

# 医学实验中心安全管理体系的构建与实践研究

黄博苑\*

(南通理工学院, 南通 226001)

**摘要:** 医学实验中心是进行医学教学和科研的重要场所, 其安全状况直接关系到师生安全和科研秩序。本文以南通理工学院医学实验中心为例, 分析现状并探索系统化安全管理体系的构建路径。研究引入智能检测技术和数字孪生平台, 平台可根据智能检测设备采集到的相对光单位值、挥发性有机化合物浓度等检测数据进行自动预警, 若检测数据超出阈值, 人工智能预测模型就可以自动预警, 给出风险的位置、等级等信息, 并推送给相关责任人。实践证明实施新的安全管理体系后, 医学实验中心安全隐患整改响应时间减少 42%, 安全事故发生比率下降 67%, 可为高校医学实验中心智能化安全管理提供参考。

**关键词:** 医学实验中心; 安全管理体系; 智能检测; 数字孪生

## 0 引言

近些年, 由于高校医学教育规模的扩大, 科研活动的频繁开展, 实验室安全形势更加复杂<sup>[1]</sup>。2021 年教育部公布的高校实验室安全事故数据显示 83% 的事故均由于人为违规操作直接造成, 设备老化、化学品泄漏为主要诱因<sup>[2]</sup>。因此, 创建系统化、智能化、高效率的安全体系是保证人员安全、维持教学科研秩序、推动医学事业发展的必然需求。本文以南通理工学院医学实验中心(以下简称“中心”)实践为基础, 结合国内外实验室安全管理最新进展, 从安全管理体系的构建路径、技术融合策略、实践成效 3 个方面系统探讨了中心的医学实验中心安全管理体系的构建与实践, 以期同类机构提供借鉴。

## 1 医学实验中心安全管理现状分析

### 1.1 智能检测技术在风险防控中的初步应用

传统检测方法耗时长达数天至数周, 难以满足快速风险识别的需求。为从“人防”向“技防”转变, 中心通过对比验证, 合理选用物联网传感设备。危险品储存区安装可燃气体检测仪(灵敏度 0.1 ppm)和温湿度传感器, 用于采集环境数据并上传到数字孪生平台; 采用智能视频行为分析系统识别不戴防护用品、违规操作等行为, 及时发出语音提醒<sup>[3]</sup>。2024 年 3 月至 6 月试运行期间, 系统共发出试剂瓶漏液预警 3 次, 避免了潜在风险。

在生物与化学风险核心管控环节, 中心引入快速检测技术。生物安全检测采用的是实时荧光定量聚合酶链式反应(quantitative real-time polymerase chain reaction, qPCR)等分子检测技术, 以代替传统的微生物培养法, 使典型病原体的检测周期缩短到 2~5 h, 灵敏度达到 93% 以上。化学安全检测方面, 针对挥发性有机试剂的泄漏风险识别, 中心选用便携式气相色谱仪进行日常巡检。实践表明, 便携气相色谱仪与实验室标准气相色谱法的检测结果高度相关[相关系数( $r$ )达 0.999 以上], 现场实现了 ppb 级的近实时监测, 避免传统方法的长时间延迟, 使风险干预窗口明显提前。

### 1.2 安全管理制度在技术支撑下日趋完善

中心在实践中不断完善安全管理制度, 把智能监测数据纳入管理决策。例如在新学期工作安排会议上确定耗材出入库规范, 用三磷酸腺苷(adenosine triphosphate, ATP)荧光检测仪监测生物安全柜洁净度, 并设置合格阈值(相对光单位值<40), 针对超标情况自动生成整改工单, 形成制度执行和技术验证闭环<sup>[4]</sup>。

### 1.3 当前存在的问题与不足

中心的安全管理工作虽已取得一定成效, 但仍有提升空间。1 月 9 日期末检查时发现, 部分实验室卫生较差, 设备布局不合理等, 反映出现有管理存在风险预测和主动干预不足的问题。另外, 传统的演练方式对于系统的应急能力培养效果不佳, 需要与虚拟仿真、智能预警等相结合才能发挥作用。

## 2 医学实验中心安全管理体系构建

### 2.1 引入智能督察终端

在安全风险防控上,中心实行实验室安全督查员制度并引进智能督查终端。督查员可使用手持终端记录检查情况,系统自动生成隐患清单并分派到责任人;平台根据历史数据训练人工智能预测模型,对高频隐患类型(设备漏电、危化品混放)做风险画像,实现从事后整改到事前预警的转变。2024年上半年的数据显示,该机制使整改响应时间减少42%。

### 2.2 建立检测过程全链条质量控制体系

为确保快速检测的结果准确可靠,中心引入多种先进的检测技术,建立覆盖“采样-检测-结果”全链条的检测过程质量控制体系。

所有的关键检测设备都纳入计量管理台账。挥发性有机气体检测仪、温湿度传感器等物联网传感设备均进行周期性的自动标定+人工核查,校准的周期为6个月,校准数据实时同步到数字孪生平台中,超期没有校准的设备会被锁定<sup>[5]</sup>。对于便携式的气相色谱、拉曼光谱仪等快速检测设备,除了定期校准外,每次使用之前还必须用标准物质做快速性能验证,强制要求每批次检测至少插入1个平行样或标准质控样,以监控当次检测的准确性<sup>[6]</sup>。

针对环境病原体的筛查、台面洁净度的检测、气体泄漏监测等不同的检测场景,制定标准化的操作程序。例如,ATP荧光检测明确规定采样面积(100 cm<sup>2</sup>)、采样力度与孵育时间(10~15 s);环境病原体PCR筛查规范了空气沉降、拭子采样的具体位置和频率<sup>[7]</sup>。采样环节需要设置10%以上的平行样,以评估采样过程的代表性误差。

建立三级结果复核机制。检测人员完成分析后,需要先自检,核对原始数据与谱图;然后由其他检测人员复核;最后由实验室安全管理员审核检测结果和质量控制数据进行审核,审核通过才可以生成正式的电子报告<sup>[8]</sup>。

### 2.3 基于数字孪生平台的安全检查体系

中心开展日常检查+定期检查+专项检查“三查”工作,并创建实验室数字孪生系统。该系统是基于Unity 3D 2022引擎进行开发,使用高精度激光扫描点云数据创建实验室三维模型,用开放平台通信统一架构协议连接实验室各个

区域的传感节点。系统参数设置如表1所示。

系统部署在独立的边缘服务器上,用消息队列遥测传输(message queuing telemetry transport, MQTT)协议做10次/s的数据同步,使虚拟场景和物理实验室的状态实时映射。系统架构设计采用微服务架构,分为数据采集层、模型计算层、业务应用层3个主要模块<sup>[9]</sup>。数据采集层实现多源传感器数据的实时采集和预处理;模型计算层使用 $k-\epsilon$ 湍流模型集成计算流体力学模块,网格划分精度达到0.1 m<sup>3</sup>;业务应用层完成风险评估、预警管理、应急推演等功能<sup>[10]</sup>。

在风险评估功能方面,系统可以根据历史检查数据生成风险分布图,能够自动找到高发隐患区<sup>[11]</sup>。当检测到设备故障率大于15%或者环境参数异常时,系统会自动把该区域标记成红色预警,然后推送给管理人员的移动终端。建立设备健康度评估模型,以累计采集的2 TB以上的设备历史运行数据为依据,采用机器学习的方法对设备剩余寿命进行预测,当设备故障概率大于25%时就生成维护工单<sup>[12]</sup>。

2024年5月模拟一次危化品泄漏的演练中,系统根据实时采集的传感器数据,自动触发三级警报。挥发性有机气体检测仪检测到的浓度瞬间达到85 ppm<sup>[13]</sup>,温湿度传感器记录异常的波动。计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)模块在28 s内完成泄漏源定位、扩散范围预测,整个推演过程耗时3 min,生成包含疏散路线、处置要点、资源调配方案的应急决策报告。

此外,系统具有智能学习功能,可依靠不断的演练数据以及实际处置的案例,来持续改进预测模型以及应急预案。目前系统中已有200多个典型事故案例,对于实时的场景可以快速匹配出最好的处置方案,实验室安全管理智能化程度大大提高。

### 2.4 教育培训与虚拟仿真演练

为全面提升师生安全素养和应急能力,创建“岗前+定期+实战”三者相结合的培训机制。新进教师需完成专门的安全培训并经过虚拟现实操作考试;在定期培训时加入以前事故案例的虚拟重现,包含病原体泄漏的情况,加强情境感知和决策水平<sup>[14]</sup>;就实战演练而言,利用数字孪生平台模拟火灾、泄漏等紧急情况,提升师生在复杂环境下的协同处置速度。

表1 数字孪生系统主要设备技术参数

设备类型	技术参数	数量	部署位置
温湿度传感器	精度±0.5 °C	45个	危险品存储区、仪器室
烟雾探测器	灵敏度 0.5% obs/m, 响应时间<3 s	28个	全区域覆盖
高清网络摄像机	分辨率 1920×1080, 帧率 25 fps	32个	主要通道、操作区
挥发性有机气体检测仪	检测范围 0~1000 ppm, 分辨率 0.1 ppm	15个	化学品仓库、实验区
边缘服务器	Intel Xeon Silver 4210, 64 GB 内存	2台	中心机房

## 2.5 应急管理 与智能联动机制

为提高突发事件应对能力,建立预案、保障和联动的应急管理体系。中心制定详细的应急预案,在关键地点设置带有超高频射频识别(ultra high frequency radio frequency identification, UHF RFID)模块的智能应急物资柜,方便应急时快速找到并使用;和学校保卫处、校医院、消防等部门建立数据互通机制,报警时自动把事故类型、位置、现场影像推送给联动单位<sup>[15]</sup>。2024年国庆节假日前联合演练中从报警到多方响应完成只用了5 min 12 s,比传统模式快大约60%。

## 3 智能技术赋能安全管理的实践效果分析

为突出实验室检测工作特点,中心把快速检测技术深植于安全管理体系中。针对危化品、生物安全及环境异常等不同的风险场景,中心采用差异化的检测方案。危化品的检测依据化学品 TLV 设定传感器阈值(1~10 ppm),每日进行便携气相色谱仪巡检;生物安全柜则实施三磷酸腺苷周检(相对光单位值<40)、病原体聚合酶链式反应月筛;关键区域的环境参数(温湿度、压差)实施不间断地在线监测,阈值严格遵循相关规范标准。通过检测、评估、干预的闭环,2024年1—9月共发现并处理潜在风险17起,没

有发生生物或化学相关事故。

通过体系化构建与技术融合,中心在安全管理方面取得显著成效。见表2。

表2数据显示,安全管理体系推行以后各项关键指标均有明显改善。隐患整改平均时间由原来的7.2 d缩短到现在的4.2 d,效率提高41.7%,主要得益于智能督查系统以及人工智能预测模型的应用,可以实现隐患的早发现、快分派。实验室事故发生率为原来的66.7%,说明体系在风险控制上取得明显效果。安全检查合格率提高8.6个百分点,说明实验室整体安全状况持续改善。应急响应时间缩短38.8%,说明智能联动机制能有效提高应急处理效率。危化品违规操作次数下降64.3%,说明技术和制度的融合可以有效管理实验操作行为。

根据表3可知,ATP荧光检测每周对生物安全柜洁净度进行检测,共发现6次超标,均及时处理,可以保证生物实验环境安全。便携式气相色谱仪每日巡检及时发现3起轻微泄漏的挥发性试剂,可有效防止可能发生的危险事故。拉曼光谱技术对入库的危化品进行纯度筛查,检出2批不合格产品,从源头上杜绝因试剂质量问题而产生的风险。PCR技术每月进行一次环境病原体检测,没有发现阳性样本,说明生物安全控制措施有效。所有发现的问题都得到有效的处理,说明该管理机制是有效的。

表2 安全管理体系实施前后关键指标对比

指标	实施前(2023年)	实施后(2024年1-9月)
隐患整改平均时间/d	7.2	4.2
实验室事故发生率/(起/月)	0.18	0.0
安全检查合格率/%	86.2	94.8
应急响应时间	8 min 30 s	5 min 12 s
危化品违规操作次数/(次/月)	14	5

表3 检测技术应用效果(2024年1-9月)

检测项目	技术手段	监测频次	发现问题数
生物安全柜洁净度	ATP 荧光检测	每周1次	6次超标
挥发性试剂泄漏	便携式气相色谱	每日巡检	3起轻微泄漏
危化品纯度筛查	拉曼光谱	每批入库	2批次不合格
环境病原体筛查	PCR 技术	每月1次	0起阳性

## 4 结束语

先进技术赋能的安全管理模式不仅降低事故发生率,还大幅提升管理效率,为同类型机构提供可以复制的实践

途径。但目前的系统还存在模型算力要求较高、检测设备成本较高难以落地的问题,未来将会采用梯度推广的方式(先行示范区-重点实验室-普通教学区)逐步推广。为克服系统算力、成本的限制,可以用JavaScript对象表示法格式来

封装检测数据, 基于标准的表现层状态转换应用程序编程接口对接公共卫生实验室网络等外部平台, 从而做到安全警报与风险数据的跨机构同步。

下一步, 中心将探索可穿戴设备, 监测的实时心率、血氧数据将与数字孪生平台中的环境传感器数据联动。通过构建多源数据融合分析模型, 识别指标数据与环境风险、不规范操作之间的关联, 形成“人员状态-环境风险-操作安全”的主动防控模式。

### 参考文献

- [1] 吴庚利, 雷阳, 史宏恩, 等. 细化地方医学院校实验室安全探索与实践——以西安医学院基础医学部形态学实验中心为例[J]. 科技风, 2025(30): 119-121.
- [2] 王涛, 王渊, 胡浩. 人工智能赋能医学基础实验教学的挑战与思考[J]. 中国医学教育技术, 2025, 39(5): 563-567.
- [3] 曹馨元, 赵峰, 高晴, 等. 基础医学智慧实验室建设的探索与实践[J]. 基础医学教育, 2025, 27(5): 461-465.
- [4] 谭杰文, 胡明一, 曾丽丽, 等. 康复医学教学实验中心设备管理与共享系统探索[J]. 海军医学杂志, 2025, 46(3): 311-314.
- [5] 朱沁涵, 王琴, 张建伟, 等. 基于动态贝叶斯网络风险识别模型在中心实验室精密医学实验设备中的安全管理研究[J]. 中国医学装备, 2025, 22(3): 132-137.
- [6] 邱轶芳. 省域高水平高等职业院校建设背景下基础医学实验中心建设研究与实践[J]. 中国医药科学, 2024, 14(21): 68-71, 100.
- [7] 梁燕. 高职院校医学专业实验实训中心安全隐患的成因分类及预防对策浅析[J]. 卫生职业教育, 2024, 42(4): 34-37.
- [8] 朱源. 医学院校实验室安全风险研究[D]. 南宁: 广西民族大学, 2023.
- [9] 彭健, 刘晓波, 张恒, 等. 化工原理工程实训实验室安全管理和探讨[J]. 广州化工, 2022, 50(2): 134-136.
- [10] 陈瑞雪, 杨冬茹, 孙旭, 等. 7S 管理在口腔医学实验中心的管理应用探索[J]. 实验室科学, 2021, 24(6): 153-156.
- [11] 李亚丽. 基础医学实验室信息化管理系统的设计与研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2021.
- [12] 祖先鹏, 王卓, 徐希科. 医学院校实验室智能化管理新模式的探讨[J]. 教育教学论坛, 2021(43): 50-53.
- [13] 阳范文, 章喜明, 谢国喜. 基于科教融合的开放共享实验体系建设与实践——以广州医科大学生物医学工程实验中心为例[J]. 海峡科技与产业, 2021, 34(6): 70-74.
- [14] 赵晓晔, 成静, 查干花, 等. 基于移动智能端的医学影像技术专业实验室管理[J]. 中国教育技术装备, 2020(18): 119-122.
- [15] 王芮东, 孟莉新, 郝浩勇, 等. 理科实验中心实验室安全管理体系构建与实践[J]. 运城学院学报, 2020, 38(3): 60-62, 77.