

引文: 尹渊博, 李玉星, 杨文, 等. 成品油管道泄漏次声波监测及信号处理方法[J]. 油气储运, 2024, 43(8): 905-915.

YIN Yuanbo, LI Yuxing, YANG Wen, et al. Study on infrasonic leakage monitoring and signal processing for product oil pipeline[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2024, 43(8): 905-915.

成品油管道泄漏次声波监测及信号处理方法

尹渊博¹ 李玉星¹ 杨文² 芦澍³ 张晨² 刘翠伟¹ 杨凯³ 王武昌¹

1. 中国石油大学(华东)储运与建筑工程学院·山东省油气储运安全重点实验室; 2. 国家管网集团华南分公司;
3. 中国石油天然气管道局有限公司

摘要:【目的】随着油气输送管道总里程不断增加, 泄漏监测已成为保证管道安全平稳运行的关键技术之一。次声波监测因其灵敏度高、定位精度高、维护费用低等诸多优点备受关注, 但其在成品油管道中的工程应用有待探讨。【方法】基于次声波监测基本原理, 自主搭建了液体管道泄漏监测实验装置, 分析了不同的泄漏孔尺寸、管道压力以及泄漏点距离工况下, 次声波传感器采集信号的特征。分析了 db 系小波基与 sym 系小波基 1~9 层小波变换的信号处理效果; 利用信号的 15 个时域特征与 4 个频域特征参与随机森林分类模型建模, 以 ROC (Receiver Operating Characteristic) 曲线下的面积 (Area Under Curve, AUC) 作为目标函数对模型参数进行优化, 并采用基于 WT-RF (Wavelet Transform-Random Forest) 的方法对实验数据进行信号处理与分类。【结果】将新建方法应用于国家管网集团华南分公司某成品油输送管道发现, 经过 sym2 小波基 8 层分解处理后的次声波信号在时频域具有明显可识别特征, 随机森林识别模型结合定位信息可实现生产管道中泄漏工况的误报率、漏报率均为 0; 在 91 km 的成品油管道监测区间, 定位误差 800 m 左右, 稳定泄漏速率 0.001 6 m³/s, 最小可检测泄漏速率为 0.000 46 m³/s。【结论】次声波泄漏监测技术在成品油管道测试中获得了较好的效果, 其误报率、漏报率均极低, 且定位误差小, 相关研究成果可为该技术在成品油管道的应用提供技术支持与参考。(图 13, 表 2, 参 20)

关键词: 成品油管道; 泄漏; 次声波; 监测; 小波分析; 随机森林; 最小可检测泄漏量

中图分类号: TE88

文献标识码: A

文章编号: 1000-8241(2024)08-0905-11

DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2024.08.007

Study on infrasonic leakage monitoring and signal processing for product oil pipeline

YIN Yuanbo¹, LI Yuxing¹, YANG Wen², LU Shu³, ZHANG Chen², LIU Cuiwei¹, YANG Kai³, WANG Wuchang¹

1. College of Pipeline and Civil Engineering, China University of Petroleum (East China)/Shandong Key Laboratory of Oil & Gas Storage and Transportation Safety; 2. PipeChina South China Pipeline Co. Ltd.; 3. China Petroleum Pipeline Bureau

Abstract: [Objective] With the total length of oil and gas transmission pipelines increasing due to booming development, pipeline leakage monitoring has emerged as one of the critical technologies to ensure the safe and stable operation of these pipelines. Infrasonic monitoring has garnered significant attention due to its high sensitivity, high positioning accuracy, and low maintenance costs. However, its engineering application in product oil pipelines requires further discussion. [Methods] Based on the basic principle of infrasonic monitoring, an experimental setup for liquid pipeline leakage monitoring was independently constructed, aimed to analyze the characteristics of signals acquired by infrasonic sensors across different leak hole sizes, pipe pressures, and distances from these sensors to the leak points. The signal processing effects of wavelet transforms at 1-9 layers on the db and sym wavelet bases were analyzed. Subsequently, a random forest classification model was established, incorporating fifteen time-domain features and four frequency-domain features of the signals. The model parameters were optimized, using the Area Under Curve (AUC) of the Receiver Operating Characteristic (ROC) curve as an objective function. Furthermore, the experimental data were processed and classified, utilizing the method based on Wavelet Transform-Random Forest (WT-RF). [Results] The proposed approach was applied to a product oil transmission pipeline section of PipeChina South China Pipeline Co. Ltd., resulting in the following findings. Following an 8-layer

decomposition on the sym2 wavelet basis, the infrasound signals exhibited distinct recognizable characteristics in both the time and frequency domains. The random forest identification model, supported by positioning information, showcased a zero false alarm rate and missing alarm rate under leakage conditions of the production pipeline. At a 91 km monitoring interval along the product oil pipeline, the positioning error was about 800 m, facilitating reliable monitoring up to a leak rate of $0.0016 \text{ m}^3/\text{s}$, with the minimum detectable leak rate recorded at $0.00046 \text{ m}^3/\text{s}$. **[Conclusion]** This study showcases the favorable experimental efficacy of infrasonic leakage monitoring technology for product oil pipelines, emphasizing extremely low false alarm rates and missing alarm rates, alongside small positioning errors. The findings of this study offer valuable technical support and serve as a reference for the application of this technology in product oil pipelines. (13 Figures, 2 Tables, 20 References)

Key words: product oil pipeline, leakage, infrasound, monitoring, wavelet analysis, random forest, minimum detectable leakage

随着油气管道服役年限增加,管道易受腐蚀、磨损、第三方破坏等影响,引发泄漏、爆炸等事故。油气管道管输介质具有易燃、易爆、有毒、高压等特性,一旦发生泄漏事故,将会给社会经济、人民生命财产造成巨大的损失。如 2013 年 11 月 22 日,山东青岛“11·22”输油管道爆炸事故造成 63 人死亡、156 人受伤,直接经济损失高达 7.5×10^8 元;2020 年 7 月 14 日,贵州遵义柴油管道泄漏事故造成严重的环境污染。因此,实时掌握管道完整性状态、及时发现管道泄漏,是当前完善能源安全储备制度与健全公共安全体系的重要途径^[1]。

近年来,针对油气管道的泄漏监测主要有声波法^[2-3]、负压波法^[4-6]、光纤传感技术^[7]等多种手段,同时支持向量机^[8]、神经网络^[9]等智能算法也相继被引入管道泄漏监测领域。根据监测对象与监测原理的不同,可对各种泄漏监测技术进行分类^[10-13]。吴同等^[14]调研了近 10 年来管道泄漏监测领域的相关研究成果,对输油管道泄漏监测技术进行了系统的综述,并针对不同的泄漏监测技术建立了定量评价体系。由于管输介质种类繁多,管道沿线环境复杂多变,现有的各类泄漏监测技术均不同程度上存在局限。其中,次声波法因其灵敏度高、定位精度高、维护费用低等优点^[15]而备受关注,但次声波法的研究与应用在输气管道领域较为常见^[16]。受输油实验操作难度大、易形成污染等限制,基于次声波法的输油管道泄漏监测研究大多是在实验室水环道中开展。目前,鲜有次声波泄漏监测系统在现场输油管道的应用案例,然而实验室条件下难以还原现场管道真实的生产环境,其实际应用效果有待进一步探究。

随着次声波泄漏监测方法的不断发展,亟需探究其在成品油管道的适用性与监测精度。为此,自主搭

建了室内液体管道泄漏监测实验装置,利用实验数据对随机森林模型进行训练与验证,建立基于 WT-RF (Wavelet Transform-Random Forest) 的成品油管道次声波泄漏监测方法。选取国家管网集团公司华南分公司(简称华南公司)某成品油管道为应用对象,开展基于次声波泄漏监测方法的识别定位精度研究,以期该方法在成品油管道输送领域的推广与发展提供技术支持与参考^[17]。

1 基于次声波信号的管道泄漏监测实验

为了监测液体管道泄漏状态下次声波信号的变化规律与特征,自主搭建室内液体管道泄漏监测实验装置(图 1,其中 t_U 、 t_L 分别为上、下游传感器接收到信号的时间),主要由管输系统、信号采集与处理系统两部分组成。管输系统包括离心泵、管道以及水箱,并配有流量计、过滤器、阀门等辅助装置,其中实验用管道内径为 42 mm、壁厚为 3 mm、有效长度为 110 m。由于成品油具有易燃、易爆、易挥发、静电、毒性等危险特性,在实验室条件下使用成品油开展实验存在较大困难,因此选择清洁且易于操作的水作为管输介质开展实验,并以此为基础进一步在现场成品油管道中进行测试。水箱中的水经过滤器进入离心泵,并由泵送至管道内部完成循环。管道沿线安装 A~D 共 4 个次声波传感器,采样频率为 1 kHz,分别距离出口阀 38.95 m、32.95 m、28.90 m、21.50 m。泄漏点位于传感器 A 与传感器 B 之间,且与传感器 A 的距离为 4.20 m。

泄漏孔由球阀与孔板组合形成,不同尺寸的孔板通过螺纹连接在球阀上。通过更换孔板尺寸控制泄漏

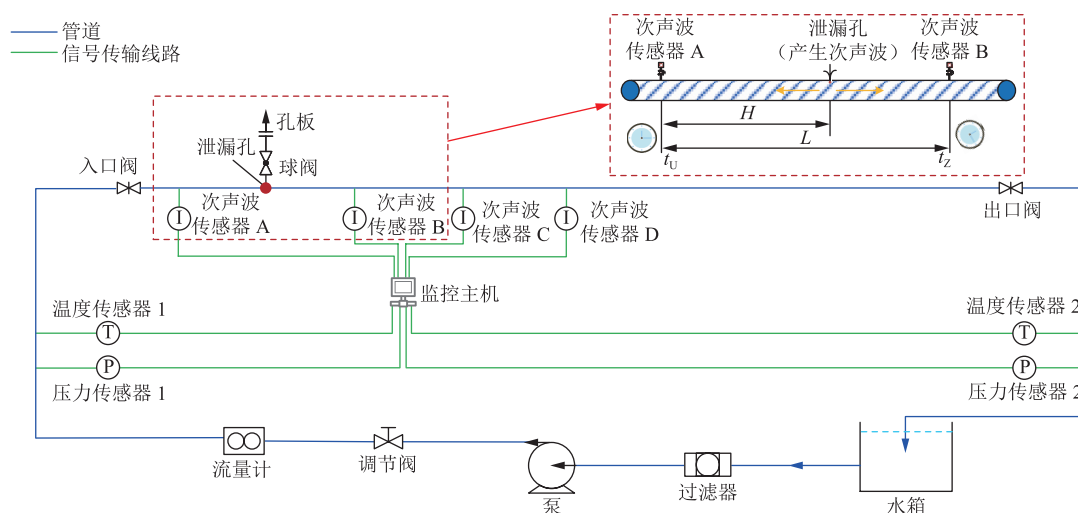


图1 基于次声波信号的管道泄漏监测实验装置组成示意图

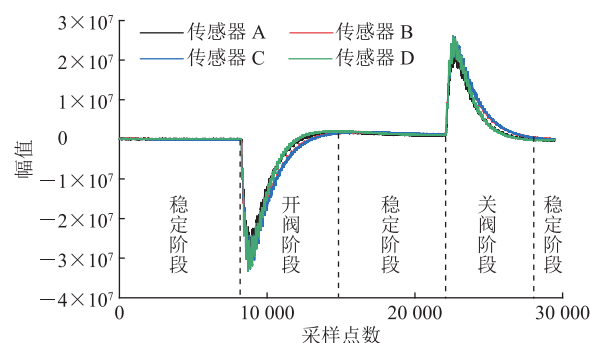
Fig. 1 Composition diagram of experimental setup for pipeline leakage monitoring based on infrasound signals

孔大小,选择孔板尺寸分别为0(即无泄漏工况)、1 mm、2 mm、3 mm、5 mm;同时,通过调节阀开度控制管道压力,压力等级分别为100 kPa、200 kPa、250 kPa、350 kPa、450 kPa,由4个次声波传感器可采集得到100个信号。在管道稳定运行工况下,迅速开启泄漏阀门,泄漏孔在管道内外压差作用下引起不同频率的振动,从而产生声波。声波在管道内传播时,会引起周围介质发生形变,介质的黏滞作用会对声波的能量造成损耗,表现为声波幅值的衰减。次声波的频率较低,其在传播过程中的衰减系数也较小,因此其传播距离长、衰减较慢,可被泄漏孔两端传感器获取,待实时采集信号达到稳定后则迅速关闭阀门。自泄漏孔产生的次声波到达传感器的时间不同,其定位公式为:

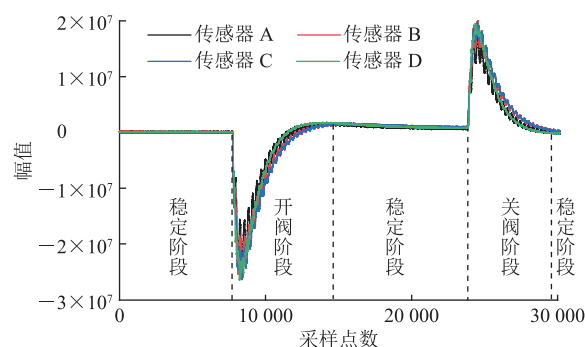
$$H = \frac{L + c(t_u - t_z)}{2} \quad (1)$$

式中: H 为泄漏孔距上游测量点的距离,m; L 为管道监测区间长度,m; c 为管输介质中声波的传播速度,m/s。

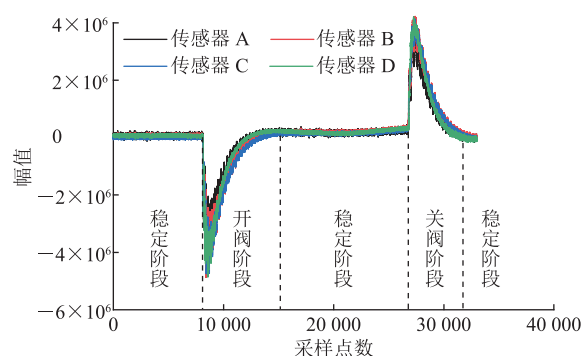
在实验过程中,管道经历“稳定→开阀→稳定→关阀→稳定”5个状态,相应的每组次声波信号表现为“平稳→下峰特征→平稳→上峰特征→平稳”5个阶段。利用4个次声波传感器,采集得到每种工况下4种次声波信号。分别选取实验工况I(压力等级450 kPa、孔板尺寸2 mm)、实验工况II(压力等级350 kPa、孔板尺寸3 mm)及实验工况III(压力等级250 kPa、孔板尺寸1 mm)的次声波信号(图2)进行对比,可见泄漏工况的识别特征极为明显。



(a) 实验工况 I



(b) 实验工况 II



(c) 实验工况 III

图2 不同实验工况下管道泄漏监测次声波信号图
Fig. 2 Infrasound signal diagram for pipeline leakage monitoring under different experimental conditions

2 信号处理

2.1 基于小波变换的信号处理方法

油气管道中存在大量干扰信号,工艺切换、过泵噪声、振动等变化均会出现在传感器采集的信号中。因此,必须对采集信号进行降噪,才能得到更加明显、可识别性更强的管道泄漏特征,并进一步实现泄漏孔的定位。小波分析适用于非平稳信号的时频分析,在信号处理的各个分支领域应用广泛^[18]。连续小波变换(Continuous Wavelet Transform, CWT)是时域信号 $x(t)$ 、母小波函数 $\Psi(t)$ 在时移 τ 、尺度 a 下的卷积,若小波基函数 $\Psi_{a,\tau}(t) > 0$ 且 $a > 0$,则:

$$f_T(a, \tau) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \Psi^* \left(\frac{t-\tau}{a} \right) dt \quad (2)$$

$$\Psi_{a,\tau}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \Psi \left(\frac{t-\tau}{a} \right) \quad (3)$$

式中: f_T 为变换后的信号; t 为信号变换的时间,s; Ψ^* 为 Ψ 的共轭。

$\Psi_{a,\tau}(t)$ 可由 $\Psi(t)$ 经过缩放与平移得到。将 τ 、 a 进行离散化可有效节省计算资源,这样的小波变换方法称为离散小波变换(Discrete Wavelet Transform, DWT)。由式(2)可知,小波变换的实质是在时域内对输入信号与小波基函数进行卷积。小波系数可表征信号在小波基函数方向的分量,因此选择合适的小波基函数将有助于泄漏信号特征的提取,从而提高信号的信噪比 R_{SN} 。分解层数对信号处理结果也有重要影响,若分解层数过多,可能导致信号细节丢失过多;若分解层数过少,会导致降噪效果不理想。因此,选择声信号去噪中常用的两簇小波基db小波系、sym小波系函数,采用2~9层分解对比,以信噪比 R_{SN} 、方根误差 E_{RMS} 作为指标进行评价,确定适用于特定信号的组合。其中, R_{SN} 表征泄漏信号幅值与背景噪声幅值的比值, E_{RMS} 则表征原始信号与降噪信号之间的差异。一般认为, R_{SN} 高、 E_{RMS} 小是较为理想的信号降噪结果。 R_{SN} 、 E_{RMS} 的计算式分别为:

$$R_{SN} = 10 \lg \left(\frac{P_S}{P_N} \right) = 20 \lg \left(\frac{A_S}{A_N} \right) \quad (4)$$

$$E_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{l} \sum_{i=1}^l [f_O(i) - f_Y(i)]^2} \quad (5)$$

式中: P_S 、 P_N 分别为信号、噪声的功率,W; A_S 、 A_N 分

别为信号、噪声的幅值; l 为样本长度; i 为样本序号; f_O 、 f_Y 分别为原始信号、降噪后信号。

2.2 基于随机森林的泄漏特征识别模型

随机森林(Random Forest, RF)是一种基于决策树的集成学习方法,最初于1995年提出,其核心思想是利用多棵不同的决策树进行分类或回归,最终结果由所有决策树的投票或加权平均计算而得,具有高精度、高鲁棒性、高可解释性等优点^[19-20]。因此,可采用RF实现成品油管道泄漏特征自动识别。

将上述4个次声波传感器采集的100个信号分为开阀信号与关阀信号两类,分别包含“平稳→上峰特征→平稳”与“平稳→下峰特征→平稳”两种特征。采用1s短时窗进行时间片段分割,传感器采样频率为1kHz,在数据中心向前、向后均取500个采样点,并以200个采样点进行步进。假定“0”代表无泄漏状态,而“1”代表泄漏状态;针对开阀信号,标记了10500个样本,每个样本包含1000个采样点,其中“0”与“1”样本占比分别为45%、55%,样本比例相近;针对关阀信号,采用相同的方法,标记了7800个样本,其中“0”与“1”样本占比分别为43%、57%。设定随机种子数为1337,训练集与测试集的比例为4:1,使用Train_test_split函数随机划分训练集与测试集。先使用自助法(Bootstrap方法)对训练集采样;再使用特征采样策略(Feature Sampling Strategy)对样本属性采样,采样比例设置为46%。

通常信号的时域分析更加直观,而频域分析则更加简洁,两种分析形式互相关联、互补互利。为实现次声波信号中成品油管道泄漏特征的识别,选择15个时域特征、4个频域特征参与建模。时域特征分为有量纲与无量纲两类,其中有量纲时域特征与工况密切相关,而无量纲时域特征对工况敏感性大幅降低,可以更加直观地显示管道状态。对15个时域特征、4个频域特征选择如下:9个有量纲时域特征,包括均值、最大值、最小值、峰峰值、最大绝对值、绝对平均值、均方根值、方根幅值、标准差;6个无量纲时域特征,包括峭度、偏度、波形因子、峰值因子、脉冲因子及裕度因子;4个频域特征,包括重心频率、平均频率、均方根频率、频率标准差。

采用召回率、精确率、召回率的调和平均数 F_1 Score及准确率综合评价所建模型性能,并利用ROC(Receiver Operating Characteristic)曲线下的面积(Area

Under Curve, AUC)作为目标函数对模型进行优化。采用 Python 语言编程进行建模与优化计算,最终计算得到所建模型的精确率、召回率、F₁ Score 以及 AUC 分别为 98.99%、98%、98%、0.997,并得到基于随机森林的泄漏特征识别模型的结构参数如下:二叉树数量为 147、最大树深度 18、叶节点最小样本数为 1、需拆分的最小样本为 3,且拆分质量标准采用基尼指数。

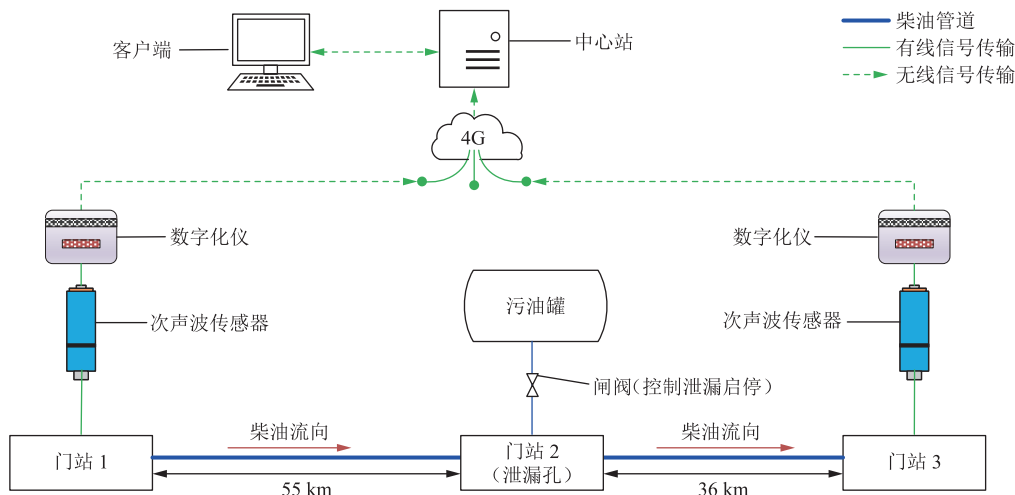


图 3 基于次声波的某成品油管道泄漏监测现场应用设备布置示意图
Fig. 3 Equipment layout for field application of infrasonic leakage monitoring in a product oil pipeline

门站 1~门站 3 的压力分别为 6.7 MPa、6.0 MPa 及 5.1 MPa,油品由门站 1 经门站 2 输往门站 3。其中,门站 1、门站 3 安装次声波传感器及用于通信的 SI-E 系列数字化仪,基于 4G 技术实现信号的远传,经中心站处理后,结果可在客户端查看。其中,数字化仪的采样频率为 1 kHz, GPS(Global Positioning System)时间同步精度为 10 ns。门站 2 内利用排污工艺模拟管道泄漏,污油排放管道直径 25 mm,基于生产作业规定与安全性考虑,模拟泄漏信号通过闸阀缓慢开启实现,该过程产生泄漏信号的瞬态特性较弱,与实验室内测试过程中的阀门快开快关不同。门站 1、门站 3 分别距离泄漏孔(门站 2)55 km、36 km。为不影响管道生产,传感器均通过三通连接在管道上。

2022 年 10 月 9 日在该成品油管道的门站进行泄漏监测(表 1),输送介质为柴油。在测试过程中,以开阀时出现尖锐的冲击声作为开阀时间点,并以冲击声消失作为关阀时间点(整个过程压降不超过 0.1 MPa)。阀门的开启与关闭通过旋转阀杆实现,每次放油操作可近似分为 3 个阶段:开阀阶段,阀门开度增大、流量逐渐增加;稳定泄漏阶段,阀门开度与流量保持不变;关阀阶段,阀门开度减小,流量逐渐减小。

3 现场应用

3.1 现场概况

将新建监测方法应用于华南公司某成品油管道的门站 1~门站 3 构成的水力线(图 3),其管道管径 323.9 mm、壁厚 6.4 mm,监测区间长度为 91 km,测试段输送介质为柴油、输量为 385 m³/h。

表 1 2022 年 10 月 9 日某成品油管道泄漏现场测试工况表
Table 1 Leakage conditions for field experiment of a product oil pipeline on October 9, 2022

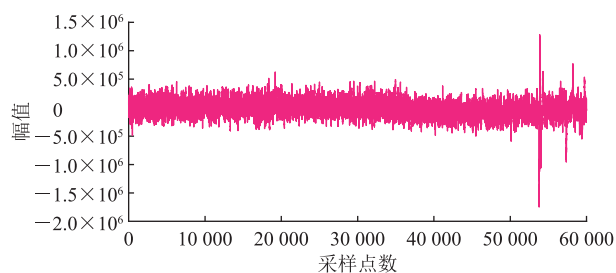
测试序号	开阀时刻	关阀时刻	油品泄漏时间/s	测试作用
第 1 次	15:08:07	15:08:11	4	模拟泄漏效果测试
第 2 次	15:11:43	15:11:47	4	
第 3 次	15:19:41	15:20:05	24	设备调整与校准
第 4 次	15:25:11	15:25:26	15	
第 5 次	15:32:40	15:32:50	10	
第 6 次	15:40:34	15:40:41	7	盲测
第 7 次	15:45:49	15:45:53	4	
第 8 次	15:51:42	15:51:51	9	
第 9 次	15:56:24	15:56:33	9	
第 10 次	16:00:00	16:00:12	12	
第 11 次	16:04:26	16:04:34	8	
第 12 次	16:08:40	16:08:47	7	

现场测试 12 次,其中第 1、2 次为测试模拟泄漏效果,即分析模拟泄漏操作是否能产生异于正常运行条件下的信号;第 3~5 次为持续泄漏油品,对设备进行调整与校准测试;第 6~12 次采用盲测方式,将新建方法处理结果与现场记录结果进行对比。其中,第 1、2 次模拟泄漏测试未记录次声波信号,不用于后续分析;主要针对第 3~12 次测试展开详细分析,第 3~12 次操作控制开阀阶段与关阀阶段均耗时 2 s。在整个测试过程中,油品泄漏总时间为 113 s、泄漏总量为 0.143 m³。

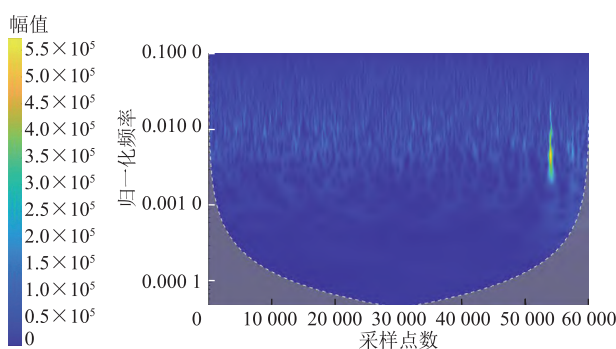
3.2 结果分析及讨论

3.2.1 小波变换信号处理

以表1中第3次测试中门站3采集的次声波信号时域特征与频域特征(图4)为例,开展小波变换信号处理分析。受管道沿线干扰、监测管段距离较长及开关阀门模拟泄漏信号操作方式等因素影响,对比图2中的实验结果可见,图4a的 R_{SN} 明显降低,因此选择合适的信号处理技术增强信噪比尤为必要。



(a) 时域信号特征

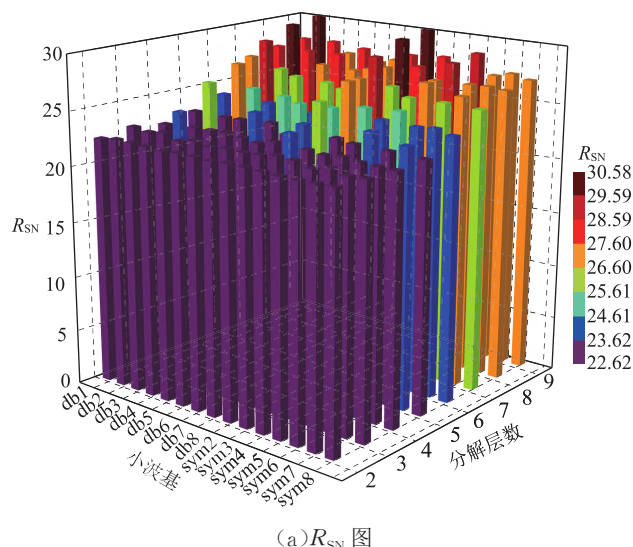


(b) 频域信号特征

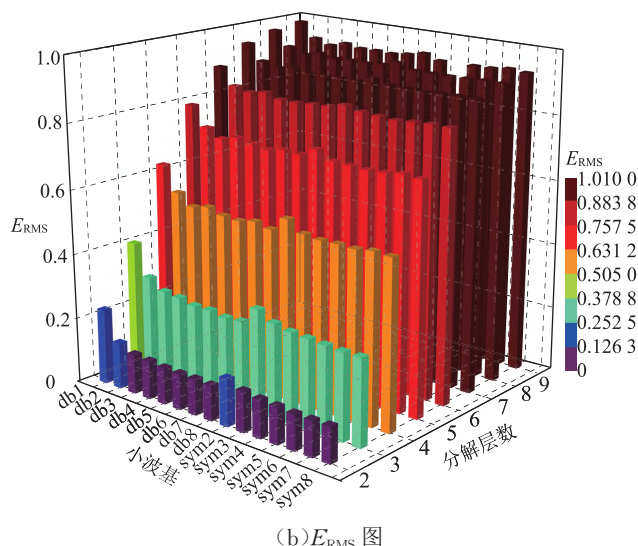
图4 某成品油管道门站3第3次泄漏次声波信号时域特征与频域特征图

Fig. 4 Time-domain and frequency-domain characteristics of infrasound signals in the 3rd round of leakage at gate station 3 of a product oil pipeline

计算不同分解层数下不同小波基函数的处理结果,可以确定合适的小波基函数与分解层数。为方便计算与展示,将图4a信号幅值均缩小10 000倍,由式(4)、式(5)分别计算得到 R_{SN} 、 E_{RMS} (图5)。由图5可见,在相同的分解层数下,不同小波基计算所得的 E_{RMS} 相差不大,但经db2与sym2小波基降噪后信号的 R_{SN} 表现出明显优势。因此,针对此类信号,通过db2或sym2小波基进行降噪可以得到较为理想的效果,且二者的降噪效果基本一致。选择sym2小波基进一步确定合适的分解层数,可见随着分解层数增加, R_{SN} 、 E_{RMS} 均表现出增大趋势。在8层分解之后,继续增加分解层数对 R_{SN} 的提升并不显著,但对计算资源的需求会明显增大。因此,最终选择使用sym2小波基的8层分解对成品油管道泄漏次声波信号进



(a) R_{SN} 图



(b) E_{RMS} 图

图5 不同小波基与分解层数下某成品油管道泄漏次声波信号 R_{SN} 、 E_{RMS} 计算结果对比图

Fig. 5 Comparison of R_{SN} and E_{RMS} calculation results for infrasound signals from leakage of a product oil pipeline under different wavelet bases and decomposition layers

行处理。与原始信号的信噪比 $R_{SN}=22.71$ 相比,处理后的信号信噪比增幅为32.86%,泄漏特征更加明显。由小波变换降噪前、后的信号对比(图6)可见,在保留泄漏特征的前提下,背景噪声幅值大幅度降低。

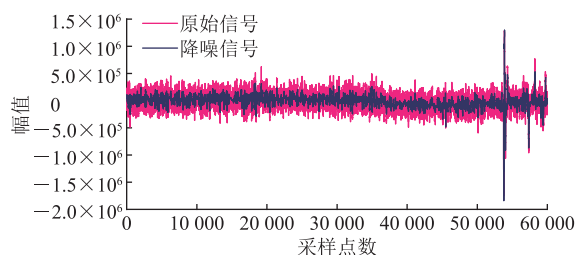


图6 某成品油管道门站3第3次泄漏次声波信号小波变换处理前后对比图

Fig. 6 Comparison before and after wavelet transform processing of infrasound signals for the 3rd round of leakage at gate station 3 of a product oil pipeline

3.2.2 泄漏工况识别及最小可检测泄漏量

根据 GPS 时间数据同步采集信号的时间序列,选取门站 1 与门站 3 部分信号(图 7~图 9)进行分析。可见,在传感器监测过程中,门站 1 泄漏信号幅值小于门站 3,且均远远小于实验室采集的信号幅值(图 2),这是

由于次声波传播距离增加造成了更大程度的信号衰减。以图 7~图 9 中红色虚线框内波形为例,经过小波变换增强处理后,泄漏信号的特征明显。利用随机森林泄漏识别模型对信号进行判别,并用式(2)对识别为泄漏的信号进行计算,即可得到泄漏位置信息(表 2)。

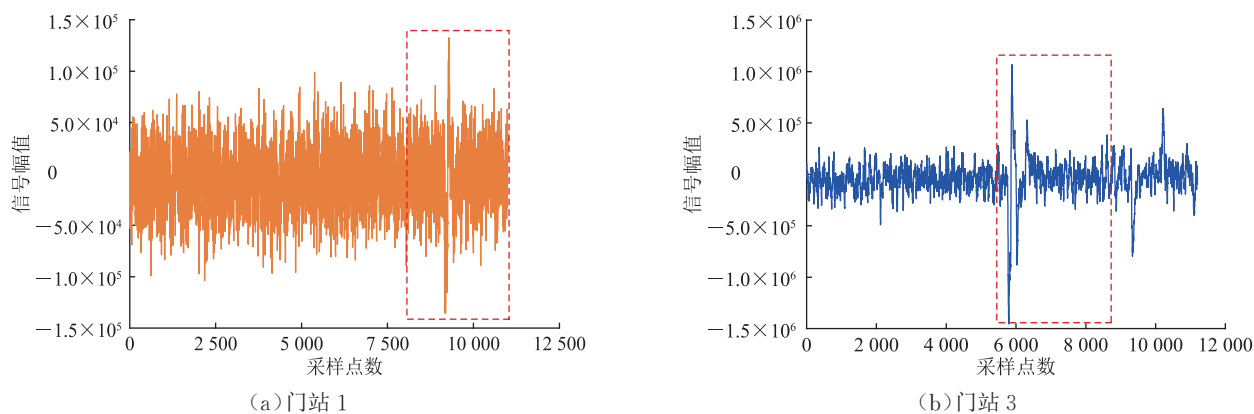


图 7 某成品油管道门站 1 与门站 3 第 3 次泄漏次声波信号处理图

Fig. 7 Infrasonic signal processing in the 3rd round of leakage at gate stations 1 and 3 of a product oil pipeline

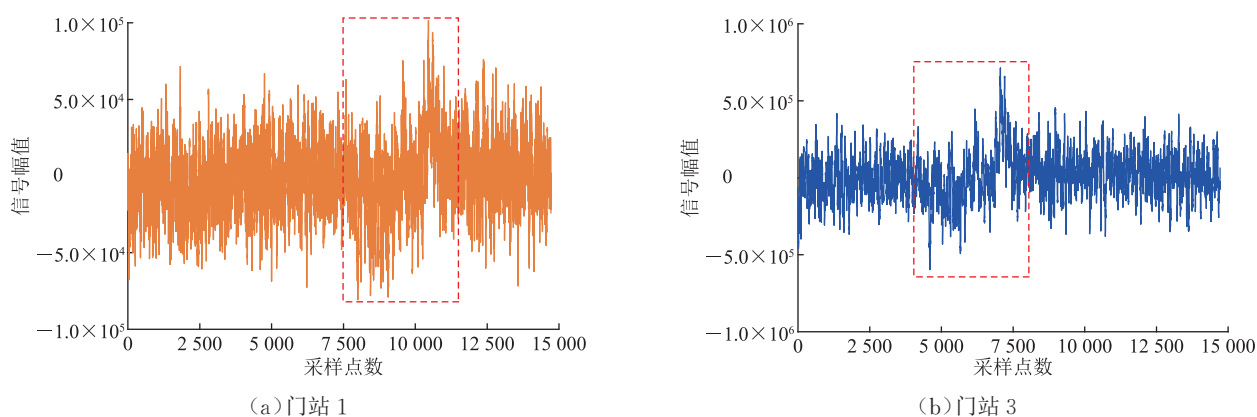


图 8 某成品油管道门站 1 与门站 3 第 4 次泄漏次声波信号处理图

Fig. 8 Infrasonic signal processing in the 4th round leakage at gate stations 1 and 3 of a product oil pipeline

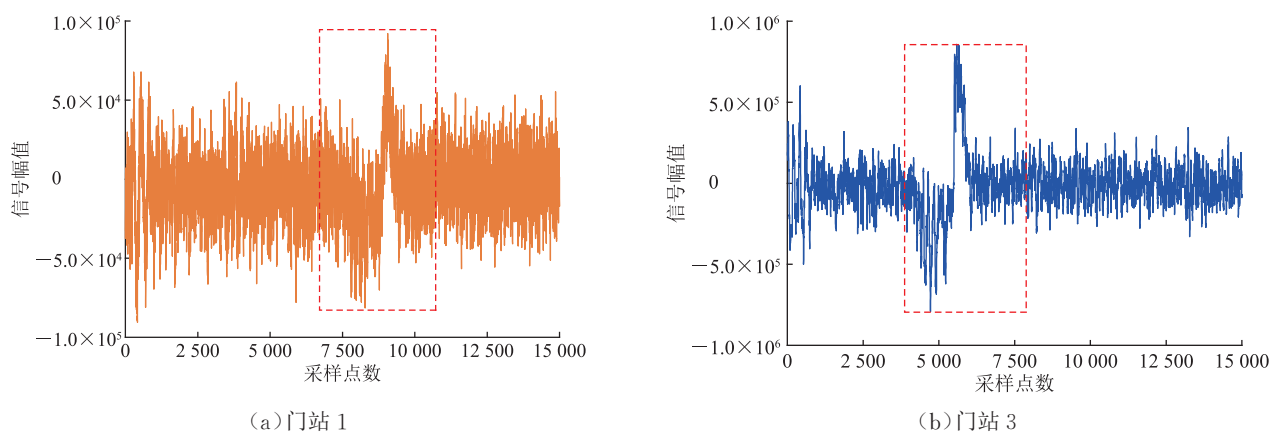


图 9 某成品油管道门站 1 与门站 3 第 5 次泄漏次声波信号处理图

Fig. 9 Infrasonic signal processing in the 5th round leakage at gate stations 1 and 3 of a product oil pipeline

根据第 3~5 次测试数据,结合式(1)得到次声波传播速度为 1 070 m/s。2022 年 10 月 9 日 15:20:00—16:10:00 在门站 2 进行模拟泄漏测试,并监测门站 1、门

站 3 的传感器信号,监测时间约 50 min,共获取异常信号 19 次(图 10)。对照表 2 中开阀状态与门站 3 监测时刻可见,泄漏识别漏报率为 0,但误报率极高。

表 2 某成品油管道泄漏监测次声波信号识别结果表
Table 2 Identification results of infrasound signals for leakage monitoring of a product oil pipeline

识别 结果序号	开阀 状态	门站 3 监测时刻	时差/ s	定位 距离/km	定位 偏差/m	计算放油 时间/s
1	15:19:41 开阀	15:20:15	34	54.163 5	836.5	22.766
2	未开阀	15:23:00	—	86.571 6	—	—
3	未开阀	15:24:00	—	3.539 1	—	—
4	15:25:11 开阀	15:25:45	34	54.165 6	834.4	13.779
5	未开阀	15:30:00	—	3.516 1	—	—
6	未开阀	15:31:00	—	86.671 2	—	—
7	15:32:40 开阀	15:33:13	33	54.201 5	798.5	8.729
8	未开阀	15:38:00	—	3.510 8	—	—
9	15:40:34 开阀	15:41:10	36	54.119 1	880.9	6.820
10	未开阀	15:45:00	—	3.513 4	—	—
11	15:45:49 开阀	15:46:22	33	54.250 2	749.8	2.880
12	未开阀	15:47:00	—	86.681 9	—	—
13	未开阀	15:52:00	—	3.511 8	—	—
14	15:51:42 开阀	15:52:16	34	54.210 0	790.0	7.989
15	未开阀	15:53:00	—	3.524 7	—	—
16	15:56:24 开阀	15:56:58	34	54.172 6	827.4	7.842
17	16:00:00 开阀	16:00:38	38	54.139 9	860.1	10.987
18	16:04:26 开阀	16:04:59	33	54.267 3	732.7	6.891
19	16:08:40 开阀	16:09:13	33	54.233 6	766.4	5.822

注：定位距离以门站 1 为起点沿流动方向计算，时差为门站 3 与门站 1 监测到次声波信号的时间差。

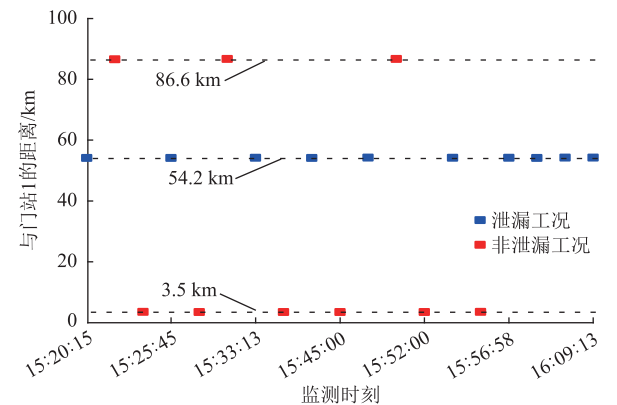


图 10 基于次声波的某成品油管道监测异常信号识别定位图
Fig. 10 Identification and positioning of abnormal signals in infrasonic monitoring of a product oil pipeline

利用式(1)对异常信号定位信息进行计算,发现异常信号的定位距离可分为 3 类(图 10),即分别距离首站 3.5 km、54.2 km、86.6 km 左右,具有明显的规律性。其中两类异常报警信号是受门站 1 与门站 3 内工

艺操作影响所产生的。除此之外,在监测周期内,不存在其他异常报警工况。针对门站内工艺操作对次声波传感器异常报警的影响问题,可以通过隔离器与传感器采集信号比对确定异常信号的方向,从而将其排除。但由于门站 1、门站 3 内的管道上已无安装隔离器的位置,且为避免影响管道正常生产运行,未能安装隔离器,导致门站内工艺操作的干扰未被排除。对当前监测结果进行深入分析,并结合定位距离,对异常报警信号进行排除,最终本次测试的误报率、漏报率均为 0。对表 1 中第 3~12 次测试结果的定位精度进行分析,计算得到定位距离均值为 54.192 km、标准差为 0.048 4 km、定位偏差为 0.8 km 左右,参考两个传感器之间的监测距离,计算得到泄漏点的相对定位误差为 8.80%。

泄漏油品作业由门站 2 内操作员手动操作完成,每次开阀、关阀时间均为 2 s(即阀门动作耗时 4 s)。考虑阀门的线性特性,每次油品泄漏速率遵循图 11(其中, v 为油品稳定泄漏速率, v_{\min} 为油品最小可检测泄漏速率)的规律,其中 t_0 、 t_1 、 t_2 、 t_3 、 t_4 、 t_5 分别代表开阀时刻、上升达到最小可检测泄漏速率时刻、开阀结束时刻、关阀时刻、下降达到最小可检测泄漏速率时刻、关阀结束时刻。

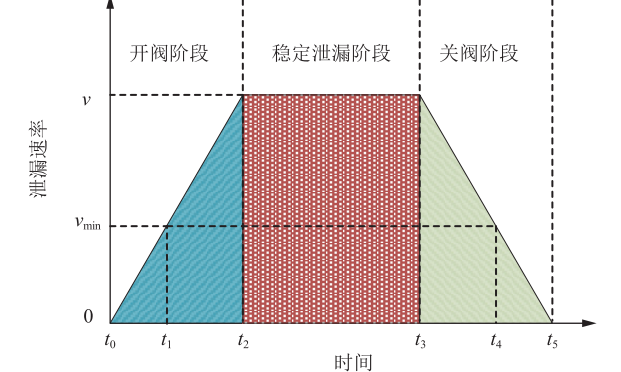


图 11 某成品油管道油品泄漏速率变化示意图
Fig. 11 Variations in oil leakage rates in a product oil pipeline

图 11 中曲线所围成的面积即为一次泄漏的油品量,整个测试过程油品泄漏总量 Q 可按式(6)计算:

$$Q = \sum_j (Q_1 + Q_2 + Q_3) = \sum_j \left(\frac{1}{2} t_1' v + t_2' v + \frac{1}{2} t_3' v \right) \quad (6)$$

式中: j 为油品泄漏次数; t_1' 为开阀阶段持续的时间(即 $t_1' = t_2 - t_0$), s ; t_2' 为稳定泄漏持续的时间(即 $t_2' = t_3 - t_2$), s ; t_3' 为关阀阶段持续的时间(即 $t_3' = t_5 - t_4$), s ; Q_1 、 Q_2 、 Q_3 分别为开阀阶段、稳定泄漏阶段、关阀阶段油品泄漏量, m^3 。

由此,将开阀阶段的持续时间 2 s、关阀阶段的持

续时间 2 s 以及油品泄漏总量 $Q(0.143 \text{ m}^3)$ 代入式(6), 可计算得 $v=0.0016 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

通过对次声波信号波形特征进行分析, 计算由于泄漏引起信号波动的持续时间, 将其作为计算泄漏时间 t_c , 并与测试过程中的实际泄漏时间 t_a (图 12) 进行对比。可见, 计算时间均少于实际时间, 其原因主要是阀门开启后需要达到泄漏速率阈值 (即 v_{\min}), 次声波传感器才能获取携带泄漏特征的信号。同时, 通过 $(t_a - t_c)/t_a \times 100\%$ 计算发现, 油品泄漏时间的计算误差小于 28%, 其中最大误差出现在第 7 次无稳定泄漏的工况下, 其他工况的误差均小于 20%。

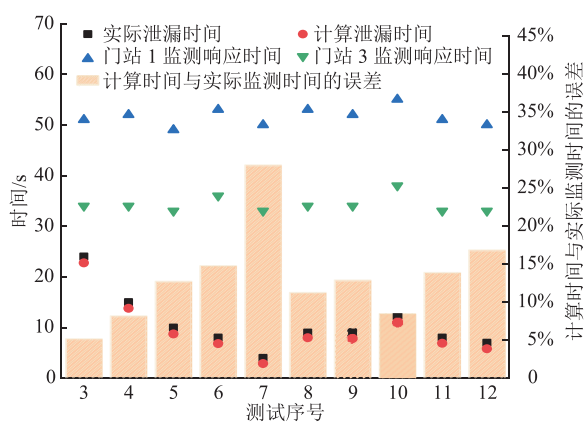


图 12 某成品油管道油品泄漏计算时间与实际时间对比图
Fig. 12 Comparison between calculated and actual durations of oil leakage in a product oil pipeline

考虑阀门开启与关闭过程的对称性, 引入最小可检测泄漏速率修正系数 $\alpha = v_{\min}/v$, 则油品泄漏时间应满足:

$$\alpha = \frac{t_1 - t_0}{t_2 - t_0} = \frac{t_5 - t_4}{t_5 - t_3} \quad (7)$$

由此, 建立油品泄漏时间求解模型为:

$$\begin{cases} t_{c,j} = 4(1 - \alpha_j) + t'_{2,c,j} \\ t_{a,j} = 4 + t'_{2,a,j} \end{cases} \quad (8)$$

式中: $t_{c,j}$ 、 $t_{a,j}$ 分别为第 j 次油品泄漏的计算时间、实际时间, s ; α_j 为第 j 次油品泄漏的最小可检测泄漏速率修正系数; $t'_{2,c,j}$ 、 $t'_{2,a,j}$ 分别为第 j 次油品泄漏的稳定泄漏阶段持续时间的计算值、实际值, s 。

根据每次模拟泄漏测试持续时间的实际值与计算值, 求解得到第 3~12 次 (表 1 中第 1 次与第 2 次测试无计算意义, 因此从第 3 次测试结果开始分析) 测试数据的修正系数 (图 13)。取均值 $\alpha=0.2873$ 进行计算, 得到该成品油管道此次测试的 v_{\min} 为 $0.00046 \text{ m}^3/\text{s}$, 从而得到其最小可检测泄漏率为 4.3%。

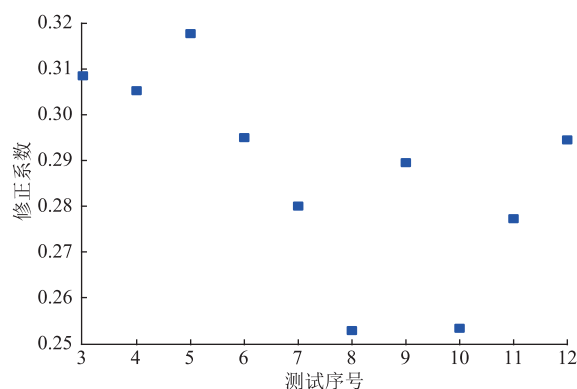


图 13 某成品油管道最小可检测泄漏速率修正系数计算结果图
Fig. 13 Calculation results for correction coefficient of minimum detectable leakage rate of a product oil pipeline

4 结论

以 sym2 小波基 8 层分解策略对成品油管道泄漏次声波信号进行处理, 选择 15 个时域特征、4 个频域特征建立随机森林泄漏识别模型, 以 ROC 曲线的 AUC 为目标函数进行优化, 确定了模型结构参数, 从而建立了基于 WT-RF 的成品油管道次声波泄漏监测方法。在某成品油管道 (监测管段 91 km) 的现场测试结果表明, 该方法的漏报率为 0、定位偏差为 800 m 左右; 以两个传感器之间的监测距离为参考, 计算得到相对定位误差为 8.80%; 此外, 最小可检测泄漏速率、最小可检测泄漏率分别为 $0.00046 \text{ m}^3/\text{s}$ 、4.3%。在现场测试过程中, 受设备安装条件限制, 未能在次声波传感器侧边安装隔离器, 使得部分站内正常工艺操作也会引发泄漏报警, 即产生了误报。然而, 结合对报警位置的定位计算结果, 可有效排除站内正常工艺引发的异常报警。针对门站内信号干扰的排除问题, 将在后续的研究中进一步探索。

参考文献:

- [1] 姜昌亮. 油气管道全生命周期质量管控与安全管理探讨[J]. 油气储运, 2023, 42(10): 1081-1091. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2023.10.001.
- JIANG C L. Quality control and safety management of oil and gas pipelines during its whole life cycle[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2023, 42(10): 1081-1091.
- [2] LIU C W, LI Y X, MENG L Y, WANG W C, ZHANG F. Study on leak-acoustics generation mechanism for natural gas pipelines[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2014, 32: 174-181. DOI: 10.1016/j.jlp.2014.08.010.

- [3] HU Z Y, 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. DOI: 10.1016/j.ymssp.2021.107994.
- [4] 王洪超, 王立坤, 伍晓勇, 于雷, 吴家勇, 富宽, 等. 负压波泄漏监测算法改进[J]. *油气储运*, 2018, 37(5): 541-545. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2018.05.010.
- WANG H C, WANG L K, WU X Y, YU L, WU J Y, FU K, et al. The algorithm improvement of pipeline leak detection based on negative pressure wave[J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2018, 37(5): 541-545.
- [5] 王洪超, 李强, 罗毅, 王文, 王立坤, 张毅甲. 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. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2021.06.011.
- WANG H C, LI Q, LUO Y, WANG W, WANG L K, ZHANG T J. A similarity based locating method of negative pressure wave caused by pipeline leakage[J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2021, 40(6): 679-684.
- [6] 尹渊博, 袁辰, 杜荟敏, 崔兆雪, 刘翠伟, 李玉星. 基于扰动响应的输油管道泄漏检测方法[J]. *振动与冲击*, 2022, 41(23): 43-50. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2022.23.006.
- YIN Y B, YUAN C, DU H M, CUI Z X, LIU C W, LI Y X. Leakage detection method of oil pipeline based on disturbance response[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2022, 41(23): 43-50.
- [7] 曲志刚. 分布式光纤油气长输管道泄漏检测及预警技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2007.
- QU Z G. Study on the leakage detection and pre-warning techniques based on the distributed optical fiber for the long-distance oil and gas pipelines[D]. Tianjin: Tianjin University, 2007.
- [8] 吴文林. 基于支持向量机的海底管道泄漏识别及定位[D]. 大连: 大连理工大学, 2020.
- WU W L. Leak identification and location of submarine pipeline based on support vector machine[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020.
- [9] 郑豫. 基于支持向量机和BP神经网络的油气管道泄漏检测方法研究[D]. 舟山: 浙江海洋大学, 2022.
- ZHENG Y. Research on pipeline leakage detection method based on support vector machine and BP neural network[D]. Zhoushan: Zhejiang Ocean University, 2022.
- [10] 袁满, 高宏宇, 路敬祎, 杨丹迪, 侯轶轩. 油气管道泄漏检测技术综述[J]. *吉林大学学报(信息科学版)*, 2022, 40(2): 159-173. DOI: 10.3969/j.issn.1671-5896.2022.02.004.
- YUAN M, GAO H Y, LU J Y, YANG D D, HOU Y X. Overview of leakage detection technology for oil and gas pipelines[J]. *Journal of Jilin University (Information Science Edition)*, 2022, 40(2): 159-173.
- [11] 吴希明, 李江丰, 严谨, 张大朋, 王成. 海底油气管道泄漏检测与定位技术研究进展[J]. *石油工程建设*, 2022, 48(3): 1-7. DOI: 10.3969/j.issn.1001-2206.2022.03.001.
- WU X M, LI J F, YAN J, ZHANG D P, WANG C. Research progress on leakage detection and location technology of submarine oil and gas pipelines[J]. *Petroleum Engineering Construction*, 2022, 48(3): 1-7.
- [12] 郭颖, 杨理践, 赵佰顺, 张贺. 长输油管道泄漏检测技术研究现状[J]. *辽宁石油化工大学学报*, 2022, 42(4): 25-31. DOI: 10.3969/j.issn.1672-6952.2022.04.005.
- GUO Y, YANG L J, ZHAO B S, ZHANG H. Research status of leakage detection technology for long-distance oil pipelines[J]. *Journal of Liaoning Petrochemical University*, 2022, 42(4): 25-31.
- [13] 周兆明, 张佳, 杨克龙, 张露露. 输气管道泄漏检测技术发展及适应性[J]. *油气田地面工程*, 2019, 38(1): 7-12. DOI: 10.3969/j.issn.1006-6896.2019.01.002.
- ZHOU Z M, ZHANG J, YANG K L, ZHANG L L. Development and adaptability of the leak detection technology for gas pipelines[J]. *Oil-Gas Field Surface Engineering*, 2019, 38(1): 7-12.
- [14] 吴同, 邓忠华, 沈亮, 谢祝祝, 陈煜凯, 刘翠伟, 等. 长距离输油管道泄漏监测技术研究进展[J]. *油气储运*, 2023, 42(3): 259-275. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2023.03.003.
- WU T, DENG Z H, SHEN L, XIE Z Z, CHEN Y K, LIU C W, et al. Research progress of long-distance oil pipeline leakage monitoring technology[J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2023, 42(3): 259-275.
- [15] 袁文强, 郎宪明, 曹江涛, 蔡再洪, 郑浩. 基于声波法的管道泄漏检测技术研究进展[J]. *油气储运*, 2023, 42(2): 141-151. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2023.02.003.
- YUAN W Q, LANG X M, CAO J T, CAI Z H, ZHENG H. Research progress of pipeline leakage detection technology based on acoustic wave method[J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2023, 42(2): 141-151.

- [16] 刘良果,梅茜迪.次声波的输气管道泄漏监测技术综述[J].石化技术,2018,25(12):203. DOI:10.3969/j.issn.1006-0235.2018.12.154.
- LIU L G, MEI Q D. Review of infrasonic gas pipeline leakage monitoring technology[J]. Petrochemical Industry Technology, 2018, 25(12): 203.
- [17] 李睿.油气管道内检测技术与数据分析方法发展现状及展望[J].油气储运,2024,43(3):241-256. DOI:10.6047/j.issn.1000-8241.2024.03.001.
- LI R. Current progress and prospects of in-line inspection techniques and data analysis methods for oil and gas pipelines[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2024, 43(3): 241-256.
- [18] VAN HIEU B, CHOI S, KIM Y U, PARK Y, JEONG T. Wireless transmission of acoustic emission signals for real-time monitoring of leakage in underground pipes[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2011, 15(5): 805-812. DOI: 10.1007/s12205-011-0899-0.
- [19] HO T K. Random decision forests[C]. Montreal: Proceedings of 3rd International Conference on Document Analysis and Recognition, 1995: 278-282.
- [20] BREIMAN L. Random forests[J]. Machine Learning, 2001,

45(1): 5-32. DOI: 10.1023/A:1010933404324.

(编辑:李在蓉)

基金项目:国家自然科学基金项目“基于气-液-声耦合机理的液体管道泄漏动态压力波传播规律研究”,52274066;国家重点研发计划“油气管网安全运维的大数据分析理论、算法及应用”,2021YFA1000104;广东省重点领域研发计划“油气储运重大基础设施灾害防御关键技术及装备研发与示范”,2019B111102001.

作者简介:尹渊博,男,1997年生,在读博士生,2015年毕业于中国石油大学(华东)油气储运工程专业,现主要从事油气管道泄漏后果分析方向的研究工作。地址:山东省青岛市黄岛区长江西路66号,266580。电话:17864268256。Email:yyuanbo@126.com

通信作者:李玉星,男,1970年生,教授,博士生导师,1997年博士毕业于中国石油大学(北京)油气储运工程专业,现主要从事油气长距离管输技术方向的研究工作。地址:山东省青岛市黄岛区长江西路66号,266580。电话:0532-86980919。Email:liyxx@upc.edu.cn

• Received: 2023-05-24

• Revised: 2023-07-11

• Online: 2024-05-14



(上接第 895 页)

- [17] 曲激婷,宋嘉诚,霍林生.基于向量式有限元的网壳结构地震易损性分析[J].世界地震工程,2024,40(1):96-106. DOI: 10.19994/j.cnki.WEE.2024.0009.
- QU J T, SONG J C, HUO L S. Seismic fragility analysis of reticulated shells based on vector form intrinsic finite element method[J]. World Earthquake Engineering, 2024, 40(1): 96-106.
- [18] 李振眠,余杨,余建星,赵宇,张晓铭,赵明仁.基于向量有限元的深水管道屈曲行为分析[J].工程力学,2021,38(4):247-256. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2020.06.0357.
- LI Z M, YU Y, YU J X, ZHAO Y, ZHANG X M, ZHAO M R. Buckling analysis of deepwater pipelines by vector form intrinsic finite element method[J]. Engineering Mechanics, 2021, 38(4): 247-256.
- [19] 余杨,赵宇,张振兴,吴晗,李振眠,张阳,等.多浮筒段缓波型立管向量有限元分析[J].天津大学学报(自然科学与工程技术版),2021,54(6):561-574. DOI: 10.11784/tdxbz202005060.
- YU Y, ZHAO Y, ZHANG Z X, WU H, LI Z M, ZHANG Y, et al. Analysis of a lazy-wave riser with multi-buoy sections based on VFIFE[J]. Journal of Tianjin University (Science and

Technology), 2021, 54(6): 561-574.

- [20] LIU W C, WANG S Q, WANG S, CI S Z. Theoretical and experimental study on the continuum damage mechanical (CDM) behavior of RTPs under axial tension[J]. Ocean Engineering, 2021, 222: 108623. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2021.108623.

(编辑:李在蓉)

基金项目:国家管网集团西气东输分公司科技攻关项目“隧道段变形管道非动火治理技术研究与应用项目”,kj02。

作者简介:邱春斌,男,1968年生,高级工程师,2010年硕士毕业于西安石油大学石油工程专业,现主要从事油气管道生产运行及管理工作。地址:福建省福州市鼓楼区五四路75号,350003。电话:13901660263。Email:qiucb@pipechina.com.cn

• Received: 2023-08-07

• Revised: 2023-10-04

• Online: 2024-06-25

