

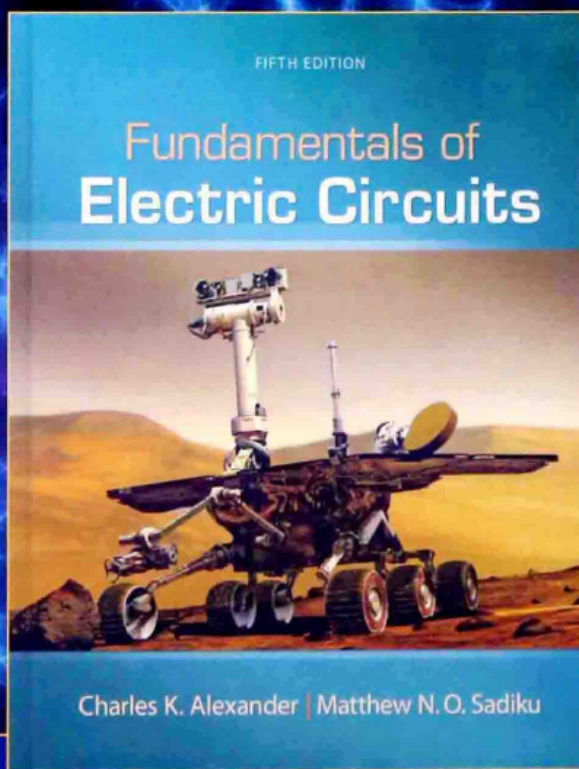
电路基础

(原书第5版)

[美] Charles K. Alexander 著
Matthew N. O. Sadiku

段哲民 周巍 李宏 尹熙鹏 等译

*Fundamentals
of Electric Circuits
Fifth Edition*



机械工业出版社
China Machine Press

本书是电路课程的经典教材，被美国众多名校采用，是美国最有影响力的教材之一。本书内容全面，涵盖了我国“电路分析基础”课程的全部教学要求和“电路理论基础”课程的大部分教学要求。

本书以电路基础知识和分析方法为主体，辅以大量例题、习题和应用实例，并穿插介绍电子工程领域的历史人物与知识。本书前4版获得了极大的成功，第5版更加清晰易懂，并反映了电路领域的最新技术进展。

本书特色

- 内容全面。全书分为直流电路、交流电路与高级电路分析三部分，还囊括了所需的常用数学公式和物理基本原理。
- 六步解题法。六步解题法为读者建立了求解电路问题的系统方法，可以帮助读者更好地理解理论知识并减少计算错误。
- 计算机仿真软件。书中使用面向Windows的PSpice软件，并新增了美国国家仪器公司(NI)的MultiSim解法，将理论与实际完美结合。

作者简介



Charles K. Alexander 分别于1967年和1971年获得俄亥俄大学的电气工程硕士学位和博士学位，现任美国克利夫兰州立大学菲恩工学院电气与计算机工程系教授，并任电子学与航空航天技术研究中心主任。Alexander博士是IEEE的会士，曾任IEEE主席和CEO。他于1984年获得IEEE百年奖章，还先后荣获英国工程委员会颁发的杰出教育成就奖和杰出工程教育领导奖。



Matthew N. O. Sadiku 博士，美国普雷里维尤农工大学教授，兼任IEEE《Transactions on Education》杂志副主编。他曾在朗讯、波音等公司从事研发工作，发表过170余篇学术论文，出版过近30部著作。

Mc
Graw
Hill
Education

www.mheducation.com

投稿热线: (010) 88379604

客服热线: (010) 88378991 88361066

购书热线: (010) 68326294 88379649 68995259

封面设计: 金易 杨彬



华章网站: www.hzbook.com

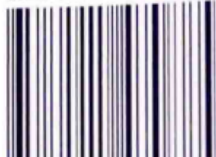
网上购书: www.china-pub.com

数字阅读: www.hzmedia.com.cn

Mc
Graw
Hill
Education

上架指导: 电路基础

ISBN 978-7-111-47088-5



9 787111 470885 >

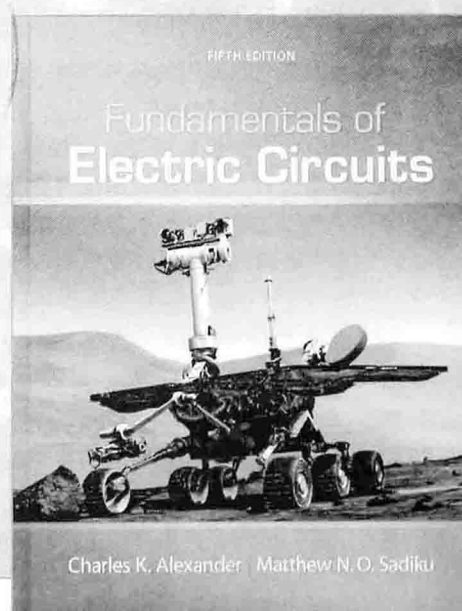
定价: 129.00元

电路基础

(原书第5版)

[美] Charles K. Alexander 著
Matthew N. O. Sadiku
段哲民 周巍 李宏 尹熙鹏 等译

*Fundamentals
of Electric Circuits
Fifth Edition*



机械工业出版社
China Machine Press

图书在版编目 (CIP) 数据

电路基础 (原书第 5 版) / (美) 亚历山大 (Alexander, C. K.) 等著; 段哲民等译. —北京: 机械工业出版社, 2014.7

(国外电子与电气工程技术丛书)

书名原文: Fundamentals of Electric Circuits, Fifth Edition

ISBN 978-7-111-47088-5

I. 电… II. ①亚… ②段… III. 电路理论 IV. TM13

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 131094 号

本书版权登记号: 图字: 01-2012-8917

Charles K. Alexander, Matthew N. O. Sadiku: Fundamentals of Electric Circuits, Fifth Edition (ISBN: 978-0-07-338057-5).

Copyright © 2013 by McGraw-Hill Education.

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including without limitation photocopying, recording, taping, or any database, information or retrieval system, without the prior written permission of the publisher.

This authorized Chinese translation edition is jointly published by McGraw-Hill Education and China Machine Press. This edition is authorized for sale in the People's Republic of China only, excluding Hong Kong, Macao SAR and Taiwan.

Copyright © 2014 by McGraw-Hill Education and China Machine Press.

版权所有。未经出版人事先书面许可, 对本出版物的任何部分不得以任何方式或途径复制或传播, 包括但不限于复印、录制、录音, 或通过任何数据库、信息或可检索的系统。

本授权中文简体字翻译版由麦格劳-希尔(亚洲)教育出版公司和机械工业出版社合作出版。此版本经授权仅限在中华人民共和国境内(不包括香港特别行政区、澳门特别行政区和台湾)销售。

版权 © 2014 麦格劳-希尔(亚洲)教育出版公司与机械工业出版社所有。

本书封面贴有 McGraw-Hill Education 公司防伪标签, 无标签者不得销售。

本书是电路课程的经典教材, 以基础知识和分析方法为主, 内容细致易懂。全书分为直流电路、交流电路和高级电路分析三个部分, 包括基本定律和定理、一阶电路、二阶电路、正弦稳态分析、三相电路、拉普拉斯变换和傅里叶变换等, 附有大量的例题、习题及应用实例, 并结合 PSpice 和 MultiSim 电路仿真技术, 以六步解题法贯穿全书。此外, 书中还穿插有电子学领域的科学家简介, 并特别为读者提供了增强技能与拓展事业的方法与指导。

本书既可作为电子与电气专业学生的教科书, 也适于自学者使用, 或供相关技术人员参考。

出版发行: 机械工业出版社 (北京市西城区百万庄大街 22 号 邮政编码: 100037)

责任编辑: 曲 熠

责任校对: 董纪丽

印 刷: 北京瑞德印刷有限公司

版 次: 2014 年 7 月第 1 版第 1 次印刷

开 本: 185mm × 260mm 1/16

印 张: 44.5

书 号: ISBN 978-7-111-47088-5

定 价: 129.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

客服热线: (010) 88378991 88361066

投稿热线: (010) 88379604

购书热线: (010) 68326294 88379649 68995259

读者信箱: hzjsj@hzbook.com

版权所有·侵权必究

封底无防伪标均为盗版

本书法律顾问: 北京大成律师事务所 韩光/邹晓东

出版者的话

文艺复兴以降，源远流长的科学精神和逐步形成的学术规范，使西方国家在自然科学的各个领域中取得了垄断性的优势；也正是这样的传统，使美国在信息技术发展的六十多年间名家辈出、独领风骚。在商业化的进程中，美国的产业界与教育界越来越紧密地结合，信息学科中的许多泰山北斗同时身处科研和教学的最前线，由此而产生的经典科学著作，不仅擘划了研究的范畴，还揭示了学术的源变，既遵循学术规范，又自有学者个性，其价值并不会因年月的流逝而减退。

近年，在全球信息化大潮的推动下，我国的信息产业发展迅猛，对专业人才的需求日益迫切。这对我国教育界和出版界都既是机遇，也是挑战；而专业教材的建设在教育战略上显得举足轻重。在我国信息技术发展时间较短的现状下，美国等发达国家在其信息科学发展的几十年间积淀和发展的经典教材仍有许多值得借鉴之处。因此，引进一批国外优秀教材将对我国教育事业的发展起到积极的推动作用，也是与世界接轨、建设真正的世界一流大学的必由之路。

机械工业出版社华章公司较早意识到“出版要为教育服务”。自1998年开始，我们就将工作重点放在了遴选、移译国外优秀教材上。经过多年的不懈努力，我们与Pearson、McGraw-Hill、Elsevier、John Wiley & Sons、CRC、Springer等世界著名出版公司建立了良好的合作关系，从他们现有的数百种教材中甄选出Thomas L. Floyd、Charles K. Alexander、Behzad Razavi、John G. Proakis、Stephen Brown、Allan R. Hambley、Albert Malvino、Mark I. Montrose、David A. Johns、Peter Wilson、H. Vincent Poor、Dikshitulu K. Kalluri、Bhag Singh Guru、Stephane Mallat等大师名家的经典教材，以“国外电子与电气工程技术丛书”为总称出版，供读者学习、研究及珍藏。这些书籍在读者中树立了良好的口碑，并被许多高校采用为正式教材和参考书籍。其影印版“经典原版书库”作为姊妹篇也越来越多被实施双语教学的学校所采用。

权威的作者、经典的教材、一流的译者、严格的审校、精细的编辑，这些因素使我们的图书有了质量的保证。随着电气与电子信息学科建设的不断完善和教材改革的逐渐深化，教育界对国外电气与电子信息教材的需求和应用都将步入一个新的阶段，我们的目标是尽善尽美，而反馈的意见正是我们达到这一终极目标的重要帮助。华章公司欢迎老师和读者对我们的工作提出建议或给予指正，我们的联系方式如下：

华章网站：www.hzbook.com

电子邮件：hzjsj@hzbook.com

联系电话：(010) 88379604

联系地址：北京市西城区百万庄南街1号

邮政编码：100037



华章教育

华章科技图书出版中心

译者序

“电路基础”这门课程是研究电路理论的基础课程，通过学习使学生掌握电路的基本概念、基本理论和分析电路的基本方法，为学习后续课程提供必要的理论知识，也为进一步研究电路理论和进行电路设计打好基础。

《Fundamentals of Electric Circuits》是由美国俄亥俄州克利夫兰州立大学的 Charles K. Alexander 教授和普雷里维尤农工大学的 Matthew N. O. Sadiku 教授为电类各专业大学生学习电路课程而编写的教科书，被众多国外著名大学选用。该书由 McGraw-Hill 公司于 2000 年出版第 1 版，2013 年出版第 5 版，译者受机械工业出版社委托对该教材第 5 版进行翻译。

《Fundamentals of Electric Circuits》(Fifth Edition) 讲述的是电路理论的基础知识，内容分为直流电路、交流电路、高级电路分析三大部分。第一部分讲述了电路分析的理论依据，包括电路的基本概念、基本定律和定理、基本分析方法和基本理论。第二部分讲述了交流电路的基本概念、基本分析方法和典型交流电路的实际应用。第三部分从更高理论层次对电路进行系统的分析。该教材内容丰富、概念清晰、层次分明、通俗易懂。每章的开始处都有一段题为“增强技能与拓展事业”的内容，介绍了与章节内容有关的工程应用背景，每章中还包括电学发展历史上若干名人的事迹，这些内容可以使读者从不同的侧面得到有益的启示。在每章的末尾给出了关键知识点的小结，有助于学生进一步理解所学知识，形成完整的知识体系。每一章都包含大量复习题和习题，并提供部分答案，十分有利于自学。本书还十分注重理论联系实际，每一章的应用实例部分通过讨论一两个实际问题或器件为读者提供了很大帮助。总之，本书的内容相当全面，基本涵盖了电路原理的各个方面，非常适合用作学习电路基本理论的本科生教科书，也适合作为正在从事电路设计的工程人员的参考书。

本书由西北工业大学电子信息学院的教师段哲民（第 1 章～第 6 章）、周巍（前言、第 9 章～第 14 章和附录）、李宏（第 15 章～第 19 章）、尹熙鹏（第 7 章～第 8 章）翻译，全书由段哲民审校和统稿，参加翻译的还有李茸、亢润龙、董兵超、张秀、郭龙和陈洋等，在此对他们表示衷心的感谢。由于水平所限，翻译不妥或错误之处在所难免，敬请广大读者批评指正。

译者

2014 年 4 月于西北工业大学

前言

或许你会好奇为什么我们会用美国宇航局（NASA）的火星探测器照片作为原书封面，实际上有许多理由。显然，这张照片让人振奋，探索太空代表了全世界最令人激动的科技前沿。另外，探测器本身大部分都是由各种各样的电路组成，并且必须在无人维护的环境下正常工作，因为一旦出现故障，不可能有人跑到火星上去维修。

探测器必须有能源系统，这个系统提供了探测器活动所需的所有能量，帮助探测器采集、分析样本，将结果反馈给地球并从地球接收指令。地球上的设备与探测器难以协同工作的一个重要原因是，地球与火星间的通信传输时间长达 20min，所以探测器无法根据 NASA 的指令迅速做出回应。

最令人惊讶的是，如此精密复杂的机电设备在飞行数百万公里并反弹到地面后竟能操作得如此精确、可靠。下面的视频介绍了什么是探测器及它是怎样前往火星的：<http://www.youtube.com/watch?v=5UmRx4dEdRI>。

特色

本版新增内容

第 13 章中增加了磁耦合模型，它可以简化分析过程并提高读者发现错误的能力。这个模型我们已成功运用多年，现在是时候把它加入本书中。另外，本书有 600 多道新增或修改过的章末习题和练习。

本书还为几乎所有可用 PSpice 解决的问题增加了 National Instruments MultiSim™ 解决方案，我们的网站上有 MultiSim 教程。增加 MultiSim 是因为其用户界面更友好且相对于 PSpice 有更多的分析选项。另外，它使得电路的修改更加容易，从而有利于观察电路参数是如何影响电压、电流和功率的。我们的网站上也有 PSpice、MATLAB® 和 KCIDE 的教程以供读者参考。

本书第 16 章新增了 43 道习题，目的在于强化运用 s 域分析技术求解电路中的电压与电流的方法。

从之前版本保留的特色

学习电路分析课程或许是学生第一次接触电气工程。通过这门课程，学生可以强化日后设计电路所需的技能。121 个“设计问题”是本书的重要部分，通过这些问题所强化的能力将会在以后的设计实践中发挥作用。但是，只学习电路基础课程不可能充分提升设计能力，若想全面提升设计能力，学生通常需要在大学那一年积累设计经验。但这并不意味着有些技能无法通过电路课程得到培养和锻炼。本书中包含帮助学生提高创新能力的开放性问题，这是学习电路设计的一个重要部分。之前版本已有一些开放性问题，在这一版中，我们希望在这个重要方面增加更多内容并且已经开发出一种实现方法。对于设计类问题，我们的目标是通过解决问题让学生学到更多理论和解决问题的方法。何不让学生跟我们一样设计问题呢？其实这正是我们在每个章节所做的事情。在常规题目里，我们让学生设计问题以帮助其他同学更好地理解概念。这将会带来两个非常重要的结果：第一是学生会基础理论有更好的理解，第二是学生的基础设计能力会得到加强。通过教学能够更有效地学习课本的内容，并且通常会学得更好。设计问题是教学过程中的关键之一，在适当的情况下，应该鼓励学生自己设计问题，这些问题中的数字可以比较简单并且数学运算

也不必太复杂。

本书的一大优势是，书中共有 2447 道例题、练习、课后复习题、习题和综合理解题。所有练习和奇数编号的习题都提供答案。

本书第 5 版的主要目标与前几版一样——以相对于其他课本更清晰、更有趣、更易理解的方式展现电路分析过程，并且帮助学生在工程入门阶段就看到乐趣。具体方式如下。

● 每章开篇与小结

每章以“增强技能与拓展事业”的讨论开篇，内容涉及电气工程的各个子学科，有助于读者成功解决问题并拓展职业生涯。之后的引言介绍当前章节与之前章节的关联和本章目标。每章最后是关键知识点和公式的小结。

● 解决问题的方法学

第 1 章介绍了解决电路问题的六步式方法，这种方法贯穿全书并配有软件仿真内容。

● 学生友好型书写风格

所有定律和定理都通过逻辑清晰、层层递进的方式呈现，我们尽可能地避免冗长的叙述及可能会隐藏概念或引起理解障碍的细节。

● 加框的公式与关键术语

书中的重要公式均带有方框，以帮助学生分清主次，同时可确保学生清楚地理解关键问题。关键术语均有明确的定义，并用突出的字体表示出来。

● 提示

提示可作为补充内容，是书中知识的附加阐述或交叉参考信息。有的提醒读者不要犯一些特定的常见错误，有的提供了解决问题的深刻见解。

● 典型例题

每一节的后面都给出了解法详尽的典型例题，它们是本书的重要组成部分。这些例题可以帮助学生更好地理解解题过程，有助于培养学生独立解决问题的信心。部分例题给出了两三种解法，以便学生比较不同的解法，加深对所学内容的理解。

● 练习

为了给学生提供实践的机会，紧接典型例题安排了一道提供答案的练习，学生可以按照例题中的步骤来求解练习题，无需从别处查阅或者翻看书末的答案。练习同时还可以检查学生对前述例题的理解程度，从而在学习下一节内容之前进一步掌握本节内容。学生可以通过网站获得练习的完整求解过程。

● 应用实例

各章的最后一节专门介绍与本章概念相关的实际应用，每章至少提供一个实际应用问题或实际器件，帮助学生了解如何将所学概念应用于实际系统中。

● 复习题

每章的结尾还给出了带有答案的多项选择题作为复习题，目的是提供典型例题或章末习题中未涉及的一些解题的小“窍门”，既可将其作为自测练习，同时也可以帮助学生了解自己对本章内容的掌握程度。

● 计算机工具

按照 ABET® 对集成计算机工具的要求，本书以友好型书写风格鼓励学生使用 PSpice、MATLAB 和 KCIDE 等计算机辅助分析软件，培养学生设计能力。本书前面章节介绍了 PSpice 软件，为帮助学生熟练掌握这一软件，PSpice 内容贯穿全书。在我们的网站可以查看相关的学习指南。此外，本书也介绍了 MATLAB 软件。

● 设计问题

“设计问题”类习题旨在帮助学生提高设计能力。

● 历史珍闻

本书的历史珍闻介绍了电子工程相关领域的重要先驱人物和历史事件。

● 运算放大器的讨论

本书在较为靠前的章节中介绍了构成电路的基本元件——运算放大器 (op amp)。

● 傅里叶变换和拉普拉斯变换

为了方便读者从电路课程向信号与系统课程过渡,本书简明而全面地介绍了傅里叶变换和拉普拉斯变换。感兴趣的教师可以从讲述一阶电路求解的内容过渡到第 15 章,这样也就非常自然地拉普拉斯变换过渡到交流傅里叶分析。

● 扩展的例题

按照六步解题法介绍的典型例题为学生提供了解题的统一途径,每章至少有一道例题以这种方式讲解。

● EC 2000 章节开场白

根据 ABET 最新技能标准 3,各章的开场白专门讨论学生应该如何掌握有效拓展工程师职业生涯所需的技能,这些技能对于学生在校学习和今后工作都是非常重要的,因此这部分内容采用标题“增强技能与拓展事业”。

● 课后习题

这版包含 468 道新增的或修改的章后习题,为学生提供了充分的练习,同时帮助学生掌握关键概念。

● 课后习题图标

与工程设计有关的习题以及能够利用 PSpice、MultiSim、KCIDe 或 MATLAB 求解的习题均采用图标予以标识。

本书的组织结构

本书可以作为两或三学期的线性电路分析教程的教材,教师也可以选择适当的章节作为一学期课程的教材。全书可以分为三部分。

- 第一部分包括第 1~8 章,主要介绍直流电路,包括电路的基本定律和定理,电路分析方法以及有源元件与无源元件等内容。
- 第二部分包括第 9~14 章,主要介绍交流电路,包括相量、电路的正弦稳态分析、交流功率、交流电的有效值、三相系统以及频率响应等内容。
- 第三部分包括第 15~19 章,主要介绍高级电路分析方法,包括拉普拉斯变换、傅里叶级数、傅里叶变换以及二端口网络分析等内容。

这三部分所包含的内容已经超出了两学期课程的需要,因此教师应根据需要选择必要的章节。书中带剑号 (†) 的内容可以略去不讲或者简要讲解,也可以作为学生的作业,省略这些并不会影响内容的连贯性。各章都安排有按节编排的大量习题,教师可以选择其中一些作为课堂例题,另外一些作为课后作业。如前所述,这一版教材采用三种图标。我们使用 **PS** 图标标识需要利用 PSpice 求解的习题,这类习题的电路比较复杂,利用 PSpice 或 MultiSim 后可以使求解过程变得更加容易。另外,需要利用 PSpice 和 MultiSim 验证结果正确性的习题也有 **PS** 的图标。**ML** 图标标识需要利用 MATLAB 求解或使用 MATLAB 求解更有效的复杂习题,以及需利用 MATLAB 验证结果正确性的习题。最后, **ED** 图标标识有助于培养学生工程设计技能的习题。难度较大的习题前都标有星号 (*)。

综合理解题安排在每章最后,它们绝大多数是应用性问题,需要利用本章学到的各种解题技能。

对先修课程的要求

作为电路分析的基础课程,在学习本书之前需要先修物理学与微积分。虽然熟悉有关复数的知识对学

习本书后半部分的内容有所帮助，但它并不是必须掌握的内容。本书的主要优势在于，学生需要掌握的所有数学公式以及物理基本原理都包括在其中。

补充资源

麦格劳-希尔连接 (McGraw-Hill Connect®) 系统

麦格劳-希尔连接系统是一个基于网络的任务分配和评估平台，通过这个平台，学生与课程、教师以及现在或将来必须知道的重要概念之间建立了更好的连接。教师可以在系统中分配任务或组织在线测试，学生可以按自己的进度练习重要的技能。关于该系统的更多细节可访问网站 www.mcgrawhillconnect.com/engineering。

教师与学生网站

登录 www.mhhe.com/alexander 可以查找与本书相关的许多额外的教师与学生资源。包括所有练习和章末习题的答案、PSpice 和 MultiSim 问题的答案、电子课件、图像文件、教师指南、专题报告的网络分析，工程师考试问题、抽认卡，以及 PSpice、MultiSim、MATLAB 和 KCIDE 的引例。这个网站以 COSMOS 为特色，是一个完整的在线解决方案组织系统，它允许教师用本书的章末习题创建日常的家庭作业、小测验和考试。

电路集成设计环境 KCIDE

KCIDE 是由 NASA 资助、克利夫兰州立大学 (Cleveland State University) 开发的软件，利用本书中的六步问题求解方法帮助学生学习电路问题。KCIDE 电路软件允许学生利用 PSpice 和 MATLAB 解决电路问题、跟踪解题过程并存储解题过程供以后参考。另外，该软件可以自动生成 Word 文件以及 Power-Point 演示文稿。KCIDE 软件可以免费下载。

希望本书及补充资源能够为教师提供有效组织教学所需的全部教辅工具。

麦格劳-希尔创建 (McGraw-Hill Create™) 系统

为你的教学制作精巧匹配的教育资源！有了麦格劳-希尔创建系统，你可以轻松地重排章节，结合其他内容源里的材料，快速上传已完成的课程大纲或者教学笔记。在创建系统中，你可以在数以万计的官方笔记中搜索需要内容，并安排内容结构以适应自己的教学风格。创建系统甚至允许你选择封面并添加名字、学校和课程信息。订购创建的书籍后，你将在 3~5 个工作日内得到一本赠阅本，或者在几分钟内收到赠阅本的电子版。登录 www.mcgrawhillcreate.com 并注册麦格劳-希尔创建系统，量身定制你的教学方案。

致谢

在本书出版之际，首先要感谢来自我们的妻子 (Hannah 与 Kikelomo)、女儿 (Christina、Tamara、Jennifer、Motunrayo、Ann 和 Joyce)、儿子 (Baixi) 以及其他家庭成员的鼎力支持。此外，我们还要感谢 Baixi (现在是 Baixi Su Alexander 博士) 悉心地审校了本书的习题，确保习题清晰易懂，准确无误。

在麦格劳-希尔集团，我们将要感谢以下编辑和工作人员：Raghu Srinivasan，出版商、高级赞助编辑；Lora Kalb-Neyens，开发编辑；Curt Reynolds，市场经理；Joyce Watters，产品经理；还有 Margarite Reynolds，设计者。

第 5 版得益于那些为前 4 版的成功做出贡献的杰出评论家和研讨会参与者！另外，以下人员为本书的

成功出版做出了重大贡献（按字母顺序排列）：

Alok Berry, 乔治梅森大学 (George Mason University)

Vahe Caliskan, 伊利诺大学芝加哥分校 (University of Illinois-Chicago)

Archie Holmes, 弗吉尼亚大学 (University of Virginia)

Anton Kruger, 爱荷华大学 (University of Iowa)

Arnost Neugroschel, 佛罗里达大学 (University of Florida)

Arun Ravindran, 北卡罗来纳大学夏洛特分校 (University of North Carolina-Charlotte)

最后，我们要感谢使用之前版本的教师和学生给我们提供的反馈，希望本书也能得到这样的反馈，读者可随时给我们发送电子邮件，或者直接与出版商联系。Charles Alexander 的联系方式是 c.alexander@ieee.org，Matthew Sadiku 的联系方式是 sadiku@ieee.org。

C. K. Alexander 与 M. N. O. Sadiku

学生须知

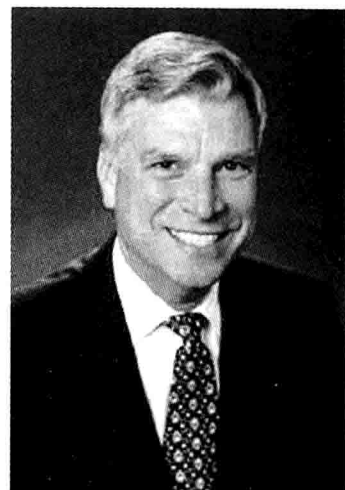
这可能是你的第一门电气工程课程。尽管电气工程是一门令人兴奋并具有挑战性的学科，但是这门课程可能会使你畏惧。为了消除这种恐惧心理，我们写作了此书。一本好的教科书和一位优秀的教授是你学习这门课程的优势——但是没人能代替你学习。如果能够记住下面几点，你将会在这门课中表现得更好。

- 因为本课程是大多数电气工程课程的基础，所以你要投入尽可能多的精力有规律地学习这门课程。
- 解题是学习过程中的一个必需部分，应当尽可能多地去解决问题。首先求解每个例题后边的练习，然后继续求解每章后边的习题，学习的最好方法就是解题。其中，星号表示有一定难度的习题。
- 全书都会用到 PSpice 和 MultiSim 两种计算机电路分析软件。PSpice 是个人计算机版本的 Spice，是很多大学里流行的标准电路分析软件。在我们的网站上介绍了 Windows 版本的 PSpice 和 MultiSim。认真学习 PSpice 和（或）MultiSim，因为你可以使用这些软件检查任何电路问题并确保得到正确的解决方案。
- MATLAB 是另一个电路分析中非常有用的软件，其他的课程中也会用到。在我们的网站上可以找到一个简短的 MATLAB 教程。学习 MATLAB 的最好方法是，一旦你知道了某个命令，就开始用它工作。
- 每一章的结尾部分都会介绍该章内容的应用实例。这部分中的概念可能较新且较为复杂，但你将会在其他课程中学到有关它们的更多细节。我们的主要目的在于使你对这些概念有大致的了解。
- 做一做每章后边的复习题，它们将帮助你发现一些在课堂上或者教科书中没有透露的小“窍门”。
- 显然，只要你付出足够多的努力，就会发现这本书中涉及的技术细节是容易理解的。此外，所有为理解这些理论所必需的数学和物理知识还将在其他工程课程中有所应用。同时，本书也专注于为相关专业的学生、工作者和研究生学位攻读者提供参考。
- 结束了此门课程后，你会很轻易地出售课本，然而，我们的建议是不要出售你的工具书！书一直是昂贵的，但这些书的花费和我早在 20 世纪 60 年代购买的电路书几乎是一样的。实际上，它是很便宜的。除此之外，过去的工程书远没有现在的有用。当我还是一个学生时，我没有卖掉任何工程课本，并且我很庆幸我没有！我发现在我的整个职业生涯中，大多数课本依然有用。
- 奇数编号习题答案见附录 A。

C. K. A 与 M. N. O. S

作者简介

Charles K. Alexander 是美国俄亥俄州克利夫兰州立大学菲恩 (Fenn) 工学院电气与计算机工程系教授, 并担任电子学与航空航天技术研究中心的主任。2002~2006 年, 他任 Fenn 工学院院长。2004~2007 年, 他任俄亥俄 ICE 研究中心主任, 即仪器、控制、电子学与传感器研究中心 (克利夫兰州立大学、Case 大学, Akron 大学和俄亥俄工业组织联合成立)。1998~2002 年, 他担任腐蚀与多相技术研究所代理主任 (2000 年和 2001 年) 和俄亥俄大学电气工程与计算机科学系的 Stocker 访问教授。1994~1996 年, 他任加利福尼亚州立大学北岭分校电气工程与计算机科学系主任。



1989~1994 年, 他担任 Temple 大学工学院代理院长, 并在 1986~1989 年任 Temple 大学电气工程系的教授和系主任。1980~1986 年, 他在田纳西技术大学担任同样职位。1972~1980 年, 他分别是扬斯顿州立大学电气工程系的副教授和教授, 并于 1977 年因“杰出的教学和研究”而获得了杰出教授的称号。1971~1972 年, 他是俄亥俄大学电气工程系的助理教授。他 1965 年获得俄亥俄北方大学电气工程学士学位, 又分别于 1967 年和 1971 年获得俄亥俄大学的电气工程学硕士学位和博士学位。

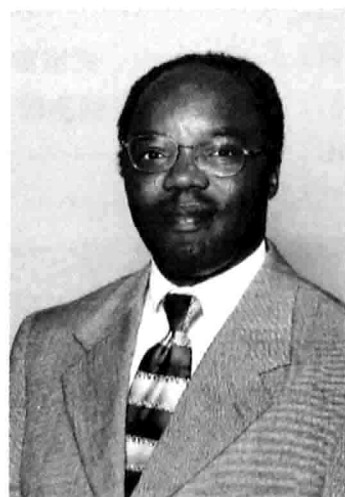
Alexander 博士现在是 23 个公司和政府机构的顾问, 包括空军、海军和一些法律公司。他已获得超过 8500 万美元的研究和开发基金, 项目范围从太阳能应用到软件工程。他已出版 40 部著作, 包括一套练习册和一系列讲课录像, 他是麦格劳-希尔集团出版的《Fundamentals of Electric Circuits, Problem Solving Made Almost Easy》和《Standard Handbook of Electronic Engineering》(第 5 版) 等书的合著者。他发表了 500 余篇论文和技术报告。

Alexander 博士是 IEEE 的合作伙伴并且在 1997 年担任其主席和 CEO。1993 年和 1994 年, 他任 IEEE 专业机构的副主席, 美国机构委员会 (USAB) 主席。1991~1992 年, 他是 IEEE 第二区的主任, 负责地区机构委员会 (RAB) 和 USAB。他还是教育机构委员会的委员。他担任过 USAB 会员机构委员会主席和 USAB 工程师专业机构委员会的副主席, 以及 RAB 学生机构委员会和 USAB 学生专业教育委员会的主席。

1998 年, 他获得了工程委员会的杰出工程教育成就奖, 并于 1996 年获得了同一组织授予的杰出工程教育领导奖。1994 年, 他因“在工程教育领域和工程类专业发展方面的领导才能”成为 IEEE 的合伙人。1984 年他获得了 IEEE 百年奖章, 1983 年又被授予了 IEEE/RAB 改革奖以表彰他对 RAB 的目标和任务所做出的突出贡献。

Matthew N. O. Sadiku 是美国普雷里维尤农工大学教授。在就职于普雷里维尤农工大学之前, 他在波卡拉顿的佛罗里达亚特兰大大学和费城的天普 (Temple) 大学任教。他也曾为朗讯/亚美亚和波音卫星系统工作。

Sadiku 博士发表过 170 余篇学术论文, 出版过近 30 部著作, 包括



《Elements of Electromagnetics》(第3版, 牛津大学出版社, 2001)、《Numerical Techniques in electromagnetics》(第2版, CRC出版社, 2000)、《Simulation of Local Area Networks》(与 M. Ilyas 合著, CRC出版社, 1994)、《Metropolitan Area Network》(CRC出版社, 1994) 和《Fundamentals of Electric Circuits》(与麦克劳-希尔集团的 C. K. Alexander 合著)。他的书被翻译为韩语、汉语、意大利语和西班牙语, 读者遍布全球各地。他曾因电气工程领域的杰出贡献获得 2000 年麦克劳-希尔集团 / Jacob Millman 奖。他曾任 IEEE 第 2 区学生活动组主席以及 IEEE “教育汇报” 的副主编。他在库克维的田纳西工程大学获得博士学位。

目 录

出版者的话
译者序
前言
学生须知
作者简介

第一部分 直流电路

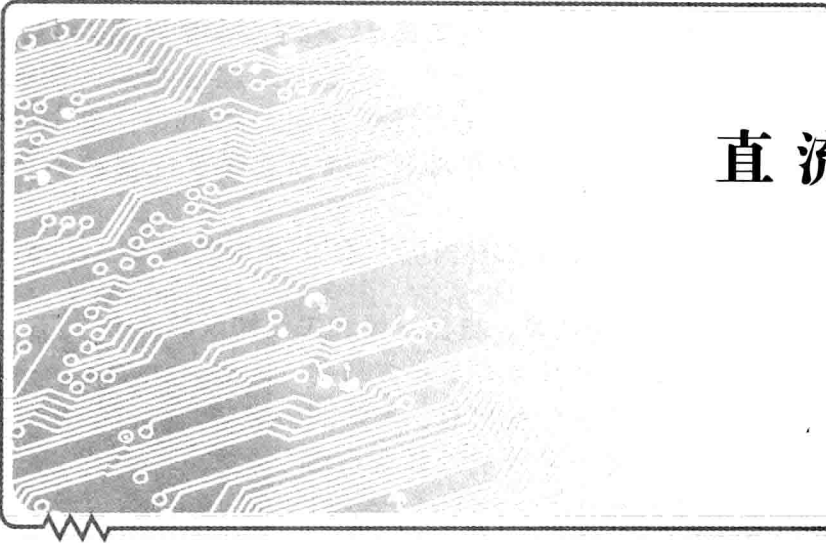
第 1 章 基本概念	2
1.1 引言	2
1.2 计量单位制	3
1.3 电荷与电流	4
1.4 电压	6
1.5 功率与能量	7
1.6 电路元件	10
† 1.7 应用实例	12
† 1.8 解题方法	14
1.9 本章小结	16
复习题	17
习题	17
综合理解题	19
第 2 章 基本定律	21
2.1 引言	21
2.2 欧姆定律	21
† 2.3 节点、支路与回路	25
2.4 基尔霍夫定律	27
2.5 串联电阻及其分压	31
2.6 并联电阻及其分流	32
† 2.7 $Y-\Delta$ 变换	37
† 2.8 应用实例	42
2.9 本章小结	46
复习题	47
习题	48
综合理解题	57
第 3 章 分析方法	59
3.1 引言	59

3.2 节点分析法	60
3.3 含有电压源电路的节点 分析法	65
3.4 网孔分析法	68
3.5 含有电流源电路的网孔 分析法	72
† 3.6 基于观察法的节点分析与 网孔分析	74
3.7 节点分析法与网孔分析法的 比较	77
3.8 基于 PSpice 的电路分析	78
† 3.9 应用实例：直流晶体管电路	79
3.10 本章小结	84
复习题	84
习题	85
综合理解题	95
第 4 章 电路定理	96
4.1 引言	96
4.2 线性性质	96
4.3 叠加定理	98
4.4 电源变换	102
4.5 戴维南定理	105
4.6 诺顿定理	110
† 4.7 戴维南定理与诺顿定理的 推导	113
4.8 最大功率传输定理	114
4.9 基于 PSpice 的电路定理验证	115
† 4.10 应用实例	118
4.11 本章小结	122
复习题	122
习题	123
综合理解题	132
第 5 章 运算放大器	133
5.1 引言	133
5.2 运算放大器	134

5.3 理想运算放大器	136	8.3 无源串联 RLC 电路	239
5.4 反相放大器	138	8.4 无源并联 RLC 电路	244
5.5 同相放大器	139	8.5 串联 RLC 电路的阶跃响应	248
5.6 加法放大器	141	8.6 并联 RLC 电路的阶跃响应	252
5.7 差分放大器	142	8.7 一般二阶电路	253
5.8 运算放大器的级联电路	144	8.8 二阶运算放大器电路	257
5.9 基于 PSpice 的运算放大器 电路分析	146	8.9 基于 PSpice 的 RLC 电路 分析	259
†5.10 应用实例	147	†8.10 对偶原理	262
5.11 本章小结	150	†8.11 应用实例	264
复习题	151	8.12 本章小结	266
习题	152	复习题	267
综合理解题	161	习题	268
第 6 章 电容与电感	162	综合理解题	275
6.1 引言	162		
6.2 电容	163		
6.3 电容的串并联	167		
6.4 电感	170		
6.5 电感的串并联	173		
†6.6 应用实例	176		
6.7 本章小结	181		
复习题	182		
习题	182		
综合理解题	190		
第 7 章 一阶电路	191		
7.1 引言	191		
7.2 无源 RC 电路	192		
7.3 无源 RL 电路	195		
7.4 奇异函数	200		
7.5 RC 电路的阶跃响应	206		
7.6 RL 电路的阶跃响应	210		
†7.7 一阶运算放大器电路	214		
7.8 基于 PSpice 的暂态分析	217		
†7.9 应用实例	220		
7.10 本章小结	224		
复习题	225		
习题	226		
综合理解题	234		
第 8 章 二阶电路	235		
8.1 引言	235		
8.2 计算初值和终值	236		
		第二部分 交流电路	
		第 9 章 正弦量与相量	278
		9.1 引言	279
		9.2 正弦信号	279
		9.3 相量	283
		9.4 电路元件的相量关系	288
		9.5 阻抗与导纳	290
		†9.6 频域中的基尔霍夫定律	292
		9.7 阻抗合并	292
		†9.8 应用实例	296
		9.9 本章小结	300
		复习题	301
		习题	302
		综合理解题	308
		第 10 章 正弦稳态分析	310
		10.1 引言	310
		10.2 节点分析法	311
		10.3 网孔分析法	313
		10.4 叠加定理	315
		10.5 电源变换	317
		10.6 戴维南等效电路与诺顿 等效电路	318
		10.7 交流运算放大器电路	321
		10.8 基于 PSpice 的交流电路 分析	323
		†10.9 应用实例	326

10.10 本章小结	328	13.8 基于 PSpice 的磁耦合电路	
复习题	329	分析	432
习题	330	†13.9 应用实例	436
第 11 章 交流功率分析	340	13.10 本章小结	440
11.1 引言	340	复习题	440
11.2 瞬时功率与平均功率	340	习题	441
11.3 最大平均功率传输	344	综合理解题	450
11.4 有效值	346	第 14 章 频率响应	452
11.5 视在功率与功率因数	349	14.1 引言	452
11.6 复功率	351	14.2 传递函数	453
†11.7 交流功率守恒	353	†14.3 分贝表示法	455
11.8 功率因数的校正	356	14.4 伯德图	456
†11.9 应用实例	358	14.5 串联谐振电路	465
11.10 本章小结	361	14.6 并联谐振电路	469
复习题	362	14.7 无源滤波器	471
习题	363	14.8 有源滤波器	475
综合理解题	370	14.9 比例转换	480
第 12 章 三相电路	372	14.10 基于 PSpice 的频率响应	
12.1 引言	372	计算	482
12.2 对称三相电压	374	14.11 基于 MATLAB 的频率响应	
12.3 对称 Y-Y 联结	376	计算	485
12.4 对称 Y- Δ 联结	379	†14.12 应用实例	486
12.5 对称 Δ - Δ 联结	381	14.13 本章小结	490
12.6 对称 Δ -Y 联结	382	复习题	491
12.7 对称系统中的功率	384	习题	492
†12.8 非对称三相系统	388	综合理解题	498
12.9 基于 PSpice 的三相电路			
分析	391		
†12.10 应用实例	395		
12.11 本章小结	401		
复习题	401		
习题	402		
综合理解题	408		
第 13 章 磁耦合电路	410		
13.1 引言	410		
13.2 互感	411		
13.3 耦合电路中的能量	416		
13.4 线性变压器	419		
13.5 理想变压器	423		
13.6 理想自耦变压器	428		
†13.7 三相变压器	430		
		第三部分 高级电路分析	
		第 15 章 拉普拉斯变换简介	500
		15.1 引言	500
		15.2 拉普拉斯变换的定义	501
		15.3 拉普拉斯变换的性质	503
		15.4 拉普拉斯反变换	510
		15.5 卷积积分	515
		†15.6 拉普拉斯变换在微积分方程	
		求解中的应用	521
		15.7 本章小结	523
		复习题	523
		习题	524
		第 16 章 拉普拉斯变换的应用	528
		16.1 引言	528

16.2 电路元件的 s 域模型	529	18.3 傅里叶变换的性质	605
16.3 电路分析	533	18.4 傅里叶变换在电路分析中的 应用	614
16.4 传递函数	536	18.5 帕塞瓦尔定理	616
16.5 状态变量	540	18.6 傅里叶变换和拉普拉斯变换的 比较	618
† 16.6 应用实例	544	† 18.7 应用实例	618
16.7 本章小结	550	18.8 本章小结	621
复习题	551	复习题	622
习题	551	习题	622
综合理解题	560	综合理解题	627
第 17 章 傅里叶级数	561	第 19 章 二端口网络	628
17.1 引言	562	19.1 引言	628
17.2 三角函数形式的傅里 叶级数	562	19.2 阻抗参数	629
17.3 对称周期函数的频谱分析	568	19.3 导纳参数	632
17.4 傅里叶级数在电路分析中的 应用	575	19.4 混合参数	636
17.5 平均功率与方均根值	578	19.5 传输参数	640
17.6 指数形式的傅里叶级数	580	† 19.6 六组参数之间的关系	643
17.7 基于 PSpice 的傅里叶分析	585	19.7 二端口网络的互联	646
† 17.8 应用实例	589	19.8 基于 PSpice 的二端口网络 参数计算	651
17.9 本章小结	591	† 19.9 应用实例	653
复习题	592	19.10 本章小结	659
习题	593	复习题	660
综合理解题	599	习题	661
第 18 章 傅里叶变换	601	综合理解题	669
18.1 引言	601	附录 A 奇数编号习题答案	670
18.2 傅里叶变换的定义	602		



第一部分

直流电路

- 第 1 章 基本概念
- 第 2 章 基本定律
- 第 3 章 分析方法
- 第 4 章 电路定理
- 第 5 章 运算放大器
- 第 6 章 电容与电感
- 第 7 章 一阶电路
- 第 8 章 二阶电路

第1章

基本概念

有的书只需读其中一部分，有的书只需知其梗概，而对于少数好书，则应当通读，细读，反复读。

——Francis Bacon

增强技能与拓展事业

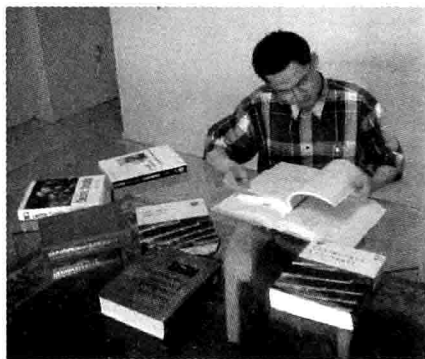
ABET EC 2000 标准(3. a)，“应用数学、自然科学和工程知识的能力”

作为学生，你需要学习数学、自然科学与工程方面的知识，并且能够应用所学的知识来解决工程问题。利用相关领域的基础知识来解决实际问题是一种技能。那么，怎样才能培养和提高自己的这种技能呢？

最好的方法是尽可能多地解决所学课程中遇到的问题。然而，要想真正掌握这种技能，就必须花时间来分析何时、何地、为什么会有困难，这样就能容易地得到解决问题的方案。你会惊奇地发现，所求解的大部分问题都依赖于数学知识而不是对基本理论的理解。你还会发现自己解决问题的速度开始变快。花费时间来思考如何解决问题的方法可以帮助你节约时间，还可以避免失败。

对我而言最有效的解决问题的方法就是“六步解题法”。然后我会认真地分析解决问题的过程中都会在哪里遇到困难。很多时候，我发现出现问题的原因要么是因为自己对问题的理解不够，要么是自己正确运用数学知识解决问题的能力不足。这时我就会去寻找那些基础的数学教材，并且认真复习相关章节的内容，有时还会求解某些例题。所以我总结出了另一个重要的经验：将所有基本的数学、自然科学以及工程教材放在手边。

不断查阅以前所学知识的过程看起来或许非常乏味，但是随着自身技能的提高和知识的增加，这个过程会变得越来越轻松。正是通过这一过程，我才从一名普通学生成长为一名博士，并且成为一名成功的研究员。



Charles Alexander 拍摄

1.1 引言

电路理论和电磁理论是电气工程的两大基础理论，电气工程的所有分支学科都是在此基础上发展起来的，如电源、电机、控制系统、电子学、通信以及电子仪器等许多分支。因此，电路理论是电气工程专业的学生最重要的课程，同时也是那些初学电气工程的学生的最佳起点。学习电路理论对于其他理工类专业的学生也是非常有用的，因为电路是一种很好的研究能量系统的模型，并且其中包含了应用数学、物理学和拓扑学等诸多内容。

在电气工程中，我们经常要研究一个点到另一个点的通信和能量传输，而实现这种功能需要将若干电气元件组合起来。这种由电气元件相互连接而成的整体称为电路(electric circuit)，电路中的每个组成部分称为元件(element)。

电路是由电气元件相互连接而成的整体。

一个简单的电路如图 1-1 所示，此电路由三个基本元件组成：电池、灯和导线。这个电路可以独立存在，也可构成几种应用，比如手电筒、探照灯等。

一个复杂的实际电路如图 1-2 所示，此电路是收音机的原理图。虽然看起来很复杂，但是利用本书所介绍的方法我们可以对该电路进行分析。本书的目标就是学习电路的分析方法和计算机软件的应用方法。

在电气系统中，不同的电路完成不同的任务，本书的目标不是研究这些电路的不同应用，而是专注于对电路的分析，并通过对电路的分析来研究电路的特性。例如：电路在给定激励的情况下是如何响应的？电路中相互连接的元件和器件是如何相互作用的？

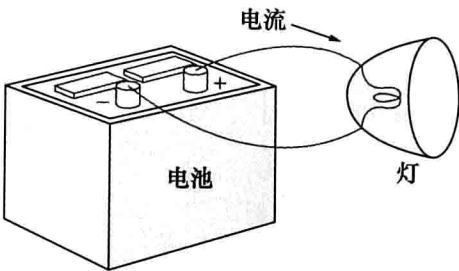


图 1-1 一个简单的电路

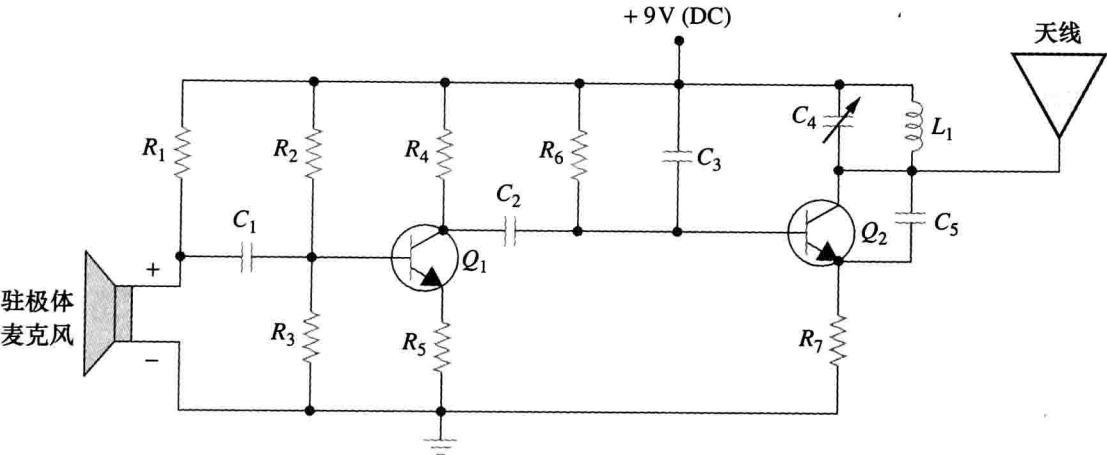


图 1-2 收音机原理图

本章首先学习几个基本概念：电荷、电流、电压、电路元件、功率和能量。在定义这些概念之前，先来介绍本书所采用的计量单位。

1.2 计量单位制

电子工程师需要处理很多测量工作，但是无论这些工作是在哪个国家完成的，都必须采用所有专业人士都能明白的标准语言来表示测量结果。这种国际计量语言就是国际单位制(International System of Unit, SI)，于 1960 年由国际度量会议确定采用。该计量单位制包括七个基本单位，由此可以推导出其他所有物理量的单位。表 1-1 给出了六个基本单位和一个与本书相关的导出单位。国际单位制的使用将贯穿全书。

表 1-1 六个基本单位与一个和本书相关的导出单位

量的名称	单位名称	单位符号	量的名称	单位名称	单位符号
长度	米	m	质量	千克	kg
时间	秒	s	电流	安[培]	A
热力学温度	开[尔文]	K	电荷量	库[仑]	C
发光强度	坎[德拉]	cd			

国际单位制的一大优势在于可以利用基于 10 的幂次方的前缀将更大或者更小的单位与基本单位联系起来，表 1-2 给出了国际单位制的前缀及其符号。例如，以下几种形式都

表示同一种距离：

$600\,000\,000\text{mm}$ $600\,000\text{m}$ 600km

表 1-2 国际单位制前缀

所表示的因数	前缀名称	前缀符号	所表示的因数	前缀名称	前缀符号
10^{18}	艾[可萨]	E	10^{-1}	分	d
10^{15}	拍[它]	P	10^{-2}	厘	c
10^{12}	太[拉]	T	10^{-3}	毫	m
10^9	吉[咖]	G	10^{-6}	微	μ
10^6	兆	M	10^{-9}	纳[诺]	n
10^3	千	k	10^{-12}	皮[可]	p
10^2	百	h	10^{-15}	飞[母托]	f
10^1	十	da	10^{-18}	阿[托]	a

1.3 电荷与电流

电荷的概念是解释各种电现象的基础，而且电路中最基本的物理量就是电荷(electric charge)。当人们脱掉羊毛衫或者在地毯上行走的时候，可能会受到静电冲击，这就是电荷的影响。

电荷是构成物质的原子的一种电气特性，单位是库仑(C)。

我们在基础物理学中学习过，所有的物质都是由原子构成的，每个原子又是由电子、质子和中子组成的。电子所带的电荷 e 是负的，其电荷量为 $1.602 \times 10^{-19} \text{C}$ ，而质子所带的则是电荷量与电子相同的正电荷。原子中数量相等的质子和电子使其呈现中性状态。

关于电荷要注意以下三点：

- 1. 对于电荷而言，库仑是一个相当大的单位，1C 的电荷量中包含了 $1/(1.602 \times 10^{-19}) = 6.24 \times 10^{18}$ 个电子。因此，实际常用的电荷量通常是 pC、nC 或 μC 量级^①；
- 2. 根据实验观测数据可知，实际产生的电荷量只能是电子电荷量 $e = -1.602 \times 10^{-19} \text{C}$ 的整数倍；
- 3. 电荷守恒定律(law of conservation of charge)说明，电荷既不能被创造，也不能被消灭，只能转移。因此一个系统中电荷量的代数和是不变的。

现在考虑电荷的流动。电荷的特征是其移动性，即电荷可以从一个位置运动到另一个位置，从而转换为另一种能量形式。

当一根导线(由若干原子组成)连接到电池(电动势源)两端时，就会迫使电荷运动。正电荷向一个方向移动而负电荷向相反方向移动，这种电荷的运动就产生了电流。习惯上将正电荷的运动方向作为电流流动的方向，即与负电荷的流动方向相反，如图 1-3 所示。这种电流方向是由美国的科学家和发明家 Benjamin Franklin(1706—1790)提出的。虽然我们现在已经知道，金属导体中的电流是由带负电荷的电子运动而产生的，但仍然沿用大家普遍接受的惯例，即认为电流是正电荷流。

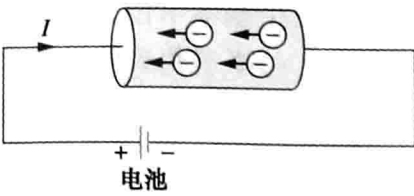


图 1-3 电荷在导体内流动所产生的电流

^① 然而，一个大的供电电容器所储存的电荷量可高达 0.5C。

提示：“惯例”是描述某个事物的一种标准方法，这样，业内人士就能够明白我们所说的是什么意思。本书将采用 IEEE 的相关国际惯例。

历史珍闻

安培(Andre-Marie Ampere, 1775—1836)，法国数学家和物理学家，电动力学的奠基人。他于 19 世纪 20 年代给出了电流的定义和一种测量电流的方法。

安培出生于法国里昂。他痴迷于数学，而当时许多著名的数学著作却是用拉丁文写成的，所以 12 岁的他，只用几个星期就掌握了拉丁文。安培是一位卓越的科学家，也是一位富有创造力的作家。他提出了许多电磁定律，发明了电磁体和电流表。电流的单位“安培”就是用他的名字命名的。



美国加州圣马里诺
亨廷顿图书馆馆藏

电流是指电荷的时间变化率，单位为安培(A)。

在数学上，电流 i 、电荷 q 和时间 t 之间的关系为：

$$i \triangleq \frac{dq}{dt}$$

(1.1)

其中，电流的单位是 A，并且有：

$$1\text{A}=1\text{C/s}$$

对式(1.1)两边取积分就得到从时刻 t_0 到 t 之间的电荷量，即：

$$Q \triangleq \int_{t_0}^t i dt$$

(1.2)

式(1.1)中电流 i 的定义方式说明电流并不是个常值函数，本章和后续章节中的大量例题和习题表明，电流的类型有若干种，即电荷以若干种不同的方式随时间变化。

如果电流不随时间变化，而是保持恒定，则称为直流电流(direct current, dc)。

直流电流是指不随时间变化的恒定电流。

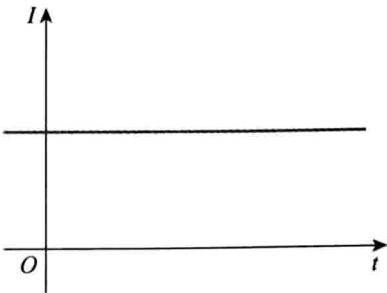
按照国际惯例，采用符号 I 来表示恒定电流。

随时间变化的电流则用符号 i 来表示，时变电流的常见形式是正弦电流或称交流电流(alternating current, ac)。

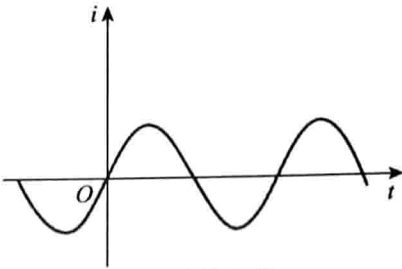
交流电流是指随时间按正弦规律变化的电流。

空调、冰箱、洗衣机以及其他家用电器的运行均采用交流电流。图 1-4 给出了两类最常见的电流：直流电流和交流电流。本书随后还将讨论其他形式的电流。

由于定义电荷的运动是电流，所以电流就要有相应的流动方向。如前所述，习惯上取正电荷的运动方向作为电流的流动方向。基于这一国际惯例，一个值为 5A 的电流既可以表示为正的，也可以表示为负的，如图 1-5 所示。换言之，图 1-5b 中沿某个方向流动的一5A 的负电流与沿相反方向流动的+5A 的正电流是一样的。



a) 直流电流



b) 交流电流

图 1-4 两类常见的电流

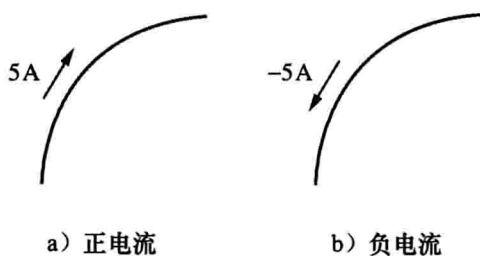


图 1-5 电流方向

例 1-1 4 600 个电子带多少电荷量?

解: 一个电子的电荷量为 $1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$, 因此 4600 个电子的电荷量为 $-1.602 \times 10^{-19} \text{ C} \times 4600 = -7.369 \times 10^{-16} \text{ C}$.

练习 1-1 计算 6 000 000 个质子所带的电荷量。 **答案:** $+9.612 \times 10^{-13} \text{ C}$

例 1-2 流入端点的总电荷量是 $q = 5t \sin 4\pi t \text{ mC}$, 计算 $t = 0.5 \text{ s}$ 时的电流。

解: $i = \frac{dq}{dt} = \frac{d}{dt}(5t \sin 4\pi t) \text{ mC/s} = (5 \sin 4\pi t + 20\pi t \cos 4\pi t) \text{ mA}$

当 $t = 0.5$ 时,

$$i = 5 \sin 2\pi + 10\pi \cos 2\pi = 0 + 10\pi = 31.42 (\text{mA})$$

练习 1-2 例 1-2 中, 如果 $q = (10 - 10e^{-2t}) \text{ mC}$, 计算 $t = 1.0 \text{ s}$ 时的电流。

答案: 2.707 mA

例 1-3 如果流过端点的电流是 $i = (3t^2 - t) \text{ A}$, 计算 $t = 1 \text{ s}$ 与 $t = 2 \text{ s}$ 之间流入该端点的电荷量。

解:

$$\begin{aligned} Q &= \int_{t=1}^2 i dt = \int_1^2 (3t^2 - t) dt \\ &= \left(t^3 - \frac{t^2}{2} \right) \Big|_1^2 = (8 - 2) - \left(1 - \frac{1}{2} \right) = 5.5 (\text{C}) \end{aligned}$$

练习 1-3 如果流过某个元件的电流为:

$$i = \begin{cases} 4 \text{ A}, & 0 < t < 1 \\ 4t^2 \text{ A}, & t > 1 \end{cases}$$

计算 $t = 0 \text{ s}$ 与 $t = 2 \text{ s}$ 之间流入该元件的电荷量。

答案: 13.333 C

1.4 电压

如前一节所述, 要使导体内的电子向某个方向运动, 需要功或者能量的转换。而这种转换需要外电动势 (external electromotive force, emf) 的推动, 典型的电动势是如图 1-3 所示的电池。电动势又称为电压 (voltage) 或电位差 (potential difference)。电路中 a 、 b 两点之间的电压 v_{ab} 是指将单位电荷从点 a 移动至点 b 所需要的能量 (即所做的功)。在数学上可以表示为:

$$v_{ab} \triangleq \frac{dw}{dq} \quad (1.3)$$

式中, w 表示能量, 单位是焦耳 (J); q 为电荷, 单位是库仑 (C); 电压 v_{ab} 简写为 v , 单位是伏特 (V)。单位伏特是为纪念发明伏打电池的意大利物理学家伏特 (Alessandro Antonio Volta, 1745—1827) 而以他的名字命名的。由式 (1.3) 可以看出:

$$1 \text{ V} = 1 \text{ J/C} = 1 \text{ N} \cdot \text{m/C}$$

电压 (电位差) 是指移动单位电荷通过某个元件所需的能量, 单位是伏特。

历史珍闻

伏特(Alessandro Antonio Volta, 1745—1827), 意大利物理学家, 他发明了能够提供连续电流的电池和电容器。

伏特出生于意大利科莫的一个贵族家庭。18岁的时候就开始做电路试验, 他于1796年发明的电池是对电能应用的一次变革。他于1800年发表的著作标志着电路理论的开端。伏特一生中赢得了众多荣誉, 电压或电位差的单位“伏特”就是以他的名字命名的。



美国加州圣马里诺
亨廷顿图书馆馆藏

图1-6所示为连接于 a 、 b 两点之间的元件(用矩形方框表示)上的电压, 正号(+)和负号(-)用于定义参考方向或电压的极性, v_{ab} 可以用如下两种方式来解释: (1)点 a 的电位比点 b 的电位高 v_{ab} ; (2)相对于点 b , 点 a 的电位是 v_{ab} 。且有下列等式:

$$v_{ab} = -v_{ba} \quad (1.4)$$

例如, 图1-7给出了同一电压的两种不同表示方法。图1-7a中, 点 a 高于点 b (+9)V; 图1-7b中, 点 b 高于点 a (-9)V。也可以说, 图1-7a中, 从点 a 到点 b 有9V的电压降(voltage drop); 或者等效地说, 从点 b 到点 a 有9V的电压升(voltage rise)。换言之, 从点 a 到点 b 的电压降等效于从点 b 到点 a 的电压升。

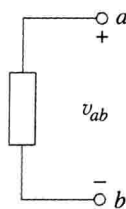


图1-6 电压 v_{ab} 的极性

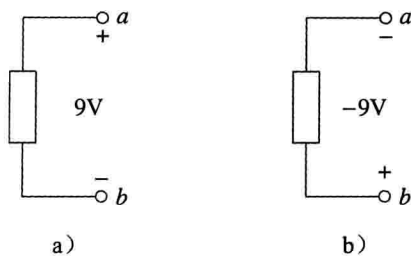


图1-7 同一电压 v_{ab} 的两种等效表示方法

电流和电压是电路中的两个基本变量。在传递信息的过程中, 常用术语信号来表示电流和电压(还有电磁波)等电量。由于这些电量在通信和其他学科中非常重要, 所以工程技术人员习惯将这些变量称为信号, 而不只是随时间变化的数学函数。与电流一样, 将恒定的电压称为直流电压, 用 V 表示, 而随时间按正弦规律变化的电压称为交流电压, 用 v 来表示。直流电压通常由电池产生, 而交流电压通常由发电机产生。

提示: 电流总是流经某个元件, 而电压总是跨接在某个元件两端或者两点之间。

1.5 功率与能量

虽然电流和电压是电路中的两个基本量, 但仅使用这两个变量还远远不够。在实际应用中, 我们需要知道电气设备能够处理多大的功率(power)。根据经验可知, 100W的灯泡要比60W的灯泡亮得多, 并且使用和消耗了电能, 就要向供电公司缴纳电费。因此, 功率和能量的计算在电路分析中是非常重要的。

为了得到功率和能量与电压和电流之间的关系, 下面回顾如下物理学知识。

功率是消耗或吸收能量的时间变化率, 单位是瓦特(W)。

这一关系的数学表达式为:

$$p \triangleq \frac{dw}{dt} \quad (1.5)$$

式中, p 为功率, 单位是瓦特(W); w 为能量, 单位是焦耳(J); t 为时间, 单位是秒(s)。由式(1.1)、式(1.3)和式(1.5)可得:

$$p = \frac{dw}{dt} = \frac{dw}{dq} \cdot \frac{dq}{dt} = vi \tag{1.6}$$

即

$$\boxed{p = vi} \tag{1.7}$$

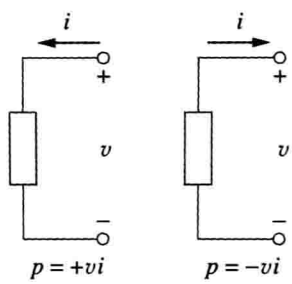
式(1.7)中的功率 p 是一个时变量, 称为瞬时功率(instantaneous power)。因此, 元件吸收或提供的功率是元件两端的电压与流过该元件的电流的乘积。如果功率为正值, 则该元件传递或吸收功率。反之, 如果功率为负值, 则该元件发出功率。但是怎样才能知道功率何时为负、何时为正呢?

确定功率正负的关键是电流的方向和电压的极性。因此, 图 1-8a 中电流 i 与电压 v 之间的关系非常重要。为使功率为正值, 电压极性与电流方向之间的关系必须与图 1-8a 一致。这就是关联参考方向(passive sign convention)。按照关联参考方向, 电流从电压的正极流入元件, 在这种情况下, $p = +vi$ 或 $vi > 0$, 表示元件吸收功率。反之如图 1-8b 所示, $p = -vi$, 或 $vi < 0$, 表示元件释放或者发出功率。

当电流流入元件的电压正极时满足关联参考方向, 且 $p = +vi$; 如果电流流入元件的电压负极, 则有 $p = -vi$ 。

除特别说明外, 本书遵循关联参考方向来确定功率的符号。例如, 在图 1-9 所示的两个电路中, 因为正电流均从正端流入, 所以元件都吸收 +12W 的功率; 但在图 1-10 所示的两种情况下, 因为正电流均从元件的负端流入, 所以元件都发出 +12W 的功率。因此吸收 -12W 的功率等效于发出 +12W 的功率。一般而言:

$$\text{吸收的正功率} = \text{发出的负功率}$$



a) 吸收功率 b) 发出功率
图 1-8 采用关联参考方向的功率参考极性

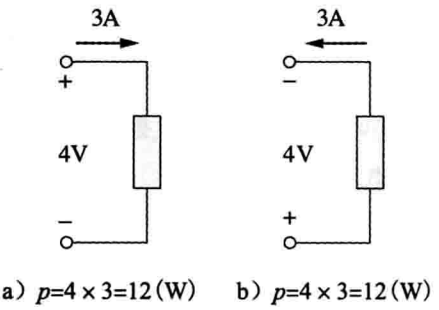


图 1-9 元件吸收功率为 12W 的两种情况

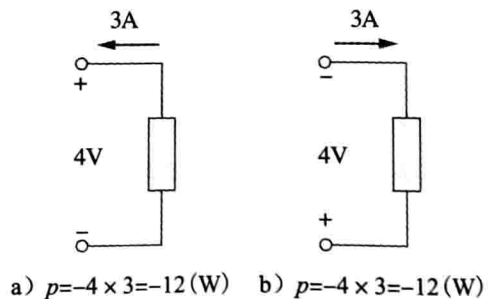


图 1-10 元件发出功率为 12W 的两种情况

事实上, 任何电路都必须遵守能量守恒定律(law of conservation of energy), 因此, 任何时刻电路中功率的代数和必须为零:

$$\boxed{\sum p = 0} \tag{1.8}$$

式(1.8)再一次证实, 提供给电路的总功率必须与吸收的总功率平衡。

由式(1.6)可得, 从 t_0 时刻到 t 时刻元件所吸收或发出的能量为:

$$w = \int_{t_0}^t p dt = \int_{t_0}^t vi dt \quad (1.9)$$

能量是指做功的能力, 单位为焦耳。

电力公司以瓦特·小时(W·h)为单位度量能量, 其中:

$$1 \text{ W} \cdot \text{h} = 3600 \text{ J}$$

例 1-4 某电源使得 2A 的恒定电流流过灯泡 10s, 如果灯泡以光能和热能的形式消耗的能量为 2.3kJ, 计算灯泡两端的电压降。

解: 总电荷量为:

$$\Delta q = i\Delta t = 2 \times 10 = 20(\text{C})$$

电压降为:

$$v = \frac{\Delta w}{\Delta q} = \frac{2.3 \times 10^3}{20} = 115(\text{V})$$

练习 1-4 将电荷 q 从 a 点移动到 b 点所需的能量为 -30J , 计算下面两种情况下的电压降 v_{ab} 。(a) $q=6\text{C}$, (b) $q=-3\text{C}$ 。
答案: (a) -5V (b) 10V

例 1-5 如果流入某元件正极的电流 i 为:

$$i = 5\cos 60\pi t \text{ A}$$

且该元件两端的电压为: (a) $v=3i \text{ V}$, (b) $v=3di/dt \text{ V}$ 。计算在 $t=3\text{ms}$ 时该元件所吸收的功率。

解: (a) 电压为:

$$v = 3i = 15\cos 60\pi t (\text{V})$$

因此功率为:

$$p = vi = 75\cos^2 60\pi t (\text{W})$$

在 $t=3\text{ms}$ 时, 所求功率为:

$$p = 75\cos^2(60\pi \times 3 \times 10^{-3}) = 75\cos^2 0.18\pi = 53.48(\text{W})$$

(b) 电压和功率的计算公式如下所示:

$$v = 3 \frac{di}{dt} = 3(-60\pi)5\sin 60\pi t = -900\pi \sin 60\pi t (\text{V})$$

$$p = vi = -4500\pi \sin 60\pi t \cos 60\pi t (\text{W})$$

在 $t=3\text{ms}$ 时, 所求功率为:

$$\begin{aligned} p &= -4500\pi \sin 0.18\pi \cos 0.18\pi \\ &= -14137.167 \sin 32.4^\circ \cos 32.4^\circ = -6.396(\text{kW}) \end{aligned}$$

练习 1-5 在例 1-5 中, 如果电流保持不变, 电压为: (a) $v=2i \text{ V}$, (b) $v = (10 + 5 \int_0^t i dt) \text{ V}$ 。
计算 $t=5\text{ms}$ 时该元件所吸收的功率。
答案: (a) 17.27W , (b) 29.7W

例 1-6 一个 100W 的电灯泡 2h 消耗的电能是多少?

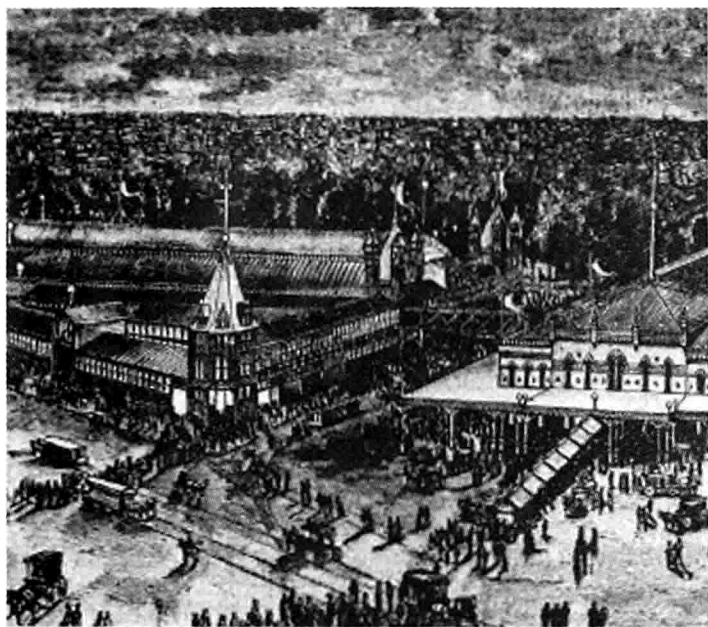
$$\text{解: } w = pt = 100\text{W} \times 2\text{h} \times 60(\text{min/h}) \times 60(\text{s/min}) = 720000\text{J} = 720\text{kJ}$$

即

$$w = pt = 100\text{W} \times 2\text{h} = 200\text{W} \cdot \text{h}$$

练习 1-6 一个炉子连接至 240V 电压的时候电流为 15A, 计算此元件消耗 180kJ 能量所需的时间。
答案: 50s

历史珍闻



由史密斯森协会提供图片

1884 年展览会 1884 年在美国举办的国际电气展览 (International Electrical Exhibition) 对电气技术的推动作用无与伦比。试想一个没有电的世界，一个靠蜡烛和煤气灯点亮的世界，一个以步行、骑马和马车作为常见交通工具的世界。在这样一个世界里，1884 年展览会横空出世，托马斯·爱迪生 (Thomas Edison) 成为此次展会的主角，他表现出了推广其发明和产品的超强能力。

爱德华·韦斯顿 (Edward Weston) 的发电机和电灯是美国电气照明公司参展的亮点，韦斯顿精心收藏的科学仪器也在本次展会展出。

其他著名的参展者包括弗兰克·斯普雷格 (Frank Sprague)、艾利和·汤普森 (Elihu Thompson) 以及克利夫兰电器公司 (Brush Electric Company of Cleveland)。在本次展览会期间，美国电气工程师学会 (American Institute of Electrical Engineers, AIEE) 于 10 月 7 日至 8 日召开了首届技术专门会议。1964 年，AIEE 与无线电工程师学会 (Institute of Radio Engineers, IRE) 合并成立了电气与电子工程师学会 (Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE)。

1.6 电路元件

正如 1.1 节中所讨论的，元件是电路的基本组成部分，电路就是由若干元件相互连接构成的总体。电路分析就是确定电路中元件两端的电压 (或流过元件的电流) 的过程。

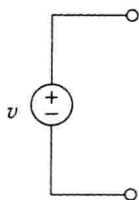
电路中有两种类型的元件：无源 (passive) 和有源 (active) 元件。有源元件能够产生能量而无源元件则不能，无源元件包括电阻、电容、电感等，典型的有源元件包括发电机、电池、运算放大器等。本节的目的让读者熟悉几个重要的有源元件。

最重要的有源元件就是电压源和电流源，一般用于为与其相连的电路输送功率。电源又分为两种：独立源和非独立源 (也称为受控源)。

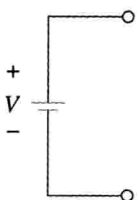
理想独立源是指能够提供与其他电路元件完全无关的特定电压或电流的有源元件。

换句话说，理想的独立电压源无论提供给电路多大的电流，其两端电压始终保持不变。电池和发电机等实际电源元件可以近似认为是理想电压源。图 1-11 给出了独立电压

源的表示符号。注意,图 1-11a 和图 1-11b 中的两种符号均可以表示独立电压源,但只有图 1-11a 中的符号才能表示交流电压源。类似地,理想的独立电流源是指能够提供与其两端电压完全无关的特定电流的有源元件,也就是说,无论两端电压多大,电流源传递给电路的电流总是保持指定的电流值。独立电流源的符号表示如图 1-12 所示,图中箭头表示电流 i 的方向。



a) 用于表示恒定电压或时变电压



b) 用于表示恒定电压 (dc)

图 1-11 独立电压源的表示符号

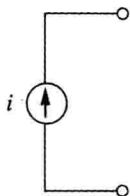


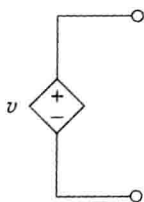
图 1-12 独立电流源的表示符号

理想的非独立源(受控源)是指其所提供的电压或电流受到其他电压或电流控制的有源元件。

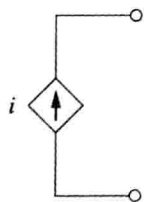
受控电源元件通常用菱形符号表示,如图 1-13 所示。由于对受控源的控制可以通过电路中某个元件的电压或电流来实现,而且受控源既可以是电压源又可以是电流源,所以有四种形式的受控源,分别为:

1. 电压控制电压源(VCCVS);
2. 电流控制电压源(CCVS);
3. 电压控制电流源(VCCS);
4. 电流控制电流源(CCCS)。

受控源在建立晶体管、运算放大器以及集成电路等元件的电路模型时是很有用的。一个电流控制电压源的电路如图 1-14 所示,其中电压源的电压 $10i$ 取决于流经元件 C 的电流。读者或许会感到意外,受控电压源的值是 $10i$ V(而不是 $10i$ A),这是因为它是一个电压源。应该记住的是,不管控制受控源的是什么电量,电压源的符号都是用极性(+、-)表示的,而电流源是用箭头表示的。



a) 受控电压源



b) 受控电流源

图 1-13 受控源的表示符号

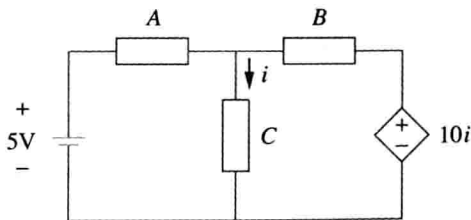


图 1-14 电路右边为一个电流控制电压源

注意,理想电压源(受控的或独立的)会产生确保其端电压所需的任意电流,而理想电流源会产生所需的电压来维持其电流。因此,从理论上讲,理想源能够提供无穷大的能量。同时还应注意到,有源元件不仅可以为电路提供功率,而且还可以从电路中吸收功率。对于电压源而言,我们知道其电压,但不知道它提供或吸收的电流是多少,同理,对于电流源而言,我们只知道它提供的电流,而不知道它两端的电压是多少。

例 1-7 计算图 1-15 中各元件所发出或吸收的功率。

解: 在计算时,要利用图 1-8 和图 1-9 所示的符号来确定功率的符号。对于 p_1 而言,5A 电流从元件的正端流出(或者说 5A 电流流入元件的负端),因此:

$$p_1 = 20 \times (-5) = -100(\text{W}) \quad \text{发出的功率}$$

对于 p_2 和 p_3 而言,电流都是流入各个元件的正端,于是:

$$p_2 = 12 \times 5 = 60(\text{W}) \quad \text{吸收的功率}$$

$p_3 = 8 \times 6 = 48(\text{W})$ 吸收的功率

对于 p_4 而言，由于该受控源的两端和无源元件 p_3 的两端相连，所以其电压与 p_3 的电压相同，为 8V(正极在上面)。(记住，电压测量是相对于电路中元件的两端来说的。)因为电流是从正端流出来的，所以：

$p_4 = 8 \times (-0.2I) = 8 \times (-0.2 \times 5) = -8(\text{W})$ 提供的功率

可以观察到，电路中 20V 的独立电压源和 0.2I 的受控电流源均为电路网络中的其他元件提供功率的，而两个无源元件则是吸收功率的，并且：

$p_1 + p_2 + p_3 + p_4 = -100 + 60 + 48 - 8 = 0$

上述结果与式(1.8)一致，即发出的总功率等于吸收的总功率。

练习 1-7 计算图 1-16 的电路中每个元件吸收的功率或发出的功率。

答案： $p_1 = -45\text{W}$ ， $p_2 = 18\text{W}$ ， $p_3 = 12\text{W}$ ， $p_4 = 15\text{W}$

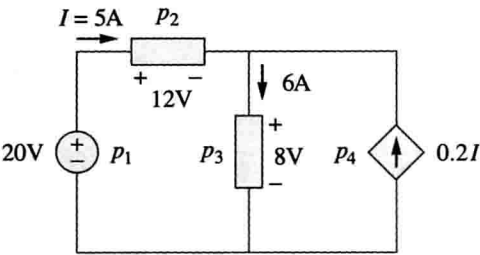


图 1-15 例 1-7 图

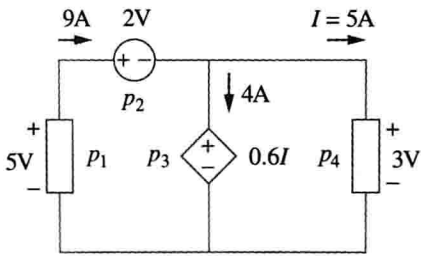


图 1-16 练习 1-7 图

† 1.7 应用实例[⊖]

这一节研究与本章介绍的概念有关的两个应用实例。一个是电视显像管，另一个是如何确定电器设备的用电量账单。

1.7.1 电视显像管

电视信号的发射和接收体现了电子运动的一个重要应用。在电视发射端，摄像管将场景的光图像转化为电信号，光电摄像管中的电子束实现了对光图像的扫描。在电视接收端，利用电视机内的阴极射线管(CRT)[⊖]重建场景的图像，CRT 的结构如图 1-17 所示。与产生恒定强度电子束的光电摄像管不同，CRT 电子束的强度随着输入信号的强弱而变

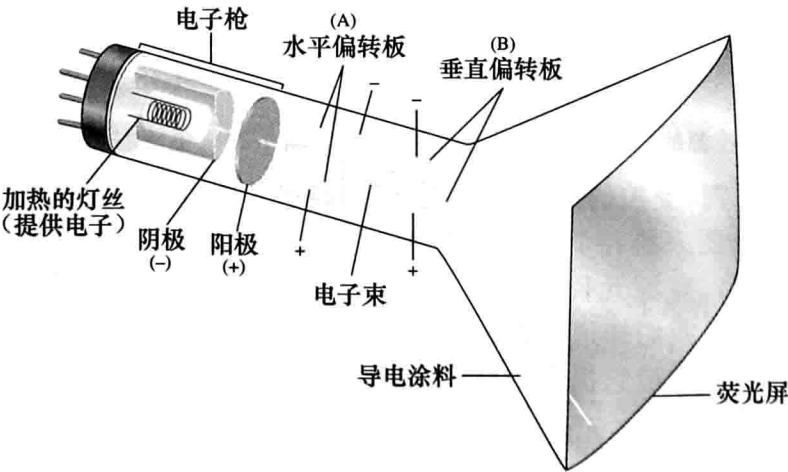


图 1-17 阴极射线管

[⊖] 各节标题前的剑号(†)表示该节可以跳过，也可以作简要介绍，或者留作课后作业。
[⊙] 现代电视显像管采用不同于 CRT 的技术。

化。图中始终保持高电压的电子枪发射电子束，经过垂直和水平两组偏转板，使射到荧光屏上的电子束能够上下左右移动。电子束击中荧光屏后，相应的点就会发亮。这样，就可以利用电子束在电视屏幕上“描绘”出图像。

历史珍闻

卡尔·费迪南德·布劳恩和弗拉基米尔·科斯马·兹沃尔金

斯特拉斯堡大学 (University of Strasbourg) 的卡尔·费迪南德·布劳恩 (Karl Ferdinand Braun, 1850—1918) 于 1879 年发明了布劳恩阴极射线管。阴极射线管在之后许多年里成为电视显像管的基本组成部分，虽然平板显示系统发展迅速，但显像管至今仍然是最经济的部件。在布劳恩阴极射线管发明之后，又借助了弗拉基米尔·科斯马·兹沃尔金 (Vladimir K. Zworykin, 1889—1982) 研究光电摄像管的创造性成果，这样才有了今天的电视机。光电摄像管不断发展为正析摄像管和超正析摄像管，从而实现了捕获图像，并将其转换为可发送给电视接收机的信号，电视摄像机就这样诞生了。

例 1-8 如果电视显像管中的电子束每秒携带 10^{15} 个电子，计算加速该电子束使之达到 4W 的功率所需的电压 V_0 。

解：一个电子的电荷量为：

$$e = -1.6 \times 10^{-19} \text{C}$$

则 n 个电子的电荷量为 $q = ne$ ，并且：

$$i = \frac{dq}{dt} = e \frac{dn}{dt} = (-1.6 \times 10^{-19}) \times 10^{15}$$
$$= -1.6 \times 10^{-4} \text{(A)}$$

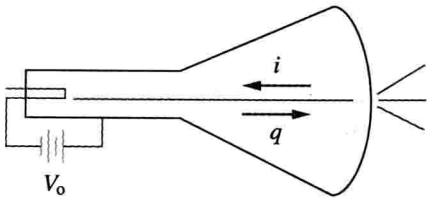


图 1-18 阴极射线管简图

其中，负号表示电流方向与电子流动方向相反，如图 1-18

所示，图中所示为垂直偏转板不带电荷情况时的 CRT 简图。于是，电子束的功率为：

$$p = V_0 i$$

或

$$V_0 = \frac{p}{i} = \frac{4}{1.6 \times 10^{-4}} = 25\,000 \text{(V)}$$

因此，所需加的电压为 25kV。

练习 1-8 如果电视显像管中的电子束每秒携带 10^{13} 个电子，通过一个电位差为 30kV 的平面场，计算其功率。
答案：48mW

1.7.2 电费账单

第二个应用讨论的是供电公司如何向用户收取电费。电费的多少取决于用户消耗的电能(影响电费的其他因素包括需求和功率因数，这里忽略不计)。但是在美国，即使用户不消耗任何电能，仍然需要支付维护电线正常工作的最低服务费。随着用电量的增加，每千瓦时所需支付的电费不断降低。表 1-3 给出了一个五口之家家用电器每月的平均耗电量。

表 1-3 家用电器每月的平均耗电量

家用电器	耗电量(kW · h)	家用电器	耗电量(kW · h)
热水器	500	洗衣机	120
冰箱	100	炉子	100
照明	100	烘干机	80
洗碗机	35	微波炉	25
电熨斗	15	个人计算机	12
电视机	10	收音机	8
烤面包机	4	电子钟	2

例 1-9 某家庭一月份耗电量为 $700\text{kW}\cdot\text{h}$ ，按照如下电费标准确定该家庭当月的电费账单。

每月的基本供电服务费 $\$12.00$ 。

每月第一个 $100\text{kW}\cdot\text{h}$ 按 16 美分/ $\text{kW}\cdot\text{h}$ 计费。

之后的 $200\text{kW}\cdot\text{h}$ 按 10 美分/ $\text{kW}\cdot\text{h}$ 计费。

超过 $300\text{kW}\cdot\text{h}$ 按 6 美分/ $\text{kW}\cdot\text{h}$ 计费。

解：电费账单计算如下：

每月的基本供电服务费 $= \$12.00$


第一个 $100\text{kW}\cdot\text{h} \times \$0.16/\text{kW}\cdot\text{h} = \16.00

之后的 $200\text{kW}\cdot\text{h} \times \$0.10/\text{kW}\cdot\text{h} = \20.00

剩余的 $400\text{kW}\cdot\text{h} \times \$0.06/\text{kW}\cdot\text{h} = \24.00

一月份的总电费 $= \$72.00$

平均价格 $= \$72.00/(100+200+400) = 10.2$ 美分/ $\text{kW}\cdot\text{h}$ ◀

 **练习 1-9** 参考例 1-9 中电费的计算方法，如果某家庭七月份大部分时间外出休假，只用了 $350\text{kW}\cdot\text{h}$ 的电量，计算该月每千瓦时的平均电费。 **答案：** 14.571 美分/ $\text{kW}\cdot\text{h}$

† 1.8 解题方法

虽然问题的复杂程度和重要程度各不相同，但解决问题所应遵循的基本原则是相同的。下面罗列了一些解决工程问题和学术问题的过程和方法，这是本书作者和他的学生们多年来经验的总结。

首先简要地列出所有的步骤，之后再做详细说明。

1. **明确**所要解决的问题；
2. **列出**问题的全部已知条件；
3. 确定问题的**备选**解决方案，并且从中找出成功可能性最大的一种方案；
4. **尝试**寻求问题的解；
5. **评价**所得到的答案并检验其准确性；
6. 对结果是否**满意**？如果满意，则提交该结果；否则返回步骤 3 重新执行这一过程。

以下是详细说明：

1. **明确**所要解决的问题。这一步可能是整个过程中最重要的一步，因为它是进行下面所有步骤的基础。一般而言，工程问题的提出多少会有点儿不完整，所以你必须尽量使你对问题的理解与问题提出者对问题的理解尽可能完全一致。在弄清问题这一步上花一些时间将为后续各步节省大量的时间并避免失败。学生可以求助于教授，把教科书中所提出的问题理解得更清楚，而工业应用中遇到的问题可能需要你与多位相关人员商讨。在这一步，非常重要的是在解决问题之前先提出问题，如果对此有疑问则可以咨询合适的相关人员，也可以借助有关资源得到问题的答案。利用这些结果，可以进一步精炼所要解决的问题，并可将精炼后的问题表述用于后面的求解过程当中。

2. **列出**问题的全部已知条件。现在可以将你对问题的全部理解及其可能的解决方案写下来，这样，能够节约时间并避免失败。

3. 确定问题的**备选**解决方案，并且从中找出成功可能性最大的一种方案。几乎每一个问题都可能存在若干种途径去解决，人们非常希望得到尽可能多的解决途径。在进行这项工作的時候，还需要确定采用什么样的工具，例如能够大幅度降低计算量、提高准确度的 PSpice、MATLAB 以及其他一些软件。需要再次强调的是，第一步明确问题和这一步研究解决问题的可选方法所花费的时间将对后续问题的解决有极大的帮助，虽然评估各种

方法的优劣并确定一种最可行的方法是比较困难的,但是仍然值得付出这样的努力。因为如果首次选用的方法失败,还要再重新执行这一步骤。

4. 尝试寻求问题的解。现在就可以开始解题了。必须将解题的过程很好地记录下来,如果解题成功,就可以给出详细解;如果失败,则可以检查整个过程。通过细致的检查可以找出问题并予以纠正,从而得到正确的解,也可以换一种方法求出正确的答案。一般来说,明智的做法是先得到结果的表达式之后再将数据代入方程,这样有助于检查你所得到的结果。

5. 评价所得到的答案并检验其准确性。这一步是评价你所完成的工作,确定是否得到可以让别人(你的团队、上司、教授等)接受的结果。

6. 对结果是否满意? 如果满意,则提交该结果;否则,返回步骤3重新执行这一过程。此时要么提交结果,要么试探另一种方法。如果提交了结果,解题过程一般就结束了。然而,提交答案后通常会发现更进一步的问题,仍然需要继续这一解题过程,从而最终得到满意的结论。

下面以电子与计算机工程专业学生的课程作业为例,说明上述过程(这一基本过程同样适用于几乎所有工程类课程)。虽然上述步骤用于学术问题时略显简单,但仍有必要按照这几个基本过程求解。下面就通过一个简单的例子予以说明。

例 1-10 计算图 1-19 中流过 8Ω 电阻的电流。

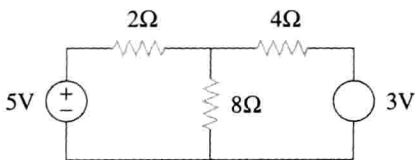


图 1-19 例 1-10 图

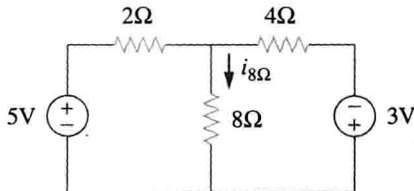


图 1-20 问题的定义

解: 1. 明确问题。这只是一个简单的例子,但是由电路图可见, $3V$ 电压源的极性并不确定。有几种解决途径可供选择。可向教授询问该电压源的极性,如果无法询问,则需要确定接下来的处理方法。如果时间充裕,则可以在 $3V$ 电压源的正极在上和正极在下两种情况下求解电流。这里假定教授告知该电压源的极性如图 1-20 所示,正极在下。

2. 列出问题的全部已知条件。列出问题的所有已知条件,包括清楚地对电路进行标记,从而确定要求解的量。已知电路如图 1-20 所示,试求 $i_{8\Omega}$ 。如果情况允许,可以和教授共同检查对问题的理解是否正确。

3. 建立备选解决方案并确定哪一个方案最有可能成功。解决这个问题可以采用三种基本方法,即本书稍后会介绍的电路分析法(基尔霍夫定律、欧姆定律)、节点分析法和网孔分析法。

采用电路分析法求解 $i_{8\Omega}$ 可以得到该题的解,但可能比节点分析法和网孔分析法更为繁杂。用网孔分析法求解 $i_{8\Omega}$ 要列写两个联立方程,并求出如图 1-21 所示的两个回路电流。采用节点分析法只需求解一个未知量,是最为简单的方法。所以选用节点分析法来求解 $i_{8\Omega}$ 。

4. 尝试求解问题。首先写出求解 $i_{8\Omega}$ 所需的所有方程:

$$i_{8\Omega} = i_2, \quad i_2 = \frac{v_1}{8}, \quad i_{8\Omega} = \frac{v_1}{8}$$

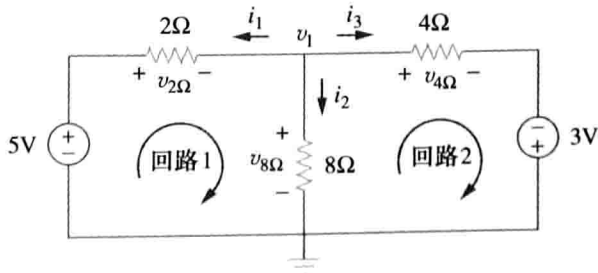


图 1-21 采用节点分析法求解的电路原理图

$$\frac{v_1 - 5}{2} + \frac{v_1 - 0}{8} + \frac{v_1 + 3}{4} = 0$$

于是可以求出 v_1 ：

$$8 \times \left[\frac{v_1 - 5}{2} + \frac{v_1 - 0}{8} + \frac{v_1 + 3}{4} \right] = 0$$

从而得到：

$$(4v_1 - 20) + v_1 + (2v_1 + 6) = 0$$

$$7v_1 = +14\text{V}, \quad v_1 = +2\text{V}, \quad i_{8\Omega} = \frac{v_1}{8} = \frac{2}{8} = 0.25(\text{A})$$

5. 评价所得到的答案并检验其准确性。可以采用基尔霍夫定律(KVL)验证所得到的结果：

$$i_1 = \frac{v_1 - 5}{2} = \frac{2 - 5}{2} = -\frac{3}{2} = -1.5(\text{A})$$

$$i_2 = i_{8\Omega} = 0.25\text{A}$$

$$i_3 = \frac{v_1 + 3}{4} = \frac{2 + 3}{4} = \frac{5}{4} = 1.25(\text{A})$$

$$i_1 + i_2 + i_3 = -1.5 + 0.25 + 1.25 = 0(\text{验证})$$

将 KVL 用于回路 1：

$$\begin{aligned} -5 + v_{2\Omega} + v_{8\Omega} &= -5 + (-i_1 \times 2) + (i_2 \times 8) \\ &= -5 + [-(-1.5) \times 2] + (0.25 \times 8) \\ &= -5 + 3 + 2 = 0(\text{验证}) \end{aligned}$$


将 KVL 用于回路 2：

$$\begin{aligned} -v_{8\Omega} + v_{4\Omega} - 3 &= -(i_2 \times 8) + (i_3 \times 4) - 3 \\ &= -(0.25 \times 8) + (1.25 \times 4) - 3 \\ &= -2 + 5 - 3 = 0(\text{验证}) \end{aligned}$$

至此，我们完全确信所得答案的正确性。

6. 是否满意？如果满意，则提交答案，否则返回步骤(3)重新计算。该题解答正确，满意。

流经 8Ω 电阻的电流是 0.25A ，自上而下流过该电阻。

 练习 1-10 利用上述解题过程求解本章最后的综合理解题。

1.9 本章小结

1. 电路由若干相互连接在一起的电路元件构成。
2. 国际单位制(SI)是工程技术人员互相交流的国际度量语言。由国际单位制的七个基本单位可以推导出其他的物理量单位。
3. 电流是在给定方向下某点电荷变化的速率：

$$i = \frac{dq}{dt}$$

4. 电压是指移动 1C 电荷所需要的能量：

$$v = \frac{d\omega}{dq}$$

5. 功率是指单位时间所发出或吸收的能量，也可以用电压与电流的乘积表示：

$$p = \frac{d\omega}{dt} = vi$$

6. 按照关联参考方向，如果电流从元件电压的正极流入，则功率的符号为正。

- 一个理想的电压源，无论两端连接什么元件，总是给出特定的电位差；一个理想的电流源，无论其两端连接什么元件，总会产生特定的电流。
- 电压源和电流源可以是受控源，也可以是独立源，受控源的大小受电路中其他变量的控制。
- 电视显像管和电费账单的计算是本章所述概念的两个应用实例。

复习题

- 毫伏等于百万分之一伏特。
(a)对 (b)错
- 词头“微”表示：
(a) 10^6 (b) 10^3
(c) 10^{-3} (d) 10^{-6}
- 2 000 000V 的电压用 10 的幂次表示，可以写为：
(a)2mV (b)2kV
(c)2MV (d)2GV
- 如果每秒流过某一点的电荷为 2C，则电流是 2A。
(a)对 (b)错
- 电流的单位是：
(a)库仑 (b)安培
(c)伏特 (d)焦耳
- 电压的度量单位是：
(a)瓦特 (b)安培
(c)伏特 (d)焦耳/秒
- 4A 的电流对一介质充电 6s 后，所储存的电荷是 24C。
- (a)对 (b)错
- 如果 1.1kW 的烤面包机产生的电流为 10A，则其两端的电压为：
(a)11kV (b)1100V
(c)110V (d)11V
- 下述哪个量不是电量：
(a)电荷 (b)时间
(c)电压 (d)电流
(e)功率
- 图 1-22 中受控源是：
(a)电压控制电流源 (b)电压控制电压源
(c)电流控制电压源 (d)电流控制电流源

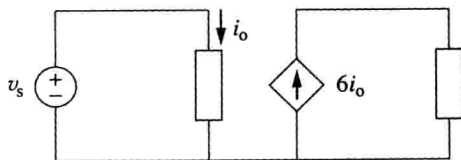


图 1-22 复习题 10 图

答案：1(b)；2(d)；3(c)；4(a)；5(b)；6(c)；
7(a)；8(c)；9(b)；10(d)

习题

1.3 节

- 下列各电子数量分别表示多少库仑的电荷？
(a) 6.482×10^{17} (b) 1.24×10^{18}
(c) 2.46×10^{19} (d) 1.628×10^{20}
- 如果电荷量由如下函数确定，试求流过元件的电流：
(a) $q(t) = (3t + 8)\text{mC}$
(b) $q(t) = (8t^2 + 4t - 2)\text{C}$
(c) $q(t) = (3e^{-t} - 5e^{-2t})\text{nC}$
(d) $q(t) = 10\sin 120\pi t\text{pC}$
(e) $q(t) = 20e^{-4t}\cos 50t\text{pC}$
- 如果流过元件的电流由如下函数确定，试求流过元件的电荷量 $q(t)$ ：
(a) $i(t) = 3\text{A}$, $q(0) = 1\text{C}$
(b) $i(t) = (2t + 5)\text{mA}$, $q(0) = 0$
(c) $i(t) = 20\cos(10t + \pi/6)\text{pA}$, $q(0) = 2\text{pC}$
(d) $i(t) = 10e^{-30t}\sin 40t\text{A}$, $q(0) = 0$
- 如果流经某导体的电流为 7.4A，计算 20s 内通

过该导体任一截面的电荷量。

- 如果电流 $i(t) = \frac{1}{2}t\text{A}$ ，计算在 $0 \leq t \leq 10\text{s}$ 期间传递的总电荷量。
- 流入某元件的电荷量如图 1-23 所示，计算以下各个时刻的电流。
(a) $t = 1\text{ms}$ ；(b) $t = 6\text{ms}$ ；(c) $t = 10\text{ms}$

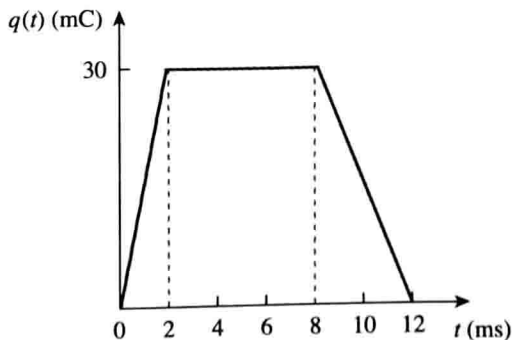


图 1-23 习题 6 图

7 流过一根导线的电荷量随时间变化的曲线如图 1-24 所示，画出相应的电流变化曲线。

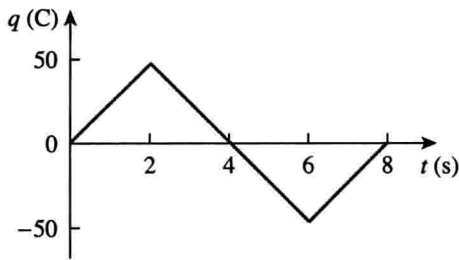


图 1-24 习题 7 图

8 流经器件中某一点的电流如图 1-25 所示，计算通过该点的总电荷量。

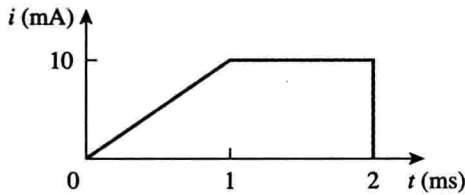


图 1-25 习题 8 图

9 流过某元件的电流如图 1-26 所示，计算下列各个时刻通过该元件的总电荷量。

(a) $t=1\text{s}$; (b) $t=3\text{s}$; (c) $t=5\text{s}$ 。

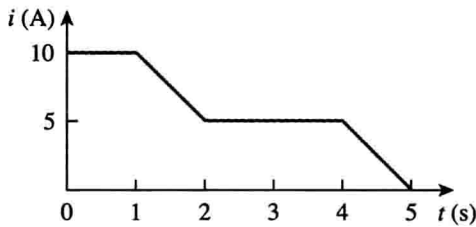


图 1-26 习题 9 图

1.4 节和 1.5 节

10 10kA 闪电击中物体的时间是 $15\mu\text{s}$ ，计算物体表面的总电荷量。

11 充电电池能够连续大约 12h 输出 90mA 的电流，计算以这样的速率所释放的电荷量为多少。如果其端电压为 1.5V，计算该电池输出的能量为多少。

12 如果流经某元件的电流为：

$$i(t) = \begin{cases} 3t\text{A}, & 0 \leq t < 6\text{s} \\ 18\text{A}, & 6 \leq t < 10\text{s} \\ -12\text{A}, & 10 \leq t < 15\text{s} \\ 0, & t \geq 15\text{s} \end{cases}$$

画出 $0 < t < 20\text{s}$ 期间该元件中储存电荷的变化曲线。

13 从某元件正极流入的电荷为 $q=5\sin 4\pi t\text{ mC}$ 且该元件两端的电压为 $v=3\cos 4\pi t\text{ V}$ 。

(a) 计算在 $t=0.3\text{s}$ 时传递给该元件的功率；

(b) 计算在 $0 \sim 0.6\text{s}$ 期间传递给该元件的能量。

14 如果某元件两端的电压 v 与流过该元件的电流 i 分别为： $v(t)=10\cos 2t\text{ V}$ ， $i(t)=20(1-e^{-0.5t})\text{ mA}$ 。计算：(a) $t=1\text{s}$ 时，该元件中的总电荷量；(b) $t=1\text{s}$ 时，该元件消耗的功率。

15 流入某元件正极的电流为 $i(t)=6e^{-2t}\text{ mA}$ ，该元件两端的电压为 $v(t)=10\text{ di/dt V}$ 。计算：(a) 在 $t=0$ 到 $t=2\text{s}$ 之间传递给该元件的电荷量；(b) 该元件吸收的功率；(c) 该元件在 3s 内吸收的能量。

1.6 节

16 图 1-27 给出了某元件的电流和电压波形。

(a) 画出 $t>0$ 时传递给该元件的功率曲线；

(b) 计算该元件在 $0 < t < 4\text{s}$ 期间吸收的能量。

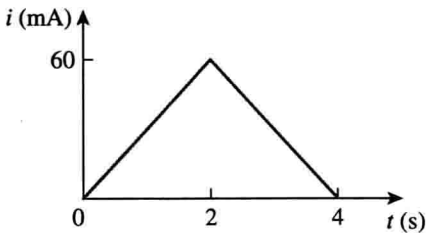


图 1-27 习题 16 图

17 图 1-28 给出一个由五个元件组成的电路，如果 $p_1=-205\text{ W}$ ， $p_2=60\text{ W}$ ， $p_4=45\text{ W}$ ， $p_5=30\text{ W}$ 。计算元件 3 吸收或发出的功率。

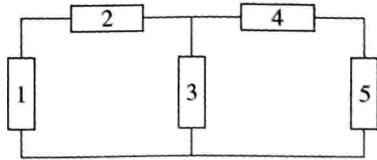


图 1-28 习题 17 图

18 计算图 1-29 中各个元件吸收的功率。

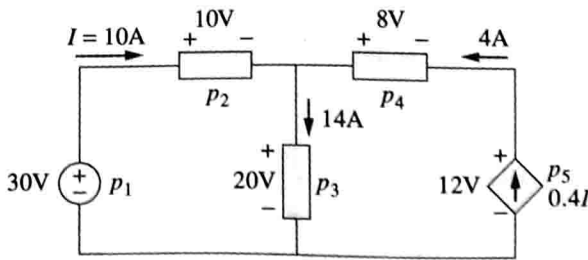


图 1-29 习题 18 图

19 计算图 1-30 所示电路网络中的 I 。

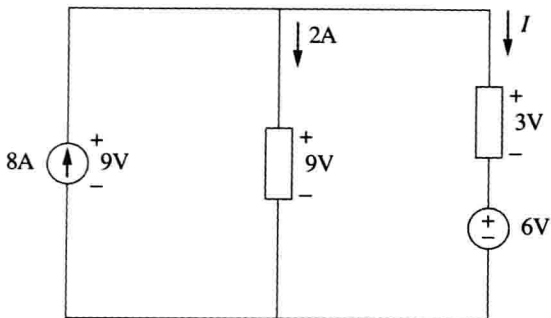


图 1-30 习题 19 图

20 计算图 1-31 中的 V_o 。以及每个元件吸收的功率。

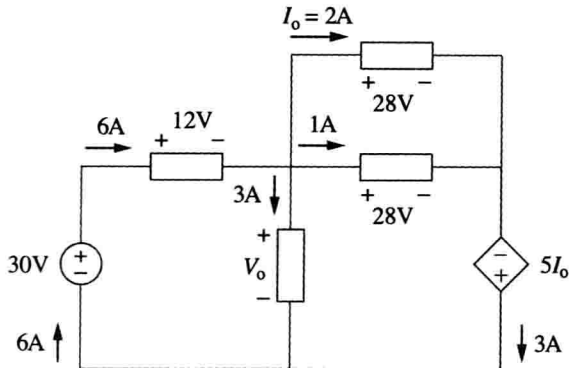


图 1-31 习题 20 图

1.7 节

- 21 一只 60W 的白炽灯工作在 120V 的电压下，计算一天内流过该白炽灯的电子量和电荷量分别是多少。
- 22 40kA 的闪电击中飞行器的时间是 1.7ms，计算分布在该飞行器上的电荷为多少库仑。
- 23 一台 1.8kW 的热水器需要 15min 烧开一定量的水，如果一天烧一次水，并且电费为 10 美分/kW·h，计算工作 30 天需要的电费。
- 24 某公司的电费收费标准为 8.2 美分/kW·h，如果一个消费者连续一天使用一只 60W 的灯泡，计算需要交纳多少电费。
- 25 一台 1.5kW 的烤面包机大约 3.5min 烤好 4

片面包，如果每天使用一次烤面包机，计算一个月(30 天)所用的电费。假定用电费用为 8.2 美分/kW·h。

- 26 一个闪光灯电池的额定容量是 0.8A·h(安培·小时)，其寿命为 10h，计算：
(a)该电池提供的电流为多大；(b)如果其端电压为 6V，则其提供的功率是多少？(c)该电池内存储了多少能量(单位为 kW·h)？
- 27 用 3A 的恒定电流对汽车电池充电需要 4h 完成，如果端电压为 $(10+t/2)$ V， t 的单位为小时，计算：
(a)充电结束后，充入电池的电荷量是多少？(b)充电消耗的电能是多少？(c)如果电费为 9 美分/kW·h，充电电费是多少？
- 28 一只 60W 的白炽灯，接 120V 的电源，始终在黑暗的楼梯间开着，计算：
(a)流过该白炽灯的电流；(b)如果电费为 9.5 美分/kW·h，该白炽灯工作一年(365 天)的电费是多少？
- 29 一个电炉灶有四个炉眼和一个烤箱。准备一顿饭时，各炉眼和烤箱的使用情况如下：
炉眼 1：20 分钟 炉眼 2：40 分钟
炉眼 3：15 分钟 炉眼 4：45 分钟
烤箱：30 分钟
如果各炉眼的额定功率 1.2kW，烤箱的额定功率为 1.8kW，且电费为 12 美分/kW·h。计算准备做这顿饭所需的电费。
- 30 美国德州休斯敦电力公司对客户的收费标准如下：
每月基本供电服务费 \$ 6
第一个 250kW·h 按 \$ 0.02/kW·h 计费
其余的 kW·h 按 \$ 0.07/kW·h 计费
如果一个用户一个月用电 2 436kW·h，计算电力公司应收取多少费用。
- 31 某家庭 120W 的计算机每天工作 4h，60W 的灯泡每天工作 8h，如果用电收费标准是 \$ 0.12/kW·h，计算该家庭一年需要为该计算机和灯泡支付多少电费。

综合理解题

- 32 流过电话线的电流为 $20\mu\text{A}$ ，计算通过电话线的电荷量到达 15 库仑需要的时间。
- 33 一次闪电携带 2kA 的电流并持续了 3ms。计算该闪电包含了多少库仑的电荷。
- 34 某家用电器一天所消耗的功率如图 1-32 所示，计算：
(a)所消耗的以千瓦时为单位的总电能；
(b)每小时消耗的平均功率。

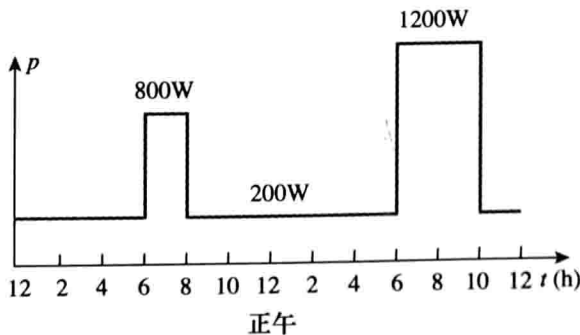


图 1-32 综合理解题 34 图

35 某工厂在上午 8:00~8:30 之间所消耗的功率如图 1-33 所示, 计算该厂这段时间所消耗的以兆瓦时为单位的总电能。

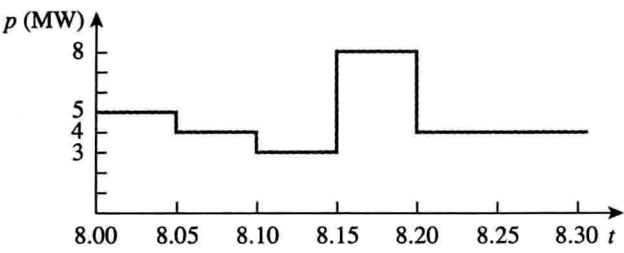


图 1-33 综合理解题 35 图

- 36 电池的额定功率可以用 $A \cdot h$ 表示。一个铅酸性电池的额定功率为 $160A \cdot h$ 。计算:
- (a) 该电池工作 40h 所能提供的最大电流;
 - (b) 如果该电池以 1mA 的电流放电, 则能持续放电多少天?
- 37 某 12V 电池充电时需要 $40A \cdot h$ 的总电荷, 计算供给该电池的能量是多少焦耳?
- 38 计算一台 10hp(马力)的发动机在 30min 内输送了多少能量($1hp=746W$)。
- 39 一台 600W 无人观看的电视机连续 4h 开机, 如果电费为 $\$0.10/kW \cdot h$, 计算浪费了多少钱。

第2章

基本定律

太多的人祈祷能够克服像山一样的困难，然而他们需要的只是攀登的勇气。

——佚名

增强技能与拓展事业

ABET EC 2000 标准(3. b)，“设计和完成实验的能力，以及分析和解释数据的能力”

工程师既要能够设计实验、完成实验，又要能够分析数据、解释数据。绝大多数的高中生和大学生都要花费相当多的时间做实验，并且需要分析实验数据和解释实验数据。因此，学生对于此类工作已非常熟练。我的建议是，今后在做实验的过程中，要花费更多的时间分析、解释实验所得的数据。这是什么意思呢？

在观察电压-电阻、电流-电阻或者功率-电阻曲线时，你真正看到的是什​​么？这样的曲线意义何在？与所学的理论是否一致？与期望的结果是否存在差别？如果是，原因何在？显然，分析和解释实验数据必将提高这方面的技能。

如果要求学生做的绝大多数(不是全部)实验很少或根本不涉及实验的设计，这种情况下，如何才能提高学生的技能呢？

实际上，在这种情况下培养学生的技能并没有想象中的那么困难。你所需要做的就是做实验并分析实验。将实验分解为最简单的组成部分，通过重新组合来尽量理解实验的设计思路，最终明白实验的设计者要教会你什么知识。虽然情况并非总是如此，但是在每个实验中，设计者都在试图教会你一些知识。

2.1 引言

第1章介绍了电路中的电流、电压和功率等基本概念，要确定这些量在给定电路中的具体数值，还需要掌握一些电路的基本定律，即欧姆定律和基尔霍夫定律，电路分析的方法和技术正是在这些基本定律的基础上建立起来的。

本章除介绍上述基本定律外，还将讨论电路分析与设计中常用的一些方法，包括电阻的串联、并联、分压、分流以及 Δ -Y和Y- Δ 转换等。本章将上述定律和方法的应用局限于电阻电路中，最后以照明电路和直流电表的设计为例说明基本定律和分析方法的具体应用。

2.2 欧姆定律

材料通常都具有阻止电荷流动的特性。这种物理性质，即阻碍电流的能力，称为电阻(resistance)，用符号 R 表示。均匀截面积为 A 的任一材料的电阻取决于截面面积 A 及其长度 l ，如图2-1a所示。电阻值的数学表达式为(实验室测量)：

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (2.1)$$

式中， ρ 称为电阻率(resistivity)，单位为 $\Omega \cdot \text{m}$ 。良导体的电阻率小，如铜、铝；而绝缘体的电阻率高，如云母、纸张。表2-1给出了某些常见的电阻率 ρ ，并标明了哪些材料是导体，哪些材料是绝缘体或半导体。

表 2-1 常见材料的电阻率

材料名称	电阻率($\Omega \cdot \text{m}$)	用 途	材料名称	电阻率($\Omega \cdot \text{m}$)	用 途
银	1.64×10^{-8}	导体	铜	1.72×10^{-8}	导体
铝	2.8×10^{-8}	导体	金	2.45×10^{-8}	导体
碳	4×10^{-5}	半导体	锗	47×10^{-2}	半导体
硅	6.4×10^2	半导体	纸张	1×10^{10}	绝缘体
云母	5×10^{11}	绝缘体	玻璃	1×10^{12}	绝缘体
聚四氟乙烯	3×10^{12}	绝缘体			

电路中对电流有抑制特性的元件称为电阻(resistor)。为了构造电路,电阻通常由合金和碳化合物制成,电阻的电路符号如图 2-1b 所示,图中 R 表示该电阻的电阻值。电阻是电路中最简单的无源元件。

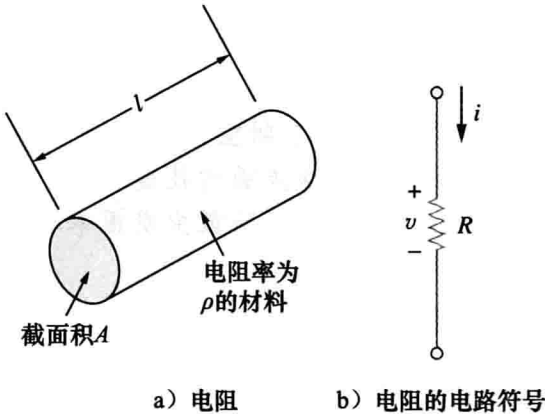


图 2-1 电阻及其电路符号

德国物理学家乔·西蒙·欧姆(Georg Simon Ohm, 1787—1854)因发现流过电阻的电流与电阻两端的电压之间的关系而闻名于世,该关系正是众所周知的欧姆定律(Ohm's law)。

欧姆定律：电阻两端的电压 v 与流过该电阻的电流 i 成正比。
即：

$$v \propto i \tag{2.2}$$

欧姆将这个比例常数定义为电阻 R (电阻是材料的一个属性,当元件的内部或外部条件改变时,例如温度发生变化,电阻值也会改变)。于是,式(2.2)可以写为：

$$v = iR$$

(2.3)

式(2.3)为欧姆定律的数学表达式,式中 R 的单位是欧姆,记作 Ω 。

元件的电阻 R 表示其阻碍电流流过的能力,单位是欧姆。

由式(2.3)可得：

$$R = \frac{v}{i} \tag{2.4}$$

所以：

$$1\Omega = 1\text{V/A}$$

应用式(2.3)的欧姆定律时,必须注意电流的方向和电压的极性。电流 i 的方向与电压 v 的极性必须符合关联参考方向,如图 2-1b 所示。当 $v=iR$ 时,电流从高电位流向低电位。反之,当 $v=-iR$ 时,电流从低电位流向高电位。

历史珍闻

乔·西蒙·欧姆(Georg Simon Ohm, 1787—1854), 德国物理学家, 于1826年通过实验确定了描述电阻的电压-电流关系的基本定律——欧姆定律。欧姆的这项工作最初曾被某些反对者所否定。

欧姆出生于巴伐利亚州埃尔兰根的一个贫苦家庭, 他一生致力于电学研究, 发现了著名的欧姆定律。1841年, 伦敦皇家学院授予他科普利勋章(Copley Medal)。1849年, 慕尼黑大学授予他物理学首席教授职位。后人为了纪念他将电阻的单位命名为欧姆。



© SSPL via Getty Images

由于电阻值 R 可以从零变到无限大, 所以考虑两种极端情况下的电阻值 R 就很重要。 $R=0$ 的电路称为短路电路(short circuit), 如图 2-2a 所示。在短路的情况下:

$$v = iR = 0 \tag{2.5}$$

表明电压为零, 电流可以取任意值。在实际电路中, 由良导体构成的导线通常为短路电路。

短路电路是电阻为零时的电路。

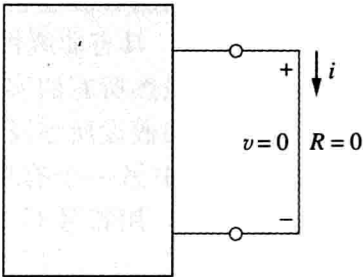
类似地, 电阻值 $R = \infty$ 的电路称为开路电路(open circuit), 如图 2-2b 所示。对于开路电路而言:

$$i = \lim_{R \rightarrow \infty} \frac{v}{R} = 0 \tag{2.6}$$

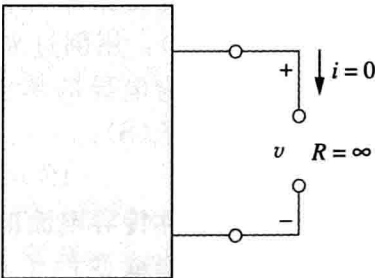
表明虽然两端的电压可以是任意值, 但其电流为零。

开路电路是电阻值趋于无穷大时的电路。

电阻既可以是固定的, 也可以是可变的。大多数电阻为固定的, 其阻值为常数。两种常见的定常电阻(线绕电阻与复合电阻)如图 2-3 所示。当需要较大阻值时, 可以采用复合电阻。固定电阻的电路符号如图 2-1b 所示。可变电阻的电阻值是可以调整的, 其电路符号如图 2-4a 所示。常用的可变电阻称为电位器(potentiometer), 其电路符号如图 2-4b 所示。电位器是一种三端元件, 其中一端为滑动抽头或滑片。移动滑动抽头时, 滑动端与两个固定端之间的电阻值随之改变。与固定电阻一样, 可变电阻器既可以是线绕的, 也可以是复合的, 如图 2-5 所示。虽然在电路设计中可以采用如图 2-3 与如图 2-5 所示的电阻, 但是, 包括电阻器在内的大多数现代电路元件通常是贴片的或集成的, 如图 2-6 所示。

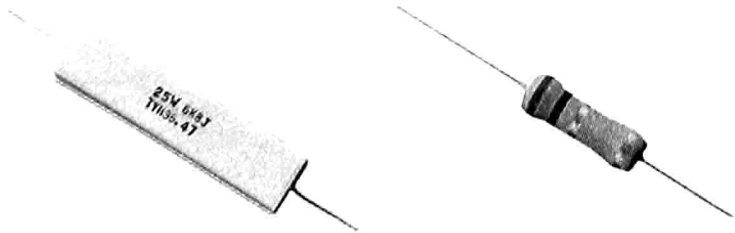


a) 短路电路 ($R=0$)



b) 开路电路 ($R=\infty$)

图 2-2 短路电路与开路电路

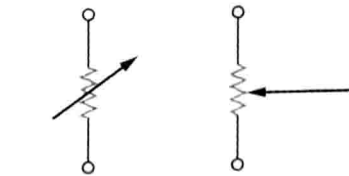


a) 绕线电阻

b) 碳膜电阻

图 2-3 固定电阻

图片由 Tech America 提供



a) 一般可变电阻

b) 电位器

图 2-4 可变电阻的电路符号



图 2-5 可变电阻器
图片由 Tech America 提供

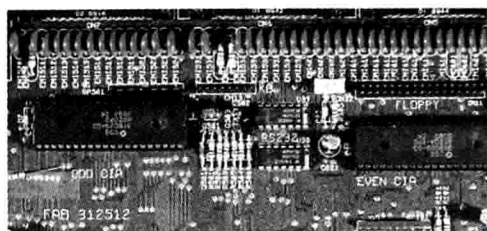


图 2-6 集成电路板上的电阻
©Eric Toney/Alamy RF

应该指出的是，并非所有的电阻器都遵守欧姆定律。遵守欧姆定律的电阻元件称为线性(linear)电阻，线性电阻具有恒定的阻值，因此，其电流-电压特性曲线(i - v 曲线)是一条通过原点的直线，如图 2-7a 所示。非线性(nonlinear)电阻不遵守欧姆定律，其阻值随着流过它的电流而变化，典型的 i - v 特性曲线如图 2-7b 所示。具有非线性电阻特性的电路元件包括照明灯泡和二极管等。虽然所有的实际电阻在某些条件下都表现为非线性特征，但本书假设所涉及的电阻元件均为线性电阻。

电路分析中另一个有用的量是电阻 R 的倒数，称为电导(conductance)，用符号 G 表示：

$$G = \frac{1}{R} = \frac{i}{v} \quad (2.7)$$

电导用来度量某个元件传导电流的强弱程度，电导的单位是姆欧(mho)，用倒过来的欧姆符号(\mathcal{U})表示。虽然工程师常使用姆欧作为电导的单位，但本书采用国际单位制中电导的单位是西门子(S)：

$$1\text{S} = 1\mathcal{U} = 1\text{A/V} \quad (2.8)$$

电导是元件传导电流的能力，其单位是西门子或姆欧。

可以用欧姆或西门子来表示同一个电阻值，例如， 10Ω 就等于 0.1S 。由式(2.7)可得：

$$i = Gv \quad (2.9)$$

电阻所消耗的功率可以用电阻 R 来表示，由式(1.7)与式(2.3)可得：

$$p = vi = i^2 R = \frac{v^2}{R} \quad (2.10)$$

同样，电阻消耗的功率也可以用电导 G 来表示：

$$p = vi = v^2 G = \frac{i^2}{G} \quad (2.11)$$

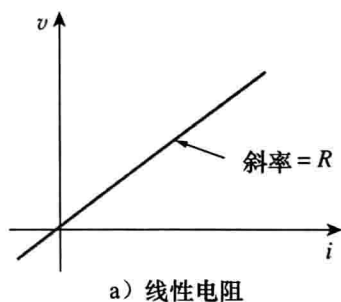
由式(2.10)与式(2.11)可得到如下两个结论：

1. 电阻上消耗的功率既是电流的非线性函数，又是电压的非线性函数。
2. 因为 R 和 G 都是正值，所以电阻消耗的功率总是正的。因此，电阻总是吸收来自电路的功率，这也证实了电阻是无源元件，不能产生能量。

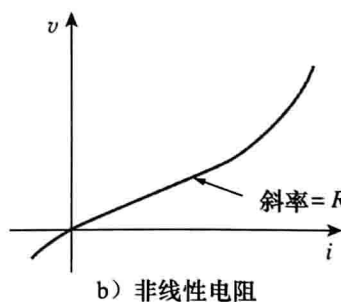
例 2-1 一个电熨斗接 120V 电源时产生的电流为 2A ，求该熨斗的阻值。

解：由欧姆定律可得：

$$R = \frac{v}{i} = \frac{120}{2} = 60(\Omega)$$



a) 线性电阻



b) 非线性电阻

图 2-7 电流-电压特性曲线

练习 2-1 烤面包机的基本部件是一种将电能转换为热能的电阻元件，试求阻值为 15Ω 的烤面包机接 110V 电源时产生的电流。

答案：7.333A

例 2-2 电路如图 2-8 所示，试计算电流 i 、电导 G 和功率 p 。

解：因为电阻两端接在电压源上，所以电阻两端的电压等于电压源的电压(30V)。因此，电流为：

$$i = \frac{v}{R} = \frac{30}{5 \times 10^3} = 6(\text{mA})$$

电导为：

$$G = \frac{1}{R} = \frac{1}{5 \times 10^3} = 0.2(\text{mS})$$

利用式(1.7)、式(2.10)或式(2.11)可以得到计算功率的几种不同方法：

$$p = vi = 30 \times 6 \times 10^{-3} = 180(\text{mW})$$

或

$$p = i^2 R = (6 \times 10^{-3})^2 \times 5 \times 10^3 = 180(\text{mW})$$

或

$$p = v^2 G = 30^2 \times 0.2 \times 10^{-3} = 180(\text{mW})$$

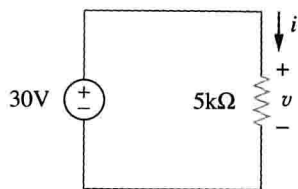


图 2-8 例 2-2 图

练习 2-2 电路如图 2-9 所示，试计算电压 v 、电导 G 和功率 p 。

答案：30V, $100\mu\text{S}$, 90mW

例 2-3 电压为 $20\sin\pi t\text{V}$ 的电压源连接到一个 $5\text{k}\Omega$ 电阻上，试求流经该电阻的电流及其消耗的功率。

解：

$$i = \frac{v}{R} = \frac{20\sin\pi t}{5 \times 10^3} = 4\sin\pi t(\text{mA})$$

所以：

$$p = vi = 80\sin^2\pi t(\text{mW})$$

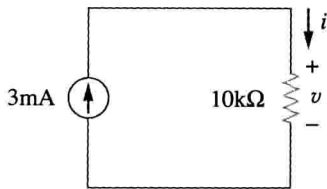


图 2-9 练习 2-2 图

练习 2-3 某电阻连接在电压源 $v=15\cos t\text{V}$ 两端，吸收的瞬时功率为 $30\cos^2 t\text{mW}$ 。求 i 与 R 。

答案： $2\cos t\text{mA}$, $7.5\text{k}\Omega$

† 2.3 节点、支路与回路

由于电路中各元件可以用不同的方式相互连接，所以有必要理解关于网络拓扑结构的一些基本概念。为了区分电路与网络，可以将网络看成是若干元件或器件的相互连接，而电路则是指具有一条或者多条闭合路径的网络。在讨论网络拓扑结构问题时，习惯采用的术语通常是网络，而不是电路。即使网络和电路指的是同一事物，本书也采用习惯方式来叙述。在网络拓扑结构中，将研究与网络中元件位置以及网络的几何结构有关的一些属性，包括支路、节点和回路等。

支路表示网络中的单个元件，如电压源、电阻等。

换言之，一条支路表示任意一个二端元件。图 2-10 所示的电路中包含 5 条支路，即 10V 电压源、 2A 电流源以及三个电阻。

节点是指两条或多条支路的连接点。

电路中的节点通常用圆点来表示。如果用一根导线来连接两个节点，则这两个节点合并为一个节点，如图 2-10 所示电路中包含 a 、 b 、 c 三个节点，图中构成节点 b 的三个点由理想导线连接在一

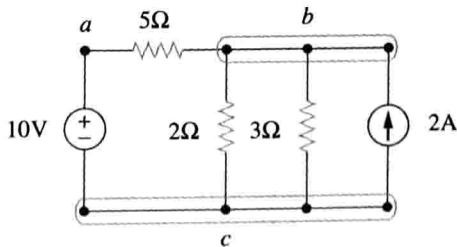


图 2-10 节点，支路，回路

起,从而成为一个点。同理,节点 c 是由四个点合并而成的。可以将仅包含三个节点的图 2-10 所示电路改画为图 2-11 所示电路,显然图 2-10 与 2-11 中的两个电路是等效的。然而,为了清楚起见,图 2-10 将节点 b 和节点 c 通过理想导体分散连接起来。

回路是指电路中的任一闭合路径。

在电路中从一个节点出发,无重复地经过一组节点,之后再回到起始节点,所构成的一条闭合路径就称为回路。如果一个回路至少包含一条不属于其他任何独立回路的支路,则称该回路为独立(independent)回路。由独立回路可以得到独立的方程组。

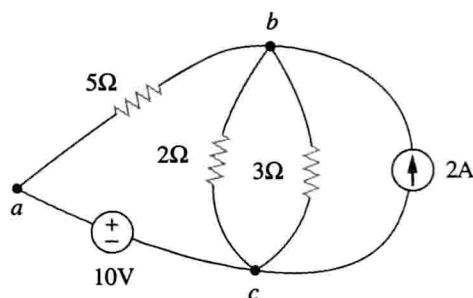


图 2-11 图 2-10 重绘

对于一组回路而言,如果其中一个回路不包含属于其他任何独立回路的支路,也可能构成一组独立回路。在图 2-11 中,第一个独立回路是包括 2Ω 电阻支路的封闭路径 $abca$,第二个独立回路是包含 3Ω 电阻和电流源的闭合路径,第三个独立回路是由 2Ω 电阻和 3Ω 电阻并联组成的闭合路径。这样就构成了一组独立回路。

包括 b 条支路、 n 个节点和 l 个独立回路的网络满足如下关于网络拓扑结构的基本定理:

$$b = l + n - 1 \quad (2.12)$$

如下两个定义表明,电路拓扑结构对于研究电路中的电压和电流至关重要。

如果两个或多个元件共享唯一的一个节点,并传递同一电流,则称这种连接方式为**串联**。

如果两个或多个元件连接到相同的两个节点上,并且它们的两端是同一电压,则称这种连接方式为**并联**。

当不同元件相互级联或者首尾顺序连接时,这些元件就是串联。例如,如果两个元件共享同一个节点,且没有其他元件连接到该节点上,则称这两个元件是串联的。并联的元件连接到同一对端点上。元件在电路中的连接方式也可以既非串联,又非并联。在图 2-10 所示的电路中,电压源和 5Ω 的电阻是串联的,因为流过它们的电流是同一电流; 2Ω 电阻、 3Ω 电阻和电流源是并联的,因为它们都连接到相同的两个节点 b 和 c 上,从而具有相同的端电压;而 5Ω 电阻和 2Ω 电阻之间的连接关系既非串联也非并联。

例 2-4 确定图 2-12 所示电路中的支路数和节点数,并指出哪些元件是串联,哪些元件是并联。

解: 由于电路中包含四个元件,所以该电路有四条支路: $10V$ 电压源支路、 5Ω 电阻支路、 6Ω 电阻支路和 $2A$ 电流源支路。电路中包含三个节点,如图 2-13 所示。 5Ω 电阻与 $10V$ 电压源串联,因为流过它们的电流相同,而 6Ω 电阻与 $2A$ 电流源并联,因为他们均与节点 2 和节点 3 相连。

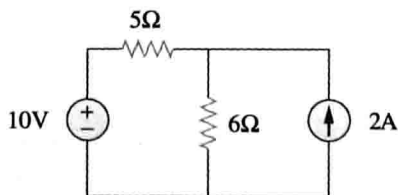


图 2-12 例 2-4 图

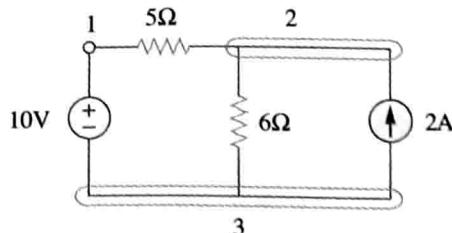


图 2-13 图 2-12 中的三个节点

练习 2-4 图 2-14 所示电路中有多少条支路,多少个节点? 确定串联和并联的元件。

答案：如图 2-15 所示，包括 5 条支路和 3 个节点、 1Ω 电阻和 2Ω 电阻是并联的， 4Ω 电阻与 10V 电压源也是并联的

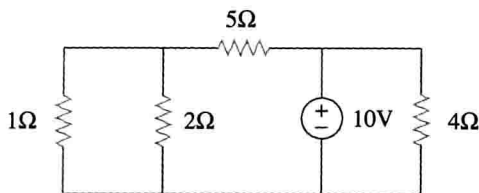


图 2-14 练习 2-4 图

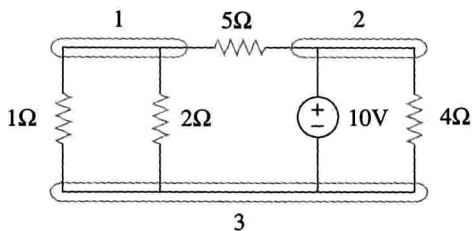


图 2-15 练习 2-4 的解答

2.4 基尔霍夫定律

分析电路时，只有欧姆定律还不够。将欧姆定律与基尔霍夫定律结合起来，就构成了分析各类电路的一组强有力的工具。基尔霍夫定律最初是由德国物理学家基尔霍夫 (Gustav Robert Kirchhoff, 1824—1887) 于 1847 年提出的，包括基尔霍夫电流定律 (Kirchhoff's current law, KCL) 和基尔霍夫电压定律 (Kirchhoff's voltage law, KVL)。

基尔霍夫电流定律是基于电荷守恒定律，即一个系统中电荷的代数和是不变的。

基尔霍夫电流定律 (KCL) 是指流入任一节点 (或任一闭合界面) 的电流代数和为零。

KCL 的数学表达式为：

$$\sum_{n=1}^N i_n = 0 \quad (2.13)$$

其中， N 为与该节点相连的支路数， i_n 为流入 (或流出) 该节点的第 n 条支路的电流。根据这一定律，可以认为流入节点的电流是正值，而流出节点的电流是负值，反之亦然。

历史珍闻

基尔霍夫 (Gustav Robert Kirchhoff, 1824—1887)，德国物理学家，于 1847 年提出了电路网络中电压与电流关系的两个基本定律。基尔霍夫定律和欧姆定律共同构成了电路分析理论的基础。

基尔霍夫出生在东普鲁士柯尼斯堡的一个律师家庭。18 岁时就进入柯尼斯堡大学读书，毕业后在柏林担任讲师。他与德国化学家罗伯特·本生 (Robert Bunsen) 合作从事光谱学方面的研究，于 1860 年发现了铯元素，于 1861 年发现了铷元素。基尔霍夫辐射定律也使他享誉世界。基尔霍夫在工程界、化学界和物理界都享有盛誉。



© Pixtal/age Fotostock RF

为了证明 KCL，假定有一组电流 $i_k(t)$ ， $k=1, 2, \dots$ ，流入某节点。这些电流在该节点处的代数和为：

$$i_T(t) = i_1(t) + i_2(t) + i_3(t) + \dots \quad (2.14)$$

对式 (2.14) 两边取积分，得到：

$$q_T(t) = q_1(t) + q_2(t) + q_3(t) + \dots \quad (2.15)$$

其中， $q_k(t) = \int i_k(t) dt$ ， $q_T(t) = \int i_T(t) dt$ 。但是电荷守恒定律要求该节点处电荷的代数和不能发生任何变化，即该节点存储的净电荷为零。因此， $q_T(t) = 0 \rightarrow i_T(t) = 0$ ，从而证明了 KCL 的正确性。

考虑图 2-16 中的节点，应用 KCL 可得：

$$i_1 + (-i_2) + i_3 + i_4 + (-i_5) = 0 \tag{2.16}$$

这是因为 i_1 、 i_2 、 i_4 是流入该节点的电流，而 i_2 、 i_5 是流出该节点的电流，移项整理后得到：

$$i_1 + i_3 + i_4 = i_2 + i_5 \tag{2.17}$$

式(2.17)可以看做是 KCL 的另一种形式。

流入节点的电流之和等于流出该节点的电流之和。

注意，KCL 也适用于任一闭合界面的情况，即 KCL 的一般情况，因为节点可以看做是一个闭合面收缩后的一个点。在二维空间中，闭合截面就是一条闭合路径。正如图 2-17 所示的典型电路，流入图中闭合曲面的总电流等于流出该曲面的总电流。

KCL 的一个简单应用是并联电流源的合并，合并后的等效电流即各独立电流源所提供电流的代数和。如图 2-18a 所示的电流源可以合并为图 2-18b 所示的电流源。在节点 a 处应用 KCL 可以得到合并后的等效电流：

$$I_T + I_2 = I_1 + I_3$$

或

$$I_T = I_1 - I_2 + I_3 \tag{2.18}$$

串联电路中不可能包含两个不同的电流 I_1 和 I_2 ，除非 $I_1 = I_2$ ，否则就会违背基尔霍夫电流定律。

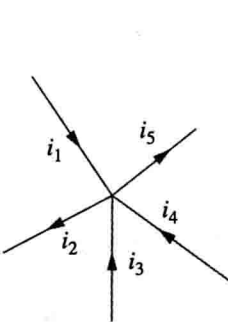


图 2-16 说明 KCL 的节点电流

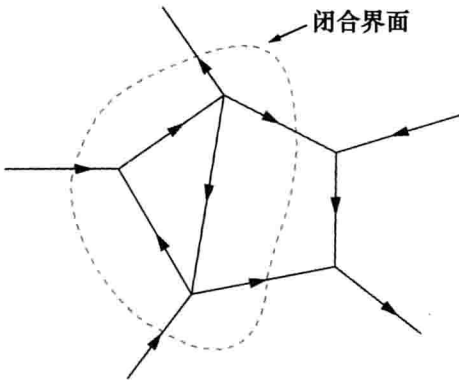


图 2-17 KCL 应用于闭合界面

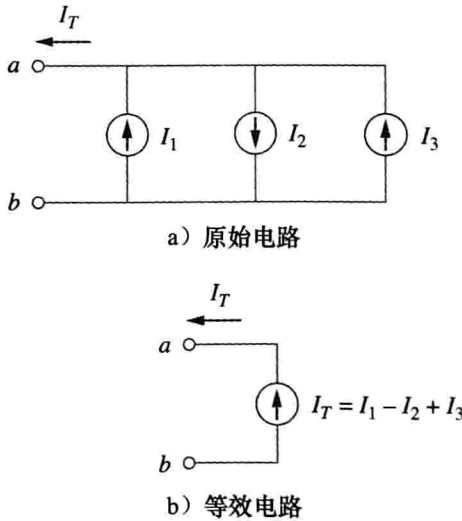


图 2-18 并联电流源

提示：两个电源(或者两个电路)在端口处具有相同的伏安关系，则称它们是等效的。基尔霍夫电压定律是基于能量守恒原理得到的。

基尔霍夫电压定律(KVL)是指任何闭合路径(或回路)上全部电压的代数和为零。

KVL 的数学表达式为：

$$\sum_{m=1}^M v_m = 0 \tag{2.19}$$

其中， M 为回路中的电压数量(或回路中的支路数)， v_m 为第 m 个电压。

下面利用图 2-19 所示的电路来说明 KVL。各电压的正负符号是环绕回路时首先遇到的该电压端点的极性。环绕回路可以从任何一条支路开始，环绕的方向可以是顺时针，也可以是逆时针。假定从电压源开始，以顺时针方向环绕回路，那么电压依次是 $-v_1$ 、 $+v_2$ 、 $+v_3$ 、 $-v_4$ 、 $+v_5$ 。例如，以顺时针方向环绕到支路 3 时，首先遇到的是 V_3 的正

极, 所以得到电压 V_3 为正, 而对于支路 4, 首先遇到的是 V_4 的负极, 所以得到电压 V_4 为负。因此, 根据 KVL 得到:

$$-v_1 + v_2 + v_3 - v_4 + v_5 = 0 \quad (2.20)$$

整理后得到:

$$v_2 + v_3 + v_5 = v_1 + v_4 \quad (2.21)$$

式(2.21)可以解释为:

$$\text{电压降之和} = \text{电压升之和} \quad (2.22)$$

KVL 还有另一种形式。如果按逆时针方向环绕回路,

则会得到 $+v_1$ 、 $-v_5$ 、 $+v_4$ 、 $-v_3$ 、 $-v_2$, 除电压符号相反外, 与顺时针方向环绕的情况相同。因此, 式(2.20)与式(2.21)是相同的。

当电压源串联时, 可以用 KVL 求出总电压, 总电压等于各个电压源的代数和。例如, 对于图 2-20a 所示的电压源, 利用 KVL 可以得到如图 2-20b 所示的等效电压源:

$$-V_{ab} + V_1 + V_2 - V_3 = 0$$

即

$$V_{ab} = V_1 + V_2 - V_3 \quad (2.23)$$

为了避免违背 KVL, 电路中不可能并联两个不同的电压 V_1 和 V_2 , 除非 $V_1 = V_2$ 。

提示: 在回路中, KVL 有两种应用方式: 顺时针方向或逆时针方向。无论沿哪种方向环绕, 回路中电压的代数和均为零。

例 2-5 如图 2-21a 所示的电路, 试求电压 v_1 和 v_2 。

解: 为了求出 v_1 和 v_2 , 需应用欧姆定律和基尔霍夫电压定律。假定回路中电流 i 的方向如图 2-21b 所示。

由欧姆定律可得:

$$v_1 = 2i, \quad v_2 = -3i \quad (2.5.1)$$

在回路中应用 KVL 可得:

$$-20 + v_1 - v_2 = 0 \quad (2.5.2)$$

将式(2.5.1)代入式(2.5.2)得到:

$$-20 + 2i + 3i = 0 \quad \text{或} \quad 5i = 20 \quad \Rightarrow \quad i = 4\text{A}$$

最后, 将电流 i 代入式(2.5.1)得到:

$$v_1 = 8\text{V}, \quad v_2 = -12\text{V}$$

练习 2-5 求图 2-22 所示电路中的 v_1 和 v_2 。

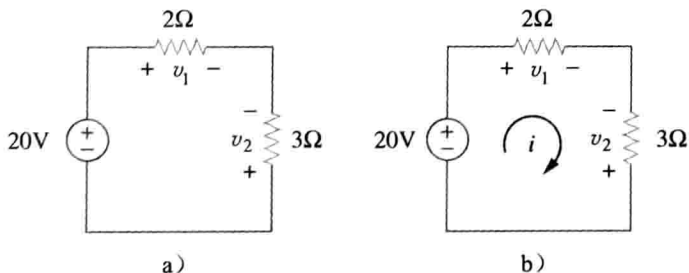


图 2-21 例 2-5 图

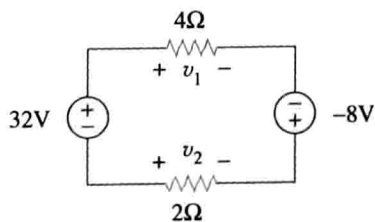


图 2-22 练习 2-5 图

答案: 16V, -8V

例 2-6 计算图 2-23a 所示电路中的 v_o 与 i 。

解：按照图 2-23b 中所示的方向应用 KVL，得到：

$$-12 + 4i + 2v_o - 4 + 6i = 0 \quad (2.6.1)$$


对 6Ω 电阻应用欧姆定律可得：

$$v_o = -6i \quad (2.6.2)$$

将式(2.6.2)代入式(2.6.1)得到：

$$-16 + 10i - 12i = 0 \Rightarrow i = -8A$$

因此， $v_o = 48V$ 。

 **练习 2-6** 求图 2-24 所示电路中的 v_x 与 v_o 。

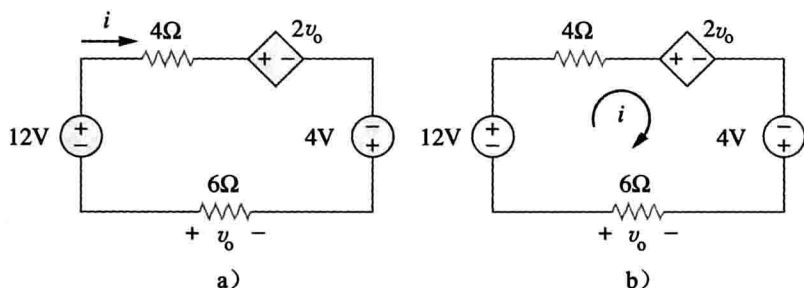


图 2-23 例 2-6 图

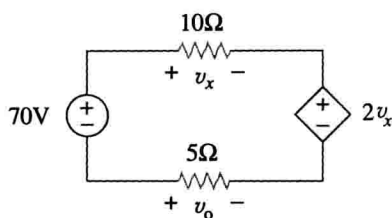


图 2-24 练习 2-6 图

答案：20V，-10V


例 2-7 求图 2-25 所示电路中的电流 i_o 与电压 v_o 。

解：在节点 a 处应用 KCL，得到：

$$3 + 0.5i_o = i_o \Rightarrow i_o = 6A$$

对于 4Ω 电阻，根据欧姆定律可得：

$$v_o = 4i_o = 24(V)$$

 **练习 2-7** 求图 2-26 所示电路中的 i_o 与 v_o 。

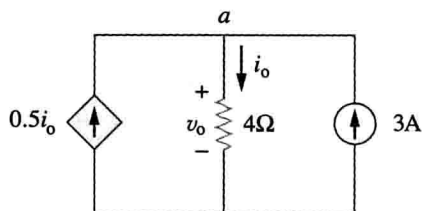


图 2-25 例 2-7 图

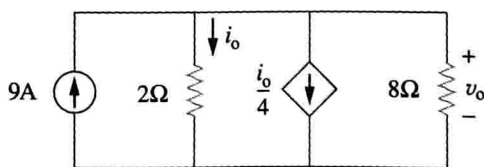


图 2-26 练习 2-7 图

答案：12V，6A

例 2-8 求图 2-27a 所示电路中的各个电流与电压。

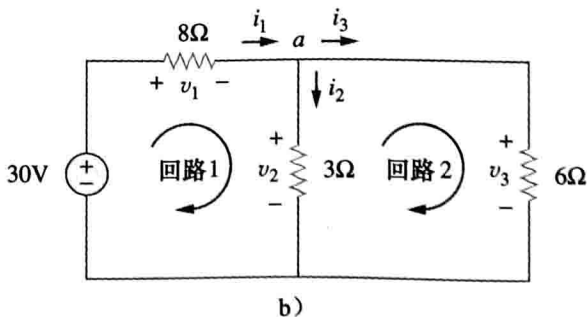
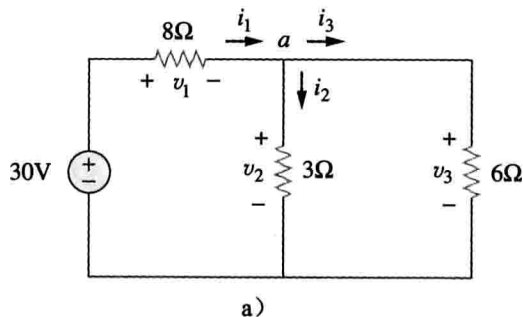


图 2-27 例 2-8 图

解：利用欧姆定律和基尔霍夫定律求解。由欧姆定律可得：

$$v_1 = 8i_1, \quad v_2 = 3i_2, \quad v_3 = 6i_3 \quad (2.8.1)$$

根据欧姆定律, 各电阻的电压与电流具有上述确定的伏安关系, 因此, 要求出的是(v_1 , v_2 , v_3)或(i_1 , i_2 , i_3)。在节点 a 处, 利用 KCL 可以得到:

$$i_1 - i_2 - i_3 = 0 \quad (2.8.2)$$

对图 2-27b 所示的回路 1 应用 KVL 得到:

$$-30 + v_1 + v_2 = 0$$

利用式(2.8.1)中的 i_1 、 i_2 表示上式中的 v_1 和 v_2 , 得到:

$$-30 + 8i_1 + 3i_2 = 0$$

即

$$i_1 = \frac{(30 - 3i_2)}{8} \quad (2.8.3)$$

对回路 2 应用 KVL 得到:

$$-v_2 + v_3 = 0 \Rightarrow v_3 = v_2 \quad (2.8.4)$$

这说明两个并联电阻两端的电压是相等的。利用式(2.8.1)中的 i_2 与 i_3 来分别表示 v_2 和 v_3 , 则式(2.8.4)变为:

$$6i_3 = 3i_2 \Rightarrow i_3 = \frac{i_2}{2} \quad (2.8.5)$$

将式(2.8.3)与式(2.8.5)代入式(2.8.2), 得到:

$$\frac{30 - 3i_2}{8} - i_2 - \frac{i_2}{2} = 0$$

即 $i_2 = 2\text{A}$ 。由 i_2 的值, 根据式(2.8.1)~式(2.8.5)可得:

$$i_1 = 3\text{A}, \quad i_3 = 1\text{A},$$

$$v_1 = 24\text{V}, \quad v_2 = 6\text{V}, \quad v_3 = 6\text{V}$$

练习 2-8 求图 2-28 所示电路中的各个电流与电压值。

答案: $v_1 = 6\text{V}$, $v_2 = 4\text{V}$, $v_3 = 10\text{V}$,

$$i_1 = 3\text{A}, \quad i_2 = 500\text{mA}, \quad i_3 = 2.5\text{A}$$

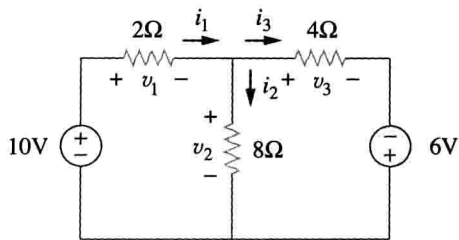


图 2-28 练习 2-8 图

2.5 串联电阻及其分压

在电路分析中经常遇到串联电阻或并联电阻的合并问题, 需引起足够的重视。一次合并其中的两个电阻就可以方便地实现多个串、并联电阻的合并。据此, 考虑图 2-29 所示的单回路电路。图中两个电阻是串联的, 因为流过这两个电阻的电流是同一电流。对每个电阻应用欧姆定律, 则有:

$$v_1 = iR_1, \quad v_2 = iR_2 \quad (2.24)$$

如果对该回路(沿顺时针方向)应用 KVL, 则得到:

$$-v + v_1 + v_2 = 0 \quad (2.25)$$

合并式(2.24)与式(2.25)可得:

$$v = v_1 + v_2 = i(R_1 + R_2) \quad (2.26)$$

或

$$i = \frac{v}{R_1 + R_2} \quad (2.27)$$

注意, 式(2.26)又可以写成:

$$v = iR_{eq} \quad (2.28)$$

表明这两个电阻可以用等效电阻 R_{eq} 来取代, 并且:

$$R_{eq} = R_1 + R_2 \quad (2.29)$$

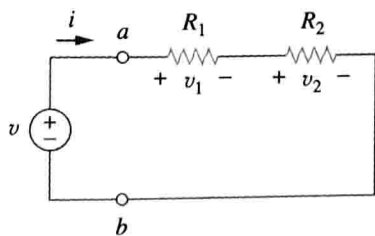


图 2-29 包含两个串联电阻的单回路电路

于是, 图 2-29 所示的电路可以用图 2-30 中的等效电路来取代。图 2-29 与图 2-30 中的两个电路之所以等效, 是因为这两个电路在 a 、 b 两端所呈现的电压-电流关系是完全相同的。诸如图 2-30 这样的等效电路对于简化电路的分析是非常有用的。

任意多个电阻串联后的等效电阻值等于各个电阻值之和。

对于 N 个串联的电阻, 其等效电阻为:

$$R_{\text{eq}} = R_1 + R_2 + \cdots + R_N = \sum_{n=1}^N R_n \quad (2.30)$$

图 2-30 图 2-29 所示电路的等效电路

提示: 串联电阻的特性与阻值等于各电阻阻值之和的单个电阻的特性相同。

为了确定图 2-29 所示电路中各个电阻上的电压, 可以将式 (2.26) 代入式 (2.24), 得到:

$$v_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} v, \quad v_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} v \quad (2.31)$$

可以看出, 电源电压在各电阻之间的电压分配与各电阻的阻值成正比, 电阻值越大, 电阻上的电压就越大, 这称为分压原理 (principle of voltage division), 而图 2-29 所示的电路称为分压电路 (voltage divider)。一般情况下, 如果电源电压为 v 的分压电路中包含 N 个电阻 (R_1, R_2, \cdots, R_N) 串联, 则第 n 个电阻 (R_n) 上的电压为:

$$v_n = \frac{R_n}{R_1 + R_2 + \cdots + R_N} v \quad (2.32)$$

2.6 并联电阻及其分流

在如图 2-31 所示的电路中, 两个电阻并联连接, 因此它们两端具有相同的电压。由欧姆定律可得:

$$v = i_1 R_1 = i_2 R_2$$

即

$$i_1 = \frac{v}{R_1}, \quad i_2 = \frac{v}{R_2} \quad (2.33)$$

在节点 a 处应用 KCL, 得到总电流 i 为:

$$i = i_1 + i_2 \quad (2.34)$$

将式 (2.33) 代入式 (2.34) 可得:

$$i = \frac{v}{R_1} + \frac{v}{R_2} = v \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) = \frac{v}{R_{\text{eq}}} \quad (2.35)$$

其中, R_{eq} 为两个并联电阻的等效电阻值:

$$\frac{1}{R_{\text{eq}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad (2.36)$$

或

$$\frac{1}{R_{\text{eq}}} = \frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2}$$

即

$$R_{\text{eq}} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \quad (2.37)$$

两个并联电阻的等效电阻值等于各电阻值的乘积除以各电阻值之和。

必须强调的是, 以上结论仅适用于两个电阻的并联。如果 $R_1 = R_2$, 则由式 (2.37) 可

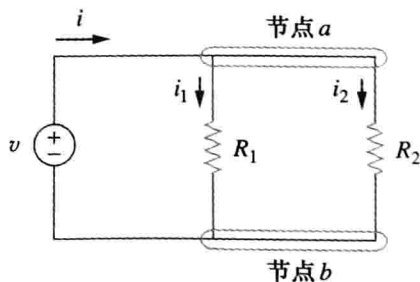
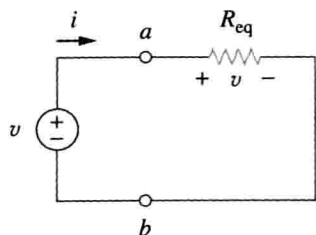


图 2-31 两个电阻的并联

得 $R_{\text{eq}} = R_1/2$ 。

可以将式(2.36)扩展到 N 个电阻并联的一般情况, 此时的等效电阻值为:

$$\frac{1}{R_{\text{eq}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \cdots + \frac{1}{R_N} \quad (2.38)$$

由此可见, 等效电阻 R_{eq} 总是小于其中最小的电阻值。当 $R_1 = R_2 = \cdots = R_N = R$ 时, 有:

$$R_{\text{eq}} = \frac{R}{N} \quad (2.39)$$

例如, 四个 100Ω 的电阻并联连接时的等效电阻值为 25Ω 。

在处理电阻并联的问题时, 采用电导通常要比采用电阻更为方便。由式(2.38)可知, N 个电阻并联后的等效电导为:

$$G_{\text{eq}} = G_1 + G_2 + G_3 + \cdots + G_N \quad (2.40)$$

其中, $G_{\text{eq}} = 1/R_{\text{eq}}$, $G_1 = 1/R_1$, $G_2 = 1/R_2$, $G_3 = 1/R_3$, \cdots , $G_N = 1/R_N$, 式(2.40)表明:

并联电阻的等效电导等于各个电导之和。

提示: 并联电导的特性与电导值等于各电导之和的单个电导的特性相同。

图 2-31 所示的电路可以用图 2-32 所示的电路替代。容易看出式(2.30)与式(2.40)的相似性, 即并联电阻等效电导的计算方法与串联电阻等效电阻的计算方法相同。同样, 串联电阻等效电导的计算方法与并联电阻等效电阻的计算方法相同。因此, N 个电阻串联(如图 2-29 所示)的等效电导 G_{eq} 为:

$$\frac{1}{G_{\text{eq}}} = \frac{1}{G_1} + \frac{1}{G_2} + \frac{1}{G_3} + \cdots + \frac{1}{G_N} \quad (2.41)$$

假定流入图 2-31 中节点 a 的总电流为 i , 如何求得电流 i_1 与 i_2 ? 我们知道并联等效电阻具有相同的电压 v , 即:

$$v = iR_{\text{eq}} = \frac{iR_1R_2}{R_1 + R_2} \quad (2.42)$$

合并式(2.33)与式(2.42), 得到:

$$i_1 = \frac{R_2 i}{R_1 + R_2}, \quad i_2 = \frac{R_1 i}{R_1 + R_2} \quad (2.43)$$

上式说明总电流被两个电阻支路分享, 且支路电流与电阻值成反比, 这个规律称为分流原理(principle of current division), 图 2-31 所示的电路称为分流电路(current divider)。可以看出, 较小电阻的支路流过较大的电流。

一种极端的情况是假定图 2-31 所示电路中的一个电阻为零, 例如 $R_2 = 0$, 即 R_2 短路, 如图 2-33a 所示。由式(2.43)可知, $R_2 = 0$ 意味着 $i_1 = 0$ 、 $i_2 = i$, 即总电流 i 不流经 R_1 , 而只流过 $R_2 = 0$ 的短路支路, 即阻值最小的支路。

因此, 当一个电路被短路时, 应该记住如下两点:

1. 等效电阻 $R_{\text{eq}} = 0$ (参见 $R_2 = 0$ 时的式(2.37))。
2. 全部电流都从短路支路中流过。

另外一个极端情况是 $R_2 = \infty$, 即 R_2 开路, 如图 2-33b 所示, 此时电流仍然从电阻最小的路径 R_1 流过。对式(2.37)取极限 $R_2 \rightarrow \infty$, 得到 $R_{\text{eq}} = R_1$ 。

若以 $R_1 R_2$ 分别去除式(2.43)的分子和分母, 则有:

$$i_1 = \frac{G_1}{G_1 + G_2} i \quad (2.44a)$$

$$i_2 = \frac{G_2}{G_1 + G_2} i \quad (2.44b)$$

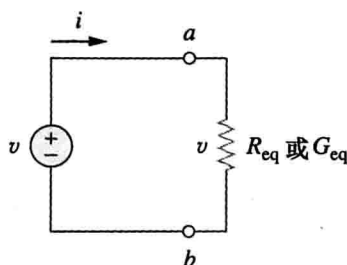


图 2-32 图 2-31 的等效电路

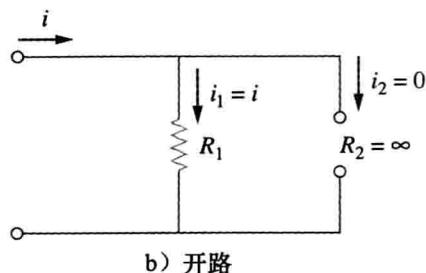
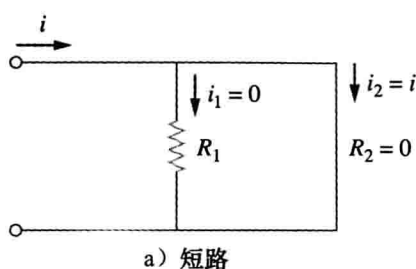


图 2-33 短路与开路

因此，一般而言，如果电源电流为 i 的分流电路中包含 N 个电导 (G_1, G_2, \dots, G_N) 并联，则流经第 n 个电导 (G_n) 的电流为：

$$i_n = \frac{G_n}{G_1 + G_2 + \dots + G_N} i \quad (2.45)$$

在电路分析过程中，通常需要合并串联和并联的电阻，从而将电阻网络简化为单个等效电阻 (equivalent resistance) R_{eq} 。该等效电阻即是网络端口之间的电阻，必须与原网络表现出相同的端口伏安特性。

例 2-9 求图 2-34 所示电路的 R_{eq} 。

解：为求出 R_{eq} ，需要合并串联和并联的电阻。图中 6Ω 电阻与 3Ω 电阻并联，其等效电阻为 (符号“ \parallel ”表示并联)：

$$6\Omega \parallel 3\Omega = \frac{6 \times 3}{6 + 3} = 2(\Omega)$$

1Ω 电阻与 5Ω 电阻是串联的，所以其等效电阻为：

$$1\Omega + 5\Omega = 6\Omega$$

于是，图 2-34 所示电路被简化为图 2-35a 所示的电路。由图 2-35a 可以看出两个 2Ω 的电阻是串联的，所以其等效电阻为：

$$2\Omega + 2\Omega = 4\Omega$$

此时，该 4Ω 电阻又与 6Ω 电阻并联，其等效电阻为：

$$4\Omega \parallel 6\Omega = \frac{4 \times 6}{4 + 6} = 2.4\Omega$$

这样，图 2-35a 所示的电路又可以简化为图 2-35b 所示电路。在图 2-35b 中三个电阻是串联的，因此，电路的等效电阻为：

$$R_{eq} = 4\Omega + 2.4\Omega + 8\Omega = 14.4(\Omega)$$

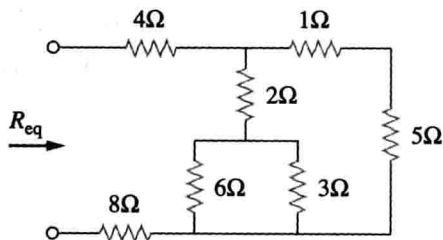


图 2-34 例 2-9 图

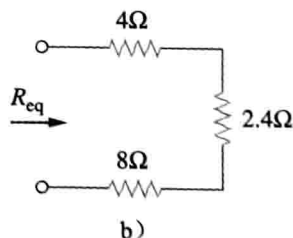
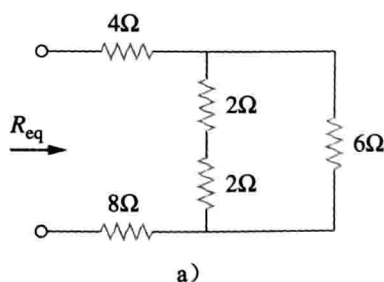


图 2-35 例 2-9 的等效电路

练习 2-9 合并图 2-36 所示电路中的电阻，求出该电路的 R_{eq} 。

答案：10Ω

例 2-10 计算图 2-37 所示的电路的等效电阻 R_{ab} 。

解：3Ω 电阻与 6Ω 电阻的两端均分别接到节点 c 和节点 b ，所以这两个电阻是并联的，合并后的阻值为：

$$3\Omega \parallel 6\Omega = \frac{3 \times 6}{3 + 6} = 2(\Omega) \quad (2.10.1)$$

同理, 12Ω 电阻与 4Ω 电阻的两端均接到节点 d 和节点 b , 所以这两个电阻也是并联的, 合并为:

$$12\Omega \parallel 4\Omega = \frac{12 \times 4}{12 + 4} = 3(\Omega) \quad (2.10.2)$$

而 1Ω 电阻与 5Ω 电阻是串联的, 其等效电阻为:

$$1\Omega + 5\Omega = 6\Omega \quad (2.10.3)$$

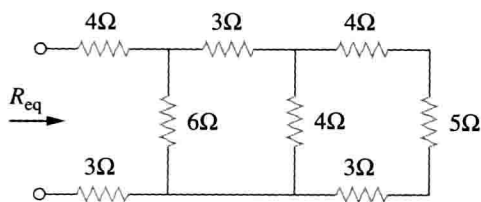


图 2-36 练习 2-9 图

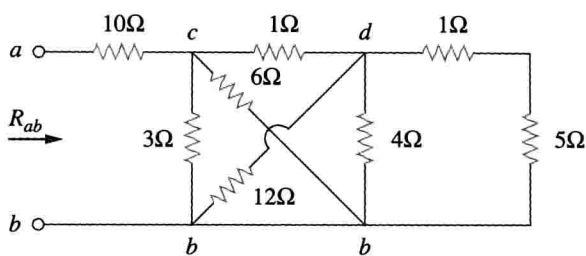


图 2-37 例 2-10 图

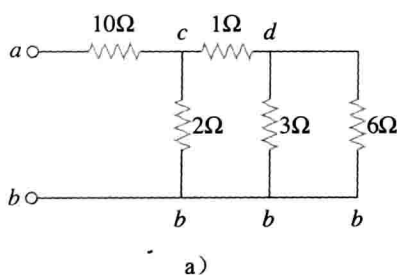
经上述三次合并后, 图 2-37 所示的电路就简化为图 2-38a 所示的电路。而在图 2-38a 中, 并联连接的 3Ω 电阻与 6Ω 电阻可合并为 2Ω 电阻, 其计算方法与式(2.10.1)相同。该 2Ω 电阻又与 1Ω 电阻串联, 从而可以合并为 $1\Omega + 2\Omega = 3\Omega$ 的电阻。于是, 图 2-38a 所示的电路简化为图 2-38b 所示的电路, 此电路中相互并联的 2Ω 电阻与 3Ω 电阻可以合并为:

$$2\Omega \parallel 3\Omega = \frac{2 \times 3}{2 + 3} = 1.2(\Omega)$$

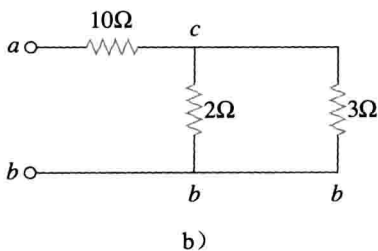
该 1.2Ω 电阻又与 10Ω 电阻串联, 从而得到等效电阻为:

$$R_{ab} = 10 + 1.2 = 11.2(\Omega)$$

练习 2-10 试求如图 2-39 所示电路的 R_{ab} 。



a)



b)

图 2-38 例 2-10 的等效电路

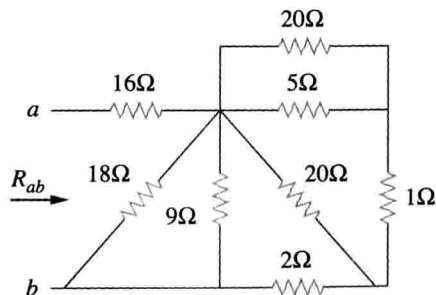


图 2-39 练习 2-10 图

答案: 19Ω

例 2-11 试求图 2-40a 所示电路的等效电导 G_{eq} 。

解: $8S$ 电阻与 $12S$ 电阻在电路中是并联的, 所以二者的等效电导为:

$$8S + 12S = 20S$$

该 $20S$ 电阻又与 $5S$ 电阻串联, 如图 2-40b 所示, 于是合并后的电导为:

$$\frac{20 \times 5}{20 + 5} = 4(S)$$

该 $4S$ 电阻又与 $6S$ 电阻并联, 因此:

$$G_{eq} = 6 + 4 = 10(S)$$

注意, 图 2-40a 所示的电路与图 2-40c 所示的电路是相同的, 只是图 2-40a 中的电阻单位采用西门子, 而图 2-40c 中的电阻单位为欧姆。要证明这两个电路是相同的, 需求出

图 2-40c 所示电路的等效电阻。

$$R_{eq} = \frac{1}{6} \parallel \left(\frac{1}{5} + \frac{1}{8} \parallel \frac{1}{12} \right) = \frac{1}{6} \parallel \left(\frac{1}{5} + \frac{1}{20} \right) = \frac{1}{6} \parallel \frac{1}{4} = \frac{\frac{1}{6} \times \frac{1}{4}}{\frac{1}{6} + \frac{1}{4}} = \frac{1}{10} (\Omega)$$

$$G_{eq} = \frac{1}{R_{eq}} = 10 (\text{S})$$

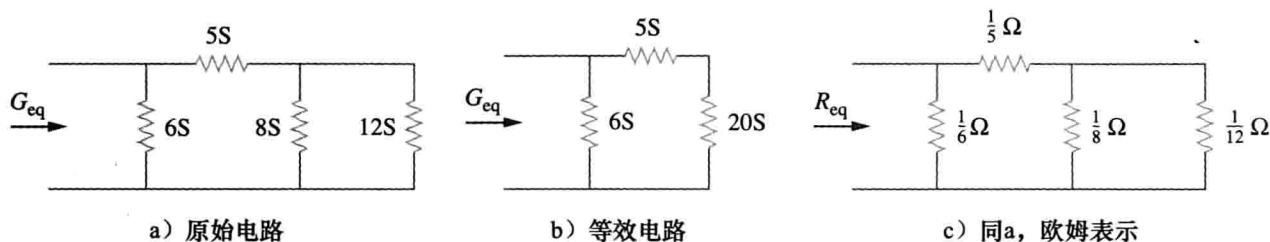


图 2-40 例 2-11 图

与上述方法求得的 G_{eq} 一样。

练习 2-11 计算如图 2-41 所示电路的 G_{eq} 。

答案: 4S

例 2-12 求如图 2-42a 所示电路的 i_o 和 v_o , 并计算 3Ω 电阻所消耗的功率。

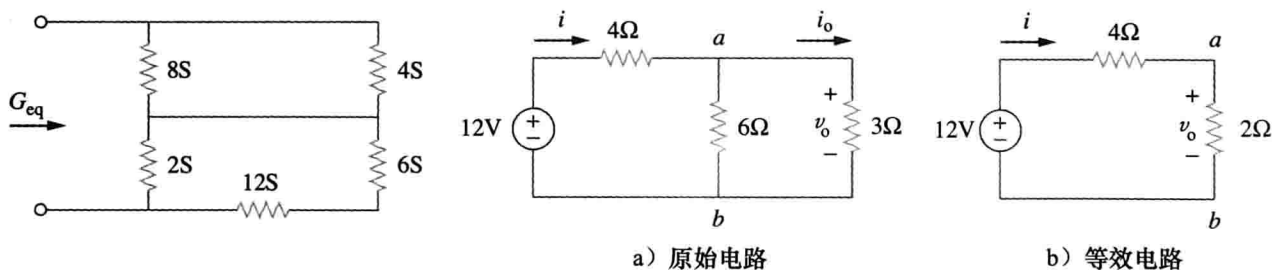


图 2-41 练习 2-11 图

图 2-42 例 2-12 图

解: 6Ω 电阻与 3Ω 电阻并联, 合并后的电阻为:

$$6\Omega \parallel 3\Omega = \frac{6 \times 3}{6 + 3} = 2(\Omega)$$

简化电路如图 2-42b 所示。注意, v_o 不会受到电阻合并的影响, 因为这两个电阻是并联的, 因此具有相同的端电压。根据图 2-42b, 可以采用两种方法求得 v_o 。

一种方法是采用欧姆定律, 得到:

$$i = \frac{12}{4 + 2} = 2(\text{A})$$

所以, $v_o = 2i = 2 \times 2 = 4\text{V}$ 。另一种方式是采用电压分压原理, 由于图 2-42b 中的 12V 电压被 4Ω 电阻和 2Ω 电阻分压, 所以:

$$v_o = \frac{2}{2 + 4} \times 12 = 4(\text{V})$$

类似地, 也可以采用两种方法得到 i_o 。一种方法是在已经求得 v_o 后, 对图 2-42a 中的 3Ω 电阻支路应用欧姆定律, 可得:

$$v_o = 3i_o = 4(\text{V}) \Rightarrow i_o = \frac{4}{3}\text{A}$$

另一种方法是在已经求得 i 后, 对图 2-42a 所示电路应用分流原理, 得到:

$$i_o = \frac{6}{6 + 3} i = \frac{2}{3} \times 2 = \frac{4}{3}(\text{A})$$

3Ω 电阻所消耗的功率为:

$$p_o = v_o i_o = 4 \times \frac{4}{3} = 5.333(\text{W})$$

练习 2-12 求图 2-43 所示电路中的 v_1 与 v_2 ，并计算 12Ω 电阻和 40Ω 电阻所消耗的功率。

答案： $v_1 = 10\text{V}$ ， $i_1 = 833.3\text{mA}$ ， $p_1 = 8.333\text{W}$ ，
 $v_2 = 20\text{V}$ ， $i_2 = 500\text{mA}$ ， $p_2 = 10\text{W}$

例 2-13 在如图 2-44a 所示的电路中，求：(a) 电压 v_o ；(b) 电流源提供的功率；(c) 每个电阻消耗的功率。

解：(a) $6\text{k}\Omega$ 电阻与 $12\text{k}\Omega$ 电阻串联，合并后的电阻为 $6 + 12 = 18\text{k}\Omega$ ，于是图 2-44a 所示电路可以简化为图 2-44b 所示电路。采用分流原理可以求出 i_1 与 i_2 。

$$i_1 = \frac{18\,000}{9\,000 + 18\,000} \times 30\text{mA} = 20\text{mA}$$

$$i_2 = \frac{9\,000}{9\,000 + 18\,000} \times 30\text{mA} = 10\text{mA}$$

注意， $9\text{k}\Omega$ 电阻与 $18\text{k}\Omega$ 电阻两端的电压是相同的，所以， $v_o = 9000i_1 = 18\,000i_2 = 180\text{V}$ 。

(b) 电流源提供的功率为：

$$p_o = v_o i_o = 180 \times 30\text{mW} = 5.4\text{W}$$

(c) $12\text{k}\Omega$ 电阻所消耗的功率为：

$$p = i v = i_2(i_2 R) = i_2^2 R = (10 \times 10^{-3})^2 \times 12\,000 = 1.2(\text{W})$$

$6\text{k}\Omega$ 电阻所消耗的功率为：

$$p = i_2^2 R = (10 \times 10^{-3})^2 \times 6000 = 0.6(\text{W})$$

$9\text{k}\Omega$ 电阻所消耗的功率为：

$$p = \frac{v_o^2}{R} = \frac{180^2}{9000} = 3.6(\text{W})$$

或

$$p = v_o i_1 = 180 \times 20\text{mW} = 3.6\text{W}$$

注意，电源提供的功率 (5.4W) 等于电路元件吸收 (消耗) 的功率 ($1.2 + 0.6 + 3.6 = 5.4\text{W}$)，这是检查计算结果正确与否的一种方法。

练习 2-13 在图 2-45 所示的电路中，试求：

(a) v_1 与 v_2 ；(b) $3\text{k}\Omega$ 与 $20\text{k}\Omega$ 电阻消耗的功率；(c) 电流源提供的功率。

答案：(1) 45V ， 60V ；(b) 675mW ， 180mW ；(c) 1.8W

† 2.7 Y- Δ 变换

在电路分析中经常会遇到电阻既非并联又非串联的情况。如图 2-46 所示的桥式电路，电阻 $R_1 \sim R_6$ 既非串联又非并联，应该如何合并？可以利用三端等效网络来化简此类电路。三端等效网络包括如图 2-47 所示的 Y 形网络和 T 形网络，或者如图 2-48 所示的 Δ 形网络和 Π 形网络。这些电路可独立存在，也可作为大型电路的一部分，用于三相电路、滤波器以及匹配电路等电路网络中。本节主要介绍在电路中如何辨认这类三端网络，以及如何在电路分析中应用 Y- Δ 变换等问题。

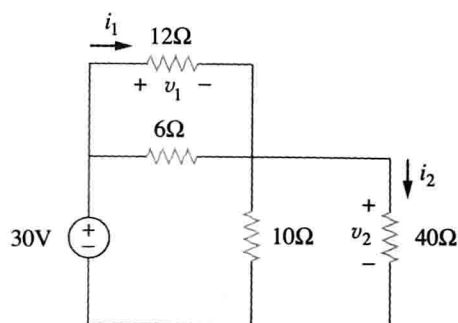
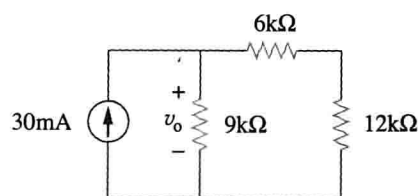
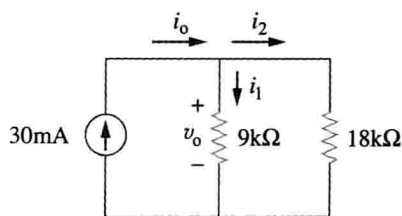


图 2-43 练习 2-12 图



a) 原始电路



b) 等效电路

图 2-44 例 2-13 图

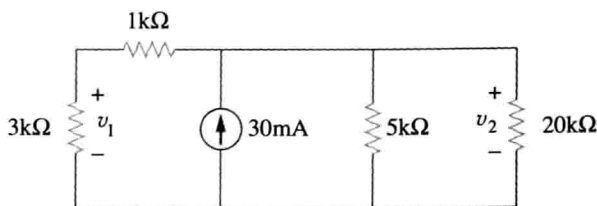


图 2-45 练习 2-13 图

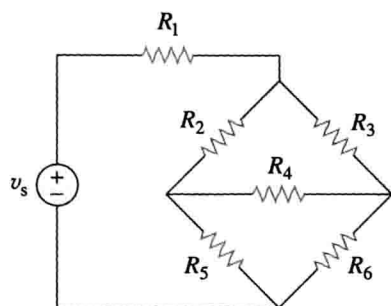
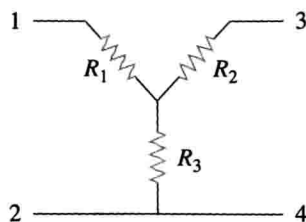
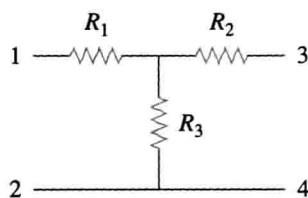


图 2-46 电桥网络



a) Y形



b) T形

图 2-47 同一网络的两种形式

2.7.1 Δ -Y 变换

假设将包含 Δ 结构的电路转换为Y结构进行处理更为方便。将一个Y电路叠加在一个 Δ 电路上，并求出Y电路中的等效电阻。为了求出Y电路中的等效电阻，要对两个电路进行比较，并确保 Δ (Π)电路中的每一对节点之间的电阻值等于Y(T)电路中对应的每对节点之间的电阻值。以图 2-47 和图 2-48 中的节点 1 和节点 2 为例，有：

$$R_{12}(Y) = R_1 + R_3 \quad (2.46)$$

$$R_{12}(\Delta) = R_b \parallel (R_a + R_c)$$

令 $R_{12}(Y) = R_{12}(\Delta)$ 有：

$$R_{12} = R_1 + R_3 = \frac{R_b(R_a + R_c)}{R_a + R_b + R_c} \quad (2.47a)$$

同理：

$$R_{13} = R_1 + R_2 = \frac{R_c(R_a + R_b)}{R_a + R_b + R_c} \quad (2.47b)$$

$$R_{34} = R_2 + R_3 = \frac{R_a(R_b + R_c)}{R_a + R_b + R_c} \quad (2.47c)$$

式(2.47a)减去式(2.47c)可得：

$$R_1 - R_2 = \frac{R_c(R_b - R_a)}{R_a + R_b + R_c} \quad (2.48)$$

式(2.47b)与式(2.48)相加可得：

$$R_1 = \frac{R_b R_c}{R_a + R_b + R_c} \quad (2.49)$$

式(2.47b)减去式(2.48)可得：

$$R_2 = \frac{R_c R_a}{R_a + R_b + R_c} \quad (2.50)$$

式(2.47a)减去式(2.49)可得：

$$R_3 = \frac{R_a R_b}{R_a + R_b + R_c} \quad (2.51)$$

式(2.49)~式(2.51)无需死记，将 Δ 电路转换为Y电路时，可增加一个节点 n ，如图 2-49 所示，并按照如下变换规则进行转换。

Y 电路各电阻值等于 Δ 电路中相邻两条支路电阻的乘积除以 Δ 电路中三个电阻之和。

根据上述变换规则即可由图 2-49 得到式(2.49)~式(2.51)。

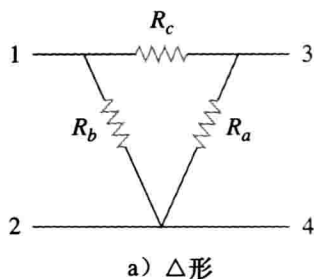
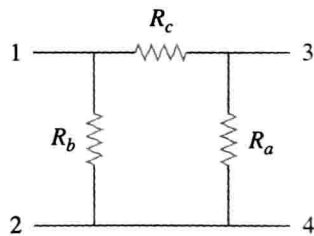
a) Δ 形b) Π 形

图 2-48 同一网络的两种形式

2.7.2 Y- Δ 变换

为了求出将 Y 电路转换为等效 Δ 电路的转换公式, 首先由式(2.49)~式(2.51)可以得到:

$$R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_3 R_1 = \frac{R_a R_b R_c (R_a + R_b + R_c)}{(R_a + R_b + R_c)^2} = \frac{R_a R_b R_c}{R_a + R_b + R_c} \quad (2.52)$$

用式(2.49)~式(2.51)分别除以式(2.52)得到:

$$R_a = \frac{R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_3 R_1}{R_1} \quad (2.53)$$

$$R_b = \frac{R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_3 R_1}{R_2} \quad (2.54)$$

$$R_c = \frac{R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_3 R_1}{R_3} \quad (2.55)$$

由式(2.53)~式(2.55)以及图 2-49 可以得出如下 Y- Δ 变换规则。

Δ 电路中各电阻值等于 Y 电路中所有电阻两两相乘之和除以相对应的 Y 电路支路电阻。

如果满足以下条件, 则称 Y 电路与 Δ 电路是平衡的:

$$\begin{aligned} R_1 &= R_2 = R_3 = R_Y, \\ R_a &= R_b = R_c = R_{\Delta} \end{aligned} \quad (2.56)$$

在上述条件下, 变换公式变为:

$$R_Y = \frac{R_{\Delta}}{3} \quad \text{或} \quad R_{\Delta} = 3R_Y \quad (2.57)$$

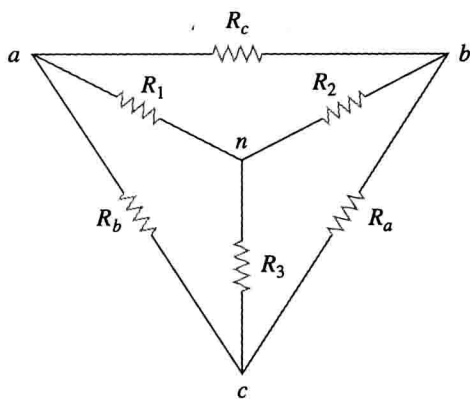


图 2-49 Y 电路与 Δ 电路变换电路

R_Y 为什么小于 R_{Δ} 呢? 这是因为 Y 形联结有点像电阻的“串联”连接, 而 Δ 形联结则像“并联”连接。

注意, 在进行变换时, 并没有对电路元件做任何增减, 只是利用等效的三端网络替代原有的三端网络, 从而得到一个由电阻串联或并联构成的电路, 以便于计算 R_{eq} 。

例 2-14 将图 2-50a 所示的 Δ 电路变换为等效的 Y 电路。

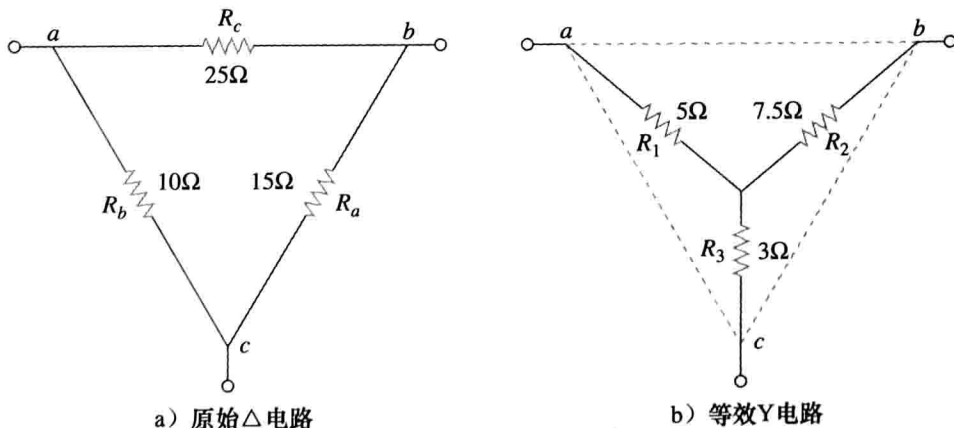


图 2-50 例 2-14 图

解: 由式(2.49)~式(2.51), 可得:

$$R_1 = \frac{R_b R_c}{R_a + R_b + R_c} = \frac{10 \times 25}{15 + 10 + 25} = \frac{250}{50} = 5(\Omega)$$

$$R_2 = \frac{R_c R_a}{R_a + R_b + R_c} = \frac{25 \times 15}{50} = 7.5(\Omega)$$

$$R_3 = \frac{R_a R_b}{R_a + R_b + R_c} = \frac{15 \times 10}{50} = 3(\Omega)$$

等效的 Y 电路如图 2-50b 所示。

练习 2-14 将图 2-51 所示的 Y 电路变换为 Δ 电路。 **答案:** $R_a = 140\Omega$, $R_b = 70\Omega$, $R_c = 35\Omega$

例 2-15 求图 2-52 所示电路的等效电阻 R_{ab} , 并计算电流 i 。

解: 1. 明确问题。本例所要解决的问题已经很明显, 但要注意, 完成这一步通常会花费相当的时间。

2. 列出问题的全部已知条件。如果去掉该电路中的电压源, 显然会得到一个纯电阻电路。由于该电路既包括 Δ 电路又包括 Y 电路, 因此电路元件的合并会变得更为复杂。一种方法是采用 Y- Δ 变换来求解这个问题, 首先要明确 Y 电路(该电路包括两个 Y 电路, 分别位于节点 n 和节点 c)和 Δ 电路(该电路包括三个 Δ 电路: can 、 abn 和 cnb)的位置。

3. 确定备选方案。可以采用不同的方法求解本题, 由于 2.7 节讨论的主要问题是 Y- Δ 变换, 所以采用该方法求解。求解等效电阻的另一个方法是在电路中插入一个放大器, 并求出 ab 之间的电压, 我们会在第 4 章学习这种方法。

这里首先采用 Y- Δ 变换的方法来求解这个问题, 之后再采用 Δ -Y 变换来检验结果的正确性。

4. 尝试求解。该电路中有两个 Y 电路和一个 Δ 电路, 只要将其中一个电路进行变换就可以简化电路。如果将由 5Ω 、 10Ω 和 20Ω 电阻构成的 Y 电路进行变换, 并且选择:

$$R_1 = 10\Omega, \quad R_2 = 20\Omega, \quad R_3 = 5\Omega$$

于是, 由式(2.53)~式(2.55)可得:

$$R_a = \frac{R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_3 R_1}{R_1} = \frac{10 \times 20 + 20 \times 5 + 5 \times 10}{10} = \frac{350}{10} = 35(\Omega)$$

$$R_b = \frac{R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_3 R_1}{R_2} = \frac{350}{20} = 17.5(\Omega)$$

$$R_c = \frac{R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_3 R_1}{R_3} = \frac{350}{5} = 70(\Omega)$$

将 Y 电路转换为 Δ 电路后的等效电路(暂时去掉电压源)如图 2-53a 所示。合并图中的三对并联电阻, 得到:

$$70 \parallel 30 = \frac{70 \times 30}{70 + 30} = 21(\Omega)$$

$$12.5 \parallel 17.5 = \frac{12.5 \times 17.5}{12.5 + 17.5} = 7.292(\Omega)$$

$$15 \parallel 35 = \frac{15 \times 35}{15 + 35} = 10.5(\Omega)$$

于是得到如图 2-53b 所示的等效电路。因此:

$$R_{ab} = (7.292 + 10.5) \parallel 21 = \frac{17.792 \times 21}{17.792 + 21} = 9.632(\Omega)$$

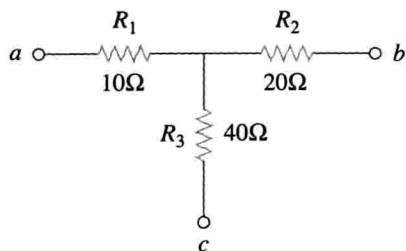


图 2-51 练习 2-14 图

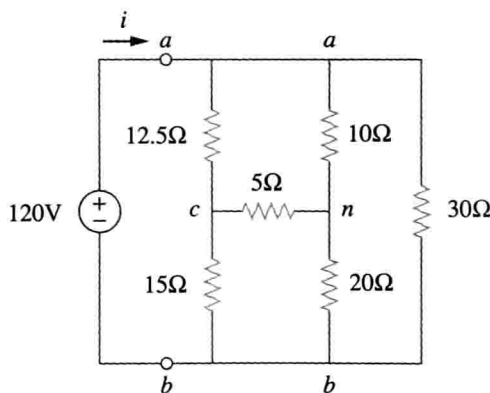


图 2-52 例 2-15 图

关于此电子书的说明

本人由于一些便利条件，可以为您提供各种中文图书的PDF电子版，保证质量清晰。只要图书不是太新，文学、法律、计算机、经济、医学、工业、学术等方面的图书，都可以帮您制作，如果您有这方面的需求，可以通过QQ联系我，我的QQ号是 [3330972307](#)。