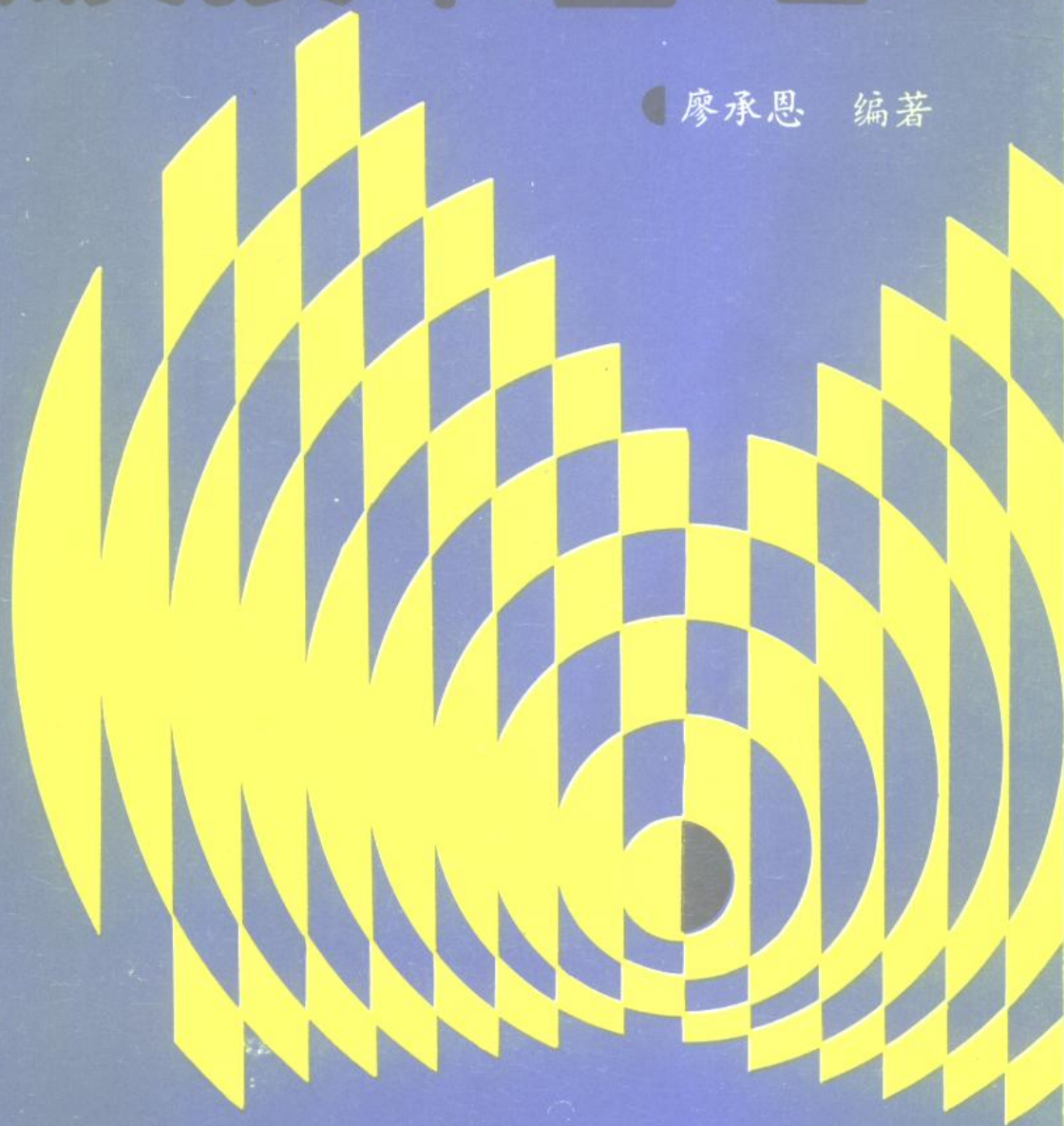




高等学校工科电子类教材

# 微波技术基础

廖承恩 编著



西安电子科技大学出版社



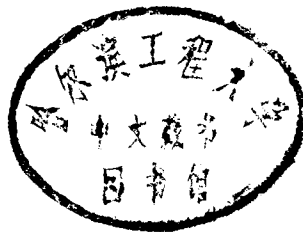
TN015  
L49-2

465131

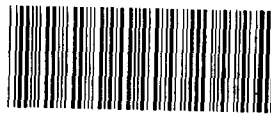
高等学校教材

# 微波技术基础

廖承恩 编著



3



00465131

西安电子科技大学出版社

1999

(陕)新登字 010 号

内 容 简 介

24/17/57

本书系高等学校工科电子类专业基础课统编教材。编著者以导行波和导模概念贯穿全书,围绕规则导行系统理论基础和微波电路元件理论基础,全面系统地讲解微波技术的基础理论、基本技术和基本分析方法,并特别注重基本概念 的阐述。全书共分九章:引论、传输线理论、规则金属波导、微波集成传输线、毫米波介质波导与光波导、微波网络基础、微波谐振器、常用微波元件和微波铁氧体元件。每章末有本章提要,并附有一定数量的习题;在每章提要中给出了该章的关键词。

本书适用作高等院校理工科电子类微波技术专业、天线专业、无线电物理专业及相近专业的教材或数学参考书,可用作有关专业研究生的教学参考书,也可供从事微波和天线工作的科研人员和工程技术人员参考。

高等学校教材  
微波技术基础  
廖承恩 编著  
责任编辑 马乐惠

西安电子科技大学出版社出版

西安辞源印刷厂印刷

陕西省新华书店发行 各地新华书店经售

开本 787×1092 1/16 印张 22 8/16 字数 534 千字

1994 年 12 月第 1 版 1999 年 3 月第 3 次印刷 印数 7 001—9 000

ISBN 7-5606-0322-X/TN·0081(课)

定价: 19.00 元

## 出版说明

根据国务院关于高等学校教材工作的规定，我部承担了全国高等学校和中等专业学校工科电子类专业教材的编审、出版的组织工作。由于各有关院校及参与编审工作的广大教师共同努力，有关出版社的紧密配合，从1978~1990，已编审、出版了三个轮次教材，及时供给高等学校和中等专业学校教学使用。

为了使工科电子类专业教材能更好地适应“三个面向”的需要，贯彻国家教委《高等教育“八五”期间教材建设规划纲要》的精神，“以全面提高教材质量水平为中心，保证重点教材，保持教材相对稳定，适当扩大教材品种，逐步完善教材配套”，作为“八五”期间工科电子类专业教材建设工作的指导思想，组织我部所属的九个高等学校教材编审委员会和四个中等专业学校专业教学指导委员会，在总结前三轮教材工作的基础上，根据教育形势的发展和教学改革的需要，制订了1991~1995年的“八五”（第四轮）教材编审出版规划。列入规划的，以主要专业主干课程教材及其辅助教材为主的教材约300多种。这批教材的评选推荐和编审工作，由各编委会或教学指导委员会组织进行。

这批教材的书稿，其一是从通过教学实践、师生反映较好的讲义中经院校推荐，由编审委员会（小组）评选择优产生出来的，其二是在认真遴选主编人的条件下进行约编的，其三是经过质量调查在前几轮组织编定出版的教材中修编的。广大编审者、各编审委员会（小组）、教学指导委员会和有关出版社，为保证教材的出版和提高教材的质量，作出了不懈的努力。

限于水平和经验，这批教材的编审、出版工作还可能有缺点和不足之外，希望使用教材的单位，广大教师和同学积极提出批评和建议，共同为不断提高工科电子类专业教材的质量而努力。

机械电子工业部电子类专业教材办公室

## 前 言

本教材系按机械电子工业部的工科电子类专业教材 1991~1995 年编审出版规划,由电磁场与微波技术教材编审委员会微波技术教材编审小组征稿并推荐出版。责任编委为林德云教授。

本教材由西安电子科技大学廖承恩教授编著,清华大学林德云教授担任主审。

本教材的参考学时数为 80 学时。全书共分九章。第一章引论,介绍微波的波段与特点、微波技术的应用,论述导波场的求解方法与导波的一般传输特性。第二章传输线理论,讲述无耗传输线的各种工作状态及其特点、有耗传输线的特性与计算方法,讨论利用阻抗圆图进行阻抗计算和阻抗匹配的方法。第三章至第五章分别讲解规则金属波导、微波集成传输线(包括带状线、微带线、悬置和倒置微带线、槽线、共面传输线和鳍线)、毫米波介质波导与光波导的传输特性与设计计算方法。第二章至第五章构成本教材的规则导行系统理论基础。第六章微波网络基础论述均匀波导的等效原理和微波接头的等效网络,介绍微波网络的各种波矩阵参数,并着重讲述散射矩阵参数的性质与应用。第七章至第九章分别讲解各种微波谐振器、常用微波元件和微波铁氧体元件的特性与设计方法。第六章至第九章构成本教材的微波电路元件理论基础。每章末有本章提要,并附有一定数量的习题。作为尝试,在每章的提要中给出了该章的关键词。

本教材在内容选取上讲究基础性、系统性和实用性,对传统内容力求少而精,适当增加微波新元件介绍,反映本学科的最新发展;在文字叙述上力求精炼、流畅、可读,便于自学。

使用本教材,要求学生熟悉电磁场和电磁波的基本理论,具备数学物理方程、矢量代数与场论、线性代数,复变函数等工程数学基础。书中各章节之间有相对的独立性,可根据要求和学时取舍或增减。

林德云教授认真审阅了全部书稿,微波技术教材编审组其他委员也参加了本教材书稿的审阅工作,他们为本书提出了许多宝贵意见。编著者谨向他们表示诚挚的感谢。由于编著者水平有限,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。

编著者

1994. 3. 10

# 目 录

<b>第一章 引论</b> .....	1
1.1 微波及其特点 .....	1
1.2 微波的应用 .....	2
1.3 本书的内容框图 .....	4
1.4 导行波及其一般传输特性 .....	4
本章提要 .....	13
习题 .....	14
<b>第二章 传输线理论</b> .....	16
2.1 传输线方程.....	16
2.2 分布参数阻抗.....	23
2.3 无耗线工作状态分析.....	27
2.4 有耗线的特性与计算.....	31
2.5 史密斯圆图.....	38
2.6 阻抗匹配.....	45
本章提要 .....	57
习题 .....	58
<b>第三章 规则金属波导</b> .....	65
3.1 矩形波导.....	65
3.2 圆形波导.....	77
3.3 同轴线.....	84
3.4 波导正规模的特性.....	89
3.5 波导的激励.....	92
本章提要.....	101
习题.....	102
<b>第四章 微波集成传输线</b> .....	105
4.1 带状线 .....	105
4.2 微带线 .....	113
4.3 耦合带状线和耦合微带线 .....	124
4.4 其它型式平面传输线 .....	132
本章提要.....	140
习题.....	141
<b>第五章 毫米波介质波导与光波导</b> .....	143
5.1 表面波及其特性 .....	143
5.2 简单介质波导 .....	148
5.3 毫米波介质镜像线 .....	159

5.4	光纤 .....	161
5.5	薄膜光波导 .....	175
5.6	带状光波导 .....	182
	本章提要 .....	183
	习题 .....	184
<b>第六章</b>	<b>微波网络基础</b> .....	<b>186</b>
6.1	微波接头的等效网络 .....	186
6.2	一端口网络的阻抗特性 .....	192
6.3	微波网络的阻抗和导纳矩阵 .....	194
6.4	微波网络的散射矩阵 .....	197
6.5	$ABCD$ 矩阵 .....	205
6.6	传输散射矩阵 .....	209
6.7	微波网络的信号流图 .....	211
	本章提要 .....	216
	习题 .....	217
<b>第七章</b>	<b>微波谐振器</b> .....	<b>220</b>
7.1	微波谐振器的基本特性与参数 .....	220
7.2	串联和并联谐振电路 .....	225
7.3	传输线谐振器 .....	229
7.4	金属波导谐振腔 .....	235
7.5	介质谐振器 .....	244
7.6	法布里 - 珀罗谐振器 .....	251
7.7	谐振器的激励 .....	254
7.8	微波谐振腔的微扰理论 .....	260
	本章提要 .....	264
	习题 .....	265
<b>第八章</b>	<b>常用微波元件</b> .....	<b>268</b>
8.1	一端口元件 .....	268
8.2	二端口元件 .....	272
8.3	三端口元件 .....	277
8.4	四端口元件 .....	287
8.5	微波周期结构 .....	302
	本章提要 .....	309
	习题 .....	310
<b>第九章</b>	<b>微波铁氧体元件</b> .....	<b>316</b>
9.1	微波铁氧体的基本特性 .....	316
9.2	铁氧体媒质中的平面波 .....	325
9.3	铁氧体加载矩形波导 .....	329
9.4	微波铁氧体隔离器 .....	331

9.5 微波铁氧体相移器 .....	335
9.6 微波铁氧体环行器 .....	337
本章提要.....	342
习题.....	343
<b>附录</b> .....	<b>344</b>
附录一 波导参数表.....	344
附录二 同轴线参数表.....	347
附录三 常用导体材料的特性.....	349
附录四 常用介质材料的特性.....	350
<b>参考书目</b> .....	<b>351</b>



# 第一章 引 论

本章简述微波的特点和应用,介绍本书的内容,论述导行波概念及其一般传输特性,使读者对本书有个整体上的了解。

## 1.1 微波及其特点

就现代微波理论和技术的研究和发展而论,微波(microwave)是指频率从 300 MHz 至 3 000 GHz 范围内的电磁波,其相应的波长从 1 m 至 0.1 mm。这段电磁频谱包括分米波(频率从 300 MHz 至 3 000 MHz)、厘米波(频率从 3 GHz 至 30 GHz)、毫米波(频率从 30 GHz 至 300 GHz)和亚毫米波(频率从 300 GHz 至 3 000 GHz)四个波段。

在雷达、通信及常规微波技术中,常用拉丁字母代号表示微波的分波段。表 1.1-1(a)、(b)分别示出常用微波分波段代号和家用电器的频段。

表 1.1-1(a) 常用微波分波段代号

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

表 1.1-1(b) 家用电器的频段

名 称	频 率 范 围
调幅无线电	535 - 1605 kHz
短波无线电	3 - 30 MHz
调频无线电	88 - 108 MHz
商用电视	
1 - 3 频道	48.5 - 72.5 MHz
4 - 5 频道	76 - 92 MHz
6 - 12 频道	167 - 223 MHz
13 - 24 频道	470 - 566 MHz
25 - 68 频道	606 - 958 MHz
微波炉	2.45 GHz

从电子学和物理学的观点看,微波这段电磁谱具有不同于其它波段的如下重要特点:

● 似光性和似声性 微波的波长很短,比地球上一般物体(如飞机、舰船、汽车、坦克、火箭、导弹、建筑物等)的尺寸相对要小得多,或在同一量级。这使微波的特点与几何光学相似,即所谓似光性。因此,使用微波工作,能使电路元件尺寸减小;使系统更加紧

凑；可以设计制成体积小、波束很窄、方向性很强、增益很高的天线系统，接收来自地面或宇宙空间各种物体反射回来的微弱信号，从而确定物体的方位和距离，分析目标的特征。

由于微波的波长与物体(如实验室中的无线电设备)的尺寸具有相同的量级，使得微波的特点又与声波相近，即所谓似声性。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喇叭、箫和笛；微波谐振腔类似于声学共鸣箱等。

● 穿透性 微波照射于物体(介质体)时，能深入物质内部：微波能穿透电离层，成为人类探测外层空间的“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的工作能力，成为遥感技术的重要波段；微波能穿透生物体，成为医学透热疗法的重要手段；毫米波还能穿透等离子体，是远程导弹和航天器重返大气层时实现通信和未制导的重要手段。

● 非电离性 微波的量子能量还不够大，不足以改变物质分子的内部结构或破坏分子间的键。而由物理学知道，分子、原子和原子核在外加电磁场的周期力作用下所呈现的许多共振现象都发生在微波范围，因而微波为探索物质的内部结构和基本特性提供了有效的研究手段。另一方面，利用这一特性和原理，可研制许多适用于微波波段的器件。

● 信息性 由于微波的频率很高，所以在不太大的相对带宽下，其可用的频带很宽，可达数百甚至上千兆赫。这是低频无线电波无法比拟的。这意味着微波的信息容量大。所以现代多路通信系统，包括卫星通信系统，几乎无例外地都是工作在微波波段。另外，微波信号还可提供相位信息、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。

## 1.2 微波的应用

由于微波具有上述重要特点，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。

微波的传统应用是雷达和通信。这是微波作为信息载体的应用。

雷达是利用电磁波对目标进行探测和定位。现代雷达大多数是微波雷达。利用微波工作的雷达可以使用尺寸较小的天线，来获得很窄的波束宽度，以获取关于被测目标性质的更多的信息。雷达不仅用于军事，也用于民用，如导航、气象探测、大地测量、工业检测和交通管制等。

由于微波具有频率高、频带宽、信息量大的特点，所以被广泛应用于各种通信业务，包括微波多路通信、微波中继通信、散射通信、移动通信和卫星通信。利用微波各波段的特点可作特殊用途的通信，例如从 S 到 Ku 波段的微波适用作以地面为基地的通信；毫米波适用于空间与空间的通信；毫米波段的 60 GHz 频段的电波大气衰减较大，适于作近距离保密通信；而 90 GHz 频段的电波在大气中的衰减却很小，是个窗口频段，适于作地空和远距离通信；对于很长距离的通信，则 L 波段更适合，因为在此波段容易获得较大的功率。

微波能的工农业应用。微波作为能源的应用始于 20 世纪 50 年代后期，至 60 年代末，微波能应用随着微波炉的商品化进入家庭而得到大力发展。

微波能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。

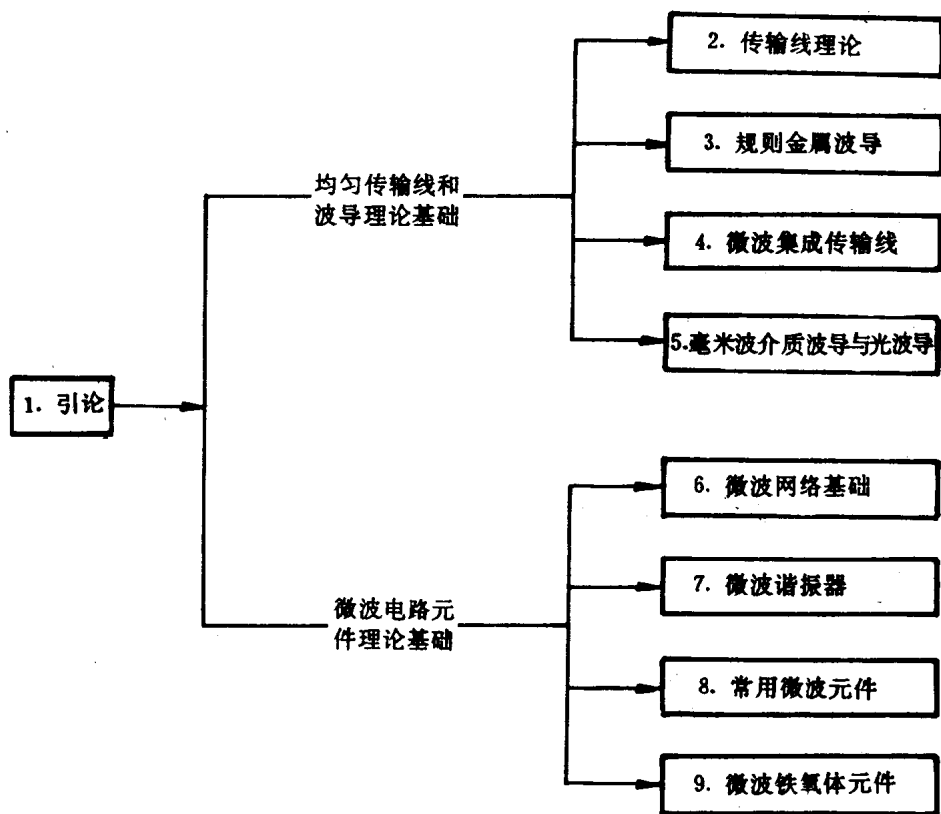
微波加热可以深入物体内部,热量产生于物体内部,不依靠热传导,里外同时加热,具有热效率高、节省能源、加热速度快、加热均匀等特点,便于自动化连续生产。用于食品加工时,还有消毒作用,清洁卫生,既不污染食品,也不污染环境,而且不破坏食品的营养成份。微波加热现已被广泛应用于食品、橡胶、塑料、化学、木材加工、造纸、印刷、卷烟等工业中;在农业上,微波加热可用于灭虫、育种、育蚕、干燥谷物等。

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。现在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。

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。用微波对生物体作局部照射,可提高局部组织的新陈代谢,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  $915 \pm 25$  MHz、 $2\,450 \pm 50$  MHz、 $5\,800 \pm 75$  MHz 和  $22\,125 \pm 125$  MHz。目前广泛使用的是 915 MHz 和 2 450 MHz。

需要指出的是,微波的生物医学效应不仅有对生物体的热效应,而且还有非热效应,在某些情况下,后者比前者更为主要。微波的生物医学应用是利用微波有益的生物效应。微波的生物效应还有有害的效应,表现为超剂量的微波照射有三致作用:致癌、致畸和致突变,即是说,微波的致热作用既能治病又能致病,问题在于处理好微波的强度(包括频率)、照射时间和作用条件三者之间的关系。微波的三致作用按其机理可分为热效应和非热效应两种。热效应或称致热效应是指由于微波照射生物体引起其组织器官的加热作用所产生的生理影响;非热效应或称热外效应是除了对生物体组织和器官的加热作用以外的对生物体的其它特殊生理影响。这些影响是用别的加热手段不会产生的。微波对人体的伤害作用主要是热效应。大剂量或长时间的微波照射全身时,可以使人体温度升高,产生高温生理反应,使人体组织和器官受到损伤,最容易受到伤害的是眼睛和睾丸。因此,应该采取适当的防护措施,并应对微波源的功率泄漏规定安全标准。中国在 1979 年制定的《微波辐射暂行卫生标准》中规定:(1)一天八小时连续辐射时,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。

### 1.3 本书的内容框图



### 1.4 导行波及其一般传输特性

微波电路是一种由各种导行系统构成的导行电磁波电路。其设计的理论基础之一是导行波基本理论，它主要包括导行波的模式及其在导行系统横截面内的场结构分析与导行波沿导行系统轴向的传输特性分析两方面。前者称为导行波理论的横向问题，它与导行系统的具体截面形状尺寸有关；后者称为导行波理论的纵向问题。对于规则导行系统，纵向问题具有一些通性。本节在讲解导行波基本概念的基础上，论述导行波的一般传输特性。

#### 1. 导行波概念

● 导行系统(guided system) 用以约束或引导电磁波能量定向传输的结构。其主要功能有二：①无辐射损耗地引导电磁波沿其轴向行进而将能量从一处传输至另一处，称之为馈线；②设计构成各种微波电路元件，如滤波器、阻抗变换器、定向耦合器等。导行系统的种类可按其上的导行波分为三类：①TEM 或准 TEM 传输线；②封闭金属波导；③表面波导(或称开波导)，如图 1.4-1 所示。

● 导行波(guided wave) 能量的全部或绝大部分受导行系统的导体或介质的边界约束，在有限横截面内沿确定方向(一般为轴向)传输的电磁波，简单说就是沿导行系统定向

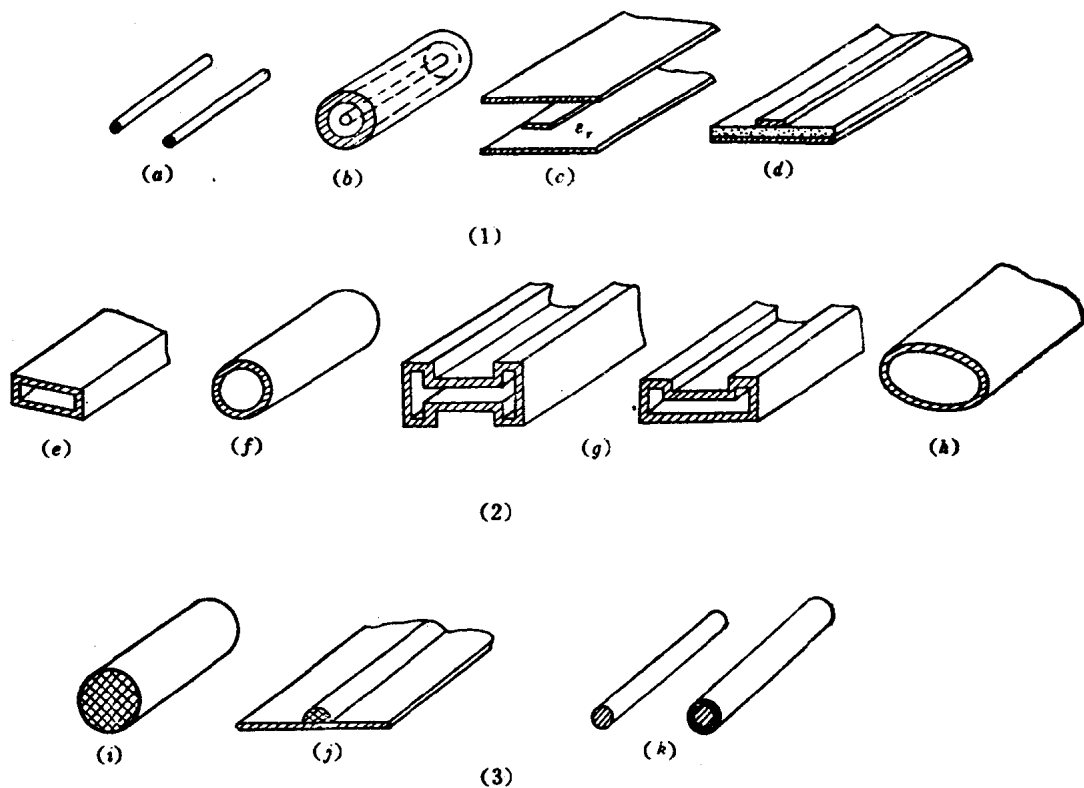


图 1.4-1 导行系统种类

(1) TEM 或准 TEM 传输线; (2) 金属波导; (3) 表面波波导

(a) 平行双导线; (b) 同轴线; (c) 带状线; (d) 微带线; (e) 矩形波导; (f) 圆形波导;

(g) 脊形波导; (h) 椭圆波导; (i) 介质波导; (j) 镜像线; (k) 单根表面波传输线

传输的电磁波, 简称为导波。

各种传输线使电磁波能量约束或限制在导体之间空间沿其轴向传播, 其导行波是横电磁(TEM)波或准 TEM 波。

封闭金属波导使电磁波能量完全限制在金属管内沿轴向传播, 其导行波是横电(TE)波和横磁(TM)波。

开波导使电磁波能量约束在波导结构的周围(波导内和波导表面附近)沿轴向传播, 其导行波是表面波。

● 导模(guided mode) 导行波的模式, 又称传输模、正规模, 是能够沿导行系统独立存在的场型。其特点是: ①在导行系统横截面上的电磁场呈驻波分布, 且是完全确定的。这一分布与频率无关, 并与横截面在导行系统上的位置无关; ②导模是离散的, 具有离散谱; 当工作频率一定时, 每个导模具有唯一的传播常数; ③导模之间相互正交, 彼此独立, 互不耦合; ④具有截止特性, 截止条件和截止波长因导行系统和模式而异。

● 规则导行系统(regular guided system) 无限长的笔直导行系统, 其截面形状和尺寸、媒质分布情况、结构材料及边界条件沿轴向均不变化。

## 2. 导波场的分析

如图 1.4-2 所示规则导行系统, 设媒质为无耗、均匀、各向同性, 媒质中无源; 又设

导行波的电场和磁场为时谐场，它们满足如下麦克斯韦方程：

$$\nabla \times \mathbf{H} = j\omega\epsilon\mathbf{E} \quad (1.4-1)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -j\omega\mu\mathbf{H} \quad (1.4-2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{H} = 0 \quad (1.4-3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = 0 \quad (1.4-4)$$

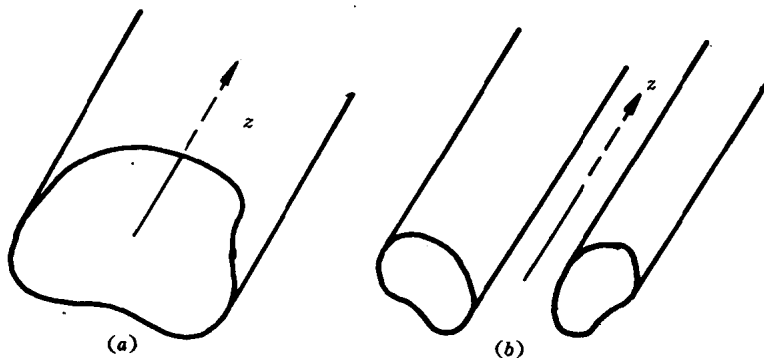


图 1.4-2 导行波沿规则波导(a)和传输线(b)的传播

式中， $\epsilon$  和  $\mu$  分别为媒质的介电常数和导磁率， $\omega$  为角频率。

对于图 1.4-2 所示规则导行系统，采用广义柱坐标系  $(u, v, z)$ ，设导波沿  $z$  向(轴向)传播，坐标  $z$  与横向坐标  $u, v$  无关，则微分算符  $\nabla$  和电场  $\mathbf{E}$ 、磁场  $\mathbf{H}$  可以表示成

$$\nabla \equiv \nabla_t + \hat{z}\partial/\partial z \quad (1.4-5)$$

$$\mathbf{E}(u, v, z) \equiv \mathbf{E}_t(u, v, z) + \hat{z}E_z(u, v, z) \quad (1.4-6)$$

$$\mathbf{H}(u, v, z) \equiv \mathbf{H}_t(u, v, z) + \hat{z}H_z(u, v, z) \quad (1.4-7)$$

足标  $t$  表示横向分量。将式(1.4-5)~(1.4-7)代入方程(1.4-1)和方程(1.4-2)，展开后令方程两边的横向分量和纵向分量分别相等，得到

$$\nabla_t \times \mathbf{H}_t = j\omega\epsilon\hat{z}E_z \quad (1.4-8a)$$

$$\nabla_t \times \hat{z}H_z + \hat{z} \times \frac{\partial \mathbf{H}_t}{\partial z} = j\omega\epsilon\mathbf{E}_t \quad (1.4-8b)$$

$$\nabla_t \times \mathbf{E}_t = -j\omega\mu\hat{z}H_z \quad (1.4-9a)$$

$$\nabla_t \times \hat{z}E_z + \hat{z} \times \frac{\partial \mathbf{E}_t}{\partial z} = -j\omega\mu\mathbf{H}_t \quad (1.4-9b)$$

将式(1.4-8b)两边乘以  $j\omega\mu$ ，式(1.4-9b)两边作  $\hat{z} \times \partial/\partial z$  运算，得到

$$j\omega\mu\hat{z} \times \frac{\partial H_t}{\partial z} = -j\omega\mu\nabla_t \times \hat{z}H_z - \omega^2\mu\epsilon E_t$$

$$-j\omega\mu\hat{z} \times \frac{\partial H_t}{\partial z} = \hat{z} \times \frac{\partial}{\partial z}(\nabla_t \times \hat{z}E_z) + \hat{z} \times \frac{\partial}{\partial z}\left(\hat{z} \times \frac{\partial E_t}{\partial z}\right)$$

由此两式消去  $H_t$ , 可得

$$\left(k^2 + \frac{\partial^2}{\partial z^2}\right)E_t = \frac{\partial}{\partial z}\nabla_t E_z + j\omega\mu\hat{z} \times \nabla_t H_z \quad (1.4-10)$$

同理可得

$$\left(k^2 + \frac{\partial^2}{\partial z^2}\right)H_t = \frac{\partial}{\partial z}\nabla_t H_z - j\omega\epsilon\hat{z} \times \nabla_t E_z \quad (1.4-11)$$

式中  $k^2 = \omega^2\mu\epsilon$ 。式(1.4-10)和式(1.4-11)表明: 规则导行系统中, 导波场的横向分量可由纵向分量完全确定。

对式(1.4-9a)作  $\nabla_t \times$  运算, 得到

$$\nabla_t \times \nabla_t \times E_t = -j\omega\mu\nabla_t \times \hat{z}H_z \quad (1.4-12)$$

式(1.4-12)的左边, 应用式(1.4-4), 变成

$$\nabla_t \times \nabla_t \times E_t = \nabla_t(\nabla_t \cdot E_t) - \nabla_t^2 E_t = -\nabla_t\left(\frac{\partial}{\partial z}E_z\right) - \nabla_t^2 E_t$$

而式(1.4-12)的右边, 由式(1.4-8b), 得到

$$-j\omega\mu\nabla_t \times \hat{z}H_z = -j\omega\mu\left(j\omega\epsilon E_t - \hat{z} \times \frac{\partial H_t}{\partial z}\right) = k^2 E_t + \frac{\partial E_t}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial z}\nabla_t E_z$$

于是式(1.4-12)变成

$$\left(\nabla_t^2 + \frac{\partial^2}{\partial z^2}\right)E_t + k^2 E_t = 0$$

即得到方程

$$\nabla^2 E_t + k^2 E_t = 0 \quad (1.4-13)$$

同理可得

$$\nabla^2 H_t + k^2 H_t = 0 \quad (1.4-14)$$

式(1.4-13)和式(1.4-14)说明, 导波的横向场满足矢量亥姆霍兹(Helmholtz)方程。它只有在直角坐标系中才能分解为两个标量亥姆霍兹方程。

对式(1.4-11)作  $\nabla_t \times$  运算, 得到

$$\left(k^2 + \frac{\partial^2}{\partial z^2}\right)\nabla_t \times H_t = \frac{\partial}{\partial z}\nabla_t \times \nabla_t H_z - j\omega\epsilon\nabla_t \times \hat{z} \times \nabla_t E_z = -j\omega\epsilon\nabla_t^2 \hat{z}E_z$$

应用式(1.4-8a), 消除  $H_t$ , 得到

$$\nabla_t^2 \hat{z}E_z + \left(k^2 + \frac{\partial^2}{\partial z^2}\right)\hat{z}E_z = 0$$

由于  $\hat{z}$  为常矢量, 所以可移到微分号外并加以消除, 即得到方程

$$\nabla^2 E_z + k^2 E_z = 0 \quad (1.4-15)$$

同理可得

$$\nabla^2 H_z + k^2 H_z = 0 \quad (1.4-16)$$

式(1.4-15)和式(1.4-16)说明, 规则导行系统中导波场的纵向分量满足标量亥姆霍兹方程。

## (1) 色散关系式

纵向场分量可以表示成横向坐标  $t$  和纵向坐标  $z$  的函数, 即

$$E_z(u, v, z) = E_z(t, z)$$

$$H_z(u, v, z) = H_z(t, z)$$

代入方程(1.4-15)和式(1.4-16), 得到

$$\left( \nabla_t^2 + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \begin{Bmatrix} E_z(t, z) \\ H_z(t, z) \end{Bmatrix} + k^2 \begin{Bmatrix} E_z(t, z) \\ H_z(t, z) \end{Bmatrix} = 0 \quad (1.4-17)$$

以  $E_z(t, z)$  求解为例, 应用分离变量法, 令

$$E_z(t, z) = E_{0z}(t)Z(z)$$

代入式(1.4-17), 得到

$$\frac{\nabla_t^2 E_{0z}(t)}{E_{0z}(t)} + \frac{d^2 Z(z)}{Z(z)} = -k^2$$

此式要成立, 左边两项应分别等于某常数。令其分离变量常数分别为  $k_c$  和  $\beta$ , 则得到方程

$$\frac{d^2 Z(z)}{dz^2} + \beta^2 Z(z) = 0 \quad (1.4-18)$$

$$\nabla_t^2 E_{0z}(t) + k_c^2 E_{0z}(t) = 0 \quad (1.4-19)$$

和色散关系式

$$k_c^2 + \beta^2 = k^2 \quad \text{或者} \quad k_c^2 = k^2 - \beta^2 \quad (1.4-20)$$

式(1.4-18)的解为

$$Z(z) = A_1 e^{-j\beta z} + A_2 e^{j\beta z} \quad (1.4-21)$$

式中  $\beta$  称为导波的传播常数或相移常数:

$$\beta = \sqrt{k^2 - k_c^2} = k \sqrt{1 - (k_c/k)^2} \quad (1.4-22)$$

## (2) 本征值方程

式(1.4-19)是导波场的本征值方程(若  $k_c \neq 0$ )。 $k_c$  是此方程在特定边界条件下的本征值, 称为导波的横向截止波数(cut-off wave number)。它与导行系统的截面形状、尺寸及模式有关。一般来说, 由两个或两个以上导体构成的导行系统(称之为传输线), 其性质是非本征值问题; 由单一导体(单导线、各种形状的金属波导管等)构成的导行系统, 其性质是本征值问题。 $H_z$  满足同样的本征值问题。此本征值方程在广义柱坐标系中的表示式为

$$\left[ \frac{1}{h_1 h_2} \left( \frac{\partial}{\partial u} \frac{h_2}{h_1} \frac{\partial}{\partial u} + \frac{\partial}{\partial v} \frac{h_1}{h_2} \frac{\partial}{\partial v} \right) + k_c^2 \right] \begin{Bmatrix} E_{0z}(u, v) \\ H_{0z}(u, v) \end{Bmatrix} = 0 \quad (1.4-23)$$

式中  $h_1$ 、 $h_2$  是正交曲线坐标的拉梅(Lame)系数。

这样, 规则导行系统中沿正  $z$  方向传播的导波纵向场分量可以表示为

$$E_z(u, v, z) = E_{0z}(u, v) e^{-j\beta z} \quad (1.4-24)$$

$$H_z(u, v, z) = H_{0z}(u, v) e^{-j\beta z} \quad (1.4-25)$$

## (3) 横-纵向场关系式

由于  $\partial/\partial z = -j\beta$ ,  $\partial^2/\partial z^2 = -\beta^2$ , 代入式(1.4-10)和式(1.4-11), 得到



$$E_t = \frac{-j\beta}{k_c^2} [\nabla_t E_z + Z_h \nabla_t H_z \times \hat{z}] \quad (1.4-26)$$

$$H_t = \frac{-j\beta}{k_c^2} [\nabla_t H_z + Y_e \hat{z} \times \nabla_t E_z] \quad (1.4-27)$$

式中

$$Z_h = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \frac{k}{\beta} \quad (1.4-28)$$

$$Y_e = \sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}} \frac{k}{\beta} \quad (1.4-29)$$

横 - 纵向场关系式(1.4-26)和式(1.4-27)在广义柱坐标系中的分量形式为

$$\begin{aligned} E_u &= \frac{-j}{k_c^2} \left( \frac{\beta}{h_1} \frac{\partial E_z}{\partial u} + \frac{\omega\mu}{h_2} \frac{\partial H_z}{\partial v} \right) \\ E_v &= \frac{-j}{k_c^2} \left( \frac{\beta}{h_2} \frac{\partial E_z}{\partial v} - \frac{\omega\mu}{h_1} \frac{\partial H_z}{\partial u} \right) \\ H_u &= \frac{-j}{k_c^2} \left( \frac{\beta}{h_1} \frac{\partial H_z}{\partial u} - \frac{\omega\varepsilon}{h_2} \frac{\partial E_z}{\partial v} \right) \\ H_v &= \frac{-j}{k_c^2} \left( \frac{\beta}{h_2} \frac{\partial H_z}{\partial v} + \frac{\omega\varepsilon}{h_1} \frac{\partial E_z}{\partial u} \right) \end{aligned} \quad (1.4-30 a)$$

写成矩阵形式为

$$\begin{bmatrix} E_u \\ H_v \\ H_u \\ E_v \end{bmatrix} = \frac{-j}{k_c^2} \begin{bmatrix} \frac{\omega\mu}{h_2} & \frac{\beta}{h_1} & 0 & 0 \\ \frac{\beta}{h_2} & \frac{\omega\varepsilon}{h_1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\beta}{h_1} & \frac{-\omega\varepsilon}{h_2} \\ 0 & 0 & \frac{-\omega\mu}{h_2} & \frac{\beta}{h_1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial H_z}{\partial v} \\ \frac{\partial E_z}{\partial u} \\ \frac{\partial H_z}{\partial u} \\ \frac{\partial E_z}{\partial v} \end{bmatrix} \quad (1.4-30 b)$$

#### (4) 导波的种类与特点

由式(1.4-26)和式(1.4-27)可见, 规则导行系统中导波的横向场  $E_t$  和  $H_t$  一般可分解成由  $E_z$  或/和  $H_z$  决定的部分和与  $E_z$ 、 $H_z$  无关的部分, 即可表示成

$$E_t = E_t^e + E_t^h + E_t^0 + E_t^m \quad (1.4-31)$$

$$H_t = H_t^e + H_t^h + H_t^0 + H_t^m$$

式(1.4-31)中的  $(E_t^e, H_t^e)$  对应于式(1.4-26)和式(1.4-27)中  $H_z=0$  的场:

$$E_t^e = \frac{-j\beta}{k_c^2} \nabla_t E_z \quad (1.4-32)$$

$$H_t^e = \frac{-j\beta}{k_c^2} Y_e \hat{z} \times \nabla_t E_z$$

这种无  $H_z$  分量的  $(E_t^e, H_t^e, E_z)$  导波称为横磁(TM)波或电(E)波, 其磁场完全分布在与导波传播方向垂直的横截面内, 电场则有传播方向分量。