



# Research and application of natural gas long distance pipeline leakage detection technology

Mailun Liu

Oil and Gas Regulation Center, National Petroleum and Natural Gas Pipeline Group, Beijing, 100020, China

## Abstract

As a clean energy source, natural gas has seen its proportion in China's energy mix steadily increase year by year. Long-distance pipelines serve as the core infrastructure ensuring its safe and efficient transportation. However, frequent leakage incidents caused by corrosion, third-party sabotage, or geological disasters not only lead to resource waste and environmental pollution but may also trigger major safety accidents like explosions. Statistics show that over 60% of leakage incidents in China's long-distance pipelines result from delayed detection. Traditional single detection technologies (such as negative pressure wave detection and manual inspections) suffer from low sensitivity, poor real-time performance, and high costs, making them inadequate for complex scenarios. Therefore, developing efficient and precise leakage detection technologies and establishing an intelligent detection system integrating multiple techniques have become urgent requirements for ensuring the safe operation of natural gas pipelines. This paper first provides a detailed analysis of leakage mechanisms and risks in long-distance natural gas pipelines, then elaborates on the specific classifications and principles of leakage detection technologies, and finally examines application cases from multiple perspectives with detailed comparisons, aiming to offer valuable references and insights for related research.

## Keywords

Natural gas long-distance pipeline; Leak detection; SCADA system; Optical fiber sensing; Machine learning; Risk assessment

# 天然气长输管道泄漏检测技术的研究与应用研究

刘麦伦

国家石油天然气管网集团油气调控中心, 中国·北京 100020

## 摘要

天然气作为清洁能源,在我国能源结构中占比逐年提升,长输管道是保障其安全高效运输的核心基础设施。然而,管道因腐蚀、第三方破坏或地质灾害引发的泄漏事故频发,不仅造成资源浪费与环境污染,更可能引发爆炸等重大安全事故。据统计,我国长输管道泄漏事故中,因检测滞后导致的损失占比超过60%,传统单一检测技术(如负压波法、人工巡检)存在灵敏度低、实时性差、成本高等问题,难以满足复杂场景需求。因此,研发高效、精准的泄漏检测技术,构建多技术融合的智能检测体系,已成为保障天然气管道安全运行的迫切需求。本文先是详细分析了天然气长输管道泄漏机理与风险,随后具体阐述了泄漏检测技术的具体分类与原理,最后从多方面分析了泄漏检测技术应用案例并进行了详细对比,以期对相关研究提供有益参考与借鉴。

## 关键词

天然气长输管道; 泄漏检测; SCADA系统; 光纤传感; 机器学习; 风险评估

## 1 引言

天然气长输管道作为国家能源动脉,其安全运行直接关系到能源供应稳定性与公共安全。近年来,随着管道里程快速增长(我国已建成超15万公里),泄漏事故频发,仅2020-2022年就发生重大泄漏事件23起,直接经济损失超10亿元。传统检测技术如人工巡检、负压波法等,受限于环境干扰、响应速度等因素,难以满足高精度、实时性需求。例如,负压波法在管道末端或分支处的定位误差可达数

百米,而光纤传感技术虽能实现长距离监测,但成本高昂且易受温度交叉敏感影响。与此同时,机器学习、物联网等新兴技术为泄漏检测提供了新思路,通过数据驱动模型实现异常特征提取与智能预警。本文聚焦多技术融合检测方案,结合实际工程案例,探讨其技术优势与应用前景,旨在为天然气管道安全运行提供理论支持与实践参考。

## 2 天然气长输管道泄漏机理与风险分析

### 2.1 泄漏原因分类

天然气长输管道泄漏诱因复杂多样,主要分为四类:一是腐蚀穿孔,管道内壁长期接触天然气中的硫化氢、水分等腐蚀性介质,会引发电化学或应力腐蚀开裂,外壁因土壤

【作者简介】刘麦伦(1990-),男,中国云南楚雄人,本科,工程师,从事天然气长输管道运行与控制研究。

微生物、电解质形成腐蚀电池,导致管壁减薄穿孔,如我国西部某管道因土壤腐蚀泄漏,修复成本超千万元;二是第三方破坏,施工机械误挖、非法打孔盗气等人为因素占比超40%,具有突发性和不可预测性,如2021年某省输气管道被挖掘机划破引发爆炸;三是地质灾害,地震、滑坡等可能导致管道弯曲、断裂或悬空,如汶川地震造成多条管道断裂并引发次生火灾;四是材料与制造缺陷,焊接质量不达标、管材强度不足等可能在运行中因压力或温度变化导致裂纹扩展。实际事故中,多种因素常协同作用,如腐蚀管壁在地质应力下更易开裂,第三方破坏可能加剧缺陷扩展。

## 2.2 泄漏扩散模型

天然气长输管道泄漏气体的扩散行为受初始压力、风速、地形等因素影响,物理过程分三个阶段:喷射阶段,高压气体从破裂口高速喷出形成射流,压力骤降致温度降低;扩散阶段,气体与空气混合,受浮力、湍流及风速影响形成可燃云团,重气沿地面扩散,轻气快速上升;稀释阶段,云团逐渐扩散至安全浓度以下,遇点火源可能爆炸<sup>[1]</sup>。数学模型上,高斯模型适用于中性气体短距离扩散,以正态分布描述浓度;CFD模拟基于计算流体力学,考虑复杂边界条件,可精确预测重气扩散路径,但高斯模型难模拟瞬态泄漏,CFD模型计算量大,均需结合实测修正。

## 2.3 风险评估方法

风险评估作为泄漏检测技术优化的前提,需综合考量事故发生可能性与后果严重性。定性分析方面,HAZOP方法通过“过多”“过少”等引导词,剖析管道运行参数偏差,识别如“压力过高致管道破裂”等潜在泄漏场景,某企业应用后新增12项安全联锁装置,使泄漏事故率下降25%。定量计算上,泄漏概率基于历史数据与可靠性工程,采用故障树分析计算,如某管道腐蚀泄漏概率由腐蚀、检测失效、保护失效三概率相乘得出;后果评估则结合扩散模型,计算热辐射、冲击波影响范围,如甲烷爆炸破坏半径可通过TNT当量法估算。某长输管道项目据此定量评估,确定高风险段加密光纤传感器并设置自动关断阀,成功将事故后果等级从“重大”降至“一般”。

# 3 泄漏检测技术分类与原理

## 3.1 基于硬件传感的检测技术

基于硬件传感的检测技术在天然气长输管道泄漏检测中发挥着重要作用。压力波分析法,是利用管道泄漏时引发的压力突变产生压力波,此波会向管道两端传播,在管道关键位置安装压力传感器,捕捉压力波的到达时间与特征,结合压力波传播速度和传感器位置信息,就能精准定位泄漏点。负压波法与之类似,泄漏瞬间泄漏点压力急剧下降形成负压波,以一定速度向上下游传播,分析上下游压力传感器记录的压力下降波形,依据波形到达时间差和负压波传播速度,可确定泄漏点位置<sup>[2]</sup>。分布式光纤传感技术,是沿管道

铺设光纤,光纤兼具传输与传感功能,管道周围环境变化如温度升高、产生应变时,光纤中光信号特性改变,监测这些变化能实时感知管道沿线温度和应变分布,进而发现泄漏位置。声波检测法,则是天然气泄漏会产生频率低、传播距离远的次声波信号,在管道周围布置声波传感器捕捉信号,分析其频率、振幅等特征,就能判断是否泄漏及大致位置。

## 3.2 基于软件模型的检测技术

基于软件模型的检测技术为天然气长输管道泄漏检测提供了高效且智能的解决方案。SCADA系统集成是其中重要一环,它能实时采集管道运行时的流量、压力、温度等各类数据,经实时监测与分析后,设定合理报警阈值,一旦数据超出正常范围,便会立即发出异常报警,提示可能存在泄漏情况。统计过程控制(SPC)则运用统计学原理,对管道正常运行参数展开统计分析,明确参数正常波动范围,当实际参数偏离此范围,即可判定可能发生泄漏,且通过不断更新优化统计模型,能提升泄漏识别准确性<sup>[3]</sup>。在机器学习与AI算法方面,监督学习如支持向量机(SVM)和神经网络,借助大量已知泄漏与正常状态样本数据训练,建立分类模型,对新管道运行数据分类以判断泄漏及模式;无监督学习采用聚类分析,对异常数据聚类,利用泄漏数据独特特征区分其与正常数据,发现潜在泄漏;深度学习中长期记忆网络(LSTM)等算法可处理时间序列数据,分析历史运行数据学习变化规律,预测未来运行状态,提前察觉泄漏趋势。

## 3.3 多技术融合检测方案

多技术融合检测方案为天然气长输管道泄漏检测带来了更为全面和精准的解决方案。其中,硬件与软件协同检测成效显著,以分布式光纤传感技术与机器学习算法结合为例,光纤传感技术可实时采集管道沿线的温度和应变数据,将这些数据输入机器学习模型后,凭借模型对大量历史数据的学习能力,能更精准地分析数据变化,进而判断是否存在泄漏以及泄漏的严重程度,极大地提升了检测的准确性与可靠性。另外,无人机巡检与地面传感器联动也发挥着重要作用。无人机搭载高清摄像头、热成像仪等设备,对管道沿线开展定期巡检,能迅速发现管道表面的腐蚀、变形等异常情况。与此同时,地面布置的压力传感器、流量传感器等实时监测管道运行参数。当无人机巡检结果与地面传感器数据相互印证,且都提示可能存在泄漏时,便可进一步确定泄漏位置和原因,实现全方位、多层次的泄漏检测,为管道安全运行提供坚实保障。

# 4 泄漏检测技术应用案例分析

## 4.1 案例1:基于负压波法的某长输管道检测

某长输管道采用基于负压波法的检测系统,该系统架构完备,由压力传感器、数据采集单元、信号处理模块和中央控制单元组成。压力传感器均匀分布于管道沿线关键位置,实时采集压力数据;数据采集单元将传感器信号转为数