

Leakage Location of the Urban Underground Natural Gas Pipeline

GAO Hua, WANG Bao-guang*, DU Zhen-hui, LIU hui-pu

(State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Rapidly development of the natural gas pipeline and its dangerous leakage, especially those buried under cities, it is necessary to find and locate the leakage timely and exactly. This paper applied phase difference between cross bispectrum and auto bispectrum which derived from direct method to locate leakage of the underground pipeline. In order to get the true phase difference, least-square bispectrum phase unwrapping algorithm form the modulo 2π bispectrum phase was involved. Two piezoelectric accelerometers and 40 m coating steel pipe were used in course of practice. Plentiful experiments verified practicality and validity. Experimental results show that the location errors less than 2 m at 30 m of detecting distance.

Key words: cross bispectrum; underground gas pipeline; leakage location; bispectrum phase unwrapping
EEACC: 7230; 7210B

城市地下燃气管网泄漏定位研究

高 华, 王宝光*, 杜振辉, 刘会朴

(天津大学精密测试计量与仪器国家重点实验室, 天津 300072)

摘 要: 由于城市燃气管网泄漏极具危险性, 而现有的检测定位手段不能有效地对泄漏点准确及时的发现与定位。根据互双谱延时估计理论, 将双谱应用于地下中压燃气管网泄漏的定位, 通过直接法得到互双谱和自双谱的估计值, 由该估计值得到双谱的相位, 为了得到真正意义相位, 对估计相位进行了解卷绕, 得到最小二乘意义上的无卷绕相位, 最后由互双谱和自双谱的无卷绕的相位差得到泄漏点的位置, 并通过大量的泄漏定位实验证明了该方法的有效性。实验结果表明, 该方法应用于城市中、低压管网的泄漏定位, 在检测距离为 30 m 的情况下, 定位绝对误差小于 2 m。

关键词: 互双谱; 地下燃气管网; 泄漏定位; 双谱相位解卷绕

中图分类号: TE88; TP212.9

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2008)12-2084-04

随着人们环保意识的增加, 国、内外都在将天然气当作石油、煤之外的第三大能源。作为天然气输送重要手段的管道也在随之飞速发展着。天然气的消费终端为城乡居民。为了将天然气输送到城市的每个居民用户家中, 就必然要发展城市地下燃气管网。目前我国的城市地下燃气管网的铺设正在展开。天然气管网位于人口密集的城乡地下, 而天然气又有着易燃、易爆等特点, 一旦发生爆炸, 很容易造成巨大的经济损失, 甚至造成人员伤亡等事故。天然气的泄漏不像水、石油的泄漏那么明显, 具有隐蔽性、流动性等特点, 仅仅依靠窰井和可燃性气体检测仪, 很难做到对漏点的准确定位。因此, 研究新的

泄漏定位手段势在必行。

基于二阶统计量的互相关是一种常用的定位手段。两信号的高度相关及噪声的不相关是互相关定位的基本要求, 若信号不具备这两个条件, 采用互相关定位会使得定位不准确, 甚至导致错误定位。对于一个平稳的非高斯信号, 采用基于高阶累积量理论的互双谱进行定位, 则不存在上述问题^[1]。

1 互双谱定位原理

由于输气燃气管道管内外存在压差, 一旦管道发生破损, 气体从压力高的管内向压力低的管外逃逸, 由此引发管壁的振动, 属于广义声发射范畴。泄

漏所产生的振动,沿着管壁向两端传播,泄漏点的两端安装振动传感器检测该振动,可判断是否有泄漏产生并对泄漏点进行定位^[2-3]。已有文献采用高阶累积量对该泄漏信号的检测,这里只涉及对泄漏信号的定位。

在一段待检测的直管道两端分别安装振动传感器,两传感器距离为 L ,设泄漏点与传感器 1 的距离为 L_1 ,泄漏点距传感器 2 的距离为 L_2 ,如图 1 所示。

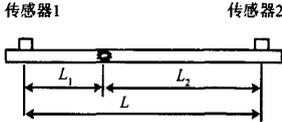


图 1 泄漏定位原理图

设传感器 1 接收到的信号为 $x_1(n)$,传感器 2 接收到的信号为 $x_2(n)$,若不考虑频散等因素:

$$\begin{cases} x_1(n) = s(n) + \omega_1(n) \\ x_2(n) = a_1 s(n - M) + \omega_2(n) \end{cases} \quad (1)$$

式中: a_1 为非零常数的衰减因子; M 为整数; ω_1, ω_2 为相关高斯噪声。

互双谱定义为:

$$B_{112}(f_m, f_n) = \sum_{r=-\infty}^{+\infty} \sum_{s=-\infty}^{+\infty} E(x_1(n+r) \times x_1(n+s)x_2(n)) \times \exp[-j2\pi(f_m r + f_n s)] \quad (2)$$

因为信号是实信号,则在 (f_m, f_n) 平面内存在两条对称线: $f_m + f_n = 0, f_m - f_n = 0$,若采样频率满足 $3B < f_0$ (B 为信号的带宽),则互双谱 B_{112} 的主值区间可取为: $T_1 \cup T_2$

$$T_1 = \{f_m, f_n: 0 \leq f_m \leq \frac{1}{2}, 0 \leq f_n \leq f_m\}$$

$$T_2 = \{f_m, f_n: 0 \leq f_m \leq \frac{1}{2}, -f_m \leq f_n \leq 0\}$$

若式(2)中的 $x_2(n)$ 由 $x_1(n)$ 代替,可得到自双谱 $B_{112}(f_m, f_n)$ 。

根据高阶累积量信号处理理论,由式(1)可得:

$$B_{112}(f_m, f_n) = B_{111}(f_m, f_n) \exp[-j2\pi f_{m+n} M]$$

将互双谱与自双谱改写为:

$$B_{112}(f_m, f_n) = |B_{112}(f_m, f_n)| \exp[-j\phi_{112}(f_m, f_n)]$$

$$B_{111}(f_m, f_n) = |B_{111}(f_m, f_n)| \exp[-j\phi_{111}(f_m, f_n)]$$

$$\text{则 } M = \frac{\phi_{112}(f_m, f_n) - \phi_{111}(f_m, f_n)}{2\pi f_{m+n}} \quad (3)$$

若采样率为 f_0 ,信号在管壁上的传播速度为 v ,则

$$\begin{cases} L = L_1 + L_2 \\ \frac{Mv}{f_0} = L_2 - L_1 \end{cases}$$

解之得:

$$\begin{cases} L_1 = \frac{1}{2}(L + \frac{Mv}{f_0}) \\ L_2 = \frac{1}{2}(L - \frac{Mv}{f_0}) \end{cases} \quad (4)$$

2 定位的实现

2.1 双谱及相位的估计

双谱的估计有两种方法:直接法和间接法,二者均提供渐进无偏估计^[4-5]。本文中采用直接法得到自双谱及互双谱的估计:设信号的样本容量为 N ,将其分为 l 段,每段为 K 个数据,并满足 $K = o(\sqrt{N})$,一般取 $K \approx \sqrt{N}$,对每段数据用直接法得到双谱估计,并用式(5)进行平均,得到最终的双谱估计。

$$\hat{B}(f_m, f_n) = \frac{1}{l} \sum_{i=1}^l \hat{B}_i(f_m, f_n) \quad (5)$$

式中 $\hat{B}_i(f_m, f_n)$ 为第 i 段数据双谱估计值。

相位的估计可表示为

$$\hat{\phi}_{112}(f_m, f_n) = \arctan(I(\hat{B}_{112})/R(\hat{B}_{112})) \quad (6)$$

式中 $I(\hat{B}_{112}), R(\hat{B}_{112})$ 分别为互双谱估计值的实部和虚部。

同理可得到 $\hat{\phi}_{111}(f_m, f_n)$ 。

按照式(3)可得到延迟 M 的估计值。为了得到相对较准确的估计量,可用下式对延迟 M 的估计进行平均:

$$\hat{M} = 4\Delta_N^2 \sum_{T_1 \cup T_2} M(f_m, f_n) \quad (7)$$

式中 $\Delta_N^2 = \frac{1}{K}$

2.2 双谱相位解卷绕

按照 § 2.1 中的分析可知,采用互双谱理论对泄漏点进行定位是通过两信号的相位差的计算来得到延迟 M 。既然算法中涉及到了相位,就不得不考虑相位的卷绕问题。当采用式(6)作为相位估计时,必定存在相位卷绕,若想得到较准确的延迟估计,须对相位进行解卷绕^[6-8]。

自双谱解卷 由自双谱的定义可知,双谱的相位 $\beta_{i,j}$ 与源信号相位 ϕ 存在下述关系:

$$\beta_{i,j} = \phi_i + \phi_j - \phi_{i+j}$$

对于 $T_1 \cup T_2$ 域内的双谱,有下式成立

$$\beta_{i,j} - \beta_{i-1,j+1} - \beta_{i,j} + \beta_{i,j-1} = 0$$

将上式写成矩阵形式:

$$C\beta_{i,j} = 0$$

考虑 $\beta_{i,j} = \hat{\beta}_{i,j} + 2k_{i,j}\pi$ ($\hat{\beta}_{i,j}$ 为卷绕双谱相位),

则有:

$$C(\hat{\beta} + 2k\pi) = 0$$

$$\alpha = -\frac{1}{2\pi} C\beta$$

可通过广义逆得到系数矩阵 k 的最小二乘解。那么解卷绕后的双谱相位为：

$$\beta_{i,j} = \hat{\beta}_{i,j} + 2k_{i,j}\pi$$

互双谱解卷 由互双谱的定义可知，双谱的相位 $\beta_{i,j}^{12}$ 与两信号相位 ϕ^1, ϕ^2 存在下述关系：

$$\beta_{i,j}^{12} = \phi_i^1 + \phi_j^2 - \phi_{i+j}^2$$

对于 $T_1 \cup T_2$ 域内的双谱，有下式成立

$$\beta_{i,j} - \beta_{-1,i+1} - \beta_{1,i} - \beta_{2,j} + \beta_{2,i-1} + \beta_{1,i+1} = 0$$

可按照自双谱解卷绕的方式求得系数矩阵 k ，由此得到解卷绕后的互双谱相位： $\beta = \beta' + 2\pi k$ 。

3 实验及数据分析

3.1 燃气管线泄漏定位实验装置

根据实验室现有条件，在某闲置工厂内，按照国家标准铺设 40 m 管线，管线材质为直径 2.5 inch 镀锌钢管。

实验中采用压电加速度传感器作为检测信号的敏感元件，用卡环将传感器与管壁紧密连接在一起，传感器与卡环采用螺钉连接的方式，如图 2 所示。考虑到传感器的声灵敏度的影响，在加速度计的外面增加了一个壁厚为 5 mm 的钢制外壳，将传感器密封起来，传感器与外壳之间以隔声材料填充，以减小外界噪声的影响。为了得到好的耦合效果，卡环与管壁、卡环与传感器之间用硅油填充。

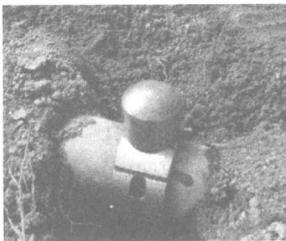


图 2 传感器的安装

试验系统还包括：NI-9215A 采集卡，传感器前置放大器，辅助外围电路，气泵及其他附件。

3.2 实验及数据处理

在压力范围为 0.01~0.25 MPa，泄漏孔径为 1.5 mm 条件下，变换两传感器之间的距离，得到不同距离、不同压力的泄漏信号。每次实验的采样频率均为 $f_0 = 100\ 000$ Hz。

实验 1 两传感器距离为 8 m，泄漏点位于两传感器正中 (L_1 的真实值为 $L_1 = 4$ m)，压力由 0.25 MPa 依次变换到 0.01 MPa，变换步长为 0.01 MPa。对两传感器接收到的信号按照互双谱定位理

论进行处理，处理结果如图 3 所示。

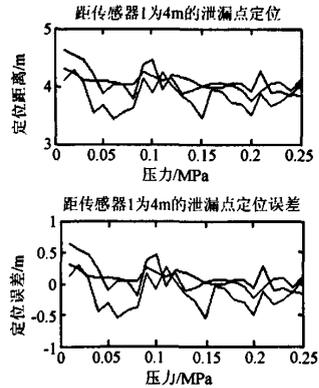


图 3 两传感器相距 8 m 的定位

实验 2 两传感器距离为 15 m，泄漏点距传感器 1 为 9.5 m ($L_1 = 9.5$ m)。其他同实验 1。定位结果如图 4 所示。

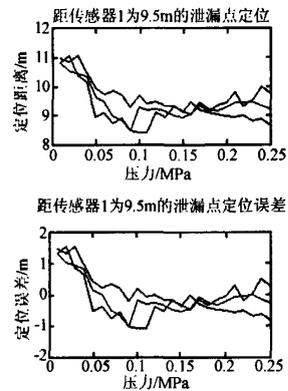


图 4 两传感器相距 15 m 的定位

实验 3 两传感器距离为 28.6 m，泄漏点距传感器 1 为 11.6 m ($L_1 = 11.6$ m)。其他同实验 1。定位结果如图 5 所示。

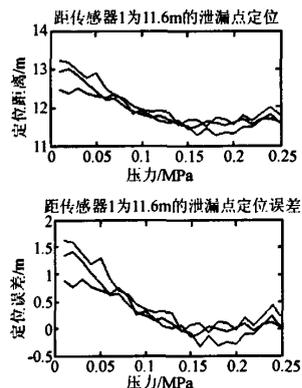


图 5 两传感器相距 28.6 m 的定位

由上述三组实验及处理结果可知：采用互双谱作为定位手段时，随着信噪比的下降，定位误差迅速

上升。根据 Melvin J. Hinich 的研究结果,定位的方差反比与信噪比的三次方,这意味着在信噪比较高的情况下,互双谱的定位精度很高(对应于图 4~图 6 中,压力高或者检测距离短的情况);在信噪比较低的情况下,定位精度较差(对应于图 4~图 6 中压力低、检测距离长的情况)。

为了改善低信噪比情况下的定位精度,应尽量提高信噪比,但由于技术上的原因,信噪比的提高是有限的。另外一种提高定位精度的方式为增加双谱估计的样本容量。由统计信号处理理论可知,增大样本容量,可提高估计量的精度。但随着样本容量的增加,数据处理的时间会成几何级数增长。在信噪比较低的情况下,一般将上述两种方法互相结合使用,以得到较高的定位精度。

4 结论

本文将互双谱理论应用于城市地下燃气管网的泄漏定位,实地采集了不同距离、不同压力下的泄漏信号,通过对大量的实验数据分析结果表明:

- ① 该方法可较准确的对充气管网的泄漏点进行定位,且定位精度较高;
- ② 该定位算法稳定性好,由图 4~图 6 中,可看到在不同距离,不同压力下,定位的重复性很好;
- ③ 参与运算的数据量及信噪比直接影响着定

位精度。

参考文献:

- [1] Hinich Melvin J, Wilson Gary R. Time Delay Estimation Using the Cross Bispectrum[J]. IEEE Transaction on Signal Processing, 1992, 40(1):106-113.
- [2] Miller RK, Pollock AA, et al. The Development of Acoustic Emission for Leak Detection and Location in Liquid-Filled, Buried Pipelines[J]. Journal of Acoustic Emission, 2001, 32(2):245-256.
- [3] Amanda M C, Lance E R, et al. Experimental Studies on the Role of Backfill and Pipeline Characteristics in the Application of Acoustic Leak Location to Underground Pipelines[J]. Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, 1997, 16, 467-473.
- [4] 张贤达 时间序列分析[M],北京:清华大学出版社,1996.
- [5] Nikias Chrysostomos L, Raghuvveer Mysore R, Bispectrum Estimation: A Digital Signal Processing Framework[J]. Proceedings of the IEEE, 1987, 75(7), 869-891.
- [6] Marron J C, Sanchez P P, Sullivan R C, Unwrapping Algorithm for Least-Squares Phase Recovery from the Modulo 2π Bispectrum Phase[J]. Opt Soc Am A, 1990, 7(1):14-20.
- [7] Haniff Christopher A, Least-Squares Fourier Phase Estimation from the Modulo 2π Bispectrum Phase[J]. Opt Soc Am A, 1991, 8(1):134-140.
- [8] Sadler Brian M, Giannakis Georgios B, Shift- and Rotation-Invariant Object Reconstruction Using the Bispectrum[J]. Opt Soc Am A, 1992, 9(1):57-69.



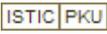
高华(1975-),女,天津大学精仪学院博士研究生,主要从事城市燃气管网的泄漏检测与定位的研究,zzbgh1001@163.com



王宝光(1946-),男,现任天津大学精仪学院教授、博士生导师。主要研究方向为精密测试技术及仪器、机光电一体化动态测试技术等。

作者: [高华](#), [王宝光](#), [杜振辉](#), [刘会朴](#), [GAO Hua](#), [WANG Bao-guang](#), [DU Zhen-hui](#), [LIU hui-pu](#)

作者单位: [天津大学精密测试计量与仪器国家重点实验室, 天津, 300072](#)

刊名: [传感技术学报](#) 

英文刊名: [CHINESE JOURNAL OF SENSORS AND ACTUATORS](#)

年, 卷(期): 2008, 21(12)

引用次数: 0次

参考文献(8条)

1. [Hinich Melvin J, Wilson Gary R](#) [Time Delay Estimation Using the Cross Bispectrum](#) 1992(1)
2. [Miller RK, Pollock AA](#) [The Development of Acoustic Emission for Leak Detection and Location in Liquid-Filled, Buried Pipelines](#) 2001(2)
3. [Amanda M C, Lance E R](#) [Experimental Studies on the Role of Backfill and Pipeline Characteristics in the Application of Acoustic Leak Location to Underground Pipelines](#) 1997
4. [张贤达](#) [时间序列分析](#) 1996
5. [Nikias Chrysostomos L, Raghuvver Mysore R](#) [Bispectrum Estimation: A Digital Signal Processing Framework](#) 1987(7)
6. [Marron J C, Samehez P P, Sullivan R C](#) [Unwrapping Algorithm for Least-Squares Phase Recovery from the Modulo \$2\pi\$ Bispectrum Phase](#) 1990(1)
7. [Haniff Christopher A](#) [Least-Squares Fourier Phase Estimation from the Modulo \$2\pi\$ Bispectrum Phase](#) 1991(1)
8. [Sadler Brian M, Giannakis Georgios B](#) [Shift-and Rotation-Invariant Object Reconstruction Using the Bispectrum](#) 1992(1)

相似文献(1条)

1. 期刊论文 [高华](#), [王宝光](#), [杜振辉](#), [乔晓崑](#), [GAO Hua](#), [WANG Bao-guang](#), [DU Zhen-hui](#), [QIAO Xiao-wei](#) [双谱在管道两点泄漏定位模型中的应用—纳米技术与精密工程](#)2009, 7(5)

在广义声发射检测理论和盲信号处理理论相结合的基础上, 在假设两泄漏信号统计独立及检测噪声与信号统计独立的前提下, 提出了一种基于双谱的管道两点泄漏定位方法, 该方法在理论上可定位已经存在或正在发生的泄漏事故. 依据该模型, 按照独立信号双谱的特性, 建立了两检测系统输出的自双谱和互双谱组成的方程组, 巧妙地利用双谱域中的两条直线上的双谱值, 推导了两泄漏点的定位理论公式. 在双谱估计中, 采用直接法和Han-ning-Poisson组合二维窗估计了观测序列的双谱值. 在实验基础上, 验证了该公式的正确性及该方法在工程上的可行性. 实验结果表明: 对于城市地下燃气管网, 在0.01~0.09 MPa压力范围内, 检测距离为28.6 m的情况下, 定位绝对误差小于1.5 m.

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_cgjsxb200812026.aspx

下载时间: 2010年4月15日