

# 基于复合型倒谱理论的石化管道微泄漏点特征识别及实验研究

郭岩宝<sup>1</sup>, 张敏<sup>1</sup>, 何仁洋<sup>2</sup>, 林楠<sup>2</sup>, 王德国<sup>1\*</sup>

1 中国石油大学(北京)机械与储运工程学院, 北京 102249

2 中国特种设备检测研究院, 北京 100026

\* 通信作者, wdg@cup.edu.cn

收稿日期: 2022-06-01

国家重点研发计划(2018YFF0215003)和中国石油大学(北京)科研基金(2462023YQTD001)联合资助

**摘要** 随着能源需求的增多, 能源运输里程数越来越长。在能源运输领域, 石化管道是主要的运输方式, 其安全问题至关重要。石化管道的微小泄漏伴随流体内压的增加, 会随时发生火灾等安全事故, 影响整段管道和站场的安全生产。因此, 管道安全性检测是必要可少的。

在油气运输过程中, 由于外负载增加、冲蚀等因素造成管道局部应力集中, 管壁减薄, 表面出现泄漏点, 降低了管道安全性能。通过采用声检测装置建立管道微泄漏点安全检测, 测试实验中采集多组泄漏数据, 分别为  $\Phi 0$  mm、 $\Phi 1$  mm、 $\Phi 1.5$  mm 泄漏点等声信号。利用 Matlab 平台搭建处理声信号的数学模型, 分析了声信号的时频域特征。在频域中, 声信号出现了回声干扰、电磁干扰等问题。接着, 采用倒谱方法分析了声信号频域特征, 信号存在频域混叠问题, 不同泄漏点的特征无法区分。最后, 提出对数谱模型改进倒谱方法处理声信号。由于不同泄漏点具有不同分贝值和频率值等特征。借助分贝值和频率值特征有效地区分频谱混叠的声信号, 并避免了频域分析中出现的电磁干扰和回声干扰问题。

分析 3 组数据发现: 管道泄漏的孔径与声检测信号的分贝值和频率值有较大影响。随着泄漏孔径的增加, 管道检测声信号的分贝值越大, 频率也越来越大。此外, 管道在未泄漏状态下, 由于检测装置内部的电磁干扰也会影响管道声检测信号。进而, 以不同分贝值和频率值表征管道不同泄漏孔径, 其分贝值分别为  $N_{dB0}=0.17$  dB,  $N_{dB1}=0.052$  dB,  $N_{dB2}=0.24$  dB; 频率值分别为:  $f_0=603$  Hz,  $f_1=1879$  Hz,  $f_2=4049$  Hz。总之, 该方法在管道微泄漏领域具有重要的理论意义与应用价值。

**关键词** 石化管道; 微泄漏; 声信号; 复合型倒谱; 幅值对数谱

## Feature identification and experimental research on micro-leakage in petrochemical pipeline based on compound cepstrum theory

GUO Yanbao<sup>1</sup>, ZHANG Min<sup>1</sup>, HE Renyang<sup>2</sup>, LIN Nan<sup>2</sup>, WANG Deguo<sup>1</sup>

1 College of Mechanical and Transportation Engineering, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

引用格式: 郭岩宝, 张敏, 何仁洋, 林楠, 王德国. 基于复合型倒谱理论的石化管道微泄漏点特征识别及实验研究. 石油科学通报, 2023, 06: 845-852

GUO Yanbao, ZHANG Min, HE Renyang, LIN Nan, WANG Deguo. Feature identification and experimental research on micro-leakage in petrochemical pipeline based on compound cepstrum theory. Petroleum Science Bulletin, 2023, 05: 845-852. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2023.06.077

2 China Special Equipment Inspection and Research Institute, Beijing 100026, China

**Abstract** With the increase of energy demand, the mileage of energy transportation is getting longer and longer. In the field of energy transportation, the petrochemical pipeline is the main mode of transportation, and its safety is of vital importance. A small leakage of the petrochemical pipeline accompanied by internal pressure in the fluid can cause fire and other safety accidents at any time, affecting the safety of the entire section of the pipeline and station yard of the production. Therefore, pipeline safety inspection is necessary and indispensable.

In the process of oil and gas transportation, due to the increase of external load, erosion, and other factors, the local stress concentration of the pipeline is caused. The pipe wall is thinner, and the leakage point appears on the surface, which reduces the safety performance of the pipeline. Through the use of an acoustic detection device to establish safety detection of pipeline micro-leakage points, multiple groups of leakage data were collected in the experiment, including  $\Phi 0$  mm,  $\Phi 1$  mm, and  $\Phi 1.5$  mm leak points, respectively. The mathematical model for processing the acoustic signal was built by the Matlab platform, and the time-frequency domain characteristics of the acoustic signal were analyzed. In the frequency domain, acoustic signals appeared echo interference, electromagnetic interference, and other problems. Then, the cepstrum method was used to analyze the acoustic signals in the frequency domain, in which the signal had the problem of frequency domain aliasing to be a distinguished difficulty. Finally, the logarithmic spectral model was proposed to improve the cepstrum method to deal with the acoustic signal. Because different leakage points had different characteristics such as decibels and frequency values, the acoustic signals with spectral aliasing could be distinguished effectively with the help of different characteristic values, and the problems of electromagnetic interference and echo interference in frequency domain analysis could be avoided.

The analysis of three groups of data shows that the pore diameter of the pipe leakage has a large impact on the decibels and frequency values of the acoustic detection signal. With the increase of the leakage pore, the greater the decibel of the pipeline detection sound signal, and the greater the frequency. In addition, the pipeline in the state of non-leakage, due to electromagnetic interference within the detection device will also affect the pipeline acoustic detection signal. Furthermore, different decibels values and frequencies are used to distinguish different leakage pore diameter of pipelines decibel values with the decibel values of  $N_{dB0}=0.17$  dB,  $N_{dB1}=0.052$  dB,  $N_{dB2}=0.24$  dB, respectively. And, the frequency values are  $f_0=603$  Hz,  $f_1=1879$  Hz,  $f_2=4049$  Hz, respectively. In short, this method has important theoretical significance and application value in the field of pipeline micro leakage.

**Keywords** petrochemical pipeline; micro-leakage; acoustic signal; compound cepstrum; logarithmic amplitude spectrum

doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2023.06.077

## 0 前言

石化管道是输运油气的关键部件。服役期间,由于不可控外界因素造成管道泄漏,严重时会造成人员伤亡和经济损失。因此,对管道定期安全检查是必要的。常见管道检测方法有声发射检测<sup>[1-4]</sup>、漏磁检测<sup>[5-6]</sup>与超声波检测<sup>[7-8]</sup>等。上述方法能够有效测得管道泄漏与无泄漏状态,辨识不同泄漏特征,依据压力容器安全评价准则评估管道安全等级<sup>[9-11]</sup>,完成管道安全建设。

目前识别较大泄漏口管道缺陷精度高,但对于微泄漏识别精度较低、研究技术相对薄弱。声检测技术刚好弥补了管道微泄漏检测这一空缺。声检测方法是利用声波的瞬间弹性现象揭示管道局部应力损伤的检测技术,分析处理声信号,获取管道缺陷特征<sup>[12]</sup>和定位<sup>[13]</sup>信息。常见分析方法有小波包降噪<sup>[12]</sup>、EMD降噪以及SWT变换等,实现对数据滤波降噪处理。张源等人<sup>[12]</sup>利用EMD和小波包实现信号滤波和特征提取,

利用BP神经网络对小波包提取的特征样本进行识别。Davoodi等人<sup>[14]</sup>和Magidi等人<sup>[15]</sup>利用小波方法对声信号进行去噪和特征识别,完成泄漏点定位。徐源等人<sup>[13]</sup>利用小波与平均滤波相结合方法对信号分析,借助互相关算法计算各传感器之间的延迟时间完成缺陷定位。Mostafapour与Davoodi<sup>[16]</sup>研究了泄漏引起埋地管道声信号的非线性振动,采用小波变换去除信号中的噪声,与FFT相比,去噪效果显著。上述分析方法对管道泄漏研究颇多,但面对管道微小泄漏还存在识别不准的问题。

因此,本文提出一种复合型倒谱分析方法实现管道微泄漏检测与识别,该方法有效地区分频谱混叠的声信号,避免了频域分析中出现的电磁干扰和回声干扰问题。利用不同分贝值和频率值特征进行缺陷表征,实现管道有效标识。首先,建立管道微泄漏声检测平台,采集检测目标分别为 $\Phi 0$  mm、 $\Phi 1$  mm、 $\Phi 1.5$  mm等泄漏口的声信号。分析声信号的时频特性,发现声信号在频域特征中出现了回声干扰和电磁干扰,无法

读取有效信息。借助倒谱方法<sup>[17-18]</sup>对管道信号进行预处理,发现分析结果中存在信号频域混叠问题,无法提取信号的特征,表征声信号的频域特征难度较大。为此,引入对数频谱结构<sup>[19-20]</sup>对倒谱分析方法进行改进,直观地得到管道泄漏口的声信号频域特征,并利用不同分贝值和频率值实现了管道微泄漏表征。总之,改进后的复合型倒频谱方法能够实现石化管道微泄漏声检测信号降噪处理与识别,具有实用性和有效性。

### 1 管道微泄漏声检测系统

为了研究管道微泄漏声检测方法及信号分析处理算法,首先搭建了实验平台,包括:多根管道(Φ0 mm、Φ1 mm、Φ1.5 mm等泄漏口)、声检测传感装置、信号放大装置、信号采集装置及计算机如图1。管道内部通入0.2 MPa的空气,管道之间通过管道法兰连接,泄漏气体从泄漏口直接排出。声传感器采集

管道内部声音信号,通过前置放大器、信号采集器,将采集的声信号传输到电脑中储存。接着数据完成分析处理。

### 2 声信号的复合型倒频谱分析理论

管道微泄漏声信号分析流程如图2。首先,信号进行归一化处理。接着,归一化后数据完成实倒谱分析与倒谱编辑,得到残余指数谱和复值残余谱,实现信号预白化过程。由于管道泄漏声信号是一组宽频带信号,引入幅值对数谱对其结构改进,能够有效地提取微泄漏声信号的特征。

#### 2.1 倒谱分析

管道微泄漏声检测信号是一组时间序列的数据,由目标声源信号和随机噪声信号组成,表达公式如下:

$$x(t) = x_1(t) + x_2(t) \tag{1}$$

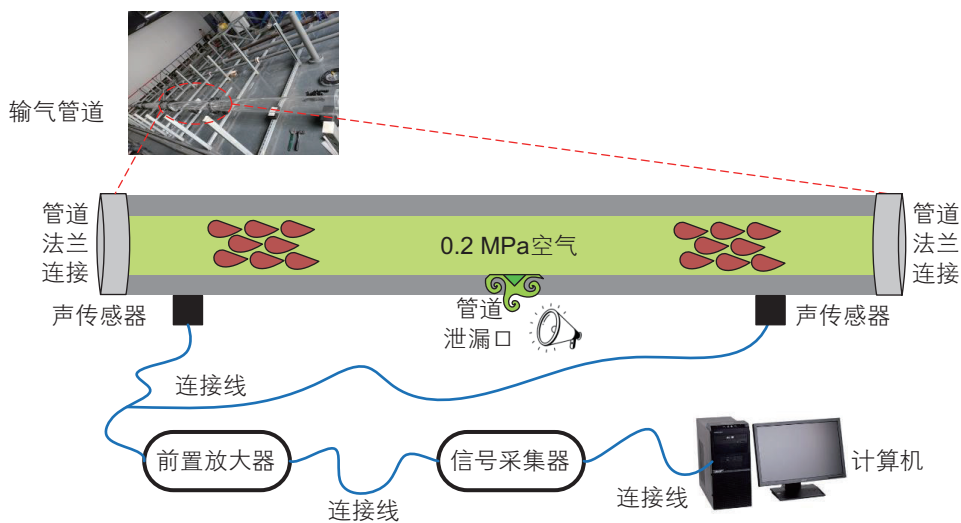


图1 管道泄漏声检测系统

Fig. 1 Acoustic detection system for pipeline leakage

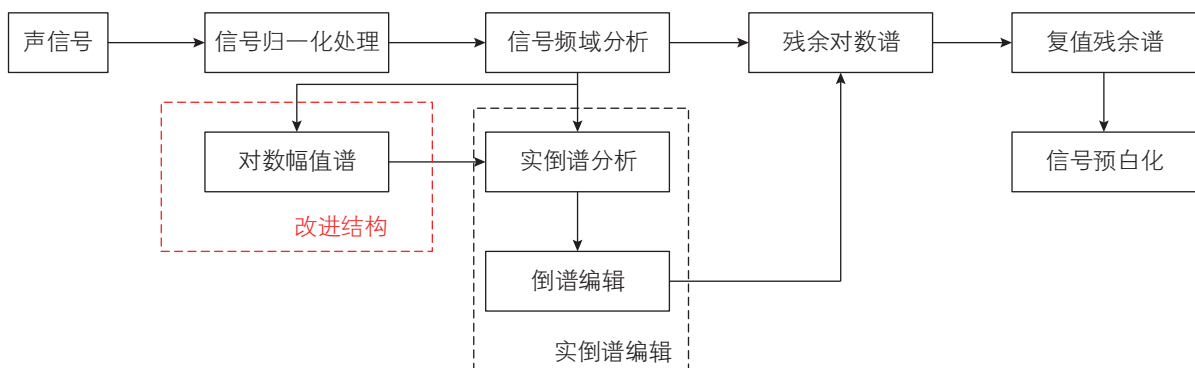


图2 管道泄漏声信号处理流程图

Fig. 2 Pipeline leakage acoustic signal processing flow chart

式中： $x(t)$  表示管道采集声信号； $x_1(t)$  是目标声源信号； $x_2(t)$  是随机噪声信号。

对管道采集信号进行傅里叶变换，其结果为：

$$\mathcal{F}_T(w) = \mathcal{F}[x(t)] = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)e^{-i\omega t} dt \quad (2)$$

式中： $\mathcal{F}_T(w)$  为傅里叶变换幅值。对傅里叶变换幅值的模进行功率谱计算，计算过程为：

$$S_x(w) = |X(w)|^2 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{|\mathcal{F}_T(w)|^2}{T} dw \quad (3)$$

式中： $S_x(w)$  为声信号的功率谱，能够平均统计单位频域带的信号能量值。接着对功率谱结果取对数，提高声信号的鲁棒性，其计算公式为：

$$\begin{aligned} \hat{X}_\omega(e^{j\omega}) &= \log X_\omega(e^{j\omega}) \\ &= \log |X_\omega(e^{j\omega})| + j \arg[X_\omega(e^{j\omega})] \\ &= F^{-1}(\log(X_1(e^{j\omega}))) + F^{-1}(\log(X_2(e^{j\omega}))) \end{aligned} \quad (4)$$

式中： $\hat{X}_\omega(e^{j\omega})$  为声信号的对数谱计算结果，进一步对对数谱结果完成声信号的逆变换，即可得到管道泄漏声信号的复倒谱得计算公式为：

$$\begin{aligned} \hat{x}_\omega(n) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \hat{X}_\omega(e^{j\omega}) \cdot e^{j\omega n} d\omega \\ &= \hat{x}_1(n) + \hat{x}_2(n), (\hat{x}(n) \text{ 为 } x(n) \text{ 的倒谱}) \end{aligned} \quad (5)$$

式中： $\hat{x}_\omega(n)$  为声信号的复倒谱的结果。 $n$  为倒谱的分帧取样值。式(2)–(5)是对管道微泄漏声信号的倒谱处理，完成声信号的双边功率谱对数加权，再进行傅里叶逆变换。进一步，获得声信号的倒谱结果。倒谱编辑是倒谱的解卷过程，其计算公式为：

$$\hat{X}_w(e^{j\omega}) = F[\hat{x}_w(n)] \quad (6)$$

$$X(e^{j\omega}) = \exp[\hat{X}_w(e^{j\omega})] \quad (7)$$

$$x(n) = F^{-1}[X(e^{j\omega})] \quad (8)$$

## 2.2 对数谱分析

由于管道泄漏声信号是一组宽带信号，因此在利用倒谱分析管道微泄漏声信号时，结果存在频域混叠问题。因此，引入对数谱改进倒谱方法，有效避免了混叠问题。为此，对数谱改进倒谱方法，主要表现为声信号和随机噪声信号的频域幅值模的线性叠加，表达式为：

$$\ln|S(f)| = \ln|X_1(f)| + \ln|X_2(f)| \quad (9)$$

式(9)中， $S$  为声信号的复数， $X_1$  为目标声源信号的复数， $X_2$  为随机信号的复数。与式(3)信号功率谱相比，

对数谱有效地滤掉低频段的杂波信息，有助于分解出信号微泄漏点声信号特征。

## 3 管道微泄漏特征识别实验

### 3.1 声信号数据采集

按照图1构建石化管道微泄漏声检测平台，完成微泄漏管道检测实验，获取不同泄漏孔径管道泄漏数据，主要有 $\Phi 0$  mm、 $\Phi 1$  mm、 $\Phi 1.5$  mm等泄漏孔的数据。实验时检测装置的声波探头距泄漏孔的距离为10 m，管道内压为0.2 MPa，外压为标准大气压。信号采样频率为30 kHz，采样时间60 s。采集的原始时域信号如图3。

根据图3可知，管道微泄漏声信号在一维时间序列上杂乱无章，没有规律性的非周期性宽频带信号。为了能够有效剥离声信号之间的粘连，需要对时域信号进行傅里叶变换，获得信号的频域图，其结果如图4。

从图4声信号的频谱可以看出，在低频段， $\Phi 0$  mm信号频域特征较为敏感，杂波比较多，主要是因为电磁干扰引起的幅值波动，无明显的声音波动，预示着无明显泄漏点信息；对于 $\Phi 1$  mm和 $\Phi 1.5$  mm信号频域特征而言，两段信号虽无电磁干扰，但在 $f = 5000$  Hz出存在明显突峰。这是由于管道空间产生的回波干扰。进而，需要进一步处理声信号频域特征，避免出现该问题。

从图4(b)和(c)可知， $\Phi 1$  mm和 $\Phi 1.5$  mm信号频

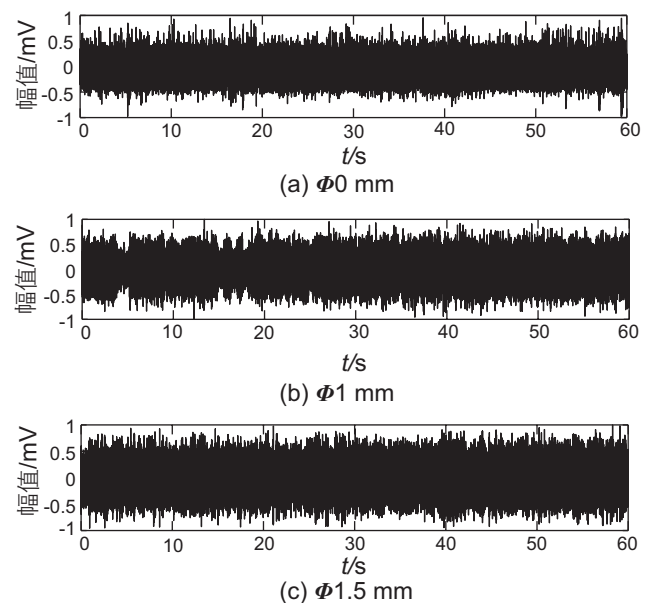


图3 管道微泄漏的时域信号

Fig. 3 Time domain signal of pipeline micro-leakage

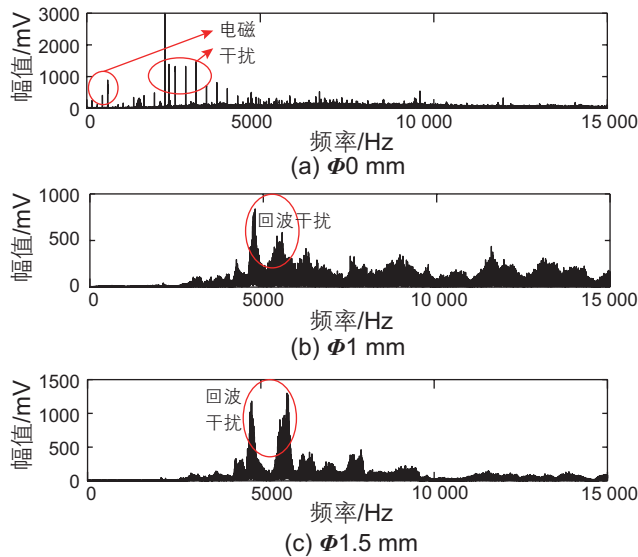


图4 管道微泄漏的频域信号  
Fig. 4 Frequency domain signal of pipeline micro-leakage

域特征不同之处在于：中高频段， $\Phi 1$  mm较为敏感，存在一组  $A > 500$  mV的尖锐波峰和多组  $A < 500$  mV小波峰，且在  $f = [4500, 5100]$  Hz之间存在尖锐的回波波峰；在高频段， $\Phi 1$  mm存在低幅值的波峰，这是因为泄漏点孔隙太小，管道内部出现涡流引发的声信号中杂波干扰。在中频段， $\Phi 1.5$  mm较为敏感，存在两组  $A > 1000$  mV的尖锐回波波峰和多组  $A < 500$  mV小波峰，并且在  $f = [4500, 6000]$  Hz之间存在两组尖锐的波峰，在高频段， $\Phi 1.5$  mm存在低幅值的波峰。

3.2 基于倒谱声信号处理分析

采用倒谱方法对管道进行预白化处理，图5为声信号的实倒谱结果。图5中， $\Phi 0$  mm信号为无回声信号，实倒谱上表现为一个有规律的微幅波动周期信号； $\Phi 1$  mm信号的实倒谱上表现为一个喇叭状，在  $T = 40 \tau/s$ 后趋于收敛； $\Phi 1.5$  mm信号的实倒谱同样表现为一个喇叭状，在  $T = 50 \tau/s$ 后趋于收敛。

对图5的实倒谱处理结果完成倒谱编辑，并结合声信号基频特性，对实倒谱的倒频段设置0处理，划分数据信号的高低频段，最后逆变换得到泄漏白化后的频域信号，其结果如图6。图6(a0)、(b0)、(c0)是对低基频进行倒谱编辑结果，图6(a1)、(b1)、(c1)是对高基频进行倒谱编辑结果。结合两组可知，图6(a0)中 $\Phi 0$  mm信号在低频段的幅值可明显观察到，信号杂乱无章，存在一定频率的电磁干扰；其相应频率分别为  $f_1 = 150$  Hz,  $f_2 = 302$  Hz,  $f_3 = 450$  Hz,  $f_4 = 603$  Hz，进而证明电磁干扰的存在。进而，以最大频率  $f_4 = 603$  Hz表征此信号特征。而图6(b0)中 $\Phi 1$  mm信号和图6(c0)

中 $\Phi 1.5$  mm信号在中频段的幅值可明显观察到，但两组信号存在更多的粘连且包络不明确。因此对两组信号进行改进。

在低基频段， $\Phi 0$  mm声信号分贝值在0.2 dB以内如图6(a0)；其次， $\Phi 1$  mm泄漏口声信号分贝值保持在0.8 dB以内见图6(b0)；最大的为 $\Phi 1.5$  mm泄漏口声信号分贝值为1.5 dB以内如图6(c0)。在高基频段， $\Phi 1.5$  mm泄漏口声信号分贝值保持在150 dB以内如图6(a1)；其次， $\Phi 1$  mm泄漏口声信号分贝值为60 dB以内见图6(b1)；最小的为 $\Phi 0$  mm声信号分贝值在20 dB以内如图6(c1)。最后在实倒谱编辑过程中，选择滤掉高基频，结果如图7。

根据图7声信号实倒谱编辑预白化处理结果可知，管道声信号包络结果相对清晰，频域信号存在多个峰值，频域混叠造成无法从频域中获得数据有效信息。因此，改进倒谱方法完成声信号重新分解。

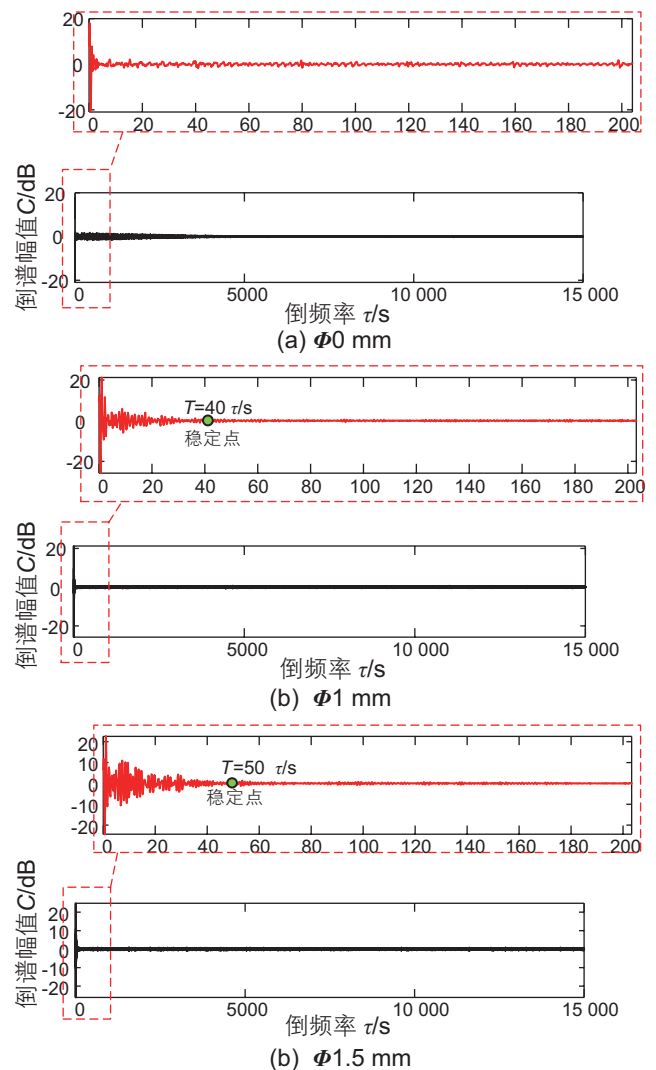


图5 微泄漏声信号数据的实倒谱图  
Fig. 5 Real Cepstrum of micro-leakage acoustic signal data

### 3.3 基于改进的倒谱声信号处理分析

引入幅值对数谱改进倒谱结构，以一种非线性处理手法将数据信息进行平滑，得到无偏估计值，幅值对数谱结果如图 8。

由图 8 可知，声信号的对数谱结果对  $\Phi 1$  mm、 $\Phi 1.5$  mm 泄漏口声信号的光滑度影响较大，对  $\Phi 0$  mm 声检测信号几乎无影响。改进后的方法直接滤掉少量非线性杂波信号，利于后续数据倒谱分析。进而，3

组声信号的低基频预白化分析结果如图 9。

图 9 改进后倒谱的声信号实倒谱编辑预白化处理结果能够直观地看出不同泄漏点具有不同分贝值和频率值等特征。从图 9(b) 知， $\Phi 1$  mm 泄漏口的频率点为  $f_1 = 1879$  Hz；图 9(c) 可知， $\Phi 1.5$  mm 泄漏口的频率点为  $f_2 = 4049$  Hz。因此，结合图 5 的  $\Phi 0$  mm 声信号的结果，进一步汇总不同泄漏口径的频率特征如图 10。

图 10 可知，图 10(a) 的  $\Phi 0$  mm 声信号主要表现为电磁干扰引起的频率波动，以最大频率表征

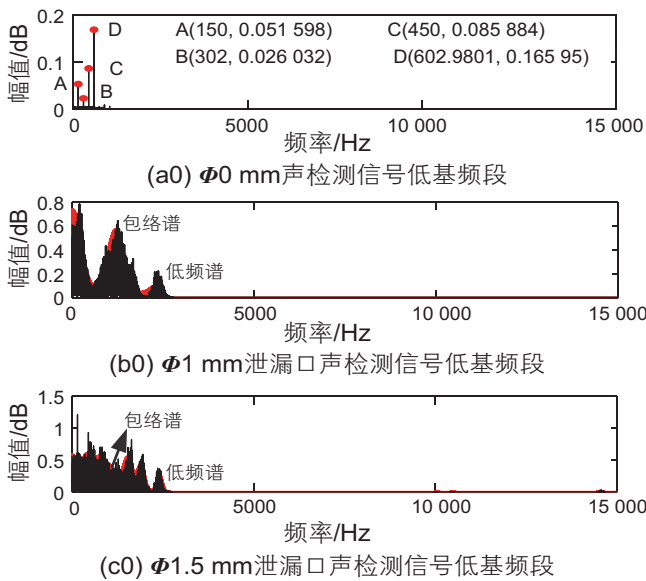


图 6 倒谱高低基频域结果分析图

Fig. 6 Analysis of cepstral high and low fundamental frequency domain results

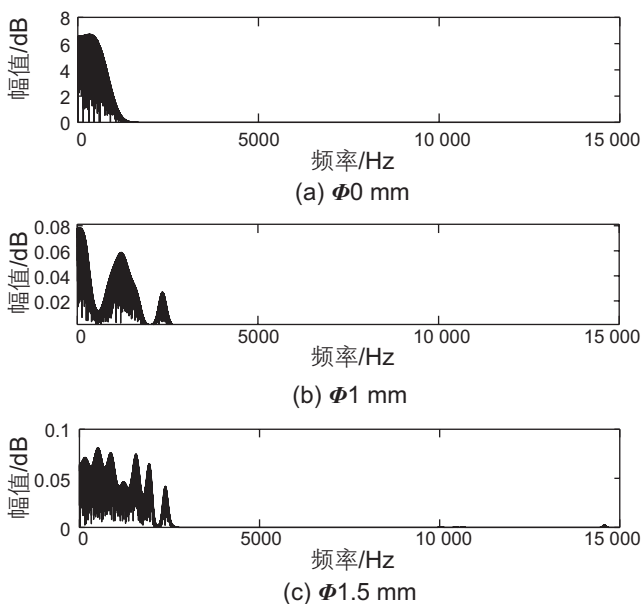


图 7 声信号实倒谱编辑预白化处理结果

Fig. 7 Real cepstrum editing and prewhitening results of acoustic signal

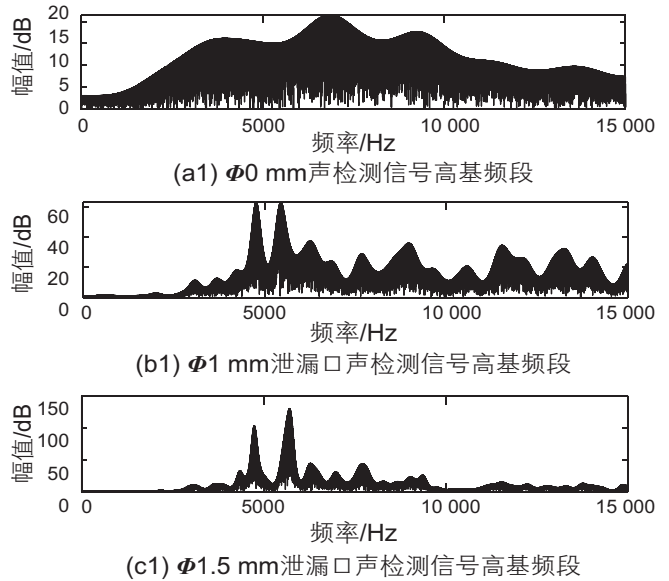


图 8 声信幅值对数谱结果

Fig. 8 Results of acoustic signal amplitude logarithmic spectrum

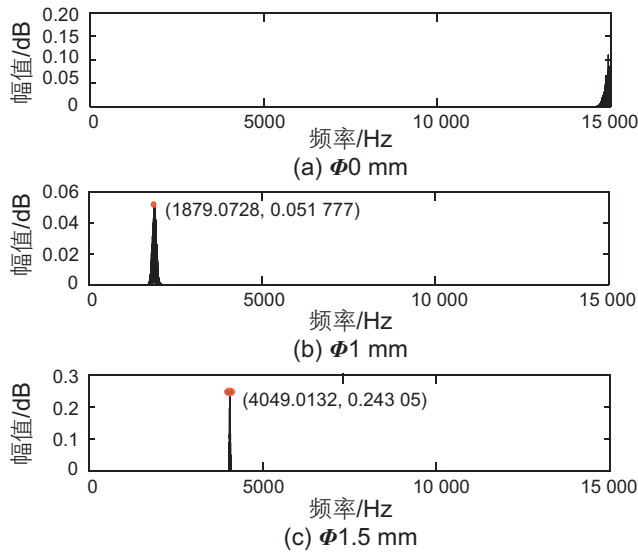


图9 改进后倒谱的声信号实倒谱编辑预白化处理结果

Fig. 9 Real cepstrum editing and prewhitening results of acoustic signal of modified cepstrum

该信号为 $f_0 = 603$  Hz, 声信号分贝值为 0.17 dB; 图 10(b)的 $\Phi 1$  mm声信号存在一个频率, 频率特征为 $f_1 = 1879$  Hz, 声信号分贝值为 0.052 dB; 图 10(c)的 $\Phi 1.5$  mm声信号只存在单个频率点, 频率值为 $f_2 = 4049$  Hz, 声信号分贝值为 0.24 dB。因此, 根据频率特征和分贝值能够区分 3 组不同管道微泄漏声信号。

#### 4 结论

本文提出了一种复合型倒谱声信号处理方法可以有效区分频谱混叠的声信号, 避免了数据分析过程中出现的电磁干扰和回声干扰问题。建立声检测装置完成 $\Phi 0$  mm、 $\Phi 1$  mm、 $\Phi 1.5$  mm等泄漏点声信号采集。分析 3 组声信号可知, 不同泄漏点具有不同分贝值和

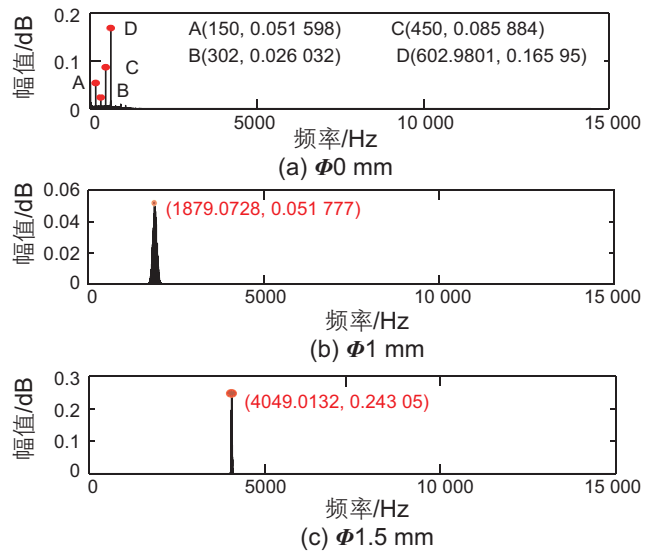


图10 3组声信号数据结合分析图

Fig. 10 Combined analysis of three groups of acoustic signal data

频率值等特征。依据分贝值和频率值特征能够区别微泄漏点。因此, 该方法在管道微泄漏领域具有一定的理论意义与应用价值。

(1)借助声检测装置采集管道微泄漏声信号, 并分析声信号。在信号时域及频域分析过程中, 发现声信号是一个非线性的宽频带信号, 信号中存在回波干扰和电磁干扰。

(2)引入对数幅值谱改进倒谱结构。频域上, 避免了 3 组信号出现频域混叠问题。同时, 有效识别了 3 种泄漏信号的特征, 包含频率值和分贝值特征。 $\Phi 0$  mm声信号频率特征为 $f_0 = 603$  Hz, 声信号分贝值为 0.17 dB;  $\Phi 1$  mm声信号存在一个频率, 频率特征为 $f_1 = 1879$  Hz, 声信号分贝值为 0.052 dB;  $\Phi 1.5$  mm声信号频率值为 $f_2 = 4049$  Hz, 声信号分贝值为 0.24 dB。

#### 参考文献

[1] 张延兵, 周琦, 孙志涛. 局部埋地输油管段腐蚀声发射监测试验研究[J]. 装备制造技术, 2021, (10): 54-57. [ZHANG Y B, ZHOU Q, SUN Z T. Experimental study on acoustic emission monitoring of local buried pipeline segment corrosion[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2021, (10): 54-57.]

[2] 马云修, 程伟, 郭雅迪, 等. 大型原油储罐声发射检测标定定位的可靠性研究[J]. 石油化工腐蚀与防护, 2020, 37(04): 1-6. [MA Y X, CHENG W, GUO Y D, et al. Study on reliability of acoustic emission detection calibration and positioning of large crude oil storage tanks[J]. Petrochemical Corrosion and Protection, 2020, 37(04): 1-6.]

[3] 王少锋, 陈智豪, 董丽丽, 等. 运载火箭管道微泄漏声发射检测仪[J]. 现代制造工程, 2020, (04): 153-158. [WANG S F, CHEN Z H, DONG L L, et al. Acoustic emission detector for micro-leakage of launch vehicle pipeline[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2020, (04): 153-158.]

[4] 陈智豪. 运载火箭管道连接处微泄漏声发射检测研究[D]. 内蒙古: 内蒙古科技大学, 2020. [CHEN Z. Research on acoustic emission detection of micro-leakage in carrier rocket pipeline joint[D]. Inner Mongolia: Inner Mongolia University of Science and Technology, 2020.]

- [5] 杨理践, 曹辉. 基于深度学习的管道焊缝法兰组件识别方法[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(02): 193–202. [YANG L J, CAO H. Recognition method of pipeline weld flange components based on deep learning[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(02): 193–202.]
- [6] KIM J W, PARK S. Magnetic flux leakage sensing and artificial neural network pattern recognition-based automated damage detection and quantification for wire rope non-destructive evaluation[J]. Sensors, 2018, 18(1): 109.
- [7] 王郑, 吴新团, 杨爱萍. 超声波加相控阵超声波技术在管道检测中的应用[J]. 石油工业技术监督, 2021, 37(12): 33–35+41. [WANG Z, WU X T, YANG A P. Application of ultrasonic and phased array ultrasonic technology in pipeline inspection[J]. Petroleum Industry Technical Supervision, 2021, 37(12): 33–35+41.]
- [8] 赵诚. 高温环境下压力容器与管道的超声波检测技术[J]. 化工管理, 2018, (27): 155–156. [ZHAO C. Ultrasonic testing technology of pressure vessel and pipeline in high temperature environment[J]. Chemical Management, 2018, (27): 155–156.]
- [9] GUO Y, MENG X, WANG D, et al. Comprehensive risk evaluation of long-distance oil and gas transportation pipelines using a fuzzy Petri net model[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2016, 33: 18–29.
- [10] GUO Y, MENG X, MENG T, et al. A novel method of risk assessment based on cloud inference for natural gas pipelines[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2016, 30: 421–429.
- [11] 郭岩宝, 张政, 王德国, 等. 考虑微动磨损的法兰垫片泄漏路径研究[J]. 石油科学通报, 2020, 03: 420–428. [GUO Y B, ZHANG Z, WANG D G, et al. Study of the flange gasket leakage path under fretting wear[J]. Petroleum Science Bulletin, 2020, 03: 420–428.]
- [12] 张源, 杜莎莎, 顾纯巍, 等. 基于实验研究的油气钻采水平两相流管道泄漏声发射检测[J]. 中国海上油气, 2021, 33(01): 158–165. [ZHANG Y, DU S S, GU C W, et al. Acoustic emission detection of pipeline leakage in horizontal two-phase flow of oil and gas drilling and production based on experimental research [J]. China Offshore Oil and Gas, 2021, 33(01): 158–165.]
- [13] 徐源, 邢兰昌, 张树立. 基于多通道声发射检测系统的管道气体泄漏位置定位方法研究[J]. 计算机测量与控制, 2020, 28(04): 36–40. [XU Y, XING L C, ZHANG S L. Research on pipeline gas leakage location method based on multi-channel acoustic emission detection system[J]. Computer Measurement and Control, 2020, 28(04): 36–40.]
- [14] DAVOODI S, MOSTAFAPOUR A. Modeling acoustic emission signals caused by leakage in pressurized gas pipe[J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2013, 32(1): 67–80.
- [15] AHADI M, BAKHTIAR M S. Leak detection in water-filled plastic pipes through the application of tuned wavelet transforms to acoustic emission signals[J]. Applied Acoustics, 2010, 71(7): 634–639.
- [16] MOSTAFAPOUR A, DAVOODI S. A theoretical and experimental study on acoustic signals caused by leakage in buried gas-filled pipe[J]. Applied Acoustics, 2015, 87: 1–8.
- [17] GHAZALI M F, BECK S B M, SHUCKSMITH J D, et al. Comparative study of instantaneous frequency based methods for leak detection in pipeline networks[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2012, 29: 187–200.
- [18] 余文晶, 何琳, 徐荣武, 等. 基于倒谱分析的低信噪比瞬态声信号检测方法[J]. 海军工程大学学报, 2019, 31(05): 63–69. [YU W J, HE L, XU R W, et al. Low signal-to-noise ratio transient acoustic signal detection method based on cepstrum analysis[J]. Journal of Naval University of Engineering, 2019, 31(05): 63–69.]
- [19] 茅宇, 杨刘, 颜亮亮, 等. 基于VMD的永磁同步电机初期匝间短路故障检测方法[J]. 电机与控制应用, 2022, 49(09): 66–74. [MAO Y, YANG L, YAN L L, et al. Detection method of primary interturn short circuit fault for permanent magnet synchronous motor based on VMD[J]. Electric Machines & Control Applications, 2022, 49(09): 66–74.]
- [20] 林朗, 王让定, 严迪群, 等. 基于逆梅尔对数频谱系数的回放语音检测算法[J]. 电信科学, 2018, 34(05): 90–98. [LIN L, WANG R D, YAN D Q, et al. Playback speech detection algorithm based on inverse Meir logarithmic spectrum coefficient[J]. Telecommunications Science, 2018, 34(05): 90–98.]

(编辑 马桂霞)