



## 本章内容

### 1、时谐电磁场的复数表示

复数形式的场方程

复数形式的能量关系;

### 2、平面电磁波在不同媒质中传播特性的分析;

理想介质中的平面波

导电媒质中的平面波

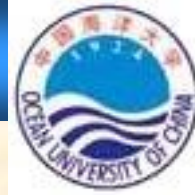
### 3、电磁波的极化



后面各章节仅研究时谐电磁场，为了书写简便起见，

今后将略去复振幅和复矢量的顶标 “ $\cdot$ ” 号；

即：复振幅  $\dot{E}_x$  仍写为  $E_x$ ，  
复矢量  $\dot{\bar{E}}$  仍写为  $\bar{E}$ 。



## ✓平面电磁波的概念

### 1.等相位面:

在某一时刻，空间具有相同相位的点构成的面称为等相位面。

等相位面又称为波阵面。

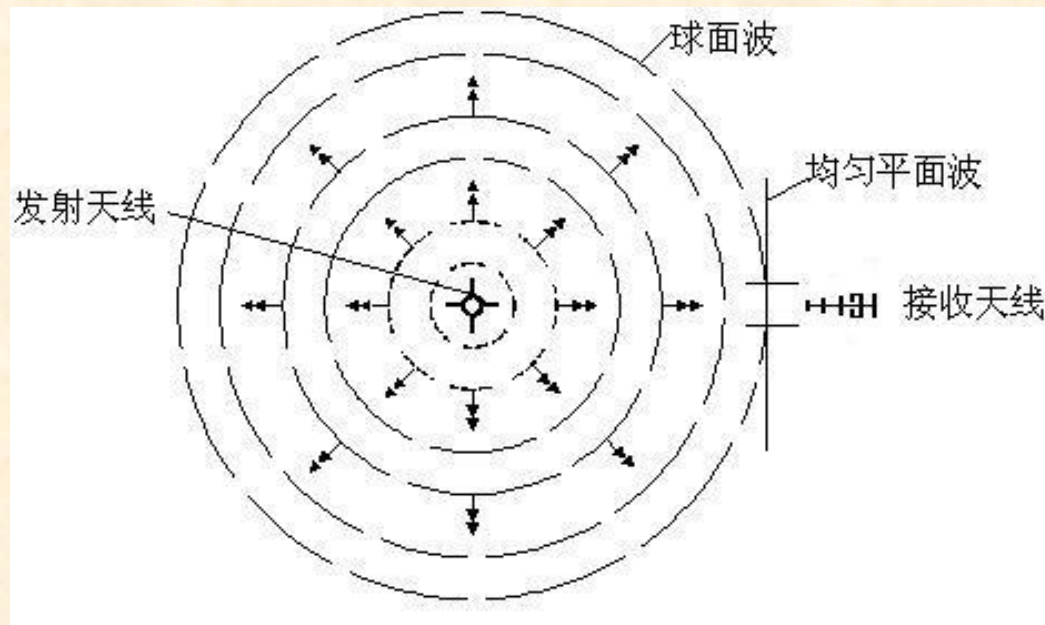
2.球面波：等相位面是球面的电磁波称为球面波。

3.平面波：等相位面是平面的电磁波称为平面电磁波。



“平面波”是一个理想化的简化模型。

一般说来，大多数源辐射的电磁波为球面波。



但当我们远离波源观察球面上的一小部分波时，由于半径足够大，球面上的一小片面积可以视为平面，在此小平面内的波可视为平面波。

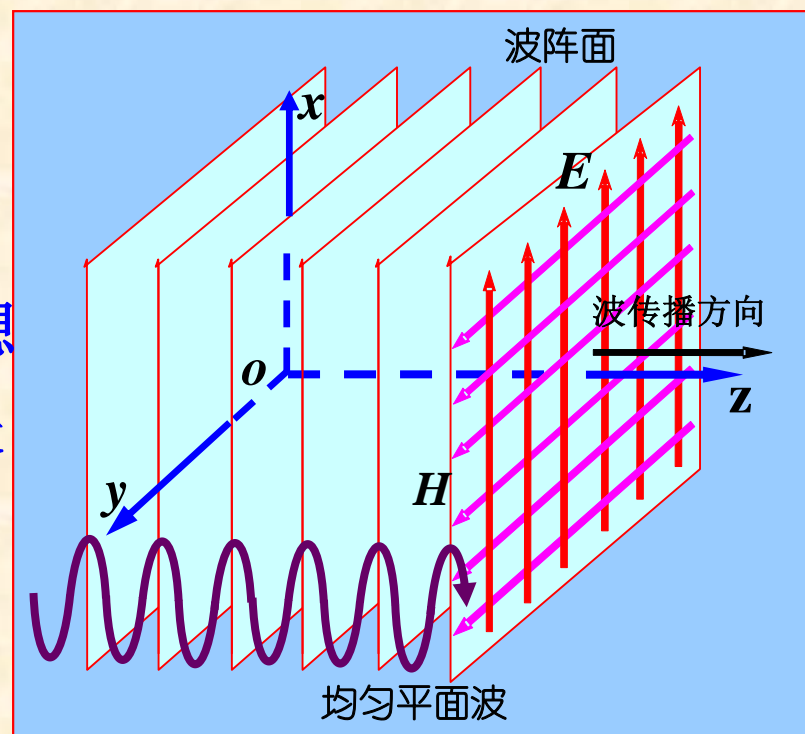
因此，对平面波的讨论具有十分重要的工程意义。



#### 4. 均匀平面波:

任意时刻, 如果在平面等相位面上, 每一点的电场和磁场强度的方向、振幅都保持不变, 这种电磁波称为均匀平面波。

均匀平面波是电磁波的一种理想情况, 其分析方法简单, 但又表征了电磁波的重要特性。



日常所用的电视或通信接收天线都可以把到达的来波看成是均匀平面波。



## § 5.4 理想介质中的平面波

### Plane Waves in Lossless Media

- 线性均匀各向同性无耗的介质称为理想介质；
- 自由空间可近似视为理想介质；
- 本节讨论：均匀平面波在充满理想介质的无界空间中的传播规律；





# 一、理想介质中平面波的波动方程及其解

## 1. 均匀平面波满足一维波动方程

从麦克斯韦方程出发：

在自由空间： $\vec{J}_c = 0, \rho_v = 0$

$$\left\{ \begin{array}{l} \nabla \times \vec{H} = \vec{J}_c + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \\ \nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\ \nabla \cdot \vec{D} = \rho_v \\ \nabla \cdot \vec{B} = 0 \end{array} \right. \xrightarrow{\begin{array}{l} \vec{D} = \epsilon \vec{E} \\ \vec{B} = \mu \vec{H} \end{array}} \left\{ \begin{array}{l} \nabla \times \vec{H} = \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \\ \nabla \times \vec{E} = -\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \\ \nabla \cdot \vec{E} = 0 \\ \nabla \cdot \vec{H} = 0 \end{array} \right.$$

对第一方程两边取旋度，得：

$$\nabla \times \nabla \times \vec{H} = \epsilon \frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times \vec{E})$$

根据矢量运算：

$$\nabla \times \nabla \times \vec{H} = \nabla(\nabla \cdot \vec{H}) - \nabla^2 \vec{H}$$

由此得： $-\nabla^2 \vec{H} = \epsilon \frac{\partial}{\partial t} (-\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t})$

则：

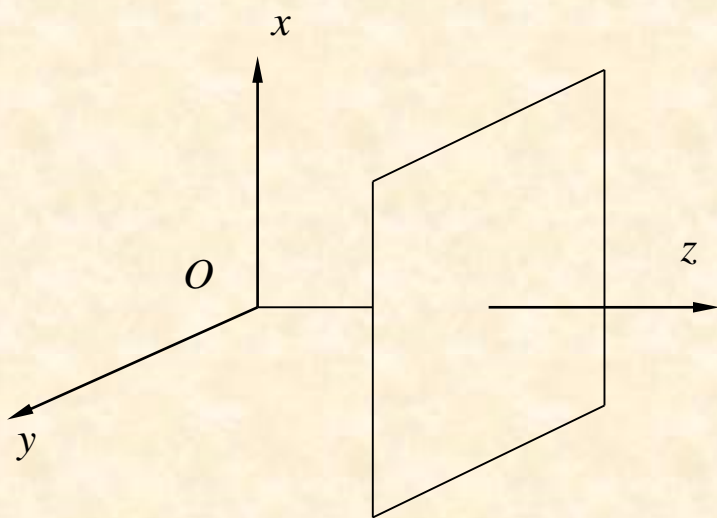
$$\nabla^2 \vec{H} = \mu \epsilon \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2}$$

——磁场的波动方程



同理可得： $\nabla^2 \vec{E} = \mu\epsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}$  ——电场的波动方程

对均匀平面波而言，选直角坐标系，假设电磁波沿  $z$  方向传播，等相位面平面平行于  $xOy$  平面。如图所示：



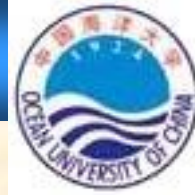
$$\frac{\partial}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial}{\partial y} = 0$$

所以：

$$\frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial z^2} = \mu\epsilon \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2}$$
$$\frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial z^2} = \mu\epsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}$$

可见： 均匀平面波满足一维波动方程。





## 2. 均匀平面波是横电磁波 (TEM波)

根据麦克斯韦第一方程:  $\nabla \times \vec{H} = \varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$

$$\nabla \times \vec{H} = \begin{vmatrix} \hat{a}_x & \hat{a}_y & \hat{a}_z \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} \\ H_x & H_y & H_z \end{vmatrix} = -\frac{\partial H_y}{\partial z} \hat{a}_x + \frac{\partial H_x}{\partial z} \hat{a}_y \rightarrow \begin{cases} \frac{\partial H_y}{\partial z} = -\varepsilon \frac{\partial E_x}{\partial t}, \\ \frac{\partial H_x}{\partial z} = \varepsilon \frac{\partial E_y}{\partial t}, \\ 0 = \varepsilon \frac{\partial E_z}{\partial t} \end{cases}$$

$$\varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = \varepsilon \left( \frac{\partial E_x}{\partial t} \hat{a}_x + \frac{\partial E_y}{\partial t} \hat{a}_y + \frac{\partial E_z}{\partial t} \hat{a}_z \right)$$

可见:  $E_z$  与时间  $t$  无关, 说明电场中没有  $E_z$  分量。  $E_z = 0$

结论: 电场只有  $E_x$  和  $E_y$  分量, 说明电场矢量位于  $xOy$  平面上。

电场强度可表示为:  $\vec{E} = \hat{a}_x E_x + \hat{a}_y E_y$



根据麦克斯韦尔第二方程:  $\nabla \times \vec{E} = -\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t}$

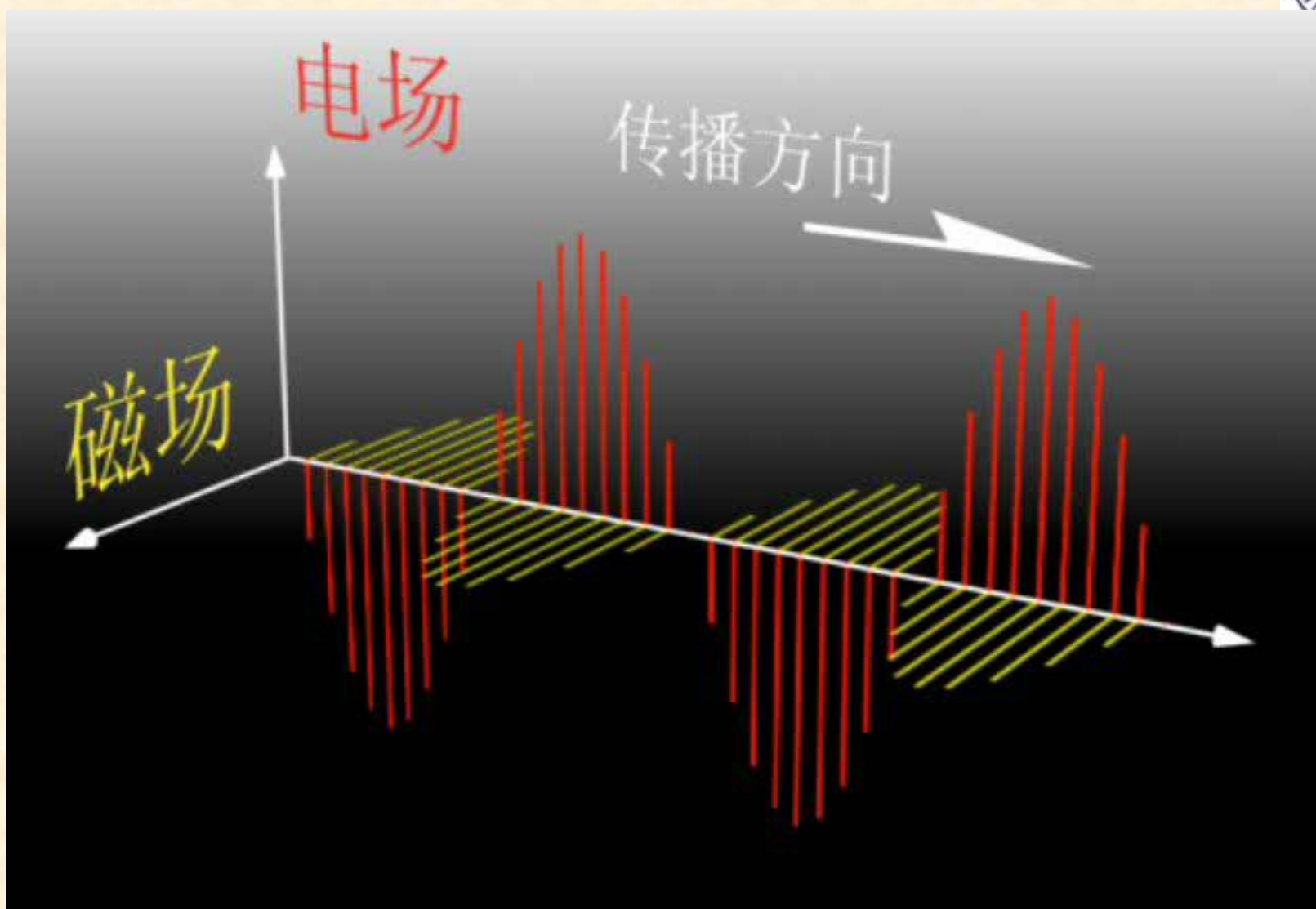
$$\begin{aligned} \nabla \times \vec{E} &= \begin{vmatrix} \hat{a}_x & \hat{a}_y & \hat{a}_z \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} \\ E_x & E_y & 0 \end{vmatrix} = -\hat{a}_x \frac{\partial E_y}{\partial z} + \hat{a}_y \frac{\partial E_x}{\partial z} \\ &= -\mu \left( \hat{a}_x \frac{\partial H_x}{\partial t} + \hat{a}_y \frac{\partial H_y}{\partial t} + \hat{a}_z \frac{\partial H_z}{\partial t} \right) \end{aligned} \quad \rightarrow \quad \begin{cases} \frac{\partial E_y}{\partial z} = \mu \frac{\partial H_x}{\partial t} \\ \frac{\partial E_x}{\partial z} = -\mu \frac{\partial H_y}{\partial t} \\ \frac{\partial H_z}{\partial t} = 0 \end{cases}$$

可见:  $H_z$  与时间  $t$  无关, 不属于时变场部分。  $H_z = 0$

磁场强度可表示为:  $\vec{H} = \hat{a}_x H_x + \hat{a}_y H_y$

结论:

对传播方向而言, 电场和磁场只有横向分量, 没有纵向分量, 这种电磁波称为横电磁波, 简称为TEM波。



理想介质中均匀平面波的电场和磁场分布



### 3. 波动方程的解

已知电场的波动方程为：

$$\frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial z^2} = \mu\epsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}$$

对于时谐电磁场，因子为  $e^{j\omega t}$ ，因此：

电场强度复矢量的齐次波动方程：

$$\nabla^2 \bar{\mathbf{E}} + k^2 \bar{\mathbf{E}} = 0, \quad k = \omega \sqrt{\mu\epsilon}$$

其中： $\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$  称为角频率。

$$\text{取 } \mathbf{E} = \hat{x}E_x, \text{ 上式化为 } \nabla^2 E_x + k^2 E_x = 0$$



$$\nabla^2 E_x + k^2 E_x = 0$$

$E_x$  只沿z向变化, 而与x, y无关:  $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} = \frac{\partial^2}{\partial z^2}$

齐次波动方程简化为  $\frac{d^2 E_x}{dz^2} + k^2 E_x = 0$

它的解为:

$$E_x = C_1 e^{-jkz} + C_2 e^{jkz}$$

对应的瞬时值为:  $E_x(t) = \text{Re}[E_x e^{j\omega t}] = C_1 \cos(\omega t - kz) + C_2 \cos(\omega t + kz)$

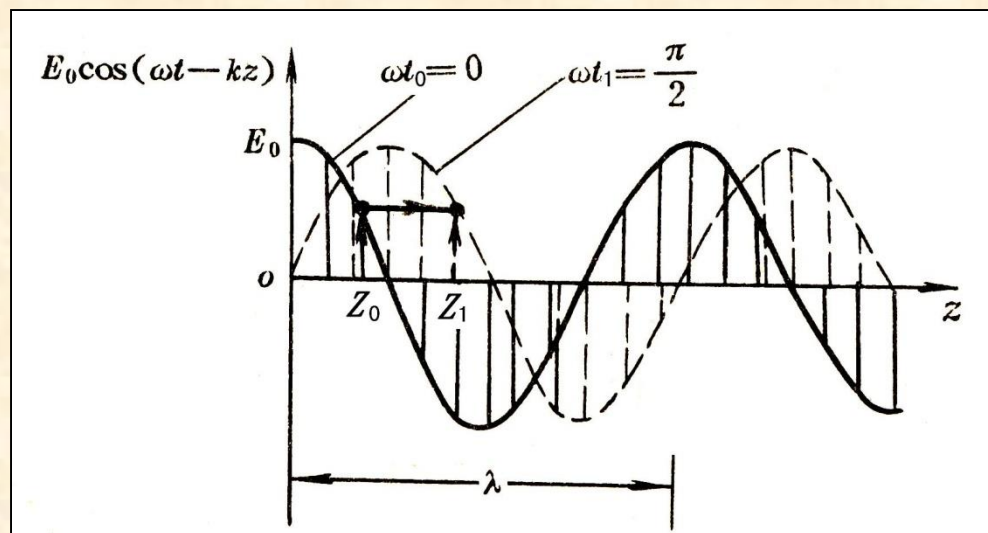
相位:  $\omega t$  是时间相位,  $kz$  为空间相位





$$E_x(t) = \text{Re}[E_x e^{j\omega t}] = C_1 \cos(\omega t - kz) + C_2 \cos(\omega t + kz)$$

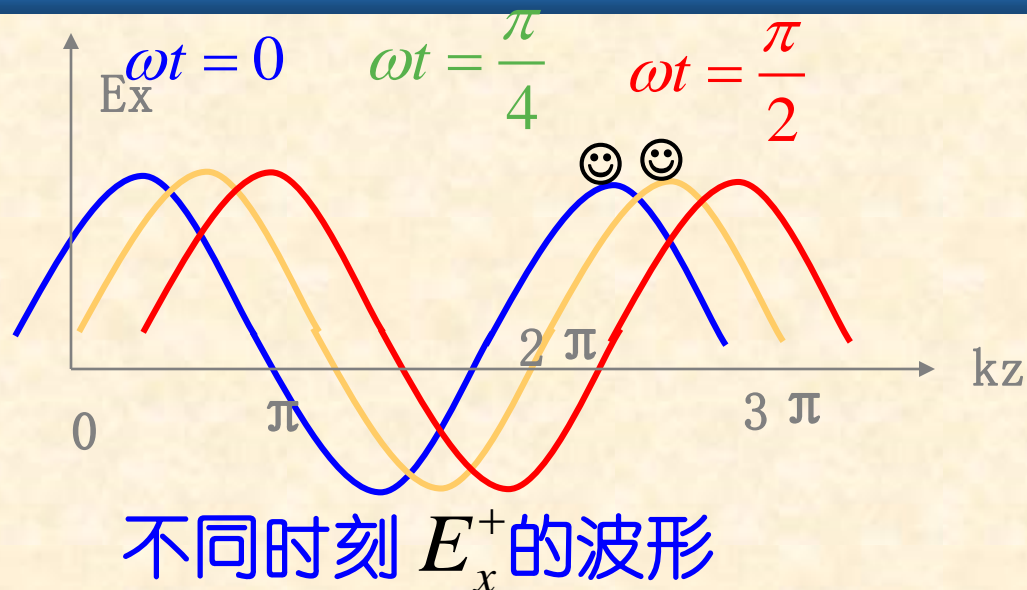
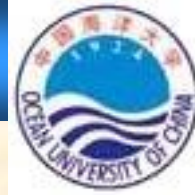
第一项，令  $C_1 = E_0$ ，这个波波形图：



**正向行波：** 当  $t$  增加时，只要  $\omega t - kz = \text{const}$ ，其值是相同的。如  $t_0 \rightarrow t_1$ ，相应地  $z_0 \rightarrow z_1$ ，这两点处场的总相位不变，从而  $E|_{z_0} = E|_{z_1}$ 。说明随着  $t$  的增加， $z_0$  处的状态沿  $+z$  方向移动到  $z_1$ ，故波沿  $+z$  方向传播。

**反向行波：** 解的第二项  $C_2 \cos(\omega t + kz)$  的相位随着  $z$  的增加而逐渐引前，代表向  $-z$  方向行波。





从图可知，随时间 $t$ 增加，波形向 $+z$ 方向平移。故：

$e^{-jkz}$  表示向 $+z$ 方向传播的均匀平面波；

同理可知：

$e^{jkz}$  表示向 $-z$ 方向传播的均匀平面波；

亥姆霍兹方程通解的物理意义：

表示沿 $z$ 向 $(+z, -z)$ 方向传播的均匀平面波的合成波。



## 4. 相伴的磁场强度复矢量和波阻抗

$$\begin{aligned}\bar{\mathbf{H}} &= \frac{j}{\omega\mu} \nabla \times \bar{\mathbf{E}} = \frac{j}{\omega\mu} \begin{vmatrix} \hat{\mathbf{x}} & \hat{\mathbf{y}} & \hat{\mathbf{z}} \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ E_x & 0 & 0 \end{vmatrix} \\ &= \frac{j}{\omega\mu} \hat{\mathbf{y}} \frac{\partial E_x}{\partial z} = \hat{\mathbf{y}} \frac{j}{\omega\mu} (-jk) E_0 e^{-jkz} = \hat{\mathbf{y}} \frac{E_0}{\eta} e^{-jkz} = \hat{\mathbf{y}} H_0 e^{-jkz}\end{aligned}$$

➡ **结论：**在理想介质中，均匀平面波的电场强度与磁场强度相互垂直，且同相位。

$$\text{式中: } \eta = \frac{E_0}{H_0} = \frac{\omega\mu}{k} = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \quad (\Omega)$$

只与媒质的介电常数和磁导率有关，称为媒质的**波阻抗**。



可知：均匀平面电磁波中电场幅度和磁场幅度之比为一定值。

媒质波阻抗定义：电场幅度和磁场幅度之比：

$$\eta = \frac{|\vec{E}|}{|\vec{H}|} = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}}$$

特殊：真空（自由空间）的本征阻抗为：

$$\eta_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} = \sqrt{\frac{4\pi \times 10^{-7}}{\frac{1}{36\pi} \times 10^{-9}}} = 120\pi \approx 377(\Omega)$$

结论：

在自由空间中传播的电磁波，电场幅度与磁场幅度之比为377。



## 二、理想介质中均匀平面波的传播特点

### 1. 均匀平面波的传播参数

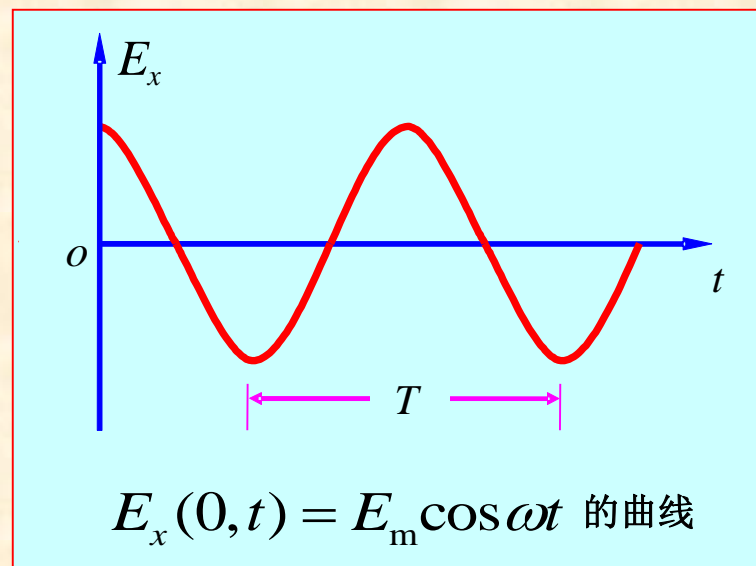
#### (1) 角频率、频率和周期

**角频率  $\omega$** ：表示单位时间内的相位变化，单位为rad /s

**周期  $T$** ：时间相位变化  $2\pi$  的时间间隔，即

$$\omega T = 2\pi \Rightarrow T = \frac{2\pi}{\omega} \text{ (s)}$$

**频率  $f$** ：  $f = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi} \text{ (Hz)}$





## (2) 波长和波数

波长 $\lambda$ ：空间相位差为 $2\pi$ 的两个波阵面的间距，

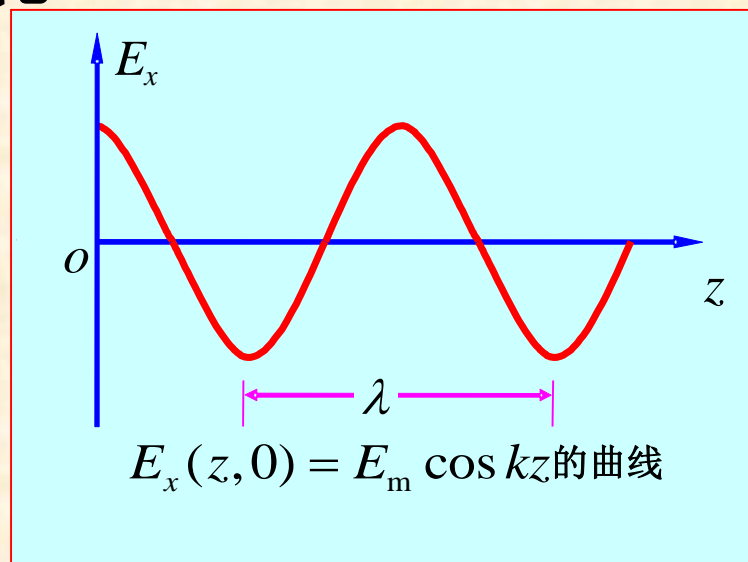
即波在一个周期中传播的距离，用 $\lambda$ 表示：

$$k\lambda = 2\pi \quad \Rightarrow \quad \lambda = \frac{2\pi}{k} = \frac{1}{f\sqrt{\mu\varepsilon}} \quad (\text{m})$$

波数 $k$ ：表示波传播单位距离的相位变化

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (\text{rad/m})$$

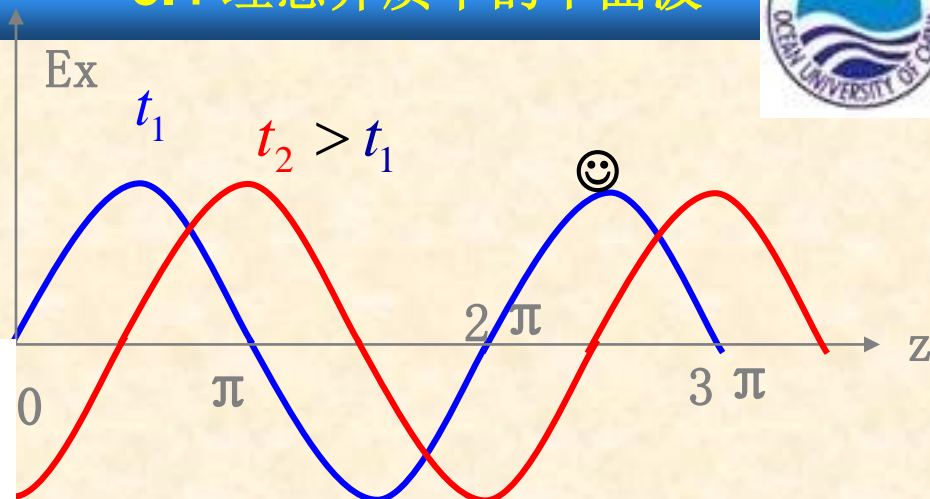
$k$  的大小等于空间距离 $2\pi$ 内所包含的波长数目，因此称为波数。



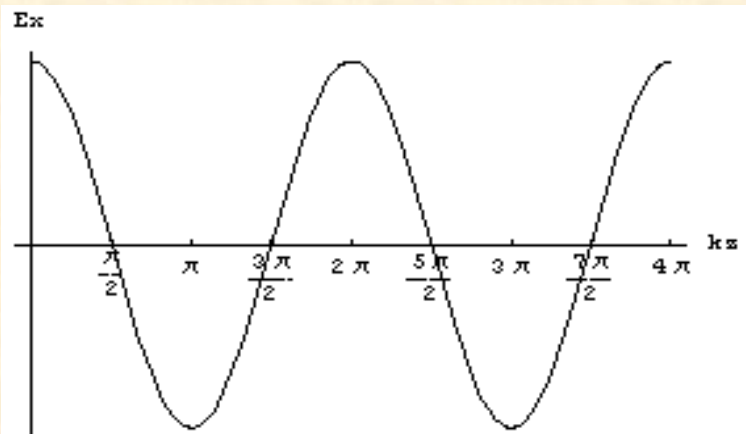


### (3) 相速 (波速)

**相速 $v$** : 电磁波的等相位面在空间中的移动速度;



从波形上可以认为是整个波形随着时间变化向 $+z$ 方向平移





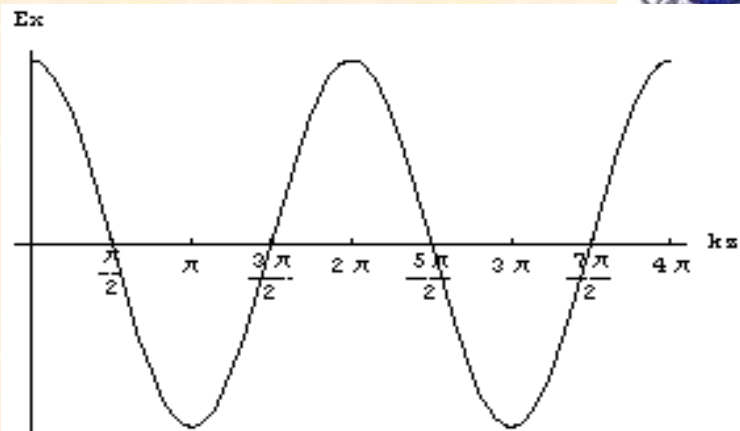


均匀平面波的相速:

$$\text{令 } \phi = \omega t - kz + \varphi_0 = \text{const}$$

两边对时间 $t$ 去导数, 得:

$$\omega - k \frac{dz}{dt} = 0 \Rightarrow v_p = \frac{dz}{dt} = \frac{\omega}{k} = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}}$$





相速:

$$v_p = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}}$$

讨论: 1、电磁波传播的相位速度仅与媒质特性相关。

2、真空中电磁波的相位速度:

$$v = c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0\epsilon_0}} = \frac{1}{\sqrt{4\pi \times 10^{-7} \times \frac{1}{36\pi} \times 10^{-9}}} = 3 \times 10^8 \text{ (m/s)}$$

真空中电磁波相位速度为光速。

※ 在其它介质中  $\epsilon > \epsilon_0$ ,  $\mu \approx \mu_0$ , 因此  $v_p < c$ , 称为慢波。

$$\text{介质中的波长 } \lambda = \frac{2\pi}{k} = \frac{2\pi v_p}{\omega} = \frac{v_p}{f} < \frac{c}{f} = \lambda_0$$



波长与频率、相速的关系：

$$\lambda = v_p T = \frac{1}{f \sqrt{\mu \epsilon}} = \frac{2\pi}{\omega \sqrt{\mu \epsilon}} = \frac{2\pi}{k}$$

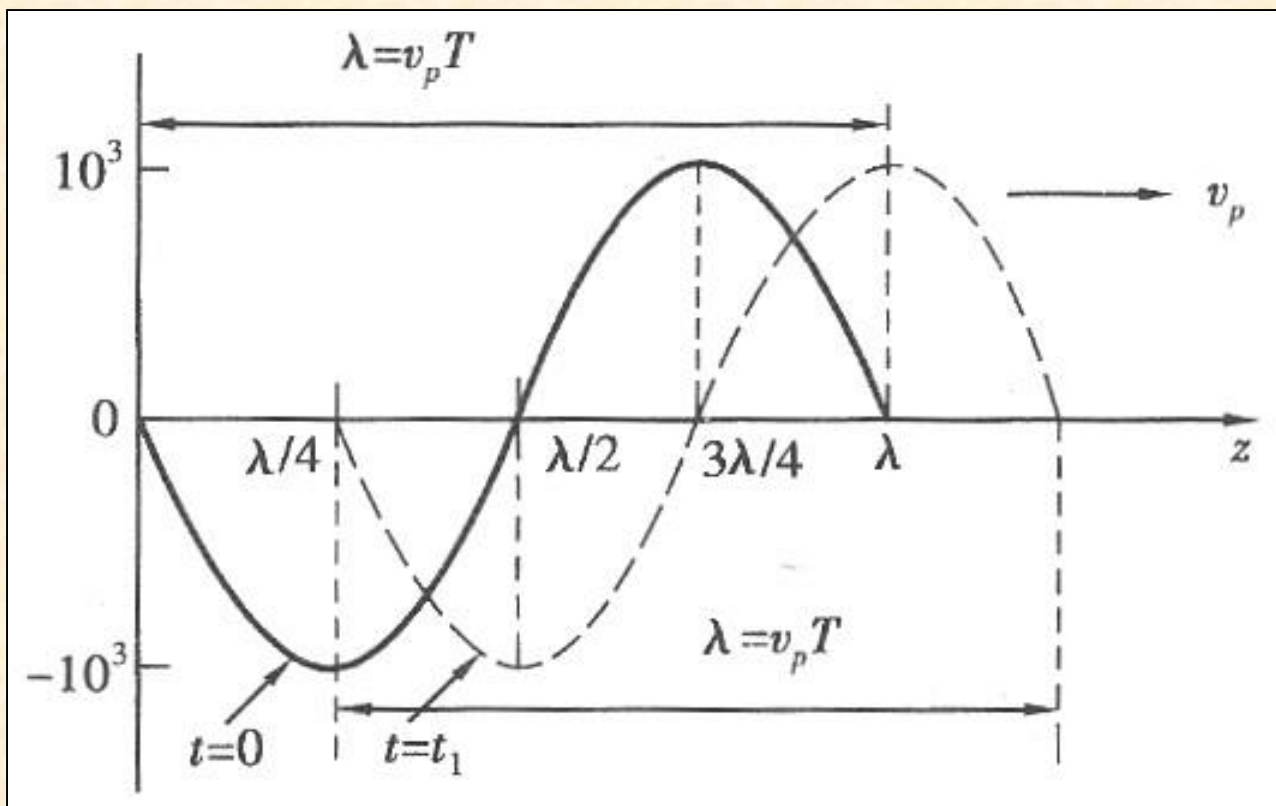


图0.2.2 正弦平面波的相速、波长的关系



## 2、能量密度与能流密度

由于  $\vec{H} = \frac{1}{\eta} \vec{e}_z \times \vec{E}$ , 于是有

$$w_e = \frac{1}{2} \varepsilon |\vec{E}|^2 = \frac{1}{2} \mu |\vec{H}|^2 = w_m$$

电场能量与磁场能量相同

故  $w = w_e + w_m = \varepsilon |\vec{E}|^2 = \mu |\vec{H}|^2$

$$\vec{S} = \vec{E}(z, t) \times \vec{H}(z, t) = \vec{e}_z \frac{1}{2\eta} E_m^2 \cos^2(\omega t - kz + \phi_x)$$

$$w_{av} = \frac{1}{2} \varepsilon E_m^2 = \frac{1}{2} \mu H_m^2$$

$$\vec{S}_{av} = \frac{1}{2} \text{Re}[\vec{E}(z) \times \vec{H}^*(z)] = \vec{e}_z \frac{1}{2\eta} E_m^2$$

$$= \vec{e}_z \frac{1}{2} \varepsilon E_m^2 \frac{1}{\sqrt{\mu \varepsilon}} = w_{av} \vec{v}$$

能量的传输速度等于相速



### 3、理想介质中的均匀平面波的传播特性

均匀平面波的电场和磁场复矢量:

$$\begin{cases} \bar{\mathbf{E}} = \hat{\mathbf{x}}E_0e^{-jkz} \\ \bar{\mathbf{H}} = \hat{\mathbf{y}}H_0e^{-jkz} \end{cases}$$

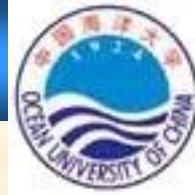
对此特定的场有  $\nabla = \hat{\mathbf{x}}\frac{\partial}{\partial x} + \hat{\mathbf{y}}\frac{\partial}{\partial y} + \hat{\mathbf{z}}\frac{\partial}{\partial z} = -jk\hat{\mathbf{z}}$

因此，无源区Maxwell方程组化为:

$$\begin{cases} \nabla \times \bar{\mathbf{E}} = -jk\hat{\mathbf{z}} \times \bar{\mathbf{E}} = -j\omega\mu\bar{\mathbf{H}} \\ \nabla \times \bar{\mathbf{H}} = -jk\hat{\mathbf{z}} \times \bar{\mathbf{H}} = j\omega\varepsilon\bar{\mathbf{E}} \\ \nabla \cdot \bar{\mathbf{E}} = -jk\hat{\mathbf{z}} \cdot \bar{\mathbf{E}} = 0 \\ \nabla \cdot \bar{\mathbf{H}} = -jk\hat{\mathbf{z}} \cdot \bar{\mathbf{H}} = 0 \end{cases}$$

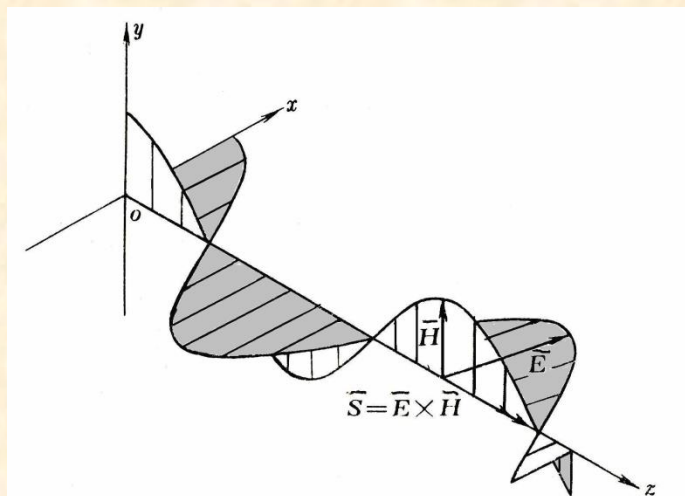
→

$$\begin{cases} \bar{\mathbf{H}} = \frac{1}{\eta} \hat{\mathbf{z}} \times \bar{\mathbf{E}} & \left( \frac{\omega\mu}{k} = \frac{\omega\mu}{\omega\sqrt{\mu\varepsilon}} = \eta \right) & (a) \\ \bar{\mathbf{E}} = -\eta \hat{\mathbf{z}} \times \bar{\mathbf{H}} & & (b) \\ \hat{\mathbf{z}} \cdot \bar{\mathbf{E}} = 0 & & (c) \\ \hat{\mathbf{z}} \cdot \bar{\mathbf{H}} = 0 & & (d) \end{cases}$$



## 结论:

- 1) **方向:** 电场  $\vec{E}$  和磁场  $\vec{H}$  相互垂直, 且  $\vec{E}$  和  $\vec{H}$  均与传播方向相互垂直, 都无纵向分量, 是横波, 称为**横电磁波(TEM波)**。



- 2) **相位:** 电场 和磁场 处处同相, 二者振幅之比是媒质的波阻抗  $\eta$  (实数)。

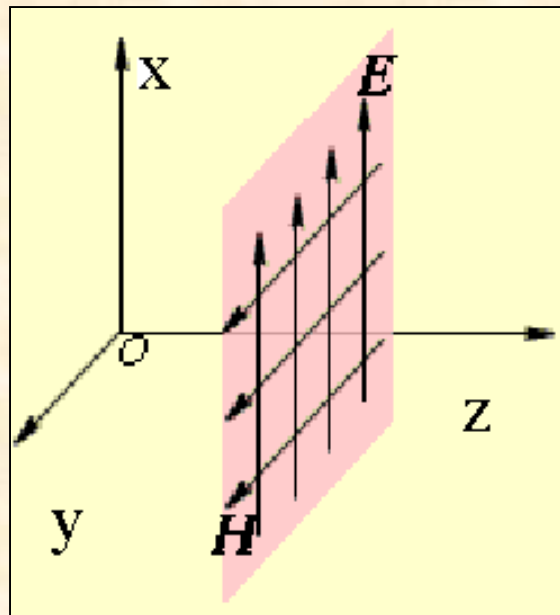


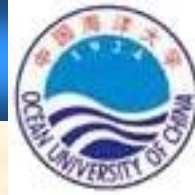


### 3) 复坡印廷矢量:

$$\bar{\mathbf{S}} = \frac{1}{2} \bar{\mathbf{E}} \times \bar{\mathbf{H}}^* = \frac{1}{2} \hat{\mathbf{x}} E_0 e^{-jkz} \times \hat{\mathbf{y}} \frac{E_0}{\eta} e^{jkz} = \hat{\mathbf{z}} \frac{1}{2} \frac{E_0^2}{\eta} = \bar{\mathbf{S}}_{\text{av}}$$

没有虚部, 说明**均匀平面波沿传播方向传输实功率, 且沿途无衰减 (无损耗)**。





**4) 瞬时电能密度:**

$$w_e(t) = \frac{1}{2} \varepsilon E^2(t) = \frac{1}{2} \varepsilon E_0^2 \cos^2(\omega t - kz)$$

**瞬时磁能密度:**

$$w_m(t) = \frac{1}{2} \mu H^2(t) = \frac{1}{2} \mu H_0^2 \cos^2(\omega t - kz)$$

$$\because H_0 = E_0 / \sqrt{\mu / \varepsilon}, \quad \frac{1}{2} \mu H_0^2 = \frac{1}{2} \varepsilon E_0^2$$

$$\therefore w_m(t) = w_e(t)$$

**任意时刻瞬时电能密度与瞬时磁能密度相等，各为总电磁能密度的一半**



### 5) 均匀平面波的能量传播速度 $v_e$

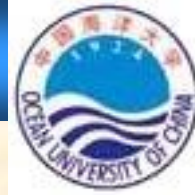
总电磁能密度的平均值:  $w^{av} = \frac{1}{T} \int_0^T W(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T \epsilon E_0^2 \cos^2(\omega t - kz) dt$

$$= \frac{1}{2} \epsilon E_0^2 = \frac{1}{2} \mu H_0^2$$

因此:  $v_e = \frac{S^{av}}{w^{av}} = \frac{\frac{1}{2} \frac{E_0^2}{\eta}}{\frac{1}{2} \epsilon E_0^2} = \frac{1}{\epsilon \eta} = \frac{1}{\sqrt{\mu \epsilon}} = v_p$

**结论:** 均匀平面波的能量传播速度等于相速;

电磁波是电磁能量的携带者;



## 总结——理想介质中的均匀平面波的传播特性

均匀平面波的电场和磁场复矢量:

$$\begin{cases} \bar{\mathbf{E}} = \hat{\mathbf{x}}E_0e^{-jkz} \\ \bar{\mathbf{H}} = \hat{\mathbf{y}}H_0e^{-jkz} \end{cases}$$

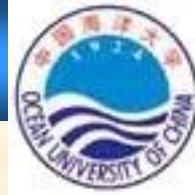
因此, 无源区Maxwell方程组化为:

$$\begin{cases} \bar{\mathbf{H}} = \frac{1}{\eta} \hat{\mathbf{z}} \times \bar{\mathbf{E}} & (a) \\ \bar{\mathbf{E}} = -\eta \hat{\mathbf{z}} \times \bar{\mathbf{H}} & (b) \\ \hat{\mathbf{z}} \cdot \bar{\mathbf{E}} = 0 & (c) \\ \hat{\mathbf{z}} \cdot \bar{\mathbf{H}} = 0 & (d) \end{cases} \quad \left( \frac{\omega\mu}{k} = \frac{\omega\mu}{\omega\sqrt{\mu\epsilon}} = \eta \right)$$



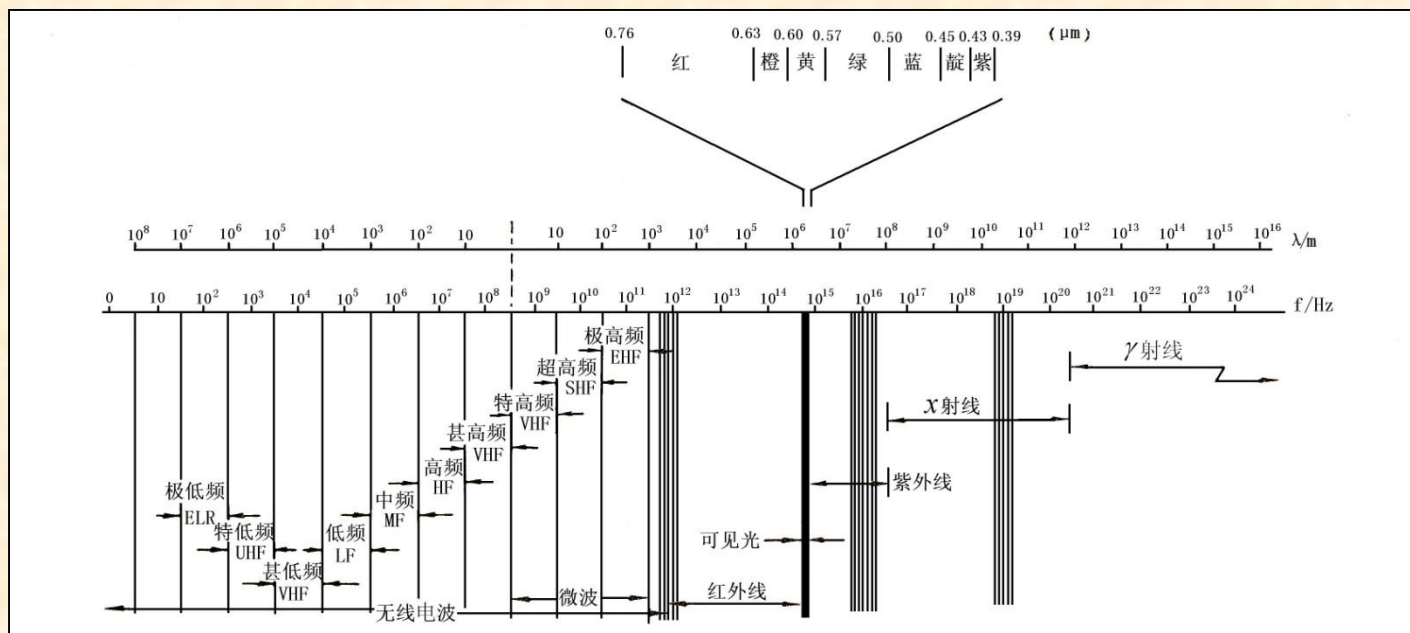
## 总结----理想介质中的均匀平面波的传播特性

- 电场、磁场与传播方向之间相互垂直，是横电磁波（TEM波）。
- 无衰减，电场与磁场的振幅不变。
- 波阻抗为实数，电场与磁场同相位。
- 电磁波的相速与频率无关，无色散。
- 电场能量密度等于磁场能量密度，能量的传输速度等于相速。



### 三、平面波电磁波谱

- Maxwell方程对电磁波的频率没有限制;
- 电磁波谱分为无线电波、红外线、可见光、紫外线、x射线,  $\gamma$ 射线;
- 这些波都是横波, 在自由空间都以光速传播。
- 但是无线电波呈现明显的波动性, 而光波和更短波长的电磁波则呈现粒子性。
- 电磁波谱是有限的资源。

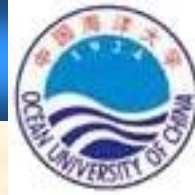






## 电磁波的波段划分及其应用

名 称	频率范围	波长范围	典型业务
甚低频VLF[超长波]	3~30KHz	100~10km	导航, 声纳
低频LF[长波, LW]	30~300KHz	10~1km	导航, 频标
中频MF[中波, MW]	300~3000KHz	1km~100m	AM, 海上通信
高频HF[短波, SW]	3~30MHz	100m~10m	AM, 通信
甚高频VHF[超短波]	30~300MHz	10~1m	TV, FM, MC
特高频UHF[微波]	300~3000MHz	100~10cm	TV, MC, GPS
超高频SHF[微波]	3~30GHz	10~1cm	SDTV, 通信, 雷达
极高频EHF[微波]	30~300GHz	10~1mm	通信, 雷达
光频 [光波]	1~50THz	300~0.006 $\mu$ m	光纤通信



中波调幅广播 (AM) : 550KHz~1650KHz

短波调幅广播 (AM) : 2MHz~30MHz

调频广播 (FM) : 88MHz~108MHz

电视频道 (TV) : 50MHz~100MHz ; 170MHz~220MHz  
470MHz~870MHz

无绳电话 (Cordless Phone) : 50MHz; 900MHz; 2.4GHz

蜂窝电话 (Cellular Phone) : 900MHz; 1.8GHz; 1.9GHz

卫星TV直播 (SDTV) : 4GHz~6GHz; 12GHz~14GHz

全球卫星定位系统 (GPS) :  $L_1 = 1575.42\text{MHz}$   
 $L_2 = 1227.60\text{MHz}$ ,  $L_3 = 1176.45\text{MHz}$

光纤通信:  $1.55\mu\text{m}$  ,  $1.33\mu\text{m}$  ,  $0.85\mu\text{m}$

ISM波段: 902~928MHz, 2.4~2.4835GHz, 5.725~5.850GHz



**例1** 频率为9.4GHz的均匀平面波在聚乙烯中传播，设其为无耗材料，相对介电常数为 $\epsilon_r = 2.26$ 。若磁场的振幅为7mA/m，求相速、波长、波阻抗和电场强度的幅值。

解：由题意  $\epsilon_r = 2.26, f = 9.4 \times 10^9 \text{ Hz}$

$$\text{因此 } v = \frac{v_0}{\sqrt{\epsilon_r}} = \frac{v_0}{\sqrt{2.26}} = 1.996 \times 10^8 \text{ m/s}$$

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{1.996 \times 10^8}{9.4 \times 10^9} = 2.12 \text{ m}$$

$$\eta = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} = \frac{\eta_0}{\sqrt{\epsilon_r}} = \frac{377}{\sqrt{2.26}} = 251 \text{ } \Omega$$

$$E_m = H_m \eta = 7 \times 10^{-3} \times 251 = 1.757 \text{ V/m}$$



**例2** 已知均匀平面波在真空中向正  $z$  方向传播，其电场强度的瞬时值为

$$\mathbf{E}(z, t) = \hat{x}20 \cos(6\pi \times 10^8 t - 2\pi z) \quad (\text{V/m})$$

试求：① 频率及波长； ② 电场强度及磁场强度的复矢量表示式；

③ 复能流密度矢量； ④ 相速及能速。

解： ① 频率

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{6\pi \times 10^8}{2\pi} = 3 \times 10^8 \text{ (Hz)}$$

波长

$$\lambda = \frac{2\pi}{k} = \frac{2\pi}{2\pi} = 1 \text{ (m)}$$

② 电场强度

$$\dot{\vec{E}}(z) = \hat{x}20e^{-j2\pi z} \text{ (V/m)}$$

磁场强度

$$\dot{\vec{H}}(z) = \frac{1}{\eta_0} \hat{z} \times \dot{\vec{E}} = \hat{y} \frac{1}{6\pi} e^{-j2\pi z} \text{ (A/m)}$$

③ 复能流密度

$$\dot{\vec{S}} = \dot{\vec{E}} \times \dot{\vec{H}}^* = \hat{z} \frac{10}{3\pi} \text{ (W/m}^2\text{)}$$

④ 相速及能速

$$v_p = v_e = \frac{\omega}{k} = 3 \times 10^8 \text{ (m/s)}$$