



# 微波技术与天线

## Microwave Technology and Antenna

杨峰 杨德强 陈波 王园 编

高等教育出版社



# 微波技术与天线

## Microwave Technology and Antenna

杨峰 杨德强 陈波 王园 编

## 内容简介

本书主要系统讲述微波技术与天线的的基本理论和基本分析方法,强调了微波器件与天线测量的原理。全书共九章,内容包括:绪论、传输线理论、导波与波导、微波网络、微波元件、天线基本理论、线天线、口径天线、微波与天线测量,各章附有适量习题。

本书可作为高等院校工科电子信息类相关课程的教学用书或教学参考书,也可供从事相关工作的科学技术人员参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

微波技术与天线 / 杨峰等编. -- 北京: 高等教育出版社, 2016. 12

ISBN 978 - 7 - 04 - 046625 - 6

I. ①微… II. ①杨… III. ①微波技术 - 高等学校 - 教材②微波天线 - 高等学校 - 教材 IV. ①TN015  
②TN822

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 254503 号

策划编辑 杜 炜      责任编辑 张江漫      封面设计 张申申      版式设计 张 杰  
插图绘制 杜晓丹      责任校对 刘娟娟      责任印制 毛斯璐

出版发行 高等教育出版社  
社 址 北京市西城区德外大街 4 号  
邮政编码 100120  
印 刷 北京新华印刷有限公司  
开 本 787mm × 960mm 1/16  
印 张 22.25  
字 数 410 千字  
插 页 1  
购书热线 010 - 58581118

咨询电话 400 - 810 - 0598  
网 址 <http://www.hep.edu.cn>  
<http://www.hep.com.cn>  
网上订购 <http://www.hepmall.com.cn>  
<http://www.hepmall.com>  
<http://www.hepmall.cn>  
版 次 2016年12月第1版  
印 次 2016年12月第1次印刷  
定 价 36.50 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换

版权所有 侵权必究

物 料 号 46625 - 00

# 前 言

---

本书是为高等院校电子信息工程专业编写的教学用书,目的是使学生通过该课程的学习能掌握微波技术与天线方面的基本概念、基本理论和基本设计方法,为今后学习其他后续课程,尤其是系统方面的课程学习打下必要与坚实的基础。

全书是按学生已完成“高等数学”“普通物理”“电磁场与电磁波”和一部分“电路”课程的基础上编写的。内容可供一学期教学,各校可根据自己的需要进行取舍。

本书共分九章,涵盖了微波技术、天线和测量等三部分内容。第一章,绪论;第二章,传输线理论;第三章,导波与波导;第四章,微波网络基础;第五章,常见微波元件;第六章,天线基本理论;第七章,线天线;第八章,口径天线;第九章,微波与天线测量。

为帮助学生掌握所学内容,提高分析问题和解决问题的能力,每章末均附有习题,同时也增加了微波与天线的测量内容。

本书第一、八章由杨峰执笔,第二章由王园执笔,第三、四、五章由陈波执笔,第六、七章由杨德强执笔,第九章由陈波和杨德强共同执笔。全书由王园统稿。

本书由南京邮电大学张业荣教授审阅,同时电子科技大学雷霆、刘贤峰、宋开军、宗显政和欧阳骏等老师也提出了不少宝贵意见,编者在此表示衷心感谢。

编者衷心希望广大的读者对本书的缺失和不足之处提出批评与指正。编者邮箱:wangyuan418@ uestc. edu. cn。

编者

2016年3月于电子科技大学

# 目 录

---

<b>第 1 章 绪论</b> .....	1
1.1 微波及微波特性 .....	1
1.2 天线分类及作用 .....	4
<b>第 2 章 传输线理论</b> .....	7
2.1 传输线方程及其解 .....	7
2.2 传输线的工作参数 .....	13
2.3 传输线的工作状态 .....	17
2.4 史密斯圆图 .....	21
2.5 阻抗匹配 .....	33
2.6 均匀有耗传输线 .....	41
习题 .....	45
<b>第 3 章 导波与波导</b> .....	51
3.1 导波的场分析方法 .....	52
3.2 各类导波的特性 .....	54
3.3 导行波的传输功率、能量及衰减 .....	63
3.4 同轴线 .....	66
3.5 矩形波导 .....	71
3.6 圆形波导 .....	84
3.7 同轴线、矩形波导和圆波导的尺寸选择 .....	93
3.8 带状线 .....	96
3.9 微带线 .....	100
3.10 耦合带状线与耦合微带线 .....	105

习题 .....	109
<b>第 4 章 微波网络基础 .....</b>	<b>111</b>
4.1 不均匀性等效为集总参数网络 .....	112
4.2 微波网络参量 .....	114
4.3 互易网络、无耗网络及对称网络各矩阵参量的特性 .....	127
4.4 参考面移动对网络参量的影响 .....	129
习题 .....	130
<b>第 5 章 常见微波元件 .....</b>	<b>133</b>
5.1 连接元件 .....	134
5.2 分支元件 .....	142
5.3 衰减器和移相器 .....	151
5.4 定向耦合器 .....	153
5.5 电抗性元件 .....	160
5.6 微波谐振器 .....	163
习题 .....	184
<b>第 6 章 天线基本理论 .....</b>	<b>187</b>
6.1 概论 .....	187
6.2 电偶极子的辐射 .....	189
6.3 磁偶极子的辐射 .....	192
6.4 天线的基本电参数 .....	193
6.5 接收天线的电参数 .....	200
习题 .....	207
<b>第 7 章 线天线 .....</b>	<b>209</b>
7.1 对称振子 .....	209
7.2 阵列天线 .....	217
7.3 地面对天线性能的影响 .....	228
7.4 对称天线与单极天线 .....	231
7.5 行波天线 .....	236
7.6 缝隙天线 .....	247
7.7 微带天线 .....	255

7.8 阵列天线的应用 .....	258
习题 .....	265
<b>第8章 口径天线</b> .....	<b>268</b>
8.1 口径天线辐射及惠更斯原理 .....	269
8.2 平面口径辐射场 .....	273
8.3 喇叭天线 .....	283
8.4 单反射面天线 .....	294
8.5 双反射面天线 .....	304
8.6 单脉冲天线 .....	313
习题 .....	319
<b>第9章 微波与天线测量</b> .....	<b>321</b>
9.1 微波频率测量 .....	321
9.2 微波功率测量 .....	325
9.3 微波频谱分析测量 .....	328
9.4 微波散射参数测量 .....	333
9.5 天线测量基础 .....	336
9.6 天线阻抗测量 .....	338
9.7 天线方向图测量 .....	339
9.8 天线增益测量 .....	343
9.9 极化测量 .....	345
<b>参考文献</b> .....	<b>347</b>

微波技术和天线是一门古老而又年轻的学科,随着科学技术的发展,它在移动通信、卫星通信、微波接力通信、广播电视传送、雷达、导航、电子对抗和医疗卫生服务等众多领域得到了广泛的应用,在国防现代化建设和推动国民经济发展中发挥着巨大的作用。典型的无线通信系统如图 1.0.1 所示,它包含微波信号的产生、传输、辐射、电波传播、接收和信号的复原等过程。微波技术与天线主要研究的内容就是微波信号高质量、低损耗的传输及微波信号的高效辐射与接收。

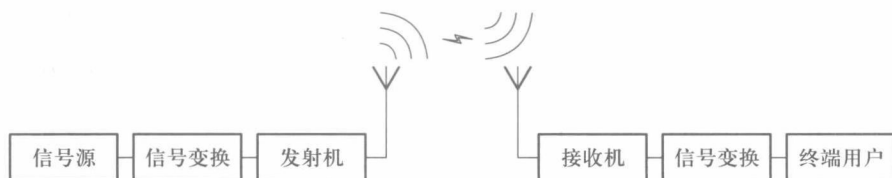


图 1.0.1 典型的无线通信系统

## 1.1 微波及微波特性

微波与无线电波、红外线和可见光一样都是电磁波,所不同的就是他们的频率不同,微波比普通的无线电波波长更短,频率更高,因而得名为“微波”。微波是指频率在 300 MHz 到 3 000 GHz 之间的电磁波,微波在整个电磁波谱中的位置如图 1.1.1 所示。

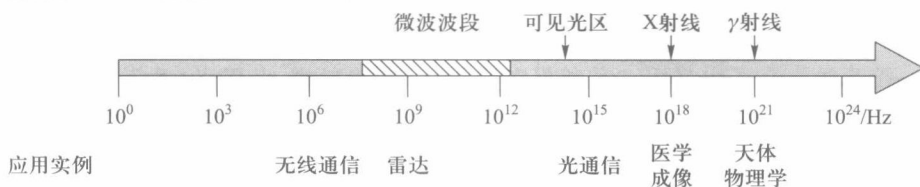


图 1.1.1 电磁波谱图



微波在低频段与超短波相邻,在高频段则与远红外波段相邻。微波波段又可以细划分为分米波、厘米波、毫米波和亚毫米波。各个波段的名称、波长范围、频率范围和频段的名称列于表 1.1.1 中。

表 1.1.1 微波波段的划分

名称	波长范围	频率范围	频段
亚毫米波	0.1 ~ 1 mm	300 ~ 3 000 GHz	超极高频
毫米波	1 mm ~ 1 cm	30 ~ 300 GHz	极高频(EHF)
厘米波	1 ~ 10 cm	3 ~ 30 GHz	超高频(SHF)
分米波	10 cm ~ 1m	300 MHz ~ 3 GHz	特高频(UHF)

为了在实际微波工程应用中表示的方便,又将常用的微波波段用拉丁字母表示,见表 1.1.2。而表 1.1.3 则是移动通信频段的划分。

表 1.1.2 常用微波波段

波段代号	频率范围	波段代号	频率范围
L	1 ~ 2 GHz	Q	33 ~ 50 GHz
S	2 ~ 4 GHz	U	40 ~ 60 GHz
C	4 ~ 8 GHz	V	50 ~ 75 GHz
X	8 ~ 12 GHz	E	60 ~ 90 GHz
Ku	12 ~ 18 GHz	W	75 ~ 110 GHz
K	18 ~ 26.5 GHz	F	90 ~ 140 GHz
Ka	26.5 ~ 40 GHz	D	110 ~ 170 GHz

表 1.1.3 移动通信频段的划分

名称		频率范围
2G 频率分配表	GSM900	895 ~ 960 MHz
	GSM1800	1 710 ~ 1 880 MHz
	PHS(小灵通)	1 880 ~ 1 930 MHz

名称		频率范围
3G 频率分配表	FDD 方式	1 920 ~ 1 980 MHz/2 110 ~ 2 170 MHz
	TDD 方式	1 880 ~ 1 920 MHz/2 010 ~ 2 025 MHz
	FDD 方式	1 755 ~ 1 785 MHz/1 850 ~ 1 880 MHz
	TDD 方式	2 300 ~ 2 400 MHz, 与无线电定位业务共存, 均为主要业务
卫星移动通信系统工作频段		1 980 ~ 2 010 MHz/2 170 ~ 2 200 MHz

微波技术是 20 世纪初发展起来的, 雷达的研制、微波接力通信、广播电视业务、卫星通信的兴起使微波技术得到飞速的发展和不断的完善。微波技术在国防军事、航空航天、无线通信中得到了极其广泛的应用。

微波技术研究的内容主要包括微波信号的产生、传输、变换、测量等, 以及相关的微波器件。微波信号的产生及变换是微波有源电路的研究内容, 本书主要介绍微波无源电路及器件。微波传输线是微波传输的通路, 主要包括 TEM 波、TE 波、TM 波以及混合模传输线。微波系统可以抽象为微波网络来研究, 将微波中的“场”等效为“路”, 简化微波系统特性的分析。微波网络主要研究网络参数的分析和网络的综合, 常用的网络参数有  $Z$  参数、 $Y$  参数、 $S$  参数、 $A$  参数、 $T$  参数等。微波无源器件主要有连接元件、分支元件、终端元件、衰减器、移相器、定向耦合器、微波滤波器、环形器等, 而微波信号的发射和接收则是天线的研究领域。微波测量可以参考微波测量的相关文献。

微波的频率比普通的无线电波高, 而又比光波的频率低, 微波在具有普通电磁波特点的基础上还有以下一些特点:

(1) 微波的频率高。可利用的频带宽, 这意味着微波信息容量大, 在大信息量数据的无线传输中微波具有明显的优势。

(2) 微波能穿透电离层。微波的这一特点使得微波在卫星通信、航空航天、深空探测中得到了广泛的应用。

(3) 微波的两重性。微波的频率介于无线电和光波之间, 不仅具有一般无线电波的性质, 还具有光波的性质。当微波照射到比其波长大得多的物体上时, 会产生反射。波长越短, 微波的光学特性就越明显。利用微波的似光性研制的高分辨率的设备, 为雷达、微波着陆、卫星定位导航等应用提供了必要的条件。

(4) 微波的致热效应。在微波的照射下, 某些物质会产生热效应, 可用微波来加热物质。微波的穿透能力强, 可深入物质内部, 加热速度快且均匀, 大大缩短了加热的时间。

(5) 微波的穿透能力强,可在不损坏物体的情况下探测物体的内部结构。

微波的应用十分广泛,随着科学技术的发展,新的应用层出不穷。主要分为两个方面,一个是将微波作为信息的载体,另一个是微波能的应用。

#### (1) 在通信方面的应用

微波的频率高,可以利用的频带宽,信息容量大,可用于多路通信。常见的微波通信有移动通信,4G网络就是微波通信的一个实例。卫星电话、卫星广播、电视传送等是微波在卫星通信中的应用。

#### (2) 在雷达中的应用

雷达是微波的早期应用。雷达利用被测目标对电磁波的回波特性,实现对被测目标的测距、测速、测向等。经过几十年的技术发展,当今雷达的种类繁多,性能也越来越强大。大多数的雷达都工作于微波波段。

#### (3) 科学研究中的应用

利用微波遥感,可以对地球资源进行调查。利用大气对微波的吸收和反射进行气象观察。利用微波可以穿透物体进行物质内部结构的无损探测。微波可以穿透电离层,可以用射电天文望远镜来观察和发现新的天体。在等离子体的研究中,微波也得到了广泛的应用。

#### (4) 微波能的应用

微波是一种清洁的能源,具有加热均匀、加热速度快、节能、效率高、清洁无污染等优点。微波炉已经成为人们常用的炊具。在空间建立太阳能电站,将太阳能转换为微波能,通过天线将微波能传输到地球,这是解决当前能源危机的一种可行的方法。高功率微波作为一种微波武器,必将在未来的战场上发挥至关重要的作用。

#### (5) 微波的医学应用

微波可以杀灭细菌,防止伤口的感染。微波还可以对人体进行局部组织的热疗,加速血液循环。由于病变的生物组织和未病变的生物组织对微波表现出不同的致热效应,在病变的组织边缘会产生微波热致超声,在医学领域可以检测微波热致超声来辨别病变的组织 and 未病变的组织。

## 1.2 天线分类及作用

通信、广播电视、全球定位、雷达等系统都是基于无线工作的,而电磁波的发射和接收都是通过天线来完成的,天线是电磁波的“出口”和“入口”。什么是天线?天线就是发射或者接收电磁波的装置。天线在无线电设备中的主要功能有两个:第一是能量转换功能;第二是定向发射(或接收)功能。发射天线的作

是将高频电流或导行电磁波转变为空间中传播的电磁波,而接收天线则是将空间中传播的电磁波转变为高频电流或导行电磁波。以最常见的无线电通信系统为例,在发射端,由发射机产生的高频电流,经过传输线传输到发射天线,发射天线将高频电流转换为空间中传播的电磁波,经过空间传输后,在接收端被接收天线转化为高频电流,高频电流再经过传输线到接收机。可以说天线是一种能量转换装置,在高频电流和空间电磁波之间转换。这种关系暗示着一种互易性,发射天线可以作为接收天线,接收天线也可以作为发射天线,对于同一副天线,不管作为接收天线还是发射天线,其天线的基本参数是不变的。定向作用是指天线发射或接收电磁波具有一定的方向性,即发射天线将电磁波能量集中在一定的方向辐射出去,接收天线则只接收特定方向的电磁波。

天线分析与设计的目标就是使上述的换能得到最佳的效果。对于设计良好的发射天线,用最小的发射功率能在规定的方向产生足够强度的电磁波,同时对其他方向的干扰最小;而对于设计良好的接收天线,可以从规定方向来的电磁波中获得尽可能大的能量,同时不受到其他方向来的电磁波的干扰。

为了满足不同的无线系统的需求,从天线的诞生到现在,已经设计出了各种类型的天线。对于天线有不同的分类方法。可以按照天线的工作性质、天线的用途、天线的工作波长和天线的工作原理等进行分类。

按照天线的工作性质可分为发射天线和接收天线;按照天线的用途可分为通信天线、广播电视天线、雷达天线、卫星天线等;按照工作波长可分为长波天线、中波天线、短波天线、超短波天线等。这些分类方法太笼统,不太明确,有些天线既可以作为发射天线又可以作为接收天线,比如雷达天线。按照用途分类也有问题,有些天线既可以当作雷达天线,又可以当作卫星天线,比如抛物面天线。而按照工作波长分类的方法大致符合了天线由长波发展到超短波以及微波的历史过程,但是这种分类方法也有一定的缺陷,比如半波振子天线,可以工作在长波波段,也可以工作在超短波和微波波段。

按照天线的工作原理来分类是目前比较合理的一种分类方法,即把天线分为线天线和口径天线。线天线是由导体构成,且导体的长度比它的横截面直径大得多,而导体的横截面直径又比工作波长小得多,一般在长波、中波、短波中广泛应用。口径天线由整块金属板或金属栅格组成,面积比波长的平方大得多。口径天线通常工作在微波波段,在卫星通信、航空航天、深空探测中得到广泛的应用。

从德国物理学家赫兹设计第一副天线至今已有 100 多年,而天线的发展又是与无线电技术的发展紧密相连,诞生了种类繁多的天线。随着第二次世界大战期间雷达的出现,厘米波得以普及,电磁频谱才得到了更为充分的利用。随着

现代无线技术的快速发展,对天线又提出新的要求,其波段已由分米波、厘米波向毫米波甚至太赫兹延伸、相继出现了介质波导、漏波天线甚至光导天线等新型天线。天线也由单一天线向阵列天线方向发展,由直线阵发展到曲线阵,由平面阵发展到共形阵。而基于阵列信号处理的自适应天线、智能天线也在军事和民用上得到广泛的应用。当前天线的研究方向是向多功能、小型化、宽频带、共口径、集成化和智能化方向发展。例如,当代无线通信终端(如手机),就要求天线多频段、小型化、低剖面、重量轻。为适应卫星通信和深空探测,就要求天线具有高增益、圆极化及自跟踪功能。为适应信息化军事技术的发展,则要求天线具备电扫描和多波束及共口径的功能。为适应复杂电磁环境,出现了具有自适应抗干扰能力的自适应天线和智能天线。

当然天线还有许多非通信应用,其中包括微波遥感与工业应用。遥感系统既可以是**有源的**(如雷达),也可以是无源的(如辐射计),分别用于接收目标的散射场或固有辐射场。工业应用包括微波加热与干燥等。

正如我们所看到的,天线的辐射特性与它的电尺寸紧密相关,不可能小型化到被芯片所取代。虽然长期使用的天线类型可能一直沿用到遥远的未来,但新的应用还是需要发明新天线系统。电子电气工程师协会(IEEE)新技术方向委员会提出的电技术7个重大挑战性的课题,第一个就是“使任何人,在世界上任何地方,在任何时刻,能不接电线或电缆就用通信手段按自己的意愿与外界联系”。“无线”社会只有通过天线才有可能。可以确信,天线的未来一定灿烂辉煌。

电磁场理论中我们知道,在给定边界条件下求解电磁波动方程可得到导波系统中的电磁场分布及电磁波的传播特性。对于能传输 TEM 波的双导体导波系统,例如平行双线、同轴线等(又称传输线),在传输 TEM 波的条件下,其电场和磁场只有横向分布。例如同轴线中  $\mathbf{E} = e_\rho E_\rho$ 、 $\mathbf{H} = e_\psi H_\psi$ ,这时在  $z = c$ (常数)平面内,内外导体间的电压  $U(z) = \int_a^b E_\rho d\rho$  和电流  $I(z) = \int_0^{2\pi} H_\psi \rho d\phi$  都具有实际意义。因此可用“电路”中的电压和电流等效传输线中的电场和磁场,这种方法称为“等效电路”法,即将传输线作为分布参数电路处理,得到由传输线的单位长度电阻、电感、电容和电导组成的等效电路,然后根据基尔霍夫定律导出传输线上电压、电流满足的方程,进而讨论波的传输特性。

## 2.1 传输线方程及其解

分布参数电路是相对于集中参数电路而言的。当传输线传输高频信号时会出现以下分布参数效应:电流流过导线使导线发热,表明导线本身有分布电阻;双导线之间绝缘不完善而出现漏电流,表明导线之间处处有漏电导;导线之间有电压,导线间存在电场,表明导线之间有分布电容;导线中通过电流时周围出现磁场,表明导线上存在分布电感。当传输信号的波长远大于传输线长度时,有限长的传输线上各点的电流(或电压)的大小和相位可近似认为相同,这时分布参数效应可以不考虑,而作为集中参数电路处理。但当传输信号的波长与传输线长度可比拟时,传输线上各点的电流(或电压)的大小和相位各不相同,显现出分布效应,此时传输线就必须作为分布参数电路处理。

假设传输线的电路参数是沿线均匀分布的,这种传输线称为均匀传输线。可用以下四个参数来描述。

$R_1$ : 单位长度的电阻 ( $\Omega/m$ )

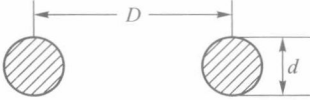
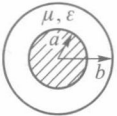
$L_1$ : 单位长度的电感 ( $H/m$ )

$G_1$ : 单位长度的电导 ( $S/m$ )

$C_1$ : 单位长度的电容 ( $F/m$ )

以上参数都可以用稳态场来进行定义和计算。表 2.1.1 给出双导线和同轴线的分布参数。

表 2.1.1 双导线和同轴线的分布参数

传输线	双导线	同轴线
分布参数		
$R_1$ ( $\Omega/m$ )	$\frac{2}{\pi d} \sqrt{\frac{\omega \mu_1}{\sigma_1}}$	$\sqrt{\frac{j \omega \mu_1}{4 \pi \sigma_1}}$
$L_1$ ( $H/m$ )	$\frac{\mu}{\pi} \ln \frac{D + \sqrt{D^2 - d^2}}{d}$	$\frac{\mu}{2 \pi} \ln \frac{b}{a}$
$C_1$ ( $F/m$ )	$\pi \epsilon / \ln \frac{D + \sqrt{D^2 - d^2}}{d}$	$2 \pi \epsilon / \ln \frac{b}{a}$

### 2.1.1 传输线方程

TEM 波传输线的电路模型可用图 2.1.1 表示。

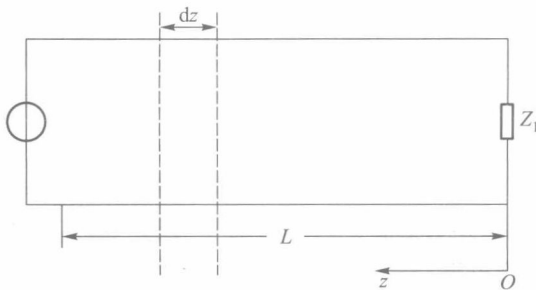


图 2.1.1 传输线电路模型

为讨论方便,将坐标系的原点选在负载。假设传输线是均匀的,故可在线上任一点  $z$  处取线元  $dz$  讨论,如图 2.1.2 所示。

根据图 2.1.2 由基尔霍夫定律,有

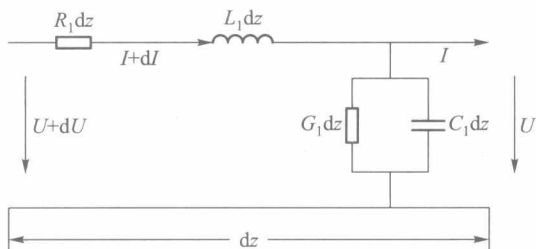


图 2.1.2 线元  $dz$  的等效电路

$$\begin{cases} dU(z) = I(z) Z_1 dz \\ dI(z) = U(z) Y_1 dz \end{cases} \quad (2.1.1)$$

式中

$$Z_1 = R_1 + j\omega L_1, Y_1 = G_1 + j\omega C_1 \quad (2.1.2)$$

分别代表传输线上单位长度的串联阻抗和并联导纳。式(2.1.1)可写为

$$\begin{cases} \frac{dU(z)}{dz} = I(z) Z_1 \\ \frac{dI(z)}{dz} = U(z) Y_1 \end{cases} \quad (2.1.3)$$

上式两端对  $z$  求导,得

$$\begin{cases} \frac{d^2 U(z)}{dz^2} = Z_1 \frac{dI(z)}{dz} = Z_1 Y_1 U(z) = \gamma^2 U(z) \\ \frac{d^2 I(z)}{dz^2} = Y_1 \frac{dU(z)}{dz} = Y_1 Z_1 I(z) = \gamma^2 I(z) \end{cases} \quad (2.1.4)$$

式(2.1.4)为传输线上电压波和电流波方程,式中

$$\gamma = \sqrt{Z_1 Y_1} = \sqrt{(R_1 + j\omega L_1)(G_1 + j\omega C_1)} = \alpha + j\beta \quad (2.1.5)$$

称为传播常数,通常是一复数,其实部  $\alpha$  为衰减常数,虚部  $\beta$  为相位常数。

## 2.1.2 传输线方程的解

方程(2.1.4)的通解为

$$U(z) = Ae^{\gamma z} + Be^{-\gamma z} \quad (2.1.6)$$

由式(2.1.3)得

$$I(z) = \frac{1}{Z_1} \frac{dU(z)}{dz} = \frac{1}{Z_c} (Ae^{\gamma z} - Be^{-\gamma z}) \quad (2.1.7)$$

式中

$$Z_c = \sqrt{\frac{Z_1}{Y_1}} = \sqrt{\frac{R_1 + j\omega L_1}{G_1 + j\omega C_1}} \quad (2.1.8)$$



具有阻抗的量纲,称为传输线的特性阻抗。

式(2.1.6)和式(2.1.7)为传输线上的电压和电流分布表示式,他们都包含两项:一项含有因子  $e^{\gamma z}$ ,代表沿  $-z$  方向(由电源到负载)传播的波,称为入射波;一项含有因子  $e^{-\gamma z}$ ,代表沿  $+z$  方向(由负载到电源)传播的波,称为反射波。

入射波电压

$$U^+ = Ae^{\gamma z} \quad (2.1.9a)$$

入射波电流

$$I^+ = \frac{1}{Z_c} Ae^{\gamma z} \quad (2.1.9b)$$

反射波电压

$$U^- = Be^{-\gamma z} \quad (2.1.9c)$$

反射波电流

$$I^- = -\frac{1}{Z_c} Be^{-\gamma z} \quad (2.1.9d)$$

式(2.1.6)和(2.1.7)中的常数  $A, B$  应由边界条件确定。下面讨论两种给定条件下方程的解。

(1) 已知终端电压和终端电流

$$U(0) = U_L, \quad I(0) = I_L \quad (2.1.10)$$

将式(2.1.10)代入式(2.1.6)和式(2.1.7)中,得

$$U_L = A + B, \quad I_L = \frac{1}{Z_c}(A - B) \quad (2.1.11)$$

联立求解得

$$A = \frac{U_L + I_L Z_c}{2}, \quad B = \frac{U_L - I_L Z_c}{2} \quad (2.1.12)$$

于是

$$\begin{cases} U(z) = \frac{U_L + I_L Z_c}{2} e^{\gamma z} + \frac{U_L - I_L Z_c}{2} e^{-\gamma z} \\ I(z) = \frac{1}{Z_c} \left( \frac{U_L + I_L Z_c}{2} e^{\gamma z} - \frac{U_L - I_L Z_c}{2} e^{-\gamma z} \right) \end{cases} \quad (2.1.13)$$

上式为已知传输线终端电压和终端电流时,线上任一点的电压和电流表达式。该式说明,传输线上的电压和电流以波的形式存在,且由入射波和反射波组成。于是,式(2.1.13)又可写为

$$\begin{cases} U(z) = U^+(z) + U^-(z) = U_L^+ e^{\gamma z} + U_L^- e^{-\gamma z} \\ I(z) = I^+(z) + I^-(z) = I_L^+ e^{\gamma z} - I_L^- e^{-\gamma z} \end{cases} \quad (2.1.14)$$

式中