

基于物联网的危险化学品仓储环境监测 与安全预警系统研究

石 旭 (密尔克卫智能供应链服务股份有限公司, 上海 201206)

摘要: 危险化学品仓储管理是生产安全的重要环节, 传统人工检查存在效率低、风险隐患大等问题。本文综合物联网技术, 设计了一套基于传感器网络、无线传输、大数据处理与智能预警算法的危化品仓储环境监测与安全预警系统。通过实际应用测试, 系统在实时数据监测、异常识别和预警应对等方面表现优异, 为危化品安全仓储管理提供了有效支撑。

关键词: 物联网; 危险化学品; 仓储管理; 环境监测; 安全预警

中图分类号: TQ086.5; TP212; TP393.09; TP311.52 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167(2026)005-0165-04

IoT-based Research on Environmental Monitoring and Safety Early Warning System for Hazardous Chemical Warehouses

Shi Xu (Milkyway Intelligent Supply Chain Service Co., Ltd., Shanghai 201206, China)

Abstract: Warehousing management of hazardous chemicals is a crucial link in production safety. Traditional manual inspections suffer from problems such as low efficiency and high potential risks. Integrating Internet of Things (IoT) technology, this paper designs a set of hazardous chemicals warehousing environment monitoring and safety early warning system based on sensor networks, wireless transmission, big data processing, and intelligent early warning algorithms. Through practical application tests, the system has performed excellently in real-time data monitoring, anomaly identification, and early warning response, providing effective support for the safe warehousing management of hazardous chemicals.

Keywords: Internet of Things (IoT); hazardous chemicals; warehousing management; environmental monitoring; safety early warning

危险化学品应用范围广泛, 但其高危险性使仓储管理成为安全生产重点和难点。传统依靠人工检查、手工记录的模式已难以满足环境实时性、安全性和系统性要求, 急需引入新技术实现智能化升级。物联网技术通过传感器网络将环境数据实时采集、分析和处理, 实现对危险信息的快速反应。本文基于实际需求开展以下研究: ①分析环境监测与预警需求; ②设计系统总体架构; ③解析关键技术实现; ④实施测试与效果分析; ⑤提出展望和改进意见。

1 相关研究综述

1.1 物联网技术发展

物联网是指通过传感设备将物理环境信息采集并接入网络, 实现万物互联和智能管理的技术体系, 已形成感知层、网络层、应用层三层架构。在安全监测领域, 物联网应用日趋广泛, 通过部署环境传感器、摄像监控等装置实时采集数据, 利用云端或边缘计算分析识别潜在危险。近年无线传感器网络和低功耗广域网络(如 ZigBee、LoRa、NB-IoT)的发展使数据传输更高效可靠, 大数据和人工智能技术则使智能分析

与异常模式识别成为可能, 为危险化学品仓储实时监控奠定了基础。

1.2 危险化学品仓储特点与安全需求

危化品仓库通常存放大量易燃、易爆、有毒、腐蚀性物质, 环境高度危险复杂, 稍有不慎可能引发泄漏、火灾或爆炸。各国制定了严格法规标准, 我国《危险化学品安全管理条例》对储存方式、容量上限、分区隔离、防火防爆措施等均有明确规定。传统管理依赖人工巡检和经验管理, 难以及时全面掌握环境变化和 risk 累积状况。

仓储安全需求主要体现在对环境参数(温度、湿度、压力、有毒有害气体浓度等)的实时监测和异常状况的及时预警。不同化学品间的相互作用增加风险复杂性, 需对仓库环境和关键设备连续监控, 及时发现隐患并干预。近年多起事故暴露出监测预警不足的问题: 2004年重庆某化工仓库氯气泄漏爆炸造成10万居民疏散; 2015年天津港危险品仓库特大爆炸事故造成173人遇难, 主因是硝化棉高温自燃引燃硝酸铵, 缺乏对温度异常升高和干燥变质等危险征兆的有效监

测。这些案例凸显了对实时监测和主动预警的迫切需求，物联网技术为实现“透明化”监控提供了新途径。

1.3 环境监测与预警技术研究现状

基于物联网的环境监测系统是当前主流方案。王丽俐等人基于 NB-IoT 构建了危化品仓储环境监测系统，针对温湿度、光照强度、烟雾、可燃气体、气压六类参数采集，通过 NB-IoT 模块将数据上传至 OneNET 云平台，实现远程查看与反馈控制，实验表明系统监测精度高、误报率低。部分企业和监管部门已建设实际监测预警平台，集成实时监测、数据分析和报警管理功能，通过 GIS 电子地图查看监控点状态，超阈值时自动预警并通知处置，显著提升可视化感知和应急响应速度。

当前技术仍存在不足：①预警策略主要基于固定阈值，对多因素耦合导致的隐患识别不够敏锐，缺乏趋势性判断能力；②传感器可靠性和数据准确性问题不容忽视，校准不当或故障会导致误报漏报；③物联网设备引入网络安全隐患，需加强数据加密和权限管理；④缺乏统一数据标准，异构设备整合困难；⑤成本因素限制中小企业应用。改进方向包括引入机器学习算法提升预警准确性、研发高稳定性传感器、制定行业标准、强化网络安全防护等。

2 系统架构设计

本系统采用分层分布式架构，包含感知层、网络传输层和应用层（图 1）。感知层由部署在仓库的各类传感器节点组成，实时采集温度、湿度、有毒有害气体浓度等数据，通过自组网络发送至就近物联网关/边缘节点实现初步汇聚与本地处理。网络传输层通过有线或无线方式（4G/5G、NB-IoT、WiFi）将数据上传至远程服务器。应用层由云端监测管理平台和数据库组成，进行数据存储、分析和可视化，管理人员可通过 PC 端或移动 App 远程查看数据、历史记录并接收报警通知。

硬件方面，选择适合仓储环境的温度、湿度、可

燃气体和有毒气体传感器模块，以低功耗微控制器为核心搭配无线通信模块。优选通信距离远、穿透力强的蜂窝物联网方案确保传输稳定。边缘节点承担协议转换和数据汇聚功能，通过安全通道发送云端。云端平台基于 B/S 架构，服务器采用高可用数据库保存数据并运行实时分析与预警算法，通过 Web 界面、短信或 App 推送向管理人员发出预警。

软件架构分为设备端和云端。设备端运行于传感器节点和网关，包括数据采集、阈值判断、本地报警控制及网络通信模块。云端包括数据接收服务、数据库管理、后台分析算法和前端展示界面。系统采用 MQTT 等轻量级协议实现设备与云平台通信，结合 SSL 加密保障安全。平台支持多用户权限管理、数据可视化、历史趋势查询、报表导出及报警阈值调整功能，形成“端+云”一体化的危化品仓储环境监测解决方案。

3 安全预警响应流程

系统针对异常情况设计完善预警响应机制（图 2）。当传感器检测到参数超出安全阈值时，自动触发预警并执行多层次响应：

①就地声光报警：仓库现场警报装置（蜂鸣器、警示灯）激活，引起现场人员注意，提示采取初步控制措施（如通风换气）。②远程报警通知：通过短信、App 推送将含仓库编号、异常参数、时间戳的报警信息发送给负责人，确保第一时间获取预警。③自动应急控制：针对特定报警联动启用应急处置装置，如温度升高时自动启动强制通风或喷淋降温，检测到火情时联动灭火系统，在人员到达前抑制险情蔓延。④数据记录与恢复监测：预警触发后存储传感器读数、报警次数等信息供事后分析。参数恢复正常后报警复位，系统返回常规监测模式，管理人员可添加事件注释以完善风险模型。

该流程实现从异常检测到报警通知再到应急处置的闭环管理。测试显示，模拟温度超阈时系统在数秒

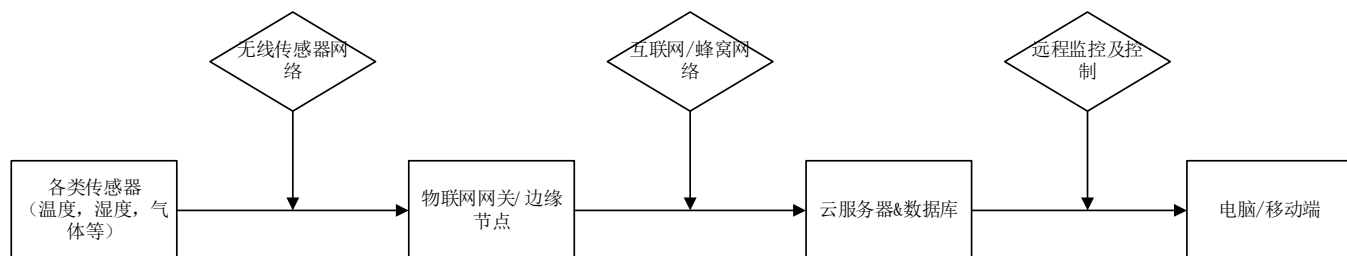


图 1 系统架构图

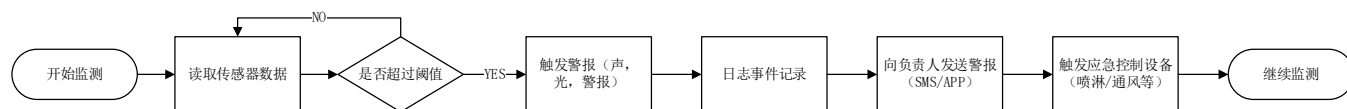


图 2 预警响应机制

内完成现场报警、远程推送和自动通风，显著优于人工巡检数小时的滞后。这种快速响应能力对避免事故具有关键作用。

4 系统测试与实际应用

4.1 测试方法与场景搭建

在 60m² 模拟仓库中部署传感器节点和网关，包括温湿度、烟雾 / 可燃气体和有毒气体传感器，覆盖不同高度和位置。采用分阶段诱导法测试功能：①正常环境长时间运行监测；②局部加热测试超温预警；③释放 CO₂ 或 CH₄ 测试气体报警；④模拟断网断电检查系统健壮性。使用校准仪器作为对照，测量从超阈值到报警的延迟，记录现场警报和远程通知时间，检查联动设备启停情况。

4.2 测试数据与结果分析

系统运行稳定，功能达标。传感器误差：温度 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 、湿度 $\pm 2\%\text{RH}$ 、可燃气体浓度 $\pm 5\text{ppm}$ 。数据上传几乎无丢包，8h 监测中云端与本地读数一致。异常场景响应迅速正确：温度测试中，环境温度从 25 $^{\circ}\text{C}$ 上升，第 12min 突破 35 $^{\circ}\text{C}$ 阈值，系统在温度达 35.2 $^{\circ}\text{C}$ 时触发预警，延迟不到 3s，现场警报灯闪烁、蜂鸣器鸣响，2s 后远程手机收到推送，排风风机自动启动，15min 后温度恢复安全值。有毒气体测试中，CO 浓度超 50ppm 时系统在 1-2s 内报警。多次测试平均延迟不超过 3s，远快于人工检测。

系统误报率和漏报率在可接受范围内。长时间运行无错误报警，短时波动接近阈值时通过滞后判断和多点验证避免抖动报警。剧烈变化时系统能准确捕获，无漏报。测试显示系统具有良好抗扰性。

4.3 数据对比分析

与传统人工巡检和独立报警器对比，本系统在监测连续性、响应速度和信息丰富度方面优势明显：

①监测连续性：人工巡检间隔长易错过隐患初期征兆。本系统 24h 不间断监测，每数秒至数十秒获取

数据，实现真正的实时监测，不会漏掉任何危险信号。

②响应速度：传统报警器仅现场声光报警且需达危险值，通知管理人员依赖巡查。本系统通过物联网瞬时传递报警信息，延迟秒级，相比人工数分钟至数十分钟的反应，极大缩短响应时间。

③信息丰富度：本系统报警信息包含具体参数数值、位置和时间，而传统报警器仅提供模糊警示。系统生成的报警日志详实记录事故发展过程数据，为事后分析提供依据。

系统也存在通信依赖和设备维护问题。短暂断网 (<30s) 时网关可缓存补传数据，但长时间中断会影响远程通知，关键场所应设置网络冗余。传感器需定期校准，电池供电节点需关注电量，测试两周电量下降约 15%，可连续工作数月，日常维护工作量不大。

4.4 实际应用示例

系统在某高校危化品仓库试点应用一个月。期间监测到一次空调故障导致温度异常升高，及时通知管理人员采取措施，避免药品受损；另一次夜间检测到可燃气体浓度轻微升高，发现储气钢瓶阀门细微泄漏并迅速处置，防止恶化。这些案例印证了系统在人工值守薄弱时段仍能保障安全，具有高灵敏度、低误报和响应快速的特点，在减少事故、保障安全方面发挥重要作用。

5 与现有监测系统的对比分析

表 1 对比了不同监测方式的优缺点。相比传统方式，基于物联网的监测系统在实时性和智能化方面突出，实现 7×24h 不间断监测和远程集中管理。云端融合分析功能使其不仅能报警，还能拓展趋势预测和隐患辨识。但物联网系统对网络基础设施和信息安全要求更高，需确保冗余可靠和安全防护。

无线传感器网络 (WSN) 兼顾传统有线和物联网优点，无需布线、安装灵活、成本低，在封闭环境下可靠性高，但通信距离有限 (如 ZigBee 单跳不超过数

表 1 不同仓储环境监测方式的优缺点对比

监测方式	优点	缺点
人工巡检	简单直观，灵活性高，无需复杂设备投入	连续性差，无法实时监测，人工成本高，可靠性不稳定
传统有线监测系统	数据可靠，抗干扰强，响应及时	部署成本高，布线复杂，扩展困难，灵活性差
无线传感器网络监测系统 (如 ZigBee)	部署灵活，成本低，功耗低，安装维护方便	覆盖范围有限，需多跳中继，信号受阻挡，电池需定期更换
物联网监测系统 (如 NB-IoT/LoRa)	覆盖广泛，远程集中监控，支持大数据分析，智能高效	依赖通信网络，安全性要求高，初期配置复杂

十米),需增加中继节点覆盖大型仓库,网络复杂度增加,且缺乏直接远程连接能力。

本系统通过运营商网络或专用物联网实现广域覆盖和远程监管,胜任大型或分散仓库的集中监控。测试表明系统在保持高精度监测的同时误报率低、响应迅速,具有明显优势。随着相关标准制定,此类系统在安全生产领域的应用前景广阔。

6 结论与展望

6.1 结论

本研究设计并实现了基于物联网的危化品仓储环境监测与安全预警系统,通过论述和验证得出以下结论:

①系统有效提升仓储本质安全水平。系统对温湿度和有毒有害气体等关键指标实时监测,实现及时预警和快速响应,显著缩短隐患发现到处理的时间窗,将事故防范从被动转为主动。实际应用成功预警潜在危险并指导采取措施,验证了实用价值。

②集成多项技术构建稳定可靠的物联网架构。系统采用传感器网络、NB-IoT通信、云平台分析等技术形成端到端解决方案。测试证明架构设计合理,传感器数据采集准确,无线传输稳定高效,云端可靠处理海量数据,前端及时反馈用户。系统具有一定容错和冗余设计,适应现场复杂环境,实现现场与远程、人工与自动的结合。

③系统性能指标达到预期要求。测试显示环境参数监测精度高,数据上传延迟和预警响应延迟均在秒级,预警阈值设置合理,有效避免误报漏报。相比国内外同类研究,本系统在保障监测全面性的同时实现更低误报率和更快响应,功能完善程度具有优势。

④研究成果具有较好通用性和推广前景。本文方法不仅适用于危化品仓库,也适用于化工厂原料库房、实验室危险品储存间等存在环境安全风险的场所。系统架构具有通用性,传感器种类和阈值可灵活调整。在国家倡导“工业互联网+安全生产”背景下,本系统契合利用物联网技术加强危险源监控的趋势。

6.2 展望

尽管取得一定成果,仍有待完善之处,未来工作可从以下方面展开:

①引入智能分析与决策支持:积累运行数据后引入机器学习和大数据分析,建立危险状态预测模型,实现由“事后报警”向“事前预警”飞跃。开发决策支持系统,在报警时提供处置建议,提高应急决策科学性。

②融合更多传感与监控手段:集成视频监控、图像识别技术,实现全方位感知。报警触发时同步调取

现场视频,利用图像识别判断明火或人员受困情况。引入射频识别(RFID)技术对危化品包装标识管理,联动环境监测数据,实现“物-环境”关联立体监控。

③提高系统安全性与鲁棒性:强化数据传输和存储安全,采用区块链保障数据不可篡改,完善身份认证和权限控制,防范黑客入侵和数据泄露。采用冗余架构设计,关键传感器设置冗余节点交叉验证,通信链路配置多条路由自动切换,防止单点故障。

④标准规范与监管平台对接:参与制定行业标准规范,使系统具备更好兼容性和通用性,实现监管部门对重大危险源的远程实时监管,形成企业自主监测预警与政府监管相结合的模式,提升全社会危化品安全保障水平。

7 结语

总之,本研究搭建的监测预警系统在实验和初步应用中展现良好性能和应用价值,为危化品仓储安全管理提供智能化、实时化技术手段,有望显著降低事故概率,保障生命财产安全。随着技术发展和完善,此类系统将更加成熟普及,在危险化学品安全管理乃至更广泛的工业安全领域发挥更大作用。

参考文献:

- [1] 胡国强. 基于6LoWPAN和WLAN的危化品实时监测系统[J]. 化学工程与技术, 2016(51):139-144.
- [2] Sun, L., Tian, H. Design and Implementation of the Safety Monitoring System of Chemical Toxic Gas Based on ZigBee Wireless Communication Technology [J]. Chemical Engineering Transactions, 2018(71):397-402.
- [3] 王丽俐, 毛雯雯, 施炯. 基于NB-IoT的危化品仓储环境监测系统设计与实现[J]. 物联网技术, 2019, 9(7):36-40.
- [4] Jean-François Tremblay. Chinese Investigators Identify Cause Of Tianjin Explosion [J]. Chemical & Engineering News, 2016, 94(7):6-7.
- [5] Anonymous. IoT Gains Momentum in the Chemical Industry with its Growing Applications [J]. Alltech Magazine, 2023(11).
- [6] Samah Kamil, et al. Advancements in Chemical Materials: Exploring Smart Storage Equipment and Protection Systems [J]. Journal of Applied Engineering and Technological Science, 2024, 5(2):573-588.
- [7] 北京石油化工学院课题组. 危化品仓储安全状态智能监测技术[Z]. 2020.
- [8] 中华人民共和国应急管理部. 危险化学品重大危险源在线监控及事故预警系统建设指南(试行)[Z]. 2016.