

电磁场与电磁波-- 规则金属波导讲解

作者：有故事的人 来源：范文网 www.wtabcd.cn/fanwen/

本文原地址：<https://www.wtabcd.cn/zhishi/a/170975404853241.html>

范文网，为你加油喝彩！

2024年3月7日发(作者：水松林)

盖士人读书

第一要有志，第二要有识，第三要有恒

有志则断不甘为下流

有识则知学问无尽，不敢以一得自足

有恒则断无不成之事

-曾国藩

长沙理工大学讲稿 《微波技术基础》 第三章 规则金属波导

第4章 规则金属波导

微波传输线是用来传输微波信号和微波能量的传输线。微波传输线的种类很多，比较常用的有平行双线、矩形波导

、圆波导、同轴线、带状线和微带线等。

导波系统中的电磁波按纵向场分量的有无，可分为以下三种波型(或模)：

(1) 横磁波(TM波)，又称电波(E波)： $H_z = 0, E_z \neq 0$

(2) 横电波(TE波)，又称磁波(H波)： $E_z = 0, H_z \neq 0$

(3) 横电磁波(TEM波)： $E_z = 0, H_z = 0$

其中横电磁波只存在于多导体系统中，而横磁波和横电波一般存在于单导体系统中，它们是色散波。

4-1 电磁场理论基础

一、导波概念:

1、思想

(1) 导波思想：

(2) 广义传输线思想：

(3) 本征模思想

3-1

长沙理工大学讲稿 《微波技术基础》 第三章 规则金属波导

2、方法：

波导应该采用具体措施

(1) 坐标匹配

(2) 分离变量法

(3) 边界确定常数

二、导行波的概念及一般传输特性

1、导行波的概念

1) 导行系统：用以约束或引导电磁波能量定向传输的结构。

其主要功能有二：

(1)无辐射损耗地引导电磁波沿其轴向行进而将能量从一处传输至另一处，称这为馈线；

(2)设计构成各种微波电路元件，如滤波器、阻抗变换器、定向耦合器等。

导行系统分类：按其上的导行波分为三类：

(1)TEM或准TEM传输线，

(2)封闭金属波导，

(3)表面波波导（或称开波导）。如书上图1.4-1

2) 规则导行系统：无限长的笔直导行系统，其截面形状和尺寸，媒质分布情况，结构材料及边界条件沿轴向均不变化。

3 - 2

长沙理工大学讲稿 《微波技术基础》 第三章 规则金属波导

3) 导行波的概念

能量的全部或绝大部分受导行系统的导体或介质的边界约束，在有限横截面内沿确定方向（一般为轴向）传输的电磁波。简单地说就是沿导行系统定向传输的电磁场波，简称为“导波”。由传输线所引导的，能沿一定方向传播的电磁波称为“导行波”。导行波的电场E或磁场H都是x、y、z三个方向的函数。导行波可分成以下三种类型：

(1) 横电磁波（TEM波）：（Transverse Electric and magnetic Wave）

各种传输线使电磁能量约束或限制在导体之间空间沿其轴向传播，其导行波是横电磁（TEM）波或准TEM波。

TEM波的特征是：电场E和磁场H均无纵向分量，亦即： $E_z = 0, H_z = 0$ 。电场E和磁场H，都是纯横向的。TEM波沿传输方向的分量为零。所以，这种波是无法在封闭金属波导中传播的，只能在导体之间的空间沿其轴向传播。

(2) 横电（TE）波和横磁（TM）波

封闭金属波导使电磁能量完全限制在金属管内沿轴向传播，其导行波是横电（TE）波和横磁（TM）波。

(a) 横电波（TE波）：

TE波即是横电波或称为“磁波”（H波），其特征是 $E_z = 0$ ，而 $H_z \neq 0$ 。亦即：电场E是纯横向的，而磁场H则具有纵向分量。

(b) 横磁波（TM波）：

TM波即是横磁波或称为“电波”（E波），其特征是 $H_z = 0$ ，而 $E_z \neq 0$ 。亦即：磁场H是纯横向的，而电场E则具有纵向分量。

(3) 表面波

开波导使电磁波能量约束在波导结构的周围（波导内和波导表面附近）沿轴向传播，其导行波是表面波。

3) 导模

导行波的模式，是能够沿导行系统独立存在的场型。

其特点是：在导行系统横截面上的电磁场呈驻波分布，且是完全确定的。这一分布与频率无关，并与横截面在导行系统上的位置无关；

导模是离散的，具有离散谱；当工作频率一定时，每个导模具有唯一

3-3

长沙理工大学讲稿 《微波技术基础》 第三章 规则金属波导

的传播常数，

导模之间相互正交，彼此独立，互不耦合；

具有截止特性，截止条件和截止波长因导行系统和模式而异。

2、导行波的一般传输特性：

(1) 导模的截止波长与传输条件

定义：导行系统中某导模无衰减所能传播的最大波长为该导模的截止波长，用 λ_c 表示；导行系统中某导模无衰减所能传播的最抵频率为该导模的截止的频率，用 f_c 表示

在截止波长以下，导行系统可以传播某种导模而无衰减；在截止波长以上传播就有衰减。通过对衰减机理的分析，可以求得相应导行系统中导模的截止条件和截止波长。

截止频率为

$$f_c = \frac{kc}{2\pi}$$

截止波长则为

$$\lambda_c = \frac{2\pi}{kc} \quad \text{---导波的横向截止波数}$$

由上述分析可知，导模无衰减传输条件是其工作波长小于截止波长（ $\lambda < \lambda_c$ ），或其工作频率大于截止频率（ $f > f_c$ ）。

只有当自由空间的波长 λ 小于临界波长 λ_c 时，电磁波才能在矩形波导中得到传播。

(2) 相速度和群速度

相速度定义为导模等相位面移动的速度：

$$v_p \quad \text{式中 } v_p = \frac{c}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

1 (C)2G r , 0 r , c和 0分别为自由空间的光速和波长；G 1 (0)2称为波导因子或色散因子。

群速度定义为波包移动速度或窄带信号的传播速度。群速 V_c 是表示能量沿波导纵向传播的速度。

$$v_g = d v_1 / d \beta = c^2 / v G$$

d 由以上两式可见导模的传播速度随频率变化，表明相应导行系统具有严重色散现象。TE波和TM波均为“色散波”。由于频率增加相速度减小，故属正常色散，且有关系

3-4

长沙理工大学讲稿 《微波技术基础》 第三章 规则金属波导

$$v_p = v_g = v_2$$

(3) 波导波长

导行系统中导模相邻同相位面之间的距离，或相位差 2π 的相位面之间的距离称为该导模的波导波长，以 λ_g 表示：

$$\lambda_g = 2\pi / \beta = c / v_g = \lambda / \sqrt{1 - \lambda^2 / \lambda_c^2}$$

因为，波导中电磁波是成“之”字形并以光速传播的。所以，波导波长 λ_g 将大于自由空间的波长 λ 。同时，相速 v_p 也大于光速 c 。它们之间的相互关系为： $v_p = c / \sqrt{1 - \lambda^2 / \lambda_c^2}$

byHEEHn

此式是导行系统的 λ_g

λ_c 和 λ 三者的重要关系式。

图1-15示出了电磁波在波导中传播的方向。

zHxa

图1-15 平面波的传播

(4) 波阻抗

导行系统中导模的横向电场与横向磁场之比称为该导模的波阻抗。

TE导波： $Z_{TE} = E_u / H_v = \eta \sqrt{1 - \lambda^2 / \lambda_c^2}$

2 1 (c)TM导波：ZTM Eu Ev HvHu 1 (c)2

k TEM导波：ZTEM 0 r 为媒质的固有阻抗，对空气， 0 0 0 376.7

3-5

长沙理工大学讲稿《微波技术基础》第三章 规则金属波导

4-2 矩形波导

矩形波导是横截面为矩形的空心金属管，如图所示。图中a和b分别为矩形波导的宽壁和窄壁尺寸。由于矩形波导不仅具有结构简单、机械强度大的优点，而且由于它是封闭结构，可以避免外界干扰和辐射损耗；因为它无内导体，所以导体损耗低，而功率容量大。在目前大中功率的微波系统中常采用矩形波导作为传输线和构成微波元器件。

在矩形波导中存在TE和TM两类波，请注意矩形波导中不可能存在TEM波(推而广之，任何空心管中都不可能存在TEM波)。

一、矩形波导中传输波型及其场分量

由于矩形波导为单导体的金属管，波导中不可能传输TEM波，只能传输TE波或TM波。

(一) TM波 (Hz=0)

各场分量与横向分布函数的复数表示式为

$$\begin{aligned} E_x &= j \frac{m}{Kc} \frac{a}{2a} \frac{n}{b} j z E_{0s} \cos x \sin y e^{-jz} \\ E_y &= j \frac{n}{Kc} \frac{a}{2a} \frac{m}{b} j z E_{0s} \sin x \cos y e^{-jz} \\ E_z &= E_{0s} \sin x \sin y e^{-jz} \\ H_x &= j \frac{n}{Kc} \frac{a}{2a} \frac{m}{b} j z E_{0s} \sin x \cos y e^{-jz} \\ H_y &= j \frac{m}{Kc} \frac{a}{2a} \frac{n}{b} j z E_{0s} \cos x \sin y e^{-jz} \\ H_z &= 0 \end{aligned}$$

K 为截止波数，

$$K^2 = \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2, \quad j = \sqrt{K^2 - k^2}, \quad \text{其中 } K \text{ 为介质波数；}$$

为传输常数：式中m和n分别代表场强沿x轴和y轴方向分布的半波数。一组m, n值代表一种横磁波波型，记作TM_{mn}。由于m=0或n=0时所有场分量均为零，因此矩形波导不存在TM₀₀、TM_{0n}及TM_{m0}等波型，所以TM₁₁是最简单的波型，即最低次波型，其余波型为高次波型。

3-6

长沙理工大学讲稿 《微波技术基础》 第三章 规则金属波导

(二) TE波($E_z = 0$)

TE波横向场分量的复数表示式为

$$\begin{aligned} E_y &= \frac{j\omega\mu}{k_c^2} \frac{\partial H_z}{\partial x} = \frac{j\omega\mu}{k_c^2} \frac{\partial}{\partial x} \left[\sum_{m,n} H_{0mn} \cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \cos\left(\frac{n\pi}{b}y\right) e^{-j\beta z}\right] \\ &= \sum_{m,n} \frac{j\omega\mu}{k_c^2} \frac{m\pi}{a} H_{0mn} \sin\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \cos\left(\frac{n\pi}{b}y\right) e^{-j\beta z} \\ E_x &= -\frac{j\omega\mu}{k_c^2} \frac{\partial H_z}{\partial y} = -\frac{j\omega\mu}{k_c^2} \frac{\partial}{\partial y} \left[\sum_{m,n} H_{0mn} \cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \cos\left(\frac{n\pi}{b}y\right) e^{-j\beta z}\right] \\ &= -\sum_{m,n} \frac{j\omega\mu}{k_c^2} \frac{n\pi}{b} H_{0mn} \cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \sin\left(\frac{n\pi}{b}y\right) e^{-j\beta z} \\ H_x &= \frac{1}{k_c^2} \frac{\partial^2 H_z}{\partial x^2} = -\sum_{m,n} \frac{m^2\pi^2}{k_c^2 a^2} H_{0mn} \cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \cos\left(\frac{n\pi}{b}y\right) e^{-j\beta z} \\ H_y &= \frac{1}{k_c^2} \frac{\partial^2 H_z}{\partial y^2} = -\sum_{m,n} \frac{n^2\pi^2}{k_c^2 b^2} H_{0mn} \cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \cos\left(\frac{n\pi}{b}y\right) e^{-j\beta z} \\ E_z &= 0 \end{aligned}$$

式(3-6)中 m 和 n 分别代表场强沿 x 轴和 y 轴方向分布的半波数。一组 m, n 值代表一种横电波波型。由于 $m=0$ 及 $n=0$ 时所有场分量才为零，因此矩形波导中存在 TE_{m0} 和 TE_{0n} 等波型。若 $a > b$ ，则模 TE_{10} 是最低次波型，其余波型为高次波型。

二、矩形波导中 H_{10} (TE_{10}) 模的特性

(一) 场分布图

化规律的图形。

对于TE型波，由于 $E_z = 0, H_z \neq 0$ ，所以电力线仅分布在横截面内，且

所谓场分布图就是在固定时刻，用电力线和磁力线表示某种波型场强空间变不可能形成闭合曲线，而磁力线则是空间闭合曲线。

将 $m=1, n=0$ 代入TE波的场方程，即可得到 H_{10} 模的场分量为

$$\begin{aligned} E_y &= \frac{j\omega\mu}{k_c^2} \frac{\partial H_z}{\partial x} = \frac{j\omega\mu}{k_c^2} \frac{\partial}{\partial x} \left[H_0 \cos\left(\frac{\pi}{a}x\right) e^{-j\beta z}\right] \\ &= \frac{j\omega\mu}{k_c^2} \frac{\pi}{a} H_0 \sin\left(\frac{\pi}{a}x\right) e^{-j\beta z} \\ E_x &= -\frac{j\omega\mu}{k_c^2} \frac{\partial H_z}{\partial y} = 0 \\ H_x &= \frac{1}{k_c^2} \frac{\partial^2 H_z}{\partial x^2} = -\frac{\pi^2}{k_c^2 a^2} H_0 \cos\left(\frac{\pi}{a}x\right) e^{-j\beta z} \\ H_y &= \frac{1}{k_c^2} \frac{\partial^2 H_z}{\partial y^2} = 0 \end{aligned}$$

$$E_x = E_z = H_y = 0$$

H10模场强与y无关，场分量沿y轴均匀分布，即电磁场沿y方向均无变化。

由欧拉公式： $e^{-jz} = \cos z - j\sin z$ ，H10模的场分量取实部有

E_y

$$a \quad H_0 \sin x \sin z$$

$$a \quad a \quad H_x = H_0 \sin x \sin z$$

$$a \quad H_z = H_0 \cos x \cos z$$

3-7

a

长沙理工大学讲稿《微波技术基础》第三章 规则金属波导

电场和磁场都有方向和函数这两部分：

先讨论电场的分布

当z一定时， $\sin z$ 为定值，可假设其为正，则 E_y 电场分量沿x轴的变化规律为

$$E_y = \sin xa$$

即电场沿x方向呈正弦变化，在 $x=0$ 、 a 处 $E_y=0$ ，在 $x=a/2$ 处 $E_y=E_{\max}$ ，即沿x边有一个驻波分布。

x 当x一定时， \sin 为定值，可假设为正，则 E_y 电场分量沿z轴的变化规律为

$$a \quad E_y = \sin z$$

由于上面z一定时，已假设 $\sin z$ 为正值，所以为使视图易于理解仍假设 $\sin z$ 起始值为正值，则 E_y 以负值开始，如图4.2.2。

H10波的电场结构图

3 - 8

长沙理工大学讲稿 《微波技术基础》 第三章 规则金属波导

再讨论磁场的分布：

当 z 一定时， $\sin z$ 为定值，可假设其为正，则磁场分量沿 x 轴的变化规律为

$$H_x = \sin x a \quad H_z = \cos x a$$

x 当 x 一定时， \sin 为定值，可假设为正，则磁场分量沿 z 轴的变化规律为

$$a \quad H_x = \sin z \quad H_z = \cos z$$

磁场的分布如图4.2.3

H10波的磁场结构图

3 - 9

长沙理工大学讲稿 《微波技术基础》 第三章 规则金属波导

ybxa0EyHx0Hzyx0z0zxa00zH0zx

矩形波导TE₁₀模场分量的分布规律

- (a) 场分量沿x轴的变化规律； (b) 场分量沿z轴的变化规律；
(c) 矩形波导横截面上的场分布； (d) 矩形波导纵剖面上的场分布。

某一时刻TE₁₀模完整的场分布如图所示，随时间的推移，场分布图以相速沿传输方向移动。

3 - 10

长沙理工大学讲稿 《微波技术基础》 第三章 规则金属波导

矩形波导TE₁₀模的场分布图

H₁₀场结构剖面图

H₂₀场结构剖面图

3 - 11

长沙理工大学讲稿 《微波技术基础》 第三章 规则金属波导

H₀₁场结构剖面图

H02场结构剖面图

(二) 壁电流分布

当波导内传输电磁波时，波导内壁上将会感应高频电流。这种电流属传导电流，称为壁电流。由于假定波导壁是由理想导体构成，故壁电流只存在于波导的内表面。

如图：

矩形波导TE₁₀模壁电流分布

3 - 12

长沙理工大学讲稿 《微波技术基础》 第三章 规则金属波导

H11场结构剖面图

E11场结构剖面图

高次模中的几个较低次波形

3 - 13

长沙理工大学讲稿 《微波技术基础》 第三章 规则金属波导

(三) 场结构的画法上要注意：

- 场存在方向和大小两个不同概念，场的大小是以力线密度表示的
- 同一点不能有两根以上力线
- 磁力线永远闭合，电力线与导体边界垂直
- 电力线和磁力线相互正交

三、矩形波导中电磁波型的传输特性

TE波和TM波的截止波数均为

$$k_c = \frac{m\pi}{a} + \frac{n\pi}{b}$$

221. 截止波长

$$\lambda_c = \frac{2}{\sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2}}$$

22截止波长不仅与波导尺寸a和b有关，而且与决定波型的m和n有关，此外，截止频率还与介质特性有关。

2. 截止频率

$$f_c = \frac{v}{\lambda_c} = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2}$$

a b 当波导尺寸a和b给定时，将不同m和n值代入，即可得到不同波型的截止波长。其分布如图

BJ-100型波导不同波型截止波长的分布图

从图中可以看出，TE₁₀模的截止波长最长，它右边的阴影区为截止区。

- (1) 通常矩形波导工作在TE₁₀单模传输情况，这是因为TE₁₀模容易实现单模传输。
- (2) 当工作频率一定时传输TE₁₀模的波导尺寸最小；
- (3) 若波导尺寸一定，则实现单模传输的频带最宽。

(1) TE₁₀波的截止特性

要传播TE₁₀波必须满足

$$k_y < 2a$$

3-14

长沙理工大学讲稿《微波技术基础》第三章 规则金属波导

2 由于 $k_x^2 + k_y^2 = k^2$ ，而传播的相位因子 $e^{j(k_z z - \omega t)}$ 是实数，所以 $k_z^2 = k^2 - k_x^2 - k_y^2$ 必满足 $k_z^2 = k^2 - k_c^2 > 0$ 或 $k > k_c$

也即 $k > k_c$

$$k_y < 2a$$

k_c^2 为此我们定义 k_c

2 其中， $\lambda_c = 2a$ 称为截止波长， k_c 是对应的截止波数。

因此，波导是一只高通滤波器，低频信号无法通过。

(2) 波导波长 λ_g

$$\lambda_g = \frac{1}{\sqrt{k^2 - k_c^2}} \lambda_c > \lambda_c$$

(3) 相速 v_p

$$v_p = \frac{c}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_c}{\lambda_g}\right)^2}} > c$$

显然相速 $v_p > c$ 。但相速并不是能量传播速度。

群速 v_g 定义

$$v_g = \frac{c}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_c}{\lambda_g}\right)^2}} < c$$

$$v_p \lambda_g = c^2 / v_g \quad \text{且} \quad v_g v_p = c^2$$

(4) 波型阻抗

$$Z_{TE} = \frac{E_y}{H_x} = \frac{1}{\sqrt{k^2 - k_c^2}} \frac{1}{\lambda_g} \frac{1}{2a} \lambda_c^2$$

(5) 传输功率

在行波状态下，传输的平均功率

211P Re ET HT dS ETdS SS22Z 2Z1ab HTdS ExHy EyHx dxdy

2S200当传输TE₁₀模时，

3 - 15

长沙理工大学讲稿《微波技术基础》第三章 规则金属波导

1P 2ZTE₁₀ 0ab0E0sin xa dxdy 2ab21

E₀₄ZTE₁₀波导中填充空气介质时，

abE₀₂₂P 1 02a

480 (6) 功率容量

波导中最大承受的极限功率称为波导的功率容量。

行波状态下波导传输TE₁₀模的功率容量

2abEbr2Pbr 1 02a

480 实际传输线上总有反射波存在。在行驻波状态下，矩形波导传输TE₁₀模的功率容量应修正为

2PabEbr2 Pbr1 02a br

480 目前的雷达战中，对提高峰值功率容量极为重视。因为在一定意义上，功率就是作用距离，所以增加传输线功率容量相当重要。

气体击空的实质是场拉出游离电子在撞到气体分子之前已具有足够的动能，再次打出电子，形成连锁反应，以致击穿。如果在概念上，我们加大气体密度，就不会出现很大动能的电子，所以加大气压和降低温度是增加耐压功率的常用办法。

实验表明：对于空气耐功率近似与气压的5/4次方成正比，而与绝对温度成反比。绝对湿度每增加2.5克/米³，耐功率下降6%。

为了留有余地，波导实际允许传输的功率一般取行波状态下功率容量理论值的25% ~ 30%。

四、矩形波导尺寸的选择

矩形波导的尺寸选择必须根据具体的技术要求来确定，一般根据以下原则考虑：

1. 只传输主模

为了实现TE₁₀单模传输，则要求其他的高次模式都应该截止，即电磁波的工作波长必须满足下列条件

c TE₂₀ c TE₁₀

$a \leq 2a$

, 即

c TE₀₁

2b

当工作波长给定时，若要实现TE₁₀单模传输，则波导尺寸必须满足

$2a \leq \lambda/2, b \leq \lambda/2$

3-16

长沙理工大学讲稿 《微波技术基础》 第三章 规则金属波导

2. 有足够的功率容量

在不至于击穿的情况下，应最大限度地增加功率容量，一般要求

$0.6 \leq a \leq b \leq a/2$

3. 损耗小

通过波导后，微波信号功率不要损失太大，由此必须考虑损耗小的要求，应使

a 0.7

综合以上几个原则，矩形波导的尺寸一般选择为

a 0.7

b (0.4~0.5)a**关于本征波的讨论

以矩形波导为例，尽管在z方向它们只可能是入射波加反射波(即还是广义传输线)，但是由于横向边界条件它们由TE_mn和TM_mn波组成并且它们只能由TE_mn和TM_mn波组成(后者，我们称之为完备性)，矩形波导中这些波的完备集合——即本征波。

任何情况的可能解，只能在简正波中去找，具体场合所不同的仅仅是比例和组合系数，事实上，这样就把求复杂场函数的问题变换成求各个模式的系数。

这种思想，最早起源于矢量分析，任何空间矢量方向与大小均不相同，但是

$\hat{y} \cdot \hat{z}$ 建立x, y, z坐标系之后，任一(三维)矢量即归结为三个系数r_{xi}

4-3 圆波导

我们已经研究了矩形波导，对于圆波导的提出应该有它的理由。

一、圆波导的一些特点

在矩形波导应用之后，还有必要提出圆波导吗？当然，既然要用圆波导，必须有其优点存在。主要有：

1. 圆波导的提出来自实践的需要。例如，雷达的旋转搜索。如果没有旋转关节，那只好发射机跟着转。象这类应用中，圆波导成了必须要的器件。至于以后要用到的极化衰减器，多模或波纹喇叭，都会应用到圆波导。可以这样说，几何对称性给圆波导带来广泛的用途和价值。
2. 从力学和应力平衡角度，机加工圆波导更为有利，对于误差和方便性等方面均略胜矩形波导一筹。
3. 根据微波传输线的研究发现：功率容量和衰减是十分重要的两个指标。这个

3 - 17

长沙理工大学讲稿 《微波技术基础》 第三章 规则金属波导

问题从广义上看

功率容量 P_{max} S (其中 S 是截面)

衰减 a L (其中 L 是周长) 很容易引出一个品质因数 F

$F = P_{max} S$

aL 很明显，数字研究早就指出：在相同周长的条件下，圆面积最大。可见，要探索小衰减，大功率传输线，想到圆波导是自然的。

4. 矩形波导中存在的一个矛盾

当我们深入研究波导衰减，发现频率升高时衰减在矩形波导中上升很快。仔细分析表明，衰减由两部分组成：一部分称纵向电流衰减，另一部分是横向电流衰减。

当频率升高时，横向电尺寸加大，使横向电流衰减反而减少。这样所构成的矛盾因素使衰减有了极值，同时形成频率升高时衰减增加。

而以后在圆波导中将会发现，有的波型(圆波导中 H_{01} 波型)无纵向电流，因此，若采用这种波型会使高频时衰减减小。

圆波导是横截面为圆形的空心金属管，如图所示，其尺寸半径为 R 。

由于圆波导具有损耗较小和双极化的特性，所以常用作天线馈线和微波谐振腔，也可作较远距离的传输线。

圆波导具有轴对称性，故宜采用圆柱坐标来分析。

一、TM波场分量表达式

$$v = \cos m \theta \quad j \quad t \quad z \quad m n r \quad E_r \quad E_{\theta} j m e$$

$$\begin{aligned} R_{\sin m} R_m v_{mn} \sin m j t z E E_0 J_m r e \\ v_{mn} R \cos m R m v_{mn} \sin m j t z H_r E_0 J_m r e \\ \cos m v_{mn} r R v_{mn} \cos m j t z H E_0 J_{mr} e \\ R \sin m v v \cos m j t z E_z j_{mn} E_0 J_m mnr e \\ R R \sin m H_z = 0 \end{aligned}$$

其中, J

$m(kcr)$ 是第一类 m 阶 Bessel 函数的导数。

圆波导 TM 波的波阻抗为

3-18

长沙理工大学讲稿《微波技术基础》第三章 规则金属波导

Z_{TM} = E_r

H = H_r 二、TE 波场分量表达式

$$\begin{aligned} \cos m j t z mnr E E_0 J_m e \\ R \sin m \sin m R_m E_r E_0 J_m mnr e j t z \\ mnr R \cos m R m m n \sin m j t z H E_0 J_m r e \\ m n r R \cos m \\ \cos m j t z mnr H_r E_0 J_m e \\ R \sin m 1 \cos m j t z H_z j_{mn} E_0 J_m mnr e \\ R R \sin m E_z = 0 \end{aligned}$$

圆波导 TE 波的波阻抗为

Z_{TE} = E_r

H = H_r 三、截止波长及波型简介

由 TM 波和 TE 波的截止波数可求得相应的截止波长, 它们分别为

$$c_{TMmn} = \frac{2}{R^2 - R^2}, \quad c_{TEmn}$$

$$v_{mn} = m n$$

圆波导波型的分布图

TE₁₁模的截止波长最长，因此TE₁₁模是圆波导传输的主模，TE₁₁单模传输的条件为

$2.62R < \lambda < 3.41R$

四、圆波导中的三个主要模式

圆波导中有无限多个模式存在，最常用的三个主要模式为TE₁₁、TE₀₁和TM₀₁模。

(一) TE₁₁模($c = 3.41R$)

3 - 19

长沙理工大学讲稿 《微波技术基础》 第三章 规则金属波导

TE₁₁模的场分布如图所示。其中图(a)表示横截面上的电磁场分布；图(b)表示纵剖面上的电场分布；图(c)为圆波导壁上的壁电流分布。

(二) TE₀₁模($c = 1.64R$)

TE₀₁模的场分布如图所示。其中图(a)表示横截面上的电磁场分布；图(b)表示纵剖面上的电磁场分布；图(c)为壁电流的分布。

TE₀₁模常作为高Q谐振腔和远距离的毫米波传输线的工作模式。另外由于它是圆电模，也可作为连接元件和天线馈线系统的工作模式。但由于它不是主模，因此该模式作为工作模式时，必须设法抑制其它模式。

(三) TM₀₁模($c = 2.62R$)

TM₀₁模的场分布如图所示。其中图(a)表示横截面上的电磁场分布；图(b)表示纵剖面上的电磁场分布；图(c)为壁电流的分布。

TM₀₁模适用于微波天线馈线旋转铰链的工作模式。由于它具有E_z分量，便于和电子交换能量，可作电子直线加速器的工作模式。但由于它的管壁电流具有

3 - 20

长沙理工大学讲稿 《微波技术基础》 第三章 规则金属波导

纵向电流，故必须采用抗流结构的连接方式。

五、圆波导型设计

H₁₁模

$$CE_{01} < \lambda < CH_{11}$$

$$3.41R \leq \lambda \leq 2.62R \quad \text{一般选} \quad 3 < R < 4 \quad E_{01} \text{模}$$

$$CH_{21} < \lambda < CE_{01} \quad 2.62R < \lambda < 2.06R \quad CH_{21} < \lambda < CE_{01} \\ < R < 1.64R \quad < 1.64R$$

H₀₁模

各类传输线内传输的主模及其截止波长和单模传输条件列表如下：

传输线类型

矩形波导

圆波导

同轴线

带状线

微带线

主模

TE₁₀模

TE₁₁模

TEM模

TEM模

准TEM模

截止波长 λ_c

2a

3.14R

单模传输条件

a