

双谱特征在地下输水管道泄漏检测中的应用

袁文菊, 程德福
(吉林大学电子学院微弱信号实验室, 吉林 长春 130026)

摘 要: 非高斯信号处理是信号处理的一个新领域. 阐述了地下输水管道泄漏检测系统原理, 并利用双谱时延估计法对地下输水管道漏点进行检测和定位, 提高了准确性和精确性. 实验结果表明, 高阶谱在地下输水管道泄漏检测方面具有很大的发展潜力.
关键词: 时延估计; 双谱特征; 高阶谱; 泄漏检测
中图分类号: TV 672. 2 文献标识码: A 文章编号: 1005-3409(2003) 02-0158-03

Bispectrum Feature Applied to the Leakage
Detection of Underground Conveying Water Pipelines

YUAN Wen-ju, CHENG De-fu
(The Weak Signal Laboratory of Jilin University, Changchun 130026, Jilin, China)

Abstract: Researching non-Gaussian signal is a new field of signal processing. The authors describe the principle of the leakage detection of underground conveying watering pipelines , and use Bispectrum Feature Time Delay Estimation to estimate the position of the goal, and then to locate it in the leakage location of underground conveying water pipelines. The experimental results indicate that high-order spectrum has great potentialities in the leakage detection of underground conveying water pipelines.
Key words: time delay estimation; bispectrum feature; high order spectra; leakage detection

水资源是国家的重要资源, 城镇的自来水是市民赖以生存的重要物资之一. 由于地下输水管道是在一定的压力下输送自来水的, 发生破损和泄漏是在所难免的. 然而泄漏或破损后若不及时检测和修整, 则势必造成较大的能源消耗和经济损失. 由此可见, 管道泄漏的检测和定位问题是一项具有重要的经济效益和社会效益的工作.

时间延迟是表征信号的一个基本参量. 所谓时间延迟, 是指接受起阵列中不同接收器所接收到的同源带噪声信号之间由于信号传输距离不同而引起的时间差. 时间延迟估计是指利用参数估计和信号处理的理论和方法, 对上述时间延迟进行估计和测定, 并由此进一步确定其它有关参数. 时间延迟估计方法有广义相关延迟估计法和广义双谱时延估计法等. 本文采用后者, 有效地消除正态噪声的影响, 得到较为精确的延时估计值. 采用与广义相关加权类似的方法对双谱加权处理, 可进一步降低时延估计的方差.

1 管道泄漏的信号分析及双谱算法

非高斯信号处理是信号处理的一个新领域. 过去人们往

往把许多实际过程当作高斯分布来处理. 而在实际生活中非高斯现象很多. 例如, 任何周期或准周期信号都可以认为是非高斯信号, 漏点的信号源噪声中也包含有非线性作用产生的能量. 因为管道中除了引起的声信号外, 还有各种各样的干扰噪声, 仪器系统也存在量测噪声, 这些噪声的干扰给真实泄漏信号的检测造成困难, 并可能在相关曲线中形成虚假的峰线, 导致漏检和误检, 降低了系统的准确性. 在复杂的管网布局中, 管道中可能由于反射的作用形成混响环境, 亦给相关时延分析造成困难. 另外, 由于漏点有各种各样的形状, 管中压力、流速及管径、管材都不尽相同, 因此漏点的信号源的特征并不是一个宽带的白噪声, 它往往是一个有色噪声信号或其包含较强的周期或准周期信号成分, 使得相关曲线中主峰变宽并发生振荡, 降低了时延估计和漏点定位的精确程度. 因而可以采用双谱时延估计法, 提高漏点定位的精确度.

双谱是三阶累积量的离散 Fourier 变换, 三阶累积量的定义如下:

假设累积量 $C_3(\tau_1, \tau_2)$ 是绝对可求和的, 则

¹ 收稿日期: 2002-10-06
作者简介: 袁文菊(1977-), 女(汉族) 安徽人, 吉林大学测试计量技术及仪器专业硕士研究生, 研究方向为信号处理。

$$Bx(\omega_1, \omega_2) = \sum_{\tau_1=-} \sum_{\tau_2=-} C_3(\tau_1, \tau_2) \exp(-j(\omega_1 \tau_1 + \omega_2 \tau_1 + \omega_2 \tau_2)) \quad (1)$$

其定义和性质可参阅文献[3]。

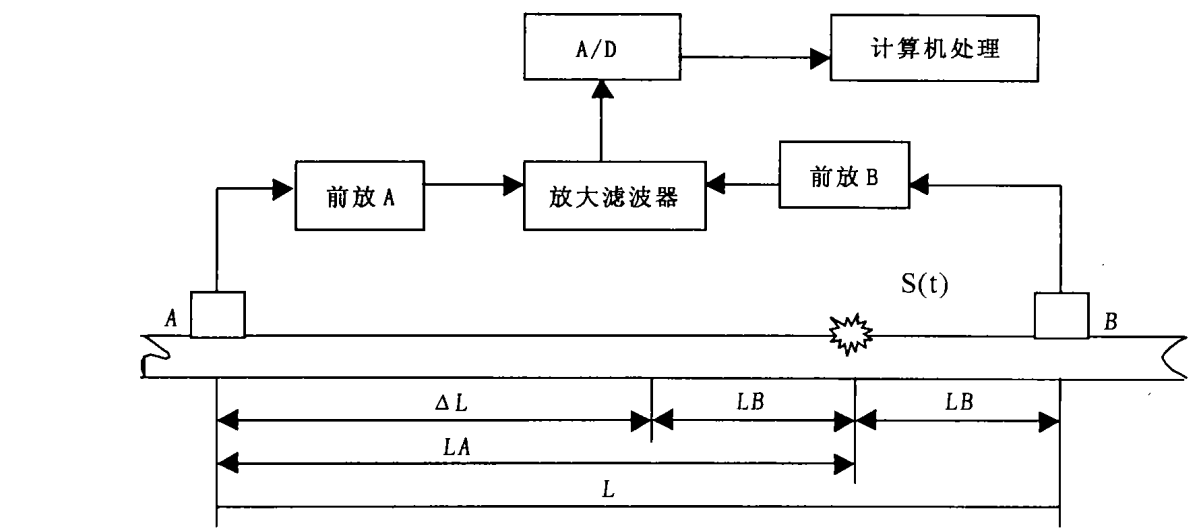


图 1 检漏原理框图

2 检测系统

管道漏水是一种承压状态下的水射现象。当某处漏水时, 压力水从管道裂口处向外喷射, 由于压力水与管道裂口缝隙间的磨擦而产生振动会引起喷射声音, 冲击空隙产生水流回旋式的振动, 有时管道裂口振动而引发管道其他部位的附加振动, 这些振动状态的传播形成应力波, 经由管壁传播。因此漏水声音信号特征与管道的形状、管径和材质有着密切的关系。由于目前我国多用铁质的圆形管道输送自来水, 这里选用圆形铁管进行实验分析。

检测时, 将 A, B 两个压电传感器, 分别置于自来水井部位露出管子的管道两端, 把埋于在几米深的地下自来水的微弱漏水声信号转换成电信号, 通过电缆送与传感器阻抗相匹配的放大器输入级经前置放大信号进入带通滤波器进入预处理, 使管道漏水声音的频率 200 ~ 2 000 Hz 信号顺利通过, 滤掉其它频率成分, 以减少噪音的干扰, 该信号再经过电压放大, 经数据采集板进行采样和量化, 然后在计算机中进行处理, 得出时延估值。上述系统中, 若采用 8 位 A/D 转换器对模拟信号进行采样和量化, 则量化误差为 0. 039 mV。若采样频率为 10 kHz, 则管道泄漏检测的理论定位精度优于 ±0. 2 m, 足以满足实际应用的需要。

3 利用时延参数检测定位的原理

3.1 由时延参数确定漏点

管壁上漏点处的泄漏引起向漏点两侧管壁中传播的信号 $s(t)$ 和 $n(t)$, 在 A, B 两处观测点用传感器检测此泄漏信号。观测点处的声压信号为:

$$x(t) = s(t) + n_1(t)$$
$$y(t) = s(t - \Delta t) + n_2(t)$$

式中: $n_1(t)$ 和 $n_2(t)$ ——高斯噪声, 信号与噪声统计独立;
 $s(t)$ —— 泄漏点的振动信源; Δt —— 两个不同接收点之间

产生的时延。

在图 1 中, 设两个不同接收点位置分别为 L_A 和 L_B , 两传感器之间的距离为 L 。由图有

$$\Delta L = L_A - L_B$$
$$L = L_A + L_B = \Delta L + 2L_B$$

设泄漏引起的应力波的群速度为 c , 则两个传感器接收到波动传播的时间差 Δt 为

$$\Delta t = \Delta L / c$$

这样, 有

$$\Delta L = c \Delta t$$

则

$$L_B = (L - c \Delta t) / 2 \quad (2)$$

在式(1) 中, 两传感器之间的距离 L 可以经测量得到。 c 为管壁上应力波的传播群速度, 可以现场标定, 或利用已有的经验数据。如果确定了参数 Δt , 就可以计算出未知漏点距传感器 A 或 B 的距离, 达到漏点定位的目的, 而时延 Δt 可通过双谱估计得到。

3.2 时延参数 Δt 的确定

采用互相关法对时延参数进行估计, 可得: $R_{xy}(\tau) = E[x(t)y(t + \tau)] = R_s(\tau - \Delta t) + R_n(\tau)$

显然, 当 $\tau = \Delta t$ 时, $R(\tau)$ 取得最大值, 因此, 通过确定 $R_s(\tau)$ 的峰值位置则可估计时延参数 Δt 。但是, 如果信噪比较小, 估计质量将变得很差。

采用双谱法分析同样问题, 对接收信号作离散化表示, 设时延参数为 T , 可得三阶子相关和三阶互相关函数如下:

$$R_{xx}(m, n) = E[x(k)x(k + n) + x(k + m)]$$
$$R_{xyx}(m, n) = E[x(k)y(k + n)x(k + m)]$$

不难推出

$$R_{xx}(m, n) = R_{ss}(m, n)$$
$$R_{xyx}(m, n) = R_{ss}(n - T, m)$$

其双谱分别为:

$$\begin{aligned} B_{xx}(\omega_1, \omega_2) &= B_{ss}(\omega_1, \omega_2) \\ B_{xyx}(\omega_1, \omega_2) &= B_{ss}(\omega_1, \omega_2) \exp(j\omega_1 T) \end{aligned}$$

于是, 有

$$A(\omega_1, \omega_2) = \frac{B_{xyx}(\omega_1, \omega_2)}{B_{xx}(\omega_1, \omega_2)} = \exp(j\omega_1 T)$$

参数 T 可有以下式确定:

$$a(n) = \frac{1}{(2\pi)^2} \int_{-\omega_1}^{\omega_1} \int_{-\omega_2}^{\omega_2} A(\omega_1, \omega_2) \exp(-j\omega_1 n - j\omega_2 m) d\omega_1 d\omega_2$$

参考文献:

[1] Chandran V, Elgar S. Bispectral analysis of two-dimensional random processes[J]. IEEE Trans. ASSP, 1990, 38: 1281–1286.

[2] Chandran V, Elgar S L. Mean and variance of estimation of the bispectrum of a harmonic random process— an analysis including leakage effects[J]. IEEE Trans. Signal Processing, 1991, 39: 2640– 2651.

[3] 张贤达. 现代信号处理[M]. 北京: 清华大学出版社, 1995. 373– 380.

[4] 王宏禹, 等. 自适应噪声抵消与时间延时估计[M]. 大连理工大学出版社, 1999. 398– 406.

[5] 沈民奋, 孙丽莎. 现代随机信号与系统分析[M]. 北京: 科学出版社, 1998. 237– 239.

所以, 通过估计序列 $a(n)$ 出现的冲激的时间便可估计时延参数. 采用双谱技术时进行时延估计的明显优点是对背景噪声不敏感.

3.3 应用实例

条件: $L = 105.0\text{ m}$, $l_A = 24.0\text{ m}$, $l_B = 81.0\text{ m}$, 选择波速 $c = 1\,230\text{ m/s}$.

采用双谱进行时间延迟估计. 可得到 $T = 46.0\text{ ms}$. 将此时延估值代入式(2), 得到传感器 B 与漏点的距离为 80.88 m . 绝对误差为 0.12 m , 相对误差小于 1% .

30	Coupling of Debris Flow Period, Climate Period and Tectonic Period in the Mountainous Area of Longnan	LI Yong-hua ¹ , ZHANG Xiao-yong ¹ , CUI Zhi-jie ² (96)
31	The Sustainable Development of Industry on Sandy Land in West of Jilin Province	DAI Quan-hou ^{1,2,3} , LIU Guo-bin ^{1,2} , BU Chong-feng ^{1,2} , et al(101)
32	An Inquiry Into Increasing Infiltration Rate Model on Soil and Water Conservation Tillage Measures	ZHENG Zi-cheng ¹ , HE Shu-qin ² , WU Fa-qi ³ (103)
33	Discussion on Watercourse Renovation of Submontane Alluvial River	HONG Chuan-xun ¹ , QIU Sheng-bin ¹ , WANG Xiao-xia ² , et al(106)
34	Status Quo and Improvement Measure of the Xiaoqing River Sewage in Shandong Province	MA Ji-gang ^{1,3} , MEI Ze-ben ² , XIA Quan ² , et al(108)
35	Plant for Protecting Ridge of Terrace Fields in Hilly Area of Qinghai: Tamarix austromongolica Nakai	WANG Wen-qing, MA Zhan-jie, FENG Ling-zheng(112)
36	Study on Eroded Land Self-rehabilitation of Ecologic System by the Initial Help of Vetiver Grass Hedgerow	DING Guang-min ¹ , LIN Fu-xing ¹ , SHI Yue-zhong ² , et al(116)
37	Environment Protection During Highway Construction in Karst Area	XIE Li-xin ¹ , LU Guang-yin ² , ZHU Zi-qiang ² (119)
38	Effects of Different Vegetative Types on Soil and Water Conservation at Erosion Areas	LI Xi-quan ¹ , TIAN Yu-xin ¹ , YUAN Zheng-ke ¹ , et al(123)
39	Preliminary Study on Ecosystem Development Mode in Loess Gully Areas in Western Shanxi Province	HU Zhen-hua ¹ , XIE Ming-shu ² , WANG Zhi-guo ¹ (126)
40	Soil Erosion Regulation and Main Control Measures in High Sandy Soil Area	XIAO Hai-tao ¹ , SHEN Bo ² , JIANG Guo-hua ³ , et al(131)
41	Detecting the Organic Content of Soil by Microwave Digestion	LIN Pei-xi, LI De-hao, ZHOU Xi-tang(135)
42	Soil and Water Conservation and Ecological Construction on the Loess Plateau in Terms of the Ecological Idea First	LIU Jing-fa ¹ , ZHANG Rong-jun ² , RAN Da-chuan ² (137)
43	Hyppophae rhamnoides Resource Management and Industrialization in Shaanxi Province	ZHANG Ai-fang(140)
44	Numerical Model of Sediment Scouring and Deposition in Qingtongxia Reservoir	ZHAO Ke-yu ¹ , ZHOU Xiao-de ¹ , JIA En-hong ² (145)
45	Research on Rainfall Effect on Surface Roughness	ZHENG Zi-cheng ¹ , HE Shu-qin ² , WU Fa-qi ³ (148)
46	Primary Study on the Theories and Process of Water Resources Carrying Capacity	ZHANG Ge-ping ¹ , ZHU Lian-yong ² (151)
47	Study and Application of Wastewater Treatment on Electrochromium	LU Jun-chen(155)
48	Bispectrum Feature Applied to the Leakage Detection of Underground Conveying Water Pipelines	YUAN Wen-jie, CHENG De-fu(158)