

◇ 研究报告 ◇

输气管道泄漏的波达时差交叉定位方法*

王强¹ 郑晓亮^{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 230601)

摘要: 为了实现对管道泄漏位置的三维定位, 该文提出一种基于波达时差法的交叉定位方法。将传感器阵列布放在不同位置, 通过波达时差法获取远场泄漏声源的两组空间方位信息, 对两组方位交叉求取空间伪交点从而完成定位。建立泄漏定位实验平台, 分析了多种互相关方法以及阵列孔径、布放间距、泄漏位置等因素对延时估计和定位精度的影响。实验结果表明: 选取基本互相关法对泄漏信号的 10~500 Hz 分量进行互相关分析, 能够获取稳定的延时估计结果; 在有效信号检测范围内, 增大阵列孔径和布放间距能有效减少误差; 该方法相较于现有波达时差法能有效提高距离原点 4 m 以上泄漏位置的定位精度。

关键词: 管道泄漏; 三维定位; 波达时差法; 测向交叉; 互相关分析

中图分类号: TN911.7 文献标识码: A 文章编号: 1000-310X(2020)03-0472-09

DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2020.03.021

Leakage localization method for gas pipelines using cross localization based on time difference of arrival

WANG Qiang¹ ZHENG Xiaoliang¹ XUE Sheng² YUAN Hongyong³ FU Ming³

(1 School of Electric and Information Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

(2 School of Mining and Safety Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

(3 Hefei Institute for Public Safety Research, Tsinghua University, Hefei 230601, China)

Abstract: To locate the gas pipeline leakage point three-dimensionally, a cross localization method based on time difference of arrival (TDOA) is presented. A sensor array is set in two positions, and two groups of spatial orientation are obtained by TDOA. Then the leakage point is three-dimensionally located through adopting cross localization method to find a pseudo intersection point of the two groups of spatial orientation. Experimental platform was established to analyze the effects of cross correlation methods, array aperture, array spacing and leakage positions on the delay estimation and localization performance. Experimental results indicate that a stable result of time delay estimation could be obtained by using basic cross correlation to analyze the 10-500 Hz component of leakage signal. Within the effective distance for signal detection, errors could be reduced by increasing the array aperture and spacing. Compared to the existing method, the localization accuracy for the leakage points which are more than 4 m from the origin can be improved by using the cross localization method.

Keywords: Pipeline leakage; 3D localization; Time difference of arrival; Cross localization; Cross correlation

2019-07-17 收稿; 2019-11-28 定稿

*“十三五”国家重点研发计划项目“冬奥会公共安全综合风险评估技术”(2018YFF0301000), 清华大学合肥公共安全研究院院士工作站课题(2017K001)

作者简介: 王强(1995-), 男, 安徽芜湖人, 硕士研究生, 研究方向: 自动化、安全监测与监控技术。

†通信作者 E-mail: zhengxl@aust.edu.cn

0 引言

随着燃气需求量的逐年提高,由输气管道泄漏带来的潜在风险不可避免地随之增加。因此,对管道泄漏的安全监测已经成为公共安全领域的重要内容。目前常用的大范围监测方法^[1-4]可实现管道泄漏位置的粗略定位,但还需要较大范围的搜索定位才能准确找到泄漏位置,整个过程工作量大、耗时长、不利于快速排查修复漏点。泄漏发生后,管内高压气体快速喷出并与泄漏孔摩擦振动产生泄漏声源,声源位置与泄漏位置高度重合,对该声源进行定位即可实现对管道泄漏的精确溯源。实际工况下必须对泄漏位置进行三维定位即同时获取其方位和深度信息,才具有应用价值。

基于传感器阵列的声源定位方法主要包括:(1)高分辨率谱估计法^[5-6],可实现对波达方向的超分辨率估计,计算量较大;(2)波束形成法^[7-9],理论上可对近场声源进行三维定位,但计算量大幅提高,丁浩等^[10]提出一种可实现近场声源三维定位的波束形成方法,对2 m以内的3000 Hz以上中高频声源定位误差低于10%;(3)波达时差(Time difference of arrival, TDOA)法^[11-15],可实现对近场声源的三维定位且计算量小,杨祥清等^[16]提出一种基于球形差值的随机梯度下降算法,实现了对三维空间点声源的精确定位。对管道泄漏声波信号特性的研究表明泄漏声波的能量集中在低频波段^[17-18],低频声波较小的传播衰减以及较强的障碍穿透能力有利于信号的检测与定位。根据近场声源判据 $r < 2d^2/\lambda$ (r 为声源与阵列距离, d 为阵元间距, λ 为波长),由于低频声波波长 λ 较长,且实际定位中阵元间距 d 不能过大,因此较远距离的低频声源很难满足近场判据,其更趋近于远场声源。而平面阵列只能观测远场声源的空间方位信息,因此基于平面阵列的定位方法无法实现对远场声源的三维定位。综上所述,3种方法中TDOA法虽然能以较低的计算量进行近场声源三维定位,但不适用于对较远距离低频泄漏声源的三维定位。

在雷达定位中,常使用多站测向交叉^[19-20]的方法,对不同位置基站所观测信源方向进行交叉以计算信源距离。为了将TDOA法应用到管道泄漏三维定位中,本文提出一种基于TDOA的交叉定位方法,将阵列设置在泄漏区域不同位置并获取两组空

间方位信息,对其进行交叉求取空间交点从而完成定位。

1 管道泄漏定位原理

TDOA法的基本原理是通过延时估计算法估计声波信号到达不同传感器阵元的时差,再结合阵列与声源的几何关系联立方程解出声源坐标。由泄漏源所产生的声波可分为近场球面波和远场平面波,理论上平面阵列可实现对近场声源的三维定位和远场声源的空间方位定位(相当于二维定位)。图1为平面阵列与两种声源的位置关系,当传感器阵列与声源足够近时,声波沿不同方向传播至4个传感器,设声波到达传感器1~3相对于参考传感器的延时分别为 τ_1 、 τ_2 、 τ_3 。结合延时 τ_1 、 τ_2 、 τ_3 以及传感器与声源的位置关系,建立3个不相关的方程即可解出近场声源坐标。

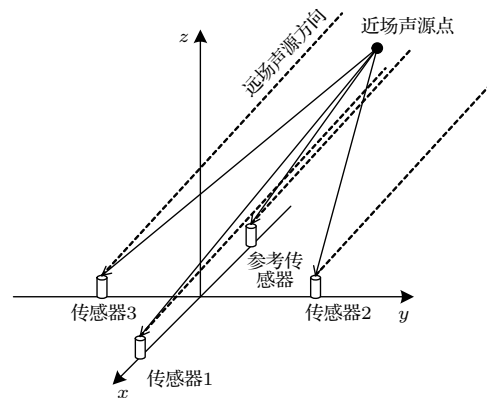


图1 平面阵列与声源位置关系示意图

Fig. 1 Relation of position between plane array and acoustic sources

为提高定位范围,无法始终保持传感器阵列与泄漏位置足够近。一方面,由远场判据 $r > 2d^2/\lambda$ 可知,将泄漏声源视为远场声源更有利于缩小阵列孔径;另一方面,管道泄漏所产生低频声波的波长更长,这进一步加剧了泄漏声源趋向远场声源的趋势。因此在实际工况下,将泄漏源作为远场声源更具有可操作性。当泄漏源被视为远场声源时,决定延时值的变量变为声源相对于阵列的空间方位而不再是三维坐标。设传感器1~3与参考传感器的距离分别为 r_1 、 r_2 、 r_3 ,两传感器连线与 x 轴夹角为 θ_1 、 θ_2 、 θ_3 。以传感器1为例,图2为远场平面声波到达传感器1和参考传感器的波程差示意图, θ 为声源方位角, φ 为仰角。

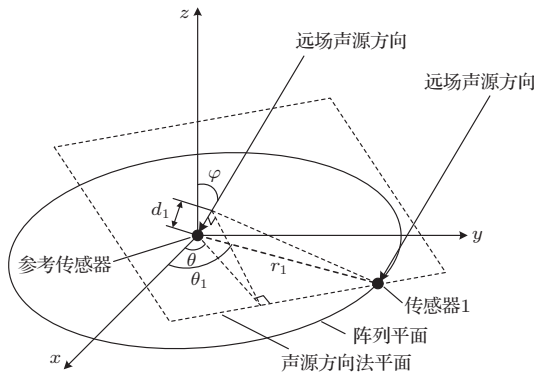


图2 波程差示意图

Fig. 2 Illustration of wave path difference

由图2中几何关系可知,远场声源到达传感器1~3与参考传感器的波程差可表示为

$$\begin{cases} d_1 = r_1 \cos(\theta_1 - \theta) \sin \varphi, \\ d_2 = r_2 \cos(\theta_2 - \theta) \sin \varphi, \\ d_3 = r_3 \cos(\theta_3 - \theta) \sin \varphi. \end{cases} \quad (1)$$

延时 τ_1, τ_2, τ_3 由算法估计得到,结合声速 c 可得3个包含变量 θ, φ 的独立方程:

$$d_1/c = \tau_1, \quad d_2/c = \tau_2, \quad d_3/c = \tau_3. \quad (2)$$

求解式(2)即可得出空间方位解。为进一步实现对远场泄漏声源的三维定位,本文提出一种基于TDOA法的交叉定位方法,其步骤为:(1)将传感器阵列先后设置在泄漏区域的两个不同位置;(2)通过TDOA法进行泄漏声源空间定向;(3)结合两组空间方位,使用交叉定位法获取泄漏声源的三维坐标,完成泄漏定位。

2 延时估计

空间定向步骤的关键是延时估计。广义互相关法从信号的相关分析基础上发展而来,首先计算两个传感器所接收相关信号的互功率谱,对互功率谱进行加权处理后经傅里叶反变换即可得到两个信号的互相关函数。设不同位置的两个传感器采集到的相关信号分别为 $x_1(t)$ 和 $x_2(t)$, 求两个信号的互功率谱得

$$G_{12}(\omega) = X_1(\omega)X_2^*(\omega), \quad (3)$$

其中, $X_1(\omega), X_2^*(\omega)$ 分别表示信号 $x_1(t), x_2(t)$ 的傅里叶变换和傅里叶变换后求共轭,再对互功率谱进

行加权求傅里叶反变换,得到信号 $x_1(t)$ 和 $x_2(t)$ 的广义互相关函数为

$$R_{12}(\tau) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} W(\omega)G_{12}(\omega)e^{j\omega\tau} d\omega, \quad (4)$$

其中, $W(\omega)$ 表示加权函数,取1时不进行任何加权,此时 $R_{12}(\tau)$ 表示基本互相关法的傅里叶变换形式。目前常用的加权函数有PHAT、Roth、SCOT、Echart、ML等^[21],其中Echart加权函数需要噪声的先验知识,因此本文只对基本互相关法和PHAT、Roth、SCOT、ML加权广义互相关法进行时延估计效果对比。

在实验室环境下(无强噪声干扰)模拟管道泄漏,所使用管道为DN50钢管,内压0.6 MPa,泄漏孔形状为圆形,孔径1.5 mm。分别在距离泄漏孔0.4 m和2 m处设置声波传感器,图3为时域连续信号的波形和频谱图。相较于距离泄漏孔0.4 m处信号,2 m处时域信号衰减幅度达到一个数量级,但500 Hz以下频段衰减较慢。考虑到所使用声波传感器频响范围下限为8 Hz,而高频声波衰减较快且穿透障碍物的能力较差,不利于提高传感器阵列有效定位范围,因此本文仅截取信号的10~500 Hz分量进行分析和定位。

使用基本互相关法和多种加权广义互相关法对两个传感器信号的10~500 Hz分量进行延时估计,保持室内温度为23 °C,管道内压和泄漏孔规格不变,改变信号到达两传感器的距离差,每组距离进行5次实验。由表1估计结果可得,PHAT、Roth、SCOT以及ML加权广义互相关法的估计结果基本保持为0,基本互相关法的估计结果则随着距离的增大而增大。使用15组数据的基本互相关分析结果计算声速,得到声速估计均值为349.5 m/s,与一个标准大气压和15 °C条件下的340 m/s空气介质声速典型值较为接近。分析本文条件下加权广义互相关法估计效果不佳的原因:本文采用低通滤波截取信号10~500 Hz分量,导致信号互功率谱 $G_{12}(\omega)$ 高频部分能量大幅降低。傅里叶反变换实际是对频域信号再次进行傅里叶变换,根据式(4)对 $G_{12}(\omega)$ 进行傅里叶反变换后,其高频部分(可视为幅度接近0的时域直流信号)本不应该被反映在反变换后的互相关系数上(可视为 $G_{12}(\omega)$ 的频谱)。而多种加权函数^[21]的分母均包含信号的互功率谱或自功率谱,对 $G_{12}(\omega)$ 的高频部分起到了放大作

用,则反变换后 $G_{12}(\omega)$ 的频谱出现了直流分量,即对应互相关系数在0时刻出现了峰值。为保证延时估计精度,采样率必须足够高,同时为避免高频信号

干扰,有必要对信号进行低通滤波。因此加权广义互相关法不适合本文高采样率低频信号的延时估计,故采用基本互相关法进行延时估计并完成定位。

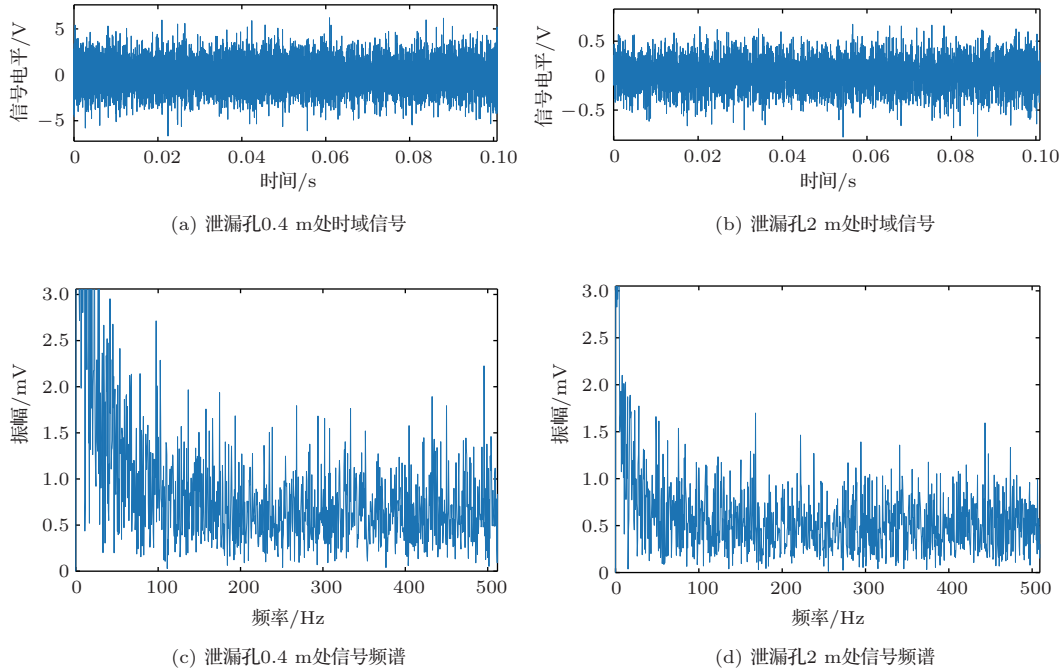


图3 信号波形和频谱

Fig. 3 Wave form and spectrum of signal

表1 多种互相关法延时估计结果

Table 1 Results of delay estimation using multiple methods

距离差/m	基本互相关/s	PHAT/s	Roth/s	SCOT/s	ML/s
1.2	0.0034	0	0	0	0.0001
	0.0035	0	0	0	0.0001
	0.0035	0	0	0	0
	0.0034	0	0	0	0
	0.0035	0	0	0	0
1.6	0.0046	0	0	0	0
	0.0046	0	0	0	0.0001
	0.0046	0	0	0	0
	0.0046	0	0.0002	0	0
	0.0045	0	0	0	0
2.0	0.0057	0	0	0	0
	0.0057	0	0	0	0
	0.0057	0	0	0	0.0001
	0.0056	0	0	0	0
	0.0057	0	0	0	0

3 交叉定位

交叉定位是本文所提出定位方法的关键。由于TDOA空间定向必然存在误差,空间中的两条直线几乎不可能相交。为解决不相交直线的交点求取问题,将两条空间直线投影到多个平面上并在平面上求取两条直线的交点,再将多个平面交点聚焦到空间中某一点上,从而完成伪交点的求取。图4为基于投影法的空间直线伪交点求取过程原理图。泄漏点 g 位于 xOy 面下方,坐标为 (x_0, y_0, z_0) 。阵列 p_1, p_2 位于 xOy 平面,坐标分别为 $(x_1, y_1, 0), (x_2, y_2, 0)$ 。利用TDOA法可获得泄漏点 g 相对于阵列 p_1, p_2 的两组空间方位角 $(\theta_1, \varphi_1), (\theta_2, \varphi_2)$,并根据该方位角形成两条空间直线 l_1, l_2 。为方便计算,将 φ_1, φ_2 定义为直线 l_1, l_2 与 z 轴负方向的夹角, θ_1, θ_2 仍为直线 l_1, l_2 在 xOy 面投影与 x 轴正方向夹角。由于误差的存在,图4中直线 l_1, l_2 均不与泄漏点 g 相交。将直线 l_1, l_2 投影到 xOz 面得交点 s_1 ,投影到 xOy 面得交点 s_2 ,过交点 s_1 做平行于 xOy 面的平面 C ,最后将 s_2 投影到平面 C 即为所求伪交点 s 。

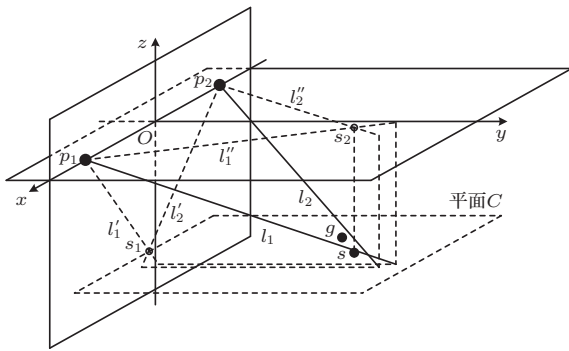


图4 投影法原理图

Fig. 4 Schematic diagram of projection method

由 $p_1(x_1, y_1, 0)$ 、 $p_2(x_2, y_2, 0)$ 以及 (θ_1, φ_1) 、 (θ_2, φ_2) 得直线 l_1, l_2 :

$$\begin{cases} l_1: \frac{x-x_1}{x_1} = \frac{y-y_1}{x_1 \tan \theta_1} = \frac{-z}{x_1 / (\tan \varphi_1 \cos \theta_1)}, \\ l_2: \frac{x-x_2}{x_2} = \frac{y-y_2}{x_2 \tan \theta_2} = \frac{-z}{x_2 / (\tan \varphi_2 \cos \theta_2)}. \end{cases} \quad (5)$$

分别将直线 l_1, l_2 投影到 xOz 面和 xOy 面得直线 l'_1, l'_2, l''_1, l''_2 :

$$\begin{cases} l'_1: \frac{x-x_1}{x_1} = \frac{-z}{x_1 / (\tan \varphi_1 \cos \theta_1)}, \\ l'_2: \frac{x-x_2}{x_2} = \frac{-z}{x_2 / (\tan \varphi_2 \cos \theta_2)}, \\ l''_1: \frac{x-x_1}{x_1} = \frac{y-y_1}{x_1 \tan \theta_1}, \\ l''_2: \frac{x-x_2}{x_2} = \frac{y-y_2}{x_2 \tan \theta_2}. \end{cases} \quad (6)$$

由直线 l'_1, l'_2, l''_1, l''_2 得到 x, y, z 的表达式为

$$\begin{cases} x = \frac{x_1 \tan \theta_1 - x_2 \tan \theta_2 + y_2 - y_1}{\tan \theta_1 - \tan \theta_2}, \\ y = \frac{(x_1 - x_2) \tan \theta_1 \tan \theta_2 + y_2 \tan \theta_1 - y_1 \tan \theta_2}{\tan \theta_1 - \tan \theta_2}, \\ z = \frac{x_2 - x_1}{\tan \varphi_2 \cos \theta_2 - \tan \varphi_1 \cos \theta_1}. \end{cases} \quad (7)$$

由式(7)即可得经投影后再聚焦的伪交点坐标 $s(x, y, z)$ 。

4 管道泄漏定位实验

4.1 实验平台

根据本文所提出的基于TDOA法的管道泄漏交叉定位方法,如图5所示搭建定位实验平台。该实验平台包含以下部分:

- (1) 气体压缩装置: 包含空气压缩机、储气罐、减压阀以及球阀若干,当储气罐充满并关闭空压机时,气体压缩装置可向模拟测试管道提供最高1 MPa的持续稳定压力输出;
- (2) 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) 定位阵列: 包含4个声波传感器和信号放大器、采集仪和配套分析软件以及传感器阵列支架。

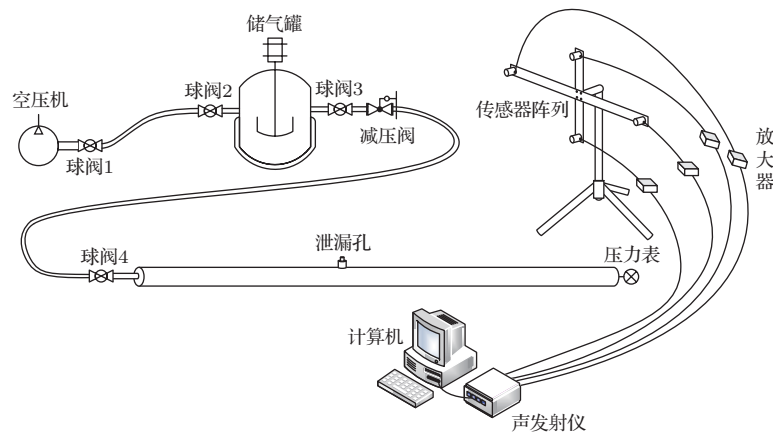


图5 定位实验平台

Fig. 5 Experimental platform for determining leakage localization

使用上述实验平台进行定位实验,调节减压阀保持管道内压为0.6 MPa,关闭空压机以避免其产生干扰噪声;采集仪采样率为3 MHz,采样时间为

10 s; 4个声波传感器按十字交叉排列,图6为传感器阵列的实物图和示意图。由图3所示信号时域波形可知泄漏信号为持续稳定信号,保持管内压力、管

道规格和泄漏孔规格等条件不变,则两次定位的信号源条件可视为不变。传感器阵列采用支架固定,实验室地面平坦且支架高度固定,改变位置后可保证阵列高度、阵元相对位置等条件基本不变。按图4所示以阵列位置连线为 y 轴建立空间直角坐标系,保持阵列平面与 xOz 面重合(即阵列平面保持竖直)。预先设定阵列两次布放位置的坐标,计算阵列与泄

漏点的距离和相对角度,并按照此相对位置布放阵列。因此,两次采样的实验条件、阵列安装、阵列相对位置等参数得以保证。综上所述,实验步骤为:储气罐充满气后关闭空压机,调节减压阀为管道提供0.6 MPa压力输出;使用传感器阵列先后在两个不同位置对泄漏信号进行采集;导出不同位置所采集信号,使用本文定位算法完成定位。

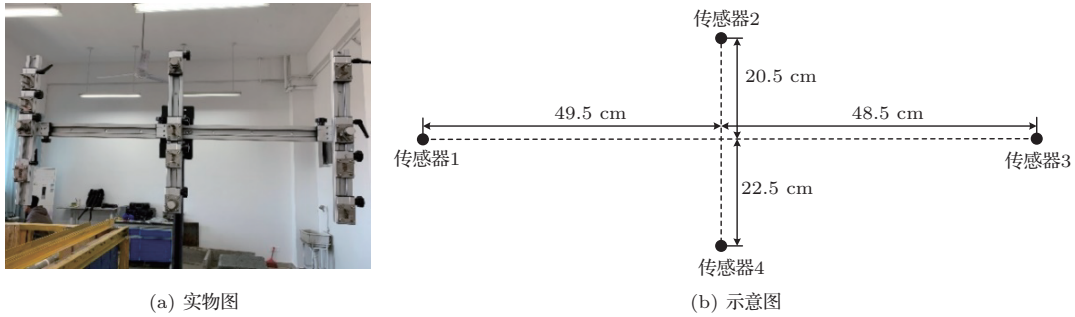


图6 传感器阵列

Fig. 6 Sensor array

4.2 声源模型对比

阵列第一次布放的位置 p_1 坐标为(1.90 m, 0, 0),第二次布放位置 p_2 坐标为(-1.90 m, 0, 0),泄漏点 g 的坐标为(0, 3.10 m, -0.84 m),则声源与两阵列的距离 r 均为3.73 m。根据本文第2节多次延时估计结果得到的声速平均值349.5 m/s,以最高频率500 Hz计算所截取信号最小波长 λ 为787.8 mm。如图6(b)阵列示意图所示可得传感器1和传感器4的间距(最大阵元间距) d 为54.4 cm,由判据 $r > 2d^2/\lambda$ 计算得到远场声源与阵列之间距离的临界值为0.75 m,因此本文实验条件下泄漏声源满足远场声源判据。根据本文第3节对空间方位角 (θ, φ) 的定义,计算得泄漏点 g 相对于布放位置 p_1 、 p_2 的空间方位角坐标为 $(121.5^\circ, 77.07^\circ)$ 和 $(58.5^\circ, 77.07^\circ)$ 。将传感器1设为参考传感器,传感器2、3、

4相对于参考传感器延时 τ_{2-1} 、 τ_{3-1} 、 τ_{4-1} 的估计结果如表2所示。根据阵列中各传感器和泄漏点的位置,计算出远近场声源的理论延时值并在表2中一同给出。对比可知,实验条件下的泄漏声源更趋近于远场声源。如图2所示以阵列平面为 xOy 面建立空间直角坐标系,根据图6(b)所示传感器位置关系,将延时估计结果带入式(2)得到两组空间方位坐标。再将空间方位计算结果转换至图4所示坐标系,得到转换后的坐标为 $(122.0^\circ, 78.1^\circ)$ 和 $(58.1^\circ, 77.0^\circ)$,与理论值较为接近。将阵列位置坐标以及方位角带入式(7)得伪交点 s 的坐标为(-0.004 m, 3.047 m, -0.791 m),相较于与泄漏点 $g(0, 3.10 \text{ m}, -0.84 \text{ m})$ 的误差为0.07 m。将延时估计结果带入近场声源模型进行空间定位,此时无法得出有效解,进一步说明实验条件下泄漏源为远场声源。

表2 延时估计值与理论值对比

Table 2 Comparison between estimated and theoretical values of time delay

延时	$p_1(1.9 \text{ m}, 0, 0)$			$P_2(-1.9 \text{ m}, 0, 0)$		
	τ_{2-1}/ms	τ_{3-1}/ms	τ_{4-1}/ms	τ_{2-1}/ms	τ_{3-1}/ms	τ_{4-1}/ms
估计值	0.6114	1.4538	0.8692	0.8658	1.4887	0.6270
近场值	0.6399	1.4218	0.9118	0.7933	1.4162	0.5215
远场值	0.5900	1.4281	0.8655	0.8526	1.4281	0.5773

4.3 定位实验

上述定位实验将传感器阵列对称放置在泄漏点两侧,但实际泄漏点位置未知,无法保证传感器对称放置。为模拟实际场景,仍以阵列两次布放的位置连线作为 y 轴、连线中点作为原点建立空间直角坐标系,但泄漏点分布放置。本文仅考虑阵列前向泄漏点的定位,因此实际泄漏点的分布范围应为 xOz 面前半空间。考虑到管道多以直线铺设,泄漏点高度变化有限,并且 xOz 面前半空间关于 yOz 面对称、阵列位置关于原点对称,讨论 yOz 面右半空间的定位情况即可推广至左半空间。因此,定位实验划定泄漏点区域为 x 、 y 坐标取 $[0, 10\text{ m}]$ 范围、 z 坐标取 -0.84 m 。图7为阵列位置与泄漏位置的俯视图,阵列两次布放的位置分别为 (M_1, N_1) 、 (M_2, N_2) 和 (M_3, N_3) , $A_1 \sim C_3$ 为9个泄漏位置(每次实验仅一个位置发生泄漏),各点 x 和 y 坐标如图7所示,阵列位置 z 坐标为0,泄漏位置 z 坐标为 -0.84 m 。为了探究阵列孔径对定位精度的影响,还需要改变阵列模型孔径参数进行实验。记图6(b)所示阵列模型孔径为孔径1,进一步缩小孔径使传感器1、3与十字交点的距离为35 cm,传感器2、4与交点距离为15 cm,记为孔径2;传感器1、3与交点的距离为20 cm,传感器2、4与交点距离为15 cm,记为孔径3。

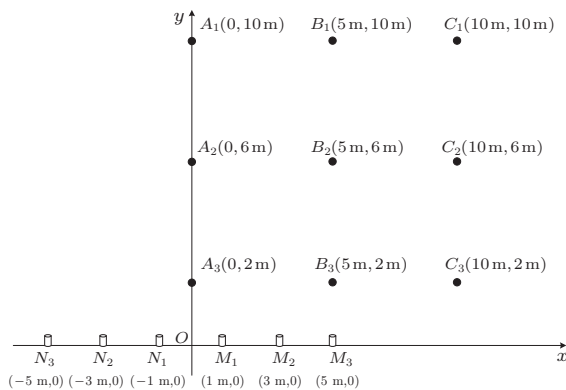


图7 阵列与泄漏位置俯视图

Fig. 7 Position of arrays and leakage points

使用3种孔径的阵列,在3组阵列布放位置下分别对9个泄漏位置进行定位实验,每个条件下进行5次实验并计算平均定位误差。表3为定位结果,对于最大的孔径1,阵列布放位置为 M_1 、 N_1 (即阵列间距2 m)时,A组泄漏点定位精度相对较高,B、C两组明显下降;阵列布放位置为 M_2 、 N_2 (即阵列间距6 m)时,整体定位误差有所降低;阵列布放位置

为 M_3 、 N_3 (即阵列间距10 m)时,A、B两组泄漏点定位误差明显降低,C组有所下降但仍较高。同样条件下,A组定位精度高于B、C两组,A组内距离原点最远的 A_1 点定位误差最大。随着阵元间距的减小,定位误差呈增大趋势,且孔径3下误差明显增大。分析原因为

(1) A组泄漏点位于 y 轴上而B、C两组偏离 y 轴,则A组各点相对于两个阵列位置的方位角 θ 分别属于 $(0, 90^\circ)$ 和 $(90^\circ, 180^\circ)$ 范围且关于 $\theta=90^\circ$ 对称,B、C两组各点两个方位角 θ 均小于 90° 且距离原点越远两方位角大小越接近,由式(7)中 x 、 y 坐标表达式可知计算A组各点坐标时分母 $\tan\theta_1 - \tan\theta_2$ 的绝对值更大,此时分子值的上下浮动所引起的误差更小,反之计算B、C两组各点坐标时分母绝对值较小,则分子波动对误差影响增大;

(2) 对于A组各点,距离原点越远或阵列间距越小则方位角越接近 90° ,由正切函数变化率可知此时方位角 θ 的误差对定位误差的影响更大,因此表3中同一条件下 A_1 点的定位误差相对于 A_2 、 A_3 更大,阵列布放位置为 M_1 、 N_1 (阵列间距最小)时A组定位误差同样更大;

(3) 对于B、C两组,阵列布放位置为 M_1 、 N_1 (阵列间距最小)时,各点两个方位角 θ 的差值较小,由原因(1)可知计算坐标时分子波动对误差影响较大,扩大阵列间距则误差得以降低;

(4) 阵列孔径决定空间方位计算的分辨率,孔径较小时信源方向的改变所引起的延时变化较小,不利于互相关法对延时进行准确估计,从而导致定位误差增大。

对比本文方法与现有基于TDOA的声源空间定位方法。杨祥清等^[16]使用SI-LMS算法在办公室环境进行语音信号定位,定位结果表明:SI-LMS算法对距离阵列1 m以内的近场声源定位误差小于0.05 m,对2~3 m的中场声源定位误差小于0.1 m,对4 m以上的远场声源定位误差则显著提高,最大误差可达到0.57 m。本文方法定位结果显示:阵列布放于 M_3 、 N_3 时,距离阵列或原点较近的泄漏点(A_3 、 B_3 点)定位误差与SI-LMS法基本一致,但距离超过4 m且靠近 y 轴的 A_1 、 A_2 、 B_1 和 B_2 点定位误差仍保持较低,而偏离 y 轴的 C_1 、 C_2 和 C_3 点定位误差则明显增加。相较于现有适用于近场声源三维定位的TDOA法,本文方法对 y 轴附近较远距离的泄漏点定位精度有较明显提升。

表3 定位结果
Table 3 Results of localization

泄漏点	M_1, N_1			M_2, N_2			M_3, N_3		
	孔径1 误差/m	孔径2 误差/m	孔径3 误差/m	孔径1 误差/m	孔径2 误差/m	孔径3 误差/m	孔径1 误差/m	孔径2 误差/m	孔径3 误差/m
A_1	0.56	0.89	1.98	0.22	0.68	1.36	0.06	0.11	1.01
A_2	0.10	0.19	1.05	0.07	0.12	1.00	0.02	0.08	0.89
A_3	0.03	0.15	1.36	0.05	0.08	1.25	0.03	0.17	1.61
B_1	0.89	1.34	2.36	0.50	0.69	1.67	0.03	0.05	0.97
B_2	0.49	0.89	3.47	0.35	0.89	2.58	0.02	0.05	0.76
B_3	0.63	0.77	1.63	0.49	0.57	1.58	0.01	0.05	0.58
C_1	0.95	1.88	2.00	0.81	1.82	3.93	0.65	1.86	1.50
C_2	0.78	1.31	2.95	0.50	1.07	4.20	0.39	1.01	2.36
C_3	1.13	2.06	3.56	0.66	1.50	2.51	0.40	0.80	2.01

综上所述,使用本文方法进行泄漏定位时,在有效信号检测范围内,应增大阵列布放间距;在不影响远场声源判据成立的前提下,应使用较大孔径阵列;当定位结果偏离 y 轴时应适当调整阵列位置,以保证泄漏点位于 y 轴附近,提高定位精度。

5 结论

为实现对管道泄漏远场声源的三维定位,本文使用交叉定位法对现有TDOA定位方法进行了改进。将泄漏声源视为远场声源并使用TDOA法进行不同位置的两次定向,提出空间不相交直线的伪交点求取方法,对两组空间方位进行交叉求取交点,从而完成定位。针对本文信号采样率高、频率低的特点,选取基本互相关法进行延时估计。建立管道泄漏定位实验平台,对阵列孔径、布放间距以及泄漏位置等因素对定位精度的影响进行了实验分析。定位结果表明:适当提高阵列间距、增大阵列孔径以及调整阵列指向,能够提高定位精度;与现有TDOA法相比,基于交叉定位改进的TDOA法对距离原点4 m以上远场泄漏声源的定位精度有明显提升。

由于实验条件所限,本文采用阵列先后两次布放的方式进行定位,且阵元数和阵列孔径无法进一步扩大。实际定位中,应采用双阵列同时布放、采集的方式提高定阵列参数的一致性和可控性,同时应进一步探索更多阵元数、更复杂阵列模型以及更大

阵列孔径对定位精度的有益影响。

参 考 文 献

- [1] 崔丽娟,高文华,杨亦春,等.一种用于高压输气管道泄漏检测的次声传感器的研究[J].应用声学,2013,32(2):144-151.
Cui Lijuan, Gao Wenhua, Yang Yichun, et al. An infrasonic sensor for high pressure gas pipeline leakage detection[J]. Journal of Applied Acoustics, 2013, 32(2): 144-151.
- [2] Mahmutoglu Y, Turk K. Received signal strength difference based leakage localization for the underwater natural gas pipelines[J]. Applied Acoustics, 2019, 153: 14-19.
- [3] 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.
- [4] 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: 147-157.
- [5] 吴江涛,胡定玉,方宇,等.基于Group Lasso的多重信号分类声源定位优化算法[J].应用声学,2019,38(2):261-266.
Wu Jiangtao, Hu Dingyu, Fang Yu, et al. An optimized multiple signal classification algorithm based on Group Lasso for sound localization[J]. Journal of Applied Acoustics, 2019, 38(2): 261-266.
- [6] 程雪,王英民.低复杂度的MIMO声呐协方差矩阵重构方法[J].应用声学,2019,38(4):666-673.
Cheng Xue, Wang Yingmin. A low complexity covariance matrix reconstruction method of MIMO sonar[J]. Journal of Applied Acoustics, 2019, 38(4): 666-673.
- [7] 穆为磊,曲文声,刘贵杰,等.搜索策略改进的波束形成定位方法研究[J].应用声学,2017,36(4):298-304.
Mu Weilei, Qu Wensheng, Liu Guijie, et al. A study

- on beamforming location method with improved search strategy[J]. *Journal of Applied Acoustics*, 2017, 36(4): 298–304.
- [8] 肖栋, 向阳, 卓瑞岩, 等. 基于波束形成的多类型多声源定位研究[J]. *应用声学*, 2017, 36(3): 220–227.
Xiao Dong, Xiang Yang, Zhuo Ruiyan, et al. Localization of multiple sound source with multi-type based on beamforming[J]. *Journal of Applied Acoustics*, 2017, 36(3): 220–227.
- [9] 于国栋, 宋永志, 王世赞. 稳健估计下的声源定位最小二乘算法[J]. *应用声学*, 2017, 36(1): 26–31.
Yu Guodong, Song Yongzhi, Wang Shizhan. Least squares algorithm for sound source localization based on robust estimation[J]. *Journal of Applied Acoustics*, 2017, 36(1): 26–31.
- [10] 丁浩, 李春晓, 金江明, 等. 可识别声源深度的三维声聚焦波束形成方法[J]. *传感技术学报*, 2013, 26(2): 175–181.
Ding Hao, Li Chunxiao, Jin Jiangming, et al. Sound source depth identifiable three-dimensional focused beamforming[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2013, 26(2): 175–181.
- [11] 王琳, 姜根山, 安连锁. 炉内管道泄漏声检测与定位系统的研究现状[J]. *应用声学*, 2010, 29(1): 1–10.
Wang Lin, Jiang Genshan, An Liansuo. Research status of the acoustic detection and location system for boiler tube leakage[J]. *Journal of Applied Acoustics*, 2010, 29(1): 1–10.
- [12] Perez-Lorenzo J M, Viciano-Abad R, Rech-Lopez P. Evaluation of generalized cross-correlation methods for direction of arrival estimation using two microphones in real environments[J]. *Applied Acoustics*, 2012, 73(8): 698–712.
- [13] 马方立, 徐扬, 徐鹏. 基于大地经纬度的二维TDOA无源定位[J]. *通信学报*, 2019, 40(5): 136–143.
Ma Lifang, Xu Yang, Xu Peng. 2D-TDOA passive location based on geodetic longitude and latitude[J]. *Journal on Communications*, 2019, 40(5): 136–143.
- [14] 张杰, 王刚. 无线传感器网络中基于TDOA/FDOA的增强半正定松弛定位算法研究[J]. *传感技术学报*, 2018, 31(12): 1912–1918.
Zhang Jie, Wang Gang. Enhanced semidefinite relaxation method for TDOA/FDOA-based source localization in wireless sensor networks[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2018, 31(12): 1912–1918.
- [15] 张传义, 卢晓. 基于广义互功率谱相位法的声源定位技术[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2018, 39(8): 1075–1079.
Zhang Chuanyi, Lu Xiao. Sound source localization technology based on generalized cross-power spectrum phase[J]. *Journal of Northeastern University(Natural Science)*, 2018, 39(8): 1075–1079.
- [16] 杨祥清, 汪增福. 基于麦克风阵列的三维声源定位算法及其实现[J]. *声学技术*, 2008, 27(2): 260–265.
Yang Xiangqing, Wang Zengfu. 3D sound source localization algorithm and its implementation based on microphone array[J]. *Technical Acoustics*, 2008, 27(2): 260–265.
- [17] 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.
- [18] Liu C W, Li Y X, Meng L Y, et al. Study on leak-acoustics generation mechanism for natural gas pipelines[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2014, 32: 174–181.
- [19] 宗军君, 崔逊学. 多站测向交叉定位的加权最大似然估计算法及其精度分析[J]. *电光与控制*, 2015, 22(11): 11–13, 47.
Zong Junjun, Cui Xunxue. Algorithm of weighted maximum likelihood estimation in multi-station DF crossing localization and its accuracy analysis[J]. *Electronics Optics & Control*, 2015, 22(11): 11–13, 47.
- [20] 沈伟, 徐斐, 伍光新, 等. 一种利用多站角度融合抗干扰方法研究[J]. *现代雷达*, 2018, 40(1): 47–50.
Shen Wei, Xu Fei, Wu Guangxin, et al. A study on anti-jamming method using angle fusion from multi-site radars[J]. *Modern Radar*, 2018, 40(1): 47–50.
- [21] Knapp C, Carter G. The generalized correlation method for estimation of time delay[J]. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 2003, 24(4): 320–327.