导和对流散热都必须在发热体与其他物体（或流体）相互接触的情况下进行。而热辐射传热则不需直接接触，是发热体的热量以电磁波的形式转移的过程。热能转换为辐射能，以辐射波的形式传播出去，穿越真空和气体而传递热量，但不能透过固体和液体物质。热辐射以红外线传递的热量为最大，可见光电磁波传递的热量为最小。

根据斯蒂芬-波尔茨曼定律（亦称四次方定律），当发热体辐射表面面积比吸收辐射热的受热体表面面积小得多时，发热体单位表面面积的热辐射功率为：

$$P = 5.67 \times 10^{-8} \varepsilon(T^4 - T_0^4) \quad (\text{W/m}^2) \quad (1-31)$$

式中 T 、 T_0 ——辐射面和受热体的热力学温度（亦称绝对温度）(K)；

ε ——热辐射系数 [$\text{W}/(\text{K}^4 \cdot \text{m}^2)$]，或物体的黑度，其值在 0~1 之间，见表 1-6。

表 1-6 常见物体的热辐射系数

材料名称	辐射系数 $\varepsilon/[\text{W}/(\text{K}^4 \cdot \text{m}^2)]$	材料名称	辐射系数 $\varepsilon/[\text{W}/(\text{K}^4 \cdot \text{m}^2)]$
绝对黑体	1	纯水银	0.52
普通烟煤	0.97	生锈的铁皮	0.685

续表

材料名称	辐射系数 $\varepsilon/[W/(K^4 \cdot m^2)]$	材料名称	辐射系数 $\varepsilon/[W/(K^4 \cdot m^2)]$
绿色颜料	0.95	镀镍抛光的铁皮	0.058
灰色颜料	0.95	抛光的黄铜	0.6
青铜色颜料	0.80	抛光的紫铜	0.15
石棉纸	0.95	抛光的锌	0.05
白色无光泽的纸	0.994	抛光的银	0.02
光滑的玻璃	0.937	抛光的铝	0.08
涂釉的瓷件	0.924	抛光的铸件	0.25
黑色而光滑的硬橡皮	0.945	云母	0.75
粗糙而氧化的铸铁	0.985	冰	0.65
氧化铜	0.5~0.6	磨光的大理石	0.55

由于热辐射能量是与辐射面热力学温度 T 的 4 次方成比例，电弧温度可达成千上万开尔文 (K)，故其热辐射不容忽视，而电器零部件的极限允许温度只有一百度数量级，它们的热辐射能较小，其散热方式要是对流和传导。

1.3.4 综合散热系数与牛顿公式

发热体虽然同时以热传导、对流和热辐射三种方式散热，但分开来计算却颇不便。因此，电器发热计算习惯上是以综合散热系数 K_T 来综合考虑三种散热方式的作用。它在数值上相当于单位面积的发热面与周围介质的温差为 1°C 时，向周围介质散出的功率，故其单位为 $W/(m^2 \cdot ^\circ\text{C})$ 。

影响综合散热系数的因素很多，诸如介质的密度、热导率、黏滞系数、比热容与发热体的几何参数和表面状态等，此外，它还是温升的函数。

综合散热系数值通常是以实验方式求得，表 1-7 中列出了综合散热系数的大致数据，既与实验条件有关，也与散热面的选取有关。

表 1-7 综合散热系数值

表面性质	$K_T/[W/(m^2 \cdot ^\circ\text{C})]$	备注
直径 1~6 cm 水平筒棒	9~13	直径小者取大数
紫铜扁平母线	6~9	以窄边竖立
涂覆绝缘漆的铸铁或钢表面	10~14	
浸于油箱内的磁质圆柱	50~150	
纸质绝缘线圈	10~12.5	
	25~36	在油中
叠片束	10~12.5	
	70~90	在油中
线圈或带状乘铜(或铜镍合金)制螺旋电阻	20	垂直放置，散热面为导体总表面积
垂直管状烧釉电阻	20	散热面为外表面
螺旋状铸铁电阻	10~13	散热面为全部螺旋表面

计算散热时还可采用下列经验公式求综合散热系数。

$$\text{对于矩形截面母线} \quad K_T = 9.2[1 + 0.009(\theta - \theta_0)] \quad (1-32)$$

$$\text{对于圆截面导线} \quad K_T = 10K_1[1 + K_2 \times 10^{-2}(\theta - \theta_0)] \quad (1-33)$$

式中 θ, θ_0 ——发热体和周围介质的温度；

K_1, K_2 ——根据导线直径不同而选择的系数。

表 1-8 K_1, K_2 的值

圆导线直径/mm	10	40	80	200
K_1	1.24	1.11	1.08	1.02
K_2	1.14	0.88	0.75	0.68

当综合考虑热传导、对流、辐射散热的热计算时，可以采用牛顿热计算公式，即：

$$P = K_T S \tau \quad (\text{W}) \quad (1-34)$$

式中 K_T ——综合散热系数 [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$]；

S ——表面散热面积 (m^2)；

τ ——温升 ($^\circ\text{C}$)。

1.4 热计算的基本原理

电器的发热计算是有内部热源时的发热计算。在计算时假定：导体通过电流产生的损耗 P 恒定不变，导体各处温度相同，且比热容 c 和表面综合数热系数 K_T 为常数，不随温度升高而变化。发热体的质量为 m ，散热面积为 S 。根据能量守恒定律，载流导体在 dt 时间内的损耗为 Pdt ，它所产生的热量一部分用来加热导体，使其温度升高 $d\tau$ 的热量为 $cm d\tau$ ；另一部分热量 $K_T S \tau dt$ 通过表面散发到周围介质中，则得：

$$Pdt = cm d\tau + K_T S \tau dt \quad (\text{J}) \quad (1-35)$$

即

$$\frac{d\tau}{dt} + \frac{K_T S}{cm} \tau = \frac{P}{cm} \quad (1-36)$$

其通解为

$$\tau = \frac{P}{K_T S} + C_1 e^{-t/T} \quad (^\circ\text{C}) \quad (1-37)$$

式中 T ——发热时间常数 (s)， $T = \frac{cm}{K_T S}$ ；

C_1 ——积分常数，由初始条件确定。

当 $t=0$ 时， $\tau=0$ ，由式 (1-37) 得 $C_1 = -\frac{P}{K_T S}$ ，则

$$\tau = \frac{P}{K_T S} (1 - e^{-t/T}) \quad (1-39)$$

显然，当 $t \rightarrow \infty$ 时，温升 τ 将达到其稳态值

$$\tau_w = \frac{P}{K_T S} \quad (1-40)$$

式 (1-40) 是计算稳态温升的牛顿公式，它是发热体产生的热量完全散失到周围介质中时的温升。

若电器接通电源时已有初始温升 τ_0 ，即当 $t=0$ 时， $\tau=\tau_0$ ，由式 (1-37) 得

$$C_1 = \tau_0 - \frac{P}{K_T S} = \tau_0 - \tau_w$$

则
$$\tau = \tau_0 e^{-t/T} + \tau_w (1 - e^{-t/T}) \quad (1-41)$$

根据式 (1-39) 和式 (1-41) 可绘制均匀体发热时其温升与时间的关系，如图 1-7 (a) 所示。由式 (1-39) 可求得发热时间常数

$$T = \frac{\tau_w}{\left. \frac{d\tau}{dt} \right|_{t=0}} \quad (1-42)$$

这就是说，在坐标原点作曲线 $\tau(t)$ 的切线与水平线 τ_w 相交，其交点的横坐标便等于发热时间常数 T 。其表示的物理意义是：电器在绝热条件下温升达到稳态温升 τ_w 所需的时间。不难证明，当经过 T 时间，发热体温升上升到稳态温升的 63.2%；当经过 $5T$ 后，可以认为已达到稳态温升，其误差不大于 1%。

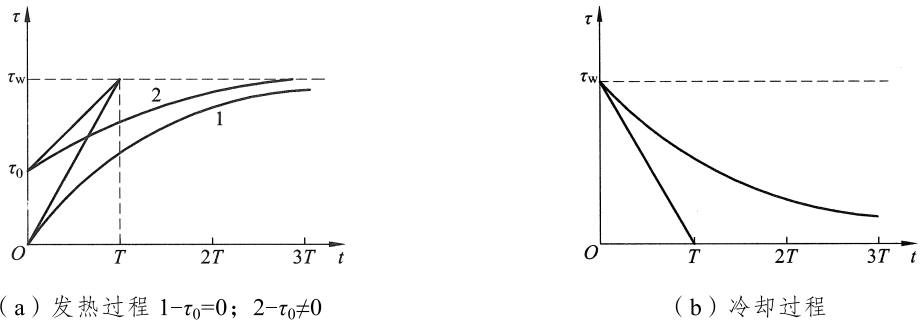


图 1-7 发热过程和冷却过程曲线

电器脱离电源后就开始冷却。当切断电源后， $P=0$ ，故式 (1-35) 将变为

$$0 = c m d\tau + K_T S \tau dt \quad (1-43)$$

式 (1-43) 移项后积分得：

$$\tau = C_2 e^{-t/T} \quad (^\circ\text{C}) \quad (1-44)$$

由于 $t=0$ 时， $\tau=\tau_w$ ，故积分常数 $C_2=\tau_w$ 。因此，冷却过程的方程为

$$\tau = \tau_w e^{-t/T} = \frac{P}{K_T S} e^{-t/T} \quad (1-45)$$

此过程的 $\tau(t)$ 曲线如图 1-7 (b) 所示。

由于发热体温度不可能均匀分布，且比热容 c 和综合散热系数 K_T 又是温度的函数，故实际发热过程要复杂得多。虽然如此，上述分析的结论仍能在相当程度上反映客观实际，故一直被普遍用于工程计算。

1.5 电器的发热工作制

国标 GB2900—82 规定电器的额定工作制有：8 小时工作制、不间断工作制、短时工作制、断续周期工作制和周期工作制。

从电器发热与冷却的观点可将发热工作制分为长期工作制（通电时间 $t \gg 5T$ ）、短时工作制（通电时间 $t_1 < 5T$ ，断电时间 $t_2 \gg 5T$ ）和反复短时工作制（通电和断电时间都小于 $5T$ ）。

1.5.1 长期工作制

8 小时工作制、不间断工作制都属于长期工作制，它们的通电时间大于 $5T$ ，发热均能达到稳定温升。这时电器的发热和散热达到动态平衡，损耗所产生的热量全部散到周围介质中，可按牛顿公式计算其散热表面的稳态温升：

$$\tau_w = \frac{P}{K_T S} \quad (^\circ\text{C})$$

该稳态温升应小于电器正常工作的极限允许温升。

电器工作于长期工作制，由于导体接触处被氧化或灰尘堆积，可使接触电阻增加，发热加剧，因此，电器的极限允许温升值应取低些。

1.5.2 短时工作制

电器的短时工作制是指通电时间很短，温升达不到稳定值，而断电时间很长，冷却可达到周围介质温度。例如断路器的合闸操作，电磁铁属于短时工作制，它仅在合闸时短时通电，合闸结束时就断电。

为了充分利用电器，短时工作制时可以加大电器的电流，只要使电器短时通电终了时的温升小于或等于长期通电时的极限允许温升，电器就不会损坏。显然，对一已定电器，在达到相同温升的条件下，通电时间越短，所允许通过的电流就越大。所以短时工作制的电流 I_d 可大于长期工作制的电流 I_n ，对应的功率 P_d 也将比长期工作时的功率 P_n 大。电流 I_d 与 I_n 之比称为电流过载倍数 K_{id} ，功率 P_d 与 P_n 之比称为功率过载倍数 K_{pd} 。

如图 1-8 所示，曲线 3 代表电器通以长期工作制的额定电流 I_n 的温升曲线，其稳定温升以 τ_w 表示， τ_w 的数值不超过长期工作制时电器的极限允许温升。曲线 1 代表电器通以短时制电流 I_d 的温升曲线，在通电时间 t_1 后，达到极限允许温升 τ_w ，然后断电降温（曲线 2），并降低到周围介质的温度。曲线 1 的虚线部分代表不断电时的假想温升曲线，这时 I_d 所对应的稳定温升以 τ_m 表示。

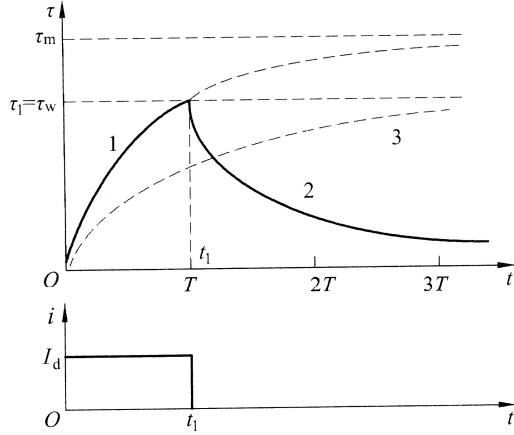


图 1-8 短时工作制时的温升曲线

根据牛顿公式，在稳定发热状态下电器产生的热量等于散失的热量，设 R 为载流体的电阻，即

$$P_d = I_d^2 R = K_T S \tau_m$$

$$P_n = I_n^2 R = K_T S \tau_w$$

则

$$K_{Pd} = \frac{P_d}{P_n} = \frac{\tau_m}{\tau_w}$$

$$K_{id} = \frac{I_d}{I_n} = \sqrt{K_{Pd}} = \sqrt{\frac{\tau_m}{\tau_w}}$$

由图 1-8，根据温升曲线 1 可知，当 $t = t_1$ 时， $\tau = \tau_w$ ，于是可得

$$\tau_1 = \tau_w = \tau_m (1 - e^{-\frac{t_1}{T}}) \quad (1-46)$$

所以短时工作制时的功率过载系数

$$K_{Pd} = \frac{1}{1 - e^{-t_1/T}} \quad (1-47)$$

电流过载系数为

$$K_{id} = \frac{1}{\sqrt{1 - e^{-t_1/T}}} \quad (1-48)$$

将 $e^{-t_1/T}$ 按泰勒级数展开，得

$$e^{-t_1/T} = 1 - \frac{t_1}{T} + \frac{1}{2!} \left(\frac{t_1}{T}\right)^2 - \frac{1}{3!} \left(\frac{t_1}{T}\right)^3 + \dots \quad (1-49)$$

若 $t_1 \leq T$ ，可忽略高次项，则有 $e^{-t_1/T} = 1 - \frac{t_1}{T}$ ，于是有

$$K_{Pd} = \frac{T}{t_1}$$

$$K_{id} = \sqrt{T/t_1}$$

显然，功率过载倍数 $K_{pd} > 1$ ，电流过载倍数 $K_{id} > 1$ 。而且 T 越大， t_1 越小，则过载能力越强。

1.5.3 反复短时工作制

反复短时工作制是指通电和断电周期性地不断循环的工作制。图 1-9 展示出了在通电时间 t_1 内电器温度上升，在断电时间 t_2 内温度下降，在第一个循环的通电和断电过程末，即 $t = t_1$ 及 $t = t_1 + t_2$ 时，温升将为 τ_{max1} 和 τ_{min1} ；及至第二个循环，通电时，温升由 τ_{min1} 上升到 τ_{max2} ，断电时则由 τ_{max2} 下降到 τ_{min2} 。每经一个循环时间 $t_1 + t_2$ ，其温升较前一个循环为高，经多次循环后，电器在通电期间升高的温度与在断电期间下降的温度相同，于是电器的温升将出现图 1-9 所示在 τ_{max} 与 τ_{min} 之间反复的过程，为了充分利用电器，其上限温升应等于长期工作制的稳定温升，即 $\tau_{max} = \tau_w$ ， τ_w 应小于或等于电器的极限允许温升。设电器反复短时工作制的功率为 P_f ，电流为 I_f ；长期工作制的功率为 P_n 、电流为 I_n 。根据牛顿公式，有

$$P_n = I_n^2 R = K_T S \tau_w = K_T S \tau_{max}$$

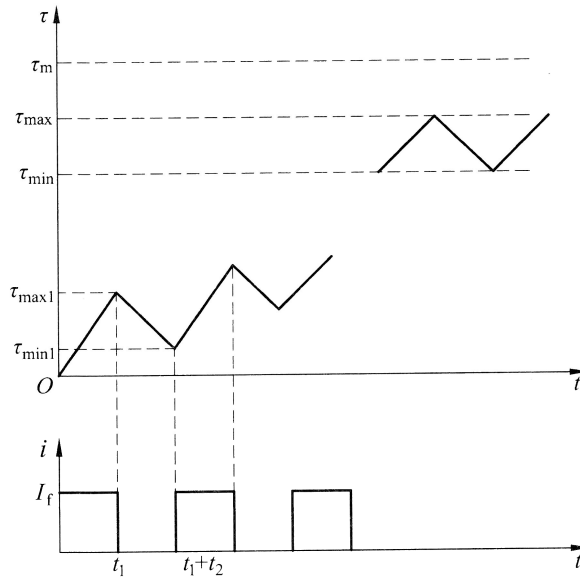


图 1-9 反复短时工作制时的温升曲线

令长期通过电流 I_f 时的稳态温升为 τ_m ，根据牛顿公式有

$$P_f = I_f^2 R = K_T S \tau_m$$

以 K_{if} 表示电流过载系数和 K_{pf} 表示功率过载系数，则：

$$K_{pf} = \frac{P_f}{P_n} = \frac{I_f^2 R}{I_n^2 R} = K_{if}^2 = \frac{K_T S \tau_m}{K_T S \tau_{max}} = \frac{\tau_m}{\tau_{max}} \quad (1-50)$$