

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2016.12.017

电动汽车动力锂电池模型参数辨识^{*}

章 群, 严世榕^{*}

(福州大学 机械工程学院, 福建 福州 350108)

摘要:针对纯电动汽车上动力锂电池等效模型参数辨识的问题,以某纯电动汽车的由 87 个单体串联的 84 Ah 的镍钴锰三元锂电池组为研究对象,基于市区行驶的电池数据,选用了二阶 RC 电池等效模型,辨识了等效模型的参数。基于整体电池数据,选取出了 8 段在连续的 12 个(及 12 个以上)采样周期内相邻两个采样点的电流变化绝对值超过 0.2 C 的电池数据段,分别对初始开路电压最大和最小的单体进行了参数辨识。以最小二乘法对电流连续变化最长的一段电池数据段作为参数辨识的结果,并结合整体电池数据对辨识得的结果进行了参数的验证。研究结果表明,初始开路电压最大单体的绝对误差平均值为 3.62%,初始开路电压最小单体的绝对误差平均值为 3.24%,满足工程要求,可运用于工程实践中。

关键词:二阶 RC 等效模型;电动汽车;三元锂电池;汽车行驶数据;最小二乘法;参数辨识

中图分类号:TM912

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2016)12-1506-05

Parameters identification of electric vehicle lithium battery model

ZHANG Qun, YAN Shi-rong

(College of Mechanical Engineering, Fuzhou university, Fuzhou 350108, China)

Abstract: Aiming at the parameters identification of the equivalent model of the power Li-ion battery in the pure electric vehicle, a three-element lithium battery group used for driving electric vehicles which was composed of 87 single 84 Ah nickel cobalt manganese lithium-ion cells in series, was studied. A second order RC equivalent model was selected, based on the urban driving data, and the parameters of the equivalent model were identified. Based on the overall battery data, 8 segments of battery data was selected, for each segment that in the 12 (and above 12) sampling periods the absolute value of the current change of the two object sampling points was more than 0.2 C. And parameter identification of the single cell with the maximum and minimum open circuit voltage was carried out respectively. Using the least square method to identify the parameters of a battery data segment with the longest continuous change as the result of the parameter identification. And the parameters of the identified results were verified by the overall battery data. The results indicate that the mean of the absolute error of the cell with maximum initial open circuit voltage is 3.62%, and the mean of the absolute error of the cell with minimum initial open circuit voltage is 3.24%, which can meet the requirements of the engineering, can be used in engineering practice.

Key words: second order RC equivalent model; electric vehicle; three element lithium battery; driving data; least square method; parameter identification

0 引 言

作为纯电动汽车的唯一动力来源,动力锂离子电

池的性能对于整车的动力性、经济性、安全性以及平顺性至关重要^[1-2]。电池管理系统(battery management system, BMS)是电动汽车的关键部件。BMS 的基础功

收稿日期:2016-06-24

基金项目:福州市科技基金资助项目(2015-G-64)

作者简介:章群(1992-),男,福建霞浦人,硕士研究生,主要从事电动汽车电池管理系统方面的研究. E-mail:751765431@qq.com

通信联系人:严世榕,男,博士,教授,硕士生导师. E-mail:mesryan@fzu.edu.cn

能之一就是准确地估算电池的 SOC, 电池等效模型的准确度对 SOC 估算精度影响极大。

根据建模的出发点不同, 等效模型可以简单归类为化学模型与性能模型。化学模型的建立需要对电池的电化学机理有很深的理解, 复杂程度较高, 考虑的因素繁多, 因此, 一般不适用于电动汽车的在线管理, 多应用于电池的研发过程。与化学模型相对应的是电池性能模型, 目前常用的性能模型主要为等效电路模型, 等效电路模型不考虑电池内部化学成分及其化学反应, 仅通过电子元器件描述电池工作时的外特性, 简单易用, 结构可根据不同电池类型进行调整, 普遍适用于电动汽车动力电池上。等效电路模型中常用的有: Rint 模型、Thevenin 模型、GNL 模型和 PNGV 模型^[3-4]。Thevenin 电池等效电路模型具有良好的非线性特性, 因此能很好体现电池的动态特性, 准确模拟电池的充放电行为。

对于已选定的电池等效模型, 由于其模型参数受到诸多因素的影响, 例如: 电池的 SOH、温度、寿命及自放电等, 其参数会随着时间的推移发生变化。因此需要对电池等效模型参数进行在线辨识更新, 以便电池模型能够真实地反映电池工作状态。因此需要在线的辨识蓄电池等效模型参数, 才能更有效地准确地估算出电池的 SOC, 可以使电池管理系统准确的对电池当前状况作出响应, 延长蓄电池的使用寿命, 减少电动汽车的故障率^[5]。

本研究以由 87 个单体额定电压为 3.8 V, 额定容量为 84 Ah 的镍钴锰三元锂离子电池串联成的纯电动汽车为实验对象, 由致远电子的 UABCAN-I 连接 PC 采集一段单人驾驶(约 60 kg)的市区行驶工况的电动汽车的锂电池的行驶数据进行电池模型参数的辨识。

1 电池建模

本研究以 Thevenin 模型为基础, 增加了一阶 RC 网络, 增强了 Thevenin 模型描述电池极化效应及浓差效应的能力^[6]。改进后的二阶 RC 网络动力锂离子电池的模型如图 1 所示。

由基尔霍夫定律有:

$$\begin{aligned} U &= U_{oc} - U_1 - U_2 - IR_0 \\ \dot{U}_1 &= \frac{I}{C_1} - \frac{U_1}{R_1 C_1} \\ \dot{U}_2 &= \frac{I}{C_2} - \frac{U_2}{R_2 C_2} \end{aligned} \quad (1)$$

对式(1) 进行拉氏变换得到:

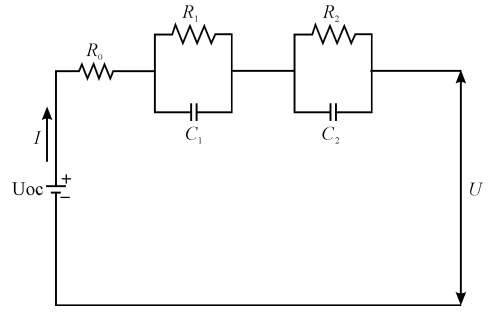


图 1 二阶 RC 网络电池模型

U_{oc} —电池的开路电压; R_0 —电池的内阻; R_1, C_1 —电池的极化电阻和极化电容; R_2, C_2 —电池的浓差电阻和浓差电容; U —负载电压; I —电池工作电流

$$U_{oc}(s) - U(s) = I(s) \left(R_0 + \frac{R_1}{1 + R_1 C_{1s}} + \frac{R_2}{1 + R_2 C_{2s}} \right) \quad (2)$$

令 $F(s) = [U_{oc}(s) - U(s)]/I(s)$ 可得:

$$F(s) = \frac{X + Ws + R_0 s^2}{Z + Ys + s^2} \quad (3)$$

其中:

$$\begin{aligned} W &= \frac{(R_0 R_1 C_1 + R_0 R_2 C_2 + R_1 R_2 C_2 + R_2 R_1 C_1)}{R_1 R_2 C_1 C_2} \\ X &= \frac{R_0 + R_1 + R_2}{R_1 R_2 C_1 C_2} \\ Y &= \frac{R_1 C_1 + R_2 C_2}{R_1 R_2 C_1 C_2} \\ Z &= \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2} \end{aligned} \quad (4)$$

对传递函数进行离散化处理, 由双线性变换法, 令:

$$s = \frac{2}{T} \cdot \frac{1 - z^{-1}}{1 + z^{-1}}$$

其中: z^{-1} —离散因子, T —采样时间, 得到:

$$F(z^{-1}) = \frac{a1 + a2z^{-1} + a3z^{-2}}{1 + a4z^{-1} + a5z^{-2}} \quad (5)$$

其中:

$$\begin{aligned} a1 &= \frac{4R_0 + 2WT + XT^2}{4 + 2YT + ZT^2} \\ a2 &= \frac{2XT^2 - 8R_0}{4 + 2YT + ZT^2} \\ a3 &= \frac{4R_0 - 2WT + XT^2}{4 + 2YT + ZT^2} \\ a4 &= \frac{2ZT^2 - 8}{4 + 2YT + ZT^2} \\ a5 &= \frac{4 - 2YT + ZT^2}{4 + 2YT + ZT^2} \end{aligned} \quad (6)$$

由式(6) 与式(4) 结合可计算得电池的参数 R_0 、

R_1 、 R_2 、 C_1 和 C_2 之间的关系如下:

$$\begin{aligned} R_0 &= \frac{a1 + a3 - a2}{1 + a5 - a4} \\ W &= \frac{4(a1 - a3)}{(1 + a5 - a4)T} \\ X &= \frac{4(a1 + a2 + a3)}{(1 + a5 - a4)T^2} \\ Y &= \frac{4(1 - a5)}{(1 + a5 - a4)T} \\ Z &= \frac{4(1 + a5 + a4)}{(1 + a5 - a4)T^2} \end{aligned}$$

将式(5)代入式(3)中,可得:

$$\begin{aligned} U(k) &= U_{oc}(k) + a4U_{oc}(k-1) + a5U_{oc}(k-2) - \\ &\quad a4U(k-1) - a5U(k-2) - a1I(k) - \\ &\quad a2I(k-1) - a3I(k-2) \end{aligned} \quad (7)$$

由于实验中的电池容量较大,在采样时间较小的情况下,每 3 个采样时间内,电池的开路电压基本不变, $U_{oc}(k) \approx U_{oc}(k-1) \approx U_{oc}(k-2)$, 则式(7)可以简化为:

$$\begin{aligned} U(k) &= (1 + a4 + a5) \cdot U_{oc}(k) - a4U(k-1) - \\ &\quad a5U(k-2) - a1I(k) - a2I(k-1) - a3I(k-2) \end{aligned} \quad (8)$$

定义:

$$\begin{aligned} \varphi(k) &= [1 \quad -U(k-1) \quad -U(k-2) \\ &\quad -I(k) \quad -I(k-1) \quad -I(k-2)], \end{aligned}$$

$$\theta(k) = [(1 + a4 + a5)U_{oc} \quad a4 \quad a5 \quad a1 \quad a2 \quad a3] \quad (9)$$

则 $U(k) = \varphi(k) \cdot \theta(k) + e(k)$ 。

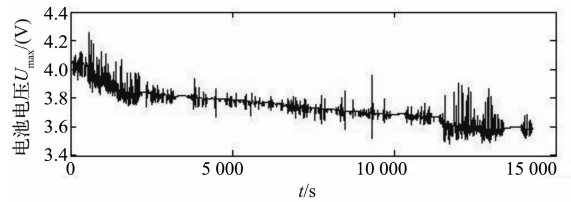
2 参数辨识

文献[6]中选用 HPPC 脉冲循环工况对电池进行放电测试,利用递推最小二乘法对电池参数进行辨识,证明了在大容量电池在电流连续以较大电流放电时通过递推最小二乘法可以辨识到电池的参数,但其收敛速度较慢,在初始参数未知的情况下,需经过 200 次以上的递推计算后,识别的参数才能收敛于稳定值。本研究以汽车在市区内行驶的电池的运行数据为研究对象,由开路电压法获取电池的 SOC_0 ,运用最小二乘法对选取后的电池数据进行等效电路模型的参数辨识。市区工况下,部分电池的电压电流数据如图 2 所示。

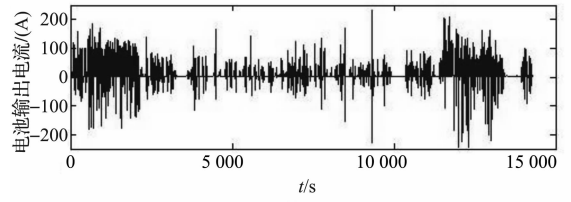
由于电池包内配有水冷和风冷系统,行驶过程中温度变化不超过 3 °C,所以不考虑温度变化的影响。

2.1 最小二乘法方程

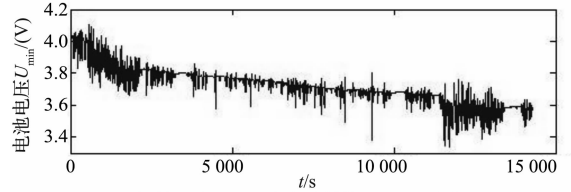
最小二乘法的基本思想是寻找一个 θ^0 值的估计值 $\hat{\theta}$,使误差 ε 的分量平方和取极小值^[7],即:



(a) 初始开路电压最大电池单体电压 $U_{\max}$ 变化



(b) 电池的输出电流变化



(c) 初始开路电压最小电池单体电压 $U_{\min}$ 变化

图 2 部分电池单体电压及电流变化

$$\min J(\theta) = \varepsilon^T(N, \theta) \varepsilon(N, \theta) = \sum_{k=n}^N e^2(k, \theta) \quad (10)$$

取极小值。 $\hat{\theta}$ 使得 $J(\theta) | \hat{\theta} = \min$, 则有:

$$\frac{\partial J(\theta)}{\partial \theta} \bigg|_{\hat{\theta}} = \frac{\partial}{\partial \theta} (U - \varphi\theta)^T (U - \varphi\theta) = 0 \quad (11)$$

得到以下方程:

$$(\varphi^T \varphi) \hat{\theta} = \varphi^T U$$

当 $\varphi^T \varphi$ 是可逆矩阵时,有:

$$\hat{\theta} = (\varphi^T \varphi)^{-1} \varphi^T U \quad (12)$$

通过极小化式(8)求出的 θ 值,则为最小二乘估计值。由求出的 θ 值则可以计算出 U_{oc} 、 R_0 、 R_1 、 R_2 、 C_1 和 C_2 。

2.2 数据的选取

由于该实验对象的电池为大容量电池,且电池在较小电流波动又受噪声的影响,电池的端电压变化基本为 0,因此电流波动较小的数据将影响电池参数的辨识精度,导致辨识出的结果发散,所以需要对电池的参数进行选取。87 个电池的最大和最小开路电压分别为:4.064 和 4.022(经过充分的电池静置),由 OCV-SOC 曲线拟合出的 SOC 与 OCV 的关系式如下式所示:

$$\begin{aligned} OCV &= 1\,054 \cdot SOC^9 - 5\,216 \cdot SOC^8 + 10\,930 \cdot \\ &\quad SOC^7 - 12\,613 \cdot SOC^6 + 8\,728 \cdot SOC^5 - \\ &\quad 3\,696 \cdot SOC^4 + 942.3 SOC^3 - 138 \cdot SOC^2 + \\ &\quad 11.17 SOC + 3.088 \end{aligned} \quad (13)$$

其拟合的多重判定系数 R^2 值为 0.999 8(越接近 1 拟合效果越好),计算出相对应的 SOC_0 ,则电池的最大

和最小 SOC₀ 分别为:91.35% 和 87.88%。在运行结束时,电池最大和最小的 OCV 和 SOC 分别为:3.604 和 3.587,30.44% 和 27.06%。

文献[8]中,介绍了以复合脉冲电流对电池充放电,以电池在电流发生阶跃的瞬间的端电压的电压变化除以电流变化值来求取电池的内阻的方式。由于电动汽车上电池管理系统成本有限,电压传感器和电流传感器的精度有限,笔者选取了在一个采样时间($T = 0.5\text{ s}$)内,以电流变化超过 1 C 的瞬间的电压变化值除以电流变化值:

$$R_0 \approx \frac{\Delta U}{\Delta I}$$

(14)

经过计算可知,受电压和电流传感器的精度所限,不能以单次放电的方式求取电池的内阻,受内阻的影响也会导致对极化、浓差内阻和电容的辨识。由式(14)求出的电压最大和最小的内阻的平均值分别为 $0.921\text{ 1 m}\Omega$ 和 $0.685\text{ 3 m}\Omega$ 。

由最小二乘法可知仅 $\varphi^T\varphi$ 可逆的情况下,求出的 θ 才有意义,否则 θ 是发散的。当电流变化很小,端电压变化极小,受测量精度有限的有限,导致电压变化基本为 0,使 $\varphi^T\varphi$ 不可逆,且 φ 矩阵的行数必须大于等于 6,否则也将使 $\varphi^T\varphi$ 不可逆。根据市区行驶的特点,本研究选取电池数据的流程图如图 3 所示。

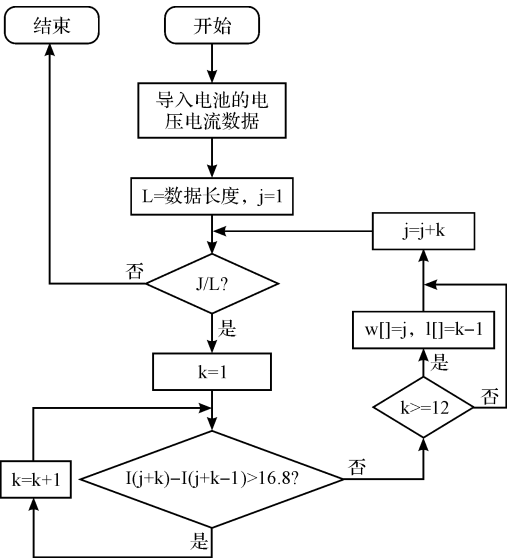


图 3 选取电池数据的流程图

根据图 3,在 Matlab 上进行数据选取,选取出的 w , l 分别为行驶数据中电流连续变化超过 0.2 C (16.8 A) 的位置及其数据长度。以初始电压最大和最小的电池单体带入计算得到的辨识结果如表 1 所示。

表 1 经过筛选后的结果

w (位置)	l (长度)	$R_{0\max}/\text{m}\Omega$	$R_{0\min}/\text{m}\Omega$
1 193 - 1 205	13	0.554 2	0.798 7
1 404 - 1 415	12	1.106 3	0.598 8
1 850 - 1 861	12	0.607 7	1.002 5
1 948 - 1 959	12	0.818 8	0.517 7
4 176 - 4 195	20	0.980 6	0.652 8
18 658 - 18 675	18	0.952 1	0.719 2
22 204 - 22 219	16	0.750 1	0.420 9
24 269 - 24 281	13	0.794 4	0.592 0
24 764 - 24 781	18	0.660 4	0.626 6
24 934 - 24 946	13	0.540 4	0.788 8
26 228 - 26 239	12	0.894 2	0.622 4

由 R_0 的结果对比通过式(14)计算的结果对比可知,当数据长度越长时,辨识的结果接近于真实值,因此,本研究以数据长度最长的,长度为 20 的 w 带入最小二乘方程中,辨识得到初始电压最大和最小值的电池单体的 5 个参数如表 2、表 3 所示。

表 2 初始电压最大的单体的参数辨识结果

$R_0/\text{m}\Omega$	$R_1/\text{m}\Omega$	$R_2/\text{m}\Omega$	C_1/F	C_2/F
0.980 6	0.193 8	0.191 8	1 250.9	1 463.2

表 3 初始电压最小的单体的参数辨识结果

$R_0/\text{m}\Omega$	$R_1/\text{m}\Omega$	$R_2/\text{m}\Omega$	C_1/F	C_2/F
0.652 8	0.162 9	0.201 1	773.04	17 235

3 辨识结果验证

二阶 RC 网络的零输入响应为:

$$U_1 = U_{01e}^{-t/\tau_1}$$
$$U_2 = U_{02e}^{-t/\tau_2}$$

二阶 RC 网络的零输出响应为:

$$U_1 = IR1e^{-t/\tau_1}$$
$$U_2 = IR2e^{-t/\tau_2}$$

因此,可以得到电池端电压的计算公式:

$$U(k) = U_{oc}(k) - I(k)R_0 - U_1(k) - U_2(k)$$
$$U_1(k) = U_1(k-1)e^{-\Delta t/\tau_1} + I(k)R_1e^{-\Delta t/\tau_1}$$
$$U_2(k) = U_2(k-1)e^{-\Delta t/\tau_2} + I(k)R_2e^{-\Delta t/\tau_2} \quad (15)$$

将选取出的数据经最小二乘辨识的最大以及最小端电压的辨识结果代入式(11)中。其中 $U_{oc}(k)$ 是以电池的安时积分法计算的 SOC 经过式(13)计算得到的^[9]。

4 实验及结果分析

本研究以选取出的数据进行最小二乘法辨识的参数辨识的结果代入计算,由图 4、图 5 可知,最大端电压计算值与真实值之间误差最大值为 0.100 7 V ,平均值为 0.002 3 V ,相对误差率最大值为 4.28% ,平均值为 0.06% ,绝对误差率的平均值 3.62% 。最小端电压

计算值与真实值之间误差最大值为 0.117 4 V, 平均值为 0.000 34 V, 相对误差率最大值为 3.5%, 平均值为 0.005%, 绝对误差率的平均值为 3.24%。根据电动汽车用电池管理系统技术条件的要求^[10], 误差小于标准要求的 6% 以下, 符合技术要求, 满足工程要求, 可运用于工程实践中。计算 $U_{\max}$ 以及真实 $U_{\max}$ 的对比如图 4、图 5 所示。

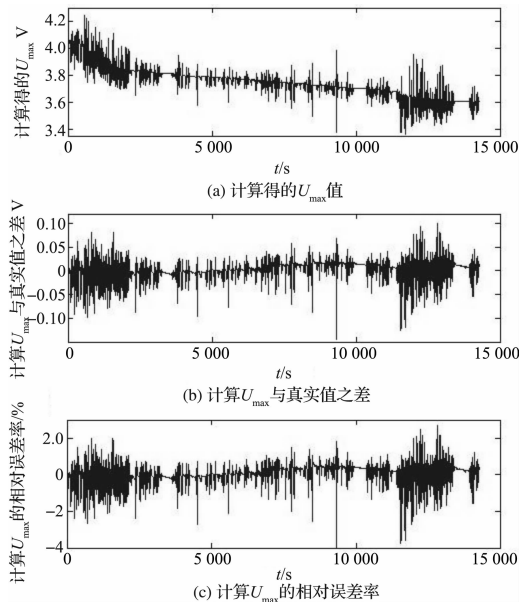


图 4 计算 $U_{\max}$ 以及真实 $U_{\max}$ 的对比

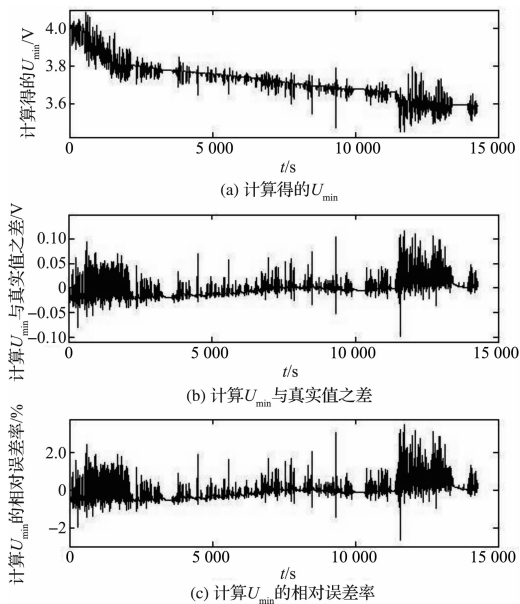


图 5 计算 $U_{\min}$ 与真实值的对比

5 结束语

本研究提出的电池数据选取方法结合二阶 RC 模型的参数辨识能实时地辨识模型的参数, 计算结果表明该方法的辨识结果的最大相对误差率为 4.28%, 可进一步用于后续的电池的 SOC 和 SOH 等一系列电池状态的计算中。

在下一步阶段中, 本研究将结合智能算法(卡尔曼滤波算法、模糊算法、神经网络算法等)计算电池的 SOC。由于整车在行驶过程中变化情况很复杂, 还需要采集更多的实车在运行过程中的数据, 对电池模型做进一步的改进, 以提高电池模型参数辨识的准确度。

参考文献 (References):

- [1] 何洪文, 余晓江. 电动车辆动力电池性能评价[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2006, 36(5): 659-623.
- [2] 欧阳剑, 李 迪, 柳俊城. 电动汽车用动力电池模型的研究综述[J]. 机电工程技术, 2015, 44(12): 1-4.
- [3] JOHNSON V H. Battery Performance Models in ADVISOR [J]. **Journal of Power Sources**. 2002(110): 321-329.
- [4] DOE/ID-11069. Freedom CAR Battery Test Manual for Power Assist Hybrid Electric Vehicles [S]. Washington -DC: US Department of Energy, 2003.
- [5] 魏学哲, 邹广楠, 孙泽昌. 燃料电池汽车中电池建模及其参数估计[J]. 电源技术, 2004, 28(10): 605-608.
- [6] 张 廷, 胡社教. 基于改进 Thevenin 模型锂电池 SOC 估算方法[J]. 电源技术, 2015, 39(11): 2400-2402.
- [7] Hongwen H, Xiaowei Z, Rui X, et al. Online model-based estimation of State-of-charge and open-circuit voltage of lithium-ion batteries in electric vehicles. **Energy**, 2012, 39(1): 310-318.
- [8] 刘兴堂. 现代辨识工程[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.
- [9] 林成涛, 仇 斌, 陈全世. 电流输入电动汽车电池等效电路型的比较[J]. 机械工程学报, 2005, 41(12): 77-81.
- [10] QC/T 897-2011. 电动汽车用电池管理系统技术条件 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2011.

[编辑: 周昱晨]

本文引用格式:

章 群, 严世榕. 电动汽车动力锂电池模型参数辨识[J]. 机电工程, 2016, 33(12): 1506-1510.

ZHANG Qun, YAN Shi-rong. Parameters identification of electric vehicle lithium battery model[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2016, 33(12): 1506-1510.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>