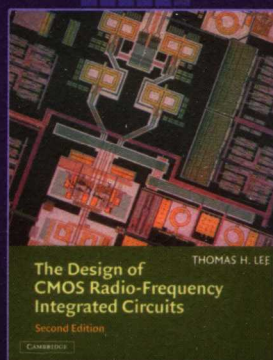


教育部 高等教育司 推荐  
国外优秀信息科学与技术系列教学用书

# CMOS (第二版)

# 射频集成电路设计

The Design of  
CMOS Radio-Frequency Integrated Circuits  
Second Edition



[美] Thomas H. Lee 著

余志平 周润德 等译



电子工业出版社  
Publishing House of Electronics Industry  
<http://www.phei.com.cn>

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

# CMOS 射频集成电路设计

( 第二版 )

The Design of CMOS Radio-Frequency  
Integrated Circuits

Second Edition

[ 美 ] Thomas H. Lee 著

余志平 周润德 等译

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 · BEIJING

## 内 容 简 介

本书是《CMOS射频集成电路设计》的第二版,这本被誉为射频集成电路设计指南的书全面深入地介绍了设计千兆赫(GHz) CMOS射频集成电路的细节。本书首先简要介绍了无线电发展史和无线系统原理;在回顾集成电路元件特性、MOS器件物理和模型、RLC串并联和其他振荡网络以及分布式系统特点的基础上,介绍了史密斯圆图、S参数和带宽估计技术;着重说明了现代高频宽带放大器的设计方法,详细讨论了关键的射频电路模块,包括低噪声放大器(LNA)、基准电压源、混频器、射频功率放大器、振荡器和频率合成器。对于射频集成电路中存在的各类噪声及噪声特性(包括振荡电路中的相位噪声)进行了深入的探讨。本书最后考察了收发器的总体结构并展望了射频电路未来发展的前景。书中包括许多非常实用的电路图和其他插图,并附有许多具有启发性的习题,因此是高年级本科生和研究生学习有关射频电子学方面课程的理想教科书,对于从事射频集成电路设计或其他领域实际工作的工程技术人员也是一本非常有益的参考书。

Authorized translation from the English language edition published by The Press Syndicate of the University of Cambridge, England. Copyright © Cambridge University Press 2004.

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 © 2006.

本书中文简体专有翻译出版权由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:01-2004-2239

### 图书在版编目(CIP)数据

CMOS射频集成电路设计:第2版/(美)李(Lee, T. H.)著;余志平等译。

北京:电子工业出版社,2006.11

(国外电子与通信教材系列)

书名原文:The Design of CMOS Radio-Frequency Integrated Circuits, Second Edition

ISBN 7-121-03280-5

I. C... II. ①李... ②余... III. 射频电路:集成电路-电路设计-教材 IV. TN432.02

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第120765号

责任编辑:周宏敏

印 刷:北京牛山世兴印刷厂  
装 订:

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:38.5 字数:1061千字

印 次:2006年11月第1次印刷

定 价:59.00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。联系电话:(010)68279077。邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zlt@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长	
范平志	西南交通大学教授、博士生导师、信息科学与技术学院院长	

# 译者序

Thomas H. Lee 的《CMOS 射频集成电路设计》一书在 1998 年由英国剑桥大学出版社首版至 2004 年第二版发行期间, CMOS 射频集成电路的设计技术已从开发实验室原型和单个电路模块发展成为能设计商用化的实现单片无线通信与无线局域网 (WLAN) 的射频前端电路。例如, 德国 Infineon (英飞凌公司) 早在 2003 年就实现了以零中频变频接收器通路和直接调制发送器通路为特征的单片 RF 收发器。2006 年初发表在国际固态电路年会 (ISSCC) 的文章已报道进一步实现了片上接收滤波器的集成。可见射频 CMOS 集成电路的设计已经实现并正在继续完善从电路到系统的过渡。

本书第二版正是为顺应这一技术发展的趋势而增订的。相对于第一版来说, 篇幅增加了三分之一 (英文版页数近 800 页)。第 2 章“无线通信原理概述”完全是新的; 第 19 章“系统结构”的内容除了少部分涵盖第一版第 18 章 (相同标题) 的内容外又增加了大量系统级的描述及两个芯片设计的实例 [即全球定位系统 (GPS), 以及 IEEE 802.11a 直接变频无线局域网收发器]。这一前一后的两章对帮助读者从无线通信的角度学习后续具体的射频电路分析方法以及从系统的高度来总结、贯通已掌握的知识极为有益。这在很大程度上也弥补了第一版对无线通信对系统级描述不充分的遗憾。

除保持了第一版流畅的写作风格外, Thomas H. Lee 在第二版的新添部分中更加注重概念和直觉的描述, 使抽象、烦琐的系统标准介绍得十分自然, 容易理解或记忆, 这也为进一步学习通信电路与系统知识打下了良好的基础。作为教科书, 这的确是一本值得推荐的大学研究生或高年级电子、信息工程领域本科生的优秀教材。

译者已在清华大学的研究生课程中连续六年使用该书 (英文原版第一、二版及中译本) 讲授 CMOS 射频集成电路的分析与设计, 并另外开设一门专门面向流片的射频电路模块的设计课程。本书对电路的工作原理介绍得十分详尽与深入, 虽有一些细节、公式上的错误, 但这已在中译本中尽可能地得到纠正。

第二版的翻译工作是在第一版中译版的基础上加以补充、修订的, 有多位研究生与教师参与了此项工作。虽经认真校对, 但仍难免在最后译稿中存在缺陷和错误, 望读者指正谅解。所幸电子工业出版社出版的第二版英文原版 [《CMOS 射频集成电路设计》(第二版) (英文版), 2005 年] 是原著的忠实影印本, 读者如能同时参考该影印本则会受益更多。译者感谢美国 UC Berkeley 大学的博士研究生周晔, 清华大学微电子学研究所的博士研究生张雷、管曦萌、叶佐昌及参与第一版翻译的其他研究生的贡献。金申美女士在结稿过程中也给予了许多帮助, 在此深表谢意。

余志平, 周润德  
于清华大学  
2006 年 5 月

# 第一版前言

RF(射频)电路设计领域的复兴在很大程度上源于无线通信领域当前意想不到的爆炸性增长。由于工业界和学术界对这个 RF 兴趣的再度涌现缺乏准备,一股培训新一代 RF 工程师的教育热潮正在兴起。然而在努力综合两种传统的领域[即“通常”的 RF 及低频 IC(集成电路)]设计时会遇到一个问题:“传统”的 RF 工程师和模拟 IC 设计者常常发现他们之间的交流是很困难的,这是因为他们不同的背景基础以及他们实现各自电路的不同方法所致。射频 IC 设计(特别是在 CMOS 中)是一个与分立 RF 设计完全不同的工作。本书力图起到一个承前启后的作用。

本书的内容取自斯坦福大学为研究生讲授的有关射频 IC 设计的一学季高级课程的一套讲义。本课程是低频模拟 IC 设计课的继续,因此这本书假定读者已非常熟悉在一般教科书中介绍的内容,如 P. R. Gray 和 R. G. Meyer (Wiley 出版社, 1993) 所著的 *Analysis and Design of Analog Integrated Circuits*。本书提供了一些复习资料,所以从事实际工作的工程师只要对大学本科教育还留有一些印象就将能够深入学习下去而不会不知所云。

本书的内容显然超出了学生在一个学季里能够轻松消化的范围,所以希望任课教师能选取适合于他们授课、学期长短以及学生背景水平的内容。在下面有关各章内容的介绍中包括了一些提示,即哪几章可以不讲或迟讲。

第 1 章介绍无线电的发展变化史。介绍这部分材料主要是出于文化上的考虑。作者注意到并不是每个人都对历史感兴趣,所以不耐烦的读者可以跳过它而提前进入讲解技术的章节。

第 2 章(第二版中的第 4 章)考察标准 CMOS 工艺中通常都有的无源部件。本章集中在电感上,因为它们在 RF 电路中起着突出的作用,此外还因为有关这一内容的材料在当前的文献中很分散(好在这种情形正在迅速改变)。

第 3 章(第二版中的第 5 章)快速地回顾了 MOS 器件的物理和模型。因为深亚微米工艺现在已很普遍了,因此重点放在考虑短沟道效应的近似解析模型上。本章自然是简短的,它只是作为对别处已有的细节讨论的一种补充。

第 4 章(第二版中的第 3 章)考察了集总的无源 RLC 网络的性质。对于程度较高的学生,这一章可以作为复习内容,如果愿意也可以跳过去。根据作者的经验,很久前大多数本科课程就已基本上不讲解电感了,所以本章采用相当的篇幅来考察有关谐振、 $Q$ (品质因子)和阻抗匹配的问题。

第 5 章(第二版中的第 6 章)把在集总参数网络里引入的许多概念延伸到分布参数的领域。传输线是以一种不寻常的方式介绍的,即完全免去了推导电报方程及其相应的波动解。一条均匀线的特征阻抗和传播常数完全是从集总参数概念的简单延伸推导出来的。尽管分布参数网络在当代的硅 IC 工艺中只起很小的作用,但这一情况将是暂时的,因为器件的速度大约每三年翻一倍。

第 6 章(第二版中的第 7 章)在传统微波技术人员的思维及 IC 设计者的看法之间架起一座重要的桥梁,即通过简单推导史密斯(Smith)圆图解释了什么是 S 参数以及为什么说它们很有用。尽管通常的 IC 工程师几乎肯定不会用这些工具来设计电路,但许多仪器都是以史密斯圆图和



S 参数的形式来提供数据的，所以现代工程师仍然需要熟悉它们。

第 7 章（第二版中的第 8 章）介绍了许多种简单的带宽估计方法，从一系列一阶的计算或简单的测量出发来估计高阶系统的带宽。前一组技术称为开路（或零值）时间常数法，它允许我们识别出电路中限制带宽的部分，同时又提供了一般偏保守的带宽估计。在带宽、延时和上升时间之间的关系允许我们折中考虑各种参数时识别出重要的自由度。特别是说明了与许多（如果不是大多数的话）工程师的想法不同，增益完全不是以任何基本的方式和带宽互相联系的，而是和延时更紧密地耦合的，这就打开了一个重要的入口，为放大器结构指出了可以运用这一折中原则而使带宽很大程度地保持不变的方法。

第 8 章（第二版中的第 9 章）详细介绍了设计极高频率放大器（宽带和窄带）的问题，其中许多技巧是通过有意违反开路时间常数法所基于的假设而来的。

第 9 章（第二版中的第 10 章）探讨了许多偏置方法。尽管主要意图是作为复习之用，但用标准 CMOS 实现可靠基准电压的问题非常重要，足以值得冒内容有些重复的风险。特别是本章重点讲述了 CMOS 兼容的能隙基准电压源以及恒跨导偏置电路，也许这比大多数通常的模拟电路教科书的内容更多一点。

第 10 章（第二版中的第 11 章）研究噪声的所有重要问题。只是在某个可接受的带宽上得到足够的增益常常是不够的。在许多无线应用中，被接收的信号幅度处在微伏的范围内。需要放大这样微小的信号而又尽可能没有噪声显然是我们所希望的，因而这一章提供了在一定工艺下找出达到最佳可能噪声性能所需条件的基础。

第 11 章（第二版中的第 12 章）继前 2 至 3 章之后介绍低噪声放大器（LNA）结构以及在对功耗有明确约束条件下所能达到的最佳可能的噪声特性的具体条件。这种有功率约束的方法与标准的针对分立器件的方法有很大的差别，它利用了为 IC 设计者所享有的自由度来调整器件的尺寸以达到一个特定的最优状态。本章还讨论了动态范围这一重要问题，并介绍了用来估计大信号线性限度的一个简单解析方法。

第 12 章（第二版中的第 13 章）介绍了第一个有意识设计的非线性元件，它也是所有现代收发器的核心——混频器。在了解混频器的关键性能参数后，考察了许多混频器的拓扑结构。与 LNA 一样，有关动态范围的问题一直保持为重点。

第 13 章（第二版中的第 15 章）介绍了各种各样构建 RF 功率放大器（PA）的拓扑结构。在对于增益、效率、线性度以及输出功率之间重要而又常常差强人意的折中考虑中，我们得到了一系列的拓扑结构，每个都有它特定的应用领域。本章最后考察了实际功率放大器负载拉（load-pull）效应的实验特性。

第 14 章复习了经典的反馈概念，主要为讲解锁相环的下一章做准备。具有扎实的有关反馈基础的读者可以粗略地读一读这一章或甚至全部跳过它。

第 15 章（第二版中的第 16 章）在介绍了一阶和二阶锁相环（PLL）的基本工作原理之后考察了许多锁相环电路。详细地考察了锁相环的稳定性，并提供了一种简单的标准评估 PLL 对电源和衬底噪声的灵敏度。

第 16 章（第二版中的第 17 章）仔细考察了振荡器和频率合成器的问题，同时考虑了阻塞（张弛）振荡器和调谐振荡器，后一类振荡器可进一步划分成 LC 和晶振控制振荡器。同时介绍了固定和可控振荡器。对振荡器幅度的预测、起振条件以及器件尺寸的确定进行了研究。

第 17 章（第二版中的第 18 章）把前面对于噪声的研究延伸到振荡器。在说明了优化振荡器

噪声性能的某些一般准则之后，介绍了很有用的基于线性时变模型的相位噪声理论。对于人们怎样可以减少像 MOSFET 这样一向被认为噪声严重的器件构成的振荡器的相位噪声，这个模型做出了令人惊奇的乐观（但已经被实验证实的）预测。

第 18 章（第二版中的第 19 章）把前面各章联系起来考察接收器和发送器的结构。推导了计算有关子系统级联的交调和噪声系数，考察了传统的超外差结构以及低 IF（中频）镜像抑制和直接变频接收器，详细地研究了它们的相对优点和缺点。

最后，第 19 章（第二版中的第 20 章）以本书开始的方式来结束：即介绍某些历史。对经典的（显然是非 CMOS）RF 电路不是泛泛地而是刻意举出了一些有代表性的例子，如观察了 Armstrong 的早期发明，即“全美”5 管真空管的台式收音机，第一台晶体管收音机，以及第一个玩具对讲机。与第 1 章一样，这一章的介绍纯粹是为了欣赏，所以那些不认为历史课很有趣或值得学习的读者可以合上这本书并且庆祝自己已经读完了整本书。

如果不是由于我的同事和学生们的慷慨帮助，这样厚的一本书本来是不可能是在给定的时间内完成的。我的行政助理 Ann Guerra 以她特有的兴致和效率处理每一件事而奇迹般地争取到了时间。同时，许多博士生阅读了本书的草稿并提出了建议，他们是 Tamara Ahrens, Rafael Betancourt-Zamora, David Colleran, Ramin Farjad-Rad, Mar Hershenson, Joe Ingino, Adrian Ong, Hamid Rategh, Hiran Samavati, Brian Setterberg, Arvin Shahani, 以及 Kevin Yu。此外还有 Ali Hajimiri, Sunderarajan S. Mohan 和 Derek Shaeffer，他们的突出贡献值得特别提及。没有他们在最后一刻的帮助，恐怕这本书至今还未完成。

作者也极为感谢这本教科书的审核者，无论是知名的还是不知名的，他们都给出了很有见地的极好建议。在知名的审核者中，要给予 Howard Swain 先生（以前在 Hewlett-Packard 公司工作）、Texas Instruments 公司的 Gitty Nasserbakht 博士、麻省理工学院的 James Roberge 教授以及华盛顿州立大学的 Kartikeya Mayaram 教授特别的感谢，他们指出了打印和插图错误，并给出了很有价值的编辑上的建议。Four-Hand Book Packaging 公司的 Matt 和 Vickie Darnell 在本书编辑和排印方面做了极好的工作。他们对我的草稿所做的化腐朽为神奇的大胆努力表明他们具有超群的智慧。另外，哥伦比亚大学出版社的 Philip Meyler 博士则是首先催促我写这本书的人，没有他，也就没有本书的及时出版。

尽管学生们在发现教授讲义中的错误时异常欣喜，但有些错误还是设法逃过了仔细的检查，甚至在经过三年的过滤之后也是如此。遗憾的是，这意味着更多的错误等待着读者去发现。我以为这正是第二版要做的事。

## 第二版前言

自 1998 年本书第一版出版以来, RF CMOS 已经迅速发展至民用领域。在 1998 年, 惟一值得举出的 RF CMOS 电路例子是科研和工业样品。那时没有任何一家公司销售采用这种工艺技术的 RF 产品, 而且会议的专题讨论 (panel session) 曾公开质疑 CMOS 是否适合于这样的应用——其结论常常是否定的。那时几乎没有什么大学开设任何一种 RF 集成电路设计课程, 只有一个大学教授开设了一门专门针对 CMOS RF 电路设计的课程。开发 RF CMOS 集成电路的障碍是缺少能正确考虑在吉赫兹 (GHz) 的频率时噪声和阻抗的器件模型。由于测量结果和模型之间相差太大引起了激烈的争论: 即深亚微米 CMOS 是否存在基本的尺寸缩小问题以至于永远无法获得良好的噪声系数 (noise figure)。

今天, 情况已经发生了很大改变, 许多公司现正利用 CMOS 工艺制造 RF 电路, 世界各地的大学也在讲授一些关于将 CMOS 作为一种 RF 工艺的内容。在吉赫兹频率下已在实际的电路中演示过低于 1 dB 的噪声系数, 并且现在已有了极好的 RF 器件模型。这种发展趋势显然已提出了出版这本教科书新版的要求。

根据许多读者的建议, 第二版现在包括了一章有关无线通信系统的基础知识。在简述了无线传播的内容之后, 我们有必要简短地讨论一下著名的香农调制方法以引入用于讨论现代调制方法的相关内容。为了避免过度陷入信息论的奥秘之中, 我们只涵盖了那些为理解无线系统为什么像它们表现的那样所必需的最基本概念。用来说明这些概念的几个系统 [如 IEEE 802.11 无线 LAN (局域网)、第二代和第三代蜂窝电话技术以及最新发展的技术如超宽带 (UWB)] 就是在这个意义上进行简略考察的。

有关无源 RLC 元件这一章现在直接放在已做了许多扩充的有关无源 IC 元件一章的前面, 而不是像第一版那样放在它的后面。有关 MOS 器件物理这一章同样也做了更新以反映最新的尺寸缩小趋势, 并增加了相关内容以使读者能更好地理解适合于手工计算的模型; 它同时还对尺寸缩小趋势将如何影响以后几年的技术的可能性做了一些合理的推测。与此相关的一章是有关 LNA 的设计, 它对射频频率下 MOS 噪声的机理进行了详细讨论。在此我们衷心地感谢 Philips 公司的 Andries Scholten 博士和他的同事们友好与及时的帮助, 就在交付本书手稿最后期限的前几天, 他们为我提供了丰富的数据。他们透彻而严格的工作为器件物理和 LNA 这两章提供了大量新材料。

第二版的另一重新安排是: 有关反馈的一章现在放在了有关功率放大器一章的前面, 以提供理解几个线性化方法所必需的原理。熟悉第一版的读者也将注意到功率放大器这一章已做了大量扩充, 其中增加了很多内容来说明线性化和提高效率的技术。

有关收发器结构的一章现在包括了更多有关直接变换结构的详细内容。许多工程师们通过坚持不懈的工作已克服了许多令人生畏的、在第一版中所描述的那些使人悲观的问题。

这一章现在包括了许多用来说明的实例, 以全面论述如何将前几章的知识综合成一个连贯的整体。本章简要地讨论了几个主题 (虽然这些主题对于实现实际的收发器是必不可少的), 但它们已多少超出了一本有关 RF 电路教科书的范围。这里还是评论了有关的细节, 这些细节包括模

拟、平面布局、封装及其他内容。

第二版几乎对所有各章都做了重要的改进、澄清和修正，这要归功于正在进行的大量研究工作，也要感谢许多专心敬业的学生和工程师们非常有价值的建议，他们在过去的五年中一直非常友好地提出他们的意见。哥伦比亚大学的 Yannis Tsiividis 教授和他的学生们所提出的建议和修正无疑是特别有价值的。

正如在第一版前言中所提到的，学生们常常特别乐意指出教授的错误。由研究生们搜集到的一系列丰富的建议大大提高了本书的清晰透彻程度，这将为今后使用本书的学生所体会。感谢所有曾为本书第一版指出错误和提出建议的人使这一版的错误大大减少，否则本书就不可能做到像现在这样好。不过，经验表明凡事不可能达到尽善尽美，而且我知道我将继续从读者那里听到有关这本书的某些印刷错误、谬见或表述不清的问题。这也就是将要出第三版的原因。

最后，我要最深切地感谢我的聪明美丽甚至迷人的妻子 Angelina 的爱、鼓励和理解，她无疑希望我要出第三版的说法是在开玩笑，只是因为太爱我而不这么说就是了。

# 目 录

第 1 章 无线电发展历史的间断回顾	1
1.1 引言	1
1.2 麦克斯韦和赫兹	1
1.3 真空管发明前的电子学	2
1.4 真空管的诞生	6
1.5 Armstrong 和再生放大器/检波器/振荡器	9
1.6 其他无线电电路	11
1.7 Armstrong 和超再生电路	13
1.8 Oleg Losev 及第一个固态电路放大器	14
1.9 结束语	15
1.10 附录 A: 真空管基础	16
1.11 附录 B: 究竟是谁发明了无线电	24
第 2 章 无线通信原理概述	31
2.1 无线系统的片段简史	31
2.2 非蜂窝无线通信的应用	40
2.3 香农定理、调制及其他	43
2.4 传播	59
2.5 结论	64
2.6 附录: 其他无线系统的特性	64
第 3 章 无源 $RLC$ 网络	67
3.1 引言	67
3.2 并联 $RLC$ 谐振回路	67
3.3 串联 $RLC$ 网络	70
3.4 其他 $RLC$ 谐振网络	71
3.5 作为阻抗变换器的 $RLC$ 网络	72
3.6 实例	80
第 4 章 无源集成电路元件的特性	88
4.1 引言	88
4.2 射频情况下的互连线: 趋肤效应	88
4.3 电阻	92
4.4 电容	94

4.5	电感	104
4.6	变压器	114
4.7	高频时的互连选择	121
4.8	小结	123
4.9	附录: 电容方程总结	124
<b>第 5 章</b>	<b>MOS 器件物理回顾</b>	<b>128</b>
5.1	引言	128
5.2	简短历史	128
5.3	场效应管: 一个小故事	129
5.4	MOSFET 物理: 长沟道近似	129
5.5	弱反型区 (亚阈值区) 的工作情况	137
5.6	短沟情况下的 MOS 器件物理	140
5.7	其他效应	143
5.8	小结	145
5.9	附录 A: 0.5 $\mu\text{m}$ Level-3 的 SPICE 模型	145
5.10	附录 B: Level-3 SPICE 模型	146
5.11	附录 C: Level-1 MOS 模型	150
5.12	附录 D: 一些非常粗略的尺寸缩小规律	151
<b>第 6 章</b>	<b>分布参数系统</b>	<b>155</b>
6.1	引言	155
6.2	集总和分布参数范畴之间的联系	157
6.3	重复结构的策动点阻抗	157
6.4	关于传输线的更详细讨论	158
6.5	有限长度传输线的特性	163
6.6	传输线公式小结	165
6.7	人工传输线	165
6.8	小结	168
<b>第 7 章</b>	<b>史密斯圆图和 S 参数</b>	<b>170</b>
7.1	引言	170
7.2	史密斯圆图	170
7.3	S 参数	173
7.4	附录 A: 关于单位的一些说明	175
7.5	附录 B: 为什么采用 50 $\Omega$ (或 75 $\Omega$ )	176
<b>第 8 章</b>	<b>频带宽度估算方法</b>	<b>180</b>
8.1	引言	180
8.2	开路时间常数方法	180
8.3	短路时间常数方法	197

8.4	补充读物	200
8.5	上升时间、延时及带宽	201
8.6	小结	206
<b>第 9 章</b>	<b>高频放大器设计</b>	<b>209</b>
9.1	引言	209
9.2	利用零点增大带宽	209
9.3	并联-串联放大器	218
9.4	采用 $f_T$ 倍频器增大带宽	223
9.5	调谐放大器	224
9.6	中和与单向化	227
9.7	级联放大器	230
9.8	调幅-调相 (AM-PM) 的转换	236
9.9	小结	237
<b>第 10 章</b>	<b>基准电压和偏置电路</b>	<b>242</b>
10.1	引言	242
10.2	二极管特性回顾	242
10.3	CMOS 工艺中的二极管和双极型晶体管	243
10.4	独立于电源电压的偏置电路	244
10.5	带隙基准电压	245
10.6	恒 $g_m$ 偏置	251
10.7	小结	253
<b>第 11 章</b>	<b>噪声</b>	<b>258</b>
11.1	引言	258
11.2	热噪声	258
11.3	散粒噪声	264
11.4	闪烁噪声	265
11.5	爆米噪声	267
11.6	经典的二端口网络噪声理论	268
11.7	噪声计算举例	272
11.8	一个方便的匡算规则	273
11.9	典型的噪声性能	274
11.10	附录: 各种噪声模型	275
<b>第 12 章</b>	<b>低噪声放大器设计</b>	<b>280</b>
12.1	引言	280
12.2	MOSFET 二端口网络噪声参数的推导	280
12.3	LNA 的拓扑结构: 功率匹配与噪声匹配	287
12.4	功耗约束噪声优化	292

12.5	设计举例	295
12.6	线性度与大信号性能	300
12.7	无失真信号的动态范围	305
12.8	小结	307
<b>第 13 章</b>	<b>混频器</b>	<b>311</b>
13.1	引言	311
13.2	混频器基础	311
13.3	作为线性混频器的非线性系统	316
13.4	基于乘法器的混频器	320
13.5	亚采样混频器	332
13.6	附录: 二极管环路混频器	333
<b>第 14 章</b>	<b>反馈系统</b>	<b>338</b>
14.1	引言	338
14.2	现代反馈理论的简短历史	338
14.3	一个令人费解的问题	341
14.4	负反馈系统灵敏度的降低	342
14.5	反馈系统的稳定性	345
14.6	衡量稳定性的增益与相位裕量	345
14.7	根轨迹技术	347
14.8	稳定性准则小结	352
14.9	反馈系统建模	352
14.10	反馈系统的误差	354
14.11	一阶和二阶系统的频域和时域特性	357
14.12	实用的匡算规则	360
14.13	根轨迹举例和补偿	361
14.14	根轨迹技术小结	366
14.15	补偿	366
14.16	通过降低增益获得补偿	366
14.17	滞后补偿	368
14.18	超前补偿	371
14.19	慢滚降补偿	372
14.20	补偿问题小结	373
<b>第 15 章</b>	<b>RF 功率放大器</b>	<b>378</b>
15.1	引言	378
15.2	一般考虑	378
15.3	A 类、AB 类、B 类和 C 类功率放大器	378
15.4	D 类放大器	386



15.5	E类放大器	387
15.6	F类放大器	389
15.7	功率放大器的调制	393
15.8	功率放大器特性小结	414
15.9	RF功率放大器的几个设计范例	415
15.10	其他设计考虑	420
15.11	设计小结	426
<b>第 16 章</b>	<b>锁相环</b>	<b>429</b>
16.1	引言	429
16.2	PLL 简史	429
16.3	几种线性化的 PLL 模型	433
16.4	PLL 的一些噪声特性	438
16.5	鉴相器	440
16.6	序列鉴相器	444
16.7	环路滤波器和电荷泵	451
16.8	PLL 设计实例	457
16.9	小结	463
<b>第 17 章</b>	<b>振荡器与频率合成器</b>	<b>467</b>
17.1	引言	467
17.2	纯线性振荡器存在的问题	467
17.3	描述函数	468
17.4	谐振器	483
17.5	调谐振荡器举例	486
17.6	负阻振荡器	491
17.7	频率合成	494
17.8	小结	501
<b>第 18 章</b>	<b>相位噪声</b>	<b>505</b>
18.1	引言	505
18.2	一般性考虑	507
18.3	详细讨论: 相位噪声	509
18.4	线性性与时变在相位噪声中的作用	511
18.5	电路实例	519
18.6	振幅响应	526
18.7	小结	528
18.8	附录: 有关模拟的说明	528
<b>第 19 章</b>	<b>系统结构</b>	<b>532</b>
19.1	引言	532