

一种基于 UKF 的 SOC 估算方法

官洪运, 张抒艺, 井倩倩, 王亚青, 缪新苗

(东华大学 信息科学与技术学院, 上海 201620)

摘要: 随着新能源汽车市场规模的增长, 电池管理系统(Battery Management Systems, BMS)的市场需求也进一步扩大。作为保障电池安全及延长电池寿命的 BMS 而言, 动力锂电池组的荷电状态(State of Charge, SOC)估算是 BMS 研究的重点。在研究了安时积分法估算 SOC 时受 SOC 初始值影响较大, 且具有累积误差的问题, 以及扩展卡尔曼滤波算法(EKF)估算 SOC 时收敛较慢的基础上, 采用二阶 RC 等效电路模型对锂电池进行建模分析, 针对锂电池各参数受 SOC 变化的影响, 引进无迹卡尔曼滤波(UKF)算法, 给出了锂电池的 SOC 仿真实验。实验结果表明, 该种基于 UKF 的估算方法对 SOC 的估算更准确, 误差更小且收敛速度快, 对传统采用定值电池参数 BMS 的改进具有重要意义。

关键词: 锂电池; 无迹卡尔曼滤波; 荷电状态; 等效电路; 估算方法

中图分类号: TM912

文献标识码: A

DOI: 10.19358/j.issn.2096-5133.2020.10.010

引用格式: 官洪运, 张抒艺, 井倩倩, 等. 一种基于 UKF 的 SOC 估算方法[J]. 信息技术与网络安全, 2020, 39(10): 49-54.

A method of SOC estimation based on UKF

Guan Hongyun, Zhang Shuyi, Jing Qianqian, Wang Yaqing, Miao Xinmiao

(School of Information Science and Technology, Donghua University, Shanghai 201620, China)

Abstract: With the growth of the new energy vehicle market, market demand for battery management systems(BMS) has also further expanded. For BMS, which guarantees battery safety and prolongs battery life, the estimation of the state of charge(SOC) of a powered lithium battery pack is the focus of BMS research. Based on the study of the problem that the AH integration method is greatly affected by the initial value of the SOC and has a cumulative error, and the extended Kalman filter algorithm(EKF) has a slower convergence when estimating the SOC, a second-order RC equivalent circuit model was used to model and analyze the lithium battery. Considering that the parameters of the lithium battery are affected by SOC changes, the Unscented Kalman Filter(UKF) algorithm was introduced to simulate the SOC of the lithium battery. The experimental results show that the UKF-based SOC estimation is more accurate, the error is smaller, and the convergence speed is faster, which is of great significance to the improvement of the traditional fixed-value battery parameter BMS.

Key words: lithium battery; unscented Kalman filter; state of charge; equivalent circuit; estimation method

0 引言

广泛使用锂电池作为动力电池的新能源汽车正逐渐普及, 而锂电池荷电状态(SOC)的估计对新能源汽车的剩余可用电量具有指导作用, 是电池管理系统研究的关键问题之一。研究估算锂电池的 SOC, 首先需要进行电池建模。目前, 锂电池模型主要有能够较好描述电化学特性电化学模型, 抽象电池电化学特性的等效电路模型及神经网络模型^[1]

等。DOYLE M 等^[2]提出经典电化学模型——Doyle-Fuller-Newman 模型用叠加法简化了数值计算; 马玉菲等^[3]提出一种改进的 PNGV 模型并使用该模型较准确地估算了电池的 SOC; PENG J C 等^[4]提出了一种三层神经网络模型较准确地预测电池的 SOC。这些电池模型虽然各有优势, 但是电化学模型计算量太大, PNGV 模型由于模型较复杂, 神经网络模型需要复杂的训练, 均不太适合应用于电池管理系

统。所以,考虑模型复杂性及模型准确性,本文采用二阶 RC 等效电路作为锂电池模型进行研究。

锂电池 SOC 估计方法有安时积分法、扩展卡尔曼滤波算法、神经网络算法等^[5],安时积分法受初始值及累计误差影响,扩展卡尔曼滤波算法收敛速度较慢且估算不够精确,神经网络算法训练数据大。综合比较各种估算电池 SOC 的方法,且在证明建立二阶 RC 等效电路模型稳定有效的基础上,本文引进 UKF 滤波算法对锂电池 SOC 进行估计。

1 锂电池等效电路模型及参数辨识

1.1 锂电池等效电路模型

锂电池等效电路模型主要有 Rint 模型、Thevenin 模型、RC 模型与 PNGV 模型^[6]。由于锂电池受极化效应的影响,具有欧姆极化、浓差极化和电化学极化的现象^[7],因此本文采取二阶 RC 等效电路模型对锂电池进行建模研究,电池模型如图 1 所示。图 1 中 U_{oc} 为电池模型的开路电压(OCV), R_0 为欧姆极化电阻, R_1 为电化学极化电阻, C_1 为电化学极化电容, R_1 与 C_1 并联的电路模拟时间常数较小的电化学极化过程; R_2 为浓差极化电阻, C_2 为浓差极化电容, R_2 与 C_2 并联的电路模拟时间常数较大的浓差极化过程; I 为流经电池的电流,定义充电时为正,放电时为负; U 为电池的端电压。

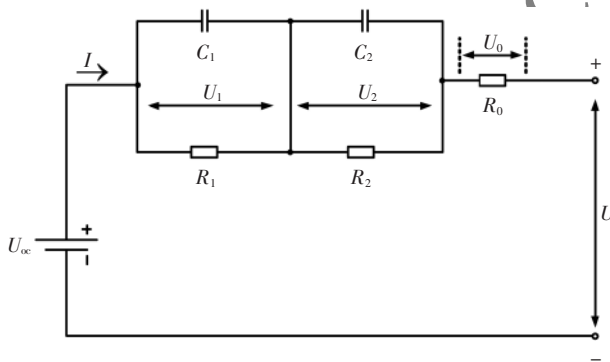


图 1 二阶 RC 等效电路模型

由基尔霍夫电流、电压定律,同时考虑电池参数受 SOC 的影响,可得方程式(1):

$$\begin{cases} U = U_{oc} - U_0 - U_1 - U_2 \\ I = \frac{U_1}{R_1(SOC_t)} + C_1(SOC_t) \frac{dU_1}{dt} \\ I = \frac{U_2}{R_2(SOC_t)} + C_2(SOC_t) \frac{dU_2}{dt} \end{cases} \quad (1)$$

1.2 锂电池等效电路模型的参数辨识

采用 32 Ah 的 NCM 三元方壳锂电池作为研究对

象,在 25 °C 下根据混合脉冲功率特性实验(HPPC)取得实验数据。实验先将充满电的电池静置 1 h,然后依次进行如下步骤:(1)以 64 A 电流恒流放电 10 s;(2)静置 3 min;(3)以 48 A 电流恒流充电 10 s;(4)静置 3 min;(5)以 32 A 恒流放电使放电深度为 10%;(6)静置 1 h;(7)循环(1)~(6),直至放电深度为 100%。

根据实验数据并用 MATLAB 的 cftool 工具箱拟合开路电压 OCV 与 SOC 关系可得 OCV-SOC 曲线,如图 2 所示。

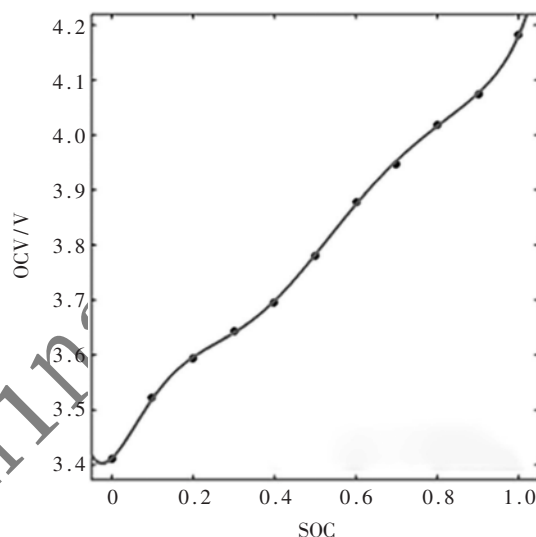


图 2 OCV-SOC 拟合曲线

拟合函数为:

$$\begin{aligned} OCV(t) = & 78.58SOC^8(t) - 349.6SOC^7(t) + \\ & 646.1SOC^6(t) - 629.9SOC^5(t) + \\ & 338SOC^4(t) - 93.67SOC^3(t) + \\ & 10.48SOC^2(t) + 0.6898SOC(t) + 3.412 \quad (2) \end{aligned}$$

在 SOC 为 90% 时开始放电 10 s,静置 3 min 后,充电 10 s,再静置 3 min 后的数据用 MATLAB 绘图得到图 3。

如图 3 所示,电流刚施加激励的 AB 阶段电压骤降与电流刚撤去的 CD 阶段电压骤升反映了电池欧姆内阻特性,此时可利用式(3)计算出欧姆内阻 R_0 :

$$R_0 = \frac{(U_A - U_B) + (U_D - U_C)}{2I} \quad (3)$$

BC 阶段为对电池进行 64 A 恒流放电 10 s,电压缓慢下降反映电池 RC 并联电路电容的缓慢充电,由于静置时间足够长,电容初始电压接近零,可以看成零状态响应,此时电池端电压可以表示成式(4);CE 阶段对电池静置处理,电压缓慢回升反映了电

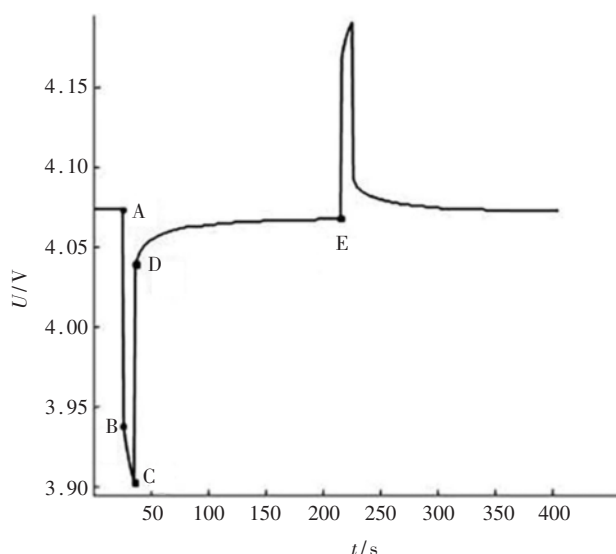


图3 电池端电压变化曲线

池 RC 并联电路电容的缓慢放电。

$$U = U_{oc} + IR_0 + IR_1(1 - \exp(-\frac{t}{\tau_1})) + IR_2(1 - \exp(-\frac{t}{\tau_2})) \quad (4)$$

其中, $\tau_1 = R_1 C_1$, $\tau_2 = R_2 C_2$ 。

在 MATLAB 中导入 BC 阶段的数据, 按照式(4)形式, 用函数:

$$y = a + b \exp(-\mu_1 t) + c \exp(-\mu_2 t) \quad (5)$$

的形式拟合 BC 阶段曲线可得到 a 、 b 、 c 、 μ_1 、 μ_2 , 从

而可以得到 R_1 、 R_2 、 C_1 与 C_2 :

$$\begin{cases} R_1 = \frac{b}{I} \\ R_2 = \frac{c}{I} \\ C_1 = \frac{1}{\mu_1 R_1} \\ C_2 = \frac{1}{\mu_2 R_2} \end{cases} \quad (6)$$

由以上分析, 可以求出不同 SOC 下的电池各参数值, 同时使用 MATLAB 的 cftool 工具箱可以拟合各参数与 SOC 的函数关系。

1.3 模型验证

首先, 使用 MATLAB/Simulink 的 Simscape 模块搭建电池模型, 如图 4 所示。

其次, 将之前获取的 OCV 和电池各参数与 SOC 的关系整合到建立的二阶 RC 等效电路模型中, 使用复杂工况下的电流数据作为激励, 图 5 为仿真电压与真实电压对比及电压误差图。

从图 5 可以看出模型估算的电压值与真实电压值误差在 0.04 V 以内, 表明该二阶等效电路模型较好地估算了电池的电压, 稳定可靠。

根据电流激励, 模型输出的电池温度的变化图如图 6 所示。

分析图 6 电流与温度的变化情况, 温度下降是

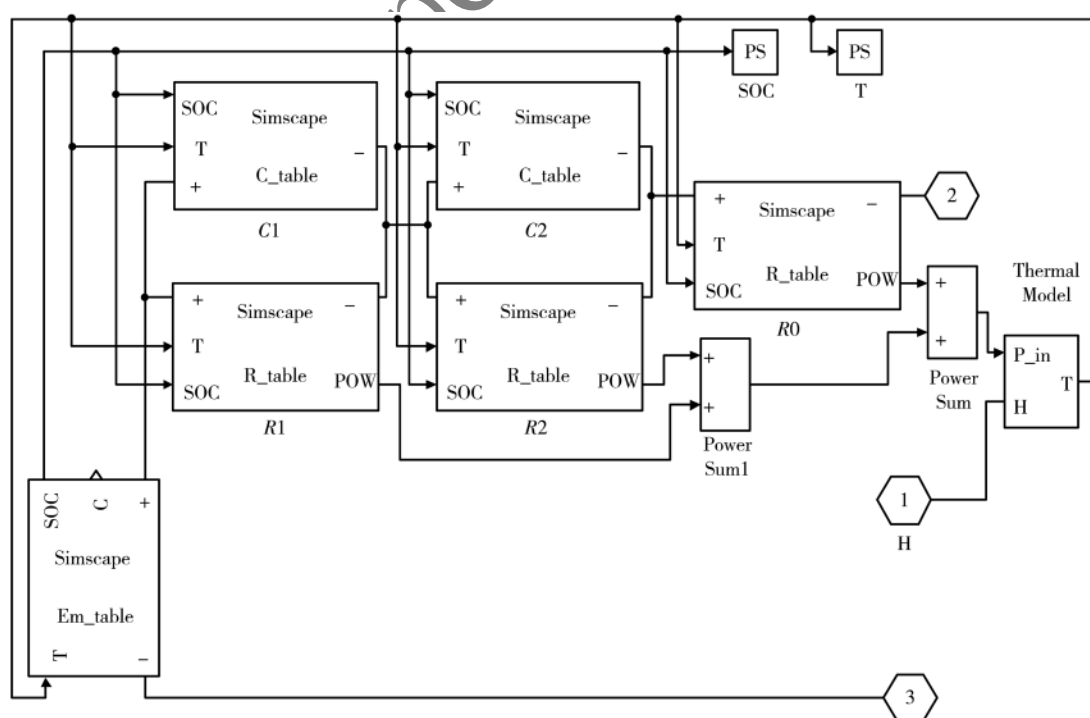


图4 使用 MATLAB/Simulink 搭建的二阶 RC 等效电路模型

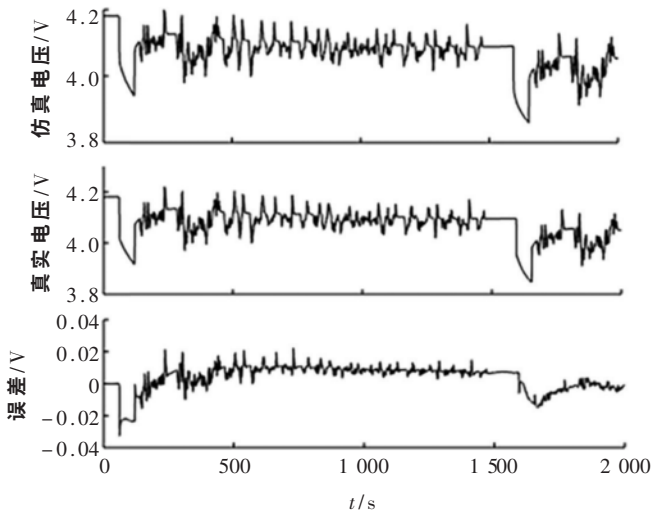


图5 仿真电压与真实电压对比及电压误差图

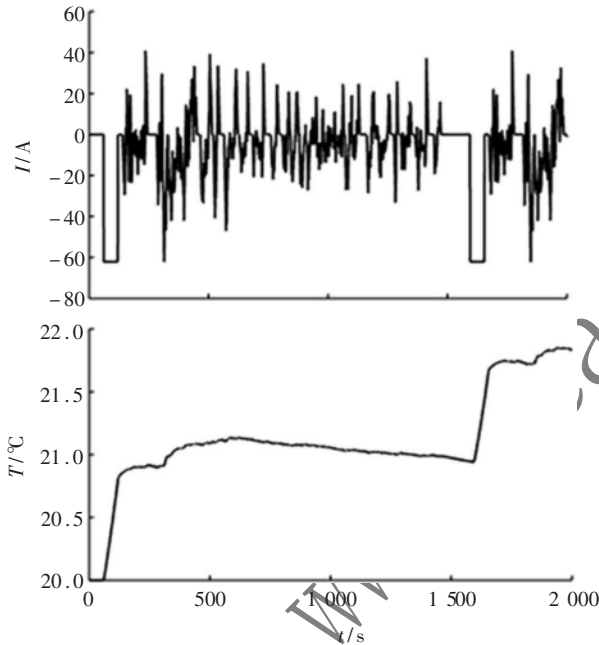


图6 电流激励与电池温度变化图

因为电池与环境的热交换,电池温度上升程度较大是因为电池以64 A大电流持续放电10 s,热量来源主要是电池极化电阻产生的焦耳热 Q_r 以及电化学反应变反应热 Q_s ^[8],其计算分别为式(7)、式(8):

$$Q_r = I^2 R t \quad (7)$$

$$Q_s = n F N T \frac{\partial E}{\partial T} \quad (8)$$

其中, I 为电流激励, R 为电池极化电阻(计算公式如式(9)所示), n 为迁移电子的摩尔数, $F=9\,685\text{ C}\cdot\text{mol}^{-1}$ 为法拉第常数, N 为实际反应剂的摩尔数^[8], E 为电池的电动势。

$$R = R_0 + R_1 + R_2 \quad (9)$$

2 UKF 滤波算法

卡尔曼滤波算法^[9]主要应用于线性系统,对于非线性系统,有学者提出扩展卡尔曼滤波算法,但是其忽略高阶项,估算精度有待提高,于是人们进一步提出无迹卡尔曼滤波算法(UKF)。相比扩展卡尔曼滤波算法,UKF使用UT变换,不要求取雅可比矩阵,既减小了计算量又减小了误差。引入一般非线性系统的状态方程和测量方程(10):

$$\begin{cases} x_{k+1} = f(x_k, u_k) + \omega_k \\ y_k = g(x_k, u_k) + v_k \end{cases} \quad (10)$$

其中, ω_k 是高斯过程噪声, v_k 为高斯测量噪声, ω_k 、 v_k 均值都为零。

UKF的计算过程如下:

(1)对状态变量及方差进行初始化:

$$\begin{cases} \hat{x}_0 = E(x_0) \\ P_0 = E[(x - \hat{x}_0)(x - \hat{x}_0)^T] \end{cases} \quad (11)$$

(2)状态预测,计算sigma点:

$$\begin{cases} \hat{x}_{k-1} = \hat{x}_0, i=0 \\ \hat{x}_{k-1}^i = \hat{x}_{k-1} + (\sqrt{(n+\lambda)P_{k-1}})_i, i=1, 2, 3, \dots, n; \\ \lambda = \alpha^2(n+k_i) - n \\ \hat{x}_{k-1}^i = \hat{x}_{k-1} - (\sqrt{(n+\lambda)P_{k-1}})_{i-n}, i=n+1, n+2, \dots, 2n \end{cases} \quad (12)$$

其中, $\hat{x}_{k-1}$ 是上一时刻的状态向量; n 是状态向量的维度; $2n+1$ 是sigma点的数量; α 为比例因子,本文 α 取0.01; k_i 一般取0或者 $3-n$,本文 k_i 取0。

(3)计算加权系数:

$$\begin{cases} \omega_m^0 = \frac{\lambda}{n+\lambda} \\ \omega_m^i = \frac{1}{2(n+\lambda)}, i=1, 2, 3, \dots, 2n \\ \omega_c^0 = \frac{\lambda}{n+\lambda} + (1-\alpha^2+\beta) \\ \omega_c^i = \frac{1}{2(n+\lambda)}, i=1, 2, 3, \dots, 2n \end{cases} \quad (13)$$

其中, ω_m 为采样点均值权重, ω_c 为协方差权重,高斯分布 β 取2最优, n 取3。

(4)时间更新:

$$\begin{cases} \bar{x}_{k+1} = \sum_{i=0}^{2n} W_m^i x_k^i \\ P_{xx} = \sum_{i=0}^{2n} W_c^i (x_k^i - \bar{x}_{k+1})(x_k^i - \bar{x}_{k+1})^T + Q_k \end{cases} \quad (14)$$

(5) 估计更新:

$$\begin{cases} \hat{\mathbf{y}}_{k+1} = \sum_{i=0}^{2n} \mathbf{W}_m^i \mathbf{y}_k^i \\ \mathbf{P}_{yy} = \sum_{i=0}^{2n} \mathbf{W}_c^i (\mathbf{y}_k^i - \hat{\mathbf{y}}_{k+1})(\mathbf{y}_k^i - \hat{\mathbf{y}}_{k+1})^T + \mathbf{R}_k \\ \mathbf{P}_{xy} = \sum_{i=0}^{2n} \mathbf{W}_c^i (\mathbf{x}_k^i - \bar{\mathbf{x}}_{k+1})(\mathbf{y}_k^i - \hat{\mathbf{y}}_{k+1})^T \\ \mathbf{K}_k = \mathbf{P}_{xy} \mathbf{P}_{yy}^{-1} \\ \hat{\mathbf{x}}_{k+1} = \bar{\mathbf{x}}_{k+1} + \mathbf{K}_k (\mathbf{y}_{k+1} - \hat{\mathbf{y}}_{k+1}) \\ \mathbf{P}_k = \mathbf{P}_{xx} - \mathbf{K}_k \mathbf{P}_{xy} \mathbf{K}_k^T \end{cases} \quad (15)$$

其中, $\hat{\mathbf{y}}_{k+1}$ 为观测值, $\mathbf{P}_{yy}$ 、 $\mathbf{P}_{xy}$ 为状态协方差, $\mathbf{R}_k$ 为测量噪声方差, $\mathbf{K}_k$ 为增益矩阵, $\mathbf{P}_k$ 为状态误差协方差。

3 基于 UKF 的 SOC 估算

基于上述对 UKF 算法的分析, 要用 UKF 算法估算锂电池的 SOC, 首先需要建立电池的状态空间方程。根据式(10), 结合二阶 RC 等效电路模型, 得到锂电池的状态方程与测量方程如式(16)所示:

$$\begin{cases} \mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{A} \mathbf{x}_k + \mathbf{B} \mathbf{u}_k + \boldsymbol{\omega}_k \\ y_k = U_{ocv}(\text{SOC}_k) - U_{1,k} - U_{2,k} - R_0 u_k + v_k \end{cases} \quad (16)$$

其中, $U_{ocv}(\text{SOC}_k)$ 根据式(2)计算, SOC_k 通过安时积分法得到, 再根据式(1)可得二阶 RC 等效电路模型的状态方程组(17):

$$\begin{cases} \text{SOC}(t) = \text{SOC}(0) - \int_0^t I(t) dt \\ \dot{U}_1 = \frac{dU_1}{dt} = -\frac{1}{R_1(\text{SOC}(t))C_1(\text{SOC}(t))} U_1 + \frac{I}{C_1(\text{SOC}(t))} \\ \dot{U}_2 = \frac{dU_2}{dt} = -\frac{1}{R_2(\text{SOC}(t))C_2(\text{SOC}(t))} U_2 + \frac{I}{C_2(\text{SOC}(t))} \end{cases} \quad (17)$$

进而可以得到离散化的状态方程组(18):

$$\begin{cases} \text{SOC}_{k+1} = \text{SOC}_k - \frac{T}{C} I_k \\ U_{1,k+1} = \exp\left(-\frac{T}{R_1(\text{SOC}_k)C_1(\text{SOC}_k)}\right) U_{1,k} + \left(1 - \exp\left(-\frac{T}{R_1(\text{SOC}_k)C_1(\text{SOC}_k)}\right)\right) R_1(\text{SOC}_k) I_k \\ U_{2,k+1} = \exp\left(-\frac{T}{R_2(\text{SOC}_k)C_2(\text{SOC}_k)}\right) U_{2,k} + \left(1 - \exp\left(-\frac{T}{R_2(\text{SOC}_k)C_2(\text{SOC}_k)}\right)\right) R_2(\text{SOC}_k) I_k \end{cases} \quad (18)$$

从而结合式(16)和式(18), 可得:

$$\begin{aligned} \mathbf{A} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \exp\left(-\frac{T}{R_1(\text{SOC}_k)C_1(\text{SOC}_k)}\right) & 0 \\ 0 & 0 & \exp\left(-\frac{T}{R_2(\text{SOC}_k)C_2(\text{SOC}_k)}\right) \end{bmatrix} \\ \mathbf{B} &= \begin{bmatrix} -\frac{T}{C} \\ R_1(\text{SOC}_k)(1 - \exp\left(-\frac{T}{R_1(\text{SOC}_k)C_1(\text{SOC}_k)}\right)) \\ R_2(\text{SOC}_k)(1 - \exp\left(-\frac{T}{R_2(\text{SOC}_k)C_2(\text{SOC}_k)}\right)) \end{bmatrix} \end{aligned}$$

状态向量 $\mathbf{x}_k = (\text{SOC}_k, U_{1,k}, U_{2,k})^T$, 系统输入 $\mathbf{u}_k$ 为电流输入 I_k 。

将状态测量方程与 UKF 算法结合, 将考虑了受 SOC 影响的电池参数代入算法计算, 即可循环递归出估算的 SOC 值。

4 实验仿真分析

用 MATLAB 编程将电池模型的状态方程与测量方程结合 UKF 算法, 采用 FUDS 工况下的电流电压数据, 同时结合拜特设备测得的 SOC 值作为 SOC 真实值, 运行代码可得 UKF 估算 SOC 值与真实 SOC 值的对比、UKF 估算 SOC 误差、UKF 估算电压误差, 分别如图 7~图 9 所示。

图 7 显示 UKF 算法估算的 SOC 能够较好地跟随真实 SOC 值的变化情况, 说明考虑了电池各参

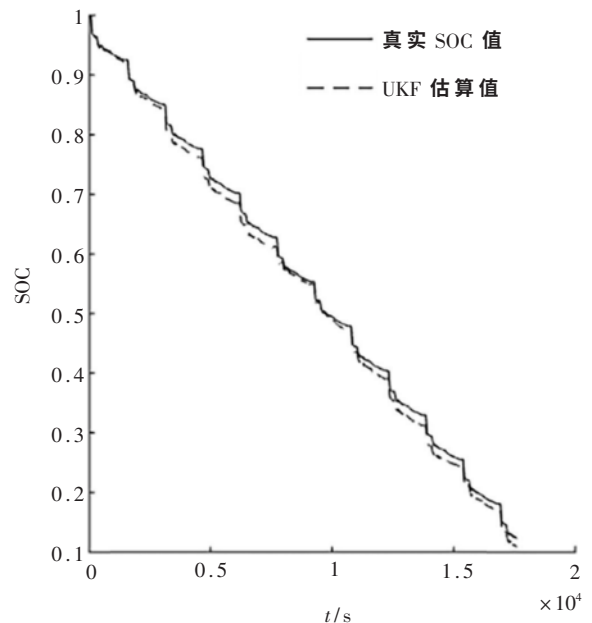


图 7 UKF 估算 SOC 值与真实 SOC 值对比图

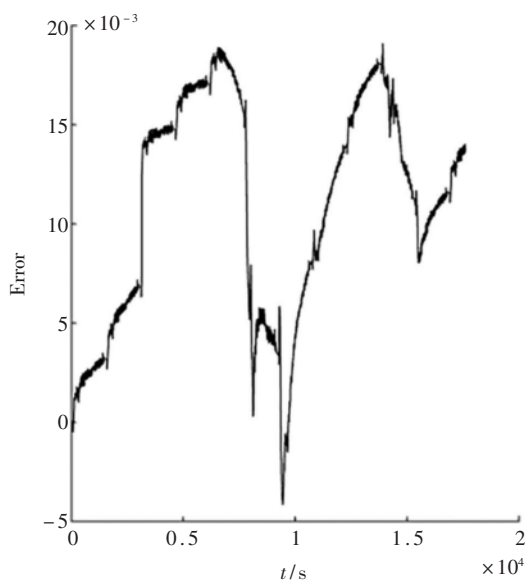


图 8 UKF 估算 SOC 误差图

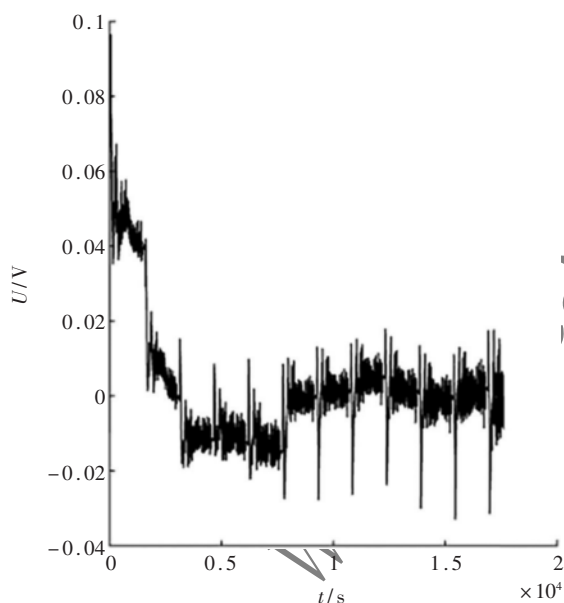


图 9 UKF 估算电压误差图

数受 SOC 影响后,UKF 算法能够较好地估算电池 SOC 值。

图 8 显示了 UKF 估算的 SOC 与真实 SOC 之间的误差在 $-0.005 \sim 0.02$ 之间,最大误差小于 0.02,说明本文使用 UKF 估算的 SOC 较准确。

从图 9 可看出估算初始时误差稍大,但是也小于 0.1 V,在后期 UKF 估算电压值与真实电压值误差在 0.04 V 以内,估算较准确。

5 结论

本文使用二阶 RC 等效电路模型对锂电池进行

建模,计算不同 SOC 下的电池各参数并代入模型中验证了该模型的准确性;另外,将受 SOC 影响的电池参数代入电池模型后,通过 UKF 滤波算法估算了电池的 SOC 与电压,其中,SOC 误差在 0.02 以内,电压估算收敛后,电压误差在 0.04 V 以内,估算准确度得到提高,能够满足实际应用需求。

参考文献

- [1] DOYLE M, FULLER T F, NEWMAN J. Modeling of galvanostatic charge and discharge of the lithium/polymer/insertion cell[J]. Electrochemical Society, 1993, 140(6): 1526.
- [2] HE H W, XIONG R, FAN J X. Evaluation of lithium-ion battery equivalent circuit models for state of charge estimation by an experimental approach[J]. Energies, 2011, 4(4): 582-598.
- [3] 马玉菲, 杨玉新, 李立伟, 等. 基于极化效应 PNGV 模型的动力锂电池 SOC 估算[J]. 青岛大学学报(工程技术版), 2019, 34(1): 58-63.
- [4] PENG J C, CHEN Y B, EBERHART R. Battery pack state of charge estimator design using computational intelligence approaches[C]. Fifteenth Annual Battery Conference on Applications and Advances. IEEE, 2000: 173-177.
- [5] 陈元丽, 赵振东, 陈素娟, 等. 动力锂电池 SOC 估算方法综述[J]. 汽车科技, 2019(5): 65-69.
- [6] 郑旭, 郭汾. 动力电池模型综述[J]. 电源技术, 2019, 43(3): 521-524.
- [7] 白婷. 锂离子电池间歇—正负脉冲优化充电方法研究[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2014.
- [8] 姜贵文, 黄菊花, 庄玲, 等. 圆柱形动力锂电池传热分析及升温特性[J]. 南昌大学学报(理科版), 2018, 42(5): 431-435.
- [9] 彭丁聪. 卡尔曼滤波的基本原理及应用[J]. 教育技术导刊, 2009, 8(11): 32-34.

(收稿日期: 2020-04-09)

作者简介:

官洪运(1960-), 男, 教授, 硕士生导师, 主要研究方向: 图像通信与信息处理。

张抒艺(1995-), 通信作者, 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 嵌入式系统和新能源汽车电池管理。E-mail: 1264263310@qq.com。

井倩倩(1995-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向: 图像处理和计算机视觉。

版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《信息技术与网络安全》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《信息技术与网络安全》编辑部
中国电子信息产业集团有限公司第六研究所