

基于BLT计算复杂腔体结构屏蔽效能的拓展方法

何瑶, 徐乐*, 李蕊, 刘涛, 霍晋聪, 蔡元铭

(西安电子科技大学工程学院, 陕西西安 710071)

摘要: 本文通过拓展BLT(Baum-Liu-Tesche)方法, 计算了复杂结构腔体的屏蔽效能(Shielding Effectiveness, SE). BLT方法最初被用于分析传输线模型, 后被扩展到计算腔体屏蔽效能, 然而其局限于计算矩形腔体和圆柱腔体的屏蔽效能, 无法分析更加复杂的腔体结构. 本文将BLT方法与数值方法相结合, 同时利用机器学习的回归方法, 将其扩展到复杂腔体结构的屏蔽效能计算中. 本文首先计算了腔体二维截面的特征模; 然后, 基于电磁波传播规律建立了等效电路网络结构, 结合BLT方法获得腔体屏蔽效能的频域响应分布; 最后, 利用机器学习方法训练支持向量回归模型(Support Vector Regression, SVR), 修正频域响应幅值, 得到腔体目标的屏蔽效能. 本文采用了3种不同结构的腔体对提出的方法进行了验证, 频率范围为0.1~3 GHz. 以商业软件仿真得到的结果为标准, 本文提出的方法可以在85%的置信度条件下, 实现均方根误差小于3, 同时计算速度相比商业软件提升80倍以上.

关键词: 计算电磁学; 电磁兼容; BLT方法; 屏蔽效能; SVR

基金项目: 国家自然科学基金(No.62001348)

中图分类号: TM154; TN4

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112(2024)01-0258-06

电子学报URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20220535

An Extended Method for Calculating Shielding Effectiveness of Complex Cavity Structures Based on BLT

HE Yao, XU Le*, LI Rui, LIU Tao, HUO Jin-cong, CAI Yuan-ming

(School of Electronic Engineering, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

Abstract: In this article, by extending the BLT (Baum-Liu-Tesche) method, the shielding effectiveness (SE) of cavities with complex structures is calculated. The BLT method was originally used to analyze the transmission line model and was later extended to calculate the shielding effectiveness of the cavity. However, it is limited to calculating the shielding effectiveness of the rectangular cavity or cylindrical cavity, and cannot analyze more complex cavity structures. Combined with the numerical method, and using the regression method of machine learning, it is extended to the shielding effectiveness calculation of complex cavity structures. The eigenmodes of the two-dimensional section of the cavity are firstly calculated; then an equivalent circuit network structure is established based on the law of electromagnetic wave propagation, and the frequency domain response distribution of the shielding effectiveness of the cavity is obtained by combining the BLT method; finally, the machine learning method is used to train the SVR (Support Vector Regression) model, modify the frequency domain response amplitude, and obtain the shielding effectiveness of the cavity target. In this paper, three cavities with different structures are used to verify the method proposed, and the frequency range is 0.1~3 GHz. Taking the results obtained by commercial software simulation as the standard, the method proposed in this paper can achieve a root mean square error of less than 3 under the condition of 85% confidence, and the calculation speed is over 80 times higher than that of commercial software.

Key words: computational electromagnetics; electromagnetic compatibility; BLT (Baum-Liu-Tesche) method; shielding effectiveness; SVR (Support Vector Regression)

Foundation Item(s): National Natural Science Foundation of China (No.62001348)

1 引言

在分析电磁兼容(ElectroMagnetic Compatibility, EMC)问题中,屏蔽效能常被用于评估屏蔽措施在减小外界电磁环境对设备的影响所起到的作用和效果.金属腔体因具有良好的电磁隔绝能力,被广泛应用于各种电子电气设备与系统中.理想且完全封闭的金属保护外壳对电子器件的保护是最好的.然而在实际中,为实现内外部信号的交换及散热需求,通常会对金属腔体进行开孔,这会降低腔体屏蔽效能,在设计不充分时,腔体内部可能的电磁谐振会进一步恶化其内部的电磁环境^[1].因此,有必要开展电磁屏蔽效能的研究.

目前,已有多种全波数值方法可对该问题求解,如FEM^[2,3],MOM^[4],FDTD^[5],FIV^[6]等.使用数值方法可对复杂结构进行建模并进行网格剖分,剖分网格越密,其结果越精确.同时,也需要更多的计算资源、计算时间.虽然解析方法可以快速地求解某些特定结构的屏蔽效能问题,但相较于数值方法,解析方法适用条件比较严格,通常需要对分析对象进行假设以及简化.如文献[7]利用Bethe小孔衍射方法^[8]计算腔体屏蔽效能,其原理是假设孔缝处于无限大零厚度导体平面,将孔缝视作电偶极子和磁偶极子的组合;Robinson等人^[9]最早使用等效电路方法计算屏蔽效能,该方法具有形式简单、计算效率高等特点.

BLT方程^[10]最初用于求解传输线网络负载的电压和电流响应,近年来被推广到计算电小开孔金属腔体的屏蔽效能.然而,其要求腔体特征模必须解析表达,仅可用于分析横截面规则腔体的屏蔽效能,如一般的矩形腔体或者圆柱形腔体.为了实现对复杂腔体结构屏蔽效能的计算,本文引入了机器学习的方法.机器学习是近年来信息技术发展的重要领域,其在计算电磁学领域已经被广泛利用,如文献[11]利用机器学习辅助EMC和EMI分析,文献[12]则利用机器学习的方法进行雷达散射的预测.本文结合特征模理论以及机器学习方法SVR,拓展了BLT方法,使其能够计算复杂腔体的屏蔽效能.

本文首先计算复杂腔体横截面的特征模电场分布,将三维问题降维为二维问题;然后,基于电磁波传播规律,对腔体结构进行电路拓扑等效,建立传播网络结构模型;再利用BLT方法进行求解,得到腔体屏蔽效能的频域响应分布;最后使用SVR方法对频域响应结果的幅值进行修正,得到复杂腔体的屏蔽效能.

本文利用以上方法计算了3种不同腔体结构的屏蔽效能,与数值方法的结果进行了对比,验证了方法的有效性,拓展了BLT方法的适用范围,同时提升了腔体

屏蔽效能的计算速度.

2 BLT拓展方法计算腔体屏蔽效能

2.1 BLT方法的基本原理

如图1所示的纵向连续的柱形腔体结构,底面或横截面形状为 S , S 的形状可以是规则或不规则的;内部纵向长度为 d ,腔体前壁开孔尺寸为 $l \times w$,其几何中心在 x - y 面坐标为 (x_a, y_a) , t 为腔体壁厚,腔体内部的观察点 P 坐标为 (x_p, y_p, z_p) ;左侧为沿着 $-z$ 方向传播的垂直极化平面波激励源.

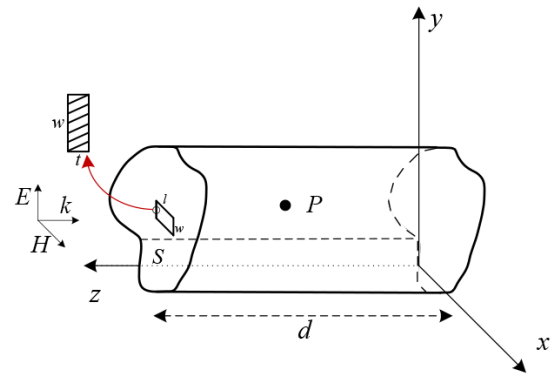


图1 腔体结构受到电磁波辐照

其等效电路如图2所示, V_s 为平面波等效电压源,腔体的开孔等效为阻抗 Z_{ap} ,其表达式为^[13]

$$Z_{ap} = \frac{l}{2d} C_{ap} j \times 120 \times \pi^2 \tan \frac{k_0 l}{2} \ln \left[2 \times \frac{1 + \sqrt{1 - (w_c/d)^2}}{1 - \sqrt{1 - (w_c/d)^2}} \right] \quad (1)$$

其中, $d = 2\pi R$, R 为截面所在的最小圆的半径.开孔等效宽度为 $w_c = w - 5t(1 + \ln(4\pi w/t))/(4\pi)$. C_{ap} 是开孔位置系数^[13], k_0 及 k_{g0} 分别为真空及波导中的波数, Z_0 及 Z_{g0} 分别为真空及腔体内波阻抗, P_0 为外部观察点, d_0 为 P_0 到开孔的距离, d_{01} 和 d_{02} 分别代表 V_s 到 P_0 和开孔的距离; z_p 为腔体后壁到 P 点的距离, $d - z_p$ 代表 P 点到开孔壁的距离.根据相应的信号传递过程建立信号流图,如图3所示.

图3中, V_s 代表电压源 V_s ,节点 J_1 代表外部观察点 P_0 , J_2 代表开孔结构, J_3 代表 P , J_4 代表腔体的末端. T_1 , T_2 , T_3 是3段不同的电磁波传播虚拟管道,分别代表自由空间、腔体内部 P 点左侧和右侧. V_{ij}^{inc} 和 V_{ij}^{ref} 分别代表不同节点处的入射电压和反射电压,下标 i 和 j 分别表示管道和节点序号.

广义BLT方程的表达式如下:

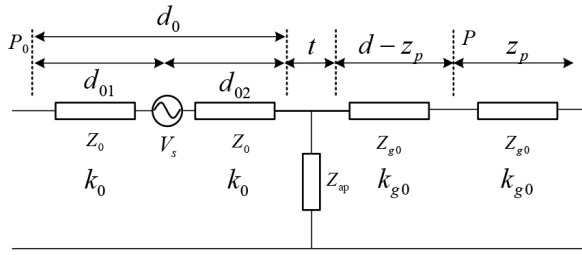


图2 平面波辐照下单孔腔体等效电路

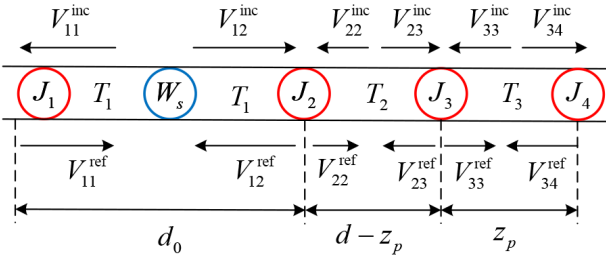


图3 建立等效信号流程图

$$\mathbf{V} = (\mathbf{U} + \boldsymbol{\rho})(\boldsymbol{\Gamma} - \boldsymbol{\rho})^{-1} \mathbf{S} \quad (2)$$

对于图1中所示的腔体,各个参数如下:

$$\begin{cases} \mathbf{V} = [V_{11} V_{12} V_{22} V_{23} V_{33} V_{34}]^T \\ \mathbf{S} = [S_1 S_2 0 0 0 0]^T \\ \boldsymbol{\rho} = \text{diag}(\rho_1, \rho_2, \rho_3, \rho_4) \\ \boldsymbol{\Gamma} = \text{diag}(\boldsymbol{\Gamma}_1, \boldsymbol{\Gamma}_2, \boldsymbol{\Gamma}_3) \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \boldsymbol{\Gamma}_1 = \begin{bmatrix} 0 & e^{jk_0 d_0} \\ e^{jk_0 d_0} & 0 \end{bmatrix} \\ \boldsymbol{\Gamma}_2 = \begin{bmatrix} 0 & e^{jk_0(d_0 - z_p)} \\ e^{jk_0(d_0 - z_p)} & 0 \end{bmatrix} \\ \boldsymbol{\Gamma}_3 = \begin{bmatrix} 0 & e^{jk_0 z_p} \\ e^{jk_0 z_p} & 0 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (4)$$

其中, \mathbf{V} 代表各个节点入射电压和反射电压组成的 n 维向量, $V_{ij} = V_{ij}^{\text{inc}} + V_{ij}^{\text{ref}}$; \mathbf{U} 是 $n \times n$ 的单位矩阵, n 是节点数量的 2 倍; $\boldsymbol{\rho}$ 是各个节点的散射构成的散射矩阵; ρ_2 和 ρ_3 分别代表 J_2 和 J_3 的散射矩阵; J_1 和 J_4 的散射可表示为 $\rho_1 = 0, \rho_4 = -1$, 即代表 J_1 处无反射, J_4 处为全反射; $\boldsymbol{\Gamma}$ 是管道传播矩阵, $\boldsymbol{\Gamma}_1, \boldsymbol{\Gamma}_2, \boldsymbol{\Gamma}_3$ 分别代表 T_1, T_2, T_3 的传播矩阵; \mathbf{S} 为 n 维源向量, $S_1 = 0.5V_0 e^{jk_0 d_{01}}, S_2 = -0.5V_0 e^{jk_0 d_{02}}$, 其中 $V_0 = 1$.

$Y_0 = 1/Z_0, Y_{g0} = 1/Z_{g0}, Y_{ap} = 1/Z_{ap}$, 分别代表自由空间、腔体波导、开孔结构的导纳, 其中 Z_0 是自由空间波阻抗, Z_{g0} 是波导阻抗. $S_1 = 0.5V_0 e^{jk_0 d_{01}}, S_2 = -0.5V_0 e^{jk_0 d_{02}}$, 令 $V_0 = 1, \rho_1 = 0, \rho_4 = -1$, 此时, V_{33} 或 V_{23} 即 P 点的电压响应 V_p , 两者均表示节点 J_3 的电压.

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\rho}_2 &= \begin{bmatrix} \rho_{11}^2 & \rho_{12}^2 \\ \rho_{21}^2 & \rho_{22}^2 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \frac{Y_0 - Y_{g0} - Y_{ap}}{Y_0 + Y_{g0} + Y_{ap}} & \frac{2Y_{g0}}{Y_0 + Y_{g0} + Y_{ap}} \\ \frac{2Y_0}{Y_0 + Y_{g0} + Y_{ap}} & \frac{Y_0 - Y_{g0} - Y_{ap}}{Y_0 + Y_{g0} + Y_{ap}} \end{bmatrix} \\ \boldsymbol{\rho}_3 &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (5)$$

在金属腔体中不存在 TEM 模(横电磁波), 只考虑 TE 模(横电模)和 TM 模(横磁波)^[14], 其特性阻抗为

$$\begin{cases} Z_{g0} = Z_{g0}^{\text{TE}} = Z_0 / \sqrt{1 - (\lambda/\lambda_c^{\text{TE}})^2} \\ Z_{g0} = Z_{g0}^{\text{TM}} = Z_0 \times \sqrt{1 - (\lambda/\lambda_c^{\text{TM}})^2} \end{cases} \quad (6)$$

其中, λ 是波长, λ_c^{TE} 和 λ_c^{TM} 分别为应的 TE 和 TM 模的截止波长.

使用数值方法求解二维截面的特征模分布, $f^{\text{TE}}(x, y)$ 和 $f^{\text{TM}}(x, y)$ 是 TE 模和 TM 模的电场分布, 通过数值方法可以得到观察点 P 处的电场:

$$\begin{cases} E_p^{\text{TE}} = CV_p^{\text{TE}} f^{\text{TE}}(x_p, y_p) \\ E_p^{\text{TM}} = CV_p^{\text{TM}} f^{\text{TM}}(x_p, y_p) \end{cases} \quad (7)$$

其中, V_p^{TE} 和 V_p^{TM} 分别为计算 TE 模和 TM 模的 P 点电压响应 V_p . 为了计算观察点 P 处的电场, 需要计算式(7)中的 C , 将其用于修正 BLT 的结果. 对于矩形或圆柱腔体, C 可采用解析方法得到, 但受到的局限性较大, 本文将通过结合 SVR 技术, 将 BLT 方法推广至更复杂腔体的屏蔽场分析问题中.

2.2 SVR 原理

通过数值计算获取 $f^{\text{TE}}(x, y)$ 和 $f^{\text{TM}}(x, y)$, 得到 BLT 的初始频域响应分布, 即此时电路分析中 P 点的电压响应结果; 然后, 使用 SVR 进行训练, 对频域结果幅值修正; 最后, 确定不同特征频率的 C 值.

SVR 是基于支持向量机 (Support Vector Machine, SVM) 得到的分类算法^[15]. SVM 是一种典型的分类算法, 其基本原理是, 对于给定训练样本集 $D = \{(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_m, y_m)\}, y_i \in \{-1, +1\}$, 找到一个超平面, 使分类集合的支持向量距离该平面最远. 而 SVR 则是找到一个回归平面, 使一个集合中所有的数据到该平面的距离最近.

如图 4 所示, 对于需要进行归一化的数据, 即图中的圆点 (红色和蓝色), SVR 回归希望找到一个超平面 (图 4 黄线), 使数据点到超平面的距离最近, 其在数学形式上满足式(8):

$$\min_{w, b} \frac{1}{2} \|\boldsymbol{\omega}\|^2 + \eta \sum_{i=1}^m l_c(f(x_i) - y_i) \quad (8)$$

其中, $\boldsymbol{\omega}$ 为待确定的模型参数, $f(\cdot)$ 为核函数, η 为正则

化常数, I_c 为不敏感常数^[16]. 相较于一般线性回归方法, SVR 在间隔带内则不计算损失, 当且仅当数据超出间隔带时才计算损失 (红色圆点). 因此, 在实现相应的电磁回归计算时, 可以容忍一定的误差, 通过调整上述参数可以拟合出良好的回归模型.

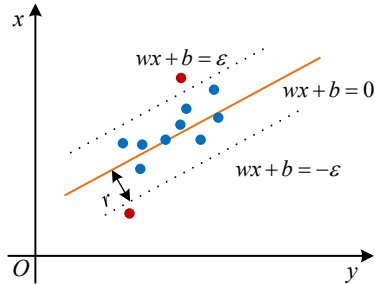


图4 SVR 基本原理

对于具有复杂截面腔体的分析, 本文选取腔体截面尺寸、开孔形状及其尺寸作为腔体参数进行机器学习的训练参数. 利用训练好的模型, 可得到待求解目标腔体 P 处电场值为

$$E_p = \sqrt{(E_p^{\text{TE}})^2 + (E_p^{\text{TM}})^2} \quad (9)$$

P 点的屏蔽效能为^[9]

$$\text{SE}_p = -20 \log_{10} \left(\left| \frac{E_p}{E_0} \right| \right) \quad (10)$$

这里规定 $E_0 = 1$.

本文方法的流程如算法 1 所示.

算法 1 基于 BLT 的拓展方法计算屏蔽效能

输入: 腔体结构的外形数据, 腔体尺寸 $S \times d$, 开孔 $l \times w$, 腔体壁厚 t , P 点位置坐标.

输出: P 点的屏蔽效能.

步骤 1 使用数值方法获得腔体二维截面的特征模.

步骤 2 对腔体进行电路等效, 结合截面特征模计算腔体的频域响应.

步骤 3 获取多个仿真实例数据, 使用 SVR 方法训练回归模型.

步骤 4 若训练结果良好, 则对步骤 2 的结果进行修正; 若不满足, 则调整训练参数, 重复步骤 3.

步骤 5 获得最终结果.

3 算法验证

为了评估本文方法相对于数值方法的误差, 本文引入统计学中置信度的概念^[17]. 对于一组数据, 置信区间表示在“某个概率”下, 真实值落在测量值附近的程度, 即被测量参数的测量结果的可信程度, 其中“某个概率”被称为置信度. 置信区间的大小与准确度正相关, 即求解的结果越准确, 置信区间越大, 置信度越高. 设数值方法仿真得到的结果为真实值 A_n , 本文方法得到的结果为测量值 B_n , A_n 和 B_n 的单位均为 dB, N 为数

据的点数, 计算均方根误差 error:

$$\text{error} = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (A_n - B_n)^2}{N}} \quad (11)$$

error 的数值越小, 说明结果越准确. 本文采取了以下 3 个模型来验证, 其横切面以及相应的电场主模分布如图 5 所示.

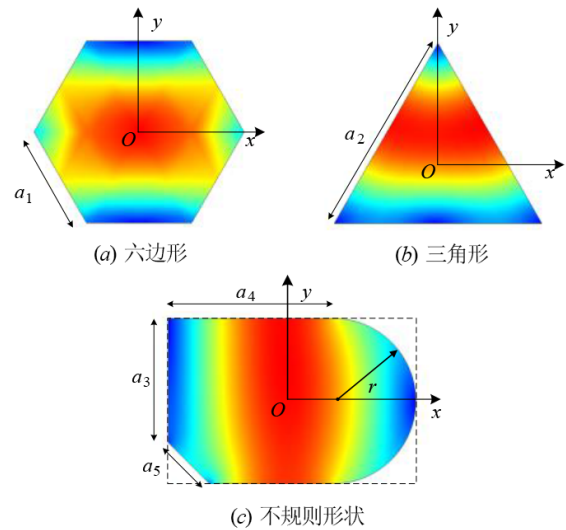


图5 3 种不同的腔体截面及其主模电场分布

图 5(a) 是边长为 a_1 的正六边形, 图 5(b) 是边长为 a_2 的正三角形, 图 5(c) 为一个不规则形状. 3 种腔体的横截面坐标如图 5 所示, 图 5(a) 和 (b) 的坐标原点均在横截面几何中心, 图 5(c) 的坐标原点在图中虚线矩形的几何中心. 同时, 在三维坐标中, 保持 xOy 面与底面重合, z 轴指向开孔面 (如图 1). 为了提高计算效率, 后文的腔体屏蔽效能结果只考虑主模的影响. 考虑到开孔大小相比于腔体截面的尺寸较小, 采用和圆柱腔体开孔相同的计算方式计算开孔阻抗 Z_{ap} ^[18], 其产生的差异可以忽略.

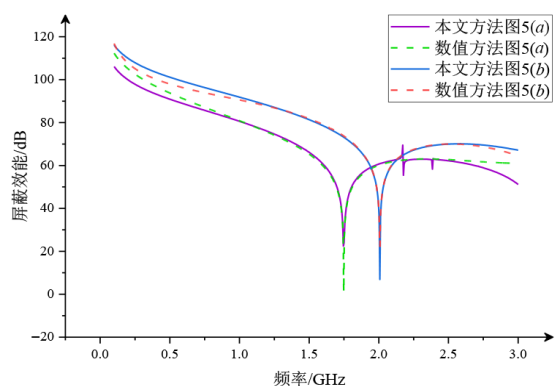
对图 5 所示 3 种腔体, 在不失一般性的条件下可将 3 种腔体横截面均同参数 a_1 关联, 以便展示案例结果.

本文选择 $a_1 = 40, 42, \dots, 60(\text{mm})$, $a_2 = a_1 \times \frac{\sqrt{3}}{2}$, $a_3 = a_1$, $a_4 + r = a_1 \times \frac{4}{3}$. 腔体开孔中心的 (x, y) 坐标均为 $(0, 0)$; 为验证算法, 令开孔为正方形, 这样做可以使开孔尺寸的信息全部包含在边长 w , 令边长 $w = 3, 4, \dots, 8(\text{mm})$; 图 5(a) 和 (b) 均使 $d = 160 \text{ mm}$, 图 5(c) 使 $d = 140 \text{ mm}$. 3 种模型均为 $t = 1 \text{ mm}$ 的金属材料, 在仿真中均设为理想电导体 (Perfect Electrical Conductor, PEC), 每种模型获得 66 组数据. 以腔体的开孔尺寸 w 和外形尺寸 a_1 作为 SVR 的输入参数; 本文采用在 1.5 GHz 处数值方法结果和上述

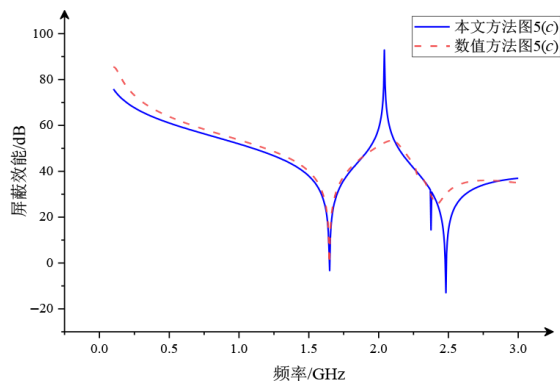
频域响应结果的差值为输出参数 C , 进行模型训练.

为了验证本文方法训练所得模型的适用性, 此处
在训练范围外选取一组结构参数, $a_1 = 65 \text{ mm}$, $a_2 = a_1 \times \frac{\sqrt{3}}{2}$, $a_3 = a_1$, $w = 8 \text{ mm}$, 利用训练得到的模型预测该结构的屏蔽效能.

在 3 种腔体内部分别选择一点作为观察点. 其中, 图 5(a) 选择观察点位于 (0 mm, 0 mm, 80 mm), 图 5(b) 的观察点位于 (0 mm, 31.5 mm, 80 mm), 图 5(c) 的观察点位于 (97.5 mm, 65 mm, 93.33 mm). 得到的屏蔽效能如图 6(a) 和 (b) 所示, 图中的虚线为数值方法结果, 采用 CST 微波工作室仿真得到, 实线为本文方法得到的结果.



(a) 图 5(a) 和 (b) 对比



(b) 图 5(c) 对比

图 6 本文方法和数值方法的对比

以数值方法的结果为标准, 对于图 5(a) 和图 5(b) 所示的两种腔体结构, 两种方法计算得到的屏蔽效能在 0.1~3 GHz 的范围内表现出一致性, 二者均可在置信度 100% 的条件下, 实现均方根误差在 3 以内; 对于图 5(c) 所示的不规则腔体结构, 其在置信度 85% 的条件下, 均方根误差在 3 以内. 100% 和 85% 的置信度分别代表不去除任何误差点和去除 15% 误差较大的点. 同数值方法的对比说明, 本文方法相比数值方法, 在一定置信度

条件下, 实现了对腔体的屏蔽效能计算, 验证了本文方法的有效性.

进一步分析本文方法对不同开孔尺寸腔体屏蔽效能的预测性能, 表 1 给出了 3 种不同腔体改变腔体尺寸时, 以数值方法为标准, 在 85% 的置信度条件下得到的均方根误差均小于 3. 在相同的计算条件下, 数值全波仿真方法耗时超过 40 s, 而本文方法可以在 0.5 s 内得到腔体屏蔽效能的响应结果, 计算速度可提升 80 倍以上.

表 1 85% 的置信度条件下改变参数 a_1 后的均方根误差

参数 a_1/mm				
61	62	63	64	65
0.55	0.37	0.40	1.24	1.26
1.17	1.74	1.89	1.77	1.95
1.67	1.87	1.66	1.51	2.01

4 结论

本文成功地采用机器学习方法拓展了 BLT 算法, 实现了对复杂形状的腔体屏蔽效能的计算, 提高了复杂腔体电磁屏蔽效能的计算效率. 本文方法可被应用于不规则横截面腔体结构的屏蔽效能计算. 与数值仿真方法结果的对比表明, 本文方法具有较高的精度和计算速度.

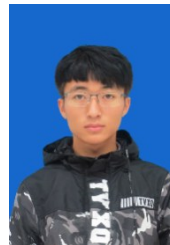
然而, 本文方法由于仍基于 BLT 算法, 对电大尺寸腔体的分析具有局限性. 仿真结果表明, 对于横截面尺度不超过 1 个波长的腔体, 本文算法具有 85% 以上的置信度. 在电小尺寸的情况下, 可引入更多的特征模式来提高计算精度. 进一步探讨如何拓展本方法计算纵向不连续结构腔体、电大尺寸腔体的屏蔽效能是一个值得研究的课题.

参考文献

- [1] 刘文奎. 电子产品机械结构电磁谐振特性及计算和抑制方法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2015.
LIU W K. Study on Electromagnetic Resonance Characteristics and Suppression and Calculation Methods of Electronic Productions Mechanical Structure[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2015. (in Chinese)
- [2] KUBÍK Z, SKÁLA J. Shielding effectiveness measurement and simulation of small perforated shielding enclosure using FEM[C]//2015 IEEE 15th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC). Piscataway: IEEE, 2015: 1983-1988.
- [3] NIE B L, DU P G. Comparative study of the shielding properties of slotted enclosure with inner or outer excita-

- tions using FEM[J]. Open Journal of Applied Sciences, 2013, 3(2): 47-50.
- [4] HARRINGTON R F. Field Computation by Moment Methods[M]. Piscataway: Wiley-IEEE Press, 1968.
- [5] GEORGAKOPOULOS S V, BIRTCHER C R, BALANIS C A. HIRF penetration through apertures: FDTD versus measurements[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2001, 43(3): 282-294.
- [6] ZHAO Y H, ZHAO L B, HUANG M M, et al. Shielding effectiveness simulation of rectangular enclosures using FIT[C]//2020 International Conference on Sensing, Diagnostics, Prognostics, and Control (SDPC). Piscataway: IEEE, 2021: 317-321.
- [7] 公延飞, 郝建红, 蒋璐行, 等. 基于 Bethe 小孔耦合理论和镜像原理的双腔体电磁泄漏的解析模型[J]. 电工技术学报, 2018, 33(9): 2139-2147.
GONG Y F, HAO J H, JIANG L H, et al. An analytical model for electromagnetic leakage from double cascaded enclosures based on bethe's small aperture coupling theory and mirror procedure[J]. Transactions of China Electro-technical Society, 2018, 33(9): 2139-2147. (in Chinese)
- [8] BETHE H A. Theory of diffraction by small holes[J]. Physical Review, 1944, 66(7/8): 163.
- [9] ROBINSON M P, BENSON T M, CHRISTOPOULOS C, et al. Analytical formulation for the shielding effectiveness of enclosures with apertures[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 1998, 40(3): 240-248.
- [10] 王为, 刘培国, 覃宇建. BLT—FDTD 时频结合分析传输线瞬态响应[J]. 微波学报, 2010, 26(S2): 25-28.
WANG W, LIU P G, QIN Y J. Hybrid BLT-FDTD approach for the transient response of transmission lines[J]. Journal of Microwaves, 2010, 26(S2): 25-28. (in Chinese)
- [11] 姜立军, 姚赫明, 张欢欢, 等. 开发 EMC/SI/PI 的机器学习 CEM 方法[J]. 安全与电磁兼容, 2020(5): 9-15.
JIANG L J, YAO H M, ZHANG H H, et al. Developing machine learning CEM methods for EMC/SI/PI[J]. Safety & EMC, 2020(5): 9-15. (in Chinese)
- [12] XIAO D H, GUO L X, LIU W, et al. Efficient RCS prediction of the conducting target based on physics-inspired machine learning and experimental design[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2021, 69(4): 2274-2289.
- [13] YIN M C, DU P. An improved circuit model for the prediction of the shielding effectiveness and resonances of an enclosure with apertures[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2016, 58: 448-456.
- [14] 梁昌洪, 谢拥军, 官伯然. 简明微波[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
LIANG C H, XIE Y J, GUAN B R. Concise Microwave [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006. (in Chinese)
- [15] PEDREGOSA F, VAROQUAUX G, GRAMFORT A, et al. Scikit-learn: Machine learning in python[EB/OL]. (2012)[2022]. <https://arxiv.org/abs/1201.0490.pdf>.
- [16] 周志华. 机器学习 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2016.
ZHOU Z H. Machine Learning[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2016. (in Chinese)
- [17] 赵颖. 电磁算法的置信度评估方法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2021.
ZHAO Y. Research on Confidence Evaluation Method of Electromagnetic Algorithm[D]. Xi'an: Xidian University, 2021. (in Chinese)
- [18] 范杰清. 复杂金属腔体高功率微波耦合效应研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2015.
FAN J Q. Study on Effect of HPM Coupling on Complex Metal Cavity[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2015. (in Chinese)

作者简介



何 瑶 男, 1996 年生, 陕西延安人. 于西安电子科技大学获得工学学士学位. 现为西安电子科技大学电子工程学院硕士研究生. 主要研究方向为计算电磁学中的电磁兼容、电磁感知的理论和应用.

E-mail: yhe_6@stu.xidian.edu.cn



徐 乐 男, 1979 年生, 陕西汉中. 于西安电子科技大学获得学士、硕士以及博士学位. 西安电子科技大学电子工程学院副教授、博士生导师. 主要研究方向为计算电磁学技术、电子设备电磁加固分析及分析. 中国电子学会会员编号: E190008698S.

E-mail: lexu@mail.xidian.edu.cn