

# 声波法在输油管道上的可检测泄漏率分析\*

郎宪明<sup>1</sup>, 朱永强<sup>1</sup>, 袁文强<sup>1</sup>, 孟强<sup>1</sup>, 蔡泽枫<sup>2</sup>

(1. 辽宁石油化工大学信息与控制工程学院 抚顺, 113001)

(2. 中国民用航空华北地区空中交通管理局 北京, 100020)

**摘要** 为了确保输油管道出现泄漏时能够及时检测到泄漏,对声波法在输油管道上的可检测泄漏率进行了分析。首先,建立了声波产生和传播衰减模型,根据模型分析了声波在管道内的衰减性,得到管道两端声波衰减幅值的计算方法;其次,采用基于互信息优化的自适应噪声完备集合经验模态分解(complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise,简称CEEMDAN)和互谱分析相结合的去噪算法对采集的信号进行去噪,并实验验证了衰减模型可准确估计声波的衰减幅值,去噪算法可以有效消除信号中的噪声;最后,分析了管道特性与声波法在输油管道上的可检测泄漏率之间的关系。研究表明,管道特性在一定程度上决定了声波法的可检测泄漏率,声波法在输油管道上的最小可检测泄漏率可达0.45%。

**关键词** 声波法;输油管道;自适应噪声完备集合经验模态分解;互信息;互谱分析;可检测泄漏率

**中图分类号** TP273;TE832;TH89

## 引言

对管道泄漏检测技术进行研究,及时检测到泄漏,对防止出现重大事故和损失具有重要意义。学者们对管道泄漏检测技术进行了大量研究<sup>[1-2]</sup>。根据泄漏检测原理,检测方法主要分为非声学检测和声学检测2类。非声学检测方法有分区检漏法<sup>[3]</sup>、负压波法<sup>[4]</sup>等,但在应用上存在反应不灵敏、检测精度差等不足。声学检测方法是对泄漏产生的音波信号进行分析,利用管道内介质的幅值脉动对泄漏进行检测。相较于非声学检测方法,声波法<sup>[5]</sup>具有实时性强、定位精确、高灵敏度和误报率低等优点。可见,声波法的应用具有广泛前景。目前,对于声波法在输油管道内的传播特性以及可检测泄漏率的研究较少,而声波在管内的传播特性在一定程度上影响了泄漏的可检测性。因此,研究声波法在管道上的可检测性具有重要意义<sup>[6]</sup>。

针对泄漏声波在管道上的传播特性,刘翠伟等<sup>[7]</sup>建立了声波在天然气管道内传播时的衰减模型,并实验验证了衰减模型的可行性和准确性。孟令雅等<sup>[8]</sup>建立了管道的实时瞬态模型,对管道的运行工况进行实时检测,在一定程度上减小了误报率。

孙良等<sup>[9]</sup>建立了负压波在管道内的产生和衰减模型,通过实验验证了模型的准确性,进一步分析了管道采用负压波法进行泄漏检测时的可检测泄漏率的问题。Muggleton等<sup>[10]</sup>得到了管道内的声波和振动波耦合的频散效应,建立了声波的传播模型,并分析了声波的衰减特性。Malekpour等<sup>[11]</sup>利用遗传优化算法建立了逆向瞬态分析模型,该模型能够在各种瞬态和稳态状态下测量小泄漏。以上工作没有对声波法在管道上可检测泄漏问题进行深入研究。

笔者建立了声波在输油管道内的产生和衰减模型,通过现场实验分析了衰减模型的准确性。在信号去噪方面,笔者提出基于互信息优化的自适应噪声完备集合经验模态分解和互谱分析相结合的去噪算法,通过互信息和互谱分析获得模态函数分量并重构信号,并通过实验验证了算法的有效性,为智慧管网的铺设及设计提供了参考。

## 1 声波的产生与衰减模型

### 1.1 泄漏声波的产生

输油管道发生泄漏时,由于管道内具有很高的

\* 国家自然科学基金资助项目(62073158);中国博士后科学基金资助项目(2020M660125);辽宁省博士科研启动基金计划资助项目(2019-BS-158);辽宁省教育厅资助项目(L2020017);辽宁石油化工大学引进人才科研启动基金资助项目(No.2019XHHL-008);辽宁省自然科学基金计划面上项目(2023-MS-289);辽宁省教育厅基本科研项目(JYTMS20231441)  
收稿日期:2021-11-05;修回日期:2021-11-26

压力,所以管内介质会在很短的时间内大量外泄。在管道内,泄漏口附近的介质会出现冲激波,进而产生泄漏声波。泄漏声波的幅值表示为

$$p = \begin{cases} p_0 e^{-(t-t_1)/t_0} & (t_1 \leq t) \\ 0 & (t_1 > t) \end{cases} \quad (1)$$

其中: $t_0$ 为时间常数,对应声波衰减为原幅值的时刻; $t_1$ 为声波产生的时刻; $p_0$ 为 $t_1$ 时刻所对应的声波幅值。

## 1.2 衰减模型

管道发生泄漏时,泄漏处产生声波信号,声波信号在输油管道内传播时的衰减公式<sup>[12]</sup>为

$$P = P_0 e^{-\sigma \partial x} \quad (2)$$

其中: $P$ 为距离泄漏点 $x$ 处的声波幅值; $P_0$ 为泄漏点处对应的声波幅值; $\sigma$ 为修正经验系数; $\partial$ 为黏热吸收系数; $\sigma$ 和 $\partial$ 的数值需要根据现场情况确定。

修正经验系数只有数值范围,没有具体的数值。为了避免取值不同造成的差异,将 $\sigma$ 和 $\partial$ 合并为一项,两者合并后称为衰减系数,其表达式为

$$\beta = \sigma \partial \quad (3)$$

其中: $\beta$ 根据现场情况取值。

式(2)又可以表示为

$$P = P_0 e^{-\beta x} \quad (4)$$

采用泄漏率 $k$ 衡量泄漏量的大小,表达式为

$$k = (v_{1,1} - v_{2,1})/v_{1,1} \quad (5)$$

其中: $v_{1,1}$ 和 $v_{2,1}$ 分别为管道上同一处在泄漏前后的流速。

泄漏点处产生的声波幅值<sup>[10]</sup>表示为

$$p_0 = \rho \alpha_s \frac{kv_0}{2-k} \quad (6)$$

其中: $\alpha_s$ 为泄漏产生的声波波速; $v_0$ 为管道泄漏之前管内液体的流速。

当管道某一点发生泄漏时,由于扰动产生的声波幅值为 $|\Delta p|$ ,则距离该点 $l$ 处的声波衰减幅值为

$$|\Delta p_l| = |\Delta p| e^{-\beta l} \quad (7)$$

当距离管道首站 $x$ 处发生泄漏,且泄漏率为 $k$ 时,在管道首末站检测到的声波幅值为

$$\begin{cases} |\Delta P_s| = |p_0| e^{-\beta x} \\ |\Delta P_m| = |p_0| e^{-\beta(L-x)} \end{cases} \quad (8)$$

其中: $\Delta P_s$ 为管道首站检测到的声波幅值变化; $\Delta P_m$ 为在管道末站检测到的声波幅值变化; $L$ 为管道的总长度。

## 2 泄漏信号的滤波去噪

### 2.1 自适应噪声完备集合经验模态分解

CEEMDAN是在经验模式分解(empirical mode decomposition,简称EMD)的基础上进行优化改进,并借鉴了集合经验模态分解(ensemble empirical mode decomposition,简称EEMD)方法中加入高斯噪声和通过多次叠加并平均来抵消噪声的思想,有效解决了EEMD算法的缺点。该方法是把自适应的白噪声加入到EEMD的各个阶段,通过计算唯一的余量信号来获得各个本征模态函数(intrinsic modal function,简称IMF)。

定义:符号 $E_j(\cdot)$ 为信号经EMD后的第 $j$ 阶本征模态函数分量; $\omega^i$ 为满足标准正态分布的白噪声; $x[n]$ 为目标数据; $\epsilon$ 为噪声的标准差; $IMF_j$ 为经EMD得到的第 $j$ 阶本征模态函数分量; $\overline{IMF}_j$ 为经EEMD得到的第 $j$ 阶本征模态函数分量; $\overline{\overline{IMF}}_j$ 为经过CEEMDAN分解得的第 $j$ 阶本征模态函数分量。

计算步骤<sup>[13]</sup>如下:

1) 通过EMD,采用 $x[n] + \epsilon_0 \omega^i[n]$ 进行变换,获得第1阶本征模态函数分量为

$$\overline{IMF}_1[n] = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I IMF_1^i[n] = \overline{IMF}_1[n] \quad (9)$$

2) 一阶残余信号为

$$r_1[n] = x[n] - \overline{IMF}_1[n] \quad (10)$$

3) 对 $r_1[n] + \epsilon_1 E_1(\omega^i[n])$ , $i=1,2,\dots,I$ 进行分解,直到得到EMD的第1阶分量,则第2阶分量为

$$\overline{\overline{IMF}}_2[n] = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I E_1(r_1[n] + \epsilon_1 E_1(\omega^i[n])) \quad (11)$$

4) 对于 $k=2,3,\dots,k$ ,计算第 $k$ 次残余值

$$r_k[n] = r_{k-1}[n] - \overline{\overline{IMF}}_k[n] \quad (12)$$

5) 对 $r_k[n] + \epsilon_k E_k(\omega^i[n])$ , $i=1,2,\dots,I$ 进行分解,直至得到EMD的第1阶分量,定义 $k+1$ 阶分量为

$$\overline{\overline{\overline{IMF}}}_{k+1}[n] = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I E_1(r_k[n] + \epsilon_k E_k(\omega^i[n])) \quad (13)$$

6) 执行步骤4~6,直到得到的残余不能再进行分解,最终残余满足

$$R[n] = x[n] - \sum_{k=1}^K \overline{\overline{\overline{IMF}}}_k \quad (14)$$

其中: $K$ 为全部分解模式总个数。

7) 信号  $x[n]$  可以表示为

$$x[n] = \sum_{k=1}^K \overline{\text{IMF}}_k + R[n] \quad (15)$$

## 2.2 互信息

2个变量或者系统之间的相关程度可采用互信息进行衡量,如果2个系统或变量之间的互信息值越大,则这2个系统或者变量之间的相关程度就越大<sup>[14]</sup>。若  $X$  和  $Y$  为2个随机信号,这2个随机信号的联合分布为  $p(x, y)$ ,且  $X$  和  $Y$  的边缘概率密度函数为  $p(x)$  和  $p(y)$ ,定义互信息<sup>[14]</sup>为

$$I(X; Y) = \sum_x \sum_y p(x, y) \log \frac{p(x, y)}{p(x)p(y)} \quad (16)$$

在各个本征模态函数中,既包含了有用信号,也包含噪音等,采用互信息对其进行相关性分析,从而判断本征模态函数包含多少有用信号。

## 2.3 互谱分析

管道首末站采集到信号均为离散信号,分别为  $x_1(k)$  和  $x_2(k)$ ,其数学表达式为

$$\begin{cases} x_1(k) = s(k) + n_1(k) \\ x_2(k) = \lambda s(k - T) + n_2(k) \end{cases} \quad (17)$$

其中: $s(k)$ 为采集的源信号; $n_1(k)$ 和 $n_2(k)$ 均为加性噪声; $\lambda$ 为衰减因子; $T$ 为时间延迟。

如果源信号以及噪声信号均为零均值信号,且源信号与噪声之间、噪声与噪声之间互不相关,源信号的自相关函数用  $R_{ss}$  表示,则  $x_1(k)$  和  $x_2(k)$  的互相关函数<sup>[15]</sup>为

$$R_{x_1x_2}(m) = E[x_1(k)x_2(k-m)] = E[\lambda s(k)s(k-T-m)] = \lambda R_{ss}(m+T) \quad (18)$$

将  $x_1(k)$  和  $x_2(k)$  的相关函数进行傅里叶变换,得到信号之间的互谱

$$S_{x_1x_2}(f) = \lambda S_{ss}(f) e^{j2\pi fT} = \lambda S_{ss}(f) e^{j\theta_{x_1x_2}(f)} \quad (19)$$

其中: $S_{ss}(f)$ 为源信号之间的自谱。

由式(19)可得2个源信号的时间延迟为  $T$ ,相位差为

$$\theta_{x_1x_2}(f) = 2\pi fT \quad (20)$$

由式(20)可知,在源信号频带内, $\theta_{x_1x_2}(f)$ 与频率成线性关系,斜率为  $2\pi T$ 。互谱的计算公式为  $G_{x_1x_2}(f) = X_1(f)X_2^*(f)$ ,其中: $*$ 表示复共轭; $X_1(f)$ , $X_2(f)$ 分别由  $x_1(k)$ , $x_2(k)$ 经离散傅里叶变换得到。

一般情况下实际数据是有限的,采用 Welch 平均周期图标法表示互谱估计  $G_{x_1x_2}(f) = C_{x_1x_2}(f) +$

$jQ_{x_1x_2}(f)$ ,其中: $C_{x_1x_2}(f)$ 为共谱密度; $Q_{x_1x_2}(f)$ 为正交谱密度。因此,相位谱为

$$\theta_{x_1x_2}(f) = \arctan \frac{Q_{x_1x_2}(f)}{C_{x_1x_2}(f)} \quad (21)$$

$x_1(k)$ , $x_2(k)$ 的两帧互谱相位谱的相位随频率成线性变化,则两信号在此频率范围内的相关性大。 $x_1(k)$ , $x_2(k)$ 的幅值平方相干函数(简称相干函数)为

$$\gamma_{x_1x_2}^2(f) = \arctan \frac{|G_{x_1x_2}(f)|^2}{G_{x_1x_1}(f)G_{x_2x_2}(f)} \quad (22)$$

相干函数可以用来表示频域内信号之间的相关程度。在某个频率范围内,相干函数越大,则2个信号之间的相关性就越高,且源信号的信噪比也越高,根据幅值可估计出源信号  $s(k)$  所在的频段<sup>[15]</sup>。

因此,根据以上求得的互谱相位谱和相干函数就可以准确估计出源信号的特征频带  $\omega_1 \sim \omega_2$ 。

## 2.4 基于互信息优化的 CEEMDAN 算法

CEEMDAN 算法是将信号分解成多个 IMF,每个 IMF 都包含一定的信息。由于每个 IMF 所含泄漏信息不同,因此需要对分解得到的 IMF 进行选择重构。CEEMDAN 算法并没有给出选择方法,故采用互信息对其进行优化:①采用 CEEMDAN 算法对管道首末站传感器采集信号进行分解,将信号分解为多个 IMF;②分别计算每个 IMF 与无泄漏信号的互信息;③根据得到的互信息对 IMF 进行筛选,互信息小的 IMF 包含的泄漏信息会更多。

为了使重构后的信号含噪声更少,结合互谱分析得到特征频带,对分解得到的 IMF 再一次筛选。将符合以上2次筛选要求的 IMF 进行重构,重构后的信号能更好地表达泄漏状况。图1为降噪处理流程图。

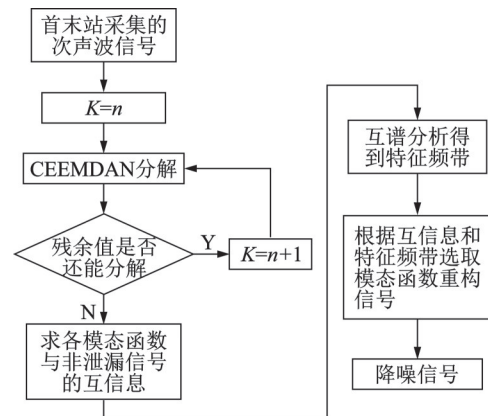


图1 降噪处理流程图

Fig.1 Noise reduction processing flow chart

### 3 实验分析

现场实验采用某航油公司的航油管道,将 PCB 106B 型声波传感器分别安装在航油管道的首末站,采样频率为 1 000 Hz。图 2 为泄漏信号采集原理图。航油管道的长度为 10 km,内径为 200 mm,首站压力 2 MPa,末站压力 0.8 MPa。在管道的 2 km, 4 km, 7 km 和 9 km 处各有一处分支管道,且有手动控制阀门,通过手动调节控制阀门向分支管道分流,来模拟泄漏的产生。

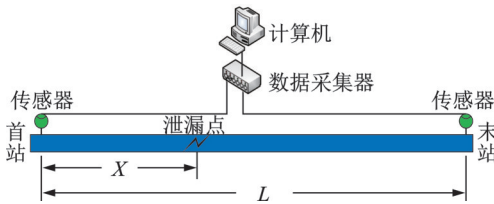


图 2 泄漏信号采集原理图

Fig.2 Leakage signal acquisition schematic diagram

#### 3.1 去噪实验

以首站信号为例进行去噪实验。对距离首站 2 km 处的阀门进行操作,向分支管道分流来模拟泄漏,首站采集的泄漏信号如图 3 所示。可以看出,去噪之前的信号中噪声多、信号波动大,不能准确确定信号拐点。对首站采集的信号进行 CEEMDAN 分解,分解后的部分 IMF 分量及对应频谱如图 4 所示。

为了选择合适的 IMF 分量需进行重构。先分别计算每个 IMF 分量与未泄漏信号的互信息,再进行比较。图 5 为首站信号的互信息。可以看出,首站信号分解得到的 IMF 分量中,IMF<sub>7</sub>, IMF<sub>12</sub>~IMF<sub>14</sub> 的互信息相较于其他 IMF 分量要小,故其包含的泄漏信息较多。

首末站信号  $x_1(k), x_2(k)$  的相干函数和互谱相位谱如图 6, 7 所示。

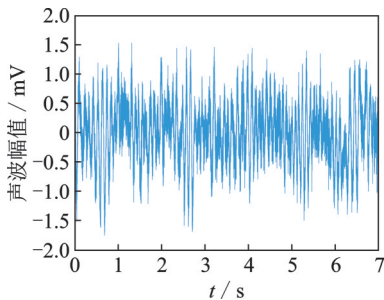
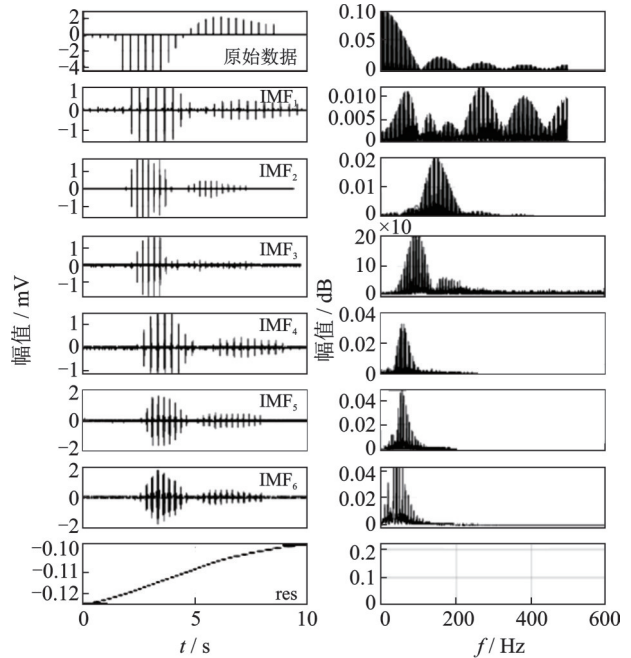


图 3 首站采集的泄漏信号

Fig.3 Leakage signal collected at the first station



(a) CEEMDAN 分解 (b) 对应频谱  
(a) CEEMDAN decomposition (b) Corresponding spectrum

图 4 部分 IMF 分量及对应频谱

Fig.4 Part of IMF components and corresponding spectrum

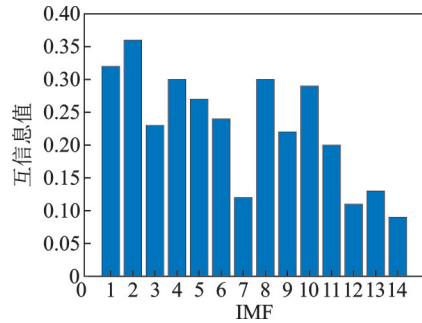


图 5 首站信号的互信息

Fig.5 Mutual information of the first station signal

图 6 中, 50~150 Hz 的相干函数较其他频段内的相干函数大。图 7 中, 50~150 Hz 频带内的相位随着频率呈线性变化。因此,选择 50~150 Hz 为特征频带。根据各模态函数对应的频谱,得到 IMF<sub>5</sub>~IMF<sub>14</sub> 位于特征频带内。综合互信息和特征频带分析可知,只有 IMF<sub>12</sub>~IMF<sub>14</sub> 符合以上要求,故采用 IMF<sub>12</sub>~IMF<sub>14</sub> 进行信号重构。

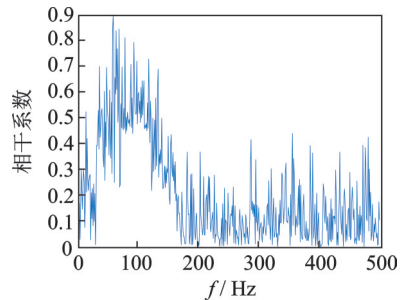


图 6 相干函数

Fig.6 Coherence function

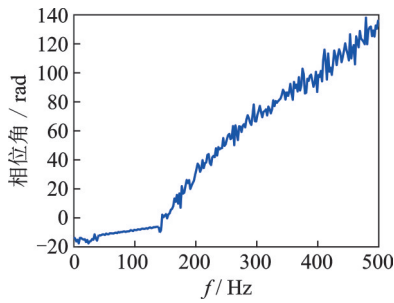


图7 互谱相位谱

Fig.7 Cross spectrum phase difference spectrum

在相同条件下对信号进行EEMD滤波去噪,将EEMD去噪后的信号曲线与本研究方法去噪重构后的信号曲线进行对比。图8为不同方法去噪后的信号对比。可以看出,用本研究方法去噪重构后的信号更加平滑,含噪声更少,能准确地确定信号拐点。

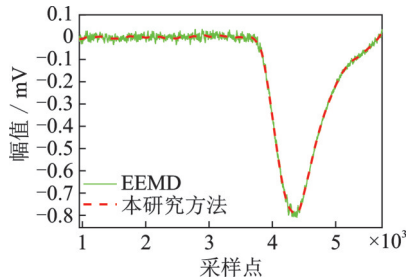
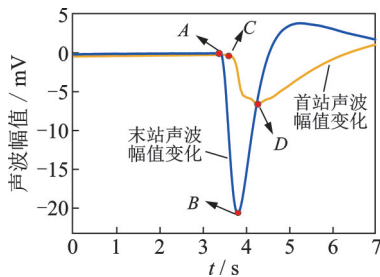


图8 不同方法去噪后的信号对比

Fig.8 Signal contrast after denoising by different methods

### 3.2 声波衰减实验

对距离管道首站7 km处的手动阀门操作,设泄漏孔径为10 mm,让航油向分支管道分流,模拟管道出现泄漏。管道泄漏时会在管道末端形成扰动波,在管道首端形成衰减波。将首末站传感器获取的信号进行去噪,图9为泄漏孔径为10 mm时的声波信号曲线。

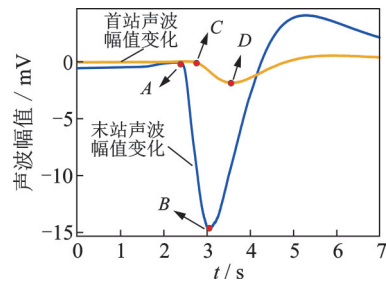


A为扰动波的波头;B为扰动波的波尾;C为衰减波的波头;D为衰减波的波尾。

图9 泄漏孔径为10 mm时的声波信号曲线

Fig.9 Signal curve when the leakage aperture is 10 mm

10 mm泄漏孔径实验完成后,在距首站9 km处操作阀门进行分流来模拟泄漏。设泄漏孔径为5 mm,将首末站传感器获取的信号进行去噪,图10为泄漏孔径为5 mm时的信号曲线。



A为扰动波的波头;B为扰动波的波尾;C为衰减波的波头;D为衰减波的波尾。

图10 泄漏孔径为5 mm时的信号曲线

Fig.10 Signal when the leakage aperture is 5 mm

以上2个泄漏实验针对的是突发泄漏,在对距首站7 km处让航油向分支管道分流,进行缓慢泄漏实验。缓慢泄漏时的声波信号曲线如图11所示,其中:A为扰动波的波头;B为扰动波的波尾;C为衰减波的波头;D为衰减波的波尾。

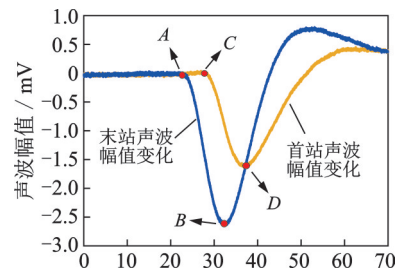


图11 缓慢泄漏时的声波信号曲线

Fig.11 Acoustic signal curve for slow leakage

从图9~11可以看出,经过本研究去噪算法处理后,噪声明显减少,可以准确判断曲线拐点。将扰动波中A~B的声波幅值代入式(7),即可得到衰减波中C~D的声波幅值。同时,根据去噪后的信号曲线得到扰动波和衰减波的现场实测值,并将其与计算值进行对比。声波衰减的实测值和计算值对比如表1所示。

表1 声波衰减的实测值和计算值对比

Tab.1 Comparison of measured value and calculated value of acoustic wave attenuation

| 实验项目     | 波的过渡时间/s | 衰减系数 | 扰动波实测值/mV | 衰减波实测值/mV | 衰减波计算值/mV |
|----------|----------|------|-----------|-----------|-----------|
| 10 mm 泄漏 | 0.3      | 0.16 | 20.20     | 6.70      | 6.67      |
| 5 mm 泄漏  | 0.6      | 0.20 | 14.05     | 2.40      | 2.34      |
| 缓慢泄漏     | 12.0     | 0.09 | 2.71      | 1.51      | 1.53      |

### 3.3 实验结论

虽然声波在传播时存在衰减且传感器采集的信

号中含有大量噪声,但经过基于互信息优化的CEEMDAN和互谱分析相结合的去噪算法处理后,可以准确地确定声波的波头和波尾。通过表1可以看出,在泄漏孔径为10 mm和5 mm的泄漏实验中,声波的过渡时间相对较短,衰减波的计算值与现场实测值几乎相等。在7 km处的缓慢泄漏实验中,声波的过渡时间虽然相对较长,但衰减波的实测值与计算值之间误差较小,几乎相等。这表明利用声波法检测管道泄漏,不论是对于突发泄漏还是缓慢的泄漏,声波法均能起到良好的检测效果。

#### 4 管道的可检测泄漏率

采用声波法对泄漏进行检测时,需要确定一个检测阈值,当传播到管道首末站的声波幅值超过检测阈值时,系统就会进行泄漏报警。检测阈值的设置取决于诸多因素,随着检测技术的不断发展,仪器设备的精度、泄漏检测系统的采样精度都可以达到很好的程度。因此,噪声级别成为确定检测阈值的主导因素。噪声级别可以在管道稳定运行状态下现场实测获取。根据实验现场情况,笔者将噪声取为0.045个大气压。

若在距离首站 $x$ 处发生泄漏,且泄漏率为 $k$ ,由式(8)得到在管道首末站的可检测泄漏率为

$$\begin{cases} k_s = \frac{2V_s}{\rho\alpha_s v_0 e^{-\beta x} + V_s} \\ k_m = \frac{2V_m}{\rho\alpha_s v_0 e^{-\beta(L-x)} + V_m} \end{cases} \quad (23)$$

其中: $k_s$ 为管道首站检测到的泄漏率; $k_m$ 为管道末站检测到的泄漏率; $V_s$ 和 $V_m$ 分别为管道首末站的检测阈值。

管道在正常工况下,管道首站的噪声标准方差 $\phi_s$ 为1.43 kPa,末站噪声的标准方差 $\phi_m$ 为1.15 kPa。令 $V_s = \mu\phi_s$ ,其中, $\mu$ 为一个系数,其值由管道检测系统的信号分析和处理能力决定,在本研究中令 $\mu = 2$ 。图12为首末站可检测的泄漏率与泄漏位置的关系曲线。管道首站和末站的可检测泄漏率与管道泄漏位置的关系由式(23)得到。

由图12可以看出,当泄漏位置发生改变时,管道首末站的可检测泄漏率呈现相反的改变。当管道出现泄漏时,如果可检测泄漏率位于图12中的实线部分,则管道的首站和末站都能检测到管道出现泄漏,且2条曲线的交点 $O$ 所对应的泄漏率即为声波法在输油管道上的最小可检测泄漏率。由图12可得,声波法在输油管道上的最小可检测泄漏率可达0.45%。因此,泄漏位置 $M$ 为声波法在输油管道上

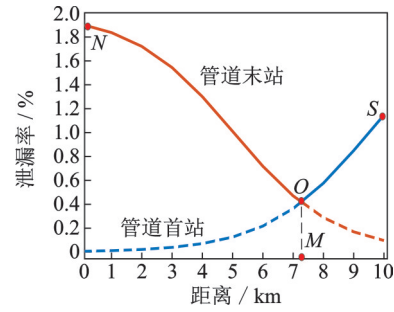


图12 首末站可检测的泄漏率与泄漏位置的关系曲线  
Fig.12 The relationship curve between the detectable leak rate of the first and last station and the leak location

进行泄漏检测时最灵敏的位置。在实线区域,距离 $M$ 点越近,则更容易检测到泄漏。

此外,图12中 $S$ 点以及 $N$ 点所对应的泄漏率的最大值就是声波检测系统能够达到的可检测泄漏率,即在管道上任意一点发生泄漏,且泄漏率大于 $S, N$ 两点所对应的泄漏率的最大值,那么泄漏检测系统都能够检测到。在 $O$ 点上,管道首末站的可检测泄漏率相等,即 $k_s = k_m$ ,故由式(23)得到

$$\frac{V_s}{V_e} = e^{\beta L - 2\beta x} \quad (24)$$

管道上灵敏位置 $M$ 的计算公式为

$$x = \frac{L - \frac{1}{\beta} \ln\left(\frac{V_s}{V_m}\right)}{2} \quad (25)$$

声波法在输油管道上的最小可检测泄漏率和可检测泄漏率分别为

$$k_{\min} = \frac{2V_s}{\rho\alpha_s v_0 e^{-\beta x} + V_s} \quad (26)$$

$$k_p = \frac{2V}{\rho\alpha_s v_0 e^{-\beta x} + V} \quad (27)$$

其中: $V$ 为管道首末站检测阈值中数值大的一方,即 $V = \max(V_s, V_m)$ 。

综上可知,管道长度、管内介质、摩阻系数以及管道口径等都会对管道的可检测泄漏率产生影响。

#### 5 结束语

管道泄漏会产生泄漏声波,其幅值和在内管的衰减性与管道口径、摩擦因数等特性相关。笔者建立了声波的产生和衰减模型,通过实验验证了该模型的准确性。针对采集的泄漏信号含噪声多、无法准确地确定声波信号拐点的问题,提出了基于互信息优化的CEEMDAN和互谱分析相结合的去噪算法。首先,信号采用CEEMDAN算法进行分解;其次,采用互信息和互谱分析相结合的方法,选取含泄

漏信息多的模态函数分量进行重构。去噪重构后的信号拐点明显,含泄漏信息多。对于声波法在输油管道上的可检测泄漏问题,笔者根据所建模型,得出了管道两端的可检测泄漏率公式。此外,还分析了输油管道的特性与声波法在输油管道上的可检测泄漏率的关系,得到声波法在管道上的最小可检测泄漏率、泄漏敏感位置等指标的计算方法,为智慧管网的建设及设计提供参考。

### 参 考 文 献

- [1] SUN J D, XIAO Q Y, WEN J T, et al. Natural gas pipeline small leakage feature extraction and recognition based on LMD envelope spectrum entropy and SVM [J]. *Measurement*, 2014, 55: 434-443.
- [2] LANG X M. Leak localization method for pipeline based on fusion signal [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(3): 3271-3277.
- [3] MERIBOUT M, KHEZZAR L, AZZI A, et al. Leak detection systems in oil and gas fields: present trends and future prospects [J]. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2020, 75: 101772.
- [4] 王洪超,李强,罗毅,等.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 Hongchao, LI Qiang, LUO Yi, et al. A similarity based locating method of negative pressure wave caused by pipeline leakage [J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2021, 40(6): 679-684. (in Chinese)
- [5] 朱雪峰,冯早,吴建德,等.基于信息增益的管道堵塞声学检测方法[J].*振动、测试与诊断*, 2021, 41(2): 267-274.  
ZHU Xuefeng, FENG Zao, WU Jiande, et al. Acoustic based approach of sewer blockage recognition using information gain for feature selection [J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2021, 41(2): 267-274. (in Chinese)
- [6] GLENTIS G O, ANGELOPOULOS K. Sound velocity measurement in acoustic leak noise correlation systems [C]//2021 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC). Glasgow: IEEE, 2021: 1-6.
- [7] 刘翠伟,敬华飞,方丽萍,等.输气管道泄漏声波衰减模型的理论研究[J].*振动与冲击*, 2018, 37(20): 109-114.  
LIU Cuiwei, JING Huafei, FANG Liping, et al. A theoretical study on the attenuation model of leakage acoustic waves for natural gas pipelines [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2018, 37(20): 109-114. (in Chinese)
- [8] 孟令雅.基于瞬态模型法的输气管道泄漏监测与定位技术[J].*北京交通大学学报*, 2008, 32(3): 73-77.  
MENG Lingya. Research on leak detection and position for natural gas pipeline based on transient model method [J]. *Journal of Beijing Jiaotong University*, 2008, 32(3): 73-77. (in Chinese)
- [9] 孙良,王建林,赵利强.负压波法在液体管道上的可检测泄漏率分析[J].*石油学报*, 2010, 31(4): 654-658.  
SUN Liang, WANG Jianlin, ZHAO Liqiang. Analysis on detectable leakage ratio of liquid pipeline by negative pressure wave method [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2010, 31(4): 654-658. (in Chinese)
- [10] MUGGLETON J M, BRENNAN M J, PINNINGTON R J. Wavenumber prediction of waves in buried pipes for water leak detection [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2002, 249(5): 939-954.
- [11] MALEKPOUR A, SHE Y T. Real-time leak detection in oil pipelines using an inverse transient analysis model [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2021, 70: 104411.
- [12] 孟令雅,付俊涛,李玉星,等.输气管道泄漏音波信号传播特性及预测模型[J].*中国石油大学学报(自然科学版)*, 2013, 37(2): 124-129.  
MENG Lingya, FU Juntao, LI Yuxing, et al. Propagating characteristics of acoustic leakage signal in natural gas pipeline and establishment of prediction model [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2013, 37(2): 124-129. (in Chinese)
- [13] TORRES M E, COLOMINAS M A, SCHLOTTHAUER G, et al. A complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise [C]//2011 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). Prague: IEEE, 2011: 4144-4147.
- [14] 蒋勉,张文安,伍济钢,等.基于S变换和互信息的梁类结构裂纹定位方法[J].*振动、测试与诊断*, 2020, 40(6): 1128-1134.  
JIANG Mian, ZHANG Wenan, WU Jigang, et al. Crack location method for beam-like structures based on S transformation and mutual information entropy [J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2020, 40(6): 1128-1134. (in Chinese)
- [15] 李帅永,夏传强,程振华,等.基于VMD和互谱分析的供水管道泄漏定位方法[J].*仪器仪表学报*, 2019, 40(7): 195-205.  
LI Shuaiyong, XIA Chuanqiang, CHENG Zhenhua, et al. Leak location method in water-supply pipeline based on combination of VMD and cross-spectrum analysis [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2019, 40(7): 195-205. (in Chinese)



**第一作者简介:**郎宪明,男,1984年6月生,博士,副教授。主要研究方向为输气管道泄漏智能监测。曾发表《A multiple leaks localization method in a pipeline based on change in the sound velocity》(《IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement》2020, Vol.69)等论文。  
E-mail: langxianming@lnpu.edu.cn