DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2026.2.108 **中图分类号**：TM912 **文献标志码**：A

基于预测静置开路电压法的锂电池SOC估算

凌六一[1,2]，张 虎[1]，张 婷[1]，杨 翀[1]，祁 靓[1]
(1.安徽理工大学电气与信息工程学院，淮南 232001；2.安徽理工大学人工智能学院，淮南 232001)

摘要：电池的荷电状态SOC(state-of-charge)估计普遍使用安时积分原理构建SOC模型再配合滤波算法来实现，针对其收敛速度慢、计算复杂的问题，基于开路电压原理和二阶RC电路模型提出预测静置开路电压PSOCV(predictive static open circuit voltage)法。讨论了前、后项差分离散状态方程的可行性，同时比较了线性插值LI(linear interpolation)拟合与最小二乘法LS(least squares)拟合的参数精度，实验表明LI拟合整体优于LS拟合。LI-PSOCV算法在HPPC和UDDS工况下SOC估算的平均绝对误差在1%以内。与容积卡尔曼CKF(cubature Kalman filter)比较，LI-PSOCV在SOC初值偏离时可以瞬间收敛且运行速度快于CKF。

关键词：锂离子电池；荷电状态；预测静置开路电压法；二阶RC模型；欧拉差分；线性插值

Estimation of Lithium-ion Battery SOC Based on Predictive Static Open Circuit Voltage Method

LING Liuyi[1,2], ZHANG Hu[1], ZHANG Ting[1], YANG Chong[1], QI Liang[1]
(1. School of Electrical and Information Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China;
2. School of Artificial Intelligence, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

Abstract: The state-of-charge (SOC) estimation of batteries generally uses the principle of ampere-hour integration to construct SOC models, which are further combined with filtering algorithms. To address the problems of a slow convergence speed and complex calculation, a predictive static open circuit voltage (PSOCV) method is proposed based on the open circuit voltage principle and second-order RC circuit models. The feasibility of discrete-time forward and backward difference state-space equations was discussed, and the parameter accuracy was also compared between linear interpolation (LI) fitting and least squares (LS) fitting. Experimental results show that LI fitting is generally better than LS fitting. The average absolute error of SOC estimation obtained using the LI-PSOCV algorithm under HPPC and UDDS operating conditions is below 1%. Compared with the cubature Kalman filter (CKF), the LI-PSOCV algorithm can converge instantly when the initial SOC value deviates and run faster.

Keywords: Lithium-ion battery; state-of-charge (SOC); predictive static open circuit voltage (PSOCV) method; second-order RC model; Euler difference; linear interpolation (LI)

电池的荷电状态 SOC(state-of-charge)是表征电池当前可用电量的重要参数，它无法直接测量只能通过电池的电流或电压间接估算。基于电流特征的安时 AH(ampere-hour)积分法有着初值偏离误差与噪声累计误差无法消除的缺陷。基于电压特征的静置开路电压 SOCV(static open circuit voltage)法是利用电池静置端电压(u_{socv})与SOC的对应关系来得到 SOC 值，具有修正能力强且没有累计噪声的优点，但需要长时间静置才能得到 u_{socv}。

收稿日期：2023-10-16；**修回日期**：2023-11-28；**录用日期**：2023-12-17；**网络首发日期**：2024-04-26
基金项目：安徽省高校自然科学基金资助项目(KJ2019A0106)
This work is supported by the Natural Science Foundation of Anhui Province Universities under the grant KJ2019A0106

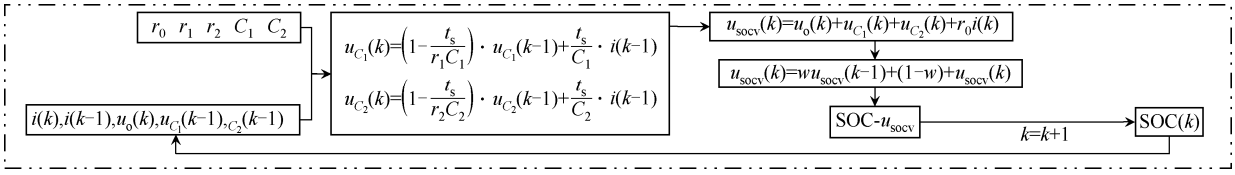
估算 SOC 的主流是用 AH 法构建 SOC 模型，再配合各种滤波算法或观测器等辅助，达到消减 AH 法自身缺陷的目的。王语园等[1]和刘迪等[2]使用拓展卡尔曼 EKF(extended Kalman filter)算法，SOC 估计误差为 1.96%，贾先屹等[3]和凌六一等[4]使用自适应无迹卡尔曼 AUKF(adaptive unscented Kalman filter)进一步将误差降低到 0.18%。此类方法有较好的精度，但滤波系统需要收敛时间，且随着初值误差的增大而变长。算法需要设置很多参量，且带有复杂矩阵计算，容易滤波失败，实际应用难度大。基于“黑箱模型”的神经网络法通过数据训练隐含层，精度可以做到 1%以下[5]，但是需要大量的数据与计算机资源，不适合实际应用。

陈东等[6]通过改变循环次数来研究 SOC-u_{socv} 曲线的变化，表明随着循环次数的增加 SOC-u_{socv} 曲线整体微小抬升，但是曲线形状基本不变。肖占龙等[7]、吴红杰等[8]和 Huang 等[9]通过改变温度研究 SOC-u_{socv} 曲线的变化，结论是温度会影响电池的容量而对曲线影响很小。可见 SOC-u_{socv} 的关系非常可靠，故只要得到准确的 u_{socv}，则根据 SOC-u_{socv} 曲线就能估算准确的 SOC。针对 SOCV 法长时间静置的缺点，申彩英等[10]利用电池的开路端电压 OCV(open circuit voltage)u_{o} 作为 u_{socv}，提高了 SOC 估算速度，但只适用于小容量的磷酸铁锂电池。孙艳艳等[11]用 20 min 后的 u_{o} 替代 u_{socv} 得到 SOC 与真实值基本相等，但是仍需要 20 min 的等待。Mostacciuolo 等[12]通过构建龙贝格观测器估算 u_{socv} 误差在 2%以下，构建过程复杂且得到的精度一般。付浪等[13]利用拟合停车曲线建立模型来预测 u_{socv} 并与 AH 法结合估计 SOC，此法只能在停车时使用，不能实时修正 SOC。

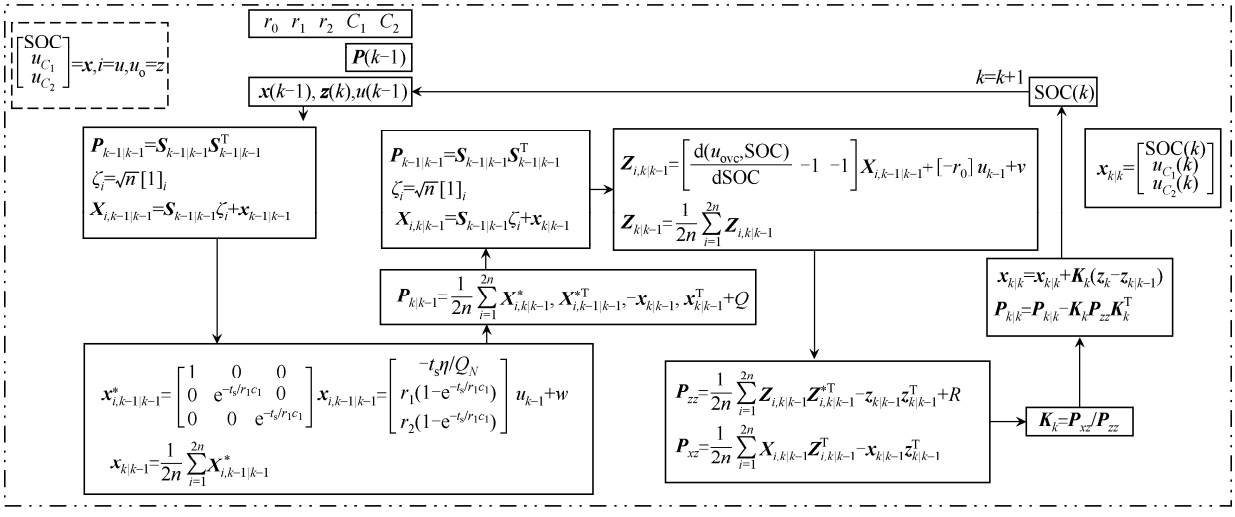
本文提出 LI-PSOCV 法，做到可以不静置实时预测 u_{socv}，进而得到 SOC。利用欧拉差分和线性插值简化计算，保留了 SOCV 法修正能力强的优点，克服了 SOCV 法需静置的缺点。实验证明方法稳定，精度在 1%以下，适合工程实际开发应用，大大提高了传统 SOCV 方法的应用范围。

1　基本原理

PSOCV 法以电池 SOC-u_{socv} 曲线作为估算 SOC 的主要特征依据，估算电池 SOC 的流程如图 1(a)所示。



(a) PSOCV流程



(b) CKF流程

图 1　PSOCV 流程和 CKF 流程

Fig. 1 Flow charts of PSOCV and CKF

容积卡尔曼滤波 CKF(cubature Kalman filter)算法的流程如图 1(b)所示。通过比较可知，PSOCV 法估算流程简单、计算环节少。而 CKF 算法结构复杂，且计算涉及到矩阵运算，易受矩阵非正定的影响。

2 电池模型

基于精度与计算量的考虑选择二阶 RC 等效电路模型如图 2 所示。图中：u_o 为端电压；i 为充放电电流；r_0 为欧姆内阻；r_1、r_2 和 C_1、C_2 分别为电池的极化电阻和极化电容；u_{socv} 为电池的内电动势，数值上等于静置的 u_o。

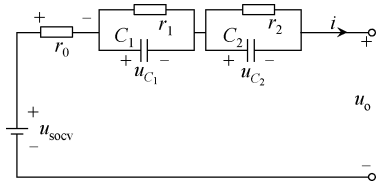


图 2 二阶 RC 电路模型

Fig. 2 Second-order RC circuit model

设定 i 为输入量，u_{socv} 为输出量，u_{C_1}、u_{C_2} 为状态变量，可写出状态空间方程为

$$\frac{\mathrm{d}u_{C_p}}{\mathrm{d}t}=-\frac{1}{r_pC_p}\cdot u_{C_p}+\frac{1}{r_p}\cdot i \qquad p=1,2 \tag{1}$$

$$u_{socv}=u_o+u_{C_1}+u_{C_2}+r_0 i \tag{2}$$

采用欧拉差分对状态方程进行离散[14]。在 k 时刻采用前、中、后项差分向后递推，原理为

$$\begin{cases}\dfrac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t}=\dfrac{y(t+\Delta t)-y(t)}{\Delta t}\\ \dfrac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t}=\dfrac{y(t+\Delta t)-y(t-\Delta t)}{2\Delta t}\\ \dfrac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t}=\dfrac{y(t)-y(t-\Delta t)}{\Delta t}\end{cases} \tag{3}$$

令 $k=t$，$\Delta t=t_s$，$t+\Delta t=k+1$，$t-\Delta t=k-2$，将式(3)分别代入式(1)，化简后即得到状态方程的前项差分公式、中项差分公式、后项差分公式分别为

$$u_{C_p}(k)=\left(1-\frac{t_s}{r_pC_p}\right)\cdot u_{C_p}(k-1)+\frac{t_s}{C_p}\cdot i(k-1) \tag{4}$$

$$u_{C_p}(k)=u_{C_p}(k-2)-\frac{2t_s}{r_pC_p}\cdot u_{C_p}(k-1)+\frac{2t_s}{C_p}\cdot i(k-1) \tag{5}$$

$$u_{C_p}(k)=\left(\frac{r_pC_p}{r_pC_p+t_s}\right)\cdot u_{C_p}(k-1)+\frac{r_pt_s}{r_pC_p+t_s}\cdot i(k) \tag{6}$$

式中，t_s 为采样周期。

输出方程在 k 时刻离散化的公式为

$$u_{socv}(k)=u_o(k)+u_{C_1}(k)+u_{C_2}(k)+r_0\cdot i(k) \tag{7}$$

综上，利用前、中、后项差分得到了 3 种离散的状态空间方程。方程的 i 与 u_o 可以测量。u_{C_1}、u_{C_2} 可以由状态方程差分递推得到，因此可以计算得到 u_{socv}。得到的 u_{socv} 跳变剧烈，采用“加权值滤波法”平滑曲线，具体为

$$u_{socv}(k)=w\cdot u_{socv}(k-1)+(1-w)u_{socv}(k) \qquad k\geqslant 3 \tag{8}$$

式中，w 为权重系数，取值 0.97。故根据 u_{socv} 与 SOC-u_{socv} 即可查询得到当前 SOC 的大小。

3 参数辨识

在常温下对标称容量为 3 A·h 的 18650 型号锂电池进行混合脉冲功率特性 HPPC(hybrid pulse power characterization)实验，为了安全只进行脉冲、恒流放电的混合实验，得到端电压 u_o 的波形如图 3 所示。

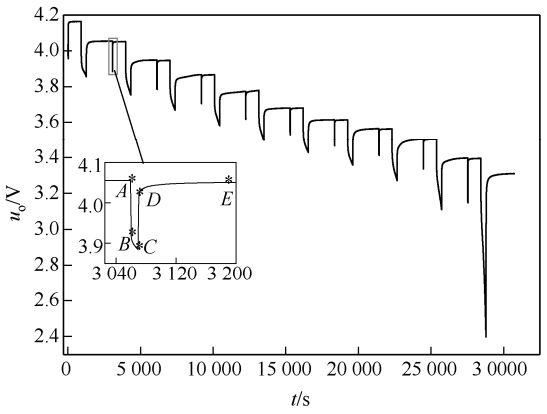


图 3 HPPC 端电压曲线

Fig. 3 Curve of terminal voltage under HPPC operating condition

脉冲放电时的电压波形如图 3 的局部放大图

所示，标记点从左到右依次为 A、B、C、D、E 点。阶跃电流作用瞬间 r_1、r_2 被 C_1、C_2 短路，此时 A—B 点电压的变化主要由 r_0 引起，利用电压的变化量除以脉冲电流的大小即可得到 r_0 的值，C—D 点同理。故当前 SOC 节点的 r_0 可表示为

$$r_0 = \frac{(u_A - u_B) + (u_D - u_C)}{2i_{\text{pulse}}} \tag{9}$$

式中：u_A、u_B、u_C、u_D 分别为 A、B、C、D 点处的电池电压；i_{pulse} 为脉冲放电电流。

D—E 点主电路中的电流为 0，故 r_0 上的电压为 0，此时没有充放电操作，故 u_{socv} 不变，端电压变化主要是由 2 个 RC 网络的自放电引起。C_1、C_2 的零输入响应可根据“三要素法”求得，因此端电压可表示为

$$u_{\text{o}} = u_{\text{socv}} - ir_1\text{e}^{-t/r_1C_1} - ir_2\text{e}^{-t/r_2C_2} \tag{10}$$

利用 MATLAB 的“自定义函数拟合工具箱”输入函数

$$f(x) = \alpha - \beta\text{e}^{-ax} - \gamma\text{e}^{-bx} \tag{11}$$

式中，α、β、γ、a、b 为待辨识的参数。SOC=0.3 处拟合曲线如图 4 所示。将式(10)与式(11)的参量一一对应即可得到 r_1、r_2、C_1、C_2 的分离公式[15]为

$$\begin{cases} r_1 = \dfrac{\beta}{i} \\ r_2 = \dfrac{\gamma}{i} \\ C_1 = \dfrac{1}{ar_1} \\ C_2 = \dfrac{1}{br_2} \end{cases} \tag{12}$$

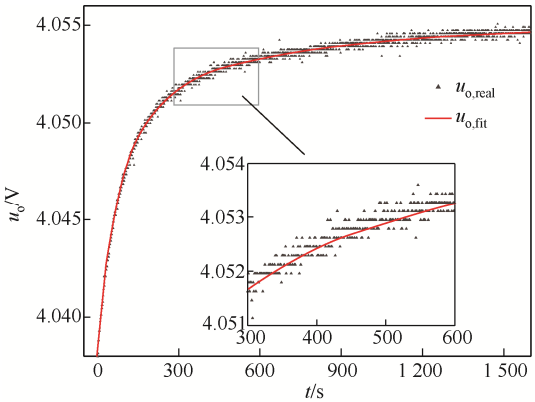


图 4　自定义函数拟合曲线

Fig. 4 Fitting curve of custom function

参数辨识结果见表 1，其中 u_{socv} 的大小是选取静置 30 min 后的端电压，SOC-u_{socv} 曲线如图 5 所示。

表 1　参数辨识结果

Tab. 1 Identification results of parameters

SOC	U_{socv}/V	r_0/Ω	r_1/Ω	r_2/Ω	C_1/F	C_2/F
0.9	4.054	0.054	0.016 1	0.005 95	2 071	2 981
0.8	3.948	0.046	0.015 8	0.006 32	2 095	12 444
0.7	3.867	0.042	0.014 1	0.009 52	1 842	23 622
0.6	3.773	0.041	0.015 6	0.013 16	2 271	93 686
0.5	3.681	0.041	0.015 6	0.008 56	2 500	89 770
0.4	3.614	0.041	0.014 8	0.004 54	2 409	38 511
0.3	3.564	0.042	0.014 6	0.005 14	2 353	21 623
0.2	3.502	0.043	0.015 5	0.009 59	2 632	23 100
0.1	3.396	0.046	0.013 6	0.017 37	2 189	28 747

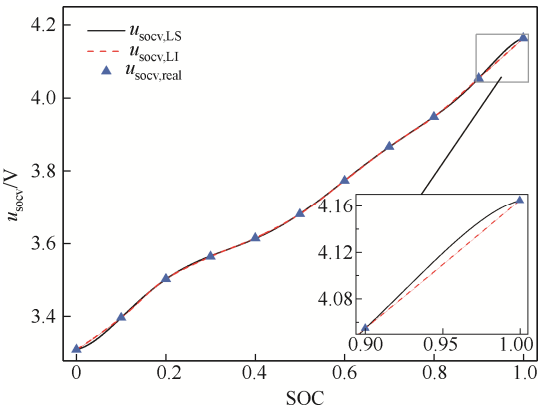


图 5　u_{socv} 拟合曲线

Fig. 5 Fitting curve of u_{socv}

4　参数拟合

参数拟合使用一次 Newton 插值多项式即线性插值 LI(liner interpolation)进行参数拟合[16]。

表 1 中的数据通过 LI 拟合与 8 阶最小二乘法 LS(least square)拟合对比，如图 5 和图 6 所示，本文展示以真实 SOC 为自变量的 C_2、u_{socv} 变化曲线。LI 拟合曲线只受两端的真值点影响，更契合局部变化不受整体数据影响。从图 6 的放大图可知 LI 拟合在真值点处等于真值，而 LS 拟合受整体真值的影响，其曲线在真值点邻域内与真实值不等。LS 拟合阶次变高会出现局部“龙格”现象，曲线在真

值附近剧烈振荡，如图 6 SOC=[0.8,1]时的图像所示。LI 拟合是一次插值，计算量小，容易开发应用，也不会出现“龙格”现象。故 LI 比 LS 更适合拟合电池参数，更加稳定可靠。

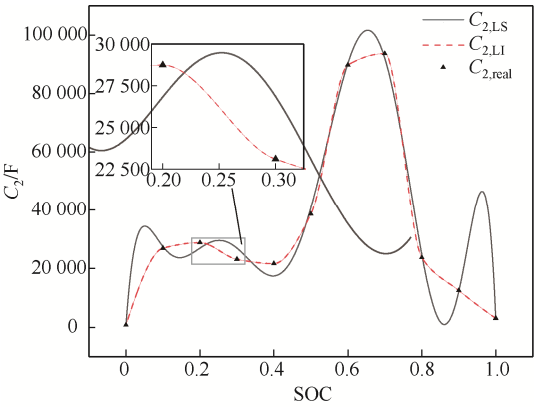


图 6 C_2 拟合曲线

Fig. 6 Fitting curve of C_2

5 结果分析

本文使用最大绝对误差 Max-AE(maximum absolute error)、平均绝对误差 MAE(mean absolute error)和均方根误差 RMSE(root mean square error)来进行误差分析。

在 HPPC 工况下，3 种差分离散模型的端电压误差对比见表 2。使用 LS、LI 2 种方式进行参数拟合的端电压比较如图 7 所示，误差数值比较见表 2，其中 Inf 表示无穷大。分析表 2 数据知，前、后项差分区别不大，而中项差分递推发散，不适用电路模型离散化，因此本文选择前项差分模型。在相同工况数据与差分模型的条件下 LI 拟合的 MAE 与 RMSE 均优于 LS 拟合。

表 2 端电压误差对比

Tab. 2 Comparison of terminal voltage errors

方式		Max-AE /mV	MAE /mV	RMSE /mV
前项	LI	78.866	3.945	6.547
	LS	78.325	4.332	7.489
后项		79.024	3.944	6.545
中项		Inf	Inf	Inf

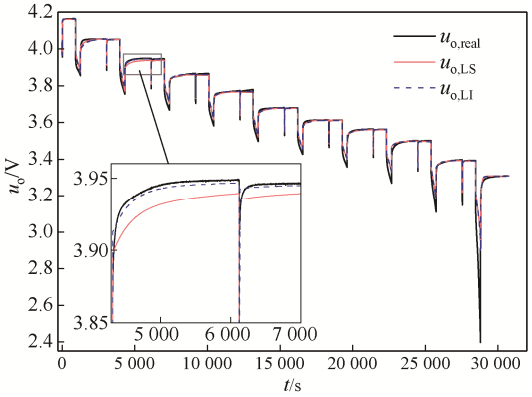


图 7 HPPC 工况端电压曲线

Fig. 7 Terminal voltage curves under HPPC operating condition

5.1 HPPC 工况

基于 HPPC 工况，控制其他变量相同的情况下对 LS-PSOCV、LI-PSOCV、LI-CKF 算法进行比较，SOC 图像如图 8 所示，误差数值见表 3。

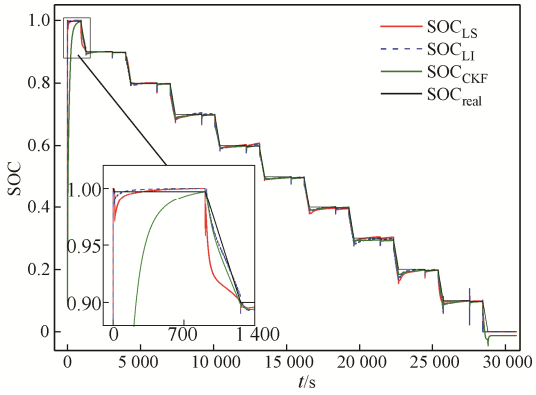


图 8 HPPC 工况 SOC 曲线

Fig. 8 SOC curves under HPPC operating condition

表 3 HPPC 工况的 SOC 对比

Tab. 3 Comparison of SOC under HPPC operating condition

参数	LS-PSOCV	LI-PSOCV	LI-CKF
数据量/个	307 000	307 000	307 000
采样周期/s	0.1	0.1	0.1
算法 SOC 初值	0.1	0.1	0.1
收敛周期/个	1	1	3 500
总运行时间/s	10	4	52
Max-AE/%	90	90	90
MAE/%	0.57	0.49	0.76
RMSE/%	1.12	0.95	2.98

通过 LS-PSOCV 和 LI-PSOCV 的比较，从图 8 的放大图可以看出，LI 拟合参数计算得到的 SOC 更加贴合真实值，SOC 的 MAE 与 RMSE 均比 LS 小，且算法总运行时间约为 LS 的一半。

通过 LI-PSOCV 和 LI-CKF 的比较可以看出，以 AH 原理建立的 CKF 算法收敛速度慢于 PSOCV 法。PSOCV 法不受 SOC 初值偏离的影响，仅需要 1 个采样周期就可以瞬间跳变收敛，而 CKF 需要 3 500 个采样周期才可收敛到真实值附近，这大大影响了 CKF 算法的整体精度。收敛速度体现了 SOCV 法与 AH 法本质原理的不同。同时，由于 CKF 流程多、计算复杂，HPPC 工况总的运行时间约为 PSOCV 法的 13 倍。通过表 3 的具体 SOC 误差数值比较可知 HPPC 工况下 PSOCV 法的精度高于传统的 CKF 算法。

5.2 UDDS 工况

对该电池进行 UDDS 工况测试，常温下 SOC 从 1 循环放电到 0.1。利用复杂工况数据进一步对 PSOCV 与 CKF 算法进行比较。

端电压曲线如图 9 所示，其 Max-AE 为 138.74 mV，MAE 为 26.82 mV，RMSE 为 33.63 mV。数据表明，LI 参数拟合的前项差分模型在 UDDS 工况依然有较好的精度。PSOCV 与 CKF 算法估算 SOC 曲线对比如图 10 所示，具体数值见表 4。从表 4 的数据可以看出，UDDS 工况下 PSOCV 法的各项指标均优于传统的 CKF 算法。

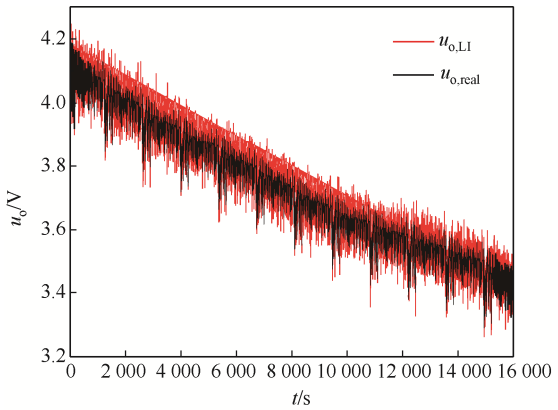


图 9　UDDS 工况端电压曲线

Fig. 9 Terminal voltage curves under UDDS operating condition

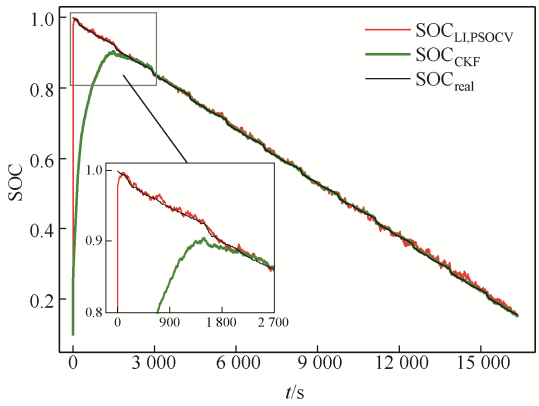


图 10　UDDS 工况 SOC 曲线

Fig. 10 SOC curves under UDDS operating condition

表 4　UDDS 工况的 SOC 对比

Tab. 4 Comparison of SOC under UDDS operating condition

参数	LI-PSOCV	LI-CKF
数据量/个	16 350	16 350
采样周期/s	1	1
算法 SOC 初值	0.1	0.1
收敛周期/个	1	1 300
总运行时间/s	0.85	3.18
Max-AE/%	90	90
MAE/%	0.48	1.99
RMSE/%	0.94	8.05

6　结语

本文提出了 LI-PSOCV 估算 SOC 的方法，基于 HPPC 工况与 UDDS 工况，证明 LI-PSOCV 法在保证 SOC 估算精度的同时可以克服传统基于 AH 原理卡尔曼滤波算法计算复杂、收敛速度慢的问题。在 2 种工况下 PSOCV 估计 SOC 的精度在 1%以下，同时在 SOC 初值偏离 0.9 时可以在 1 个采样周期迅速收敛到真实值附近。此外，通过欧拉前项差分与线性插值进一步简化计算，在数据量相同时总体运行时间要远小于传统 CKF 算法，适合嵌入式系统开发应用。

参考文献：

[1]　王语园，安盼龙，惠亮亮. 基于卡尔曼滤波算法的电池状态估计[J]. 电源学报, 2024, 22(4): 243-250.

Wang Yuyuan, An Panlong, Hui Liangliang. Battery state estimation based on Kalman filter algorithm [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(4): 243-250. (in Chinese)

[2] 刘迪, 李琳, 姜晓健. 基于安时积分法和 UKF 的锂电池 SOC 估测[J]. 新型工业化, 2021, 11(11): 125-128.
Liu Di, Li Lin, Jiang Xiaojian. SOC estimation of lithium battery based on ampere-hour integration method and UKF [J]. The Journal of New Industrialization, 2021, 11 (11): 125-128. (in Chinese)

[3] 贾先屹, 王顺利, 曹文, 等. 基于二阶 RC 等效电路和 SR-DUKF 算法的锂电池 SOC 估算研究[J]. 电源学报, 2024, 22(4): 236-242.
Jia Xianyi, Wang Shunli, Cao Wen, et al. Research on estimation of lithium battery SOC based on second-order RC equivalent circuit and SR-DUKF algorithm [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(4): 236-242. (in Chinese)

[4] 凌六一, 吴贤圆, 王星凯, 等. 基于 FFRLS-AUKF 的锂电池参数在线辨识及 SOC 估计[J]. 安徽理工大学学报(自然科学版), 2023, 43(1): 1-7.
Ling Liuyi, Wu Xianyuan, Wang Xingkai, et al. Online parameter identification and SOC estimation of lithium battery based on FFRLS-AUKF [J]. Journal of Anhui University of Science and Technology (Natural Science), 2023, 43(1): 1-7. (in Chinese)

[5] 王超. 基于 BP 神经网络修正优化的锂电池 SOC 与 SOH 协同估计策略研究[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2023.
Wang Chao. Research on co-estimation strategy of SOC and SOH for lithium batteries based on BP neural network modification and optimization [D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2023. (in Chinese)

[6] 陈东, 高文根, 李鹏飞, 等. 磷酸铁锂电池 SOC-OCV 曲线特性研究[J]. 黑龙江工业学院学报(综合版), 2021, 21(12): 89-94.
Chen Dong, Gao Wengen, Li Pengfei, et al. Study on SOC-OCV curve characteristics of $LiFePO_4$ Li-ion batteries [J]. Journal of Heilongjiang University of Technology (Comprehensive Edition), 2021, 21(12): 89-94. (in Chinese)

[7] 肖占龙, 郑岳久, 李相俊, 等. 变温下磷酸铁锂电池的 SOC 估计方法研究[J]. 电源学报, 2024, 22(6): 199-206.
Xiao Zhanlong, Zheng Yuejiu, Li Xiangjun, et al. Study on SOC estimation method for $LiFePO_4$ battery at variable temperature [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(6): 199-206. (in Chinese)

[8] 吴红杰, 谢旺, 黄宏成, 等. 温度对锂离子电池脉冲充放电特性的影响[J]. 新型工业化, 2013, 3(10): 48-53.
Wu Hongjie, Xie Wang, Huang Hongcheng, et al. Influence of temperature on Lithium ion battery pulse charge and discharge characteristics [J]. New Industrialization Straregy, 2013, 3(10): 48-53. (in Chinese)

[9] Huang C, Wang L. Gaussian process regression-based modelling of lithium-ion battery temperature-dependent open-circuit-voltage [J]. Electronics Letters, 2017, 53(17): 1214-1216.

[10] 申彩英, 左凯. 基于开路电压法的磷酸铁锂电池 SOC 估算研究[J]. 电源技术, 2019, 43(11): 1789-1791.
Shen Caiying, Zuo Kai. Research on SOC estimation of $LiFePO_4$ batteries based on open circuit voltage method [J]. Chinese Journal of Power Sources, 2019, 43(11): 1789-1791. (in Chinese)

[11] 孙艳艳, 周雪松, 游祥龙, 等. 基于开路电压法的电池荷电状态估算修正[J]. 内燃机与配件, 2019(19): 225-226.
Sun Yanyan, Zhou Xuesong, You Xianglong, et al. Estimation and correction of battery state of charge based on open circuit voltage method [J]. Internal Combustion Engine & Parts, 2019(19): 225-226. (in Chinese)

[12] Mostacciuolo E, Iannelli L, Natella D, et al. Parameters identification for open circuit voltage characteristic in battery models [C]// 2023 IEEE International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles & International Transportation Electrification Conference (ESARS-ITEC). Venice, Italy, 2023: 1-6.

[13] 付浪, 杜明星, 刘斌, 等. 基于开路电压法与卡尔曼滤波法相结合的锂离子电池 SOC 估算[J]. 天津理工大学学报, 2015, 31(6): 9-13.
Fu Lang, Du Mingxing, Liu Bin, et al. Estimation of lithium-ion battery SOC based on combination of open-

circuit voltage and Kalman filter [J]. Journal of Tianjin University of Technology, 2015, 31(6): 9-13. (in Chinese)

[14] Lin Peng, Jin Peng, Zhang Hongyin. Identification and fast measurement method of open-circuit voltage [J]. Journal of the Electrochemical Society, 2023, 170(3): 030525.

[15] 赵佳美. 基于二阶 EKF 的锂离子电池 SOC 估计的建模与仿真[D]. 西安: 西安科技大学, 2018.
Zhao Jiamei. Modeling and simulation of SOC estimation of lithium-ion battery based on second-order EKF [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2018. (in Chinese)

[16] 许峰. 数值分析[M]. 安微: 中国科学技术大学出版社，2017: 25-28, 81-83.
Xu Feng. Numerical Analysis [M]. Anhui: China University of Science and Technology Press, 2017: 25-28, 81-83. (in Chinese)



凌六一

作者简介：

凌六一(1980—)，男，博士，教授。研究方向：检测技术与智能信息处理。E-mail：lyling@aust.edu.cn。

张虎(1998—)，男，通信作者，硕士研究生。研究方向：电池状态检测。E-mail：2022200992@aust.edu.cn。

张婷(1998—)，女，硕士研究生。研究方向：电池状态检测。E-mail：2022200810@aust.edu.cn。

杨翀(1998—)，男，硕士研究生。研究方向：电池状态检测。E-mail：2021200773@aust.edu.cn。

祁靓(1999—)，女，硕士研究生。研究方向：电池状态检测。E-mail：2021200960@aust.edu.cn。

(责任编辑：孙美菊)