

# 城镇燃气管道泄漏检测技术的对比分析与工程应用

郭金才 (宜丰昆仑燃气有限公司, 江西 宜春 336000)

**摘要:** 本研究对城镇燃气管道泄漏检测技术进行了全面的分析, 对城镇燃气管道泄漏检测技术的分类及原理进行了详细的阐述, 介绍了声学检测法、光学检测法、电化学检测法、光纤传感等主要的检测方法。从精度、反应速度、环境适应性、经济成本四个方面对检测方法进行了详尽的评价, 分析了各种检测技术之间的优劣、适用条件, 为后面设备的选择提供依据。

**关键词:** 城镇燃气管道; 泄漏检测技术; 对比分析; 工程应用

**中图分类号:** TU996 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2026) 005-0153-03

## Comparative Analysis and Engineering Application of Gas Pipeline Leakage Detection Technology in Urban Areas

Guo Jincai (Yifeng Kunlun Gas Co., Ltd., Yichun Jiangxi 336000, China)

**Abstract:** This study provides a comprehensive analysis of urban gas pipeline leak detection technologies, detailing their classification and operational principles. It introduces key detection methods including acoustic detection, optical detection, electrochemical detection, and fiber optic sensing. The evaluation focuses on four critical aspects: detection accuracy, response speed, environmental adaptability, and cost-effectiveness. By comparing the strengths and limitations of these technologies as well as their applicable conditions, the research offers a solid foundation for equipment selection in subsequent applications.

**Keywords:** urban gas pipeline; leak detection technology; comparative analysis; engineering application

城镇燃气管道属于城市能源输送的重要基础设施, 它的安全、稳定运行十分重要。随着技术不断创新, 各种先进的检测技术相继问世, 但是每种方法都有其适用范围的局限性及应用场景的特点。本文对目前城镇燃气管道泄漏监测技术进行比较, 用典型工程案例进行分析, 为相关人员在技术选型时提供依据和借鉴。

### 1 城镇燃气管道泄漏检测技术概述

#### 1.1 泄漏检测技术分类

按照检测原理的不同, 燃气管道泄漏监测技术大致可分为四大类: 声学探测方法就是通过分析介质中声波传播特性, 对频率、振幅、传输时延等参数的变化情况进行分析, 来确定异常声响信号的位置。光学成像手段, 即利用红外热成像或者激光散射理论, 在获取到环境温度波动或者气体分子光谱特征之后进行精确识别。

电化学传感模式按照电解质反应机理, 依靠电流或者电压响应来判断目标组分浓度, 从而判定是否存在泄漏点。光纤分布式感知系统通过对入射光调制效应的实时监测<sup>[1]</sup>, 用相位偏移、衰减量、色散现象来量化的表示管路的状态, 达到全方位动态监控。

根据检测原理的不同, 泄漏探测技术还可大致分为直接测量法和间接推断法两类: 直接测量法: 以目标介质为研究对象, 依靠组分、浓度或者物理性质的变化来定位, 常见的方法有气体传感器监测、示踪剂

追踪等。间接推断法: 依靠管道运行参数(压力、流量、温度等)的异常变化或者外部环境信号(土壤电阻率、声学特征等)的变化来进行逻辑推理判断, 进而推测出泄漏点的大致位置, 具体应用有压力波扫描、负压脉冲评价、超声成像等。

#### 1.2 主流泄漏检测技术原理

声波检测技术就是利用管道泄漏时, 泄漏点处物质损失造成压力突然下降, 沿管道以声速传播形成负压波, 该波引起管道沿线压力变化。在管道沿线设置声波传感器, 测量压力信号的时间差及波形特征, 使用小波变换分析法或者神经网络学习的方法确定泄漏点所在位置, 预测泄漏量。

红外热成像检测技术根据斯特藩-玻尔兹曼定律, 所有高于绝对零度的物体都会发射出与其温度有关的红外辐射。红外热成像仪接收管道周围环境发出的红外辐射来生成温度场图像<sup>[2]</sup>, 当燃气泄漏时, 泄漏处由于气体蒸发吸热或者燃烧放热而产生温度异常, 通过分析温度差异就可以找到泄漏点。

气体传感器检测技术, 使气体和传感器内部敏感元件发生反应, 引起电信号的变化来完成泄漏检测。电化学型传感器是气体扩散进入电解液后发生氧化还原反应, 产生与气体浓度成线性关系的电流信号; 热导式传感器是检测气体热导率不同造成的电阻值变化, 再将电阻值的变化转换成电压信号输出。

## 2 主流泄漏检测技术对比分析

### 2.1 检测精度对比

根据精度理论分析可知,各种燃气管道泄漏检测技术各有优缺点。声波探测法依靠负压波动的时差来实施定位,理想情况下可以达到管长1%到2%的误差范围,但是实际应用会受到材料特性、介质属性、环境噪声等因素的影响。红外热成像技术虽然在高分辨率设备辅助下可以达到厘米级的精度,但是在遇到微小的泄漏或者温差较小的时候,很容易出现误判。气体传感方法依靠传感器类型以及标定水平,电化学传感器由于灵敏度较高而被广泛使用,但是同样存在交叉干扰的风险。光纤传感系统因为具有分布式结构,所以能够实现较高的空间分辨能力,并且抗电磁干扰的能力很强,但是要实现精准的解码还需要复杂的信号处理算法来完成。

### 2.2 响应速度对比

根据燃气管道泄漏检测技术响应时间理论分析可知,不同的方法有较大的差别。由于负压波的传播速度接近音速(1000m/s),理论上可以实现秒级信号的采集。红外热成像检测依靠的是目标温差累积效应,其典型的响应时间周期稳定在秒到分钟之间<sup>[1]</sup>。气体传感器受分子扩散速率和传感单元动态特性所限,电化学式设备实际检测时间多集中在10s-60s。光纤传感除了具有毫秒级的敏感度外,但是要想实现准确识别还需要依靠解调算法来获取结果,所以尽管该法效率较高,但仍需要较长的操作时间。

### 2.3 经济性对比

声波检测设备单点探测器成本区间在5000到20000元人民币之间,但是使用时需要多节点传感器布局方案来实现。红外热成像仪价格昂贵,便携式一般5-20万元,固定安装系统50万元以上。气体传感网络的成本受传感器数量规模影响,每个单元大约1000元到5000元之间,部署范围越大则成本也越高。光纤传感技术的初始投资较高,每公里成本在10万-30万元之间,但是可以实现远距离连续监测的功能。

声波检测定时检查传感器连接和信号传输线路,花费少;红外热成像定时清理镜头、校准温度基准,花费中等;气体传感器3到6个月更换敏感元件或校准,花费较多;光纤传感系统不用日常维护,但光纤断裂的修补费用很高。

短距离、低风险的场景下,声波探测技术具有明显的优势;中远距离或者核心地区开展监测活动时,会更多地采用光纤感应方案;开放式空间和短期内变动频次高的环境之下,气体感应仪器成为了更加适合的选择;将红外热图仪部署在温度湿度都很高的场所

里,其实际使用情况必须得到全方位的考虑,然后才慎重决定是否适合特定的要求。

### 2.4 对比总结

根据前面的分析可知,各种检测技术各有优缺点。声波检测的测量精度较高、响应速度快,但是抗干扰能力差;红外热成像操作简便直观,但是成本高、环境适应性差<sup>[4]</sup>;气体传感器覆盖面广,但是维护起来不方便;光纤传感由于其高精度的特点和良好的电磁兼容性受到推崇,但是初期投资大。实际应用时需要综合考虑管道长度、运行工况、预算分配、监测需求等各方面因素之后再做出选择,城市核心区域的高压管线应优先选用光纤传感方案,工业园区的中压管网应采用声波结合气敏的组合系统,偏远地区的低压线路可以采用经济型声波检测装置。

## 3 城镇燃气管道泄漏检测技术的工程应用

### 3.1 应用场景分析

钢管具有强度高、耐压强度高、耐腐蚀性好的特点,被用作城市高压燃气管道系统的主要材料。但是钢管容易受到点蚀或缝隙腐蚀的影响,出现泄漏的情况,虽然泄漏位置大多比较隐蔽,泄漏规模也比较小,但是要准确找到泄漏的位置,仍然需要借助精密的检测设备才能保证检测的准确性。

聚乙烯(PE)管具有较好的化学稳定性、柔性,在中低压天然气输送中具有明显的优势。但是聚乙烯管的线性膨胀系数大,接口处容易因为应力集中而产生渗漏隐患,而且聚乙烯管对声波信号的衰减作用大,传统的基于声学原理的检测方法很难达到理想的效果。

由于城市中心燃气管网高密度布置,周围环境很复杂(存在强电磁场干扰、机械振动等各种干扰因素),因此对监测系统有很高的抗干扰要求。该地区人口稠密,风险大,需要紧急应对,必须研发出快速反应的即时监测方案。郊区的管道受到外界的干扰比较小,但是线路复杂,巡检工作繁重,应使用覆盖面积大、运维成本低的技术手段<sup>[5]</sup>。工业园区内部管线大多处在化工生产环境之中,极易遭到腐蚀介质、高温工况等破坏,所用设备必须具有良好的耐蚀性及热稳定性。

### 3.2 技术选型与配置

对城市核心区域高压钢管的监测,推荐使用光纤传感技术,该技术电磁兼容性好、空间定位精度高,长距离连续监测效果好。对于中低压聚乙烯(PE)管道,采用声波-气敏双模态传感器组合,声学手段主要用来精确定位泄漏点,气敏元件用来识别目标气体成分特征。

对于郊区长输管线的应用背景,分布式光纤传感

系统或者负压波动分析法都可以选择。分布式光纤传感系统全路径覆盖范围广、维护成本低的优势比较明显；负压波动分析法通过泄漏引起压力脉冲信号的变化来完成故障诊断。工业园区内管道巡检可以采用电化学传感阵列和多源数据融合的方式，可以消除交叉污染干扰，综合测量精度和可靠性水平大大提高<sup>[6]</sup>。

光纤传感系统要沿着管道全程敷设传感光纤，重点区域（阀门井、弯头处）要加密布置。声波传感器的间距根据管道材质和声波衰减系数来确定，钢管间距为 500 - 1000m，PE 管间距缩减为 200 - 500m。气体传感器应布置在管道沿线低洼处、人口密集区上风向和阀门井内部，检测范围要覆盖全部保护区域。红外热成像仪适合安装在调压站、门站等固定监测点或者装配在移动巡检车上，定期对重点区域进行扫描。

### 3.3 工程实施要点

光纤传感安装时，光纤不能过度弯曲（弯曲半径  $\geq 10$  倍光纤直径），接头处采用熔接技术减小损耗。声波传感器安装时要与管道刚性连接，减少振动干扰，校准传感器时间同步精度到微秒级。气体传感器安装前要进行零点校准和量程标定，保证检测数据的准确性。红外热成像仪安装高度要保证视野覆盖目标区域，不能有强光直射。

光纤传感系统要配备采样率  $\geq 1\text{MHz}$  的高速数据采集卡，及时采集光信号的变化；声波检测系统采用多通道同步采集，采样频率不低于 10kHz。数据预处理阶段要进行滤波去噪（小波变换、卡尔曼滤波）、特征提取（负压波波分析、温度梯度计算）和异常检测（阈值比较或者机器学习算法），之后把数据无线传送到监控中心，存储时长不少于 3 年。

三级报警阈值分别为，一级预警（疑似泄漏）系统自动记录并报警给巡检员；二级预警（确认泄漏）声光报警；三级预警（重大泄漏）关闭上下游阀门、启动应急排风、打 119、110 求救。应急预案包括勘查泄漏具体位置、隔离泄漏范围，疏散泄漏范围内人员，紧急处置泄漏之后的事故以及事故分析和总结。

### 3.4 运维管理策略

光纤传感系统运行维护中，有半年一次的光功率测量、一年一次的全程衰减检测等常规检测任务。声波传感器要按季度检查连接状态并校准同步时间参数。气体传感器每月需要做零点和量程校正，半年更换敏感元件以保证其性能稳定。红外热成像设备还要做年度温度标定、镜头清洁保养等工作。

建立故障树分析模型，就信号中断、数据异常这些常见问题制订系统的排查方案。光纤通信链路断点定位时，可以采用 OTDR 设备完成精确检测，完成熔

接和修复之后进行衰减检测。声波传感器如果失效，就要检查其供电情况和传输路径是否完整，更换相应的部件后，要立即进行时间参数的校准。如果气体传感装置出现故障，重点应该放在检查供气管道的连接状态和电气接口的可靠性上，部件更换完毕后要重新进行量程标定。

运维人员要取得特种设备操作证，并且接受过专业的培训，培训内容包括设备操作、数据解读、应急处理等内容。制定安全管理制度，巡检时穿戴便携式气体检测仪、防静电服，禁止雷雨天气户外作业，定时开展泄漏事故应急演练，保证人员熟悉应对流程和设备操作<sup>[7]</sup>。

## 4 结束语

城镇燃气管道泄漏检测技术系统对比研究及其工程实际应用，对于城市供气安全有非常现实的意义。从精确度、反应速度、适应环境状况、经济成本等各个方面来评价各种检测方法，结合具体使用场景加以考虑，可以为方案选择提供理论依据。在具体工程中，在充分了解管材性能、管线全长、周围地质条件以及资金投入等实际情况之后，要合理地设计出科学的技术组合策略。健全的设计规划以及运维管理，是保证监测设备长期稳定运行、达到早期预警目的的重要条件。

### 参考文献：

- [1] 赵宏伟. 城镇燃气管道泄漏检测技术的创新与发展 [J]. 天然气化工 (C1 化学与化工), 2022, 47(10): 109-115.
- [2] 高飞光. 光纤传感技术在燃气管道泄漏监测中的应用研究 [J]. 传感技术学报, 2021, 34(6): 869-873.
- [3] 郭峰宇. 无人机巡检在城镇燃气管道安全管理中的实践探讨 [J]. 城市燃气, 2023, 23(3): 38-41.
- [4] 李炜, 朱芸. 长输管线泄漏检测与定位方法分析 [J]. 天然气工业, 2005, (6): 65-65.
- [5] 刘海峰, 胡剑, 杨俊. 国内油气长输管道检测技术的现状与发展趋势 [J]. 天然气工业, 2004, (11): 12-12.
- [6] 闫松, 乔佳, 马旭卿. 城市燃气埋地管道泄漏点监测/检测技术概况 [C]//2023 年中国城市燃气协会标准工作委员会年会暨燃气安全运营和智慧建设研讨会. 北京市燃气集团研究院, 2023.
- [7] 周立国, 姚安林, 蒋宏业, 等. 城镇燃气管道第三方施工损伤风险评估方法研究 [J]. 中国安全生产科学技术, 2015, 11(12): 6-6.

### 作者简介：

郭金才 (1985-), 男, 河北衡水人, 本科, 中级工程师, 研究方向: 城镇燃气安全环保。