

文章编号: 1000-8241(2022)02-0159-06

# 基于白化滤波的天然气管集输管道微泄漏定位方法

武刚<sup>1</sup> 赵敏<sup>2</sup> 郑欣<sup>3</sup> 蔡锐<sup>1</sup> 宋成立<sup>1</sup> 李丽锋<sup>1</sup> 孙守宇<sup>2</sup>

1. 中国石油集团石油管工程技术研究院·石油管材及装备材料服役行为与结构安全国家重点实验室;  
2. 北京声创新技术发展有限责任公司; 3. 西安长庆科技工程有限责任公司

**摘要:** 油气田集输管道因腐蚀导致的微泄漏信号提取和识别是泄漏监测技术领域的一大难题。针对淹没在管道噪声中的微弱泄漏信号,提出了一种基于白化滤波的天然气管集输管道微泄漏定位方法。以某油田天然气管集输管道为例,采用自适应白化滤波算法消采集信号中的除低频分量,进而对泄漏定位公式进行优化,通过互相关方法计算管道上、下游信号的延迟时间,得到泄漏点位置。结果表明:利用所提出的方法,白化滤波处理后的信号功率谱趋于平坦且接近白噪声,信噪比提高约4 dB,可检测到管道中的微弱泄漏信号,泄漏点定位误差为2 m,建议进一步开展在不同介质、压力等级、地形条件管道中的示范应用,以期提升油气田集输管道的安全管理水平,助力无泄漏示范区建设。(图6,表1,参22)

**关键词:** 天然气管集输管道; 泄漏信号; 管道噪声; 白化滤波; 微泄漏定位

中图分类号: TE832

文献标识码: A

DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2022.02.005

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Microleakage locating algorithm of gas gathering pipeline based on whitening filter

WU Gang<sup>1</sup>, ZHAO Min<sup>2</sup>, ZHENG Xin<sup>3</sup>, CAI Rui<sup>1</sup>, SONG Chengli<sup>1</sup>, LI Lifeng<sup>1</sup>, SUN Shouyu<sup>2</sup>

1. CNPC Tubular Goods Research Institute//State Key Laboratory for Performance and Structure Safety of Petroleum Tubular Goods and Equipment Materials; 2. Beijing Sheng Chuang New Technology Development Co. Ltd.; 3. Xi'an Changqing Technology Engineering Co. Ltd.

**Abstract:** The extraction and identification of microleakage signal caused by the corrosion of gathering pipelines in the oil and gas fields is a great technical challenge for leakage monitoring. Therefore, a microleakage locating algorithm of gas gathering pipeline based on whitening filter was proposed for the microleakage signal submerged in the pipeline noise. As the acquired signal of gathering pipeline contains an abundance of low-frequency components, tracking with the adaptive whitening filter can eliminate the low-frequency components, so that the power spectrum of the acquired signal becomes flat and close to the white noise. The microleakage signal processed by whitening filter is enhanced, and the signal-to-noise ratio (SNR) is increased by nearly 4 dB. At the same time, the cross-correlation operation with the signals processed by whitening filter can calculate the time delay of signals at both ends of pipeline, further locate the microleakage point of gathering pipeline by leakage positioning formula. According to the calculation results, the algorithm can accurately locate the microleakage signal of the oil and gas field gathering pipeline, with error of 2 m. Thus, demonstration application should be provided for various media at different pressure levels under different topographic conditions, so as to improve the locating accuracy of the algorithm, further providing technical support for the construction of no-leakage demonstration area. (6 Figures, 1 Table, 22 References)

**Key words:** gas gathering pipeline, leakage signal, pipeline noise, whitening filter, microleakage locating

安全防护和环境保护是工业4.0时代最为关注的课题,输油气管道泄漏监测是保障管道安全生产

运营、实现安全防护和环境保护的有效手段<sup>[1]</sup>。国内外有关管道泄漏监测技术的研究比较广泛,典型的

泄漏监测方法有负压波法<sup>[2-3]</sup>、次声波法<sup>[4-5]</sup>、Hilbert-Huang 变换法<sup>[6]</sup>、小波变换法<sup>[7]</sup>、高阶统计量法<sup>[8]</sup>、神经网络法<sup>[9]</sup>、人工智能法<sup>[10]</sup>以及基于光纤传感的管道泄漏检测方法<sup>[11]</sup>等。这些方法各有优点,但对于监测系统传感器采集的泄漏信号信噪比较低的情况,均不适用。

相较于长输管道,油气田集输管道管径小、运行压力差异大、工艺管道中气液两相流型复杂<sup>[12]</sup>、介质中含有较多 H<sub>2</sub>S、CO<sub>2</sub> 等有害腐蚀成分,容易引起管道中传输介质的不均匀性,导致管道中声波传播衰减较大。因此,当集输管道发生微泄漏时,受站场工况和野外复杂地形的影响,微泄漏信号时常淹没在管道背景噪声中,使微泄漏检测定位非常困难<sup>[13]</sup>。为此,采用次声波泄漏监测方法,对某油田采气井至集气站间天然气集输管道开展微孔泄漏模拟试验,实时在线采集数据,对比分析监测管段两端信号白化处理前后的功率谱,采用自适应白化滤波处理技术,开展集输管道微泄漏信号检测定位算法研究。

## 1 数据采集

以某油田采气井至集气站间天然气集输管道为研究对象,开展微孔泄漏模拟试验(图 1),获取泄漏检测信号数据。该段管道长度为 4.69 km,管径为 60 mm,采气井与管道 1.911 km 间管段壁厚为 6 mm,剩余管道壁厚为 7 mm。在距采气井 1.911 km 处设置放空点,通过装配不同孔径的放空管件模拟管道泄漏点大小。在管道上游、下游及泄漏点处分别设置 3 个监测点安装泄漏监测系统,包括次声波传感器、数据采集器、北斗时统系统及监测中心。次声波传感器用于实时检测管道泄漏的声波信号;采集器用于采集传感器检测到的声波信号,将声波信号与北斗时统系统记录的时间

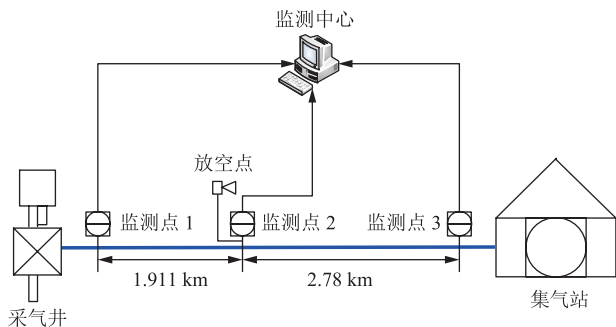


图 1 某油田采气井至集气站天然气集输管道微泄漏模拟试验示意图

标签对应后上传至监测中心,采样频率为 50 Hz;监测中心对接收到的声波信号进行综合分析后识别并定位管道泄漏点。

采用孔径 3 mm 微小限流孔放空管件模拟微泄漏,截取监测信号发生变化的时间段内 2 500 个采样点,得到 3 个监测点处泄漏信号随采样时间的变化曲线(图 2)。结合采样点的时间标签数据可知,当放空阀开启即管道开始发生泄漏时,监测点 2 处脉冲电压瞬间下降,阀门关闭即泄漏停止后,脉冲电压瞬间升高(图 2a)。开始发生泄漏约 5 s 后,泄漏脉冲信号在上游监测点 1 处出现,可以清晰辨认出脉冲电压的瞬间下降与升高(图 2b)。依据声波传播基本理论推算,约 7 s 后泄漏脉冲信号应在下游监测点 3 处出现,但由于泄漏点过小,泄漏脉冲淹没在管道背景噪声中,泄漏监测系统未监测到泄漏信号(图 2c)。

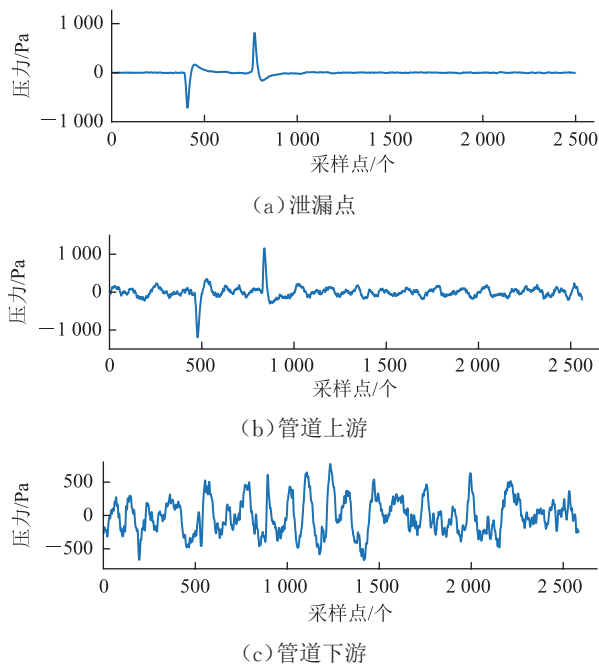


图 2 某集输管道不同位置监测点微泄漏信号波形图

## 2 数据白化滤波处理

利用自适应白化滤波处理技术,将淹没在管道背景噪声中的微弱泄漏信号提取出来,用以支撑微泄漏信号的检测定位。

### 2.1 自适应白化滤波算法

信号处理基础理论表明,在高斯白噪声条件下,匹配滤波器是最佳的信号检测器<sup>[14-15]</sup>,而在实际应用中,大都在非高斯背景噪声下检测有用信号。采用白化

滤波原理进行信号处理<sup>[16-17]</sup>,可将非高斯噪声信号(窄带)转换为接近高斯白噪声信号(宽带)。根据信号传播原理,在理想情况下,泄漏信号传播至管道上、下游后,两处监测点传感器应均能够检测到泄漏信号。但实际情况中,泄漏信号与传播至管道上游或下游监测点处的信号之间存在时间延迟,且可能淹没在背景噪声中。依据自适应白化滤波算法原理(图3),对于输入信号 $r(n)$ ( $n$ 为迭代次数),根据延迟时间计算得到信号 $x(n)$ ,进而通过迭代调整自适应算法的学习率并计算自适应滤波器的权重系数,使输出信号 $y(n)$ 与输入信号之间的误差信号 $e(n)$ 能量最小<sup>[18-20]</sup>,从而得到最优滤波。

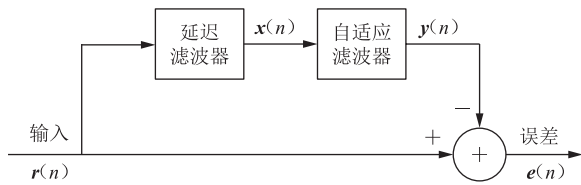


图3 自适应白化滤波算法原理示意图

$$e(n) = r(n) - [h(n)]^T x(n) \quad (1)$$

$$h(n+1) = h(n) + \mu e(n) x(n) \quad (2)$$

$$\mu = \frac{1}{(N+1)P} \quad (3)$$

式中： $h(n)$ 为第 $n$ 次迭代后自适应滤波器的权重系数； $\mu$ 为自适应算法的学习率； $N$ 为自适应滤波器的阶数； $P$ 为信号的平均功率， $W$ 。

### 2.2 处理结果

对管道下游采集到的泄漏信号(图2c)进行自适应白化滤波处理,对比自适应滤波前后信号波形(图4)。自适应滤波前,管道下游采集到的信号中,推算时刻对应的采样点未检测到泄漏信号(图4a虚线框内);经白化滤波后,输出的误差信号为类似白噪声的波形图,淹没在管道背景噪声中的微弱泄漏信号得到增强并在波形图中凸显出来(图4c虚线框内)。

对比管道上、下游白化滤波前后信号的功率谱密度(图5)可知,白化滤波前,管道下游(集气站)信号功率谱密度比上游(采气井)信号功率谱密度高10倍以上(图5a),因此,当微泄漏信号传播至管道下游时,被淹没在管道背景噪声中,且管道上、下游信号功率谱能量基本集中在10 Hz内,管道背景噪声为色噪声,低频成分丰富。白化滤波后,两处信号功率谱均展宽约5倍,近似白噪声,为微弱泄漏信号检测定位提供了可能(图5b)。

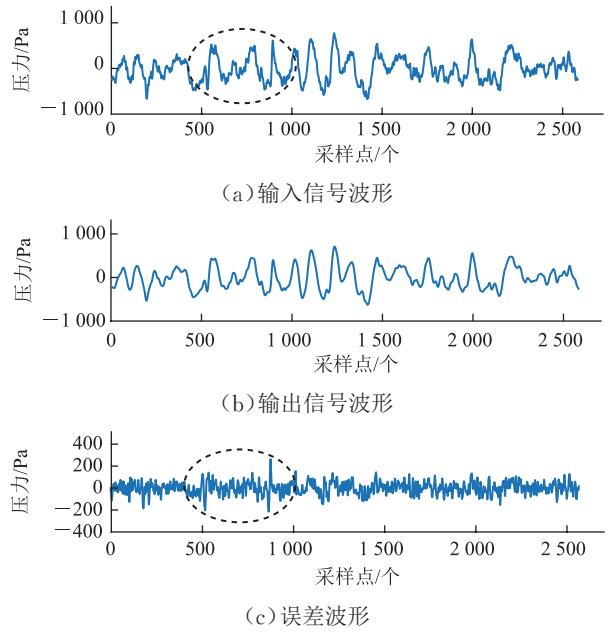


图4 自适应白化滤波前后信号的输入、输出及误差波形图

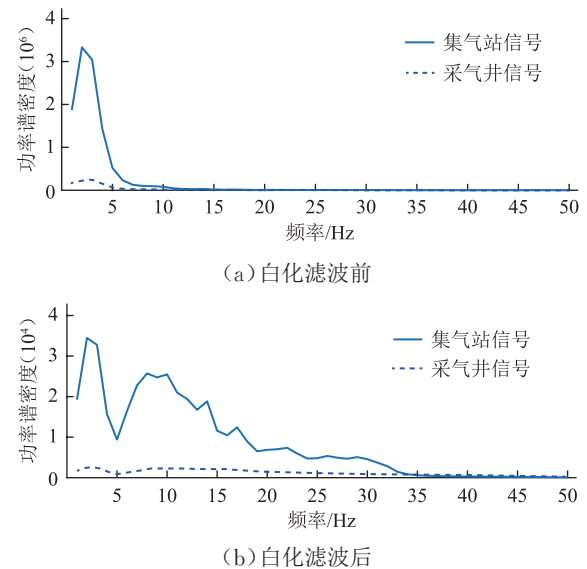


图5 自适应白化滤波前后集气站和采气井功率谱密度对比曲线

## 3 管道微泄漏信号定位

### 3.1 定位方法优化

管道泄漏时差定位通常采用声速进行定位计算,但声速在不同介质、压力条件下会有所不同。为提高天然气集输管道泄漏点的定位精度,减小常规时差定位法中计算误差的影响,采用信号传播时间测量值代替常规时差定位法中的声速计算值,则管道泄漏点定位公式为:

$$d = \frac{L}{2} \left( 1 + \frac{\Delta t}{t} \right) \quad (4)$$

式中： $d$ 为管道泄漏点至上游采气井的距离，m； $L$ 为上游采气井与下游集气站之间的管道距离，m； $t$ 为声波从泄漏点传播至上、下游的时间之和，s； $\Delta t$ 为泄漏点信号传播至上、下游端的时间差，s。

上式中， $d, t$ 均为已知量，确定 $\Delta t$ 即可定位泄漏点。当 $\Delta t < 0$ 时，表明泄漏点距离上游端近；当 $\Delta t > 0$ 时，表明泄漏点距离下游端近。 $\Delta t$ 可采用互相关方法<sup>[21]</sup>计算得到，即在管道噪声和干扰背景下，检测上下游两端泄漏信号的相似度，相似度越高，时间差精度越高，管道泄漏点的定位精度就越高。以管道上游采集的随机信号为基准，将管道下游的随机信号平移，对两处随机信号做互相关运算，找出相关值最大时两处信号的延迟时间，即为 $\Delta t$ 。

两随机信号 $x_1(n)$ 和 $x_2(n)$ 做互相关运算：

$$R(n) = E[x_1(n)x_2(n)] = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m [x_1(k)x_2(k-n)] \quad (5)$$

式中： $R(n)$ 为两随机信号 $x_1(n)$ 和 $x_2(n)$ 的相关值； $E$ 为数学期望； $k$ 为参变量； $m$ 为相关窗口采样点数。

### 3.2 定位效果

相关窗口采样点数取1 000(即20 s)，下游随机信号每次平移200个采样点(即4 s)，利用式(5)对管道上、下游采集到的随机信号做互相关运算，平移10次后得到两处随机信号白化滤波后的相关最大值和延迟时间，与白化滤波前的值对比(表1)可知：①白化滤波前，两处随机信号直接相关，每次平移得到的相关最大值中，最大量与最小量的比值(简称相关最大值之比)为1.42；白化滤波后的相关最大值之比为2.4，则白化滤波处理后的泄漏信号检测定位判决阈值优于处理

表1 某集输管道上、下游信号白化滤波前后相关最大值和延迟时间对比表

平移 采样点数	相关最大值		延迟采样点数	
	白化滤波前	白化滤波后	白化滤波前	白化滤波后
0	$1.65 \times 10^4$	$3.86 \times 10^2$	3	-14
200	$1.70 \times 10^4$	$4.72 \times 10^2$	9	-14
400	$1.44 \times 10^4$	$4.01 \times 10^2$	-14	-14
600	$1.62 \times 10^4$	$5.69 \times 10^2$	-55	-73
800	$1.43 \times 10^4$	$5.68 \times 10^2$	-69	-73
1 000	$1.79 \times 10^4$	$9.18 \times 10^2$	-103	-103
1 200	$1.59 \times 10^4$	$9.25 \times 10^2$	-103	-103
1 400	$1.55 \times 10^4$	$9.21 \times 10^2$	-169	-103
1 600	$1.43 \times 10^4$	$7.24 \times 10^2$	-163	-103
1 800	$2.01 \times 10^4$	$7.54 \times 10^2$	-189	-103
2 000	$2.03 \times 10^4$	$4.91 \times 10^2$	-189	-189

前。②白化滤波前，直接相关得到的延迟时间是随机变化的，无法实现泄漏定位；白化滤波后，经过互相关运算延迟时间相对稳定，其中5次平移得到的管道上、下游泄漏信号均在同一相关窗口，下游信号比上游信号延迟103个采样点，即2.06 s。利用式(4)计算得到发生微泄漏的位置距离采气井1.913 km，实际距离为1.911 km，误差为2 m，定位精度较高。

将管道上、下游采集的信号共 $1.2 \times 10^5$ 个采样点，按相关窗口1 000个采样点划分，共计120个相关窗口。对比两处信号白化滤波前后的相关峰(图6)可知，在白化滤波前，泄漏点相关峰为 $1.646 \times 10^7$ ，相关峰绝对值均值为 $8.508 \times 10^6$ ；在白化滤波后，泄漏点相关峰为 $6.512 \times 10^5$ ，相关峰绝对值均值为 $2.189 \times 10^5$ ，与相关峰绝对值相比，泄漏点相关峰显著增强(虚线框内)。

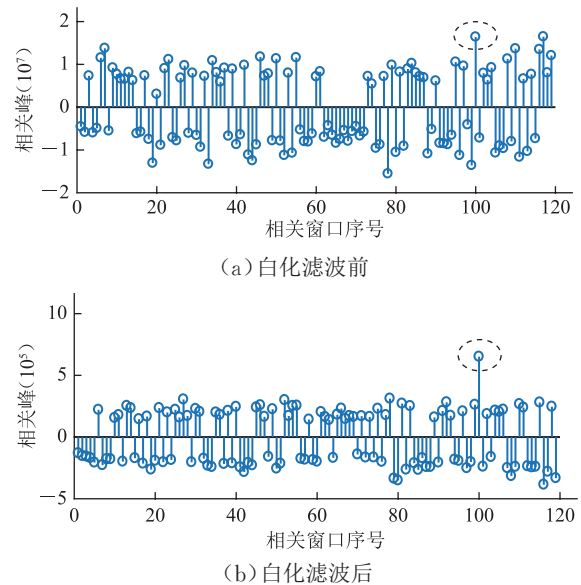


图6 某集输管道上、下游信号白化滤波前后相关峰对比图

为了量化信号白化滤波前后泄漏点信噪比改善程度<sup>[22]</sup>，将泄漏点信噪比 $R_{SN}$ 定义为泄漏点相关峰平方与相关峰平方均值的比值：

$$R_{SN} = 10 \lg \frac{R_{max}^2}{Q} \quad (6)$$

$$R_{max}^2 = \max \{R_i^2, i = 1, 2, \dots, M\} \quad (7)$$

$$Q = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M R_i^2 \quad (8)$$

式中： $R_{max}^2$ 为泄漏点相关峰平方； $Q$ 为相关峰平方均值； $R_i$ 为任一相关峰值； $M$ 为相关窗口个数。

利用式(6)计算得到管道上、下游信号白化滤波前后的信噪比，在白化滤波前，两处随机信号相关，泄漏点信噪比为5.732 dB；在白化滤波后，两处随机信号



相关, 泄漏点信噪比为 9.468 dB。因此, 白化滤波后与白化滤波前相比, 泄漏点信噪比改善了约 4 dB, 有效提高了泄漏信号检测定位的准确度。

## 4 结论

针对某油田采气井至集气站间天然气集输管道的微泄漏问题, 采用数据实时在线采集分析及自适应白化滤波处理技术, 开展天然气集输管道微泄漏信号检测定位方法研究。结果表明: 白化滤波后, 淹没在管道背景噪声中的微弱泄漏信号得到增强, 对比上下游两端信号白化滤波前后的功率谱可知, 自适应白化滤波算法能够消除低频分量, 使管道输入噪声信号的功率谱变得平坦且接近白噪声。根据互相关方法计算泄漏点信号传播至管道上、下游的时间差即可定位泄漏位置, 且白化滤波后的泄漏点信噪比改善了近 4 dB, 有效提高了泄漏信号检测定位精度。采用天然气集输管道上、下游两端信号先白化再相关的处理方法, 能够准确检测、定位淹没在管道背景噪声中的微弱泄漏信号。针对目前油气田集输管道的复杂监测条件, 建议进一步开展该方法在不同介质、压力等级及地形条件下的示范应用, 验证其适用性和准确性, 为油气田集输管道完整性管理, 特别是无泄漏示范区建设提供技术保障。

### 参考文献:

- [1] 赵竹, 董红军, 吴琼, 徐亮, 潘志榆, 王立坤, 等. 泄漏监测系统应用中的认识误区[J]. 油气储运, 2019, 38(1): 87-92.  
ZHAO Z, DONG H J, WU Q, XU L, PAN Z Y, WANG L K, et al. Misunderstandings on the application of leakage monitoring systems[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2019, 38(1): 87-92.
- [2] 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.  
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.
- [3] 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.  
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.
- [4] 赵会军, 武伟强, 王克华, 王小兵, 周宁, 王树立. 基于次声波法的油气管道泄漏检测与定位[J]. 油气储运, 2012, 31(3): 215-218.  
ZHAO H J, WU W Q, WANG K H, WANG X B, ZHOU N, WANG S L. Infrasonic wave-based leakage detection and location technology for oil & gas pipelines[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2012, 31(3): 215-218.
- [5] 李睿. 基于龙格-库塔法的天然气管道泄漏检测与定位[J]. 油气储运, 2019, 38(7): 816-821.  
LI R. Gas pipeline leakage detection and location based on Runge-Kutta method[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2019, 38(7): 816-821.
- [6] 杨红英, 华科, 叶昊, 王桂增. 基于 Hilbert-Huang 变换的输气管道泄漏诊断方法[J]. 化工学报, 2011, 62(8): 2095-2100.  
YANG H Y, HUA K, YE H, WANG G Z. Leak diagnosis of gas transport pipelines based on Hilbert-Huang transform[J]. CIESC Journal, 2011, 62(8): 2095-2100.
- [7] 王建国, 刘朋真, 王少锋, 高琳. 基于 EMD 和小波包降噪的压力管道微泄漏源定位研究[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2017, 36(4): 83-88.  
WANG J G, LIU P Z, WANG S F, GAO L. Research on the location of the micro pressure pipeline leak based on the EMD and wavelet packet[J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science), 2017, 36(4): 83-88.
- [8] 高华, 王宝光, 杜振辉, 乔晓威. 双谱在管道两点泄漏定位模型中的应用[J]. 纳米技术与精密工程, 2009, 7(5): 445-450.  
GAO H, WANG B G, DU Z H, QIAO X W. Application of bispectrum to two-leak location model in a pipeline[J]. Nanotechnology and Precision Engineering, 2009, 7(5): 445-450.
- [9] WALEED D, MUSTAFA S H, MUKHOPADHYAY S, ABDEL-HAFEZ M F, JARADAT M A K, DIAS K R, et al. An in-pipe leak detection robot with a neural-network-based leak verification system[J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(3): 1153-1165.
- [10] 邓飞云, 严震海, 王馨, 胡洋洋. 基于音波的复杂环境泄漏点检测算法[J]. 船海工程, 2018, 47(6): 1-4, 9.  
DENG F Y, YAN Z H, WANG X, HU Y Y. Research on leak detection algorithm based on sound wave in complex environment[J]. Ship & Ocean Engineering, 2018, 47(6): 1-4, 9.
- [11] 纪健, 李玉星, 纪杰, 张建军, 耿晓茹. 基于光纤传感的管道泄

- 漏检测技术对比[J]. 油气储运, 2018, 37(4): 368-377.
- JI J, LI Y X, JI J, ZHANG J J, GENG X R. Comparison between the pipeline leakage detection technologies based on optical fiber sensing[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2018, 37(4): 368-377.
- [12] 张玉香, 何鹏程, 李程, 朱琳. 天然气集输管道内腐蚀分析及防护[J]. 油气田地面工程, 2019, 38(8): 95-100.
- ZHANG Y X, HE P C, LI C, ZHU L. Analysis and protection for internal corrosion of natural gas gathering and transportation pipeline[J]. Oil-Gas Field Surface Engineering, 2019, 38(8): 95-100.
- [13] 王桂增, 叶昊. 流体输送管道的泄漏检测与定位[M]. 北京: 清华大学出版社, 2010: 42-53.
- WANG G Z, YE H. Leak detection and location for fluid transportation pipelines[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2010: 42-53.
- [14] 唐宋元, 杨健, 艾丹妮. 微弱信号处理理论[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2018: 44-47.
- TANG S Y, YANG J, AI D N. Theory of weak signal processing[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2018: 44-47.
- [15] 李启虎. 声呐信号处理引论[M]. 北京: 科学出版社, 2012: 133-138.
- LI Q H. Introduction to sonar signal processing[M]. Beijing: Science Press, 2012: 133-138.
- [16] 杨天霖, 杜选民, 周胜增. 预白化与小波变换联合的混响抑制方法研究[J]. 声学技术, 2021, 40(1): 110-116.
- YANG T L, DU X M, ZHOU S Z. Research on the reverberation suppression method combining pre-whitening and wavelet transform[J]. Technical Acoustics, 2021, 40(1): 110-116.
- [17] WADE G. Signal coding and processing[M]. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1994: 43-65.
- [18] 武伟强, 赵会军, 王克华, 王小兵, 周宁, 王树立. 次声波法输气管道泄漏检测系统的信号处理[J]. 油气储运, 2012, 31(5): 376-378.
- WU W Q, ZHAO H J, WANG K H, WANG X B, ZHOU N, WANG S L. Infrasound wave method-based signal processing of leak detection system of gas pipeline[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2012, 31(5): 376-378.
- [19] 费凡, 赵敏, 董绍华, 田野, 孙守宇. 非高斯噪声背景下的管道泄漏微弱信号自适应检测[J]. 油气储运, 2015, 34(7): 732-736.
- FEI F, ZHAO M, DONG S H, TIAN Y, SUN S Y. Adaptive detection of weak signals of pipeline leakage under background of non-Gauss noises[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2015, 34(7): 732-736.
- [20] 李玉星, 刘翠伟, 方丽萍, 李雪洁. 基于混沌振子的输气管道微泄漏音波信号处理方法[J]. 油气储运, 2017, 36(6): 683-688.
- LI Y X, LIU C W, FANG L P, LI X J. An acoustic signal processing method on micro-leakages of natural gas pipelines based on the chaotic oscillator[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2017, 36(6): 683-688.
- [21] 高希光, 李庭. 一种基于数字信道化的弱信号自相关检测技术[J]. 舰船电子对抗, 2014, 37(5): 23-26.
- GAO X G, LI T. A weak signal self-correlation detection technique based on digital channelization[J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2014, 37(5): 23-26.
- [22] 吴家勇, 李海娜, 王立坤, 许斌, 王洪超, 蔡永军, 等. 管道泄漏监测系统的性能评价指标[J]. 油气储运, 2017, 36(2): 209-213.
- WU J Y, LI H N, WANG L K, XU B, WANG H C, CAI Y J, et al. Performance evaluation indices of pipeline leak monitoring systems[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2017, 36(2): 209-213.
- (收稿日期: 2020-04-21; 修回日期: 2021-12-14; 编辑: 王雪莉)
- 
- 基金项目:** 中国石油天然气股份有限公司科学研究与技术开发项目“长庆油田 5 000 万吨持续高效稳产技术研究与应用”, 2016E-05.
- 作者简介:** 武刚, 男, 1985 年生, 高级工程师, 2011 年硕士毕业于北京科技大学机械设计与理论专业, 现主要从事油气管道及储存设施完整性管理技术研究及工程技术服务工作。地址: 陕西省西安市锦业二路 89 号, 710077。电话: 15191899113。Email: wugang010@cnpc.com.cn