

第二、三章

1. TEM、TE和TM波是如何定义的？什么是波导的截止性？分别说明矩形波导、圆波导、同轴线、带状线和微带线的主模是什么？

- 1) TE波、TM波、TEM波是属于电磁波的三种模式。TE波指电矢量与传播方向垂直，或者说传播方向上没有电矢量。TM波是指磁矢量与传播方向垂直。TEM波指电矢量和磁矢量都与传播方向垂直；
- 2) k_c 是与波导横截面尺寸、形状及传输模式有关的一个参量，当相移常数 $\beta = 0$ 时，意味导波系统不再传播，亦称为截止，此时 $k_c = k$ ，故将 k_c 称为截止波数
- 3) 矩形波导的主模是 TE₁₀ 模；圆波导的主模是 TE₁₁ 模；同轴线的主模是TEM模；带状线的主模是TEM模；微带线的主模是准TEM模。

2. 简述矩形波导传输特性的主要参数定义：相移常数，截至波长，截至波数，波导波长，相速度，TE波和TM波的波阻抗

- 1) 相移常数和截止波数：相移常数 β 和截止波数的 k_c 关系是

$$\beta = \sqrt{k^2 - k_c^2} \quad (1)$$

- 2) 相速 v_p ：电磁波的等相位面移动速度称为相速，即

$$v_p = \frac{\omega}{\beta} = \frac{c/\sqrt{\mu_r \epsilon_r}}{\sqrt{1 - k_c^2/k^2}} \quad (2)$$

- 3) 波导波长 λ_g ：导行波的波长称为波导波长，它与波数的关系式为

$$\lambda_g = \frac{\omega}{\beta} = \frac{2\pi}{k} \frac{c/\sqrt{\mu_r \epsilon_r}}{\sqrt{1 - k_c^2/k^2}} \quad (3)$$

- 4) 波阻抗：某个波形的横向电场和横向磁场之比，即

$$Z = \frac{E_t}{H_t} \quad (4)$$

3. 简述导波系统中截止波长、工作波长和波导波长的区别。

- 导行波的波长称为波导波长，用 λ_g 表示，它与波数的关系式为

$$\lambda_g = \frac{2\pi}{\beta} = \frac{2\pi}{k} \frac{1}{\sqrt{1 - k_c^2/k^2}} \quad (5)$$

其中， $2\pi/k$ 为工作波长

4. 为什么空心的金属波导内不能传播TEM波？

- 空心金属波导内不能存在TEM波。这是因为：如果内部存在TEM波，则要求磁场完全在波导的横截面内，而且是闭合曲线。有麦克斯韦第一方程可知，闭合曲线上磁场的积分等于与曲线相交链的电流。由于空心金属波导中不存在轴向即传播方向的传导电流，故必要求有传播方向的位移电流，由位移电流的定义式可知，要求一定有电场存在，显然这个结论与TEM波的定义相矛盾，所以，规则金属内不能传输TEM波。

5. 圆波导中的主模为 __，轴对称模为__模，低损耗模为 __ 模。

- TE₁₁模、TM₀₁模、TE₀₁模

6. 说明圆波导中TE₀₁模，TE₁₁模和TM₀₁模的各自特点

- TE01模磁场只有径向和轴向分量，故波导管壁电流无纵向分量，只有周向电流。因此当传输功率一定时，随着频率升高，管壁的热损耗将单调下降，故其损耗相对其它模式来说是低的，故可将工作在TE01模的圆波导用于毫米波的远距离传输或制作高Q值的谐振腔
- 圆波导TE11模易于实现单模传输，但由于模极化面是不稳定的存在着模的极化简并，所以实用中不用圆波导作为传输线，但是利用TE11的极化简并可以构成一些特殊的波导元器件：极化衰减器、极化变化器、微波铁氧体环形器等
- TM01的结构的特点是电场具有轴对称性，沿 φ 方向无变化；磁场只有 φ 分量，圆波导横截面上的磁利县是一些同心圆， $r=0$ 时， $H_\varphi = 0$ 。由于TM01模场结构具有轴对称性，故将两端工作在TM01模的圆波导作相对运动，不影响其中电磁波的传输，所以适合作微波天线馈电系统旋转关节中的圆波导传输模式。同时一些微波管直线电子加速器所用的谐振腔和慢波系统往往是这种波形演变而来的。

7. 什么叫模式简并现象？矩形波的和圆波导的模式简并有何异同？

- 波导中的电磁波是各种 TM_{mn} 模和 TE_{mn} 模的各种线性组合， m 为 x 方向变化的半周期数， n 是 y 方向变化的半周期数；如果当两个模式的 TM_{mn} 和 TE_{mn} 截止波长相等时，也就说明这两种模式在矩形波导里出现的可能性相同，这种现象就叫做简并

8. 解释圆波导中的模式简并和极化简并

- E-H简并（模式简并）：由于贝塞尔函数具有 $J'_0(x) = -J_1(x)$ 的性质，所以一阶贝塞尔函数的根和零阶贝塞尔函数导数的根相等，即 $u_{0n} = v_{1n}$ ，故有 $\lambda_{cTE_{0n}} = \lambda_{cTM_{1n}}$ ，从而形成了TE0n模和TM1n模的简并，称为模式简并
- 极化简并：由于原波导具有轴对称性，对 $m \neq 0$ 的任意非圆对称模式，横向电磁场可以有任意的极化方向而截止波数相同，任意极化方向的电磁波可以看成是偶对称极化波和奇对称极化波的线性组合。偶对称极化波和奇对称极化波具有相同的场分布，故称之为极化简并。

9. 为什么一般矩形（主模工作条件下）测量线探针开槽开在波导宽壁的中心线上

- 因为一般矩形波导中传输的电磁波是TE10模。而TE10模在波导壁面上的电流分布是在波导宽壁的中线上只有纵向电流。因而波导宽壁的中线开槽不会切断电流而影响波导内的场分布，也不会引起电磁波由开槽处向波导外辐射电磁波能量。

10. 在波导激励中常用哪三种激励方式？

- 电激励、磁激励、电流激励
 - 电激励：将同轴线内的导体延伸一小段，沿电场方向插入矩形波导内，构成探针激励
 - 磁激励：将同轴线的内导体延伸一小段后弯成环形，将其端部焊在外导体上，然后插入波导中所需激励模式的磁场最强处，并使小环法线平行于磁力线
 - 电流激励：在两个波导的公共壁上开孔或缝，使一部分能量辐射到另一波导去，由于波导开口的辐射类似电流元，故称之。

11. 带状线传输主模TEM模时，必须抑制高次模 _____ 和 _____；微带线的高次模有 _____ 和 _____。

- TE模、TM模、波导模式、表面波模式

12. 微带线的特性阻抗随着 w/h 的增大而 ____。相同尺寸的情况下， ϵ_r 越大，特性阻抗越 _____。

- 减小、小

13. 微带工作在什么模式？其相速和光速、带内波长及空间波长分别什么关系？

- 微带工作在准TEM模式， $\epsilon_e \in (1, \epsilon_r)$

$$v_p = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_e}}, \lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_e}} \quad (6)$$

其中 λ_g 为带内波长， λ_0 为空间波长

习题

• 【2.3】

【2.3】 矩形波导截面尺寸为 $a \times b = 23 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$, 波导内充满空气, 信号源频率为 10 GHz , 试求: ① 波导中可以传播的模式。② 该模式的截止波长 λ_c 、相移常数 β 、波导波长 λ_g 及相速 v_p 。

解 信号波长为

$$\lambda = \frac{c}{f} = 3 \text{ cm} = 30 \text{ mm}$$

$$\lambda_{c\text{TE}_{10}} = 2a = 46 \text{ mm}$$

$$\lambda_{c\text{TE}_{20}} = a = 23 \text{ mm}$$

因而波导中可以传输的模式为 TE_{10} , $\beta = \sqrt{k^2 - k_c^2} = 158.8$ 。此时, 有

$$v_p = \frac{\omega}{\beta} = 3.95 \times 10^8 \text{ m/s}$$

$$\lambda_g = \frac{2\pi}{\beta} = 39.5 \text{ mm}$$

• 【2.4】

【2.4】 用 BJ-100 矩形波导以主模传输 10 GHz 的微波信号, ① 求 λ_c 、 λ_g 、 β 和波阻抗 Z_w 。② 若波导宽边尺寸增加一倍, 上述各量如何变化? ③ 若波导窄边尺寸增大一倍, 上述各量如何变化? ④ 若尺寸不变, 工作频率变为 15 GHz , 上述各量如何变化?

解 BJ-100 波导的尺寸为

$$a \times b = 22.86 \text{ mm} \times 10.16 \text{ mm}$$

信号波长为

$$\lambda = \frac{c}{f} = 3 \text{ cm} = 30 \text{ mm}$$

①

$$\lambda_c = 2a = 45.72 \text{ mm}$$

$$k_c = \frac{2\pi}{\lambda_c}, \quad k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

$$\beta = \sqrt{k^2 - k_c^2} = 50\pi$$

$$\lambda_g = \frac{2\pi}{\beta} = 40 \text{ mm}$$

$$Z_w = \frac{120\pi}{\sqrt{1 - (\lambda/\lambda_c)^2}} = 159\pi \Omega$$

② 宽边增大一倍, 有

$$\lambda_c = 91.44 \text{ mm}$$

$$k_c = \frac{2\pi}{\lambda_c}, \quad k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

$$\beta = \sqrt{k^2 - k_c^2} = 63\pi$$

$$\lambda_g = \frac{2\pi}{\beta} = 32 \text{ mm}$$

$$Z_w = \frac{120\pi}{\sqrt{1 - (\lambda/\lambda_c)^2}} = 127\pi \Omega$$

③ 窄边增大一倍, 由于 $b' = 2b = 20.32 \text{ mm} < a$, 因而传输的主模仍然为 TE_{10} 、 λ_c 、 β 、 λ_g 和 Z_w 与①中相同。

④ 波导尺寸不变, 有

$$f' = 15 \text{ GHz}, \quad \lambda' = \frac{c}{f'} = 2 \text{ cm}$$

此时波导中存在 TE_{10} 、 TE_{20} 、 TE_{01} 三种模式。

对主模 TE_{10} 来说, 有

$$\begin{aligned}\lambda_c &= 2a = 45.72 \text{ mm} \\ \beta &= \sqrt{k^2 - k_c^2} = 89.92\pi \\ \lambda_g &= \frac{2\pi}{\beta} = 2.22 \text{ cm} \\ Z_w &= \frac{120\pi}{\sqrt{1 - (\lambda/\lambda_c)^2}} = 133.4\pi \Omega\end{aligned}$$

• 【2.7】

【2.7】 设矩形波导尺寸为 $a \times b = 6 \times 3 \text{ cm}^2$, 内充空气, 工作频率 3 GHz , 工作在主模, 求该波导能承受的最大功率为多少?

解

$$\begin{aligned}\lambda &= \frac{c}{f} = 10 \text{ cm} \\ P_{br0} &= 0.6ab \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2} = 5.97 \text{ MW}\end{aligned}$$

• 【2.8】

【2.8】 已知圆波导的直径为 5 cm , 填充空气介质。试求:

- ① TE_{11} 、 TE_{01} 、 TM_{01} 三种模式的截止波长。
- ② 当工作波长分别为 7 cm 、 6 cm 、 3 cm 时, 波导中出现上述哪些模式?
- ③ 当工作波长为 $\lambda = 7 \text{ cm}$ 时, 求最低次模的波导波长 λ_g 。

解 ① 三种模式的截止波长为

— 42 —

$$\begin{aligned}\lambda_{cTE_{11}} &= 3.4126a = 85.3150 \text{ mm} \\ \lambda_{cTM_{01}} &= 2.6127a = 65.3175 \text{ mm} \\ \lambda_{cTE_{01}} &= 1.6398a = 40.9950 \text{ mm}\end{aligned}$$

- ② 当工作波长 $\lambda = 70 \text{ mm}$ 时, 只出现主模 TE_{11} ;
当工作波长 $\lambda = 60 \text{ mm}$ 时, 出现 TE_{11} 和 TM_{01} ;
当工作波长 $\lambda = 50 \text{ mm}$ 时, 出现 TE_{11} 、 TM_{01} 和 TE_{01} 。

$$\textcircled{3} \quad \lambda_g = \frac{2\pi}{\beta} = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - (\lambda/\lambda_c)^2}} = \frac{70}{\sqrt{1 - (70/85.3150)^2}} = 122.4498 \text{ mm}$$

• 【2.11】

【2.11】 已知工作波长 $\lambda=5\text{ mm}$, 要求单模传输, 试确定圆波导的半径, 并指出是什么模式?

解 圆波导中两种模式的截止波长为

$$\lambda_{\text{cTE}_{11}} = 3.4126a, \lambda_{\text{cTM}_{01}} = 2.6127a$$

要保证单模传输, 工作波长满足以下关系:

$$2.6127a < \lambda < 3.4126a$$

即 $1.47\text{ mm} < a < 1.91\text{ mm}$ 时, 可以保证单模传输, 此时传输的模式为主模 TE_{11} 。

• **【3.2】**

【3.2】 一根以聚四氟乙烯 ($\epsilon_r=2.1$) 为填充介质的带状线, 已知 $b=5\text{ mm}$, $t=0.25\text{ mm}$, $w=2\text{ mm}$, 求此带状线的特性阻抗及其不出现高次模式的最高工作频率。

解 由教材中式 (3-1-4) 即可求得特性阻抗 $Z_0=69.4\ \Omega$ 。

带状线的主模为 TEM 模, 但若尺寸选择不当也会引起高次模, 为抑制高次模, 带状线的最短工作波长应满足:

$$\lambda > \max(\lambda_{\text{cTE}_{10}}, \lambda_{\text{cTM}_{10}})$$

$$\lambda_{\text{cTE}_{10}} = 2w\sqrt{\epsilon_r} = 5.8\text{ mm}$$

$$\lambda_{\text{cTM}_{10}} = 2b\sqrt{\epsilon_r} = 14.5\text{ mm}$$

所以, 它的最高工作频率为

$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{3 \times 10^8}{14.5 \times 10^{-3}} = 20\text{ GHz}$$

• **【3.5】**

【3.5】 在厚度 $h=1\text{ mm}$ 的陶瓷基片上 ($\epsilon_r=9.6$) 制作 $\lambda_g/4$ 的 $50\ \Omega$ 的微带线, 试设计其导体带宽度和长度。设工作频率为 6 GHz , 导带厚度 $t \approx 0$ 。

解 由教材中图 3-6 可得阻抗为 $50\ \Omega$ 的微带线的导带宽度 w 和基带厚度之比等于 1, 即 $w/h=1$, 因此, 有

$$w = 1\text{ mm}$$

由教材中式 (3-1-26) 得相同尺寸下的空气微带线的特性阻抗为

$$Z_0^a = 126.5\ \Omega$$

由教材中式 (3-1-25) 求得介质微带线的有效介电常数为

$$\epsilon_e = \left(\frac{Z_0^a}{Z_0}\right)^2 = 6.4$$