

# 锂电池实验室智能安全管控技术研究

刘钊 朱正茂

(华北电力大学 实验室管理处, 北京 102206)

**摘要:** 实验室安全是高校开展科技人才培养和引领科学进步的前提。现阶段, 随着中国在领域的弯道超车, 锂离子电池已成为高校和科研院所的热点研究方向。自身材料的危险性导致锂离子电池试验过程存在潜在风险, 采取有效管控技术保障实验室安全是极其必要的。在实验室中广泛应用无线通讯、射频识别技术、传感器和执行装置等智能安全管控技术可以有效覆盖试验的各个环节, 从入库管理、个人防护装备预警、区域分区和试验过程的不同角度有效提升了实验室科学化、信息化的管理能力, 有力保障高校实验室安全运行。

**关键词:** 实验室安全; 锂离子电池; 无线通讯; 传感器; 安全管控

**中图分类号:** X923

**文献标识码:** A

高校实验室是从事科学研究的重要前沿阵地。2019 年, 随着《教育部关于加强高校实验室安全工作的意见》(教技函〔2019〕36 号)的发布, 进一步强化了国家对于高校实验室安全工作的重视程度。从工作实践来看, 高校实验室管理工作系统性强, 需要及时发现和判断实验室运行过程中存在的深层次隐患和不足。传统实验室安全防护技术较为基础, 对于管理人员的依赖程度较大, 难以与科研活动中的复杂场景和紧急情况相适应, 对实验室管理部门的专业能力考验极大。

锂离子电池作为一种相对成熟的储能技术, 越来越多的应用于新能源交通和电力系统等领域, 近年来在国家政策和资金的积极支持下迅猛发展<sup>[1-2]</sup>。锂离子电池组成材料特殊, 在试验过程中一般通过条件触发锂离子电池进入热失控阶段, 可能出现漏液、冒烟、着火、爆炸、有毒气体释放等危险试验现象, 极易导致事故风险<sup>[3-4]</sup>。如: 文献<sup>[5]</sup>从锂离子电池产品的安全标准出发, 得出锂离子电池(组)在滥用条件下出现热失控, 经热扩散后导致安全事故; 文献<sup>[6]</sup>分析了锂离子电池热失控的诱因和机理, 得出热失控会生成大量气体同时释放大热量, 发生物质喷射甚至燃烧; 文献<sup>[7]</sup>指出, 单体热失控锂离子电池将继续加热电池组内其他电池, 造成热失控的传播。

目前, 锂离子电池在实验室中的危险性主要分为成品电池质量问题、自研电池不确定性和电池存放环境问题<sup>[8]</sup>。高校管理部门对锂离子电池进入实验室后的危险性认识不足, 尤其缺乏对购买、使用、保存和处置等非试验状态下火灾隐患的预判, 其潜在风险对实验室安全

造成极大的威胁。为此，高校除要对锂离子电池试验项目开展风险评估时，应充分考虑试验过程和安全管控的自动化、信息化和数字化，通过智能安全管控技术最大程度规避可能产生的严重后果。

随着科技的迅猛发展，基于无线通讯、射频识别技术、传感器和执行装置的各类产品凭借其性能可靠、性价比高和改造成本低等优势，可逐步替代传统安全防护技术。因此，在锂电池实验室应用各种先进技术和产品，是提升实验室安全防护水平和管控智能化的重要研究方向。

1 无线通信技术

随着智慧校园基础环境建设力度的逐年加大，校园无线互联网基本可做到无死角全覆盖。为防止海量终端非授权接入可能引发的 DDoS 攻击风险，校园无线互联网屏蔽了门禁、摄像头、报警器等智能终端的直接接入认证。

物联网无线通讯技术融合了传感器、无线通信、信息传输以及网络计算等万物互联核心理念，包括：Wi-Fi、蓝牙、Zigbee、LoRa 和 NB-IOT 等，其技术特点、应用优势和缺点如表 1 所示。

表 1 几类物联网无线通讯技术的特点和优缺点

|       | Wi-Fi                             | 蓝牙                | Zigbee           | LoRa                       | NB-IoT                     |
|-------|-----------------------------------|-------------------|------------------|----------------------------|----------------------------|
| 组网方式  | 基于无线路由                            | 节点                | 基于 Zigbee 网关     | 基于 LoRa 网关                 | 基于蜂窝组网                     |
| 网络部署  | 节点+路由                             | 节点                | 节点+网关            | 节点+网关                      | 节点                         |
| 传输距离  | 50m                               | 10m               | 10-100m          | >2000m                     | >10000m                    |
| 单网接入量 | 20-50 个                           | <7 个              | 200-500 个        | 500-5000 个                 | 200000 个                   |
| 电池续航  | 数小时                               | 数天                | 理论 2 年           | 理论 10 年                    | 理论 10 年                    |
| 传输速度  | 2.4G: 1-11 Mbps<br>5G: 1-500 Mbps | 1Mbps             | <100kpbs         | <50kpbs                    | <100kpbs                   |
| 优势    | 可接入互联网；<br>无需布线                   | 功耗低；兼容性<br>好；移动性强 | 容量大；安全<br>性高；功耗低 | 距离远；功耗<br>低；通信安全；<br>穿透障碍物 | 覆盖范围广；<br>功耗低；成本<br>低；安全性高 |
| 缺点    | 功耗大；距离短；<br>安全性低                  | 低速率；距<br>离短；      | 距离短；低速<br>率      | 低速率；时延<br>较大               | 低速率；信号<br>强度低              |

高校实验室普遍面积不大，多数房间建筑面积约 200m<sup>2</sup>，经常会根据需求进行物理空间隔断。锂离子电池实验室管理所需传感器种类集中、整体数量较少，主要是射频识别(RFID)、人体传感器、烟感报警器、空气质量综合监测器和智能门禁等，对于数据传输速度要求不高。所以，Zigbee 技术特别符合在锂离子电池实验室的使用场景要求，配合与 Wi-Fi 相结合实现接入互联网的功能，各类传感器终端可通过 Zigbee 网关与远程控制中心或手机 App 进行通讯。

## 2 识别技术、传感器和执行装置

### 2.1 射频识别技术

射频识别技术（英文：Radio Frequency Identification，缩写：RFID）是一种非接触式的自动识别技术，采用射频信号与空间耦合从而实现目标物品识别<sup>[9]</sup>。RFID 系统通常包含标签读写器和电子标签：标签读写器可与后台数据库通信，具有强大的数据存储和处理能力；电子标签由天线和射频芯片组成，一般可采用纸质、塑料、陶瓷、抗金属等材质封装成卡片、圆扣、薄膜、植入等多种不同大小形式，进入磁场后接收标签读写器发出的射频信号，凭借感应电流产生的能量发送出存储在芯片中的物品信息。

RFID 在高校资产盘点和图书借还场景中应用广泛<sup>[10-12]</sup>，在实验室管理中也有较好的适用性和实用性。RFID 电子标签可以粘贴在各类实验用锂离子电池表面以及护目镜、降噪耳塞、防毒面具和实验服等 PPE 内衬或表面，通过手持标签读写器进行隔空信息写入和权限编辑。同时，实验室出入口设置标签读写器能够即时读取电子标签信息并实时记录，对样品信息不符、未正确佩戴个人防护装备和将样品带出实验室等特殊情况下发出声光预警，杜绝可能发生的火灾和爆炸等事故。

### 2.2 传感器和执行装置

在锂离子实验室可用于安全管理的传感器主要包括人体传感器、烟感报警器、室内空气质量综合检测设备和智能门锁，执行装置主要是压缩气体阀门、换气风机开关和消防装置阀门等。

人体传感器从技术角度分为红外检测，多普勒微波以及毫米波雷达，多通过 Zigbee 网关无线通讯。在实验室内人体传感器主要用于感应联动和人体状态侦测，一般安装在实验室出入口和实验室内屋顶。在实验室出入口的传感器主要用于及时激活与其联动的 RFID 标签读写器和智能门锁，采用成本较低的多普勒微波技术是理想的电子开关量传感器。安装在实验室屋顶的可采用毫米波雷达技术，可精确分区、多目标监测人体空间位置、动作方向和接近距离，精确识别站立、坐下或跌倒等人体姿态。一旦发现有人未着 PPE 进入试验区域或

携带锂离子电池样品离开试验区域，可及时发出语音提醒；若人员出现意外跌倒或其他不适呈现的非正常人体姿态，可及时发出报警信息。实验室管理人员通过手机收到警示信息后，可及时查看摄像头或联系值班人员现场查看处理。对于承担涉密项目的实验室，采用毫米波雷达技术的人体感应器能够实现无感化的信号侦测，无需采集实时画面，更易满足科研人员的保密要求。

烟感报警器利用烟雾粒子对光的散射原理当烟雾进入报警器时，烟雾粒子会散射光源发出的光线，导致光敏元件接收到的光线强度发生变化。光敏元件将这种变化转换成电信号，当这个信号低于预设的阈值时，烟雾报警器就会发出警报。烟感报警器应安装在有烟产生的试验区外，确保因排烟失败或其他原因导致的烟雾扩散。锂离子电池样品库房也应该安装烟感报警器，能够及时知晓试验后的锂离子电池是否发生自燃。烟感报警器通过 Zigbee 网关无线通讯，可与换气系统联动，强制开启换风。

室内空气质量监测仪在实验室中能够全面检测温度、湿度、PM2.5 和 CO2 等空气指标。虽然现在新建实验室多配置新风系统，但锂离子电池实验室因工况复杂、现象激烈导致室内空气质量堪忧。室内空气质量监测仪通过 Zigbee 网关联动新风系统主动调节室内环境，CO2 浓度过高时，自动开启并加大新风换气量，保持实验室内空气时刻新鲜；PM2.5 含量过高时，开启空气净化系统自动滤除有害颗粒物确保科研人员健康呼吸。

智能门锁通常集成 RFID 标签读写器和人体传感器，可选配摄像头作为人脸识别和远程监测。通过 Zigbee 网关进行门锁状态实时监测、远程开门和访客视频通话等，还可远程推送告警至实验室管理人员手机。

实验室内针对安全管理应用的执行器主要为电动执行器，主要嵌入实验室气路、风机和消防装置中。其工作原理简单可靠，实现受控或自动切断气体供应、强制排风换气和紧急喷射灭火等安全动作，消除事故。

### 3 锂电池实验室安全管控技术的运行状况分析

锂离子电池的使用条件分为正常使用、合理可预见的误用和滥用，而高校实验室对锂离子电池的测试主要分为常规试验和滥用试验，均不属于正常使用条件。一些在试验过后仍保持原有形态的锂离子电池样品，可能已经发生内短路，容易出现热失控导致的冒烟和起火，具有较高的火灾隐患。以圆柱形 18650 锂离子电池为例，送达实验室专用库房后待登记。将合适尺寸的 RFID 电子标签贴在电池柱体表面并设置为管理员修改模式，通过标签读写器将相关信息内容录入标签，如表 2。

表 2 录入 RFID 电子标签的锂离子电池样品信息

| 电池信息 | (示例)         | 电池信息       | (示例)          |
|------|--------------|------------|---------------|
| 样品编号 | 240607SX-001 | 正极材料       | 磷酸铁锂 (LFP)    |
| 入库时间 | 20240606     | 额定容量 (mAh) | 1800-2600     |
| 品牌   | 三星           | 标称电压 (V)   | 3.6-3.7       |
| 封装形式 | 圆柱形          | 使用人        | 刘二            |
| 型号   | 18650        | 存放位置       | 普通样品区 B 柜 3 层 |

进行锂离子电池试验的实验室在最初设计阶段要针对锂离子电池试验的高危险性做好物理空间的隔离<sup>[13]</sup>。锂离子电池实验室应严格分为试验区和非试验区。试验区内留有样品通道、不同试验目的的测试区、试验准备区和样品库房，门口设置标签读写器，如图 1 所示。

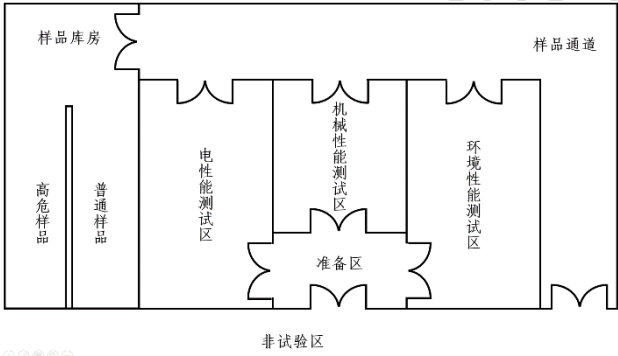


图 1 锂离子电池实验室分区

实验准备区可作为辅助功能区域使用，可分别通向不同实验目的的测试区，是日常实验人员出入、记录和观察的主要区域。样品通道是锂离子电池样品从非试验区进入样品储存区的专用通道，一般用于新进样品入库和废弃样品处置。实验人员可在不同测试区经由样品通道进入样品库房，完成锂离子电池样品的取用和暂存。只要贴有 RFID 标签的锂离子电池样品经过各区域时，门口的标签读写器即时读取标签信息至管理系统，对样品和测试区不匹配、未正确佩戴个人防护装备和将样品带入非试验区等情况发出声光预警，杜绝可能发生的火灾和爆炸等事故。

锂离子电池样品分为试验前、试验中、留观和待处置四种状态，用于指导储存区域的分类隔离存放<sup>[14]</sup>。通过标签读写器定期对实验室储存区内的锂离子电池样品进行查验，及时了解种类、状态、数量等安全管理信息，使整个锂离子样品信息管理环节更加地高效、准确和科学合理。表 3 是锂离子电池在试验过程中的各种数据信息的示例。

表 3 录入 RFID 电子标签的试验信息

| 试验信息（示例）                                                                                                                                             |                                                                                                                               |          |               |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|---------------|
| 样品编号                                                                                                                                                 | 240507SX-001                                                                                                                  | 操作人      | 刘二            |
| 开始时间                                                                                                                                                 | 20250607/1000                                                                                                                 | 结束时间     | 20250607/1130 |
| 测试项目                                                                                                                                                 | 电性能试验                                                                                                                         | 测试内容     | 外短路           |
| 2025 年 6 月 7 日上午 10 时，对编号 240607SX-001 的锂离子电池<br>试验过程表述 <div>             样品进行电性能测试，测试内容为外短路。<br/>             样品外壳涨破，出现漏液，未见明火和爆炸。           </div> |                                                                                                                               |          |               |
| 样品是否需要留观                                                                                                                                             | <input checked="" type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否                                                              | 样品留观完成时间 | 20250608/2330 |
| 样品状态                                                                                                                                                 | <input type="checkbox"/> 试验前 <input type="checkbox"/> 试验中 <input checked="" type="checkbox"/> 留观 <input type="checkbox"/> 待处置 |          |               |

#### 4 结语

锂离子电池是现阶段新能源交通和电力系统赛道的重要科学研究方向，相关安全问题正慢慢凸显，做好高校实验室锂离子电池的安全管理具有重要意义。根据高校危险化学品“全周期”的管理经验，智能管控技术应用于锂离子电池实验室可以大幅提高实验室的安全防护的水平，降低安防工作的强度，提高科研人员的工作环境的安全性和舒适度。通过强化实时监管力度，传感器和执行器通过场景联动功能进行追踪和预警，并能够将锂离子电池的状态及时反馈给管理人员，最大程度保护实验人员安全，为高校开展锂离子电池安全试验提供管理新思路 and 参考。

#### 参考文献

- [1] 张良,张得胜,陈克,等.基于模组加热的新能源汽车火灾试验研究[J].安全与环境学报, 2023,23(10):3600-3605.
- [2] 李晋,王青松,孔得朋,等.锂离子电池储能安全评价研究进展[J].储能科学与技术,2023,12(07):2282-2301.
- [3] 杨旭,戴妙妙,徐微,等.锂电池检测实验室的风险分析与应对[J].电池,2023, 53(01):83-87.
- [4] PING P, KONG D P, ZHANG J Q, *et al.* Characterization of behavior and hazards of fire and deflagration for high-energy Li-ion cells by over-heating[J]. Journal of Power Sources, 2018, 398:55-66.

- 
- [5] 赵丽香,何鹏林,王晓冬,等.从标准化看锂离子电池安全准入与监管趋势[J].电池,2023,53(05):471-476.
- [6] 陈素华,白莹.锂离子动力电池热失控机理及热管理技术研究进展[J].中国科学基金,2023,37(02):187-198.
- [7] 林震,田浩,周晓蓉,等.储能系统锂离子电池火灾抑制技术分析和研究[J].消防科学与技术,2021,40(12):1793-1796.
- [8] 刘博睿,虞振飞,刘云飞,等.实验室锂离子电池安全性问题与管控措施研究[J].实验技术与管理,2023,40(S1):53-57.
- [9] 寇广岳,魏国珩,平源,等.RFID安全认证协议综述[J].计算机工程与科学,2023,45(01):77-84.
- [10] 崔琳,丁立,陈定江,等.高校资产管理中的物联网应用[J].实验技术与管理,2018,35(06):257-260.
- [11] 冯银花.高校智能书柜应用场景探讨[J].图书馆学研究,2021(16):44-50.
- [12] 孟令军,李臣亮,姜丹,等.高校实验室危险化学品安全管理实践[J].实验技术与管理,2019,36(02):178-180.
- [13] 莫梁君,张海娟,陆瑞强,等.动力电池实验室检测安全风险控制[J].电池,2020,50(04):380-382.
- [14] 尹振斌.锂电池检测实验室的安全工作[J].电子质量,2018,No.381(12):66-67+74.