

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.201413

基于因子分析与 K-means 聚类的退役动力电池快速分选方法

张朝龙, 赵筛筛, 章博

(安庆师范大学电子工程与智能制造学院, 安徽 安庆 246011)

摘要: 针对目前退役动力电池数量多、快速分选方法匮乏的问题, 提出一种基于脉冲功率测试(Hybrid Pulse Power Characteristic, HPPC)、因子分析和聚类算法的退役动力电池快速分选与重组方法。根据电池管理系统(Battery Management System, BMS)记录的电池数据, 计算单体电池电压数据得到电池最大可用容量。以 HPPC 一次放电脉冲提取的电池开路电压、欧姆内阻、极化电阻以及浓差电阻作为特征变量。特征变量数据经归一化算法与因子分析优化后, 通过聚类算法完成电池分选与重组。实验结果表明: 该方法下单体电池平均分选重组时间压缩在 30 min 以内, 分组后一致性指标较好, 在退役动力电池分选与重组中具有较好的实际意义。

关键词: BMS; HPPC; 因子分析; 聚类算法; 快速分选与重组

A fast classification method based on factor analysis and K-means clustering for retired electric vehicle batteries

ZHANG Chaolong, ZHAO Shaishai, ZHANG Bo

(School of Electronic Engineering and Intelligent Manufacturing, Anqing Normal University, Anqing 246011, China)

Abstract: In order to solve the problem of a large number of retired electric vehicle batteries with a lack of quick sorting means, a fast classification and regroup approach of batteries is presented based on Hybrid Pulse Power Characteristic (HPPC), factor analysis and a clustering algorithm. The maximum available capacity of the battery is calculated by the voltage data of the battery cell in the Battery Management System (BMS). The primary discharge pulse of the HPPC is used to extract the open-circuit voltage, ohmic, polarization and concentration resistances of the battery as characteristic variables. After the characteristic variable data is processed by the normalization algorithm and factor analysis, the battery sorting and recombination are completed by the clustering algorithm. Experimental results show that the average separation and recombination time of a single battery is compressed within 30 min using the proposed method, which has practical significance for classification and regrouping of retired electric vehicle batteries.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51607004), the Collaborative Innovation Project of Anhui Universities (No. GXXT-2019-002) and the Natural Science Research Project of Anhui University (No. KJ2020A0509).

Key words: battery management system (BMS); hybrid pulse power characteristic (HPPC); factor analysis; clustering algorithm; fast classification and regroup

0 引言

随着新能源汽车的使用愈发普遍, 动力电池作为电动汽车的动力核心, 在电动汽车上得到了广泛

应用^[1-10]。动力电池容量衰减至 80%时将不再适合新能源汽车使用, 导致一般车载动力电池寿命平均为四到五年。近年来, 动力电池迎来一波退役高潮, 据不完全统计, 2020 年, 我国动力电池累计退役量将达 20 万吨(约 25 GWh); 2025 年, 累计退役量约为 78 万吨(约 116 GWh), 因此动力电池梯次利用成为当前的一个研究热点。

动力电池梯次利用主要是针对动力电池容量降

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51607004); 安徽高校协同创新项目资助(GXXT-2019-002); 安徽高校自然科学研究重点项目资助(KJ2020A0509)

低到无法满足新能源汽车的使用要求,但动力电池本身并没有报废,仍可应用于其他相关领域。做好退役动力电池的梯次利用,是降低动力电池成本、促进可再生能源发展的有效路径,更是响应国家五位一体总体布局、建设绿色家园的必要手段。目前,很多学者致力于该领域的研究。文献[11]通过实验得到单体电池的开路电压、容量与内阻数据,以K均值法与遗传算法处理数据进行电池筛选,聚类效果好且容易实现。文献[12]为研究退役动力电池分组使用SOC、温度与最大放电倍率,以单体电池直流内阻与温度、SOC和放电倍率的关系对电池进行筛选,精度较高。文献[13]对光伏电站退役动力电池包进行处理,发现一个退役电池包中大部分电池容量衰减并不严重,而是由于少量电池SOH小于80%导致整个电池包退役。文献[14]通过测定退役动力电池外观、容量、脉冲特性和电化学阻抗,发现外观性检查和容量测量只是对电动汽车退役电池进行筛选和分类的初步方法。文献[15]提出了一种基于支持向量机的退役电池筛选方法,分类准确率达到96.8%。文献[16]在利用容量增量分析和统计方法识别电池老化变化的同时提出利用识别电池老化变化对电池分组的策略。目前总体上看电池分选方法效果好,筛选后电池组一致性较高,但仍然存在退役动力电池数量庞大、急需快速分选方法的问题。

因子分析是一种数据降维方法,它能够消除变量之间的耦合性,以少量的新因子最大化表征原变量。K-means聚类是一种无监督聚类算法,它能够将相似的样本归到一类。在此,本文提出一种基于HPPC与因子分析、聚类算法的动力电池快速分选与重组方法。该方法首先通过计算BMS记录的单体电池电压数据得到电池最大可用容量,以HPPC一次放电脉冲测试提取的电池开路电压、欧姆内阻、极化电阻以及浓差电阻作为特征变量,归一化方法优化特征变量数据后,应用因子分析算法提取新因子,之后利用新因子进行聚类分析,自动化完成电池分类与重组。最后基于电池包模组中拆解下的18650锂离子梯次电池实验证明了该方法的快速性与有效性。

1 理论基础

1.1 电池模型的建立

目前常见的动力电池模型主要分为数学模型、电化学模型、耦合模型、神经网络模型以及等效电路模型^[17-18]。综合考虑模型精度与特征提取难度,采用二阶RC等效电路模型,图1为其模型图。其

中:电压源 U_{oc} 为动力电池的开路电压; R_0 为欧姆内阻; R_{pa} 、 C_{pa} 为极化电阻、电容; R_{pc} 、 C_{pc} 为浓差电阻、电容。

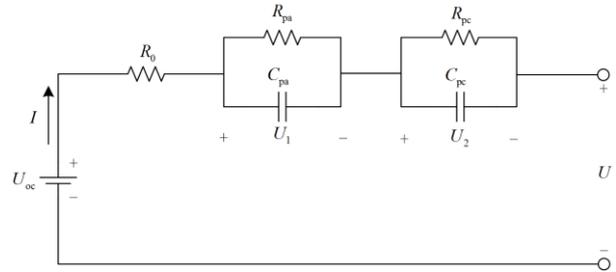


图1 二阶RC等效电路模型

Fig. 1 Second-order RC equivalent circuit model

1.2 动力电池特征提取

1) 电池欧姆内阻、开路电压参数辨识

对动力电池进行HPPC实验,具体过程如下:18~25℃环境下静置10s,1C恒流放电6min,随后静置1h,测试结束。以18650锂离子电池、额定容量2.4Ah为例进行HPPC测试,图2为动力电池一次HPPC恒流放电前后电压变化曲线,可以看出,放电后15min电池电压基本不变。

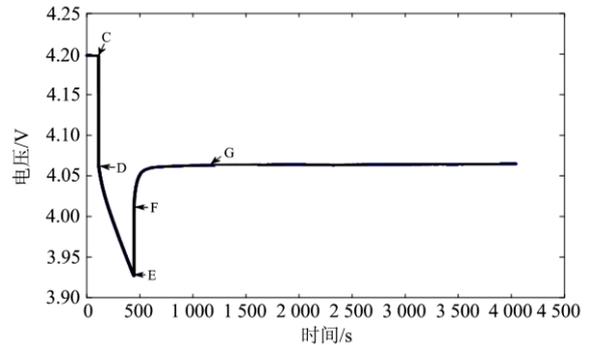


图2 电压变化曲线

Fig. 2 Curve of voltage change

C点之前,直接读取电池开路电压 U_{oc} 。在电池放电开始C点和结束E点电压分别出现向下和向上的跳变。此处根据式(1)求得欧姆内阻。

$$R_0 = \frac{(U_C - U_D) + (U_F - U_E)}{2I} \quad (1)$$

式中: U_C 、 U_D 、 U_E 、 U_F 分别为图2中C、D、E、F点的电压; I 为放电电流。

2) 电池极化参数辨识

根据电路模型有

$$U_1(t) = U_1(0)e^{-\frac{t}{\tau_1}} + IR_{pa}(1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}}) \quad (2)$$

$$U_2(t) = U_2(0)e^{-\frac{t}{\tau_2}} + IR_{pc}(1 - e^{-\frac{t}{\tau_2}}) \quad (3)$$

式中: $U_1(0)$ 、 $U_2(0)$ 分别为两个 RC 网络两端初始电压; τ_1 为极化时间常数; τ_2 为浓差时间常数; t 为极化响应时间。

E 点到 G 点段为 RC 网络零输入状态响应, 此时端电压为

$$U(t) = U_{oc} - U_1(0)e^{-\frac{t}{\tau_1}} + U_2(0)e^{-\frac{t}{\tau_2}} \quad (4)$$

极化电压的变化可由静止 15 min 后的开路电压值 U_{oc} 减去电池从 F 点后的端电压得到。在 Matlab 中使用 Curve Fitting 工具按照式(5)对极化电压进行指数拟合。

$$f(t) = ae^{-\lambda_1 t} + be^{-\lambda_2 t} \quad (5)$$

联立式(4)、式(5), 得

$$a = U_1(0), b = U_2(0), \tau_1 = \frac{1}{\lambda_1}, \tau_2 = \frac{1}{\lambda_2} \quad (6)$$

D 点之前为 RC 网络的零状态响应, 有

$$U_1(t) = IR_{pa}(1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}}) \quad (7)$$

$$U_2(t) = IR_{pc}(1 - e^{-\frac{t}{\tau_2}}) \quad (8)$$

E 点到 F 点时间变化为 0, 极化电压基本不变, 有

$$U_1(0) = IR_{pa} \quad (9)$$

$$U_2(0) = IR_{pc} \quad (10)$$

联立式(6)、式(9)和式(10), 得到极化电阻与浓差电阻。

3) 电池荷电状态(State Of Charge, SOC)、最大可用容量参数辨识

由电池开路电压与 SOC 的对应关系, 利用 BMS 提供的单体电池开路电压可快速得到电池 SOC, 采用安时积分法逆运算如式(11), 可以高效计算出动力电池最大可用容量。

$$C_{\max} = \frac{\int_{t_0}^t \eta_i(\zeta) d\zeta}{SOC(t_0) - SOC(t)} \quad (11)$$

式中: $SOC(t_0)$ 、 $SOC(t)$ 分别表示 t_0 和 t 时刻动力电池 SOC 估计值; η_i 为库伦效率, $i(\zeta)$ 为 ζ 时刻电池充放电电流; C_{\max} 为梯次电池最大可用容量。

2 算法分析

2.1 因子分析法

因子分析是一种数据简化和降维技术, 通过研究众多变量内部的耦合关系, 减少数据维度且较小

影响数据集信息熵的^[19-20], 常用在数据挖掘、工程管理^[21]等领域。因子分析数学模型如式(12)。

$$X = \begin{pmatrix} u_1 \\ \vdots \\ u_m \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{p1} & \cdots & a_{pm} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} F_1 \\ \vdots \\ F_m \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \vdots \\ \varepsilon_m \end{pmatrix} \quad (12)$$

式中: X 为原始数据集; $m \leq p$, m 、 p 为常数; F_1, \dots, F_m 为原始变量的公共因子, 公共因子的系数矩阵称为因子载荷阵。主成分法求解因子载荷阵详细流程如下述。

Step1 计算原始数据集 X 中变量均值和方差, 并由式(13)标准化处理得到 X' , 其中: $E(x_j)$ 为第 j 列的平均值, $Var(x_j)$ 为第 j 列的方差;

$$x_{ij} = \frac{x_{ij} - E(x_j)}{\sqrt{Var(x_j)}} (i=1, \dots, p; j=1, \dots, m) \quad (13)$$

Step 2 计算 X' 相关系数矩阵及其特征值、特征向量;

Step 3 采用主成分法求得因子载荷阵, 并计算方差贡献率和累积方差贡献率;

Step 4 确定公共因子: 当前 q 个因子的累计贡献率超过 90% 时, 可取该 q 个因子作为公共因子。

2.2 K-means 聚类算法

K-means 算法是一种无监督聚类算法, 主要作用是将相似的样本自动归到一个类别中, 无论是在生物领域还是图像处理等其他领域皆有应用。但聚类算法往往容易受到“维度灾难”的影响^[22-23], 导致聚类算法不适用于维度较高的场合, 因此本文将因子分析算法与聚类算法结合使用。因子分析可以有效降低数据维度并尽可能保留有效信息, 与聚类算法互补后, 可在数据降维的同时完成数据分类。本文以逐个分类法^[24-25]确定聚类数目, 具体应用步骤如下述。

Step1 输入原数据集 X , 选取 k 个质心, 分别为 $u_1, \dots, u_k \in R^n$, 且 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}$, $x_i \in R^n, i = 1, 2, \dots, m$;

Step2 计算数据集 X 中每一个样本 x_i 到质心 u_j 的欧氏距离, 将样本 x_i 归类为最近质心所属集合, 计算式为

$$C_i = \arg \min \|x_i - u_j\|, C_i = j = 1, \dots, k \quad (14)$$

Step 3 不断更新 k 个集合的质心;

$$u_j = \frac{\sum_{i=1}^m x_i |_{C_i=j}}{\sum_{i=1}^m 1 |_{C_i=j}} \quad (15)$$

Step 4 重复步骤 2~4, 直到质心基本不变;

Step 5 将数据的 k 个集合数据点归为 k 个簇。

2.3 电池不一致性评价

不一致性是动力电池成组应用时必须研究的问题，本文采用“基于电池荷电状态的电池组离散度^[26-27]”的思想，对聚类后电池进行不一致性分析。该方法能够精准地反应电池组一致性状态，但实际中得到的电池组内各单体的 SOC 存在误差，因此该方法也存在一定的局限性。具体计算式为

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (SOC_i - SOC_m)^2}{n}} \quad (16)$$

式中： ε 表示电池组的整体离散度； n 为电池组内单体电池的数量； SOC_i 表示电池组第 i 节单体电池的 SOC； SOC_m 为电池组的平均 SOC。电池组的整体离散度越大，电池组一致性越差，大量实验表明，锂离子电池组离散度与一致性关系如表 1 所示。

表 1 锂离子电池组离散度与一致性关系

Table 1 Relationship between dispersion and consistency of lithium-ion battery pack

电池组离散度	一致性评价
$\leq 1\%$	较好
1%~3%	轻度离散
3%~5%	中度离散
$\geq 10\%$	重度离散

3 实验及分析

为展示本文提出的退役动力电池快速分选和重组技术方法的过程和性能，在此对某品牌电动汽车电池包模组中拆解下的锂离子梯次电池进行实验验证，图 3 为实验流程图。首先对实验所使用的的参量进行快速度量，其次利用合适算法对数据分析与聚类，最后评估该方法产生的电池组一致性并验证筛选方法的快速性。

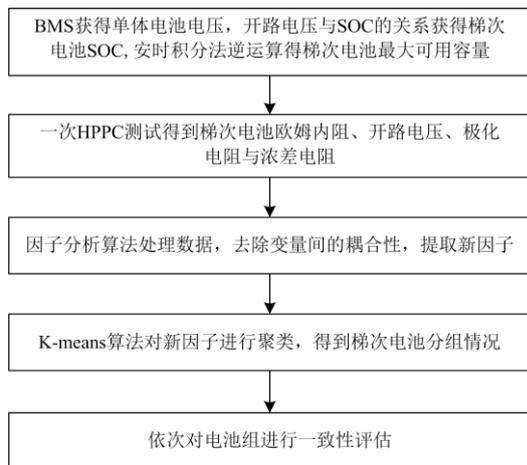


图 3 实验设计流程图

Fig. 3 Flow chart of experimental design

3.1 实验设备与设计

实验中采用 NEWARE 电池实验测试平台，图 4 为实验设备，工作环境温度 18~25℃，对电动汽车电池包模组中拆解下的 563 节 18650 锂离子梯次电池进行测试，图 5 为梯次电池模组图。



图 4 实验设备

Fig. 4 Experiment equipment

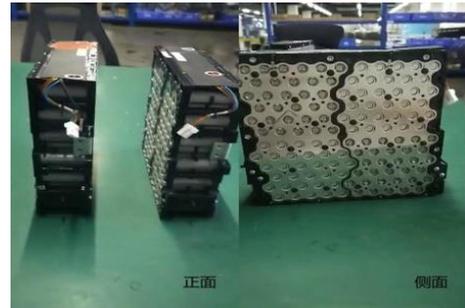


图 5 梯次电池模组

Fig. 5 Echelon battery module

具体实验测试步骤核心分为两步：(1) 特征变量的快速提取。将锂离子梯次电池编号后，通过电池实验测试平台进行 HPPC 一次放电脉冲测试，具体流程为：静置 10 s 后在室温环境下 1C 恒流放电 6 min，随后静置 15 min，测试结束。通过 Matlab 计算得到动力电池的开路电压、欧姆内阻、极化电阻以及浓差电阻数据；BMS 上传的单体电池记录数据，根据电池开路电压与 SOC 的对应关系，得到单体电池 SOC，应用安时积分法逆运算得到单体电池最大可用容量，表 2 为部分梯次电池数据。(2) 计算机处理梯次电池数据集。首先将梯次电池的欧姆内阻、极化电阻、浓差电阻、开路电压以及最大可用容量数据归一化处理，其次进行 Bartlett 检验，显著性水平小于 0.001 即可进行因子分析，满足条件

后应用因子分析算法处理归一化后的标准数据, 提取出能够表征原变量的新因子, 之后以逐个分类法确定聚类数目并将因子分析得到的新因子数据作为聚类算法的输入, 得到梯次电池的最终分选与重组结果。

表 2 部分梯次电池数据

Table 2 Partial echelon battery data

编号	C_{\max} / Ah	R_0 / Ω	U_{oc} / V	R_{ps} / Ω	R_{pc} / Ω
0001	1.86	0.048 1	4.13	0.012 1	0.018 1
0002	1.82	0.043 1	4.14	0.016 0	0.010 3
0003	1.80	0.048 3	4.11	0.016 3	0.013 1
0004	1.89	0.040 6	4.15	0.016 5	0.017 9
0005	1.93	0.049 9	4.15	0.010 9	0.016 4
0006	1.91	0.043 8	4.13	0.014 3	0.010 4
0007	1.90	0.044 7	4.12	0.010 7	0.014 4
0008	1.90	0.040 8	4.11	0.014 6	0.011 8
0009	1.81	0.045 3	4.13	0.022 0	0.015 4
0010	1.93	0.044 3	4.13	0.001 4	0.014 7

3.2 实验结果与分析

因子分析算法处理变量后, 消除了变量之间的耦合性, 并提取出五个新因子, 表 3 为新因子对原特征变量的方差贡献率。

表 3 方差及各新因子贡献率

Table 3 Variance and new factor contribution rate

新因子	方差贡献率/%	累计方差贡献率/%
F_1	41.733	41.733
F_2	29.404	71.137
F_3	18.451	89.588
F_4	8.351	97.939
F_5	2.061	100

显然, 新因子 F_1 、 F_2 、 F_3 、 F_4 对原变量的累计解释率超过 95%, 因此可将前四个新因子作为筛选变量, 对梯次电池进行分选。将因子分析得到的新因子 F_1 、 F_2 、 F_3 、 F_4 作为 K-means 算法的输入进行分析。首先, 对分类数目通过逐一分类法进行预处理, 得到 K-means 分类时最合适的 K 值为 8, 即梯次电池分为八类。之后通过聚类算法得到梯次电池的分组数据。最后对八类电池进行一致性判定, 完成分组。表 4 为聚类后每一个类别中的梯次电池数目以及电池组整体离散度。分组后, 电池组整体平均离散度小于 2%, 电池组整体一致性良好。

整个退役动力电池分选与重组过程中, 首先计算 BMS 记录的单体动力电池数据得到梯次电池最大可用容量; 通过 HPPC 一次放电脉冲测试实验, 精准得到梯次电池欧姆内阻、开路电压、极化电阻

与浓差电阻, 之后通过因子分析算法与聚类算法, 完成梯次电池的分选与重组。该方法成功做到单个梯次电池平均分组时间 30 min, 极大地缩短了单体电池分组时间, 提升了退役动力电池分组效率。

表 4 类别中梯次电池数目及离散度

Table 4 Number and class dispersion of the cascade batteries

类别	每一类中电池数目	类别离散度/%
1	75	1.40
2	61	1.25
3	80	0.70
4	66	1.08
5	81	1.23
6	72	1.70
7	69	1.29
8	59	1.96

4 结论

本文提出了一种退役动力电池快速分选与重组方法。首先计算 BMS 历史记录的单体电池电压数据, 得到电池最大可用容量, 以 HPPC 一次放电脉冲测试提取的电池开路电压、欧姆内阻、极化电阻以及浓差电阻作为特征变量, 表征电池老化程度与电池寿命。随后归一化特征变量, 消除数据间数量与量纲影响, 应用因子分析算法减少数据间的耦合性, 并利用提取出的新因子进行聚类分析, 完成梯次电池分类与重组。实验表明, 该方法能够精确地将退役动力电池快速分选与重组, 生成一致性良好的电池组。

本文提出的方法实用性强, 实际操作表明, 该方法与传统筛选方法相比, 极大地缩短了筛选时间, 做到单个动力电池平均筛选时间压缩在 30 min 以内, 对动力电池的快速筛选与重组具有一定的参考价值。

参考文献

- [1] 张永明, 姚志力, 李菁, 等. 基于配电网概率潮流计算的电动汽车充电站规划策略[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(22): 9-16.
ZHANG Yongming, YAO Zhili, LI Jing, et al. Electric vehicle charging station planning strategy based on probabilistic power flow calculation of distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(22): 9-16.
- [2] 李宏刚, 潘景宜. 铁路综合交通枢纽电动汽车充电桩系统设计[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(19): 152-157.
LI Honggang, PAN Jingyi. System design of charging

- pile system for electric vehicle in railway comprehensive communication hub[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(19): 152-157.
- [3] 鄂明亮, 戴朝华, 邓惠文, 等. 基于单体光伏/单体储能电池模组的新型光伏储能发电系统[J]. *电力系统保护与控制*, 2017, 45(3): 56-61.
- WU Mingliang, DAI Chaohua, DENG Huiwen, et al. A novel PV energy storage generating system based on single PV cell/single energy storage cell module[J]. *Power System Protection and Control*, 2017, 45(3): 56-61.
- [4] MURTY V, KUMAR A. Multi-objective energy management in microgrids with hybrid energy sources and battery energy storage systems[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2020, 5(1): 1-20. DOI: 10.1186/s41601-019-0147-z.
- [5] 徐靖, 赵霞, 罗映红. 氢燃料电池并入微电网的改进虚拟同步机控制[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(22): 165-172.
- XU Jing, ZHAO Xia, LUO Yinghong. Improved virtual synchronous generator control for hydrogen fuel cell integration into a microgrid[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(22): 165-172.
- [6] 应飞祥, 徐天奇, 李琰, 等. 含电动汽车充电站商业型虚拟电厂的日前调度优化策略研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(21): 92-100.
- YING Feixiang, XU Tianqi, LI Yan, et al. Research on day-to-day scheduling optimization strategy of a commercial virtual power plant with an electric vehicle charging station[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(21): 92-100.
- [7] 刘坚. 电动汽车储能技术应用潜力及功能定位研究[J]. *全球能源互联网*, 2020, 3(1): 44-50.
- LIU Jian. An analysis on the application potential and position of electric vehicle energy storage[J]. *Journal of Global Energy Interconnection*, 2020, 3(1): 44-50.
- [8] 胡静, 李琼慧, 黄碧斌, 等. 适应中国应用场景需求和政策环境的电网侧储能商业模式研究[J]. *全球能源互联网*, 2019, 2(4): 367-375.
- HU Jing, LI Qionghui, HUANG Bibin, et al. Business model research of energy storage on grid side adapted to application scenarios and policy environment in China[J]. *Journal of Global Energy Interconnection*, 2019, 2(4): 367-375.
- [9] 田恬, 王灿, 陈思睿, 等. 考虑微电网间能量互济的多微电网日前经济优化策略[J]. *广东电力*, 2020, 33(1): 69-76.
- TIAN Tian, WANG Can, CHEN Sirui, et al. Day-ahead economic optimization strategy for multi-microgrid considering energy exchange among microgrids[J]. *Guangdong Electric Power*, 2020, 33(1): 69-76.
- [10] 王洪, 卢志涛, 王少博, 等. 基于人工智能的电网用蓄电池健康度评估[J]. *广东电力*, 2019, 32(4): 79-84.
- WANG Hong, LU Zhitao, WANG Shaobo, et al. Evaluation on state of health of storage battery for power grid based on artificial intelligence[J]. *Guangdong Electric Power*, 2019, 32(4): 79-84.
- [11] 杨泓奕, 陈家辉, 汤志明. 基于 K 均值法与遗传算法的退役动力电池筛选[J]. *电源技术*, 2019, 43(12): 2001-2004.
- YANG Hongyi, CHEN Jiahui, TANG Zhiming. Screening decommissioned power batteries based on K-means algorithm and genetic algorithm[J]. *Journal of Power Sources*, 2019, 43(12): 2001-2004.
- [12] 严媛, 顾正建, 黄惠, 等. 梯次利用动力电池筛选方法[J]. *电池*, 2018, 48(6): 414-416.
- YAN Yuan, GU Zhengjian, HUANG Hui, et al. Selecting method on secondary use of power Li-ion battery[J]. *Battery*, 2018, 48(6): 414-416.
- [13] LI X, ZHANG L, LIU Y, et al. A fast classification method of retired electric vehicle battery modules and their energy storage application in photovoltaic generation[J]. *International Journal of Energy Research*, 2020, 44(3): 2337-2344.
- [14] LIAO Q, MU M, ZHAO S, et al. Performance assessment and classification of retired lithium ion battery from electric vehicles for energy storage[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017, 42(30): 18817-18823.
- [15] ZHOU Z, DUAN B, KANG Y, et al. An efficient screening method for retired lithium-ion batteries based on support vector machine[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020: 12-18.
- [16] JIANG Y, JIANG J, ZHANG C, et al. Recognition of battery aging variations for LiFePO₄ batteries in 2nd use applications combining incremental capacity analysis and statistical approaches[J]. *Journal of Power Sources*, 2017, 360: 180-188.
- [17] 闫回想, 甘小燕, 武鸿辉, 等. 基于二阶 Thevenin 模型的锂电池建模仿真[J]. *江苏大学学报: 自然科学版*, 2018, 39(4): 403-408.
- YAN Huixiang, GAN Xiaoyan, WU Honghui, et al. Odelling and simulation of lithium battery based on second order Thevenin model[J]. *Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition*, 2018, 39(4): 403-408.
- [18] 高金辉, 朱迎正. 基于新电源模型的动力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 battery based on new power supply model[J]. Journal Henan Normal University: Natural Science Edition, 2019, 47(1): 58-61, 92.
- [19] 刘照德, 詹秋泉, 田国梁. 因子分析综合评价研究综述[J]. 统计与决策, 2019, 35(19): 68-73.
LIU Zhaode, ZHAN Qiuquan, TIAN Guoliang. Research review on comprehensive evaluation of factor analysis[J]. Statistics and Decision, 2019, 35(19): 68-73.
- [20] 林海明, 杜子芳. 主成分分析综合评价应该注意的问题[J]. 统计研究, 2013, 30(8): 25-31.
LIN Haiming, DU Zifang. Some problems in comprehensive evaluation in the principal component analysis[J]. Statistical Research, 2013, 30(8): 25-31.
- [21] 孙雷, 谢洪平, 余越中, 等. 基于韧性的工程施工安全管控影响因素[J]. 土木工程与管理学报, 2020, 37(4): 60-65.
SUN Lei, XIE Hongping, YU Yuezhong, et al. Influencing factors of engineering construction safety management based on resilience[J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2020, 37(4): 60-65.
- [22] 向兆军, 胡凤玲, 罗明华, 等. 基于电池组模型和聚类算法的锂离子电池组 SOC 不一致估计[J]. 机械工程学报, 2020, 56(18): 154-163.
XIANG Zhaojun, HU Fengling, LUO Minghua, et al. Estimation of SOC inconsistencies in lithium-ion battery packs based on battery pack modeling and clustering algorithm[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(18): 154-163.
- [23] 周奇, 罗培. 基于聚类算法的蓄电池 SOC 模糊预测[J]. 电源技术, 2017, 41(1): 71-74.
ZHOU Qi, LUO Pei. Battery SOC fuzzy estimation based on fuzzy clustering[J]. Journal of Power Sources, 2017, 41(1): 71-74.
- [24] 高崧, 朱华炳, 刘征宇, 等. 基于 K-means 聚类的退役动力电池梯次利用成组方法[J]. 电源技术, 2020, 44(10): 1479-1482, 1513.
GAO Song, ZHU Huabing, LIU Zhengyu, et al. Reutilization grouping of retired electric vehicle battery based on K-means clustering[J]. Journal of Power Sources, 2020, 44(10): 1479-1482, 1513.
- [25] 王骏, 王士同, 邓赵红. 聚类分析研究中的若干问题[J]. 控制与决策, 2012, 27(3): 321-328.
WANG Jun, WANG Shitong, DENG Zhaohong. Survey on challenges in clustering analysis research[J]. Control and Decision, 2012, 27(3): 321-328.
- [26] 朱浩, 赵策, 刘云峰, 等. 一种新型动力电池组能量均衡系统研究[J]. 电源技术, 2015, 39(11): 2387-2390.
ZHU Hao, ZHAO Ce, LIU Yunfeng, et al. Study on new type of power battery energy balance system[J]. Journal of Power Sources, 2015, 39(11): 2387-2390.
- [27] 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.
DAI Haifeng, WANG Nan, WEI Xuezhe, et al. A research review on the cell inconsistency of Li-ion traction batteries in electric vehicles[J]. Automotive Engineering, 2014, 36(2): 181-188, 203.

收稿日期: 2020-11-16; 修回日期: 2021-01-24

作者简介:

张朝龙(1982—), 男, 博士, 教授, 研究方向为动力电池管理技术。E-mail: zhangchaolong@126.com

(编辑 魏小丽)