

油气储运过程中泄漏检测与应急响应机制的研究与实践

程 林 刘 涛 (国家管网集团储能技术公司平顶山项目部, 河南 平顶山 467000)

摘 要: 油气储运工程中的泄漏事故不仅可能引发环境污染, 还可能对人员和财产安全造成严重威胁。伴随储运系统复杂度的增加, 传统泄漏检测技术存在响应慢、误报多、定位不准等问题, 应急处置机制普遍存在分工模糊、协同效率低下的难题, 为此打造一个融合分布式监测、声发射识别、负压波定位等多源技术的精准泄漏识别体系, 且嵌入快速处置的闭环响应机制, 是保障油气输送安全的关键办法。借助技术路径革新与实操机制重塑, 促使泄漏防控从“被动反应”过渡到“主动感知+联动处置”协同治理阶段, 推动储运系统朝着智能化与韧性化迈进。

关键词: 油气储运; 泄漏检测; 应急响应; 多源监测

中图分类号: TE88

文献标识码: A

文章编号: 1674-5167 (2025) 032-0142-03

Research and Practice on Leak Detection and Emergency Response Mechanisms in Oil and Gas Storage and Transportation Process

Cheng Lin, Liu Tao (Pingdingshan Project Department, Energy Storage Technology Company, National Oil and Gas Pipeline Group, Pingdingshan Henan 467000, China)

Abstract: Leakage incidents in oil and gas storage and transportation projects can not only cause environmental pollution but also pose serious threats to personnel and property safety. With the increasing complexity of storage and transportation systems, traditional leak detection technologies suffer from issues such as slow response, frequent false alarms, and inaccurate localization. Concurrently, emergency response mechanisms often face challenges like ambiguous division of labor and low coordination efficiency. Therefore, establishing a precise leak identification system that integrates multi-source technologies—such as distributed monitoring, acoustic emission recognition, and negative pressure wave localization—and embedding it within a closed-loop rapid response mechanism is a key solution for ensuring the safety of oil and gas transportation. Through technological innovation and the restructuring of practical operation mechanisms, the approach to leakage prevention and control is transitioning from a “passive reaction” stage to a synergistic phase of “active perception + coordinated response,” thereby advancing storage and transportation systems towards greater intelligence and resilience.

Keywords: Oil and Gas Storage and Transportation; Leak Detection; Emergency Response; Multi-source Monitoring

随着全球油气工业的迅猛发展, 输送管网规模持续扩大, 管道泄漏事故的防控与处置已成为行业亟待解决的关键问题。不同于点状突发风险, 泄漏事故往往呈链式演化态势, 其发生不光具备隐蔽性, 还带有突发性, 常伴随着高环境负荷以及多级安全威胁, 往往会导致供能中断、生态污染甚至人员伤亡。鉴于传统手段无法全面覆盖复杂工况的现状, 迫切需要从智能识别、多源监测以及平台联动等维度, 重新构建技术路径和实操机制。当前油气储运行业正处在从静态管控迈向动态感知转型的关键节点, 唯有打通“感知—研判—响应”各环节的协同链条, 才可真正实现对泄漏风险的精准把控与高效处理。

1 油气储运过程中泄漏形式及危害分析

油气储运系统呈现出高压、高温、长距离持续运行等典型特点, 结构复杂且环境暴露面大, 让它在运行期间极易引发多种形式的泄漏事故^[1]。泄漏出现的核心机制可归为三类: 一是疲劳裂纹扩展会引发结构破坏, 特别是焊缝、弯头与接口等应力集中的区域, 长时间经受周期性压力波动后, 容易产生微裂纹并逐

渐扩展; 二是壁厚削弱是由介质腐蚀造成的, 尤其是在含硫、含水或输送杂质繁多的油气流体当中, 电化学腐蚀和应力腐蚀相互叠加, 会迅速引发点蚀穿孔; 三是存在第三方破坏情况, 诸如违规施工、非法占压等外力因素会直接破坏管道结构, 造成高强度瞬间泄漏。一旦发生泄漏, 极易引发爆炸、火灾等次生灾害, 给作业人员及周边居民的生命安全带来严重威胁, 还会造成有毒有害气体扩散、油品渗入土壤和水体, 造成生态系统持续污染, 修复费用极高, 危害范围持续延展。此外泄漏引发的输送中断会直接对下游能源供应的稳定性产生影响, 致使重大经济损失, 如黄岛油库火灾、辽河油田管道泄漏这类典型事故, 均表明传统安全管理手段在识别滞后、处理失控、机制中断等方面存在系统性不足, 因此准确辨认泄漏诱因、搭建动态感知机制, 是达成系统性防控的关键起点。

2 油气储运过程中泄漏检测技术

2.1 分布式光纤传感技术

分布式光纤传感技术作为高灵敏度在线监测手段, 在当下油气输送领域应用十分广泛。其主要优势

为可将一根光纤本体转变为连续、等效无缝的传感器,做到对长距离管道状态的全天候实时监控,这项技术借助捕捉光信号在光纤内部传播时的温度、应变和振动扰动,进而判定是否存在泄漏或结构异常现象。光纤顺着管道完成敷设后,无需电源与信号节点支持,在抗电磁干扰、覆盖长度、适应恶劣环境等方面表现极为出色,尤其适合荒野、沙漠、高寒等地段管线的远程部署,它具备的监测灵敏度可实现对毫米级别变形以及小于 0.1°C 温度差异的探测,能识别由泄漏引发的细微扰动信号。系统常借助光时域反射原理实施定位与回波分析,具备故障报警、区段识别以及信号回溯功能,构建起闭环监控链条,这种技术作为一种物理接触式的无源传感机制,在泄漏早期识别上优势明显,是构建油气输送安全冗余机制的核心单元之一^[2]。

2.2 负压波定位检测技术

负压波检测技术依靠泄漏点附近介质快速释放时产生的瞬时压力波动信号,借助管道系统里的高频响应传感装置精准捕捉异常压力变化。这种压力波会在介质里高速传播,在传播期间形成具有一定幅度的负压波谷,监测系统针对该负压波在管道首末站的时间响应差异开展精密对比分析,进而推算出泄漏位置。此技术的特点是响应速度极快、系统结构紧密,且能广泛适配输油和输气场景,在长距离、高压输送系统里表现极为突出,采用多点布设和预设阈值的方式,可切实防止因管道正常运行波动引发的误报问题,同时系统借助高频采集、滤波分析和数据追踪,达成对微小波形扰动的智能辨别,可迅速发出报警指令。这项技术在处理因突发性结构破坏而引发的大流量泄漏事件时,识别效率极高,是现阶段油气行业中应用成熟且成本可控的重要物理型检测途径之一。

2.3 声发射信号识别技术

声发射技术凭借泄漏过程中介质从高压区向低压区快速流动产生的声学信号波动来进行实时检测^[3]。这一过程所释放的弹性应力波会在管壁中传播,会激发出独一无二的声学特征,辨识度极高,借助沿管道布置高灵敏度声发射传感阵列的方式,系统可同时捕捉声波的频率、能量及传播路径等参数特征,进而打造泄漏事件的声学指纹图谱。

和传统的振动或温度监测方法相比,声发射拥有穿透力强、响应迅速、无需物理接触点等长处,特别适合高压、高速流动状态下的实时监控,为减少外界背景噪声的干扰,此技术常常配合信号增强、波形去噪以及机器学习算法来对声信号进行多维建模,保证系统能对微量泄漏、裂纹扩展等早期异常做出足够响应。声发射系统对不便开挖、不能断流的运行管线尤

为适用,给构建不间断运行与智能诊断相融合的安全管控系统提供了有力保障。

2.4 智能远程监控技术

智能远程监控技术作为信息化管理平台,核心特征是自动化采集与集中管控,在油气管道泄漏检测时对信息整合与系统决策起着关键作用。这项技术一般借助SCADA系统架构来构建,达成对压力、温度、流量、阀门状态等运行参数的全部采集与动态研究。边缘计算节点先对前端数据进行初步筛选和异常标记,传输到后端服务器后,进一步把来自声波、振动、温度等多种传感模块的输入进行融合,系统依据设定阈值或算法模型自动判定运行状态有无异常趋势或突发泄漏迹象,从决策逻辑的角度来看,此技术可开展动态趋势分析、进行事故预判并实现溯源回放,构建起完整的信息闭环。同时,平台拥有报警推送、远程下达操作指令和多终端联动控制的能力,实现从识别、预警、处置到复核的全流程数字化闭环管理,智能远程监控不仅增强了对泄漏风险的感知精准度,还为响应时效与资源调配搭建起数字化协同的基础,成为现代油气输送安全体系里不可或缺的关键部分。

3 油气储运过程中泄漏应急响应机制的建立与实施

3.1 细化分级预案体系,明确处置流程责任

油气储运泄漏应急预案关键是达成“风险分级、响应分层、责任分段”的精细化管控^[4]。实际开展操作时,应急体系依据泄漏规模和影响范围划分成三级响应机制:Ⅰ级对应轻微渗漏,Ⅱ级对应局部喷泄,Ⅲ级对应大面积扩散,不同等级分别设定了专属的触发条件和启动指令,由监测系统自动判别阈值并推送预警信息。调度中心接到报警后马上调用应急平台里的责任矩阵,依照“监测—研判—启动—封控—反馈”顺序自动生成任务流,对于Ⅰ级事件,由站点负责人在现场进行处置;Ⅱ级事件交由区域应急分队统筹开展封堵与排险行动;Ⅲ级事件则由总指挥部统一调度,协同消防、环保及医疗协作单元开展行动。为杜绝指令层级阻滞现象,预案提出要设立“并行确认制”,也就是系统连续两次检测到异常数据时,现场指挥员能直接触发一级响应,不用层层审批,不同层级的责任主体在数字化平台实名绑定任务节点,执行时自动留存痕迹且实时回传进度,达成全过程可追溯效果。为保障执行效率,各个应急单元均被配备流程化操作卡,精准明确操作顺序、工具配置以及安全边界,让响应行为由经验主导转向标准化、可验证、可复制的程序化操作模式。

3.2 组建专业应急队伍,强化实战演练训练

在油气储运泄漏的响应机制里,队伍能力是行动

效率的关键决定因素。为达成目标,应急队伍建设要依照“结构清晰、功能专责、响应闭合”的组织原则,按任务功能分成三类单元:一是现场封控小组,需立即抵达泄漏点,执行封堵、隔离以及初步排险任务,成员必须具备操作阀控系统、运用快速封堵工具、操作作业区气体检测仪的能力;二是技术支持单元,主要担负泄漏介质识别、扩散模拟、环境评估以及应急数据上传的任务,其成员由技术骨干与调度平台人员组成,需要掌握 SCADA 系统操作、数值模拟与应急预案匹配分析;三是组建远程协调指挥组,安置于调度中心处,主要开展跨单位指令发布、资源调配以及流程干预等工作。整个队伍采用“岗位责任+能力等级”双轨管理模式,为每人配备专属的岗位能力矩阵,系统按季度推送不同的训练内容,演练体系构建,演练体系上,运用“功能任务模块+全流程演练+突发扰动注入”的组合机制,每月开展岗位专项训练,每季度开展模拟泄漏联合演练,每年安排一次无预告的全场景响应拉练,演练评估结果与岗位复任关联。把所有演练数据上传至数字平台,生成“响应能力评分图谱”,以此动态优化队伍结构和个体匹配,推动人员配置从静态编制向动态实能驱动转变。

3.3 优化物资储备配置,构建应急调度网络

应急物资体系构建需以“响应时效、布点逻辑、调拨路径”作为核心设计参数,彻底替换传统仓储式配置方式。实践中,可把物资储备结构划分为由固定储备点、流动前置包、数字调度平台构成的三位一体模式,依据风险等级,把固定储备点设置在重点管段和关键节点,每个储备点要储备泄漏封堵、环境保护、通讯保障、个体防护这四类装备,并且配备专属的温湿监测装置,建立定期检修制度,保证物资可正常使用。流动前置包由应急分队随车配置好,按标准化要求打包,里面装有多规格卡箍、复合吸附材料、快速压封布、便携式气体报警器等一线操作工具,依照“即提即走即用”原则执行。

物资调度环节全面接入应急平台,创建“位置—类型—状态”三维资源信息图谱,若是收到泄漏报警,系统即刻定位泄漏点周边五公里范围内能够调用的资源点,还会匹配路线、交通条件以及调拨权限,生成最佳调度路径并推送给现场指挥终端。调用流程借助“权限节点授权+平台扫码出库+责任人闭环签收”机制,保障全过程有记录、状态能掌控、责任可追溯。此外,每季度根据事件回顾以及数据积累动态调节物资模型参数,促使物资配置从静态冗余备料升级为动态仿真精准配置,让物资体系在突发泄漏处置中拥有真正的实战响应能力^[5]。

3.4 构建应急处置闭环,实现平台联动响应

构建泄漏处置闭环的关键在于实现“信息流、指令流与数据流”的三轨同步联动,通过数字平台支撑全过程精确响应。应急联动系统以监测平台为入口节点,接收到异常信号后,自动触发“事件识别—等级判断—任务分发”流程。在事件等级初判后,平台根据预设响应模型匹配对应的调度模板,并实时生成任务清单,推送至现场指挥终端、物资管理系统和技术支持后台。各端任务在操作前需通过专属身份认证模块激活任务节点,确保操作责任与执行路径绑定。指挥系统中控平台可实时查看每个响应任务的执行状态、位置轨迹与物资调配路径,支持人工干预与任务调整,实现动态过程干预。各类数据在响应过程中通过移动终端与 IoT 设备自动上传,包括泄漏点坐标、处置时间戳、封堵图片、任务完成率等,平台据此自动生成“事件全程指令链”,用于追溯与归档。处置完成后,系统根据响应指标(响应时长、资源调度效率、操作合规度)对任务全过程打分,并归入应急响应案例数据库,用于模型优化与后续训练推送。整套机制打通了“监测—响应—处置—复盘”的闭环链条,实现从静态响应体系向智能联动生态的转化,为突发泄漏事件提供一体化、数据驱动、责任明晰的全场景支撑框架。

4 结语

油气储运系统的泄漏风险具备隐蔽性显著、反应窗口期小、处置环节多等特性,传统应急管理模式下无法支撑高强度运行环境中的快速响应需求。构建“精准检测+闭环响应”双机制,贯通技术感知、预案联动、队伍执行和平台支撑各环节,能达成从风险识别到联动处置的全程闭环管控。分布式监测技术、多级预案体系、专业应急队伍与数字平台协同配合,将为油气储运行业打造一套可复制、可落地、可评估的泄漏应急实战模型,增强系统韧性与安全运行能力。

参考文献:

- [1] 林蓓微. 油气储运管道泄漏检测系统实时监测与响应技术 [J]. 化工设计通讯, 2025, 51(09): 44-46.
- [2] 李莹玉, 孙健刚. 油气储运工程中的泄漏事故预防与应急响应机制 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2024, 44(10): 1-3.
- [3] 吴同, 邓忠华, 沈亮, 等. 长距离输油管道泄漏监测技术研究进展 [J]. 油气储运, 2023, 42(03): 259-275.
- [4] 袁满, 高宏宇, 路敬祯, 等. 油气管道泄漏检测技术综述 [J]. 吉林大学学报(信息科学版), 2022, 40(02): 159-173.
- [5] 屈静, 张建彬, 李旭芳, 等. 基于贝叶斯网络的输油管道泄漏事故情景推演 [J]. 中国安全科学学报, 2021, 31(01): 192-198.