



北京市高等教育精品教材立项项目

电子信息类精品教材

微波技术基本教程

闫润卿 编



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

北京高等教育精品教材立项项目
电子信息类精品教材

微波技术基本教程

闫润卿 编

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书包括三部分内容：传输线的基本理论、常用（无源）微波元件、微波网络基本知识。全书共7章：传输线的基本理论、规则波导、微带传输线、光纤、微波谐振器、常用（无源）微波元件和微波网络基本知识。这些内容是工程微波技术的重要组成部分，也是进一步学习和掌握微波技术领域其他知识的理论基础。本书着重于基本概念、基本理论和基本分析方法的阐述。本书的习题都有参考答案，并编写了例题解析，供参考。

本书可作为电子与信息技术专业（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）的教材或参考书；对于不属于这些专业，但又需要具备一定的微波技术知识的专业，同样是适用的；还可作为成人高教有关专业的教材或参考书。本书也适合工程技术人员和自学者参考使用。

未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有，侵权必究。

图书在版编目（CIP）数据

微波技术基本教程/闫润卿编. —北京：电子工业出版社，2011.11

电子信息类精品教材

ISBN 978-7-121-14762-3

I. ①微… II. ①闫… III. ①微波技术—高等学校—教材 IV. ①TN015

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2011）第 203708 号

策划编辑：韩同平

责任编辑：谭海平

印 刷：北京市顺义兴华印刷厂

装 订：三河市又印刷

出版发行：电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编 100036

开 本：787×1092 1/16 印张：21.25 字数：585千字

印 次：2011年11月第1次印刷

定 价：39.80元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题，请向购买书店调换。若书店售缺，请与本社发行部联系，联系及邮购电话：（010）88254888。

质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn，盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线：（010）88258888。

前 言

当前,电子与信息技术在科技、生产、经济、军事、通信、航天,以及社会生活等领域的重要性日益突出,应用范围日趋广泛,其中,微波技术的应用起着重要和突出的作用。鉴于此,有相当数量的高校及大专院校设置了信息技术或与之密切相关的专业,其中,有的是纯微波技术专业,有的则不是,但都要求学生具备微波技术方面的基本理论和知识。因此,编写一本适应这种要求的微波技术教材是十分必要的。

本书包括三部分内容:传输线的基本理论、常用(无源)微波元件、微波网络基本知识。这是工程微波技术的重要组成部分,是相关专业必学的基础知识,也是进一步学习和掌握微波技术领域更多知识的理论基础。以往,这三部分内容由三门独立的课程(三本独立的教材)讲授,内容庞杂、冗长,学时数多。本书针对这三门课程所涵盖的内容做了筛选,去粗存精,使其合于篇幅不大的一本书中,节约了学时数,节约了成本,方便了读者。在本书中,这三部分内容既有内在联系,又有相对的独立性,便于相关专业根据实际要求安排所学内容和学时数。

本课程的特点或难点有两个:一是涉及的物理概念和术语比较抽象,对于初学者较难理解和接受;二是涉及的数学知识多、面广。因此,能否较好地解决这两个问题,使读者容易理解和接受,就成了教材的关键所在。为此,本书把严密的数学推导、理论分析与物理概念紧密地结合在一起,特别着重于基本概念、基本理论和基本分析方法的阐述,使初学者更易理解、更易接受。本书是基础理论课教材,其内容相对而言比较稳定,但并非一成不变,随着科技的发展,内容也会有所变化,例如,平面传输线、光纤,其应用范围已十分广泛,又如,无线光通信技术也已开始进入实验和应用阶段。对此,本书都做了详细或简要的介绍。

为了能够与前修课“电磁场理论”相衔接,书中增加了矢量分析和麦克斯韦方程组的有关内容;另外,对于阅读本书必备但又不宜在书中正文讲解的基本知识、数学公式和数据等,都编写了附录,供参考;为使读者能够自己检查所做习题的结果是否正确,本书对于每一章的习题都给出了参考答案;此外,为使读者做习题时有所借鉴,特编写了例题解析,供参考。本书既可作为相关专业的本科生或大专生的教材或参考书,又可作为工程技术人员和自学者的参考书。

北京理工大学尚洪臣教授、崔正勤教授和陈重副教授对部分书稿做了详细的审阅,提出了修改意见,对此,表示衷心的感谢。

编者主观上想把书写好,但限于编者的水平和时间,书中难免有疏漏、不妥或错误之处,殷切期望读者、专家不吝指正。

目 录

绪论	1
第 1 章 传输线的基本理论	6
1.1 引言	6
1.1.1 传输线的种类和分析方法	6
1.1.2 传输线的应用	7
1.1.3 长线与分布参数	9
1.1.4 传输线理论的重要性和传输线在微波技术中的地位	10
1.2 均匀无耗传输线上的行波	11
1.2.1 传输线方程及其解	11
1.2.2 均匀无耗传输线的特性阻抗	14
1.3 接有负载的均匀无耗传输线	16
1.3.1 接有任意负载时均匀无耗传输线上电压波和电流波的一般表示式	16
1.3.2 反射系数、驻波比和输入阻抗	17
1.3.3 均匀无耗传输线接有不同类型负载时的工作状态	21
1.4 应用举例	29
1.4.1 用做元器件的有限长传输线	29
1.4.2 在传输能量方面的应用举例	30
1.5 阻抗圆图和导纳圆图	33
1.5.1 阻抗圆图	33
1.5.2 阻抗圆图应用举例	37
1.5.3 导纳圆图	39
1.6 阻抗匹配	40
1.6.1 阻抗匹配的概念	40
1.6.2 负载与传输线阻抗匹配的方法	42
1.7 均匀和非均匀有耗传输线	46
1.7.1 均匀有耗传输线	46
1.7.2 非均匀有耗传输线	51
附录 1.1 双导线和同轴线的分布参数	52
附录 1.2 某些传输线的特性阻抗	52
附录 1.3 阻抗的测量方法	53
习题	55
第 2 章 规则波导	57
2.1 引言	57
2.1.1 梯度、散度和旋度	58

2.1.2	麦克斯韦方程	62
2.2	波动方程与导行波	66
2.2.1	波动方程	66
2.2.2	导行电磁波	69
2.3	规则波导中的导行波	72
2.3.1	波型	72
2.3.2	传输特性	75
2.4	矩形波导管中电磁波的传输特性	88
2.4.1	波动方程在直角坐标系中的解	88
2.4.2	波型及场结构	90
2.4.3	矩形波导管中电磁波的传输特性	94
2.4.4	矩形波导管的管壁电流	99
2.4.5	等效阻抗	100
2.4.6	激励与耦合	102
2.5	圆形波导管中电磁波的传输特性	103
2.5.1	波动方程在圆柱坐标系中的解	103
2.5.2	波型及场结构	106
2.5.3	传输功率和衰减	112
2.6	同轴线及其中的高次波型	115
2.6.1	同轴线中的 TEM 波型	116
2.6.2	同轴线中的高次波型	118
2.6.3	同轴线尺寸的选择	122
附录 2.1	贝塞尔函数简介	124
附录 2.2	部分同轴线、矩形软波导管结构示意图	127
	习题	128
第 3 章	微带传输线	130
3.1	带状传输线	130
3.1.1	特性阻抗	131
3.1.2	相速度和导波波长	134
3.1.3	带状线的损耗和衰减	134
3.1.4	带状线的功率容量	135
3.1.5	带状线尺寸的选择	135
3.2	微带线	136
3.2.1	微带线中的模式	137
3.2.2	微带线的特性阻抗	137
3.2.3	相速度和导波波长	140
3.2.4	微带线的损耗	140
3.2.5	微带线的色散特性与尺寸选择	141
3.3	耦合带状线和耦合微带线	142

3.4 用于微波集成电路的其他传输线简介	143
3.4.1 悬置和倒置微带线	143
3.4.2 槽线	144
3.4.3 共面波导	144
3.4.4 鳍线	145
附录 3.1 椭圆积分简介	146
附录 3.2 零厚度微带线特性阻抗数据表	149
习题	156
第 4 章 光纤	157
4.1 引言	157
4.2 阶跃光纤的射线分析	161
4.2.1 在不同介质分界面上波的反射和折射	161
4.2.2 阶跃光纤的射线分析	165
4.3 阶跃光纤的波动理论	169
4.3.1 波动方程及其解	170
4.3.2 特征方程、模的传输与截止、模的远离截止	175
4.3.3 光纤的色散特性	180
4.4 无线光通信基本知识简介	181
习题	182
第 5 章 微波谐振器	184
5.1 谐振器的特性参数	185
5.1.1 谐振频率	185
5.1.2 品质因数	185
5.2 圆柱形谐振腔	189
5.2.1 电磁场的表示式	190
5.2.2 谐振频率与波型图	193
5.2.3 固有品质因数	197
5.2.4 圆柱形谐振腔中常用的三种主要模式	198
5.3 矩形谐振腔	200
5.3.1 电磁场的表示式	200
5.3.2 特性参数的计算	204
5.4 同轴线谐振腔	206
5.4.1 二分之一波长型同轴线谐振腔	207
5.4.2 四分之一波长型同轴线谐振腔	209
5.4.3 电容加载同轴线谐振腔	210
5.5 其他类型微波谐振器简介	211
5.5.1 介质谐振器	211
5.5.2 平面谐振器	215

5.5.3 微带传输线谐振器	216
习题	217
第 6 章 常用(无源)微波元件	219
6.1 连接元件	219
6.1.1 矩形波导接头	219
6.1.2 同轴线接头	221
6.2 变换元件	223
6.2.1 传输线尺寸变换器	223
6.2.2 阶梯式阻抗变换器	226
6.2.3 模式转换器	228
6.3 分支元件	230
6.3.1 同轴线型功率分配器	230
6.3.2 微带线功率分配器	232
6.3.3 矩形波导管分支接头	234
6.4 终端元件	238
6.4.1 匹配负载	238
6.4.2 全反射终端器(短路器)	240
6.5 矩形波导管中的衰减器和移相器	243
6.5.1 衰减器	243
6.5.2 移相器	243
6.6 定向耦合器	244
6.6.1 双孔定向耦合器	246
6.6.2 均匀多孔阵列定向耦合器	247
6.6.3 耦合机构在波导宽壁的定向耦合器	248
6.7 微波滤波器	249
6.7.1 由矩形波导谐振腔构成的滤波器	250
6.7.2 利用高低阻抗线构成的滤波器	251
6.8 场移式隔离器	253
6.9 Y 形结环形器	254
6.10 电抗性元件	255
6.10.1 矩形波导管中的膜片、谐振窗和金属杆	255
6.10.2 矩形波导管中的阶梯	259
6.10.3 同轴线中的阶梯	260
习题	261
第 7 章 微波网络基本知识	262
7.1 引言	262
7.2 波导等效为双线, 不均匀性等效为网络	263
7.2.1 波导等效为双线传输线	263

7.2.2 不均匀性等效为网络	267
7.3 归一化参量	268
7.3.1 阻抗的归一化	269
7.3.2 电压和电流的归一化	269
7.3.3 场强复振幅的归一化	269
7.3.4 归一化电压、电流与归一化的场强复振幅之间的关系	270
7.4 微波网络的参量	270
7.4.1 微波网络的电路参量	271
7.4.2 微波网络的波参量	277
7.4.3 常用网络参量之间的互换关系	279
7.4.4 参考面移动对散射参量的影响	283
7.4.5 基本电路单元的网络参量	283
7.5 二端口网络的工作特性参量	285
7.5.1 插入反射系数和插入驻波比	286
7.5.2 插入衰减	286
7.5.3 插入相移	287
7.5.4 电压波的传输系数	288
7.6 网络的连接	288
7.6.1 二端口网络的串联	288
7.6.2 二端口网络的并联	289
7.6.3 二端口网络的级联	290
7.7 网络参量的性质	291
7.7.1 互易(可逆)网络	291
7.7.2 无耗网络	292
附录 7.1 矩阵知识初步	293
附录 7.2 复功率定理	296
习题	296
附录一 例题解析	298
附录二 数学公式	308
附录三 奈培和分贝	314
附录四 常用导体材料的特性	316
附录五 常用介质基片材料的高频特性	317
附录六 微带线常用导体材料的特性	318
附录七 空心矩形和圆形金属波导管参数	319
习题答案	325
主要参考资料	329

绪 论

微波也是电磁波，但它是一个比普通无线波段的频率更高、波长更短的波段，故名微波。微波技术是在继普通无线电波的长波、中波、短波和超短波之后，在波长更短的基础上发展起来的，它们之间既有相同之处，又有很多差别，因此，微波技术已成为现代电子学中独树一帜的学科领域，微波技术的研究成果在科技、经济及社会生活等方面都有广泛的应用，微波技术已经成为现代科技领域的重要组成部分之一。

微波技术的研究最早始于 1933 年，当时只处于实验室研究阶段（研究微波的产生、传输），以后，直到 1940—1945 年这个阶段，正是第二次世界大战时期，由于军事方面的需求，微波技术在实际应用方面有了快速的发展，是微波技术发展的重要阶段。在当时，为了测量目标飞机的距离、方位，以及为了引导自己一方飞机按要求的路线飞行，而制造出了工作于微波波段的雷达、导航和遥控设备、测量设备等。在这些设备中，用来产生微波振荡源的有：磁控管、速调管、三极管（电子管）等。同时，还使用了具有各种功能的微波元件和微波器件。从那时起，直到现在，微波技术在理论研究和实际应用方面都有了突飞猛进的发展，它的应用已不仅仅限于军事方面，而是已渗透到人类工作和生活的各个方面，尤其是在高科技的应用领域。例如，在宽频带通信、广播和电视直播、微波遥感、遥控、全球定位系统、飞行体的导航系统、雷达和电子抗干扰系统，以及移动通信等方面，都有着广泛的应用；与此同时，由于微波技术的发展还催生了一些新兴学科，例如射电天文学、微波频谱学等，还可以利用微波探测物质的内部结构；微波技术在工业、农业、医学、食品加工等方面也都有着广泛的应用。总之，应用范围十分广泛，不胜枚举。

随着科学技术的发展，微波技术中使用的元件、器件也有很多改进，并制造出了一些新的微波元件和器件。目前，在中等和大功率的微波系统中，电真空器件，例如，磁控管、速调管、行波管、返波管和正交场放大管等，仍在使用，它们的主要用途是产生较大功率的微波，并把它加以放大；与此相适应，能够承受较大功率的波导管、同轴线、微波元件和器件也在被广泛地应用。但是，另一方面，从 20 世纪 60 年代以来，由于微波半导体材料的研制成功，从而制造出了可用于微波范围的微波半导体器件，例如，金属半导体二极管、雪崩二极管、场效应管、隧道二极管、耿氏（Gunn）二极管和 PIN 管等，一般把它们称为固态器件或固态微波源，其特点是，体积小、坚固耐用，制造成本低，而且，这些器件特别适合与平面结构的微波传输线（微带线、槽线、共面波导）相结合，或者与单片集成技术相结合，从而构成微波集成电路（MIC）或单片微波集成电路（MMIC），像这一类的所谓微波固态电路系统，在中等功率以下的小功率范围内，例如发射机和接收机，都有着广泛的应用。可见，把传统的微波元件、微波器件和现代的微波元件、微波器件结合在一起，使微波技术的理论和实际应用在原有的基础上又前进了一大步，其发展前景也更为广阔。

从以上的概述可知，微波技术涉及的领域很广泛，每一领域都有专门的学科或课程在进行研究和讨论，本书不可能包罗万象地都讲，而主要讲述工程微波技术的基本概念、基本知识和基本理论，目的是给初学者进一步学习与微波技术有关的其他学科或课程，或者进一步提高理论水平和实际工作能力打下基础。

最后需要说明的是，本绪论只是很粗略地概述了微波技术的发展简况，肯定是不全面的，若读者有兴趣和有需要，可以查阅相关的资料，在此不再赘述。

1. 微波在电磁波谱中的位置

对于电磁波谱,按照从波长较长(频率较低)到波长愈来愈短(频率愈高)的次序可排列为:普通无线电波(从超长波到超短波)、微波、红外线、可见光、X射线和 γ 射线。可见,微波波段的低频端与普通无线电波中超短波的高频端(波长为1m,频率为300MHz)相毗邻,而高频端则与红外线的低频端(波长为1mm,频率为300GHz,或波长为0.1mm,频率为3000GHz)相衔接。表0-1给出了普通频率波段中各波段的名称、波长和频率范围,以及它们的频段名称,这里的波长是指波在自由空间(理想的真空状态)中随着时间做简谐振荡时TEM(横电磁波)的波长。波的频率是由波源决定的,因此同一频率的波在不同媒质中的频率是不变的,但波长和传播速度是变化的。不同频率的波在自由空间中的波长虽然不同,但传播速度相同,这就是通常所说的光速(3×10^8 m/s)。

表 0-1 普通频率波段的划分

波段名称	波长范围/m	频率范围	频段名称
极长波	$10^8\sim 10^7$	3 Hz~30 Hz	极低频(ELF)
超特长波	$10^7\sim 10^6$	30 Hz~300 Hz	超低频(SLF)
特长波	$10^6\sim 10^5$	300 Hz~3 kHz	特低频(ULF)
超长波	$10^5\sim 10^4$	3 kHz~30 kHz	甚低频(VLF)
长波	$10^4\sim 10^3$	30 kHz~300 kHz	低频(LF)
中波	$10^3\sim 10^2$	300 kHz~3 MHz	中频(MF)
短波	$10^2\sim 10^1$	3 MHz~30 MHz	高频(HF)
超短波	$10\sim 1$	30 MHz~300 MHz	甚高频(VHF)

注:目前用实验方法测得的最低频率为 10^{-2} Hz。

对于微波常把它划分为分米波、厘米波、毫米波和亚毫米波4个波段,表0-2给出了各波段的名称、波长和频率范围,以及它们的频段名称。

表 0-2 微波波段的划分

波段名称	波长范围	频率范围/GHz	频段名称
分米波	1m~10cm	0.3~3	特高频(UHF)
厘米波	10cm~1cm	3~30	超高频(SHF)
毫米波	1cm~1mm	30~300	极高频(EHF)
亚毫米波	1mm~0.1mm	300~3000	超极高频

在实际应用中,还常把微波波段划分为更细的分段,并用拉丁字母作为各分段的代号和称谓,如表0-3所示。各文献资料列出的波长与频率范围基本相同,个别数据稍有差别,但这并不影响使用。

表 0-3 常用微波波段及其代号

波段代号	标称波长/cm	频率范围/GHz	波长范围/cm
P	80	0.23~1	130~30
L	22	1~2	30~15
S	10	2~4	15~7.5
C	5	4~8	7.5~3.75
X	3	8~12.5	3.75~2.4

(续表)

波段代号	标称波长/cm	频率范围/GHz	波长范围/cm
Ku	2	12.5~18	2.4~1.67
K	1.3	18~26.5	1.67~1.13
Ka	0.8	26.5~40	1.13~0.75
毫米波		30~300	1~0.1
亚毫米波		300~3000	0.1~0.01

在某些文献资料中,有时还用到另外一种波段划分的方法,它是按照英文字母的排列顺序而命名的,如表 0-4 所示。

表 0-4 微波波段划分及其代号

波段代号	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
频率范围/GHz	0.1~0.25	0.25~0.5	0.5~1	1~2	2~3	3~4	4~6	6~8	8~10	10~20	20~40	40~60	60~100	100~140

微波波段之后各个波段(在自由空间中)波长的范围为:红外线 $0.75\text{ mm} \sim 0.76\text{ }\mu\text{m}$ (远、中、近红外线的范围分别为 $0.75\text{ mm} \sim 15\text{ }\mu\text{m}$, $15\text{ }\mu\text{m} \sim 1.5\text{ }\mu\text{m}$, $1.5\text{ }\mu\text{m} \sim 0.76\text{ }\mu\text{m}$; 远红外线波段的一部分与亚毫米波段相重叠); 可见光 $0.76\text{ }\mu\text{m} \sim 0.39\text{ }\mu\text{m}$; 紫外线 $0.39\text{ }\mu\text{m} \sim 0.005\text{ }\mu\text{m}$; X 射线 $0.005\text{ }\mu\text{m} \sim 10^{-8}\text{ }\mu\text{m}$; γ 射线 $10^{-8}\text{ }\mu\text{m}$ 以下。

2. 微波的特点和应用

从频率最低(波长最长)到频率极高(波长极短)的电磁波;它们本质上都是电场和磁场,是一种波动,这是共同之处;但是,频率不同,它们的性质和特点也不同,例如 X 射线和 γ 射线,通常电磁波的特点已不明显,而射线贯穿物质能力的特点却比较显著,当然,还有其他的一些特点。不同频率的电磁波与物质的分子和原子之间的相互作用也不相同。微波只是电磁波谱中的一部分,下面将要讨论的微波的特点,不是与整个电磁波谱中的电磁波相比较,而主要是与普通无线电波段的电磁波比较。微波的主要特点如下。

(1) 微波的波长很短,在其传播过程中,若所遇物体的几何尺寸大于或可与波长相比拟时,就会产生反射,波长越短,传播特性越与几何光学相似(如近似于直线传播的特性)。利用微波的这种可以把电磁波的能量集中于很窄的波束之内的高方向性和反射性,制造出了可以测定目标方向,跟踪飞行体的飞行状态、导航、遥控遥测、气象预报、测量等多种用途的雷达。

(2) 在距离地球表面大约 $80\text{ km} \sim 400\text{ km}$ 之间的范围内存在着环绕地球的电离层,这是由于在此范围内的大气层受到太阳的紫外线和宇宙射线的辐射作用,使大量气体分子中的电子游离出来形成自由电子和离子,从而形成了电离层。当波长为长波、中波、短波的电磁波从地球向大气外传播遇到电离层时会与电离层产生相互作用,电磁波的一部分能量被吸收,另一部分能量被反射回地球,即不能穿过电离层;而对于频率较高的超短波和微波则能够穿过电离层至外层空间。电视广播、卫星通信、宇宙航行、射电天文学,以及受控热核反应中的等离子的参数测量等,都是利用了微波的这一特性实现的。

(3) 微波的频率很高,因此可利用的频带较宽、信息容量大,从而使微波通信得到了广泛的应用和发展。

(4) 微波的频率很高、振荡周期很短,因此,低频范围(普通无线电波段)内所使用的元(器)件,对于微波已不再适用,而必须研制适用于微波的元(器)件。

(5) 微波可以深入某些物质的内部, 并与分子和原子产生相互作用, 利用这一特性可以探测物质的内部结构。

(6) 某些物质吸收微波后会产生热效应, 因此可利用微波作为加热和烘干的手段, 其特点是, 微波的穿透性强, 可深入物质内部, 加热速度快而均匀, 从而在工农业和食品业等部门得到了广泛的应用。除此而外, 微波的热效应和非热效应在化学、生物学和医学等领域的应用前景也是十分广阔的。

(7) 微波的研究方法与低频不同。在低频(普通无线电波段), 由于电路系统内传输线(导线)的几何长度 l 远小于所传输的电磁波的波长 λ (即 l/λ 很小), 因此称为“短线”; 而且, 系统内元(器)件的几何尺寸也远小于波长 λ 。这样, 波在传输过程中的相位滞后效应可以忽略, 而且, 一般也不计趋肤效应和辐射效应的影响; 电压和电流也都有确定的定义。因此, 在稳态下, 系统内各处的电压或电流可近似地认为是同时地只随时间变化的量, 而与空间位置无关; 电场能量和磁场能量分别集中于电容和电感内, 电磁场的能量只消耗于电阻上, 而对于连接元(器)件的导线, 则可近似地认为, 它既无电容, 也无电感, 也不消耗能量(即没有串联电阻和并联电导), 这就是通常所说的集总参数电路的情况。研究集总参数电路的问题, 采用的方法是低频中的电路理论, 一般地讲, 无须采用电磁场的方法求解。

在微波波段, 由于电路系统内传输线的几何长度 l 大于所传输的电磁波的波长 λ , 或者可与波长 λ 相比拟。因此称为“长线”; 而且, 系统内元(器)件的几何尺寸也大于波长 λ , 或者可与波长 λ 相比拟。这样, 波在传输过程中的相位滞后、趋肤、辐射效应等都不能忽略, 而且, 一般地讲, 除了个别情况外, 对于电压和电流难以给出确切的定义, 也更难以测量。因此, 系统内各点的电场或磁场随时间的变化不是同步的, 即它们不仅是时间的函数, 而且还是空间位置的函数; 系统内的电场和磁场均呈分布状态, 而非“集中”状态, 因此, 与电场能量相联系的电容和与磁场能量相联系的电感, 以及与能量损耗相联系的电阻和电导也都呈分布而非“集中”的状态; 而且, 传输线本身的电容、电感、串联电阻和并联电导效应均不能被忽略。这样, 就构成了所谓的分布参数系统(分布参数电路)。研究分布参数系统的问题, 一般地讲, 不能采用低频中的电路理论, 而应采用电磁场理论, 即在一定的边界和初始条件下求电磁场波动方程的解, 从而得出场量随时间和空间的变化规律, 研究波的各种特性。

以上所讲的是, 对于低频和微波这两类不同的问题, 应分别采用“路”和“场”的方法去解决, 这是一般的原则。但是, 有的问题既可用“场”的方法去解决, 也可用“路”的方法去解决, 或者将两种方法结合起来; 而且, 在一定的条件下, 还可以将本质上属于“场”的问题等效为“路”的问题来处理, 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的, 而是有联系的。实际上, “路”与“场”这两种理论只是表明, 对于同一个客观事物, 可以采取不同的分析方法, 其中何者为宜, 需视具体问题而定。

需要指出的是, 微波的特点, 尤其是微波的应用, 远不止于以上所列举的内容, 限于篇幅不再列举。微波技术已成为无线电电子学中的一个重要分支, 随着对它的深入研究, 其应用范围会愈来愈广泛。

3. 本课程的设置目的和主要内容

微波技术所研究的内容, 概略地讲, 就是微波的产生、传输、变换(包括放大、调制)、检测、发射和测量, 以及与此相对应的微波器件和设备等。从物理学的角度讲, 微波技术所研究的主要是微波产生的机理, 它在各种特定边界条件下的存在特性, 以及微波与物质的作用; 从工程技术的角度讲, 微波技术所研究的主要是具备各种不同功能的微波元(器)件(包括传输线)的设计, 以及这些微波元(器)件的合理组合和微波的测量。

由以上所述可知，微波技术的应用范围和包含的内容都是很广泛的，而且都有相关的学科对其进行专门的研究，因此，本书作为理论基础课，没必要、也不可能都予以讨论。本书以讲述工程微波技术的基本理论、基本概念和分析方法为主，尤其着重于基本概念の阐述。

本书的主要内容是讨论微波在传输线中的传输问题，即传输线理论问题，以及以传输线为基础构成的微波谐振器和部分常用（无源）微波元件；对于微波网络的基本知识也做了简要的介绍。其中，尤以传输线最为重要，传输线的概念和理论贯穿于本书的所有章节，因为它不仅仅能够传输微波，而且还是微波元（器）件、微波集成电路和微波天线等的重要组成部分。微波网络理论是微波技术的一个重要分支，它用化“场”为“路”的方法去解决电磁场的边值问题，从而使问题得以简化，因此具有较大的实用价值。

总之，本书所涉及的内容，是与微波技术有关专业的必学内容，也是进一步学习和掌握更广泛的工程微波技术知识的理论基础。

第1章 传输线的基本理论

1.1 引言

1.1.1 传输线的种类和分析方法

1. 传输线的种类

广义地讲,凡是能够导引电磁波沿一定方向传输的导体、介质或由它们共同组成的导波系统,都可以称为传输线。传输线是微波技术中最重要的基本元件之一,这是因为它不仅可以把电磁波的能量从一处传输到另一处,而且还可用它作为基本组成部分来构成各种用途的微波元(器)件。具体传输线的种类是很多的,而且可按不同的标准分类。若按传输线所导引的电磁波的波型(亦称模、场结构或场分布)来划分,则可分为三种类型:(1) TEM 波传输线,如双导线、同轴线、平板线、带状线以及微带线和共面波导(严格地讲,是准 TEM 波——近似于 TEM 波)等,它们都属于双导体传输系统。多导体系统也可以传输 TEM 波;(2) TE 波和 TM 波传输线,如矩形、圆形、脊形和椭圆形波导等,它们是由空心金属管构成的,属于单导体传输系统(双导体和多导体传输系统在一定条件下,例如,当传输线的横向尺寸与工作波长相比足够大时,也可以传输 TE 和 TM 波,但一般不常用,常用的是主模 TEM 波);(3) 表面波传输线,如介质波导(包括光波导)、介质镜像线以及单根的表面波传输线等,电磁波聚集在传输线内部及其表面附近沿轴线方向

传播,一般的是混合波型(TE 波和 TM 波的叠加),某种情况下也可传播 TE 波或 TM 波。图 1.1-1 给出了这三种类型传输线中比较典型和常用的传输线的结构简图,并非传输线的全部。此外,还有一些结构上更为复杂的传输线,它们是上述三种基本类型的组合和发展。需要说明的是,对于(1)、(2)两类传输线而言,是在不考虑其损耗时可能存在的波形,若考虑损耗,则沿传输线纵向,电场和磁场的纵向分量会同时存在,是混合波型 EH(纵电波)或 HE(纵磁波)。粗略地讲,若纵向电场较强、纵向磁场较弱,则为 EH 波,反之,则为 HE 波。因为实际应用的传输线大都由良导体(近似地视为理想导体,电导率 $\sigma \rightarrow \infty$)和损耗很小的介质(近似地视为理想介质,电导率 $\sigma \rightarrow 0$)所构成,所以,(1)和(2)两项所述,

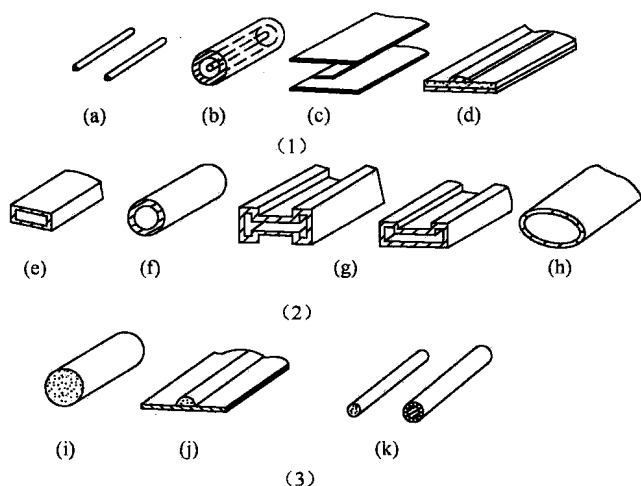


图 1.1-1 传输线的种类:(1) TEM 波和准 TEM 波传输线;
(2) TE 波和 TM 波传输线;(3) 表面波传输线。
(a)平行双导线;(b)同轴线;(c)带状线;(d)微带线;
(e)矩形波导;(f)圆形波导;(g)脊形波导;(h)椭圆波
导;(i)介质波导;(j)镜像线;(k)单根表面波传输线

对于实用而言是足够精确的。(i)是介质波导(光纤属介质波导的一种),其基本工作原理是,只要介质的介电常数大于其周围物质(例如空气)的介电常数,进入介质内的电磁波就会在两种介质的分界面处产生反射(理论上讲,全反射),从而使大部分电磁波集中于介质及其表面附近,并形成沿介质波导轴线方向传输的波。介质波导不仅可传播电磁波,而且还可利用其辐射性能制成介质天线(表面波天线)。(j)是镜像线,它是由半圆形的介质棒与一薄金属板而构成的传输线,电磁波的能量主要集中于介质棒及其表面附近,并沿棒的轴线方向传播。(k)是单根表面波传输线,左边是一介质棒,右边是由在金属导体的表面上涂覆一层薄的介质而构成的传输线。

2. 传输线的分析方法

传输线理论主要包括两方面的内容:一是研究所传输波型的电磁波在传输线横截面内电场和磁场的分布规律(亦称场结构、模、波型),称为横向问题;二是研究电磁波沿传输线轴向的传播特性和场的分布规律,称为纵向问题。横向问题要通过求解电磁场的边值问题来解决,不同类型或同一类型但结构形式不同的传输线,具有不同的边界条件,应分别加以研究。但是,各类传输线的纵向问题却有很多共同之处,例如,都是沿轴线方向把电磁波的能量从一处传向另一处,都是一种波的传播(波动),而且,由于传输线终端所接负载的不同,当沿着传输线的纵向(轴向)观察时,可能是行波、行驻波或纯驻波,因此,尽管传输线类型不同,但都可以用相同的物理量来加以描述。可见,如果我们的着重点不是各类传输线横截面内的场结构(横向问题),而是它的纵向问题,则可以用一个等效的简单传输线(如传输 TEM 波的双导线或同轴线)来描述。简单传输线的纵向问题,可以用场的方法来分析;在求得传输线的分布参数之后,也可以用电路的方法来分析。前者是根据边界和初始条件求电磁场波动方程的解,得出电磁场随时间和空间的变化规律;后者是利用分布参数电路的理论(传输线的电路模型)来分析电压波(与电场相对应)和电流波(与磁场相对应)随时间和空间的变化规律。实际上,这是对同一客观事物的两种不同描述方法,可根据具体情况采用其中的一种方法。就一般问题而言,场的分析方法是普遍的方法。对于本章而言,鉴于路的方法简便、易懂,我们将采用路的方法来分析传输线的纵向问题。

对传输线的基本要求是:工作频带宽(或满足一定的要求)、功率容量大(或满足一定的要求)、工作稳定性好、损耗小、尺寸小和成本低等。在实际应用中,一般地讲,在米波或分米波中的低频段范围内,可采用双导线或同轴线;在厘米波范围内可采用空心金属波导管以及带状线和微带线等;在毫米波范围可采用空心金属波导管、介质波导、介质镜像线和微带线;在光频段则采用光波导(光纤)。以上的划分主要是从减少损耗(导体损耗、介质损耗和辐射损耗)、屏蔽好、受外界干扰小,以及减小结构尺寸和工艺上的可实现性来考虑的,并非只从频率的高低来考虑,例如波导管,若用于米波或分米波波段,一般地,则因其尺寸过大,而不便于应用。例如,同轴线也可用于厘米波和毫米波范围;再如,双导线、同轴线、带状线以及微带线和共面波导(严格地讲,是准 TEM 波——近似于 TEM 波)等,在传输 TEM(或准 TEM)波的情况下,若不考虑其他因素,并无频率下限,也就是说,即使是直流电也可以传输。由此可见,以上的划分只是大致的情况,其界限并不十分严格。

1.1.2 传输线的应用

从通信技术发展的过程可以看出,自从利用电磁波传递信息(有线传递,无线传递)以来,所使用的工作频率在不断地提高,从早期的利用低频开始直到现在的利用光频为止,这是一个非常宽的频段范围。其原因在于,从早期的只是传递电报信息逐渐地发展到传递语音、图像、数据等信息;从利用模拟信息的传递发展到数字信息的传递;从近距离的信息传递发展到远距离(跨洲越洋)的信息传递,以及地面与外层空间、外层空间中飞行器之间的信息传递,等等。这就要

求电磁波的传输系统(双线传输线或波导,以及带状线、微带线、光纤,直到无线光通信等)、发射和接收等设备具有宽频带、大信息容量、高精密度、低损耗等性能,同时还要求集成化、小型化(频率愈高,波长愈短,则相应设备的尺寸也愈小)。解决这些问题的方法就是不断地提高所使用的工作频率,作为通信系统中主要构成部分之一的传输系统,为了适应这一要求,必然会随着工作频率的不断提高,在结构形式和材料的选用上需要不断地改进和完善,因此就出现了使用频率范围不同、结构形式不同的各种各样的传输线(广义的)。下面简略地介绍一下这些不同类型传输线的主要特点。

双导线传输线 它在低频范围内有广泛的应用,可用于长波、短波,在某些情况下也可用于超短波波带。若波长更短(频率更高),电流的趋肤效应增强,导体损耗、绝缘介质和支架介质的损耗都会增加,而且,当工作波长与两导线之间的距离可比拟或更短时,会产生辐射损耗,波长愈短,损耗愈大。由于这些原因,双导线传输线会失去传输电磁波能量的作用。

同轴线 与双导线传输线相比,它可用于较高的频率范围,一般可用于分米波和厘米波波带。它的优点是,电流通过同轴线的面积加大了,使导体损耗减小了,外导体的屏蔽作用消除了辐射损耗;它的缺点是,若频率再高,趋肤效应引起的导体损耗、填充物引起的介质损耗都会增加。另外,在大多数情况下同轴线中传输的都是主模 TEM 波(单模传输),因此为了抑制高次波型(TE 和 TM)的传输,同轴线的横向尺寸(内导体的外半径,外导体的内半径)不能太大,这就使得内、外导体之间的距离较近,在传输大功率时会发生击穿现象。因此,当波长小于 10 cm 时,应采用没有内导体的波导管来传输电磁波的能量。

以上所讲,是从损耗和传输功率的角度来考虑的,而在实际应用中应根据具体情况灵活掌握。例如,当传输功率较小时,同轴线也可以用于厘米波和毫米波。另外,从本章有关同轴线的讲授内容可知,在传输 TEM 波的情况下,若不考虑损耗,在同轴线的使用上没有频率下限和上限,直流电压和电流也可以传输,这一点在微波电路中非常有用,因为它可以给有源器件的电源提供一个直流通路。

金属波导管 与同轴线相比,它的优点是,结构坚固,不易变形,没有内导体,增加了功率承受能力,减少了导体损耗,管内填充的是空气或惰性气体,没有介质损耗,与同轴线一样,波导管也有屏蔽作用,没有辐射损耗。它主要用于厘米波和毫米波范围内,在要求传输大功率的情况下也可用于分米波波带。因为工作波长愈长,波导管的横向尺寸也愈大,因此在一般情况下,不宜采用高于分米波的工作波长。目前传输线的类型很多,在许多方面可以替代波导管的作用,但是在微波天线、雷达、卫星通信、电子对抗、电子加速器等方面,以及在要求大功率传输的精密检测仪器中仍然需要采用波导管。波导管不仅可以传输电磁波,而且还可以用来制造各种各样的微波元(器)件。

平面传输线 平面结构的传输线(例如,微带线、带状线、槽线、共面波导等)的特点是,尺寸小、质量轻、结构紧凑、易制造、成本低,易与微波有源或无源器件构成微波集成电路(Microwave Integrated Circuit, MIC),也可以构成各种用途的微波元(器)件及微波天线等,用途非常广泛。

介质波导与光波导 一般的介质波导是全部由介质构成的棒状形波导,其横截面可以是圆形、椭圆形和矩形,电磁波沿其轴线方向传输。当工作波长较长时,例如厘米波段,则因损耗较大而不宜用做传输电磁能量的波导,但在毫米波段损耗较小,大部分能量集中于介质内,可以用做波导。另外,在一定波长范围内,利用介质棒在传输电磁波的过程中产生的辐射效应,还可以把它制作成微波天线。

光波导(光纤——光导纤维) 也属于介质波导的范畴,但它与一般的介质波导相比,其横截面尺寸要小得多,工作波长更短(光波波带)。与前述几种传输线相比,工作频带宽,信息容量