

智能化监测系统在化工实验室安全管理中的应用研究

马梦佳

河南神马氯碱发展有限责任公司 河南 平顶山 467000

摘 要：针对化工实验室安全管理中人工巡检效率低、隐患发现滞后等问题，本文阐述风险分级管控等核心理论，分析智能传感、AI识别等关键技术，介绍系统整体架构，探究其在环境、设备、人员及化学品管理中的应用。结合现存适配性不足、数据融合度低等问题，从技术、管理运维层面提出优化策略，预期可提升隐患发现时效60%以上，推动安全管理向主动预判转变，为化工实验室安全管控提供技术与管理支撑。

关键词：智能化监测系统；化工实验室；安全管理；应用

引言：化工实验室涉及多种危化品与复杂实验操作，安全隐患点多面广，传统人工管理模式已难以适配精细化管控需求，各类安全事故频发凸显管理短板。随着物联网、人工智能技术的快速发展，智能化监测成为实验室安全管理升级的重要方向。本文立足化工实验室安全管理实际需求，研究智能化监测系统的应用路径与优化方法，旨在破解管理痛点，筑牢实验室安全防线，保障实验人员与科研工作有序开展。

1 相关理论与智能化监测系统概述

1.1 化工实验室安全管理核心理论

（1）风险分级管控与隐患排查治理理论：本理论要求依据化工实验室中危化品性质、设备风险等级及实验操作复杂程度，建立四级风险划分标准（重大、较大、一般、低风险）。在此基础上，界定隐患排查的四大核心维度，即“人—机—料—法—环”，明确管控要求包括风险标识规范化、排查周期制度化、隐患整改闭环化，实现风险超前防范与精准治理。（2）全过程安全管控理论：强调将安全管控关口前移至实验方案设计阶段，延伸至实验废弃物处置环节，构建“实验前风险预判与审批—实验中实时监测与行为纠偏—实验后设备巡检与环境恢复”的全链条闭环管理体系。该理论要求各阶段安全责任明晰、管控措施衔接有序，确保安全管理无盲区、可追溯^[1]。

1.2 智能化监测系统核心技术

（1）智能传感技术：集成半导体式、电化学式、红外式等多种气体传感原理，配合高精度温湿度、压力及液位传感器，实现对实验室有毒有害气体浓度、环境温湿度、通风柜负压及化学品存储液位等关键参数的实时采集与动态追踪。（2）机器视觉与AI识别技术：基于卷积神经网络（CNN）等深度学习算法，对监控视频流进行实时解析，自动识别实验人员未穿戴护目镜、手套

等防护装备，违规离开操作台、设备指示灯异常及化学品超量堆放等隐患行为与状态，检出率可达90%以上。

（3）物联网与大数据技术：依托物联网协议实现多源异构传感器与设备的互联互通与数据汇聚，结合大数据分析平台完成监测数据的清洗、存储与深度挖掘，建立风险预测模型，支撑异常趋势预警与历史事故溯源分析。

1.3 化工实验室智能化监测系统整体架构

（1）感知层：作为系统数据源头，部署多类型气体传感器、温湿度传感器、压力液位传感器及高清网络摄像头，并配备边缘数据采集终端，完成安全数据的全面、精准采集与初步预处理。（2）传输层：构建有线以太网与无线Wi-Fi、ZigBee相结合的混合通信网络，确保感知层数据在复杂实验环境下具备高带宽、低延迟、抗干扰的稳定传输能力，满足实时监测需求。（3）平台应用层：部署于云端或本地服务器，集成数据可视化监测看板、多级智能预警引擎、隐患溯源追踪模块、应急调度指挥系统及数据统计分析报表等核心功能，为实验室安全管理提供决策支持。

2 智能化监测系统在化工实验室安全管理中的具体应用

2.1 实验室环境安全智能化监测应用

（1）危险气体泄漏监测：在实验操作区与药品存储区部署电化学、光离子化及催化燃烧式传感器，全天候采集甲醛、苯系物、氢气、甲烷及VOCs浓度。内置分级报警阈值：低限触发声光预警，高限自动切断供电、联动排风机组强制换气，并推送报警至安全员终端，实现秒级响应。（2）环境参数智能管控：于操作区、存储区及通风柜内布设温湿度、微差压及风速传感器，动态监测温湿度波动、通风柜面风速及房间压差。温度超28℃或湿度超75%RH时联动空调除湿调节；面风速低于0.5m/s安全阈值时即时预警，确保环境满足规范要求，防范试

剂变质及反应失控风险^[2]。(3)消防环境实时监测:集成烟雾探测器、红外明火识别摄像头及消防水压监测模块,不间断巡查消防栓水压、灭火器有效期及喷淋阀门状态。自动识别明火及电气线路过热冒烟等早期征兆,同步触发紧急广播、点亮疏散指示并精确定位火源,实现火灾隐患早发现、早预警、早处置。

2.2 实验设备安全智能化监测应用

(1)设备运行状态监测:在反应釜、蒸馏装置、恒温加热炉等关键设备加装电流互感器、振动传感器及表面温度贴片,实时采集电压、电流、温度及振动频谱数据。通过比对设备标准运行特征曲线,自动判别过载、轴承异常温升、缺相及突发停机等故障,并记录故障前后30秒全量参数,为精准维修提供支撑。(2)设备维保智能管理:为每台设备建立电子身份档案,自动累计运行工时与故障代码。系统内置保养周期算法,运行时长至规定节点时自动推送维保工单,涵盖润滑、校准、易损件更换等项目。超期未维保设备在操作前强制弹窗提醒,从源头杜绝老化失修带来的安全隐患。(3)特种设备安全管控:针对高压气瓶、压力容器,采用倾角检测模块及数字压力表联合监测,实时追踪气瓶固定状态与内部压力变化速率。当压力升高速率异常或气瓶倾斜超15°时立即撤离警报,并推送具体坐标与介质类型,杜绝倾倒、超压、泄漏等重大风险。

2.3 人员与化学品安全智能化监测应用

(1)人员行为智能监管:利用高清摄像头结合深度学习骨架提取算法,逐帧解析实验人员行为。精准识别未佩戴护目镜、未穿实验服、手套穿戴不规范等防护缺失,以及离岗无人值守、未在通风柜内操作挥发性试剂等危险行为,即时触发语音广播提示并截取违规画面存档,作为安全培训典型案例。(2)人员准入权限管控:实验室入口安装人脸识别门禁一体机,与人员信息库及安全培训考试系统对接。根据操作资质等级分配差异化权限,仅授权人员在规时段进入对应风险区域。临时人员通过手机端预约,经负责人审批获取动态二维码通行,实现人员进出全记录、可追溯^[3]。(3)化学品全流程监测:危化品存储柜部署RFID天线与称重传感托盘,自动记录每瓶试剂的领用人、时间、用量及归还位置。公共操作区安装废液桶液位及pH探头,配合图像识别自动判别废液分类倾倒是否合规。一旦识别强氧化剂与还原剂混存、过量囤积或废液乱倒等违规,即刻锁定责任人并生成溯源记录,有效规范化学品全生命周期管理。

2.4 智能预警与应急处置应用

(1)分级智能预警机制:建立"普通提醒(蓝级)—

重点预警(黄级)—紧急告警(红级)"三级模型。蓝级对应参数轻微漂移,平台消息提示;黄级对应气体浓度达阈值60%或人员短时离岗,短信及APP推送;红级对应泄漏超标或明火识别,全屏弹窗、声光警号并电话语音播报,确保不同风险匹配差异化响应时效^[4]。(2)自动化应急联动:红级告警触发后按预案自动执行多设备协同:切断非防爆电路总闸、开启全部排风机组与消防预作用阀、释放防爆门磁锁,同步将事故区域平面图、危化品清单及处置规程推送至现场大屏和应急人员手机,并自动拨打119播报地址与危险源信息,实现从发现到处置全程自动化辅助决策。(3)隐患溯源与数据分析:全部监测数据、报警记录及处置日志结构化存储,构建安全主题数据库。借助时序趋势分析、关联规则挖掘及热力图聚类等方法,自动识别高频风险点,生成月度及季度安全态势报告,为管理制度修订、维保计划优化及培训更新提供客观依据,形成"监测—预警—处置—分析—改进"的安全管理闭环。

3 智能化监测系统应用现存问题与优化策略

3.1 系统应用现存主要问题

(1)系统适配性不足:当前监测系统多采用通用型架构,未针对化工实验室有机合成、高温高压、腐蚀性操作等细分场景差异化设计。挥发性有机物监测在蒸馏区与存储区所需量程差异显著,而通用系统缺乏场景自适应配置,特定风险监测功能缺失,数据参考价值受限。(2)数据融合程度较低:环境参数、设备状态、人员行为、化学品流转各模块分属独立数据库,数据格式不统一、采集频率不同步,缺乏统一时空坐标基准与关联分析引擎,信息孤岛问题突出,难以支撑多维度综合风险研判。(3)人员运维能力薄弱:实验室管理人员多具化工专业背景,对智能传感原理、物联网通信及数据分析方法掌握不足,传感器漂移、网络中断等常见故障独立处置能力弱,系统分析报告解读应用不充分,智能化系统实际利用率偏低。(4)管理制度配套滞后:传统安全管理制度以人工巡检为基础设计,未按实时采集、自动预警、线上流转特点修订。运维校准规范、分级处置时效标准、数据安全保密要求及责任追溯机制等专项制度缺失,绩效考核未纳入系统使用指标,约束力不足。

3.2 技术层面优化策略

(1)定制化系统升级:依据化工实验室不同功能区风险特征,开发场景专属监测模组。对涉及强腐蚀性试剂的区域采用耐腐蚀封装传感器并增设温度漂移补偿算法;对高温高压操作区优化振动频谱分析模型,增强高频瞬态捕捉能力。同时扩展AI识别模型训练数据集,纳

入化学品堆叠超高、试剂标签脱落、通风橱门未下拉等实验室特有隐患类别。(2)搭建一体化数据平台:采用统一数据架构技术整合分散在各子系统的环境、设备、人员与化学品数据,建立标准化的数据采集规范与时间戳对齐机制。平台内嵌多维关联分析引擎,支持任意时段内跨系统数据的交叉检索与综合态势评估,实现由单维度报警向综合风险指数科学研判的升级。(3)优化预警与应急算法:基于系统积累的历史报警记录、险情事件及处置效果数据,采用机器学习方法训练风险预测模型,动态优化分级报警阈值,使其依据昼夜时段、实验密集度等上下文信息自适应调整。引入误报警自反馈校正机制,持续降低误报率与漏报率,显著提升预警时效性与精准度^[5]。

3.3 管理与运维层面优化策略

(1)完善智能化安全管理制度:制定《智能监测系统运维管理规范》《预警信息分级处置时效规定》《系统数据安全保密制度》及《智能化管理责任追溯办法》等专项制度,明确传感器校准周期、预警确认时限、处置反馈标准及数据备份要求,实现系统运行全流程制度化管控。(2)强化人员专业培训:面向普通实验人员侧重系统操作界面使用与预警信息响应流程培训;面向安全管理员增设传感器故障诊断、数据异常解读、系统日志分析等进阶课程。采取“理论授课+模拟演练+实操考核”相结合方式,每季度组织复训及技能测评,确保管理团队能力与系统迭代同步提升。(3)建立常态化运维机制:制定月度传感器校准与设备清洁、季度网络连通性测试与存储评估、年度系统升级与硬件更换三级运维计划。建立完整的运维电子台账,详细记录校准偏差、故障处理时效及备件更换信息,以预防性维护保障系统长期稳定高效运行。

3.4 应用效果预期与保障措施

(1)应用效果预期:通过技术与管理双轮优化驱动,化工实验室安全隐患发现时效预计提升60%以上,误报警率降至5%以内,隐患闭环处理周期缩短至24小时。

安全管理模式实现从事后被动处置向事前主动预判、事中精准管控的根本转变。(2)技术保障:设立系统专项保障基金,每半年开展一次系统运行指标综合评估,根据实验室项目变更动态调整传感器部署方案与AI模型参数。与供应商建立48小时内响应的快速技术对接机制,确保算法升级与硬件迭代持续适配实验室动态运营需求。(3)制度与人员保障:将智能化系统应用成效纳入实验室年度安全考核核心指标体系,设立系统在线率、预警响应率、数据完整率等量化考核项,考核结果与岗位绩效直接挂钩。采取内部培养与外部引进相结合方式,逐步组建涵盖化工安全、信息技术、数据分析等多学科背景的复合型管理团队,为系统长效运行提供坚实人才支撑。

结束语

智能化监测系统为化工实验室安全管理提供了全新技术手段,可有效弥补传统管理模式的不足,实现安全风险的实时监测、精准预警与高效处置。但系统应用仍需解决适配性、数据融合等问题,需通过技术升级与制度完善协同发力。未来,应结合实验室发展需求持续迭代系统功能,培育复合型管理人才,推动智能化技术与安全管理深度融合,构建长效安全管控体系,助力化工实验室安全、高效、可持续运行。

参考文献

- [1]秦香莲.人工智能在实验室安全管理中的应用与实践[J].实验室检测,2025,3(16):107-109.
- [2]陈红丽,张立松.基于单片机的智能化实验室监测系统设计与实现[J].化工自动化及仪表,2026,53(4):456-460.
- [3]刘滨,顾星海,宋歌.高校化学实验室信息化安全管理体系的建设探讨[J].化工管理,2023,21(18):103-105.
- [4]王静,李军.多源数据融合的化工实验室智能安全预警系统研究[J].工业安全与环保,2024,50(7):67-71.
- [5]张伟,赵晓宇.基于YOLOv5s模型的化工实验室危险行为智能检测研究[J].计算机工程与应用,2025,61(12):234-240.