

doi: 10.3969/j.issn.1674-8425(z).2020.02.003

本文引用格式:殷娟娟,王伟贤,袁小溪,等.退役锂电池快速评价及分选方法研究[J].重庆理工大学学报(自然科学),2020,34(2):15-23.

Citation format: YIN Juanjuan, WANG Weixian, YUAN Xiaoxi, et al. Study on Rapid Evaluation and Sorting Method of Cascade Lithium Battery [J]. Journal of Chongqing University of Technology(Natural Science), 2020, 34(2): 15-23.

# 退役锂电池快速评价及分选方法研究

殷娟娟<sup>1</sup>, 王伟贤<sup>2</sup>, 袁小溪<sup>2</sup>, 许伟<sup>3</sup>, 李想<sup>4</sup>, 何正旭<sup>1</sup>

(1. 清华四川能源互联网研究院, 成都 610200; 2. 国网北京电科院, 北京 100075;  
3. 清华大学, 北京 100084; 4. 四川大学, 成都 610065)

**摘 要:**针对退役锂电池梯次利用的问题,分析总结了现有梯次利用锂电池一致性判断方法的局限性。根据锂电池放电状态过程中不同放电倍率下对应的状态电压和状态电阻对单体锂电池的表现不一致性,提出了一种锂电池评价指标电池系数;根据该指标利用层次聚类分析和最小二乘原理建立了一套关于锂电池快速评价分选的流程,实现了对退役锂电池的快速分选。实验结果表明:通过该流程对锂电池的评价和分选最多只需要进行一次放电。

**关键词:**退役锂电池;状态电压;状态电阻;聚类分析

中图分类号:TM912

文献标识码:A

文章编号:1674-8425(2020)02-0015-09

## Study on Rapid Evaluation and Sorting Method of Cascade Lithium Battery

YIN Juanjuan<sup>1</sup>, WANG Weixian<sup>2</sup>, YUAN Xiaoxi<sup>2</sup>,  
XU Wei<sup>3</sup>, LI Xiang<sup>4</sup>, HE Zhengxu<sup>1</sup>

(1. Sichuan Energy Internet Research Institute of Tsinghua, Chengdu 610200, China;  
2. State Grid Beijing Electric Power Research Institute, Beijing 100075, China;  
3. Tsinghua University, Beijing 100084, China; 4. Sichuan University, Chengdu 610065, China)

**Abstract:** This paper analyzes and summarizes the limitations of the existing methods for determining the consistency of lithium batteries in decommissioned lithium batteries. At the same time, based on the inconsistency of the corresponding state voltage and state resistance at different discharge rates during the discharge state of lithium batteries to the performance of different single lithium batteries, a lithium battery evaluation index battery coefficient was proposed. Finally, according to the index, a set of procedures for rapid evaluation and sorting of lithium batteries was established by using hierarchical clustering analysis and least squares principle, and the rapid sorting of decommissioned lithium batteries was realized. The experiments show that the evaluation and sorting of lithium batteries through this process only needs to be discharged at most once.

**Key words:** decommissioned lithium battery; state voltage; state resistance; cluster analysis

收稿日期:2018-12-24

基金项目:国家电网公司科技资助项目(52020118000G)

作者简介:殷娟娟,女,硕士,主要从事新能源汽车方面研究,E-mail:yinjuanjuan@tsinghua-eiri.org;通讯作者 何正旭,助理研究员,E-mail:hezhenxu@tsinghuaeiri.org.

随着电动汽车产业的快速发展,锂电池作为一种绿色环保的电池,得到了广泛的使用。一般而言,当锂电池容量不足 80% 时,将不再适合电动汽车使用。考虑到未来会有大量的动力锂电池退役,因此如何处理这些退役锂电池成为难题<sup>[1-3]</sup>。

在《节能与新能源汽车产业发展规划(2011—2020)》中明确提出了动力锂电池回收利用的要求,同时建立电池梯次利用和回收管理的体系。梯次利用指的是如何对锂电池的全生命周期的过程进行合理充分的利用,充分发挥其价值。电动汽车和电动自行车等电动装置中退役下来的锂电池,未来无论应用到电网等储能装置、低端用能设备端,或是最终拆解回收材料,都需要一种对于其性能进行快速评价以及分选的方法。实现锂电池的梯次利用一方面可以增加锂电池生命周期价值,另一方面可以一定程度上解决锂电池成本过高的现状,降低使用成本<sup>[1-2]</sup>。

对于同一电池组的各单体电池,由于电动汽车复杂的运行工况、外部环境不一致导致了锂电池的性能衰减的程度不同,影响电池一致性的内、外部因素如图 1 所示。由于锂电池使用中的不当,如过充或过放以及温度不一致进一步致使单体电池之间的不一致性增加,最终使锂电池组的整体性能下降<sup>[4-5]</sup>。

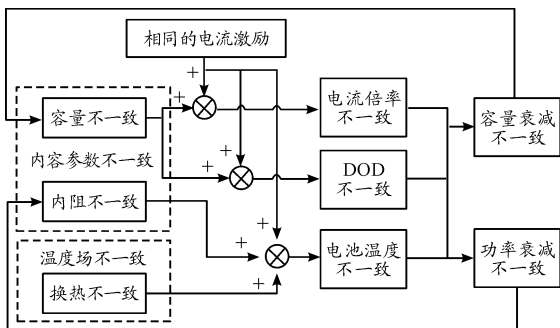


图 1 影响电池一致性的内、外部因素<sup>[4]</sup>

这些问题对退役锂电池的性能分析和一致性分选造成了较大的难度。目前对锂电池的梯次利用并没有明确的标准,现阶段的研究仍然处于初级阶段,尚未有成熟技术或者成套的体系出现<sup>[2]</sup>。

针对锂电池一致性分析以及梯次利用分选的

问题,国内外开展了广泛的研究。其中对于锂电池的一致性分析,现阶段主要的分析方法集中在单参数、多参数、动态特性以及内部特性的分析等方面。单参数的分选方法仅考虑一种特性参数的影响,主要集中在端电压和荷电状态(SOC)的分析<sup>[6-8]</sup>方面,赵萌<sup>[9]</sup>对锂电池内阻的一致性进行系统分析。虽然单参数分选过程简单,但是因为单参数分选的方法考虑因素单一,筛选性能较差。

多参数则是通过锂电池多个特征参数的提取然后进行一致性分析的方法,通过锂电池组的容量、电压、自放电值、内阻等参数进行一致性分析并对锂电池进行筛选成组。申建斌<sup>[10]</sup>通过对电压、容量、内阻等 6 项指标采用主成分分析以及模糊聚类的方法进行分选,但较多参数的引入会造成聚类困难。同时多参数分选测试过程复杂,对于上述参数的获取需要通过一系列不同的试验,且耗时较长<sup>[11-15]</sup>。其中,张彩萍<sup>[12]</sup>研究了阻抗模型特性参数随电池荷电状态(SOC)和老化状况的变化特性,但是电化学阻抗谱测试设备一般较难获取,故该方法难以广泛推广。

单毅等<sup>[14]</sup>通过聚类分析方法对电池样品的特征值进行分选,并进行循环性能测试,发现电池组性能得到明显提升。王佳元等<sup>[16]</sup>根据电池的实际差异情况提出分类特征和聚类的分选方法,能够得到明确的分选结果。陈燕虹等<sup>[17]</sup>通过多参数与聚类分析方法进行电池的分析,有效地改善了电池组的不一致性。层次聚类方法在算法上对于锂电池的内部特性和外部特性表征的状态电阻和状态电压的值之间的距离和规则的相似度容易定义,限制比较少;同时因为层次聚类不需要给定聚类数量,能够自由地结合相近的样本数据,可以发现类之间的层次关系。本文以退役锂电池组作为研究对象,通过层次聚类和最小二乘法分析锂电池组放电过程中锂电池单体电池端电压和特征电阻的不一致性,并评价退役锂电池组内部单体电池的性能,在此基础上研究分析退役锂电池分选的方法,建立了一套分选退役锂电池的流程体系,能够实现退役锂电池的快速评价和分选。

## 1 退役锂电池评价参数提取方法

为了更好地说明本文提出方法的有效性和快速性,选取3组不同的退役锂电池组进行实验测试,其中每个模组中的单体电池的数目均为12个。对3组不同的退役锂电池组都进行相同的放

电处理,即按照放电电流的值为0.1 C、0.2 C、…、1 C,共获取10组放电状态。同时设置数据点提取的时间间隔为 $\Delta t = 1$  s,控制每个放电状态持续时间,保证同一退役电池组内部单体电池工况的一致性,提高分选的准确度。单体锂电池的电压特性曲线如图2所示。

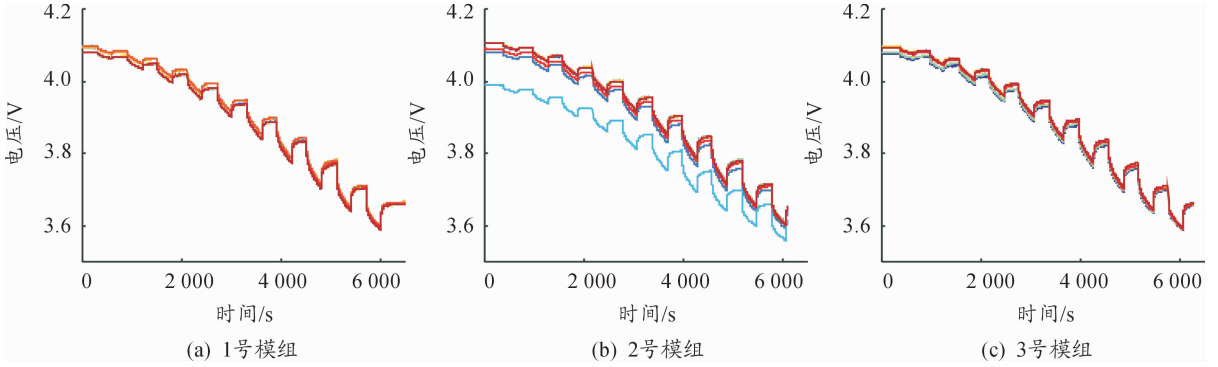


图2 退役电池组的单体电压时间变化曲线

### 1.1 状态电压提取

从微观角度看,在电池的充放电过程中,电池内部作用过程以及外部电化学反应过程共同决定了电池的电压外特性<sup>[12]</sup>。从锂电池单体等效电路模型来看,锂电池端电压的不一致实际是容量、内阻等不一致的综合表现<sup>[4]</sup>。本文状态电压的提取是计算每一阶段放电过程中,上述不同放电状态对应的不同单体电池的平均端电压的大小。其计算方法为

$$\overline{U}_k^i = \frac{1}{T} \int_0^T u_k^i(t) dt \quad (1)$$

式中: $i$ 表示放电状态; $k$ 表示单体电池编号; $\overline{U}_k^i$ 对应单体电池端电压的平均值; $u_k^i(t)$ 对应单体电池的瞬时电压。针对上述3组退役锂电池组电压特征曲线,对0.1 C放电状况下的状态电压进行获取,得到的结果如图3所示。

从图3可见:1号和3号模组状态电压的一致性较好,2号模组除了C4单体电池状态电压偏差较大外,其他单体电池状态电压之间的偏差不超过0.03 V。

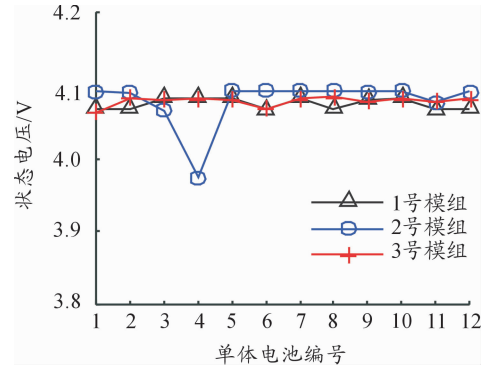


图3 模组0.1 C放电状态电压

### 1.2 状态电阻提取

目前,对于锂电池单体电阻的提取方法,厂家对于锂电池分选成组均是利用内阻测试仪进行测试,而内阻测试仪频率单一,不能准确反映其不同工况下工作的内阻。常用的内阻测量方法有直流电压测量法和交流电压测量法,HPCC (hybrid pulse power characteristic)方法也是常用的内阻测试方法<sup>[11]</sup>。

根据锂电池的内部特性,在通某一倍率的电流时,锂电池端部的电压降即体现了锂电池内阻的特性。对于锂电池状态电阻的提取方法利用某一放

电状态  $i$  中的电压波动的程度反映锂电池内阻的特性。该电阻值并不是真实的锂电池内阻,而是一个反映内阻特性以及锂电池动态变化特性的等效电阻值。其具体的计算过程根据式(2)获得。

$$R_k^i = \frac{\Delta u_k^i}{i_k^i} = \frac{u_{kH}^i - u_{kL}^i}{i_k^i}, k = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

式中: $i$ 表示放电状态; $k$ 表示单体电池编号; $u_{kH}^i$ 、 $u_{kL}^i$ 分别表示对应放电状态  $i$  中最大电压和最小电压; $i_k^i$ 表示放电状态  $i$  中电流大小。取 0.1 C 模组放电时的放电曲线计算得到的对应的图像如图 4 所示。

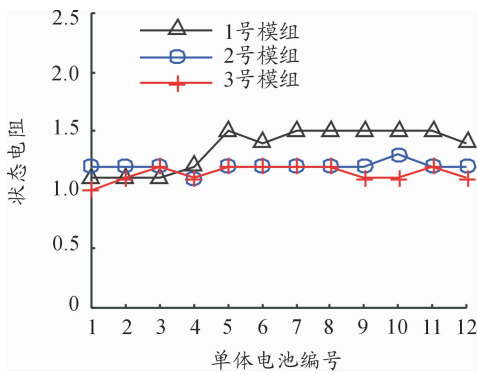


图4 模组0.1 C 放电状态电阻

仅从分布上考虑,通过分析可以发现:2号模组状态电阻一致性最好,3号次之,而1号最差。其中2号和3号模组整体分布特征比较一致,而1号模组中除了A1、A2、A3、A4之外,其他单体电池的状态电阻值与2号模组和3号模组误差较大,差值达到0.3 V。

而对比图3和图4可以发现:同一单体电池表现出来的状态电压和状态电阻特性不一致,仅利用单一的状态电压和状态电阻可能无法获得准确评价其一致性以及达到分选的目的。

## 2 退役锂电池评价参数处理方法

针对上述退役锂电池的特征参数的获取,锂电池的状态电压和状态电阻均表现出一定程度的一致性和差异性。如果仅用单一的指标,即仅利用状态电压或者状态电阻进行分选,则分选的结果

果将仅表现单一参数的差异性。而经过分析发现,对应于同一锂电池单体,其状态电压一致性和状态电阻的一致性差异较大,所以需要综合2种评价因子进行进一步的分析。

### 2.1 数据预处理

状态电压和状态电阻的量纲和数量级均不一致,如果直接进行处理,可能会引入较大误差,所以对原始参数进行归一化预处理。具体的处理办法是根据得到的状态电压矩阵和状态电阻矩阵分别和矩阵中的特征数据进行比较分析<sup>[18-19]</sup>,对于状态电压和状态电阻的处理过程分别如下所示:

$$U_{i\_mean} = [\bar{U}_1^i, \bar{U}_2^i, \bar{U}_3^i, \dots, \bar{U}_n^i] / \max\{\bar{U}_1^i, \bar{U}_2^i, \bar{U}_3^i, \dots, \bar{U}_n^i\} \quad (3)$$

$$R_{i\_mean} = [\bar{R}_1^i, \bar{R}_2^i, \bar{R}_3^i, \dots, \bar{R}_n^i] / \max\{\bar{R}_1^i, \bar{R}_2^i, \bar{R}_3^i, \dots, \bar{R}_n^i\} \quad (4)$$

### 2.2 电池系数的获取

本文利用上述归一化的状态电阻和状态电压,获取综合2种特征参数特性的电池系数作为评价单体电池性能以及作为分选最终的评价标准。电池系数为

$$Q_q = k_v U_{i\_mean} + k_{re} R_{i\_mean} \quad (5)$$

其中  $k_v + k_{re} = 1$ ,  $k_v, k_{re}$  分别表示状态电阻和状态电压在电池系数中所占权重的大小,也取决于所关注的量的重要程度。

### 2.3 聚类分析建立单体评价因子

聚类分析是直接比较各事物之间的性质,将性质相近的事物归为一类,性质差别大的事物归为另一类的技术。文献[14]中采取聚类分析对电池的充放电曲线离散化取点,计算不同2个单体电池充放电曲线的欧式距离,根据2个单体电池放电曲线之间的欧式距离来评判2个单体电池的一致性。

本文根据状态电压矩阵  $U_{i\_mean}$ 、状态电阻矩阵  $R_{i\_mean}$  以及电池系数矩阵  $Q_q$ ,采取绝对值距离来判断不同单体之间的一致性程度,达到聚类分选的目的,得到的偏差距离矩阵的表达式为

$$A_d = \begin{bmatrix} 0 & A_{12} & A_{13} & \cdots & A_{1n} \\ & 0 & A_{23} & \cdots & A_{2n} \\ & & 0 & \cdots & \cdots \\ & & & 0 & A_{(n-1)n} \\ & & & & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中:  $A_{jk} = |A_{imean}(j) - A_{imean}(k)| (1 \leq j < k \leq n)$  表示第  $j$  个单体和第  $k$  个单体之间的绝对值距离。其中矩阵元素选取不同,可以得到上述状态电压偏差矩阵  $U_d$ 、状态电阻偏差矩阵  $R_d$  和电池系数偏差矩阵  $Q_d$ 。因为共有  $n$  个电池单体,且第  $j$  个单体和第  $k$  个单体之间的绝对值距离和第  $k$  个单体和第  $j$  个单体之间的绝对值距离相同,所以得到的偏差矩阵共有  $(n-1)n/2$  个元素,其中对角元素为 0。同时矩阵中的绝对值距离越小,表明 2 个电池单体之间的一致性越好。通过  $A_d$  中元素的分析和判断,可以快速地判断电池单体的聚类性质<sup>[20]</sup>。

## 2.4 最小二乘法建立整体评价因子

除了对于单体电池之间的差异性进行分析,还需要评估退役电池组的整体性能。本文设置电压评价因子  $D_v$ 、内阻评价因子  $D_R$  和电池系数评价因子  $D_q$ ,分别表征整个退役锂电池模组的状态电压、状态电阻以及电池系数整体差异性的大小。计算方法如下:

$$D_v = \sum_{j=1}^{n-1} \sum_{k>1}^n V_{jk}^2, D_R = \sum_{j=1}^{n-1} \sum_{k>1}^n R_{jk}^2, D_q = \sum_{j=1}^{n-1} \sum_{k>1}^n Q_{jk}^2 \quad (7)$$

电压评价因子  $D_v$ 、内阻评价因子  $D_R$  和电池系数评价因子  $D_q$  值越小,表明该电池组整体的一致性能越好。该值的建立为本文快速评价的方法提供了参考依据。

## 2.5 锂电池快速评价和分选流程的建立

在特征参数和评价因子的获取的基础上,建立了一套完整的评价和分选流程体系,对退役锂电池组进行评价和对单体锂电池进行分选。为了实现快速有效的分选,有 2 个问题需要解决:一是如何设定终止条件判断锂电池组的放电终止状态,即如何实现分选的快速性;二是如何设定偏差距离差值来实现单体锂电池充分的分选。

为了解决上述问题,提出了设置收敛阈值来判断结束放电的条件。同时,确定参考状态电压基准、状态电阻基准以及计算得到的电池系数基准来进行退役锂电池组的分选。

对于收敛阈值的设定,根据设计分选要求,确定每 2 个单体电池电压之间允许的最大偏差距离  $\varepsilon_v$ 。同样地,确定最大电阻偏差距离  $\varepsilon_r$  和最大电池系数偏差距离  $\varepsilon_q$ ,即可得到对应迭代收敛阈值条件:

$$\begin{aligned} S_v &= \varepsilon_v * (n-1)n/2 \\ S_r &= \varepsilon_r * (n-1)n/2 \\ S_q &= \varepsilon_q * (n-1)n/2 \end{aligned} \quad (8)$$

通过整体评价因子和对应的收敛阈值条件的比较,可以快速地确定放电终止状态。

为了更好地进行聚类分选,对其中单体锂电池性能评级,根据不同单体电池与基准值的偏差距离进行评级。分选区间的设置如下:[0,0.1%) 为 L1 级,[0.1%,1%) 为 L2 级,[1%,5%) 为 L3 级,[5%,20%) 为 L4 级,[20%,+∞) 为 L5 级。整体的评价和分选流程如图 5 所示。

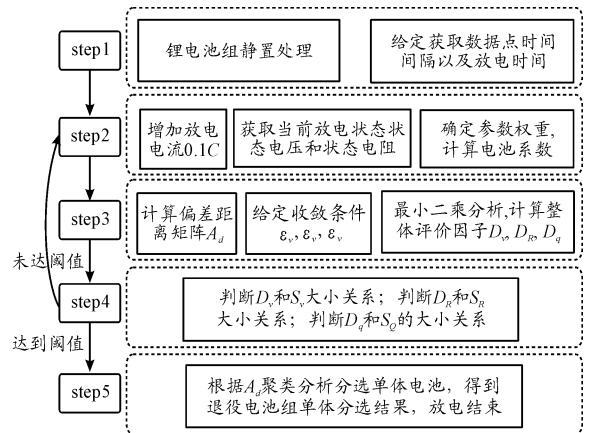


图5 分选流程体系

## 3 退役锂电池快速分析与分选效果研究

针对建立的分选流程体系,为了具体地说明评价和分选的有效性和快速性,通过退役的 3 组锂电池组进行详细的分析。首先根据图 5 中的算法流程进行退役电池组的评价和分选,其中不同评价参数的偏差距离的阈值设置如表 1 所示。通

过该算法收敛边界条件的设立,也确定了对应不同特征参数、退役锂电池的一致性允许误差范围区间。

表1 算法收敛边界条件设置

参数	电压阈值 $\varepsilon_v$	电阻阈值 $\varepsilon_r$	电池系数阈值 $\varepsilon_q$
预设值	3%	3%	3%

### 3.1 单参数分选分析

通过计算状态电压和状态电阻与设定参考状态电压以及参考状态电阻的差值,根据分选流程得到状态电压和状态电阻关于基准值的偏差距离的树图,如图6~8所示。其中横轴表示模组内部单体电池的编号,纵轴的偏差距离表示该单体电池的一致性程度。

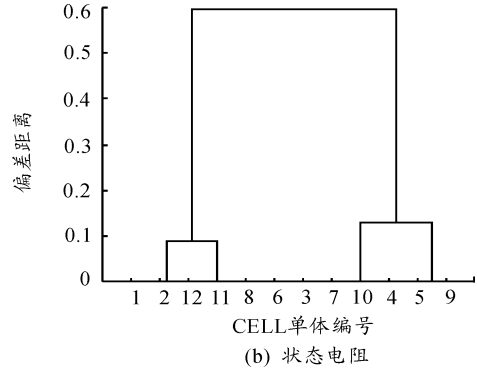
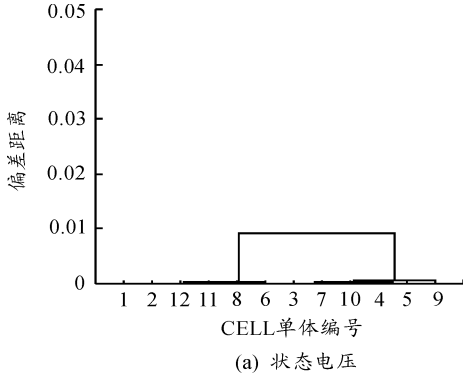


图6 1号模组分选结果树状图

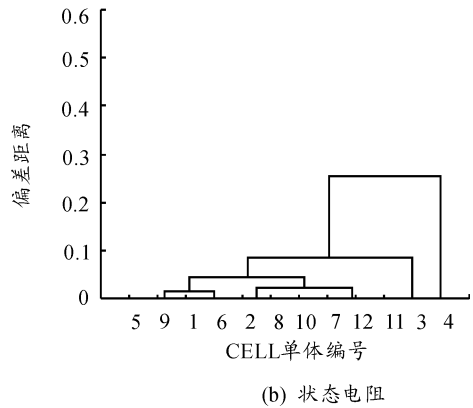
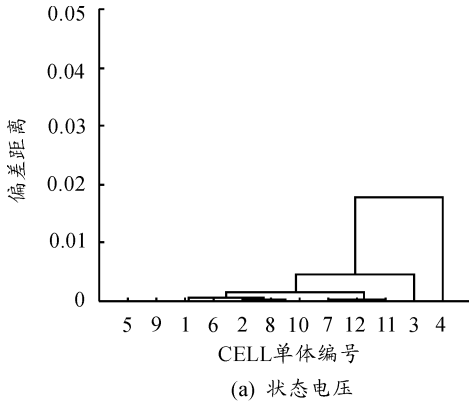


图7 2号模组分选结果树状图

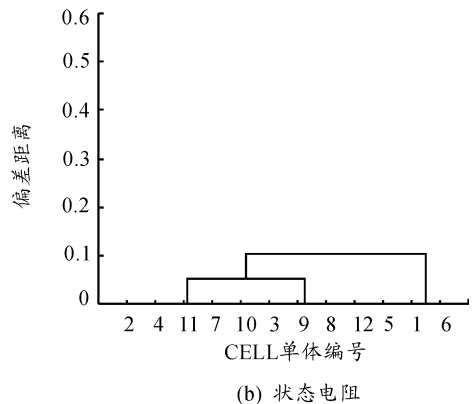
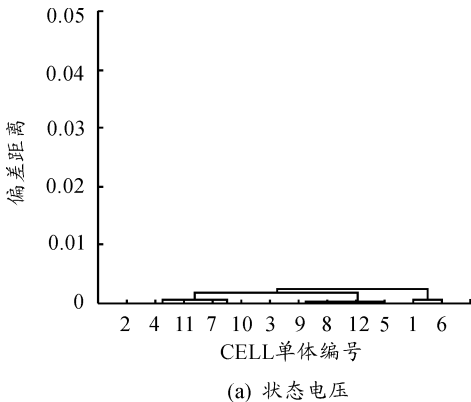


图8 3号模组分选结果树状图

从状态电压的角度来看,3号模组的电压的一致性良好,其最大偏差距离不超过0.3%。而1号和2号相对3号模组而言,状态电压的一致性程度较低,其中2号模组分散程度最大,达到2%左右。

从状态电阻的角度来看,1号模组偏差距离达到了60%,2号模组达到30%,3号模组达到15%。且1号模组分散梯度大,而2号、3号模组分散梯度较小。

对比状态电压和状态电阻来看,状态电压的偏差距离百分比数量级远低于状态电阻偏差距离。从3号模组的状态电阻的偏差距离来看,尽管其单体状态电压一致性良好,但是其状态电阻的偏差也达到15%。这也说明采用单一的状态电压特征参数不足以作为最终退役锂电池的分选标准。为了更好地说明分选之后的结果,根据单参数得到最终的状态电压和状态电阻的分选结果,如表2所示。

表2 状态电压分选结果

分选评级	模组1单体 电池编号	模组2单体 电池编号	模组3单体 电池编号
L1	A1, A2, A6, A8, A11, A12	B1, B2, B5, B6, B8, B9, B10, B11, B12	C2, C3, C4, C5, C8, C9, C10, C7, C11, C12
L2	A5, A3, A7, A4, A9, A10	B3	C1, C6
L3	\	B4	\
L4	\	\	\
L5	\	\	\

对于其中的状态电压的分选,如表3所示,从评级的角度来看,大部分单体电池评级在L1中,其中1号模组和3号模组评级均在L1~L2,仅有2号模组中单体B4在L3评级,整体呈现集中性质。

而对于状态电阻的分选结果,整体差异性较大,呈现极端趋势。其中3号模组的分选结果,除了部分在L1评级,其他均集中在L3~L5的评级,整体分散性较大。

综上所述,通过状态电压、状态电阻2种分选结果表现的非一致性,单参数的分选无法准确地对退役锂电池进行有效分选。

表3 状态电阻分选结果

分选评级	模组1单体 电池编号	模组2单体 电池编号	模组3单体 电池编号
L1	A1, A2, A3	B1, B5, B9, B6, B8, B10	C2, C4, C5, C8, C9, C10
L2	A4	\	\
L3	\	B2, B7, B12	C7, C11, C12
L4	\	B3, B11	C3, C4, C5, C7
L5	A5, A6, A7, A8, A9, A10, A11, A12	B4	\

### 3.2 多参数分选分析

多参数的分选和评价过程与单参数处理过程一致,通过电池系数得到单体电池间偏差距离聚类分选树图,如图9所示。

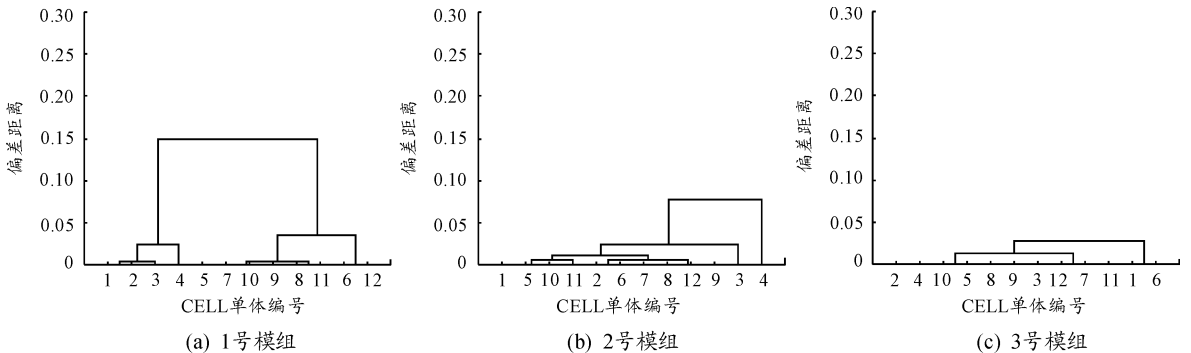


图9 电池系数偏差距离树状图

通过得到的上述电池系数的偏差距离的树状图(如图9所示),与单参数分选的结果(如表4所示)进行对比分析发现,多参数的分选性能明显变优。因为状态电阻偏差距离大的缘故,导致了电池系数的分选偏差性能受到状态电阻的影响较大。但是整体而言,相对状态电阻的两极分化趋势和状态电压单极化趋势明显减小,采取电池系数进行整体评价结果能更准确地反映退役锂电池组的单体性能。

表4 模组单体电池分选结果

分选评级	模组1单体 电池编号	模组2单体 电池编号	模组3单体 电池编号
L1	A1, A2, A3	B1, B5, B10	C2, C4, C5, C8, C9, C10
L2	A4	B11	C3, C7, C11, C12
L3	\	B2, B6, B7, B8, B9, B12, B3	C1, C6
L4	A5, A6, A7, A8, A9, A10, A11, A12	B4	\
L5	\	\	\

### 3.3 退役锂电池分选的快速性分析

为了验证分选的快速性,得到不同模组分选所需的放电次数。不同模组一致性评价与筛选如表5所示。

表5 不同模组一致性评价与筛选

模组编号	$D_v$	$D_r$	$D_q$	放电实验次数
1号模组	0.140 5	11.545 5	5.810 0	1
2号模组	0.328 1	3.670 9	1.991 9	8
3号模组	0.096 6	4.116 8	2.085 8	1

从上述分选结果来看,1号模组和3号模组仅需要1次放电实验即可成功分选出,这也充分地体现了上述分选过程的快速性。如果改变放电收敛的阈值条件,可以得到表6中不同模组的放电

次数变化。

表6 改变收敛阈值的放电次数变化

收敛阈值			模组1	模组2	模组3
$\varepsilon_v$	$\varepsilon_r$	$\varepsilon_q$	放电次数	放电次数	放电次数
1%	1%	1%	1	1	1
3%	3%	3%	1	8	1
5%	5%	5%	1	9	1
7%	7%	7%	1	10	2
9%	9%	9%	7	10	10

两单体锂电池之间的一致性要求越高,即允许的误差越小,越容易识别两单体锂电池之间的差值,能够更加快速地实现分选。从表6可以看出:随着收敛阈值的增加,放电分选的实验次数增加,但是对模组1和模组3,当增加到5%时,仍能仅用1次放电就实现分选。这也进一步说明当2个单体锂电池之间的不一致性程度允许范围增加到5%时,该算法仍然能快速识别两单体锂电池之间5%的误差,达到退役锂电池快速分选的目的。

## 4 结束语

以退役锂电池为研究对象,针对退役锂电池的外部特性和动态特性,综合状态电压和状态电阻利用归一化的方法得到评价锂电池性能的电池系数。利用该参数,通过层次聚类分析方法和最小二乘法建立了退役锂电池评价和分选的完整流程体系。实验结果证明:利用该方法进行分选,最少仅需要1次放电过程即可得到最终的分选过程。同时,通过比较单参数和多参数在分选性能方面和快速性能的分析,总结了单参数分选的局限性。本文提供的方法为退役锂电池梯次利用提供了参考依据,简化了多参数一致性分析过程,为退役锂电池性能快速评价和分选提供了参考。

## 参考文献:

[1] 马泽宇,姜久春,文锋,等. 用于储能系统的梯次利用



- 锂电池组均衡策略设计[J]. 电力系统自动化,2014,38(3):106-111.
- [2] 韩路,贺狄龙,刘爱菊,等. 动力电池梯次利用研究进展[J]. 电源技术,2014,38(3):548-550.
- [3] 李香龙,陈强,关宇,等. 梯次利用锂离子动力电池试验特性分析[J]. 电源技术,2013,37(11):1940-1943.
- [4] 戴海峰,王楠,魏学哲,等. 车用动力锂离子电池单体不一致性问题研究综述[J]. 汽车工程,2014,36(2):181-188,203.
- [5] 赵光金,何睦,唐国鹏,等. 退役动力锂电池可用性评价方法研究[J]. 电源技术,2018(11):1632.
- [6] 王东梅,冯伟峰,白红燕,等. 基于电压平台的电池聚类分选算法研究[J]. 电源技术,2016,40(5):994-996.
- [7] KIM J H, SHIN J W, JEON C Y, et al. Screening process of Li-Ion series battery pack for improved voltage/SOC balancing [C]//Power Electronics Conference. USA: IEEE,2010.
- [8] 王芳,孙智鹏,林春景,等. 能量型磷酸铁锂动力电池直流内阻测试及分析[J]. 重庆理工大学学报(自然科学),2017,31(8):44-50.
- [9] 赵萌,李娜,苑津莎,等. 梯次利用锂电池内阻一致性评估指标[J]. 中外能源,2018,23(8):86-92.
- [10] 申建斌,唐有根,李玉杰,等. 无监督聚类在锂离子电池分类中的应用[J]. 计算机与应用化学,2007(3):305-308.
- [11] 李然. 锂动力电池健康度评价与估算方法的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学,2016.
- [12] 张彩萍,姜久春,张维戈,等. 梯次利用锂离子电池电化学阻抗模型及特性参数分析[J]. 电力系统自动化,2013,37(1):54-58.
- [13] 田崔钧,田君,陈芬,等. 锂离子电池安全性测试分析[J]. 重庆理工大学学报(自然科学),2018(10):34-39.
- [14] 单毅. 锂离子电池一致性研究[D]. 北京:中国科学院研究生院,2008.
- [15] 谭泽富,孙荣利,杨芮,等. 电池管理系统发展综述[J]. 重庆理工大学学报(自然科学),2019,33(9):40-45.
- [16] 王佳元,孙泽昌,魏学哲,等. 电动汽车动力电池分选方法研究[J]. 电源技术,2012,36(1):94-98.
- [17] 陈燕虹,吴伟静,刘宏伟,等. 电动汽车锂离子动力电池分选方法研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2016,43(10):23-31.
- [18] 周韦润,姜文刚. 基于遗传算法优化扩展卡尔曼滤波的锂电池 SOC 估计[J]. 重庆理工大学学报(自然科学),2019,33(9):33-39.
- [19] KIM J, SHIN J, CHUN C, et al. Stable configuration of a Li-ion series battery pack based on a screening process for improved voltage/SOC balancing[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2011,27(1):411-424.
- [20] KIM J, SHIN J, JEON C, et al. High accuracy state-of-charge estimation of Li-Ion battery pack based on screening process [C]//Applied Power Electronics Conference & Exposition. USA:IEEE,2011.

(责任编辑 林 芳)