

天然气管道泄漏次声波检测技术研究

李时博（江西天然气都昌有限公司，江西 九江 332600）

摘要：天然气是重要的能源资源，一旦发生泄漏，将造成能源浪费和经济损失，传统的泄漏检测方法往往受制于灵敏度和准确性的限制，无法快速定位泄漏点。针对此问题，本次研究引入了次声波检测定位技术，首先从泄漏检测方法和定位方法两个角度出发，开展天然气管道泄漏次声波检测技术原理分析，在此基础上，对次声波传感器、降噪处理方法和信号特征识别方法等关键技术分别进行研究，为推动天然气管道泄漏检测领域的进一步发展奠定基础。研究表明：在使用次声波技术对泄漏位置进行定位的过程中，时间差法以精度见长，信号强度法以实现便捷著称，而混合定位法则通过融合优势展现了强大的环境适应能力和高精度潜力，天然气管道泄漏次声波检测传感器技术的关键在于高灵敏度信号捕捉、多传感器阵列布局、环境适应性和远程监控能力的综合实现，在信号降噪处理的过程中可以结合多种方法构建综合降噪系统，以此提高信号降噪效果。

关键词：天然气管道；泄漏检测；次声波；技术原理；关键技术

0 前言

天然气作为一种清洁高效的能源，在全球能源消费结构中占据重要地位，随着天然气管道运输网络的不断扩大和复杂化，管道泄漏问题逐渐成为影响能源安全和社会稳定的重大隐患。天然气泄漏不仅会导致资源浪费和经济损失，还可能引发火灾和爆炸等严重安全事故，对生态环境和人员生命安全造成威胁^[1]。现有的泄漏检测方法虽然在一定程度上实现了泄漏监测功能，但仍存在灵敏度不足和检测距离有限等局限性，尤其是在长距离且复杂地形的天然气管道中，其应用效果受到了显著制约。次声波是频率低于 20 Hz 的声波，其传播具有低衰减和远距离等特性，当天然气管道发生泄漏时，泄漏点会因气体流动和压力变化产生特定频率的次声信号，这为泄漏检测提供了新的技术手段。本次研究主要是对该种检测技术的原理以及应用过程中的关键技术分别进行研究，为进一步推广和使用次声波检测技术奠定基础。

1 天然气管道泄漏次声波检测技术原理

1.1 泄漏检测方法

当天然气管道发生泄漏时，高压气体通过泄漏点喷出，与周围的环境空气产生剧烈的摩擦和压力波动，形成一定频率范围的声波，这些声波中，频率低于 20 Hz 的部分即为次声波。泄漏点的压力差越大，气体喷射速度越快，形成的次声波强度越高。泄漏孔口的几何特征会影响次声波的频率分布和能量大小，小型泄漏孔口会产生高频次声成分，而大型泄漏口会更明显地产生低频成分。管道材料的振动特性和周围介质的声传播特性会对次声波的信号特征产生一定影响^[2]。

由于次声波的频率极低，其在土壤和液体中传播时的能量衰减远小于高频声波，即使在长距离传播中，信号强度仍能保持相对较高的可检测性。次声波能够覆盖数十公里甚至上百公里的范围，特别适合监测长距离天然气管道，相比高频声波，次声波不容易受到环境噪声的干扰，其信号在复杂环境中具有较高的稳定性。次声波泄漏检测技术的核心在于通过传感器捕捉泄漏点产生的特征信号，并对其进行分析与处理，次声波传感器通常采用高灵敏度的微压传感器或声压传感器，能够检测微小的次声信号。传感器一般安装在管道附近的地面上，通过数字信号处理技术，对捕获的次声信号进行频谱分析和时域分析，提取泄漏次声的特征参数^[3]。基于特定的信号模式，建立泄漏特征数据库，通过人工智能或模式识别算法将正常信号与异常信号区分开来。

1.2 定位方法

天然气管道泄漏次声波检测定位技术利用次声波的传播特性，通过信号采集与处理实现泄漏点的精准定位，当前主要有时间差法、信号强度法和混合定位法三种常见方法，每种方法基于不同的原理，具有独特的优势与局限性。时间差法基于次声波从泄漏点传播到不同传感器所需时间的差异进行定位，具体而言，泄漏点作为次声波的源头，波动会以固定速度传播。当次声波到达布置在管道周围的传感器阵列时，由于距离不同，信号到达各传感器的时间会不同，通过测量到达时间的差异，可以计算泄漏点到各传感器的相对距离，从而建立几何方程组并解算泄漏点位置^[4]。该种类型的方法在多传感器布置情况下，能够实现厘

米级甚至更高精度的定位，信号的时间差能够在较长距离内保持准确测量。但是各传感器的时间同步误差可能影响定位精度，复杂环境中，次声波传播路径可能受到反射或干扰，导致时间差测量误差。

信号强度法基于次声波信号随传播距离衰减的规律进行定位，通过测量各传感器处的次声波强度，结合传感器位置，可以计算泄漏点到各传感器的距离，并利用几何方法确定泄漏点位置。该方法实现简单，信号处理复杂度较低，不需要高精度时间同步设备，适合资源有限的场景。但是信号强度容易受到气候、地形和噪声等因素的干扰，定位精度受强度测量误差影响，且难以在复杂环境中应用。

混合定位法结合时间差法和信号强度法的优点，通过多源信息融合提高定位精度，一般来说，优先利用时间差法确定泄漏点的大致范围，再结合信号强度法对结果进行修正和优化，混合方法综合考虑了信号的时间和强度特征，具有更强的环境适应能力^[5]。多种方法结合的方式减少单一方法的误差影响，适用于复杂地形和多噪声场景，定位结果更稳定。但是需要更高的算法设计和计算能力，成本较高，多种方法融合可能增加计算负担，实时性稍差。

在实际应用中，时间差法适用于高精度要求的长距离管道监测，特别是在环境干扰较少的区域。信号强度法适合资源有限的中短距离管道，或者噪声干扰较小的场景。混合定位法适合复杂地形或多干扰环境的管道监测，特别是需要高精度、可靠性的项目。

2 天然气管道泄漏次声波检测关键技术分析

2.1 次声波传感器

天然气泄漏时，管道内部的压力变化引起次声波的产生，泄漏次声信号通常较弱且频率范围有限，因此传感器必须具备高灵敏度以捕捉微弱信号。选择具有高信号增益和低本底噪声的传感材料，为了确保对次声波信号的完整捕捉，传感器的频率响应范围应覆盖 0.01 Hz 至 20 Hz，要求传感器设计高性能的振动感应元件和高精度滤波系统。集成高增益放大电路，同时通过数字信号处理技术降低环境噪声对信号的干扰，天然气管道泄漏次声波检测的环境复杂，周围可能存在风噪或机械振动等干扰源，传感器必须能够在复杂环境中提取有效信号，高信噪比的信号处理技术是确保传感器性能的关键。

通过在传感器附近布置参考麦克风或振动感应器，实时采集环境噪声，并使用自适应算法进行信号

抵消，增强目标信号的强度，次声波泄漏信号具有独特的频谱特征，利用傅里叶变换或小波变换等方法提取频谱信息，可区分泄漏信号与环境噪声。通过预训练的模型对采集到的信号进行分类和分析，提高对泄漏次声波的识别能力，同时能够适应多种环境下的信号变化。

单一传感器虽然可以捕获泄漏次声信号，但无法实现精确定位，多传感器阵列的布局与协调工作是泄漏检测的关键技术之一。根据管道长度、直径和泄漏特点，优化传感器阵列的数量和位置，使传感器能够覆盖可能发生泄漏的区域。由于次声波传播速度较慢，多传感器需要通过高精度时钟同步确保时间差测量的准确性，校准过程需减少各传感器间的偏差，通过信号到达时间差和信号强度衰减信息计算泄漏点位置，利用几何解算和优化算法进一步提升定位精度。

次声波传感器需要长期安装在野外环境中，面对温度变化、湿度波动、机械振动和腐蚀性气体等外部挑战，传感器的环境适应性和耐久性显得尤为重要。传感器外壳通常采用耐腐蚀合金或复合材料，并使用高等级的密封技术以防止水汽和灰尘进入，通过优化电路设计和选用宽温域元器件，使传感器能够在 -40℃ 至 85℃ 的温度范围内稳定运行，通过增加减振装置或使用弹性结构设计，避免传感器受到振动冲击时性能下降。

次声波传感器采集的数据需要实时传输到监控中心进行处理与分析，这对数据采集与远程通信提出了高要求，确保传感器可以长时间不间断工作，特别是在使用电池供电的情况下，低功耗设计尤为关键。同时，采用窄带物联网或 5G 技术，满足长距离低延迟数据传输需求，同时保障管道运行数据的实时性和安全性，在传感器节点集成初步数据处理功能，减少传输带宽需求，同时提高数据处理效率。

2.2 降噪处理

在使用次声波技术开展天然气管道泄漏检测的过程中，主要的信号降噪处理方法有滤波技术、小波变换、主动噪声控制、深度学习降噪和频谱分析五种方法。滤波技术是通过滤波器对信号进行频段选择，保留目标信号的频率成分，滤除背景噪声，次声波频率低于 20 Hz，可采用低通滤波器排除高频噪声，带通滤波器则可以精确设定频率范围，针对性提取次声信号。该方法实现简单，计算效率高，适合实时处理，对频率稳定的噪声效果明显。但是对复杂非线性噪声

或频率与目标信号重叠的背景噪声效果较弱,需要精确调整滤波参数以适应不同环境。

小波变换是一种多尺度信号处理方法,可将信号分解为不同频率和时间尺度的小波系数,通过设定阈值滤除噪声成分,随后重构得到降噪后的信号。该方法能有效处理非平稳信号,适合动态背景噪声的降噪,具有良好的时间和频率分辨率,可精确保留次声信号特征。但是算法复杂,计算量较大,对实时性要求较高的应用需优化实现,阈值设定敏感,可能导致信号失真或残留噪声。

主动噪声控制通过实时采集环境噪声信号,生成与其相位相反的干扰信号,与背景噪声叠加后实现抵消,在管道沿线布置参考传感器,采集风噪或机械振动噪声后生成干涉信号抑制其干扰。该方法对周期性或连续性噪声效果显著,例如风噪和机械振动,能够实时动态适应环境噪声的变化。但是对随机噪声或短时非周期性噪声效果有限,实现复杂,硬件成本较高。

深度学习降噪利用深度学习算法,对大量次声波信号和噪声样本进行训练,构建能够自动分离信号与噪声的模型,在实际应用中,将采集到的信号输入模型,模型输出降噪后的次声波信号。该方法自适应能力强,能处理复杂多样的噪声源,对频率重叠或非线性噪声的降噪效果较好。但是需要大量标注数据进行训练,数据采集和处理成本较高,模型计算量大,对硬件资源要求较高。

频谱分析与统计方法通过分析次声波信号的频谱特征,将信号的功率谱密度与背景噪声分离,利用主成分分析提取信号主成分,或通过卡尔曼滤波对动态信号进行估计与滤波。该种方法的算法成熟,适合固定频段的次声波提取,能有效处理部分低频噪声。但是对非线性噪声或复杂动态背景噪声效果有限,在多源噪声环境中需配合其他降噪方法使用。

2.3 信号特征识别

在使用次声波技术开展天然气管道泄漏检测的过程中,主要的信号特征识别方法有时域特征分析、频域特征分析、模式识别以及深度学习等方法。时域分析主要通过研究信号在时间上的变化特性来识别特征,计算泄漏次声波信号的均值和方差等多种统计特征指标,以区分泄漏信号与背景噪声。该方法实现简单,计算量较小,适合实时处理,可直观反映信号随时间变化的动态特性。但是对复杂背景噪声敏感,

无法准确区分非平稳信号,缺乏频域和时间-频域信息,对信号频率特性描述不足。

频域分析通过傅里叶变换将信号从时域转换到频域,以获取信号的频谱特性,次声波泄漏信号通常具有特定的频率特征,可通过频域分析分离目标信号与背景噪声。该方法能有效提取信号的频率特性,对稳定的周期性噪声有较好的分离效果,其提供丰富的频谱信息,便于进一步特征提取。但是对非平稳信号的分析能力有限,难以捕捉信号的瞬态特征,噪声频率与目标信号重叠时效果较差。

基于模式识别的特征提取通过模式识别算法对次声波信号进行特征提取和分类,主成分分析法可以提取次声信号的主成分特征,降低维度以增强信号与噪声的区分度,支持向量机算法则可通过训练模型,自动识别泄漏信号与非泄漏信号。该方法适合处理多维数据,可增强信号分类的准确性。深度学习特征提取利用深度学习模型对次声波信号进行自动特征提取,通过训练大量样本,深度学习模型可学习到次声信号的高维特征,并能从复杂背景噪声中识别出目标信号。

3 结论

综上所述,通过对次声波泄漏检测技术进行综合分析发现,次声波具有低频、低衰减特性,可用于长距离天然气管道的泄漏监测,其对管道泄漏产生的特定次声信号具有较高的辨识能力,能有效降低误报率,该技术可以实现非接触式的远程监测,适用于危险区域或不易接近的地形,因此未来需要在天然气领域进一步推广和使用该技术,以此提高天然气管道的安全性。

参考文献:

- [1] 赵志勇.天然气管道泄漏次声波泄漏定位系统[J].中国储运,2023,(01):97-98.
- [2] 郭鹏,赵会军,慈智,等.基于次声波法的天然气管道泄漏检测[J].油气田地面工程,2014,33(08):43-44.
- [3] 周旭.基于SVM的天然气管道泄漏次声波检测技术研究[J].中国石油和化工标准与质量,2014,34(06):17.
- [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] 阙玲玲,梁洪卫,高丙坤,等.基于次声波的天然气管道泄漏检测系统设计[J].化工自动化及仪表,2011,38(06):653-655.