

文章编号:1000-582X(2012)08-001-05

车载雨刮电机电磁辐射干扰仿真模型

汪泉弟¹, 尹华平¹, 郑亚利¹, 刘青松^{1,2}, 李旭³

(1. 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;

2. 重庆车辆检测研究院, 重庆 401122; 3. 重庆长安汽车研究院, 重庆 401120)

摘要:提出了基于仿真软件 HFSS 的车载雨刮电机辐射干扰仿真模型。分析了雨刮电机产生电磁辐射的原理, 进而建立了车载雨刮电机辐射模型。在 HFSS 中将车体结构分解成若干简单模块, 各模块的关键点坐标从导入的汽车 CAD 模型中提取, 并分别对其进行网格剖分, 然后组合成车体的有限元网格模型; 利用自适应网格剖技术, 得到满足精度要求的仿真结果; 仿真结果与实测值变化趋势一致, 峰值频点吻合, 表明仿真模型是正确的, 可用于雨刮电机在整车上的辐射干扰预测。研究方法有较高的通用性, 对汽车其它电器部件或子系统的整车辐射仿真分析具有很好的参考价值。

关键词:汽车模型; 雨刮电机; 辐射干扰; 自适应网格剖分

中图分类号: TM331

文献标志码: A

Simulation model on the radiated electromagnetic interference of wiper motor inside automobile

WANG Quandi¹, YIN Huaping¹, ZHENG Yali¹, LIU Qingsong^{1,2}, LI Xu³

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China;

2. National Motor Vehicle Quality Supervision & Inspection Center, Chongqing 401122, P. R. China;

3. Chongqing Changan Automobile Research Institute, Chongqing 401120, P. R. China)

Abstract: The radiated electromagnetic interference (EMI) simulation model of the wiper motor inside automobile is presented by using simulation software HFSS. The radiated EMI theory of the wiper motor is analyzed and the radiated EMI simulation model of the wiper motor inside automobile is established. Automobile body is broken down into several simple modules whose key point coordinates are extracted from the imported CAD model, then these modules' initial meshing are generated and combined into the finite element mesh model of automobile. The simulation results can be obtained with enough accuracy requirements through adaptive meshing. The simulation results coincide well with experimental results, which shows that the established simulation model is correct and it can be used for predicting the radiated EMI of the wiper motor inside automobile. This research method has high versatility and a good reference value for the radiated EMI simulation of other electrical components or subsystem inside automobile.

Key words: automobile model ; wiper motor; radiated electromagnetic interference; adaptive meshing

收稿日期: 2012-02-20

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.

随着现代电子技术在汽车上的大量应用,汽车内部的电磁环境日益复杂,汽车电磁兼容性的重要性越来越显著^[1]。由于汽车内部结构十分复杂,即使在零部件满足测试标准的条件下,仍不能保证整车的电磁兼容问题。雨刮电机工作时引起的辐射干扰是汽车子系统模块中最大的干扰源之一,是导致整车不能通过 EMC 标准的重要原因^[2],如何解决雨刮电机对外辐射干扰问题,提高整车的电磁兼容性成为一个非常重要的研究课题。

国内外对雨刮电机这一类直流电机的电磁兼容性已做了很多研究。如文献[3-5]从电路的角度建立了电机等效电路模型,对其传导干扰进行了预测分析。文献[6]从“场”的角度对电机辐射干扰进行了预测,但研究工作仅局限于雨刮电机的电磁辐射,没有考虑车体的影响。研究整车的电磁兼容性需要建立汽车模型,然而,目前国内几乎没有这方面可借鉴的有效研究方法。国外建立整车电磁兼容仿真模型是由外部软件先建立车体模型后,再导入电磁仿真软件进行计算^[7-8]。导入的车体模型一般还需要进行一系列复杂处理后才能进行仿真分析^[9-10],不利于实际工程的应用和推广。

基于上述分析,文中建立了基于 HFSS 软件的车载雨刮电机仿真模型,分析了雨刮电机的整车辐射干扰问题。文中的研究方法具有较高的通用性,对汽车其它电器部件或电气子系统的整车辐射建模仿真具有很好的参考价值。

1 雨刮电机辐射原理

汽车雨刮电机一般为永磁直流电机,在正常运行时,由于换向过程及电刷与换向器之间不稳定的滑动接触,会在电机与电源的连接线上产生瞬变电压。如果瞬变电压的频率足够高,在电源导线上形成的共模电流会引起辐射干扰^[11]。雨刮电机的辐射干扰模型由雨刮电机、电源、电源线 3 部分组成^[6]。电源线相当于单极天线^[12],是雨刮电机对外引起电磁干扰的重要途径,它将干扰电磁能量以电磁波的形式向周围空间传播,产生辐射干扰。雨刮电机端部的瞬变电压相当于天线的馈源,在雨刮电机端以电压激励方式馈电,电源的内阻则相当于其负载。

图 1 为雨刮电机工作时产生的瞬态电磁干扰通过电源线向周围空间辐射的示意图。其中, $I_c(\omega, z)$ 为电源线位置 z 处的共模电流, $U(\omega, 0)$ 为电机瞬态端电压, E 为观察点处的场强。

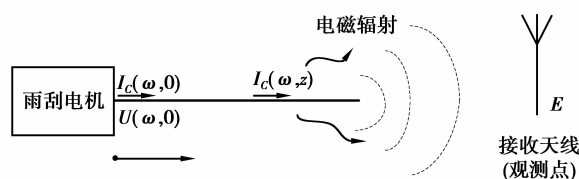


图 1 雨刮电机辐射示意图

2 基于 HFSS 软件的车载雨刮电机辐射模型

Ansoft HFSS 是基于有限元法的三维高频电磁场分析软件,该软件采用自适应剖分技术。当车载雨刮电机辐射干扰模型建成后,在 HFSS 中对求解场域进行有限元网格剖分,以实测的雨刮电机端电压为激励源,正确设置材料的特性参数、边界条件和求解精度,便可完成仿真计算,获得车载雨刮电机的辐射场强。

2.1 车载雨刮电机求解场域控制方程

对于自由空间辐射远场,电场强度 E 与磁场强度 H 存在简单的线性关系,因此仅需解出电场强度即可。车载雨刮电机的远区场属自由空间辐射问题,车内空间看作空气介质,于是车载雨刮电机求解场域的控制方程可由 Maxwell 方程组的 2 个旋度方程获得,即

$$\nabla \times \frac{1}{\mu_r} \nabla \times \dot{\mathbf{E}} - k_0^2 \epsilon_r \dot{\mathbf{E}} = 0. \quad (1)$$

其中, $\dot{\mathbf{E}}$ 为电场强度相量, μ_r 为相对磁导率, ϵ_r 为相对介电常数, $k_0 = \omega \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}$ 为自由空间传波常数。

2.2 求解场域边界条件

雨刮电机位于车内,车体材料主要由金属、玻璃等组成,车体结构、形状和材料属性对雨刮电机的辐射干扰有较大影响。车载雨刮电机求解场域的边界根据车体材料属性、结构形状在 HFSS 软件中分别处理成有限导体边界、阻抗边界、理想磁边界、辐射边界等 4 种边界条件^[13]。

车身的金属壳体满足有限导体边界条件,玻璃窗满足阻抗边界条件,两者的数学表达形式完全相同,即

$$\dot{\mathbf{E}}_t = Z_s (\mathbf{n} \times \dot{\mathbf{H}}_t). \quad (2)$$

式中, \mathbf{n} 为车体表面外法向单位矢量, $\dot{\mathbf{E}}_t$ 和 $\dot{\mathbf{H}}_t$ 分别为车体表面电场和磁场的切向分量。 Z_s 为边界的表面阻抗。在有限导体边界条件中

$$Z_s = (1 + j) / \delta \sigma. \quad (3)$$

其中, δ 为导体的透入深度, σ 为导体的电导率。

在阻抗边界条件中

$$Z_s = R_s + jX_s. \quad (4)$$

其中, R_s 和 X_s 分别为电阻和电抗。

车体的前部通常有排列整齐的条形通风口,电磁能量将穿过通风口向车外辐射。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

$$\left. \begin{aligned} \dot{H}_t &= 0, \\ \dot{E}_t &\neq 0. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

HFSS 软件的计算方法为有限元法,对于车载雨刮电机的无界求解场域,需要设置吸收电磁辐射的边界将其进行有限截断,采用二阶辐射边界条件,即

$$\begin{aligned} (\nabla \times \dot{E})_t &= jk_0 \dot{E}_t - \frac{j}{k_0} \nabla_t \times (\nabla_t \times \dot{E}_t) + \\ &\frac{j}{k_0} \nabla_t (\nabla_t \cdot \dot{E}_t). \end{aligned} \quad (6)$$

2.3 激励源的设置

在雨刮电机辐射模型中,雨刮电机电源线两端分别接负载(蓄电池)和激励源(雨刮电机)。电源线负载端的阻抗值由蓄电池内阻决定,电机工作时端部的瞬态干扰电压可以通过实验获取,因此电源线激励端口接电压源激励^[14]。

最后,基于 HFSS 软件的车载雨刮电机求解模型如图 2 所示。

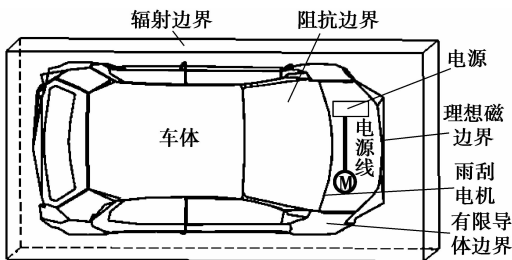


图 2 基于 HFSS 软件的车载雨刮电机求解模型

3 车载雨刮电机求解场域的自适应剖分

3.1 求解场域有限元初始网格的形成

汽车结构复杂,车箱内部有座椅、电子电器设备等,引擎室内有发动机、蓄电池、雨刮电机、各类电控单元(ECU)等。汽车的几何尺寸通常可从生产厂家提供的汽车结构 CAD 模型中得到,但是如果直接将 CAD 模型导入 HFSS 软件进行网格剖分,得到的剖分网格会出现缝隙或重叠,这种剖分网格不能进行有限元计算,因此需要建立用于有限元计算的车体网格剖分模型。为简化问题,忽略车内座椅、细小的部件以及一些非金属构件,但引擎室内发动机的位置、尺寸及引擎室和驾驶室的主要孔缝则需要考虑。建模时首先按汽车结构把车体拆分为 8 部分:引擎盖、车顶、

前后门、前后轮、车尾、车底、发动机以及其他部件,然后分别提取各部分 CAD 模型的关键点的空间坐标,并将关键点坐标进行连接形成初步的三角形剖分网格,最后再将各部分的初始网格组合成车体的有限元剖分模型。为了说明各部分形成初始网格的过程,图 3 给出了汽车引擎盖网格剖分的具体步骤。

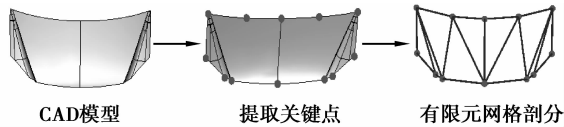


图 3 汽车引擎盖网格剖分步骤

由于曲面结构要进行精细剖分非常困难,且会增加计算时间和内存,因此对各部分进行初始网格剖分时,汽车的曲面外壳均用三角形平面代替。各部分关键点的疏密程度由车体外部形状变化快慢决定,关键点坐标取其在车体模型的全局坐标系中的实际位置坐标。在 HFSS 软件中直接组合各部件后的车体有限元剖分模型如图 4 所示。

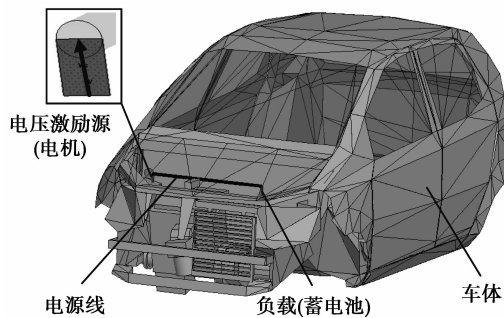


图 4 车载雨刮电机有限元初始网格模型

3.2 自适应网格剖分

HFSS 软件采用自适应网格剖分技术,当车体的初始网格形成之后,需要选择一个频率作为自适应网格剖分的求解频率,在该频点上进行自适应网格剖分,同一项目下的其它频点的场量求解都是基于这一频点上所完成的剖分网格。雨刮电机产生的电磁干扰属于宽频干扰,求解场量采取单频点计算方式,考虑到计算时间、所需内存、求解精度等综合因素,文中将自适应网格剖分频率选在计算频段的中间。在开始进行计算之前,需事先设置收敛条件,在对每一个频点求解的过程中,如果某个区域的误差不能满足收敛条件,软件自动对该区域网格进行细分,然后重新计算直至求解结果满足收敛条件为止。收敛条件的设置由激励类型决定,文中激励为电压源,因此将自适应求解过程前后两次迭代解的相对能量最大误差 ΔE 设置为收敛条件。设自适应剖分频率 $f=189 \text{ MHz}$,收敛条件 $\Delta E=0.1$ 。通过 6 步迭代,求解场量满足收敛条件,此时剖分的网格数

为 292 219 个, 占用内存 7.22 G, 计算时间为 126 min, 剖分结果如图 5 所示。在电源线附近, 因为电场变化很快, 所以剖分的网格非常密集, 而在汽车尾部, 网格则很稀疏。

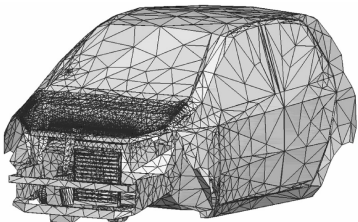


图 5 车体有限元自适应剖分网格

4 仿真分析与实验验证

4.1 仿真模型参数的设置

车载雨刮电机辐射仿真模型的车体外部尺寸为 $3.43 \text{ m} \times 1.88 \text{ m} \times 1.436 \text{ m}$, 根据辐射边界设置要求^[13], 建立一个属性为空气、尺寸为 $7.43 \text{ m} \times 3.88 \text{ m} \times 3.436 \text{ m}$ 的矩形框包围车体, 如图 2 所示。该矩形框的 6 个面除了正对车头的面离车体 3 m 外, 其余 5 个面均离车体 1 m。车身的金属材料设为不锈钢, 其相对磁导率 $\mu_r = 1$, 电导率 $\sigma = 1.1 \times 10^6 \text{ S/m}$ 。车窗为玻璃材料, 在 HFSS 软件中, 车窗玻璃的相对介电常数 $\epsilon_r = 5.5$, 相对磁导率 $\mu_r = 1$ 。电源线设为理想导体, 其长度为 0.7 m。电源线接的负载阻值为蓄电池内阻值, 由于蓄电池内阻复杂且阻值很小, 将其设为 $20 \text{ m}\Omega$ ^[15]。电压源激励通过实验获得, 实验使用的雨刮电机型号为 ZD1439, 由 12 V 车用蓄电池供电, 采用 TEK 示波器测量雨刮电机在正常运行时的瞬态端电压, 测量结果通过傅里叶变换得其频域值。受 TEK 示波器的宽带限制, 仿真计算只考虑了 30~350 MHz 频段内的辐射干扰电压。在这一频段内从 30 MHz 起每隔 1.5 MHz 取一个频点, 得到间隔为 1.5 MHz 的电机瞬态端电压幅频特性, 如图 6 所示。

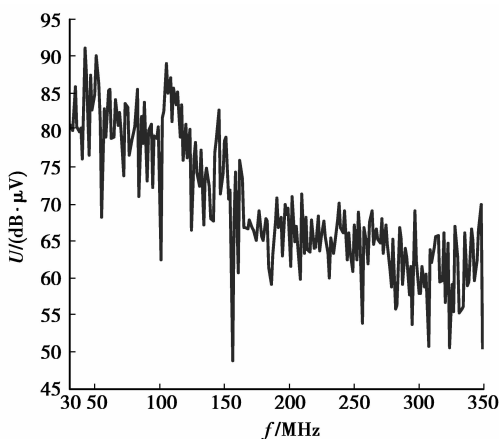


图 6 雨刮电机瞬态端电压频域值

4.2 仿真结果与实验验证

将图 6 中每个频点的电压值依次设为仿真模型的电压源激励值, 应用 HFSS 软件可求得雨刮电机辐射干扰模型在各个频点的辐射场强。

电磁辐射干扰通常需要分析在观察点处的水平和垂直两个方向上的辐射场强, 通过计算及后处理, 本文分别得到了距车头 3 m 处的水平方向和垂直方向的电场强度仿真值, 如图 7、8 所示。图中的实测数据是在重庆市电磁兼容工程技术中心的电波暗室中, 按照 GB14023—2006《车辆、船和由内燃机驱动的装置无线电骚扰特性限值和测量方法》的测试规范要求测取的。

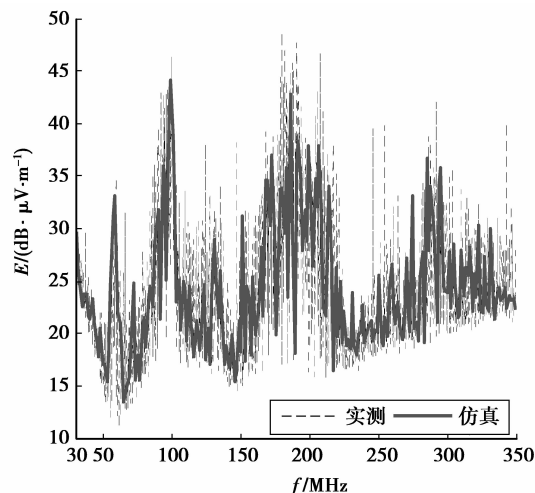


图 7 3 m 处水平方向的辐射电场

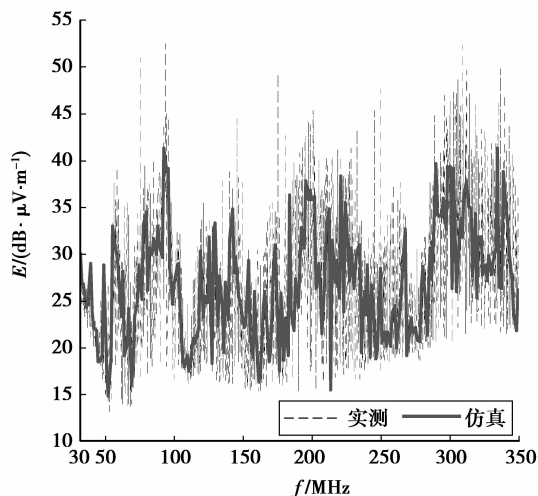


图 8 3 m 处垂直方向的辐射电场

从图 7 可以看出, 在 30~349.5 MHz 频段内, 水平方向辐射电场的仿真值和实测值变化趋势一致, 出现峰值的频点大部分是相当吻合的, 仿真与实测的最大误差出现在 250.5 MHz 附近, 为 $20.09 \text{ dB} \cdot \mu\text{V/m}$ 。图 8 中, 垂直方向辐射场强仿真

结果与实测值总体上看两者变化趋势基本一致,其最大误差与水平方向的相比有所减少,误差较大的场强值出现在 286.5~349.5 MHz 频段,但在 $15 \text{ dB} \cdot \mu\text{V}/\text{m}$ 以内。仿真结果与实测值的误差主要来自 2 个方面:其一,电压源激励的测量误差;其二,仿真模型忽略了许多次要因素,仅是真实汽车的近似。

综合上述分析,在雨刮电机容易超标的 100 MHz 频段附近,水平和垂直方向的辐射场强仿真结果与实测值吻合较好,误差在 $5 \text{ dB} \cdot \mu\text{V}/\text{m}$ 以内。在 30~349.5 MHz 的整个频段,仿真结果均能较好的反映实际的车载雨刮电机辐射场强的频谱特性,表明本文建立的仿真模型是有效的。

5 结 论

1)应用 HFSS 软件对结构复杂的场域建立电磁辐射干扰仿真模型时,可将复杂结构分解成若干简单模块,分别对其剖分形成初始网格,然后再进行组合,使复杂场域的有限元网格剖分得以实现。

2)得到的仿真结果与实测值变化趋势一致,峰值频点吻合,说明本文建立的模型是正确的,可用于预测车载雨刮电机的电磁辐射。

3)建模方法具有较高的通用性,对汽车其它电器部件或电气子系统的整车辐射建模仿真具有很好的参考价值。

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. Development of automotive EMC Technology in China [J]. Safty & EMC,2003(1):35-37.
- [2] 王纬敏,王昌文. 我国汽车零部件的电磁兼容性产品水平的现状分析[EB/OL]. [2009-10-08]. <http://www.cataarc.org.cn/bzh/html/wgqclbjdcjr.pdf>.
- [3] 俞集辉,周尚华,汪泉弟,等. 永磁直流电动机传导电磁干扰的建模与仿真[J]. 重庆大学学报,2009,32(5):539-543.
YU Jihui, ZHOU Shanghua, WANG Quandi, et al. Modeling and simulation of the conducted electromagnetic interference for permanent magnet direct current motors [J]. Journal of Chongqing University,2009,32(5):539-543.
- [4] Chen S, Nehl T W, Lai J S, et al. Towards EMI prediction of a PM motor drive for automotive applications[C]//Proceedings of the Eighteenth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, Feb. 9-13, 2003, Miami Beach, FL, USA. [S. l.]:IEEE Press,2003,1:14-22.
- [5] Huang X D, Pepa E, Lai J S, et al. EMI characterization with parasitic modeling for a permanent magnet motor drive[C]//Proceedings of the 38th IAS Annual Meeting & Conference Record of the Industry Applications, Oct. 12-16, 2003, Salt Lake City, USA. [S. l.]: IEEE Press,2003,1:416-423.
- [6] 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.
- [7] Ankarson P, Carlsson J. FDTD — simulation of the electrical environment for vehicles by using CAD — data [C] // Proceedings of the IEEE third International Symposium on Electromagnetic Compatibility, May 21-24, 2002, Beijing, China. [S. l.]:IEEE Press,2002:272-275.
- [8] Ala G, Di piazza 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 IET 7th International Conference on Computation in Electromagnetics, April 7- 10, 2008, Brighton, England. [S. l.]: 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, Aug. 18-22, 2003, Istanbul, Turkey. [S. l.]:IEEE Press,2003,1:409-413.
- [11] Mutoh N, Nakanishi M, Kanesaki M, et al. EMI noise control methods suitable for electric vehicle drive systems [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility,2005,47(4):930-937.
- [12] Suriano C R, Suriano J R, Thiele G, et al. Prediction of radiated emissions from DC motors[C]//Proceedings of the 1998 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Aug. 23-28, 1998, Denver, CO, USA. [S. l.]:IEEE Press,1998,2:790-795.
- [13] 谢永军,刘莹. HFSS 基础与工程应用[M]. 北京:科学出版社,2009.
- [14] 李明洋. HFSS 电磁仿真设计应用详解[M]. 北京:人民邮电出版社出版,2010.
- [15] 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.
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.