

气体管道泄漏声发射单一非频散模态定位*

杨丽丽¹, 谢昊飞², 李帅永², 李伟雄¹, 何明峰¹

(1 广西区气象技术装备中心 南宁 530000; 2 重庆邮电大学 工业物联网与网络化控制教育部重点实验室 重庆 400065)

摘要:针对气体管道泄漏声发射信号的多模态、频散特性导致互相关泄漏定位误差大的问题,提出采用单一非频散模态提取的气体管道泄漏声发射定位方法。对检测信号的互谱加窗,并根据模态波数确定窗参数,可获得泄漏声发射信号的单一非频散模态导波的互谱。对单一非频散模态导波的互谱进行傅里叶反变换,得到泄漏声发射中单一非频散模态信号的互相关函数以及时延估计,就可以采用单一非频散模态声速,更准确计算出泄漏位置。对气体管道泄漏进行定位实验,相比用未经分解的泄漏声发射信号进行定位,由于声发射单一非频散模态信号的相关性增强,且选用的声速更准确,定位相对误差平均降低7%以上。这表明,通过提取泄漏信号互谱的单一非频散模态成分进行时延估计,可以提高泄漏检测的有效性和减小定位误差。

关键词: 泄漏定位; 气体管道; 单一模态提取; 互功率谱

中图分类号: TN911.7 TH86 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.40

Leak location in gas pipelines by extraction of single non-dispersive mode from leakage-induced acoustic emission signal

Yang Lili¹, Xie Haofei², Li Shuaiyong², Li Weixiong¹, He Mingfeng¹

(1. Guangxi Autonomous Region Meteorological Technology Equipment Center, Nanning 530000, China; 2. Key Laboratory of Industrial Internet of Things & Networked Control, Ministry of Education, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: The correlation-based leak location errors are large due to the multi-modal and dispersive characteristics of leakage-induced acoustic emission. One kind of leak location in the gas pipelines by extracting the single non-dispersive mode is proposed in this study. The cross-power spectrum of the single modal and non-dispersive component in the leak acoustic emission can be obtained by applying the weighing window with parameters of the wave number of the relative mode. Then, the cross-power spectrum of a single modal and non-dispersive component is analyzed by the inverse Fourier-transformed to acquire the cross-correlation for estimating the time delay. Hence, the acoustic velocity of a single modal and non-dispersive component can be used for calculating the leak position more accurately. The experiments of leak location indicate that the relative error is reduced at least 7%. The reason is the enhancement of correlativity of a single modal and non-dispersive component in leak acoustic emission and the adoption of a more accurate acoustic velocity. It shows that the time-delay estimation by extracting the single-modal and non-dispersive component in the cross-power spectrum of leakage-induced acoustic emission signals will enhance the leak detection and location.

Keywords: leak location; gas pipeline; single mode extraction; cross-power spectrum

1 引言

天然气作为燃料因热值高、清洁,受到世界各国青睐。我国“十二五”规划指出要增加天然气消费,加快全

国天然气管道建设,到2015年95%以上城市用上天然气。天然气是易燃易爆有毒气体,一旦发生管道泄漏,将威胁人们的生命财产安全。因此及时发现和定位天然气管道泄漏,对社会可持续发展具有重要意义。

目前天然气管道泄漏检测方法主要有管内探测球法、

光纤传感器检测法、声学检测法等。管内探测球法利用检测球获得管线内壁缺陷的详细信息来检测定位^[1-2]。但这种检测方法一般适用于大口径管道,对分支多,管径多变的城市天然气管道并不适合。光纤检测法能快速检测微小泄漏,定位精度高^[3-4]。但需要沿管线铺设光纤,对已建管道须重新铺设,成本较高。声学检测方法包括管内音波法和管外声发射检测法。管内音波法,将传感器置于管道气体内,通过检测沿气体传播的泄漏声信号来定位,检测的信号形式简单,声速稳定,通过相关时延定位准确^[5-6]。但这种方法须对管道进行打孔安装传感器,传感器与管内气体接触要求传感器耐高压耐腐蚀。管外声发射检测方法通过采集管壁声信号进行定位,传感器安装方便,泄漏信号易获取,检测成本低^[7-8]。气体管道泄漏声发射信号沿管道传播能量主要集中在管壁^[9-14]。因此管外声发射检测法对气体管道泄漏检测具有独特的优势。

导波在管道内外两边界面的反射和折射会产生模式转换,使导波有多种模式,泄漏信号组成形式复杂。导波在传播过程中存在频散,不同频率的导波波速不同^[15]。导波的多模式特性和频散特性使声发射的传播速度随模式成分和频率的不同而不同。对未经分解的泄漏声发射信号进行相关时延分析,并根据泄漏信号能量中起主要作用的模式导波波速计算定位,会产生较大的泄漏定位误差。因此提取泄漏信号中频散小的单一模式导波进行相关定位非常重要。吴银锋等提出利用小波变换提取气体管道泄漏的高能量模式来进行相关时延定位^[16]。该方法通过实测声速进行定位,需要3只以上传感器检测泄漏信号。Rewerts L. S. 等人^[17]分析充液管道中波传播的频散特性,解析泄漏信号由多种模式导波组成,通过对泄漏源两端检测的声发射信号进行时间-频率变换和时间-空间变换来提取信号的单一模式,对两单一模式信号进行相关分析理论上实现泄漏声发射源的准确定位。但该模式提取方法需要获得两检测点附近 $\pm \Delta$ 范围内的声发射信号,即实际定位中泄漏源两端的每个检测点附近至少需要两只传感器同时采集信号。焦敬品等人^[18]在Rewerts L. S. 等人模式提取算法的基础上,根据某处传感器接收的导波波形可确定任意位置处的传播波形的原理,利用两只传感器拾取泄漏信号实现声发射单一模式定位。但实验结果显示对于充液管道泄漏,40 m以内不同检测距离下,定位相对误差大多在4%以上,最高达13%,其定位误差较大。

根据导波理论,对检测信号互谱加窗,提取泄漏声发射信号中单一的且频散小的模式的互谱。对单一模式导波的互谱进行傅里叶反变换,得到互相关函数,从而估计出距离差,实现漏点定位。实验对中低压气体管道不同检测距离下的泄漏定位的结果表明,通过互谱加高斯窗提取单一模式成分进行定位,减少了多模式导波干扰,降低了泄漏定位的误差。

2 多模式导波的相关性

管道泄漏检测示意图如图1所示。管道泄漏产生的声发射信号由多模式导波组成,假设泄漏源信号含有 n 种模式导波,则泄漏源信号 $x(t)$ 可表示为^[17]:

$$x(t) = \sum_{u=1}^n s_u(t) \quad (1)$$

式中: $s_u(t)$ 是泄漏源的第 u 种模式导波。

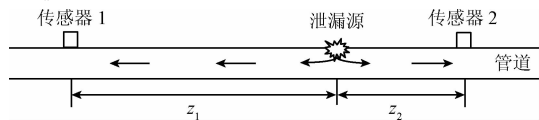


图1 管道泄漏检测示意图

Fig. 1 Schematic diagram of leak detection in pipelines

图1中管道上传感器1距离泄漏源为 z_1 ,传感器1的检测信号由泄漏信号和噪声组成,根据导波理论泄漏声发射信号各模式导波沿管壁传播会产生衰减和时间延迟。泄漏声发射沿管道传播,各模式导波波速不同,泄漏源信号到达检测点的时间延迟也不同。因此,传感器1的检测信号可表示为:

$$x_1(t) = \sum_{u=1}^n \alpha_{1u} s_u(t - \tau_{1u}) + n_1(t) \quad (2)$$

式中: α_{1u} 、 τ_{1u} 是泄漏源第 u 种模式导波传播到传感器1时的衰减因子和时间延迟, $n_1(t)$ 是传感器1检测的噪声。假设两不同传感器检测的噪声以及噪声与泄漏信号互不相关。

对式(2)进行傅里叶变换,可得到检测信号的频谱为:

$$X_1(\omega) = \sum_{u=1}^n \alpha_{1u} S_u(\omega) \exp(-j\omega\tau_{1u}) + N_1(\omega) \quad (3)$$

式中: $S_u(\omega)$ 为泄漏源处导波 $s_u(t)$ 的频谱, $X_1(\omega)$ 、 $N_1(\omega)$ 分别为传感器1检测信号 $x_1(t)$ 和噪声 $n_1(t)$ 的频谱。

时间延迟与传播距离、导波的传播速度存在函数关系:

$$\tau_{1u} = z_1/c_{pu} \quad (4)$$

式中: c_{pu} 是第 u 种模式导波的相速度。

导波的相速度与波数存在函数关系:

$$c_{pu} = \omega/k_u(\omega) \quad (5)$$

式中: $k_u(\omega)$ 是第 u 种模式导波的波数。

结合式(4)、(5)可以得出:

$$\tau_{1u} = k_u(\omega) z_1/\omega \quad (6)$$

将式(6)的结果代入式(3),可得:

$$X_1(\omega) = \sum_{u=1}^n \alpha_{1u} S_u(\omega) \exp[-jk_u(\omega) z_1] + N_1(\omega) \quad (7)$$

同理可求得管道上传感器2检测信号的频谱为:

$$X_2(\omega) = \sum_{u=1}^n \alpha_{2u} S_u(\omega) \exp[-jk_u(\omega) z_2] + N_2(\omega) \quad (8)$$

式中: $X_2(\omega)$ 是传感器 2 检测信号 $x_2(t)$ 的频谱。根据式(7)和(8)对检测信号进行相关分析:由于噪声与噪声,噪声与泄漏信号不相关,两检测信号相关性主要由泄漏信号中的各模态导波的相关性决定。根据模态导波理论^[18]:1)当 $u \neq v$ 时, S_u, S_v 是两种不同的模态波,两种波的振动形式不同波形不同,两种导波的相关性弱;2)当 $u = v$ 时, S_u, S_v 是同一种模态导波,若该模态导波频散较大,导波波形在传播过程中发生畸变,随传播距离差增大,两导波的相关性越差;3)当 $u = v$ 时, S_u, S_v 是同一种模态波,若该模态导波频散较小,随传播距离差增大,两导波波形几乎不变,其相关性较好。根据3种情况导波的相关性分析可知,互相关时延主要由检测信号中同一种模态波的相关值决定。当信号由多种模态导波组成时,由于模态不同和各模态频散不同,信号的传播速度是各模态导波叠加的平均速度。平均速度近似为能量最大的模态导波波速。若直接用检测信号互相关时延和泄漏信号能量中起主要作用的模态导波波速来计算定位,定位误差将会比较大。因此提取频散小的单一声发射模态进行定位是十分必要的。

3 声发射互谱单一模态成分提取

通过泄漏信号的互谱进行加窗,可以获得声发射单一模态互谱。在气体管道泄漏声发射信号频带范围内,任意频率 ω_0 处构造互谱加高斯窗分析表达式^[18]为:

$$C_{x_1x_2}(\omega_0) = \int_0^\infty X_1(\omega) X_2^*(\omega) \exp(-\beta\gamma^2(\omega - \omega_0)^2 - j\gamma(\omega - \omega_0)) d\omega \quad (9)$$

式中: * 表示复共轭, $\beta > 0$ 为常数。 γ 是波数和两信号时延的函数。 $\exp(-\beta\gamma^2(\omega - \omega_0)^2)$ 为高斯窗函数, $\beta\gamma^2$ 控制窗宽。

将式(7)、(8)代入式(9),同时考虑到不同采集点的噪声以及噪声与泄漏信号互不相关,这样噪声与噪声,噪声与泄漏信号互谱为0,则:

$$G_{x_1x_2}(\omega_0) = \sum_{u=1, v=1}^n \alpha_{1u} \alpha_{2v} \int_0^\infty S_u(\omega) S_v^*(\omega) \exp(j(k_v(\omega)z_2 - k_u(\omega)z_1)) \times \exp(-\beta\gamma^2(\omega - \omega_0)^2 - j\gamma(\omega - \omega_0)) d\omega \quad (10)$$

当窗宽足够小时, $\omega \approx \omega_0$, 则 $S_u(\omega) \approx S_u(\omega_0)$, $S_v(\omega) \approx S_v(\omega_0)$ 。对波数用泰勒级数展开得 $k_u(\omega) \approx k_u(\omega_0) + (\omega - \omega_0)k'_u(\omega_0)$, $k_v(\omega) \approx k_v(\omega_0) + (\omega - \omega_0)k'_v(\omega_0)$, 代入式(10)得:

$$G_{x_1x_2}(\omega_0) = \sum_{u=1, v=1}^n \alpha_{1u} \alpha_{2v} S_u(\omega_0) S_v^*(\omega_0) \times \exp(j(k_v(\omega_0)z_2 - k_u(\omega_0)z_1)) \times \int_0^\infty \exp[-\beta\gamma^2(\omega - \omega_0)^2 + j(k'_v(\omega_0)z_2 - k'_u(\omega_0)z_1 - \gamma)(\omega - \omega_0)] d\omega \quad (11)$$

令 $\beta\gamma^2 = A$, 则 $j(k'_v(\omega_0)z_2 - k'_u(\omega_0)z_1 - \gamma) = B$, $(\omega - \omega_0) = x$, 则式(11)中的积分式可表示为:

$$\int_{-\omega_0}^\infty \exp(-Ax^2 + Bx) dx = \exp\left(\frac{B^2}{4A}\right) \int_{-\omega_0}^\infty \exp\left(-A\left(x - \frac{B}{2A}\right)^2\right) dx = \exp\left(\frac{B^2}{4A}\right) \int_{-\omega_0}^\infty \exp\left(-\left(\sqrt{A}x - \frac{B}{2\sqrt{A}}\right)^2\right) dx \quad (12)$$

$$\text{令 } h = \sqrt{A}x - \frac{B}{2\sqrt{A}}, \text{ 式(12)可进一步变换为:} \\ \exp\left(\frac{B^2}{4A}\right) \int_{-\sqrt{A}\omega_0 - \frac{B}{2\sqrt{A}}}^\infty \exp(-h^2) dh = \frac{1}{2\sqrt{A}} \sqrt{\frac{\pi}{A}} \left(1 - \text{erf}\left(-\sqrt{A}\omega_0 - \frac{B}{2\sqrt{A}}\right)\right) \exp\left(\frac{B^2}{4A}\right) \quad (13)$$

式(13)中积分的指数项为高斯函数,高斯函数的不定积分不能用初等函数表示,但定积分存在。在此结果仍用积分式来表示。式(13)积分式 $\text{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x \exp(-t^2) dt$ 。

$$\text{由式(12)、(13)得到:} \\ \int_{-\omega_0}^\infty \exp(-Ax^2 + Bx) dx = \frac{1}{2\sqrt{A}} \sqrt{\frac{\pi}{A}} \left(1 - \text{erf}\left(-\sqrt{A}\omega_0 - \frac{B}{2\sqrt{A}}\right)\right) \exp\left(\frac{B^2}{4A}\right) \quad (14)$$

$$\text{将式(14)中 } A, B \text{ 变量还原得:} \\ \int_{-\omega_0}^\infty \exp(-Ax^2 + Bx) dx = \frac{1}{2\sqrt{\frac{\pi}{\beta\gamma^2}}} \left(1 - \text{erf}\left(-\sqrt{\beta\gamma^2}\omega_0 - \frac{j(k'_v(\omega_0)X_2 - k'_u(\omega_0)X_1 - \gamma)}{2\sqrt{\beta\gamma^2}}\right)\right) \times \exp\left(-\frac{((k'_v(\omega_0)X_2 - k'_u(\omega_0)X_1)/\gamma - 1)^2}{4\beta}\right) \quad (15)$$

式(15)的指数项是有关 γ 的高斯窗函数, 4β 决定窗宽, β 越小,窗越窄。令 $\gamma = k'_i(\omega_0)z, u, v$ 有不同的组合,当 $k'_u(\omega_0) = k'_v(\omega_0) = k'_i(\omega_0), z = z_B - z_A$ 时,在信号频率范围内,无论 ω_0 取何值,指数项取得最大值1,同时积分式 $\text{erf}(x)$ 值的虚部为0。此时,若 ω_0 不变,分式 $\text{erf}(x)$ 值的实部也不变。即 $\omega = \omega_0$ 时式(15)取得实部的最大值,式(15)的指数项可近似成实采样函数 δ_{ω_i} 。式(15)可改写为:

$$\int_{-\omega_0}^\infty \exp(-Ax^2 + Bx) dx = \frac{1}{2\sqrt{\frac{\pi}{\beta\gamma^2}}} (1 - \text{erf}(-\sqrt{\beta\gamma^2}\omega_0)) \delta_{\omega_i} \quad (16)$$

令 $C = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\pi}{\beta\gamma^2}} (1 - \text{erf}(-\sqrt{\beta\gamma^2}\omega_0))$, 其大小只与 ω_0 有关,与模态组合无关。将式(16)代入式(11)得:

$$G_{x_1x_2}(\omega_0) = \sum_{u=1, v=1}^n C \alpha_{1u} \alpha_{2v} S_u(\omega_0) S_v^*(\omega_0) \delta_{\omega_i} \exp(j(k_v(\omega_0)z_2 - k_u(\omega_0)z_1)) \quad (17)$$

分析式(17)可知,当 $u = v = i, z = z_2 - z_1$ 时,经过

采样提取第 i 种模态导波成分。即:

$$G_{x_i, x_2}(\omega_0) = C\alpha_{1i}\alpha_{2i}S_i(\omega_0)S_i^*(\omega_0)\exp(j(k_i(\omega_0)z)) \quad (18)$$

分析式(18)可知,式中 $\alpha_{1i}\alpha_{2i}S_i(\omega_0)S_i^*(\omega_0) \cdot \exp(j(k_i(\omega_0)z))$ 是第 i 种模态导波互谱在 ω_0 的值。 $G_{x_i, x_2}(\omega_0)$ 大小是第 i 种模态导波互谱在 ω_0 的值的 C 倍, $G_{x_i, x_2}(\omega_0)$ 包含了两个传感器的距离差信息,因此可来定位管道泄漏。

为了计算 $G_{x_i, x_2}(\omega_0)$, 需要已知窗参数 γ 和 β 。 γ 由 $\gamma = k'_i(\omega_0)z$ 确定,一旦选定模态,就能计算出波数 $k_i(\omega_0)$ 以及 $k'_i(\omega_0)$ 。但在定位分析中,两导波的传播距离差未知,因此选取可能的 z 值,逐个定出 γ ,并根据式(18)计算出对应 $G_{x_i, x_2}(\omega_0)$, 其中的最大值,就是要提取的第 i 种模态导波成分。由于 β 取值受两个条件限制:1)式(10)变换到式(11)时,要求窗宽要足够小即 $\beta\gamma^2$ 要足够大;2)式(15)中指数项是有关 γ 的高斯窗函数,窗宽 4β , β 越小,窗宽越小,这时指数项可近似成实采样函数 $\delta_{\text{窗}}$,从而提取出单一模态互谱。综合条件1)和2),当 γ 确定时, β 不宜过大或过小,否则条件不满足,不能有效提取出单一模态互谱。

4 泄漏定位

互谱反映信号在频域的相关性,互谱的傅里叶反变换-互相关函数描述了信号在时域的相关性。通过泄漏点两端传感器1、2采集的信号 $x_1(t)$ 和 $x_2(t)$ 的互相关函数 $R_{x_1, x_2}(\tau)$ 估计两检测信号的时延,就可以定位泄漏点。对式(18)第 i 种模态导波的互谱求傅里叶反变换,得到根据第 i 种模态导波互相关定位的表达式为:

$$R_{ix, x_2}(\Delta z) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} 0G_{x_i, x_2}(\omega) \exp(jk_i(\omega)z) d\omega = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} 0C\alpha_{1i}\alpha_{2i}S_i(\omega)S_i^*(\omega) \times \exp(jk_i(\omega)(z + \Delta z)) d\omega \quad (19)$$

分析式(19),当 $jk_i(\omega)(z + \Delta z) = 0$ 时,即 $\Delta z = -z = z_A - z_B$ 时,互相关函数取得最大值。设最大值对应两传感器距离差为 Δz_0 , 传感器1、2间距为 L , 则泄漏源到管道传感器1点的距离为:

$$z_1 = (L + \Delta z_0)/2 \quad (20)$$

为了评定两信号的相关性,计算相关系数:

$$\rho_{x_i, x_2}(\Delta z) = \frac{R_{x_i, x_2}(\Delta z)}{\sqrt{R_{x_i, x_1}(0)R_{x_2, x_2}(0)}} \quad (21)$$

相关系数越大,相关性就越高。第 i 种模态导波的相关系数为:

$$\rho_{i, x_1, x_2}(\Delta z) = \frac{R_{i, x_1, x_2}(\Delta z)}{\sqrt{R_{i, x_1, x_1}(0)R_{i, x_2, x_2}(0)}} \quad (22)$$

5 泄漏声发射信号检测及单模态定位分析

5.1 气体管道泄漏声发射检测实验平台

气体管道泄漏声发射检测定位实验平台,主要由输气管网系统和声发射检测系统构成。其中输气管网系统如图2所示,钢管全长113 m,直径 $\Phi 26.9 \times 2.8$ mm。管道能承受的最高压力0.3 MPa。实验通过空气压缩机向储气罐充气,储气罐向钢管道提供中低压气流。放气阀放气仿真漏孔泄漏,放气阀内径为10 mm,可螺旋调节泄漏孔大小。管道泄漏声发射检测定位系统如图3所示,包括声发射传感器、前置放大器、数据采集卡。传感器安装在管道外壁上,拾取沿管壁传播的泄漏声发射信号。前置放大器放大传感器输出信号。数据采集卡与计算机相连,由计算机控制数据采集,并对采集的信号进行分析、显示和保存。



图2 输气管网系统实物

Fig. 2 The physical object of gas pipeline network

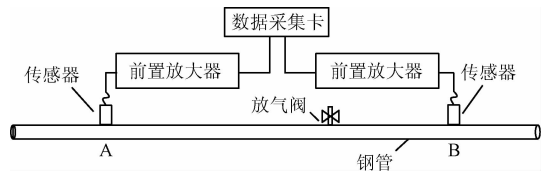


图3 输气管道泄漏声发射检测定位系统

Fig. 3 Leak detection system by using acoustic emission in gas pipelines

气体管道泄漏模态定位中,选择合适的模态进行定位非常关键。模态选择要考虑信号频带内各模态导波特性。因此分析不同条件下检测的气体管道泄漏声发射信号的频率特性,确定泄漏信号频带;分析泄漏信号频带内管道上模态导波特性,选择频散小,能远距离传播的模态进行定位分析。信号处理流程:1)滤波,根据噪声和泄漏信号的不同特征,进行滤波,减少噪声的干扰;2)计算滤波后信号的互谱;3)确定要选取的模态,根据模态参数设置窗参数,对互谱加窗提取互谱中的单一模态互谱;4)定位,对单一模态互谱进行反傅里叶变换得到互相关函数,从而估计两传感器到泄漏源的距离差,计算出泄漏位置。

5.2 泄漏信号频谱分析

传感器检测信号特征与多种因素有关,不同管内压力、泄漏口径、传播距离下检测的声发射信号各有不同^[19]。图4~7所示为不同条件下检测的信号频谱。图4(a)所示为无泄漏时采集到的背景噪声,噪声能量主要集中在低频3 kHz以内;图4(b)所示为泄漏信号频谱,其频率分布较广,频率分布在3~15 kHz。泄漏信号与噪声频带无重叠,因此选择频率在3 kHz以上的检测信号用于定位,可避免低频噪声的干扰。图5所示为不同压力条件下的声发射信号频谱,由图可知管道压力越大,检测信号能量越大,同时激发出更多高频成分,信号主要能量频带向高频转移。图6反映了泄漏孔径增大,信号能量变大,但对信号频率分布影响较小,能量主要集中在低频部分。图7显示了当传播距离增加时,信号衰减,且高频部分衰减比低频部分更快,使信号能量集中频率向低频转移。综合图5~7可知,在不同泄漏条件下,特别在管内压力小、泄漏孔径小、传播距离长时,信号能量主要集中在低频3~8 kHz,因此选择该频带模态信号更有利于实际泄漏定位。

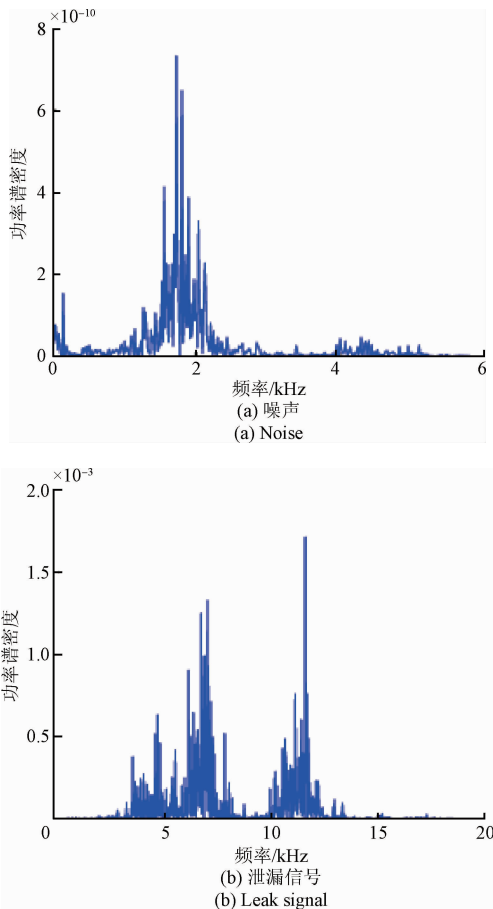


图4 噪声、泄漏信号频谱

Fig. 4 Spectrum of noise and leak signal

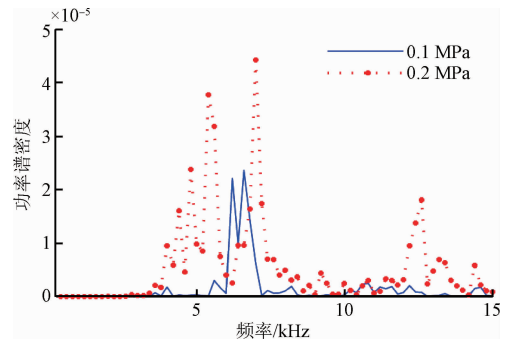


图5 不同管内压力下泄漏信号频谱

Fig. 5 Spectrum of leak signal in different pipeline pressures

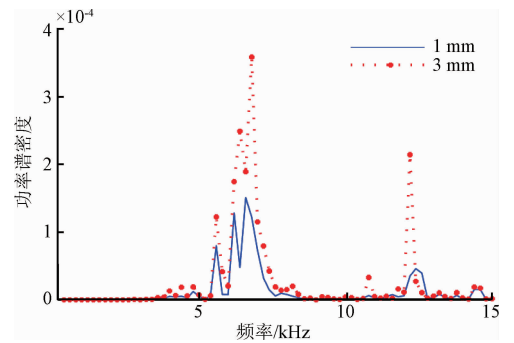


图6 不同泄漏孔径下泄漏信号频谱

Fig. 6 Spectrum of leak signal in different apertures

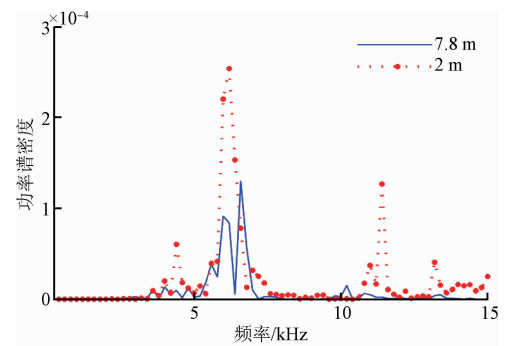


图7 不同传播距离下泄漏信号频谱

Fig. 7 Spectrum of leak signal in different transmission distances

5.3 导波模态分析

根据圆管中超声导波理论^[20],对实验钢管 $\Phi 26.9 \times 2.8$ mm 进行频散分析。图8所示为实验管道的频散曲线。其中 $L(n, m)$, $F(n, m)$ 表示管道中的纵向模态和弯曲模态。 n 表示周向阶次, m 表示模数(n, m 都为整数)。根据气体管道泄漏声发射信号频谱分布,中低压气体管道泄漏信号能量主要集中在频率3~8 kHz之间。由图8

可知在该频段内,管道中传播的模式数最少,只有纵向模式 $L(0,1)$ 和弯曲模式 $F(1,1)$ 两种模式。所以为了避免多模式叠加,降低信号复杂程度,选择对该频段的信号进行分析。模式选择还要考虑信号稳定性及模式导波能传播的距离。从图8可知在低频 $L(0,1)$ 模式几乎无频散,信号传播过程波形不畸变,信号更稳定,信号相关性更强。同时考虑到纵向模式比弯曲模式的径向位移更小,轴向位移更大,纵向模式导波沿管道传播的衰减更小,在远距离传播中更容易检测。因此远距离泄漏检测定位中选择 $L(0,1)$ 模式更合适。

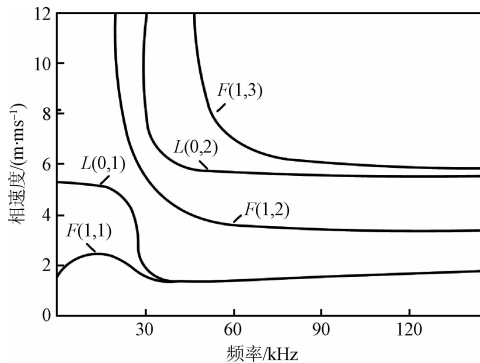


图8 $\Phi 26.9 \times 2.8$ mm 气体钢管频散曲线
Fig. 8 Dispersive curve of steel pipeline with 26.9×2.8 mm

5.4 泄漏声发射单一模式定位

根据泄漏信号频谱分析及管道导波模式分析,选择泄漏信号 3 ~ 8 kHz 频带内的 $L(0,1)$ 模式进行定位。即式(19)中第 i 种模式选择为 $L(0,1)$,并以 $L(0,1)$ 的波数来确定窗参数 γ 。经过反复实验,另一个窗参数 β 取 0.001 时效果较好。图9所示为用未经分解的泄漏信号进行相关时延定位的结果(远距离泄漏检测时,信号能量主要集中在 $L(0,1)$ 模式,因此定位时以信号频带内 $L(0,1)$ 模式的平均波速计算)。图10所示为对泄漏信号的互谱加高斯窗提取 $L(0,1)$ 模式进行定位的结果。对比图8~9的相关系数可知,未经分解的泄漏信号的相关系数为 0.165 3,提取 $L(0,1)$ 模式定位的相关系数为 0.356 9。模式提取使相关系数提高了近一倍。对比两种定位方法得到的距离差,发现两种结果相差较大。已知两传感器间距为 78.03 m,利用式(20)分别计算两种定位方法估计的 z_1 :用未经分解的泄漏信号进行定位的结果为 56.09 m,提取泄漏信号中 $L(0,1)$ 模式定位的结果为 58.83 m,而实际距离为 58.09 m。两种方法估计 z_1 的绝对误差分别为 2 和 0.74 m,相对误差为 3.44% 和 1.27%。即采用模式提取定位算法降低了气体管道泄漏定位的误差。

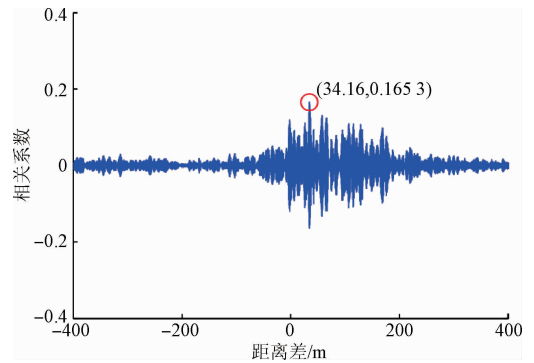


图9 用未经分解的泄漏信号定位估计的距离差
Fig. 9 Estimation errors of leak location using undecomposed leak signal

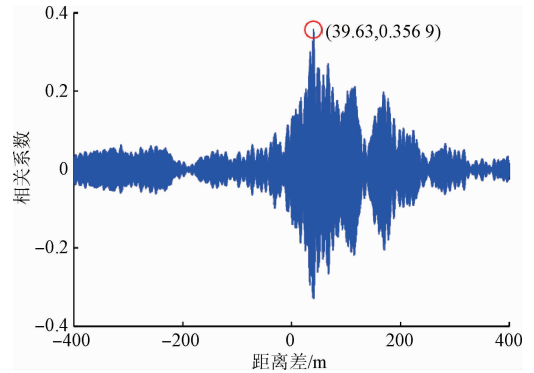


图10 提取泄漏信号中 $L(0,1)$ 模式定位估计的距离差
Fig. 10 Estimation errors of leak location using extracted modal signal $L(0,1)$

根据单一模式定位方法,采用 LabVIEW 开发平台设计了管道泄漏声发射单一模式定位虚拟仪器系统,将该系统应用于气体管道泄漏定位中,并与互相关定位方法做比较,结果如表1所示。分析表1中两种定位方法的结果:用未经分解的泄漏信号进行定位时,由于多模式导波叠加,检测信号的相关系数较小,相关性较差,估计的时延(距离差)误差大;实际声速是多种模式导波叠加的平均速度,而定位时以恒定的高能量模式导波速度计算。这两方面造成用未经分解的泄漏信号进行定位,误差较大,表1显示用未经分解泄漏信号进行定位,大部分定位相对误差在 10% 以上。而通过提取频散小的 $L(0,1)$ 模式进行定位,减少其它模式干扰,提高信号的相关性,同时选择更准确的声速,使定位相对误差稳定在 1.38% 左右。相比用未经分解的泄漏信号进行定位,定位相对误差平均降低 7% 以上。李帅永等人^[14]采用 $F(1,1)$ 弯曲模式进行互相关定位实验,结果表明采用弯曲模式进行定位的相对误差为 12.56%。因此提取单一非频散模式

进行互相关定位的相对误差与采用弯曲模态互相关定位 比相对误差减少了8倍。

表1 气体管道泄漏定位结果

Table 1 Results of leak location in gas pipelines

传感器 间距 L/m	实际漏 点位置 Z_1/m	用未经分解泄漏信号定位			提取泄漏信号中 $L(0,1)$ 导波定位		
		估计距离 Z'_1/m	相关系数 ρ_{x_1, x_2}	相对误差/%	估计距离 Z'_1/m	相关系数 ρ_{x_1, x_2}	相对误差/%
29.5	25.12	24.250	0.199 5	3.46	24.875	0.448 7	0.98
40.68	25.12	27.027 5	0.258 6	7.59	25.278	0.306 1	0.63
69.73	67.73	80.911	0.089 7	19.46	67.928	0.132 5	0.29
73.33	63.97	68.230	0.164 2	6.66	64.665	0.356 9	1.09
75.61	67.73	77.993	0.110 9	15.15	69.805	0.146 0	3.06
82.91	63.97	69.580	0.141 0	8.77	64.268	0.168 5	0.47
83.21	61.79	63.996	0.129 9	3.57	62.918	0.232 9	1.82
97.27	76.03	81.146	0.122 6	6.73	73.885	0.162 1	2.82
99.67	79.73	95.122	0.182 7	19.31	77.918	0.204 9	2.27
109.13	86.71	87.012	0.108 9	0.35	87.012	0.266 9	0.35

6 结 论

检测气体管道泄漏声发射,可以对泄漏点进行定位。但是,导波中有多个模态,而且各个模态的频散不同。如果直接采用采集的声发射信号进行相关分析并定位泄漏,信号的相关性弱,时延估计误差大;另一方面声速只能取频率范围内某一模态导波速度的平均值,这两点会造成泄漏定位误差。本文重点分析了对互谱信号加窗,通过选择窗参数可以提取出选定的单一模态成分。通过对气体管道泄漏声发射导波分析表明,在0~30 kHz频段,主要存在纵向模态 $L(0,1)$ 和弯曲模态 $F(1,1)$ 两种模态,其中模态 $L(0,1)$ 频散最小。据此,从泄漏点两端采集信号的互谱中加高斯窗提取该单一模态互谱进行检测,实验结果表明,单一模态互谱分析显著地减小泄漏定位误差。

参考文献

[1] SAHA S, MUKHOPADHYAY S, MAHAPATRA U, et al. Empirical structure for characterizing metal loss defects from radial magnetic flux leakage signal[J]. NDT and E International, 2010, 43(6):507-512.

[2] ZAKARIA Z, BADRI MANSOR M S, HARTINI JAHIDIN A, et al. Simulation of magnetic flux leakage (MFL) analysis using FEMM software [C]. IEEE Symposium on Industrial Electronics and Applications, 2010:481-486.

[3] HUANG S C, LIN W W, TSAI M T, et al. Fiber optic in-line distributed sensor for detection and localization of the pipeline leaks [J]. Sensors and Actuators, A;

Physical, 2007, 135(2):570-579.

[4] WANG Q, WANG X. Underwater natural gas pipeline leakage detection based on interferometric fiber optic sensor in experiment-scale [C]. Chinese Control and Decision Conference, 2010:257-260.

[5] MOON Y S, LEE S K. Gas leakage in buried gas pipe based on wavelet analysis for vibro-acoustic signal in a long duct [J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2011, 22(5):387-399.

[6] MENG L, LI Y, WANG W, et al. Experimental study on leak detection and location for gas pipeline based on acoustic method [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2012, 25(1):90-102.

[7] SUN L Y, LI Y B, LIU T G, et al. Leak detection and position method for pressure piping using acoustic emission [C]. 7th World Congress on Intelligent Control and Automation, 2008:8419-8424.

[8] XIANG X, FANG Z, LU C. Experimental study on detection and location of pipeline leakage based on acoustic emission technique [C]. International Conference on Pipelines and Trenchless Technology: Sustainable Solutions for Water, 2011:645-652.

[9] FULLER C R, FAHY F J. Characteristics of wave propagation and energy distributions in cylindrical elastic shells filled with fluid [J]. Journal of Sound and Vibration, 1982, 81(4):501-518.

[10] 吴慧娟, 文玉梅, 杨进, 等. 低信噪比环境下基于 γ -LMS 算法的修正无偏自适应时延估计方法 [J]. 仪器仪表学报, 2009, 30(4):774-779.

WU H J, WEN Y M, YANG J, et al. Modified bias-free adaptive time delay estimation with lower SNR using γ -LMS algorithm. [J]. Chinese Journal of Scientific

- Instrument, 2009, 30(4):774-779.
- [11] 孙立瑛, 李一博, 靳世久, 等. 基于小波包和 HHT 变换的声发射信号分析方法[J]. 仪器仪表学报, 2008, 29(8):1577-1582.
- SUN L Y, LI Y B, JIN SH J, et al. Acoustic emission signal processing method based on wavelet package and HHT transform [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument. 2008, 29(8):1577-1582.
- [12] 郭晨城, 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 CH CH, WEN Y M, LI P, et al. Enhancement of leak signals using EMD in pipeline[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(6): 1397-1405.
- [13] 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 J, WEN Y M, LI P. Research on leak location in the presence of non-leak noises in water distribution pipelines[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument. 2012, 33(2):248-254.
- [14] 李帅永, 王鹏飞, 严冬. 等. 气体管道泄漏模态声发射时频定位方法[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(9):1972-1979.
- LI SH Y, WANG P F, YAN D, et al, Leak location in gas pipelines by time-frequency analysis of modal acoustic emission using smooth pseudo Wigner-Ville distribution[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(9):1972-1979.
- [15] WEINGARTEN V I. Free vibration of thin cylindrical shells[J]. AIAA Journal, 1964, 2(4): 717-722.
- [16] 吴银锋, 裴丽莹, 陈斌, 等. 基于 Symlets 小波变换的燃气管道泄漏诊断方法[J]. 高技术通讯, 2009, 19(8):872-887.
- WU Y F, PEI L Y, CHEN B, et al. Leak diagnosis in gas pipelines based on symlets wavelet transformation[J]. Chinese High Technology Letters, 2009, 19(8):872-87.
- [17] REWERTS L E, ROBERTS R R, CLARK M A. Dispersion compensation in acoustic emission pipeline leak location[J]. Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, 1997, 16: 427-434.
- [18] 焦敬品, 何存富, 吴斌, 等. 基于导波理论的管道泄漏声发射定位新技术研究[J]. 机械工程学报, 2004, 40(10):77-81.
- JIAO J P, HE C F, WU B, et al. New technique for modal acoustic emission pipeline leak location [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2004, 40(10):77-81.
- [19] MILLER R K, POLLOCK A A, FINKEL P, et al. The development of acoustic emission for leak detection and location in liquid-filled, buried pipelines [J]. ASTM Special Technical Publication, 1999, 1353:67-78.
- [20] LI S, CHENG N, WANG P, et al. Extraction of single non-dispersive mode in leakage acoustic vibrations for improving leak detection in gas pipelines[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2016, 41(5): 77-86.

作者简介



杨丽丽 (通讯作者), 2010 年于四川大学获得学士学位, 2013 年于重庆大学硕士学位, 现为广西区气象局工程师, 主要研究方向为信息获取与处理。E-mail: lylyang1217@163.com

Yang Lili (Corresponding author) received her B. Sc. degree from Sichuan University in 2010 and M. Sc. degree in 2013 from Chongqing University. Now she is an engineer in meteorological bureau of Guangxi Zhuang autonomous region. Her main research interests include information acquisition and processing.



李帅永, 2010 年于信阳师范学院获得学士学位, 2014 年于重庆大学硕博连读获得博士学位, 现为重庆邮电大学副教授, 主要研究方向为信息获取与处理。

E-mail: lishuaiyong@cqupt.edu.cn

Li Shuaiyong received his B. Sc. degree from Xinyang Normal University in 2010 and Ph. D. degree in 2014 from Chongqing University. Now he is an associate professor in Chongqing University of Posts and Telecommunications. His main research interests include information acquisition and processing.