

石油仓储罐区智能化监控与风险评估体系构建

李洪波（中化（蓬莱）石化储运有限公司，山东 烟台 265601）

摘要：石油仓储罐区作为石油化工行业的重要基础设施，其安全运行直接关系到国家战略能源安全、区域经济稳定及生态环境保护。随着罐区规模持续扩大、储存介质种类增多以及服役年限延长，传统人工巡检与周期性维护模式已难以满足安全风险全域感知、动态预警及高效处置的需求。构建智能化监控与动态风险评估体系，成为提升罐区安全水平的关键路径。

关键词：石油仓储罐区；智能化监控；动态风险评估；预测性维护

中图分类号：TE972 文献标识码：A 文章编号：1674-5167(2025)023-0162-03

Construction of an Intelligent Monitoring and Risk Assessment System for Petroleum Storage Tank Farms

Li Hongbo (Sinochem (Penglai) Petrochemical Storage & Transportation Co., Ltd., Yantai Shandong 265601, China)

Abstract: Petroleum storage tank farms, as critical infrastructure in the petrochemical industry, play a direct role in national strategic energy security, regional economic stability, and ecological environmental protection. With the continuous expansion of tank farm scales, the increase in the variety of stored media, and the extension of service life, traditional manual inspection and periodic maintenance models have become inadequate to meet the demands for comprehensive perception of safety risks, dynamic early warning, and efficient response. Constructing an intelligent monitoring and dynamic risk assessment system has become a key approach to enhancing the safety level of tank farms.

Keywords: Petroleum storage tank farms; Intelligent monitoring; Dynamic risk assessment; Predictive maintenance

在全球能源格局深度调整背景下，石油仓储罐区作为连接生产与消费的战略枢纽，其规模持续扩张。我国现有罐区总库容突破 8500 万 m³，存储介质涵盖原油、成品油、LNG 及化工品等高危物质。然而，随着服役年限延长、介质种类增多及环境载荷加剧，罐区安全风险呈现复杂化、链式化演变趋势。近五年行业事故统计表明，储罐泄漏引发火灾爆炸的概率达 32%，环境敏感区罐区的事故后果放大系数超过 5 倍。传统管理模式依赖人工经验判断与固定周期检修，难以应对多物理场耦合作用下的动态风险。

以某沿海 LNG 接收站为例，其 16 万 m³ 储罐群采用传统压力表监测，无法实时捕捉介质相变引发的罐内压力波动，导致安全阀异常启跳事件年均发生 3.2 次。这类事件暴露出静态监测技术的根本性局限，构建智能化监控与动态评估体系，成为破解罐区安全困境的必然选择。

1 石油仓储罐区安全风险及管理现状

石油仓储罐区安全风险源于介质特性、设备状态与环境载荷的非线性交互作用。腐蚀性成分与罐体电化学反应加速罐底板减薄；设备疲劳损伤随压力波动频率呈指数级增长；地震等突发环境载荷易引发罐体失稳。其风险演化呈现三阶段特征，初期表现为涂层脱落、密封老化等微观损伤；中期发展为罐壁减薄、法兰失效等结构性病害；后期则可能突变为泄漏、火

灾等灾难性事件，本质上是多物理场耦合下材料退化、强度衰减与工艺扰动叠加的动态过程。

当前石油仓储罐区管理存在三重系统性缺陷。监测参数覆盖不足导致关键信号缺失，如浮顶罐缺乏温度场梯度和罐壁位移监测；风险评估依赖历史均值统计，忽视设备实时状态（如呼吸阀疲劳损伤与压力波动的动态关联）；应急机制缺乏情景推演能力，难以应对连锁故障。

例如某原油储罐因未建立沉降动态监测模型，三年内发生 12cm 不均匀沉降，导致密封失效泄漏，暴露出静态设计规范与动态风险演化的深层矛盾——规范仅保障初始安全裕量，而长期运行中的材料退化、环境载荷累积及工艺扰动会引发风险的质变跃迁。这一现状凸显传统模式在风险预警时效性、评估精准性和应急适应性方面的不足，亟需构建覆盖全生命周期的动态监控与评估体系，实现从被动防御向主动防控的范式转变。

2 智能化监控体系

本文提出的“端 - 边 - 云”协同智能化监控架构，通过深度融合物联网、数字孪生与人工智能技术，构建了覆盖罐区全生命周期的动态管控体系。该架构由物联感知层、边缘计算层和云端协同层三个核心层级组成，各层级在技术实现、模型算法及工程应用层面均取得系统性突破。

2.1 物联感知层

物联感知层作为体系的数据入口，通过部署多模态传感器网络实现罐区物理场的立体化重建。其技术实现涵盖以下关键维度：①多物理场传感器集成与优化配置。采用高精度雷达液位计、分布式光纤测温系统及超声波泄漏检测仪等设备，构建覆盖罐体、附件及环境的立体监测体系。雷达液位计基于调频连续波技术，在复杂介质界面反射场景下仍保持毫米级测量精度；分布式光纤测温系统利用拉曼散射效应与光时域反射技术，实现罐体温度场的连续分布式测量，显著提升温度监测的精度与覆盖范围；超声波泄漏检测仪通过窄带相控阵技术与波束成形算法，在背景噪声环境下精准识别泄漏声波特征；②极端工况传感技术突破。针对低温介质存储需求，研发低温型光纤布拉格光栅传感器，采用特殊封装工艺在-196℃环境下保持高精度测温性能。在电磁干扰严重区域，采用光纤传感与无线HART协议混合组网，结合时分多址技术有效规避干扰，确保数据传输的完整性与实时性；③传感网络拓扑优化。基于复杂网络理论构建传感器布局模型，通过遗传算法求解最优覆盖路径，在减少传感器数量的同时提升关键区域覆盖率，优化监测效率与成本效益。

2.2 边缘计算层

边缘计算层通过数字孪生引擎实现物理空间向信息空间的实时映射，其核心技术创新体现在：①多尺度数字孪生模型构建。集成几何孪生、物理孪生与行为孪生模型，构建罐区设备的数字镜像。几何孪生利用激光扫描与BIM技术实现毫米级精度建模；物理孪生通过有限元分析与计算流体力学仿真实现多物理场耦合计算；行为孪生基于状态空间方程与扩展卡尔曼滤波算法实现实时状态估计，显著提升状态感知的实时性与准确性；②动态模态分析与异常检测。开发基于小波包变换的振动特征提取算法，建立罐体模态参数数据库，实时判别结构响应是否超越正常运行包络线。通过Mahalanobis距离异常检测模型，提前预警潜在故障，为预防性维护提供决策支持；③边缘-云协同计算框架。设计任务卸载决策模型，根据网络状态与计算负载动态分配处理任务，平衡边缘端实时性需求与云端算力资源，优化系统整体性能。

2.3 云端协同层

云端协同层通过时序数据挖掘与知识推理，实现风险演化路径的智能解析，其技术实现包含：①时空关联时序数据库与混合深度学习模型。采用InfluxDB构建多维时间序列存储引擎，集成LSTM-Transformer混合模型，通过注意力机制捕捉长程时序依赖，显著

提升泄漏事件预测准确率。迁移学习技术的应用使新罐型部署时的模型训练数据量大幅减少，加速模型收敛与部署效率；②风险传播路径挖掘与应急决策支持系统。构建动态贝叶斯网络，通过MCMC采样揭示失效模式间触发关系，量化风险演化路径。集成泄漏扩散模拟与多目标路径规划算法，为应急处置提供最优救援方案，显著提升应急决策效率与处置精准度。

3 动态风险评估体系

3.1 石油仓储罐区风险评估体系特殊性

石油仓储罐区作为高危能源基础设施，其风险评估需建立在对行业特殊风险的深刻认知基础上。动态评估体系需从两个层面实现与罐区特性的深度融合：①动态评估的时空特性适配。在时间动态性上，针对油品周转周期（如装卸作业时段）、设备检修周期（如清罐作业期）、季节气候变化（如夏季高温）三类时间维度，构建动态权重分配机制，例如夏季高温时段自动提升温度监测指标的评估权重；在空间异质性上，考虑罐区平面布局（如防火间距）、立体结构（如浮顶罐与固定顶罐差异）、地下管网（如输油管道阴极保护状态）的三维空间特征，建立分区风险评估模型。通过三维点云建模技术实现空间风险可视化；②人-机-环系统交互理论。构建“操作失误-设备异常-介质泄漏”的传导模型，分析卸油作业误操作、巡检漏检等行为对系统安全的影响路径。基于行为安全理论建立人员操作可靠性评估子模块；针对罐区广泛应用的自动控制系统（如SIS系统）、智能巡检机器人等设备，建立设备协同工作状态评估模型。通过数字孪生技术模拟设备交互过程中的故障传播路径。

3.2 动态风险评估体系的核心架构

3.2.1 多源数据融合层的建设

3.2.1.1 感知网络拓扑设计

部署分布式光纤测温系统，实现罐体表面温度场连续监测；安装声发射传感器网络，捕捉储罐焊缝微裂纹扩展信号；构建气象监测微站网络，实时采集风速、湿度、雷电活动数据；集成视频智能分析系统，自动识别人员违规操作、车辆越界等行为。

3.2.1.2 数据治理机制

建立数据清洗规则库，自动过滤传感器误报数据（如雷击干扰信号）；开发时空对齐算法，解决不同频率监测数据的同步问题；构建数据质量评价体系，设置完整性、准确性、时效性三级评价指标。

3.2.2 风险评估引擎的构建

3.2.2.1 动态指标体系设计

基础层指标：储罐壁厚剩余率、密封圈老化指数、油气浓度梯度值等；

组合层指标：区域火灾爆炸指数（综合介质存量、设备状态、环境参数）；

预测层指标：腐蚀速率预测值、剩余使用寿命（RUL）估计值。

3.2.2.2 智能算法融合策略

采用LSTM神经网络处理时间序列数据（如液位波动趋势）；应用随机森林算法评估多因素耦合风险概率；构建专家系统规则库，将行业事故案例转化为评估规则；开发迁移学习框架，实现不同罐区评估模型的快速移植。

3.2.2.3 评估周期动态调整

常规模式：每小时生成区域风险评估矩阵；

应急模式：重大操作（如油轮靠泊）期间启动分钟级评估；

事件触发模式：检测到压力异常时自动启动专项评估。

3.2.3 风险可视化与决策支持系统

3.2.3.1 三维态势感知平台

集成BIM模型与实时监测数据，动态渲染风险热力图；开发风险溯源功能，点击异常区域可追溯历史数据曲线；构建虚拟漫游系统，支持管理人员第一视角巡查关键点位。

3.2.3.2 智能决策树构建

建立标准应急场景库（如浮盘卡阻、密封圈泄漏等）；开发处置方案模拟器，预测不同处置策略的后果演化；生成动态应急预案，自动匹配当前风险等级的最佳处置流程。

3.3 体系运行保障机制与实践路径

3.3.1 全生命周期管理机制

3.3.1.1 建设期风险预控

将评估体系嵌入罐区设计阶段，通过数字仿真验证平面布局合理性；建立设备选型评估矩阵，量化不同材质储罐的耐腐蚀性能差异；制定传感器布点优化方案，确保监测网络覆盖所有风险敏感点。

3.3.1.2 运行期动态优化

建立评估模型持续训练机制，每日新增数据自动导入训练集；设置模型性能衰减预警，当评估误差率超过5%时触发模型更新；开发风险知识管理系统，将日常处置经验转化为评估规则。

3.3.2 多主体协同响应机制

3.3.2.1 部门联动体系构建

设定生产部门、设备部门、安监部门的三级响应权限，建立评估结果自动推送规则；不同风险等级触发对应部门预警，开发移动终端应用；实现现场人员与指挥中心的实时数据交互。

3.3.2.2 外部应急资源整合

对接地方应急管理平台，共享罐区周边消防资源分布数据；构建企业间互助网络，实现特殊处置设备（如大流量泡沫炮）的快速调配；建立专家远程会商系统，重大险情时启动多方视频诊断。

3.3.3 标准化与持续改进机制

①标准体系构建。制定动态风险评估操作规程，明确数据采集、模型调用、结果复核等流程。建立评估报告标准模板，规范风险等级描述、趋势分析、建议措施等内容。开发系统接口标准，确保与现有SCADA系统、ERP系统的数据互通；

②PDCA改进循环设计。计划阶段结合年度检修计划制定体系优化方案；执行阶段通过红蓝对抗演练检验系统响应效能；检查阶段采用第三方审计评估体系运行效果，处理阶段将审计结果转化为下阶段优化需求；

③人员能力提升工程，开发虚实结合的培训系统，利用VR技术模拟典型事故场景；建立岗位能力矩阵，将系统操作技能纳入关键岗位认证体系；实施“评估分析师”培养计划，培育兼具行业知识与数据分析能力的复合型人才。

4 结语

石油仓储罐区智能化监控与风险评估体系的演进，是工业互联网技术在安全生产领域深度应用的缩影。构建智能化监控系统，能够实时、准确地监测罐区的运行状态，及时发现潜在的安全隐患；通过建立风险评估体系，能够科学评估安全风险，为制定针对性的防范措施提供依据。同时，实现智能化监控系统和风险评估体系的集成，建立联动机制，能够进一步提高应急响应能力，降低事故发生率。为保障体系的顺利实施，需要加强技术、人员、制度和资金等方面的保障。未来，随着信息技术的不断发展和应用，石油仓储罐区智能化监控与风险评估体系将不断完善和优化，为石油仓储行业的安全发展提供更加有力的支持。

参考文献：

- [1] 史先召,马臣信,周宁,等.危险化学品仓储安全管理现状及对策[J].工业安全与环保,2017(7):33-35.
- [2] 戴波,安海洋,刘学君,等.面向危化品仓储堆垛三维几何重建的单目视觉标定算法研究[J].中国安全生产科学技术,2017(4):52-55.
- [3] 潘越,吴林根.高校实验室危化品安全预警评价体系设计及应用[J].实验技术与管理,2019(6):62-64.

作者简介：

李洪波(1988-)，男，汉族，山东烟台人，本科学历，工程师，研究方向为油品仓储。