

CAMBRIDGE

国外大学优秀教材——微电子类系列 (翻译版)

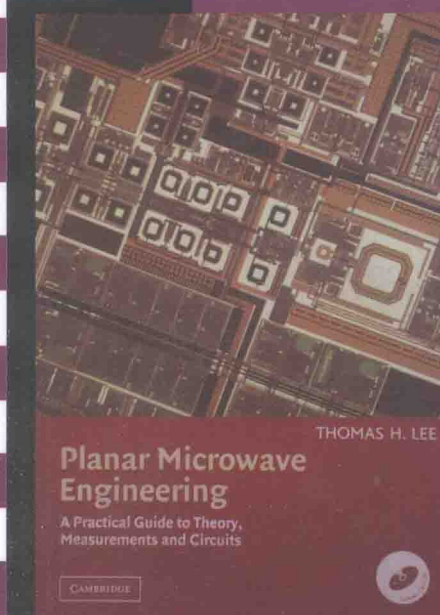
平面微波工程： 理论、测量与电路

Planar Microwave Engineering

A Practical Guide to Theory, Measurements and Circuits

[美] Thomas H. Lee 著

余志平 孙玲玲 王皇 译



清华大学出版社

国外大学优秀教材 —— 微电子类系列 (翻译版)

平面微波工程： 理论、测量与电路

Planar Microwave Engineering

A Practical Guide to Theory, Measurements and Circuits

[美] Thomas H. Lee 著

余志平 孙玲玲 王皇 译

清华大学出版社

北京

This is a simplified Chinese edition of the following title(s) published by Cambridge University Press:

Planar Microwave Engineering: A Practical Guide to Theory, Measurements and Circuits

© Cambridge University Press 2004.

This book is in copyright. Subject to statutory exception and to the provisions of relevant collective licensing agreements, no reproduction of any part may take place without the written permission of Cambridge University Press.

This simplified Chinese edition for the People's Republic of China (excluding Hong Kong, Macau and Taiwan) is published by arrangement with the Press Syndicate of the University of Cambridge, Cambridge, United Kingdom.

© Cambridge University Press and Tsinghua University Press 2014

This simplified Chinese edition is authorized for sale in the People's Republic of China (excluding Hong Kong, Macau and Taiwan) only. Unauthorised export of this simplified Chinese edition is a violation of the Copyright Act. No part of this publication may be reproduced or distributed by any means, or stored in a database or retrieval system, without the prior written permission of Cambridge University Press and Tsinghua University Press.

版权登记号: 图字 01-2010-6372

版权所有,侵权必究。侵权举报电话: 010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

平面微波工程: 理论、测量与电路/(美)李(Lee, T. H.)著; 余志平, 孙玲玲, 王皇译.--北京: 清华大学出版社, 2014

书名原文: Planar microwave engineering: a practical guide to theory, measurements and circuits

国外大学优秀教材. 微电子类系列: 翻译版

ISBN 978-7-302-38791-6

I. ①平… II. ①李… ②余… ③孙… ④王… III. ①微波电路—高等学校—教材 IV. ①TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 291256 号

责任编辑: 邹开颜 赵从棉

封面设计: 傅瑞学

责任校对: 王淑云

责任印制: 李红英

出版发行: 清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址: 北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编: 100084

社 总 机: 010-62770175 邮 购: 010-62786544

投稿与读者服务: 010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈: 010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者: 清华大学印刷厂

经 销: 全国新华书店

开 本: 185mm×260mm 印 张: 39.5 字 数: 955 千字

(附光盘 1 张)

版 次: 2014 年 12 月第 1 版

印 次: 2014 年 12 月第 1 次印刷

印 数: 1~3000

定 价: 89.00 元

产品编号: 036442-01

献给安捷莉娜(Angelina)

作者简介

托马斯·李(Thomas H. Lee)在麻省理工学院(MIT)获得科学博士学位,目前是斯坦福(Stanford)大学的教授。他曾经是国际电机电子工程师协会(IEEE)固体电路分会和微波理论与技术分会这两个分会的杰出讲师(distinguished lecturer)。他在国际会议上四次评得“最佳论文”奖,并得到过 Packard 基金会的奖励。李教授发表了超过 100 篇的专业技术文章,并是著名的《CMOS 射频集成电路设计》(The Design of CMOS Radio-Frequency Integrated Circuits)的作者。这本书现在已出了第二版。他持有 35 个美国专利,并与他人创建了几个高科技公司,包括“矩阵半导体”(Matrix Semiconductor)公司。

译者序

美国斯坦福大学教授 Thomas H. Lee 这本《平面微波工程：理论、测量与电路》可以看作是该作者于 1998 年出版(2004 年第二版)的领 CMOS 射频电路教科书之先、在世界范围内十分有影响的《CMOS 射频集成电路设计》(The Design of CMOS Radio-Frequency Integrated Circuits, Cambridge University Press)(以下简称“Lee 射频”)一书在微波领域的扩展。

这本英文原版书有 862 页,附有微波教学软件(如 SonnetLite)光盘的宏著,内容涵盖了传输线、天线与滤波器分析、设计及对阻抗、噪声的测量方法。为了对微波电路的知识有一个完整的介绍,本书相当大一部分(大约在全书的 23 章中占 11 章)重复了“Lee 射频”一书中对具有超外差结构的射频收发器的单元(包括低噪声放大器、混频器、振荡器、频率综合器以及功率放大器)电路工作原理的讨论,但阐述的角度更为强调微波的背景及应用。

由于近年来 CMOS 技术的长足进步(现在已处于 22nm 工艺节点),采用 CMOS 实现的射频电路频率不断提高,从用于手机通信的几百 MHz 到 2GHz,及无线局域网(Wi-Fi)的 2.4/5GHz 频段,逐渐发展到 60GHz,目前更向亚太赫兹(大约在 100~300GHz)的电路前进。本书的中文译本出版,顺应了这方面的科学研究、教学与工程化的需要,相信能在众多的微波书籍中凸显其出色的历史回顾及对电路、系统的深入直观理解,帮助读者以较小的努力进入微波,尤其是 CMOS 平面电路设计的领域。本书可以作为研究生或大学本科高年级学生的射频、微波课程的参考教科书。

本书的翻译历经 4 年,是清华大学与杭州电子科技大学诸多教师与学生(包括研究生与当时的本科生)通力合作的结果。在此特别对清华大学的叶佐昌老师,王洪瑞、冉秋实、张明、杨东旭、袁泽、康佳昊、于欣馨、梁爽、黄声希、郑宏达及赵亮同学,及杭州电子科技大学的刘军与文进才老师,以及苏国东同学表示深切的感谢。没有他们的贡献,此书难以完成。全书的校对、定稿工作由署名作者完成,也因此对可能存在的翻译不准确及笔误负全责。

译者蒙清华大学出版社邹开颜编辑的鼎力支持,从立题到结稿,她以极大的耐性与细致的指导,伴随着我们圆满结束了全书的翻译。在此一并致谢。

余志平(清华大学、杭州电子科技大学)
孙玲玲、王皇(杭州电子科技大学)
2013 年新春伊始
2014 年 12 月付印前

前言

起始,它被称为无线,然后是无线电。无线这个名词在几十年的沉寂后,又变得时髦了。不管我们选择如何去称呼它,射频设计领域的变化是如此之快,教科书的作者们(更不用说工程师了)被逼得不断地跟踪这个领域的发展。对于这个领域中的新手的一个重要挑战是在掌握几代人以来一直没有什么变化的基本知识的同时,吸收指数式增长的新的信息。使得这个挑战更复杂化的是一方面许多有关微波工程的教科书十分偏重电磁场理论,而不讨论那些有实际应用的物理实现例子;另一方面则是一些类似于菜谱的书,几乎完全不涉及理论。更为糟糕的是许多有关这个专题的知识,只是承继了代代口口相传的传统,还往往不正确。其他的有关知识则散落在数不清的应用注解、产品手册、给业余爱好者看的杂志与用户手册中。这些资料中,有许多很难找到,而且互相之间也并不一致。业余爱好者总是不满意学术型教科书过多地强调理论的倾向(“太多的方程,而一直到最后也不告诉你如何去实现”);而学生及从业工程师们则对给业余爱好者看的杂志的菜谱式的叙述方法不感兴趣(“它们不介绍必要的理论,而通过这些理论则可以将现有的设计改造成一个人所想要的”)。这本书可以满足那些抱怨缺乏平衡理论与实践的带有时效性的参考书的学生、业余爱好者及从业工程师的要求。

这本书是一个在斯坦福大学讲授单学期研究生有关 GHz 收发器设计的高等实验课程——EE414 讲义基础上经过较大扩展的版本。尽管如此,本书的目标不局限于只是那些博士学位课程,而是更大范围的读者面。在 EE414 这门课中,修课的学生们用将近 9 周的时间,用微带线的构建技术,设计、制作与测试一个 1GHz 收发器中的各个模块。这些电路模块包括各种天线与微带线滤波器,以及低噪声放大器、混频器、基于 PLL 的频率综合器与 FM(调频)调制/解调器和功率放大器。这门课程的最后“测验”是一个成功采用这些 FM 收发器的双向通信系统的演示。我深深地特别感谢这门课的第一批学生,他们乐意而热忱地参与这门课的初次尝试,尽管课程课件与讲义的准备在最好的情况下也只是临时抱佛脚完成的。现在这本书的内容与安排很多都是基于这些学生的建议。

毋庸置疑,读者会在书中发现相当数量的有关测试技术与微波设计的理论讨论,伴随着不少的传递函数与变换,这是必要的。因为博士生培养计划中本来就有(开个玩笑)在精神上折磨学生的环节。但是对那些只想一步直接获得所需的业余爱好者来说,他们可以忽略所有的方程,而将注意力集中在许多实用的重要设计规则或者是诸多的采用不昂贵的元器件及仪器来实现与表征微波电路的方法。本书作了最大的努力来提供定性与物理层面上的有关遇到的方程意味着什么的解释。特别是对那些喜欢在周末做实验的人,他们可以享受包含在许多章节中的业余制作的二极管及不到 10 美元的微波测量系统。那些从业的工程师则可以找到如何从眼下最先进的仪器中提取最靠得住的数据的方法,特别是注重理解校准方法(以及这些方法的局限性)。这样做就可以避免犯不经意的但却是非常常见的错误。更加年轻的工程师也会感到高兴来发现平时他们对射频(RF)有关话题的疑问的答案(比

如,BNC 是否真的代表“婴儿 N 头的连接器”(baby N connector)?^① 为什么所有的场合下都用 50Ω ? 谁是史密斯(Smith)? 为什么他发明了圆图?。读者可以自己挑选符合他们口味的话题。这本书就是瑞典式自助餐。这从下面对各章的简略的描述可以清楚地看出来。

第 1 章提供了有关射频与微波电路的一个简史。即使是相对全面地介绍这个宏大的题目,在一章内完成也是不可能的。因此,我们并不试图去这么做。我们的希望是这一章能以轻松的方式为全书的其余部分提供一个背景框架。

第 2 章介绍一些定义与基本概念。试图给出一个不同于在许多其他书籍提供的简单基于频率的有关“微波”的定义。这个定义比较起来不那么具有任意性。我们也尽力避免在书中的任一处出现实际求解麦克斯韦(Maxwell)方程组。代之以采用带有物理直观的方法。再一次强调,这本书是有关设计与测试,而不是纯粹的分析,所以进行的分析都是服务于这些目标的。

史密斯圆图与 S 参数是所有经典微波电路设计的主要成分,所以本书在第 3 章中提供了一个有关它们的简略介绍。史密斯圆图看上去的复杂表象让许多本来对射频与微波设计感兴趣的读者觉得沮丧。因此为了使其不那么吓人,我们通过介绍史密斯圆图的历史来说明它为什么这么有用。

在高频下,功率增益是很难实现的。因此对每一个微波工程师来说,阻抗匹配是一个不可缺少的任务。第 4 章提供了一些阻抗匹配的方法,同时简略解释了 Bode-Fano 极限。这个极限告诉我们什么时候需要放弃阻抗匹配的尝试(或者说,什么时候我们根本不应该去尝试这样做)。

在看到了一些性急的学生不在意地损坏了昂贵的接插件之后,作者感到有必要提供一章专门来讨论如何小心摆弄这些接插件。第 5 章回顾了许多常用的接插件,它们的历史起源与应用范围,以及如何恰当地保养它们。这一章也讨论了电缆线与它们的特性。

第 6 章研究了在微波频率下的集总无源元件的特性。提出了简单的电路模型(适合于设计,但不一定足够精确到能进行分析)以提醒学生们注意那些方面,它们可能会导致实现了的电路不能按照设计意图进行工作。另外不要轻视在射频与微波设计中的一个重要教训是总是存在着一些不能忽略的寄生元件。设计者必须学会怎样去利用这些寄生元件作为电路的一部分,而不是感到无可奈何。保持对寄生元件的简单而又准确的模型,能使我们设计出达到利用寄生元件为电路服务的聪明的办法。

在第 7 章中,我们介绍制作微波电路(不论是基于分立元件的还是以集成形式)的最常用的方法:微带线。尽管这一章主要讨论这种特定的实现平面电路的方式,我们也花些时间讨论共面波导与共面带状线,以及一般的带状线。在介绍了基本概念与一些简单的(但是相当精确的)设计方程之后,我们考察大量的可以用微带形式实现的无源元件。

一旦已经设计与制作了一些电路,就需要去表征它们。所采用的最基本的测量方法之一一是阻抗的测量。第 8 章提供了阻抗测量的几种方法,包括从时域反射计(reflectometry)到矢量网络分析。我们花很大的篇幅描述各种校准技术,因为这里的不留心会导致尽管用了价值 10 万美元的仪器,而只得到值 1 美元的答案。对那些不想在买一个房子(译者注:10 万美元可以在美国买一个房子了)与买一个网络分析仪之间作选择的设计者而言,我们提

^① 答案是“不是”。

供一个简单的“开槽线”的测量装置,它只需花 10 美元就能得到至少频率高达几个 GHz 的测试功能。幸运的是,这个 40dB(即 10^4 ,译者注)的成本的节省并不是以 40dB 的使用率下降为代价的。举个例子说,经过校准了的这个装置可以被用来确定频率在 1%~2% 以内的精度。

第 9 章专门讨论微波二极管。习惯于低频设计的工程师们经常会惊讶地发现二极管能完成十分广泛的功能。特别令新手感到惊奇的是某些二极管不仅能有放大作用,甚至还能用于产生振荡。

第 10 章在前一章的基础上描述众多的混频器。混频器是现代超外差收发器的核心所在。采用集总或分布的实现都进行了讨论,有源与无源的电路也都在讨论之列。取决于可以利用的技术及设计限制,对于给定的情况,任何上面的一种都可能是适用的。

当然,有源器件是更有趣些(至少对作者来说是如此),因此第 11 章是有关晶体管的讨论。器件物理工作者近十年来一直在勤奋地进行研究,至今给我们提供了 JFET, MOSFET, HEMT, VMOS, UMOS, LDMOS, HBT, 等等。这个器件的清单还在不断变长。我们试图提供对这些晶体管的大概统一的处理方法,并且集中在仅两类(MOSFET 与双极型)的晶体管作为一个更大类的晶体管的代表。

第 12 章考虑如何从我们所具备的晶体管技术中挤出最大的性能来。用几页的篇幅来描述如何对晶体管加直流偏置,因为在微波频率下,许多低频实施技术有其严重的后果(即带来寄生参数,这与前面讨论的是一样的)。然后讨论通过不大的电路复杂度的增加来将带宽展宽 2~3 倍。这里首次(根据作者的知识,此前未见报道)给出详细的对于一个桥接 T 形线圈(T-coil)带宽展宽技术的转移函数与最佳条件的推导。

在第 13 章中,我们将目标由“给我你能提供的所有的带宽”转为“给我最低可能的放大噪声”。首先讨论噪声模型,然后给出了噪声匹配理论。我们发现最大化功率转移的条件几乎不会与最小化噪声因子的条件相重合,因而有必要得到一个折中的策略。又一次,尽管我们集中在讨论一种或二种类型的晶体管,这里给出的一般概念适用于所有的放大器。

一旦已经建造了我们所认为的低噪声放大器,必须证明这一点。第 14 章描述了噪声系数测量所基于的原则,同时描述如何会得到错误的答案(这很容易发生)。取决于最初的目标(是使 LNA 看起来棒呢,还是让竞争对手的产品看起来差),可以故意犯这些错误或是去避免它们。

第 15 章描述如何得到振荡器所要求的可控不稳定性。在手足无措的微波工程师间的一个陈年笑话是“放大器发生振荡,而振荡器却只起放大作用”。我们希望通过这一章的讨论,使读者能设计真正能起振的振荡器,甚至是在所希望的频率下。

几乎每一个现代收发器在某处都会有一个频率综合器。第 16 章描述锁相环频率综合器,以及有关产生杂散信号的设计缺陷(与如何抑制)的广泛讨论。尽管理论的讨论能变得非常复杂,书中给出的几个设计实例可以帮助缺乏耐心的业余爱好者不需要懂得每一个方程就能完成一个设计工作。

第 17 章分析了相位噪声这一重要的课题。仅仅使得一个振荡器起振是不够的。频谱资源的不足要求每一个发射器遵守“做一个好邻居”的政策,即不在其被指定的频带外发射过多的能量。所有的振荡器在这方面都不是完美的,因此第 17 章确认相位噪声是由哪里来的,以及如何能减小相位噪声。

第 18 章描述相位噪声的测量。就像与噪声系数的测量一样,会有许多不被注意(或是注意到)的方面将相位噪声的测量搞糟糕。我们试图帮助读者梳理清楚这些细节。

第 19 章描述示波器、频谱分析仪与探针。工程师经常只将他们的注意力放在仪器本身,而忘了他们的任务也包括将被测试的电路连接到仪器上。如果在连接时不是足够小心,测量的精度会大大降低。这一章指出了普遍存在的操作错误与避免发生错误的方法。同时,因为高频探针是如此昂贵,本书提供了只需花几个美元就可做一个探针的方法。与探针有关联的,本书也提供了几个可用来测试探针与示波器连接的快速脉冲产生器电路。

第 20 章描述了实现 RF 与微波功率放大器的众多的方法。初看起来,设计满足所要求的增益与输出功率就足够了。遗憾的是,随着电信革命的继续,需求持续的增长,现在设计者必须达到高效率、低成本、应对负载条件变化的鲁棒性以及高线性度。我们试图给出取得所有这些目标的各种方法。

第 21 章的目标是阐述如何将信号功率发射到空气中去,或从空气中取得信号功率。天线看起来总是有点神秘。希望这一章的内容能至少从天线设计中去掉某些神秘感。我们主要讨论微带线贴片天线,但是在开始天线的讨论之前,首先来看一下经典的非平面天线(比如偶极子天线)以便确定一些重要的概念。

最后,第 22 章与第 23 章集中在无源滤波器的设计上。这里的讨论大致分为第 22 章的集总滤波器与第 23 章的微带线滤波器。在这两章的讨论中,我们始终试图给具有实际影响的细节以协调的注意,如元件值容差的效应,或者说是有限的 Q 值。我们希望通过众多的设计实例与模拟结果,会讲清楚设计步骤,让读者很快地将精力集中放在可以被接受与可重复的设计上。

我们再次指出,这些章的组织顺序是半随机的。读者没有必要依书中给出的顺序逐次阅读,可以任意跳过一些章节。记住,这是你自己的书(你有完全控制权)。

这本书的内容吸取了许多令人赞叹的先行者、我的同事与学生提供的信息。他们在过去的日子里与我分享他们的知识与观点。斯坦福的 Malcolm McWhorter 教授(现在是退休的终身教授)主持开发了 EE414 这门课要求的先修课 EE344 中的令人高兴的非常规 BNC 微带线组装步骤。EE344 的中文名称是微波入门实验课程。在这本书的后面会提到,这个组装方法十分适合学生与业余爱好者,因为它使得快速与低代价的制作工作在 GHz 低端频率下的电路原型成为可能。之前在惠普公司工作的 Howard Swain 与 Dieter Scherer 帮助创立了 EE344 这门课,并且一直在帮助教这门课。这两位是惠普公司被广泛使用的微波仪器的天才设计师。EE414 目前的顾问,Donald Cox 教授很慷慨地与我分享他多年来教授 EE344 的经验与体会。这本书的内容经过与他的交流后作了相应的调整。我也要感谢加州理工学院的 David Rutledge 教授,不仅仅是因为他大方地容许在这本书所附的 CD 盘中包括了他主持开发的 Puff 这个程序,而且因为通过与他的个人接触和他发表的著作而给予我丰富的知识。我为 David Leeson 就是我身边的同事这一事实得益匪浅。我的微波系统的知识因为他的随时在旁边而自动地增加了几个分贝。有这么一个如此知识丰富的同事,实在是上帝赐予的礼物。

我也是若干努力工作而又专注的研究生的受益者。他们制作与测试了这本书中描述的大多数课程设计项目。斯坦福的博士生 Sergei Krupenin, Arjang Hassibi, Talal Al-Attar, Moon-Jung Kim, 以及 Michael Mulligan 特别应该在此提及。安捷伦的 Rob Chavez, 他也

算是 EE414 的一个学生,经常长时间工作来帮助这门课的学生与助教。将来的 EE414 学生以及这本书的读者应该感谢他,因为他的远见卓识与建议成就了目前这些材料的组织。

研究经费是保持学术引擎运行的燃料,在这方面我是十分幸运的。惠普公司与安捷伦技术公司慷慨的仪器捐赠给了斯坦福几代学生直接有最先进的仪器动手的机会,而许多其他学校则没有这个条件。由 William G. Hoover 讲座学者教授基金与 David Packard/Lucile Packard 基金会提供的资助给了我极大的自由空间,使得我可以开发新的课程,探索一些看起来荒唐的研究想法,及撰写教科书。

最后,我深深感谢我所爱的妻子 Angelina,在这本书的写作期间给予我的耐心支持,以及平时的幸福生活。没有她的忍耐,在一个漫长的一年内,完成两本书稿的写作是不可能的。

目 录

第 1 章 微波技术简史	1
1.1 引言	1
1.2 真空管的诞生	9
1.3 阿姆斯特朗(Armstrong)与自激放大器/检波器/振荡器	11
1.4 奇才间的战争	14
1.5 结语	21
1.6 附录 A 其他一些无线系统的特征	22
1.7 附录 B 谁是无线电的真正发明人	23
第 2 章 射频与微波电路导论	30
2.1 一些定义	30
2.2 常规的频段划分	31
2.3 集总电路与分布电路	33
2.4 集总与分布域的联系	35
2.5 级联重复结构的策动点阻抗	35
2.6 传输线更详细的讨论	37
2.6.1 有损传输线的集总参数模型	37
2.6.2 有损传输线的特征阻抗	37
2.6.3 传播常数	38
2.6.4 γ 与传输线参数的关系	39
2.7 有限长度传输线的行为特征	41
2.7.1 终端匹配的传输线	41
2.7.2 终端接上任意负载阻抗的传输线	41
2.8 传输线方程小结	43
2.9 人造传输线	43
2.9.1 集总参数传输线的截止频率	44
2.9.2 集总参数传输线的终断	44
2.9.3 m 参数推导出的半段网络	45
2.10 总结	46
第 3 章 史密斯圆图与散射(S)参数	47
3.1 引言	47
3.2 史密斯圆图	47

3.3	散射参数(S 参数)	52
3.4	附录 A 对于单位的注解	54
3.5	附录 B 为什么采用 50Ω 或 75Ω	55
3.5.1	功率处理能力	56
3.5.2	衰减	56
3.5.3	总结	57
第 4 章	阻抗匹配	58
4.1	引言	58
4.2	最大功率传输定理	59
4.3	匹配方法	60
4.3.1	经典的集总元件匹配方法	60
4.3.2	经典的传输线阻抗变换器	67
4.3.3	宽带阻抗匹配技术	71
第 5 章	连接件 电缆线与波导	81
5.1	引言	81
5.2	连接件	81
5.2.1	模与衰减	81
5.2.2	非线性效应	85
5.3	同轴电缆	86
5.3.1	为何要同轴	86
5.3.2	同轴电缆的种类	87
5.4	波导	88
5.4.1	有关模的术语	89
5.4.2	波导的衰减性质	90
5.5	总结	90
5.6	附录 同轴电缆的性质	91
第 6 章	无源元件	93
6.1	引言	93
6.2	射频频率下的互连线：趋肤效应	93
6.3	电阻器	97
6.4	电容器	100
6.5	电感器	104
6.5.1	表面贴片电感和铁氧磁珠	104
6.5.2	电感公式	104
6.6	磁耦合的导体	110
6.6.1	变压器	110

6.6.2	耦合的键合线	113
6.6.3	宽带传输线变压器	113
6.6.4	窄带传输线变压器	116
6.7	总结	117
第7章	微带线、带状线与平面无源元件	118
7.1	引言	118
7.2	印刷电路板(PC板)的一般特征	118
7.3	印刷电路板上的传输线	121
7.3.1	共面波导(CPW)和共面带线(CPS)	125
7.3.2	线线之间的不连续性	127
7.3.3	连接器和传输线之间的过渡	130
7.4	用传输线段构成的无源器件	132
7.5	谐振器	134
7.6	合成器 分配器和耦合器	135
7.6.1	电阻性合成器	136
7.6.2	分布式合成器	136
7.6.3	混合型变换器和巴伦变换器	140
7.6.4	定向耦合器	147
7.6.5	宽带和尺寸缩小技术	164
7.7	总结	167
7.8	附录 A 一些有用的电感公式	167
7.8.1	平板金属和圆导线	168
7.8.2	单圆环	168
7.8.3	平面螺旋线	168
7.9	附录 B 边缘修正公式的推导	170
7.10	附录 C 其他材料的介电常数	173
第8章	阻抗测量	174
8.1	引言	174
8.2	时域反射计	174
8.2.1	定位不连续	174
8.2.2	表征不连续性	175
8.2.3	参数提取	177
8.2.4	补偿	179
8.2.5	TDR 总结	179
8.3	开槽线	180
8.3.1	引言	180
8.3.2	往昔: 开槽线阻抗测量	180

8.4	矢量网络分析仪(VNA)	186
8.4.1	背景	186
8.4.2	基本测试模式和误差来源	187
8.4.3	对微带线的一些专门考虑	192
8.5	校准方法小结	193
8.6	VNA 的其他一些测量能力	193
8.7	参考文献	194
8.8	附录 A 其他一些阻抗测量的装置	194
8.8.1	SWR 计	194
8.8.2	栅陷式(Grid-Dip)振荡器(GDO)	194
8.9	附录 B 设计课题	196
8.9.1	微带槽线设计方案	196
8.9.2	自制亚纳秒级脉冲发生器	198
第 9 章	微波二极管	201
9.1	引言	201
9.2	结型二极管	201
9.3	肖特基二极管	204
9.4	变容管	205
9.5	隧道二极管	207
9.6	PIN 二极管	209
9.7	噪声二极管	210
9.8	急变(snap)二极管	211
9.9	耿氏(Gunn)二极管	212
9.10	金属-绝缘层-金属(MIM)二极管	214
9.11	IMPATT(碰撞电离雪崩渡越时间: IMPact ionization Avalanche Transit-Time)二极管	214
9.12	总结	215
9.13	附录 自制便士二极管和晶体收音机	215
第 10 章	混频器	220
10.1	引言	220
10.2	混频器的基本原理	221
10.2.1	转换增益	221
10.2.2	噪声系数: 单边带(SSB)与双边带(DSB)	221
10.2.3	线性度和隔离度	222
10.2.4	杂散信号	224
10.3	非线性、时变与混频	225
10.4	基于乘法器的混频器	229

10.4.1	单平衡乘法器	229
10.4.2	有源双平衡混频器	231
10.4.3	无源双平衡混频器	234
10.4.4	单二极管混频器	236
10.4.5	双二极管混频器	237
10.4.6	双平衡二极管混频器	239
10.4.7	在镜像频率处的终断	240
10.4.8	其他混频器结构	242
第 11 章	晶体管	244
11.1	历史与回顾	244
11.2	建模	251
11.3	双极型晶体管的小信号模型	252
11.3.1	简单的直流模型	252
11.3.2	一个简单的高频模型	254
11.3.3	高频品质因数	256
11.3.4	从数据手册中提取模型参数	257
11.4	场效应晶体管(FET)模型	258
11.4.1	动态元件	260
11.4.2	MESFET 和 HEMT 的区别	263
11.5	总结	263
第 12 章	放大器	264
12.1	引言	264
12.2	微波偏置电路基础	264
12.2.1	双极型晶体管的偏置	265
12.2.2	耗尽型 FET 的偏置	269
12.2.3	有源偏置	271
12.3	带宽扩展技术	272
12.3.1	串联和并联补偿	272
12.3.2	更多关于用零点来拓展带宽	278
12.3.3	二端口网络的带宽拓展	279
12.4	并串放大器	282
12.4.1	并联-串联放大器的详细设计	283
12.4.2	分布式放大器(行波放大器)	290
12.4.3	宽带放大器的交调失真	293
12.5	调谐放大器	294
12.5.1	引言	294
12.5.2	带单个调谐负载的共射放大器	295

12.5.3	调谐放大器的详细分析	296
12.6	中和与单向化	297
12.7	异常的阻抗行为及稳定性	299
12.8	附录 桥接 T 形线圈转移函数的推导	304
12.8.1	差模响应	305
12.8.2	共模响应	305
12.8.3	完整的传输函数	306
12.8.4	最大平坦幅度响应的设计公式	307
12.8.5	最大平坦时延的设计公式	310
12.8.6	最大带宽的设计公式	311
12.8.7	总结	312
第 13 章	低噪声放大器(LNA)设计	313
13.1	引言	313
13.2	经典的两端口网络噪声理论	313
13.2.1	噪声因子	313
13.2.2	最优的源导纳	315
13.2.3	经典噪声优化方法的局限	316
13.2.4	噪声系数与噪声温度	316
13.3	双极型噪声模型的推导	317
13.4	窄带 LNA	321
13.5	几个实用的设计细节	323
13.5.1	实现发射极简并电感	323
13.5.2	集电极负载	324
13.5.3	偏置电路	324
13.6	线性度与大信号性能	325
13.7	馈空动态范围(SFDR)	328
13.8	级联系统	330
13.9	总结	333
13.10	附录 A 双极型晶体管的噪声系数方程	333
13.11	附录 B 场效应晶体管(FET)噪声参数	333
13.11.1	理论	333
13.11.2	实际考虑	335
第 14 章	噪声系数测量	336
14.1	引言	336
14.2	基本定义和噪声测量理论	336
14.3	噪声温度	339
14.4	级联系统噪声系数的 Friis 公式	341