

21世纪高等院校规划教材

微波技术及应用

牛忠霞 雷 雪 张德伟 编著

国防工业出版社

<http://www.ndip.cn>

21 世纪高等院校规划教材

微波技术及应用

牛忠霞 雷雪 张德伟 编著

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书分为7章,比较全面、系统地介绍了传输线理论、微波传输系统、微波网络基础、微波元器件以及微波计算机辅助设计、微波电子管等内容及其新发展,各章末附有相应思考题或习题。全书力求概念准确、条理清晰、叙述简洁严谨、注重各章内容上的内在联系。既注重原理性的阐述和理论性的分析,又充分考虑到实际应用及其技术发展,具有较强的可用性及参考价值。

本书可作为高等院校理工科通信工程、电子信息工程、电子科学与技术等各电子与信息类及其相关专业本科生和研究生的教材或参考用书,也可供从事各相关专业的科研人员和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

微波技术及应用/牛忠霞等编著. —北京:国防工业出版社,2005.1

ISBN 7-118-03713-3

I. 微... II. 牛... III. 微波技术 IV. TN015

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 120749 号

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 20 $\frac{3}{4}$ 473 千字

2005 年 1 月第 1 版 2005 年 1 月北京第 1 次印刷

印数:1—4000 册 定价:32.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

前 言

科学技术的发展表明,电子与信息领域中的任何重大突破,都离不开电磁场与微波技术的新进展,因而电磁场与微波技术作为基础性学科,其意义和重要性是显而易见的。正是基于这样的认识,我们在多年来所用牛忠霞同志《微波技术》一书的基础上,结合微波技术新的发展和应用,经过改写而构成本书。

全书共分7章。第1章概括地介绍了微波技术的概念、波段划分、特点、应用及本书的基本内容;第2章作为本书的内容和分析方法基础之一,应用分布参数理论介绍了传输线的各种概念、特性参量及其应用;第3章作为本章的基础利用“场解”的方法以规则波导为主,讨论了各种微波传输系统以及波导等效为长线的问题;第4章作为微波技术中关于各种微波电路及元件常用的分析与综合方法,介绍了微波网络基础;第5章在上述内容基础上,以“场”、“路”或“场路”结合的方法,先后介绍分析了微波不连续性和一些常用微波元器件及其特性;第6章以计算机辅助分析为基础,介绍了几种典型元器件的计算机辅助设计;第7章介绍了曾一度为人们有所忽视的微波电子管,包括速调管和行波管的分析方法,以及其特性。

在本书编写中,如何处理好加强基础知识与引入新的理论和技术之间的关系;注意培养提高学生的创新能力,是一个值得探讨的永久课题,也是衡量一本教科书质量的关键;另外本书还在力求结构紧凑,叙述简捷,加强各章之间的内在联系等方面,结合长期教学与科研工作实践进行了一些有益的尝试。

本书的第1,2,3,7章由牛忠霞编写;第4章由张德伟编写;第5章由雷雪编写;第6章由雷雪和张德伟共同完成。本书的完成得到解放军信息工程学院各级领导的关心与支持,周东方、罗小武和张广求教授曾对本书的初稿提出了改进意见;另外博士生杜晓燕、饶育萍曾提供了部分研究资料;硕士生翁凌雯、张毅、张峰、邵颖、李现兵、曹金坤、魏檀、赵瑛等在录入、绘图、校对等方面做了大量工作,在此对他们表示衷心感谢。此外,本书的完成参考了国内外众多的书籍及文献,仅将主要的参考文献列于书后,同时向原作者表示深深的谢意。

由于作者水平有限,酝酿不够,错漏之处诚请读者批评指正。

作 者

2004年10月

目 录

第1章 绪论	1
1.1 微波波段的划分及其特点	1
1.2 微波的应用	2
1.3 本教材的基本内容	3
第2章 长线理论	5
2.1 引言	5
2.2 电报方程及其解	5
2.2.1 电报方程	5
2.2.2 电报方程的解	7
2.3 传输线的阻抗概念和反射系数	8
2.3.1 传输线的阻抗概念	8
2.3.2 反射系数	9
2.4 无耗传输线上的3种工作状态	10
2.4.1 行波状态	10
2.4.2 纯驻波状态	11
2.4.3 混合波状态	13
2.5 阻抗匹配的概念和功率传输	15
2.5.1 阻抗匹配的概念	15
2.5.2 传输功率的计算和功率容量	17
2.6 史密斯圆图	18
2.6.1 史密斯圆图构成	18
2.6.2 导纳圆图	22
2.6.3 导抗圆图	23
2.6.4 史密斯圆图应用举例	23
2.6.5 阻抗匹配技术	26
2.7 传输线瞬变特性分析	28
2.7.1 传输线时域方程及其对阶跃信号的响应	29
2.7.2 跳跃图	32
思考题	34
习题	35
第3章 微波传输系统	37
3.1 引言	37
3.2 导行电磁波及其传输特性	38

3.2.1 导行波方程及其解·····	38
3.2.2 导行波的分类及其传输特性·····	39
3.3 矩形波导中的导行波·····	42
3.3.1 矩形波导中 TE、TM 波场量表达式·····	43
3.3.2 矩形波导中的场结构·····	44
3.3.3 矩形波导中的波型·····	48
3.4 矩形波导中的 H_{10} 波型·····	49
3.4.1 H_{10} 波的几个参量·····	49
3.4.2 H_{10} 波的波导壁电流分布·····	51
3.4.3 波导的功率容量·····	53
3.4.4 波导的损耗与衰减·····	54
3.4.5 矩形波导截面尺寸选择·····	56
3.5 圆波导·····	56
3.5.1 圆波导中的场量表达式和波型·····	57
3.5.2 圆波导中的几个主要波型·····	61
3.6 其他波导介绍·····	64
3.6.1 脊波导·····	64
3.6.2 截止波导·····	66
3.7 波导等效为长线问题·····	68
3.8 同轴线·····	72
3.9 微带传输线·····	75
3.9.1 微带的传输特性·····	75
3.9.2 带状线·····	88
3.9.3 其他形式微带线简介·····	90
3.9.4 耦合微带的传输特性·····	92
3.10 其他形式的传输线简介·····	97
3.10.1 共面波导·····	97
3.10.2 槽线·····	98
3.10.3 毫米波传输系统·····	99
3.11 波的激励与激励机构·····	101
3.11.1 激励的一般规律·····	101
3.11.2 激励机构·····	102
思考题·····	104
习题·····	105
第 4 章 微波网络基础·····	107
4.1 引言·····	107
4.2 微波不连续性的等效及多端口网络·····	108
4.3 线性微波网络的 Z 、 Y 、 A 参数·····	112
4.3.1 Z 参数矩阵·····	112

4.3.2	Y 参数矩阵	114
4.3.3	A 参数矩阵	114
4.3.4	基本电路单元的[A]矩阵参数	117
4.4	线性微波网络的 S、T 参数	118
4.4.1	S 参数矩阵	118
4.4.2	S 矩阵参数的性质	120
4.4.3	S 参数的测量	122
4.4.4	双端口网络的 S 参数与 A、Y、Z 参数的关系	123
4.4.5	基本电路单元的 S 参数	125
4.4.6	T 参数矩阵	127
4.5	散射参数的信号流图法	128
4.5.1	网络流图的建立法则	128
4.5.2	信号流图的解法	131
4.6	多端口网络特性分析	134
4.6.1	三端口网络分析	134
4.6.2	四端口网络元件分析	136
4.7	网络的工作特性参数	142
4.7.1	插入驻波比	142
4.7.2	工作衰减和插入衰减	142
4.7.3	插入相移	144
4.8	网络综合的概念和对偶定理	144
4.8.1	网络综合的概念	144
4.8.2	对偶电路定理	145
4.9	单端口无耗网络的电抗函数及其网络综合	148
4.9.1	电抗函数	148
4.9.2	由电抗函数综合出梯形网络	151
4.10	集总元件双端口无耗网络的综合	153
4.10.1	由工作衰减求输入阻抗	153
4.10.2	由输入阻抗综合梯形网络	154
4.11	微波等长传输线双端口网络的综合	156
4.11.1	s 面网络	156
4.11.2	s 面网络的综合	158
	思考题	162
	习题	162
第 5 章	不连续性与微波元件	164
5.1	引言	164
5.2	微波传输系统中的不连续性	164
5.2.1	波导中的一些不连续性	164
5.2.2	同轴线中的某些不连续性	169

5.2.3 微带线中的不连续性	171
5.3 微波谐振器	175
5.3.1 微波谐振器的特性参数	176
5.3.2 传输线型谐振器的等效电路	179
5.3.3 实用微波谐振腔介绍	183
5.3.4 谐振器等效电路及激励与耦合	189
5.4 单端口互易元件	190
5.4.1 短路器	190
5.4.2 匹配负载	193
5.4.3 失配负载	194
5.5 二端口互易元件	195
5.5.1 衰减器	195
5.5.2 移相器	198
5.5.3 微波滤波器	202
5.5.4 连接元件	205
5.6 三端口互易元件	207
5.6.1 E-T 波导分支元件	207
5.6.2 H 面分支	208
5.6.3 两路功率分配器	209
5.7 四端口互易元件	211
5.7.1 三分贝隙缝桥式雷达天线收发开关	211
5.7.2 定向耦合器	212
5.8 微波铁氧体器件	221
5.8.1 微波铁氧体的电磁特性	221
5.8.2 法拉第效应	223
5.8.3 几种微波铁氧体元件	225
思考题	231
第 6 章 微波电路计算机辅助设计	232
6.1 引言	232
6.2 微波电路计算机辅助分析	234
6.2.1 待定导纳矩阵分析	234
6.2.2 待定导纳矩阵性质	235
6.2.3 建立待定导纳矩阵的方法	236
6.2.4 分布参数元件的待定导纳矩阵	240
6.2.5 组合网络不定导纳矩阵的建立	244
6.2.6 不定导纳矩阵的化简	246
6.3 微波电路最优化设计	247
6.3.1 最优化设计基本原理	247
6.3.2 目标函数	251

6.4 微波电路辅助设计编程举例	257
习题	280
第7章 微波电子管	281
7.1 引言	281
7.2 双腔式速调管放大器	282
7.2.1 构成和简单的工作过程	282
7.2.2 电子束的速度调制	282
7.2.3 电子束的群聚——密度调制	284
7.2.4 群聚电子流的小信号分析	285
7.2.5 双腔速调管存在的问题	288
7.3 反射式速调管	288
7.3.1 反射式速调管的结构及电子束的群聚过程	288
7.3.2 振荡条件和振荡区	289
7.3.3 反射式速调管群聚电子流的小信号分析	291
7.3.4 反射速调管的负阻分析	292
7.3.5 反射式速调管的功率特性	294
7.3.6 反射式速调管的调谐和振荡调制	295
7.4 O型行波管	300
7.4.1 直行波管	300
7.4.2 返波管简介	311
思考题	312
附录一 分贝换算表	313
附录二 同轴线参数表	315
附录三 国产矩形和扁矩形波导管数据表	317
参考文献	319

第 1 章 绪 论

1.1 微波波段的划分及其特点

顾名思义微波就是波长很微小的波。它不是指一个固定波长的波,而是代表从 1 m 到 1 mm 范围内电磁波的整个波段。微波在整个电磁波谱中的位置可由图 1.1.1 查到。由图 1.1.1 可见,其低频端与“超短波”波段相连,而高频端则毗邻于红外线波段。由于微波波段所对应的频率是从 300 MHz 到 300 GHz,频率很高,因而又叫做超高频。

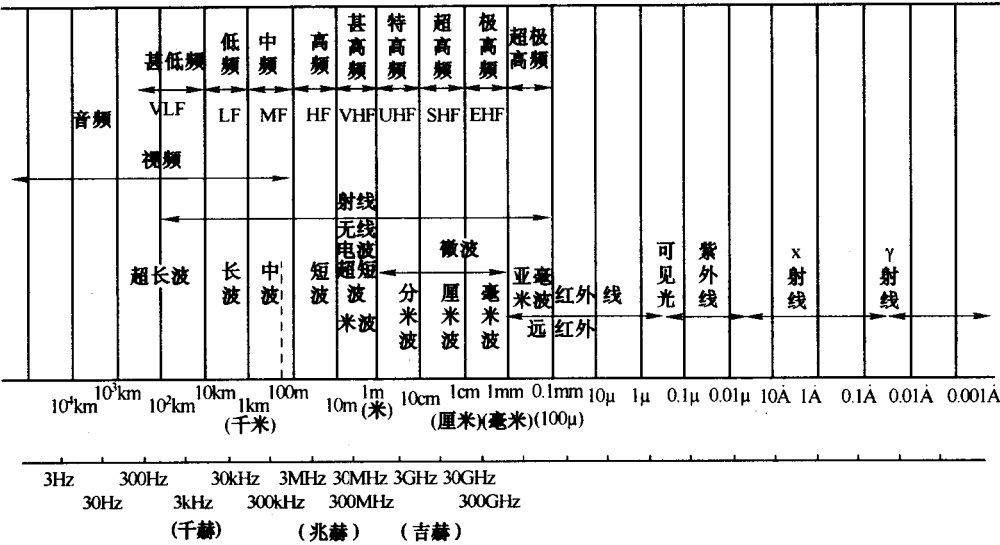


图 1.1.1 电磁波频谱表

为了方便,常将微波波段按波长细分为如表 1.1.1 所列波段。习惯上,又把常用的微波波段用拉丁字母表示,分别以 L、S、C、X、Ku、K、Q 表示 50 cm~23 cm、10 cm、5.5 cm、3.2 cm、2 cm、1.25 cm、0.82 cm 波段等。

表 1.1.1 微波的分波段

波段名称	波长范围	频率范围/MHz
分米波	1 m~10 cm	$3 \times 10^2 \sim 3 \times 10^3$
厘米波	10 cm~1 cm	$3 \times 10^3 \sim 3 \times 10^4$
毫米波	1 cm~1 mm	$3 \times 10^4 \sim 3 \times 10^5$
亚毫米波	1 mm~0.01 mm	$3 \times 10^5 \sim 3 \times 10^7$

人们之所以把微波作为一个专门的波段来研究,是因为微波具有区别于其他波段的显著特点,这些特点决定了它的特殊地位。

(1) 频率高。微波的振荡频率在 10^9Hz 以上,即振荡周期在 10^{-9}s 以下,而一般的电子管中,电子从阴极渡越到阳极的时间差不多也是这个数量级。由于在中短波的情况下,电磁波的周期比这个渡越时间长得多,所以渡越时间的影响可以忽略不计。但在微波情况下,二者已可以相比拟,因而渡越时间的影响不能再忽略,其影响甚至使得电子管无法正常工作。这就迫使人们必须利用新的工作原理来设计微波源和微波放大器。例如人们利用渡越时间效应制造出速调管、行波管、磁控管等,还利用其他一些原理设计出一些固态源和器件。这都是微波波段所特有的。

(2) 波长短。由于微波波长短,所以具有类光的特性。这表现在:① 宏观看来,具有直线传播的特点,所以碰到一般的目标(飞机、舰艇、建筑物等)时,会发生强烈反射,甚至当波长短于 1cm 或更小时,雨、雪、云雾及大气中的水汽和沙尘都会对微波发生程度不同的反射、吸收和散射。这就启发我们对微波的辐射和收集可以利用透镜和抛物面等所谓“面天线”的办法来进行。另外,当一根与波长可以相比拟的导线分布有电流时,导线可以像天线那样产生电磁辐射。② 具有波动性。由于其波长很短,可以和一般的微波元、器件及电路的几何尺寸相比拟,甚至比其更短,这时电磁波的波动性就表现了出来,从而导致了微波波段电路形式的变化,即原来低频时的 R 、 L 、 C 集总参数电路不再适用,而代之以分布参数的电路形式。③ 微观的研究,可知微波还具有粒子特性。这一性质在研究微波与物质的相互作用时必须考虑。

(3) 能穿透电离层。由于微波频率高,具有能够穿透电离层而不为其反射和吸收的特点,因而被喻为无线电波谱中的“宇宙窗”,为星际通信、卫星通信、遥测遥感、射电天文学的研究和发展提供了条件。

1.2 微波的应用

微波技术的发展到目前已有 60 多年的历史了。几十年来,微波的发展很快,它的应用已经遍及各个领域。下面从 5 个方面进行简单的介绍。

(1) 通信方面。微波最重要的应用之一就是多路通信。由于微波频率高,在同样的相对带宽下,它比短波和超短波的频带要宽几十倍、数百倍左右,承载信息量大。因而微波通信以微波多路通信,微波中继通信、散射通信、卫星通信、移动通信的方式,已经用于或规划用于从米波 $400\text{MHz}\sim 500\text{MHz}$ 到毫米波的 275GHz 的各波段上,根据通信业务的具体要求,分别用于近距和远距的话音、文字、图像和电视等各种信息的传输,目前随着通信业务的发展,微波通信正向着更高频率发展。

(2) 雷达方面。雷达技术的发展与微波技术的发展有着密切的关系。实际上,正是第二次世界大战期间人们把微波技术用于雷达中,刺激了微波技术的迅速发展。当时雷达作为战争中的先进装备对战争的进程起了很大作用。目前雷达仍然主要用于军事目的。这方面的雷达有大型远程预警雷达、舰载雷达、机载雷达、弹载雷达等。主要用于预警、侦察、跟踪和攻击敌人的目标。同时,也发展了多种民用雷达,如导航、气象、防撞雷达以及遥感侧视雷达等,以用于导航、气象预报、地表及地下资源探测等。另外,与被动雷达

功能类似,微波辐射计以高灵敏度微波接收系统探测目标的等效温度,然后经过信息处理以获取目标有关的信息,它在军事上可以用于目标的监视、监测、确认及测绘,在民用上可用于物质内含水测量,冰层雪层测绘及环境质量及其变异的监视等,正是微波技术的发展推动了雷达等技术发展。

(3) 科学研究方面。近些年来,在科学研究中,微波技术发挥着越来越大的作用。如原子钟和加速器的研制成功,就是微波技术的应用和发展的结果。再如 20 世纪 60 年代中,射电天文观察正是以微波技术作为主要观测手段才发现了类星体、中子星、2.7K 背景辐射和星际有机分子等天文学的四大发现。另外,近年来人们利用微波的观测作用还发展了微波遥感技术,以用于农林生产状况,地理、地质矿产分布,大气和海洋污染等调查、监视与监测等。

(4) 微波能的应用。人们除了把微波作为运载信息的工具外,近年来广泛研究了微波能的使用。人们利用物质吸收微波后产生的热效应进行烘烤、食物烹调 and 理疗等微波加热。微波加热的特点是:从物体内部起,穿透深度深,各部分热量均匀,加热速度快,效率高等,因而它已广泛地引起了人们的兴趣,其应用已遍及农业、工业、医疗卫生等各方面。另外对其他形式的微波能效应的研究也十分活跃,因而微波能应用的前景将非常广阔。

(5) 上述介绍的只是低功率微波频率资源应用,目前一些世界大国正在研究已接近实用化的高功率微波武器(HPM)。HPM 所发射的总能量可在 100 kJ 以上,而且定向性很好。据报道,在 $(0.01 \sim 1) \text{ W/cm}^2$ 剂量下,可使计算机芯片及通信雷达导航等系统性能显著下降或失效;在 $(10 \sim 100) \text{ W/cm}^2$ 剂量下即可使有壳体屏蔽的电子器件烧坏,并使工作在任何频段的电子系统失效而瘫痪;在 $(10^2 \sim 10^3) \text{ W/cm}^2$ 下能引起非线性效应,并能引爆炸弹、导弹、核弹等武器,在瞬间摧毁目标;在 $(3 \sim 10) \text{ mW/cm}^2$ 即可使人员产生精神错乱或行为失常,而在 80 mW/cm^2 剂量上,持续时间 1 s 即可致人死亡。这种高功率微波武器既可用于攻击,也可用于自卫。

1.3 本教材的基本内容

微波技术属于应用性学科,其基本内容必然要涉及到理论和实际两个方面。微波技术的基本理论主要是以麦克斯韦方程组为核心的经典电磁场理论,基本的研究方法是“场解”的方法。这方面的内容在电磁场理论中已经论及。另外其经典理论还包括,在低频电路和概念基础上发展起来的微波传输线理论和微波网络理论。它是在一定条件下把“场”的问题化为“路”的问题来处理,这种方法对于一般的分析和工程计算是一种简便而有效的方法。本书第 2 章讨论传输线理论即长线理论问题;第 3 章将利用“场解”的方法讨论各传输系统的问题;第 4、5 章分别讲述和分析由微波不连续性构成的微波网络和各种微波元件;第 6 章介绍微波计算机辅助设计问题;第 7 章介绍微波电子管问题。

铁氧体在微波技术中有着广泛的应用,实际上它所涉及的问题,是微波与物质的相互作用问题,因而它代表着微波技术所涉及的一个方面。而鉴于学时有限,我们只能在第 5 章中进行一些原理性的讨论。第 7 章微波电子管所涉及的也是微波与物质相互作用的问题,微波电真空管仍然是一种发展中的技术,并具有与其他微波有源器件同样重要的应

用。该章内容的设置主要是考虑到由于种种因素的影响,一段时间以来存在着本不该忽视这部分内容的倾向。在上述内容中,本书只涉及了部分微波元器件的分析、设计计算与性能介绍。但是,只要较好地掌握了上述内容对于从事微波技术实际工作就有了一定的基础。还应指出,由于大多数微波器件边界条件非常复杂,很难精确地分析和计算,一般的计算只能给出其量值的大概范围,因而其最后的设计定型往往要经过实验和测量决定。所以微波测量与实验技术是解决工程实际问题的重要手段,掌握它与掌握微波技术理论具有同样重要的意义。

由于微波技术涉及面颇广,作为通信雷达及其相关专业的教材,只能涉及一些基本的理论与技术问题。望读者学习本教材时,应着重基本理论和基本方法的学习,以期达到触类旁通,举一反三,从而提高分析问题、解决问题的能力,为今后的工作和再学习打下应有的基础。

第2章 长线理论

2.1 引言

本章采用“路”的方法来分析微波传输系统。

所谓长线,是指线的长度与它所传输的电磁波的波长可以相比拟的意思。它是相对于一般低频电路中电路的几何尺寸远小于工作波长(这被称为短线)而言。“长线”这个词是人们从“电路”的角度去研究微波传输系统的产物,因而长线理论又叫做传输线的电路理论。

应该指出,虽然到了微波波段,由于传输系统的几何尺寸和工作波长已可比拟,使“似稳条件”遭到破坏,“场”的概念变得重要起来,但是这并不意味着“路”的概念和方法变得过时和陈旧。事实上许多微波问题,常常是以场的分析开始,然后在一定条件下归结为“路”的方法来处理。这样既简化了问题,又可以借助电路中已经掌握了的概念来理解微波问题的物理意义。正是本着这种观点,本章安排了对长线理论的讨论,它一方面为我们展示了分析传输系统的另一种方法,另一方面也为第4章以后的微波网络及用微波网络来分析处理微波技术中的一些问题打下基础。但是也应该看到,“场”毕竟不是“路”,“场”的问题,用“路”的方法来分析是有条件的,这也说明了“路”的方法的近似性。

本章的讲法是,首先介绍长线理论的有关内容,并把它们归结在一个圆图上,用圆图来研究和处理传输线的工作状态和各参量之间的关系,练习圆图——史密斯圆图的使用,并讨论阻抗匹配问题。另外,考虑到涉及瞬态场的问题日渐增多,在最后简单介绍传输线的瞬态特性分析。

2.2 电报方程及其解

2.2.1 电报方程

用电路的方法来研究长线,就是把对于长线整体已经被破坏了的似稳条件,想办法再用于分析长线。其作法是把长线分成很短的一些线段,保证每段长 $\Delta l \ll \lambda$,显然对长线的每一段 Δl ,似稳条件成立。在长线的每一小段上,把沿线分布的电场和磁场分别与集总参数的电容 C 和电感 L 联系起来,把沿线的欧姆损耗、线间介质损耗与集总参数的电阻 R 和电导 G 联系起来。这样就把看来不存在什么集总元件的均匀传输线,看成是由每一小段 dl 都同时存在着上述4种集总参数 C 、 L 、 R 、 G ,即把均匀传输线看成是由上述4种集总参数所构成的分布参数电路,如图2.2.1所示。

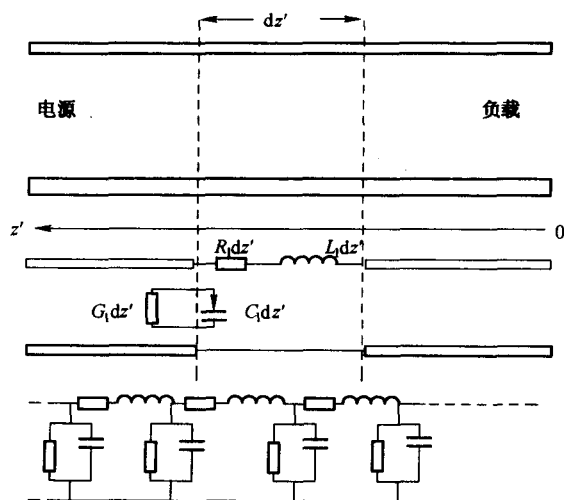


图 2.2.1 长线等效电路

在图 2.2.1 中, 设距终端 $z + dz$ 处的电压和电流分别为 $u + du, i + di$; 电压 u 和电流 i 定义如下:

$$\begin{cases} u = u(z', t) \\ i = i(z', t) \end{cases} \quad (2.2-1)$$

于是经线元 dz 后, 电压、电流变化为

$$\begin{cases} du = \frac{\partial u}{\partial z'} dz' \\ di = \frac{\partial i}{\partial z'} dz' \end{cases}$$

利用电路理论中的基尔霍夫定律, 具体地写出 dz' 段的压降 du 及分流 di , 并略去高阶无穷小量, 加以整理, 可得到线上电压 $\dot{U}$ 和电流 $\dot{I}$ 的传输线方程或电报方程为

$$\begin{cases} \frac{d\dot{U}}{dz'} = Z_1 \dot{I} \\ \frac{d\dot{I}}{dz'} = Y_1 \dot{U} \end{cases} \quad (2.2-2)$$

式中

$$Z_1 = R_1 + j\omega L_1 \quad (2.2-3a)$$

$$Y_1 = G_1 + j\omega C_1 \quad (2.2-3b)$$

Z_1, Y_1 分别为单位长度传输线的串联阻抗和并联导纳; R_1, G_1, L_1, C_1 分别为单位长度传输线上的电阻、电导、电感和电容; $\dot{U}, \dot{I}$ 分别表示距终端 z' 处的复电压和复电流。

$$\begin{cases} u(z', t) = \text{Re}[\dot{U}(z')e^{j\omega t}] \\ i(z', t) = \text{Re}[\dot{I}(z')e^{j\omega t}] \end{cases} \quad (2.2-4)$$

式(2.2-2)表明传输线上电压的变化是由串联阻抗压降造成的; 而电流的变化是由并联导纳的分流造成的。

2.2.2 电报方程的解

将式(2.2-2)对 z' 再微分一次得到

$$\frac{d^2 \dot{U}}{dz'^2} = Z_1 Y_1 \dot{U} = \gamma^2 \dot{U} \quad (2.2-5)$$

式(2.2-5)即为均匀传输线的波动方程,其通解为

$$\dot{U} = \dot{U}_1 e^{j\gamma z'} + \dot{U}_2 e^{-j\gamma z'} \quad (2.2-6a)$$

将式(2.2-6a)代入(2.2-2a)得到

$$\dot{I}(z') = \frac{1}{Z_1} \frac{d\dot{U}}{dz'} = \frac{1}{Z_0} (\dot{U}_1 e^{j\gamma z'} - \dot{U}_2 e^{-j\gamma z'}) \quad (2.2-6b)$$

Z_0 和 γ 是表征传输线传输特性的两个参量, Z_0 称为特性阻抗, γ 为传输常数。一般情况下(有耗)传输线的特性阻抗为复数。

式(2.2-6)表明传输线上任一点的电压波和电流波均有两部分组成:第一部分是,沿 $-z'$ 方向(电源向负载)传输的入射波;第二部分是沿 z' 方向传输的反射波。一般情况下,传输线上任何一点的电压和电流都是由这两部分波叠加而成的。

$$\text{式中} \quad Z_0 = \sqrt{\frac{R_1 + j\omega L_1}{G_1 + j\omega C_1}} \quad (2.2-7)$$

$$\gamma = \sqrt{(R_1 + j\omega L_1)(G_1 + j\omega C_1)} = \alpha + j\beta \quad (2.2-8a)$$

对于微波传输线,损耗一般很小,当满足 $R_1 \ll \omega L_1$, $G_1 \ll \omega C_1$ 时有:

$$\begin{cases} \alpha = \frac{R_1}{2Z_0} + \frac{G_1 Z_0}{2} \\ \beta = \omega \sqrt{L_1 C_1} \end{cases} \quad (2.2-8b)$$

式中, $R_1/2Z_0$ 为传输线的导体损耗, $G_1 Z_0/2$ 为传输线的介质损耗。

在理想情况下, $G_1 = 0, R_1 = 0$

则

$$\text{特性阻抗为} \quad Z_0 = \sqrt{L_1/C_1} \quad (2.2-9)$$

$$\text{传输常数为} \quad \gamma = j\omega \sqrt{L_1 C_1} = j\beta \quad (2.2-10)$$

$$\text{衰减常数为} \quad \alpha = 0 \quad (2.2-11)$$

$$\text{相位常数为} \quad \beta = \omega \sqrt{L_1 C_1} \quad (2.2-12)$$

由于一般微波传输线较短,且由良导体构成,近似有 $G_1 = 0, R_1 = 0$,故上述结果可用于微波传输线。于是对于无耗传输线,其通解变为

$$\begin{cases} \dot{U} = \dot{U}_1 e^{j\beta z'} + \dot{U}_2 e^{-j\beta z'} \\ \dot{I} = \frac{1}{Z_0} (\dot{U}_1 e^{j\beta z'} - \dot{U}_2 e^{-j\beta z'}) \end{cases} \quad (2.2-13)$$

式中, $\dot{U}_1$ 和 $\dot{U}_2$ 为待定常数,须由传输线边界条件来确定。传输线边界条件一般有 3 种:

① 已知终端 $z' = 0$ 的电压 $\dot{U}_L$ 和电流 $\dot{I}_L$; ② 给定始端电压 $\dot{U}_1$ 和电流 $\dot{I}_1$; ③ 已知电源电动势 $\dot{E}_g$ 、内阻 R_g 及负载阻抗 Z_L 。这里我们仅考虑第一种。

由式(2.2-13)考虑到 $z'=0$ 有

$$\begin{aligned} \dot{U}_L &= \dot{U}_1 + \dot{U}_2 \\ \dot{I}_L &= \frac{1}{Z_0} (\dot{U}_1 - \dot{U}_2) \end{aligned}$$

解得

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = \frac{1}{2} (\dot{U}_L + \dot{I}_L Z_0) \\ \dot{U}_2 = \frac{1}{2} (\dot{U}_L - \dot{I}_L Z_0) \end{cases} \quad (2.2-14)$$

将 $\dot{U}_1$ 、 $\dot{U}_2$ 表示式代回式(2.2-13)中得到

$$\begin{cases} \dot{U} = \dot{U}_L \cos \beta z' + j \dot{I}_L Z_0 \sin \beta z' \\ \dot{I} = \dot{I}_L \cos \beta z' + j \frac{\dot{U}_L}{Z_0} \sin \beta z' \end{cases} \quad (2.2-15)$$

式(2.2-15)又称为终端方程,它把距离终端负载 z' 处的参考面上的电压 $\dot{U}$ 和电流 $\dot{I}$ 与终端负载的电压 $\dot{U}_L$ 和电流 $\dot{I}_L$ 联系在一起。

2.3 传输线的阻抗概念和反射系数

2.3.1 传输线的阻抗概念

和低频电路一样,在长线理论中“阻抗”也是一个重要的概念,而且传输线上任一点的阻抗都遵从欧姆定律。不同的是长线中的阻抗概念与传输线上的工作状态是相联系的,工作状态不同,阻抗的定义也不同。

一般,传输线上是入射波和反射波同时存在的混合波状态,即线上每一点的电压和电流分别是入射波电压(电流)和反射波电压(电流)所合成的总电压和总电流。

定义线上任一点的总电压与总电流之比为该点的等效阻抗,以 Z_e 表示。由式(2.2-15)显然得到

$$Z_e = \frac{\dot{U}(z')}{\dot{I}(z')} = Z_0 \frac{Z_L + jZ_0 \tan \beta z'}{Z_0 + jZ_L \tan \beta z'} \quad (2.3-1)$$

有了等效阻抗的概念后,就可以直接定义输入阻抗 Z_{in} 和负载阻抗 Z_L 。 Z_L 和 Z_{in} 与 Z_e 的区别只是它们是表示特定点的等效阻抗而已。

输入阻抗 Z_{in} 是传输线输入端的等效阻抗,在式(2.3-1)中,只要令 $z'=l$,则有

$$Z_{in} = Z_0 \frac{Z_L + jZ_0 \tan \beta l}{Z_0 + jZ_L \tan \beta l} \quad (2.3-2)$$

负载阻抗 Z_L 是传输线负载端的等效阻抗。

下面我们定义特性阻抗。把上节式(2.2-13)中的反射波 $\dot{U}_2 e^{-j\beta z'}$ 和入射波 $\dot{U}_1 e^{j\beta z'}$ 分别视为两个独立的行波,且令:

$$\text{入射波} \quad \dot{U}^+ = U_1 e^{j\beta z'}, \dot{I}^+ = \frac{\dot{U}_1}{Z_0} e^{j\beta z'} \quad (2.3-3a)$$