

# 石油库储油罐腐蚀泄漏风险实时监测方法

江 铭 (中国石化销售股份有限公司湖北石油分公司, 湖北 武汉 430033)

**摘要:** 由于现有监测方法监测误差大, 监测用时久, 为此研究石油库储油罐腐蚀泄漏风险实时监测方法。无人机搭载的多传感器系统通过高频次环绕飞行与数据融合, 实现了罐体三维形变模型的精准构建。结合LSTM算法构建预测模型, 通过预测形变趋势, 分析形变时序特征与多源环境参数的关联性, 最终输出监控风险概率。通过判断不同等级风险概率情况完成监测。实验结果表明, 实验组的监测误差仅为0.2以下, 在监测过程中所需的时间仅为5s, 可以对腐蚀和泄漏进行早期发现和控制, 从而减少事故的风险。

**关键词:** 石油库; 储油罐; 腐蚀; 泄露; 监测风险

中图分类号: TP191 文献标识码: A 文章编号: 1674-5167 (2025) 024-0115-03

## Real time monitoring method for corrosion and leakage risk of oil storage tanks in oil depots

Jiang Ming (Sinopec Sales Hubei Petroleum Branch, Wuhan Hubei 430033, China)

**Abstract:** Due to the large monitoring errors and long monitoring time of existing monitoring methods, a real-time monitoring method for corrosion and leakage risks of oil storage tanks in oil depots is studied. The multi-sensor system carried by the drone achieves precise construction of the three-dimensional deformation model of the tank through high-frequency surround flight and data fusion. Build a prediction model using LSTM algorithm, predict deformation trends, analyze the correlation between deformation time series characteristics and multi-source environmental parameters, and ultimately output the monitoring risk probability. Monitoring is completed by assessing the probability of different levels of risk. The experimental results show that the monitoring error of the experimental group is only below 0.2, and the required time during the monitoring process is only 5 seconds, which can detect and control corrosion and leakage early, thereby reducing the risk of accidents.

**Keywords:** Oil depot; Storage tank; Corrosion; Leakage; Monitoring risks

石油库储油罐其安全稳定运行直接关系到能源供应, 由于储油罐长期处于恶劣的工业环境中, 受到介质腐蚀等多重因素的影响, 在泄漏严重时会危害生态环境。因此, 建立精准的腐蚀泄漏风险实时监测方法, 及时捕捉突发性泄漏风险。通过部署分布式传感器网络, 可实现对罐体腐蚀状态的连续采集与动态分析。结合算法从海量数据中识别腐蚀速率异常, 从而实现风险的早期预警与精准定位。使得储油罐腐蚀泄漏监测面向更加智能化的方向, 为石油库的安全管理提供更可靠的技术支撑。推动石油行业数字化转型, 提升风险防控能力。

在分析过程中, 文献[1]利用混凝土中多重散射的超声尾波信号, 定量表征混凝土内部腐蚀引起的微裂纹扩展等损伤。实际工程中混凝土结构复杂, 换能器安装位置受限, 可能无法覆盖关键区域。文献[2]在管道表面粘贴压电片作为激励-接收传感器, 通过扫频信号激发并采集响应信号, 提取峰值频率作为特征参数。结合有限元仿真建立频率-腐蚀深度模型, 实现定量监测。埋地管道受土壤耦合影响, 振动信号衰减快, 信噪比低。因此现阶段, 以石油库储油罐腐蚀泄漏风险实时监测方法为研究对象, 结合实际情况

展开研究与分析。

### 1 腐蚀泄漏风险监测

#### 1.1 无人机智能巡检的石油库储油罐三维形变模型建立

在石油库储油罐的智能巡检中, 无人机搭载的多传感器系统通过高频次环绕飞行与数据融合, 实现了罐体三维形变模型的精准构建。无人机每周执行一次环绕飞行任务, 飞行高度与速度根据罐体尺寸动态调整, 确保激光雷达点云与多光谱图像的覆盖率达到要求<sup>[3]</sup>。热成像相机通过红外波段捕捉罐体表面温度分布, 异常温升区域可能预示腐蚀或泄漏。通过扫描罐体轮廓, 生成初始点云, 多光谱传感器采集可见光与近红外数据, 用于腐蚀特征提取。由于无人机光谱图像受环境噪声与传感器误差影响, 采用贝叶斯阈值收缩对高频子带去噪。其计算公式为:

$$d_j^{(k)} = \text{sign}(d_j^{(k)}) \cdot \max(|d_j^{(k)}| - \lambda) \quad (1)$$

公式中:  $\lambda$  为阈值参数;  $d_j^{(k)}$  为高频子带系数。通过去噪后可以经过逆变换从而重构图像, 获得图像为  $\hat{I}(x, y)$ 。通过结合小波神经网络来提升图像细节, 将图像小波分解为低频与高频子带。通过神经网络训

练习低频分量并增强高频分量，获得最终重构图像。基于增强后的重构图像与点云，通过运动恢复结构与多视点立体视觉算法生成三维模型<sup>[4]</sup>。首先，利用尺度不变特征转换算法从多角度图像序列中提取特征点  $pi$ ，通过欧氏距离约束  $|pi-pj| < \epsilon$  建立特征点对应关系。运用匹配点的方式，经过不断迭代，得到相机外参数矩阵与平移向量之间的关系，其目标函数可以表示为：

$$R = \arg \min \sum_{i,j} \|xi - Rx + t\| \quad (2)$$

公式中： $xi$  为特征点归一化坐标； $t$  为平移向量。通过生成罐体稀疏点云  $pa$ ，采用多视点立体视觉算法对稀疏点云进行密集重建，生成罐体表面密集点云  $pd$ 。同时，利用 GPS 实测控制点坐标  $C=(xi,yi,zi)$  对图像进行空间标定，构建采样矩阵通过最小二乘拟合实现图像坐标与地理坐标的亚像素级匹配，确保三维模型与实际场景的空间一致性。其公式为：

$$M = \arg \min \sum_i \|C - m\|^2 \quad (3)$$

公式中： $m$  为图像像素坐标； $M$  为采样矩阵。在三维形变分析阶段，将当前周期点云  $pa$  与历史基准点云  $pd$  进行迭代最近点配准，计算形变场  $\Delta p$ ，拟合形变梯度。其计算公式为：

$$\Delta \nabla p = ICP \sum_i \|\Delta p - Axi\|^2 \quad (4)$$

公式中： $A$  为形变参数矩阵。当监测区域局部形变量突破预设安全阈值  $\Delta d < 5$ ，系统将自动锁定风险坐标并标注为潜在腐蚀泄漏点，同步生成覆盖罐体全域的形变热力图。以颜色梯度直观呈现形变强度分布。在石油库储油罐群中实现三维模型重建。通过预测形变趋势，分析形变时序特征与多源环境参数的关联性，实现未来形变趋势的动态推演，并输出风险等级评估报告。

## 1.2 LSTM 法腐蚀泄露风险监测

在石油库储油罐的腐蚀泄漏风险监测中，基于长短期记忆网络（Long Short-Term Memory，LSTM）的时序预测模型结合卷积神经网络的空间特征提取能力，构建智能监测模型实现形变趋势的精准预测与风险等级动态监测。储油罐的腐蚀过程具有显著的时间累积效应，其形变特征往往呈现非线性渐变趋势，并受温度、压力等多维时序变量耦合影响。

LSTM 特有的门控机制可长期记忆关键历史状态，同时过滤噪声干扰，从而准确捕捉腐蚀速率的动态演变规律。结合卷积神经网络（CNN）提取的局部形变空间特征，该混合模型能够实现腐蚀位置定位与剩余寿命预测的协同优化，为风险等级动态评估提供兼具

时序敏感性和空间分辨率的智能分析框架。

首先，采集石油库储油罐的历史形变数据，通过滑动窗口法构建时序样本集  $D = \{(X, y)\}_{i=1}^N$ ，其中输入特征矩阵为  $X$ ，输出标签为  $y$ ，表示未来 72 小时的腐蚀风险等级。在此过程中，需要对采集数据进行归一化处理，其公式为：

$$\mu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N xi \quad (5)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (xi - \mu)^2}$$

公式中： $\mu$  为数据均值； $\sigma$  为数据标准差值。采用长短期记忆网络构建时序预测模型，通过输入门、遗忘门和输出门的动态调控机制，自适应地学习历史形变数据的长期依赖关系。该架构能够有效捕捉时序数据的非线性动态演化特征，并通过门控单元选择性地保留或遗忘历史信息，从而提高预测精度。构建模型可以表示为：

$$c = f \odot c_{t-1} + o \odot \tanh(i \odot \bar{c}) \quad (6)$$

公式中： $f$  为遗忘门； $i$  为输入门； $o$  为输出门； $\odot$  为逐元素乘积。采用堆叠式 LSTM 网络架构，通过深层递归计算提取高维时序特征，输出 72 小时形变预测序列。构建 CNN 特征提取器，使用可学习卷积核在空间维度分析形变预测与热成像数据的局部关联特征。通过全局平均池化实现特征降维，最终经全连接层输出三维概率向量。最终输出监控风险概率，其公式为：

$$p = -\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sum_{c=0}^2 y \log(L, c) \quad (7)$$

公式中： $L$  为空间特征向量。结合形变预测结果与 CNN 输出的风险概率，获取监测风险分级结果。当  $0 < p < 0.7$  时，处于低风险；当  $0.7 < p < 1.6$  时，处于高风险。在石油库储油罐群实测中，该模型对未来 72 小时形变趋势的预测并进行风险分级。通过可视化形变热力图，辅助运维人员快速定位风险区域，及时获取泄漏事故情况，实现了腐蚀泄漏风险的精准预测与动态监测。

## 2 实验测试与分析

### 2.1 搭建实验环境

石油库储油罐泄露测试前期准备：为验证腐蚀模拟试验的可靠性，运用 ABAQUS 软件开展数值模拟工作。在模拟结果的后处理阶段，建立柱坐标系，提取各管段的平均环向应变信息。各管段的连接处，因应力集中现象，腐蚀区的应变出现差异。基于此，传感器应安装在每个管段的中部位置，以避免边界应力集中对监测结果的影响。具体测试过程如图 1 所示：



图 1 监测罐体泄漏过程

为全面保障石油库储油罐及其周边管道的安全运行,在井口等关键区域,安装监测仪实现对管道泄漏情况的实时监测。在阀室设置压力监测装置,实时掌握管道内的压力变化情况。针对敷设光缆的酸气管道,在管道两端安装声波传感器。针对高风险管段,安装在线监测装置实现特殊管段气体的实时在线监测,确保特殊管段的安全运行。结合管道所处地貌和实际工况,为石油库储油罐及其周边管道的泄露测试提供保障。

## 2.2 结果与分析

为验证本文方法在监测过程中的应用性,设置对照实验。在此过程中,设置运用本文方法的小组为实验组。通过对三个小组在监测过程中的泄露风险监测误差值进行计算,获得结果如图 2 所示:

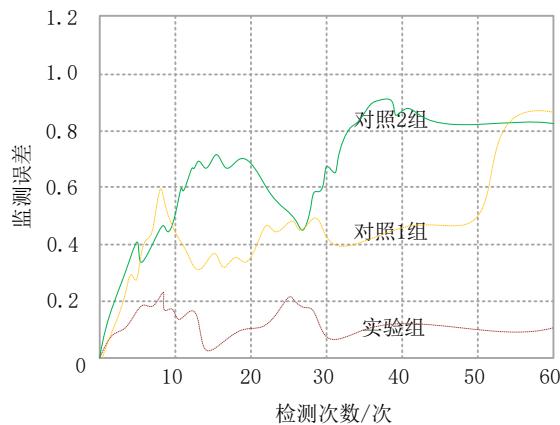


图 2 泄露风险监测误差

由图中结果可知,实验组的监测误差仅为 0.2 以下,相比于两个对照组的监测误差结果较小,更有效地识别和预测泄露风险,提高了监测的准确性。使得本文方法具有更高的监测准确率,并且在实际应用中表现出更高的可靠性。经过本文方法精准的数据处理和特征提取,使模型能够更有效地学习泄露特征,增强了模型的泛化能力,确保了在不同情况下都能保持较高的监控效果。

在石油库储油罐腐蚀泄露风险监测过程中,使用 CNN 来加速数据特征提取。通过分析在监测过程中的监测时间,其结果如图 3 所示:

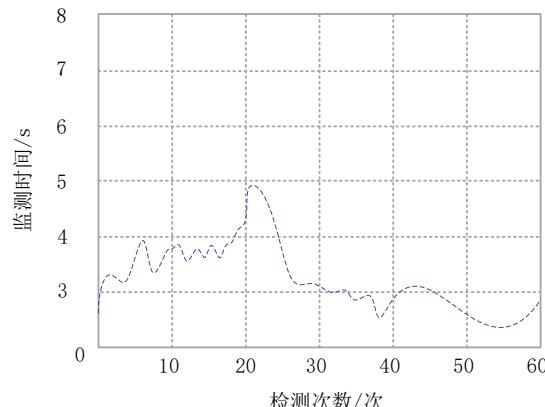


图 3 泄露风险监测时间

由图中结果可知,在监测过程中所需的时间仅为 5s,显示出本文方法具有更快的响应速度,从而极大提升了本文监测方法的监测效率。通过多维度数据采集与智能分析,可实现风险早期预警。通过实时监测,可以对腐蚀和泄漏进行早期发现和控制,从而减少事故的风险。

综上所述,通过本文监测方法实时监测和管理腐蚀和泄漏问题,可以减少废物的产生和排放。及时发现腐蚀和泄漏的迹象,并立即发出警报,有助于避免潜在的损害,减少停机时间。通过本文监测方法最终保持稳定监测,从而保障了设备安全运行。

## 3 结束语

通过本文石油库储油罐腐蚀泄露风险的实时监测方法,部署高精度传感器网络,建立多参数融合的风险评估模型,能够实现对腐蚀进程和泄漏风险的早期预警与精准定位。进一步提升实时性和预测能力,推动石油储运行业向智慧化方向迈进,以确保监测技术的长期稳定运行。腐蚀泄露实时监测方法,不仅能够有效降低安全事故风险,还能为石油库的智能化管理和可持续发展提供支撑,具有较高的应用价值。

## 参考文献:

- [1] 吕锋,徐嘉豪,胡宏伟,等.基于超声尾波法的钢筋混凝土腐蚀监测研究 [J].振动与冲击,2024,43(2):264-270.
- [2] 陈高木,杨丹,汪洋,等.基于频率跟踪法的管道腐蚀监测方法 [J].传感技术学报,2023,36(7):1148-1152.
- [3] 陈昊翔,李伟华.自感知发光涂层在腐蚀监测中的研究进展 [J].材料导报,2023,37(2):163-172.
- [4] 赵泽,胡世杰,林睿,等.石油储罐腐蚀行为及腐蚀监测研究进展 [J].电镀与涂饰,2023,42(14):42-54.

## 作者简介:

江铭 (1972-),男,汉族,安徽安庆人,硕士,中级工程师,研究方向:石油库及加油站安全、自动计量。