



西安电子科技大学
XIDIAN UNIVERSITY



5.7 电磁屏蔽效能



电磁场屏蔽

一般在远离干扰源的情况下，电磁干扰均是电场和磁场同时存在的高频辐射电磁场。

近区存在两种特殊情况，于是可以分别按电场屏蔽和磁场屏蔽来考虑：

- 对于高电压、小电流的干扰源，近场以电场为主，其磁场分量可以忽略
- 对于低电压、大电流的干扰源，近场以磁场为主，其电场分量可以忽略



电磁屏蔽：当频率较高，或在离干扰源较远的地方（即远场条件）不论干扰源本身特性如何，均可看作平面波电磁场，此时电场和磁场都不可忽略

高频电磁屏蔽的原理主要依据电磁波到达金属屏蔽体时产生的反射及吸收作用。

波阻抗相差愈大，由反射引起的损耗也愈大；而反射和频率有关，频率愈低，反射愈严重。



电磁波在穿透屏蔽体时的能量吸收损耗主要是由于涡流引起的。涡流的作用：

- 产生反磁场来抵消原干扰磁场。
- 产生热损耗。

因此，频率越高，屏蔽体越厚，涡流损耗也越大。



屏蔽原理与分析方法

原理组成：

- 表面反射 (R -反射损耗)
- 屏蔽材料吸收衰减 (A -吸收损耗)
- 多次反射 (B -多次反射修正)

分析方法：

- 电磁感应原理，分析屏蔽体上的涡流的屏蔽效应来计算屏蔽效能。
- 平面波理论计算反射与衰减。
- 等效传输线理论计算反射与衰减。



导体平板的屏蔽效能

屏蔽的平面波模型特别适用于屏蔽结构的尺寸远大于骚扰场的波长且骚扰源至屏蔽体之间的距离相对较大的情形。

下面在平面波垂直入射的情况下具体对单层屏蔽体的屏蔽效能进行分析讨论。



■ 屏蔽效能的计算

考虑厚度为 t 的屏蔽体，其两侧为自由空间 $Z_1=Z_2$ 。屏蔽效能的计算，则根据单层屏蔽体的屏蔽效能，可以得到

$$\begin{aligned} SE &= -20\lg | pe^{-\gamma t} (1 - qe^{-2\gamma t})^{-1} e^{\gamma_1 t} | \\ &= 20\lg | e^{\gamma t} | - 20\lg | p | + 20\lg | 1 - qe^{-2\gamma t} | \\ &= A + R + B \end{aligned}$$

其中屏蔽效能对应于吸收损耗、反射损耗、多次反射损耗之和。



对于良导体，若令 Z_1/Z_2 则有：

- 吸收损耗： $A = 20\lg |e^{\gamma t}| = 20\lg e^{\alpha t} \approx 8.686\alpha t$
- 反射损耗： $R = -20\lg |p| = 20\lg \left| \frac{(k+1)^2}{4k} \right|$
- 多次反射修正： $B = 20\lg |1 - qe^{-2\gamma t}| = 20\lg \left| 1 - \frac{(k-1)^2}{(k+1)^2} e^{-2\gamma t} \right|$

Note: 吸收损耗与多次反射损耗间存在如下关系

$$B = 10\lg[1 - 2 \times 10^{-0.1A} \cos(0.23A) + 10^{-0.2A}]$$



- 屏蔽效能: $SE = R + A + B(\text{dB})$
- 吸收损耗: $A = 8.98\alpha t \approx 0.131t\sqrt{f\mu_r\sigma_r}(\text{dB})$
- 反射损耗: 平面波源 - $R_w = 168.1 - 10\lg(\mu_r f / \sigma_r)$
电场源 - $R_e = 321.7 - 10\lg(\mu_r r^2 f^3 / \sigma_r)$
磁场源 - $R_m = 14.56 + 10\lg(\sigma_r r^2 f / \mu_r)$
- 多次反射修正: $B = 20\lg \left| 1 - \left(\frac{Z_m - Z_w}{Z_m + Z_w} \right)^2 10^{-0.1A} e^{-j0.23A} \right|$
 $= 10\lg [1 - 2 \times 10^{-0.1A} \cos(0.23A) + 10^{-0.2A}]$



反射损耗

电磁波在媒质交界面的反射损耗，与两种媒质的特性阻抗的差别相关。

对于具体媒质而言，与其自身物理特性相关的主要有本征阻抗和传播常数两个物理量。从理论角度来看，这两个物理量又是有着内在联系的，其在一定程度上从路和场的联系中反映了媒质物理电磁参数（介电常数、磁导率）的内在关联。



- 媒质的本征阻抗:

$$Z = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon_c}} = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\sigma + j\omega\varepsilon}}, \quad \varepsilon_c = \varepsilon + \frac{\sigma}{j\omega}$$

良导体: $(\sigma \gg \omega\varepsilon)$ $Z_m = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\sigma}} = (1 + j)\sqrt{\frac{\pi\mu}{\sigma}} f$

- 传播常数: $\gamma = \alpha + j\beta = j\omega\sqrt{\mu\varepsilon_c} = \sqrt{j\omega\mu(\sigma + j\omega\varepsilon)}$

良导体: $\gamma = \alpha + j\beta \approx \sqrt{j\omega\mu\sigma} = (1 + j)\sqrt{\pi\mu\sigma} f$



- 波阻抗:

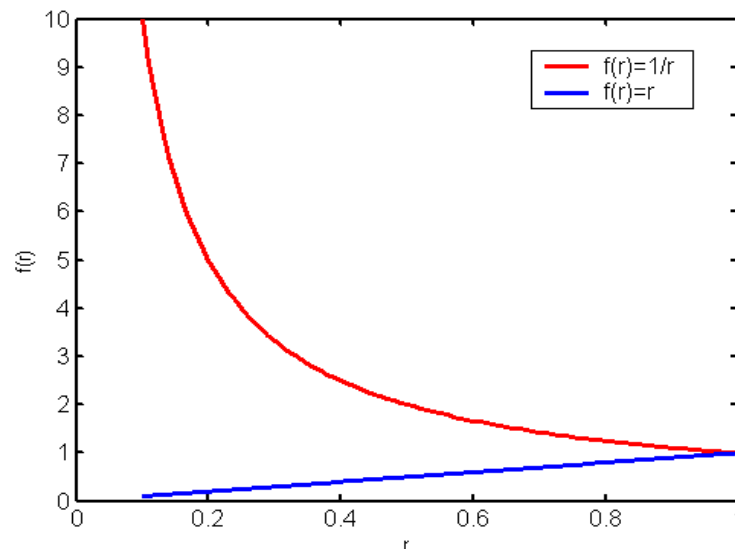
远场: $Z_W = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \approx 120\pi \approx 377\Omega$

近场 (以电场为主):

$$|Z_{we}| = Z_W \frac{\lambda}{2\pi r} \quad \blacksquare \quad |Z_{we}| = \frac{1}{2\pi f \epsilon_0 r}$$

近场 (以磁场为主):

$$|Z_{wm}| = Z_W \frac{2\pi r}{\lambda} \quad \blacksquare \quad |Z_{wm}| = 2\pi f \mu_0 r$$



■ 一般情况下, 自由空间的波阻抗比金属屏蔽体的波阻抗大得多。



吸收损耗

当电磁波通过金属层时，感应出的涡流产生欧姆损耗，并转化为热能而耗散。

对此工程上有：

$$\begin{aligned} A &= 20 \lg |e^{rt}| = 20 \lg e^{\alpha t} \\ &= 20\alpha t \lg e = 8.68\alpha t \approx 0.131t\sqrt{f\mu_r\sigma_r} \text{ (dB)} \end{aligned}$$

其中： σ_r - 相对于铜的电导率，铜： $\sigma = 5.82 \times 10^7 \text{ S/m}$

μ_r - 相对磁导率， t - 厚度（mm）。



在具体应用中，由于前面的吸收损耗关系将损耗值与金属层厚度联系起来，因此，可以对金属厚度的确定提供指导。若 $A=100\text{dB}$ ， $\mu_r=1$ ， $\sigma_r=1$ ，则当频率为 1MHz 时，屏蔽壳体的厚度为 $t=0.76\text{mm}$ 。随着频率的增加，获得一定屏蔽效能所需的金属层的厚度会随之减少。若将其它损耗因素再考虑在内，则所需厚度可能更小。因此，在高频情况下，选择屏蔽壳体的厚度时，一般并不需要从电磁屏蔽效果考虑，而只要从工艺结构和机械性能考虑即可。



在工程中，当需要考虑如何应用吸收特性时，可以考虑如下原则：

- 屏蔽材料越厚，吸收损耗越大。
- 磁导率越高，吸收损耗越大。
- 电导率越高，吸收损耗越大。
- 频率越高，吸收损耗越大。



影响反射损耗的因素

- **材料特性**。屏蔽材料的电导率越高，磁导率越低，反射损耗就越大。
- **场源特性**。对于同一屏蔽材料，不同的场源特性有不同的反射损耗。通常，磁场反射损耗小于平面波反射损耗和电场反射损耗，即 $R_m < R_w < R_e$ ；因此从可靠性考虑，计算种的屏蔽效能时，应以磁场反射损耗代入计算。

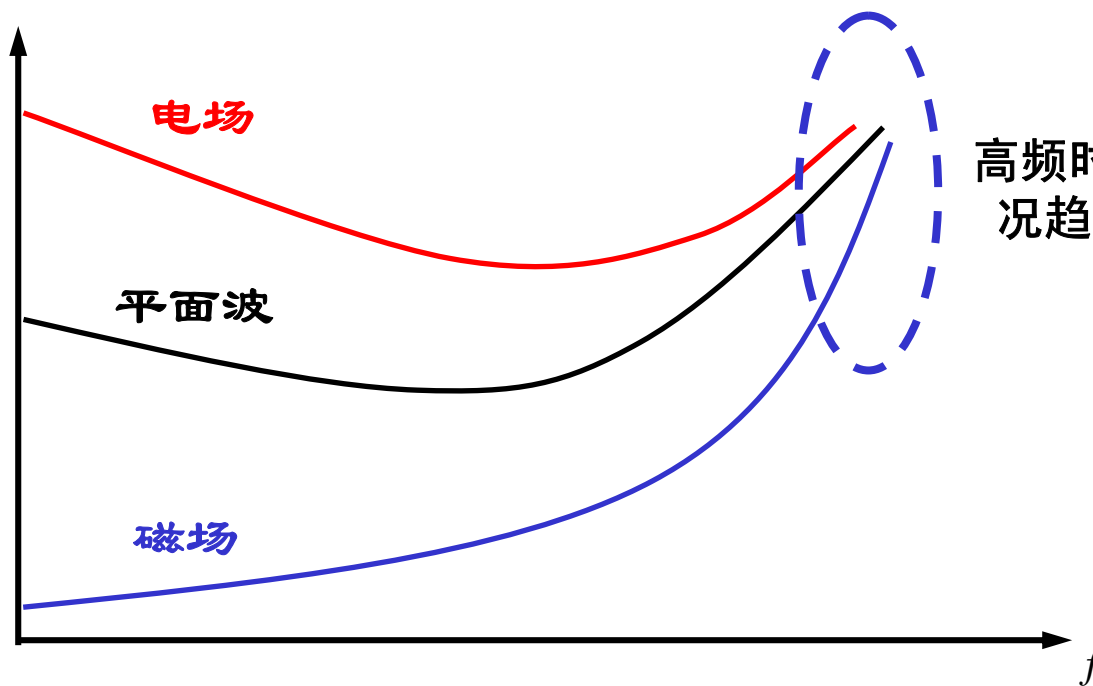


- **场源至屏蔽体的距离特性**。平面波的反射损耗与距离无关，电场的反射损耗与距离的平方成反比，磁场的反射损耗与距离的平方成正比；
- **频率特性**。平面波的反射损耗以频率一次方的速率减小，磁场的反射损耗以频率的一次方的速率增加，电场的反射损耗以频率的三次方的速率减小。



屏蔽效能的频率特性

屏蔽效能



高频时各种情况趋于相近



常用金属材料对铜的相对电导率 σ_r 和相对磁导率 μ_r

材料	σ_r	μ_r	材料	σ_r	μ_r	材料	σ_r	μ_r
银	1.05	1	磷青铜	0.18	1	铁	0.17	50~1000
铜	1	1	白铁皮	0.15	1	冷轧钢	0.17	180
金	0.7	1	锡	0.15	1	不锈钢	0.02	500
铝	0.61	1	钽	0.12	1	4%硅钢	0.029	500
锌	0.29	1	铍	0.10	1	热轧硅钢	0.038	1500
黄铜	0.26	1	铅	0.08	1	高磁导率硅钢	0.06	80000
镉	0.23		钼	0.04	1	坡莫合金	0.04	8000~12000
镍	0.20		钛	0.036		铁镍钼超导磁合金	0.023	10^5



例1：一长方体屏蔽盒的尺寸为（120mm × 25mm × 50mm），材料为铜，铜盒厚度为0.5mm。求频率为1MHz时该屏蔽盒的电磁屏蔽效能。

解：实际中的屏蔽壳体多为矩形，其长、宽、高分别用 a 、 b 、 h 来表示，则屏蔽壳体的等效球体半径（与屏蔽壳体体积相同的球体的半径）为

$$r_0 = \sqrt[3]{\frac{3abh}{4\pi}}$$



当骚扰源至屏蔽体的距离 r 大于屏蔽壳体的等效球体半径时，计算屏蔽效果时以 $r=r_0$ 带入计算。因此屏蔽盒的等效球体半径为

$$r_0 = \sqrt[3]{\frac{3abh}{4\pi}} = \sqrt[3]{\frac{3 \times 120 \times 25 \times 50}{4\pi}} = 33\text{mm}$$

对于铜， $\mu_r=1$ ， $\sigma_r=1$ ，因而得其吸收损耗为

$$A = 0.131t\sqrt{f\mu_r\sigma_r} \text{ (dB)} = 0.131 \times 0.5 \times \sqrt{10^6 \times 1 \times 1} = 65.5\text{dB}$$



由于 $\frac{\lambda}{2\pi} = \frac{C}{2\pi f} = \frac{3 \times 10^8}{2\pi \times 10^6} = 47.75m$

所以， $r_0 = 33mm \ll 47.75m$ ，固屏蔽盒所处场区为近区。
从可靠性出发，选择磁场反射损耗计算反射损耗，得

$$R_m = 14.56 + 10 \lg(\sigma_r r^2 f / \mu_r) = 14.56 + 10 \lg \frac{1 \times (33 \times 10^{-3})^2 \times 10^6}{1}$$
$$= 14.6 + 30.4 = 45dB$$

因吸收损耗 $A = 65.6dB > 10dB$ ，所以可忽略多次反射损耗。

因而，屏蔽盒的屏蔽效能为

$$SE = A + R = A + R_m = 65.6 + 45 = 110.5dB$$