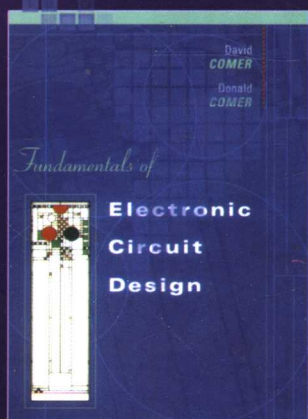


国外电子与通信教材系列

电子电路设计

Fundamentals of Electronic Circuit Design



[美] David Comer 著
Donald Comer

王华奎 马建芬 等译
赵菊敏 张晓琴



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

电子电路设计

Fundamentals of Electronic Circuit Design

[美] David Comer 著
Donald Comer

王华奎 马建芬 赵菊敏 张晓琴 等译

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

内 容 简 介

本书以清晰、直观的文体论述了电子电路设计的技术基础及应用。内容包括基本放大电路及应用、放大器模型和频率特性、半导体二极管和非线性建模、金属氧化物半导体场效应管(MOSFET)放大器、双极型晶体管(BJT)放大器、运算放大器、反馈放大器、大信号电路,并以较大的篇幅介绍了集成电路的设计方法,包括用MOSFET和BJT进行集成电路设计,最后对CMOS逻辑电路做了简要介绍。全书概念清晰、取材新颖、深入浅出、易于理解,各章均配有大量富有特色的例题和习题,并在附录中给出了部分习题的解答。

本书可作为电类本科生教材,也可作为研究生的参考书和工程技术人员的自学用书。

David Comer, Donald Comer: **Fundamentals of Electronic Circuit Design.**

ISBN 0-471-41016-0

Copyright © 2003, John Wiley & Sons Inc. All Rights Reserved.

Authorized translation from the English language edition published by John Wiley & Sons, Inc.

No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of John Wiley & Sons, Inc.

Simplified Chinese translation edition Copyright © 2004 by John Wiley & Sons, Inc. and Publishing House of Electronics Industry.

本书中文简体字翻译版由 John Wiley & Sons 授予电子工业出版社。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。

版权贸易合同登记号 图字: 01-2003-3678

图书在版编目(CIP)数据

电子电路设计 / (美)科默(Comer, D.)等著;王华奎等译. -北京:电子工业出版社, 2004.8
(国外电子与通信教材系列)

书名原文: Fundamentals of Electronic Circuit Design

ISBN 7-5053-9953-5

I. 电... II. ①科... ②王... III. 电子电路-电路设计-教材 IV. TN710.02

中国版本图书馆CIP数据核字(2004)第069575号

责任编辑:谭海平 特约编辑:李玉龙

印 刷:北京兴华印刷厂

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:27.5 字数:704千字

印 次:2004年8月第1次印刷

定 价:43.00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 zltts@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。

吴佑寿

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、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
杨千里 | 北京邮电大学校长、教授、博士生导师
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委员会委员 |
| | 徐安士 | 北京大学教授、博士生导师、电子学系副主任
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委员会委员 |
| | 阮秋琦 | 北方交通大学教授、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、电子工程系主任
教育部电子信息科学与电气信息类基础课程教学指导委员会委员 |
| | 郑宝玉 | 南京邮电学院副院长、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委员会委员 |
| | 徐重阳 | 华中科技大学教授、博士生导师、电子科学与技术系主任
教育部电子信息科学与工程类专业教学指导委员会委员 |
| | 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、教材建设委员会主任 |
| | 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 | 电子工业出版社副社长 |

译 者 序

当前,一个以全球性互联网络为主要载体、以信息高速公路为代表、以微电子技术为核心的信息革命正在世界各地蓬勃兴起。信息革命已对人类社会的发展产生了巨大的影响。作为信息技术的先导和核心,电子电路设计与制作已发生了本质性的变化。从最初的真空管及其电路,经过晶体管及其电路阶段,现已发展成集成电路乃至超大规模集成电路。但是,目前国内电子电路课程的一些教材内容陈旧,课程体系老化,已不适应现代科学技术对人才的要求。

美国布里格姆扬大学 David Comer 和 Donald Comer 教授所著的本书,给人以耳目一新的感觉。本书重点突出,讲解细致精辟,内容编排合理,理论与工程实际结合紧密,反映了近十几年来电子电路设计发展变化的新成就。本书的特点主要有:(1)内容以集成电路为主,适当保留了作为电子电路基础的分立电路的部分内容,对分立元件以 MOSFET 为主做了阐述,重点讨论了各种基本放大电路及其分析方法、放大电路中的反馈、模拟集成电路及其应用等;(2)对电子器件以及各种集成电路内部的工作原理做了适当的压缩,注重电子电路的组成及结构的基本分析方法,突出了电子电路设计原理的阐述,减少了繁琐复杂的数学推导;(3)在电路设计的有关章节中,本书添加了一些集成电路设计的模拟实例,通过使用 Spice 软件的仿真技术,可以大大提高学生理论与实践相结合的能力(目前在国内电子电路课程的教材中,有关 Spice 软件的介绍还不多见);(4)将理论阐述与具体的例题相结合,通过大量丰富的例题和练习题来说明有关电子电路的设计方法。这些例题,在数据计算上并不繁琐,但在形式类别上别具一格,既突出重要概念,又联系实际应用,这就更增加了本书的应用价值。

本书可供大专院校电子、通信、计算机、自动化、电力等专业作为电子技术基础课程的教材,也可供有关科技工作者自学参考。

本书的翻译由王华奎主持,第 1 章至第 4 章由马建芬翻译,第 5 章至第 7 章由赵菊敏翻译,第 8 章至第 10 章由张晓琴翻译,第 11 章至第 14 章及附录由王华奎翻译。参加本书翻译的还有张立毅、康亦佳、杨琨、贾兰芳、李静、王旭鹏等,在此向他们表示感谢。

由于全书篇幅较大,时间仓促,加之译者水平有限,译文中难免有错误和不妥之处,敬请广大读者批评指正。

前 言

最近二十年,由于科学技术的迅猛发展,大学中有关电气工程和电子工程的课程发生了很大的变化。许多教学计划都是通过压缩数字信号处理方面的基础课程来增加计算机工程的系列教程,这就导致了电子电路课时数的减少。某些教学计划甚至安排电气工程专业的学生只学一门电子电路课程。

当今,金属-氧化物-半导体场效应晶体管(MOSFET)已经代替了双极型晶体管(BJT)而成为电子工业的宠儿。尽管BJT仍用于分立电路设计和高速异质结技术,但与用CMOS工艺制造的集成电路相比,体积过大。MOSFET不仅将个人电脑的时速提高到了千兆赫兹,而且广泛用于模拟电路设计。所以不论从事哪个领域的电气工程师都应掌握用MOSFET设计集成电路的方法。

现代研究方法

本书对电子技术的这些发展趋势做了解释,重点讨论MOSFET和BJT,对那些不常使用的器件则很少涉及。电路设计的基本概念在本书占据了一定的篇幅。有关电子设计的课题和内容可安排为6学分小时^①。本书若用于3学分2门课的教学,教师应补充少量的课外材料;若用于4学分1门课的教学,本书内容富余,教师应做适当取舍。

考虑到MOSFET的重要性,在教材内容的安排上,首先介绍MOSFET,然后介绍BJT。另外,在关于集成电路设计的章节中又对MOSFET做了重点阐述。

集成电路的重要性决定了其在初级电子教程中是不能忽略的。现在几乎所有的工业公司都会有机会接触各种半导体厂。为此,本书在第8章、第9章、第10章专门对集成电路设计做了介绍。根据过去所学的课程,虽然学生对电路仿真的基本概念以及分析方法有了大致的了解,但是鉴于电路模拟对集成电路设计的重要性,本书专门在电路设计章节中添加了一些模拟实例,试图从各方面来调动学生的学习兴趣。

本书的组织结构

第1章介绍电子的发展史以及在这个领域做出过重大贡献的杰出人士。通过了解这些内容可以激发同学为这一领域做出贡献的潜力。第2章回顾一些重要的电路分支,以及一些对电路设计比较重要的理论,如戴维南定理、密勒效应。通过学习这部分内容可以使同学们掌握更多的电路和器件。第3章讨论普通放大器模型、放大元件以及频率相关因子。通过讨论这部分内容,为后面介绍的MOSFET和BJT做铺垫。我们希望通过对这些知识的回顾,使学生了解在以后的章节学习放大器设计时,需要懂得哪些知识。

第4章介绍最重要的放大器件即运算放大器。之所以首先介绍它,是因为其代表了一种近似理想化的模型,便于引入建模课题。尽管在以前有关电路分析的课程中已经讨论过运算

^① 1学分小时,即在1学期内每周听课1小时,自习2小时——译者注。

放大器,但是本章增加了运算放大器对放大器频率响应的一些限制。第5章讨论半导体物理学和 pn 结的基本概念,非线性元件建模机理也予以涉及。在本章的结尾还讨论了二极管和击穿二极管的应用。

第6章讨论了简单的 MOSFET 放大器和 MOSFET 的基本工作原理。第7章采用与第6章类似的方法,论述了以 BJT 为放大元件的 BJT 放大器。这两章主要是让学生理解放大器的基本原理,而对这些放大器的详尽构造则涉及较少。

在前面各章的基础上,第8章、第9章、第10章阐述了集成电路的设计方法。第8章着重介绍了分立电路和集成电路的区别、集成电路的基础设计以及 Spice 模拟的方法。第9章介绍了在 MOSFET 集成电路放大设计中常用的单级放大器或基本组件。第10章介绍了与 BJT 集成电路放大器有关的知识。

第11章从集成电路观点出发,论述了差分输入级和运算放大器的设计。其中运算放大器的稳定性和补偿度也在讨论范围之内。第12章的论题是反馈放大器,重点叙述了反馈的一般理论以及反馈放大器的部分组态,并用电压反馈来说明反馈电路的分析方法。

第13章、第14章论述数字电路。第13章首先论述了开关电路的基本概念,接着介绍了分立多谐振荡器,最后分析了集成电路定时器。第14章介绍了组合逻辑电路,如与非门、或非门。在论述完如何用 CMOS 电路实现组合逻辑功能之后重点介绍了与非门。更多先进的数字 CMOS 电路将在今后的数字电路设计课程里进行讨论。

本书的教学特征

为了帮助学生更好地理解电路设计,本书中增加了一些提示性的语句。

- **概述**。位于每章的主标题之后,告诉学生本章研究内容的要点及范围。
- **重要概念**。位于每节的开头,是对本节主要观点的总结,有助于学生将学习的重点集中在这些内容上。
- **范例**。大多数章节在其开头都提供了一个典型电路设计范例作为本章的引子,然后将完成这一设计问题的基本原理贯穿于整个章节中。在该章的末尾,会应用这些原理去求解这个范例。
- **实际考虑**。以整节的形式广泛分布在本书中,将电路设计的理论研究与工程实践相结合。通过这些内容的学习,可使学生更加彻底地了解理论对实践的指导意义。
- **练习题**。在学习新的内容之前,学生可以通过做一些附有答案的练习题来检查自己对所学内容的掌握情况。
- **小结**。放在每章的最后,用于总结本章所论述的重点概念。
- **习题**。出现在各章末尾,冠以各节的标题对这些习题分段。这样做有助于教师选择适宜的习题,同时也有助于学生知悉求解该题需要哪些知识。题目前加“☆”表示该题的难度较大。设计题目前加字母“D”。
- **例题**。本书提供了大量的例题,用于验证前面陈述的理论,以便学生巩固所学的知识。
- **Spice 实例**。全书一直用 Spice 举例,有关集成电路设计的三章,即第8章、第9章、第10章对 Spice 模拟进行了重点论述。

为了说明 Spice 的用法,每个示范电路都附有 netlist 文件和原理图。尽管用图解捕获程序

对基本电路进行模拟非常普遍,但是通晓 netlist 中所使用的符号也很重要。更先进的电路图形设计工具如 LVS 程序,其输出结果也是 netlist 形式。正确使用 netlist 的有关信息,对一个设计者来说是必不可少的。因此对所有要模拟的电路都给出了 netlist 文件。我们试图使用 Web 构建一些附录为本书提供补充内容。登录 www.ee.byu.edu/circuit,可以了解到更多关于 Spice 的知识并可查询一些模拟结果。

尽管本书用到的微分公式并不多,但在学习本书时,还是需要预先掌握这部分数学知识和一些基本电路分析方法,如基尔霍夫节点与回路法、戴维南定理、诺顿定理和一些有关频率响应的概念。本书对一些常用的电子学专业词汇给出了相应的工程解说,为学生学习电路设计术语提供了机会。另外,本书对那些在校期间未曾系统地学习过电子设计的电气专业和计算机专业的大学毕业生也有一定的参考价值。

感谢

作者感谢下列同仁,感谢他们审阅了本书的原稿,他们富有想像的意见使本书臻于完善。

Robert Bernick,加利福尼亚理工学院,波莫纳

Dan Chen,弗吉尼亚理工学院

Yogendra P. Kakad,北卡罗莱纳大学,夏洛特

Robert J. Krueger,威斯康星大学,密尔沃基

Jeff Schowalter,威斯康星大学,麦迪逊

Guru Subramanyam,代顿大学

Trevor J. Thornton,亚利桑那大学

Douglas Tougaw,瓦尔帕莱索大学

Joseph Tront,弗吉尼亚理工学院

很高兴与 Bill Zobrist 编辑一起负责这项工作。他给了我很多鼓励,并对本书的内容和封面提出了很多宝贵的建议。最后感谢 Barbara Heaney 编辑和 Christine Cervoni 编辑以及整个团队,感谢他们所做的出色工作。

David J. Comer

Donald T. Comer

目 录

第 1 章 电子学导论	1
1.1 电子学的意义	1
1.1.1 通信系统	1
1.1.2 计算机及计算器	2
1.1.3 自动控制系统	2
1.1.4 仪器	2
1.1.5 汽车电子学	2
1.1.6 发电及配电	3
1.1.7 雷达	3
1.1.8 集成电路	3
1.2 电子电路的设计	3
1.3 电子学的简要发展概况	4
1.3.1 电子管及收音机	4
1.3.2 电视	7
1.3.3 晶体管及集成电路	8
1.3.4 数字计算机	9
1.4 电子学教学	11
1.4.1 电路仿真	12
1.5 本书的适用范围	12
1.5.1 设计和分析	13
参考文献	13
第 2 章 电子电路的应用	14
2.1 放大器	14
2.1.1 放大器的应用	14
2.1.2 放大器的性能	16
2.2 数字电路	20
2.2.1 数字电路的应用	21
2.2.2 数字电路的性能	21
2.3 电子仪器	24
2.4 调制电路	24
2.5 滤波器	25
2.5.1 滤波器的应用	25

2.5.2 滤波器的性能	25
2.6 电力电子	26
2.7 电子电路设计中戴维南定理的复习	27
2.7.1 电路图	27
2.7.2 戴维南等效定理	28
2.7.3 信号发生器的阻抗	32
2.8 密勒效应	33
2.8.1 输入回路的密勒效应	34
2.8.2 输出回路的密勒效应	36
2.8.3 密勒效应的等效电路	36
2.8.4 密勒效应的重要意义	38
2.9 暂态波	38
小结	40
习题	41
第3章 放大器模型及频率响应	47
3.1 放大元件的一般模型	48
3.1.1 独立电压源与独立电流源	50
3.2 增益元件	51
3.2.1 理想的放大元件	52
3.2.2 实际的放大元件	52
3.2.3 中频模型	53
3.2.4 低频模型	54
3.2.5 高频模型	54
3.3 频率相关系数	55
3.3.1 常系数	57
3.3.2 与频率成正比	57
3.3.3 $(1 + j\frac{f}{f_c})$ 系数	58
3.3.4 $(1 - j\frac{f}{f_c})$ 系数	59
3.3.5 合成曲线	60
3.4 放大器的低频响应	61
3.5 放大器的高频响应	65
3.5.1 单极点电路	65
3.5.2 双极点电路	66
3.5.3 电容的密勒效应	67
3.6 多级放大器	71
小结	74

习题	74
第 4 章 建模及运算放大器	79
4.1 建模	80
4.1.1 什么是建模	80
4.1.2 使用模型的必要性	80
4.1.3 建模时应考虑的因素	81
4.1.4 模型中使用的元件	81
4.2 运算放大器	83
4.2.1 基本的运放	84
4.2.2 非倒向端输入放大器	85
4.2.3 倒向端输入放大器	89
4.2.4 输入及输出电阻	92
4.3 运放电路举例	94
4.4 最大带宽的设计	99
4.4.1 多级迭代放大电路带宽的缩减	100
4.4.2 总带宽的优化	101
小结	103
习题	103
第 5 章 半导体二极管与非线性模型	108
5.1 半导体材料与掺杂	108
5.1.1 增加自由电子或空穴的浓度(掺杂)	110
5.1.2 空间电荷平衡性	111
5.1.3 半导体内部电流	111
5.1.4 带电载流子的复合	112
5.1.5 伴随复合过程的扩散电流	112
5.2 pn 结	114
5.2.1 结的形成	115
5.2.2 耗尽层	116
5.2.3 pn 结电流	118
5.2.4 非理想特性的二极管	121
5.2.5 二极管电容	121
5.3 非线性模型	123
5.3.1 模型化的目的	123
5.3.2 非线性电路的元件	125
5.4 二极管的等效电路	126
5.4.1 预备知识	126
5.4.2 低频率、大信号二极管等效电路	126

5.4.3	低频率、小信号二极管等效电路	128
5.4.4	高频二极管等效电路	131
5.4.5	Spice 中的二极管电路模型	131
5.5	二极管的应用	132
5.5.1	整流电路	132
5.5.2	削波电路与钳位电路	133
5.5.3	集成电路中二极管的绝缘	134
5.5.4	击穿二极管或齐纳二极管	135
小结	138
习题	139
第 6 章	MOSFET	144
6.1	场效应晶体管	145
6.2	MOSFET 的定性描述	146
6.3	MOSFET 特性的数学描述	147
6.3.1	三极管区	148
6.3.2	放大区	152
6.4	MOSFET 的放大功能	153
6.4.1	MOSFET 与常用放大器电路模型	154
6.4.2	小信号(增量)参数	155
6.4.3	MOSFET 的中频增量电路模型	158
6.5	其他类型的放大电路结构	163
6.5.1	源极跟随器	164
6.5.2	共栅极放大器	167
6.6	分离 MOSFET 级的偏置	167
6.6.1	电阻偏置	167
6.7	MOSFET 的高频率等效电路	168
小结	172
习题	173
第 7 章	双极型晶体管	177
7.1	BJT 的特性	178
7.1.1	BJT 的特性	178
7.1.2	共基极电路	180
7.1.3	共射极电路	182
7.1.4	BJT 放大电路的定性描述	184
7.2	BJT 的图形分析法	185
7.3	分立电路的偏置	187
7.3.1	一般偏置问题	187

7.3.2	基偏电流	188
7.3.3	射极偏置	190
7.3.4	稳定性与 β 变化的关系	192
7.4	小信号(线性)模型	194
7.4.1	共基极电路结构	195
7.4.2	共射极电路结构	196
7.4.3	射极跟随器(共集电极电路结构)	200
7.4.4	小信号模型与外接电阻的共用	201
7.4.5	不同电路结构的比较	203
7.5	BJT 的高频特性	205
7.5.1	电抗效应	205
7.5.2	高频等效电路的简化	207
7.5.3	短路电流增益	208
7.5.4	放大电路举例	209
7.5.5	高频电路的应用	211
	小结	214
	习题	215
第 8 章	集成电路设计	220
8.1	集成电路和分立元件电路的比较	220
8.1.1	集成电路的物理结构	220
8.1.2	形状差异	224
8.1.3	成本差异	224
8.1.4	元件差异	225
8.1.5	性能差异	225
8.1.6	差异总结	226
8.2	IC 设计仿真	226
8.2.1	BJT 模型	227
8.2.2	双极 Spice 模型参数	228
8.2.3	MOSFET 模型	231
8.2.4	CMOS Spice 模型参数	233
8.3	BJT 电路设计中的近似	234
第 9 章	用 MOSFET 设计集成电路	236
9.1	MOSFET 镜像电流源	236
9.2	MOSFET 集成电路的放大器结构	239
9.2.1	简单放大电路	240
9.2.2	有源负载电路	245
9.2.3	带有有源负载的源极跟随器	249

9.2.4 共射共基放大器电路的连接	253
9.2.5 有源共射共基放大器	256
小结	259
习题	259
第 10 章 用 BJT 设计集成电路	262
10.1 应用镜像电流源的集成电路偏置	262
10.1.1 简单的镜像电流源	263
10.1.2 减小误差的镜像电流源	265
10.1.3 Wilson 镜像电流源	266
10.2 应用有源负载的高增益级	267
10.2.1 电流源负载	267
10.3 BJT 集成电路的放大器结构	269
10.3.1 镜像电流源负载	269
10.3.2 射极跟随器	272
10.3.3 共射共基放大器	275
小结	280
习题	280
第 11 章 差分级和运算放大器	283
11.1 差分放大器	284
11.1.1 基本差分对	284
11.1.2 BJT 差分对	286
11.1.3 MOSFET 差分对	294
11.2 典型的运算放大器结构和技术指标	297
11.2.1 高增益差分级	298
11.2.2 第二个放大级	300
11.2.3 运算放大器技术指标	303
11.3 实际应用中的运算放大器	306
11.3.1 741 型运算放大器	306
11.3.2 BiCMOS 运算放大器的设计	309
小结	310
习题	310
第 12 章 反馈放大器	317
12.1 理想反馈放大器	318
12.1.1 增益的稳定性	319
12.1.2 信噪比	321
12.1.3 带宽的扩展	323
12.1.4 反馈的类型	324

12.1.5	反馈对阻抗大小的影响	327
12.1.6	交流和直流反馈	330
12.2	实际的电压反馈放大器	330
12.2.1	理想电压放大器的一种结构	330
12.2.2	一个实际反馈网络的使用	331
12.3	反馈系统的稳定	336
12.3.1	稳定性的判断	337
小结		341
习题		341
第 13 章	大信号电路	350
13.1	开关	350
13.1.1	开关电路	351
13.1.2	互补开关	353
13.1.3	半导体开关	353
13.2	在开关电路中使用半导体元件	354
13.2.1	BJT 开关	354
13.2.2	MOSFET 开关	356
13.2.3	半导体二极管	358
13.2.4	开关的例子	359
13.3	多谐振荡器电路	362
13.3.1	单稳态多谐振荡器	363
13.3.2	无稳态多谐振荡器	369
13.4	555 定时器	372
13.4.1	555 单稳态触发器	372
13.4.2	555 无稳态触发器	374
小结		377
习题		378
第 14 章	基本的 CMOS 逻辑电路	384
14.1	CMOS 反相器	384
14.1.1	反相器低频时的特性	384
14.1.2	反相器的图表分析	385
14.1.3	反相器的数学分析	388
14.1.4	反相器的开关速度	391
14.2	CMOS 逻辑门	392
14.2.1	或非门(NOR)	392
14.2.2	与非门(NAND)	395
14.3	逻辑函数的实现	396