

海洋平台不间断电源锂离子蓄电池故障诊断

吴佳铭, 陈自强

(上海交通大学 海洋工程国家重点实验室, 高新船舶与深海开发装备协同创新中心, 上海 200240)

摘要: **目的** 针对海洋平台不间断电源 (Uninterrupted Power Supply, UPS) 可靠性要求高, 工作环境复杂等特点, 建立一种基于多模型粒子滤波的海洋平台 UPS 故障诊断系统。**方法** 该系统基于飞思卡尔芯片建立各模块间的通信, 并根据锂离子电池故障实验后的参数建立故障模型, 通过条件概率对海洋平台 UPS 的正常、过充、过放和过热四类状态进行诊断, 提高海洋平台 UPS 的可靠性。**结果** 使用部分实验所得数据测试了诊断系统对单一故障和复合故障诊断的结果, 得到诊断算法对过充、过放和过热三种故障的诊断时间在 5 s 以内, 准确率极高。**结论** 测试结果显示, 设计得到的海洋平台 UPS 故障诊断系统可以准确迅速地诊断故障类型。

关键词: 不间断电源, 锂离子电池, 粒子滤波, 故障诊断

DOI: 10.7643/ issn.1672-9242.2018.12.006

中图分类号: U665

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2018)12-0035-05

Fault Diagnosis of Lithium-Ion Battery for Offshore Platform UPS

WU Jia-ming, CHEN Zi-qiang

(Collaborative Innovation Center for Advanced Ship and Deep-Sea Exploration, State Key Laboratory of Ocean Engineering of Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

ABSTRACT: Objective To establish a fault diagnosis system of offshore platform UPS based on multi model particle filter to meet the high reliability requirement on uninterrupted power supply under the complex working environment. **Methods** The system built the communication between modules with Freescale chip, and established the fault model according to the parameters of the lithium-ion battery after failure experiment. Through conditional probability, the offshore platform UPS's normal, overcharging, over-discharge and overheating states were diagnosed to improve the reliability of offshore platform UPS. **Results** The experimental data were used to test the results of the diagnosis system for single fault and complex fault diagnosis, and the diagnosis time of three faults of overcharge, over-discharging and overheating was within 5 seconds. The accuracy was extremely high. **Conclusions** The results of test show that the fault diagnosis system designed for offshore platform UPS can diagnose fault types accurately and quickly.

KEY WORDS: UPS; lithium ion battery; particle filter; fault diagnosis

为满足深海资源开发技术发展, 促进深海工程装备战略新兴产业发展, 开展水下作业装备技术研究成为当下热潮之一。由于海洋环境复杂多变, 海洋平台

在作业中不可避免地会遇见各类危险状况。作为主电源故障时, 平台通讯设备和安全设备的维系装置, UPS 在海洋平台安全领域有着不可或缺的作用。因

收稿日期: 2018-08-03; 修订日期: 2018-08-27

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51671119)

作者简介: 吴佳铭 (1995—), 男, 浙江人, 硕士, 主要研究方向为动力电池故障诊断。

通讯作者: 陈自强 (1967—), 男, 河南人, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向为电池系统辨识与故障诊断。

此,实时监控运行状态,及时诊断故障,提升海洋平台 UPS 安全性和可靠性是当下的研究重点。对此,主要有以下两个研究方向,一是改善 UPS 的结构^[1];二是提高 UPS 锂离子蓄电池的性能。

目前,海洋平台 UPS 主要有密封式阀控铅酸蓄电池和磷酸铁锂蓄电池两种类型。铅酸蓄电池采用全密封结构,在使用过程中无酸雾泄露腐蚀设备、污染环境,在不间断电源领域内受到广大用户的欢迎。但是其能量密度小,反应产生的气体具有一定的危险性,且需要定期的维护、监测和替换,不符合海洋平台 UPS 高可靠性要求。而磷酸铁锂蓄电池自放电小,对温度波动不太敏感,单体锂电池的损坏不会引起整组电池失效,具有极高的可靠性。在物理结构上,对比铅酸蓄电池,锂离子电池还具有质量轻、体积小等优势,方便海洋平台内部空间布置。因此,笔者选择磷酸铁锂电池研究海洋平台 UPS 的故障诊断系统。

由于海洋平台作业环境的复杂性和不可预知性,UPS 在实际过程中会遇到复杂的工况和各类突发事件,造成蓄电池物理化学性能方面不可逆转的损坏。例如短路、过充、过放、过载等问题都会导致蓄电池内部电阻阻值的增加,产热量上升,降低电池最大容量和充放电效率^[2]。此外蓄电池性能也会在多次循环下不断衰减^[3]。目前,磷酸铁锂电池的诊断方法包括使用扩展卡尔曼滤波 EKF (Extended Kalman Filter) 监测电池内部状态参数^[4],使用最小二乘评估电池荷电状态^[5]和使用无迹粒子滤波 UPF (Unscented Particle Filter) 评估电池寿命^[6]等。为了解决传统方法鲁棒性差,个别算法也引入了自适应参数 λ 加强对突变故障的识别速度,如 Zheng 等人的自适应无迹卡尔曼滤波^[7]。然而大部分算法主要研究电池的参数变化,缺乏对故障类型的诊断和复杂海况的适应性,无法用于故障诊断系统。

因此,文中基于多模型粒子滤波算法,结合磷酸铁锂电池等效电路模型,研究复杂工况下的海洋平台 UPS 蓄电池故障诊断系统。通过设计电池过充、过放和过热三种故障实验检测系统的准确性与可靠性^[8-9]。

1 故障诊断系统设计

海洋平台 UPS 故障诊断系统总体设计方案如图 1 所示。系统由数据采集、控制设备、故障诊断系统和上位机四部分组成^[10]。系统通过采集模块实时采集海洋平台 UPS 蓄电池的充放电电流、端电压和温度等信息,并将各项数据通过 CAN 总线传输到故障诊断系统。故障诊断系统通过诊断算法滤波,并通过各个电池状态模型辨识得到蓄电池的各项参数和故障类型。上位机的图形化界面中将显示电池参数,并对故障信息进行显示和警报。历史故障和异常参数将存

储在上位机的数据库中,方便后期查看和蓄电池维护。在故障诊断系统中,采用飞思卡尔的 MPC5606S 芯片作为处理器,确保充足的计算资源和处理速度。

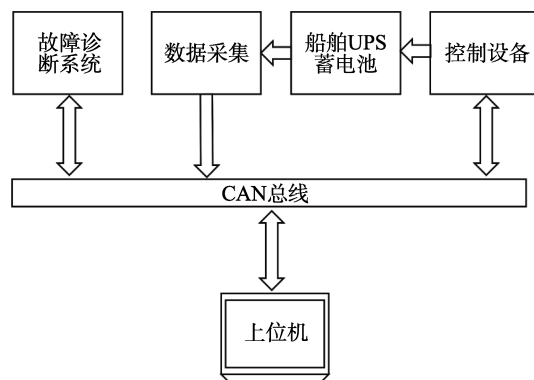


图 1 海洋平台 UPS 故障诊断系统

2 电池模型与离散

合理的电池模型对故障诊断算法有着极其重要的意义^[11-12]。一方面,精确的电池模型能够为故障诊断算法提供合理的依据。在实践中,锂离子电池的故障是通过其外在特性诊断的,合理的模型能够建立电池故障和外在特性之间的数值联系,从而实现算法精确诊断功能。另一方面,电池模型可以估计系统的工作状态,对各种工况进行模拟仿真,提高工作的安全性和可靠性。

为了较好拟合电池的极化现象,同时降低模型复杂度,增加算法实用性,选择磷酸铁锂电池二阶 RC 等效电路模型,如图 2 所示^[13]。其中欧姆内阻 R_s 描述电池通电后的瞬间压降,两个 RC 回路分别描述电池的较快和较慢的极化特性。

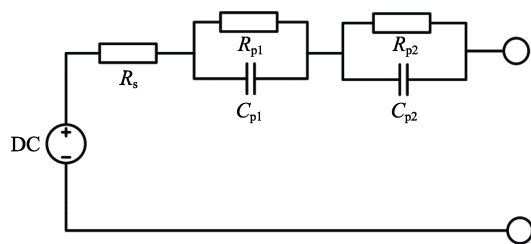


图 2 UPS 蓄电池等效电路模型

针对以上模型,设向量 X 为:

$$X = [SOC, U_{p1}, U_{p2}] \quad (1)$$

则离散后的状态空间方程:

$$\begin{cases} x_k = A(x_{k-1})x_{k-1} + B(x_{k-1})I_{k-1} + e_{k-1} \\ z_k = h(x_k, I_k) + r_k \end{cases} \quad (2)$$

$$A(x_{k-1}) = \text{diag}[1, \exp(-T/R_{p1}C_{p1}), \exp(-T/R_{p1}C_{p1})] \quad (3)$$

$$B(x_{k-1}) = [T/Q, R_{p1}(1 - \exp(-T/R_{p1}C_{p1})), R_{p2}(1 - \exp(-T/R_{p2}C_{p2}))] \quad (4)$$

$$h(x_k, I_k) = f(SOC_k) + U_{p1,k} + U_{p2,k} + I_k R_s \quad (5)$$

式中： z_k 为锂离子电池端电压； $U_{p1,k}$ 和 $U_{p2,k}$ 为第 k 次迭代容阻的端电压； e_{k-1} 为系统噪声； r_k 为观测噪声，在这里，假设系统噪声和观测噪声之间互不相关； T 为两次采样的时间间隔。

针对海洋平台运行环境中的复杂工况，增加系统噪声 e_{k-1} 的均方差值，突出其对故障诊断系统的影响。

3 电池故障实验

磷酸铁锂电池在发生故障后，欧姆内阻和极化特性将发生较大的变化，导致电池的端电压和放电效率降低，造成 UPS 在工作状态下放电功率不足和放电时间过短的情况。这在海洋平台 UPS 的使用中是需要竭力避免的，因此磷酸铁锂电池故障实验的设计和对于海洋平台安全性和可靠性有着重要的意义。文中分别设计了磷酸铁锂电池的过充、过放和过热三种故障实验，并记录了电池的参数变化，

3.1 装置与环境

实验用电池为软包磷酸铁锂电池，实际容量为 2.5 Ah，充放电截止电压为 3.65 V/2.5 V，实验温度为 25 °C。实验设备包含恒温箱、高温防爆箱、电池测试平台、辅助通道以及电脑上位机。其中电池测试平台测量电池实时状态数据，电压分辨率为 0.002 V，电流分辨率为 0.02 A。辅助通道和电脑上位机采集数据并绘制电压与电流的时域曲线。

为了实时监测电池温度，防止热失控，将磷酸铁锂电池放于特制的高温防爆箱中，在电池的五个位置布置热电偶，在电池温度与恒温箱温度超过 2 °C 时，中断实验，静置电池降温。具体实验设备连接如图 3 所示，

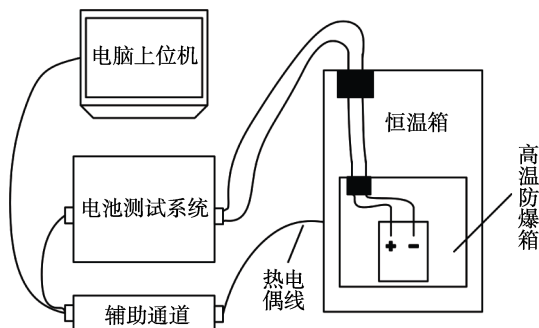


图 3 实验设备连接

3.2 方法

分别对三组相同的电池进行过充、过放和过热实验，每次实验过充过放深度为 20%，并循环 15 次。

过充电故障实验方法如下所述。

1) 在 25 °C 的条件下，分别将电池 1 和电池 2 以 1 C 放电倍率 ($I=2500$ mA) 放电，至电池达到截止电压 2.5 V。静置 1.5 h 后，对电池 1 进行充电。先以 1 C 充电倍率充电，直到电池达到充电截止电压 3.65 V。静置 1 h 后，以 0.1 C 充电倍率充电至 3.65 V。之后，静置 600 s 后，以 0.02 C 充电倍率充电，直到电池电压大于截止电压。

2) 将电池 1 和电池 2 放置在 25 °C 的恒温箱中静置 90 min。

3) 在电池过充实验中，将电池 1 与电池 2 串联后放于高温防爆箱中，以 0.2 C 放电倍率充电，当充电时间为 60 min 时停止充电。

4) 将过充后的电池放于 25 °C 恒温箱中，使得电池与恒温箱温度不大于 2 °C。之后采用基于 FreedomCAR 发布的《功率辅助型电池测试手册》中的混合脉冲功率测试 (Hybrid Pulse Power Characterization, HPPC) [14] 测量故障实验后电池的各项参数。

故障实验流程如图 4 所示。

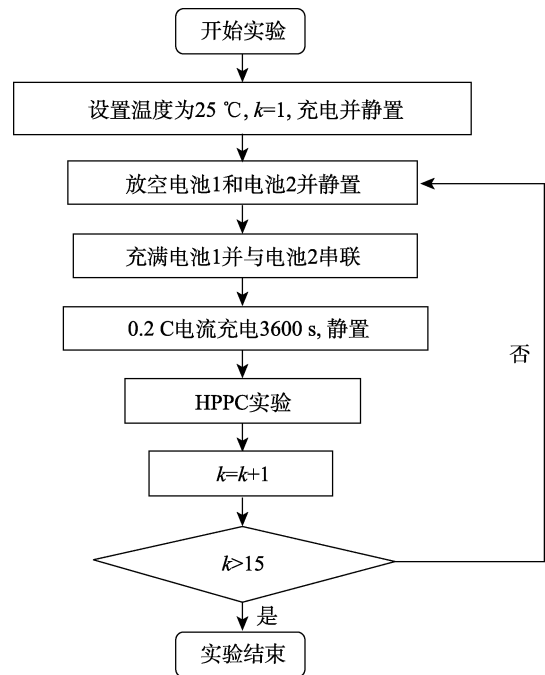


图 4 磷酸铁锂电池故障实验步骤

以上步骤为磷酸铁锂电池的过充故障实验，同理，在过放故障实验中，需要将过充故障实验中的放电和充电互换。在过热故障实验中，设置恒温箱温度为 45 °C，进行 HPPC 循环实验。

单个 HPPC 充放实验具体步骤为：先以 1 C 电流倍率放电 10 s，之后静置 40 s 消除电池极化特性，之后以 0.75 C 的电流倍率充电 10 s。在 HPPC 实验前，需要将电池充满，并静置 1.5 h。在每个 HPPC 实验结束后，要以 1 C 电流倍率放电 357.5 s，使得电池荷电状态 (State of Charge, SOC) 减少 10% 左右。之

后,将电池静置 1.5 h,开始下一个 HPPC 充放电试验,直到电池电压小于 2.5 V。最后以 0.02 C 放电倍率放电,计算 HPPC 循环实验中放电总量,用于标定每个 HPPC 充放电时的 SOC。

4 多模型粒子滤波算法

海洋平台 UPS 运行环境复杂,工况多变,导致电流波动,测量设备噪声偏大。又由于磷酸铁锂电池模型的不确定性,需要采取特定的算法加强模型输出中的电池参数和故障信息,抑制并削弱模型误差和测量噪声,提高参数估计和诊断的可靠性。文中采用粒子滤波算法。

粒子滤波算法得到的残差和故障类型之间为非线性问题,为了根据残差准确地诊断故障类型,在这里引入交互式多模型算法。交互式多模型粒子滤波算法针对粒子滤波算法中磷酸铁锂电池模型和状态参数估计的非线性和非高斯问题,以多模型结构跟踪各类故障,增强粒子滤波算法性能,扩大故障诊断范围。其主要步骤如下所述。

1) 输入粒子间交互。对 $k-1$ 时刻得到的正常状态、过充状态、过放状态和过热状态四个模型的粒子均值进行输入交互。

2) 随机抽取粒子。根据 $k-1$ 时刻各模型的粒子协方差和交互得到的粒子均值,随机得到各模型粒子。

3) 多模型粒子滤波。将得到的各模型粒子带入到各自的粒子滤波器中,计算得 k 时刻的粒子集:

$$x_{i,k|k-1} = f(x_{i,k-1|k-1}) + e_{k-1} \quad (6)$$

通过观测值的残差计算各粒子的权值并进行归一化操作:

$$\bar{w}_{i,k} = d(z_k - z_{i,k|k-1}) \quad (7)$$

$$w_{i,k} = \bar{w}_{i,k} / \sum_{i=1}^N \bar{w}_{i,k} \quad (8)$$

4) 模型概率更新。根据各模型残差得到协方差矩阵:

$$S_k^j = \sum_{i=1}^N w_{i,k} [z_{i,k|k-1} - z_{k|k-1} \mathbb{I} [z_{i,k|k-1} - z_{k|k-1}]^T \quad (9)$$

根据协方差矩阵,得到粒子的似然分布:

$$L_k^j = N(r_k^j, S_k^j) \quad (10)$$

并根据似然分布求得各模型概率:

$$\mu_k^j = L_k^j c^j / \sum_{i=1}^m L_k^i c^i \quad (11)$$

5) 输出粒子间交互。根据更新的模型数据,对四个模型的粒子集进行交互,得到其加权平均值。

$$x_{k|k} = \sum_{j=1}^m \mu_k^j x_{k|k}^j \quad (12)$$

算法模型总体流程如图 5 所示。

由图 5 可得,在系统工作过程中,每一时刻测量得到的电池端电压 Z_k 和电流 I_k 作为外界输入量输入

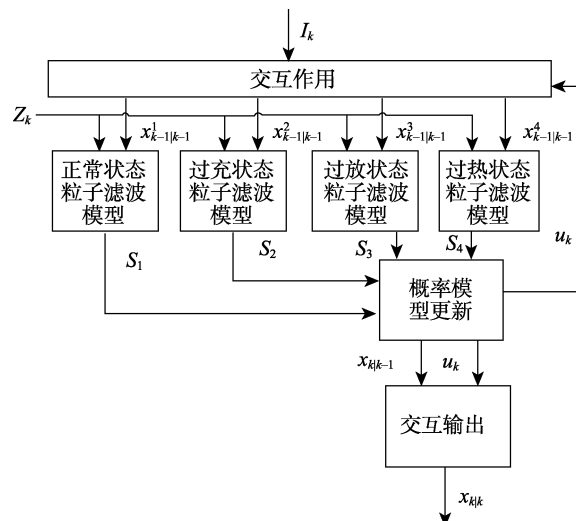


图 5 多模型粒子滤波模型

诊断系统,各个粒子滤波模型将估计得到的残差输入到模型更新和交互输出算法。对各个模型进行归一化操作,输出当前电池处于各个模型的条件概率 μ_k^j 和根据条件概率诊断得到海洋平台 UPS 蓄电池的故障类型。

5 测试与结果分析

多模型粒子滤波算法中的参数由故障实验中 HPPC 实验辨识得到,并选择其中四组数据作为测试样本,检测故障诊断的时间和效果。

5.1 单故障类型诊断

在测试中,针对电池在工作中连续出现不同的故障进行实验。将实验时间分为四步,每步时间为 300 s,具体方案为:在 0~300 s,电池为正常工作状态;在 300~600 s,电池发生过充故障;在 600~900 s,电池发生过放故障;在 900~1200 s,电池发生过热故障。在测试过程中,故障诊断系统对各类型故障的诊断结果如图 6 所示。

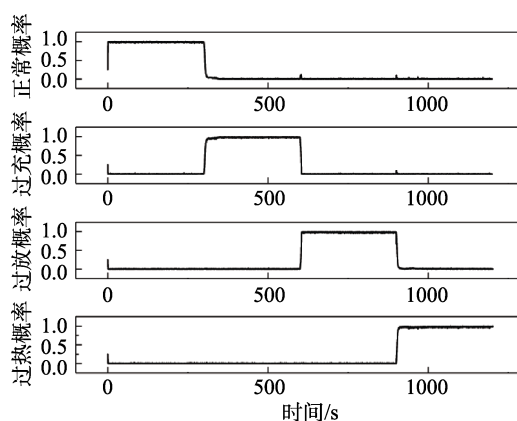


图 6 故障类型诊断概率

由图 6 可得, 在初始时刻, 选取各个模型的条件概率为 $1/4$ 。在 $0\sim 300\text{ s}$, 正常状态模型的条件概率从 $1/4$ 逐渐收敛于 1, 其他故障模型的概率均收敛于 0。在 $300\sim 1200\text{ s}$, 电池处于故障状态时, 相应的故障模型概率在 5 s 内收敛于 1, 其余模型收敛于 0。

5.2 混合故障类型诊断

由于海洋平台 UPS 的工况复杂, 有较大概率发生复合故障的情况。为了检验提出的故障诊断系统是否适应复合故障的检验, 文中使用第三节提出的故障实验对正常状态下的磷酸铁锂电池进行 5 次过充循环实验和 10 次过放循环实验, 并测得实验后电池的状态参数, 使用故障诊断系统进行故障类型诊断。具体测试步骤为: 在 $0\sim 300\text{ s}$, 电池为正常工作状态; 在 $300\sim 600\text{ s}$, 电池发生复合故障。本次测试对磷酸铁锂电池故障类型诊断如图 7 所示。

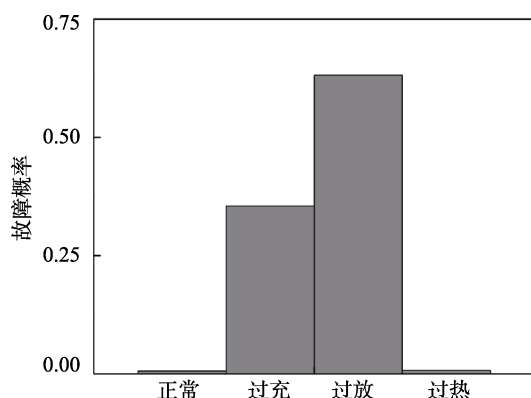


图 7 复合故障诊断结果

由图 7 可得: 复合故障诊断结果为过充故障的概率为 35%, 过放故障概率为 65%, 基本符合预期结果。综上可得, 故障诊断系统可以正确诊断故障类型, 在海洋平台 UPS 故障诊断领域有较好的可行性。

6 结论

文中提出了一种基于多模型粒子滤波算法的海洋平台 UPS 故障诊断算法, 设计了安全有效的蓄电池过充、过放和过热故障实验, 研究得到了复杂工况下海洋平台 UPS 故障诊断系统, 并测试了单一故障和复合故障下诊断系统的性能。

1) 故障诊断精确性。单一的故障发生后, 相应的故障模型的条件概率迅速上升趋于 1, 并在其附近小幅度震荡。复合故障发生后, 故障诊断系统也能较为精确地诊断出故障的概率。

2) 故障诊断时间。在测试中, 电池状态发生改变, 即产生故障时, 故障诊断系统能迅速地改变各个模型输出的条件概率, 并在 5 s 内准确地诊断出故障类型, 有较好的及时性。

后期将进一步研究电池组的实验和算法, 扩大故障诊断系统的适应性, 更好地研究真实环境下海洋平台 UPS 的故障诊断系统, 提高海洋平台 UPS 的安全性和可靠性。

参考文献:

- [1] 郑朝阳, 许建平, 王佳佳. 一种全密封型军用 UPS 结构与散热分析[J]. 新技术新工艺, 2017(3): 16-19.
- [2] PRASAD G K, RAHN C D. Model Based Identification of Aging Parameters in Lithium Ion Batteries[J]. Journal of Power Sources, 2013, 232(232): 79-85.
- [3] DONG H, JIN X, LOU Y, et al. Lithium-ion Battery State of Health Monitoring and Remaining Useful Life Prediction Based on Support Vector Regression-particle Filter[J]. Journal of Power Sources, 2014, 271: 114-123.
- [4] SONG C, SHAO Y, SONG S, et al. Insulation Resistance Monitoring Algorithm for Battery Pack in Electric Vehicle Based on Extended Kalman Filtering[J]. Energies, 2017, 10(6): 714.
- [5] ZHANG J, LEE J. A Review on Prognostics and Health Monitoring of Li-ion Battery[J]. Journal of Power Sources, 2011, 196(15): 6007-6014.
- [6] LI L, WANG Z, JIANG H. Storage Battery Remaining Useful Life Prognosis Using Improved Unscented Particle Filter[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part O Journal of Risk & Reliability, 2015, 229(1): 52-61.
- [7] ZHENG C, GE Y, CHEN Z, et al. Diagnosis Method for Li-Ion Battery Fault Based on an Adaptive Unscented Kalman Filter[J]. Energies, 2017, 10(11): 1810.
- [8] 王宏伟, 邓爽, 肖海清, 等. 不同环境温度下锂离子电池过充过放研究[J]. 电源技术, 2014, 38(3): 431-433.
- [9] 潘铁辉. 过放电对蓄电池的损害及解决方案[J]. 通信电源技术, 2007, 24(4): 61-62.
- [10] 谭晓军. 电动汽车动力电池管理系统设计[M]. 广州: 中山大学出版社, 2011.
- [11] HU X, LI S, PENG H. A Comparative Study of Equivalent Circuit Models for Li-ion Batteries[J]. Journal of Power Sources, 2012, 198(198): 359-367.
- [12] JOHNSON V H. Battery Performance Models in ADVISOR[J]. Journal of Power Sources, 2002, 110(2): 321-329.
- [13] SEAMAN A, DAO T S, MCPHEE J. A Survey of Mathematics-based Equivalent-circuit and Electrochemical Battery Models for Hybrid and Electric Vehicle Simulation[J]. Journal of Power Sources, 2014, 256(3): 410-423.
- [14] HUNT G, MOTLOCH C. FreedomCAR Battery Test Manual for Power-assist Hybrid Electric Vehicles[M]. USA: INEEL, Idaho Falls, 2003.