



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

高等院校信息与通信工程系列教材

微波技术与实验

彭沛夫 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

高等院校信息与通信工程系列教材

TN015/44

2007

微波技术与实验

彭沛夫 编著

清华大学出版社
北 京

内 容 简 介

本书是教育部“十一五”国家级规划教材,内容共分13章,分别阐述了微波技术概论、电磁场与电磁波的基本理论、传输线理论、微波波导与微带传输线、微波谐振电路、微波网络分析、阻抗匹配与阻抗变换、滤波器分析与设计、功率衰减器与功率分配器、定向耦合器、振荡器、检波器和混频器、微波放大器、天线系统以及微波技术实验。

本书内容广泛,重点突出,知识新颖,方法明确,通俗易懂,深入浅出,联系实际,适合教学,方便自学,既可作为高等学校本科通信工程、电子信息工程、电子科学与技术等专业的教材,也可作为成人高等教育有关专业的教材或参考书,并可供相关工程技术人员阅读参考。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13501256678 13801310933

图书在版编目(CIP)数据

微波技术与实验/彭沛夫编著. —北京:清华大学出版社,2007.11

(高等院校信息与通信工程系列教材)

ISBN 978-7-302-15253-8

I. 微… II. 彭… III. 微波技术—高等学校—教材 IV. TN015

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 073443 号

责任编辑:陈国新 柴文强

责任校对:李建庄

责任印制:王秀菊

出版发行:清华大学出版社 地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

<http://www.tup.com.cn> 邮 编:100084

c-service@tup.tsinghua.edu.cn

社 总 机:010-62770175 邮购热线:010-62786544

投稿咨询:010-62772015 客户服务:010-62776969

印 刷 者:北京市清华园胶印厂

装 订 者:三河市兴旺装订有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185×260 印 张:30 字 数:685 千字

版 次:2007 年 11 月第 1 版 印 次:2007 年 11 月第 1 次印刷

印 数:1~3000

定 价:42.00 元

本书如存在文字不清、漏印、缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与清华大学出版社出版部联系调换。联系电话:(010)62770177 转 3103 产品编号:023503-01

出版说明

信息与通信工程学科是信息科学与技术的重要组成部分。改革开放以来,我国在发展通信系统与信息系统方面取得了长足的进步,形成了巨大的产业与市场,如我国的电话网络规模已位居世界首位,同时该领域的一些分支学科出现了为国际认可的技术创新,得到了迅猛的发展。为满足国家对高层次人才的迫切需求,当前国内大量高等学校设有信息与通信工程学科的院系或专业,培养大量的本科生与研究生。为适应学科知识不断更新的发展态势,他们迫切需要内容新颖又符合教改要求的教材和教学参考书。此外,大量的科研人员与工程技术人员也迫切需要学习、了解、掌握信息与通信工程学科领域的基础理论与较为系统的前沿专业知识。为了满足这些读者对高质量图书的渴求,清华大学出版社组织国内信息与通信工程国家级重点学科的教学与科研骨干以及本领域的一些知名学者、学术带头人编写了这套高等院校信息与通信工程系列教材。

该套教材以本科电子信息工程、通信工程专业的专业必修课程教材为主,同时包含一些反映学科发展前沿的本科选修课程教材和研究生教学用书。为了保证教材的出版质量,清华大学出版社不仅约请国内一流专家参与了丛书的选题规划,而且每本书在出版前都组织全国重点高校的骨干教师对作者的编写大纲和书稿进行了认真审核。

祝愿《高等院校信息与通信工程系列教材》为我国培养与造就信息与通信工程领域的高素质科技人才,推动信息科学的发展与进步做出贡献。

北京邮电大学

陈俊亮

2004年9月

序

随着现代电子与通信技术的迅速发展,微波与射频(RF)技术已经广泛地应用于各个领域。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、微波遥感、医疗监控、防卫武器操控系统等诸多领域,都有微波技术的重要应用。微波技术极大地改变了人类的生产和生活。与此同时,需要更多更好的电子与通信技术方面的人才投入该领域,以适应其不断地向深度和广度发展的需要。本书就是顺应这种需要而编写的。

本书第一个特点是深入浅出。作者尽量通俗而清晰地阐述一些重要的物理概念和数学公式的含义,使一些难懂的理论推导和数学运算易于理解和掌握。书中涉及的内容广泛,重点突出,在着力阐述微波与射频(RF)技术的同时,自然融入了电磁场与天线的应用理论。既注意内容简洁,又注意保持理论体系的完整。本书的第二个特点是吐故纳新。作者放弃了诸多与现代科学技术不相适应的内容,吸收了诸多现代的知识,扩展了若干章节内容,提出一些分析解决问题的新方法,推广运用了计算机辅助设计(CAD)。本书的第三个特点是物理概念清楚。按照从一般到具体,从原理到应用的顺序,在介绍微波系统、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。本书的第四个特点是应用实例多。书中每章都附有习题,便于教学,方便自学。通过各章的学习与习作,能达到掌握现代微波技术的目的。书中吸收了微波与射频(RF)技术实验 18 个,这些实验目的明确、原理清楚、内容翔实、方法和步骤具体。

高校学生要想真正把现代微波技术学好,有两个环节至关重要,即使用计算机辅助设计(CAD)模拟软件和微波实验训练。如果学生通过 CAD 软件进行微波设计,得出结果后,会使兴趣大增,为用 CAD 设计电路打下良好的基础。本书所采用的微波实验训练可使学生提高对微波现象的直觉感知能力,增强对微波物理概念的理解。

希望本书为培养 21 世纪微波技术人才作出贡献。

王永久

2007 年 3 月

前 言

遵照教育部对“十一五”规划教材的要求,《微波技术与实验》立足微波技术的前沿领域,完整体现现代微波科学技术体系,吸收现代化新知识;注重基础知识,加强新的理论和技术,培养和提高学生的创新能力,真正使学生成为面向 21 世纪的电子与信息领域中的技术人才。本书为此而作出了努力。

微波技术与电磁场密切相关,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,应用广泛。本书在重点突出微波与射频(RF)技术的同时,将电磁场与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。

本书共分 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、雷达操控系统和家庭生活中的应用及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,重点介绍了麦克斯韦方程、波动方程及电磁波的传播。第 3 章传输线理论,是本书内容的分析基础,讨论了分布电路和传输线方程解的构成、特性参量及其应用。第 4 章微波波导与微带传输线,研究了导波原理及各种波导和微带传输线,同时介绍了现代光纤技术。第 5 章微波谐振电路,分析了传输线谐振电路及各种谐振腔。第 6 章微波网络分析,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。第 8 章滤波器分析与设计,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 章定向耦合器,深入讨论了定向耦合器的基本概念和测量,分析了诸如单孔和多孔定向耦合器、耦合线定向耦合器及各种微波耦合器。第 11 章振荡器、检波器和混频器,介绍了现代微波振荡器、检波器和混频器的基本原理和应用技术。第 12 章微波放大器,讨论了微波的基本原理和特性,阐述了最大增益放大器、低噪声放大器、宽带放大器、前置放大器、功率放大器的设计。第 13 章天线,讨论了天线的基本原理,描述了现代微波通信中应用最广泛、技术较先进的有关天线。每章都有应用例题、设计方法及习题。通过习题解答后,能够更好地巩固所学的知识。本书提供的实验共 18 个。实验一至实验五是计算机辅助设计(CAD)实验,实验六至实验十八是微波及射频技术实验和天线实验。

本书可作为全国电子信息与通信工程类及相关专业的微波和射频技术课程教材。目前全国各高校都在进行课程体系改革,较大地调整了电磁波传播、微波技术、天线等内容,一些高校将这些内容作为一门课开设,该教材正是适用了这一需求。如果课时较少,对于本书内容的取舍,各高校可根据专业需要自行酌定。

本书的完成得到了湖南师范大学各级领导的关心与支持；匡乐满教授自始至终关心该书的写作；王永久教授欣然为本书作序；清华大学出版社陈国新编辑给予了热情的帮助；中国台湾固纬电子有限公司林彦志协理和研发中心廖嶽儒副总经理给予了大力的支持；张桂芳老师为本书作了大量的工作，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专著及论文，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。

作 者

2007 年 5 月

目 录

第 1 章 概论	1
1.1 引言	1
1.2 微波及其特点	1
1.3 微波通信系统	4
1.4 微波传输	11
1.5 微波在生活与生产中的应用	14
1.6 微波的功率传送、生物效应与安全性	17
1.7 微波的研究方法	19
习题	19
第 2 章 电磁场与电磁波的基本理论	20
2.1 麦克斯韦方程	21
2.1.1 麦克斯韦方程的定义	21
2.1.2 结构方程	22
2.2 时变电磁场的边界条件	22
2.3 坡印廷定理	24
2.4 动态矢量位和标量位	25
2.5 波动方程	27
2.6 介质中的平面波	28
2.7 自由空间中的平面波	32
2.8 导电媒质中的平面波	33
2.9 波的极化	35
2.9.1 线极化波	36
2.9.2 椭圆极化波	37
2.9.3 圆极化波	37
2.10 媒质边界上的垂直入射均匀平面波	38
2.10.1 导体与导体分界面	38
2.10.2 介质与介质分界面	39
2.10.3 介质与完全导体分界面	40
2.11 媒质边界上的斜入射	42

习题	45
第 3 章 传输线理论	47
3.1 传输线简介	47
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	49
3.2.3 相速和群速	50
3.3 无耗传输线	50
3.3.1 无耗传输线	50
3.3.2 端接负载的无耗传输线	51
3.4 无耗传输线的状态分析	56
3.4.1 终端短路的情形	56
3.4.2 终端开路的情形	56
3.4.3 终端接任意复数阻抗的情形	57
3.4.4 具有不同特征阻抗的两段传输线连接	59
3.5 有耗传输线	60
3.5.1 低损耗传输线	60
3.5.2 终端接负载的有耗传输线	61
3.5.3 阻抗与传播常数的测量	62
3.6 传输线的阻抗匹配	66
3.6.1 传输线的阻抗匹配状态	67
3.6.2 阻抗匹配的方法	67
3.7 Smith 圆图	68
习题	73
第 4 章 微波波导与微带传输线	77
4.1 引言	77
4.2 导波原理	78
4.3 矩形波导	80
4.3.1 TE 波和 TM 波的电磁场分布	80
4.3.2 矩形波导的传输特性	83
4.3.3 传输功率	87
4.3.4 波导的损耗与衰减	88
4.3.5 矩形波导尺寸的选择	90
4.3.6 波导法兰盘	90
4.4 平行平板波导	91
4.5 圆形波导	94

4.5.1 场方程	94
4.5.2 圆形波导的传输特性	97
4.5.3 圆形波导的三个主要模式	98
4.6 同轴线	99
4.6.1 同轴线上电压、电流和传输功率	99
4.6.2 耐压最高时的特性阻抗	100
4.6.3 传输功率最大时的特性阻抗	100
4.6.4 衰减最小时的特性阻抗	101
4.7 介质波导	101
4.7.1 常用介质波导	101
4.7.2 介质板上的表面波	102
4.8 带状线	103
4.9 微带线	105
4.9.1 微带线的基本原理	105
4.9.2 有效介电常数、特征阻抗和衰减的计算公式	106
4.10 光纤波导	107
4.10.1 单模光纤和多模光纤	108
4.10.2 光纤的基本参量	108
4.10.3 光纤的传输特性	109
4.10.4 光纤通信	111
习题	112
第5章 微波谐振电路	114
5.1 谐振回路的基本特性	114
5.1.1 谐振回路中的储能	114
5.1.2 品质因数与谐振频率	115
5.1.3 有载品质因数 Q_L	116
5.1.4 输入阻抗	116
5.2 传输线谐振电路	117
5.2.1 短路传输线	117
5.2.2 开路传输线	120
5.3 矩形谐振腔	121
5.3.1 矩形谐振腔中的振荡模	121
5.3.2 矩形谐振腔的谐振波长 λ_0	123
5.3.3 矩形谐振腔的主模 TE_{101}	123
5.4 圆柱形谐振腔	125
5.5 介质谐振腔	127
5.6 谐振腔与外电路的耦合	128

5.6.1 临界耦合.....	129
5.6.2 缝隙耦合带谐振器.....	130
习题.....	131
第 6 章 微波网络分析.....	133
6.1 端口网络及模式等效传输线	133
6.1.1 端口网络.....	133
6.1.2 模式等效传输线.....	134
6.1.3 单口网络的传输线.....	135
6.2 阻抗参量 Z 与阻抗矩阵	136
6.3 导纳参量 Y 与导纳矩阵	138
6.4 混合参量 h 与混合矩阵	141
6.5 转移参量与转移矩阵	143
6.6 散射参量 S 与散射矩阵	146
6.6.1 散射参量与散射矩阵.....	146
6.6.2 双端口网络接外电路分析.....	147
6.7 传输参量 T 与传输矩阵	152
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	153
习题.....	156
第 7 章 阻抗匹配与阻抗变换.....	158
7.1 引言	158
7.2 阻抗匹配网络	158
7.2.1 L 型匹配网络.....	158
7.2.2 T 型匹配网络.....	164
7.2.3 Π 型匹配网络.....	165
7.2.4 Smith 圆图阻抗匹配网络设计	167
7.3 阻抗变换器	170
7.3.1 单节 $\lambda/4$ 变换器.....	170
7.3.2 多节 $\lambda/4$ 变换器.....	172
7.3.3 反射系数的变换器均匀分布.....	173
7.4 二项式变换器	175
7.5 渐变传输线	177
7.5.1 指数渐变.....	177
7.5.2 三角形渐变.....	178
7.5.3 K 渐变	179
7.6 无耗匹配网络的约束条件	180
习题.....	182

第 8 章 滤波器分析与设计	184
8.1 滤波器的基本概念	184
8.1.1 滤波器的基本形式	184
8.1.2 滤波器的功率	185
8.1.3 插入损耗	185
8.1.4 回波损耗	186
8.1.5 群延时	186
8.2 镜像参量法	187
8.3 插入损耗法	190
8.4 滤波器的设计与转换	191
8.4.1 巴特沃兹滤波器	191
8.4.2 切比雪夫滤波器	193
8.4.3 特殊响应滤波器	196
8.4.4 滤波器转换	196
8.5 滤波器的分析与仿真	201
8.5.1 滤波器分析	201
8.5.2 滤波器的仿真	202
8.6 阻抗和导纳变换器	203
8.7 微波滤波器	205
8.7.1 理查德变换	205
8.7.2 科洛达恒等关系	206
习题	208
第 9 章 功率衰减器与功率分配器	209
9.1 功率衰减器与功率分配器的技术参数	209
9.2 功率衰减器	210
9.2.1 T 型同阻式衰减器($Z_1 = Z_2 = Z_0$)	211
9.2.2 Π 型同阻式衰减器($Z_1 = Z_2 = Z_0$)	212
9.2.3 异阻式集总参数衰减器	212
9.2.4 集总参数衰减器的设计	212
9.2.5 应用型衰减器	213
9.3 T 型(Y 型)功率分配器	216
9.3.1 无耗分配器	217
9.3.2 电阻式功率分配器	218
9.4 威尔金森功率分配器	219
9.5 电感电容式集总参数比例功率分配器	222
9.5.1 电感电容式集总参数功率分配器	222

9.5.2 比例型功率分配器	223
习题	223
第 10 章 定向耦合器	225
10.1 定向耦合器的基本概念	225
10.1.1 定向耦合器的两种常用表示符号和常规功率流向	225
10.1.2 定向耦合器的表征参量	225
10.1.3 定向耦合器的类型	226
10.1.4 耦合器的应用和耦合器方向性的测量	227
10.2 小孔定向耦合器	229
10.2.1 单孔定向耦合器	229
10.2.2 多孔定向耦合器	231
10.3 耦合线定向耦合器	232
10.3.1 耦合线的等效电容网络与特性阻抗的计算	232
10.3.2 耦合线定向耦合器的原理	234
10.3.3 单节耦合线耦合器	235
10.3.4 多节耦合器	237
10.4 正交混合网络与 180° 混合网络	238
10.4.1 正交混合网络	238
10.4.2 180° 混合网络	240
10.5 多导体耦合器	241
10.6 其他耦合器	242
习题	244
第 11 章 振荡器、检波器和混频器	247
11.1 RF 振荡器	248
11.1.1 反馈及基本概念	248
11.1.2 振荡器电路分析	248
11.2 晶体振荡器	252
11.3 微波振荡器	253
11.4 微波晶体管振荡器	255
11.5 介质谐振器	258
11.6 传输线谐振腔振荡器	259
11.7 锁相环	262
11.8 微波源	276
11.8.1 固态源	276
11.8.2 微波电子管	277
11.9 振荡器特性和测量	279

11.9.1	调制带宽	279
11.9.2	频率和功率牵引	280
11.9.3	相位噪声和抖动	281
11.10	检波器	285
11.10.1	检波器的工作原理	285
11.10.2	小信号检波器	287
11.10.3	大信号检波器	289
11.11	检波器的设计	290
11.12	检波器灵敏度与噪声等效功率	293
11.13	混频器的工作原理	295
11.14	混频器电路	298
11.14.1	单端混频器	298
11.14.2	单平衡混频器	299
11.14.3	双平衡混频器	300
11.14.4	双双平衡混频器	301
11.14.5	单端 FET 混频器	302
11.15	混频器的特性参量与测量	303
11.15.1	混频器噪声温度比	303
11.15.2	噪声因子和噪声系数	303
11.15.3	转换损耗和转换增益	305
11.15.4	混频器的交调	306
11.15.5	谐波抑制	306
11.15.6	隔离参数	306
11.15.7	RF 匹配	307
11.15.8	IF 匹配	307
习题		307
第 12 章	微波放大器	311
12.1	RF 和微波晶体管放大器特性	311
12.1.1	场效应晶体管	312
12.1.2	双极结型晶体管	314
12.1.3	微波放大器功率增益	315
12.1.4	放大器的噪声特性	318
12.1.5	稳定性	322
12.1.6	非线性特性	324
12.1.7	动态范围	325
12.2	最大增益放大器设计	325
12.3	低噪声放大器设计	326

12.4	带宽放大器设计	330
12.4.1	带宽放大器设计概述	330
12.4.2	分布放大器	332
12.4.3	平衡放大器	333
12.5	前置放大器设计	334
12.5.1	前置放大器的工作原理	334
12.5.2	前置放大器的结构	336
12.6	功率放大器的设计	337
12.6.1	晶体管(BJT)功率放大器的设计	338
12.6.2	场效应管(FET)功率放大器的设计	342
	习题	346
第 13 章	天线	348
13.1	天线基础知识	348
13.1.1	天线的基本概念	348
13.1.2	天线口径	349
13.1.3	有效高度	349
13.1.4	振荡偶极子产生的场	350
13.1.5	天线的场区	351
13.1.6	天线发射功率与接收功率的关系	352
13.1.7	天线形状及其演变	353
13.1.8	波瓣图	354
13.1.9	描述天线辐射的相关参量	356
13.2	电偶极子和细直天线	357
13.2.1	电偶极子	357
13.2.2	细直天线	359
13.3	环天线	360
13.3.1	天线的远场表达式	360
13.3.2	辐射效率、品质因数	360
13.4	缝隙天线	363
13.5	八木天线	364
13.6	贴片天线	365
13.7	螺旋聚束天线	367
13.8	喇叭天线	369
13.9	抛物面反射镜天线	372
13.10	宽频带天线	374
13.11	非频变平面对数螺旋天线	375
13.12	移动通信系统的天线	376

13.13 短桩形天线、小型遗传算法天线和小型串联调谐环天线	378
13.14 天线的实际应用问题	378
习题	381
实验一 微波 EDA 软件的使用	384
实验二 微波电路计算机辅助设计 CAD 软件及传输线匹配的 CAD 方法	388
实验三 微带传输线 CAD 实验	395
实验四 定向耦合器 CAD 实验	398
实验五 功率分配器 CAD 实验	401
实验六 阻抗匹配网络	403
实验七 微带线匹配电路	408
实验八 功率衰减器	411
实验九 低噪声放大器的设计与制作	413
实验十 前置放大器	415
实验十一 功率放大器	417
实验十二 滤波器实验	421
实验十三 压控振荡器	423
实验十四 锁相环实验	426
实验十五 混频器实验	429
实验十六 射频发射机	433
实验十七 射频接收机	436
实验十八 射频天线	440
附录 A 重要的矢量公式	443
附录 B 分贝和奈培	445
附录 C 标准矩形波导主要参数表	447
附录 D 常用同轴射频电缆特性参数表	448
附录 E 本书重要的数学公式	450
附录 F 术语表	452
参考文献	457

第 1 章

概 论

1.1 引言

微波理论和微波技术的基础是 19 世纪科学家和数学家奠定的。1873 年麦克斯韦 (James Clerk Maxwell) 总结了拉普拉斯 (Laplace)、泊松 (Poisson)、法拉第 (Faraday)、高斯 (Gauss) 等人的研究, 提出了电磁场的基本规律和电磁波传播的假说, 并指出光也是电磁能量的一种形式。由麦克斯韦等人建立和完善了麦克斯韦方程。后由赫兹 (Heinrich Hertz) 在 1887—1891 年做了一系列实验, 完全证实了麦克斯韦的电磁波理论。今天, 所有电磁理论的应用, 包括无线电、电视、雷达和微波技术都归功于麦克斯韦方程。

20 世纪初无线电技术的快速发展主要发生在高频 (HF) 到甚高频 (VHF) 范围。20 世纪 40 年代第二次世界大战期间, 雷达的出现和发展使微波理论和技术得到了人们根本上的重视。随后, 微波技术在通信领域得到迅速的发展。

由于众多的科学家致力于波导元件的理论和实验分析、微波天线理论及微波网络理论的研究, 经过几十年的努力, 使微波技术日臻成熟, 应用十分广泛。

例如, 微波技术广泛应用是在蜂窝电话系统中。21 世纪到来后, 世界范围内蜂窝电话用户的数量及这项服务的容量迅速增长。卫星系统已经发展到能在世界范围内提供蜂窝 (语音)、视频和数据连接。尤其是小卫星系统如全球卫星定位 (global positioning satellite, GPS) 系统和直播卫星 (direct broadcast satellite, DBS) 系统特别成功。无线局域网 (wireless local area network, WLAN) 提供了短距离内的计算机之间的高速网连接, 而对此容量的需求也正在快速增长。最新的应用技术是超宽带 (ultra wide band, UWB) 无线通信, 其中的广播信号占有相当宽的频带, 但其功率电平非常低, 以避免和其他系统的干扰。为了了解微波, 本章介绍微波的特点及其在各领域中的具体应用。

1.2 微波及其特点

微波是电磁波谱中介于超短波与红外线之间的波段, 它属于无线电波中波长最短 (即频率最高) 的波段, 其频率范围为 300MHz (波长 1m) ~ 3000GHz (波长 0.1mm)。通常又将微波波段划分为分米波、厘米波、毫米波和亚毫米波四个分波段, 在通信和雷达工程上还使用拉丁字母来表示微波更细的分波段。图 1.2.1 给出了微波在电磁波谱中的位置, 表 1.2.1 给出了常用微波波段的划分。

微波的特点体现在以下几个方面。