

中文引用格式:许晴晴,陈杰,高保彬,等. 磷酸铁锂储能电站主动在线多源监测和分级预警系统[J]. 中国安全科学学报, 2025, 35(7):184-191.

英文引用格式:XU Qingqing, CHEN Jie, GAO Baobin, et al. Active online multi-source monitoring and hierarchical early warning system for LiFePO₄ energy storage power station[J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(7):184-191.

磷酸铁锂储能电站主动在线多源监测和 分级预警系统*

许晴晴¹, 陈杰^{**1} 讲师, 高保彬¹ 教授, 王燕¹ 教授,
王健¹ 副教授, 程祖田² 高级工程师

(1 河南理工大学 安全科学与工程学院, 河南 焦作 454003;

2 中国电建集团 河南省电力勘测设计院有限公司, 河南 郑州 451450)

中图分类号:X924.4

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.07.0708

资助项目: 河南省科技攻关项目(242102321108); 中国工程科技发展战略河南研究院咨询研究项目(2024HENZDB05); 河南省重点研发专项项目(241111322400)。

【摘要】 为提升锂离子电池储能电站事故监测效果和预警效率,降低火灾发生概率,针对预制舱式磷酸铁锂(LFP)电池储能电站存在的被动监测延时、单一参量监测不准确以及灾变风险分级模糊等问题,设计一套 LFP 储能电站主动在线多源监测与分级预警系统。首先,分析储能电站热失控及火灾发生过程,基于不同层级构建特征指标集,包括内部温度(单体)、内压-声音(电池包)、H₂ 和 CO 浓度(电池簇)、烟雾特征图像(电池舱),并规划详细的监测实施路径;然后,根据4个层级对应的4级预警,制定预警策略,明确预警流程。结果表明:该监测预警系统在 LFP 储能电站热失控极早期预警方面有显著优势,尤其是在 2C 过充条件下,可提前 38.9 min 预警 32 Ah 电池单体的热失控;在 0.5C 过充条件下提前 53.2 min 预警 344 Ah 电池模组的燃烧。

【关键词】 磷酸铁锂(LFP)电池; 储能电站; 多源监测; 分级预警; 热失控; 火灾

Active online multi-source monitoring and hierarchical early warning system for LiFePO₄ energy storage power station

XU Qingqing¹, CHEN Jie¹, GAO Baobin¹, WANG Yan¹, WANG Jian¹, CHENG Zutian²

(1 School of Safety Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo Henan 454003, China;

2 Henan Electric Power Survey & Design Institute, POWERCHINA, Zhengzhou Henan 451450, China)

Abstract: In order to enhance the accident monitoring effect and early warning efficiency of lithium-ion battery energy storage power stations and reduce the probability of fire occurrence, aiming at the problems existing in prefabricated cabin LiFePO₄ (LFP) battery energy storage power stations, such as passive monitoring delay, inaccurate monitoring of a single parameter, and ambiguous classification of disaster risks, an active online multi-source monitoring and hierarchical early warning system for LFP energy

* 文章编号:1003-3033(2025)07-0184-08; 收稿日期:2025-03-24; 修稿日期:2025-05-16

** 通信作者:陈杰(1993—),男,河南安阳人,博士,讲师,硕士生导师,主要从事锂离子电池安全方面的研究。E-mail:chenj1996@hpu.edu.cn。

storage power stations was designed. Firstly, the thermal runaway and fire occurrence process of the energy storage power station was analyzed. The characteristic index set of each level was constructed, which is specific: internal temperature (single), internal pressure-sound (battery Pack), H_2 and CO concentration (battery cluster), smoke characteristic image (battery chamber), and plan a detailed monitoring implementation path. Then, based on the four-level early warning corresponding to the four levels, formulate the early warning strategy and clarify the early warning process. Experimental results demonstrated that: This monitoring and early warning system can effectively achieve the early warning of LFP energy storage power stations. Under 2C overcharging conditions, it can give an early warning of the thermal runaway of 32 Ah battery cells 38.9 min in advance. The combustion of the 344 Ah battery module was warned 53.2 min in advance under the condition of 0.5C overcharging. This study proves that this system can provide an effective guarantee for the safe operation of energy storage power stations.

Keywords: $LiFePO_4$ (LFP) battery; energy storage power station; multi-source monitoring; hierarchical early warning; thermal runaway; fire

0 引 言

随着“十四五”能源领域科技创新及规划的提出以及我国“双碳”目标的逐步推进落实,电化学储能成为未来主流的储能技术发展方向。自 2012 年以来,我国电化学储能装机规模呈指数级增长,其中磷酸铁锂($LiFePO_4$, LFP)电池因安全性高、循环寿命长、原料价格低等优势得到最为广泛的应用^[1-3]。但是,在规模化应用下,储能电站火灾、爆炸等安全事故数量激增,对人们的财产和生命安全造成巨大威胁,为此,开发一套能够主动监测和预警储能电站安全问题的系统,对于解决储能电站的安全问题,具有高度的紧迫性和重要性。

近年来,国内学者对储能电站监测预警系统的研究不断深入。在监测指标方面,金阳^[4]提出一种基于单频点阻抗检测的内部温度监测方法,相比表面温度监测可提前 10 min 预警。徐振恒等^[5]通过试验证明,电压和电流的变化较电池的热扩散速度缓慢,目前主要将其作为辅助判断依据。CAI Ting 等^[6]指出,内部短路时,电池气压信号能在表面温度上升前被检测到,并基于此建立电压-温度-压力耦合模型,检测电池气压和热失控。WANG Lubing 等^[7]通过试验证明,电池热失控引起的气压变化峰值时间较短,约 100 ms,泄压阀开启后,内部气压迅速回落,这一快速变化不易被检测到。李正力等^[8]指出,可将气液逸出物烟雾及其伴随的微固体颗粒作为监测指标。在监测设备方面, SU Yangduan 等^[9]指出,布拉格光纤光栅传感器对电池内部压力变化感应灵敏,可检测快速变化。吴敏等^[10]提出一种基于单片机的动力电池储能系统有害气体检测与

预警装置,采用不同特征气体传感器,测量不同烟雾浓度情况下传感器输出的电压值,实现储能电站的声光报警功能。陶致格等^[11]提出利用高精度传感器实现电池包(Pack)级火灾防控极早期火灾探测的构想,可为火灾隐患提供 4~11 h 预警时间。在预警系统方面,陈银等^[12]建立一个多层级储能电站电池热失控预警系统,利用快速区域卷积神经网络/级联区域卷积神经网络等算法检测电池外部健康状况,通过电压、电流-超声波监测系统实时监测电池内部电荷状态,使用温度预警系统实时温度监测电池的每个模块,同时通过气体-声信号预警系统准确检测电池气体泄漏的声信号。综上所述,目前的监测预警系统仍存在以下问题:①监测设备多为被动监测,通常在特定或异常情境下触发,主要用于对已发生事件或系统故障的后续响应,存在响应速度较慢及误报和漏报率较高的问题;②监测指标较为单一,监测结果不准确;③灾变风险分级模糊,对灾变程度认知不清会导致消防系统的误响应或响应不及时。

鉴于此,笔者拟分析储能电站火灾发生过程,梳理不同层级的监测指标,规划监测路径,部署监测设备,制定分级预警策略,设计一套适用于 LFP 电池储能电站的主动在线监测多关键参量的监测和分级预警系统,以期快速发现储能电站异常情况,降低火灾发生概率,保障电站安全运行。

1 热失控机制及储能电站火灾发生过程

电池的热失控是引发 LFP 电池储能电站事故的根本原因^[13]。热失控通常源于电滥用、热滥用与机械滥用,其内部反应机制如图 1 所示。

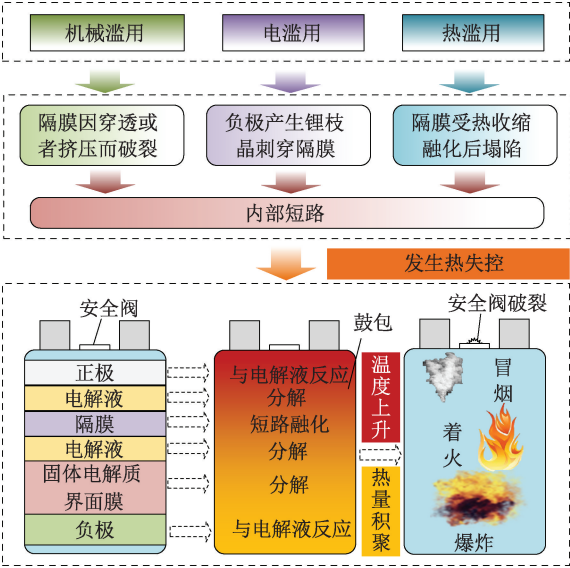


图1 电池热失控内部反应机制

Fig.1 Internal reaction mechanism of battery thermal runaway

由于储能电站由大量排列密集的电池组成,一旦局部电池发生燃烧,其产生的热量会在密闭空间内迅速聚集,并向其他电池传播,从而引发电池包、电池簇乃至整个储能舱层级的连锁故障反应,最终形成较大规模的火灾^[14-15]。为有效预防储能电站火灾,可以从2方面着手:①在电池失效前阻断热失控过程;②在单个电池失效后阻止其热量传播和火焰蔓延。而这些措施都必须基于实时监测和精准预警。

2 主动在线多源监测系统

2.1 构建多源监测指标集

构建“电池单体-Pack-电池簇-储能舱”多层次热失控征兆及“电-力-声-气-光”特征指标集,如图2所示。具体而言,将电池阻抗和内部温度设定为单体级的监测指标;将声音信号及电池包内压设定为Pack级的监测指标;将气体信号设定为电池簇级的监测指标;将烟雾及火焰设定为储能舱级的监测指标。

2.2 主动在线多源监测的实施路径

2.2.1 各层级监测模块技术路线

1) 电池单体层级。电池单体监测主要涉及对电池阻抗和内部温度的监测。温度会影响电池内部动力学参数,而阻抗数据能反映这些参数的变化。根据 Arrhenius 公式可知:温度与电池内部动力学阻抗之间存在明确关联^[16],因此,可以利用阻抗数据

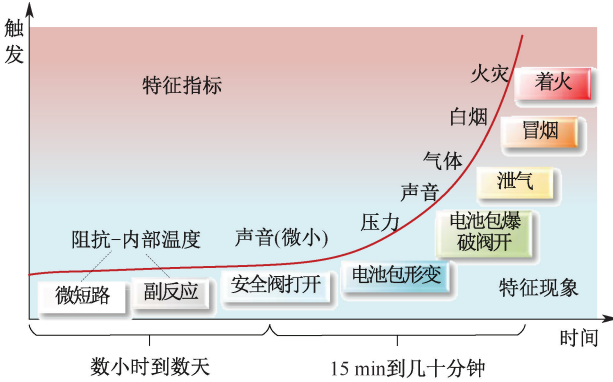
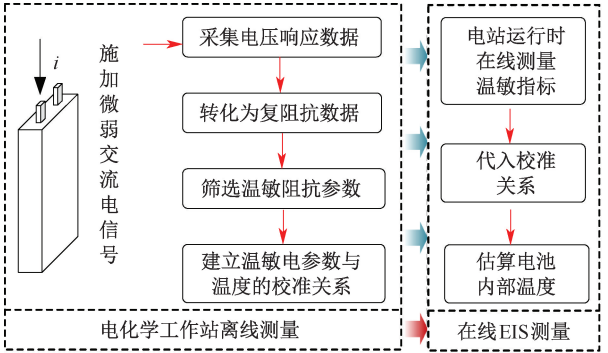


图2 热失控现象及指标集

Fig.2 Thermal runaway phenomenon and indicator set

测量 LFP 电池的内部温度,将电池单体的监测指标聚焦于阻抗。基于单频电化学阻抗 (Electrochemical Impedance Spectroscopy, EIS) 测内部温度的方法如图3所示,通过电池外部施加的微弱交流信号筛选出敏感阻抗参数并建立对应关系,对比估算电池内部温度。



注: i 为外部施加的微弱交流电, A。

图3 基于 EIS 测内部温度的方法

Fig.3 Method of measuring internal temperature based on single-frequency EIS

2) Pack 层级。Pack 级监测主要聚焦于电池包的内部压力和声音指标。声音特指电池包爆破阀开启时产生的声响。对于声音定位,采用基于相位变换加权的可控响应功率 (Steered Response Power-Phase Transform, SRP-PHAT) 的声源定位算法。通过计算所有麦克风对接收信号的相位变换加权的广义互相关函数之和,在整个声源空间中寻找使指向响应功率值最大的点 Q_n ,即为声源位置^[17]。同时,电池包的内部压力通过安装在电池包内的压力传感器实现实时监测。将声音定位技术与电池包内部压力实时监测数据相结合,能够更精准地确定故障模组的位置。

3) 电池簇层级。电池簇级监测主要为气体监测。然而,电池热失控后释放的气体成分复杂,且不同气体对各类气体传感器存在显著的耦合效应,导致各气体传感器探测的气体浓度出现较大误差。因此,解耦处理各传感器数据是确保监测准确性的关键环节。

各气体传感器数据解耦过程如图 4 所示。首先,利用大量试验数据及厂家提供的参数,通过数据拟合构建各传感器对单一气体的响应模型,并明确混合气体中各气体与传感器的耦合关系。在此基础上,进一步推导混合气体环境下传感器输出信号与气体组分及其浓度之间的内在联系。最终,通过构建并求解传感器输出信号方程组,精确计算混合气体中各典型气体的实际浓度^[18],从而实现对气体浓度状况的精准监测。

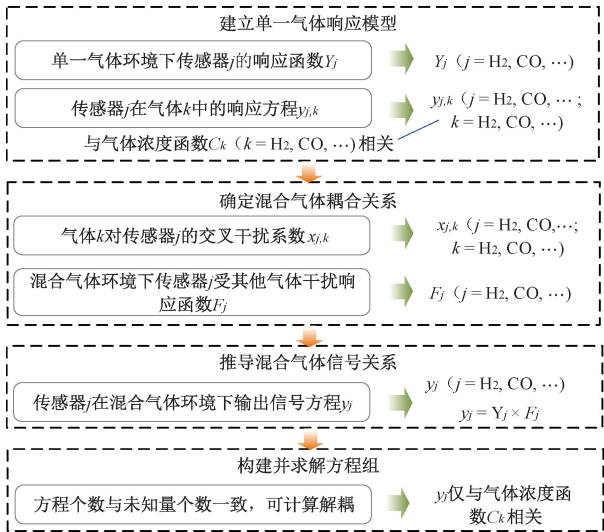


图 4 各气体传感器数据解耦处理

Fig. 4 Data decoupling processing of each gas sensor

4) 储能舱层级。在储能舱层级的监测中,烟雾与火焰的监测是关键,可借助 YOLOv8 模型实现对特征烟雾及火灾的检测与追踪。首先,广泛采集多种情境下的火灾烟雾特征图像,运用卷积神经网络分析图像,以提取烟雾的关键特征。然后,利用 LabelMe 标注工具精确标注每张图像中的目标边框及其类别,构建基础数据集。由于储能电站实际环境与白色或灰色烟雾色彩相似度极高,识别难度大,因此,采用 Cutmix 和 Mixup 数据增强技术训练和扩充数据集,使模型学习更为多元的烟雾及火灾特征模式,增强其应对复杂场景的能力,从而确保在实际储能舱监测中,能够精准、及时地察觉烟雾和火灾隐患。

2.2.2 主动在线多源监测系统线路及架构

主动在线多源监测系统包括各类特征指标探测器、电池管理系统 (Battery Management System, BMS)、储能变流器系统 (Power Conversion System, PCS)、能量管理系统 (Energy Management System, EMS) 以及人机交互系统。其中, BMS 为感知模块,负责监测和采集电池运行数据; EMS 为决策模块,负责接收数据并作出控制反馈; PCS 为执行模块,根据 EMS 的决策调度电池的充放电; 人机交互系统通过可视化界面为工作人员反馈电站运行信息。

监测系统的 BMS 由电池从控单元 (Battery Module Unit, BMU)、电池主控单元 (Battery Cluster Unit, BCU) 和电池总控单元 (Battery Array Unit, BAU) 组成。BMU 负责汇总电池单体的电信息及采集 Pack 级特征指标信息; BCU 汇总 Pack 级信息并采集电池簇的特征指标信息; BAU 汇总电池簇信息及电池舱内探测器的监测信息。每个舱安装 1 套 BMS, 数据汇总到舱中的智能上位机后, 可与 EMS、PCS 及人机交互系统实现互联互通。

由于不同传输端的数据需要通过特定的连接方式实现高效传输与汇总, 常见的通信连接方式包括控制器局域网 (Controller Area Network, CAN)、局域网 (Local Area Network, LAN) 以及推荐标准 485 (Recommended Standard 485, RS485)。表 1 为 3 种通信方式特点及适用场景分析。基于此, 构建监测系统的线路连接及架构, 如图 5 所示。

表 1 3 种通信方式特点及适用场景分析

Table 1 Analysis of characteristics and application scenarios of three communication modes

通信方式	特点	适用场景
CAN	可靠性高、实时性强、抗干扰能力强	适用于复杂环境下的短距离通信,如 BMS 相关组件与电池簇内传感器的连接
LAN	传输速率较高、带宽较大,能迅速完成大量数据的传输与交互	适用于需要进行大规模数据流转的应用场景,例如 BMS 与 EMS 之间的数据交互
RS485	接口简单、成本较低,并且可以实现较长距离的通信	适用于长距离且对速率要求不高的稳定通信场景,例如与人机交互相关的连接

3 分级预警系统设计

根据主动在线多源监测系统和储能电站火灾事

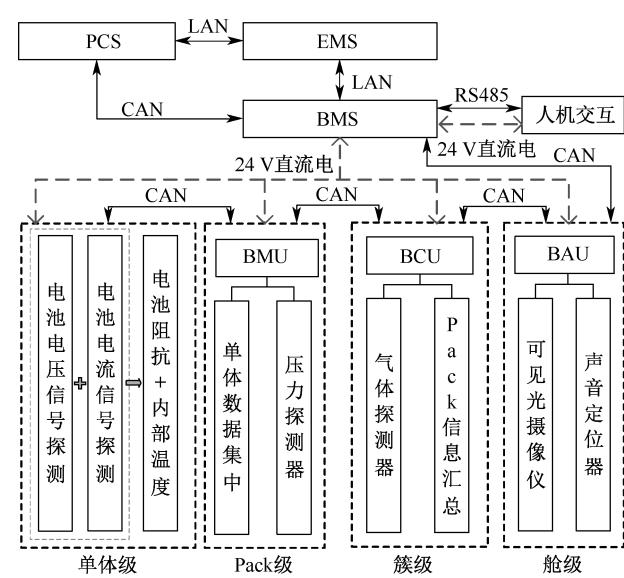


图5 监测系统线路及架构

Fig. 5 Circuit and architecture of monitoring system

故演化进程,预制舱式 LFP 储能电站的分级预警系统从 4 个层级进行分级预警,以便迅速了解电站灾变程度,从而有针对性地采取措施,确保电站及其周边环境的安全。

3.1 预警策略

1) 一级预警。监测电池单体内部温度、电压、电流和阻抗等数据。当内部温度温升速率异常时, BMS 系统将数据上传至 EMS, 综合分析电压、电流以及温升速率等多项数据, 预警电池的不健康状态。一旦触发预警, 系统自动启动保护机制, 控制 PCS 对异常电池所在簇的充电、放电和断电等操作, 防止

电池热失控。

2) 二级预警。监测电池包的内部压力及爆破平衡阀开启的声音。当声音探测器捕捉到特征频率声音, 且电池包内置压力传感器监测到压力持续上升后连续 3 s 急剧下降时, 触发二级预警。预警信号发出后, 依据麦克风阵列原理快速定位故障模组, 并将信息反馈给 EMS 和人机界面, 调控其所在簇的液冷系统温度, 实现降温。

3) 三级预警。监测电池簇内的 H_2 和 CO 气体。LFP 电池包爆破平衡阀打开后, 热失控产生的 H_2 、 CO 和 CO_2 等特征气体会快速泄出, 气体探测器实时监测可燃气体 H_2 、 CO 等的浓度, 若浓度经解耦处理后异常, 则触发三级预警。系统向 EMS 和人机界面上传预警信息, 控制排风机排出可燃气体, 切断总配电电源和电池系统主回路接触器, 30 s 后停止排风并释放全氟己酮灭火剂, 待灭火剂充满电池簇后, 隔绝氧气、惰化环境并抑制化学反应。

4) 四级预警。监测储能舱烟雾特征图像。一旦可见光摄影仪探测到烟雾或火焰, 系统立即启动高压细水雾灭火装置进行降温 and 灭火。明火扑灭后, 系统采用间歇式喷射降温方法^[19], 确保在 1 h 内将电池表面温度降至 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下, 防止 24 h 内复燃。

3.2 预警流程

当监测系统监测到异常情况时, 预警流程随即启动, 以便及时采取措施减少潜在的风险和损失。针对预制舱式 IEP 储能电站, 结合监测系统和预警策略, 绘制分级预警流程, 如图 6 所示。

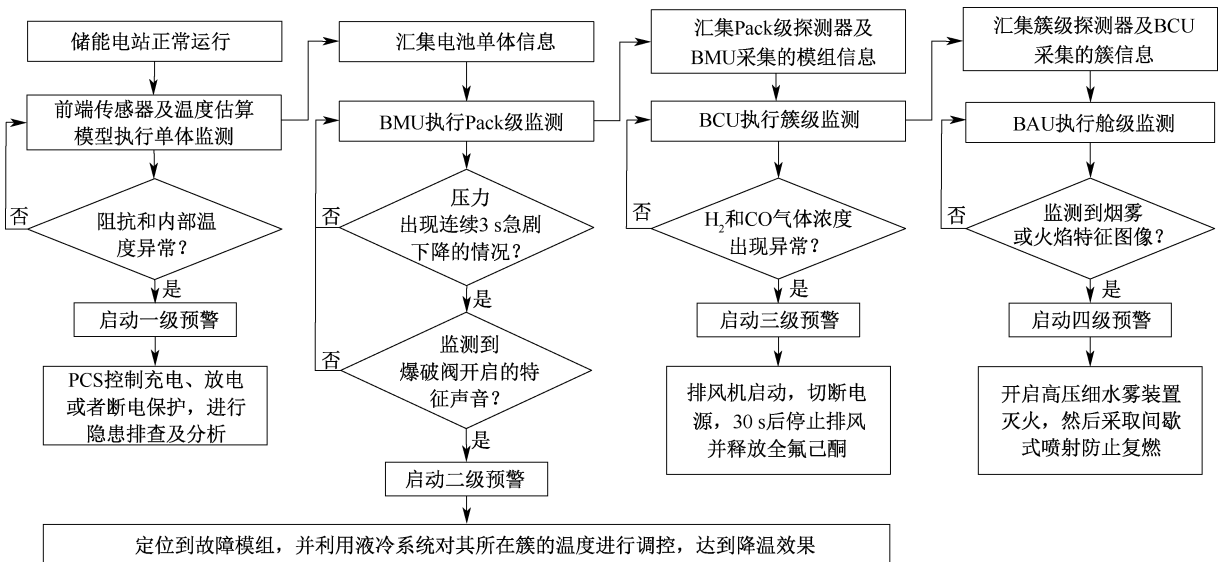


图6 分级预警流程

Fig. 6 Hierarchical early warning process

4 有效性及先进性验证

4.1 电池单体过充热失控预警分析验证

对储能电站用容量为 32 Ah 的 LFP 方形铝壳电池以 2C 倍率正常充电,热电偶探针置于电芯内部实时测量内部温度,并利用在线阻抗测试仪实时测量阻抗。电池单体过充时各特征参数变化如图 7 所示。

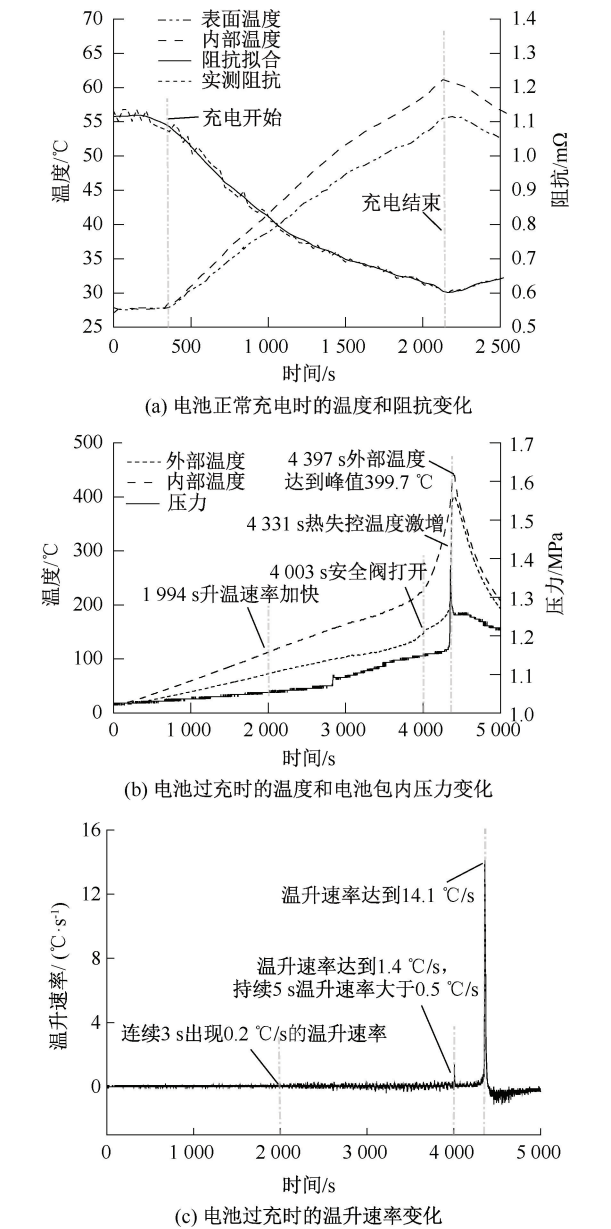


图 7 电池单体过充时各特征参数变化
Fig. 7 Changes of various characteristic parameters of a single battery cell during overcharging

由测量结果可知:①充电过程中,阻抗和内部温度呈负相关,可通过阻抗检测内部温度;②过充开始后,电压和内部温度的升高速率激增,当内部温度超

过 50 °C 且升温速率持续 3 s 大于等于 0.2 °C/s 时,一级预警响应,比热失控时间提前 38.9 min。

4.2 储能舱火灾预警验证

选用容量为 86 Ah 的 LFP 方形铝壳电池,通过四并八串的方式构成模组(模组容量 344 Ah)。试验中以 0.5C 的充电倍率持续对该模组充电,并在真实的预制舱环境中开展过充试验。为模拟真实场景,在预制舱内放入一个电池簇,其中包含 7 个空电池包和 1 个试验电池包。同时,在簇顶安装复合气体探测器,在舱顶安装声音定位探测器和可见光摄影仪,并将每个电池接入在线 EIS 测量仪,通过离线测量获得的转换关系估算电池内部温度,实现内部温度的实时监测。

持续充电过程中实时记录模组的内部温度、温升速率、声音信号、H₂ 和 CO 气体浓度以及特征图像,各层级的监测预警响应时刻见表 2。

表 2 特征指标监测预警响应时刻
Table 2 Schedule of monitoring early warning and response for characteristic indicators

特征事件	预警级别	比起火提前时间/min
过充开始	—	—
电池内部温度超 50 °C 且持续 3 s 温升速率 ≥0.2 °C/s	一级	53.2
电池包爆破阀开启	二级	13.2
H ₂ 被探测到	三级	12.9
CO 被探测到	三级	12.6
冒烟	四级	2.2
起火	四级	0

由表 2 可知:一级预警比二级预警时间提前 40 min,二级预警比三级预警至少提前 30 s,三级预警比四级预警提前大约 10 min。一、二级预警间隔时间最长,可以为隐患排查预留充足的时间。

5 结 论

1) 提出一套适用于 LFP 电池储能电站的主动在线监测多关键参数的监测和分级预警系统,该系统在热失控极早期预警方面具有显著优势,尤其是在 2C 过充条件下,可提前 38.9 min 对 32 Ah 电池单体热失控发出预警;在 0.5C 过充条件下,可提前 53.2 min 对 344 Ah 的电池模组燃烧发出预警。

2) 文中提出的监测预警系统和消防系统相对独立,尚未实现有效协同联动,未来可研究储能电站的监测预警系统和消防系统的协同联动,开发 LFP 储能电站“感、传、知、用”的一体化智能联动平台,

以缩短预警和响应的间隔时间,提高储能电站事故发生后的应急响应能力。

参 考 文 献

[1] JIA Zhuangzhuang, HUANG Zonghou, ZHAI Hongju, et al. Experimental investigation on thermal runaway propagation of 18 650 lithium-ion battery modules with two cathode materials at low pressure[J]. Energy, 2022; DOI: 10.1016/j.energy.2022.123925.

[2] JIN Changyong, SUN Yuedong, YAO Jian, et al. No thermal runaway propagation optimization design of battery arrangement for cell-to-chassis technology[J]. eTransportation, 2022; DOI:10.1016/j.etrans.2022.100199.

[3] LYU Peizhao, LIU Xinjian, QU Jie, et al. Recent advances of thermal safety of lithium ion battery for energy storage[J]. Energy Storage Materials, 2020, 31; DOI:10.1016/j.ensm.2020.06.042.

[4] 金阳. 锂离子电池储能电站早期安全预警及防护[M]. 北京:机械工业出版社, 2021:111.

[5] 徐振恒, 周晓燕, 付佳龙, 等. 锂离子电池热失控及其预警方法[J]. 科学通报, 2023, 68(33):4 501-4 516.

XU Zhenheng, ZHOU Xiaoyan, FU Jialong, et al. Monitoring and diagnostic approaches for thermal runaway in lithium-ion batteries[J]. Chinese Science Bulletin, 2023, 68(33):4 501-4 516.

[6] CAI Ting, STEFANOPOULOU A G, SIEGEL J B. Modeling li-ion battery temperature and expansion force during the early stages of thermal runaway triggered by internal shorts[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2019; DOI: 10.1149/2.1561910jes.

[7] WANG Lubing, DUAN Xudong, LIU Binghe, et al. Deformation and failure behaviors of anode in lithium-ion batteries: model and mechanism[J]. Journal of Power Sources, 2020; DOI:10.1016/j.jpowsour.2019.227468.

[8] 李正力, 李肖辉, 王京, 等. 锂离子电池储能电站热失控预警与防护研究进展[J]. 高压电器, 2024, 60(1): 87-99.

LI Zhengli, LI Xiaohui, WANG Jing, et al. Research progress on thermal runaway warning and protection of lithium-ion battery energy storage power station[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(1):87-99.

[9] SU Yangduan, PREGGER Y, BURROUGHS H, et al. Fiber optic sensing technologies for battery management systems and energy storage applications[J]. Sensors, 2021, 21(4); DOI:10.3390/s21041397.

[10] 吴敏, 闫蕙馨, 赵雨微, 等. 面向动力电池储能系统的气体检测与预警装置设计[J]. 电器与能效管理技术, 2020(5):96-99.

WU Min, YAN Huixin, ZHAO Yuwei, et al. Design of gas detection and warning device for power battery energy storage system[J]. Electrical and Energy Management Technology, 2020(5):96-99.

[11] 陶致格, 朱顺兵, 侯双平, 等. 锂电池储能电站火灾与消防安全防护技术综合研究[J]. 储能科学与技术, 2024, 13(2):536-545.

TAO Zhige, ZHU Shunbing, HOU Shuangping, et al. Comprehensive research on fire and fire safety protection technology for lithium battery energy storage power stations[J]. Energy Storage Science and Technology, 2024, 13(2):536-545.

[12] 陈银, 肖如, 崔怡琳, 等. 储能电站锂离子电池火灾早期预警与抑制技术研究综述[J]. 电气工程学报, 2022, 17(4):72-87.

CHEN Yin, XIAO Ru, CUI Yilin, et al. Research review on early warning and suppression technology of lithium-ion battery fire in energy storage power station[J]. Journal of Electrical Engineering, 2022, 17(4):72-87.

[13] 蔡昊燃. 储能电站电化学特性分析及火灾防控措施思考[J]. 山东化工, 2022, 51(16):219-221.

CAI Haoran. Analysis of electrochemical characteristics of energy storage power station and thoughts on fire prevention and control measures[J]. Shandong Chemical Industry, 2022, 51(16):219-221.

[14] ZHOU Zhizuan, ZHOU Xiaodong, WANG Dong, et al. Experimental analysis of lengthwise/transversal thermal

characteristics and jet flow of large-format prismatic lithium-ion battery[J]. Applied Thermal Engineering, 2021; DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2021.117244.

[15] 喻航, 张英, 徐超航, 等. 锂电储能系统热失控防控技术研究进展[J]. 储能科学与技术, 2022, 11(8): 2 653–2 663.

YU Hang, ZHANG Ying, XU Chaohang, et al. Research progress of thermal runaway prevention and control technology for lithium battery energy storage systems[J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(8): 2 653–2 663.

[16] 杜伟兮, 周子牛, 鲁金科, 等. 基于电化学阻抗谱的锂离子电池内部温度监测方法综述[J]. 广东电力, 2023, 36(8): 27–38.

DU Weixi, ZHOU Ziniu, LU Jinke, et al. Review of internal temperature monitoring methods for lithium-ion batteries based on electrochemical Impedance spectroscopy[J]. Guangdong Electric Power, 2023, 36(8): 27–38.

[17] 张二亮, 曹雪林, 朱松, 等. 快速 SRP-PHAT 多声源定位算法[J]. 重庆理工大学学报: 自然科学, 2023, 37(9): 167–172.

ZHANG Erliang, CAO Xuelin, ZHU Song, et al. Fast SRP-PHAT multi-source localization[J]. Journal of Chongqing University of Technology: Natural Science, 2023, 37(9): 167–172.

[18] 刘宝泉, 曹小雨. 锂电池热失控早期典型气体精准检测方法[J]. 储能科学与技术, 2024, 13(6): 1 995–2 009.

LIU Baoquan, CAO Xiaoyu. Accurate typical gas detection of lithium battery in early thermal runaway period[J]. Energy Storage Science and Technology, 2024, 13(6): 1 995–2 009.

[19] 陆佳政, 周天念, 吴传平. 锂离子电池储能灭火防复燃技术研究[J]. 湖南电力, 2022, 42(6): 3–6, 14.

LU Jiazheng, ZHOU Tiannian, WU Chuanping. Study on fire extinguishing and anti-reburning technology of lithium-ion battery energy storage system[J]. Hunan Electric Power, 2022, 42(6): 3–6, 14.



作者简介： 许晴晴 （2000—）,女,河南焦作人,硕士研究生,主要研究方向为电化学储能电站的安全理论与技术。E-mail:13782830668@163.com。