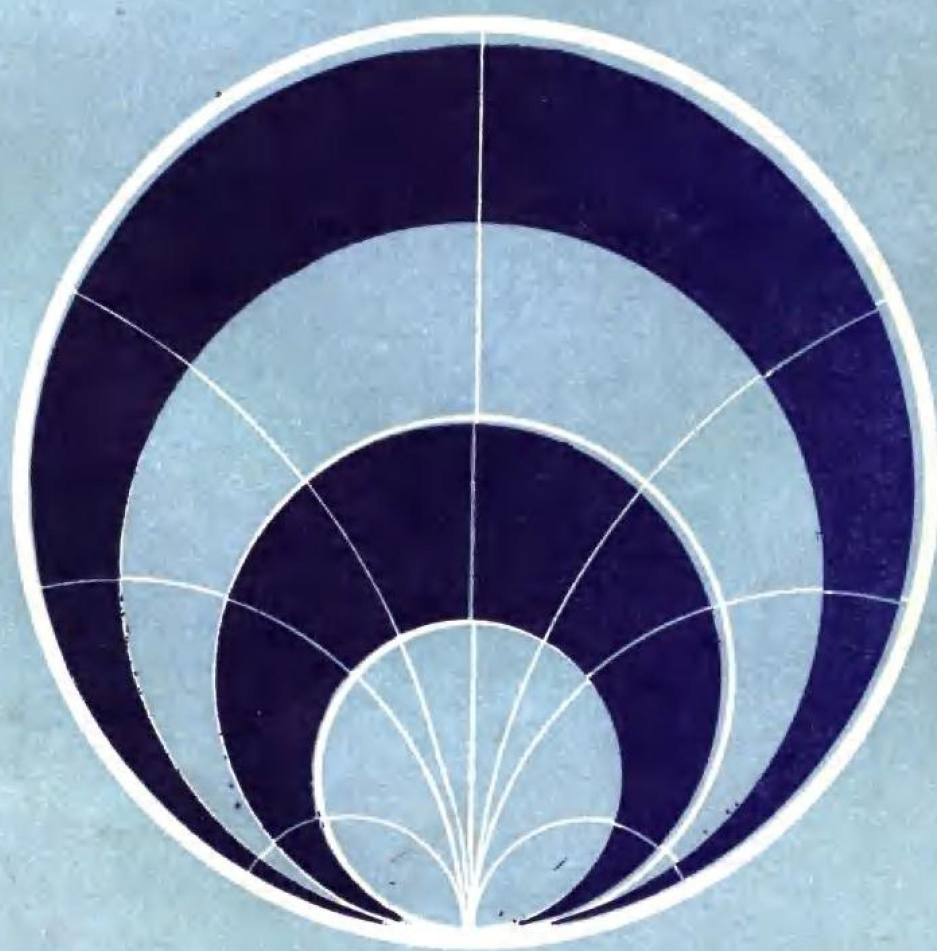


# 微波技术基础

阎润卿 李英惠 编



北京理工大学出版社

## 内 容 简 介

本书以讨论微波技术的基本理论、基本技术和基本分析方法为主,尤其着重于基本概念的阐述。全书有七章:传输线的基本理论、规则波导、微带传输线、光波导、微波谐振器、常用微波元件和微波网络基础。每章都有一定数量的习题。文字叙述简洁明了,便于自学。

本书可作为工科电子类电磁场与微波技术专业、电子工程和无线电技术专业的教材或参考书,也可作为成人高等教育有关专业的教材或参考书。本书对于工程技术人员也是一本有益的参考书。

## 微波技术基础

阎润卿 李英惠 编

\*

北京理工大学出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

北京通县向阳印刷厂印刷

\*

787×1092毫米 16开本 21.75印张 533千字

1988年12月第一版 1988年12月第一次印刷

ISBN 7-81013-072-2/TN·5

印数:1-5000册 定价:4.30元

## 前 言

本书主要讨论微波技术的基本理论、基本技术和分析方法。主要内容为：第一章从分布参数电路理论和电磁场理论两个方面来讨论传输线的基本理论和应用；第二章讲述在一般坐标系情况下的一般波导理论，并在此基础上讨论了常用波导的特性；第三、四两章扼要地讲述了微带类传输线和光波导的基本特性和分析方法；第五章讲述了各种具体的微波谐振器，并介绍了用赫兹矢量和等效电路的方法分析微波谐振器；第六章讲述常用微波元件的基本工作原理和应用；第七章讲述波导接头的基本理论和网络分析的基本内容，它们构成了微波网络的基础。

“微波技术基础”是工科电子类专业的一门技术基础课。本书在取材上力求做到既突出基本理论和技术，以及分析方法方面的内容，又能紧密地结合实际。在章节的安排和叙述上力求由浅入深、循序渐进，并使“场”与“路”的概念融汇贯通起来，使本书能适用于不同专业读者的需要，也便于自学。

本书的授课时数为72学时。本书各章之间既有内在的联系，又具有相对的独立性，因此，有关的专业可根据实际情况安排学时数和讲授内容。本书是在读者已经学完了“线性电路基础”和“电磁场理论”课之后，而开设的一门技术基础课。针对本书各章的内容，选编了一定数量的习题，目的是通过作习题进一步加深理解和掌握所学内容。

本书是在北京理工大学微波技术教研室汤世贤、邓次平、高本庆、尚洪臣和李英惠等所编讲义的基础上、并根据编者多年的教学实践，经修订补充后编写而成的。

本书由华东工学院陈忠嘉教授担任主审，并经原兵器工业部第一教材编审委员会微波技术小组的评审和推荐出版。主审人和评审小组对本书进行了仔细认真的审阅，提出了很多宝贵意见，谨向他们表示诚挚的谢意。

本书的出版得到了北京理工大学电子工程系的领导、出版社的领导和编辑、以及微波技术教研室的同志们的大力支持和热情帮助。在此谨向他们表示衷心的感谢。由于编者水平有限，书中难免存在一些缺点和错误，殷切期望广大读者批评指正。

编者 1988.6.

# 目 录

## 绪 论

### 第一章 传输线的基本理论

|                                    |       |
|------------------------------------|-------|
| §1.1 引言 .....                      | ( 3 ) |
| §1.2 均匀无耗传输线上的行波 .....             | ( 4 ) |
| 一、同轴线的等效电路、电压和电流的基本方程及其解 .....     | ( 5 ) |
| 二、理想传输线的特性阻抗 .....                 | ( 9 ) |
| §1.3 接有负载的均匀无耗传输线 .....            | (10)  |
| 一、接有负载时均匀无耗传输线上电压波和电流波的一般表示式 ..... | (11)  |
| 二、反射系数、驻波比和输入阻抗 .....              | (13)  |
| 三、传输线接有各类不同负载时的工作特征 .....          | (16)  |
| §1.4 应用举例 .....                    | (26)  |
| 一、用作元、器件的有限长传输线 .....              | (26)  |
| 二、在传输能量方面的应用举例 .....               | (27)  |
| §1.5 阻抗圆图和导纳圆图 .....               | (30)  |
| 一、阻抗圆图 .....                       | (30)  |
| 二、阻抗圆图应用举例 .....                   | (33)  |
| 三、导纳圆图 .....                       | (35)  |
| §1.6 有耗传输线和渐变参数传输线 .....           | (36)  |
| 一、均匀有耗传输线 .....                    | (37)  |
| 二、渐变参数线的基本分析方法 .....               | (41)  |
| §1.7 阻抗匹配 .....                    | (42)  |
| 一、阻抗匹配的概念 .....                    | (42)  |
| 二、窄频带匹配 .....                      | (44)  |
| 三、宽频带匹配简介 .....                    | (48)  |
| 习题 .....                           |       |

### 第二章 规则波导

|                           |      |
|---------------------------|------|
| §2.1 波动方程与导行波 .....       | (56) |
| 一、波动方程 .....              | (56) |
| 二、导行电磁波 .....             | (59) |
| §2.2 规则波导中的导行波 .....      | (61) |
| 一、波型 .....                | (61) |
| 二、传输特性 .....              | (64) |
| §2.3 矩形波导管中电磁波的传输特性 ..... | (72) |
| 一、波动方程在直角坐标系中的解 .....     | (72) |
| 二、波型及场结构 .....            | (74) |
| 三、矩形波导管的管壁电流 .....        | (80) |
| 四、矩形波导管中电磁波的传输特性 .....    | (82) |
| 五、矩形波导管中的主波型(主模) .....    | (85) |

|                              |         |
|------------------------------|---------|
| 六、矩形波导管传输线实际应用中的—些基本问题 ..... | ( 85 )  |
| 七、部分波概念 .....                | ( 90 )  |
| 八、 $TE_{10}$ 波型的等效阻抗 .....   | ( 94 )  |
| §2.4 圆形波导管中电磁波的传输特性 .....    | ( 96 )  |
| 一、波动方程在圆柱坐标系中的解 .....        | ( 96 )  |
| 二、波型及场结构 .....               | ( 98 )  |
| §2.5 同轴线及其中的高次波型 .....       | ( 105 ) |
| 一、同轴线中的TEM波型 .....           | ( 106 ) |
| 二、同轴线中的高次波型 .....            | ( 107 ) |
| 三、同轴线尺寸的选择 .....             | ( 111 ) |
| §2.6 脊波导简介 .....             | ( 113 ) |
| 一、截止波长 .....                 | ( 114 ) |
| 二、等效阻抗 .....                 | ( 116 ) |
| §2.7 椭圆波导简介 .....            | ( 117 ) |
| 习题                           |         |

### 第三章 微带传输线

|                             |         |
|-----------------------------|---------|
| §3.1 带状传输线 .....            | ( 120 ) |
| 一、特性阻抗 .....                | ( 120 ) |
| 二、相速度和波导波长 .....            | ( 124 ) |
| 三、带状线的损耗和衰减 .....           | ( 124 ) |
| 四、带状线的功率容量 .....            | ( 125 ) |
| 五、带状线尺寸的选择 .....            | ( 125 ) |
| §3.2 耦合带状线 .....            | ( 126 ) |
| 一、薄带侧耦合带状线的主要特性 .....       | ( 127 ) |
| 二、厚带侧耦合带状线的主要特性 .....       | ( 128 ) |
| §3.3 微带线 .....              | ( 133 ) |
| 一、微带线中的模式 .....             | ( 134 ) |
| 二、微带线的特性阻抗 .....            | ( 136 ) |
| 三、相速度和波导波长 .....            | ( 144 ) |
| 四、微带线的损耗 .....              | ( 144 ) |
| 五、微带线的色散特性与尺寸选择 .....       | ( 145 ) |
| §3.4 耦合微带线 .....            | ( 147 ) |
| 一、奇模和偶模特性阻抗 .....           | ( 147 ) |
| 二、相速度和波导波长 .....            | ( 150 ) |
| 三、功率损耗 .....                | ( 151 ) |
| §3.5 用于微波集成电路的其它传输线简介 ..... | ( 151 ) |
| 一、悬置和倒置微带线 .....            | ( 151 ) |
| 二、槽线 .....                  | ( 152 ) |
| 三、共面波导 .....                | ( 152 ) |
| 四、鳍线 .....                  | ( 153 ) |

#### 习题

#### 附录 用保角变换法求带状线的特性阻抗

|                         |         |
|-------------------------|---------|
| 一、对称带状线的特性阻抗 .....      | ( 156 ) |
| 二、零厚度对称耦合带状线的特性阻抗 ..... | ( 160 ) |

## 第四章 光波导

|                    |       |
|--------------------|-------|
| §4.1 引言            | (163) |
| §4.2 阶跃光纤的射线分析     | (165) |
| 一、在不同介质分界面上波的反射和折射 | (165) |
| 二、阶跃光纤的射线分析        | (168) |
| §4.3 阶跃光纤的波动理论     | (171) |
| 一、波动方程及其解          | (171) |
| 二、特征方程式和波导模        | (173) |
| 三、各种模的截止条件         | (175) |
| 四、模的色散特性           | (178) |
| 五、弱导光纤的线极化(LP模)    | (178) |
| 六、光纤波导中的场结构图       | (182) |
| 七、阶跃光纤中的传输功率       | (183) |

### 习题

## 第五章 微波谐振器

|                      |       |
|----------------------|-------|
| §5.1 谐振器的主要特性参数      | (185) |
| 一、谐振频率               | (186) |
| 二、固有品质因数和有载品质因数      | (188) |
| 三、等效电导               | (190) |
| §5.2 圆柱形谐振腔          | (190) |
| 一、电磁场的表示式            | (191) |
| 二、谐振频率与波型图           | (193) |
| 三、固有品质因数             | (196) |
| 四、圆柱形谐振腔中常用的三种主要模式   | (196) |
| §5.3 利用赫兹矢量分析矩形谐振腔   | (198) |
| 一、由场方程求解时所用的二阶偏微分方程  | (198) |
| 二、用赫兹矢量表示的波动方程       | (202) |
| 三、利用赫兹矢量求矩形谐振腔中的场结构  | (204) |
| §5.4 谐振腔与外部相耦合时的等效电路 | (210) |
| 一、单端口谐振腔的等效电路        | (210) |
| 二、级联耦合谐振腔的等效电路       | (213) |
| 三、多模谐振腔的等效电路         | (214) |
| §5.5 其它类型微波谐振器简介     | (217) |
| 一、介质谐振器              | (217) |
| 二、平面谐振器              | (218) |
| 三、渐变型谐振腔             | (220) |
| 四、开式谐振腔              | (220) |
| 五、YIG磁谐振器            | (221) |

### 习题

## 第六章 常用微波元件

|           |       |
|-----------|-------|
| §6.1 连接元件 | (226) |
| 一、矩形波导接头  | (226) |

|                                  |       |
|----------------------------------|-------|
| 二、同轴线接头.....                     | (229) |
| §6.2 变换元件.....                   | (231) |
| 一、传输线尺寸变换器.....                  | (231) |
| 二、阶梯式阻抗变换器.....                  | (234) |
| 三、连续式阻抗变换器.....                  | (243) |
| 四、波型转换器.....                     | (246) |
| §6.3 分支元件.....                   | (248) |
| 一、同轴线型功率分配器.....                 | (248) |
| 二、微带线功率分配器.....                  | (250) |
| 三、矩形波导管分支接头.....                 | (253) |
| §6.4 终端元件.....                   | (257) |
| 一、匹配负载.....                      | (257) |
| 二、全反射终端器(短路器).....               | (259) |
| §6.5 矩形波导管中的衰减器和移相器.....         | (263) |
| 一、衰减器.....                       | (263) |
| 二、移相器.....                       | (263) |
| §6.6 定向耦合器.....                  | (264) |
| 一、双孔定向耦合器.....                   | (265) |
| 二、均匀多孔阵列定向耦合器.....               | (266) |
| 三、裂缝电桥.....                      | (268) |
| §6.7 微波滤波器.....                  | (270) |
| 一、利用四分之一(波导)波长传输线并联电抗元件的滤波器..... | (271) |
| 二、利用高低阻抗线构成的微波滤波器.....           | (272) |
| §6.8 场移式隔离器.....                 | (274) |
| §6.9 Y型的结环行器.....                | (276) |
| 习题                               |       |

## 第七章 微波网络基础

|                                |       |
|--------------------------------|-------|
| §7.1 微波结构的网络描述.....            | (279) |
| 一、微波结构等效为网络模型的概念.....          | (281) |
| 二、任意截面形状柱波导中的电磁场.....          | (281) |
| 三、波导等效为长线的一般方法.....            | (283) |
| 四、不均匀性等效为网络.....               | (284) |
| 五、归一化处理.....                   | (287) |
| §7.2 微波网络的各种参数矩阵.....          | (290) |
| 一、常用的网络参数.....                 | (290) |
| 二、其它网络参数简介.....                | (301) |
| §7.3 网络参数的某些基本特征及应用举例.....     | (302) |
| 一、互易网络的各种网络参数的基本特征.....        | (302) |
| 二、无源网络耗能性的网络参数表示.....          | (303) |
| 三、对称网络的网络参数特征.....             | (306) |
| 四、应用举例.....                    | (308) |
| §7.4 散射参数矩阵的本征方程、本征值及本征矢量..... | (311) |
| 一、本征方程、本征值、本征矢量及其物理意义.....     | (311) |
| 二、在对称网络分析中的应用.....             | (312) |

|                                    |       |
|------------------------------------|-------|
| <b>§7.5 二端口网络的工作参数</b> .....       | (312) |
| 一、插入(输入)驻波比 $s$ .....              | (312) |
| 二、二端口网络的相移 .....                   | (313) |
| 三、插入衰减(损失)与工作衰减 .....              | (314) |
| <b>§7.6 多端口网络连接后[S]参数的求法</b> ..... | (316) |
| 一、概述 .....                         | (316) |
| 二、由已知二端口网络的[S]参数求级联后的[S]参数 .....   | (316) |
| 三、任意多端口网络的连接 .....                 | (318) |
| 四、多端口网络接任意负载后的[S]参数 .....          | (319) |
| <b>§7.7 适用于散射参数的信号流图</b> .....     | (320) |
| 一、信号流图与线性代数方程组的关系 .....            | (321) |
| 二、信号流图中各种“点”、“线”的专有名称 .....        | (321) |
| 三、简化法则 .....                       | (323) |
| 四、信号流图中的不接触环路法则 .....              | (324) |
| <b>习题</b>                          |       |
| <b>附录一、矩形与扁矩形波导规格</b>              |       |
| <b>附录二、同轴线参数表</b>                  |       |
| <b>附录三、常用介质基片材料的高频特性</b>           |       |
| <b>附录四、微带线常用导体材料的特性</b>            |       |
| <b>附录五、几种常用金属的常数</b>               |       |
| <b>主要参考资料</b>                      |       |

## 绪 论

微波通常是指波长从1m到0.1mm范围内的电磁波,其相应的频率范围是300MHz~3000GHz。对于微波常把它划分为分米波、厘米波、毫米波和亚毫米波四个波段。表0-1给出了这些波段的波长范围、频率范围和它们的名称。

表0-1 微波波段的划分

| 波 段 名 称 | 波 长 范 围   | 频 率 范 围     | 频 段 名 称  |
|---------|-----------|-------------|----------|
| 分 米 波   | 1m~10cm   | 0.3~3GHz    | 超高频(UHF) |
| 厘 米 波   | 10cm~1cm  | 3~30GHz     | 特高频(SHF) |
| 毫 米 波   | 1cm~10mm  | 30~300GHz   | 极高频(EHF) |
| 亚毫米波    | 1mm~0.1mm | 300~3000GHz | 超极高频     |

在实际应用中,还常把微波波段划分为更细的分段,并用拉丁字母作为各个分段的代号和称谓,如表0-2所示。

表0-2 微波中常用波段的划分及其代号

| 波 段 代 号 | 频率范围(GHz) | 波 段 代 号 | 频率范围(GHz) |
|---------|-----------|---------|-----------|
| P       | 0.75~1.12 | K       | 18~26.5   |
| L       | 1.12~1.7  | Ka      | 26.5~40   |
| LS      | 1.7~2.6   | U       | 40~60     |
| S       | 2.6~3.95  | E       | 60~90     |
| C       | 3.95~5.85 | F       | 90~140    |
| J       | 5.85~8.2  | G       | 140~220   |
| X       | 8.2~12.4  | R       | 220~32.5  |
| Ku      | 12.4~18   |         |           |

微波与通常的无线电波相比,它的波长更短(频率更高),因此它的存在形式,对物质的作用,以及对它的研究方法等,都具有许多不同的特性。正是由于这些特性,在近几十年以来,微波技术在诸如通信、天文、医学、气象、工业和农业等科技领域内,都得到了广泛的应用,成为无线电电子学中的一个重要分支。

微波技术所研究的内容,概略地讲,就是微波的产生、传输、变换(包括放大、调制)、检测、发射和测量,以及与此相对应的微波器件和设备,等等。从物理学的角度讲,微波技术所研究的主要是微波产生的机理,它在各种特定边界条件下的存在特性,以及微波与物质的作用;从工程技术的角度讲,微波技术所研究的主要是具备各种不同功能的微波元件(包

括传输线)的设计, 以及这些微波元件的合理组合和微波的测量。

由以上所述可知, 微波技术的应用范围和包含的内容都是很广泛的, 本书不可能都予以讨论。本书的大部分内容是讨论微波的传输问题, 具体地讲, 也就是传输线问题, 这是研究微波技术中其它问题的基础; 因此, 传输线的概念几乎贯穿于本书的各个章节。除此而外, 本书还讨论了微波谐振器(它是微波源和微波滤波器的重要组成部分)、常用微波元件的基本工作原理与应用和微波网络基础(用化“场”为“路”的方法去解决本质上是属于电磁场的边值问题, 从而问题简化)。

总之, 通过对于“微波技术基础”课的学习, 掌握微波的基本理论、基本技术和分析方法, 为进一步学习微波技术领域中的其它学科和内容打下一个初步的基础。

# 第一章 传输线的基本理论

## §1.1 引言

广义地说,传输线是微波技术中最重要的基本元件。凡是能够导引电磁波沿一定方向传输的导体、介质、或由它们共同组成的导波系统,都可以称为传输线。具体传输线的种类很多,而且可以按不同的准则分类。若按传输线所导引的电磁波的波型(或称传输模式)来划分,则基本上可分为三类:(1)TEM波传输线,如双导线、同轴线、带状线和微带线(严格讲,是准TEM波)等,它们属于双导体;(2)TE波和TM波传输线,如矩形、圆形、脊形和椭圆形波导等,它们是由空心金属管构成的,属于单导体系统;(3)表面波传输线,如介质波导、介质镜象线,以及单根的表面波传输线等,电磁波聚集在传输线的表面附近沿轴线方向传播,一般是混合波型。图1.1-1给出了这三类传输线的结构简图。还有一些结构上更为复杂的传输线,它们是上述三种基本型式的组合和发展。

传输线理论主要包括两方面的内容。一是研究电磁场在传输线横截面内的场结构(场分布),称为横向问题;另一个是研究电磁波沿传输线轴向的传输和分布特性,称为纵向问题。横向问题要通过求解场的边值问题来解决,不同类型的传输线、同一类型但结构型式不同的传输线,都导致不同的边界条件,因此必须分别加以讨论。但是,各类传输线的纵向问题却

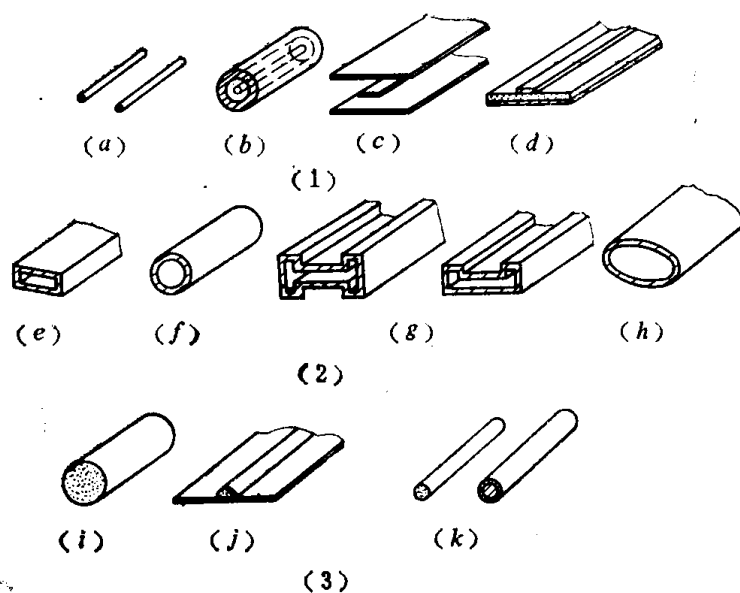


图 1.1-1 传输线的种类

(1)TEM波和准TEM波传输线;(2)TE波和TM波传输线;(3)表面波传输线。

(a)平行双导线;(b)同轴线;(c)带状线;(d)微带线;(e)矩形波导;(f)圆形波导;(g)脊形波导;(h)椭圆形波导;(i)介质波导;(j)镜象线;(K)单根表面波传输线。

有很多共同之处,而且往往可用一个等效的简单传输线(如双导线或同轴线)来描述。简单传输线的纵向问题可以用场的方法来分析,在求得电路参数以后,也可以采用路的方法来分

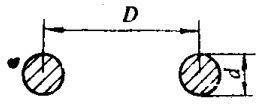
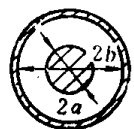
析。前者是根据边界条件求电磁场方程的解，得出电磁场随时间和空间的变化规律；后者则是利用分布参数电路的理论，去分析传输线上分别与电场和磁场的某种积分量相对应的电压波与电流波随时间和空间的变化规律。鉴于后一种方法比较简单、易懂，本章将以路的方法为主来讨论传输线的纵向问题，但同时也指出其电磁波的本质。

本章主要是结合同轴线的例子来讨论有关的问题，但所得出的结论，包括引出的一些概念，以及计算传输线的参量时所采用的方法(如阻抗圆图和导纳圆图等)，都具有普遍的意义。正是基于这一点，在本章的讨论中，有时明确指出所讨论的是同轴线，有时又笼统地称传输线，以强调其普遍意义。

传输线理论中的纵向问题，最初是从研究很长的双导线传输线开始的，由于这个原因，习惯上常把这方面的理论问题称为“长线理论”，并进而把几何长度可与工作波长相比拟的传输线称为“长线”。为使读者熟悉这种用法，本书有时也使用长线这个名词。

传输线按其结构尺寸和填充媒质沿纵向(轴向)是否均匀，还可分为均匀和非均匀两类。本章主要讨论前者，对于后者只作简单介绍。表 1.1-1 列出了几种均匀传输线分布参数的计算公式。表中的  $R$ 、 $L$ 、 $C$  和  $G$  分别表示传输线单位长度上的分布电阻、分布电感、分布电容和分布电导。

表1.1 —1 双导线和同轴线传输线分布参数

| 分布参数 \ 传输线                    | 双导线<br> | 同轴线<br> |
|-------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|
| $R \text{ (}\Omega/\text{m)}$ | $\frac{2}{\pi d} \sqrt{\frac{\omega \mu_1}{2\sigma_1}}$                                    | $\sqrt{\frac{f \mu_1}{4\pi\sigma_1}} \left( \frac{1}{a} + \frac{1}{b} \right)$               |
| $L \text{ (H/m)}$             | $\frac{\mu}{\pi} \ln \frac{D + \sqrt{D^2 - d^2}}{d}$                                       | $\frac{\mu}{2\pi} \ln \frac{b}{a}$                                                           |
| $C \text{ (F/m)}$             | $\pi \epsilon / \ln \frac{D + \sqrt{D^2 - d^2}}{d}$                                        | $2\pi \epsilon / \ln \frac{b}{a}$                                                            |
| $G \text{ (S/m)}$             | $\pi \sigma / \ln \frac{D + \sqrt{D^2 - d^2}}{d}$                                          | $2\pi \sigma / \ln \frac{b}{a}$                                                              |

注  $\epsilon$ 、 $\sigma$  分为介质的介电常数和电导率； $\mu_1$  和  $\sigma_1$  分别为导体的磁导率和电导率。

### §1.2 均匀无耗传输线上的行波

这里要讨论的是，均匀传输线在没有任何外界影响的情况下，电压波和电流波在线上是如何传输的。在讨论中，我们假定传输线是一个无限长的理想(均匀、无耗)传输线。虽然实际上并不存在这种传输线，但是，可以把有限长度传输线在匹配状态下的情况看作是与无限长的传输线等效的。下面结合同轴线来进行讨论。

## 一、同轴线的等效电路、电压和电流的基本方程及其解

在实践中人们发现，当在传输线的一端接通信号源时，线上的电压和电流并不是立即在全线同时建立起来的，而是从输入端开始，由近及远地逐步向前推进，即有一个建立的过程。从电磁波的角度看，这是因为波从一处传到另一处需要时间，有一个延时效应，从而造成了相位滞后；从分布参数电路理论的角度看，同样也能说明这种现象。下面以无限长的理想同轴线为例，用分布参数电路理论来分析这个过程。

我们可以把同轴线看作是由无限多相同的小段  $dz$  所组成的，每一小段的分布电感和分布电容分别为  $Ldz$  和  $Cdz$ ， $L$  和  $C$  分别为单位长度上的分布电感和分布电容。同轴线及其等效电路如图 1.2-1 所示。

为说明问题方便起见，设在同轴线内、外导体之间接上直流信号源，如图 1.2-2(a) 所示。信号源接通后，始端的分布电容即被充电而建立起电压，与此同时，充电电流就流过始端的分布电感。实际上，分布电容上的电压和分布电感中的电流都不会立即达到最大值，因为分布电容两端电压的建立，有赖于分布电容两端电荷的积累，而分布电感中电流的建立又有赖于分布电感中感应电动势的消失。但是，如果所取的  $dz$  足够小，以致使得  $Cdz$  和  $Ldz$  也足够小，则可近似地认为，在  $dz$  这一小段上电压和电流是立即建立起来的。但是，整个同轴线上的电压和电流只能从始端开始，由近及远地逐步建立起来。因为只有在前面的分布电感中的感应电动势消失之后，以及前面的分布电容上的电压建立之后，后面的分布电容才能被充分地充电。可见，线上任意一点的电压和电流必然是同时进行的，因为电压的建立有赖于电流对该点分布电容的充电，而电流的推进又有赖于该点电压的建立。若忽略掉信号源内阻的影响，则线上电压和电流的建立过程，也就是其幅度与电源电压相等的一个电压波，以及与其相应的一个等幅的电流波由线的始端开始，沿线向前传播的过程。如图 1.2-2(b) 所示。

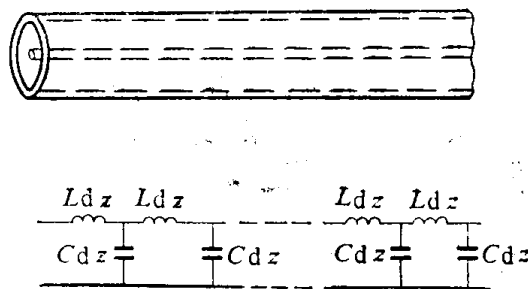


图 1.2-1 同轴线及其等效电路

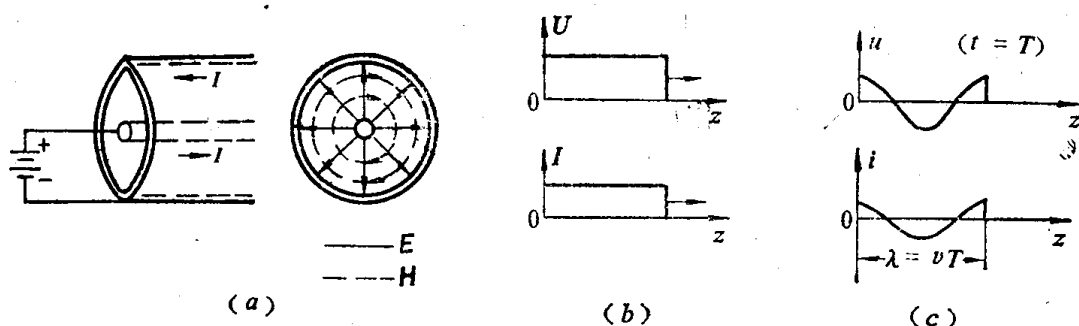


图 1.2-2 同轴线上的电压波和电流波

如果在始端接入的不是直流信号源，而是一个随时间作简谐(如余弦)变化的稳态交流信号源，则线上电压和电流的建立过程，与接直流源时相比，并没有什么本质上的变化。所不同的，只是在线上传播的电压波和电流波不再是恒定不变的，而是和信号源一样，随着时间作简谐(如余弦)变化。设电压(或电流)波沿线的传播速度为  $v$ ，那么，当信号源电压经过了

一个周期 $T$ 的变化时, 电压(或电流)波即传播了一个波长 $\lambda(\lambda=v_p T)$ 的距离, 在此距离内, 电压(或电流)波的分布状态相当于在一个周期内余弦的分布状态。由于线上任意一点的电压和电流必然是同时建立的, 因此电压波和电流波是同相位的。图1.2-2(c)给出了这种分布图形。

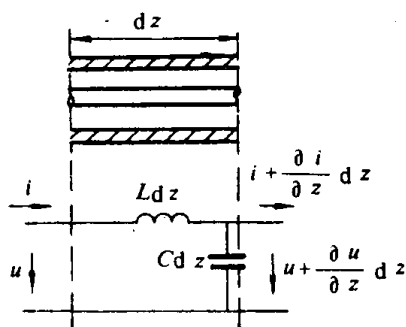


图 1.2-3 微小段同轴线的等效电路

上面对同轴线中电压波和电流波的建立过程, 从物理意义方面作了分析, 现在对它作定量的分析, 即建立均匀无耗传输线上电压和电流的基本方程, 并对方程的解进行分析。为此, 在同轴线上任取一小段 $dz$ , 这一小段的电感和电容分别为 $Ldz$ 和 $Cdz$ , 其等效电路如图1.2-3所示。根据前面讲过的道理, 若 $dz$ 取得足够小, 则可把这一小段当作集总参数电路来处理。利用一般的电路理论, 略去高阶无穷小量后, 得到下列方程

$$u(z, t) - [u(z, t) + \frac{\partial u(z, t)}{\partial z} dz] = - \frac{\partial u(z, t)}{\partial z} dz$$

$$= Ldz \frac{\partial i(z, t)}{\partial t}$$

$$i(z, t) - [i(z, t) + \frac{\partial i(z, t)}{\partial z} dz] = - \frac{\partial i(z, t)}{\partial z} dz$$

$$= Cdz \frac{\partial u(z, t)}{\partial t}$$

写得简明一些, 就是

$$-\frac{\partial u(z, t)}{\partial z} dz = Ldz \frac{\partial i(z, t)}{\partial t} \quad (1.2-1)$$

$$-\frac{\partial i(z, t)}{\partial z} dz = Cdz \frac{\partial u(z, t)}{\partial t} \quad (1.2-2)$$

该式表明:  $dz$ 段上的电压降, 或称电压变化的负值, 是由电感 $Ldz$ 上的感应电动势造成的, 它等于电感 $Ldz$ 与电流对时间变化率的乘积;  $dz$ 段上两端电流的变化, 也即流经 $dz$ 段后电流的减少量, 是由电容 $Cdz$ 产生了分流作用造成的, 它等于电容 $Cdz$ 与电压对时间变化率的乘积。若把上式中的长度因子 $dz$ 消去, 就可得到下面的均匀无耗传输线的电压和电流的基本方程

$$\frac{\partial u(z, t)}{\partial z} = -L \frac{\partial i(z, t)}{\partial t} \quad (1.2-3)$$

$$\frac{\partial i(z, t)}{\partial z} = -C \frac{\partial u(z, t)}{\partial t} \quad (1.2-4)$$

对于式(1.2-3), 对 $z$ 再求一次偏导数, 并把式(1.2-4)中的 $\frac{\partial i(z, t)}{\partial z}$ 代入; 对于式(1.2-4)也

对 $z$ 再求一次偏导数, 并把式(1.2-3)中的 $\frac{\partial u(z, t)}{\partial z}$ 代入, 这样, 就得到了关于电压 $u(z, t)$ 和电流 $i(z, t)$ 的波动方程

$$\frac{\partial^2 u(z,t)}{\partial z^2} = LC \frac{\partial^2 u(z,t)}{\partial t^2} \quad (1.2-5)$$

$$\frac{\partial^2 i(z,t)}{\partial z^2} = LC \frac{\partial^2 i(z,t)}{\partial t^2} \quad (1.2-6)$$

这两个方程对于随时间作任何变化规律的电压 $u(z,t)$ 和电流 $i(z,t)$ 都是适用的。但经常遇到的是，随时间的变化规律具有 $e^{j\omega t}$ 形式的电压和电流。因此在本书中，若无特别说明，均指的是这种变化规律的电压和电流。在这种情况下，对时间求导 $\left(\frac{\partial}{\partial t}\right)$ 就可以用 $j\omega$ 来表示，在上式中对距离 $z$ 的求导可改写为求全导数的形式。利用电路理论中的符号法，将 $u$ 、 $i$ 记为

$$u(z,t) = \text{Re}[U(z)e^{j\omega t}] \quad (1.2-7)$$

$$i(z,t) = \text{Re}[I(z)e^{j\omega t}] \quad (1.2-8)$$

式中的 $U(z)$ 和 $I(z)$ 分别表示电压和电流的复振幅，这样，就可把波动方程式(1.2-5)和(1.2-6)改写为

$$\frac{d^2 U(z)}{dz^2} = -\omega^2 LC U(z) = -\beta^2 U(z) \quad (1.2-9)$$

$$\frac{d^2 I(z)}{dz^2} = -\omega^2 LC I(z) = -\beta^2 I(z) \quad (1.2-10)$$

式中， $\beta = \omega \sqrt{LC}$ 称为相移常数，表示单位距离内电磁波相位的变化量，其中 $\omega$ 为角频率。该方程的通解为

$$U(z) = A_1 e^{-j\beta z} + A_2 e^{j\beta z} \quad (1.2-11)$$

$$I(z) = B_1 e^{-j\beta z} + B_2 e^{j\beta z} \quad (1.2-12)$$

式中，第一项表示向正 $z$ 方向传输的波，第二项表示向负 $z$ 方向传输的波； $A_1$ 、 $A_2$ 、 $B_1$ 和 $B_2$ 是待定的积分常数，它们取决于传输线两端处的边界条件。电压和电流的瞬时值的表示式为

$$u(z,t) = \text{Re}[U(z)e^{j\omega t}] = A_1 \cos(\omega t - \beta z) + A_2 \cos(\omega t + \beta z) \quad (1.2-13)$$

$$i(z,t) = \text{Re}[I(z)e^{j\omega t}] = B_1 \cos(\omega t - \beta z) + B_2 \cos(\omega t + \beta z) \quad (1.2-14)$$

由此式可知，在一般情况下，传输线存在着朝相反方向(正 $z$ 和负 $z$ )传输的两个波。对于无限长的传输线而言，若只接有一个信号源，则电压波和电流波将从信号源出发，朝相反的方向传输，即在信号源的两侧各有一个离开信号源而向前传输的波；若同时接有两个信号源，则线上任意位置的电压和电流将由两个波相叠加而成。前面已假定同轴线是均匀无耗的，因此波在传输过程中只有相位的变化，而无幅度的衰减，式(1.2-11)和式(1.2-12)中的波因子 $e^{-j\beta z}$ 和 $e^{j\beta z}$ 即表示了向正 $z$ 和负 $z$ 方向传输时相位的变化规律。

电磁波的等相位点(即某一给定相位)沿传输方向移动的速度，称为波的相速，用 $v_p$ 表示。令

$$\omega t - \beta z = \text{常数}$$

或

$$\frac{d}{dt}(\omega t - \beta z) = 0$$

则得

$$v_p = \frac{dz}{dt} = \frac{\omega}{\beta} = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (1.2-15)$$

而相移常数  $\beta$  即可写为

$$\beta = \frac{\omega}{v_p} = \frac{2\pi}{T v_p} = \frac{2\pi}{\lambda} = \omega \sqrt{LC} \quad (1.2-16)$$

式中的  $L$  和  $C$  分别为传输线单位长度上的分布电感和分布电容。具体地讲, 对于同轴线而言, 从表 1.1-1 知,  $L$  和  $C$  分别为

$$L = \frac{\mu}{2\pi} \ln \frac{b}{a} \quad (\text{H/m}) \quad (1.2-17)$$

$$C = \frac{2\pi\epsilon}{\ln \frac{b}{a}} \quad (\text{F/m}) \quad (1.2-18)$$

即  $L$  和  $C$  可以采用在静态场的情况下所导出的计算公式。式中的  $a$  和  $b$  分别为同轴线内导体的外半径和外导体的内半径,  $\epsilon$  和  $\mu$  分别为同轴线内填充媒质的介电常数和磁导率。将式 (1.2-17) 和 (1.2-18) 代入式 (1.2-15) 和 (1.2-16) 得

$$v_p = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}} \quad (1.2-19)$$

$$\beta = \omega \sqrt{\mu\epsilon} \quad (1.2-20)$$

由此式可知, 在传输 TEM 波的情况下, 同轴线内电压波和电流波的传输速度(相速)  $v_p$  与具有同轴线内媒质相同的均匀媒质中均匀平面波的传播速度是完全一致的。这种一致性并非偶然, 因为利用分布参数电路理论所讨论的电压和电流, 实际上也就是在同轴线中传播的平面电磁波的电场和磁场的某种积分量 ( $u = \int_a^b E \cdot dr$ ,  $i = \oint_l H \cdot dl$ )。

对于上述的同轴线中电压波和电流波的传输规律, 也可以根据平面电磁波的特性推导出来。当在内、外导体之间接上信号源时, 在信号源处的内、外导体之间立即建立起电场, 而建立这个电场的电荷在导体上的移动(即流过导体的充电电流)又必然在空间产生磁场; 因为假定同轴线是无耗的, 即电导率  $\sigma_1 = \infty$ , 而且同轴线在几何结构上又是轴对称的, 所以对于具有轴对称、而又无纵向分量的电磁场(TEM 波)而言, 它必须满足边界条件: 在导体表面上电场与表面相垂直; 磁场的切向分量  $H_\tau$  与表面电流密度矢量  $J_s$  满足下列关系式

$$J_s = n \times H_\tau \quad (1.2-21)$$

式中的  $n$  是导体表面法线方向的单位矢量。图 1.2-2(a) 给出了这种电磁场的场结构(分布)的图形。可见, 同轴线内的电磁场构成了一个与传输方向相垂直的平面电磁波, 它与具有同轴线内媒质相同的均匀媒质中的均匀平面电磁波并没有本质上的差别, 所不同的, 只是在同轴线内的波是一个不均匀的平面电磁波。因为沿传输方向同轴线具有完全均匀的参量, 所以在波的传输过程中, 同轴线横截面内的场结构是保持不变的。显然, 在同轴线中的这种波与均匀平面电磁波的传输规律是一样的。因此应有下列的关系式

$$E_r = Ae^{-j\beta z} + Be^{j\beta z} \quad (1.2-22)$$

$$H_\phi = \frac{A}{\eta} e^{-j\beta z} - \frac{B}{\eta} e^{j\beta z} \quad (1.2-23)$$

式中,  $E_r$  为 TEM 波在半径方向的电场分量(电场只有这个分量), 磁场力线是与  $E_r$  相垂直的一族同心圆, 用  $H_\phi$  表示磁场;  $\eta = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}$  是 TEM 波的波阻抗;  $\beta$  即式(1.2-20)所表示的相移常数; 待定常数  $A$  和  $B$  可根据边界条件来确定。

从以上的分析可知, 均匀无耗传输线的理论虽然是从分布参数电路理论中得出来的, 但它确实反映了电磁波的一个共性。从数学的角度看, 这个共性就是: 电磁波的场满足波动方程, 而且在方程的解中含有波因子  $e^{-j\beta z}$  和  $e^{j\beta z}$ 。

因为波因子是一个比较重要的概念, 为此再对它作进一步的说明。假设有一个如图1.2-4所示的同轴线, 坐标  $z$  的原点取在任一横截面 I-I 内。如果已知在此横截面内某点  $P$  处的入射波(沿正  $z$  方向传输的波)的电场为  $E^+ = A$ , 则在 I-I 截面右侧与该截面相距为  $l$  的横截面 II-II 内, 与点  $P$  的位置相对应的  $Q$  点处入射波的电场应为  $Ae^{-j\beta l}$ , 即向正  $z$  方向传输的波,  $Q$  点处场的相位比  $P$  点处场的相位滞后  $\beta l$  (rad)。这是因为波由  $P$  点传输到  $Q$  点需要  $t = l/v_p$  (s) 的时间, 而在此时间内,  $P$  点处场的相位变化了  $\omega t = \omega(l/v_p) = \beta l$  (rad)。若用  $e^{j\omega t}$  表示电磁波随时间的变化规律, 则  $P$  点处相位的变化是超前的。如果已知反射波(向负  $z$  方向传输的波)在  $P$  点的电场为  $B$ , 则在  $Q$  点处反射波的电场应为  $Be^{j\beta l}$ , 这说明  $Q$  点处场的相位比  $P$  点处场的相位超前  $\beta l$  (rad)。总之, 象一切波动现象一样, 在均匀无耗传输线中, 电磁波的等相位面总是以固定的相速向传输方向移动。波先到达点的相位比后到达点的相位要超前, 反过来说就是, 波后到达点的相位比先到达点的相位要滞后。这就是波因子  $e^{j\beta z}$  和  $e^{-j\beta z}$  的物理意义。

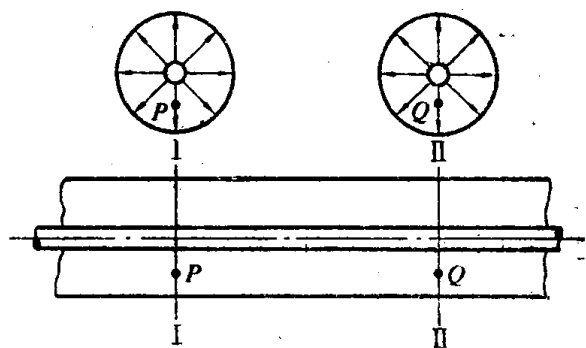


图1.2-4 说明波因子物理意义用图

上述的关于波动的传播共性, 不仅平面电磁波有, 而且在其它结构形式的均匀无耗传输线中传输的电磁波也具有。由此可以推断, 式(1.2-22)和式(1.2-23), 以及由此而导出的其它结论, 都可以推广到其它结构型式无耗均匀传输线的类似问题的分析中去。

## 二、理想传输线的特性阻抗

我们已知, 平面电磁波的电场和磁场之间有一定的关系; 同样的, 同轴线上的电压和电流之间也有一定的关系。现在来讨论后一个问题, 并引入均匀无耗传输线的特性阻抗的概念。由式(1.2-11)和(1.2-12), 或者从式(1.2-13)和(1.2-14)可知,  $A_1$ 、 $A_2$ 、 $B_1$  和  $B_2$  四个待定常数并不是互相独立的, 它们之间有一定的关系。将式(1.2-11)、(1.2-12)代入式(1.2-3), 经运算可得

$$-j\beta(A_1e^{-j\beta z} - A_2e^{j\beta z}) = -j\omega L(B_1e^{-j\beta z} + B_2e^{j\beta z})$$

该式对任意的  $z$  值都应成立、因此应有

$$A_1\beta = \omega LB_1$$

$$-A_2\beta = \omega LB_2$$

由此可得