

基于数据分布的新能源汽车动力电池异常检测与维修技术

马哈木提江·米吉提

克拉玛依职业技术学院

DOI:10.32629/pe.v4i2.20020

[摘要] 随着新能源汽车保有量的快速增长,动力电池安全性与可靠性已成为支持行业高质量发展的关键。加强动力电池异常检测与维修,对于保障群众出行安全,促进行业健康发展具有重要意义。新能源汽车行驶以及动力锂电池系统在工作中会产生大量数据,基于数据分布的异常检测方法,可充分利用各类信息数据,对于提升检测效率、解决疑难杂症提供了新思路。本文系统阐述了动力电池异常检测的技术背景与分类,分析了基于数据分布的异常检测核心方法,包括统计学方法、机器学习方法等,并探讨了数据驱动的新能源动力电池维修技术与策略。希望本文抛砖引玉,能为动力电池安全管理提供一定理论与实践参考。

[关键词] 动力电池; 新能源汽车; 异常检测; 数据分布; 维修技术

中图分类号: F407.471 **文献标识码:** A

Abnormal Detection and Maintenance Technology for New Energy Vehicle Power Batteries Based on Data Distribution

Mahamutijiang Mi Jiti

Karamay Vocational and Technical College

[Abstract] With the rapid growth of new energy vehicle ownership, the safety and reliability of power batteries have become critical to supporting high-quality industry development. Enhancing abnormal detection and maintenance of power batteries is of great significance for ensuring public travel safety and promoting healthy industry development. New energy vehicles and their power lithium battery systems generate substantial data during operation. Abnormal detection methods based on data distribution can fully utilize various types of information and data, offering new approaches to improving detection efficiency and solving complex problems. This paper systematically elaborates on the technical background and classification of power battery abnormal detection, analyzes core methods of data distribution-based abnormal detection, including statistical methods and machine learning methods, and discusses data-driven maintenance technologies and strategies for new energy power batteries. It is hoped that this paper will provide both theoretical and practical references for power battery safety management.

[Key words] Power battery; new energy vehicle; abnormal detection; data distribution; maintenance technology

1 引言

新能源汽车产业正处于快速发展的关键时期。锂电池技术虽然迭代升级很快,但依然未能完全杜绝安全隐患,各类事故仍有发生,特别是内短路、热失控等故障模式具有隐蔽性强、发展过程快,极易引起热失控,是导致新能源汽车火灾的主要原因之一。基于数据分布的检测方法,是一种新型检查方法,不依赖精确的物理模型,也不要求大量标注样本,通过分析数据自身的统计特性、分布模式及其变化规律,识别偏离正常分布的异常行为。伴随着车载传感技术和车联网的普及,各类数据越来越多,分布越来越细化,为基于数据分布分析的异常检测提供了基础

条件。特别是在电池老化异常检测、内短路诊断、热失控预警等场景中展现出显著优势。基于此,本文针对这一方法进行分析研究,并提出了相应的维修技术策略。

2 动力电池故障机理与数据特征

2.1 典型故障模式

(1) 内部短路。电池内部短路指电池内部正负极之间发生了不正常的直接接触,形成了一个低电阻通路,瞬间产生巨大电流并急剧升温。内部短路是电池热失控最主要,也是最危险的诱因之一,是电动车火灾事故的主要原因之一。内部短路在初期阶段特征微弱,往往被电压波动所掩盖,极易与低容量电池、低电量

电池等正常老化状态混淆。若不及时识别,可能逐步演化为内短路现象,触发热失控。导致动力锂电池内部短路的主要原因有锂枝晶、外力穿刺、高温环境等,是动力锂电池最需要防范的原因之一。

(2) 单体不一致。单体不一致是指由于制造过程中的微小差异以及运行环境的不同,导致动力电池包(Pack)中,各个电芯(Cell)在电压、容量、内阻、自放电率等关键参数上存在差异。这是电池系统中的一个核心工程问题,直接影响电池包的性能、寿命和安全性。特别是在充电末期,容量低的电芯电压升到上限,若BMS(电池管理系统)未能及时干预,可能引发过充,导致析锂、内短路甚至热失控。同样,放电末期弱电芯可能发生过放,造成铜溶解等问题。

(3) 容量异常衰减。容量异常衰减是指动力电池的可用容量以明显快于正常老化速率的速度下降。与常规的日历寿命或循环寿命衰减不同,异常衰减呈现出明显的非线性,下降曲线呈明显的加速趋势。在标准温度(如25℃)、标准倍率(如0.33C或1C)下进行一次完整的充放电,计算实际放出的容量,与出厂标称容量或历史数据对比。如果衰减率超过预期,如半年内衰减大于10%,则可基本判定为异常。电池容量衰减的主要原因有电极材料退化、电解液分解、析锂等多重因素。

2.2 动力锂电池的数据特征

(1) 运行数据的多源异构性。新能源汽车动力电池运行数据具有典型的多源异构特征。从数据来源看,载体丰富多元,包括车载BMS采集的电压、电流、温度、荷电状态等实时参数;充电桩记录的充电数据、云端平台存储的历史运行轨迹等。从数据结构看,既有连续的时序数据,也有离散的状态记录;既有高频率采样数据,也有低频率稀疏数据。不同车型、不同电池体系(如三元锂、磷酸铁锂)的数据分布特征存在显著差异,需要分开进行建模分析。

(2) 数据分布特性的挖掘价值。在无标签、稀疏数据、海量设备的现实条件下,数据分布特性为诊断异常信息提供了新的思路:首先,正常运行状态下电池数据呈现典型统计规律,偏离这一规律可能存在异常;其次,故障发生时往往将伴随数据分布的局部偏移、离散度增大或多模态等异常现象,通过聚类分析、群组分析等手段,深入挖掘数据分布内在特征,及时辨识和筛查动力电池异常现象,提示用户加强关注或者提前进行电池全面检测。

3 基于数据分布的异常检测方法

3.1 统计学方法

统计学方法是基于数据分析异常检测法的基础。其核心思想是利用数据的统计特征来定义“正常”范围,将偏离该范围的观测标记为异常。目前常见的统计学方法包括自适应阈值法和统计学习框架法。

(1) 自适应阈值方法。该方法主要通过分析数据的经验分布函数来确定异常检测的动态阈值。首先对实车数据进行预处理以保证数据质量,利用经验分布函数计算自适应阈值,再

通过信息熵算法识别异常状态,并引入异常故障系数界定异常状态与故障报警之间的关系。通过批量实践证明,该方法在热失控、传感器故障等场景的实车验证中,有效控制了误报率和漏检率。

(2) 统计学习框架法。该方法主要通过聚类分析和群组内异常识别等方式进行检测。首先,新能源车企或动力电池供应商将海量电池现场数据按照提前预设好的衰减条件进行聚类,再将分好类的各组数据,应用统计学方法识别其异常。该方法通过分组分类分析,具有较高识别率。在实践中,某企业对60万辆汽车、1200条数据进行聚类分析和识别,成功标记了98%的异常数据。

(3) 多维异常检测框架法。还有的学者提出了多维异常检测框架法,主要用于检测电池容量衰减情况。首先,收集电池充放电数据,包括电压、电流、时间、温度等参数。提取与容量相关特征,通过特征筛选和降维,保留对容量估计影响显著的特征。其次,采用堆叠自编码深度学习和迁移学习算法进行建模,构建电池容量估算模型,定义使用里程、使用时间等容量衰减指标,根据衰减率的统计分布设计动态多维阈值(包括使用温度、充电电流、放电深度等),通过阈值变化检测异常。

3.2 机器学习方法

机器学习方法是目前应用最为广泛的数据分布检测方法。其最大的优势在于通过海量数据分析,自动学习复杂的数据分布模式,无需预先设定严格的统计假设,速度快、效率高。

(1) 孤立森林法。孤立森林法是一种基于树结构的异常检测算法,其核心原理是利用异常数据“少而不同”的特点,异常数据往往更容易被孤立,路径长度更短。在动力锂电池故障诊断中,主要用于识别内短路识别和电芯不一致的前期预警。该方法不依赖故障标签,能够在无监督条件下快速筛查异常样本,因此主要应用于换电站等大规模场景中,可实现百万级设备的毫秒级筛选,有助于全面降低风险隐患。

(2) 局部离群因子法。该方法是基于数据密度的异常检测方法,通过比较样本点与其邻域内样本点的密度来判定局部离群程度,再通过离群程度检测异常。该方法在动力电池组故障检测中,可对电池组整体进行检测,通过局部异常分析,可有效识别电压异常电芯。

(3) 图引导方法。该方法通过构造物理关系图来捕捉数据的动态演化规律来判断故障原因。首先,构建学习正常条件中的物理量关系图;其次,通过长期实践,采集并学习故障场景变化特征,构建变化途径;最后通过对比分析识别故障信息。

4 打造基于数据分布的分级维修技术体系

按照异常程度、故障类型划分维修等级,构建数据驱动的分级维修、精准维修体系,实现精准维修、降低成本。

4.1 异常等级划分标准

根据数据分布偏离特征,分析安全风险、判断可修复性,并进行异常等级划分,具体可见表1:

4.2 基于数据分布的精准维修流程

表1 动力电池异常体系标准

异常等级	数据分布偏离特征	安全风险	可修复性
轻度	单体压差 20-100mV, 温差 5-8℃, 数据分布轻微偏离, 无明显离群点	无	完全修复
中度	单体压差 100-300mV, 温差 8-15℃, 局部数据分布偏移, 存在少量离群点	潜在风险	部分修复
重度	单体压差 >300mV, 温差 >15℃, 数据分布严重偏离, 大量离群点, 电压、温度骤变	较高风险	不可修复

(1) 精准定位故障类型: 基于孤立森林和LOF的方法, 通过数据分布特征的分析, 精准定位问题电芯或模组, 分析具体风险层次和发展趋势, 并尽早识别微型内短路等渐进性故障, 将热失控等风险控制在萌芽状态。

(2) 采取差异化维修方式: 不同类型和严重程度的异常需要不同的维修响应。轻度容量衰减或单体不一致可通过BMS软件干预方式处理; 中度容量异常衰减可能需要电芯更换, 微内短路早期可能仅需均衡管理或软件策略调整; 严重问题需要更换单体或者整个模组。

(3) 验证维修效果: 维修后的运行数据可重新进入异常检测系统, 通过对比维修前后的数据分布变化来评估维修效果, 打造“检测—维修—验证”的闭环管理流程。

4.3 分级维修技术方案

(1) 轻度异常——软件校准与被动均衡。针对一致性轻微失衡、传感器轻微漂移等现象, 一般情况下无需拆解电池包, 主要通过BMS软件进行调整优化: 一是参数校准。修正SOC、SOH模型参数, 补偿漂移无擦。二是被动均衡。启动电阻放电均衡功能, 优化均衡电流(0.3-0.5A)与均衡时间, 缩小电压分布离散度, 尽量将压差控制在30mV以内。三是被动均衡。采取电阻放电方式, 将单体电池中容量稍多的个体消耗掉, 实现整体的均衡。

(2) 中度异常——主动均衡与参数优化。针对一致性严重失衡、局部衰减、自放电偏大, 采用硬件主动均衡技术进行调整: 一是主动均衡。利用电池组上的主动均衡模块, 通过能量转移方式实现电芯间能量双向转移, 均衡电流一般在0-5A, 控制在±2.5A为最佳状态。二是优化参数。重新校准BMS采样参数与异常

检测阈值, 适配电池老化后的分布特征, 避免误判、漏判。三是控制温度。根据不同场景, 对电池组的散热系统做参数调整, 比如风扇转速、液冷流量、散热策略等。目的是缓解电池组局部过热, 均衡内部整体温度。目标温差控制在8℃以内。

(3) 重度异常——单体更换与整包修复。针对内部短路、严重衰减、热失控等高风险, 一般采取更换单体、模组等方式进行维修。精准判断故障, 针对故障单体, 筛选同批次、同参数(容量偏差≤5%, 内阻偏差≤10%)的电芯/模组, 替换故障部件, 避免新的一致性异常。更换新的单体后, 一般要进行3次完整的充放电测试, 并重新校准BMS参数, 验证数据分布回归正常。对于SOH≤80%、单体损坏超过一半以上、无修复价值的电池包, 采取整包更换方式维修。

5 结语

基于数据分布的新能源汽车动力电池异常检测方法, 充分利用了车辆运行、电池工作过程中的海量数据, 突破了传统诊断方法依赖精确物理建模和大量标注样本的局限。通过统计学方法、机器学习等方法, 能够有效识别容量异常衰减、内短路、单体不一致性等多种故障模式, 在保持较高检测准确率的同时降低误报率和漏检率。在具体维修实践中, 要根据数据分布的异常类型, 进行综合分析研判, 采取差异化的维修方式, 兼顾时间、成本与效率, 从而实现动力电池故障的精准定位、高效处置与全生命周期安全管控, 助力行业健康稳定发展。

[参考文献]

- [1]王慧丽,朱杰.基于数据分布的新能源汽车动力电池异常检测技术[J].汽车知识,2026,26(01):25-27.
- [2]董芳甫.基于数据分布的新能源汽车动力电池异常检测技术[J].专用汽车,2025,(09):102-104.
- [3]张磊光,曹宇,陈海涛.基于数字孪生技术的电动汽车电池储能系统的状态检测方法[J].电工技术,2024,(24):65-69.
- [4]柏云耀,邹时波,李顶根.基于数据分析方法的动力电池系统滥用故障诊断[J].新能源进展,2020,8(01):1-5.

作者简介:

马哈木提江·米吉提(1982--),男,新疆喀什岳普湖县人,研究方向:职业教育、材料学、汽车专业方向,研究生讲师,克拉玛依职业技术学院。