

# 电动车用Ni/MH电池组剩余容量的非线性自回归滑动平均预测

郭桂芳<sup>1,2</sup>, 曹秉刚<sup>2</sup>

(1. 西藏民族学院 信息工程学院, 陕西 咸阳 712000; 2. 西安交通大学 机械工程学院, 陕西 西安 710049)

**摘要:** 准确的蓄电池荷电状态(SOC)决定了电动汽车剩余的行驶里程数. 为准确评估电动车用Ni/MH电池组荷电状态(SOC)值, 本文提出了一种非线性自回归滑动平均(NARMAX)模型的系统辨识方法. 文中使用联邦城市行驶工况(FUDS)的试验数据, 采用NARMAX模型线性简化逼近的辨识方法, 对蓄电池SOC建立了多输入变量的模型, 并使用这个模型进行实时预测; 预测结果与试验结果进行了比较. 结果表明, 该方法是简单、有效的. 预测的最大相对误差为1%.

**关键词:** 电动汽车; Ni/MH电池组; 荷电状态; NARMAX; 辨识预测

**中图分类号:** TP273      **文献标识码:** A

## NARMAX method for estimating the residual capacity of Ni/MH battery pack for electric vehicle

GUO Gui-fang<sup>1,2</sup>, CAO Bing-gang<sup>2</sup>

(1. Information Engineering Department, Tibet College of Nationalities, Xianyang Shannxi 712000, China;

2. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an Shannxi 710049, China)

**Abstract:** An accurate state of charge(SOC) determines the residual driving distance of electric vehicles. For evaluating the state of charge(SOC) of the Ni/MH battery pack for electric vehicle, we propose an identification approach using NARMAX(nonlinear auto-regressive moving average with exogenous inputs) model. Employing the federal urban driving schedule(FUDS) tested data and adopting the simplified linear approximation of NARMAX method, we build the multi-input model for the SOC of the battery pack. This model is used for predicting the real-time SOC, and the results are compared with the tested data. The comparison of the predicted results with the tested data shows that the proposed method is simple and efficient. The maximum relative error of the estimation results is within 1%.

**Key words:** electric vehicle; Ni/MH battery pack; state of charge(SOC); NARMAX method; prediction

### 1 引言(Introduction)

蓄电池作为电动汽车的储能动力源, 要求有高的比能量(满足续航里程的要求)、高的比功率(满足加速与爬坡性能要求)和高的充放电效率. 目前电动汽车所用的动力电池主要有铅酸电池、镍氢电池、锂离子电池, 其中镍氢电池具有良好的综合性能. 准确和可靠地获得电池荷电状态(state of charge, SOC)是电池管理系统的主要任务之一, 因为SOC直接反映了电池所处的状态. 对蓄电池剩余电量的准确测量一直是电动汽车发展中的一个至为关键的问题.

电池充放电时, 其内部的电化学过程是一个对环境敏感的复杂的非线性动态过程, 很难用一个简单的数学模型来精确描述它的特性<sup>[1~3]</sup>.

本文针对联邦城市行驶工况(FUDS), 应用一种非线性自回归平均滑动(NARMAX)模型线性简化逼近的辨识方法, 对电动车用Ni/MH电池组剩余容量

进行了预测.

### 2 SOC概念及NARMAX建模(SOC definition and NARMAX modeling)

电池荷电状态SOC表示电池目前剩余电量与电池总容量之比. 电动汽车运行中负载是变化的, 放电电流是时变电流, 因此需要用到Peukert公式<sup>[4]</sup>进行修正. 故在实际中荷电状态可表示为

$$\text{soc}(t) = 1 - \frac{\int_0^t \eta(i(t))i(t)dt}{Q_m}, \quad (1)$$

其中:  $Q_m$ 为电池标称容量,  $i(t)$ 为电池在 $t$ 时刻的电流,  $\eta$ 为库仑效率.

蓄电池的SOC是通过对电池外特性——电压、电流、温度、充放电倍率、循环工作次数等参数的检测来进行推断的.

模型辨识的要求是: 在给定不同的工作电压、电

流、温度等因素下,能够动态地模拟出SOC的变化轨迹。

非线性自回归滑动平均(NARMAX)模型是Bilings等<sup>[5]</sup>于1982年提出的,并于1985年~1989年基于Nerode的有限实现理论及泰勒定理对该模型描述的一般非线性系统的普适性给予了证明<sup>[6,7]</sup>。该模型具有逼近精度高、结构简单、收敛速度快等优点。对非线性系统可以很好地描述和辨识。

NARMAX模型用非线性差分方程的形式表述如下<sup>[8~11]</sup>:

$$y(k) = F^l(y(k-1), \dots, y(k-n_y), u(k-d), \dots, u(k-d-n_u+1), e(k), \dots, e(k-n_e)), \quad (2)$$

$y(k)$ ,  $u(k)$ ,  $e(k)$ 分别是系统的输出、输入和噪声; $n_y$ ,  $n_u$ ,  $n_e$ 分别是输出、输入和噪声的最大延迟, $d$ 是采样延迟, $F^l(\cdot)$ 是非线性函数。

因此,一个 $r$ 维输出 $s$ 维输入的多维NARMAX模型可展开为:

$$\begin{aligned} y_t(k) = & \theta_0^t + \sum_{i_1=1}^m \theta_{i_1}^t p_{i_1}(k) + \sum_{i_1=1}^m \sum_{i_2=i_1}^m \theta_{i_1, i_2}^t p_{i_1}(k) p_{i_2}(k) + \dots + \\ & \sum_{i_1=1}^m \dots \sum_{i_i=i_{i-1}}^m \theta_{i_1, \dots, i_i}^t p_{i_1}(k) \dots p_{i_i}(k) + \\ & e_t(k), \quad t = 1, 2, \dots, r, \\ p_1(k) = & y_1(k-1), \quad p_2(k) = y_1(k-2), \\ & \vdots \\ p_{r \times n_y}(k) = & y_r(k-n_y), \quad p_{r \times (n_y+1)}(k) = u_1(k), \\ & \vdots \\ p_{r \times n_y + s \times (n_u+1)}(k) = & u_s(k-n_u), \\ p_{r \times n_y + s \times (n_u+1) + 1}(k) = & e_1(k-1), \\ & \vdots \\ m = & (r \times (n_y + n_e) + s \times (n_u + 1)). \end{aligned} \quad (3)$$

对于非线性多入单出系统,可以简化为

$$\begin{aligned} y(k) = & \theta_0 + \sum_{i_1=1}^m \theta_{i_1} p_{i_1}(k) + \sum_{i_1=1}^m \sum_{i_2=i_1}^m \theta_{i_1, i_2} p_{i_1}(k) p_{i_2}(k) + \\ & \dots + \sum_{i_1=1}^m \dots \sum_{i_i=i_{i-1}}^m \theta_{i_1, \dots, i_i} p_{i_1}(k) \dots p_{i_i}(k) + \\ & e(k). \end{aligned} \quad (4)$$

对式(4)可建立矩阵形式的线性模型

$$y(k) = P^T(k) \Theta + \varepsilon(k), \quad (5)$$

其中:  $P(k) = [1, p_1(k), \dots, p_{i_1 \dots i_i}(k), \dots, p_{i_1 \dots i_i}(k)]^T$

为回归项;

$$\Theta = [\theta_0, \theta_1, \dots, \theta_{i_1 \dots i_i}, \dots, \theta_{i_1 \dots i_i}]^T$$

为辨识参数;  $\varepsilon(k)$ 为模型误差。

因此,通过简化,一个非线性辨识问题转换为一个线性参数估计问题。常用的最小二乘算法就可以非常有效地完成式(5)中的参数估计。

$$\begin{aligned} \Theta = \text{Arg min} & \sum_{k=0}^{L-1} (y(x_k) - \hat{y}(x_k))^2 = \\ \text{Arg min} & \sum_{k=0}^{L-1} (y(x_k) - P^T(k) \Theta)^2. \end{aligned} \quad (6)$$

当使用递推最小二乘算法(RLS)时,可以实现系统的在线辨识。常用的递推算法公式为:

$$\begin{aligned} \hat{\theta}(k) = & \hat{\theta}(k-1) + G(k)[y(k) - P^T(k)\hat{\theta}(k-1)], \quad (7) \\ G(k) = & \frac{Q(k-1)P(k)}{P^T(k)Q(k-1)P(k) + 1}, \\ Q(k) = & [I - K(k)P^T(k)]Q(k-1). \end{aligned}$$

### 3 FUDS实验(FUDS experiments)

实验用80 Ah/96 V氢镍电池组由北京有色金属研究总院提供,实验在EV Test Systems: AV-900/900CE测试平台上进行。整个系统分为电压采集模块、电流采集模块、U/F转换模块、电压转换模块、计算及输出显示模块等。电压采集系统选用CRYSTAL公司的CS5460 A,其内部具有24位的A/D转换器,可以实时测量电压。电流传感器选用CS400B/4 V霍尔电流传感器。对于联邦城市驾驶(federal urban driving schedule, FUDS)循环,电流的输出随所需的驱动功率的变化而变化。图1~图3分别为FUDS实验所采集的功率信号、电流信号、电压信号。

图4则为实验所测量计算的SOC值。SOC值采用开路电压法与安时计量法相结合的算法:先用开路电压法测量计算电池组的SOC0,再用安时计量法计算后续时刻的SOC值。两种方法综合应用能取长补短,可较精确地测量计算出电池组的SOC值。

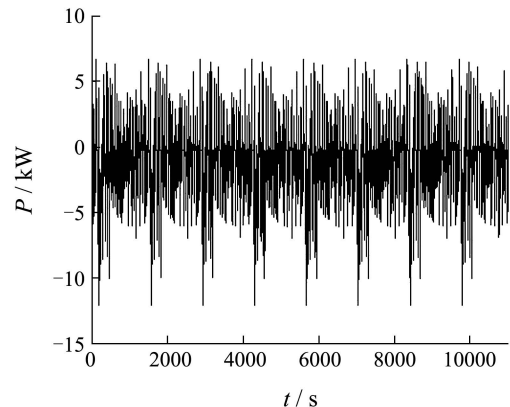


图1 FUDS实验所采集的功率信号  
Fig. 1 Measured power in FUDS experiment

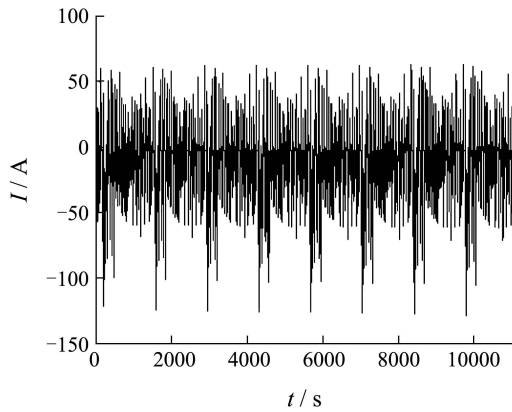


图 2 FUDS实验所采集的电流信号

Fig. 2 Measured battery current in FUDS experiment

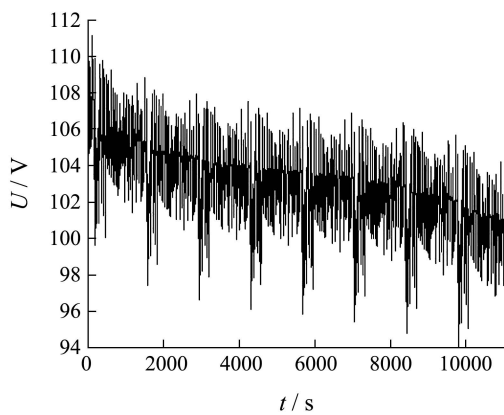


图 3 FUDS实验所采集的电压信号

Fig. 3 Measured battery voltage in FUDS experiment

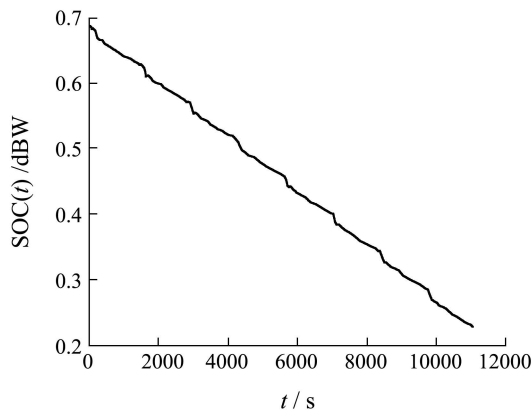


图 4 SOC的测量输出

Fig. 4 Measured SOC output in FUDS experiment

#### 4 辨识预测(Identification and prediction)

本文在保证温度等因素不变的情况下, 考虑工作电压与电流对SOC的影响, 把其他对蓄电池容量的影响因素作为系统噪声, 在有测量噪声环境中对蓄电池的荷电状态进行实时估计.

选择前5500个点的值建立模型, 图5为辨识所输入的4500~5500点的电流、电压、随机噪声及输出SOC的变化图.

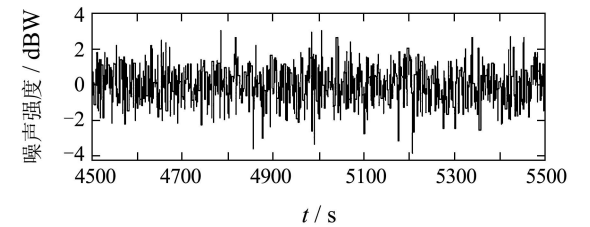
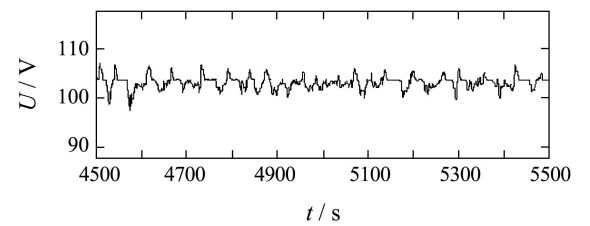
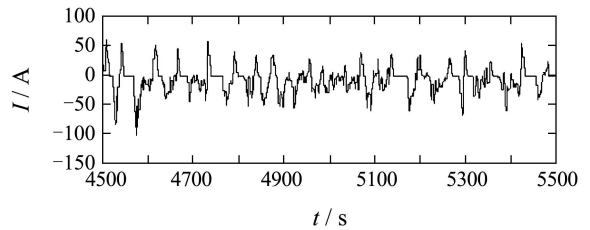
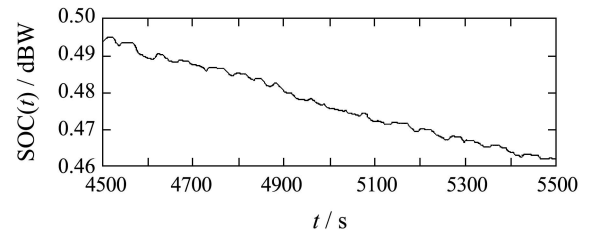


图 5 统辨识的输入/输出、噪声曲线

Fig. 5 Input/output and random noise curve of identification

取系统输入、输出和噪声变量的最大延时分别为:  $n_y = 3, n_u = 4, n_e = 3$ .

辨识得到的系统模型为:

$$y(t) = -0.90283y(t-1) - 0.1604u_1(t-1) + 0.0887u_1(t-2) \cdot u_2(t-2) - 0.7754u_2^2(t-3) - 0.2062y(t-2) + 0.0065y(t-3) \cdot u_2(t-4),$$

式中:  $y(t)$ 为SOC序列,  $u_1(t)$ 为电流序列,  $u_2(t)$ 为电压序列.

且辨识结果参数及偏差如表1所示.

表 1 NARMAX辨识模型结果  
Table 1 NARMAX identification results

回归项	辨识参数	标准偏差
$y(t-1)$	-0.90283	0.038160
$u_1(t-1)$	-0.16040	0.009100
$u_1(t-2) \cdot u_2(t-2)$	0.08870	0.032600
$u_2^2(t-3)$	-0.77540	0.052620
$y(t-2)$	-0.20620	0.000308
$y(t-3) \cdot u_2(t-4)$	0.00650	0.006890

同时采用递推最小二乘法(RLS)对参数估计的收敛曲线如图6所示,可看到RLS有较好的收敛性能。

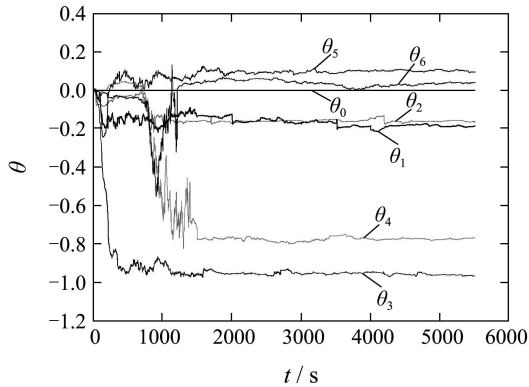


图6 基于递推最小二乘法的模型参数估计的收敛性  
Fig. 6 Convergence of model parameters estimation based on recursive least squares method

图7是预测输出与测量输出的比较图。从图7可以看出很好地实现了SOC辨识预测,模型适应度达到99.65%。

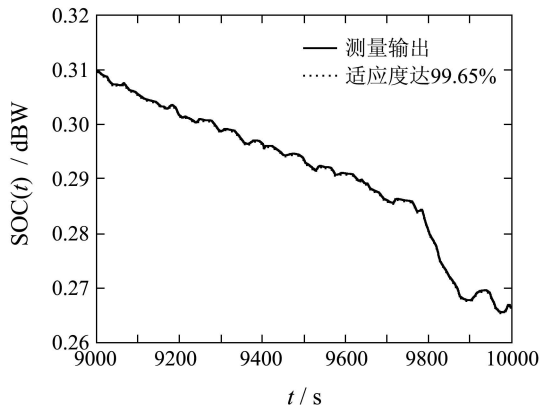


图7 SOC实测值与预测值比较  
Fig. 7 Comparison between the measured and estimated SOC

同时,为了评价辨识结果,验证模型的有效性和可靠性,分别做出了残差的自相关曲线图和预测误差图,分别如图8和图9所示。

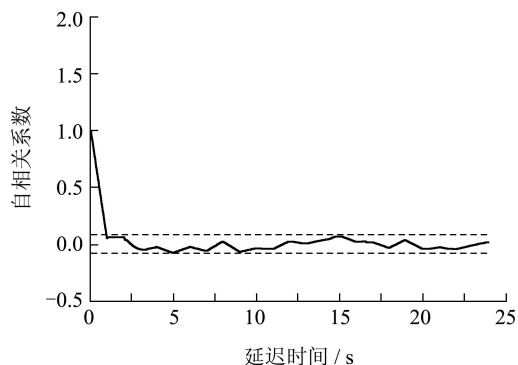


图8 残差的自相关曲线图  
Fig. 8 Auto-correlation function of residuals

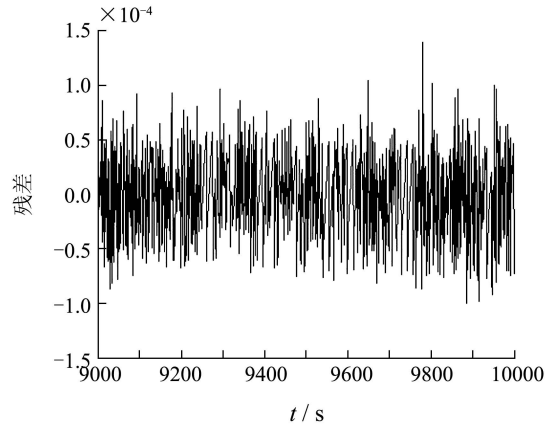


图9 预测误差图  
Fig. 9 Prediction error

得到相对误差仅为1%, 优于其他方法预测的相对误差(2.15%~4.8%)<sup>[1,12]</sup>, 且

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y(i) - \hat{y}(i))^2 = 1.6e - 6.$$

在本辨识预测中,分别取不同的样本进行验证,在先验信息不足的情况下,该方法依然高效可靠。

目前国内外研究对SOC估计大多采用放电实验法、Ah计量法、开路电压法、神经网络法、卡尔曼滤波法等<sup>[13]</sup>. 其中开路电压法和放电实验法在实验室使用较多,开路电压法用于粗略估计试验前电池SOC,放电实验法用于电池使用后剩余电量的精确计算.神经网络具有非线性的基本特性,具有并行结构和学习能力,能够模拟电池动态特性,用以估计电池SOC.神经网络输入变量的选择是否合适,变量数量是否恰当,直接影响模型的准确性和计算量.但是缺点是其需要大量的参考数据进行训练,估计误差受训练数据和训练方法的影响很大.卡尔曼滤波法适合于电流变化剧烈的电池SOC的估计,但是卡尔曼滤波法涉及大量的矩阵运算,缺点在于对电池模型准确性和计算能力要求很高.王军平等利用单变量的镍氢电池组状态空间模型,基于卡尔曼滤波对电池SOC估计的最大相对误差为2.15%<sup>[14]</sup>. Jaemoon Lee等采用降阶扩展卡尔曼滤波方法以节约计算时间,其SOC评估误差小于2%<sup>[15]</sup>.而NARMAX方法对SOC的预测是一种全新的探究,结果证明是简单、有效的。

## 5 结论(Conclusion)

通过以上验证分析表明,使用NARMAX的非线性系统动态线性逼近的简化模型,对电池的SOC进行预测是一种可行的方法,并可达到很高的精度.该方法具有很好的动态跟踪性能、较强的鲁棒性和克服外扰能力,而且算法简单,易于实现,具有很好的工程实用价值.同时,利用递推最小二乘算法可以非常方便地实现系统的在线辨识预测。

## 参考文献(References):

- [1] 王军平, 陈全世, 林成涛. 镍氢电池组的荷电状态估计方法研究[J]. 机械工程学报, 2005, 41(12): 62 – 65.  
(WANG Junping, CHEN Quanshi, LIN Chengtao. Study on estimating of the state of charge of Ni/MH battery pack for electric vehicle[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2005, 41(12): 62 – 65.)
- [2] PILLER S, PERRIN M, JOSSEN A. Methods for state of charge determination and their application[J]. *Power Sources*, 2001, 96(1): 113 – 120.
- [3] 邵海岳, 钟志华, 何莉萍, 等. 电动汽车动力电池模型及SOC预测方法[J]. 电源技术, 2004, 18(10): 637 – 640.  
(SHAO Haiyue, ZHONG Zhihua, HE Liping, et al. Research on mathematic model and SOC estimation method of traction-battery for electric vehicle[J]. *Chinese Journal of Power Sources*, 2004, 18(10): 637 – 640.)
- [4] 朱松然. 蓄电池手册[M]. 天津: 天津大学出版社, 1998.  
(ZHU Songran. *Storage Battery Handbook*[M]. TianJin: TianJin University Press, 1998.)
- [5] BILLINGS S A, LEONTARITIS I J. Parameter estimation techniques for nonlinear systems[C] // *Proceeding of the 6th IFAC Symposium: Identification and System Parameter Estimation*. Washington, USA: Pergamon Press, 1982: 505 – 510.
- [6] LEONTARITIS I J, BILLINGS S A. Input-output parametric models for nonlinear systems – Part I : Deterministic nonlinear systems; Part II : Stochastic-nonlinear Systems[J]. *International Journal of Control*, 1985, 41(3): 303 – 344.
- [7] CHEN S, BILLINGS S A. Representation of nonlinear systems: the NARMAX model[J]. *International Journal of Control*, 1989, 49(3): 1013 – 1032.
- [8] SHI H L, CAI Y L, QIU Z L. System identification on NARMAX model using Hopfield networks[J]. *Journal Shanghai University*, 2006, 10(3): 238 – 243.
- [9] CHEN J, FENG S. A simplified NARMAX method using nonlinear input-output data[J]. *Journal of Control Theory and Applications*, 2007, 5(3): 261 – 265.
- [10] 王军平, 陈全世, 曹秉刚, 等. 电动车用镍氢电池模块的充放电模型研究[J]. 西安交通大学学报, 2006, 40(1): 50 – 52.  
(WANG Junping, CHEN Quanshi, CAO Binggang, et al. Study on the charging and discharging model of Ni/MH battery module for electric vehicle[J]. *Xi'an Jiaotong University*, 2006, 40(1): 50 – 52.)
- [11] FENG S, CHEN J, TU X. Nonlinear system identification with shortage of input-output data[C] // *Proceedings of the 16th IFAC World Congress*. Oxford: Elsevier Science, 2005.
- [12] 林成涛, 陈全世, 王军平, 等. 用改进的安时计量法估计电动汽车动力电池SOC[J]. 清华大学学报, 2006, 46(2): 247 – 251.  
(LIN Chengtao, CHEN Quanshi, WANG Junping, et al. Improved Ah counting method for state of charge estimation of electric vehicle batteries[J]. *Journal of Tsinghua University(Science and Technology)*, 2006, 46(2): 247 – 251.)
- [13] 林成涛, 王军平, 陈全世. 电动汽车SOC估计方法原理与应用[J]. 电池, 2004, 34(5): 376 – 378.  
(LIN Chengtao, CHEN Quanshi, WANG Junping. Methods for state of charge estimation of EV batteries and their application[J]. *Battery*, 2004, 34(5): 376 – 378.)
- [14] SABINE P, MARION P, ANDREAS J. Methods for state-of-charge determination and their application[J]. *Journal of Power Sources*, 2001, 96 (1): 113 – 120.
- [15] LEE J, NAM O, CHO B H. Li-Ion battery SOC estimation method based on the reduced order extended Kalman filtering[J]. *Journal of Power Sources*, 2007, 174(1): 9 – 15.

## 作者简介:

**郭桂芳** (1971—), 女, 博士, 研究方向为电动汽车动力电池热性能及能量管理系统研究, E-mail: ggf8053@163.com;

**曹秉刚** (1953—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电动汽车智能控制, E-mail: cbg@mail.xjtu.edu.cn.