

高等学校“十一五”规划教材

电子信息与通信工程系列

微波技术基础及应用

主 编 边 莉 主 审 赵春晖

高等学校“十一五”规划教材
电子信息与通信工程系列

微波技术基础及应用

主 编 边 莉
副主编 题 原 陈炳才 李 雯 冯丽媛

哈尔滨工业大学出版社

内容简介

本书是根据微波技术专业发展对本课程的新要求,以及对学生能力培养、加强基础和拓宽专业的要求而编写。内容包括传输线理论、导波系统、微波网络分析、微波元器件以及微波元件计算机辅助设计。本书在阐述基本理论的基础上,增加了微波元件的计算机仿真关键技术和过程,给出电磁仿真的注意事项及工程应用等方面的内容。

本书可作为高等院校电磁场与微波技术、电子工程、信息工程、通信工程和应用电子技术专业本科生教材,也可供其他讲授微波技术基础的教师、学生及专业技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

微波技术基础及应用/边莉主编. —哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2009.8

(电子信息与通信工程系列)

ISBN 978-7-5603-2924-6

I. 微… II. 边… 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(2009)第 112811 号

责任编辑 许雅莹

封面设计 刘长友

出版发行 哈尔滨工业大学出版社

社 址 哈尔滨市南岗区复华四道街 10 号 邮编 150006

传 真 0451-86414749

网 址 <http://hitpress.hit.edu.cn>

印 刷 肇东粮食印刷厂

开 本 787mm×1092mm 1/16 印张 10.5 插页 1 字数 250 千字、

版 次 2009 年 8 月第 1 版 2009 年 8 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5603-2924-6

印 数 1~3 000 册

定 价 21.80 元

(如因印装质量问题影响阅读,我社负责调换)

高等学校“十一五”规划教材

电子信息与通信工程系列

编 委 会

主 任 吴 群

编 委 (按姓氏笔画排序)

于晓洋	王艳春	史庆军	齐怀琴	刘 梅
孙道礼	邹 斌	何 鹏	宗成阁	孟维晓
胡 文	姜成志	赵志杰	赵金宪	童子权
冀振元	魏凯丰			

总 序

电子信息与通信工程是当今世界发展最快的领域,该技术领域的新概念、新理论、新技术不断涌现,其知识更新速度也是令人吃惊。这就使得从事电子信息与通信工程技术的科技人员要不断学习,把握前沿动态,吸收最新知识。近年来,各高校通过教学改革,在引导学生将最新知识应用于社会实践和市场需求环境,解决实际问题,培养学生实践动手能力、探索性学习能力和创新思维能力等方面都取得了可喜成绩。

为了培养国家和社会急需的电子信息与通信工程领域的高级科技人才,配合高等院校电子信息与通信工程专业的教学改革和教材建设,哈尔滨工业大学出版社组织哈尔滨工业大学、哈尔滨理工大学、黑龙江科技学院、齐齐哈尔大学、佳木斯大学等多所高校编写了这套面向普通高等院校“电子信息与通信工程系列”教材,通过共同研讨和合作,联合编写专业教材,相互取长补短、发挥各自的优势和特色,促进教学水平的提高。

本系列教材的编写要求:结合新的专业规范,融合先进的教学思想、方法和手段,体现科学性、先进性和实用性,强调对学生实践能力的培养,以适应新世纪对通信、电子人才培养的需求。

本系列教材力求做到:专业基础课教材概念清晰、理论准确、深度合理、内容精炼、注意与专业课教学的衔接;专业课教材覆盖面广、深度适中,体现相关领域的新发展和新成果,注重理论联系实际。

本系列教材的编委会阵容强大,编者都是在教学工作第一线的骨干教师。他们具有多年丰富的教学和科研经历,掌握最新的理论知识,具有丰富的实践经验,是一支高水平的教材编写队伍。

本系列教材理论性与工程实践性紧密结合,旨在引导读者将电子信息与通信工程的理论、技术与应用有机结合,适合高等学校电子、信息、通信和自动控制等专业作教材。我深信:这套教材的出版,对于推动电子信息与通信工程领域的教学改革、提高人才培养质量必将起到积极的推动作用,以其内容的先进性、实用性和系统性为特色而获得成功。

吴群

哈尔滨工业大学教授

2009年4月

前 言

微波技术是电子与信息工程专业(电磁场与微波技术、电子工程、信息工程、通信工程和应用、电子技术等专业)的一门专业基础课,主要讲述微波技术的基本理论、基本概念和基本分析方法。

近年来,随着信息科学技术突飞猛进的发展,微波技术在电子信息等学科教学中的地位越来越重要。但是,微波技术这一课程由于对工程数学和电磁理论基础要求较高,涉及的数学公式较多也较为晦涩,具体工程问题的分析与传统教材中讲授的基础知识结合不够紧密等特点,再加上课时有限,一直成为学生学习的难点。因而编写适合高等学校电子信息与通信工程专业人才培养模式的教材迫在眉睫。

基于上述认识,在教材的编写上,综合考虑它作为专业基础课的特点以及与其他相关课程的衔接问题,坚持明确教材定位,以人才培养为根本目标,力求编写先进性、针对性、实践性较强的“精品”教材。

(1) 避免繁琐公式推导。微波技术内容繁多,理论性强,适用的范围宽,针对这门课对于工科电子与通信类开设,应弱化复杂公式推导,尽量使内容精炼,突出专业特点。

(2) 强调理论联系实践。尽量参照国内外同类大学所采用的教材,博取众家之长,既注重理论,也强调实际,使学生在掌握微波技术的基本理论和分析方法的同时,培养他们分析问题和解决问题的能力。

(3) 结合计算机仿真工具。随着计算机技术的发展,大量复杂的电磁场问题都是在软件仿真和设计中进行,所以为学生介绍一些新的仿真软件,使学生能尽快接受现代电磁问题解决方法,对学生的实践能力和科学兴趣的培养都极其重要。编者改变已有书籍中语言多而图较少的弱点,使学生能够既学到严密的理论,又有直观图示,以减弱微波技术内容的枯燥性。

全书共分5章。第1章,从路的观点出发研究微波传输线的基本传输特性及其计算方法,给出一系列关于微波传输线的基本概念和分析方法;第2章,研究规则的空心金属波导中的场分布及主要模式的传输特性,同时分析微带线、带状线等传输系统的结构及传输特性;第3章,讨论微波网络基础,给出网络的5种参量矩阵的定义,着重阐述散射矩阵及其基本性质,介绍二端口网络特性参量的计算方法,研究多端口网络的基本性质;第4章,介绍微波工程中常用的几种微波无源元件的结构、工作原理、主要技术参数及其特性,还对一些重要元件的设计方法作扼要介绍;第5章,介绍常用的EDA仿真工具,进一步结合CST和HFSS电磁仿真软件,介绍微波元件的仿真关键技术和过程,给出电磁仿真的注意事项。

全书绪论及第5章由黑龙江科技学院边莉编写,第1章及第3.4~3.5节由齐齐哈尔大学题原编写,第2章及第4.4节由哈尔滨工程大学陈炳才编写,第3.1~3.3节由黑龙江科技学院冯丽媛编写,第4.1~4.3节及4.5~4.6节由黑龙江科技学院李雯编写。全书由边莉统稿。

本书在编写工程中,得到了许多同志的大力支持和帮助,哈尔滨工业大学孟繁义博士、黑龙江科技学院王娟老师提供了部分习题,并对全部习题答案进行了校验。

本书由哈尔滨工程大学赵春晖教授主审,并提出了许多宝贵意见和建议,在此表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,书中错误和不当之处难免,衷心希望读者批评指正!

编者

2009年5月

目 录

CONTENTS

绪论	1
第1章 传输线理论	9
1.1 微波传输线	9
1.2 均匀传输线方程及其解	10
1.3 无耗传输线的状态分析	21
1.4 史密斯圆图	27
1.5 阻抗匹配	35
本章小结	40
习题	41
第2章 导波系统	44
2.1 矩形波导	44
2.2 圆形波导	55
2.3 同轴线	62
2.4 带状线和微带线	64
2.5 耦合带状线和耦合微带线	69
2.6 共面波导	73
2.7 槽线	74
本章小结	74
习题	76
第3章 微波网络分析	77
3.1 微波网络概述	77
3.2 微波传输线的等效	79
3.3 微波元件的等效	83
3.4 二端口微波网络	86
3.5 多端口微波网络	101
本章小结	103
习题	104

第4章 微波元器件	108
4.1 电抗性元件	108
4.2 连接元件和终端元件	112
4.3 变换元件	116
4.4 微波滤波器	118
4.5 定向耦合器	125
4.6 矩形波导中衰减器和移相器	133
本章小结	135
习题	137
第5章 微波元器件计算机辅助设计	138
5.1 现代 EDA 仿真工具的介绍	138
5.2 基于 CST 仿真软件的设计实例	140
5.3 基于 HFSS 仿真软件的设计实例	148
本章小结	152
习题	152
习题参考答案	153
参考文献	158

绪 论

INTRODUCTION

麦克斯韦创立现代电磁学的基本概念,作为微波技术的理论基础,已有 100 多年的历史。从第二次世界大战微波技术的第一个主要应用——雷达的强劲发展,到如今高频固态器件、微波集成电路以及 MEMS 微机电系统等微波技术应用的迅速发展,微波技术已成为一门比较成熟的学科。它是电子信息、通信工程等专业的专业课程,对科学技术的发展起着重要的作用。

1. 微波

微波(Microwave)是指频率为 300 MHz ~ 300 GHz,对应的波长为 1 m ~ 1 mm 的电磁波。波长在毫米量级的电磁波,称为毫米波(Millimeter Waves)。图 1 给出了微波频段在电磁波谱中的位置。从图中可见,微波波段的低频端与普通无线电波中超短波的高频段相毗邻,而高频端则与红外线的低频段相衔接。

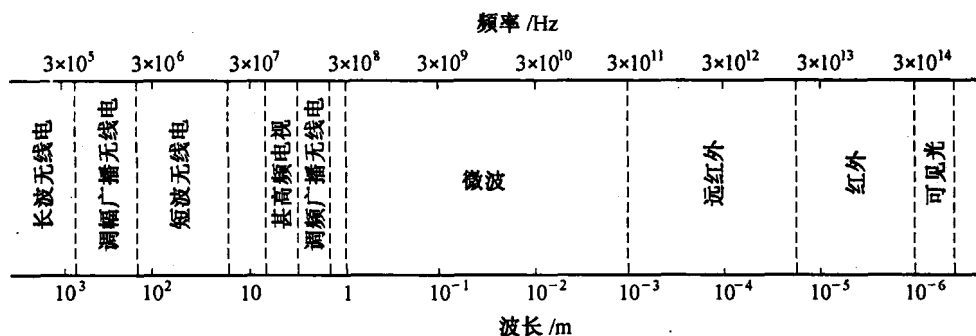


图 1 电磁频谱

表 1 为典型微波波段的划分。对于表 1 右边所列频段,还有习惯上的称谓:S(10 厘米波段),C(5 厘米波段),X(3 厘米波段),Ku(2 厘米波段),K(1.3 厘米波段),Ka(8 毫米波段)。

表 1 典型微波波段的划分

典型的频率	频率	频段的大体分配	频率
调幅广播频段	535 ~ 1605 kHz	中频	300 kHz ~ 3 MHz
短波无线电频段	3 ~ 30 kHz	高频(HF)	3 ~ 30 MHz
调频广播频段	88 ~ 108 kHz	甚高频(VHF)	30 ~ 300 MHz
甚高频电视(2~4)	54 ~ 72 MHz	超高频(UHF)	300 MHz ~ 3 GHz

续表 1

典型的频率	频率	频段的大体分配	频率
甚高频电视(5~6)	76~88 MHz	L 波段	1~2 GHz
超高频电视(7~13)	174~216 MHz	S 波段	2~4 GHz
超高频电视(14~83)	470~890 MHz	C 波段	4~8 GHz
美国蜂窝电话	824~849 MHz	X 波段	8~12 GHz
	869~894 MHz	Ku 波段	12~18 GHz
欧洲 GSM 蜂窝电话	880~915 MHz	K 波段	18~26 GHz
	925~960 MHz	Ka 波段	26~40 GHz
中国 GSM 蜂窝电话	900 MHz	U 波段	40~60 GHz
	1 800 MHz	V 波段	50~75 GHz
	1 900 MHz	E 波段	60~90 GHz
全球定位系统	1 575.42 MHz	W 波段	75~110 GHz
	1 227.60 MHz	F 波段	90~140 GHz
微波炉	2.45 GHz		
美国直播系统	11.7~12.5 GHz		
美国 ISM 波段	902~928 MHz		
	2.400~2.484 GHz		
	5.725~5.850 GHz		
美国超宽带无线电	3.1~10.6 GHz		

2. 微波的特点及应用

微波与低频电磁波一样,具有电磁波的一切特性,但由于微波的波长短、频率高,因此又具有许多独特的性质,主要表现如下。

(1) 研究方法的独特性

在低频时,电路的几何尺寸比工作波长小得多,能量集中,其传播性质用“路”的概念来描述,使用的元件称为集总参数元件(如电阻、电容、电感等)。由于微波的波长极短,与使用的元件和设备的尺寸可以相比拟,故微波的传播应利用“场”的概念来处理,使用的元件称为分布参数元件(如波导管、谐振腔等)。因此低频电路的电流、电压、电阻等不再适用,而是采用等效方法处理,如微波测量中以功率、波长、阻抗取代了电流、电压、电阻。

(2) 携带的信息容量大

任何通信系统为了传递一定的信息必须占有一定的频带宽度,纯粹的单频正弦波并不携带任何信息。例如,人耳所能听到的声音频带范围约是 20~20 000 Hz,但为了能听懂对方的语言,只需传递 300~3 400 Hz 这一频段频率的信号。也就是说,一个语言信道至少要有 3 000 Hz 的带宽,普通电话就是这样设计的,因此电话可以听懂但不悦耳。为了更逼真的传送语音和音乐,则需要占 6~15 kHz,这就是广播所要求的频带。为了传送电视图像,则需要更宽的频带,对于我国电视制式,一路黑白或彩色的电视加上伴音要占 8 MHz 的带宽。可见,频带宽度可以体现信息的容量。在微波段可以实现更大的带宽,也就是说,微波可以携带更多的信息。例如,800 MHz 频率下 1% 的带宽为 8 MHz(这是一路电视频道的带宽),而 80 GHz 频率下 1% 的带宽为 800 MHz(这是 100 路电视频道的带宽)。

(3) 易实现窄波束定向辐射

早在无线电发展的初期,人们在实践中就认识到可以利用无线电波的反射测定目标物的位置,这就是雷达的原理。为了精确定位,则必须让无线电波定向发射,聚成一个窄束。理论和实践表明,为了使电磁波定向发射,发射天线的尺寸应远大于电磁波的波长。例如常用的抛物面天线,它所发射电磁波的主波束角为

$$\theta = \frac{140^\circ}{D/\lambda}$$

式中 D ——抛物面直径;

λ ——波长。

为了得到波束角为 5° 的波束,必须使用直径为波长 28 倍的抛物面,即使选用短波段的最短波长(10 m),也要使用一个直径达 280 m 的抛物面天线,这样大的天线建设在地面上已十分困难,更不用说装在船舶或飞机上了。而如果选用微波波段,例如 3 厘米波段,则一个直径 84 cm 的抛物面天线就可获得同样窄的波束,这样的天线装在小型歼击机上也不困难。因此,只有掌握了微波波段,才能使雷达的实现成为可能。

(4) 波粒两重性

对于尺寸大的物体,如建筑物、火箭、导弹,微波显示出粒子的特点——似光性(以光速直线传播、反射、折射、干涉、衍射等);而对于尺寸小的物体,显示波动性。

(5) 可穿透性

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,因而成为人类外层空间通信的重要手段。如图 2 所示,这就是我们常说的“宇宙窗口”。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信的重要手段。

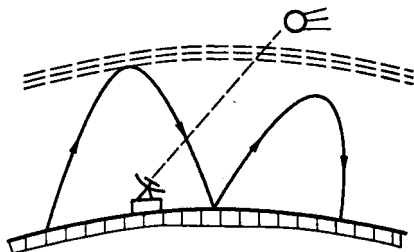


图 2 宇宙窗口

(6) 产生方法的特殊性

微波的周期在 $10^{-9} \sim 10^{-12}$ s, 与电子管内电子的渡越时间(约为 10^{-9} s)相近,因此微波的产生和放大不能再使用普通的电子器件,取而代之的是结构和原理完全不同的微电子元件——速调管、磁控管、行波管及微波固态器件。

微波技术的主要应用是通信、雷达、环境遥感和医学系统。特别在今天,无线连接承诺能在“任意时间、任意地点对任意人”提供语音和数据服务,使射频和微波通信系统的应用遍地开花。

从 20 世纪 70 年代,首次提出的蜂窝电话系统开始,微波技术的应用无处不在。到 2008 年底,中国移动电话用户达 6.88 多亿,用户的数量及这项服务的容量还在继续增长。

2009年1月,3G系统在国内启动,标志着移动通信的新纪元。同时,移动通信的快速发展为微波技术的应用提出了更多的挑战。

目前,卫星系统已经发展到能在世界范围内提供语音、视频和数据连接。遗憾的是,庞大的卫星电话系统如铱星(Iridium)、全球星(Globalstar)都遇到了技术缺陷和疲软的商务运作的打击,从而导致了数十亿美元的损失。但是,小卫星系统如全球定位卫星(GPS, Global Positioning Satellite)系统和直播卫星(DBS, Direct Broadcast Satellite)系统则特别成功。无线局域网(WLAN, Wireless Local Area Network)提供了短距离内的计算机之间的高速网连接,而对此容量的需求正在快速增长。最新的无线通信技术是超宽带(UWB, Ultra Wide Band)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,避免了和其他系统的干扰。这些都是微波成功应用的实例。

雷达系统在军事、商业和科学系统中都有广泛的应用。雷达用做空中、地面和海洋上目标的探索和定位,也用做导弹的导引和火力控制。商业方面,雷达技术用于空中交通管制、动作探索器(门的开启和安全报警)、车辆的防撞及距离测量。科学方面,雷达技术用于气象预报,大气、海洋和陆地的遥感,以及医学诊断和治疗。微波辐射计是一种对物体自身辐射微波能量的无源检测,可用于大气和地球的遥感、医学诊断,并可用作安全检查的成像。

3. 微波技术主要研究内容

微波技术是无线电技术的一个组成部分。如前所述,由于微波波段电磁波的波长和常用设备或元件的尺寸差不多,甚至更小,从而使微波波段中所用的元件、器件及其分析方法和低频时大不相同。因此,微波技术成为无线电技术的一个独立分支,它主要包括以下内容。

(1) 传输系统

在低频设备中任意形态的导线都可以传输电磁能,只有在远距离传输时才需要考虑传输线的形状。在低频时最常用的是平行双线式传输线,如电力传输线或电话的架空明线,如图3(a)所示。

当频率提高以致波长短到可以同导线之间的距离相比时,双线传输线上就会有相当大的电磁能量辐射出去,形成辐射损耗。为了减少辐射损耗,可以减小两线之间的距离。例如作为电视天线的扁带线,两线距离约为10 mm,它可以应用在几十至几百兆赫兹的频率,如图3(b)所示。

现代微波集成电路中广泛应用的微带线也可认为是一种双线传输线,它的导线做成扁带状,实际上是一层金属薄膜,两导线之间的距离只有毫米量级,如图3(c)所示。它被成功地利用到厘米波或毫米波段的长波端,但它耐受功率有限,只能用于小功率设备中。严格地说,微带线已不是普通传输线。

为了彻底避免辐射损耗,人们把传输线的两个导体做成同轴形,外边的称为外导体,里边的称为内导体,如图3(d)所示。这样就构成一种封闭的传输线,它把电磁场限制在内外导体之间,从而避免了辐射损耗。同轴线在微波波段应用很广,一直可以用到毫米波段,又可以传输相当大的功率。

同轴线的内导体较细,所以损耗主要在内导体上;同时,内导体表面电场最强,该处的

场强限制了它的功率容量。此外,内导体不可能悬空放置在外导体中,必须用某种方式把它支撑起来,这也带来许多麻烦,主要是增加了损耗,降低了功率容量。频率越高,上述这些缺点越显著。

以上几种传输系统的共同特点是由两个导体构成,这类双导体传输系统称为传输线。

(本书第1章,从路的观点出发研究微波传输线的基本传输特性及其计算方法,给出一系列关于微波传输线的基本概念和分析方法。)

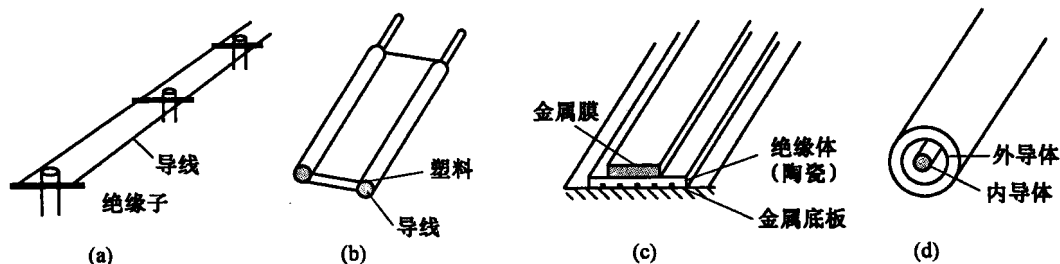


图3 双导体传输线

为了克服同轴线的缺点,能不能把内导体抽掉,用一根中空金属管传输电磁能呢?按照低频电路的观点这是不可想像的,人们早就习惯地认为必须有两根导线形成回路才能使电流流通。但实践和理论都证明,只要金属管的横截面尺寸与工作波长相比足够大,单根中空金属管是可以传输电磁能的,这种传输系统称为波导管或波导。波导的横截面可以是矩形、圆形或其他形状的。

后面我们将会看到,矩形波导宽边尺寸必须大于半波长。因此,如果在短波或中波波段应用波导,其尺寸要达到数十米至数百米,这显然是不切实际的,因此,只有在微波波段才有实际应用的可能。除了由金属管构成的波导外,还可以用单根介质棒、敷介质的单根金属棒等构成不同形式的表面波波导。

(本书第2章,研究规则的空心金属波导中的场分布及主要模式的传输特性,同时分析微带线、带状线等传输系统的结构及传输特性。)

(2) 谐振系统

在无线电技术中广泛应用由电感线圈和电容组成的谐振回路,如图4(a)所示,回路的谐振频率为

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

当频率提高时,要求电感 L 和电容 C 减小。当频率提高到一定程度时,电容只剩下两片,电感只剩下一圈,如图4(b)所示。

当频率进一步提高时,一圈的电感仍嫌太大,我们可以把许多只有一圈的电感并联起来以减小电感量,同时把电容的两个极板拉远些以减小电容量,这样就形成图4(c)所示回路。

进一步增加并联电感的数目,以致圈与圈之间连成一片,形成一个封闭的中间凹进去的导体空腔。这就是微波器件中常用的重入型谐振腔,如图4(d)所示。

继续把构成电容的两个极板拉开,则谐振频率进一步提高,这样就形成一个圆盒子或

方盒子,如图4(e)所示。这也是微波谐振腔的常用形式,虽然它同图4(a)所示的最初的谐振回路相比已经面目全非,但它们的作用完全一样,只是适用于不同的频率而已。

对于谐振腔而言,已无法严格区分哪里是电容,哪里是电感。在腔内电磁场已成为一个整体,必须用场的方法来处理。由于本书篇幅限制,这部分详细内容,请读者查阅相关资料。

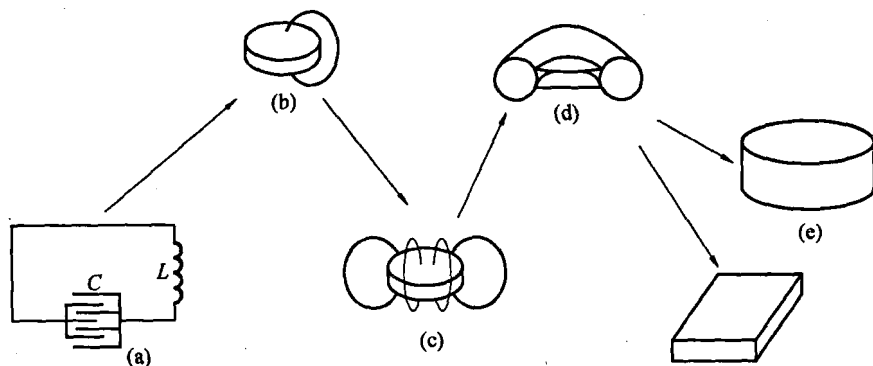


图4 从谐振回路到谐振腔

(3)微波网络

如上所述,在研究波导和谐振腔问题时,必须用电磁场方法。这种方法对于均匀波导或简单形状的谐振腔是很方便、很有效的。但对于一个复杂的微波系统,其中包括一些波导的不均匀性以及各种波导元件,严格地进行场解就变得很复杂。为了便于设计计算,常常把它等效为一个电路,即把均匀波导等效为传输线,把不均匀性或波导元件等效为一个集总参数电路,这就是微波网络或微波等效电路。这种等效电路在主要方面描述了它所等效的微波系统的性质而忽略了其次要方面,从而可以应用已经发展得很成熟的电路理论的定理、公式和方法来处理微波系统的问题,给工程设计带来很大方便。但是不要忘记,这样的等效电路只是在一定条件下和特定范围内同实际的微波系统等效。为了正确和有效地运用微波网络的方法,必须首先具备扎实的场的知识基础。

(本书第3章,讨论微波网络基础,给出网络的5种参量矩阵的定义,着重阐述散射矩阵及其基本性质,介绍了二端口网络特性参量的计算方法,研究多端口网络的基本性质。)

(4)微波无源元件

在低频电子线路中,常用的元件很多,例如最常用到的是电阻、电容、电感、变压器、扼流圈等。同样在微波电路中也广泛地使用电阻、电容、电感等元件,但是由于频率的增高,低频电路中常用的这些元件已经不能运用于微波频段,那么在微波频段如何产生这些常用元件呢?微波技术的研究解决了上述问题,例如使用分布参数电路、利用传输线的不均匀性等方法都能实现微波频段的电感与电容。此外,构成一个具有一定功能的微波电路,还离不开诸如定向耦合器、功分器、电桥、阻抗匹配器、微波滤波器、衰减器、环行器、移相器、模式变换器、微波转换接头、终端负载等,几十种微波元件。它们如同中药店里的中药,形形色色,五花八门,它们的各种组合并结合微波有源器件能完成对微波信号的一系列处理。因此,微波技术中,很重要的内容之一就是对这些无源元件工作原理进行分析,

研究对它们的设计及制造以及它们的应用等。

(本书第4章,介绍微波工程中常用的几种微波无源元件的结构、工作原理、主要技术参数及其特性,还对一些重要元件的设计方法作扼要介绍。)

(5)微波电子线路

微波的产生、放大、倍频、变频等问题都属于微波技术中必须解决的实际问题,在实际微波系统和组成微波系统的元件、部件中,几乎都不可避免地存在上述问题。

与低频电子线路一样,微波电子线路绝大多数都包含有各种形式的微波有源器件。随着微波固体电子学的发展,各种形式的固体微波有源器件不断出现,例如20世纪60年代发展起来的混合微波集成电路和20世纪80年代出现的单片微波集成电路,它们使得微波系统集成化、小型化成为可能。但不可忽视的是微波电真空技术,一些电真空器件,例如行波管、速调管等仍在大功率系统中发挥着自己的作用,它们的不断发展,同样也推动了微波技术的发展。

(6)微波仿真

随着单片集成电路技术的不断发展,GaAs、硅为基础的微波/毫米波单片集成电路(MIMIC)和超高速单片集成电路(VHSIC)都面临着一个崭新的发展阶段,电路的设计与工艺研制日益复杂化,如何进一步提高电路性能、降低成本、缩短电路的研制周期,已经成为微波电路设计的一个焦点,而EDA技术是设计的关键。

EDA技术的范畴包括产品开发的全过程,以及电子产品生产过程中期望由计算机提供的各种辅助功能。一方面EDA技术可分为系统级、电路级和物理实现级3个层次上的辅助设计过程;另一方面EDA技术应包括电子线路从低频到高频、从线性到非线性、从模拟到数字、从分立电路到集成电路的全部设计过程。

EDA仿真软件与电磁场的数值解法密切相关,不同的仿真软件是根据不同的数值分析方法来进行仿真的。通常,数值解法分为显式和隐式算法,随着问题的增加,隐式算法(包括所有的频域方法)表现出强烈的非线性。显式算法(例如FDTD、FIT方法)在处理问题时,表现出合理的存储容量和时间。根据电磁仿真工具所采用的数值解法进行分类,常用的软件有很多种。

(本书第5章,介绍常用的EDA仿真工具,进一步结合CST和HFSS电磁仿真软件,介绍微波元件的仿真关键技术和过程,给出电磁仿真的注意事项。)

(7)微波测量

微波测量是微波技术的一个重要组成部分。科学研究工作者常常需要对事物进行实验性的探讨,没有适当的测量方法和测量仪器科学研究工作是无法进行的。因此,可以说科学技术发展的速度很大程度上依赖于测量技术水平。反过来,科学技术的发展又给测量技术的进一步发展和完善创造了有利条件。

在微波技术中,经常会遇到一系列微波测量问题。例如,雷达或通信机的发射功率和频率是多少?接收机的灵敏度如何?天线馈线系统的匹配情况怎样等。这些都是微波测量的课题,由于微波系统的工作特性取决于其内部电磁场分布,因此微波系统的设计往往涉及复杂边界条件情况下的电磁场技术问题,很多情况下只能求得近似解。因此,在一些情况下,理论分析只能提供设计的大致规律和趋向;在一些情况下,理论虽然也能够给出

相当精确的设计结果,但加工制造难以保证足够的尺寸精度。所以,当我们从事微波元件和系统的设计研制时,通常都是根据理论设计确定的基本尺寸,制造初样,然后通过测量,反试,修改设计尺寸,最后才能达到预定的技术指标。

在低频电路中,电压、电流和阻抗是基本测量参量。但在微波系统中,电压、电流已失去了确定的意义,而以反射系数(或阻抗)、功率和频率(或波长)作为基本测量参量。因此微波测量主要内容也是研究这些基本参数的测试原理和方法,研究微波测试仪表的工作原理、性能特点和应用范围。由于本书篇幅限制,这部分详细内容,请读者查阅相关资料。