

基于声波信号的供热管网多孔径 泄漏检测算法

李子瑞¹, 郭津宏², 马驰骋¹

(1. 河北工业大学 机械工程学院, 天津 300401; 2. 河北工业大学 能源与环境工程学院, 天津 300401)

摘 要: 针对供热管网长期老化易受内外力致漏、且传统脉冲检测法在电磁干扰、温变、湿土等环境下误差大的问题, 提出基于声波信号的多孔径泄漏检测方法。采用轴对称的方式在供热管网中安装加速度传感器, 实时采集携带泄漏信息的声波信号; 利用小波包变换分解采集到的声波信号, 以提取对泄漏检测有用的特征信息, 并将其作为 Duffing 振子函数的输入; 通过将内置驱动力的相位调整至与待检测声波信号的相位一致, 将 Duffing 振子激发到大尺度周期状态, 有助于在噪声背景下区分出微弱的声波信号特征, 从而实现更高效的供热管网多孔径泄漏检测。实验结果表明, 该算法能够依据声波特性准确区分并检测到所有孔径的供热管网泄漏, 并在检测 2 mm 的泄漏孔径时, 可以将时间控制在 0.32 ms 以内。这说明所提方法可以及时检测到供热管网多孔径泄漏, 保证供热管网的稳定运行。

关键词: 声波信号; 供热管网; 加速度传感器; 小波包变换; Duffing 振子; 泄漏检测

中图分类号: TU995.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5497(2026)01-0116-07

DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20241073

Multi aperture leak detection algorithm for heating pipeline network based on acoustic signals

LI Zi-rui¹, GUO Jin-hong², MA Chi-cheng¹

(1. School of Mechanical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China; 2. School of Energy and Environmental Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China)

Abstract: Aiming at the problem that long-term aging makes heating pipelines prone to leakage under internal or external forces, and that traditional pulse-based methods suffer large errors under electromagnetic interference, temperature variation, and soil-moisture conditions, we propose a multi-aperture leak-detection method based on acoustic signals. Install acceleration sensors in the heating pipeline network in an axisymmetric manner to collect real-time sound signals carrying leaked sound waves. By using wavelet packet transform to decompose the collected acoustic signals, useful feature information for leak detection can be extracted and used as input for the Duffing oscillator function. By adjusting the phase of the built-in driving force to match the phase of the acoustic signal to be detected, the Duffing oscillator can be excited to a large-scale periodic state, which helps to distinguish weak acoustic signal features in

收稿日期: 2024-10-10.

基金项目: 国家自然科学基金项目(12072100).

作者简介: 李子瑞(1969-), 男, 教授, 博士. 研究方向: 计算力学及微纳流体力学. E-mail: lizirui@hebut.edu.cn

noisy backgrounds and achieve more efficient multi aperture leak detection in heating pipelines network. The experimental results show that the algorithm can accurately distinguish and detect leaks in the heating pipeline network of all apertures based on the characteristics of sound waves, and can control the time within 0.32 ms when detecting leaks with an aperture of 2 mm. This indicates that the method proposed in this paper can detect multi aperture leaks in the heating pipeline network in a timely manner, ensuring the stable operation of the heating pipeline network.

Key words: acoustic signal; heating pipeline network; acceleration sensors; wavelet packet transform; Duffing oscillator; leak detection

0 引言

供热管网作为城市基础设施的重要组成部分^[1],其运行状态影响居民的生活质量。然而,由于材料老化、施工不当、地质变动等,供热管网的泄漏问题时有发生^[2,3],这不仅造成了能源浪费和环境污染,还可能引发安全事故,对居民生活和城市运行造成严重影响。为保证供热管网的稳定运行,众多学者对其泄漏的检测方法展开了大量研究。

郭帅杰等^[4]通过加速度传感器捕捉管道运行中的声波信号,识别出与泄漏声波信号相关的特征频段,并根据声波信号的特征,结合管道的物理特性和环境条件,运用定位算法计算泄漏点的具体位置,实现供热管道泄漏检测。但该研究在一定程度上忽略了信号处理过程中,泄漏声波信号被背景噪声掩盖或扭曲的问题,进而影响泄漏检测和定位的准确性。杨辉斌等^[5]利用遗传算法(Genetic algorithm, GA)对支持向量回归(Support vector regression, SVR)模型进行参数优化,以提升模型的预测能力。通过收集供热管网的实时和历史数据,训练优化后的GA-SVR模型对各管段的水量进行精确预测,将预测值与实际监测值进行对比,分析差异并设定阈值以识别异常漏损区域,实现管网的泄漏检测。但该算法在处理大规模管网数据时,未考虑背景噪声对管网数据的影响,导致噪声信号保留在所处理的数据中,进而影响后续的数据分析和模型训练。Lyu等^[6]提出一种基于Vibe视觉背景提取器和Efficient-NetB0卷积神经网络的视觉早期液体泄漏检测系统,通过分析和识别监控视频中的图像信息,实现了对工业环境中早期液体泄漏的高效准确检测。但背景环境中存在与泄漏目标相似的动态变化,这些变化可能会被误认为泄漏目标,导致提取出

的候选区域中包含大量非泄漏的环境干扰。张璟等^[7]利用小波去噪技术处理供热管网的监测数据,并通过卡尔曼滤波实时分析处理后的信号,识别出异常泄漏区域。卡尔曼滤波虽然能够在一定程度上平滑数据并预测未来状态,但在面对复杂的噪声环境时,其性能可能会受到限制。

小波包变换能够多分辨率地分析信号,捕捉不同频率的细节特征^[8];而Duffing振子则对微弱信号具有高度的敏感性^[9],通过调整其内置驱动力的相位,可以将振子激发到大尺度周期状态,从而在噪声背景下准确区分泄漏声波信号的特征。两者结合使用不仅提高了检测的灵敏度,还缩短了检测时间。因此,本文将小波包变换与Duffing振子相结合,提出基于声波信号的供热管网多孔径泄漏检测算法,以适应不同的泄漏情况和环境背景,实现更加准确、高效的泄漏检测。

1 加速度传感器布置方案设置

供热管网发生泄漏时,泄漏点周围的介质流动会产生特定的振动模式,进而发出声波信号。然而,声波在供热管网中传播时,其强度会随着距离的增加而衰减^[10],且因为管壁的材质、厚度,以及泄漏孔的大小、形状不同,会出现不同程度的衰减。加速度传感器能够实时、准确地监测管道振动产生的声波信号,其高灵敏度和快速响应能力使得检测过程更加及时和可靠。因此,根据管网的实际情况和泄漏检测的需求,合理选择加速度传感器的布置位置,确保能够全面覆盖管网并实时捕捉到泄漏点产生的声波信号。

考虑声波在供热管网中传播时高频信号会产生较为明显的衰减,供热管网多孔径泄漏检测主要关注环频率以下的低频段。环频率是声波在供热管道中传播的一个重要参数,能够决定声波的模态转换和衰减特性。在环频率以下,声波主要

以 $L(0,1)$ 和 $F(1,1)$ 两种模态传播。其中, $L(0,1)$ 模态是管道轴向的伸缩振动,而 $F(1,1)$ 模态是管道截面的弯曲振动。这两种模态携带的泄漏声波信息可以通过管道传播较远的距离,对于供热管网多孔径泄漏检测具有重要意义。因此,使用加速度传感器采集这两种模态的声波信号。

$L(0,1)$ 和 $F(1,1)$ 两种模态的声波在管道中的传播特性不同,因此在供热管网的同一位置以轴对称的形式布置两个加速度传感器,可以更容易地区分这两种模态。

由此,结合供热管网声波的衰减特性和多模态传播特性^[11],准确采集供热管网不同位置上的声波信号。基于声波强度,建立加速度传感器管壁不同位置的声波空间分布模型:

$$\chi_{p,dx} = \chi_{sp} e^{-bdx} \quad (1)$$

式中: χ_{sp} 为供热管网的初始声波强度; e^{-bdx} 为供热管网材料的衰减项; b 为衰减系数; $\chi_{p,dx}$ 为距离泄漏孔轴向距离 dx 处的声波强度。

同时,为了确保在任何位置发生泄漏时,两侧的传感器都能正常采集到加速度信号,需要满足:

$$\frac{e^{-bD_{ar}}}{\delta e_a} > \frac{V_{a,\min}}{\chi_{sp}} \quad (2)$$

式中: D_{ar} 为布置间距; δe_a 为灵敏度; $V_{a,\min}$ 为数采设备的最小输入电压值。

通过合理布置传感器,可以实时采集到供热管网多孔径声波信号,为后续准确检测与定位提供可靠的基础。

2 供热管网多孔径泄漏检测

2.1 声波信号特征提取

在供热管网系统中,多孔径泄漏意味着管网中存在多个泄漏点,每个泄漏点产生的声波信号可能相互干扰,形成复杂的声场环境。这些复杂的声波信号中蕴含着丰富的特征信息,对于准确检测管网状态至关重要^[12,13]。小波包变换可以在不同的频带范围内对信号进行分解,从而更准确地识别泄漏信号。

在供热管网多孔径泄漏检测中,小波基函数(Daubechies wavelete, DB)因具有良好的正交性和紧支性,能够将泄漏信号分解成多个频率带,每个频率带对应不同的信号特征。在分解过程中,供热管网声波信号 $s(t)$ 被分解为多个小波系数,每个系数代表供热管网声波信号与某个特定频率

和时间位置上小波函数的相似程度。分解过程可以表示为:

$$\phi_n^j(t) = s(t) \sum_{n=1}^N h_m \phi_{n-1}^{2j}(t-m) + g_m \phi_{n-1}^{2j+1}(t-m) \quad (3)$$

式中: $\phi_n^j(t)$ 为第 n 层第 j 个小波包系数; h_m 为低通滤波器系数; g_m 为高通滤波器系数; m 为下采样后的索引。通过不断调整尺度因子(即层数 n)和平移因子(即索引 m),可以计算得到不同频率和时间位置上的小波包系数。

对于每个小波包系数 $\phi_n^j(t)$,其能量 $E_n^j(t)$ 的计算公式为:

$$E_n^j(t) = \sum_{n=1}^N |\phi_n^j(t)|^2 \quad (4)$$

选择能量最高的几个频带作为特征,可以得到树状结构的系数集,每个节点对应信号的一个特定频率带。通过分析不同节点的频率分布,并结合泄漏信号的特征和检测需求,选择与泄漏信号频率范围相匹配的节点进行重构。重构是分解的逆过程,通过将所有小波包系数与其对应的小波基函数相乘并求和,可以精确地恢复原始信号,以突出显示对泄漏检测有用的特征。重构表达式为:

$$s'(t) = \sum_{m \in M} \phi_{n,m} E_n^j(t) \quad (5)$$

通过精细的信号分解与重构,可有效提取泄漏信号中的关键特征。这种方法不仅可以提高泄漏检测的准确性,还可以增强系统对复杂声场环境的适应能力。

2.2 基于 Duffing 振子的泄漏检测

小波包变换对噪声较为敏感,而供热管网周围的环境噪声可能较为复杂,包括机械振动、环境噪声等。这些噪声可能会干扰信号的分解和重构过程,影响特征提取的准确性和可靠性。Duffing 振子是一种非线性动力学系统,能够利用非线性特性对信号进行更复杂的处理^[14]。这有助于更好地揭示信号中的隐藏信息,提高特征提取的精度和全面性。

Duffing 振子的数学模型由一个二阶非线性微分方程表示,即:

$$\ddot{x} + k\dot{x} - x + x^3 = \varphi \cos(t) + s'(t) \quad (6)$$

式中: $\ddot{x}$ 为振子的加速度; k 为阻尼系数; $-x + x^3$ 为非线性恢复力项; $\varphi \cos(t)$ 为内置驱动力项。

假设提取出的供热管网多孔径声波信号特征

为余弦波,在不考虑噪声的基础上,该信号可表示为:

$$s'(t) = \varphi_d \cos(\iota_d t + \lambda_d) \quad (7)$$

式中: φ_d 为振幅; ι_d 为角频率; λ_d 为相位。

为了将提取出的供热管网多孔径声波信号特征的角频率转换为 1 rad/s ,对 t_i 进行时间尺度变换。令新的时间变量为 t_i ,则有:

$$t_i = \iota_d t \quad (8)$$

将 t_i 代入原声波信号,得到:

$$s'(t_i) = \varphi_d \cos(t_i + \lambda_d) \quad (9)$$

式中: t_i 为以 1 rad/s 角频率为基准的时间尺度。

在供热管网多孔径泄漏检测中^[15],待检测供热管网多孔径声波信号 $s'(t)$ 以采样率 f_s 进行采样。为了在时间尺度 t_i 上准确表示信号,采用三次样条插值算法对 $s(t_i)$ 进行重构,得到新的供热管网多孔径声波信号 $s'(t'_i)$,其中 t'_i 以 $1/f_s$ 为步长。

Duffing 振子的内置驱动力通常设定为具有特定相位的余弦波。然而,为了匹配供热管网多孔径声波信号的相位 λ_d ,可以调整内置驱动力的相位 $\lambda = \lambda_d$ 。当两者相位一致时,Duffing 振子更容易被激发到大尺度周期状态,可以显著提高检测灵敏度,这有助于在噪声背景下区分出信号特征,从而更容易检测到微弱的声波信号。

由此,Duffing 振子的非线性微分方程可改写为:

$$\ddot{x} + k\dot{x} - x + x^3 = \varphi \cos(t + \lambda) + s'(t'_i) \quad (10)$$

确定了时间尺度变换、信号插值以及相位匹配后,使用数值方法求解上述非线性微分方程。通过监测 Duffing 振子的相轨迹变化,可以判断声波是否由混沌状态转变为大尺度周期状态,进而确定供热管网多孔径声波信号中是否存在与内置驱动力的频率和相位相匹配的周期信号。

在实际应用中待检测信号的相位和频率未知,特别是当信号为窄带信号时,需要通过扫描内置驱动力的相位 λ 和待检测信号的频率 f_d 寻找匹配项。因此,设定相位扫描范围为 $\lambda \in [0, 2\pi]$,频率扫描范围为 $f_d \in [f_0, f_1]$ 。

综上所述,基于 Duffing 振子的供热管网多孔径泄漏检测流程如图 1 所示,具体步骤如下。

(1) 初始化 Duffing 振子的内置驱动力相位为 0,作为扫描的起始点。

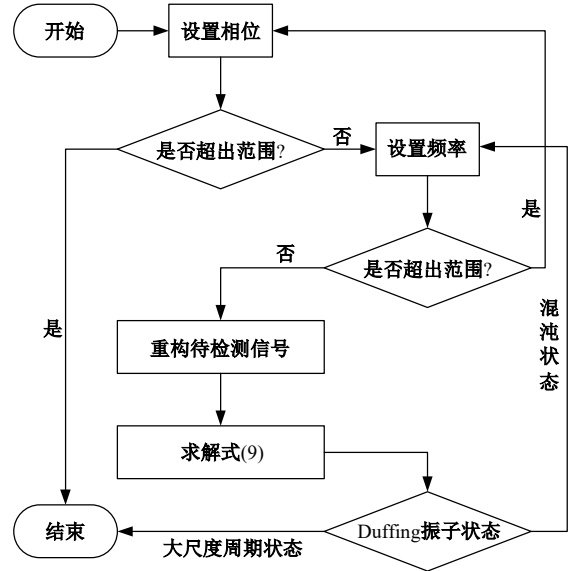


图 1 供热管网多孔径泄漏检测流程

Fig. 1 Multi aperture leak detection process for heating pipeline network

(2) 检查当前相位是否超出设定的扫描范围(即是否 $\geq 2\pi$)。若是,则结束对当前待检测供热管网多孔径声波信号的检测,并假设未检测到管道泄漏信号。

(3) 设置待检测供热管网多孔径声波信号的初始检测频率为 16 Hz ,作为频率扫描的起始点。

(4) 检查当前检测频率是否超出设定的扫描范围。若是,则将内置驱动力的相位增加 0.1 rad ,并跳转回步骤(2)继续下一轮相位扫描。

(5) 根据当前相位和频率值,重构待检测供热管网多孔径声波信号 $s'(t'_i)$,并求解 Duffing 振子的非线性方程,以获取该条件下的相轨迹。

(6) 分析相轨迹的状态,若相轨迹处于混沌状态,则说明当前频率与待检测供热管网多孔径声波信号的频率不匹配,因此将检测频率增加 1 Hz ,并跳转回步骤(4)进行下一轮频率扫描。若相轨迹进入大尺度周期状态,则表明在当前相位和频率下,检测到了与内置驱动力相匹配的信号,即认为存在供热管网多孔径泄漏,结束对当前待检测信号的检测。

(7) 若需要继续检测其他供热管网多孔径声波信号,则输入新的待检测信号,并跳转回步骤(1)重新开始整个检测流程。

通过上述流程,可以更有效地检测供热管网多孔径声波信号中的微弱或隐藏信号,特别是与内置驱动力频率和相位相匹配的周期信号,从而有效提高泄漏信号检测的实时性,实现快速、精准

的供热管网多孔径泄漏检测。

3 实验分析

3.1 实验设置

为了验证本文供热管网多孔径泄漏检测算法的有效性,以绿源智慧热力有限公司为实验对象。该公司拥有完善的城市供热系统,覆盖全市范围内的居民区、商业区及工业区。选取 MAX765D 三轴数字无线加速度传感器作为声波信号的采集设备,在 MATLAB 上搭建模拟 DN300 管径直埋热水供热管网实验环境,该环境包括管道、阀门、水泵、储水罐、加速度传感器、数据采集模块、变频器和上位机等。加速度传感器的安装位置和实验环境如图 2 所示。

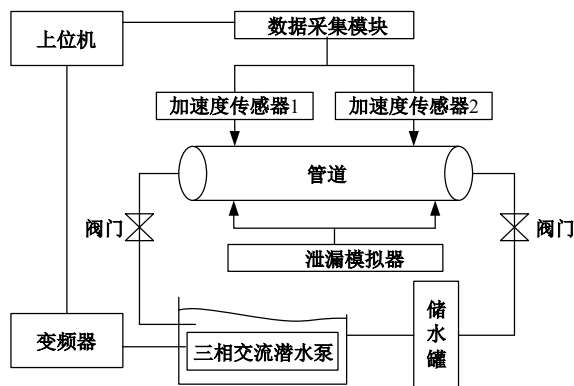


图 2 加速度传感器的安装位置和实验环境
Fig. 2 Installation location and experimental environment of acceleration sensor

在如图 2 所示的实验环境中,管径长度为 500 mm,管壁厚度为 3 mm,管道运行压力为 6 MPa。设备连接并调试完成后开始实验,模拟管道无泄漏和有泄漏状态,按照本文方法安装加速度传感器,采集管道的声波信号,采集结果如图 3 所示。

从图 3 可以看出,在无泄漏状态下,供热管网的声波信号能量显著集中于 0~600 Hz 的低频范围,展现出随频率上升而逐步衰减的稳定趋势。当管网发生泄漏时,其声波信号在频率域上展现出更为宽泛的覆盖范围,特别是在 600~3 300 Hz 的中高频段,泄漏信号的能量聚集并凸显,相较于未泄漏状态其功率谱密度明显提升。这说明按照本文方法布置加速度传感器,可以有效采集到有无泄漏状态下的声波信号,为供热管网泄漏故障的检测提供了直观且可靠的声学指标,也进一步揭示了声波特性对供热管网泄漏检测的深刻影响。

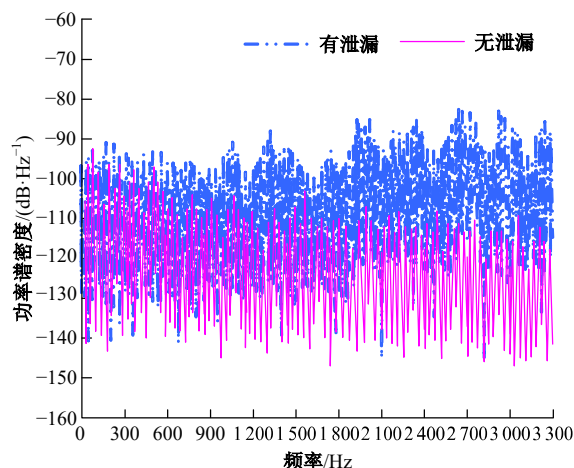


图 3 有无泄漏声波信号功率谱

Fig. 3 Power spectrum of sound wave signal with or without leakage

为更全面地验证本文方法的有效性,在供热管网的同一位置分别使用泄漏模拟器模拟 2、4、6、8 mm 这 4 个不同孔径的泄漏,采集和分析不同孔径泄漏时产生的声波信号,验证不同孔径对供热管网泄漏检测的影响。实验过程中,本文算法的参数设置如表 1 所示。

表 1 算法的参数设置

Table 1 Parameter settings for algorithms

参数名称	参数值/描述
分解层数/层	5
内置驱动力角频率范围/Hz	500~2 000
非线性系数	0.1
阻尼系数	0.01

基于上述设置,利用小波包变换分解如图 3 所示有泄漏声波信号中的一段随机信号,以提取信号中的关键特征,结果如图 4 所示。

从图 4 可以看出,通过计算每个小波包系数的能量,并选择能量最高的几个频带作为特征,可

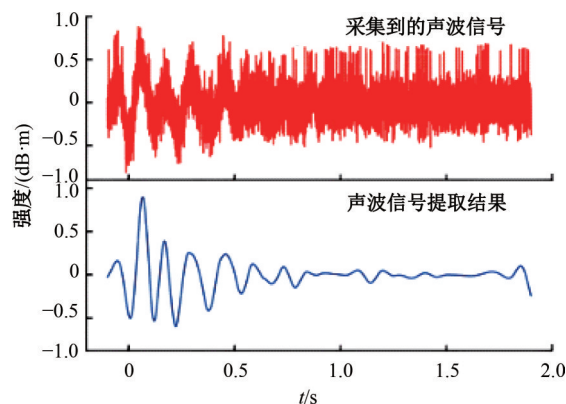


图 4 声波信号特征提取结果

Fig. 4 Feature extraction results of acoustic signal

以突出显示对泄漏检测有用的信号成分,自动筛选出包含泄漏信号主要特征的频带,有效地提取声波信号特征,从而提高泄漏检测的准确性。

3.2 结果分析

不同孔径对供热管网泄漏检测的验证结果如图 5 所示。

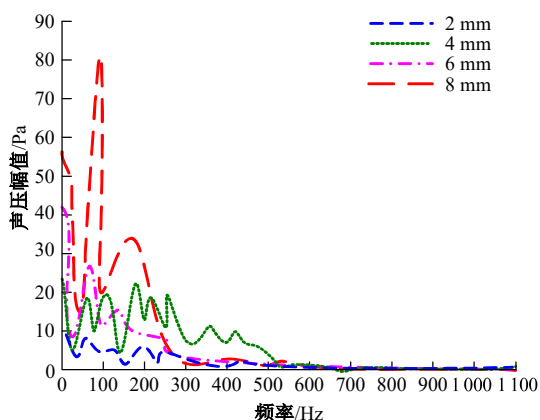


图 5 不同孔径的声波信号

Fig. 5 Sound wave signals with different apertures

从图 5 可以看出,随着泄漏孔径的增大,声波信号的强度也随之增强。当泄漏孔径为 8 mm 时,产生的声波更低频、更持久;而当泄漏孔径为 2 mm 时,产生的声波高频且短暂。因此,可以通过频率分布、波形形状等特征的变化实现供热管网的泄漏检测,这进一步验证了本文算法基于声波特性对供热管网泄漏检测的有效性。

在供热管网的特定位置使用泄漏模拟器模拟 2、4、6、8 mm 这 4 个不同孔径的泄漏,验证文献[4]方法、文献[5]方法和本文方法的检测灵敏度,结果如表 2 所示。

表 2 检测灵敏度

Table 2 Detection sensitivity

泄漏孔径/mm	文献[4]方法/ms	文献[5]方法/ms	本文方法/ms
2	0.56	0.61	0.32
4	0.49	0.57	0.26
6	0.42	0.36	0.20
8	0.34	0.28	0.14

从表 2 可以看出,随着泄漏孔径的增加,3 种方法的检测灵敏度均不断上升。其中,本文方法在检测 2 mm 的泄漏孔径时,检测时间可控制在 0.32 ms 以内,相对较短。这是因为本文方法应用的 Duffing 振子是一种对微弱信号敏感的非线性系统,通过将其内置驱动力的相位调整至与待检测声波信号的相位一致,可以将 Duffing 振子激

发到大尺度周期状态。这种状态下,Duffing 振子对微弱信号的响应更加灵敏,有助于在噪声背景下区分出泄漏声波信号的特征。因此,本文方法能够实现对微小泄漏孔径的高效检测。

4 结束语

为实时准确地检测供热管网的泄漏,本文提出了基于声波信号的供热管网多孔径泄漏检测算法。实验结果表明,本文方法融合了声波信号的精细频率分布解析、强度量化评估及波形形态辨识能力,实现了对不同尺度孔径泄漏的精准检测。未来,可以进一步融合三维定位技术(如时差定位、角度测量),或结合声波信号的传播速度和管网布局进行建模,以实现泄漏位置的三维精确定位。这将为运维人员提供更为直观的泄漏位置信息,为城市供热管网的运维管理开辟一条高效、智能、可持续的发展路径。

参考文献:

- [1] 王阳, 仪垂杰, 赵鹏, 等. 基于 CEEMDAN-IGWO-BP 的供热管道泄漏孔径预测[J]. 传感器与微系统, 2023, 42(1): 135-139.
Wang Yang, Yi Chui-jie, Zhao Peng, et al. Leakage aperture prediction for heating supply pipeline based on CEEMDAN-IGWO-BP[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2023, 42(1): 135-139.
- [2] 孙少杰, 乔磊, 李勇, 等. 供热管道泄漏声源特性仿真及实验[J]. 机电工程技术, 2023, 52(7): 111-114.
Sun Shao-jie, Qiao Lei, Li Yong, et al. Simulation and experiment of sound source characteristics from heat supply pipeline leakage[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2023, 52(7): 111-114.
- [3] 吴文红, 崔玉莹, 刘宁. 基于布谷鸟算法的管网漏损定位模型[J]. 中国给水排水, 2022, 38(11): 38-42.
Wu Wen-hong, Cui Yu-ying, Liu Ning. Leakage location model of pipeline network based on cuckoo search algorithm[J]. China Water & Wastewater, 2022, 38(11): 38-42.
- [4] 郭帅杰, 张立申, 李成, 等. 声波法直埋热水供热管道泄漏检测定位[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(11): 4765-4772.
Guo Shuai-jie, Zhang Li-shen, Li Cheng, et al. Leakage detection and localization of direct buried hot water heating pipeline by acoustic wave method[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(11): 4765-4772.

- [5] 杨辉斌, 郑德仁, 王贺龙, 等. 基于 GA-SVR 的管网异常漏损检测[J]. 水电能源科学, 2024, 42(3): 133-136.
Yang Hui-bin, Zheng De-ren, Wang He-long, et al. Abnormal leakage detection of pipe network based on GA-SVR[J]. Water Resources and Power, 2024, 42(3): 133-136.
- [6] Lyu C G, Liu Y, Wang X K, et al. Visual early leakage detection for industrial surveillance environments[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2022, 18(6): 3670-3680.
- [7] 张璟, 杜坤, 许丁, 等. 基于小波去噪-卡尔曼滤波的供水管网爆管检测[J]. 工业安全与环保, 2023, 49(6): 34-38.
Zhang Jing, Du Kun, Xu Ding, et al. Pipe burst detection of water distribution system based on wavelet denoising-Kalman filter[J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2023, 49(6): 34-38.
- [8] 李立柱, 孟明, 高云园, 等. 基于小波变换的 EEG-fNIRS 多模态数据融合方法[J]. 传感技术学报, 2023, 36(7): 1064-1072.
Li Li-zhu, Meng Ming, Gao Yun-yuan, et al. A data fusion method for hybrid EEG-fNIRS BCI base on wavelet transform[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2023, 36(7): 1064-1072.
- [9] 陈大全, 贾美美, 李娜. 基于新耦合 Duffing 振子系统的微弱信号检测[J]. 内蒙古工业大学学报: 自然科学版, 2022, 41(2): 150-158.
Chen Da-quan, Jia Mei-mei, Li Na. Weak signal detection based on a new coupled Duffing oscillators system[J]. Journal of Inner Mongolia University of Technology (Natural science edition), 2022, 41(2): 150-158.
- [10] 袁丁, 薛贵军, 张红梅. 分布式供热管网中异常数据识别算法设计[J]. 计算机仿真, 2022, 39(5): 494-498.
Yuan Ding, Xue Gui-jun, Zhang Hong-mei. Design of abnormal data recognition algorithm in distributed heating network[J]. Computer Simulation, 2022, 39(5): 494-498.
- [11] 廖康桥, 张立申, 王随林, 等. 热水供热管道泄漏声波特性与传播规律[J]. 暖通空调, 2022, 52(4): 152-159.
Liao Kang-qiao, Zhang Li-shen, Wang Sui-lin, et al. Acoustic wave characteristics and propagation law of hot water heating pipeline leakage[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2022, 52(4): 152-159.
- [12] 李鸿, 张欢, 王雅然, 等. 集中供热管网泄漏的分类识别[J]. 暖通空调, 2022, 52(11): 175-184.
Li Hong, Zhang Huan, Wang Ya-ran, et al. Classification and identification of leakage in central heating networks[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2022, 52(11): 175-184.
- [13] 彭森, 程蕊, 程景, 等. 基于贝叶斯优化 FCN-DenseNet 算法的供水管网爆管智能识别[J]. 安全与环境学报, 2022, 22(1): 306-315.
Peng Sen, Cheng Rui, Cheng Jing, et al. Research on burst intelligent identification in water distribution network based on Bayesian optimized FCN-DenseNet algorithm[J]. Journal of Safety and Environment, 2022, 22(1): 306-315.
- [14] 刘强, 钟俊. 基于 CFAR 和 Duffing 振子的 FOD 联合检测算法[J]. 计算机应用与软件, 2023, 40(12): 243-247.
Liu Qiang, Zhong Jun. FOD joint detection algorithm based on CFAR and Duffing oscillator[J]. Computer Applications and Software, 2023, 40(12): 243-247.
- [15] 宋文轲, 王杉月, 陶涛. 一种基于虚拟压力分区的供水管网漏损区域识别方法[J]. 环境工程, 2023, 41(7): 184-191.
Song Wen-ke, Wang Shan-yue, Tao Tao. A method for identifying leakage areas in water supply networks based on virtual pressure zoning[J]. Environmental Engineering, 2023, 41(7): 184-191.