

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2107895

## 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\*

李文华<sup>1</sup>, 邵方旭<sup>1</sup>, 暴二平<sup>2</sup>, 何明泽<sup>1</sup>, 王洋洋<sup>1</sup>

(1. 河北工业大学省部共建电工装备可靠性与智能化国家重点实验室 天津 300130;  
2. 中国航天建设集团有限公司 北京 100071)

**摘要:**电动汽车锂离子电池会受振动与老化影响而加速衰减,为了诊断振动老化条件下的衰退机理,实现健康状态(SOH)预测,采取如下措施:首先,分析电池受振动影响的衰减结果;其次,辨识衰退模式,利用容量增量-微分电压(IC-DV)曲线对衰退模式进行量化,Z组结果为:活性物质损失(36.94%)、锂离子损失(35.12%)、电导率损失(1.9%);最后,将量化结果输入建立的GA-Elman模型实现SOH预测,结果误差保持在5%以内,满足电池管理系统(BMS)预测的要求。该研究为振动老化条件下锂离子电池的衰退机理诊断与SOH预测提供了依据,有助于BMS制定相关策略延长电池使用寿命。

**关键词:**锂离子电池;健康状态;振动;老化;容量增量;衰退机理

**中图分类号:** TH707 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 530

## Diagnosis of degradation mechanism and SOH prediction of lithium-ion batteries under 6-DOF vibration and aging conditions

Li Wenhua<sup>1</sup>, Shao Fangxu<sup>1</sup>, Bao Erping<sup>2</sup>, He Mingze<sup>1</sup>, Wang Yangyang<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory for reliability and intelligence of electrical equipment jointly constructed by ministry and province, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China; 2. China Aerospace Construction Group Co., Ltd., Beijing 100071, China)

**Abstract:** The lithium-ion battery in electric vehicle may decay quickly due to vibration and aging. One purpose of this research is to diagnose the degradation mechanism under such conditions. The other is to realize the state of health (SOH) prediction. The specific methods are given as follows. First, the attenuation results of the battery affected by vibration are analyzed. Secondly, the degradation mode is identified. Then, the incremental capacity-differential voltage (IC-DV) curve is used to quantify the degradation mode. The results of group Z are illustrated as follows. The loss of active material is 36.94%, the loss of lithium ions is 35.12%, and the conductivity loss is 1.9%. Finally, the quantified results are taken as the input to formulate the GA-Elman model to realize SOH prediction. The errors are within 5%, which can meet the requirements of battery management system (BMS). This research provides a basis for the diagnosis and SOH prediction of lithium-ion batteries under vibration and aging conditions. It could help BMS formulate relevant strategies to extend battery life.

**Keywords:** lithium-ion battery; state of health; vibration; aging; incremental capacity; degradation mechanism

## 0 引言

近年来,电动汽车凭借其高效能和无污染的优势,已逐渐代替内燃机汽车成为主要的运输工具。锂离子电池作为电动汽车的主要动力供应源,其寿命的可靠决定了

运输的可靠和安全。

老化是影响电池的寿命的重要因素,受道路振动与冲击的影响,电池的寿命受到更严峻的考验。为了研究电池在振动条件下的性能变化,王文等<sup>[1]</sup>分析了单自由度下的振动对锂离子电池的影响,发现振动会使电极材料与集流体的结合力下降,阻抗增大;Berg等<sup>[2]</sup>通过强化

收稿日期:2021-05-08 Received Date: 2021-05-08

\* 基金项目:河北省自然科学基金创新群体项目(E2020202142)、河北省自然科学基金项目(E2020202221)资助

实验,分析恶劣随机振动下电池的电性能和机械性能,利用容量检测、电化学阻抗谱(electrochemical impedance spectroscopy, EIS)检测、电子计算机断层扫描,发现振动导致集电器接头损坏,导致性能降低;张勇等<sup>[3]</sup>引入频域随机振动疲劳与疲劳损伤累计理论,同时考虑振动激励的方式、持续时间、幅值、带宽等因素的影响,对比了电池包在不同振动下的损伤差别;Hooper等<sup>[4]</sup>提出了一种新方法分析六自由度振动下电池退化的原因,对振动后的电气性能和机械性能进行量化,最终发现电池的固有频率没有明显改变,但直流电阻却明显增加。另外,文献[5-6]等集中研究了充放电策略对电池循环寿命的影响,分析循环老化,即各种充放电倍率下性能变化情况。

然而,分析电池性能不应仅单独考虑振动或单独考虑老化影响,应重视二者共同作用,这有利于提高振动老化条件下电池的机理诊断和健康状态(state of health, SOH)预测的真实性。另外,根据文献[7-8]等提出的“电动车受道路振动等效成六自由度模型理论”,以及“国际标准 ISO 8608 中规定用功率谱密度(power spectral density, PSD)反映道路振动水平<sup>[9]</sup>”可知,对电池施加单自由度的正弦或随机振动,单倍率放电都具有一定的局限性。因此,为了尽可能模拟现实世界的行驶环境,有必要用六自由度振动替代单自由度振动,并根据电动车行驶工况进行相应充放电策略。

现代电池诊断技术的发展为电池机理分析提供了便利。Carlos等<sup>[10]</sup>在同一电池退化数据上评估了增量容量-微分电压(incremental capacity-differential voltage, IC-DV)技术及EIS技术,两种技术可以对退化得出相同的结果,即锂离子损失和活性材料损失是电池退化的主要原因;孙丙香等<sup>[11]</sup>利用转化容量增量曲线划分电池工作区间分析衰退机理,研究发现,动力电池在不同荷电状态区间循环使用会产生差异性明显的衰退路径;王筱彤等<sup>[12]</sup>提出一种基于离散区间二进制序列脉冲信号的燃料电池EIS在线测量及故障诊断方法,故障诊断方法准确率高达97%;杨涛等<sup>[13]</sup>对比了正负极片循环前后X射线衍射(X-ray diffraction, XRD)和场发射扫描电子显微镜(search engine marketing, SEM)发现,正极颗粒破碎及结构转变,负极Li<sup>+</sup>持续脱嵌导致石墨层状结构损伤是电池失效的原因。这些诊断技术能将内部参数量化,外部形貌表征出来,可以应用于振动老化条件下电池的衰退机理诊断。

随着人工智能技术的发展,电池SOH预测发展到一个新高度。刘健等<sup>[14]</sup>提出一种基于等压差充电时间和改进高斯过程回归模型的电池寿命预测方法,建立了具备不确定性表达能力的高斯过程回归模型预测SOH;张金龙等<sup>[15]</sup>采用一种平方根采样点卡尔曼滤波方法,配合在线递推最小二乘算法,同时实现对电池等效模型参数

的辨识以及估算;徐鑫珉等<sup>[16]</sup>利用EIS研究电池单体的老化规律,并提出了一种阻抗参数预测SOH算法。在实际监测过程中,由于容量不是直接获取的,需要对监测到的电流和时间积分得到,这就导致了容量的监测较为困难且成本较高,计算结果往往存在累积误差<sup>[17-18]</sup>;结合模型预测的方法易受电池种类和参数限制,不如数据驱动的算法适应性广泛<sup>[19]</sup>;而结合EIS阻抗预测的方法受设备和环境限制,检测时间长,也不利于SOH实时预测<sup>[12]</sup>。

综上所述,在电池的振动试验条件、诊断及预测方面,仍有提升空间:即根据六自由度PSD谱模拟道路的振动条件;选择合适的诊断方法并提取有利于量化的参数;进一步提升数据驱动算法的速度以适应电池管理系统(battery management system, BMS)的要求。基于此,本文首先搭载了六自由度振动老化测试平台;其次,通过EIS、拆解以及IC-DV曲线诊断了老化机理,并通过IC-DV曲线量化三种衰退模式;最后,将量化后的参数作为特征量输入改进的GA-Elman算法中,完成SOH预测。

## 1 锂离子电池老化机理及IC-DV曲线

### 1.1 老化机理

锂离子电池的老化是极其复杂的过程,它取决于内在和外在因素引起的反应之和<sup>[20]</sup>。通常将老化分为3种衰退模式:电导率损失(conductivity loss, CL)、活性材料损失(loss of active material, LAM)和可用锂离子损失(loss of lithium ions, LLI)。

从电化学角度看,导致3种衰退模式的原因并不相同,CL包括电池电子部件的退化,例如集电器腐蚀和粘合剂分解。LAM与活性物质的结构转变和电解质分解有关。LLI归因于可用于嵌入和脱出过程中锂离子数量的变化<sup>[20]</sup>。

### 1.2 IC-DV曲线

IC-DV曲线把电池内部化学反应中的离子嵌入过程通过容量和电压之间的微分关系表示。随着电池循环,曲线中可以观察到高度和位置变化的波峰波谷,从而推断电池的衰退机理。

预先获取充电过程的容量和电压:

$$V = f(Q) = f(It) \quad (1)$$

其中,  $V, Q, I, t$  分别是电压、容量、电流和时间。函数  $f$  用于描述  $V$  和  $Q$  之间的关系。IC曲线表示为容量对电压求导后与电压的关系,横坐标为  $V$ , 其纵坐标  $\Delta c$  为:

$$\Delta c = \frac{dQ}{dV} \quad (2)$$

DV曲线表示为电压对容量求导后与容量的关系,横坐标为  $Q$ , 其纵坐标  $\Delta u$  为:

$$\Delta u = \frac{1}{\Delta c} = \frac{dV}{dQ} \quad (3)$$

汽车 BMS 中采集的电池数据是离散的,因此用  $\Delta Q/\Delta V$  和  $\Delta V/\Delta Q$  近似替代  $dQ/dV$  和  $dV/dQ$ <sup>[8]</sup>。

## 2 GA-Elman 预测模型

### 2.1 模型输入参数选取

常规预测模型仅从数值关系上筛选与容量相关的特征,为了把内部机理与外部参数结合,在老化诊断的同时完成 SOH 预测,提出如下思路:

文献[21]提出,3 种衰退模式对应 IC-DV 曲线的几何特征:DV 曲线向低容量方向移动辨识为 LLI;IC 曲线向低电压方向移动辨识为 CL;IC 曲线峰值差值辨识为 LAM。其量化公式为:

$$CL_i(\%) = \frac{\max(V_0) - \max(V_i)}{\max(V_0)} \quad (4)$$

$$LLI_i(\%) = \frac{\max(Q_0) - \max(Q_i)}{\max(Q_0)} \quad (5)$$

$$LAM_i(\%) = \frac{\max\left(\frac{dQ}{dV_0}\right) - \max\left(\frac{dQ}{dV_i}\right)}{\max\left(\frac{dQ}{dV_0}\right)} \quad (6)$$

式中:  $LLI_i$ ,  $CL_i$ ,  $LAM_i$  分别为量化后的衰退模式值;  $V_0$ ,  $Q_0$  分别为初始电压和容量;  $i$  表示循环次数。

如此,能从 IC-DV 曲线得到相关的老化信息,为了进一步探究衰退模式与 SOH 的关系,实现 SOH 预测作铺垫。

### 2.2 GA-Elman 模型

Elman 网络是前馈式局部回归网络<sup>[19]</sup>,由输入层、隐藏层、承接层和输出层组成。可以在短时间内实现函数逼近,有强大的训练能力。

$$S(t) = k(\omega_x * x(t) + \omega_c * C(t) + b_1) \quad (7)$$

$$y(t) = g(\omega_y * S(t) + b_2) \quad (8)$$

$$C(t) = D(t - 1) \quad (9)$$

式中:  $k(*)$ 、 $g(*)$  分别为输入层、隐藏层、输出层之间的传递函数;  $S(t)$ 、 $y(t)$ 、 $C(t)$  分别为隐藏层、输出层、承接层的结果;  $\omega_x$ 、 $\omega_y$ 、 $\omega_c$  分别为输入层、隐藏层、承接层的权重;  $b_1$ 、 $b_2$  分别为隐藏层和输出层的阈值。

遗传算法(genetic algorithm, GA)是典型的启发式搜索算法,为了加强网络的适应能力和准确性,利用遗传算法对 Elman 神经网络的权值及阈值寻优:

1) 初始化网络结构。确定种群数量、染色体数、最大迭代次数等参数,创建初始种群。

2) 确定适应度函数。选用适应度函数值  $f$ :

$$f = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (T_i - Q_i)^2 \quad (10)$$

式中:  $N$  为训练样本个数;  $T_i$ 、 $Q_i$  分别为容量的实测值、预测值。

3) 选择。从当前种群选择适应度高的染色体进行复制,进而产生新的种群。各个体  $x_i$  被选择的几率  $p_i$ :

$$p_i = f(x_i) / \sum_{i=1}^N f(x_i) \quad (11)$$

式中:  $N$  为个体种群数;  $f(x_i)$  为个体适应度。

4) 根据个体适应度复制、交叉、变异。

5) 判断是否达到终止条件,是则结束,否则返回步骤 2)。

6) 把最佳初始参数赋予 Elman 神经网络,重新训练得到输出。

## 3 实验及结果

### 3.1 实验平台

#### 1) 六自由度振动工况

本实验振动工况设计思路如下:一方面,文献[7-8]中提出,现实中电动车受到路面的振动可以等效为六自由度模型,并且六自由度振动台广泛应用于模拟车辆内部各种部件的振动;另一方面,根据国际标准 ISO 8608,可以用 PSD 谱反映道路振动水平。因此,本次实验选用六自由度振动台内部标准 B 级公路 PSD 谱,比传统单自由度实验更接近真实振动情况。

图 1 是六自由度振动台。电池受到振动可以分解成向前/向后、向上/向下、左/右、偏航、俯仰和滚动 6 个分力,反映到振动台为  $\Delta X$ 、 $\Delta Y$ 、 $\Delta Z$ 、 $\omega$ 、 $\theta$ 、 $\psi$  6 个参数。

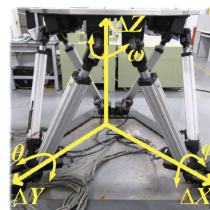


图 1 六自由度振动台

Fig. 1 Six degrees of freedom vibrating table

图 2 是振动台输入的从实际道路采集中提取的 B 级公路 PSD 路谱。

#### 2) 充放电工况

本实验充放电工况设计如下:由于充放电倍率对电池的循环老化有影响,而且放电电流与行驶速度成正比<sup>[22]</sup>。所以,为了考虑现实中可能出现的不同速度运行的情况,本实验考虑多种倍率下的放电,尽可能向真实放电工况接近。为了延续先前的研究,本文采用了与文

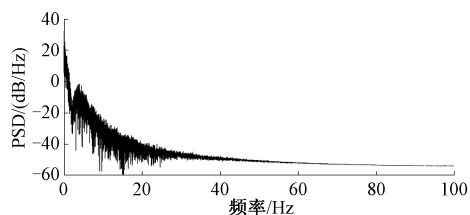


图2 B级公路 PSD 谱

Fig. 2 B-route PSD spectrum

献[23]中相同的放电工况,以额定倍率(1 C)充电时不振动,只在放电时振动。模拟出现的4种速度级行驶状况(怠速、匀速、加速、减速),设置了4种放电倍率(0.1、2、0.5 C),充放电工况如图3所示。

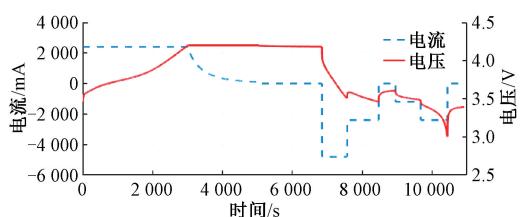


图3 充放电工况

Fig. 3 Charge and discharge conditions

### 3) 电池测试夹具

样品为三元锂离子电池,由  $\text{LiNi}_{0.5}\text{Co}_{0.2}\text{Mn}_{0.3}\text{O}_2$  (NCM) 正极和石墨负极组成,额定容量 2 400 mAh。为了模拟电池在汽车中不同的封装方向,设计了一种电池固定夹具,固定在振动台上,如图4所示。每个固定夹具具有3个平面可用于固定,每个面最多可安装3个电池。

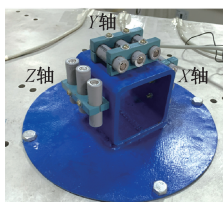


图4 电池固定夹具

Fig. 4 Battery fixing fixture

为了避免数据的偶然性,实验选择12个相同状态的电池,并分组:振动组(X组,Y组,Z组)9个电池;常规组(N组)3个电池,不振动,将每组3个电池数据取平均值代表该组水平。

### 3.2 振动老化实验衰退结果

#### 1) 容量衰退结果

容量衰退到80%为退役电池,仅考虑衰退到80% SOH之前的数据。将容量作为SOH的判断依据,其定义为:

$$SOH = \frac{Q_i}{Q_0} \times 100\% \quad (12)$$

其中,  $Q_i$  为当前循环周期的实际容量;  $Q_0$  为初始额定容量。

通过充放电记录容量,图5显示了容量衰减结果,振动组衰减速度比常规组快,当常规组衰减到初始容量的80% (1 920 mAh) 时约150个周期,因此只比较前150个周期4组电池的衰减情况。前50周期,4组衰减缓慢,振动组较常规组出现初步差距,但振动组内部差别不大,初期容量损失可能与负极固体电解质界面(solid electrolyte interphase, SEI)膜形成有关<sup>[24]</sup>;在50周期后,4组衰减都表现出加速趋势,振动组和常规组的差距明显,可能电解质分解并且可用锂离子数量减少<sup>[24]</sup>;在100周期后,衰减进一步加速,振动组和常规组的差距拉大,Z组衰减最为严重。

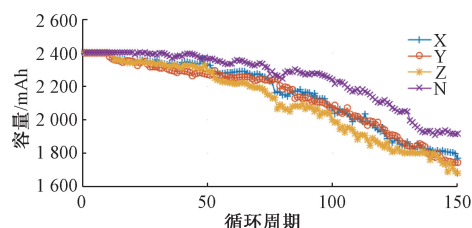


图5 容量衰减

Fig. 5 Capacity fade

#### 2) IC-DV 曲线结果及衰退模式量化

图6显示了衰退结果的IC-DV曲线,由于各组曲线趋势相同,仅以N组为例。为方便展示,以10周期为间隔:1)IC曲线峰值逐渐减小,低电压处(3.52 V)的峰在循环后期逐渐消失,DV曲线谷值逐渐增加;2)IC曲线出现峰值时的电压逐渐增大,DV曲线出现谷值时的容量逐渐减小。

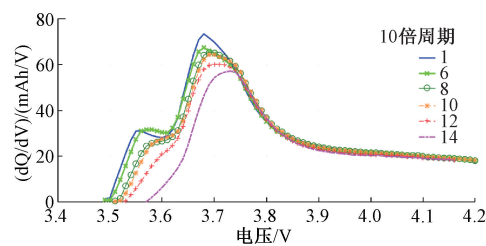
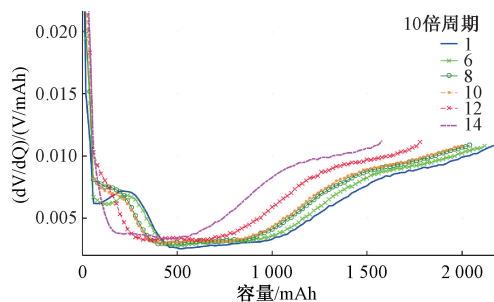
(a) IC 曲线  
(a) IC curve(b) DV 曲线  
(b) DV curve

图6 IC-DV 曲线

Fig. 6 IC-DV curves



按式(4)~(6)对衰退模式进行量化,如图7和表1所示,LAM和LLI的增长远大于CL。推测LAM和LLI是造成老化的两个主要因素。其中振动组的衰退结果大于常规组,Z组影响最严重。

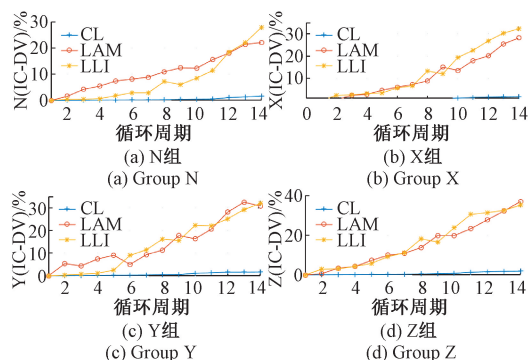


图7 IC-DV 衰退模式

Fig. 7 IC-DV degradation pattern

表1 IC-DV 衰退模式结果

Table 1 IC-DV degradation model results %

| 方向 | CL   | LAM   | LLI   |
|----|------|-------|-------|
| N  | 1.63 | 22.08 | 27.87 |
| X  | 1.79 | 28.12 | 32.28 |
| Y  | 1.69 | 30.83 | 31.98 |
| Z  | 1.90 | 36.94 | 35.12 |

### 3.3 衰退机理诊断

IC-DV 曲线辨识的衰退模式与对应的机理如表2所示<sup>[10]</sup>。

表2 IC-DV 老化机理

Table 2 IC-DV ageing mechanism

| 曲线变化          | 衰退模式 | 老化机理         |
|---------------|------|--------------|
| IC 曲线向低电压方向移动 | CL   | 集电器腐蚀        |
| DV 曲线向低容量方向移动 | LLI  | 电解质氧化及分解     |
|               |      | 锂枝晶形成        |
| IC 峰值变化差值     | LAM  | 电极分解,电解质氧化   |
|               |      | 活性粒子变性,锂枝晶形成 |
|               |      | 晶体结构无序化      |

EIS 测试范围 0.01 ~ 100 kHz, 高频感抗部分与老化无关,仅对中低频率用二阶等效模型拟合,得到:欧姆阻抗( $R_{ohm}$ )、SEI 膜阻抗( $R_{SEI}$ )、电荷转移阻抗( $R_{ct}$ )和扩散阻抗( $R_w$ )。以 10 周期为间隔,结果如图8所示: $R_{ohm}$ 、 $R_{ct}$ 和 $R_w$ 的阻值随着循环逐渐增大,且 $R_{ct}$ 和 $R_w$ 最明显; $R_{SEI}$ 并未表现出明显规律。

SEM 和 XRD 如图9、10所示,并结合 IC-DV 曲线和 EIS 对三种衰退模式进行诊断。

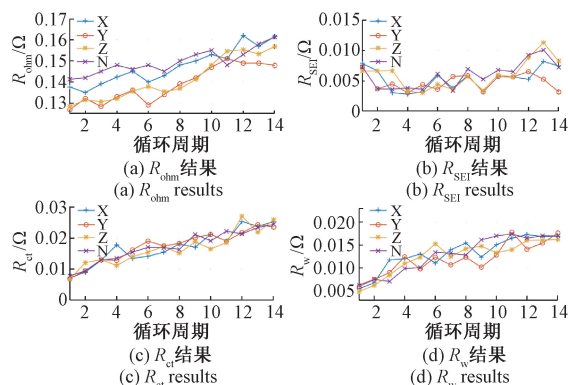


图8 阻抗结果

Fig. 8 Impedance results

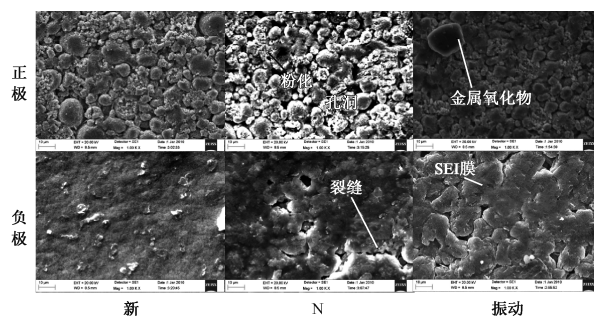


图9 SEM 结果

Fig. 9 SEM results

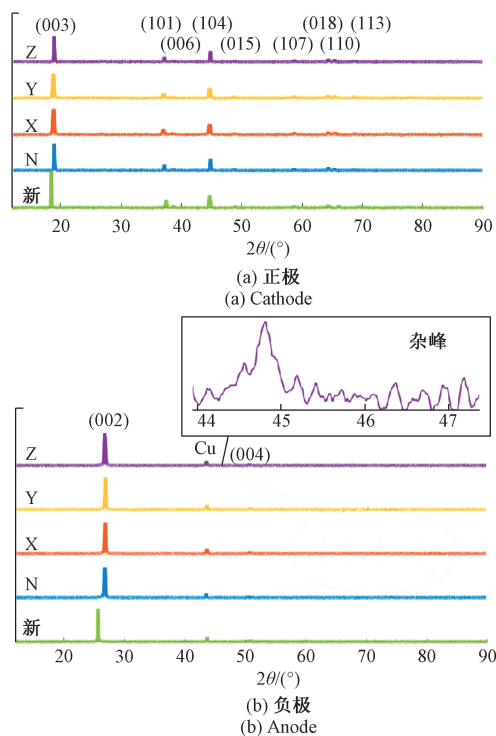


图10 XRD 结果

Fig. 10 XRD results

CL 与集电器腐蚀,电解液分解有关<sup>[25]</sup>,电解液随老化不断消耗,表示为  $R_{ohm}$  逐渐增大。在各组正极 SEM 可以看到集电器腐蚀导致的表面颗粒破损,振动组中甚至出现粉化,表明正极材料在循环中与电解液接触,导致界面阻抗增大<sup>[10]</sup>。

LLI 与电解质氧化分解、锂枝晶形成有关<sup>[25]</sup>,电解质氧化分解使锂离子表面形成致密的 SEI 膜,可用  $R_{SEI}$  表示;锂枝晶使化学转移过程中可嵌入脱出的锂离子减少,即  $R_{ct}$  也增大。对应正极 SEM 表面沉积金属氧化物,同时晶体结构改变使锂离子嵌入脱出的孔洞减少<sup>[26]</sup>。负极 SEM 循环前颗粒表面较平整,无明显裂缝。循环后表面破损严重,覆盖了一层较厚的 SEI 膜。一方面适量的 SEI 膜能阻隔电解液与负极界面,阻碍更多副反应的发生;另一方面 SEI 膜过厚会导致活性锂损失,造成极化反应。循环过程中电解液不断分解,金属阳离子迁移到负极表面破坏 SEI 膜,而新的 SEI 膜还不断形成,又进一步消耗活性锂,导致各类阻抗不断增加,造成 CL、LLI、LAM 共同增加。可以推测,振动组化学反应更剧烈,SEI 膜更厚,活性锂损失更多,容量的衰减更严重。

LAM 与电极分解、电解质氧化、活性粒子变性、锂枝晶形成、晶体结构无序化、过渡金属溶解等多种因素有关<sup>[25]</sup>,对应到 EIS 中  $R_{ohm}$ 、 $R_{SEI}$ 、 $R_{ct}$ 、 $R_w$  都不同程度增大。在正负极的 SEM 中可以观察到表面形貌结构变化,由于 NCM 为  $\alpha$ -NaFeO<sub>2</sub> 型结构,循环后正极 XRD 各峰向高角度偏移,峰强度比  $I_{(003)}/I_{(104)}$  由循环前的 2.815 减小为: N2.381; X2.358; Y2.390; Z2.362, 比值减小表明混排增加,但都大于 1.2,证明材料没有出现严重的混排,依旧保持良好的层状结构<sup>[26]</sup>。另外,由于 Ni<sup>2+</sup> 和 Li<sup>+</sup> 离子半径的离子半径相近且其迁移势垒较低,NCM 材料晶格的 3b 位点易发生 Li/Ni 位置交换,出现 Li<sup>+</sup>/Ni<sup>2+</sup> 混排,阻塞 Li 的传输通道,有层状结构向岩盐结构转变的趋势,导致电池长循环性能差<sup>[26]</sup>。负极 XRD 中,各峰值变化不明显,仅能略微观察到循环后各峰强度变弱,峰位置略向高角度偏移。但循环后杂峰增多,可能是循环过程中锂离子插入导致部分石墨层晶面间距变大引起的,说明循环过程中负极结构有部分损伤<sup>[10]</sup>。

综上,振动的施加在一定程度上促进了电池内部各类化学反应。正极出现粉化现象,峰强度比  $I_{(003)}/I_{(104)}$  降低,晶体混排增加;负极表面的 SEI 膜更厚,使得锂离子损失加剧,造成 LLI 和 LAM 两类衰退模式影响较严重。另外,容量的衰减速率快慢与 IC-DV 曲线、EIS 及异位拆解分析的趋势一致,可以将 IC-DV 分析作为主要分析手段,为下一步作为 SOH 预测提供依据。

### 3.4 GA-Elman 预测结果

上一节从机理层面解释了用 3 种衰退模式作为特征来预测 SOH 的合理性,为了从数值上进一步证明这些特

征与容量的相关性,引入皮尔逊相关性系数  $\rho$ ,来衡量两组变量  $X$ 、 $Y$  之间的相关性,定义如下:

$$\rho = \frac{cov(X, Y)}{\sigma_X \times \sigma_Y} \quad (13)$$

其中,  $cov(*)$  表示协方差;  $\delta$  为标准差;  $\rho$  绝对值越接近 1,相关性越强。表 3 为量化后的衰退模式与容量之间的  $\rho$  值,可以看出各组的强相关性,满足作为电池老化特征的要求。

表 3 特征相关性

Table 3 Characteristic correlation

| 方向 | $\rho_{CL}$ | $\rho_{LLI}$ | $\rho_{LAM}$ |
|----|-------------|--------------|--------------|
| N  | 0.811 2     | 0.906 3      | 0.932 2      |
| X  | 0.805 0     | 0.916 2      | 0.885 4      |
| Y  | 0.827 5     | 0.893 0      | 0.910 2      |
| Z  | 0.835 4     | 0.927 0      | 0.867 5      |

将 3 种量化参数输入 GA-Elman 预测模型,按相对误差对结果进行评判<sup>[27]</sup>:

$$error = \frac{Q_{pr} - Q_{tr}}{Q_{tr}} \times 100\% \quad (14)$$

其中,  $Q_{pr}$  为容量预测值;  $Q_{tr}$  为容量真实值。

预测结果及误差如下图 11 所示。

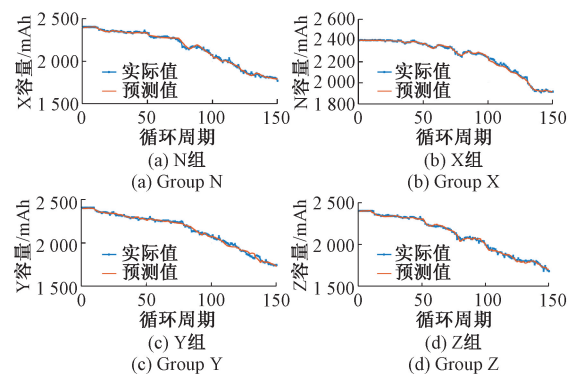


图 11 预测结果

Fig. 11 Prediction results

搭载的 GA-Elman 模型在 4 个实验组都表现出高拟合度,误差结果如表 4,各组误差都在可接受范围内,证明了 GA-Elman 模式强适应性,保证了工况振动条件下 SOH 预测的可靠性。

表 4 模型误差

Table 4 Model error

| 方向 | 误差   | % |
|----|------|---|
| N  | 3.46 |   |
| X  | 4.06 |   |
| Y  | 4.18 |   |
| Z  | 3.95 |   |

## 4 结 论

本文研究了锂离子电池振动老化条件下的机理诊断和 SOH 预测。首先对比了振动下实验组的衰减程度,振动加速了容量衰减,衰退模式以 LAM 和 LLI 为主,以 Z 组衰退最严重;LAM (36.94%)、LLI (35.12%)、CL (1.9%);其次,振动加速了内部电化学反应,导致阻抗增长,并以  $R_{ct}$  和  $R_w$  为主。SEM 和 XRD 显示经振动的正负极破损情况更严重;正极出现粉化现象,峰强度比  $I_{(003)}/I_{(104)}$  降低,晶体混排增加;负极表面的 SEI 膜更厚,锂离子损失加剧;最后,将衰退模式作为特征参数输入 GA-Elman 网络预测 SOH,误差保持在 5% 以内,取得良好的预测效果。

本文的局限性在于没有考虑其他道路振动条件,并只有单一充放电模式,未来将增加不同行驶工况条件下振动的影响分析,另外也将增加其他机理分析的方法。

### 参考文献

- [1] 王文,王红凯. 通信设备用锂电池电极材料与振动的关系[J]. 电源技术, 2018, 42(7): 959-961.  
WANG W, WANG H K. Relationship between electrode material and vibration of lithium batteries for communication equipment[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2018, 42(7): 959-961.
- [2] BERG P, SPIELBAUER M, TILLINGER M, et al. Durability of lithium-ion 18650 cells under random vibration load with respect to the inner cell design[J]. Journal of Energy Storage, 2020, 31: 101499.
- [3] 张勇,董钊志,侯之超. 基于疲劳损伤谱的动力电池包振动标准分析[J]. 汽车技术, 2020(4): 27-32.  
ZHANG Y, DONG ZH ZH, HOU ZH CH. Analysis of vibration standards for power battery pack based on fatigue damage spectrum[J]. Automobile Technology, 2020(4): 27-32.
- [4] HOOPER J M, MARCO J, CHOUCHELAMANE J H, et al. Multi-axis vibration durability testing of lithium ion 18650 NCA cylindrical cells [J]. Journal of Energy Storage, 2018, 15: 103-123.
- [5] KEIL P, JOSSEN A. Charging protocols for lithium-ion batteries and their impact on cycle life-An experimental study with different 18650 high-power cells[J]. Journal of Energy Storage, 2016, 6: 125-14.
- [6] HU X, YUAN H, ZOU C, et al. Co-estimation of state of charge and state of health for lithium-ion batteries based on fractional-order calculus [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(11): 10319-10329.
- [7] 李杰,高雄,王培德,等. 路面和开关磁阻电机作用下电动汽车振动分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2018, 45(8): 7-14.  
LI J, GAO X, WANG P D, et al. Vibration analysis of electric vehicle under the action of road and switched reluctance motor [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2018, 45(8): 7-14.
- [8] 张慧杰,郝慧荣,郭志平. 六自由度发动机悬置系统分析与优化设计[J]. 振动工程学报, 2019, 32(5): 801-810.  
ZHANG H J, HAO H R, GUO ZH P. Analysis and optimization design of six degrees of freedom engine mount system [J]. Journal of Vibration Engineering, 2019, 32(5): 801-810.
- [9] 殷琨,陈辛波,吴利鑫,等. 滤波白噪声路面时域模拟方法与悬架性能仿真[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2017, 45(03): 398-407.  
YIN J, CHEN X B, WU L X, et al. Simulation method of road excitation in time domain using filtered white noise and dynamic analysis of suspension[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2017, 45(3): 398-407.
- [10] CARLOS P, KOTUB U, GAEL H. A comparison between electrochemical impedance spectroscopy and incremental capacity-differential voltage as Li-ion diagnostic techniques to identify and quantify the effects of degradation modes within battery management systems[J]. Journal of Power Sources, 2017, 360: 301-318.
- [11] 孙丙香,姜久春,韩智强,等. 基于不同衰退路径下的锂离子动力电池低温应力差异性[J]. 电工技术学报, 2016, 31(10): 159-167.  
SUN B X, JIANG J CH, HAN ZH Q, et al. The lithium-ion battery low temperature stress based on different degradation paths [J]. Transactions of China Electro Technical Society, 2016, 31(10): 159-167.
- [12] 王筱彤,李奇,王天宏,等. 基于离散区间二进制序列激励信号的燃料电池 EIS 测量及故障诊断方法[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(14): 4526-4537, 4732.  
WANG X T, LI Q, WANG T H, et al. EIS measurement based on dils excitation signal and fault diagnosis method of fuel cell [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(14): 4526-4537, 4732.
- [13] 杨涛,刘文凤,马梦月,等. 三元锂离子动力电池衰减机理[J]. 应用化学, 2020, 37(10): 1181-1186.  
YANG T, LIU W F, MA M Y, et al. Fade mechanism of ternary lithium ion power battery [J]. Chinese Journal of Applied Chemistry, 2020, 37(10): 1181-1186.
- [14] 刘健,陈自强,黄德扬,等. 基于等压差充电时间的锂离子电池寿命预测[J]. 上海交通大学学报, 2019, 53(9): 1058-1065.

- LIU J, CHEN Z Q, HUANG D Y, et al. Remaining useful life prediction for lithium-ion batteries based on time interval of equal charging voltage difference [J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2019, 53(9): 1058-1065.
- [15] 张金龙, 佟微, 漆汉宏, 等. 平方根采样点卡尔曼滤波在磷酸铁锂电池组荷电状态估算中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(22): 6246-6253.
- ZHANG J L, TONG W, QI H H, et al. Application of square root sigma point Kalman filter to SOC estimation of LiFePO<sub>4</sub> battery pack [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(22): 6246-6253.
- [16] 徐鑫珉, 王练, 史慧玲. 基于电化学阻抗谱的电池老化寿命研究[J]. 电源技术, 2015, 39(12): 2579-2583.
- XU X M, WANG L, SHI H L. Research on battery aging mechanisms based on electrochemical impedance spectroscopy [J]. Chinese Journal of Power Sources, 2015, 39(12): 2579-2583.
- [17] ZHOU Y, HUANG M, CHEN Y. A novel health indicator for on-line lithium-ion batteries remaining useful life prediction [J]. Journal of Power Sources, 2016, 321(30): 10.
- [18] 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.
- LIU D T, SONG Y CH, WU W, et al. Review of state of health estimation for lithium-ion battery pack [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(11): 1-18.
- [19] 石伟杰, 王海民. 基于锂离子电池热特性的 SOH 在线诊断模型研究 [J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(8): 206-216.
- SHI W J, WANG H M. On-line diagnosis model of SOH based on thermal characteristics of lithium-ion battery [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(8): 206-216.
- [20] DUBARRY M, TRUCHOT C, LIAW B Y. Synthesize battery degradation modes via a diagnostic and prognostic model [J]. Journal of Power Sources, 2012, 219: 204-216.
- [21] YU M, BILLY W, VLADIMIR Y, et al. Extending battery life: A low-cost practical diagnostic technique for lithium-ion batteries [J]. Journal of Power Sources, 2016, 331: 224-231.
- [22] 李仲兴, 李颖, 周孔亢, 等. 纯电动汽车不同行驶工况下电池组的温升研究 [J]. 机械工程学报, 2014, 50(16): 180-185.
- LI ZH X, LI Y, ZHOU K K, et al. Temperature study of pure electric vehicles battery pack at different driving conditions [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(16): 180-185.
- [23] LI W H, JIAO Z, XIAO Q, et al. A study on performance characterization considering six-degree-of-freedom vibration stress and aging stress for electric vehicle battery under driving conditions [J]. IEEE Access, 2019, 7: 112180-112190.
- [24] RUI X, YUE P, WEIXIANG S, et al. Lithium-ion battery aging mechanisms and diagnosis method for automotive applications: Recent advances and perspectives [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2020, 131: 110048.
- [25] KOTUB U, SURAK P, WI DA NAGE W, et al. Characterising lithium-ion battery degradation through the identification and tracking of electrochemical battery model parameters [J]. Batteries, 2016, 2(2): 13.
- [26] KIM J Y, KIM J Y, KIM M K, et al. Health monitoring of mechanically fatigued flexible lithium ion battery by electrochemical impedance spectroscopy-sciencedirect [J]. Microelectronics Reliability, 2020, 114: 113818.
- [27] 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.
- ZHENG X Y, DENG X G, CAO Y P. State of health prediction of lithium-ion batteries based on energy-weighted Gaussian process regression [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(6): 63-69.

## 作者简介



**李文华** (通信作者), 2006 年于河北工业大学获得博士学位, 现为河北工业大学教授, 主要研究方向为电器可靠性与检测技术分析、智能电器与通信技术分析。

E-mail: liwenhua@hebut.edu.cn

**Li Wenhua** (Corresponding author)

received his Ph. D. degree from Hebei University of Technology in 2006. He is currently a professor at Hebei University of Technology. His main research interests include reliability and detection technology of electrical appliance, intelligent electric appliance and communication technology.



**暴二平**, 2011 年于河北工业大学获得硕士学位, 现为航天建筑设计研究院有限公司高级工程师, 主要研究方向为供配电。

E-mail: 13716906056@139.com

**Bao Erping** received his M. Sc. degree from

Hebei University of Technology in 2011. He is currently a senior engineer at China Aerospace Academy of Architectural Design & Research Co., Ltd. His main research interests include power supply and distribution.