

DOI: 10.13382/j.jemi.B1902494

燃气管道泄漏的次声源定位算法研究*

张梅¹ 张双双¹ 袁宏永² 付明²

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

摘要:针对城市燃气管道泄漏定位精度不高的问题,根据燃气管道泄漏时泄漏点产生次声波的特性,提出了一种燃气管道泄漏的次声源定位算法。该算法通过构建泄漏源的定位模型,利用传感器节点和泄漏点之间位置上的几何关系得到泄漏点位置。首先利用传感器阵列采集燃气管道泄漏时产生的次声波信号,并对该信号进行小波去噪处理,接着利用广义互相关法计算相邻传感器节点间的时延,最后结合定位模型计算出泄漏点位置。针对算法的信号处理部分进行了仿真,并在实验室进行了泄漏点定位的模拟实验。结果表明,在燃气管道泄漏定位中,算法的定位误差在 1 m 以内,具有较高的定位精度。

关键词: 燃气泄漏;定位算法;次声波;传感器阵列;广义互相关法;时延

中图分类号: TP274;TN98 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.40

Research on infrasound source location algorithm of gas pipeline leakage

Zhang Mei¹ Zhang Shuangshuang¹ Yuan Hongyong² Fu Ming²

(1.School of Electrical and Information Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huai'nan 232001, China;
2.Hefei Institute for Public Safety Research, Tsinghua University, Hefei 320601, China)

Abstract: Aiming at the problem that the underground gas pipeline leakage positioning accuracy is not high, according to the characteristic of infrasound waves generated with leakage points when gas pipeline leaks, an infrasound source location algorithm of gas pipeline leakage is proposed. The algorithm builds positioning model, and the position of the leak point is obtained by the geometric relationship between the sensor nodes and the leak point. Firstly, the infrasound wave signals generated by the gas pipeline leaks are collected through a sensor array, and the signals are processed by wavelet denoising. Then the time delay between adjacent sensor nodes is calculated by the generalized cross-correlation method, and finally the location of the leak point is calculated by combining the geometric model of the leak location. The signal preprocessing part of the algorithm is simulated, and the simulation experiment of leak location is carried out in the laboratory. The results show that the positioning error of the algorithm is within 1 m in the gas pipeline leakage location, and it has high positioning accuracy.

Keywords: gas leakage; location algorithm; infrasound waves; sensor array; the generalized cross-correlation method; time delay

0 引言

自 20 世纪管道燃气出现至 20 世纪后期城市管道迅速发展,管道燃气泄漏问题一直是人们十分关注的问题。由于管道深埋地下多年,随着地理环境的变化、腐蚀物质

物含量增加等一些不可抗拒因素及管道本身的质量问题,燃气管道泄漏情况时有发生。管道燃气多为有毒易燃易爆气体,一旦发生泄漏极易造成巨大的灾难。因此,对城市地下燃气管道泄漏的及时监测及精确的泄漏源定位极其必要。现有的燃气泄漏检测定位方法主要是一些间接的检测定位,包括负压波法、流量平衡法、动态压变

收稿日期: 2019-08-20 Received Date: 2019-08-20

* 基金项目: 国家自然科学基金(51874010)、国家自然科学基金(61170060)、重大创新平台及高校创新人才团队_矿山物联网研发团队(2017A053)资助项目

法、泄漏检测电缆法、光纤传感检漏法、软件检漏法等^[1-3]。负压波法是在管道两端安装压力传感器,采集泄漏时产生的负压波,再根据负压波的传输速度以及到达管道两端传感器的时间差,即可实现泄漏点的定位。该方法是目前国际国内最成熟应用的泄漏监测方法,但其只能检测突发性大的泄漏,对微小泄漏不敏感,并且易受站内输送工艺的影响,可能出现误报^[4-5]。流量平衡法是通过检测燃气管道入口及出口处的流量,然后根据输入、输出流量的平衡与否,即可判断出管道燃气泄漏与否。其原理简单、易于执行,但无法实现泄漏点的定位。泄漏检测电缆法是在燃气管道外壁敷上对可燃气体敏感的高聚物电缆对泄漏检测。其原理是当发生燃气泄漏时,泄漏的可燃气体被高聚物吸收,引起电缆电压的变化,通过对电缆电压变化的检测即可判断泄漏发生,并进行泄漏点定位。该方法的不足之处是不能检测到缓慢的泄漏,并且成本太高^[1-3]。光纤传感检漏法能快速检测出较小的泄漏,且定位精度较高,但需要沿管线铺设光纤,一方面成本较高,另一方面对已建好的燃气管道较难铺设^[6]。这些传统的检测定位方法都存在各自的不足和局限之处,使得燃气管道泄漏的检测定位不能及时、准确,给检修人员带来极大的不便。

针对城市燃气管道泄漏检测定位难、精度低的问题,本文提出了一种基于传感器阵列的燃气管道泄漏次声源定位算法。该定位算法采用四阵列的传感器对泄漏点产生的次声波信号进行检测,利用检测节点和泄漏点之间位置上的几何关系,对泄漏点进行定位,极大提高了泄漏点的定位精度,为燃气管道泄漏点的检测维修提供了可靠依据。

1 燃气管道泄漏的次声源定位模型及分析

城市燃气管道在正常工作时,管道内的燃气流体存在一定的压力,且与管外的大气有一个压力差。当燃气管道出现腐蚀、磨损或者受到外界破坏发生燃气泄漏时,管道内燃气流体由于管内压力的作用会急速的流向泄漏

处,并在泄漏处发生燃气喷射现象,燃气喷出时与泄漏点处破损的管道内壁发生摩擦产生振动,形成不同频率的声波。其中,可听声波和超声波的波长短,衰减很快,传播的距离很近,而次声波由于波长长,不易发生衰减,传播距离远。因此,利用次声波的这一特性,在城市燃气管道泄漏检测中,可以通过检测次声波信号并进行处理,来实现泄漏检测与定位^[7-8]。

次声源定位的原理是利用传感器阵列采集同一次声源的次声波信号,根据同一次声源到达阵列中各点时间不同,求出各点间信号的到达时间差(时间延迟),再根据各点与次声源之间位置上的几何关系来实现定位^[9-12]。根据误差扩散原理,阵列中点数越多,定位越精确,但同时计算也越复杂。本文提出一种四点阵定位算法,实现燃气泄漏的次声源位置判别,其几何计算模型如图 1 所示。

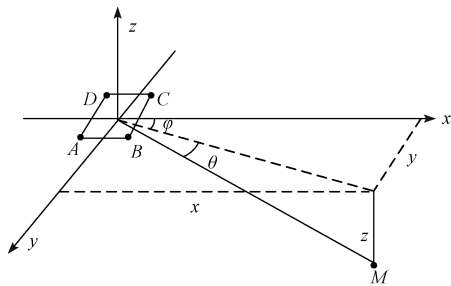


图 1 四点阵次声源定位计算模型

Fig.1 Four-point array infrasound source localization calculation model

图 1 中,取一个地理方位为 x 的正方向, x 正方向的顺时针 90° 为 y 轴的正方向,垂直地面向上为 z 轴正方向;平面正方形的 4 个节点 A 、 B 、 C 、 D 代表四个次声波传感器检测节点,其坐标分别设置为 $A(-a, a, 0)$ 、 $B(a, a, 0)$ 、 $C(a, -a, 0)$ 、 $D(-a, -a, 0)$;点 M 为泄漏点,其坐标未知,设其为 (x, y, z) 。

根据图 1 所示的模型,利用各点间的几何关系,可以得到以下方程组:

$$\begin{cases} \sqrt{(x+a)^2 + (y-a)^2 + z^2} - \sqrt{(x-a)^2 + (y-a)^2 + z^2} = \tau_1 \cdot v \\ \sqrt{(x-a)^2 + (y+a)^2 + z^2} - \sqrt{(x-a)^2 + (y-a)^2 + z^2} = \tau_2 \cdot v \\ \sqrt{(x+a)^2 + (y+a)^2 + z^2} - \sqrt{(x-a)^2 + (y+a)^2 + z^2} = \tau_3 \cdot v \end{cases} \quad (1)$$

式中: τ_1 、 τ_2 、 τ_3 分别为节点 AB 之间、 BC 之间、 DC 之间的时间延时量; v 为次声波传播速度; a 为节点与坐标轴的距离。

由式(1)可得:

$$\begin{cases} x = -\frac{\tau_3 v (2\tau_1 \tau_2 v^2 - \tau_2 \tau_3 v^2 + \tau_2^2 v^2)}{4av(\tau_2 - \tau_3)} \\ y = -\frac{\tau_1^2 \tau_2 v^3 + \tau_1^2 \tau_3 v + \tau_1 \tau_2^2 v^3 - \tau_1 \tau_3^2 v^3}{4a\tau_2 v - 4a\tau_3 v} \\ z = \frac{A}{B} \end{cases} \quad (2)$$

其中:

$$A = \begin{pmatrix} -\frac{\tau_1^4 \tau_2^2 v^6}{4} - \frac{\tau_1^4 \tau_2 \tau_3 v^6}{2} - \frac{\tau_1^4 \tau_3^2 v^6}{4} - \frac{\tau_1^3 \tau_2^3 v^6}{2} \\ -\frac{\tau_1^3 \tau_2^2 \tau_3 v^6}{2} + \frac{\tau_1^3 \tau_2 \tau_3^2 v^6}{2} + \frac{\tau_1^3 \tau_2^3 v^6}{2} - \frac{\tau_1^2 \tau_2^4 v^6}{4} \\ -\frac{\tau_1^2 \tau_2^2 \tau_3^2 v^6}{2} + 2a\tau_1^2 \tau_2^2 v^4 - \frac{\tau_1^2 \tau_3^4 v^6}{4} + 2a^4 \tau_1^2 \tau_3^2 v^4 \\ -2a^2 \tau_1 \tau_3^3 v^4 - \frac{\tau_2^4 \tau_3 v^6}{4} + a^2 \tau_2^4 v^4 + \frac{\tau_2^3 \tau_3^3 v^6}{2} \\ -2a^2 \tau_2^3 \tau_3 v^4 - \frac{\tau_2^2 \tau_3^3 v^6}{4} + 2a^2 \tau_2^2 \tau_3^2 v^4 - 8a^4 \tau_2^2 v^2 \\ -2a^2 \tau_2 \tau_3^3 v^4 + 16a^4 \tau_2 \tau_3 v^2 + a^2 \tau_3^4 v^4 - 8a^4 \tau_3^2 v^2 \end{pmatrix}^{\frac{1}{2}}$$

$$B = -2av(\tau_2 - \tau_3)$$

由式(2)可知,在已知 a 时,只需求出节点间的时延量 τ_1 、 τ_2 、 τ_3 和次声波波速 v ,即可得到泄漏点的坐标。

在实际检测中,为了便于测量,常把坐标点转化为距离、角度等量,其计算公式如下:

$$\begin{cases} d = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \\ \theta = \arctg \frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2}} \\ \varphi = \arctg \frac{y}{x} \end{cases} \quad (3)$$

式中: d 为坐标原点与泄漏源间的距离; φ 为方位角; θ 为仰角。

2 燃气管道泄漏的定位算法

基于传感器阵列的燃气管道泄漏定位算法的构成如图2所示。

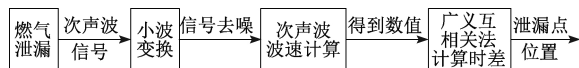


图2 燃气管道泄漏定位算法的构成框图

Fig.2 Composition diagram of gas pipeline leak location algorithm

燃气管道泄漏的次声源定位算法由如下部分构成:首先利用四点阵的次声波传感器采集泄漏产生的次声波信号;然后对信号中的噪声进行小波去噪处理,再根据环境温度对次声波的影响计算次声波波速,接着利用广义互相关法求时延;最后由定位模型即可计算得到泄漏点的位置^[13-14]。

2.1 基于小波变换的信号去噪处理

在实际泄漏检测环境中,次声波传感器除了接收到泄漏源产生的信号,还有管内外的干扰噪声,这些噪声叠

加在真实泄漏信号上,故要对信号进行去噪处理。这里利用小波变换对信号做去噪处理:首先对信号进行小波变换,变换后得到不同尺度的高频和低频系数,然后对不同频率的系数进行阈值处理,减小噪声对定位精度的影响,最后重构小波系数得到降噪的次声波信号^[15]。

小波变换法去除信号中噪声的过程如下。

1) 对含有噪声的次声波信号 $i(t)$ 做离散小波变换。设 $i(t)$ 离散小波变换的小波系数 $W(a, b)$, 则:

$$W(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a_l}} \int_{-\infty}^{+\infty} i(t) \phi_{l,n} \left(\frac{t}{a_l} - nb \right) dt \quad (4)$$

式中: ϕ 表示母小波; $a = a_0^l$ ($a_0 > 1, l \in Z$) 表示尺度因子; $b = ka_0^n b_0$ ($b \neq 0, n \in Z, k \in Z$) 表示平移因子。

2) 对小波系数的阈值进行处理

为了达到平滑的处理效果,并且不产生震荡,这里采用软阈值处理方法。软阈值函数表达式为:

$$\hat{W} = \begin{cases} \text{sgn}(w) (|w| - \lambda), & |w| > \lambda \\ 0, & |w| \leq \lambda \end{cases} \quad (5)$$

式中: $\text{sgn}(w)$ 表示符号函数; λ 表示阈值。

3) 利用小波重构函数得到降噪的次声波信号。小波重构函数为:

$$\tilde{i}(t) = C \sum_{a=2}^{+\infty} \sum_{b=1}^{+\infty} \hat{W}(a, b) \phi_{(l,n)}(t) \quad (6)$$

式中: C 表示一个与信号无关的常数。

2.2 次声波波速的计算

次声波在空气中传播速度与大气中温度与大气摩尔质量有关,由物理常识给出如下计算公式:

$$v = \frac{\gamma P}{\rho} = \frac{\gamma R T}{M} \quad (7)$$

式中: γ 为气体比热比; P 为声压; ρ 为大气密度; R 为气体摩尔常量; M 为大气摩尔质量(这里指接近地面的大气摩尔质量); T 表示大气华氏温度。

2.3 基于广义互相关法的时间延迟计算

由于在泄漏源的精确定位中,泄漏源的坐标都与时间延迟 τ 有关,因此计算出的时延 τ 的精度直接影响着定位的准确性。本文利用广义互相关时延估计法来计算同声源各路信号间时延差。广义互相关法是在互相关法的基础上做了改进,较互相关时延估计法精度有所提高^[16]。

基本互相关法求时延的方法简单快捷,但去噪之后的次声波信号仍包含少量的环境噪声,这些噪声会对时延的求解产生较大的影响,在相关函数的峰值检测时发现最大峰值被减弱,并且出现多个峰值,很难确定相关函数真正的峰值。

广义互相关法在互相关法的基础上做了改进,弥补了上述不足。该方法先求出两信号之间的互功率谱;再

在频域内加上加权函数,使得被噪声影响的那部分次声波信号得到加强,在峰值检测中能够得到明显的峰值位置;最后进行傅里叶逆变换 (IFFT) 到时域,得到关于时延的互相关函数,从而求得时延量。广义互相关求时延的模型如图 3 所示。

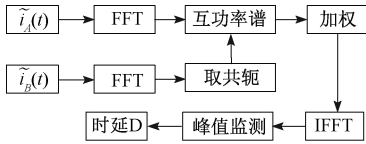


图 3 广义互相关时延估计模型图

Fig.3 Generalized cross-correlation time delay estimation model

由互相关基本原理可知 A 、 B 两传感器得到的次声波信号为:

$$\begin{aligned}\tilde{i}_A(t) &= \alpha_1 s(t - t_1) + n_A(t) \\ \tilde{i}_B(t) &= \alpha_2 s(t - t_2) + n_B(t)\end{aligned}\quad (8)$$

式中: $\tilde{i}_A(t)$ 、 $\tilde{i}_B(t)$ 为 A 、 B 两传感器接收到的次声波信号; $s(t)$ 为次声源的信号; $n_A(t)$ 、 $n_B(t)$ 为环境噪声。且 $s(t)$ 、 $n_A(t)$ 和 $n_B(t)$ 之间彼此不相关。

由图 3 所示信号 $\tilde{i}_A(t)$ 、 $\tilde{i}_B(t)$ 经快速傅里叶变换 (FFT) 到频域得到互功率谱 $G_{AB}(w)$ 为:

$$\begin{aligned}G_{AB}(w) &= \tilde{I}_A(w) \tilde{I}_B^*(w) = \\ &\alpha_1 \alpha_2 S(w) S^*(w) e^{-jw(t_1 - t_2)} + \alpha_1 S(w) e^{-jw t_1} N_B^*(w) + \\ &\alpha_2 S(w) e^{-jw t_2} N_A(w) + N_A(w) N_B^*(w)\end{aligned}\quad (9)$$

式中: $S(w)$ 为次声波源的次声波信号的频域表示; $N_m(w)$ 为噪声的频域表示 (m 取 A 或 B)。

因为 $s(t)$ 、 $n_A(t)$ 和 $n_B(t)$ 之间彼此不相关,为了计算简便 α_1 、 α_2 均取 1,所以 $G_{AB}(w)$ 可表示为:

$$G_{AB}(w) = \tilde{I}_A(w) \tilde{I}_B^*(w) = S(w) S^*(w) e^{-jw(t_1 - t_2)} \quad (10)$$

图 3 中互功率谱进行加权和傅氏逆变换得到两信号的时域互相关函数 $R_{AB}(t_1 - t_2)$, 令 $\tau = t_1 - t_2$, 则互相关函数 $R_{AB}(\tau)$ 为:

$$R_{AB}(\tau) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \psi_{AB}(w) \tilde{I}_A(w) \tilde{I}_B^*(w) e^{jw\tau} dw \quad (11)$$

式中: $\psi_{AB}(w) = \frac{1}{|G_{AB}(w)|}$ 。

峰值检测器检测到互相关函数峰值,得到时延 $D = \tau$, D 表示为:

$$D = \arg\max[R_{AB}(\tau)] \quad (12)$$

通过广义互相关法求时延的方式,避免了互相关函数峰值难以确定的问题,也为后面的定位运算提供了精确的时间延迟量。

2.4 基于传感器同步时钟协议 (TPSN) 的时间同步算法

上述定位算法主要涉及不同位置传感器的数据,传

感器间的时间同步精确度直接影响着定位精度。为了提高传感器阵列的时间戳精度,这里采用 TPSN 时间同步算法对传感器节点进行时间同步。

TPSN 是基于发送者与接收者的双向同步算法,主要分为两个阶段,层次发现阶段和同步阶段,其原理如图 4 所示。

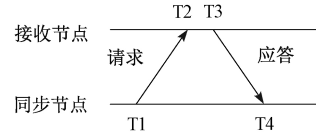


图 4 TPSN 时钟同步算法基本原理

Fig.4 The basic principle of TPSN clock synchronization algorithm

同步节点在本地时钟为 T_1 时刻时通过广播时钟同步消息请求,接收节点接收到同步请求报文后记录接收时刻为 T_2 。然后等待一段时间,在本地时间 T_3 时再向同步节点回复一个应答报文,而同步节点在本地时钟为 T_4 时刻接收到应答报文。假定同步请求报文和应答报文传递的延时相等为 d , 接收节点和同步节点之间的时偏为 γ , 则传递时延和时偏为:

$$\begin{cases} d = \frac{(T_2 - T_1) + (T_4 - T_3)}{2} \\ \gamma = \frac{(T_2 - T_1) - (T_4 - T_3)}{2} \end{cases} \quad (13)$$

根据传递时延和时偏来调整接收节点的时钟与同步节点的时钟,使其时钟一致。

设置传感器阵列中的一个节点为接收节点,其余为同步节点,对其进行上述同步算法即可实现传感器节点间的时钟同步。

3 泄漏源信号预处理系统的仿真分析

这里对 MATLAB 平台产生类似次声波的模拟信号进行了小波去噪和广义互相关法的仿真,验证该方法的可行性和可靠性。

3.1 小波去噪的仿真分析

利用 MATLAB 平台产生次声波模拟信号,然后加入高斯噪声,再利用上述基于小波变换的信号去噪算法进行去噪。原始的信号图和小波去噪后的信号图如图 5 所示。

由图 5 可知,小波去噪法对高频部分通过软阈值做进一步的提取和叠加处理,去除了噪声信号,最终得到真实、有用的信号。经过多次模拟仿真,证明该小波去噪法对强噪声弱信号的处理也能够达到理想的去噪效果。

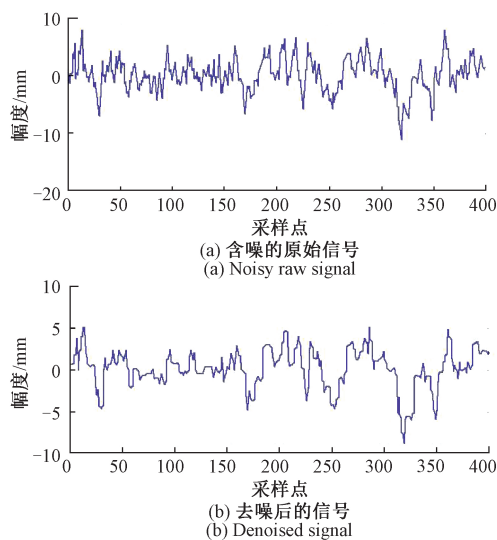


图5 小波去噪的仿真

Fig.5 Simulation figure of wavelet denoising

3.2 基于广义互相关的时延仿真分析

为验证广义互相关法求时延的精确性,用 MATLAB 模拟了两路时延为 -0.159 s 的含噪正弦波信号,做广义互相运算后,观察其互相关函数峰值处的数值特征。设定仿真环境中,系统采样周期 T 为 0.01 s,取 $2\ 048$ 采样点。两信号的互相关函数也是一系列点值,其原点位置处在“ $2\ 048/2+1$ ”处。两信号原型及其互相关函数仿真结果如图 6、7 所示。

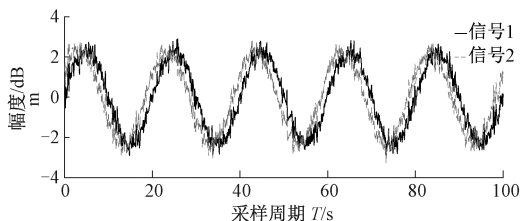


图6 两路含噪的正弦信号

Fig.6 Two noise-containing sinusoidal signals

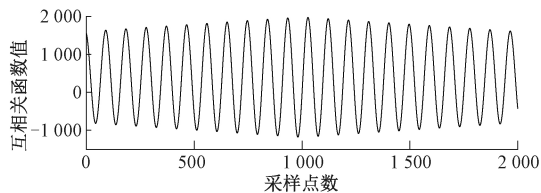


图7 两路信号的互相关函数

Fig.7 Cross-correlation function of two signals

由图 7 峰值可知,互相关函数在 $1\ 038$ 位置处取得最大。按照相关函数初始原点计算方式,此时估算的时延为 $(2\ 048/2+1)-1\ 041=-16$ 个采样周期,折算成时间为

-0.16 s。

从仿真结果可以看出,其时延计算值与实际仿真设定的时延值非常接近,精确度可达 99.4% 。

4 燃气管道泄漏的泄漏点定位实验

由于实际实验条件受限,这里对本文所提的燃气管道泄漏定位算法在实验室进行了模拟实验。

4.1 模拟实验

安徽理工大学能源学院安全工程实验室内布建了 200 m 的实验燃气管道,在地面平面放置,上面布有多个阀门,用阀门的开启来模拟泄漏。管道模型如图 8 所示。

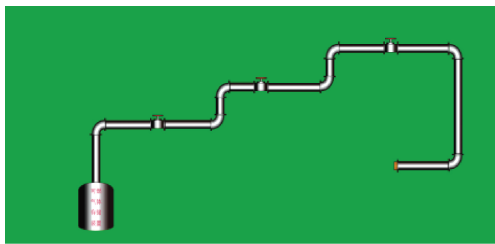


图8 实验燃气管道模型

Fig.8 Experimental gas pipeline model

为了实现上述燃气管道泄漏的定位算法,采用基于 STM32 的嵌入式系统设计了燃气泄漏检测与定位系统,其结构示意图如图 9 所示。

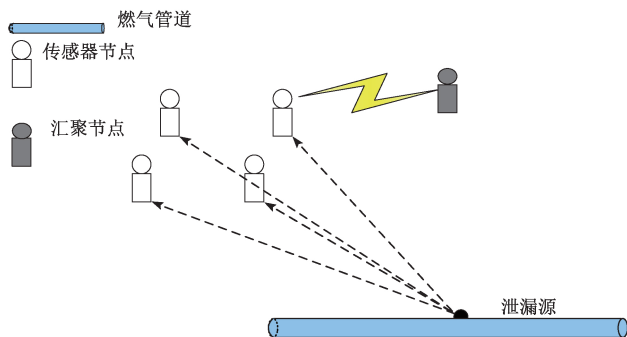


图9 燃气泄漏检测与定位系统示意图

Fig.9 Gas leak detection and positioning system schematic

该系统主要由 4 个次声波传感器节点和一个汇聚节点组成。传感器节点主要由次声波传感器、Lora 通信芯片和主控芯片 STM32F103 组成。本实验中的次声波传感器采用电容式传感器 CASI-DBF-2013,该传感器具有灵敏度高、稳定性好、可进行非接触式测量等优点,其检测频率范围为 $0.1\sim 300$ Hz,灵敏度为 150 mV/Pa。传感器节点负责采集泄漏源的次声波信号,并将其去噪,然后将数据上传给汇聚节点;汇聚节点主要由 Lora 通信芯片、LCD 显示屏和主控芯片 STM32F103 组成,用来接收 4

个传感器节点的数据,进行相关定位算法处理,并将最后的泄漏点位置在显示屏上显示。

4.2 实验结果与分析

实验时,次声波的波速计算中,气体比热比 γ 取值为 1.4,气体摩尔常量 R 取值为 $8.3145 \text{ J/mol}\cdot\text{K}$,大气摩尔质量 M 取值为 $28.966 \text{ J/mol}\cdot\text{K}$,大气温度 T 为传感器实时检测温度。

实验时设置坐标原点为 4 个传感器节点的中心点,泄漏点为 3 个阀门点,其坐标为 $(20, 10)$ 、 $(40, 20)$ 、 $(60, 30)$ 。设传感器节点与坐标轴之间的距离为 a ,则 4 个传感器节点的坐标分别为 (a, a) 、 $(-a, a)$ 、 $(-a, -a)$ 、 $(a, -a)$ 。

1) 时钟同步算法的实验

为了验证传感器节点间的时间同步对泄漏源定位精度的影响,这里首先进行了基于 TPSN 的时钟同步算法实验。

选取传感器节点与坐标轴之间的距离为 a 为 1 m,打开坐标为 $(40, 20)$ 的阀门,对其进行泄漏点定位。这里分别在传感器节点不使用时钟同步和使用时钟同步两种情况下,进行多次实验,实验结果如图 10 所示。

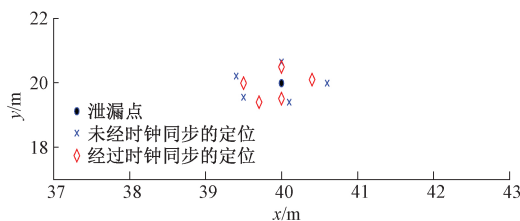


图 10 时钟同步算法的实验定位结果

Fig.10 Experimental positioning results for clock synchronization algorithm

由图 10 可看出,使用基于 TPSN 的时钟同步算法后,泄漏点的定位精度可提高 15% 左右。这时由于泄漏点的定位是由各传感器间的时延决定的,传感器间时间同步误差越小,时延就越精确,定位精度就越高。

2) 不同泄漏点的定位实验

由于 a 的取值直接决定着时延,影响定位坐标,这里分别在 a 取 0.5、1、1.5 m 时对每个泄漏点进行多次实验。

分别打开 3 个阀门进行管道泄漏模拟实验,其实验结果如图 11 所示。

由图 11 可看出,泄漏源距离检测系统越远,定位误差越大,但误差都在 1 m 以内;而传感器节点间的距离过大过小,误差都比较大,当距离值 a 取 1 m 时误差最小。这是因为 a 越大,时延误差带来的定距误差越小;而另一方面,当 a 太大时,传感器节点传输到汇聚节点的时间越大,因而将降低定位输出的更新率,引起滞后,所以 a 不

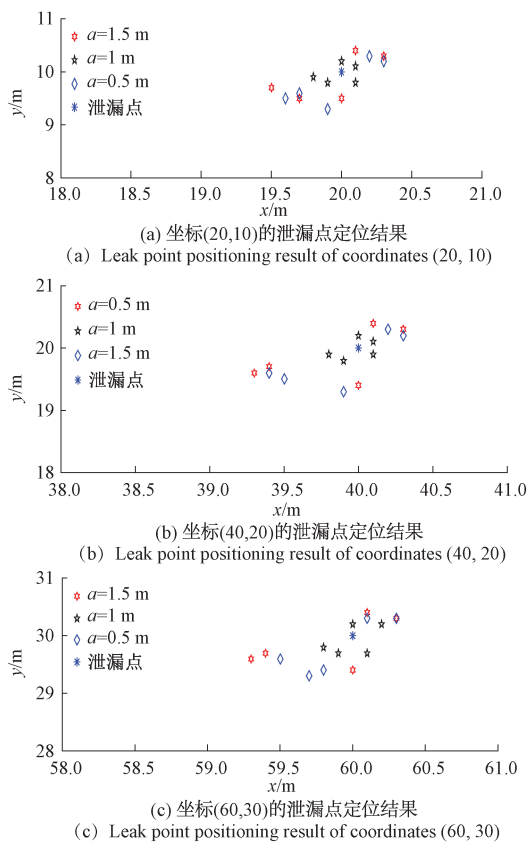


图 11 不同位置泄漏点的实验定位结果

Fig.11 Experimental positioning results for leak points at different locations

宜太大。经多次模拟实验比较, a 取 1 m 附近的值时,误差较小。

5 结 论

为了对燃气管道泄漏点进行精确定位,本文提出一种基于传感器阵列的次声源定位算法,该算法,利用四阵列的传感器采集泄漏时的次声波,对采集到次声波信号分别进行小波去噪、求波速、广义互相关法求时延分析,最后结合泄漏源的几何定位模型得到泄漏源坐标。

对加入高斯噪声的次声波信号进行小波去噪的仿真,仿真结果说明对于次声波信号,基于小波变换的去噪效果很好;对广义互相关法进行了仿真,仿真结果说明广义互相关法求时延精确度非常高。通过在实验室布置燃气管道进行了模拟实验,实验结果表明传感器节点间进行时钟同步后,定位精度可以显著提高;同时传感器阵列距离泄漏源越远,定位误差越大,但误差没有超过 1 m,验证了本文所提算法可以对燃气管道泄漏点进行精确定位。

参考文献

- [1] 李健,陈世利,黄新敬,等.长输油气管道泄漏监测与准实时检测技术综述[J].仪器仪表学报,2016,37(8):1747-1760.
- LI J, CHEN SH L, HUANG X J, et al. Review of leakage monitoring and quasi real-time detection technologies for long gas & oil pipelines [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37 (8): 1747-1760.
- [2] 狄彦,帅健,王晓霖.油气管道事故原因分析及分类方法研究[J].中国安全科学学报,2013,23(7):109-115.
- DI Y, SHUAI J, WANG X L. Study on methods for classifying oil and gas pipeline incidents [J]. China Safety Science Journal, 2013,23(7):109-115.
- [3] TIAN C H, YAN J C, HUANG J, et al. Negative pressure wave based pipeline leak detection: challenges and algorithms [C]. IEEE International Conference on Service Operations and Logistics, and Informatics, 2012: 372-376.
- [4] HOU Q, REN L, JIAO W, et al. An improved negative pressure wave method for natural gas pipeline leak location using FBG based strain sensor and wavelet transform [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2013(3): 1-8.
- [5] 王正,王洪诚,傅磊,等.基于多压力传感器负压波的管道检测法[J].传感器与微系统,2015,34(5):115-118.
- WANG ZH, WANG H CH, FU L, et al. Pipeline detection method based on multiple-pressure sensor and negative pressure wave[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2015,34(5):115-118.
- [6] 张晓威.基于分布式光纤传感器的管道泄漏监测试验研究[J].水利与建筑工程学报,2016,14(3):1-6.
- ZHANG X W. Experimental research on pipeline leakage monitoring based on distributed optical fiber sensor[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2016, 14(3): 1-6.
- [7] 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.
- [8] 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 single non-dispersive mode from leakage-induced acoustic emission signal [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(4): 969-976.
- [9] 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.
- [10] 刘斌,栾忠权,马超,等.基于L型阵列的故障声源位置估计[J].电子测量与仪器学报,2017,31(4):617-622.
- LIU B, LUAN ZH Q, MA CH, et al. Fault sound sources position estimation based on L array method [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2017, 31(4): 617-622.
- [11] 孙云亭,蔡振江,程曼,等.多超声波传感器局部放电源定位方法的研究[J].电子测量与仪器学报,2016,30(3):416-422.
- SUN Y T, CAI ZH J, CHENG M, et al. Research on partial discharge source localization method of multi-ultrasonic-sensor[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2016, 30(3): 416-422.
- [12] 杨庆生,丁浩亮,夏雅琴.三点阵次声源定位估算法[J].北京工业大学学报,2017,43(6):819-825.
- YANG Q SH, DING H L, XIA Y Q. Estimation method of three-point subsequence sound source location [J]. Journal of Beijing Polytechnic University, 2017, 43(6): 819-825.
- [13] 郭士旭,张正模,杜建国.振源定位技术在文化遗产地保护中的应用[J].计算机工程与应用,2017,53(11):265-270.
- GUO SH X, ZHANG ZH M, DU J G. Application of vibration source localization technology in the protection of cultural heritage sites [J]. Computer Engineering and Applications, 2017, 53(11): 265-270.
- [14] 金磊磊,梁红,马艳.基于水下无线传感器阵列网络多模态信息融合的目标定位[J].西北工业大学学报,2017,35(6):1020-1025.
- JIN L L, LIANG H, MA Y. Target location based on multimodal information fusion for underwater wireless sensor array networks [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2017, 35(6): 1020-1025.
- [15] 杜岳峰,汪金菊.双密度双树复小波域统计模型的地震信号降噪[J].合肥工业大学学报(自然科学版),

2018, 4(7):995-1001.

DU Y F, WANG J J. Diagnostic signal denoising of double-density double-tree complex wavelet domain statistical model [J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2018, 4(7):995-1001.

- [16] 程方晓,刘璐,姚清华.基于改进时延估计的声源定位算法[J].吉林大学学报(理学版), 2018, 56(3): 681-687.

CHENG F X, LIU W, YAO Q H. A sound source localization algorithm based on improved time delay estimation [J]. Journal of Jilin University: Sci Ed, 2018, 56(3): 681-687.

作者简介



张梅, 分别在 2002 年和 2005 年于安徽理工大学获得学士学位和硕士学位, 现为安徽理工大学副教授、硕士生导师, 主要研究方向为智能控制、信息获取与处理。

E-mail: 149660072@qq.com

Zhang Mei received her B. Sc. and M. Sc. from Anhui University of Science and Technology in 2002 and 2005, respectively. Now she is an associate professor and M. Sc. supervisor at Anhui University of Science and Technology. Her main research interests include intelligent control, information acquisition and processing.