DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2025.6.300 中图分类号：TM912 文献标志码：A

一种高精度磷酸铁锂电池 OCV-SOC 曲线获取方法

林加顺，周 娟(中国电源学会会员)，吴乃豪(中国电源学会学生会员)，杨晓全
(中国矿业大学电气工程学院，徐州 221008)

摘要：准确的开路电压特性 OCV-SOC(open-circuit voltage-state of charge)曲线是保证锂离子电池建模精度的基础。静置法与涓流法在获取磷酸铁锂电池 OCV-SOC 曲线时分别存在无法描述非静置点 OCV 特性与极化效应影响的问题，为此，基于对磷酸铁锂电池特性的分析，结合静置法与涓流法提出 1 种高精度磷酸铁锂电池 OCV-SOC 曲线获取方法。该方法以分段形式拟合的涓流放电曲线为优化对象，基于静置法测量数据与一阶RC等效电路模型设计约束条件，采用差分进化方法寻优获取OCV-SOC优化曲线。实验结果表明，OCV-SOC优化曲线能够精确模拟磷酸铁锂电池的OCV特性。相比静置法获取的OCV-SOC曲线，基于OCV-SOC优化曲线进行的电池建模与SOC估算精度更高，其模型精度提升41.8%，SOC估算精度提升58.3%。

关键词：磷酸铁锂电池；开路电压；分段拟合；差分进化

High-precision OCV-SOC Curve Acquisition Method for $LiFeO_4$ Battery

LIN Jiashun, ZHOU Juan, *Member*, *CPSS*, WU Naihao, *Student Member*, *CPSS*, YANG Xiaoquan
(School of Electrical Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China)

Abstract: The accurate open-circuit voltage-state of charge (OCV-SOC) curve is a basis for ensuring the modeling accuracy of lithium-ion battery. The OCV-SOC curves of $LiFeO_4$ battery obtained by a low-current OCV test cannot describe the OCV characteristics at a non-testing point, while those obtained by an incremental OCV test are interfered by the polarization effect. Therefore, based on the analysis of the characteristics of $LiFeO_4$ battery, a high-precision OCV-SOC curve acquisition method for $LiFeO_4$ battery is proposed by combining the low-current OCV test and incremental OCV test. This method takes the incremental discharge curve which is fitted in piecewise form as its optimization object, designs constraints based on the low-current OCV test data and first-order RC equivalent circuit model, and uses the differential evolution method to acquire the OCV-SOC optimization curve. Experimental results show that the OCV-SOC optimization curve can accurately simulate the OCV characteristics of $LiFeO_4$ battery. Compared with the OCV-SOC curve obtained by the low-current OCV test, the battery modeling and SOC estimation based on the OCV-SOC optimization curve has a higher accuracy, with the model accuracy increasing by 41.8% and SOC estimation accuracy increasing by 58.3%.

Keywords: $LiFeO_4$ battery; open-circuit voltage (OCV); piecewise fitting; differential evolution

锂离子电池凭借循环寿命长、能量密度高、无污染等优点被广泛应用于储能与新能源汽车等领域，是执行“双碳”目标的重要助力[1]。为保证锂离子电池安全可靠运行，必须对电池状态进行科学监测与风险评估。开路电压OCV(open-circuit voltage)是锂离子电池的重要参数之一，其在一定温度下与电池的荷电状态SOC(state of charge)呈现一一对应的关系，对应关系可描述为OCV-SOC曲线[2-3]。

收稿日期：2022-11-02；**修回日期：**2023-01-02，2023-02-13；
录用日期：2023-03-07；**网络首发日期：**2023-05-17
基金项目：江苏省研究生科研与实践创新计划资助项目(KYCX22_2539)
This work is supported by Graduate Research & Practice Innovation Program of Jiangsu Province under the grant KYCX22_2539

OCV-SOC 曲线的精度关系到电池模型的参数辨识结果，会间接影响电池 SOC 的估算精度[4-5]。因此，获取准确的 OCV-SOC 曲线十分重要。

目前，OCV-SOC 曲线获取方法主要有 2 类：静置法与涓流法[6]。静置法是将电池以一恒定倍率充/放电至 SOC 测试点(通常以 10%SOC 为间隔)后充分静置(时间 1 h 以上)，然后继续充/放电至下一测试点，重复此过程直至电池 SOC 为 100%或 0%，将静置后恢复稳定的电池端电压视为当前 SOC 测试点下的 OCV，采用多项式形式拟合 OCV 与 SOC 间的数据关系获取 OCV-SOC 曲线函数[7]。该方法利用充分静置降低电池充放电过程中的极化电压，能够精确获取 SOC 测试点处的开路电压。涓流法将电池以 1 个极小电流(通常小于 C_r/20 倍率，其中 C_r 为电池额定容量)进行一次完整的充放电测试[8]，该方法以等效电路模型为基础，认为电池在受到极小电流作用时内部的化学反应较为稳定，其极化效应可以忽略不计[9]，此时电池 OCV 可以视为放电电压与充电电压的平均值。然而，使用静置法获取的 OCV-SOC 曲线仅能在 SOC 测试点处保证 OCV 的准确性，在非 SOC 测试点处无法准确描述电池 OCV 特性；而涓流法本质上是 1 种理想化的近似，使用其获取的 OCV-SOC 曲线在电压变化趋势上符合实际 OCV 特性，但在电压数值上仍受到变化微小的极化电压的干扰[10-11]。并且，在应用上述方法获取磷酸铁锂电池 OCV-SOC 曲线时，受制于磷酸铁锂电池特殊的电池特性，方法不足带来的影响会被进一步放大[12-13]。针对现有 OCV-SOC 曲线获取方法的不足，已有少部分研究尝试从方法联合的角度入手，通过结合静置法与涓流法以期获得高精度的 OCV-SOC 曲线。文献[10]针对传统静置法在非 SOC 测试点处无法描述电池 OCV 特性和涓流法得到的 OCV-SOC 曲线精度不足等问题，提出 1 种基于粒子群优化算法的 OCV-SOC 曲线优化方法。然而，该方法并非针对开路电压特性较为特殊的磷酸铁锂电池展开研究，而且在原理上只是将涓流放电曲线进行简单平移，使其接近静置法测量数据，并未考虑涓流放电曲线精度误差的产生机理。

为准确描述磷酸铁锂电池 OCV 特性，本文利用静置法在 SOC 测试点处的准确性，结合涓流法符合实际 OCV 特性的电压变化趋势，提出 1 种高精度磷酸铁锂电池 OCV-SOC 曲线获取方法。该方法以分段形式拟合的涓流放电曲线为优化对象，基于静置法测量数据与一阶 RC 等效电路模型设计约束条件，利用差分进化方法进行寻优以达到降低涓流放电过程受极化效应影响的目的，从而获取 OCV-SOC 优化曲线。本文结合仿真实例对所提方法进行讨论，并对比现有方法，验证其优越性。

1　OCV-SOC 优化曲线获取方法

通过分析静置法与涓流法的特点，可以发现，若能降低涓流放电过程中极化效应的影响，那么涓流放电曲线可近似认定为真实的 OCV-SOC 曲线。基于此，本节给出 1 种高精度磷酸铁锂电池 OCV-SOC 曲线获取方法的具体过程：①针对磷酸铁锂电池特殊的电池特性，使用分段形式拟合涓流放电曲线提升拟合精度；②将分段形式拟合的涓流放电曲线作为优化对象，以静置法测量数据与涓流放电曲线在特定 SOC 测试点处电压差最小为优化目标，依据一阶 RC 等效电路模型分析极化效应机理并建立优化方程，使用差分进化方法寻优以降低涓流放电过程中极化效应的影响，从而获取 OCV-SOC 优化曲线。

1.1　分段拟合

涓流放电曲线的拟合精度会影响 OCV-SOC 曲线的优化效果，图 1 给出了某磷酸铁锂电池 1/30C 放电曲线与多项式拟合结果，可以看出，使用多项式形式拟合磷酸铁锂电池的涓流放电曲线时，受其中特殊电压环节(电压平台期、电压陡变)的影响，拟合结果在局部 SOC 区域内表现不佳[5]。

为了提升涓流放电曲线的拟合精度，本文采用 1 种分段拟合方法，将待拟合曲线按单一变化趋势分段进行拟合，其具体实现过程为：①曲线分段，

依据磷酸铁锂电池的特性划分子 SOC 段，在分段过程中避免单 SOC 段出现多个特殊电压环节；②拟合形式选取，针对每一个子 SOC 段的特点，选取拟合精度较高的拟合形式；③曲线融合，将各子 SOC 段在首尾小范围拓展(0~5%SOC)后进行拟合，以避免在拟合过程中仅追求曲线主体拟合效果而忽略末端变化趋势，导致各子 SOC 段连接点处的电压相差较大。

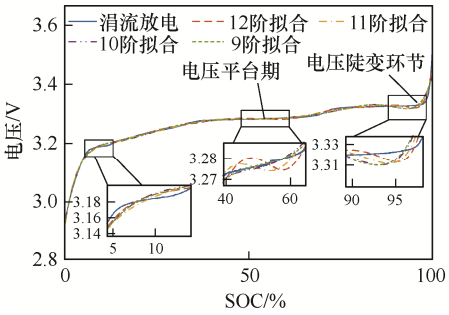


图 1 滑流放电曲线多项式拟合结果

Fig. 1 Polynomial fitting results of incremental discharge curve

1.2 滑流放电曲线优化

1.2.1 建立优化方程

在实际过程中难以保证静置法与滑流法测试的起始电压相同，导致滑流放电曲线与真实 OCV-SOC 曲线在 SOC 轴上存在细微偏移。为此，本文引入待确定参数 w_1 用于校准滑流放电曲线在 SOC 轴上的偏移。

图 2 为一阶 RC 等效电路模型[14]，图中：U_{oc} 为电池开路电压；R_0、R_1、C 分别为电池欧姆内阻、极化内阻、极化电容。分析一阶 RC 等效电路模型可知，当电池由静置状态进入恒流放电状态时，电池端电压 U 与开路电压 U_{oc} 间满足

$$U_{oc}-U=R_0I+R_1I(1-e^{-\frac{t}{R_1C}}) \tag{1}$$

式中：t 为放电时间；I 为电流。

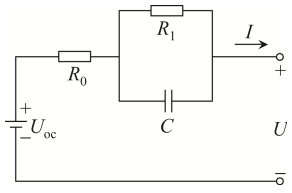


图 2 一阶 RC 等效电路模型

Fig. 2 First-order RC equivalent circuit model

滑流法测试中采集的滑流放电电压 U_{td} 实际为带有细微极化效应影响的电池端电压。在滑流放电过程的前中期，电池的工作电流较小，电池特性稳定，此时可将一阶 RC 等效电路模型参数(R_0、R_1、C)视为恒定值，则式(1)可转化为

$$U_{op}=U_{td}+w_2+w_3(1-e^{-\frac{t}{m}}) \tag{2}$$

式中：U_{op} 为 OCV-SOC 优化曲线上对应电压，用于模拟电池实际 OCV；w_2、w_3 为引入的待确定参数，w_2=R_0I、w_3=R_1I，用于模拟电池欧姆电压与极化稳态电压；m 为未知常量，m=R_1C。

由安时积分法[15]可知，在放电过程中电池的 SOC 变化满足

$$S_{oc}=1-\frac{n}{Q_{max}}\int I\mathrm{d}t \tag{3}$$

式中：S_{oc} 为电池 SOC 值；Q_{max} 为电池额定容量；n 为充放电效率。在恒流放电过程中，充放电效率可视为恒定值[16]，则电池 SOC 与放电时间 t 间满足

$$S_{oc}=1-zt \tag{4}$$

式中，z 为未知常数。

将式(4)代入式(2)可得

$$U_{op}=U_{td}+w_2+w_3(1-e^{-\frac{1-S_{oc}}{w_4}}) \tag{5}$$

式中，w_4 为引入的待确定参数，w_4=mz，用于模拟滑流放电初期极化电压的变化过程。

在滑流放电后期，电池电量较低，电池特性急剧变化，此时无法认定一阶 RC 等效电路模型参数(R_0、R_1、C)为恒定值，导致式(5)难以描述该阶段电池特性的变化规律。经过海量数据拟合后发现，在电池 SOC 低于 30%时电池的电压变化符合在式(5)基础上叠加经验公式

$$U_{sup}=w_5(e^{-w_6S_{oc}}-e^{-0.25S_{oc}}) \tag{6}$$

式中：U_{sup} 为叠加电压；w_5、w_6 为引入的待确定参数。

综上所述，全 SOC 阶段的优化方程为

$$\begin{cases} U_{\mathrm{op}}(S_{\mathrm{oc}})=U_{\mathrm{td}}(S_{\mathrm{oc}}+w_1)+w_2+w_3(1-\mathrm{e}^{-\frac{1-S_{\mathrm{oc}}}{w_4}})+ \\ \quad w_5(\mathrm{e}^{-w_6 S_{\mathrm{oc}}}-\mathrm{e}^{-0.25 w_6}) \quad 0\% \leqslant S_{\mathrm{oc}} < 30\% \\ U_{\mathrm{op}}(S_{\mathrm{oc}})=U_{\mathrm{td}}(S_{\mathrm{oc}}+w_1)+w_2+w_3(1-\mathrm{e}^{-\frac{1-S_{\mathrm{oc}}}{w_4}}) \\ \quad 30\% \leqslant S_{\mathrm{oc}} \leqslant 100\% \end{cases} \tag{7}$$

1.2.2　寻优算法

在 1.2.1 节所述优化方程的基础上，将涓流放电曲线与静置法在对应 SOC 测试点处的电压之差的和最小为优化目标，其目标函数为

$$\begin{cases} G=\sum_{i=1}^{11}\sqrt{[U_{\mathrm{op}}(i)-U_{\mathrm{ss}}(i)]^2} \\ \arg\ \min(G) \end{cases} \tag{8}$$

式中：$U_{\mathrm{ss}}(i)$为静置法在第 i 个 SOC 测试点处的电压；$U_{\mathrm{op}}(i)$为 OCV-SOC 优化曲线在第 i 个 SOC 测试点处的电压。约束条件依据涓流放电曲线与静置法在对应 SOC 测试点的电压对比选择最大上下限范围。

所提方法采用差分进化 DE(differential evolution)算法求解上述优化问题以获取 OCV-SOC 优化曲线。DE 算法是由 Rainer S 和 Kenneth P 于 1997 年在遗传算法等进化思想的基础上提出的[17]，该算法比较稳定，收敛速度较快，控制参数较少，且控制参数设置对结果的影响不大[18]。

2　仿真分析

2.1　测试条件

测试选用全新单体 ANR26650 磷酸铁锂电池，其详细参数见表 1。使用 NEWARE BT4000 测试仪在 25 ℃恒温箱中对电池分别进行涓流法、静置法及联邦城市驾驶工况 FUDS(federal urban driving schedule)测试。

表 1　电池参数

Tab. 1 Battery parameters

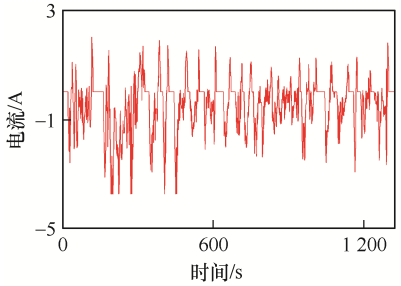
参数	数值
标称容量/(A·h)	2.5
标称电压/V	3.2
充电截止电压/V	3.6
放电截止电压/V	2.0
工作温度/℃	−30~55

涓流法与静置法测试的具体步骤如下。

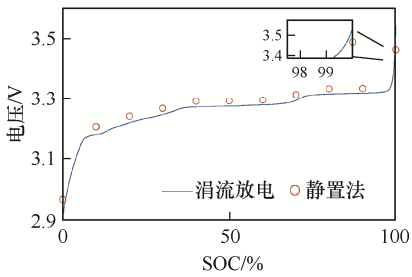
(1)静置法测试：将电池以《ANR26650 电池手册》规定的恒流恒压 CC-CV(constant-current to constant-voltage)方式充至满电后静置 4 h，以 1/3C 倍率恒流放电，在 SOC 为 100%、90%、80%、70%、60%、50%、40%、30%、20%时静置 4 h[9]记录当前电压，在 10%、0%时静置 6 h[13]记录当前电压。

(2)涓流法测试：将电池以《ANR26650 电池手册》规定的 CC-CV 方式充至满电后静置 4 h，以 1/30C 倍率恒流放电至电池截止电压。

图 3 为 ANR26650 磷酸铁锂电池的实验测试结果。



(a)单循环FUDS工况电流



(b)静置法与涓流法测试结果

图 3　实验测试结果

Fig. 3 Results of experimental test

2.2　分段拟合效果分析

依据 1.1 节所述分段拟合方法拟合涓流放电曲线，其中，基于磷酸铁锂电池 OCV 特性[19]与涓流放电曲线特征选取 90%SOC 与 25%SOC 为分段点，以保证各个子 SOC 段内仅存在单个特殊电压环节。通过反复拟合，选用 MATLAB 软件中 curve fitting tool 提供的有理数形式[20]拟合子 SOC 段，其基础

方程为

$$f(x)=\frac{\sum_{1}^{n+1}p_i x^{n+1-i}}{x^m+\sum_{1}^{m}q_j x^{m-j}} \qquad 0\leqslant n,m\leqslant 5 \tag{9}$$

将各子 SOC 段首尾拓展 2%SOC 后进行拟合(0%~27%、23%~92%、88%~100%)，以降低组合后的段间电压差。上述选取细节，由于篇幅所限不再赘述。涓流放电曲线分段拟合函数为

$$U_{\mathrm{td}}(S_{\mathrm{oc}})=\begin{cases}\dfrac{\sum_{i=1}^{6}p_1(i)\cdot S_{\mathrm{oc}}^{6-i}}{S_{\mathrm{oc}}^3+\sum_{i=1}^{3}q_1(i)\cdot S_{\mathrm{oc}}^{3-i}} & 90\%<S_{\mathrm{oc}}\leqslant 100\%\\ \dfrac{\sum_{i=1}^{6}p_2(i)\cdot S_{\mathrm{oc}}^{6-i}}{S_{\mathrm{oc}}^5+\sum_{i=1}^{5}q_2(i)\cdot S_{\mathrm{oc}}^{5-i}} & 25\%<S_{\mathrm{oc}}\leqslant 90\%\\ \dfrac{\sum_{i=1}^{6}p_3(i)\cdot S_{\mathrm{oc}}^{6-i}}{S_{\mathrm{oc}}^3+\sum_{i=1}^{3}q_3(i)\cdot S_{\mathrm{oc}}^{3-i}} & 0\%\leqslant S_{\mathrm{oc}}\leqslant 25\%\end{cases} \tag{10}$$

式(10)中相关系数取值见表 2。

表 2 式(10)相关系数值

Tab. 2 Values of correlation coefficients in Eq. (10)

系数	数值
p_1	187 140.173，−868 978.624，1 613 589.851，−1 496 200.474，691 480.736，−127 027.735
p_2	3.461，−3.825，−1.806，3.869，−1.666，0.229
p_3	−0.192，0.141，3.272，−0.271，−0.001，0.000 815
q_1	453.279，−1 024.684，571.516
q_2	−1.019，−0.705，1.259，−0.529，0.072
q_3	−0.076 5，−0.001 32，0.000 28

图 4 为涓流放电曲线的分段拟合结果与 12 阶多项式拟合结果的对比，不同拟合结果的均方根误差 RMSE(root mean squared error)见表 3，其中 RMSE 的计算公式为

$$R_{\mathrm{MSE}}=\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{t=1}^{n}(A_t-F_t)^2} \tag{11}$$

式中：A_t为实际值；F_t为预测值。

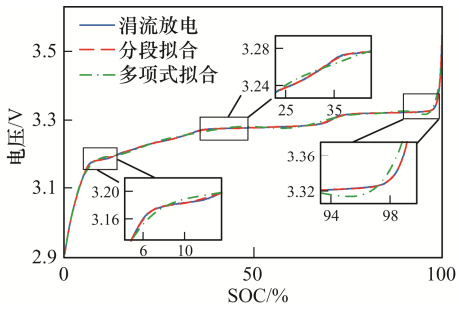


图 4 涓流放电曲线拟合结果

Fig. 4 Fitting results of incremental discharge curve

表 3 涓流放电曲线拟合结果的 RMSE

Tab. 3 RMSE of incremental discharge curve fitting results

拟合方式	R_{MSE}/V
分段拟合	0.000 498
12 阶多项式拟合	0.004 700

由涓流放电曲线拟合结果可见，相比 12 阶多项式拟合曲线，涓流放电曲线的分段拟合结果(下称分段拟合曲线)在局部 SOC 区域内表现出较好的拟合效果，在全 SOC 周期内具有较高的拟合精度，其 RMSE 为 0.000 498 V。该结果证明分段拟合方法能够有效降低磷酸铁锂电池放电过程中特殊电压环节对拟合结果的影响，提高曲线拟合精度。

2.3 OCV-SOC 优化曲线效果分析

由图 3 所示的涓流法与静置法测试结果可知，使用涓流法获取的涓流放电曲线在电压变化趋势上接近真实 OCV 变化趋势，但在电压数值上存在不可忽略的极化效应干扰。为了降低涓流法中极化效应的影响，本节使用 1.2 节所述涓流放电曲线优化方法对分段拟合曲线进行优化，基于差分进化算法获取的待确定参数寻优结果见表 4。为了验证 OCV-SOC 优化曲线对电池 OCV 特性的模拟效果，

表 4 参数寻优结果

Tab. 4 Parameter optimization result

参数	结果
w_1	−0.003 153 5
w_2	0.014 733 6
w_3	0.007 652 2
w_4	0.027 363 9
w_5	0.044 849 1
w_6	24.933 993 2

本节从 OCV-SOC 曲线、电池模型及 SOC 估算 3 个角度进行分析。其中，由于涓流放电曲线与真实 OCV-SOC 曲线存在明显差距，本文仅以静置法拟合曲线作为比较对象。

2.3.1　OCV-SOC 曲线

图 5 对比了使用不同方法获取的 OCV-SOC 曲线，其中静置法拟合曲线为静置法测试数据的 12 阶多项式拟合结果。可以看出，OCV-SOC 优化曲线在 SOC 测量点处的电压与真实 OCV 相符，在非 SOC 测量点处能够依据涓流放电电压变化趋势模拟实际 OCV 特性。结果表明，所提优化方法能够有效降低涓流放电过程中极化效应的影响。

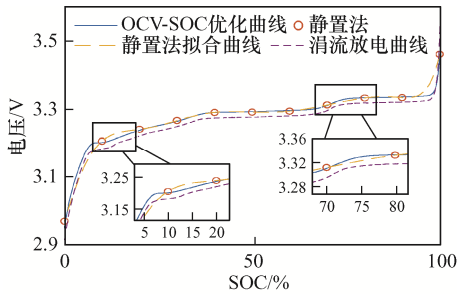


图 5　不同 OCV-SOC 曲线对比

Fig. 5 Comparison among different OCV-SOC curves

2.3.2　电池模型

为了分析 OCV-SOC 优化曲线对电池模型精度的影响，本节基于文献[21]提出的高精度锂离子电池建模方案，分别建立了基于静置法拟合曲线的常规二阶 RC 等效电路模型(简称常规模型)与基于 OCV-SOC 优化曲线的优化二阶 RC 等效电路模型(简称优化模型)。

图 6 给出了 FUDS 工况下基于 2 种模型估算的电池端电压，同时，采用指标 RMSE 定量分析电池模型的精确程度，FUDS 工况下基于 2 种模型的端电压估算值与实际值间的 RMSE、平均绝对百分比误差 MAPE(mean absolute percentage error)及最大电压误差见表 5。其中 MAPE 为

$$M_{\mathrm{APE}}=\frac{1}{n}\sum_{t=1}^{n}\left|\frac{A_t-F_t}{A_t}\right| \tag{12}$$

实验结果表明，相比常规模型，优化模型具有更高的模型精度。从以上模型验证结果可以看出，OCV-SOC 优化曲线能够有效提升锂离子电池的建模精度，证明 OCV-SOC 优化曲线更接近电池实际 OCV 特性。

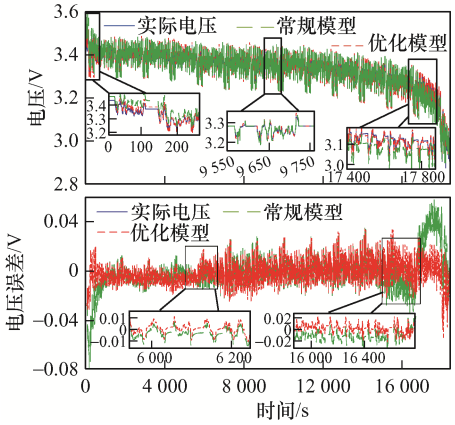


图 6　FUDS 工况下基于 2 种模型估算的电池端电压

Fig. 6 Battery terminal voltage estimation based on two models under FUDS condition

表 5　2 种模型端电压误差的误差比较

Tab. 5 Comparison of terminal voltage errors between two models

模型	R_{MSE}/V	M_{APE}/%	最大电压误差/V
常规模型	0.013 98	0.275 1	0.078 7
优化模型	0.008 13	0.188 3	0.054 6

2.3.3　SOC 估算

为了评估 OCV-SOC 优化曲线对 SOC 估算精度的影响，本节使用 SOC 估算方法中应用广泛的扩展卡尔曼滤波 EKF(extended Kalman filter)算法[22]估算锂离子电池 SOC，分别在 FUDS 工况下基于常规模型与优化模型进行 SOC 估算，将使用高精度测量仪器获取的电池 SOC 值作为参考。EKF 算法的估算精度受限于电池模型精度，在算法参数相同的情况下，其估算结果在一定程度上可表征 OCV-SOC 曲线的精确程度。

图 7 给出了 FUDS 工况下基于 2 种模型估算的电池 SOC，FUDS 工况下基于 2 种模型的 SOC 估算值与参考值间的 RMSE、MAPE 及最大 SOC 估算误差见表 6。可以看出，在 FUDS 工况下，相比常规模型，基于优化模型获取的 SOC 估算结果精度更高。该结果证明使用 OCV-SOC 优化曲线构造的电池模型精度更高，进一步验证了 OCV-SOC 优

化曲线更接近实际 OCV 特性。

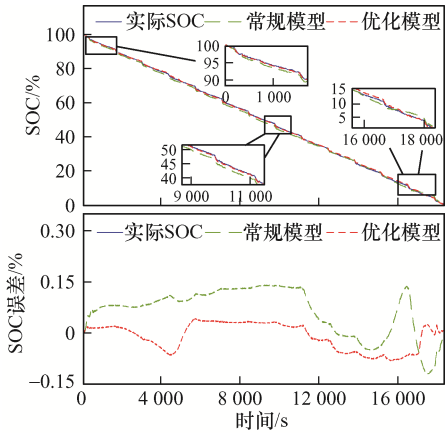


图 7 FUDS 工况下基于 2 种模型估算的电池 SOC

Fig. 7 Battery SOC estimation based on two models under FUDS condition

表 6 2 种模型 SOC 估算误差的误差比较

Tab. 6 Comparison of SOC estimation errors between two models

模型	R_{MSE}/%	M_{APE}/%	最大 SOC 误差/%
常规模型	0.947 4	3.624	1.417
优化模型	0.394 5	1.644	0.814

3 结语

针对静置法与涓流法难以准确模拟磷酸铁锂电池开路电压特性的问题，围绕静置法与涓流法所受磷酸铁锂电池影响展开分析，在此基础上提出 1 种高精度磷酸铁锂电池 OCV-SOC 曲线获取方法。该方法利用涓流法符合实际开路电压特性的电压变化趋势结合静置法在 SOC 测试点处的准确性，以分段形式拟合的涓流放电曲线为优化对象，基于静置法测量数据与一阶 RC 等效电路模型设计约束条件，采用差分进化方法寻优获取 OCV-SOC 优化曲线，能够有效降低磷酸铁锂电池特性对 OCV-SOC 曲线获取过程的影响。FUDS 工况下的实验结果表明，采用本文所提方法获取的 OCV-SOC 优化曲线更接近磷酸铁锂电池真实的开路电压特性。相比采用静置法获取的 OCV-SOC 曲线，基于 OCV-SOC 优化曲线构建的二阶 RC 等效电路模型具有更高的模型精度，其 RMSE 为 0.008 13 V，模型精度提升 41.8%；基于 OCV-SOC 优化曲线利用 EKF 算法进行的 SOC 估算表现出更好的估算效果，其 RMSE 为 0.394 5%，SOC 估算精度提高 58.3%。所提方法为精确模拟磷酸铁锂电池开路电压特性提供了 1 种新思路，具有一定的实用推广价值。

参考文献：

[1] 明彤彤, 赵晶, 王晓磊, 等. 基于改进 LSTM 的脉冲大倍率工况下锂电池 SOC 估计[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(8): 144-150.
Ming Tongtong, Zhao Jing, Wang Xiaolei, et al. SOC estimation of a lithium battery under high pulse rate condition based on improved LSTM [J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(8): 144-150. (in Chinese)

[2] 成燕, 郑林弘, 刘江. 基于模态分解和时间序列的锂电池健康状态估计[J]. 电源学报. 2025, 23(5): 241-250.
Cheng Yan, Zheng Linhong, Liu Jiang. Estimation of state-of-health of lithium-ion batteries based on modal decomposition and time series [J]. Journal of Power Supply. 2025, 23(5): 241-250. (in Chinese)

[3] 吴健, 尹泽, 李豪, 等. 基于分数阶理论的锂离子电池高频等效电路模型[J]. 电工技术学报, 2021, 36(18): 3902-3910.
Wu Jian, Yin Ze, Li Hao, et al. High-frequency equivalent circuit model of lithium-ion battery based on fractional order theory [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(18): 3902-3910. (in Chinese)

[4] 马锐, 贾学翠, 张永康, 等. 基于三次样条插值法的储能锂电池建模与参数辨识[J]. 电源学报, 2023, 21(1): 133-141.
Ma Rui, Jia Xuecui, Zhang Yongkang, et al. Modeling and parameter identification of Li-ion battery for energy storage based on cubic spline interpolation [J]. Journal of Power Supply, 2023, 21(1): 133-141. (in Chinese)

[5] Zhang Ruifeng, Xia Bizhong, Li Baohua, et al. A study on the open circuit voltage and state of charge characterization of high capacity lithium-ion battery under different temperature [J]. Energies, 2018, 11(9): 2408.

[6] Ren Zhong, Du Changqing, Wu Zhongyi, et al. A

comparative study of the influence of different open circuit voltage tests on model-based state of charge estimation for lithium-ion batteries [J]. International Journal of Energy Research, 2021, 45(9): 13692-13711.

[7] Wei Zhongbao, Zou Changfu, Leng Feng, et al. Online model identification and state-of-charge estimate for lithium-ion battery with a recursive total least squares-based observer [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(2): 1336-1346.

[8] Lin Cheng, Yu Quanqing, Xiong Rui, et al. A study on the impact of open circuit voltage tests on state of charge estimation for lithium-ion batteries [J]. Applied Energy, 2017, 205: 892-902.

[9] 陈嵩, 康鑫, 朱志贤, 等. 考虑迟滞效应的电池极化电压误差修正方法[J]. 电网技术, 2020, 44(1): 316-322.
Chen Song, Kang Xin, Zhu Zhixian, et al. Polarization voltage error correction considering battery's hysteresis effect [J]. Power System Technology, 2020, 44(1): 316-322. (in Chinese)

[10] 来鑫, 李云飞, 郑岳久, 等. 基于 SOC-OCV 优化曲线与 EKF 的锂离子电池荷电状态全局估计[J]. 汽车工程, 2021, 43(1): 19-26.
Lai Xin, Li Yunfei, Zheng Yuejiu, et al. An overall estimation of state-of-charge based on SOC-OCV optimization curve and EKF for lithium-ion battery [J]. Automotive Engineering, 2021, 43(1): 19-26. (in Chinese)

[11] 郭宝甫, 张鹏, 王卫星, 等. 基于 OCV-SOC 曲线簇的磷酸铁锂电池 SOC 估算研究[J]. 电源技术, 2019, 43(7): 1125-1128, 1139.
Guo Baofu, Zhang Peng, Wang Weixing, et al. Research on SOC estimation of $LiFePO_4$ battery based on OCV-SOC curve cluster [J]. Chinese Journal of Power Sources, 2019, 43(7): 1125-1128, 1139. (in Chinese)

[12] Yu Quanqing, Wan Changjiang, Li Junfu, et al. An open circuit voltage model fusion method for state of charge estimation of lithium-ion batteries [J]. Energies, 2021, 14(7): 1797.

[13] 李建林, 李雅欣, 黄碧斌, 等. 退役动力电池一致性评估及均衡策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(12): 1-7.
Li Jianlin, Li Yaxin, Huang Bibin, et al. Research on consistency evaluation and control strategy of a retired power battery [J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(12): 1-7. (in Chinese)

[14] 谷苗, 夏超英, 田聪颖. 基于综合型卡尔曼滤波的锂离子电池荷电状态估算[J]. 电工技术学报, 2019, 34(2): 419-426.
Gu Miao, Xia Chaoying, Tian Congying. Li-ion battery state of charge estimation based on comprehensive Kalman filter [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(2): 419-426. (in Chinese)

[15] 程从智, 徐晨, 戴珂, 等. MMC-BESS 电池荷电状态三级均衡控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(15): 100-108.
Cheng Congzhi, Xu Chen, Dai Ke, et al. Three-level balancing control for battery state-of-charge based on MMC-BESS [J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(15): 100-108. (in Chinese)

[16] 姚芳, 张楠, 黄凯. 锂离子电池状态估算与寿命预测综述[J]. 电源学报, 2020, 18(3): 175-183.
Yao Fang, Zhang Nan, Huang Kai. Review of state estimation and life prediction for lithium-ion batteries [J]. Journal of Power Supply, 2020, 18(3): 175-183. (in Chinese)

[17] 王烁, 谷正气, 韩征彤, 等. 基于改进离散差分进化算法的桁架优化[J]. 计算机工程, 2021, 47(1): 275-283.
Wang Shuo, Gu Zhengqi, Han Zhengtong, et al. Truss optimization based on improved discrete differential evolution algorithm [J]. Computer Engineering, 2021, 47(1): 275-283. (in Chinese)

[18] 叶年辉, 龙腾, 武宇飞, 等. 基于 Kriging 代理模型的约束差分进化算法[J]. 航空学报, 2021, 42(6): 324580.
Ye Nianhui, Long Teng, Wu Yufei, et al. Kriging-assisted constrained differential evolution algorithm [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42(6): 324580. (in Chinese)

[19] Xiong Rui, Yu Quanqing, Wang Leyi, et al. A novel method to obtain the open circuit voltage for the state of charge of lithium-ion batteries in electric vehicles by using H infinity filter [J]. Applied Energy, 2017, 207: 346-353.

[20] 穆尔. MATLAB 实用教程[M]. 高会生, 刘童娜, 李聪

聪，译. 北京：电子工业出版社, 2010.
Moore H. MATLAB for Engineers [M]. Gao Huisheng, Liu Tongna, Li Congcong, trans. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2010. (in Chinese)

[21] 周娟，化毅恒，刘凯，等. 一种高精度锂离子电池建模方案研究[J]. 中国电机工程学报，2019，39(21)：6394-6403.
Zhou Juan, Hua Yiheng, Liu Kai, et al. Research on a high-precision modeling scheme for lithium-ion battery [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(21): 6394-6403. (in Chinese)

[22] 巫春玲，胡雯博，孟锦豪，等. 基于最大相关熵扩展卡尔曼滤波算法的锂离子电池荷电状态估计[J]. 电工技术学报, 2021, 36(24): 5165-5175.
Wu Chunling, Hu Wenbo, Meng Jinhao, et al. State of charge estimation of lithium-ion batteries based on maximum correlation-entropy criterion extended Kalman filtering algorithm [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(24): 5165-5175. (in Chinese)



林加顺

作者简介：

林加顺(1998—)，男，硕士研究生。研究方向：锂离子电池建模及其荷电状态估算。E-mail：ljs943790347@163.com。

周娟(1976—)，女，中国电源学会会员，通信作者，博士，教授。研究方向：电能质量控制技术，电池管理系统。E-mail：zhjcumt@126.com。

吴乃豪(1999—)，男，中国电源学会学生会员，硕士研究生。研究方向：电池均衡。E-mail：845585459@qq.com。

杨晓全(1997—)，男，硕士研究生。研究方向：锂离子电池建模及其荷电状态估算。E-mail：1962598992@qq.com。

(责任编辑：郭凯凯)