

微波技术

孙道礼 主编

哈尔滨工业大学出版社





数据加载失败，请稍后重试！

内 容 简 介

本书系高等工科院校无线电电子类专业（非微波专业）的技术基础课教材。

本书以基础理论、基本分析方法为主要内容，其中包括：传输线理论、TEM波传输线、规则波导、微波网络、微波元件、微波谐振器、微波滤波器等共八章。每章末附有一定数量的习题，书末给出了各章习题的题解。

本书可作为无线电电子类专业的教材或教学参考书，也可供从事微波技术与天线工作的工程技术人员参考。

微 波 技 术

孙道礼 主编

*

哈尔滨工业大学出版社出版

新华书店首都发行所发行

哈尔滨工业大学印刷厂印刷

*

开本787×1092 1/16 印张25.75 字数520 000

1989年10月第1版 1989年10月第1次印刷

印数1—2 000

ISBN 7-5603-0192-4/TN·13 定价4.10元

前 言

《微波技术》是高等学校无线电电子学中一门重要的技术基础课程，是在电工基础、电路原理和电磁场理论学习的基础上，涉足无线电频谱中极为重要的波段——微波领域的重要科目。

本书是作为高等工科院校电子类专业（非微波专业）的技术基础课而编写的。重点讲述微波传输系统与微波元、器件的基本原理以及基本分析方法。

全书共分八章，按70学时的教学时数编写。书中各章节之间既有联系又有相对的独立性，可根据教学时数和要求做适当地选择和删节。使用本书时，要求读者熟练掌握电磁场与电磁波的基本理论，具有数理方程、线性代数、复变函数、矢量分析、场论以及特殊函数等工程数学基础。为便于学习，每章末列出了一定数量的习题，在全书末尾列出了参考资料并给出了习题题解。

本书是作者在多年教学实践的基础上，参阅国内外有关资料，经过认真分析、选材并结合自己的科研成果编写出来的。在编写过程中，力求说理清楚，言简意赅，做到理论性强，系统性强，逻辑性强。

本书由哈尔滨工业大学航天学院钱国蕙教授审阅。参加编写工作的有：孙道礼、陈振中、刘维坤、任长在、黄国全、张铁韧等同志。全书由孙道礼主编。哈尔滨工业大学微波教研室有关教师对本书提出了许多宝贵意见和建议，在此谨表衷心谢意。

限于水平和经验，不当之处在所难免，热忱欢迎读者提出宝贵意见，以便斧正。

编 者

1988年10月于哈尔滨

目 录

第一章 绪论	(1)
§1-1 微波及其特点.....	(1)
§1-2 微波的应用.....	(3)
§1-3 微波技术的研究方法和基本内容.....	(5)
习题.....	(5)
第二章 传输线基本理论	(6)
§2-1 引言.....	(6)
§2-2 传输线方程.....	(9)
§2-3 行波.....	(15)
§2-4 驻波.....	(18)
§2-5 行驻波.....	(24)
§2-6 行波系数和驻波系数.....	(30)
§2-7 传输功率及传输效率.....	(31)
§2-8 阻抗圆图.....	(34)
§2-9 传输线的阻抗匹配.....	(41)
习题.....	(48)
第三章 TEM波传输线	(55)
§3-1 双线传输线.....	(55)
§3-2 同轴传输线.....	(58)
§3-3 带状线.....	(69)
§3-4 微带.....	(76)
§3-5 耦合带状线.....	(79)
§3-6 耦合微带.....	(87)
习题.....	(95)
第四章 规则波导理论	(97)
§4-1 电磁场基础.....	(97)
§4-2 矩形波导.....	(101)
§4-3 圆形波导.....	(119)
§4-4 波导中的功率传输.....	(130)
§4-5 波导的损耗与衰减.....	(132)
§4-6 波导的激励与耦合.....	(138)
§4-7 模式耦合与模式正交性.....	(141)
§4-8 截止波导.....	(143)
§4-9 波导尺寸的选择.....	(147)

习题	(150)
第五章 微波网络基础	(152)
§5-1 引言	(152)
§5-2 均匀波导系统与长线的等效	(154)
§5-3 微波网络的各种参量矩阵	(160)
§5-4 基本电路单元的参量矩阵	(172)
§5-5 网络的工作特性参量	(179)
§5-6 二、三、四口网络的基本特性	(182)
§5-7 对偶电路定理	(188)
§5-8 福斯特定理	(193)
§5-9 网络参数的测量	(195)
习题	(197)
第六章 微波元件	(201)
§6-1 引言	(201)
§6-2 终端负载	(201)
§6-3 电抗元件	(203)
§6-4 衰减器	(211)
§6-5 移相器	(213)
§6-6 阻抗变换器	(217)
§6-7 定向耦合器	(227)
§6-8 桥式分路元件	(240)
习题	(247)
第七章 微波谐振器	(251)
§7-1 引言	(251)
§7-2 微波谐振器的基本参量	(252)
§7-3 波导矩形谐振腔	(257)
§7-4 圆柱谐振腔	(264)
§7-5 同轴谐振腔	(270)
§7-6 微带线谐振器	(274)
§7-7 谐振腔的等效电路	(276)
习题	(279)
第八章 微波滤波器	(282)
§8-1 微波滤波器的基本概念	(282)
§8-2 原型低通滤波器	(283)
§8-3 频率变换	(292)
§8-4 倒量变换器	(298)
§8-5 滤波电路的微波实现, 微波低通滤波器	(304)
§8-6 微波带通滤波器	(309)

§8-7 微波带阻滤波器.....	(322)
习题.....	(331)
题解.....	(333)
参考资料.....	(398)
附录 I 同轴线参数表.....	(400)
附录 II 国产矩形和扁矩形波导管数据表.....	(402)

第一章 绪 论

微波技术已有几十年的发展历史，现已成为一门比较成熟的学科。在雷达、通信、导航、遥感、电子对抗以及工农业和科学研究等方面，微波技术都得到了广泛的应用。微波技术是无线电电子学门类中一门相当重要的学科，对科学技术的发展起着重要的作用。

§ 1-1 微波及其特点

一、微波的含义

微波是超高频率的无线电波。由于这种电磁波的频率非常高，故微波又称为超高频电磁波。电磁波的传播速度 v 与其频率 f 、波长 λ 有下列固定关系

$$f\lambda = v \quad (1-1-1)$$

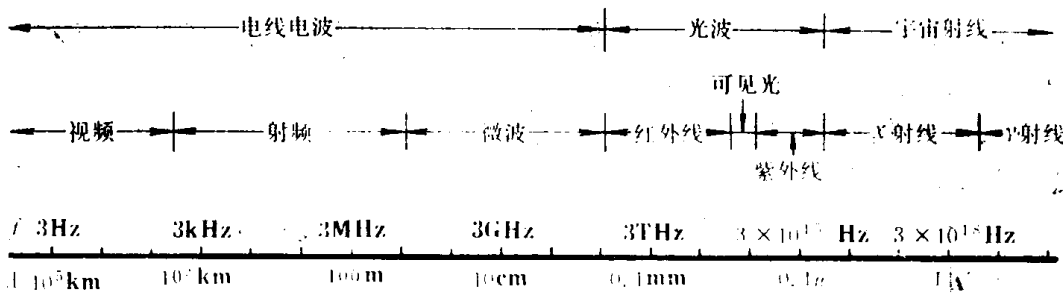
若波是在真空中传播，则速度为 $v = c = 3 \times 10^8 \text{m/s}$ 。

微波的频率范围通常为 $3 \times 10^8 \text{Hz} \sim 3 \times 10^{12} \text{Hz}$ ，对应的波长范围从 1m 到 0.1mm 左右。

为使人们对微波在电磁波谱中所占的位置有一个全貌的了解，现将整个宇宙中电磁波的波段划分列于表 1-1-1 中。从表中可见，微波频率的低端与普通无线电波的“超短波”波段相连接，其高端则与红外线的“远红外”区相衔接。

在使用中，为方便起见，可将微波分为分米波、厘米波、毫米波及亚毫米波等波段。还可做更详细的划分，如厘米波又可分为10厘米波段、5厘米波段、3厘米波段及1.25厘米波段等等；毫米波亦可细分为8毫米、6毫米、4毫米及2毫米波段等等。

表 1-1-1 宇宙电磁波谱



实际工程中常用拉丁字母代表微波波段的名称。例如 S、C、X 分别代表10厘米波段、5厘米波段和3厘米波段；Ka、U、F分别代表8毫米波段、6毫米波段和3毫米波段等等，详见表1-1-2。

表 1-1-2 微波频段的划分

波 段	频率范围 (GHz)	波 段	频率范围 (GHz)
UHF	0.30~1.12	Ka	26.50~40.00
L	1.12~1.70	Q	33.00~50.00
LS	1.70~2.60	U	40.00~60.00
S	2.60~3.95	M	50.00~75.00
C	3.95~5.85	E	60.00~90.00
XC	5.85~8.20	F	90.00~140.00
X	8.20~12.40	G	140.00~220.00
Ku	12.40~18.00	R	220.00~325.00
K	18.00~26.00		

二、微波的特点

属于无线电波的微波，之所以作为一个相对独立的学科来加以研究，是因为它具有下列独特性质。

1. 频率极高 根据电磁振荡周期 T 与频率 f 的关系式

$$T = 1/f \quad (1-1-2)$$

可以推知微波波段的振荡周期在 $10^{-9} \sim 10^{-13}$ 秒(s)量级，而普通电真空器件中电子的渡越时间一般为 10^{-9} 秒(s)量级，就是说二者属于同一数量级。于是，在低频时被忽略了的电子惯性，亦即电磁波与电子间的相互作用、极间电容和引线电感等的影响就不能再忽视了。普通电子管已不能用做微波振荡器、放大器或检波器了，代之而来的则是建立新的原理基础上的微波电子管、微波固体器件和量子器件。同时伴随频率的升高、高频电流的趋肤效应、传输系统的辐射效应以及电路的延时效应（相位滞后）等都明显地表露出来。

由于微波频率极高，故它的实际可用频带很宽，可达 10^9 Hz数量级，这是低频无线电波无法比拟的。频带宽意味着信息容量大，这就使微波得到了更广泛的应用。

2. 波长极短 一种情况：微波的波长比地球上的宏观物体（如飞机、舰船、导弹、卫星、建筑物等）的几何尺寸小得多，故当微波照射到这些物体上时将产生强烈的反射。微波最早的应用实例——雷达就是根据这个原理工作的。这种直线传播的特点与几何光学相似，故可以说微波具有“似光特性”。利用这一特性，可以制成体积小、方向性很强的天线系统，可以接收到由地面或宇宙空间物体反射回来的微弱信号，从而增加雷达的作用距离并使定位精确。

另一种情况：微波的波长与实验设备（比如波导、微带、谐振腔或其它微波元件）的尺寸相比在同数量级，使得电磁能量分布于整个微波电路之中，形成所谓“分布参数”系统。这与低频电路有原则区别，因为低频时电场和磁场能量是分别集中于所谓“集总参数”的各个元件中。

3. 能穿透电离层 地球大气外层由厚厚一层电离层所包围。低频无线电波由于频率低, 所以当它射向电离层时, 其一部分被吸收, 一部分被反射回来。对低频电磁波来说, 电离层形成一个屏蔽层, 低频电磁波是无法穿过它的。而微波的频率很高, 它可以穿透电离层, 从而成为人类探测外层空间的“宇宙之窗”。这样不仅可以利用微波进行卫星通信和宇航通信, 也为射电天文学等学科的研究开拓了广阔前程。

4. 量子特性 根据量子理论, 电磁辐射的能量不是连续的, 而是由一个个的“光子”所组成。单个光子的能量与其频率的关系为

$$\varepsilon = hf \quad (1-1-3)$$

式中 $h = 4 \times 10^{-15}$ 电子伏·秒(eV·s), 称为普朗克常数。由于低频电波的频率很低, 光子能量很小, 故量子特性不明显。微波波段的电磁波, 单个光子的能量为 $10^{-8} \sim 10^{-3}$ eV。而一般顺磁物质在外磁场中所产生的能级间的能量差额介于 $10^{-5} \sim 10^{-4}$ eV 之间, 因而电子在这些能级间跃迁时所释放或吸收的光子的频率是属于微波范畴的, 因此, 微波可用来研究分子和原子的精细结构。同样地, 在超低温时物体吸收一个微波光子也可产生显著反应。上述两点近代尖端科学, 如微波波谱学、量子无线电物理的发展都起着重要作用。

§ 1-2 微波的应用

研究微波的产生、放大、传输、辐射、接收和测量的学科称为“微波技术”, 它是近代科学技术的重大成就之一。

微波技术的发展是和它的应用紧密联系在一起的。微波的实际应用极为广泛, 下面就几个重要方面加以介绍。

一、雷达 雷达是微波技术应用的典型例子。在第二次世界大战期间, 敌对双方开始为了迅速准确地发现敌人的飞机和舰船的踪迹, 继而又为了指引飞机或火炮准确地攻击目标, 所以发明了可以进行探测、导航和定位的装置, 这就是雷达。事实上, 正是由于第二次世界大战期间对于雷达的急需, 微波技术才迅速地发展起来。雷达的发展经过了几个阶段。为适应各种不同要求, 雷达的种类很多, 性能也在不断提高。现代雷达多数是微波雷达。迄今为止, 各种类型的雷达, 例如导弹跟踪雷达、炮火瞄准雷达、导弹制导雷达、地面警戒雷达乃至大型国土管制相控阵雷达等, 仍然代表微波频率的主要应用。这主要是由于这些雷达要求它所用的天线能象光探照灯那样, 把发射机的功率基本上全部集中于一个窄波束内辐射出去。但天线的辐射能力受绕射效应的限制, 而绕射效应又取决于辐射器口径尺寸相对于波长的比值 D/λ_0 , 其中 D 是辐射器口径面线长度, λ_0 是工作波长。抛物面天线的主波束波瓣宽度可用下式计算

$$2\theta_0 = k^0 \frac{\lambda_0}{D}$$

其中 k^0 是用度表示的系数, 视抛物面口径面张角 ψ 的不同而异。例如当 $\psi = 90^\circ$ 时, $k^0 = 81.84^\circ$ 。于是一个直径 $D = 90\text{cm}$ 的抛物面, 在波长 $\lambda_0 = 3\text{cm}$ (即频率为 10GHz) 工作时, 可以产生 2.73° 的波束。这样窄的波束可以相当精确地给出雷达要观察的目标的

位置。但当频率为 10^8Hz 时，欲达到与上述情况可相比拟的性能，将需要直径达 90m 的抛物面，这样的天线未免太大了。

又例如，微波超远程预警雷达的作用距离可达 1 万公里以上，从而可以给出几十分钟的预警时间以应付洲际导弹的突然袭击。

除军事用途之外，还发展了多种民用雷达，如气象探测雷达、医用雷达、盲人雷达、防盗雷达、汽车防撞雷达及机场交通管制雷达等。这些雷达也多是利用微波频率。

二、通信 由于微波的可用频带宽、信息容量大，所以一些传送大信息量的通信设备都采用微波作为载体。微波多路通信是利用微波中继站来实现高效率、大容量的远程通信的。由于微波的传播只在视距内有效，所以，这种接力通信须沿途以一定间隔（30~50km）建立高塔接力站。利用微波的一种更有意义的通信方式是把人造卫星作为微波接力站。美国在1962年7月发射的第一个卫星微波接力站——Telstar卫星，首次把现场的电视图象由美国传送到欧洲。这种卫星的直径只有 88cm，因而，有效的天线系统只可能在微波波段。近年来，利用微波的卫星通信得到了进一步的发展，利用互成 120° 角的三个定点同步卫星，可以实现全球性的电视转播和通信联络。

三、工农业的应用 在工农业生产方面广泛应用微波进行加热和测量。利用微波进行测量的一个典型例子是微波湿度计。它是利用微波通过物质时被吸收而减弱的原理制成的。它可以用来测量煤粉、石油或各种农作物的水分；检查粮库的湿度；测量土壤、织物等的含水量等等。微波加热的独特优点是从物质内部加热，内外同热，无需传热过程，瞬时可达高温，因而加热速度快、均匀、质量好，而且能进行自动控制。微波加热现已应用于造纸、印刷、制革、橡胶、木材加工及卷烟等工业生产中。在农业上，微波已用来灭虫、育种、育蚕和谷物干燥等。在医疗卫生事业中，微波不仅可用于某些疾病的诊断，还可用于治疗，如微波理疗、微波针灸、冷藏器官的快速解冻以及对浅表皮癌的治疗等。目前，有人正利用微波进行节制生育的科学研究；微波热效应的研究也十分活跃，这将为微波在化学、生物学和医学诸方面的应用开辟新的途径。

四、微波能的应用 微波本身可以作为一种能源。目前，微波加热炉不仅应用于许多工农业部门，而且已广泛用于食物烹调。微波作为能源还有更为令人神往的应用前景，即在未来的卫星太阳能电站的应用中，可先将太阳能变为直流电流，再转换成微波能量发射回地面接收站，最后将接收到的微波能量转换成直流电功率，以供人类使用。

最后应当指出，事物总是一分为二的。一方面微波能量可以造福于人类，但另一方面，大功率、长时间的微波辐射又对人体有明显的损害，甚至导致死亡。人体最易受微波伤害的器官是眼睛和睾丸以及神经系统。为此必须采取防护措施。主要的防护措施是：对微波辐射装置和工作场所的屏蔽；工作人员应备防护衣帽、戴防护眼镜。理论与实践结果表明，人体受微波照射的容许强度约为 $100\text{mW}/\text{cm}^2$ ，一般规定比此值小 10 倍的强度（ $10\text{mW}/\text{cm}^2$ ）作为安全标准。目前，我国电子工业部和卫生部制定并颁布了微波辐射卫生标准（暂行），规定工作人员操作位的微波辐射强度，一日八小时连续辐射时不应超过 $38\mu\text{W}/\text{cm}^2$ ；短时间间断辐射及一天超过八小时照射时，一日总计量不超过 $300\mu\text{W}/\text{cm}^2$ ；一般不容许在强度超过 $5\text{mW}/\text{cm}^2$ 的辐射环境下工作。

§ 1-3 微波技术的研究方法和基本内容

微波的基本理论是经典的电磁理论，主要是以麦克斯韦方程为核心的场与波的理论。研究微波技术问题的基本方法是“场解”的方法，这与在低频电路中采用的路的概念和方法完全不同。在低频时，电路的几何尺寸比工作波长小得多，因此在整个电路系统中，各处的电压和电流可以认为是同时建立起来的。电压、电流有确定的物理意义，能对系统作完全的描述，这就是以基尔霍夫方程为核心的低频电路理论。在微波电路中，工作波长与电路尺寸可相比拟，甚至更小，因而在整个系统中，从源端起直至负载端，波已变化了若干个周期，这样，电磁场的相位滞后现象（延时效应）不能再忽视了。此时，电压、电流等概念已失去明确的物理意义，只有用电磁场和电磁波的概念和方法才能对系统作完全的描述。

然而，这种“场解”法虽然是严格的，但只有在非常简单的边界条件下方能奏效。因为它涉及到偏微分方程的求解问题，对较复杂的边界条件，直接求解相当繁杂，常需借助各种数值解法。实际上，有许多微波工程问题并不需要知道系统中某点处的电、磁场的具体数据，所关心的仅是某元件、器件的对外特性，因而利用等效电路法求解，即可满足要求。这种等效电路法就是把本质上属于场的问题，在一定条件下化为电路问题。这种化场为路的方法是一种简便的工程计算方法，在微波技术中得到了广泛的应用。

前已述及，微波技术是研究微波信号的产生、放大、传输、发射、接收和测量的学科，本书主要是研究微波传输方面的基本理论，它是研究其它方面问题的基础。

本书共分八章。在本章“绪论”中，简述了微波的概念、特点、应用概况及研究方法。第二章是从路的观点出发研究微波传输线的基本传输特性及其计算方法，给出一系列关于微波传输线的基本概念、阻抗圆图及匹配方法。第三章是关于几种TEM波传输线的分类研究，包括双线、同轴线、带状线和微带的电磁场结构及其传输特性。第四章是研究几种截面尺寸规则的空心金属波导中的场分布及主要波型的传输特性。第五章给出网络的五种参量矩阵的定义，着重阐述散射矩阵及其基本性质，介绍了二口网络的外特性参量的计算方法，研究二、三、四口网络的基本性质，对几种复合网络作了分析和研究。第六章介绍微波工程技术中常用到的几种微波元器件的结构、工作原理、主要技术参数及其特性，还对一些重要元器件的设计方法作以扼要介绍。第七章研究的是几种主要的微波谐振器的构成原理及各基本参量的计算方法。第八章简要介绍微波滤波器的基本概念，各类滤波器的基本原理及基本分析方法。

为帮助初学者深入掌握教材的基本理论并能举一反三解决实际问题，每章之后列有一定数量的习题，并在书后附有题解或答案以作参考。

习 题

- 1-1 什么叫微波？微波波段是怎样划分的？
- 1-2 简述微波具有哪些特点？
- 1-3 微波有哪些重要应用？

第二章 传输线基本理论

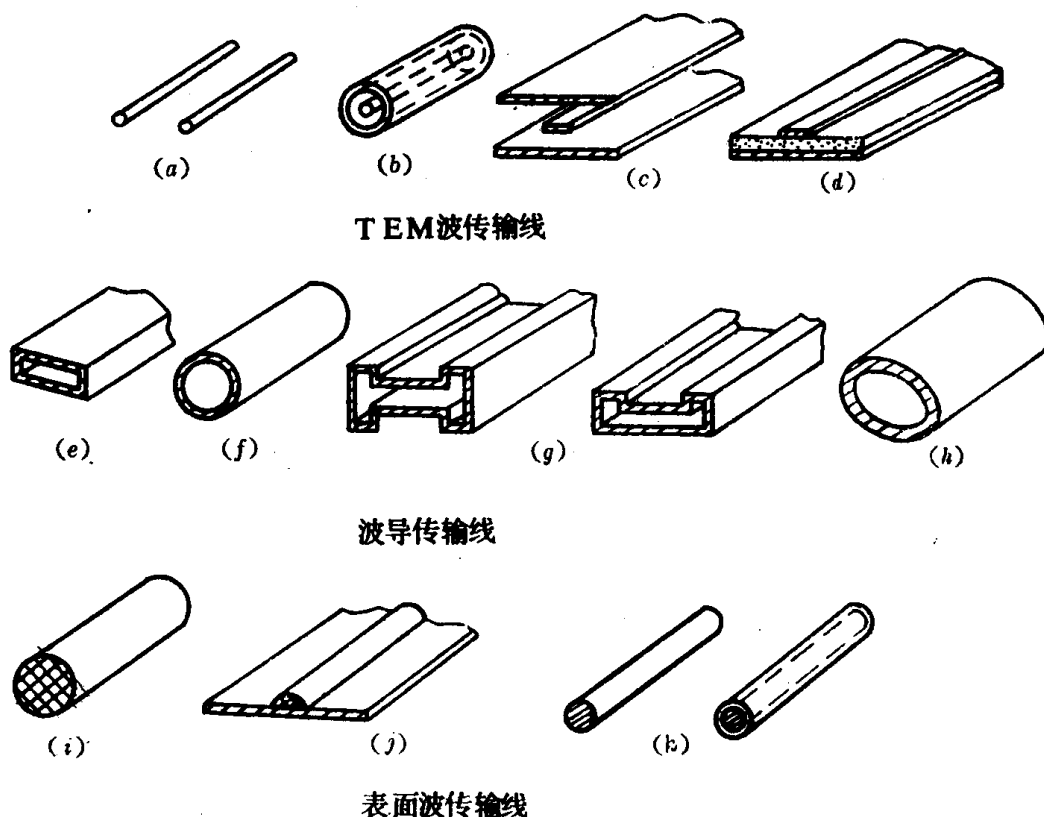
§ 2-1 引言

一、传输线的种类

用来传输电磁能量的线路统称为传输系统，由传输系统引导向一定方向传播的电磁波称为导行波。

和低频段不同，微波传输线的种类繁多。按其上传播的导行波的特征可分为三大类：

- ① TEM 波传输线。如平行双线、同轴线以及微带传输线（包括带状线和微带）等；
- ② 波导传输线。如矩形波导、圆柱波导、椭圆波导及脊波导等；
- ③ 表面波传输线。如介质波导、镜像线及单根线等等。各类传输线示于图2-1-1中。



(a) 平行双导线；(b) 同轴线；(c) 带状线；(d) 微带；(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

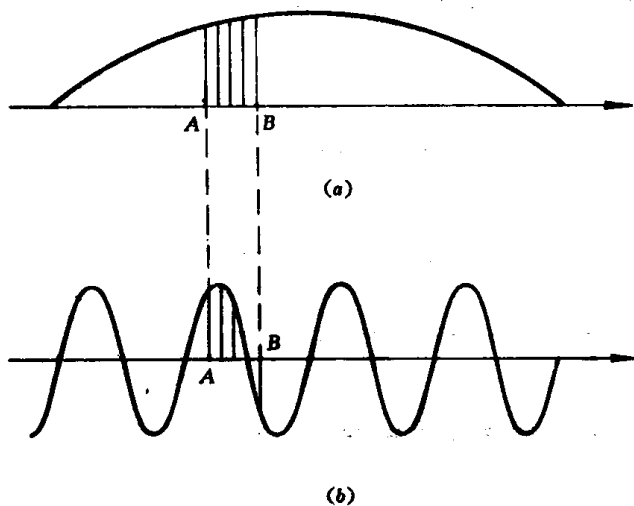
图 2-1-1 传输线的种类

微波传输线不仅能将电磁能量由一处传送到另一处，还可以构成各种各样的微波元件，这与低频传输线截然不同。不同的频段，可以选用不同类型的传输线。对传输线的基本要求是：损耗小、效率高；功率容量大；工作频带宽；尺寸小且均匀。

二、分布参数的概念

“长度”有绝对长度与相对长度两种概念。对于传输线的“长”或“短”，并不是以其绝对长度而是以其与波长比值的相对大小而论的。我们把比值 l/λ 称为传输线的相对长度。在微波领域里，波长 λ 以厘米或毫米计。虽然传输线的长度有时只不过是几十厘米甚至几个毫米，比如传输频率为 3GHz 的同轴电缆虽只有半米长，但它已是工作波长的 5 倍，故须把它称为“长线”；相反，输送市电的电力传输线（频率为 50Hz）即使长度为几千米，但与市电的波长（6 000 千米）相比小得多，因此只能称为“短线”而不能称为“长线”。微波传输线都属于“长线”的范畴，故本章又可称作长线的基本理论。

我们用图 2-1-2 所示线上的电压（或电流）随空间位置的分布状况来说明长、短线的区别。图(a)示出的是半波长的波形图，AB是线上的一小段，它比波长小许多倍。由图可见，线段AB上各点电压（或电流）的大小和相位几乎不变，此时的AB应视为“短线”。如果频率升高了，虽然线段长仍为 AB，但在某一瞬时其上各点电压（或电流）的大小和相位均有很大变化，如图（b）所示，此时线段AB即应视为“长线”。



(a) 短线情况；(b) 长线情况
图 2-1-2 电流（电压）沿线分布图

前者对应于低频率传输线。它在低频电路中只起连接线的作用，因频率低，其本身分布参数所引起的效应完全可以忽略不计，所以在低频电路中只考虑时间因子而忽略空间效应，因而把电路当作集中参数电路来处理是允许的。后者对应于微波传输线。因为频率很高时分布参数效应不能再忽视了，传输线不能仅当作连接线，它将形成分布参数电路，参与整个电路的工作。因而传输线在电路中所引起的效应必须用传输线理论来研究。

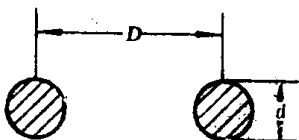
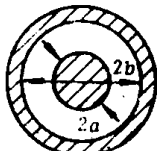
亦即，在微波传输线上处处存在分布电阻、分布电感，线间处处存在分布电容和漏电导。我们用 R_1 、 L_1 、 G_1 、 C_1 分别表示传输线单位长度的电阻、电感、电导和电容，它们的数值与传输线截面尺寸、导体材料、填充介质以及工作频率有关。表 2-1-1 列出了平行双导线和同轴线的各分布参数表达式。根据传输线上分布参数的均匀与否，可将传输线分为均匀和不均匀两种。本章讨论的主要是均匀传输线。

对于均匀传输线，由于参数沿线均匀分布，故可任取一小线元 dz 来讨论。因 dz 很小，故可将它看成一个集总参数电路。用一个 Γ 形（ T 或 π 形）四端网络来等效，如图 2-1-3(a)所示。于是，整个传输线就可看成是由许多相同线元的四端网络级联而成的电路，如图 2-1-3(b) 所示。这是有耗传输线的等效电路，对于无耗传输线（即 $R_1 = G_1 = 0$ ），其等效电路如图 2-1-3(c) 所示。

有了上述等效电路就容易解释传输线上电压、电流不相同的现象。参看图 (b)，

表 2-1-1

平行双导线和同轴线的分布参数

参 数	传 输 线	双 导 线	同 轴 线
L_1 (H/m)			
C_1 (F/m)		$\frac{\pi \epsilon_1}{\ln \frac{D + \sqrt{D^2 - d^2}}{d}}$	$\frac{2\pi \epsilon_1}{\ln \frac{b}{a}}$
R_1 (Ω /m)		$\frac{2}{\pi d} \sqrt{\frac{\omega \mu}{2\sigma_2}}$	$\sqrt{\frac{f \mu}{4\pi \sigma_2}} \left(\frac{1}{a} + \frac{1}{b} \right)$
G_1 (S/m)		$\frac{\pi \sigma_1}{\ln \frac{D + \sqrt{D^2 - d^2}}{d}}$	$\frac{2\pi \sigma_1}{\ln \frac{b}{a}}$

注： σ_1 为导体间介质不理想的漏电电导率； σ_2 为导体的电导率，单位为S/m； μ 为磁导率； ϵ_1 为介质介电常数。

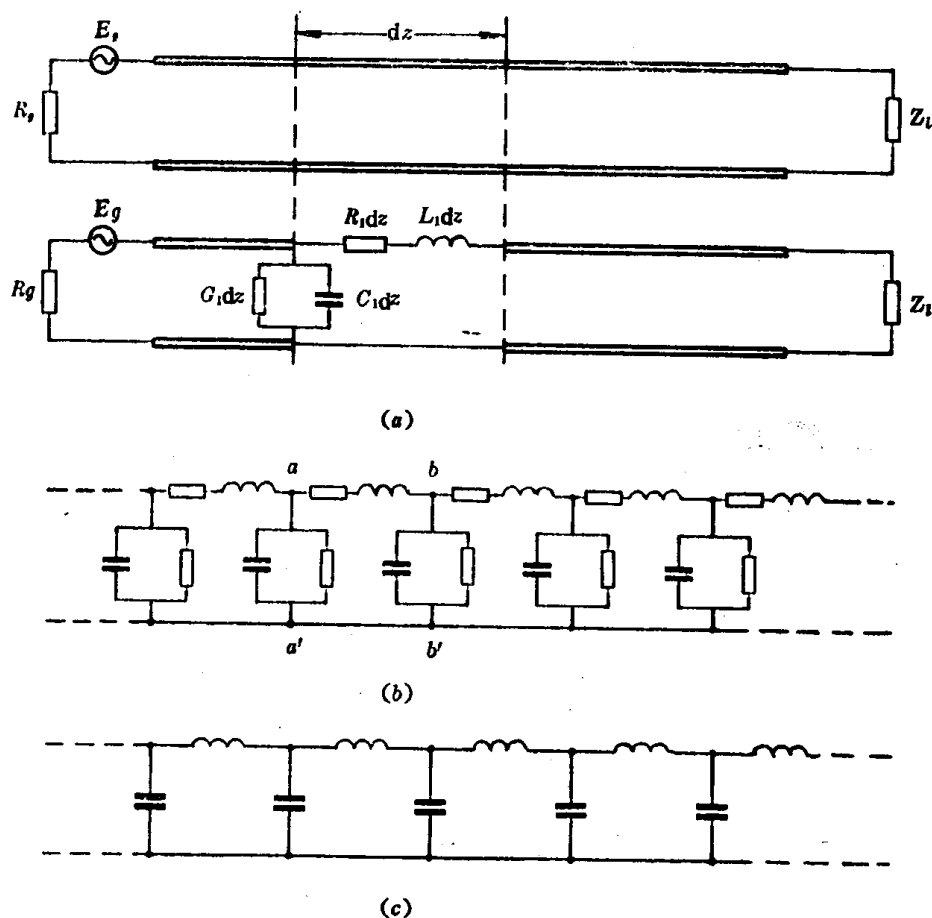


图 2-1-3 传输线的等效电路

由于 aa' 和 bb' 之间有串联电阻存在，二处的阻抗不相等，因而两处的电压也不相同；又

由线间并联回路的分流作用,通过 a 和 b 点的电流亦不相同。同时还可看出,当接通电源后,电源通过分布电感逐次向分布电容充电形成向负载传输的电压波和电流波。就是说电压和电流是以波的形式在传输线上传播并将能量从电源传至负载。

§ 2-2 传输线方程

一、传输线方程

表征均匀传输线上电压电流关系的方程式称为传输线方程。该方程最初是在研究电报线上电压电流的变化规律时推导出来的,故又称做“电报方程”。

分析图2-2-1所示的微波传输系统。令传输线上距始端为 z 处的瞬时电压、瞬时电流

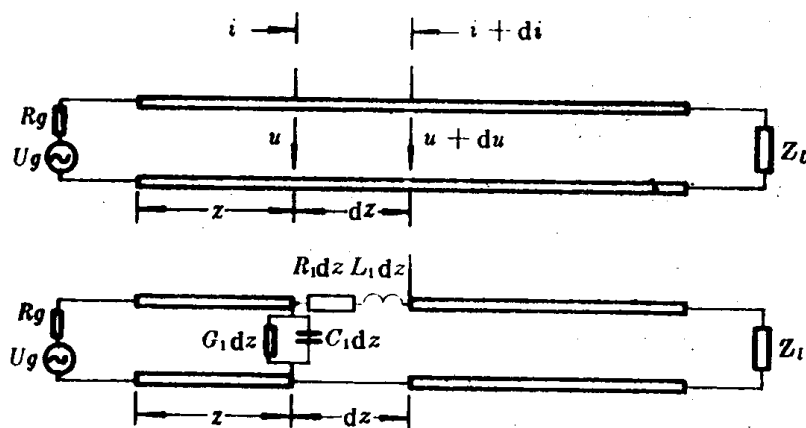


图 2-2-1 传输线等效电路

分别为 u 、 i ; 在 $z+dz$ 处则分别为 $u+du$ 和 $i+di$ 。其中 u 、 i 既是空间位置 z 又是时间 t 的函数,即

$$u = u(z, t)$$

$$i = i(z, t)$$

于是,在某一时刻经过微小线元 dz 后,电压电流的变化分别为

$$-du = -\frac{\partial u}{\partial z} dz$$

$$-di = -\frac{\partial i}{\partial z} dz$$

我们知道,线元 dz 两端处电压、电流的变化(减小)是由于串联阻抗的电位降、并联导纳分流造成的,它们遵循基尔霍夫定律,即

$$-\frac{\partial u}{\partial z} dz = R_1 dz \cdot i + L_1 dz \cdot \frac{\partial i}{\partial t}$$

$$-\frac{\partial i}{\partial z} dz = G_1 dz \cdot u + C_1 dz \cdot \frac{\partial u}{\partial t}$$

消去 dz ,上式变为分布参数电路的微分方程式

$$-\frac{\partial u}{\partial z} = R_1 i + L_1 \frac{\partial i}{\partial t} \quad (2-2-1)$$

$$-\frac{\partial i}{\partial z} = G_1 u + C_1 \frac{\partial u}{\partial t} \quad (2-2-2)$$

此即为均匀传输线方程或称电报方程。

二、波动方程

考查无耗传输线的情况，此时 $R_1 = 0$ 、 $G_1 = 0$ 。式 (2-2-1)、(2-2-2) 退化为 $-\partial u / \partial z = L_1 \partial i / \partial t$ 、 $-\partial i / \partial z = C_1 \partial u / \partial t$ 。将前式再对 z 微分一次并将后式代入，将后式再对 z 微分一次并将前式代入，整理后即可得到

$$\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = L_1 C_1 \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (2-2-3a)$$

$$\frac{\partial^2 i}{\partial z^2} = L_1 C_1 \frac{\partial^2 i}{\partial t^2} \quad (2-2-3b)$$

此即无耗传输线的波动方程式。这是一组二阶偏微分方程，两式的形式完全一样，故我们只讨论其中一个即可，比如选择式 (2-2-3a) 进行讨论。

根据工程数学，上述方程可以写出下列两个独立的达朗贝尔解的形式，即

$$u = u_1(v_p t - z) + u_2(v_p t + z) \quad (2-2-4a)$$

$$i = i_1(v_p t - z) + i_2(v_p t + z) \quad (2-2-4b)$$

将式 (2-2-4a) 式代入式 (2-2-3a) 中，有

$$u_1''(v_p t - z) + u_2''(v_p t + z) = L_1 C_1 [v_p^2 u_1''(v_p t - z) + v_p^2 u_2''(v_p t + z)]$$

于是解得

$$v_p = 1 / \sqrt{L_1 C_1} \quad (2-2-5)$$

由此可见，式 (2-2-4a) 的第一项表示以速度 v_p 沿 z 轴正方向传播的任意形状的电波，如图 2-2-2 所示。我们考查任意时刻 t ，波形 $u_1(v_p t - z)$ 上的 A 点，它随整个波形以速度 v_p 向 $+z$ 方向行进。经过时间 Δt 后， A 点到达虚线波形上的 A' 点，此电压波形为 $u_1[v_p(t + \Delta t) - z] = u_1[v_p t - (z - v_p \Delta t)]$ ，即 A 点沿 $+z$ 方向移动了 $v_p \Delta t$ 。同样地，式 (2-2-4a) 的第二项 $u_2(v_p t + z)$ 则表示向 $-z$ 方向移动的电波。

$$u_1(v_p t - z) = u_1[v_p(t + \Delta t) - z] = u_1[v_p t - (z - v_p \Delta t)]$$

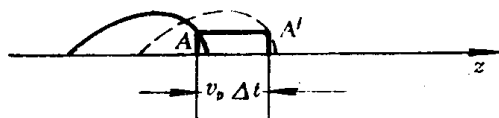


图 2-2-2 电压行波

若选式 (2-2-3b) 来讨论，则式 (2-2-4b) 中的 $i_1(v_p t - z)$ 和 $i_2(v_p t + z)$ 分别代表以速度 v_p 沿 $+z$ 和 $-z$ 两个方向传播的电流波。

三、正弦波动

正弦波动是波动中最基本的传播形式。此时的电压、电流可分别表示为