

波导与带状线

〔西德〕瓦·扬森 著

鲍贤杰 译

李玉文 校

国防工业出版社

内 容 简 介

本书阐述了矩形波导、圆波导和带状线等微波传输线的基本理论和某些制造方法；介绍了以传输线为主体所构成的滤波器、衰减器、耦合器、开关、环行器、检波器、调制器和混频器等电路元件。全书共12章；第1章讨论微波传输线的频率范围及其应用；第2~3章论述传输线基本理论；第4~7章详尽说明矩形波导和圆波导的技术、应用及元件的工作原理；第8~12章探讨了微波带状的有关问题及元件。

本书可供从事微波技术的工程技术人员及有关院校师生阅读参考。

HOHLLEITER UND STREIFENLEITER

Walter Janssen

Huthig 1977

*

波 导 与 带 状 线

〔西德〕瓦·扬森 著

鲍 贤 杰 译

李 玉 文 校

*

国防工业出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

850×1168¹/₃₂ 印张 6¹/₂ 163 千字

1981年11月第一版 1981年11月第一次印刷 印数：10,001—2,800册

统一书号：15034·2231 定价：0.82元

原 序 (节 译)

近年来,微波技术的迅速发展,促使人们采用一系列新型的电路和传输线。将微波技术视为高频技术中的特殊领域的时代,已一去不复返了。

一些独特的专门的系统工程正从微波技术中派生出来,它们正日益显示其重大意义及独特的发展方向。

这种发展方向的一个特点就是电路统一性问题,而电路的统一性,又取决于所选择的电路元件。

在微波传输线领域方面的渊博知识,是通晓现代微波系统的基础。厘米波和毫米波传输线技术,对电路和结构统一性的影响正在与日俱增。昔日,传输线技术被视为一门在特殊场合应用的专业知识;如今,它已成为学者和工程师们所必须掌握的基础知识。

撰写本书的指导思想是使读者了解微波传输线的基础理论,同时,也为从事实践工作的工程师提供一本有益的参考书。

利用大量的插图和表格,使理论叙述更臻完美,借助实例阐明有关主题及其解决方法,可使读者能深入理解所讨论的问题。

本书主要讨论微波传输线、矩形波导技术、圆波导技术以及微波带状线等问题。第一章讨论微波传输线的频率范围及其应用;第二章和第三章论述传输线基本理论;第四章到第七章详尽说明矩形波导和圆波导的技术和应用以及元件的工作原理;第八章至第十二章探讨微波带状线。文中以一定的篇幅来叙述制造方法和传输电路的特性参量。此外,本书还进一步描述了诸如滤波器、耦合器、环行器、开关和混频器等带状线电路。

基于本书的宗旨,对某些问题的讨论,有意避开繁琐的理论分析。有志于进一步钻研理论问题的读者,可参阅各章列出的参考文献。

瓦尔特·扬森

译者序

微波技术的应用范围正在不断地扩展，从四十年代单纯服务于军事目的，发展到目前已渗透到国防军事、国民经济和科学技术的各个领域。近年来，微波技术已在卫星、雷达、中继通信、导航、制导、微波全息、射电天文、微波电热、医疗以及科学研究等方面的许多系统工程中获得卓有成效的应用，并继续开拓着新的应用领域。

微波技术的迅速发展推动了新型传输线和新型元件的研制，并对其提出更高的要求。当前，微波传输线和元件正在向（1）不断满足新波段的需要；（2）不断展宽工作频带；（3）降低传输线的衰减；（4）缩小体积等方面努力。

通晓微波传输线方面的技术知识，乃是掌握现代微波系统之基础。本书主要论述矩形波导、圆波导和带状线等微波传输线的基本理论和某些制造方法，探讨了由传输线为主体所构成的诸如滤波器、衰减器、耦合器、开关、环行器、检波器、调制器和混频器等电路元件。在微带线一章中介绍了几种比较新型传输线及其组成的元件，对正在从事这方面的研究和制造工作的同志将有一定的启发和帮助。

原作者在某些符号运用上较混乱，译者作了必要的统一。

胡汉泉和吴富根两同志对译文提出许多宝贵意见，译者在此谨表衷心的感谢。

由于译者水平有限，译文中错误和不足之处在所难免，恳请广大读者不吝批评指正。

目 录

第一章 电工程技术中的微波	1
1.1 微波的频率范围	1
1.2 微波传输线类型	4
第二章 微波传输线基本原理	8
2.1 电磁波	8
2.2 波导	12
2.3 无衰减波和衰减波	15
2.3.1 衰减常数和相位常数	16
2.3.2 穿透深度	17
第三章 波的反射和传输线阻抗	22
3.1 传输线的不连续性和传输线的反射	22
3.2 反射系数	24
3.3 反射系数的测量	25
3.4 驻波比和行波系数	27
3.5 传输线圆图中的阻抗	31
3.5.1 无源阻抗和导纳	31
3.5.2 短路传输线和开路传输线	33
3.6 传输线的变换	35
3.7 S 参量	38
第四章 矩形波导	43
4.1 由平面波叠加形成波导电磁波	43
4.2 矩形波导的 H_{10} 波	49
4.2.1 H_{10} 波的场特性	49
4.2.2 场特性阻抗和传输线阻抗	50
4.2.3 波长、相位常数和波速	52
4.2.4 截止频率和传输范围	52
4.2.5 波导壁电流	54

4.2.6 波衰减	56
4.2.7 非周期性衰减	57
4.2.8 功率传输	60
4.2.9 矩形波导的结构形式	63
4.2.10 波导法兰盘接头	66
4.3 矩形波导的 H_{nm} 波	68
4.4 矩形波导的 E_{nm} 波	71
第五章 圆波导	72
5.1 圆波导中波的场分布	72
5.2 圆波导中波的衰减	77
5.3 圆波导在无线电中继通讯技术中的应用	79
5.4 圆波导波的辐射特性	82
5.5 H_{01} 技术	83
5.5.1 原理	83
5.5.2 波导类型	83
5.5.3 在弯波导中波的耦合	84
5.5.4 H_{01} 波的产生	85
5.5.5 H_{01} 波的传输频带	86
5.5.6 信号传输方式	89
第六章 波导元件	93
6.1 基本结构	93
6.2 短路活塞	95
6.3 波导过渡段	96
6.3.1 锥形波导过渡段	96
6.3.2 特性阻抗变换器	96
6.3.3 矩形波导-同轴电缆过渡段(转接器)	97
6.4 螺钉匹配器	98
6.5 E-H 调谐器和魔 T	98
6.6 终端阻抗和衰减元件	101
6.7 频率计	103
6.8 定向耦合器	105
6.8.1 矩形波导耦合器	105
6.8.2 拍频耦合器	107

6.8.3 十字形定向耦合器	108
6.9 波导滤波器	108
6.9.1 单回路滤波器	108
6.9.2 多回路滤波器	110
第七章 非线性波导元件	111
7.1 半导体检波器	111
7.2 测辐射热计	112
7.3 调制器	114
7.4 铁氧体元件	115
7.4.1 铁氧体的工作原理	115
7.4.2 铁氧体衰减元件	119
7.4.3 定向传输线	120
7.4.4 非可逆移相器	121
7.4.5 环行器	121
7.4.6 法拉第圆筒的作用原理	123
7.4.7 隔离器	127
7.4.8 法拉第环行器	128
第八章 带状线及其传输特性	130
8.1 微带线类型及其制造方法	130
8.2 微带线的特性阻抗、波长和衰减	132
8.3 带状线外壳和同轴线-带状线过渡	139
8.4 微带线电路计算	140
8.4.1 阻抗匹配	140
8.4.2 特性阻抗变换	142
8.4.3 2 千兆赫低通滤波器设计	144
第九章 带状线电路	148
9.1 集成电阻	148
9.2 集成电容	149
9.3 集成电感	151
9.4 带状线电抗	151
9.5 低通滤波器和高通滤波器	153
9.6 带通滤波器和带阻滤波器	154
9.7 带状线定向耦合器	157

9.7.1 混合型耦合器	157
9.7.2 带状线耦合器	158
9.7.3 带状线耦合器设计	161
9.8 微带线环行器	168
第十章 集成脉冲调制器和相位调制器	172
10.1 卫星工程和相控阵天线中采用的调制器	172
10.2 微波集成 PIN 二极管开关	174
10.3 铁氧体移相器	176
第十一章 带状线混频器	178
11.1 混频器的工作原理	178
11.2 单端混频器	180
11.3 平衡混频器	181
第十二章 微带线与其它几种带状线的比较	183
12.1 对称带状线 (三平面线)	185
12.2 开槽线	187
12.3 共面线	192
12.4 布雷内尔传输线 (悬浮基片传输线)	195
12.5 盒状线	196
参考文献	197

第一章 电工程技术中的微波

无论从事实际工作的或从事理论工作的人员，都认为电磁波传输线是微波技术中最重要的元件。在射频领域内，同轴线、带状线和波导是最常用的传输线。

图 1.1 表明，在微波技术中，传输线不单用作传统的能量传输元件，而且，首先是用作构成电路的元件。例如图中就示出了用集中参数元件和传输线元件构成低通电路的情况。

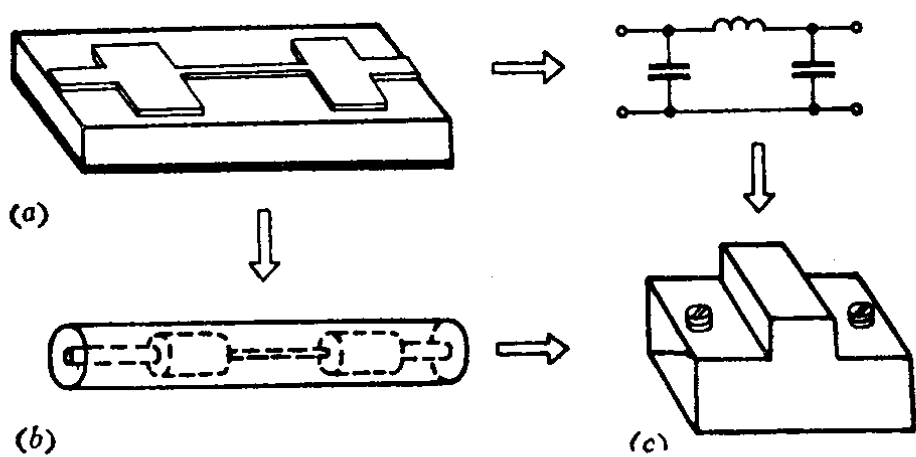


图1.1 传输线构成的微波电路元件
(a) 带状线低通电路；(b) 同轴线低通电路；(c) 波导低通电路（仅工作在截止频率以上）。

下面将叙述各种频率范围内的微波传输线的特性。试图通过不同公式的简单推导来阐明各种传输线的工作原理和作用方式，并借助于例举和习题来加深对所求得知识的理解。

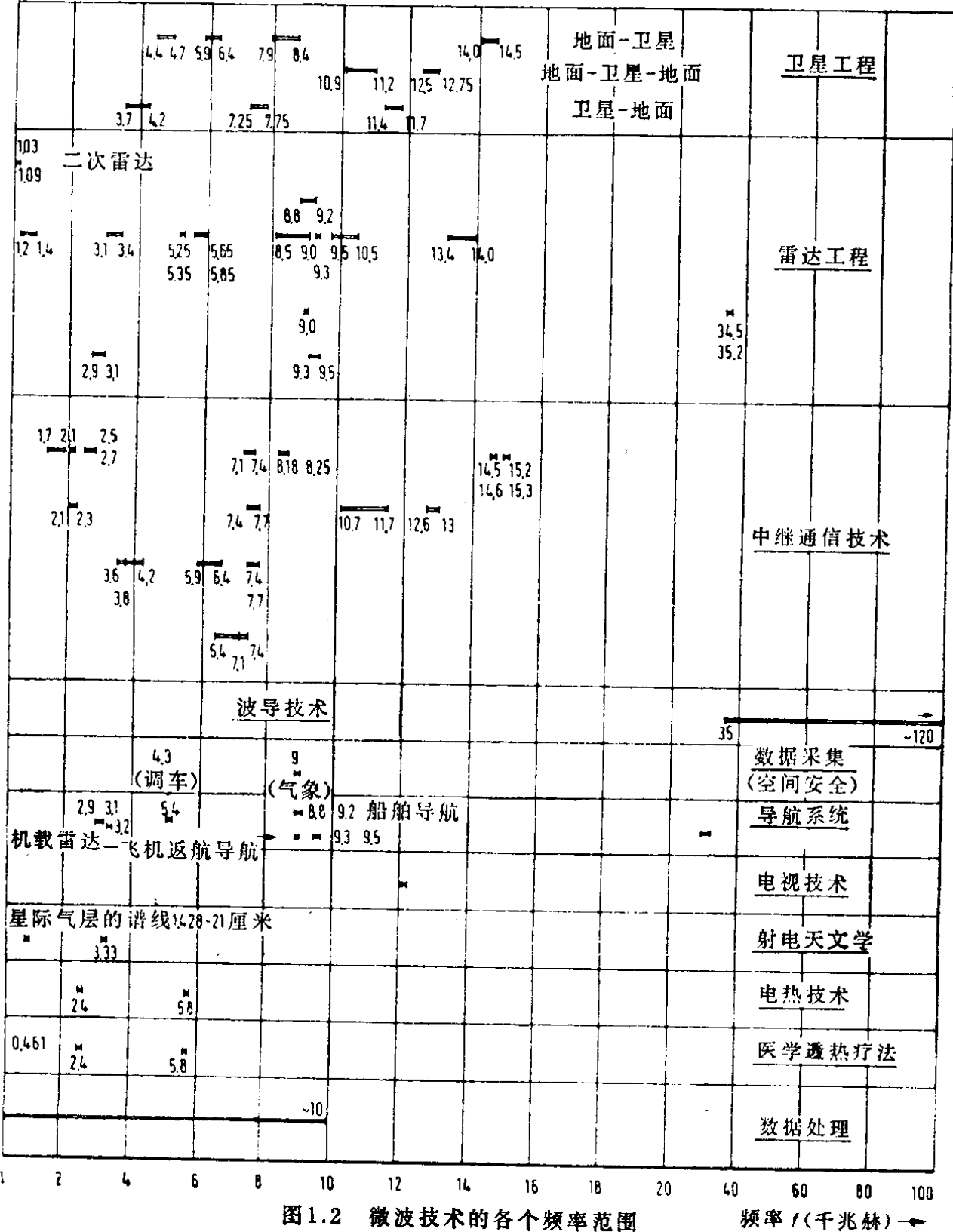
1.1 微波的频率范围

所谓微波，通常就是指频率范围约从 1 千兆赫到 300 千兆赫的电磁波。

往往还把低于 1 千兆赫的频率范围也视为微波领域的一部分。

分。远距离作用的雷达系统就采用这一波段，而通常是将雷达技术包括在微波技术之内。

图 1.2 概述了各个微波频率范围及其所属的系统工程。图 中所标注的频谱仅表明该工程的主要频率范围⁽¹⁾，但并不意味着它们只能采用图中所指明的波段。



本章不可能就各种应用领域进行深入的探讨，而只能通过对主要应用领域进行简明扼要的叙述，来阐明微波在各个技术领域中日趋重要的意义。

微波和微波传输线已在下列系统工程中获得应用：

1. 卫星工程 通信卫星，导航卫星，气象卫星，研究卫星。
2. 雷达工程 一次-二次雷达，目标跟踪雷达，电子扫描雷达，远距离-近距离雷达，气象雷达，多卜勒雷达。
3. 中继通信技术 商用通信网，移动式微波中继站。
4. 波导技术 利用敷介质的圆波导或螺旋状圆波导的宽频带通信系统 (H_{01} 技术)。
5. 数据采集技术和信息技术 空间安全设备，物理量的非接触测量，公路和铁路运输工程中的号志和遥控，自动调车技术。
6. 导航和制导系统 近距离导航，自动程序控制，火箭制导系统。
7. 电视技术 12 千兆赫电视（固定的微波中继发射机，可移动的转播发射机）。
8. 射电天文学 星际信号的接收和处理。
9. 电热技术 在塑料工业、胶合板和夹板制造工业及大型伙食单位可利用微波进行焊接、烘烤和电热。
10. 透热疗法 利用微波辐射进行治疗。
11. 微波在科学和研究中的应用 材料性能研究，气态、液态和固态材料的结晶、分子和原子性能的研究，等离子体特性研究和生物研究。
12. 数据技术 快速数据处理和数据传输。

今天，微波技术已广泛地应用到各个领域，由于它具有引人注目的宽频带性能，所以微波技术正在与日俱增地开拓着新的应用领域。

在通信技术、测量技术和数据处理等技术中，上升时间小于 0.5 毫微秒的数据已屡见不鲜，因而，必须设计带宽超过 1 千兆

赫的宽频带电路。例如，数据处理中的电路就考虑了这些要求，从而也渗入到微波技术领域。因此，随着新的应用领域的不断开创，使微波技术的进一步发展越来越富有生命力。近几年来，一些有源和无源元件，诸如半导体振荡器、半导体调制器、半导体解调器、半导体混频器、半导体放大器、二极管开关和集成电路等都已进入微波波段。

所谓微波集成电路（MIS），实际上是一种采用带状线技术，把有源和无源电路元件高度集成在一起的小型化微波电路。因而，元件的再现性和可靠性大大提高。在人造卫星和火箭中应用集成电路时，恰好就要求这种坚固性。根据当前的技术水平，可以制成高达 20 千兆赫的微波集成电路。当频率更高时，通常，就要采用较为昂贵的、部分集成的混合电路。

1.2 微波传输线类型

对微波电路提出的一个严格的要求是，信号必须能无辐射损耗地由一点传输到另一点。电磁能量从某一元件传输到另一元件也应该是无损耗和无干扰的。传输线的类型就确定了电路元件及其传输技术的形式。

微波元件的特征是由微波传输线的类型来确定的。因而，微波通用部件可以说是由波导、带状线或同轴线等技术制成的，它们可以分成为三种典型的传输线：1. 勒谢尔传输线或称为 TEM 传输线，2. 波导，3. 表面波导。

勒谢尔传输线的电场和磁场在垂直于传播方向（图 1.3）上极化，因此，也把这类传输线命名为 TEM（横电磁波）传输线。

波导的电场或磁场分量也在传播方向（图 1.4）上极化。表面波导像波导那样，除了具有横向场分量外，还具有沿传播方向的场分量（图 1.5）。

假使勒谢尔传输线的导体材料完全无损耗，而且导体之间的介质均匀而又不分层，那么，传输线在传播方向上就确实不存在

场分量。

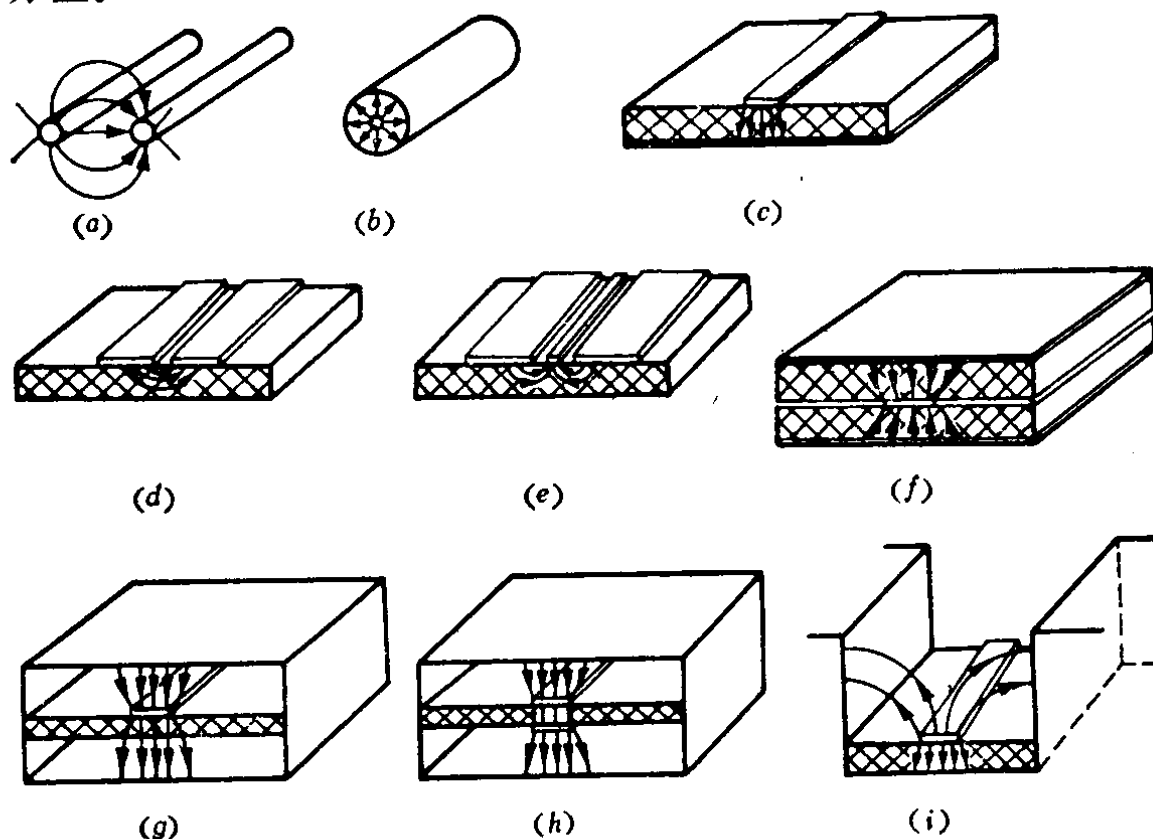


图1.3 TEM 传输线

(a) 双线传输线；(b) 同轴线；(c) 微带线；(d) 开槽线；(e) 共面传输线；(f) 对称带状线（三平面线）；(g) 布雷内尔（Brenner）线（悬浮基片传输线）；(h) 带状线（介质支撑基片）；(i) 盒状线。

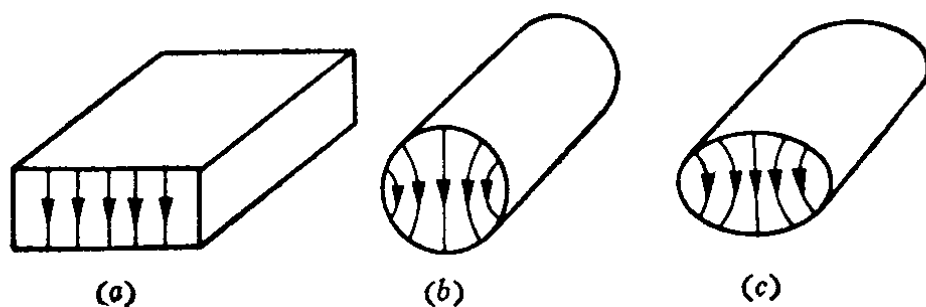


图1.4 波导

(a) 矩形波导；(b) 圆波导；(c) 椭圆波导。

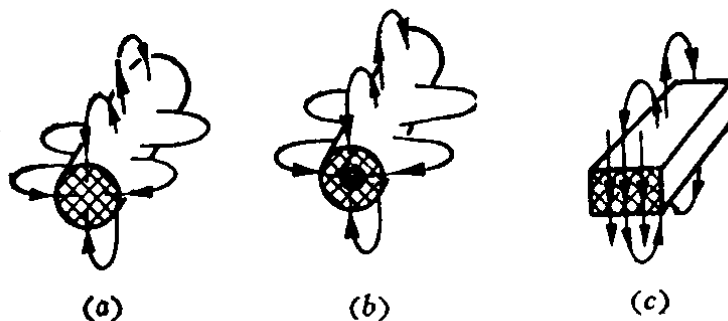


图1.5 表面波导

(a) 介质导线；(b) 高伯（Goubau）波导；(c) 矩形介质波导。

表 2.2 给出各种导体材料的电导率 κ 。假使均匀的勒谢尔传输线选用诸如金、银、铜、铝和黄铜之类的导体材料时,那么,就可以认为仅存在单一的勒谢尔波,这种假设与实际情况很吻合。

因而,撇开特殊情况,当同轴线传输线以及双线和平行板传输线采用上述材料时,可以认为在传播方向的电场分量和磁场分量足以小到可予以忽略不计。

一旦传输线采用了分层的非均匀介质,则产生与 TEM 波很相似的波型,但这种波多少显示出复合波特性,它是由 TEM 波和表面波的场分量结合而成。

微带线和布雷内尔线就具有这种特性。首先,它不像共面传输线和开槽线那样,只有单一的勒谢尔波型。

图 1.3、1.4 和 1.5 汇列了最主要的微波传输线。这些传输线都应用于微波电路中,尤其是带状线,还应用于微波集成电路中。

在粗略规定传输线横截面的尺寸时,可认为它的几何尺寸应该小于介质中传播波长的四分之一。

在频率极高时,最主要的传输线则是波型为 H_{10} 和 H_{11} 的矩形波导、椭圆波导和圆波导。

此外,还将叙述应用于宽频带通信系统的 H_{01} 波导(图 5.9)。 H_{01} 波导的直径大于波长。

从几种能够传输的波型中,挑选这种衰减特别小的 H_{01} 波型来传播信号,这是选择满足长途通信波导的一个重要指标。为了无干扰地传输 H_{01} 波,圆波导需敷上介质层,或者采用圆形绕制的螺旋线作为螺旋波导的边界导体。在 5.5 节中将进一步论述这种传输技术。

介质表面波导在微波领域的意义略为小一些。通常,不易获得较好的传输性能。在传输线拐弯处常因辐射而引起较大的能量损耗。

因而,表面波导仅在特殊场合中应用,例如应用于挠性的波

导连接和天线馈线等。这种波导的四周情况应该尽可能无干扰和尽可能均匀。

在用玻璃纤维进行光波传输时，圆形介质传输线具有很重大的意义，局部地段的传输衰减已小于 3 分贝/公里。

这种从原理上讲可称为表面波导的介质波导，其能量的主要部分在介质（介电常数较大）的内部通过。波的传播是由于入射波在介质波导的内表面上的全反射来完成的。图 1.5 示出几种这类表面波导。

在介质波导内激励起表面波是很困难的。为了产生正确的波型，可局部地使用喇叭形天线。

在我们进一步描述微波传输线中不同波型的场分布和传输参量之前，首先应该讨论一下电磁波传播的一些基本问题。

第二章 微波传输线基本原理

本章扼要探讨微波传输线若干基本原理, 这将有助于读者对随后几章的深入理解^{[2][3][4][5][6]}。

2.1 电 磁 波

电磁波原理在许多教科书中已予以论述, 因而, 本节仅就电磁波的场的基本关系式加以讨论。场的矢量性质用符号上方的箭头标志(例如 $\vec{E}$), 而其复数性质则用符号下方的横线标志(例如 $\underline{E}$)。

电场 E (伏/米) 和磁场 (安/米) 间的相互关系由电工学第一、第二基本定律得出:

$$\oint_A H_s ds = j\omega \underline{\epsilon} \int_A E_n dA \quad \text{第一基本定律} \quad (2.1)$$

$$\oint_A E_s ds = -j\omega \underline{\mu} \int_A H_n dA \quad \text{第二基本定律} \quad (2.2)$$

这些关系式图示于图 2.1 中。

式中 A 是线积分 $\oint_A$ 所包围的面积。单元长度 ds 应该具有电场或磁场 (E_s 或 H_s) 的方向。上两关系式适用于简谐振荡。这里设均匀介质材料的复数介电常数为 $\underline{\epsilon} = \epsilon' - j\epsilon''$, 复数导磁率为 $\underline{\mu} = \mu' - j\mu''$ 。

利用这两个符合自然规律的基本关系式, 可以阐明均匀电磁过程。

若以微分方式 ($A \rightarrow dA$) 考虑方程 (2.1) 和 (2.2), 则得麦克斯韦方程。

对笛卡尔坐标系, 可得下列矩阵方程:

$$\begin{vmatrix} \hat{i} & \hat{j} & \hat{k} \\ \partial/\partial x & \partial/\partial y & \partial/\partial z \\ H_x & H_y & H_z \end{vmatrix} = j\omega\epsilon \underline{\underline{E}} \quad (2.3)$$

$$\begin{vmatrix} \hat{i} & \hat{j} & \hat{k} \\ \partial/\partial x & \partial/\partial y & \partial/\partial z \\ E_x & E_y & E_z \end{vmatrix} = -j\omega\mu \underline{\underline{H}} \quad (2.4)$$

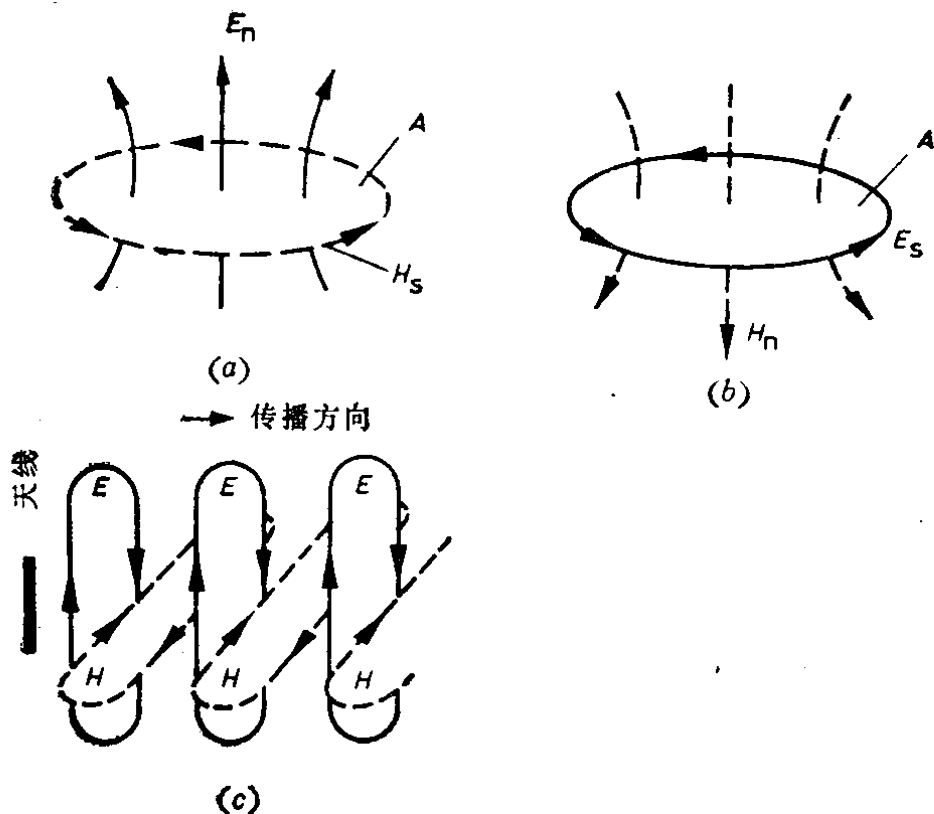


图2.1 电磁场基本关系

(a) 第一基本定律 (毕奥萨伐尔定律) 图示说明; (b) 第二定律 (感应定律) 图示说明; (c) 把第一、第二基本定律结合在一起产生电磁波。

$\underline{\underline{E}}$ 和 $\underline{\underline{H}}$ 矢量有 x , y , z 三个方向的分量 (例如 $\underline{\underline{E}} = \hat{i}E_x + \hat{j}E_y + \hat{k}E_z$)。其中 $\hat{i}$, $\hat{j}$ 和 $\hat{k}$ 是单位矢量, 仅表示方向, 其数值为 1。

由方程 (2.3) 和 (2.4) 可以得到波的电磁场关系式。为说明其结果, 设电磁波为最简单的状态。

作如下假设:

电磁波仅在 z 方向传播。