

输气管道泄漏声波识别和定位方法研究现状

曹智敏^{1,2,3},胡斌^{2,3},李志农¹,张君娇^{2,3}

(1. 南昌航空大学 无损检测技术教育部重点实验室,南昌 330063;

2. 中国特种设备检测研究院,北京 100029;3. 国家市场监管无损检测与评价重点实验室,北京 100029)

摘要:总结了国内外声波法在输气管道泄漏检测和定位方面的研究进展,介绍了输气管道泄漏声波产生原理、声波法泄漏检测和定位方法的基本原理和传感器技术,指出了各种泄漏检测和定位方法的优点和不足,并在此基础上,对声波法在输气管道泄漏检测和定位的研究趋势进行了展望。

关键词:输气管道;声波法;泄漏识别;泄漏定位

中图分类号: TE973; TG115.28

文献标志码: A

文章编号:1000-6656(2023)03-0049-09

Research status of acoustic wave identification and location methods for gas pipeline leakage

CAO Zhimin^{1,2,3}, HU Bin^{2,3}, LI Zhenong¹, ZHANG Junjiao^{2,3}

(1. Key Laboratory of Nondestructive Testing of Ministry of Education, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China; 2. China Special Equipment Inspection and Research Institute, Beijing 100029, China; 3. Key Laboratory of Nondestructive Testing and Evaluation for State Market Regulation, Beijing 100029, China)

Abstract: The article summarizes the research progress of acoustic wave method in gas transmission pipeline leak detection and location at home and abroad, introduces the principle of gas transmission pipeline acoustic wave generation, the basic principle of acoustic wave method leak detection and location method and sensor technology, points out the advantages and shortcomings of various leak detection and location methods, and on this basis, focuses on the research trend of acoustic wave method in gas transmission pipeline leak detection and location.

Key words: gas pipeline; acoustic method; leak detection; leak location

天然气是制造业和住宅中燃料或原材料的重要来源,占全球总能耗的 24%^[1],管道在天然气的运输、收集和分配中至关重要^[2]。据统计,到 2025 年,我国油气长输管道规划里程数将达到 24 万公里,“十四五”期间,油气长输管道规划新增里程数将达到 7.1 万公里^[3]。受管道建设质量不符合规范、腐蚀磨损、人为破坏、突发性自然灾害(地震、泥石流)等因素影响,在压差的作用下,管道中的化学气体易发生泄漏,对人类环境、生产生活、生命财产安全造成

破坏性的影响^[4]。因此,对输气管道进行泄漏检测和定位,不仅对输气管道的安全运行管理具有经济意义,还对国民经济发展具有重大的现实意义^[5]。

输气管道泄漏检测方法主要有氦质谱法^[6]、负压波法^[7]、红外检测法^[8-9]、声波法等。氦质谱法适用于密封管道,测试系统简单,但是其检测周期长,需要重复充放气且受限于检测结构的体积^[10-11]。负压波法具有部署速度和响应迅速快的优点,可及时发现突发性管道泄漏,但是由于环境对小流量、小范围的缓慢泄漏敏感度差,易出现漏检、误判^[12]。红外气体成像检测可实现泄漏源的可视化,实现非接触成像检测,但是障碍物会影响成像造成漏检。近几年声波法由于灵敏度高、成本低、定位精度高、误报率低、适应性强在输气管道泄漏检测中得到了广泛运用^[13]。声波法可以检测到管道泄漏的微弱动态压力波,响应频率高,检测范围宽^[14]。按频率

收稿日期:2022-11-30

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFC3001800,2022YFF0609700,2022YFF0609703);国家自然科学基金项目(52075236)

作者简介:曹智敏(1999—),男,硕士研究生,主要研究方向为智能检测与泄漏检测

通信作者:胡斌, hubin@cesi.org.cn

范围分类,气体管道泄漏声波可以分为次声波信号、声发射信号、超声波信号。次声波不受管道材料的影响,传播距离较远,在非金属泄漏检测中应用较多。泄漏声发射信号频率范围较广,当泄漏尺寸较小且雷诺数较高时,泄漏气体与附近空气混合形成湍流,湍流处产生声波,当空气中传播的声波振动频率高于 20 kHz 时,便产生空载超声波^[15-16]。

目前国内外学者对声波法泄漏检测和定位进行了多方面研究,文章梳理声波法在输气管道泄漏检测和定位方面的研究现状,并对未来声学泄漏检测和定位方法进行展望。

1 泄漏声波产生原理

当输气管道发生泄漏时,管道内的介质从泄漏点喷射流出,同时管道压力和介质流速发生明显变化形成湍流。输气管道泄漏声波产生机制服从流体力学基本方程,从 Navier-Stokes 波动方程出发,Lighthill 波动方程进一步推导出了泄漏声源流场分布情况,介绍了自由空间内管道泄漏声波的产生机理,如式(1)~(3)所示^[17]。

$$\frac{\partial^2(\rho - \rho_0)}{\partial t^2} - a_0^2 \nabla^2(\rho - \rho_0) = \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} \mathbf{T}_{ij} \quad (1)$$

$$\mathbf{T}_{ij} = \rho v_i v_j + p_{ij} - a_0^2 (\rho - \rho_0) \delta_{ij} \quad (2)$$

$$p_{ij} = p_0 \delta_{ij} - \tau_{ij}, \begin{cases} \delta_{ij} = 1, & (i = j), \\ \delta_{ij} = 0, & (i \neq j), \end{cases} \quad (3)$$

式中: ρ 为气体密度; ρ_0 为自由流体密度; t 为时间; δ_{ij} 为克罗内克符号; v_i 和 v_j 为速度分量; \mathbf{T}_{ij} 为 Lighthill 湍流应力张量; $\partial^2 \mathbf{T}_{ij} / \partial x_i \partial x_j$ 为 Lighthill 四极子声源; p_{ij} 为压力张量; p_0 为流场静压; τ_{ij} 为黏滞应力; i, j 为自由指标。

当式(1)右端 \mathbf{T}_{ij} 各项为零时,表示管道未产生泄漏声波。当管道发生泄漏时, $\rho v_i v_j$ 为有限值,输气管道产生气体射流引发管道内流体紊乱,此时会产生泄漏声波^[17]。

2 输气管道泄漏声波识别方法

2.1 基于信号处理的泄漏识别方法

常用的泄漏声波信号处理方法主要有小波分析、小波包分析、经验模态分解、变分模态分解、盲源分离法等。小波变换可以观察到泄漏信号的局部特征,具有对泄漏信号在时频域进行多分辨分析和重构的能力,因此在管道泄漏识别中运用颇多。小波分析对高噪声环境中的管道声发射泄漏信号去噪效果良好^[18],对低频信号分析有明显优势,但对高频

信号的去噪效果不良,小波包则弥补了这一缺点^[19]。小波(包)的基函数、分解层数对泄漏信号去噪效果影响很大,选取的分解层数过大或过小,都可能造成泄漏信号去噪不足或信号失真,探究最优的小波(包)基函数对处理泄漏信号的意义重大。

经验模态分解(EMD)对非平稳泄漏信号的分析效果显著,通过提取与管道泄漏相关的特征信息,来判别管道是否泄漏,与小波分析相比,其不需要选择合适的基函数,具有自适应的特点,但是在处理泄漏信号时,该方法容易产生端点效应和模态混叠问题,为解决这一问题,国内外学者开展了大量研究。MENG 等^[20]提出使用集合经验模态分解方法(EEMD)和互谱分析同时对泄漏声波信号和负压波信号进行降噪,该方法不仅抑制了模态混叠,还解决了声波法易受噪声干扰而出现误报的问题。此后还有学者提出用变分模态分解(VMD)解决经验模态分解对噪声敏感和端点效应的问题,VMD 方法具有更强的噪声鲁棒性和弱化端点效应的能力,但是其需要经验知识选择模态分解层数和惩罚因子(没有相应的准则),经常需要优化 VMD 参数对泄漏声波信号进行降噪和特征提取。HAO 等^[21]提出了一种优化 VMD 分解层数参数的算法,对管道多点泄漏信号进行定位,减少弱相关性和噪声的影响。还有学者提出将 VMD 法与其他算法结合对泄漏信号进行降噪,DIAO 等^[22]提出粒子群优化(PSO)算法与 VMD 结合,用以优化惩罚因子等控制参数去除背景噪声。

上述时频分析方法对泄漏信号进行降噪时,传感器采集的泄漏信号信息与噪声特性是已知的,但是在实际燃气管道工况中,环境干扰噪声类型较多,且噪声信号强度多大于泄漏信号强度,增加了提取泄漏信号特征的难度。盲源分离技术可以分离出泄漏信号中无法直接观测到的未知原始信号,且不需要过多的先验知识,适应能力强^[23]。盲源分离技术的原理如图 1 所示。

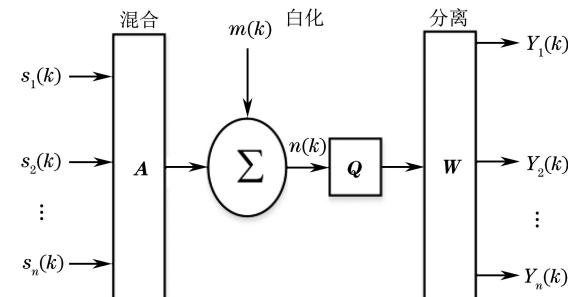


图 1 盲源分离技术原理示意

图 1 中 $s_1(k), s_2(k), \dots, s_n(k)$ 为 n 个原始泄

漏信号, \mathbf{A} 为混合矩阵, $n(k)$ 为混合后的泄漏信号, $m(k)$ 为噪声, \mathbf{Q} 为白化矩阵, \mathbf{W} 为解混矩阵, $\mathbf{Y}_i(k)$ 为分离信号。盲源分离能够将泄漏信号和噪声分离, 实现对泄漏声波信号的滤波。在该方法的实际应用过程中, 快速独立成分分析(FastICA)由于计算过程较为简便, 收敛速度快等优点得到广泛应用。刘光晓等^[24]通过快速独立成分分析算法对输气泄漏声波信号进行分离滤波处理, 证明了盲源分离技术具有较好的滤波效果和适用性。当对长输管道泄漏进行检测时, 可能会产生数百个声波信号, 参数量和计算速度要求超出了传统盲源分离系统的能力, DANKERS 等^[25]使用稀疏估计技术结合盲源分离技术改善声学泄漏检测系统, 减少估计参数和计算时间, 更容易在测量数据中找到声学泄漏事件。盲源分离虽然能弥补一些时频分析方法的不足, 可以在输入声源信息和先验知识较少时对泄漏进行识别, 且具有良好的信噪比, 但其使用时有原始泄漏信号之间相对独立、观测泄漏信号数目要不小于原始泄漏信号数目、原始泄漏信号中最多只有一个泄漏信号满足高斯分布等限制条件。在泄漏信号采集过程中, 外部干扰信号易耦合到管壁中, 因此, 如何有效分离泄漏信号和干扰信号, 又能保证计算速度快、精度高成为进一步需要研究的问题。

2.2 基于智能算法的泄漏识别方法

2.2.1 支持向量机

支持向量机(SVM)是一种基于统计理论的机器学习算法, 泛化能力强, 可以解决小样本、非线性核高维模式识别问题^[26], 其泄漏识别原理如图 2 所示。SVM 将训练数据向高维空间投影, 其识别泄漏信号性能与核函数和惩罚系数的选择有紧密关系, YU 等^[27]分别选取了高斯径向基(RBF)核、线性核、多项式核、Sigmoid 核等 4 个核函数分别对泄漏信号进行识别, 结果表明基于高斯 RBF 核函数的 SVM 算法的识别精度最高。相比其他 3 种核函数, RBF 核函数训练时间和测试时间更短, 总体泄漏识别准确性更高, 因此基于 RBF 核函数的支持向量机常被用于泄漏识别中。BANJARA 等^[28]进一步探索基于 RBF 内核的 SVM 和相关向量机(RVM)机器学习算法, 发现与 RVM 算法相比, SVM 对于泄漏信号的识别精确度更高。BANJARA 等提取的是泄漏声波的时域特征, 并未在频域上对泄漏声波特征进行分析。XIAO 等^[29]提出了一种基于支持向量机与小波变换的融合声学泄漏检测方法, 提取管道泄漏的时频

特征, 将其作为训练 SVM 分类器的输入进行泄漏识别, 精度可以达到 95.6%。基于支持向量机框架, 最小二乘支持向量机(LS-SVM)^[30]、改进的粒子群优化算法(SMDPSO)-SVM^[31]等算法对支持向量机参数进行优化, 提高了 SVM 的泛化学习能力。综上所述, 支持向量机对小样本数据以及非线性情况下的信号处理有独特优势, 可以对管道泄漏进行较准确地判别^[32], 但是该算法在核函数和惩罚参数的选择上没有固定准则, 往往需要靠经验、试凑等方法进行选择, 粒子群算法、灰狼算法等一系列优化算法往往与支持向量机结合, 使其在参数选择上更加合理, 提高了管道泄漏识别精度。

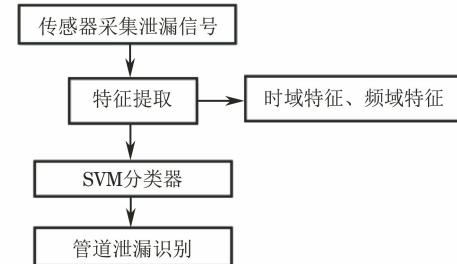


图 2 支持向量机泄漏检测原理示意

2.2.2 神经网络

利用泄漏信号隐藏的深层特征, 实现特征的自动提取, 探究适用范围大, 泛化能力强的泄漏检测方法是目前的热点问题^[33]。基于神经网络的泄漏识别原理如图 3 所示。

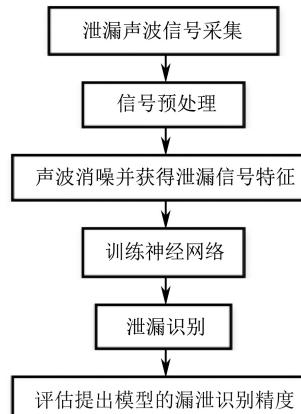


图 3 基于神经网络的泄漏识别原理示意

卷积神经网络(CNN)应用于管道泄漏声波信号识别优势明显, 卷积核通过位于不同位置的图像块进行卷积运算, 对泄漏声波的有效特征进行提取和识别, 卷积核的形状一般为正方形, 不同的卷积核尺寸与 CNN 模型性能有着密切关系。宁方立等^[34]对卷积神经网络进行改进, 提出使用扁横状卷积核对泄漏超声信号进行识别, 较传统 CNN 模型有更

高的识别精度。为了验证 CNN 模型与其他神经网络模型对于泄漏声波信号特征提取的能力, 部分学者考虑了管道运行条件等因素, WANG 等^[35]提出一种基于内核主成分分析(KPCA)-卷积神经网络的泄漏识别模型, 考虑出入口压力数据, 提取了泄漏信号的时频特征和能量特征, 将识别结果与 ANN, KNN, SVM 等机器学习模型的结果进行比较, 其中 KPCA-CNN 模型的各项识别指标均达到 100%。输气管道早期泄漏时, 泄漏流量低于输送流量标准的 1.2% 称为小泄漏, CNN 模型在小泄漏信号识别上有明显优势。针对小泄漏信号易被噪声淹没的问题, 孟庆旭等^[36]提出将残差收缩模块添加到 CNN 模型中, 能减小甚至消除输入样本噪声对训练造成的误差, 可有效降低不同噪声对识别结果的影响。但是孟庆旭等仅对高斯白噪声和排风机为主的模拟

噪声源进行了分析, 未对其他类型噪声进行分析。

CNN 虽然对于泄漏声波特征提取有着良好的性能, 但是其所需数据量较大, 数据冗余, 占用存储空间, 在实际工业生产应用时适用性较差。为了解决这个问题, 孙洁娣等^[37]提出一种基于多卷积稠密块的轻量级神经网络, 引入注意力机制改善管道泄漏特征的区分能力, 结果表明, 提出的方法识别准确率达到了 96.69%, 参数量仅为 781 kB, 实时响应能力快, 减小了泄漏检测系统的资源要求, 为神经网络泄漏识别的实际应用提供了一种思路。神经网络模型可以自动选择和提取泄漏声波信号的某些特征, 但是需要训练的数据量较大, 由于泄漏声波信号处于高噪声环境下, 识别困难, 在实际应用中, 提高识别和定位准确率的同时, 也要求提高实时响应能力。上述管道泄漏识别方法的优缺点对比如表 1 所示。

表 1 输气管道泄漏识别方法优缺点对比

检测方法	优点	缺点
小波(包)分析法	可以观察到泄漏信号的局部特征, 区分信号和噪声具有明显优势	去噪效果与选取的小波(包)基函数和小波(包)分解层数有关
经验模态分解法	具有很强的自适应性, 处理非线性、非平稳泄漏信号具有优势	具有端点效应和模态混叠问题
变分模态分解法	解决了 EMD 方法中的端点效应和模态混叠问题, 模态分量更加清晰	选择 k 参数和惩罚因子 α 没有相应的准则, 需要经验知识
盲源分离法	所需要的先验条件少, 适应能力强	选取的目标函数和优化算法对于系统矩阵的求解影响很大
支持向量机法	可以解决小样本、非线性和高维模式识别问题	惩罚参数 c 和核函数参数 g 对于 SVM 的分类精度有重要影响
神经网络法	可以利用泄漏信号隐藏的深层特征, 实现泄漏信号特征的提取	泄漏量较小时, 识别能力降低; 高噪声环境下无法检出信号特征

3 输气管道泄漏声波定位方法

3.1 基于时延估计的泄漏定位方法

当管道发生泄漏时, 管道的上游传感器和下游传感器分别检测到包含泄漏信息的声波, 可以根据时延定位公式计算出泄漏点的位置, 原理如图 4 所示。

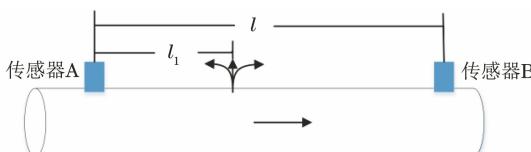


图 4 基于时延估计的泄漏定位原理

发生泄漏的位置与传感器 A 的距离 l_1 为^[38]

$$l_1 = \frac{l + v\Delta t}{2} \quad (4)$$

式中: l 为上下游传感器之间的距离; v 为泄漏声波传播速度; Δt 为泄漏信号之间的时间差。

在实际管道工况中, 管道长度 l 已知, 关键问题就

是准确获取时间差和传播速度 v 。KOUSIOPoulos 等^[39]提出了基于互相关技术的 3 种不同的时间延迟估计方法(互相关, 广义互相关, 广义互相关-Roth), 验证在高噪声下识别泄漏位置的准确性。上述方法在时域上对泄漏信号进行互相关定位, 还有学者在频域上对泄漏信号进行互相关分析, 李帅永等^[40]提取泄漏信号互相关函数的时频谱信息, 能有效抑制泄漏信号的频散, 与传统的互相关泄漏定位相比, 定位误差大大降低。无论在时域上还是在频域上分析声波信号, 用时延估计方法定位时, 获取的时间差和管道内的声波传播速度是影响定位精度的主要参数。泄漏声波在管道内传播时, 不仅会引起压力和温度的变化, 还会在管道内发生折射和散射造成传播速度的不稳定^[41], 除此之外, 为了保证管道两端泄漏信号检测的同时性, 需要使用 GPS(全球定位系统)时钟来确保测量泄漏信号的一致性, 但该措施增加了成本, 因此准确得到时间延迟并提高定位精

度往往很困难,对时延方法进行改进或探究一种不需要时间延迟和速度进行泄漏定位的方法成为目前需要解决的问题。

3.2 基于声波衰减的泄漏定位方法

当管道发生泄漏时,泄漏处产生连续的声发射信号而且其频率成分非常丰富,这些信号在实际传播过程中,包含多种模态,受到散射、反射、折射和模式转换的影响,衰减极大^[42]。声波在管道中传播时,振幅和压强会呈指数规律衰减,衰减公式为^[43]

$$p(x) = p_0 \exp(-\alpha x) \quad (5)$$

式中: $p(x)$ 为泄漏声波信号传播一定距离后的压强; x 为声波传播距离; p_0 为声波的振幅; α 为幅值衰减系数。

国内外专家、学者对泄漏声波衰减特性展开了大量工作和研究,目前研究集中于从气体声学和流体动力学角度出发,探究泄漏声波的产生和衰减特性,并应用于泄漏声波信号定位研究。泄漏声波的产生机理主要由 Lighthill 波动方程和 FW-H 方程解释,输气管道泄漏声波以四极子声源和偶极子声源为主,涡流是泄漏声波产生的根本原因^[17]。虽然文献[17]未明确指出泄漏声波四极子声源和偶极子声源的具体产生原因,但为泄漏声波定位奠定了理论基础。2015 年,刘翠伟^[14]对泄漏声波定位技术进行了深入研究,提出声波幅值衰减公式,可以有效定位天然气管道泄漏,定位公式为

$$|y| = \frac{L}{2} + \frac{\ln(p_2/p_1)}{2\alpha(M)} \quad (6)$$

式中: L 为管道长度; y 为泄漏点距离管道起点距离; p_1 和 p_2 为管道上下游声波幅值; $\alpha(M)$ 为声波衰减系数。

声波幅值衰减模型中,声波幅值直接被用于泄漏声波定位,可不计算泄漏声波声速和时差,较传统的互相关定位技术更加简洁和直接。为了验证声波衰减模型对于各种输气管道运行条件的适应性,2018 年,文献[44]进一步分析了管道内黏性均匀流动介质中粘滞吸收、热传导和气体流动对于声波衰减的影响,利用理论和试验得到的衰减因子进行拟合,进一步分析了泄漏声波在不同介质中的传播和衰减规律。上述研究表明,声波振幅衰减模型相较于传统泄漏互相关定位法有着更高的定位精度和更大的适用范围。此后,部分学者考虑到了泄漏声波信号频率和管道壁厚对于声波衰减特性的影响,张曦等^[42]研究了声发射泄漏信号频率对声波衰减的影响,得到能量衰减系数、幅值衰减系数与信号频率

之间的关系,建立三传感器能量衰减定位模型。此模型不仅考虑了声波散射和热传导的因素,还考虑了不同的声波频率成分对于幅值衰减系数和能量系数的影响。当金属管道较薄时,声发射信号幅值未呈单调衰减趋势,同时泄漏声波频率与传感器的频谱密切相关^[45],这为利用声发射泄漏信号衰减特性定位提供了参考。综上所述,管道材料、加工工艺、流动介质等条件,以及泄漏声波频率,管道泄漏定位时放置传感器的方式等因素都会造成泄漏声波信号衰减特性产生变化。

3.3 基于特征参数的管道泄漏定位方法

沿管道传播的泄漏声波信号通常是连续信号,频率分散,具有多种模态,传播速度不稳定。在时频域上对泄漏信号进行处理可以提取到泄漏信号的参数特征,从而对泄漏信号进行定位,均方根值、平均值、方差、幅值、峰值、能量、振铃计数等特征参数通常被用于泄漏定位。BANJARA^[28]探究了声发射信号振铃计数、能量、信号强度、标准偏差和泄漏流量的关系,发现声发射计数、声发射能量和信号强度等声学特征是重要的声发射参数。BANJARA 验证了声发射参数在识别和定位管道泄漏方面的有效性,并且发现声发射信号的一些特征参数可以反映泄漏速度的变化,但是并未在频域上对泄漏声波进行特征提取。由于泄漏声波往往伴随着随机噪声,在时域上进行特征提取较困难,部分学者将时域变换为其他空间,在其他空间提取特征参数。刘翠伟等^[46]利用 HHT(希尔伯特-黄变换)方法对泄漏声波信号进行处理,获得泄漏信号的幅频特性、HHT 三维谱能量及边际谱特性等 7 个声波特征量,并通过试验验证了 HHT 三维谱作为有效声波特征量的可行性。在管道泄漏早期直接提取泄漏声波信号的时域特征往往不能正确反映泄漏信息,而需要采用时频联合分析信号处理方法对泄漏信号进行降噪后,再提取泄漏信号特征。

3.4 基于信息融合的管道泄漏定位方法

信息融合技术将多种传感器收集的信息或者复杂实体提供的信息数据进行处理整合,增强智能化分析处理水平,最后对其进行决策^[47]。信息融合技术与经典信号处理方法对管道泄漏信号处理时有着本质区别,即信息融合技术可以处理泄漏检测中使用的多个传感器的信息,并可以在数据层、特征层、决策层等不同信息层次发挥作用,基于信息融合的泄漏定位原理如图 5 所示。由于管道泄漏时,管道

气体介质在压差作用下喷射而出产生泄漏声波, 泄漏声波的声速和管道内流速都将发生变化, 而发生小泄漏和缓漏时, 流量信号和声波声速变化不明显, 考虑到这一点, 郎宪明^[48] 使用超声波速信号和流量信号进行信号融合, 使融合信号凸显拐点, 并通过环形管道泄漏定位试验, 验证了信息融合方法有着较高的定位精度, 更能凸显泄漏声波声速和流量变化的瞬变信息, 为解决小泄漏定位问题提供了参考。当管道气体从泄漏点流出时, 泄漏位置和临近位置会产生明显压力扰动, 同时泄漏气体也会与管道壁摩擦产生噪声振动, 为了研究噪声和压力对于泄漏声波信号定位的影响, LI 等^[49] 基于互相关算法建立了基于多信息融合的噪声-压力相互作用模型, 提出了单点多信号的泄漏定位算法, 该算法有着更快的响应速度和检测准确性。该模型中噪声信号和压力信号可以相互充当滤波器, 抗干扰能力得到增强, 多信号融合系统确保了更好的可靠性和准确性。还

有部分学者考虑到了泄漏声波的频域特征, 将频域特征和泄漏信号时域特征进行融合对泄漏声波信号进行定位, HAN 等^[50] 通过分析 CO₂ 管道泄漏声发射信号的特性, 提出了基于小波包和径向基函数网络(RBFN)的信息融合定位方法, 通过提取小波包处理后的泄漏信号进行能量与时间差、最大值等泄漏信号特征的信息融合, 以克服单个泄漏信号特征对管道泄漏定位的不确定问题。多传感器信息融合系统能够处理泄漏声波的复杂信息, 降低泄漏定位误差, 避免多余的信息干扰, 为输气管道泄漏声波定位提供了一种新的思路。输气管道泄漏定位方法优缺点对比如表 2 所示。

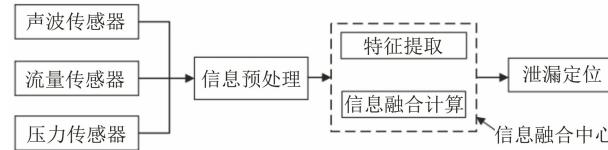


图 5 基于信息融合的泄漏定位原理

表 2 输气管道泄漏定位方法优缺点对比

定位方法	优点	缺点
基于时延估计的泄漏定位法	可以抑制不相关的噪声, 考虑了信号之间的弱关联性	泄漏声波信号具有多模态、频散特点, 使时间差和波速的确定精度误差较大
基于声波衰减的泄漏定位法	不再受限于时间差的测量和波速的测量	管道上游和下游衰减参数不同, 管道工况发生变化时, 衰减参数需要重新计算
基于信息融合的泄漏定位法	多个传感器信息融合方法解决了各传感器采集的泄漏信息单一的问题, 提高了泄漏定位精度	输入变量、决策方法、信息融合结构和融合单元等对其影响较大

4 传感器技术

传感器是决定泄漏声波定位准确性和响应能力的重要因素, 目前对传感器技术的研究主要集中在以下两个方面:① 对传感器数量和传感器布置方式的研究;② 对不同传感器类型对管道泄漏定位影响的研究。

传感器数量越多, 泄漏定位精确度越高, 但是在实际情况下, 传感器数量受到管道实际环境和经济条件限制。传统的互相关定位方法使用两个传感器定位泄漏位置, 且传感器位于泄漏位置两侧, 需要时钟同步来获得精确时间差和波速。针对该问题, OZEVIN 等^[51] 使用两个位于同侧的传感器对管道泄漏进行定位, 分别对管道泄漏点在轴向和径向产生的声波进行检测, 与传统的互相关定位法相比, 不再需要时钟同步。张曦等^[42] 考虑到环境噪声的影响, 提出三传感器定位模型对管道泄漏进行定位, 传感器的布置方式如图 6 所示。其试验结果表明, 该

定位模型可以弱化噪声影响, 适用于泄漏率较低和定位精度要求高的情况。此外, 当少量传感器不能满足需求时, 部分学者考虑利用传感器阵列对泄漏进行定位, TAO 等^[52] 提出阵列式超声换能器气体泄漏定位方法, 使用阵列时差算法对微小泄漏进行精确定位。传感器阵列多应用于定位管道平面或者整个空间上的泄漏。

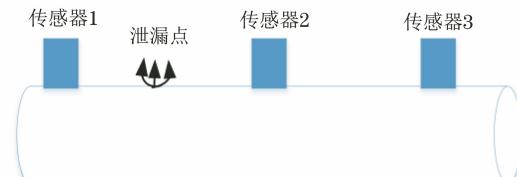


图 6 三传感器定位模型传感器布置方式

目前传感器主要包括动态压力传感器、超声波换能器、声发射传感器等。LIU 等^[53] 选择动态压力传感器对泄漏信号进行测量, 其建立的去噪系统可对直管、弯管和变径管道进行泄漏检测和定位。动态压力传感器对管道泄漏微弱压力信号有着较高的灵

敏度和低误报率。与动态压力传感器安装方式不同的是,超声波换能器无需接触管道壁,属于非接触性检测。超声波换能器识别到泄漏超声信号并将其转换为电信号,当其频率为40 kHz时,气体泄漏超声波信号和环境噪声声强差异最大,因此大多选择40 kHz作为超声波换能器的中心频率。声发射传感器通过检测泄漏湍流引起的弹性波,进而利用信号处理方法对泄漏位置进行判别,属于接触性检测。沿输气管道壁传播的泄漏声发射信号通常是具有频散特征的连续信号,传播速度不稳定,在对泄漏位置进行判别时,通常需要提取泄漏声发射信号的波形特征、频域特征和能量特征来进行定量分析。

5 结论与展望

声波法由于定位精度和灵敏度高,在输气管道泄漏检测定位中应用广泛,随着信号处理技术、人工智能和大数据的发展,声波法在输气管道泄漏定位中的优势更加明显。介绍了声波法在输气管道泄漏检测和定位方面的应用,总结国内外声波泄漏检测定位方法,指出目前输气管道声波法泄漏检测定位方法的一些优点和不足。

输气管道状态方面,声波法目前集中于对架空管道泄漏的检测和定位,对于埋地输气管道的研究较少。受土壤条件、管道压力、泄漏孔径、管道深度、土壤类型等诸多因素影响,目前对于埋地输气管道泄漏声波的产生和传播特性、衰减规律研究处于理论和仿真研究阶段。

输气管道泄漏声波检测和定位理论研究方面,主要从信号处理、特征分析、声波传感技术出发,而从气体声学和气体动力学角度对管道声波的产生和传播特性、衰减特性的研究较少。管道气体流速、流向和气动噪声产生与泄漏声波的传播和衰减有着紧密关系,应更加深入理解输气管道泄漏信号的各种声源特性和传播规律,为实际管道工况泄漏检测和定位提供理论支持。

输气管道声波法泄漏检测试验研究方面,受外界噪声的影响,管道泄漏信号易失真,严重影响泄漏检测和定位的精度。小波分析、经验模态分解、短时傅里叶变换等时频分析技术单独使用时,适用性往往受到诸多限制,主要表现为对于含噪微小泄漏信号的去噪效果不理想,管道处于高噪声环境下时,需要融合多种信号处理方法对泄漏信号进行分析,提高含噪泄漏信号的去噪效果和特征提取能力。

输气管道声波法泄漏定位试验研究方面,传统的互相关算法和各种改进的定位算法具有需要先验知识的缺点,且响应慢,内存资源消耗大,限制了其在工业生产资源有限并且需要实时处理的条件下的应用。在实际工况中,需要对管道泄漏检测和定位算法进行优化,提高识别和定位准确率的同时,也要求提高实时响应能力。

输气管道声波法泄漏检测定位模型方面,目前研究多集中于单点模型,对于多点泄漏源的检测和定位研究很少。由于实际管道工况存在多点泄漏源和许多类型的干扰噪声,通过单个或两个传感器往往不能全面反映管道运行工况,故需要将多个传感器获取的泄漏声波信息融合进行推理和决策,进而提高泄漏检测效率和定位精度。

输气管道声波法泄漏检测定位智能化研究方面,物联网技术和无线通信技术的快速发展为输气管道泄漏在线监测预警提供了可能。物联网云平台管道泄漏监测方式和机器人搭载声波传感器等作业方式,可以不受管道外部环境的影响,检测效率和检测精度能得到极大提高。

目前,声学方法已经在管道泄漏识别和定位中有着明显的优势,声波在管道中的传播规律和特性研究的不断深入,信号处理技术和各种算法的不断进步,都将促进声波法在输气管道泄漏识别和定位中的发展。

参考文献:

- [1] LUKONGE A B, CAO X. Leak detection system for long-distance onshore and offshore gas pipeline using acoustic emission technology[J]. Transactions of the Indian Institute of Metals, 2020, 73(7): 1715-1727.
- [2] HU Z, TARIQ S, ZAYED T. A comprehensive review of acoustic based leak localization method in pressurized pipelines [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2021, 161: 107994.
- [3] 黎晨. 基于声发射信号的管道泄漏检测及定位方法研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2021.
- [4] NDALILA P D, LI Y, LIU C, et al. Modeling Dynamic Pressure of Gas Pipeline With Single and Double Leakage[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(9): 10804-10810.
- [5] MURVAY P-S, SILEA I. A survey on gas leak detection and localization techniques[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2012, 25: 966-973.

- [6] SHEEN S H, CHIEN H T, RAPTIS A C. Ultrasonic techniques for detecting helium leaks[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2000, 71(3): 197-202.
- [7] YUAN F, ZENG Y, LUO R, et al. Numerical and experimental study on the generation and propagation of negative wave in high-pressure gas pipeline leakage [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2020, 65: 104129.
- [8] YANG H, YAO X F, WANG S, et al. Simultaneous determination of gas leakage location and leakage rate based on local temperature gradient [J]. Measurement, 2019, 133: 233-240.
- [9] DUDIĆ S, IGNJATOVIĆ I, ŠEŠLIJA D, et al. Leakage quantification of compressed air using ultrasound and infrared thermography [J]. Measurement, 2012, 45: 1689-1694.
- [10] DIAS L M B, FILIPE E J M, MCCABE C, et al. Liquid mixtures of xenon with fluorinated species: xenon + sulfur hexafluoride [J]. The Journal of Physical Chemistry B, 2007, 111(19): 5284-5289.
- [11] 王勇, 孙立臣, 窦威, 等. 刚性收集室的密封性对航天器总漏率测试结果的影响[J]. 真空科学与技术学报, 2017, 37(7): 665-668.
- [12] 王洪超, 李强, 罗毅, 等. 基于相似度的管道泄漏负压波定位算法[J]. 油气储运, 2021, 40(6): 679-684.
- [13] 刘翠伟, 李雪洁, 李玉星, 等. 基于音波法的输气管道泄漏检测与定位[J]. 化工学报, 2014, 65(11): 4633-4642.
- [14] 刘翠伟. 输气管道泄漏声波产生及传播特性研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2016.
- [15] LYU Y, JAMIL M, MA P, et al. An ultrasonic-based detection of air-leakage for the unclosed components of aircraft[J]. Aerospace, 2021, 8(2): 55.
- [16] HAN H L, WANG T Y, LI J J. The design of intelligent ultrasonic gas leak detection and analysis system[J]. J. Univ. Sci. Technol., 2010, 33: 114-117.
- [17] 刘翠伟, 李玉星, 王武昌, 等. 输气管道声波法泄漏检测技术的理论与实验研究[J]. 声学学报, 2013, 38(3): 372-381.
- [18] DAVOODI S, MOSTAFAPOUR A. Gas leak locating in steel pipe using wavelet transform and cross-correlation method [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 70(5): 1125-1135.
- [19] LANG X, LI P, GUO Y, et al. A multiple leaks' localization method in a pipeline based on change in the sound velocity [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2020, 69 (7): 5010-5017.
- [20] MENG Q, LANG X, LIN M, et al. Leak localization of gas pipeline based on the combination of EEMD and cross-spectrum analysis[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 71: 1-9.
- [21] HAO Y, DU Z, XING Z, et al. Leakage signal analysis of urban gas pipeline based on improved variational mode decomposition [J]. International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2020, 34(13): 2058018.
- [22] DIAO X, JIANG J, SHEN G, et al. An improved variational mode decomposition method based on particle swarm optimization for leak detection of liquid pipelines[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2020, 143: 106787.
- [23] 逯雯雯. 基于改进 EMD 和 SVM 的输油管道泄漏信号处理方法研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2019.
- [24] 刘光晓, 孟令雅, 刘翠伟, 等. 基于盲源分离技术的泄漏音波信号滤波方法分析[J]. 振动与冲击, 2014, 33(24): 192-199.
- [25] DANKERS A, JALILIAN E, WESTWICK D. Blind acoustic source separation via system identification for leak detection in pipelines[J]. IFAC-PapersOnLine, 2016, 49(13): 229-234.
- [26] 陈冲, 张仕民, 彭鹤, 等. 基于支持向量机的钻柱黏滑振动等级评估方法[J]. 石油机械, 2019, 47(1): 20-26.
- [27] YU L, LI S Z. Acoustic emission (AE) based small leak detection of galvanized steel pipe due to loosening of screw thread connection[J]. Applied Acoustics, 2017, 120: 85-89.
- [28] BANJARA N K, SASMAL S, VOGGU S. Machine learning supported acoustic emission technique for leakage detection in pipelines [J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2020, 188: 104243.
- [29] XIAO R, HU Q, LI J. Leak detection of gas pipelines using acoustic signals based on wavelet transform and support vector machine [J]. Measurement, 2019, 146: 479-489.
- [30] JIN H, ZHANG L, LIANG W, et al. Integrated leakage detection and localization model for gas pipelines based on the acoustic wave method [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2014, 27: 74-88.
- [31] WANG C, ZHANG Y, SONG J, et al. A novel optimized SVM algorithm based on PSO with

- saturation and mixed time-delays for classification of oil pipeline leak detection [J]. Systems Science & Control Engineering, 2019, 7(1): 75-88.
- [32] ZHANG H F, LI Z L, JI Z L, et al. Application of acoustic emission and support vector machine to detect the leakage of pipeline valve[C]//2013 Fifth International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation. Hong Kong, China: IEEE, 2013:16-17.
- [33] KANG J, PARK Y-J, LEE J, et al. Novel leakage detection by ensemble CNN-SVM and graph-based localization in water distribution systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 65(5): 4279-4289.
- [34] 宁方立, 韩鹏程, 段爽, 等. 基于改进 CNN 的阀门泄漏超声信号识别方法[J]. 北京邮电大学学报, 2020, 43(3): 38-44.
- [35] WANG C, ZHENG J, LIANG Y. Deeppipe: operating condition recognition of multiproduct pipeline based on KPCA-CNN[J]. Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice, 2022, 13 (2): 0402206.
- [36] 孟庆旭, 沈功田, 俞跃, 等. 深度残差收缩网络的含噪微泄漏超声识别方法[J]. 应用声学, 2022, 41 (6):1-10.
- [37] 孙洁婷, 王利轩, 温江涛, 等. 改进稠密块轻量化神经网络的管道泄漏孔径识别[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(3): 98-108.
- [38] MA Y, GAO Y, CUI X, et al. Adaptive phase transform method for pipeline leakage detection[J]. Sensors, 2019, 19(2): 310.
- [39] KOUSIOPoulos G P, PAPASTAVROU G N, KAMPELOPOULOS D, et al. Comparison of time delay estimation methods used for fast pipeline leak localization in high-noise environment [J]. Technologies, 2020, 8(2): 27.
- [40] 李帅永, 王鹏飞, 严冬, 等. 气体管道泄漏模态声发射时频定位方法[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(9): 2068-2075.
- [41] MENG L, YUXING L, WUCHANG W, et al. Experimental study on leak detection and location for gas pipeline based on acoustic method[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2012, 25: 90-102.
- [42] 张曦, 章兰珠. 声发射衰减特性管道泄漏定位方法 [J]. 应用声学, 2022, 41(1): 158-167.
- [43] LIU C, LI Y, YAN Y, et al. A new leak location method based on leakage acoustic waves for oil and gas pipelines[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2015, 35: 236-246.
- [44] 刘翠伟, 敬华飞, 方丽萍, 等. 输气管道泄漏声波衰减模型的理论研究[J]. 振动与冲击, 2018, 37(20): 109-114.
- [45] 王瑶, 刘才学, 何攀, 等. 管道声发射信号衰减特性随管道壁厚变化研究[J]. 振动. 测试与诊断, 2022, 42(3): 588-592. 623.
- [46] 刘翠伟, 李玉星, 孟令雅, 等. 基于希尔伯特黄变换的输气管道泄漏音波时频特性分析[J]. 振动与冲击, 2014, 33(16): 42-49.
- [47] XIANG H C, WANG X D, HUANG G Y. Approach to fault feature extractions of rolling bearing via EEMD and full-vector envelope spectrum[C]//2017 29th Chinese Control and Decision Conference (CCDC). Chongqing, China: IEEE, 2017: 6492-6497.
- [48] 郎完明. 基于特征提取与信息融合的管道泄漏检测与定位研究[D]. 西安:西北工业大学, 2018.
- [49] LI F, ZHANG L, DONG S, et al. Noise-Pressure interaction model for gas pipeline leakage detection and location[J]. Measurement, 2021, 184: 109906.
- [50] HAN X, ZHAO S, CUI X, et al. Localization of CO₂ gas leakages through acoustic emission multi-sensor fusion based on wavelet-RBFN modeling[J]. Measurement Science and Technology, 2019, 30(8): 085007.
- [51] OZEVIN D, YALCINKAYA H. New leak localization approach in pipelines using single-point measurement [J]. Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice, 2014, 5(2):04013020.
- [52] TAO W, DONGYING W, YU P, et al. Gas leak localization and detection method based on a multi-point ultrasonic sensor array with TDOA algorithm [J]. Measurement Science and Technology, 2015, 26 (9): 095002.
- [53] LIU C, LI Y, FANG L, et al. Experimental study on a de-noising system for gas and oil pipelines based on an acoustic leak detection and location method[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2017, 151: 20-34.