

DOI: 10.13234/j.issn.2095-2805.2018.5.124

中图分类号: TM912

文献标志码: A

基于改进 EKF 算法的锂离子电池 SOC 估算方法

张方亮

(西南科技大学制造科学与工程学院, 绵阳 621010)

摘要: 针对锂离子电池在变电流放电过程中荷电状态 SOC(state of charge)估算精度的问题,提出了一种基于改进扩展卡尔曼滤波 EKF(extended Kalman filter)算法的新估算方法。首先,通过放电实验和混合脉冲功率特性 HPPC(hybrid pulsepower characteristic)实验,分析计算了等效电路模型参数;然后,利用该方法获得了该模型参数与放电倍率和 SOC 之间的关系,提出了一种估算 SOC 时在线修正开路电压和欧姆内阻的新原理和方法;最后,通过变电流放电的 SOC 估算结果,验证了该改进算法的可行性与有效性,从而解决了锂离子电池在复杂工况下估算精度不足的问题。

关键词: 锂离子电池;荷电状态;变电流;改进扩展卡尔曼;估算精度

SOC Estimation Method for Lithium Ion Battery Based on Improved EKF Algorithm

ZHANG Fangliang

(School of Manufacturing Science and Engineering, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China)

Abstract: A novel estimation method based on improved extended Kalman filter(EKF) algorithm was proposed, which aimed at the low accuracy problem when estimating the lithium ion battery' state of charge(SOC) in the variable-current discharging process. First, through the discharging and hybrid pulse power characteristic(HPPC) experiments, the parameters of equivalent circuit model were analyzed and calculated. Then, the relationship among model parameters, discharge rate and SOC was obtained, and a novel principle and a novel method for estimating SOC were proposed, which were based on online correcting the open circuit voltage and ohmic resistance. Finally, the feasibility and effectiveness of the improved method were verified by the SOC estimation results in the variable-current discharging process. In this way, the proposed method can solve the low estimation accuracy problem of lithium ion battery under complex working conditions.

Keywords: lithiumion battery; state of charge(SOC); variable current; improved extended Kalman; estimation accuracy

锂电池作为电动汽车的核心部件, 电池荷电状态 SOC(state of charge)直接反映了电动汽车的运作状态,因此准确估算电池 SOC 对保障电动汽车的安全运行具有重要意义^[1-2]。

目前国际上对电池 SOC 估算开展了系列研

究,常用的估算方法有:安时积分法、开路电压法、神经网络法、卡尔曼滤波法及相应的多种扩展形式的方法等^[3],国内外对 SOC 的估算方法也进行了不同优化和改进。如 Zhang 和 Li^[4]通过分析电池开路电压与 SOC 之间的滞后效应,采用非线性互补模型来捕获滞后效应,并以加权递归最小二乘法回归模型,提出了一种基于实时修正开路电压与 SOC 关系的新型估算方法;马兹林和冒晓建等^[5]根据电池瞬间脉冲电流的变化特点,以修正的 RC 模型为基础,通过合理分配权值的方法对累计电量和开路

收稿日期:2016-07-14;修回日期:2017-12-28

基金项目:四川省科技支撑计划资助项目“大容量锂电池组管理系统关键技术研究”(2014GZ0078)

Project Supported by Key Technology R&D Program of Sichuan Province(the Research on the Key Technology of High Capacity Lithium Battery Management System)(2014GZ0078)

电压进行分析,结合卡尔曼滤波算法实现对SOC 的预测,估算精度可达 94%;以及一些基于安时和内阻相结合的安时内阻算法等^[6]。但这些方法都存在不足,都没有同时考虑电池开路电压和欧姆内阻对 SOC 估算的影响,而实际电池在变电流放电过程中,二者对 SOC 的估算具有直接的影响。

本文通过建立等效电路模型并结合卡尔曼滤波算法的方法,以放电实验法和 HPPC 实验法分析获得恒流放电下电池开路电压、欧姆内阻与放电倍率和 SOC 之间的关系;提出了在变电流放电下估算 SOC 时在线修正 EKF 算法中电池开路电压和欧姆内阻的原理和方法;以改进 EKF 算法实现了对变电流过程中 SOC 的在线精准估算。

1 电路模型建立与算法理论分析

1.1 等效电路模型建立

锂电池内部属于一个复杂的非线性系统,直接测量电池内部各项参数难以实现。等效电路模型可以通过外部特性来描述电池的内部特性,如开路电压、端电压和电池欧姆内阻等参数^[7]。考虑模型的结构、精度和运算量等综合因素,本文选用 Thevenin 等效电路模型作为研究分析的基础^[8-10],如图 1 所示。

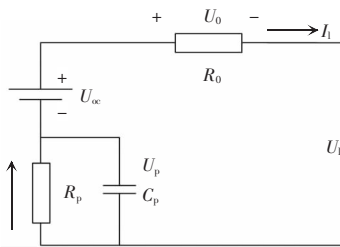


图 1 Thevenin 等效电路模型

Fig.1 Thevenin equivalent circuit model

图中: U_{oc} 和 R_o 分别为电池的开路电压和欧姆内阻; R_p 和 C_p 为电池的极化电阻和极化电容; U_1 为电池的端电压; I_1 为电路电流。

根据模型确定锂离子电池的系统空间状态方程,即

$$\begin{bmatrix} U_{pk} \\ SOC_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - \frac{T_s}{C_p R_p} & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{p,k-1} \\ SOC_{k-1} \end{bmatrix} +$$

$$\begin{bmatrix} \frac{T_s}{C_p} \\ \frac{\eta_k T_s}{C_N} \end{bmatrix} [I_{k-1}] + \begin{bmatrix} W_{1,k-1} \\ W_{2,k-1} \end{bmatrix} \quad (1)$$

观测方程为

$$[U_{1k}] = [U_{oc}] - [R_o][I_{1k}] - [1 \ 0] \begin{bmatrix} U_{pk} \\ SOC_k \end{bmatrix} + [V_k] \quad (2)$$

式中: T_s 为系统采样时间; C_N 为电池额定容量; η_k 为电池的充放电效率; $W_{1,k-1}$ 、 $W_{2,k-1}$ 为均值为 0、方差为 Q 的高斯白噪声; V_k 为均值为 0、方差为 R 的高斯白噪声。

1.2 EKF 算法理论

根据 Thevenin 等效电路模型的建立和分析,实现对锂电池 SOC 的估算需结合相应的估算算法^[11]。本文以改进 EKF 算法作为电池 SOC 的估算算法,其递推式^[12]如下。

滤波初始值为

$$\mathbf{x}_{00} = \mathbf{E}(x_0), \mathbf{P}_{00} = var(x_0) \quad (3)$$

状态估计值为

$$\mathbf{x}_{k/k-1} = \mathbf{A}_{k-1} \mathbf{x}_{k-1/k-1} + \mathbf{B}_{k-1} I_{k-1} \quad (4)$$

误差协方差估计矩阵为

$$\mathbf{P}_{k/k-1} = \mathbf{A}_{k-1} \mathbf{P}_{k-1/k-1} \mathbf{A}_{k-1}^T + \mathbf{\Gamma}_{k-1} \mathbf{Q}_{k-1} \mathbf{\Gamma}_{k-1}^T \quad (5)$$

增益系数为

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_{k/k-1} \mathbf{C}_k^T (\mathbf{C}_k \mathbf{P}_{k/k-1} \mathbf{C}_k^T + \mathbf{R}_k)^{-1} \quad (6)$$

观测值为

$$U_{1k} = U_{oc,k} - R_{o,k} I_{1k} - U_{pk} \quad (7)$$

状态滤波值为

$$\mathbf{x}_{k/k} = \mathbf{x}_{k/k-1} + \mathbf{K}_k [y_k - g(\mathbf{x}_{k/k-1}, u_k)] \quad (8)$$

滤波误差协方差矩阵为

$$\mathbf{P}_{k/k} = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{C}_k) \mathbf{P}_{k/k-1} \quad (9)$$

由系统空间状态方程和算法递推过程确定如下

矩阵:系统状态向量为 $\mathbf{x}_k = \begin{bmatrix} U_{pk} \\ SOC_k \end{bmatrix}$;系统矩阵为 $\mathbf{A}_k =$

$$\begin{bmatrix} 1 - \frac{T_s}{C_p R_p} & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}; \text{系统输入矩阵为 } \mathbf{B}_k = \begin{bmatrix} \frac{T_s}{C_p} \\ \frac{\eta_k T_s}{C_N} \end{bmatrix}; \text{系统}$$

$$\text{观测矩阵为 } \mathbf{C}_k = \frac{\partial U_1}{\partial \mathbf{x}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial U_1}{\partial U_p} & \frac{\partial U_1}{\partial SOC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{\partial U_{oc}}{\partial SOC} \\ I_1 \times \frac{\partial R_o}{\partial SOC} \end{bmatrix}。$$

2 研究设计分析

为了研究分析锂电池参数在不同放电倍率下与 SOC 的变化关系,以及参数变化对估算 SOC 结果的影响。本文以标称额定容量为 $10 \text{ A}\cdot\text{h}$ 的磷酸铁锂电池为实验对象,以课题组自主研制的电池管理控制系统为实验分析测试平台,在 20°C 测试环境下,对锂离子电池进行不同倍率下的放电实验和 HPPC 实验。

2.1 开路电压 U_{oc} 分析

分别以 0.3C 、 0.5C 和 1.0C 倍率对锂电池进行放电实验,获得电池开路电压与放电倍率和 SOC 之间的关系曲线,如图 2 所示。

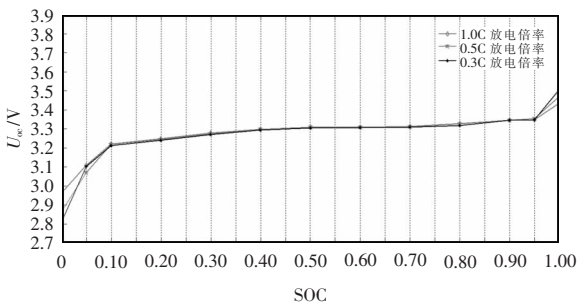


图 2 不同放电倍率下,开路电压与 SOC 的关系曲线

Fig.2 Curve of relationship between open circuit voltage and SOC at different discharge rates

由图 2 可见:在 $\text{SOC} < 0.1$ 和 $\text{SOC} > 0.95$ 范围内, U_{oc} 变化剧烈。低 SOC 状态下,放电倍率越大, U_{oc} 越大;高 SOC 状态下,放电倍率越大, U_{oc} 越小,表明电池内部极化效应严重, U_{oc} 受放电倍率的影响较大。

放电初期和末期,电池开路电压受放电倍率的影响较大,且根据 EKF 算法递推式可知, U_{oc} 决定了观测值 U_{ik} 的变化,进一步决定了状态滤波值的修正过程,从而导致在变电流放电过程中对 SOC 的估算影响较大。为了使电池开路电压 U_{oc} 能适用于变电流的 SOC 估算过程,本文通过对 U_{oc} 和电流、SOC 之间的相互关系进行多项式拟合处理,得到拟合 Polynomial 图形,如图 3 所示。

分析图 3,在不同电流和 SOC 状态下,为尽可能地有效表述电池开路电压的真实有效性,且满足拟

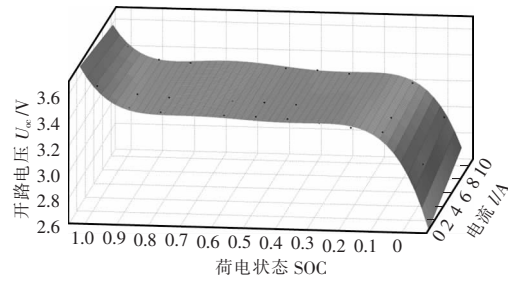


图 3 电池开路电压与电流、SOC 的曲线关系

Fig.3 Curve of relationship among open circuit voltage of battery, current, and SOC

合结果均方根误差小于 2% 的原则,故采用 SOC 的 5 阶多项式拟合方式。拟合多项式函数关系为

$$U_{oc}(I, \text{SOC}_k) = 2.777 + 0.01897I + 5.782\text{SOC}_{k-1} - 0.1713\text{SOC}_{k-1}^2 - 24.72\text{SOC}_{k-1}^3 + 0.4721\text{SOC}_{k-1}^4 + 50.02\text{SOC}_{k-1}^5 - 0.4802\text{SOC}_{k-1}^6 - 48.05\text{SOC}_{k-1}^7 + 0.1523\text{SOC}_{k-1}^8 + 17.71\text{SOC}_{k-1}^9 \quad (10)$$

根据 $U_{oc}(I, \text{SOC}_k)$ 与电流 I 和 SOC_{k-1} 的函数关系特点,采用该方法可通过前一时刻估算的 SOC 值计算下一时刻的 U_{oc} 值,实现对 U_{oc} 在变电流放电过程中的实时修正作用。

2.2 欧姆内阻 R_o 分析

实验在 20°C 测试环境下,采用 16 位 ADC 数据采集卡以 250 Hz 的采样频率进行数据采集,分别以 2 、 3 、 5 和 10 A 的电流对磷酸铁锂电池进行 HPPC 循环实验,然后通过 Matlab 对数据进行分析处理,分析得出了不同放电倍率下 SOC 与 R_o 的关系。HPPC 实验分析如图 4 所示。

由于系统噪声和外部干扰等因素的影响,对实

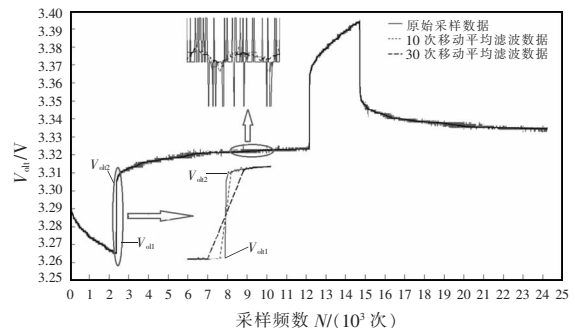


图 4 单次 HPPC 脉冲实验分析

Fig.4 Experimental analysis of single HPPC pulse

验数据平滑滤波处理。为保证滤波处理对整个实验数据不失真,分别采用 10 次和 30 次移动平均滤波处理方法对 HPPC 原始采样数据进行滤波处理。

根据电压在放电脉冲停止时刻瞬间上升的变化可知,采用 10 次移动平均滤波处理更能有效保证拐点数据的不失真,更能有效保证了欧姆内阻的计算准确性,因此可计算出 $R_o=(V_{oh2}-V_{oh1})/I_1$ 。

按照相同的原理和方法可计算出不同放电倍率下的 R_o ,见表 1。

表 1 不同放电倍率下欧姆内阻与 SOC 的数据

Tab.1 Data of ohmic internal resistance and SOC at different discharge rates

SOC	$R_o/m\Omega$			
	1.0C	0.5C	0.3C	0.2C
1.0	4.0	4.0	3.9	4.0
0.9	4.2	3.9	3.8	3.9
0.8	4.0	3.9	3.9	3.9
0.7	4.3	3.8	3.8	3.8
0.6	4.2	3.9	3.9	3.9
0.5	4.2	4.1	4.0	4.1
0.4	4.4	4.0	4.1	4.0
0.3	4.4	4.1	4.1	4.1
0.2	4.7	4.3	4.3	4.3
0.1	4.7	4.4	4.3	4.4
0	4.5	4.5	4.6	4.5

同开路电压 U_{oc} 的多项式拟合处理方法,基于拟合图形能更有效反映实际数据特点,对欧姆内阻 R_o 的拟合结果满足均方根误差小于 10% 的原则,故采用 SOC 的 5 阶多项式拟合方案。电池欧姆内阻与电流、SOC 的曲线关系如图 5 所示。

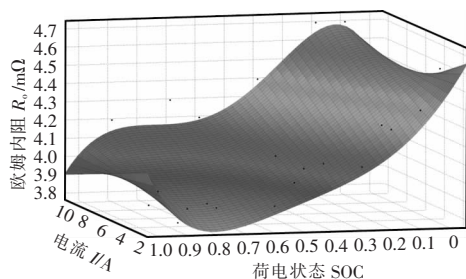


图 5 电池欧姆内阻与电流、SOC 的曲线关系

Fig.5 Curve of relationship among ohmic internal resistance, current, and SOC

拟合多项式函数关系为

$$R_o(I, SOC_k) = 4.465 + 0.004736I - 3.075SOC_{k-1} + 0.3869I^2SOC_{k-1} + 9.076SOC_{k-1}^2 - 1.367I^3SOC_{k-1}^2 - 16.96SOC_{k-1}^3 + 1.901I^3SOC_{k-1}^3 + 15.08SOC_{k-1}^4 - 0.9226I^3SOC_{k-1}^4 - 4.646SOC_{k-1}^5 \quad (11)$$

根据 $R_o(I, SOC_k)$ 与电流 I 和 SOC_{k-1} 的函数关系特点,该方法也可通过前一时刻估算的 SOC 值计算下一时刻的 R_o 值,实现了对 R_o 在变电流放电过程中的实时修正作用。

2.3 改进 EKF 算法分析

根据不同放电倍率下 U_{oc} 和 R_o 随 SOC 变化而变化的特性,为准确估算变电流情况下的电池 SOC,提出了一种新型的 EKF 改进算法。改进算法流程如图 6 所示。

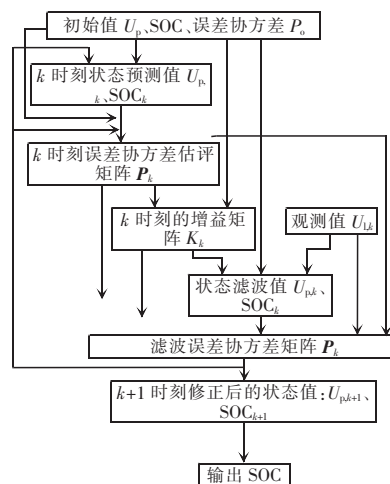


图 6 改进 EKF 算法流程

Fig.6 Flow chart of improved EKF algorithm

通过对改进 EKF 算法递推过程的分析可知:观测值 $U_{ik}=U_{oc,k}-R_{0,k}I_{i,k}-U_{pk}$ 中,开路电压 U_{oc} 和欧姆内阻 R_o 通常都只是描述在某一固定倍率下与电池 SOC 之间的函数关系,而电池实际使用过程中, U_{oc} 和 R_o 往往由放电倍率和电池 SOC 共同决定。在变电流放电过程中,通过前一时刻预测的状态值,推导修正前一时刻的 U_{oc} 和 R_o ,对整个放电过程进行在线修正参数作用,实现 SOC 的估算。故本文提出了一种针对在变电流放电过程中实时修正电池 U_{oc} 和 R_o 的改进 EKF 算法,并以此改进算法对电池

SOC 进行估算研究。

3 实验结果与分析

实验以 20 °C 为测试环境温度,采用 16 位 ADC 数据采集卡以 120 Hz 的采样频率进行数据采集,通过对相关数据以安时积分计算的 SOC 值作为 SOC 实测值。在变电流放电工况下,通过 Matlab 的改进 EKF 算法程序,结合实验所得的 U_{oc} 和 R_o 与倍率和 SOC 之间的关系,实现对 1.0C、0.5C、0.3C 和 0.2C 倍率的变电流放电过程进行 SOC 估算。前后估算 SOC 结果与实测 SOC 结果的分析对比结果如图 7 所示。

分析图 7 可知:在变电流放电过程中,不同放电倍率下对应的 U_{oc} 和 R_o 值对 SOC 的估算影响较大,估算精度低;而改进 EKF 算法通过实时修正 U_{oc} 和 R_o 的方法,估算精度明显提高。

图 8 为 SOC 估算误差曲线。从误差曲线可以看出,在放电初期电流瞬间变化时刻,SOC 估算效

果变化明显,主要是由于电池在不同的放电电流下,电池内部参数不同而导致,这对 SOC 的估算也相应地产生了影响,估算精度也逐渐降低;而采用基于实时修正电池参数的方法,估算结果明显改善,精度可达 97%以上。因此,采用在线修正 EKF 算法中的开路电压 U_{oc} 和欧姆内阻 R_o ,对动态工况下的 SOC 估算具有显著的效果。

4 结语

锂离子电池 SOC 的估算受诸多因素的影响,利用单一放电电流下的电池参数值估算 SOC 难以取得较好的结果。本文结合电池开路电压 U_{oc} 和欧姆内阻 R_o 与放电倍率和 SOC 之间的关系,同时将变电流放电过程视分为多个不同时段,并实时根据前一时刻估算的 SOC 值计算出当前时刻对应的 U_{oc} 和 R_o ,从而运用于算法中下一时刻的 SOC 估算,实现了在不同时刻运用不同参数估算 SOC 的过程。最后以实际工况下的估算结果,验证了本文所提出的改进算法的可行性和有效性。此外,当电池工作温度变化较大时,如何有效、更好地估算 SOC 有待进一步研究。

参考文献:

[1] Zhang Yanhui, Song Wenji, Lin Shili, et al. A critical review on state of charge of batteries[J]. Journal of Renewable & Sustainable Energy, 2013, 5(5): 347-355.

[2] 尚丽平,王顺利,李占锋,等.基于放电试验法的机载蓄电池 SOC 估计方法研究[J].电源学报,2014,12(1): 61-65.

Shang Liping, Wang Shunli, Li Zhanfeng, et al. Research on SOC estimation method of airborne battery based on discharge test method[J]. Journal of Power Supply, 2014, 12 (1): 61-65(in Chinese).

[3] 刘新天,刘兴涛,何耀,等.基于 $V_{(min)}$ -EKF 的动力锂电池组 SOC 估计[J].控制与决策,2010,25(3): 445-448.

Liu Xintian, Liu Xingtao, He Yao, et al. Based-in-EKF SOC estimation for power Li-ion battery pack[J]. Control and Decision, 2010, 25(3): 445-448(in Chinese).

[4] Zhang Cheng, Li Kang, Pei Lei, et al. An integrated ap-

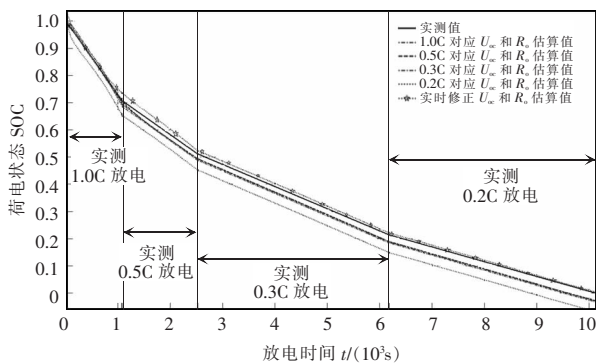


图 7 SOC 的估算与实测曲线

Fig.7 Estimated and measured SOC curves

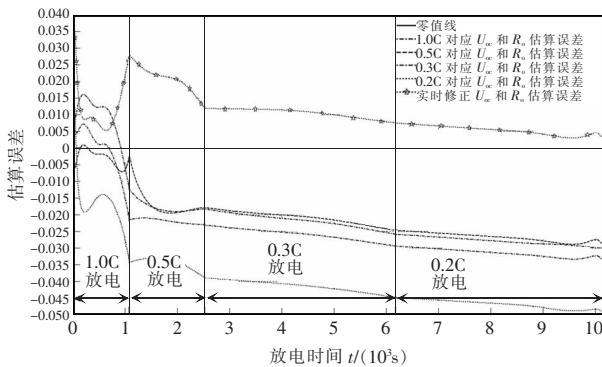


图 8 SOC 的估算与实测误差曲线

Fig.8 Estimated and measured error curves of SOC

- proach for real-time model-based state-of-charge estimation of lithium-ion batteries[J]. Journal of Power Sources, 2015, 283(4): 24-36.
- [5] 马兹林, 冒晓建, 王俊席. 修正 RC 模型混合动力车用氢镍蓄电池 SOC 预测[J]. 电源技术, 2012, 36(7): 966-968. Ma Zilin, Mao Xiaojian, Wang Junxi. The modified RC model of hybrid prediction for nickel hydrogen battery SOC[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2012, 36(7): 966-968(in Chinese).
- [6] 吴池. AH 计量法在 MATLAB 环境下对锂离子电池 soc 的估算[D]. 天津: 天津大学, 2007. Wu Chi. Estimation of SOC for lithium ion battery by AH measurement method in MATLAB environment[D]. Tianjin: Tianjin University, 2007(in Chinese).
- [7] 冯光. 基于 EKF 的锂离子电池 SOC 估算的建模与仿真[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2013. Feng Guang. Based on EKF modeling and simulation of lithium ion battery SOC estimation[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2013(in Chinese).
- [8] Du Jiani, Liu Zhitao, Chen Can, et al. Li-ion battery SOC estimation using EKF based on a model proposed by extreme learning machine[C]. Industrial Electronics and Applications, 2012: 1651-1656.
- [9] Wei Kexin, Chen Qiaoyan. States estimation of Li-ion power batteries based on adaptive unscented Kalman filters[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(3): 445-452.
- [10] 俞云锋, 沈锦飞. 基于 EKF 的锂电池状态估算策略[J]. 电源技术, 2014, 38(2): 237-238. Yu Yunfeng, Shen Jinfei. Based on EKF for lithium battery state estimation strategy[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2014, 38(2): 237-238(in Chinese).
- [11] 王笑天, 杨志家, 王英男. 双卡尔曼滤波算法在锂电池 SOC 估算中的应用[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(8): 1732-1738. Wang Xiaotian, Yang Zhijia, Wang Yingnan. Double kalman filtering algorithm in the application of lithium battery SOC estimation[J]. Journal of Instruments and Meters, 2013, 34(8): 1732-1738(in Chinese).
- [12] 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. Zhang Ting, Hu Shejiao. Based on the method of improving Thevenin model for lithium battery SOC estimation[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2015, 39(11): 2400-2402(in Chinese).
- acid battery through pulses charging with variable frequency and duty cycle[C]. International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE), Pilsen, 2016: 254-256.
- [13] Freitas D C C, Moraes J L D, Neto E C, et al. Battery charger lead-acid using IC BQ2031[J]. IEEE Latin America Transactions, 2016, 14(1): 32-37.
- [14] Hua C C, Syue Z W. Charge and discharge characteristics of lead-acid battery and LiFePO4 battery[C]. IEEE International Power Electronics Conference, Sapporo, 2010: 1478-1483.
- [15] Elsayed A T, Lashway C R, Mohammed O A. Advanced battery management and diagnostic system for smart grid infrastructure[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(2): 897-905.
- [16] Qian Ping, Guo Maopai. Design of pulse charger for lead-acid battery[C]. International Conference on Electric and Electronics (EEIC), Nanchang, 2011: 897-901.
- [17] 谭颖琦, 范大鹏, 陶溢. 基于线性光耦 HCNR200 的 DSP 采集电路设计与实现[J]. 电测与仪表, 2006, 43(486): 46-48. Tan Yingqi, Fan Dapeng, Tao Yi. Design and implementation of DSP acquisition circuit based on linear optocoupler HCNR200[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2006, 43(486): 46-48(in Chinese).

(上接第 123 页)



张方亮

作者简介:

张方亮(1989-),男,通信作者,硕士研究生,研究方向:电池状态监测与控制, E-mail: zfliang1030@foxmail.com。



魏芝浩

作者简介:

魏芝浩(1990-),男,硕士研究生,研究方向:电能变换技术及新能源开发技术, E-mail: hankwei0722@163.com。

王春芳(1964-),男,中国电源学会高级会员,通信作者,博士,教授,研究方向:电能变换技术及新能源开发技术, E-mail: qduwcf@163.com。