

文章编号:1000-582X(2013)02-007-05

# 汽车有限元建模及其电磁兼容预测的多软件联合仿真

汪泉弟,梁凌红,安宗裕,彭河蒙,刘青松

(重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室,重庆400044)

**摘要:**针对一般仿真软件建立大型复杂模型的局限性,提出了多软件联合仿真技术。该技术利用前处理软件 Hypermesh 高质量的导入汽车 CAD 模型并进行三角形网格剖分;采用 Matlab 编程从 Hypermesh 输出的网格数据文件中提取各部件单元的节点坐标数据,再以文本文件的形式输出,以便 Hfss 读取;在 Matlab 编写形成有限元网格模型的 VBS 程序,然后在 Hfss 中运行该程序读取单元节点坐标、形成整车的初始三角剖分网格。以点火系统电源线上的共模电流为干扰源,仿真分析了在该干扰源作用下车内外的电场分布情况。研究方法具有较强的通用性,对汽车整车级电磁兼容仿真建模具有很好的参考价值。

**关键词:**整车建模;软件联合仿真;EMC 预测;电磁辐射

**中图分类号:**TP391.9

**文献标志码:**A

## Finite element modeling and multi-software co-simulation in automobile EMC prediction

WANG Quandi, LIANG Linghong, AN Zongyu, PENG Hemeng, LIU Qingsong

(State Key Laboratory of Transmission Equipment and System Safety and Electrical New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** For general software in the limitation of large and complex structures' modeling, this article proposes a multi-software co-simulation technology. Hypermesh is a pre-processing software which can high-quality import and triangular CAD-models, taking advantage of this, the CAD-model of the car is meshed in Hypermesh. Using Matlab, the node coordinates data of each component's elements are extracted from the grid data file outputted by Hypermesh, and are exported in the form of text file for Hfss to read. VBS program is used to build the finite element model, which is written in Matlab, then runs in Hfss to read the node coordinates data and form the initial triangular-mesh model of the Automobile. Considering only the interference of the ignition system power line's common-mode current we simulated and analyzed the electric field distribution inside and outside of the automobile. This modeling method has a strong commonality, and is a good reference for automobile EMC simulation modeling.

**Key words:** vehicle modeling; software co-simulation; EMC prediction; electromagnetic radiation

**收稿日期:**2012-11-30

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(50877081)

**作者简介:**汪泉弟(1954-),女,重庆大学教授,博士生导师,主要从事电磁场理论及应用、电磁场数值计算及电磁兼容技术等方面研究,(E-mail) wangquandi@yahoo.com.cn.

由于电子设备在汽车上的大量应用,使得汽车内部的电磁环境日趋复杂和严峻。电子设备工作时产生的电磁干扰直接威胁着汽车的可靠性和安全性<sup>[1]</sup>,因此,汽车的电磁兼容(EMC: Electromagnetic Compatibility)问题日益引起汽车厂家、研究部门、驾乘人员的关注<sup>[2]</sup>。目前针对汽车 EMC 的研究主要集中在零部件<sup>[3~4]</sup>,也有少量量子系统级的研究<sup>[5]</sup>,但没有考虑车体的影响。汽车整车级的 EMC 研究几乎没有,其主要原因是汽车车体结构复杂,在 EMC 仿真软件中建立一个合理的整车仿真模型相当困难。EMC 的仿真计算首先需要建立可靠的几何模型,模型的可靠性不仅影响计算的效率而且直接影响到计算的准确性。目前国内还没有建立整车 EMC 模型可借鉴的有效方法,国外建立整车 EMC 仿真模型的方法是先由外部软件建立车体模型后,再导入电磁仿真软件进行计算<sup>[6~8]</sup>。导入电磁仿真软件的车体模型一般还需要进行一系列复杂的处理后才能进行仿真分析<sup>[9~10]</sup>,这种建模方法不利于实际工程应用和推广。

鉴于以上分析,提出一种多软件联合仿真技术,该技术应用了 Hypermesh、Hfss 和 Matlab 3 个软件对整车进行快速建模。利用此方法建立了汽车整车的 EMC 仿真模型,仿真分析了在点火系统干扰源作用下车内外的电场分布,以此验证整车 EMC 模型的可靠性。

## 1 整车快速有限元建模原理

建模仿真分析是在已有汽车 CAD 模型的基础上,利用 Hypermesh、Hfss 和 Matlab 软件建立汽车整车 EMC 仿真模型、进行仿真计算、输出可视化的计算结果。

Hfss 软件是基于有限元方法的电磁场数值计算软件,因具有解决电磁辐射问题的强大功能,被广泛应用于 EMC 仿真分析中。但 Hfss 与 CAD 的兼容性较差,直接导入的 CAD 模型图元丢失严重,由此建立的有限元网格常常出现重叠或缝隙且很难进行修改。前处理软件 Hypermesh 则可高质量的导入 CAD 模型,并能完成有限元网格的初步剖分。因 Hfss 与 Hypermesh 不具有兼容性,所以,经 Hypermesh 剖分的网格数据输出文件还需通过 Matlab 编程读取,再转化成 Hfss 可利用的数据文件。

### 1.1 汽车 CAD 模型的导入与剖分

汽车 CAD 模型接近实际车体,结构非常复杂,为了建模方便将汽车按其结构特点拆分为几个部

件,分别将各部件导入 Hypermesh 软件中进行处理。

汽车 CAD 模型中包含了很多小结构、倒圆、以及由线条围成的小面积等小几何特征,如图 1 所示。在 Hypermesh 进行剖分时这些小特征会产生很多细小的三角网格,不仅会在仿真时增加计算时间与内存,还会产生畸形网格,影响计算精度。因此,在保证不改变部件基本形状的基础上,需要对这些小特征进行清理。小结构较小而且是独立结构,直接删除不会影响到计算结果。倒圆一般连接着几个面,不能直接删除,可当作小面积特征来处理。对于不会影响基本结构的小面积特征,将其某些边删除使之形成较大的面积结构。

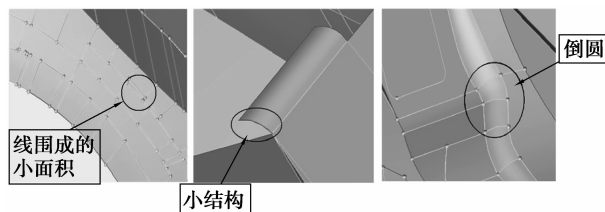


图 1 小几何特征

Hypermesh 自带的几何清理工具 geometry clean up,可以自动进行小几何特征的清理。在 geometry clean up 的 edit parameters 子面板里根据需要设置 target element size 的值,即设置目标网格单元的大小,然后点击 clean up,小于设定值的小面积的边将被自动删除。这一步执行完后,大部分的小几何特征都将被清理掉,但仍会留下一些会形成畸形单元的线条,因此需要进一步清理。利用 toggle edge 命令删除剩下的少许线条,使它们成为较大的面积结构。接下来就是利用 Automesh 工具进行三角网格剖分。以车门为例,过程如图 2 所示,由图 2 可看出导入 Hypermesh 的车门 CAD 模型有小面积结构,通过几何清理删除了小面积的边,避免了细小网格的生成,且保持了车门的基本形状。

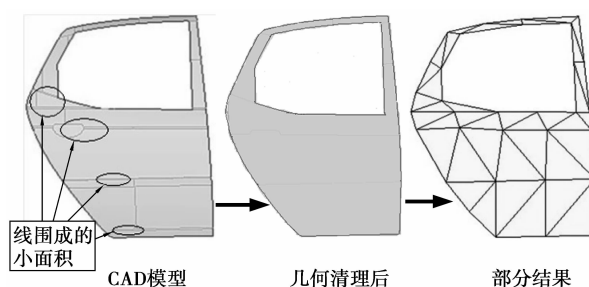


图 2 小几何特征的清理及剖分

各部件剖分完成后,在 Hypermesh 中打开所有网格数据文件,组合成车体框架的有限元模型。为避免各部件衔接处出现重叠节点,使用 equivalence 命令合并各部件衔接处同坐标的节点,最后再输出各部件的网格数据文件,以便单元节点坐标的提取。

### 1.2 节点信息的提取

利用 Hypermesh 的自动网格剖分命令 Automesh 完成剖分,然后输出模型的网格数据文件,Hypermesh 的输出文件包括 3 个部分:文件头、节点信息、单元信息,文件格式如下。

```

** ABAQUS.....HyperMeshVersion;8.0SR1
... ..
** Template;ABAQUS/STANDARD3D

```

文件头

NODE

```

node1   x   y   z
node2   x   y   z
... ..
noden   x   y   z

```

节点信息段

ELEMENT

```

element 1  node1  node2  node3
... ..
element i  node1  node2  node3
... ..
element n  node1  node2  node3

```

单元信息段

Hypermesh 数据输出文件的信息需要利用 Matlab 语言编程提取,然后再以文本文件的形式输出,以便 Hfss 可以读取。本文的方法是先提取单元信息段中每个单元的三个节点编号,再由编号遍历节点信息段提取节点坐标数据,Matlab 程序的算法如下:

1)按顺序从单元信息段的队列中提取出单元  $i$  对应的节点,读取其三个顶点的编号 node1,node2,node3;

2)在节点信息段中寻找单元  $i$  的三个节点的坐标  $(x_{i1}, y_{i1}, z_{i1}), (x_{i2}, y_{i2}, z_{i2}), (x_{i3}, y_{i3}, z_{i3})$ ;

3)将单元  $i$  对应节点的坐标数据按行输出到文本文件中。

### 1.3 有限元整车模型的建立

在 Matlab 编写形成有限元网格模型的 VBS (Visual Basic Script) 脚本程序,即:使用 opentextfile 命令打开 Matlab 输出的网格数据文本文件,readline 命令按行读取各单元对应节点的坐标数据,并使用画线命令 CreatePolyline 根据读入的

坐标数据绘制三角网格单元。程序中使用循环语句 do loop 依次循环进行单元节点坐标数据的提取及网格单元的绘制,直至文本文件中最后一个单元。在 Hfss 中运行 VBS 程序即可建立起用于汽车有限元仿真的初始模型,如图 3 所示。

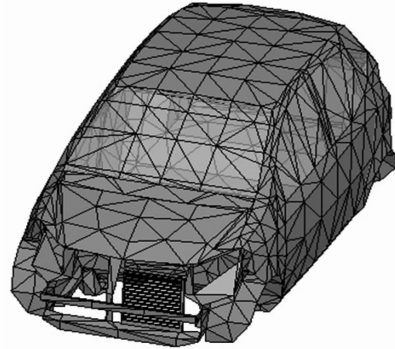


图3 仿真软件 Hfss 建立的汽车模型

## 2 电磁兼容仿真分析

以火花塞放电在点火线圈电源线上形成的脉冲电流为电磁干扰源<sup>[11]</sup>,按汽车辐射标准规定的带宽,研究 30 MHz~1 GHz 频段的电磁干扰在车内的分布。

### 2.1 导线辐射原理

当电磁信号频率超过 30 MHz 时,导线会产生明显的天线效应<sup>[11]</sup>,因此将电源线看作线天线,电源线上的干扰脉冲电流对外产生的电磁辐射可认为是由若干个电偶极子共同作用的结果<sup>[12-13]</sup>。位于坐标原点的电偶极子  $\dot{I}dl$  在空间产生的辐射电场  $E$  在球坐标系下的三个分量的相量形式为<sup>[14]</sup>

$$d\dot{E}_r = \frac{2\dot{I}dlk^3 \cos\theta}{4\pi\alpha\epsilon_0} \left[ \frac{1}{(kr)^2} - \frac{j}{(kr)^3} \right] e^{-jkr}, \quad (1)$$

$$d\dot{E}_\theta = \frac{\dot{I}dlk^3 \sin\theta}{4\pi\alpha\epsilon_0} \left[ \frac{j}{kr} + \frac{1}{(kr)^2} - \frac{j}{(kr)^3} \right] e^{-jkr}, \quad (2)$$

$$d\dot{E}_\varphi = 0. \quad (3)$$

其中,  $k = \omega \sqrt{\mu\epsilon}$  为相位常数,  $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}$  (F/m) 为自由空间的介电常数。

在电磁兼容领域,粗略地将  $r \geq \frac{\lambda}{2\pi}$  划分为远场区,  $r \leq \frac{\lambda}{2\pi}$  为近场区<sup>[14]</sup>。辐射场属于远区场,起作用的是  $1/kr$  的低次幂,因此,远场区的  $E_r \approx 0$ ,电场仅有  $\theta$  分量,于是有<sup>[14]</sup>

$$d\dot{E}_\theta = j \frac{\dot{I}dlk^2 \sin\theta}{4\pi\alpha\epsilon_0} e^{-jkr} = j \frac{\dot{I}dl\gamma \sin\theta}{2\lambda r} e^{-jkr}. \quad (4)$$

式中,  $\eta = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}}$  为自由空间波阻抗。

电源线上的电流看成是由无数个小电偶极子的电流组成, 每个电偶极子上的电流分布可看作常数。因此导线产生的辐射电场由所有电偶极子产生的电场叠加而成, 如图 4 所示。由于导线长度  $L$  与波长是可比拟的, 因此电源线上电流的相位差不能忽略, 所以位于  $z'$  处的电流元  $\dot{I}(z')dz'$  在  $P$  点产生的电场

$$d\dot{E}_\theta = j \frac{\dot{I}(z')dz' \eta \sin\theta'}{2\lambda r'} e^{-jkr'} \quad (5)$$

式中,  $r'$  为电流元  $\dot{I}(z')dz'$  到  $P$  点的距离。由于  $P$  点远离辐射源, 对于电场的振幅而言, 可以认为  $r' \approx r$ ,  $\theta' \approx \theta$ , 但是相位因子  $e^{-jkr'}$  中的波程差不能忽略, 可用  $r' \approx r - z' \cos\theta$  近似, 因此式(5)重写为

$$d\dot{E}_\theta = j \frac{\dot{I}(z')dz' \eta \sin\theta}{2\lambda r} e^{-jk(r-z' \cos\theta)} \quad (6)$$

于是导线电流在  $P$  点产生的总场应为所有电流元产生电场的叠加, 即:

$$\dot{E}_\theta = \int_0^L j \frac{\dot{I}(z') \eta \sin\theta}{2\lambda r} e^{-jk(r-z' \cos\theta)} dz' \quad (7)$$

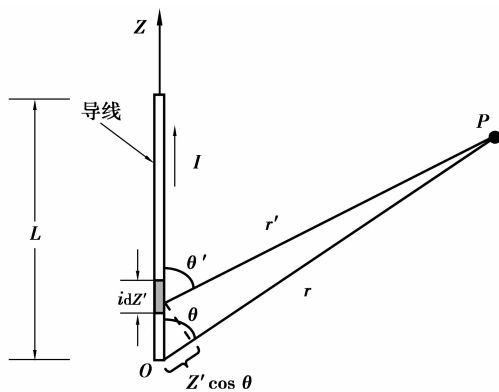


图 4 电源线电流辐射原理图

## 2.2 仿真模型的参数设置

式(7)适用于计算线天线在自由空间产生的电场, 而点火系统电源线位于车内, 车体材料主要由金属、玻璃等组成, 车体结构、形状和材料属性对天线的辐射电场有较大影响, 因此式(7)不能直接套用。

在 Hfss 中仿真时, 将车身的金属壳体设为有限导体边界, 玻璃窗设为阻抗边界, 车体前部的条形通风口, 具有裂缝天线效应, 因此处理成理想磁边

界条件。然后建立一个属性为空气的矩形框包围车体, 矩形框的底面设为理想导体边界并延伸为无限大来模拟大地, 其余的面设为吸收边界来模拟自由空间<sup>[7]</sup>。本文的吸收边界采用辐射边界, 根据辐射边界设置要求, 辐射边界至少距离辐射体  $\lambda/4$ <sup>[15]</sup>, 因此取中心频率(500 MHz)的波长为边界设置依据。

车身的金属材料设为不锈钢, 其相对磁导率  $\mu_r = 1$ , 电导率  $\sigma = 1.1 \times 10^6$  S/m; 玻璃材料的相对介电常数  $\epsilon_r = 5.5$ , 相对磁导率  $\mu_r = 1$ ; 电源线为铜质材料, 铜的相对介电常数  $\epsilon_r = 1$ , 电导率  $\sigma = 5.8 \times 10^7$  S/m。电源线沿车体长度方向水平放置, 距离车底板及车头前部分别为 500 mm 和 100 mm, 其长度为 250 mm 是点火系统初级端到蓄电池的距离。电源线的负载阻抗为蓄电池内阻, 由于蓄电池内阻复杂且阻值很小, 将其设为 20 m $\Omega$ <sup>[16]</sup>, 电源线的激励端设为电流源激励, 幅频特性如图 5 所示, 该电流是点火系统工作时在电波暗室测取的电源线上的共模电流。

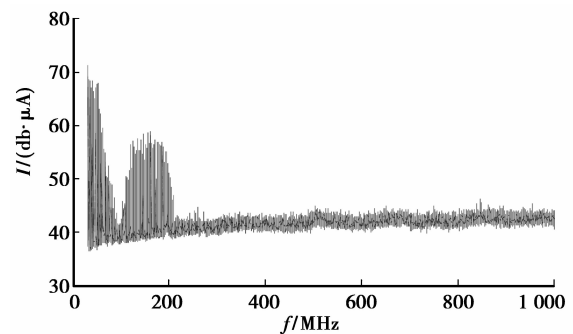


图 5 电源线上共模电流的幅频特性

## 2.3 仿真结果分析

图 6 给出了 200、500 和 700 MHz 三个频点的电场在车内的分布。从仿真结果可以看出车外电场的波动性比较规则、明显, 干扰源所在的车头场强较大, 车尾场强较小; 随着频率的增加, 辐射有所增强, 观察点离干扰源越近电场越强, 这些都与式(7)一致。从图 6 可观察到, 700 MHz 与 500 MHz 的电场相比略有减少, 这是由于 700 MHz 的干扰源电流幅值为 40.2 dB/ $\mu$ A, 而 500 MHz 的电流幅值为 43.9 dB/ $\mu$ A, 根据式(7)辐射场强与电流幅值成正比, 因此出现了尽管频率更高, 但场强反而有所下降的情况。在车内受车壳影响, 电磁波发生了多次反射形成驻波, 有些地方电场被明显加强, 且频率越高越显著, 如图 6(b)、(c)所示。

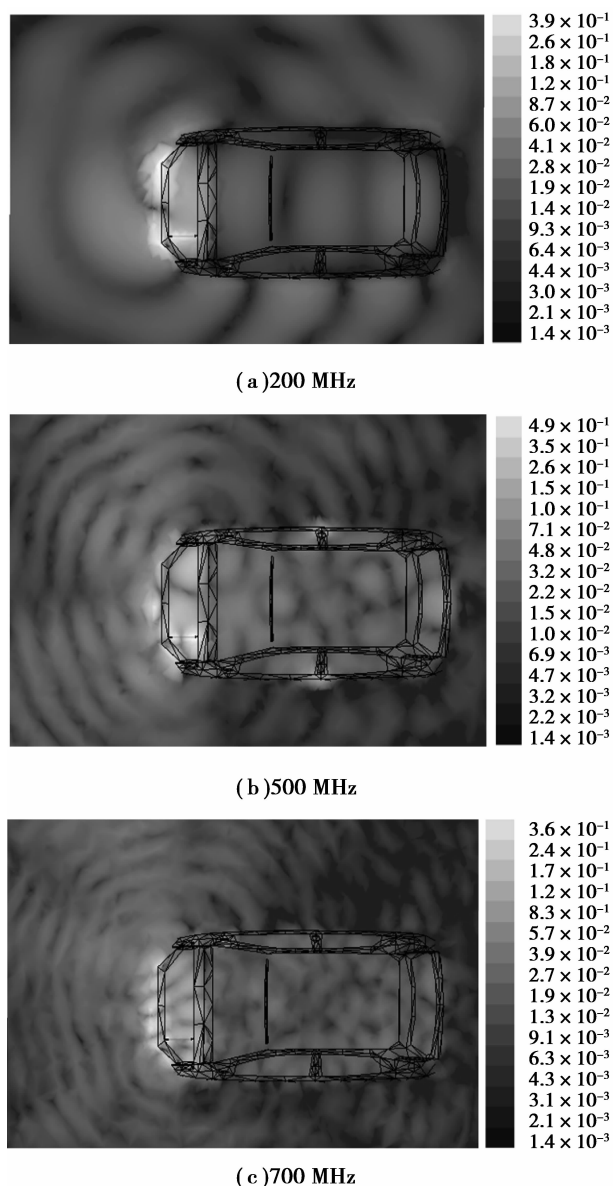


图 6 横向剖面场强分布图

### 3 结 论

根据 Hypermesh、Hfss 和 Matlab 软件的特点,探索了一种直接通过汽车 CAD 模型,快速建立有限元模型的方法,大大提高了汽车整车级电磁兼容仿真分析的效率。仿真分析了点火系统干扰源作用下汽车内外的电场空间分布情况,得到以下结论:

1)应用本文方法进行有限元建模,不需重新建立汽车的三维模型,同时减少人工投入,过程省时便利,且该方法具有很强的通用性,可以应用于不同的车型,对其他复杂物体的有限元建模也有借鉴作用。

2)掌握电磁干扰在车内的分布情况,可合理布置电子设备以避开强干扰区,从而实现汽车电系的电磁兼容设计。

3)通过对车内干扰源及分布情况的掌握,可采取有效的方法来改善车内的电磁环境。

#### 参考文献:

- [1] 徐立. 我国汽车电磁兼容技术发展状况[J]. 安全与电磁兼容, 2003(1):35-37.  
XU Li. Overview on automotive EMC research at home[J]. Safety & EMC, 2003(1):35-37.
- [2] 李旭, 吴存学, 何举刚, 等. 汽车发动机点火系统电磁兼容优化技术研究[J]. 汽车技术, 2010(5):22-26.  
LI Xu, WU Cunxue, HE Jugang, et al. Research on electromagnetic compatibility optimization technology for automotive engine ignition system[J]. Automobile Technology, 2010(5):22-26.
- [3] 汪泉弟, 李飞, 周尚华, 等. 汽车雨刮器电机电磁辐射干扰预测模型[J]. 重庆大学学报, 2010, 33(4):26-30.  
WANG Quandi, LI Fei, ZHOU Shanghua, et al. Prediction model on the radiated electromagnetic interference of wiper motor in automobile[J]. Journal of Chongqing University, 2010, 33(4):26-30.
- [4] 郑亚利, 俞集辉, 汪泉弟, 等. 面向点火系统电磁兼容预测的火花塞动态电路模型[J]. 电工技术学报, 2011, 26(2):8-13.  
ZHENG Yali, YU Jihui, WANG Quandi, et al. Dynamic circuit model of the spark plug for EMC prediction of ignition system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(2):8-13.
- [5] 汪泉弟, 刘庆升, 贾晋, 等. 抑制汽车点火系统电磁干扰的光电隔离方法[J]. 重庆大学学报, 2011, 34(2):14-18.  
WANG Quandi, LIU Qingsheng, JIA Jin, et al. The optical isolation method of suppressing electromagnetic interference of automotive ignition system[J]. Journal of Chongqing University, 2011, 34(2):14-18.
- [6] Jobava R G, Bogdanov F G, Gheonjian A L, et al. Analysis of influence of vehicle bodyshell on the characteristics of wire antennas using a new MoM-based EM/EMC solver[C]// Proceedings of the 2003 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, June 22-27, 2003, Columbus, Ohio. Piscataway:IEEE Press, 2003, 4:831-834.
- [7] Ankarson P, Carlsson J. FDTD: simulation of the electrical environment for vehicles by using CAD-data [C] // Proceedings of the 2002 IEEE thirth International Symposium on Electromagnetic Compatibility, May 21-24, 2002, Beijing, China. Piscataway:IEEE Press, 2002:272-275.

(下转第 36 页)

- 28(5):85-89.  
SHEN Shuguang, WANG Guangjun, CHEN Hong. Application of RLS-SVM in identification and control for inverse dynamics of system[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(5):85-89.
- [8] 陈红, 王广军, 王志杰, 等. 基于最小二乘支持向量机的模糊辨识及其在热工对象逆系统建模中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2010(29):103-106.  
CHEN Hong, WANG Guangjun, WANG Zhijie, et al. Fuzzy identification based on least squares support vector machine and its application on modeling the inverse system of thermal object[J]. Proceedings of the CSEE, 2010(29):103-106.
- [9] 李益国, 沈炯. 基于  $v$ -支持向量回归的 T-S 模糊模型辨识[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(18):148-153.  
LI Yiguo, SHEN Jiong. T-S fuzzy modeling based on  $v$ -support vector regression machine[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(18):148-153.
- [10] Suykens J A K, Lukas L, Vandewalle J. Sparse approximation using least squares support vector machines [C] // Proceedings of the 2000 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS 2000), May 28-31, 2000, Geneva, Switzerland. Piscataway: IEEE Press, 2000, 2:757-760.
- [11] 王广军, 李勇, 吴景兴. 锅炉受热面热力过程的通用数学模型[J]. 中国电机工程学报, 1998, 18(4):254-257.  
WANG Guangjun, LI Yong, WU Jingxing. General model of thermal process of the boiler heated surface [J]. Proceedings of the CSEE, 1998, 18(4):254-257.
- [12] 王广军, 章臣樾. 直流锅炉蒸发受热面运行分析及实时仿真通用数学模型[J]. 中国电机工程学报, 1995, 15(1):61-66.  
WANG Guangjun, ZHANG Chenyue. A universal mathematical model for both performance analysis and real-time simulation of evaporation zone in once-through boiler[J]. Proceedings of the CSEE, 1995, 15(1):61-66.
- [13] 沈曙光. 基于支持向量机的热工过程逆动力学建模及控制[D]. 重庆:重庆大学博士学位论文, 2009.

(编辑 陈移峰)

## (上接第 11 页)

- [8] Ala G, Di P M C, Tine G, et al. Evaluation of radiated EMI in 42-V vehicle electrical systems by FDTD simulation [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2007, 56(4):1477-1484.
- [9] Ruddle A R. Electromagnetic modeling for EMC [C] // Proceedings of the 2008 IEEE 7th International Conference on Computation in Electromagnetics, April 7-10, 2008, Brighton, UK. Piscataway: IEEE Press, 2008:170-174.
- [10] Neumayer R, Stelze A, Haslinger F, et al. Continuous simulation of system-level automotive EMC problems [C] // Proceedings of the 2003 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, August 18-22, 2003, Boston, MA, USA. Piscataway: IEEE Press, 2003, 1:409-413.
- [11] 贾晋. 汽车点火系统电磁干扰预测方法的研究[D]. 重庆:重庆大学, 2010.
- [12] Chen C C. Predicting vehicle-level EMC performance utilizing on-bench component characterization results [C] // Proceedings of the 1999 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, August 2-6, 1999, Seattle, WA, USA. Piscataway: IEEE Press, 1999, 2:765-769.
- [13] Smith W T, Frazier R K. Prediction of anechoic chamber radiated emission measurements through use of empirically-derived transfer function and laboratory common-mode current measurement [C] // Proceedings of the 1998 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, August 24-28, 1998, Denver, CO, USA. Piscataway: IEEE Press, 1998:387-392.
- [14] 路宏敏. 工程电磁兼容[M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 2003.
- [15] 李明洋. HFSS 电磁仿真设计应用详解[M]. 北京:人民邮电出版社, 2010.
- [16] 黄怡然, 孙悦, 尹成群. 基于混沌理论的蓄电池内阻检测的研究[J]. 电源技术, 2009, 33(5):415-416, 425.  
HUANG Yiran, SUN Yue, YIN Chengqun. Battery internal resistance measurement based on chaotic theory [J]. Chinese Journal of Power Sources, 2009, 33(5):415-416, 425.

(编辑 张小强)