

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.19.006

水听器次声波在大口径供水管道探漏中的应用研究

王海涛¹, 葛奇¹, 江安华¹, 袁庆军¹, 黄清龙², 杨蕊²,
徐哲³

(1. 杭州水务集团有限公司, 浙江 杭州 310009; 2. 中国船舶重工集团公司第七一五研究所, 浙江 杭州 310023; 3. 杭州电子科技大学 自动化学院, 浙江 杭州 310018)

摘要: 大口径供水管道由于高频振动噪声衰减快、埋地深、检查井间距大,人工听漏或使用噪声仪等常规手段无法奏效。针对此问题,通过对次声波水听器采集的不同大小漏点、不同外部介质、不同口径管道的模拟渗漏信号分析,发现大口径管道渗漏信号以低频分量为主,多为次声波成分;进一步运用特征分析法、能量积累法及AI分析方法等,可以获得较好的检测效果。研究表明,应用水听器探漏,能及时发现远端漏点,弥补了常规手段对大口径供水管道探漏的短板,能够更好地保障城市供水系统的安全运行。

关键词: 供水管道; 探漏; 水听器; 次声波; 特征分析法; 能量积累法; AI学习算法

中图分类号: TU991 文献标识码: A 文章编号: 1000-4602(2024)19-0039-06

Application of Hydrophone Infrasound Waves in Leak Detection of Large-diameter Water Supply Pipelines

WANG Hai-tao¹, GE Qi¹, JIANG An-hua¹, YUAN Qing-jun¹, HUANG Qing-long²,
YANG Rui², XU Zhe³

(1. Hangzhou Water Group Co. Ltd., Hangzhou 310009, China; 2. 715 Research Institute of China Shipbuilding Group, Hangzhou 310023, China; 3. School of Automation, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Due to the fast attenuation of high-frequency vibration noise, deep burial, and large spacing between inspection wells, conventional methods such as manual leak detection or noise logger cannot be effective for large-diameter water pipelines. In response to this issue, through the analysis of simulated leakage signals collected by infrasonic hydrophones with different leak sizes, external media at different leak points, and pipelines with different diameters, it was found that the leakage signals of large-diameter pipelines were mainly low-frequency components, mostly infrasonic components. Further application of analysis methods such as feature analysis method, energy accumulation method, and AI could achieve good detection results. Research has shown that using hydrophones to detect leaks can timely detect remote leakage points, filling the gap of conventional methods for detecting leaks in large-diameter water supply pipelines and better ensuring the safe operation of urban water supply systems.

Key words: water supply pipeline; leak detection; hydrophone; infrasound wave; feature analysis method; energy accumulation method; AI learning algorithms

目前,管径在DN300以下的金属供水管道的人工检漏技术已较为成熟^[1],而通过智能漏水噪声监测仪等设备能及早发现管段渗漏,配合人工巡检及相关仪器的使用,能精确识别和准确定位漏点位置并予以修复,及时消除管网隐患。然而,城市主干输水管道由于管径大,高频振动噪声衰减快,漏水噪声监测仪较难监测^[2];同时,由于监测接入点少,人工听漏也较难。目前主要采用人工巡查方式,实时性差,渗漏发生后存在较大的隐患和风险。为此,探索了采用水听器接收渗漏次声波的探漏途径。由于在供水管道中次声波传输条件佳,传输距离远,通过对渗漏次声波信号进行采集,提取能够反映管道运行状态的特征,对于应用次声波信号实现大的供水管道渗漏检测具有重要意义^[3],也有益于今后大口径管道检漏技术的发展和应

1 试验方法

1.1 试验段管线选定

对辖区现有大口径供水管道目前现存的测量点接入物理条件进行摸底,以便提出尽可能多的管道次声波采集设备安装方式和方法。选定同协南路(天城路—备塘路—坍桥头路)DN1 200管道作为试验段,监测安装点为管道上的排气阀位置,先将排气阀卸下,再定制法兰接口和安装水听器,共设置3个监测点,如图1(a)所示,自北往南之间的距离依次为270、900 m。

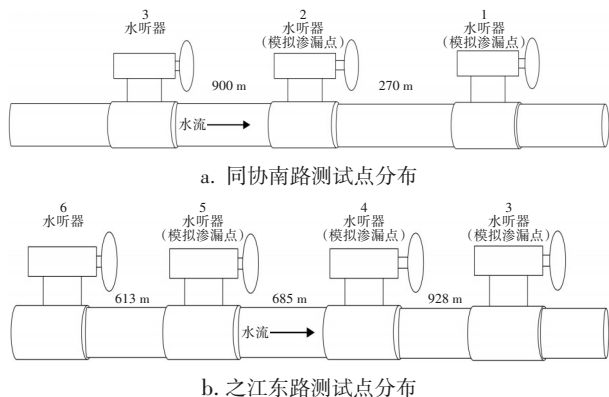


图1 测试点分布

Fig.1 Distribution of measurement points

为增加样本数量,选定之江东路DN1 600供水管道进行补充试验,自西向东分别选定聚首路与之江东路、聚首路与智格路、聚首路与智格路口以及一号大街之江东路过桥管上排气阀位置安装水听器,相邻两个点位之间的距离分别为613、685、928

m,如图1(b)所示。水听器采集的信号通过4G远传设备传至云端城市管网漏水监测系统,以便于下载和分析。

1.2 试验方案

试验时,同协南路3个点都安装次声波采集设备,分别在1号和2号点模拟渗漏,3个点同时进行采集;在之江东路进行测试时,4个点也都安装次声波采集设备,其中3号、4号和5号为模拟渗漏点,4个点同时进行采集。

次声波数据采集设备对接收到的噪声信号进行放大、滤波、采集和处理后,通过窄带物联网(NB)传输到网络后端,再通过软件在后端进行下载,下载后的原始音频数据采用MATLAB、人工智能(AI)等专业分析软件进行时域、频域和特征提取^[4]。同时,为了分析漏点大小和介质对渗漏声源产生的影响,分别模拟了不同渗漏开度及外部介质的渗漏源。主要试验内容见表1。

表1 渗漏试验内容

Tab.1 Content of leakage test

管径、管材	周围介质	漏点位置	装置离漏点距离/m
DN1 200钢管	空气、水	埋地管道	270、900
DN1 600钢管	空气、水	埋地管道	613、685、928
注: 针对DN1 200管道不同渗漏度(开度约10%、30%、50%、70%、90%)开展信号对比测试。			

2 水听器的泄漏信号特征值检测

2.1 背景噪声特征

当管道未发生渗漏时,由于管内水在流动,水流会产生声信号,为其中的背景噪声。当管道发生渗漏时,背景噪声也存在,背景噪声对研究渗漏噪声具有重要影响。除了水流声,地面车辆行驶噪声、附近工地施工噪声、脚步声、说话声等都可能被水听器收集,进而影响对管道渗漏的判断。除了水流声其他噪声主要集中在白天,深夜时间段干扰较小,在实际分析数据时可以选取深夜进行采集,以减少噪声影响。为研究大口径供水管道的水流信号特性,将水听器安装在供水管道排气阀连接处来采集水流信号。

为减少道路车辆、工地施工等其他外界环境的影响,在22:00之后对管道中水流信号进行采集,得到时域波形图;再通过MATLAB工具对该段信号数据进行FFT分析,得到其频域图和时频图。结果表

明,水流的背景噪声信号比较稳定,且主要集中在0~50 Hz的频段。

2.2 不同漏点大小的信号特征

研究发现漏点大小对渗漏信号影响较大,当流速、水压一定时,不同大小漏点的渗漏信号有较大区别。将水听器安装在管道的排气阀处,通过调整DN50闸阀的开度来模拟渗漏大小,结果见图2。

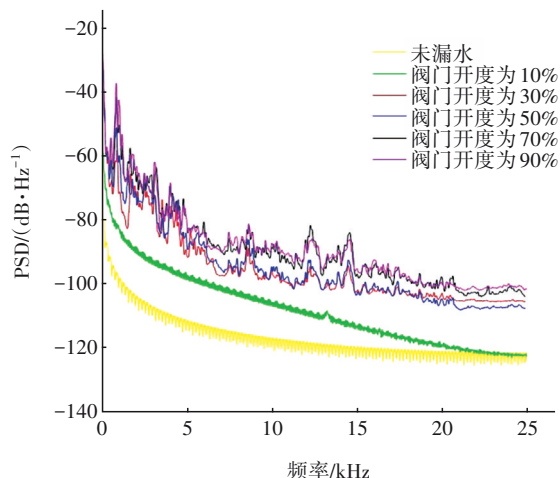


图2 不同渗漏程度的功率谱密度

Fig.2 Different hydrant leaks power spectral density estimate

功率谱密度(PSD)是描述信号功率在频域上分布情况的密度函数,通常用单位频率范围内的功率值表示。由图2可知,渗漏程度不同则功率谱密度存在差异,阀门开度为10%时功率较低,阀门开度为30%和50%时功率分布相近,阀门开度为70%和90%的功率分布也比较相近。不同的阀门开度,代表不同大小的渗漏。虽然它们的渗漏频率有一定的差异,与未渗漏噪声相比也有显著差别,但整体都是低频信号较大、高频分布较少,且所有的渗漏

信号在各个频率相对于未渗漏时都有升高,据此可以检测渗漏。

2.3 漏点周边不同介质的信号特征

由于管道工作环境复杂多样,发生渗漏时管道外可能为水、空气等不同介质。为此,考察了不同介质对渗漏信号的影响。通过安装在DN1 200钢管排气阀处的水听器采集距离渗漏点270 m处的噪声信号,对比渗漏点处介质为水和空气的渗漏信号可以发现,渗漏原点经过270 m的管道传输之后,高频渗漏信号基本消失,渗漏信号都集中在频率为0~50 Hz的低频段,且频谱分布相近。此外,渗漏点周围介质为水时,渗漏信号的信噪比为11.23 dB;渗漏点周围介质为空气时,渗漏信号的信噪比为8.60 dB,即周围介质为水时渗漏信号的低频信号特征更为明显。因此,当渗漏点处的介质不是空气,而是水、土壤等其他物质时,渗漏信号的信噪比会发生变化,相对于空气要高,故渗漏信号传播更远,更容易被捕获^[5]。

2.4 不同管径漏点的信号特征

考察了不同管径的钢管渗漏信号,结果见图3和图4。通过对比可知,在漏水程度相近的条件下,DN100信号主要集中在频率<1 000 Hz的频段范围,在1 000~5 000 Hz的频段内也有较强信号。因此,常规人工检漏和噪声仪更容易发现小口径供水管道的漏点信号。而DN1 200信号主要集中在频率<1 000 Hz的频段范围,在1 000~2 000 Hz的频段内也有较强的信号,但是在频率>2 000 Hz的频段范围内基本没有信号。此外,检测距离越长则高频信号衰减越快。可见,在相同渗漏条件下,大口径管道较难被人工检漏和噪声仪识别。因此,应用水听器收集次声波进行漏点检测和分析,可以弥补该局限。

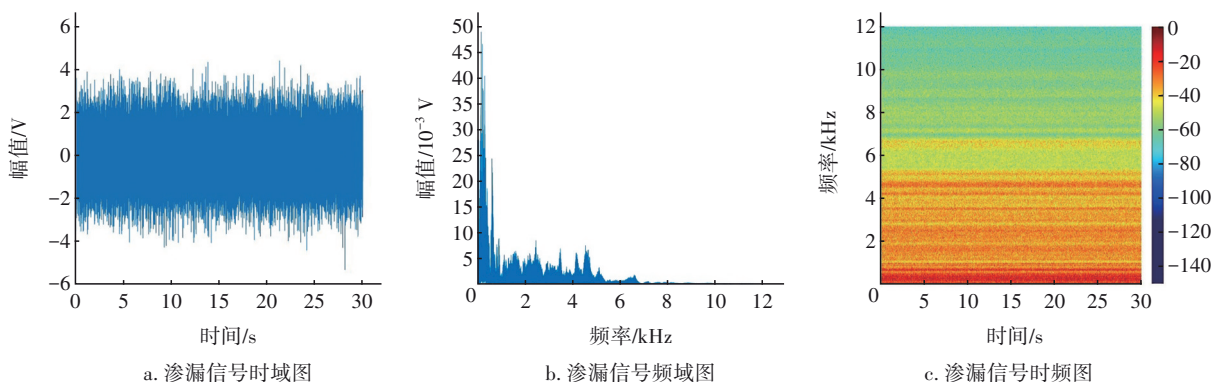


图3 DN100钢管渗漏信号

Fig.3 Leakage signal of DN100 steel pipe

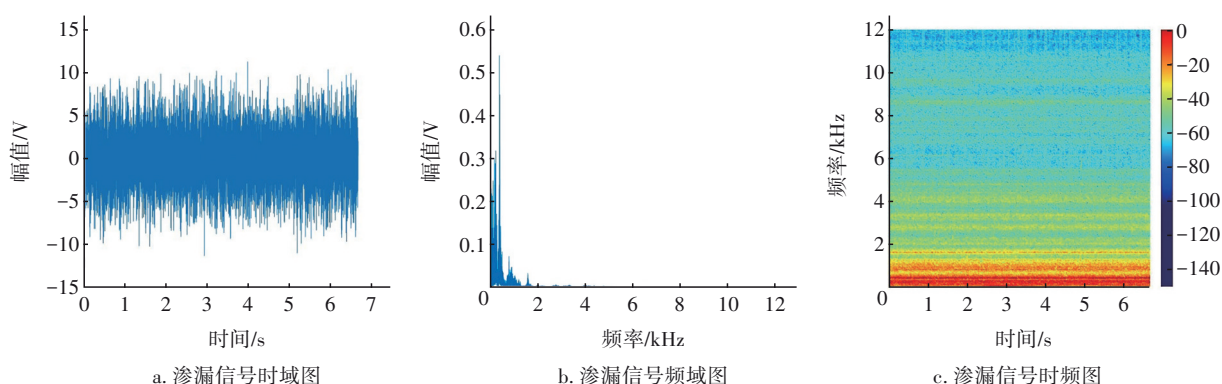


图4 DN1 200钢管渗漏信号

Fig.4 Leakage signal of DN1 200 steel pipe

2.5 突发渗漏(爆管)的次声波特征

渗漏信号可以沿着管壁和水体传播^[6],其中沿着管壁传播的部分携带高频成分较多,沿着水体传播的部分高频成分较少。由于大口径管道与地面的接触面积较大,管道中渗漏信号通过土壤扩散,管道传播的信号损失严重,沿着水体传播的渗漏信号损失相对较少。由于高频信号随着距离增加而迅速衰减,因此远距离的渗漏信号主要为水中传输的次声波。突然性的渗漏(包含爆管)会引发严重的冲击波,其频率低于20 Hz,属于典型的次声波。突然性的渗漏和水锤会产生次声波,并在管道内部传输,次声波的远距离传输特性使得监测范围较远,被接收到后通过专业分析软件进行处理、识别,可及时通过预警通知用户。

在DN1 600输水管的3号排气阀位置设置水听器,在距离928 m的4号点通过快速开关阀装置模拟突发渗漏(爆管)情形,3号水听器对4号点开关阀产生的次声波信号进行监测,结果见图5。

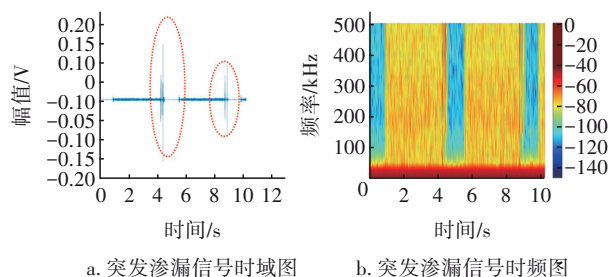


图5 突发性渗漏原点位置水听器信号

Fig.5 Hydrophone signal at sudden leakage point

当突然开启和关闭渗漏时,在传感器端都接收到了相关信号。对模拟爆管信号分频段滤波,发现关阀信号主要为10~20 Hz,而突然开启阀门模拟的爆管信号主要频率 ≤ 10 Hz。在对突发渗漏(爆管)次

声波进行远端监听时,可捕捉到模拟爆管信号,但由于供水管道压力低,信号较弱。

因此,对于上述类型的管道漏水特征值信号,在远端监测时,与管道水流等背景噪声频域会有重叠,且距离越长,干扰程度越大,较难提取。

3 水听器渗漏信号能量累积法检测

大管道由于管径粗、与周边介质接触面积大,高频振动信号快速被管壁周围介质吸收而传输距离较短,同时,低频信号受水流、周边环境等干扰,当水听器距离渗漏点较远时,无法采用特征值监测法实施有效渗漏监测。

根据管道内渗漏信号的频谱稳定性及噪声信号的随机性,提出能量累积方法^[7]。由于渗漏稳定信号累积速率大于管道随机噪声信号累积速率,可运用能量累积处理方法,通过加密对管道渗漏噪声信号进行采集和叠加,进而发现管道噪声信号的异常。主要处理过程如下:①对水听器采集到的声音信号进行预处理,以减少可能干扰渗漏检测的噪声。预处理方式可能包括滤波、降噪和信号放大。这些步骤旨在强调潜在渗漏信号,使其从背景噪声中凸显出来。②采用长时间能量累积的方法进行渗漏检测。将接收到的信号切分成短时段,然后对每个时段内的信号能量进行计算,将这些能量值进行累积,从而形成长时间的能量曲线。这一累积过程有助于保留长时间内存在的持续信号,同时抑制瞬时噪声的影响。

通过长时间能量累积,系统能够更好地捕捉到持续时间较长的声音事件,这在管道渗漏检测中特别重要,因为渗漏声音可能相对微弱且持续时间较长,累积能量曲线能够帮助识别这些潜在的渗漏信

号,而不会受到瞬时噪声的干扰。

为了确定渗漏是否存在,可以设置适当的能量阈值^[8]。当累积能量超过设定的阈值时,系统可以发出警报,提示可能存在管道渗漏。但能量累积的方法也存在一定的缺陷,当管道附近存在干扰因素,如阀门未开足而产生的水流噪声、水泵运行噪声或其他稳定发生的噪声,都会引起能量累积方式误判。因此,需要通过不断采集信号,建立检测点位背景噪声的数据库,来区分背景噪声和渗漏噪声,从而减少误判。

此外,水听器接收点与漏点的相对位置也可能影响检测效果。如图1所示,当3号点渗漏时4号点接收方向与水流方向相反,试验采集240组渗漏和非渗漏数据进行积累分析,10 Hz 低频次声波频段有所增加,信号功率有所增强,但区分稍难,如图6(a)所示。将安装点与漏点互换后,接收方向与水流方向相同,信噪比较好,能够更有效区分渗漏,如图6(b)所示。因此,水听器长时间能量累积方法是一种有效的供水管道渗漏检测技术,可通过多次采样进行能量累积来提升渗漏信号检测的信噪比。同时,相比在上游逆流方向,水听器接收点在漏点下游方向更有利于收听检测。

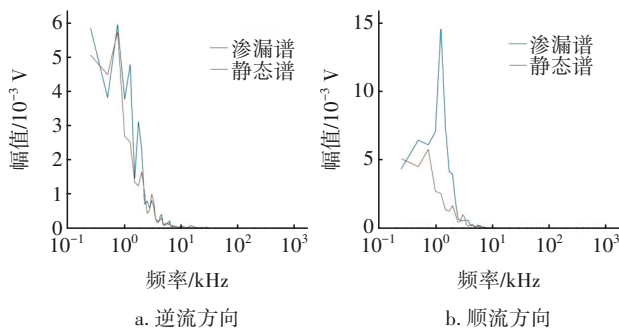


图6 不同水流方向的渗漏信号能量累积

Fig.6 Detection signal in the reverse and downstream direction

4 水听器 AI 渗漏检测

大管道的渗漏检测,也可通过引入AI技术来提高检测速度和准确性。本次试验 AI 渗漏模型采用 Pytorch 深度学习框架,并使用 Python3.7 作为编程语言模型,检测方法如下:

① 数据采集与预处理。传感器接收的数据可能包含多种信号,比如渗漏声音、环境噪声、水流声音等,需要对数据进行噪声去除、异常值处理等预处理操作,为将数据输入到深度学习模型中做好

准备。

② 深度学习模型设计。采用深度学习技术,例如卷积神经网络(CNN)^[9]和递归神经网络(RNN),构建供水管道渗漏检测模型。模型应该能够识别正常状态和渗漏状态之间的差异,同时考虑多传感器数据的融合。

③ 模型训练与优化。使用正常运行状态和已知渗漏情况下的历史数据进行模型训练,通过反复训练和优化^[10]以提高模型的准确性和泛化能力。

④ 实时监测与预警系统。将训练好的模型嵌入到实时监测系统中,对传感器产生的数据进行实时分析,一旦检测到异常,系统将及时反馈管道渗漏结果。

⑤ 部署与实地测试。将系统部署在实际供水管道中,并进行实地测试,通过与现有的监控系统协同工作,验证系统的实用性和可行性。

⑥ 持续监控和优化。建立系统的持续监控和优化机制,周期性地评估系统性能,根据反馈数据不断优化模型和算法,以确保系统能长期保持高效的渗漏检测能力。

通过这一基于AI的供水管道渗漏检测方法,可以提高渗漏检测的准确性、实时性。目前针对小口径PE管道的水听器渗漏检测识别准确率达到99.94%,下沙之江路DN1 600管道的渗漏识别准确率达到90%。可视化的下沙DN1 600管道数据AI识别结果见图7。

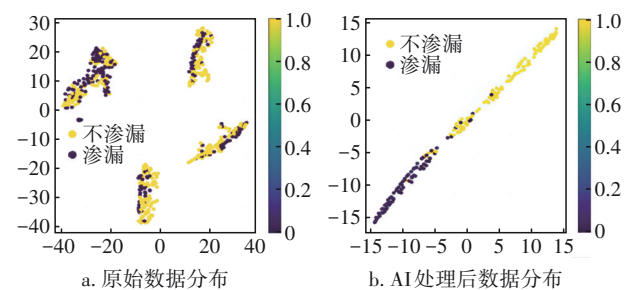


图7 DN1 600管道渗漏AI识别结果

Fig.7 AI identification results of DN1 600 pipeline leakage

5 结论

① 大口径管道渗漏信号集中在频率 ≤ 50 Hz的低频段,但低频段信号受环境背景噪声干扰而难以提取,高频信号则衰减快,导致常规人工检漏和噪声仪的检漏效果不佳。大口径管道漏点有效的检测方法主要有特征分析法、能量积累法、AI识别法。特征识别法适用于近距离的大口径管道渗漏

检测。针对检测距离增大,大口径管道渗漏信号衰减和受背景噪声干扰的情况,可采用多次采集、能量累积的办法,提升渗漏检测信号的信噪比,从而提高检测效果。此外,水听器接收点的位置也会影响检测效果,相比于上游逆流方向,在漏点下游方向检测的效果更好。

② AI技术作为一种综合的信号处理方式,当渗漏和非渗漏样本较多且经过充分训练时,AI识别准确率可达到90%以上,在识别供水管道渗漏点中展现出较高的准确率,具有较好的应用价值。

参考文献:

- [1] 郭新蕾,马慧敏,李甲振,等.管道系统漏损控制技术进展[J].水利水电技术,2018,49(6):65-71.
GUO Xinlei, MA Huimin, LI Jiazhen, *et al.* Review on advance of technique for leakage control in pipeline system [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2018, 49(6): 65-71(in Chinese).
- [2] 文玉梅,张雪园,文静.依据声信号频率分布和复杂度的供水管道泄漏辨识[J].仪器仪表学报,2014,35(6):25-31.
WEN Yumei, ZHANG Xueyuan, WEN Jing. Identification of water pipeline leakage based on acoustic signal frequency distribution and complexity [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(6): 25-31(in Chinese).
- [3] 王春雨.管道泄漏特征诊断方法研究[D].吉林:东北电力大学,2012.
WANG Chunyu. Research of the Pipeline Leakage Features Diagnosis Method [D]. Jilin: Northeast Dianli University, 2012(in Chinese).
- [4] 于海良.供水管道漏损所引起的振动特性研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2017.
YU Hailiang. Study on the Vibration Characteristics Caused by Water Supply Pipeline Leakage[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017(in Chinese).
- [5] 耿雪,田一梅,裴亮,等.声学在给水管道的检测中的应用[J].给水排水,2013,39(S1):503-507.
GEBG Xue, TIAN Yimei, PEI Liang, *et al.* Leakage detection in water supply pipe based on acoustics [J]. Water & Wastewater Engineering, 2013, 39(S1): 503-507(in Chinese).
- [6] 夏传强.基于VMD和互谱分析的供水管道泄漏检测定位研究与应用[D].重庆:重庆邮电大学,2020.
XIA Chuanqiang. Research and Application of Leak Detection and Location Based on VMD and Cross-spectrum Analysis in Water Supply Pipeline [D]. Chongqing: Chongqing University of Posts and Telecommunications, 2020(in Chinese).
- [7] 路敬祎,马雯萍,叶东,等.基于VMD的声音信号增强算法研究[J].机械工程学报,2018,54(10):27-32.
LU Jingyi, MA Wenping, YE Dong, *et al.* Algorithm of sound signal enhancement based on VMD[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(10): 27-32 (in Chinese).
- [8] 杨进,文玉梅,李平.基于相关分析和近似熵的管道泄漏声信号特征提取及辨识方法[J].仪器仪表学报,2009,30(2):50-57.
YANG Jin, WEN Yumei, LI Ping. Feature extraction and identification of leakage acoustic signal in water distribution pipeline using correlation analysis and approximate entropy [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2009, 30(2): 50-57(in Chinese).
- [9] 郭晨,简涛,徐从安,等.基于深度多尺度一维卷积神经网络的雷达舰船目标识别[J].电子与信息学报,2019,41(6):37-44.
GUO Chen, JIAN Tao, XU Cong'an, *et al.* Radar HRRP target recognition based on deep multi-scale 1D convolutional neural network [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2019, 41(6): 37-44 (in Chinese).
- [10] DING Y H, JIA M P. A multi-scale convolutional auto-encoder and its application in fault diagnosis of rolling bearings [J]. Journal of Southeast University, 2019, 35(4): 417-423.

作者简介:王海涛(1983-),男,浙江台州人,硕士,高级工程师,研究方向为城市供水管网漏损监控、智慧水务。

E-mail:26607038@qq.com

收稿日期:2024-04-16

修回日期:2024-06-03

(编辑:李德强)