

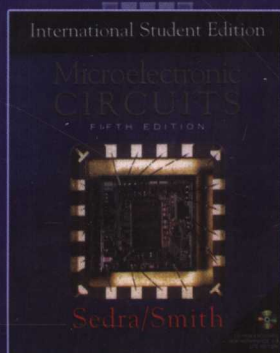
国外电子与通信教材系列

下册

微电子电路

(第五版)

Microelectronic Circuits, Fifth Edition



[加] Adel S. Sedra 著
Kenneth C. Smith

周玲玲 蒋乐天 应忍冬 等译
徐国治 审校



电子工业出版社

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

内 容 简 介

本书是电子和计算机工程专业的一本权威的经典教材。全书分为上下两册。上册主要内容包括: 运算放大器, 二极管, 场效应晶体管, 双极型晶体管, 单级集成电路放大器, 差分和多级放大器, 反馈放大器, 运算放大器和数据变换电路; 下册主要内容包括: 数字CMOS逻辑电路, 寄存器和高级数字电路, 滤波和调谐放大器, 信号发生器和波形整形电路, 输出级和功率放大器。

本书既可作为电子与计算机工程专业的教材, 也适合作为其他相关领域工程师的自学参考书。

Copyright ©2004 by Oxford University Press, Inc.

This translation of Microelectronic Circuits, Fifth Edition, originally published in English in 2004, is published by arrangement with Oxford University Press, Inc., U.S.A.

Simplified Chinese translation edition Copyright © 2006 by Publishing House of Electronics Industry.

本书中文简体版专有出版权由美国 Oxford University Press, Inc. 授予电子工业出版社, 未经许可, 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: 01-2004-2232

图书在版编目 (CIP) 数据

微电子电路. 下册 (第五版) / (加) 塞德雷 (Sedra, A. S.), (加) 史密斯 (Smith, K. C.) 著; 周玲玲等译.
北京: 电子工业出版社, 2006.7

(国外电子与通信教材系列)

书名原文: Microelectronic Circuits, Fifth Edition

ISBN 7-121-02671-6

I. 微... II. ①塞... ②史... ③周... III. 超大规模集成电路 - 教材 IV. TN47

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 051679 号

责任编辑: 周宏敏

印 刷: 北京市天竺颖华印刷厂

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: 22.5 字数: 650 千字

印 次: 2006 年 7 月第 1 次印刷

定 价: 36.00 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、博士生导师
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
	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
	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 国务院学位委员会学科评议组成员
	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副主任委员 中国电子学会常务理事
	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 教育部电子信息科学与工程类专业教学指导分委员会副主任委员
	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兼秘书长，教授级高工 信息产业部通信科技委副主任
	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 教育部高等学校电子电气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

《微电子电路》一书是电子、通信、电气和计算机工程专业电子电路核心课程的教材，同时对于那些想通过自学提高集成电路设计知识的工程师和其他技术人员也非常有用。

本书在详细阐述晶体管器件基本性能的基础上，侧重于模拟和数字电路的分析和设计。本书作者非常注重将新技术引入教材中，无论是晶体管器件和晶体管电路，还是 MOS 晶体管及其电路，它们都被作为首要内容加以阐述，这是因为 MOS 器件及 CMOS 工艺已经成为现代集成电路设计的主流。本书既重视基本电路的性能分析、工程估算，更重视电路的设计，每一章都有关于电路设计的例子，正如作者在前言中所述：“本书的目的是使读者具有分析和设计电子电路的能力，包括模拟电路和数字电路、分立元件电路和集成电路。”

本书语言浅显，通俗易懂，对基本概念的阐述思路清晰，即使一些比较深奥的概念，作者也能娓娓道来，在表述基本概念的同时，还结合实际电路的设计，使得读者对基本概念的理解不仅仅停留在理论层面上，还具有了感性的认识。由于现代电路设计已经离不开计算机的帮助，作为电路设计工程师，掌握电路分析和设计用的计算机辅助工具已成必然，本书在这方面同样做得很出色，在每一章的最后都安排了 PSpice 仿真实例作为结束，体现了作者长期以来在电路分析和设计方面的经验积累。

本书的另一个特点是例题和习题非常丰富，通过例题可以加深对基本概念的理解，而大量的练习和习题对读者检验基本概念的掌握程度、加深基本概念的理解、牢记基本概念的要点都有积极的帮助作用。作者在教材编写方面具有丰富的经验，所挑选的例题以及大多数习题和练习都基于实际电路和实际电路设计中的应用，对读者而言，在解题的同时，也学会了如何解决实际的电路设计问题。

本书的前言、第 1 章至第 5 章主要由蒋乐天翻译；第 6 章和第 11 章由华颖翻译；第 7 章由俞子丰翻译；第 8 章由张骋元翻译；第 9 章、第 12 章、第 13 章、第 14 章和附录由周玲玲翻译，第 10 章和 1.7 节、4.10 节、5.10 节、9.7 节、9.8 节、9.9 节由应忍冬翻译；周玲玲对全书做了统一校订，最后由徐国治教授审阅了全书。

由于译者水平有限，书中难免有不妥和错误之处，敬请读者给予批评和指正。

前言

《微电子电路》(第五版)是电气工程和计算机工程专业电子电路的核心课程教材,同时对于那些想通过自学掌握更多知识的工程师和其他技术人员也非常有用。

同前四版一样,本书的目的是使读者掌握分析和设计电子电路(包括模拟电路和数字电路,分立元件电路和集成电路)的能力。在涉及集成电路的应用时,重点放在晶体管电路的设计上。这是因为我们认为即使大多数读者不从事 IC 设计,但掌握一些 IC 芯片的知识将有助于合理和创造性地应用这些芯片。此外,由于 VLSI 技术和设计方法学的进步,越来越多的工程师可以接触到 IC 设计本身。

预修课程

学习本书内容的预修课程是电路分析。作为回顾,本书的附录中介绍了一些线性电路知识。具体而言,附录 B 是有关二端口网络参数的;附录 C 是关于一些有用的网络定理的;附录 D 总结了单时间常数电路;附录 E 讲解了 s 域分析。学习本书不需要具备很深入的电子物理知识,所有要讲述的器件的物理知识在书中均有介绍,附录 A 还对 IC 制造工艺做了简单描述。

本版新增内容

尽管保留了前四版的教学方法,然而第五版在组织和内容上还是做了一些修改。

1. 各章的组织结构如下:重要的必须涉及的内容放在前面,比较专业的内容放在后面。这可以使采用本书的教和学有相当的灵活性。
2. 对第 4 章和第 5 章进行了重写和更新,而且这两章内容相互之间完全独立。把有关 MOSFET 的一章放在前面完全是因为 MOSFET 现在在很多领域都是最重要的电子器件。但是如果需要,也可以将有关 BJT 的一章放在前面。此外,这两章的内容具有相同的结构,因此第二种器件的教和学会更加简单和快捷。
3. 为了使第一门课程更完整,第 4 章和第 5 章都包含了放大器和数字逻辑电路的内容。而且也包括了基本的共源(共发射极)放大器的频率响应内容。这对于有可能不选修第二门电子学课程的学生来说非常重要。
4. 增加了一章新内容,即集成电路(IC)放大器(第 6 章)。在这一章中,首先对 MOSFET 和 BJT 进行了全面的比较,给出了利用现代亚微米制造工艺得到的器件的典型参数值,并在例题、练习和章后习题中使用了这些参数。由于各种放大器组态都包含它的频率响应,这使得放大器频率响应的学习更加有趣,在某种程度上也更加简单。
5. 第 7 章(差分放大器和多级放大器)的内容也是重写的,该章最先给出的是 MOSFET 差分对,并对例题、练习和习题进行了扩展和更新,采用了反映现代亚微米技术的器件的参数值。
6. 第五版的重点是 MOSFET 电路。

7. 为了给更多的新内容留出篇幅,第五版去掉了一些已经不太流行的内容(如 JFET 和 TTL)和非常专业化的内容(如砷化镓器件和电路)。但是,这些内容可以在本书附带的光盘和网站上得到。
8. 为有助于读者学习和参考,第五版增加了许多总结性的表格。
9. 更新了练习、例题和章后习题,并且增加了数量和种类。
10. 重写了关于 SPICE 的内容,而且 SPICE 实例现在使用原理图输入。为了能够进一步进行仿真实验,在光盘和网站上提供了所有 SPICE 实例的相关文件。

光盘和网站

第五版(上册)附光盘一张,其中包含许多有用的补充材料,希望能够丰富读者学习的经历。具体内容包括:(1) OrCAD PSpice 9.2 学生版;(2) 书中所有 SPICE 例题的输入文件;(3) 链接本书网站,可以访问本书中每个插图的 PowerPoint 幻灯片,学生可以打印出来并带到课堂上以便于记笔记;(4) 书中未包含的一些很专业的主题,包括: JFET、GaAs 器件和电路以及 TTL 电路。

本书有一个对应的网站(www.sedrasmith.org),其内容更新较快以求能够反映该领域的最新发展。主要包括所有 PSpice 实例的 SPICE 模型和文件,与感兴趣的业界和学术界网站的链接,以及与作者交流的信息中心。此外还包含一个与牛津大学出版社高等教育组的链接,从而使教师们可以得到完整的文本材料。

强调设计

我们认为教好电路设计的最好方法是指出在选择电路结构和为特定结构选择元件值时应该有各种折中或者权衡的考虑。第五版通过增加更多的设计实例、练习和章后习题来着重强调设计内容。那些关于“基于设计”的练习和章后习题前面都用 D 来表示。此外,本书采用了最有用的设计辅助工具 SPICE。

练习、习题和附加的有解答的习题

第五版共有 450 余个练习。每个练习的下面都给出了答案,学生可以根据这些练习检查是否理解了所学的内容。求解这些练习可以使读者了解对所学内容的掌握和理解程度。此外,第五版还给出了 1370 多道习题,其中大约三分之一是本版新增的习题。这些习题是针对各章的关键问题的,其难易程度用加星号的方法来表示:难题用一个星号(*)标注,更难的习题用两个星号标注(**),很难(和/或耗时)的习题用三个星号标注(***)。但是我们必须承认这样的分类并不准确,因为我们的分类无疑在某种程度上取决于我们的思维(或情绪)。附录 H 中大约包含一半习题的答案。所有练习和习题的完整解答在教师手册中提供,采用本书的教师可以从出版商那里获得教师手册。

与前面四个版本一样,第五版中包含了许多例题。这些例题以及大多数习题和练习都基于实际电路和实际电路设计中碰到的应用。第五版仍然在许多例子的插图使用数字来标注解答步骤,希望此举能够增加课堂教学的互动性。

使用早期版本的学生曾多次提出需要一本习题解答。为了满足这个要求,第五版提供了一本有解答的关于习题的书(可参见后面关于辅导书的介绍)。

第五版内容概要

第 1 章简单介绍电子学的基本概念。其中介绍了信号、信号频谱以及信号的模拟形式和数字形式。放大器作为模块电路构件来介绍,并且分析了不同类型的放大器及其模型。本章根据电压传输特性定义了数字电路的基本单元——数字逻辑反相器,讨论了利用电压和电流开关得到的反相器的不同实现方法。此外,本章还给出了本书采用的术语和符号的含义。

接下来的四章主要讲解电子器件和基本电路。第 2 章讨论运算放大器及其端口特性、简单应用和限制条件。我们比较早地把运算放大器作为模块电路来讨论是因为它比较容易处理,学生可以用运算放大器做实验,通过完成一些重要的应用获得一种成就感。我们发现这种方法会极大地激发学生的兴趣。但是,我们也要指出,本章的部分内容或者全部内容都可以暂时跳过,留待后面再学习(例如,与第 7 章、第 8 章和/或第 9 章相结合),这样做不会影响内容的连续性。

第 3 章介绍最基本的电子器件—— pn 结二极管。内容包括二极管端口特性、各种层次的模型和基本电路应用。为了理解二极管的工作原理(同样也是 MOSFET 和 BJT 的工作原理),第五版对半导体和 pn 结做了简明而重点突出的介绍。这部分内容放在本章的结尾处(见 3.7 节),在电子物理学中已经学过相关内容的读者可以部分或全部地跳过该内容。

第 4 章和第 5 章分别讨论两类主要的电子器件——MOS 场效应管(MOSFET)和双极型晶体管(BJT)。这两章具有相同的结构并且互相独立,先学习哪一章都可以。这两章都以器件结构和器件的工作原理开始,然后引出端口特性的描述。通过大量的晶体管直流电路的例子使读者能够比较深入地熟悉作为电路元件的晶体管的运行特性。接下来介绍基本共源(共发射极)电路的大信号工作性能,分析器件作为线性放大器的工作区以及作为开关的工作区。不同区域需要对晶体管进行相应偏置来得到,因此引出了偏置方法的内容。此处的偏置方法主要针对分立元件电路,关于 IC 偏置方法的介绍见第 6 章。接下来,介绍小信号工作原理以及小信号模型的推导和分立元件放大器的基本组态。由于晶体管内部电容对高频性能的影响,从而引出了晶体管的高频等效电路模型,该模型可用来确定共源(共发射极)放大器的高频响应,同时也介绍了由耦合电容和旁路电容引起的低频响应。此后介绍了基本数字逻辑反相器电路。这两章都以 SPICE 中使用的晶体管模型和使用 PSpice 的电路仿真实例作为结束。应该指出,第 4 章和第 5 章是电子学第一门课程的基本内容。

第 6 章到第 10 章介绍模拟和数字集成电路。第 6 章首先对 MOSFET 和 BJT 的特性进行了全面描述和比较,并在比较时利用了现代制造工艺技术得到的器件的典型参数值。接下来有条理地介绍了 IC 放大器设计中采用的偏置方法(见 6.3 节)、放大器高频响应的背景知识(见 6.4 节)和单级 IC 放大器的不同组态。对于每一种情况,首先给出 MOS 电路。一些晶体管对组态(如 Cascode 电路和达林顿电路)通常也被作为单级电路来对待。每一节都包含特定放大器组态的高频响应的内容。我们相信将高频响应的学习嵌入到每一节中比传统的将所有频率响应的内容放到后面要好。同其他各章一样,我们把更专业的内容放在本章后半部分讲解,其中包括高性能的镜像电流源和电流源的概念,这样使读者在第一遍阅读时可以跳过其中一些内容。本章为模拟 IC 设计的深层次的学习奠定了很好的基础。

第 7 章介绍 IC 放大器,其中重点强调两个主要的放大器——差分放大器和多级放大器。这一章也首先讲解 MOSFET 差分对。频率响应则是在需要的地方讨论,包括在多级放大器的两个例子中。

第 8 章介绍重要的反馈内容。给出了负反馈的实际电路应用,此外还详细讨论了反馈放大器

的稳定性问题及频率补偿的内容。

第9章集成了前面三章介绍的模拟IC设计内容，并将它应用于两个主要的模拟IC功能块的分析和设计中，这两个模块是运算放大器和数据转换电路。本章既分析了CMOS运算放大器，也分析了双极型运算放大器。其中数据转换电路的内容为第10章数字CMOS逻辑电路的学习架设了桥梁。

第10章的内容建立在4.10节介绍的CMOS逻辑电路的基础之上，讲解了包括静态和动态CMOS逻辑电路的一些精选内容，这些内容使第二部分的模拟和数字IC的学习更加完整。

第11章介绍数字电路。具体而言，讲解存储器以及相关电路，如锁存器、触发器以及单稳态、双稳态和多谐振荡器。此外，还讲解了两个比较专业但却很重要的数字电路技术：射极耦合逻辑（ECL）和BiCMOS。第10章和第11章与前面介绍的关于数字电路的内容可以为读者学习后续数字IC设计和VLSI电路课程提供很好的准备。

接下来的两章（即第12章和第13章）是基于应用和系统的内容。第12章主要讲解模拟滤波器的设计和调谐放大器。第13章介绍正弦波振荡器、波形发生器以及其他非线性信号处理电路。

本书最后一章（即第14章）讲解不同类型的放大器输出级电路。这一章将介绍与散热有关的设计并给出了许多IC功率放大器的实例。

8个附录中包含了许多有用的背景知识和补充材料。我们希望读者能够特别关注附录A，因为该附录概括了包括IC版图设计在内的IC制造工艺的重要内容。

课程组织

本书的内容可以用于两个学期课程的教学（每个学期40~50课时）。本书的组织为课程设计提供了很大的灵活性。下面我们给出了两门课程安排的建议。

第一门课程

第一门课程显然要包括第1章到第5章的内容。但是，如果时间有限，可以将下面的内容部分或全部推迟到第二门课程中讲解：1.6节，1.7节，2.6节，2.7节，2.8节，3.6节，3.8节，4.8节，4.9节，4.10节，4.11节，5.8节，5.9节和5.10节；此外，也可以在这门课程中去掉第2章。可以把精力主要集中在MOSFET的内容（第4章）上，然后只介绍部分（或较快地介绍）BJT的内容（第5章）；还可以介绍第5章的全部内容和第4章的一部分内容，但是我们不推荐这样做。另外一种选择是略去1.7节、4.10节和5.10节，整个课程全部作为模拟电路来介绍；同样，第一门课程也可以基于数字内容讲解，其中包括以下内容：1.1节，1.2节，1.3节，1.4节，1.7节，1.8节，3.1节，3.2节，3.3节，3.4节，3.7节，4.1节，4.2节，4.3节，4.4节，4.10节，4.12节，5.1节，5.2节，5.3节，5.4节，5.10节，5.11节，第10章的全部和第11章中精选出来的内容。此外，如果时间允许，介绍一下第2章中关于运算放大器的内容也非常有用。

第二门课程

第二门课程最好从第6章开始，其中，6.2节可以作为MOSFET和BJT特性的回顾。理想情况下，第二门课程应包括第6章到第10章（当然，假设第一门课程包括第1章到第5章）。如果时间较短，那么第10章可以推迟到后续的关于数字电路的课程中讲解或者去掉第6章到第9章中的某些节。一种选择是不重点介绍双极型电路，因此可以略去第6章、第7章和第9章中双极型的部分内容或全部内容。另一种选择是减少反馈的内容（见第8章）。此外，第二门课程中也可以略去数据转换电路的内容。对于第9章，可能只需要包含CMOS运算放大器的内容。还有一

种可能是将第 6 章到第 10 章的部分内容用第 11 章到第 14 章中的精选内容来代替。例如, 如果第二门课程全部都是讲模拟内容的, 那么就可以用第 13 章到第 14 章中的一些内容来替换第 10 章。

辅导材料

本书还提供了一套完整的辅导材料对课程学习提供支持。

教师用辅助材料

教师手册 (“*Instructor's Manual with Transparency Masters*”) 给出了每章所有练习及习题的解答, 此外还包含 200 张幻灯片, 这些幻灯片是课上经常使用的图片的副本。

一套透明幻灯片, 包含本书最重要的 200 张图片。

一张 PowerPoint 光盘, 其中包含了本书中所有插图的幻灯片以及对应的说明。

学生和教师用辅助材料

每本书附带的光盘包含所有含有 SPICE 输入文件的正文内容、一个学生版的 OrCAD PSpice 9.2 Lite 版、一个链接到本书插图和补充内容网站的网址。

由 Kenneth C. Smith (KC) 编著的 *Laboratory Explorations for Microelectronic Circuits, 5th edition* 包含本书中一些重要内容的实验和指导。

由 Kenneth C. Smith (KC) 编写的 *KC's Problems and Solutions for Microelectronic Circuits, 5th edition* 包含数百道附加习题以及完整解答, 可以满足学生进一步练习之需。

由 McGill 大学的 Gordon Roberts 和 Adel Sedra 编著的 *SPICE, 2nd edition* 提供了 SPICE 的详细内容以及在本书电路分析和设计中的应用。

致谢

本书第五版中所做的许多修改是在得到使用第四版的教师的反馈信息后进行的。我们非常感谢那些花时间写信给我们的人。此外, 以下的评阅人对第四版提出了许多意见和修改建议, 这些都已经体现在修订当中, 在此向他们表达最真诚的谢意。他们是: Maurice Aburdene (Bucknell 大学), Patrick L. Chapman (伊利诺大学 Urbana-Champaign 分校), Artice Davis (圣何塞州立大学), Paul M. Furth (新墨西哥州立大学), Roobik Gharabagi (圣路易斯大学), Reza Hashemian (北伊利诺大学), Ward J. Helms (华盛顿大学), Hsiung Hsu (俄亥俄州立大学), Marian Kazimierczuk (Wright 州立大学), Roger King (Toledo 大学), Robert J. Krueger (Wisconsin-Milwaukee 大学), Un-Ku Moon (Oregon 州立大学), John A. Ringo (华盛顿州立大学), Zvi S. Roth (佛罗里达 Atlantic 大学), Mulukutla Sarma (东北大学), John Scalzo (路易斯安纳州立大学), Ali Sheikholeslami (多伦多大学), Pierre Schmidt (佛罗里达国际大学), Charles Sullivan (达特默思学院), Gregory M. Wierzbna (密西根州立大学), 以及 Alex Zaslavsky (布朗大学)。

我们也要感谢许多同事和朋友, 他们提出了很多有用的建议, 他们是: Anthony Chan-Carusone (多伦多大学), Roman Genov (多伦多大学), David Johns (多伦多大学), Ken Martin (多伦多大学), Wai-Tung Ng (多伦多大学), Khoman Phang (多伦多大学), Gordon Roberts (McGill 大学), Ali Sheikholeslami (多伦多大学)。

此外还要感谢前四版的评阅人, 他们是: Michael Bartz (Memphis 大学); Roy H. Cornely (新泽西理工学院), Dale L. Critchlow (佛蒙特大学), Steven de Haas (加利福尼亚州立大学萨克拉门

托分校), Eby G. Friedman (Rochester 大学), Rhett T. George (Jr., Duke 大学), Richard Hornsey (York 大学), Robert Irvine (加利福尼亚州立大学 Pomona 分校), John Khoury (哥伦比亚大学), Steve Jantzi (Broadcom 公司), Jacob B. Khurgin (Johns Hopkins 大学), Joy Laskar (乔治亚理工大学), David Luke (New Brunswick 大学), Bahram Nabet (Drexel 大学), Dipankar Nagchoudhuri (印度理工学院), David Naim [模拟器件公司 (AD 公司)], Joseph H. Nevin (辛辛那提大学), Rabin Raut (Concordia 大学), Richard Schreier [模拟器件公司 (AD 公司)], Dipankar Sengupta (皇家墨尔本理工学院), Michael L. Simpson (Tennessee 大学), Karl A. Spuhl (华盛顿大学), Daniel van der Weide (Delaware 大学)。

许多人都对本版做出了很大贡献。多伦多大学的 Anas Hamoui 在本版的组织和内容的成形上发挥了重要作用, 此外他还编写了 SPICE 几节。多伦多大学的 Olivier Trescases 进行了 SPICE 仿真工作。AD 公司的 Richard Schreier 帮我们确定了封面照片^①。多伦多大学的 Wai-Tung Ng 重写了附录 A。McGill 大学的 Gordon Roberts 允许我们使用 Roberts 和 Sedra 编写的 SPICE 书中的一些例子。Mandana Amiri, Karen Kozma, Shahriar Mirabbasi, Roberto Rosales, Jim Somers 和 John Wilson 在准备教师和学生用辅助材料方面都给予了很大帮助。Jennifer Rodrigues 输入了所有的修订内容。Laura Fujino 帮助我们准备了索引内容从而使我们能够把精力集中于正文的写作。对所有这些朋友和同事, 我们在此一并表示感谢。

我们还要感谢 Cadence Design Systems 公司, 感谢他们允许牛津大学出版社随本书附带 OrCad 系列 9.2 Lite 版软件。感谢 AD 公司的 John Geen 提供了封面照片以及感谢 Tom McElwee (TWM 研究中心)。

牛津大学出版社的许多工作人员对第五版和各种辅导书的出版做出了很多贡献。我们特别要感谢 Barbara Wasserman, Liza Murphy, Mary Beth Jarrad, Mac Hawkins, Barbara Brown, Cathleen Bennett, Celeste Alexander, Chris Critelli, Eve Siegel, Mary Hopkins, Jeanne Ambrosio, Trent Haywood, Jennifer Slomack, Ned Escobar, Jim Brooks, Debbie Agee, Sylvia Parrish, Lee Rozakis, Kathleen Kelly, Sheridan Orr 和 Kerry Cahill。

我们特别要向牛津大学出版社的 Chris Rogers 表达我们的感谢。我们也要感谢市场和销售主任 Scott Burns 提出的许多创造性想法。我们还从以前的编辑和朋友 Peter Gordon 处得到了许多支持和意见。Peter 离开后, 该项目就由我们现在的编辑 Danielle Christensen 主持。编辑部、设计和生产部主任 Elyse Dubin 为确保本书能够在设计和生产的不同阶段得到最大可能的关注发挥了关键作用。

能够使该书及时出版以及达到如此好的质量的究竟是谁呢? 她就是我们的主编 Karen Shapiro, 我们在这里对她深表谢意。我们同样要感谢我们的家人, 感谢他们的支持和理解。

Adel S. Sedra
Kenneth C. Smith

^① 指的是英文原书的封面照片。——编者注

目 录

第 10 章 数字 CMOS 逻辑电路	1
引言	1
10.1 数字电路设计：概述	1
10.1.1 数字 IC 技术和逻辑电路系列	1
10.1.2 逻辑电路特性	3
10.1.3 数字系统的设计风格	5
10.1.4 设计抽象与计算机辅助设计	5
10.2 CMOS 反相器设计与性能分析	6
10.2.1 电路结构	6
10.2.2 静态工作	6
10.2.3 动态工作	8
10.2.4 动态功耗	11
10.3 CMOS 逻辑门电路	12
10.3.1 基本结构	12
10.3.2 二输入或非门	15
10.3.3 二输入与非门	15
10.3.4 复杂门	15
10.3.5 从 PDN 得到 PUN (或从 PUN 得到 PDN)	16
10.3.6 异或函数	17
10.3.7 设计方法总结	18
10.3.8 确定晶体管尺寸	18
10.3.9 扇入与扇出对传播延迟的影响	21
10.4 伪 NMOS 逻辑电路	21
10.4.1 伪 NMOS 反相器	21
10.4.2 静态特性	22
10.4.3 VTC 的推导	23
10.4.4 动态工作特性	25
10.4.5 设计	26
10.4.6 门电路	26
10.4.7 最后的说明	27
10.5 传输晶体管逻辑电路	28
10.5.1 基本设计要求	29
10.5.2 作为开关工作的 NMOS 晶体管	30

10.5.3 作为开关的 CMOS 传输门	33
10.5.4 传输晶体管逻辑电路举例	35
10.5.5 最后的说明	36
10.6 动态逻辑电路	36
10.6.1 基本原理	37
10.6.2 非理想效应	38
10.6.3 多米诺 CMOS 逻辑	40
10.6.4 最后的说明	41
10.7 SPICE 仿真实例	41
小结	44
习题	45
第 11 章 存储器与高级数字电路	53
引言	53
11.1 锁存器与触发器	53
11.1.1 锁存器	53
11.1.2 SR 触发器	54
11.1.3 SR 触发器的 CMOS 实现	55
11.1.4 时钟 SR 触发器的简单 CMOS 实现	57
11.1.5 D 触发器电路	58
11.2 多谐振荡器电路	60
11.2.1 CMOS 单稳态电路	60
11.2.2 非稳态电路	63
11.2.3 环形振荡器	64
11.3 半导体存储器的类型与结构	65
11.3.1 存储器芯片构架	66
11.3.2 存储器芯片时序	67
11.4 随机存储器 (RAM) 单元	68
11.4.1 静态存储器单元	68
11.4.2 动态存储器单元	72
11.5 读放大器与地址译码器	74
11.5.1 读放大器	74
11.5.2 行地址译码器	78
11.5.3 列地址译码器	80
11.6 只读存储器 (ROM)	81
11.6.1 MOS 只读存储器 (ROM)	81
11.6.2 掩膜可编程 ROM	83
11.6.3 可编程 ROM (PROM 和 EPROM)	83
11.7 射极耦合逻辑 (ECL)	85
11.7.1 基本原理	86

11.7.2	ECL 系列	86
11.7.3	基本门电路	87
11.7.4	电压传输特性	89
11.7.5	扇出	93
11.7.6	工作速度与信号传输速度	93
11.7.7	功率损耗	94
11.7.8	温度效应	94
11.7.9	线或 (wired-OR) 能力	96
11.7.10	最后的说明	96
11.8	BiCMOS 数字电路	97
11.8.1	BiCMOS 反相器	97
11.8.2	动态特性	99
11.8.3	BiCMOS 逻辑门	99
11.9	SPICE 仿真实例	100
小结		105
习题		106
第 12 章	滤波器与调谐放大器	114
引言		114
12.1	滤波器传输、分类和规范	114
12.1.1	滤波器传输	114
12.1.2	滤波器分类	115
12.1.3	滤波器规范	115
12.2	滤波器传输函数	117
12.3	巴特沃斯与切比雪夫滤波器	120
12.3.1	巴特沃斯滤波器	120
12.3.2	切比雪夫滤波器	124
12.4	一阶和二阶滤波器函数	126
12.4.1	一阶滤波器	127
12.4.2	二阶滤波器函数	127
12.5	二阶 LCR 谐振器	134
12.5.1	谐振器的极点	134
12.5.2	传输零点的实现	135
12.5.3	低通传输函数的实现	135
12.5.4	高通传输函数的实现	136
12.5.5	带通传输函数的实现	137
12.5.6	陷波函数的实现	137
12.5.7	全通函数的实现	138
12.6	基于电感替代的二阶有源滤波器	139
12.6.1	Antoniou 电感模拟电路	139

12.6.2	运算放大器 RC 谐振器	140
12.6.3	各种类型滤波器的实现	141
12.6.4	全通滤波器电路	145
12.7	基于双积分环结构的二阶有源滤波器	146
12.7.1	双积分环双二次函数的推导	146
12.7.2	电路实现	147
12.7.3	另一种双积分环双二次电路	149
12.7.4	最后的说明	150
12.8	带单级放大的双二次有源滤波器	151
12.8.1	反馈环的合成	151
12.8.2	输入信号的接入	153
12.8.3	等效反馈环路的产生	154
12.9	灵敏度	157
12.9.1	最后的说明	159
12.10	开关电容滤波器	159
12.10.1	基本原理	159
12.10.2	实际电路	161
12.10.3	最后的说明	164
12.11	调谐放大器	164
12.11.1	基本原理	164
12.11.2	电感损耗	166
12.11.3	变压器的使用	167
12.11.4	多级调谐放大器	168
12.11.5	cascade 和 CC-CB 级联电路	168
12.11.6	同步调谐	169
12.11.7	参差调谐	170
12.12	SPICE 仿真实例	173
小结		177
习题		178
第 13 章	信号发生器与波形整形电路	186
引言		186
13.1	正弦波振荡器的基本原理	186
13.1.1	振荡器反馈环	186
13.1.2	振荡判定条件	187
13.1.3	非线性幅度控制	188
13.1.4	实现幅度控制的通用限幅器电路	189
13.2	运算放大器 RC 振荡器电路	191
13.2.1	文氏电桥振荡器	191
13.2.2	移相振荡器	193

13.2.3	正交振荡器	194
13.2.4	有源滤波调谐振荡器	195
13.2.5	最后的说明	196
13.3	LC 振荡器与晶体振荡器	197
13.3.1	LC 调谐振荡器	197
13.3.2	晶体振荡器	199
13.4	双稳态多谐振荡器	201
13.4.1	反馈环	201
13.4.2	双稳态电路的传输特性	202
13.4.3	双稳态电路的触发	204
13.4.4	作为存储器元件的双稳态电路	204
13.4.5	具有同相传输特性的双稳态电路	204
13.4.6	作为比较器应用的双稳态电路	205
13.4.7	更精确的输出电平	207
13.5	基于非稳态多谐振荡器实现的方波和三角波发生器	207
13.5.1	非稳态多谐振荡器的工作原理	208
13.5.2	三角波信号的产生	210
13.6	标准脉冲发生器——单稳态多谐振荡器	211
13.7	集成电路计时器	213
13.7.1	555 电路	213
13.7.2	采用 555 计时器实现的单稳态多谐振荡器	214
13.7.3	采用 555 芯片的非稳态多谐振荡器	215
13.8	非线性波形整形电路	217
13.8.1	断点法	218
13.8.2	非线性放大法	219
13.9	精密整流电路	220
13.9.1	精密半波整流器——超二极管	221
13.9.2	另一种电路	221
13.9.3	应用——交流电压测量	222
13.9.4	精密全波整流器	223
13.9.5	精密桥式整流器在仪表中的应用	225
13.9.6	精密峰值检波器	225
13.9.7	带缓冲的精密检波器	226
13.9.8	精密钳位电路	226
13.10	SPICE 仿真实例	227
小结		231
习题		231
第 14 章	输出级与功率放大器	241
引言		241