

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J1905366

基于延迟求和的输气管道泄漏声波定位方法^{*}

郑晓亮¹, 王强¹, 薛生², 袁宏永³, 付明³

(1. 安徽理工大学电气与信息工程学院 淮南 232001; 2. 安徽理工大学能源与安全学院 淮南 232001;
3. 清华大学合肥公共安全研究院 合肥 320601)

摘要:针对基于互相关分析的输气管道泄漏声波定位方法因声速和延时估计误差导致定位误差大的问题,提出一种基于延迟求和的泄漏位置声波定位方法。在泄漏位置上下游各增设一个声波传感器,使用延迟求和法对增设传感器信号进行延时估计并计算上下游方向声速;以泄漏位置表征各传感器间的延时,再利用延时表达式构造加权向量对线性阵列输出加权,搜索输出峰值点即可完成定位。在实验室进行了定位实验,结果表明:对泄漏信号的3.7 kHz分量使用延迟求和法进行延时估计能够获得更加稳定的输出,定位平均误差率由互相关分析法的9.09%降低至2.04%,声速计算环节的加入以及基于延迟求和的线性阵列定位方法能够有效提高声波法定位精度。

关键词:管道泄漏;声波定位;延迟求和;声速;线性阵列

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

Leakage localization for gas pipelines based on delay-and-sum using acoustic signal

Zheng Xiaoliang¹, Wang Qiang¹, Xue Sheng², Yuan Hongyong³, Fu Ming³

(1. School of Electrical and Information Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China;

2. School of Energy and Security, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China;

3. Hefei Institute for Public Safety Research, Tsinghua University, Hefei 320601, China)

Abstract: The acoustic-based leakage localization error for gas pipelines using cross-correlation analysis is large due to the error of acoustic speed and time delay estimation. A leakage localization method based on delay-and-sum is proposed in this study. Two acoustic sensors are deployed in two sides of the leakage position to obtain two kinds of acoustic speed by using delay-and-sum to estimate the time delay of the signal in each side. Then, the time delay between two sensors is determined by leakage position. The weight vector can be obtained by using time-delay expression to weight the output of linear array. Hence, localization can be determined by searching the peak of weighted output. Experimental results show that a more stable output can be achieved by using delay-and-sum to estimate the time delay of 3.7 kHz component. The delay-and-sum method has a mean error rate of 2.04% while the rate of the cross-correlation method is 9.09%. The accuracy of the acoustic method can be improved by calculating acoustic speed and localizing based on delay-and-sum with linear array.

Keywords: pipeline leakage; acoustic-based localization; delay-and-sum; acoustic speed; linear array

0 引言

管道运输作为一种重要的运输方式(世界上100%的天然气管道、85%的原油通过管道运输),为能源运输带来便利的同时也不可避免地增加了安全隐患。随着我国燃气需

求量的逐年增加,由燃气泄漏带来的灾害也越来越多,为实现安全可持续发展有必要对燃气管网泄漏进行有效定位。声波法作为管道泄漏定位方法之一,以其较好的综合性能而得到日益广泛的研究和应用^[1-7]。声波法的原理是利用泄漏位置上下游两端的传感器采集信号并进行延时估计,结合传感器间距和声速即可计算出泄漏位置。但该

方法的定位误差较大,影响因素主要有:1)噪声等干扰因素造成延时估计误差;2)延时估计函数自身性能不佳造成延时估计误差;3)管道环境复杂导致声速估计误差。针对以上问题,学者从信号滤波、延时估计方法改进和声速模型优化3个方面开展了相应的研究。

在信号滤波方面,郭晨城等^[8]使用不依赖经验参数的经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)进行管道泄漏信号增强,经处理的信号互相关函数峰值更加尖锐,泄漏定位精度更高。顾明生^[9]将自适应噪声抵消算法与 EMD 降噪算法相结合,改善了 EMD 降噪算法在强噪声背景下的泄漏声波信号处理效果。延时估计算法方面,目前主要包括广义互相关法、最小均方(least mean square, LMS)自适应滤波法、参量模型法以及基于高阶统计量的双谱估计法等^[10-14]。吴慧娟等^[15]基于 γ -LMS 算法提出一种无偏自适应延时估计方法,通过迭代逐步去除噪声,供水管道泄漏定位结果显示该方法定位精度得到了有效提高。李帅永等^[16]利用平滑伪 Wigner-Ville 分布对互相关函数进行时频分析,找出延时估计值对应频率并带入该频率下的声速进行定位,定位精度得到提高。杨丽丽等^[17]提出基于单一非频散模态提取的管道泄漏定位方法,对信号互谱加窗获取单一非频散模态导波的互谱,经傅里叶反变换后获取该模态信号的延时估计并结合相应声速完成定位。声速模型方面,梁坤鹏等^[18-19]提出泄漏管道波速预测理论,分析了 PVC 管和钢管的几何、材料特性对波速的影响,预测波速与实验结果的对比表明预测公式具有较强的准确性和可靠性。刘盈^[20]在原有介质密度、压力、比热和材质的基础上,进一步引入温度、气压和介质流速等因素推导管道次声波速方程,该理论表明管内介质流速会导致泄漏信号沿上下游传播的速度不一致。

综上所述,管道泄漏声波定位的研究主要集中在延时估计精度的提高上。一方面,延时估计精度将不可避免地受到噪声和延时估计器性能的影响;另一方面,复杂的管道环境决定了声速模型无法准确表达实际声速。因此有必要在基本不改变实施方案的前提下对现有声波法进行改进,本文拟加入声速计算环节,研究将波束形成算法应用于管道定位的可行性,使用抗干扰能力更强的延迟求和算法进行定位。

1 管道泄漏定位原理

1.1 基于互相关法的定位方法分析

当输气管道发生泄漏时,由于内外压差的作用管内气体快速喷出并与周围介质作用产生声波,泄漏声波信号沿管道介质传播至预先埋设在上下游管壁上的声波传感器。再使用互相关算法计算上下游两个传感器接收信号的延时并代入距离公式即可得出泄漏点位置。

图1所示为互相关法定位原理,其中泄漏点上游传感器信号为 $x_1(t)$,下游传感器信号为 $x_2(t)$, L 为两个传感器的距离, d 为泄漏点与上游传感器的距离。对信号 $x_1(t)$ 和 $x_2(t)$ 进行互相关分析得广义互相关函数。

$$R_{12}(\tau) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} W(\omega) G_{12}(\omega) \exp(j\omega\tau) d\omega \quad (1)$$

式中: $W(\omega)$ 为加权函数, $W(\omega) = 1$ 时,式(1)即为基本互相关函数的傅里叶形式。 $G_{12}(\omega)$ 为 $x_1(t)$ 和 $x_2(t)$ 的互功率谱,表达式为:

$$G_{12}(\omega) = X_1(\omega) X_2^*(\omega) \quad (2)$$

式中: $X_1(\omega)$ 为 $x_1(t)$ 的频域表达式; $X_2^*(\omega)$ 为 $x_2(t)$ 频域表达式取共轭。互相关函数 $R_{12}(\tau)$ 取得最大峰值时对应 τ 的值即为所求延时。设信号在管道介质中的传播速度为 c ,可得表达式为:

$$L - d = d + c\tau \quad (3)$$

解得泄漏点位置 d 的表达式为:

$$d = \frac{L - c\tau}{2} \quad (4)$$

由式(4)知定位结果 d 的精度受 $c\tau$ 项制约。实际定位过程中,波速 c 由速度模型估计得到,复杂的管道环境使得误差不可避免。即便使用 Roth、SCOT、PHAT、Echart、ML 等加权函数,在干扰信号存在的情况下,延时 τ 的估计精度无法得到保证。

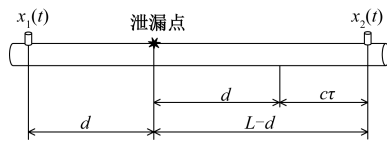


图1 互相关法定位原理

Fig.1 Schematic of localization using cross-correlation

1.2 延迟求和法管道泄漏定位应用分析

在阵列信号处理技术中,波束形成法的作用是空域滤波,其本质是一个非参数化的波达方向估计器。其中,延迟求和波束形成法以补偿每个阵元信号延时的方式对阵列的输出进行加权求和,理论上只有在波达方向上各阵元加权重构信号才会同相叠加并形成主瓣波束。为了使用延迟求和进行波达方向估计,首先将波达方向参数化,代入参数对阵列信号进行延迟求和并搜索输出最大值,该最大值对应参数值即为所求波达方向。如果将延迟求和法应用于管道泄漏定位中,则波达方向估计过程实际转化为线性阵列一维定位过程。图2所示为线性阵列一维定位原理,其中线性阵列由参考阵元和 M 个阵元按直线排列构成,内侧信源位于参考阵元和阵元1之间,外侧信源位于参考阵元左侧。

首先分析信源位于阵列内测的情况。内侧信源与参考阵元的距离为 d ,阵元1与参考阵元的距离为 L_1 ,信号

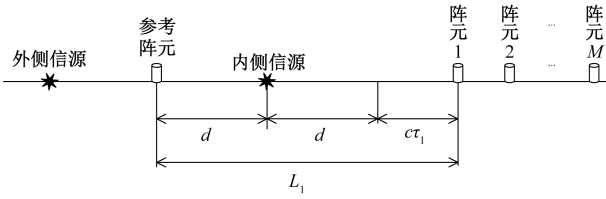


图 2 线性阵列定位原理

Fig.2 Schematic of localization using linear array

传播速度为 c , 则信号到达阵元 1 相对于参考传阵元的延时为:

$$\tau_1 = \frac{L_1 - 2d}{c} \quad (5)$$

将延时表达式(5)推广至阵元 1~ M 并构造加权向量得:

$$\mathbf{W}(d) = [1, \exp(-j\omega\tau_1), \dots, \exp(-j\omega\tau_M)]^T \quad (6)$$

构造阵列输出信号矩阵为:

$$\mathbf{x}(t) = [x_0(t), x_1(t), \dots, x_M(t)]^T \quad (7)$$

对阵列信号进行延迟求和并得到输出功率为:

$$P(d) = \mathbf{W}^T(d) \mathbf{E}[\mathbf{x}(t)\mathbf{x}^T(t)] \mathbf{W}(d) \quad (8)$$

当延迟求和输出功率达到最大值时对应参数 d 即为所求内侧信源位置。再分析信源位于参考阵元左侧的情况, 此时阵元 m (取 1~ M) 相对于参考阵元的延时应修改为:

$$\tau_m = \frac{L_m}{c} \quad (9)$$

式中: 延时 τ_m 无法用外侧信源与参考阵元的距离 d 参数化表达。但值得注意的是, 式(5)和(9)中波速 c 并非严格已知的参数, 因此可以将 c 作为未知参数来表征延时 τ_m , 得到阵列延迟求和输出功率为:

$$P(c) = \mathbf{W}^T(c) \mathbf{E}[\mathbf{x}(t)\mathbf{x}^T(t)] \mathbf{W}(c) \quad (10)$$

当延迟求和输出功率达到最大值时对应参数 c 即为所求波速。

1.3 基于延迟求和法的泄漏定位方法

由 1.2 节对延迟求和法的分析可知: 线性阵列可对内侧信源进行定位, 计算外侧信源来波的波速。另外, 根据泄漏声波沿管道上下游传播的速度模型^[20], 上下游方向波速并不一致。基于此结论, 本文提出一种基于延迟求和的管道泄漏声波定位方法, 图 3 所示为定位方法原理, 管道上下游各设置两个传感器。

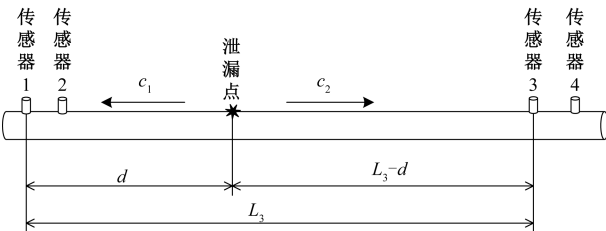


图 3 定位原理

Fig.3 Schematic of localization

利用传感器 1、2 计算泄漏信号沿上游传播的波速 c_1 , 利用传感器 3、4 计算下游波速 c_2 , 传感器 1、3、4 和传感器 2、3、4 可构成两个三元线性阵列从而实现一维定位。泄漏信号到达传感器 3 相对于 1 的延时为:

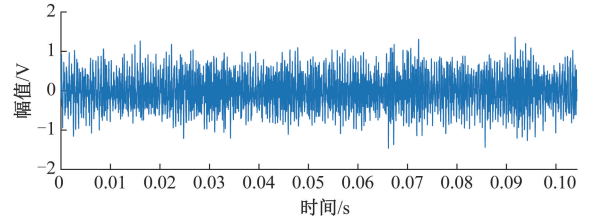
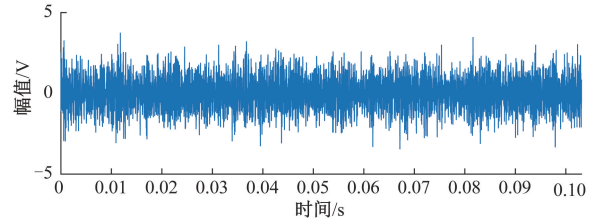
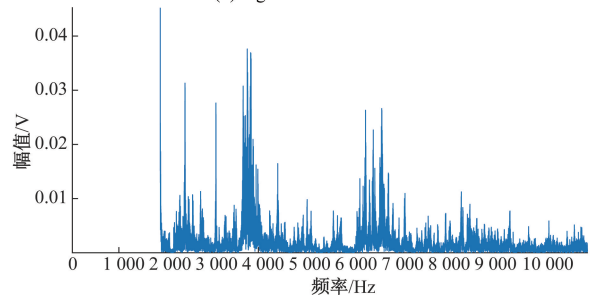
$$\tau_{3-1} = \frac{L_3 - d}{c_2} - \frac{d}{c_1} \quad (11)$$

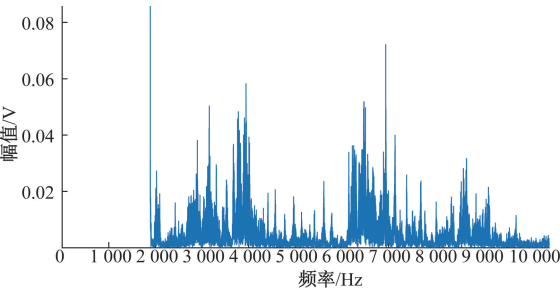
同理可得延时 τ_{4-1} 、 τ_{3-2} 和 τ_{4-2} 的表达式, 将修正后的延时代入式(8)即可求得泄漏点的位置 d 。在管道上下游增设传感器以计算两端实际波速并代入修改后的延时表达式, 再使用基于线性阵列的延迟求和法进行定位, 即为本文所提出的改进方法。

2 基于延迟求和的延时估计性能分析

由 1.2 节原理分析可知, 声速计算过程实际为基于延迟求和法的外侧信源到达两传感器的延时估计过程。互相关分析法也可以进行延时估计从而完成波速计算, 本节将对两种方法的波速计算(延时估计)效果做对比分析。使用两个传感器进行泄漏信号采集, 传感器 1 距离泄漏孔 2.2 m, 传感器 2 距离泄漏孔 0.6 m, 两个传感器的距离差为 1.6 m, 管道内压为 0.6 MPa。

图 4 所示为传感器所采集泄漏信号时域波形和频谱。传感器 1 距离泄漏孔更远, 信号幅值更低。

(a) 传感器 1 信号波形
(a) Signal waveform of sensor 1(b) 传感器 2 信号波形
(b) Signal waveform of sensor 2(c) 传感器 1 信号频谱
(c) Signal spectrum of sensor 1

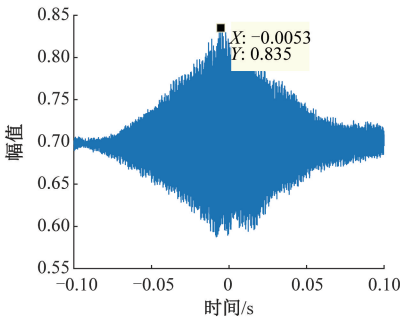


(d) 传感器2信号频谱
(d) Signal spectrum of sensor 2

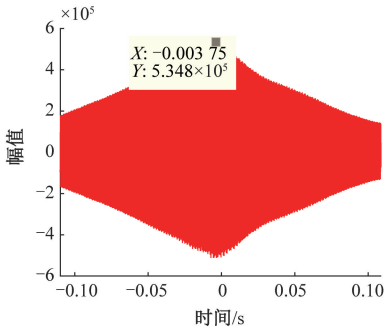
图 4 传感器 1、2 信号

Fig.4 Signals of sensor 1 and sensor 2

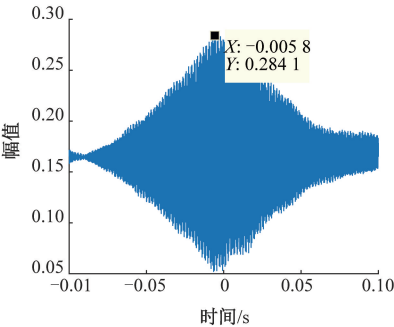
由频谱可知泄漏信号频响范围较宽,且在 1.8、3.7、6.5 kHz 附近有着较为突出的频率响应。对信号进行带通滤波分解,对比延迟求和法和互相关分析法对不同频率信号的分析效果。图 5 所示为原始信号、1.8、3.7 和 6.5 kHz 信号分量的延迟求和分析和互相关分析结果。图 5 中各估计函数峰值点对应 x 坐标值即为延时估计结果。结果显示延迟求和法对 4 种信号的延时估计结果较为一致,互相关分析的估计结果波动较大。分析图 5(a)、(b)、(c)、(f)可知,1.8 kHz 分量与原始信号的延时估计结果基本一致,估计函数波形高度相似 ($[-0.1\text{ s}, 0.1\text{ s}]$ 范围内呈三角形且峰值点不突出)。



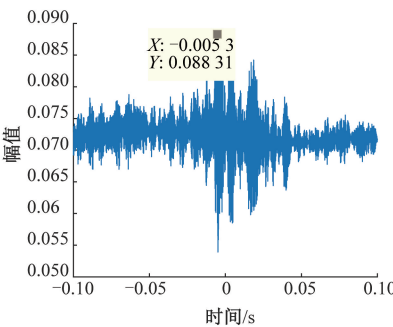
(a) 原始信号延迟求和分析
(a) Delay-and-sum analysis of original signal



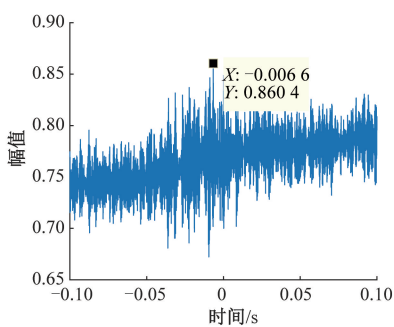
(b) 原始信号互相关分析
(b) Cross-correlation analysis of original signal



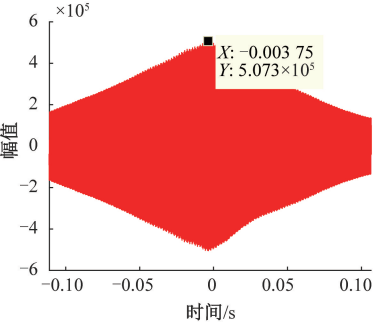
(c) 1.8 kHz 分量延迟求和分析
(c) Delay-and-sum analysis of 1.8 kHz component



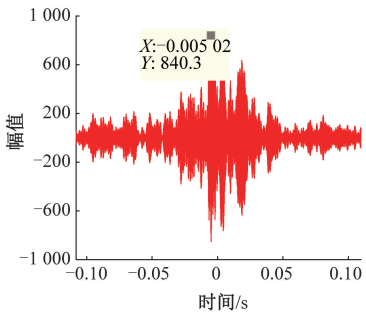
(d) 3.7 kHz 分量延迟求和分析
(d) Delay-and-sum analysis of 3.7 kHz component



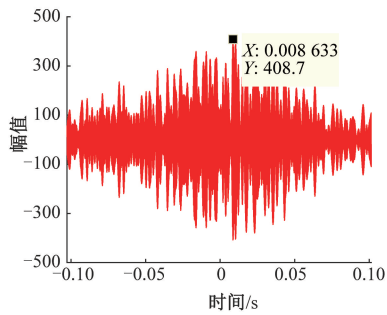
(e) 6.5 kHz 分量延迟求和分析
(e) Delay-and-sum analysis of 6.5 kHz component



(f) 1.8 kHz 分量互相关分析
(f) Cross-correlation analysis of 1.8 kHz component



(g) 3.7 kHz 分量互相关分析
(g) Cross-correlation analysis of 3.7 kHz component



(h) 6.5 kHz 分量互相关分析
(h) Cross-correlation analysis of 6.5 kHz component

图 5 不同信号分量延迟求和与互相关分析

Fig.5 Delay-and-sum and cross-correlation analysis of different components

这一结果在信号频谱上得到反映,1.8 kHz 频响最高,该分量在信号中所占比重最高,对延时估计的影响最大。分析图 5(d)、(e)、(g)、(h)可知,3.7 和 6.5 kHz 分量的估计函数波形拥有更加尖锐的峰值点,但 6.5 kHz 分量的互相关分析结果出现了严重偏差,这说明高频分量受干扰较小,且延迟求和法对各频率分量的估计结果比互相关分析法更稳定。基于以上结果和分析可知,采用延迟求和法对泄漏信号的 3.7 kHz 分量进行延时估计可获得更为精确的波速计算结果。

3 管道泄漏定位实验

3.1 管道泄漏定位实验系统

按照图 3 所示定位原理搭建定位实验系统,管道中部设置一个泄漏孔,两端各设置两个传感器,由空气压缩机向储气罐充气并为管道提供持续压力输出,实验系统如图 6 所示。架空管道定位实验系统由以下部分组成:1)气体压缩装置,包含空压机、储气罐、减压阀以及球阀若干,在储气罐充满气体、空压机关闭的情况下,可向实验管道提供最高 1 MPa 的持续稳定压力输出;2)架空泄漏管道,包含一根长度为 6 m 的 DN50 镀锌钢管,预留圆形泄漏孔直径为 1.5 mm;3)信号采集系统,包含 4 个声波传感器(泄漏孔两侧各 2 个)、采集仪和计算机,传感器紧贴于管道外壁。实验过程中,由空压机按 1 MPa 压力为储气罐充满气体后关闭压缩机和球阀 1、2,打开球阀 3、4 并调节减压阀至目标压力,形成稳定泄漏后运行信号采集系统完成一次信号采集,所采集数据由计算机进行分析处理并完成定位。

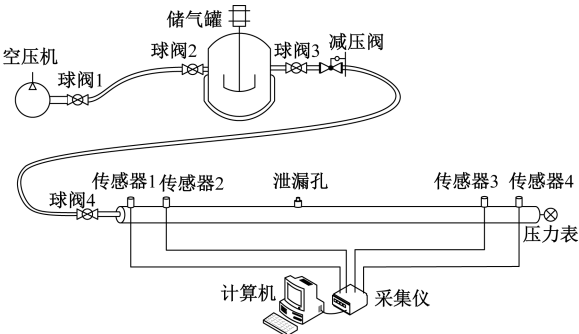


图 6 架空管道定位实验系统

Fig.6 Experimental platform for overhead pipeline leakage localization

3.2 管道泄漏延迟求和定位

设置管道内压为 0.8 MPa,传感器 1~4 与泄漏孔的距离分别为 2.50、1.42、1.83 和 2.93 m。采用延迟求和法的泄漏信号 3.7 kHz 分量延时估计结果如图 7 所示,

图 7(a)为传感器 1 和 2 的延时估计结果,图 7(b)为传感器 3 和 4 的延时估计结果。结合传感器的距离计算声速,泄漏信号在传感器 1、2 间传播的平均速度为 337.5 m/s,传感器 3、4 间的平均速度为 550 m/s。于是将信号在泄漏孔和传感器 1 间的平均速度 c_1 视为 337.5 m/s,泄漏孔和传感器 4 间的平均速度 c_2 视为 550 m/s。将声速估计值代入式(11)和(8),传感器 1、3、4 构成线性阵列,得到泄漏孔与传感器 1 距离 d 的定位结果如图 8 所示。

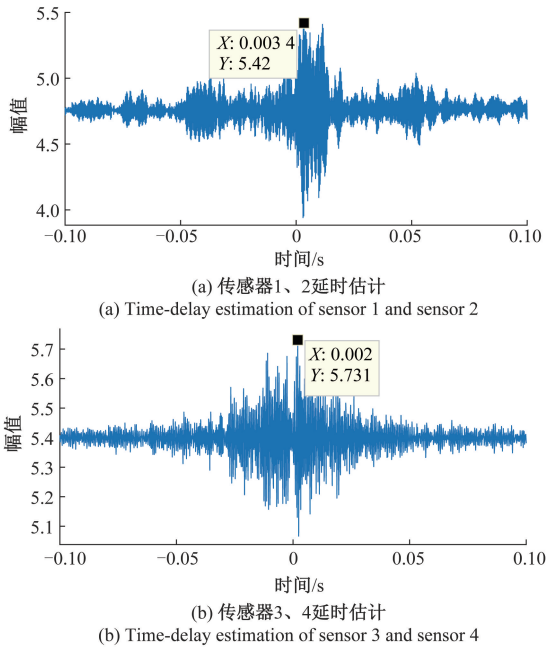


图 7 基于延迟求和的延时估计

Fig.7 Time-delay estimation based on delay-and-sum

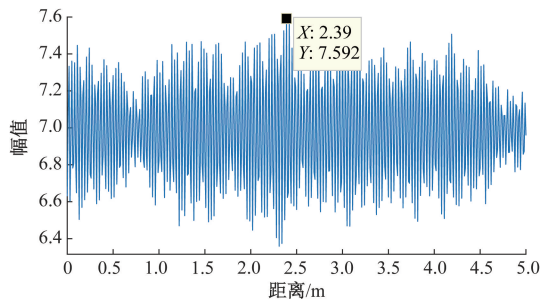


图 8 距离 d 定位结果

Fig.8 Localization result of d

在 c_1 和 c_2 估计结果相差较大的情况下,图 8 显示基于延迟求和的管道泄漏定位方法依然获得了较高的定位精度(传感器 1 和 4 的间距为 5.43 m, d 的实际值为 2.50 m,定位值为 2.39 m,误差率为 2.03%)。但这一结果并不能说明信号在泄漏孔两侧的实际声速相差达到 212.5 m/s,理论上实验室条件下声速应基本保持不变,

这说明实验环境下所采集到多个信号间的延时并不严格正比于传感器间距,反应在定位上即声速计算结果差异较大但定位结果较为精确。其原因为:受到噪声、混响等干扰因素的影响,各传感器所接收信号延时的实际值与理论值存在误差,使用存在误差的延时估计值计算声速,再将存在误差的声速代入式(11)进行定位;式(11)的作用是使用距离 d 表征各传感器间的延时,误差的存在导致基于理想声速的式(11)无法准确表达实际延时,而以实际延时计算得到声速在一定程度上修正了干扰信号所导致的误差,使得式(11)能够更加正确地反应距离 d 与各传感器延时的关系,从而提高定位精度。

3.3 管道泄漏互相关分析定位

保持实验条件不变,使用互相关分析法进行定位。由于实验条件下管道外壁传感器所采集信号大多是通过空气介质传播,因此取声速为340 m/s。基于互相关分析的延时估计结果如图9所示,将声速和图9(a)所示传感器1和3的延时估计结果代入式(4)得到距离 d 的定位结果为1.62 m,误差为0.88 m,误差率为16.21%。由于采用理想声速的定位误差较大,使用传感器1和3的延时估计结果修正声速为209 m/s。代入修正声速和图9(b)所示传感器2和4的延时估计结果得到定位结果为3.01 m,误差为0.51 m,误差率为9.39%。由于延时估计误差的存在,即便使用修正的声速进行定位,基于互相关分析的管道泄漏定位方法误差仍较大。

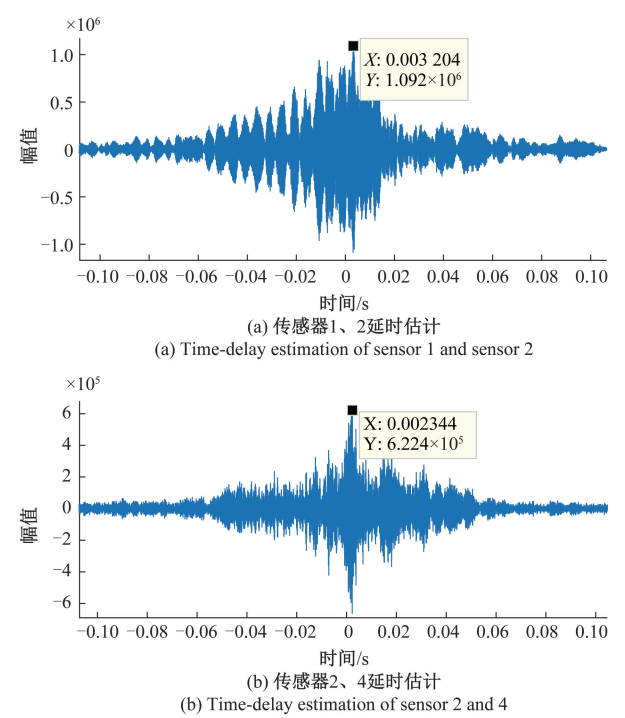


图9 基于互相关分析的延时估计

Fig.9 Time-delay estimation based on cross-correlation analysis

3.4 两种定位方法对比分析

保持其他实验条件不变,分别取泄漏孔与传感器1的距离 d 为2.93、2.53、1.73、1.53、1.19和0.74 m进行6次定位实验,表1所示为两种方法定位结果以及误差率对比。其中, d 为泄漏孔与传感器1的距离, L 为传感器1与4的距离(即最大定位范围,用作误差率分母), c_1 和 c_2 为泄漏孔两侧声速计算值, d_1 为延迟求和法的定位结果, η_1 为误差率, d_2 为互相关分析法(声速取340 m/s)的定位结果, η_2 为误差率。

表1 不同距离 d 下延迟求和法和互相关分析法定位误差对比
Table 1 Localization errors between delay-and-sum and cross-correlation analysis under different d

d / m	L / m	c_1 / ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	c_2 / ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	d_1 / m	η_1 / %	d_2 / m	η_2 / %
2.93	5.85	318	542	3.02	1.54	3.79	14.70
2.50	5.43	317	550	2.39	2.03	1.95	10.13
1.73	4.66	310	487	1.66	1.50	1.28	9.66
1.53	4.46	165	537	1.49	0.90	1.87	7.62
1.19	4.12	400	556	1.09	2.43	1.39	4.85
0.74	3.67	315	515	0.88	3.81	1.15	7.55

由表1结果可得,互相关分析法多次定位得到 η_2 的平均值为9.09%,并且 η_2 随着距离 d 的减小呈降低趋势。由图3所示定位原理可知,在传感器4位置不变的情况下,距离 d 的减小使传感器1、4信号的延时(波程差)增大,较大的延时更有利于互相关函数的延时估计,所以 η_2 呈降低趋势。考虑到对比实验中互相关分析法的声速取值为340 m/s定值,并未根据管道介质参数以及声速模型进行相对更为准确的声速估计,于是进一步将定位实验结果与现有研究成果中以声速模型确定声速的定位结果作对比。李帅永等^[16]选取0~1 000 Hz频带内的信号进行互相关定位,根据基本弯曲模态的群速度频散曲线获得1 000 Hz以内声发射信号的平均声速,多次实验的定位误差率平均值为12.56%。

由表1知,使用延迟求和法计算得到的 c_1 、 c_2 仍呈现出较大波动,但延迟求和法的误差率 η_1 相较于 η_2 整体更低, η_1 平均值为2.04%。这说明声速计算环节的加入使得定位方法的抗扰动能力得到加强,即使各传感器信号间的延时不严格正比于间距,但声速修正过程使得定位误差得以降低。定位结果表明增加每端传感器数量以计算声速是十分有必要的,一方面,声速修正可以使参数 d 更为准确地表达延时,实际应用过程中泄漏信号沿管道上下游的传播速度不同,有必要对上下游声速进行分别计算;另一方面,基于线性阵列的延迟求和法相较于互相关分析法抗干扰能力更强,定位精度更高。

李帅永等^[16]基于互相关法提出一种模态声发射时频定位方法,将定位误差率平均值降低至 2.1%。相比之下,本文方法的定位误差率并未得到明显降低。某原因为:本文所用模拟管道长度 6 m,传感器间距受限,分母较大致使误差率计算结果增大;传感器与泄漏孔距离较近,导致多频带信号分量可沿空气、管道等不同介质传播至传感器,传感器实际接收信号受混响、多径等因素干扰严重,致使定位精度无法提高。进一步在不同距离下进行多次定位,每组定位 5 次并计算定位误差和误差率平均值,图 10 所示为定位误差绝对值和误差率的变化趋势。随着传感器间距 L 的增大,误差绝对值基本保持稳定而误差率逐渐减小,当间距 L 取得接近管道长度的最大值 5.85 m 时误差率平均值低至 1.37%,相较于 L 取 3.67 m 时的误差率 3.12% 有所降低,也低于模态声发射时频定位方法的误差率 2.1%。

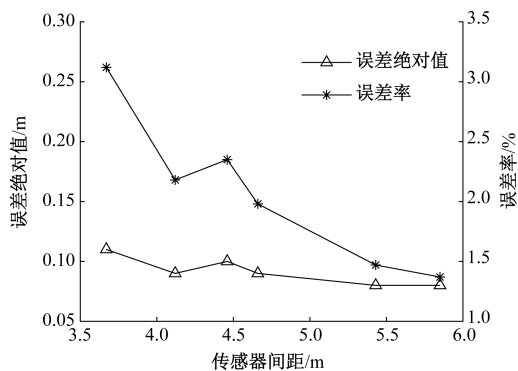


图 10 定位误差绝对值与误差率变化趋势

Fig.10 Change trend of location errors and error rate

4 结 论

本文提出一种基于延迟求和的管道泄漏声波定位方法,通过增加泄漏位置两端传感器数量,实现对上下游声速的计算,并基于线性阵列实现对泄漏位置的一维定位。首先对延迟求和法的延时估计性能进行了分析,相较于互相关分析法,其延时估计在各个频率分量下的输出更为稳定,抗干扰能力更强;然后使用延迟求和法进行管道泄漏定位实验,在泄漏位置两侧声速计算结果不一致的情况下,定位结果仍保持了较高的精度;最后分别使用延迟求和法和互相关分析法进行多次定位实验,两者的平均定位误差率分别为 2.04% 和 9.09%;对比李帅永等^[16]提出的模态声发射时频定位方法,在传感器间距达到 5.85 m 的情况下,本文所提出方法的定位误差率可降低 34.8%。

以上结果表明:使用延时估计性能更为稳定的延迟求和法进行两端声速计算并将声速带入延时表达式,能

够有效降低声速估计误差和实际信号延时误差的影响,提高延时表达式的准确性;进一步使用基于线性阵列的延迟求和法进行定位,能够有效降低定位误差。

参考文献

- [1] 文玉梅, 张雪园, 文静, 等. 依据声信号频率分布和复杂度的供水管道泄漏辨识[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(6): 1223-1229.
WEN Y M, ZHANG X Y, WEN J, et al. Identification of water pipeline leakage based on acoustic signal frequency distribution and complexity [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(6): 1223-1229.
- [2] SUN J D, XIAO Q Y, WEN J T, et al. Natural gas pipeline leak aperture identification and location based on local mean decomposition analysis [J]. Measurement, 2016, 79(2): 147-157.
- [3] LIU C W, LI Y X, YAN Y K, et al. A new leak location method based on leakage acoustic waves for oil and gas pipelines[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2015, 35(5): 236-246.
- [4] MURVAY P S, SILEA I. A survey on gas leak detection and localization techniques [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2012, 25(6): 966-973.
- [5] MENG L Y, LI Y X, WANG W CH, 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, 2011, 25(1): 90-102.
- [6] 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): 1-8.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 顾明生. 管道泄漏次声波信号分析方法研究[D]. 北京:中国矿业大学, 2017.

- GU M SH. Analysis method of infrasonic wave signal of pipeline leakage[D]. Beijing: China University of Mining & Technology, 2017.
- [10] 文静, 文玉梅, 李平. 地下管道泄漏检测定位中的时延估计方法[J]. 仪器仪表学报, 2007, 28(7): 1274-1280.
- WEN J, WEN Y M, LI P. Time delay estimation method for leakage location of buried water distribution pipes[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2007, 28(7): 1274-1280.
- [11] 王鹏, 张晓彤, 徐丽媛, 等. 基于自适应时延估计的室内近场测距算法[J]. 计算机学报, 2017, 40(8): 1902-1917.
- WANG P, ZHAN X T, XU L Y, et al. Indoor near field ranging algorithm based on adaptive time delay estimation[J]. Chinese Journal of Computers, 2017, 40(8): 1902-1917.
- [12] 邓昌建, 蒋世奇, 蔚泽峰, 等. 球形麦克风阵列时频故障信号定位算法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31(2): 309-314.
- DENG CH J, JIANG SH Q, WEI Z F, et al. Research on location algorithm of time-frequency fault signal based on spherical microphone array[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2017, 31(2): 309-314.
- [13] BHARATHI B M R, MOHANTY A R. Time delay estimation in reverberant and low SNR environment by EMD based maximum likelihood method [J]. Measurement, 2019, 137(4): 655-663.
- [14] JIN F X, QIU T SH. Adaptive time delay estimation based on the maximum correntropy criterion[J]. Digital Signal Processing, 2019, 88(5): 23-32.
- [15] 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.
- [16] 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): 2068-2075.
- LI SH Y, WANG P F, YAN D, et al. Leak location in gas pipelines with time-frequency analysis of modal acoustic emission using smooth pseudo Wigner-Ville distribution[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(9): 2068-2075.
- [17] 杨丽丽, 谢昊飞, 李帅永, 等. 气体管道泄漏声发射单一非频散模态定位[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(4): 969-976.
- YANG L L, XIE H F, LI SH Y, et al. Leak location in gas pipelines by extraction of signal non-dispersive mode from leakage-induced acoustic emission signal [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(4): 969-976.
- [18] 梁坤鹏, 刘志宏, 刘彦森, 等. 泄漏管道中振动波波速特性研究[J]. 噪声与振动控制, 2008, 28(5): 44-47.
- LIANG K P, LIU ZH H, LIU Y S, et al. Investigation on the characteristics of wavespeeds in leak pipes[J]. Noise and Vibration Control, 2008, 28(5): 44-47.
- [19] 刘志宏, 崔伟华, 梁坤鹏. 泄漏管道波速预测理论及其应用[J]. 振动. 测试与诊断, 2011, 31(4): 405-408, 531.
- LIU ZH H, CUI W H, LIANG K P. Wave-Speed prediction method of leaking pipes and its applications[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2011, 31(4): 405-408, 531.
- [20] 刘盈. 基于次声波的煤气管道泄漏监测系统研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2010.
- LIU Y. Study on gas pipeline leakage monitoring system based on infrasound [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2010.

作者简介



郑晓亮, 分别在 2002 年、2005 年和 2018 年于安徽理工大学获得学士学位、硕士学位和博士学位, 现为安徽理工大学教授, 主要研究方向为自动化、安全监测与监控技术。

E-mail: zhengxl@ aust.edu.cn

Zheng Xiaoliang received his B.Sc., M.Sc., and Ph.D. degrees all from Anhui University of Science and Technology in 2002, 2005 and 2018, respectively. He is currently a professor at Anhui University of Science and Technology. His main research interests include automation and safety monitoring and control technology.



王强(通信作者),2018 年于安徽理工大学获得学士学位,现为安徽理工大学硕士研究生,主要研究方向为自动化、安全监测与监控技术。

E-mail: 13135543032@163.com

Wang Qiang (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Anhui University of Science and Technology in 2018. He is currently a M. Sc. candidate at Anhui University of Science and Technology. His main research interests include automation and safety monitoring and control technology.



薛生,1984 年于中国矿业大学获得学士学位,1991 年于新南威尔士大学获得博士学位,现为安徽理工大学教授,主要研究方向为安全科学与工程。

E-mail: sheng.xue@ aust.edu.cn

Xue Sheng received his B. Sc. degree from China University of Mining and Technology in 1984, and received his Ph. D.

degree from The University of New South Wales in 1991. He is currently a professor at Anhui University of Science and Technology. His main research interest is the safety science and engineering.



袁宏永,1986 年于中南大学获得学士学位,1989 年于合肥工业大学获得硕士学位,1994 年于武汉大学获得博士学位,现为清华大学教授,主要研究方向为城市公共安全科技。

E-mail: hy-yuan@ tsinghua.edu.cn

Yuan Hongyong received his B. Sc. degree from Central South University in 1986, and his M. Sc. degree from Hefei University of Technology in 1989, and his Ph. D. degree from Wuhan University in 1994. He is currently a professor at Tsinghua University. His main research interest is the urban public safety technology.