

DOI: 10.7667/PSPC151245

基于离散 Fréchet 距离的电动汽车电池健康状态诊断方法

焦东升, 王海云, 朱洁, 迟忠君, 曾爽

(国网北京市电力公司, 北京 100075)

摘要: 针对动力电池在电动汽车运行过程中的安全性和动力性问题, 将离散 Fréchet 距离法与电池充放电曲线辨识相结合, 提出了基于在线检测平台的电池健康度(State of Health, SOH)诊断方法。通过 CAN 通信模块, 系统直接控制车载电池完成在线满充放电试验, 获取实际运行状态数据。并建立电动汽车服役全周期信息数据库, 进行健康度诊断预测, 来指导动力电池的安全评估和均衡维护。通过算例试验分析, 将诊断结果与退运后的检测数据做比较, 验证了该方法的正确性和准确性。

关键词: 电动汽车; 动力电池; 健康状态; 离散 Fréchet 距离; 曲线相似性

EV battery SOH diagnosis method based on discrete Fréchet distance

JIAO Dongsheng, WANG Haiyun, ZHU Jie, CHI Zhongjun, ZENG Shuang

(State Grid Beijing Electric Power Company, Beijing 100075, China)

Abstract: For EV battery safety and power performance during running, this paper combines discrete Fréchet distance method and identification of battery charge-discharge curve to propose a diagnostic method of battery SOH based on online test platform. System can control directly EV battery to complete the full charge-discharge test online by CAN communication module, and get the actual operational status data. EV service full cycle information databases are established to forecast the diagnosis of health degree, which can guide power battery safety assessment and balanced maintenance. By analyzing the cases of test calculation, the correctness and accuracy of the method is verified after comparing diagnosis result and test data of switching off.

Key words: electric vehicle; EV battery; state of health; discrete Fréchet distance; curve similarity

0 引言

能源危机和环境污染问题日益严重, 电动汽车取得了良好的发展前景。锂离子电池作为能量载体, 以其高能量密度、长循环寿命等优点得到广泛应用。因此, 其性能状态直接影响到电动汽车运行的安全性与动力性, 为了能够更经济高效的使用电池, 对其健康状态的评测将变得非常必要。

电动汽车运行过程中, 储能单元受到长期振动和随机脉冲式放电影响, 电池电化学性能受到不同程度的破坏, 单体间不一致性显现, 进而影响到电池管理系统(Battery Management System, BMS)对电池荷电状态(State of Charge, SOC)的估算精度。开展在运电池的健康状态诊断工作, 对其充放电曲线、

内阻等参数进行比较分析, 指导提升 SOC 的估算精度, 为均衡策略提供依据, 从而延长电池组的使用寿命^[1]。锂离子电池在使用过程中, 仅能采集到输出的电压和电流值, 是一个典型的黑盒模型。文献[2-6]在进行健康度评估时, 均是在研究电池衰退机理的基础上, 依据其内特性进行建模, 从而仿真分析与验证。该方法极大地依赖于电池的历史运行数据, 并局限于建立的模型结构。

本文放弃了传统的锂离子电池健康状态诊断方法。通过 CAN 通信模块, 将整车系统对储能单元的控制权交由上位机, 使得车载电池、充放电装置与上位机系统形成控制闭环, 在不拆卸电池模块的条件下, 直接对车载电池进行 100%DOD 充放电试验^[7-9], 绕过了依据历史数据建模估算的环节, 却获得了更加准确的 SOH 数据信息; 另一方面, 创新性地将离散 Fréchet 距离准则应用于电池模块的 SOH 诊断过程中^[10-13], 进行电池充放电曲线的“形

相似”辨识, 依据电池模块曲线簇间裂化程度判定其健康状态, 为电动汽车运行过程中在运电池的安全维护提供了依据。

1 动力电池健康状态诊断

1.1 充放电试验

国外用于锂离子电池检测的标准, 主要包括美国 USABC 提出的 FUDS, 以及美国能源部的 Freedom CAR 计划提出的 HPPC。我国的测试标准主要为 QC/T 743-2006《电动汽车用锂离子蓄电池》^[14], 其主要规定了锂离子电池的循环寿命测试和简单模拟工况标准。

本文进行的锂离子电池充放电试验, 采用美国 Aero Vironment 公司的 ABC-150 双通道、可回馈测试设备, 因其具有 450 V/150 A 的充放电性能, 经常用于电动汽车充电机和电池的分析试验中。锂离子电池充放电试验, 是指在实验室环境下, 将大功率充放电设备与温控箱、多维度振动台结合, 在电池组的充放电过程中, 完成其容量、内阻、开口电压等特性的测试。本文试验对象为车载 NB-LFP60 磷酸铁锂电池模组, 具体铭牌参数如表 1 所示。

表 1 NB-LFP60 锂离子电池参数

Table 1 Parameters of NB-LFP60 li-ion batteries

类别	参数值
单体规格	60 A/3.2 V
成组规格	1p24s
额定容量	60 Ah
成组电压	76.8 V
箱体重量	65 kg
箱体外型	23 cm×27 cm×80 cm
循环寿命	80%DOD: ≥2000 次
	70%DOD: ≥3000 次
充放电环境	充电: -18~75 °C
	放电: -30~75 °C
单体内阻	≤2 mΩ

按照 QC/T 743-2006 规定, 若没有针对性特殊试验要求策略, 通常在 20 °C ±5 °C 条件下, 磷酸铁锂蓄电池以 I_3 A 电流放电, 当蓄电池电压至 2.0 V 时截止, 静置 1 h; 然后在 15~25 °C 条件下以 I_3 A 恒流充电, 当蓄电池电压达 3.65 V 时转恒压充电, 充电电流降至 0.1 I_3 A 时截止, 静置 1 h, 记录测试结果, 一次循环试验完成。

可以看出, 锂离子电池特性测试主要是根据试验标准, 按照测试对象的特定要求, 在实验室环境下深度充放电循环, 获取过程数据和表征参数, 分析评估锂离子电池的健康状态。在 IEEE 标准 1188-

1996 中规定, 当锂离子电池的容量能力下降至 80% 额定值时, 该电池将从电动汽车上退运。

1.2 SOH 诊断测试

电动汽车在实际路况下, 当 SOC 小于 20% 时, 深度放电车辆容易降功率运行, 甚至抛锚, 但是电池在盈亏两端充放电试验最能体现其健康度; 同时, 实际路况驾驶测试, 很难保证测试环境的一致性, 而且不便于安装检测仪器; 将电池组从车上拆下来试验, 可能破坏到整车的电气和机械性能。因此, 车载电池的 SOH 诊断变得非常困难。

为了定性分析 SOH 的衰退情况, 本文将 CAN 通信模块接入整车控制系统, 应用上位机遥控车载充电继电器分合, 通过直流充电枪对电池组直接进行充电放电, 并将 BMS 信息反馈充电机, 形成控制闭环, 从而实现 SOH 信息的数据采集。具体充放电控制拓扑如图 1 所示。

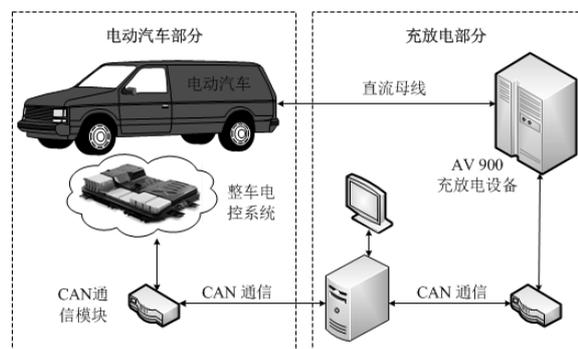


图 1 电动汽车 SOH 试验拓扑

Fig. 1 SOH test topology of electric vehicle

表 2 所示电动汽车服役初期的 NB-LFP60 电池组测试记录, 对应的 24 支单体充放电簇曲线如图 2 所示。此时电池容量还稍微高于表 1 的额定值, 充放电曲线紧密重叠, 相似度很高, 说明此时电池组有较好的一致性。

表 2 NB-LFP60 电池组检测数据

Table 2 Test data of NB-LFP60 li-ion batteries

项目	阶段	循环 1	循环 2	循环 3
容量/Ah	充电	61.03	61.95	61
	放电	60.82	60.79	60.85
截止电压/V	充电总电压	85.64	85.54	85.61
	充电单体最大	3.75	3.75	3.76
	充电单体最小	3.47	3.46	3.46
	放电总电压	64.80	64.79	64.74
	放电单体最大	2.84	2.84	2.85
	放电单体最小	2.54	2.54	2.53
内阻/mΩ	充完	27.20	27.20	27.20
	放完	24.36	24.05	24.5

2 离散 Fréchet 距离法

2.1 曲线相似性定义

曲线的相似性判断是计算机图像、模式识别和蛋白质结构预测等领域的核心问题^[15-16]，通常以相似性函数来定义判别曲线的差异性。从数学角度描述，给定两条曲线函数 $\theta_A, \theta_B: [a, b] \rightarrow \mathbf{R}^2$ ，它们之间的距离 L_p 定义为

$$\delta_p(A, B) = \|\theta_A - \theta_B\|_p \quad (1)$$

式中， $\|\cdot\|_p$ 表示 L_p 范数，对于给定的值 ε ， $\delta_p(A, B) \leq \varepsilon$ ，则称曲线 θ_A 与 θ_B 相似。

事实上，对整条曲线计算距离来确定它们是否匹配，将会产生很大的误差。一般情况下，需要对参与比较的两条或多条曲线进行分段，再逐段匹配。并且在分段匹配过程中，须对某段进行平移和伸缩变换。

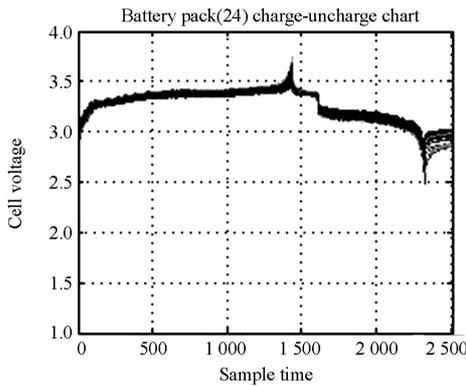


图2 电池组第120次充放电循环曲线

Fig. 2 120th charge-discharge curve of batteries pack

2.2 离散 Fréchet 距离

Fréchet 距离由 M. Fréchet 于 1906 年提出，随后 H. Alt 和 M. Godau 等人给出了 Fréchet 距离的计算方法^[17-18]，充分考虑了曲线的形状以及曲线上各点的时序，是一种判别曲线间相似程度的距离测度。

Fréchet 距离的直观解释是：给定距离空间的 2 条曲线 A 和 B ，一个人牵着一只狗，分别沿着曲线 A 和 B 以任意的自由速度从起点移动至终点，但不得后退，那么 Fréchet 距离就是人与狗之间最短拴狗绳的长度。

Fréchet 空间是指距离完备的赋范空间，即设二元组 (\mathbf{R}^2, d) 是度量空间，其中 d 是 \mathbf{R}^2 上的度量函数，在无需指明度量函数的情况下，把度量空间简称为 \mathbf{R}^2 。 $A, B: [0, 1] \rightarrow \mathbf{R}^2$ 是 Fréchet 空间上的两条连续曲线；又设 $\alpha, \beta: [0, 1] \rightarrow [0, 1]$ 是单位区间的

两个重参数化函数，则曲线 A 和 B 的 Fréchet 距离 $\partial_{dF}(A, B)$ 定义为

$$\partial_{dF}(A, B) = \inf \max_{t \in [0, 1]} \|A(\alpha(t)) - B(\beta(t))\|_p \quad (2)$$

式中： $\|\cdot\|_p$ 为欧几里德范数； \inf 为集合的下确界。 α, β 是重新参数化后建立的关于参数 t 的连续非减函数，并且 $\alpha(0) = \beta(0) = 0$ ， $\alpha(1) = \beta(1) = 1$ 。如果仅要求 α, β 是非减函数，那么 $\partial_{dF}(A, B)$ 就被称为弱 Fréchet 距离。

在 Fréchet 距离函数 $\partial_{dF}(A, B)$ 中， A, B, α, β 均为度量空间的已知函数， t 为单位区间 $[0, 1]$ 的连续变量，为了更好地处理实际问题，Eiter 和 Mannila 等人在连续 Fréchet 距离的基础上定义了离散 Fréchet 距离，将 \mathbf{R}^2 空间作离散化处理，即在区间采样若干点做分析，通过求极限的思想来理解两条曲线的离散 Fréchet 距离。

曲线 A 和 B 的采样点序列 $A'(t_k)$ 与 $B'(t_k)$ ，那么 A' 和 B' 间的离散 Fréchet 距离就是

$$\partial'_{dF}(A', B') = \min_{i \rightarrow n} \left[\min_{j \rightarrow m} \left(\min_k A'(t_k) - B'(t_k) \right) \right] \quad (3)$$

式中， $\partial'_{dF}(A', B')$ 即为曲线 A, B 间的 Fréchet 距离近似值，为提高精度，可增大采样点 n 的值。则 $A'(t_k)$ 与 $B'(t_k)$ 的集合链叫做曲线 A 和 B 的排列。

3 充放电曲线的相似性判定

如图 3 所示，电动汽车开始服役时，将对车辆的储能模块进行全面的检测，建立该车辆的 SOH 信息数据库，对于检测合格的车辆，投入实际路况运行。规定充放电循环次数、或行驶里程进行周期性 SOH 检测、数据存储和分析，判定在运电池的健康度。依据健康指标进行具体的均衡维护，从而保障电池的安全运行。

本文的电池 SOH 定性分析是通过离散 Fréchet 距离法来进行充放电曲线的相似性判定，计算过程如下。

设 $A: [0, m] \rightarrow \mathbf{R}^2$ 表示周期抽检的截尾均值曲线，即电池组某次循环时 100%DOD 充放电电压曲线簇的“标准值”曲线。 $\sigma(A) = (a_1, a_2, \dots, a_m)$ 表示 BMS 模块对应时间序列的采样点集，其中 m 为正整数，表示采样长度。同理，设 $B: [0, n] \rightarrow \mathbf{R}^2$ 表示电动汽车该次 SOH 抽检时，电池组 100%DOD 充放电中某支单体的电压曲线， $\sigma(B) = (b_1, b_2, \dots, b_n)$ 即为对应采样时序点集，其中 n 为正整数。 $d(a_i, b_j) = a_i - b_j$ 表示集合 $\sigma(A)$ 中元素 a_i 与集合 $\sigma(B)$ 中元素

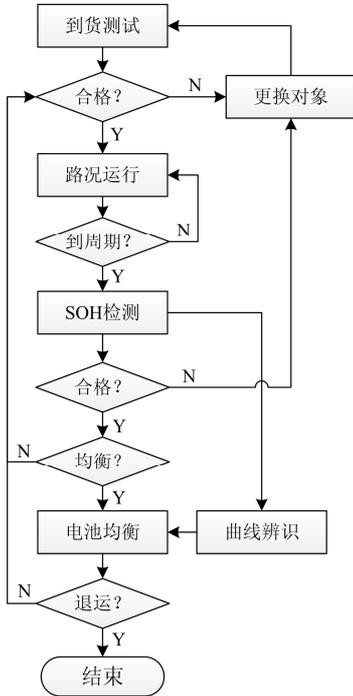


图 3 电池组 SOH 试验流程

Fig. 3 Flow chart of batteries pack SOH test

b_j 之间的连接距离, $\partial_{dF}(i, j)$ 表示两质点分别运动到曲线 A 的 i 位置和曲线 B 的 j 位置时对应的离散 Fréchet 距离。

由集合 $\sigma(A)$ 和 $\sigma(B)$ 求曲线 A 和 B 的元素连接矩阵 $D_{a \times b}$:

$$D_{a \times b} = \begin{bmatrix} d(1,1) & \cdots & d(1,n) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ d(m,1) & \cdots & d(m,n) \end{bmatrix} \quad (4)$$

令 $i=1, j=1$, 则 $\partial_{dF}(1,1) = d(a_1, b_1)$; 令 $i=2 \rightarrow m, j=1$, 则

$$\partial_{dF}(i, j) = \max\{\partial_{dF}(i-1, j), d(a_i, b_j)\} \quad (5)$$

令 $i=1, j=2 \rightarrow n$, 则

$$\partial_{dF}(i, j) = \max\{\partial_{dF}(i, j-1), d(a_i, b_j)\} \quad (6)$$

从 $i=2, j=2$ 出发, 按照式(7)搜索前进, 直至 $i=m, j=n$, 则曲线 A 和 B 的离散 Fréchet 距离 $\partial_{dF}(A, B) = \partial_{dF}(m, n)$ 。

$$\begin{cases} \partial_{dF}(i, j) = \max\{\partial_{dF}(i, j-1), d(a_i, b_j)\} \\ \partial_{dF}(i, j) = \min\{\partial_{dF}(i-1, j), \partial_{dF}(i-1, j-1), \partial_{dF}(i, j-1)\} \end{cases} \quad (7)$$

那么, $\partial_{dF}(A, B)$ 值表示曲线“形相似”程度。

4 算例分析

以配置 NB-LFP60 成组电池的北汽 E-150 电动汽车为研究对象, 成组方式为 1p24s(1 并 24 串), 单箱容量为 76.8 V/60 Ah, 算例以单箱进行分析, 将实际路况运行和 SOH 测试相结合, 车辆每次能耗运行均 100%DOD 深度放电。设定 SOH 抽检的间隔周期约为每 100 次满充放循环, 通过 BMS 获取充放电曲线和成组放电容量。如图 4 所示, 成组容量由额定值 $C_n = 60$ Ah 经过约 468 次循环能耗测试, 衰减至 80% C_n 的退运值, 根据 SOH 指标, 进行均衡维护。为了进行算例验证, 该测试过程在 80% C_n 下共进行了 817 次充放电循环, 成组容量最终衰减至 26.35 Ah。

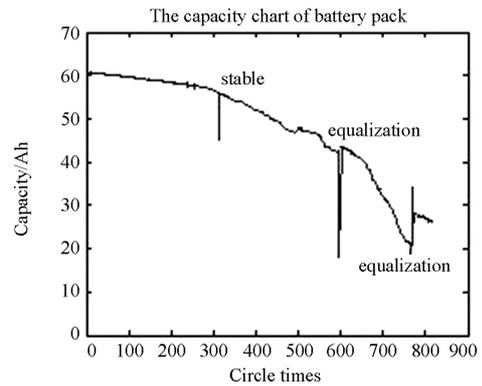


图 4 成组电池容量衰减曲线

Fig. 4 Capacity fade curve of batteries pack

按照图 3 所示的 SOH 试验流程, 选取第 120 次周期 100%DOD 充放电曲线作为辨识对象, 此时的成组放电容量为 59.45 Ah, 单体间最大压差为 336.7 mV, 成组内阻为 24.36 mΩ。按照 QC/T 743-2006 充放电策略, 采样速率为 12 S/min, 采样点数为 2510 个。该箱电池的 24 支单体相对曲线簇“标准值”曲线的 ∂'_{dF} 值分布如图 5 所示。可以看出, ∂'_{dF} 最小值为 0.0343, 是 4 号单体, 在电池组运行初期, ∂'_{dF} 相对较小, 各单体的充放电曲线相似度较高, 很接近“标准值”曲线, 一致性好, 放电容量接近额定容量 C_n 。

电动汽车运行至第 520 个满充放周期时, 电池放电容量为 46.91 Ah, 额定值占比 78.2%, 单体间最大压差 579.7 mV, 一致性能变差。进行该阶段的 SOH 试验, 曲线的 ∂'_{dF} 值分布如图 6 所示。可以看出 20 和 18 号单体的 ∂'_{dF} 均大于 0.1, 其中 20 号单体的 ∂'_{dF} 达到 0.4745, 远大于其他单体。因此, 在试验至第 600 次循环时, 对 20 号单体进行了更换, 并做均衡维护, 均衡后单体最大压差降低至

205.8 mV, 100%DOD 放电容量上升至 44.96 Ah, 相对均衡前提升 4.12%, 并对被更换的 20 号单体单独进行了容量测定, 为 43.52 Ah, 低于 80% C_n 值。

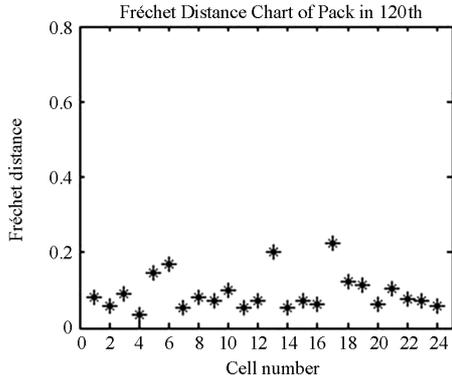


图 5 第 120 次循环曲线离散 Fréchet 距离
Fig. 5 Discrete Fréchet distance of the 120th circle curve

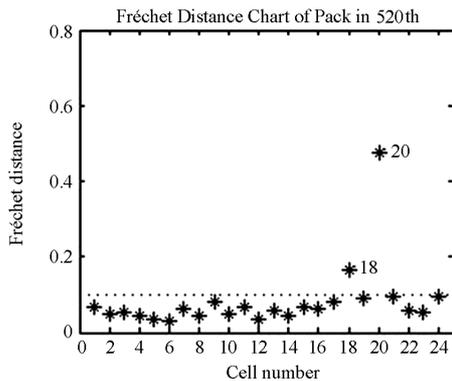


图 6 第 520 次循环曲线离散 Fréchet 距离
Fig. 6 Discrete Fréchet distance of the 520th circle curve

在电池组运行到第 720 个循环时, 容量已衰减至 29.21 Ah, 额定值占比为 48.7%, 完全不能够满足电动汽车的正常运行需求。进行 SOH 抽检, 充放电曲线如图 7 所示, 曲线簇的一致性明显变差。获取曲线簇的 δ'_{dF} 值分布如图 8 所示, 可以看出, 12、18 和 20 号单体的 δ'_{dF} 均大于 0.1, 其中, 20 号单体在更换、均衡后, δ'_{dF} 减小; 18 号单体的 δ'_{dF} 从第 520 个循环的 0.165 7 快速递增至 0.546 0; 12 号单体的 δ'_{dF} 值为 0.117 1, 也超过了 0.1 的限值。

为了分析该箱电池组的 SOH 衰减情况, 试验共进行了 817 次循环, 图 9 为电池组全服役周期的一致性情况。从图中可知, 大约第 750 次循环后最大压差反而递减, 说明电池组一致性问题, 已不是导致该阶段放电容量衰减的主要因素, 各单体的化学活性已整体老化。

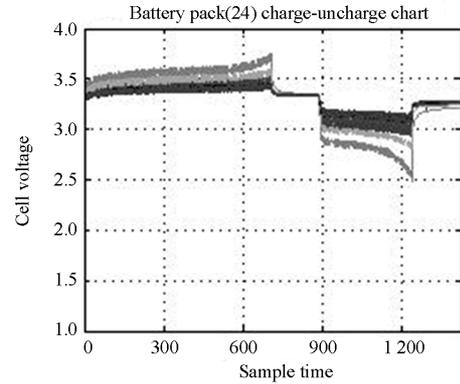


图 7 电池组第 720 次充放电循环曲线簇
Fig. 7 720th charge-discharge curve of batteries pack

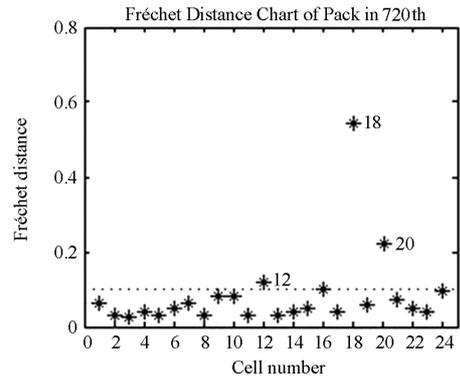


图 8 第 720 次循环曲线离散 Fréchet 距离
Fig. 8 Discrete Fréchet distance of the 720th circle curve

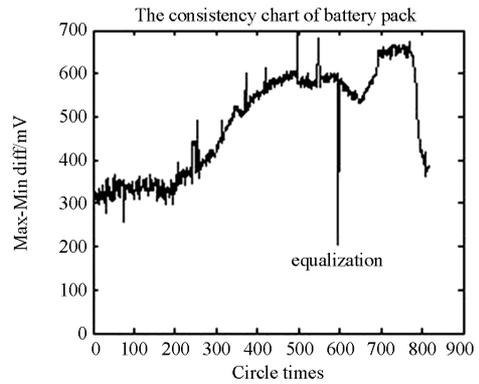


图 9 电池组服役全周期一致性曲线
Fig. 9 Consistency curve of batteries pack

最后, 对电池组进行了拆解, 将每支单体的容量进行测定, 具体情况如图 10 所示。可以看出, 12 和 20 号单体容量衰减最多, 剩余容量仅为 32.93 Ah 和 39.6 Ah, 远低于 80% C_n 值, 最大剩余容量为第 600 次循环已更换过的 18 号单体, 为 59.78 Ah, 接近额定值 C_n 。此剩余容量的测定结果与第 720 次周期抽检曲线簇的 δ'_{dF} 值判定完全一致, 12、20 和 18

号单体的 δ'_{df} 均大于 0.1, 并且早在第 520 次循环中已能够准确的预测。

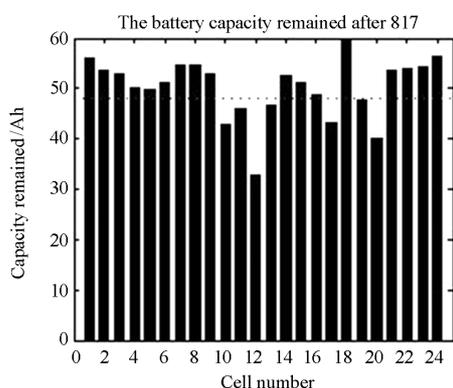


图 10 组内单体最终容量对比图

Fig. 10 Comparison chart of RUL from all cells

另外, 本次 SOH 试验对电池组的全服役周期均进行了抽检, 在 800 余次 100%DOD 充放电循环中, 记录的 δ'_{df} 如图 11 所示, 分别为曲线簇中 4 和 20 号单体, 以及全服役周期的截尾均值曲线的健康度。可以看出, δ'_{df} 值随着电池服役周期而递增, 说明曲线簇间裂化程度加剧; 同时, 约 600 次循环周期后进行组内均衡, 整体 δ'_{df} 变小; 另外, 循环初期 20 号单体 δ'_{df} 值还比较类似于“标准值”曲线, 试验后期 20 号单体的 δ'_{df} 值明显偏离曲线簇, 说明离散 Fréchet 距离法能够准确判定充放电曲线的“形相似”, 从而预测出电池组中的“不健康”单体。

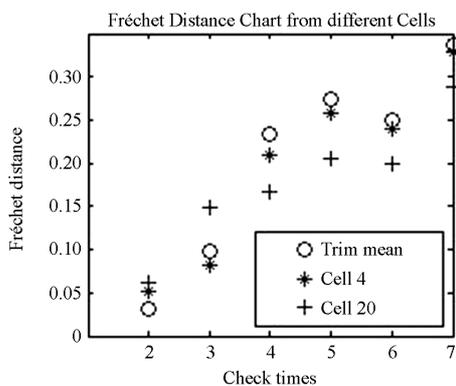


图 11 不同抽检周期的离散 Fréchet 距离对比

Fig. 11 Comparison chart of discrete Fréchet distance

5 结论

(1) 本文摒弃了传统的锂离子电池健康度判定方法, 建立了基于实验室环境的车载储能模块检测平台, 直接实现车载电池的 100%DOD 充放电试验, 改变了依靠历史数据建模估算的方法, 保证了 SOH

诊断的信息准确性;

(2) 将离散 Fréchet 距离方法应用在电池组充放电曲线辨识中, 通过 δ'_{df} 值筛选出电池组中的“不健康”单体, 成功实现 SOH 的预测。并进行了单体剩余容量的测定, 验证了单体容量的衰减情况与预测结果的一致性;

(3) 建立了基于服役前检测、SOH 周期诊断和均衡维护等信息的电池组数据库, 形成了电动汽车电池全服役周期的健康度诊断和维护体系, 保证了电池在电动汽车服役运行过程中的安全性。

参考文献

- [1] 宋永华, 阳岳希, 胡泽春. 电动汽车电池的现状与发展趋势[J]. 电网技术, 2011, 35(4): 1-6.
SONG Yonghua, YANG Yuexi, HU Zechun. Present status and development trend of batteries for electric vehicles[J]. Power System Technology, 2011, 35(4): 1-6.
- [2] 李勇, 王丽芳, 廖承林. 电动车锂离子电池健康状态模型研究进展[J]. 电源技术, 2013, 137(5): 863-866.
LI Yong, WANG Lifang, LIAO Chenglin. Advances of state of health modeling of lithium-ion battery for electric vehicles[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2013, 137(5): 863-866.
- [3] 刘大同, 周建宝, 郭力萌, 等. 锂离子电池健康评估和寿命预测综述[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(1): 1-16.
LIU Datong, ZHOU Jianbao, GUO Limeng, et al. Survey on lithium-ion battery health assessment and cycle life estimation[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(1): 1-16.
- [4] GANG N. Cycle life performance of rechargeable li-ion batteries and mathematical modeling[D]. USA: University of South Carolina, 2004.
- [5] RAMADASSP, HARANB, WHITE R, et al. Mathematical modeling of the capacity fade of Li-ion cells[J]. Journal of Power Sources, 2003, 123(2): 230-240.
- [6] 商云龙, 张奇, 崔纳新, 等. 基于 AIC 准则的锂离子电池变阶 RC 等效电路模型研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(17): 55-62.
SHANG Yunlong, ZHANG Qi, CUI Naxin, et al. Research on variable-order RC equivalent circuit model for lithium-ion battery based on the AIC criterion[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(17): 55-62.
- [7] 高明煜, 何志伟, 徐杰. 基于采样点卡尔曼滤波的动力电池 SOC 估计[J]. 电工技术学报, 2011, 26(11): 161-167.
GAO Mingyu, HE Zhiwei, XU Jie. Sigma point Kalman filter based SOC estimation for power supply battery[J].

- Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(11): 161-167.
- [8] 姚致清, 于飞, 赵倩, 等. 基于模块化多电平换流器的大型光伏并网系统仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(36): 27-33.
YAO Zhiqing, YU Fei, ZHAO Qian, et al. Simulation research on large-scale PV grid-connected systems based on MMC[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(36): 27-33.
- [9] 李加升, 吴免利, 刘玉芳, 等. 基于充放电曲线的锂电池智能分选系统研究[J]. 电源技术, 2011, 35(8): 912-914.
LI Jiasheng, WU Mianli, LIU Yufang, et al. Research of li-ion battery intelligent classifying system based on charge and discharge curve[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2011, 35(8): 912-914.
- [10] 连湛伟, 石欣, 克潇, 等. 电动汽车充换电站动力电池全寿命周期在线检测管理系统[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(12): 137-142.
LIAN Zhanwei, SHI Xin, KE Xiao, et al. The whole life cycle on-line detection and management system of power battery in the electric vehicle charging and exchanging station[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(12): 137-142.
- [11] 多智华, 李革臣. 具有波形识别能力的电池分类器的算法研究[J]. 电源技术, 1998, 22(4): 74-78.
DUO Zhihua, LI Gechen. Study on the method of battery classification with waveform recognition ability[J]. Chinese Journal of Power Sources, 1998, 22(4): 74-78.
- [12] 罗滇生, 何洪英. 基于形态相似准则的曲线拟合算法及其在超短期负荷预测中的应用[J]. 电网技术, 2007, 31(21): 81-84.
LUO Diansheng, HE Hongying. A shape similarity criterion based curve fitting algorithm and its application in ultra-short-term load forecasting[J]. Power System Technology, 2007, 31(21): 81-84.
- [13] 钟浩, 舒文倩, 唐民富. 基于局部曲线拟合的电压失稳预防控制算法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(12): 36-40.
ZHONG Hao, SHU Wenqian, TANG Minfu. Preventive control method to avoid voltage instability based on local curve fitting[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(12): 36-40.
- [14] QC/T 743-2006 电动汽车用锂离子蓄电池[S]. 北京: 中华人民共和国工业和信息化部, 2006.
QC/T 743-2006 lithium-ion batteries for electric vehicle[S]. Beijing: Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China, 2006.
- [15] 郭煜华, 范春菊. 含大规模电动汽车的配电网保护技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(8): 14-20.
GUO Yuhua, FAN Chunju. Research on relaying technologies of distribution network including mass electric vehicles[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(8): 14-20.
- [16] 唐进君, 曹凯. 一种自适应轨迹曲线地图匹配算法[J]. 测绘学报, 2008, 37(8): 308-314.
TANG Jinjun, CAO Kai. An adaptive trajectory curves map-matching algorithm[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2008, 37(8): 308-314.
- [17] 周生奇, 周维维, 孙鹏菊. 基于曲线离散 Fréchet 距离的风电并网变流器中 IGBT 模块缺陷诊断方法[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(2): 8-13.
ZHOU Shengqi, ZHOU Luowei, SUN Pengju. Defect diagnosis based on discrete Fréchet distance of curves for IGBT module used in grid-connected converter of wind power[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(2): 8-13.
- [18] 陈超, 黄国勇, 范玉刚, 等. 基于离散 Fréchet 距离和 LS-SVM 的短期负荷预测[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(5): 142-147.
CHEN Chao, HUANG Guoyong, FAN Yugang, et al. Short-term load forecasting based on discrete Fréchet distance and LS-SVM[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(5): 142-147.

收稿日期: 2015-07-19

作者简介:

焦东升(1985-), 男, 通信作者, 硕士研究生, 工程师, 研究方向为电动汽车与储能技术, 动力电池检测技术; E-mail: jdsh_01@163.com.

王海云(1988-), 女, 硕士研究生, 工程师, 研究方向为大电网调度优化. E-mail: 13520396759@139.com

(编辑 姜新丽)