

锂电池热失控早期特征识别与BMS联动保护技术研究

陈宇辉

国投电力(广西)有限公司 广西 南宁 530200

摘要: 锂电池热失控是制约电化学储能与电动汽车安全发展的核心难题,其突发性与破坏性源于从内部微观劣化到外部剧烈反应的级联演化过程。提前识别热失控早期特征并触发电池管理系统(BMS)实施联动保护,是阻断事故链的关键手段。本文系统分析了锂电池热失控的级联反应机理与多阶段演进路径,深入梳理了电气参数变异、温度异常演化、内阻增长及产气特征等早期可测前兆信号及其识别方法;在此基础上,构建了涵盖特征提取、多参量融合预警和分级联动保护的BMS决策框架,并从信号可靠性、响应时效和保护策略差异化等维度探讨了工程实施中的关键技术挑战与应对策略,旨在为锂电池热失控主动防控提供系统化的技术路径参考。

关键词: 锂电池;热失控;早期特征识别;电池管理系统;联动保护

引言

锂电池凭借高能量密度等优势,广泛应用于电动汽车、储能及消费电子领域。然而,热失控作为其安全最大隐患,指电池内部热量产生速率远超散热速率,引发不可控链式放热反应,导致起火爆炸。近期多起储能电站火灾及电动车事故,暴露出当前电池管理系统(BMS)在早期预警和保护响应方面的不足。热失控并非瞬间发生,而是经历从微观触发到宏观失控的级联演化过程,持续数分钟至数十分钟,存在宝贵的预警窗口。但早期信号微弱且特征隐蔽,电压温度偏差常淹没于正常噪声中;现有BMS过压、过温等阈值保护属被动“末端保护”,多在加速阶段才触发,难以阻断事故链。因此,研究热失控早期特征识别方法,并与BMS保护策略深度联动,实现从“被动响应”向“主动预警”转变,是提升锂电池系统安全性的核心突破口。

1 锂电池热失控机理与早期特征分析

1.1 热失控的触发源与演进阶段

锂电池热失控的触发源可分为机械滥用(挤压、针刺、碰撞)、电气滥用(过充、过放、外部短路)和热滥用(过热、外部火焰)三类。无论触发方式如何,热失控的物理化学本质是相同的。其演进过程可分为三个阶段。孕育阶段——触发源导致电池内部发生初始放热反应,如SEI膜分解(约90~120℃开始)、负极与电解液反应、隔膜收缩等。此阶段热量产生速率较低,若散热条件良好可能自行终止。加速阶段——放热反应积累的热量使电池温度持续升高,触发更剧烈的反应——正极材料释氧、电解液分解燃烧,热量产生速率呈指数增长,电池内部压力急剧升高,安全阀可能开启排气。失控阶段——热失控全面爆发,电池温度急剧飙升至600℃以

上,伴随大量有毒可燃烟气释放、喷射火焰甚至爆炸。

1.2 早期阶段的特征信号分析

在孕育阶段至加速阶段前期,电池的外部可测信号会产生一系列细微但可辨识的异常变化,主要包括:电压特征异常——过充时电压平台异常升高并持续偏离正常充电曲线;微短路或内部自放电加速则表现为电压异常下降或静置期间压降速率加快;电压波动噪声特征(如高频噪声成分变化)亦可能反映内部结构的早期损伤。温度特征异常——正常情况下电池温升与电流平方成正比^[1]。当内部出现局部放热反应时,电池表面温度分布将出现非对称性热点,温升速率偏离理论值。在热失控孕育阶段,温升速率的变化往往比绝对温度值更早反映异常。内阻特征变化——电化学阻抗谱中的欧姆内阻和电荷转移内阻对电池内部状态变化极为敏感,SEI膜增厚或局部受损会导致特定频率段阻抗特征出现偏移。产气与压力特征——锂离子电池在过充和热失控孕育阶段会产生多种特征气体(如H₂、CO、CO₂、CH₄、C₂H₄等),电池内部压力上升,安全阀尚未开启前,压力变化率即可作为敏感早期信号。

1.3 特征信号的多源性、微弱性与耦合性

早期特征信号具有三个显著特征。一是多源性——不同触发模式下的早期信号表现形式不同:过充以电压异常为主,内部短路以自放电为主,机械损伤以内阻异常为主。单一信号难以覆盖所有故障模式。二是微弱性——早期信号幅值小,与正常运行工况下的噪声(如充放电电流波动、环境温度变化引起的温度波动)处于相近量级,容易被淹没。三是耦合性——电压、温度和电流信号之间相互影响,同一异常可能同时引起多项参数变化,但各项变化的因果关系复杂,给信号源判定带

来困难。

2 早期特征识别方法与技术路径

2.1 基于电压序列特征的异常检测

电压是BMS最易获取、采样率最高的信号，是早期特征识别的首选维度。基于电压序列特征的方法主要包含电压差分分析（DV）——在恒流充电过程中，对电压-容量曲线进行一阶微分处理，可有效放大电池内部相变过程的特征峰。当电池发生老化或出现早期劣化时，dV/dQ曲线的峰位偏移或峰高衰减比电压本体变化更早、更显著，可在热失控前多个循环发现征兆。增量容量分析（ICA）是DV分析的扩展形式，通过提取充电曲线中的特征参数（如峰值高度、峰位电压、峰面积），建立健康特征向量，当特征向量偏离历史基线时发出早期预警。此外，静置电压下降速率分析也是识别微短路的有效手段——通过比较电池静置时段的端电压下降斜率，可区分正常自放电与异常微短路。

2.2 基于温升速率与热场分布的异常识别

温度是热失控最直接的关联参数，其早期识别方法包括：温升速率异常监测——在恒流充放电过程中，电池温升速率与电流平方成正比（ $Q = I^2 R t$ ）。当温升速率明显高于同一工况下的历史均值时，表明内阻增大或内部放热反应已启动，结合电流值进行归一化处理可排除环境温度变化的影响。热场分布监测——对于由多个电池串联组成的模组，对比同一时刻各电池表面温度的横向差异，若某一电池温度持续高于同组平均值并呈发散趋势，则该电池可能存在早期内短路或局部放热^[2]。该方法的优势在于通过横向比较抵消了环境温度的影响，对微小温差的检测灵敏度更高。

2.3 基于内阻与阻抗谱特征的在线辨识

电池内阻是反映其内部状态的重要指标，包括欧姆内阻与极化内阻两部分。直流内阻在线辨识方法通过电流中断瞬间的电压跳变来估算——在充放电过程中短时中断电流，测量电压的瞬变响应，计算欧姆内阻和极化内阻。当直流内阻的增长率在短期内出现明显拐点时，指示内部结构发生了异常变化。对于更精细的监测，可引入基于脉宽调制激励的宽频阻抗谱在线测量技术，提取特定频率下的阻抗特征（如中频区电荷转移阻抗、低频区扩散阻抗），建立不同老化机制与阻抗特征变化的对应关系，实现对内部劣化模式的诊断。

2.4 基于气体与压力传感器的辅助识别

气体检测是热失控早期识别的前沿方向。在电池模组内配置MEMS气体传感器，重点检测H₂、CO和电解液挥发分的浓度变化，当浓度在短时间内出现异常上升趋势

时，即发出预警信号。压力变送器监测电池外壳或模组密封腔内的气体压力及压力变化率，在热失控孕育阶段，即使电压和温度尚未出现明显异常，内部产气导致的气压变化率升高也可能率先反映异常。气体与压力信号对电化学噪声不敏感，可作为电气信号识别的独立校验通道，降低误报率。

2.5 多特征融合的综合识别策略

单一特征识别方法各有局限——电压法对过充类故障敏感但对早期内短路不敏感，温度法受环境干扰较大，内阻法在线测量精度有限。多特征融合识别策略的核心逻辑是：将来自不同物理维度的特征进行归一化和加权融合，构建综合异常指数 $S = \sum w_i \cdot x_i$ （ x_i 为各特征的归一化异常度， w_i 为权重），当 S 超过阈值时判定为热失控早期预警。权重的设定可根据电池运行工况动态调整——充电阶段提高电压特征权重，放电阶段提高温度和内阻权重。同时引入信息冗余校验机制，当至少两个独立特征维度同时报警时，综合报警可信度显著提升，降低误报和漏报风险。

3 BMS 联动保护策略与技术架构

3.1 预警分级与保护动作的联动逻辑

BMS联动保护的核心是建立预警等级与保护动作之间的映射关系。本文建议将早期预警分为三个等级。三级预警（关注级）——识别到单一特征的轻微偏离但未达到明确故障标准，动作策略为：记录事件、增加数据采集频率、启动主动均衡调整、向运维人员发送提示信息。二级预警（告警级）——两个及以上特征确认异常，或单特征已明显超出正常范围，动作策略为：限制充放电电流至额定值的50%、暂停下一次充电操作、启动模组内风机加强散热、向远程监控平台发送详细告警及建议措施^[3]。一级预警（紧急级）——多特征综合判断为热失控高概率前兆，动作策略为：立即断开主回路接触器终止充放电、闭合消防联动干接点启动灭火装置预充、向人员发出声光报警并执行人员疏散程序。三级预警形成从“关注提示”到“主动干预”再到“紧急切断”的递进保护链。

3.2 信号通信的低延时设计

从特征识别到保护动作的执行，通信延时是决定保护有效性的关键。在BMS架构中，特征识别算法部署于从控单元（BMU），识别结果需经内部通信传递至主控单元（BCU）执行保护决策。要求从控单元到主控单元的信号传递延时不大于100ms，主控单元接收到二级以上预警后的保护指令输出延时不大于50ms，保护接触器的动作时间不大于30ms，总响应时间不超过200ms。通信

设计宜采用控制器局域网（CAN）总线或菊花链冗余架构，确保单点通信故障不影响保护指令的可靠传输。

3.3 保护策略的差异化与复位机制

不同应用场景对保护策略的要求不同。储能系统以安全为首要，可在二级预警时即降功率运行，一级预警直接切离；电动汽车需兼顾行车安全，高速行驶中一级预警不应立即切断动力（防止动力中断引发交通事故），而应首先限制功率并引导车辆进入安全区域后再切离^[4]。保护动作触发后，需设计复位流程——三级预警可由操作人员远程确认后复位；二级预警需现场人员排查处理后手动复位；一级预警触发后须经专业检测确认电池组状态安全，方可重新接入系统，严禁自动复位。

4 关键挑战与应对措施

4.1 环境噪声干扰下的误报抑制

在真实的电池系统中，电流波动、环境温度变化和电磁干扰会显著影响特征识别的准确性。应对措施包括：在算法前端设置自适应噪声滤波器，根据电流变化率动态调整检测阈值——大电流突变时段适当放宽阈值，平稳运行时段收紧阈值；采用多数投票机制——连续多个采样周期的异常才认定为有效预警，避免瞬时尖峰触发误报；结合工况标签对特征提取进行工况分区，不同SOC区间和温度区间建立不同的基准值库。

4.2 计算资源约束下的算法轻量化

BMS的微控制器计算资源有限（通常为M级主频和有限RAM），复杂的信号处理和机器学习算法难以直接部署。轻量化策略包括：采用递推形式的最小二乘法和卡尔曼滤波，避免矩阵求逆等计算密集型操作，降低计算复杂度；将在线实时检测与离线深度分析分离——在线仅运行计算量小的阈值判断和趋势检测，全波形数据存储后上传至云平台进行离线深度学习分析，用于模型参数更新和阈值修正；利用硬件加速单元（如DSP或集成FPGA）承担浮点运算密集型任务，释放主控芯片的计算

资源。

4.3 特征库建立与阈值自适应性

不同材料体系（三元锂、磷酸铁锂、钛酸锂）的热失控特征差异显著，固定阈值无法适应所有电池类型。应对方法包括：在电池系统投入运行前进行基准特征标定，建立该批次电池的基础特征库；运行期间持续收集正常工况数据，采用移动窗口更新各特征基准值及正态分布参数，使算法自适应于电池的缓慢老化；当特征偏离基准值超过 3σ 时触发预警，其中 σ 根据近期数据的标准差动态更新。

5 结语

针对锂电池热失控，本文从级联反应机理出发，分析孕育阶段的电压异常、温升速率变化、内阻增长及产气等早期特征信号。据此构建多特征融合识别策略，设计三级预警分级与递进保护动作联动的BMS架构。核心理念在于：摒弃单一电气阈值，建立基于多物理量融合的早期异常识别模型；避免简单“跳闸”，形成匹配预警等级且场景差异化的分级响应体系。工程实施中，需克服信号噪声抑制、计算资源适配和阈值自适应更新三大挑战。未来，随着电化学机理模型精确化、边缘算力提升及AI算法轻量化，热失控早期预警将更精准及时，为储能与电动汽车安全发展提供可靠技术保障。

参考文献

- [1] 欧阳明高,冯旭宁,周伟.锂离子电池热失控机理与安全防控技术研究进展[J].汽车工程,2022,44(8):1135-1148.
- [2] 何向明,王莉,李建军.锂离子电池热失控早期预警方法综述[J].电源技术,2023,47(3):285-293.
- [3] 张剑波,李哲,周伟.基于电压特征分析的锂离子电池故障诊断技术[J].机械工程学报,2022,58(18):125-137.
- [4] 王震坡,孙逢春,刘鹏.动力电池热失控多参数融合预警方法研究[J].中国公路学报,2023,36(5):245-256.