



教育部高等学校电子信息类专业教学指导委员会规划教材
高等学校电子信息类专业系列教材

电子信息类国家级实验教学示范中心教材

信息与通信工程

M easurement and Simulation of Electromagnetic Field and
Microwave Technology

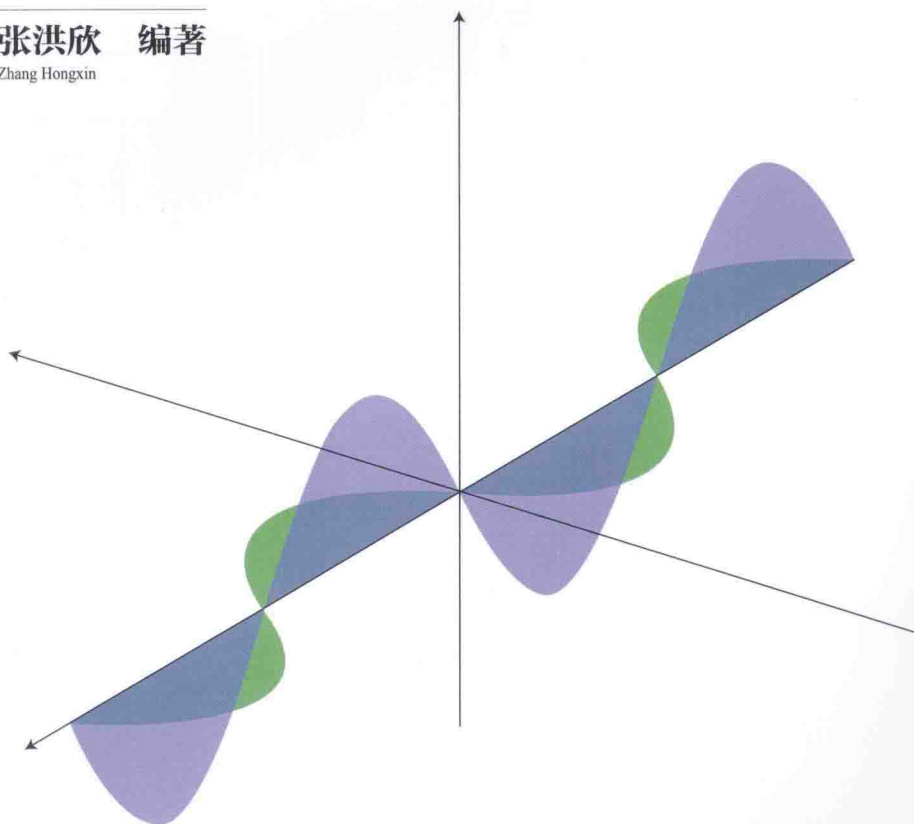
电磁场与微波技术 测量及仿真

赵同刚 李莉 张洪欣 编著

Zhao Tonggang

Li Li

Zhang Hongxin



清华大学出版社



教育部高等学校电子信息类专业教学指导
高等学校电子信息类专业系列教材

Measurement and Simulation of Electromagnetic Field
and Microwave Technology

电磁场与微波技术 测量及仿真

赵同刚 李莉 张洪欣 编著

Zhao Tonggang

Li Li

Zhang Hongxin

清华大学出版社

内 容 简 介

本书系统论述了电磁场与微波技术测量及仿真。全书共分为6章,分别介绍了电磁场电磁波基础理论验证、微波工程设计、微波传播测量等。具体内容包括基础测量实验、设计与综合性实验、综合创新性实验及微波工程仿真、创新性实验与微波工程仿真。基础测量实验包括:电磁波反射和折射的测量;自由空间内电磁波波长测量;衍射、干涉实验;波导测量系统相互校准;频谱仪、矢量网络分析仪对微波器件进行测量的工作原理介绍。设计性与综合性实验包括:波导波长的测量、微波驻波比的测量、单支节阻抗匹配、谐振腔微扰法测量介电常数等实验内容。创新性实验与微波工作仿真包括:障碍物和反射体下电磁波的传播规律、微波功分器、匹配器的仿真和设计。

本书适合作为普通高校电子信息类专业“电磁场与电磁波”相关课程的实验教材,也可供相关工程技术人员参考。

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

电磁场与微波技术测量及仿真/赵同刚,李莉,张洪欣编著.--北京:清华大学出版社,2014

高等学校电子信息类专业系列教材

ISBN 978-7-302-36682-9

I. ①电… II. ①赵… ②李… ③张… III. ①电磁场—技术测量—高等学校—教材 ②微波技术—技术测量—高等学校—教材 ③电磁场—计算机仿真—高等学校—教材 ④微波技术—计算机仿真—高等学校—教材 IV. ①O441.4 ②TNO15

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第117257号

责任编辑:盛东亮

封面设计:李召霞

责任校对:焦丽丽

责任印制:宋林

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 装 者:北京密云胶印厂

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm

印 张:11.25

字 数:274千字

版 次:2014年9月第1版

印 次:2014年9月第1次印刷

印 数:1~2500

定 价:25.00元

产品编号:057997-01

高等学校电子信息类专业系列教材

一 顾问委员会

谈振辉	北京交通大学 (教指委高级顾问)	郁道银	天津大学 (教指委高级顾问)
廖延彪	清华大学 (特约高级顾问)	胡广书	清华大学 (特约高级顾问)
华成英	清华大学 (国家级教学名师)	于洪珍	中国矿业大学 (国家级教学名师)
彭启琮	电子科技大学 (国家级教学名师)	孙肖子	西安电子科技大学 (国家级教学名师)
邹逢兴	国防科技大学 (国家级教学名师)	严国萍	华中科技大学 (国家级教学名师)

一 编审委员会

主 任	吕志伟	哈尔滨工业大学		
副主任	刘 旭	浙江大学	王志军	北京大学
	隆克平	北京科技大学	葛宝臻	天津大学
	秦石乔	国防科学技术大学	何伟明	哈尔滨工业大学
	刘向东	浙江大学		
委 员	王志华	清华大学	宋 梅	北京邮电大学
	韩 焱	中北大学	张雪英	太原理工大学
	殷福亮	大连理工大学	赵晓晖	吉林大学
	张朝柱	哈尔滨工程大学	刘兴钊	上海交通大学
	洪 伟	东南大学	陈鹤鸣	南京邮电大学
	杨明武	合肥工业大学	袁东风	山东大学
	王忠勇	郑州大学	程文青	华中科技大学
	曾 云	湖南大学	李思敏	桂林电子科技大学
	陈前斌	重庆邮电大学	张怀武	电子科技大学
	谢 泉	贵州大学	卞树檀	第二炮兵工程大学
	吴 瑛	解放军信息工程大学	刘纯亮	西安交通大学
	金伟其	北京理工大学	毕卫红	燕山大学
	胡秀珍	内蒙古工业大学	付跃刚	长春理工大学
	贾宏志	上海理工大学	顾济华	苏州大学
	李振华	南京理工大学	韩正甫	中国科学技术大学
	李 晖	福建师范大学	何兴道	南昌航空大学
	何平安	武汉大学	张新亮	华中科技大学
	郭永彩	重庆大学	曹益平	四川大学
	刘缠牢	西安工业大学	李儒新	中科院上海光学精密机械研究所
	赵尚弘	空军工程大学	董友梅	京东方科技集团
	蒋晓瑜	装甲兵工程学院	蔡 毅	中国兵器科学研究院
	仲顺安	北京理工大学	冯其波	北京交通大学
	黄翊东	清华大学	张有光	北京航空航天大学
	李勇朝	西安电子科技大学	江 毅	北京理工大学
	章毓晋	清华大学	谢凯年	赛灵思公司
	刘铁根	天津大学	张伟刚	南开大学
	王艳芬	中国矿业大学	宋 峰	南开大学
	苑立波	哈尔滨工程大学	靳 伟	香港理工大学
丛书责任编辑	盛东亮	清华大学出版社		

序

FOREWORD

我国电子信息产业销售收入总规模在 2013 年已经突破 12 万亿元,行业收入占工业总体比重已经超过 9%。电子信息产业在工业经济中的支撑作用凸显,更加促进了信息化和工业化的高层次深度融合。随着移动互联网、云计算、物联网、大数据和石墨烯等新兴产业的爆发式增长,电子信息产业的发展呈现了新的特点,电子信息产业的人才培养面临着新的挑战。

(1) 随着控制、通信、人机交互和网络互联等新兴电子信息技术不断发展,传统工业设备融合了大量最新的电子信息技术,它们一起构成了庞大而复杂的系统,派生出大量新兴的电子信息技术应用需求。这些“系统级”的应用需求,迫切要求具有系统级设计能力的电子信息技术人才。

(2) 电子信息系统设备的功能越来越复杂,系统的集成度越来越高。因此,要求未来的设计者应该具备更扎实的理论基础知识和更宽广的专业视野。未来电子信息系统的设计越来越要求软件和硬件的协同规划、协同设计和协同调试。

(3) 新兴电子信息技术的发展依赖于半导体产业的不断推动,半导体厂商为设计者提供了越来越丰富的生态资源,系统集成厂商的全方位配合又加速了这种生态资源的进一步完善。半导体厂商和系统集成厂商所建立的这种生态系统,为未来的设计者提供了更加便捷却又必须依赖的设计资源。

教育部 2012 年颁布了新版《高等学校本科专业目录》,将电子信息类专业进行了整合,为各高校建立系统化的人才培养体系,培养具有扎实理论基础和宽广专业技能的、兼顾“基础”和“系统”的高层次电子信息人才给出了指引。

传统的电子信息学科专业课程体系呈现“自底向上”的特点,这种课程体系偏重对底层元器件的分析与设计,较少涉及系统级的集成与设计。近年来,国内很多高校对电子信息类专业课程体系进行了大力度的改革,这些改革顺应时代潮流,从系统集成的角度,更加科学合理地构建了课程体系。

为了进一步提高普通高校电子信息类专业教育与教学质量,贯彻落实《国家中长期教育改革和发展规划纲要(2010—2020 年)》和《教育部关于全面提高高等教育质量若干意见》(教高【2012】4 号)的精神,教育部高等学校电子信息类专业教学指导委员会开展了“高等学校电子信息类专业课程体系”的立项研究工作,并于 2014 年 5 月启动了《高等学校电子信息类专业系列教材》(教育部高等学校电子信息类专业教学指导委员会规划教材)的建设工作。其目的是为推进高等教育内涵式发展,提高教学水平,满足高等学校对电子信息类专业人才培养、教学改革与课程改革的需要。

本系列教材定位于高等学校电子信息类专业的专业课程,适用于电子信息类的电子信

息工程、电子科学与技术、通信工程、微电子科学与工程、光电信息科学与工程、信息工程及其相近专业。经过编审委员会与众多高校多次沟通,初步拟定分批次(2014—2017年)建设约100门课程教材。本系列教材将力求在保证基础的前提下,突出技术的先进性和科学的前沿性,体现创新教学和工程实践教学;将重视系统集成思想在教学中的体现,鼓励推陈出新,采用“自顶向下”的方法编写教材;将注重反映优秀的教学改革成果,推广优秀的教学经验与理念。

为了保证本系列教材的科学性、系统性及编写质量,本系列教材设立顾问委员会及编审委员会。顾问委员会由教指委高级顾问、特约高级顾问和国家级教学名师担任,编审委员会由教育部高等学校电子信息类专业教学指导委员会委员和一线教学名师组成。同时,清华大学出版社为本系列教材配置优秀的编辑团队,力求高水准出版。本系列教材的建设,不仅有众多高校教师参与,也有大量知名的电子信息类企业支持。在此,谨向参与本系列教材策划、组织、编写与出版的广大教师、企业代表及出版人员致以诚挚的感谢,并殷切希望本系列教材在我国高等学校电子信息类专业人才培养与课程体系建设中发挥切实的作用。

吕志伟 教授

前言

PREFACE

著名科学家门捷列夫曾经说过：“没有测量就没有科学。”这句话充分概括了现代测量手段、测试技术在现代科学发展中的重要地位。

“电磁场与电磁波”以及“微波工程”是工科电子信息类专业重要的专业基础课。该类课程核心概念、基本理论和分析方法具有抽象、理论性强的特点，所以，在学习此类课程时，如果能结合必要的实验，会使抽象的概念和理论形象化、具体化，对学生加深理解和深入掌握基本理论和分析方法，培养学生分析问题和解决问题、设计实验方案的能力，增强学生学习本课程兴趣等方面，具有极大的好处。

本实验课程是一门涵盖电磁场与电磁波基础理论验证、微波工程设计、微波传播测量等内容的一门重要实验课程。旨在通过该实验课程的学习，学生可以验证所学的电磁场与电磁波的抽象理论，加深学生对所学的电磁场与电磁波理论的理解，在实验环节中了解典型微波测量仪器、仪表的使用方法，掌握场与波的相关测量方法和手段，培养通过检测和测量手段来解决电磁场与电磁波实际问题的能力。通过这门课程实践，同学们结合理论，可以提高自身的理论水平和动手能力，科研水平将进一步提升，为继续深造和就业都将打下一个坚实基础。

现在微波、无线通信、射频电路设计、天线技术发展非常快，本书安排的实验教学内容力求能够体现经典实验与现代实验的结合，又能协调基础性与前沿性、理论性与实践性的统一。本实验课程虽是完全的实验课，但在每次课前，都采取理论教学与实验教学相结合的方式，首先回顾理论知识，然后进行实验，要求学生实验中能自主做到理论和实践结合，能通过理论知识来正确指导自己的实验过程，对在实验中遇到的一些问题，也能运用理论知识以求自主解决。

本书的内容包括将以下几个部分。

首先是电磁场与微波传播基础测量实验，包括电磁波参量以及均匀无耗媒质参量的测量，电磁波反射和折射的测量；利用波的相干原理，测定自由空间内电磁波波长及相关参量；验证电磁波在良介质表面上的反射和折射；电磁波全反射条件的测试；进行电磁波的衍射、干涉实验；完成布拉格衍射实验。另外，还有实验技能培训的实验，这包括：微波分光仪，波导测量系统相互校准，微波场强仪的使用，频谱仪、矢量网络分析仪对微波器件测量的工作原理介绍，通过这些单元的培训，学生基本的操作和动手能力得到提高，仪器仪表使用正确，为以后的实验环节打下基础。

其次是设计性和综合性实验内容，例如：利用测量线测量微波参量掌握波导波长的测量、微波驻波比的测量、测量负载阻抗及单支节阻抗匹配，掌握测量线法测量阻抗的原理和方法、对阻抗匹配技术进行软件仿真、对失配负载利用单支节匹配器进行匹配调谐、掌握用

谐振腔微扰法测量介电常数的原理等实验内容。空间波场强测量测试研究、验证当有障碍物和反射体时电磁波的传播规律；微波收发系统频谱特性测量，学生通过频谱分析，直观地了解信号在频域的频谱形状、谐波、杂波、寄生波信号的分布规律，加深对信号“时域-频域”变换特性的理解和掌握；学习微波无源器件的非线性特性的测量方法。

最后是综合创新性实验和仿真实验，综合和创新是一名工科学生成为优秀工程师所必备的能力。要同时做好射频、微波系统设计类的综合与衔接是比较困难的。为了达到这个目的，本书设计了两大类的实验内容，在这一环节，提供给学生的实验内容包括：

(1) 多种类型天线的方向图测量，天线方向图的电磁软件仿真；测量若干典型天线的方向图；对测量结果进行分析并与计算的方向图进行对比，分析不同类型天线的方向性。

(2) 用频谱仪测试微波器件，掌握频谱仪的原理及使用，完成微波收发系统测试，测试定向耦合器的耦合度及方向性；测试滤波器的主要参数。掌握低噪声放大器的设计，最佳噪声阻抗测量；掌握网络的传输和反射特性的测量。

(3) 介绍 ADS、Microwave Office 仿真软件，进行匹配器的设计，功分器、带通滤波器的设计的学习。

本书由赵同刚、李莉、张洪欣共同编写，吴国华、李秀萍、赵娜、邹景昊、陈迅、王嵩、王欢、戴杰、李莉等也为本书做了很大贡献，在此也一并表示衷心感谢。

本书不仅作为一门专业课教材而编写，也可作为电磁场与微波专业研发人员、工程技术人员、通信院校相关专业的本科生、研究生的学习参考书。

最后需要特别指出的是，电磁场与微波测量技术尚在不断的完善和发展，加之编著者水平有限，书中难免还存在一些缺点和错误，殷切希望广大读者批评指正。

编者

2014年4月

目录

CONTENTS

第 1 章 基本理论	1
1.1 电磁场与微波技术的发展	1
1.1.1 微波波段.....	1
1.1.2 微波的特点.....	2
1.2 传输线基本理论	3
1.2.1 传输线等效电路.....	3
1.2.2 阻抗圆图.....	8
1.2.3 传输线的阻抗匹配	11
1.3 微波元件.....	13
1.3.1 终端负载	13
1.3.2 电抗元件	14
1.3.3 衰减器	17
1.3.4 微带线	18
第 2 章 常用测量仪表的使用和基本常识	20
2.1 微波分光仪.....	20
2.1.1 DH926B 型微波分光仪的部件	20
2.1.2 利用微波分光仪开展实验	20
2.2 三厘米固态信号源.....	22
2.2.1 信号源主要技术特性	22
2.2.2 工作原理	22
2.3 频谱分析仪.....	23
2.3.1 概述	23
2.3.2 频谱分析仪的主要技术指标	23
2.3.3 注意事项	24
2.4 网络分析仪工作.....	24
2.4.1 二端口射频网络参量	24
2.4.2 多端口射频网络参量	25
2.4.3 网络分析仪的测量原理	25
2.4.4 S 参数测量原理和优点	26
2.4.5 S 参数的测量误差	27
2.4.6 矢量网络分析工作注意事项	29
2.5 微波功率计.....	30

2.5.1	技术特性	30
2.5.2	工作原理	30
2.5.3	注意事项	30
2.6	微波信号源	31
2.6.1	主要技术特性	31
2.6.2	工作原理方框图	31
2.6.3	仪器的面板及功能	32
2.6.4	仪器的具体操作步骤	33
2.7	波导测量线实验系统	33
2.8	微波测试仪器的选择和防护	36
2.8.1	测量仪器的选择	36
2.8.2	测量仪器的防护	36
2.8.3	电子测量仪器及其系统的环境要求	37
2.8.4	电源规则	37
2.8.5	接地系统	37
2.8.6	电源选择开关	38
2.8.7	额定电流	38
2.8.8	电源配线工程	38
第 3 章	微波传播特性的测量	39
3.1	电磁波反射和折射实验	39
3.1.1	实验目的	39
3.1.2	预习内容	39
3.1.3	实验设备与仪器	39
3.1.4	实验原理	39
3.1.5	实验内容与步骤	41
3.1.6	实验报告	43
3.1.7	思考题	43
3.2	单缝衍射实验	43
3.2.1	实验目的	43
3.2.2	预习内容	43
3.2.3	实验设备	43
3.2.4	实验原理	43
3.2.5	实验报告	45
3.3	双缝干涉实验	48
3.3.1	实验目的	48
3.3.2	预习内容	48
3.3.3	实验设备	48
3.3.4	实验原理	48
3.3.5	实验内容与步骤	48
3.3.6	实验报告	49
3.3.7	思考题	52

3.4 迈克尔逊干涉实验	52
3.4.1 实验目的	52
3.4.2 预习内容	52
3.4.3 实验设备	52
3.4.4 实验原理	52
3.4.5 实验内容及步骤	53
3.4.6 实验报告	54
3.4.7 实验分析	54
3.4.8 思考题	55
3.5 极化实验	55
3.5.1 实验目的	55
3.5.2 预习内容	55
3.5.3 实验设备	55
3.5.4 实验原理	55
3.5.5 实验过程及方法	56
3.5.6 实验分析	56
3.5.7 思考题	57
3.6 布拉格衍射实验	57
3.6.1 实验目的	57
3.6.2 预习内容	57
3.6.3 实验设备	57
3.6.4 实验原理	57
3.6.5 实验内容及步骤	58
3.6.6 实验报告	59
3.7 无线信号场强特性的研究	60
3.7.1 实验目的	60
3.7.2 实验原理	60
3.7.3 实验内容	62
3.7.4 拓展实验内容	63
3.7.5 报告示例	63
第4章 微波工程参数特性测量实验	65
4.1 微波测量基本知识	65
4.2 微波测量系统的使用和信号源波长功率的测量	66
4.2.1 实验目的	66
4.2.2 实验原理	67
4.2.3 实验内容和实验步骤	70
4.3 波导波长与晶体检波器的校准测量	73
4.3.1 波导波长测量实验内容	73
4.3.2 晶体检波器校准实验步骤	74
4.3.3 实验报告内容	75
4.3.4 思考题	75

4.4	微波驻波比的测量	75
4.4.1	实验目的	75
4.4.2	实验原理	75
4.4.3	实验内容及数据处理	78
4.4.4	思考题	79
4.5	阻抗匹配技术软件仿真	79
4.5.1	实验目的	79
4.5.2	实验原理	79
4.5.3	实验内容	80
4.5.4	实验步骤	80
4.6	阻抗测量及匹配技术	81
4.6.1	实验目的	81
4.6.2	实验内容	81
4.6.3	实验原理	81
4.6.4	实验装置	83
4.6.5	实验步骤	84
4.6.6	实验报告内容	84
4.6.7	实验结果记录	85
4.6.8	思考题	86
4.7	用谐振腔微扰法测量介电常数	86
4.7.1	实验目的	86
4.7.2	实验原理	86
4.7.3	实验装置	87
4.7.4	实验内容	88
4.7.5	实验注意事项	89
4.7.6	思考题	89
第5章	微波收发系统的测量	90
5.1	微波通信技术	90
5.2	微波无源器件	91
5.2.1	衰减器的特性	91
5.2.2	定向耦合器的特性	92
5.3	微波实验单元项目	95
5.3.1	频谱分析仪的使用	95
5.3.2	衰减器的特性测量	98
5.3.3	定向耦合器特性测量	99
5.3.4	滤波器的特性及其测量	101
5.4	微波设计综合实验	103
5.4.1	放大器的设计原理与技巧	103
5.4.2	放大器的设计与测试	104
5.4.3	低噪声放大器的设计方法及流程	110
5.4.4	放大器的特性测量	110

5.4.5	变频器的特性及其测量	113
5.5	微波收发机的系统调测	115
5.5.1	微波 TV 收发系统的基本原理	115
5.5.2	微波 TV 发射机系统的调测	117
5.5.3	微波 TV 接收机系统调测	121
5.5.4	微波 TV 收发系统的干扰测量	124
5.6	天线的特性和测量	127
5.6.1	实验目的	127
5.6.2	天线工作原理	127
5.6.3	喇叭天线工作原理	129
5.6.4	天线方向图的测试内容与步骤	130
5.6.5	方向图测试实验数据	131
5.7	简易无线数字调制通信系统的设计和实现	132
5.7.1	实验目的	132
5.7.2	实验内容	132
5.7.3	实验设备	132
5.7.4	实验原理	133
5.7.5	设计要求	133
第 6 章	微波工程仿真软件介绍	135
6.1	ADS 仿真软件介绍	135
6.1.1	使用 ADS 项目	135
6.1.2	ADS 中的仿真设计	138
6.1.3	ADS 输入输出	140
6.2	Microwave Office 仿真软件介绍	140
6.2.1	工程部分基本操作	140
6.2.2	原理图部分	140
6.3	微带分支线匹配器的设计	145
6.3.1	实验目的	145
6.3.2	实验原理	145
6.3.3	实验内容	146
6.3.4	Microwave Office 实验内容	146
6.4	微带多节阻抗变换器的设计	152
6.4.1	实验目的	152
6.4.2	实验原理	152
6.4.3	实验内容	153
6.4.4	实验步骤	153
6.4.5	实验示例	153
6.5	微带功分器的设计	155
6.5.1	实验目的	155
6.5.2	实验原理	156
6.5.3	实验内容	157

6.5.4	实验步骤	157
6.5.5	实验示例	158
6.6	微带带通滤波器的设计	159
6.6.1	实验目的	159
6.6.2	实验原理	159
6.6.3	实验任务	160
附录		162
附录 1	无线电频段划分	162
附录 2	常用导体材料的参数	162
附录 3	常用介质材料的参数	162
附录 4	常用物理常数	163
参考文献		164

1.1 电磁场与微波技术的发展

1.1.1 微波波段

波长为 $1\text{m}\sim 0.1\text{mm}$ 的电磁波称为微波,其对应的频率范围在 $300\text{MHz}\sim 3000\text{GHz}$,此波段称为微波波段。

微波波段可分为分米波段(频率为 $300\sim 3000\text{MHz}$)、厘米波段(频率为 $3\sim 30\text{GHz}$)、毫米波段(频率为 $30\sim 300\text{GHz}$)、亚毫米波段($300\sim 3000\text{GHz}$),如图 1-1 所示。

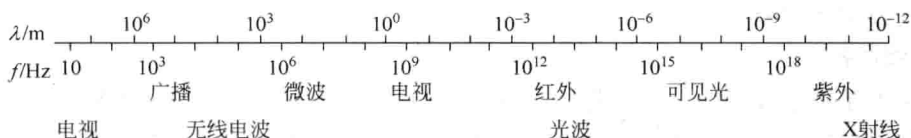


图 1-1 电磁波的分类

在雷达、通信及微波技术领域里,常用英文字母来表示的微波波段,如表 1-1 所示。

表 1-1 常用的微波波段代号、波长及频率的关系表

波段代号	标称波长/cm	频率范围/GHz	波长范围/cm
L	22	1~2	30~15
S	10	2~4	15~7.5
C	5	4~8	7.5~3.75
X	3	8~12	3.75~2.5
Ku	2	12~18	2.5~1.67
K	1.25	18~27	1.67~1.11
Ka	0.8	27~40	1.11~0.75
U	0.6	40~60	0.75~0.5
V	0.4	60~80	0.5~0.375
W	0.3	80~100	0.375~0.3

微波技术是近代发展起来的一门尖端科学技术,它不仅在通信、原子能技术、空间技术、量子电子学以及农业生产等方面有着广泛的应用,在科学研究中也是一种重要的观测手段,

微波的研究方法和测试设备与无线电波有所不同。

1.1.2 微波的特点

微波的频率范围是处于光波和广播电视所采用的无线电波之间,因此它兼有两者的性质,却又区别于两者。与无线电波相比,微波有下述几个主要特点。

1. 频率高(波长短)

“长度”有绝对长度与相对长度两种概念。对于传输线的“长”或“短”,并不是以其绝对长度而是以其与波长比值的相对大小而论的,把比值 l/λ 称为传输线的相对长度。在微波领域里,波长 λ 以厘米或毫米计。虽然传输线的长度有时只不过是几十厘米甚至几个毫米,比如传输频率为 3GHz 的同轴电缆虽只有半米长,但它已是工作波长的 5 倍,故须把它称为“长线”;相反,输送市电的电力传输线(频率为 50Hz)即使长度为几千米,但与市电的波长(6000km)相比小得多,因此只能称为“短线”而不能称为“长线”。对应于低频率传输线,它在低频电路中只起连接线的作用,因频率低,其本身分布参数所引起的效应可以忽略不计,所以在低频电路中只考虑时间因子而忽略空间效应,把电路当作集总参数电路来处理是允许的。对应于微波传输线,因为频率很高时分布参数效应不能再忽视了,传输线不能仅当作连接线,它将形成分布参数电路,参与整个电路的工作,因而传输线在电路中所引起的效应必须用传输线理论来研究。

微波频率很高时很明显地出现了高频电流的趋肤效应、传输系统的辐射效应以及电路的延时效应(相位滞后)等,因此,在微波波段里,应重视电磁波与电子间的相互作用、极间电容和引线电感的影响。

2. 穿透性

穿透性是指微波照射于介质物体时,能深入该物质内部的特点,称之为微波穿透性特性。例如,地球大气外层由厚厚一层电离层所包围,低频无线电波由于频率低,所以当它射向电离层时,无法穿过,微波的频率很高(波长很短),可以穿透电离层。微波的性能得到了广泛应用。

微波能穿透云雾、雨、植被、积雪和地表层;微波能穿透生物体,所以成为医学透热疗法的重要手段;毫米波能穿透等离子体,是远程导弹和航天器重返大气层时实现通信和末端制导的重要手段。

3. 量子特性

根据量子理论,电磁辐射的能量不是连续的,而是一个个的“光量子”所组成。单个量子的能量与其频率的关系为

$$e = hf \quad (1-1)$$

式中, h 为普朗克常数。

对于低频电波,量子能量很小,故量子特性不明显。微波波段的电磁波,单个量子的能量较大,而一般顺磁物质在外磁场中所产生的能级间的能量差额在 $10^{-6} \sim 10^{-3}$ eV 之间,因而电子在这些能级跃迁时释放或吸收的量子频率是属于微波波段内,例如, Cs 原子的跃迁频率为 9192631770Hz。因此,微波可用来研究分子和原子的精细结构。

4. 信息性

微波波段宽,可载的信息非常巨大,即使是很窄的相对带宽,其可用的频带也是很宽的。

所以现代多路通信系统,包括卫星通信系统,几乎无一例外地都是工作在微波波段。

5. 分析方法的独特性

微波波段建立了一套独特的分析方法——电磁场理论的场和波传输的分析方法;用新的装置(如传输线、波导、谐振腔等)代替集总参数的电阻、电感、电容。研究微波系统中的电磁场,以波长、功率、驻波系数等作为基本测量参量。

描写电磁场的基本方程为

$$\left. \begin{aligned} \nabla \cdot D &= \rho, & \nabla \cdot B &= 0 \\ \nabla \times E &= \frac{\partial B}{\partial t}, & \nabla \times H &= J + \frac{\partial D}{\partial t} \\ D &= \epsilon E, & B &= \mu H, & J &= \gamma E \end{aligned} \right\} \begin{array}{l} (1-2) \\ (1-3) \end{array}$$

对于空气和导体的界面,由上述关系可以得到边界条件(左侧均为空气中场量)

$$\left. \begin{aligned} E_t &= 0, & E_n &= \frac{\rho}{\epsilon_0} \\ H_t &= J_s, & H_n &= 0 \end{aligned} \right\} (1-4)$$

1.2 传输线基本理论

当信号的频率比较高,信号波长可以与电路尺寸相比拟时所设计的电路称为射频电路。但是,射频电路中信号分析与低频电路信号分析有着很大的不同。适用于低频电路的基尔霍夫电路理论已经不再适用于射频电路。射频电路理论是低频电子学原理与电磁场数理函数分析模式的结合。由于传输线理论和射频网络理论为射频电路设计提供了基本概念、参数和基本的研究方法,因此在射频电路设计中作为研究重点具有重要地位。

传输线理论本质上是分布参数电路理论,它将基本电路理论与电磁场理论有机的联系在一起。与低频电路完全不同,当工作频率不断升高,信号波长不断减小并且信号波长可以与电路几何尺寸相比拟时,传输线上的电流与电压呈现出波动特性,电流与电压会随着空间位置的变化而发生变化。传输线理论就是用来分析这种变化特性。

在微波波段,常用的微波传输线有平行双线、同轴线、带状线、微带线、金属波导管及介质波导等多种形式的传输线。按其上传播的导行波的特征可分为三大类。

- (1) TEM 波传输线。如平行双线、同轴线以及微带传输线(包括带状线和微带)等。
- (2) 波导传输线。如矩形波导、圆柱波导、椭圆波导及脊波导等。
- (3) 表面波传输线。如介质波导、镜像线及单根线等。

传输线方程也是本书学习中常用到的理论模型。本课程实验用得最多的传输线是矩形波导管。

1.2.1 传输线等效电路

实际中,由于“趋肤效应”的存在而使得传输线的有效面积减小,导致分布在传输线上的电阻增大,就成为分布电阻;如果传输线两导体间存在漏电,即两者之间存在漏电导,就把漏电导称之为传输线的分布电导;由于传输线两个导体之间存在电压,从而形成高频电场,因此电场沿线便会有电容分布,这些电容称之为分布电容;高频电流流过传输线时会存在