



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

电子信息科学与工程类专业

# 微波技术与天线

## (第二版)

● 王新稳 李 萍 李延平 编著 梁昌洪 主审



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

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



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

电子信息科学与工程类专业

# 微波技术与天线

## (第二版)

王新稳 李 萍 李延平 编著

梁昌洪 主审

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

## 内 容 简 介

本书从“路”的观点出发,较为系统地论述了微波技术与天线的基本理论与基础知识。在编写时力求去繁就简,深入浅出,这样既保持了知识结构的完整性,也为非电磁场专业的学生或其他人员学习微波技术与天线知识提供一条简捷的通道。全书共4章,第1章至第3章为微波技术部分,第4章为天线部分。主要内容有:长线理论、理想导波系统的一般理论分析、规则波导传输线、常用微波横电磁(TEM)波传输线、微波网络理论基础、各种常用微波元件、天线基础知识和基本理论、线天线、面天线、移动通信中的基站天线等。

本书可作为电子信息工程与通信工程专业的本科生教材参考用书,也可供相关专业的工程技术人员使用。

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

微波技术与天线/王新稳等编著. —2版. —北京:电子工业出版社,2006.12

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 7-121-02992-8

I. 微... II. 王... III. ①微波技术—高等学校—教材②微波天线—高等学校—教材 IV. ①TN015②TN822

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第089228号

责任编辑:陈晓莉 特约编辑:李双庆

印 刷: 北京牛山世兴印刷厂  
装 订:

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:18.5 字数:470千字

印 次:2006年12月第1次印刷

印 数:5000册 定价:25.00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。联系电话:(010)68279077;邮购电话:(010)88254888。

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

服务热线:(010)88258888。

## 第二版前言

本书正式列选为“普通高等教育‘十一五’国家级规划教材”。我们根据教育部普通高等教育“十一五”国家级规划教材选题的通知精神,对已出版、使用三年的该教材进行了修订除部分内容进行调整,还将为本教材编写学习辅导书。

修订中,我们参考了部分使用该教材的教师提出的意见和建议。微波技术部分由王新稳修改。补充了由杨德顺教授提供的、与工程应用有关的几个传输线阻抗和驻波系数关系的公式;对传输线上的功率传输问题进行了详细的探讨;增加了部分例题;对波导传输线一节做了补充修改;对微波网络一章中归一化转移参数矩阵改用  $\bar{A}$  表示,避免与散射参数中归一化入射波矩阵  $a$  相混淆,并考虑大部分任课教师的建议,微波网络一章中 2.7 节“简单不均匀性的等效电路分析”移到附录中,由任课教师选讲。天线部分由李萍和李延平共同修改,由李延平执笔重修。对天线基本理论知识进行了较详细叙述,增加了接收天线基本理论和面天线基本理论知识。由于教材篇幅和上课时数限制,删掉了原书上具体天线的介绍,只保留了移动通信中基站天线内容。此外,对书中一些已发现的印刷错误和不妥之处作了修改;增加了附录;增加了部分例题和习题。杨德顺教授和傅德明教授审阅了重修部分。本教材的参考教学学时数 60 学时左右。

本教材的多媒体教学软件,在西安电子科技大学校教改基金的资助下,由王新稳负责研制,目前已制作完成。该教学软件将动画、图形、文字、公式等素材集成为一体,为使用该教材的教师提供了一个灵活自主课堂教学的计算机教学平台。利用动画设计软件完成的入射波、反射波、行波、驻波、波导  $TE_{10}$  模场结构图、电流分布图的动画演示软件,将复杂抽象、概念高深的电磁波的运动规律用动画图形展示出来,既可以有效地辅助老师的课堂教学,帮助学生更好地学习、理解和掌握这种看不见、摸不着的电磁波的运动规律,又可以使单调、枯燥、乏味的教学工作变得生动有趣。该教材的习题详细解答的多媒体演示软件也设计完成,可用于辅助教学。和本教材配套的学习指导书也即将出版发行。

编者对梁昌洪教授、杨德顺教授、傅德明教授在修编该教材中给予的指导和帮助表示诚挚的感谢,同时对郑会利教授、李青凤高工、田小林老师和李军、苟永刚、邢蕊娜、张鹏等学生在修编该教材和制作多媒体教学课件中给予的帮助表示诚挚的感谢。

本书由梁昌洪教授审阅,并提出了许多宝贵的意见和建议,在此,编者表示衷心的感谢。

尽管书中已发现的不足之处及印刷上的错误已做了修正,但金无足赤,若今后再有发现,望能及时告诉我们,以便及时改正。

编 者  
2006 年 8 月

# 第一版前言

本书是高等工科大学电子信息与通信工程专业的专业基础教材,是西安电子科技大学国家电工电子教学基地规划教材之一。

为了面向未来,宽口径培养人才,传统的专业理论课程都面临大幅度压缩课时,而新技术、新知识类课程又不断涌现的情况。随着信息时代的到来,作为信息主要载体的高频电磁波——微波,不仅在卫星通信、计算机通信、移动通信等新兴学科领域得到了广泛的应用,而且深入到了各行各业,甚至在人们的日常生活中也扮演着重要的角色。因此对于电子信息与通信工程专业的学生来说,电磁场、微波技术与天线类课程在目前及在今后都是不可缺少的。但由于学生在校学习的时间有限,不可能像过去那样设置多门大课时课程,所以如何在有限的时间内系统地让学生学习电磁场、微波电路的基本知识,以适应培养从事电子工程系统研究专业人才知识结构的需要,为今后从事这方面工作提供一个“接口”,就是这几年我们进行的主要教改工作。

我们根据电子信息与通信工程专业的特点,对《微波技术与天线》课程的内容在尊重知识构成的基本内在规律的基础上做了调整,对课时进行了压缩。微波技术部分将传统“场”与“路”两条线分析法调整为重点突出“路”的分析法,无源元件也以常用平面电路元件为主,并通过课内加开实验的方法,让学生对微波系统有一定的感性认识。天线部分重点放在天线的性能指标与各种实用天线的结构特点介绍上。经过几年的教学实践,我们编写了这本教材,已使用多年。感谢电子工业出版社的帮助,使该教材得以正式出版。

本教材全书共4章,第1章至第3章为微波技术部分,主要内容有传输线理论与微波传输线、微波网络理论、微波元件等,由西安电子科技大学的王新稳编写。第4章天线部分,由武警工程学院的李萍编写。在编写过程中得到杨德顺教授、王家礼教授、孙肖子教授、褚庆昕教授、朱满座系主任、李林子老师及武警工程学院李绍义教授、苑炳福政委、李逢彦副教授的关心、指导和帮助,李延平给出了第4章的部分习题答案,周晓辉、郭航利、梁浩、周非、袁涛(武警工程学院研究生)为本书打印了部分手稿、绘制了部分图稿、制作了本书的多媒体课件,编者所在的院、室对本书的编写工作也给予了大力的支持和帮助,编者在此表示诚挚的感谢。

本书由梁昌洪教授审阅,并提出了许多宝贵的意见和建议,在此,编者表示衷心的感谢。

由于编者的水平有限,尽管抱着良好的愿望,并做出了不懈的努力,但书中缺点错误在所难免,殷切希望得到使用本书的教师、同学和广大读者的批评指正。

编者  
2002年10月

# 目 录

绪论	(1)
0.1 微波及其特点	(1)
0.2 研究对象及应用	(2)
0.3 微波的发展简史回顾	(3)
第1章 传输线理论	(4)
1.1 长线理论	(5)
1.1.1 分布参数电路的模型	(5)
1.1.2 长线方程及其解	(7)
1.1.3 传输线的输入阻抗与反射系数	(13)
1.1.4 均匀无耗长线的工作状态	(16)
1.1.5 圆图	(30)
1.1.6 长线的阻抗匹配	(39)
1.2 波导与同轴线	(42)
1.2.1 理想导波系统的一般分析	(43)
1.2.2 波导传输线	(50)
1.2.3 同轴线	(62)
1.3 平面传输线	(66)
1.3.1 带状线	(66)
1.3.2 微带线	(70)
1.3.3 耦合带状线与耦合微带线	(73)
1.3.4 其他形式平面传输线	(81)
习题一	(84)
第2章 微波网络	(90)
2.1 网络的基本概念	(90)
2.2 微波元件等效为网络	(92)
2.2.1 微波传输线等效为双线	(92)
2.2.2 不均匀区域等效为网络	(95)
2.3 双端口微波网络的 $Z$ 、 $Y$ 、 $A$ 参数及其归一化参数	(98)
2.3.1 阻抗参数与导纳参数	(98)
2.3.2 转移参数 $A$	(100)
2.4 散射矩阵(Scattering Matrix)	(105)
2.4.1 $S$ 参数的定义	(106)
2.4.2 $S$ 参数的性质	(107)
2.4.3 $S$ 矩阵与 $\bar{Z}$ 矩阵、 $\bar{Y}$ 矩阵之间的变换关系	(109)
2.4.4 双端口网络 $S$ 参数的讨论	(109)
2.5 双端口网络的传输散射矩阵	(114)
2.6 双端口网络的功率增益与工作特性参数	(115)

2.6.1	双端口网络的功率增益	(115)
2.6.2	双端口网络的工作特性参数	(117)
* 2.7	简单不均匀性的等效电路分析	(120)
2.7.1	矩形波导的不连续性	(120)
2.7.2	同轴线的不连续性	(127)
2.7.3	微带线的不连续性	(130)
习题二		(132)
<b>第3章</b>	<b>微波元件</b>	(135)
3.1	阻抗匹配与变换元件	(135)
3.1.1	阻抗匹配与变换元件	(135)
3.1.2	抗流连接和转接器	(147)
3.2	定向耦合元件	(149)
3.2.1	定向耦合器的基本概念	(149)
3.2.2	平行耦合线定向耦合器	(153)
3.2.3	分支定向耦合器和混合环	(158)
3.2.4	微带功分器	(164)
3.2.5	波导匹配双T	(167)
3.3	微波谐振器	(172)
3.3.1	微波谐振器的一般概念	(172)
3.3.2	传输线型谐振器的等效电路	(175)
3.3.3	几种实用的微波谐振器(腔)	(179)
3.3.4	谐振器的实际等效电路及激励与耦合	(185)
3.4	微波滤波器与微波铁氧体元件简介	(186)
3.4.1	微波滤波器	(186)
3.4.2	微波铁氧体元件简介	(196)
习题三		(198)
<b>第4章</b>	<b>天线基本理论</b>	(203)
4.1	天线基本概念	(203)
4.2	电基本振子(电流元)的辐射场	(205)
4.2.1	电基本振子的辐射场公式	(205)
4.2.2	电基本振子的辐射功率和辐射电阻	(208)
4.3	小电流环(磁流元)的辐射场	(210)
4.3.1	小电流环(磁流元)的辐射场	(210)
4.3.2	缝隙元的辐射场	(211)
4.4	对称振子的辐射场	(212)
4.4.1	对称振子的电流分布	(213)
4.4.2	对称振子的辐射场和方向性	(213)
4.4.3	对称振子的辐射功率与辐射阻抗	(216)
4.5	发射天线的电参数	(217)
4.5.1	天线的方向性及方向性参数	(217)

4.5.2	天线效率与增益系数	(221)
4.5.3	天线的极化特性	(223)
4.5.4	天线的工作频带宽度	(224)
4.5.5	天线的有效长度	(224)
4.5.6	天线的输入阻抗	(225)
4.6	接收天线理论	(229)
4.6.1	天线接收无线电波的物理过程	(229)
4.6.2	用互易原理法分析接收天线	(230)
4.6.3	接收天线的等效电路和有效接收面积	(232)
4.6.4	接收天线的电参数	(234)
4.6.5	接收天线的方向性与干扰	(235)
4.6.6	对接收天线方向性的要求	(236)
4.7	天线阵的方向性、均匀直线阵	(236)
4.7.1	直线阵的辐射场和方向性	(237)
4.7.2	均匀直线阵的辐射场和方向性	(238)
4.7.3	几种常见均匀直线阵	(241)
4.7.4	均匀直线阵栅瓣和间距选择	(244)
4.8	二元天线阵、理想地面对天线的影	(246)
4.8.1	二元天线阵和方向性	(246)
4.8.2	理想地面对天线方向性的影响	(249)
4.9	天线阵的阻抗	(254)
4.10	面天线基本理论简介	(259)
4.10.1	惠更斯—菲涅尔原理与惠更斯元	(260)
4.10.2	面天线的辐射场与辐射积分	(262)
4.10.3	面天线的方向系数和口径效率	(264)
4.10.4	口面场均匀分布的辐射场	(265)
4.10.5	常用面天线简介	(267)
4.11	移动通信中的基站天线简介	(269)
4.11.1	富兰克林天线	(270)
4.11.2	多段同轴振子天线	(270)
4.11.3	直立共线阵	(272)
	习题四	(273)
	附录	(279)
	附录 A 波导参数表	(279)
	附录 B 同轴线参数表	(281)
	部分习题答案	(282)
	参考文献	(285)



# 绪 论

微波技术是近代科学研究的重大成就之一。几十年来,它已发展成为一门比较成熟的学科,在雷达、通信、导航、电子对抗等许多领域得到了广泛的应用。尤其是雷达,正是微波技术的典型应用。可以说没有微波技术的发展,具体地说是没有微波有源器件的发展,就不可能有现代雷达。两者休戚相关,互相促进。因此,微波技术目前已成为无线电电子工程专业的专业基础课之一。在绪论中我们首先讨论微波及其特点、微波的应用与发展。

## 0.1 微波及其特点

目前把波长为  $1\text{m}\sim 0.1\text{mm}$  的电磁波称为微波。其对应的频率在  $300\text{MHz}\sim 3000\text{GHz}$ , 此波段就称为微波波段,由此可见微波是指波长很短的波,是可以顾名思义的。这一点从 Microwave 一词中就可以看出。但从频率上来看,则恰好相反,频率非常地高,对应数值也很大。因此在微波理论研究的早期,称其为超高频技术。

在实际应用中,为了方便起见,常把微波波段简单地分为:分米波段(B. dm)(频率从  $300\sim 3000\text{MHz}$ )、厘米波段(B. cm)(频率从  $3\sim 30\text{GHz}$ )、毫米波段(B. mm)(频率从  $30\sim 300\text{GHz}$ )及亚毫米波段(频率从  $300\sim 3000\text{GHz}$ )。

在雷达、通信及常规微波技术中,常用英文字母来表示更为详细的微波分波段,如表 0-1 所示。表 0-2 给出了家用电器的频段。

表 0-1 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 0-2 家用电器的频段

名 称	频 率 范 围
调幅无线电	535~1605kHz
短波无线电	3~30MHz
调频无线电	88~108MHz
商用电视	
1~3 频道	48.5~72.5MHz
4~5 频道	76~92MHz
6~12 频道	167~223MHz
13~24 频道	470~566MHz
25~68 频道	606~968MHz
微波炉	2.45GHz

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

微波波段的波长与无线电设备的线长度及地球上的一般物体(如飞机、舰船、火箭、导弹、

建筑物等)的尺寸相当或小得多,这样当微波照射到这些物体上时,将产生显著的反、折射,就和光线的反、折射一样。同时微波传播的特性也和几何光学相似,能像光线一样地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反射回来的微弱信号,从而确定该物体的方位与距离,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喇叭、箫和笛;微波谐振腔类似于声学共鸣箱等。

### (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的一些现象和效应(例如趋肤效应、辐射效应、相位滞后现象等)在微波波段则不可忽略。这样低频电路中常用的集总参数元件电阻、电感、电容已不适用,电压、电流在微波波段甚至失去了惟一性意义。因此用它们已无法对微波传输系统进行完全的描述,而要求建立一套新的能够描述这些现象及效应的理论分析方法——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,这些装置起着与它们相似的作用。

### (3)共度性

电子在真空管内的渡越时间( $10^{-9}$ s左右)与微波的振荡周期( $10^{-9}\sim 10^{-13}$ s)相当的这一特点称为共度性,该特性是给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

微波照射于介质物体时,能深入该物质内部的特点称为穿透性,例如微波是射频波谱中惟一能穿透电离层的电磁波(光波除外),因而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末端制导的重要手段。

### (5)信息性

微波波段可载的信息容量是非常巨大的,即使是很小的相对带宽,其可用的频带也是很宽的,可达数百甚至上千兆赫。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。此外,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。

### (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其分子的化学键,所以微波和物体之间的作用是非电离的。而由物理学可知,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,因此微波为探索物质的内部结构和其基本特性提供了有效的研究手段。此外,利用这一特性和原理可研制出许多适用于微波波段的器件。

## 0.2 研究对象及应用

微波技术研究的是微波信号的产生、放大、传输、接收、控制、测量、使用的方法。

微波的应用范围很广,最典型的应用就是雷达与通信。在二次大战期间,由于迫切需要能够对敌机及舰船进行探测定位的高分辨率雷达,而微波的似光性正好可以满足这一要求,因而大大促进了微波技术的发展。在那时,雷达工程就是微波工程的同义语。甚至在今天,各种类型的雷达,例如导弹跟踪雷达、炮火瞄准雷达、气象探测雷达和机场管制雷达等,仍然代表着微波频率的典型应用。微波波段的巨大的信息量使得其被广泛地应用于各种通信业务中,例如微波多路通信、微波中继通信、散射通信、移动通信和卫星通信等。

微波的另一方面的应用就是作为能源应用于工农业生产及人们的日常生活中,特别是随着微波炉的日益普及,使得微波产品也进入了寻常百姓的家中,直接为人类造福。

### 0.3 微波的发展简史回顾

微波技术的应用仅在第二次世界大战前几年才开始。尽管在 19 世纪末,人们已经知道了超高频的许多特性,赫兹用火花振荡器得到了微波信号,并对其进行了研究。但赫兹本人并没有想到将这种电磁波用于通信,他的实验仅是证实了麦克斯韦的一个预言——电磁波的存在。他在给朋友的信中甚至否认了将微波用于实际的可能性,因此很长一段时间内对微波没有更深入的研究。

20 世纪初期对微波技术的研究又有了一定的进展,但仅限于实验室研究。此阶段研制出了磁控管、速调管及其他一些新型的微波电子管。这些器件的功率较小,效率也很低。在 1936 年 4 月美国科学家 SouthWorth 用直径为 12.5cm 的青铜管将 9cm 的电磁波传输了 260m 远。这一实验结果激励了当时的研究者,因为它证实了 Maxwell 的另一预言——电磁波可以在空心的金属管中传输,因此在第二次世界大战中微波技术的应用就成了一个热门的课题。

战争的需要,促进了微波技术的发展,而电磁波在波导中传输的成功,又提供了一个有效的能量传输设备。因此,这时微波电真空振荡器及微波器件的发展十分迅速。在 1943 年终于制造出了第一台微波雷达,工作波长为 10cm。这一阶段由于战争的影响,只注重应用,理论问题的探讨远远落后于实际。

战后,可以认为是微波技术发展的第三阶段,这一阶段,不仅系统研究了微波技术的传输理论,而且向着多方应用发展,并且一直在不断地发展完善。其发展的趋势如表 0-3 所示。

表 0-3 微波技术的发展简表

传输线	双线 同轴传输线 波导传输线 带状 微带线 介质波导 鳍线波导 传输线
振荡器	微波电真空器件 微波半导体器件 多管合成器件
电路形式	波导电路 微带电路 混合集成电路 单片集成电路
研究的波段	分米波段 厘米波段 毫米波段 亚毫米波段

# 第 1 章 传输线理论

凡是用以引导电磁波的装置都称为传输线。在微波波段,由于频率甚高,频率范围极宽,应用目的各异,因此微波传输线的种类较多,如图 1-1 所示。此外,还有一些特殊形式及不断问世的新型传输线。对微波传输线的基本要求就是:宽频带、低衰减的单模传输电磁波。微波传输线除用来传输电磁波外,还可用来构成各种结构形式的微波元件。

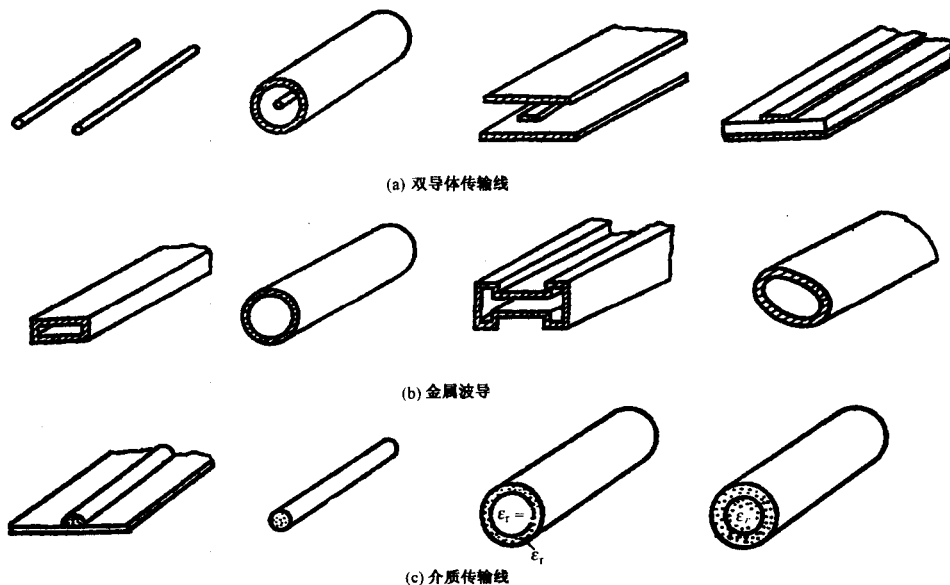


图 1-1 微波传输线的主要形式

从图 1-1 可以看出,微波传输线主要有三种结构类型。第一类是双导体结构的传输线,主要有平行双导线、同轴线、带状线及微带线等。这类传输线上传输的是横电磁波,所以又称其为 TEM 波传输线。第二类是均匀填充介质的波导管,主要有矩形波导、圆波导、脊波导及椭圆波导等。这类传输线上传输的是横电(TE)波或横磁(TM)波,都是色散波,所以又称其为色散波传输线。第三类是介质波导,有镜像线、介质线等。这类传输线上传输的是 TE 和 TM 波的混合波,并且沿线的表面传输,所以称其为表面波传输线,它也是色散波传输线。所以从传输的电磁波类型上来分,微波传输线可以简单地分为两种类型:TEM 波(或非色散波)传输线与非 TEM 波(或色散波)传输线。

分析电磁波沿传输线的传播特性的方法有两种。一种是“场”的分析方法,即从麦克斯韦方程出发,在特定的边界条件下解电磁场的波动方程,求得各场量的时空变化规律,分析电磁波沿线的各种传播特性,这就是“场”理论的分析方法。电磁场理论中对波导传输线所用的分析方法就是“场”的分析方法,该方法能够对微波系统进行完全的描述,是分析色散波传输系统的根本方法。另一种是“路”的分析方法,将传输线作为分布参数电路处理,用基尔霍夫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,分析其传输特性。TEM 波传输线多用

此方法进行分析。事实上，“场”的理论和“路”的理论是密切相关的，很多方面两者互相补充。有些电磁现象可用“路”的理论处理，有些电磁现象却只能用“场”的理论处理。有时对同一种电磁现象既可用“路”的理论，也可用“场”的理论处理，因此两种理论只是分析同一问题的不同途径。另外，从广义传输线理论的观点来看，广义“路”的理论和“场”的理论是等效的。学完本课之后，对此会有一些的理解。

本章首先讨论一维分布参数电路和传输线理论——长线理论，然后用长线理论分析基本 TEM 波传输线的传输特性，最后介绍一些其他形式的微波传输线。

## 1.1 长线理论

本节从路的观点研究传输线在微波运用下的传输特性，讨论用阻抗圆图进行阻抗计算和阻抗匹配的方法。本节所得到的一些基本概念和公式不仅适用于 TEM 波传输线，而且还可以用于天线和波导传输线中。

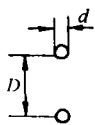
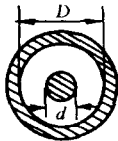
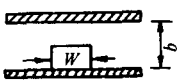
### 1.1.1 分布参数电路的模型

在学习长线理论前，首先应弄清楚 TEM 波传输线的结构特点及为什么 TEM 波传输线可用“路”的理论分析，而非 TEM 波则不行的问题，应弄清楚“长线”、“分布参数”及“分布参数电路”等概念。

#### 1. TEM 波传输线的结构特点

典型的 TEM 波传输线如表 1-1 中的插图所示，其结构上的最大特点就是：都是双导体构成，也正是由于这一结构特点使得其上的电磁波分布有别于非 TEM 波传输线。图 1-2 给出在  $t$  时刻平行双导线和同轴线上的电磁波分布。

表 1-1 几种双导体传输线  $L_1$ 、 $C_1$  的计算公式

种类	双导线	同轴线	薄带状线
			
$L_1$	$\frac{\mu}{\pi} \ln \frac{2D}{d}$	$\frac{\mu}{2\pi} \ln \frac{D}{d}$	$\frac{\pi\mu}{8 \operatorname{arch} \exp \frac{\pi W}{2s}}$
$C_1$	$\frac{\pi\epsilon}{\ln \frac{2D}{d}}$	$\frac{2\pi\epsilon}{\ln \frac{D}{d}}$	$\frac{8\epsilon}{\pi} \operatorname{arch} \exp \frac{\pi W}{2s}$

从电磁波的形状上我们可以看出：平行双导线和同轴线所传输的电磁波与在自由空间传播的均匀平面波的共同特点是：电场靠磁场支持，磁场靠电场维系，彼此互为存在的前题；不同点是：在 TEM 波传输线里， $t$  时刻的电场力线还可以看成是从一个导体的正电荷发出落到另一个导体的负电荷上，它们是靠正、负电荷支持的，不是封闭的力线。围绕导体的一圈圈的

封闭磁力线,还可以看成是由导体上的电流激发的,并且在任一时刻电磁场分量都是同相的,与传输方向正交。其横向场随空间横向变化与静态场完全一样,这样电场可由单值的电压确定,磁场可由单值电流维系,因此 TEM 波传输线是唯一可以用分布参数的“路”的理论描述的。

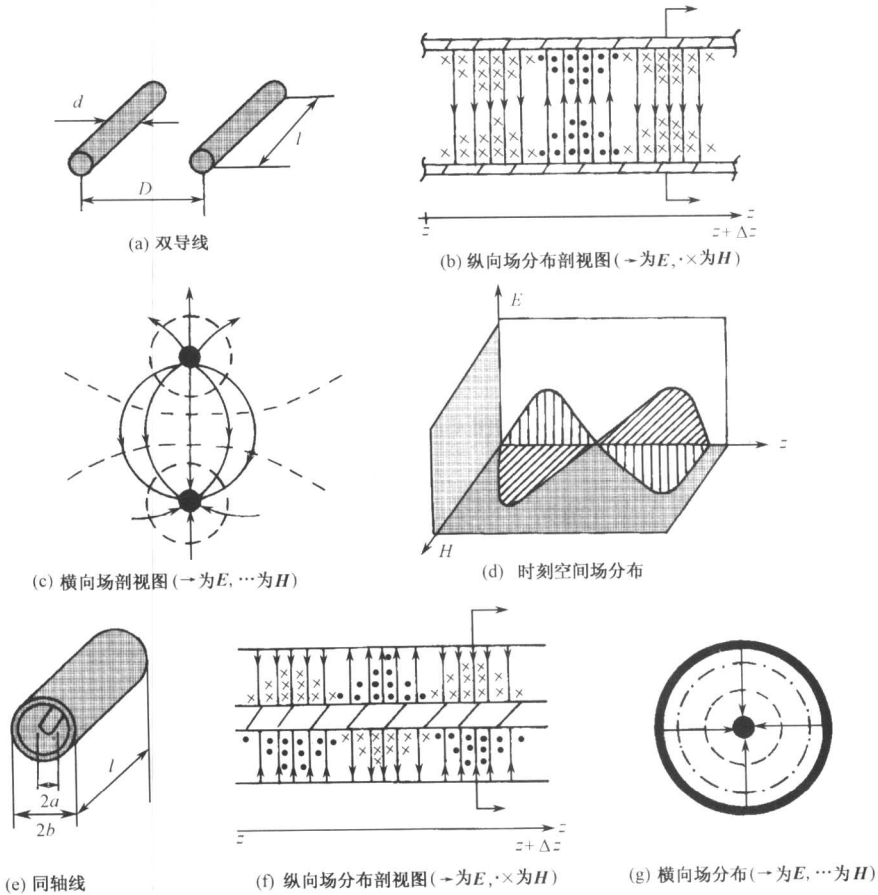


图 1-2 双导线和同轴线的电磁场分布

## 2. 长线的概念

通常人们把 TEM 波传输线称为长线,这是由于微波的波长很短,而传输线的长度往往比波长长许多或与波长相当的缘故。例如在电力工程中,对于频率为 50Hz、波长为 6000km 的交流电,1000m 的输电线仍远远小于波长,故视为短线;而对于 1000MHz 的电磁波,其波长为 30cm,1m 长的传输线远大于波长,故为长线,所以长线是相对波长而言的。凡是线长度比波长长或与波长相当的传输线就称为长线。在长线理论中为了分析计算方便引入了一个相对长度量——电长度,即定义传输线的长度与所传输的电磁波波长之比为电长度,用  $\bar{l} = l/\lambda$  表示,其中  $\lambda$  为波长, $l$  为传输线的长度。

## 3. 分布参数电路的模型

分布参数是相对集总参数而言的。在低频电路中,电阻、电感、电容和电导都是以集总参

数的形式出现的,连接元件的导线都是理想的短路线,可以任意延伸或压缩。在微波波段,由导体构成的传输线往往比波长长或与波长相当,当电磁波沿长线传播时,低频时忽略的各种现象与效应,此时都通过沿导体线的损耗电阻、电感、电容和漏电流表现出来,导致沿线的电压、电流随时间和空间位置变化。这些参数虽然看不见,但其对传输的电磁波的影响分布在传输线上的每一点,故称其为分布参数,并且用  $R_1$ 、 $L_1$ 、 $C_1$  和  $G_1$  表示,分别称其为传输线单位长度的分布电阻、分布电感、分布电容和分布电导。

如果长线的分布参数是沿线均匀分布的,不随位置而变化,则称其为均匀长线或均匀传输线。本节内容只限于分析均匀长线,表 1-1 给出了几种典型的双导体传输线的分布参数的计算公式。

对于连接源和负载的 TEM 波传输线,可用图 1-3(a)所示的电路表示。有了分布参数的概念之后,就可将均匀长线划分为许多无限小的线段  $\Delta z$  ( $\Delta z \ll \lambda$ ),则每一个小线元可看成集总参数电路,其上有电阻  $R_1 \Delta z$ 、电感  $L_1 \Delta z$ 、电容  $C_1 \Delta z$  和漏电导  $G_1 \Delta z$ ,于是得到其等效电路如图 1-3(b)所示。此即为传输线的电路模型:线元等效为集总元件构成的  $\Gamma$  型网络,实际的传输线则表示成各线元等效网络的级联,如图 1-3(c)、(d)所示。

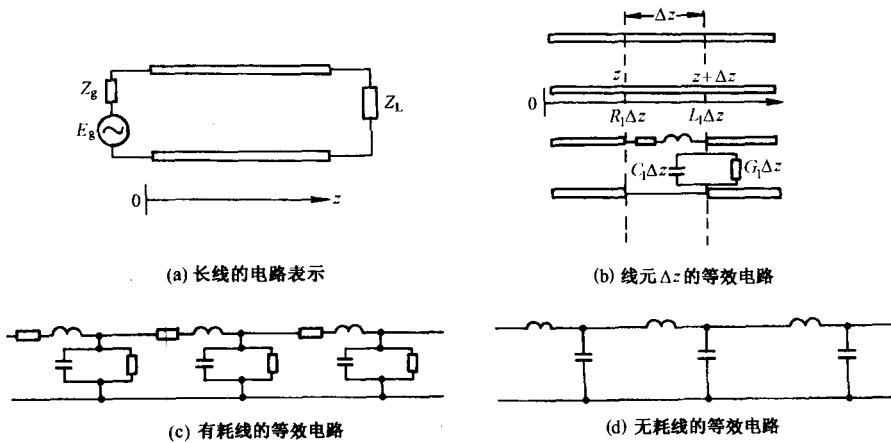


图 1-3 传输线的电路模型

## 1.1.2 长线方程及其解

### 1. 传输线方程

当把传输线用图 1-4 所示的电路等效后,则根据基尔霍夫电压、电流定律,线元  $\Delta z$  段上电压、电流的变化为

$$u(z, t) - u(z + \Delta z, t) = R_1 \Delta z i(z, t) + L_1 \Delta z \frac{\partial i(z, t)}{\partial t}$$

$$i(z, t) - i(z + \Delta z, t) = G_1 \Delta z u(z + \Delta z, t) + C_1 \Delta z \frac{\partial u(z + \Delta z, t)}{\partial t}$$

对上两式两边同除  $\Delta z$ , 并取  $\Delta z \rightarrow 0$  的极限有

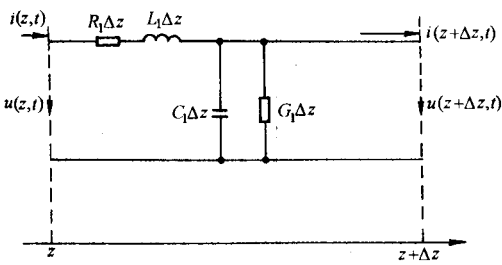


图 1-4 线元  $\Delta z$  段的等效电路

$$\left. \begin{aligned} -\frac{\partial u(z,t)}{\partial z} &= R_1 i(z,t) + L_1 \frac{\partial i(z,t)}{\partial t} \\ -\frac{\partial i(z,t)}{\partial z} &= G_1 u(z,t) + C_1 \frac{\partial u(z,t)}{\partial t} \end{aligned} \right\} (1-1)$$

此即一般传输线方程,也叫电报方程。

对于角频率为  $\omega$  的信号源,电压、电流的瞬时值  $u, i$  与复振幅  $U, I$  的关系为

$$\begin{aligned} u(z,t) &= \text{Re}[U(z)e^{j\omega t}] \\ i(z,t) &= \text{Re}[I(z)e^{j\omega t}] \end{aligned}$$

代入式(1-1)可得时谐传输线方程

$$\left. \begin{aligned} \frac{dU(z)}{dz} &= -Z_1 I(z) \\ \frac{dI(z)}{dz} &= -Y_1 U(z) \end{aligned} \right\} (1-2)$$

式中,  $Z_1 = R_1 + j\omega L_1, Y_1 = G_1 + j\omega C_1$  分别称为传输线单位长度的串联阻抗和并联导纳。

## 2. 均匀传输线方程的通解

如果长线的分布参数沿线均匀分布,不随位置变化,则称其为均匀传输线。对于均匀传输线,为求解式(1-2),两边对  $z$  再求一次微分得

$$\begin{aligned} \frac{d^2 U(z)}{dz^2} &= -Z_1 \frac{dI(z)}{dz} \\ \frac{d^2 I(z)}{dz^2} &= -Y_1 \frac{dU(z)}{dz} \end{aligned}$$

将式(1-2)代入上两式,并令  $\gamma^2 = Z_1 Y_1 = (R_1 + j\omega L_1)(G_1 + j\omega C_1)$  得到均匀长线电压和电流的波动方程为

$$\left. \begin{aligned} \frac{d^2 U(z)}{dz^2} - \gamma^2 U(z) &= 0 \\ \frac{d^2 I(z)}{dz^2} - \gamma^2 I(z) &= 0 \end{aligned} \right\} (1-3)$$

该式的通解为

$$\begin{aligned} U(z) &= A_1 e^{-\gamma z} + A_2 e^{\gamma z} \\ I(z) &= B_1 e^{-\gamma z} + B_2 e^{\gamma z} \end{aligned}$$

由式(1-2)的第一式可得

$$I(z) = -\frac{1}{Z_1} \frac{dU(z)}{dz} = \frac{\gamma}{Z_1} (A_1 e^{-\gamma z} - A_2 e^{\gamma z}) = \frac{1}{Z_0} (A_1 e^{-\gamma z} - A_2 e^{\gamma z})$$

所以式(1-3)的通解可简化为

$$\left. \begin{aligned} U(z) &= A_1 e^{-\gamma z} + A_2 e^{\gamma z} \\ I(z) &= \frac{1}{Z_0} (A_1 e^{-\gamma z} - A_2 e^{\gamma z}) \end{aligned} \right\} (1-4)$$

式中

$$\begin{aligned} Z_0 &= \frac{Z_1}{\gamma} = \sqrt{\frac{Z_1}{Y_1}} = \sqrt{\frac{R_1 + j\omega L_1}{G_1 + j\omega C_1}} \\ \gamma &= \sqrt{Z_1 Y_1} = \sqrt{(R_1 + j\omega L_1)(G_1 + j\omega C_1)} = \alpha + j\beta \end{aligned}$$



对于有耗长线  $Z_0$  和  $\gamma$  都是复数,其中  $Z_0$  具有阻抗量纲,称其为传输线的特性阻抗, $\gamma$  称为长线的传播常数,其实部称为衰减常数,虚部称为相移常数。

把  $\gamma = \alpha + j\beta$  代入式(1-4)中的指数项中,有

$$e^{-\gamma z} = e^{-\alpha z} \cdot e^{-j\beta z} \quad \text{及} \quad e^{\gamma z} = e^{\alpha z} \cdot e^{j\beta z}$$

对比电磁波在自由空间传播的情形可知: $e^{-j\beta z}$  项为离开源向负载方向传输的电压、电流波,称为入射波,用下标  $i$ (incidental wave)表示;而  $e^{j\beta z}$  项为离开负载端向电源方向传输的电压、电流波,称为反射波,用下标  $r$ (reflected wave)表示。可见,传输线上的电压与电流是以波的形式出现的。根据复振幅与瞬时值的关系,将通解表示成瞬时值的形式有

$$\left. \begin{aligned} u(z,t) &= \text{Re}[U(z)e^{j\omega t}] \\ &= |A_1| e^{-\alpha z} \cos(\omega t - \beta z + \varphi_1) + |A_2| e^{\alpha z} \cos(\omega t + \beta z + \varphi_2) \\ &= u_i(z,t) + u_r(z,t) \\ i(z,t) &= \text{Re}[I(z)e^{j\omega t}] \\ &= \left| \frac{A_1}{Z_0} \right| e^{-\alpha z} \cos(\omega t - \beta z + \varphi'_1) - \left| \frac{A_2}{Z_0} \right| e^{\alpha z} \cos(\omega t + \beta z + \varphi'_2) \\ &= i_i(z,t) + i_r(z,t) \end{aligned} \right\} \quad (1-5)$$

式(1-5)表明:传输线上任意位置的电压与电流都是入射波与反射波的叠加。当  $Z_0$  为实数时,电压入射波与电流入射波相位相同,电压反射波与电流反射波相位相反,沿线入射波与反射波的瞬时分布如图 1-5 所示。

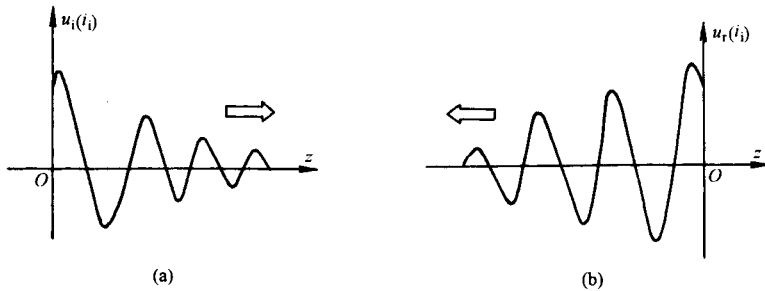


图 1-5 长线上的人射波与反射波分布

### 3. 均匀传输线方程的定解

式(1-4)中的积分常数  $A_1$ 、 $A_2$  可由传输线的端接条件确定,如图 1-6 所示。下面分别讨论长线始端或终端电压、电流已知时,传输线方程的定解。

#### (1) 已知始端条件的解

设已知  $z=0$  时,  $U(0) = U_1$ ,  $I(0) = I_1$ , 代入式(1-4)解得

$$A_1 = \frac{U_1 + I_1 Z_0}{2} \quad A_2 = \frac{U_1 - I_1 Z_0}{2}$$

将  $A_1$  和  $A_2$  代回式(1-4),整理后得到

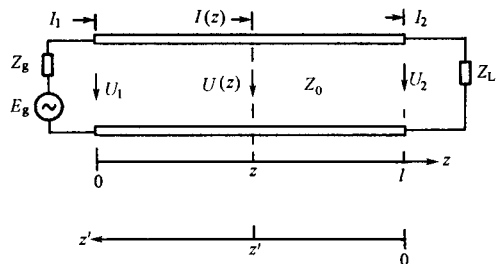


图 1-6 传输线的端接条件