

高校电子信息类专业主干课“十一五”规划教材

微波技术

吕芳 辛莉 侯海鹏◎编著

MICROWAVE TECHNIQUE

5



东南大学出版社
SOUTHEAST UNIVERSITY PRESS

高校电子信息类专业主干课“十一五”规划教材

微波技术

◆ 吕芳 辛莉 侯海鹏 编著



东南大学出版社
· 南京 ·

内 容 提 要

本书是为高等院校电子信息类专业课“微波技术”课程编写的本科生教材,以“场”、“路”结合的方法系统地介绍微波技术的基本理论和基础知识及基本分析方法,并结合当今微波技术发展的需要,对微波电路的相关基础知识作了较全面的介绍,给出了定量的数学分析和应用举例。

本书从传输线基本理论入手,着重讨论电磁场的基本理论。全书共分七章,内容包括传输线基本理论、微波传输线、微波网络、常用微波元件、微波有源器件与电路、微波系统概述。书末有附录、习题参考答案、参考文献等。

在编写过程中注意强调基本原理和典型问题的解决方法,增加了工程应用方面的部分内容。

图书在版编目(CIP)数据

微波技术/吕芳等编著. —南京:东南大学出版社,

2009. 12

ISBN 978 - 7 - 5641 - 1888 - 4

I. 微… II. ①吕…②辛…③侯… III. ①微波技术

IV. TN015

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 173510 号

微波技术

出版发行 东南大学出版社

出 版 人 江 汉

社 址 江苏省南京市玄武区四牌楼 2 号

邮 编 210096

经 销 江苏省新华书店

印 刷 南京京新印刷厂

开 本 700 mm×1000 mm 1/16

印 张 13.25

字 数 275 千字

书 号 ISBN 978 - 7 - 5641 - 1888 - 4

版 次 2010 年 1 月第 1 版

印 次 2010 年 1 月第 1 次印刷

印 数 1—3000 册

定 价 22.00 元

(凡有印装质量问题,请与我社读者服务部联系。电话:025—83792328)

前 言

微波技术具有巨大的应用价值。目前,现代无线通信、卫星通信、微电子学、纳米技术、电机科学、雷达等技术乃至生命科学与技术都是以电磁场与微波技术为基础,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。本课程的任务是使学生理解微波理论和技术的基础概念、基本理论和基本分析方法,培养学生分析问题和解决问题的能力,为今后从事微波研究和工程设计工作以及电磁场与微波技术工作的研究生的专业学习打下良好的基础。

本书是为高等院校电子信息类专业基础课“微波技术”课程编写的本科生教材,是编者在多年从事教学实践的基础上编写而成的。教材注重微波技术的基本概念和理论的清晰阐述,配以一定的例题以加深理解,又强调了实际应用。同时还列出了电磁场微波词汇汉英对照表,意在熟悉并掌握一些专业术语。

本书在内容安排上力求突出基本概念和基本方法的分析及总结,使学生能在较少的学习中掌握微波技术的基本概念,了解解决微波工程实际问题的方法和思路。本书文字表述明了,物理概念清晰,数学推导简捷,并结合例题说明解题的方法和要点。为了增加读者学习兴趣,制作了矩形波导场结构的动画,更便于学生理解。全书共分7章。第1章简要介绍了微波的概念、基本特性和应用;第2章详细讨论了传输线的基本理论、Smith圆图及其应用;第3章讨论了微波传输线理论(包括矩形波导、圆波导、同轴线、带状线、微带线的传输特性);第4章研究了网络的特性参量以及信号流图的应用等;第5章介绍了微波系统中的常用元件;第6章讨论了微波有源器件与电路,重点介绍了小信号微波晶体管放大器的理论和设计方法;第7章简要地介绍了微波通信系统。由于课时的限制,本书没有涉及微波测量和微波实验的内容。

在编写中,吸收了其他院校部分讲课教师的意见和建议,同时融入了课题组教师长期的讲授该课程的教学经验和体会,也结合了电子信息类专业后续课程知识的需求(如天线技术等)。

其中第1~3章由吕芳编写,第4,6章由辛莉编写,第5,7章由侯海鹏编写,附录由吕芳整理,最后由吕芳负责全书的统稿工作。本书在编写过程中,得到了许多老师的大力支持与帮助,在此深表谢意,同时向引用的参考书的作者致以敬意。课后大部分习题由侯婷演算,课件制作由于跃、沈玉红、乌仁格日乐完成。

书中不妥之处敬请广大读者提出宝贵意见。

作 者
2009年10月

CONTENTS 目 录

1 微波的理论基础	(1)
1.1 微波的特点和发展	(1)
1.2 电磁理论回顾	(4)
1.3 微波的应用	(6)
1.4 微波技术的研究方法和基本内容	(8)
思考题.....	(9)
2 传输线基本理论	(10)
2.1 传输线的基本概念	(10)
2.2 传输线方程及其解	(12)
2.3 均匀传输线的基本特性	(15)
2.3.1 传输特性	(16)
2.3.2 特性阻抗	(17)
2.3.3 输入阻抗和反射系数	(18)
2.3.4 驻波系数和行波系数	(20)
2.3.5 传输功率	(21)
2.4 均匀无损耗传输线的工作状态	(22)
2.4.1 行波状态(无反射情况)	(22)
2.4.2 驻波工作状态(全反射情况)	(23)
2.4.3 行驻波工作状态(部分反射情况)	(26)
2.5 阻抗圆图	(30)
2.5.1 阻抗圆图	(30)
2.5.2 导纳圆图	(34)

2.6 传输线阻抗匹配	(36)
2.6.1 阻抗匹配概念	(36)
2.6.2 阻抗匹配的方法	(38)
本章提要	(43)
思考题	(45)
习 题	(45)
3 微波传输线	(48)
3.1 波导系统的一般理论	(48)
3.1.1 规则金属波导理论	(48)
3.1.2 导波系统的传输特性	(50)
3.1.3 波导的激励与耦合	(53)
3.2 矩形波导	(54)
3.2.1 矩形波导中传输波形	(54)
3.2.2 矩形波导中电磁波形的传输特性	(57)
3.2.3 矩形波导中传输模式的场结构	(62)
3.2.4 矩形波导中传输功率和功率容量	(68)
3.3 圆波导	(69)
3.3.1 TM波、TE波场分量表达式	(70)
3.3.2 截止波长及波形简并	(73)
3.3.3 圆波导中的三个主要模式	(73)
3.4 同轴线	(75)
3.4.1 同轴线传输主模——TEM模	(76)
3.4.2 同轴线中的高次模	(77)
3.5 带状线	(77)
3.5.1 特性阻抗	(78)
3.5.2 中心带厚度不为零时的特性阻抗	(79)
3.5.3 带状线尺寸的设计考虑	(79)
3.5.4 带状线的优缺点	(79)
3.6 微带线	(79)
3.6.1 微带线传输的主模	(80)
3.6.2 微带线的特性阻抗	(80)
3.6.3 微带线的色散特性和尺寸设计考虑	(83)
本章提要	(88)

思考题	(89)
习 题	(90)
4 微波网络	(92)
4.1 网络的基本概念	(93)
4.1.1 网络参考面的选择	(93)
4.1.2 微波网络的分类	(94)
4.2 微波传输线与双绞传输线的等效	(95)
4.3 微波元件等效为微波网络的原理	(95)
4.4 二端口微波网络	(96)
4.4.1 阻抗矩阵参量	(97)
4.4.2 导纳矩阵参量	(98)
4.4.3 转移矩阵参量	(101)
4.4.4 散射矩阵参量和传输矩阵参量	(103)
4.4.5 矩阵参量间的相互转换	(106)
4.5 单元电路的基本网络参量	(108)
4.6 常用的微波网络特性	(110)
4.6.1 可逆网络	(110)
4.6.2 对称网络	(112)
4.6.3 无耗网络	(112)
4.7 信号流图在微波网络中的应用	(113)
4.7.1 信号流图概述	(113)
4.7.2 信号流图与线性方程组的关系	(114)
4.7.3 基本电路的信号流图	(114)
4.8 微波网络的工作特性参量	(118)
4.8.1 电压传输系数 T	(118)
4.8.2 插入衰减 L	(119)
4.8.3 插入相移 θ	(119)
4.8.4 输入驻波比 ρ	(120)
本章提要	(120)
思考题	(121)
习 题	(121)
5 微波元件	(124)
5.1 微波连接元件和终端元件	(124)

5.1.1 连接元件	(124)
5.1.2 终端元件	(127)
5.2 匹配元件、衰减器和移相器	(129)
5.2.1 匹配元件	(129)
5.2.2 衰减器	(136)
5.2.3 移相器	(138)
5.3 功率分配器和定向耦合器	(139)
5.3.1 功率分配器	(139)
5.3.2 定向耦合器	(145)
5.4 微波滤波器和谐振器	(150)
5.4.1 滤波器	(150)
5.4.2 谐振器	(154)
5.5 微波铁氧体元件	(162)
本章提要	(163)
思考题	(164)
习 题	(164)
6 微波有源器件与电路	(166)
6.1 微波晶体管放大器	(166)
6.1.1 微波晶体管放大器的稳定性	(166)
6.1.2 小信号微波晶体管放大器的设计	(170)
6.2 微波混频器	(172)
6.2.1 微波混频器的混频原理	(172)
6.2.2 混频器的主要特性	(174)
6.3 微波振荡器	(175)
本章提要	(178)
思考题	(179)
习 题	(179)
7 微波系统概述	(180)
7.1 微波通信系统	(180)
7.2 微波发射机和接收机	(182)
7.3 雷达系统	(183)
7.4 微波遥感	(186)

7.5 微波炉	(187)
附录一 电磁场微波词汇汉英对照表	(189)
附录二 常用同轴射频电缆特性参数	(193)
附录三 常用硬同轴线特性参量	(194)
附录四 标准矩形波导主要参数表	(195)
附录五 The Complete Smith Chart	(196)
各章习题参考答案	(197)
参考文献	(200)

1 微波的理论基础

微波技术是近代科学的重大成就之一,几十年来,微波已发展成为一门比较成熟的学科。在雷达、通讯、导航、电子对抗等许多领域得到了广泛的应用。雷达更是微波技术的典型应用,可以说没有现代微波技术的发展,具体地说若没有微波有源器件的发展,就不可能有现代雷达。现代的手机通讯更是与微波休戚相关。

1.1 微波的特点和发展

微波是波长约从 $1\text{ m} \sim 0.1\text{ mm}$ (相应的频率约从 $300\text{ MHz} \sim 3\,000\text{ GHz}$) 的电磁波。这段电磁频谱包括分米波、厘米波和毫米波等波段。在雷达和常规微波技术中,常用拉丁字母代号表示更细的波段划分。

上述关于微波的波长或频率范围,是一种传统上的约定。从现代微波技术的发展来看,一般认为短于 1 mm 的电磁波(即亚毫米波)属于微波范围,而且是现代微波研究的一个重要领域。

从电子学和物理学的观点看,微波这段电磁谱具有一些不同于其他波段的特点。

微波在电子学方面的特点表现在它的波长比地球上很多物体和实验室中常用器件的尺寸相对要小很多或在同一量级。这和人们早已熟悉的普通无线电波不同,因为普通无线电波的波长远大于地球上一般物体的尺寸。当波长远小于物体(如飞机、船只、火箭、建筑物等)的尺寸时,微波的传输特点与几何光学相似。利用这个特点,在微波波段能制成高方向性的系统(如抛物面反射器);当波长和物体(如实验室中的无线电设备)的尺寸有相同量级时,微波的特点又与声波相近,例如微波波导类似于声学中的传声筒,喇叭天线和缝隙天线类似于喇叭、箫和笛,谐振腔类似于共鸣箱等。波长和物体尺寸在同一量级的特点,提供了一系列典型的电磁场边值条件。

在物理学方面,分子、原子与核系统所表现的许多共振现象都发生在微波的范围,因而微波为探索物质的基本特性提供了有效的研究手段。

在实际工作中,为了方便起见,常把微波波段简单地划分为:分米波段(B. dm)(频率从 $300 \sim 3\,000\text{ MHz}$)、厘米波段(B. cm)(频率从 $3 \sim 30\text{ GHz}$)、毫米波段(B. mm)(频

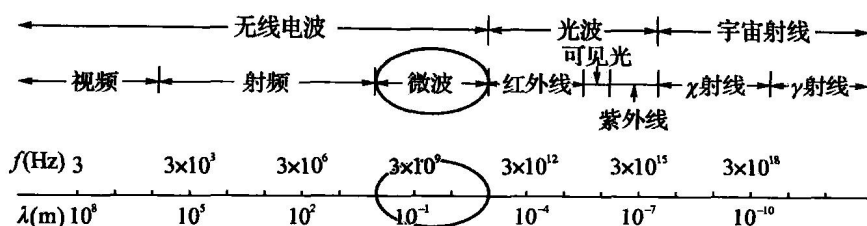


图 1.1 电磁波的频谱图

率从 30~300 GHz)、亚毫米波段(频率从 300~3 000 GHz)。在雷达、通讯及常规微波技术中,常用英文字母来表示更为详尽的微波波段,如表 1.1 所示。

表 1.1 微波波段

常用微波分波段				家用电器频段	
波段代号	标称波长(cm)	频率范围(GHz)	波长范围(cm)	名称	频率范围
L	22	1~2	30~15	调幅无线电	535~1 605 kHz
S	10	2~4	15~7.5	短波无线电	3~30 kHz
C	5	4~8	7.5~3.75	调频无线电	88~108 kHz
X	3	8~12	3.75~2.5	商用电视	
Ku	2	12~18	2.5~1.67	1~5 频道	48.5~92 kHz
K	1.25	18~27	1.67~1.11	6~12 频道	167~223 kHz
Ka	0.8	27~40	1.11~0.75	13~24 频道	470~566 kHz
U	0.6	40~60	0.75~0.5	25~68 频道	606~968 kHz
V	0.4	60~80	0.5~0.375	家用微波炉	2 450 kHz
V	0.3	80~100	0.375~0.3	手机通讯	900 kHz 或 1 800 kHz

微波是一个非常特殊的电磁波段,尽管它介于无线电波和红外辐射之间,但却不能仅依靠将低频无线电波和高频红外辐射加以推广的办法导出微波的产生、传输和应用的原理。电磁波的微波波段之所以要从射频频谱中分离出来单独进行研究,是由于微波波段有着不同于其他波段的重要特点:

1) 似光性和似声性

微波波段的波长和无线电设备的线长度及地球上的一般物体(如飞机、舰船、导弹等)的尺寸相当或小得多,当微波辐射到这些物体上时,将产生显著的反射、折射,这和光的反射、折射一样。同时微波的传播特性也和几何光学相似,能够像光线一样直线传播和容易集中,即具有似光性。这样利用微波就可以获得方向性极好、体积小的天线设备,用于接收地面上或宇宙空间中各种物体发射或者反射回来的微弱信号,从而确定该物体的方向与距离,这就是雷达及导航技术的基础。

微波的波长与无线电波设备尺寸相当的特点,使得微波又表现出与声波相似的特征,即具有似声性。例如:微波波导类似于声学中的传声筒;喇叭天线和缝隙天线类似于声学中的喇叭、箫和笛。微波谐振腔类似于声学中的共鸣箱。

2) 分析方法的独特性

由于微波的频率很高,波长很短,使得在低频电路中被忽略了一些现象和效应(例如:趋肤效应、辐射效应、相位滞后现象等)在微波波段则不可以忽略。这样低频电路常用的集中参数元件电阻、电感、电容已不适用,电压、电流在微波波段甚至失去了唯一性意义。因此用它们已无法对微波传输系统进行完全描述,而要求建立一套新的能够描述这些现象的理论分析方法——电磁场理论的场与波传输的分析方法,用新的装置(例如传输线、波导、谐振腔等)代替那些我们已习惯了的电容、电感、电阻。

3) 共度性

电子在真空管内的渡越时间(10^{-9} 秒左右)与微波的振荡周期($10^{-9} \sim 10^{-13}$ 秒)相当的这一特点称为共度性。该特性是给予微波电子学以巨大影响的非常重要的物理因素。利用这种共度性可以做成各种微波电真空器件,得到微波振荡源。而这种渡越效应在静电控制的电子管中是忽略不计的。

4) 穿透性

微波辐照于介质物体时,能深入到该物体内部的特点称为穿透性。例如微波是射频波谱中除光波外唯一能穿透电离层的电磁波,因而成为人类探测外层空间的重要手段。微波能穿透云雾、雨、植被、积雪和地表层,具有全天候和全天时工作的能力,成为遥感技术的重要波段;微波能穿透生物体,成为医学热透疗法的重要手段;毫米波还能穿透离子体,是远程导弹末端制导和航天器重返大气层时实现通讯的重要手段。

5) 信息性

微波波段可载的信息容量是非常大的,即使是很小的相对带宽,其可用的频带也是非常宽的,可以达数百甚至上千兆赫。所以现代多路通讯系统,包括卫星通信系统,几乎都是工作在微波频段。此外,微波信号还可以提供相应信息、极化信息、多普勒频率信息,这在目标探测、遥感、目标特征分析等应用中是十分重要的。

6) 非电离性

微波的量子能量不够大,因而不会改变物质分子的内部结构或破坏分子的化学键,所以微波和物体的作用是非电离的。由物理学可知,分子、原子和原子核在外加电磁场的周期作用下所呈现的许多共振现象都发生在微波范围,因此微波为探索物质的内部结构及其基本特性提供了有效的研究手段。

微波成为一门技术科学,开始于20世纪30年代。微波技术的形成以波导管的实际应用为其标志。若干形式的微波电子管(速调管、磁控管、行波管等)的发明,是另一标志。其发展过程大致可分为以下四个阶段:

(1) 1940年以前为第一阶段。此阶段为实验室阶段,主要研究微波产生的方法。

(2) 1940~1945年为第二阶段。这个阶段是微波技术迅速发展并应用于实际的

阶段。该阶段正处于第二次世界大战期间,由于军事应用的迫切需要,微波技术得到了巨大发展,产生了很多微波器件(如微波元件和器件、高功率微波管等)。但是由于各国都忙于实际应用,对理论的研究注意得较少,使得理论落后于实际应用。

(3) 1945~1965 年为第三阶段。这一阶段不仅开辟了新波段,而且扩展了应用范围,并逐步形成了一系列新的科学领域,如微波波谱学、射电天文学、射电气象学等。同时在前一阶段的基础上,比较完整而系统地建立了一整套微波电子学,为微波技术的进一步发展打下了理论基础。

(4) 1965 年以后为第四阶段。随着微波固体器件和微波集成电路的发展与应用,为微波技术的发展,也为微波设备的固定化与小型化开辟了一个新时代。

至今,微波技术已成为一门无论在理论和技术上都相当成熟的学科,又是不断向纵深发展的学科。

频率不断向更高范围推进,仍然是微波研究发展的一个主要趋势。20 世纪 60 年代激光的研究和发展,已越过亚毫米波和红外之间的间隙而深入到可见光的电磁频谱。利用常规微波技术和量子电子学方法,已能产生从微波到可见光的整个电磁频谱的辐射功率。但在毫米波—红外间隙中的某些频率和频段上,还不能获得足够用于实际系统的相干辐射功率。

微波的发展还表现在应用范围的扩大。微波的最重要应用是雷达和通信。雷达不仅用于国防,同时也用于导航、气象测量、大地测量、工业检测和交通管理等方面。通信应用主要是现代的卫星通信和常规的中继通信。射电望远镜、微波加速器等对于物理学、天文学等的研究具有重要意义。毫米波微波技术对控制热核反应的等离子体测量提供了有效的方法。微波遥感已成为研究天体、气象和大地测量、资源勘探等的重要手段。微波在工业生产、农业科学等方面的研究以及微波在生物学、医学等方面的研究和发展已越来越受到重视。

微波与其他学科互相渗透而形成若干重要的边缘学科,其中如微波天文学、微波气象学、微波波谱学、量子电动力学、微波半导体电子学、微波超导电子学等,已经比较成熟。微波声学研究和应用已经成为一个活跃的领域。微波光学的发展,特别是 20 世纪 70 年代以来光纤技术的发展,具有技术变革的意义。

1.2 电磁理论回顾

从理论上讲,一切电磁波(包括光波)在宏观媒质中都服从 Maxwell 方程组。因此,深入研究和考察它,将有助于了解电磁波动的深入含义。

人类首次实现的 Hertz 电磁波试验,从现在的眼光来看,只是一个极近距离上的电火花收发实验,完全不足为奇。然而,当时却轰动了学术界。人们不得不坐下来认真思索:电磁波这个东西没有“脚”是怎么走过去的。用学术性的语言则可以说是如何实现超距作用的。

于是,历史选择了 Maxwell,一批年青的学者总结出电磁运动规律,即 Maxwell 方程组。同时,提出了 Newton 力学所没有的崭新概念——场(Field)的概念。

Maxwell 方程组中独立方程主要表现为前面两个,即

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (1.1)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (1.2)$$

这里,首先让我们来探讨一下上面方程内含的哲学思想:

(1) 这两个方程左边物理量为磁(或电),而右边物理量则为电(或磁)。*这中间的等号深刻揭示了电与磁的相互转化,相互依赖,相互对立,共存于统一的电磁波中。正是由于电不断转换为磁,而磁又不断转成为电,才会发生能量交换和贮存。

值得指出:人类对于电磁的相互转化在认识上走了很多弯路。其中 Faraday 起到关键的作用。Oersted 首先发现电可转化为磁(即线圈等效为磁铁),而 Faraday 坚信磁也可以转化为电。但是无数次实验均以失败而告终。只是在 10 年无效工作后,沮丧的 Faraday 鬼使神差地把磁铁一拔,奇迹出现了,连接线圈的电流计指针出现了晃动。

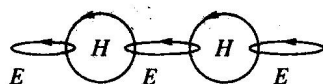


图 1.1 电磁波的激发

这一实验不仅证实了电磁转换,而且知道了只有动磁才能转换为电。

(2) 进一步研究 Maxwell 方程两边的运算,从物理上看,运算反映一种作用(Action)。方程的左边是空间的运算(旋度),方程的右边是时间的运算(导数),中间用等号连接。它深刻揭示了电(或磁)场任一地点的变化会转化成磁(或电)场时间的变化;反过来,场的时间变化也会转化成地点变化。正是这种空间和时间的相互变化构成了波动的外在形式。用通俗的一句话来说,即一个地点出现过的事物,过了一段时间又在另一地点出现了。

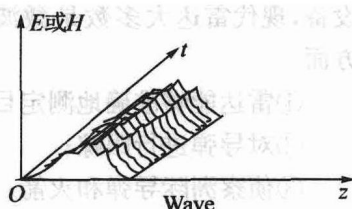


图 1.2 电磁波传播

(3) Maxwell 方程还指出:电磁转化有一个重要条件,即角频率 ω 。让我们写出单色波频域的 Maxwell 方程

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + j\omega\epsilon\mathbf{E} \quad (1.3)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -j\omega\mu\mathbf{H} \quad (1.4)$$

任何形式的信号高频分量都包含很少高的 ω ,才能确保电磁的有效转换,直流情况没有转换。可以这样说,在高频时封闭电路才有可能变成开放电路。不过很有意思的是频率愈高,越难出功率,这也是一个有趣的矛盾。

(4) 在 Maxwell 方程中还存在另一对矛盾对抗,即

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$$

构成了 Maxwell 方程本质的不对称性。

Maxwell 针对将安培环路定律直接应用到时变电磁场时出现的矛盾,提出了位移电流(Displacement Current)的假说,对安培环路定律进行了修正,从而揭示了随时间变化的电场也要激发产生磁场。

安培环路定律的实质在于说明传导电流是激发漩涡磁场的场源。而对建立在 Maxwell 位移电流假设下的全电流定律而言,其实质在于说明位移电流和传导电流一样,都是激发漩涡场的场源。

Maxwell 的漩涡电场假设表明变化着的磁场可以激发漩涡电场。而 Maxwell 位移电流假设表明变化着的电场可以激发漩涡磁场。将这两个假设结合在一起,它就预示着电磁波的存在。

1.3 微波的应用

由于微波具有诸多特点,所以获得了广泛的应用。微波的应用包括作为信息载体的应用和作为微波能的应用两个方面。下面就其应用的主要领域加以简单介绍。

1) 军事应用

微波技术最主要的应用是在军事上,其中以雷达和通信系统中的应用最为广泛。

(1) 雷达系统。雷达是利用电磁波对目标的反射特性进行目标探测和定位的一种设备,现代雷达大多数是微波雷达,微波传播的高方向性主要可以应用于以下几个方面:

- ① 雷达能够准确地测定目标的方向、距离和速度,用以发现敌机、敌舰等的活动;
- ② 对导弹进行跟踪;
- ③ 侦察洲际导弹和火箭;
- ④ 测定炮位;
- ⑤ 导航飞机、船只;
- ⑥ 跟踪卫星,控制宇宙飞船飞行;
- ⑦ 测定风速、风向,测定雨和雪的分布、云层的高度与厚度,以进行天气预报。

(2) 通信系统。由于微波具有频率高、频带宽、信息量大的特点,因此被广泛地应用于各种通信业务中。如微波多路通信、微波接力通信、散射通信、移动通信和卫星通信等。同时,用微波各波段的特点可实现特殊用途的通信。

- ① S~Ku 波段的微波适于进行以地面为基础的通信;
- ② 毫米波适于空间与空间之间的通信;
- ③ 毫米波段的 60 GHz 频段的电波大气衰减大,适于近距离的保密通信;
- ④ 90 GHz 频段的电波在大气中的衰减很小,是一个无线电窗口频段,适于地一空和远距离通信;
- ⑤ 对于很长距离的通信,L 波段更适合。

(3) 新的军事应用。利用微波无源探测方法可测量隐身飞机,也可用高功率微波摧毁敌方武器。

2) 工农业应用

微波作为能源的应用始于 20 世纪 50 年代后期至 60 年代末,微波能的应用是随着微波炉的商品化及进入家庭而得到大力发展的。

微波能的应用包括微波的强功率应用和弱功率应用两个方面。强功率应用是微波加热;弱功率应用是用于各种电量和非电量(包括长度、速度、湿度、温度等)的测量。

(1) 微波加热可以深入物体内部,热量产生于物体内部,不依靠热传导,里外同时加热,具有热效率高、节省能源、加热速度快、加热均匀等特点,便于自动化连续生产。用于食品加工时,还有消毒作用,清洁卫生。既不污染食品,也不污染环境,而且不破坏食品的营养成分。微波加热现已被广泛应用于食品、橡胶、塑料、化学、木材加工、造纸、印刷、卷烟等工业中;在农业上,微波加热可用于灭虫、育种、育蚕、干燥谷物等。

(2) 弱功率应用的电量和非电量的测量,其显著特点是不需要和被测量对象接触,因而是非接触式的无损测量,特别适宜于生产线测量或进行生产的自动控制。目前应用最多的是测量湿度,即测量物质(如煤、原油等)中的含水量。

3) 生物医学应用

微波的生物医学应用,也属于微波能的加热应用。利用微波对生物体的热效应,选择性局部加热,是一种有效的热疗方法,临床上可用来治疗人体的各种疾病。微波的医学应用包括微波诊断、微波治疗、微波解冻、微波解毒和微波杀菌等。用微波对生物体做局部照射,可提高局部的新陈代谢,并诱导产生一系列的物理化学变化,从而达到解痉镇痛、抗炎脱敏、促进生长等作用,广泛用于治疗骨折、创伤、小儿肺部疾病、胰腺疾病等。国际上规定的允许用于工业、科学、医学的微波加热专用频率是 $915\text{ MHz} \pm 25\text{ MHz}$ 、 $2450\text{ MHz} \pm 50\text{ MHz}$ 、 $5800\text{ MHz} \pm 75\text{ MHz}$ 和 $22.125\text{ MHz} \pm 125\text{ MHz}$,目前广泛使用的是 915 MHz 和 2450 MHz 。

4) 能源

在能源紧张的情况下,人们正向大自然寻求获取能源的各种途径。可利用微波对电离层的穿透性,把卫星上所产生的电功率传递到地面,首先把卫星上太阳电池所产生的功率转换成微波功率,然后用定向天线把微波聚集并射向地面,通过接收和整流,把微波能再转换成直流电。

5) 计算机

1977 年,个人计算机(PC)的出现,使计算机应用扩展到家庭或个人,计算机在未来的生产和社会生活中,将担当着极其重要的角色,而它的进一步发展(超快速方向),将必须用微波技术的概念去解决芯片接线之间的脉冲反射(失配引起)和串扰(互耦引起)等问题。

6) 微波的有害方面

(1) 大功率的微波辐射对人体有明显的伤害和破坏作用。

(2) 频率在 150 MHz~1.2 GHz 范围内时,电磁能量易被生物体中央部分吸收,对内脏器官危害性较大。

(3) 频率在 1.2~3.3 GHz 范围内时,电磁能量易被生物体表皮和皮下深部组织吸收,并转化为热量。

(4) 3 GHz 的微波辐射对视网膜有损害。

(5) 频率高于 3 GHz 的微波辐射,可使人体温度升高,产生高温生理反应。

目前对微波的主要防护措施大致有以下 3 种:

(1) 对微波辐射器件(微波管和发射机)进行屏蔽。

(2) 在大功率工作场所的工作人员要穿防护衣,带防护镜。

(3) 微波源的功率泄露要在规定的安全指标范围内。中国在 1979 年制定的《微波辐射暂行卫生标准》中规定:

①一天八小时连续发射时,其剂量不应超过 $38 \mu\text{W}/\text{cm}^2$;

②短时间间断辐射及一天超过八小时照射时,一天总剂量不超过 $300 \mu\text{W} \cdot \text{h}/\text{cm}^2$;

③由于特殊情况需要在辐射剂量大于 $1 \text{ mW}/\text{cm}^2$ 环境中工作时,必须使用个人防护用品,但日剂量不得超过 $300 \mu\text{W} \cdot \text{h}/\text{cm}^2$,一般不容许在剂量超过 $5 \text{ mW}/\text{cm}^2$ 的辐射环境下工作。

1.4 微波技术的研究方法和基本内容

研究传输线上电磁波特性和两种分析方法即“场”和“路”的分析方法。“场”的分析方法指从 Maxwell 方程出发,在特定边界条件下解电磁场波动方程,求得场量的时空变化规律,分析电磁波沿线的各种传播特性;“路”的分析方法指将传输线作为分布参数电路处理,用 Kirchhoff 定律建立传输线方程,求得线上电压和电流的时空变化规律,分析电压和电流的各种传输特性,TEM 波传输线多用此方法进行分析。

在微波波段不能再用“路”的概念而要用“场”的概念来描写。在低频电路中,电路尺寸比波长小得多,可以认为稳定状态的电压和电流效应在整个系统各处是同时建立起来的,但在微波波段,波长与电路的尺寸可相比拟甚至更小,不能忽略电磁场的空间部分,应当作为波动过程来研究,而电压、电流等概念在微波波段已失去确切的含义,只有用电磁场和电磁波的概念,才能对系统做完全描述。但有时也将电场、磁场等效为电压、电流,将微波传输线等效为低频传输线来处理,这种方法是等效的概念,从而使问题能比较容易地得到解决,也就是说,这两种方法并非截然分开,而是有联系的。实际上,“路”与“场”这两种理论表明,对于同一个客观事物,可以采取不同的分析方法,其中哪个为宜,需视具体情况而定。

一般低频集中参数的传输线、电容、电感等已不适用,必须采用原理上完全不同的分布参数元件如波导管、波导器件等。在微波测量中,以驻波、波长(频率)、功率作为三个基本量测量,通过驻波的测量不仅可以测出电磁波在传输线中传播时场强的相对大