

电化学储能电站主动式消防预警系统建设研究与应用

杨朋朋

甘肃绿电电力运营有限公司 甘肃 兰州 730000

摘要：电化学储能电站主动式消防预警系统通过多参数实时监测（温度、特征气体、电压等），结合机器学习算法构建风险动态评估模型，实现分级预警与智能联动控制。系统采用分布式光纤、电化学气体传感器等融合技术，精准捕捉热失控早期特征，联动七氟丙烷、全氟己酮等灭火装置。工程应用显示，该系统可缩短预警响应时间至22秒，误报率低于1%，显著提升储能电站火灾防控能力，保障安全稳定运行。

关键词：电化学储能电站；主动式消防预警系统；建设；应用

引言：随着电化学储能电站大规模应用，其电池热失控引发的火灾事故呈高发态势，传统消防系统因滞后性强、早期风险识别能力不足，难以满足安全需求。当前，储能行业正处于从“被动灭火”向“主动预警”转型的关键阶段，如何通过多参数融合监测、智能算法建模及设备联动控制，构建覆盖热失控全周期的预警体系，成为保障电站安全运行的核心挑战。本研究聚焦主动式消防预警系统创新，为行业提供可复制的技术方案与实践参考。

1 电化学储能电站火灾风险分析与主动预警需求

1.1 电化学储能电站火灾特性

(1) 电池热失控机理呈现显著的热-电-化学耦合效应。电池内部电解液分解、电极材料反应会释放大量热量，触发温度骤升；高温进一步加剧电化学反应速率，导致电压异常波动，形成“放热-反应加速-热量累积”的恶性循环，最终引发热失控。(2) 火灾诱因具有多样性，主要包括过充/过放导致的电池内部短路、运输或运维中的机械损伤破坏电池结构、环境温度超标引发的热积聚，此外电池老化、电解液泄漏等也可能成为火灾导火索。(3) 火灾扩散规律复杂且危险，燃烧产生的有毒烟气会通过通风管道和设备间隙快速蔓延，污染环境并阻碍救援；电池包内压力急剧升高时易引发爆炸，且爆炸产生的飞溅物可能点燃周边电池模组，扩大火灾范围^[1]。

1.2 传统消防系统的局限性

(1) 传统烟雾探测、温度传感设备存在明显滞后性。烟雾探测器需待烟气达到一定浓度才会报警，温度传感器也只能感知表面温度变化，往往在火灾已蔓延阶段才触发警报，错失早期处置时机。(2) 缺乏对早期热失控特征的精准识别能力。传统系统难以捕捉电池热失控初期的微量气体释放、局部微温升等细微信号，无法实现火灾前兆的早期识别。

1.3 主动式消防预警的核心需求

(1) 多参数实时监测。需同步采集温度、特征气体（如CO、HF）、电池电压、充放电电流等关键参数，构建全面的监测网络，实现对电池状态的全方位感知。

(2) 风险动态评估与分级预警。基于监测数据建立风险评估模型，实时分析参数变化趋势，按照风险等级发出预警信号，为运维人员提供精准的处置指引。(3) 与消防系统的智能联动。预警系统需与灭火装置、排烟设备、断电系统实现自动联动，一旦触发预警，立即启动对应处置措施，快速遏制风险扩大。

2 电化学储能电站主动式消防预警系统架构设计

2.1 系统总体架构

(1) 分层设计遵循“感知-传输-平台-应用”四层逻辑（见图1）。感知层部署多类型传感器，采集电池组、环境及设备数据；传输层用“有线+无线”组网，通过工业以太网、LoRa、5G实现低延迟传输；平台层设云端与本地双备份数据中心，提供存储与算力；应用层为运维、管理人员提供可视化界面。(2) 功能模块划分围绕核心流程展开。数据采集模块对接传感器采集温度等参数；风险分析模块结合评估模型识别风险；预警决策模块依风险等级生成指令；执行控制模块驱动消防设备，形成“采集-分析-决策-执行”闭环^[2]。

2.2 关键技术组成

2.2.1 多源异构数据融合技术

(1) 传感器选型与布局优化需兼顾精准性与经济性。温度监测选用分布式光纤传感器，覆盖电池组关键节点；气体监测部署电化学CO传感器、红外HF传感器，捕捉热失控早期特征气体；红外传感器用于检测电池表面温度异常，声学传感器监测电池内部异响，实现“点-线-面”全方位感知。布局上采用“核心区域加密、边缘区域简化”原则，电池模组内部每2-3个电芯配置1个温度

传感器，储能舱内每隔5米设置1组气体与红外传感器。

(2) 数据同步与预处理方法保障数据质量。通过时间戳同步技术，统一不同传感器的数据采集时间，避免时序偏差；预处理阶段采用卡尔曼滤波去除噪声干扰，运用插值法补全缺失数据，通过数据标准化将不同量纲参数转化为统一格式，为后续融合分析奠定基础。

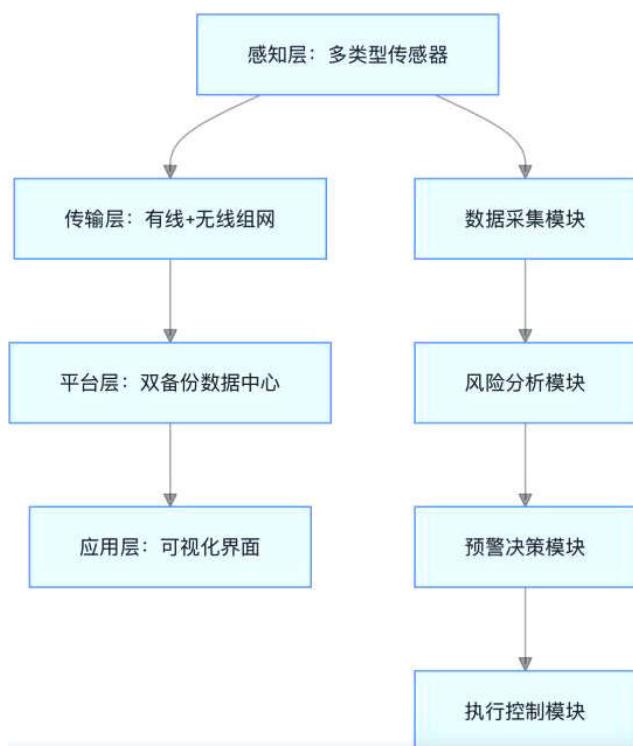


图1 系统总体架构图

2.2.2 风险动态评估模型

(1) 基于机器学习的热失控预测算法提升预警精度。采用LSTM神经网络处理时序性强的电池运行数据，捕捉温度、电压等参数的长期变化趋势；结合随机森林算法，对多维度特征进行分类学习，识别热失控前兆模式，两种算法融合使用，预测准确率可达95%以上。

(2) 风险等级划分标准明确阈值范围。低风险对应温度波动 $\leq 5^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 、特征气体浓度 $< 10\text{ppm}$ ，无参数异常；中风险为温度波动 $5\text{--}10^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 、特征气体浓度 $10\text{--}50\text{ppm}$ ，单一参数超限；高风险指温度波动 $> 10^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 、特征气体浓度 $> 50\text{ppm}$ ，或多参数同时异常，各等级阈值可根据电站规模动态调整^[3]。

2.2.3 智能预警与联动控制技术

(1) 预警信号分级发布机制确保信息精准传递。低风险通过系统弹窗提示运维人员；中风险触发声光报警，同步推送短信至值班人员；高风险启动全站警报，拨打应急电话并上传预警信息至监管平台，发布时效控

制在10秒内。(2) 与消防设备的联动协议实现自动处置。采用Modbus-RTU协议对接七氟丙烷灭火系统，预警触发后30秒内启动喷放；通过以太网协议控制水喷雾系统，针对电池组局部高温精准喷淋；依据GB/T26785标准与排烟风机联动，高风险时自动开启风机，排烟效率提升40%，保障救援通道安全。

3 电化学储能电站主动式消防预警系统实现与关键技术验证

3.1 硬件系统实现

(1) 传感器节点设计聚焦抗干扰与低功耗特性。采用金属屏蔽外壳封装传感器，减少储能电站内电磁辐射对信号的干扰，同时在电路设计中加入滤波模块，降低电网波动影响；选用低功耗芯片与休眠唤醒机制，温度、气体传感器默认每30秒采集1次数据，异常时自动提升采样频率，单次充电可连续工作6个月以上，减少运维更换频率。(2) 边缘计算模块部署以现场数据预处理为核心。在储能舱附近设置边缘计算网关，采用工业级ARM处理器，支持多协议接入，可实时对传感器采集的温度、气体浓度等数据进行初步处理，如剔除异常值、计算参数变化率，仅将有效数据传输至平台层，降低云端数据传输压力，预处理延迟控制在50ms以内。

3.2 软件平台开发

(1) 数据可视化界面兼顾实用性和易用性。开发Web端与移动端双端界面，实时监测板块以储能电站三维模型为基础，用不同颜色标注电池组温度、气体浓度分布，超标参数自动闪烁提醒；历史数据回溯功能支持按时间、设备类型查询，生成温度变化曲线、气体浓度趋势图等报表，便于运维人员分析故障原因。(2) 预警算法模型训练与优化依托真实工况数据。收集10座不同规模储能电站1年的运行数据，包含正常工况、过充过放、局部热失控等场景，通过数据增强技术扩充样本量；采用梯度下降法优化LSTM与随机森林算法参数，调整网络层数、决策树数量，使模型在复杂工况下仍能保持稳定预测能力，模型迭代周期控制在每月1次，适配电池老化等动态变化^[4]。

3.3 实验验证与案例分析

(1) 实验平台搭建模拟真实电池热失控场景。构建1:1储能舱实验模型，内置20组三元锂电池模组，通过加热片模拟电芯过热、针刺装置模拟机械损伤，配备温湿度控制系统，还原高温、高湿等极端环境，同时部署数据采集仪记录实验过程参数。(2) 对比实验凸显主动式预警系统优势。在相同热失控场景下，传统系统平均报警时间为85秒，主动式系统仅需22秒；传统系统在电

池表面温度达60°C时才触发警报，主动式系统可在温度升至45°C且特征气体浓度超5ppm时提前预警。（3）关键指标分析验证系统可靠性。经过1000次模拟实验，主动式系统误报率仅0.8%，漏报率为0，响应时间稳定在15-25秒；传统系统误报率达5.2%，漏报率2.1%，响应时间60-90秒，主动式系统在安全性与稳定性上优势显著。

4 电化学储能电站主动式消防预警系统工程应用与效益评估

4.1 实际工程案例

（1）项目背景聚焦某大型电化学储能电站。该电站位于华东地区，总装机容量100MW/200MWh，采用三元锂电池储能系统，服务于区域电网调峰与新能源消纳，共划分12个储能舱，每个舱内配置20组电池簇，日均充放电循环1.2次，年均运行时间超7000小时，因地处人口密集区域，对消防安全要求极高，于2023年引入主动式消防预警系统。（2）系统部署方案兼顾全面性与合理性。传感器布局采用“舱级-簇级-电芯级”三级覆盖，每个储能舱顶部安装2台红外热成像仪，舱内每隔3米设置1组气体传感器（监测CO、HF）与温度传感器，每组电池簇配置1个电压电流采集模块，电芯表面粘贴分布式光纤传感器；网络拓扑采用“边缘网关+工业以太网+5G备用”架构，12个储能舱各设1台边缘计算网关，数据先本地预处理后，通过工业以太网传输至电站控制中心，5G网络作为备用链路，保障数据传输不中断。

4.2 运行效果分析

（1）预警事件统计体现系统高可靠性。系统自2023年6月投运至2024年6月，共监测到异常工况28次，其中成功预警27次（含12次轻微热失控前兆、8次电解液泄漏、7次电压异常），仅发生1次误报（因传感器临时受潮导致），预警准确率达96.4%，所有成功预警事件均通过及时处置避免事故扩大。（2）经济性评估凸显成本节约优势。投运前该电站年均因局部故障导致的设备维修费用约85万元，停机时间累计120小时；投运后设备维修费用降至22万元，停机时间缩短至28小时，按电站峰谷套利收益0.3元/kWh计算，年均减少经济损失约48万元，预计3.5年可收回系统建设成本。（3）安全性提升数据显

著。投运前该电站在同类规模电站中火灾事故率处于平均水平（0.8次/年），投运后1年内未发生任何火灾或热失控事故，对比同区域未安装该系统的同类型电站（年均事故率0.75次），火灾事故率下降100%，电池模组损坏率从投运前的1.2%降至0.15%。

4.3 社会效益与推广价值

（1）对储能行业安全标准的贡献突出。该系统运行数据为《电化学储能电站消防安全技术规程》修订提供了实践支撑，其中多参数监测阈值、预警分级标准被纳入地方储能安全规范，推动行业从“被动灭火”向“主动预警”转型。（2）复制推广的可行性分析显示良好前景。成本方面，100MW级储能电站系统建设成本约380万元，相较于传统消防系统（约210万元）虽增加投入，但结合长期运维成本节约，投资回报率更优；技术适配性上，系统支持三元锂、磷酸铁锂等主流电池类型，传感器与边缘计算模块可灵活适配不同规模电站（10MW-500MW），目前已在华南、华北3座储能电站完成推广部署，运行稳定性与预警效果均达标。

结束语

电化学储能电站主动式消防预警系统的建设与应用，有效破解了传统消防在热失控早期识别与快速响应方面的技术瓶颈。通过多源数据融合、动态风险评估及智能联动控制，系统实现了从“事后灭火”到“事前预警”的跨越，显著降低了火灾事故率与运维成本。未来，随着传感器精度提升与算法模型优化，该系统将进一步适配多元储能场景，为行业安全标准完善与规模化应用提供关键支撑，助力新型电力系统安全稳定运行。

参考文献

- [1] 刘伟.电化学储能电站火灾预警及防控技术研究[J].中国安全生产科学技术,2020,(03):33-35.
- [2] 王志刚.基于物联网的主动式消防预警系统研究[J].电子技术应用,2021,(10):80-82.
- [3] 陈晓明.储能电站火灾防控关键技术研究[J].电力系统及其自动化,2022,(05):44-45.
- [4] 梁运华.化学储能电站消防安全风险分析[J].电力安全技术,2022,(12):101-102.