

基于改进阈值函数的直埋供热管网检漏研究^{*}

徐自强¹ 李成¹ 穆连波¹ 王随林¹ 刘建军²

(1. 北京建筑大学环境与能源工程学院 北京 100044; 2. 北京市热力集团有限公司 北京 100028)

摘要: 为提高声波法直埋热水供热管网泄漏应用的定位精度,在分析各种小波法阈值函数适用性的基础上,提出了改进阈值函数降噪方法,该方法理论上能够克服软阈值函数的恒定偏差和硬阈值函数信号振荡的缺点,设置调节参数,提升降噪能力,保留小于阈值点区域信号,避免有效信号丢失。在大型直埋热水循环管网中进行泄漏测试实验,研究表明采用本方法进行声波法直埋供热管道泄漏检测,可实现泄漏定位误差在±1 m内,定位精度可达0.11%~3.49%,最后选择北京市供热系统中实际工程案例,采用本方法进行声波法泄漏检测,泄漏定位误差为0.37%~0.66%,定位精度提升。

关键词: 改进阈值函数;直埋供热管道;声波法;泄漏检测;定位

中图分类号: TU995.3 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 560.5540

Research on the leak detection of directly buried heating pipe network by an improved threshold function

Xu Ziqiang¹ Li Cheng¹ Mu Lianbo¹ Wang Suilin¹ Liu Jianjun²

(1. School of Environment and Energy Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China;

2. Beijing Thermal Group Co., Ltd., Beijing 100028, China)

Abstract: To improve the positioning accuracy of the leakage application of the direct buried hot water heating pipe network by acoustic method, based on the analysis of the applicability of various wavelet threshold functions, an improved threshold function noise reduction method is proposed. This method can theoretically overcome the constant deviation of the soft threshold function and the shortcomings of the hard threshold function signal oscillation. Through setting adjustment parameters, improving the noise reduction ability, and retaining the signal of the region less than the threshold point to avoid effective signal loss. The experiment was carried out in a large direct buried hot water circulation pipe network. The research showed that the leakage positioning error was within ±1 m and the positioning accuracy reached 0.11%~3.49%. Finally, the acoustic leakage detection method was adopted in a practical engineering case of a Beijing heating system. The leakage location error is 0.37%~0.66%, and the positioning accuracy has efficiently improved.

Keywords: threshold function; directly buried heating pipelines; acoustic method; leakage detection; orientation

0 引言

城市供热管网泄漏的智能精准监测是韧性城市供热基础设施安全高效低碳运行与民生的重要保障。我国是供热规模最大的国家,2022年全国集中供热面积达 $106.03 \times 10^8 \text{ m}^2$,供热管道总长达 $46.15 \times 10^4 \text{ km}$ ^[1],热水供热管网在长期使用后,易出现腐蚀、破损和老化现象,地震等自然灾害及人为破坏也会损坏管网,这将成为管道泄漏的重点

监测区域。我国城市主要采用直埋敷设供热方式^[2],当泄漏管网的修复不及时,会造成大量热水损失,严重影响区域采暖,甚至会造成地面塌陷隐患,增加抢修成本。其泄漏点非开挖检测定位难是长期制约管网泄漏快速高效修复的难题之一,亟待研发非开挖智能精准检测技术设备。

在直埋供热管道泄漏抢修工程中,管网泄漏定位约占整个抢修工程的1/2时间,准确快速的管道定位将大大提升抢修效率。目前,国内外在管道泄漏检测方面有大量研

究,声波法、负压波法、流量平衡法、磁通量法和光纤传感器法等,声波法^[3]通过检测管壁的加速度信号并利用算法分析进行泄漏定位,因具有不破土不开挖、可灵活安装等特点而应用潜力巨大,在输油、输水管道泄漏检测中广泛应用和研究,但管道泄漏信号不同于传统通信信号,其噪声信号是一种来源广泛、泄漏声波和部分噪声同频、不同管道噪声来源差异性大的混叠信号,如果采用傅里叶变换进行带通降噪处理,难以获得良好的降噪效果,甚至会丢失泄漏特征信号。可见,上述复杂噪声的有效降噪处理,对声波法在热力管道泄漏快速定位中的应用有重要意义。

信号分析中应用广泛的是希尔伯特-黄变换、傅里叶变换、小波变换法等。在复杂噪声环境中,希尔伯特-黄变换与傅里叶变换只对信号进行时频分析,无法实现信号降噪,经变换所得信号可直观信号时频特征,但受噪声信号干扰,所得信号并非真实特征信号。小波法是将原始信号分解,并阈值化处理和重构的一种对信号细节特征进行降噪的方法^[4]。由于小波硬阈值函数在阈值点处的不连续导致降噪信号发生振荡,而软阈值函数的小波系数向零收缩存在恒定偏差问题^[5-6]。为提高小波法降噪精度,需进行阈值函数改进。具有代表性的改进阈值函数有半软阈值函数、Garrote 阈值函数、双曲线阈值函数及其他改进的阈值函数等^[5,7-9],它们解决了大于阈值的小波系数造成的信号偏差。倪培峰等^[10]对大于阈值部分的细节小波系数进行修正,忽略小于阈值部分,易造成降噪不彻底。但他们忽略小于阈值部分的小波系数对信号质量的影响,因此灵活性低。李树勋等^[11]提出了可变参数的阈值函数,仅考虑小于阈值的小波系数改进,降噪效果不高。还有部分学者优化阈值降噪函数^[12-13],虽提高信号降噪能力,但缺少应用的灵活性。综上,在供热管道检测信号降噪应用中,环境噪声信号复杂、多变,仅采用固定阈值函数对检测信号降噪处理,难识别泄漏特征,影响声波法诊断定位。根据热力管道的壁面上噪声来源、强度和频段等特征,需要综合考虑阈值上下限值的细节小波系数的综合降噪效果,同时保留有用信号。

本文基于直埋供热管网泄漏检测的复杂噪声环境特点,重点研究具有连续性、灵活性、多参数可变特点的改进阈值函数降噪算法,在保留必要的信号信息的前提下,克服软阈值函数将小波系数按照固定量向零收缩导致恒定偏差的缺陷和硬阈值函数的不连续造成信号振荡问题,实现最大可能降噪同时保留更多泄漏特征信息,并通过直埋热水供热管道大型模化泄漏检测实验及实际供热管网泄漏检测相结合,验证改进阈值函数在供热管道泄漏检测应用中的可靠性,旨在为非开挖智能精准检测技术设备提供依据。

1 检漏原理与实验系统

1.1 检漏原理

供热管道发生泄漏时,在管内外压差作用下泄漏处会产生不同频率声波信号,引起管壁振动,该信号以泄漏点为

振源,沿管壁向管道上下游传播。在泄漏点上、下游管壁上采用加速度传感器 A 和 B 进行数据采集,利用小波法进行信号降噪,通过互相关时延定位法对漏点进行定位研究。

声波法检测示意图如图 1 所示,被测管段长度为 L ,漏点与传感器 A 的距离为 X 。

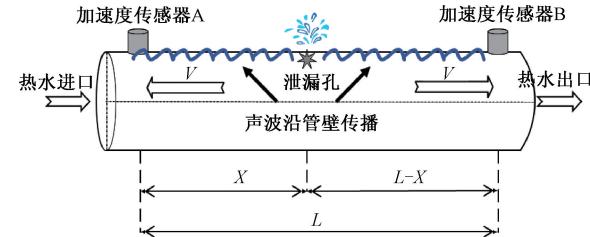


图 1 声波法检示意图

漏点位置 X 通过式(1)得到^[14]:

$$X = \frac{L + v \cdot \Delta t}{2} \quad (1)$$

式中: v 为泄漏声波沿管道的综合传播速度,单位为 m/ms; Δt 为两侧管壁接收到泄漏信号的时间差,单位为 ms。

时间差可由式(2)得到^[15-16]:

$$R_{12}(\Delta t) = E[f_1(\Delta t)f_2(t - \Delta t)] \quad (2)$$

式中: $f_1(t)$ 和 $f_2(t)$ 为测量得到的泄漏信号, Δt 的准确性取决于降噪质量,当 $f_1(t)$ 和 $f_2(t)$ 中含有少背景噪声时,依据式(2)得到的 Δt 能准确反映泄漏信号传播到两个测点的时间差,将会提高泄漏定位精度。

1.2 实验系统

直埋热水泄漏实验的系统如图 2 所示,实验系统装置如图 3 所示,实验管段选用管长为 18.6 m、DN300 钢管,实验管段埋于地下 1.5 m 处。分别在实验管段的上下游布置加速度传感器 A 和 B,采集声波振动加速度幅值,传感器 A、B 之间的距离为 18.65 m。在实验管段内布置两个模拟泄漏孔 1 号(距离加速度传感器 A 为 1.45 m)和 2 号(距离加速度传感器 A 为 9.35 m)。

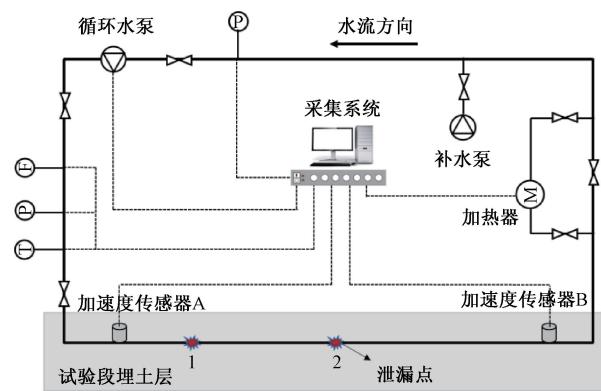


图 2 直埋热水检漏实验系统

实验时,先启动实验系统,待实验系统流量、温度和压力运行稳定后开启泄漏孔,加速度传感器采集管壁振动信



图3 直埋热水实验系统装置

号,采样频率为8 000 Hz,每次实验采集数据的有效时长为10 s。

1.3 实验工况

本实验通过选用不同压力,研究直埋供热管道进行泄漏信号特征提取和定位规律。降噪处理方法选用小波包变换进行信号处理,采用常规阈值函数和本文的改进阈值函数进行泄漏特征提取。实验水温为88 °C,水压为0.8 MPa。

1.4 主要设备参数

实验选用电磁流量计测量流量,选用铂电阻和压力表测量水温和管段压力,通过数据采集器将加速度传感器采集信号上传电脑,仪器仪表参数如表1所示。

表1 主要检测参数与仪器设备

检测参数	仪器设备	型号	精度
幅值/g	传感器	ICP YA-23	±0.01 mg
水温/°C	铂电阻	PT100	±0.1 °C
水量/(L/min)	流量计	7MQ5701-2BA10-1CB0	±0.001 L/min
水压/MPa	压力表	精密燕宁	±0.05 MPa

2 小波阈值函数优化改进

2.1 小波与小波包变换

小波变换是一种窗口大小固定、形状可变、时域和频域分辨率高的局部化分析方法^[17-18],由于小波变换只对近似小波系数进行分解,在供热管道泄漏检测的混叠信号处理方面,会造成有效信号成分丢失。小波包变换处理信号更为精细,它可提高信号的时频分辨率,在能量分布方面表现突出^[19-21]。

小波包变换尺度函数和小波函数为^[22]:

$$\begin{cases} \varphi(x) = \sqrt{2} \sum_{n \in Z} h_n \varphi(2x - n) \\ \psi(x) = \sqrt{2} \sum_{n \in Z} g_n \psi(2x - n) \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\varphi(x)$ 和 $\psi(x)$ 分别为信号在 $L^2(R)$ 上多分辨分析中的尺度函数和小波函数, h_n 和 g_n 为滤波器系数。

小波包分解系数为:

$$w_{j+1}^{2n}(k) = \sum_{l \in Z} h_{l-2k} w_j^n(l) \quad (4)$$

$$w_{j+1}^{2n+1}(k) = \sum_{l \in Z} g_{l-2k} w_j^n(l) \quad (5)$$

式中: $w_j^n(k)$ 为分解尺度 j 的第 n 条分叉树上的第 k 个小波包分解系数, $w_{j+1}^{2n}(k)$ 和 $w_{j+1}^{2n+1}(k)$ 为 $w_j^n(k)$ 的两个分叉。

小波包重构算法为:

$$w_j^n(k) = \sum_{l \in Z} h_{k-2l} w_{j+1}^{2n}(l) + \sum_{l \in Z} g_{k-2l} w_{j+1}^{2n+1}(l) \quad (6)$$

式中: w 为信号经过小波包分解后得到的分解系数; h 和 g 为小波包分解的滤波器系数; j 和 n 为小波包分解中各分解节点的编号; l 和 k 为信号小波包分解的分解层数。

2.2 小波阈值函数

小波包处理信号时,小波细节系数需采用阈值函数进行筛选,因此阈值函数直接影响信号降噪效果。软阈值和硬阈值函数^[23]应用广泛,但经过软阈值函数处理后信号易丢失特征信息,采用硬阈值函数存在阈值点处的不连续^[24]。因此,小波阈值函数在小波降噪中至关重要,需要克服软硬阈值函数造成的固定偏差或振荡问题。

为解决软硬阈值函数在各领域信号降噪中存在的缺陷,已对小波阈值函数进行多次优化改进和验证,改进的小波阈值函数会保留更多特征信号,弥补软硬阈值函数的不足。典型的改进阈值函数包括Garrote阈值函数和双曲线阈值函数。在振动信号处理方面,吴飞等^[25]提出了一种改进的小波阈值函数降噪法,避免了软硬阈值函数恒定偏差和不连续的问题,但函数整体灵活性差,其改进阈值函数公式为:

$$\hat{w}_{j,k} = \begin{cases} w_{j,k} - \frac{\lambda^2}{3w_{j,k}} - \frac{\text{sign}(w_{j,k})}{3e^{|w_{j,k}|-\lambda}}, & |w_{j,k}| \geq \lambda \\ \frac{w_{j,k}}{3} e^{\frac{|w_{j,k}|-\lambda}{3}}, & |w_{j,k}| < \lambda \end{cases} \quad (7)$$

式中: $\hat{w}_{j,k}$ 为降噪后的小波系数, $w_{j,k}$ 为原始信号小波系数, λ 为阈值。各阈值函数曲线如图4所示。

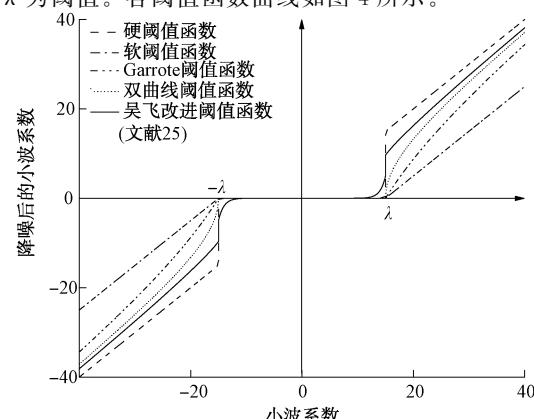


图4 各阈值函数曲线图

2.3 改进的小波阈值函数

综合上述分析,提出一种更具灵活性的小波阈值函数。该函数设置可调参数 a ,保证函数在阈值点 λ 处的连续性,设置可调参数 α 和 β ,大于和小于阈值部分的小波系数向软/硬阈值函数逼近,根据所需选取适当参数值,适用于各类信号降噪。在小于阈值点处,不直接设置为零,可保留重要信号特征,能获得更好的降噪效果。改进的阈值函数表达式为:

$$\hat{w}_{j,k} = \begin{cases} \text{sign}(w_{j,k})[|w_{j,k}| - (1-a) * \lambda * e^{\alpha * \lambda * (\lambda - |w_{j,k}|)}], & |w_{j,k}| \geq \lambda \\ \text{sign}(w_{j,k}) * a * e^{\beta * \lambda * (|w_{j,k}| - \lambda)} * |w_{j,k}|, & |w_{j,k}| < \lambda \end{cases} \quad (8)$$

式中:可调参数 $a \in [0,1]$ 用于调节阈值处的小波系数大小,可调参数 $\alpha \in [0,1]$ 和 $\beta \in [0,1]$ 用于调节细节小波系数大于和小于阈值点的小波系数用于改变图像弯曲程度。

如图 5(a)和(b)所示,本文改进阈值函数实现全域覆盖、灵活多变,且在小于阈值点区域对信号降噪处理,函数本身提高降噪能力,可根据复杂噪声环境,通过调节设置参数对应降噪。

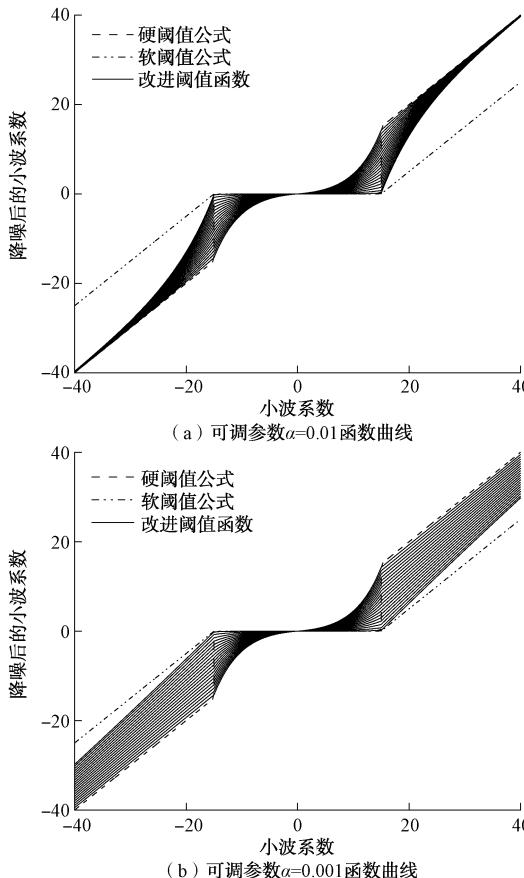


图 5 改进阈值函数曲线图

2.4 阈值的选择

直埋热水供热管道泄漏信号降噪时,阈值是区分泄漏信号与噪声信号的关键,阈值选取过大易造成泄漏特征信

号丢失,过小则导致降噪不彻底,影响检测信号质量。合理选取阈值有助于提高信号降噪效果和泄漏检测精度。

噪声信号的小波系数随分解尺度的增大而减小,常规的固定阈值计算未考虑分解尺度对阈值的影响,需采取新的阈值计算^[26-27]。式(9)中改进阈值是在固定阈值的基础上,考虑了分解尺度对阈值的影响,使计算的每层阈值随着分解尺度的增大而减小,符合噪声信号小波系数随分解尺度的增大而减小的特点。

$$\lambda_j = \sigma \sqrt{2 \log(N_j)} / \log(j+1) \quad (9)$$

式中: j 为分解尺度; N_j 为第 j 层小波系数长度; σ 为噪声标准方差,由式(10)计算。

$$\sigma = \text{median} |w_{j,k}| / 0.6745 \quad (10)$$

2.5 阈值降噪评价指标

采用信噪比(signal-to-noise ratio, SNR)和均方根误差(root mean square error, RMSE)作为评价降噪效果指标^[28]。信噪比越大,均方根误差越小,降噪效果越显著,管道泄漏特征信号占比越大。SNR 和 RMSE 计算表达式为:

$$\text{SNR} = 10 \lg \left(\frac{\sum_{i=1}^N x^2(i)}{\sum_{i=1}^N [x(i) - \hat{x}(i)]^2} \right) \quad (11)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [x(i) - \hat{x}(i)]^2} \quad (12)$$

式中: $x(i)$ 为原始含噪信号; $\hat{x}(i)$ 为降噪后的信号; N 为信号长度。

3 实验研究

3.1 原始信号结果分析

图 6 为声波信号泄漏前后的时频特征,如图 6(a)所示,为泄漏与未泄漏信号时域图,直埋热水供热管道未发生管道泄漏时,加速度传感器采集的声波振动信号幅值在 0 附近均匀分布且振动幅值小,当泄漏发生时,加速度传感器采集信号的振动幅值逐渐增大,达到最大后平稳波动,泄漏前后加速度幅值变化明显,通过时域图幅值变化的特点进而分析判断供热管道是否发生泄漏。

如图 6(b)所示,为泄漏与未泄漏信号的频域图,未发生泄漏时,频域信号覆盖整个频段内,且在 0~2 500 Hz 内的振动明显,且与环境噪声混叠。当供热管道发生泄漏后,整个频域内的加速度振动幅值波动明显,且声波信号的能量主要集中在 1 500~4 000 Hz 频段内,因传感器 A 靠近循环水泵,实验系统运行时,受泵源振动影响,在该频段内具有高振动幅值增加振动信号干扰和泄漏特征识别难度,影响定位精度。

3.2 软硬阈值函数降噪结果

采用小波基函数(daubechies 4, DB4)对两个加速度传感器采集的信号进行 4 层小波分解,通过式(9)计算得到各层细节系数的阈值,两通道阈值大小对比如图 7 所示。

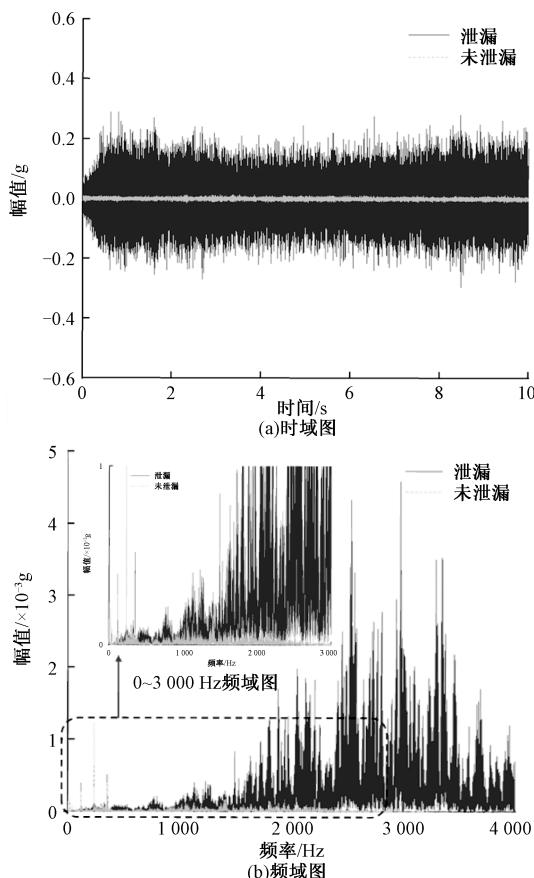


图6 声波信号泄漏前后的时频特征

图7表明各层阈值随分解尺度的增加呈现递减趋势,符合噪声信号随分解尺度的增加而减小的规律。

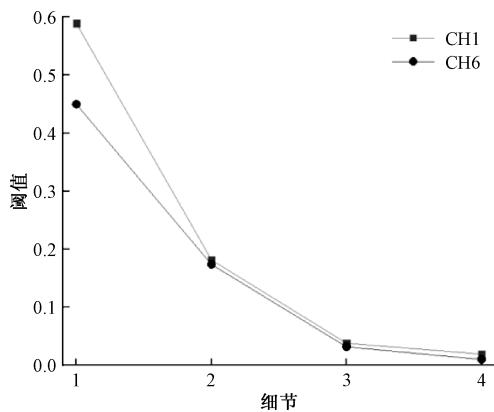


图7 两通道各层细节系数阈值对比

经常规小波阈值降噪后的时域图8和降噪前后的频域图9。如图8所示,两传感器采集信号有明显幅值差,说明信号沿管壁传播中,先后被两个传感器采集,以此形成明显的时间差。

如图9所示,经常规阈值降噪后信号特征集中在0~800 Hz内,噪声信号主要集中在800~4 000 Hz频段内,阈值化处理后可有效降低噪声对泄漏特征信号的干扰,但小

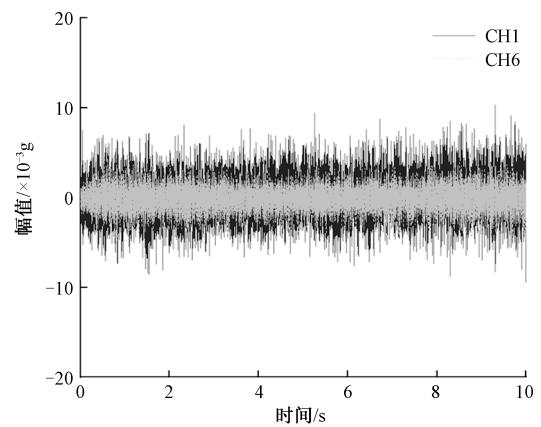


图8 常规阈值降噪后两通道时域对比图

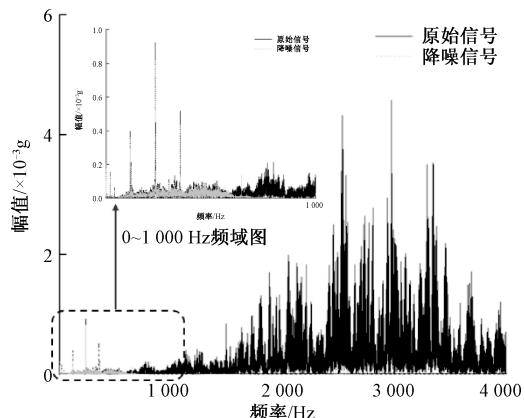


图9 常规阈值降噪前后的频域对比图

波分解仅分解近似信号,并对细节小波系数阈值化处理,由于小波分解不彻底,易导致泄漏特征信号丢失和降噪不彻底。

3.3 其他改进阈值函数降噪结果

选用式(7)对加速度传感器采集信号进行降噪处理,得到降噪信号时域图10和降噪前后频域对比图11。如图10所示,经降噪后两测点存在明显幅值差。

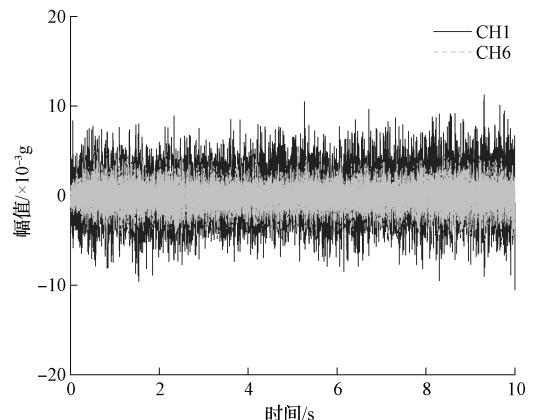


图10 降噪后两通道时域对比图

如图 11 所示,降噪后特征信号集中在 0~800 Hz,与常规软硬阈值函数降噪效果相同,降噪信号频域特征逐渐向低频段收缩,易造成有效特征信号丢失,影响定位精度。

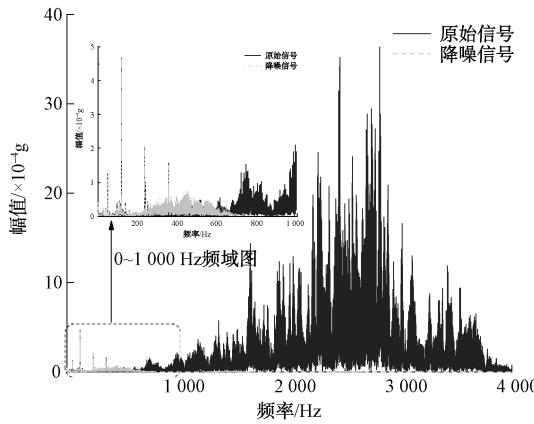


图 11 降噪前后频域对比图

3.4 本文改进阈值函数降噪结果

选用 DB4 小波基函数对加速度传感器采集信号进行三层小波包分解,对所选 4 个分支进行阈值化处理后重构,得到的原始信号与降噪信号的时域图 12 和频域图 13。如图 12 所示,经降噪处理后幅值明显降低且平稳波动,降低了泵源和管路构件的振动干扰,增加信号相关性。

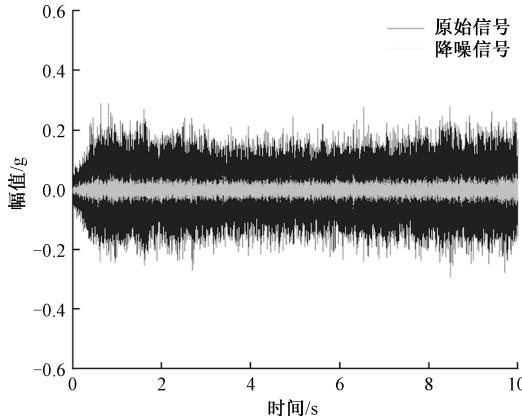


图 12 降噪前后时域对比图

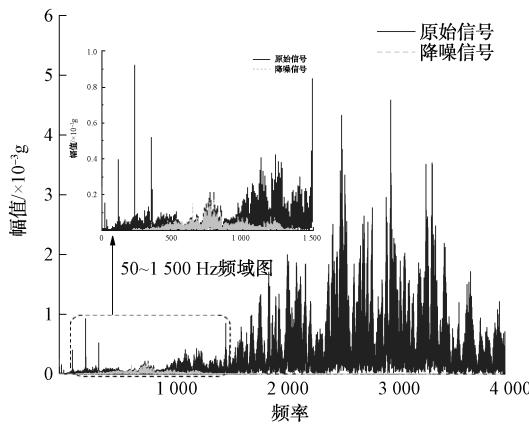


图 13 降噪前后频域对比图

如图 13 所示,经降噪处理后在 1 500~4 000 Hz 频段和 0~50 Hz 内的信号被剔除,50~1 500 Hz 内降噪效果显著,存在明显振动幅值差,且呈现指数衰减特性,突出泄漏信号频域特征。

通过式(11)和(12)计算得到个阈值函数降噪的 SNR 与 RMSE,所得计算结果如图 14 所示。由图 14 可知,经不同阈值函数降噪处理后,本文改进阈值函数的 SNR 最大,且 RMSE 最小。

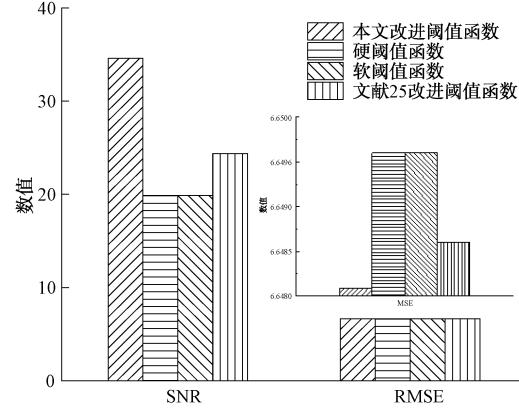


图 14 不同阈值函数降噪效果对比图

经计算得到声波在管道介质中的传播速度为 1.243 m/ms,如图 15 所示,为不同降噪方法定位结果示意图。常规阈值函数定位相对误差为 14.32%,文献 24 改进阈值函数定位相对误差为 15.92%,本文改进阈值函数降噪后所得定位结果相对误差为 0.37%,定位精度比常规阈值函数提升 13.90%,比文献 24 改进阈值函数定位精度提升 15.55%。

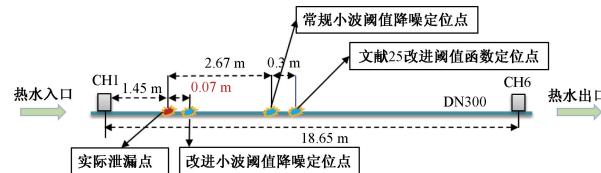


图 15 不同降噪方法定位结果示意图

为验证本文改进阈值函数在直埋热水供热管道泄漏检测定位中的可行性,对不同水温(36 °C、60 °C、86 °C)、压力(0.4 MPa、0.8 MPa)、流量(250 T/h、300 T/h、350 T/h、400 T/h)条件下进行泄漏定位,定位结果如表 2 和 3 所示。

表 2 不同压力和温度定位结果

压力/ MPa	温度/ °C	总长度/ m	绝对 误差/m	相对 误差/%
0.4	31		0.65	3.49
0.8			0.36	1.96
0.4	60	18.65	0.25	1.34
0.8			0.06	0.32
0.4	86		0.14	0.75
0.8			0.02	0.11

表3 不同压力和流量定位结果

流量/ T/h	压力/ MPa	总长度/ m	绝对 误差/m	相对 误差/%
250			0.64	3.43
300	0.4		0.6	3.22
350			0.25	1.34
400		18.65	0.29	1.55
250			0.29	1.55
300	0.8		0.16	0.86
350			0.06	0.32
400			0.03	0.16

由表2和3可知,不同温度、压力、流量条件下均可实现精准定位,定位误差在±1 m内,且在不同温度和压力条件下,定位精度为0.11%~3.49%,不同压力和流量条件下,定位精度为0.16%~3.43%。

4 工程验证

为进一步验证该改进降噪方法在直埋供热管道泄漏检测中的降噪效果,选取位于北京市东城区的某埋地供热管道进行泄漏测试。测试管段总长为109 m,管径为DN500,热水温度为70 °C、运行压力为0.6 MPa,数据采集时间为10 s。经计算得到声波在管道介质中的传播速度为1.147 m/ms,依次选用常规阈值降噪法、改进阈值降噪法和现有听漏仪、相关仪等检测设备进行漏点定位。最后选择开挖方式验证,对定位结果进行对比。定位结果对比图如图16所示。

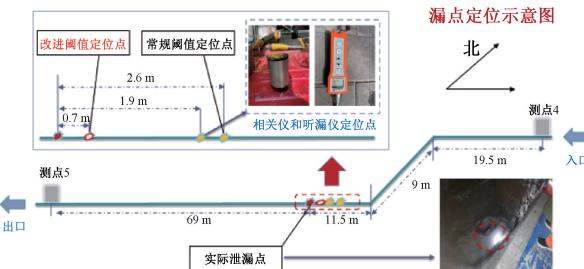


图16 结果对比示意图

由图16可知,在实际现场检测环境下,不同方法均可实现对直埋热水供热管道泄漏定位,但现有成熟的检测设备与常规阈值降噪法所得定位结果偏差大,经改进阈值函数降噪后定位结果误差在±1 m,定位精度可达0.64%。

对北京市不同区域直埋供热管道进行泄漏检测定位,选取不同阈值函数降噪定位结果如图17所示。

由图17可知,常规阈值函数定位相对误差为1.69~6.02%,文献24改进阈值函数定位相对误差为1.74~6.6%,本文改进阈值函数定位相对误差为0.37~0.66%。

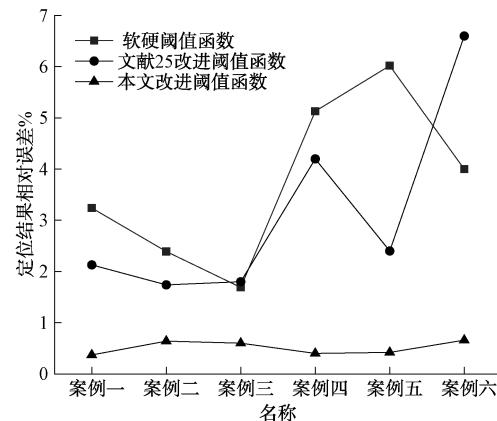


图17 不同阈值函数降噪定位结果

5 结论

为提高声波法供热管道泄漏检测,结合泄漏信号的加速度声波信号特点,对比分析了小波法中各种阈值函数降噪特点,提出了一种改进阈值函数降噪方法,通过直埋热水供热管网大型模拟实验与工程实测相结合,开展管道泄漏定位的降噪研究。主要结论如下:

本文提出的一种改进阈值函数降噪方法实现了全域具有连续可导性,克服了常规阈值函数降噪后信号失真和恒定偏差的缺陷,利用本方法在函数中设置可调参数,提高该函数在降噪中的灵活性。

采用声波法进行大型直埋热水循环管网泄漏检测实验,完成了本方法在声波法大型直埋热水循环管网泄漏检测工程中应用的可行性研究。本方法可保留真实泄漏特征信息,适用于声波法直埋热水供热管网的泄漏定位,可有效降低噪声对直埋热水供热管网泄漏特征识别的干扰,对比其他阈值函数定位误差,可提升定位精度为13.9%~15.55%,且本方法定位精度可达0.11%~3.49%,定位误差为±1 m。

在实际现场环境中,对比其他检测手段定位结果,突出本改进方法在埋地供热管道泄漏检测与定位中的优势,使得定位精度可达0.37%~0.66%,相比其他阈值函数定位方法,定位精度提升。

参考文献

- [1] 国家统计局. 中国统计年鉴 2022 [M]. 北京:中国统计出版社, 2022.
- [2] 马晓华. 直埋供热管网泄漏原因分析及检测 [J]. 区域供热, 2019, (2): 1-4.
- [3] LIU Y, HABIBI D, CHAI D, et al. A comprehensive review of acoustic methods for locating underground pipelines [J]. APPLIED SCIENCES-BASEL, IEEE; IEEE Tainan Sec Sensors Council; Taiwanese Inst Knowledge Innovat, 2020, 10(3).
- [4] 司莉, 毕贵红, 魏永刚, 等. 基于RQA与SVM的声

- 发射信号检测识别方法[J]. 振动与冲击, 2016, 35(2): 97-103,123.
- [5] IL K K, HWAN R U, PIL C B. An appropriate thresholding method of wavelet denoising for dropping ambient noise[J]. International Journal of Wavelets, Multiresolution and Information Processing, 2018, 16(3): 1850012.
- [6] LIU H, WANG W, XIANG C, et al. A de-noising method using the improved wavelet threshold function based on noise variance estimation [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2018, 99: 30-46.
- [7] 李维松, 许伟杰, 张涛. 基于小波变换阈值去噪算法的改进[J]. 计算机仿真, 2021, 38(6): 348-351,356.
- [8] 吴安全, 沈长圣, 肖金标, 等. 基于一种渐进半软阈值函数的小波去噪[J]. 电子器件, 2017, 40(2): 396-399.
- [9] 吴叶丽, 行鸿彦, 李瑾, 等. 改进阈值函数的小波去噪算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(4): 9-16.
- [10] 倪培峰, 胡雄. 一种基于改进阈值函数的小波阈值降噪算法[J]. 电子技术应用, 2016, 42(8): 98-100,104.
- [11] 李树勋, 王志辉, 康云星, 等. 基于改进小波阈值函数的安全阀排放声信号降噪[J]. 振动与冲击, 2021, 40(12): 143-150.
- [12] 刘志坚, 赵浩益, 刘航, 等. 基于改进阈值估计和改进阈值函数的局部放电信号降噪方法[J]. 振动与冲击, 2022, 41(22): 1-13.
- [13] 周金, 高云鹏, 吴聰, 等. 基于改进小波阈值函数和CEEMD电能质量扰动检测[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(1): 141-148.
- [14] 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.
- [15] 焦敬品, 任玉宝, 吴斌, 等. 基于迭代递推的供水管道多泄漏点声定位方法[J]. 振动与冲击, 2020, 39(14): 1-8.
- [16] 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.
- [17] 王盟, 翁顺, 余兴胜, 等. 基于时变模态振型小波变换的结构损伤识别方法[J]. 振动与冲击, 2021, 40(16): 10-19.
- [18] 牟海维, 段朝辉, 韩建, 等. 基于多视小波变换融合的医学 CT 图像增强方法[J]. 电子测量技术, 2021, 44(9): 122-127.
- [19] 谷旭东, 滕科嘉, 史雪梅. 基于小波包变换及时间-小波能量谱的振动信号分析研究[J]. 空间控制技术与应用, 2020, 46(4): 29-33.
- [20] 孙萍萍. 基于小波包理论的激波信号去噪研究[J]. 国外电子测量技术, 2016, 35(7): 38-42.
- [21] GARCIA P E, NUNEZ L P J. Application of the wavelet packet transform to vibration signals for surface roughness monitoring in CNC turning operations [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2018, 98: 902-919.
- [22] 邵广盛, 刘志杰, 余秋雨, 等. 基于小波包阈值法的脉冲星信号去噪方法研究[J]. 天文研究与技术, 2021, 18(4): 523-532.
- [23] 李红延, 周云龙, 田峰, 等. 一种新的小波自适应阈值函数振动信号去噪算法[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(10): 2200-2206.
- [24] 曹玲玲, 李晶, 彭镇, 等. 基于改进小波阈值降噪的滚动轴承故障诊断方法[J]. 振动工程学报, 2022, 35(2): 454-463.
- [25] 吴飞, 马晨浩, 程坤. 基于改进阈值的振动信号小波去噪方法研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2022, 45(7): 873-877,900.
- [26] 章志涛, 丁芳, 罗宇, 等. 小波阈值去噪在偏滤器光谱信号处理中的应用[J]. 量子电子学报, 2022, 39(3): 307-315.
- [27] 许子非, 李春, 杨阳, 等. 基于改进小波阈值及多重分形的风力机轴承振动信号分析[J]. 热能动力工程, 2019, 34(9): 191-198.
- [28] 龚静. 可调阈值函数和能量阈值优化的电能质量扰动小波去噪方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(5): 137-145.

作者简介

徐自强, 硕士研究生, 主要从事直埋热水供热管网泄漏智能化检测研究。

E-mail: xzq1220482455@163.com

王随林(通信作者), 教授, 博士, 主要从事能源高效利用与智能监测研究。

E-mail: suilinwang@bucea.edu.cn