

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.2210524

基于最短路径规划的供热管网泄漏定位方法*

黄新敬¹, 燕育培¹, 裴连军², 高潮³, 封皓¹

(1. 天津大学精密测试技术及仪器全国重点实验室 天津 300110; 2. 天津能源投资集团有限公司 天津 300110;
3. 天津精仪精测科技有限公司 天津 300380)

摘要:针对供热管网泄漏检测、定位困难的问题,本文充分考虑了管网负压波传播的多径效应,提出了一种基于负压波传播最短路径规划的供热管网泄漏定位方法。本方法首先搜索出各潜在漏点到各压力变送器的最短路径,计算负压波在管网中传播的最短时延,构成时延标准库;然后将现场测得的负压波的实际到达时延与时延标准库进行比对,确定漏点位置。在区域面积为13 km×5 km的现场供热管网对本方法开展了泄漏定位实验验证;当有效压力监测点数为5时,本方法可实现对1 000 m半径比对范围内泄漏的零偏差定位。本方法采用了精确的非模糊型的原理,且避免了在现场大型管网所有支管上安装压力变送器,具有重要的应用价值。

关键词: 管网; 泄漏定位; 负压波; 最短路径规划

中图分类号: TH86 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8040

Leak location method of heated water pipeline network based on shortest path planning

Huang Xinjing¹, Yan Yupei¹, Pei Lianjun², Gao Chao³, Feng Hao¹

(1. State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300110, China; 2. Tianjin Energy Investment Group Co., Ltd., Tianjin 300110, China; 3. Tianjin Precision Technology Co., Ltd., Tianjin 300380, China)

Abstract: In response to the difficulty in detecting and locating HWPN leaks, this article fully considers the multipath effect of negative pressure waves (NPWs) propagation in the pipeline network and proposes a HWPN leak location method based on the shortest path planning of NPW propagation. First, the shortest paths from each potential leak point to each pressure transmitter are searched, and the shortest time delay of NPW propagation in the HWPN is calculated to form a time delay standard library. Then, the actual arrival time delay of NPWs that is measured in real time is compared with the time delay standard library to determine the leak location. Small leak location experiment in an on-site 13 km×5 km HWPN is implemented to evaluate the proposed method. When the number of effective pressure monitoring points is only 5, this method can realize zero-error leak location within the time-delay match range of 1 000 m radius. This method utilizes accurate and non-fuzzy principle, which can also avoid installing pressure transmitters on all branches of huge HWPN in field. Therefore, it has important application value.

Keywords: pipeline network; leak location; negative pressure wave; shortest path planning

0 引 言

供水、供热等流体压力管网在人们生活中发挥着不可或缺的作用。随着城市的不断发展,管网建设规模越来越大,腐蚀老化也越来越严重,管道泄漏事件时有发生

生,不但造成巨大的经济损失和资源浪费,还会威胁人民生命安全。例如,当城市供水管网发生泄漏时,供水总量上升,供水管网的运行成本也随之增加。同时,外部污染物易从泄漏处进入管道,将污染水质,影响居民的正常用水。对于供热管网而言,泄漏等突发故障工况的发生将导致持续的热能损失,当泄漏点搜寻时间较长时,整个供

收稿日期:2022-10-04 Received Date: 2022-10-04

* 基金项目:国家自然科学基金(62073233)、企业委托项目(2021GKF-1036)资助

热系统可能无法正常运行甚至瘫痪,给城市居民生活带来巨大干扰。因此,需要实时监测流体管网泄漏,第一时间对泄漏进行准确报警和定位,及时采取补救措施,将损失降到最低水平。

目前,对于单条压力管道的泄漏监测,应用最广泛的是负压波法^[1]。当管道中某一位置发生泄漏时,漏点处流体因管道与外界压力差的存在而泄放,使得该点压力值骤降,引起负压波,其传播距离可长达数 10 km^[2]。通过测量管道两端的负压波信号及其时延差,即可判断泄漏事件的发生及漏点位置。目前的负压波检测法已经发展比较成熟,并得到了广泛应用^[3-5]。由于负压波在单条管道上传播路径单一,压力变送器部署简便,负压波法均具有较好的泄漏检测与定位效果。

然而,在具有网状结构的输水管网上,泄漏引起的负压波的传播路径却不止一条。对于小型管网,可以稠密部署压力变送器,尽量保证每条支路的压力信号都能被采集。即便如此,由于负压波在管网中的传播路径不唯一,传统的针对单条长输管道的负压波检漏法,并不适用于管网。为了克服这一困难,国内外不少学者针对小型管网进行了各种探索。林伟国等^[6]通过在小型实验管网各个节点处部署压力变送器,分析各节点泄漏信号的到达先后顺序,实现对泄漏管段的确定,以及对漏点的定位;Kampelopouls 等^[7]利用声发射原理,测定管网中不同位置传感器接收到泄漏声信号的时间差,结合互相关函数理论,确定小型简单管网的漏点位置;郭新蕾等^[8]提出了水力瞬变检测方法,通过在小型管网的一个支路末端激励瞬变水击波并测定水击波波形中间断点的时刻来计算漏点位置。

然而,输水管网很庞大且存在非常多的分支,导致负压波在管网中的传播路径数目巨大,依靠时延差定位泄漏的难度极大。用于小型简单管网的泄漏检测与定位的方法在大型输水管网上失效。对此,许多科学家采用人工智能技术开展了管网泄漏检测与定位研究。如利用线性判别分析^[9]、K-均值聚类^[10]、支持向量机^[11-13]、反向传播(back propagation, BP)神经网络^[14-15]等方法进行管网泄漏的识别。Li 等^[16]建立了实际管网的仿真模型,模拟泄漏状态,并基于蚁狮优化(ant lion optimizer, ALO)算法和粒子群(particle swarm optimization, PSO)算法进行管网模式识别和泄漏定位,最终可以判别出仿真管网中的漏点位置;Basnet 等^[17]根据 K-均值聚类的原理,将某城市中的供水网络划分为若干区域,然后监测管网的流量和压力数据,并利用卷积神经网络识别泄漏所在的区域。可以看出,以上运用人工智能技术的检测方法往往只能确定管网是否发生泄漏,或者确定漏点的所属的大致区域;这些方法并不能实现对管网泄漏的精准定位。

流体运输管网结构非常复杂。以城市供热管网为例,为满足多用户的取暖需求,管道需包含多个分支,在住户密集的区域,管道分支也会相应增加。这种情况下若仍要使用传统的负压波检测法进行管道泄漏检测,需在每一支路两端部署压力变送器,成本极高,并不可行。因此,本文提出了一种基于最短路径规划的输水管网泄漏检测方法。首先将管网离散化为若干节点,并在管网数个位置部署压力变送器。然后根据负压波声速公式,计算出管网每一点发生泄漏时,负压波到达各个压力变送器的时间,构成时延标准库。当管网某点真实发生泄漏时,将各个压力变送器测得的时延组合与提前计算各点的标准时延进行比对,确定漏点位置。从数学原理上来说,这是一种精确的而非模糊的管网漏点定位方法。

1 泄漏定位原理

如图 1 所示,本方法的原理主要包括管网细分、最短路径搜索、标准时延库建立和时延比对 4 部分。首先根据线性插值公式,将管网细分为若干等传播时长的离散点;再使用广度优先搜索算法解算出任一离散点发生泄漏时,负压波到达各个压力变送器的最短路径;然后根据负压波声速公式,计算出每一条最短路径对应的传播时间,构成时延标准库;以上步骤可以在超算中心提前计算完成。当管网某点真实发生泄漏时,将各个压力变送器测得的负压波到达时刻的时延组合与各离散点到压力变送器的标准时延进行比对,从而确定漏点位置;此步骤在压力监测中心的主计算机上实时进行。

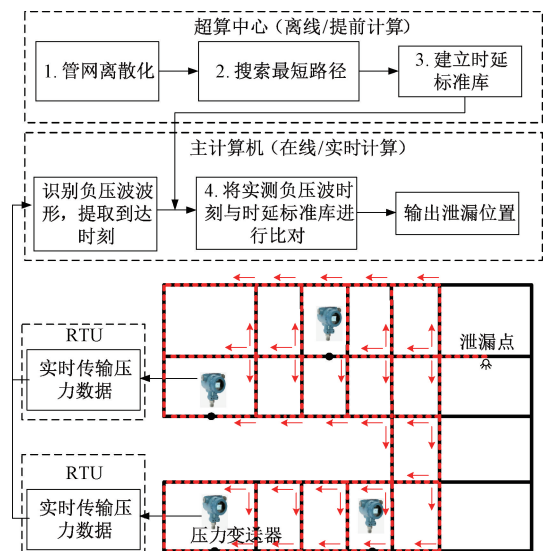


图 1 多径管网泄漏定位系统框图

Fig. 1 Block diagram of the leak location system for HWPN with multiple propagation paths

本方案所采用的压力监测系统框图如图1所示。图中黑色网格线折线代表供热输水管网(heated water pipeline network, HWPN),在管网的若干已知位置部署压力变送器。当管道某一位置发生泄漏时,负压波沿管网不同路径传播。粗虚线指示负压波传播至压力变送器处的可能的路径。负压波在每个分支点处都有多个传播方向。提前对管网离散化,每一离散点都是潜在的泄漏点,由超算中心提前解算出管网中每一离散点(潜在漏点)到各压力变送器的最短路径,然后获得负压波传播的最短时间,建立时延标准库。系统工作时,使用远程处理单元(remote terminal unit, RTU)^[18]连接压力变送器,来监测和采集压力信号。由RTU把采集的压力信号实时传输给中心站主计算机。由主计算机实时检测压力波形,识别并提取负压波到达时刻。最后将各个压力变送器测得的负压波到达时刻与时延标准库进行比对,即可确定漏点位置。

2 算法设计

2.1 管网离散化

设管网中某条分支管道两端点的经纬度坐标为 $(x_0, y_0), (x_1, y_1)$,该两点之间管段的内径为恒定值。对这条管段进行离散细分,离散点间距为 Δd_D 。设第 q 个离散点的坐标为 (x_q, y_q) ,则:

$$\begin{cases} x_q = \frac{y_q - y_1}{y_0 - y_1}x_0 + \frac{y_q - y_0}{y_1 - y_0}x_1 \\ y_q = y_0 + q \frac{\Delta d_D}{\lambda \sqrt{1 + k_0^2}} \end{cases} \quad (1)$$

其中, $k_0 = \frac{x_1 - x_0}{y_1 - y_0}$ 且 $y_0 < y_1$; λ 为地球表面单位纬度的经线弧长。

由于负压波传播速度与管道内径有关,如式(2)所示。

$$a = \sqrt{\frac{K/\rho}{1 + \frac{KD}{E\delta}C_1}} \quad (2)$$

其中, K 为液体的弹性系数,单位为Pa; ρ 为液体密度,单位为 kg/m^3 ; δ 为管道壁厚,单位为m; D 为各个分支管段内径,单位为m; E 为管材的弹性模量,单位为Pa; C_1 为管道的约束系数。本次建模中,主要参数设置如下:水的弹性系数 $K=2.1 \times 10^9$ Pa;水的密度 $\rho=1.0 \times 10^3$ kg/m^3 ;钢管的弹性模量 $E=2.0 \times 10^{11}$ Pa;管道的约束系数 $C_1=0.81$ 。

不同分支管段的离散点间距 Δd_D 需要根据式(2)声速公式进行修正,如式(3)所示。其中, D_{\min} 为管网中的最小管径, Δd_0 为预设的最小管径支管的细分间距。这

样可以使得每节细分管段上负压波传播时长是相等的,从而将最短时长路径求解转换为以路径包含最少细分点为目标。

$$\Delta d_D = \Delta d_0 \cdot \sqrt{\frac{KC_1 D_{\min} + E\delta}{KC_1 D + E\delta}} \quad (3)$$

最终,将管网离散为 n 个离散点,其编号构成集合 $U = \{i | i \in N^*, i \leq n\}$ 。设管网安装了 p 个压力变送器,其所在节点的编号组成集合 $V = \{v_j | j \in N^*, j \leq p\}$,且 $V \subseteq U$ 。记时延标准库为 $T = \{t_{ij} | i, j \in N^*, i \leq n, j \leq p\}$, t_{ij} 为当离散点 i 处发生泄漏时,负压波从离散点 i 传播至 v_j 处压力变送器所需要的时间。

2.2 最短路径搜索

使用广度优先搜索算法^[19-20]解算管网中每一离散点(潜在漏点)到各压力变送器的最短路径,然后获得负压波传播的最短时间,建立时延标准库;其具体过程分3部分。

1) 管网离散点信息初始化。

根据管网离散化所得到的 n 个离散点的相连关系,建立邻接矩阵 $C_{n \times n} = \{c_{\alpha\beta} | \alpha, \beta \in U\}$,其中,

$$c_{\alpha\beta} = \begin{cases} 1, & \text{点 } \alpha \text{ 与点 } \beta \text{ 相连} \\ 0, & \text{点 } \alpha \text{ 与点 } \beta \text{ 不相连或 } \alpha = \beta \end{cases} \quad (4)$$

定义离散点位置集合 $P, P = \{(x_i, y_i) | i \in N^*, i \leq n\}$,其中, (x_i, y_i) 表示第 i 个离散点的经纬度坐标。定义离散点访问标志集合 $F, F = \{f_i | i \in U\}$,其中, $f_i = 0$ 表示离散点 i 尚未被访问过; $f_i = 1$ 表示离散点 i 被访问过; f_i 均初始化为0。

选取管网中任一离散点 $i \in U$ 作为潜在漏点,该点编号另记为 $u=i$;将某一压力变送器所在的离散点 $v_j \in V$ 作为负压波传播终点,该点编号另记为 $v=v_j$ 。这里 $i, j \in N^*, i \leq n, j \leq p$ 。

初始令 $i=1, j=0$ 。

2) 搜索 u 到 v 的最短路径。

若 $i \leq n$,对 j 的值进行判断:

若 $j < p$,令 $j=j+1$;若 $j \geq p$,令 $j=1, i=i+1$;

令 $u=i, v=v_j$,并进入步骤(1);

若 $i > n$,则完成了全部时延标准库 T 的建立,退出建库程序。

(1) 定义遍历缓存数组为 Q ,用于存储待访问的离散点编号,将当前潜在漏点编号 u 置于 Q 的第一个位置,即 $Q[1]=u$ 。记待访问离散点为 $i', i' \in U$,初始令 $i'=1$ 。

(2) 依次访问 U 中的离散点,当访问至点 i' 时,将其对应的访问标志变量 $f_{i'}$ 设为1。记 Q 的首个元素点编号为 m ,即 $m=Q[1]$,查验邻接矩阵 C ,若 $c_{mi'}=1$,则将 i' 置于 Q 末尾,即 $Q = \{Q, i'\}$;若 $c_{mi'} \neq 1$,则不对 Q 进行修改。然后将 Q 的首元素和尾元素组合成有序数对,储存

在集合 O 中。设 Q 的长度为 l , 则集合 O 的元素满足:

$$O = \{ (a, b) \mid a = Q[1], b = Q[l] \} \quad (5)$$

(3) 判断是否完成当前 $u \rightarrow v$ 最短路径搜索。

若 $v \in Q$, 说明已访问到负压波传播路径的终点 v , 进入步骤(4)。若 $v \notin Q$, 则将 Q 的第一个元素去除, 其余元素前移一位。然后, 将 i' 的值加 1, 转到步骤(2)。

(4) 对集合 O 储存的有序数对, 逐级溯源, 得到从当前潜在漏点 u 到压力变送器 v 的完整的最短路径。

首先将 O 中的数对按建立的先后顺序排布于 1 列中, 若 O 中共有 M 个有序数对, 则将其按列排布后, 对数对元素进行拆分, 可以得到一个 M 行 2 列的矩阵, 如式(6)所示。

$$\begin{pmatrix} a_1 & b_1 \\ a_2 & b_2 \\ a_3 & b_3 \\ \vdots & \vdots \\ a_M & b_M \end{pmatrix} \quad (6)$$

根据 O 的建立过程, 有 $a_1 = u, b_M = v$ 。设第 k 次溯源到的数对为 (A_k, B_k) , 第 $k+1$ 次溯源到的数对为 (A_{k+1}, B_{k+1}) , 则有:

$$B_{k+1} = A_k \quad (7)$$

从数对 (a_M, b_M) 开始溯源。当溯源的数对包含起点位置 $a_1 = u$ 时, 溯源结束。若这一过程共溯源 x 次, 显然:

$$\begin{cases} A_1 = a_M, & B_1 = b_M \\ A_x = a_1, & B_x = b_1 \end{cases} \quad (8)$$

根据式(7)、(8), 最终得到从起始点 $a_1 = u$ 到终点 $b_M = v$ 的最短路径为:

$$a_1 = u \rightarrow b_1 = B_x \rightarrow B_{x-1} \rightarrow \dots \rightarrow B_1 = b_M = v \quad (9)$$

3) 计算负压波在最短路径上的传播时间。

通过步骤 2) 求解出 u 到 v 的最短路径后, 利用 2.3 节的算法, 计算出离散点 $u = i$ 处发生泄漏时, 负压波到达点 $v = v_j$ 处的最短时间, 记为 t_{ij} , 并将 t_{ij} 储存在时延标准库 T 中。然后重复执行步骤 2)。

2.3 时延标准库的建立

因管网分支众多, 位于第 i 离散点的某一泄漏点和第 j 个压力变送器(位于第 v_j 节点)之间有多条连通路经。考虑实际泄漏发生后, 压力变送器最先接收到的负压波信号, 是传播路径最短的那个, 后续波形会叠加和淹没在尾波中。设该最短路径共包含 M 个分支管段, 各个分支管段长度为 $L^{(k)}$ 、直径为 $D^{(k)}$, 压力波传播速度为 $a^{(k)}$ 、由式(2)计算, 负压波在各分支管段的传播时间为 $t_{ij}^{(k)}$, 其中 k 为管段编号, $k = 1, 2, 3, \dots, M$, 则

$$t_{ij} = \sum_{k=1}^M t_{ij}^{(k)} = \sum_{k=1}^M \frac{L^{(k)}}{a^{(k)}} \quad (10)$$

其中, 设第 k 个分支管段两端的经纬度坐标为

$(x_A, y_A), (x_B, y_B)$, 则 $L^{(k)}$ 计算公式为:

$$L^{(k)} = R \cdot \arccos[\cos(y_A) \cos(y_B) \cdot \cos(x_A - x_B) + \sin(y_A) \sin(y_B)] \quad (11)$$

其中, R 为地球半径。

2.4 时延比对

管道泄漏发生后, 利用管网 p 个压力变送器检测管道内的压力波形, 并由主计算机计算各压力变送器波形的到达时刻 t_j 。由于负压波传播的绝对时间未知, 需要对各 t_j 进行整体平移, 记时间平移值为 t 。将经过平移后的 t_j 和时延标准库进行求差运算, 结果记为 E_i , 如式(12)所示, 用于后续筛选定位结果。

$$E_i = \sum_{j=1}^p [t_{ij} - (t_j + t)]^2 \quad (12)$$

为得到真实的负压波传播时间, 需找到一个最佳平移值, 使波形到达时刻 t_j 最终经过时间平移后 E_i 的平均值 w 最小, 如式(13)所示。

$$w = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^p [t_{ij} - (t_j + t)]^2 \quad (13)$$

可以看出, 当时延元素 t_{ij} 和 t_j 确定时, w 是关于 t 的二次函数。设 w 极小值点为 t_0 , 则:

$$t_0 = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^p (t_{ij} - t_j)}{n \cdot p} \quad (14)$$

其中, t_0 即为波形到达时刻 t_j 的最佳平移值。对 t_j 进行 $t = t_0$ 长度的平移后, 再次计算 E_i , 并判定使 E_i 最小的离散点作为泄漏位置。

3 实 验

在天津市城区某供热管网进行泄漏定位实验验证。管网地图如图 2 所示。管网区域大小为 $13 \text{ km} \times 5 \text{ km}$, 包含 1 692 个管道分支, 管径从 $33.7 \sim 1\ 820 \text{ mm}$ 不等。区域内共部署了 9 个压力变送器, 编号 1~9; 其中, 邻近压力变送器之间的直线距离在 $300 \sim 5\ 500 \text{ m}$ 不等。整个管网计算标准时延库时管网离散点的等时长间隔是 $10 \sim$

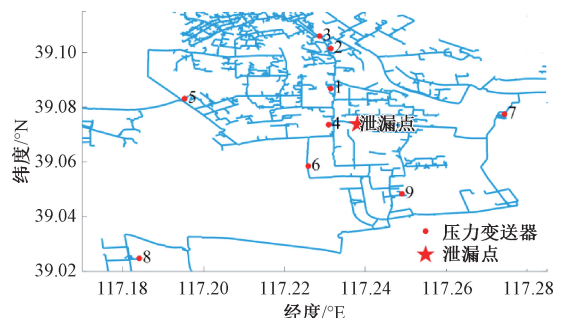


图 2 检测区域供热管网图

Fig. 2 Experiment HWPN's map

20 m,一共有 29 500 个离散点。模拟泄漏的放水位置坐标为(117.238 04°E,39.073 84°N),在图中以五角星标识。供热管网的放水实验现场照片如图 3 所示。为验证本方法的有效性,本文将比对半径从 400 m 逐步扩大,观察管网泄漏的定位精度。进行放水实验前提前解算出时延标准库。本次解算所使用的计算机为 i7-11800H 处理器,18 核,128 GB 内存,64 位操作系统。时延解算覆盖全区域时,计算时长是 4 d 9 h 55 min。

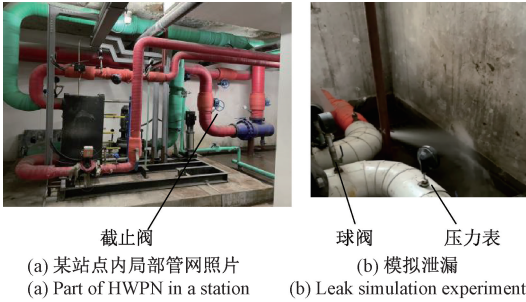


图 3 供热管网的实验现场
Fig. 3 Experiment field of HWPN leak

4 结果与讨论

该管网拓扑结构复杂,负压波在经过各个变径管道、分支管道和拐点时,衰减畸变严重且衰减规律复杂,负压波衰减程度不单单取决于传播距离。测试区域包含 1 692 个管道分支,但仅部署了 9 个压力变送器,占分支数的 0.532%,因此负压波监测点非常稀疏。而且由于人工放水的泄漏量远小于实际爆管的泄漏量,泄漏引起的压力下降很小。9 个压力变送器,只有 5 个测得的泄漏负压波波形比较明显,分别是 2、3、5、6、8 号压力变送器,其波形图如图 4 所示。图中箭头指示负压波到达时刻,分别为 16:41:0.82、16:41:2.15、16:41:0.38、16:41:0.45、16:41:11.00。

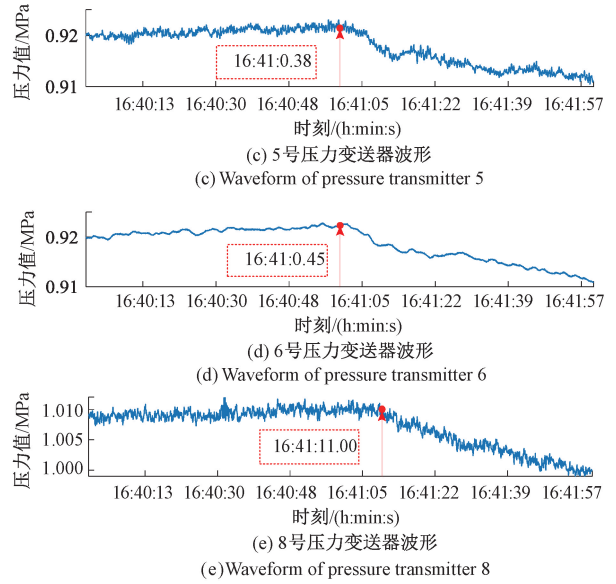
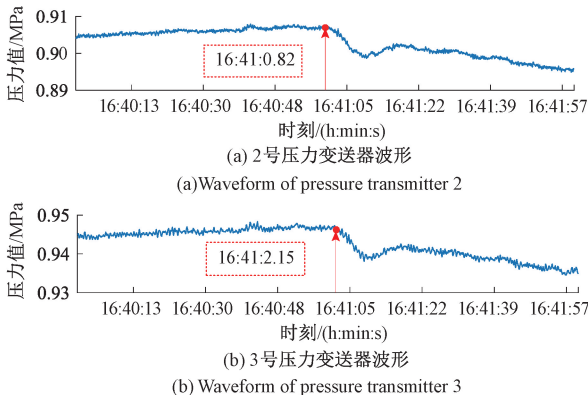


图 4 压力变送器测得的负压波波形图
Fig. 4 Waveforms of NPWs measured by pressure transmitters

首先对漏点 400 m 半径范围内的所有管线进行泄漏定位验证。该区域共有 133 个离散点,8 条支管,管道总长为 2 158 m。运行比对程序,根据式(14)解得时间平移值 $t=t_0=3.083$ s,之后由式(12)计算各离散点的时延偏差 E_i 。本次实验选取偏差 E_i 最小的 10 个点作为定位结果,定位结果分布图如图 5 所示,图中的圆形虚线表示 400 m 半径的比对范围,管线中的 10 个点为程序比对出的时延误差最小的离散点,其中红色五角星为实际泄漏点。可以看出,10 个预测点均位于同一管线支路上,且该支路为放水点所在的支管,定位成功,最低误差为 0。

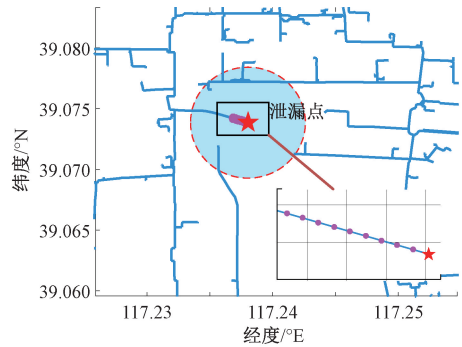


图 5 比对半径为 400 m 时的泄漏定位结果
Fig. 5 Leak location results of 400 m match radius

为说明时间平移值 t 对泄漏定位精度的影响,将 t 取为 $-5\sim 5$ s 之间的若干值,间隔步长为 1 s。分别计算不同 t 时的定位误差值,如表 1 所示。可以发现,随着时间

平移值从 -5 s 开始增大, 定位误差先减小, 后增大, 在 $t=3$ s 时定位误差有最小值。如式 (13) 所示, E_i 的平均值 w 是关于 t 的二次函数, 而 w 与定位误差呈正相关关系, 因此可以认为当 $t=t_0$ 时, 定位误差最小, 最佳平移值 t_0 的计算方法是正确的。

表 1 不同时间平移值 t 时的定位误差
Table 1 Positioning errors at different time translation values t

时间平移值 t/s	最小定位误差/m	平均定位误差/m
-5	386.34	455.85
-4	386.34	455.85
-3	386.34	455.85
-2	386.34	455.85
0	386.34	455.85
1	386.34	455.85
2	18.53	101.92
3	0	83.39
4	386.58	414.04
5	394.33	409.36

为了进一步说明和分析比对算法的正确性, 做出了时间平移值为 $t=t_0=3.083$ s 时, 检测管网中所有潜在漏点 i 的“定位误差”与时延偏差 E_i 的对应关系散点图, 如图 6 所示。图 6 中的每一簇点构成的分支线对应实际管网中的一个管道分支, 图中的 A 点对应真实的泄漏点, 此时定位误差为 0, 时延偏差 E_i 最小。图中虚线为人为设定的误差阈值, 低于该阈值共有 10 个散点, 即为定位结果, 包含了泄漏点所在管道支路上的节点, 这与图 5 的定位结果吻合。

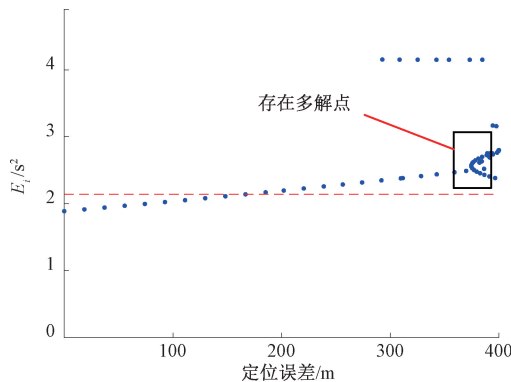


图 6 漏点定位误差与 E_i 的对应关系图

Fig. 6 Corresponding relationship between leak point positioning error and E_i

此外, 从图 6 还可以看出, 当 E_i 较小时, 点簇聚集于包含放水点的一条分支上。随着时延的比对偏差 E_i 逐渐增加, 比对点偏离放水点的距离 (定位误差) 也逐渐变大, 且出现了多条点簇分支, 对应多条管道分支。对于同一个比对偏差 E_i , 可能存在多个比对成功的点, 这是“多解”现象。对于多解的这些点所在的管道分支, 需要在其上面额外部署压力变送器。

本次实验选取偏差 E_i 最小的 10 个点作为预选定位结果, 下面预选定位结果的数量, 重新进行定位测试, 得到定位误差值如表 2 所示。可以看出, 定位结果个数增加时, 仍能实现泄漏点的精确定位, 即最小定位误差为 0, 真实漏点包含于预选定位结果中。但由于错误解的增多, 平均定位误差随之增大。因此, 本文输出 10 个点作为预选定位结果是合理的、定位结果是准确的。

表 2 不同预选定位结果个数时的定位误差
Table 2 Positioning errors with different numbers of preselected positioning results

预选定位结果个数	最小定位误差/m	平均定位误差/m
10	0	83.39
20	0	235.72
30	0	272.15
40	0	295.32
50	0	314.21

接下来, 扩大搜索范围, 测试识别出的漏点位置是否受比对范围的影响。对于同一放水点, 比对半径分别扩大到 600, 800, 1 000 m, 不同比对范围如图 7 所示。可以看出, 比对半径扩大后, 参与比对的管道长度和支路个数也随之增加。不同半径时所涵盖的区域管网参数和平移时间 t_0 如表 3 所示。扩大比对半径后, 重新进行时延比对, 定位结果如表 3 所示。当比对半径为 600 m 和 800 m 时, 定位结果同半径为 400 m 时完全一样, 均正确识别出了漏点所在的支管, 且最小误差为 0, 均实现了对漏点的精确定位。

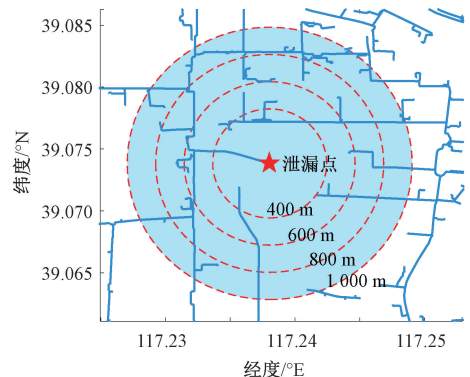


图 7 不同比对半径对应的范围

Fig. 7 Diagram of different ranges with different match radii

表3 不同比对半径时的定位结果

Table 3 Positioning results with different match radii

比对半径/m	管道总长/m	离散点个数	支管数量	识别出的支管数量	t_0/s	最小误差/m	平均误差/m
400	2 158	133	8	1	3.083	0	83.39
600	5 205	335	24	1	2.782	0	83.39
800	8 342	558	47	1	2.628	0	83.39
1 000	11 281	780	76	2	2.475	0	152.78

当比对半径为 1 000 m 时,定位到了两个支管,其中一个为包含漏点的正确支管且最小定位误差为 0,另一个为错误识别的支管;具体定位结果如图 8 所示。在识别出的误差最小的 10 个漏点中,有 9 个分布在放水点所在管线,其中包括真实泄漏点(放水点);仅有 1 个预测漏点偏差较大,位于另一个支管上,该点经纬度为(117.229 91°E, 39.078 32°N),与泄漏点的直线距离为 860 m。考虑到该错误点与放水点所处的位置环境类似,即,都位于管道末端,且二者相距较近、到达各个压力变送器的时延很接近,导致该错误点的时延比对误差也很小,该错误点也被识别为漏点,属于管网漏点时延比对检测中的“多解”情况。需要在此局部区域增设压力变送器来排除错误的多解。

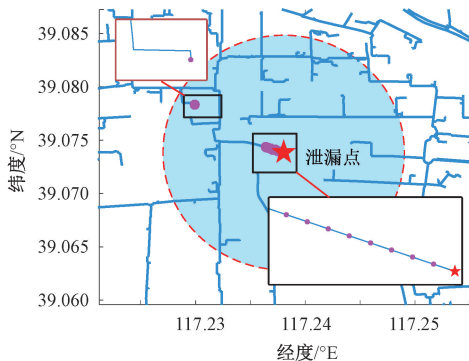


图8 比对半径为 1 000 m 时的定位结果

Fig. 8 Leak location results of 1 000 m match radius

继续扩大比对半径。当比对半径从 1 000 m 继续扩大,定位误差开始变大至 500 m 以上,考虑误差来源有以下两个方面。1) 管网的经纬度位置、管道管径等结构参数存在测量或记录误差,导致标准时延的计算存在偏差。今后应当在管网的关键位置进行精密测绘,完善管网信息,提高标准时延的准确度。2) 供热管网全域共有 1 692 个分支,而本文实验中部署的压力变送器仅有 9 个,只占分支数的 0.532%,负压波监测点十分稀疏,因此算法在解算过程中的“多解”情况更加普遍,这显然增大了大范围内的泄漏定位难度。因此,在管网的适当位置部署压力变送器,可以充分利用冗

余的时延信息,提高定位准确度和精度。压力变送器部署的优化方案有待进一步研究。

在以往的研究中,林伟国等^[6]在 7 个分支,总长 98 m 的小型管网中部署了 14 个压力变送器,通过分析各节点泄漏信号的到达先后顺序,实现了对漏点的定位;郭新蕾^[8]在 9 个分支,总长 247 m 的小型管网中部署了 21 个传感器,通过测定水击波波中间断点的时刻来计算出漏点位置;Li 等^[16]提出了融合 ALO 算法和 PSO 算法的管网模式识别和泄漏定位方法,建立了实际管网的仿真模型,通过仿真验证了管网漏点判定方法的有效性。Basnet 等^[17]将 905 个分支管段的小镇级别的管网分割为 33 个区域,部署了 33 个压力传感器、10 个流量传感器,利用 K-均值聚类法识别出了管网泄漏分区,但不能实现泄漏点的精准定位。可以看出,以上方法的实现都需要布置大量的压力传感器。

可以看出,对于小型管网的泄漏定位,允许部署较为稠密的压力变送器,对于大型管网的泄漏检测,受成本限制,压力变送器部署得比较稀疏,往往只能识别出泄漏事件或者大致判断泄漏发生的区域,无法进行泄漏的精准定位。而本文所提出的基于最短路径规划的供热管网泄漏检测方法,真正考虑了管网负压波传播的多径效应,并建立了精确的传播时延数据库,通过最短时延比对确定漏点位置,仅需部署 9 个压力变送器,即可以实现对大型管网泄漏的检测和定位,具有极大优势。当比对半径从 400 m 扩大至 1 000 m 的过程中,本文所用的方法都可以快速定位到真实的泄漏点;而且当比对半径为 1 000 m 时,区域内共有多达 76 条管线,但本方法可以成功将泄漏点的范围缩小至 2 条管线,这大大减小了排查泄漏点的工作量。对于更大的比对半径,需要在可能存在多解的区域增设压力变送器。与少数仅能够大致识别漏点所属区域的方法^[16-17]不同,本方法可以精确指出漏点所属支管以及漏点的地理坐标。

5 结 论

本文提出了一种基于最短路径规划的供热管网泄漏定位方法。通过在管网特定位置部署若干压力变送器,

获得实时压力信号,并在泄漏发生时捕捉泄漏时刻,通过将实测时延与事先建立好的时延标准库进行比对,实现管网泄漏定位。结论如下:

1)在以往的管网泄漏检测、定位方法中,对于小型管网,允许部署相对稠密的压力变送器,而对于大型管网,压力变送器的部署非常稀疏,往往只能识别出泄漏是否发生或者泄漏的大致区域。而本方法真正考虑了大型管网负压波传播的多径效应,并建立了精确的传播时延数据库,通过最短时延比对确定漏点位置,可以实现大型管网的泄漏检测和管段级别准确定位,具有极大优势。

2)通过引入负压波声速公式将管网细分为等传播时长的离散点,从而将最短时长路径搜索转换为最少点数路径搜索,且保证了标准时延计算精度。

3)在区域面积为 $13\text{ km}\times 5\text{ km}$ 、分支数为1 692、有效压力监测点数为5的条件下开展了泄漏定位实验,可实现对1 000 m半径比对范围内泄漏的零偏差定位,表明所提方法是正确的和有效的。

4)当比对范围扩大时,管网经纬度、管径等参数存在的测量或记录误差,会导致漏点比对错误或偏差。应当在管网的关键位置进行地理坐标精确测绘,提高标准时延的计算精度。

5)管网分支数目远大于压力变送器数目造成的多解问题,可通过在管网中适当位置增设压力监测点来解决,从而保证定位准确度和精度;压力变送器的部署优化方案有待进一步研究。

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] 刘伯相,张远民,江竹.基于变分模态分解的管道泄漏信号降噪方法[J].振动.测试与诊断,2023,43(2):397-403,416.
LIU B X, ZHANG Y M, JIANG ZH. A noise reduction method for pipeline leakage signal based on variational modal decomposition [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2023, 43(2): 397-403, 416.

[3] 王贵愚,方睿,孙凯,等.基于STA/LTA的输油管道泄漏检测方法[J].北京理工大学学报,2020,40(7):760-764.
WANG G Y, FANG R, SUN K, et al. A STA/LTA based pipeline leak detection method[J]. Transactions of

Beijing Institute of Technology, 2020, 40(7): 760-764.

- [4] 李帅永,韩明秀,文井辉.基于四阶累积量的供水管道泄漏振动信号自适应时延估计[J].仪器仪表学报,2020,41(7):126-135.
LI SH Y, HAN M X, WEN J H. Adaptive time delay estimation of water supply pipeline leakage vibration signal based on the fourth-order cumulant[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(7): 126-135.
- [5] 李帅永,毛维培,程振华,等.基于广义互相关的供水管道泄漏振动信号时延估计器性能研究[J].电子测量与仪器学报,2021,35(2):202-211.
LI SH Y, MAO W P, CHENG ZH H, et al. Research on time-delay estimator of leakage-induced vibration signal in water-supply pipelines based on generalized cross-correlation[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(2): 202-211.
- [6] 林伟国,吴震,王芳.基于虚拟声波的舰艇管网泄漏检测方法研究[J].舰船科学技术,2018,40(7):152-157.
LIN W G, WU ZH, WANG F. Research on leakage detection and location of the ship piping network based on virtual acoustic signal [J]. Ship Science and Technology, 2018, 40(7): 152-157.
- [7] KAMPELOPOULOS D, KOUSIOPOULOS G, KARAGIORGOS N, et al. Acoustic leak localization method based on signal segmentation and statistical analysis[C]. International Conference on Modern Circuits and Systems Technologies, 2021.
- [8] 郭新蕾,马慧敏,王涛,等.管网故障水力瞬变检测实验系统研发[J].水利学报,2019,50(3):305-314.
GUO X L, MA H M, WANG T, et al. Research and development of hydraulic transient detection experimental system for pipe network fault [J]. Journal of Water Conservancy, 2019, 50(3): 305-314.
- [9] AYATI A, HAGHIGHI A. Multiobjective wrapper sampling design for leak detection of pipe networks based on machine learning and transient methods[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2023, 149(2): 04022076.
- [10] LI Z R, WANG J Y, YAN H X, et al. Fast detection and localization of multiple leaks in water distribution network jointly driven by simulation and machine learning[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2022, 148(9):05022005.
- [11] LIU M Y, YANG J, LI SH Y, et al. Robust GMM least

- square twin K-class support vector machine for urban water pipe leak recognition [J]. *Expert Systems with Applications*, 2022, 195(1): 116525.
- [12] 毛兴翔, 吴世德, 王文明, 等. 基于支持向量机的燃气管道泄漏识别方法研究 [J]. *石油机械*, 2021, 49(7): 147-154.
MAO X X, WU S H D, WANG W M, et al. Research on gas pipeline leakage identification method based on support vector machine [J]. *China Petroleum Machinery*, 2021, 49(7): 147-154.
- [13] ZHANG C H, STEPHENS M, LAMBERT M, et al. Acoustic signal classification by support vector machine for pipe crack early warning in smart water networks [J]. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2022, 148(7): 04022035,.
- [14] 焦敬品, 李勇强, 吴斌, 等. 基于 BP 神经网络的管道泄漏声信号识别方法研究 [J]. *仪器仪表学报*, 2016, 37(11): 2588-2596.
JIAO J P, LI Y Q, WU B, et al. Research on acoustic signal recognition method for pipeline leakage with BP neural network [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2016, 37(11): 2588-2596.
- [15] ROYA C, BRYAN T, JEFF O. Detecting leaks in water distribution pipes using a deep autoencoder and hydroacoustic spectrograms [J]. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 2020, 34(2): 04020001.
- [16] LI L X, CHEN H F. Artificial intelligence and internet of things-based leak detection method for the water supply network [J]. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 2023, 11: 3443047.
- [17] BASNET L, BRILL D, RAN J T, et al. Supervised machine learning approaches for leak localization in water distribution systems: Impact of complexities of leak characteristics [J]. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2023, 149(8): 04023032.
- [18] 张晓兰, 谷永刚, 张少强, 等. 智能监测系统下的线性电网状态估计研究 [J]. *电测与仪表*, 2021, 58(10): 112-117.
ZHANG X L, GU Y G, ZHANG S H Q, et al. Research on state estimation of linear grid based on intelligent monitoring system [J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2021, 58(10): 112-117.
- [19] CHEN X Y, XU Z H F, WU Y S H, et al. Heuristic algorithms for reliability estimation based on breadth-first search of a grid tree [J]. *Reliability Engineering and System Safety*, 2023, 232: 109083.

- [20] 李翠然, 王雪洁, 谢健骊, 等. 基于改进 PSO 的铁路监测线性无线传感器网络路由算法 [J]. *通信学报*, 2022, 43(5): 155-165.

LI C R, WANG X J, XIE J L, et al. Routing algorithm for railway monitoring linear WSN based on improved PSO [J]. *Journal on Communications*, 2022, 43(5): 155-165.

作者简介



黄新敬, 分别在 2010 年和 2016 年于天津大学获得学士学位和博士学位, 现为天津大学精密仪器与光电子工程学院副教授、博士生导师, 研究方向为声磁智能感知、管道缺陷检测和新型管道内检测器。

E-mail: huangxinjing@tju.edu.cn

Huang Xinjing received his B.Sc. and Ph.D. degrees both from Tianjin University in 2010 and 2016, respectively. He is currently an associate professor and a Ph.D. advisor in the School of Precision Instruments and Opto-electronic Engineering at Tianjin University. His main research interests include acoustic and magnetic intelligent sensing, pipeline defect detection, and new type pipeline detector.



燕育培, 在 2021 年于中国计量大学取得学士学位, 现为天津大学精密仪器与光电子工程学院硕士研究生, 研究方向为管网泄漏检测、管道安全预警。

E-mail: ares954880656@tju.edu.cn

Yan Yupei received his B.Sc. degree from China Jiliang University of Technology in 2021. He is currently a master student in the School of Precision Instrument and Opto-electronics Engineering at Tianjin University. His main research interests include pipeline leakage detection and pipeline safety warning.



封皓 (通信作者), 2006 年于天津大学获得学士学位, 2011 年于天津大学获得博士学位, 现为天津大学副教授, 主要研究方向为光纤传感技术、管道智能检测技术。

E-mail: fenghao@tju.edu.cn

Feng Hao (Corresponding author) received his B.Sc. degree from Tianjin University in 2006, and received his Ph.D. degree from Tianjin University in 2011. He is currently an associate professor at Tianjin University. His main research interests include optical fiber sensing technology, pipeline intelligent detection technology.