

# 基于台架模拟的纯电动汽车能耗经济性研究\*

刘忠途, 伍庆龙, 宗志坚  
(中山大学工学院, 广东 广州 510006)

**摘要:** 能源和环保问题使纯电动汽车能耗经济性问题被日趋重视, 采用台架模拟的方法研究能耗经济性, 建立了纯电动汽车能耗试验台架系统, 开发了测试系统软件。以实验室研发的 ECUV 纯电动汽车为对象, 在台架上测试不同车速下匀速行驶的百公里能耗作出能耗经济特性曲线, 模拟道路循环行驶工况实现续驶里程及能耗仿真计算。通过测试纯电动汽车在不同整车质量下的百公里能耗, 分析整车质量对能耗经济性的影响。研究结果用于指导 ECUV 纯电动汽车能耗性能的改善及续驶里程的提高, 对开发其它电动汽车具有参考作用。

**关键词:** 纯电动汽车; 能耗经济性; 台架模拟; 续驶里程; 行驶工况

**中图分类号:** U469.72; U467.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579(2011)01-0044-06

## Study on the Energy Consumption Economy of Electric Vehicle Based on Test Bench Simulation

LIU Zhongtu, WU Qinglong, ZONG Zhijian

(School of Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510006, China)

**Abstract:** The evaluation of EV energy consumption economy is emphasized because of energy and environmental issues. The work studies the energy consumption economy based on the method of test bench simulation, which included a dynamometer and related software. Taking the ECUV vehicle as an object, hundred kilometer energy consumption is tested in different vehicle speeds and driving cycles. Energy consumption economic characteristic curve is depicted in figure and driving range is calculated. Vehicle mass influence on the energy consumption economy is analyzed through testing the EV's hundred kilometer energy consumption. The result is used to improve the ECUV vehicle energy consumption performance and increase the driving range, and also provides the references for the development of other EVs.

**Key words:** electric vehicle (EV); energy consumption economy; test bench simulation; driving range; driving cycle

纯电动汽车是以车载电池为电源, 依靠大功率电机提供动力的新能源交通工具, 具有清洁无污染、能量转换效率高、结构简单等优点<sup>[1]</sup>。纯电动汽车行驶时要求尽可能降低汽车的各种能耗, 充分利用携带的有限电能, 最大限度地增加续驶里程, 提高能耗经济性<sup>[2]</sup>。在产业化、商业化的进程中, 纯电动汽车能耗经济性问题被日趋重视, 研究纯电动汽车能耗经济性十分必要。对于纯电动汽

车耗能经济性的改善与提高, 主要考虑续驶里程以及行驶工况能耗。续驶里程是指纯电动汽车在动力电池完全充电状态下, 以一定的行驶工况, 能连续行驶的最大距离。行驶工况能耗是以一定的车速或循环行驶工况为基础, 以车辆行驶一定里程的能量消耗量来衡量<sup>[3-4]</sup>。

目前对能耗经济性的研究主要采用的方式有室外道路实车试验、计算机软件仿真、室内台架测试

\* 收稿日期: 2010-05-23

基金项目: 国家企业技术创新基金资助项目(08C26214411233); 省粤港关键领域重点突破资助项目(2007A010301010)

作者简介: 刘忠途(1977年生), 男, 讲师, 博士; 通讯作者: 伍庆龙; E-mail: wqlsysu@163.com

等。相比而言, 室外道路实车试验能提供真实的运行环境, 测试结果准确, 但是制造成本高、适应性差、测试和调节难度大<sup>[5]</sup>。计算机软件仿真具有实用性好、成本低、灵活性好等优点, 但只能获取仿真结果, 准确度不高<sup>[6]</sup>。而电动汽车能耗试验台架系统是包括测功机及控制子系统、被测电机及控制子系统、电池组供电子系统、计算机控制和数据采集子系统四个组成部分在内的整体系统。室内台架测试介于仿真与实车试验之间, 可以实时有效地对动力系统各总成进行性能测试<sup>[7]</sup>, 对控制策略的优劣进行分析和评价, 减少开发成本和加快开发进度, 具有上述两者不可替代的作用。

本文利用台架模拟的方法研究纯电动汽车能耗经济性, 在试验台架系统上模拟汽车行驶时作用在电机输出轴上的实际负载, 再现诸如起步、变速、制动等行驶过程, 实现同道路试验相同或更为理想的电机运行工况的仿真。以实验室研发的 ECUV 纯电动汽车为对象, 利用能耗试验台架系统测试其等速百公里耗电量和在不同整车质量下的百公里耗电量, 评价纯电动汽车的能耗经济性, 分析整车质量对纯电动汽车能耗经济性的影响。

## 1 续驶里程及能耗模型

续驶里程和能量消耗均有等速法和工况法两种测量方法, 计算和测试可以针对这两种工况进行。等速能耗曲线通常以测出速度间隔为 10 km/h 或 20 km/h 的等速行驶能耗为标准, 在“速度-能耗”曲线图上连成曲线, 称为等速能耗经济特性曲线。等速能耗测试不能全面反映汽车实际行驶中受工况变化的影响, 但是对于经济时速的确定及匀速法计算续驶里程是有必要的。在对实际行驶车辆进行跟踪测试统计的基础上, 各国都制定了一些典型的循环行驶试验工况来模拟实际汽车运行状况, 并以其百公里耗电量来评定相应行驶工况下的能耗经济性。欧洲一些国家常用的是 UDDS 工况, 在国内用的比较典型的是 ECE\_ EUDC 工况<sup>[8]</sup>, 其试验循环工况见图 1。

工况其实就是车速  $V$  与时间  $t$  的函数关系, 由于工况法循环只比等速法多了加速和减速状态, 在计算能量消耗时, 计入加速时的能量消耗就可以了。因此, 等速法和工况法在某一状态时的计算方法是相同的。

### 1.1 汽车行驶消耗功率

汽车行驶时需要克服相应的阻力<sup>[9]</sup>, 消耗的

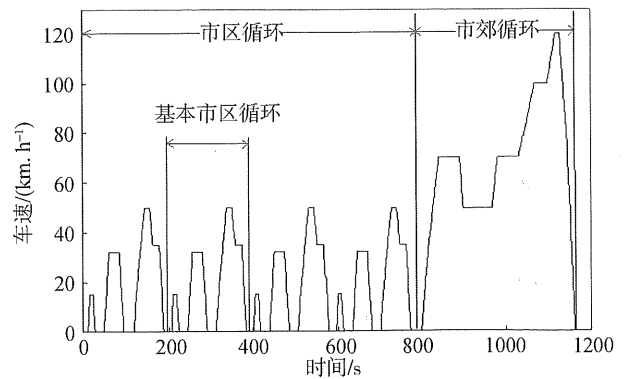


图 1 试验循环行驶工况

Fig. 1 Driving cycle for test

功率  $P$  为<sup>[10]</sup>

$$P = \frac{mgfv_a}{3.6} + \frac{mgiv_a}{3.6} + \frac{C_D A v_a^3}{76.14} + \frac{\delta m v_a}{3.6} \frac{dv}{dt} \quad (1)$$

式 (1) 中,  $m$  为电动汽车质量, kg;  $g$  为重力加速度,  $m/s^2$ ;  $v_a$  为行驶速度, km/h;  $dv/dt$  为加速度,  $m/s^2$ ;  $P$  为功率, W;  $i$  为爬坡度, 用百分数表示;  $C_D$  为风阻系数;  $A$  为迎风面积,  $m^2$ ;  $\delta$  为汽车旋转质量换算系数。

### 1.2 电机转速扭矩输出

考虑到实际上正常道路的坡度角不大, 汽车行驶方程为<sup>[11]</sup>

$$\frac{T i_g i_o \eta_T}{r} = mgf + \frac{C_D A}{21.15} v_a + mgi + \delta m \frac{du}{dt} \quad (2)$$

电机输出扭矩为

$$T = \frac{r}{i_g i_o \eta_T} (mgf + \frac{C_D A}{21.15} v_a + mgi + \delta m \frac{du}{dt}) \quad (3)$$

电机输出转速为

$$n = 2.653 \frac{i_g i_o v_a}{r} \quad (4)$$

式 (2)、(3)、(4) 中的参数含义同式 (1) 中一样, 其中,  $r$  为汽车轮胎半径, m;  $i_g$  为变速器传动比,  $i_o$  为主减速器传动比,  $\eta_T$  表示传动系的机械效率。

电机输出功率为

$$P_e = nT/9549 \quad (5)$$

### 1.3 电池储存的能量

$$W_e = C_e U_e M N \eta_{DoD} \quad (6)$$

式 (6) 中,  $C_e$  为单个电池容量, A · h;  $U_e$  为单个电池的额定电压, V;  $M$  为每组电池的个数;  $N$  为并联的电池组数;  $\eta_{DoD}$  为电池的放电深度, 用百分数表示。

在研究续驶里程时, 主要关心放电电流与放电

时间的关系。对于锂离子动力电池, 目前主要采用 Peukert 方程计算为<sup>[12]</sup>

$$t_b = k \cdot I_b^{-n} \quad (7)$$

式 (7) 中,  $k, n$  为常数, 与蓄电池本身有关, 可以通过放电实验数据计算而得到;  $I_b$  为电池放电电流, A;  $t_b$  为放电时间, h。

#### 1.4 等速法续驶里程计算

设电动汽车以速度  $v_a$  行驶时间  $t$ , 则一次充电的续驶里程为:

$$S = v_a \cdot t = v_a(we/p)\eta \quad (8)$$

#### 1.5 工况法续驶里程计算

工况法续驶里程为

$$S = \sum_{n=1}^K S_n \quad (9)$$

式 (9) 中,  $S_n$  为每个状态的行驶距离, km;  $K$  为车辆能够完成的状态总数。

#### 1.6 台架能耗测试计算

在进行纯电动汽车行驶消耗功率测试时, 能耗试验台架上的被测电机驱动系统为实车上的电机驱动系统。工作时, 电池组为电机控制器提供的电功率  $P_i$  为

$$P_i = U \cdot I \quad (10)$$

式 (10) 中,  $U$  的单位为 V,  $I$  的单位为 A。

将各个时刻在台架上测得的电功率积分, 即为纯电动汽车所消耗的能量  $W$  为

$$W = \int U(t) \cdot I(t) dt \quad (11)$$

## 2 纯电动汽车能耗试验台架系统

### 2.1 台架模拟原理

能耗试验台架系统包含四个组成部分: 测功机及其控制子系统、被测电机驱动子系统、电池组供电电子系统和可控的数据采集子系统。其中, 测功机与电机同轴连接, 它的基本作用就是提供被测电机负载并且可控; 电池组提供给被测电机控制器所需的电压电流; 数据采集系统测量电机驱动系统输入输出的电压、电流、功率及电机的转速、扭矩并根据公式 (5) 算出其机械功率。台架模拟电动汽车道路行驶工况时, 测功机按照模拟汽车行驶时作用在电机轴上的实际负载运行, 负载值参见公式 (3), 同时被测电机按照设定工况转速运行, 转速值参见公式 (4), 两者在时间上保持同步性。试验时, 数据采集系统实时地采集各个试验数据, 并根据公式 (6) - (11) 计算出续驶里程以及能量

消耗。

### 2.2 系统硬件组成

纯电动汽车能耗测试动力平台的硬件实现见图 2, 由 (a) 电机测试台架、(b) 供电电池、(c) 仪器检测和计算机控制系统四大部分组成。其中, 电机测试台架由被测电机子系统和测功机子系统组成, 具体包括一台 ECUV 车用电机, 一台南京中科院仪器厂的 YVP200L 型交流变频电机, 一套 ABB 公司生产的 ACS800 变频控制系统。仪器检测系统采用湘仪动力的 JW-3 型扭矩仪和日本横河公司的 WT1600 功率计组成。另外, 计算机控制系统由工控机、PCICAN113 通信卡、PCI2318H 采集卡以及 GPIB (PCI) FL 通信卡组成。PCICAN113 卡是一种 PCI 接口的高性能 CAN 总线通信接口卡, PCI2318H 采集卡, 它具有 32 个模拟输入通道, 4 个电压模拟和 4 个电流模拟输出通道, 采样频率最高可达 250 kHz, 完全满足系统数据采集和控制的需要, GPIB 卡可以插到工控机的 PCI 槽中, 负责工控机与 WT1600 功率计的通信。

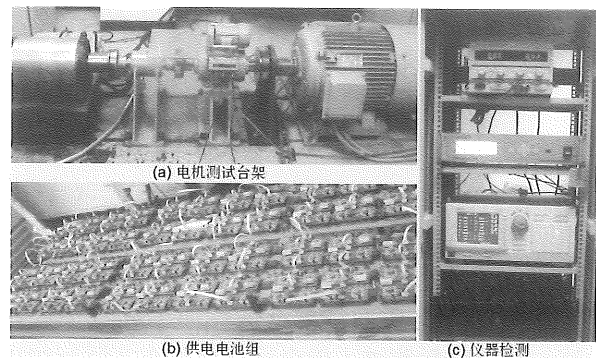


图 2 纯电动汽车能耗试验台架系统  
Fig. 2 Test bench for evaluation of EV energy consumption economy

能耗试验台架系统工作时, 电池组提供给车用电机驱动系统所需的电压和电流, 工控机通过 CAN 总线控制被测电机转速变化, 采用 RS232 串行总线控制测功机加载变化, 扭矩仪测试车用电机输出的转速和扭矩, 数字功率计测试电池组输出电压、电流和功率, 对功率积分算出所耗能量。控制信号和采集数据通过相应的接口卡实现与工控机的通信与信号的处理。

### 2.3 测试软件开发

循环行驶工况仿真测试时, 测功电机模拟整个汽车惯量, 电动汽车行驶过程中所需的力以附加扭

矩的形式通过测功机加载到电机轴上<sup>[13-14]</sup>。转速扭矩的求解过程利用了后向仿真的方法。将汽车的“速度-时间”曲线转换为电机的“转速-时间”曲线和“扭矩-时间”曲线。电机的“转速-时间”曲线作为车用电机的转速参考命令，而“扭矩-时间”曲线作为测功电机转矩参考命令。

程序运行时，配置汽车参数，输入将要被试验的车型参数，然后配置新的工况或选择数据库中的试验工况。程序读取计算出的电机工况，以时间为同步将转速指令输入到被测电机控制器，扭矩指令输入给负载电机控制器。台架系统开始工作，数据采集系统采集数据包括电压、电流、转速、扭矩等，实时记录电池组消耗的能量和计算续驶里程并存储。调用存储的数据进行分析与处理，作出能耗曲线，评价电动汽车的能耗经济性。利用 LabVIEW 图形化编程语言开发台架系统测试软件，仿真运行界面如图 3 所示。

由图 3 可以看出，工况车速可以实时转化成电机的工况转速及扭矩，并且根据公式 (5) 算出电机的瞬时功率。根据文中前面提到的续驶里程及能耗模型原理公式 (6) - (11) 实时仿真计算续驶里程及能量消耗。

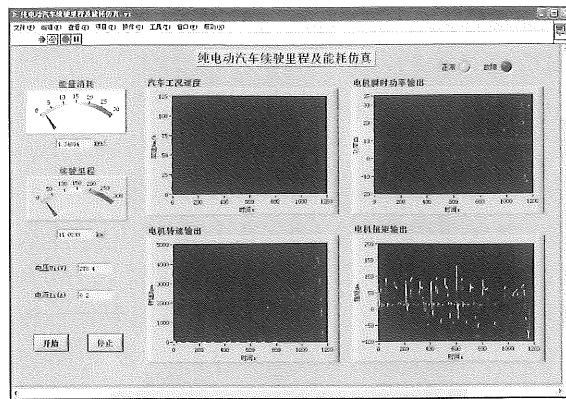


图 3 续驶里程及能耗仿真界面

Fig. 3 Driving range and energy consumption test simulation interface

### 3 纯电动汽车能耗测试与仿真

以实验室研发的新一代 ECUV 纯电动汽车为对象，利用建立的能耗试验台架系统，测试在不同车速下的匀速百公里耗电量和不同整车质量下的百公里耗电量。ECUV 纯电动汽车的整车技术参数见表 1，在本文中涉及的测试及仿真车型均采用该车参数。

表 1. ECUV 电动汽车主要参数

Table 1 Parameters of the ECUV car

外形尺寸/ (mm * mm * mm)	整备质量 m/kg	迎风面积 A/m <sup>2</sup>	车轮半径 r/m	滚动阻力 系数 f	空气阻力 系数 C <sub>D</sub>	传动效率 η <sub>T</sub>
4 200 * 1 780 * 1 550	1 100	2.1	0.285	0.015	0.3	0.92

#### 3.1 行驶工况百公里能耗测试

等速百公里能耗测试时，测试方法遵循国家标准 GB/T 18386-2005 的试验方法。速度从 20 km/h 开始，每组测试完毕速度依次增加 10 km/h，直至 120 km/h，并且在测试的过程中实时记录电池组的能量状态和计算续驶里程，待行驶百公里时测得在该速度下的能耗。将速度和能耗及续驶里程在同一图上作出曲线，得到如图 4 的等速百公里能耗经济特性曲线以及续驶里程与车速关系曲线。

从图 4 中可以看出，百公里能耗随着车速的提高而增加，续驶里程随着车速的提高而减少，低速行驶及能耗少时有助于增加电动汽车的续驶里程。在 60 km/h 和 80 km/h 时，百公里能耗测试结果分别为 9.96 kWh 和 11.85 kWh，但前者的续驶里程为 223 km 高于后者的 185 km。道路实车试验时，电动汽车处于满载状态，以 60 km/h 等速行驶，车

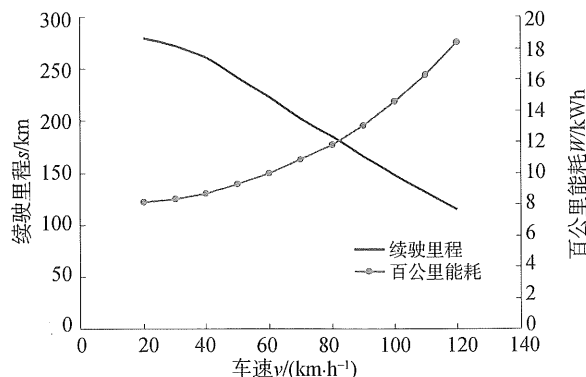


图 4 电动汽车等速百公里能耗和续驶里程与车速关系

Fig. 4 The relations between EV hundred kilometer energy consumption and vehicle speed, driving range and vehicle speed

速波动控制在 3 km/h 以内，试验路面按照交通部规定的为环形平坦耐久性路面，试验时，电动汽车

续驶里程达到了 218 km, 实车试验与室内台架的测试结果基本上一致。

利用 UDSS 工况和 ECE + EUDC 工况进行百公里能耗仿真和续驶里程计算。由仿真结果可知, 该纯电动汽车在 UDSS 工况下的百公里能耗为 11.05 kWh, 续驶里程为 205 km。在 ECE + EUDC 工况下的百公里能耗为 12.28 kWh, 续驶里程为 180 km。能量消耗少的工况可以认为电动汽车行驶时的滚动阻力小、风阻小或道路坡度小等。

### 3.2 整车质量对能耗的影响测试

纯电动汽车的能耗与整车质量有很大的关系, 要想减少不必要的能耗, 应在保证安全的前提下尽量减轻整车质量。由于汽车质量减少时, 其受到的行驶阻力将减小, 在能耗试验台架系统上表现为加载扭矩值变小。为了研究整车质量对能耗的具体影响程度, 通过改变 ECUV 的整车质量而其它参数不变进行台架模拟测试。当整车质量发生变化时, 在台架上表现为扭矩加载变化, 而转速与车速有关与质量无关。因此, 可以通过在同一车速下改变质量, 此时转速保持不变而扭矩加载改变, 在台架上模拟测试其百公里能耗, 得到在不同车速下的整车质量与能耗的关系, 如图 5 所示。

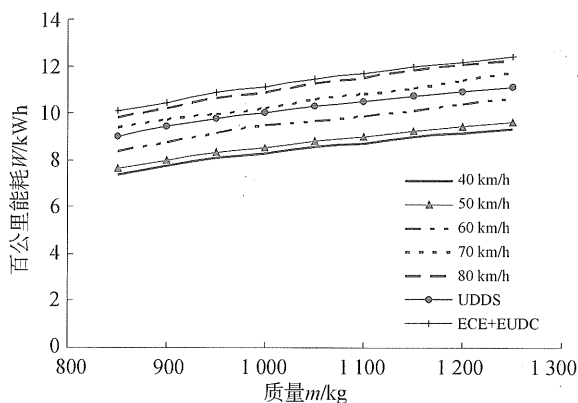


图 5 电动汽车整车质量对能耗的影响

Fig. 5 EV vehicle mass influence on the energy consumption

从图 5 可以看出, 在同一车速时, 整车质量越大, 台架模拟测试百公里能耗越大。在车速 60 km/h 下行驶百公里, 整车质量在 1 250 kg 比 850 kg 多耗了 2.16 kWh 的电能, 在 80 km/h 时, 前者比后者多耗了 2.48 kWh 的电能。在同一循环试验工况下行驶百公里, 整车质量越大, 能耗越大, 在相同的整车质量下, 汽车在 ECE + EUDC 工况下行驶百公里能耗比在 UDSS 工况下要大。ECUV 纯电动汽车采用全铝车身, 质量减小 10%, 百公里能

耗降低 6% - 7% 之间, 实车试验车速为 60 km/h, 其续驶里程为 236 km, 比原来提高了 13 km。试验测试结果表明, 整车质量减轻能够节能, 纯电动汽车质量小有助于增加其续驶里程。

## 4 结 语

本文通过建立纯电动汽车能耗试验台架系统并开发测试系统软件研究纯电动汽车的能耗经济性。在台架上测试了 ECUV 纯电动汽车的等速百公里能耗曲线, 实现了纯电动汽车道路循环行驶工况百公里能耗仿真及续驶里程计算, 完成了 ECUV 车在不同整车质量下的等速百公里能耗测试。通过实车试验与台架测试结果比较说明台架模拟测试方法的有效性和可行性。由测试结果表明低速行驶、电动汽车质量小、能量消耗少时有助于增加电动汽车的续驶里程, 提高能耗经济性。研究结果对于 ECUV 纯电动汽车的能耗优化设计及进一步开发其它纯电动汽车具有一定的指导意义。

### 参考文献:

- [1] 陈清泉, 孙逢春, 祝嘉光. 现代电动汽车技术[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2002: 24 - 25.
- [2] 李国良, 初亮, 鲁和安. 电动汽车续驶里程的影响因素[J]. 长春: 吉林工业大学学报, 2000, 30(3): 20 - 23.
- [3] 王震坡, 姚利民, 孙逢春. 纯电动汽车能耗经济性评价体系初步探讨[J]. 北京理工大学学报, 2005, 25(6): 479 - 482.
- [4] 秦孔建, 陈海峰, 方茂东, 等. 插电式混合动力电动汽车排放和能耗评价方法研究[J]. 汽车技术, 2010, 7: 11 - 16.
- [5] CHRISTIAN Hartmann. Dynamometers can be designed to cater to the needs of all kinds of vehicles[J]. Testing Technology International, 2000, 2: 118 - 120.
- [6] ANDERS Froberg, LARS Nielsen. Efficient Drive Cycle Simulation[C] // IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2008, 57(3): 1442 - 1452.
- [7] BIANCO G LO, PEDE G, PUCCHETTI A, et al. Vehicle testing in ENEA drive-train test facility[C] // SAE Society of Automotive Engineers, 2001: 101 - 111.
- [8] 中国国家标准化管理委员会. GB/T 18386 - 2005 电动汽车能量消耗率和续驶里程试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005.
- [9] 刘清虎, 郭孔辉. 动力参数的选择对纯电动汽车性能的影响[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2003, 30(3): 62 - 64.
- [10] 余志生. 汽车理论[M]. 5 版. 北京: 机械工业出版社, 2009: 30 - 31.

(下转第 52 页)

- 148-156.
- [5] HASCHKE J M, OVERSBY V M. Plutonium chemistry: a synthesis of experimental data and a quantitative model for plutonium oxide solubility [J]. *J Nuclear Materials*, 2002, 305: 187-201.
- [6] MOREL J, BICKEL M, HILL C. Results of the international Pu-2000 exercise for plutonium isotopic composition measurements [J]. *Applied Radiation and Isotopes*, 2004, 60: 607-614.
- [7] ROUSSEL D S. Experimental values for  $^{241}\text{Am}$  and  $^{239+240}\text{Pu}$   $K_d$ 's in French agricultural soils [J]. *J Environmental Radioactivity*, 2005, 79: 171-185.
- [8] WANG H Y, ZHU Z H, JIANG G. Potential energy function for the ground state  $X^3\Sigma^-$  and excited state  $^1\Sigma^+$  of UO [J]. *Molecular Phys*, 2000, 13: 875-880.
- [9] MENG D Q, ZHU Z H, JIANG G. Geometrical configuration of  $\text{Pu}_4$  and the Jahn-teller effect [J]. *J Molec Struct*, 2002, 610: 241-245.
- [10] LI Q, ZHU Z H. Study of analytic potential energy function and stability for  $\text{PuO}^{n+}$  with density functional theory [J]. *J Molec Struct*, 2001, 10 (6): 501-505.
- [11] LI Q, ZHU Z H, WANG H Y, et al. Potential energy function for  $\text{PuO}^{2+}$ ,  $\text{PuH}^{2+}$  and  $\text{PuN}^{2+}$  ions [J]. *J Molec Struct: Theochem*, 2002, 578: 177-180.
- [12] 高涛, 王红艳, 易有根, 等.  $\text{PuO}$  分子  $X^3\Sigma^-$  的势能函数及热力学函数的量子力学计算 [J]. *物理学报*, 1999, 12: 2222-2227.
- [13] 蒙大桥, 蒋刚, 朱正和.  $\text{Pu}_3$  体系的结构与势能函数 [J]. *物理学报*, 2001, 50: 1268-1273.
- [14] JOHN M H, THOMAS H A. Plutonium hydride, sesquioxide and monoxide monohydride: pyrophoricity and catalysis of plutonium corrosion [J]. *J Alloys and Compounds*, 2001, 320: 58-71.
- [15] HAY P J, MARTIN R L. Theoretical studies of the structures and vibrational frequencies of actinide compounds using relativistic effective core potentials with Hartree-Fock and density functional methods:  $\text{UF}_6$ ,  $\text{NpF}_6$ , and  $\text{PuF}_6$  [J]. *J Chem Phys*, 1998, 109: 3875-3881.
- [16] GROZEMA F C, TELESCA R, JOUKMAN H T. Excited state polarizabilities of conjugated molecules calculated using time dependent density functional theory [J]. *J Chem Phys*, 2001, 115: 10014-10021.
- [17] KJEELLBERG P, ZHI H, TONU P. Bacteriochlorophyll in electric field [J]. *J Phys Chem B*, 2003, 107: 13737-13742.
- [18] STEFAN G. Density functional calculations with configuration interaction for the excited states of molecules [J]. *Chem Phys Lett*, 1996, 259: 128-137.
- [19] 陈晓军, 罗顺忠, 蒋树斌, 等. 外场下二甲基硅酮双自由基的从头计算研究 [J]. *原子与分子物理学报*, 2004, 21: 203-209.
- [20] CRAMER C J. *Essentials of Computational Chemistry* [M]. England: Wiley, 2002, 441.
- [21] FRISCH M J, TRUCKS G W, SCHEGEL H B. *Gaussian03, Revision B 03* [R]. Pittsburgh P A: Gaussian Inc, 2003.
- [22] 刘华蓉, 葛学武, 倪永红, 等. 水溶液中金属团簇的脉冲辐解研究进展 [J]. *化学物理学报*, 2001, 14: 1-18.

(上接第48页)

- [11] 查鸿山, 宗志坚, 刘忠途, 等. 纯电动汽车动力匹配计算与仿真 [J]. *中山大学学报: 自然科学版*, 2010, 49 (5): 47-51.
- [12] DKARIMI M, MOKHTARI H, IRAVANI M R. Wavelet based on-line disturbance detection for power quality applications [J]. *Power Delivery*, 2000, 15 (14): 1212-1220.
- [13] 石坚, 卓斌, 李伟华. 汽车加速工况的仿真实验 [J]. *上海交通大学学报*, 2000, 34(4): 437-440.
- [14] ZELLER P. A highly dynamic ellgine test bed with vehiele and driver simulation [J]. *Antomobile-Industrie*, 2002, 35(1): 89-101.