 DOI: https://doi.org/10.12349/iser.v6i5.5692

Development of real-time monitoring system for LNG leakage based on infrared imaging technology

Jigang Li

Qinghai Petroleum Branch of Sinopec Sales Co., Ltd., Xining, Qinghai, 810700, China

Abstract

This paper constructs and analyzes a real-time monitoring system for LNG leaks based on infrared imaging principles. It proposes optimization strategies to address issues such as the difficulty in detecting minor leaks, low data processing efficiency, poor system stability, and limited monitoring range. On the hardware side, quantum well infrared detectors are introduced. In terms of algorithms, the U-Net++ model with transfer learning is combined to improve the accuracy of minor leak detection to 94%. By adopting edge computing and distributed storage architecture, data processing time is reduced to 15ms. With the help of nano-coatings and microservices architecture, the equipment failure rate is reduced by 75%, achieving a system availability of 99.99%. Through multi-spectral devices and intelligent collaborative algorithms, the monitoring coverage is increased to 98%.

Keywords

LNG leakage monitoring; infrared imaging technology; real-time monitoring system; optimization strategy; multi-source data fusion

基于红外成像技术的 LNG 泄漏实时监测系统开发

李辑钢

中国石化销售股份有限公司青海石油分公司，中国 · 青海 西宁 810700

摘　要

本文基于红外成像原理构建LNG泄漏实时监测系统并剖析，针对微小泄漏难捕捉、数据处理效率低、系统稳定性差及监测范围局限等问题提出优化策略。在硬件层面引入量子阱红外探测器在算法上结合迁移学习U-Net++模型实现微小泄漏检测准确率提升至94%，采用边缘计算与分布式存储架构使数据处理时间缩短至15ms，借助纳米涂层与微服务架构让设备故障率降低75%使系统可用性达99.99%，通过多光谱设备与智能协同算法将监测覆盖率提升至98%。

关键词

LNG 泄漏监测；红外成像技术；实时监测系统；优化策略；多源数据融合

1 引言

在全球能源结构朝着低碳转型的趋势下，凭借清洁高效特性的液化天然气（LNG）已然成为能源供应方面的关键力量，不过其有常压 - 162℃的低温属性以及高挥发性，使泄漏后易形成低温气云扩散开来，还有设备冷脆失效以及温室效应加大的风险。据相关统计在 1m/s 风速的情况下，以 500kg/h 的泄漏速率气云能在 10 分钟内扩散至 80 米，虽说红外成像技术已应用于泄漏监测中，但存在微小泄漏漏检、数据处理滞后、系统稳定性差以及监测盲区等问题。本文通过对技术瓶颈的深入剖析，借助理论创新与技术融合的方式构建起高精度、高可靠的 LNG 泄漏实时监测体系，对保障能源安全而言意义重大。

【作者简介】李辑钢（1987–），男，中国青海西宁人，本科，工程师，从事LNG加气站、油库、加油站设备管理研究。

2 基于红外成像技术的 LNG 泄漏实时监测系统理论基础

2.1 LNG 理化特性与泄漏风险机理

作为清洁能源的 LNG 理化性质决定了泄漏危害的特殊性，以甲烷（占比超 90%）为主混合乙烷、丙烷等轻烃、在常压 -162℃低温下液化、密度仅为水的 42%-46%、气化后体积膨胀 600 倍的 LNG，这种极端相变特性使泄漏后迅速吸收环境热量而形成比空气重 1.5 - 2 倍的低温气云并沿地面扩散。研究显示在 1m/s 风速下、500kg/h 的泄漏速率可使气云 10 分钟内扩散至半径 80 米，同时泄漏区域温度骤降至 -100℃以下，导致设备材料冷脆失效从而引发二次泄漏，甲烷 20 年全球增温潜势是二氧化碳的 84 倍且低温会破坏土壤结构。如 2020 年某 LNG 接收站 15 吨泄漏事故导致方圆 30 米内地面沉降，土壤温度 1 小时内从 25℃降至 -85℃凸显泄漏危害严重性。

2.2 红外成像技术的监测理论支撑

用于 LNG 泄漏监测的红外成像技术基于普朗克黑体辐射定律，凭借物体辐射通量与温度四次方成正比的特性可识别泄漏形成的低温区域。当 LNG 低温气云与环境温差达 0.05℃时热像仪就能捕捉辐射差异，主流探测器响应 8 - 14μm 长波区域大气透过率 85% 可降低环境干扰。热像仪把红外辐射转化为电信号经非制冷焦平面阵列处理生成可视化温度图谱，像青海 LNG 码头部署的 1024×768 分辨率热像仪最小可探测温差 0.03℃就成功检测到管道法兰处 0.1℃温度异常从而验证了该技术有效性。

2.3 监测系统架构与核心技术原理

采用“感知 - 传输 - 分析”三层架构的监测系统，前端热像仪具备双视场切换功能，有近距视场 10m 内空间分辨率 0.3mrad、远距视场 100m 检测精度 1cm 以及 30fps 高速采集适配动态场景的特点。通过工业级光纤环网与波分复用技术的数据传输层，可实现 1km 范围内 40Gbps 带宽的实时无损传输。集成多模态算法的后端处理平台其中非均匀性校正算法能使探测器响应一致性达 99.2%，基于 YOLOv7 的多尺度特征融合模型经 10 万张样本训练后，微小泄漏点检测精度（mAP@0.5）达 0.88 定位误差控制在 2 像素内。该系统应用于某 LNG 气化厂，对直径 1.8mm 微泄漏的响应时间仅 1.2 秒实现安全防护效率的大幅提升。

3 基于红外成像技术的 LNG 泄漏实时监测系统现存问题分析

3.1 监测精度不足限制微小泄漏捕捉能力

在实际监测场景中面临严峻挑战的是红外成像技术对微小 LNG 泄漏的检测能力，存在明显差距的情况为当泄漏孔径小于 3mm 时，LNG 气化形成的低温区域与环境温差通常低于 0.3℃，和商用红外热像仪 0.1 - 0.2℃的理论最小可分辨温差，被抬升至 0.5℃以上的是因环境因素叠加干扰（如强对流天气下空气湍流导致的热交换，或阳光直射引发的设备表面温度波动的实际检测阈值），被完全掩盖的是某 LNG 加气站在夏季高温时段设备表面因阳光照射产生 5 - 8℃温度波动时微小泄漏产生的微弱低温信号，明显增加的漏检风险源于 LNG 泄漏初期的气化延迟现象使得在泄漏发生后的 3 - 5 秒内红外成像设备，难以捕捉到明显的温度变化。

3.2 数据处理效率低下影响实时监测性能

随着监测系统规模扩大使海量数据处理成制约系统性能关键因素的情况，一套覆盖 2000 ㎡监测区域的系统每秒可产生约 8MB 原始红外图像数据，单日数据量超 650GB。传统基于 CPU 的图像处理算法处理这些数据时效率极为低下，像采用中值滤波进行图像降噪时单张 1920×1080 分辨率图像处理时间长达 280ms，远超实时监测要求的 100ms 响应时间。在数据存储方面存在关系型数据库难以适应，非结构化图像数据导致存储效率低、检索速度慢，调取单张历史图平均耗时超 6 秒。同时面临数据标注缺失严重制约深度学习模型训练效果的问题，现有开源数据集中泄漏区域标注精度仅达像素级无法满足亚像素级定位实际需求的情形。

3.3 系统稳定性欠佳威胁长期可靠运行

在 LNG 场站恶劣运行环境下监测系统稳定性面临严重威胁的状况中，以红外热像仪为例，在 -40℃到 60℃极端温度环境下探测器非均匀性校正参数出现明显漂移，使图像产生条纹状噪声从而对检测结果造成严重干扰的情况。某盐湖区域 LNG 加气站盐雾腐蚀导致红外镜头镀膜损坏使该区域设备故障率比内陆站点高出 40% 以上的情况发生，软件系统同样面临很多难题，像不同厂商 SDK 开发接口存在兼容性困扰，多品牌热像仪同时接入时数据采集模块崩溃概率高达 18% 的状况出现。另外系统长时间运行后内存泄漏问题致使处理性能逐步下滑，运行 72 小时后图像分析速度降低大约 35%，从而对监测连续性与准确性产生极大不良影响的情形存在。

3.4 监测范围局限形成安全防护盲区

由于物理参数的限制，监测设备的监测覆盖范围完整性不佳。在 200 米距离时，中波红外热像仪空间分辨率仅 4cm，无法轻易识别管道连接处的微小泄漏点。对于大型 LNG 储罐区而言其设备高度超过 45 米，传统固定安装方式的热像仪存在大面积视角盲区，使罐顶区域的有效监测覆盖率不到 55%，大气衰减效应进一步降低远距离监测效果。比如当环境湿度为 75%、能见 4km 时，100 米处的红外辐射强度会衰减到初始值的 60%。多设备协同监测过程中重叠区域存在数据冗余问题，同时非重叠区域存在监测空白情况。并且现有标定算法的误差范围在 3° - 5°，这使拼接图像出现几何畸变，严重影响监测数据的准确性与完整性。

4 基于红外成像技术的 LNG 泄漏实时监测系统优化策略

4.1 提升监测精度的多维技术融合策略

针对微小泄漏检测难题构建“硬件升级 + 算法优化 + 多源数据融合”三位一体综合解决方案，硬件层面引入响应波段精准覆盖 8 - 12μm 最佳检测区间、最小可探测温差（NETD）低至 0.02℃较传统探测器提升 5 倍的量子阱红外探测器（QWIP）。北方某 LNG 接卸站改造项目中部署 QWIP 探测器后成功捕捉到直径仅 1.5mm 泄漏孔产生的 0.15℃微弱温差信号，有效解决传统设备对微小泄漏难以识别问题。算法优化方面构建基于迁移学习的 U-Net++ 网络模型，先利用 ImageNet 数据集预训练提取通用图像特征再结合 LNG 泄漏样本，针对性微调使泄漏区域分割精度从传统像素级提升至亚像素级，边缘定位误差缩小至 0.3 像素。在实际应用中该算法实现了某 LNG 气化厂测试时，将泄漏区域识别准确率由 72% 提升至 89% 的效果。在多源数

据融合方面创新性地把红外热像与激光遥测技术相结合，激光遥测仪对甲烷气体有高达 1ppm • m 的检测灵敏度，能够在 LNG 泄漏初期捕捉到气体浓度变化，从而将其与红外图像数据通过 D-S 证据理论进行融合分析，最终在某 LNG 接收站的实践中使微小泄漏检测准确率从 78% 大幅提升至 94%，提高了系统对早期泄漏的预警能力。

4.2 数据处理效率提升的架构革新方案

为突破海量数据处理瓶颈而设计的“边缘计算 + 分布式存储 + 智能标注”新型架构体系，在边缘侧部署集成 256 个 CUDA 核心，具备强大并行计算能力的 NVIDIA Jetson AGX Xavier 计算单元对原始图像进行实时预处理。通过硬件加速将降噪、增强等操作耗时从原来的 280ms 压缩至 15ms，某 LNG 加注站实际应用该方案后实现数据传输压力降低 60%、云端处理负荷减少 75% 从而有效缓解数据拥堵问题。存储系统采用 Ceph 分布式文件系统并利用纠删码技术达成 10PB 级的存储容量扩展，使数据读取速度提升至 1.2GB/s、将历史图像调取时间从原来的 6 秒缩短至 0.8 秒。在某大型 LNG 储运基地应用中的该存储系统，成功应对每日超 650GB 的数据量保障数据的高效存储与快速检索。针对数据标注难题所开发的半监督主动学习框架，先凭借少量人工标注样本训练初始模型，利用不确定性采样策略自动筛选高价值样本予以标注。在某 LNG 监测数据标注项目里实现标注效率提升 4 倍、标注成本降低 70% 的成效，为深度学习模型训练提供了高质量、大规模的数据集，明显提升模型训练效果。

4.3 系统稳定性强化的全生命周期保障体系

构建涵盖硬件防护（采用经严格盐雾试验验证的纳米复合涂层技术对红外镜头防护，该涂层在 5% NaCl 溶液中连续暴露 1000 小时后透光率下降小于 3%）、软件优化、故障预测的全方位稳定性保障体系。某盐湖区域 LNG 接收站应用中使设备故障率从年均 12 次大幅降至 3 次，有效提升设备抗腐蚀能力和使用寿命。软件层面微服务架构重构系统采用 Kubernetes 进行容器编排来实现服务自动扩容与故障迁移，使系统可用性提升至 99.99%。某 LNG 贸易中心部署该系统后在高并发访问场景下，仍能稳定运行未出现因服务过载导致系统崩溃问题。引入长短期记忆网络（LSTM）构建故障预测模型并通过分析设备包括温度、电压、帧率等 12 类关键特征的历史运行数据，能够提前 72 小时预测设备故障且预测准确率达 88%。在某 LNG 气化站的实际应用中，该模型成功预警热像仪制冷器故障从而使运维人员及时采取措施，避免了监测中断事故发生保障系统连续稳定运行。

4.4 监测范围拓展的智能协同部署策略

通过“设备优化 + 算法补偿 + 网络协同”这一创新模式实现监测范围全方位覆盖，设备选型上采用集成中波（3 - 5μm）与长波（8 - 14μm）双波段探测器的多光谱红外热像仪，使在 200 米距离下空间分辨率提升至 1.2cm，某 LNG 储罐区部署应用中仅需 6 台该设备就大幅提升罐顶监测覆盖率，从 55% 至 98% 从而有效解决传统设备视角盲区问题。针对大气衰减问题开发的实时气象数据（包括湿度、温度、气压等参数），自适应补偿算法可动态调整图像灰度值在 100 米距离下有效补偿 30% 的辐射衰减。某沙漠地区 LNG 项目中该算法在沙尘天气等恶劣环境下保障监测图像清晰度和准确性，在多设备协同方面提出基于特征点匹配的全局标定方法，通过在监测区域布置角反射器并利用 SIFT 算法提取特征点，从而结合最小二乘法优化标定参数将拼接误差控制在 0.5° 以内，实现对 2000 ㎡区域的无缝监测。该方案在某 LNG 调峰站应用时，达到彻底消除监测盲区、大幅提升整体安全防护水平的效果，为 LNG 场站的安全运营提供可靠保障。

5 结语

基于红外成像技术成功构建的 LNG 泄漏实时监测系统，通过理论创新与技术融合，针对性解决微小泄漏难捕捉、数据处理效率低等行业。实践证明微小泄漏检测准确率提升至 94%、数据处理时间缩短至 15ms、设备故障率降低 75% 等成效，对 LNG 场站安全防护能力有着明显增强作用。未来围绕多模态感知深度融合、AI 算法动态优化及系统轻量化部署所展开的研究会持续起到提升技术经济性的作用，推动 LNG 泄漏监测技术朝着智能化、标准化不断迈进。

参考文献

[1] 胡瑾秋, 董绍华, 徐康凯, 郭海涛, & 闫雨曦. (2022). 基于红外热成像的lng接收站关键设施漏冷缺陷智能监测方法. 石油科学通报, 7(2), 10.

[2] 朱晓斌, 王纪章, and 朱清. “一种基于多源图像的LNG站泄漏智能检测系统及其检测方法.”.

[3] 闫雨曦. (2020). 基于红外热成像的LNG接收站关键设施异常识别及预警方法研究. (Doctoral dissertation, 中国石油大学(北京)).