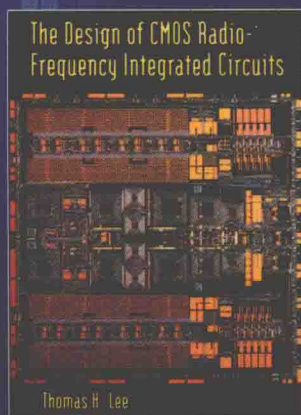


教育部高等教育司推荐  
国外优秀信息科学与技术系列教学用书

# CMOS 射频 集成电路设计

The Design of CMOS Radio-Frequency  
Integrated Circuits



[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

The Design of CMOS Radio-Frequency Integrated Circuits

[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

本书全面深入地介绍了如何设计千兆赫兹 (GHz) CMOS 射频集成电路。本书首先回顾了集成电路元件的特性、MOS 器件物理和晶体管模型, RLC 并联、串联和其他形式的振荡网络, 以及分布式系统的特点及其与集总参数电路的区别。然后详细讨论了现代高频宽带放大器的设计。接下来介绍了关键的射频功能块, 包括低噪声放大器 (LNA)、基准电压源、混频器、射频功率放大器、振荡器和频率综合器。最后探讨了发送接收器的总体结构并展望了射频电路未来发展的前景。书中包括许多非常有用的电路图和其他插图, 除第 1 章和最后一章外, 每章的后面都附有许多启发性的习题, 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相关领域的工程技术人员来说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. Copyright © Cambridge University Press 1998.

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 © 2004.

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: 01-2003-0368

### 图书在版编目 (CIP) 数据

CMOS 射频集成电路设计 / (美) 李 (Lee, T. H.) 著; 余志平等译. - 北京: 电子工业出版社, 2004.7  
(国外电子与通信教材系列)

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

ISBN 7-121-00073-3

I. C... II. ①李... ②余... III. 射频电路: 集成电路 - 电路设计 - 教材 IV. TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 063742 号

责任编辑: 周宏敏

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: 27.25 字数: 698 千字

印 次: 2004 年 7 月第 1 次印刷

定 价: 40.00 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 zllts@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<br>杨千里 | 北京邮电大学校长、教授、博士生导师<br>总参通信部副部长、中国电子学会会士、副理事长<br>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<br>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<br>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<br>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<br>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<br>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<br>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<br>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<br>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<br>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<br>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   |
|     | <b>徐重阳</b> | 华中科技大学教授、博士生导师、电子科学与技术系主任<br>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<br>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

美国斯坦福 (Stanford) 大学电机工程系教授 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出版时就受到了普遍的关注和读者的青睐, 如今该书已成为从事射频集成电路设计的技术人员和有关电路专业学生少数必读和必备的参考书和教科书之一。该书之所以取得巨大成功, 其原因是多方面的。一方面是对这方面 (CMOS 射频集成电路) 的专著大量的、不断增长的需求, 另一方面则是作者严谨、活泼的写作风格和选题的恰当。阅读该书就似在科学的殿堂和历史的隧道间来回漫游, 既学到了用 CMOS 来设计射频集成电路的方法, 又了解了无线电学科漫长的发展历史。

无线通信技术是继计算机技术之后近几十年来在信息技术 (IT) 领域中发展最快的技术之一。无线通信的发展大致可分为两个阶段: 移动通信 (以手机的广泛使用为标志) 和移动计算。后者的起飞则是以无线局域网 (WLAN) 为代表, 并且与 CMOS 射频电路的设计技术和 CMOS 工艺的成熟密切相关。由于数字集成电路多年来一直是集成电路设计的主流, 大学的教育和工程界对数模混合信号电路和射频集成电路的技术缺乏足够的准备和训练, Lee 的这本书正好弥补了这方面知识的空档。

该书除了介绍足够多的微波、电磁场和无线电知识以使读者有必要的基础来了解和掌握射频电路的分析和设计外, 还用了大量的篇幅讨论了 CMOS 器件的工作原理和模型化。作者擅长用简洁明了的直观形象思维阐述问题的物理本质, 使读者很快能理解和学会电路分析的方法。举个例子来说, 尽管作者是一个电路背景出身的学者, 他对 MOS 短沟、长沟器件的定义和区分不以物理长度而以外加电场的大小为标尺, 一下子就点明了问题的本质所在。书中对衡量器件高频特性两个代表品质因子的特征频率  $f_T$  和  $f_{max}$  的讨论也十分深刻, 不仅使读者学会了如何去计算它们, 而且了解到为什么在电路分析中往往要用品质因子来表征一个复杂电路或系统的性能 (因为它是一个综合的指标)。这样的寓一般原理于个案研究的例子在书中不乏其数。

本书的侧重点是讲述电路的工作原理和分析方法, 而将射频电路看做是一个讲解的载体。将该书作为模拟电路分析和设计课程的后续课来教授或自修通读, 会大大增强读者理解和分析电子电路的能力。全书组织合理, 内容由浅入深, 并由下而上 (bottom up) 介绍器件、电路与系统。作者从无源元件讲起; 然后介绍 MOS 器件原理, 包括噪声模型, 直到射频收发器的各个单元电路 (低噪声放大器, 混频器, 功率放大器, 锁相环, 振荡器和频率合成器); 最后以介绍射频收发器的总体结构结束全书的技术内容的讨论。

除了该书卓著的专业内容外, 尚有两个非技术特色不可不提。一是本书提供了极佳的无线电通信发展历史的回顾。作者引用的材料准确仔细 (甚至提供了有关发明专利的号码), 描述生动 (例如真空管发明时期的一些轶闻), 读起来如同看科普文章, 容易记忆。另一个特点是作者文笔风趣, 遣词“平民”化, 但表达的专业内容又无失真。例如作者将 A 类 (class A) 功率放大器比喻为“吃了激素”的通用的小信号放大器, 令人忍俊不禁。但事实上这个比方在技术上是十分贴切的。读者如想学习现代美式英语, 不妨在攻读这本中文译本时, 参照阅读英文原版 (电子工

业出版社出版的英文原版的影印版), 必定收益不浅。

译者连续三年用该书(英文原版)在清华大学教授研究生课程, 其间也发现和纠正了原文中的一些错误(大多系排版类的错误)。这些错误都在中文译本中得到了纠正。这本书的翻译工作大多为年轻人完成, 特别要感谢的是周晔(清华大学电子工程系毕业生, 现美国 UC Berkeley 博士研究生), 她承担了大部分章节的翻译。清华大学微电子学研究所博士研究生高巍、邵雪、叶佐昌和焦超帮助结束了第 15 章到第 19 章的翻译工作, 在此深表谢意。

余志平, 周润德  
于清华大学



# 前 言

RF (射频) 电路设计领域正在再次兴起, 在很大程度上这主要是为无线通信当前意想不到的爆炸性增长所驱动。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。本书力图起到承前启后的作用。

本书的内容取自 Stanford 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 (好在这一情形正在迅速改变)。

第 3 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, 因此重点放在考虑短沟道效应的近似解析模型。本章自然是简短的, 它只是作为对别处已有的对细节讨论的一种补充。

第 4 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, 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教电感了, 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) 图, 解释了什么是 S 参数以及为什么它们很有用。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去熟悉它们。

第7章介绍许多种简单的方法，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仍使带宽很大程度地保持不变的方法。

第8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提升来的。

第9章探讨了许多偏置方法。尽管主要意图是作为复习，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。这一有功率约束的方法与标准的针对分立器件的方法有相当的差别，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。本章也考察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效应（load-pull）的实验特性。

第14章复习了经典的反馈概念，主要为有关锁相环的下一章做准备。具有反馈扎实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，这一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连的交调和噪声系数，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

究了其中每一个的相对优点和缺点。

最后，第19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“全美五管”真空管的桌上收音机，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是很有趣或值得学习的人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，这样长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，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 教授要给予特别的感谢，他们指出了打印和插图错误以及给出了他们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现出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。

# 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 麦克斯韦尔和赫兹	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：真空管基础	16
第 2 章 无源集成电路 (IC) 元件的特性	24
2.1 引言	24
2.2 电阻	24
2.3 电容	26
2.4 电感	33
2.5 小结	40
2.6 附录：电容方程总结	40
第 3 章 MOS 器件物理回顾	44
3.1 引言	44
3.2 简短历史	44
3.3 场效应管：一个小故事	44
3.4 MOSFET 物理：长沟道近似	45
3.5 弱反型区（亚阈值区）的工作情况	51
3.6 短沟情况下的 MOS 器件物理	51
3.7 其他效应	54
3.8 渡越时间的影响	56
3.9 小结	57
3.10 附录：0.5 $\mu\text{m}$ Level-3 的 SPICE 模型	57
第 4 章 无源 <i>RLC</i> 网络	61
4.1 引言	61

4.2	并联 $RLC$ 谐振回路	61
4.3	串联 $RLC$ 网络	64
4.4	其他 $RLC$ 谐振网络	65
4.5	作为阻抗变换器的 $RLC$ 网络	66
4.6	实例	74
<b>第 5 章</b>	<b>分布参数系统</b>	<b>82</b>
5.1	引言	82
5.2	集总和分布参数范畴之间的联系	84
5.3	重复结构的策动点阻抗	84
5.4	关于传输线的更详细讨论	85
5.5	有限长度传输线的特性	90
5.6	传输线公式小结	92
5.7	人工传输线	92
5.8	小结	95
<b>第 6 章</b>	<b>史密斯圆图和 S 参数</b>	<b>97</b>
6.1	引言	97
6.2	史密斯圆图	97
6.3	S 参数	100
6.4	附录: 对于单位的一些说明	102
6.5	附录: 为什么采用 $50$ (或 $75$ ) $\Omega$	102
<b>第 7 章</b>	<b>频带宽度估算方法</b>	<b>106</b>
7.1	引言	106
7.2	开路时间常数方法	106
7.3	短路时间常数方法	117
7.4	补充读物	121
7.5	上升时间、延时及带宽	121
7.6	小结	126
<b>第 8 章</b>	<b>高频放大器设计</b>	<b>130</b>
8.1	引言	130
8.2	利用零点增大带宽	130
8.3	并联-串联放大器	139
8.4	采用 $f_T$ 倍频器增大带宽	144
8.5	调谐放大器	145
8.6	中和与单向化	148
8.7	级联放大器	151
8.8	小结	157

<b>第 9 章 基准电压和偏置电路</b> .....	162
9.1 引言 .....	162
9.2 二极管特性回顾 .....	162
9.3 CMOS 工艺中的二极管和双极型晶体管 .....	163
9.4 独立于电源电压的偏置电路 .....	164
9.5 带隙基准电压 .....	165
9.6 恒 $g_m$ 偏置 .....	171
9.7 小结 .....	173
<b>第 10 章 噪声</b> .....	177
10.1 引言 .....	177
10.2 热噪声 .....	177
10.3 散粒噪声 .....	182
10.4 闪烁噪声 .....	183
10.5 爆米噪声 .....	185
10.6 经典的二端口网络噪声理论 .....	186
10.7 噪声计算举例 .....	189
10.8 一个方便的匡算规则 .....	191
10.9 典型的噪声性能 .....	191
10.10 附录: 各种噪声模型 .....	192
<b>第 11 章 低噪声放大器设计</b> .....	197
11.1 引言 .....	197
11.2 MOSFET 两端口网络噪声参数的推导 .....	197
11.3 LNA 的拓扑结构: 功率匹配与噪声匹配 .....	201
11.4 功耗约束噪声优化 .....	206
11.5 设计举例 .....	209
11.6 线性度与大信号性能 .....	214
11.7 无失真信号的动态范围 .....	219
11.8 小结 .....	220
<b>第 12 章 混频器</b> .....	223
12.1 引言 .....	223
12.2 混频器基础 .....	223
12.3 作为线性混频器的非线性系统 .....	226
12.4 基于乘法器的混频器 .....	230
12.5 亚采样混频器 .....	242
12.6 附录: 二极管环路混频器 .....	243

<b>第 13 章 RF 功率放大器</b> .....	248
13.1 引言 .....	248
13.2 一般考虑 .....	248
13.3 A、AB、B 和 C 类功率放大器 .....	248
13.4 D 类放大器 .....	256
13.5 E 类放大器 .....	257
13.6 F 类放大器 .....	259
13.7 功率放大器的调制 .....	262
13.8 功率放大器特性小结 .....	263
13.9 RF 功率放大器的几个设计范例 .....	263
13.10 其他设计考虑 .....	268
13.11 设计小结 .....	274
<b>第 14 章 反馈系统</b> .....	278
14.1 引言 .....	278
14.2 现代反馈理论的简短历史 .....	278
14.3 一个令人费解的问题 .....	281
14.4 负反馈系统灵敏度的降低 .....	282
14.5 反馈系统的稳定性 .....	285
14.6 衡量稳定性的增益与相位裕量 .....	285
14.7 根轨迹技术 .....	287
14.8 稳定性准则小结 .....	291
14.9 反馈系统建模 .....	291
14.10 反馈系统的误差 .....	294
14.11 一阶和二阶系统的频域和时域特性 .....	296
14.12 实用的匡算规则 .....	298
14.13 根轨迹举例和补偿 .....	299
14.14 根轨迹技术小结 .....	304
14.15 补偿 .....	304
14.16 通过降低增益获得补偿 .....	305
14.17 滞后补偿 .....	307
14.18 超前补偿 .....	309
14.19 补偿小结 .....	311
<b>第 15 章 锁相环</b> .....	315
15.1 引言 .....	315
15.2 PLL 的简短历史 .....	315
15.3 线性化的 PLL 模型 .....	317
15.4 PLL 的一些噪声特性 .....	321

15.5	鉴相器	323
15.6	序列鉴相器	327
15.7	环路滤波器和电荷泵	334
15.8	PLL 设计实例	338
15.9	小结	344
<b>第 16 章</b>	<b>振荡器与频率合成器</b>	<b>348</b>
16.1	引言	348
16.2	纯粹线性振荡器存在的问题	348
16.3	描述函数	349
16.4	谐振器	360
16.5	调谐振荡器举例	363
16.6	负阻振荡器	367
16.7	频率合成	370
16.8	小结	377
<b>第 17 章</b>	<b>相位噪声</b>	<b>382</b>
17.1	引言	382
17.2	一般性考虑	382
17.3	详细讨论：相位噪声	383
17.4	Hajimiri 模型：时变相位噪声理论	386
17.5	小结	392
<b>第 18 章</b>	<b>系统结构</b>	<b>396</b>
18.1	引言	396
18.2	动态范围	396
18.3	亚采样	406
18.4	发送器结构	406
18.5	振荡器的稳定性	408
18.6	小结	408
<b>第 19 章</b>	<b>射频电路历史回顾</b>	<b>410</b>
19.1	引言	410
19.2	Armstrong	410
19.3	“全美 (All-American)” 5 管超外差结构	413
19.4	Regency TR-1 晶体管收音机	415
19.5	三管玩具民用波段对讲机	416



# 第 1 章 无线电发展历史的间断回顾

## 1.1 引言

集成电路工程师们毫不吝惜地把增加管子所需要的成本理所当然地认为基本上为零，这就导致了今天有大量器件的电路非常普遍。当然，这是近期的发展情形；在电子学的大部分历史中，电路设计在经济学方面的考虑恰好与它们今天的情况相反。其实并不是太久以前迫于有源器件的相对高成本，工程师们还在像试图从石头中榨出油那样来获取廉价性能（或者至少对整流是如此）。而且确实令人惊奇的正是无线电的开创者们只用少量的元件就能榨取出如此多的性能。例如我们将会看到美国无线电的天才 Edwin Armstrong 在 20 世纪 20 年代初期设计了电路可以用增益的对数来换取带宽，而不是像通常认为的那样增益和带宽多多少少应当直接互换。我们也将看到就在 Armstrong 正在开发这些电路的时候，自学成才的前苏联无线电工程师 Oleg Losev 正在做蓝色 LED（发光二极管）的实验并建造可工作至 5 MHz 的全固态电路的无线电，而这发生在晶体管发明的 1/4 世纪之前。

很少有人会讲到这些奇妙的故事，因为它们往往处在历史课程和工程课程之间的夹缝中。然而应当有人来讲这些故事，因为这样可以回答许多经常问到的问题（“为什么他们不这样做？”，回答是“他们过去曾这样做过，但它引起了关键部件质量变差”）。这一极为曲折的无线电历史简短触及了这些主要故事中的一些，并为那些想要进一步探索的读者列出了参考文献。

## 1.2 麦克斯韦尔和赫兹

每一个电气工程师至少都知道一点有关麦克斯韦尔（James Clerk Maxwell, Clerk 读做“Clark”）的事情：他写下的那些方程使那些二三年级学生的生活变得极为忙碌。他不仅写下了以他名字命名的电动力学方程<sup>①</sup>，而且也第一个发表了对反馈系统稳定性的数学论述（即“On Governors”，它解释了为什么蒸气引擎的速度控制器有时可能不稳定<sup>②</sup>）。

麦克斯韦尔收集了那时所知的所有有关电磁的现象，并且不可思议<sup>③</sup>和才气横溢地发明了位移（电容性）电流的概念，这使他推导出一个方程。而这个方程导致了对电磁波传播的预测。

接着是赫兹（Heinrich Hertz），他第一个用实验证明了麦克斯韦尔的预测，即存在着电磁波，它以有限的速度传播。他设计的“发送器”就是按照这一个简单的想法工作的：使一个线圈通过一个火花隙放电并且连在某种天线上以发射一个谐波丰富（这是无意的）的波。

他的设备自然只提供对这一“不干净”信号最基本的滤波，所以需要不寻常的细心和毅力来验证这一干扰信号零值和峰值的存在（并进行量化），这些信号是电磁波传播的印证。他也设法

① 实际上 Oliver Heaviside 是第一个使用向量积分的符号惯例把麦克斯韦尔方程转变为今天大多数工程师都熟悉的形式。

② *Proc. Roy. Soc.*, (皇家学会论文集), 1868。

③ 许多电和磁（E&M）的教科书提供了符合逻辑但在历史上却是错误的解释，即认为麦克斯韦尔发明位移电流的概念是在认识到在已知的 E&M 定律与电流的连续性方程之间存在着不一致性之后。事实是麦克斯韦尔是一位天才，而天才的灵感常常具有无从捉摸的来源。这里就是这些情形中的一个。