

范晶璟, 苗大勇, 冯乐, 等. 基于激励信号同步采集的供水管网泄漏声波定位技术[J]. 净水技术, 2025, 44(9): 166–174, 185.

FAN J J, MIAO D Y, FENG L, et al. Excitation signal-based synchronous acquisition for acoustic leakage localization in water supply pipelines distribution networks [J]. Water Purification Technology, 2025, 44(9): 166–174, 185.

## 基于激励信号同步采集的供水管网泄漏声波定位技术

范晶璟<sup>1</sup>, 苗大勇<sup>2</sup>, 冯乐<sup>3</sup>, 任植元<sup>4</sup>, 陈博<sup>2</sup>, 郭冠呈<sup>3,\*</sup>

(1. 上海临港供排水发展有限公司, 上海 201306; 2. 河南力科管线探测技术有限公司, 河南郑州 450051; 3. 清华大学环境学院, 北京 100084; 4. 内蒙古科技大学能源与环境学院, 内蒙古包头 014000)

**摘要** 【目的】供水管网泄漏问题严重影响水资源利用效率和供水安全, 亟需发展高精度泄漏定位技术以提升管网运行效率。声波定位技术作为当前主流的泄漏检测方法, 其定位精度受到采集设备同步精度的显著影响。传统的网络时间协议(NTP)仅能达到毫秒级精度, 而全球卫星定位系统(GNSS)授时虽能达到纳秒级, 但在地下管道环境中常因信号遮挡而无法正常工作。因此, 此研究旨在提出一种不依赖GNSS信号的同步采集方法, 解决复杂环境下分布式采集系统的时间同步问题, 实现高精度泄漏定位, 为供水管网智能化运维提供技术支撑。【方法】本文针对多点同步集中的时间同步问题, 提出一种基于激励信号的同步采集方法。首先, 建立泄漏声波时延估计理论模型, 分析采样率、量化精度和时间同步误差对定位精度的影响机制; 然后, 设计基于激励信号的同步采集算法, 通过在管道上施加已知特征的周期性激励信号, 实现采集数据的相位校准和同步基准建立; 提出基于小波变换的信号处理方法, 通过3个关键阶段(信号预处理、特征提取与识别、相位校准与时延补偿)实现高精度时间同步; 设计层级化同步采集流程, 结合NTP、GNSS授时和激励信号同步3种技术, 确保各种环境条件下均能维持高精度时间同步。【结果】此方法在供水管道中典型声速( $V=1\,500\text{ m/s}$ )条件下, 时间同步误差可控制在 $0.67\text{ ms}$ 以内, 实现泄漏点定位误差控制在 $1\text{ m}$ 以内。【结论】文章所提出的激励信号同步采集方法不依赖GNSS信号, 可补偿设备自身时钟偏差, 不受历史累积误差影响, 为供水管网泄漏声波定位提供了新的技术路径。

**关键词** 供水管网 声学检测 激励信号 同步采集 泄漏定位

中图分类号: TU991 文献标志码: A 文章编号: 1009-0177(2025)09-0166-10

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2025.09.021

## Excitation Signal-Based Synchronous Acquisition for Acoustic Leakage Localization in Water Supply Pipelines Distribution Networks

FAN Jingjing<sup>1</sup>, MIAO Dayong<sup>2</sup>, FENG Le<sup>3</sup>, REN Zhiyuan<sup>4</sup>, CHEN Bo<sup>2</sup>, GUO Guancheng<sup>3,\*</sup>

(1. Shanghai Lingang Water Supply and Drainage Development Co., Ltd., Shanghai 201306, China;

2. Henan Lico Pipeline Detection Technology Co., Ltd., Zhengzhou 450051, China;

3. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

4. School of Energy and Environment, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014000, China)

**Abstract** [Objective] Water pipeline leakage significantly impacts water resource efficiency and supply security, urgently requiring high-precision leak localization technology to improve pipeline operation efficiency. Acoustic location technology, as the current mainstream leak detection method, has its positioning accuracy significantly affected by the synchronization precision of acquisition equipment. Traditional network time protocol (NTP) can only achieve millisecond-level precision, while global navigation satellite system (GNSS) timing, though capable of nanosecond-level precision, often fails to function normally in underground pipeline environments due to signal obstruction. Therefore, this study aims to propose a synchronization acquisition method that does not rely on GNSS signals, solving the time synchronization problem of distributed acquisition systems in complex environments, achieving high-

[收稿日期] 2025-05-22

[基金项目] 国家重点研发计划(2023YFC3208103); 清华大学“水木学者”计划(2023SM021)

[作者简介] 范晶璟(1982—), 男, 研究方向为高品质饮用水、漏损控制等, E-mail: daniel\_fan@126.com。

[通信作者] 郭冠呈(1992—), 男, 研究方向为供水管网漏损控制, E-mail: 942967894@qq.com。

precision leak localization, and providing technical support for intelligent operation and maintenance of water supply networks. [Methods] This paper addressed the time synchronization issue in multi-point acquisition systems by proposing a synchronization acquisition method based on excitation signals. First, a theoretical model for leak acoustic time delay estimation was established, analyzing the impact mechanisms of sampling rate, quantization precision, and time synchronization errors on positioning accuracy. Then, a synchronization acquisition algorithm was designed, which achieved phase calibration and synchronization reference establishment by applying known periodic excitation signals to pipelines. A wavelet transform-based signal processing method was proposed, achieving high-precision time synchronization through three key stages including signal preprocessing, feature extraction and identification, and phase calibration and delay compensation. A hierarchical synchronization acquisition process was designed, combining NTP, GNSS timing, and excitation signal synchronization to ensure high-precision time synchronization under various environmental conditions. [Results] Experimental results demonstrated that with typical sound velocity ( $V$ ) = 1 500 m/s in water pipelines, time synchronization error can be controlled within 0.67 ms, achieving leak position error control within 1 m. [Conclusion] The proposed excitation signal synchronization acquisition method does not rely on GNSS signals, can compensate for device clock bias, is not affected by historical cumulative errors, and provides a new technical approach for water pipeline leak acoustic positioning.

**Keywords** water supply pipelines network acoustic detection excitation signal synchronized acquisition leakage localization

供水管网是城市基础设施的重要组成部分,承担着输送和分配水资源的关键功能。然而,由于管网系统老化、施工质量不佳、外部损坏等原因,管网泄漏问题普遍存在。据数据<sup>[1]</sup>统计,我国城市供水管网平均漏损率为 15%~20%,部分城市甚至高达 30%以上,远高于发达国家 5%~10%的水平。高漏损率不仅造成水资源的浪费,而且也增加了供水企业的运行成本,同时,潜在的泄漏点还可能导致水质污染和路面塌陷等安全隐患。

现有供水管网泄漏定位技术主要包括压力波法、相关法、声学检测法等<sup>[2]</sup>。其中,声学检测法因其适用范围广、定位精度高等优势,成为当前主流的泄漏定位技术。基于声波到达时间差(time difference of arrival, TDOA)的泄漏定位原理是利用泄漏声波到达不同采集点的时间差估计泄漏点位置<sup>[3-4]</sup>。然而,在实际应用中,该方法的定位精度受到多种因素影响,特别是分布式采集系统中各采集设备的时间同步精度<sup>[5]</sup>。

传统的时间同步方法主要包括网络时间协议(network time protocol, NTP)和全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)授时技术<sup>[6]</sup>。NTP 通过网络实现时间同步,但精度仅能达到毫秒级;GNSS 授时技术可实现纳秒级同步精度,但在地下管道环境中往往受到信号遮挡无法正常工作。这些限制严重影响了泄漏定位技术在复杂环境下的应用效果。

针对上述问题,文章提出一种基于激励信号的

同步采集方法,通过在管道上施加特定的激励信号,实现对分布式采集系统中各采集通道的相位校准和同步基准建立。该方法不依赖 GNSS 信号,具有更强的环境适应性,能够在时间同步受限条件下维持高精度泄漏定位,为供水管网泄漏定位技术提供了新思路。

## 1 定位理论模型构建

### 1.1 泄漏定位基本理论

当供水管道发生泄漏时,管内水流从泄漏点喷出,与管壁和管外介质摩擦产生泄漏声波并沿管道传播,在传播过程中高频成分易衰减,低频成分易保留<sup>[4]</sup>。图 1 为基于 TDOA 的泄漏定位方法原理。

在供水管道上存在泄漏点  $X$  和 2 个采集点  $A$ 、 $B$ ,则泄漏声波从漏水点传到采集点的时间和距离关系如式(1)。通过测量时间差,计算得到泄漏点位置,如式(2)。

$$\begin{cases} L = L_1 + L_2 \\ \Delta t = t_1 - t_2 \\ L_1 - L_2 = V \cdot \Delta t \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} L_1 = \frac{L + V \cdot \Delta t}{2} \\ L_2 = \frac{L - V \cdot \Delta t}{2} \end{cases} \quad (2)$$

其中: $\Delta t$ ——测量时间差,s;

$t_1$ ——泄漏声波从泄漏点  $X$  传播到采集点  $A$  需要时间,s;

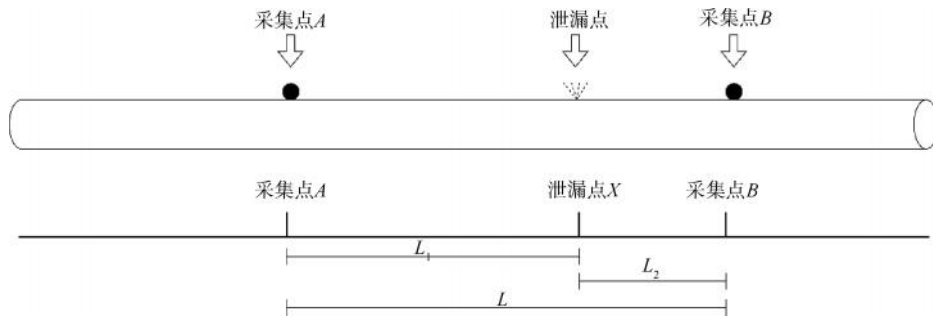


图1 供水管道泄漏定位模型

Fig. 1 Leakage Localization Model of Water Supply Pipelines

$t_2$ ——泄漏声波从泄漏点  $X$  传播到采集点  $B$  需要时间, s;

$L$ ——采集点  $A$  与采集点  $B$  之间的距离, m;

$L_1$ ——泄漏点  $X$  到采集点  $A$  的距离, m;

$L_2$ ——泄漏点  $X$  到采集点  $B$  的距离, m;

$V$ ——声音在管道中的传播速度, m/s。

## 1.2 广义互相关时延估计原理

精确估计泄漏声波信号到达 2 个采集点的时间差是泄漏定位的关键, 可以通过对接收信号进行预处理和互相关分析提高时延估计精度<sup>[4]</sup>。对于 2 个信号, 其互相关函数定义如式(3)。

$$R_{x_1x_2}(\tau) = E[x_1(t)x_2(t - \tau)] \quad (3)$$

其中:  $t$ ——时间, ms;

$E$ ——期望值, 用于描述 2 个信号在不同时下的相关性;

$\tau$ ——时延, ms;

$x_1$ ——信号 1;

$x_2$ ——信号 2。

广义互相关方法通过引入频域滤波器提高时延分辨率, 表达式如式(4)。

$$\hat{R}_{y_1y_2}^{(g)}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} \psi_g(f) \hat{G}_{x_1x_2}(f) e^{j2\pi f\tau} df \quad (4)$$

其中:  $\psi_g(f)$ ——频域加权函数(预滤波器);

$\hat{G}_{x_1x_2}(f)$ ——信号  $x_1(t)$  和  $x_2(t)$  的互功率谱估计;

$f$ ——频率, Hz;

$e^{j2\pi f\tau}$ ——傅里叶逆变换的核函数。

在管道泄漏定位应用中, 由于环境复杂且噪声干扰强, 平滑相干变换器(SCOT)滤波器通常具有较好的性能, 因其考虑了背景噪声影响, 能有效降低计

算误差<sup>[5]</sup>。

## 2 误差传播机制研究

### 2.1 误差分析模型

泄漏点定位精度受多种因素影响, 包括采集点间距误差、声速估计误差和时间差测量误差<sup>[6]</sup>。其中, 时间差测量误差主要来源于采样率、量化精度和时间同步误差。采集点拾取的信号  $X[n]$  由泄漏声波、噪声决定, 受到采集点时间同步精度、模数转换器采样率和量化误差影响, 其数学模型如式(5)~式(7)。

$$X(t) = \alpha \cdot S(t - \tau + \varepsilon t) + n(t) \quad (5)$$

$$X(t) \xrightarrow{\text{采样}} X(nT_s) \quad (6)$$

$$X[n] = Q\{X(nT_s)\} \quad (7)$$

其中:  $S(t)$ ——原始泄漏声波信号;

$\alpha$ ——衰减系数;

$n$ ——离散时间采样总序号;

$\varepsilon$ ——设备间的时间同步误差, ms;

$n(t)$ ——环境噪声;

$T_s$ ——采样周期;

$Q$ ——量化函数。

### 2.2 误差传播分析

采样率影响信号特征还原度, 在采样率一定条件下, 定位精度理论上限为声速( $V$ )/采样频率( $F$ )。以供水管道中典型  $V=1\,500$  m/s 计算, 当  $F$  为 10 kHz 时, 理论精度上限约为 15 cm。

时间同步误差直接影响时延估计结果。若两采集点间时间同步误差为  $T$ , 则对最终定位影响为  $V \cdot T$ 。以供水管道中典型  $V=1\,500$  m/s 计算, 为保证定位误差小于 1 m, 时间同步误差应控制在 0.67 ms 以内。

NTP 时间同步精度为毫秒级, 无法满足高精度定位要求; GNSS 授时可达纳秒级, 但在地下管道环境中信号受限。因此, 需要更适合泄漏定位场景的

同步采集技术<sup>[7]</sup>。

### 3 同步采集方法

#### 3.1 现有同步方法分析

分布式采集系统的同步技术主要分为基于时间的同步机制和基于信号的同步方法。基于时间的同步如 NTP 和 GNSS 授时,要求各设备有独立时钟,并将其频率和相位对齐到基准时钟源。

NTP 通过客户端与服务器间通信交互计算时间相位偏差和通信时延。如图 2 所示,该过程包含 4 个关键时间戳:客户端发送请求时间( $f_0$ )、服务器接收请求时间( $f_1$ )、服务器发送响应时间( $f_2$ )和客户端接收响应时间( $f_3$ )。通过这些时间戳计算时间偏移( $\theta$ )和时延( $\delta$ ),如式(8)~式(9)。通过多次测量和统计滤波,NTP 可实现毫秒级时间同步精度。

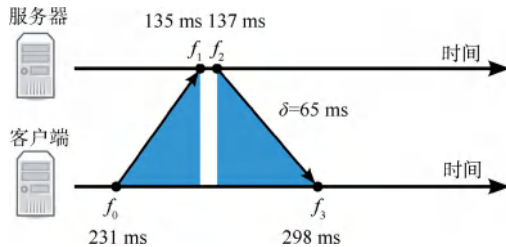


图 2 NTP 授时算法

Fig. 2 NTP Timing Algorithm

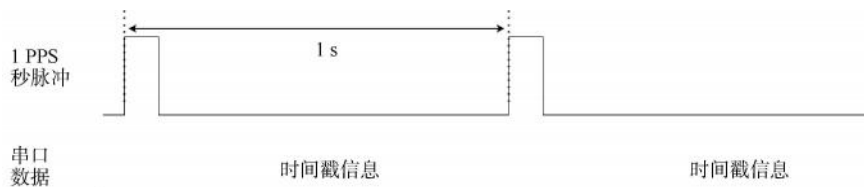


图 3 GNSS 模组授时接口

Fig. 3 Timing Interface of GNSS Module

的同步机制和基于信号的同步方法。基于时间的同步如 NTP 和 GNSS 授时,要求各设备有独立时钟,并将其频率和相位对齐到基准时钟源。

针对供水管网泄漏定位场景特点,本文提出一种基于激励信号的同步采集方法。该方法通过在管道上施加已知特征的激励信号,利用激励信号在不同采集点的相位关系,实现采集数据的相位校准和同步基准建立。

如图 4 所示,在供水管道上布设 2 个采集点 A 和 B,其位置和距离为已知信息;在管道上施加可控的周期性激励信号。通过在两采集点获取数据中提取激励信号位置,并利用激励信号对采样数据进行相位和频率校准,实现两采集点的同

$$\theta = \frac{(f_1 - f_0) + (f_2 - f_3)}{2} \quad (8)$$

$$\delta = (f_3 - f_0) - (f_2 - f_1) \quad (9)$$

其中: $\theta$ ——时间偏移,s;

$\delta$ ——时延,s;

$f_0$ ——客户端发送请求时间,s;

$f_1$ ——服务器接收请求时间,s;

$f_2$ ——服务器发送响应时间,s;

$f_3$ ——客户端接收响应时间,s。

GNSS 授时通过接收导航卫星的精确时间信号实现。GNSS 模块完成自身时间同步后,输出 1 PPS (每秒一脉冲)信号和时间戳信息,理想情况下可达纳秒级同步精度,如图 3 所示。但卫星信号易受干扰和遮挡,在埋地管道环境中常难以正常工作<sup>[8]</sup>。

基于信号的同步通过在多设备间共享触发信号实现,可保证采集数据的相位同步和频率同步。这种方法在总线连接的多通道系统中广泛应用,如可扩展仪器总线(PXI)可实现小于 8 ns 的同步误差,高速可扩展仪器总线(PXIe)甚至可小于 1 ns。基于 GNSS 的 1 PPS 输出信号也是常见的信号同步手段。

#### 3.2 基于激励信号的同步采集方法

分布式采集系统的同步技术主要分为基于时间

步采集。

该方法的主要优势在于:(1)不依赖 GNSS 信号,适用于信号受限环境;(2)可补偿因设备自身时钟偏差导致的采样频率差异;(3)每次采集均建立独立同步基准,不受历史累积误差影响。

#### 3.3 关键算法设计

##### 3.3.1 同步采集流程优化

基于激励信号的同步采集流程如图 5 所示。采集设备启动后首先通过网络获取时间信息(NTP 同步),并尝试 GNSS 授时;若 GNSS 授时成功,直接进行采样;若失败,则采用激励信号同步方法。该流程结合了 NTP、GNSS 授时和激励信号同步 3 种技术,形成层级化的同步策略,确保在各种环境条件下均



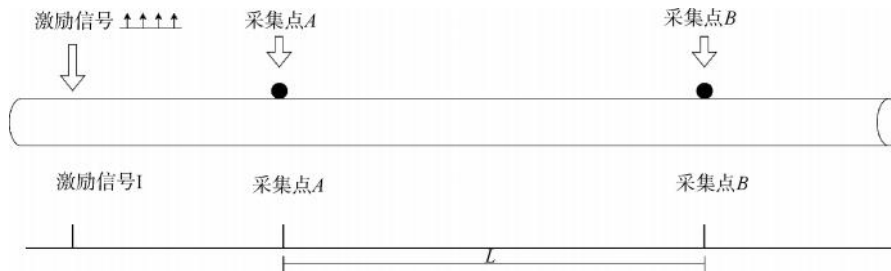


图4 基于激励信号同步采集模型

Fig. 4 Synchronized Acquisition Model Based on Excitation Signals

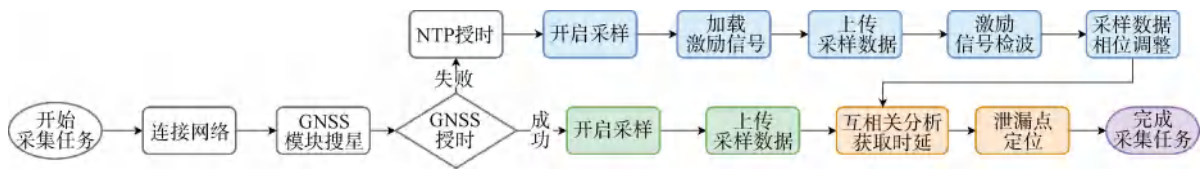


图5 基于激励信号同步采集流程

Fig. 5 Synchronized Acquisition Process Based on Excitation Signals

能维持高精度时间同步。

### 3.3.2 激励信号提取与识别

激励信号在管道传播过程中会受到噪声干扰和各种不确定因素影响,因此,需要采用高效的信号处理方法对其进行特征提取和识别。本文采用小波变换方法识别激励信号,该方法具有优异的时频局部化特性,特别适用于管道中短暂、瞬态的冲击式激励信号,其数学表达式如式(10),其中尺度参数控制小波的伸缩,平移参数控制小波的位置,选用 Morlet 小波作为基函数。

$$W_f(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi^* \left( \frac{t-b}{a} \right) dt \quad (10)$$

其中:  $f(t)$  ——待分析的信号;

$\psi^*(t)$  ——小波函数;

$a$  ——尺度参数,控制分析的频率分辨率;

$b$  ——平移参数,控制时间位置;

$W_f(a, b)$  ——小波系数。

本文提出了一种基于小波变换的激励信号识别与相位校准统一处理方法。该方法综合考虑了激励信号在管道中传播的特性和环境噪声干扰,通过严谨的数学模型实现了高精度的同步基准建立。整个处理流程主要分为3个关键阶段:首先,对原始信号进行预处理以增强信噪比,然后,利用小波变换进行特征提取与识别,最后,实现相位校准和传播时延补偿。以下将详细阐述各阶段的关键步骤和数学

原理。

#### 1) 信号预处理

首先,对原始信号进行预处理,包括直流分量去除和带通滤波,预处理后的信号如式(11)。

$$R'_a(n) = H \left\{ R_a(n) - \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} R_a(i) \right\} \quad (11)$$

其中:  $R_a(n)$  ——采集点 A 获取的原始信号;

$R'_a(n)$  ——预处理后的信号;

$N$  ——信号的总长度(样本点数);

$H\{\cdot\}$  ——带通滤波器操作。

带通滤波通带范围选择为激励信号的主要频率范围,这一步骤能有效去除采集信号中的直流偏置和带外噪声干扰,增强后续特征提取的信噪比。对采集点 B 的信号  $R_b(n)$  进行相同的处理,获得  $R'_b(n)$ 。

#### 2) 特征提取与识别

预处理后的信号通过连续小波变换进行时频分析,对信号  $R'_a(n)$  应用连续小波变换,如式(12)。

$$W_{R'_a}(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \sum_{n=0}^{N-1} R'_a(n) \psi^* \left( \frac{n-b}{a} \right) \quad (12)$$

其中:  $\psi$  ——Morlet 小波基函数, \* 代表变共轭。

这里尺度参数控制分析的频率分辨率,平移参数控制时间位置,实际处理中,选取多个尺度  $a \in \{1, 2, \dots, 30\}$  进行变换,以捕捉不同频率成分的激励信号特征。

为增强激励信号的时域特征,计算小波系数的能量分布,如式(13)。

$$E_a(t) = \sum_{j=1}^m |W_{R'_a}(a_j, t)|^2 \quad (13)$$

其中:  $E_a(t)$  ——小波能量。

小波能量反映了信号在时间  $t$  处的能量集中程度,激励信号位置通常表现为能量的显著峰值。基于此,采用极值检测方法识别能量曲线中的局部最大值,如式(14)。

$$P_{\text{all}} = \{t \mid E_a(t) > E_a(t-1) \text{ and } E_a(t) > E_a(t+1) \text{ and } t - t_{\text{prev}} > \delta'\} \quad (14)$$

其中:  $t_{\text{prev}}$  ——上一个峰值的时刻, s;

$P_{\text{all}}$  ——局部最大值;

$\delta'$  ——最小峰值间距, s。

这里设置最小峰值间距以避免检测到过于密集的峰值。获取峰值后,按能量大小降序排列并提取显著峰值,如式(15)。这种方法能够自适应地选择显著峰值,同时避免固定阈值可能带来的局限性。

$$P_a = \{p \in P_{\text{all}} \mid \text{rank}(p) \leq \max(3, 0.3 \cdot |P_{\text{all}}|) \text{ or } E_a(p) > 2 \cdot \mu E_a\} \quad (15)$$

其中:  $\text{rank}(p)$  ——峰值  $P$  在能量排序中的位置;

$\mu E_a$  ——能量序列的均值,所有能量值的平均水平。

为排除干扰并提高识别精度,利用激励信号的周期性特征进行验证和优化。根据此特性,从候选点集合  $P_a$  中提取满足周期性条件的点集  $P'_a$ ,如式(16)。

$$P'_a = \{p_{a_1}, p_{a_1}, \dots, p_{a_k}\} \subseteq P_a \quad (16)$$

设激励信号周期为  $T_p$  (本研究中  $T_p = 3\text{ s}$ ),采样频率为  $f_s$ ,则理想情况下相邻激励信号的间隔应为  $f_s \cdot T_p$  个样本点。其中相邻点间隔满足  $|P_{a_{i+1}} - P_{a_i} - f_s \cdot T_p| < \varepsilon$ ,  $\varepsilon$  为允许的偏差范围。

对采集点 B 的信号执行相同的小波变换、能量计算和极值检测步骤,获得激励信号位置集合  $P'_b$ 。至此,2 个采集点的激励信号位置均被准确识别,为下一阶段的相位校准奠定基础。

### 3) 相位校准与时延补偿

相位校准的核心是计算 2 个采集点检测到的激

励信号位置的时间差,即相位差。考虑到可能存在的噪声干扰,采用多个识别点的平均值提高校准精度,如式(17)。

$$\Delta\phi = \frac{1}{\min(k, l)} \sum_{i=1}^{\min(k, l)} (P_{a_i} - P_{b_i}) \quad (17)$$

其中:  $\Delta\phi$  ——相位差;

$k$  ——采集点 A 检测到的激励信号位置数量;

$l$  ——采集点 B 检测到的激励信号位置数量;

$P_{a_i}$  ——采集点 A 检测到的第  $i$  个激励信号位置;

$P_{b_i}$  ——采集点 B 检测到的第  $i$  个激励信号位置。

基于计算的相位差 ( $\Delta\phi$ ),对采集点 B 的数据进行相位校准,如式(18)。

$$\begin{cases} Z_a(n) = R_a(n) \\ Z_b(n) = R_b(n - \Delta\phi) \end{cases} \quad (18)$$

其中:  $Z_a(n)$  和  $Z_b(n)$  ——相位校准后的数据序列。

这一步骤消除了两个采集设备之间的时间同步误差影响,然而,还需考虑激励信号在管道中的实际传播时延。设采集点间距离为  $L$ ,声波传播速度为  $V$ ,进一步校准数据如式(19)。

$$\begin{cases} \Delta t_1 = L/V \\ C_a(n) = Z_a(n) \\ C_b(n) = Z_b(n - f_s \cdot \Delta t_1) \end{cases} \quad (19)$$

其中:  $\Delta t_1$  ——传播时延, s;

$C_a(n)$  和  $C_b(n)$  ——时延补偿后的数据序列。

完成相位校准后,根据识别的激励信号位置,将校准后的数据按周期  $T_p$  切分为多个数据段。对于第  $i$  个周期存在式(20)。

$$\begin{cases} S_{a_i}(n) = C_a(P_{a_i} + n) \\ S_{b_i}(n) = C_b(P_{b_i} + n) \end{cases}, n \in [0, f_s \cdot T_p - 1] \quad (20)$$

其中:  $S_{a_i}(n)$  和  $S_{b_i}(n)$  ——第  $i$  个周期对应的数据序列。

为消除激励信号本身对泄漏声波分析的干扰,

应用窗函数  $\omega(n)$  移除激励信号对应的片段可由式 (21) 表示。

$$\begin{cases} S'_{a_i}(n) = S_{a_i}(n) \cdot \omega(n) \\ S'_{b_i}(n) = S_{b_i}(n) \cdot \omega(n) \end{cases} \quad (21)$$

经过上述 3 个阶段的处理,实现了高精度的激励信号识别和相位校准,克服了传统泄漏定位中时间同步误差的影响。该方法主要具有以下 3 个关键优势。

①时频联合分析能力使小波变换成为处理非平稳激励信号的理想工具,能够精确捕捉管网中激励信号的时变特性。对于分析管道中短暂的、频谱随时间变化的激励信号至关重要,为准确识别不同传播路径上的激励信号提供了基础。

②良好的噪声抑制性能解决了管网复杂环境下的信号识别难题。小波变换通过在不同尺度上分解信号,结合能量积累和自适应阈值机制,能够有效区分结构化的激励信号与随机分布的环境噪声。

③高精度的时间定位能力为精确泄漏定位提供

了保障。小波变换的时域局部化特性使其能够将激励信号位置的识别误差控制在采样率的一个周期内,对于  $F$  为 10 kHz 的系统,时间精度可达约 100  $\mu\text{s}$ ,满足工程应用对定位精度的严格要求。

## 4 试验设计与验证

### 4.1 试验环境

为验证本研究提出方法的有效性,本研究基于 1 套管道泄漏试验系统。如图 6 所示,试验系统由 DN100 钢管构成,管内充满水并维持 0.3 MPa 压力。系统中各测点的位置分布如下。

1) 激励信号施加点至采集点  $A$  距离 ( $L_{ia}$ ) = 6 m。

2) 采集点  $A$  至泄漏点距离 ( $L_{ax}$ ) = 6 m。

3) 泄漏点至采集点  $B$  距离 ( $L_{xb}$ ) = 9 m。

试验采用 2 套相同信号的泄漏噪声采集设备,  $F$  为 10 kHz。为模拟实际泄漏场景,在管道上设置直径为 2 mm 的漏水孔,通过控制阀门实现泄漏状态的精确控制。

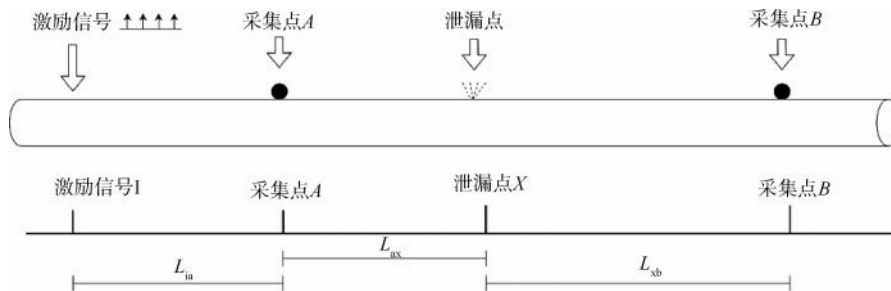


图 6 管道泄漏定位试验模型

Fig. 6 Model of Pipelines Leakage Localization Experimental

### 4.2 泄漏信号采集与分析

试验首先在无激励信号条件下采集泄漏声波,以建立基准数据。图 7 展示了采集点  $A$  和  $B$  获取的泄漏信号时域波形,可见信号具有典型的随机非平稳特征。将信号进行时频分析,结果如图 7 所示,频谱主要集中在 200~800 Hz,与文献<sup>[5]</sup>中金属管道泄漏声波频率特征相符。泄漏信号的时频特征分析表明,信号中高频成分(>500 Hz)随传播距离显著衰减,这与声波在充水管道中的传播特性一致。采集点  $B$  处信号的信噪比明显低于采集点  $A$ ,为后续时延估计带来挑战,也凸显了高精度同步采集的必要性。

### 4.3 激励信号生成与加载

针对管道声学特性,本研究设计了具有明确时频特征的激励信号。如图 8 所示,激励信号采用周

期性脉冲序列,单个脉冲持续时间为 0.1 s,主频成分为 500~1 500 Hz,单组激励信号包含 3 次连续脉冲。为确保激励信号与泄漏信号频域特性部分重叠但又便于识别,脉冲间隔设为 1 s,每组激励信号重复周期为 3 s。

激励信号通过共振音响加载到管道上,如图 9 所示,共振音响固定在管道表面,通过声学耦合将振动能量传入管道系统。

图 10 展示了加载激励信号后 2 个采集点获取的时域波形,激励信号特征清晰可辨,验证了激励信号在管道系统中的有效传播。为便于后续识别激励信号采样选取周期性脉冲,单次脉冲持续 0.1 s,每组激励信号包含 3 次脉冲信号,每组激励信号间隔为 3 s。

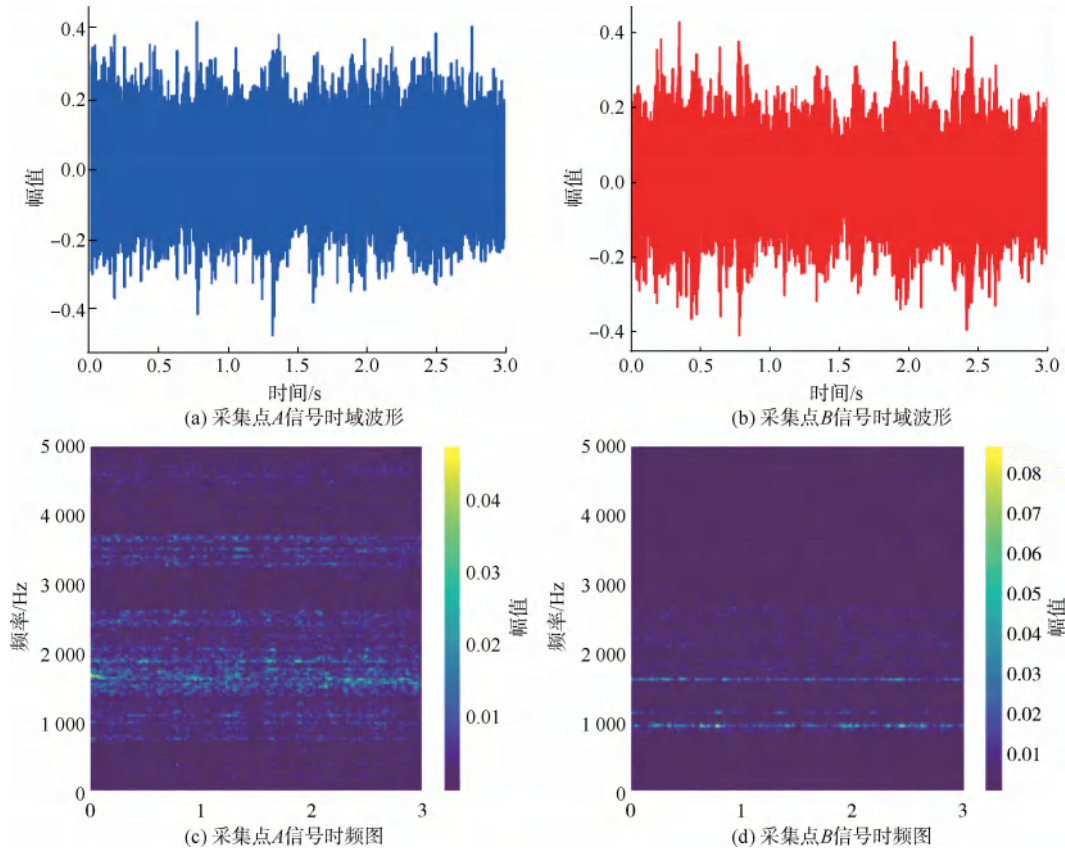


图7 管道泄漏声波信号

Fig. 7 Acoustic Signals of Pipelines Leakage

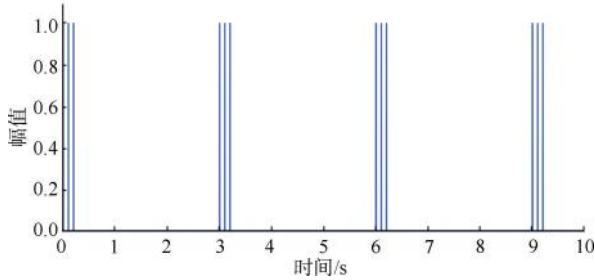


图8 激励信号波形

Fig. 8 Waveform of Excitation Signals

#### 4.4 相位校准与泄漏定位

采用基于小波变换的方法识别采集数据中的激励信号。图 11 展示了 2 个通道采集数据的连续小波变换结果。从图中明显观察到周期性的能量集中带,对应于激励信号的位置。在尺度 1~10(对应频率为 300~600 Hz),激励信号表现出显著的能量聚集特征。为精确定位激励信号,计算小波系数的能量分布,并通过极值检测方法识别激励信号位置。每个激励脉冲在能量曲线上形成明显峰值,通过文中描述的式(10)~式(16)提取这些

峰值位置。为消除可能的误检,结合激励信号周期特性( $T=3$  s)进行验证,有效排除了环境中的非周期性干扰。

#### 5 结论

文章提出了一种基于激励信号同步采集的供水管网泄漏声波定位方法,能够不依赖 GNSS 信号,补偿设备自身时钟偏差,并且不受历史累积误差影响,有效提升了漏点定位精度,结论如下。

(1) 基于激励信号的同步采集方法能够在 GNSS 授时受限环境下,实现分布式采集系统的高精度时间同步,为复杂环境中的管网泄漏定位提供了新的技术路径。

(2) 基于小波变换的激励信号识别与相位校准方法具有优异的时频联合分析能力、噪声抑制性能和高精度时间定位能力,能有效克服复杂环境下的信号干扰。

(3) 试验验证表明,所提方法能够将泄漏点定位误差控制在 1 m 以内,满足实际工程应用需求,明显优于传统 NTP 同步方法的定位效果。





图 9 利用共振音响加载激励信号

Fig. 9 Excitation Signals Loaded with Resonant Acoustic System

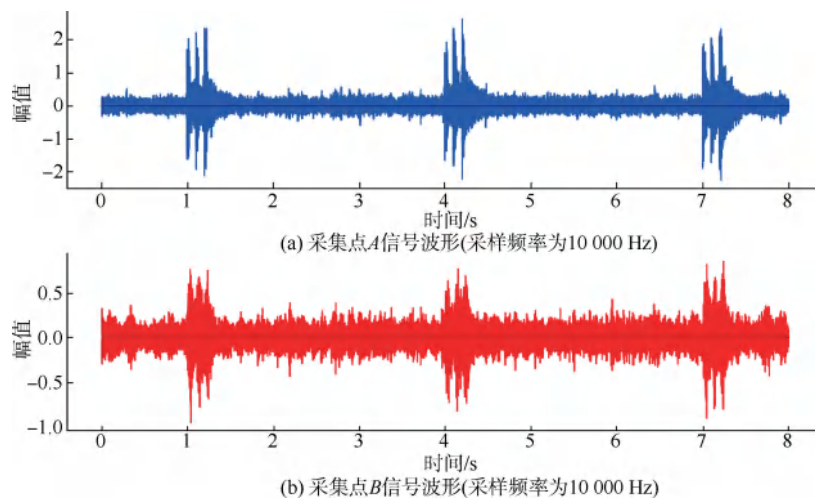


图 10 加载激励信号后采集的声波信号

Fig. 10 Acoustic Signals Acquisition after Loaded with Excitation Signals

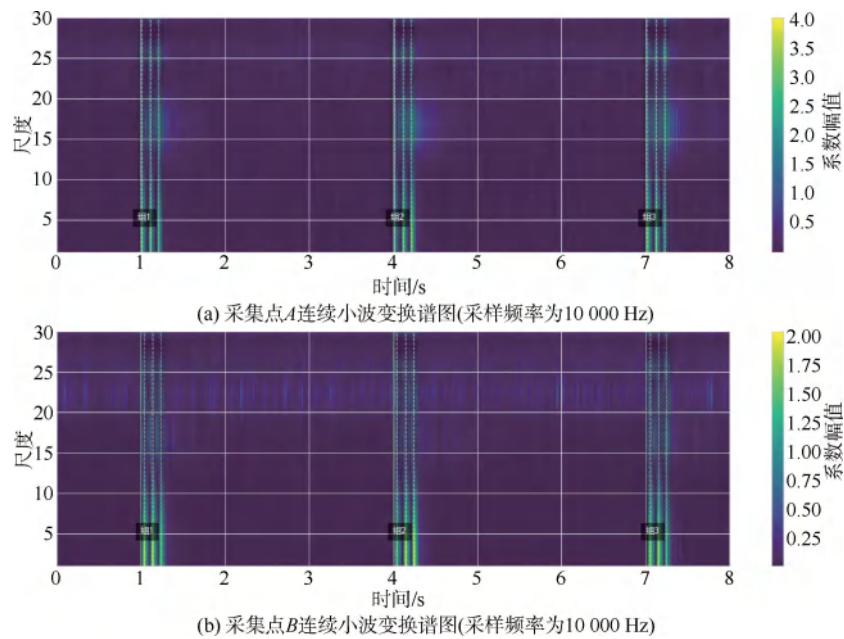


图 11 激励信号识别与定位

Fig. 11 Identification and Localization of Excitation Signals

(下转第 185 页)

- consumption prediction model based on machine learning [J]. Zhejiang Water Resources Science and Technology, 2022, 50 (4): 103-107.
- [14] 顾杰, 王嘉, 邓俊晖, 等. 基于 ARIMA 模型与 BP 神经网络算法的水质预测[J]. 净水技术, 2020, 39(6): 73-82.
- GU J, WANG J, DENG J H, et al. Water quality prediction based on ARIMA model and BP neural network algorithm [J]. Water Purification Technology, 2020, 39 (6): 73-82.
- [15] 高赫余, 王圣, 吴潇勇. 基于机器学习 XGBoost 集成模型的边界流量计日流量预测方法[J]. 净水技术, 2020, 39(10): 181-186.
- GAO H Y, WANG S, WU X Y. Daily flow prediction method of boundary flowmeter based on machine learning XGBoost integrated model [J]. Water Purification Technology, 2020, 39 (10): 181-186.
- [16] 朱健. LSTM 模型在海绵城市建设中的应用[J]. 净水技术, 2022, 41(2): 103-110.
- ZHU J. Application of LSTM model in sponge city construction [J]. Water Purification Technology, 2022, 41(2): 103-110.
- [17] 申志豪, 李娜, 尹世豪, 等. 基于 TPA-Transformer 的机票价格预测[J]. 数据与计算发展前沿, 2023, 5(6): 115-125.
- SHEN Z H, LI N, YIN S H, et al. Airfare price prediction based on TPA-transformer [J]. Frontiers of Data & Computing, 2023, 5(6): 115-125.
- [18] FV G T, JIN Y W, SUN S, et al. The role of deep learning in urban water management: A critical review[J]. Water Research, 2022, 223: 118973. DOI: 10.1016/j.watres.2022.118973.

(上接第 174 页)

(4) 层级化的同步采集流程设计实现了 NTP、GNSS 授时和激励信号同步 3 种技术的有机结合, 确保在各种环境条件下均能维持高精度泄漏定位。

在未来的工作中, 还应结合管网材质特性和环境条件合理选择激励信号特征参数, 进一步优化小波变换中的参数选择方法, 并探索将该技术拓展至其他类型管网泄漏检测领域的可能性。

### 参考文献

- [1] 胡文俊, 孙岩. 世界主要国家的节水措施及其启发与思考[J]. 水利经济, 2024, 42(2): 1-6.
- HU W J, SUN Y. Inspiration and reflection on review of water saving measures in major countries [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2024, 42(2): 1-6.
- [2] 刘书明, 徐强, 信昆仑, 等. 供水管网漏损系统性管控技术与装备[J]. 建设科技, 2022(7): 115-117.
- LIU S M, XU Q, XIN K L, et al. Technologies and equipment for systematic leakage control of water distribution networks [J]. Construction Science and Technology, 2022(7): 115-117.
- [3] KOTHANDARAMAN M, LAW Z, EZRA M A G, et al. Adaptive independent component analysis-based cross-correlation techniques along with empirical mode decomposition for water pipeline leakage localization utilizing acoustooptic sensors [J]. Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice, 2020, 11 (3): 04020027. DOI: 10.1061/(ASCE)PS.1949-1204.0000471.
- [4] KNAPP C H, CARTER G C. Generalized correlation method for estimation of time-delay [J]. IEEE Transactions on Acoustics Speech and Signal Processing, 1976, 24(4): 320-327.
- [5] GUO G C, YU X P, LIU S M, et al. Novel leakage detection and localization method based on line spectrum pair and cubic interpolation search [J]. Water Resources Management, 2020, 34(12): 3895-3911.
- [6] KANG J, PARK Y J, LEE J, et al. Novel leakage detection by ensemble CNN-SVM and graph-based localization in water distribution systems [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(5): 4279-4289.
- [7] 杏运, 徐滢, 石琪琦. 分布式高精度时间同步装置专利技术现状[J]. 中国科技信息, 2024(11): 17-19.
- XING Y, XU Y, SHI Q Q. Current status of patent technology for distributed high-precision time synchronization devices [J]. China Science and Technology Information, 2024(11): 17-19.
- [8] 许龙霞, 刘娅, 李孝辉. GNSS 授时与时间同步在基础设施行业的应用[J]. 航空学报, 2024, 45(s1): 91-101.
- XU L X, LIU Y, LI X H. Applications of GNSS timing and time synchronization in infrastructures [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2024, 45(s1): 91-101.