

The latest research progress on screening technology in the secondary utilization of lithium batteries

Xiao Wei Weidong Zhang Lunwang Xiao Liqin Qian

School of Mechatronic Engineering, Yangtze University, Jingzhou, Hubei, 434000, China

Abstract

The production of new energy vehicles in China has grown from approximately 460,000 units in 2016 to about 13.16 million units in 2024. A typical household electric vehicle contains at least a hundred batteries, while a Tesla electric vehicle has over a thousand. The number of used lithium batteries directly caused by battery aging is extremely large. Improper handling can seriously cause environmental pollution. How to deal with these used lithium batteries has become an important engineering issue in the lithium battery industry. The key to solving the problem lies in the classification and treatment of used lithium batteries. Therefore, the technology of secondary utilization has emerged, where usable batteries are reused and unusable ones are recycled for materials. This article mainly reviews the screening technology of secondary-life lithium batteries in the process of secondary utilization, with the aim of selecting the batteries that can still be used. It introduces the role of neural networks in battery screening and reviews the application of some advanced algorithms such as random forests and machine learning, as well as advanced equipment such as ultrasonic and spectroscopy in the battery screening process. The combination of battery screening technology with neural networks and machine learning has become a new trend in technological development.

Keywords

Cascade utilization Screening

锂电池梯次利用中筛选技术的最新研究进展

肖伟 张卫东 肖伦旺 钱利勤*

长江大学机械工程学院, 中国·湖北荆州 434000

摘要

中国新能源汽车产量从2016年约46万辆增长至2024年约1316万辆, 一辆普通家用电动车至少有上百节电池, 特斯拉电动车有上千节电池, 由于电池老化而直接带来的废旧锂电池数量是极其庞大的。处理不当会严重造成环境污染, 如何处理这些废旧锂电池成为锂电池行业的重要工程问题。解决问题的关键在于: 对废旧锂电池分类处理。因此, 梯次利用技术应运而生, 继续可用的电池进行二次利用, 不可用的电池进行材料回收。本文主要综述了梯次利用当中二次寿命锂电池的筛选技术, 目的是选出继续可用的锂电池。介绍了神经网络在电池筛选中的发挥的作用, 并回顾了近年来随机森林, 机器学习等一些先进算法和超声波、光谱等先进设备在电池筛选过程中的应用。电池筛选技术结合神经网络和机器学习成为技术发展的新趋势。

关键词

梯次利用 筛选

1 引言

锂电池作为现代社会中广泛应用的一种能源储存装置, 扮演着重要的角色。因其具有高能量密度、长使用寿命和可再充电性, 被广泛应用于电动汽车、航空航天、各类便携式电子设备等领域。然而, 随着锂电池使用数量的持续增加,

废旧锂电池的数量也在持续增加, 带了显著的环境问题。

梯次利用, 即废旧锂电池通过拆解、评估、筛选和重组后, 用于能源要求较低的应用场景, 如电网储能、功率要求小的移动设备等。梯次利用是解决废旧锂电池问题的重要途径之一, 不仅可以延长锂电池的使用寿命, 而且降低了对新资源的需求, 减少废弃物产生, 减轻环境污染。这种资源节约型和环境友好型的处理方式, 符合当前社会对绿色发展和可持续发展的需求。目前, 梯次利用在全球范围内已逐渐受到重视, 并取得了一定进展。各国的研究机构和企业已经开始探索锂电池梯次利用的实际应用^[1]。然而, 梯次利用过程中仍面临许多技术挑战, 如电池性能的评估和管理、梯次利用的经济性分析以及相关政策法规的制定等。因此,

【作者简介】肖伟(2000-), 男, 硕士, 从事锂离子电池的梯次利用研究。

【通讯作者】钱利勤, 副教授, 从事电动汽车锂离子电池组热管理系统的研究。

深入研究和推动锂电池梯次利用的技术和应用，对促进资源节约、环境保护和经济可持续发展具有重要意义。

本论文综述了梯次利用当中二次寿命锂电池的筛选技术。主要讲述结合神经网络、先进算法和先进设备的筛选技术。

2 筛选技术

电池筛选技术主要是对二次寿命锂电池进行分级^[2, 3]。目的是保证电池一致性，将一致性相似的二次寿命锂电池筛选到一类，组装成新的模块或者电池组^[3]，使得二次寿命锂电池在再利用中能够长久有效的使用。另外是保证能够满足实际应用场景，或可应用在功率要求不高的小型电动车上，或可应用在对容量有需求的储能电站中。

常见的是根据内阻进行筛选，其优势体现时间成本小，能够很快的得到对应的内阻，J.A.D 等人^[4]使用混合脉冲功率表征（HPPC）测试作为分析基准，对 12 个退役电池组和 1 个新电池组的电池进行电阻测量。这种方法固然十分迅速，但是正如前文提到的，直流内阻容易受到很多因素的影响，具有不稳定性，因此对二次寿命锂电池的分类结果并不准确。现阶段，许多科研工作者结合机器学习的方法进行分类，支持向量机是一种强大的分类模型^[5]，它通过在特征空间中寻找一个最优的超平面来区分不同类别的数据点。Z.Z 等人^[6]对 240 个电池单体进行分类，最后利用支持向量机将二次寿命锂电池准确地分为 4 类，分类准确率达到 96.8%。同样，H.Q 等人^[7]提出了一种多类核函数的支持向量机，并将二次寿命锂电池分为 4 类，准确率高达 97%。选取新得特征并与当下先进的算法结合成为一种筛选的重要方式。P.H 等人^[8]通过对容量 - 电压曲线求导得到所有电池的增量容量（IC）曲线，再通过对 IC 曲线的数值求导计算得到新的增量 IIC 曲线做为新得输入并结合随机森林算法进行筛选，结果表面，对 108 个样本筛选，总体筛选准确率达到 97.2%。

考虑到在家庭储能和备用电源的应用场景中，对二次寿命锂电池的容量一致性要求更高，因此对筛选方法的准确性也提出了更高的要求。王恩吉等人提出了一种结合充电电压片段特性、基于多层感知机 - 支持向量回归 - 线性回归的混合模型，以及等数 K-means 聚类算法用于二次寿命锂电池筛选^[9]。除了多类算法结合在一起形成新的筛选混合模型，还可以结合二次寿命锂电池的动态和静态特征，在输入信息上更加多元，以此提高筛选精度。R.P 等人^[10]提出了一种基于静态和动态特征聚类的二次寿命锂电池多阶段深度分拣策略，筛选后电池的容量、电阻、开路电压分布紧凑，相应的标准差分别降低了 36.76%、62.97%、71.62%。同时，动态剖面的截止时间和电压降分别降低了 8.87% 和 65.36%。G.R.J 等人为了能够快速捕捉到电池的静态和动态特性，设计了一种将低电流混合脉冲功率特性（L-HPPC）测试与中国轻型车测试周期（CLTC）相结合的混合测试。

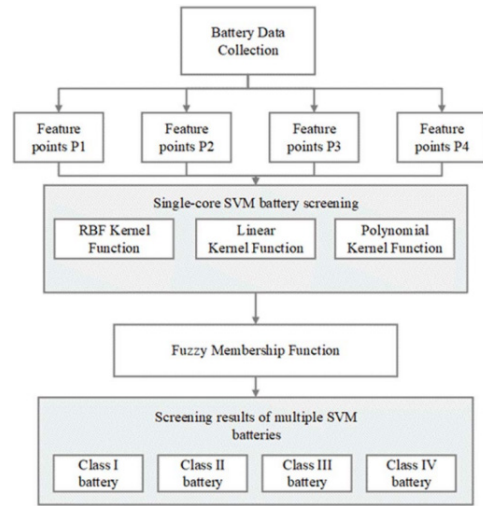


图 1 多类内核电池筛选流程图函数的支持向量机^[7]

除了上述方法外，神经网络也在二次寿命锂电池的筛选中发挥着越来越重要的作用。L.X 等人^[11]研究了大规模退役电池的串联充电曲线特征。然后，利用少量样品电池的容量和电压分布，构建了神经网络模型，最后对 5000 个二次寿命锂电池进行筛选，筛选效率大大提高，至少是传统筛选方式的 5 倍。L.X 等人^[12]提出了一种基于局部放电曲线的新型筛选方法，采用遗传算法和反向传播（GA-BP）神经网络对二次寿命锂电池处理，对 20 个不同老化程度的二次寿命锂电池进行实验验证。结果表明，该方法是可行的，容量估计的最大误差为 2.951%。但是，神经网络通常需要大量的数据进行训练。这是因为神经网络模型，特别是深度神经网络，包含大量的参数，需要足够的数据来有效地估计这些参数。

大量的数据可以帮助神经网络学习到数据中的模式和结构，提高模型的泛化能力，避免过拟合。二次寿命锂电池中，电池体系众多，这无疑在模型训练上和模型数量和模型泛化能力提出了更高的要求^[5, 13]。同样需要大量数据作为支撑的数据驱动的筛选方法也受到了广泛应用，X.W 等人^[14]提出了一种基于多源时间序列数据的预训练数据驱动模型的 LIB 分组单元筛选方法。这种方法在特征提取方面更有效，并且对标记数据的依赖程度更低。基于 18650 电池实际生产数据的实验验证了该方法的有效性。结果表明，可以达到 95.8% 的准确率。A.S 等人^[15]提出了一种基于数据驱动的机器学习算法的充电电压松弛模式识别方法，以有效地对锂电池进行分类。在不同环境和充电条件下收集的大量电池循环数据用于训练、测试和验证所提出的分类策略。为了更快的对大量二次寿命锂电池进行筛选，利用声学、光学等物理手段也是一种新的筛选方法，S.M.B 等人^[16]采用超声阵列，从圆柱形电池周围的周波中获得中波段定量超声光谱参数，包括中波段拟合、光谱斜率和截距，从而对二次寿命锂电池进行分类。

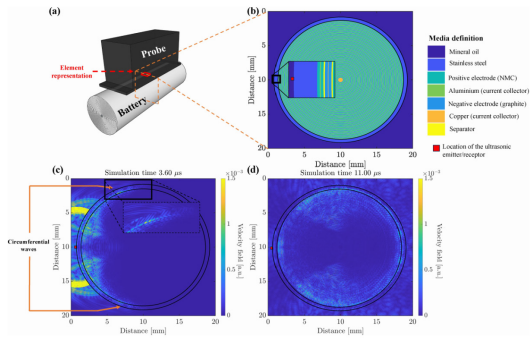


图2 (a)3D与超声阵列平行排列的圆柱形电池的渲染显示了用于模拟的独特元素位置红色标记, (b)表示模拟介质的网格, (c,d)周向波开始时的模拟结果快照以两个不同的时间戳传播。快照在0-0.0015之间归一化以增加对比度。^[16]

在二次寿命锂电池筛选过程中,常规方法的基准主要以串联连接为基础,以参数差异作为筛选指标。但由于并联时存在“自平衡”现象,允许存在一定程度的参数差异,参数差异可能不是最佳选择,导致参数的均匀性较高,导致筛选效率降低。基于这种考虑,H.K等人^[17]确定了参数差的边界,并提出了与最大容量利用效率有关的理想工作点(IWP),作为从电流分布推导出的新型并联筛选指标。这无疑对模块和电池组级别的分类提供了很大帮助。Y.S.J等人^[18]提出了一种采用模块级测试和机器学习的快速筛选方法来评估和分类模块老化,其中不需要拆卸电池组和单独测试模块。

3 展望

二次寿命锂电池常常会面临信息的情况。如年份、废弃时的容量、电池制造商等,这些信息的缺失为电池的再利用带来了隐患,难以对电池进行准确的性能评估和寿命预测。因此有必要建立一个完成的溯源体系,将锂电池信息存储起来,确保数据的完整性和可追溯性。为此,行业内正在探索建立基于区块链技术的全生命周期溯源信息采集与上报平台,以解决动力电池数据流过程中的信息遗漏、遗失、误报和错报问题。

4 结论

梯次利用技术有其本身重大的环境保护使命而需格外重视。筛选所运用的方法主要有两类的:(1)仅依靠阻抗、容量、电压等信息进行分类;(2)将提取的信息与人工智能技术相结合作出分类。随着技术不断成熟,未来解决方案会更有效,这里只是对前人研究的总结,不代表仅限这些方法。

参考文献

[1] ILLA FONT C H, SIQUEIRA H V, MACHADO NETO J E, et al. Second life of lithium-ion batteries of electric vehicles: A short review and perspectives [J]. 2023, 16(2): 953.
 [2] 张浩年. 退役锂离子动力电池健康状态估计及分选方法研究[D], 2022.
 [3] 钟瑶. 基于安全状态的退役动力电池阶梯式筛选方法研究 [D],

2023.
 [4] DRALLMEIER J A, WONG C, SOLBRIG C E, et al. A Fast Diagnostic to Inform Screening of Discarded or Retired Batteries [J]. 2022.
 [5] 王恩吉. 基于充电电压片段的退役锂离子电池筛选重组 [D], 2024.
 [6] ZHOU Z, DUAN B, KANG Y, et al. An efficient screening method for retired lithium-ion batteries based on support vector machine [J]. 2020, 267: 121882.
 [7] QIANG H, LIU Y, ZHANG W J J O E E C, et al. A Screening Method for Retired Lithium-Ion Batteries Based on Support Vector Machine With a Multi-Class Kernel Function [J]. 2024, 21(2).
 [8] HUANG P, ZHANG Y, KANG Y, et al. A flexible screening scheme for retired lithium-ion batteries based on novel capacity indicator and random forest algorithm [J]. 2024.
 [9] 郑仁鹏, 郑雪钦, 黄维彪. 采用改进K-means算法的退役动力电池快速分选方法 %J 厦门理工学院学报 [J]. 2022, 30(05): 74-81.
 [10] PAN R, XIAO X, FAN J, et al. Multi-stage deep sorting strategy for retired batteries based on the clustering of static and dynamic features [J]. 2024, 99: 113387.
 [11] LAI X, QIAO D, ZHENG Y, et al. A rapid screening and regrouping approach based on neural networks for large-scale retired lithium-ion cells in second-use applications [J]. 2019, 213: 776-91.
 [12] LAI X, QIAO D, ZHENG Y, et al. A novel screening method based on a partially discharging curve using a genetic algorithm and back-propagation model for the cascade utilization of retired lithium-ion batteries [J]. 2018, 7(12): 399.
 [13] 李济飞. 电动汽车退役电池剩余容量估计与分选方法研究 [D], 2020.
 [14] WANG X, HE J, SHEN S, et al. A cell screening method for lithium-ion battery grouping based on pre-trained data-driven model with multi-source time series data [J]. 2024, 85: 110902.
 [15] SAMANTA A, KARNEHM D, NEVE A, et al. Voltage Relaxation Pattern Recognition for Efficient Sorting of Healthy Cells for Second-Life Applications of Retired Electric Vehicle Batteries; proceedings of the 2024 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), F, 2024 [C]. IEEE.
 [16] MONTOYA - BEDOYA S, GARCIA - TAMAYO E, ROHRBACH D, et al. Quantitative Ultrasound Spectroscopy for Screening Cylindrical Lithium - Ion Batteries for Second - Life Applications [J]. 2024, 7(5): e202400002.
 [17] HE K, TAO S, FU S, et al. A novel quick screening method for the second usage of parallel-connected lithium-ion cells based on the current distribution [J]. 2023, 170(3): 030514.
 [18] YANG S, ZHANG C, JIANG J, et al. Fast screening of lithium-ion batteries for second use with pack-level testing and machine learning [J]. 2023, 17: 100255.