

国外电子与通信教材系列

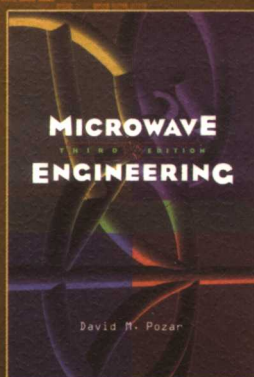


微波工程

(第三版)

Microwave Engineering

Third Edition



[美] David M. Pozar 著

张肇仪 周乐柱 吴德明 等译

徐承和 审校



电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

<http://www.phei.com.cn>

著作
力作
力作
力作

国外电子与通信教材系列

微波工程

(第三版)

Microwave Engineering

Third Edition

[美] David M. Pozar 著

张肇仪 周乐柱 吴德明 等译

徐承和 审校

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 · BEIJING

内 容 简 介

本书第1章至第4章介绍了电磁场的基本理论和电路理论,第5章至第12章利用相关的概念阐明了各种微波电路和器件,第13章描述了几种微波系统。在基本理论方面,本书既介绍了经典的电磁场理论,又叙述了现代微波工程中常用的分布电路和网络分析方法。在微波电路和器件方面,除了介绍传统的线性微波电路及波导型器件外,为适应当前微波工程的需要,还增加了平面结构元件和集成电路的设计、振荡器的相位噪声、晶体管功率放大器、非线性效应以及当今微波工程师经常使用的工具,如微波CAD软件包和网络分析仪等内容。在每章结尾提供了习题,并在书末提供了部分习题的答案,可供教师选用和学生自测。本书在内容上既有深度又有广度,是当今微波工程方面的一本优秀教材。

该书的特点是以基本概念为起点,然后以此为基础展示出有实用价值的专用电路和部件的设计,使读者知道和理解应用基本概念得出有用成果的处理过程,提高读者运用理论解决实际问题的能力。该书可作为高年级本科生或研究生的微波工程教材,也可作为微波电路及器件研制和开发的工程技术人员的参考书。

David M. Pozar: **Microwave Engineering, Third Edition.**

ISBN 0-471-44878-8

Copyright © 2005, 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 © 2005 by John Wiley & Sons, Inc. and Publishing House of Electronics Industry.

本书中文简体字翻译版由电子工业出版社和John Wiley & Sons合作出版。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: 01-2005-2687

图书在版编目(CIP)数据

微波工程:第3版/(美)波扎(Pozar, D. M.)著;张肇仪等译.-北京:电子工业出版社,2006.3

(国外电子与通信教材系列)

书名原文: Microwave Engineering, Third Edition

ISBN 7-121-02312-1

I. 微... II. ①波... ②张... III. 微波技术-教材 IV. TN015

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第013477号

责任编辑:谭海平 特约编辑:李玉龙

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:39 字数:998千字

印 次:2006年3月第1次印刷

定 价:59.00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。

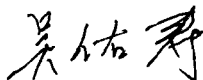
我国领导部门对教材建设一直非常重视。20世纪80年代,在原教委教材编审委员会的领导下,汇集了高等院校几百位富有教学经验的专家,编写、出版了一大批教材;很多院校还根据学校的特点和需要,陆续编写了大量的讲义和参考书。这些教材对高校的教学工作发挥了极好的作用。近年来,随着教学改革不断深入和科学技术的飞速进步,有的教材内容已比较陈旧、落后,难以适应教学的要求,特别是在电子学和通信技术发展神速、可以讲是日新月异的今天,如何适应这种情况,更是一个必须认真考虑的问题。解决这个问题,除了依靠高校的老师 and 专家撰写新的符合要求的教科书外,引进和出版一些国外优秀电子与通信教材,尤其是有选择地引进一批英文原版教材,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。



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
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 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
	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委员
	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、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分委员会委员
	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、秘书长
	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 教育部电子信息科学与电气信息类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、计算机与通信工程学院院长

译者序

马萨诸塞大学 David M. Pozar 教授编著的本书是一本适用于高年级本科生和研究生使用的教材。这本教材近年来在美国相当流行,前两版得到了读者的巨大反响,这一版又在收集广大教师和读者的大量反馈信息的基础上,进行了修改和更新。除了教材正文外,教师和学生还可在 Wiley 出版社的网址上得到为教材中许多(不是全部)习题和例题编写的 CAD 课件、SERENADE 电路文件和实验室手册,还可为有资格的教师提供所有习题的在线题解手册。所有这些均表明这是一本成熟的教材。

在电子工业出版社的大力支持下,我们决定翻译此书,以供各高校选用。我们推荐该教材的理由如下:

1. 第 1 章至第 9 章的内容大体上与国内多数在用教材的内容相仿,但实用性更强。
2. 重视理论分析和基本物理概念的阐述,但更重视应用。本书不但介绍微波器件的原理,还强调器件设计的训练。例如,第 9 章在论述铁氧体元件时,介绍了多种隔离器、相移器和环行器的原理性设计,这在国内教材中是不多见的。
3. 以较大篇幅介绍了有源微波器件以及相关的专题(如噪声、交调失真等)。对微波技术应用于无线通信系统,这些内容是不可或缺的。
4. 取材新颖。第三版主要增添了一些新内容,例如在噪声、非线性效应、射频 MEMS、晶体管功放、振荡器的相位噪声等领域都增添了新内容,并改写和增加了新的例题和习题。

这些理由使微波工程的教学内容在当今无线通信(手机通信和卫星通信)飞速发展的形势下,增加了新的活力。

该书可作为高年级本科生或研究生的微波工程教材,也可作为微波电路及器件研制和开发的工程技术人员的参考书。本书由四人合作翻译,不同译者在译文遣词用句上难免存在一些差异,但专业名词力求统一规范。书中的专业术语尽量注上原文,以便读者查询。在翻译过程中,我们尽量使书中主要概念的术语与国内规范译名相符,以免给读者造成不便。

全书共分 13 章和 10 个附录。其中第 1 章至第 3 章由周乐柱教授翻译;前言、第 4 章、第 9 章、第 10 章由徐承和教授翻译;第 12 章、第 13 章由吴德明教授翻译;第 5 章~第 8 章、第 11 章及附录由张肇仪教授翻译;徐承和教授还负责进行了全书的审校。刘家祯编审参加了译文的讨论及修改工作,李力工程师参加了文字录入工作,在此一并表示感谢。

由于译者水平有限,译文还有不妥之处,希望广大读者给予批评指正。最后,译者感谢电子工业出版社对本书翻译工作的大力支持和促进。

前 言

通过教育获得的知识,不但是人们对科学事物的积累,而且是人们对事物洞察力的积累。为此,我试图写一本着重于电磁学的基本概念、波传播、网络分析和应用于现代微波工程设计原理的教科书。然而,我避免采用手册的写法,即在较小的篇幅内罗列大量信息,不做或少做解释;本书中相当多的内容涉及到了专用电路和元件的设计,这很有实用价值并可启发读者积极进行思考。在这些设计的背后,我力图给出分析和逻辑思路,以使读者知道和理解应用基本概念得出有用成果的处理过程。能牢固掌握微波工程的基本概念和原理,并知道怎样把这些内容应用于特定设计对象的工程师,最有可能在有创造性和多产出的事业中胜出。

与更早时期定位于波导和场论相比,现代微波工程中占支配地位的内容是分布电路分析。当今大多数微波工程师从事平面结构元件和集成电路设计,无需直接求助于电磁场分析。当今微波工程师所使用的基本工具是微波 CAD(计算机辅助设计)软件和网络分析仪,而微波工程的教学必须对此给出回应,把重点转移到网络分析、平面电路和元器件以及有源电路设计方面。微波工程仍总是离不开电磁学(许多较为复杂的 CAD 软件包要使用严格的电磁场理论求解),而学生仍将从揭示事物的本质中受益(诸如波导模式和通过小孔耦合),但是把重点改变到微波电路分析和设计上来这一点是不容置疑的。

微波与射频(RF)技术已蔓延到了各个方面。在商业等领域,更是如此,其现代应用包括蜂窝电话、个人通信系统、无线局域数据网、车载毫米波防撞雷达、用于广播和电视的直播卫星、全球定位系统(GPS)、射频识别标识(identification tagging)、超宽频带无线通信和雷达系统以及微波环境遥感系统。防卫系统继续大量地依靠微波技术用于无源和有源测向、通信以及武器操控系统。这样的业务发展态势意味着,在可预见的将来,在射频和微波工程方面不存在缺少挑战性的课题;同时对于工程师们,显然需要领悟微波工程的基本原理,同样需要有把这些知识应用于实际感兴趣问题的创造能力。

本书前两版的成功推出是令人感奋的。对于这一版,我们从教师和读者那里努力详尽地获取反馈信息——有关哪些专题应删去和哪些专题应添加的想法。关于去掉某些具体内容几乎没有相一致的意见(看来本书中的几乎每一个论题都有人采用)。然而,赞成把有源电路设计及相关课题的内容进行扩充的意见相当一致。因此,我们已把原来的 12 章增加到了 13 章,并在噪声、非线性效应、RF 微机电系统(MEMS)、二极管和晶体管器件特性、场效应管(FET)混频器、晶体管振荡器、振荡器相位噪声、倍频器等方面增加了新的内容。对交调产物、动态范围、混频器、天线和接收机设计各小节进行了重写,增加了很多新的或修改过的例题和习题,其中一些与平面电路和元件的实际设计问题有关。这一版的另一个新特色是在书的结尾列出了部分习题的答案。这一版还去掉了一些论题,包括惟一性定理、法布里-珀罗谐振腔、电子战以及有关波导的一些例题。

这本微波工程教材针对于高年级本科生或一年级研究生,用于两学期课程的教学。若学生在本科生期间学习电磁学的情况良好,则书中第 1 章和第 2 章的内容可很快地复习过去。情况较差的学生则需要详尽地复习这两章的内容。然后循序渐进地学习第 3 章至第 13 章,任课教师可以适当地把重点选择在场论方面(第 3 章至第 9 章,第 13 章),或更多地选择在电路设计方面

(第4章至第8章,第10章至第12章)。另外,也可将重点放在第2章、第4章至第8章以及第10章至第13章中所包含的微波电路设计内容上,从而避开有关电磁场分析的内容。

在一门有成效的微波工程课程中,应有两项重要内容:使用计算机辅助设计(CAD)模拟软件和微波实验训练。若学生可通过CAD软件对课本中有设计意向的习题结果进行验证,则立刻得到的反馈信息会使学生建立起信心,并使所做的努力得到更为满意的回报。由于消除了令人乏味的重复计算,学生可以很容易地试用另一种方法,并对习题做更加详细的探究。举例来说,传输线损耗影响已在多个例题和习题中加以了探究——没有现代CAD工具的使用,要有效地做到这一点是不可能的。此外,在课堂上使用CAD工具,可对毕业后的学生提供有用的历练。大多数商业上推出的微波CAD工具是非常昂贵的,但多家软件制造商在其产品中对学院的使用进行打折,或是提供免费的“学生版”。例如,Ansoft公司对他们的SERENADE软件包提供有学生版,该版本可在网站 www.ansoft.com 上免费下载。

装备一个使学生亲身实践的微波教学实验室是很昂贵的,但它为学生提供了开发对微波现象的直觉感知能力和物理观念的最佳途径。针对课程第一学期的实验包括微波功率、频率、驻波比、阻抗和 S 参量的测量,以及对基本微波元件如调谐器、耦合器、谐振腔、负载、环行器和滤波器特性的测量。通过这些测量,学生们还将获得有关连接器、波导和微波测试设备的重要实际知识。作为一种选择,下学期更为先进的实验课程可考虑诸如噪声系数、交调失真和混频这样的主题。当然,能提供这类实验很大程度上依赖于可用的测试设备。

对于本书,我们在Wiley的网站上为学生和教师提供了若干资料。除了为教材中许多习题和例题编写的SERENADE电路文件之外,还有一个样本教学实验室手册,这可在 www.wiley.com/college/pozar 中找到。获得了授权的教师可通过网站 www.wiley.com/college/pozar 并进入 Instructor's Companion Site,得到本书中所有习题的在线题解手册。

致谢

在完成此书的过程中,很多人对我给予了帮助,特别是使用本书前两版的数不清的教师和学生们,在此对他们表示感谢。我还要感谢我多年来在马萨诸塞大学的同事们,尤其是 Keith Carver 和 Bob Jackson,他们提出了许多有益的建议并做出了很大的贡献, Juraj Bartolic (Zagreb 大学)提供了第11章中 μ 参量稳定性准则的简化推导。感谢以下各位提供了本书中的图片: Mil-litech公司的Naresh Deo博士,密歇根大学的John Bryant博士,Alpha工业公司的Harry Syrgos先生,马萨诸塞大学的Cal Swift教授、Bob Jackson教授和B.Hou先生, M/A-COM的J.Wendler先生,雷声(Raytheon)公司的Mike Packard博士和Mark Russell先生,HP公司Hugo Vifian先生以及林肯实验室的M.Abouzahra博士。最后,我要感谢John Wiley & Sons出版社的Bill Zobrist和全体雇员在这项工作中所给予的宝贵帮助和专业技能方面的贡献。

David M. Pozar
Amherst, MA

目 录

第 1 章 电磁理论	1
1.1 微波工程简介	1
1.1.1 微波工程的应用	1
1.1.2 微波工程的简史	3
1.2 麦克斯韦方程	4
1.3 媒质中的场和边界条件	7
1.3.1 一般材料分界面上的场	10
1.3.2 介质分界面上的场	11
1.3.3 理想导体(电壁)分界面上的场	11
1.3.4 磁壁边界条件	12
1.3.5 辐射条件	12
1.4 波方程和基本平面波的解	12
1.4.1 亥姆霍兹方程	12
1.4.2 无耗媒质中的平面波	13
1.4.3 一般有耗媒质中的平面波	14
1.4.4 良导体中的平面波	15
1.5 平面波的通解	17
1.5.1 圆极化平面波	20
1.6 能量和功率	21
1.6.1 良导体吸收的功率	22
1.7 媒质分界面上的平面波反射	24
1.7.1 普通媒质	24
1.7.2 无耗媒质	25
1.7.3 良导体	26
1.7.4 理想导体	27
1.7.5 表面阻抗概念	28
1.8 斜入射到一个介电界面	30
1.8.1 平行极化	31
1.8.2 垂直极化	32
1.8.3 全反射和表面波	33
1.9 一些有用的定理	35
1.9.1 互易定理	35
1.9.2 镜像理论	36
参考文献	38
习题	39

第 2 章 传输线理论	42
2.1 传输线的集总元件电路模型	42
2.1.1 传输线上的波传播	43
2.1.2 无耗传输线	44
2.2 传输线的场分析	44
2.2.1 传输线参量	45
2.2.2 由场分析导出同轴线的电报方程	47
2.2.3 无耗同轴线的传播常数、阻抗和功率流	48
2.3 端接负载的无耗传输线	49
2.3.1 无耗传输线的特殊情况	51
2.4 Smith 圆图	55
2.4.1 组合阻抗-导纳的 Smith 圆图	57
2.4.2 开槽线	59
2.5 四分之一波长变换器	62
2.5.1 阻抗观点	62
2.5.2 多次反射观点	64
2.6 源和负载失配	66
2.6.1 负载与线匹配	67
2.6.2 源与带负载的线匹配	67
2.6.3 共轭匹配	67
2.7 有耗传输线	68
2.7.1 低耗线	68
2.7.2 无畸变的传输线	69
2.7.3 端接的有耗传输线	70
2.7.4 计算衰减的微扰法	71
2.7.5 惠勒增量电感定则	72
参考文献	74
习题	74
第 3 章 传输线和波导	78
3.1 TEM、TE 和 TM 波的通解	78
3.1.1 TEM 波	80
3.1.2 TE 波	81
3.1.3 TM 波	82
3.1.4 由电介质损耗引起的衰减	83
3.2 平行平板波导	84
3.2.1 TEM 模	84
3.2.2 TM 模	85
3.2.3 TE 模	88
3.3 矩形波导	90
3.3.1 TE 模	90

3.3.2	TM 模	94
3.3.3	部分加载波导的 TE_{m0} 模	98
3.4	圆波导	100
3.4.1	TE 模	101
3.4.2	TM 模	104
3.5	同轴线	108
3.5.1	TEM 模	108
3.5.2	高阶模	109
3.6	接地介质板上的表面波	112
3.6.1	TM 模	112
3.6.2	TE 模	115
3.7	带状线	118
3.7.1	传播常数、特征阻抗和衰减的公式	119
3.7.2	近似的静电解	121
3.8	微带线	123
3.8.1	有效介电常数、特征阻抗和衰减的计算公式	124
3.8.2	近似的静电解	125
3.9	横向谐振法	128
3.9.1	部分加载矩形波导的 TE_{0n} 模	128
3.10	波速和色散	129
3.10.1	群速	129
3.11	传输线和波导小结	132
3.11.1	其他类型的传输线和波导	132
	参考文献	134
	习题	135
第 4 章	微波网络分析	138
4.1	阻抗和等效电压与电流	138
4.1.1	等效电压与电流	138
4.1.2	阻抗概念	142
4.1.3	$Z(\omega)$ 和 $\Gamma(\omega)$ 的奇偶性	144
4.2	阻抗和导纳矩阵	145
4.2.1	互易网络	146
4.2.2	无耗网络	148
4.3	散射矩阵	149
4.3.1	互易网络与无耗网络	151
4.3.2	参考平面的移动	154
4.3.3	广义散射参量	155
4.4	传输(ABCD)矩阵	157
4.4.1	与阻抗矩阵的关系	159
4.4.2	二端口网络的等效电路	159

4.5	信号流图	161
4.5.1	信号流图的分解	162
4.5.2	TRL 网络分析仪校正的应用	165
4.6	不连续性和模式分析	168
4.6.1	矩形波导中 H 平面阶梯的模式分析	170
4.7	波导的激励——电流和磁流	175
4.7.1	只激励一个波导模式的电流片	175
4.7.2	任意电流源或磁流源的模式激励	176
4.8	波导激励——小孔耦合	179
4.8.1	通过横向波导壁上小孔的耦合	181
4.8.2	通过波导宽壁上小孔的耦合	183
	参考文献	185
	习题	185
第 5 章	阻抗匹配和调谐	190
5.1	用集总元件匹配(L 网络)	190
5.1.1	解析解法	191
5.1.2	Smith 圆图解法	192
5.2	单短截线调谐	195
5.2.1	并联短截线	196
5.2.2	串联短截线	199
5.3	双短截线调谐	201
5.3.1	Smith 圆图解法	202
5.3.2	解析解法	204
5.4	四分之一波长变换器	206
5.5	小反射理论	209
5.5.1	单节变换器	209
5.5.2	多节变换器	210
5.6	二项式多节匹配变换器	211
5.7	切比雪夫多节匹配变换器	214
5.7.1	切比雪夫多项式	215
5.7.2	切比雪夫变换器的设计	216
5.8	渐变传输线	219
5.8.1	指数渐变	220
5.8.2	三角形渐变	221
5.8.3	Klopfenstein 渐变	221
5.9	Bode-Fano 约束条件	224
	参考文献	226
	习题	226
第 6 章	微波谐振器	228
6.1	串联和并联谐振电路	228

6.1.1	串联谐振电路	228
6.1.2	并联谐振电路	230
6.1.3	有载和无载 Q	232
6.2	传输线谐振器	233
6.2.1	短路 $\lambda/2$ 传输线	233
6.2.2	短路 $\lambda/4$ 传输线	236
6.2.3	开路 $\lambda/2$ 传输线	237
6.3	矩形波导谐振腔	238
6.3.1	谐振频率	239
6.3.2	$TE_{10\ell}$ 模的 Q 值	240
6.4	圆波导腔	242
6.4.1	谐振频率	243
6.4.2	$TE_{nm\ell}$ 模的 Q	244
6.5	介质谐振腔	247
6.5.1	$TE_{01\delta}$ 模的谐振频率	247
6.6	谐振腔的激励	250
6.6.1	临界耦合	250
6.6.2	缝隙耦合微带谐振器	252
6.6.3	小孔耦合空腔谐振器	254
6.7	腔的微扰	256
6.7.1	材料微扰	257
6.7.2	形状微扰	259
	参考文献	261
	习题	261
第 7 章	功率分配器和定向耦合器	265
7.1	分配器和耦合器的基本特性	265
7.1.1	三端口网络(T型结)	265
7.1.2	四端口网络(定向耦合器)	268
7.2	T型结功率分配器	271
7.2.1	无耗分配器	271
7.2.2	电阻性分配器	273
7.3	Wilkinson 功率分配器	274
7.3.1	偶-奇模分析	274
7.3.2	不等功率分配和 N 路 Wilkinson 分配器	277
7.4	波导定向耦合器	279
7.4.1	倍兹孔定向耦合器	279
7.4.2	多孔耦合器的设计	282
7.5	正交(90°)混合网络	287
7.5.1	偶-奇模分析	288
7.6	耦合线定向耦合器	290

7.6.1	耦合线理论	291
7.6.2	耦合线耦合器的设计	293
7.6.3	多节耦合线耦合器的设计	297
7.7	Lange 耦合器	300
7.8	180°混合网络	303
7.8.1	环形混合网络的偶-奇模分析	305
7.8.2	渐变耦合线混合网络偶-奇模分析	308
7.8.3	波导魔 T	311
7.9	其他耦合器	312
	参考文献	314
	习题	315
第 8 章	微波滤波器	319
8.1	周期结构	319
8.1.1	无限长周期结构的分析	320
8.1.2	有负载的周期结构	322
8.1.3	$k\beta$ 图和波速	323
8.2	用镜像参量法设计滤波器	325
8.2.1	二端口网络的镜像阻抗和传递函数	326
8.2.2	定 k 式滤波器节	327
8.2.3	m 导出式滤波器节	330
8.2.4	复合滤波器	333
8.3	用插入损耗法设计滤波器	335
8.3.1	用功率损耗比表征	335
8.3.2	最平坦低通滤波器原型	337
8.3.3	等波纹低通滤波器原型	340
8.3.4	线性相位低通滤波器原型	342
8.4	滤波器转换	343
8.4.1	阻抗和频率定标	343
8.4.2	带通和带阻转换	346
8.5	滤波器的实现	349
8.5.1	理查德变换	350
8.5.2	科洛达恒等关系	350
8.5.3	阻抗和导纳倒相器	354
8.6	阶跃阻抗低通滤波器	355
8.6.1	短传输线段近似等效电路	356
8.7	耦合线滤波器	359
8.7.1	耦合线段的滤波器特性	359
8.7.2	耦合线带通滤波器的设计	363
8.8	耦合谐振器滤波器	368
8.8.1	用四分之一波长谐振器的带阻和带通滤波器	368

8.8.2	用电容性耦合串联谐振器的带通滤波器	372
8.8.3	用电容性耦合并联谐振器的带通滤波器	374
参考文献		377
习题		378
第 9 章	铁氧体元件的理论与设计	380
9.1	亚铁磁性材料的基本性质	380
9.1.1	磁导率张量	380
9.1.2	圆极化场	385
9.1.3	损耗效应	386
9.1.4	退磁因子	388
9.2	铁氧体中的平面波传播	391
9.2.1	在偏置场方向的传播(法拉第旋转)	391
9.2.2	垂直于偏置场的波传播(双折射)	394
9.3	在铁氧体加载的矩形波导中的波传播	396
9.3.1	载有单片铁氧体的波导的 TE_{m0} 模	396
9.3.2	有两个对称铁氧体片的波导中的 TE_{m0} 模	399
9.4	铁氧体隔离器	400
9.4.1	谐振隔离器	400
9.4.2	场位移隔离器	403
9.5	铁氧体相移器	405
9.5.1	非互易锁存相移器	406
9.5.2	其他类型的铁氧体相移器	408
9.5.3	回转器	409
9.6	铁氧体环形器	409
9.6.1	失配环形器的特性	410
9.6.2	结型环形器	411
参考文献		415
习题		415
第 10 章	噪声与有源射频元件	418
10.1	微波电路中的噪声	418
10.1.1	动态范围和噪声源	419
10.1.2	噪声功率与等效噪声温度	420
10.1.3	噪声温度的测量	422
10.1.4	噪声系数	424
10.1.5	级联系统的噪声系数	425
10.1.6	无源二端口网络的噪声系数	427
10.1.7	失配有耗线的噪声系数	428
10.2	动态范围和交调失真	430
10.2.1	增益压缩	431
10.2.2	交调失真	432

10.2.3	3 阶截断点	433
10.2.4	动态范围	434
10.2.5	级联系统的截断点	436
10.2.6	无源交调	437
10.3	RF 二极管特性	438
10.3.1	肖特基二极管和检波器	438
10.3.2	PIN 二极管和控制电路	442
10.3.3	变容二极管	447
10.3.4	其他二极管	448
10.4	RF 晶体管特性	448
10.4.1	场效应晶体管	450
10.4.2	双极结型晶体管	451
10.5	微波集成电路	453
10.5.1	混合微波集成电路	453
10.5.2	单片微波集成电路	454
	参考文献	457
	习题	457
第 11 章	微波放大器设计	460
11.1	二端口功率增益	460
11.1.1	二端口功率增益的定义	460
11.1.2	二端口功率增益的进一步讨论	463
11.2	稳定性	465
11.2.1	稳定性圆	465
11.2.2	无条件稳定的检验	467
11.3	单级晶体管放大器设计	470
11.3.1	最大增益设计(共轭匹配)	470
11.3.2	等增益圆和固定增益的设计	475
11.3.3	低噪声放大器设计	479
11.4	宽带晶体管放大器设计	482
11.4.1	平衡放大器	482
11.4.2	分布放大器	484
11.5	功率放大器	489
11.5.1	功率放大器的特性和放大器类型	489
11.5.2	晶体管的大信号特性	490
11.5.3	A 类功率放大器的设计	490
	参考文献	492
	习题	493
第 12 章	振荡器和混频器	495
12.1	RF 振荡器	495
12.1.1	一般分析方法	496