

基于超声波技术和随机森林模型的电池浸润程度分析

王一宇, 来鑫*

上海理工大学机械工程学院, 上海

收稿日期: 2024年1月16日; 录用日期: 2024年3月15日; 发布日期: 2024年3月22日

摘要

近年来, 锂离子电池的需求量随着新能源汽车的发展急速上升。然而, 锂电池在生产过程中存在一些一致性方面的挑战。其中, 电池浸润一致性是影响电池寿命和性能的关键因素之一, 不均匀的电解液分布可能引发电池起火、爆炸等危险。超声波检测技术用于评估电池电解液的浸润一致性是一种高效且无损的方法。传统的超声波检测电池浸润一致性技术通常采用超声C扫图像与经验法相结合的方式, 但依靠人为经验看图分析, 会存在较大的误差。为了克服传统技术的局限性, 本文提出通过超声波A扫波形进行波形分析, 以磷酸铁锂软包电池为研究对象, 分析不同注液量电池的浸润区域波形差异。介绍了基于随机森林模型进行不同浸润程度自动识别的具体流程。结果表明, 该模型具有较高的识别精度, 对未浸润和浸润不良电池的分类准确率达到100%, 而浸润良好电池的分类准确率为97.8%, 过注液电池的准确率也达到了95%。本文为识别电池的不同浸润程度提供一定的理论指导。

关键词

磷酸铁锂, 超声波技术, 随机森林, 浸润一致性

Analysis of Battery Wetting Degree Based on Ultrasonic Technology and Random Forest Model

Yiyu Wang, Xin Lai*

School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Jan. 16th, 2024; accepted: Mar. 15th, 2024; published: Mar. 22nd, 2024

*通讯作者。

文章引用: 王一宇, 来鑫. 基于超声波技术和随机森林模型的电池浸润程度分析[J]. 建模与仿真, 2024, 13(2): 1404-1413. DOI: 10.12677/mos.2024.132132

Abstract

In recent years, the demand for lithium-ion batteries has surged rapidly with the development of new energy vehicles. However, there are some consistency challenges in the production process of lithium batteries. Among them, the consistency of battery wetting is one of the key factors affecting battery life and performance. Uneven distribution of electrolyte may cause dangerous incidents like battery fires and explosions. Ultrasonic detection technology is an efficient and non-destructive method used to evaluate the consistency of battery electrolyte wetting. Traditional ultrasonic techniques for detecting battery wetting consistency usually combine ultrasonic C-scan imaging with empirical analysis. However, relying on manual image analysis can lead to significant errors. To overcome the limitations of traditional techniques, this paper proposes waveform analysis through ultrasonic A-scan waveforms. Using lithium iron phosphate soft pack batteries as the research subject, the paper analyzes the waveform differences in the wetting areas of batteries with different electrolyte volumes. The paper introduces the specific process of automatic identification of different wetting degrees based on the random forest model. The results show that this model has high recognition accuracy, achieving a classification accuracy of 100% for unwetted and poorly wetted batteries, 97.8% for well-wetted batteries, and 95% for over-wetted batteries. This paper provides some theoretical guidance for identifying the different degrees of battery wetting.

Keywords

Lithium Iron Phosphate, Ultrasonic Technology, Random Forest, Wetting Consistency

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着全球对可持续发展和环保意识的提升, 电动汽车因其清洁、低碳的特性, 正逐步成为汽车产业的发展重点[1]。电动汽车的电池电解液在关键性能方面扮演着重要角色。电解液作为电池内部离子传递的媒介, 不仅直接影响电池的充放电效率, 还决定了电池的工作温度范围和安全性。如果电解液质量不佳或浸润不均匀, 可能导致电池内部电阻增加, 从而引发过热、充放电效率下降甚至安全隐患。

常用的电池浸润程度的检测方法[2], 包括质量法[3], 接触角测量法[4], 电化学阻抗谱法[5], 计时电流法[6], 中子成像法[7] [8], 聚焦离子束法和超声检测法等[9] [10]。质量法可根据电芯注液前后的质量变化得到实际的电解液保液量。电化学阻抗谱法通过测量电池的电阻来评估电解液和电极之间的接触情况。通过分析电池的交流电阻谱, 可以了解电解液和电极之间的接触状态。电阻越小, 表示电解液对电极的浸润程度越好。质量法和电化学阻抗谱法无法得到电池内部的浸润情况和浸润速率。接触角测量法和聚焦离子束法都需要将电池进行拆解, 破坏了电池结构。中子成像法对轻元素有较高的敏感度, 可与轻元素(如 H, Li 等)发生相互作用, 从而检测电池内部电解液。但中子成像设备存在成本高、实验环境要求高等问题, 难以大规模使用。

超声波技术因其无损和高效的特点[11], 近年来被用于检测电池内部电解液的浸润情况。华中科技大学的邓哲等人[10]利用超声透射成像方法还原了电解液的浸润及老化情况, 通过对浸润后不同搁置时间的电池进行超声扫查, 可视化电池的浸润过程以及浸润路径。该研究为无损原位表征电池浸润状态提供思

路。Gold 等人研究了超声波在不同浸润程度电池之间的差异[12], 在实验过程中发现, 当锂离子电池的多孔结构被电解液填充时, 声速会出现高达 100% 的巨大变化。通过识别电池浸润程度, 可以消除人为拆解成本, 与建模方法相结合可以得到电池的最佳注液量, 从而避免电解液过注所带来的生产成本。

本文旨在研究和探讨电池浸润程度分析。通过超声 A 扫波形和随机森林模型相结合, 自动化识别电池浸润程度, 避免人为经验法所带来的误差。通过实验数据, 验证了该方法的可行性和精度。

2. 电池制作及超声波检测实验

2.1. 制作不同注液量电池

制作过程如图 1 所示, 制作电池样品的步骤如下: 1) 通过剪开软包电池一侧的气袋, 使用注射器将预先设计好的电解液含量注入干电芯内。2) 使用塑封机将步骤 1 中剪开的气袋口热封好。3) 待所有电池都完成电解液注射后, 将其放置于烘箱中进行静置。温箱温度设置为 40°C, 静置时间设置为 48 h。期间需要每隔 8 小时翻转电池, 使电解液更好地渗透到电池材料孔隙中。4) 取出电池并待其完全冷却后, 使用真空封口机将电池放入并抽取至 0.09 MPa 的真空环境, 以除去废料 2 (电池内部多余气体和气囊中的电解液), 随后裁剪掉气袋区域进行热封, 得到成品电池。本文所使用电池的最佳注液量为 0.5 g, 制作后实际注液量为 0.1 g~0.6 g, 0.1 g 为注液量间隔。图 2 为真空干燥箱和真空塑封机的实际图片。

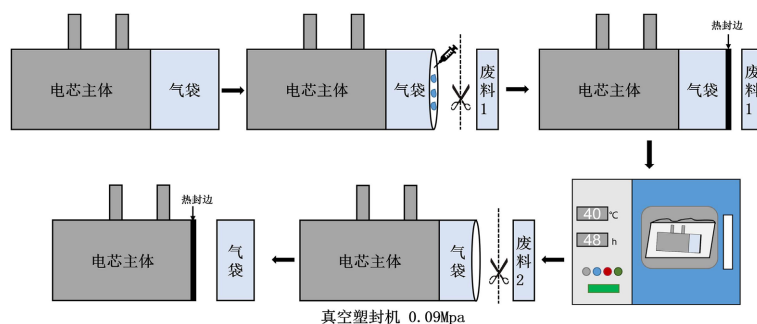


Figure 1. Battery manufacturing process with different electrolyte filling volumes
图 1. 不同注液量电池制作过程

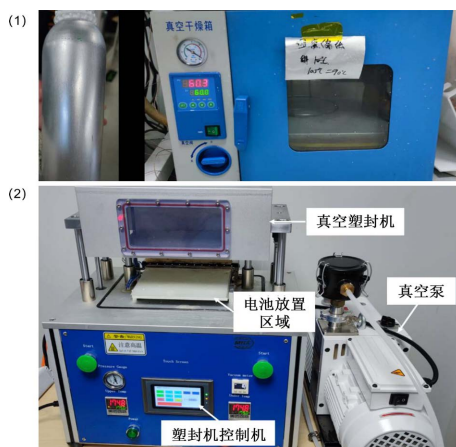


Figure 2. Actual photos of the devices used in the battery manufacturing process (1) Vacuum drying oven; (2) Vacuum sealing machine

图 2. 电池制作过程使用装置实际图片(1) 真空干燥箱; (2) 真空塑封机

2.2. 超声波扫描实验

本文通过夹具夹持电池两侧铝塑膜, 能保证电池平面与声波传递方向垂直, 可以非常准确地得到超声波扫描电池内部的详细数据, 可以更好地分析和评估电池内部材料的状态变化。本文采用的超声波方法为透射法, 图 3(1)呈现了透射法的基本原理和所需设备, 频率为 2.5 MHz 的聚焦超声波探头被布置在样品电芯的两侧。图 3(2)为超声装置的扫描路径示意图, 启动起点、终点、运动轨迹如图中的白色虚线所示, 可以看到在控制臂的驱动下, 逐层向上运动直至扫描完电池整个大面。图 3(3)为所采用的汕头超声探伤仪设备, 该装置功耗 15 W, 脉冲重复频率为 25~10 KHz, 增益范围是 0.0~110.0 dB, 与 2.5 Mhz 的聚焦探头结合使用可以对软包电池有较好的检测效果。

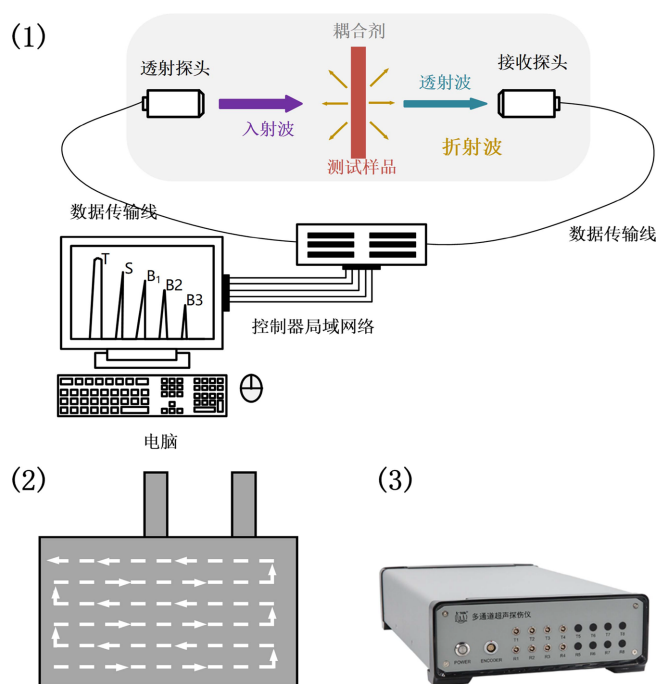


Figure 3. Schematic diagram of the ultrasonic nondestructive testing device (1) Diagram of the transmission method; (2) Schematic diagram of ultrasonic scanning of the battery; (3) Image of the flaw detector

图 3. 超声波无损检测装置示意图(1) 透射法示意图; (2) 超声波扫描电池的示意图; (3) 探伤仪图片

3. 超声波检测结果

图 4 展示了超声波在通过电池浸润良好区域和浸润不良区域的传递路径, 由于浸润不良区域超声波仅能通过固 - 固传递, 而浸润良好区域不仅可以进行固 - 固传递, 还增加了液 - 固的传递路径, 减少了声波传递过程中的能量耗散。

通过上述超声波装置对不同注液量的电池进行超声扫查, 基于最高幅值进行成像的超声 C 扫图像如图 5 所示, 由于 0.1 g~0.3 g 的注液量过少, 电池整体上还是处于干涸状态, 当超声波穿过这些未被电解液完全填充的孔隙时, 会产生大量散射和能量损耗, 扫描结果全部呈现深蓝色。虽然电池在一定深度范围内已经被电解液充分浸润, 但在电池内部仍然存在一些没有被浸润的孔隙。这些孔隙会导致透射信号在电池内部传播时受到阻碍从而影响成像质量。通过实验结果可以发现, 超声波检测对电池内部的孔隙

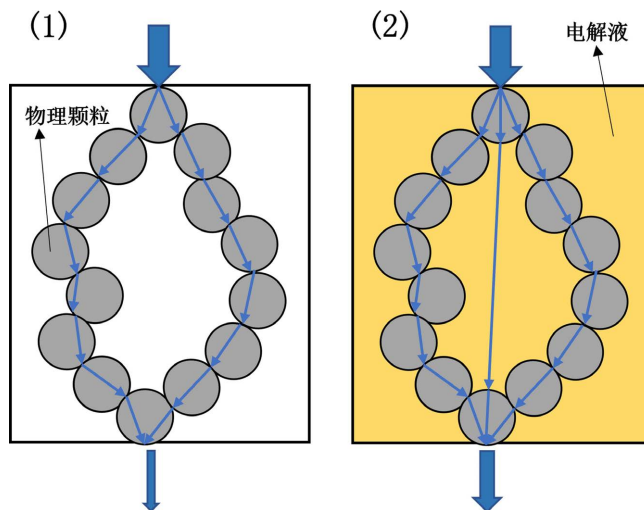


Figure 4. Schematic diagram of ultrasonic transmission path in porous electrodes. (1) Without electrolyte; (2) With electrolyte
图 4. 超声在多孔电极中的传输路径示意图。(1) 无电解液; (2) 有电解液

有很高的敏感度，当这些孔隙数量达到一定程度时，超声波检测就无法有效地进行，从而影响电池的表征效果，特别是对于低电解液含量的电池。对于当前的试验样品，本实验最小可以检测到 0.4 g 左右的电解液含量。如果需要检测到更低的电解液量，可以更换更加高频的探头以增强检测效果。0.4 g 注液量的电池可以观察到电芯周围有未浸润的低幅值区域。0.5 g 和 0.6 g 注液量的电池电芯区域一致性较好，但无法通过肉眼进行分辨最佳注液电池(0.5 g)和过注液电池(0.6 g)。

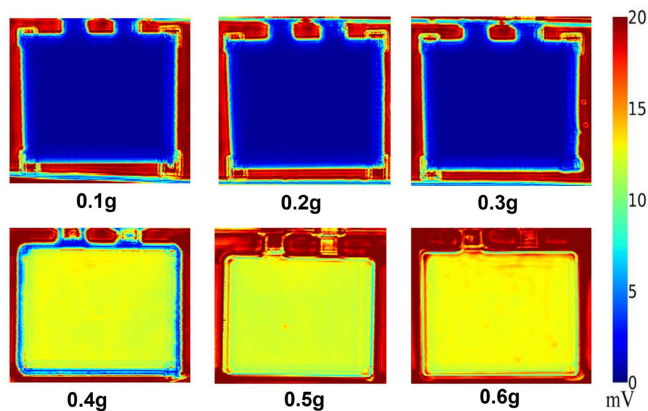


Figure 5. Ultrasonic inspection images of batteries with different electrolyte filling volumes
图 5. 不同注液量电池超声检测图像

4. 不同浸润程度电池的超声波特征分析

本文对不同注液量电池的电芯区域超声波形进行了对比分析，图 6 为不同注液量电池的波形汇总图。其中 0.1 g~0.3 g 注液量的电池为未浸润电池，0.4 g 注液量的电池为浸润不良电池，0.5 g 注液量的电池为浸润良好电池，0.6 g 注液量的电池为过注液电池。其中注入 0.1 g~0.3 g 电解液的最高幅值均低于 0.2 mv，0.4 g~0.6 g 注液量的电池最高幅值均在 4.5 mV 左右，这是因为超声波在电池内部传播时，其最高幅值主

要受材料密度和结构的影响。无论电池浸润良好还是不良, 电池内部的材料组成(如电极和隔膜)基本保持不变, 这导致不同浸润程度的电池在最高幅值上表现相似, 因此仅通过最高幅值一个超声波参数无法划分不同浸润程度的电池。

通过图 6 进一步研究可以发现, 0.1 g~0.3 g 注液量电池的幅值较低, 采用平均幅值进行选取波峰的方法所得到的波峰数量大于 25 个, 与其他注液量电池的波峰数量存在明显差异。这表明该注液量范围的电池属于未浸润电池。0.4 g 注液量电池的首波 TOF 相较于 0.5 g 注液量电池和 0.6 g 注液量电池要晚, 这是因为极片未完全浸润, 仍存在一定数量的孔隙, 超声波穿过孔隙会发生折散, 导致首波 TOF 变晚。而 0.5 g 注液量电池的波峰数量要大于 0.6 g 注液量电池, 这是因为过注液电池的电解液有少量弥散在铝塑膜和极片之间, 使铝塑膜和极片更为贴合, 从而导致波峰数量下降。

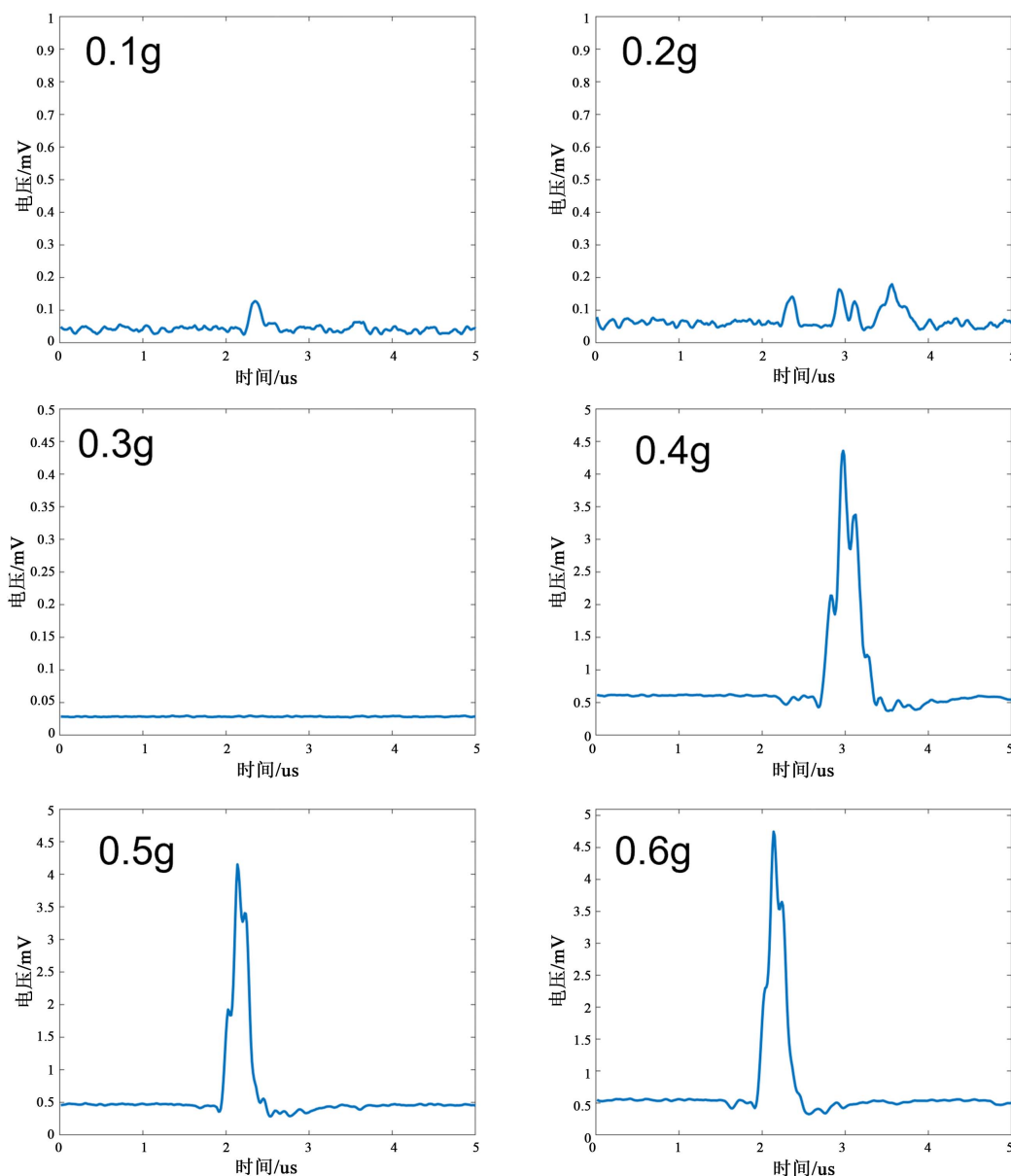


Figure 6. Organized ultrasonic waveforms of batteries with different electrolyte filling volumes

图 6. 不同注液量电池超声波形整理

本研究在最高幅值的基础上增加了波峰数量、首波 ToF、首波幅值、尾波 ToF、尾波幅值和声波总能量。采用多特征的方式可以对超声波检测技术进行更细致的研究, 提高浸润程度的识别精度。表 1 为超声波特征及其含义, 图 7 为不同注液量电池的实际特征值。

Table 1. Ultrasound characteristics and meanings
表 1. 超声波特征及其含义

特征	含义
波峰数量	电池层数及材料声阻抗变化
首波 ToF (μs)	厚度和声速变化
首波幅值(mv)	与最高幅值线性相关
尾波 ToF (μs)	界面变化及声阻抗
尾波幅值(mv)	与最高幅值线性相关
最高幅值(mv)	声阻抗变化
声波总能量(mv)	电池层数与界面质量

	首波 TOF	首波幅值	最高幅值	尾波 TOF	尾波幅值	波峰数量	总和
0.1g	28.069	0.040	0.097	418.406	0.041	27.396	8.918
0.2g	25.455	0.044	0.122	427.139	0.047	26.594	9.701
0.2g	22.921	0.033	0.056	438.980	0.032	39.733	7.263
0.3g	19.100	0.034	0.062	438.901	0.034	39.960	7.538
0.3g	22.733	0.043	0.100	425.426	0.041	32.366	7.181
0.4g	226.386	2.100	4.713	261.762	1.226	4.059	137.659
0.4g	226.416	2.015	4.628	261.842	1.332	4.050	135.421
0.5g	162.277	2.004	4.524	181.723	2.727	3.297	106.991
0.5g	162.594	1.929	4.649	179.495	3.379	3.000	114.010
0.5g	162.010	1.916	4.303	236.119	2.409	3.446	108.425
0.6g	166.950	3.227	4.750	174.030	4.058	1.851	117.849
0.6g	164.069	2.468	4.789	175.663	3.825	2.455	118.230

Figure 7. Compilation of multiple features for batteries with different electrolyte filling volumes
图 7. 不同注液量电池的多特征整理

通过观察图 7 可以发现, 未浸润电池可以采用最高幅值和波峰数量进行判断, 浸润不良电池的首波 TOF 与浸润良好电池以及过注液电池存在明显差异, 这是因为电解液的分布不均或量不足会影响电池内部的声波传播路径。由于电解液的声速一般高于固体电极材料, 电解液分布不均会导致声波传播路径变得复杂, 增加传播时间。因此我们可以通过找到首波 TOF 最低时的注液量来判断是否属于最佳注液量。过注液电池的波峰数量明显要小于浸润良好的电池, 这是因为过量的电解液导致电池内部某些区域的声阻抗差异减小, 进一步减少了声波在这些区域的反射。并且过注液可能导致电池内部结构的改变, 如隔膜膨胀或电极层压缩, 这种结构的改变可能影响声波的传播路径, 导致波峰数量减少。上述研究结论表明, 通过分析图 7 中多个声学特征可以将未浸润电池、浸润不良电池、浸润良好电池和过注液电池进行更为细致的分类。

5. 基于随机森林的不同注液量电池分选

为了自动识别不同浸润程度的电池, 本研究采用随机森林模型进行分选工作。随机森林是一种基于

决策树的集成学习方法, 通过构建多个决策树进行标签分类。该模型引入了数据和特征的随机性, 减少了过拟合风险, 提高了模型的准确性和鲁棒性。该集成学习方法适用于多特征、多类别分类问题, 能有效处理大规模数据集和高维特征。

为了评估不同注液量电池的超声波信号特征, 本文在原始超声波的基础上提取了 7 个关键特征, 这些信号反映了电池浸润程度。这些特征旨在全面捕捉超声波信号中的细微差异, 从而准确判断电池的浸润质量。通过该模型不仅增强了数据分析的精度, 而且提高了模型的可解释性。这些特征被整合并输入到随机森林模型中, 以进行深入的数据挖掘和模式识别。模型的训练和验证过程均侧重于区分不同注液量电池的特性, 以期在浸润质量评估方面达到高精度。模型的最终输出为分类结果, 展示了随机森林算法在准确区分不同电池状态方面的有效性。本研究采用交叉验证方法进一步确保模型的泛化能力, 避免过度拟合训练数据集。并且可以对随机森林的超参数(如树的数量、树的深度等)进行优化。特别是在数据量有限的情况下, 交叉验证可以确保模型看到数据集中的每一个样本, 从而最大化训练模型时使用的数据量。提高模型的准确性和可靠性。

在本文中, 我们构建了一个包含 1100 个数据点的随机森林模型, 以区分四种不同状态的电池: 未浸润电池(500 个样本)、浸润不良电池(200 个样本)、浸润良好电池(200 个样本)和过注液电池(200 个样本)。模型的训练集和验证集分别占数据总量的 80% 和 20%。这种数据划分旨在确保模型训练的充分性以及验证集评估的代表性。图 8 展示了随机森林模型的性能, 通过混淆矩阵形式呈现。在该混淆矩阵中, 预测标签和实际标签的关系通过不同的单元格数量进行了可视化表达, 以直观地评估模型预测的准确性。结果表明, 模型在区分未浸润和浸润不良电池方面表现出色, 达到了 100% 的验证集准确率。同时, 对于浸润良好电池的分类准确率为 97.8%, 这表明仅有 1 个样本出现分类偏移。过注液电池的分类准确率为 95%, 有 2 个样本未被准确分类。这些结果强调了随机森林在电池浸润程度分类任务中的高效性能, 为电池生产中的浸润质量控制提供了一种可靠的机器学习工具。通过对模型预测结果的细致评估, 本研究为电池制造业的质量保证和进程优化提供了有力的数据支持。

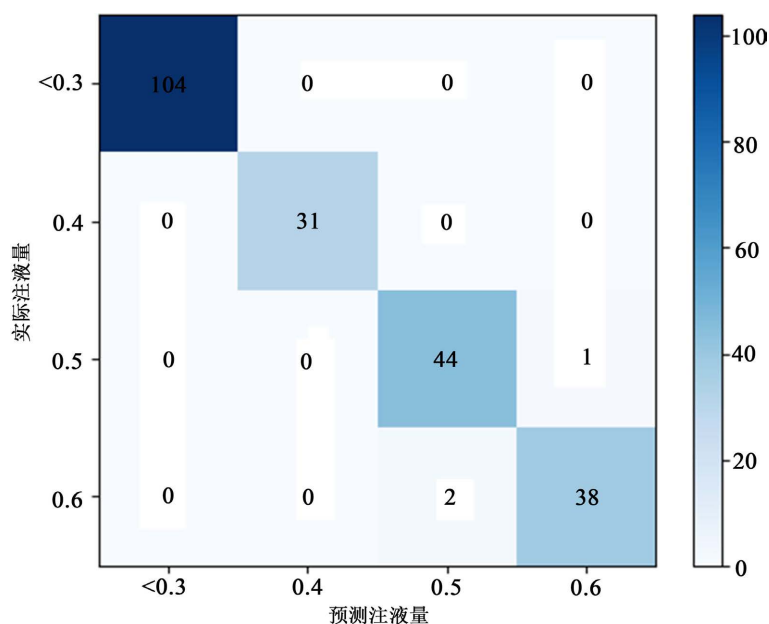


Figure 8. Confusion matrix of the random forest model's predictions versus actual electrolyte volumes

图 8. 随机森林模型预测与实际注液量的混淆矩阵

6. 结论

本文采用了超声波技术与随机森林模型, 开发出了电池浸润程度检测方法, 并用实际超声波数据证明了该模型的准确性, 为确保电解液在电池内部的均匀分布和充分浸润提供了解决方案, 为电池制造业的质量保证和进程优化提供了有力的数据支持。

1) 本文首次提出使用最高幅值进行分选未浸润电池, 通过首波 TOF 进行分选浸润不良电池, 通过波峰个数进行分选过注液电池。

2) 本研究成功构建了一个随机森林模型, 该模型涵盖了 1100 个数据点, 旨在区分四种不同浸润状态的电池: 未浸润(500 个样本)、浸润不良(200 个样本)、浸润良好(200 个样本)和过注液(200 个样本)。我们将数据划分为 80% 的训练集和 20% 的验证集, 这样的划分保证了模型的全面训练及其在未知数据上的性能评估。

3) 通过混淆矩阵的直观展示, 我们的模型在验证集上对未浸润和浸润不良电池的分类准确率达到 100%, 而浸润良好电池的分类准确率为 97.8%, 只有 1 个样本偏差; 过注液电池的准确率也达到了 95%, 仅 2 个样本分类不准确。这些结果明确表明了随机森林算法在区分电池浸润状态方面的高效能力, 特别是在电池生产的浸润质量控制领域。

4) 本文所提出的方法为电池制造过程中的质量保障和流程优化提供支持。这为未来在电池制造行业实施先进的机器学习技术提供了一个坚实的基础, 有望显著提高电池产品的一致性和整体质量。

参考文献

- [1] 来鑫, 陈权威, 顾黄辉, 韩雪冰, 郑岳久. 面向“双碳”战略目标的锂离子电池生命周期评价: 框架、方法与进展[J]. 机械工程学报, 2022, 58(22): 3-18.
- [2] Kaden, N., Schlimbach, R., *et al.* (2023) A Systematic Literature Analysis on Electrolyte Filling and Wetting in Lithium-Ion Battery Production. *Batteries*, **9**, 164. <https://doi.org/10.3390/batteries9030164>
- [3] Fang, L.-F., Shi, J.-L., Zhu, B.-K. and Zhu, L.-P. (2013) Facile Introduction of Polyether Chains onto Polypropylene Separators and Its Application in Lithium Ion Batteries. *Journal of Membrane Science*, **448**, 143-150. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2013.07.065>
- [4] Stepniak, I. and Ciszewski, A. (2010) Grafting Effect on the Wetting and Electrochemical Performance of Carbon Cloth Electrode and Polypropylene Separator in Electric Double layer Capacitor. *Journal of Power Sources*, **195**, 5130-5137. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2010.02.032>
- [5] Günter, F.J., Habedank, J.B., *et al.* (2018) Introduction to Electrochemical Impedance Spectroscopy as a Measurement Method for the Wetting Degree of Lithium-Ion Cells. *Journal of the Electrochemical Society*, **165**, A3249-A3256. <https://doi.org/10.1149/2.0081814jes>
- [6] Peter, C., Nikolowski, K., Reuber, S., Wolter, M. and Michaelis, A. (2020) Chronoamperometry as an Electrochemical *In Situ* Approach to Investigate the Electrolyte Wetting Process of Lithium-Ion Cells. *Journal of Applied Electrochemistry*, **50**, 295-309. <https://doi.org/10.1007/s10800-019-01383-2>
- [7] Günter, F.J., Keilhofer, J., Rauch, C., *et al.* (2022) Influence of Pressure and Temperature on the Electrolyte Filling of Lithium-Ion Cells: Experiment, Model and Method. *Journal of Power Sources*, **517**, Article ID: 230668. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2021.230668>
- [8] Weydanz, W.J., Reisenweber, H. *et al.* (2018) Visualization of Electrolyte Filling Process and Influence of Vacuum during Filling for Hard Case Prismatic Lithium Ion Cells by Neutron Imaging to Optimize the Production Process. *Journal of Power Sources*, **380**, 126-134. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2018.01.081>
- [9] Wanner, J. and Birke, K.P. (2022) Comparison of an Experimental Electrolyte Wetting of a Lithium-Ion Battery Anode and Separator by a Lattice Boltzmann Simulation. *Batteries*, **8**, 277. <https://doi.org/10.3390/batteries8120277>
- [10] Deng, Z., Huang, Z.Y., *et al.* (2020) Ultrasonic Scanning to Observe Wetting and “Unwetting” in Li-Ion Pouch Cells. *Joule*, **4**, 2017-2029. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2020.07.014>
- [11] 周世杰, 李顶根. 基于超声测量及神经网络的锂离子动力电池 SOC 估算[J]. 汽车工程学报, 2021, 11(1): 19-24. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=aHgEko1xHjg9MoReZopoxMkb0NFS9XiApwbVUscr109y7SW51IZ3jr9Q3Eel2_99YAPmtWkrA35yOBgeg_OkFeYul6SytEoMhXuTK9OY7LO0yjWumqJRcXI0Og2SuCJ481IPLXP7Axqb

[m0PUd_nWoA==&uniplatform=NZKPT&language=CHS](#)

- [12] Gold, L., Herzog, T., *et al.* (2023) Ultrasound Propagation in Lithium-Ion Battery Cell Materials: Basis for Developing Monitoring and Imaging Methods. *Energy Technology*, **11**, Article ID: 2200861.
<https://doi.org/10.1002/ente.202200861>