

第九讲 屏蔽的平面波模型

王绪虎

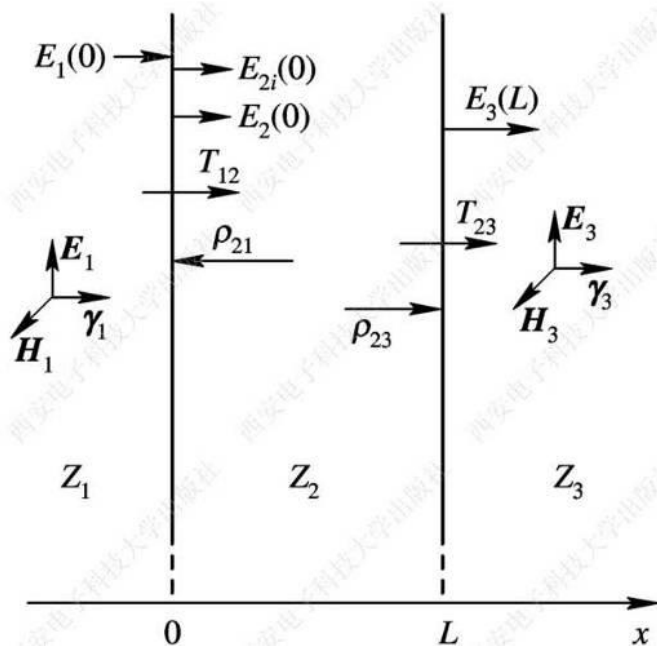
通信与电子工程学院

5.6 屏蔽的平面波模型

6.1 导体平板的屏蔽效能

I. 单层屏蔽体的有效传输系数

有耗媒质的电磁屏蔽机理：电磁场理论指出，入射到有耗媒质平面分界面上的电磁波，部分被反射，其余部分透过界面在有耗媒质中衰减传输，出射后的电磁波强度较入射电磁波强度减小。



$$\gamma = \sqrt{j\omega\mu(\sigma + j\omega\varepsilon)}$$

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

$$T_{\text{eff}} = \frac{E_3(L)}{E_1(0)}$$

图1 屏蔽的平面波模型

● 导体平板的屏蔽效能

不计分界面对电磁波的**多次反射**有

$$E_2(0) = E_1(0)T_{12}, \quad E_2(L) = E_2(0)e^{-\gamma_2 L}, \quad E_3(L) = E_2(L)T_{23}$$

单层屏蔽体的有效传输系数为

$$T_{\text{eff}} = \frac{E_3(L)}{E_1(0)} = T_{12}T_{23}e^{-\gamma_2 L} \quad (8-1)$$

式中

$$T_{12} = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2}, \quad T_{23} = \frac{2Z_3}{Z_2 + Z_3}$$

计入分界面对电磁波的**多次反射**时，设 $E_{2i}(0)$ 为区域2中界面 $x=0$ 处沿 $+x$ 方向(从左向右)传播的第 i 次反射波，那么

$$E_{21}(0) = E_2(0)e^{-\gamma_2 L} \rho_{23} e^{-\gamma_2 L} \rho_{21} = E_2(0) \rho_{23} \rho_{21} e^{-2\gamma_2 L}$$

$$E_{22}(0) = E_{21}(0)(\rho_{23} \rho_{21} e^{-2\gamma_2 L}) = E_2(0)(\rho_{23} \rho_{21} e^{-2\gamma_2 L})^2$$

因此，区域2中从 $x=0$ 处向右传播的所有波的和为

$$\begin{aligned} E_{\text{total}} &= E_2(0) + E_{21}(0) + E_{22}(0) + \dots \\ &= E_2(0) \left[1 + \rho_{21} \rho_{23} e^{-2\gamma_2 L} + (\rho_{21} \rho_{23} e^{-2\gamma_2 L})^2 + \dots \right] \end{aligned}$$



• 导体平板的屏蔽效能

式中

$$\rho_{21} = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2}, \rho_{23} = \frac{Z_3 - Z_2}{Z_3 + Z_2}$$

因为 $|\rho_{21}\rho_{23}e^{-2\gamma_2 L}| < 1$ 所以

$$E_{\text{total}} = E_2(0) \frac{1}{1 - \rho_{21}\rho_{23}e^{-2\gamma_2 L}} = \frac{E_1(0)T_{12}}{1 - \rho_{21}\rho_{23}e^{-2\gamma_2 L}}$$

E_{total} 沿 $+x$ 方向传播距离 L 后形成 $E_{\text{total}}e^{-\gamma_2 L}$ ，它透过区域2和区域3的分界面，在区域3中 $x=L$ 处形成 $E_3(L)$ ，所以

$$E_3(L) = T_{23}E_{\text{total}}e^{-\gamma_2 L}$$

于是,单层屏蔽体的有效传输系数为

$$T_{\text{eff}} = \frac{E_3(L)}{E_1(0)} = \frac{T_{23}e^{-\gamma_2 L}E_1(0)T_{12}}{E_1(0)(1 - \rho_{21}\rho_{23}e^{-2\gamma_2 L})} = \frac{T_{12}T_{23}e^{-\gamma_2 L}}{1 - \rho_{21}\rho_{23}e^{-2\gamma_2 L}} \quad (8-2)$$

(8-2)是TEM波透过厚 L 的任何媒质时，其电场分量的有效传输系数(传输函数)表示式。



• 导体平板的屏蔽效能

比较式(8-1)与式(8-2)可见，分界面的多次反射效应体现于因子 $(1 - \rho_{21}\rho_{23}e^{-2\gamma_2 L})^{-1}$ 。

为分析方便，以 $T_{ij}^E \rho_{ij}^E$ 和 $T_{ij}^H \rho_{ij}^H$ 分别表示分界面处电场和磁场的透射系数与反射系数，以 T_E 、 T_H 表示屏蔽体的电场和磁场的有效传输系数，同时令

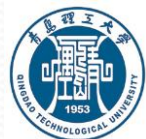
$$p_E = T_{12}^E T_{23}^E = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} \frac{2Z_3}{Z_3 + Z_2}$$
$$q_E = \rho_{12}^E \rho_{23}^E = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \frac{Z_3 - Z_2}{Z_3 + Z_2}$$

则式(8-2)化简后的表示式如下：

$$T_E = p_E e^{-\gamma_2 L} (1 - q_E e^{-2\gamma_2 L})^{-1} \quad (8-3)$$

同理，可得磁场分量的有效传输系数表示式：

$$T_H = p_H e^{-\gamma_2 L} (1 - q_H e^{-2\gamma_2 L})^{-1} \quad (8-4)$$



● 导体平板的屏蔽效能

式中

$$T_{12}^H = \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2}, \quad T_{23}^H = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_3}, \quad p_H = T_{12}^H T_{23}^H$$

$$\rho_{12}^H = -\frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2}, \quad \rho_{23}^H = -\frac{Z_3 - Z_2}{Z_3 + Z_2}, \quad q_H = \rho_{12}^H \rho_{23}^H$$

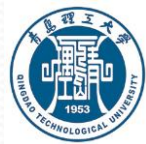
由上面分析可见，一般而言， $p_E \neq p_H$ ， $q_E = q_H = q$ ，所以， $T_E \neq T_H$ 。如果 $Z_1 = Z_3$ （区域1与区域3媒质相同），那么 $p_E = p_H = p$ ， $q_E = q_H = q$ ，从而 $T_E = T_H = T$ 。

II. 单层屏蔽体的屏蔽效能

设图1中没有屏蔽体时， $x = L$ 处的电场是 $E_1(0)e^{-\gamma_1 L}$ 。如果定义屏蔽系数为屏蔽区域中同一点屏蔽后与屏蔽前的场强之比，那么电场和磁场的屏蔽系数分别为

$$T_E^C = \frac{E_1(0)T_E}{E_1(0)e^{-\gamma_1 L}} = T_E e^{\gamma_1 L} = p_E e^{-\gamma_2 L} (1 - q_E e^{-2\gamma_2 L})^{-1} e^{\gamma_1 L} \quad (8-5)$$

$$T_H^C = \frac{H_1(0)T_H}{H_1(0)e^{-\gamma_1 L}} = T_H e^{\gamma_1 L} = p_H e^{-\gamma_2 L} (1 - q_H e^{-2\gamma_2 L})^{-1} e^{\gamma_1 L} \quad (8-6)$$



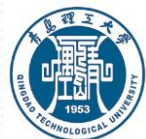
● 导体平板的屏蔽效能

当 $Z_1 = Z_3$ 时，垂直入射的均匀平面波的电场与磁场的屏蔽系数相同。于是根据屏蔽效能的定义，无限大平板对垂直入射均匀平面波电场及磁场的屏蔽效能可表示如下：

$$SE_E = 20\lg \left| \frac{1}{T_E^C} \right| = -20\lg |T_E^C|$$
$$SE_H = 20\lg \left| \frac{1}{T_H^C} \right| = -20\lg |T_H^C|$$

(8-7)

当 $Z_1 = Z_3$ 时电场和磁场的屏蔽效能相等。如果媒质1是无耗媒质，那么因子 $e^{\gamma_1 L}$ 只对相位有贡献，而对屏蔽效能无贡献。反之，如果媒质1是有耗媒质，则此因子会使屏蔽效能减小。



● 导体平板的屏蔽效能

III. 多层平板屏蔽体的屏蔽效能

多层屏蔽体结构如图2所示，应用屏蔽的平面波模型推出的2层($n=3$)屏蔽体的电场和磁场的传输系数如下

$$\begin{aligned}
 T_E^C &= T_{12}^E T_{23}^E T_{34}^E \left[e^{-\gamma_2 L_2} (1 - q_2 e^{-2\gamma_2 L_2})^{-1} \right] \left[e^{-\gamma_3 L_3} (1 - q_3 e^{-2\gamma_3 L_3})^{-1} \right] e^{\gamma_1 (L_2 + L_3)} \\
 &= p_E \left[e^{-\gamma_2 L_2} (1 - q_2 e^{-2\gamma_2 L_2})^{-1} \right] \left[e^{-\gamma_3 L_3} (1 - q_3 e^{-2\gamma_3 L_3})^{-1} \right] e^{\gamma_1 (L_2 + L_3)} \\
 T_H^C &= T_{12}^H T_{23}^H T_{34}^H \left[e^{-\gamma_2 L_2} (1 - q_2 e^{-2\gamma_2 L_2})^{-1} \right] \left[e^{-\gamma_3 L_3} (1 - q_3 e^{-2\gamma_3 L_3})^{-1} \right] e^{\gamma_1 (L_2 + L_3)} \\
 &= p_H \left[e^{-\gamma_2 L_2} (1 - q_2 e^{-2\gamma_2 L_2})^{-1} \right] \left[e^{-\gamma_3 L_3} (1 - q_3 e^{-2\gamma_3 L_3})^{-1} \right] e^{\gamma_1 (L_2 + L_3)}
 \end{aligned}$$

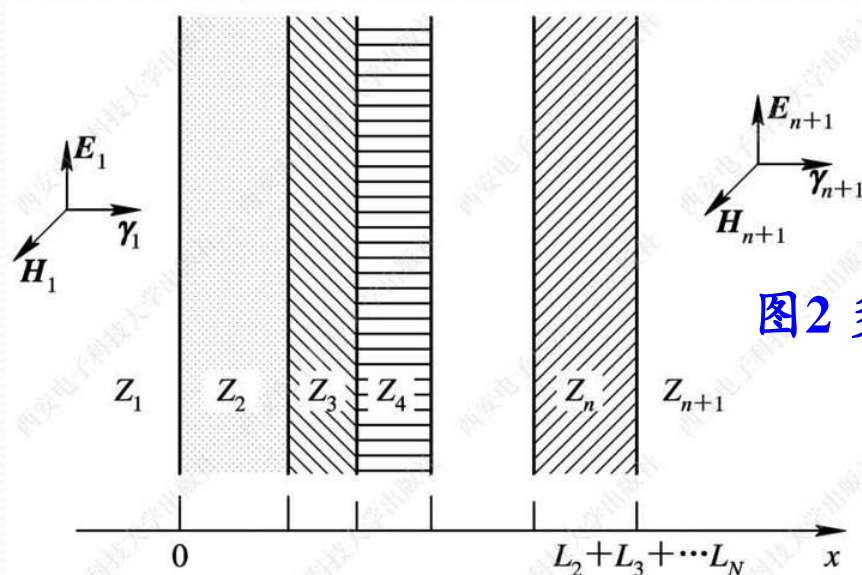


图2 多层平板屏蔽体结构

● 导体平板的屏蔽效能

式中

$$p_E = T_{12}^E T_{23}^E T_{34}^E = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} \frac{2Z_3}{Z_2 + Z_3} \frac{2Z_4}{Z_3 + Z_4}$$

$$p_H = T_{12}^H T_{23}^H T_{34}^H = \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2} \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_3} \frac{2Z_3}{Z_3 + Z_4}$$

$$q_i = \frac{Z_{i-1} - Z_i}{Z_{i-1} + Z_i} \frac{Z_{i-1} + Z_i}{Z_{i-1} + Z_i} \quad (i = 2, 3)$$

同理， $n - 1$ 层屏蔽体的电场和磁场的屏蔽系数为

$$T_E^C = p_E \prod_{i=2}^n e^{-\gamma_i L_i} (1 - q_i e^{-2\gamma_i L_i})^{-1} e^{\gamma_1 \sum_{i=2}^n L_i} \quad p_E = \prod_{i=1}^n \frac{2Z_{i+1}}{Z_i + Z_{i+1}} \quad (i = 2, 3, \dots, n)$$

$$p_H = \prod_{i=1}^n \frac{2Z_i}{Z_i + Z_{i+1}} \quad (i = 2, 3, \dots, n)$$

$$T_H^C = p_H \prod_{i=2}^n e^{-\gamma_i L_i} (1 - q_i e^{-2\gamma_i L_i})^{-1} e^{\gamma_1 \sum_{i=2}^n L_i} \quad q_i = \frac{Z_{i-1} - Z_i}{Z_{i-1} + Z_i} \frac{Z_{i+1} - Z_i}{Z_{i+1} + Z_i} \quad (i = 2, 3, \dots, n)$$



• 导体平板的屏蔽效能

显然，根据屏蔽效能的定义知，如果 $Z_1 = Z_{n+1}$ ，那么 $p_E = p_H = p$ ，从而电场和磁场屏蔽效能相等。媒质1是有耗媒质时，屏蔽效能表达式中的因子 $-20\lg \left| \exp(\gamma_1 \sum_{i=2}^n L_i) \right|$ 不等于零；媒质1无耗时，此因子为零。



• 6.2 平面波模型推广到非理想屏蔽结构

实际情况中骚扰场并不是以平面波形式投射到屏蔽结构上的，因此，**平面波模型**的应用**受到限制**，预测的屏蔽效能尤其在低频误差较大。为了使平面波模型推广应用到实际的屏蔽结构，作如下假定：

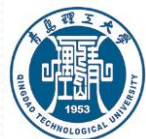
- ① 设屏蔽结构的形状是一球形，骚扰源(短线天线或小圆环天线)位于其中心。这样，骚扰源产生的电磁场分量 E_{θ} 和 H_{ϕ} 将与球表面相切，与屏蔽体的半径无关。对于源激励的垂直投射到屏蔽体上的球面波，其近场波阻抗在球面上各点是一样的。
- ② 球面波进入屏蔽体后，将被视为平面波。因此，这时屏蔽体的阻抗是平面波的波阻抗 Z_2 。
- ③ 透射波离开屏蔽体后，仍在上面①中确定的波阻抗中传播，且认为屏蔽体的厚度远小于屏蔽体的半径。



● 平面波模型推广到非理想屏蔽结构

在上述假设条件下，已经推导出的计算平板屏蔽体屏蔽效能的表达式可用来计算球壳屏蔽体的屏蔽效能。此时，对于近区场，用近区波阻抗(短线天线或小圆环天线的近区波阻抗)代替波阻抗 Z_1 ；对于远区场(无论是电场还是磁场)， $Z_1 = Z_0 = 120\pi$ ；而 Z_2 使用良导体构成的波阻抗

$$Z_2 = \sqrt{\frac{\pi f \mu}{\sigma}}(1 + j) \quad (8-8)$$



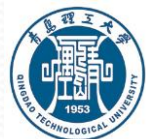
● 6.3 屏蔽效能计算的解析法

设厚度为 t 的导体平板屏蔽体两侧的区域为自由空间，则单层平板屏蔽体的屏蔽效能表达式(8-7)可表示为

$$\begin{aligned} SE &= 20\lg\left|\frac{1}{T^C}\right| = -20\lg|T^C| \\ &= -20\lg\left|pe^{-\gamma t}(1-qe^{-2\gamma t})^{-1}e^{\gamma t}\right| \\ &= 20\lg|e^{\gamma t}| - 20\lg|p| + 20\lg|1-qe^{-2\gamma t}| - 20\lg|e^{\gamma t}| \\ &= A + R + B - 20\lg|e^{\gamma t}| \end{aligned} \quad (8-9)$$

在式(8-9)中， $\gamma = \alpha + j\beta$ (α 和 β 是电磁波在金属屏蔽体中的衰减常数和相移常数)。对于良导体， $\alpha \approx \beta \approx \sqrt{\pi\mu f\sigma}$ ，集肤深度 $\delta = 1/\alpha = 1/\sqrt{\pi\mu f\sigma}$ ，因此有吸收损耗

$$A = 20\lg|e^{\gamma t}| = 20\lg e^{\alpha t} = 8.6859\alpha t \quad (\text{dB}) \quad (8-10)$$



● 屏蔽效能计算的解析法

反射损耗

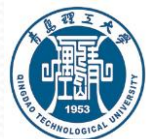
$$R = -20\lg|p| = 20\lg\left|\frac{(k+1)^2}{4k}\right| \quad (\text{dB}) \quad (8-11)$$

多次反射损耗

$$B = 20\lg\left|1 - qe^{-2\gamma t}\right| = 20\lg\left|1 - \frac{(k-1)^2}{(k+1)^2}e^{-2\gamma t}\right| \quad (8-12)$$

式(8-9)表明：屏蔽效能可分解为**吸收损耗**(Absorption Loss) A 、**反射损耗**(Reflection Loss) R 和**多次反射损耗**(Multiple Reflection) B 之和。吸收损耗、多次反射损耗与衰减常数和屏蔽体厚度的乘积 αt 相关。对于良导体屏蔽体，衰减常数与集肤深度 δ 的关系是 $\delta = 1/\alpha$ ，因此，屏蔽效能与因子 t/δ 相关，因子 t/δ 越大，屏蔽效能越大。可以证明，吸收损耗与多次反射损耗的关系为

$$B = 20\lg \left[1 - 2 \times 10^{-0.1A} \cos(0.23A) + 10^{-0.2A} \right] \quad (\text{dB}) \quad (8-13)$$



●屏蔽效能计算的解析法

当 $A > 15$ dB时，多次反射损耗 B 可忽略不计。**多次反射损耗的值总是负的或趋近于零。**

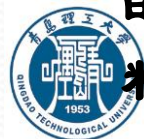
I. 吸收损耗

当电磁波通过金属板时，由于金属板感应涡流产生欧姆损耗，并转变为热能而耗散。与此同时，涡流反磁场抵消入射波骚扰场而形成吸收损耗。

工程上为了计算方便，常用金属屏蔽材料的相对电导率、磁导率来表示吸收损耗，因此，式(8-12)可以重新改写为

$$A = 0.131t\sqrt{f\mu_r\sigma_r} \quad (\text{dB}) \quad (8-14)$$

式中： t 为屏蔽体厚度(mm)； μ_r 为屏蔽体的相对磁导率； σ_r 为屏蔽体相对于铜的电导率， $\sigma_r = \sigma/\sigma_{cu}$ ，铜的电导率为 $\sigma_{cu} = 5.82 \times 10^7$ S/m； f 为电磁波频率(Hz)。由此可见，吸收损耗随屏蔽体的厚度 t 和频率 f 的增加而增加，同时也随着屏蔽材料的相对电导率 σ_r 和磁导率 μ_r 的增加而增加。表1为常用金属材料对铜的相对电导率和相对磁导率。



屏蔽效能计算的解析法

表1 常用金属材料对铜的相对电导率和相对磁导率

材 料	相对电导率 σ_r	相对磁导率 μ_r	材 料	相对电导率 σ_r	相对磁导率 μ_r
铜	1	1	白铁皮	0.15	1
银	1.05	1	铁	0.17	50~1000
金	0.70	1	钢	0.10	50~1000
铝	0.61	1	冷轧钢	0.17	180
黄铜	0.26	1	不锈钢	0.02	500
磷青铜	0.18	1	热轧硅钢	0.038	1500
镍	0.20	1	高导磁硅钢	0.06	80000
铍	0.1	1	坡莫合金	0.04	8000~12000
铅	0.08	1	铁镍钼合金	0.023	100000

● 屏蔽效能计算的解析法

由式(8-10)，可根据所要求的吸收衰减量求出屏蔽体的厚度，即

$$t = \frac{A}{0.131\sqrt{f\mu_r\sigma_r}} \quad (\text{mm})$$

例如，设 $A = 100$ dB， $\mu_r = 1$ ， $\sigma_r = 1$ ，则当频率 $f = 1$ MHz时，屏蔽壳体厚度 $t = 0.76$ mm。随着频率的增加，获得一定屏蔽效能所需要的屏蔽壳体的厚度也随之减小。如果把反射损耗也考虑在内，则所需厚度可更小。所以在高频情况下，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。**

II. 反射损耗

电磁波在两种媒质(自由空间和屏蔽体)交界面的反射损耗，与两种媒质的特性阻抗的差别有关。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，即 $Z_1 \gg Z_2$ ，故式(8-11)可以简化为



● 屏蔽效能计算的解析法

$$R \approx 20 \lg \left(\frac{|Z_1|}{4|Z_2|} \right) \quad (8-15)$$

自由空间的波阻抗在不同类型的场源和场区中，其数值是不一样的，对于远区 ($r \gg \frac{\lambda}{2\pi}$) 平面波的波阻抗为

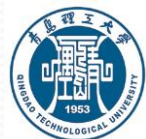
$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 120\pi = 377 \Omega \quad (8-16)$$

近区 ($r \ll \frac{\lambda}{2\pi}$) 电场的波阻抗为

$$Z_{Ew} = -j \frac{1.8 \times 10^{10}}{fr} \quad (\Omega) \quad (8-17)$$

近区 ($r \ll \frac{\lambda}{2\pi}$) 磁场的波阻抗为

$$Z_{Hw} = j7.9 \times 10^{-6} fr \quad (\Omega) \quad (8-18)$$



● 屏蔽效能计算的解析法

金属屏蔽体(良导体)的波阻抗为

$$Z_2 = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\sigma}} = \sqrt{\frac{\omega\mu}{2\sigma}}(1+j)$$

对于铜, $\sigma_{cu} = 5.82 \times 10^{-7} \text{ S/m}$, 因而

$$|Z_2| = 3.69 \times 10^{-7} \sqrt{f} \quad (\Omega)$$

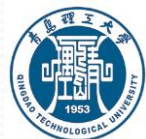
故对于任意的良导体有

$$|Z_2| = 3.69 \times 10^{-7} \sqrt{\frac{\mu_r}{\sigma_r}} f \quad (\Omega) \quad (8-19)$$

式中: σ_r 表示导体材料对于铜的相对电导率; μ_r 表示导体材料的相对磁导率,它们的值见表1。

用 Z_0 、 Z_{Ew} 、 Z_{Hw} 代替(8-15)中的 Z_1 , 用(8-19)代替(8-15)中的 Z_2 , 则由(8-15)可以获得远场区的平面波反射损耗(Reflection Loss to Plane Waves):

$$R_p = 168 + 10 \lg \left(\frac{\sigma_r}{\mu_r f} \right) \quad (\text{dB}) \quad (8-20)$$



● 屏蔽效能计算的解析法

近场区的电场反射损耗(Electric Field Reflection Loss in the Near Field):

$$R_e = 321.7 + 10\lg\left(\frac{\sigma_r}{\mu_r f^3 r^2}\right) \quad (\text{dB}) \quad (8-21)$$

近场区的磁场反射损耗(Magnetic Field Reflection Loss in the Near Field):

$$R_m = 14.6 + 10\lg\left(\frac{fr^2 \sigma_r}{\mu_r}\right) \quad (\text{dB}) \quad (8-22)$$

影响表面反射损耗的因素有:

(1)屏蔽材料。根据式(8-20)、式(8-21)和式(8-22), 可以写出反射损耗的一般方程:

$$R = C + 10\lg\left(\frac{\sigma_r}{\mu_r}\right)\left(\frac{1}{f^n r^m}\right) \quad (8-23)$$

上式中各个常数的取值如表2。由此可见, 屏蔽材料的电导率越高, 磁导率越低, 反射损耗越大。



屏蔽效能计算的解析法

(2)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 $R_m < R_p < R_e$ ，因此，从可靠性考虑，计算总的屏蔽效能时，应以

场 型	C	n	m
平面波	168	1	0
电场	321.7	3	2
磁场	14.6	-1	-2

表2 (8-23)中的常数取值

磁场反射损耗 R_m 代入计算。

(3)场源至屏蔽体的距离。平面波的反射损耗 R_p 与距离 r 无关，电场的反射损耗 R_e 与距离的平方成反比，磁场的反射损耗 R_m 与距离的平方成正比。

(4)频率。平面波的反射损耗 R_p 以频率 f 的一次方的速率减少，磁场的反射损耗 R_m 以频率 f 的一次方的速率增加，电场的反射损耗 R_e 以频率 f 的三次方的速率减少。

● 屏蔽效能计算的解析法

III. 多次反射损耗

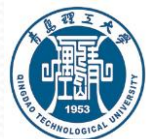
屏蔽体第二边界的反射波反射到第一边界再次反射，接着又回到第二边界进行反射。如此反复进行，就形成了屏蔽体内的多次反射。一般情况下，自由空间的波阻抗比金属屏蔽体的波阻抗大得多，即 $Z_1 \gg Z_2$ ，故式(8-12)可以简化为

$$B = 20 \lg (1 - e^{-2t/\delta}) \quad (\text{dB}) \quad (8-24)$$

当屏蔽体较厚或频率较高时，屏蔽体吸收损耗较大。

一般 $A > 10 \text{ dB}$ ，多次反射损耗即可忽略不计。

但是，当屏蔽体较薄或频率较低时，吸收损耗很小，一般在 $A < 10 \text{ dB}$ 时，多次反射作用对屏蔽效能的影响就必须考虑。



● 屏蔽效能计算的解析法

实例1—长方体屏蔽盒的尺寸为120 mm×25 mm×50 mm，材料为铜（其厚度为0.5 mm）。求频率为1 MHz时该铜屏蔽盒的电磁屏蔽效能。

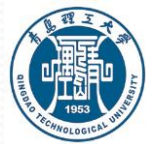
【解】 实际中的屏蔽壳体多为矩形，其长、宽、高分别用a、b、h表示，屏蔽壳体的等效球体半径（与屏蔽壳体体积相同的球体半径）为

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

当骚扰源至屏蔽壳体的距离 r 大于屏蔽壳体的等效球体半径时，计算屏蔽效能时以 $r = r_0$ 代入计算。对于铜， $\mu_r = 1$ ， $\sigma_r = 1$ ，由式(5-83)可得吸收损耗为

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

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



● 屏蔽效能计算的解析法

所以， $r_0 = 33 \text{ mm} (\ll 47.75\text{m})$ ，故屏蔽盒所处场区为近区。从可靠性出发，选择式(8-22)计算反射损耗，得

$$R_m = 14.6 + 10 \lg \left(\frac{fr^2 \sigma_r}{\mu_r} \right) = 14.6 + 10 \lg \left[\frac{10^6 \times (33 \times 10^{-3})^2 \times 1}{1} \right]$$
$$= 14.6 + 30.4 = 45 \text{ dB}$$

因吸收损耗 $A = 65.6 \text{ dB} (>10 \text{ dB})$ ，所以可以忽略多次反射损耗。综上所述，屏蔽盒的屏蔽效能为

$$SE = A + R = A + R_m = 65.5 + 45 = 110.5 \text{ dB}$$

