

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2211994

基于区域容量的锂离子电池健康状态评估^{*}张雅¹ 蔡永翔² 刘伟² 王露焱¹ 廖强强¹

(1.上海电力大学环境与化学工程学院 上海 200090; 2.贵州电网有限责任公司电力科学研究院 贵阳 550002)

摘要: 锂离子电池的健康状态(SOH)评估为电池安全保护、充放电控制、热管理等功能提供重要参考。提出了一种基于容量增量分析(ICA)的区域容量分析(RCA)方法,引入了区域电压和区域容量的概念。对不同倍率下的磷酸铁锂(LFP)电池模组充放电电压数据进行ICA分析,分别提取了IC曲线的最高峰值和RCA的区域容量作为健康因子,并建立了健康因子与SOH之间的数学模型。研究表明,当充放电倍率为1C时,最高峰值与SOH的拟合优度(R^2)在充电阶段为0.8154、放电阶段为0.8741,而区域容量与SOH的拟合度在充电阶段为0.9842、放电阶段为0.9576;当充放电倍率为2C时,最高峰值作为健康因子在充电阶段与SOH的拟合度只有0.1884,放电阶段的拟合度为0.5767,而区域容量与SOH的拟合度在充电阶段为0.8942、放电阶段的 R^2 为0.9882。可以看出充放电倍率为1C或2C时,区域容量作为健康因子评估电池的SOH效果更好。研究结果对大倍率下的电池SOH评估有重要参考价值。

关键词: 磷酸铁锂电池模组;容量增量分析;区域容量分析;健康因子;SOH评估

中图分类号: TM912 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.40

State of health estimation of lithium-ion batteries based on the regional capacity

Zhang Ya¹ Cai Yongxiang² Liu Wei² Wang Luyan¹ Liao Qiangqiang¹

(1. School of Environmental and Chemical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China;

2. Guizhou Power Grid Co. Ltd. Electric Science Research Institute, Guiyang 550002, China)

Abstract: The state of health (SOH) of the lithium-ion battery is evaluated to provide an important reference for battery safety, charge and discharge control, heat management and other functions. Regional capacity analysis (RCA) based on capacity incremental analysis (ICA) is proposed, and the concept of regional voltage and regional capacity is introduced. The ICA analysis of the lithium iron phosphate (LFP) battery module charged voltage data at different magnifications, extracted the highest peak value of the IC curve and the regional capacity of RCA as health factors, and established mathematics model between health factors and SOH. The results show that the goodness of fit (R^2) of the linear relationship between the highest peak and SOH is 0.8154 in the charging stage and 0.8741 in the discharging stage when the charge-discharge rate is 1C, while the R^2 of the linear relationship between the regional capacity and SOH is 0.9842 in the charging stage and 0.9576 in the discharging stage; When the charge-discharge rate is 2C, the fitting degree of the highest peak as a health factor of SOH in the charging stage is only 0.1884, and the fitting degree of the discharging stage is 0.5767, while the fitting degree of the regional capacity to SOH in the charging stage is 0.8942, and the R^2 in the discharging stage is 0.9882. It can be seen that when the charge-discharge rate is 1C or 2C, the regional capacity is better as a health factor to evaluate the SOH of the battery. The research results have important reference value for the evaluation of battery SOH at large current rates.

Keywords: lithium iron phosphate battery module; incremental capacity analysis; regional capacity analysis; health factor; SOH evaluation

0 引言

电动汽车逐步取代燃油汽车是实现“双碳”目标的重

要途径之一。锂离子电池因其体积小、寿命长、效率高、功率密度高、动态响应快、环境友好等优点,已成为电动汽车的首选电源^[1]。电池容量随着老化的增加而降低,这主要

收稿日期:2022-11-08

* 基金项目:贵州省科技支撑计划(黔科合支撑[2022]一般012,黔科合支撑[2022]一般015)项目资助

是由充放电过程中活性物质和锂离子的损失造成的^[2]。由于电池老化速率不同,造成电池之间的不一致性逐渐凸显。然而,电池的衰减是一个缓慢的过程,实时的准确评估电池的健康状态(state of health, SOH)值对电池系统的安全运行具有重要意义。

目前,电池 SOH 的评估方法主要分为实验数据特征分析、模型分析和数据驱动^[3]。其中实验数据特征分析包括基于测量的电化学阻抗谱分析^[4]、基于充放电分析的概率密度函数(probability density function, PDF)^[5]、增量容量法(incremental capacity analysis, ICA)^[6]和差分电压分析(differential voltage analysis, DVA)^[7]等可以间接预测 SOH 的方法;模型分析法包括电化学模型^[8]、等效电路模型^[9]和容量衰减模型,模型法涉及的参数多、计算量大;数据驱动是大数据分析电池 SOH 变化,包括基于神经网络^[10]和支持向量机^[11]的机器学习等,这种评估电池 SOH 的精度比较高,可以实现在线实时的智能估计^[12]。这些方法为 SOH 的快速评价做出了一定的贡献,但仍有一些领域需要探索。大多数文章侧重于低电流率和高采样频率下的充放电数据,而很少有文章讨论大倍率和低采样频率下的电池 SOH 建模问题。然而,在高倍率和低采样频率下,电池系统的实际运行非常普遍。根据高倍率充放电的实际运行数据对 SOH 进行评价是值得尝试的。另一方面,大多数文章侧重于单个电池的 SOH 评估,而不是电池模块的 SOH 评估。

ICA 能够探查电池微小且逐步改变的电化学特性,从而建立内部电化学特性与电池外特性的对应关系^[13],可用于分析电池老化的原因和预测电池老化的程度。当为低倍率充电或放电时,ICA 方法可以提供准确的结果^[14],但实际应用中电流不可能只存在小倍率情况,在大倍率充放电条件下的 SOH 评估更有意义。

本文为了解决大倍率充放电条件下 ICA 方法评估电池模组 SOH 精确度不高的问题,提出采用 ICA 的区域容量作为电池模组 SOH 评估的健康因子的观点,探讨了电池模组在 1 C、2 C 充放电倍率下 SOH 的评估模型,比较了 ICA 峰高和区域容量两个健康因子评估 SOH 的准确性,用 ICA 的区域容量作为健康因子以解决高倍率下 SOH 评估难的问题。

1 方法

1.1 SOH 定义

SOH 用来表示电池的健康状态或劣化程度,可以用容量、内阻、开路电压等指标来定义电池的 SOH。本文从容量角度来定义 SOH^[5],如式(1)所示,其中 C_{rated} 表示新电池的额定容量, $C_{pre-max}$ 为旧电池的最大可用容量。

$$SOH = \frac{C_{pre-max}}{C_{rated}} \times 100\% \quad (1)$$

1.2 容量增量分析

容量增量分析是研究电池老化行为的经典分析方法,ICA 的优点是将充放电电压曲线上涉及电池一阶相变的电

压平台转化成 IC 曲线上能明确识别的 $\Delta Q/\Delta V$ 峰^[13],可以从 IC 曲线中峰值的变化来反映电池的老化行为^[15]。IC 曲线的绘制需要得知电池的恒流充放电电压和容量(即充放电曲线),当在恒定电流 I 下充放电时间为 t 时,容量 Q 、电压 V 及 dQ/dV 可采用式(2)~(4)计算:

$$Q = I \cdot t \quad (2)$$

$$V = f(Q), Q = f^{-1}(V) \quad (3)$$

$$(f^{-1}) = \frac{dQ}{dV} = \frac{I \cdot dt}{dV} = I \cdot \frac{dt}{dV} \quad (4)$$

为了计算方便,往往采用 $\Delta Q/\Delta V$ 代替 dQ/dV 。 $\Delta Q/\Delta V$ 峰随着电池的老化而不断演变,峰值可以反映出在不同的电极电势下电池的可充放电容量能力,因此可以将 IC 曲线的峰值作为健康因子来评估电池的 SOH。

1.3 区域容量分析

为了提高 SOH 评估模型的准确性,在 ICA 的基础上提出了区域容量分析法(regional capacity analysis, RCA),其中引入了区域容量和区域电压的概念。图 1 为提取区域容量示意图。基于 RCA 的 SOH 数学建模步骤如下:

1) 确定 IC 曲线最大峰值高度位置的峰值电压 V_{peak} 。

2) 选择合适的区域电压 ΔV ($\Delta V = V_2 - V_1$),其中 ΔV 的中点是峰值电压 V_{peak} , V_1 与 V_2 分别是 ΔV 的起始和结束电压。 V_1 与 V_2 分别由式(5)和(6)计算。

$$V_1 = V_{peak} - \Delta V/2 \quad (5)$$

$$V_2 = V_{peak} + \Delta V/2 \quad (6)$$

3) 如图 1 所示,分别确定充放电曲线中 V_1 和 V_2 对应的容量值 Q_1 和 Q_2 。然后,通过式(7)计算区域容量 C^* 。

$$C^* = |Q_2 - Q_1| \quad (7)$$

4) 在获得一系列(C^* , SOH)数据后,建立区域容量 C^* 和 SOH 之间的线性关系。

2 实验

2.1 实验对象

以奇瑞 S18B 电动汽车的磷酸铁锂(LiFePO_4 , LFP)电池模组为本实验的研究对象,该电池由天津比克电池有限公司生产,电池正极为涂有 LiFePO_4 的铝箔,负极为涂有石墨的铜箔。电池模组由 60 个 2.69 Ah 的 26650 型圆柱形 LiFePO_4 电池单芯组成,连接方式为 15 并 4 串(简称 15P4S)。15P4S 电池模组额定容量为 40 Ah。

2.2 实验仪器

实验仪器主要由电池测试仪、电池管理系统(battery management system, BMS)、中央控制计算机和物理控制开关组成。在实验过程中,由计算机编写测试程序,通过开关传输到电池测试仪,锂电池由电池测试机进行充放电。电池容量、电流、电压和其他数据由电池管理系统监控。BMS 采集的电池模组和单元的电压数据传输到电池测试机,然后电池测试机通过开关将测试数据传输到计算机,最后由电脑进行记录和保存。

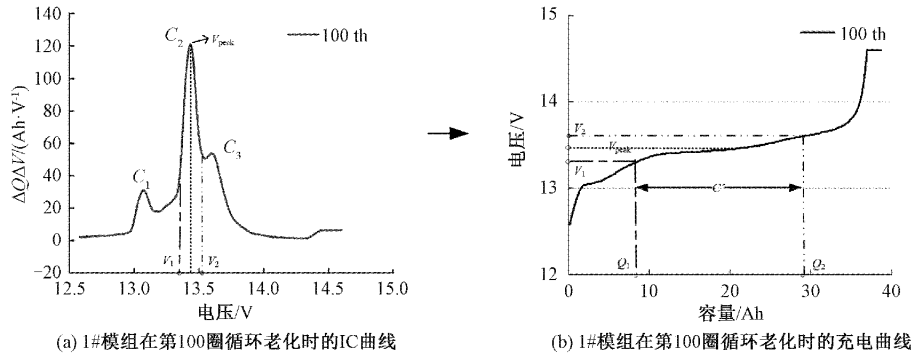


图 1 提取区域容量示意图

2.3 实验方法

在电池模组进行循环老化测试之前,先进行了预处理激活实验来保证数据的真实可靠。预处理激活步骤如表 1

所示,锂离子电池经过 5 次 1/5 C 倍率充放电循环以激活电池,恢复电池容量。

表 1 预处理激活步骤

步骤	步骤名称	持续时间	电流	截止条件
1	充电	—	1/5 C	$V_{\text{module}} \geq 14.6 \text{ V}$ 或 $3.65 \text{ V} \times 4$
2	静置	30 min	—	—
3	放电	—	1/5 C	$V_{\text{module}} \leq 10.8 \text{ V}$ (2.7 V × 4)
4	静置	30 min	—	—
5	重复 1~4 步骤 5 次	—	—	—

为了研究不同充放电倍率条件下,基于 RCA 的 SOH 评估方法的普适性,采用不同的充放电倍率对电池模组进行循环老化测试,直到 SOH 降到 60% 以下。电池测试温度均为 $25 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$,且充放电深度都为 100%,采样频率为 1/60 Hz。每 50 次循环为 1 个周期,每个周期结束后采用 1/3 C 倍率进行容量标定并计算电池的 SOH。1# 模组初始容量为 39.58 Ah(98.95% SOH),循环老化倍率为 1 C,经过 1 300 圈循环后容量下降到 23.54 Ah(58.85%

SOH),停止老化。2# 模组初始容量为 39.47 Ah(98.68% SOH),循环老化倍率为 2 C,经过 400 圈循环后容量下降到 21.43 Ah(53.58% SOH),停止老化。

结合锂离子电池充放电特性来制定电池的循环老化协议,利用美国 Bitrode FTV 1-300-100 型电池模组测试系统对电池进行充放电测试及数据记录,2 个电池模组循环老化测试的详细步骤如表 2 所示,步骤里所有截止条件都是为电池安全考虑设置的。

表 2 电池模组测试步骤

步骤	步骤名称	持续时间	电流	截止条件
1	恒流放电	—	1/3 C	$V_{\text{module}} \leq 10.8 \text{ V}$ 或 $V_{\text{cell}} \leq 2.5 \text{ V}$
2	静置	30 min	—	—
3	恒流充电	—	1# 为 1 C,2# 为 2 C	$V_{\text{module}} \geq 14.6 \text{ V}$
4	恒压充电	—	—	电流减小至 1/5 C 或 $V_{\text{cell}} \geq 3.75 \text{ V}$
5	静置	30 min	—	—
6	恒流放电	—	1# 为 1 C,2# 为 2 C	$V_{\text{module}} \leq 10.8 \text{ V}$ 或 $V_{\text{cell}} \leq 2.5 \text{ V}$
7	静置	30 min	—	—
8	重复 3~7 步骤 50 次	—	—	—
9	恒流充电	—	1/3 C	$V_{\text{module}} \geq 14.6 \text{ V}$
10	恒压充电	—	—	电流减小至 1/30 C 或 $V_{\text{cell}} \geq 3.75 \text{ V}$
11	静置	30 min	—	—
12	恒流放电	—	1/3 C	$V_{\text{module}} \leq 10.8 \text{ V}$ 或 $V_{\text{cell}} \leq 2.5 \text{ V}$
13	静置	30 min	—	—
14	重复 8~13 步骤	—	—	直到 SOH 下降到 60% 以下

3 结果与讨论

3.1 循环老化行为

1# 模组在 0%~100% 荷电状态 (state of charge, SOC) 的范围内,以 1 C 倍率完成了 1 300 次充放电循环老化,电池模组的 SOH 从 98.95% 降到 58.85%。图 2 为 1# 模组的循环老化结果,其中图 2(a) 为电池模组的 SOH 随循环圈数 (cycle number, CN) 的变化规律,可以看出 1# 模组的 SOH 与 CN 基本呈线性关系,尽管刚开始的 400 圈衰减缓慢,但模组的 SOH 值随着整个循环圈数的增加而线性下降,拟合优度 (goodness of fit, R^2) 高达 0.98。图 2(b) 表示 1# 模组在 1 C 倍率循环下不同圈数的充放电曲线,可以看出充放电平台随着循环圈数的增加而变短,充放电曲线的电压平台随着循环次数的增加而升高,而放电曲线的电压随着循环次数的增加而降低,这表明内阻增大^[13]。此外,恒压过程随着老化而缩短甚至消失,表明模组中的电池不一致性逐渐明显,电池模组中严重劣化的电池优先触发电芯的截止电压条件。

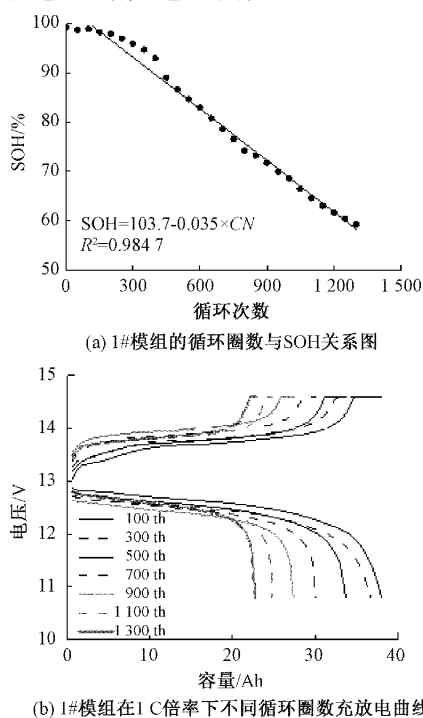


图 2 1# 模组的循环老化结果

2# 模组以 2 C 倍率,在 0%~100% SOC 的范围内循环的老化结果如图 3 所示。图 3(a) 显示 2# 模组的老化行为表现为先慢后快,采用分段线性拟合,前 200 个循环的拟合 R^2 为 0.958 3、后 200 个循环 R^2 为 0.984 0。图 3(b) 显示了在不同的循环老化圈数后,2# 模组以 2 C 倍率充放电的电压和容量的关系,可以看出随着电池的老化,电池的充放电曲线会逐渐发生变化^[16],充放电曲线是 ICA 和 RCA 方法评估 SOH 的基础,从中提取与 SOH 相关的健

康因子是评估电池 SOH 的重点。

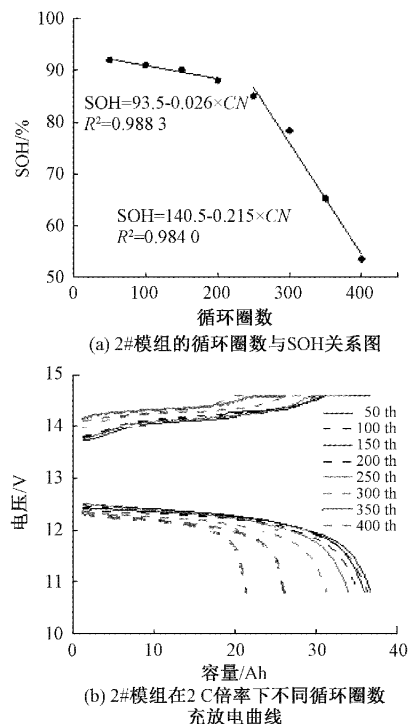


图 3 2# 模组的循环老化结果

3.2 基于 ICA 方法的 SOH 建模

图 4(a) 和 (b) 分别为 1# 模组在 1 C 倍率循环老化下的不同圈数的 IC 充放电曲线,不同循环圈数的 IC 曲线上都出现了明显的相变峰。通常,锂离子电池的 IC 曲线会

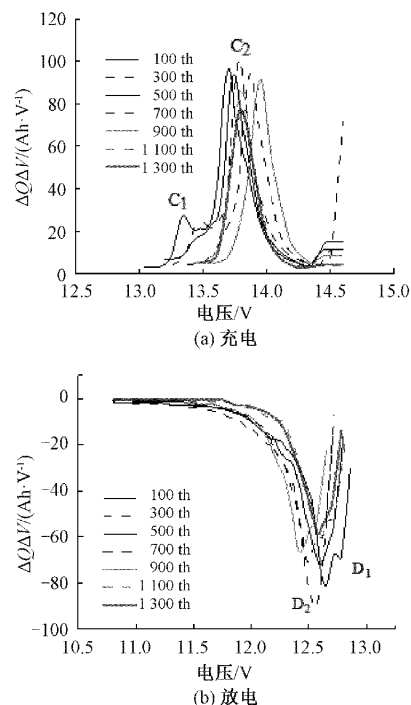


图 4 1# 模组在 1 C 循环过程中不同循环圈数下电池模组的 IC 曲线

出现 5 个峰值,但是随着循环倍率的增加,IC 曲线峰的位置和个数都会发生变化^[13],在图 4 所示的 IC 充放电曲线中只分别出现 2 个峰,充电曲线的峰依次标记为 C_1 、 C_2 ,放电曲线上的峰依次标记为 D_1 、 D_2 。其中 C_2 、 D_2 峰的峰值最大,说明这两个峰对应电池相变反应明显,把它们作为本文评估 SOH 的健康因子。图 5(a)~(b)分别为 IC 充放电曲线的最高峰值 C_2 和 D_2 作为健康因子与 1 # 模组的 SOH 进行线性拟合的结果。其中 H_{IC-A-C} 和 H_{IC-A-D} 值分别表示 C_2 和 D_2 的峰值高度。结果表明,SOH 和 H_{IC-A-C} 或 H_{IC-A-D} 峰高之间都存在线性相关性,但 R^2 均未达到 0.90 以上。

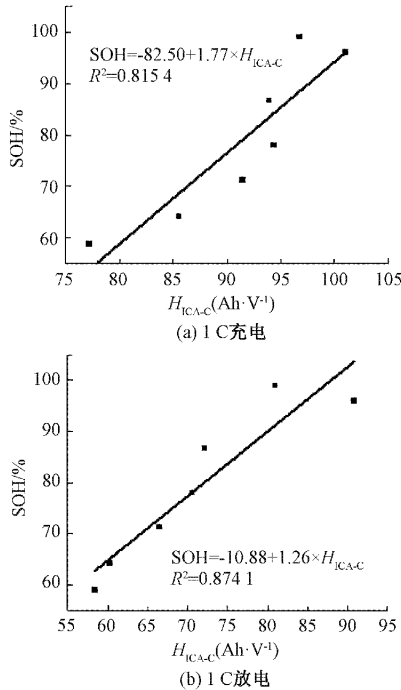


图 5 1 # 模组 IC 曲线最大峰值与 SOH 对应关系及评估模型

图 6(a)和(b)分别为 2 # 模组在 2 C 倍率循环老化下的 IC 充放电曲线,2 C 倍率的 IC 充放电曲线只分别出现 1 个明显的特征峰 C_2 和 D_2 ,形状和位置与 1 C 倍率有非常明显的区别,这是充电倍率大导致的。图 7(a)和(b)分别为 2 # 模组在 2 C 倍率下,SOH 对 H_{IC-A-C} 和 H_{IC-A-D} 值的依赖度,可以看出充电阶段拟合度为 0.188 4、放电阶段为 0.576 7。

采用 IC 曲线最大峰值作为健康因子来评估电池的 SOH 时,当充放电倍率为 1 C 时,拟合度在 0.81 以上;而在 2 C 倍率充电的情况下拟合度 R^2 只有 0.188 4。可以看出随着倍率的增加,拟合效果逐渐下降,在大倍率充放电时,此方法不足以用来评估 SOH,因此需要寻找高倍率下更加有效的健康因子来评估 SOH。

3.3 基于 RCA 方法的 SOH 建模

在现有的 ICA 评估电池 SOH 模型方法中,IC 曲线一般需要以小电流的充放电电压数据为基础^[16]。根据 3.2

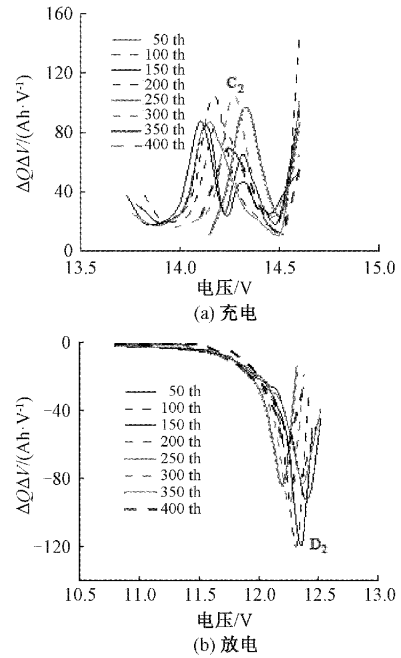


图 6 2 # 模组在 2 C 循环过程中不同循环圈数下电池模组的 IC 曲线

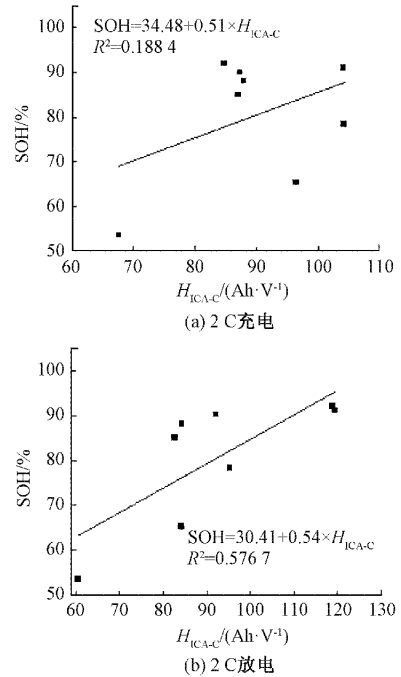


图 7 2 # 模组 IC 曲线最大峰值与 SOH 对应关系及评估模型

所示,将较大倍率的 IC 曲线的峰高作为健康因子,具有一定的妥协性。本节采用区域容量作为健康因子来评估电池模组的 SOH。区域电压 ΔV 依次选择 200、400、600、800 mV,计算相应的区域容量 C' ,考察 ΔV 的变化对 C' -SOH 模型拟合度的影响。

图 8(a)和(b)给出了 1 # 模组在 1 C 倍率充放电时不

同 ΔV 对应的区域容量 C^* 与 SOH 的拟合结果, C^* 与 SOH 始终为线性正相关。表 3 为 1# 模组在 1 C 循环中不同 ΔV 值下的 SOH 模型, 通过图 8 和表 3 可以清晰地看出, 随着区域电压 ΔV 的增加, SOH 和 C^* 之间的线性拟合度 R^2 增大, R^2 在 $\Delta V=800$ mV 时对应的 C^* 与 SOH 拟合结果高达 0.98, 比采用 IC 曲线峰高评估 SOH 的拟合度更高。

与上述方法相同, 图 9(a) 和 (b) 分别为 2# 模组以 2 C 倍率充放电过程中的不同 ΔV 对应的数据集的拟合结果, 表 4 为 2# 模组在 2 C 循环中不同 ΔV 值下的 SOH 模型, 可以得出相同的实验规律, ΔV 越大, 拟合效果越好, 并且每个子图都呈现出很好的线性。在 2 C 倍率下, 当 $\Delta V=800$ mV 时所有的线性模型 R^2 的值均大于 0.89。比较 1 C 倍率和 2 C 倍率的拟合结果, 可以看出, SOH 可以通过区域容量的方法快速的评估出来, 且不会因为充放电倍率的增大而评估不准确。

通过分析上述结果, 比较 IC 曲线峰高和 RCA 的区域容量两个健康因子与 SOH 的拟合精度, 可以看出区域容量作为健康因子在 1 C、2 C 不同倍率时的拟合精度都要优于 ICA 峰高的拟合结果。IC 曲线最大峰高作为健康因子

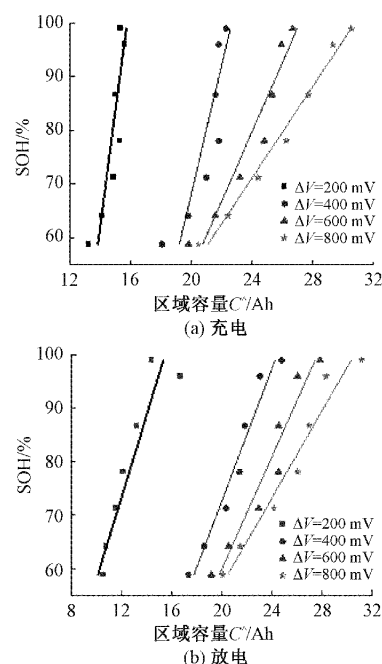


图 8 1# 模组在 1 C 循环过程中不同 ΔV 下 C^* 与 SOH 拟合曲线

表 3 1# 模组在 1 C 循环中不同 ΔV 值下的 SOH 模型

ΔV / mV	充电过程		放电过程	
	C^* -SOH 模型	R^2	C^* -SOH 模型	R^2
200	$SOH = -157 + 16.0 C^*$	0.752 7	$SOH = -3.48 + 6.46 C^*$	0.840 2
400	$SOH = -110 + 9.03 C^*$	0.758 1	$SOH = -45.7 + 5.93 C^*$	0.954 1
600	$SOH = -63.1 + 5.95 C^*$	0.924 7	$SOH = -37.7 + 4.94 C^*$	0.939 5
800	$SOH = -29.0 + 4.18 C^*$	0.984 2	$SOH = -20.5 + 3.91 C^*$	0.957 6

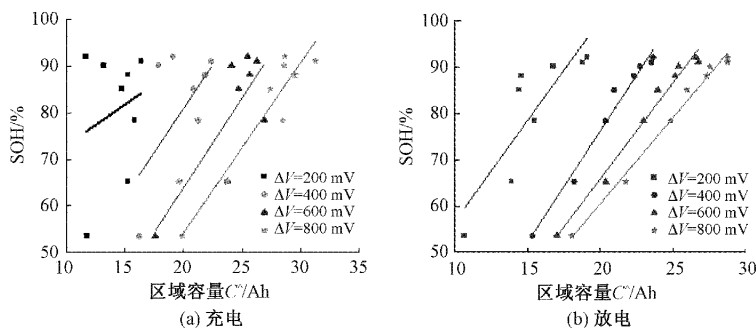


图 9 2# 模组在 2 C 循环过程中不同 ΔV 下 C^* 与 SOH 拟合曲线

表 4 2# 模组在 2 C 循环中不同 ΔV 值下的 SOH 模型

ΔV / mV	充电过程		放电过程	
	C^* -SOH 模型	R^2	C^* -SOH 模型	R^2
200	$SOH = 55.6 + 1.74 C^*$	0.051 7	$SOH = 13.5 + 4.33 C^*$	0.727 5
400	$SOH = 5.62 + 3.76 C^*$	0.316 0	$SOH = -19.7 + 4.79 C^*$	0.976 6
600	$SOH = -12.7 + 3.83 C^*$	0.635 2	$SOH = -16.8 + 4.13 C^*$	0.980 9
800	$SOH = -18.3 + 3.63 C^*$	0.894 2	$SOH = -13.6 + 3.70 C^*$	0.988 2

随着充放电倍率的增大, R^2 降低, 在 2 C 倍率下拟合度仅有 0.1884。而区域容量与 SOH 的拟合度不会因为充放电倍率的增大而有所减小, R^2 均可以达到 0.98 以上。所以, RCA 的区域容量可以作为准确且适用性更广的电池 SOH 评估方法。

4 结 论

以 1 C 倍率、2 C 倍率对不同老化状态下的 15P4S 电池模组在 0%~100% SOC 范围内进行充放电实验, 采样频率为 1/60 Hz, 采用 ICA 和 RCA 的方法分别建立电池模组 SOH 评估模型。结论如下:

1) IC 曲线最大峰高作为健康因子的拟合度会随着充放电倍率的增大而减小, 在 1 C 倍率充放电时, SOH 模型的 R^2 在 0.81 以上, 但是在 2 C 倍率充放电的 SOH 模型的拟合度很差, 说明在较大倍率时 ICA 最大峰高不适合作为 SOH 模型的健康因子。

2) 在 ICA 框架下引入了区域容量和区域电压的概念, 提出了区域容量作为电池模组 SOH 评估的健康因子。随着区域电压范围从 200 mV 增加到 800 mV, 采用区域容量评估电池模组 SOH 的拟合精度越来越高。

3) 通过比较评估 SOH 的两个健康因子的 IC 曲线最大峰高和区域容量, 发现在充放电倍率较高时, 区域容量比最大峰高具有更大的优势, 评估结果更加准确。

本文的研究结果对较高倍率下 SOH 的评估有较好的参考价值, 但提出的方法适用于恒流条件下电池模组 SOH 的评估, 电池模组在其他工况下的 SOH 评估仍需进一步研究; 本文讨论的电池模组在 25 ± 1 °C 的环境温度下老化, 因此环境温度对电池 SOH 模型的影响仍为未来研究的方向。

参考文献

- [1] 刘大同, 宋宇晨, 武巍, 等. 锂离子电池组健康状态估计综述[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(11): 1-18.
- [2] 张志伟, 郑见杰. 大电流脉冲工况下磷酸铁锂电池衰减机理[J]. 电源技术, 2022, 46(9): 984-987.
- [3] 郑雪莹, 邓晓刚, 曹玉苹. 基于能量加权高斯过程回归的锂离子电池健康状态预测[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(6): 63-69.
- [4] 骆凡, 黄海宏, 王海欣. 基于电化学阻抗谱的退役动力电池荷电状态和健康状态快速预测[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(9): 172-180.
- [5] HUANG S, LIU C, SUN H, et al. State of health estimation of lithium-ion batteries based on the regional frequency [J]. Journal of Power Sources, 2022, 518: 230773.
- [6] 李文华, 邵方旭, 暴二平, 等. 六自由度振动老化条件下锂离子电池的衰退机理诊断与 SOH 预测[J]. 仪器仪表学报, 2021, 41(8): 62-69.

- [7] CHEN X, HU Y, LI S, et al. State of health (SOH) estimation and degradation modes analysis of pouch NMC532/graphite Li-ion battery[J]. Journal of Power Sources, 2021, 498: 229884.
- [8] 牛凯, 李静如, 李旭晨, 等. 电化学测试技术在锂离子电池中的应用研究[J]. 中国测试, 2020, 46(7): 90-101.
- [9] 赵可沧, 江境宏, 邓进, 等. 基于遗忘因子递推最小二乘法的锂电池等效电路模型参数辨识方法[J]. 电子测量技术, 2022, 45(16): 87-92.
- [10] 王义, 刘欣, 高德欣. 基于 BiLSTM 神经网络的锂电池 SOH 估计与 RUL 预测[J]. 电子测量技术, 2021, 44(20): 1-5.
- [11] 魏业文, 解园琳, 李梅, 等. 基于多指标最优权值融合的锂电池 SOH 估计[J]. 电子测量技术, 2021, 44(15): 23-29.
- [12] 赵月荷, 庞宗强. 基于无迹卡尔曼滤波的动力电池健康状态估计[J]. 国外电子测量技术, 2022, 41(10): 136-141.
- [13] 马泽宇, 姜久春, 王占国, 等. 基于容量增量分析的石墨负极磷酸铁锂电池 SOC 估算方法研究[J]. 汽车工程, 2014, 36(12): 1439-1444.
- [14] SCHALTZ E, STROE D I, NØRREGAARD K, et al. Incremental capacity analysis applied on electric vehicles for battery state-of-health estimation [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2021, 57(2): 1810-1817.
- [15] 吴琼, 徐锐良, 杨晴霞, 等. 基于 PCA 和 GA-BP 神经网络的锂电池容量估算方法[J]. 电子测量技术, 2022, 45(6): 66-71.
- [16] JENU S, HENTUNEN A, HAAVISTO J, et al. State of health estimation of cycle aged large format lithium-ion cells based on partial charging[J]. Journal of Energy Storage, 2022, 46: 103855.

作者简介

张雅, 硕士研究生, 主要研究方向为电池健康状态评估。
E-mail: 2843249758@qq.com

蔡永翔, 博士, 工程师, 主要研究方向为配电网运行、控制与规划。
E-mail: lpscaiyx@163.com

刘伟, 工学学士, 高级工程师, 主要研究方向为电网化学与储能。
E-mail: 2829291447@qq.com

王露焱, 硕士研究生, 研究方向为电池健康状态评估。
E-mail: 994249634@qq.com

廖强强(通信作者), 博士, 教授, 主要研究方向为动力电池回收与梯次利用。
E-mail: 13371895959@163.com