

基于模糊逻辑的多特征参量综合锂电池 SOH 评估

黄炜昭¹, 徐曙¹, 陈荔², 刘玉², 胡蓉²

(1. 深圳供电局有限公司, 深圳 518000; 2. 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510663)

摘要: [目的] 针对锂离子电池 SOH(State of Health) 评估易受电池特性不一致影响, 从而产生评估结果分散并最终导致难以满足电动汽车服役环境需求的问题。[方法] 分析了典型储能元件 NCM 电池在寿命循环测试过程中的开路电压曲线、脉冲电压响应和增量容量曲线的相应变化。选取与电池容量衰减密切相关的 6 种特征参量, 提出一种基于模糊逻辑的隶属函数, 建立 SOH 评价集关联特征参量, 并采用以相关系数为标度的层次分析法确定参量指标对评估结果影响权值的 SOH 综合评估方法, 最后以完成寿命循环测试的 4 只 NCM-21700 电池对所提出方法的有效性进行了验证。[结果] 结果表明: 该方法能有效消减 SOH 评估结果的分散, 评估平均误差不超过 3%, 最大误差不超过 5%。[结论] 所提 SOH 综合评估方法是正确并有效的, 可为实际应用提供指导。

关键词: 锂离子电池; SOH; 模糊逻辑; 特征参量; 容量衰减

中图分类号: TK01; TM7

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2019)03-0098-07

Multiple Characteristic Variables Comprehensive SOH Evaluation Based on Fuzzy Logic for Lithium-ion Battery

HUANG Weizhao¹, XU Shu¹, CHEN Li², LIU Yu², HU Rong²

(1. Shenzhen Power Supply Co., Ltd., Shenzhen 518000, China;

2. China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

Abstract: [Introduction] (The SOH(State of Health) evaluation of lithium-ion batteries is difficult to meet the on-board environment requirements of electric vehicles because of the dispersion of evaluation results was caused by the inconsistent characteristics of batteries. [Method] To solve the problem, the corresponding changes of open circuit voltage curve, pulse voltage response and incremental capacity curve of typical energy storage component NCM battery during life cycle test were analyzed. 6 characteristic variables which were closely related to the battery capacity loss were selected, and a comprehensive SOH evaluation method based on fuzzy logic was proposed. In this method, membership function was used to establish the relationship between SOH evaluation sets and variable indicators, and analytic hierarchy process based on correlation coefficient was used to determine the weights of variable indicators that have an impact on the evaluation results. Finally, the validity of the proposed method was verified by four NCM-21700 batteries that completed the life cycle test. [Result] The results show that the method can effectively reduce the dispersion of SOH evaluation, and the average error is not more than 3% as well as the maximum error is no more than 5%. [Conclusion] This work provides some guidance for further study on state of health evaluation of lithium-ion batteries.

Key words: lithium-ion battery; SOH; fuzzy logic; characteristic variables; capacity loss

近年来, 随着人们对化石能源逐渐衰竭和气候环境不断恶化等问题的日益关注, 电动汽车(Elec-

tric Vehicles, EV)以其独特的性能效率优势和节能环保特质得到了广泛应用^[1-3]。锂离子电池凭借能量密度大、输出电压高、自放电率低、循环寿命长等优势, 被普遍认为是 EV 储能电源最优的选择方案^[4-5]。

电池健康状态(State of Health, SOH)是反映电

池老化衰减程度的重要状态量。根据工程实际的需求,SOH 可以从不同角度进行定义,最常使用容量衰减来进行表示,即当前老化状态下静态容量与初始状态下静态容量的比值。相较于电池荷电状态(State of Charge, SOC),SOH 的相关研究仍不完善,是锂离子电池状态评估研究领域的薄弱环节^[6]。SOH 评估直接关系到 EV 应用下电池全寿命周期内运行的安全性和可靠性,不仅能为电池的梯次利用提供决策依据,而且是电池管理系统实现故障诊断和安全预警功能的必要前提^[4,7-8]。

事实上电池的老化衰减显然取决于电极和电解质材料在运行过程中性能的变化^[9-10]。要想从本质上阐述电池的老化发展机制,应采用电化学阻抗谱、X 射线衍射、电子显微镜扫描等电化学手段对全寿命周期内材料反应变化情况进行研究。参考文献[11]中,作者利用 X 射线衍射法分析了锂离子电池阴极材料在老化衰减过程中成分特性的改变,并进一步讨论了其与电池容量衰减的关系。文献[12]针对锂电池阳极、阴极和电解质材料老化机制的差异性和关联性进行了全面综合的探究,并对电化学阻抗谱方法在电池老化过程和健康状态研究中的应用进行了综述。电化学方法虽然能直接阐明电池内部物理化学层面的衰减退化情况,但往往难以适用实际 EV 应用条件,分析设备昂贵、操作流程复杂、关键参数配置困难,及对电池系统造成的侵入性或破坏性,都严重阻碍电化学方法在 EV 领域的进一步应用。

本文针对锂离子电池 SOH 评估易受电池特性不一致影响从而产生评估结果分散,并最终导致难以满足电动汽车服役环境需求的问题,选取了与电池容量衰减密切相关的 6 种特征参量,提出一种基于模糊逻辑隶属函数建立 SOH 评价集与特征参量指标联系,并采用以相关系数为标度的层次分析法确定参量指标对评估结果的影响权值的 SOH 综合评估方法。

1 电池 SOH 评估方法

目前,阻抗辨识、特征信息提取以及增量容量(Incremental Capacity, IC)曲线分析是三种具有潜力满足车载环境需求的 SOH 评估方法,因此获得了国内外学者的广泛关注。

阻抗辨识法利用电池某些特定阻抗(如欧姆内

阻、极化阻抗等)与容量衰减之间的相关性进行老化状态的识别。相关阻抗可以通过某些规程化测试结果直接计算得到,但这种开环计算通常被认为容易受到外部噪声的干扰。更为可靠的办法是基于等效电路模型采用最小二乘^[13]等递推算法或遗传搜索^[14]等智能算法对相关阻抗参数进行闭环辨识。文献[6]通过对电池电化学阻抗谱进行简化处理提取出一种双极化模型,采用遗忘因子递推最小二乘法实现对固体电解质界面膜(Solid Electrolyte Interface, SEI)电阻的在线辨识,通过其与容量衰减的映射关系,完成了对剩余容量的实时估计。

随着电池的老化衰减,相同激励下的电池端电压响应序列将呈现一定规律性的变化。利用信息论中熵的概念对满足条件的充放电测试数据进行特征信息提取可对该变化规律实现量化分析。文献[15-17]分别采用了基于香农熵、样本熵、多尺度熵的方法对电池健康状况和衰减故障进行了监测诊断,并取得了一定成效。在文献[18]中,针对 EV 电池健康管理提出了一种改进的基于样本熵的容量估计方法,该方法以混合充放电脉冲激励下的电压响应作为估计器的输入,克服了样本熵方法在恒流激励情况时的不足。估计器在三种不同温度下的有效性和稳健性在文献最后得到了充分验证。

通过对恒流充电或放电时的电压容量特性计算 $\Delta Q/\Delta U$ 可以获得电池的 IC 曲线。IC 曲线峰值是电池相变过程中电压平台效应的反映,与电池老化衰减程度密切相关。因此,分析电池全寿命周期内 IC 曲线的演变,可以在一定程度上解释电池的老化机制和特性变异,从而对电池健康状况形成一个初步判断^[19-21]。文献[22]选择 10 mV 的电压间隔采用点计数法获取 IC 曲线,考虑到 IC 曲线峰值的交互重叠问题,参考模糊逻辑中隶属函数的概念,将 IC 曲线量化成与阳极相变过程对应的三个容量 QA、QB、QC。这三个容量在电池全寿命周期内的变化情况,即能够表征出电池的老化衰减状态。

锂离子电池的寿命循环测试通常需要消耗大量时间,而且测试结果往往呈现出较大的分散性,这是由于电池单体特性的不一致所造成的。这将导致寿命循环测试结果的参考价值和指导意义变得十分有限,从而进一步提升电池 SOH 评估工作难度^[6,23]。因此,探寻一种准确度高、分散性低、满足电池车载环境需求的 SOH 估计方法仍是锂离子

电池状态估计领域的研究重点和难点。

2 模糊综合 SOH 评估

2.1 评估指标体系的建立

对阻抗辨识法、特征信息提取法和 IC 曲线分析法综合进行考虑后,共选取 6 个特征参量建立起如图 1 所示的 SOH 评估指标体系,以下将详述各指标的量化过程。

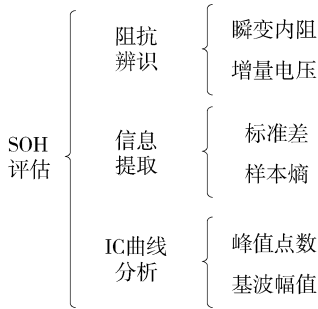


图 1 SOH 评估指标体系

Fig. 1 SOH evaluation indicators system

1) 阻抗指标。利用混合脉冲电压响应能够计算出电流突变时的瞬变内阻 R_0 和充/放脉冲阶段的增量电压 ΔU , R_0 和 ΔU 分别取决于欧姆内阻和极化阻抗,计算公式如下:

$$R_0 = \left| \frac{U^+ - U^-}{\Delta I} \right| \quad (2)$$

$$\Delta U = |U_{t1} - U_{t0}| \quad (3)$$

式中: U^- 、 U^+ 分别表示电流突变前、后的端电压值; ΔI 表示电流突变差值; U_{t1} 、 U_{t0} 分别表示脉冲结束和起始时刻的端电压值。实际计算时, R_0 取两次电流突变的平均值, ΔU 取充电、放电两个脉冲的平均值。

特征信息指标。将电压响应看作一时间序列 u_i , 其中 $1 \leq i \leq N$, 利用统计学中标准差的概念能够量化数据的离散程度, 利用信息论中样本熵的概念能够量化序列的波动特性。标准差计算公式如下:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (u_i - \bar{u})^2} \quad (4)$$

式中: \bar{u} 是时间序列 u_i 的平均值。

样本熵是一种研究时间序列复杂度的有效工具, 最早由 Richman 和 Moorman 提出并应用于生理时间序列分析^[32]。当参数序列长度 N 、分段窗口长

度 m 、容差阈值 r 确定后, 样本熵计算过程如下:

对于长度为 N 的电压序列 u_i , 重构形成 $N - m + 1$ 个 m 维向量, 其中第 j 个向量为

$$X_j = \{u_j, u_{j+1}, \dots, u_{j+m-1}\} \quad (5)$$

两个向量之间的距离被定义为对应标量元素的最大绝对差值:

$$d[X_i, X_j] = \max \{|u_{i+k} - u_{j+k}| : 0 \leq k \leq m - 1\} \quad (6)$$

求向量 X_i 和其他 $N - m$ 个向量 X_j , $j \neq i$ 间的距离, 并统计其中满足条件 $d[X_i, X_j] < r$ 的向量个数, 记为 W_i , 定义与向量 X_i 对应的模版匹配数为:

$$B_i^m = \frac{1}{N - m} W_i, i = 1, 2, \dots, N - m + 1 \quad (7)$$

求 B_i 对所有 i 值的平均值:

$$B^m = \frac{1}{N - m + 1} \sum_{i=1}^{N - m + 1} B_i^m \quad (8)$$

令 $k = m + 1$, 重复上述步骤, 求得

$$A^k = \frac{1}{N - k + 1} \sum_{i=1}^{N - k + 1} A_i^k \quad (9)$$

则样本熵定义为

$$\text{SampEn}(N, m, r) = -\ln \left[\frac{A^k}{B^m} \right] \quad (10)$$

3) IC 曲线指标。IC 曲线适用于对电池老化程度的定性分析, 因此需要采取一定手段将其与容量衰减的相关性进行量化。通过对 IC 曲线的分析可知, 曲线的变化主要集中在峰值附近, 因此可以通过统计三个峰值电压范围内的总采样点数作为评价指标来反映 SOH 的变化, 本文峰值电压范围选取为 3.5 ~ 3.8 V。此外, 可以将 IC 曲线看作一离散信号, 通过对该离散信号进行快速傅里叶变换 (Fast Fourier Transform, FFT) 分析其频谱, 结果发现其对应基波分量的振幅随老化衰减程度的加剧逐渐减小, 实际上这是 IC 曲线峰值下降在频谱上的反映, 因此将该幅值选作量化 IC 曲线的另一个评估指标。

由于各指标在单位和量纲上存在差异, 使得指标之间的可比性较差, 需要进行归一化处理, 使各指标处于同一数量级, 归一化公式如下:

$$x^* = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (11)$$

x_{\min} 和 x_{\max} 分别表示各指标统计后获得的最小和最大值。值得注意的是, 文中对于 x_{\min} 和 x_{\max} 的选取只考虑到参与测试的电池, 虽具有一定代表性,

仍不会增加对评估结果的分散性。实际应用时应考虑采用大量随机抽样的电池数据以减少分散性的影响。经归一化后的各指标与容量衰减的相关性由散点图2给出。可以看出, 所选取的各指标与容量衰减均具备完全单调关系, 但某些指标如瞬变电阻和标准差, 与容量衰减变化规律存在一定非线性, 这可能给评估过程代入偏差, 这更说明了选取多特征参量的必要性。

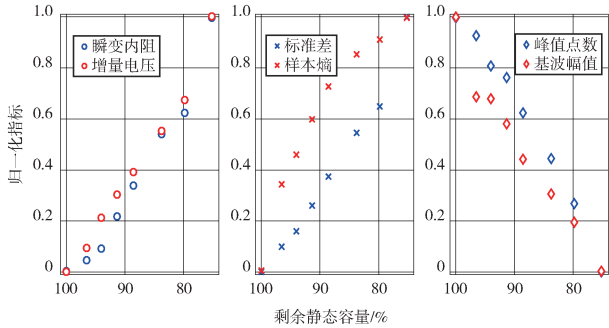


图2 各指标与容量衰减散点图

Fig. 2 The scattered plots between each indicator and capacity loss

2.2 模糊集合的生成

当计算得到上述各指标归一化数值后, 并不能通过其与静态容量衰减的拟合关系直接查找 SOH 值, 原因在于拟合曲线是由被测电池数据导出, 不具备对该型号电池的普遍适用性。为解决这个问题, 本文采用了模糊逻辑的方式对各指标离散数据使用相应的隶属度函数进行了模糊化, 具体步骤如下:

1) 评价集的确定。考虑到本文以 75% 初始容量作为寿命终止时刻, 为方便计, 确定评价集为 $V = \{V_1, V_2, V_3, V_4, V_5, V_6\}$, 其中 V_1 对应 100% 初始容量, 其余以 5% 的间隔依次递减。

2) 隶属度函数的选择。对于某个归一化指标 x_i^* ($1 \leq i \leq 6$) 需要通过隶属度函数使其与评价集建立联系。本文涉及到的隶属度函数均采用如图 3 所示三角形和梯形组合的形式, 其中横坐标表示指标的归一化数值, 纵坐标表示指标隶属于某评价集的概率。这样处理后一个指标便能同时对应属于多个评价集, 即每个评价集只部分占有该指标。需要注意的是, 对于评价随指标值减小而恶化的情况, 评价集的方向应该与图 3 所示相反。

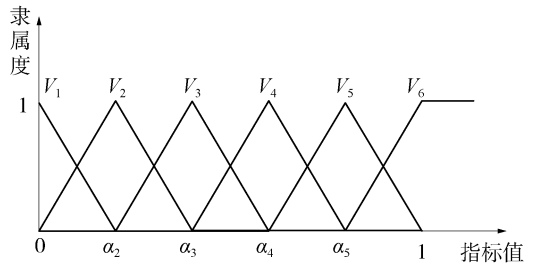


图3 隶属度函数示意图

Fig. 3 Diagram of membership function

由于各指标与静态容量衰减的关系曲线并不完全相同, 故而在每个指标对应的隶属度函数中评价集概率为 1 的横坐标点应区别选择, 此处以 α_i ($1 \leq i \leq 6$) 来表示。归一化处理指标后, α_1 和 α_6 分别确定为 0 或 1, 还需确定其余四点的位置。本文根据各指标和静态容量衰减的拟合曲线规律对 $\alpha_2 \sim \alpha_5$ 的位置进行了确定, 结果如表 1 所示。

表1 $\alpha_2 \sim \alpha_5$ 选择结果

Tab. 1 Selection results of $\alpha_2 \sim \alpha_5$

指标	α_2	α_3	α_4	α_5
x_1^*	0.07	0.27	0.50	0.62
x_2^*	0.16	0.35	0.51	0.67
x_3^*	0.14	0.31	0.51	0.64
x_4^*	0.43	0.66	0.83	0.91
x_5^*	0.86	0.69	0.50	0.27
x_6^*	0.69	0.51	0.33	0.20

3) 模糊集合的生成。使用隶属度函数对全部 6 个指标进行模糊化, 建立起其与全部 6 个评价集之间的联系后, 即可生成相关的模糊集合, 使用 6×6 的矩阵 Z 来表示。

$$Z = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} & \cdots & z_{16} \\ z_{21} & z_{22} & \cdots & z_{26} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ z_{61} & z_{62} & \cdots & z_{66} \end{bmatrix} \quad (12)$$

式中: 元素 z_{ij} 表示第 i 个指标对应于第 j 个评价集的隶属度。

2.3 综合评价的计算

对于如 2.2 节生成的模糊集合 Z , 某列中元素值越大, 说明该列对应的评价集越能描述电池的健康状况。但在工程实际中, 以矩阵变化来说明电池老化衰减程度会显得不够简便明晰。因此需要将模糊集合在一定规则的约束下实现去模糊化, 获得确

定的 SOH 评价值。本文采用加权平均法对模糊集合去模糊化。

设各评价指标的权重为 β_i : $1 \leq i \leq 6$ 且和等于 1, 则对于评价集 V_j : $1 \leq i \leq 6$ 来说, 其输出值由下式计算:

$$y_j = \frac{\sum_{i=1}^6 \beta_i z_{ij}}{\sum_{i=1}^6 \beta_i} = \sum_{i=1}^6 \beta_i z_{ij} \quad (13)$$

y_j 是对评价集 V_j 对应列元素大小的量化说明。综合全部 6 个评价集的输出值, 即可计算出 SOH 评估数值:

$$Y = \sum_{j=1}^6 y_j V_j \quad (14)$$

各评价指标的权重采用层次分析法 (Analytic Hierarchy Process, AHP) 确定。AHP 通过将指标两两比较, 按照一定的标度理论, 建立表征重要程度的判别矩阵, 通过计算判别矩阵的最大特征值和特征向量, 得到各指标重要性次序, 从而得到权重向量。本文根据图 2 所示指标与容量衰减的散点关系计算二者的相关系数, 按照系数越大取重要程度越高这一标度理论建立了判别矩阵。也正是基于这一标度理论, 判别矩阵自动满足一致性检验要求。

3 方法验证

为了验证上述方法的有效性, 该方法被应用到 4 只 NCM-21700 电池上。实际剩余静态容量为 96.58%、91.34% 和 83.71% 时 3 号电池各指标值经过隶属度函数生成的模糊集合如图 4 所示。明显, 模糊集合随着电池静态容量的衰减呈现出相应的变化, 即随着电池容量衰减程度的加深, 模糊集合的列元素值相应地向对应评价集较低的方向转移。

以指标和容量衰减相关系数为重要标度的层次分析法计算得到的指标权重显示, 对于进行测试的 4 只 NCM-21700 电池, IC 曲线基波幅值、瞬变内阻和样本熵三种特征参量指标与容量衰减的相关性较强, 这说明在此情形下用这三种特征参量作为判断电池寿命衰减的依据相较于其余三种来说更为可靠, 因此给这三种特征参量选取更大的重要度数值, 因此其计算得到的权重系数更大。

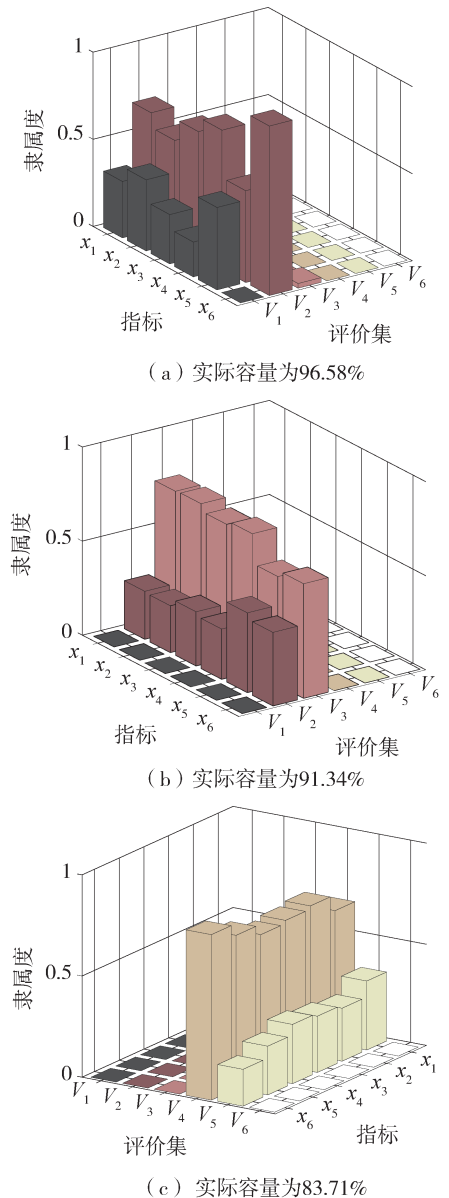


图4 三号电池在不同剩余容量下的模糊集合

Fig. 4 Fuzzy set of battery 3 under different residual capacity

4 只 NCM-21700 电池 SOH 评估结果和静态容量测试获得的实际结果及相对误差如图 5 所示。结果表明, 在文中规定的寿命范围内, 所提出方法对 SOH 的评估具有有效性, 对于所测试的 4 只 NCM-21700 电池评估平均误差均不超过 3%, 最大误差均不超过 5%。

此外, 利用单参量曲线拟合的方法对电池的 SOH 进行评估, 并与所提出方法进行了对比, 误差结果如表 3 所示。在全部 6 种特征参量中, 使用内阻、基波幅值、样本熵以及标准差进行单参量评估时效果较好, 但从评估最大误差看, 单参量评估法

最大误差均在 7% 以上, 甚至超过 15%, 这是由于电池特性不一致造成的评估结果分散, 这将导致单参量评估方法难以满足实际车载环境应用条件。

表 3 与单参量评估方法对比

Tab. 3 Comparing with single variable evaluation %

误差	内阻	基波幅值	样本熵	标准差	综合评估
平均误差	4.02	4.24	4.70	5.76	2.62
最大误差	7.73	9.74	16.54	12.40	4.96

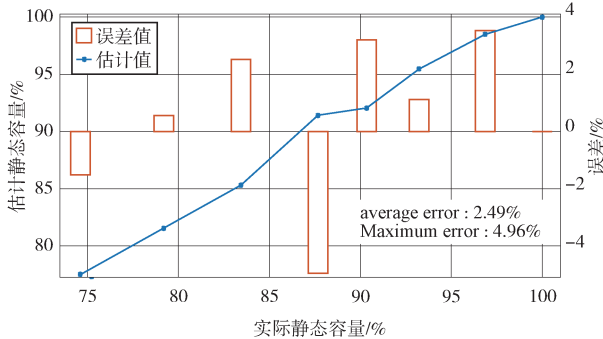
由表 3 可知, 相较于单参量直接曲线拟合的方法, 采用基于模糊逻辑的多特征参量综合的 SOH 评估能够有效消减由于电池特性不一致导致的评估分散问题, 有效消减评估误差。

4 结论

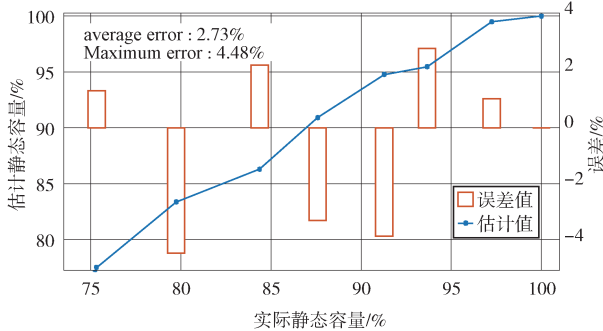
本文综合阻抗辨识法、特征信息提取法和 IC 曲线分析法, 获取得到与电池容量衰减存在密切联系的 6 个特征参量。然后通过层次分析法给各特征参量赋权, 并使用模糊逻辑方法综合进行 SOH 评估。最后, 利用 4 只 NCM-21700 电池对所提出方法的有效性进行了验证。结果表明该方法能有效消减电池不一致性造成的评估结果的分散, 评估平均误差不超过 3%, 最大误差不超过 5%。

参考文献:

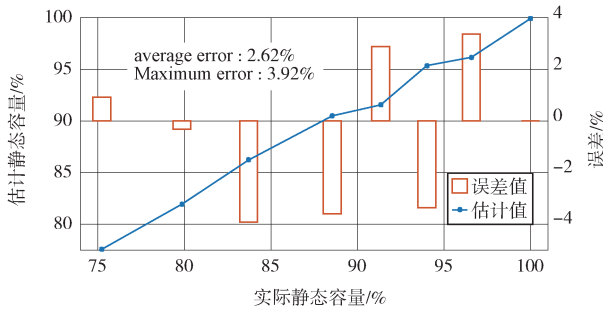
- [1] HANNAN M A, LIPU M S H, HUSSAIN A, et al. A review of lithium-ion battery state of charge estimation and management system in electric vehicle applications; challenges and recommendations [J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2017, 78(1): 834-854.
- [2] YONG J Y, RAMACHANDARAMURTHY V K, TAN K M, et al. A review on the state-of-the-art technologies of electric vehicle, its impacts and prospects [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 49(1): 365-385.
- [3] SUN F, XIONG R, HE H. A systematic state-of-charge estimation framework for multi-cell battery pack in electric vehicles using bias correction technique [J]. Applied Energy, 2016, 162(1): 1399-1409.
- [4] 唐偲, 鲁丽娟. 磷酸铁锂电池在电力系统中的应用研究 [J]. 南方能源建设, 2016, 3(增刊1): 39-42.
- [5] CONTE F V. Battery and battery management for hybrid electric vehicles: a review [J]. E & I Elektrotechnik and Informationstechnik, 2006, 123(10): 424-431.
- [6] XIONG R, TIAN J, MU H, et al. A systematic model-based degradation behavior recognition and health monitoring method for lithium-ion batteries [J]. Applied Energy, 2017, 207(1): 372-383.
- [7] 沈佳妮, 贺益君, 马紫峰. 基于模型的锂离子电池 SOC 及 SOH 估计方法研究进展 [J]. 化工学报, 2018, 69(1):



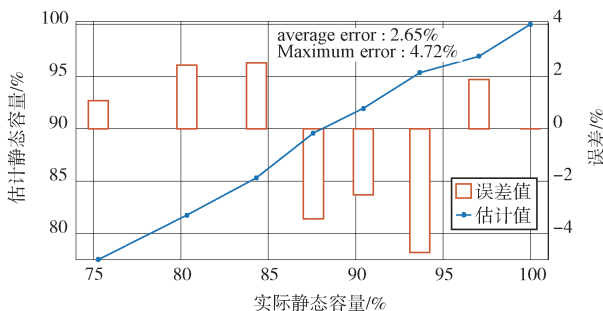
(a) 1号电池结果



(b) 2号电池结果



(c) 3号电池结果



(d) 4号电池结果

图 5 NCM 电池 SOH 评估结果

Fig. 5 SOH evaluation results of NCM batteries

- 309-316.
- [8] LU L, HAN X, LI J, et al. A review on the key issues for lithium-ion battery management in electric vehicles [J]. Journal of Power Sources, 2013, 226(1): 272-288.
- [9] SCROSATI B, JÜRGEN G. Lithium batteries: Status, prospects and future [J]. Journal of Power Sources, 2010, 195(9): 2419-2430.
- [10] NAGPURE S C, BHUSHAN B. Atomic force microscopy studies of aging mechanisms in Lithium-ion batteries [M]. Applied Scanning Probe Methods XIII. Springer Berlin Heidelberg, 2009: 203-233.
- [11] WOHLFAHRT-MEHRENS M, VÖGLER C, GARCHE J. Aging mechanisms of Lithium cathode materials [J]. Journal of Power Sources, 2004, 127(1): 58-64.
- [12] VETTER J, NOVÁK P, WAGNER M R, et al. Ageing mechanisms in Lithium-ion batteries [J]. Journal of Power Sources, 2005, 147(1): 269-281.
- [13] ZOU Y, HU X, MA H, et al. Combined state of charge and state of health estimation over Lithium-ion battery cell cycle lifespan for electric vehicles [J]. Journal of Power Sources, 2015, 273(1): 793-803.
- [14] CHEN Z, CHUNTING CHRIS M I, et al. Online battery state of health estimation based on genetic algorithm for electric and hybrid vehicle applications [J]. Journal of Power Sources, 2013, 240(31): 184-192.
- [15] ZHENG Y, HAN X, LU L, et al. Lithium ion battery pack power fade fault identification based on Shannon entropy in electric vehicles [J]. Journal of Power Sources, 2013, 223(1): 136-146.
- [16] WIDODO A, SHIM M C, CAESARENDRA W, et al. Intelligent prognostics for battery health monitoring based on sample entropy [J]. Expert Systems with Applications, 2011, 38(9): 11763-11769.
- [17] CHEN Y, BAO J, XIANG Z, et al. Predictability analysis of lithium-ion battery remaining useful life with multiscale entropy [C] //IEEE.org. 2013 Fifth international conference on computational and information sciences (ICIS 2013), Hubei, China, June 21-23, 2013, Hubei: IEEE.org, 2013.
- [18] HU X, LI S E, JIA Z, et al. Enhanced sample entropy-based health management of Li-ion battery for electrified vehicles [J]. Energy, 2014, 64(1): 953-960.
- [19] DUBARRY M, TRUCHOT C, LIAW B Y. Synthesize battery degradation modes via a diagnostic and prognostic model [J]. Journal of Power Sources, 2012, 219(1): 204-216.
- [20] KASSEM M, BERNARD J, REVEL R, et al. Calendar aging of a graphite/LiFePO₄ cell [J]. Journal of Power Sources, 2012, 208(1): 296-305.

- [21] WENG C, CUI Y, SUN J, et al. On-board state of health monitoring of lithium-ion batteries using incremental capacity analysis with support vector regression [J]. Journal of Power Sources, 2013, 235(4): 36-44.
- [22] HAN X, OUYANG M, LU L, et al. A comparative study of commercial lithium ion battery cycle life in electrical vehicle: Aging mechanism identification [J]. Journal of Power Sources, 2014, 251(1): 38-54.
- [23] REZVANIZANIANI S M, LIU Z, CHEN Y, et al. Review and recent advances in battery health monitoring and prognostics technologies for electric vehicle (EV) safety and mobility [J]. Journal of Power Sources, 2014, 256(12): 110-124.

作者简介:



HUANG W Z

黄炜昭(通信作者)

1981-, 男, 福建泉州人, 深圳供电局有限公司, 高级工程师, 电力工程硕士, 主要从事高压设备管理和输变电智能化技术研究(e-mail) goodbean2000@163.com。

徐曙

1986-, 男, 湖北武汉人, 深圳供电局有限公司, 高级工程师, 电气工程及其自动化硕士, 主要从事高压输电线路运维工作(e-mail)158155513590@163.com。

陈荔

1980-, 女, 广东兴宁人, 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限责任公司, 高级工程师, 电力系统及其自动化硕士, 主要从事储能站、高压输变电设计工作(e-mail) chenli@gedi.com.cn。

刘玉

1991-, 女, 湖南衡阳人, 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限责任公司, 工程师, 高电压与绝缘技术硕士, 主要从事储能站、高压输变电设计工作(e-mail) liuyu2@gedi.com.cn。

胡蓉

1987-, 女, 湖南娄底人, 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限责任公司, 高级工程师, 高电压与绝缘技术硕士, 主要从事高压输变电设计工作(e-mail) hurong@gedi.com.cn。

(责任编辑 李辉)