

钢丝试井天然气泄漏激光遥测监测系统

金毅浪¹, 刘奇林¹, 杨国¹, 金子一², 李顺雨¹, 罗沿续¹

1. 中国石油西南油气田分公司川西北气矿 四川江油 621700

2. 中国石油西南油气田分公司四川页岩气勘探开发有限责任公司 四川成都 610051

项目支持: 中国石油西南油气田分公司川西北气矿科研项目“钢丝试井气体泄漏远程报警及作业可视系统研究”(2021SY-01)

引用: 金毅浪, 刘奇林, 杨国, 等. 钢丝试井天然气泄漏激光遥测监测系统[J]. 油气井测试, 2026, 35(2): 59-65.

Cite: JIN Yilang, LIU Qilin, YANG Guo, et al. Laser telemetry monitoring system for natural gas leakage in slickline well testing[J]. Well Testing, 2026, 35(2): 59-65.

摘要 针对钢丝试井作业中井口泄漏因高位布置、接口分散及人工巡检存在时空盲区而难以及时发现难题, 构建了一套基于激光遥测技术的监测系统。该系统采用非接触探测方式, 预先标定5个关键风险点位, 利用激光甲烷传感器以8秒每点的周期进行巡回扫描, 并结合边缘计算单元实现阈值自动判定, 构建了“前端采集、边缘判定、本地声光报警、远程视频联动”的闭环响应机制。室内与现场试验表明, 系统在10 μL/L标准气体浓度下响应一致, 井场模拟泄漏后平均45 s内触发报警; 远程传输数据包丢包率为0.83%; 单组100 Ah电源可支持系统持续运行10~12 h。该系统实现了对井口泄漏的连续监测与快速远程报警, 有效提升了移动作业场景下的安全监控能力, 具备工程应用价值。

关键词 钢丝试井; 气体泄漏监测; 激光遥测; 巡回扫描; 边缘计算; 远程联动

中图分类号: TE38

文献标识码: B

DOI: 10.19680/j.cnki.1004-4388.2026.02.009

Laser telemetry monitoring system for natural gas leakage in slickline well testing

JIN Yilang¹, LIU Qilin¹, YANG Guo¹, JIN Ziyi², LI Shunyu¹, LUO Yanxu¹

1. Northwest Sichuan Gas District of PetroChina Southwest Oil & Gasfield Company, Jiangyou, Sichuan 621700, China

2. Sichuan Shale Gas Exploration and Development Company Limited, PetroChina Southwest Oil & Gasfield Company, Chengdu, Sichuan 610051, China

Abstract: To address the challenge of timely detecting wellhead leakages during slickline well testing operations—caused by elevated equipment layouts, scattered interfaces, and the spatiotemporal blind spots inherent in manual inspections—a monitoring system based on laser telemetry technology was developed. Employing a non-contact detection method, the system pre-calibrates five key risk points and performs cyclic scanning with laser methane sensors at an interval of 8 seconds per point. Integrated with an edge computing unit for automatic threshold determination, it establishes a closed-loop response mechanism encompassing “front-end acquisition, edge-based determination, local audible and visual alarms, and remote video linkage.” Both laboratory and field tests demonstrate that the system responds consistently at a standard gas concentration of 10 μL/L and triggers an alarm within an average of 45 seconds following a simulated leak at the well site. The packet loss rate during remote data transmission is only 0.83%, and a single 100 Ah power supply module can sustain continuous system operation for 10 to 12 hours. This system achieves continuous monitoring and rapid remote alarming for wellhead leakages, effectively enhancing safety monitoring capabilities in mobile operation scenarios and demonstrating significant engineering application value.

Keywords: slickline well testing; gas leakage monitoring; laser telemetry; cyclic scanning; edge computing; remote linkage

油气井作业现场可燃气体和含硫气体泄漏具有扩散快、事故链条长、处置窗口短等特点, 泄漏监测与预警是井口作业安全保障的重要环节。现有固定站控系统主要面向井站固定工艺参数监测, 难以覆盖钢丝试井井口的高位装置和临时流程区; 人工巡检又受巡检频次和作业节奏限制, 存在时间空

档与空间盲区。围绕危险气体泄漏监测, 曹江涛等^[1]和迟晓铭等^[2]分别综述了红外光谱成像和红外成像检测技术的机理、流程及工程应用, 指出成像类方法在泄漏可视化和远距离发现方面具有优势; 洗敏元等^[3]和孙秉才等^[4]进一步验证了气云成像、FTIR成像在海上钻井平台和油气危险化学品场

景中的应用可行性。为提升自动识别能力,谷小婧等^[5]和翁静等^[6]分别提出基于实例分割和支持向量机的红外泄漏检测方法,季怡萍等^[7]对SF₆气体泄漏红外成像检测技术及应用进行了分析;WANG等^[8-9]将机器视觉与深度学习用于甲烷红外视频识别,提高了成像检测的自动化水平。总体来看,红外及成像类技术已在泄漏发现方面取得较多进展,但在井口高位装置、遮挡较多及夜间、恶劣天气条件下,仍可能受到视场受限、背景干扰和定量能力不足等因素影响。

激光遥测与开放光路光谱技术因具有非接触、远距离和响应快等优势,逐渐成为天然气泄漏监测的重要方向。IWASZENKO等^[10]和HOLLENBECK等^[11]将激光甲烷传感器与无人机或sUAS平台结合,用于泄漏检测与定量;WU Q等^[12]、XI Z等^[13]和ZHU S等^[14]则围绕开放光路TDLAS、小型化遥测传感器及高灵敏激光检测开展研究,为复杂环境下甲烷快速监测提供了技术基础。在油气设施的长期连续监测与溯源定位方面,IJZERMANS等^[15]开展多开放光路激光色散光谱的设施级长期连续监测;VOSS等^[16]将多开放光路激光色散光谱与贝叶斯状态估计结合,实现泄漏定位与定量;ALDEN等^[17]和徐鹏飞^[18]在生产设施开展连续激光甲烷监测验证测试,为工程化部署评价与性能验证提供了证据链。

但现有研究多面向固定场景或平台搭载监测,对钢丝试井井口多接口、临时流程和移动作业条件下的连续监测关注不足。针对上述问题,本文提出一种适用于钢丝试井井口场景的激光遥测多点位巡回扫描与远程联动监测方法,并通过室内标气试验与井场可控泄漏试验验证其适用性。

1 作业场景需求与监测方法设计

与固定站场相比,钢丝试井作业现场监测条件更复杂,具备设备临时布置、作业阶段切换频繁和井口接口集中的特点。上述特点使得井口泄漏风险具有随机性、瞬时性和隐蔽性。高风险部位主要集中于转换法兰密封面、防喷管连接处、放喷流程连接处、辅助管线接口及盘根盒等。

1.1 监测需求与关键约束

钢丝试井井口泄漏监测难点在于井口装置布置较高、接口分散;且作业过程节奏快,异常发生后需在短时间内完成发现、确认和快速处置;监测面临覆盖不足、连续性不足与确认滞后等迫切需求。

据此,钢丝试井场景井口泄漏监测需满足如下四项约束:一是具备非接触、远距离探测能力,适应高位井口及复杂布置条件;二是支持多点位巡回覆盖,减少固定视场遗漏和人工巡检空档;三是具备阈值化报警与现场联动能力,缩短异常发现至处置的响应链路;四是实现监测数据、报警信息和现场视频同步推送,为远程确认和过程留痕提供依据。其典型失效类型可分为密封件失效、法兰密封异常和附件连接失稳。上述特征决定了该场景更适合采用多点位、非接触和连续化的监测方式。

1.2 激光遥测监测原理

激光遥测监测基于可调谐半导体激光吸收光谱(Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy, TDLAS)技术,利用甲烷分子在特定波长的特征吸收实现气体浓度反演。其核心原理是比尔-朗伯定律;当激光通过待测气体介质时,出射光强与入射光强、气体浓度及光程长度满足指数衰减关系。甲烷在近红外波段(如1 653 nm附近)具有明显的吸收谱线,该波段可有效避开空气中水汽和二氧化碳的干扰,因此常被选为检测波长。

系统工作时,激光器在驱动电路控制下产生波长扫描和调制信号,经准直后发射至目标区域。激光束在到达待测界面(如法兰接口、盘根盒等)后被漫反射返回,部分回波信号由探测器接收。由于目标路径上的甲烷分子对激光存在选择性吸收,接收光强中包含气体浓度信息。为抑制环境噪声和背景干扰,系统采用波长调制光谱(Wavelength Modulation Spectroscopy, WMS)技术,通过谐波检测提取二次谐波信号,将气体吸收信息从低频噪声中分离出来,从而提高信噪比和检测灵敏度。最终,经标定的浓度反演模型将谐波信号转换为光路平均甲烷浓度(单位: $\mu\text{L}/\text{L}\cdot\text{m}$)或相对响应值,用于表征目标区域是否存在泄漏异常。

与点式催化燃烧或电化学传感器相比,激光遥测方法无需待测气体扩散至传感器表面,也不需要人员靠近高风险区域,具有非接触、远距离、响应快(毫秒级)及不受氧气浓度影响等优点。在钢丝试井场景中,井口防喷装置、放喷管线等接口分散且高度多变,传统便携式检测仪难以实现多点位连续覆盖。激光遥测通过预先设定扫描点位,利用云台或转镜实现光束指向切换,可在数秒内完成对多个关键接口的巡回监测,同时避免夜间或恶劣天气下的人员近距离暴露。该方法输出结果为光路积分

浓度,虽无法直接换算泄漏率,但通过设定合适的吸收阈值和复测逻辑,可有效识别突发泄漏事件,满足井场快速预警需求。

1.3 多点位巡回扫描与报警联动方法

本文采用多点位巡回扫描与边缘侧报警联动方法。依据井口装置结构预置监测点位,对防喷装置、法兰接口、盘根盒及放喷流程关键连接处实施周期性巡检;当监测值超过阈值时,由边缘侧完成异常判定,并联动现场声光报警,同时向远程平台和移动端推送报警信息、监测数据和现场视频。

该方法可概括为点位预置、巡回扫描、复测确认和联动留痕四项要素。其输入为监测点位、扫描周期和报警阈值,判据为超限与复测确认,输出为现场告警、远程推送及事件记录。该流程可在有限设备条件下实现井口多风险点的连续监测与快速响应,适用于接口分散、需快速发现并远程确认异常的钢丝试井井口场景。

1.4 激光遥测监测方法与监测区域设计

系统气体监测采用激光遥测方式,对甲烷吸收谱线进行扫描并反演得到浓度路径积分量,实现远距离非接触检测。与点式探测相比,遥测方式更适合井口高位装置与多接口区域的快速覆盖。为适配井口布置与泄漏随机性,系统以井口关键接口为目标,结合监测区域划定与多点位覆盖,实现对潜在泄漏源的连续监测。

如图1所示,激光在吸收谱线附近扫描时产生稳定吸收特征,吸收强度变化为浓度反演提供依据,是实现远距离检测的关键物理基础。监测区域覆盖井口防喷装置及关键连接部位,可针对高位接口和复杂布置开展区域化扫描,为多点位布设提供空间依据。

遥测输出以浓度路径积分量表征,便于将不同点位的检测结果统一到阈值判据框架内,实现可操作的报警触发,如图2所示。

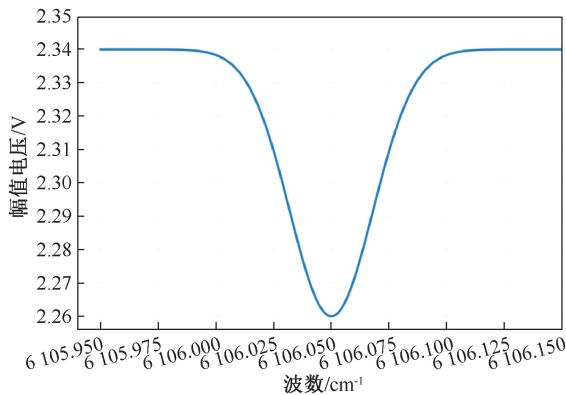


图1 激光吸收扫描(LAS)原理示意

Fig. 1 Principle of laser absorption scanning (LAS)



图2 瓦斯遥测原理示意

Fig. 2 Principle of remote methane detection

2 系统实现与试验方案

为实现钢丝试井井口泄漏的连续监测与快速处置,本章从系统架构与数据链路、监测点位、试验设计和联动控制等方面阐述具体实施方案。

2.1 系统架构与数据链路

为满足钢丝试井井口泄漏连续监测与快速处置需求,系统设计目标包括非接触远距离探测、多点位连续覆盖、阈值化快速报警以及数据与视频同步推送。基于此,构建由前端监测单元、边缘处理单元、无线传输链路和平台终端组成的监测系统。

系统数据链路为“前端采集—边缘判定—本地联动—远程推送”,系统总体架构如图3所示。

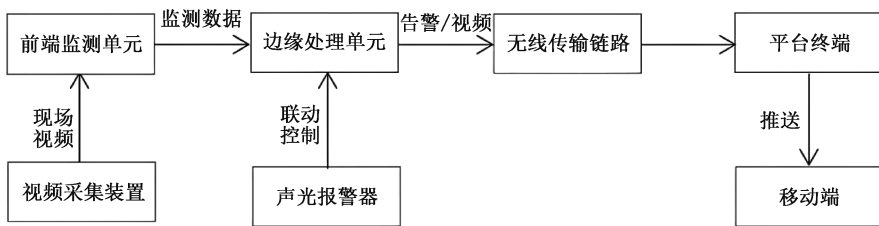


图3 系统组成框图

Fig. 3 System block diagram

前端采集激光吸收信号与视频,边缘侧完成数据汇聚、滤波和阈值比对,异常触发后执行现场告警,该架构将关键判定保留在本地,降低网络时延影响,在网络存在的情况下还可以同步进行与远程推送。

2.2 监测点位与阈值设置

监测点位覆盖防喷装置连接处、法兰接口、盘根盒、放喷流程连接部位及辅助管线关键节点,系统通过预置多点位方式对关键区域实施巡回扫描,以提高对分散泄漏风险的覆盖能力。

异常判断在边缘侧完成。系统依据单点阈值及复测结果判定是否报警,以兼顾识别灵敏性与误报控制。报警确认后,通过无线链路将监测数据、告警信息和现场视频推送至远程端,系统关键参数与部署要素见表1。

表2 试验设计与评价指标体系

Table 2 Test design and evaluation metrics

| 试验环节 | 试验场景 | 关键指标 | 判定依据 | 输出结果 |
|--------|---|-----------------|---------------------|---------------|
| 室内一致性 | 空气袋、10 $\mu\text{L/L}$ 标气袋、25 $\mu\text{L/L}$ 标气袋扫描 | 读数一致性,阈值触发 | 读数与标称接近且同向变化,超限可触发 | 一致性结果,阈值校准依据 |
| 现场可控泄漏 | 井场5点位预置,8 s巡回扫描,开启考克制造泄漏 | 报警时效,多点位响应,报警解除 | 泄漏后短时间报警,关闭泄漏源后回落归零 | 时间轴,点位峰值,处置闭环 |
| 远程联动 | 网页端与移动端访问,告警推送,视频推流 | 触达及时性,多端一致性,稳定性 | 多端可访问且告警可触达,记录可追溯 | 推送效果,传输指标 |
| 续航能力 | 多日连续运行监测 | 单电源有效时长 | 满足全天作业覆盖需求 | 续航结果与覆盖评估 |

评价指标围绕“能否发现、能否及时报警、能否稳定联动”展开,主要包括监测一致性、报警触发时效、远程传输稳定性、续航能力和联动完整性。其中监测一致性用于表征系统在受控条件下对异常气体响应的稳定程度;报警时效用于评价从异常出现到系统触发告警的时间;传输稳定性和联动完整性则用于反映系统在现场远程推送、平台展示和移动端接收过程中的可靠性。上述指标在表2中均有对应的关键指标与判定依据予以支撑:室内一致性试验中的“读数一致性”与“阈值触发”即表征监测一致性及其边界;现场可控泄漏试验的“报警时效”“多点位响应”“报警解除”对应报警触发时效和协同响应能力;远程联动试验的“触达及时性”“多端一致性”及“稳定性”反映传输与联动完整性;“续航能力”则对应系统长时间连续工作的保障程度。表格同时给出了清晰的结果输出形式,便于逐项量化校核。上述指标能够较为完整地支撑系统在工程应用场景下的可用性评价。

表1 系统参数与部署清单

Table 1 System parameters and deployment list

| 点位/周期 | 阈值判定 | 回传方式 | 供电方式 | 告警方式 |
|--------|-------|-------|-----------|---------|
| 5点/8 s | 超限+复测 | 4G/5G | 100 Ah+车载 | 声光+远程推送 |

2.3 试验设计与评价指标

为验证所提监测方法在钢丝试井场景中的适用性,本文设置室内试验和井场试验两类验证环节。室内试验用于考察系统在标准气体条件下的响应一致性及阈值合理性;该泄漏方式全程处于受控状态,泄漏量与扩散范围均在安全阈值内,不会引发次生风险,确保试验过程风险可控。井场试验则依托表2中“现场可控泄漏”场景开展,通过规范开启考克产生定量、短时的气体泄漏,用以检验报警时效、多点位响应能力和远程联动效果。试验设计与评价指标体系如表2所示。

3 现场试验结果与分析

为验证所提监测方法在钢丝试井场景中的实际性能,开展室内一致性验证与井场可控泄漏试验,并从监测一致性、报警时效、传输稳定性及续航能力等方面分析结果。评价指标包括监测一致性、报警触发时效、远程传输稳定性、续航能力及联动完整性。

3.1 室内一致性验证与阈值触发结果

室内测试采用空气袋、10 $\mu\text{L/L}$ 可燃气体密封气体袋与25 $\mu\text{L/L}$ 可燃气体密封气体袋作为对照对象,记录激光遥测系统读数并与便携式检测结果进行对比。

由图4得,系统对低浓度泄漏具有可感知响应,读数变化方向与泄漏工况一致,可用于阈值校准与上井前验证。较高浓度泄漏响应更明显,说明系统对泄漏强度变化具有可区分性,可支持分级阈值策略。



图 4 10 μL/L 标气袋泄漏模拟监测结果示意

Fig. 4 Monitoring results for the 10 μL/L standard-gas bag leakage simulation

由表 3 得, 系统对空气背景读数为 0, 对 10 μL/L 标气读数为 10.2 且与便携式检测 11 μL/L 接近, 说明遥测读数具备一致性。同时, 25 μL/L 标气能够稳定表现出超阈值特征, 为上井前阈值设定与报警链路验证提供了依据。

表 3 室内标气测试结果与对比

Table 3 Indoor standard-gas test results and comparison

| 测试对象 | 标称浓度 / (μL/L) | 系统读数 / (μL/L) | 对比仪器读数 / (μL/L) | 一致性判断 | 工程结论 |
|-------------|---------------|---------------|-----------------|-------|------------------|
| 空气袋 | 约 0 | 0 | — | 一致 | 背景基线稳定 |
| 10 μL/L 标气袋 | 10 | 10.2 | 11 | 一致 | 读数接近, 可用于校核准确性 |
| 25 μL/L 标气袋 | 25 | 可稳定检测到明显特征 | — | 有效 | 可验证超限触发链路并支撑阈值设置 |

3.2 井场可控泄漏试验与报警时效分析

在井场可控泄漏试验中, 系统对 5 个预置点位执行 8 s 每点巡回扫描, 井场五点位布设与泄漏源位置关系如图 5 所示。

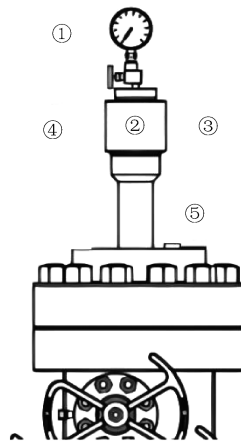


图 5 井场五点位布设与泄漏源位置关系示意

Fig. 5 Layout of five field monitoring points and the leak-source location

泄漏测试点位②位于采气树考克中心, 其余点位环绕布设。监测仪以 8 s 间隔在 5 个点位巡回扫描。报警上限设置为点位① = 100、点位② = 150、点位③ = 110、点位④ = 110、点位⑤ = 100, 下限均为 0。通过开启采气树考克制造可控泄漏, 记录报警触发与多点位响应过程, 并在关闭泄漏源后观察报警解除与点位回落, 试验详情见表 4。

表 4 现场可控泄漏试验时间轴与关键响应

Table 4 Timeline and key responses of the field controlled-leak test

| 时间节点 | 工况操作 | 关键点位 | 读数摘录 | 联动表现 | 结论 |
|---------------|-------------|-------|----------------------------------|-------------|---------|
| 16:38 前 | 系统运行, 未开泄压阀 | 全部 | 显示值为 0 | 无报警 | 背景稳定 |
| 16:38 | 打开泄压阀制造泄漏 | 点位② | — | 进入响应阶段 | 泄漏开始 |
| 16:39 约 1 min | 泄漏持续 | 点位② | 报警值 462.00 | 声光报警; 移动端推送 | 快速触发 |
| 16:50 | 泄漏量变化 | 点位②/③ | 点位② = 131 < 150; 点位③ = 109 < 110 | 不报警 | 阈值抑制误报 |
| 16:55 | 泄漏增强 | 点位② | 609 > 150 | 点位②报警 | 对强泄漏敏感 |
| 16:57 | 泄漏增强 | 点位③ | 141 > 110 | 点位③报警 | 扩散被捕获 |
| 17:00 | 泄漏增强 | 点位① | 105 > 100 | 点位①报警 | 多点位联动响应 |
| 17:05 | 关闭考克 | 全部 | 静置 5 min 后归零 | 报警解除 | 闭环完成 |
| 17:30 | 重复试验 | 同上 | 结果一致 | 试验成功 | 稳定可重复 |

表 4 试验数据显示, 模拟泄漏后系统平均在 45 s 内(约 6 个扫描周期)完成异常识别并触发报警, 满足分钟级响应需求。不同点位因距泄漏源远近及风向影响, 峰值响应幅度存在差异(最大相对偏差约 15%), 但均能反映泄漏趋势。泄漏源关闭后, 监测曲线呈指数衰减, 并在 2 min 内回落至背景噪声水平, 验证了系统对瞬态泄漏事件的捕捉与恢复能力。

3.3 远程联动性能与运行可靠性

远程联动与运行可靠性关键结果汇总见表 5。

(1) 传输稳定性: 在野外弱网环境下, 数据包平均丢包率为 0.83%, 视频流卡顿率低于 1%。

(2) 多端一致性: Web 端与移动端接收报警信息的平均延迟为 1.2 s, 实现了现场与远程的状态同步。

表5 远程联动与可靠性关键结果汇总

Table 5 Summary of remote linkage performance and reliability results

| 评价维度 | 观测结果摘录 | 量化指标 | 工程评价 | 支撑结论 |
|----------|----------------------|------------------------------|-----------|------------|
| 视频与数据可达性 | 网页端与移动端均可访问实时画面与数据 | 视频流卡顿率低于1% | 满足远程监管 | 具备跨地域可视化能力 |
| 告警触达与留痕 | 报警触发后移动端可接收推送并形成列表记录 | Web端与移动端接收报警信息的平均延迟为1.2 s | 满足联动处置 | 形成告警证据链 |
| 传输稳定性 | 间断性现场测试链路稳定 | 丢包率0.83% | 可基本保障施工需求 | 仍具优化空间 |
| 续航覆盖 | 两套电源交替可连续运行 | 100 Ah 单电源 10~12 h; 连续4天监测验证 | 满足全天覆盖 | 适配移动作业 |

(3) 续航能力: 在典型工况下(扫描频率8 s 每次, 视频常开), 单组100 Ah 后备电源支持系统连续运行10.5 h, 配合车载电源充放电管理策略, 可实现7×24 h 不间断作业覆盖。

综合室内与井场试验结果可见, 所提方法能够实现井口关键部位的连续监测、阈值化报警和远程联动, 但其环境适应性和定量能力仍需进一步优化。

3.4 局限性分析

尽管本文方法在室内和井场试验中取得了较好的应用效果, 但仍存在以下局限。

(1) 环境适应性方面, 风、雨雾、扬尘及现场遮挡会影响激光光路稳定性, 弱泄漏条件下可能增加识别难度, 后续需进一步优化点位布设和复测确认策略。

(2) 定量表征方面, 当前结果主要反映光路气体吸收响应, 尚难直接换算实际泄漏量, 后续需结合不同井口布置和工况开展对照试验, 完善分级判据。

(3) 推广应用方面, 不同井场在装置结构、点位布设和阈值设置上存在差异, 后续需进一步形成标准化部署模板和参数配置方法, 以提高跨场景复制能力。

4 结论

(1) 提出了适用于钢丝试井井口的“多位点预置、周期性巡回扫描、边缘侧阈值判定”方法, 可对关键风险部位实施连续监测。

(2) 室内标气与井场可控泄漏试验表明, 系统在10 μL/L 条件下响应稳定, 报警触发达到分钟级, 远程链路丢包率为0.83%, 单电源续航为10~12 h。

(3) 该系统通过“本地声光报警+远程视频联动”的闭环机制, 实现了泄漏风险的即时警示与远程确认, 有效规避了人工巡检的时空盲区, 显著提升了井口高危作业区域的本质安全水平。

(4) 该方法适用于井口接口分散、需要快速发现并远程确认异常的移动作业场景, 可为现场处置提供监测支撑。

致谢: 感谢中国石油西南油气田分公司川西北气矿对本文公开发表的支持。

参考文献

- [1] 曹江涛, 李泉成, 班铭, 等. 基于红外光谱成像的危险气体泄漏检测技术综述[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(19): 8050-8060.
CAO Jiangtao, LI Quancheng, BAN Ming, et al. Review of hazardous gas detection technology based on infrared spectral imaging[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(19): 8050-8060.
- [2] 迟晓铭, 肖安山, 朱亮, 等. 石化企业气体泄漏红外成像检测技术研究进展[J]. 安全、健康和环境, 2021, 21(2): 1-5.
CHI Xiaoming, XIAO Anshan, ZHU Liang, et al. Research progress of infrared imaging detection technology for gas leakage in petrochemical enterprises [J]. Safety Health & Environment, 2021, 21(2): 1-5.
- [3] 洗敏元, 薛晨亮, 王飞, 等. 气云成像泄漏监测技术在海上钻井平台的应用[J]. 设备管理与维修, 2022(3): 90-92.
XIAN Minyuan, XUE Chenliang, WANG Fei, et al. Application of gas cloud imaging leakage monitoring technology on offshore drilling platforms [J]. Equipment Management and Maintenance, 2022(3): 90-92.
- [4] 孙秉才, 张静宇, 黄伟, 等. 油气类危险化学品泄漏 FTIR 成像安全监测技术研究与应用[J]. 安全与环境学报, 2022, 22(4): 2086-2090.
SUN Bingcai, ZHANG Jingyu, HUANG Wei, et al. Research and application of FTIR imaging safety monitoring technology for leakage of oil and gas hazardous chemicals [J]. Journal of Safety and Environment. 2022, 22(4): 2086-2090.
- [5] 谷小婧, 林昊琪, 丁德武, 等. 基于红外气体成像及实例分割的气体泄漏检测方法[J]. 华东理工大学学报(自然科学版), 2023, 49(1): 76-86.
GU Xiaojing, LIN Haoqi, DING Dewu, et al. An infrared

- gas imaging and instance segmentation based gas leakage detection method[J]. *Journal of East China University of Science and Technology*, 2023, 49(1): 76–86.
- [6] 翁静, 袁盼, 王铭赫, 等. 基于支持向量机的泄漏气体云团热成像检测方法[J]. *光学学报*, 2022, 42(9): 0911002.
- WENG Jing, YUAN Pan, WANG Minghe, et al. Thermal imaging detection method of leak gas clouds based on support vector machin. [J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(9): 0911002.
- [7] 季怡萍, 邓先钦, 徐鹏, 等. SF₆ 气体泄漏红外成像检测的技术分析和应用探讨[J]. *红外技术*, 2022, 44(2): 198–204.
- JI Yiping, DENG Xianqin, XU Peng, et al. Analysis of SF₆ leakage detection using infrared imaging [J]. *Infrared Technology*, 2022, 44(2): 198–204.
- [8] WANG J F, TCHAPMI L P, RAVIKUMAR A P, et al. Machine vision for natural gas methane emissions detection using an infrared camera[J]. *Applied Energy*, 2020, 257: 113998.
- [9] WANG J F, JI J W, RAVIKUMAR A P, et al. VideoGasNet: deep learning for natural gas methane leak classification using an infrared camera[J]. *Energy*, 2022, 238: 121516.
- [10] IWASZENKO S, KALISZ P, ŚLOTA M, et al. Detection of natural gas leakages using a Laser-Based methane sensor and UAV[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(3): 510.
- [11] HOLLENBECK D, ZULEVIC D, CHEN Y. Advanced leak detection and quantification of methane emissions using sUAS[J]. *Drones*, 2021, 5(4): 117.
- [12] WU Q, YANG Y, SHI Y, et al. Highly Responsive, Miniaturized methane telemetry sensor based on open-path TDLAS[J]. *Photonics*, 2023, 10(11): 1281.
- [13] XI Z, ZHENG K, ZHENG C, et al. Near-Infrared dual-gas sensor system for methane and ethane detection using a compact multipass cell[J]. *Frontiers in Physics*, 2022, 10: 843171.
- [14] ZHU S, LIU S, TANG G, et al. Single-photon laser methane detection methodology and initial validation[J]. *Chinese Optics Letters*, 2024, 22(10): 100101.
- [15] IJZERMANS R, JONES M, WEIDMANN D, VAN DE KERKHOF B, et al. Long-term continuous monitoring of methane emissions at an oil and gas facility using a multi-open-path laser dispersion spectrometer [J]. *Scientific Reports*, 2024, 14: 623.
- [16] VOSS A, VÄNSKÄ E, WEIDMANN D, et al. Multi-open-path laser dispersion spectroscopy combined with Bayesian state estimation for localizing and quantifying methane emissions [J]. *Atmospheric Environment: X*, 2024, 22: 100260.
- [17] ALDEN C B, CHIPPONERI D, YOUNGQUIST D, et al. Validation testing of continuous laser methane monitoring at operational oil and gas production facilities [J]. *Atmosphere*, 2025, 16(12): 1409.
- [18] 徐鹏飞. 基于 TDLAS 技术的甲烷浓度检测系统设计 [D]. 杭州: 中国计量大学, 2023: 1–63.
- XU Pengfei. Design of methane concentration detection system based on TDLAS technology [D]. Hangzhou: CHINA JILIANG UNIVERSITY, 2023: 1–63.

编辑 陈志杰

第一作者简介:金毅浪,男,1989年出生,工程师,本科,2011年毕业于重庆科技学院石油工程专业,现从事油气田开发及试修井工艺管理。电话:0816-3612868,18780558799,Email:304162784@qq.com。通信地址:四川省江油市川西北气矿江油应急抢险维修大队,邮政编码:621700。