

BLT 方程在箱体屏蔽效能分析中的应用

赵蒙, 达新宇, 张亚普, 王舒

(空军工程大学信息与导航学院, 陕西西安, 710077)

摘要 根据 Robinson 算法和电磁拓扑理论, 提出了一种基于 BLT 方程的有孔箱体屏蔽效能分析方法, 介绍了 BLT 方程的基本原理, 推导出了描述孔缝耦合的 BLT 方程, 建立了屏蔽箱体、孔缝、入射波等参数与屏蔽效能的函数关系, 并扩展到偏心孔以及任意极化角的情形, 分析了孔缝形状、尺寸以及观测点位置等对屏蔽效能的影响。在 0~1 GHz 范围, 对中心开孔箱体的屏蔽效能进行仿真, 并与 CST 仿真结果进行对比, 验证了方法有效性, 数值计算结果表明: 文中算法不仅能够准确的描述出箱体屏蔽效能随入射波频率的变化关系, 而且能有效地估算出屏蔽箱体的谐振频率。

关键词 屏蔽效能; BLT 方程; 电磁拓扑; 孔缝; CST

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2014.05.012

中图分类号 TM15; TN011 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2014)05-0051-06

The Application of BLT Equation to Analyzing Shielding Effectiveness of Enclosure with Aperture

ZHAO Meng, DA Xin-yu, ZHANG Ya-pu, WANG Shu

(Information and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

Abstract: According to Equivalent Circuit Model and Electromagnetic Topology Theory, a method of evaluating the shielding effectiveness(SE) based on BLT equation is proposed, and the basic principle of BLT equation is introduced, the BLT equation of cavity-seam coupling described is derived, the function relationship between SE and related parameters such as enclosure dimensions, aperture dimensions is not only built up, but also can be used in an extension situation including off-centre aperture and arbitrary polarization direction. The effect of the aperture shape, aperture area, and the test point on SE are also analyzed. The SE of single aperture is simulated within a frequency domain from 0 GHz to 1 GHz, compared with the CST results. The results indicate that the relationship between SE and the frequency of incident wave can not only be described accurately by this method, but also can the resonant frequency of the shielding enclosure be estimated effectively.

Key words: shielding effectiveness; Baum-Liu-Tesche equation; Electromagnetic Topology Theory; aperture; CST

屏蔽箱体作为电子系统防护措施的重要组成部分, 可屏蔽大部分空间电磁能量。尽管无缝金属板

对电磁波具有非常高的电磁屏蔽效能, 然而实际应用中, 由于通风、散热等原因屏蔽箱体不可避免地存

收稿日期: 2014-03-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61271250)

作者简介: 赵蒙(1989-), 男, 陕西商洛人, 硕士生, 主要从事电磁防护技术研究. E-mail: zhaomengcom@126.com

引用格式: 赵蒙, 达新宇, 张亚普, 等. BLT 方程在箱体屏蔽效能分析中的应用[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2014, 15(5): 51-56. ZHAO Meng, DA Xinyu, ZHANG Yapu, et al. The Application of BLT Equation to Analyzing Shielding Effectiveness of Enclosure with Aperture [J]. Journal of air force engineering university: natural science edition, 2014, 15(5): 51-56.

在孔缝,从而使得箱体的完整性受到破坏。因此,如何有效的估算有孔屏蔽箱体的屏蔽效能具有重要的理论指导意义和实际的应用价值^[1-4]。

有孔屏蔽箱体电磁屏蔽效能的研究分析一直是电磁防护领域内的研究热点之一。目前,研究方法主要分为 2 类。一类是数值方法,主要包括矩量法^[5]、传输线矩阵法^[6]、时域有限差分法^[7]等。虽然这类方法的计算精度高,但是计算过程复杂、效率低下,因而在实际工程中难以应用和推广;另一类是解析方法,主要包括等效传输线法。Robinson^[8]提出的传输线法将场的问题转换为电路模型,虽然计算精度比数值方法略差,但是计算简便、高效,应用性更强,并且可以明确的给出箱体屏蔽效能与孔缝参数的解析表达式,并且在一定条件下,可得到与实验一致的结果,因而在实际工程中应用比较广泛。等效传输线法研究的问题仅限于中心孔和单一模式情况,并且没有考虑腔体内场的过孔辐射效应,不能直接反应孔缝电磁耦合过程。近年来,大多数文献在屏蔽效能的研究中都以 Robinson 等效传输模型为基础,对解析式的扩展和补充,而很少有学者利用电磁拓扑理论去研究此问题。

1 理论计算

1.1 等效电路模型

图 1 为一平面电磁波照射到长、宽、高分别为 $a \times b \times d$ 的矩形屏蔽腔体上,其中长为 L_a 宽为 w_a 的孔缝位于入射面板中心位置。一般将矩形金属箱体除过开孔面以外部分等效为终端短路的矩形波导^[9-11]。根据电磁拓扑理论以及 Robinson 算法,可将孔缝及其所在平面等效为二端口网络 T_1 ,将观测点 J_3 等效为二端口网络 T_2 ,自由空间等效成特性阻抗为 Z_0 、传播常数为 k_0 的传输线,孔缝等效成特性阻抗为 Z_{os} 终端短路的共面传输线,孔后箱体等效为特性阻抗 Z_g 、传播常数为 k_g 的短路矩形波导,其等效电路模型见图 2。

图 2 中,电压源 V_0 表示辐射源,自由空间波阻抗 $Z_0=377 \Omega$,传播常数 $k_0=2\pi/\lambda$ 。孔缝等效传输线的有效宽度为:

$$W_e = W_a - \frac{5t}{4\pi} \left(1 + \ln \frac{4\pi W_a}{t} \right) \quad (1)$$

式中 t 为箱体的厚度,孔缝的特性阻抗为^[12]:

$$Z_{os} = 120\pi \frac{K(W_e/b)}{K'(W_e/b)} \quad (2)$$

当 $W_e \ll b/\sqrt{2}$ 时:

$$Z_{os} = 120\pi^2 \left[\ln \left(2 \frac{1 + \sqrt{1 - (W_e/b)^2}}{1 - \sqrt{1 - (W_e/b)^2}} \right) \right]^{-1} \quad (3)$$

孔缝等效阻抗为:

$$Z_a = \frac{1}{2} \frac{L_a}{a} Z_{os} \frac{Z_x + jZ_{os} \tan(k_0 L_a/2)}{Z_{os} + jZ_x \tan(k_0 L_a/2)} \quad (4)$$

式中 Z_x 为箱体阻抗,文献[9、11]都将箱体近似为理想导体,因而 $Z_x=0$ 。而实际上箱体的阻抗是由箱体壁的材料决定的,即:

$$Z_x = (1 + j) \sqrt{\pi f \mu / \sigma} \quad (5)$$

式中 μ 、 σ 分别为箱体材料的磁导率和电导率。

对于箱体中传播的 TE_{10} 模,矩形波导的传播常数和特性阻抗分别为:

$$k_g = k_0 \sqrt{1 - (\lambda/2a)^2} \quad (6)$$

$$Z_g = Z_0 / \sqrt{1 - (\lambda/2a)^2} \quad (7)$$

考虑多模的影响则:

$$k_g = k_0 \sqrt{1 - (m\lambda/2a)^2 - (n\lambda/2b)^2} \quad (8)$$

$$Z_g = Z_0 / \sqrt{1 - (m\lambda/2a)^2 - (n\lambda/2b)^2} \quad (9)$$

式中 λ 为自由空间的波长; m 、 n 为矩形波导中的传播模式。

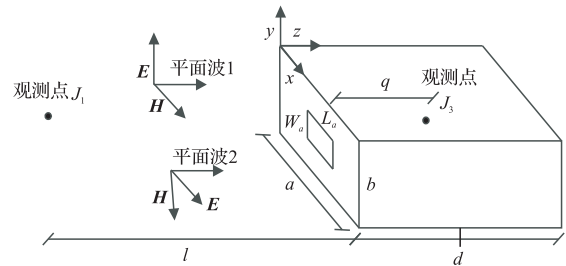


图 1 平面波入射有孔矩形腔体

Fig.1 Rectangular cavity with aperture irradiated by plane wave

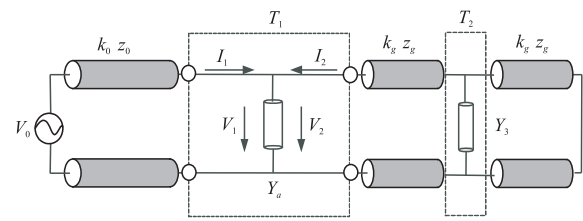


图 2 等效电路模型

Fig.2 Equivalent circuit model

1.2 BLT 方程的建立与求解

电磁拓扑理论 (Electromagnetic Topology Theory, EMT) 由 Baum.C.E.1974 年首次提出,随后 Baum.C.E.同 Liu.T.K.和 Tesche.F.M.一起提出了用于分析复杂电磁干扰问题著名的 BLT(Baum-Liu-Tesche,BLT)方程。经过 30 多年的研究和应用,BLT 方程以及电磁拓扑理论日趋完善,并且成功应用于分析研究外场对电子系统的耦合效应。

BLT 方程的基本形式具有通用性,在使用过程中只需求解对应模型的参数,代入方程即可^[13-16]。

基于电磁拓扑理论,可得图 2 等效电路模型 的信号流图,见图 3。Tube1 表示自由空间,Tube2 和 Tube3 表示矩形腔体, J_1 为箱体外观测节点, J_2 为孔节点, J_3 为箱体内观测节点, J_4 为矩形腔体末节点, W_s 为平面波激励, $V_{i,j}^{inc}$ 、 $V_{i,j}^{ref}$ 分别为管道 i 上 j 节点的入射和反射电压波。

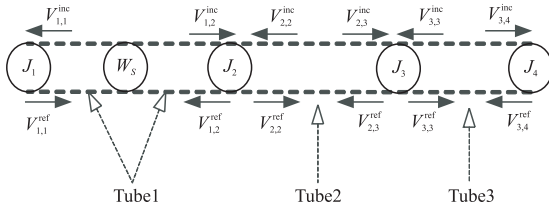


图 3 电路模型的信号流图

Fig.3 The signal flow graph for circuit model

BLT 方程的基本形式为:

$$\mathbf{V}^{ref} = \mathbf{P} \cdot \mathbf{V}^{inc} - \mathbf{V} \quad (10)$$

$$\mathbf{V}^{ref} = \mathbf{S} \cdot \mathbf{V}^{inc} \quad (11)$$

$$\mathbf{V} = \mathbf{V}^{ref} + \mathbf{V}^{inc} \quad (12)$$

式(10)为传输方程,式(11)为散射方程,式(12)为电压方程; \mathbf{V}^{inc} 、 \mathbf{V}^{ref} 分别为入射电压波和反射波向量; \mathbf{P} 为传输矩阵,表示传输网络中各管道的传输关系; \mathbf{V} 为激励源向量; \mathbf{S} 为散射矩阵,表示各节点的散射关系,由各节点的散射矩阵 \mathbf{S} 确定。

根据微波电路理论以及图 2 等效电路模型可得到二端口网络 T_1 、 T_2 的散射矩阵分别为:

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} \frac{Y_0 - Y_g - Y_a}{Y_0 + Y_g + Y_a} & \frac{2Y_g}{Y_0 + Y_g + Y_a} \\ \frac{2Y_0}{Y_0 + Y_g + Y_a} & \frac{Y_g - Y_0 - Y_a}{Y_0 + Y_g + Y_a} \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\mathbf{S}' = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

式中 Y_0 、 Y_g 、 Y_a 分别为自由空间、矩形波导、孔缝的特性导纳。

由等效电路模型的信号流图可得传输矩阵:

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} 0 & e^{jk_0 l} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ e^{jk_0 l} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e^{jk_g q} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & e^{jk_g q} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & e^{jk_g(d-q)} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & e^{jk_g(d-q)} & 0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

散射矩阵:

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & S'_{11} & S'_{12} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & S'_{21} & S'_{22} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S'_{11} & S'_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S'_{21} & S'_{22} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

分别将传输矩阵 \mathbf{P} 、散射矩阵 \mathbf{S} 带入式(10)、式(11),联合式(12)可得 BLT 电压方程的解为:

$$\begin{bmatrix} V_{1,1} \\ V_{1,2} \\ V_{2,2} \\ V_{2,3} \\ V_{3,3} \\ V_{3,4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 + S'_{11} & S'_{12} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & S'_{21} & 1 + S'_{22} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 + S'_{11} & S'_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S'_{21} & 1 + S'_{22} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ e^{jk_0 l} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$\begin{bmatrix} 0 & e^{jk_0 l} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ e^{jk_0 l} & -S'_{11} & -S'_{12} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -S'_{21} & -S'_{22} & e^{jk_g p} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & e^{jk_g p} & -S'_{11} & -S'_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -S'_{21} & -S'_{22} & e^{jk_g(d-p)} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & e^{jk_g(d-p)} & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} V_0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

式中 $V_{i,j} = V_{i,j}^{ref} + V_{i,j}^{inc}$ 为管道(Tube) i 上 j 节点的总电压。

由式(15)~(17)可得观测点 J_3 节点的电压 $V_J = V_{2,3} + V_{3,3}$,对于矩形波导中的多种传播模式则 J_3 观测点的总电压为:

$$V_{Total} = \sum_{m,n} V_J \quad (18)$$

屏蔽效能是衡量箱体电磁防护能力的重要指标,根据定义可得箱体观测点的屏蔽效能为:

$$SE = -20 \lg |V_{Total}/V_0| \quad (19)$$

1.3 公式扩展

对于孔缝不在屏蔽箱体入射面中心位置的情况,见图 4,其中 X 、 Y 分别为孔缝中心 x 、 y 坐标, x_0 、 y_0 为孔缝的边界坐标。

根据孔缝处场的连续性引入偏心系数^[1]:

$$C_{mn} = \int_{x_0}^{x_0+l_a} \int_{y_0}^{y_0+w_a} \frac{\cos(n\pi y)}{b} \frac{\cos(n\pi(y-y_0))}{w_a} \frac{\sin(m\pi x)}{a} \frac{\sin(m\pi(x-x_0))}{l_a} dx dy / XY \quad (20)$$

可得偏心孔缝的等效阻抗为:

$$Z'_a = \frac{1}{2} C_{m,n} Z_{0S} \frac{Z_x + jZ_{0S} \tan(k_0 L_a / 2)}{Z_{0S} + jZ_x \tan(k_0 L_a / 2)} \quad (21)$$

图 1 中若入射电场 E 与 y 轴夹角为 θ ,则可以将入射电场 E 分解为图 1 中的平面波 1 和平面波 2,即 $E_y = E \cos \theta$ 、 $E_x = E \sin \theta$ 。与之相对应,可将 V_0 分解为 $V_{0y} = V_0 \cos \theta$ 和 $V_{0x} = V_0 \sin \theta$ 。对于 V_{0y}

和 V_{0x} 应用式(15)~(18)可得 J_3 观测点 y 、 x 方向的电压分量 V_{Jy} 和 V_{Jx} , 最终可得到 J_3 观测点的电压为 $V_J = \sqrt{V_{0y}^2 + V_{0x}^2}$ 。

若要观察箱体内部任意一点的电压, 考虑多模的影响, 则箱体内部任意点 (P_x, P_y, P_z) 的电压:

$$V_{Total} = \sum_{m, n} V_J \sin(m\pi p_x/a) \cos(n\pi p_y/b) \quad (22)$$

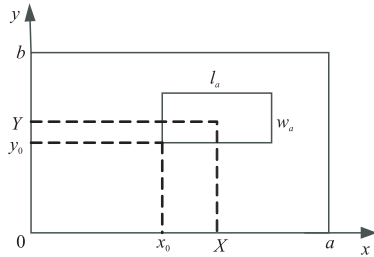


图 4 偏心孔缝示意图

Fig.4 Sketch map of offer-center aperture

2 算法验证与仿真分析

为验证本文算法的准确性, 仿真实验中如果不特殊说明, 本文所采用屏蔽箱体的尺寸 $a \times b \times d$ 均为 $300 \text{ mm} \times 200 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$, 箱体中心点坐标 $(150, 100, 150)$, 箱体壁厚度为 $t = 1.5 \text{ mm}$, 入射平面波以图 1 中的平面波 1 垂直入射, 入射平面波幅值为 $V_0 = 1 \text{ V/m}$, 观测点 J_1 距孔缝的距离为 $l = 400 \text{ mm}$ 。

2.1 算法验证

长为 $L_a = 120 \text{ mm}$ 、宽为 $W_a = 30 \text{ mm}$ 的孔缝位于屏蔽箱体入射面的中心位置, 2 个观测点的坐标分别为 $(150, 100, 150)$ 和 $(150, 100, 100)$, 即 $q_1 = 150 \text{ mm}$, $q_2 = 100 \text{ mm}$ 。图 5 为箱体中心点 $(150, 100, 150)$ 的屏蔽效能曲线, 图 6 为箱体内部 $(150, 100, 100)$ 点的屏蔽效能曲线。

对比图 5 中本文算法与专业电磁仿真软件 CST 仿真结果: 本文算法仿真结果与 CST 仿真结果吻合良好, 由图 6 可得到相同的结论, 经与 CST 仿真结果对比验证了本文算法的有效性。由图 5 和图 6 可知, 在 700 MHz 附近箱体内部出现共振现象, 根据矩形波导腔体的谐振频率计算公式:

$$f_{mn} = \frac{c}{2} \sqrt{(m/a)^2 + (n/b)^2 + (p/d)^2} \quad (23)$$

式中: c 为电磁波在空气中的传播速度; m, n, p 表示矩形波导中传播模式。经计算可得箱体在 1 GHz 范围内的谐振点为 707 MHz (TE_{101} 模)。图 5、6 中 CST 仿真软件计算出箱体的谐振频率为 704 MHz , 本文算法利用孔缝的散射矩阵描述箱体内外场关系, 散射矩阵既包含了外部电磁场的孔缝耦合效应,

又包含了箱体内部场的过孔辐射效应, 计算出箱体的谐振频率为 701 MHz , 已经非常接近箱体谐振频率的真实值。虽然本文算法对谐振频率的估算结果略微差于 CST 的计算结果, 但是计算速度却远远快于 CST。由此可见, 本文算法不仅能够较为快速、准确的描述出箱体屏蔽效能随入射波频率的变化关系, 而且还能有效地估算出箱体内部测试点处的谐振频率。

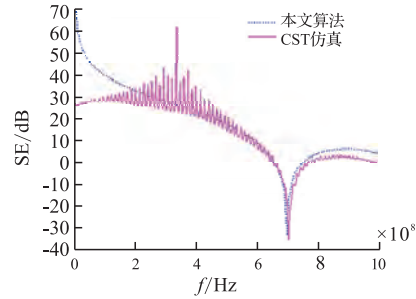


图 5 (150, 100, 150) 点的屏蔽效能

Fig.5 Calculated SE at (150, 100, 150) point

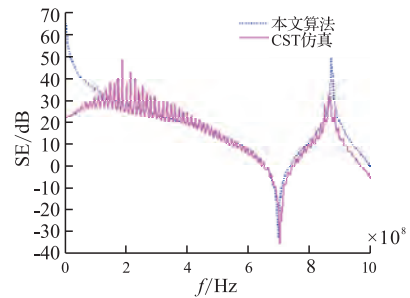


图 6 (150, 100, 100) 点的屏蔽效能

Fig.6 Calculated SE at (150, 100, 100) point

2.2 仿真分析

本小节利用本文算法, 对中心开孔箱体内部观测点的屏蔽效能进行了分析研究。

2.2.1 不同开孔形状的屏蔽效能

为了研究孔缝的形状对屏蔽效能的影响, 在开孔面积相同的情况下, 分别取尺寸为 $120 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ 、 $90 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ 的长方形孔和 $60 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$ 的正方形孔, 测试点为箱体中心点 $(150, 100, 150)$, 仿真结果见图 7。

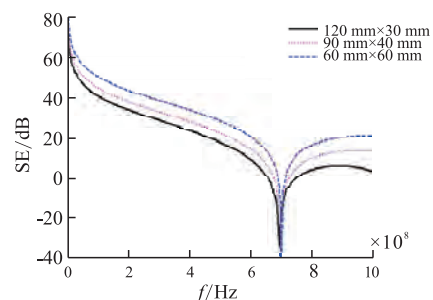


图 7 不同形状孔缝的屏蔽效能

Fig.7 Calculated SE of different aperture shape

从仿真结果中可以得出: 开孔面积相同的情况

下,孔缝与入射平面波的电场极化方向相垂直边的边长越长,则箱体的屏蔽效能越差。因此为了提高箱体的屏蔽效能,在实际工程中,应尽量减小开孔与电场极化方向相垂直边的边长。

2.2.2 箱体内部不同位置的屏蔽效能

为了研究孔阵箱体内部不同位置处的屏蔽效能,选择长为 $L_a = 100$ mm、宽为 $W_a = 5$ mm 的孔缝,在箱体的中心轴上选取 3 个不同的测试点 (150, 100, 90)、(150, 100, 150)、(150, 100, 210), 仿真结果见图 8。从仿真结果中可以得出:在 0~700 MHz 范围内,即谐振频率以下时,测试点距离孔缝越近,则该点的电场越强,因此屏蔽效能越差;在 700~1 000 MHz 范围内,由于受到箱体内部多种传播模式的影响,不同测试点的屏蔽效能没有明显变化规律。因而,为了提高箱体电磁防护水平,应该尽量将工作在较低频率内的电磁敏感器件,以及重要电路模块安置在距离孔缝相对远的位置。

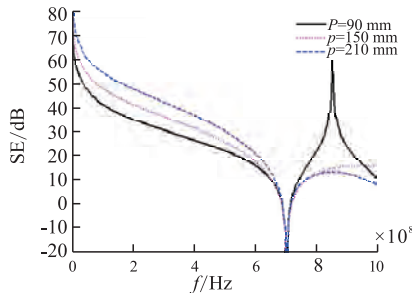


图 8 不同测试点的屏蔽效能

Fig.8 Calculated SE of different test point

2.2.3 不同尺寸孔缝的屏蔽效能

为了研究孔缝尺寸对屏蔽效能的影响,在开孔形状相同的条件下,分别取 20 mm × 20 mm、30 mm × 30 mm 以及 40 mm × 40 mm 的正方形孔缝,测试点为箱体中心点 (150, 100, 150), 仿真结果见图 9。

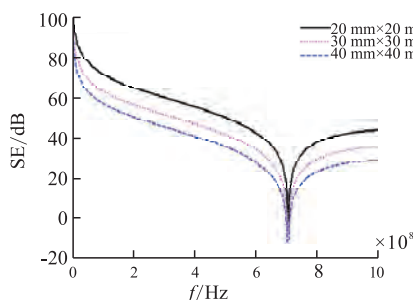


图 9 不同开孔面积的屏蔽效能

Fig.9 Calculated SE of different aperture area

从仿真结果中可以得出:在开孔形状相同的情况下,开孔面积越大,经过孔缝耦合进入箱体的电场强度越强,箱体的屏蔽效能随着开孔面积的增加而减小。因而在设计屏蔽箱体散热,通风等开孔时应综合考虑,避免重复开过多的开孔,以提高箱体的电

磁屏蔽效能。

3 结语

本文基于 Robinson 等效电路模型和电磁拓扑理论,利用 BLT 方程推导出计算箱体屏蔽效能的解析表达式,并对公式进行了进一步的扩展,考虑了高次模、任意极化角、偏心孔缝、任意观测位置等情况,因而适用范围更广。除此之外,该方法继承了 Robinson 算法便捷、高效的特点,并建立了屏蔽箱体、孔缝、入射波等参数与屏蔽效能的函数关系。在明确箱体等参数的情况下只需修改 Matlab 程序中的参数设置便可以得到箱体的屏蔽效能,而避免了运用 CST 软件建立模型、设置激励、添加边界条件等繁琐复杂操作,在实际的工程应用方面具有一定的参考价值,实用性强。通过仿真分析得出了有孔箱体屏蔽效能的一些规律,希望能够为电磁防护产品的生产和设计提供一些理论指导。

参考文献(References):

- [1] 石丹. 平面波斜入射到有孔腔体的屏蔽效能分析[J]. 电波科学学报, 2011, 26(4): 678-682.
SHI Dan. Shielding effectiveness analysis of enclosure with aperture irradiated by oblique incident plane wave[J]. Chinese Journal of radio science, 2011, 26(4): 678-682. (in Chinese)
- [2] 李永明, 郑春旭, 郝战铎, 等. 有孔箱体屏蔽效能的多模传输线法分析[J]. 重庆大学学报, 2011, 34(10): 27-31.
LI Yongming, ZHENG Chunxu, HAO Zhando, et al. Analysis of a multimode transmission line model of the shielding effectiveness of enclosures with apertures [J]. Journal of Chongqing university, 2011, 34(10): 27-31. (in Chinese)
- [3] Jong joo Shim, Dong Gun Kam, Jong Hwa Kwon, et al. Circuit modeling and measurement of shielding effectiveness against oblique incident plane wave on apertures in multiple sides of rectangular enclosure[J]. IEEE transactions on electromagnetic compatibility, 2010, 52(3): 566-577.
- [4] 吴刚, 张新刚, 刘波. 有孔矩形金属腔体屏蔽效能的估算[J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(3): 743-748.
WU Gang, ZHANG Xingang, LIU Bo. Prediction for shielding effectiveness of rectangular metallic enclosure with aperture[J]. High power laser and particle beams, 2011, 23(3): 743-748. (in Chinese)
- [5] Araneo R, Lovat G. Fast MoM analysis of the shielding effectiveness of rectangular enclosures with apertures, metal plates, and conducting objects[J]. IEEE trans on electromagnetic compat, 2009, 51(2): 274 - 283.
- [6] Walter P Carpes Jr, Golberis S. Ferreira, et al. TLM and FEM methods applied in the analysis of electromagnetic coupling [J]. IEEE transactions on magnetic, 2000, 36(4): 982-985.

(下转第 61 页)

- [7] Cheng-Nan C, Wen-Yi W. A dual-frequency miniaturized element FSS with closely located resonances[J]. *Anten and wire propag lett*, 2013, 12: 163-165.
- [8] Feresidis A P, Vardaxoglou J C. High gain planar antenna using optimized partially reflective surfaces[J]. *IEEE proc microw antennas propag*, 2001, 148(6): 345-350.
- [9] Andrew R W, Trevor S B, Guo Y J. A reconfigurable high-gain partially reflecting surface antenna[J]. *IEEE trans on anten and propag*, 2008, 56(11): 3382-3390.
- [10] Yuehe G, Karu P E, Trevor S B. The use of simple thin partially reflective surfaces with positive reflection phase gradients to design wideband, low-profile EGB resonator antennas[J]. *IEEE trans anten and propag*, 2012, 60(2): 743-750.
- [11] 袁子东, 高军, 曹祥玉, 等. 基于双层 FSS 的 X 波段高增益微带天线[J]. *微波学报*, 2013, 21(29): 55-59.
YUAN Zidong, GAO Jun, CAO Xiangyu, et al. A X-band high-gain microstrip antenna based on FSS[J]. *Journal of microwaves*, 2013, 21(29): 55-59. (in Chinese)
- [12] 杨倩, 李迎松, 杨晓冬, 等. 波导缝隙全向天线的设计与分析[J]. *应用科技*, 2010, 37(1): 19-22.
YANG Qian, LI Yingsong, YANG Xiaodong, et al. Design and analysis of wide wall slotted-waveguide array[J]. *Applied science and technology*, 2010, 37(1): 19-22. (in Chinese)
- [13] 邸英杰. 梯形单脊波导缝隙天线的研究与应用[D]. 西安: 西安电子科技大学, 1999.
DI Yingjie. Analysis of slot array in single-ridged trapezoidal waveguides and applications[D]. Xi'an: Xidian university, 1999. (in Chinese)
- [14] 陈亮, 党晓杰, 梁昌洪. EBG 结构在介质覆层波导缝隙相控阵中的应用[J]. *电波科学学报*, 2008, 23(1): 115-118.
CHEN Liang, DANG Xiaojie, LIANG Changhong. Application of EBG structures in waveguide end-solt phased arrays under a dielectric sheet[J]. *Chinese journal of radio science*, 2008, 23(1): 115-118. (in Chinese)
- [15] James J R, Kinany S J A, Peel P D, et al. Leaky-wave multiple dichroic beamformers[J]. *Electron lett*, 1989, 25: 1209-1211.
- [16] Boutayeb H K, Mahdjoubi, Tarot A C, et al. Directivity of an antenna embedded inside a fabry-perot cavity: analysis and design[J]. *Microwave opt tech lett*, 2006, 48(1): 12-17.
- [17] Boutayeb H K, Denidni T A, Nedil M. Bandwidth widening techniques for directive antennas based on partially reflecting surfaces[J]. *Progress in electromagnetics research*, 2007, 74: 407-419.

(编辑:徐楠楠)

(上接第 56 页)

- [7] Jiao C, Li L, Cui X, et al. Subcell FDTD analysis of shielding effectiveness of a thin-walled enclosure with an aperture[J]. *IEEE trans magn*, 2006, 42(4): 1075 - 1078.
- [8] Martin Paul Robinson, Trevor M Benson, Christos Christopoulos, et al. Analytical formulation for the shielding effectiveness of enclosures with apertures[J]. *IEEE trans electromagn. compat*, 1998, 40(3): 240-248.
- [9] 汪柳平, 高攸纲. 有孔矩形腔的屏蔽效能及其对谐振抑制研究[J]. *电波科学学报*, 2008, 23(3): 560-564.
WANG Liuping, GAO Yougang. Analysis of shielding effectiveness for rectangular cavity with apertures and resonance suppression[J]. *Chinese journal of radio science*, 2008, 23(3): 560-564. (in Chinese)
- [10] 石丹, 沈远茂, 高攸纲. 有孔屏蔽腔屏蔽效能的高次模式分析[J]. *电波科学学报*, 2009, 24(3): 510-513.
SHI Dan, SHEN Yuanmao, GAO Yougang. High-order modes analysis on shielding effectiveness of enclosure with off-center aperture[J]. *Chinese journal of radio science*, 2009, 24(3): 510-513. (in Chinese)
- [11] 路宏敏, 罗朋, 刘国强, 等. 有孔阵矩形机壳屏蔽效能研究[J]. *兵工学报*, 2009, 30(6): 695-700.
LU Hongmin, LUO Peng, LIU Guoqiang, et al. Shielding effectiveness of PCB loaded rectangular enclosure with circular aperture array[J]. *Acta armamentarii*, 2009, 21(1): 108-112. (in Chinese)
- [12] Shim Jong joo, Kam Dong Gun, Kwon Jong Hwa, et al. Circuit modeling and measurement of shielding effectiveness against oblique incident plane wave on apertures in multiple sides of rectangular enclosure[J]. *IEEE transactions on electromagnetic compatibility*, 2010, 52(3): 566-577.
- [13] 翁凌雯, 朱忠霞, 林竞羽, 等. 运用 BLT 方程研究高功率微波的电磁干扰[J]. *强激光与粒子束*, 2005, 17(8): 1272-1276.
WENG Lingwen, NIU Zhongxia, LIN Jingyu, et al. Application of BLT equation to electromagnetic interaction of high power microwave[J]. *High power laser and particle beams*, 2005, 17(8): 1272-1276. (in Chinese)
- [14] 安霆, 刘尚合. 基于 BLT 方程的电磁干扰建模[J]. *高电压技术*, 2007, 33(12): 55-58.
AN Ting, LIU Shanghe. Modeling for electromagnetic interaction by the BLT equation[J]. *High voltage engineering*, 2007, 33(12): 55-58. (in Chinese)
- [15] 鱼群, 王亚弟, 韩继红, 等. BLT 方程的时域扩展及其在微带线中的应用[J]. *系统工程与电子技术*, 2011, 33(11): 2372-2376.
YU Qun, WANG Yadi, HAN Jihong, et al. Development of the BLT equation in the time domain and its application in line[J]. *Systems engineering and electronics*, 2011, 33(11): 2372-2376. (in Chinese)
- [16] Baum C E. Including apertures and cavities in the BLT formalism[J]. *Electro magnetics*, 2005, 25(7-8): 623-635.

(编辑:徐楠楠)