

基于时差估计的管道漏点定位方法

宋培培^{1,2}, 贾瑞生^{1,2}, 崔云洁^{1,2}, 矫丰霞¹

(1. 山东科技大学 计算机科学与工程学院, 山东 青岛 266590;

2. 山东科技大学 山东省智慧矿山信息技术省级重点实验室, 山东 青岛 266590)

摘 要: 时差估计精度是影响管道漏点定位准确与否的重要因素。针对复杂噪声环境下管道泄漏点定位不准确问题, 提出一种基于经验模态分解重构的互相关时差估计管道漏点定位方法。首先对含噪信号进行经验模态分解, 得到一系列按频率从高到低排列的本征模态函数, 利用 Pearson 相关系数法在本征模态函数中判定出噪声分量与信号分量的分界, 把信号分量重构, 实现信号降噪; 最后基于广义互相关法对降噪后的求取两路信号的时差后, 再使用线性定位法对管道泄漏位置定位。实验表明, 该方法能有效滤除漏点定位监测过程中的非平稳随机噪声, 获得了较高的时差估计精度, 提高了管道漏点定位的准确性。

关键词: 管道漏点定位; 经验模态分解; 互相关; 时差估计

中图分类号: TE973

文章标志码: A

文章编号: 1672-3767(2017)03-0104-10

Pipeline Leakage Location Method Based on Time Delay Estimation

SONG Peipei^{1,2}, JIA Ruisheng^{1,2}, CUI Yunjie^{1,2}, JIAO Fengxia¹

(1. College of Computed Sciences and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China;

2. Shandong Provincial Key Laboratory of Wisdom Mining Information Technology, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China)

Abstract: The precision of time delay estimation is an important factor affecting the accuracy of pipeline leakage location. To solve the problem of inaccurate pipeline leakage location in noisy environments, a pipeline leakage location method based on empirical mode decomposition and cross-correlation time delay estimation was presented. Firstly, empirical mode decomposition was conducted on the noisy signals and a series of eigenmode functions arrayed from high frequency to low frequency were obtained. Pearson correlation coefficients were used to determine the demarcation between noise components and signal components in the eigenmode functions so as to reconstruct signal components and reduce signal noise. Finally, the pipeline leakage was located by using the linear method after the time delay between the two signals was obtained based on the generalized cross-correlation method for noise reduction. Experiments show that this method can effectively filter out the random nonstationary noise in the monitoring process of leakage location, obtain higher time delay estimation precision, and improve the accuracy of pipeline leakage location.

Key words: pipeline leakage location; empirical mode decomposition; cross-correlation; time delay estimation

收稿日期: 2016-07-22

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0801406); 中国博士后科学基金项目项目(2015M582117)。

作者简介: 宋培培(1991—), 女, 山东济宁人, 硕士研究生, 主要从事微震信号分析及数据解释研究。

贾瑞生(1972—), 男, 安徽砀山人, 教授, 硕士生导师, 主要从事微震信号分析及数据解释研究, 本文通信作者。

E-mail: jrs716@163.com

管道作为一种传输工具,在城市供水、天然气及石油等行业有着重要的作用^[1]。埋于地下的传输管道会由于种种原因发生泄漏,造成资源严重浪费和财产损失。及时准确地发现泄漏,定位泄漏点非常重要。管道检漏技术已成为了各国关注的重点。目前常用的管道泄漏检测方法有光纤检测法、压力梯度法、次声波法等^[2-3];光纤对温度十分敏感,所以可以检测泄漏,但是对光纤的质量要求很高,并且光纤埋设要贴近管道;次声波法虽然定位精确,而且适应面广,但是高额的成本阻碍了其推广。现有泄漏检测方法难以对微量泄漏进行快速准确地判断和对泄漏源准确定位^[4],互相关法利用信号到达不同传感器的时延值来计算定位具有定位快速准确,抗干扰性高,成本低等优点,成为各国专家研究的热点^[5]。

管道发生泄漏时,流体从漏点出喷出,产生泄漏声波,通过求得泄漏信号到达两个传感器的时间差可以定位泄漏点。但是在实际环境中,管道所在的环境如果比较复杂,传感器接采集的信号就可能含有较多的干扰噪声^[6],噪声的存在对时差估计精度有较大的影响,降低了泄漏定位的准确性。因此,降低非平稳信号中掺杂的不确定的噪声干扰以提高时差估计精度问题非常重要。到目前为止,人们已提出了一些信号降噪的方法,从复杂环境背景中提取有用信息,如利用奇异值分解可以降低白噪声和色噪声对信号的干扰,但计算量大且依赖于经验^[7-8];小波去噪可以区分信号中的噪声和突变部分,但是需要设定合适的阈值才能达到好的降噪效果。以上降噪方法大多需要设置经验参数,而管道所在环境和条件会严重影响经验参数^[9]。而经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)^[10-13]方法不需要信号的先验信息,也不需要人为设定阈值即可将信号分解为若干个本征模函数(intrinsic mode function, IMF),选取符合需要的 IMF 分量对信号进行重构,将噪声与信号在不同尺度下进行分离,提高信号信噪比。

因此,本研究将传感器接收到的信号进行 EMD 分解,计算各 IMF 分量与原信号的皮尔逊相关系数^[14],选取与原信号相关性较大的 IMF 分量进行重构,从而达到降噪的目的,并对降噪后的信号进行广义互相关计算,求得信号的时间差,进而对泄漏点进行定位。

1 检测及定位原理

1.1 漏点定位原理

漏点定位算法原理如图 1 所示,将 2 个传感器 A 和 B 安置在管道上,假设漏点为 O,传感器将接收泄漏声波引起的管壁振动转化为电信号。

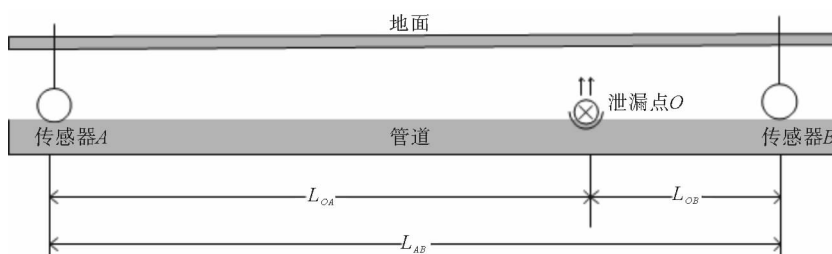


图 1 漏点定位算法原理图

Fig. 1 Schematic diagram of leakage point location algorithm

漏点 O 到 2 个传感器的距离分别记作 L_{OA} 和 L_{OB} , 传感器间距为 L_{AB} 。泄漏信号传播的速度 v 由计算得到或实际测得^[15]。

理论上,传感器 A 和 B 接收到信号的时间差为

$$\tau_{AB} = \frac{L_{OA} - L_{OB}}{v} \quad (1)$$

这个时间差可以通过对传感器接收到的两路信号用互相关法求出来。式(1)可以变形为:

$$L_{OA} = v\tau_{AB} + L_{AB} \quad (2)$$

根据:

$$L_{AB} = L_{OA} + L_{OB} \quad (3)$$

可以得到:

$$L_{OB} = L_{AB} - L_{OA} \quad (4)$$

联立式(2)和式(4),求得定位泄漏点的位置

$$L_{OB} = \frac{L_{AB} - v \times \tau_{AB}}{2} \quad (5)$$

由式(5)知,泄漏定位的误差与 2 个传感器距离 L_{AB} 、波速 v 和时差 τ_{AB} 三者的精确程度有关,而得到精确的时差值是检测漏点位置的关键。互相关分析法是目前常用的时差估计方法^[16]。

2 互相关时差估计

管道发生破裂后产生的泄漏信号同时反向传到 2 个传感器,假设 2 个传感器接收到的信号分别为:

$$x_1(t) = \lambda_1 s(t)(t - \tau_1) + n_1(t) \quad (6)$$

$$x_2(t) = \lambda_2 s(t)(t - \tau_2) + n_2(t) \quad (7)$$

式中 $s(t)$ 为源信号, $n_1(t)$ 与 $n_2(t)$ 为噪声,且 $s(t)$ 、 $n_1(t)$ 与 $n_2(t)$ 两两互相独立。 τ_1 与 τ_2 为 2 个传感器接收到信号的时间, λ_1 、 λ_2 为衰减因子。 $\tau = \tau_1 - \tau_2$ 为 2 路信号间的时间差。

信号 $x_1(t)$ 和 $x_2(t)$ 的互相关函数 $R_{12}(\tau)$ 可以表示为

$$R_{12}(\tau) = E[x_1(t)x_2(t - \tau)] = \lambda_1\lambda_2 R_{ss}(\tau - (\tau_1 - \tau_2)) \quad (8)$$

根据自相关函数的特点可知,当 $\tau = \tau_1 - \tau_2$ 时, $R_{12}(\tau)$ 得到最大值。所以 $R_{12}(\tau)$ 峰值对应的时间 τ 即为两路信号之间的延迟 $\hat{\tau}_{12}$, 有

$$\hat{\tau}_{12} = \arg \max_{\tau} [R_{ss}(\tau - (\tau_1 - \tau_2))] \quad (9)$$

基本相关法求时差方法容易实现,计算量小,但前提是信号与噪声及噪声与噪声之间不存在相关性。在实际管道泄漏中,传感器采集到的信号中可能存在相关噪声会对时差估计的结果造成很大的误差甚至不能估计^[17],严重影响定位精度。因此,采用广义加权互相关时差估计算法,通过选用抑制噪声能力强的 PHAT 加权函数来调整互功率谱密度,从而优化互相关函数的性能^[18-21],在低信噪比的情况下提高时差估计的精度。

虽然广义互相关时差估计在一定程度上能够抑制高斯信号的干扰,但是管道泄漏产生的信号往往不满足高斯分布,属于非平稳信号,此时广义互相关时差估计算法的性能也会出现退化,因此对信号进行相关分析之前要滤除这些非平稳噪声。

3 EMD 去噪

信号在采集过程中难免会混杂一些非平稳的噪声,使互相关函数的峰值偏移,对定位的精度产生影响,因此需要滤除这些噪声。由于无法准确获取这些噪声的先验知识,所以很难将这些噪声从时域或频域中去除。基于傅立叶分析的传统去噪方法通常只适合周期性的平稳信号,而对于像管道泄漏产生的这种属于非平稳的随机信号的去噪效果不佳^[22-23];小波去噪可以有效区分信号中的噪声和突变,但是需要选择合适的小波基才能达到好的去噪效果^[24-25];经验模态分解(EMD)具有多分辨率和自适应性的特点,能够较好地处理随机非平稳信号,无需预先设定基函数就可以依据信号自身的特点将复杂信号自适应的分解成若干个本征模态函数(IMF)。Huang 等^[11]认为,一个本征模态函数需要满足两个条件:

1) 函数在整个时间范围内,局部极值点数与过零点相等或不超过 1;

2) 任一时刻,由局部极大极小值所确定的包络平均值等于零。

3.1 EMD 分解步骤

对信号 $s(t)$ 进行 EMD 分解的步骤如下:

a) 计算 $s(t)$ 所有的极大值和极小值点,用三次样条函数在极值点间进行插值,得到上、下包络线 $e_{\max}(t)$ 和 $e_{\min}(t)$ 。

b) 求出上下包络的平均值: $m(t) = e_{\max}(t) + e_{\min}(t) / 2$ 。

c) 求原始信号与均值的差值 $d(t) = s(t) - m(t)$ 。

d) 若 $d(t)$ 符合 IMF 的两个条件,则令 $d_i(t) = d(t)$,将其算作一个 IMF 分量并进入下一步;若不符合,则令 $s(t) = d(t)$,重复执行以上步骤 a)~d)。

e) $m_i(t) = s(t) - d_i(t)$,若 $m_i(t)$ 是一个单调函数或其绝对值很小可看作测量误差,则循环结束,否则令 $s(t) = m_i(t)$ 转到步骤 a)。

分解循环结束后得到 n 个满足条件的 IMF 分量 $imf_i(t) = d_i(t)$ 和剩余分量 $r_n = m_n(t)$ 。EMD 的分解结果为

$$s(t) = \sum_{i=1}^n imf_i(t) + r_n \quad (10)$$

3.2 基于皮尔逊相关系数的 EMD 去噪方法

皮尔逊(Pearson)相关系数是一种线性相关系数,用来反映两个数据集线性相关程度的统计量。由 EMD 分解得到的一系列 IMF 分量可以表示原信号由高到低的频率成分,代表了信号不同时间尺度的特征,因此可以考虑计算各 IMF 分量与原信号之间的皮尔逊相关系数来区分信号 IMF 分量和噪声 IMF 分量;信号 IMF 分量与原信号有较好的相关性,而噪声 IMF 分量与原信号的相关性较差^[26]。最后将噪声 IMF 分量剔除,把信号 IMF 分量重构后即可达到降噪的目的。

IMF 分量与原信号之间的皮尔逊相关系数为:

$$\rho_{imf_i(t), x(t)} = \frac{E(imf \cdot x) - E(imf)E(x)}{\sqrt{E(imf^2) - E^2(imf)} \sqrt{E(x^2) - E^2(x)}} \quad (11)$$

文献[26-27]给出了利用皮尔逊相关系数判别信号 IMF 分量与噪声 IMF 分量的方法,其基本过程如下:

阈值

$$\delta = \max[\rho_{imf_i(t), x(t)}] / \eta \quad (\eta = 10.0) \quad (12)$$

利用式(11)计算出每个 IMF 分量与原信号的皮尔逊相关系数,若 $\rho_{imf_i(t), x(t)} \geq \delta$,则 $imf_i(t)$ 为信号 IMF 分量,否则为噪声 IMF 分量。将所有信号 IMF 分量累加重构即可得到去噪后的信号

$$x'(t) = \sum_{\rho_i \geq \delta} imf_i(t) + r_n \quad (13)$$

4 基于时差估计的漏点定位方法

将实际采集到的信号先进行 EMD 分解,得到所有的 IMF 分量和残余分量;再计算各 IMF 分量与原信号之间的皮尔逊相关系数,设置阈值,去除小于阈值的相关系数所对应的 IMF 分量,保留大于阈值的 IMF 分量,将保留的 IMF 分量进行重构,得到降噪后较纯净的信号,根据互相关泄漏检测原理,对管道泄漏点进行定位。

基于时差估计的漏点定位整体算法步骤如下:

输入:传感器 A、B 同一时间段接收到的信号 $x_1(t)$ 、 $x_2(t)$;

输出:泄漏点 O 到传感器的距离 L_{OB} ;

Step 1:根据 EMD 分解原理将信号 $x_1(t)$ 、 $x_2(t)$ 进行 EMD 分解:

$$x_1(t) = \sum_{i=1}^n imf_i^1(t) + r_n^1, \quad (14)$$

$$x_2(t) = \sum_{i=1}^n imf_i^2(t) + r_n^2; \quad (15)$$

Step 2: 计算 imf_i^1 与 $x_1(t)$ 、 imf_i^2 与 $x_2(t)$ 之间的皮尔逊相关系数, 设置皮尔逊相关系数序列中最大值的 $\frac{1}{10}$ 为阈值:

$$\delta_1 = \frac{1}{10} \max[\rho_{imf_i^1(t), x_1(t)}], \quad (16)$$

$$\delta_2 = \frac{1}{10} \max[\rho_{imf_i^2(t), x_2(t)}]; \quad (17)$$

Step 3: 选出符合条件的 IMF 应用本征模函数重构算法对信号进行重构:

$$x'_1(t) = \sum_{\rho_i \geq \delta_1} imf_i^1(t) + r_n^1, \quad (18)$$

$$x'_2(t) = \sum_{\rho_i \geq \delta_2} imf_i^2(t) + r_n^2; \quad (19)$$

Step 4: 根据公式(8)采用 PHAT 加权互相关函数求重构信号 $x'_1(t)$ 、 $x'_2(t)$ 的时差 τ ;

Step 5: 将已知量 L_{AB} 、 v 、 τ 带入公式(5)对管道泄漏点进行定位。

5 仿真实验

为验证本文方法的性能, 进行模拟实验。实验在长为 13 m, 直径为 50 mm 的铸铁管道上进行, 管壁厚度为 2 mm, 在管道上人工凿一个直径为 2 mm 的圆孔 O 。将两个传感器放置在首尾两端, 分别记作传感器 A 和传感器 B , 设置传感器的采样频率为 10 kHz, 用气泵对管道充气, 使管内气压达到 2.5 MPa, 当泄漏点 O 与首端传感器 L_{OA} 距离为 100 cm 时, 对管道上的泄漏点采集了大量数据来计算速度, 以确保泄漏信号在实验管道中的传播速度更精确, 定位误差更小。通过实验采集的数据测得的速度如表 1 所示。可以计算出泄漏信号在管道中的传播速度为 174.788 5 m/s。

更改传感器的位置, 使 $L_{OA} = 5$ m, $L_{OB} = 1.5$ m。当有泄漏发生时, 传感器检测到的泄漏信号如图 2 所示。

将两路信号进行 EMD 分解, 计算各 IMF 与原信号的皮尔逊相关系数, 结果如表 2 所示。

表 1 实验采集的数据

Tab. 1 Data collected in the experiment

实验次数	采样点	速度 $v/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
1	512	172.576 2
2	512	176.582 5
3	1 024	169.482 3
4	1 024	174.419 7
5	2 048	180.817 5
6	2 048	174.852 8

表 2 信号各 IMF 分量与原信号的皮尔逊相关系数

Tab. 2 The Pearson correlation coefficient of IMF components signal with the original signal

$A - IMF$	$\rho_{A-IMF, A}$	$B - IMF$	$\rho_{B-IMF, B}$
IMF1	0.009 0	IMF1	0.002 4
IMF2	0.042 2	IMF2	0.051 1
IMF3	0.263 6	IMF3	0.136 5
IMF4	0.324 9	IMF4	0.382 4
IMF5	0.542 5	IMF5	0.780 2
IMF6	0.680 4	IMF6	0.613 5
IMF7	0.368 6	IMF7	0.405 7
IMF8	0.296 7	IMF8	0.310 7

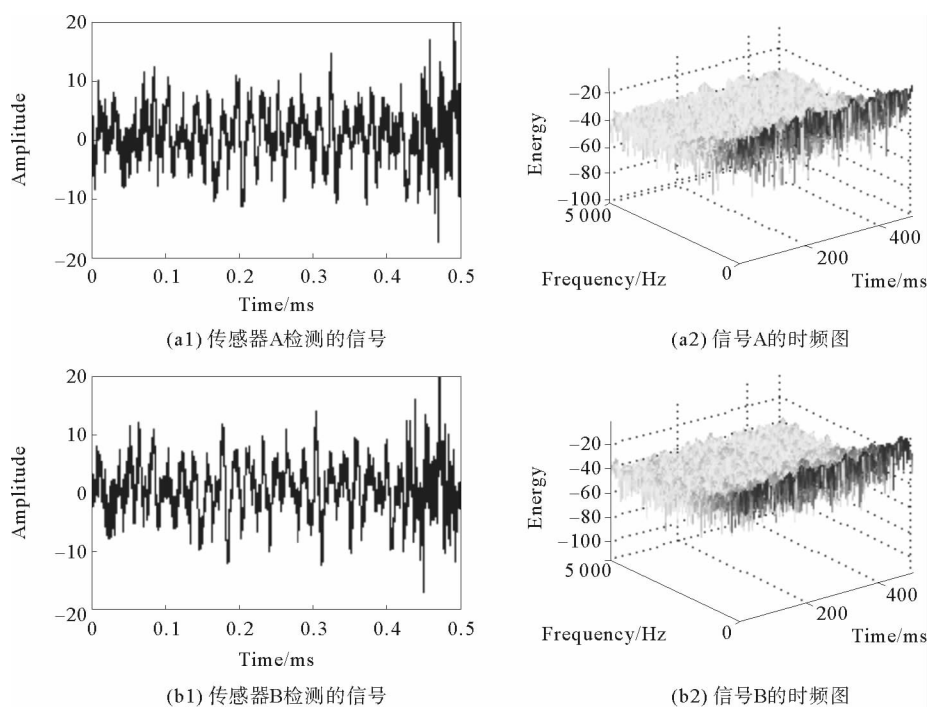


图 2 首尾两端传感器接收到的泄漏信号

Fig. 2 The leak signal received by both head and end sensors

根据表 2 数据可以确定阈值分别为 0.068 04 和 0.078 02。因此,首端和尾端传感器均选择 IMF3~IMF8 进行重构。重构后的信号及其频谱图如图 3 所示。

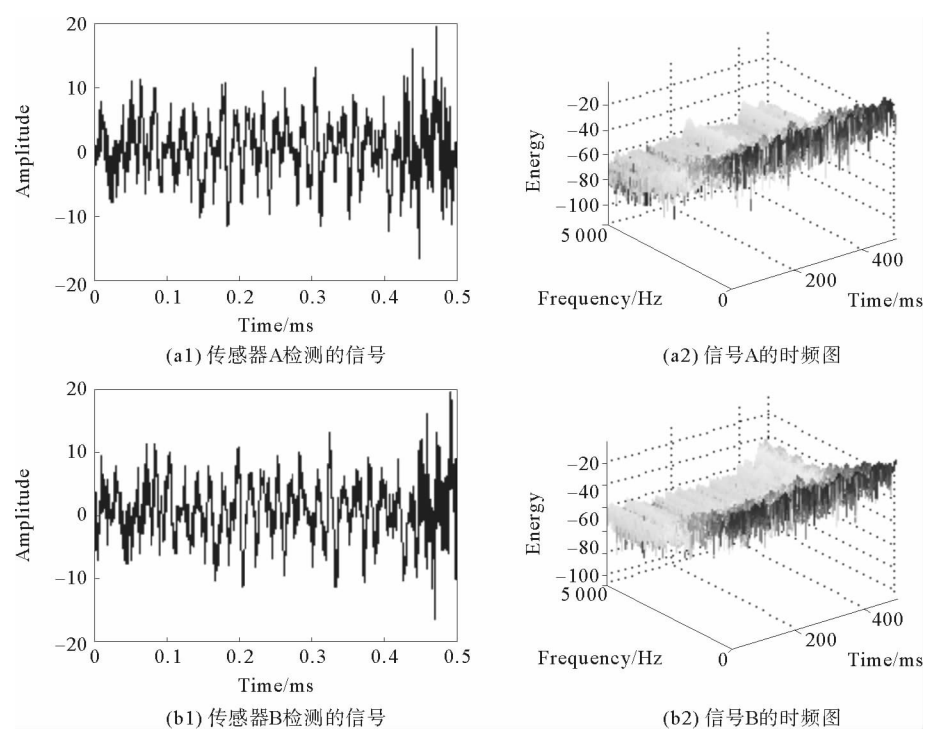


图 3 首尾两端传感器重构信号

Fig. 3 The reconstruction signal of both head and end sensors

从图 2 和图 3 信号及其频谱图可以看出,信号经过 EMD 分解重构,大部分噪声被去除。对采集的信号直接用互相关求得的时差结果如图 4 所示,对采集的信号进行 EMD 分解重构后采用 PHAT 加权互相关求得的时差结果如图 5 所示。

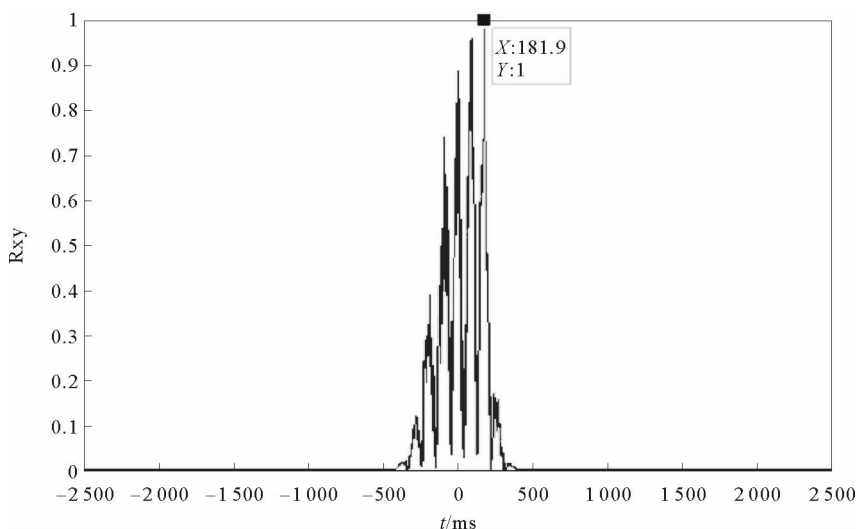


图 4 直接互相关求时延

Fig. 4 Time delay estimation based on GCC

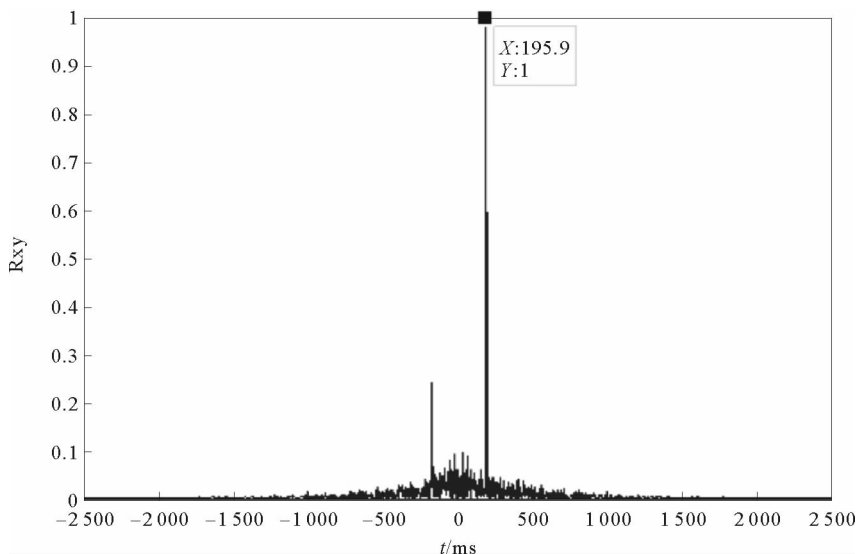


图 5 基于 EMD 分解重构的互相关求时延

Fig. 5 Time delay estimation based on EMD and PHAT-GCC

实验中的真实时差为 0.020 00 s,通过分析比较实验结果得出:利用互相关函数得出的时差为 0.018 19 s,误差为 9.05%,利用本文方法得出的时差为 0.019 59 s,误差为 2.05%,误差显著降低,根据公式(5)计算出泄漏点距离尾端传感器的距离 $L_{OB}=1.538$ m。

图 5 可以看出,本文方法由于采用 PHAT 加权函数,有效增强了信号中的高频成分,使互相关函数波峰更加突出,提高了时差估计精度与定位精度。

更改首尾传感器的位置,调整与漏孔间的距离,多次测量,对比直接互相关方法和目前常用的漏点定位方法^[28],得到的定位结果如表 3 所示。

表 3 实际距离与两种方法测得的距离

Tab. 3 The actual distance and the distance measured by two methods m

实验次数	1	2	3	4	5	6
实际距离	1.500	3.000	6.000	8.500	10.000	12.000
互相关方法	1.660	2.712	6.848	9.327	10.790	13.068
常用方法	1.598	3.165	6.314	8.327	10.281	12.480
本文方法	1.538	3.089	6.207	8.660	10.127	12.144

测量距离误差如图 6 所示。可以看出本文方法的定位误差明显小于直接用互相关方法和目前常用的管道检漏方法定位的误差。

6 结论

1) EMD 能够根据信号自身的特点将复杂信号自适应分解成不同时间尺度的本征模函数,选取合适的 IMF 可以提高信号的信噪比,提高定位精度;

2) 通过大量实验及实验结果分析表明,基于 EMD 分解重构的广义互相关时延估计的漏点定位系统是正确可行的,提出的方法得到的定位误差明显小于直接用互相关法和常用方法的定位误差,该方法不依赖于噪声特性,不需要设置经验参数,能够在含非平稳噪声时准确定位泄漏点;

3) 本研究针对的管道漏点定位系统是在直管道、单个漏点的情况下进行的实验,没有进行更加复杂条件下的实验研究。

参考文献:

[1]金浩,张来斌,梁伟,等.天然气管道泄漏声源特性及传播机理数值模拟[J].石油学报,2014,35(1):172-177.
JIN Hao,ZHANG Laibin,LIANG Wei,et al. Simulation research on leak source characteristics and propagation mechanism for natural gas pipeline[J]. Acta Petrolei Sinica,2014,35(1):172-177.

[2]庄须叶,王浚璞,邓勇刚,等.光纤传感技术在管道泄漏检测中的应用与进展[J].光学技术,2011,37(5):543-550.
ZHUANG Xuye,WANG Junpu,DENG Yonggang,et al. Optical fiber sensing technologies for pipeline leakage detection[J]. Optical technique,2011,37(5):543-550.

[3]孙良,王建林.气体管道泄漏的仿真建模[J].系统仿真学报,2011,23(7):1310-1314.
SUN Liang,WANG Jianlin. Modeling simulation of leaking gas pipeline[J]. Journal of System Simulation,2011,23(7):1310-1314.

[4]孟令雅,刘翠伟,刘超,等.基于特征量提取的输气管道微泄漏检测[J].中国石油大学学报(自然科学版),2014,38(6):153-160.
MENG Lingya,LIU Cuiwei,LIU Chao,et al. Characteristics extraction of acoustic leakage signal for natural gas pipeline[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science),2014,38(6):153-160.

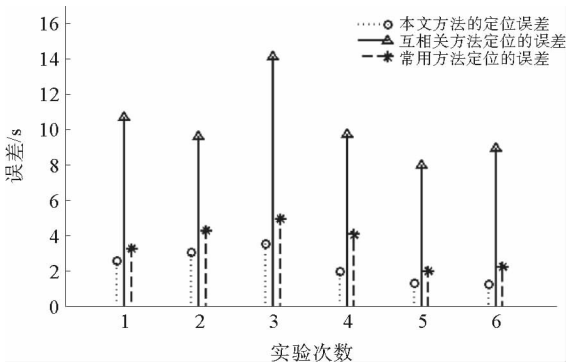


图 6 三种方法得到的距离误差

Fig. 6 The distance error calculated by three methods

- [5]郝永梅,徐明,李秀中,等. 基于广义概念的城市燃气管道泄漏精确定位[J]. 工业安全与环保,2016,4(1):80-84.
HAO Yongmei,XU Ming,LI Xiuzhong,et al. The precise location of city gas pipeline leak based on the generalized concept [J]. Industrial Safety and Environmental Protection,2016,4(1):80-84.
- [6]杨进,文玉梅,李平. 非泄漏固定声源干扰下的管网泄漏定位技术研究[J]. 仪器仪表学报,2012,33(2):248-254.
YANG Jin,WEN Yumei,LI Ping. Research on leak location in the presence of non-leakage noises in water distribution pipelines[J]. Chinese Journal of Scientific Instrumentation,2012,33(2):248-254.
- [7]钱征文,程礼,李应红. 利用奇异值分解的信号降噪方法[J]. 振动、测试与诊断,2011,31(4):459-463.
QIAN Zhengwen,CHENG Li,LI Yinghong. Noise reduction method based on singular value decomposition[J]. Journal of Vibration,Measurement & Diagnosis,2011,31(4):459-463.
- [8]姜洲,丁华平,沈庆宏. 具有瞬时较大波动的信号降噪方法研究[J]. 电子测量技术,2015,38(3):116-119.
JIANG Zhou,DING Huaping,SHEN Qinghong. Research of denoising method of signal with temporal large fluctuation [J]. Electronic Measurement Technology,2015,38(3):116-119.
- [9]郭晨展,文玉梅,李平,等. 采用 EMD 的管道泄漏声信号增强[J]. 仪器仪表学报,2015,36(6):1397-1405.
GUO Chencheng,WEN Yumei,LI Ping,et al. Enhancement of leak signals using EMD in pipeline[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument,2015,36(6):1397-1405.
- [10]贾瑞生,赵同彬,孙红梅,等. 基于经验模态分解及独立成分分析的微震信号降噪方法[J]. 地球物理学报,2015,58(3):1013-1023.
JIA Ruisheng,ZHAO Tongbin,SUN Hongmei,et al. Microseismic signal denoising method based on empirical mode decomposition and independent component analysis[J]. Chinese Journal of Geophysics,2015,58(3):1013-1023.
- [11]HUANG N E,SHEN Z,Long S R,et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[J]. Proceedings: Mathematical, Physical and Engineering Sciences,1998,454(1971):903-995.
- [12]PENG J G,WANG W L,FANG M. Hilbert-Huang transform (HHT) based analysis of signal characteristics of vortex flowmeter in oscillatory flow[J]. Flow Measurement and Instrumentation,2012,26(4):37-45.
- [13]苗晟,王威廉,姚绍文. Hilbert-Huang 变换发展历程及其应用[J]. 电子测量与仪器学报,2014,28(8):812-818.
MIAO Sheng,WANG Weilian,YAO Shaowen. Historical development of HHT and its application[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation,2014,28(8):812-818.
- [14]路晓妹,寇文珍,段渭军. 基于 EMD 分解重构的互相关时延估计方法[J]. 测控技术,2013,32(7):45-48.
LU Xiaomei,KOU Wenzhen,DUAN Weijun. Cross-correlation delay estimation method based on EMD decomposition and reconstruction algorithm[J]. Measurement & Control Technology,2013,32(7):45-48.
- [15]孙洁娣,肖启阳,温江涛,等. 局域均值分解分析的管道泄漏孔径识别及定位[J]. 仪器仪表学报,2014,35(12):2835-2842.
SUN Jiedi,XIAO Qiyang,WEN Jiangtao,et al. Pipeline leak aperture classification and location based on local mean decomposition analysis[J]. Chinese Journal of Scientific Instrumentation,2014,35(12):2835-2842.
- [16]OZEVIN D,HARDING J. Novel leak localization in pressurized pipeline networks using acoustic emission and geometric connectivity[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping,2012,92(4):63-69.
- [17]OMOLOGO M,SVAIZER P. Use of the crosspower-spectrum phase in acoustic event location[J]. IEEE Transactions on Acoustics,Speech and Signal Processing,1997,5(3):288-292.
- [18]CHEN J D,BENESTY J,HUANG Y T. Performance of GCC and AMDF based time delay estimation in practical reverberant environments [J]. EURASIP Journal on Advances in Signal Processing,2005(1):25-36.

- [19] DUFF A L, HAMDI SE, PLANTIER G, et al. Time delay estimation for acoustic source location by means of short-time cross correlation [C]//Sensors, IEEE, 2011:1885-1888.
- [20] KNAPPP C H, CARTER G C. The generalized correlation method for estimation of time delay[J]. IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing, 1976, 24(4):320-27.
- [21] 金中薇, 姜明顺, 隋青美, 等. 基于广义互相关时延估计算法的声发射定位技术[J]. 传感技术学报, 2013, 26(11):1513-1518.
- JIN Zhongwei, JIANG Mingshun, SUI Qingmei, et al. Acoustic emission location technique based on generalized cross-correlation time difference estimation algorithm[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2013, 26(11):1513-1518.
- [22] ALVANITOPOULOS P F, PAPAVALASILEIOU M, ANDREADIS I, et al. Seismic intensity feature construction based on the Hilbert-Huang transform[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2012, 61(2):326-337.
- [23] GACI S. The use of wavelet-based denoising techniques to enhance the first-arrival picking on seismic traces[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2014, 52(8):4558-4563.
- [24] BEENAMOL M, PRABAVATHY S, MOHANALIN J. Wavelet based seismic signal de-noising using Shannon and Tsallis entropy[J]. Computers & Mathematics with Applications, 2012, 64(11):3580-3593.
- [25] CHATLANI N, SORAGHAN JJ. EMD-based filtering (EMDF) of low-frequency noise for speech enhancement[J]. IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing, 2012, 20(4):1158-1166.
- [26] 王玉静, 康守强, 张云, 等. 基于集合经验模态分解敏感固有模态函数选择算法的滚动轴承状态识别方法[J]. 电子与信息学报, 2014, 36(3):595-600.
- WANG Yujing, KANG Shouqiang, ZHANG Yun, et al. Condition recognition method of rolling bearing based on ensemble empirical mode decomposition sensitive intrinsic mode function selection algorithm[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2014, 36(3):595-600.
- [27] PENG Z K, TSE P W, CHU F L. A comparison study of improved Hilbert-Huang transform and wavelet transform; Application to fault diagnosis for rolling bearing[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2005, 19(5):974-988.
- [28] 孙立瑛, 李一博, 曲志刚, 等. EMD 信号分析方法的声发射管道泄漏检测研究[J]. 振动与冲击, 2007, 26(10):161-164.
- SUN Li ying, LI Yibo, QU Zhigang, et al. Study on acoustic emission detection for pipeline leakage based on EMD signal analysis method[J]. Journal of Vibration and Shock, 2007, 26(10):161-164.

(责任编辑:傅 游)