

基于 GA-DE 算法的开孔外壳屏蔽效能预测与优化

赵旭东^{1,2}, 王一凡³, 赵 阳^{1,2}, 张哲民⁴, 陈泽南^{1,2}, 刘守城^{1,2}

(1. 南京师范大学南瑞电气与自动化学院, 江苏 南京 210023)

(2. 江苏省电气装备与电磁兼容工程实验室, 江苏 南京 210023)

(3. 江苏益邦电力科技有限公司, 江苏 南京 210001)

(4. 南京四方亿能电力自动化有限公司, 江苏 南京 210001)

[摘要] 电子设备工作频率的提高, 导致电磁辐射噪声日益严重, 外壳屏蔽辐射噪声是最为有效的方法。然而, 由于散热和接线, 外壳会带有孔洞, 极大地影响了其屏蔽效能。对开孔外壳建模, 通过 CST 仿真得到外壳屏蔽效能的结果, 根据仿真结果利用传输线等效电路模型及遗传-进化差分 (genetic algorithm-differential evolution, GA-DE) 算法进行参数提取, 对比屏蔽效能仿真结果和算法结果, 证明算法结果的准确性和可靠性, 并探究了离开孔面的距离对屏蔽效能的影响, 对实际屏蔽设计具有重要意义。

[关键词] 电磁辐射, 屏蔽效能, 传输线理论, GA-DE 算法

[中图分类号] TM72 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1672-1292(2022)02-0009-06

Prediction and Optimization of Shielding Effectiveness of Opening Shell Based on GA-DE Algorithm

Zhao Xudong^{1,2}, Wang Yifan³, Zhao Yang^{1,2}, Zhang Zheming⁴, Chen Zenan^{1,2}, Liu Shoucheng^{1,2}

(1. School of NARI Electrical and Automation, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

(2. Jiangsu Engineering Laboratory of Electrical Equipment Electromagnetic Compatibility, Nanjing 210023, China)

(3. Jiangsu Yibang Power Technology Co., Ltd., Nanjing 210001, China)

(4. Nanjing Sifang Yineng Electric Power Automation Co., Ltd., Nanjing 210001, China)

Abstract: The increase in the operating frequency of electronic equipment has led to increasingly serious electromagnetic radiation noise, and the shielding of the radiation noise by the shell is the most effective method. However, due to heat dissipation and wiring, the shell will have holes, which greatly affects its shielding effectiveness. After modeling the perforated enclosure, this paper obtains the results of the shielding effectiveness of the enclosure through CST simulation. According to the simulation results, the transmission line equivalent circuit model and the genetic algorithm-differential evolution (GA-DE) algorithm are used for parameter extraction, and the shielding effectiveness simulation results and algorithms are compared. As a result, the accuracy and reliability of the algorithm results are proved, and the influence of the distance from the hole surface on the shielding effectiveness is explored, which is of great significance to the actual shielding design.

Key words: electromagnetic radiation, shielding effectiveness, transmission line theory, GA-DE algorithm

近年来, 随着电力电子设备的快速发展, 电子设备工作频率的不断提高, 电磁干扰噪声问题也日益严重^[1], 导致周围电磁环境越来越差, 严重影响了周围电力电子设备和自身设备的稳定运行。实际工程中因散热和接线, 箱体外壳往往会带有孔缝, 产生电磁泄露, 大大降低了外壳的电磁防护能力^[2-3]。电磁屏蔽作为抑制辐射电磁干扰噪声最简单直接有效的方法^[4], 吸引了众多国内外学者的研究和关注。

屏蔽效能可以通过实验或计算得到, 实验会消耗大量资源且可重复性差。所以要寻求合适的计算方法, 快速准确地预测屏蔽腔体的屏蔽效能对屏蔽腔体的设计具有重要的意义。目前屏蔽腔体屏蔽效能的计算方法主要包括数值计算法和解析计算法两种。数值计算法包括时域有限差分法 (FDTD)、有限元法

收稿日期: 2021-07-19.

基金项目: 江苏省社会发展重点项目 (BE2019716)、电网环境保护国家重点实验室开发基金项目 (GYW51202001558)。

通讯作者: 赵阳, 博士, 教授, 研究方向: 电磁兼容。E-mail: zhaoyang2@njnu.edu.cn

(FEM)、矩量法(MOM)与传输线模型(transmission line modeling, TLM)等. 通过数值计算方法可以在宽频带下预测复杂腔体的屏蔽效能,其缺点是计算量较大. 解析算法比数值算法有更多的限制(如无法对复杂的物理结构进行分析、存在较多近似等),但在结构简单的情况下也可以得到较为精确的结果,与数值算法相比,其计算速度更快,占用内存更少. 目前对外壳屏蔽效能的计算均存在计算量大和计算结果不准确的问题. 本文采用 GA-DE 算法获得准确的等效电路模型参数^[5],预测开孔外壳屏蔽效能,使得计算量更小,计算结果更加精确.

1 开孔外壳电磁屏蔽特性仿真与分析

通常用屏蔽效能(shielding effectiveness, SE)来衡量外壳的屏蔽效果,电场和磁场屏蔽效能定义分别为^[6-7]:

$$SE_E = 20\lg(E_0/E_s), \quad (1)$$

$$SE_H = 20\lg(H_0/H_s). \quad (2)$$

式中, H_0 和 E_0 表示未加外壳时某点的电场和磁场大小, H_s 和 E_s 表示加外壳后该点的电场和磁场大小,屏蔽效能的单位为 dB. 在本文中以电场屏蔽效能为度量结果,其数值越大代表屏蔽效果越好,数值越小代表屏蔽效果越差^[8-9].

本文研究外壳开孔对电磁屏蔽效能的影响. 根据外壳物理结构,利用 Solidworks 软件构造外壳物理模型,并将物理模型导入电磁仿真软件 CST 中进行电磁仿真分析,外壳模型示意图如图 1 所示. 外壳参数为: $a=50$ cm, $b=120$ cm, $c=60$ cm, $e=15$ cm, $f=10$ cm, $g=5$ cm, $h=8$ cm. 外壳厚度 t 为 3 mm.

探究外壳开孔后屏蔽效果的变化,本文使用 CST 中的 EMC/EMI(Radiated Emission)模块对开孔外壳屏蔽情况进行仿真^[10],将画好的开孔外壳模型图导入到 CST 中,设置外壳参数,外壳材料为铝,磁导率是 $11 \text{ H} \cdot \text{m}^{-1}$,电导率是 $35\,400\,000 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$. 因为本文需要代入传输线模型模式,将仿真的激励源设置为电场矢量垂直传播方向,圆形极化,电场模为 $1 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$ 的平面波,探针分别设置为壳体几何中心 P 点及壳体中轴线上距离壳体正面 25 cm 的 Q 点. 壳体几何中心 P 点的屏蔽效能仿真结果如图 2 所示.

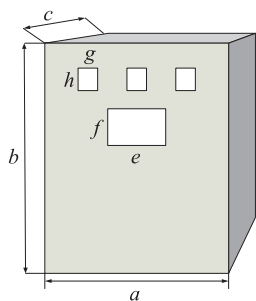


图 1 开孔外壳模型图

Fig. 1 Open-hole shell model diagram

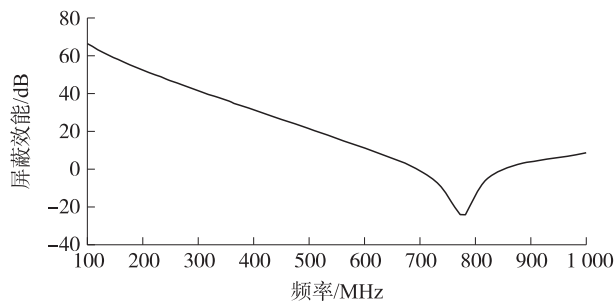


图 2 P 点屏蔽效能仿真结果

Fig. 2 P -point shielding effectiveness simulation results

由图 2 可知,在 100~780 MHz 上,壳体几何中心 P 点的屏蔽效能随着频率的提高而降低,在 780~1 000 MHz 上,屏蔽效能随着频率的提高而提高. 780 MHz 时的屏蔽效能为仿真图像的最低点,分析为谐振频率点,由于入射波与反射波叠加产生.

2 基于 GA-DE 算法的开孔外壳屏蔽效能研究

2.1 开孔外壳的传输线等效电路

开孔可以等效为一段终端短路的无损耗传输线,屏蔽外壳可以等效为终端短路的波导^[11-12],传输线电报方程为

$$\frac{dU(x)}{dx} + j\omega LI(x) = E_x(x, h), \quad (3)$$

$$\frac{dI(x)}{dx} + j\omega CU(x) = 0. \quad (4)$$

式中, $U(x)$ 和 $I(x)$ 分别为传输线上任意点的电压与电流, h 为传输线间距, L 为传输线电感, C 为传输线电容. 图 3 为屏蔽外壳等效电路. 根据传输线理论、戴维南定理及屏蔽效能定义式^[13], 观测点 P 处的等效电压源 V_1 、等效阻抗 Z_1 、负载 Z_2 和等效电压 V_p 及屏蔽效能 SE_p ,

$$\begin{cases} V_1 = \frac{V_{ap}}{\cos(k_g y_p) + j(Z_{ap}/Z_g) \sin(k_g y_p)}, \\ Z_1 = \frac{Z_{ap} + jZ_g \tan(k_g y_p)}{1 + j(Z_{ap}/Z_g) \tan(k_g y_p)}, \\ Z_2 = jZ_g \tan[k_g(d - y_p)], \\ V_p = \frac{k_3 V_1 Z_2}{Z_1 + Z_2}, \\ SE_p = -20 \lg(V_p/V_{ap}), \\ Z_{ap} = k_1 j \tan k_2 f. \end{cases} \quad (5)$$

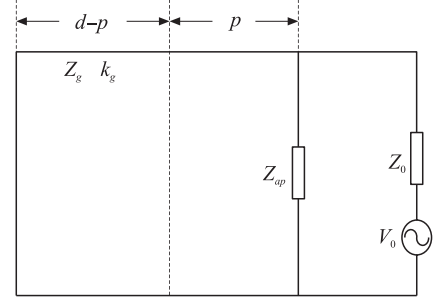


图 3 屏蔽外壳等效电路

Fig. 3 Equivalent transmission line circuit

式中, k_g 、 Z_g 为矩形波导的相位阻抗和特征阻抗, y_p 、 d 分别为观测点位置坐标与屏蔽外壳几何尺寸, k_1 、 k_2 、 k_3 分别为算法优化得到的开孔阻抗参数、开孔形状参数及位置参数, SE_p 为观测点位置屏蔽效能的预测值, Z_{ap} 为 P 处等效电阻, V_{ap} 为电阻上电压.

2.2 基于 GA-DE 算法的参数提取

根据的壳体中央位置的屏蔽效能信息, 本文通过 GA-DE 算法来获取式(5)中的参数 k_1 、 k_2 、 k_3 , 先利用 GA 处理开孔外壳屏蔽效能信息来获取等效参数的初始值, 然后利用 DE 算法进行优化得到最终的等效参数^[13]. 具体过程如下.

Step 1: 编码

实数编码, 构造线性变换

$$f_j = a_j + x_j(b_j - a_j). \quad (6)$$

将定义域 $[a_j, b_j]$ 的第 j 个变量 f_j 映射到区间 $[0, 1]$ 上的实数 x_j , $j = 1, 2, \dots, N$.

Step 2: 初始化种群

产生 w 个, z 组, 其中每组 c 个 $[0, 1]$ 区间内的均匀随机数, 可以得到 $\{u_j\}$, 将每个 u_j 当做初始群体的父代个体值 x_j , w 表示子种群数, z 表示每个子种群数内的个体数, 优化参数个数用 c 表示, 系统模型平方和用 Q 表示, Q 最小构造优化准则函数.

$$\min Q = \sum_{i=1}^N |\varphi(f_i) - \varphi(f)|^2. \quad (7)$$

式中, 表示实测阻抗值, 表示理论计算值.

经式(6)优化变量值后, 再通过式(7)得到目标函数值.

Step 3: 适应度评价

目标函数值 $Q(x_i)$ 代表个体适应能力. $Q(x_i)$ 越大表示适应能力越弱, $Q(x_i)$ 越小表示适应能力越强. 适应度评价函数为

$$F(x_i) = \frac{1}{\tau + Q(x_i)}. \quad (8)$$

式中, $\tau = 0.001$.

Step 4: 选择操作

每一个子种群在父代的个体中按比例选择方式以概率 p_i 选第 i 个个体, 共选 n 组个体, 按轮盘赌被选概率为

$$p_i = \frac{F(x_i)}{\sum_{i=1}^n F(x_i)}. \quad (9)$$

Step 5: 交叉操作

每一个子种群中任意两个个体算数交叉,随机线性重组之后新个体为

$$\begin{cases} x'_i = u_1 x_j + (1-u_1) x_i, & u_1 < 0.5, \\ x'_j = u_2 x_i + (1-u_2) x_j, & u_2 < 0.5. \end{cases} \quad (10)$$

式中, u_1, u_2 为 $[0, 1]$ 内均匀分布随机数.

Step 6: 变异操作

在每个子种群父代染色体上基因添加小概率 $p_m = 1-p_i$ 的扰动,维持多样性,防止早熟.

$$\begin{cases} x'_j = u(j), & u_m < p_m(i), \\ x'_j = x_j, & u_m \geq p_m(i). \end{cases} \quad (11)$$

式中, $u(j)$ 和均为随机数, $j=1, 2, \dots, n$.

Step 7: 判别收敛

当个体目标函数值小于设置值时或者算法达到设置的进化次数时,结束运行. 种群中最优个体为所求方程参数,最优估计值的结果是等效参数的初始值,记为 k_{10}, k_{20}, k_{30} , 分别代表等效开孔阻抗参数、开孔形状参数和位置参数的初始值. 否则,转入 Step 4,重新评价、选择、交叉和变异操作.

进一步地,利用 DE 算法优化上述过程得到的结果, Z 是屏蔽效能表达式,样本测量屏蔽效能 Z_x 为 100~1 000 MHz 中 900 个线性分布不同频的数据. 即探索最小化拟合屏蔽效能和实际屏蔽效能之间的差异. DE 参数是按选择原则经过多次比较后的最佳值.

$$\begin{aligned} Z &= \min f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_D), \\ \text{s.t. } x_j^L &\leq x_j \leq x_j^U, \quad j=1, 2, \dots, D. \end{aligned} \quad (12)$$

式中, D 是空间维数, x_j^L 为第 j 个分量的最小值, x_j^U 为第 j 个分量的最大值.

等效参数的优化步骤如下:

Step 1: 根据下式初始化种群

$$\begin{aligned} \{x_i(0) | x_{j,i}^L \leq x_{j,i}(0) \leq x_{j,i}^U, i=1, 2, 3, \dots, N_p; j=1, 2, 3, \dots, D\}, \\ x_{j,i}(0) = x_{j,i}^L + \text{rand}(0, 1) \cdot (x_{j,i}^U - x_{j,i}^L). \end{aligned} \quad (13)$$

式中, N_p 表示种群规模,取值受数据量和处理精度影响. $x_i(0)$ 表示种群 0 代第 i 个个体, $x_{j,i}(0)$ 表示种群 0 代第 i 个个体上的第 j 个基因, $\text{rand}(0, 1)$ 是 $(0, 1)$ 内随机分布数, $x_{j,i}^U, x_{j,i}^L$ 为第 i 个个体上的第 j 个基因最大值和最小值,表示空间维数.

Step 2: 变异操作

初始参数值向量是每一代总体,种群内两个个体加权差异作为中间个体,该个体为差异向量;该差异向量加上第 3 个个体将产生突变,

$$v_i(g+1) = x_{r1}(g) + F \cdot (x_{r2}(g) - x_{r3}(g)). \quad (14)$$

式中, F 表示诱变因子, $F=0.85$, $x_i(g)$ 表示 g 代种群第 i 个个体.

Step 3: 交叉操作

交换种群个体和对于突变个体的组成部分产生交叉总体, g 代种群 $|x_i(g)|$ 交叉运算,变体 $\{v_i(g+1)\}$ 为:

$$u_i(g+1) = \begin{cases} v_{j,i}(g+1), & \text{rand}(0, 1) \leq C_R \text{ or } j=j_{\text{rand}}, \\ x_{j,i}, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (15)$$

式中, j_{rand} 表示 $[1, 2, 3, \dots, D]$ 内随机整数, C_R 表示交叉概率, $C_R=0.7$.

Step 4: 选择操作

当个体目标函数大于候选者目标函数,就用下一代种群代替现在的个体,

$$x_i(g+1) = \begin{cases} u_i(g+1), & f(u_i(g+1)) \leq f(x_i(g)), \\ x_i(g), & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (16)$$

Step 5: 收敛判别

算法达到设置次数时或选择的优秀个体小于设置值时,结束算法,估计结果为 k_{10}, k_{20}, k_{30} 的最佳值. 如未收敛,则返回 Step 2 继续执行操作. 屏蔽外壳的等效电路参数如表 1 所示.

表 1 屏蔽外壳的等效电路参数

Table 1 Equivalent circuit parameters of shielded enclosure

参数	GA	GA-DE 算法
k_{10}	0.33	0.45
k_{20}	1.50	1.22
k_{30}	952.87	1 130

根据算法参数结果代入公式(5)计算 Q 点屏蔽效能与仿真结果对比如图 4 所示。

由图 4 可知,算法提取参数后的 Q 点屏蔽效能结果与仿真结果有着较好的重合性和趋势一致性,验证了算法计算屏蔽效能方法的准确性和可靠性,算法结果与仿真结果存在微小差异是由于实验测试中存在误差造成。在 CPU 为 Inter Core I7 的计算机上 CST 仿真用时约 60 000 s,而本文方法用时仅 400 s,效率有了很大的提高。同时,本文算法对不规则外壳开孔的屏蔽效能也能有效预测,也更容易分析各参数对外壳屏蔽效能的影响。

3 机箱外壳电磁屏蔽优化分析

利用 GA-DE 算法获取的等效参数,将壳体中轴线上各点屏蔽效能关于频率的平均值作为参考值,根据公式(5)可以得到屏蔽效能与中轴线上点距离壳体正面距离的关系如图 5 所示。

由此可知,距离开孔面的距离越远,屏蔽效能数值越大,外壳电磁屏蔽效果越好;距离开孔面的距离越近,屏蔽效能数值越小,外壳电磁屏蔽效果越差。实际应用中外壳屏蔽时应将辐射干扰源远离开孔面摆放,提高外壳的电磁屏蔽性能。

4 结论

本文通过 GA-DE 算法处理仿真获取的外壳几何中心处的屏蔽效能信息,得到外壳等效传输线电路模型的相关参数,然后对开孔外壳中轴线上其他点的屏蔽效能进行研究,对比了算法结果与仿真结果,重合性较好,在 100~1 000 MHz 内走势基本一致,证明了算法提取参数后计算得到屏蔽效能结果的正确性和准确性,并通过算法提取的参数计算了距离壳体开孔面不同距离的屏蔽效能情况,为屏蔽体内辐射源的摆放位置提供了依据。

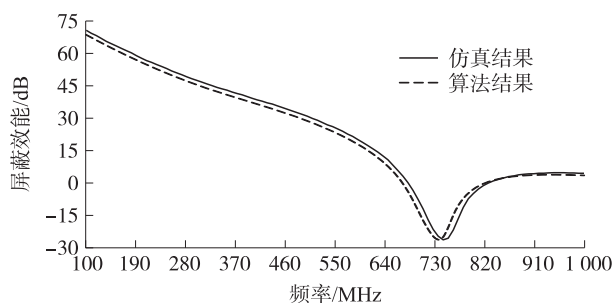
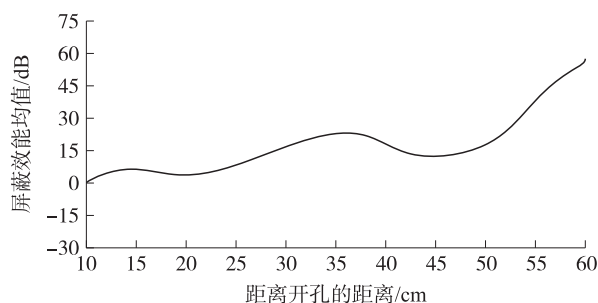
图 4 Q 点屏蔽效能仿真结果和算法结果对比Fig. 4 Comparison of Q -point shielding effectiveness simulation results and algorithm results

图 5 距离开孔面距离对屏蔽效能的影响

Fig. 5 The influence of the distance from the opening surface on the shielding effectiveness

[参考文献] (References)

- [1] 白婉宁,赵阳,刘强强,等. 基于孔缝设计的开关电源外壳电磁屏蔽特性研究[J]. 南京师范大学学报(工程技术版), 2019,19(4):86-91.
- [2] 曾美玲,蔡金良,易早,等. 孔缝对金属腔体强电磁脉冲耦合特性影响研究[J]. 强激光与粒子束,2021,33(4):39-48.
- [3] TAKAHASHI N, NAKAZAKI S, MIYAGI D. Optimization of electromagnetic and magnetic shielding using ON/OFF method[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2010,46(8):3153-3156.
- [4] SEVGI L. Electromagnetic screening and shielding-effectiveness (SE) modeling [J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2009,51(1):211-216.
- [5] 王永安,赵阳,蓝雨晨,等. 基于进化差分算法的环形电感建模及应用[J]. 南京师范大学学报(工程技术版), 2020, 20(3):32-37.
- [6] 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.

-
- [7] NIE B L, DU P A. Electromagnetic shielding performance of highly resonant enclosures by a combination of the FETD and extended Prony's method[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2014, 56(2): 320–327.
- [8] YAN Z, QIN F, CAI J. Shielding effectiveness of materials under the excitation of high-power microwave[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2020, 62(5): 2317–2320.
- [9] 周泽伦. 带孔缝箱体电磁屏蔽效能的研究[J]. 西安科技大学学报, 2016, 36(1): 122–126.
- [10] 胡溥宇. 任意平面波辐照下开孔矩形腔体屏蔽效能快速计算方法[J]. 电工技术学报, 2018, 33(15): 3651–3660.
- [11] ROBINSON M P, TURNER J D, THOMAS D W P, et al. Shielding effectiveness of a rectangular enclosure with a rectangular aperture[J]. Electronics Letters, 1996, 32(17): 1559–1560.
- [12] 张亚普, 达新宇, 谢铁城. 孔缝箱体屏蔽效能电磁拓扑分析模型[J]. 强激光与粒子束, 2014, 26(2): 228–233.
- [13] 焦重庆, 牛帅, 李琳. 复合材料工频电场和工频磁场屏蔽效能实验研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(10): 1–6.

[责任编辑: 陈 庆]