

天线结构设计

叶尚辉 李在贵 编

西北电讯工程学院出版社

内 容 简 介

近年来,由于电子工程发展的需要,电子设备结构专业开设了“天线结构设计”这门课程,本书是该课程的试用教材。

书中介绍天线电性能的基本知识,天线结构设计的原则与一般方法,天线的载荷分析,圆抛物面天线结构设计,非圆截面反射体天线结构设计,无线电塔桅结构的分析计算,反射面天线的制造、安装与检测。

本书也可供工厂、研究所从事天线结构设计的工程技术人员参考。

高等学校教材

天 线 结 构 设 计

叶尚辉 李在贵 编

责任编辑 杨 兵

西北电讯工程学院出版社出版

空军地空导弹学院印刷厂印刷

陕西省新华书店发行·各地新华书店经售

开本787×1092 $\frac{1}{16}$ 印张15 字数362千字

1986年6月第一版 1986年6月第一次印刷 印数1—3,000

统一书号: 15322·46 定价: 2.50元

出版说明

根据国务院关于高等学校教材工作分工的规定，我部承担了全国高等学校工科电子类专业课教材的编审、出版的组织工作。从一九七七年底到一九八二年初，由于各有关院校，特别是参与编审工作的广大教师的努力和有关出版社的紧密配合，共编审出版了教材159种。

为了使工科电子类专业教材能更好地适应社会主义现代化建设培养人才的需要，反映国内外电子科学技术水平，达到“打好基础、精选内容、逐步更新、利于教学”的要求，在总结第一轮教材编审出版工作经验的基础上，电子工业部于一九八二年先后成立了高等学校《无线电技术与信息系统》、《电磁场与微波技术》、《电子材料与固体器件》、《电子物理与器件》、《电子机械》、《计算机与自动控制》，中等专业学校《电子类专业》、《电子机械类专业》共八个教材编审委员会，作为教材工作方面的一个经常性的业务指导机构，并制定了一九八二~一九八五年教材编审出版规划，列入规划的教材、教学参考书、实验指导书等共217种选题。在努力提高教材质量，适当增加教材品种的思想指导下，这一批教材的编审工作由编审委员会直接组织进行。

这一批教材的书稿，主要是从通过教学实践、师生反映较好的讲义中评选择优和从第一轮较好的教材中修编产生出来的。广大编审者、各编审委员会和有关出版社都为保证和提高教材质量作出了努力。

这一批教材，分别由电子工业出版社、国防工业出版社、上海科学技术出版社、西北电讯工程学院出版社、湖南科学技术出版社、江苏科学技术出版社、黑龙江科学技术出版社和天津科学技术出版社承担出版工作。

限于水平和经验，这一批教材的编审出版工作肯定还会有许多缺点和不足之处，希望使用教材的单位、广大教师和同学积极提出批评建议，共同为提高工科电子类专业教材的质量而努力。

电子工业部教材办公室

前 言

本教材系由电子机械教材编审委员会无线电设备结构设计教材编审小组审定，并推荐出版。

本教材由西北电讯工程学院叶尚辉担任主编，成都电讯工程学院陈白韧担任主审。编审者均是依据无线电设备结构设计教材编审小组审定的编写大纲进行编写和审阅的。

本书的前版原来包括结构力学及天线结构设计两部分内容，教学总学时数约需 100 小时。这次修订时，经电子机械教材编审委员会研究决定，将第一部分内容抽出，另成一册，冠名为《结构分析》，对第二部分内容作了补充后，即成本书。

本教材的主要内容为天线电性能的基本知识，天线结构设计的一般方法，天线的载荷分析，无线电塔桅结构的分析计算，圆抛物面天线结构设计，非圆截面反射体天线结构设计，反射面天线的制造、安装和检测方法。与前版相比，作了较大的补充。关于天线结构的有限元分析，由于在《结构分析》一书中已作详细论述，这里就不重复了。

在使用本教材之前，读者应掌握结构力学基础。教材中有关工程实际的具体内容，对于从事天线结构设计工作来说是很需要的，但在教学实施中，可安排自学。另外，有些章节则可根据各院校的情况，自行选择取舍。

天线的种类繁多，因此天线结构型式亦多种多样，大至直径几百米，小至直径数十厘米。另外，天线结构设计所涉及的内容亦比较广泛，本书作为一本教材，不能全部包括进去，只能择其主要的作基本论述。天线结构的力学试验、优化设计及天线罩等内容，这里也未列入。

本教材第一、二、三章由李在贵改写，其余各章由叶尚辉编写并统编全稿。

国内外有关天线结构的文献甚少，更缺乏系统的著作，本书是企图对其作较为系统的论述的一个尝试，很不成熟。由于时间仓促，加之编者水平有限，书中难免存在不少缺点与错误，希望广大读者批评指正。

编 者

一九八五年三月

目 录

第一章 天线概述	1
§ 1-1 电磁场与电磁波.....	1
§ 1-2 传输线.....	5
§ 1-3 天线的基本参数.....	14
§ 1-4 简单天线.....	20
§ 1-5 天线阵.....	27
§ 1-6 微波天线.....	36
§ 1-7 扇形波束天线.....	43
§ 1-8 双反射体天线.....	47
第二章 天线结构设计总论	53
§ 2-1 对天线结构的一般要求.....	53
§ 2-2 天线公差分析.....	54
§ 2-3 最佳吻合抛物面.....	62
§ 2-4 卡氏天线的指向精度.....	67
§ 2-5 反射面.....	69
§ 2-6 天线结构的材料.....	73
§ 2-7 天线结构设计中的几个问题.....	75
第三章 天线的载荷	83
§ 3-1 天线载荷的分类.....	83
§ 3-2 风力计算.....	89
§ 3-3 抛物面天线的风力.....	98
§ 3-4 抛物面天线的风力矩.....	105
§ 3-5 设计风速的确定.....	110
§ 3-6 风洞试验.....	112
第四章 塔桅结构设计	116
§ 4-1 概述.....	116
§ 4-2 柔索原理及纤绳计算基础.....	119
§ 4-3 纤绳的应力计算.....	124
§ 4-4 桅杆杆身的内力计算.....	130
§ 4-5 桅杆整体稳定计算.....	136
§ 4-6 塔架计算.....	140
§ 4-7 桅杆及塔架的自振频率计算.....	142
§ 4-8 应用有限元法计算桅杆.....	145

第五章 圆抛物面天线的结构设计	153
§ 5-1 结构型式.....	153
§ 5-2 圆抛物面天线结构的近似计算.....	163
§ 5-3 圆抛物面天线结构的力学分析.....	168
§ 5-4 馈源支架(副面支架).....	176
§ 5-5 展开天线.....	180
第六章 非圆截面反射体天线结构设计	186
§ 6-1 结构型式.....	186
§ 6-2 非圆截面反射体天线结构的近似计算.....	191
§ 6-3 非圆截面反射体天线结构的力学分析.....	197
第七章 抛物面反射体的制造与检测	201
§ 7-1 反射面的制造工艺.....	201
§ 7-2 型材的成形.....	213
§ 7-3 主力骨架的制造工艺.....	216
§ 7-4 反射面的精度检测.....	219
§ 7-5 反射体的装配及天线系统的安装调整.....	227

第一章 天线概述

§ 1-1 电磁场与电磁波

一、电磁场与电磁波的概念

处于相对静止的电荷，其周围存在着电场，这种电场是静止的电场。恒定电流的周围存在着磁场，这种磁场是静止的磁场。

如果某一导体上有变化的电流和电荷，在导体的周围将产生交变的电磁场。在交变电磁场的条件下，变化的电场可以产生磁场，变化的磁场又可以产生电场。它们互相激发，互相转化。这时，电场和磁场已成为不可分割的、统一的整体，在空间形成统一的电磁场。这种电磁场以波动的形式向外传播，这就是电磁波。

在静止的情况下，电场依附于电荷而存在，磁场依附于电流而存在。电荷消失了，静电场就消失了；恒定电流停止了，静磁场也就消失了。静电场和静磁场可以独立地、静止地存在，彼此间没有联系，不能形成统一的电磁场，因此也不存在电磁波。而交变的电磁场一旦被激励，便可以依附于电荷和电流而存在，它们可以脱离波源而在空间传播。这种交变的电场或交变的磁场不可能彼此独立地存在，而是互相有联系的、不可分割的、统一的电磁场。可见，交变的电磁场与静止的电场和磁场是有着根本区别的。交变的电场和交变的磁场之间的这种互相依存的关系是电磁场的基本概念之一。

怎样说明电磁波的传播呢？交变的电场和磁场之间的相互联系和相互转化可以说明电磁场在空间的运动。如果在空间存在着由交变电荷激发所产生的交变电场，那么这个交变的电场将在邻近的区域中激发起交变的磁场，这个交变的磁场又将在较远的区域中激发起交变的电场，进而在更远的区域引起新的交变磁场。这样，电场和磁场依次交替地产生，由近及远地向外传播。而电磁场中储藏能量，这样就把能量不断地传输到远方，形成电磁波的传输和能量的传输（参见图1-1）。

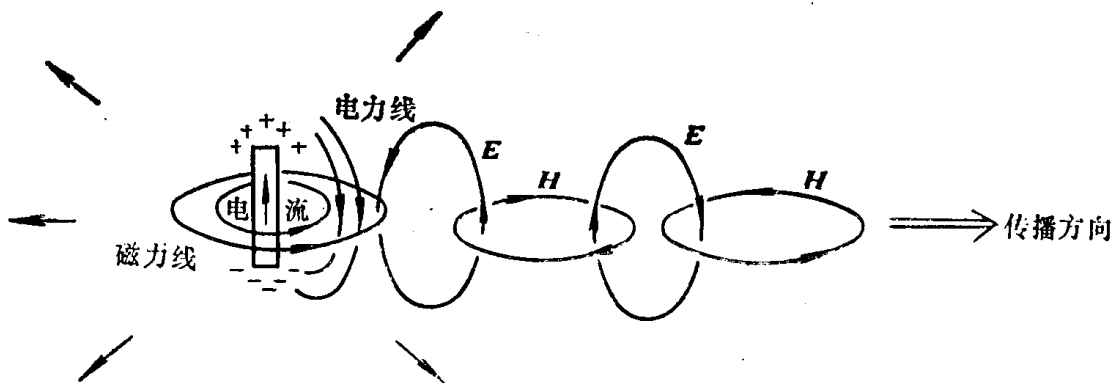


图1-1 电磁波的传播

由此可见，空间电磁场的变化将是以一定的速度传播的，也就是说，空间某一点处场的变化要比场源（交变的电荷或电流）的变化滞后一段时间。设电磁波传播的速度为 v ，

空间某观察点与场源之间的距离为 z ，则电磁波由场源传到观察点所需的时间为 $t = z/v$ ， t 就代表观察点的电磁场比场源的变化滞后的时间。这种在时间上滞后的概念，是交变电磁场的又一个基本概念。

电磁场在真空中或空气中传播的速度就是光速 c 。

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} = 3 \times 10^8 \text{ m/s} \quad (1-1)$$

式中， μ_0 是真空（或空气）的导磁率； ϵ_0 是真空（或空气）的介电常数。这两个常数的数值分别为

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$$

$$\epsilon_0 = \frac{1}{36\pi} \times 10^{-9} \text{ F/m}$$

电磁波在其它介质中的传播速度，由该介质的磁导率 μ 和介电常数 ϵ 决定，其关系式为

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}} \quad \text{或} \quad v = \frac{c}{\sqrt{\mu_r \epsilon_r}} \quad (1-2)$$

这里， μ_r 是介质的相对导磁率， ϵ_r 是介质的相对介电常数。它们与真空（或空气）的磁导率和介电常数的关系为

$$\mu = \mu_r \mu_0$$

$$\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$$

由于 μ_r 与 ϵ_r 的乘积总是大于或等于 1，即 $\mu_r \epsilon_r \geq 1$ ，因此电磁波在其它介质中的传播速度一般是小于光速的。

电磁场的基本特性可以归纳如下：

1. 电力线由正电荷出发终止于负电荷；在没有自由电荷的区域，电力线在空间自成闭合圈，而且必定是围绕交变磁力线的。

2. 磁力线总是成闭合的曲线，它或者围绕在电流的周围，或者围绕交变的电场。

3. 电力线和磁力线总是互相交连而且互相垂直的，如图 1-1 所示。

4. 在理想导体表面上，电力线总是和导体表面垂直，而不可能与理想导体表面平行。在导体内部电场为零（即不存在电场）。

5. 在理想导体表面上，磁力线总是和导体表面平行。在导体内部交变磁场为零（即不存在交变磁场）。因为理想导体中交变电流都集中在导体表面上，而磁力线又是围绕电流的，因此磁力线一定和导体表面平行，而且和电流方向垂直。

4 和 5 两个性质决定了靠近导体表面的电磁场结构，因此称为“边界条件”，电磁场的结构总是要满足边界条件的。

6. 在自由空间传播的电磁波，电场 E 、磁场 H 和电磁波传播方向互相垂直，它们三者的方向关系可用右手螺旋法则来表示，如图 1-2 所示。

波的传播方向也就是电磁场能量运动的方向。其能量的大小由空间该点的电场 E 和磁场 H 的数值所决定。单位时间内通过垂直于传播方向单位面积的电磁能量 S ，称为功率通量密度，或能流密度。能流的方向即传播方向，因此能流也是一个矢量。如果采用矢量代数中所规定的矢积来表示，则能流密度可写为

$$\mathbf{S} = \mathbf{E} \times \mathbf{H} \quad (1-3)$$

7. 波长 λ , 频率 f 与波的传播速度 v 的关系为

$$v = f\lambda \quad (1-4)$$

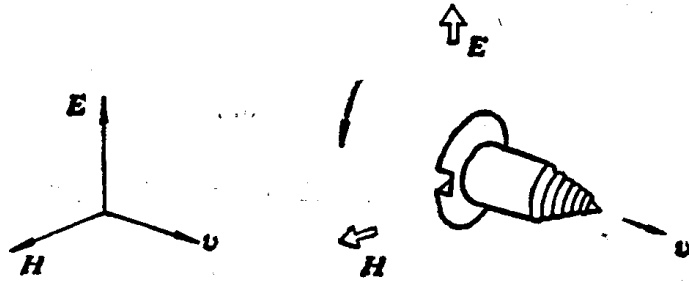


图1-2 辐射场的方向关系

二、电磁波的传播

下面研究导体上载有正弦变化的高频电流时, 空间电场和磁场的变化规律。

设一个导体上载有正弦变化的电流, 则在它附近 (很靠近导体处) 的电场或磁场也一定是正弦变化的。这个场 (比如电场) 可用下式来表达:

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_m \sin \omega t$$

式中 $\omega = 2\pi f$, 叫做角频率; \mathbf{E}_m 代表电场的振幅, 也就是电场变化的最大值; f 是频率; t 是时间。

在离开载流导体一定距离处, 由于场源变化是以一定速度传到该点的, 经过一定距离的传播, 该点场的状态就和载流导体附近场的状态不一样了。设距离场源为 z 处的 A 点的电场为 \mathbf{E}_A , 因波由场源传到 A 点需要时间 t_1 , 所以 A 点的场是场源在 t_1 时间以前的状态。于是 A 点的电场可以写成

$$\mathbf{E}_A = \mathbf{E}_m \sin \omega(t - t_1)$$

因

$$t_1 = z/v, \quad v = f\lambda, \quad \omega = 2\pi f$$

故

$$\omega t_1 = \frac{2\pi f z}{f\lambda} = \frac{2\pi}{\lambda} z$$

令

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

于是, 距离导体为 z 处空间一点的电场为

$$\mathbf{E}_A = \mathbf{E}_m \sin(\omega t - kz) \quad (1-5)$$

$k = \frac{2\pi}{\lambda}$, 叫做相移常数, 它表明波在单位距离内引起相位角度的变化量。

上面公式中, ωt 和 kz 分别表示场在任意时间 t 和任意空间距离 z 处的相位, 或说所处的状态。其中 ωt 叫时间相位, kz 叫空间相位, 它们分别代表场在不同时间和不同空间位置所处的状态。可见, 电磁波既是时间 t 的函数, 又是空间距离 z 的函数。

对于均匀介质中的均匀平面波, 磁场和电场始终保持着固定的关系, 这些关系是:

1. 在电磁波传播过程中, 电场矢量和磁场矢量总是互相垂直的, 而且和传播方向三

者保持右手螺旋关系，这在前面已经提到。

2. 电场和磁场的振幅大小始终保持固定的比值

$$\frac{E_M}{H_M} = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} = \eta \quad (1-6)$$

η 称为波阻抗。如果介质是空气，则

$$\frac{E_M}{H_M} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 120\pi = 377\Omega$$

3. 电场和磁场的相位关系，无论时间相位或空间相位，处处都是一致的，也就是电场和磁场的变化规律和状态是完全一致的。

根据以上关系，我们只要知道电场的函数公式，很快就可以写出磁场的函数公式来。即

$$\left. \begin{aligned} E_x &= E_M \sin(\omega t - kz) \\ H_y &= H_M \sin(\omega t - kz) \\ &= \frac{E_M}{\eta} \sin(\omega t - kz) \end{aligned} \right\} (1-7)$$

它们的瞬时空间分布图形如图1-3所示。

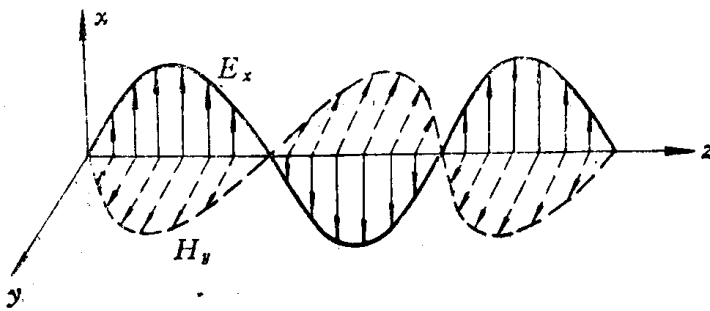


图1-3 电磁波的瞬时空间分布图

三、波阵面(等相位面)

电磁波从它的场源出发向空间各个方向辐射时，在各个方向上总会有一些相位相同的点，把这些等相位的点连成一片，形成空间的曲面，这样的曲面叫做波的等相位面或波阵面。若波阵面是以波源为中心的球面，则这种波称为球面波；若波阵面是垂直于传播方向的平面，则称为平面波。

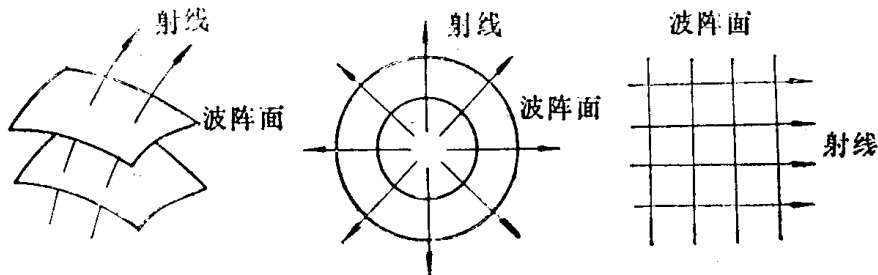


图1-4 波阵面与射线

除以波阵面表示波动的空间形象外，还可以用射线来表示波的传播。这里我们只把射线理解为自波源画出的垂直于波阵面的空间几何曲线，它表示波的传播方向，如图1-4所示。利用波阵面和射线可使波动过程形象化，使我们容易认识波在空间传播的物理过程。

四、惠更斯-菲涅耳原理

波是由波源的振动产生的，波是这种振动的传播。波在传播过程中又依次在介质中激起振动。因此我们可以设想，在一定的介质中传播的波，其波阵面的每一点都可视为向下一步传播的新波源。从这一概念出发提出了惠更斯-菲涅耳原理，或简称惠更斯原理。

惠更斯原理认为，在前进中的波阵面上每一点，其作用都相当于一个小的波源，从这些波源产生了二次发射的球面子波，后一时刻形成的新波阵面就是这些二次子波波阵面的叠加。即空间任一点辐射场的场强将是这些子波源所发射的球面波的叠加。从几何观点来说，新的波阵面是和这些子波波阵面相切的曲面，即包络面。在图1-5中， A 是原波阵面， A' 是传播中的下一个波阵面，可以看到 A' 是 A 上各个球面子波波阵面的包络面。这些小球面波源，常称为惠更斯源。

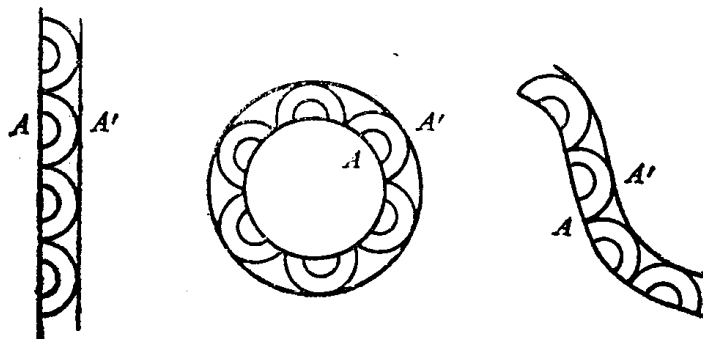


图1-5 惠更斯原理

应用惠更斯原理时要注意的：某一波阵面上的惠更斯源，只对构成下一波阵面有作用，它在原波阵面后方不起作用。

惠更斯原理是波动的一个普遍原理。就电磁波而言，惠更斯源就是在传播过程中，在一定的波阵面上振动着的电磁波。

根据惠更斯原理可以解释电磁波的绕射问题。

§ 1-2 传 输 线

传输线是引导电磁波传播，以输送电磁能量的金属导体。例如把发射机的输出信号功率送到天线去的馈线就是传输线的一种。

下面我们稍微详细地介绍一下传输线的工作原理和各种传输线的特性。

一、双导线传输线

首先，我们以双导线传输线为例说明电磁波沿传输线传输的过程。

假设在无限长的双导线上接一台交流发射机，如图1-6(a)所示，并设发射机的电压

U 随时间按正弦规律变化, 即

$$U = U_M \sin \omega t$$

式中 U_M ——电压的振幅 (最大值);

ω ——电压的角频率, $\omega = 2\pi f = 2\pi/T$;

f ——频率;

T ——周期;

t ——时间。

显然, 在线路上刚接上正弦电压时, 线路始端的电场 E 也将按同样规律变化, 即

$$E = E_M \sin \omega t$$

式中 E_M ——电场强度的振幅值。

假设发射机是在电压为最大值的那一瞬间接到线路上的, 在双导线的始端产生了最大值的电场 E_M 。在形成电场的同时, 导线上的电荷发生位移, 引起电流, 在导线周围出现了相应的磁场最大值 H_M , 见图 1-6

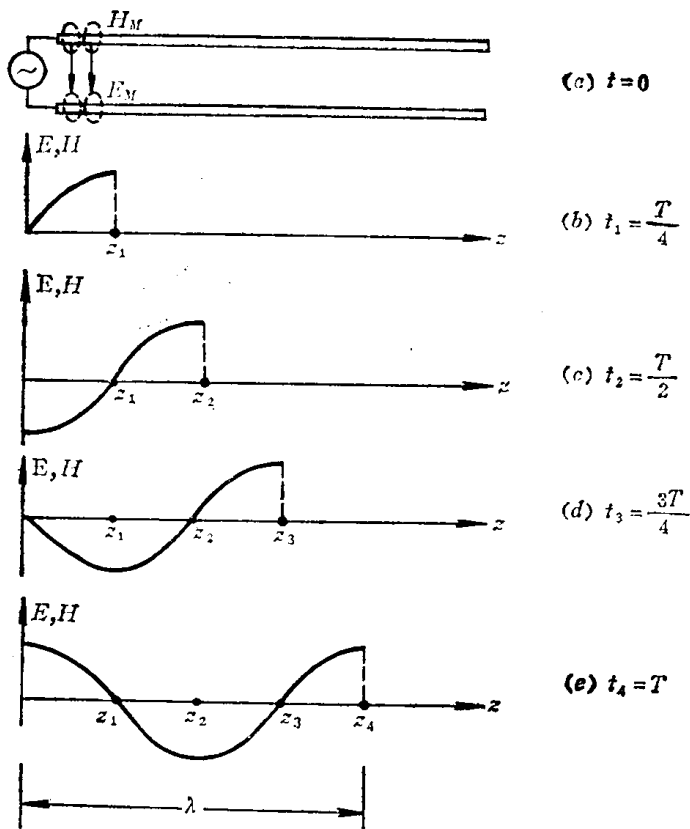


图 1-6 电场和磁场沿双线传输线的瞬时分布

(a)。电场和磁场将同时沿线路传输, 在离线路始端一定距离 z 处, 电磁场相位要比始端滞后一定时间 $t = z/v$, 其中 v 是场的传播速度。当发射机电压过了 $T/4$ 之后, 场的最大值传到了距始端 z^1 的地方, 电场和磁场的分布如图 1-6(b) 所示。

随着时间的推移, 在线路始端建立的交变场将沿线路愈来愈远地传播, 图 1-6(c)、(d) 和 (e) 分别表示振荡开始后经过 $T/2$ 、 $3T/4$ 和 T 时间的场分布情况。

图 1-6 表明, 电场和磁场沿着线路的全长是按正弦规律变化的。在某一瞬时 t , 线路上某一点的电场和磁场的值决定于关系式

$$E_z = E_M \sin(\omega t - kz) = E_M \sin \omega \left(t - \frac{z}{v} \right)$$

$$H_z = H_M \sin(\omega t - kz) = H_M \sin \omega \left(t - \frac{z}{v} \right)$$

式中 E_M 、 H_M 分别为电场和磁场强度的振幅值; z 表示自线路始端到被研究点的距离; v 表示

电场和磁场的传播速度； ω 是角频率； k 是相移常数， $k = \omega/v = 2\pi/\lambda$ 。

可见，沿线路传播着按正弦规律变化的电磁场，即传播着电磁波，导线的作用就好像是引导着电磁波沿线前进。电磁波沿双导线传播的过程和电磁波在空间传播的过程是类似的，也是电场和磁场互相垂直而且两者又都垂直于传播方向。这种电场和磁场都垂直于传播方向的电磁波，称为横电磁波，记为TEM波。

线路上任一点的电压和电流值，由该瞬间到达此点的波的电场和磁场值决定，因此沿线路传播的是相位变化的电压波和电流波，也就是说，在任何瞬间，交变的电压和电流沿线路各点的大小分布是不均匀的。

不过，沿线路各处电流和电压分布不均匀的这种现象，只有在频率很高的情况下，当传输线的长度与工作波长差不多或比工作波长还长时才比较显著：在普通交流电路中，例如，对频率为50Hz，波长为6000km的交流电来说，即使线长为1km，相对于波长也是很短的，因此其上电流和电压随长度的变化很不明显，可以认为沿线各处的电流和电压几乎相等且都是同时变化的。但是对高频传输线来说，例如当频率为3000MHz，波长为10cm时，即使导线只有1m长，它却相当于十个波长，相对说来就是很长的了，因此沿线各处的电流和电压的大小和正负各不相同，电流和电压将以波动的形式沿线传播。在高频情况下，因为传输线的长度相对于波长来说是很长的，因此通常把高频传输线称为长线。

我们知道，任何通电流的导体周围存在着磁场，具有一定电压的导体之间存在着电场。在普通交流电路中，我们忽略这种电场和磁场的影响，线上电流和电压不会表现为波动，但在高频情况下，导线周围电场和磁场的影响，则是不可忽略的。在这种情况下，尽管导线上并无电容器和电感线圈，但是可以把电场和磁场的作用等效为电容和电感，因此我们可以认为导线上处处都有电感和电容，它们分布于导线的全长，如图1-7所示。这些分布的电感和电容，是电路的分布参数。

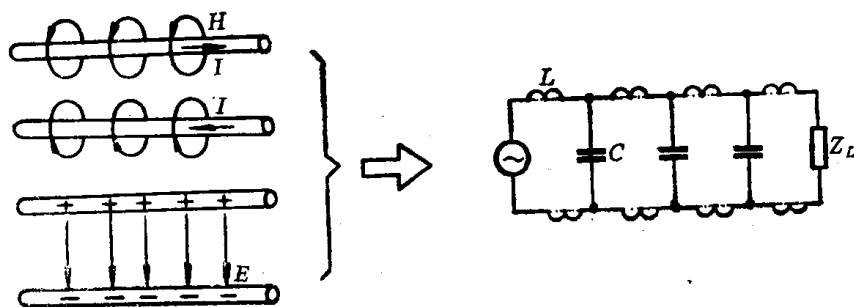


图1-7 传输线的等效参数

在高频情况下，由于电流和电压以波的形式出现，所以，即使是终端开路，线上的电流并不消失；即使是终端短路，线上的电压也不消失。这是与低频电路根本不同的现象。

如果设想传输线是无损耗的，并且是无限长的，那么电压波和电流波将沿导线无限地向一个方向传输下去。从电源来看，不断有能量送出去而没有返回，这就相当于有一个电阻性负载吸收了全部电磁能量而无返回。这种波称为行波。

对于一段有限长的传输线，如果终端所接的负载阻抗 Z_L 等于传输线的特性阻抗 Z_0 （图1-8），则其效果相当于把有限长传输线变成无限长传输线，线上也将只有行波。传输线的所谓特性阻抗 Z_0 （又称波阻抗），是指线上的行波电压与行波电流之比，或者一般地说，

指入射波电压与入射波电流之比，具体数值可由导线的形状、尺寸和分布状况计算。

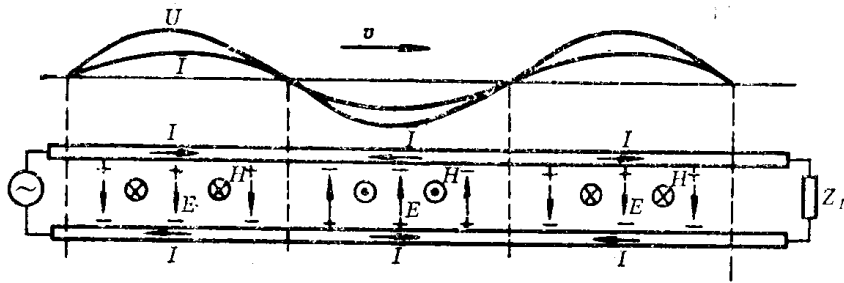


图1-8 双导线传播的电压、电流行波

传输线上电压和电流的行波关系式可表示成

$$U = U_0 \sin(\omega t - kz)$$

$$I = \frac{U_0}{Z_0} \sin(\omega t - kz)$$

式中 U_0 —— 电压波的振幅，

Z_0 —— 传输线的特性阻抗。

如图1-8所示，电流和电压行波沿导线从电源至终端以速度 v 运动。图中也简单地表明了电场和磁场的分布情况。

但是，实际的传输线不可能获得理想的完全行波状态，它总是存在着一个入射波和一个反射波，线上任一点处的电压和电流都是入射波和反射波之和，即两个相反方向的行波相叠加。这里，我们不进行详细的讨论，只是对终端短路和开路的情况作一简单的说明。

如图1-9 (a) 所示，如果终端短路，电磁能传到终端时，能量就不被吸收，将要返回电源，于是有反射波存在。由于全部能量都不被吸收，故反射波与入射波相等，入射波与反射波叠加起来，在全线路上形成电流、电压驻波。短路线终端是电流驻波的波腹和电压驻波的波节，如图1-9 (b)、(c) 所示。这一点可用图1-10来说明。当波传到终端时，正电荷和负电荷都分别通过短路线返回来，因此在终端的两头总是同时带有异号电荷。与电

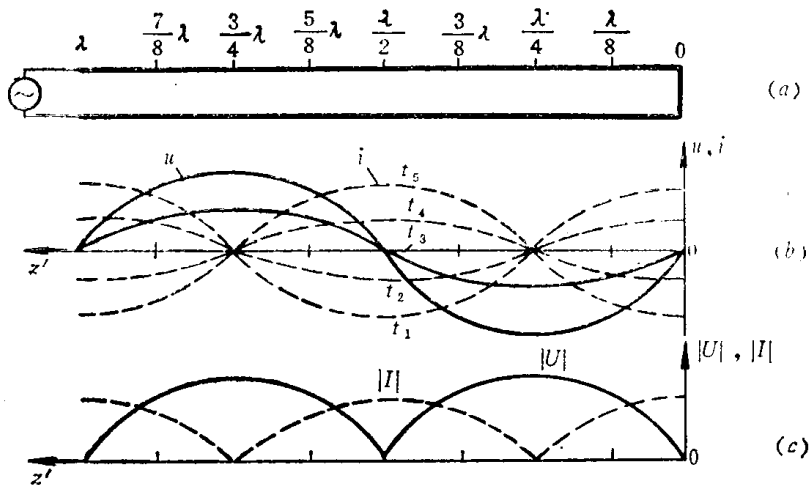


图1-9 短路线的电流、电压分布

荷相联系的电压，相应地抵消到最小，于是终端形成电压波节。至于电流，则由于异号电

荷的反向流动等于同号电荷的同向流动，故终端电流总是相加成为最大，形成波腹。然后，从终端起算，每隔 $\lambda/4$ ，电压与电流的波节和波腹交替出现，如图 1-9 所示的那样。

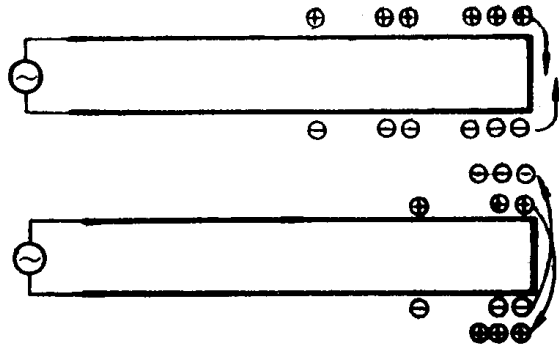


图1-10 短路端的电荷运动

对于终端开路的情况，也会存在类似的驻波。不过，开路终端将会是电压波腹和电流波节，如图 1-11 所示。这可由图 1-12 说明。当波传到开路终端时，正电荷和负电荷都要沿原来的导线返回来，因此终端两头总是带有较多的同号电荷。与电荷相联系的电压，相应地增加到最大，于是终端形成电压波腹。至于电流，则由于同号电荷的反向流动而抵消至最小，形成电流波节。然后，从终端起算，每隔 $\lambda/4$ ，电压与电流的波腹和波节交替出现。

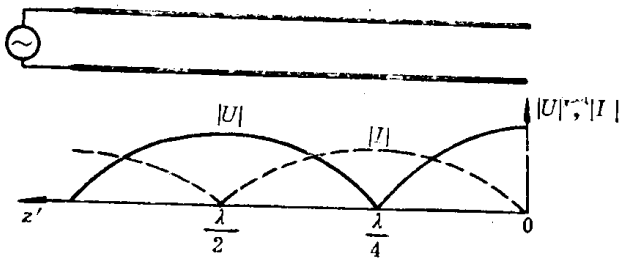


图1-11 开路线的电流、电压分布

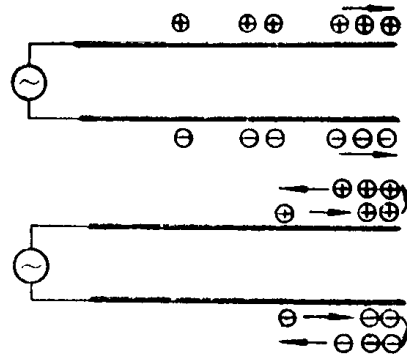


图1-12 开路端的电荷运动

上面我们已经比较详细地说明了电磁波沿双导线传输的过程，同时也讨论了导体上电流和电压的情况。但是，我们特别感兴趣的还是传输线上的电磁场结构。这里，我们可以把各种传输线的导体系统看作是引导电磁波的传输系统，导体上的电荷、电流分布仅仅是为了维持一定的电磁场结构。结合图 1-6 所讨论的情况，便可把双导线周围的电磁场结构画出，如图 1-13 所示。图中实线代表电力线，虚线代表磁力线。

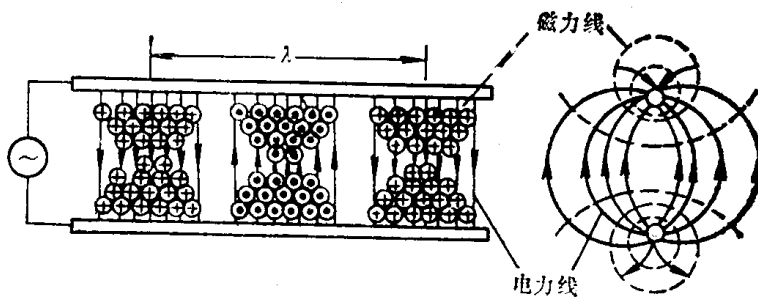


图1-13 双导线的电磁场

由图可见，靠近导体处的电磁场较强，远离导体处的电磁场较弱。双导线常使用在 1MHz 以下的工作频率。当工作频率提高，以致双导线间的距离可以和工作波长相比拟，

甚至比波长还大时，会产生显著的辐射，使能量不能完全送到负载。为了避免能量的辐射损失，可以采用同轴线。

二、同轴线

同轴线有软同轴线和硬同轴线两种，一般用于 10cm 以上的波段中。软同轴线即一般

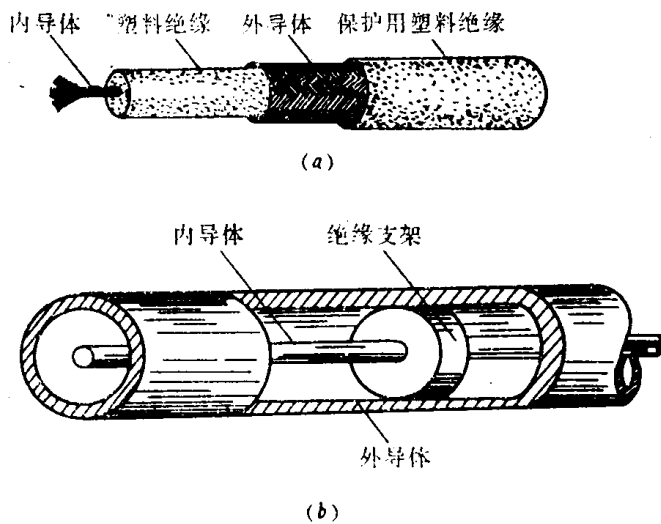


图1-14 同轴线结构图
(a) 软同轴线；(b) 硬同轴线

所说的同轴电缆，其结构如图 1-14(a) 所示。内导体由一根细铜导线或多股胶合铜线构成，外导体由一层或多层金属丝编织而成，中间填充介质(一般为聚乙烯或聚四氟乙烯)，最外层是橡皮或塑料保护套。软同轴线可以弯曲成任意形状。硬同轴线也称为刚性同轴线，由两个同心圆柱导体组成，中间充以空气，其结构如图 1-14(b) 所示。为了保持两导体同心，一般在内、外导体之间每隔一定距离放有介质支撑物。

同轴线的电磁场限于内、外导体之间，使能量辐射成为不可能，因此同轴线的工作频率比双导线高得多。同轴线的电磁场结构如图 1-15 所示。同轴线和双导线在电磁场分布上的共同点是：电场和磁场都分布在垂直于导线的横截面内，并且互相垂直。因此这两种传输线所传输的电磁波都属于横电磁波。

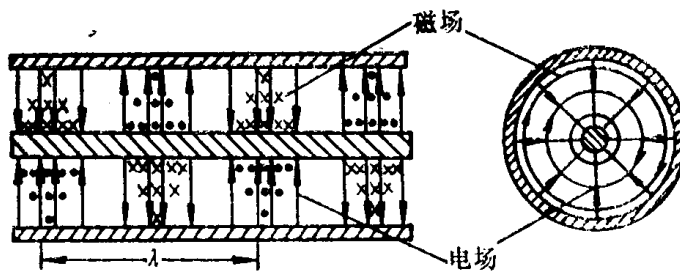


图1-15 同轴线的电磁场

三、波导

当工作频率再升高时，同轴线中会引起很大的功率损耗。另外由于同轴线内、外导体间距不大，在高压时容易被击穿，这就限制了同轴线的传输功率容量。因此，在 300MHz 以上，特别是在厘米波段以上，广泛采用一种空心导体管作为传输线，这就是波导。波导乃是圆形或矩形的金属管(常用的是矩形)，如图 1-16 所示。电磁波在波导内传播，波导壁实质上起了屏蔽作用，它不让电磁波向四面八方传播，而强迫它沿着波导移动。波导中不需要填充什么介质，这就大大地避免了高频时的介质损耗；导体内壁表面积大，导体

的电阻所引起的功率损耗也较小；而且管壁的间距可以做得较大，能传输较大的功率而不被击穿。

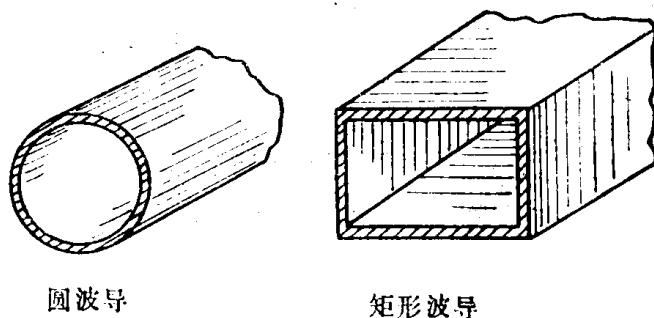


图1-16 波导

(一) 矩形波导中的波型

在波导中传输的电磁波都有一定的电磁场结构，称为波型。波导能够传输的波型有很多种，可以是横电波，也可以是横磁波。所谓横电波，是指电场是垂直于传播方向的横向场，而磁场有平行于传播方向分量的波，记为TE波。当电场有平行于传播方向的分量，而磁场是垂直于传播方向的横向场时，则称为横磁波，记为TM波。但是波导中不可能传播横电磁波（即TEM波）。这是因为，根据电磁场的基本规律，磁力线一定要闭合的，如果有了横向电场，磁力线必然要包围电力线，因此要出现磁场的纵向分量，这就是TE波，见图1-17 (a)。如果只有横向磁场，而磁力线也要包围电力线，因而必然有电场的纵向分量，这就是TM波，见图1-17 (b)。

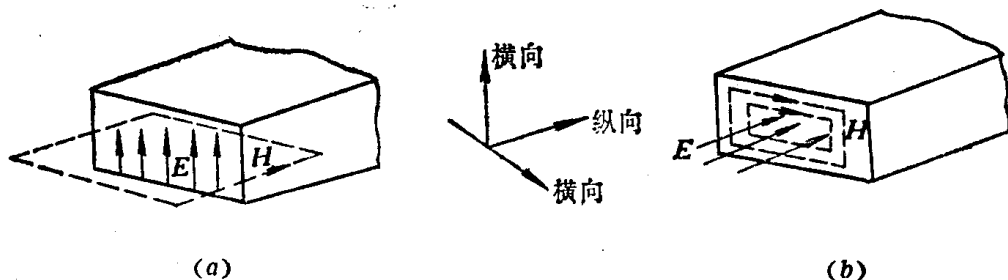


图1-17 横电波和横磁波

(a)横电波； (b)横磁波

矩形波导中最常用的一种波型是TE₁₀波，如图1-18所示。其电流分布见图1-54。TE₁₀波脚标“1”表示横向电场沿波导宽边有一个腹值，“0”表示电场沿窄边不发生变化。除了这种基本波型外，矩形波导还能传输很多其它的波型。譬如，横向电场沿宽边有两个腹值，沿窄边不发生变化，称为TE₂₀波；横向电场沿宽边不变化，沿窄边有一个腹值，则称为TE₀₁波。按这种注脚标号方法，一般来说，横电波有TE_{m,n}波，横磁波有TM_{m,n}波。这里m和n都是正整数，可以为零，但是不能同时为零，否则就没有意义了。

(二) 矩形波导的传输特性

波导管内传输的电磁波与双导线或同轴线传输的横电磁波存在着一些根本不同的重要特性。这些特性可用截止波长、波导波长、相速和能速的概念来说明。