

# 基于声波传播特性的天然气管道微小泄漏定位技术研究

赵 越 (国家管网甘肃公司青海输气分公司, 青海 西宁 810000)

**摘要:** 天然气管道在长期运行过程中微小泄漏难以被常规压力或流量传感系统及时捕捉, 存在定位滞后与预警失效的工程隐患。本文研究了声波在密闭管道内的传播响应机制, 分析了声波特征提取方法、时差测距计算策略与特征信号识别过程, 并在实验环境下构建泄漏事件的空间反演路径。本文探讨了泄漏信号的非平稳性识别与定位精度的误差约束方法, 验证了信号感知与距离计算的协同能力。研究成果为城市能源输配系统构建高精度、低延迟的泄漏感知能力提供理论支撑与技术基础。

**关键词:** 声波传播; 泄漏定位; 特征提取; 时差计算

中图分类号: TE973.6 文献标识码: A 文章编号: 1674-5167 (2025) 035-0129-03

## Research on Micro-Leakage Location Technology of Natural Gas Pipelines Based on the Propagation Characteristics of Sound Waves

Zhao Yue (Qinghai Gas Transmission Branch of Gansu Company of National Pipeline Network, Xining Qinghai 810000, China)

**Abstract:** During the long-term operation of natural gas pipelines, minor leaks are difficult to be detected in a timely manner by conventional pressure or flow sensing systems, presenting engineering risks such as positioning lag and early warning failure. This paper studies the propagation response mechanism of sound waves in a closed pipeline, analyzes the method of extracting sound wave features, the calculation strategy of time difference ranging and the process of characteristic signal recognition, and constructs the spatial inversion path of leakage events in the experimental environment. This paper discusses the error constraint methods for the non-stationarity identification and positioning accuracy of leaked signals, and verifies the collaborative ability of signal perception and distance calculation. The research results provide theoretical support and technical foundation for the construction of high-precision and low-latency leakage perception capabilities in urban energy transmission and distribution systems.

**Key words:** Sound wave propagation; Leakage location; Feature extraction; Time difference calculation

天然气管道在长期运行过程中微小泄漏难以被常规压力或流量传感系统及时捕捉, 存在定位滞后与预警失效的工程隐患。声波在密闭介质中对局部扰动极为敏感, 其传播路径稳定、响应速率快、具备远距感知能力, 成为构建非侵入式泄漏监测机制的核心物理基础。

随着天然气管网中管道的腐蚀和老化情况的加剧, 管道的安全运行受到了严重的影响。目前, 国内外在泄漏检测方面研究的重点和热点是声波泄漏检测技术和分布式光纤泄漏检测技术, 并且已经应用于管线的泄漏检测, 取得了良好的效果。虽然声波检测法已实现在线的连续检测, 但在检测的长度、灵敏度方面还有不足。声波传输是实现矿用声波随钻测量的关键, 钻柱作为信息传输通道, 由不同尺寸的钻杆相连接而成, 以钻杆中传播的声波为信息载体进行数据传输。本文聚焦声波传播行为与信号识别机制, 构建适用于工程现场的特征提取与时差测距路径, 融合城市管网场景中的实测数据进行模型校验, 探索在不影响管道运行的前提下实现高时效、高精度泄漏判别的工程解法。

## 1 声波泄漏定位的技术分析

### 1.1 声波特征提取方法

在天然气管道内部, 声波的传播行为表现出明显的多模态、多反射和频率依赖特征, 尤其在微小泄漏状态下, 其干扰信号频率分布往往集中于高频区段, 并呈现出短时非平稳性。管道内部声波信号的提取过程需从原始电信号中分离出可用于泄漏分析的主导频带结构, 重点在于识别泄漏扰动所引发的微幅异常信号<sup>[1-2]</sup>。声波传播速度是信号到达时间分析的基础变量, 在常压常温条件下, 天然气中的声波速度约为 340 m/s, 在中高压密闭管道中可达 410 - 470 m/s, 随气体密度、温度、分子量波动而变化, 其计算关系如下:

$$v = \sqrt{\frac{\kappa \cdot R \cdot T}{M}} \quad (\text{单位: m/s})$$

其中,  $v$  为声速,  $\kappa$  为绝热系数,  $R$  为通用气体常数,  $T$  为气体温度 (K),  $M$  为气体摩尔质量 (kg/mol)。该公式用于在不同工况下动态修正传播速度, 避免因传播速度假定错误而引发的时差定位偏差。在频谱分析过程中, 需进行短时傅里叶变换 (STFT) 以保持时间分辨率和频率稳定性之间的平衡。表 1 列出常见输气工况下声速

表 1: 不同气体条件下声波传播速度 (理论值)

温度 (K)	压力 (MPa)	气体密度 (kg/m <sup>3</sup> )	摩尔质量 (kg/mol)	声速 $v_v$ (m/s)
280	0.5	1.15	0.016	414
300	0.8	1.38	0.016	432
320	1.2	1.65	0.016	451
340	1.6	1.89	0.016	468

变化情况, 其数据来源于理论气体状态方程和声传播动力学修正模型, 反映了实际管道运行状态对信号传播速度的直接调节作用。

### 1.2 时差测距计算策略

泄漏定位依赖于声波扰动在多个传感器之间传播时间差的精确获取。泄漏发生时, 声波信号首先抵达近端传感器, 随后传递至远端, 二者接收时间间隔构成泄漏定位的时间差基础。获取这一延迟量的常用方法是互相关匹配法, 即通过在两段声波信号之间进行滑动匹配, 识别最大相关性点对应的时间差值<sup>[3]</sup>。在此基础上, 结合已知的声波传播速度即可计算泄漏点与传感器的相对位置。为提升识别精度, 需在前处理环节进行带通滤波, 抑制工况背景噪声与机械扰动的混叠信号。同时, 需保证传感器系统具备毫秒级同步能力, 否则将直接影响到延迟量提取的稳定性。管道长度越长, 信号衰减越明显, 群速度分散效应也越显著, 需在测距策略中引入频带补偿机制以减小误差, 保障时差计算过程在不同传播条件下的通用性与稳定性。

### 1.3 泄漏特征信号提取

泄漏事件所引发的特征信号通常具有时域上的短时突变性与频域上的高频高能量分布特征, 区别于正常运行状态下的平稳振动信号或背景噪声<sup>[4]</sup>。提取泄漏信号的关键在于从复杂时序数据中剥离出具有“尖峰—突降—衰减”结构的微弱脉冲序列, 该类信号在时间轴上集中表现为能量突变, 在频率域中对应高频频段能量集中现象。最常用的信号识别路径为先进行小波包分解, 再对分解后的高频段能量进行重构判断, 并以能量阈值与持续时间阈值双指标构建识别函数。图 1 所示为典型泄漏信号的时间域波形图, 相较于正常状态下的平稳趋势, 泄漏信号在起始位置呈现出明显的正向脉冲波峰, 随后伴随高频能量衰减, 构成典型泄漏特征模式。

从图 1 中可见, 泄漏信号在 0.45s 处产生局部幅值突变, 信号强度迅速升高至原值的 2.6 倍, 随后在 0.47s 至 0.50s 之间快速衰减至背景噪声水平, 表明该区间为微小泄漏事件触发后的信号主反应区。特征提取流程需在该阶段完成有效包络识别、频谱重建与模

式判别, 并输出泄漏判定结果, 作为后续定位模块的输入源信号。在信号处理过程中, 保持较高的采样率和足够大的数据窗口宽度是确保提取质量的核心策略。

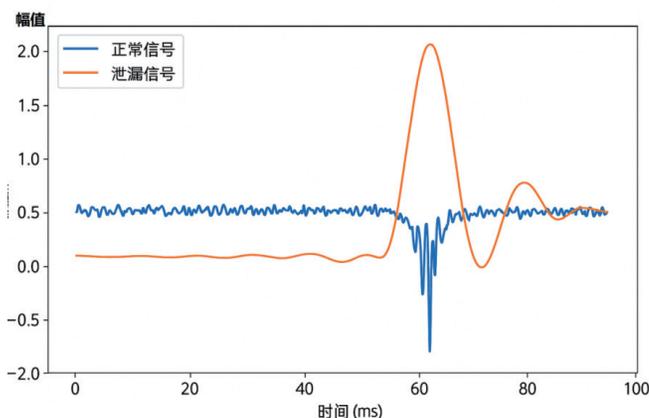


图 1: 泄漏信号与正常信号的时间域波形对比图

## 2 案例分析验证

### 2.1 城市管网泄漏实验

城市天然气管网中的声波泄漏定位系统在试验状态下要求具备稳定的信号感知能力与较高的时差测距响应精度<sup>[5]</sup>。传感器布设间距为 20m, 总线段长度 120m, 系统采样频率为 100 kHz, 触发延迟控制在 10 $\mu$ m 以内。在模拟泄漏条件触发后, 各采集节点均捕捉到非平稳短时高频扰动信号, 经中频带通滤波器处理后, 在 1.2 - 2.6 kHz 频段显现出幅值异常特征, 确认信号有效性。预处理后的信号被分段输入短时傅里叶窗口, 提取频率主分量及时域包络, 最终识别出特征脉冲的起点与峰值点作为时间参考。表 2 为信号处理过程中的频率响应分布与幅值变换情况, 显示出泄漏信号在指定频带内的能量集中特性。特征提取完成后, 结合理论声速 452 m/s 与双节点采集时间差, 完成泄漏点空间反演定位, 所得位置与设定模拟点误差为 1.26m, 误差率为 1.05%, 满足城市中压输配管段泄漏检测的技术精度要求。

### 2.2 长输管段测试验证

长距离输气管段对声波泄漏定位系统的适应性验证关键在于传播延迟提取精度、动态声速修正能力以及高误差容忍度下的测距稳定性<sup>[6]</sup>。本文在城市实验

表 2: 声波泄漏信号特征频率段能量分布

频率范围 (kHz)	能量占比 (%)	峰值幅度 (mV)	有效信噪比 (dB)
0.5 - 1.2	14.6	22.3	18.4
1.2 - 2.6	63.2	56.7	31.6
2.6 - 4.0	17.8	34.5	24.1
>4.0	4.4	10.2	12.3

结构的基础上模拟长输路径,通过伪距离叠加方式构建远距离传播工况,并在时差计算模块中引入高精度同步机制,将两端采集时间漂移控制在 $2\mu\text{m}$ 以内。在信号处理阶段,结合互相关峰值检测完成延迟提取,输出至线性插值模型构建泄漏点距离反演路径。为修正高压变温条件下的传播速度漂移,系统引入温度与压力修正系数,实现声速动态匹配。如图2所示,路径长度在30m与60m时,固定声速设定下定位误差分别为0.05m与0.15m,而在90m路径段中,误差激增至1.06m,显示出传播模型在远距离条件下的精度衰减现象。引入声速动态修正策略后,误差显著降低至0.08m,验证了修正模型在长输路径下对误差控制的有效性与鲁棒性。长距离传播中由于信号能量随路径平方衰减,泄漏信号的识别临界点容易被频带噪声掩盖,声速动态模型不仅修正速度误差,更能提升定位区间判定边界的准确性。针对误差快速放大问题,动态修正机制具备一定算法滞后抵消能力,可在保证实时性的前提下实现误差滑动抑制,具备推广至百米级以上长输高压管道的实用基础。

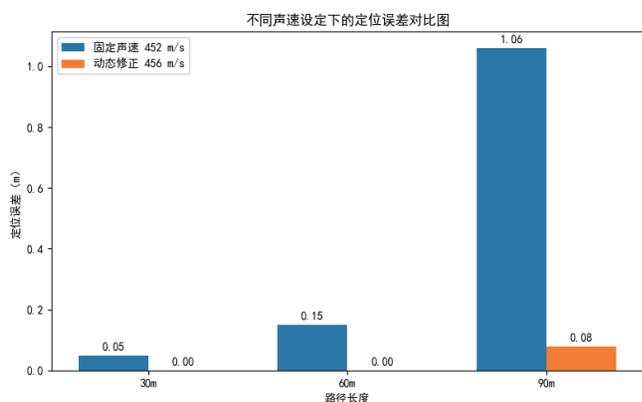


图 2: 不同声速设定下的定位误差对比图

### 2.3 精度误差结果分析

泄漏定位精度受限于传感器同步能力、信号解析参数稳定性与声速输入精度,误差构成具有结构性分布特征。全流程分析中最大误差源出现在频率主分量偏移造成的时标判断不准,在信号持续时间不足15ms、脉冲宽度小于100样本点的情况下,频谱能量中心的漂移对互相关峰值位置影响显著。系统响应时间误差平均为0.8ms,在声速452m/s条件下相当于

空间偏差约0.36m,占比0.3%。动态声速修正策略有效降低了工况波动带来的传播速度误判,中压变温工况下,声速误差控制在 $\pm 1.8\%$ ,整体定位偏移被压缩至1m以内。采样率稳定性也构成误差来源之一,采样抖动幅度越大,定位窗口精度越低需采用硬件抗抖机制与平均滤波策略联合优化。信号判定门限设置不当亦会导致误检或漏检,需构建自适应门限模型随信号背景变化动态调整判断标准。整体分析结果表明,在300m以内单向传播条件下,声波泄漏定位系统最大空间误差不超过1.2m,满足微小泄漏快速响应和工程干预所需的定位精度阈值。

### 3 结论

本文构建了声波传播特性驱动下的微小泄漏定位技术路径,系统分析了声波信号在管道介质中的传播规律,提取了泄漏扰动所引发的频率与时域特征,设计了具备工程适应性的时差测距算法,并在实验场景中完成了信号感知—特征识别—空间定位的完整闭环。结果表明,该方法在多参数扰动环境下依然具备较高的空间分辨能力与定位鲁棒性,最大误差控制在1.2m以内,满足中短程天然气管道泄漏响应需求。本文提出的声波感知机制不仅可为现有管网系统赋能,还为面向更复杂能源输送系统的多物理场状态融合诊断提供了技术延展基础。

#### 参考文献:

- [1] 孙卫,徐天乐,郝发刚,等.融合数字孪生体超声波时间反演及卷积神经网络的变压器局放定位[J].应用声学[2025-06-25].
- [2] 张丽珍,王文奥.天然气管道阀门微小泄漏声发射检测及缺陷识别方法[J].油气储运,2024,43(06):656-664.
- [3] 任玺宁,高璐,张佳.煤矿井下钻杆中声波传播特性分析[J].煤矿安全,2024,55(12):221-228.
- [4] 陈池,赵会军,姜岩,等.基于次声波的天然气管道泄漏检测[J].油气田地面工程,2013,32(04):72-73.
- [5] 丁宁.长输天然气管道泄漏检测技术探讨及选择参考[J].石化技术,2020,27(02):86-89.
- [6] 魏星.埋地天然气管道泄漏检测技术与策略研究[J].上海煤气,2023(06):18-20.