

孔缝对航空器电子设备舱屏蔽效能的影响

周 超 彭卫东 何 建 胡 炎 高丽霞 刘 英

(中国民用航空飞行学院航空工程学院, 广汉 618307)

摘要 应用全域基函数表示缝隙场技术的矩量法, 分析计算矩形屏蔽体的屏蔽效能。基于缝隙切向电磁场连续条件, 通过求解腔体格林函数得到屏蔽体内部场强。通过对经典孔缝电磁耦合模型的数值仿真, 得出的结论与已有文献和实验结果吻合良好。验证了该算法的准确性和计算效率。仿真结果表明: 孔缝的形状、入射波极化方向和屏蔽体内不同计算点等因素对屏蔽效能影响很大。通过数值仿真得出的规律性结论, 有利于指导屏蔽体孔缝形状的设计以及敏感器件和设备的合理布局。因此屏蔽效能的仿真分析在民用航空电子系统防护高强度辐射场的工作中具有重要的指导意义。矩形屏蔽体 孔缝 屏蔽效能 矩量法 格林函数

中图法分类号 V243; **文献标志码** A

现代航空器机载设备中电子电气元件参数(例如输入的电压、电流、功率)的降低, 使得航空器电子系统经受电磁干扰的能力下降。在受到不断增多增大的来自地面、舰船、海上平台或航空器上的雷达、无线电、电视、卫星上行数据等高功率发射机的辐射时, 由这类航空电子设备构成的机载系统的功能会受到严重影响, 严重时将导致功能的丧失或混乱。过去许多由手动、机电或液压部件执行的功能现在改由先进的数字式航空电子系统实现。在提高航空器性能和燃油效率的前提下, 这些先进系统因其运行价格低廉、机组负担小和维修工作简单等原因而被迅速接受。与模拟式电子系统相比, 先进的数字式航空电子系统更容易受到高强度电磁辐射的影响。

为了满足电磁兼容要求, 常用金属屏蔽体来保护航空电子系统免受外部辐射干扰以及内部电磁泄漏, 其屏蔽性能一般都用屏蔽效能(SE)来衡量。但在实际应用中, 由于输入输出连接、散热、馈电、控制面板和显示装置安装等需要, 其金属屏蔽体上

不可避免地存在一些孔缝, 来自外界的电磁干扰能量就可以通过这些孔缝耦合进入航空电子系统内部, 从而大大降低了金属屏蔽体的屏蔽效能甚至造成金属屏蔽体内电子设备或元器件的损坏。孔缝是外部电磁环境对航空电子设备干扰的主要途径。因此, 为了提高航空电子设备在复杂电磁环境下的安全性能, 增强航空电子系统抗高强度辐射场破坏的能力, 金属屏蔽体屏蔽效能的分析计算在近几年已经成为电磁兼容领域的研究热点。在进行分析时, 通常可将这类电磁耦合看作腔体孔缝耦合。

目前电磁场屏蔽效能的分析方法主要有传输线法和数值方法。数值方法主要包括时域有限差分法(FDTD)^[1—3]、有限元法(FEM)^[4—7]、矩量法(MoM)^[8—13], 其应用范围较广, 但计算耗时耗资源; 传输线矩阵法^[14—15]虽然计算速度快, 但由于做了很多近似处理, 应用范围有限。本文提出一种基于全域基函数表示缝隙场技术的矩量法分析计算矩形屏蔽体的屏蔽效能, 并对经典孔缝电磁耦合模型进行了数值仿真, 得出的结论与已有文献和实验结果吻合良好。

1 屏蔽体结构及矩量法分析原理

通常所说的屏蔽效能指的是电场屏蔽效能, 其定义为

2012 年 5 月 11 日收到 中国民用航空飞行学院自然基金项目
(J2007-23)、民航飞行技术与飞行安全科研

基地 2008 年度开放基金项目资助
第一作者简介: 周 超(1980—), 男, 汉族, 安徽省濉溪县人, 讲师,
硕士学位, 研究方向: 电磁环境效应。E-mail: zc_cafuc@163.com。

$$SE(\text{dB}) = -20\lg\left(\frac{|E_{\text{int}}|}{|E_{\text{ext}}|}\right) \quad (1)$$

E_{ext} 为无屏蔽体时某点的电场强度, E_{int} 是加屏蔽体之后该处的电场强度。因此,屏蔽效能计算本质上是计算由自由空间垂直入射平面波在腔体内产生电磁场的问题。如图1所示,矩形金属屏蔽体尺寸为 $a \times b \times c$,在其一侧开有尺寸为 $L_r \times W_r$ 的孔缝,参考坐标及入射波方向已标注在图1中。

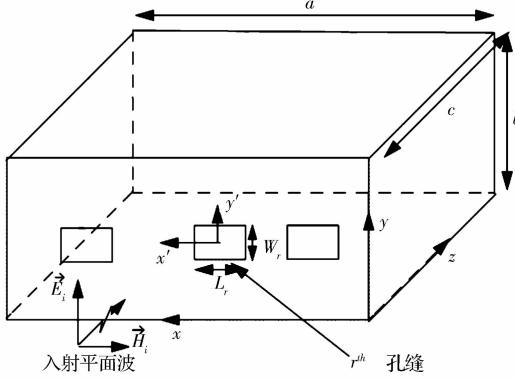


图1 带孔缝的矩形腔体模型示意图

1.1 缝隙场与等效磁流

屏蔽体内(区域1)外(区域2)缝隙场都用等效磁流替代。

$$M = n \times E_{\text{apt}} \quad (2)$$

E_{apt} 是在缝隙上感应出的切向电场, n 是缝隙的法向矢量。

$$\begin{aligned} E_{\text{apt}}(z=0) = & \sum_{r=1}^R \left[\hat{y} \sum_p \sum_q U_{rpq} \sin\left(\frac{p\pi}{L_r} \left(\frac{L_r}{2} + x - x_{cr}\right)\right) \times \right. \\ & \cos\left(\frac{q\pi}{W_r} \left(\frac{W_r}{2} + y - y_{cr}\right)\right) + \\ & \hat{x} \sum_p \sum_q V_{rpq} \cos\left(\frac{p\pi}{L_r} \left(\frac{L_r}{2} + x - x_{cr}\right)\right) \times \\ & \left. \sin\left(\frac{q\pi}{W_r} \left(\frac{W_r}{2} + y - y_{cr}\right)\right) \right] \end{aligned} \quad (3)$$

U_{rpq} 和 V_{rpq} 是缝隙外部等效磁流第 pq 阶模,通过求解耦合积分方程得到。

应用等效原理,等效磁流推导如下:

$$\begin{aligned} M_{\text{apt}} = n_1 \times E_{\text{apt}} = -\hat{z} \times E_{\text{apt}}(z=0) = \\ \sum_{r=1}^R \left[\hat{x} \sum_p \sum_q U_{rpq} \Psi_r - \right. \\ \left. \hat{y} \sum_p \sum_q V_{rpq} \Phi_r \right] = \end{aligned}$$

$$\sum_{r=1}^R M_{rl} \quad (4)$$

$$\Psi_r = \sin\left(\frac{p\pi}{L_r} \left(\frac{L_r}{2} + x - x_{cr}\right)\right) \cos\left(\frac{q\pi}{W_r} \left(\frac{W_r}{2} + y - y_{cr}\right)\right) \quad (5)$$

$$\Phi_r = \cos\left(\frac{p\pi}{L_r} \left(\frac{L_r}{2} + x - x_{cr}\right)\right) \sin\left(\frac{q\pi}{W_r} \left(\frac{W_r}{2} + y - y_{cr}\right)\right) \quad (6)$$

1.2 屏蔽体外部电磁场

假设孔缝在 $z=0$ 平面上,屏蔽体外部基于第 r 个缝隙的散射场可以通过求解电矢位得到。

$$E = -\frac{1}{\epsilon_0} \nabla \times F \quad (7)$$

$$H = -\frac{j\omega}{k_0^2} (k_0^2 F + \nabla \nabla \cdot F) \quad (8)$$

$$F = \frac{\epsilon_0}{4\pi} \int \int apt 2M_r \frac{e^{-jk_0|r-r'|}}{r-r'} ds \quad (9)$$

叠加 $z=0$ 平面上所有缝隙的散射场可以得到屏蔽体外总的场分布如下^[17]:

$$\begin{aligned} H_x' = & \sum_{r=1}^R \sum_p \sum_q \frac{\omega \epsilon_0}{4\pi^2 k_0^2} (U_{rpq} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-jk_z|z-z'|} \psi_{rpqy} \times \\ & \frac{k_z^2 - k_x^2}{k_z} e^{jk_x x + jk_y y} dk_x dk_y - V_{rpq} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-jk_z|z-z'|} \times \\ & \phi_{rpqy} \frac{-k_x k_y}{k_z} e^{jk_x x + jk_y y} dk_x dk_y) \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} H_y' = & \sum_{r=1}^R \sum_p \sum_q \frac{-\omega \epsilon_0}{4\pi^2 k_0^2} (V_{rpq} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-jk_z|z-z'|} \phi_{rpqy} \times \\ & \frac{k_z^2 - k_y^2}{k_z} e^{jk_x x + jk_y y} dk_x dk_y - U_{rpq} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-jk_z|z-z'|} \times \\ & \psi_{rpqy} \frac{-k_x k_y}{k_z} e^{jk_x x + jk_y y} dk_x dk_y) \end{aligned} \quad (11)$$

$$H_z' = \sum_{r=1}^R \sum_p \sum_q \frac{-\omega \epsilon_0}{4\pi^2 k_0^2} (\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-jk_z|z-z'|} (U_{rpq} \psi_{rpqy} k_x - \\ V_{rpq} \phi_{rpqy} k_y) e^{jk_x x + jk_y y} dk_x dk_y) \quad (12)$$

式(10)—式(12)中, ϕ_{rpqy} 和 ψ_{rpqy} 分别是 Φ_{rpqy} 和 Ψ_{rpqy} 的傅里叶变换。

1.3 屏蔽体内部电磁场

同理,叠加 $z=0$ 平面上所有缝隙等效磁流源的辐射场可以得到屏蔽体内总的场分布如下^[17]:

$$H_x^{\text{II},0} = \frac{-j\omega}{k_0^2} \sum_{r=1}^R \sum_{p,q} U_{rpq} \sum_{m,n}^{\infty} \frac{-\epsilon_0}{k_l} \frac{\epsilon_{0m} \epsilon_{0n}}{ab \sin(k_l C)} \times$$

$$\left(k_0^2 - \left(\frac{m\pi}{a} \right)^2 \right) \sin\left(\frac{m\pi x}{a} \right) \times \cos\left(\frac{n\pi y}{b} \right) \cos(k_I(z - c)) I_{rpqmnx} \quad (13)$$

$$H_y^{\text{II},x0} = \frac{-j\omega}{k_0^2} \sum_{r=1}^R \sum_{p,q} U_{rpq} \sum_{m,n}^{\infty} \frac{-\mathcal{E}_0}{k_I} \frac{\mathcal{E}_{0m}\mathcal{E}_{0n}}{ab \sin(k_I c)} \times \frac{m\pi}{a} \left(-\frac{n\pi}{b} \right) \cos\left(\frac{m\pi x}{a} \right) \times \sin\left(\frac{n\pi y}{b} \right) \cos(k_I(z - c)) I_{rpqmnx} \quad (14)$$

$$H_z^{\text{II},x0} = \frac{-j\omega}{k_0^2} \sum_{r=1}^R \sum_{p,q} U_{rpq} \sum_{m,n}^{\infty} \frac{-\mathcal{E}_0}{k_I} \frac{\mathcal{E}_{0m}\mathcal{E}_{0n}}{ab \sin(k_I c)} \times \frac{m\pi}{a} (-k_I) \cos\left(\frac{m\pi x}{a} \right) \times \cos\left(\frac{n\pi y}{b} \right) \sin(k_I(z - c)) I_{rpqmnx} \quad (15)$$

$$H_x^{\text{II},y0} = \frac{-j\omega}{k_0^2} \sum_{r=1}^R \sum_{p,q} -V_{rpq} \sum_{m,n}^{\infty} \frac{-\mathcal{E}_0}{k_I} \frac{\mathcal{E}_{0m}\mathcal{E}_{0n}}{ab \sin(k_I c)} \times \left(-\frac{m\pi}{a} \right) \frac{n\pi}{b} \sin\left(\frac{m\pi x}{a} \right) \cos\left(\frac{n\pi y}{b} \right) \times \cos(k_I(z - c)) I_{rpqmnx} \quad (16)$$

$$H_x^{\text{II},y0} = \frac{-j\omega}{k_0^2} \sum_{r=1}^R \sum_{p,q} -V_{rpq} \sum_{m,n}^{\infty} \frac{-\mathcal{E}_0}{k_I} \frac{\mathcal{E}_{0m}\mathcal{E}_{0n}}{ab \sin(k_I c)} \times \left(k_0^2 - \left(\frac{n\pi}{b} \right)^2 \right) \cos\left(\frac{m\pi x}{a} \right) \times \sin\left(\frac{n\pi y}{b} \right) \cos(k_I(z - c)) I_{rpqmnx} \quad (17)$$

$$H_x^{\text{II},y0} = \frac{-j\omega}{k_0^2} \sum_{r=1}^R \sum_{p,q} -V_{rpq} \sum_{m,n}^{\infty} \frac{-\mathcal{E}_0}{k_I} \frac{\mathcal{E}_{0m}\mathcal{E}_{0n}}{ab \sin(k_I c)} \times \frac{n\pi}{b} (-k_I) \cos\left(\frac{m\pi x}{a} \right) \times \cos\left(\frac{n\pi y}{b} \right) \sin(k_I(z - c)) I_{rpqmnx} \quad (18)$$

$$I_{rpqmn} = \iint_q \Phi_{rpqy}(x', y') \cos\left(\frac{m\pi x'}{a} \right) \sin\left(\frac{n\pi y'}{b} \right) dx' dy'.$$

$$I_{rpqmnx} = \iint_q \psi_{rpqy}(x', y') \sin\left(\frac{m\pi x'}{a} \right) \cos\left(\frac{n\pi y'}{b} \right) dx' dy'.$$

由于缝隙切向电场和切向磁场连续,应用矩量法可以求出等效磁流。

1.4 积分方程推导

腔体缝隙内部总的切向场可表示为:

$$H_x^{\text{II}} = H_x^{\text{II},x0} + H_x^{\text{II},y0} \quad (19)$$

$$H_x^{\text{II}} = H_x^{\text{II},x0} + H_x^{\text{II},y0} \quad (20)$$

在 $z=0$ 平面应用切向磁场连续性条件可以得到:

$$H_x^1|_{z=0} + H_{xi}|_{z=0} = H_x^{\text{II}}|_{z=0} \quad (21)$$

$$H_y^1|_{z=0} + H_{yi}|_{z=0} = H_y^{\text{II}}|_{z=0} \quad (22)$$

选择 $\psi_{r'p'q'x}$ 作为检验函数并应用伽辽金法化简式 (21)

$$I_{r'p'q'xi} = \sum_{r=1}^R \sum_{p,q} (U_{rpq} Y_{rpqr'p'q'}^{x1x1} + V_{rpq} Y_{rpqr'p'q'}^{x1y1}) \quad (23)$$

此处:

$$Y_{rpqr'p'q'}^{x1x1} = \frac{-j\omega}{k_0^2} \sum_{m,n=0}^{\infty} \frac{-\mathcal{E}_0}{k_I} \frac{\mathcal{E}_{0m}\mathcal{E}_{0n}}{ab \sin(k_I c)} \times \left(k_0^2 - \left(\frac{m\pi}{a} \right)^2 \right) \cos(k_I c) I_{rpqmn} I_{r'p'q'mnx} + \frac{\omega\mathcal{E}_0}{4\pi^2 k_0^2} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \psi_{rpqy} \psi_{r'p'q'x}^* \frac{k_0^2 - k_x^2}{k_z} dk_x dk_y \\ Y_{rpqr'p'q'}^{x1y1} = \frac{j\omega}{k_0^2} \sum_{m,n=0}^{\infty} \frac{-\mathcal{E}_0}{k_I} \frac{\mathcal{E}_{0m}\mathcal{E}_{0n}}{ab \sin(k_I c)} \left(-\frac{m\pi}{a} \right) \left(\frac{n\pi}{b} \right) \times \cos(k_I c) I_{rpqmn} I_{r'p'q'mnx} \quad (24)$$

$$\frac{\omega\mathcal{E}_0}{4\pi^2 k_0^2} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \phi_{rpqy} \phi_{r'p'q'x}^* \frac{-k_x k_y}{k_z} dk_x dk_y \quad (25)$$

$$I_{r'p'q'xi} = \iint_{r'p'q'} H_{xi} \psi_{r'p'q'x} dx dy \quad (26)$$

同理,选择 $-\Phi_{r'p'q'y}$ 为检验函数并应用法化简式 (22)。

$$I_{r'p'q'yi} = \sum_{r=1}^R \sum_{p,q} (U_{rpq} Y_{rpqr'p'q'}^{y1x1} + V_{rpq} Y_{rpqr'p'q'}^{y1y1}) \quad (27)$$

此处:

$$Y_{rpqr'p'q'}^{y1x1} = \frac{j\omega}{k_0^2} \sum_{m,n=0}^{\infty} \frac{-\mathcal{E}_0}{k_I} \frac{\mathcal{E}_{0m}\mathcal{E}_{0n}}{ab \sin(k_I c)} \left(\frac{m\pi}{a} \right) \left(-\frac{n\pi}{b} \right) \times \cos(k_I c) I_{rpqmn} I_{r'p'q'mny} + \frac{\omega\mathcal{E}_0}{4\pi^2 k_0^2} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \psi_{rpqy} \phi_{r'p'q'y}^* \frac{-k_x k_y}{k_z} dk_x dk_y \quad (28)$$

$$Y_{rpqr'p'q'}^{y1y1} = -\frac{j\omega}{k_0^2} \sum_{m,n=0}^{\infty} \frac{-\mathcal{E}_0}{k_I} \frac{\mathcal{E}_{0m}\mathcal{E}_{0n}}{ab \sin(k_I c)} \times \left(k_0^2 - \left(\frac{n\pi}{b} \right)^2 \right) \cos(k_I c) I_{rpqmn} I_{r'p'q'mny} - \frac{\omega\mathcal{E}_0}{4\pi^2 k_0^2} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \phi_{rpqy} \phi_{r'p'q'y}^* \frac{(k_0^2 - k_x^2)}{k_z} dk_x dk_y \quad (29)$$

$$I_{r'p'q'y_i} = \iint_{r'p'q'} H_{y_i} \Phi_{r'p'q'x} dx dy \quad (30)$$

方程为(23)和式(27)写成矩阵形式:

$$\begin{bmatrix} Y_{rpqr'p'q'}^{x1x1} & Y_{rpqr'p'q'}^{x1y1} \\ Y_{rpqr'p'q'}^{y1x1} & Y_{rpqr'p'q'}^{y1y1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{rpq} \\ V_{rpq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{r'p'q'xi} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (31)$$

通过矩量法求解方程式(31),即可得到屏蔽体内部任一点的场强分布。

2 仿真结果及讨论

为了研究带有孔缝金属腔体的屏蔽效能,本文以一个典型的金属机箱外壳为研究对象,其尺寸为 $30\text{ cm} \times 12\text{ cm} \times 30\text{ cm}$ 。孔缝开在 $z=0$ 平面上的中心位置处,机箱壁采用理想导体材料,假设其厚度为0,机箱内外的空气都当作理想状态来考虑。本节对该算法进行验证,并讨论入射波不同极化方向、测试点不同位置和相同面积但不同形状孔缝对屏蔽效能的影响。

2.1 算法验证

为了验证该算法的准确性和计算效率,在本文中,选择平面波正对孔缝所在壁面垂直入射,其电场极化方向平行于矩形缝隙的短边,即垂直极化。孔缝尺寸为 $10\text{ cm} \times 0.5\text{ cm}$,测试点在该屏蔽腔体中心,其仿真结果与文献[16]中的仿真和测试结果进行了对比,如图3所示,吻合良好。

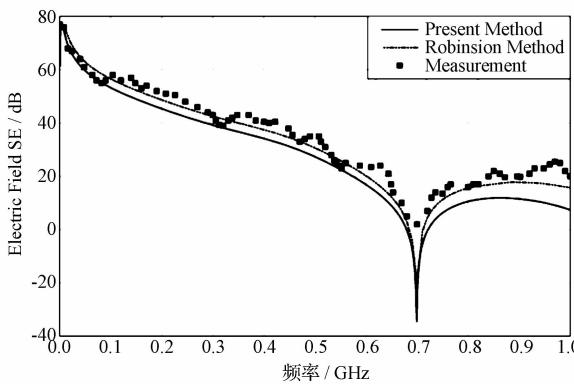


图2 矩形屏蔽体中心处屏蔽效能仿真与测试结果图

2.2 入射波极化方向对屏蔽效能的影响

为了验证入射波极化方向在矩形屏蔽体中心处对屏蔽效能的影响,本文选取入射波两种极端情况,即垂直极化和水平极化(即入射平面波的电场

极化方向垂直于矩形缝隙的短边)。图3显示了孔缝尺寸为 $10\text{ cm} \times 0.5\text{ cm}$ 时,两种极化方向对矩形屏蔽体屏蔽效能的影响。显然,当入射波为垂直极化时,屏蔽体的屏蔽效能劣于水平极化时的屏蔽效能,因此可以得出一个结论:当屏蔽体上的孔缝为矩形且入射波的电场极化方向平行于矩形缝隙的短边时,对应于该极化方向的屏蔽体屏蔽效能是所有极化方向中最差的。

2.3 屏蔽体内不同位置处的屏蔽效能分析

对于屏蔽体内的不同点,其屏蔽效能也有不同。以上述金属屏蔽体为例,孔缝尺寸为 $10\text{ cm} \times 0.5\text{ cm}$,入射波为垂直极化和水平极化,在金属屏蔽体内的中心 z 轴上均匀设有3个不同的测试点,仿真结果如图3所示。当入射波为垂直极化时,频率低于主谐振频率时(即图3中所示的700 MHz左右),测试点距离缝隙越近,该点的耦合场越强,屏蔽效能越差,当频率高于主谐振频率时,由于高次模影响以及电磁波在腔体内的谐振与反射,该结论不成立。因此可以把屏蔽体中在低频段工作的敏感器件或设备尽可能地安装在离孔缝相对较远的位置,以达到提高电子设备电磁兼容性的目的。当入射波为水平极化时,屏蔽效能变化不大,而且没有明显的规律性。

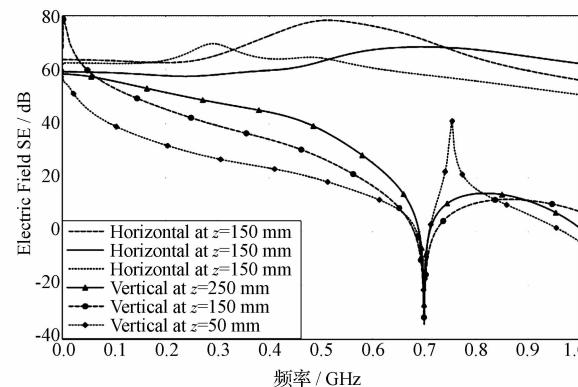


图3 不同极化方向时的带孔缝矩形屏蔽体中心处的屏蔽效能

2.4 相同面积不同形状孔缝对屏蔽效能的影响

为了验证金属屏蔽体上的孔缝形状对屏蔽效能的影响,选择垂直极化的平面波正对孔缝入射,并分别选取尺寸为 $10\text{ cm} \times 0.5\text{ cm}$, $2.23\text{ cm} \times 2.23\text{ cm}$

cm 和 $5.0\text{ cm} \times 1.0\text{ cm}$ 面积相同但形状不同的孔缝。测试点在该屏蔽体中心,从如图 4 所示的仿真结果可以看出:在孔缝面积相同的情况下,正方形孔缝的屏蔽效能要优于矩形孔缝的屏蔽效能,而且不同长宽比例孔缝的屏蔽效能也不同。因此在实际设计屏蔽体时,考虑用正方形孔缝替代矩形孔缝来提高屏蔽效能。

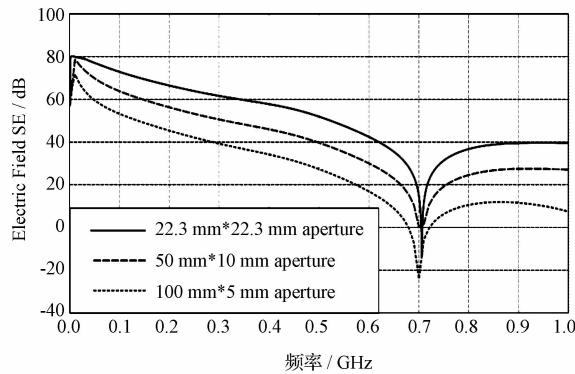


图 4 具有不同形状孔缝的矩形腔体屏蔽效能

3 结论

本文应用基于全域基函数表示缝隙场技术的矩量法分析计算矩形屏蔽体的屏蔽效能,而且考虑了孔缝的形状、入射波极化方向、屏蔽体内不同计算点等因素对屏蔽效能的影响。通过对经典孔缝电磁耦合模型的数值仿真,得出的结论与已有文献和实验结果吻合良好,验证了该算法的准确性和计算效率。结果表明:通过数值仿真得出的规律性结论有利于指导屏蔽体孔缝形状的设计以及敏感器件和设备的合理布局,因此屏蔽效能的仿真分析在航空电子系统防护高强度辐射场的工作中具有重要的指导意义。

参 考 文 献

- Wang J, Koh W J. Electromagnetic coupling analysis of transient signal through slots or apertures perforated in a shielding metallic enclosure using FDTD methodology. *Progress In Electromagnetics Research*, PIER, 2002; 36, 247—264
- Li M, Nuebel J, Drewniak J L, et al. EMI from cavity modes of shielding enclosures—FDTD modeling and measurements. *IEEE Trans Electromagn Compat*, 2000; 42(1):29—38
- Lei J Z, Liang C H, Zhang Y. Study on shielding effectiveness of metallic cavities with apertures by combining parallel FDTD method with windowing technique. *Progress In Electromagnetics Research*, PIER, 2007; 74, 82—112
- Benhassine S, Pichon L, Tabbara W. An efficient finite – element time – domain method for the analysis of the coupling between wave and shielded enclosure. *IEEE Trans Magn*, 2002; 38(2): 709—712
- Carpes W P, Jr, Pinchon L, Razek A. Analysis of the coupling of an incident wave with a wire inside a cavity using an FEM in frequency and time domains. *IEEE Trans Electromagn Compat*, 2002; 44(3): 470—475
- Edrisi M, Khodabakhshian A. Simple methodology for electric and magnetic shielding effectiveness computation of enclosures for electromagnetic compatibility use. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 2006; 20(8): 1051—1060
- Ojeda X, Pichon L. Combining the finite element method and Padé approximation for scattering analysis application to radiated electromagnetic compatibility problems. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 2005; 19(10): 1375—1390
- Wallyn W, De Zutter D, Rogier H. Prediction of the shielding and resonant behavior of multisection enclosures based on magnetic current modeling. *IEEE Trans Electromagn Compat*, 2002; 44 (1): 130—138
- Wu G, Zhang X G, Song Z Q, et al. Analysis on Shielding Performance of Metallic Rectangular Cascaded Enclosure with Apertures. *Progress In Electromagnetics Research Letters*, 2011; 20: 185 — 195
- Yla-Oijala P, Taskinen M, Sarvas J. Surface integral equation method for general composite metallic and dielectric structures with junctions. *Progress In Electromagnetics Research*, PIER, 2005; 52, 81—108
- Matsushima A, Nakamura Y, Tomino S. Application of integral equation method to metal-plate lens structures. *Progress In Electromagnetics Research*, PIER, 2005; 54, 245—262
- Nie X C, Yuan N. Accurate modeling of monopole antennas in shielded enclosures with apertures. *Progress In Electromagnetics Research*, PIER, 2008; 79, 251—262
- Wei X C, Li E P, Liang C H. Fast solution for large scale electromagnetic scattering problems using wavelet transform and its precondition. *Progress In Electromagnetics Research*, PIER, 2002; 38, 253—267
- Podlozny V, Christopoulos C, Paul J. Efficient description of fine features using digital filters in time domain computational electromagnetics. *IET Sci Meas Technol*, 2002; 149 (5): 254—257
- Attari R, Barkeshli K. Application of the transmission line matrix method to the calculation of the shielding effectiveness for metallic enclosures. in Proc. IEEE Antennas Propagation Soc Int Symp, 2002;

- 3: 302—305
- 16 Robinson M P, Benson T M, Christopoulos C, et al. Analytical formulation for the shielding effectiveness of enclosures with apertures. IEEE Trans Electromagn Compat, 1998;40(3): 240—248
- 17 Electromagnetic field penetration studies (NASA/CR - 2000 - 210 297), M. D. Deshpande. (2000, Jun.). [Online]. Available: <http://techre-ports.larc.nasa.gov/ltrs/PDF/2000/cr/NASA-2000-cr210-297.pdf>. 2000

Influence of Apertures in the Avionics Cabin on Electromagnetic Shielding Effectiveness

ZHOU Chao, PENG Wei-dong, HE Jian, HU Yan, GAO Li-xia, LIU Ying

(Aviation Engineering Institute, Civil Aviation Flight University of China, CAFUC, Guanghan, 618307, P. R. China)

[Abstract] Electric field shielding effectiveness of metallic enclosure with apertures when illuminated by different polarization plane wave have been studied by using modal method of moment technique. Electric field shielding effectiveness of enclosure with different shape apertures and same area has been calculated at different points inside the enclosure. To achieve this, assuming appropriate electric field distribution on the aperture, fields inside the cavity are determined using rectangular cavity Green's function. Electromagnetic fields outside the cavity and scattered due to the aperture are obtained using the free space Green's function. Matching the tangential magnetic field across the apertures, the integral equation with aperture fields as unknown variables is obtained. A very good agreement among the results of the proposed technique, results available in the literature and experimental results is observed. The results also show that the electric field shielding effectiveness is seriously affected by calculation points, the shape of apertures and polarization of the illuminating field.

[Key words] rectangular enclosure single aperture shielding effectiveness (SE) MoM Green's function