

华东交通大学教材（专著）出版基金资助项目

杨丰萍 李中奇 彭伟发 编著

# 电器技术及控制

（第2版）



西南交通大学出版社

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 ·

---

### 图书在版编目 (C I P) 数据

电器技术及控制 / 杨丰萍, 李中奇, 彭伟发编著

—2 版. —成都: 西南交通大学出版社, 2022.11

ISBN 978-7-5643-9047-1

I. ①电… II. ①杨… ②李… ③彭… III. ①电器—  
高等学校—教材 IV. ①TM5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2022) 第 231348 号

---

Dianqi Jishu ji Kongzhi

### 电器技术及控制

(第 2 版)

杨丰萍 李中奇 彭伟发 编著

---

责任编辑	黄淑文
封面设计	原谋书装
出版发行	西南交通大学出版社 (四川省成都市金牛区二环路北一段 111 号 西南交通大学创新大厦 21 楼)
发行部电话	028-87600564 028-87600533
邮政编码	610031
网 址	<a href="http://www.xnjdcbs.com">http://www.xnjdcbs.com</a>
印 刷	四川森林印务有限责任公司
成品尺寸	185 mm × 260 mm
印 张	21.25
字 数	529 千
版 次	2012 年 8 月第 1 版 2022 年 11 月第 2 版
印 次	2022 年 11 月第 2 次
书 号	ISBN 978-7-5643-9047-1
定 价	59.00 元

---

图书如有印装质量问题 本社负责退换

版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

# 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程的教材来编写的。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

<b>第 4 章 电接触</b> .....	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
<b>第 5 章 电磁机构理论</b> .....	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
<b>第 6 章 常用低压电器</b> .....	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
<b>第 7 章 牵引电器</b> .....	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
<b>第 8 章</b>	<b>电器控制典型环节及应用实例分析 .....</b>	<b>205</b>
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
<b>第 9 章</b>	<b>电气控制系统设计 .....</b>	<b>261</b>
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
<b>第 10 章</b>	<b>电气控制实验与课程设计 .....</b>	<b>294</b>
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
	<b>参考文献 .....</b>	<b>331</b>

# 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、起动机、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，而继电器—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  $\text{AgCdO}$  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  $\text{AgCdO}$  材料有毒，近年来，从环保要求出发，人们以  $\text{AgSnO}_2$  代替  $\text{AgCdO}$ 。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 ( $\Omega$ )；

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

$l$  ——导体长度 (m)；

$S$  ——导体截面积 ( $\text{m}^2$ )。

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  $0^\circ\text{C}$  时的导体电阻 ( $\Omega$ )；

$\alpha$ 、 $\beta$  ——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  $\Phi$  和

$\Phi_2$ ，导体表面（B 部分）匝链的磁通仅为  $\Phi_2$ ，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 ( $\text{A/m}^2$ )；

$I_N$ ——交流电流有效值 (A)；

$R_N$ ——导体单位长度交流等效电阻 ( $\Omega/\text{m}$ )。

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 ( $\text{A/m}^2$ )，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 ( $\Omega/\text{m}$ )。

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：

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

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，使导体截面中的电流分布不均，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。

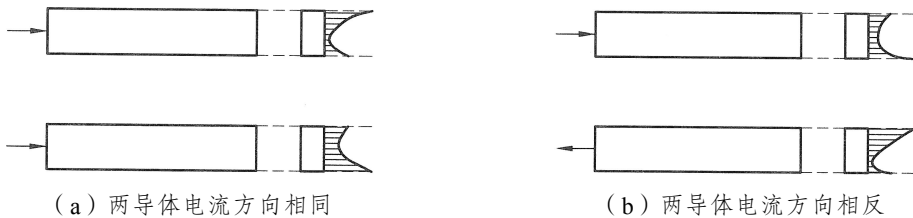


图 1-2 邻近效应对电流分布的影响

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， $P_N$  为仅考虑临近效应时，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。

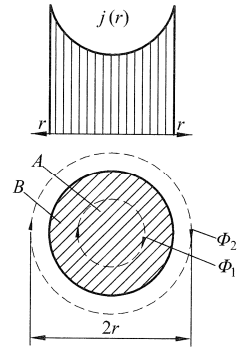


图 1-1 集肤效应影响下导体内部电流密度的分布

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；

$\rho$ ——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；

$\delta$ ——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  $\sigma$  与温度  $\theta$  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  $300^\circ\text{C}$ 。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  $\sigma$  随温度  $\theta$  的变化规律，曲线 4 表示铝线缓慢加热 2 h 的机械强度  $\sigma$  随温度  $\theta$  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

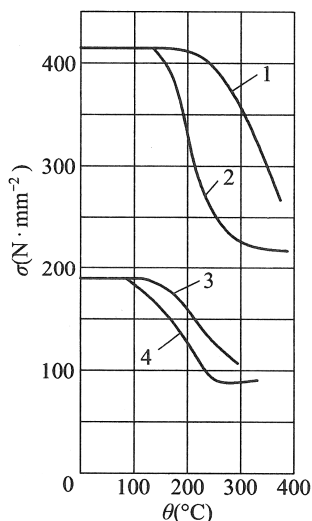


图 1-3  $\sigma = f(\theta)$  特性曲线