

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.210244

# 退役锂离子电池健康状态快速评估方法

黄健<sup>1</sup>, 李建林<sup>2</sup>, 李征<sup>1</sup>

(1. 东华大学信息科学与技术学院, 上海 201620; 2. 储能技术工程研究中心(北方工业大学), 北京 100144)

**摘要:** 锂离子电池退役高峰期到来, 退役锂离子电池健康状态(State of Health, SOH)快速评估方法因可有效缓解电池退役问题而得到高度重视。提出一种基于层次分析(Alytic Hierarchy Process, AHP)的退役锂离子电池健康状态快速评估方法。首先选取可并行测试的健康因子并分析其可行性与有效性, 并采用相关度指数分析健康因子对电池健康状态的表达能力。在此基础上以层次分析法评估电池的健康状态。最后比较不同方法对电池健康状态评估的精度。结果表明所提方法比单要素评估精度更高, 比动态评估更容易实现, 测试时间更短。

**关键词:** 锂离子电池; 相关度; 健康状态; 层次分析; 健康因子

## A state of health rapid assessment method for decommissioned lithium-ion batteries

HUANG Jian<sup>1</sup>, LI Jianlin<sup>2</sup>, LI Zheng<sup>1</sup>

(1. Department of Information Science and Technology, Donghua University, Shanghai 201620, China; 2. Energy Storage Technology Engineering Research Center (North China University of Technology), Beijing 100144, China)

**Abstract:** The peak of lithium-ion battery obsolescence is coming, and the State of Health (SOH) rapid assessment method of decommissioned lithium-ion batteries is highly valued as an effective way to alleviate the problem of battery obsolescence. This paper proposes an SOH rapid assessment method for the decommissioned lithium-ion batteries based on an Analytic Hierarchy Process (AHP). First, it selects the health factors that can be tested in parallel and analyzes their feasibility and effectiveness. A correlation index is used to analyze the characterization ability of the health factors to the SOH of batteries. On this basis, the SOH of batteries is evaluated by AHP. Finally, the accuracy of different assessment methods is compared. The result shows that the proposed method has higher accuracy than single-element evaluation, and easier operation and shorter test time than dynamic evaluation.

This work is supported by the Key Program of National Natural Science Foundation of China (No. 51837007) and Beijing Natural Science Foundation (No. 21JC0026).

**Key words:** lithium-ion battery; correlation; state of health; analytic hierarchy process; health factor

## 0 引言

作为新能源汽车和储能两个领域的关键成分, 储能电池发展迅速<sup>[1-2]</sup>, 尤其是能量密度与功率密度较高的锂离子电池。目前动力锂离子电池存在利用率低、成本高与安全性差等问题<sup>[3-4]</sup>, 对退役锂离子电池进行梯次利用对于性能要求不高的场景, 如平抑新能源出力波动、削峰填谷、调峰调频以及家用储能与备用电源等, 可分摊电动汽车成本、延长电池使用寿命<sup>[5-7]</sup>。而健康状态评估与筛选可以保障梯

次电池具有较大的剩余价值和较好的一致性, 提高电池安全性<sup>[8-9]</sup>。

目前退役电池健康状态评估的方法主要有经验模型法<sup>[10-11]</sup>、电化学模型法<sup>[12-14]</sup>、等效电路模型法<sup>[15-17]</sup>以及基于数据驱动的抽象模型法<sup>[18-20]</sup>。经验模型法依赖大量不同工况的离线实验数据, 总结出电池健康状态关于相关因素的函数模型, 如文献[11]采用威布尔 S 型函数表征在给定温度和恒定负载下的电池放电特性, 通过高斯-牛顿非线性拟合得到电池放电特性表达式, 但该方法只对指定工况条件下有较好的估计精度; 电化学模型法对充放电过程中电池内部的物理化学过程进行建模, 评估的准确性高, 但机理复杂、建模难度大, 不适于商业用途,

**基金项目:** 国家自然科学基金重点项目资助(51837007); 北京市自然科学基金项目资助(21JC0026)

如文献[14]提出了锂阳极、固体聚合物电解质和插入复合阴极的全电池模型,该模型采用浓溶液理论,该模型求解了锂离子浓度、电流密度、温度、容量之间的关系,但该模型需要大量的结构参数和材料特性参数。等效电路模型是在电化学机理基础上将电池等效成电路模型进而对电池健康状态进行评估,简化建模过程,如文献[16]基于二阶 Thevenin 等效电路模型设计了自适应无迹卡尔曼滤波算法,辨识在变电流工况与间歇恒定电流工况下电池系统的欧姆内阻,实时估算电池的健康状态;文献[17]考虑了温度、老化和循环次数这三个因素的影响,在传统的等效电路模型上加入了循环电阻表征循环次数造成的影响。基于数据驱动的抽象模型依赖于纯数学方法来描述电池的行为,该方法的应用前提是认为电池老化是稳定的随机过程,进而根据激励和响应的关系构建数学模型。文献[19]针对测量数据中的噪声问题,结合小波去噪方法及混沌粒子群—相关向量机算法,提出了一种新的锂电池剩余寿命预测模型。

以上多种方法速度慢,且对电池型号依赖性大,适用范围窄,随着动力电池退役高峰期到来,亟需一种速度快且适用范围的电池健康状态评估方法。本文提供一种对退役锂离子电池健康状态快速评估的方法,首先根据退役电池的放电特性选取 3 个适用于电池健康状态评估的健康因子,通过试验得到健康因子在不同电池与电池循环数条件下的结果;针对锂离子电池放电特性,确定健康因子与测试的放电区间,采用 Pearson 指数分析各因子的可行性与有效性;层次分析法结合健康因子确定一个通用的权值,用以电池评估;最后分析该方法的均方根误差与平均绝对百分比误差以及不同评估方法间的差异。

## 1 健康因子选取

退役动力锂离子电池经过长期的车载使用,电池性能衰减,健康度降低,且衰减程度各异,为快速评估电池的健康状态以筛选出安全性与经济性较好的退役电池,需选取测试周期短、独立性强的健康因子来表征电池健康状态。

本文选取了 3 节健康状态不同的退役锂离子电池进行充放电循环试验,试验中所使用的退役电池为磷酸铁锂(LiFePO<sub>4</sub>)动力电池,额定电压为 3.7 V,额定容量为 3 A h,充放电截止电压分别为 4.2 V 和 2.7 V,试验采取(CC-VC)的充电工况。首先以 0.6C 恒流充电至电压达到 4.2 V,然后恒压充电直至充电电流小于 0.05 A;放电工况为 0.8C 恒流放电至电压

达到 2.7 V。

### 1.1 等幅放电时间

安时积分法可以直接估算电池容量变化,如式(1)所示,若电池的充放电电流一定,则可根据充放电时间来估计电池容量变化,简化安时积分法如式(2)所示。

$$\Delta Q = \int_{t_s}^{t_e} i(t) dt \quad (1)$$

$$\Delta Q = I \times (t_e - t_s) \quad (2)$$

式中:  $\Delta Q$  为电池容量变化量;  $t_s$  与  $t_e$  分别为充放电起始时刻与终止时刻;  $i(t)$  与  $I$  分别为充放电电流瞬时值与电流有效值。其中电池 #1 的 200 次循环放电曲线如图 1 所示。

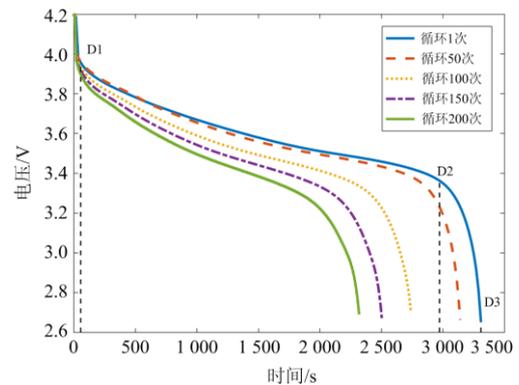


图 1 电池的放电曲线

Fig. 1 Batteries' discharge curves

从图 1 能看出: 电池在 D1 之前与 D2—D3 区间,电压迅速下降,电池放电后期是由于电池储能减少,而放电初期虽电池能量充足,但处在不稳定状态的锂离子数量较大,电池电压下降更明显<sup>[20]</sup>。D1—D2 的标称放电区域呈线性下降趋势,且占到整个放电阶段总容量的约 89%,因此标称放电区域的容量随循环次数增加而减少的趋势可以近似描述电池容量衰减现象。由于标称放电区域的线性特征,可采用一个较小的电压区间来表征整个标称放电区域,根据式(2),放电电流固定的试验过程中该电压区间的的时间跨度可表征电池容量衰减程度,即健康状态。

电压区间需满足: 1) 放电时间跨度不能太小,防止健康状态估计的误差过大; 2) 为保证测试快速性,放电时间跨度不能太大; 3) 不同健康状态电池的时间差异性明显,确保所选区间具备锂离子电池健康状态区分能力。为选取合适的电压区间,作出放电时间关于电池电压的变化率随电压变化的曲线如图 2 所示。

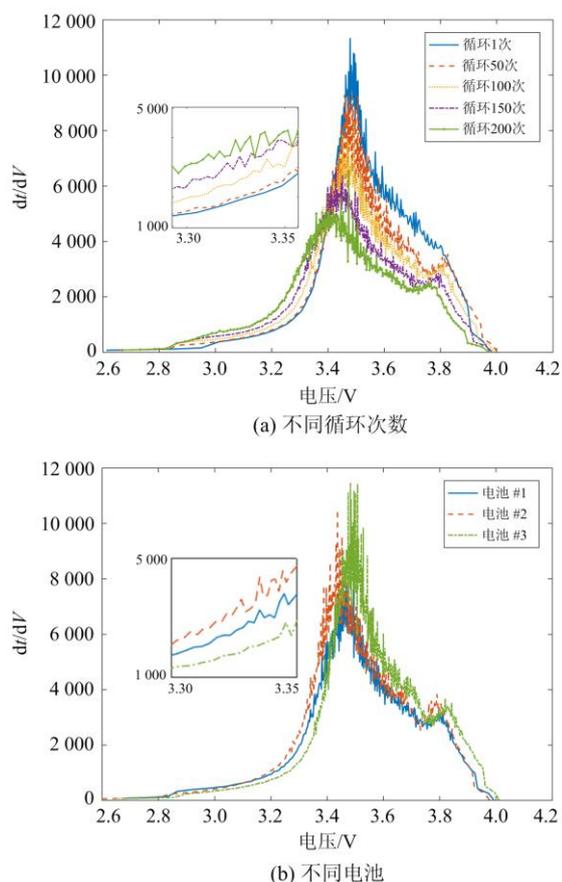


图2 电池放电时间对电压的变化率

Fig. 2 Change rate of battery discharge time to voltage

如图2所示:电压在3.2~3.7 V时,放电时间相对放电电压的变化率较大且不同循环次数与不同电池的区别明显,对比多组数据并兼顾其他健康因子的测试条件,以3.30~3.35 V作为放电区间较合适,可在最短的测量周期内得到区分度高的健康因子数据。较小的放电区间相对于较大的放电区间其测试时间缩短,但估计误差更大,因此在下面补充两个可并行测量的健康因子。

### 1.2 直流内阻

锂离子电池经过长期车载使用,健康状态降低,直流内阻会升高,直流内阻高的锂离子电池在工作中发热量更大,能量转换效率降低,伏安特性较软,带载后的标称放电区域缩小。

不同荷电状态(State of Charge, SOC)的锂离子电池内部电解质成分占比有差异,导致电池直流内阻不相同,需确定频谱时的SOC,同时考虑到其他健康因子的测试条件为3.30~3.35 V,对应的SOC约为20%,因此频谱分析选择在锂离子电池SOC为20%时进行。

### 1.3 等幅放电温升

锂离子电池的工作过程中伴随着电化学反应与电池极化,因此锂离子电池的产热来源除内阻上电流的热效应以外还有电化学反应热与极化热。锂离子电池的工作温度会对电池的使用性能造成影响,高温甚至会加剧电池老化,导致电池产生过热、爆炸的危险,危害电池安全性<sup>[21-22]</sup>。

影响锂离子电池在工作过程中产热的因素有很多,如充放电循环倍率、环境温度、电池SOC、电池健康状态等。本试验控制其他因素不变的前提下,对电池放电过程中温度的变化进行测量,得到温升随着放电电压的变化率如图3所示。

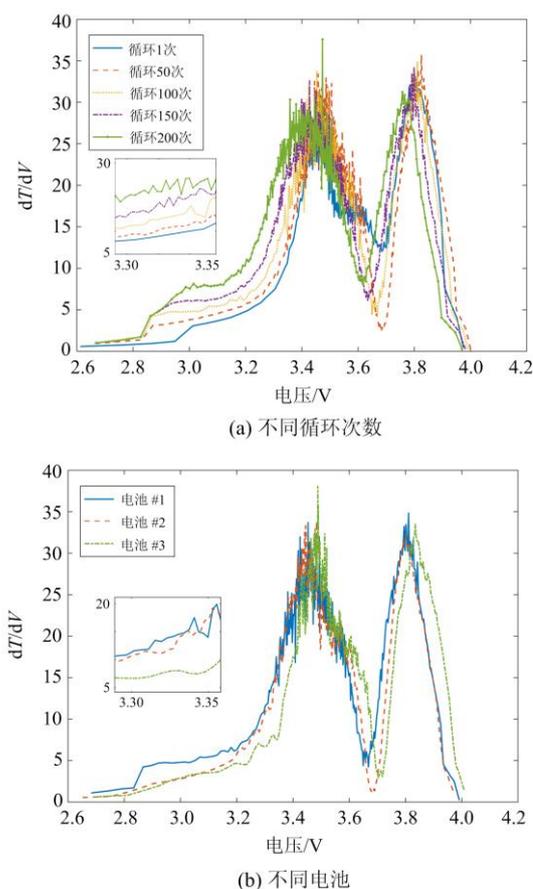


图3 电池温升对电压的变化率

Fig. 3 Change rate of battery temperature rise to voltage

从图3中看出:放电电压在3.0~3.4 V 电池温升相对电池电压的变化率较大且不同循环次数的区别明显,对比图2与图3中等幅放电时间与等幅放电温升的变化曲线,选取可并行测试的电压区间,保证测试快速性,最终以对不同健康状态的区分能力较强的3.30~3.35 V作为健康因子测试的放电区间。

### 1.4 健康因子相关度分析

为验证所选健康因子的有效性,对电池3个健康因子与SOH随电池循环次数变化的数据做归一化处理,绘制曲线如图4所示,其中电池SOH的测定方法为国标《电动汽车用动力蓄电池循环寿命要求及试验方法》所述方法<sup>[23]</sup>,归一化处理如式(3)所示。

$$R = \frac{D - D_{\min}}{D_{\max} - D_{\min}} \quad (3)$$

式中:  $R$  为归一化结果;  $D$  为参数数据;  $D_{\max}$  与  $D_{\min}$  分别为对应参数的最大值与最小值。

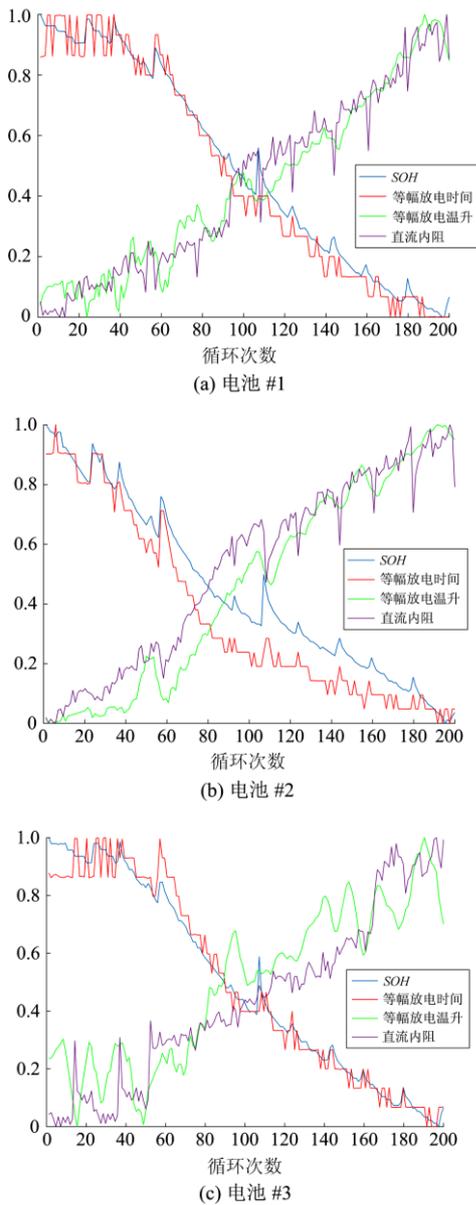


图4 归一化处理的电池SOH与3个健康因子  
Fig. 4 Normalized batteries SOH and 3 health factors

因为数据采集周期为15s,导致图中等幅放电时间曲线存在阶梯变化现象。由图4可以看出:SOH随循环次数增加大体呈下降趋势,在SOH下降的过程中,SOH与等幅放电时间曲线呈明显的正相关,SOH与等幅放电温升、直流内阻大体上呈互补关系,且3个电池均存在上述特征,证明了所选健康因子可以在一定程度上表征退役锂离子电池的SOH。为更客观、直观地描述3个健康因子与SOH的关系,下面利用Pearson指数对两者做相关度分析,如表1所示。

表1 电池的3种健康因子的Pearson结果

Table 1 Pearson results of 3 health factors for batteries

健康因子	Pearson 指数			
	电池 #1	电池 #2	电池 #3	均值
等幅放电时间	0.992 6	0.984 3	0.987 2	0.988 0
直流内阻	-0.975 4	-0.987 1	-0.955 7	-0.972 7
等幅放电温升	-0.969 7	-0.972 5	-0.944 8	-0.962 3

由表1可以看出:3个健康因子与SOH的Pearson指数绝对值均大于0.95,其中等幅放电时间的指数为正值,体现为正相关;直流内阻与等幅放电温升为负值,为负相关,与图4结果相印证,再次证明3个健康因子与SOH的相关度高,将其用于SOH估计的可行性较好。

## 2 电池健康状态评估

本文采用层次分析法评估退役锂离子电池的健康状态,层次分析法是一种定性和定量相结合的分析方法,广泛应用于决策、预测以及评估方面<sup>[24]</sup>。

层次分析法做评估通常有4个步骤:1)确定样本目标及参与评估的因素,并构建层次分析结构模型;2)评价准则层各因素的关系,并构建两两比较阵;3)采用特征向量法计算各因素的权重并进行一致性校验;4)评估各样本的目标,并进行排序。

### 2.1 层次分析结构模型

本文主要对退役锂离子电池的SOH进行快速评估,即需评估的目标;等幅放电时间、直流内阻与等幅放电温升为参与评估的因素,退役电池为待评估的样本。构建层次分析结构模型如图5所示。

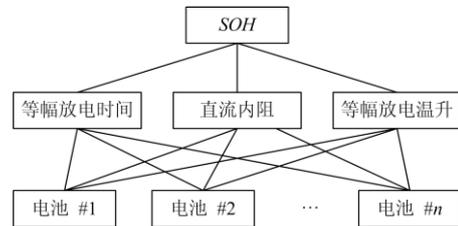


图5 电池健康状态评估方法的层次分析结构模型

Fig. 5 Analytic hierarchy process structure model for the state of health of batteries assessment method

## 2.2 成对比较阵

层次分析法采用相对尺度, 提高评估的准确度, 将两两评价因素相互比较, 根据重要程度构建成对比较阵  $A$ , 其中因素  $i$  对因素  $j$  的重要程度用  $a_{ij}$  表示,  $a_{ij}$  需满足式(4),  $a_{ij}$  的标度方法如表 2 所示。

$$\begin{cases} a_{ij} > 0 \\ a_{ij} = \frac{1}{a_{ji}} \\ A = (a_{ij})_{n \times n} \end{cases} \quad (4)$$

式中,  $n$  为评价因素数目。

表 2 重要性标度的划分

Table 2 Importance scale division

因素 $i$ 对因素 $j$ 的重要程度	$a_{ij}$
同等重要	1
稍微重要	3
较强重要	5
强烈重要	7
极端重要	9
介于两相邻判断中间	2, 4, 6, 8

两两评价因素重要性的标度是一个定性的步骤, 导致层次分析法的主观性较大, 因此本文将健康因子对于  $SOH$  的相关度作为重要性的判定, 健康因子与  $SOH$  的相关度越高则代表该健康因子在评估中的重要性越强, 增强了层次分析法的客观性, 提高了方法的合理性与可解释性。由 1.4 节得出的 3 个健康因子与  $SOH$  相关度关系可知, 等幅放电时间的相关程度稍强于直流内阻, 强于等幅放电温升; 直流内阻的相关程度略强于等幅放电温升, 但没有等幅放电时间较直流内阻的程度大, 于是构建成对比较阵为

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 4 \\ 3 & 2 & 2 \\ 1/4 & 1/2 & 1 \end{bmatrix}$$

## 2.3 一致性校验与健康状态评估

本文采用因素与目标的相关度作为重要性评判的依据, 削弱了层次分析法的主观性, 但为进一步保证成对比较阵  $A$  中相对重要性标度的合理性, 仍需进行一致性校验, 校验的过程如式(5)所示。

$$\begin{cases} CI = \frac{\max\{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n\} - n}{n - 1} \\ CR = \frac{CI}{RI_{n-2}} \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $\lambda_n$  为成对比较阵对应的特征值;  $CI$  为一致性指标,  $CI = \{0.58, 0.90, 1.12, 1.24, 1.32, 1.41, 1.45, 1.49\}$ ;  $RI$  与  $RI_{n-2}$  为随机一致性指标及其第  $n-2$  维分量;  $CR$  为一致性比率。

如果  $A$  的一致性比率  $CR$  小于 0.1, 则一致性校验通过; 否则认为  $A$  的结构不合理, 需重新标度两两因素的重要性, 直至  $CR$  小于 0.1。采用方根法求解  $A$  的最大特征根  $\lambda_{\max}$  以及对应的特征向量  $V$ , 得

$$\begin{cases} \lambda_{\max} = 3.018 \\ V = \{0.625, 0.238, 0.137\} \end{cases}$$

代入式(5)解得  $CR$  约等于 0.015 8, 小于 0.1, 通过一致性校验, 成对比较阵  $A$  结构合理, 并将特征向量  $V$  作为各评价因素的权重。则健康状态的估算方法如式(6)所示。

$$SOH = \frac{Q_{75} + (Q_{100} - Q_{75}) \times \sum_{i=1}^n \left( \frac{B_i - B_{i,75}}{B_{i,100} - B_{i,75}} \times V_i \right)}{Q_{100}} \quad (6)$$

式中:  $B_i$  与  $B_{i,100}$ 、 $B_{i,75}$  为第  $i$  项因素与  $SOH$  等于 100% 和 75% 时对应因素的平均值;  $Q_{100}$  与  $Q_{75}$  为  $SOH$  等于 100% 和 75% 时电池的容量平均值;  $V_i$  为第  $i$  项因素  $B_i$  对应的权重。

## 3 结果验证

在第 1 节给出的工况条件下, 对退役锂离子电池进行充放电试验, 获取退役锂离子电池的  $SOH$  与 3 个健康因子的数据, 对  $SOH$  为 75% 时的健康因子数值取均值, 绘制表 3 如下, 其中 100%  $SOH$  的因素值是由新电池经过测试并取均值所得。

表 3 固定  $SOH$  的因素参考值

Table 3 Fixed  $SOH$  factors reference value

健康因子	100% $SOH$ 的因素值	75% $SOH$ 的因素值
等幅放电时间/s	101.8	54.9
直流内阻/ $\Omega$	0.042 7	0.060 3
等幅放电温升/ $^{\circ}\text{C}$	0.14	0.31

将表 3 数据代入式(6)得到电池  $SOH$  估计值, 绘制电池  $SOH$  的测量值与估计值随电池循环次数的变化以及测量值与估计值的偏差值如图 6 所示。

如图 6 所示: 本文所提方法能较好估计退役锂离子电池的  $SOH$ , 其中电池#1 与#2 估计偏差除个别循环次数外均在  $\pm 2\%$  内, 而对电池#3 的估计偏差较大, 最大偏差达  $-5\%$ , 但总体偏差在  $\pm 3\%$  内。为检验所补充的健康因子直流内阻与等幅放电温升对于等幅放电时间在  $SOH$  估计中的修正作用, 在电池

SOH 评估中仅采用等幅放电时间, 绘制电池 SOH 的测量值与估计值以及两者的偏差值如图 7 所示。

对比图 6 和图 7 可知: 仅采用健康因子等幅放电时间的估计精度较差, 3 个电池的偏差值最大处分别超过 3.5%、3.5%与 9%, 且总体偏差值更为发散。对上述两种评估方式进行均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)与平均绝对百分比误差(Mean Absolute Percent Error, MAPE)处理如表 4 所示, 定量分析两种方式的估计精度。

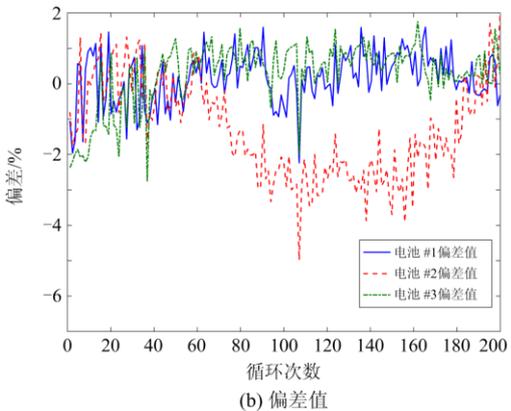
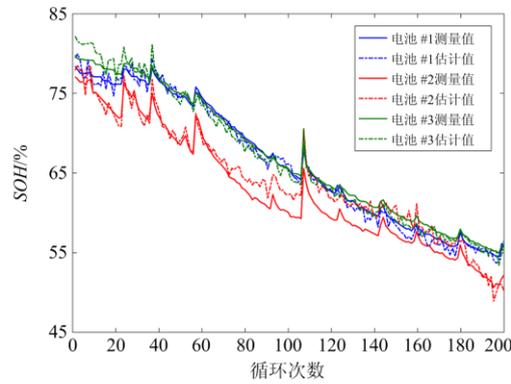


图 6 退役锂离子电池健康状态评估结果

Fig. 6 Prediction results of the SOH of decommissioned lithium-ion batteries

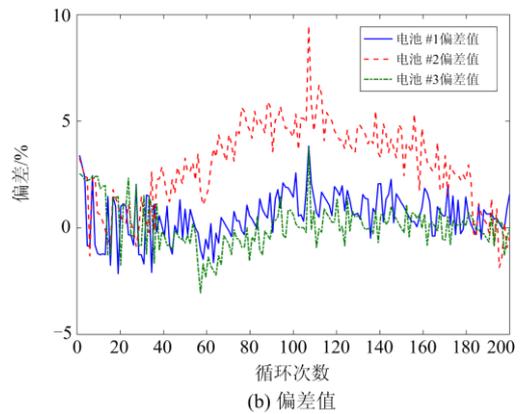
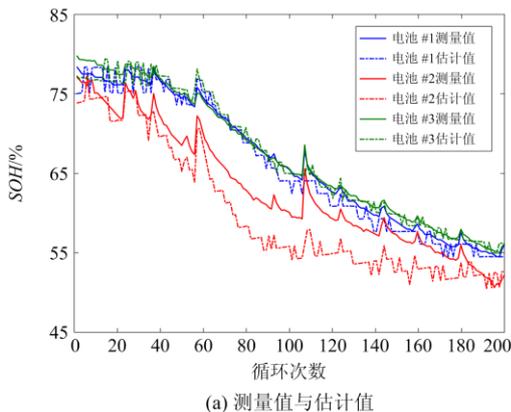


图 7 等幅放电时间的电池健康状态评估结果

Fig. 7 Prediction result of the SOH of batteries with constant amplitude discharge time

表 4 两种评估方式的 RMSE 与 MAPE

Table 4 RMSE and MAPE of two evaluation methods

电池编号	3 个健康因子		等幅放电时间	
	RMSE	MAPE/%	RMSE	MAPE/%
电池 #1	0.007 5	0.907 1	0.012 1	1.488 2
电池 #2	0.019 2	2.672 1	0.035 3	4.993 4
电池 #3	0.009 5	1.143 2	0.010 7	1.146 0

表 4 数据表明: 3 个健康因子综合评价的 RMSE 与 MAPE 均小于仅凭借等幅放电时间估算的结果, 证明本文所提方法在提高退役锂离子电池健康状态评估快速性的同时也在一定程度上弥补了缩短测试周期带来的误差放大问题。

对比现有方法中采取动态最优充电片段的电池健康状态评估方法, 其在 3.85~4.05 V 测试电池的充电容量, 测试时长在 700~1 900 s, 得到 RMSE 与 MAPE 小于 0.015 5 与 1.54% 的评估精度, 而本文方法在健康状态较差的电池评估中, 如电池 #2, RMSE 与 MAPE 达到 0.019 2 与 2.67%, 对于电池 #1 与电池 #3 的评估, 也可达到 RMSE 与 MAPE 小于 0.01 与 1.2% 的评估精度, 但本文所需的电压片段为 3.30~3.35 V, 测试时间仅为 80~165 s, 评估时间更短。

## 4 结论

本文提出了一种基于层次分析法的退役锂离子电池健康状态快速评估方法, 可有效缩短测试时间, 得到主要结论如下:

1) 等幅放电温升与等幅放电时间均是随退役锂离子电池 SOH 变化而有规律变化的参数, 可用作电池 SOH 估计。

2) 等幅放电温升与等幅放电时间的电压跨度过大会导致退役锂离子电池 SOH 估计的精度与鲁

棒性变差, 过大则会导致测试时间长。

3) 采用多个健康因子互补估计退役锂离子电池 *SOH* 可改善单一健康因子评估中偏差值较大的缺点, 提高评估精度, 可在保证评估精度满足要求的前提下, 缩短测试时间。

### 参考文献

- [1] 程俊, 曲妍, 李媛, 等. 基于剩余电量估计的电池组充放电均衡策略[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(3): 122-129.  
CHENG Jun, QU Yan, LI Yuan, et al. Charge and discharge equalization strategy for batteries packs based on remaining capacity estimation[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(3): 122-129.
- [2] LIU Chunyang, QIN Yinghao, ZHANG Hengxu. Real-time scheduling strategy for microgrids considering operation interval division of DGs and batteries[J]. Global Energy Interconnection, 2020, 3(5): 442-452.
- [3] 孙立明, 杨博. 蓄电池/超导混合储能系统非线性鲁棒分数阶控制[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(22): 76-83.  
SUN Liming, YANG Bo. Nonlinear robust fractional-order control of batteries/SMES hybrid energy storage systems[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(22): 76-83.
- [4] 邹幽兰. 基于退役锂离子动力电池容量、内阻和荷电状态的建模与参数估计[D]. 长沙: 中南大学, 2014.  
ZOU Youlan. Modeling and parameter estimation of retired lithium-ion power batteries based on capacity, resistance and the state of charge[D]. Changsha: Central South University, 2014.
- [5] MURTY V V S N, KUMAR A. Multi-objective energy management in microgrids with hybrid energy sources and batteries energy storage systems[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2020, 5(1): 1-20. DOI: 10.1186/s41601-019-0147-z.
- [6] 张宝锋, 童博, 冯仰敏, 等. 电化学储能在新能源发电侧的应用分析[J]. 热力发电, 2020, 49(8): 13-18.  
ZHANG Baofeng, TONG Bo, FENG Yangmin, et al. Application analysis of electrochemical energy storage technology in new energy power generation side[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(8): 13-18.
- [7] 许欣慧, 舒征宇, 李世春. 基于退役电池在多储能场景下梯级利用的经济运行研究[J]. 智慧电力, 2020, 48(12): 58-64.  
XU Xinhui, SHU Zhengyu, LI Shichun. Research on economic operation of retired batteries cascade utilization in multiple energy storage scenarios[J]. Smart Power, 2020, 48(12): 58-64.
- [8] 李建林, 李雅欣, 周喜超, 等. 储能商业化应用政策解析[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(19): 168-178.  
LI Jianlin, LI Yaxin, ZHOU Xichao, et al. Analysis of energy storage policy in commercial application[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(19): 168-178.
- [9] 王莉, 谢乐琼, 张干, 等. 锂离子电池一致性筛选研究进展[J]. 储能科学与技术, 2018, 7(2): 194-202.  
WANG Li, XIE Leqiong, ZHANG Gan, et al. Research progress in the consistency screening of Li-ion batteries[J]. Energy Storage Science and Technology, 2018, 7(2): 194-202.
- [10] RAKHMATOV D, VRUDHULA S, WALLACH D A. A model for batteries lifetime analysis for organizing applications on a pocket computer[J]. IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems, 2003, 11(6): 1019-1030.
- [11] SYRACUSE K C, CLARK W D K. A statistical approach to domain performance modeling for oxyhalide primary lithium batteries[C] // The Twelfth Annual Battery Conference on Applications and Advances, January 14-17, 1997, Long Beach, CA, USA: 163-170.
- [12] XU X L, MI J F, FAN M S, et al. Study on the performance evaluation and echelon utilization of retired LiFePO<sub>4</sub> power batteries for smart grid[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 213: 1080-1086.
- [13] LÜ C, SONG Y K, ZHENG J, et al. In situ monitoring of lithium-ion batteries degradation using an electrochemical model[J]. Applied Energy, 2019, 250: 685-696.
- [14] DOYLE M, FULLER T F, NEWMAN J. Modeling of galvanostatic charge and discharge of the lithium/polymer/insertion cell[J]. Journal of Electrochemical Society, 1993, 140(6): 1526-1533.
- [15] 陈杨明. 基于 SIMULINK 的退役动力电池建模与仿真[J]. 云南电力技术, 2019, 47(6): 2-5.  
CHEN Yangming. Modeling and simulation of retired lithium-ion power batteries based on Simulink[J]. Yunnan Electric Power, 2019, 47(6): 2-5.
- [16] 颜湘武, 邓浩然, 郭琪, 等. 基于自适应无迹卡尔曼滤波的动力电池健康状态检测及梯次利用研究[J]. 电工技术学报, 2019, 34(18): 3937-3948.  
YAN Xiangwu, DENG Haoran, GUO Qi, et al. Study on the state of health detection of power batteries based on adaptive unscented Kalman filters and the batteries echelon utilization[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(18): 3937-3948.
- [17] 肖蕙蕙, 王志强, 李山, 等. 电动汽车动力电池锂离子电池建模与仿真研究[J]. 电源学报, 2012, 10(1): 41-44.

- XIAO Huihui, WANG Zhiqiang, LI Shan, et al. Modeling and simulation of dynamic lithium-ion batteries for electric vehicle[J]. Journal of Power Supply, 2012, 10(1): 41-44.
- [18] 张朝龙, 何怡刚, 袁莉芬. 基于 CPSO-RVM 的锂电池剩余寿命预测方法[J]. 系统仿真学报, 2018, 30(5): 1935-1940.
- ZHANG Chaolong, HE Yigang, YUAN Lifan. Approach for lithium-ion batteries RUL prognostics based on CPSO-RVM[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(5): 1935-1940.
- [19] 高金辉, 朱迎正. 基于新电源模型的动力锂电池荷电状态估计研究[J]. 河南师范大学学报: 自然科学版, 2019, 47(1): 58-61, 92.
- GAO Jinhui, ZHU Yingzheng. Study on state estimation of power lithium batteries based on new power supply model[J]. Journal of Henan Normal University: Natural Science Edition, 2019, 47(1): 58-61, 92.
- [20] 周雅夫, 孙宵宵, 黄立建, 等. 面向全生命周期的锂电池健康状态估计[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2021, 53(1): 55-62.
- ZHOU Yafu, SUN Xiaoxiao, HUANG Lijian, et al. A state of health estimation method for full lifetime of lithium-ion batteries[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2021, 53(1): 55-62.
- [21] 张向倩, 高月, 黄飞. 锂离子动力电池安全问题及防控技术分析[J]. 现代化工, 2019, 39(8): 7-10.
- ZHANG Xiangqian, GAO Yue, HUANG Fei. Analysis on safety problems of dynamic lithium-ion batteries and review on prevention and control technologies[J]. Modern Chemical Industry, 2019, 39(8): 7-10.
- [22] 赵斌, 呼如威, 蒋东方, 等. 高寒高海拔地区微网储能锂电池系统优化设计[J]. 中国电力, 2020, 53(5): 128-134.
- ZHAO Bin, HU Ruwei, JIANG Dongfang, et al. Optimized design of lithium batteries system for microgrid energy storage in severely cold and high elevation regions[J]. Electric Power, 2020, 53(5): 128-134.
- [23] 中华人民共和国标准. 电动汽车用动力蓄电池循环寿命要求及试验方法: GB/T 31484—2015[S]. 北京: 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 2008.
- Standards of the People's Republic of China. Cycle life requirements and test methods for traction batteries of electric vehicle: GB/T 31484—2015[S]. Beijing: General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, 2008.
- [24] 周剑, 罗添允, 李智勇, 等. 基于改进可拓层次分析的停电影响综合评估[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(3): 31-38.
- ZHOU Jian, LUO Tianyun, LI Zhiyong, et al. Comprehensive evaluation of power failure based on improved extension analytic hierarchy process[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(3): 31-38.

---

收稿日期: 2021-03-08

作者简介:

黄健(1996—), 男, 硕士研究生, 研究方向为大规模储能技术; E-mail: 2191458@mail.dhu.edu.cn

李建林(1976—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 研究方向为大规模储能技术。E-mail: dkyljl@163.com

(编辑 周金梅)