

国外电子与通信教材系列

THE **ART** OF ELECTRONICS

电子学

SECOND EDITION

第二版

[美] Paul Horowitz 著
Winfield Hill

吴利民 余国文 欧阳华 梅进杰 等译
吴利民 审校



电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry
<http://www.phei.com.cn>

内 容 简 介

本书是哈佛大学的经典教材,自出版以来已被译成多种语言版本。本书通过强调电子电路系统设计者所需的实用方法,即对电路的基本原理、经验准则以及大量实用电路设计技巧的全面总结,侧重探讨了电子学及其电路的设计原理与应用。它不仅涵盖了电子学通常研究的全部知识点,还补充了有关数字电子学中的大量较新应用及设计方面的要点内容。对高频放大器、射频通信调制电路设计、低功耗设计、带宽压缩以及信号的测量与处理等重要电路设计以及电子电路制作工艺设计方面的难点也做了通俗易懂的阐述。本书包含丰富的电子电路分析设计实例和大量图表资料,内容全面且阐述透彻,是一本世界范围内公认的电子学电路分析、设计及其应用的优秀教材。

本书可作为电气、电子、通信、计算机与自动化类专业本科生的专业基础课程教材或参考书。对于从事电子工程、通信及微电子等方面电路设计的工程技术人员,也是一本具有较高参考价值的好书。

Authorized translation from the English language edition published by The Syndicate of the Press of the University of Cambridge, England. Copyright © Cambridge University Press 1980, 1989.

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 the Publisher.

This edition is licensed for distribution and sale in the People's Republic of China only excluding Hong Kong, Taiwan and Macau and may not be distributed and sold elsewhere.

Simplified Chinese language edition published by Publishing House of Electronics Industry. Copyright © 2005.

本书中文简体专有翻译出版版权由Cambridge University Press 授予电子工业出版社。其原文版权及中文翻译出版版权受法律保护。未经许可,不得以任何形式或手段复制或抄袭本书内容。

本书中文简体字版仅限于在中华人民共和国境内(不包括香港、澳门特别行政区以及台湾地区)发行与销售,并不得在其他地区发行与销售。

版权贸易合同登记号 图字:01-2003-3946

图书在版编目(CIP)数据

电子学(第二版)/(美)霍罗威茨(Horowitz P.)等著;吴利民等译.-北京:电子工业出版社,2005.10
(国外电子与通信教材系列)

书名原文:The Art of Electronics, Second Edition

ISBN 7-121-01253-7

I. 电... II. ①霍... ②吴... III. 电子学-教材 IV. TN01

中国版本图书馆CIP数据核字(2005)第105780号

责任编辑:马 岚 特约编辑:马爱文

印 刷:北京牛山世兴印刷厂

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

经 销:各地新华书店

开 本:787×1092 1/16 印张:58 字数:1636千字

印 次:2005年10月第1次印刷

定 价:95.00元

凡购买电子工业出版社的图书,如有缺损问题,请向购买书店调换;若书店售缺,请与本社发行部联系。联系电话:(010)68279077。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。

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,除了依靠高校的老教师和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

教材出版委员会

主 任	吴佑寿	中国工程院院士、清华大学教授
副主任	林金桐	北京邮电大学校长、教授、博士生导师
	杨千里	总参通信部副部长，中国电子学会会士、副理事长 中国通信学会常务理事
委 员	林孝康	清华大学教授、博士生导师、电子工程系副主任、通信与微波研究所所长 教育部电子信息科学与工程类专业教学指导分委员会委员
	徐安士	北京大学教授、博士生导师、电子学系主任 教育部电子信息与电气学科教学指导委员会委员
	樊昌信	西安电子科技大学教授、博士生导师 中国通信学会理事、IEEE 会士
	程时昕	东南大学教授、博士生导师、移动通信国家重点实验室主任
	郁道银	天津大学副校长、教授、博士生导师 教育部电子信息科学与工程类专业教学指导分委员会委员
	阮秋琦	北京交通大学教授、博士生导师 计算机与信息技术学院院长、信息科学研究所所长
	张晓林	北京航空航天大学教授、博士生导师、电子信息工程学院院长 教育部电子信息科学与电气信息类基础课程教学指导分委员会委员
	郑宝玉	南京邮电大学副校长、教授、博士生导师 教育部电子信息与电气学科教学指导委员会委员
	朱世华	西安交通大学副校长、教授、博士生导师、电子与信息工程学院院长 教育部电子信息科学与工程类专业教学指导分委员会委员
	彭启琮	电子科技大学教授、博士生导师、通信与信息工程学院院长 教育部电子信息科学与电气信息类基础课程教学指导分委员会委员
	毛军发	上海交通大学教授、博士生导师、电子信息与电气工程学院副院长 教育部电子信息与电气学科教学指导委员会委员
	赵尔沅	北京邮电大学教授、《中国邮电高校学报（英文版）》编委会主任
	钟允若	原邮电科学研究院副院长、总工程师
	刘 彩	中国通信学会副理事长、秘书长
	杜振民	电子工业出版社原副社长
	王志功	东南大学教授、博士生导师、射频与光电集成电路研究所所长 教育部电子信息科学与电气信息类基础课程教学指导分委员会主任委员
	张中兆	哈尔滨工业大学教授、博士生导师、电子与信息技术研究院院长
	范平志	西南交通大学教授、博士生导师、计算机与通信工程学院院长

译 者 序

Paul Horowitz 是美国哈佛大学物理系与电子工程系的教授。他在哈佛任教物理学与电子学的同时,首开了哈佛的实验电子学课程。Winfield Hill 是一位研究科学家,并且是 Rowland 科学研究所电子工程研究室主任。他们两位多年来一直致力于现代电子电路设计理论及其在其他方面的应用研究,并均取得了丰硕的成果。由这样两位在电子学领域内颇有建树的知名大师级专家合著的 *The Art of Electronics*, 已被公认是在模拟与数字电子电路设计方面的一本权威教材与工程参考书。该书的英文版已在世界范围内发行超过了 125 000 册, 并已被翻译成 8 种其他语言文字。

该书是作者根据自己在哈佛大学电子学实验室讲授电子学课程的讲稿改编的。与众多传统电子学教材大为不同的是,本书通过强调由电路设计者使用的实际方法,即由一些基本电路定律、经验准则与大量实用电路设计技巧相结合,将实用物理学家的实用研究方法工程师的量化分析方法相结合,用这种简明的方法来探讨电路设计的基本原理。它对应的结果是给电子学课程的教学带来了一场巨大的变革;产生了一种不需要大量利用数学工具进行电路设计的简捷方法。这种方法着重激发学习者对电子电路的灵感,并能对电路数值与特性进行简化估算。该书已被世界上许多大学的电气、电子、通信、计算机等相关专业选为本科或研究生的电子学、电子技术应用、电子电路设计等课程的教材或教学参考书。由于该书的新版本仍保留了原版中的通俗易懂性,数学分析理论很少,因此也可作为那些从未接触过电子学的初学者的一本电子电路设计的学习用书或参考书,并能引导他们最终设计出性能优越的电子电路。

该书内容全面,阐述翔实透彻。它不仅涵盖了经典电子学通常研究的全部知识点,而且还补充了有关数字电子学中大量较新的应用及设计方面的重要内容,主要包括电路的基本元器件(含晶体管与场效应管)、反馈与运算放大器、有源滤波器与振荡器、稳压器与电源电路、精度电路与低噪声技术;书中也包括了数字电子学中的各种数字逻辑电路、数/模转换和模/数转换、锁相环、伪随机码序列与数字噪声产生、小型计算机、微型计算机以及微处理器等的基本原理及应用。此外,本书还讨论了高频放大器、射频通信调制电路设计、低功耗设计、带宽压缩以及信号的测量与处理等重要电路的设计。与一般电子学教材不同的是,本书还对有关电子电路制作工艺设计方面的具体问题进行了通俗易懂的阐述。书中包含大量的实用电子电路的分析与设计实例、大量的图表资料以及有一定参考价值的有关附录。每一小节中均附有习题,以巩固相应知识点。

该书是作者为本科生全年的电子电路设计课程而编写的,而在我国高校的电子信息类等相关专业的课程体系中,电子电路(其中包括高频电路和低频电路)或电子技术的课程一般不超过 100 学时。因此,在选用本书作为教材时需对相应内容进行一些取舍。此外,由于该书毕竟初版于 1980 年,改版于 1989 年,而现代微电子、集成芯片和计算机技术的发展日新月异,所以该书的一些内容以及涉及芯片的应用就显得时过境迁了。因此,对于第 4 章、第 8 章和第 9 章,尤其是对于第 10 章和第 11 章中的内容的学习,更需注意精选取舍。承担本书审校工作的吴利民教授曾在国外用英语讲授近两年的高、低频电子线路和电子学课程,在此期间以及在国内的长期双语教学过程中均参考了该书英文版的许多内容。因此,译者可为选用该书作为教材的同行提供一些参考意见,并相互学习以取长补短。

本书主要由中国人民解放军空军雷达学院和华中科技大学的多位老师翻译完成,其中吴利民翻译了前言、第1章、第2章和第8章以及大部分附录,并负责审校全书;余国文、梅进杰、晁曙、李跃华和秦江敏翻译了第4章至第7章以及第12章至第15章;刘玉、欧阳华、倪炜、杨杰和戴锐翻译了第3章以及第9章至第11章,王振华和林静宜翻译了附录K和术语表。

在翻译这本巨著的过程中,面对书中如此广泛的涉猎范畴,如此丰富翔实的内容和如此庞大的专业术语量,再加上作者那独具的诙谐与幽默,并使用了在通常专业书中不常见的调侃与文学语言风格来叙述电子学专业知 识,我们一直深感受翻译好此书具有较大的难度。因此,全书译文中的不当之处,差错与疏忽也就在所难免。恳请读者斧正并不吝赐教。若有任何建议或意见,欢迎E-mail至wlmq@public.wh.hb.cn。借此机会,我们也要向对本书的翻译工作给予帮助的所有同仁表示由衷的感谢。

最后,这里译出*Radio Communication*与*EDN*(新闻版)分别给予该书英文版的精彩评论,以飨读者:

“该书堪称一本最好的电子学自学教材和参考书。全书淋漓尽致地展现了电子学的美妙与乐趣。”

“该书充满了各种颇有价值的信息。更重要的是,精读该书是一种享受,根本不是在枯燥地学习,而是乐在其中。”

作者简介

Paul Horowitz

哈佛大学物理学教授。他在哈佛任教物理学与电子学的同时,首开了哈佛的实验电子学课程,迄今已有15年了。他的研究兴趣广泛,涉猎观测天体物理学、X射线与粒子显微技术、光干涉技术测量技术以及外星人探索等研究领域。作为已有60多篇技术文章与报告的作者,他也广泛地为工业和政府有关部门做咨询顾问工作,并且是大量电子与摄影仪器的设计者。

Winfield Hill

一位研究科学家,Rowland科学研究所(由Edwin land创立)电子工程室主任。研究人眼彩色视觉的生理学与表象学。他也在哈佛大学工作,并设计了100多种电子与科学仪器。然后,他创立了Sea Data公司,并作为首席工程师设计了50多种海洋学研究用仪器。他一直致力于深海实验,并撰写了10多篇科研技术文章。

前 言

在过去的40多年里,电子学及其技术比其他任何领域内的技术发展更为迅猛。这也是我们早在1980年就已经试图编写一部关于电子学技术的教材的原因。这里,我们用“技术”或“技巧”来表明对电路与实际器件的本质与应用方面的精通与掌握,而不是像一些常用的电子学教材那样侧重于探讨电路及器件中的较抽象的理论部分。当然,在这种技术日新月异发展的领域中,探讨其主要特点及基本组成部分又不免蒙受讨论内容老套过时之责难。

电子学及其技术发展的步伐并没有令人们失望,但却让我们感慨万千。本书第一版还墨迹未干的时候,在我们对这样的陈述语句:“2 Kb 经典 2716 EPROM……,其价格大约是25美元”还记忆犹新的时候,人们却在市场上再也找不到这类器件,而新的 EPROM 是原来容量的64倍,价格却低于原价的一半。因此,这也导致我们对本书进行了重大修改,以适应改进的器件与方法。我们完全重写了关于微计算机与微处理器的章节(使用 IBM PC 与 68008 芯片),修改了关于 PLD 与新的 HC 与 AC 逻辑系列的数字电子学章节,修改了关于运算放大器与精度设计的内容,这些内容反映了具有优越性能的场效应管作为运算放大器输入级的可用性,还修改了关于 CAD/CAM 电路构造技术的章节。书中的每个表格也进行了修改,对其中一些表格还进行了重大修改。例如,在表 4.1(关于运算放大器)中,只保留了原有 120 个条目中的 65%,并添加了 135 种新的运算放大器。

借此机会,我们也根据读者的建议以及使用本书第一版进行教学所得的经验,对本书进行了修改。我们重写了关于 FET 的一章(原有的章节太复杂)并将其调整至运算放大器这一章之前(在这些运算放大器中大量增加了场效应管的应用),并新增了一章来讨论低功耗与微功耗设计(既含模拟部分,也含数字部分),这是一个虽重要但容易被忽视的部分。对于其他章节,也进行了大量修改,另外还添加了许多新的表格,包括 A/D 与 D/A 转换器、数字逻辑器件与低功耗器件等。本书中电路图的数量也增加了。全书现有 78 个表格和 1000 多幅图。

在修改过程中,我们力图保留本书第一版作为参考书或教材的通俗易懂性。正是由于这一点才使本书的第一版能如此成功与畅销。我们深知学生首次接触电子学课程的难度,因为这一学科错综交织,而且缺少一种能按照逻辑条理学习知识、引导初学者的途径。因此,在本书中附有大量参考条目。此外,本书还有一本配套的学生手册。该手册包含了许多电路设计实例、解释、习题与实验室练习以及对一些精选问题的解答。通过给学生提供一本补充材料,就能使本书不仅简明扼要,而且内容详实,这一点也正好满足了那些将此书作为参考书的读者的要求。

我们衷心希望本书的新版本能满足读者(无论是学生还是工程师)的需求。我们也欢迎读者提出建议与修改意见,并直接寄往:

Paul Horowitz
Physics Department
Harvard University
Cambridge, MA 02138

在新版本的编写过程中，我们得到了如下人员的帮助，在此一并表示衷心感谢。他们分别是 Mike Aronson 与 Brian Matthews (AOX 公司)，John Greene (开普敦大学)，Jeremy Avigad 与 Tom Hayes (哈佛大学)，Peter Horowitz (EVI 公司)，Don Stern 与 Owen Walker。我们也非常感谢 Jim Mobley 的认真校对；感谢剑桥大学出版社的 Sophia Prybylski 与 David Tranah 的鼓励与专注。我们还要感谢 Rosenlaui 出版公司的那些永不知疲倦的排版人员所做的工作。

最后，根据现代法律方面的条文精神，我们提醒读者阅读以下所附的法律通告。

Paul Horowitz
Winfield Hill
1989 年 3 月

法律通告

在本书中，我们为讲授电子设计的技巧而采用了我们确信其准确的电路示例与数据。然而，这些示例、数据与其他信息在此仅用于教学目的。它们在未经单独测试与应用者确认的情况下不应当用于任何具体电路应用中。在任何应用中，对电路的单独测试与确认是尤其重要的，因为电路的不正确功能将引起人身安全与财产受损。

出于这些理由，我们不能保证，表示或隐含在本书中的示例、数据与其他资料信息是没有错误的，也不能保证它们一定会与工业标准一致或能满足任何具体应用的要求。尽管作者已有一个具体目的并示于书中。本书作者与出版商明确否认本书具有商业上的承诺和任何特殊应用的可能性。

作者与出版商也对任何直接、间接、偶然或必然采用本书中的示例数据或其他资料信息而引起的损失概不负任何责任。

第一版前言

我们的初衷是把此书作为一本电子电路设计的教材与参考书。本书适用于那些从未接触过电子学的初学者,希望引导他们最终能够合理地熟练设计电子电路。本书采用一种简明的方法来探讨电路设计的基本原理,并分不同主题选择了一些深层次内容。我们也试图将物理学家的实用研究方法与工程师的量化分析相结合。

本书是基于作者在哈佛大学电子学实验室讲授的一学期课程的讲稿改编而成的。这些年来,学习这门课程的学生范围已有了较大的变化,其中有本科生,因为在其最终从事的理工类工作中必须掌握相应的电子技术,另外还有在其他相关专业已有明确研究方向的研究生,以及一些博士生与博士后研究人员。最后这些高学历人员也需要学习电子学,因为他们在各自的研究过程中也会感觉到自己对与电子学有关的知识内容力不从心。

显而易见,现有的教材不足以适合这种课程。虽然有为四年工程师培养计划或为工程师实践应用而编写的对电子学各专题探讨极妙的各类教材,但这些书总是试图涵盖电子学的全部内容,从而使其显得过分烦琐(这正是手册类图书的通病);或者又过于单一化(就像烹饪类的图书那样过于简单);或者内容材料极不平衡。何况,常规电子学教材讲授的许多内容没有必要,因为并不实用,而有用的电路及其电路设计者常用的分析方法通常总是隐含于应用笔记、工程刊物以及一些难以获得的数据手册中。换句话说,一般电子学教材的作者总是习惯于陈述电子学的理论而不讲电子学及其电路设计的技术与技巧。

在本书的编著过程中,我们着重将电路设计工程师的规范要求与实用物理学家以及电子学教师的观点相结合。因此,本书主要反映了这样的思想,即电子学基本上是一种简单的技术,它是那些基本定律、经验准则与大量电路技巧的结合。出于这些理由,我们在书中完全省略了那些通常对固态物理学、晶体管的 h 参数模型以及复杂网络理论的讨论,也大大压缩了关于负载与 s 平面图的讨论。书中的理论讨论大部分不依赖于数学,作者着重鼓励读者利用对电路的直觉与独特见解,对电路参数值及特性进行心算或简单估算。

除了一般电子学教材通常讨论的主题以外,本书还包括了如下内容:

- 一种简易可用的晶体管模型。
- 一些有用的子电路,例如电流源与镜像电流源的扩展探讨。
- 单电源运算放大器设计。
- 对一些专题进行简明易懂的讨论,而关于它们的实用设计资料常常不易看到。这些专题包括运算放大器的频率补偿、低噪声电路、锁相环、精度线性设计。
- 用图表简化对有源滤波器的设计。
- 关于噪声、屏蔽与接地的内容。
- 一种特有的图解方法,用于合理改进的低噪声放大器分析。
- 用一章的篇幅来讨论电压参考电路与稳压电路(含恒流源电路)。
- 对单稳态多谐振荡器及其不同特性的讨论。
- 对数字逻辑错误的收集以及解决办法。
- 对逻辑接口的扩展讨论,并侧重于新NMOS与PMOS LSI的探讨。
- 对模/数和数/模转换技术的详细讨论。

- 关于数字噪声产生的讨论。
- 对小型计算机及数据总线接口的讨论，并介绍了汇编语言。
- 用一章的篇幅来讨论微处理器，并给出了设计实例与相应的讨论，包括如何将其设计成实用的设备，如何使其按要求实现所需功能。
- 用一章的篇幅来讨论结构工艺，主要包括原型、印刷电路板及仪器设计。
- 评价高速转换电路的一种简化方法。
- 用一章的篇幅来讨论科学测量与数据处理，包括能测量什么，如何准确测量以及使用测量数据能做些什么。
- 提出了清晰的带宽变窄方法，包括信号求均值、多信道估计、同步放大器与脉冲高度分析。
- 给出了一系列“电路集锦”和“不合理电路”。
- 非常有用的附录，讨论了如何画电路原理图、IC 类型、LC 滤波器设计、电阻值、示波器、数学知识回顾以及其他基础内容。
- 关于二极管、三极管、场效应管、运算放大器、比较器、稳压器、电压参考电路、微处理器以及其他器件的图表，一般列出通用型与最佳型的特性。

在本书的编写过程中，我们总是采用直接列出器件名称的原则来比较那些可用于任何电路的有竞争力的器件的特性，并对可替换电路结构的优点进行比较。书中的电路例子均采用实用的电路器件类型，而不是用一些未知框。这样做的目的是使读者彻底懂得在电路设计中如何选择电路结构、器件类型与元件值，并且知道不主要依赖数学方法来进行电路设计的技术并不会降低电路的精确性、性能或可靠性。与此相反，这种技术能使我们真正懂得在电路设计过程中所做的选择与面临的折中方案。这种技术才真正是设计性能优越的电路的最佳方法。

本书可用于本科生一年的电子电路设计课程，对学生的数学基础知识要求不高。也就是说，只需要学生对三角函数与指数函数有一定的了解。当然，他们能对微积分知识有一定的了解则更好（在附录中已回顾了复数与导数的知识）。如果省略一些基本的章节，本书也可以作为一学期使用（哈佛大学就是这样用的）。

此外，还有一本单独的实验手册（由 Horowitz 与 Robinson 在 1981 年编写）。该手册包含了 23 个实验，有阅读内容和书面作业，并附有习题答案。

为了帮助读者使用该书，我们已经在每一章的标题边沿用空方框标明了那些完全可用简略方式阅读的内容。此外，对于在一学期课程内使用本书的学生，可省略第 5 章（前半部分）、第 7 章、第 12 章到第 14 章，另外也可以省略第 15 章。省略的理由已在各章导读段落进行了解释。

最后，要感谢我们的同事在本书书稿准备过程中提供的许多真知灼见与巨大帮助。尤其要感谢 Mike Aronson, Howard Berg, Dennis Crouse, Carol Davis, David Griesinger, John Hagen, Tom Hayes, Peter Horowitz, Bob Kline, Costas Papaliolios, Jay Sage 与 Bill Vetterling。我们也非常感激剑桥大学出版社的 Eric Hieber 与 Jim Mobley, Rhona Johnson 与 Ken Werner，感谢他们富有想像力的高度专业化的工作。

Paul Horowitz
Winfield Hill
1980 年 4 月

目 录

第 1 章 电子学基础	1	1.7.7 感性负载与二极管保护	45
1.1 概述	1	1.8 其他无源元件	46
1.2 电压、电流与电阻	1	1.8.1 机电器件	46
1.2.1 电压与电流	1	1.8.2 显示部分	49
1.2.2 电压与电流之间的关系：电阻	3	1.8.3 可变元器件	50
1.2.3 分压器	6	1.9 补充题	51
1.2.4 电压源和电流源	7	第 2 章 晶体管	53
1.2.5 戴维南等效电路	9	2.1 概述	53
1.2.6 小信号电阻	11	2.1.1 第一种晶体管模型：电流放大器	53
1.3 信号	13	2.2 几种基本的晶体管电路	54
1.3.1 正弦信号	13	2.2.1 晶体管开关	54
1.3.2 信号幅度与分贝	14	2.2.2 射极跟随器	56
1.3.3 其他信号	15	2.2.3 射极跟随器作为稳压器	59
1.3.4 逻辑电平	16	2.2.4 射极跟随器偏置	60
1.3.5 信号源	16	2.2.5 晶体管电流源	62
1.4 电容与交流电路	17	2.2.6 共射放大器	66
1.4.1 电容	17	2.2.7 单位增益的反相器	67
1.4.2 RC 电路：随时间变化的 V 与 I	19	2.2.8 跨导	68
1.4.3 微分器	21	2.3 用于基本晶体管电路的 Ebers-Moll 模型	69
1.4.4 积分器	22	2.3.1 改进的晶体管模型：跨导放大器	69
1.5 电感与变压器	24	2.3.2 对射极跟随器的重新审视	70
1.5.1 电感	24	2.3.3 对共射放大器的重新审视	71
1.5.2 变压器	24	2.3.4 共射放大器的偏置	73
1.6 阻抗与电抗	25	2.3.5 镜像电流源	76
1.6.1 电抗电路的频率分析	26	2.4 几种放大器组成框图	78
1.6.2 RC 滤波器	31	□ 2.4.1 推挽输出级	78
1.6.3 相位矢量图	35	2.4.2 达林顿连接	81
1.6.4 “极点”与每二倍频的分贝数	35	□ 2.4.3 自举电路	83
1.6.5 谐振电路与有源滤波器	36	2.4.4 差分放大器	84
1.6.6 电容的其他应用	37	2.4.5 电容与密勒效应	87
1.6.7 戴维南定理推广	37	2.4.6 场效应晶体管	89
1.7 二极管与二极管电路	38	2.5 一些典型的晶体管电路	89
1.7.1 二极管	38	2.5.1 稳压源	90
1.7.2 整流	38	2.5.2 温度控制器	90
1.7.3 电源滤波	39	2.5.3 带晶体管与二极管的简单逻辑电路	90
1.7.4 电源的整流器结构	40	2.6 电路示例	93
1.7.5 稳压器	42	2.6.1 电路集锦	93
1.7.6 二极管的电路应用	42		

2.6.2 不合理电路	93	4.5 详细分析精选的运算放大器电路	177
2.7 补充题	93	4.5.1 对数放大器	177
第3章 场效应管	96	4.5.2 有源峰值检波器	179
3.1 概述	96	4.5.3 抽样和保持	182
3.1.1 FET的特性	96	□ 4.5.4 有源箝位器	184
3.1.2 FET的种类	99	□ 4.5.5 绝对值电路	185
3.1.3 FET的普遍特性	100	4.5.6 积分器	185
3.1.4 FET漏极特性	102	□ 4.5.7 微分器	187
3.1.5 FET特性参数的制造偏差	103	4.6 单电源供电的运算放大器	188
3.2 基本FET电路	106	□ 4.6.1 单电源交流放大器的偏置	188
3.2.1 JFET电流源	106	□ 4.6.2 单电源运算放大器	188
3.2.2 FET放大器	109	4.7 比较器和施密特触发器	191
3.2.3 源极跟随器	112	4.7.1 比较器	191
3.2.4 FET栅极电流	114	4.7.2 施密特触发器	192
3.2.5 FET用做可变电阻	116	4.8 有限增益放大器的反馈	193
3.3 FET开关	119	4.8.1 增益公式	194
3.3.1 FET模拟开关	119	4.8.2 反馈对放大电路的影响	194
3.3.2 场效应管开关的局限性	121	□ 4.8.3 晶体管反馈放大器的两个例子	197
3.3.3 一些场效应管模拟开关举例	126	4.9 一些典型的运算放大器电路	199
3.3.4 MOSFET逻辑和电源开关	128	4.9.1 通用的实验室放大器	199
3.3.5 MOSFET使用注意事项	141	4.9.2 压控振荡器	200
3.4 电路示例	143	□ 4.9.3 带 R_{on} 补偿的JFET线性开关	201
3.4.1 电路集锦	143	□ 4.9.4 TTL过零检测器	201
3.4.2 不合理电路	144	□ 4.9.5 负载电流感应电路	202
第4章 反馈和运算放大器	145	4.10 反馈放大器的频率补偿	202
4.1 概述	145	4.10.1 增益和相移与频率的关系	203
4.1.1 反馈	145	4.10.2 放大器的补偿方法	204
4.1.2 运算放大器	145	□ 4.10.3 反馈网络的频率响应	206
4.1.3 黄金规则	146	4.11 电路示例	208
4.2 基本运算放大器电路	147	4.11.1 电路集锦	208
4.2.1 反相放大器	147	4.11.2 不合理电路	208
4.2.2 同相放大器	147	4.12 补充题	208
4.2.3 跟随器	148	第5章 有源滤波器和振荡器	219
4.2.4 电流源	148	5.1 有源滤波器	219
4.2.5 运算放大器电路的基本注意事项	150	5.1.1 RC滤波器的频率响应	219
4.3 运算放大器常用实例	151	5.1.2 LC滤波器的理想性能	220
4.3.1 线性电路	151	5.1.3 有源滤波器: 一般描述	220
4.3.2 非线性电路	154	5.1.4 滤波器的主要性能指标	222
4.4 运算放大器特性详细分析	155	5.1.5 滤波器类型	223
4.4.1 偏离理想运算放大器特性	156	5.2 有源滤波器电路	226
4.4.2 运算放大器限制对电路特性的影响	171	5.2.1 VCVS电路	227
4.4.3 低功率和可编程运算放大器	176	5.2.2 使用简化表格设计VCVS滤波器	227
		5.2.3 状态可变的滤波器	229
		□ 5.2.4 双T型陷波滤波器	232

5.2.5	回转滤波器的实现	233	□ 6.6.3	低功耗稳压器	305
5.2.6	开关电容滤波器	233	6.6.4	快速电容(电荷泵)电压转换器	306
5.3	振荡器	235	6.6.5	恒流源	307
5.3.1	振荡器介绍	235	6.6.6	商用供电模块	309
5.3.2	阻尼振荡器	236	6.7	电路示例	311
5.3.3	经典定时芯片: 555	237	6.7.1	电路集锦	311
5.3.4	压控振荡器	240	6.7.2	不合理电路	311
5.3.5	正交振荡器	241	6.8	补充题	311
□ 5.3.6	文氏电桥和 LC 振荡器	244	第 7 章 精密电路和低噪声技术	317	
□ 5.3.7	LC 振荡器	245	7.1	精密运算放大器设计技术	317
5.3.8	石英晶体振荡器	247	7.1.1	精度与动态范围的关系	317
5.4	电路示例	249	7.1.2	误差预算	317
5.4.1	电路集锦	249	7.1.3	电路示例: 带自动调零的精密放大器	318
5.5	补充题	249	7.1.4	精密设计的误差预算	319
第 6 章 稳压器和电源电路	253		7.1.5	元器件误差	320
6.1	采用典型稳压芯片 723 的基本稳压电路	253	7.1.6	放大器的输入误差	321
6.1.1	723 稳压器	253	7.1.7	放大器输出误差	327
6.1.2	正电压稳压器	254	7.1.8	自动调零(斩波器稳定)放大器	338
6.1.3	大电流稳压器	256	7.2	差分 and 仪器用放大器	341
6.2	散热和功率设计	257	7.2.1	差分放大器	341
6.2.1	功率晶体管及其散热	257	7.2.2	标准 3 运算放大器仪器用放大器	344
6.2.2	反馈限流保护	259	7.3	放大器噪声	348
6.2.3	杠杆式过压保护	260	7.3.1	噪声的起源和种类	348
□ 6.2.4	大电流功率器件电源电路设计的进一步研究	262	7.3.2	信噪比和噪声系数	350
□ 6.2.5	可编程电源	263	7.3.3	晶体管放大器的电压和电流噪声	353
□ 6.2.6	电源电路实例	264	□ 7.3.4	晶体管的低噪声设计	355
6.2.7	其他稳压芯片	266	7.3.5	场效应管噪声	359
6.3	未稳压电源	266	7.3.6	低噪声晶体管的选定	360
6.3.1	交流器件	266	□ 7.3.7	差分 and 反馈放大器的噪声	361
6.3.2	变压器	268	7.4	噪声测量和噪声源	364
6.3.3	直流器件	269	□ 7.4.1	无需噪声源的测量	364
6.4	基准电压	271	□ 7.4.2	有噪声源的测量	365
□ 6.4.1	齐纳管	271	□ 7.4.3	噪声和信号源	366
□ 6.4.2	能带隙基准源	275	□ 7.4.4	带宽限制和电压均方根值的测量	367
6.5	3 端和 4 端稳压器	278	7.4.5	混合噪声	368
6.5.1	3 端稳压器	278	7.5	干扰: 屏蔽和接地	369
6.5.2	3 端可调稳压芯片	279	7.5.1	干扰	369
6.5.3	3 端稳压器注意事项	284	7.5.2	信号接地	370
6.5.4	开关稳压器和直流-直流转换器	290	□ 7.5.3	仪器之间的接地	371
6.6	专用电源电路	299	7.6	电路示例	376
□ 6.6.1	高压稳压电路	299	7.6.1	电路集锦	376
□ 6.6.2	低噪声、低漂移电源	304	7.7	补充题	380

第8章 数字电子学	381	8.9 电路示例	443
8.1 基本逻辑概念	381	8.9.1 电路集锦	443
8.1.1 数字与模拟	381	8.9.2 不合理电路	444
8.1.2 逻辑状态	381	8.10 补充题	445
8.1.3 数码	383	第9章 数字与模拟	451
8.1.4 门和真值表	386	9.1 CMOS 和 TTL 逻辑电路	451
□ 8.1.5 门的分立电路	387	□ 9.1.1 数字逻辑电路家系列的发展历史	451
8.1.6 门电路举例	388	9.1.2 输入和输出特性	455
8.1.7 有效电平逻辑表示法	389	9.1.3 逻辑系列之间的接口	457
8.2 TTL 和 CMOS	391	9.1.4 驱动 CMOS 和 TTL 输入端	459
8.2.1 一般门的分类	391	9.1.5 用比较器和运算放大器驱动数字 逻辑电路	461
8.2.2 IC 门电路	391	9.1.6 关于逻辑输入的一些说明	462
8.2.3 TTL 和 CMOS 特性	392	9.1.7 比较器	463
8.2.4 三态门和集电极开路器件	393	9.1.8 用 CMOS 和 TTL 驱动外部数字 负载	468
8.3 组合逻辑	395	9.1.9 与 NMOS 大规模集成电路的接口	470
8.3.1 逻辑等式	396	9.1.10 光电子	472
8.3.2 最小化和卡诺图	396	9.2 数字信号和长线传输	479
8.3.3 用 IC 实现的组合功能	398	9.2.1 电路板上的连接	479
8.3.4 任意真值表的实现	402	9.2.2 板卡间的连接	480
8.4 时序逻辑	407	□ 9.2.3 数据总线	481
8.4.1 存储器件: 触发器	407	9.2.4 驱动电缆	482
8.4.2 带时钟的触发器	408	9.3 模/数转换	489
8.4.3 存储器和门的组合: 时序逻辑	412	9.3.1 模/数转换概述	489
8.4.4 同步器	414	9.3.2 数/模转换器	491
8.5 单稳态触发器	415	□ 9.3.3 时域(平均) D/A 转换器	493
8.5.1 一次触发特性	415	9.3.4 乘法 D/A 转换器	494
8.5.2 单稳态电路举例	417	9.3.5 如何选择 D/A 转换器	495
8.5.3 有关单稳态触发器的注意事项	418	9.3.6 模/数转换器	495
8.5.4 计数器的定时	419	9.3.7 电荷平衡技术	500
8.6 利用集成电路实现的时序功能	420	□ 9.3.8 一些特殊的 A/D 和 D/A 转换器	503
8.6.1 锁存器和寄存器	420	9.3.9 A/D 转换器选择	505
8.6.2 计数器	420	9.4 A/D 转换示例	509
8.6.3 移位寄存器	422	9.4.1 16 通道 A/D 数据采集系统	509
8.6.4 时序 PAL	424	9.4.2 31/2 位数字电压计	511
8.6.5 各种时序功能	432	□ 9.4.3 库仑计	511
8.7 一些典型的数字电路	435	9.5 锁相环	515
8.7.1 模 n 计数器: 时间的例子	435	9.5.1 锁相环介绍	515
8.7.2 多用 LED 数字显示	436	□ 9.5.2 锁相环设计	517
□ 8.7.3 恒星望远镜驱动	437	□ 9.5.3 设计实例: 倍频器	518
□ 8.7.4 n 脉冲产生器	439	□ 9.5.4 锁相环的捕捉和锁定	521
8.8 逻辑问题	439	□ 9.5.5 锁相环的一些应用	522
8.8.1 直流问题	439	9.6 伪随机比特序列及噪声的生成	525
8.8.2 开关问题	441		
8.8.3 TTL 和 CMOS 的先天缺陷	442		

□ 9.6.1 数字噪声的生成	525	第 11 章 微处理器	595
□ 9.6.2 反馈移位寄存器序列	525	11.1 68008 的详细介绍	595
□ 9.6.3 利用最大长度序列生成模拟噪声	527	11.1.1 寄存器、存储器和 I/O	596
□ 9.6.4 移位寄存器序列的功率谱	528	11.1.2 指令集和寻址	596
□ 9.6.5 低通滤波	529	11.1.3 机器语言介绍	601
□ 9.6.6 小结	530	11.1.4 总线信号	603
□ 9.6.7 数字滤波器	533	11.2 完整的设计实例: 模拟信号均衡器	609
9.7 电路示例	536	11.2.1 电路设计	609
9.7.1 电路集锦	536	11.2.2 编制程序: 任务的确定	621
9.7.2 不合理电路	536	11.2.3 程序编写: 详细介绍	624
9.8 补充题	536	□ 11.2.4 性能	641
第 10 章 微型计算机	540	11.2.5 一些设计后的想法	642
10.1 小型计算机、微型计算机与微处理器	540	11.3 微处理器的配套芯片	644
10.1.1 计算机的结构	541	11.3.1 中规模集成电路	644
10.2 计算机的指令集	544	11.3.2 外围大规模集成电路芯片	646
10.2.1 汇编语言和机器语言	544	11.3.3 存储器	654
10.2.2 简化的 8086/8 指令集	545	11.3.4 其他微处理器	661
10.2.3 一个编程实例	549	11.3.5 仿真器、开发系统、逻辑分 析器和评估板	662
10.3 总线信号和接口	550	第 12 章 电气结构	666
10.3.1 基本的总线信号: 数据、 地址、选通	550	12.1 基本方法	666
10.3.2 可编程 I/O: 数据输出	550	12.1.1 面包板	666
10.3.3 可编程 I/O: 数据输入	553	12.1.2 印制电路原型板	666
10.3.4 可编程 I/O: 状态寄存器	554	12.1.3 绕线镶嵌板	667
10.3.5 中断	557	12.2 印制电路	669
10.3.6 中断处理	558	12.2.1 印制电路板生产	669
10.3.7 一般中断	560	□ 12.2.2 印制电路板设计	671
10.3.8 直接存储器访问	563	12.2.3 印制电路板器件安装	674
10.3.9 IBM PC 总线信号综述	565	12.2.4 印制电路板的进一步考虑	675
□ 10.3.10 同步总线通信与异步总线通 信的比较	568	12.2.5 高级技术	676
10.3.11 其他微型计算机总线	569	12.3 仪器结构	683
10.3.12 将外围设备与计算机连接	571	12.3.1 电路板安装	683
10.4 软件系统概念	573	12.3.2 机壳	685
10.4.1 编程	573	12.3.3 提示	685
10.4.2 操作系统、文件以及存储器的 使用	575	12.3.4 冷却	686
10.5 数据通信概念	577	12.3.5 关于电子器件的注意事项	688
10.5.1 串行通信和 ASCII	577	12.3.6 器件采购	689
10.5.2 并行通信: Centronics, SCSI, IPI 和 GPIB (488)	585	第 13 章 高频和高速技术	691
10.5.3 局域网	589	13.1 高频放大器	691
□ 10.5.4 接口实例: 硬件数据打包	590	13.1.1 高频晶体管放大器	691
10.5.5 数字格式	592	□ 13.1.2 高频放大器交流模型	692
		□ 13.1.3 高频计算举例	693
		13.1.4 高频放大器参数	694

□ 13.1.5 宽带设计举例	696	14.3.4 微功耗电压参考和温度传 感器	756
□ 13.1.6 改进的交流模型	697	14.4 线性微功耗设计技术	758
□ 13.1.7 分流级联对	698	14.4.1 微功耗线性设计	758
□ 13.1.8 放大器模块	698	14.4.2 分立器件线性设计举例	758
13.2 射频电路元件	703	14.4.3 微功耗运算放大器	759
13.2.1 传输线	703	14.4.4 微功耗比较器	770
□ 13.2.2 短线、巴仑线和变压器	705	14.4.5 微功耗定时器和振荡器	770
13.2.3 调谐放大器	706	14.5 微功耗数字设计	773
13.2.4 射频电路元件	707	14.5.1 CMOS	773
13.2.5 信号幅度或功率检测	710	14.5.2 CMOS 低功耗保持	774
13.3 射频通信: AM	714	14.5.3 微功耗微处理器及其外围 器件	777
13.3.1 通信基本概念	714	14.5.4 微处理器设计举例: 温度 记录仪	781
13.3.2 幅度调制	715	14.6 电路示例	786
13.3.3 超外差接收机	716	14.6.1 电路集锦	786
13.4 高级调制技术	717	第 15 章 测量与信号处理	788
□ 13.4.1 单边带	717	15.1 概述	788
□ 13.4.2 频率调制	718	15.2 测量传感器	788
□ 13.4.3 频移键控	720	15.2.1 温度	788
□ 13.4.4 脉冲调制技术	720	15.2.2 光强度	794
13.5 射频电路技巧	721	15.2.3 应变和位移	798
□ 13.5.1 电路结构	721	15.2.4 加速度、压力、力和周转率 (速度)	800
□ 13.5.2 射频放大器	722	15.2.5 磁场	802
13.6 高速开关	723	15.2.6 真空计	803
13.6.1 晶体管模型	723	15.2.7 粒子探测器	803
13.6.2 仿真建模工具	726	15.2.8 生物和化学电压探针	806
13.7 高速开关电路举例	726	15.3 精度标准和精度测量	809
□ 13.7.1 高压驱动器	726	□ 15.3.1 频率标准	809
□ 13.7.2 集电极开路总线驱动器	727	15.3.2 频率、周期和时间间隔测量	811
□ 13.7.3 举例: 光电倍增器前置放大器	729	□ 15.3.3 电压和阻抗标准与测量	815
13.8 电路示例	731	15.4 限制带宽技术	816
13.8.1 电路集锦	731	15.4.1 信噪比问题	816
13.9 补充题	731	15.4.2 信号平均和多通道计数	817
第 14 章 低功耗设计	733	15.4.3 信号周期化	819
14.1 引言	733	15.4.4 锁定检测	820
14.1.1 低功耗应用	733	15.4.5 脉冲高度分析	823
14.2 电源	735	15.4.6 时间幅度转换器	823
14.2.1 电池类型	735	15.5 频谱分析和傅里叶变换	824
14.2.2 插在墙上的便携式电源	743	15.5.1 频谱分析仪	824
□ 14.2.3 太阳能电池	744	15.5.2 离线频谱分析	826
14.2.4 信号电流	745		
14.3 电源开关和微功耗稳压器	749		
14.3.1 电源开关	749		
14.3.2 微功耗稳压器	751		
14.3.3 参考地	754		