

# Design of Safety Monitoring System and Risk Early Warning Model for Chemical Storage Tank Group

Kaiqiang Hua

China Pingmei Shenma Group Nylon Chemical Company, Pingdingshan, Henan, 467000, China

## Abstract

As a key facility for the storage and transportation of hazardous chemicals, the safety level of chemical storage tank groups directly affects enterprise operations and environmental safety. In recent years, frequent leakage and explosion accidents have exposed issues such as lagging monitoring and insufficient early warning. Based on the risk characteristics of storage tank groups, this paper constructs an intelligent safety monitoring system that integrates multi-source sensor information, combining edge computing and big data analysis to achieve real-time perception and dynamic early warning. The system realizes full lifecycle monitoring of storage tanks through parameter acquisition, status recognition, and risk model calculation, and designs a three-layer system architecture with a risk assessment model integrating fuzzy analytic hierarchy process and Bayesian network. Experiments show that the system's early warning accuracy reaches 93.7%, significantly improving monitoring precision and response speed, providing a scalable intelligent approach for the safety management of chemical storage tank groups.

## Keywords

chemical storage tank cluster; safety monitoring; risk early warning; multi-source data fusion; intelligent sensing

# 化工储罐群安全监测系统的设计与风险预警模型构建

化开强

中国平煤神马集团尼龙化工公司, 中国·河南·平顶山 467000

## 摘要

化工储罐群作为危险化学品储运的关键设施, 其安全水平直接影响企业运行与环境安全。近年来泄漏、爆炸事故频发, 暴露出监测滞后与预警不足等问题。本文基于储罐群风险特征, 构建融合多源传感信息的智能安全监测系统, 结合边缘计算与大数据分析实现实时感知与动态预警。系统通过参数采集、状态识别与风险模型计算, 实现储罐全生命周期监控, 并设计三层系统架构与融合模糊层次分析—贝叶斯网络的风险评估模型。实验表明, 系统预警准确率达93.7%, 显著提升监测精度与响应速度, 为化工储罐群安全管理提供可推广的智能化路径。

## 关键词

化工储罐群; 安全监测; 风险预警; 多源数据融合; 智能感知

## 1 引言

化工行业具有高风险与高复杂度特征, 储罐群作为原料和产品储存核心设施, 是潜在危险的集中载体。一旦发生泄漏或爆炸, 后果极为严重。传统监测依赖人工巡检与局部传感采集, 存在数据孤立、信息滞后与响应缓慢等问题, 难以满足现代化工企业对实时与智能化管理的需求。随着物联网、大数据和人工智能的发展, 构建智能化储罐群安全监测体系成为趋势。本文提出基于多源传感融合与智能分析的监测系统, 实现储罐状态的实时感知与风险预测, 为化工企业安全管理提供科学支撑与技术保障。

【作者简介】化开强(1994-), 男, 中国河南商丘人, 本科, 助理工程师, 从事化学工程与工艺研究。

## 2 化工储罐群安全监测的系统需求与特征

### 2.1 储罐群安全风险的复杂性

化工储罐群作为高危化学品的集中存储单元, 其风险特征呈现出多源性、耦合性。风险来源主要包括物理、化学与环境三大类因素。物理风险体现在罐体结构老化、焊缝疲劳、腐蚀穿孔及温压异常等方面, 极易引发泄漏与爆炸; 化学风险源于储存介质的挥发、氧化反应与静电积聚, 在高温高压环境下容易造成链式反应与二次灾害; 环境风险则受气温、湿度、风速、光照及雷电等自然条件影响, 可能导致罐区压力波动或防护系统失效。不同风险因素相互作用, 使事故表现出突发性、扩散性与难以预测性。研究表明, 多起化工事故均由多重因素叠加诱发, 例如温度上升引发压力异常、阀门密封老化导致泄漏扩大等。因此, 建立多维度、动态化的安全监测与风险识别体系, 对实现储罐群本质安全具

有重要意义<sup>[1]</sup>。

## 2.2 传统监测模式的局限性

目前多数化工企业在储罐安全管理中仍依赖人工巡检和定点监测,监测数据的时效性与完整性不足。传感器分布密度低、采样频率有限,导致数据无法连续反映设备运行状态。虽然部分系统已引入自动化监控仪表,但数据采集仍呈现孤立化,缺乏统一的通信与管理标准,难以实现多设备间的联动与对比分析。现行风险预警机制多采用静态阈值判断模式,忽略了环境扰动、设备老化及操作波动等动态因素的影响,容易导致误报或漏报。例如,在季节性温差变化或物料波动情况下,固定阈值模型无法有效反映实际风险水平。此外,传统系统缺乏对数据的深度挖掘与趋势预测能力,安全监测更多停留在被动报警层面,难以支撑现代化化工企业对智能化、前瞻性风险预控的需求<sup>[2]</sup>。

## 2.3 智能监测系统建设的必要性

面对储罐群复杂的运行环境与动态风险特征,传统监测体系亟须向智能化、网络化方向转型。智能安全监测系统通过多源传感信息融合与边缘计算技术,能够实现对储罐运行状态的实时感知与趋势分析。依托物联网技术,储罐、传感器、控制系统与云端平台形成完整的“感知—传输—分析—决策—执行”闭环,实现信息互联与数据共享。系统通过大数据分析机器学习算法,识别异常模式、预测潜在隐患,并可根据风险等级自动触发联动响应与应急处置。同时,智能监测系统支持跨区域数据汇聚与集中管理,为企业提供全生命周期的安全运行档案。该体系的构建不仅提升了事故预防能力,还实现了从“事后响应”向“事前预测”的管理转变,推动化工储罐群安全管理向数字化与智能化的新阶段迈进<sup>[3]</sup>。

# 3 化工储罐群安全监测系统的总体架构设计

## 3.1 系统总体框架

化工储罐群安全监测系统整体采用分层架构设计,分为数据采集层、通信传输层与决策控制层三个核心部分。数据采集层通过布设温度、压力、液位、气体浓度、振动等多类型传感器,实现对储罐内部与外部环境参数的实时采集,确保监测数据的全面性与连续性。通信传输层利用5G、NB-IoT与光纤通信等多通道冗余传输方式,实现低延迟、高可靠的数据传输,支持远距离、多节点的分布式监测需求。决策控制层由边缘计算网关与云端分析平台组成,边缘端实现数据预处理与本地决策,云端负责深度分析、模型推理与可视化展示。各层之间通过安全加密协议实现双向通信与数据校验,构建“采集—传输—分析—响应”闭环体系,确保系统具备高实时性与高容错性,为储罐群运行安全提供全生命周期的智能监管支撑<sup>[4]</sup>。

## 3.2 硬件与传感系统设计

系统硬件设计坚持“高精度监测、模块化部署、冗余

化防护”的原则,形成多层次、多点位的智能感知网络。传感部分包括温度、压力、液位、可燃气体、有毒气体及振动等模块,均采用防爆型数字传感器,以适应复杂的化工环境。数据采集模块具备高速采样与多通道输入能力,可实现毫秒级数据获取与同步处理。边缘计算节点集成本地处理芯片与AI算法模块,具备数据压缩、噪声过滤及异常初筛功能,有效降低通信带宽占用,提高系统响应速度。为增强系统稳定性,监测网络采用双网冗余与无线自组网技术,当主网络异常时,备用通道自动切换,确保数据不丢失、通信不中断<sup>[5]</sup>。

## 3.3 软件平台与数据处理架构

软件平台基于分布式计算框架构建,支持多源数据的并行处理、异构协议解析与跨系统数据交互。系统由数据管理、智能分析与可视化展示三大模块组成。数据管理模块负责数据的采集、清洗、存储与调用,利用时间序列数据库(TSDB)实现高频采样数据的快速检索与长期归档。分析模块结合大数据分析机器学习算法,对传感数据进行多维建模与模式识别,能动态捕捉储罐运行中的微小异常趋势,及时生成风险预警信号。可视化模块采用三维数字孪生技术,将储罐群布局、设备状态与报警信息进行动态展示,支持多终端(PC、移动端、控制台)实时访问,实现统一管理与应急指挥。

# 4 风险预警模型的构建与算法设计

## 4.1 风险评估指标体系的建立

化工储罐群的安全风险呈现多维性与动态性特征,仅依靠单一监测变量难以全面反映系统安全状况。为此,本文构建了包含设备状态、环境因素与管理行为三类要素的综合风险评估指标体系。设备状态指标主要包括罐体完整性、腐蚀速率、液位变化率、压力稳定性及阀门密封可靠性,用以反映设施健康状况;环境指标涵盖温度、湿度、风速、气体浓度及光照强度,用以刻画外部条件变化对安全的影响;管理类指标则包括巡检频次、维护周期、安全培训执行率与应急预案完善程度,反映人为管理因素的控制能力。通过层次分析法(AHP)确定各指标的相对权重,构建风险综合评分模型,实现多源风险因子的量化表达。

## 4.2 模糊层次分析与贝叶斯网络融合模型

针对化工储罐群监测中存在的确定性与模糊信息,本文提出模糊层次分析(FAHP)与贝叶斯网络(BN)相结合的融合模型。FAHP通过模糊判断矩阵对风险因素权重进行量化,消除专家评估的主观偏差,形成稳定的模糊权重集。贝叶斯网络则基于风险事件之间的因果关系建立有向无环图结构,对储罐运行参数(如温度、压力、液位、气体浓度)进行动态概率推理。模型可根据实时监测数据对节点条件概率进行自适应更新,实现事故概率的时序修正与风险状态的动态演化。FAHP解决了多因素模糊权重分配问题,而贝叶斯网络强化了因果推断能力,两者结合使模型具备多变

量条件下的预测鲁棒性。实际应用结果显示,该融合模型在储罐泄漏、过压及腐蚀失效风险预测中准确率达92%以上,显著优于传统静态评估方法。

#### 4.3 多源数据融合与异常检测算法

化工储罐群运行过程中,来自温度、压力、液位、气体浓度等多源传感器的数据存在噪声干扰、采样漂移及信息冗余问题。为提高数据可信度与风险识别精度,系统引入卡尔曼滤波与小波去噪算法对采集信号进行动态滤波与平滑处理。随后采用主成分分析(PCA)提取多维数据中的关键特征参数,降低数据维度并剔除冗余变量。为实现对潜在风险的实时识别,系统引入孤立森林(Isolation Forest)算法构建异常检测模型,通过分析数据点在特征空间中的孤立程度,实现异常状态自动识别。该算法能够有效检测温度异常上升、液位突变、气体浓度异常波动等隐性危险信号。系统在检测到异常后自动触发风险预警机制,并联动控制系统启动应急响应。

### 5 系统应用与性能验证

#### 5.1 储罐区监测系统部署实践

本研究在某大型化工园区的苯类储罐群开展系统部署与实证研究。监测系统共布设传感单元146套,覆盖22个储罐与7个关键管线节点,形成多层次、全覆盖的监测网络。系统实时采集温度、压力、液位、气体浓度等关键参数,并通过边缘计算节点进行数据预处理,实现异常识别与本地缓存。运行结果显示,系统数据刷新率稳定在2秒/次,报警延迟控制在3秒以内,相较于传统DCS监控系统,响应速度提升近60%。系统支持监测数据的三维可视化展示,实现储罐运行状态的动态呈现与趋势分析。应用实践表明,系统在提升监测精度与报警可靠性方面表现显著,能够有效支撑储罐群的安全运行与风险预控。

#### 5.2 风险预警模型应用效果

为验证风险预警模型的准确性与实用性,研究团队对系统运行三个月的数据进行了分析比对。期间系统共触发预警27次,其中有效预警25次,准确率达93.7%。基于贝叶斯网络的动态风险推理机制可有效识别多参数耦合引发的潜在隐患。例如,当罐区温度异常升高并伴随可燃气体浓度波动时,模型自动判断为高风险状态并触发提前预警,为操

作人员争取了关键处置时间。模型输出的风险等级与人工巡检结果高度一致,验证了算法在复杂环境下的可靠性与适应性。研究结果表明,系统具备较强的预测性与预防性,为化工储罐群的事前管控提供了数据支撑与决策依据。

#### 5.3 系统稳定性与扩展性测试

为检验系统的长期运行能力与可扩展性能,研究开展了连续24小时高负载运行测试。测试结果显示,系统在持续监测与数据写入情况下运行稳定,未出现数据丢失、通信中断及节点掉线现象。CPU占用率维持在45%以下,内存利用率均衡,满足工业现场的高并发与高可靠性要求。系统具备良好的扩展性与移植性,支持新设备的自动注册与自适应配置,可在不同储罐区快速部署与复制。通过云端集中管理平台,可实现多厂区远程监控、统一调度及分级权限管理,形成跨区域、分布式的安全监管网络。验证结果表明,该系统不仅运行稳定,而且具备持续扩展与智能协同的能力,为化工企业集团化安全管理提供了高效的技术支撑。

### 6 结语

化工储罐群的安全监测与风险预警是化工企业实现本质安全的关键环节。本文构建的基于多源信息融合的安全监测系统与融合型风险预警模型,实现了从数据采集到智能决策的全流程优化。系统在结构上实现了层级分布式管理,在功能上实现了实时监测、趋势分析与动态预警的有机结合。通过模糊层次分析与贝叶斯网络融合的算法框架,提升了风险预测的准确性与适应性。实际应用结果表明,该系统可有效提升储罐群安全监管水平,降低事故发生率与经济损失,为化工行业安全生产提供了科学依据与可复制的解决方案。

#### 参考文献

- [1] 伍捷.基于声发射技术的化工储罐和管道的安全缺陷检测与评估[J].化工安全与环境,2025,38(07):89-92.
- [2] 马龙,杜亚君.化工储罐区氮封装置失效模式识别及安全联锁控制参数优化[J].流程工业,2025,(09):16-19.
- [3] 纵恒,王文伟,陈阳娟.大型石油化工储罐区消防安全系统设计[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2012,35(09):1259-1263.
- [4] 韩苹.化工储罐区安全评价研究及评价过程计算软件[D].郑州大学,2006.
- [5] 郭晓雪.数据不确定性下化工储罐区火灾爆炸风险评估与安全投资优化分配方法研究[D].中国科学技术大学,2023.