

一种基于BLT方程的孔缝箱体屏蔽效能计算方法

罗静雯 杜平安 任丹 聂宝林

A BLT equation-based approach for calculating the shielding effectiveness of enclosures with apertures

Luo Jing-Wen Du Ping-An Ren Dan Nie Bao-Lin

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 010701 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.010701

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.010701>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I1>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于特征基函数的球面共形微带天线阵列分析

[Analysis on spherical conformal microstrip antenna array by characteristic basis function method](#)

物理学报.2014, 63(23): 230701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.230701>

一种考虑小孔尺寸效应的孔阵等效建模方法

[An equivalent approach to modeling aperture array with considering size effect of apertures](#)

物理学报.2014, 63(12): 120701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.120701>

球形压头与单晶铝材料纳米接触过程的多尺度分析

[Multi-scale analysis of nanoscale contact process between spherical indenter and single crystal aluminium](#)

物理学报.2013, 62(18): 180702 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.180702>

石墨烯等二维原子晶体薄片样品的光学衬度计算及其层数表征

[The numerical-aperture-dependent optical contrast and thickness determination of ultrathin flakes of two-dimensional atomic crystals: A case of graphene multilayers](#)

物理学报.2013, 62(11): 110702 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.110702>

温度梯度对晶粒生长行为影响的相场模拟

[Effect of temperature gradient on grain growth behavior from phase field simulations](#)

物理学报.2011, 60(10): 100701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.60.100701>

一种基于BLT方程的孔缝箱体屏蔽效能计算方法*

罗静雯 杜平安[†] 任丹 聂宝林

(电子科技大学机械电子工程学院, 成都 611731)

(2014年7月17日收到; 2014年8月20日收到修改稿)

本文基于等效电路法, 提出一种通过BLT方程计算带孔缝箱体屏蔽效能的方法, 可以快速准确计算任意入射、极化平面波照射箱体以及任意位置开孔和双面开孔箱体的屏蔽效能. 根据等效电路法求解出孔缝散射矩阵, 依据信号流图建立传播关系和散射关系方程, 并推导出包含孔缝耦合效应的广义BLT方程. 将BLT方程计算结果与等效电路法计算结果以及CST仿真做对比, 验证了方法的正确性. 与等效电路法相比, 在同一孔阻抗下, 孔缝散射矩阵包含箱体内外能量之间的相互耦合作用, 本方法计算结果精度更高, 能预测更多箱体谐振模式; 与CST仿真相比, 本方法占用时间和资源少, 可以对箱体参数进行规律性研究.

关键词: BLT方程, 孔缝散射矩阵, 等效电路法, 屏蔽效能

PACS: 07.05.Tp, 41.20.Gz, 41.90.+e

DOI: 10.7498/aps.64.010701

1 引言

随着电子科学与技术的发展, 电磁环境逐渐变得恶劣, 敏感设备越来越容易因电磁干扰导致性能降级或损坏, 因此对电子设备箱体屏蔽性能的要求越发严苛. 由于通风散热和信号线进出等需要, 箱体表面不可避免存在孔缝, 这使得孔缝箱体屏蔽效能的计算受到广泛重视和研究.

孔缝箱体屏蔽效能的计算方法有数值法和解析法. 数值法^[1-3]计算精度高, 但耗费资源多, 计算时间长, 对建模准确性要求极高; 解析法^[4-7]计算精确, 但能处理的模型有限. 解析法的代表是Bethe等^[8,9]的小孔衍射理论和Robinson等^[10]的等效电路法. 小孔衍射理论使用场的方法计算通过孔的辐射, 方法较复杂; 等效电路法使用路的方法, 算法简单, 但只能处理简单结构. 值得一提的是, 在孔缝耦合问题上王建国等^[11]给出了微波脉冲通过孔缝线性耦合进入腔体内的研究方法, 做了

理论、数值和实验方面的研究, 得出了任意腔体和孔缝的瞬态电磁波耦合问题的解决方法.

BLT方程自提出以来, 经众多学者的努力得到了重大发展^[12,13], 应用越来越广. 2005年, Baum^[14]推导出包含孔缝耦合问题的广义BLT方程, 该方程的关键在于孔缝散射矩阵的求解, 但孔缝散射矩阵的求解停留在理论层面. Xie等^[15]将时域BLT方程进一步拓展, 基于时域BLT方程研究了屏蔽线缆在非均匀场照射下的响应. Kang等^[12]使用BLT方程计算了垂直入射垂直极化下多孔箱体的屏蔽效能. 张亚普等^[16]基于等效电路法, 使用BLT方程计算了斜入射下开孔阵箱体的屏蔽效能. 本文基于BLT方程提出一种计算孔缝箱体屏蔽效能的方法, 可以快速、准确计算任意入射和极化的平面波照射箱体以及箱体任意位置开孔和双面开孔的屏蔽效能. 本方法的思路是: 首先将孔缝箱体进行电路模型等效, 再根据等效电路计算孔缝散射矩阵, 然后绘制系统的信号流图, 最终推导出广义BLT方程用于计算箱体屏蔽效能.

* 国家自然科学基金(批准号: 51175068)资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: dupingan@uestc.edu.cn

2 计算方法的理论推导

2.1 等效电路模型建立

计算模型见图1. 箱体为矩形, 侧面开矩形孔, 干扰源为垂直入射、垂直极化的平面波, 计算箱体内部中心点P的屏蔽效能. 根据Robinson等效电路法, 将箱体等效为一端短路的波导, 开孔等效为左右两端短路的共面带状传输线, 如图2所示. 其中入射波等效电压源为 V_0 , 阻抗为 Z_0 ; v_p 为P点的电压值; Z_{ap} 为孔的特性阻抗.

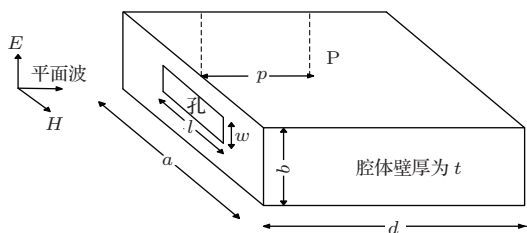


图1 平面波照射孔缝箱体计算模型

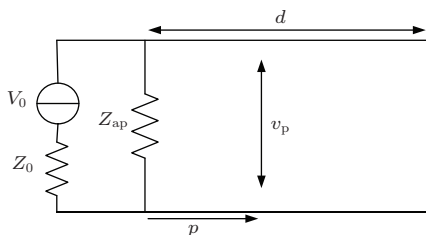


图2 孔缝箱体的等效电路模型

根据等效电路法得到孔的特性阻抗^[10] Z_{ap} 为

$$Z_{ap} = \frac{1}{2} \frac{l}{a} j Z_{0s} \tan \frac{k_0 l}{2}, \quad (1)$$

式中,

$$Z_{0s} = 120\pi^2 \left[\ln \left(2 \frac{1 + \sqrt{1 - (w_e/b)^2}}{1 - \sqrt{1 - (w_e/b)^2}} \right) \right]^{-1},$$

$$w_e = w - \frac{5t}{4\pi} \left(1 + \ln \frac{4\pi w}{t} \right),$$

k_0 为自由空间波数.

2.2 BLT方程建立

2.2.1 信号流图

根据图2电路模型, 绘制该模型的信号流图^[17]如图3所示. 节点 J_1 表示箱体外部监测点,

J_2 表示孔, J_3 表示箱体内部监测点, J_4 表示箱体尾端. W_s 表示等效电路中的源. 管道1表示箱体外部自由空间波传播, 管道2, 管道3表示箱体内部的波传播. V^{inc} 表示节点入射波, V^{ref} 表示节点反射波.

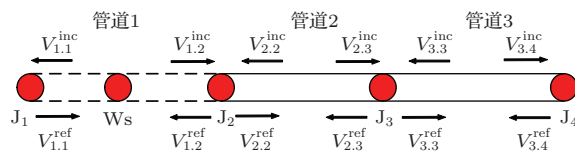


图3 信号流图

节点 J_2, J_3 的散射矩阵 S_1, S_2 分别为

$$S_1 = \begin{bmatrix} \frac{Y_0 - Y_g - Y_{ap}}{Y_0 + Y_g + Y_{ap}} & \frac{2Y_g}{Y_0 + Y_g + Y_{ap}} \\ \frac{2Y_0}{Y_0 + Y_g + Y_{ap}} & \frac{Y_g - Y_0 - Y_{ap}}{Y_0 + Y_g + Y_{ap}} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$S_2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中, Y_0, Y_g, Y_{ap} 分别为自由空间、传输线以及孔的导纳.

2.2.2 传播关系方程

根据波在自由空间和波导内部的传播特性, 可以得到系统的传播关系方程

$$\begin{bmatrix} V_{1,1}^{ref} \\ V_{1,2}^{ref} \\ V_{2,2}^{ref} \\ V_{2,3}^{ref} \\ V_{3,3}^{ref} \\ V_{3,4}^{ref} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & e^{\gamma_0 l_0} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ e^{\gamma_0 l_0} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e^{\gamma_g p} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & e^{\gamma_g p} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & e^{\gamma_g (d-p)} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & e^{\gamma_g (d-p)} & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} V_{1,1}^{inc} \\ V_{1,2}^{inc} \\ V_{2,2}^{inc} \\ V_{2,3}^{inc} \\ V_{3,3}^{inc} \\ V_{3,4}^{inc} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} V_0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中, l_0 为入射波与箱体的距离; $\gamma_0 = jk_0$, 自由空间传播常数;

$$\gamma_g = jk_g = jk_0 \sqrt{1 - (m\lambda/2a)^2 - (n\lambda/ab)^2},$$

为波导传播常数; m, n 表示波导中波的传播模式; 方程(4)中的6阶方阵即为传播矩阵 Γ .

2.2.3 散射关系方程

节点反射系数 ρ 的定义如下:

$$V^{\text{ref}} = \rho V^{\text{inc}}, \quad \rho = \frac{Z_L - Z_C}{Z_L + Z_C},$$

式中, Z_L 为负载阻抗, Z_C 为特性阻抗. 根据每个节点入射波与反射波的关系可以得到散射关系方程

$$\begin{bmatrix} V_{1,1}^{\text{ref}} \\ V_{1,2}^{\text{ref}} \\ V_{2,2}^{\text{ref}} \\ V_{2,3}^{\text{ref}} \\ V_{3,3}^{\text{ref}} \\ V_{3,4}^{\text{ref}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \rho_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & S_{11}^1 & S_{12}^1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & S_{21}^1 & S_{22}^1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{11}^2 & S_{12}^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{21}^2 & S_{22}^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \rho_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{1,1}^{\text{inc}} \\ V_{1,2}^{\text{inc}} \\ V_{2,2}^{\text{inc}} \\ V_{2,3}^{\text{inc}} \\ V_{3,3}^{\text{inc}} \\ V_{3,4}^{\text{inc}} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式中, ρ_1 为节点1的反射系数, $\rho_1 = 0$;

$$S_1 = \begin{bmatrix} S_{11}^1 & S_{12}^1 \\ S_{21}^1 & S_{22}^1 \end{bmatrix}, \quad S_2 = \begin{bmatrix} S_{11}^2 & S_{12}^2 \\ S_{21}^2 & S_{22}^2 \end{bmatrix};$$

ρ_4 为节点4的反射系数, $\rho_4 = -1$. 方程(5)中的6阶方阵即为散射矩阵 S .

2.2.4 广义BLT方程

定义节点处的合成电压波为 $V(x)$ 如下:

$$V(x) = V^{\text{inc}} + V^{\text{ref}}. \quad (6)$$

将(4)式和(5)式代入(6)式, 可得计算孔缝箱体屏蔽效能的广义BLT方程为

$$\begin{bmatrix} V_{1,1} \\ V_{1,2} \\ V_{2,2} \\ V_{2,3} \\ V_{3,3} \\ V_{3,4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + \rho_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 + S_{11}^1 & S_{12}^1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & S_{21}^1 & 1 + S_{22}^1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 + S_{11}^2 & S_{12}^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{21}^2 & 1 + S_{22}^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 + \rho_4 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} -\rho_1 & e^{\gamma_0 l_0} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ e^{\gamma_0 l_0} & -S_{11}^1 & -S_{12}^1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -S_{21}^1 & -S_{22}^1 & e^{\gamma_g p} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & e^{\gamma_g p} & -S_{11}^2 & -S_{12}^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -S_{21}^2 & -S_{22}^2 & e^{\gamma_g(d-p)} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & e^{\gamma_g(d-p)} & -\rho_4 \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} V_0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

$V_{3,3}$ 即为箱体内观测点P的电压值 V_P , $V_{P'}$ 为不存在箱体时观测点的电压值. 观测点屏蔽效能值为

$$SE = -20 \log(V_P/V_{P'}). \quad (8)$$

方程(7)也可写成

$$V = (S + \Gamma)(U + S)^{-1} \cdot E, \quad (9)$$

式中, S 为散射矩阵, Γ 为传播矩阵, U 为单位矩阵, E 为源矩阵. 这样写的好处在于如果系统的参数发生改变, 不需要完全重新建立BLT方程, 只需要修改方程中相应的矩阵即可, 可以减少计算时间, 方便计算在不同条件下孔缝箱体的屏蔽效能.

2.3 任意平面波入射下箱体屏蔽效能计算

任意入射角度和极化方式的平面波照射下, 沿

箱体小孔处的电压分布函数^[18] $v(x)$ 为

$$v(x) = A e^{-jw\sqrt{LC}x} + B e^{+jw\sqrt{LC}x} + K e^{-j\beta_x x}, \quad (10)$$

式中 A, B, K 都为常数, 与入射波性质有关; L 和 C 分别为传输线单位电感和单位电容.

令 $x = l/2$, 计算得到小孔中心位置的电压 $V_{ap} = v(l/2)$. 在任意入射极化平面波照射下, 广义BLT方程(9)的散射矩阵 S 和传播矩阵 Γ 保持不变, 只有源矩阵 E 发生变化. 为此做如下替换: 去掉源方程 E 中的等效源 V_0 , 把小孔中心位置的电压 V_{ap} 作为新的源引入到源矩阵 E 中. 由此得到新的源矩阵 E' 有如下形式:

$$E' = \begin{bmatrix} 0 & V_{ap} & V_{ap} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T. \quad (11)$$

修改后的广义BLT方程为

$$V = (S + \Gamma)(U + S)^{-1} \cdot E'. \quad (12)$$

利用(12)式便可计算任意平面波入射下的箱体屏蔽效能.

2.4 任意位置开孔时箱体屏蔽效能计算

箱体上不同位置的开孔对屏蔽效能影响较大, 本节推导不同位置的单孔、双面开孔以及双面孔阵三种情况下箱体屏蔽效能计算方法.

2.4.1 任意位置的单孔

任意位置开单孔的箱体模型见图4, X, Y 表示单孔中心点坐标, x_0, y_0 表示孔的左下角起始坐标.

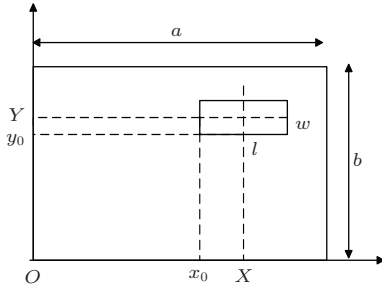


图4 任意位置开单孔几何模型

计算不同位置开单孔箱体的屏蔽效能需要引入孔缝耦合系数^[19] C_m , 任意位置单孔的阻抗 Z_{ap} 为

$$Z_{ap} = \frac{1}{2} C_m Z_0 j \tan \frac{k_0 l}{2}, \quad (13)$$

式中, 孔缝耦合系数 C_m 为

$$C_m = \frac{1}{XY} \int_{x_0}^{x_0+l} \int_{y_0}^{y_0+w} \cos \frac{n\pi y}{b} \cos \frac{n\pi(y-y_0)}{w} \times \sin \frac{\pi m x}{a} \sin \frac{\pi m(x-x_0)}{l} dx dy.$$

任意位置单孔会引起孔阻抗 Z_{ap} 变化, 将变化的 Z_{ap} 代入到散射矩阵 S 中, 修改广义BLT方程

(9)中的散射矩阵 S , 便可计算不同位置单孔的屏蔽效能.

2.4.2 双面开孔

双面开孔电路模型^[20]如图5所示, 箱体双面都在几何中心位置开矩形单孔.

单面开孔阻抗中引入孔缝耦合系数 C_m , 可得双面开孔阻抗 Z_{ap} 为

$$Z_{ap} = \frac{1}{2} C_m \frac{l}{a} j Z_0 \tan \frac{k_0 l}{2}, \quad (14)$$

式中

$$C_m = \frac{1}{XY} \int_{x_0}^{x_0+l} \int_{y_0}^{y_0+w} \cos \frac{n\pi y}{b} \cos \frac{n\pi(y-y_0)}{w} \times \sin \frac{\pi m x}{a} \sin \frac{\pi m(x-x_0)}{l} dx dy.$$

双面开孔箱体的信号流图见图6. 节点 J_4 表示第二个孔, J_5 表示箱体外部另一个监测点. 管道1, 管道4表示箱体外部自由空间波传播, 管道2, 管道3表示箱体内部波传播.

由于双面开孔的孔阻抗 Z_{ap} 与单面开孔孔阻抗不同, 因此对于广义BLT方程(7)需要双面开孔下节点的散射矩阵. 节点 J_3, J_4 的散射矩阵分别为 S_2, S_3 . 节点 J_5 的反射系数为 $\rho_5 = 0$.

$$S_2 = \begin{bmatrix} \frac{Y_g - Y_0 - Y_{ap}}{Y_0 + Y_g + Y_{ap}} & \frac{2Y_0}{Y_0 + Y_g + Y_{ap}} \\ \frac{2Y_g}{Y_0 + Y_g + Y_{ap}} & \frac{Y_0 - Y_g - Y_{ap}}{Y_0 + Y_g + Y_{ap}} \end{bmatrix}, \quad (15)$$

$$S_3 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}. \quad (16)$$

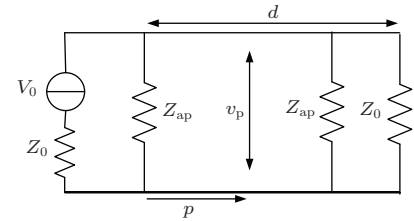


图5 双面开孔电路模型

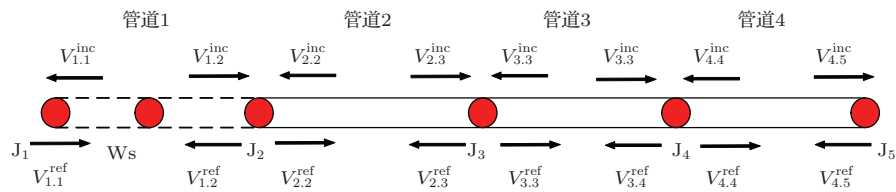


图6 双面开孔箱体信号流图

2.4.3 双面开孔阵

借助孔阵导纳^[21]公式计算出孔缝的散射矩阵,在双面开孔的广义BLT方程中修改散射矩阵 S ,便可计算双面开孔阵箱体的屏蔽效能.

3 几种计算方法的对比分析

本节对BLT方程计算方法、等效电路计算方法、CST数值计算方法进行对比分析.

图7为箱体几何模型图,图8为 45° 入射、 80° 极化平面波照射下箱体屏蔽效能曲线,箱体的几何尺寸为 $a = d = 300$ mm, $b = 120$ mm, $t = 1$ mm;在中心位置开单孔 $l = 30$ mm, $w = 12$ mm. 三种方法的计算结果总体趋势一致, BLT方程的计算结果与CST计算结果符合,能准确预测箱体谐振模式;等效电路法的计算精度较差. 由于等效电路法考虑多模传播形式复杂,这里只考虑主模,所以计算出的结果误差较大;而BLT方程通过控制传播常数 γ_g 可以考虑多种模式传播,且形式简单. 等效电路法把孔缝处理为阻抗,只考虑了从箱体外部耦合到内部的能量;但BLT方程中孔缝散射矩阵除此之外还考虑了箱体内部耦合到外部的能量. 因此在使用相同孔阻抗前提下, BLT方程计算结果比等效电路法精度更高. BLT方程预测了箱体在2.5 GHz以下的所有谐振模式,而等效电路法没有预测出 TE_{212} 和 TE_{312} 谐振模式.

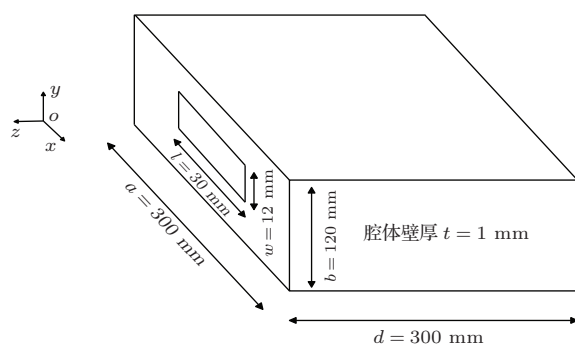


图7 箱体几何模型图

图9为单孔几何中心坐标为(270, 60)时箱体的屏蔽效能曲线,箱体的几何尺寸为 $a = d = 300$ mm, $b = 120$ mm, $t = 1$ mm;在(270, 60)位置开单孔 $l = 30$ mm, $w = 12$ mm. BLT方程的计算结果更接近CST仿真结果,等效电路法求解精度比BLT方程差. 等效电路法预测了 TE_{101} 和 TE_{103} 两个谐振模式,而BLT方程除此之外还预测了谐振

模式 TE_{102} 和 TE_{312} .

图10为双面开孔箱体的计算结果,箱体几何尺寸为: $a = d = 200$ mm, $b = 120$ mm, $t = 1$ mm;在双面的中心位置开单孔 $l = 20$ mm, $w = 12$ mm. 三种方法计算的屏蔽效能总体趋势一致, BLT方程计算结果精度高于等效电路法. BLT方程比等效电路法多预测出 TE_{102} 和 TE_{112} 谐振模式.

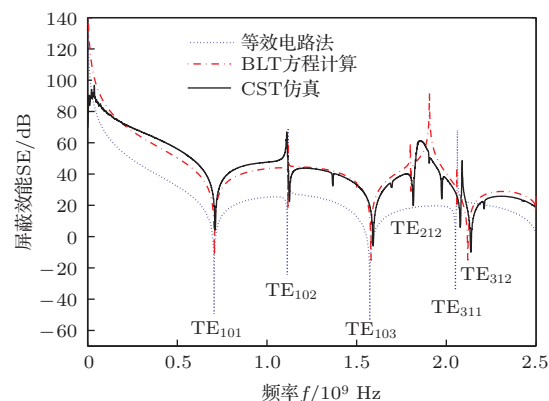


图8 BLT方程计算任意入射极化屏蔽效能验证

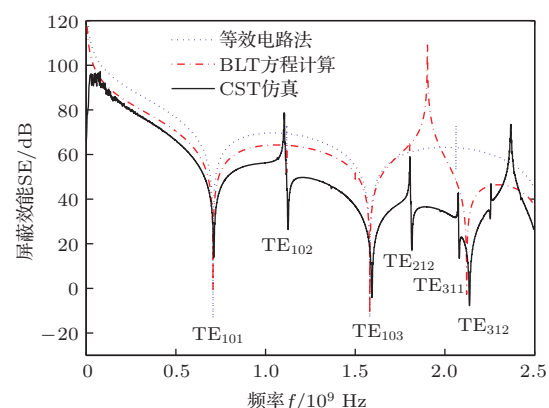


图9 BLT方程计算单孔位置为(270, 60)屏蔽效能验证

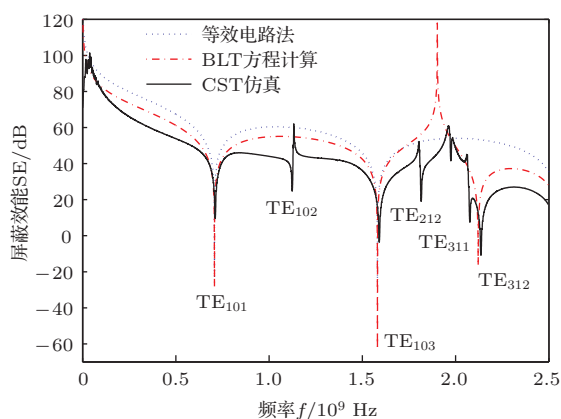


图10 BLT方程计算双面开孔屏蔽效能验证

双面开孔阵的箱体模型如图 11 所示, 表 1 为模型几何参数, 图 12 为计算结果. 计算模型 1 的屏蔽效能时, BLT 方程计算精度高于等效电路法, 比等效电路法多预测出 TE_{102} , TE_{212} 和 TE_{312} 谐振模式. 模型 2 具有发散分布的孔阵, 使用孔阵导纳计算发散分布孔阵的散射特性在方法上存在较大误差, 等效电路法仅预测了 TE_{101} 和 TE_{103} 两个谐

振模式, 而 BLT 方程则预测了全部谐振模式, 但两者计算出的屏蔽效能值与 CST 计算结果对比都存在一定的误差. 发散分布的孔阵会激发出箱体很多新的谐振模式有 TE_{110} , TE_{210} , TE_{310} , TE_{213} 和 TE_{313} . 对于具有发散分布孔阵的箱体来说, BLT 方程和等效电路法都存在误差.

表 1 模型几何参数

	腔体尺寸/mm	正面开孔/mm	背面开孔/mm
模型 1	$a = 300$,	中心位置开单孔	中心位置开正方形孔阵,
	$b = 120$,	$l = 30$,	孔边长 $d_k = 20$,
	$d = 300$	$w = 12$	孔间 X 向间距 15, Y 向间距 10
模型 2	$a = 300$,	中心位置开正方形	中心位置开正方形孔阵,
	$b = 120$,	孔阵, 孔边长 $d_k = 20$,	孔边长 $d_k = 20$,
	$d = 300$	孔间 X 向间距 15, Y 向间距 10	孔间 X 向间距 150, Y 向间距 50

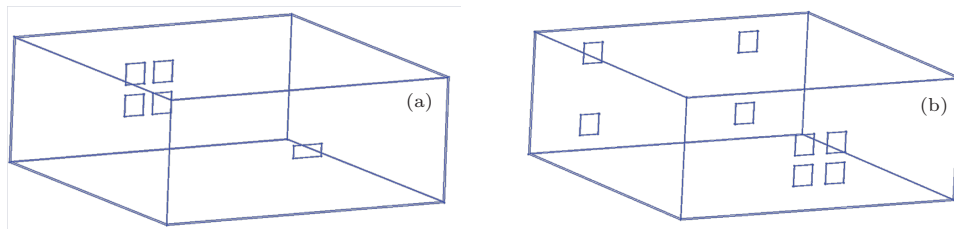


图 11 双面孔阵模型图 (a) 双面孔阵模型 1; (b) 双面孔阵模型 2

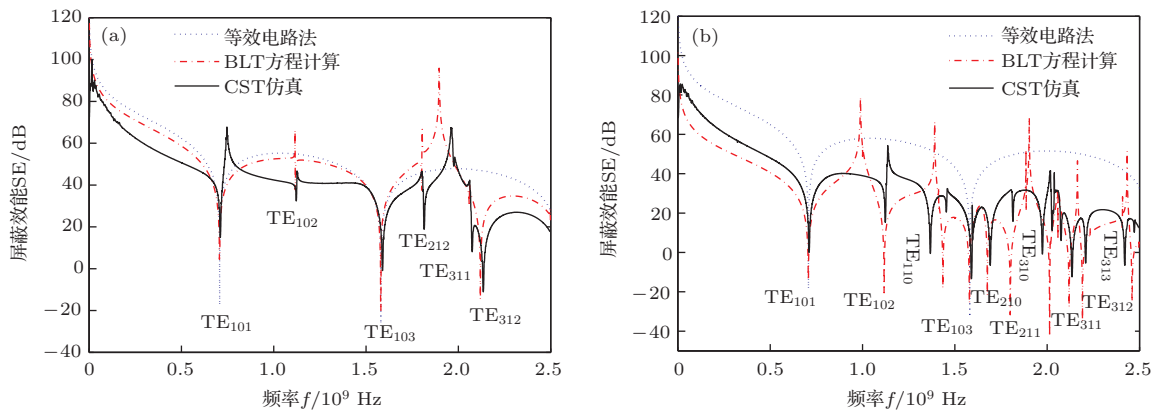


图 12 BLT 方程计算双面孔阵箱体屏蔽效能验证 (a) 双面孔阵模型 1 验证; (b) 双面孔阵模型 2 验证

4 结 论

本文提出基于 BLT 方程计算孔缝箱体屏蔽效能的方法. 首先通过等效电路法求解孔缝散射矩

阵, 再根据传输线理论推导出广义 BLT 方程, 利用广义 BLT 方程可以快速、准确计算任意入射极化方式平面波以及任意位置开孔和双面开孔箱体的屏蔽效能. 仿真验证表明, 在同样的孔阻抗下, BLT 方程比等效电路法拥有更高的精度, 可以在传播矩

阵中弥补等效电路法考虑传播模式的不足,能准确预测所有箱体谐振模式.与数值法相比,BLT方程占用很少计算资源,求解快速,可以方便地对箱体参数做规律性研究.

参考文献

- [1] Yenikaya S 2011 *Iranian Journal of Electrical and Computer Engineering*. **10** 70
- [2] Chen J, Wang J G 2007 *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility* **49** 354
- [3] Zhou G Q 2011 *Chin. Phys. B* **20** 074203
- [4] Martin T, Backstrom M, Loren J 2003 *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility* **45** 229
- [5] Niu S, Jiao C Q, Li L 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 214102 (in Chinese) [牛帅, 焦重庆, 李琳 2013 物理学报 **62** 214102]
- [6] Shim J, Kam D G, Kwon J H, Kim J 2010 *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility* **52** 566
- [7] Jiao C Q, Qi L 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 114102 (in Chinese) [焦重庆, 齐磊 2012 物理学报 **61** 114102]
- [8] Bethe H A 1944 *Phys. Rev.* **66** 163
- [9] Jiao C Q, Niu S 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 134104 (in Chinese) [焦重庆, 牛帅 2013 物理学报 **62** 134104]
- [10] Robinson M P, Benson T M, Christopoulos C 1998 *IEEE Trans on Electromagne Compat.* **40** 240
- [11] Wang J G, Liu G Z, Zhou J S 2003 *High Power Laser and Particle Beams* **15** 1093 [王建国, 刘国治, 周金山. 2003 强激光与粒子束 **15** 1093]
- [12] Kang W J, Lee V O, Mun S K, Chung Y S, Cheon C Y 2010 *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*. July 11–17 2010 p1–4
- [13] Tesche F M 2007 *IEEE Trans on Electromagn Compat.* **49** 427
- [14] Baum C E 2005 *Electromagnetics* **25** 623
- [15] Xie H Y, Wang J G, Fan R Y, Liu Y N 2011 *IEEE Trans on Electromagnetic Compatibility* **53** 185
- [16] Zhang Y P, Da X Y, Xie T C 2014 *High Power Laser and Particle Beams* **02** 234 [张亚普, 达新宇, 谢铁城 2014 强激光与粒子束 **02** 234]
- [17] Tesche F M, Butler C M 2003 *Interaction Notes* 588
- [18] Azaro R, Caorsi S, Donelli, M, Gragnani, G L 2002 *Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions* **50** 2259
- [19] Shi D, Shen Y M, Ruan F M, Wei Z G, Gao Y G 2008 *IEEE International Symposium on.* Aug. 18–22 2008 p1–5
- [20] Mao X Y, Du P A 2010 *Science China Technological Sciences* **07** 1993
- [21] Dehkhoda P, Tavakoli A, Moini R 2008 *IEEE Transactions* **50** 208

A BLT equation-based approach for calculating the shielding effectiveness of enclosures with apertures^{*}

Luo Jing-Wen Du Ping-An[†] Ren Dan Nie Bao-Lin

(School of Mechatronics Engineering University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

(Received 17 July 2014; revised manuscript received 20 August 2014)

Abstract

A calculation method based on BLT equation is proposed for analyzing the shielding effectiveness of enclosures containing apertures. This method can accurately and quickly obtain the shielding effectiveness of oblique incidence and polarization, off-centered apertures, and multi-apertures in two walls of enclosures. Aperture scattering matrix can be obtained according to equivalent circuit theory. Then, propagation relationships and reflection relationships are established, and finally the general BLT equation is derived, including the coupling to apertures. In order to verify the validity, the results are compared with these from equivalent circuit theory and CST. With the same aperture impedance, the aperture scattering matrix contains the interaction of the electromagnetic field so that the method proposed in this paper owns higher precision and can predict more resonant modes compared with the equivalent circuit theory. This method takes less time and computer resource compared with CST which cannot easily get the influence of enclosure parameters.

Keywords: BLT equation, aperture scattering matrix, equivalent circuit theory, shielding effectiveness

PACS: 07.05.Tp, 41.20.Gz, 41.90.+e

DOI: [10.7498/aps.64.010701](https://doi.org/10.7498/aps.64.010701)

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 51175068).

[†] Corresponding author. E-mail: dupingan@uestc.edu.cn