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

- 波在**理想介质**中传播的最大特点是**没有损耗**；

  因为理想介质是一种**无耗**媒质；

- **实际的媒质都是有耗媒质；**

§ 5.5 导电媒质中的平面波

Plane Waves in Conducting Media

- 导电媒质的典型特征是电导率$\sigma \neq 0$。
- 电磁波在导电媒质中传播时，有传导电流 $\boldsymbol{J}=\sigma \boldsymbol{E}$ 存在，同时伴随着电磁能量的损耗。
- 电磁波的传播特性与非导电媒质中的传播特性有所不同。

讨论内容

一. 导电媒质的分类

二. 导电媒质中的均匀平面波

三. 弱导电媒质中的均匀平面波

四. 良导体中的均匀平面波

一、导电媒质的分类

➢等效复介电常数

在无源区

在理想介质中：$\sigma = 0$ $\qquad \nabla\times\vec{H} = \mathrm{j}\omega\varepsilon\vec{E}$

在有耗媒质中：$\sigma \neq 0$ $\qquad \nabla\times\vec{H} = \vec{J}_{\mathrm{c}} + \mathrm{j}\omega\varepsilon\vec{E} \quad = \sigma\vec{E} + \mathrm{j}\omega\varepsilon\vec{E}$

$$\nabla\times\overline{H} = \sigma\overline{E} + j\omega\overline{E} = j\omega\left(1\text{-}j\frac{\sigma}{\omega}\right)\overline{E} = j\omega\varepsilon_x\overline{E}$$

引入等效复介电常数 $\boxed{\varepsilon_x = \varepsilon - j\dfrac{\sigma}{\omega} = \varepsilon\left(1 - j\dfrac{\sigma}{\omega\varepsilon}\right)}$

引入等效复介电常数后，导电媒质可以看作等效的介质，只是 $\boxed{\varepsilon \rightarrow \varepsilon_x}$

➢电介质的损耗角正切

对于介质的损耗，工程上经常用电介质的损耗角正切 来描述；

损耗正切：复介电常数虚部和实部的比，即

损耗角

$$\tan\delta_c = \frac{\sigma}{\omega\varepsilon}$$

损耗正切代表传导电流密度和位移电流密度的大小之比。

$$\frac{|\mathbf{J}_c|}{|\mathbf{J}_d|} = \frac{|\sigma E|}{|j\omega\varepsilon E|} = \frac{\sigma}{\omega\varepsilon}$$

ε_x **的虚部取决于导电媒质中传导电流密度振幅与位移电流密度振幅的比值；**

➢媒质的分类

1、当 $\dfrac{\sigma}{\omega\varepsilon} \to \infty$ 时，媒质被称为**理想导体**。

实际中理想导体是不存在的，它只是一种理想模型。

导电媒质

2、当 $\dfrac{\sigma}{\omega\varepsilon} >> 1$ 例如 $\dfrac{\sigma}{\omega\varepsilon} >> 10^2$ 时，良导体

如铜、银、铝等金属导体，它们的电导率都在10^7以上。

3、当 $\dfrac{\sigma}{\omega\varepsilon} \approx 1$ 例如 $10^{-2} < \dfrac{\sigma}{\omega\varepsilon} < 10^2$ 时，不良导体

4、当 $\dfrac{\sigma}{\omega\varepsilon} << 1$ 例如 $\dfrac{\sigma}{\omega\varepsilon} << 10^{-2}$ 时，电介质或低损耗介质

如工作在高频和微波频段内有机玻璃、聚乙烯

3、当 $\dfrac{\sigma}{\omega\varepsilon} = 0$ 时，媒质被称为**理想介质**。

实际中理想介质也是不存在的，它只是一种理想模型。

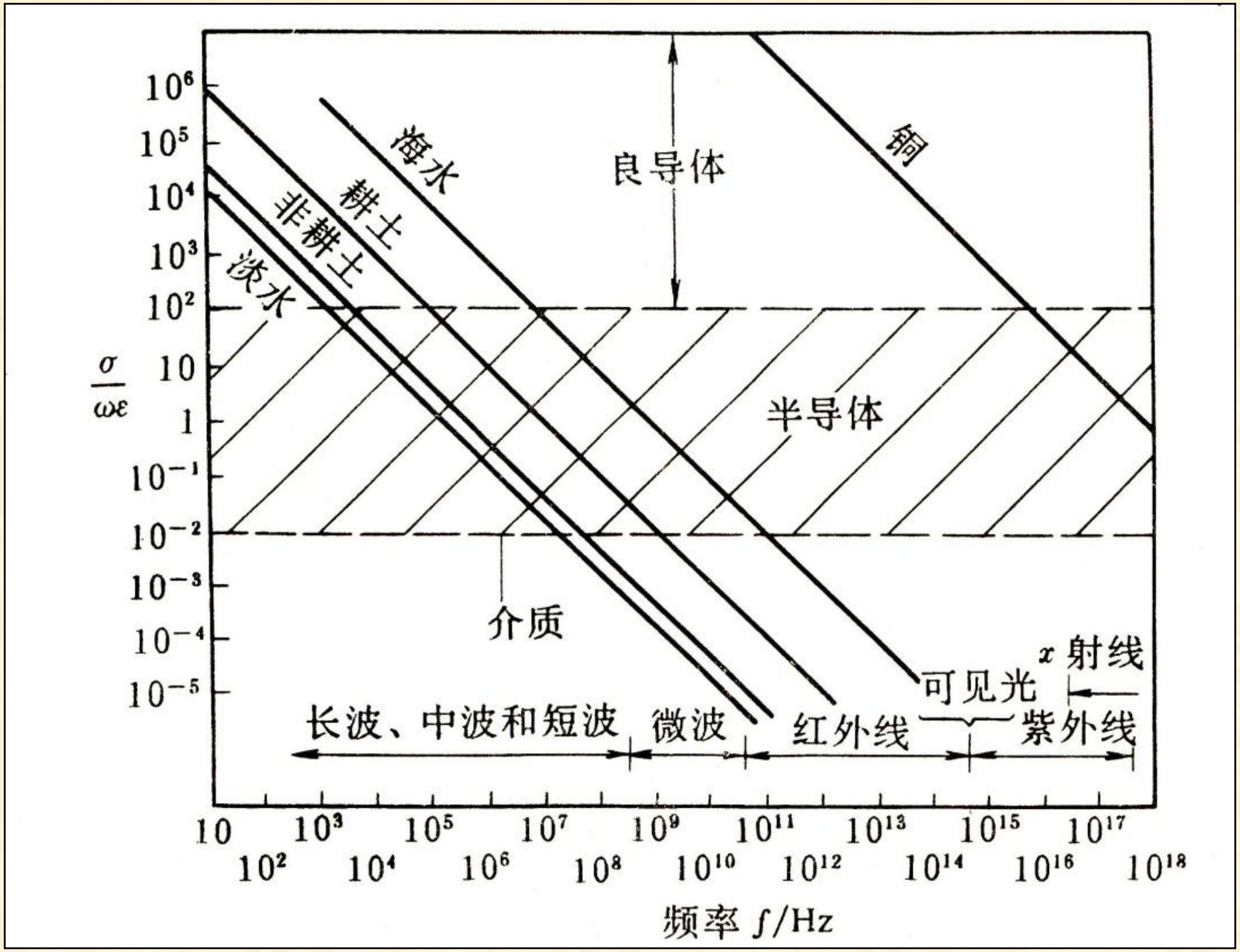


图5.5-1　几种媒质的 $\frac{\sigma}{\omega\varepsilon}$ 与频率的关系

二、平面波在导电媒质中的传播特性

1.导电媒质中波动方程的解

在无源区,设时谐电场复矢量为 $\overline{\mathbf{E}} = \hat{\mathbf{x}} E_x$

$$\nabla^2 E_x + k_x^2 E_x = 0 \quad k_x = \omega\sqrt{\mu\varepsilon_x} = \omega\sqrt{\mu(\varepsilon - j\frac{\sigma}{\omega})}$$

对+z方向传播的波，其解为 $\overline{E} = \hat{x} E_0 e^{-jk_x z}$

从麦氏方程得到磁场复矢量为 $\overline{H} = \frac{1}{\eta_x}\hat{z}\times\overline{E} = \hat{y}\frac{E_0}{\eta_x}e^{-jk_x z}$ $\quad \eta_x = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon_x}} = \sqrt{\frac{\mu}{1 - j\frac{\sigma}{\omega}}}$

k_x是复传播常数，它可以写成实部和虚部之和：$k_x = \beta - j\alpha$ β 称为相位常数，α称为衰减常数。

$$\alpha = \omega\sqrt{\frac{\mu\varepsilon}{2}}\left[\sqrt{1 + (\frac{\sigma}{\omega\varepsilon})^2} - 1\right]^{1/2} \qquad \beta = \omega\sqrt{\frac{\mu\varepsilon}{2}}\left[\sqrt{1 + (\frac{\sigma}{\omega\varepsilon})^2} + 1\right]^{1/2}$$

故电场复矢量：$\overline{\mathbf{E}} = \hat{\mathbf{x}} E_0 e^{-\alpha z} e^{-j\beta z}$ 其瞬时值为 $\overline{E}(t) = \hat{\mathbf{x}} E_0 e^{-\alpha z}\cos(\omega t - \beta z)$

2.传播参数

1) 衰减量

场强振幅随z的增加按指数不断衰减（电磁能量变为热能损耗），

衰减量可用场量衰减值的自然对数来计量，记为奈比(Np)。

$$E_1 = E_o e^{-al} \qquad al = \ln\frac{E_0}{E_1} \quad (Np)$$

在工程上常用分贝dB来计算衰减量，其定义为：

$$A_{dB} = 10\lg\frac{P_0}{P_1} = 20\lg\frac{E_0}{E_1} \quad (dB)$$

衰减系数α 的单位Np/m，或者dB/m

2) 相速

场的相位随z的增加按 βz 滞后，即波向+z方向传播。波的相速为：

$$v_p=\frac{\omega}{\beta}=\frac{1}{\sqrt{\mu\varepsilon}}\left[\frac{2}{\sqrt{1+(\frac{\sigma}{\omega\varepsilon})^2}+1}\right]^{1/2}<\frac{1}{\sqrt{\mu\varepsilon}}$$

※导电媒质中波的相速比μ、ε相同的理想介质中的慢，且σ越大，相速越慢。

※相速还与频率有关，携带信号的电磁波，其不同的频率分量将以不同的相速传播，经过一段距离后，信号的相位将发生变化，从而导致信号失真。

这种波的相速随频率而变的现象称为**色散**。

※因此**导电媒质是色散媒质**。

导电媒质中平面波的波长为

$$\lambda' = \frac{2\pi}{k'} = \frac{2\pi}{\omega\sqrt{\dfrac{\mu\varepsilon}{2}\left[\sqrt{1+\left(\dfrac{\sigma}{\omega\varepsilon}\right)^2}+1\right]}}$$

可见，此时波长不仅与媒质特性有关，而且与频率的关系是非线性的。

3) 波阻抗

导电媒质的波阻抗: $\eta_x = \sqrt{\dfrac{\mu}{\varepsilon - j\dfrac{\sigma}{\omega}}} = \sqrt{\dfrac{\mu}{\varepsilon}}\left[1 - j\dfrac{\sigma}{\omega\varepsilon}\right]^{-1/2} = |\eta_x| e^{j\zeta}$

两边同时平方: $|\eta_x|^2 e^{j2\xi} = \dfrac{\mu}{\varepsilon}\dfrac{1 + j\dfrac{\sigma}{\omega\varepsilon}}{1 + (\dfrac{\sigma}{\omega\varepsilon})^2}$

得 $|\eta_x| = \sqrt{\dfrac{\mu}{\varepsilon}}\left[1 + (\dfrac{\sigma}{\omega\varepsilon})^2\right]^{-1/4} < \sqrt{\dfrac{\mu}{\varepsilon}}$ $\quad \zeta = \dfrac{1}{2}\mathrm{arctg}(\dfrac{\sigma}{\omega\varepsilon}) = 0 \sim \pi/4$

波阻抗具有感性相角。电场相位比磁场相位引前，二者不再同相。

4)磁场强度矢量

$$\overline{H}=\hat{y}\frac{E_0}{\eta_x}e^{-jk_c z}=\hat{y}\frac{E_0}{|\eta_x|}e^{-\alpha z}e^{-j\beta \mathbf{z}}e^{-j\zeta}$$

$$\overline{\mathbf{H}}(t)=\hat{y}\frac{E_0}{|\eta_x|}e^{-\alpha z}\cos(\omega \mathbf{t}-\beta z-\zeta)$$

- 磁场强度的相位比电场强度的相位滞后 ζ, σ 越大，滞后越多
- 磁场强度的振幅随z的增加，按指数衰减 $\frac{E_0}{|\eta_x|}e^{-\alpha z}$
- 电场强度和磁场强度相互垂直，都分别垂直于传播方向
- 导电媒质中的电磁波也是横电磁波

导电媒质中平面电磁波瞬时图

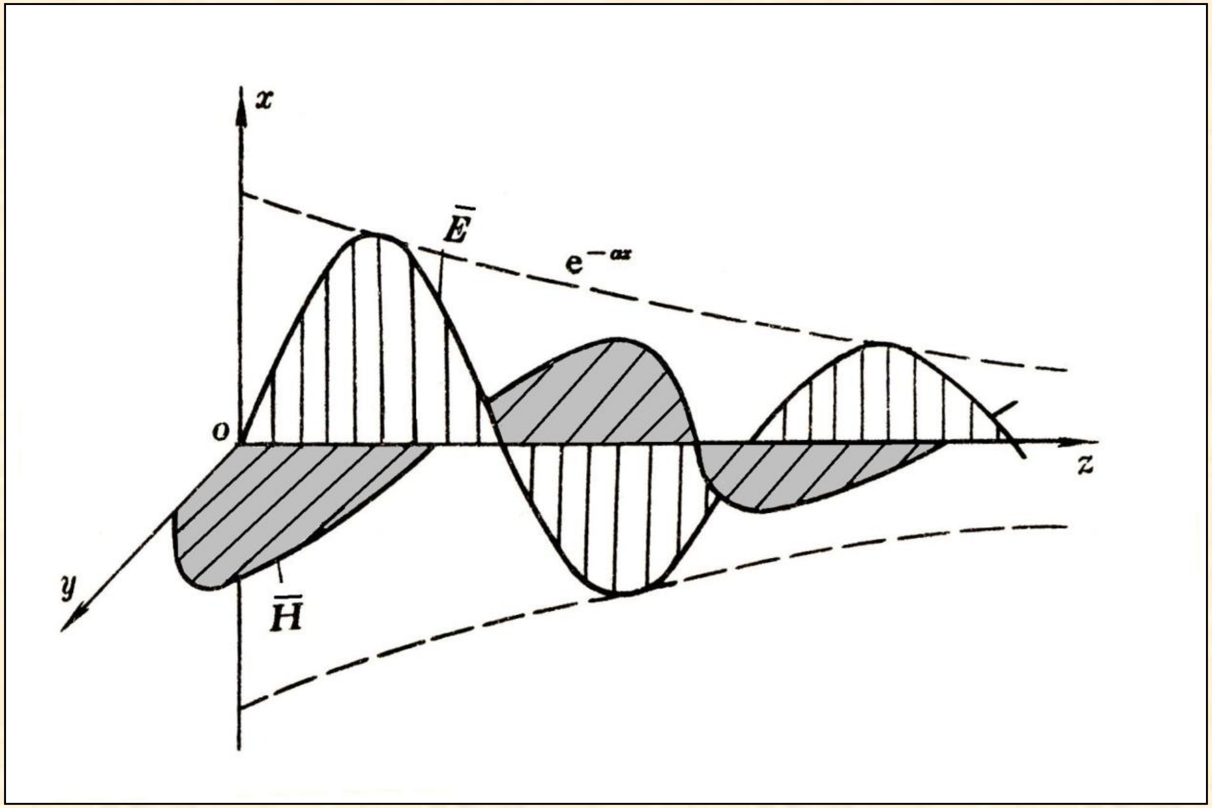


图5.5 - 2 导电媒质中平面电磁波瞬时图形

5)功率流密度

复坡印廷矢量：

$$\overline{\mathbf{S}} = \frac{1}{2}\overline{\mathbf{E}} \times \overline{\mathbf{H}}^{*}$$

$$= \hat{\mathbf{x}}E_0 e^{-\alpha z} e^{-j\beta z} \times \hat{\mathbf{y}}\frac{E_0}{|\eta_c|} e^{-\alpha z} e^{j\beta z} e^{j\zeta}$$

$$= \hat{z}\frac{1}{2}\frac{E_0^2}{|\eta_x|} e^{-2\alpha z} e^{j\zeta}$$

平均功率流密度：

$$\boxed{\overline{S^{av}} = \mathrm{Re}(\overline{S}) = \hat{z}\frac{1}{2}\frac{E_0^2}{|\eta_x|} e^{-2\alpha z}\cos\zeta}$$

瞬时坡印廷矢量：

$$\overline{\mathbf{S}}(t) = \overline{\mathbf{E}}(t) \times \overline{\mathbf{H}}(t)$$

$$= \hat{\mathbf{z}}\frac{1}{2}\frac{E_0^2}{|\eta_x|} e^{-2\alpha z}[\cos\zeta + \cos(2\omega t - 2\beta z - \zeta)]$$

$$\cos\zeta = \cos[\frac{1}{2}\mathrm{arctg}(\frac{\sigma}{\omega\varepsilon})] = \frac{1}{\sqrt{2}}\left[1 + \frac{1}{\sqrt{1 + (\frac{\sigma}{\omega\varepsilon})^2}}\right]^{1/2}$$

6）电磁能

电磁场储能在一周内的平均值：

电能平均值：
$$w_e^{av}=\frac{1}{T}\int_0^T w_e\mathrm{d}t=\frac{1}{4}\varepsilon|E|^2=\frac{1}{4}\varepsilon E_0^2e^{-2az}$$

磁能平均值：
$$w_m^{av}=\frac{1}{4}\mu|H|^2=\frac{1}{4}\mu\frac{E_0^2}{|\eta_x|^2}e^{-2az}$$

$$\because\qquad |\eta_x|=\sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}}\left[1+(\frac{\sigma}{\omega\varepsilon})^2\right]^{-1/4}$$

$$\therefore\qquad w_m^{av}=\frac{1}{4}\varepsilon E_0^2\sqrt{1+(\frac{\sigma}{\omega\varepsilon})^2}e^{-2az}$$

所以，**导电媒质中平均磁能密度比平均电能密度大。**

这是由于传导电流激发了附加磁场。

总平均储能密度：

$$w^{av}=w_e^{av}+w_m^{av}=\frac{1}{4}\varepsilon E_0^2\left(1+\sqrt{1+\left(\frac{\sigma}{\omega\varepsilon}\right)^2}\right)e^{-2az}$$

电磁能传播速度

$$v_e=\frac{S^{av}}{W^{av}}=\frac{\frac{1}{2}\cos\xi/|\eta|}{\frac{1}{2}\varepsilon\left[1+\sqrt{1+\left(\frac{\sigma}{\omega\varepsilon}\right)^2}\right]}=\frac{1}{\sqrt{\mu\varepsilon}}\left[\frac{2}{1+\sqrt{1+\left(\frac{\sigma}{\omega\varepsilon}\right)^2}}\right]^{\frac{1}{2}}=v_p$$

导电媒质中均匀平面波的能量传播速度等于相速。

小结---导电媒质中的均匀平面波

$$\varepsilon \to \varepsilon_x = \varepsilon\left(1 - j\frac{\sigma}{\omega\varepsilon}\right) \qquad k \to k_x = \beta - j\alpha \qquad \eta \to \eta_x = |\eta_x| e^{j\xi}$$

$$\bar{E} = \bar{E}_0 e^{-jk_x z} = \hat{x} E_0 e^{-\alpha z} e^{-j\beta z}$$

$$\bar{H} = \frac{1}{\eta_x}\hat{z}\times\bar{E} = \bar{H}_0 e^{-jk_x z} = \hat{y}\frac{E_0}{|\eta_x|} e^{-\alpha z} e^{-j\beta z} e^{-j\xi}$$

$$\bar{S} = \frac{1}{2}\bar{E}\times\bar{H}^* = \hat{z}\frac{E_0^2}{2|\eta_x|} e^{-2\alpha z} e^{-j\zeta}$$

■ **沿 z 轴传播的均匀平面波电场：**

振幅有衰减

电场复矢量：
$$\overline{E} = \hat{x}E_0 e^{-jk_x z} = \hat{x}\boxed{E_0 e^{-\alpha z}}e^{-j\beta z}$$

瞬时值：
$$\overline{E}(t) = \hat{\mathbf{x}}E_0 e^{-\alpha z}\cos(\omega t - \beta z)$$

相伴的磁场

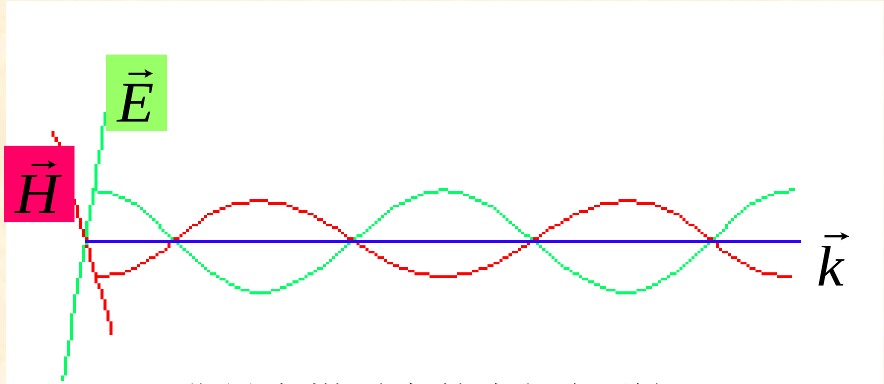
$$\overline{H}=\hat{y}\frac{E_0}{\eta_x}e^{-jk_xz}=\hat{y}\frac{E_0}{|\eta_x|}e^{-\alpha z}e^{-j\beta z}e^{-j\zeta}$$

$$\overline{H}(t)=\hat{y}\frac{E_0}{|\eta_x|}e^{-\alpha z}\cos(\omega t-\beta z-\zeta)$$

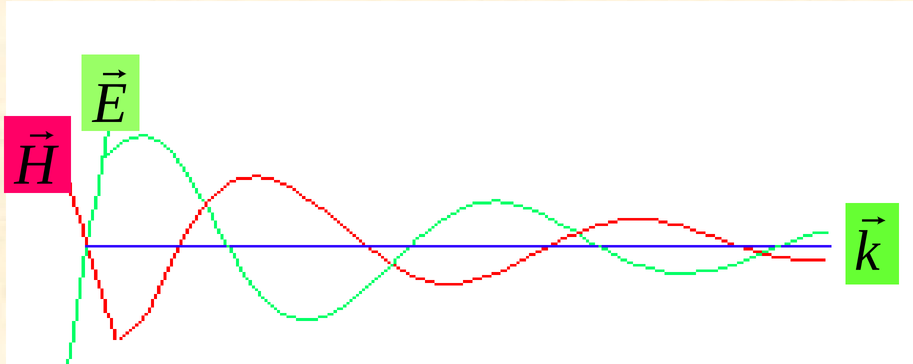
本征波阻抗 $\eta_x=\sqrt{\dfrac{\mu}{\varepsilon_x}}=\boxed{|\eta_x|e^{j\zeta}}$

本征阻抗为复数

磁场滞后于电场



非导电媒质中的电场与磁场



导电媒质中的电场与磁场

传播参数

k_x：复传播常数　　$k_x = \omega\sqrt{\mu\varepsilon_x} = \beta - j\alpha$

β：相位常数

$$\alpha = \omega\sqrt{\frac{\mu\varepsilon}{2}}\left[\sqrt{1+\left(\frac{\sigma}{\omega\varepsilon}\right)^2} - 1\right]^{1/2}$$

α：衰减常数

$$\beta = \omega\sqrt{\frac{\mu\varepsilon}{2}}\left[\sqrt{1+\left(\frac{\sigma}{\omega\varepsilon}\right)^2} + 1\right]^{1/2}$$

相速：

$$v_p = \frac{\omega}{\beta} = \frac{1}{\sqrt{\mu\varepsilon}}\left[\frac{2}{\sqrt{1+\left(\frac{\sigma}{\omega\varepsilon}\right)^2} + 1}\right]^{1/2} < \frac{1}{\sqrt{\mu\varepsilon}}$$

相速不仅与媒质参数有关，而且与电磁波的频率有关

导电媒质中均匀平面波的传播特点：

- 电场强度 $\boldsymbol{E}$ 、磁场强度 $\boldsymbol{H}$ 与波的传播方向相互垂直，是横电磁波（TEM波）；
- 媒质的波阻抗为复数，电场与磁场不同相位，磁场滞后于电场；
- 在波的传播过程中，电场与磁场的振幅呈指数衰减；
- 波的传播速度（相速）不仅与媒质参数有关，而且与频率有关（有色散）。

- **表5.5-3**； 理想介质和导电媒质传播特性的比较（p.146）

两种特殊情况

一、若 $\sigma \ll \omega\varepsilon$ 　即 $\dfrac{\sigma}{\omega\varepsilon} \ll 1$

弱导电媒质------具有低电导率的介质属于这种情况;

（低损耗介质）

二、若 $\sigma \gg \omega\varepsilon$，即 $\dfrac{\sigma}{\omega\varepsilon} \gg 1$

良导体属于这种情况;

（高损耗媒质）

三、弱导电媒质（低损耗介质）中的均匀平面波

弱导电媒质： $\dfrac{\sigma}{\omega\varepsilon} << 1$

$$\boxed{(1-x)^{1/2} \approx 1-\frac{x}{2}}$$

$$k_x = \omega\sqrt{\mu\varepsilon}\left(1-j\frac{\sigma}{\omega\varepsilon}\right)^{1/2} \approx \omega\sqrt{\mu\varepsilon}\left(1-j\frac{\sigma}{2\omega\varepsilon}\right) \Rightarrow \begin{cases} \alpha \approx \dfrac{\sigma}{2}\sqrt{\dfrac{\mu}{\varepsilon}} \\ \beta \approx \omega\sqrt{\mu\varepsilon} \end{cases}$$

$$\eta_x = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon_x}} = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}}\left(1-j\frac{\sigma}{\omega\varepsilon}\right)^{-1/2} \approx \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}}\left(1+j\frac{\sigma}{2\omega\varepsilon}\right) \approx \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}}$$

$$\eta_x \approx \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}}$$

$$\boxed{(1-x)^{-1/2} \approx 1+\frac{x}{2}}$$

弱导电媒质中均匀平面波的特点

- 衰减小；
- 相位常数和理想介质中的相位常数大致相等；
- 电场和磁场之间存在较小的相位差。

可见：

平面波在低损耗介质中的传播特性，除了由微弱的损耗导致的衰减外，与理想介质中几乎相同。

例如，在聚本乙烯中10MHz的电磁波每公里只有0.5%的衰减，电场与磁场之间的相位差只有0.003^0。

例1 干燥土壤的$\varepsilon_r=4$, $\sigma=10^{-4}1/\Omega.m$，试计算频率分别为f=500kHz和f=100MHz的电磁波在其中传播时，场的振幅衰减到原来的10^6分之一的距离。当土壤是潮湿的, $\varepsilon_r=10$ $\sigma=10^{-2}1/\Omega.m$ 时，重复上述计算。

$$\alpha=\omega\sqrt{\frac{\mu\varepsilon}{2}}\left[\sqrt{1+(\frac{\sigma}{\omega\varepsilon})^2}-1\right]^{1/2}=2\pi f\frac{1}{\sqrt{2}\frac{1}{\sqrt{\mu_0\varepsilon_0}}}\left\{\varepsilon_r\left[\sqrt{1+(\frac{\sigma}{\omega\varepsilon})^2}-1\right]\right\}^{1/2}$$

解：干燥土壤：由上式可得f=500kHz时

$$\alpha_1=2\pi\times5\times10^5\times\frac{1}{3\sqrt{2}\times10^8}[(4^2+3.6^2)^{1/2}-4]^{1/2}$$
$$=\frac{\sqrt{2}\pi}{6}\times10^{-2}\times1.18=8.7\times10^{-3}\ [奈/米]$$

当电磁波振幅衰减到原来的10^6分之一时　$e^{-\alpha_1 l_1}=\frac{1}{10^6}$

$$l_1=\frac{1}{\alpha_1}\ln10^6=\frac{13.8}{8.7\times10^{-3}}=1.59\quad km$$

当f=100MHz时，考虑到 $\frac{\sigma}{\omega\varepsilon} \ll 1$，即

$$\sqrt{1+\left(\frac{\sigma}{\omega\varepsilon_0\varepsilon_r}\right)^2} \approx 1+\frac{1}{2}\left(\frac{\sigma}{\omega\varepsilon_0\varepsilon_r}\right)^2$$

则衰减常数可近似为

$$\alpha_2 = \frac{\sigma}{2}\sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0\varepsilon_r}} = \frac{60\pi\sigma}{\sqrt{\varepsilon_r}} = \frac{60\pi\times10^{-4}}{\sqrt{4}} = 9.43\times10^{-3} \text{ [奈/米]}$$

$$l_2 = \frac{1}{\alpha_2}\ln10^6 = \frac{13.8}{9.43\times10^{-3}} = 1.46 \quad km$$

干燥土壤：500KHz时，$\frac{\sigma}{\omega\varepsilon}$ =0.9

100MHz时，$\frac{\sigma}{\omega\varepsilon}$ =0.0045 均属于低损耗介质；

2、在潮湿的土壤中　$\varepsilon_r = 10, \sigma = 10^{-2} \quad 1/\Omega \cdot m$

当f=500kHz时

$$\alpha_1^{'} = \frac{\sqrt{2}\pi}{6} \times 10^{-2} \times 18.7 = 13.87 \times 10^{-2} \quad [奈/米]$$

$$l_1^{'} = \frac{1}{\alpha_1^{'}} \ln 10^6 = \frac{13.8}{13.8 \times 10^{-2}} = 100 \quad m$$

$$\frac{\sigma}{\omega\varepsilon} = 36良导体$$

当f=100MHz时

$$\alpha_2^{'} = 2\pi \times 10^8 \times \frac{1}{3\sqrt{2} \times 10^8}[(10^2 + 1.8^2)^{1/2} - 10]^{1/2}$$

$$= \frac{\sqrt{2}\pi}{3} \times 0.4 = 0.591 \quad [奈/米]$$

$$\frac{\sigma}{\omega\varepsilon} = 0.18不良导体$$

$$l_2^{'} = \frac{1}{\alpha_2^{'}} \ln 10^6 = \frac{13.8}{0.591} = 23.4 \quad m$$

四、良导体中的均匀平面波

良导体：$\dfrac{\sigma}{\omega\varepsilon} >> 1$

对于大多数金属，在无线电频段上 $\dfrac{\sigma}{\omega\varepsilon} > 10^2$ ，

即传导电流密度远大于位移电流密度；

金、银、铜、铁、铝等金属对于无线电波均是良导体。

■良导体中的参数

a) 传播常数

$$k_x = \omega\sqrt{\mu\varepsilon}\left(1 - j\frac{\sigma}{\omega\varepsilon}\right)^{1/2} \approx \omega\sqrt{\mu\varepsilon\left(-j\frac{\sigma}{\omega\varepsilon}\right)} = \sqrt{\omega\mu\sigma}e^{-j\frac{\pi}{4}} = (1-j)\sqrt{\frac{\omega\mu\sigma}{2}}$$

$$k_x \approx (1-j)\sqrt{\pi f\mu\sigma} = \beta - j\alpha$$

$$\alpha \approx \beta \approx \sqrt{\frac{\omega\mu\sigma}{2}} \approx \sqrt{\pi f\mu\sigma}$$

$$\propto \sqrt{f}$$

b) 相速： $v = \dfrac{\omega}{\beta} \approx \dfrac{\omega}{\sqrt{\pi f\mu\sigma}} = \sqrt{\dfrac{2\omega}{\mu\sigma}}$

波长： $\lambda = \dfrac{2\pi}{\beta} \approx \dfrac{2\pi}{\sqrt{\pi f\mu\sigma}} = 2\sqrt{\dfrac{\pi}{f\mu\sigma}}$

$$\propto 1/\sqrt{f}$$

c) 波阻抗

$$\eta_x = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon_x}} \approx \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon(-j\frac{\sigma}{\omega\varepsilon})}} = \sqrt{\frac{2\pi f\mu}{\sigma}} e^{j\frac{\pi}{4}} = (1+j)\sqrt{\frac{\pi f\mu}{\sigma}} = (1+j)\frac{\alpha}{\sigma}$$

■集肤深度（穿透深度）

集肤效应：高频电磁波只能存在于导体表面的一个薄层内的现象。

电磁波场强振幅衰减到表面处$1/e$ 的深度，称为集肤深度。

由 $E_0 e^{-\alpha\delta} = \frac{1}{e} E_0$,

得集肤深度：$\delta = \frac{1}{\alpha} = \sqrt{\frac{1}{\pi f \mu \sigma}}$ （m）

导电性能越好（σ 越大），电磁波的频率越高，衰减得越快。

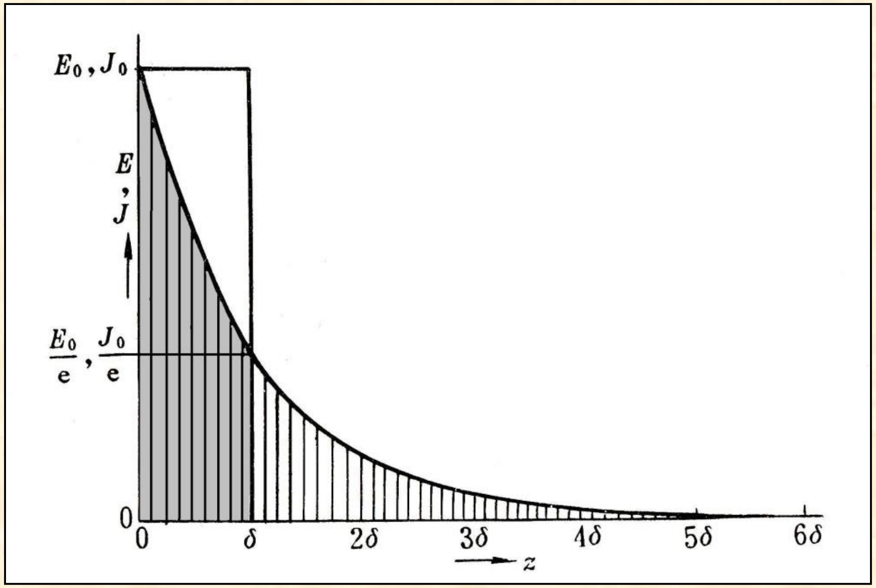


图5.5-3　场强或电流密度振幅在导体内的分布

•对于高频电磁波，集肤深度一般在微米量级，因此，电磁波进入良导体后会很快衰减到很小，从而使薄金属有很好的**屏蔽**作用；用作**导电涂层**，也只需几微米。

表5.3.1一些金属材料的趋肤深度和表面电阻

材料名称	电导率σ /(S/m)	趋肤深度δ /m	表面电阻R_S /Ω
银	6.17×10^7	$0.064/\sqrt{f}$	$2.52\times10^{-7}\sqrt{f}$
紫铜	5.8×10^7	$0.066/\sqrt{f}$	$2.61\times10^{-7}\sqrt{f}$
铝	3.72×10^7	$0.083/\sqrt{f}$	$3.26\times10^{-7}\sqrt{f}$
钠	2.1×10^7	$0.11/\sqrt{f}$	
黄铜	1.6×10^7	$0.13/\sqrt{f}$	$5.01\times10^{-7}\sqrt{f}$
锡	0.87×10^7	$0.17/\sqrt{f}$	
石墨	0.01×10^7	$1.6/\sqrt{f}$	

例2： 一沿 x 方向极化的线极化波在海水中传播，取+ z 轴方向为传播方向。已知海水的媒质参数为$\varepsilon_r = 81$、$\mu_r = 1$、$\sigma = 4$ S/m ， 在 $z = 0$ 处的电场$E_x = 100\cos(10^7\pi t)$ V/m 。求：

（1）衰减常数、相位常数、本征阻抗、相速、波长及趋肤深度；

（2）电场强度幅值减小为$z = 0$ 处的 1/1000 时，波传播的距离

解：（1） 根据题意，有

$$\omega = 10^7\pi \ \text{rad/s} \qquad f = \frac{\omega}{2\pi} = 5\times10^6 \quad \text{Hz}$$

所以

$$\frac{\sigma}{\omega\varepsilon} = \frac{4}{10^7\pi\times(\frac{1}{36\pi}\times10^{-9})\times80} = 180 >> 1$$

此时海水可视为良导体。

故衰减常数 $\alpha=\sqrt{\pi f\mu\sigma}=\sqrt{\pi\times5\times10^{6}\times4\pi\times10^{-7}\times4}=8.89\ \text{Np/m}$

相位常数 $\beta=\alpha=8.89\ \text{rad/m}$

本征阻抗 $\eta_{\text{x}}==\sqrt{\dfrac{\omega\mu}{\sigma}}e^{j\frac{\pi}{4}}=\sqrt{\dfrac{10^{7}\pi\times4\pi\times10^{-7}}{4}}e^{j\frac{\pi}{4}}=\pi e^{j\frac{\pi}{4}}\Omega$

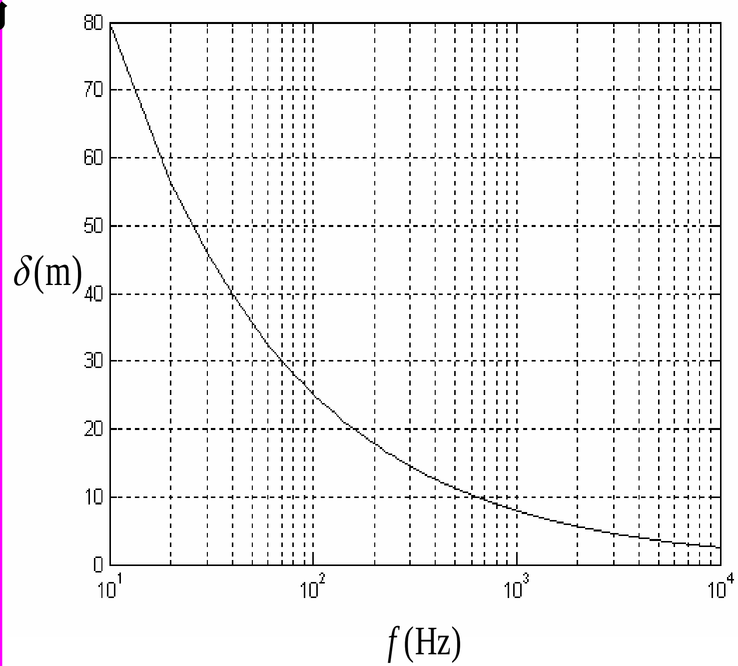
相速 $v=\dfrac{\omega}{\beta}=\dfrac{10^{7}\pi}{8.89}=3.53\times10^{6}\ \text{m/s}$

波长 $\lambda=\dfrac{2\pi}{\beta}=\dfrac{2\pi}{8.89}=0.707\ \text{m}$

趋肤深度 $\delta=\dfrac{1}{\alpha}=\dfrac{1}{8.89}=0.112\ \text{m}$

（2）令$e^{-\alpha z}=1/1000$，即$e^{\alpha z}=1000$，由此得到电场强度幅值减小为 $z = 0$ 处的1/1000 时，波传播的距离

$$z=\frac{1}{\alpha}\ln 1000=\frac{2.302}{8.89}=0.777\ \text{m}$$



海水中的趋肤深度随频率变化的曲线

由此可知，电磁波在海水中传播时衰减很快，尤其在高频时，衰减更为严重，这给潜艇之间的通信带来了很大的困难。若为保持低衰减，工作频率必须很低，但即使在 1 kHz 的低频下，衰减仍然很明显。

例5. 5. 2 P. 150　海水$\varepsilon_r = 80$，$\mu_r = 1$，$\sigma = 4 \ S/m$。频率为3kHz和30MHz的电磁波在海平面处电场强度为1V/m。

求电场衰减到 $1\mu V/m$处的深度。应选择哪个频率作潜水艇的水下通信？

[解]　首先求 $\dfrac{\sigma}{\omega\varepsilon}$ 的值，判断其是良导体还是不良导体，然后才能用不同公式求深度。

f=3kHz：

$$\frac{\sigma}{\omega\varepsilon} = \frac{4\times 36\pi\times 10^9}{2\pi\times 3\times 10^3\times 80} >> 1$$

，此时海水为良导体，因此

$$\alpha \approx \sqrt{\frac{\omega\mu\sigma}{2}} = 0.218 \qquad l = \frac{1}{\alpha}\ln\frac{|E_0|}{|E|} = 63.3m$$

f=30MHz：

$$\frac{\sigma}{\omega\varepsilon} = \frac{4\times 36\pi\times 10^9}{2\pi\times 3\times 10^7\times 80} = 30$$

，此时海水为不良导体

$$\alpha = \omega\sqrt{\frac{\mu\varepsilon}{2}}\left[\sqrt{1+\left(\frac{\sigma}{\omega\varepsilon}\right)^2} - 1\right]^{1/2} = 21.4$$

$$l = \frac{13.8}{\alpha} = 0.645m$$

可见，由于30MHz衰减太大，应选低频3kHz的电磁波。