

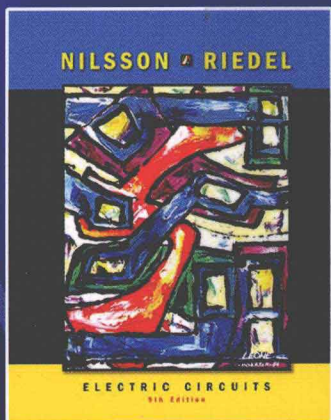
国外电子与通信教材系列

PEARSON

电 路

(第九版)

Electric Circuits, Ninth Edition



W. Nilsson
A. Riedel

著

周玉坤 冼立勤
李 莉 宿淑春

等译



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

国外电子与通信教材系列

电 路

(第九版)

Electric Circuits

Ninth Edition

[美] James W. Nilsson 著
Susan A. Riedel

周玉坤 沈立勤 等译
李 莉 宿淑春

电子工业出版社
Publishing House of Electronics Industry
北京 · BEIJING

内 容 简 介

本书被 IEEE “Spectrum” 杂志称为“电路领域的经典之作”，是欧美“电路”课程采用最为广泛的教材，近些年国内引进了该教材，从该书的第六版开始翻译出版，至今已经是第九版，国内读者反映良好。全书共 18 章，系统地讲述了电路的基本概念、基本理论、基本的分析和计算方法。内容包括电阻电路及其分析方法、运算放大器基本应用电路、动态电路的分析方法、正弦稳态电路的分析及其功率计算、平衡三相电路、拉普拉斯变换及其应用、选频滤波电路、傅里叶变换、双端口网络等。书中给出了大量的例题、习题和详尽的图表资料，内容新颖，例题和习题与实际应用结合紧密，讲解透彻，是一本电路分析的优秀教材。

本书是电气、电子、计算机与自动化等本科专业电路课程的教材，也可供相关学科的科技人员自学或参考。

Authorized translation from the English language edition, entitled Electric Circuits, Ninth Edition, ISBN: 978013614994 by James W. Nilsson, Susan A. Riedel, published by Pearson Education, Inc., publishing as Prentice Hall, Copyright © 2011 Pearson Education, Inc.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, recording or by any information storage retrieval system, without permission from Pearson Education, Inc.

CHINESE SIMPLIFIED language edition published by PEARSON EDUCATION ASIA LTD., and PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY Copyright © 2012.

本书简体中文版由 Pearson Education 培生教育出版亚洲有限公司授权电子工业出版社出版。未经出版者预先书面许可，不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

本书简体中文版贴有 Pearson Education 培生教育出版集团激光防伪标签，无标签者不得销售。

版权贸易合同登记号 图字：01-2010-4330

图书在版编目 (CIP) 数据

电路：第 9 版 / (美) 尼尔森 (Nilsson, J. W.), (美) 里德尔 (Riedel, S. A.) 著；周玉坤等译。

北京：电子工业出版社，2012.2

(国外电子与通信教材系列)

书名原文：Electric Circuits, Ninth Edition

ISBN 978-7-121-15634-2

I. ①电… II. ①尼… ②里… ③周… III. ①电路 - 教材 IV. ①TM13

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 278263 号

策划编辑：马 岚

责任编辑：李秦华

印 刷：涿州市京南印刷厂

装 订：涿州市桃园装订有限公司

出版发行：电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编：100036

开 本：787 × 1092 1/16 印张：46.25 字数：1433 千字

印 次：2012 年 2 月第 1 次印刷

定 价：79.00 元

凡所购买电子工业出版社的图书有缺损问题，请向购买书店调换；若书店售缺，请与本社发行部联系。联系及购电话：(010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn，盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线：(010) 88258888。

序

2001年7月间,电子工业出版社的领导同志邀请各高校十几位通信领域方面的老师,商量引进国外教材问题。与会同志对出版社提出的计划十分赞同,大家认为,这对我国通信事业、特别是对高等院校通信学科的教学工作会很有好处。

教材建设是高校教学建设的主要内容之一。编写、出版一本好的教材,意味着开设了一门好的课程,甚至可能预示着一个崭新学科的诞生。20世纪40年代MIT林肯实验室出版的一套28本雷达丛书,对近代电子学科、特别是对雷达技术的推动作用,就是一个很好的例子。

我国领导部门对教材建设一直非常重视。20世纪80年代,在原教委教材编审委员会的领导下,汇集了高等院校几百位富有教学经验的专家,编写、出版了一大批教材;很多院校还根据学校的特点和需要,陆续编写了大量的讲义和参考书。这些教材对高校的教学工作发挥了极好的作用。近年来,随着教学改革不断深入和科学技术的飞速进步,有的教材内容已比较陈旧、落后,难以适应教学的要求,特别是在电子学和通信技术发展神速、可以讲是日新月异的今天,如何适应这种情况,更是一个必须认真考虑的问题。解决这个问题,除了依靠高校的老师 and 专家撰写新的符合要求的教科书外,引进和出版一些国外优秀电子与通信教材,尤其是有选择地引进一批英文原版教材,是会有好处的。

一年多来,电子工业出版社为此做了很多工作。他们成立了一个“国外电子与通信教材系列”项目组,选派了富有经验的业务骨干负责有关工作,收集了230余种通信教材和参考书的详细资料,调来了100余种原版教材样书,依靠由20余位专家组成的出版委员会,从中精选了40多种,内容丰富,覆盖了电路理论与应用、信号与系统、数字信号处理、微电子、通信系统、电磁场与微波等方面,既可作为通信专业本科生和研究生的教学用书,也可作为有关专业人员的参考材料。此外,这批教材,有的翻译为中文,还有部分教材直接影印出版,以供教师用英语直接授课。希望这些教材的引进和出版对高校通信教学和教材改革能起一定作用。

在这里,我还要感谢参加工作的各位教授、专家、老师与参加翻译、编辑和出版的同志们。各位专家认真负责、严谨细致、不辞辛劳、不怕琐碎和精益求精的态度,充分体现了中国教育工作者和出版工作者的良好美德。

随着我国经济建设的发展和科学技术的不断进步,对高校教学工作会不断提出新的要求和希望。我想,无论如何,要做好引进国外教材的工作,一定要联系我国的实际。教材和学术专著不同,既要注意科学性、学术性,也要重视可读性,要深入浅出,便于读者自学;引进的教材要适应高校教学改革的需要,针对目前一些教材内容较为陈旧的问题,有目的地引进一些先进的和正在发展中的交叉学科的参考书;要与国内出版的教材相配套,安排好出版英文原版教材和翻译教材的比例。我们努力使这套教材能尽量满足上述要求,希望它们能放在学生们的课桌上,发挥一定的作用。

最后,预祝“国外电子与通信教材系列”项目取得成功,为我国电子与通信教学和通信产业的发展培土施肥。也恳切希望读者能对这些书籍的不足之处、特别是翻译中存在的问题,提出意见和建议,以便再版时更正。



中国工程院院士、清华大学教授
“国外电子与通信教材系列”出版委员会主任

出版说明

进入21世纪以来,我国信息产业在生产和科研方面都大大加快了发展速度,并已成为国民经济发展的支柱产业之一。但是,与世界上其他信息产业发达的国家相比,我国在技术开发、教育培训等方面都还存在着较大的差距。特别是在加入WTO后的今天,我国信息产业面临着国外竞争对手的严峻挑战。

作为我国信息产业的专业科技出版社,我们始终关注着全球电子信息技术的发展方向,始终把引进国外优秀电子与通信信息技术教材和专业书籍放在我们工作的重要位置上。在2000年至2001年间,我社先后从世界著名出版公司引进出版了40余种教材,形成了一套“国外计算机科学教材系列”,在全国高校以及科研部门中受到了欢迎和好评,得到了计算机领域的广大教师与科研工作者的充分肯定。

引进和出版一些国外优秀电子与通信教材,尤其是有选择地引进一批英文原版教材,将有助于我国信息产业培养具有国际竞争能力的技术人才,也将有助于我国国内在电子与通信教学工作中掌握和跟踪国际发展水平。根据国内信息产业的现状、教育部《关于“十五”期间普通高等教育教材建设与改革的意见》的指示精神以及高等院校老师们反映的各种意见,我们决定引进“国外电子与通信教材系列”,并随后开展了大量准备工作。此次引进的国外电子与通信教材均来自国际著名出版商,其中影印教材约占一半。教材内容涉及的学科方向包括电路理论与应用、信号与系统、数字信号处理、微电子、通信系统、电磁场与微波等,其中既有本科专业课程教材,也有研究生课程教材,以适应不同院系、不同专业、不同层次的师生对教材的需求,广大师生可自由选择 and 自由组合使用。我们还将与国外出版商一起,陆续推出一些教材的教学支持资料,为授课教师提供帮助。

此外,“国外电子与通信教材系列”的引进和出版工作得到了教育部高等教育司的大力支持和帮助,其中的部分引进教材已通过“教育部高等学校电子信息科学与工程类专业教学指导委员会”的审核,并得到教育部高等教育司的批准,纳入了“教育部高等教育司推荐——国外优秀信息科学与技术系列教学用书”。

为做好该系列教材的翻译工作,我们聘请了清华大学、北京大学、北京邮电大学、南京邮电大学、东南大学、西安交通大学、天津大学、西安电子科技大学、电子科技大学、中山大学、哈尔滨工业大学、西南交通大学等著名高校的教授和骨干教师参与教材的翻译和审校工作。许多教授在国内电子与通信专业领域享有较高的声望,具有丰富的教学经验,他们的渊博学识从根本上保证了教材的翻译质量和专业学术方面的严格与准确。我们在此对他们的辛勤工作与贡献表示衷心的感谢。此外,对于编辑的选择,我们达到了专业对口;对于从英文原书中发现的错误,我们通过与作者联络、从网上下载勘误表等方式,逐一进行了修订;同时,我们对审校、排版、印制质量进行了严格把关。

今后,我们将进一步加强同各高校教师的密切关系,努力引进更多的国外优秀教材和教学参考书,为我国电子与通信教材达到世界先进水平而努力。由于我们对国内外电子与通信教育的发展仍存在一些认识上的不足,在选题、翻译、出版等方面的工作中还有许多需要改进的地方,恳请广大师生和读者提出批评及建议。

电子工业出版社

前 言

在过去的28年间,全世界有70多万学生使用过这本入门性的电路教材,为了不断地改进和提高这本教材,我们推出了《电路》第九版。虽然为了适应学生学习方式的变化,该书一直在改版,但是,教材基本目标始终不变。本书的目标是:

- 通过一个阶段的学习,建立起对概念和思想的充分理解。对学生来说,要将以前建立起来,但没有理解透彻的概念上建立新的概念是一件很困难的事,该书把重点放在帮助学生理解新概念和以前建立起来的观念之间有何关系,以及怎么样建立在原有概念基础上。
- 重视概念的理解与解题方法之间的关系。在学习电路课程的前期,解题技巧的训练仍然是重点内容,本书列举了很多例题,提出了很多解题方法和技巧,之后又编排了一些评测性的练习题,以便通过解答习题使学生测试对所学知识和解题方法的掌握程度,我们演示的解题过程是建立在概念基础上的,而不是套用固定的解题过程,这样就可以鼓励学生在解题前对问题进行深入思考。
- 为学生打下坚实的工程实践基础。在前半部分的电路分析中,能够为学生提供实际工程训练的机会非常有限,但是我们会充分利用现有的机会为学生提供使用了实际元件值和提供可实现的电路的例题和习题,习题中有许多问题都与每章开头的实例应用有关,习题中还有些题目是为了激励学生对工程实现的兴趣,需要学生对典型的实际工程有深刻的理解。

出版第九版的原因

《电路》第九版是经过正在使用本教材的教师和使用其他教材的教师的彻底检查和校订后最终确定的。明定了哪些内容对教师和他们的学生来说是最重要的,并最终做了以下改动:

- 解题是学习电路分析最基本的训练。在任何电路课程中,关键是要有丰富的新问题留给学生去做。修改和增加新的课后习题,与前一版相比较,大约有80%得到了更新和改进。
- 学生和老师都想知道,面向工程实际的问题在第一年的电路分析课程中是如何体现的,实例应用提供了电路分析和真实世界之间的联系。我们将实例应用放在每章的开始,这样就扩展了它的用处,每一个实例应用都会在本章的结尾得到解答,至少是部分的解答,并且每章后特别安排的附加习题能给学生提供机会,以便于对实例应用涉及的问题做进一步研究。
- 在提出新的概念后,会嵌入一些例题以展示概念的应用,这是改善学生理解效果的重要手段。第九版增加了新的例题,除了第12章之外,每章都有至少有4个例题。第12章对拉普拉斯变换进行了介绍,这一章包含有一个例题,与其他章节所采用的从概念到例题的编排方式不同。
- 第八版的章后习题中许多电路的元件都具有标准值,这些电路都能在实验室中搭接起实际电路并进行测试。在第九版中,新内容是附录H,该附录中列出了电感、电容和电阻的标准值。另外,大部分章节习题中都会要求学生根据实际需要附录H中选择元件来构成电路。使用标准元件的目的是努力使学生将电路分析的概念和实际电路联系起来。

- 与第八版配套出版了一本手册，该手册介绍了 PSpice 以及其学生在线性电路的学习中遇到的电路的仿真方法。与第九版配套的有两本手册，一册是《PSpice 手册》，另一册是《Multisim 手册》，学生和教师可以从中选择。每本手册的内容都和教材中的资料一致，都是直接从教材中摘录出来的。在教材的习题中会继续标示出哪些题目适合于用 PSpice 仿真，哪些题目适合于用 Multisim 仿真。
- 对于已经掌握了附加例题和实践性习题的同学，可以使用辅助练习册，这个辅助练习册中有；例题和习题，内容涵盖了功率平衡、简单电阻电路、节点电压法、网孔电流法、戴维南和诺顿等效电路、理想运放电路、一阶电路、二阶电路、交流稳态电路分析和拉普拉斯变换电路分析等。
- 教师和学生都会从各种评测学生学习的手段中获得有益的信息，第九版的 PowerPoint 可以提供给教师^①，其中包含有嵌入的评测问题，教师在课堂上可以用 PowerPoint 展示资料，根据资料向学生提出问题并要求学生对问题做出回答解释，利用课堂应答系统，教师能立刻得到学生回答的结论，将学生对材料理解的实时信息反馈给教师，这种即时反馈手段能让教师根据学生对资料的理解程度采取不同的措施，如果学生对资料理解不透彻，则可以对资料反复阅读，如果学生对资料的理解很令人满意，则提供新的资料继续新的内容。
- 每一本书都可以访问视频资料和 Pearson 电子文档，视频资料是个完整的、可以一步步带你完成所有典型课后作业，Pearson 电子版文档完全是教材的在线版，它具有能打重点标记、做笔记和搜索功能。

第九版的特点

每章习题

电路的用户一直把习题看做是本书最具有吸引力的特点之一。第九版中大约有 1300 多道习题，其中的 75% 是新增的或者从以前版本中改编的，习题放在每章的最后，并且按照章节的顺序组织。

实例应用

第九版仍然以实例应用的介绍作为每章的开头，这些电路取自于现实生活中的实际电路，每一章都以简单描述本章知识的简单应用开始，当本章内容介绍完毕后，再以对实例应用的定量分析结尾。每章的习题中有一组内容与实例应用有直接关系，通过这些题目的求解就能使读者知道如何应用本章知识解决实际问题。

评测练习

每一章的开始都有一套本章目标，在本章的关键点处设置了一些评测练习题，通过解题评测你对本章目标的掌握程度，为了方便检查学习效果，所有的评测题目都给出了答案，如果能正确求解这些评测习题，就说明你已经掌握了所要达到的目标要求。如果需要做更多的练习，则可以在评测练习题后面列出了一些相关的章后习题的编号。

^① 关于索取本书的配套教学辅助资料的方法，请参阅书后所附的《教学支持说明》——编者注。

目 录

第 1 章 电路变量	1	4.6 网孔电流法和非独立源	89
1.1 电气工程概述	2	4.7 网孔电流法的特例	91
1.1.1 电路理论	4	4.7.1 超网孔的概念	91
1.1.2 解决问题	5	4.7.2 放大电路的网孔电流分析	92
1.2 国际单位制	6	4.8 节点电压法与网孔电流法的比较	93
1.3 电路分析概述	8	4.9 电源变换	96
1.4 电压和电流	9	4.10 戴维南与诺顿等效电路	99
1.5 理想基本电路元件	10	4.10.1 戴维南等效电路	100
1.6 功率和能量	11	4.10.2 诺顿等效电路	101
小结	14	4.10.3 使用电源变换	101
习题	15	4.11 导出戴维南等效电路的补充	103
第 2 章 电路元件	20	4.11.1 戴维南等效电路用于放大电路	104
2.1 电压源和电流源	21	4.12 最大功率传输	105
2.2 电阻 (欧姆定律)	24	4.13 叠加原理	107
2.3 电路模型结构	27	小结	112
2.4 基尔霍夫定律	30	习题	113
2.5 含受控源电路的分析	35	第 5 章 运算放大器	128
小结	39	5.1 运算放大器端子	129
习题	39	5.2 端电压和端电流	130
第 3 章 简单电阻电路	46	5.3 反相放大器电路	133
3.1 电阻的串联	47	5.4 求和放大器电路	135
3.2 电阻的并联	48	5.5 同相放大器电路	136
3.3 分压器和分流器电路	50	5.6 差分放大器电路	138
3.3.1 分流器电路	52	5.6.1 关于差分放大器的其他问题	140
3.4 分压法和分流法	53	5.6.2 衡量差分放大器 性能的共模抑制比	140
3.5 测量电压和电流	55	5.7 实际的运算放大器模型	142
3.6 惠斯通电桥	58	5.7.1 用实际的运放模型 分析反相放大器电路	142
3.7 Δ -Y(π -T)等效电路	59	5.7.2 用实际的运放模型分析 同相放大器电路	143
小结	64	小结	145
习题	65	习题	146
第 4 章 电路分析法	77	第 6 章 电感、电容和互感	156
4.1 术语	78	6.1 电感	157
4.1.1 描述电路的词汇	78	6.1.1 用电感上的电压表示 电感中的电流	158
4.1.2 需要多少个联立方程	79	6.1.2 电感中的功率和能量	160
4.1.3 举例说明系统方法	80	6.2 电容	162
4.2 节点电压法	81	6.3 电感和电容的串并联	166
4.3 节点电压法和非独立源	83	6.4 互感	169
4.4 节点电压法的特例	84	6.4.1 确定点标记的过程	170
4.4.1 超节点的概念	85		
4.4.2 电流表电路的节点电压分析	86		
4.5 网孔电流法	87		

6.5	更详细地讨论互感	172	9.4.3	电容的伏安特性	285
6.5.1	复习自感	172	9.4.4	阻抗和电抗	286
6.5.2	互感的概念	173	9.5	频域下的基尔霍夫定律	287
6.5.3	用自感表示互感	175	9.5.1	频域下的基尔霍夫电压定律	287
6.5.4	能量计算	176	9.5.2	频域下的基尔霍夫电流定律	287
小结	.....	179	9.6	串联、并联和三角形-星形变换	288
习题	.....	180	9.6.1	并联阻抗和串联阻抗的合并	288
第 7 章 一阶 RL 和 RC 电路的响应	189		9.6.2	三角形-星形变换	292
7.1	RL 电路的固有响应	190	9.7	电源变换以及戴维南-诺顿等效电路	295
7.1.1	推导电流表达式	191	9.8	节点电压法	298
7.1.2	时间常数的意义	192	9.9	网孔电流法	299
7.2	RC 电路的固有响应	196	9.10	变压器	301
7.2.1	推导电压表达式	196	9.10.1	线性变压器电路分析	301
7.3	RL 和 RC 电路的阶跃响应	199	9.10.2	反映阻抗	302
7.3.1	RL 电路的阶跃响应	199	9.11	理想变压器	304
7.3.2	RC 电路的阶跃响应	203	9.11.1	探索极限值	304
7.4	阶跃响应和固有响应的一般解法	205	9.11.2	确定电压和电流比	306
7.5	按序换路	210	9.11.3	确定电压和电流比的极性	307
7.6	无限响应	214	9.11.4	理想变压器的阻抗匹配	309
7.7	积分放大器	215	9.12	相量图	310
小结	.....	219	小结	.....	313
习题	.....	219	习题	.....	314
第 8 章 RLC 电路的固有响应和阶跃响应	237		第 10 章 正弦稳态功率计算	327	
8.1	并联 RLC 电路固有响应简介	238	10.1	瞬时功率	328
8.1.1	二次微分方程的一般解法	238	10.2	平均功率和无功功率	329
8.2	并联 RLC 电路固有响应的形式	241	10.2.1	纯电阻电路的功率	330
8.2.1	过阻尼电压响应	242	10.2.2	纯电感电路的功率	330
8.2.2	欠阻尼电压响应	244	10.2.3	纯电容电路的功率	331
8.2.3	欠阻尼响应特性	246	10.2.4	功率因数	332
8.2.4	临界阻尼电压响应	247	10.2.5	应用范围	333
8.3	并联 RLC 电路的阶跃响应	249	10.3	均方根及功率计算	334
8.3.1	间接法	250	10.4	复功率	335
8.3.2	直接法	251	10.5	功率计算	337
8.4	串联 RLC 电路的固有响应和阶跃响应	255	10.5.1	复功率的变换形式	338
8.5	双集成运放电路	259	10.6	最大功率传输定理	344
8.5.1	具有反馈电阻的 两级运算放大电路	261	10.6.1	吸收的最大平均功率	345
小结	.....	265	10.6.2	限制 Z 时的最大功率传输	345
习题	.....	266	小结	.....	351
第 9 章 正弦稳态分析	275		习题	.....	351
9.1	正弦信号源	276	第 11 章 平衡三相电路	363	
9.2	正弦响应	279	11.1	平衡三相电压	364
9.3	相量	280	11.2	三相电压源	365
9.3.1	反相量变换	281	11.3	Y-Y 形电路分析	366
9.4	频域下的无源电路元件	284	11.4	Y- Δ 形电路分析	371
9.4.1	电阻的伏安特性	284	11.5	平衡三相电路功率的计算	375
9.4.2	电感的伏安特性	284	11.5.1	平衡 Y 形负载的平均功率	375
			11.5.2	平衡 Y 形负载的复功率	376
			11.5.3	平衡 Δ 形负载的功率计算	376
			11.5.4	三相电路的瞬时功率	377

11.6	三相电流平均功率的测量	380	13.4.1	$H(s)$ 零极点的位置	443
11.6.1	双瓦特计方法	381	13.5	转移函数的部分分式的展开式形式	443
	小结	385	13.5.1	$H(s)$ 在电路分析中的应用	445
	习题	385	13.6	转移函数和卷积积分	445
			13.6.1	记忆性和加权函数的概念	451
第 12 章	拉普拉斯变换简介	394	13.7	转移函数和正弦稳态响应	452
12.1	拉氏变换的定义	395	13.8	电路分析中的冲激响应	454
12.2	阶跃函数	396	13.8.1	开关操作	454
12.3	冲激函数	397	13.8.2	冲激电源	457
12.4	函数变换	400		小结	460
12.5	算子变换	402		习题	461
12.5.1	乘以常数	402	第 14 章	选频电路	477
12.5.2	加(减)运算特性	402	14.1	预备知识	478
12.5.3	微分	402	14.2	低通滤波器	480
12.5.4	积分	403	14.2.1	串联 RL 电路的定性分析	480
12.5.5	时域平移	404	14.2.2	截止频率的定义	481
12.5.6	频域平移特性	404	14.2.3	串联 RL 电路——定性分析	482
12.5.7	尺度变换	405	14.2.4	串联 RC 电路	484
12.6	拉氏变换的应用	406	14.2.5	频域和时域的关系	485
12.7	拉氏反变换	407	14.3	高通滤波器	486
12.7.1	部分分式展开法: 有理真分式	407	14.3.1	串联 RC 电路——定性分析	486
12.7.2	部分分式展开式: $D(s)$ 具有独立的实根	407	14.3.2	串联 RC 电路——定量分析	487
12.7.3	部分分式展开式: $D(s)$ 具有不等的复根	408	14.4	带通滤波器	490
12.7.4	部分分式展开式: $D(s)$ 具有实重根	410	14.4.1	中心频率、带宽和品质因数	491
12.7.5	部分分式展开式: $D(s)$ 具有多重复数根	411	14.4.2	串联 RLC 电路——定性分析	491
12.7.6	部分分式展开: 假分式	413	14.4.3	串联 RLC 电路——定量分析	492
12.8	$F(s)$ 的零极点	414	14.4.4	时域与频域的关系	499
12.9	初值定理和终值定理	415	14.5	带阻滤波器	500
12.9.1	初值定理和终值定理的应用	416	14.5.1	串联 RLC 电路——定性分析	500
	小结	418	14.5.2	串联 RLC 电路——定量分析	501
	习题	419		小结	505
				习题	505
第 13 章	拉氏变换在电路分析中的应用 ..	426	第 15 章	有源滤波器电路	513
13.1	s 域中的电路元件	427	15.1	一阶低通和高通滤波器	514
13.1.1	s 域中的电阻	427	15.1.1	关于频率响应曲线的知识	515
13.1.2	s 域中的电感	427	15.2	比例变换	518
13.1.3	s 域中的电容	428	15.2.1	比例变换在运放滤波器 设计中的应用	519
13.2	s 域中的电路分析	430	15.3	运放带通和带阻滤波器	521
13.3	应用	431	15.4	高阶运放滤波器	527
13.3.1	RC 电路的固有响应	431	15.4.1	相同滤波器的级联	527
13.3.2	并联电路的阶跃响应	432	15.4.2	巴特沃思滤波器	531
13.3.3	并联 RLC 电路的暂态响应	433	15.4.3	巴特沃思滤波器电路	533
13.3.4	多网孔电路的阶跃响应	435	15.4.4	巴特沃思滤波器的阶数	535
13.3.5	戴维南等效电路的应用	436	15.4.5	巴特沃思高通、带通 和带阻滤波器	538
13.3.6	含耦合电感的电路	438	15.5	窄带带通和带阻滤波器	539
13.3.7	叠加原理的应用	439		小结	547
13.4	转移函数	441		习题	548

第 16 章 傅里叶级数	558	17.6.9 时域卷积	609
16.1 傅里叶级数分析: 概述	560	17.6.10 频域卷积	610
16.2 傅里叶系数	561	17.7 电路应用	611
16.3 对称性对傅里叶系数的影响	563	17.8 帕塞瓦尔定理	613
16.3.1 偶函数对称	564	17.8.1 帕塞瓦尔定理的证明	614
16.3.2 奇函数对称	565	17.8.2 帕塞瓦尔定理的解释说明	615
16.3.3 半波对称	566	17.8.3 矩形电压脉冲包含的能量	618
16.3.4 四分之一波对称	567	小结	621
16.4 傅里叶级数的另一种三角函数形式	569	习题	621
16.5 应用	571	第 18 章 双端口网络	628
16.5.1 直接法求稳态响应的应用	574	18.1 端口方程	629
16.6 周期函数平均功率的计算	576	18.2 双端口参数	630
16.7 周期函数的均方根值	578	18.2.1 双端口网络参数间的关系	633
16.8 傅里叶级数的指数形式	580	18.2.2 互易双端口网络	635
16.9 幅值谱和相位谱	582	18.3 具有端接的双端口网络的分析	637
16.9.1 幅值谱和相位谱的举例说明 ...	582	18.3.1 用 z 参数表示的六个特性参数	638
小结	586	18.4 双端口网络的互连	642
习题	587	小结	646
第 17 章 傅里叶变换	598	习题	646
17.1 傅里叶变换的引出	599	附录 A 线性联立方程组的求解	653
17.2 傅里叶积分的收敛	601	附录 B 复数	670
17.3 用拉普拉斯变换求傅里叶变换	602	附录 C 耦合电感和理想变压器的补充内容 ...	675
17.4 极限情况下的傅里叶变换	604	附录 D 分贝	683
17.4.1 符号函数的傅里叶变换	604	附录 E 伯德图	685
17.4.2 单位阶跃函数的傅里叶变换 ...	605	附录 F 三角恒等式简表	700
17.4.3 余弦函数的傅里叶变换	605	附录 G 积分简表	701
17.5 一些数学性质	606	附录 H 常用的标准元件值	703
17.6 算子变换	608	部分习题答案	704
17.6.1 乘以一个常数	608		
17.6.2 相加 (相减)	608		
17.6.3 微分	608		
17.6.4 积分	609		
17.6.5 尺度变换	609		
17.6.6 时域变换	609		
17.6.7 频域变换	609		
17.6.8 调制	609		

第1章 电路变量

本章目标

- 理解并能够使用国际单位制 (SI) SI 和 10 的幂的标准前缀。
- 了解并能够使用电压和电流的定义。
- 了解并能够使用功率和能量的定义。
- 已知理想基本电路元件电压和电流的条件下, 能够使用无源符号约定计算其功率。

对于热衷于应用科学和数学并有这方面才能的人来讲, 电气工程是一个令人兴奋且具有挑战性的领域。在过去的一个半世纪, 电气工程师已经在开发系统、改变人们的生活方式和工作方式方面扮演了重要的角色。卫星通信、电话、数字计算机、电视、用于诊断的医学设备和外科医学设备、流水作业的机器人以及电力工具, 已成为现代技术社会具有代表性的组成部分。你可以像电气工程师那样投入到这场正在进行的技术革命中去, 不断改善和精炼目前的系统, 并且为了满足不断变化的社会需求去开发新系统。

当开始电路分析的学习时, 需要先了解电气工程的主题。这里将先给出电气工程概述以及一些与电路分析有关的工程学概念, 并复习一下国际单位制。

接着, 将一般性地描述电路分析的意义, 介绍电压和电流的概念, 并进行理想基本元件和极性参照系统的讨论, 最后描述电流和电压与功率和能量的关系。

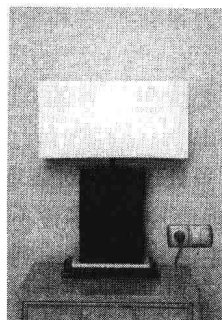
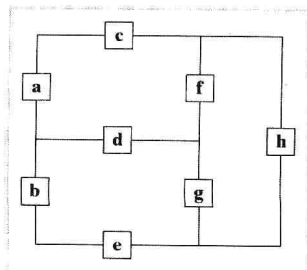
实例应用

功率平衡 (一)

能够对根据教材提供的方法分析和设计的电路进行检验, 是需要掌握的一种很重要的技能。一种普通的检验方法是电路功率平衡。我们学习的线性电路没有净功率。因此, 电路各元件的功率之和必须为零。如果电路的总功率为零, 则功率平衡; 如果总功率不为零, 则需要找出计算中的错误。

例如, 考虑一个非常简单而典型的家用电器分布电路的模型, 如下图所示 (注意: 一个更为现实的模型将在第9章的实例应用中研究)。标号为 a 和 b 的元件表示家中的电源, 标号为 c、d 和 e 的元件表示通往家中电气设备的带电电缆。标号为 f、g 和 h 的元件表示灯具、电视机、电吹风、冰箱和其他电气设备。

一旦介绍了电压、电流、功率和能量的概念, 将详细研究该电路模型, 并使用功率平衡来检查电路的分析结果是否正确。



1.1 电气工程概述

电气工程专业与生产、传送、测量电信号的系统有关。电气工程是将物理学家的自然现象模型和数学家的数学工具结合在一起,并运用这些模型系统来满足实际需要。电气系统在生活中非常普及,无论是在家庭、学校、车间中,还是在汽车中,到处都能找到它的身影。电气系统的5个主要分支是:

- 通信系统
- 计算机系统
- 控制系统
- 电力系统
- 信号处理系统

下面分别从这5个系统中举几个例子,然后讨论电气工程师是怎样分析和设计这些系统的。

通信系统是产生、传送、分配信息的电气系统。众所周知的例子包括电视设备、照相机、发报机、接收机和VCR、探测宇宙的电子望远镜、返回行星和地球图像的卫星系统、定位飞机航线的雷达系统以及电话系统等。

图1.1描述了现代电话系统的主要组成部分。在图的左面,电话机的话筒内部将声波转化为电信号,电信号传送到交换中心,在交换中心,它们和来自数十、数百甚至数千个其他电话的信号组合在一起。组合后的信号从交换中心出发,信号的形式取决于传播距离。在图1.1所示的例子中,信号将通过地下同轴电缆传送到微波发射站。在微波发射站,信号转换成微波,从发射天线传播到空间,再经过通信卫星传送到接收天线。微波接收站将微波信号转化为适当的形式以便进一步传输,例如,可以将微波信号转化为光脉冲通过光缆传输。当到达第二个交换中心后,组合的信号被分离,并且每个信号都发送给相应的电话,这时的电话耳机相当于扬声器,将接收到的电信号转换为声波。在传输过程的每个阶段,电路都对信号起作用。可以想象,艰巨的挑战在于设计、建造和运行每个电路,每个电路都应保证成千上万个电话同时工作时仍具有高质量连接。

计算机系统用电信号处理信息,包括文字处理和数学计算。不同系统的体积、功率大小不同,从袖珍计算器、个人计算机,到能完成相当复杂任务的超级计算机(比如计算机能处理气象资料,能对复杂的有机分子化学反应建模)。计算机系统包括微电路网络或集成电路,邮票大小的集成电路中装有成百上千甚至上百万个元器件,这些元器件的运行速度和功率都接近于物理极限(比如光速和热力学定律的极限值)。

控制系统用电信号控制生产过程,例如炼油厂里的温度、压力和流速的控制器,电子燃油喷射式汽车发动机里的燃料空气混合设备,电梯中电机、门和灯光的控制装置,以及巴拿马运河的闸门装置。此外,帮助飞机飞行和着陆的自动导航及自动着陆系统也是众所周知的控制系统。

电力系统产生和分配电力。电力是技术社会的基础,通常是由核电站、水电站及热电站(烧煤、油或气)大量产生的。电力由跨越全国的电力网分配。设计和运行这样的系统的主要挑战是要提供足够的冗余和控制,这样,任何一台设备出故障都不会使一座城市或一个地区完全停电。

信号处理系统对表现信息的电信号进行处理。通过处理,使信号所包含的信息成为更合适的形式。处理信号有很多种不同的方法。例如,图像处理系统收集到沿轨道飞行的气象卫星传来的大量数据,先把数据量压缩到易于处理的程度,再将其转换为供晚间新闻播放的视频图像。计算机处理

的X射线断层摄影(CT)扫描是另一个图像处理系统的例子,它获取特殊的X射线机产生的信号,将它们转换成类似图1.2的图像。尽管原始的X射线信号很少被医生使用,但是一旦将X射线信号处理成为可以识别的图像,它们包含的信息就能应用在疾病和伤害的诊断中。

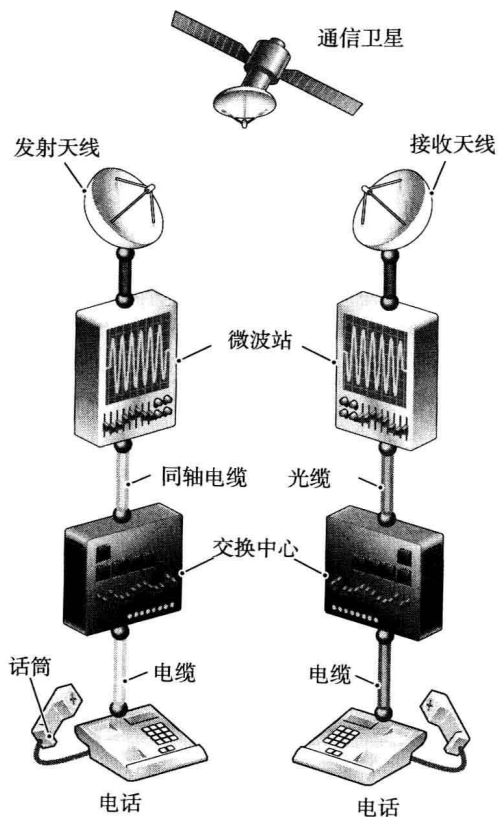


图 1.1 电话系统

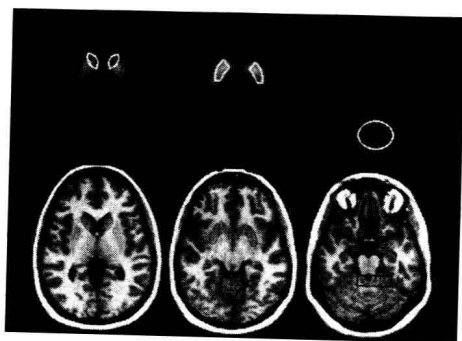


图 1.2 成人头部的CT扫描

5类系统之间的联系及其相互作用值得注意。例如,通信工程师会用数字计算机来控制信息的流动。计算机中包含控制系统,而控制系统中也包含计算机。电力系统需要规模巨大的通信系统来安全可靠地调整系统的运行,其系统也许会扩展而穿过整个大陆。信号处理系统中会包括通信、计算机和控制系统。

系统之间相互作用的例子很多,最有说服力的例子之一是民用飞机,图1.3表示一个高级通信系统,它为飞行员和所有附近的航空飞行器设计出安全的飞行路线,使飞行员保证飞机飞行在指定航线上。在最新的民用飞机上,机载计算机系统具有管理发动机的功能,提供导航和飞行控制系统,同时在驾驶员座舱的屏幕上播放这些信息。复杂的控制系统可以使用驾驶员座舱发布的指令来调整飞机的位置和速度,产生的信号对发动机进行控制,并可实现飞机表面的控制(如机翼、侧翼和方向舵等),以确保飞机安全飞行且飞行在预定的航线上。飞机必须要有自己的动力系统才能在空中飞行,同时还要提供和分配所需要的电力,如维持机舱照明、制作咖啡、播放影片。信号处理系统能够减少空中交通通信中的噪音,把有关飞机位置的信息转换成更有实际意义的形式,并展示在驾驶员座舱里的显示屏幕上。工程学的挑战在于要设计所有这些系统并把它们融合为一个整体。例如,这些系统必须在变化范围大而且不可预测的环境条件中运行。当然,最重要的工程学挑战是确保乘客安全准时地到达预定的目的地,保证在设计中包含足够的安全余量。

尽管电气工程师可能主要关心某一领域,但是他们必须要熟悉与这一领域相关的其他领域的知识。各个领域间的相关性是电气工程成为具有挑战性的专业的原因之一。每项工程的重点是未完成的工作,因此只要有助于完成工作,工程师们就应该从各个领域汲取各种知识。

1.1.1 电路理论

电气工程领域涉及面较广,那么电气工程的各个分支是否有共同的部分呢?回答是肯定的,共同的部分就是电路。电路是实际电气系统特性的近似数学模型。它为学习电气工程提供了重要的基础,在后续课程中,作为工程师将学习设计和运行那些前面提到的系统的具体细节。模型、数学知识和电路理论将为未来的工程学探索构成智慧的框架。

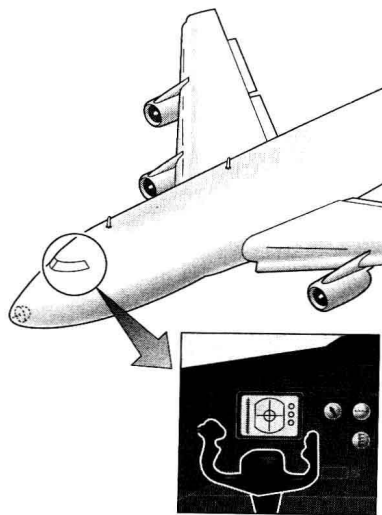


图 1.3 飞机

“电路”通常是指实际的电气系统以及它的模型。在正文中,当谈到电路的时候,除非另有说明,否则总是指模型。它是跨越各个工程学科、有广泛应用的电路理论的结晶。

电路理论是研究静止和运动电荷的电磁理论的特例。尽管广义的电磁理论似乎是研究电信号的出发点,但是在应用的时候不仅麻烦,而且需要使用高深的数学知识,因此,电磁理论课程不是理解本书内容的前提条件,不过这里还是假定读者学过简单的物理课程,了解一些电现象和磁现象。

如果满足3个基本假设,就可以利用电路理论而不是电磁理论研究电路形式的物理系统。这3个假设如下所示:

1. **电效应在瞬间贯穿整个系统。**大家知道电信号的传播速度接近光速,所以可以做这样的假定。如果系统在物理结构上相当小,电信号通过它又如此迅速,则可以认为电信号同时影响系统中的所有点。一个系统如果足够小,就能做这样的假定,并称这种系统为集总参数系统。
2. **系统里每个元件的净电荷总是零。**没有元件能够收集到额外的净电荷,尽管有些元件可以保持等量的相对隔离的电荷(以后将会讨论这些元件)。
3. **系统里的元件之间没有磁耦合。**稍后会证明,磁耦合能够发生在元件内部。

除此之外,没有其他假设。对于同一个问题,使用电磁理论解决方案非常复杂,而使用电路理论则能获得简单而又足够精确的解决方案。在介绍基本电路元件的分析和互连元件的规则之后,第2个假设和第3个假设的重要性将会显而易见。

需要进一步探讨第1个假设。多小的物理系统有资格作为集总参数系统?如果注意到电信号的波浪式传播,问题可以得到一个定量的解答。如果信号的波长比系统的物理尺寸大得多,则称系统为集总参数系统。波长 λ 等于信号的速度除以频率,即 $\lambda = cf$ 。频率的单位为赫兹(Hz)。例如,美国电力系统使用的频率为60 Hz。如果用光速($c = 3 \times 10^8$ m/s)作为传播速度,那么波长为 5×10^6 m。如果该电力系统的物理尺寸远小于这个波长,就可以将它看成集总参数系统,可以用电路理论来分析它的特性。怎样来定义远小于呢?好的标准是十分之一。如果系统的尺寸是波长尺寸的十分之一,则系统就可以作为集总参数系统。因此,只要电力系统的物理尺寸小于 5×10^5 m,就可以将它看成是集总参数系统。

另一方面,无线电信号的传播频率规定为 10^9 Hz,因此波长为0.3 m。使用十分之一的标准,发送或接收无线电信号的通信系统的相应尺寸必须小于3 cm才能作为集总参数系统。如果研究中的系统其物理尺寸与信号的波长接近,就必须使用电磁理论去分析该系统。

1.1.2 解决问题

如果问题解答者是一名工程师,就不会要求他去解决已经解决了的问题了。不论是改善已有的系统功能,还是创造新系统,工程师都将分析研究未解决的问题。然而,作为一名学生,则要将注意力投入到探讨已经被解决的问题上。学习和讨论这些问题在过去是如何被解决的并完成相关的作业和测验题的目的,就是要提高技能以便成功地处理未被解决的问题,成为工程师以后就会遇到那些未被解决的问题了。

下面给出一般问题的解答步骤(多数属于在计算之前应考虑的问题),以便找到解决问题的方案和策略。

1. **确定什么是已知的,什么是待求的。**在解答问题时,需要知道目的地,以便选择一条路径到达目的地。需要解答或求解的问题是什么?有时目标问题是明显的,有时则需要解释或者列出已知和未知信息清单或表格以便了解目标。
问题陈述中可能包含一些无关的信息,在解答前需要将其排除。另一方面,可能会出现不完整的信息,或者复杂程度超出已知的解决方法。这种情况下,需要做出假设来填补失去的信息或者简化问题的上下文关系。如果计算陷入困境或者产生的答案似乎无意义,就要准备回过头重新考虑那些无关的信息或假设。
2. **画电路图或者采用其他形式的模型。**将口头描述的问题转化为形象的模型是解答问题过程中经常使用的步骤。如果电路图已经提供了,则需要在上面加一些信息,如标注、数值或者

参考方向。也可以根据需要重新画一个简单、等效的电路图。在书中，将会学习简化电路和求等效电路的方法。

3. **考虑几个解决方案并从中挑选一个方案。**电路课程将帮助你收集许多分析工具，每一种工具都可以解决一些问题。有的方法在解题时可能比其他方法少用方程式，有的方法在解题时只用代数方法而不需要微积分。如果能采用这些方法，就会提高效率并能够有效地减少计算量。当用某种解决方法陷入困境时，就要想换一种方法，这时可能会指出一条继续前进的道路。
4. **计算答案。**这里的计划是确定一个好的分析方法和正确的方程来解答问题。接着要求解方程，用纸和笔、计算器或者计算机都可以完成对电路分析的实际计算。效率以及教师的选择决定了将使用的工具。
5. **发挥创造性。**如果怀疑答案错了，或者计算好像没能接近解答，应该暂停并考虑替换方案。这时需要重新检查，或者选择另一种解决方法，或者采取一种非常规的解决步骤，例如从结果倒着推算。本书提供了全部“评测目标”所采用问题的答案和许多习题答案，需要时可以倒着推算。在现实世界中，不可能预先有答案，但是可以从预期的结果倒着推算。还有其他创造性的方法，比如观察与其相似的其他类型的问题（这些问题可能是你已经成功解答了的），或者凭直觉或预感决定如何进行，还可以暂时将问题放在一边，以后再对付它。
6. **检验解答。**问自己得到的解答是否有实际意义。答案的数量级合理吗？解答能否在物理上实现？还可以进一步用其他方法重新解答问题，这样做不仅检验了最初答案的正确性，而且还帮助开发了你的直觉，总之要根据不同种类的问题找到最有效的解决方法。在现实世界中，安全的临界设计总是要用几种独立的方法进行检验。养成检验答案的习惯，不论是学生，还是工程师，都会获益匪浅。

当然，以上解决问题的步骤不能作为处方去解决电路课程或其他课程的所有问题，有时可能需要跳过一些步骤，或改变一些步骤的顺序，或者详细制定某些步骤来解决特殊问题。可以使用这些步骤作为指南，形成工作中解决问题的风格。

1.2 国际单位制

工程师通过测量来比较理论结果和实验结果，以及各项工程设计。现代工程设计包含多个学科，许多工程小组在工程设计中一起工作，如果各小组使用相同的测量单位，就可以互相参照测量结果。世界范围内的主要工程学会和大多数工程师都采用国际单位制（SI），所以本书也采用国际单位制。

SI制以7个定义量为基础：

- 长度
- 质量
- 时间
- 电流
- 热力学温度
- 物质的量
- 发光强度

上述量及其单位和符号列在表1.1中。还有一些大家熟悉的时间单位，如分、小时等，尽管不是严格的SI制，但也经常使用在工程计算中。此外，定义量还可以组合形成导出单位，如力、能量、功率和电荷等，物理课程中经常用到这些导出单位。表1.2中列出了本书使用的导出单位。