

# 基于改进卡尔曼滤波的电池 SOC 估算

徐 颖 沈 英

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100191)

**摘 要:** 以研究电动汽车动力电池管理系统为背景, 以电池荷电状态估算为关键技术, 介绍了荷电状态与其主要影响因素的非线性动态关系, 建立了二阶 RC 等效电池模型. 在此基础上, 考虑了温度对电池内阻的影响, 采用卡尔曼滤波算法、改进的安时计量法和开路电压法, 结合基于温度的电池模型参数在线辨识, 对电池荷电状态进行估算, 通过 MATLAB 仿真, 并与基于经验公式的卡尔曼滤波算法进行了对比, 平均误差为 2.46%, 提高了估算精度, 验证了算法的可行性和可靠性.

**关 键 词:** 荷电状态; 电动汽车; 电池模型; 卡尔曼滤波

**中图分类号:** TM 912.1

**文献标识码:** A **文章编号:** 1001-5965(2014)06-0855-06

## Improved battery state-of-charge estimation based on Kalman filter

Xu Ying Shen Ying

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

**Abstract:** Set in the research in the battery management system of electric vehicle, the state of charge, as well as the main factors to their nonlinear dynamic relationship, was illustrated and a second-order RC equivalent cell model was established based on the key technology of battery state of charge estimation. After taking the influence of temperature on the battery internal resistance into account, the state of charge of the battery was estimated with Kalman filter algorithm, the improved Ah counting method and the open-circuit voltage method, combined with the online thermal model parameters identification. MATLAB simulation shows that the average error was 2.46% compared with the conventional Kalman filter algorithm, which verifies the feasibility and reliability.

**Key words:** state-of-charge; electrical vehicles; battery model; Kalman filtering

随着环境污染和能源匮乏的问题越来越严重, 国家制定了电动汽车发展战略, 但是发展的瓶颈在于电池和电池管理系统<sup>[1]</sup>. 电池的荷电状态 (SOC, State of Charge) 的精确估算是电池管理系统的核心, 也是重要内容和难点, 它提供了电池的使用信息及续航里程, 并且是实现电池均衡及其他功能的基础. 而建立准确的电池模型和适当的估算方法是提高 SOC 估算精度的关键<sup>[2]</sup>.

由于电池的荷电状态和很多因素相关, 而且具有很强的非线性, 给 SOC 实时在线估算带来很大的困难<sup>[3]</sup>. 目前应用的各种 SOC 实时在线估算

方法都存在或多或少的缺陷, 不能很好地满足实际使用的要求. 开路电压法, 简单易行, 精度较高, 但是动态响应慢, 只适合电动汽车停车状态下检测电池剩余容量, 不能满足在线检测的需要; 安时计量法, 如果电流测量和初始值存在误差, 则会导致误差累计, 不断放大, 但是安时计量法可以作为其他算法的辅助工具; 除此之外还有内阻法、放电实验法、神经网络法和卡尔曼滤波法等, 其中卡尔曼滤波算法是研究的热点, 它可对初始误差进行修正, 并对噪声有很强的抑制作用, 在估算过程中有很好的精度<sup>[4]</sup>. 所以本文采用改进的卡尔曼滤

收稿日期: 2013-07-11; 网络出版时间: 2013-12-06 16:27; DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2013.0414

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20131206.1627.003.html

作者简介: 徐 颖(1969-) ,女,四川德阳人,副教授, xuying@buaa.edu.cn.

波算法,对电池的荷电状态进行在线实时估计.

目前电池的模型多种多样,二阶 RC 等效电路模型与其他的电池模型相比,能准确地反映电池的各个参数的关系,较好地体现电池的动态性能,并且阶数不高,便于工程实现,所以本文电池的模型采用了二阶 RC 等效电路模型.

## 1 电池模型的建立和参数辨识

建立准确的电池模型对荷电状态的估算有很重要的影响,内阻是表征其特性的重要参数之一,而温度对内阻有重要影响,本方案在建模过程中充分考虑了温度对内阻的影响,并实现了荷电状态实时在线估计.

### 1.1 建立电池模型

对于磷酸铁锂电池来讲,电池的内阻分为欧姆内阻和极化内阻,欧姆内阻由电极材料、电解液、隔膜电阻及各部分零件的接触电阻组成,极化内阻是指电化学反应时由极化引起的电阻,包括电化极化和浓差极化引起的电阻.所以本文采用二阶 RC 等效电路模型<sup>[5]</sup>,如图 1 所示.

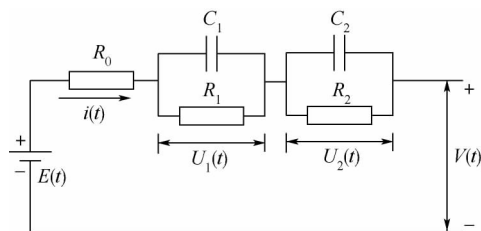


图1 二阶 RC 等效电池模型

图 1 中  $E(t)$  表示电池容量,同时也可以描述电池的开路电压 (OCV, Open-Circuit Voltage), 而开路电压和电池的荷电状态相关,如图 2 所示.

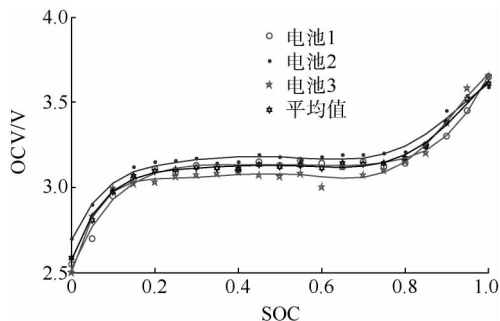


图2 OCV 和 SOC 关系图

不同的电池单体开路电压和荷电状态的函数关系基本相似,本文采用平均值进行拟合来表示 OCV 和 SOC 的函数关系.  $R_0$  为电池的等效欧姆内阻,  $R_1$  和  $R_2$  分别表示电池电化极化和浓差极化产生的等效内阻,  $R_1$  和  $C_1$  等效为锂离子电极间传输时受到的阻抗,时间常数  $\tau_1$  较小,  $U_1$  为

$R_1$  和  $C_1$  两端的电压值,  $R_2$  和  $C_2$  等效为锂离子在电极材料中扩散时受到的阻抗,时间常数  $\tau_2$  较大,  $U_2$  为  $R_2$  和  $C_2$  两端的电压值,  $V(t)$  表示电池的端电压. 由戴维南定理可以得到以下的数学关系式:

$$\dot{U}_1(t) = \left(-\frac{1}{R_1 C_1}\right) U_1(t) + \frac{1}{C_1} i(t) \quad (1)$$

$$\dot{U}_2(t) = \left(-\frac{1}{R_2 C_2}\right) U_2(t) + \frac{1}{C_2} i(t) \quad (2)$$

$$V(t) = f(s, t) - U_1(t) - U_2(t) - R_0 i(t) + v(t) \quad (3)$$

式中,  $\dot{U}_1$  和  $\dot{U}_2$  分别表示电压  $U_1$  和  $U_2$  微分;  $s$  表示 SOC 大小. 由上述 3 式得出:

$$V(t) = f(s, t) - i(t) R_0 (1 - e^{-t/\tau_1}) - i(t) R_2 (1 - e^{-t/\tau_2}) - R_0 i(t) + v(t) \quad (4)$$

式中  $t$  为采样时刻;  $f(s, t)$  表示 OCV 和 SOC 的函数关系;  $v(t)$  为计算过程产生的观测噪声.

### 1.2 模型参数在线辨识

在图 1 所示的等效电路模型中,只有确定  $R_0$ ,  $R_1$ ,  $C_1$ ,  $R_2$  和  $C_2$  的值,才可以完整地确定该模型. 在电池处于稳态或者是离线状态时,通过脉冲充放电实验可以计算得到这些参数,但是在汽车行驶过程中,电池处于工作状态,很难用典型的信号实验来得到模型参数<sup>[6]</sup>. 并且  $R_0$ ,  $R_1$ ,  $C_1$ ,  $R_2$  和  $C_2$  这些模型参数具有时变性,受到很多因素的影响,比如:电池的温度、SOC 和老化程度等. SOC 在很窄的范围内对电池内阻有很大的影响,很宽的范围影响不大,由 SOC 引起的内阻的变化可能在极短的时间内就消失了<sup>[7]</sup>,所以暂不考虑 SOC 所引起的电池内阻的变化. 温度和老化程度是本文研究的重点.

环境温度对于电池欧姆内阻和极化内阻的影响很明显,温度降低,电池的欧姆内阻增大,同时,温度降低,离子移动速度减慢,化学反应速度降低,浓差极化和电化极化增大,这使得极化内阻也增大. 一般地,温度越低内阻越大,欧姆内阻比极化内阻对温度更敏感. 相比高温,电池欧姆内阻的变化对于低温更加敏感. 汽车启动时和行驶过程中电池的温度肯定有很大的变化,最高温度可能到 40 ~ 50 °C,则电池也会经历低温到高温的过程,内阻会发生比较大的改变,用适合高温的模型参数在低温下对 SOC 估算,或者用低温的模型参数对高温充放电估算,势必会产生较大的误差. 拟将把温度分为 3 段,如图 3 所示,两个分界点分别是 10 °C 和 25 °C,对电池单体来讲在大多数情况下,大于 25 °C 可以称之为高温,电池内阻对这个

温度段不敏感,可以采用一个模型参数.

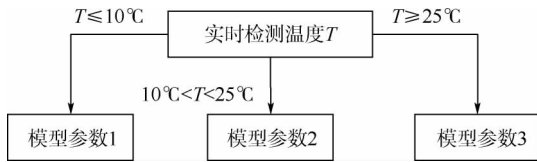


图3 不同温度段下的模型参数不同

分别在 10℃ 和 25℃ 恒定温度下,采集同电池单体完整放电过程的电压和电流的多组数据,基于式(4)采用最小二乘法拟合,得出电池单体在不同温度下的模型参数值,其中一组数据如表1所示,当温度在 10℃ 和 25℃ 之间时,模型参数采用这两个温度下参数的平均值.

表1 不同温度下的模型参数

温度	$R_0/\Omega$	$R_1/\Omega$	$\tau_1/s$	$R_2/\Omega$	$\tau_2/s$
$T \leq 10^\circ\text{C}$	0.0448	0.0216	37.3015	0.0157	318.2769
$10^\circ\text{C} < T < 25^\circ\text{C}$	0.0382	0.0225	35.2581	0.0185	348.3899
$T \geq 25^\circ\text{C}$	0.0316	0.0235	33.2147	0.0213	378.5029

另一方面,随着充放电次数的增加,电池会出现老化,内阻会发生改变,每当电池完整充放电次数达到规定的次数时,用最近一次的充放电数据对模型参数进行修改,以改善老化对 SOC 估算的影响.

## 2 SOC 估算的影响因素及修正方法

锂电池放电过程是复杂的电化学变化过程,在使用过程中表现出高度的非线性,电池荷电状态 SOC 受多种因素影响,除了一些不能改变的因素,如电池材料、尺寸、电解质的传导能力等,主要受到充放电倍率、温度等因素的影响.

### 2.1 充放电倍率

放电电流越大,电池实际可放出的电量越小,反之,电池实际可用容量增加.在理想状态下,电池的实际总容量等于标称容量,但是在实际使用过程中,受到放电倍率的影响,关系表示如下:

$$Q_N = \eta_i Q(t) = \int_0^t \eta_i i(t) dt \quad (5)$$

式中  $t$  表示持续充放电时间;  $Q(t)$  表示  $t$  时刻电池的容量;  $Q_N$  表示标称容量;  $\eta_i$  表示充放电倍率系数;  $i(t)$  表示  $t$  时刻电池的充放电电流,充电时  $i(t) < 0$ ,放电时  $i(t) > 0$ .

采用多种放电倍率下恒流放电实验,计算电池实际放电容量  $Q(t)$ ,它和标称容量  $Q_N$  的比值即为充放电倍率  $\eta_i$ ,绘制  $\eta_i$  和放电倍率的关系图,用最小二乘法拟合曲线,如图4所示,得到  $\eta_i$  和放电倍率的关系式:

$$\eta_i = \frac{8}{0.006387x^2 - 0.08335x + 8.016} \quad (6)$$

式中  $x$  表示放电电流.

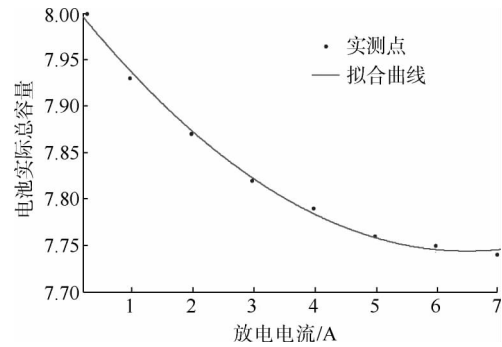


图4 电流实际总容量与放电电流关系图

### 2.2 温度因素

电池实际可用容量与温度成正相关,主要原因是随着电池温度升高,使得电池内部活性物质利用率提高,电池实际可用容量增大.汽车行驶过程中实际的工作温度并不是一个恒定的常数,电池的温度必然会升高,所以在估算电池的 SOC 时必须考虑温度的影响,用  $\eta_T$  表示温度影响系数,则  $T$  温度下电池容量和标称容量的关系如下:

$$Q_{NT} = \eta_T Q_N \quad (7)$$

用安时计量法得出

$$Q(t) = Q_0 - \int_{t_0}^t \eta_i i(t) dt \quad (8)$$

在式(8)两边同除以  $Q_{NT}$  得

$$s(t) = s_0 - \int_{t_0}^t \frac{\eta_i i(t) dt}{\eta_T Q_N} \quad (9)$$

式中,  $Q_{NT}$  表示在温度  $T$  下的电池单体的容量;  $s(t)$  表示  $t$  时刻的 SOC;  $s_0$  表示  $t_0$  时刻的 SOC.

对电池单体完全充满电,在不同的恒定温度情况下,以标准的放电倍率对电池放电,得到不同环境温度下电池单体的放电总容量和标称容量的比值为  $\eta_T$ ,温度和  $\eta_T$  成一定的相关性,如图5所示.

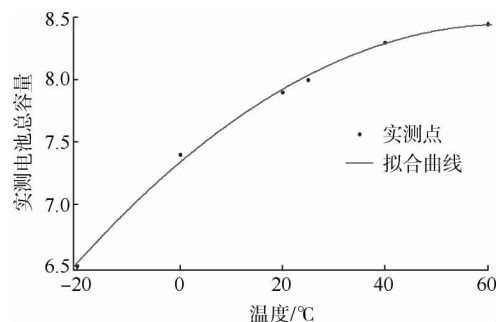


图5 实测电池总容量和温度关系图

用最小二乘法拟合的温度和  $\eta_T$  的关系式为

$$\eta_T = -3.42 \times 10^{-5} \times T^2 + 4.36 \times 10^{-3} \times T + 0.91625 \quad (10)$$

本文考虑了在电池充放电过程中对 SOC 估算影响比较大的因素: 充放电倍率和温度, 在此基础上建立了 SOC 估算的积分模型, 减少了计算过程中的误差, 使 SOC 的估计值更加接近真实值。

### 3 基于扩展卡尔曼滤波的 SOC 估算

综上所述, 电池的估算策略如图 6 所示。卡尔曼滤波算法是整个 SOC 估算过程的核心, 标准卡尔曼滤波是线性动态系统的最佳状态估计方法, 由于电动汽车动力电池单体是一个非线性动态系统, 因此采用扩展卡尔曼滤波法在线估计电池单体 SOC, 将非线性系统状态空间模型进行线性化。用上时刻的电池的状态估算值和观测值, 来精确估算这一时刻的状态值, 其等效的离散方程如下:

$$X(k+1) = A(k)X(k) + B(k)U(k) + \omega(k) \quad (11)$$

$$Y(k) = C(k)X(k) + v(k) \quad (12)$$

式中  $\omega(k)$  和  $v(k)$  分别表示状态方程和观测方程产生的状态噪声和观测噪声。

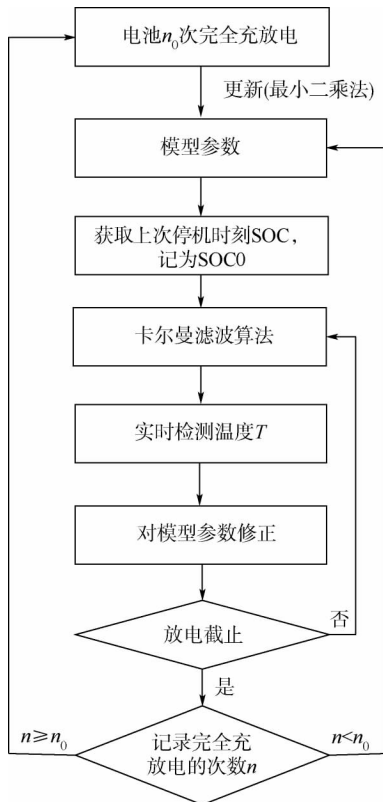


图 6 估算策略

将式(1)、式(2)、式(4)和式(9)连续函数离散化, 基于式(11)和式(12)的等效离散方程得到电池的状态空间模型如下:

$$X(k+1) = \begin{bmatrix} U_1(k+1) \\ U_2(k+1) \\ s(k+1) \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} 1 - \frac{\Delta t}{R_1 C_1} & 0 & 0 \\ 0 & 1 - \frac{\Delta t}{R_2 C_2} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1(k) \\ U_2(k) \\ s(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\Delta t}{C_1} \\ \frac{\Delta t}{C_2} \\ \frac{\eta_i \Delta t}{\eta_r Q_N} \end{bmatrix} i(k) + w(k) \quad (13)$$

$$V(k) = \begin{bmatrix} \frac{\partial f(s)}{\partial s} & -1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s(k) \\ U_1(k) \\ U_2(k) \end{bmatrix} + v(k) \quad (14)$$

式中  $\Delta t$  为采样时间; 假设  $\omega(k)$  和  $v(k)$  都是零均值的高斯随机白噪声。将卡尔曼滤波过程中的计算公式表示为下列各式, 它们之间的递推关系如图 7 所示。

$$X^-(k+1) = A(k)X^+(k) + B(k)U^+(k) \quad (15)$$

$$P^-(k+1) = A(k)P^+(k)A^T(k) + B(k)D_\omega \quad (16)$$

$$H(k) = P^-(k)C^T(k)(C(k)P^-(k)C^T(k) + D_v)^{-1} \quad (17)$$

$$X^+(k) = X^-(k) + H(k)(V(k) - V^-(k)) \quad (18)$$

$$P^+(k) = (1 - H(k)C(k))P^-(k) \quad (19)$$

式中  $X^-(k)$  表示  $X$  的初始估计值;  $X^+(k)$  表示  $X$  的最优估计值;  $D_\omega$  表示状态噪声的方差;  $D_v$  表示观测噪声的方差;  $V(k)$  为端电压的测量值;  $A(k)$ 、 $B(k)$  和  $C(k)$  为方程系数:

$$A(k) = \begin{bmatrix} 1 - \frac{\Delta t}{R_1 C_1} & 0 & 0 \\ 0 & 1 - \frac{\Delta t}{R_2 C_2} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$B(k) = \begin{bmatrix} \frac{\Delta t}{C_1} \\ \frac{\Delta t}{C_2} \\ \frac{\eta_i \Delta t}{\eta_r Q_N} \end{bmatrix}$$

$$C(k) = \begin{bmatrix} \frac{\partial f(s)}{\partial s} & -1 & -1 \end{bmatrix}$$

估算过程是不断递推的过程, 在这样的循环往

复中,先得到状态变量的初始估计值,通过观测估计值、测量值和滤波增益对初始值进行修正,逐步去除噪声,使得估计值更加接近真实值,得到状态变量的最优估计,也就是得到 SOC 的最优估算。

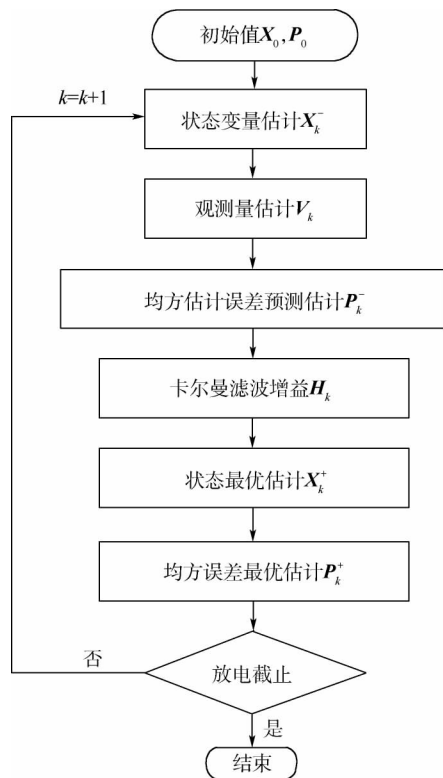


图7 递推过程

## 4 实验结果和仿真分析

为验证算法的可靠性和准确性,实验采用 12 串 8 Ah 磷酸铁锂电池组成的电池组,温度控制在室温(25℃)以上。首先进行均衡充电至电池组充满,然后以 3 A 恒流放电至结束。电池管理系统是根据上一次放(充)电结束时的 SOC 来确定本次 SOC 的初始值,由于受到电池的迟滞效应等因素影响,往往会导致初始值的偏差。图 8 是设置 SOC 的初始值的偏差为 50% 的改进 Kalman 估计值,可以看出该算法对 SOC 的初始误差有极强的修正作用。

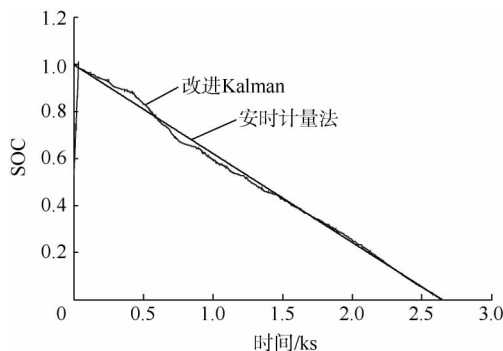


图8 Kalman 对初始偏差的修正

图 9 是二阶 RC 等效模型和基于经验公式<sup>[8]</sup>的卡尔曼滤波估算的对比曲线。图 10 是 SOC 的估算误差,基于经验公式的 SOC 估算的平均误差为 4.87%,二阶 RC 等效模型的平均误差为 2.46%,可以看出二阶 RC 等效电池模型能够更准确地模拟电池的性能。

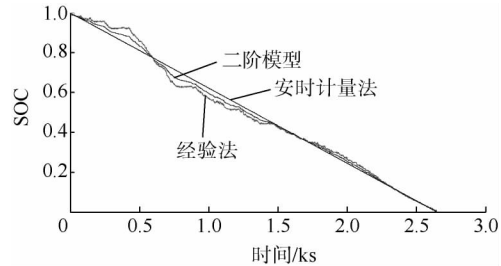


图9 SOC 估算曲线对比

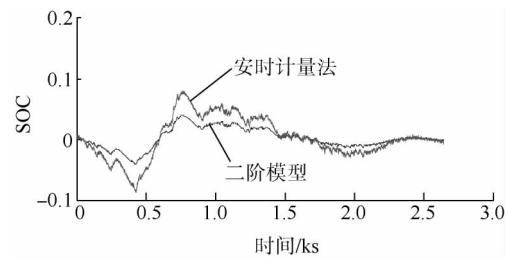


图10 SOC 估算误差对比

由于实验过程中温度会不断变化,温度对电池的内阻有很大的影响,模型参数也会随之改变,以同样的实验条件,将电池温度控制在 10~40℃ 之间,以具有参数辨识功能的模型和无参数辨识的模型进行仿真,如图 11 所示。可见,具有参数辨识功能的模型对 SOC 估算更加精确,误差比较小,所以在 SOC 估算过程中应适当考虑温度对电池内阻的影响。

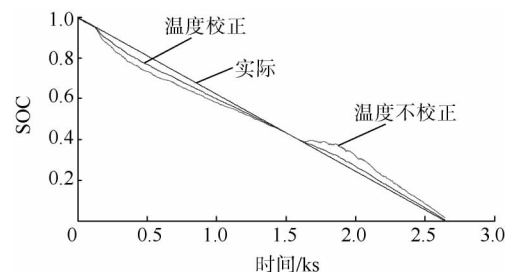


图11 温度校正前后的 SOC 图

## 5 结 论

1) 本文采用了能较好模拟电池动态性能的二阶 RC 等效电路模型,并且利用卡尔曼滤波法将开路电压法、改进的安时积分法有效地结合起来,该算法对初值有极强的修正作用,如初值误差为 50% 的情况下,可以在极短的时间内得到修正;

2) 本文采用的算法与基于经验公式的卡尔

曼滤波方法相比,提高了估算精度,平均误差降低到 2.46%;

3) 从实验中可以看出,基于温度的电池模型参数在线辨识方法与无模型参数辨识相比,提高了估算精度,所以电池荷电状态估算应该考虑温度对电池内阻的影响.

### 参考文献 (References)

- [1] 吴红杰, 齐铂金, 郑敏信, 等. 基于 Kalman 滤波的镍氢动力电池 SOC 估算方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2007, 33(8): 945 – 948  
Wu Hongjie, Qi Bojin, Zheng Minxin, et al. Ni-MH battery state-of-charge estimation based on Kalman filter[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2007, 33(8): 945 – 948( in Chinese)
- [2] He H, Xiong R, Fan J. 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] Lee J, Nam O, Cho B H. Li-ion battery SOC estimation method based on the reduced order extended Kalman filtering[J]. Journal of Power Sources, 2007, 174(1): 9 – 15
- [4] Di Domenico D, Fiengo G, Stefanopoulou A. Lithium-ion battery state of charge estimation with a kalman filter based on a electrochemical model [C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Control Applications. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 2008: 702 – 707
- [5] Wu T, Liu L, Xiao Q, et al. Research on SOC estimation based on second-order RC model [J]. Telkomnika: Indonesian Journal of Electrical Engineering, 2012, 10(7): 1667 – 1672
- [6] 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  
Wei Xuezhe, Zou Guangnan, Sun Zechang. Modelling and parameter estimation of Li-ion battery in a fuel cell vehicle[J]. Journal of Power Sources, 2004, 28(10): 605 – 608( in Chinese)
- [7] 李哲, 韩雪冰, 卢兰光, 等. 动力型磷酸铁锂电池的温度特性[J]. 机械工程学报, 2011, 47(18): 115 – 120  
Li Zhe, Han Xuebing, Lu Languang, et al. Temperature characteristics of power LiFePO<sub>4</sub> batteries [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(18): 115 – 120( in Chinese)
- [8] 徐杰. 基于卡尔曼滤波的动力电池组 SOC 精确估计[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2009  
Xu Jie. State of charge accurate estimation based on Kalman filtering for power battery [D]. Hangzhou: Hangzhou Dianzi University, 2009( in Chinese)