

油气管道泄漏应急响应中的快速定位技术 与抢险修复策略优化

李尚敏 杨 梅(东营市赫邦化工有限公司, 山东 东营 257029)

薄纯真(智诚建科设计有限公司东营分公司, 山东 东营 257091)

摘要:作为国家能源输送的“生命线”,油气管道的稳定运行,对能源保障和经济发展不可或缺。但地质条件的动态变化、材料老化及人为失误,致使管道泄漏事故频繁发生,带来资源浪费与环境、安全隐患。本研究针对管道泄漏应急响应的关键技术问题,梳理了声波检测、分布式光纤等定位技术的优缺点,对比各类抢修方案的应用条件。基于现有技术不足,提出智能监测和快速修复的创新举措,结合实际案例验证成效,为管道安全管理提供新的技术方案。

关键词:油气管道;泄漏应急响应;快速定位技术;抢险修复策略

中图分类号: TE973.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167(2025)029-0154-03

Rapid positioning technology and optimization of emergency response strategies for oil and gas pipeline leaks

Li Shangmin, Yangmei (Dongying Hebang Chemical Co., Ltd., Dongying Shandong 257029, China)

Bo Chunzhen (Zhicheng Jianke Design Co., Ltd. Dongying Branch, Dongying Shandong 257091, China)

Abstract: As the lifeline of national energy transmission, the stable operation of oil and gas pipelines is indispensable for energy security and economic development. However, the dynamic changes in geological conditions, material aging, and human errors have led to frequent pipeline leakage accidents, resulting in resource waste and environmental and safety hazards. This study focuses on the key technical issues of emergency response to pipeline leaks, and summarizes the advantages and disadvantages of positioning technologies such as acoustic detection and distributed fiber optics. It also compares the application conditions of various repair plans. Based on the shortcomings of existing technology, innovative measures for intelligent monitoring and rapid repair are proposed, and the effectiveness is verified through practical cases, providing new technical solutions for pipeline safety management.

Keywords: oil and gas pipelines; Emergency response to leakage; Rapid positioning technology; Emergency repair strategy

作为能源输送的关键环节,油气管道安全维系国家能源安全与社会稳定。长期运行中,地质环境变化、第三方施工及材料老化等因素,致使泄漏事故频发且危害显著,不仅造成直接经济损失,更易引发环境与公共安全风险。本研究围绕应急技术瓶颈,系统研究声波检测、分布式光纤传感等监测技术,及模块化修复方法的适用性。经实验与工程实例验证,提出提升应急响应效能的技术策略,为管道安全管理提供新的技术支撑。

1 油气管道泄漏快速定位技术

1.1 基于硬件设备的定位技术

1.1.1 压力波定位技术

压力波定位技术,以管道泄漏时的物理现象为依据。当管道发生泄漏,泄漏点处压力会瞬间改变,进而产生压力波,该压力波会沿着管道向两端快速传播。在管道的起始端与末端安装压力传感器,凭借传感器

捕捉压力波抵达两端的时间差,同时结合管道的实际长度,以及事先测定的压力波在该管道中的传播速度,就能计算出泄漏点的位置。这一技术响应十分迅速,并且成本相对不高,在工况较为简单的管道场景中得到了广泛应用。不过,在复杂的管道环境下,它的定位精度会受到诸多因素的干扰。管道内部介质流速的不稳定,以及温度的大幅波动,都会对压力波的传播造成影响,改变其传播速度与路径,最终导致定位准确性下降。

1.1.2 光纤传感定位技术

光纤传感定位技术,基于光纤独特的光弹效应与热光效应,可对管道应变、温度等参数展开实时监测。一旦管道发生泄漏,泄漏点周边的温度会异常波动,管道结构也会因受力改变产生应变。光纤传感器对这类变化极为敏感,能迅速将其转化为光信号的改变。借助专业设备和算法对光信号分析处理,便能精准定

位泄漏点。这项技术灵敏度极高，定位精准，且拥有出色的抗干扰能力，在对定位精度要求严苛的场景中优势明显。但它也存在一定弊端，整套系统搭建成本高昂，安装时需专业技术指导，后期维护同样复杂，对技术人员的专业知识和实操经验要求都很高。

1.2 基于数据分析的定位技术

1.2.1 流量平衡法

流量平衡法基于管道物料守恒的原理，通过不间断地对比管道入口与出口的流量数据，判断管道是否存在泄漏情况，并计算出泄漏量。一旦确定管道发生泄漏，便借助管道拓扑结构和流体力学模型，运用特定计算机算法定位泄漏点。该技术在输送介质流量相对稳定的管道中，定位效果较好。但此方法对流量测量设备的精度要求近乎苛刻，微小的测量误差，都会严重影响定位的准确性。在多分支管道系统中，由于各分支的流量分配会随工况不断变化，流量分布错综复杂，常规算法难以准确追溯泄漏源头，导致定位难度大幅增加。为实现精准定位，需配备高精度流量测量设备，并优化定位算法，以适应复杂的管道网络。

1.2.2 机器学习算法定位

大数据和人工智能技术的迅猛发展，为油气管道泄漏定位开辟了新路径，机器学习算法在该领域的应用愈发广泛。借助收集管道运行过程中的压力、流量、温度等多维度数据，以支持向量机、神经网络等常用机器学习算法搭建定位模型，从而实现对管道泄漏状态的精准识别与定位。机器学习算法凭借强大的自主学习能力，可挖掘数据特征与潜在规律，在复杂管道工况下，对泄漏定位展现出良好适应性。但该算法在实际应用中存在短板。模型训练对数据质量、数量要求苛刻，数据出现偏差或数量短缺，模型性能便会下滑。此外，算法模型“黑箱”特性明显，可解释性差，操作人员难以理解模型决策机制，这会降低对定位结果的信任，干扰应急决策的科学制定。

2 油气管道泄漏抢险修复策略

2.1 传统抢险修复方法

2.1.1 带压封堵技术

在保障油气管道安全运行的工作中，带压封堵技术作为处理管道泄漏且维持不停输的常用方法，应用广泛。当管道出现泄漏情况，工作人员会立即在泄漏点两侧部署专用封堵设备。设备通过密封结构和机械装置的协同运作，阻止管道内介质流动，为后续泄漏点修复工作创造安全条件。带压封堵技术优势明显，它能维持管道运输的连续性，防止因停输给生产带来负面影响，还能快速遏制泄漏，降低事故造成的经济和环境危害。但这项技术对设备性能要求极高，设备

要具备良好的耐压和密封性能，来抵御管道内的高压及介质腐蚀。并且，其操作流程复杂，各环节环环相扣，需专业人员严格按规程操作。

2.1.2 补焊修复技术

补焊修复技术作为油气管道泄漏修复的常用手段，先将管道泄漏点杂质、油污等清理干净，随后运用焊接工艺对受损部位进行修复。该技术主要适用于泄漏孔径小，且管道材质焊接性能良好的场景，因其所需设备和材料常见，故而成本较低，操作流程也相对简便。然而，由于油气管道内部充斥易燃易爆的油气介质，补焊作业时，一旦焊接参数设置不当，或是现场安全措施不到位，极有可能点燃管道内的油气，引发火灾甚至爆炸，造成严重的人员伤亡与财产损失。所以，实施补焊修复前，作业人员务必全面评估风险，严格遵循焊接操作规程，落实气体检测、防火防爆等安全防护措施。

2.2 新型抢险修复策略

2.2.1 智能修复机器人

智能修复机器人是管道修复领域的创新设备，近年来备受关注。它可凭借自身的驱动系统，在管道内部实现自主移动，利用搭载的超声、激光等多种传感器，对管道内壁进行全方位扫描，精准定位泄漏点并判断损坏程度。基于检测数据，机器人能自动匹配适用的修复工具，灵活运用焊接、封堵等技术，完成管道修复工作。该设备优势显著，修复效率远超人工，作业质量稳定，即便在狭窄、高风险的复杂管道环境下，也能正常作业。然而，目前智能修复机器人的研发成本居高不下，技术尚处于完善阶段。实际应用时，机器人续航能力有限，难以满足长距离管道修复需求，且通信易受管道结构和介质干扰，稳定性欠佳，这些问题制约了它的大规模推广应用。

2.2.2 纳米材料修复技术

纳米材料因具有独特物理与化学属性，在管道修复领域展现出极大应用潜力。纳米材料修复技术，利用纳米材料的自修复特性，可针对管道细微裂缝与损伤实施修复。当纳米材料与管道表面接触，便会触发物理化学反应，生成一层致密保护膜。保护膜一方面能将管道和输送介质有效隔开，阻止介质腐蚀管道；另一方面，还能修复管道在微观层面的缺陷，显著延长管道的使用寿命。纳米材料修复技术优势明显，不仅修复效果突出，操作简便，对管道原有结构的影响微乎其微，且在确保修复质量的同时，还能缩短修复周期。但这项技术的推广应用仍面临诸多挑战。一方面，纳米材料生产成本高，限制其大规模应用；另一方面，纳米材料在复杂管道环境中的长期稳定性，及其对人体健康、生态环境的潜在影响，缺乏足够研究

和验证，有待进一步探索解决。

3 快速定位技术与抢险修复策略的协同优化

3.1 技术协同的必要性

于油气管道泄漏应急工作而言，快速定位技术与抢险修复策略是影响响应效能的关键，二者相互制约、协同作用。精准定位泄漏点是制定科学抢险策略的前提，以此为基础方可结合现场实际情况，合理选择修复技术及设备。此举既能大幅提升修复效率，减少泄漏带来的经济损失与环境风险，又能增强抢险工作的安全性和精准性。

3.2 协同优化方法

3.2.1 构建一体化应急响应平台

一体化应急响应平台的搭建，有力整合快速定位技术与抢险修复策略。平台整合数据采集、地理信息系统、资源管理等功能模块，实现对管道运行状态的全时段监控。实时汇聚的运行数据，既为泄漏点精准定位提供数据支撑，也能同步呈现管道工况与周边环境信息，为科学决策提供重要参考。平台的数据共享特性尤为突出，其打破部门间信息孤岛，促进跨领域协作配合。这不仅显著提升应急响应速度，更通过资源优化配置，为高效处理泄漏事故提供保障。

3.2.2 基于大数据的决策支持

依托大数据技术，海量历史泄漏事故数据得到系统性整合与挖掘。数据围绕事故成因、泄漏规模、影响范围等维度，清晰反映各类泄漏事故的特点及发展规律，在此基础上搭建起完整的事故案例库，为后续分析和决策提供坚实的数据基础。同时，大数据技术实现了管道实时数据与历史数据的深度融合分析，通过对数据的关联建模，能够精准预测管道运行趋势，识别潜在风险点。管理部门借助分析结果，提前开展风险评估并制定针对性预案，使应急响应更具主动性和精准性。这种前瞻性管理模式，可在事故发生前采取干预措施，将损失控制在最低限度，为管道安全稳定运行提供长效保障。

4 案例分析

4.1 某输油管道泄漏事故

运行中的某输油管道突发泄漏，大量原油向外喷涌。相关部门迅速响应，借助压力波定位技术查找泄漏点。然而，管道沿线地形复杂，高山深谷交错，与此同时，管内原油在温度、压力的综合作用下，流动状态极不稳定。二者共同干扰压力波传播，造成定位结果与实际情况偏差较大，无法精准确定泄漏点的具体位置。开展抢险作业时，现场运用传统带压封堵技术。但管道实际工况远比预想的复杂，致使操作难度剧增。屋漏偏逢连夜雨，封堵设备突发故障，导致抢

险作业难以为继。由于抢险耗时显著拉长，原油持续大量泄漏，周边土壤和水体受到严重污染，生态环境遭受极大破坏风险，亟需采取补救措施。

4.2 改进措施及效果

针对此次事故暴露出的定位失准、抢险效率欠佳等突出问题，相关部门快速响应，从多个维度对快速定位技术与抢险修复策略展开全面优化。在定位环节，突破传统模式，创新性地将光纤传感定位技术和机器学习算法深度融合。光纤传感器像敏锐的触角，实时、精准地感知管道应变、温度等细微变化，采集大量一手数据。机器学习算法则对这些数据进行挖掘，解析其中隐含的规律。二者优势互补，显著提升定位精度，为后续抢险作业筑牢基础。在抢险修复阶段，相关部门引入智能修复机器人，并制定了一套涵盖操作流程、安全防护等内容的详细规范。后续模拟泄漏事故演练表明，改进成效显著：应急响应时间大幅缩短，泄漏点定位误差明显降低。智能修复机器人能按照指令，有条不紊地开展作业，既提升了抢险修复效率，又保证了修复质量。

5 结论与展望

本文聚焦油气管道泄漏应急响应，对快速定位技术与抢险修复策略展开深入研究。系统梳理现有技术和策略，从技术原理、应用场景、实施难点等多维度进行剖析，提出二者协同优化的方法，并结合实际案例，验证优化方案的可行性和有效性。但随着油气管道行业规模持续扩张，运行环境日益复杂，对泄漏应急响应技术的要求愈发严格。未来，一方面要加大技术创新投入，综合运用新兴技术，研发定位更精准、响应更迅速的快速定位技术，以及操作更便捷、修复更高效的抢险修复设备，提升应急响应的智能化水平。另一方面，要持续完善应急管理体系，强化部门间沟通协调，增强应急响应的协同性。此外，搭建管道运行实时监测系统，强化风险评估，做到防患于未然。同时，推动材料科学、计算机科学等多学科交叉融合，为油气管道泄漏应急响应技术的突破提供新契机。

参考文献：

- [1] 朱本廷, 等. 油气输送管道事故应急响应现存问题及解决方案 [J]. 石油工业计算机应用, 2010 (3):4.
- [2] 吴轩, 李竟, 胡京民, 等. 油气管道重大突发事件应急响应对策 [J]. 油气储运, 2019, 38(12):6.
- [3] 康前前. 海底输气管道泄漏扩散风险管控研究 [D]. 中国石油大学(华东), 2019.
- [4] 王卫强. 基于 Web GIS 的油气管道风险分析与应急响应系统研究 [D]. 中国石油大学(华东), 2009.
- [5] 付立武. 油气长输管道维抢修预警分级响应体系 [J]. 油气储运, 2012, 31(5):4.