

基于 Symlets 小波变换的燃气管道泄漏诊断方法^①

吴银锋^② 裴丽莹* 陈 斌* 万江文

(北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院 北京 100191)

(* 北京邮电大学自动化学院 北京 100876)

摘 要 提出一种新的基于无线传感器网络的管道泄漏诊断方法,以解决现有管道泄露诊断方法存在的定位精度差、距离受限和实时性差的问题。该方法采用分布式数据融合技术,在源节点处利用 Symlets 小波变换提取包含泄漏特征的单模态声发射信号,消除噪声干扰及频散现象;在汇聚节点处根据信号幅值大小将泄漏点两侧的信号排列组合,利用互相关时差定位和加权平均原理获得泄漏点位置坐标。实验结果表明,基于无线传感器网络的新型管道泄露诊断方法可显著提高泄漏点定位精度,其定位误差小于 5%。

关键词 泄漏检测,无线传感器网络,模态声发射,小波变换

0 引 言

随着城市天然气管线的增长和管网日趋复杂,管道泄漏检查的重要性显得日益突出。传统的管道泄漏检测大都采用人工定期巡检方式,检测效率低、实时性差,难以满足管网安全监测需求。另外采用有线网络检测时,其布线成本是检测传感器的数十倍^[1,2],布线规模因此受到了限制。基于无线传感器网络(wireless sensor networks, WSN)的安全监测新技术^[1,2]具有部署方便快捷、多跳自组和实时性强等特点,采用该技术实现地下管网的远程在线监控,成为国内外研究的热点。

已有研究者提出在传统有线泄露检测网络中,使用声发射法、负压波法、压力点分析法、质量平衡法以及实时瞬变模型法等多种诊断方法,它们各有优缺点,目前负压波法或声发射技术应用较广^[3-8]。负压波法要求传感器网络系统能及时准确地捕捉到泄漏发生时信号的拐点,但在无线传感器网络中,若此时节点处于休眠状态,则该方法失效^[9];而声发射检测技术不受此限制^[10]。但由于检测源节点所采集到的声发射信号包含多种频率成分,具有多模态性和频散特性,存在各种噪声干扰,难以有效提取信号中的泄漏源特征信息,单对传感器检测结果可靠性差。本文针对上述问题,利用小波变换对信号分别进行时域和频域局部化分析,通过小波基的伸缩

平移运算实现信号的多尺度细化,提取出单模态泄漏声发射信号;采用互相关技术计算单模态信号波形到达上下游传感器的时差,选取泄漏点两侧的两个节点波形进行泄漏定位,并通过对多个定位结果的加权平均提高系统定位精度和可靠性。

1 系统描述

基于无线传感器网络的泄漏检测系统采用分级融合的数据处理方式,第一级融合直接作用于原始信号,目的在于滤去噪声干扰和提取单模态信号;第二级融合在汇聚节点处进行,综合处理各源节点发送来的信号,实现泄漏源定位。

1.1 基于无线传感器网络的泄漏检测系统模型

无线传感器网络管道泄漏的检测原理如图 1 所示,采用传感器节点代替常规节点,用无线代替有线,节省布线成本,提高工作效率。

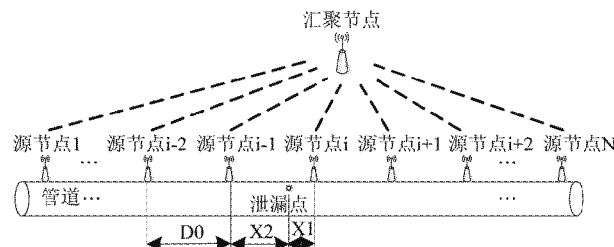


图 1 WSN 管道检测示意图

① 国家自然科学基金(60873240)和北京市教育委员会共建项目专项资助项目。

② 男,1979年生,博士,讲师;研究方向:传感技术及其系统;联系人,E-mail: yfwu@buaa.edu.cn

(收稿日期:2008-10-06)

系统共包含两类传感器节点:汇聚节点和源节点。源节点在管道上按设定位置布撒,负责采集泄漏发生时管壁上的声发射信号。汇聚节点负责一定范围内源节点数据的收集、融合、决策并将决策结果发送给监控中心。可以布置在地面以上,直接与监控中心通信,其功能要强于源节点。

1.2 检测及定位原理

材料或结构受力作用产生变形或断裂时,以弹性波形式释放出应变能的现象,称为声发射(acoustic emission)^[3]。模态声发射(modal acoustic emission)技术是一种基于波形分析的声发射信号处理技术,认为信号由模态和频率丰富的导波构成。天然气管道泄露时,气体与裂口摩擦产生的能量以应力波形式沿管壁传输的现象可看作是声发射现象,通过对该声发射信号的采集和分析即可实现泄漏检测。

由于声发射信号本身的特性及传播路径、环境噪声和测量系统等多种复杂因素的影响,节点采集到的信号波形十分复杂,进行泄漏定位需采取有效的数据融合方法提取包含泄漏特征的单模态信号。

时差定位是管道泄漏定位中最常用的定位方法,定位时至少需要两个传感器节点,且分别位于泄漏点两侧,其定位原理如图 2 所示。泄漏点的定位公式为

$$X = \frac{L - \alpha \Delta t}{2} \quad (1)$$

其中, X 为泄漏点与较近源节点间的距离,各节点在整个 WSN 中具有确定的位置坐标,因此求出 X 即可确定泄漏点位置; L 为上下游两节点间的距离,布网时已经确定; α 为声波在管道中的传播速度,可以通过查阅工程手册或实测波速的方法来获得; Δt 为声发射信号到达上下游节点的时间差,是时差定位方法中需要解决的关键问题。

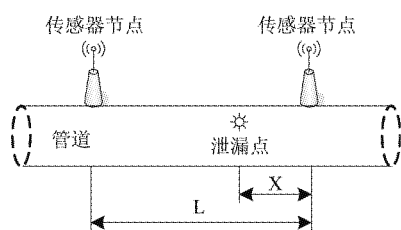


图 2 泄漏点定位原理图

当时差定位用于处理突发型泄漏信号时, Δt 可以通过信号拐点到达传感器的时间来确定。声发射泄漏检测信号为连续型信号,无法直接提取到两节点接收到泄漏信号的准确时间。基于波形互相关的

时差定位方法是连续声发射源定位的重要方法之一,位置函数 $x(n)$ 和 $y(n)$ 的相关系数 ρ_{xy} 由式

$$\rho_{xy} = \frac{\sum_{n=0}^{\infty} x(n)y(n)}{\left[\sum_{n=0}^{\infty} x^2(n) \sum_{n=0}^{\infty} y^2(n) \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (2)$$

表示。

由许瓦兹(Schwartz)不等式,有 $0 \leq |\rho_{xy}| \leq 1$ 。当两信号完全相等时, $\rho_{xy} = 1$ 取最大值;当 $x(n)$ 和 $y(n)$ 完全无关时, $\rho_{xy} = 0$;当 $x(n)$ 和 $y(n)$ 相似时, $0 < |\rho_{xy}| < 1$, $|\rho_{xy}|$ 越大,表示 $x(n)$ 和 $y(n)$ 的相似程度越高。取泄漏声发射源上下游两个节点在相同时段、相同采样点数的声发射信号进行相关计算,相关结果最大时对应的采样点即为时差 Δt 。

1.3 基于小波变换的单模态信号提取技术

用于声发射信号分解的小波基必须对缺陷信号敏感,必须能突出信号奇异特征、减小信号失真并具有良好的时频分析性能,文中选择 Symlets 系列小波对信号进行变换。

算法的处理步骤如下:

(1)选择小波基。

(2)按照平移参数将小波基在时间轴上平移并与原始信号进行比较,由式

$$C(a, t) = \int f(t) \Psi(a, t) dt \quad (3)$$

计算小波系数 C 。

变换结果得到一系列小波系数,这些系数是缩放尺度 a 和时间 t 的函数,表示该尺度下时间位置的部分信号与小波的近似程度, C 值越高表示信号与小波越相似。

(3)改变缩放尺度 a , 重复步骤(2),实现信号的多尺度小波变换。尺度越大,表示小波函数在时间上越长,频率的分辨率就越低,主要获取的是信号的低频特性;反之,尺度变小,获取信号的高频特性。

(4)利用不同尺度下的小波系数对信号进行重构,获取不同频率的单模态信号成分。重构公式为

$$f_a(x) = \sum_b C_a \Psi_{a,b}(t) \quad (4)$$

提取其中泄漏特征明显且包含原始信号大部分能量的单模态信号发送给汇聚节点,作为系统下一步处理对象。

小波变换将原始多模态信号进行分解,消除噪声和频散特性的影响,包含泄漏特征的单模态信号进行互相关定位可大大提高定位精度。

2 泄漏源定位

研究表明,随着传播距离的增大,泄漏声发射信号的能量将发生衰减,在信号波形上表现为幅值的减小。假设泄漏发生时,受信号衰减的影响,泄漏点周围共有 N 个节点可以检测到泄漏异常信号。

源节点发现异常时,按 1.3 中的步骤对原始信号进行小波变换,并将处理后的单模态信号和自己的 ID、位置信息一起打包发送给汇聚节点。如图 1 所示,假设 $X1 < X2$, 汇聚节点比较所接收到信号的平均幅值 $V_i (1 \leq i \leq N)$, 可得

$$V_i > V_{i-1} > V_{i+1} > V_{i-2} > \cdots > V_N > V_1$$

采用间隔分组的方法按上述排序将信号分为两组,结果如下:

$$A = \{S_i, S_{i+1}, S_{i+2}, \cdots, S_N\}$$

$$B = \{S_{i-1}, S_{i-2}, S_{i-3}, \cdots, S_1\}$$

其中, $S_i (1 \leq i \leq N)$ 表示源节点 i 发送给汇聚节点的信号, A 组信号的源节点位于泄漏点的右侧, B 组信号的源节点位于泄漏点左侧。

根据时差定位原理,利用位于泄漏点两侧的任何两个节点波形均可确定泄漏点位置,则从 A、B 组信号中各取其一进行两两组合,所得信号对的数量即为可计算出的泄漏点坐标的数量。若令 N_A, N_B 分别表示 A、B 组内的信号数量,则信号对的数量由下式计算:

$$N_C = N_A \times N_B = (i-1) \times (N-i+1)$$

N_C 对信号通过互相关时差定位可得 N_C 个泄漏点位置坐标。为了减小各处理环节中的误差干扰,提高定位精度,将各泄漏点位置信息按如下公式进行加权平均:

$$P_{\text{leak}} = \sum_{j=1}^{N_C} \mu_j P_j \quad (1 \leq j \leq N_C) \quad (5)$$

其中, P_{leak} 表示系统最终确定的泄漏点位置; P_j 表示第 j 对信号计算出的泄漏点位置; μ_j 为加权因子,反映该组信号所确定泄漏点位置的可信程度。根据节点布网方式和信号衰减可知,相距越远的两个节点,接收到的信号衰减程度越大,信号中所携带的泄漏信息越不明显,这样的信号计算出的结果可信度就越低,因此 μ_j 的大小与该对源节点间的距离成反比,且 N_C 对信号的 μ_j 之和必须为 1,即

$$\mu_j = \frac{Con}{L_j} \quad (1 \leq j \leq N_C) \quad (6)$$

$$\sum_{j=1}^{N_C} \mu_j = 1 \quad (7)$$

其中, L_j 为第 j 对信号中两源节点之间的距离,大小为 D_0 的整数倍; Con 为常数,用于确保各 μ_j 之和等于 1,以保证加权平均后得到的泄漏点位置坐标同各个 P_j 处于同一数量级。当 N_C 与各 L_j 的值确定时,可通过式

$$Con = \frac{1}{\sum_{j=1}^{N_C} \frac{1}{L_j}} \quad (8)$$

计算得到 Con 。

综上所述,基于无线传感器网络的管道声发射检测方法的处理步骤如图 3 所示。

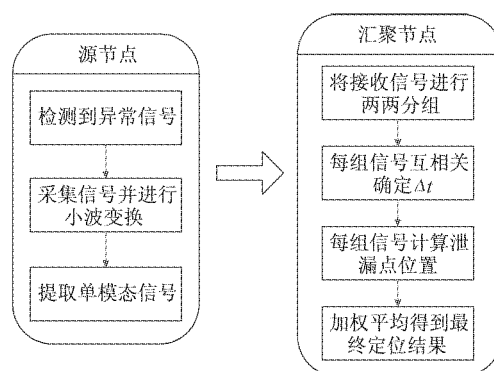


图 3 检测方法处理步骤

3 实验结果分析

本实验在一段金属管道上模拟天然气管道泄漏。管道外径 160mm,壁厚 6mm,内部压力 0.2MPa,使用泄漏阀模拟泄漏,实验系统如图 2 所示。在泄漏点附近等间距布置 4 个传感器节点, ID 分别为 1、2、3、4,节点间距 $D_0 = 2\text{m}$ 。设源节点 1、2、3、4 的坐标分别为 0m、2m、4m 和 6m,泄漏点位于坐标 3.3m 处。节点内的声发射传感器在每个采样过程内的采样点数为 1024,采样频率为 1MHz,采样过程持续时间为 $1024 \times 10^{-6}\text{s}$,实测波速 $\alpha = 5830\text{m/s}$ 。

管道发生泄漏时,4 个传感器节点接收到的信号波形如图 4 所示,按照各节点与泄漏源之间距离由小到大的顺序将各信号分别标注为(a)、(b)、(c)、(d)。

从图中可以看出,原始信号为掺杂了大量噪声及干扰的连续型声发射信号,很难分辨出泄漏特征。但是原始信号的平均幅值随着源节点与泄漏点间距离的增大而明显减小。

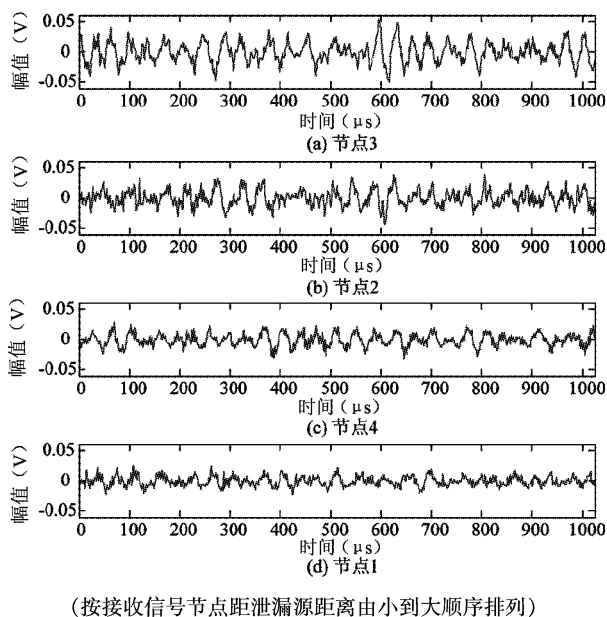


图4 源节点接收到的原始信号

对节点3信号进行5层小波分解后的结果如图5所示。可以看出其中第4、第5层信号具有明显的周期性冲击,反映了泄漏特征,且第5层信号包含了原始信号的大部分能量,因此我们提取小波分解的第5层信号作为包含泄漏特征的单模态信号进行下一步处理。将4个原始信号分别进行小波分解后所提取的信号结果如图6所示。

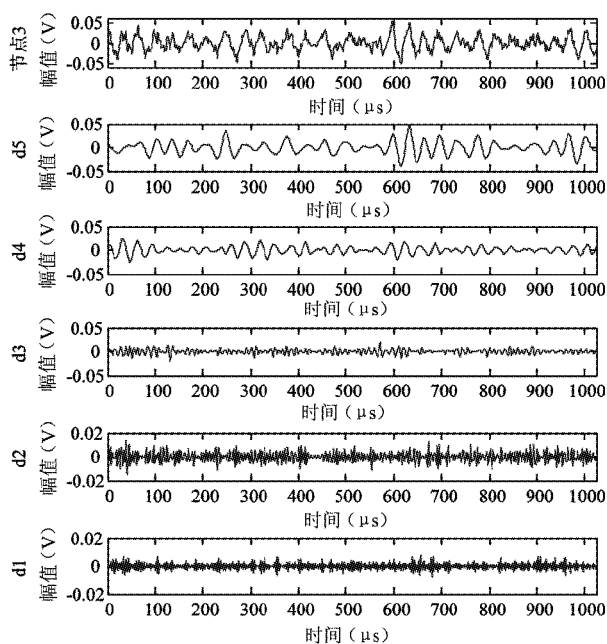


图5 节点3信号小波分解

图6中的各信号波形分别与图4相对应。按照2.2中的组合方式将上述信号两两组合为(a, b),

(b, c), (a, d), (c, d)。每对信号的互相关结果如图7所示。

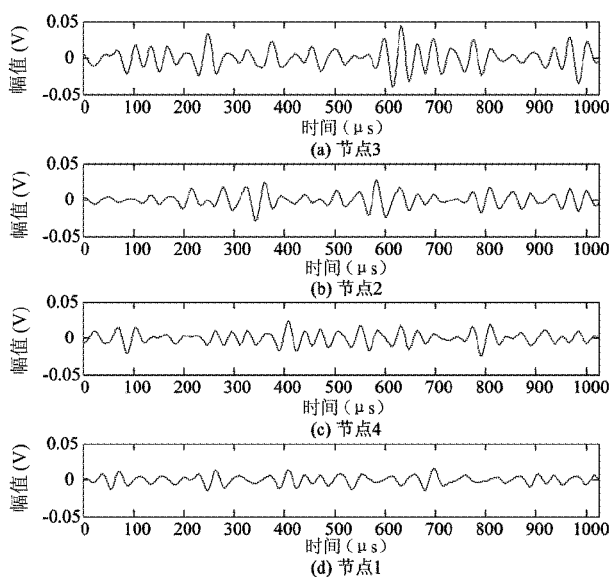


图6 单模态泄漏信号

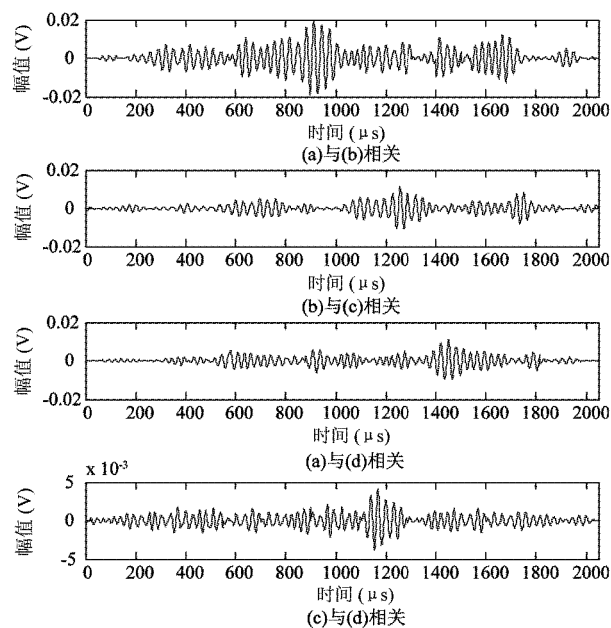


图7 各组信号的相关结果

从图中可以看出,各对信号的互相关函数均有明显的最大值,利用互相关时差定位原理求得各对信号的泄漏点位置坐标及误差如表1所示。

得到多个泄漏点坐标后,需要选取合适的加权因子 μ 对上述结果进行加权平均。由式(6)和(7)可得: $\mu_{ab} = 0.43, \mu_{bc} = \mu_{ad} = 0.215, \mu_{cd} = 0.14$ 。代入式(5),即可求出最终的泄漏点位置坐标:

$$P_{\text{leak}} = \sum_{j=1}^4 \mu_j P_j = 3.330\text{m}$$

其绝对误差为 0.03m, 相对误差为 0.91%。通过加权平均运算之后, 泄漏点的定位精度有了显著提高。

表 1 各对信号定位结果及误差

信号对	(a)(b)	(b)(c)	(a)(d)	(c)(d)
节点距离 $L(\text{m})$	2	4	4	6
$\Delta t(\mu\text{s})$	118	221	417	144
$X = \frac{L - a\Delta t}{2}(\text{m})$	0.656	1.356	0.784	2.580
泄漏点坐标 $P(\text{m})$	3.344	3.356	3.216	3.420
绝对误差(m)	0.044	0.056	0.084	0.12
相对误差(%)	1.33	1.70	2.55	3.64

4 结 论

通过多级数据融合, 将无线传感器网络技术与模态声发射检测方法相结合, 解决了传统管道泄漏检测中实时性差、范围受限、精度不高等问题。利用小波变换方法实现了声发射信号的多模态分解, 消除了噪声干扰及频散现象的影响; 互相关时差定位有效解决了连续型信号到达上下游传感器节点的时差求解问题; 多个泄漏点位置坐标的加权平均可显著减小各处理环节中的误差, 提高定位精度。实验结果证明了该方法的有效性。

参考文献

[1] Sanderford B. Wireless sensor networks - battery operation of link and sensor. In: Proceedings of the Sensors for Industry

Conference, Houston, Texas, USA, 2002. 169-171
 [2] Scheible G, Schutz J, Apneseth C. Novel wireless power supply system for wireless communication devices in industrial automation systems. In: Proceedings of the IEEE Annual Conference of the Industrial Electronics Society (IECON 2002), Sevilla, Spain, 2002. 1358-1363
 [3] Dunegan H L. Modal analysis of acoustic emission signals. *Journal of Acoustic Emission*, 1998, 15(1): 1-4
 [4] Taghvaei M, Beck S B M, Staszewski W J. Leak detection in pipelines using cepstrum analysis. *Measurement Science and Technology*, 2006, 17: 367-372
 [5] Gao, X M, Fan H, Huang T, et al. Natural gas pipeline leak detector based on NIR diode laser absorption spectroscopy. *Spectrochimica Acta - Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2006, 65(1):133-138
 [6] 靳世久, 王立宁, 李健等. 原油管道漏点定位技术. 石油学报, 1998, 19(3): 93-97
 [7] 李帆, 张丽娟. 基于小波分析消噪技术的燃气管道泄漏检测与定位. 流体机械, 2006, 34(12):47-51
 [8] Chen H L, Ye H, Chen L, et al. Application of support vector machine learning to leak detection and location in pipelines. In: Proceedings of the 21st IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference (IMTC 2004), Como, Italy, 2004. 3.2273-2277
 [9] Henrique V, Morooka C, Guilherme I, et al. Leak detection in petroleum pipelines using a fuzzy system. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2005, 49:223-238
 [10] Muggleton J M, Brennan M J. Leak noise propagation and attenuation in submerged plastic water pipes. *Journal of Sound and Vibration*, 2004, 278: 527-537

Leak diagnosis in gas pipelines based on Symlets wavelet transformation

Wu Yinfeng, Pei Liying*, Chen Bin*, Wan Jiangwen

(Department of Instrument Science and Opto-Electronics Engineering,
Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191)

(* Department of Automation, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876)

Abstract

A novel pipeline leakage diagnosis method based on wireless sensor networks is presented to improve the accuracy of leakage localization, the detecting range and the real-time performance. In order to eliminate noise and the frequency dispersion, the method uses the distributed data aggregation technique combined with the Symlets wavelet transformation to convert original signals to single-mode acoustic emission signals in source nodes, and in sink nodes, it divides the single-mode signals into couples from ordinary nodes. The leak position is obtained by the cross-correlation time differences of arrival (TDOA) localization and the weighted average method. The simulation results show that the localization accuracy can be improved obviously by aggregating the data from multi-nodes. The localization error of the method is less than 5%.

Key words: leak detection, wireless sensor network, modal acoustic emission, wavelet transformation