文章编号:1674-2974(2024)10-0116-08 DOI:10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2024205

燃料电池控制器的电磁干扰分析

罗宝军[1†],陶佳霖[2],梁薛霖[1],杨加瑶[1],周菊光[1],付建勤[1],段雄波[3]
(1. 湖南大学 机械与运载工程学院,湖南 长沙,410082;
2. 中南大学 机电工程学院,湖南 长沙,410083;
3. 中南大学 能源科学与工程学院,湖南 长沙,410083)

摘 要:为了研究燃料电池控制器(Fuel Cell Controller, FCU)的电磁干扰(Electromagnetic Interference,EMI)特性,采用差分进化算法建立等效辐射源,基于近场扫描方法测试FCU的磁场,通过对比等效辐射源产生的磁场和测试的磁场,获得各频点在X、Y、Z方向的平均误差均在3%左右;利用重构模型对印制电路板(Printed Circuit Board,PCB)上方半空间的远场辐射进行仿真模拟.结果表明,仿真电场与实测电场的平均误差在4.1 dB左右,在测量频带范围内整体趋势一致,验证了差分进化算法重构的等效辐射源具有较高的精度,该方法可以用来预测辐射源的影响.研究了重构等效辐射源对金属外壳的影响,仿真结果表明,PCB板的远场辐射降低了10 dB左右,金属外壳能有效减少FCU向外产生辐射.

关键词:近场扫描;燃料电池;电磁干扰;控制器;等效辐射源
中图分类号:U46;U461.99 **文献标志码**:A

Electromagnetic Interference Analysis of a Fuel Cell Controller

LUO Baojun[1†], TAO Jialin[2], LIANG Xuelin[1], YANG Jiayao[1], ZHOU Juguang[1], FU Jianqin[1], DUAN Xiongbo[3]
(1. College of Mechanical and Vehicle Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;
2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University, Changsha 410083, China;
3. School of Energy Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: To study the Electromagnetic Interference (EMI) characteristics of the Fuel Cell Controller (FCU), this paper develops an equivalent radiation source using the differential evolution algorithm and measures the magnetic field of the FCU controller based on the near-field scanning method. By comparing the magnetic field generated by the equivalent radiation source with the measurement, the average error in X, Y, and Z direction at each frequency point is about 3%. Then, the far-field radiation in the half-space above the PCB board is simulated with the reconstructed model, and the results show that the average error between the simulated electric field and the measured electric field is around 4.1 dB, and the overall trend tends to be consistent in the measurement band range, which shows the accuracy of the equivalent radiation source reconstructed based on differential evolution algorithm. Thus, this method can be used for predicting the effects of the radiation sources. Furthermore, this paper

* **收稿日期**:2023-07-24
基金项目:国家重点研发计划资助项目(2020YFB1506004), National Key Research and Development Program of China(2020YFB1506004)
作者简介:罗宝军(1981—),男,湖南新化人,湖南大学副教授
† 通信联系人, E-mail:luobaojun@hnu.edu.cn

also investigates the effect of the metal shell based on the reconstructed equivalent radiation source, and the results show that far-field radiation of the PCB board is reduced by about 10 dB. Thus, the metal shell can effectively reduce the radiation interference generated by the FCU controller.

Key words: near-field scanning; fuel cells; Electromagnetic Interference (EMI); controller; equivalent radiation source

氢燃料电池是将储存在燃料和氧化剂中的化学能直接转化为电能,排放的主要产品是水和热,因此,氢燃料电池汽车(Fuel Cell Vehicle,FCV)被广泛认为是未来新能源汽车的重要方向之一,并被列入《氢能产业发展中长期规划(2021—2035 年)》[1],对改善未来能源结构、发展低碳交通具有深远意义.

燃料电池汽车的电子系统较传统汽车大幅增加,尤其是在燃料电池电堆系统中,DC/DC 变换器、空压机及空压机控制器、燃料电池控制器(FCU)、节电压巡检单元等多个电子系统集成在一起,导致电堆系统及整车电磁兼容问题非常复杂.由于超标的电磁干扰可能导致整个电子系统的误动作,降低系统的安全性和可靠性,为了保障燃料电池电堆系统安全可靠运行,我国于 2021 年发布了《燃料电池发动机电磁兼容性能试验方法》团体标准(T/CSAE 149—2020)[2],因此,燃料电池电堆电磁兼容特性研究对燃料电池汽车产业未来的发展非常关键[3].

根据电磁兼容(Electromagnetic Compatibility,EMC)问题的"三要素",从干扰源入手解决往往是最有效的,因此电磁干扰(EMI)问题的关键部分是如何准确高效地量化辐射干扰源.目前,国内外针对燃料电池汽车相关子系统的电磁兼容特性研究较少.苏丹[4]、李卫华[5]分析了燃料电池汽车 DC/DC 变换器的 EMC 特性,并提出燃料电池汽车 DC/DC 变换器在 EMC 设计中可采用的抑制干扰措施.罗宝军等[6]针对燃料电池汽车 DC/DC 变换器电磁兼容特性问题建立了燃料电池汽车 DC/DC 变换器的电磁仿真模型,仿真结果与实验结果的整体变化趋势一致,得到了较为可靠的 DC/DC 变换器仿真模型.张戟等[7]根据燃料电池汽车整车控制器的设计理论和涉及的 EMC 机理,指出燃料电池汽车电子零部件必做的 EMC 试验,并对相关试验结果进行了讨论.余召锋[8]以燃料电池汽车车载控制器为基础,从软、硬件方面分析了车载控制器的电磁抗扰措施,并提出车载控制器的 EMC 分层设计思想.谭理刚等[9]基于屏蔽衰减的三同轴法搭建测试台,试验结果表明双层屏蔽比单层屏蔽的屏蔽效能高 10 ~ 15 dB,研究结果可用于指导车载通信同轴电缆的选用及分段布局设计.Rendusara 等[10]提出了一种改进的 PWM 驱动系统逆变器输出滤波器,试验结果表明该滤波器有效地降低了燃料电池汽车电机端口上的差模和共模干扰电流.Al Sakka 等[11]比较了不同拓扑结构直流变换器的电磁干扰特性,便于为燃料电池汽车选择最合适的拓扑结构.Anak Justin 等[12]通过 LTSpice 仿真研究了不同功率变换器对燃料电池系统 EMC 的影响,并以实验结果为支撑,分析了变换器的传导和辐射干扰特性并讨论了如何快速识别影响 EMC 的因素.Lee 等[13]分析了氢燃料电池大功率线缆的电磁场,得出高压/电流线缆的 EMC 分析是防止产生电气功能安全问题的重要因素这一结论.综上所述,目前较少见到 FCU 的 EMI 特性相关公开报道,而且,由于 FCU 具体的电路结构属于供应商商业秘密且电路结构复杂,因此,对于燃料电池电堆集成厂商或整车厂商而言,在 FCU 的 PCB 板电路结构未知的情况下,主要依赖于试验方法.因此,开发出一种精度较高的 FCU 的 EMI 特性的仿真方法对工程开发具有重要意义.

因此,本文针对燃料电池系统 FCU 的 EMI 特性,首先介绍了基于差分进化算法的等效辐射源重构原理;然后基于该方法,构建了 FCU 的磁偶极子,并通过燃料电池系统 FCU 的 PCB 板的近场扫描测试,对重构的等效辐射源有效性进行验证;最后,基于验证的等效辐射源,对 FCU 的 EMI 特性进行仿真研究.

1　基于差分进化算法的等效辐射源构建

1.1　差分进化算法

Storn 等[14]提出差分进化算法,这是一种基于群体的自适应优化算法,模拟生物进化过程,包含有变

异、交叉与选择3种操作.基本进化思想是利用群体中任意2个矢量的差分作为第3个随机矢量的扰动项,F为缩放因子,取值为0~1,t表示进化的代数.

$$\boldsymbol{V}_i^t = \boldsymbol{d}_i^t + F(\boldsymbol{d}_{r1}^t - \boldsymbol{d}_{r2}^t) \tag{1}$$

式中:$\boldsymbol{V}_i^t$为变异矢量;$\boldsymbol{d}_i^t$为目标矢量.交叉过程中将$\boldsymbol{V}_i^t$与$\boldsymbol{d}_i^t$交叉生成$\boldsymbol{U}_i^t$,$\boldsymbol{U}_i^t$为试验矢量,若通过随机函数在0~1内随机生成的数小于事先预设的交叉参数C_{R},则执行交叉操作,否则不进行交叉.具体方式如式(2)所示.

$$\boldsymbol{U}_{ij}^t = \begin{cases} \boldsymbol{V}_{ij}^t, \text{if}(\text{rand}(0,1)) \geqslant C_{\mathrm{R}} \text{ or } i = j_{\text{rand}} \\ \boldsymbol{d}_{ij}^t, \text{otherwise} \end{cases} \tag{2}$$

为了使每次交叉过程矢量个体中至少有一个元素能进行交叉操作,强制选择其中一个元素进行交叉操作,其余元素则按照式(2)进行判断再进行交叉,能保证每次运算都能进行搜索.如式(3)所示,经过交叉过程产生的试验矢量$\boldsymbol{U}_i^t$与目标矢量$\boldsymbol{d}_i^t$竞争,若$\boldsymbol{U}_i^t$使得式(4)中的误差函数值G_k变小,则此时代表试验矢量比目标矢量性能更优异,并保存性能更为优异的试验矢量作为t+1代个体进行下一轮进化,否则再次进行变异与交叉过程.

$$\boldsymbol{d}_i^{t+1} = \begin{cases} \boldsymbol{U}_i^t, \boldsymbol{f}(\boldsymbol{U}_i^t) \leqslant \boldsymbol{f}(\boldsymbol{d}_i^t) \\ \boldsymbol{d}_i^t, \text{otherwise} \end{cases} \tag{3}$$

$$G_k = \sqrt{\frac{\left\| \boldsymbol{H}^{\text{cal}} - \boldsymbol{H}^{\text{ref}} \right\|}{\left\| \boldsymbol{H}^{\text{ref}} \right\|}} \tag{4}$$

式中:$\|\cdot\|$代表欧几里得范数;$\boldsymbol{H}^{\text{cal}}$为由等效辐射源计算得到的磁场;$\boldsymbol{H}^{\text{ref}}$为近场扫描实测磁场;$k$=$X$、$Y$、$Z$分别代表$X$、$Y$、$Z$方向的误差.由此可看出,每进行一次差分进化算法运算,下一代整体的计算结果不会比上一代差,从而保证整体矢量能向最优方向靠拢.

1.2 等效辐射源构建

首先需要设定个体总数N,每一个个体代表一个磁偶极子,在距离FCU的PCB表面高度为h的平面建立等效辐射源模型,各磁偶极子坐标为(x_n, y_n)(n=1,2,…,N),构成等效辐射源的磁偶极子可以用式(5)中的八维矢量$\boldsymbol{d}_n$来表示.

$$\boldsymbol{d}_n = \begin{Bmatrix} x_n, y_n, \text{Re}(\boldsymbol{M}_{n,x}), \text{Re}(\boldsymbol{M}_{n,y}), \text{Re}(\boldsymbol{M}_{n,z}), \\ \text{Im}(\boldsymbol{M}_{n,x}), \text{Im}(\boldsymbol{M}_{n,y}), \text{Im}(\boldsymbol{M}_{n,z}) \end{Bmatrix} \tag{5}$$

式中:x_n和y_n为第n个等效磁偶极子在直角坐标系中的位置;$\text{Re}(\boldsymbol{M}_{n,x})$、$\text{Re}(\boldsymbol{M}_{n,y})$、$\text{Re}(\boldsymbol{M}_{n,z})$分别为磁偶极子在$X$、$Y$、$Z$方向磁偶极矩的实部;$\text{Im}(\boldsymbol{M}_{n,x})$、$\text{Im}(\boldsymbol{M}_{n,y})$、$\text{Im}(\boldsymbol{M}_{n,z})$分别为磁偶极子在$X$、$Y$、$Z$方向磁偶极矩的虚部.假设近场扫描点的数量为$M$,$\boldsymbol{H}_{m,i}^{\text{model},n}$为第$n$个等效磁偶极子在第$m$个近场扫描点上第$i$个方向($i$=1、2、3分别代表$X$、$Y$、$Z$方向)上产生的磁场幅值分量,设近场扫描平面距离FCU的PCB板高度为z,扫描点坐标为(x_m, y_m, z)(m=1,2,…,M).由于磁偶极子和电偶极子具有对偶关系[15-16],根据电偶极子产生的电磁辐射可以推得磁偶极子在自由空间中某点产生的电磁辐射,由等效磁偶极子产生的磁场表达式为:

$$\begin{aligned} \boldsymbol{H}_{m,x}^{\text{model},n} = {} & K_{\mathrm{h}} k_0 f(r) M_{n,x} \left[-\frac{(y_m - y_n)^2 + (z-h)^2}{r^2} g(r) + h(r) \right] + \\ & K_{\mathrm{h}} k_0 f(r) M_{n,y} \left[\frac{(x_m - x_n)(y_m - y_n)}{r^2} g(r) \right] + \\ & K_{\mathrm{h}} k_0 f(r) M_{n,z} \left[\frac{(x_m - x_n)(z-h)}{r^2} g(r) \right] \end{aligned} \tag{6}$$

$$\begin{aligned} \boldsymbol{H}_{m,y}^{\text{model},n} = {} & K_{\mathrm{h}} k_0 f(r) M_{n,x} \left[\frac{(x_m - x_n)(y_m - y_n)}{r^2} g(r) \right] + \\ & K_{\mathrm{h}} k_0 f(r) M_{n,y} \left[-\frac{(z-h)^2 + (x_m - x_n)^2}{r^2} g(r) + h(r) \right] + \\ & K_{\mathrm{h}} k_0 f(r) M_{n,z} \left[\frac{(y_m - y_n)(z-h)}{r^2} g(r) \right] \end{aligned} \tag{7}$$

$$\begin{aligned} \boldsymbol{H}_{m,z}^{\text{model},n} = {} & K_{\mathrm{h}} k_0 f(r) M_{n,x} \left[\frac{(z-h)(x_m - x_n)}{r^2} g(r) \right] + \\ & K_{\mathrm{h}} k_0 f(r) M_{n,y} \left[\frac{(z-h)(y_m - y_n)^2}{r^2} g(r) \right] + \\ & K_{\mathrm{h}} k_0 f(r) M_{n,z} \left[-\frac{(x_m - x_n)^2 + (y_m - y_n)^2}{r^2} g(r) + h(r) \right] \end{aligned} \tag{8}$$

式中:

$$g(r) = -\frac{3}{(k_0 r)^2} + \mathrm{j}\frac{3}{k_0 r} - 1 \tag{9}$$

$$h(r) = \frac{2}{(k_0 r)^2} + \mathrm{j}\frac{2}{k_0 r} \tag{10}$$

$$f(r) = \frac{\mathrm{e}^{-\mathrm{j}k_0 r}}{r} \tag{11}$$

式中:$f(r)$为工作频率;r为等效磁偶极子源与近场扫描点的距离;k_0=2π/f;K_{h}=k_0/(4π).通过式(6)~式(11)可得,单个磁偶极子在自由空间内某点产生的磁场辐射矩阵方程(简写$\boldsymbol{A}_n \boldsymbol{M}_n = \boldsymbol{H}_m$,$n$=1,2,…,$N$;$m$=1,2,…,$M$).

$$\begin{bmatrix} a_{1x}^{n} & a_{1y}^{n} & a_{1z}^{n} \\ a_{2x}^{n} & a_{2y}^{n} & a_{2z}^{n} \\ a_{3x}^{n} & a_{3y}^{n} & a_{3z}^{n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_{nx} \\ M_{ny} \\ M_{nz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{mx} \\ H_{my} \\ H_{mz} \end{bmatrix} \tag{12}$$

根据叠加原理可以得到单个频点下 N 个等效磁偶极子在 M 个近场扫描点上产生的磁场辐射的方程,其表达式可简写成如下矩阵形式:

$$[\boldsymbol{A}_n]_{M\times N}[\boldsymbol{M}_n]_{N\times 1} = [\boldsymbol{H}_m]_{M\times 1} \tag{13}$$

式中:$\boldsymbol{A}_n$ 为等效磁偶极子源与扫描场的转换系数矩阵;$\boldsymbol{M}_n$ 为各磁偶极子待求磁偶极矩;$\boldsymbol{H}_m$ 为通过近场扫描获取的各扫描点的 X、Y、Z 方向的磁场强度幅值.

差分进化算法进行等效辐射源迭代流程图如图 1 所示. 首先对磁偶极子进行初始化,为磁偶极子各方向的分量提供初始幅值与相位,以此作为算法迭代进化中的第一代磁偶极子源. 经变异操作后进行交叉生成试验磁偶极子(试验矢量),分别计算由目标磁偶极子源产生的磁场与实测磁场的相对误差以及试验磁偶极子源产生的磁场与实测磁场的误差,通过比较,误差值小的磁偶极子作为下一代个体. 按照该方式重复迭代,不断更新磁偶极子,直至优化后的等效磁偶极子源产生的磁场与近场扫描实测磁场之间的误差小于预设值或者差分进化算法迭代次数达到预设的最大迭代次数,则算法终止[15].

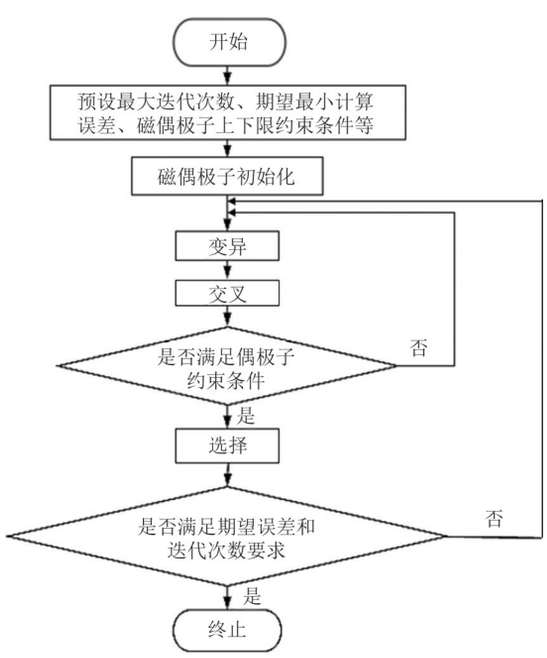


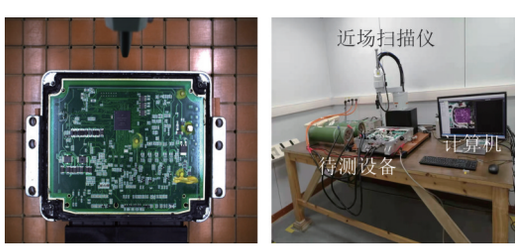
图 1　差分进化算法进行等效辐射源迭代流程图

Fig.1　Iteration flowchart of the differential evolutionary algorithm for equivalent radiation sources

2　近场扫描测试及仿真模拟

2.1　FCU 近场扫描测试

FCU 的近场扫描测试系统如图 2 所示. 图 2(a)为本文研究的待测设备,即为 FCU 的 PCB 板,将 PCB 板放入金属外壳内. 在近场扫描测试中,拆除底部金属外壳,将 PCB 板裸露在外,PCB 板位置保持恒定且与扫描平面平行,测量过程中设备均处于正常工作状态. 为了降低线缆辐射对近场扫描测试的影响,采用金属箔纸包裹线缆以及各接头,让线缆的电磁辐射小于环境背景噪声,以保证测试结果的可靠性[16]. 针对该控制单元的测量,扫描方式采用平面扫描,共有 34×25=850 个近场扫描点,扫描步长为 5 mm,扫描探头为磁场探头,分别测量 X、Y、Z 方向的磁场幅度值,测量频带为 30~1 000 MHz. 磁场探头在机械臂的控制下(由计算机中的软件控制),沿着预设的移动路径和扫描步长移动并采集信号,扫描平面与 PCB 板距离为 10 mm,在测试频带范围内均远小于 1/6 波长.



(a)待测设备　　(b)近场扫描平台

图 2　FCU 的近场扫描测试系统

Fig.2　Near-field scanning test system of FCU

单探头平面近场扫描示意图如图 3 所示. 磁场探头接收到的信号值(功率)经过频谱仪采样并通过信号接口将扫描结果保存在计算机中,将近场扫描得到的功率数据换算成电压,并根据探头校准得到天线系数,通过式(14)将功率数据换算成磁场值. 近场扫描磁场探头天线系数与频率关系曲线如图 4 所示.

$$H = U + K_{\mathrm{H}} + G_{\mathrm{H}} \tag{14}$$

式中:K_{H} 为磁场探头天线系数;G_{H} 为增益;U 为由功率换算得到的电压值;H 为近场扫描磁场探头的频率. 在 EMC 近场扫描测试中,探头负载阻抗为 50 Ω,

可得知端口接收电压为 $U=P+47$ dB,因此,电压与功率 P 之间的关系由阻抗值决定,与其他因素无关.

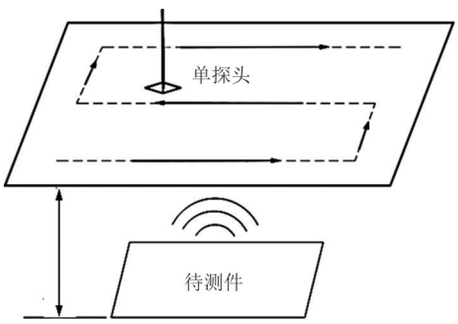


图 3 单探头平面近场扫描示意图

Fig.3 Schematic of single probe near-field scanning

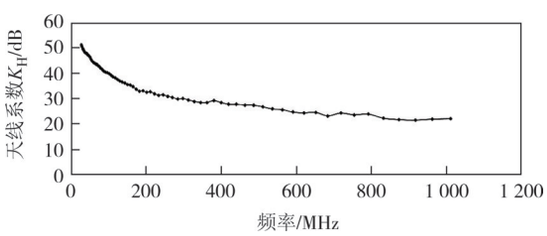


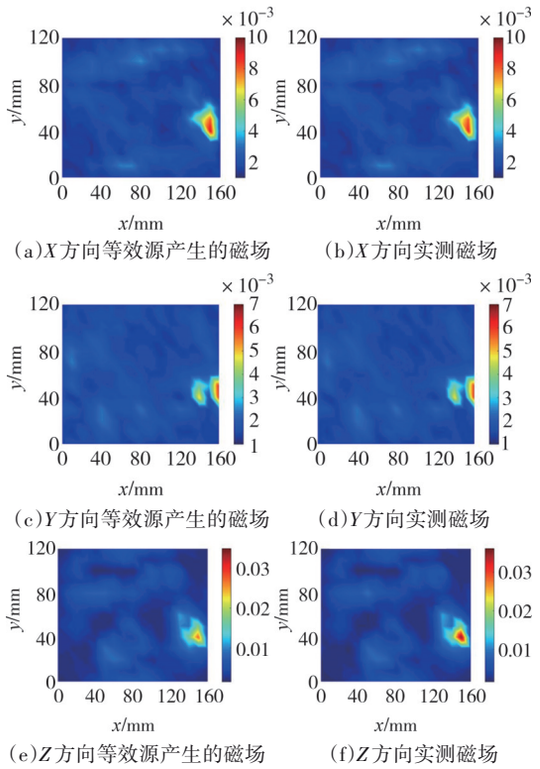
图 4 近场扫描磁场探头天线系数与频率关系曲线

Fig.4 Relationship curve between antenna coefficient and frequency of near-field scanning magnetic field probes

2.2 PCB 板等效辐射源重构

磁偶极子在 PCB 板上呈阵列形式布置,尺寸为 160 mm×120 mm. 根据测试得到的近场磁场数据并结合差分进化算法,将算法优化目标精度设为 0.1,差分矢量缩放因子 F 设为 0.2~0.8,即差分矢量缩放因子 F 在迭代过程中可随迭代次数而变化,交叉参数 C_R 设为 0.5,由此通过迭代计算得到了 PCB 板辐射的等效磁偶极子源模型. 在 43.81 MHz 频率下,等效源产生的磁场和实测磁场对比如图 5 所示. 由图 5 可知,基于等效磁偶极子源产生的磁场与实测磁场几乎完全一致. 具体来说,X、Y、Z 3 个方向上磁场幅值的平均误差分别为 2.6%、2.3% 和 3.8%,因此,基于等效磁偶极子源模型的预测磁场与实测磁场在离 PCB 板 10 mm 处具有较高的一致性.

为了进一步验证磁偶极子源模型在多个频点的准确性,首先对 PCB 板正上方 1 m 处电场强度进行 2 次测量,并分 2 次对多个区间内电场强度的峰值取值,选取电场强度的峰值对应的频率为频点,测试结果如图 6 所示. 在 798.98~1 000 MHz 内电场强度值基本相等,最后共得到 26 个频点,频点中频率最大值为 798.98 MHz.



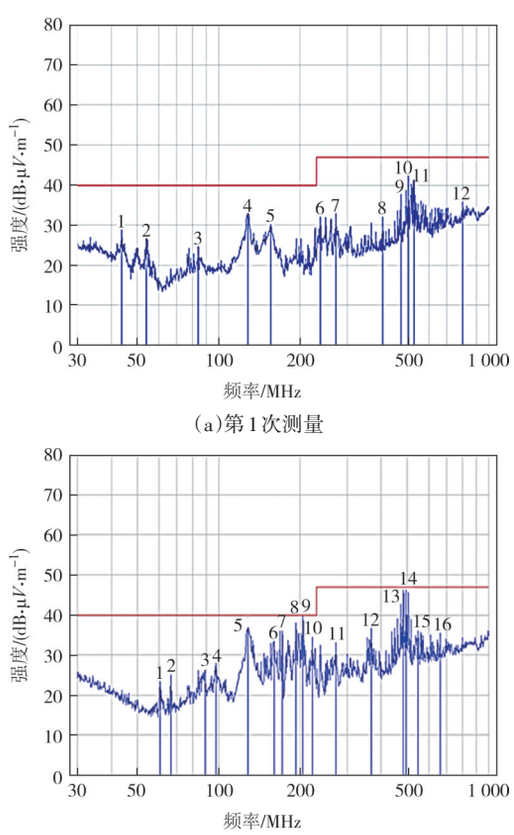
(a)X 方向等效源产生的磁场 (b)X 方向实测磁场

(c)Y 方向等效源产生的磁场 (d)Y 方向实测磁场

(e)Z 方向等效源产生的磁场 (f)Z 方向实测磁场

图 5 等效源产生的磁场和实测磁场对比

Fig.5 Comparison of the magnetic field generated by the equivalent source and the measured magnetic field



(a)第 1 次测量

(b)第 2 次测量

图 6 PCB 板正上方 1 m 处电场强度

Fig.6 The electric field 1 meter directly above of PCB

对26个频点近场扫描磁场进行等效磁偶极子源重构,重构过程与前面所述一致,由于在26个频点下获得了大量的近场扫描磁场数据和仿真磁场数据,因此对各频点下重构的等效源模型产生的磁场与近场扫描所得磁场在X、Y、Z方向上的平均误差进行了计算. 如图7所示,X、Y、Z方向的平均误差均约为3%,最大误差分别为4.04%、4.03%和6.46%. 结果表明,重构的等效辐射源模型在30~1 000 MHz测量频带范围内具有较高的准确性.

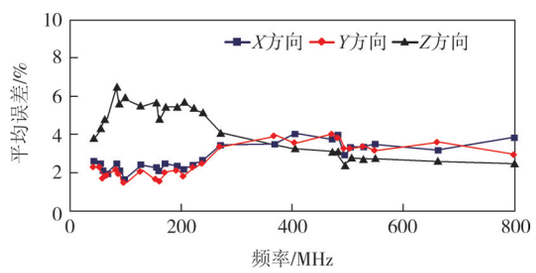
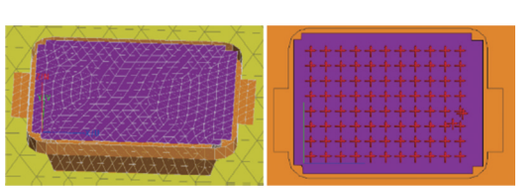


图7　X、Y、Z方向的平均误差

Fig.7　Mean error rate in three directions X, Y, Z

2.3　仿真分析

辐射源在自由空间的辐射区域可以分为3个部分:感应近场区、辐射近场区和远场区[17]. 由于近场扫描是针对感应近场区. 将经过验证的等效辐射源模型导入全波仿真软件FEKO中进一步进行仿真分析. 磁偶极子位置及三维仿真模型如图8所示,设备正下方为长1.5 m、宽1 m的桌面,可看作地平面,PCB板尺寸约为160 mm×120 mm,PCB厚度为1.6 mm,介质的相对介电常数ε_r为4.4,介电损耗正切值tanδ为0.02,等效磁偶极子呈阵列放置.



(a)局部三维仿真模型　　(b)磁偶极子位置示意

图8　磁偶极子位置及三维仿真模型

Fig.8　Magnetic dipole position and 3D simulation model

等效磁偶极子的位置及其磁偶极矩参数可以通过激励源的形式编写,并批量导入FEKO的工程文件中. 通过仿真得到这26个频点下PCB板正上方1 m处的电场强度值,并与实测电场强度进行对比,如图9所示,由此可以得到在测量频带范围内,仿真电场值与实测电场值的平均误差在4.1 dB左右,实测电场和仿真电场整体趋势基本一致,因此,再次验证通过差分进化算法重构的等效磁偶极子源模型精度较高.

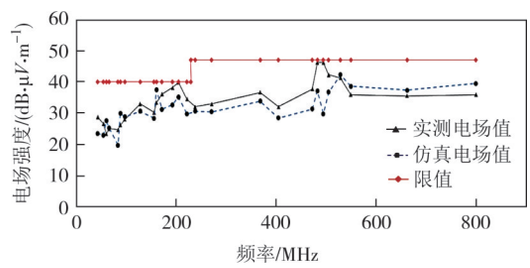


图9　测量频带范围内实测和仿真电场强度值与限值对比

Fig.9　Comparison of measured and simulated electric field values with limits in the measurement band range

图10为PCB板正上方不同距离的电场强度. 从图10中可以看出,随着距离增加,PCB板的辐射电场强度值逐渐减小. 在PCB板上方0.2 m处,平均电场强度为49.75 dB·μV/m. 为了降低FCU控制器对其他设备的影响,在实际应用中应使各设备之间保持一定的距离.

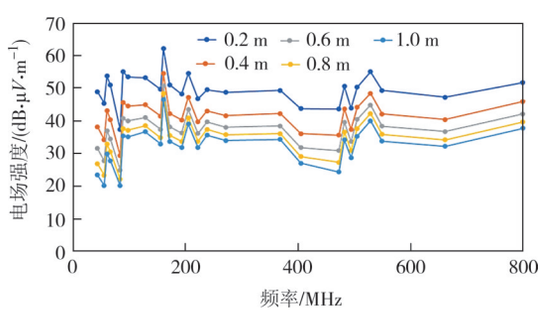


图10　PCB板正上方不同距离的电场强度

Fig.10　Electric field at different distances above the PCB

由于在PCB板上方0.6 m处,电场平均强度为37.07 dB·μV/m,因此,为了避免FCU控制器对燃料电池堆其他模块如节电压巡检模块的影响,有必要进一步研究FCU控制器的辐射抑制措施. 根据王雪华等[18]的研究,燃料电堆各设备安置在一起,通常采用外壳屏蔽来抑制辐射干扰,本文进一步研究FCU添加金属外壳后的辐射情况.

图11为FCU有、无金属外壳时远场辐射对比,其中Φ=0°时是YZ平面,φ=90°时是XZ平面,σ=90°时是XY平面. 由图11可知,添加金属外壳后,PCB板在水平方向和垂直方向的远场辐射普遍降低了10 dB左右,因此,金属外壳能有效减少FCU向外产生的辐射干扰.

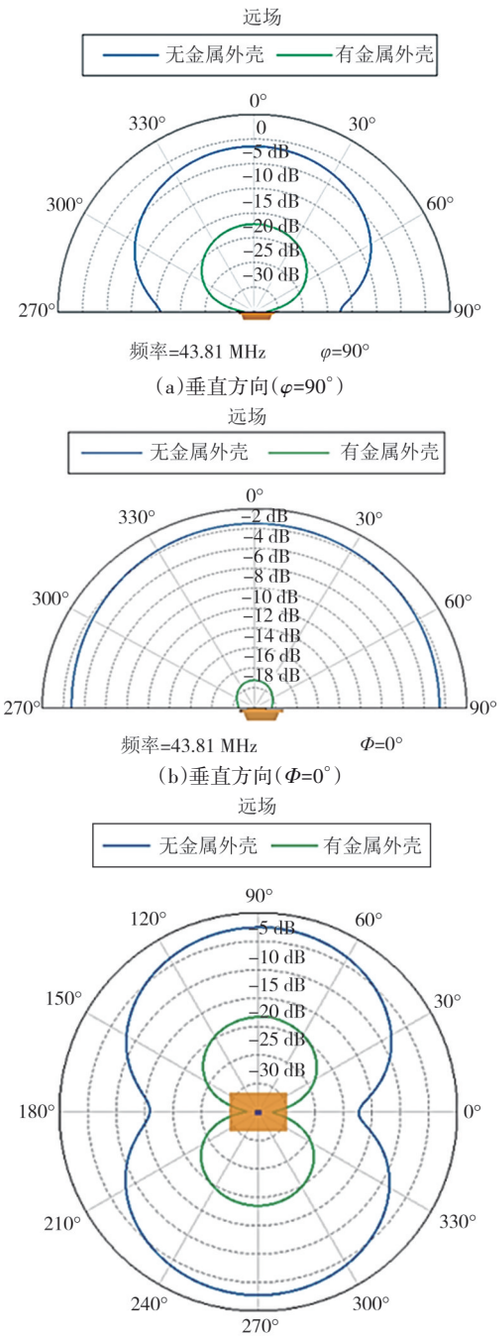


图 11 FCU 有、无金属外壳时远场辐射对比

Fig.11 Comparison of FCU far-field radiation with and without metal casing

3 总 结

本文主要介绍了近场扫描原理及其在分析电子设备的电磁干扰(EMI)方面的应用,通过结合自适应进化算法——差分进化算法对燃料电池 FCU 控制器 PCB 板进行了等效辐射源重构.

1)通过计算重构的等效辐射源产生的磁场与近场扫描实测的磁场进行对比,发现平均误差在 3% 左右,在 30~1 000 MHz 测量频带范围内 X、Y、Z 方向上磁场幅值的最大误差分别为 4.04%、4.03% 和 6.46%,验证了基于差分进化算法用于构建等效辐射源方法的准确性.

2)利用重构的模型在测量频带范围内对 PCB 板上方的电场进行仿真,结果显示随着距离的增加,PCB 板产生辐射电场值逐渐减小,并且上方 1 m 处的电场与实测电场的平均误差在 4.1 dB 左右,整体趋势一致. 此外,研究了有、无金属外壳时 PCB 板上方半空间内的远场辐射,结果显示金属外壳能有效减少 FCU 控制器向外产生的辐射干扰. 本文研究结果为 FCU 控制器的 EMI 分析及开发提供了参考.

参考文献

[1] 中华人民共和国国家发展和改革委员会,国家能源局. 氢能产业发展中长期规划(2021—2035 年)[EB/OL]. (2023-03-23)[2023-07-24]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghwb/202203/t20220323_1320038_ext.html.
National Development and Reform Commission, National Energy Administration. Medium and long term plan for the development of hydrogen energy industry (2021—2035) [EB/OL]. (2023-03-23) [2023-07-24]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghwb/202203/t20220323_1320038_ext.html.

[2] 《燃料电池发动机电磁兼容性能试验方法》团体标准:T/CSAE 149—2020 [EB/OL]. (2021-05-17)[2023-07-24]. http://www.ttbz.org.cn/StandardManage/Detail/46081/.
Group Standard for Electromagnetic Compatibility Performance Test Methods of Fuel Cell Engines: T/CSAE 149—2020[EB/OL]. (2021-05-17)[2023-07-24]. http://www.ttbz.org.cn/StandardManage/Detail/46081/.

[3] 蒋莉, 柳海明, 陈希琛, 等. 燃料电池发动机电磁兼容测试方法研究[J]. 安全与电磁兼容,2021(1):47-49.
JIANG L, LIU H M, CHEN X C, et al. Research on EMC test methods for fuel cell engine[J]. Safety & EMC,2021(1):47-49.(in Chinese)

[4] 苏丹. 燃料电池轿车用 DC/DC 变换器的 EMC 研究[D]. 上海:同济大学, 2008.
SU D. Research on EMC of DC/DC converter for fuel cell electric vehicles[D]. Shanghai:Tongji University,2008.(in Chinese)

[5] 李卫华. 燃料电池轿车用 DC/DC 变换器电磁兼容(EMC)技术的研究[D]. 上海:同济大学, 2003.
LI W H. Research on electromagnetic compatibility (EMC) technology of DC/DC converter for fuel cell electric vehicles[D]. Shanghai:Tongji University,2003.(in Chinese)

[6] 罗宝军, 杨加瑶, 梁薛霖. 燃料电池汽车 DC/DC 变换器电磁

兼容研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2023, 50(4): 48-54.
LUO B J, YANG J Y, LIANG X L. Study on electromagnetic compatibility of fuel cell vehicles' DC/DC converter[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2023, 50(4): 48-54. (in Chinese)

[7] 张戟, 孙泽昌. 燃料电池汽车整车控制器电磁兼容性研究与试验[J]. 安全与电磁兼容,2006(5):65-69.
ZHANG J, SUN Z C. The EMC theory study and test of VMS controller in FCV-fuel cell vehicle[J]. Safety & EMC,2006(5): 65-69.(in Chinese)

[8] 余召锋.燃料电池汽车及其关键部件的电磁兼容性研究[D]. 上海:同济大学, 2004.
YU Z F. Study on EMC of FCEV and its key components[D]. Shanghai: Tongji University,2004.(in Chinese)

[9] 谭理刚, 李高磊, 向云秀, 等. 车载通信同轴电缆及连接器屏蔽效能研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2023, 50(4): 31-37.
TAN L G, LI G L, XIANG Y X, et al. Research on shielding effectiveness of automotive communication coaxial cables and connectors[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2023,50(4):31-37.(in Chinese)

[10] RENDUSARA D A, ENJETI P N. An improved inverter output filter configuration reduces common and differential modes d*v*/d*t* at the motor termin als in PWM drive systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1998, 13(6): 1135-1143.

[11] AL SAKKA M, VAN MIERLO J, GUALOUS H, et al. Comparison of 30 kW DC/DC converter topologies interfaces for fuel cell in hybrid electric vehicle [C]//Power Electronics and Applications, 13th European Conference on Barcelona in Spain, September 8-10,2009. Barcelona:IEEE, 2009.

[12] ANAK JUSTIN E C, BOURIOT B, GUSTIN F, et al. Electromagnetic Compatibility Study of a GaN-based converter for fuel cell electric vehicle [C]//IECON 2022-48th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, October 17-20,2022. Brussels,Belgium:IEEE,2022:1-6.

[13] LEE S Y, CHOI J H. Numerical analysis of electromagnetic characteristic of high voltage/current cable for fuel cell electric vehicle (FCEV)[J]. Transactions of the Korean Hydrogen and New Energy Society, 2010, 21(3): 149-157.

[14] STORN R, PRICE K. Differential evolution-a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces [J]. Journal of Global Optimization, 1997, 11(4): 341-359.

[15] 舒余飞. 基于近场扫描的电磁干扰源重构算法研究[D]. 杭州: 浙江大学,2019.
SHU Y F. Reconstruction algorithm of electromagnetic interference source based on near-field scanning[D]. Hangzhou: Zhejiang University,2019.(in Chinese)

[16] WILSON P. On correlating TEM cell and OATS emission measurements [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility,1995,37(1):1-16.

[17] 琚俊健.基于近场扫描的复杂电磁干扰源分析方法研究[D]. 杭州:浙江大学,2023.
JU J J.Research on analysis method of complex EMI source based on near-field scanning [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2023.(in Chinese)

[18] 王雪华, 张伟, 杜青, 等. 燃料电池车用大功率DC/DC变换器电磁兼容性研究[J]. 电子产品世界, 2009, 16(12): 22-24.
WANG X H,ZHANG W,DU Q,et al. Research on EMC of high power DC/DC converter for fuel cell electric vehicles [J]. Electronic Engineering & Product World,2009,16(12):22-24.(in Chinese)