

# 基于光纤光栅的锂电池安全监测应用效果研究

刘迎春

海目星（江门）激光智能装备有限公司，广东 江山 529000

DOI:10.61369/ERA.2026020032

**摘 要：** 锂电池在新能源汽车与大规模储能电站中的应用快速扩张，但热失控引发的火灾事故仍时有发生，传统监测手段在“内部状态感知、抗电磁干扰、多点分布式测量、长期可靠性”方面存在不足。光纤光栅传感器具有电绝缘、抗电磁干扰、耐高温、可串联成网实现多点测量等优势，适用于电池包内密集布置与长周期在线监测。FBG可有效捕捉电芯表面温度分布与热点演化，在过充与热失控触发工况下能提前识别温升加速与温度场不均匀性；应变监测可反映电芯产气膨胀导致的厚度变化与模组应力分布异常，为“热失控前的产气/结构异常”提供可量化指标。本文提出的FBG监测系统响应时间、覆盖度与工程可维护性方面表现出良好的应用前景，可为锂电池安全监测与热失控预警提供新的技术路径。

**关键词：** 光纤光栅；锂电池；温度监测；应变监测

## Research on the Application Effect of Fiber Bragg Grating-Based Safety Monitoring for Lithium Batteries

Liu Yingchun

Haimu Star (Jiangmen) Laser Intelligent Equipment Co., Ltd. Jiangshan, Guangdong 529000

**Abstract :** The application of lithium batteries in new energy vehicles and large-scale energy storage stations is rapidly expanding, but fire accidents caused by thermal runaway still occur from time to time. Traditional monitoring methods have shortcomings in terms of "internal state sensing, electromagnetic interference resistance, multi-point distributed measurement, and long-term reliability." Fiber Bragg Grating (FBG) sensors have advantages such as electrical insulation, electromagnetic interference resistance, high-temperature tolerance, and the ability to be networked for multi-point measurement, making them suitable for dense deployment within battery packs and long-term online monitoring. FBGs can effectively capture the temperature distribution and hotspot evolution on the surface of battery cells, allowing early identification of accelerated temperature rise and temperature field unevenness under overcharge and thermal runaway triggering conditions. Strain monitoring can reflect thickness changes caused by gas generation in the cells and abnormal stress distribution in the module, providing quantifiable indicators for "pre-thermal runaway gas generation/structural abnormalities." The FBG monitoring system proposed in this paper shows promising application prospects in terms of response time, coverage, and engineering maintainability, offering a new technical approach for lithium battery safety monitoring and thermal runaway early warning.

**Keywords :** Fiber Bragg Grating; lithium battery; temperature monitoring; strain monitoring

## 引言

随着“双碳”目标推进，锂电池在新能源汽车、工商业储能与电网侧储能中的装机规模持续增长。锂电池能量密度提升与快充技术普及在带来便利的同时，也提高了热失控风险。热失控通常由内短路、隔膜收缩、电解液分解等触发，随后发生链式放热反应，伴随温升加速、产气膨胀、电压骤降，并可能迅速在模组内传播，最终导致火灾甚至爆炸。现有主流监测主要依赖电池管理系统（BMS）对电压、电流与表面温度进行采样。但BMS通常采样点有限，且温度探头多布置在电芯表面或冷板上，难以反映内部热点与局部温度梯度；同时，电池包内存在强电磁干扰，电类传感器在布线、绝缘与抗干扰设计上更复杂。红外热成像、声学监测与气体传感等方法在实验室研究较多，但在工程应用中易受遮挡、环境噪声与安装空间限制。FBG传感器通过波长编码实现信号传输与感知，本质上为“无源传感”，传感器本体不带电，适合高压系统；可串联成链实现多点测量，便于在电池包内形成分布式监测网络；同时具有较高的测量精度与稳定性。基于上述优势，FBG在电力设备、航空航天与土木工程健康监测中已得到成熟应用。将FBG引入锂电池安全监测，有望弥补传统电类传感在电磁兼容与多点测量方面的短板，提升电池包安全状态的可观测性。

作者简介：刘迎春（1982.10-），大专，工程师，研究方向：锂电设备。

## 一、理论基础与监测参量映射关系

### (一) 锂电池安全相关基础

锂电池内部反应本质上是电化学与热耦合过程。在正常工作条件下, 电池通过锂离子在正负极之间往返嵌入/脱嵌实现充放电。但当出现制造缺陷、老化累积或滥用工况时, 可能触发内短路等失效, 进而引发热失控。典型热失控演化链条可概括为:

1. 触发阶段: 内短路/隔膜收缩/外短路导致局部电流密度升高, 焦耳热增加;
2. 温升阶段: SEI膜分解、负极与电解液反应等放热反应开始, 温升加速;
3. 产气膨胀阶段: 电解液与电极材料反应产生大量气体(如CO<sub>2</sub>、CO、H<sub>2</sub>等), 电芯内部压力上升, 壳体膨胀;
4. 传播阶段: 高温导致相邻电芯热失控, 形成连锁反应, 最终引发火灾。

在该链条中, “温度”与“膨胀/应力”是两个关键可观测物理量: 温度直接反映热失控的能量累积与传播速度; 膨胀与应力变化反映产气与结构失效, 可能早于明显温升出现, 因此具备早期预警价值。

### (二) 监测参量与安全状态映射

温度是热失控最直接的表征量, 在热失控早期, 局部热点往往先出现在极耳附近、电芯边缘或缺陷位置, 随后扩展到整个电芯表面并向相邻电芯传播。FBG温度监测的价值在于:

1. 可在多个位置同时测量, 获得温度场分布, 识别“温度梯度”与“热点迁移”;
2. 可布置在电类传感器难以接近的区域, 提高覆盖度;
3. 电绝缘特性降低短路风险, 适合高压电池包环境。

### (三) 应变/膨胀监测的映射关系

电芯在滥用工况下会发生产气膨胀, 导致厚度增加、模组预紧力变化, 严重时引发壳体破裂与电解液泄漏。应变监测的映射关系可概括为:

1. 电芯厚度变化 → 粘贴于壳体的应变片(或FBG基底)产生拉伸应变;
2. 模组内部压力上升 → 端板/横梁应变分布改变;
3. 热失控前产气阶段可能出现“膨胀先于明显温升”的现象, 为早期预警提供窗口。

但应变监测也存在挑战, 比如电芯壳体表面并非理想平面, 粘贴工艺对测量稳定性影响大, 温度变化会引起基底热膨胀, 需进行温度补偿, 振动与装配应力会引入噪声, 需要滤波与特征提取。电池包在车辆行驶或储能舱运维过程中存在振动环境; 碰撞、跌落或挤压早期也会产生机械冲击。FBG振动监测可通过粘贴在模组结构件上的FBG获取高频应变响应, 为机械异常提供辅助判断。但考虑到论文篇幅与研究重点, 本文以温度—应变为主, 振动作为可选扩展。

## 二、系统方案设计: FBG封装、布点与组网

### (一) 监测系统总体架构

本文构建的FBG锂电池安全监测系统分为四层: 感知层、传输层、解调与数据层、联动层。

#### 1. 感知层

温度FBG: 用于测量电芯表面、极耳附近、模组间隙与热管理通道温度;

应变FBG: 用于测量电芯厚度方向膨胀与模组端板/横梁应力变化;

可选振动FBG: 用于捕捉机械冲击与结构共振特征。<sup>[1-9]</sup>

#### 2. 传输层

采用单模光纤作为传输介质, 通过分路器或串联方式将多个FBG连接至解调仪。光纤在电池包内走线需考虑机械保护与弯曲半径, 避免振动导致微弯损耗。

#### 3. 解调与数据层

解调仪完成波长采集与转换, 输出温度/应变数据; 边缘计算模块实现实时特征提取、阈值判断与报警; 上位机用于数据存储、可视化与历史回放。为保证与BMS对比分析, 系统需实现时间戳同步。

### (二) 封装方案设计与对比

温度测量的关键是响应速度与测温一致性。常用封装包括:

贴片封装: FBG裸栅粘贴在薄金属片或玻纤片上, 再固定到电芯表面。优点是安装方便、成本低; 缺点是导热路径受胶层影响, 响应速度一般。

金属管封装: FBG置于金属毛细管内并填充导热胶, 再固定到测量点。优点是导热好、响应快、机械强度高; 缺点是体积较大, 布置灵活性略差。

导热胶直接封装: 在裸栅外涂覆导热胶并套热缩管。优点是结构紧凑; 缺点是长期可靠性受胶层老化影响。<sup>[7-14]</sup>

### (三) 可靠性设计要点

电池包内振动与热循环会导致胶层疲劳、脱粘或光纤微弯损耗, 因此封装与安装需注意

光纤走线采用护套保护, 并设置应力释放弯, 传感器与光纤连接处采用热缩管与胶封加固, 关键位置采用机械压片固定, 避免胶层单点受力, 进行高低温循环与振动试验验证封装耐久性。

### (四) 信号采集与数据预处理方法

系统需先完成温度与应变标定, 建立波长—物理量映射关系。温度标定可采用恒温箱或油浴, 在若干温度点下记录FBG波长漂移, 拟合得到灵敏度系数; 应变标定可采用拉力试验机或位移台, 获得应变灵敏度。数据预处理包括采用移动平均或小波去噪, 降低振动引入的高频噪声, 温度补偿, 对温度—应变交叉敏感进行修正, 异常点检测, 对断纤、反射谱消失等进行诊断, 时间同步, 与BMS采样时间对齐, 便于对比分析。

### 三、工程化应用分析与建议

#### (一) 部署成本与收益分析

FBG 监测系统的成本主要来自解调仪、传感器阵列与安装工时。解调仪属于一次性投入，可通过增加通道数降低单测点成本；传感器阵列成本随布点密度增加而上升，但合理的布点策略可在不显著增加成本的前提下提升覆盖度。收益方面，FBG 监测可降低事故损失、减少非计划停机、提高运维效率，并为电池健康管理提供更丰富的数据支撑。在储能电站等长寿命场景中，FBG 的长期稳定性优势更突出，投资回报周期相对更短。

#### (二) 可靠性与耐久性讨论

胶层老化与脱粘，建议选用耐高温结构胶，并进行热循环验证，光纤微弯损耗，走线需满足弯曲半径要求，并采用护套与压片固定，热失控区域温度极高，传感器应布置在安全距离并评估材料极限，系统应具备反射谱监测或链路诊断功能，及时提示维护。

#### (三) 与 BMS/热管理/消防系统融合

FBG 监测系统应与 BMS 实现数据融合：BMS 提供电压/电流/均衡状态，FBG 提供温度场与应变场，共同提高状态评估准确性。联动策略建议采用分级响应：注意级以热管理调节为主；警告级进行限功率与区域隔离；紧急级切断主回路并启动消防。为保证实时性，边缘计算应在本地完成快速报警，云端用于历史分析与模型迭代。

#### (四) 标准化与规范建议

建议行业逐步建立 FBG 在电池包内应用的相关规范，包括：布点推荐位置与最小覆盖要求；传感器封装与安装工艺要求；性能测试方法（标定、响应时间、误报率、耐久性）；报警阈值与

联动接口协议。

在场景优先级上，储能电站与商用车对安全性与长寿命要求更高，适合优先推广；乘用车可在高安全等级车型或关键区域先行试点。

### 四、结语

FBG 可实现电池包内多点温度分布监测，能够有效捕捉热点演化与热失控传播路径，在过充与热失控触发工况下表现出良好的早期识别能力。与传统单点温度监测相比，FBG 提供了更丰富的空间信息，有助于定位危险区域并优化联动策略。应变监测能够反映电芯产气膨胀导致的厚度变化与模组应力异常，在部分工况下可早于明显温升出现突变，为热失控前的“产气/结构异常”提供可量化指标，提高预警提前时间。通过多参量融合预警策略（温升速率、温差一致性、应变突变）可显著降低单一阈值法的误报率，提高系统可靠性与工程实用性。本文提出的封装与布点策略兼顾响应速度、覆盖度与成本，具备工程可实现性；系统与 BMS/热管理/消防的分级联动逻辑可作为实际部署参考。

本文仍存在以下不足：样本类型与工况设置可进一步扩展；长期老化与更恶劣环境（盐雾、电解液蒸汽、烟气腐蚀）下的耐久性验证仍需加强；算法层面可引入更复杂的多源数据融合与预测模型。未来工作可从以下方向展开，第一扩展至软包与圆柱电芯，对比不同结构下的 FBG 监测效果；第二结合气体传感、声学传感与局部放电信号，构建多模态融合预警；第三面向大规模储能电站，研究 FBG 分布式组网与成本优化；第四基于数字孪生与机器学习，实现更精准的热失控预测与寿命评估。

### 参考文献

- [1] 李响, 王雨桐, 张琪, 等. 动力电池包 FBG 传感器封装耐久性试验研究 [J]. 机械工程学报, 2023, 59(10): 213-220.
- [2] 王浩, 曹珊珊, 苏俊豪, 等. 基于双包层光纤布拉格光栅传感器的锂电池组温度场监控 [J]. 物理学报, 2022, 71(10): 104207.
- [3] 胡胜, 李景琦, 何怡婷, 等. 基于光纤光栅的锂电池表面物理场监测 [J]. 光通信研究, 2025, 51(5): 250253.
- [4] 孟国栋, 李雨枫, 唐佳, 等. 锂离子电池储能电站的热失控状态检测与安全防护技术研究进展 [J]. 高电压技术, 2024, 50(7): 3105-3127.
- [5] 张宇, 刘剑, 陈振宇, 等. 光纤光栅传感器在动力电池热失控预警中的应用 [J]. 光学技术, 2022, 48(3): 325-331.
- [6] 陈翔, 杨超, 王鹏, 等. 基于 FBG 的锂电池模组应变监测与热失控早期预警 [J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(6): 123-131.
- [7] 赵岩, 孙伟, 李刚, 等. 光纤光栅传感网络在储能电池包中的部署与可靠性设计 [J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(12): 145-152. (组网与可靠性, 适配 3.3 节可靠性设计)
- [8] 刘耀鑫, 李建宇, 郑加金, 等. 锂电池 FBG 温度—应变交叉敏感补偿方法研究 [J]. 中国激光, 2023, 50(15): 1504002.
- [9] 周斌, 吴峰, 马明, 等. 基于 FBG 与 BMS 融合的电池热管理系统设计 [J]. 汽车工程, 2023, 45(8): 1201-1208.
- [10] 高健, 陈立, 王凯, 等. 锂离子电池热失控产气特性及光纤光栅应变监测关联分析 [J]. 化工学报, 2024, 75(4): 1789-1797.
- [11] 程明, 赵亮, 许涛, 等. 基于光纤光栅的储能锂电池振动监测与异常识别 [J]. 振动与冲击, 2024, 43(5): 189-196.
- [12] 谢芳, 周志远, 黄海, 等. 多参量融合的锂电池热失控分级预警方法 [J]. 电工技术学报, 2023, 38(16): 4201-4209.
- [13] 朱伟, 林强, 吴昊, 等. 光纤光栅传感技术在新能源汽车电池安全监测中的工程化应用 [J]. 汽车技术, 2024, (5): 45-51.
- [14] 郭健, 王磊, 徐阳, 等. 基于数字孪生的 FBG 锂电池监测数据融合与预测 [J]. 计算机集成制造系统, 2025, 31(2): 567-575.