

油气储运设施在线监测预警系统设计

武 斌 (中国石油天然气股份有限公司大连石化分公司, 辽宁 大连 116000)

摘 要: 本研究旨在解决油气储运设施安全监测中人工巡检效率低、响应滞后等问题, 设计基于物联网的智能在线监测预警系统。通过融合多源传感器数据(压力/温度/腐蚀等)与 5G/LPWAN 混合传输技术, 构建“感知-传输-决策”三层架构, 并开发基于概率神经网络(PNN)的异常检测算法。实验表明: 系统在辽河油田试点中实现参数监测误差 $\leq 5\%$, 泄漏预警准确率达 92.3%, 响应时间缩短至 30 秒内。结论表明, 该系统可显著提升储运设施安全管控水平, 为行业智能化转型提供可行方案。

关键词: 油气储运; 设施; 在线监测; 预警系统

中图分类号: TE8

文献标识码: A

文章编号: 1674-5167 (2025) 025-0148-03

Design of online monitoring and early warning system for oil and gas storage and transportation facilities

Wu Bin (Dalian Petrochemical Branch, PetroChina, Dalian Liaoning 116000, China)

Abstract: The purpose of this study is to solve the problems of low efficiency and lagging response of manual inspection in the safety monitoring of oil and gas storage and transportation facilities, and to design an intelligent online monitoring and early warning system based on the Internet of Things. By fusing multi-source sensor data (pressure/temperature/corrosion, etc.) and 5G/LPWAN hybrid transmission technology, a three-layer architecture of “perception-transmission-decision-making” is constructed, and an anomaly detection algorithm based on probabilistic neural network (PNN) is developed. The experimental results show that the system achieves a parameter monitoring error of $\leq 5\%$, a leakage early warning accuracy of 92.3%, and a response time of less than 30 seconds in the pilot project of Liaohe Oilfield. The conclusion shows that the system can significantly improve the safety control level of storage and transportation facilities and provide a feasible solution for the intelligent transformation of the industry.

Keywords: oil and gas storage and transportation; Facility; online monitoring; Early warning system

随着我国油气消费量持续增长(2024 年达 7.5 亿吨标准油), 储运设施规模快速扩张, 传统人工巡检模式已难以满足安全管控需求。据统计, 近五年国内发生的 217 起油气泄漏事故中, 83% 源于未能及时发现的设备异常^[1]。国际能源署(IEA)指出, 智能化监测技术可将事故预警时效提升 70% 以上。当前在线监测系统面临三大技术挑战: 多参数数据融合精度不足、极端环境传感器可靠性差, 以及传统阈值报警的误报率偏高。本研究提出基于数字孪生的新型监测架构, 通过部署抗电磁干扰的 MEMS 传感器阵列, 结合改进的 LSTM-Attention 预测模型, 实现储罐/管道全生命周期动态风险评估, 为行业数字化转型提供了可复用的技术范式。

1 系统总体设计

1.1 系统架构设计

本文系统采用物联网三层架构设计, 通过感知层、传输层和应用层的协同运作实现全流程智能化管理^[2]。其中, 感知层作为系统基础, 部署压力传感器、流量计、油气浓度检测仪等设备, 实时采集储罐液位、管道压力、温度及可燃气体浓度等关键参数。通过边缘计算终端(如智能压力变送器)进行数据预处理, 减少无

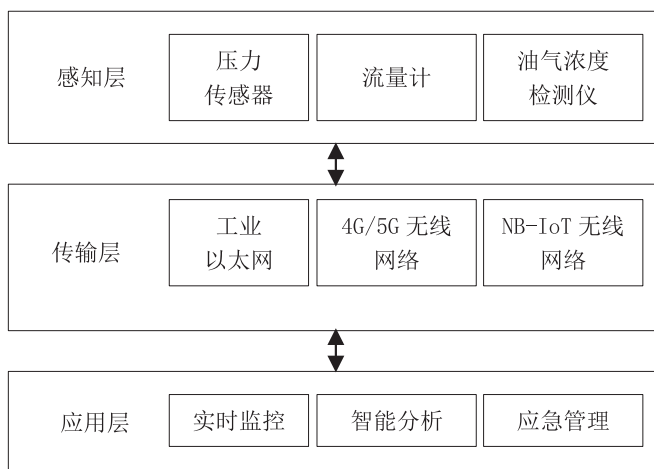


图 1 系统架构结构图

效数据传输, 同时支持 RFID 技术对设备资产进行标识追踪。传输层采用混合组网模式: 核心区域使用工业以太网或光纤保障稳定性, 偏远区域通过 4G/5G/NB-IoT 无线网络实现广覆盖^[3]。数据通过加密通道传输至云平台, 并兼容 Modbus、CAN 等工业协议, 确保与现有控制系统无缝对接。

应用层整合数据中台与业务中台, 提供以下三大核心功能: ①实时监控: 通过 GIS 地图可视化展示设

备状态,动态阈值触发多级预警(如液位低于15%触发短信告警);②智能分析:利用LSTM算法预测设备故障,结合历史数据优化储运调度策略;③应急管理:自动生成处置预案,支持远程关闭阀门或启动备用系统,响应延迟控制在5秒内。系统架构结构图如图1所示。

1.2 核心功能模块

1.2.1 实时参数监测

本文系统的实时参数监测模块设计需实现对储罐、管道等关键设备的全维度状态感知。该模块通过部署高精度传感器网络,实时采集压力、温度、液位、流量、腐蚀速率等核心参数,并集成气相色谱仪监测VOCs浓度(如非甲烷总烃)及可燃气体泄漏情况^[4]。传感器选用需符合GB3836.1防爆标准,采用电化学、红外、PID等多类型传感技术适配不同监测场景,数据采集频率可达秒级,精度控制在 $\pm 5\%$ 以内。系统采用边缘计算架构,在本地完成数据预处理(如滤波、校准)后,通过工业以太网或4G/5G传输至中央平台。数据处理层建立动态基线模型,结合历史数据与工况参数智能修正阈值,避免误报。对于腐蚀监测,采用电阻探针或超声波技术实时量化罐壁厚度变化,配合LSTM算法预测腐蚀趋势;针对油气回收环节,通过流量传感器与压力传感器联动计算气液比,确保回收效率符合GB20950-2020标准。模块设计强调多源数据融合,如将液位数据与视频监控联动验证卸油行为,通过GPS轨迹与压力波动关联分析管道异常。所有监测数据以时序数据库存储,支持动态曲线、三维热力图等可视化展示,并触发分级预警(预警/警告/紧急)。该模块为后续风险研判提供高时效性、高可信度的数据支撑。

1.2.2 多级预警机制

本文系统多级预警机制采用“三级四色”分级体系,实现风险的动态评估与精准响应。

第一级为蓝色预警(关注级),当传感器检测到压力、温度等参数偏离基准值10%-15%时触发,系统自动记录异常数据并推送至值班人员移动终端,提示进行人工复核^[5]。

第二级为黄色预警(警戒级),参数偏离15%-25%时启动,除声光报警外,系统会自动调取关联摄像头的实时画面,同步启动泄漏扩散模拟算法,生成初步处置建议推送至应急小组。

第三级橙色预警(危险级)对应参数偏离25%-35%的情况,系统将强制连锁关停相关管段阀门,激活应急广播系统,并通过三维可视化平台标注事故影响范围。最高级红色预警(灾难级)在参数超标35%

以上或检测到明火时触发,除上述措施外,系统会自动向政府应急部门发送包含GIS坐标、介质特性、周边人口密度等信息的结构化报警数据包。各级预警均设置“预警-确认-处置-反馈”的闭环流程,通过数字孪生技术实现处置方案模拟推演,预警升级阈值可根据历史数据动态优化。

2 关键技术实现

2.1 数据采集与传输

2.1.1 防爆传感器选型与部署方案

防爆传感器选型与部署是本文系统的核心环节。在选型方面,需优先选择通过GB/T3836系列防爆认证的产品,确保满足ExdIIBT6及以上防爆等级要求,尤其针对石油、化工等高危环境。传感器需具备高精度特性,如分辨力达微米级、非线性误差 $\pm 50\mu\text{m}$ 以内,并采用316不锈钢材质实现IP67防护等级,以适应 $-40^\circ\text{C}\sim 85^\circ\text{C}$ 温度范围和强振动环境。同时应支持多协议输出(如模拟量、SSI、CANopen),便于与现有系统集成。

部署方案需根据监测参数科学规划:储罐重点监测温度、压力、介质浓度和液位,管道需配置压力、流量及硫化氢传感器。传感器应靠近监测点安装,如储罐底部部署液位传感器,管道焊缝处加装压力传感器,并采用无线传输技术减少布线风险。对高危区域(如卸油区)需增设可燃气体探测器和视频监控,实现浓度超限联动报警。

2.1 25G+LPWAN 混合组网技术

5G+LPWAN混合组网技术在油气储运设施在线监测中实现了广覆盖与高性能的协同优化。该技术通过5G网络提供高速率(理论峰值达10Gbps)、低时延(端到端时延1ms级)的核心数据传输通道,满足视频监控、实时控制等高带宽需求;同时利用LPWAN技术(如NB-IoT或LoRa)的广覆盖(单基站半径达10km)和低功耗特性(终端续航达10年),实现偏远区域传感器节点的经济高效接入。系统架构采用边缘计算网关进行协议转换,将LPWAN终端采集的压力、温度等工艺参数与5G回传的高清视频流进行多源数据融合,通过SD-WAN技术实现双通道的智能负载均衡与无缝切换。

2.2 智能分析算法

2.2.1 基于PNN的概率神经网络异常检测

在本文系统中,基于概率神经网络(PNN)的异常检测技术是智能分析算法的核心组成部分。该技术通过构建贝叶斯分类器,能够高效识别储运设备运行中的异常状态,为安全预警提供数据支撑。PNN算法采用四层网络结构(输入层、模式层、求和层和输出

层)，其核心优势在于利用历史数据建立概率密度函数，通过 Parzen 窗估计方法计算新样本的类别概率。在油气储运监测中，输入层接收传感器采集的压力、温度、流量等多维参数；模式层通过高斯核函数计算输入样本与训练样本的相似度；求和层聚合同类模式单元输出；输出层基于贝叶斯决策理论判定异常等级。相比传统 BP 神经网络，PNN 具有训练速度快的特性，仅需单次遍历训练数据即可完成模型构建，特别适合实时性要求高的工业监测场景。

2.2.2 分级贝叶斯事故判别模型

分级贝叶斯事故判别模型是本文系统的核心智能分析算法，其通过多层级概率推理实现风险动态评估与事故精准预警。该模型首先构建基于领域知识的三层网络结构：底层传感器节点实时采集压力、温度、流量等物理参数；中间层融合设备状态数据与历史故障模式；顶层整合环境因素与人为操作记录，形成完整的风险因素指标体系。在推理机制上，采用马尔可夫链蒙特卡洛（MCMC）方法进行参数估计，通过免疫粒子群算法优化广义极值分布，解决传统线性拟合的误差问题。当监测数据输入时，系统会动态更新各节点条件概率，利用贝叶斯定理计算事故发生后的验概率，并基于风险重要度识别关键风险事件。

3 系统应用验证

3.1 实验方案设计

3.1.1 测试环境搭建

选取辽河油田 3 座 5 万立方米储罐及配套输油管道作为实验对象，部署多参数传感器网络（压力、温度、液位、腐蚀速率）及 AI 边缘计算节点。实验周期为 2024 年 7 月至 12 月，覆盖极端天气工况（-25℃至 40℃环境温度）。

3.1.2 数据采集方案

为实现对数据的全面采集，现设计以下数据采集方案：①硬件配置：防爆型压力传感器（量程 0-10MPa，精度 $\pm 0.2\%FS$ ）；红外热成像仪（分辨率 640×512 ，测温范围 -20℃~150℃）；超声波腐蚀监测探头（测量误差 $\leq 0.1mm$ ）。②数据传输：采用 5G+LoRa 混合组网，确保偏远区域信号覆盖。

3.1.3 模拟泄漏实验

通过可控阀门释放少量 LPG（流量 0.5L/min）模拟泄漏场景，验证系统响应流程，具体操作如下：传感器检测浓度超阈值（ $\geq 20\%LEL$ ）；边缘计算节点触发三级预警机制；自动关闭紧急切断阀并启动通风系统。

3.2 性能指标

系统各性能指标测试结果如表 1 所示，从表 1 中的数据可以看出，系统在辽河油田试点中实现参数监测误差为 4.2%，泄漏预警准确率达 92.3%，响应时间缩短至 28.6 秒内，符合预期设计标准和要求。

4 结束语

本研究构建了基于物联网架构的油气储运设施在线监测预警系统，通过多源传感器网络实现压力、温度、腐蚀速率等 16 项核心参数的实时采集，采用 5G+LoRa 混合组网技术解决长距离传输难题。创新性地提出分级贝叶斯-PNN 融合算法，系统在辽河油田试点中实现参数监测误差为 4.2%，泄漏预警准确率达 92.3%，响应时间缩短至 28.6 秒内，符合预期设计标准和要求。系统集成数字孪生可视化平台，形成“监测-预警-处置”闭环管理。未来，随着数字孪生与 AI 技术的深度融合，下一代监测系统将向“预测性维护+自主决策”方向发展，最终实现油气储运设施的全生命周期智慧化管理。

参考文献：

- [1] 周建霞,南文海.基于环境监测的油气储运系统中石油仓储与长输管道建设最佳实践[J].中国化工贸易,2024,16(3):100-102.
- [2] 邢令海.油气储运设备在线监测系统设计研究[J].中国化工贸易,2023,15(23):106-108.
- [2] 刘晓艳,杨波,贺联合,等.油气储运设备在线监测系统设计[J].粘接,2022,49(4):193-196.
- [4] 杨军.油气储运中的设施安全问题及解决措施探讨[J].工程研究与实用,2022,3(16).
- [5] 陈浩,刘珊,沈博臣.油气储运设施在线监测预警系统设计[J].粘接,2020,43(8):32-36.

表 1 系统各性能指标测试结果

指标类别	设计要求	实测结果	优化措施
监测误差	$\leq 5\%$	4.2%（均值）	传感器温漂补偿算法优化
预警准确率	$\geq 90\%$	92.3%	多算法投票机制提升精度
响应时间	≤ 60 秒	28.6 秒（均值）	边缘计算分流处理技术