

1. 标量场 $u = 2x(y+z^2)$ 在点 $(1, 1, 1)$ 处沿 $\vec{l} = \vec{e}_x + \vec{e}_y + \vec{e}_z$ 的方向导数为 C

- A. 8 B. 10 C. $\frac{5}{3}\sqrt{6}$ D. $\frac{10}{3}\sqrt{6}$

$\vec{l}|_M = \vec{e}_x + \vec{e}_y + \vec{e}_z$ 其方向余弦为

$$\cos\alpha = \frac{l_x}{|\vec{l}|} = \frac{1}{\sqrt{6}}, \quad \cos\beta = \frac{l_y}{|\vec{l}|} = \frac{1}{\sqrt{6}}, \quad \cos\gamma = \frac{l_z}{|\vec{l}|} = \frac{1}{\sqrt{6}}$$

$$\frac{\partial u}{\partial x}|_M = 2y + 2z^2|_M = 4, \quad \frac{\partial u}{\partial y}|_M = 2x|_M = 2, \quad \frac{\partial u}{\partial z}|_M = 4xz|_M = 4$$

$$\therefore \frac{\partial u}{\partial l}|_M = \frac{\partial u}{\partial x} \cos\alpha + \frac{\partial u}{\partial y} \cos\beta + \frac{\partial u}{\partial z} \cos\gamma = \frac{4}{\sqrt{6}} + \frac{2}{\sqrt{6}} + \frac{4}{\sqrt{6}} = \frac{10}{\sqrt{6}}$$

2. 无旋矢量场 $\vec{A} = \vec{e}_x \cdot x^2 + \vec{e}_y \cdot y^3 + \vec{e}_z \cdot z^4$ 可以用 A 表示

- A. 一个标量场的梯度 B. 一个标量场的旋度
C. 一个矢量场的散度 D. 一个矢量场的旋度

3. 斯托克斯定理中, 矢量场 \vec{F} 旋度的面积分 $\int_S \nabla \times \vec{F} \cdot d\vec{S}$ 等于

- B
A. $\oint_S \vec{F} \cdot d\vec{S}$ B. $\oint_L \vec{F} \cdot d\vec{l}$ C. $\oint_S \nabla \cdot \vec{F} \cdot d\vec{l}$ D. $\oint_L \nabla^2 \vec{F} \cdot d\vec{l}$

4. 静电场中, 电场强度 \vec{E} 的单位是 C

- A. A/m B. A/m^2 C. V/m D. V/m^2

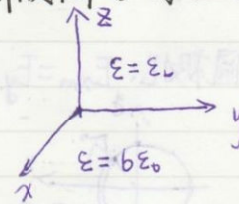
5. 无限大平面 $z=0$ 的一侧 ($z < 0$) 是理想介质 ($\epsilon_r = b$), 另一侧 ($z > 0$) 是空气, 已知空气侧的电位移矢量 $\vec{D} = \vec{e}_x(x^2 - z^2) + \vec{e}_y(y^2 - 2yz) + \vec{e}_z zxy^2$, 则 $z=0$ 平面上介质侧 \vec{D} 为 C

A. $\vec{D} = \vec{e}_x b x^2 + \vec{e}_y b y^2 + \vec{e}_z 12 x y^2$

B. $\vec{D} = \vec{e}_x \frac{1}{b} x^2 + \vec{e}_y \frac{1}{b} y^2 + \vec{e}_z \frac{1}{3} x y^2$

C. $\vec{D} = \vec{e}_x b x^2 + \vec{e}_y b y^2 + \vec{e}_z z x y^2$

D. $\vec{D} = \vec{e}_x \frac{1}{b} x^2 + \vec{e}_y \frac{1}{b} y^2 + \vec{e}_z z x y^2$



法向: $D_{nz} = D_{nz}$

$$\text{切向} \begin{cases} E_{1xt} = E_{2xt} \rightarrow \epsilon_0 D_{1x} = b \epsilon_0 D_{2x} \rightarrow D_{2x} = b D_{1x} \\ E_{1yt} = E_{2yt} \rightarrow \epsilon_0 D_{1y} = b \epsilon_0 D_{2y} \rightarrow D_{2y} = b D_{1y} \end{cases}$$

$$\therefore \vec{D} = \vec{e}_x b(x^2 - z^2) + \vec{e}_y b(y^2 - 2yz) + \vec{e}_z zxy^2 \quad z=0 \text{ 时} \rightarrow \vec{B}$$

6. 位于 $x=0$ 平面外有一无限大接地导体面, 其右侧 $x=x_0$ 平面内放置有一无限长线电荷, 若该线电荷的电荷线密度为 ρ_l , 则其镜像电荷的电荷线密度为 , 位置为 **B**

- A. $\rho_l, x = -x_0$ B. $-\rho_l, x = -x_0$
 C. $2\rho_l, x = -x_0$ D. $-2\rho_l, x = x_0$

7. 已知一电磁波电场强度矢量为 $\vec{E} = \vec{e}_y 7e^{-\alpha z} \sin(2\pi \times 10^9 t - \beta z)$, 则对应的磁场强度矢量为 , 该电磁波是 **(C)**

- A. $\vec{H} = -\vec{e}_x \frac{1}{120\pi} e^{-\alpha z} \sin(2\pi \times 10^9 t - \beta z)$, 非均匀平面波
 B. $\vec{H} = \vec{e}_x \frac{1}{120\pi} e^{-\alpha z} \sin(2\pi \times 10^9 t - \beta z)$, 非均匀平面波
 C. $\vec{H} = -\vec{e}_x \frac{1}{120\pi} e^{-\alpha z} \sin(2\pi \times 10^9 t - \beta z)$, 均匀平面波
 D. $\vec{H} = \vec{e}_x \frac{1}{120\pi} e^{-\alpha z} \sin(2\pi \times 10^9 t - \beta z)$, 均匀平面波

$\vec{H} = \frac{1}{\eta} \vec{e}_z \times \vec{E}, \eta = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} = 120\pi \Omega$ **右手螺旋定理**

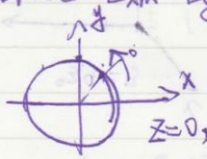
$\vec{e}_z \times \vec{E} = \begin{vmatrix} \vec{e}_x & \vec{e}_y & \vec{e}_z \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 7e^{-\alpha z} \sin(\dots) & 0 \end{vmatrix} = -\vec{e}_x 7e^{-\alpha z} \sin(\dots)$

8. 均匀平面波的表达式 $\vec{E} = \vec{e}_x 10 \sin(\omega t - kz + \frac{\pi}{4}) + \vec{e}_y 10 \cos(\omega t - kz + \frac{\pi}{4})$ 则该均匀平面波的极化方程式为 **(A)**

- A. 左旋圆极化 B. 右旋圆极化
 C. 线极化 D. 右旋椭圆极化

直线极化: E_x 与 E_y 初始相位差为 0° 或 180°

圆极化: $E_{xm} = E_{ym} = E_m$, 相位相差 $\pm 90^\circ$



取特殊点判断左右旋

$z=0, \omega t = 0, \pi/4, \pi/2, 3\pi/4, \pi$

$\phi_y - \phi_x = \frac{\pi}{2}$ 左旋

$\phi_y - \phi_x = -\frac{\pi}{2}$ 右旋

$\sin(\frac{\pi}{2} + \theta) = \cos \theta, \quad \sin(\frac{\pi}{2} - \theta) = \cos \theta$

$\cos(\frac{\pi}{2} + \theta) = -\sin \theta, \quad \cos(\frac{\pi}{2} - \theta) = \sin \theta$

9. 电磁波由媒质1 ($\epsilon_r=4, \mu_r=1$) 斜入射至空气时, 产生全反射的临界角为 D

A. $\frac{\pi}{2}$ B. $\frac{\pi}{3}$ C. $\frac{\pi}{4}$ D. $\frac{\pi}{6}$

$$\theta_c = \arcsin\left(\sqrt{\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}}\right) = \arcsin\left(\sqrt{\frac{1}{4}}\right) = \frac{\pi}{6}$$

$\sin x = \frac{1}{2}$

10. 同轴导线的最低模式是 C

A. TE_{10} 模 B. TE_{01} 模 C. TEM 模 D. TM_{11} 模

高次模 高次模 最低型高次模

填空题

1. 静电场中, 标量电位 ϕ 与电场强度矢量 \vec{E} 之间关系的数学表达式为 $\vec{E} = -\nabla\phi$; 恒定磁场中, 矢量磁位 \vec{A} 与磁感应强度矢量 \vec{B} 之间关系的数学表达式为 $\vec{B} = \nabla \times \vec{A}$

2. 对于线性、各向同性的简单媒质来说: 静电场中, 电场强度矢量与电位标量之间满足 $\vec{D} = \epsilon \vec{E}$ 的本构关系; 恒定磁场中, 磁场强度矢量与磁感应强度矢量之间满足 $\vec{B} = \mu \vec{H}$ 的本构关系; 恒定电场中, 电场强度矢量与电流密度矢量之间满足 $\vec{J} = \sigma \vec{E}$ 的本构关系

3. 恒定磁场中, 在两种磁导率均为有限值的媒质分界面上, 磁场强度矢量和磁感应强度矢量分别满足 $\vec{e}_n \times (\vec{H}_1 - \vec{H}_2) = 0$ 和 $\vec{e}_n \cdot (\vec{B}_1 - \vec{B}_2) = 0$ 的边界条件。

4. 静电场中, 介质内部极化电荷体密度及其表面极化电荷面密度与极化强度矢量之间的关系为 $\rho_p = -\nabla \cdot \vec{P}$, $\rho_{sp} = \vec{P} \cdot \vec{e}_n$

5. 瞬时坡印廷矢量 \vec{S} 的定义式是 $\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H}$, 时谐场的瞬时坡印廷矢量 \vec{S} 与平均坡印廷矢量 \vec{S}_{av} 的关系是 $\vec{S}_{av} = \frac{1}{T} \int_0^T \vec{S} dt$

6. 时变电磁场中, 广义安培环路定律的积分形式为

$$\oint_L \vec{H} \cdot d\vec{l} = \int_S (\vec{J} + \frac{d\vec{D}}{dt}) \cdot d\vec{S}$$

7. 任意时变电磁场中, 无源理想介质内部的电场强度矢量所满足的波动方程为 $\nabla^2 \vec{E} - \mu\epsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0$. 对于时谐电磁场情况, 该方程的复矢量表达式可以写为 $\nabla^2 \vec{E} + k^2 \mu\epsilon \vec{E} = 0$

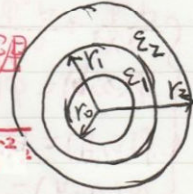
8. 若已知海水的电导率 $\sigma = 4 \text{ S/m}$, 相对介电常数 $\epsilon_r = 81$, 则海水对 100 GHz 电磁波的损耗角正切为 $\frac{4}{450}$, 属于弱导电媒质 (弱/强导电媒质)

$$\begin{aligned} \omega &= 2\pi f \\ \frac{\sigma}{\omega\epsilon} &= \frac{4}{2\pi \times 10^{11} \times (2\pi \times 10^{-9}) \times 81} \quad \text{小于 } 100 \text{ 为弱} \\ &= \frac{4 \times 18}{.81 \times 100} = \frac{8}{9} \times 10^{-2} \\ &= \frac{4}{450} < 100 \end{aligned}$$

9. 空气填充矩形波导横截面尺寸为 $a \times b$ ($a > b$), 则该波导的主模是 TE_{10} 模, 该模式的截止波长是 $\lambda_c = 2a$
 \downarrow
最低次波 $TE_{20}, \lambda_c = a$

10. 空气填充的矩形谐振腔尺寸为 $a \times b \times l$ 且 $a > l > b$, 若真空光速为 c , 则该谐振腔的最低谐振频率为 $\frac{c}{2} \sqrt{\frac{1}{a^2} + \frac{1}{l^2}}$, 对应的模式为 TE_{101} 模

1. 填充双层理想介质的同心导体球与球壳如图所示, 已知 $\epsilon_1 = 9\epsilon_0$, $\epsilon_2 = 3\epsilon_0$, 导体球和球壳表面分别均匀分布总量为 $+q$ 和 $-q$ 电荷
 求: 1) 四个区域 ($r < r_0$, $r_0 < r < r_1$, $r_1 < r < r_2$, $r > r_2$) 内电场强度分布
 2) 两种介质在分界面 ($r = r_1$) 上的极化电荷密度
 3) 内外导体间的电容



解: 结构及电荷分布具有对称性, 故采用高斯散度定理

设高斯球面半径为 r , 则 $\oint \vec{D}(\vec{r}) \cdot d\vec{S} = \sum q$
 $\therefore \oint \vec{D}(\vec{r}) \cdot \vec{e}_r \cdot d\vec{r} = \sum q \Rightarrow \vec{E}(\vec{r}) = \vec{e}_r \cdot \frac{q}{4\pi\epsilon_r\epsilon_0 r^2}$

1) $r < r_0$ 时, $\sum q = 0 \Rightarrow \vec{E}(\vec{r}) = 0$

$r_0 < r < r_1$ 时, $\sum q = q, \epsilon_r = 9 \Rightarrow \vec{E}(\vec{r}) = \vec{e}_r \cdot \frac{q}{36\pi\epsilon_0 r^2}$

$r_1 < r < r_2$ 时, $\sum q = q, \epsilon_r = 3 \Rightarrow \vec{E}(\vec{r}) = \vec{e}_r \cdot \frac{q}{12\pi\epsilon_0 r^2}$

$r > r_2$ 时, $\sum q = q + (-q) = 0 \Rightarrow \vec{E}(\vec{r}) = 0$

2) $r_0 < r < r_1$ 时, $\epsilon_r = 9 \Rightarrow \chi_e = \epsilon_r - 1 = 8 \Rightarrow \vec{P}(\vec{r}) = \chi_e \epsilon_0 \vec{E}(\vec{r}) = \vec{e}_r \cdot \frac{2q}{9\pi r^2}$

$\therefore \rho_{sp1} = \vec{P}(\vec{r}) \cdot \vec{e}_r = \frac{2q}{9\pi r^2}$

$r_1 < r < r_2$ 时, $\epsilon_r = 3 \Rightarrow \chi_e = \epsilon_r - 1 = 2 \Rightarrow \vec{P}(\vec{r}) = \vec{e}_r \cdot \frac{q}{6\pi r^2}$

$\therefore \rho_{sp2} = \vec{P}(\vec{r}) \cdot \vec{e}_r = -\frac{q}{6\pi r^2}$

$\therefore r = r_1$ 处总极化电荷 $\rho_{sp} = \frac{2q}{9\pi r_1^2} - \frac{q}{6\pi r_1^2} = \frac{q}{18\pi r_1^2}$

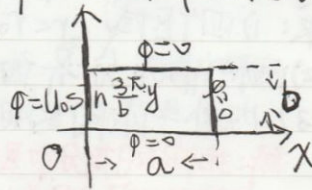
3) $U = \int \vec{E}(\vec{r}) \cdot d\vec{l} = \int_{r_0}^{r_2} \vec{E}(\vec{r}) \cdot d\vec{r} = \int_{r_0}^{r_1} \frac{q}{36\pi\epsilon_0 r^2} \cdot \vec{e}_r \cdot d\vec{r} + \int_{r_1}^{r_2} \frac{q}{12\pi\epsilon_0 r^2} \cdot d\vec{r}$

$= \frac{q}{36\pi\epsilon_0} \left(\frac{1}{r_0} - \frac{1}{r_1} \right) + \frac{q}{12\pi\epsilon_0} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$

$\therefore C = \frac{q}{U} = \frac{36\pi\epsilon_0 r_0 r_1 r_2}{r_1 r_2 + 2r_0 r_2 - 3r_0 r_1}$

2. 截面为矩形的无限金属槽整体接地，槽的宽度和高度分别为 a 和 b ，其右内壁和上下底面的电位为 $\varphi=0$ ，左侧壁的电位为 $\varphi=U_0 \sin \frac{3\pi}{b} y$ ，求金属槽内电位分布。

该问题在数学上表示为图。



$$\begin{cases} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} = 0 & (0 < x < a, 0 < y < b) \\ \varphi(x, 0) = \varphi(x, b) = 0 & (0 < x < a) \\ \varphi(0, y) = U_0 \sin \frac{3\pi}{b} y & (0 < y < b) \\ \varphi(a, y) = 0 & (0 < y < b) \end{cases}$$

通解为 $\varphi(x, y) = (A_0 + B_0 x)(C_0 + D_0 y) + \sum_{n=1}^{\infty} (A_n \cosh k_n x + B_n \sinh k_n x)(C_n \cos k_n y + D_n \sin k_n y)$

$y=0, 0 \leq x \leq a$ 时, $\varphi(x, 0) = 0$

$$\therefore \varphi(x, 0) = (A_0 + B_0 x) \cdot C_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (A_n \cosh k_n x + B_n \sinh k_n x) \cdot C_n = 0$$

$$\therefore C_n = 0$$

$$\varphi(x, y) = (A_0 + B_0 x) \cdot D_0 y + \sum_{n=1}^{\infty} (A_n \cosh k_n x + B_n \sinh k_n x) \cdot D_n \sin k_n y$$

$y=b, 0 \leq x \leq a$ 时, $\varphi(x, b) = 0$

$$\varphi(x, b) = (A_0 + B_0 x) \cdot D_0 b + \sum_{n=1}^{\infty} (A_n \cosh k_n x + B_n \sinh k_n x) \cdot D_n \sin k_n b = 0$$

$$\therefore D_0 = 0, \sin k_n b = 0 \Rightarrow k_n = \frac{n\pi}{b} \quad (n=0, 1, 2, \dots)$$

$$\therefore \varphi(x, y) = \sum_{n=1}^{\infty} (A_n \cosh \frac{n\pi}{b} x + B_n \sinh \frac{n\pi}{b} x) \cdot D_n \sin \frac{n\pi}{b} y$$

$$\varphi(a, y) = \sum_{n=1}^{\infty} (A_n \cdot \cosh \frac{n\pi}{b} a + B_n \sinh \frac{n\pi}{b} a) \cdot D_n \sin \frac{n\pi}{b} y = 0$$

$$\therefore A_n \cdot \cosh \frac{n\pi}{b} a + B_n \sinh \frac{n\pi}{b} a = 0 \Rightarrow A_n = -B_n \cdot \tanh \frac{n\pi a}{b}$$

$$\therefore \varphi(x, y) = \sum_{n=1}^{\infty} (-B_n \tanh \frac{n\pi a}{b} \cdot \cosh \frac{n\pi}{b} x + B_n \sinh \frac{n\pi}{b} x) \cdot D_n \sin \frac{n\pi}{b} y$$

$$\therefore \varphi(0, y) = \sum_{n=1}^{\infty} (-B_n \tanh \frac{n\pi a}{b}) \cdot D_n \sin \frac{n\pi}{b} y = U_0 \sin \frac{3\pi}{b} y$$

$$\int_0^b \sum_{n=1}^{\infty} (-B_n \tanh \frac{n\pi a}{b} \cdot D_n \sin \frac{n\pi}{b} y \cdot \sin \frac{m\pi}{b} y) dy = \int_0^b U_0 \sin \frac{3\pi}{b} y \cdot \sin \frac{m\pi}{b} y dy$$

$$\therefore -B_n D_n \frac{b}{2} \tanh \frac{n\pi a}{b} = \begin{cases} 0, & m \neq 3 \\ \frac{b}{2} U_0, & m=3 \end{cases}$$

$$\therefore B_n D_n = \begin{cases} 0, & m \neq 3 \\ -\frac{U_0}{\tanh \frac{m\pi a}{b}}, & m=3 \end{cases}$$

$$\therefore \varphi(x, y) = \left[U_0 \cosh \frac{3\pi}{b} x - \frac{U_0}{\tanh \frac{3\pi a}{b}} \sinh \frac{3\pi}{b} x \right] \sin \frac{3\pi}{b} y$$

3. 均匀平面波的电场振幅为 $\vec{E} = 60\pi(\vec{e}_x e^{-j\frac{\pi}{3}z} + \vec{e}_y j e^{-j\frac{\pi}{3}z})$, 从空气中垂直入射到 $z=0$ 的导体平面上, 求

- 1) 入射波的极化方式及相伴磁场的表达式
- 2) 反射波的电场与磁场的表达式并判断其极化形式
- 3) 求导体表面的面电流密度

1) 入射波为左旋极化波

$$\vec{H}_i = \frac{1}{\eta_0} \vec{e}_z \times \vec{E}_i = \frac{1}{120\pi} \vec{e}_z \times \vec{E}_i = \frac{1}{2}(\vec{e}_y e^{-j\frac{\pi}{3}z} - \vec{e}_x j e^{-j\frac{\pi}{3}z})$$

$$2) \vec{E}_r = (\vec{e}_x E_{xm} e^{j\frac{\pi}{3}z} + \vec{e}_y j E_{ym} e^{j\frac{\pi}{3}z})$$

在 $z=0$ 处总电场的切向分量 $E_x = E_y = 0$ 则 $E_{xm} = E_{ym} = -60\pi \times$

$$\therefore \vec{E}_r = -60\pi(\vec{e}_x e^{j\frac{\pi}{3}z} + \vec{e}_y j e^{j\frac{\pi}{3}z}) \quad (r = -1)$$

$$\vec{H}_r = -\vec{e}_z \times \frac{1}{\eta_0} \vec{E}_r = \frac{1}{2}(\vec{e}_y j e^{j\frac{\pi}{3}z} - \vec{e}_x e^{j\frac{\pi}{3}z})$$

反射波为右旋极化波

$$3) \vec{H}_{tot} = \vec{H}_i + \vec{H}_r = \frac{1}{2}(\vec{e}_y e^{-j\frac{\pi}{3}z} - \vec{e}_x j e^{-j\frac{\pi}{3}z}) + \frac{1}{2}(\vec{e}_y j e^{j\frac{\pi}{3}z} - \vec{e}_x e^{j\frac{\pi}{3}z})$$

$$\text{在导体表面 } z=0 \text{ 上, } \vec{H}_{tot} = \frac{1}{2}(\vec{e}_y - \vec{e}_x j) + \frac{1}{2}(\vec{e}_y - \vec{e}_x j)$$

$$= \vec{e}_y - j\vec{e}_x$$

$$\text{由理想导体边界条件 } \Rightarrow \vec{J} = -\vec{e}_z \times \vec{H}_{tot} = -\vec{e}_z \times (\vec{e}_y - j\vec{e}_x)$$

$$= \vec{e}_x + \vec{e}_y j$$

4. 已知空气填充的矩形波导截面尺寸为 $a \times b = 22.86 \text{ mm} \times 10.16 \text{ mm}$ 当传播 10 GHz 电磁波时, 求 1) 波导中能支持哪些模式的电磁波 是否存在简并模式 如果存在, 请指出.

2) 如果波导中填充理想介质 ($\epsilon_r = 9, \mu_r = 1$) 波导中能支持哪些模式的电磁波 是否存在简并模式 如果存在, 请指出.

1) $f = 10 \text{ GHz} = 10^{10} \text{ Hz}$ 时, 空气中 $\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8}{10^{10}} = 0.03 \text{ m} = 30 \text{ mm}$

$$\text{矩形波截止波长 } \lambda_c = \sqrt{\left(\frac{m\lambda}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\lambda}{b}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{m\lambda}{22.86}\right)^2 + \left(\frac{n\lambda}{10.16}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{m}{22.86}\right)^2 + \left(\frac{n}{10.16}\right)^2} \lambda$$

$$\lambda = 30 \text{ mm} \text{ 时, } \lambda < \lambda_c \Rightarrow \left(\frac{m}{22.86}\right)^2 + \left(\frac{n}{10.16}\right)^2 < \frac{4}{900}$$

a) $m=0$ 时, $n < 0.677$, 无传播

b) $m=1$ 时, $n < 0.51$, 对应 TE_{10} .

c) $m=2$ 时, 不满足条件

\therefore 波导中仅支持传输 TE_{10} 模式, 不存在简并现象.

2) $f=10\text{GHz}$, $\epsilon_r=9$, $\mu_r=1 \Rightarrow$ 介质中波长为 $\lambda = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r} f} = \frac{c}{\sqrt{9} f} = 10\text{mm}$
 $\lambda=10\text{mm}$, $\lambda < \lambda_c \Rightarrow \left(\frac{m}{2.86}\right)^2 + \left(\frac{n}{10.16}\right)^2 < \left(\frac{3}{10}\right)^2$

a) $m=0$ 时, $n < 2.03$, 有 TE_{01} , TE_{02}

b) $m=1$ 时, $n < 1.98$, 有 TE_{10} , TE_{11} , TM_{11}

c) $m=2$ 时, $n < 1.83$, 有 TE_{20} , TE_{21} , TM_{21}

d) $m=3$ 时, $n < 1.53$, 有 TE_{30} , TE_{31} , TM_{31}

e) $m=4$ 时, $n < 0.98$, 有 TE_{40}

f) $m > 4$ 时 不满足条件,

\therefore 波导中填充介质时能支持: TE_{01} , TE_{02} , TE_{10} , TE_{11} , TM_{11} , TE_{20} , TE_{21} , TM_{21} , TE_{30} , TE_{31} , TM_{31} , TE_{40} 共 12 种中波

其中 TE_{11} 和 TM_{11} , TE_{21} 和 TM_{21} , TE_{31} 和 TM_{31} 为简并模式