

锂离子电池建模与参数识别

刘璇, 王立欣, 吕超, 李俊夫

(哈尔滨工业大学电气工程及自动化学院, 哈尔滨 150001)

摘要: 锂离子电池作为最新一代的绿色高能充电电池受到越来越多的关注, 成为诸多领域的核心储能部件。为了更好地发挥电池管理系统的作用, 基于电化学机理提出一种新的电池等效电路模型, 模型中同时考虑了热行为描述, 模型参数通过激励响应分析的方法获取。通过实验证明该模型能够较精确地描述电池充放电行为, 并且由于其较高的计算效率和精确度, 将该模型嵌入到电池管理系统中将使电池管理更加有效。

关键词: 锂离子电池; 等效电路模型; 激励响应分析

Modeling and Parameter Identification for Lithium-ion Battery

LIU Xuan, WANG Lixin, LYU Chao, LI Junfu

(School of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: As one of the most up-to-date green high-energy rechargeable batteries, lithium-ion battery is attracting more attention and has become a main energy storage part in many fields. In order to improve the performance of existing battery management system(BMS), a new equivalent circuit model(ECM) for lithium-ion battery is proposed based on electrochemistry mechanism, in which heat generation is also taken into account and parameters are obtained through excitation response analyses. Experiments show that the proposed model can describe the charging and discharging behaviors of lithium-ion battery more accurately; moreover, by virtue of its high calculation efficiency and accuracy, this model can be embedded into battery management system to improve the efficiency of existing BMS.

Keywords: Lithium-ion battery; equivalent circuit model; excitation response analysis

锂离子电池能量密度高、输出功率大, 越来越多地应用在新能源汽车、新能源发电等领域^[1]。电池的广泛应用也对管理系统提出了更高的要求。对电池性能状态进行科学准确的估计和预测, 以便让锂离子电池最大限度地释放电能发挥作用、长期稳定可靠地工作, 需要构建一种准确、便捷、通用性好的模型。

将模型应用于管理系统当中, 不仅要考虑模型的准确性, 使模型尽量准确地还原电池的工作情况, 还要考虑模型的简便程度, 以使模型的计算合

理占用资源提高效率^[2]。目前, 锂离子电池机理模型鲜见于实际系统中, 主要由于描述电池内部复杂的物理、化学过程, 通常形式复杂、计算耗时。常用的等效电路模型结构简单, 但其参数无实际物理意义, 对电池健康状态评估时意义不明确^[3]。所以, 有必要将电池电化学机理与等效电路模型相结合。

本文首先从锂离子电池的电化学机理出发, 增加了热行为描述, 提出了一种新的等效电路模型, 然后利用激励响应分析的方法进行参数获取, 最后通过仿真实验验证该模型的正确性和准确度。

1 等效电路模型

结合锂离子电池机理过程, 本文提出一个等效电路模型, 如图 1 所示。有别于现有的等效电路模

收稿日期: 2016-03-02; 修回日期: 2017-09-26

基金项目: 面向性能在线评估的锂离子电池机理模型仿真关键技术研究资助项目(NSFC.51477037)

Project Supported by Research on the Mechanism Model of Lithium-ion Battery in the Evaluation of Performance Online

型,该模型涵盖了开路电势以及欧姆极化、反应极化和浓差极化三部分过电势的计算^[4],热行为的描述包括产热和热扩散计算^[5],是一种简化的计算方法。模型包括 2 个子模型,目标是实现任意负载电流下电池的端电压和表壳温度进行仿真计算。

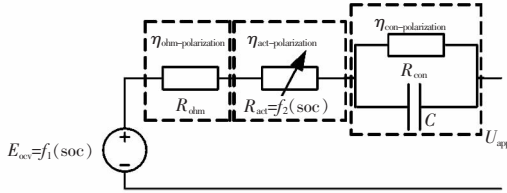


图 1 锂离子电池等效电路模型

Fig.1 Equivalent circuit model of lithium-ion Battery

(1)开路电势是对电池基本过程的描述,决定了电池端电压曲线的基本形状,其精确估计是电池充放电行为准确把握的基础。电池的电动势为 2 个电极开路电势的差,在电化学模型中,固相粒子表面浓度决定了开路电势^[6],其计算公式为

$$E_{ocv}(t) = U_p \left(\frac{c_{p,surf}^s(t)}{c_{max,p}^s} \right) - U_n \left(\frac{c_{n,surf}^s(t)}{c_{max,n}^s} \right) \quad (1)$$

式中: U_p 和 U_n 为已知的正、负极开路电势函数曲线^[7]; $c_{max,p}^s$ 、 $c_{max,n}^s$ 为正、负极集流体边界处两活性粒子的固相最大锂离子浓度; $c_{p,surf}^s$ 、 $c_{n,surf}^s$ 为表面锂离子浓度。类似地,在等效电路模型中,开路电势可以看成是电池荷电状态(SOC)的函数。在本文模型中,定义 SOC 范围为 1~0,对应电池从满充状态放电至 2.5 V。开路电势的计算公式为

$$E_{ocv}(t) = a_{13} \cdot \frac{a_1 \text{soc}(t)^5 + a_2 \text{soc}(t)^4 + a_3 \text{soc}(t)^3 + a_4 \text{soc}(t)^2 + a_5 \text{soc}(t) + a_6}{a_7 \text{soc}(t)^5 + a_8 \text{soc}(t)^4 + a_9 \text{soc}(t)^3 + a_{10} \text{soc}(t)^2 + a_{11} \text{soc}(t) + a_{12}} \quad (2)$$

式中: $a_1 \sim a_{13}$ 为拟合系数。SOC 采用安时计数法^[8]计算为

$$\text{soc}(t) = 1 - \frac{I(t)t}{Q_{\text{capa}}} \quad (3)$$

式中: I 为负载电流,放电时为正; Q_{capa} 为电池总放电容量。

(2)欧姆极化过电势与负载电流成正比, R_{ohm} 是用集中参数形式表达的电池欧姆内阻,则过电势与负载电流之间的函数关系为

$$\eta_{ohm-polarization}(t) = R_{ohm}I(t) \quad (4)$$

(3)反应极化过电势表征了电池电化学反应过程,从其电化学阻抗谱曲线^[9]可以看出,反应极化过电势的数值大小不仅与负载电流有关,也和电池 SOC 状态相关,即

$$\eta_{act-polarization}(t) = (b_1 \text{soc}(t)^3 + b_2 \text{soc}(t)^2 + b_3 \text{soc}(t) + b_4)I(t) \quad (5)$$

式中, $b_1 \sim b_4$ 为拟合系数

(4)浓差极化过程。在不考虑电池老化的情况下,根据物料守恒,固液相锂离子浓度总体保持平衡^[6]。扩散的作用效果可以等效地看成是锂离子浓度差的建立过程,扩散过程由一个电容和电阻的组合形式来表示。为符合实际物理意义,设时间常数 τ ($\tau = R_{con}C$)在电池各个状态时为固定值,初始时刻的 $\eta_{con-polarization}$ 为 0,则浓差极化过电势 $\eta_{con-polarization}$ 的迭代计算公式为

$$\eta_{con-polarization}(t_{k+1}) = \eta_{con-polarization}(t_k) + (I(t)/C - \eta_{con-polarization}(t_k)/\tau)(t_{k+1} - t_k) \quad (6)$$

根据上述分析,可得电池端电压的计算公式为

$$U_{app}(t) = E_{ocv}(t) - \eta_{con-polarization}(t) - \eta_{act-polarization}(t) - \eta_{ohm-polarization}(t) \quad (7)$$

热行为的描述包括产热和热扩散计算。电池内部温度沿径向分布的方程为

$$G(t) - G_{\text{exchange}}(t) + \lambda \nabla^2 T = mC_p \frac{dT}{dt} \quad (8)$$

采用体积平均方法分析电池热行为^[10],认为电池是一个等温体,其温度的描述包括两个部分,内部温度和表面温度即用 T 和 T_{surf} 来描述。电池输入的能量为自身产热 $G(t)$,借助热阻 R_{cond} 建立内部温度和电池表壳温度之间的函数关系^[11],即

$$G(t) = \frac{T(t) - T_{\text{surf}}}{R_{\text{cond}}} \quad (9)$$

规定 $G_{\text{exchange}}(t)$ 为正值时,表示电池向环境放热, $G_{\text{exchange}}(t)$ 可表示为

$$G_{\text{exchange}}(t) = hA_0(T_{\text{surf}}(t) - T_a(t)) \quad (10)$$

由式(8)~式(10)可得

$$\frac{T(t) - T_{\text{surf}}}{R_{\text{cond}}} - hA_0(T_{\text{surf}}(t) - T_a(t)) = mC_p \frac{dT}{dt} \quad (11)$$

在假设条件下,热传导部分可以忽略不计^[12]。

简化的能量方程可以适用于各种形状的电池。则电池总产热 $G(t)$ 计算公式为

$$G(t) = I(t)(\eta_{\text{ohm-polarization}}(t) + \eta_{\text{act-polarization}}(t) + \eta_{\text{con-polarization}}(t)) \quad (12)$$

为计算电池内部温度和表面温度,将式(11)离散化可以得到

$$T(t_{k+1}) = T(t_k) + (t_{k+1} - t_k)(G(t_k)(1 + hA_0R_{\text{cond}}) - hA_0(T_{\text{surf}}(t_k) - T(t_k)))/(mC_p) \quad (13)$$

$$T_{\text{surf}}(t_{k+1}) = T(t_{k+1}) - G(t_k)R_{\text{cond}} \quad (14)$$

2 参数获取

良好的仿真精度和便捷的参数获取流程是衡量模型应用性的两个必要条件,如果模型只有高精度,参数获取过程复杂难以实现,那么便失去了模型的价值。除电池质量、电池表面积可由厂商提供或直接测量外,其他参数均需要估计。为此,对提出的模型进行分析,建立模型参数与端电压、表壳温度之间的数值函数关系,提出了基于激励响应分析的参数估计方法。

针对电池基本工作过程,实际中用较小倍率工况下测量的端电压近似为理想电动势曲线,即选择 0.02C 小倍率放电曲线作为电池理想电动势曲线^[13]。使用最小二乘法拟合式(2),得到开路电势和 SOC 之间的函数关系。

电池内部各物理化学过程的时间常数不同,频率响应也不同。欧姆极化作用电子导电过程的响应最快,欧姆电阻导致的压降在施加电流激励后很短暂的时间即可产生,因此,可利用电化学阻抗谱的高频段测量电池的欧姆内阻。具体做法是电池静置后施加 1 kHz 正弦小电压激励,测量电池的电流响应,计算欧姆内阻。

反应极化过程需要设计动态工况用以辨识相应的参数。设计的动态负载电流、以及端电压和外壳温度响应曲线如图 2 所示,环境温度控制在 25℃。

电流从 0 变化到某一固定值的瞬间,电压存在跳变 ΔU ,如图 3 所示。除去欧姆极化过电势,即为

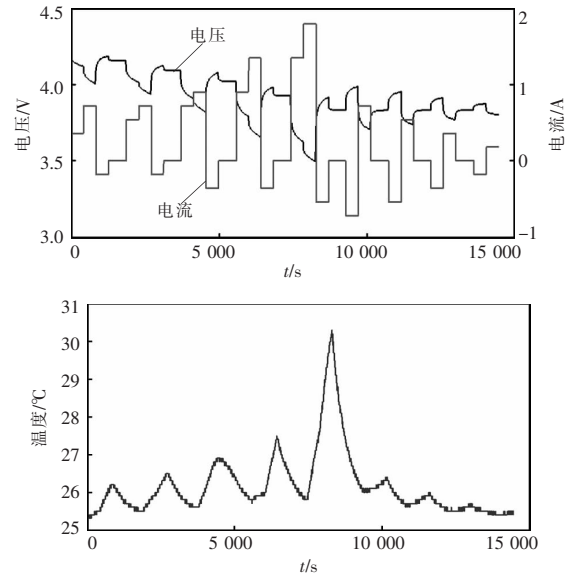


图 2 负载电流、端电压和外壳温度动态响应曲线

Fig.2 Dynamic response curves of load current, voltage and shell temperature

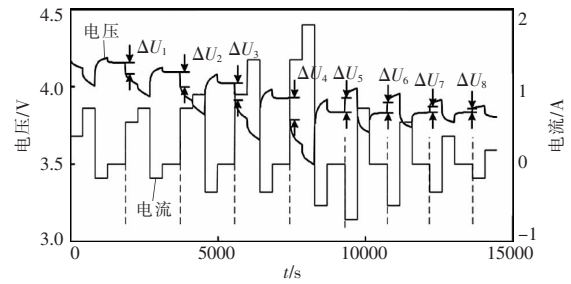


图 3 负载电流及端电压动态响应细节曲线

Fig.3 Dynamic response detail curves of load current and voltage

反应极化过电势。依据反应极化的计算式(5),使用最小二乘方法,拟合未知参数。

与上述情况不同,扩散过程需要一段过渡时间,才进入新的稳定状态,继而建立一个新的浓度差^[14]。为了减小耗时,每段恒流充放电的时间控制为 7 min。依据浓差极化过电势计算式(6),使用最小二乘方法,拟合未知参数。

在计算产热之前,需要设计工况辨识热容 C_p 。由式(11)可知,当负载电流为 0 时,产热为 0,式(11)可变形为

$$-hA_0(T_{\text{surf}}(t) - T_a(t)) = mC_p \frac{dT(t)}{dt} \quad (15)$$

认为电池表面温度和内部温度相等^[15],即当 $t=0$ 时, $T(0)=T_0$; 当 $t=\infty$ 时, $T(\infty)=T_a$ 。整理可得该方程

的解析解为

$$T_{\text{surf}}(t) = T_a(t) + (T_0 - T_a) \exp(-hA_0 t / (C_p m)) \quad (16)$$

易知,时间常数 $\tau = \frac{C_p m}{hA_0}$ 。换热系数 h 与电池本身没有关系,与所处的环境有关,电池在恒温箱内进行测试,在电池外壳贴装温度传感器进行测温。通常情况下,考虑电池所处环境不同换热系数的取值范围从 15 到 20 变化,将电池搁置在空气中时换热系数取 $17.5^{[16]}$,当电池处于手机内或者其他设备中,换热系数通过经验进行选取,环境温度较高时,换热系数取值较小,反之换热系数取值较大^[17]。

电池的外壳温度与放电倍率和环境温度相关。图 4 给出了在不同的环境温度和不同倍率下,电池壳温度的变化情况。在电池放电截止后,让其散热,恢复到室温,用式(16)进行拟合,得到的时间常数 τ_{heat} 取均值,进而计算 C_p 。

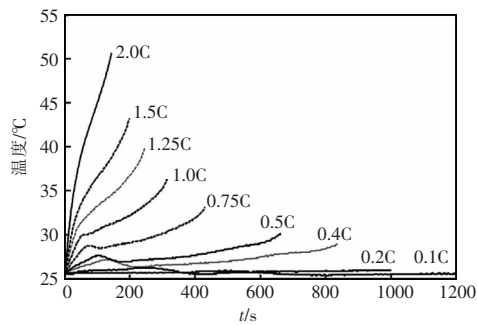


图 4 电池壳温度与放电倍率关系

Fig.4 Relationship between surface temperature and discharge ratio of the battery

由于三部分过电势都与内部温度相关,如果过电势计算出现较大偏差,热行为的计算结果将出现较大误差。产热计算公式变为

$$G(t) = I(t)(E_{\text{ocv}}(t) - U_{\text{app}}(t)) \quad (17)$$

能量平衡方程经整理可以写成

$$G(t) - hA_0(T_{\text{surf}}(t) - T_a(t)) = mC_p \frac{dT(t)}{dt} \quad (18)$$

根据实测可以得到 $U_{\text{app}}(t)$ 和 $T_{\text{surf}}(t)$, 记

$$T(t_{k+1}) = T(t_k) + [G(t_k) - hA_0(T_{\text{surf}}(t_k) - T_a(t_k))] \cdot (t_{k+1} - t_k) / (mC_p) \quad (19)$$

则热阻 R_{cond} 的计算公式为

$$R_{\text{cond}}(t_k) = (T(t_k) - T_{\text{surf}}(t_k)) / G(t_k) \quad (20)$$

3 参数估计验证

选取天津力神公司的 LS.LR1865BC 锂离子电池进行参数获取,该电池基本参数数据如表 1 所示,电池实验测试系统设备参数如表 2 所示。

表 1 LS.LR1865BC 电池基本参数

Tab.1 Basic parameters of LS.LR1865BC battery

封装尺寸/mm	重量/g	标称容量/mAh	平台电压/V	正极材料	负极材料
高:65.0±0.3 宽:18.0±0.2	约 40	1 800	4.2	LiCoO ₂	石墨

表 2 电池实验测试系统设备参数

Tab.2 Parameters of test system equipment of battery

装置	厂商	型号	主要参数
电池测试系统	Neware	BTS-5V-6A	电压精确度±5mv 电流精确度±3mA
内阻测量装置	ZEEMOO	ZM3000E	电阻精确度±1mΩ
恒温箱	Partner	PTC14003-M	温度精确度±0.1℃

对 LS.LR1865BC 锂离子电池进行参数辨识,根据辨识得到的参数,参照第 2 部分介绍的模型内容,计算电池端电压和表壳温度曲线,用辨识工况的数据进行验证。利用实验设备测量得到该节电池的端电压及表壳温度曲线,将仿真结果与实测结果进行对比,仿真结果如图 5 所示。同样地,随机选取多节不同型号的锂电池进行参数辨识与验证,仿真结果与实测结果均有较高的一致性。验证结果表明,提出的模型可以比较准确地仿真电池的行为。

在不同环境温度和动态负载电流下,电池充放电行为的仿真和实测对比结果如图 6 所示,误差结果如表 3 所示。从仿真结果可以看出,由于忽略了电池正负极材料熵系数给产热计算带来的影响,外壳温度计算并未出现最大局部温度。电压的仿真计算在室温附近时,比较精确。当环境温度大于 40℃ 或者低于 20℃ 时,端电压的计算会有较大误差。这是因为模型中,开路电势和过电势的计算并未考虑温度对其影响^[18],这也是今后将重点研究的内容。

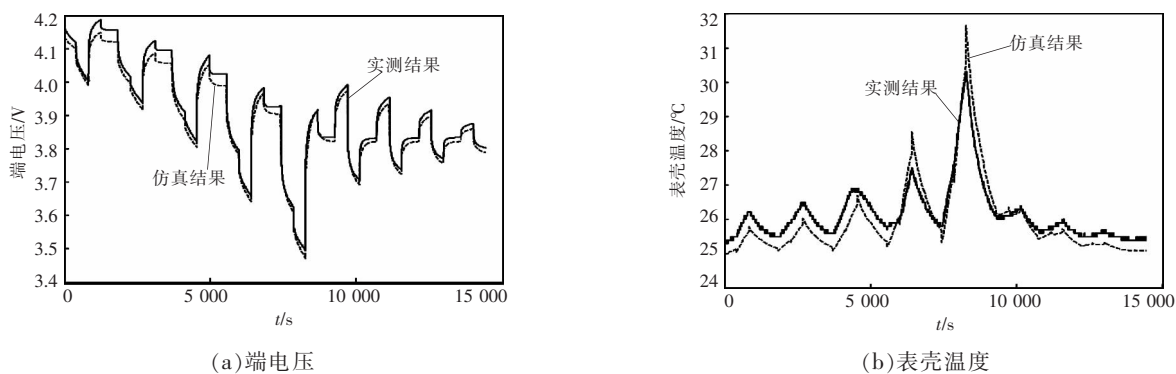


图 5 电池端电压和表壳温度的仿真与实测曲线

Fig.5 Simulation and measured curves of battery voltage and surface temperature

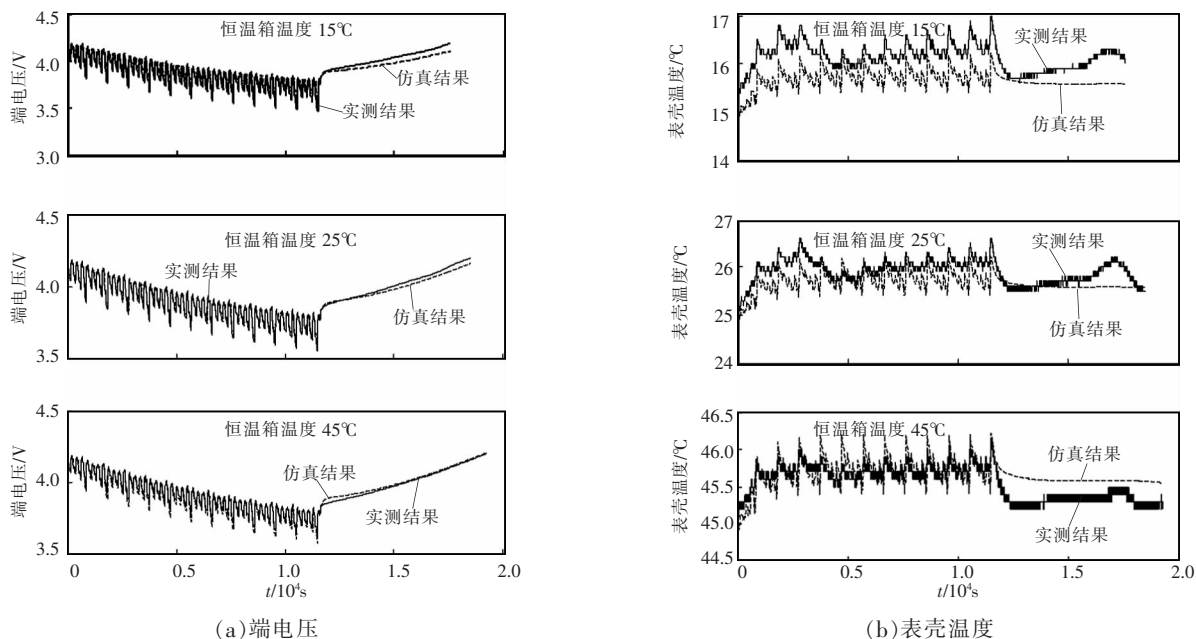


图 6 电池充放电行为的仿真和实测对比结果

Fig.6 Simulation and measured comparison results of battery charging and discharging behavior

表 3 动态负载电流下仿真和实测结果误差

Tab.3 Simulation and measured error of dynamic load current

环境温度/°C	端电压平均误差/mV	表面温度平均误差/°C
15	47.0	0.468 1
25	16.8	0.294 1
45	13.5	0.174 3

4 结语

本文结合电池机理,提出了一种等效电路模型,设计不同辨识工况来获取模型中的参数,并给出了在不同的恒定环境温度下,对任意负载电流的

端电压和表壳温度的仿真计算。验证结果表明,在室温附近或室温以上,模型具有很好的适用性。该研究为机理模型应用于电池管理系统提供了一定的技术支持,为解决电池管理系统精度不高、性能描述不全面的问题提供了解决思路。

参考文献:

[1] Hu Xiaosong, Li Shengbo, Peng H. A comparative study of equivalent circuit models for Li-ion batteries[J]. Journal of Power Sources, 2012, 198(2): 359-367.
 [2] Doyle M, Fuller T F, Newman J. Modeling of galvanostatic charge and discharge of the lithium/polymer/insertion cell [J]. Journal of the Electrochemical Society, 1993, 140(6):

- 1526-1533.
- [3] Rahimian S K, Rayman S, White R E. Comparison of single particle and equivalent circuit analog models for a lithium-ion cell[J]. *Journal of Power Sources*, 2011, 196(20): 8450-8462.
- [4] Haran B S, Popov B N, White R E. Determination of the hydrogen diffusion coefficient in metal hydrides by impedance spectroscopy[J]. *Journal of Power Sources*, 1998, 75(1): 56-63.
- [5] Guo M, Sikha G, White R E. Single-particle model for a lithium-ion cell: Thermal behavior[J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 2011, 158(2): A122-A132.
- [6] Schmidt A P, Bitzer M, Imre ÁW, et al. Experiment-driven electrochemical modeling and systematic parameterization for a lithium-ion battery cell[J]. *Journal of Power Sources*, 2010, 195(15): 5071-5080.
- [7] Luo Weilin, Lü Chao, Wang Lixin, et al. An approximate solution for electrolyte concentration distribution in physics-based lithium-ion cell models[J]. *Microelectronics Reliability*, 2013, 53(6): 797-804.
- [8] Tatsukawa E, Tamura K. Activity correction on electrochemical reaction and diffusion in lithium intercalation electrodes for discharge/charge simulation by single particle model[J]. *Electrochimica Acta*, 2014, 115(4): 75-85.
- [9] Baba N, Yoshida H, Nagaoka M, et al. Numerical simulation of thermal behavior of lithium-ion secondary batteries using the enhanced single particle model[J]. *Journal of Power Sources*, 2014, 252(15): 214-228.
- [10] Eddahech A, Briat O, Vinassa J M. Thermal characterization of a high-power lithium-ion battery: Potentiometric and calorimetric measurement of entropy changes[J]. *Energy*, 2013, 61(6): 432-439.
- [11] Forgez C, Do D V, Friedrich G, et al. Thermal modeling of a cylindrical LiFePO₄/graphite lithium-ion battery [J]. *Journal of Power Sources*, 2010, 195(9): 2961-2968.
- [12] Zhang Jianbo, Ge Hao, Li Zhe, et al. Internal heating of lithium-ion batteries using alternating current based on the heat generation model in frequency domain[J]. *Journal of Power Sources*, 2015, 273(7): 1030-1037.
- [13] Saito Y, Shikano M, Kobayashi H. Heat generation behavior during charging and discharging of lithium-ion batteries after long-time storage[J]. *Journal of Power Sources*, 2013, 244(4): 294-299.
- [14] Vazquez-Arenas J, Gimenez L E, Fowler M, et al. A rapid estimation and sensitivity analysis of parameters describing the behavior of commercial Li-ion batteries including thermal analysis[J]. *Energy Conversion and Management*, 2014, 87(15): 472-482.
- [15] Tourani A, White P, Ivey P. A multi scale multi-dimensional thermo electrochemical modelling of high capacity lithium-ion cells[J]. *Journal of Power Sources*, 2014, 255(6): 360-367.
- [16] Li Junfu, Wang Lixin, Lü Chao, et al. New method for parameter estimation of an electrochemical-thermal coupling model for LiCoO₂ battery[J]. *Journal of Power Sources*, 2016, 307(9): 220-230.
- [17] Luo Weilin, Lü Chao, Wang Lixin, et al. A new extension of physics-based single particle model for higher charge-discharge rates[J]. *Journal of Power Sources*, 2013, 241(1): 295-310.
- [18] 吕超, 郑君, 罗伟林, 等. 锂离子电池热耦合 SP+模型及其参数化简[J]. *电源学报*, 2015, 13(3):28-35.
- Lü Chao, Zheng Jun, Luo Weilin, et al. Thermal coupling SP+ model of lithium-ion battery and parameters simplification[J]. *Journal of Power Supply*, 2015, 13(3):28-35 (in Chinese).



刘璇

作者简介:

刘璇(1991-),女,通信作者,硕士,研究方向:锂离子电池建模与管理, E-mail: liuxuan_hit@163.com。

王立欣(1966-),男,博士,教授,研究方向:电力电子与电力传动, E-mail: wlx@hit.edu.cn。

吕超(1978-),男,中国电源学会会员,博士,副教授,研究方向:系统故障预测与健康, E-mail: lu_chao@hit.edu.cn。

李俊夫(1990-),男,中国电源学会会员,博士,研究方向:锂离子电池建模与健康状态预测, E-mail: 609603443@qq.com。