

新能源汽车动力电池故障检修技术研究

杨黔生

重庆经贸职业学院 重庆 409000

摘要：新能源汽车产业的快速发展对动力电池系统的可靠性与安全性提出了更高要求。动力电池作为整车的核心储能部件，其故障诊断与检修技术直接关系到车辆的使用寿命、运行安全及用户体验。本文系统梳理了动力电池典型故障模式及其成因机制，重点围绕电压异常、温度失控、内阻增大、容量衰减及通信中断等主要故障类型展开分析。在此基础上，从故障检测与定位、状态评估与预警、检修策略优化三个维度，构建了涵盖离线检测、在线监测与智能诊断相结合的检修技术体系。研究表明，将传统电气检测方法与现代数据处理技术有机融合，能够显著提升动力电池故障检修的准确性和效率，为新能源汽车后市场服务能力建设提供理论支撑。

关键词：新能源汽车；动力电池；故障诊断；检修技术；状态评估

引言

动力电池系统作为新能源汽车的能量核心，其性能状态直接决定了车辆的续驶里程、动力输出和安全边界。然而，动力电池在复杂使用工况下，不可避免地面临过充过放、高温老化、机械振动、湿气侵入等多重应力作用，导致内部电化学体系逐渐劣化，各类故障隐患随之累积。一旦故障未能及时识别和有效处置，不仅可能造成电池组提前报废，增加用户使用成本，更可能引发热失控等严重安全事故，制约行业健康可持续发展。动力电池故障检修技术是连接电池制造、使用维护与梯次回收的关键环节。当前，主流检修手段仍以离线电压检测、绝缘电阻测试和内阻测量等传统方法为主，这些方法对于明显失效具有较好的判别效果，但对于早期微弱故障和渐进性退化趋势的感知能力相对有限。与此同时，电池管理系统虽然能够实时采集大量运行数据，但在数据挖掘和故障预警方面的功能尚未得到充分发挥，检修决策仍高度依赖技术人员经验。因此，亟待从故障机理出发，系统整合多层次检测手段，构建科学、高效、可操作的检修技术框架。

1 动力电池常见故障类型及成因分析

1.1 电压异常故障

电压异常是动力电池最常见的故障表征之一，具体表现为单体电压过高、过低或单体间电压不一致性超标。过充电状态下，正极材料结构可能发生不可逆相变，导致容量损失和产气；过放电则可能引起负极铜箔溶解，在后续充电过程中析出铜枝晶，增加内短路风险。单体间电压不一致主要源于电芯制造过程中材料性

能差异、组装时初始容量匹配误差，以及使用过程中各单体所处温度场分布不均导致的衰减速率差异。电压异常不仅降低电池组有效可用容量，严重时还会触发保护机制造成车辆动力中断。

1.2 温度异常与热失控

动力电池在工作过程中产生焦耳热和反应热，若散热条件不足或内部发生微短路，局部温度将快速上升。温度异常包括持续高温运行和局部热点两类情况。高温会加速电解液分解、SEI膜增厚和正极材料相变，致使内阻增大和容量衰减加剧；当温度达到一定阈值时，链式放热反应可能被触发，最终演变为热失控。热失控的诱因复杂多样，包括机械滥用（碰撞挤压、穿刺）、电滥用（过充过放、外短路）和热滥用（加热器失效、冷却系统故障）等。理解热失控的触发条件和传播路径，对于制定针对性检修预案至关重要。

1.3 内阻增大与功率衰减

电池内阻包含欧姆内阻和极化内阻，其增大直接导致端电压在充放电过程中偏离平衡电位，造成可用能量损失和发热增加。内阻增大的内在原因包括：电极活性物质在循环过程中发生颗粒破裂和接触丧失；电解液浸润性下降；SEI膜持续生长增厚；以及低温环境下锂离子扩散系数显著降低^[1]。在实际检修中，内阻增大往往表现为车辆大电流加速时压降过大、充电末端电压快速上升等可感知现象。内阻的在线准确估算具有较大难度，通常需要结合充放电数据和离线脉冲测试综合判定。

1.4 容量衰减与寿命缩短

容量衰退是动力电池老化的必然结果，但其衰减速

率和规律可为检修提供重要线索。正常使用工况下的日历寿命衰减相对缓慢,若出现容量跳水式下降,则暗示系统层面存在异常因素,如长期深度充放电循环、高温存储、充电策略不匹配或均衡电路失效等。容量检测通常采用标准充放电法,但整车条件下受时间和设备限制难以频繁实施,因此需要发展基于部分充电片段数据的容量快速估算技术。容量评估结果不仅是判定电池是否需要更换的核心依据,也是测算残值和确定梯次利用去向的重要参考。

1.5 通信故障与 BMS 异常

电池管理系统负责采集电压、电流、温度信号并进行状态计算和保护控制,其通信链路若出现中断或数据跳变,将直接干扰故障判断和能量管理策略。通信故障的硬件原因包括连接器接触不良、线束破损、CAN 总线终端电阻失配等;软件层面则可能有协议配置错误、数据帧丢包或校验失败等问题。BMS 自身传感器漂移或校准失准也可能导致电压、电流测量偏差,从而误导上层诊断算法。因此,检修人员需具备区分电池本体故障与 BMS 系统故障的能力,避免误换电池造成资源浪费。

2 动力电池故障检测与诊断方法

2.1 离线检测技术

离线检测是指在车辆停止运行且电池系统脱离高压回路的状态下,借助专用仪器对电池性能进行逐项检查。主要包括:绝缘电阻测试,用于检测高压正负极与车辆底盘之间的绝缘性能是否满足安全阈值,可有效发现电解液泄漏或绝缘膜破损引发的漏电隐患;开路电压测量,通过静置足够长时间后的端电压判断各单体荷电状态一致性,若出现明显离散则暗示自放电率异常或微短路;交流阻抗谱测试,通过施加小幅度正弦激励信号获取电池在不同频率下的阻抗特性,进而分析电荷转移阻抗和扩散阻抗的变化趋势;容量核定测试,采用标准充放电制度对电池组进行完整充放循环,获得实际可用容量并与标称值比对^[2]。离线检测结果直观、可靠,但耗时较长且需要专用场地和设备,适用于定期保养或故障排查时的深度检查。

2.2 在线监测与实时诊断

在线监测依托车载 BMS 持续采集运行数据,具有实时性强、覆盖范围广的优势。BMS 采集的各单体电压和温度信息可用于监测极值超限、突变跳变以及一致性漂移;电流传感器与库仑积分配合实现充放电电量计量,为 SOC 和 SOH 估计提供基础。实时诊断算法通常采用阈值触发机制,当某一参数超出设定安全边界时立即发

出报警并采取降功率或切断高压等保护动作。然而,单一阈值法难以捕捉缓变退化型故障,容易产生漏报。为此,研究者发展了基于滑动窗口的统计过程控制方法,通过监测参数的变化速率和波动方差来识别异常趋势。此外,基于等效电路模型的参数辨识也能够运行过程中在线更新内阻和极化参数,为健康状况跟踪提供动态依据。

2.3 基于数据驱动的智能诊断方法

随着车载数据采集密度提高和云端计算能力增强,数据驱动的智能诊断方法逐渐进入工程应用视野。此类方法不依赖于精确的物理模型,而是从海量历史运行数据中提取故障特征模式。常用的机器学习算法包括支持向量机、随机森林、梯度提升决策树等,它们能够利用电压曲线形状、温度变化率、充放电效率等多维特征构建分类器,判别正常与故障状态。深度学习模型如卷积神经网络和长短期记忆网络,在时序数据建模方面具有突出优势,可自动提取电压序列中的异常波动模式,实现早期故障预警^[3]。迁移学习则尝试将实验室条件下训练的模型适配到实车运行场景,以应对数据分布差异。值得注意的是,数据驱动方法的有效性高度依赖于训练数据质量和故障样本的丰富程度,实际应用中需与基于模型的诊断形成互补。

2.4 多源信息融合诊断策略

鉴于单一诊断源存在局限性,多源信息融合策略成为提升诊断鲁棒性的重要方向。融合可在数据层、特征层和决策层分别实施。数据层融合将电压、电流、温度、振动、气压等多类传感器原始信号进行同步和整合,形成全景状态描述;特征层融合从各类信号中提取互补性特征,例如电压一致性特征与温升特征共同用于判断是否发生内短路;决策层融合则采用 D-S 证据理论、贝叶斯推理或投票机制,综合离线检测结论、在线报警信息和历史维护记录,给出最终故障判定和置信度。融合策略能够有效降低误报率,并在某一类数据缺失时仍保持一定的诊断能力,对于实际维修场景中信息不完整的常见困境具有良好适应性。

3 动力电池故障检修策略与流程优化

3.1 检修安全规范与预处理

动力电池检修具有高电压、大电流和易燃风险,安全是首要前提。检修人员须持有相应资质证书,穿戴绝缘防护装备,并使用经过校验的专用工具。检修前的预处理包括:将车辆断电下电并等待 BMS 主继电器断开,测量高压母线电压确认已降至安全值以下,挂接放电瓶

阻对高压电容进行主动放电,随后挂接接地线以防静电积累。对于发生热失控或疑似漏液的电池包,还需进行气体检测和防火防爆处理。建立标准化的安全操作票制度,逐项签字确认,可最大限度减少人为疏忽导致的安全事故。

3.2 故障定位与隔离方法

故障定位的精度直接影响检修效率。对于电压异常,可通过对比各单体电压排序和离群程度,快速锁定可疑单体,再借助红外热成像或局部电压探针确认故障点。对于绝缘故障,采用绝缘监测仪逐级分段排查,先判断故障发生在电池包内部还是高压线束侧,再进一步细分至模组或单体。内阻异常则可通过电化学阻抗谱或混合脉冲功率特性测试,确定阻抗增大的主要贡献环节^[4]。在定位过程中,应充分利用 BMS 存储的历史故障码和冻结帧数据,这些信息往往记录了故障发生瞬间的系统状态,为定位提供重要线索。定位完成后,需将故障模组或单体从高压回路中物理隔离,确保后续检修作业安全。

3.3 维修决策与更换标准

维修决策的核心是权衡修复成本、安全风险和后续寿命。对于均衡电路失效导致的电压不一致,可优先修复均衡板或重新执行均衡程序;对于单体容量严重衰减或内阻超出阈值,通常需要更换故障单体或整个模组。更换标准应基于定量指标而非主观判断。建议综合以下维度制定阈值:容量保持率低于初始值的 80%、直流内阻较初始值增长超过 50%、静态电压差大于 50mV (或动态压差大于 100mV)、绝缘电阻低于 500 Ω /V、以及热成像温差超过 5 $^{\circ}$ C。同时,更换时需注意新单体与旧单体之间的匹配性问题,包括容量、内阻和老化程度尽量接近,否则新换入单体将因不匹配而加速劣化。

3.4 检修后的验证与测试

故障修复完成后,必须执行系统的验证测试以确认问题彻底解决且未引入新隐患。验证测试内容包括:绝缘电阻复测,确保检修过程中未损伤绝缘层;接触电阻检测,确保高压连接器和汇流排紧固可靠;均衡状态检查,确认各单体电压恢复至合理一致性区间;充放电功能测试,在小电流和大电流工况下分别监测电压响应和温升情况;以及 BMS 通信测试,确认诊断数据流正常且无故障码残留。验证合格后,方可恢复车辆高压回路并进行道路试驾,试驾过程中持续监控关键参数,确保动

态工况下电池表现稳定。完整的检修记录需归档保存,为后续维护和故障趋势分析积累数据。

3.5 预防性检修与状态维护

传统的故障检修属于事后纠正模式,而预防性检修则致力于在故障发生前采取干预措施。其核心在于基于状态评估结果制定维护计划,例如当预测某单体在未来一定里程内将达到容量阈值时,提前安排更换或均衡处理,避免途中抛锚。状态维护的实施方案包括:定期采集电池充放电曲线并上传云端进行健康评估,利用老化模型预测剩余使用寿命;结合行驶里程、环境温度和充电习惯等使用特征,动态调整检修周期,避免固定周期导致的过度检修或检修不足。此外,通过 OTA 远程升级优化 BMS 策略,也可在一定程度上缓解某些软件层面的“伪故障”,减少不必要的进店检修。

4 结语

动力电池故障检修技术是保障新能源汽车安全高效运行的重要支撑。本文系统梳理了电压异常、温度失控、内阻增大、容量衰减和通信故障等主要故障模式及其内在机理,从离线检测、在线监测、数据驱动诊断和融合策略等方面阐述了检测诊断方法体系,并围绕安全预处理、故障定位、维修决策、验证测试和预防性维护构建了全流程检修策略框架。研究表明,单纯依赖传统检测手段已难以满足日益增长的高可靠性要求,将多源信息融合、机器学习辅助诊断和数字孪生等先进技术融入检修实践,是提升故障识别精度和维修效率的可行路径。与此同时,行业标准的健全、智能装备的研发以及检修人员专业能力的持续提升,将共同推动动力电池检修从经验依赖型向数据驱动型、从被动维修型向主动预防型转变,为新能源汽车产业高质量发展筑牢安全底线。

参考文献

- [1] 王震坡,孙逢春,刘鹏. 锂离子动力电池系统安全性与故障诊断技术综述 [J]. 机械工程学报,2022,58(10):1-15.
- [2] 张剑波,卢兰光,欧阳明高. 车用锂离子动力电池热失控机理与防护研究进展 [J]. 汽车安全与节能学报,2021,12(3):261-276.
- [3] 陈全世,林成涛,朱家骥. 基于数据驱动的动力电池健康状态估计方法研究 [J]. 电源技术,2023,47(2):198-203.
- [4] 刘大同,周建宝,郭力萌. 锂离子电池故障预测与健康健康管理技术综述 [J]. 仪器仪表学报,2020,41(11):1-14.