



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会推荐教材
电子信息学科基础课程系列教材



微波与射频技术

彭沛夫 张桂芳 编著

清华大学出版社





普通高等教育“十一五”国家级规划教材



教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会推荐教材
电子信息学科基础课程系列教材

微波与射频技术

彭沛夫 张桂芳 编著



清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书内容共分13章,分别阐述了微波与射频技术的基本概念,电磁场与电磁波的基本理论,传输线,微波波导与微带传输线,微波与射频谐振电路,微波与射频网络分析,阻抗匹配与阻抗变换,定向耦合器与滤波器,功率衰减器与功率分配器,振荡器与放大器,射频识别,射频/微波发射与接收,以及微波射频电路设计与仿真。

该书内容丰富、重点突出,具有明显的先进性,叙述通俗易懂、深入浅出、联系实际、面向应用,既适应教学,也方便自学,可作为高等学校本科通信工程、电子信息工程、电子科学与技术、物联网等专业的教材。也可作为职业技术学院和成人高等教育有关专业的教材或参考书,并供相关工程技术人员阅读参考。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

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

微波与射频技术/彭沛夫,张桂芳编著.--北京:清华大学出版社,2013.1

电子信息学科基础课程系列教材

ISBN 978-7-302-30749-5

I. ①微… II. ①彭… ②张… III. ①微波技术—高等学校—教材 ②射频—高等学校—教材
IV. ①TN015 ②O45

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 284582 号

责任编辑:文 怡

封面设计:常雪影

责任校对:焦丽丽

责任印制:何 芊



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

课 件 下 载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62795954

印 刷 者:三河市君旺印装厂

装 订 者:三河市新茂装订有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm

印 张:25.75

字 数:575千字

版 次:2013年1月第1版

印 次:2013年1月第1次印刷

印 数:1~3000

定 价:49.00元

《电子信息学科基础课程系列教材》
编 审 委 员 会

主任委员

王志功(东南大学)

委员 (按姓氏笔画)

马旭东(东南大学)	邓建国(西安交通大学)
王小海(浙江大学)	王诗宓(清华大学)
王 萍(天津大学)	王福昌(华中科技大学)
刘宗行(重庆大学)	刘润华(中国石油大学)
刘新元(北京大学)	张 石(东北大学)
张晓林(北京航空航天大学)	沈连丰(东南大学)
陈后金(北京交通大学)	郑宝玉(南京邮电大学)
郭宝龙(西安电子科技大学)	柯亨玉(武汉大学)
高上凯(清华大学)	高小榕(清华大学)
徐淑华(青岛大学)	袁建生(清华大学)
崔 翔(华北电力大学)	傅丰林(西安电子科技大学)
董在望(清华大学)	曾孝平(重庆大学)
蒋宗礼(北京工业大学)	

《电子信息学科基础课程系列教材》

丛书序

电子信息学科是当今世界上发展最快的学科,作为众多应用技术的理论基础,对人类文明的发展起着重要的作用。它包含诸如电子科学与技术、电子信息工程、通信工程和微波工程等一系列子学科,同时涉及计算机、自动化和生物电子等众多相关学科。对于这样一个庞大的体系,想要在学校将所有知识教给学生已不可能。以专业教育为主要目的的大学教育,必须对自己的学科知识体系进行必要的梳理。本系列丛书就是试图搭建一个电子信息学科的基础知识体系平台。

目前,中国电子信息类学科高等教育的教学中存在着如下问题:

- (1) 在课程设置和教学实践中,学科分立,课程分立,缺乏集成和贯通;
- (2) 部分知识缺乏前沿性,局部知识过细、过难,缺乏整体性和纲领性;
- (3) 教学与实践环节脱节,知识型教学多于研究型教学,所培养的电子信息学科人才不能很好地满足社会的需求。

在新世纪之初,积极总结我国电子信息类学科高等教育的经验,分析发展趋势,研究教学与实践模式,从而制定出一个完整的电子信息学科基础教程体系,是非常有意义的。

根据教育部高教司 2003 年 8 月 28 日发出的[2003]141 号文件,教育部高等学校电子信息与电气信息类基础课程教学指导分委员会(基础课分教指委)在 2004—2005 两年期间制定了“电路分析”、“信号与系统”、“电磁场”、“电子技术”和“电工学”5 个方向电子信息科学与电气信息类基础课程的教学基本要求。然而,这些教学要求基本上是按方向独立开展工作的,没有深入开展整个课程体系的研究,并且提出的是各课程最基本的教学要求,针对的是“2+X+Y”或者“211 工程”和“985 工程”之外的大学。

同一时期,清华大学出版社成立了“电子信息学科基础教程研究组”,历时 3 年,组织了各类教学研讨会,以各种方式和渠道对国内外一些大学的 EE(电子电气)专业的课程体系进行收集和研究,并在国内率先推出了关于电子信息学科基础课程的体系研究报告《电子信息学科基础教程 2004》。该成果得到教育部高等学校电子信息与电气学科教学指导委员会的高度评价,认为该成果“适应我国电子信息学科基础教学的需要,有较好的指导意义,达到了国内领先水平”,“对不同类型院校构建相关学科基础教学平台均有较好的参考价值”。

在此基础上,由我担任主编,筹建了“电子信息学科基础课程系列教材”编委会。编委会多次组织部分高校的教学名师、主讲教师和教育部高等学校教学指导委员会委员,进一步探讨和完善《电子信息学科基础教程 2004》研究成果,并组织编写了这套“电子信息学科基础课程系列教材”。

在教材的编写过程中,我们强调了“基础性、系统性、集成性、可行性”的编写原则,突出了以下特点:

(1) 体现科学技术领域已经确立的新知识和新成果。

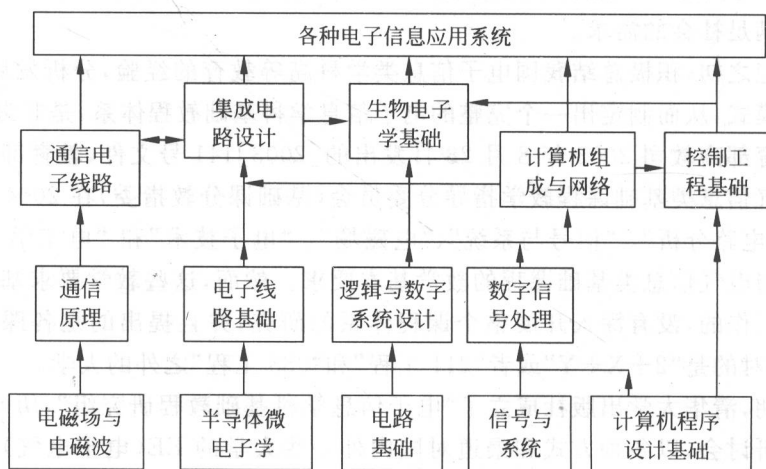
(2) 学习国外先进教学经验,汇集国内最先进的教学成果。

(3) 定位于国内重点院校,着重于理工结合。

(4) 建立在对教学计划和课程体系的研究基础之上,尽可能覆盖电子信息学科的全部基础。本丛书规划的 14 门课程,覆盖了电气信息类如下全部 7 个本科专业:

- 电子信息工程
- 通信工程
- 电子科学与技术
- 计算机科学与技术
- 自动化
- 电气工程与自动化
- 生物医学工程

(5) 课程体系整体设计,各课程知识点合理划分,前后衔接,避免各课程内容之间交叉重复,目标是使各门课程的知识点形成有机的整体,使学生能够在规定的课时数内,掌握必需的知识和技术。各课程之间的知识点关联如下图所示:



即力争将本科生的课程限定在有限的与精选的一套核心概念上,强调知识的广度。

(6) 以主教材为核心,配套出版习题解答、实验指导书、多媒体课件,提供全面的教学解决方案,实现多角度、多层面的人才培养模式。

(7) 由国内重点大学的精品课主讲教师、教学名师和教指委委员担任相关课程的设计和教材的编写,力争反映国内最先进的教改成果。

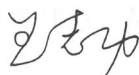
我国高等学校电子信息类专业的办学背景各不相同,教学和科研水平相差较大。本系列教材广泛听取了各方面的意见,汲取了国内优秀的教学成果,希望能为电子信息学科教学提供一份精心配备的搭配科学、营养全面的“套餐”,能为国内高等学校教学内容

和课程体系的改革发挥积极的作用。

然而,对于高等院校如何培养出既具有扎实的基本功,又富有挑战精神和创造意识的社会栋梁,以满足科学技术发展和国家建设发展的需要,还有许多值得思考和探索的问题。比如,如何为学生营造一个宽松的学习氛围?如何引导学生主动学习,超越自己?如何为学生打下宽厚的知识基础和培养某一领域的研究能力?如何增加工程方法训练,将扎实的基础和宽广的领域才能转化为工程实践中的创造力?如何激发学生深入探索的勇气?这些都需要我们教育工作者进行更深入的研究。

提高教学质量,深化教学改革,始终是高等学校的工作重点,需要所有关心我国高等教育事业人士的热心支持。在此,谨向所有参与本系列教材建设工作的同仁致以衷心的感谢!

本套教材可能会存在一些不当甚至谬误之处,欢迎广大的使用者提出批评和意见,以促进教材的进一步完善。



2008年1月

微波与射频技术在 21 世纪之所以发展迅速,其主要原因是它有巨大的应用价值。目前,现代无线通信、卫星通信、全球定位系统(GPS)、物联网工程、射频识别(RFID)、微波遥感、医疗监控、微电子学、纳米技术、电机科学、雷达等传感器技术乃至生命科学与技术都是以电磁场、微波与射频技术为基础,而现代武器装备信息化更是离不开微波、毫米波这项核心技术的支撑。例如微波雷达技术不仅应用于国防,还用于导航、气象测量、大地测量、工业检测和交通管理等方面。微波仪器方面,微波测量仪器、微波信号源、微波专用仪器也极具应用价值。因此微波与射频技术支撑着众多的社会效益和经济效益极其明显的高新科技产业。

纵观微波与射频技术在各领域不断地向深度和广度的应用发展,培养其技术人才是关键,而《微波与射频技术》是一本难得的、极具教学性、应用性、先进性的书。因为该书具有如下特点:

(1) 以通俗易懂的写作方法,将繁杂的理论推导通俗化,包括一些难懂的理论 and 复杂的数学推导,作者深入浅出地用易于理解的数学分析给出了一些重要的物理概念和数学公式,书中涉及的内容广泛,重点突出微波与射频(RF)技术的同时,将电磁场与天线的理论也融为一体,且尽量限制了篇幅,始终保持理论体系的完整、合理与严谨,尽量使读者易于理解和接受。

(2) 作者站在现代微波与射频领域的前沿,提出分析问题和解决问题的新思维、新方法,写出了特色,写成了精品,以全新的面貌出现在读者的面前。

(3) 物理概念清楚,按照从一般到具体,从原理到应用,在通俗介绍微波系统、通信系统的基本概念和原理的基础上、对各种射频和微波通信电路的设计进行了阐述和分析,并介绍了相关的设计方法。应用实例多,电路设计和调试方法明确,书中每章都附有习题,便于教学,方便自学,通过各章的学习,能达到掌握现代微波与射频技术的目的。

(4) 该书具备较强的可读性和可操作性。做到从一个初学者的角度看问题,从实践应用的角度讲解问题,理论介绍和实践相结合,如微波射频电路设计与仿真技术,帮助没有 ADS、HFSS 使用基础的初学者毫无障碍地进入 ADS、HFSS 设计领域。通过本书循序渐进地学习,然后从陌生到熟悉,从熟悉到精通。

彭沛夫教授在微波与射频及相关领域已作了多年的研究,更是微波教学研究的探索者。他的前一部书《微波技术与实验》是国家“十一五”规划教材,本书在前一部书的基础

上,内容更新,分析更透彻,理论与技术更翔实,实用性更强。现在各院校开设该内容的课程名称虽然不同,如“电磁场与微波技术”、“微波与射频技术”、“微波技术与天线”等。该书作为这些课程的教材恰到好处。我们相信相关专业课程采用该书后,必将受益匪浅。

教材编审委员会
2012年8月

微波与射频(RF)技术极大地改变了人类的生产和生活,其应用十分广泛,在卫星通信、雷达系统、全球定位系统(GPS)、射频识别标识、超宽带无线通信、防卫武器操作系统、医疗监控、物联网等诸多领域都有微波与射频技术的重要应用。

本书立足微波与射频技术的前沿领域,完整体现现代微波与射频科学技术体系,吸收现代化新知识。注重基础知识,突出新的理论和技术,立足培养学生在工程实际中的应用能力,提高学生的创新能力,真正使学生成为现代电子与信息领域中的技术人才。

微波与射频是一对孪生兄弟,电磁场、电磁波、微波、射频、天线是其家族中的兄弟姐妹,它们相辅相成,密切相关,共成体系。这门课程牵涉面广,理论性较强,概念较抽象,公式较繁琐,内容繁多。本书在重点突出微波与射频(RF)技术的同时,将电磁场、电磁波及天线知识融合在一起。以通俗易懂的写作方法,将繁杂的理论推导通俗化,在尽量使读者易于理解和接受的同时,又保持理论体系的完整、合理与严谨。

本书注重精炼,每个知识点都是用最精炼的语言进行基础知识和基本理论的分析,得出简明精练的结论,使读者易学易懂,消除了读者对微波学习的畏难情绪。

本书引入了工程应用技术和方法。如射频识别(RFID),微波射频的设计与仿真。各章中的举例,都是从实际出发,面向应用,使学生学有所用、有的放矢,为今后理论研究的深造和工程实际应用打下良好的基础。

本书共有13章,第1章概论,介绍了微波频段及特点,描述了微波在通信、工农业生产、雷达操作系统及家庭生活中的应用,微波技术的研究方法;第2章电磁场与电磁波的基本理论,作为本书的理论基础,精炼地论证了麦克斯韦方程、波动方程及电磁波的传播;第3章传输线理论,精巧地阐述了传输线方程解的构成、特性参量及其应用;第4章微波波导,研究了导波原理及各种波导和微波传输线及其应用,精辟地介绍了现代光纤技术;第5章微波与射频谐振电路,分析了谐振腔的特性,阐述了传输线谐振电路及各种谐振腔的理论和应用;第6章微波与射频网络分析,精炼地分析了阻抗、导纳、混合、转移、散射、传输参量的基本概念及其应用;第7章阻抗匹配与阻抗变换,详细研究了各种匹配网络以及Smith圆图阻抗匹配网络的设计,介绍了阻抗变换器及其应用;第8章定向耦合器与滤波器,简述了定向耦合器的基本概念和测量,讨论了滤波器的基本概念和分析方法,介绍了滤波器的设计与转换,以及微波滤波器的实现;第9章功率衰减器与功率分配器,从现代微波技术应用的角度介绍了各种功率衰减器和功率分配器;第10章振荡器与放大器,介绍了现代微波振荡器与射频放大器的基本原理和应用技术,详细阐述了锁相环、微波固态源以及磁控管的原理和工程应用;第11章射频识别(RFID),精炼介绍了

射频识别的基本原理和应用系统构架,从应用层面分析了基于 AT89S51 单片机的 RFID 读写器、ARM 处理器的读写器及 RFID 应用举例;第 12 章射频/微波发射与接收,介绍了天线的基本原理,讲解了现代微波通信中应用最广泛、技术较先进的有关天线;第 13 章微波射频电路设计与仿真,比较和分析了各种微波射频电路设计与仿真技术,精细地介绍了 ADS 软件、HFSS 软件的具体操作方法,使初学者毫无障碍地进入 ADS 和 HFSS 设计领域,并把 ADS 和 HFSS 真正应用到实际工程设计工作中去。

这 13 章内容,包括了电磁场、电磁波、微波、射频、天线的基本理论和应用技术。因此本书作为电子信息类教材,适用面较广,也就是说不管课时多少,不管课程名称是“微波与射频技术”,还是“电磁场与微波技术”、“微波技术与天线”,都能选用本书。教学上可按需精选并取舍本书内容。同时本书配有课件以及微波与射频实验。

本书的完成得到了湖南师范大学的支持,得到了同行众多的专家教授的关心和帮助,我们的研究生为此书做了大量的工作,在此谨向他们表示衷心的感谢。本书参考了国内外许多专家的书籍及文献,仅将主要的参考文献列于书后,在此向他们表示诚挚的谢意。

由于作者水平有限,书中难免存在缺点和错误,恳请读者批评指正。

彭沛夫 张桂芳

2012 年 8 月

第 1 章 概论	1
1.1 引言	2
1.2 微波与射频	2
1.2.1 微波与射频概念	2
1.2.2 微波与射频的特点	2
1.3 微波通信系统	5
1.4 微波传输	15
1.5 微波在生活与生产中的应用	18
1.6 微波的生物效应与安全性	22
1.7 微波的研究方法	23
习题	23
第 2 章 电磁场与电磁波的基本理论	24
2.1 麦克斯韦方程	25
2.1.1 静态电磁场的基本定律和基本场矢量	25
2.1.2 法拉第电磁感应定律	29
2.1.3 传导电流与位移电流	29
2.1.4 麦克斯韦方程	31
2.1.5 结构方程	32
2.2 坡印廷定理	33
2.3 波动方程	34
2.4 介质中的平面波	36
2.5 自由空间中的平面波	40
2.6 导电媒质中的平面波	41
2.7 波的极化	43
2.7.1 线极化波	43
2.7.2 椭圆极化波	44
2.7.3 圆极化波	45
习题	46

目录

第3章 传输线理论	47
3.1 传输线简介	48
3.2 传输线方程及其解	48
3.2.1 传输线方程	48
3.2.2 传输线方程的解	50
3.2.3 相速和群速	51
3.3 无耗传输线	52
3.3.1 无耗传输线简介	52
3.3.2 端接负载的无耗传输线	52
3.4 无耗传输线的状态分析	57
3.4.1 终端短路的情形	57
3.4.2 终端开路的情形	58
3.4.3 终端接任意复数阻抗的情形	59
3.4.4 具有不同特征阻抗的两段传输线连接	61
3.5 同轴线	62
3.5.1 同轴线上电压、电流和传输功率	62
3.5.2 耐压最高时的特性阻抗	63
3.5.3 传输功率最大时的特性阻抗	63
3.5.4 衰减最小时的特性阻抗	63
3.6 有耗传输线	64
3.6.1 低损耗传输线	65
3.6.2 终端接负载的有耗传输线	66
3.6.3 阻抗与传播常数的测量	67
3.7 传输线的阻抗匹配	69
3.7.1 负载的功率计算	69
3.7.2 传输线的三种阻抗匹配状态	70
3.7.3 阻抗匹配的方法	71
3.8 Smith 圆图	72
习题	77
第4章 微波波导	80
4.1 引言	81

4.2	导波原理	82
4.3	矩形波导	84
4.3.1	TE 波和 TM 波的电磁场分布	84
4.3.2	矩形波导的传输特性	87
4.3.3	传输功率	90
4.3.4	波导的损耗与衰减	92
4.3.5	矩形波导尺寸的选择	94
4.4	平行平板波导	95
4.5	圆形波导	97
4.5.1	场方程	97
4.5.2	圆形波导的传输特性	100
4.5.3	圆形波导的三个主要模式	101
4.6	光纤波导	103
4.6.1	光纤波导简介	103
4.6.2	光纤的导光原理	104
4.6.3	多模光纤和单模光纤	105
4.6.4	光纤的传输特性	108
4.6.5	光纤通信系统	110
4.7	微带线	114
4.7.1	微带线的基本原理	114
4.7.2	有效介电常数、特征阻抗和衰减的计算公式	115
习题	116
第 5 章	微波与射频谐振电路	118
5.1	谐振腔的特性参数	119
5.1.1	谐振波长(或谐振频率)	119
5.1.2	品质因数	119
5.1.3	损耗电导	120
5.1.4	有载品质因数	121
5.2	传输线谐振电路	122
5.2.1	短路传输线	122
5.2.2	开路传输线	124

目录

5.3	矩形谐振腔	126
5.3.1	矩形谐振腔中的振荡模	126
5.3.2	矩形谐振腔的谐振波长 λ_0	127
5.3.3	矩形谐振腔的主模 TE_{101}	128
5.4	圆柱形谐振腔	130
5.5	介质谐振腔	132
5.6	谐振腔与外电路的耦合	134
5.6.1	临界耦合	134
5.6.2	缝隙耦合带谐振器	135
	习题	136
第6章 微波与射频网络分析		138
6.1	端口网络及模式等效传输线	139
6.1.1	端口网络	139
6.1.2	模式等效传输线	140
6.1.3	单口网络的传输特性	141
6.2	阻抗参量 Z 与阻抗矩阵	142
6.3	导纳参量 Y 与导纳矩阵	145
6.4	混合参量 h 与混合矩阵	147
6.5	转移参量与转移矩阵	149
6.6	散射参量 S 与散射矩阵	152
6.6.1	散射参量与散射矩阵	152
6.6.2	双端口网络接外电路分析	154
6.7	传输参量 T 与传输矩阵	159
6.8	阻抗、导纳、传输和混合参量的相互转换以及散射参量的变换	160
	习题	163
第7章 阻抗匹配与阻抗变换		165
7.1	引言	166
7.2	阻抗匹配网络	166
7.2.1	L型匹配网络	166
7.2.2	T型匹配网络	172

7.2.3	II型匹配网络	174
7.3	Smith圆图阻抗匹配网络设计	176
7.4	阻抗变换器	180
7.4.1	单节 $\lambda/4$ 变换器	180
7.4.2	多节 $\lambda/4$ 变换器	181
	习题	183
第8章	定向耦合器与滤波器	185
8.1	定向耦合器	186
8.1.1	定向耦合器的两种常用表示符号和常规功率流向	186
8.1.2	定向耦合器的表征参量	187
8.1.3	定向耦合器的类型	187
8.1.4	耦合器的应用和耦合器方向性的测量	189
8.2	滤波器的基本概念	190
8.2.1	滤波器的基本形式	190
8.2.2	滤波器的功率	191
8.2.3	插入损耗	192
8.2.4	回波损耗	192
8.3	镜像参量法	193
8.3.1	镜像阻抗	193
8.3.2	电压传递函数	194
8.3.3	典型的二端口网络的有关参数计算	194
8.3.4	低通和高通滤波器	195
8.4	插入损耗法	197
8.5	滤波器的设计与转换	198
8.5.1	巴特沃兹滤波器	198
8.5.2	切比雪夫滤波器	200
8.5.3	特殊响应滤波器	203
8.5.4	滤波器转换	203
8.6	阻抗与导纳变换器	208
8.7	微波滤波器	210
8.7.1	理查德变换	210

目录

8.7.2 科洛达恒等关系	211
习题	212
第9章 功率衰减器与功率分配器	214
9.1 功率衰减器与功率分配器的技术参数	215
9.2 功率衰减器	216
9.2.1 T型同阻式衰减器($Z_1 = Z_2 = Z_0$)	217
9.2.2 II型同阻式衰减器($Z_1 = Z_2 = Z_0$)	217
9.2.3 异阻式衰减器	218
9.2.4 应用型衰减器	219
9.3 T型(Y型)功率分配器	223
9.3.1 无耗分配器	223
9.3.2 电阻式功率分配器	225
9.4 电感电容式比例功率分配器	226
9.4.1 电感电容式功率分配器	226
9.4.2 比例型功率分配器	227
习题	228
第10章 振荡器与放大器	229
10.1 振荡器	230
10.1.1 RF振荡器	230
10.1.2 晶体振荡器	235
10.1.3 微波振荡器	236
10.2 锁相环	238
10.3 微波固态源简介	252
10.4 磁控管	254
10.5 微波射频放大器	255
10.5.1 最大增益放大器	256
10.5.2 低噪声放大器	257
10.5.3 宽带放大器	260
10.5.4 前置放大器	266
10.5.5 功率放大器	267