

TURING

图灵电子与电气工程丛书

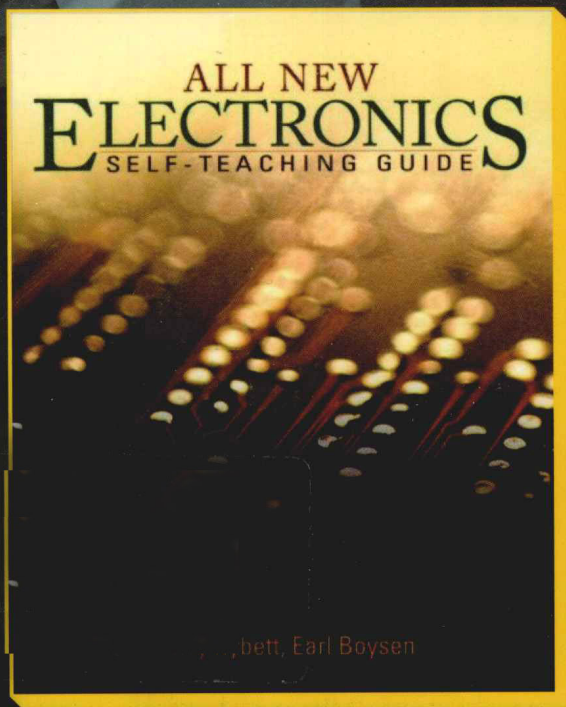
WILEY

电子技术自学指南

(第3版)

All New Electronics Self-Teaching Guide
Third Edition

[美] Harry Kybett 著
Earl Boysen
张鼎 等译



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

TURING

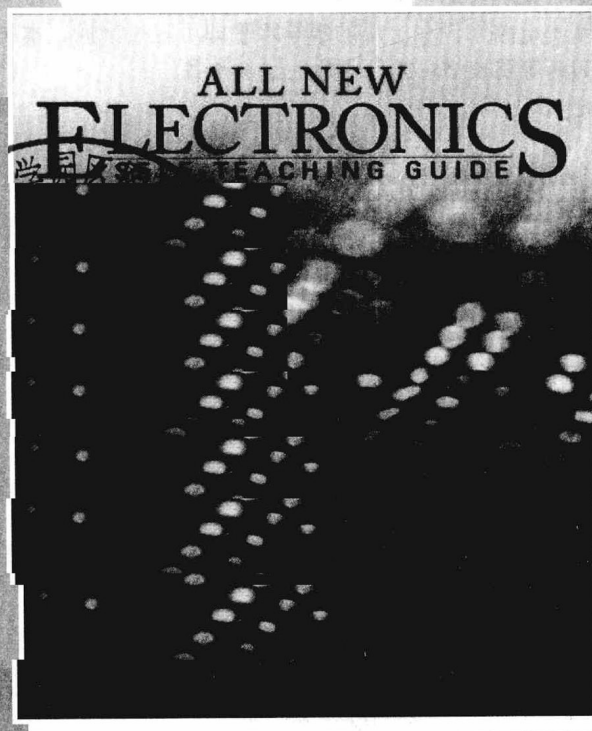
图灵电子与电气工程丛书

电子技术自学指南

(第3版)

All New Electronics Self-Teaching Guide
Third Edition

[美] Harry Kybett 著
Earl Boysen
张鼎 等译



人民邮电出版社
北京

版 权 声 明

Original edition, entitled *All New Electronics Self-Teaching Guide, Third Edition*, by Harry Kybett and Earl Boysen, ISBN 978-0-470-28961-7, published by Wiley Publishing, Inc.

Copyright © 2008 by Wiley Publishing, Inc., All rights reserved. This translation published under License.

Simplified Chinese translation edition published by POSTS & TELECOM PRESS Copyright © 2010.

Copies of this book sold without a Wiley sticker on the cover are unauthorized and illegal.

本书简体中文版由 John Wiley & Sons, Inc. 授权人民邮电出版社独家出版。
本书封底贴有 John Wiley & Sons, Inc. 激光防伪标签，无标签者不得销售。
版权所有，侵权必究。

译 者 序

当今世界正处于信息时代，作为信息领域核心技术之一的电子技术，已经渗透到我们生活和工作的各个方面。家用电器、通信器材、交通工具、仪器仪表及工业设备中都包含有各种电子电路。特别是大规模集成电路的普及，全面更新了电子技术理论：新兴的微电子学发展迅猛，而与电子管甚至晶体管相关的模拟电子技术则基本已遭淘汰。

为了适应电子技术的发展，近年来，国内的电子技术类教材正遵循“精简模拟电子技术、侧重集成电路技术”的思路不断革新。例如新兴的集成模拟电子技术教材，在继承传统模拟技术关键理论的同时，突出以集成模拟器件为核心介绍实用电路，剖析电路原理、讲解电路设计方法，代表了模拟电子技术类教材的改革方向。本书与这类教材的定位相当。

作为一本电子技术入门书，本书在内容选材及组织上都突出了易读性、实用性和新颖性的特点。比如：在素材选择方面，讲解晶体管时不涉及详细的工作机理，而强调晶体管的开关特性，这为今后学习数字电子技术打下了良好基础；讲解放大器电路时，在介绍了最简单的单晶体管放大电路后，不纠缠于复杂的多级多管晶体管放大电路，转而讨论实用的集成运算放大器电路。在内容组织方面，本书采用了独具特色的“问答式”叙述方式，先借用问题引导读者探索新知识点，而后在解答过程中阐述基本原理、计算公式及设计方法等。这使读者在学习过程中能体会到明显的层次感和成就感，非常适合于自学。希望读者阅读本书后能在学习电子技术的道路上迈出坚实的一步。

本书主要由张鼎负责翻译。Be Flying 工作室负责人肖国尊对本书的翻译和出版做了大量的协调和规范工作，特别是译者的选择、翻译思想的指导、进度和质量的把关方面，在此表示衷心感谢。同时欢迎各位光顾 Be Flying 工作室博客 http://blog.csdn.net/be_flying 及其所译图书介绍页面 <http://www.china-pub.com/main/sale/renwu/luminary.asp?id=64>。

致 谢

首先要感谢本书第一作者 Harry Kybett，他多年前就写了这本书的初版，我很荣幸能够更新这部电子技术领域中的经典著作。然后要感谢 Carol Long 介绍我参与该项目，感谢 Kevin Shafer 对本书所做的项目管理工作。感谢 Rex Miller 所做的出色的技术编辑工作，感谢 Mildred Sanchez 对本书初稿进行了拼写和语法检查。感谢 Wiley 出版社的工作人员，特别是 Liz Britten，她一丝不苟地绘制了本书的所有插图，还有 Eric Charbonneau，他控制整个项目的总体进度。最后，感谢我的妻子 Nancy Muir，她鼓励并支持我写完了本书。

Earl Boysen

引 言

现代电子技术的迅猛发展是显而易见的。如今市场上应用了电子技术的各种商品要么在1960年以前根本就不存在，要么在如今的标准看来显得过于简陋。这方面的例子在现代化的家用电器中就有很多，比如尺寸很小但是功能强大的袖珍计算器、个人电脑、MP3播放器、DVD机以及数码相机。随着现代电子技术在制造工艺以及电子产品本身中的可用性和应用性的不断增强，众多新兴工业应运而生，传统工业也已改头换面。

现代电子技术的基础是晶体管及其衍生物——集成电路（IC）和微处理器。它们淘汰了很多传统电子技术理论，革新了实践，并且导致整个电子技术领域出现数条新的探索道路。本书将帮助你踏上这些道路并迈开旅程的第一步。

本书内容

电子技术的传统教学方法常常令人费解。很多学生学完后留下的印象就是，电子技术的核心神秘而且晦涩难懂，如同巫术一般。其实并非如此。事实上，尽管我们生活的很多方面已经变得难以置信地复杂，但是通过在工作中和作为业余爱好对电子技术的学习与实践，电子技术已经变得出奇地简单。本书的优点是简明扼要，只涉及实际需要的部分现代电子技术知识。

本书适合于那些已初步掌握电子技术概念，并希望掌握最常见的分立电路中元件工作机制的读者。本书各章着重讲述那些广泛用于很多常见电子设备的电路，以及在使用电子技术时所需的极少数重要原理。

本书的组织结构和讲述方法与其他的电子技术书籍完全不同，它采用“问答”的方式将你带入简单而恰当的实验中。本书以易于理解的方式引导你逐步完成每个示例的计算，而所需的数学知识不会超出第一年学代数的水平。此外，本书省略了在其他书籍中常见的关于半导体物理的内容，因为在学习电子技术的初期并不需要这些知识。

电子技术是一门十分简单的技术，任何人只要稍加努力就能理解。本书将着重介绍如何运用电子技术中为数不多的几个基本原理，它们是现代电子技术实践的基础。掌握本书讨论的这些由分立元件构成的电路以及适用的计算方法，不仅在设计和搭建电路时有用，而且还有助于使用IC。这是因为IC也使用小元件，如晶体管、二极管、电容和电阻等，它们也和分立元件一样，遵从相同的规则工作。（那些极小尺寸的IC元件还要遵从一些特殊的规则。）

本书结构

本书由一系列的问答组成。先提出问题，促使你仔细思考某个概念或者过程；而后给出答

案，以便你随时检查学习的进度和掌握情况。本书各章的具体内容如下。

- 第1章对学习直流(DC)电路时所需的基本概念、元件以及计算知识进行复习和前测。
- 第2章将介绍包括如何在直流电路中使用二极管、二极管的主要特点以及用来确定二极管的电流、电压和功率的相关计算等知识。
- 第3章将介绍晶体管及其在电路中的应用知识，还将研究BJT(Bipolar Junction Transistor, 双极型晶体管, 简称三极管)以及JFET(Junction Field Effect Transistor, 结型场效应管)的电流控制问题。
- 第4章将研究晶体管最简单且最广泛的应用——开关。除了要学习如何设计晶体管电路来驱动特定的负载之外，还将比较JFET和BJT的开关动作。
- 第5章将介绍与交流(AC)电路有关的基本概念和公式，将研究如何在交流电路中使用电阻和电容，并且学习相关的计算。
- 第6章研究电阻、电容和电感是如何用于高通滤波器和低通滤波器来实现传导或者阻断高于或者低于一定频率的交流信号的。
- 第7章研究如何在带通滤波器电路和带阻滤波器电路中使用电容、电感和电阻，以实现传导或者阻断以该电路谐振频率为中心的一段频带上的交流信号，并学习如何计算这些电路的谐振频率和带宽。本章还将介绍如何将谐振电路用于(实现)振荡器。
- 第8章将研究如何用晶体管放大器放大电信号。除了将研究设计三极管放大器的基本步骤之外，还将研究如何在放大器电路中使用JFET和运算放大器(下文简称运放)。
- 第9章介绍振荡器，这是一种能产生连续的交流输出信号的电路。将学习振荡器是如何工作的，并掌握设计和搭建振荡器的步骤。
- 第10章将学习变压器是如何将交流电压转换为更高或者更低的电压的。你将学习到变压器如何实现这一转换，并学会如何计算其输出电压。
- 第11章将弄清楚电源是如何利用一个由变压器、二极管、电容以及电阻所组成的电路将交流电转换为直流电的，还将学习如何计算产生指定直流输出电压的电源电路所需元件的大小。
- 第12章让你通过一套最终自测题来检查自己对本书所述内容的理解情况，这套题能评估出你已掌握的全部的电子技术知识。

此外，本书还提供了以下附录以便参考。

- 附录A给出了关键的电子术语及其定义。
- 附录B提供了一套常用符号和缩写的简易参考。
- 附录C列出了电子技术中的常用符号及其对应的值。
- 附录D列出了最常用的电阻——碳化合物电阻(碳膜电阻)的标准阻值。
- 附录E提供了一些有用的参考资源，包括网站、书籍和杂志。
- 附录F是一个常用公式的速查表，表中的章节和问题序号给出了对应公式在本书中首次出现的位置。
- 附录G列出了本书使用的原理图符号。在本附录中可以快速查阅到本书问题中使用的原理图符号。

本书约定

一旦开始学习电子技术，你就会发现不同的书的术语和所画的电路有所不同。这里给出你应该事先了解的本书的两个约定。

- 在本书的论述中，用 V 代表电源，而不同于其他书所采用的 E。
- 在本书的所有电路图中，相交线表示电气上互连。（有些书则在相交线上加圆点表示互连。）如果在相交处出现半圆，则表示它们此处不互连，如图 9-5 所示。

本书用法

本书假定你已经掌握了基本的电子技术知识，比如欧姆定律和电流。如果阅读过电子技术的教科书或者上过这方面的课，又或者从事过电子技术方面的工作，那么你应该已经拥有了一定的预备知识。如果上述经历都没有，那么最好先读一本这方面的书籍，比如 *Electronics for Dummies* (Indianapolis: Wiley, 2005)，以获得阅读本书所必需的背景知识。你还可以去作者的网站 www.BuildingGadgets.com，通过 Tutorial 链接可以找到一些有用的电子技术方面的在线课程。此外，在第 1 章和第 5 章，你可以测试自己的知识，并且复习必需的电子技术基础知识。

请注意，你应当按顺序阅读本书的各章，因为后面的内容往往和前面各章介绍的概念和技巧有关。

本书采用了自学式结构，你能够按照自己的节奏轻松地学习。所有内容被分成带编号的节依次讲述，这些节被称作问题 (Problem)。每个问题都引出一些新的内容，并要求你解答所提出的问题或者尝试一个实验。为了最有效地学习，你应当先用纸遮住答案，独立解答每一个问题，然后再对答案。如果做错了，更正后再继续解答下面的问题。如果连续答错很多题，则应该回头复习前面的各节，否则就可能无法读懂后续内容。

要尽力完成所有的实验。这些实验都很简单，并能帮助你巩固所学的内容。如果没有实验设备来开展实验，那么即便只是通读实验内容，也会帮助你更好地理解所演示的概念。

当读到一章的结尾时，应利用自测题评估学习情况。如果做错了题，就应该重新复习该章正文中对应的内容。在本书的最后，还有一套最终自测题，它能评估你对本书中全部知识的掌握情况。

请按照你自己的节奏阅读本书。既可以自学，也可以配合课程来学习。如果是自学，那么可以把它当作电子技术的入门书，而不是一门完整的课程。为此，本书结尾列出了一些进一步学习的建议和一些在线资源。此外，本书的结尾还有符号和缩写表供参考和复习。

接下来，就请做好准备，开始学习电子技术吧！

目 录

第 1 章 直流电路知识复习和前测 1	4.3 为何将晶体管用作开关.....81
1.1 电流..... 1	4.4 三晶体管开关.....87
1.2 欧姆定律.....3	4.5 交错基极开关.....90
1.3 电阻的串联.....4	4.6 结型场效应管的导通与关断.....94
1.4 电阻的并联.....5	4.7 结型场效应管实验.....94
1.5 功率.....6	4.8 小结.....97
1.6 微电流.....7	4.9 自测题.....97
1.7 伏-安特性曲线.....9	第 5 章 交流电路知识前测与复习 101
1.8 分压器.....10	5.1 信号发生器.....101
1.9 分流器.....12	5.2 交流电路中的电阻.....105
1.10 开关.....14	5.3 交流电路中的电容.....106
1.11 直流电路中的电容.....16	5.4 交流电路中的电感.....108
1.12 小结.....20	5.5 谐振.....109
1.13 直流电路知识前测.....22	5.6 小结.....110
第 2 章 二极管 25	5.7 自测题.....111
2.1 认识二极管.....25	第 6 章 电子技术中的交流信号 113
2.2 二极管实验.....29	6.1 交流电路中的电容.....113
2.3 二极管的击穿.....39	6.2 电容器和电阻串联.....114
2.4 齐纳二极管.....41	6.3 高通滤波器实验.....119
2.5 小结.....46	6.4 RC 电路中的相移.....123
2.6 自测题.....47	6.5 电容和电阻并联.....127
第 3 章 晶体管概述 50	6.6 交流电路中的电感.....130
3.1 认识晶体管.....50	6.7 RL 电路中的相移.....135
3.2 晶体管实验.....61	6.8 小结.....136
3.3 结型场效应管.....68	6.9 自测题.....137
3.4 小结.....71	第 7 章 谐振电路 141
3.5 自测题.....71	7.1 电容和电感串联.....141
第 4 章 晶体管开关 74	7.2 输出曲线.....148
4.1 晶体管的导通.....74	7.3 振荡器概述.....159
4.2 晶体管的关断.....79	7.4 小结.....161

7.5 自测题	162	第 10 章 变压器	227
第 8 章 晶体管放大器	165	10.1 变压器基础	227
8.1 学习晶体管放大器	165	10.2 通信电路中的变压器	233
8.2 稳定的放大器	173	10.3 小结与应用	237
8.3 偏置	176	10.4 自测题	237
8.4 射极跟随器	182	第 11 章 电源电路	239
8.5 放大器分析	186	11.1 交流电路中的二极管能产生脉动的直流信号	239
8.6 结型场效应管放大器	189	11.2 平稳直流(平滑脉冲直流信号)	247
8.7 运算放大器	196	11.3 小结	259
8.8 小结	198	11.4 自测题	259
8.9 自测题	199	第 12 章 结束语与最终自测	262
第 9 章 振荡器	202	12.1 总结	262
9.1 认识振荡器	202	12.2 最终自测题	263
9.2 反馈	209	附录 A 术语表	272
9.3 考毕兹振荡器	213	附录 B 符号和缩写表	274
9.4 哈特利振荡器	216	附录 C 10 的幂次方和工程前缀	275
9.5 阿姆斯特朗振荡器	218	附录 D 标准碳化合物电阻值	276
9.6 实用的振荡器设计	218	附录 E 补充资源	277
9.6.1 简单的振荡器设计过程	219	附录 F 参考公式	279
9.6.2 可选实验	221	附录 G 本书使用的原理图符号	281
9.7 振荡器故障分析检查表	221		
9.8 小结与应用	225		
9.9 自测题	225		

直流电路知识复习和前测

在学习电子技术之前应先掌握电子学的基本知识。本章就是对电子技术中用到的相关直流(DC)电路知识的复习和前测。这里绝不是罗列整个直流电路理论,而只涉及那些关系到基本电子技术本质的主题。本章将复习以下内容:

- 电流
- 电势和电压
- 欧姆定律
- 电阻的串联与并联
- 功率
- 微电流
- 伏-安特性曲线
- 基尔霍夫电压和电流定律
- 分压器与分流器
- 开关
- 电容的充电与放电
- 电容的串联与并联

1.1 电流

1 电气和电子设备需要电流才能工作。

问题

什么是电流?

答案

电荷的流动被称为电流。这种电荷通常由带负电的电子组成。然而,在半导体中,也有带正电的载流子,它们被称为空穴(hole)。

2 产生电流的方法有很多种。

问题

请写出至少 3 种产生电子流(或电流)的方法。

答案

下面列出了一些最常见的产生电流的方法。

磁场法——在磁场中旋转的导线中能产生感生电子。比如水力、风力或者蒸汽驱动的发电机，以及汽车里的风扇。

化学法——利用化学品和电极之间发生的化学反应来产生电子（比如电池）。

光伏法——当光照射到半导体晶体上时产生电子（比如太阳能电池）。

还有一些不常用的产生电流的方法，如下所示。

热学法——利用热电偶的结间温差产生电子。太空飞船上的发电机就使用热学法发电，它使用放射性物质作为燃料。

电化学反应——利用氢气、氧气和电极间的电化学反应产生电荷（燃料电池）。

压电法——利用压电物质的机械形变产生电荷。比如，安装在鞋跟上的压电材料能在人走动时点亮LED。

3 本书的大部分简单示例都采用电池作为电压源。电池能为电路提供电势差，从而产生电流。电流就是电荷的流动。对电池来说，流动的电荷就是电子，它们能从电子过剩的一端流向电子匮乏的一端。任何连接到电池两端的完整电路都会出现这样的情况。正是这些电荷的差别导致电池中出现电势差，而电子则不断地在平衡这种差别。

由于电子带负电荷，所以它们实际上是从电池的负极流向正极。我们称该方向为电子流的方向。然而，大多数教科书里都采用电流的方向，它和电子流的方向正好相反。可称之为常规的电流方向或者简称为电流方向。本书的所有电路都采用常规的电流方向。

在后面将看到，很多半导体器件都有一个带箭头的符号，用来指示常规的电流方向。

问题

A. 请画出图 1-1 中的电流方向。电池符号里已经注明了极性。

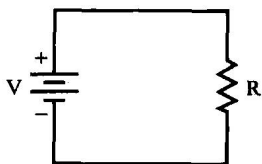


图 1-1

B. 什么表明存在电势差？

C. 电势差会导致什么情况？

D. 如果电池反接会出现什么情况？

答案

A. 参见图1-2。

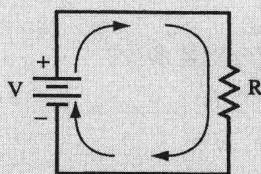


图 1-2

- B. 电池符号表明电路两端有电势差（也称为电压）。
- C. 如果接有如图1-1所示的完整电路，那么就会产生电流。
- D. 电流会沿反方向流动。

1.2 欧姆定律

- 4 欧姆定律阐明了电压、电流和电阻之间的基本关系。

问题

欧姆定律的代数表达式是什么？

答案

$$V = I \times R$$

这是电子学中最基本的公式，一定要牢牢记住它。请注意，有些电子学书籍中将欧姆定律表示为 $E = IR$ 。 E 和 V 都代表电压，而本书自始至终都采用 V 。此外，在该公式中，电阻与电流成反比。请注意，在给定的电压下，电阻越大，则产生的电流就越小。

- 5 请运用欧姆定律求解以下问题。

问题

以下每组电阻和电流对应的电压分别是多少？

- | | | |
|-----------------------|-------------|-------------|
| A. $R = 20\Omega$ | $I = 0.5A$ | $V =$ _____ |
| B. $R = 560\Omega$ | $I = 0.02A$ | $V =$ _____ |
| C. $R = 1\ 000\Omega$ | $I = 0.01A$ | $V =$ _____ |
| D. $R = 20\Omega$ | $I = 1.5A$ | $V =$ _____ |

答案

- A. 10V B. 11.2V C. 10V D. 30V

- 6 请改写欧姆定律，然后计算电流值。

问题

以下每组电压和电阻对应的电流分别是多少?

A. $V = 1\text{V}$ $R = 2\Omega$ $I = \underline{\hspace{2cm}}$

B. $V = 2\text{V}$ $R = 10\Omega$ $I = \underline{\hspace{2cm}}$

C. $V = 10\text{V}$ $R = 3\Omega$ $I = \underline{\hspace{2cm}}$

D. $V = 120\text{V}$ $R = 100\Omega$ $I = \underline{\hspace{2cm}}$

答案

A. 0.5A B. 0.2A C. 3.3A D. 1.2A

7 请改写欧姆定律，然后计算电阻值。

问题

以下每组电压和电流对应的电阻分别是多少?

A. $V = 1\text{V}$ $I = 1\text{A}$ $R = \underline{\hspace{2cm}}$

B. $V = 2\text{V}$ $I = 0.5\text{A}$ $R = \underline{\hspace{2cm}}$

C. $V = 10\text{V}$ $I = 3\text{A}$ $R = \underline{\hspace{2cm}}$

D. $V = 50\text{V}$ $I = 20\text{A}$ $R = \underline{\hspace{2cm}}$

答案

A. 1 Ω B. 4 Ω C. 3.3 Ω D. 2.5 Ω

8 从上述例子可以看出，在任何情况下，只要已知两项就能求解出第三项。

问题

请问缺少的一项是多少?

A. 已知 12V 和 10 Ω ，请求出电流。

B. 已知 24V 和 8A，请求出电阻。

C. 已知 5A 和 75 Ω ，请求出电压。

答案

A. 1.2A B. 3 Ω C. 375V

1.3 电阻的串联

9 电阻可以串联。图 1-3 就是两个串联的电阻。

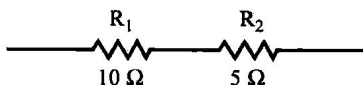


图 1-3

问题

它们的总电阻是多少?

答案

$$R_T = R_1 + R_2 = 10\Omega + 5\Omega = 15\Omega$$

总电阻通常被称为等效串联电阻 (equivalent series resistance), 记作 R_{eq} 。

1.4 电阻的并联

10 电阻也可以并联, 如图 1-4 所示。

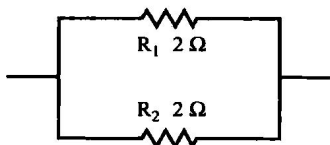


图 1-4

问题

图 1-4 的总电阻是多少?

答案

$$\frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} = 1$$

因此, $R_T = 1\Omega$ 。

R_T 通常被称为等效并联电阻 (equivalent parallel resistance)。

11 由问题 10 得出的这个简单公式可以扩展到很多个电阻并联的情况。

问题

3 个并联电阻的电阻计算公式是什么?

答案

$$\frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

通常看到的是如下形式:

$$R_T = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}}$$

12 在下列练习题中, 两个电阻都是并联的。

问题

请问总电阻或者等效电阻是多少?

A. $R_1 = 1\Omega$ $R_2 = 1\Omega$ $R_T =$ _____

B. $R_1 = 1\ 000\Omega$ $R_2 = 500\Omega$ $R_T =$ _____

C. $R_1 = 3\ 600\Omega$ $R_2 = 1\ 800\Omega$ $R_T =$ _____

答案

A. 0.5Ω B. 333Ω C. $1\ 200\Omega$

请注意, R_T 总是比并联电阻中阻值最小的一个还要小。

1.5 功率

13 当有电流流过电阻时, 就会消耗电能 (通常以热量的形式)。功率的单位是瓦特 (W)。

问题

功率的计算公式是什么?

答案

计算功率的公式有3个:

$$P = VI \text{ 或 } P = I^2R \text{ 或 } P = \frac{V^2}{R}$$

14 当已知电压和电流时, 可以利用问题 13 中的第一个公式计算功率。

问题

已知电压和电流如下, 请问电阻上的功率分别是多少?

A. $V = 10V$ $I = 3A$ $P =$ _____

B. $V = 100V$ $I = 5A$ $P =$ _____

C. $V = 120V$ $I = 10A$ $P =$ _____

答案

A. 30W B. 500W即0.5kW C. 1 200W即1.2kW

15 当已知电流和电阻时，可以利用问题 13 中的第二个公式计算功率。

问题

已知电阻和电流如下，请问电阻上的功率是多少？

A. $R = 20\Omega$ $I = 0.5A$ $P =$ _____

B. $R = 560\Omega$ $I = 0.02A$ $P =$ _____

C. $V = 1V$ $R = 2\Omega$ $P =$ _____

D. $V = 2V$ $R = 10\Omega$ $P =$ _____

答案

A. 5W B. 0.224W C. 0.5W D. 0.4W

16 电子设备中所用的电阻通常都是依照电阻值和额定功率制成的标准值。附录 D 列出了标准电阻阻值表。通常，当电路需要某个阻值的电阻时，你只能选择最接近的标准值。本书中就有一些这样的例子。

选择电阻时必须考虑额定功率。决不能让电路中的电阻的实际功率超出其额定值。

问题

如果碳膜电阻的标准额定功率为 1/4W、1/2W、1W 和 2W，那么应该为问题 15 中给出的电阻选择多大的额定功率？

A. 5W _____ B. 0.224W _____

C. 0.5W _____ D. 0.4W _____

答案

A. 5W (或者更大) B. 1/4W (或者更大)

C. 1/2W (或者更大) D. 1/2W (或者更大)

大多数电路都使用低额定功率的碳膜电阻。如果需要更高的额定功率（比如问题 A 中需要 5W），可以使用其他类型的电阻。

1.6 微电流

17 尽管重型工业设备中使用的电流远大于 1A，但是大多数电路需要的电流都不足 1A。