

21

高等学校信息工程类“十二五”规划教材

江苏省精品教材

微波技术与天线

(第四版)

刘学观 郭辉萍 编著

WEIBOJISHU
YUTIANXIANY



扫一扫
看动画



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

高等学校信息工程类“十二五”规划教材
江苏省精品教材

微波技术与天线

(第四版)

刘学观 郭辉萍 编著

西安电子科技大学出版社

内 容 简 介

本书系统地论述了微波技术与天线的基本原理、基本技术及其典型的应用系统。在编写中尽量深入浅出,对当前技术热点,诸如无线传感与射频识别、光纤技术、智能天线、低温共烧陶瓷(LTCC)、芯片集成波导(SIW)等新技术进行了讨论。另外,本书较多地将理论与工程结合起来,强调工程设计及工程应用。

全书共分 10 章:均匀传输线理论、规则金属波导、微波集成传输线、微波网络基础、微波元器件、天线辐射与接收的基本理论、电波传播概论、线天线、面天线及微波应用系统。每章都附有本章小结和习题。

本书可作为电子信息类各专业本科生的教材,也可作为电子工程与通信工程技术人员或相关专业的技术人员进行继续教育的参考书。

教材中所有章节的电子课件和“旋转场”等 19 个精彩动画,可通过扫描相应位置的二维码获取,对读者学习掌握教材内容有极大的帮助。

图书在版编目(CIP)数据

微波技术与天线/刘学观,郭辉萍编著. —4 版.

—西安:西安电子科技大学出版社,2016.8

高等学校信息工程类“十二五”规划教材

ISBN 978 - 7 - 5606 - 4177 - 5

I. ① 微… II. ① 刘… ② 郭… III. ① 微波技术—高等学校—教材

② 微波天线—高等学校—教材

IV. ① TN015 ② TN822

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 189144 号

策 划 马乐惠

责任编辑 马乐惠 马 琼

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路 2 号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfxb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西天意印务有限责任公司

版 次 2016 年 8 月第 4 版 2016 年 8 月第 21 次印刷

开 本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印张 17

字 数 399 千字

印 数 121 001~127 000 册

定 价 36.00 元

ISBN 978 - 7 - 5606 - 4177 - 5/TN

XDUP 4469004—21

* * * 如有印装问题可调换 * * *

本社图书封面为激光防伪覆膜,谨防盗版。

前 言

本书第一版自 2001 年 11 月出版至今已超过十五年,连续印刷了 20 次,累计销量近 12 万册,全国几十所重点高校将其作为教材使用,东南大学等著名高校还将其作为研究生考试指定参考书。2007 年本书被遴选为江苏省精品教材。为了进一步体现工程教育和射频微波技术的发展趋势,根据许多师生的建议和意见,特做第三次修订。

以“工业 4.0”及“互联网+”为特征的新一代工业技术的发展,使射频及无线应用领域不断拓展,相应地微波与天线领域也出现了一些新趋势,因此本次修订在保持前三版特色的基础上,强调工程实际应用,为培养卓越射频工程师提供有力支撑。

本次修订中,除增加相关内容之外,突出工程应用,同时对部分表述略作修改以使阅读更加流畅。同步出版的课件和学习指导书为老师节约课堂时间、把握重点以及学生学习提供了方便。

本书计划学时数为 72 学时,全书共分 10 章,包括微波技术、天线与电波传播和微波应用系统三个部分,每章都有本章小结和习题。第 1~5 章为微波技术部分,主要讨论了均匀传输线理论、规则金属波导、微波集成传输线、微波网络基础和微波元器件,其中在微波集成传输线部分主要讨论了带状线、微带线、耦合微带线、共面波导及介质波导的传输特性,并对光纤传输原理及特性做了介绍;在“微波元器件”一章中从工程应用的角度出发,重点介绍了具有代表性的几组微波无源元器件,主要包括连接匹配元件、功率分配与合成器件、微波谐振器件和微波铁氧体器件,还介绍了 LTCC 器件。第 6~9 章为天线与电波传播部分,主要叙述了天线辐射与接收的基本理论、电波传播概论、线天线及面天线,其中在线天线部分侧重介绍了在工程中常用的鞭天线、电视天线、移动通信基站天线、行波天线、宽频带天线、微带天线等,还对智能天线技术做了简要介绍。微波应用系统安排在第 10 章,主要讨论了雷达系统、微波通信系统、微波遥感系统及无线传感与射频识别系统等四个典型系统。上述三部分既有联系又有相对灵活性,使用本书作教材时可根据不同的教学要求进行取舍。同时书中将专业词汇加注英文以满足工程需求。

本书由刘学观和郭辉萍合编,刘学观编写了绪论、第 1~5 章及第 10 章,郭辉萍编写了第 6~9 章,曹洪龙同志参与了配套多媒体课件的设计与制作,周朝栋教授审阅了全书,责任编辑马乐惠对本书提出了许多宝贵的意见,在此表示诚挚的谢意。本书在成稿过程中得到了苏州大学电子信息学院领导和同事、苏州大学-禾邦电子无线辐射测试中心、苏州大学-兵器 214 所微波毫米波联合实验室有关同行的支持,高等学校电磁场教学与教材研究会的许多同志提出了一些具有建设性的意见,研究生田龙、胡晗之、张琪等同学提供了

很多帮助，在此一并表示感谢。同时作者对西安电子科技大学出版社的大力支持表示诚挚的感谢。

由于作者水平有限，书中难免还存在一些缺点和错误，敬请广大读者批评指正。

E-mail: txdzlxg@suda.edu.cn

刘学观 郭辉萍

2016年4月

第一版前言

针对目前全国各高校课程体系改革,电磁场微波技术系列课程的内容调整较大,一方面课时压缩,另一方面如天线、无线电波传播等课程已不再单独开设,但按照专业要求,学生对相关知识应有一定的掌握,本书就是针对这一要求编写的。

本书在保持理论体系的完整和严谨的同时,尽量简化繁杂的推导,以使读者易于接受。其次,为了拓宽学生知识面以适应宽口径培养的需要,结合当前技术热点,书中适当讨论了光纤技术、智能天线技术等方面的内容,以实现微波与光、天线与数字信号处理等技术的相互渗透,完成学科结合。另外,为了使读者在熟悉理论的基础上建立一个系统平台的概念,书中安排了微波应用系统一章。另外,鉴于 MATLAB 是研究和解决工程问题的有力工具,它在微波、天线的分析与设计中应用日趋广泛,本书中的许多图表曲线都是作者用该软件绘制的。

本书可作为高等学校信息与通信系统学科本科有关各专业学生的教材,也可作为相关学科及有关专业技术人员的参考书。

本教材计划学时数为 72 学时,全书共分为 10 章,包括微波技术、天线与电波传播和微波应用系统三个部分。第 1~5 章为微波技术部分,主要讨论了均匀传输线理论、规则金属波导、微波集成传输线、微波网络基础和微波元器件,其中在微波集成传输线部分主要讨论了带状线、微带线、耦合微带线及介质波导的传输特性,并对光纤的传输原理及特性做了介绍;在“微波元器件”一章中,从工程应用的角度出发,重点介绍了具有代表性的几组微波无源元器件,主要包括连接匹配元件、功率分配元器件、微波谐振元件和微波铁氧体器件。第 6~9 章为天线与电波传播部分,主要叙述了天线辐射与接收的基本理论、电波传播概论、线天线及面天线,其中在线天线部分侧重介绍了在工程中常用的鞭天线、电视天线、移动通信基站天线、行波天线、宽频带天线、微带天线等,还对智能天线技术做了简要介绍。微波应用系统安排在第 10 章,主要讨论了雷达系统、微波通信系统及微波遥感系统三个典型系统。上述三部分既相互联系又相对独立,使用本书作教材时可根据不同的教学要求进行取舍。

本书由刘学观和郭辉萍合编,刘学观编写了绪论、第 1~5 章及第 10 章,郭辉萍编写了第 6~9 章,周朝栋教授审阅了全书,主审和审阅人及责任编辑对本书提出了许多宝贵的意见,在此表示诚挚的感谢。在本书的编写过程中,高等学校电磁场教学与教材研究会的许多同志提出了许多建设性意见,研究生陈东华同学、朱祺同学也提供了很多帮助,在此一并表示感谢。同时作者对西安电子科技大学出版社的大力支持表示感谢。由于作者水平有限,书中难免还存在一些缺点和错误,敬请广大读者批评指正。

刘学观 郭辉萍

2001 年 7 月

目 录

绪论	1
第 1 章 均匀传输线理论	5
1.1 均匀传输线方程及其解	6
1.2 传输线阻抗与状态参量	10
1.3 无耗传输线的状态分析	13
1.4 传输线的传输功率、效率和损耗	19
1.5 阻抗匹配	21
1.6 史密斯圆图及其应用	27
1.7 同轴线及其特性阻抗	32
本章小结	34
习题	35
第 2 章 规则金属波导	38
2.1 导波原理	38
2.2 矩形波导	42
2.3 圆形波导	50
2.4 波导的激励与耦合	55
本章小结	57
习题	57
第 3 章 微波集成传输线	59
3.1 平面型传输线	59
3.2 介质波导	75
3.3 光纤	79
本章小结	84
习题	84
第 4 章 微波网络基础	85
4.1 等效传输线	85
4.2 单口网络	88
4.3 双端口网络的阻抗与转移矩阵	89
4.4 散射矩阵与传输矩阵	94
4.5 多端口网络的散射矩阵	98
4.6 网络参数的测量	100
本章小结	102
习题	102

第 5 章 微波元器件	104
5.1 连接匹配元件	104
5.2 功率分配与合成器件	112
5.3 微波谐振器件	122
5.4 微波铁氧体器件	127
5.5 低温共烧陶瓷(LTCC)器件	132
本章小结	132
习题	133
第 6 章 天线辐射与接收的基本理论	135
6.1 概论	135
6.2 基本振子的辐射	136
6.3 天线的电参数	139
6.4 接收天线理论	148
本章小结	151
习题	151
第 7 章 电波传播概论	152
7.1 电波传播的基本概念	152
7.2 视距传播	155
7.3 天波传播	158
7.4 地面波传播	161
7.5 不均匀媒质的散射传播	162
7.6 室内电波传播	163
本章小结	164
习题	164
第 8 章 线天线	165
8.1 对称振子天线	165
8.2 阵列天线	171
8.3 直立振子天线与水平振子天线	181
8.4 引向天线与电视天线	189
8.5 移动通信基站天线	198
8.6 螺旋天线	200
8.7 行波天线	203
8.8 宽频带天线	205
8.9 缝隙天线	208
8.10 微带天线	210
8.11 智能天线	212
本章小结	215
习题	215

第 9 章 面天线	217
9.1 惠更斯元的辐射	217
9.2 平面口径的辐射	219
9.3 旋转抛物面天线	226
9.4 卡塞格伦天线	233
本章小结	235
习题	235
第 10 章 微波应用系统	237
10.1 雷达系统	237
10.2 微波通信系统	240
10.3 微波遥感系统	242
10.4 无线传感与射频识别系统	245
本章小结	248
习题	248
附录	249
附录一 标准矩形波导参数和型号对照	249
附录二 史密斯圆图	250
附录三 [S]参数的多点测量法	251
附录四 微波 EDA 电磁仿真软件简介	253
习题参考答案	256
参考文献	261

结 论



1. 微波及其特点

微波(Microwave)是电磁波谱中介于超短波与红外线之间的波段,它属于无线电波中波长最短(即频率最高)的波段,其频率范围从 300 MHz(波长 1 m)至 3000 GHz(波长 0.1 mm)。通常又将微波波段划分为分米波、厘米波、毫米波和亚毫米波四个分波段,在通信和雷达工程上还使用拉丁字母来表示微波更细的分波段。图 1 给出了微波在电磁波谱中的位置,表 1 给出了常用微波波段的划分。

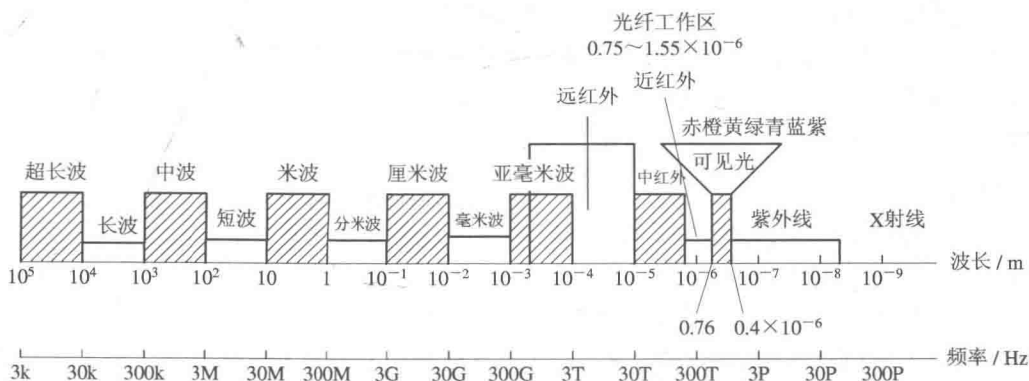


图 1 微波在电磁波谱中的位置

表 1 常用微波波段的划分

波段符号	频率/GHz	波段符号	频率/GHz
UHF	0.3~1.12	Ka	26.5~40.0
L	1.12~1.7	Q	33.0~50.0
LS	1.7~2.6	U	40.0~60.0
S	2.6~3.95	M	50.0~75.0
C	3.95~5.85	E	60.0~90.0
XC	5.85~8.2	F	90.0~140.0
X	8.2~12.4	G	140.0~220.0
Ku	12.4~18.0	R	220.0~325.0
K	18.0~26.5		

对于低于微波频率的无线电波,其波长远大于电系统的实际尺寸,可用集总参数电路的理论进行分析,即为电路分析法;频率高于微波波段的光波、X射线、 γ 射线等,其波长远小于电系统的实际尺寸,甚至与分子、原子的尺寸相比拟,因此可用光学理论进行分析,

即为光学分析法；而微波则由于其波长与电系统的实际尺寸相当，不能用普通电子学中电路的方法研究或用光的方法直接去研究，而必须用场的观点去研究，即由麦克斯韦尔方程组出发，结合边界条件来研究系统内部的结构，这就是场分析法。

正因为微波波长的特殊性，所以它具有以下特点。

1) 似光性

微波具有类似光一样的特性，主要表现在反射性、直线传播性及集束性等几个方面，即：由于微波的波长与地球上的一般物体(如飞机、轮船、汽车等)的尺寸相比要小得多，或在同一量级，因此当微波照射到这些物体上时会产生强烈的反射，基于此特性人们发明了雷达系统；微波如同光一样在空间直线传播，如同光可聚焦成光束一样，微波也可通过天线装置形成定向辐射，从而可以定向传输或接收由空间传来的微弱信号以实现微波通信或探测。

2) 穿透性

微波照射到介质时具有穿透性，主要表现在云、雾、雪等对微波传播的影响较小，这为全天候微波通信和遥感打下了基础，同时微波能穿透生物体的特点也为微波生物医学打下了基础；另一方面，微波具有穿越电离层的透射特性，实验证明：微波波段的几个分波段，如1~10 GHz、20~30 GHz及91 GHz附近受电离层的影响较小，可以较为容易地由地面向外层空间传播，从而成为人类探索外层空间的“无线电窗口”，它为空间通信、卫星通信、卫星遥感和射电天文学的研究提供了难得的无线电通道。

3) 宽频带特性

我们知道，任何通信系统为了传递一定的信息必须占有一定的频带，为传输某信息所需的频带宽度叫做带宽。例如，电话信道的带宽为4 kHz，广播的带宽为16 kHz，而一路电视频道的带宽为8 MHz。显然，要传输的信息越多，所用的频带就越宽。一般一个传输信道的相对带宽(即频带宽度与中心频率之比)不能超过百分之几，所以为了使多路电视、电话能同时在一条线路上传送，就必须使信道中心频率比所要传递的信息总带宽高几十至几百倍。而微波具有较宽的频带特性，其携带信息的能力远远超过中短波及超短波，因此现代多路无线通信几乎都工作在微波波段。随着数字技术的发展，单位频带所能携带的信息更多，这为微波通信提供了更广阔的前景。

4) 热效应特性

当微波电磁能量传送到有耗物体的内部时，就会使物体的分子互相碰撞、摩擦，从而使物体发热，这就是微波的热效应特性。利用微波的热效应特性可以进行微波加热，由于微波加热具有内外同热、效率高、加热速度快等特点，因而被日益广泛应用于粮食、茶叶、卷烟、木材、纸张、皮革、食品等各种行业中。另外，微波对生物体的热效应也是微波生物医学的基础。

5) 散射特性

当电磁波入射到某物体上时，会在除入射波方向外的其它方向上产生散射。散射是入射波和该物体相互作用的结果，所以散射波携带了大量关于散射体的信息。打个比方：早晨，当太阳还没有升起的时候，我们虽然无法直接看到太阳，但当我们看到天空被染成鱼肚白或云被染成红色时，我们就知道太阳在地平线下不远的地方了，这个信息就是通过大气或云对阳光的散射作用而传递给我们的。由于微波具有频域信息、相位信息、极化信

息、时域信息等多种信息,人们通过对不同物体的散射特性的检测,从中提取目标特征信息,从而进行目标识别,这是微波遥感、雷达成像等的基础。另一方面,还可利用大气对流层的散射实现远距离微波散射通信。

6) 抗低频干扰特性

地球周围充斥着各种各样的噪声和干扰,主要归纳为:由宇宙和大气在传输信道上产生的自然噪声,由各种电气设备工作时产生的人为噪声。由于这些噪声一般在中低频区域,与微波波段的频率成分差别较大,它们在微波滤波器的阻隔下,基本不能影响微波通信的正常进行。这就是微波的抗低频干扰特性。

微波除了具有以上一些特性外,还有以下几个特点:

1) 视距传播特性

各波段电磁波的传播特性是不一样的,长波可沿地表传播,短波可利用电离层反射实现天波传播,而超短波和微波只能在视距内沿直线传播,这就是微波的视距传播特性。但由于地球表面的弯曲和障碍物(高山、建筑物等)的阻拦,微波不能直接传播到很远的地方去(一般不超过 50 km),因此在地面上利用微波进行远距离通信时,必须建立中继站,并使站与站之间的距离不超过视距,微波信号就像接力棒一样一站一站地传递下去。这样显然增加了通信的复杂程度。

2) 分布参数的不确定性

在低频情况下,电系统的元器件尺寸远远小于电波的波长,因此稳定状态的电压和电源的效应可以被认为是在整个系统各处同时建立起来的,系统各种不同的元件可用既不随时间、也不随空间变化的参量来表征,这就是集总参数元件。而微波的频率很高,电磁振荡周期极短,与微波电路中从一点到另一点的电效应的传播时间相比是可比拟的,因此就必须用随时间、空间变化的参量,即分布参量来表征。由于分布参量明显的不确定性,增加了微波理论与技术的难度,从而增加了微波设备的成本。另外,随着电子设备主频越来越高,高速电路间的分布效应越来越明显,因此高速电路设计也越来越依赖于微波理论。

3) 电磁兼容与电磁环境污染

随着无线电技术的不断发展,越来越多的无线设备在相同的区域同时工作,势必会引起相互干扰,尤其是在飞行器、舰船上不同通信设备之间的距离极小就会产生相互干扰,另外在十分拥挤的公共场所,众多的移动用户之间的相互影响也是显而易见的,这就必须考虑电磁兼容的问题;另一方面,越来越多的无线信号充斥于人们的生活空间,必然对人体产生影响。因此从某种意义上说,电磁环境污染已成为新的污染源。这方面已引起各国政府和科技界的广泛重视。

2. MATLAB 的特点及在本书中的应用

MATLAB 自 1984 年由美国 Math Works 公司推向市场以来,历经了二十多年的发展与竞争,现已成为国际公认的最优秀的科技应用软件。与 C、C++、FORTRAN、PASCAL 和 BASIC 相比, MATLAB 不但在数学语言的表达与解释方面表现出人机交互的高度一致,而且具有作为优秀高技术计算环境所不可或缺的以下特点:

(1) 强大的数值计算和符号计算能力(且计算结果和编程可视化、数字和文字统一处理、离线和在线计算)。

- (2) 以向量、数组和复数矩阵为计算单元,指令表达与标准教科书的数学表达式相近。
- (3) 高级图形和可视化处理能力。
- (4) 广泛地应用于解决各学科、各专业领域的复杂问题,广泛地应用于自动控制、图像信号处理、生物医学工程、语音处理、雷达工程、信号分析、振动理论、时序分析与建模、优化设计等领域。
- (5) 拥有一个强大的非线性系统仿真工具箱。
- (6) 支持科学和工程计算标准的开放式可扩充结构。
- (7) 跨平台兼容。

由于 MATLAB 具有一般高级语言难以比拟的优点,而且有许多实用工具箱,使它很快成为应用学科计算机辅助分析、设计、仿真、教学乃至科技文字处理不可缺少的基础软件。

微波、天线的分析与设计涉及的数学知识较多,公式冗长,计算繁琐,而且经常还要用到多种特殊函数,因此常常要借助于计算机,这样不仅可以省时、省力,而且还可以做到比较直观。比如在天线的分析中,如果了解天线的辐射电阻,借助 MATLAB,不仅可以计算其辐射电阻,而且还可以画出其辐射特性曲线;如果想知道天线的方向特性,借助 MATLAB,不仅可以计算方向系数,还可以画出主平面方向图及全空间方向图;等等。在天线的优化设计中,由于天线的一些参数(如天线增益与工作带宽、主瓣宽度与旁瓣电平)往往是相互矛盾的, MATLAB 更显示其魅力。

本教材是针对非电磁场专业的学生编写的,所以只注重微波、天线的分析和基本概念的介绍,但 MATLAB 作为一个工具始终贯穿其中。像书中的计算、曲线、图形大多是使用 MATLAB 得到的结果。读者也可通过 MATLAB 的实际编程更好地理解微波、天线的概念。

3. 本课程的体系结构

微波、天线与电波传播是无线电技术的一个重要组成部分,它们三者研究的对象和目的有所不同。微波主要研究如何导引电磁波在微波传输系统中的有效传输,它的特点是希望电磁波按一定要求沿微波传输系统无辐射地传输,对传输系统而言,辐射是一种能量的损耗。天线的任务则是将导行波变换为向空间定向辐射的电磁波,或将在空间传播的电磁波变为微波设备中的导行波,因此天线有两个基本作用:一个是有效地辐射或接收电磁波,另一个是把无线电波能量转换为导行波能量。电波传播则是分析和研究电波在空间的传播方式和特点。微波、天线与电波传播三者的共同基础是电磁场理论,三者都是电磁场在不同边值条件下的应用。

本书力图保持理论体系完整严谨,对微波、天线和电波传播的基本理论进行了讨论,并结合当前的技术热点,尤其在光纤技术、智能天线方面,完成学科结合,实现学科的相互渗透;同时加强系统概念,突出工程应用,使理论与实用系统相结合,以拓宽学生的知识面。另外, MATLAB 是研究和解决工程问题的有力工具,它在微波、天线的分析与设计中应用日趋广泛,因此本教材也尽力体现这一点。此外,微波辅助设计(EDA)软件在工程中应用越来越广泛,附录中对相关软件作了简单介绍。

全书共分为 10 章,包括均匀传输线理论、规则金属波导、微波集成传输线、微波网络基础、微波元器件、天线辐射与接收的基本理论、电波传播概论、线天线、面天线及微波应用系统等。

第 1 章 均匀传输线理论



微波传输线(Transmission Line)是用以传输微波信息和能量的各种形式传输系统的总称,它的作用是引导电磁波沿一定方向传输,因此又称为导波系统,其所导引的电磁波被称为导行波。一般将截面尺寸、形状、媒质分布、材料及边界条件均不变的导波系统称为规则导波系统,又称为均匀传输线。把导行波传播的方向称为纵向,垂直于导波传播的方向称为横向。无纵向电磁场分量的电磁波称为横电磁波(Transverse Electromagnetic Wave),即 TEM 波。另外,传输线本身的不连续性可以构成各种形式的微波无源元器件,这些元器件和均匀传输线、有源元器件及天线一起构成微波系统。

微波传输线大致可以分为三种类型。第一类是双导体传输线,它由两根或两根以上平行导体构成,因其传输的电磁波是横电磁波(TEM 波)或准 TEM 波,故又称为 TEM 波传输线,主要包括平行双线、同轴线、带状线和微带线等,如图 1-1(a)所示。第二类是均匀填充介质的金属波导管,因电磁波在管内传播,故称为波导,主要包括矩形波导、圆波导、脊形波导和椭圆波导等,如图 1-1(b)所示。第三类是介质传输线,因电磁波沿传输线表面传播,故称为表面波波导,主要包括介质波导、镜像线和单根表面波传输线等,如图 1-1(c)所示。

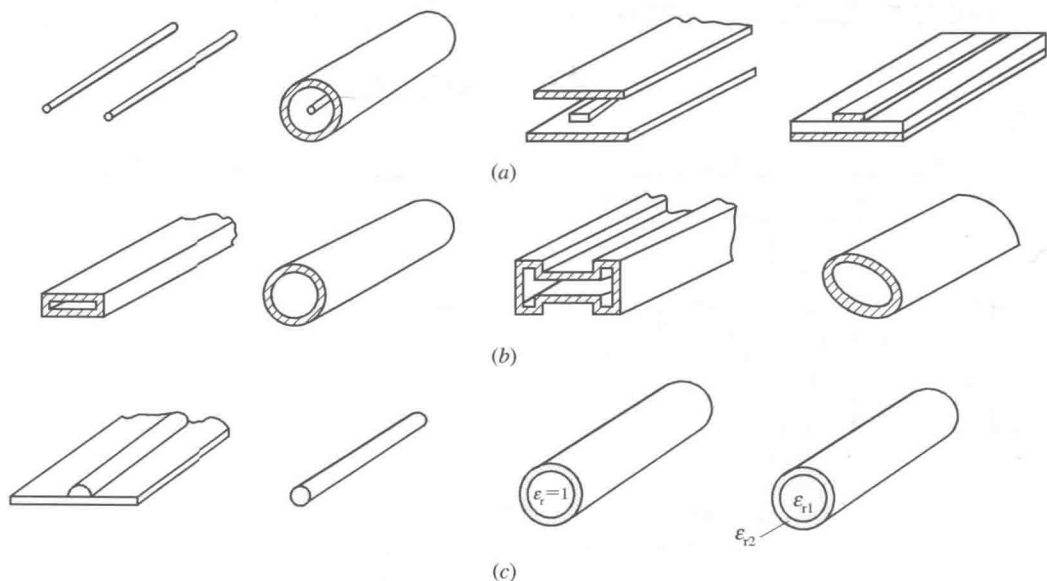


图 1-1 各种微波传输线
(a) 双导体传输线; (b) 波导; (c) 介质传输线

对均匀传输线的分析方法通常有两种：一种是场分析法，即从麦克斯韦方程出发，求出满足边界条件的波动解，得出传输线上电场和磁场的表达式，进而分析传输特性；另一种是等效电路法，即从传输线方程出发，求出满足边界条件的电压、电流波动方程的解，得出沿线等效电压、电流的表达式，进而分析传输特性。前一种方法较为严格，但数学上比较繁琐，后一种方法实质是在一定的条件下“化场为路”，有足够的精度，数学上较为简便，因此被广泛采用。

本章从“化场为路”的观点出发，首先建立传输线方程，导出传输线方程的解，引入传输线的重要参量——阻抗、反射系数及驻波比；然后分析无耗传输线的特性，给出传输线的匹配、效率及功率容量的概念；最后介绍最常用的 TEM 传输线——同轴线。

1.1 均匀传输线方程及其解

1. 均匀传输线方程

由均匀传输线组成的导波系统都可等效为如图 1-2(a) 所示的均匀平行双导线系统。其中传输线的始端接微波信号源(简称信源)，终端接负载，选取传输线的纵向坐标为 z ，坐标原点选在终端处，波沿负 z 方向传播。在均匀传输线上任意一点 z 处，取一微分线元 Δz ($\Delta z \ll \lambda$)，该线元可视为集总参数电路，其上有电阻 $R\Delta z$ 、电感 $L\Delta z$ 、电容 $C\Delta z$ 和漏电导 $G\Delta z$ (其中 R, L, C, G 分别为单位长电阻、单位长电感、单位长电容和单位长漏电导)，得到的等效电路如图 1-2(b) 所示，则整个传输线可看作由无限多个上述等效电路的级联而成。有耗和无耗传输线的等效电路分别如图 1-2(c)、(d) 所示。

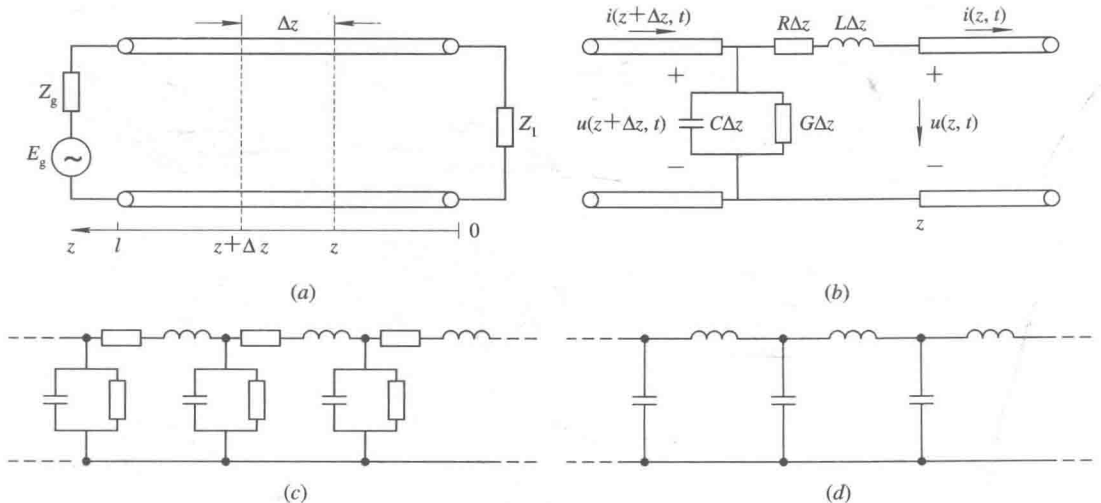


图 1-2 均匀传输线及其等效电路

- (a) 均匀平行双导线系统；(b) 均匀平行双导线的等效电路；
- (c) 有耗传输线的等效电路；(d) 无耗传输线的等效电路

设在时刻 t ，位置 z 处的电压和电流分别为 $u(z, t)$ 和 $i(z, t)$ ，而在位置 $z + \Delta z$ 处的电压和电流分别为 $u(z + \Delta z, t)$ 和 $i(z + \Delta z, t)$ 。对很小的 Δz ，忽略高阶小量，有

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

对图 1-2(b), 应用基尔霍夫定律可得

$$\left. \begin{aligned} u(z, t) + R\Delta z i(z, t) + L\Delta z \frac{\partial i(z, t)}{\partial t} - u(z + \Delta z, t) &= 0 \\ i(z, t) + G\Delta z u(z + \Delta z, t) + C\Delta z \frac{\partial u(z + \Delta z, t)}{\partial t} - i(z + \Delta z, t) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1-1-2)$$

将式(1-1-1)代入式(1-1-2), 并忽略高阶小量, 可得

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial u(z, t)}{\partial z} &= Ri(z, t) + L \frac{\partial i(z, t)}{\partial t} \\ \frac{\partial i(z, t)}{\partial z} &= Gu(z, t) + C \frac{\partial u(z, t)}{\partial t} \end{aligned} \right\} \quad (1-1-3)$$

这就是均匀传输线方程, 也称电报方程。

对于时谐电压和电流, 可用复振幅表示为

$$\left. \begin{aligned} u(z, t) &= \operatorname{Re}[U(z)e^{j\omega t}] \\ i(z, t) &= \operatorname{Re}[I(z)e^{j\omega t}] \end{aligned} \right\} \quad (1-1-4)$$

将上式代入式(1-1-3), 即可得时谐传输线方程

$$\left. \begin{aligned} \frac{dU(z)}{dz} &= ZI(z) \\ \frac{dI(z)}{dz} &= YU(z) \end{aligned} \right\} \quad (1-1-5)$$

式中, $Z=R+j\omega L$, $Y=G+j\omega C$, 分别称为传输线单位长串联阻抗和单位长并联导纳。

2. 均匀传输线方程的解

将式(1-1-5)的第一式两边微分并将第二式代入, 得

$$\frac{d^2 U(z)}{dz^2} - ZYU(z) = 0$$

同理可得

$$\frac{d^2 I(z)}{dz^2} - ZYI(z) = 0$$

令 $\gamma^2 = ZY = (R+j\omega L)(G+j\omega C)$, 则上两式可写为

$$\left. \begin{aligned} \frac{d^2 U(z)}{dz^2} - \gamma^2 U(z) &= 0 \\ \frac{d^2 I(z)}{dz^2} - \gamma^2 I(z) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1-1-6)$$

显然电压和电流均满足一维波动方程。电压的通解为

$$U(z) = U_+(z) + U_-(z) = A_1 e^{+\gamma z} + A_2 e^{-\gamma z} \quad (1-1-7a)$$

式中, A_1, A_2 为待定系数, 由边界条件确定。

利用式(1-1-5), 可得电流的通解为

$$I(z) = I_+(z) + I_-(z) = \frac{1}{Z_0} (A_1 e^{+\gamma z} - A_2 e^{-\gamma z}) \quad (1-1-7b)$$

式中, $Z_0 = \sqrt{(R+j\omega L)/(G+j\omega C)}$ 。

令 $\gamma = \alpha + j\beta$, $A_1 = |A_1| e^{j\theta_1}$, $A_2 = |A_2| e^{j\theta_2}$, Z_0 为实数, 则可得传输线上的电压和电流的瞬时值表达式为

$$\left. \begin{aligned} u(z, t) &= u_+(z, t) + u_-(z, t) \\ &= |A_1| e^{+\alpha z} \cos(\omega t + \beta z + \theta_1) + |A_2| e^{-\alpha z} \cos(\omega t - \beta z + \theta_2) \\ i(z, t) &= i_+(z, t) + i_-(z, t) \\ &= \frac{1}{Z_0} [|A_1| e^{+\alpha z} \cos(\omega t + \beta z + \theta_1) - |A_2| e^{-\alpha z} \cos(\omega t - \beta z + \theta_2)] \end{aligned} \right\} \quad (1-1-8)$$

由上式可见, 传输线上电压和电流以波的形式传播, 在任一点的电压或电流均由沿 $-z$ 方向传播的行波(称为入射波)和沿 $+z$ 方向传播的行波(称为反射波)叠加而成。

现在来确定待定系数, 由图 1-2(a)可知, 传输线的边界条件通常有以下三种:

- ① 已知终端电压 U_1 和终端电流 I_1 。
- ② 已知始端电压 U_i 和始端电流 I_i 。
- ③ 已知信源电动势 E_g 和内阻 Z_g 以及负载阻抗 Z_l 。

下面我们讨论第一种情况, 其它两种情况留给读者自行推导。

将边界条件 $z=0$ 处 $U(0)=U_1$ 、 $I(0)=I_1$ 代入式(1-1-7), 得

$$\left. \begin{aligned} U_1 &= A_1 + A_2 \\ I_1 &= \frac{1}{Z_0}(A_1 - A_2) \end{aligned} \right\} \quad (1-1-9)$$

由此解得

$$\left. \begin{aligned} A_1 &= \frac{1}{2}(U_1 + I_1 Z_0) \\ A_2 &= \frac{1}{2}(U_1 - I_1 Z_0) \end{aligned} \right\} \quad (1-1-10)$$

将上式代入式(1-1-7), 则有

$$\left. \begin{aligned} U(z) &= U_1 \operatorname{ch}\gamma z + I_1 Z_0 \operatorname{sh}\gamma z \\ I(z) &= I_1 \operatorname{ch}\gamma z + \frac{U_1}{Z_0} \operatorname{sh}\gamma z \end{aligned} \right\} \quad (1-1-11)$$

写成矩阵形式为

$$\begin{bmatrix} U(z) \\ I(z) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \operatorname{ch}\gamma z & Z_0 \operatorname{sh}\gamma z \\ \frac{1}{Z_0} \operatorname{sh}\gamma z & \operatorname{ch}\gamma z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ I_1 \end{bmatrix} \quad (1-1-12)$$

当 $\gamma = j\beta$ 时, 上式可写成

$$\begin{bmatrix} U(z) \\ I(z) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\beta z & jZ_0 \sin\beta z \\ \frac{j}{Z_0} \sin\beta z & \cos\beta z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ I_1 \end{bmatrix} \quad (1-1-13)$$

可见, 只要已知终端负载电压 U_1 、电流 I_1 及传输线特性参数 γ 、 Z_0 , 则传输线上任意一点的电压和电流就可由式(1-1-12)求得。