

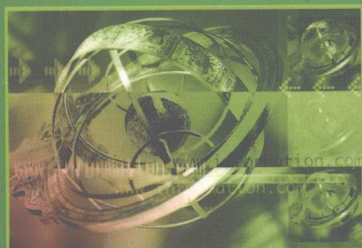


本书赠送电子教案

❖ 普通高等教育电子信息类规划教材 ❖

# 微波技术、微波电路 及天线

## MICROWAVE TECHNIQUE, MICROWAVE CIRCUIT AND ANTENNA



范寿康 李进 胡容 曲丽荣 编著



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育电子信息类规划教材

# 微波技术、微波电路及天线

范寿康 李进 胡容 曲丽荣 编著



机械工业出版社

本书为高等院校通信及信息类专业通用的专业基础教材，主要介绍微波技术的基本理论和基本概念、微波元器件和微波电路的工作原理及运用、天线的基础知识、线天线、面天线等。上述各专业的本科生或大专生在学完本教材后，能对微波技术及天线技术有比较系统的了解并具有一定的解决工程技术问题的能力。

全书共分为8章，覆盖了微波技术与天线的基本内容，它们是微波传输线理论与技术、微波网络理论基础、微波无源元器件、微波有源电路、天线的基础。在内容的深度上主要是介绍微波技术及天线的基础理论知识及分析方法、微波元器件的工作原理及应用、微波电路的组成及分析，天线的特性参量、基本元、天线阵、天线阵的阻抗、地面对天线性能的影响、平衡馈电装置、线天线、面天线等。微波电路的设计仅在部分章节中进行简要介绍，不作为本书的重点。

本书除作为高等院校通信与信息等专业教材外，还可供从事微波技术、天线技术、电子技术及无线电技术等相关领域的工程技术人员参考。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

微波技术、微波电路及天线/范寿康等编著. —北京:  
机械工业出版社, 2008.7  
普通高等教育电子信息类规划教材  
ISBN 978-7-111-24584-1

I. 微… II. 范… III. ①微波技术-高等学校-教材  
②微波电路-高等学校-教材③微波天线-高等学校-  
教材 IV. TN015 TN710 TN822

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 100627 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)  
责任编辑: 李馨馨 版式设计: 霍永明 责任校对: 张莉娟  
封面设计: 鞠 杨 责任印制: 邓 博  
北京京丰印刷厂印刷  
2009 年 1 月第 1 版 · 第 1 次印刷  
184mm × 260mm · 19.25 印张 · 471 千字  
0 001—4 000 册  
标准书号: ISBN 978-7-111-24584-1  
定价: 32.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换  
销售服务热线电话: (010) 68326294  
购书热线电话: (010) 88379639 88379641 88379643  
编辑热线电话: (010) 88379739  
封面防伪标均为盗版

# 前 言

为了适应 21 世纪高等院校通信与信息专业迅速发展的大好形势,高等院校相应专业急需大量紧跟当前科学技术发展、反映新技术、体现新成果的教材,在机械工业出版社的组织及帮助指导下,编者编写了《微波技术、微波电路及天线》一书。

正如本书第 1 章所述,微波技术的内容已经包括了微波电路这一部分,但教材之所以取名为《微波技术、微波电路及天线》,是考虑到一些传统的习惯。在一些院校及相关专业中,经常把传输线理论与技术、微波传输线这部分内容划出来,形成一门课程,称之为“微波技术基础”,而微波网络理论、微波无源元件、微波有源电路的内容分成另一门课程,称为“微波电路”,或者还有其他的划分方法,而天线本身就是较为独立的部分。本书的取名是为了方便使用者对书中内容的取舍,方便各层次、各专业的学生及不同教学学时的需要。

本书定位在通信及信息各专业通用的专业基础教材,其先行课程是“电路基础”、“信号及系统”、“模拟电子线路”和“电磁场理论”,希望上述各专业的本科生或大专生在学完本课程后,能比较系统地了解微波理论,并具有一定的解决工程技术问题的能力,对天线的基础知识有一定的了解。本教材在内容上除具有较大的覆盖范围外,还具有一定的深度。其范围包含微波技术的全部基本内容和天线的基础知识。在深度上重点是学习微波技术的基础理论知识及分析方法、微波元器件的工作原理及应用、微波电路的组成及分析、天线的基本概念及分类,而微波电路的设计仅在部分章节中讨论,不作为本书的重点。

本教材是在 2003 年机械工业出版社出版的教材《微波技术与微波电路》的基础上进行修改的,本次修改有如下变动:

- 增加了较多的例题。在“微波传输线”一章中增加了习题课的内容;在“微波无源元件”一章中增加了较多的对主要元件应用的例题;在“微波二极管及其电路”一章中增加了较多的实用电路;在“微波晶体管放大器”一章中增加了微波晶体管放大器电路的计算机辅助设计软件 ADS 介绍及设计举例。

- 增加了“天线”一章。
- 删除了原书的部分章节,化简了一些繁琐的数学推导。
- 修正了原书的错误。

- 简化了阻抗圆图的介绍并把它作为选学内容(目录中标 \* 为选学),其考虑是:作为一个工具,阻抗圆图的学习及熟悉要占用较多的学时,本教材仅作为基础知识的学习,不可能面面俱到,但目前常用的微波测试仪器以及各种仿真软件普遍以史密斯圆图作为结果显示,因此应有阻抗圆图的组成及基本用途介绍。阻抗圆图的内容完全不影响微波传输线基本概念的学习。

全书内容由 6 部分组成,参考学时为 60~70 学时,具体各部分内容及建议参考学时(按 70 学时划分)如下:

- (1) 微波概论(第 1 章)2 学时;
- (2) 微波传输线(第 2 章、第 3 章)16 学时;

- (3) 微波网络基础(第4章)8学时;
- (4) 微波无源元件(第5章)18学时;
- (5) 微波电子电路(第6章、第7章)18学时;
- (6) 天线(第8章)8学时。

本书主要由三江学院范寿康、李进、胡容、曲丽荣编写,本书的编者长期从事微波技术与科研工作,教材中一些章节的内容直接引用于编者的教案及近年的科研成果。另外编者还参考了大量近年来出版的国内外优秀教材,所参考的主要教材及文献均列在本书后的“参考文献”中。

在本书的编写过程中,王增和同志仔细地阅读了“天线”一章的书稿并作了详细的修改,编者在此深表感谢。

由于编者学识水平有限,因此教材中错误及缺点在所难免,敬请读者批评指正。

读者可在 [www.cmpedu.com](http://www.cmpedu.com) 上下载本书配套的电子教案。

编者

# 目 录

## 前言

<b>第 1 章 微波概论</b> .....	1	2.5 均匀传输线的功率传输和阻抗匹配 .....	25
1.1 微波波段的划分 .....	1	2.5.1 均匀传输线的功率传输 .....	26
1.2 微波的特点和应用 .....	2	2.5.2 均匀传输线上的阻抗匹配 .....	26
1.3 微波技术及微波电路的主要内容 .....	5	*2.6 史密斯圆图 .....	28
1.3.1 传输系统 .....	5	2.6.1 阻抗圆图 .....	28
1.3.2 微波网络 .....	6	2.6.2 导纳圆图 .....	33
1.3.3 微波无源元件 .....	7	2.7 习题 .....	36
1.3.4 微波电子电路 .....	7	<b>第 3 章 微波传输线</b> .....	40
1.3.5 微波测量 .....	7	3.1 常用的微波传输线 .....	40
1.4 习题 .....	8	3.2 规则金属波导 .....	41
<b>第 2 章 均匀传输线理论概述</b> .....	9	3.2.1 规则金属波导的分析方法 .....	41
2.1 均匀传输线 .....	9	3.2.2 波导中电磁波的传输特性 .....	45
2.1.1 导波的分类及常见的传输线 .....	9	3.2.3 矩形波导 .....	47
2.1.2 传输线的分布参数和等效电路 .....	10	3.2.4 圆形波导 .....	56
2.1.3 均匀传输线的传播常数和特性阻抗 .....	11	3.3 同轴线 .....	62
2.2 均匀传输线方程及其解 .....	12	3.3.1 同轴线的结构 .....	62
2.2.1 均匀传输线方程 .....	12	3.3.2 同轴线的主模与高次模 .....	62
2.2.2 均匀传输线方程的解 .....	13	3.3.3 同轴线的尺寸选择 .....	64
2.2.3 根据边界条件确定均匀传输线方程的特解 .....	14	3.4 微带线 .....	65
2.3 均匀传输线的传输特性及传输参数 .....	15	3.4.1 平面型微波传输线 .....	65
2.3.1 均匀传输线的传输特性 .....	15	3.4.2 微带线 .....	66
2.3.2 均匀传输线的传输参数 .....	15	3.4.3 耦合微带线 .....	72
2.3.3 例题 .....	18	3.5 习题 .....	76
2.4 无耗传输线的三种工作状态 .....	21	<b>第 4 章 微波网络基础</b> .....	78
2.4.1 行波状态 .....	21	4.1 波导传输线与平行双线传输线的等效 .....	78
2.4.2 驻波状态 .....	22	4.1.1 波导传输线与平行双线传输线的等效 .....	78
2.4.3 行驻波状态 .....	23	4.1.2 等效传输线的阻抗、电压、电流归一化 .....	79
2.4.4 无耗传输线的三种工作状态小结 .....	25	4.2 微波元件等效为微波网络 .....	80
		4.2.1 网络参考面的选择 .....	80
		4.2.2 不均匀区等效为微波网络 .....	81

4.2.3	微波网络的分类	82	5.3.1	微波滤波器概述	125
4.3	二端口微波网络	83	5.3.2	低通原型滤波器及频率变换	126
4.3.1	二端口微波网络的网络参量	83	5.3.3	微波低通滤波器	128
4.3.2	二端口微波网络参量的相互转换	87	5.3.4	变型低通原型滤波器	130
4.3.3	组合二端口微波网络与网络参量的关系	90	5.3.5	微波带通滤波器	135
4.3.4	二端口微波网络参量的性质	92	5.4	阻抗变换器	138
4.3.5	基本电路单元的参数矩阵	94	5.4.1	阻抗变换器	138
4.3.6	参考面移动对二端口微波网络参量的影响	97	5.4.2	单节 $\lambda/4$ 阻抗变换器	139
4.3.7	二端口微波网络参量的测定方法	99	5.4.3	多节 $\lambda/4$ 阶梯阻抗变换器	140
4.3.8	二端口微波网络的工作特性参量	100	5.4.4	渐变线阻抗变换器	141
4.4	多端口微波网络	102	5.4.5	阻抗变换器的微波结构	141
4.4.1	多端口微波网络的网络参量	102	5.5	定向耦合器	143
4.4.2	多端口微波网络参量的性质	103	5.5.1	定向耦合器的概念及技术指标	143
4.4.3	多端口微波网络参量间的互换关系	106	5.5.2	定向耦合器的网络分析	144
4.4.4	参考面移动对散射参量的影响	108	5.5.3	定向耦合器的用途举例	146
4.5	习题	108	5.5.4	波导型定向耦合器	148
<b>第5章</b>	<b>微波无源元件</b>	<b>112</b>	5.5.5	微带平行耦合线定向耦合器	149
5.1	微波电抗元件的构成方法举例	112	5.5.6	分支定向耦合器	151
5.1.1	用微波传输线构成微波电抗元件	112	5.5.7	双 T 和魔 T 形接头	151
5.1.2	用矩形波导的不连续性构成电抗元件	113	5.6	衰减器和移相器	156
5.1.3	用微带线的不连续性构成电抗元件	115	5.6.1	衰减器	156
5.2	微波谐振器	116	5.6.2	移相器	160
5.2.1	微波谐振器的基本参数	116	5.7	微波环形器与隔离器	160
5.2.2	单模传输线谐振器与 LCR 谐振器的等效条件	117	5.7.1	微波铁氧体材料的特性	160
5.2.3	单模微波传输线谐振器的微波结构	120	5.7.2	微波环形器与隔离器	162
5.2.4	多模谐振腔	121	5.8	习题	166
5.2.5	谐振器的激励与耦合	124	<b>第6章</b>	<b>微波半导体二极管及其电路</b>	<b>173</b>
5.3	微波滤波器	124	6.1	金属-半导体二极管及微波混频器	173
			6.1.1	金属-半导体二极管	173
			6.1.2	微波混频器的工作原理	177
			6.1.3	混频器的噪声系数	180
			6.1.4	微波混频器电路	182
			6.2	微波变容二极管及微波上变频器	191
			6.2.1	微波变容二极管	191
			6.2.2	非线性电容中的能量关系及其应用	193
			6.2.3	变容管上变频器	196
			6.3	体效应二极管及微波振荡器	197

6.3.1	体效应二极管	197	7.6	微波晶体管放大器的设计	241
6.3.2	微波二极管负阻振荡器电路	202	7.6.1	微波晶体管放大器设计概述	241
6.4	PIN 二极管及微波控制电路	204	7.6.2	微波晶体管放大器的 设计举例	243
6.4.1	PIN 二极管	204	7.6.3	用 ADS 软件设计微波晶体管 放大器	245
6.4.2	PIN 二极管微波开关电路	208	7.7	习题	249
6.4.3	PIN 二极管电调衰减器	212	<b>第 8 章 天线</b>		252
6.4.4	PIN 二极管移相器	214	8.1	天线的基础知识	252
6.5	习题	219	8.1.1	天线的特性参量	252
<b>第 7 章 微波晶体管放大器</b>		222	8.1.2	天线的基本单元	259
7.1	微波晶体管	222	8.1.3	天线阵	266
7.1.1	微波双极型晶体管	222	8.1.4	天线阵的阻抗	275
7.1.2	微波场效应晶体管	223	8.1.5	地面对天线性能的影响	276
7.1.3	异质结双极型晶体管	226	8.2	平衡馈电装置	278
7.1.4	高电子迁移率晶体管	227	8.2.1	四分之一波长平衡—不平衡 转换器	279
7.2	微波晶体管的 S 参数	228	8.2.2	二分之一波长平衡—不平衡 转换器(半波长旁路式巴仑)	279
7.2.1	微波晶体管的 S 参数的定义	228	8.3	线天线	280
7.2.2	微波晶体管的 S 参数的测量	230	8.3.1	对称振子	280
7.3	微波晶体管放大器的功率增益	230	8.3.2	水平振子天线	283
7.3.1	微波晶体管放大器的输入、 输出功率	230	8.3.3	直立天线	284
7.3.2	微波晶体管放大器的三种 功率增益	232	8.3.4	引向天线	285
7.4	微波晶体管放大器的稳定性	234	8.3.5	行波天线	286
7.4.1	微波晶体管放大器稳定的 原则	234	8.3.6	微带天线	288
7.4.2	用图解法判定放大器的 稳定性	235	8.4	口径面天线	291
7.4.3	绝对稳定的判别准则	237	8.4.1	口径面天线的辐射特性	291
7.5	微波晶体管放大器的噪声系数	239	8.4.2	喇叭天线	294
7.5.1	有源二端口网络噪声系数的 一般表达式	239	8.4.3	抛物面天线	294
7.5.2	等噪声系数圆	240	8.5	习题	296
			<b>参考文献</b>		297



# 第1章 微波概论

## 1.1 微波波段的划分

无线电波按波长长短可划分为超长波、长波、中波、短波、米波、分米波、厘米波、毫米波和亚毫米波。而其中分米波、厘米波、毫米波乃至亚毫米波统称为微波(Microwave)。它属于无线电波中波长最短,即频率最高的波段。

微波和普通无线电波、可见的光波、不可见的光波、x射线、 $\gamma$ 射线一样,本质上都是随时间和空间变化呈波动状态的电磁场即电磁波。尽管它们的表现各不相同,例如可见光可以被肉眼所感觉而其他波段则不能被人眼所感觉;x射线和 $\gamma$ 射线具有穿透导体的能力而其他波段则不具有这种能力;无线电波可以穿透浓厚的云雾而光波则不能等,但它们都是电磁波。之所以出现这么多不同表现,是因为它们的频率不同,即波长不同。

微波波段区别于其他波段的主要特点是其波长可与常用电路或元件的尺寸相比拟,即为分米、厘米、毫米量级,而其他波段都不具有这个特点。普通无线电波的波长大于或远大于电路或元件的尺寸,电路或元件内部的电波传输过程可忽略不计,因此可以用路的方法进行研究;光波、x射线、 $\gamma$ 射线的波长则远小于常用元件的尺寸,甚至可以和分子或原子的尺寸相比拟,因此根本不可能用电磁的方法或普通电子学的方法来产生或研究它们,它们是同分子、原子或核的行为相联系的。

如上所述,由于微波的波长可以与电路或元件尺寸相比拟,因此电磁波在电路内甚至元件内的传播时间以及导致的相位滞后就不再是微不足道的,在普通无线电电子技术中的集总参数的概念和方法就不那么有效了。

在频率较低的电路中,往往可以区分出电路的某一部分是电容(即电场集中的地方),另一部分是电感(磁场集中的地方)或电阻(损耗集中的地方),而连接它们的导线则既没有电容、电感,也没有电阻,这就构成集总参数电路。但是到了微波波段,元件中的电场与磁场已构成了一个整体——交变电磁场或电磁波,使用的元件称为传输线、波导、谐振腔等,因此,集总参数电路的方法就失效了,取而代之的就是本书中将要讨论的分布参数电路的方法和场的方法。

在微波领域中以麦克斯韦方程为基础的宏观电磁理论得到了最充分、最成功的运用。当进一步过渡到亚毫米波、红外线以至可见光或频率更高的电磁波谱时,由于波长逐渐同分子或原子的尺寸相比拟,宏观电磁理论又不那么有效,不那么完善,这时就必须运用量子理论的方法。当然以上的划分不是绝对的,例如在研究普通无线电波的辐射和传播问题时必须舍弃路的方法而采用场的方法;在研究原子或分子精细能级结构的微波发射与吸收时必须舍弃宏观的方法而采用量子的方法。但是,在研究光学的某些问题如反射、折射、衍射等时,宏观的方法也是行之有效的。

总之,微波波段的范围是由所应用的独特的元件、技术和研究方法来决定的。精确地划

分出微波波段的范围没有什么实际意义，只能说波长从几米量级到十分之几毫米量级属于微波波段，通常把波长 1m ~ 1mm (频率 300MHz 至 300GHz) 之间的波段称为微波，波长从 1mm ~ 0.01mm 之间的波段称为亚微波波段。亚毫米波段是微波与红外的过渡波段，微波在电磁波谱中的位置如图 1-1 所示。

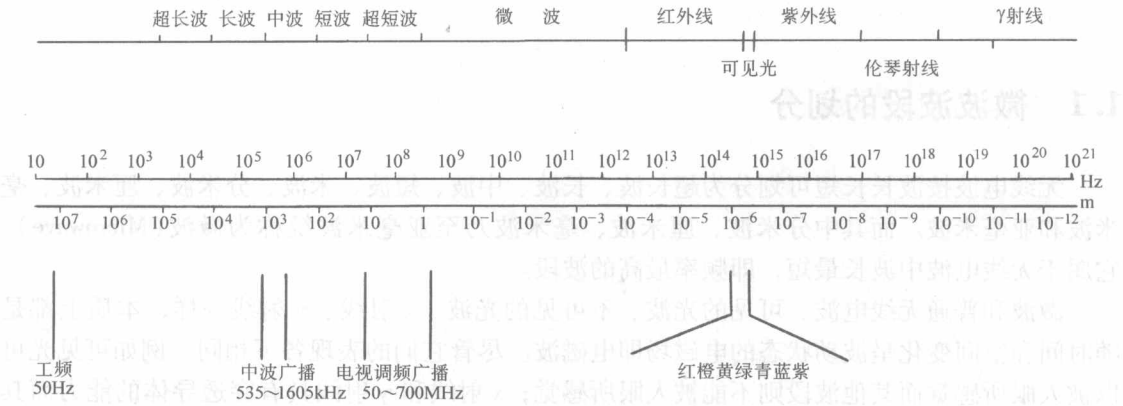


图 1-1 电磁波谱

在微波波段内部又可划分为分米波、厘米波和毫米波，各波段波长(频率)范围、波段名称见表 1-1。

表 1-1 微波波段

波长范围/m	频率范围/MHz	波段名称			
		按波长	按频率	代号	
10 ~ 1	30 ~ 300	米波	甚高频	VHF	普通无线电波与微波的过渡
1 ~ 0.1	300 ~ 3000	分米波	特高频	UHF	
0.1 ~ 0.01	3000 ~ 30000	厘米波	超高频	SHF	微波(超高频)
0.01 ~ 0.001	30000 ~ 300000	毫米波	极高频	EHF	
0.001 ~ 0.0001	300000 ~ 3000000	亚毫米波			微波与红外的过渡

有时用一些特定的字母来代表微波中的某一波段。这些代号起源于初期雷达研究的保密需要，后来沿用至今。它们没有严格的和统一的定义。比较通行的代号见表 1-2。

表 1-2 微波波段代号

波段代号	P	L	S	C	X	Ku	K	Q	V
波段	米波	22cm	10cm	5cm	3cm	2cm	1.25cm	8mm	4mm

## 1.2 微波的特点和应用

自 20 世纪初无线电技术开始发展以来，使用的波段不断地扩展，从最初使用的长波和中波一直扩展到超长波。另一方面尤为迅速地向短波方向扩展，经过短波、超短波，在 20 世纪 40 ~ 50 年代扩展到分米波和厘米波，在 20 世纪 60 年代后又扩展到毫米波和亚毫米波。现在，在无线电波和光波之间已不存在空白。

微波波段研究的进展是由实际需要推动的，而微波的实际应用则是与微波的特点密切相关的。微波具有如下主要特点。

### 1. 微波波长短易于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，也就是聚成一个窄束，不这样就无法判断反射波究竟是从哪个方向反射回来的。理论和实践表明，为了使电磁波定向发射，必须使用尺寸远大于波长的天线。例如常用的抛物面天线，它所发射电磁波的主波束角约等于

$$\theta = \frac{140^\circ}{D/\lambda} \quad (1-1)$$

式中， $D$  为抛物面天线直径； $\lambda$  为波长。为了得到波束角为  $5^\circ$  的波束，代入到式(1-1)可算出必须使用直径为波长 28 倍的抛物面天线，如果选用短波波段的最低波长(10 米)，也要使用一个直径达 280 米的抛物面天线，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 3cm 波段，则一个直径 84cm 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是不困难的。因此只有使用微波波段，才能使雷达的实现成为可能。

事实上，在 20 世纪 40 年代微波发展历史的初期，微波技术几乎是与雷达一起发展起来的。现在雷达的种类和用途已是多种多样，如远程或超远程警戒雷达、炮火控制和瞄准雷达、火箭或航天器的制导及轨道警戒雷达、导航雷达、气象雷达、汽车防撞雷达等。它们所使用的几乎无例外地是微波波段。

微波易于实现定向辐射的特点还有助于点对点通信及定向广播。现代多路通信、卫星通信、卫星电视广播等都使用微波波段。

### 2. 微波频率高、频带宽、信号容量大

任何通信系统为了传递一定的信息必须占有一定的频带，纯粹的单频正弦波并不携带任何信息。为传递某种信息必须的频带宽度叫做信道。例如人耳所能听到的声音频带范围大约是在 20 ~ 20000Hz，但为了能听懂对方的语言，大约只需传递 300 ~ 3400Hz 这一段频率的信号就够了，也就是说，一个语言信道至少要有 3000Hz 的频带，普通电话就是这样设计的。因此电话可以听懂但不悦耳，也就是不够逼真。为了相当逼真地传送语言和音乐，则需要占 6 ~ 15kHz 的频带，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，对于我国的电视制式，一路黑白的或彩色的电视加上伴音要占据 8MHz 的频带。

为了避免相互干扰，一个地区或一条线路上各个信道所占的频带必须错开，因此在一定频段内所能容纳的信道是有限的。即使采用数字通信，线路的信息容量仍然取决于线路的频带宽度。

一条通信线路(即一套发射机、接收机和传输媒介)一般只有不超过百分之几的相对带宽(即频带宽度与中心频率之比)。所以为了把许多路电视、电话或电报同时同一条线路上传送，就必须使信道中心频率比所要传递的信息的总带宽高几十倍乃至百倍。因此为了有足够的信息容量，现代多路通信系统包括卫星通信系统几乎无例外地工作在微波波段内。

对于无线电波，每个波段的频带宽度见表 1-3。

表 1-3 无线电波各波段的频带宽度

波段	波长范围	频率范围	频段范围	波段	波长范围	频率范围	频带范围
长波	10000 ~ 1000m	30 ~ 300kHz	270kHz	分米波	1 ~ 0.1m	300 ~ 3000MHz	2700MHz
中波	1000 ~ 100m	300 ~ 3000kHz	2.7MHz	厘米波	10 ~ 1cm	3 ~ 30GHz	27GHz
短波	100 ~ 10m	3 ~ 30MHz	27MHz	毫米波	10 ~ 1mm	30 ~ 300GHz	270GHz
米波	10 ~ 1m	30 ~ 300MHz	270MHz	亚毫米波	1 ~ 0.1mm	300 ~ 3000GHz	2700GHz

### 3. 视距传播能穿透电离层—微波的穿透性

各波段的无线电波传播特性是不一样的。长波可以沿着地球的弯曲表面传播到很远，这种传播方式叫地波传播。

从中波过渡到短波，地波的衰减逐渐增大，传播距离逐渐减小。但短波可以借助 60 ~ 300km 高空的电离层折射返回地面，这种传播方式叫天波传播。短波通信就是利用天波，它可实现远距离通信，但不够稳定，因为电离层的密度和高度随季节、昼夜以及太阳的活动而变化。

到了微波波段，地波的衰减更大，已无法利用。同时这个波段的电磁波一般不能被电离层折射返回地面，它能穿过电离层，因此也不能采用天波的传播方式。微波只能在视距内沿直线传播(视距传播)，并能穿过电离层达到外层空间，这种传播称为空间波。

微波的视距传播特性有有利的一面，也有不利的一面。有利方面是可以把作用范围限制在所需要的区域内，以避免干扰。同时由于微波可以穿透电离层而不像频率较低的电磁波那样被电离层折返或吸收，因此，地球和宇宙之间的通信、卫星通信等必须使用微波。不利一面也是很明显的，即在地球上它不能直接传播到很远的地方，因为地球是弯曲的球面，一个高 100m 的发射天线其作用半径只有约 40km。天线越高作用半径越大，但架设很高的天线是困难的。

为了解决微波传播距离有限这一困难，通常采用以下几种方法：

#### (1) 中继通信(接力通信)

在相距很远的发射台与接收台之间设立若干中继站(接力站)，站与站之间的距离不超过视距。这样微波信号就可以像接力棒那样一站一站地传递过去，我国古代的烽火台和驿站传书就是应用中继通信的例子。

#### (2) 散射通信

在距地面上几十千米以内的大气层叫做对流层，可以利用它对微波的散射作用进行距壁通信。打个比方，在早晨当太阳还没升起的时候，虽然无法直接看到太阳，但当看到天空被染成鱼肚白色或云染成红色时，就知道太阳即将从地平线下升起，这个信息就是通过大气或云对阳光的散射作用传递的。

#### (3) 卫星通信和卫星广播

如前所述，微波天线架设得越高通信距离越大，广播的服务半径也越大。如果把中继站或发射台及其天线放到人造卫星上去，那么这个中继站或发射台的作用距离就可以大大增加。这就是卫星中继通信或卫星电视广播，目前广泛使用的是在赤道上空距地面约 36000km 的同步轨道上的卫星。在这个轨道上卫星公转周期恰好等于地球的自转周期，从地面上看，卫星是固定不动的，这种卫星称为同步卫星。三颗这样的同步卫星就可覆盖全球的大部分面

积(南、北极除外)。

#### 4. 微波的热效应和微波能的应用

高频感应加热和介质加热早已应用在许多工业部门。在微波波段,材料的介质损耗增大,特别是含水份的材料对微波能的吸收非常有效,从而使微波成为很好的加热手段。微波加热具有效率高、透热深度大、加热迅速等一系列优点。因此微波加热和微波烘干正日益广泛地应用于粮食、茶叶、卷烟、木材、纸张、皮革、蚕丝、纺织、食品等工农业生产领域中,微波理疗也日益广泛地被利用。

微波代替原来所用的煤、煤气或蒸气进行加热或烘烤可以节约能源,提高产品质量,改善劳动条件,便于实现生产过程的自动化。此外,家庭烹饪用微波炉也已得到了广泛的应用。

微波在未来能源的探索 and 开发中也起着重要作用。例如在受控热核聚变研究中利用毫米波电子回旋共振效应加热等离子体,在空间太阳能发电站的设计中用微波作为将能量送回地面的手段等。

### 1.3 微波技术及微波电路的主要内容

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与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:传输系统、微波网络、微波无源元件、微波电子线路、微波测量等内容。

#### 1.3.1 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就属于这种类型,如图 1-2a 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拟时,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 10mm,它可以应用在几十至几百兆赫,如图 1-2b 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

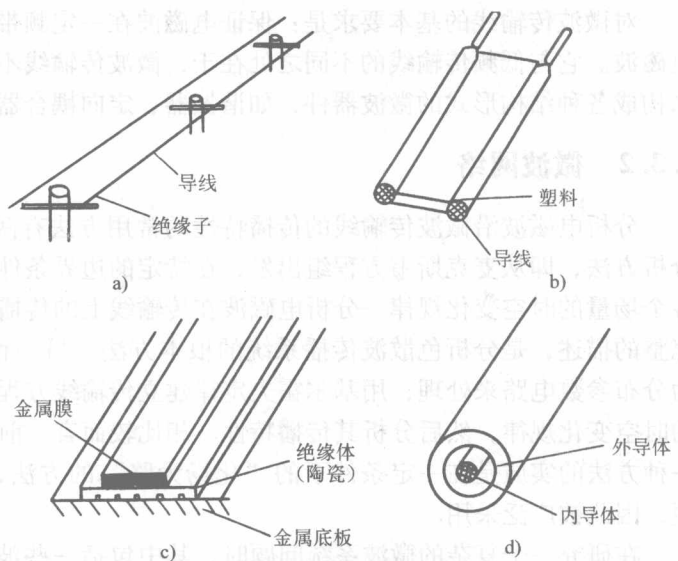


图 1-2 双导体传输线

1-2c 所示。它成功地利用到厘米波或毫米波段的低端，但它耐受功率有限，只能用在小功率设备中。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，把传输线的两个导体做成同轴形，外边的叫外导体，里边的称为内导体，如图 1-2d 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。

为了克服同轴线的缺点，可以把内导体抽掉，用一根中空的金属管传输电磁能量。按照低频电路的观点这是不可想像的，因为一般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，单根金属管是可以传输电磁能的，这种传输系统称为波导，如图 1-3 所示。波导的横截面可以是矩形（见图 1-3a）、圆形（见图 1-3b）或其他形状等（如图 1-3c、图 1-3d 所示）。波导传输电磁能是有条件的，例如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，而只有在微波波段才有实际应用的可能。

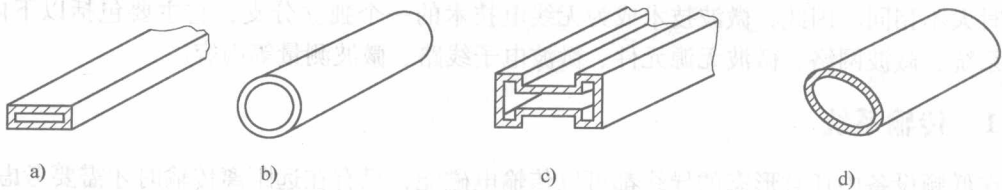


图 1-3 波导传输线

对微波传输线的基本要求是：保证电磁波在一定频带内，低损耗地传播单一工作模式的电磁波。它与低频传输线的不同之处在于，微波传输线不仅能够传输电磁波，而且还可以用来构成各种结构形式的微波器件，如谐振器、定向耦合器等。

### 1.3.2 微波网络

分析电磁波沿微波传输线的传播特性的常用方法有两种，一种是精确的方法——“场”分析方法，即从麦克斯韦方程组出发，在特定的边界条件下解电磁场的波动方程，从而求得各个场量的时空变化规律，分析电磁波在传输线上的传播特性。该方法能够对微波系统进行完整的描述，是分析色散波传播系统的根本方法。另一种是“路”的方法，即将传输线作为分布参数电路来处理，用基尔霍夫定律建立传输线方程，从而求得传输线上的电压和电流的时空变化规律，然后分析其传播特性。相比较而言，前一种方法较为严格但比较繁琐，后一种方法的实质是在一定条件下的“化场为路”的方法，它有足够的精度，数学上简单方便，因此被广泛采用。

在研究一个复杂的微波系统问题时，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”分析方法就变得很复杂，这时常采用“路”的方法进行处理，即常常把

微波系统等效为一个电路,例如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,这就是所谓微波网络或微波等效电路。这种等效电路在主要方面描写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的方便,这就是微波网络理论的分析方法。但是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,必须首先具备坚实的场的知识基础。

### 1.3.3 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办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……,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的工作原理进行分析、研究、设计及制造,并探讨它们的应用等。

### 1.3.4 微波电子电路

微波的产生、放大、倍频、变频及控制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。

微波电路的研究方法有别于低频电路。低频电路的电压、电流仅是时间的函数而与空间位置无关,因此采用基尔霍夫定律来解决实际问题。在微波电路中,电压、电流已不具有明确的物理意义,它们不仅是时间的函数,而且还是空间的函数,电路已变成了分布参数电路,低频电路的研究方法已不适用于微波电路,必须建立新的研究体系。

与低频电子电路一样,微波电子电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、磁控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。

### 1.3.5 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,天馈线系统的匹配情况怎样,等等。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到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; 在另外一些情况下, 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。所以在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来制造初样, 然后通过测量, 反复调试, 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)作为基本测量参数。因此微波测量的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。

## 1.4 习题

1. 什么是微波? 微波波段是怎样划分的?
2. 简述微波具有哪些特点。
3. 微波有哪些主要应用?
4. 微波技术主要包含哪些内容?



## 第2章 均匀传输线理论概述

### 2.1 均匀传输线

传输线是指引导电磁波能量向一定方向传输的各种形式传输系统的总称。它起着引导能量和传输信息的作用,所引导的电磁波称为导行波,因此传输线也被称为导波系统。

在微波工程中,对传输线的分析方法通常有两种:一种是采用“场”的方法,从麦克斯韦方程出发,求出满足边界条件的波动方程解,得出传输线上电场和磁场的表达式。场解法的优点在于它给出了模式、截止等重要概念以及电磁场空间分布结构,较为严格,但是它在数学上比较繁琐,并且场解法中的主要物理量也与低频电路中的物理量不相同,因而场解法妨碍了许多低频电路的成熟理论和概念在微波工程中的运用;另一种是采用“路”的方法,从传输线方程出发,求出满足边界条件的电压和电流波动方程解,得出传输线上等效电压和等效电流的表达式。这种方法既简化了分析,又可以借助已经掌握了的诸多概念来理解微波问题。这两种方法有着密切的联系,互相补充,交替使用,使得微波工程既有严格的理论基础,又有简化的等效方法。然而要注意的是,等效电路的方法只是一种近似分析方法,在微波的低频段能满足实际工程的要求,被广泛采用,而工作于毫米波的传输线只能用“场”的方法来进行分析。

本章首先运用“场”的分析方法,推导出传输线的分布参数,将传输线等效为分布参数电路,再用“路”的分析方法建立起传输线方程,求出传输线方程的解,然后分析传输线的传输特性及其重要参量,最后讨论无耗传输线的三种工作状态。

#### 2.1.1 导波的分类及常见的传输线

微波传输线所传播的电磁波的场结构会因传输线的不同而有所区别,是不同类型的导波。每一种导波系统中可以有多种形式的导波模存在,每一个导波模就是麦克斯韦方程组的一组解,这个解也必定满足其边界条件。导波系统中究竟存在哪些导波模式,除了与导波系统的结构、尺寸、填充介质有关外,还与激励方式有关。通常按照电磁波沿传输方向是否存在电场或磁场纵向分量,将电磁波的场结构——导波模式分为4类:

- 横电磁波(TEM模),其电场和磁场纵向分量都为零,即在传播方向上既没有电场分量,又没有磁场分量,  $E_z = H_z = 0$ 。
- 横电波(TE模或H波),其电场的纵向分量为零,即在传播方向上没有电场分量,  $E_z = 0, H_z \neq 0$ 。
- 横磁波(TM模或E波),其磁场的纵向分量为零,即在传播方向上没有磁场分量,  $H_z = 0, E_z \neq 0$ 。
- 混合模(EH模或HE模),其纵向电场和纵向磁场都不为零,但某一横向场分量可以为零,即  $E_z \neq 0, H_z \neq 0$ 。它们是TE模和TM模的叠加,纵向电场占优势的模式称为EH模,