

# 基于双层 ELM 模型的汽车锂电池充电状态评估分析

温喜梅, 丁志成, 康金龙, 李前通

(郑州工业应用技术学院机电工程学院, 河南 郑州 451150)

**摘要:**锂电池充电状态直接影响到新能源汽车领域的经济效益,采用双层集成极限学习机(ELM)模型对锂电池充电荷电状态(SOC)和健康状态(SOH)进行评估。通过分析电池健康特征实现充电状态的迭代计算。研究结果表明:以等电压区间健康特征来估算双层集成 ELM 模型获得 SOC 和老化 SOC 估计参数偏差不超过 1.4%,模型实现了高精度估计效果并表现出了优异鲁棒性。相比较其他算法,集成 ELM 预测准确率、训练与测试精度都达到了最高,在更短时间内集成 ELM 模型。该研究有助于提高新能源汽车行业的高效率运行和降低成本。

**关键词:**锂电池;充电状态;健康特征;集成极限学习机

**中图分类号:**TM912

**文献标识码:**A

**文章编号:**2095-0748(2024)09-0215-02

## 0 引言

锂离子动力电池具备高效能量转换、长寿命、安装使用便捷等优势而成为电动汽车领域的重要动力部件<sup>[1-2]</sup>。荷电性能(SOC)与健康状态(SOH)呈现良好的时间尺度耦合状态,因此需对其开展联合估算以获得更准确的结果<sup>[3]</sup>。

根据 SOC 与 SOH 的组成结构可知,存在同时满足两者需求的最大容量,SOC 估计结果与 SOH 间存在紧密关联<sup>[4]</sup>。相关方面的研究吸引了很多的学者,取得了一定的研究成果。

高德欣等<sup>[5]</sup>提出基于卷积神经网络(CNN)和双向门控循环单元(BiGRU)的电池充电状态监测方法,构建电池温度预测模型,相比其他预测模型具有更高的预测精确度和预测效果。卢地华等<sup>[6]</sup>提出基于双充电状态因子的电池健康状态估计方法,建立具备强泛化能力的改进支持向量回归模型,所建立改进支持向量回归模型可实时估计不同老化状态下的电池健康状态,具备容量局部回弹变化的表征能力。文献[7]设计了一种避免粒子退化的闪烁粒子滤波算法(I-FA-PF),再通过包含遗忘系数的递归最小二乘法来识别参数,再以内阻构成健康特征对 SOC 与 SOH 开展估算。文献[8]通过设置循环神经网络与门控循环单元神经网络(GRU-RNN),再以数据驱动开展估算。

本文在前人研究的基础上,采用双层集成极限学习机(ELM)模型对锂电池充电荷电状态(SOC)和健康状态(SOH)状态进行评估。通过集成极限学习机(ELM)模型与集成算法来提升学习效率,在此基础上设计了电池健康特征模型来实现各充电状态的迭代计算。

## 1 双层 ELM 模型

极限学习机是根据单隐层前馈神经网络建立的,具有明显的随机性,这主要是由于隐含层呈现随机分

布的权值与偏差。毛玲等<sup>[9]</sup>通过选择合适的集成 ELM 模型集成度,解决了单个 ELM 模型输出不稳定的问题,提出双层 ELM 算法实现锂电池 SOC 和 SOH 联合估计。

本文在前人的基础上,构建了由  $n$  个神经元构成的模型,输出层中包含了  $m$  个神经元,隐含层由 1 个神经元构成。向量  $b$  属于隐含层偏置矩阵,其计算式如下:

$$b=(b_1, b_2, \dots, b_l)^T. \quad (1)$$

利用  $n$  维输入向量  $x_i$  与激活函数来确定模型输出  $F(x)$ 。

$$F_L(x)=\sum_{i=1}^L \beta_i \cdot h(x_i). \quad (2)$$

式中: $L$  为总样本个数。

随机学习时,需在隐含层与输出层间建立矩阵  $\beta$ ,使二范数  $H\beta$  达到最小平方值或到达 0 附近, $H$  表示隐含层输出矩阵。

通过计算个体输出  $f(i)$  和集成模型期望  $f(j)$  差值得到潜在误差,结果见下式:

$$E_{\text{maj}}=|f_i(x_j)-f_j(x_i)|. \quad (3)$$

采用数据驱动集成 ELM 模型开展离线测试,将易测健康特征表示为 SOC1,以 SOC2 表示难以进行在线测试的充电时间,建立健康特征和实测 SOH 函数关系<sup>[10]</sup>。

## 2 测试结果与评价

### 2.1 NASA 数据集的估计结果

NASA 样本由艾姆斯预测中心提供。因将模型集成度设置成  $k=100$ ,在满足估计精度的条件下可以尽量简化计算过程。

将 NASA 数据集中电池通过等充电电压片段时间差构成健康特征再开展 SOH 预测,结果见图 1 所示。

对 CALCE 数据集电池(CS2-35、CS2-37)进行

收稿日期:2024-04-15

第一作者简介:温喜梅(1995—),女,河南郑州人,硕士,毕业于新疆农业大学交通运输工程专业,从事交通工程工作。

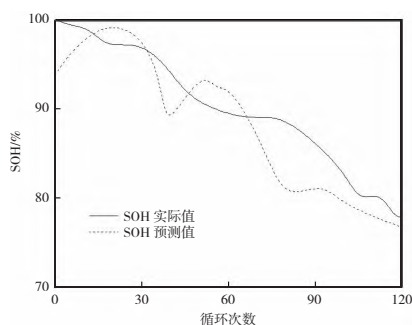


图 1 NASA 电池 SOH 估计结果

SOH 预测, 并通过估算最大容量 SOC 得到表 1 的测试结果。

表 1 显示, 设定电压为 4.2 V 时, 以等电压区间健康特征来估算双层集成 ELM 模型获得的 SOC 和计及老化 SOC 估计参数偏差都不超过 1.4%。

表 1 充电终止电压为 4.2 V 的 SOC 估计结果

	均方根误差	平均绝对百分误差	平均绝对误差
NASA B0005	0.011 5	0.009 9	0.015 3
NASA B0007	0.013 7	0.011 8	0.017 1
CALCE CS2-35	0.011 6	0.009 0	0.010 4
CALCE CS2-37	0.014 8	0.011 3	0.013 0

通过估计结果发现, 集成 ELM 模型实现了高精度估计的效果并表现出了优异鲁棒性。此时可以采用在线调控的方法设置充电电压 SOC。

## 2.2 算法比较

针对集成度值  $k=100$  情况下的集成 ELM 算法开展性能验证, 并与其它算法开展预测结果对比, 得到表 2 的结果, 对各模型超参数实施优化, 开展性能对比的算法包括长短记忆神经网络(LSTM)、单独 ELM、支持向量机(SVM)、随机森林(RF)、集成 ELM。进行算法对比时, 设置了 NASA 与 CALCE 数据集, 由此确保获得相同的训练与测试条件。

表 2 不同算法 SOC 预测精度(均方根误差)比较

算法	NASAB005	NASAB007	CALCECS2-35	CALCECS2-37
LSTM	0.021 6	0.020 1	0.024 3	0.028 4
RF	0.016 8	0.018 8	0.020 3	0.018 9
SVM	0.015 0	0.016 1	0.018 3	0.017 4
SPO	0.015 6	0.017 4	0.021 1	0.018 8
单个 ELM	0.018 9	0.014 4	0.028 9	0.015 5
集成 ELM	0.011 5	0.013 7	0.011 6	0.014 8

综合考虑机器学习算法的各项指标来判断算法性能, 表 3 是对 CALCE 的 CS2-35 电池测试所需时间与准确率的情况。

将表 2 与 3 的最优结果实施加粗标注, 结果发现, 集成 ELM 预测准确率、训练与测试精度都达到了最高。采用单独 ELM 模型进行训练所需时间最短。但因为单个 ELM 预测结果存在一定波动性, 因此可以

表 3 不同算法训练 / 测试的时间 / 准确率(均方根误差)比较

算法	训练时间/s	测试时间/s	训练 RMSE/%	测试 RMSE/%
LSTM	2.389 4	2.078 0	2.18	2.45
RF	0.321 9	0.121 5	1.82	1.67
SVM	0.413 2	0.398 8	1.93	2.01
SPO	0.266 3	0.125 6	1.84	1.63
单个 ELM	0.027 5	0.017 3	1.65	1.58
集成 ELM	0.561 0	0.507 0	1.59	1.44

在更短时间内完成计算的集成 ELM 模型具备更广阔发展空间。

## 3 结论

本文开展基于双层 ELM 模型的汽车锂电池充电状态评估分析, 取得如下有益结果:

1) 以等电压区间健康特征来估算双层集成 ELM 模型获得 SOC 和老化 SOC 估计参数偏差都不超过 1.4%, 型实现了高精度估计效果并表现出了优异鲁棒性。

2) 相比较其它算法, 集成 ELM 预测准确率、训练与测试精度都达到了最高, 在更短时间内集成 ELM 模型。

本文研究有助于节约新能源汽车的成本, 但是在面对长期工作导致高温环境时存在对充电状态评估误差较大的问题, 期待后续引入深度学习方法进行加强。

## 参考文献

- [1] 王义军, 左雪. 锂离子电池荷电状态估算方法及其应用场景综述[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(14): 193-207.
- [2] 夏向阳, 邓子豪, 张嘉诚, 等. 基于动力锂离子电池健康状态的全寿命周期优化充电策略[J]. 电力科学与技术学报, 2022, 37(6): 17-24.
- [3] 黎冲, 王成辉, 王高, 等. 基于数据驱动的锂离子电池健康状态估计技术[J]. 中国电力, 2022, 55(8): 73-86, 95.
- [4] 来鑫, 李云飞, 郑岳久, 等. 基于 SOC-OCV 优化曲线与 EKF 的锂离子电池荷电状态全局估计[J]. 汽车工程, 2021, 43(1): 19-26.
- [5] 高德欣, 王义, 郑晓雨, 等. 基于深度学习的电动汽车充电状态监测与安全预警方法[J]. 电机与控制学报, 2023, 27(7): 122-132.
- [6] 卢地华, 陈自强. 基于双充电状态的锂离子电池健康状态估计[J]. 上海交通大学学报, 2022, 56(3): 342-352.
- [7] WU Tiezhou, LIU Sizhe, WANG Zhikun, et al. SOC and SOH joint estimation of lithium-ion battery based on improved particle filter algorithm[J]. Journal of Electrical Engineering & Technology, 2022, 17(1): 307-317.
- [8] 李超然, 肖飞, 樊亚翔, 等. 基于深度学习的锂离子电池 SOC 和 SOH 联合估算[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(2): 681-692.
- [9] 毛玲, 温佳林, 赵晋斌, 等. 基于集成 ELM 的锂离子电池充电截止电压下的 SOC 和 SOH 联合估计[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(11): 86-95.
- [10] 向铭, 何怡刚, 张慧. 基于改进集成经验模态分解和高斯过程回归的锂离子电池剩余容量及寿命预测方法[J]. 电测与仪表, 2023, 60(9): 27-33.

(编辑: 白龙)(下转第 219 页)

- [J].现代制造工程,2023(6):150-159.
- [2] 高淑芝,裴志明,张义民.动态自适应学习率优化的卷积神经网络轴承故障诊断方法[J].机械设计与制造,2023(7):211-214.
- [3] 白亮,张银,梁武科,等.优化变分模态分解与集成机器学习的风力机滚动轴承故障分类研究[J].机械设计与研究,2023,39(3):101-108.
- [4] 阮强,刘韬,王振亚,等.基于小波卷积与注意力机制的RV减速器齿轮箱故障识别[J].机电工程,2023,40(6):815-824.
- [5] 徐天贇,周俊.基于信息熵和VMD的RV减速器行星轮故障分析[J].噪声与振动控制,2023,43(1):122-127.
- [6] 周俊,谢文松,伍星,等.基于时频脊线提取与改进稀疏分量分析的RV减速器复合故障盲分离[J].农业工程学报,2023,39(22):18-26.
- [7] 程亮,董子健,王树民,等.基于改进一维卷积神经网络的滚动轴承故障诊断分析[J].机械设计与研究,2023,39(3):126-130.
- [8] 李慧芳,徐光浩,黄双喜.基于主动生成式过采样和深度堆叠网络的轴承故障诊断[J].计算机集成制造系统,2023,29(1):146-159.

(编辑:白龙)

## Fault Identification and Analysis of RV Gear Box of Industrial Robot Based on DAL

Liu Xiqing, Zhang Wenhao, Pan Zhenzhen

(School of Electronic Information Engineering, Zhengzhou City Vocational College, Zhengzhou Henan 452370, China)

**Abstract:** The transmission efficiency of industrial robots directly affects the effect of industrial energy saving. Aiming at the fault diagnosis capability of gearbox, a fault identification method of RV gearbox of industrial robot based on deep active learning (DAL) was designed and tested. The results show that the accuracy of edge sampling, deep learning, deep active learning and random sampling can reach 77.23%, 94.35%, 97.18% and 84.26% respectively, indicating that the method can effectively filter out difficult samples. The analysis of confusion matrix shows that the DAL algorithm can get better results than the traditional learning algorithm when only using small samples for training. This research is helpful to improve the control efficiency of industrial robots and has wide application value.

**Key words:** industrial robot; RV gear box; fault identification; deep active learning

(上接第214页)

## Multi-Source Fusion GRP-SVM Diagnosis of Industrial Robot Transmission Shaft Vibration Signals

Niu Ruili, Wu Yitao

(Zhengzhou Institute of Industrial and Applied Technology, College of Mechanical and Electrical Engineering, Zhengzhou Henan 451100, China)

**Abstract:** The operating stability of the drive system of industrial robots directly affects the efficiency of use, and then saves industrial costs. The random mapping algorithm is used to realize the fault and achieve the dimensionality reduction of multi-source information. After considering the classification according to SVM method, the corresponding experimental scheme is designed. It is proved that the above method meets the practical feasibility. The results show that when the number of samples reaches 800 ~ 2 100, the ideal fault diagnosis results can be obtained. The vibration signal fusion can obtain higher diagnostic accuracy than the Z direction, and obtain more accurate prediction results, with an accuracy of 99.89%. This research has a good theoretical support for improving the operational stability of industrial robot drive system and is easy to be popularized.

**Key words:** industrial robot; drive shaft; vibration signal; support vector machine; multi-source information fusion

(上接第216页)

## Analysis of State-of-Charge Assessment of Automotive Lithium Batteries Based on a Two-Layer ELM Model

Wen Ximei, Ding Zhicheng, Kang Jinlong, Li Qiantong

(School of Electrical and Mechanical Engineering, Zhengzhou Institute of Industrial Applied Technology, Zhengzhou Henan 451150, China)

**Abstract:** The state of charge of lithium battery directly affects the economic benefits in the field of new energy vehicles, and a two-layer integrated extreme learning machine (ELM) model is used to evaluate the state of charge (SOC) and state of health (SOH) of lithium battery. The iterative calculation of the state of charge is realized by analyzing the battery health characteristics. The results show that the deviation of the estimated parameters of SOC and aging SOC obtained from the two-layer integrated ELM model by estimating the health characteristics of equal voltage intervals is no more than 1.4%, and the type achieves high precision estimation effect and shows excellent robustness. Compared with other algorithms, the integrated ELM prediction accuracy, training and testing accuracy are the highest, and the ELM model is integrated in a shorter time. This research helps to improve the efficient operation and reduce the cost in the new energy vehicle industry.

**Key words:** lithium battery; state of charge; health characteristics; integrated extreme learning machine