

供水管道泄漏声信号及其传播特性

路 炜, 文玉梅

(重庆大学光电工程学院, 重庆 400030)

摘要: 相关仪利用供水管道泄漏时产生的泄漏声波对漏点定位。泄漏信号验证为高斯分布, 泄漏声波主要是在管道里的水中传播, 与管壁发生流固耦合作用, 引起管壁振动。用 FIR 滤波器对管道系统建模, 采用最小均方误差(LMS)自适应系统辨识方法得到管道的冲激响应函数, 与线性相位 FIR 滤波器的冲激响应相比较, 表明泄漏声波在传播过程中存在频散。泄漏声信号受各种噪声干扰, 根据互谱相位谱信息估计泄漏信号的频带范围, 对信号滤波后作时延估计, 结果表明, 提高了泄漏定位的置信度。

关键词: 泄漏定位; 时延估计; 振动; 流固耦合; 自适应系统辨识; 互谱

中图分类号: TB123, TN911.7

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2007)-05-0871-06

Leakage noise and its propagation in water pipeline

LU Wei, WEN Yu-mei

(Department of Optoelectronic Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: Leaks in water supply pipelines cause waste of precious resources and endanger the environment. Correlator pinpoints leaks depending on the noise from the leaks. The leakage noise meets Gaussian distribution. The fluid-filled pipe is considerably complicated due to fluid-structure interaction. The radial pipe wall vibration is excited by internal water pressure pulsations arising from water-borne sound. The pipeline system is supposed to be a finite impulse response (FIR) system. Adaptive system identification technique employing least-mean-square (LMS) algorithm is applied to modelling the pipeline and analyzing the propagation characteristics of leak noise. Signal dispersion is observed corresponding to the significant asymmetry displayed by the impulse response of the pipeline. Basing on cross-power spectrum phase, the frequency band of leak signal is obtained. The filtered signals are used in the estimation of time delay. It is indicated that the method improves confidence of locating leak.

Key words: leakage location; time delay estimation; vibration; fluid-structure interaction; adaptive system identification; cross-power spectrum

1 引 言

供水管道泄漏不仅浪费宝贵的水资源和生产资金, 而且对管道自身、建筑物和公路的地基造成破坏, 污染物也可能从管道破损处进入供水系统给公共卫生带来危害, 因此世界各国都非常重视供水系统的漏损控制, 很早就开展了检漏技术及设备的研

发工作。20 世纪 70 年代中期英国水研究中心研制出了利用泄漏噪声对漏点定位的便携式相关检漏仪, 随后德、美、日等国家也竞相研制相关仪, 目前全世界有数十家公司生产此类设备。使用相关仪减少了对检漏人员经验的依赖, 提高了工作效率^[1]。在环境干扰噪声大、管道埋设深的场合, 与音听检漏法相比, 相关仪更显其优越性。由于相关仪价格比较昂贵, 在我国只有大型自来水公司和专业管道检修公司配备这种设备。如能有国产的相关仪在各中小自来水公司普及和推广, 将会极大地提高有效供水能力, 产生巨大的经济效益和社会效益。

收稿日期: 2006-06-24; 修回日期: 2006-09-29

作者简介: 路炜(1971-), 男, 辽宁铁岭人, 汉, 博士研究生, 研究方向为信号检测与智能仪器。

通信作者: 路炜, E-mail: weilucqu@yahoo.com.cn

至今国内只有几所高校和研究所从事过相关仪等检漏设备的研发^[2,3]。本文结合泄漏定位检测实践和理论分析,对泄漏声信号及其在管道中的传播进行了研究。泄漏信号在传播中衰减并受到各种噪声的干扰,根据互谱相位谱信息对信号预滤波再进行时间延迟估计,提高了泄漏定位的置信度。

2 管道泄漏定位原理

供水管道发生泄漏时,喷出的流体与漏孔摩擦以及与周围介质撞击产生声波。相关仪由主机、两个数据采集系统和两个压电加速度传感器探头或水听器组成,利用检测到的泄漏声波对漏点定位。检测过程如图1所示,加速度传感器探头通过磁性座吸附在消防栓、阀门等管道的暴露点上,数据采集系统将泄漏信号传到主机上。声波从漏点传播到两个探头有个时间差,主机对两路信号用时间延迟估计方法处理,计算出时间差。由探头之间管道的长度 L 、声波传播速度 v 和时间差 τ ,按下式计算漏点的位置

$$D=(L-v\tau)/2 \quad (1)$$

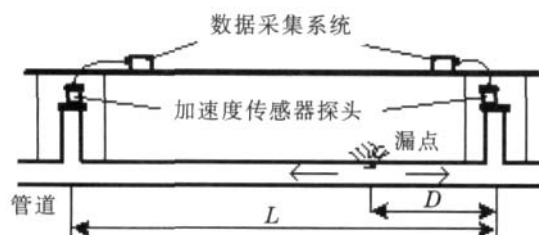


图1 相关仪检测示意图

Fig.1 Schematic of leak detection with correlator

主机接收到的两个离散时间信号 $x(k)$ 和 $y(k)$ 的数学模型为^[4]:

$$x(k)=s(k)+n_1(k) \quad (2a)$$

$$y(k)=\alpha s(k-\tau)+n_2(k) \quad (2b)$$

式中 k 是离散时间变量, $s(k)$ 是泄漏源信号, α 是衰减因子, τ 是未知的时间延迟, $n_1(k)$ 、 $n_2(k)$ 是加性噪声。互相关法是常用的时延估计方法,两个信号的互相关函数为

$$R_{xy}(m)=E[x(k)y(k-m)] \quad (3)$$

E 表示求数学期望, m 为时间移位。互相关分析是使 $y(k)$ 相对于 $x(k)$ 移动,在时延域中求它们达到最大相似时的位置。假设源信号和噪声是零均值、互不相关的,当 $m=-\tau$ 时互相关函数 $R_{xy}(m)$ 达到最大值。为了评定任意两个信号的相关性,将互相关函数 $R_{xy}(m)$ 归一化得到相关系数。

3 泄漏信号特征

从漏点喷出的流体与管壁摩擦、形成湍流和压力脉动等产生声波,频谱与管道压力和漏孔的大小、形状有关。声波在传播过程中频率越高衰减越大,传感器接收到的泄漏噪声分布在某一频段,一般低于2000Hz。

图2为一次检测得到的相关系数,图3为其时延域上的放大,呈现出周期性,似乎源信号中包含周期信号。相关系数约为0.32,表明信号有较高的信噪比。数学软件MATLAB中的normplot函数用图形的方式分析数据是否为高斯(正态)分布。如果数据是高斯分布,数据点将呈线性排列,为其它概率密度函数的数据点则呈曲线排列。取没有明显外界干扰的数据段,用该函数检验两路信号,结果如图4所示,在概率0.01~0.99的区间内数据点为线性排列。分析多次实测中的高信噪比数据,得到相似的概率分布图形。

根据概率论中的中心极限定理,如果一个物理过程为许多独立作用之和,那么该过程就趋于高斯过程。当液体从缝隙处喷射出来,形成无数细小的

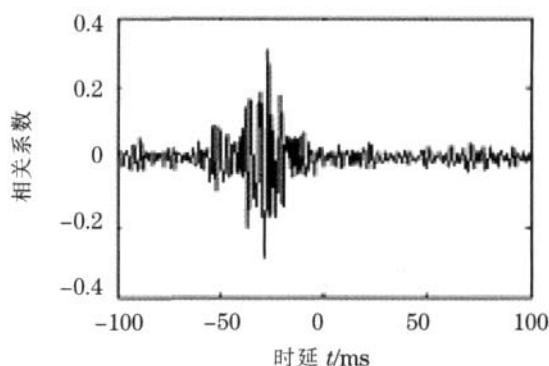


图2 相关系数

Fig.2 Cross-correlation coefficient

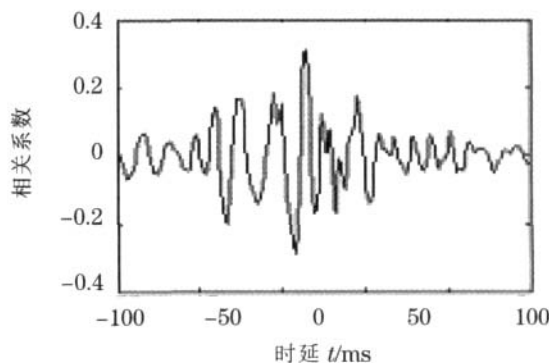


图3 时延域放大的相关系数

Fig.3 Zoomed in cross-correlation coefficient

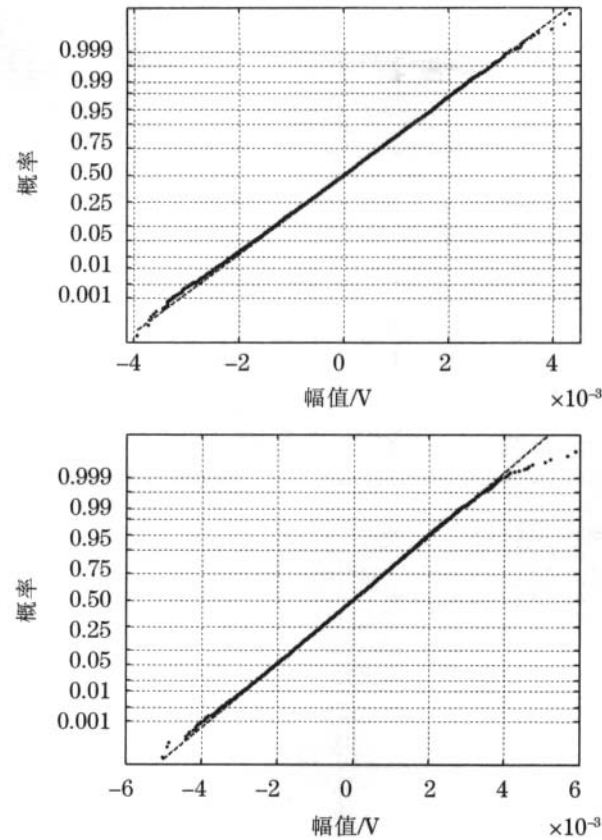


图 4 数据的概率分布
Fig.4 Probability plot of the data

紊流、旋涡, 激发出向空间辐射的射流噪声, 也应遵从高斯分布律。因此式(2)中的泄漏信号 $s(k)$ 是高斯分布的平稳随机过程。

在作时延估计前, 将信号滤波为带限信号, 相关系数是同样带宽的低频信号的相关系数乘上一个余弦函数, 其频率为带限信号的中心频率^[5], 使相关系数呈周期振荡, 而不是因为信号中包含较强的周期或准周期信号成分。由于泄漏信号服从高斯分布, 双谱时延估计等高阶统计量方法在泄漏定位中并不适用。

4 泄漏信号的传播途径

由式(1)可知, 声速、时间差和探头间的距离这三者都影响漏点定位的精度, 其中声速涉及泄漏声波的传播途径。由于检测时是将加速度传感器吸附在管道暴露点上, 所以在直觉上会认为泄漏声波沿管壁传播。国外有人认为: 流体喷出时诱发的宽频谱应力波在管壁内传播, 与管道的固有圆环振动发生共振的频率才能传播较远的距离^[6]。加拿大国家研究委员会建筑研究所通过实验研究塑料管线中泄漏声波的传播特性^[7], 发现管道接头对声波衰减没有影响; 把加速度传感器探头放在没有充满水的消防栓

上就不能定位漏点。从声速参数上也会产生几个疑问: 某种材质管道的泄漏声波的传播速度与该材质的声速可能相差数倍; 同种材质的管道, 直径不同声速就不同; 水泥管道和钢管的声速很接近^[8]。

英国南安普敦大学声音振动研究所对充液管道中的声波传播进行了研究^[9,10], 认为管道中的波主要以流体中的纵波、管壁中的轴向压缩波(使管壁产生径向运动)和扭转及梁弯曲波传播。这些研究是在置于空气中的数米长的整根管道上进行的, 而埋地供水管道是由一根根管道连接而成, 接头处有填充物、密封垫。在管壁中传播的声波遇到这些不同材料的界面以及管道拐角时, 发生吸收、反射、折射和散射等而极大地衰减, 还有周围的土壤、支撑等对管道的约束, 所以在管壁中传播的波和梁弯曲波不能远传。因此供水管道中泄漏声波主要是以流体中的纵波形式传播。

加速度传感器和水听器都是压电换能器, 但传感机理不同。加速度传感器的基座与被测物体相固结, 物体振动时, 传感器内的质量块相对基座发生位移, 压电元件受力产生与物体振动加速度成正比的电荷。而水听器中的压电元件是在水中声波的作用下伸张或收缩产生电信号。流固耦合力学的特征是固体结构的振动和流体载荷之间相互影响, 在管道水中传播的纵波使管壁产生径向运动, 于是加速度传感器检测到管壁的振动。浸在水中的水听器则直接感应水中的纵波, 因此使用加速度传感器和水听器都用同样的声速参数。加速度传感器对声波不敏感, 在检测中发现汽车鸣笛等人耳听到的声音也被加速度传感器感应到, 这是声波激振管道造成的。对水泥、塑料等非金属管道, 要用铁箍卡在管道上, 再将探头吸附在铁箍上。水听器多用于检测声信号衰减大的大口径管道。

在管道中流体的纵波传播速度近似为

$$c=c_f(1+\frac{Bd}{Eh})^{-1/2} \tag{4}$$

c_f 是自由场中流体的波速, B 是流体的体积弹性模量, E 是管壁材料的杨氏弹性模量, d 、 h 分别是管道的内径和壁厚。流体波速 $c_f=\sqrt{B/\rho}$, ρ 是流体的密度。泄漏噪声传播速度可用式(4)计算, 但管壁材料弹性模量、流体体积弹性模量会随环境条件改变而变化。

为提高泄漏定位精度, 可根据实际情况修正或实测得到声速。从式(4)可知 $c < c_f$, 管道流体中纵波的波速比自由场流体中的波速低。管壁弹性模量大,

波速高;壁厚增大,波速增加;管径增加,波速减小,即波速是由几个因素共同决定的。

尽管泄漏信号有水、管壁、土壤三个传播途径,但是由于管道结构、媒质的声传播性质以及传感器的感应机理,决定了接收到的泄漏信号主要是在管道内的水中传播的。

5 泄漏信号传播中的频散

系统的冲激响应反映了系统的特性,可以用来分析未知系统。如图 5 所示,泄漏信号在管道的水中向漏点两边传播,不考虑其它干扰,管道上以漏点为中心对称的 A、B 两点的泄漏信号是相同的。把 A、C 两点采集的信号看作 B、C 两点的信号,根据泄漏信号从 B 点传播到 C 点的变化可以研究 BC 这段管道系统对泄漏信号的影响,B、C 两点的信号分别是系统的输入和输出,输出对输入没有反馈,是一个有限冲激响应(FIR)系统。

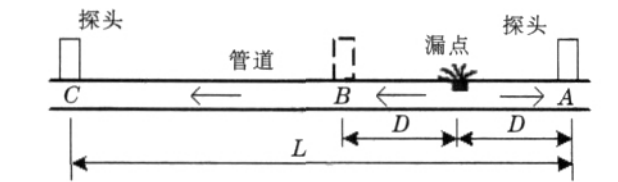


图 5 管道系统示意图
Fig.5 Schematic of pipeline system

自适应系统辨识方法可得到 FIR 系统的冲激响应函数^[11],图 6 为用自适应 FIR 滤波器为未知系统建模的原理框图。未知系统的输入作为滤波器的输入,与滤波器权向量卷积,得到滤波器的输出,它与未知系统输出之间的差异为误差 ε ,用来调整滤波器的权向量 W ,形成一个反馈环路,使滤波器的输出与未知系统的输出相匹配, ε 的均方值最小。实际测量到的未知系统的输入和输出都带有噪声, X 为带噪的输入信号向量。采用最小均方(LMS)误差算法调整滤波器权向量,滤波器权向量按下式迭代:

$$W_{k+1}=W_k+2\mu\varepsilon(k)X_k$$
 (5)

k 表示第 k 次迭代,步长 μ 控制自适应收敛速度和稳定性。为保证算法收敛, μ 要满足

$$0<\mu<1/((N+1)P)$$
 (6)

N 是滤波器权向量的数目, P 是输入信号的平均功率。

噪声影响迭代过程,因此要选取信噪比高的检测信号。当两个探头距离较近且用互相关法得到的相关系数较高、漏点定位较准确时,信号的信噪比

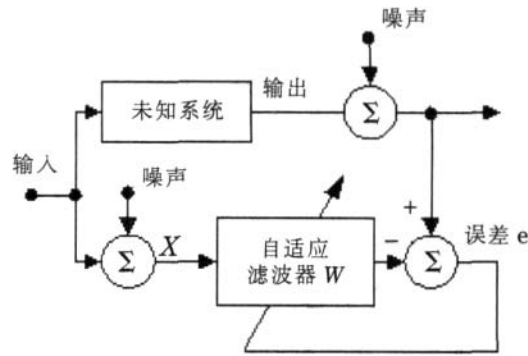


图 6 未知系统建模为自适应滤波器
Fig.6 Block diagram of adaptive filter modeling the unknown system

高。距离漏点近的探头的信号作为自适应滤波器的输入。图 7 为一次检测后用该法得到的管道冲激响应。

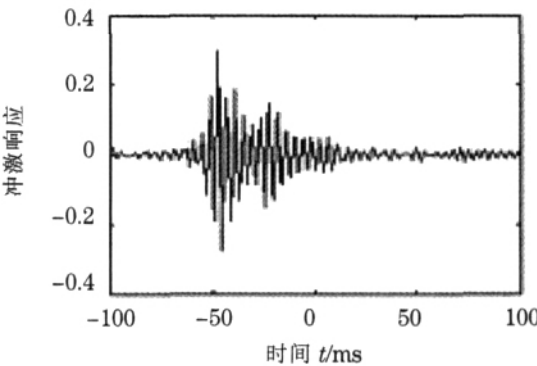


图 7 自适应系统辨识得到的管道冲激响应
Fig.7 The impulse response of a section of pipeline using adaptive system identification

线性相位 FIR 滤波器的相位滞后和群延迟在整个频带上相等且不变,它的冲激响应是中心对称的^[12]。而在图 7 中,以管道冲激响应的最大值为中心没有对称性。在多次检测中发现,漏点偏离两个传感器之间管道的中点越远,冲激响应的不对称越明显。这说明不同频率声波的传播速度不同,泄漏噪声在管道的水中传播时存在频散,信号波形发生了变化,检测到的两个信号之间不是简单的时移关系,式(2)是忽略频散的理想化模型。

6 时延估计中的信号处理

相关仪工作在有各种噪声干扰的环境中,如管道固有振动频率和工频干扰,管道转弯、三通、大小头等处水流受阻或冲击产生的声响,这些都会导致漏检和误检。通常根据管道材料等情况设置一个高通滤波器,以滤除这些频率较低的干扰^[1]。泄漏声信号在传播过程中高频部分比低频部分衰减大,使得

高频部分信噪比低甚至完全没有泄漏信号。因此如何设置滤波器的截止频率以用信噪比高的频段的信号进行时延估计是提高泄漏定位精度的关键。

根据维纳-辛钦定理, 自相关函数与自谱、互相关函数与互谱是两个傅立叶变换对。两个信号的相关性在时域内用互相关函数表示, 在频域内则用互谱。对式(3)作傅立叶变换, 得互谱

$$G_{xy}(f) = \alpha G_{ss}(f) e^{j2\pi f\tau}$$

(7)

式中 f 为频率, $G_{ss}(f)$ 为源信号 $s(k)$ 的自谱。从上式可知, 如果两个接收信号中含有一个时间延迟为 τ 的源信号, 则它们有相位差 $\theta_{xy}(f) = 2\pi f\tau$, 即在源信号的频带内, 互谱相位谱 $\theta_{xy}(f)$ 随频率呈线性变化, 它的斜率为 $2\pi\tau$ 。因此, 从两个信号之间相位关系随频率变化上可以确定源信号的频带。

互谱可表示为 $G_{xy}(f) = C_{xy}(f) + jQ_{xy}(f)$, $C_{xy}(f)$ 为共谱密度, $Q_{xy}(f)$ 为正交谱密度, 分别是互谱的实部和虚部。互谱相位谱为^[5]

$$\theta_{xy}(f) = \arctan \frac{Q_{xy}(f)}{C_{xy}(f)}$$

(8)

泄漏信号是连续、稳定的, 两个接收信号中泄漏信号的时延关系保持不变, 根据理想情况下的式(7), 在泄漏信号的频带内, 两个接收信号之间的相位变化是线性的。用得到图 2 结果的两路信号作互谱相位谱(图 8), 可以看到在 100Hz 到 1 050Hz 的频率范围内, 相位随频率近似线性变化。自适应系统辨识方法已验证了泄漏信号传播中存在频散, 但从相位谱上难以观察到频散现象。时延估计中的相位数据法就是用直线回归分析方法从相位谱拟合求解得到时延^[13], 由于干扰噪声的影响和存在频散, 在源信号的频带内相位谱不是严格的线性变化, 采用这种非线性变换方法得到的时延值会有较大误差。尽管存在噪声和频散, 在泄漏信号信噪比高的频带, 互谱相位谱的斜率没有剧烈变化, 相位仍呈某个趋势变化。而接收信号中的噪声之间没有时延关系, 在不存在泄漏信号或信噪比很低的频带内, 相位谱变化剧烈。相位谱提供了泄漏信号所在频带的信息, 据此可以设置带通滤波器的截止频率。

在信噪比低的情况下, 可以将两个接收信号分为几个数据段, 得到相对应的数据段的互谱相位谱, 几个相位谱中的相位有相同变化趋势和斜率的频段就是泄漏信号的频带。

图 9 为一次检测中对信号处理得到的相位谱, 在 200Hz 到 450Hz 之间相位都随频率有一致的变化趋势, 而其它频段的相位变化趋势都不相同。由此判断泄漏信号的频带为 200Hz 到 450Hz。

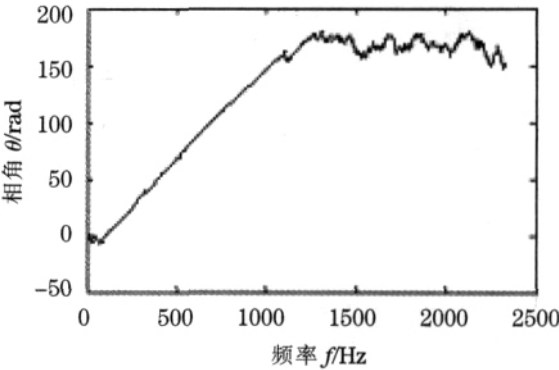


图 8 互谱相位谱
Fig.8 Phase angle spectrum

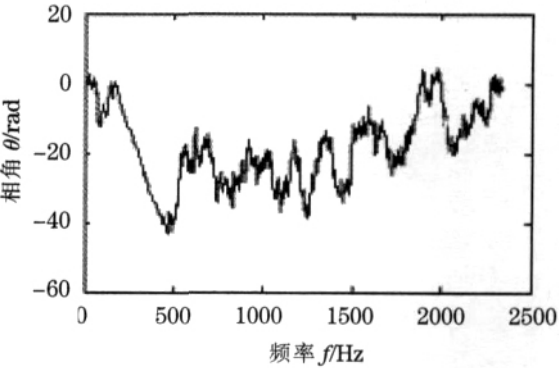


图 9 互谱相位谱
Fig.9 Phase angle spectrum

图 10 是只设置高通滤波器得到的相关系数, 其值都未超过 0.05, 也没有明显的相关峰。

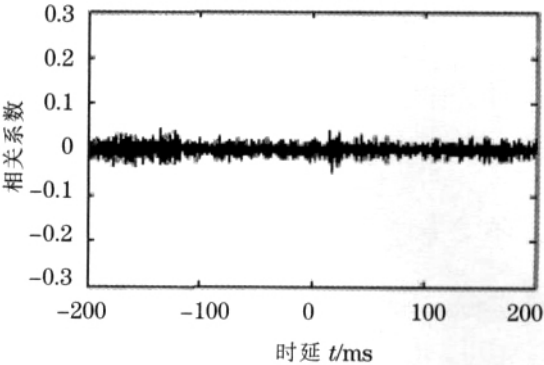


图 10 只设置高通滤波器得到的相关系数
Fig.10 Cross-correlation coefficient when only the high-pass filter is set

图 11 是根据相位谱将高、低通滤波器的截止频率分别设置为 200Hz 和 450Hz 对信号滤波后作互相关得到的相关系数, 相关峰的清晰度和数值都得到提高。

在供水管道泄漏定位检测中, 一般每次有数万甚至更多的采样点, 用式(3)直接计算互相关函数的计算量很大, 在实际应用中一般利用快速傅立叶变换(FFT): 对两个接收信号 $x(k)$ 和 $y(k)$ 作 FFT 得

到它们的离散傅立叶变换系数 $X(f)$ 和 $Y(f)$, 计算互谱 $G_{xy}(f)=X(f)Y^*(f)$, * 表示复共轭。再对 $G_{xy}(f)$ 作逆 FFT, 并作移位和无偏处理得到互相关函数的估计 $\hat{R}_{xy}(m)$, 归一化得到相关系数, 时延估计值 $\tau=-m$ 。表 1 为实际检测中采用只设置高通滤波器和根据互谱相位谱设置高通、低通滤波器两种方法的比较结果。

表 1 检测结果比较
Table 1 Comparison of detection

序号	传感器 间距 /m	漏点实 际位置 /m	相关 系数	时延值 /ms	漏点检 测位置 /m	绝对 误差 /m	相对 误差 /%
1	140.0	22.7	0.056	79.5	20.3	2.4	1.7
			0.353	74.8	23.2	0.5	0.4
2	45.0	5.0	0.065	28.6	5.7	0.7	1.6
			0.157	29.4	5.3	0.3	0.7
3	363.0	64.8	0.143	186.7	72.0	7.2	2.0
			0.324	188.8	70.8	6.0	1.7
4	65.0	2.5	0.121	55.5	2.1	0.4	0.6
			0.239	54.5	2.7	0.2	0.3
5	110.0	11.5	0.135	85.7	10.3	1.2	1.1
			0.361	85.0	10.6	0.9	0.8

表中每次检测的第一行是只设置高通滤波器的检测结果, 第二行是根据相位谱设置滤波器后得到的结果, 相对误差由绝对误差与传感器间距相比得到。管道为铸铁管, 序号 1 的管道内径为 100mm, 声速为 1 250m/s; 序号 2、3 的管道内径为 200mm, 声速为 1 173m/s; 序号 4 的管道内径为 400mm, 声速为 1 095m/s; 序号 5 的管道内径为 700mm, 声速为 1 044m/s。可以看到, 根据相位谱设置滤波器的方法提高了相关系数、减小了定位误差, 有较高的置信度。

7 结 论

正确认识泄漏声信号及其在管道中的传播特性、采用合适的检测方法和信号处理方法是提高漏点定位精度的前提。利用互谱相位谱估计泄漏信号的频带, 设置合适的滤波器截止频率, 滤除泄漏信号

频带以外的噪声, 提高了信噪比和检测结果置信度。

参 考 文 献

[1] Fuchs H V, Riehle R. Ten years of experience with leak detection by acoustic signal analysis[J]. Applied Acoustic (0003-682X), 1991, 33(1): 1-19.

[2] 孟子厚, 盛胜我, 赵松龄. 自来水管网相关检漏系统的软件设计[J]. 声学技术, 1995, 14(2): 67-72.
MEN Zihou, SHENG Shengwo, ZHAO Songling. Software design of correlation leak detection system in water pipeline[J]. Technical Acoustics, 1995, 14(2): 67-72.

[3] 周彰敏, 文玉梅. 泄漏检测应用中突发干扰对 LMS 时延估计性能的影响[J]. 声学技术, 2004, 23(3): 168-172.
ZHOU Zhangmin, WEN Yumei. Effect of burst interference on the performance of LMS time-delay estimation in leak detection[J]. Technical Acoustics, 2004, 23(3): 168-172.

[4] Knapp C H, Carter G C. The generalized correlation method for estimation of time delay[J]. IEEE ASSP (0096-3518), 1976, 24(4): 320-327.

[5] Bendat J S, Piersol A G. Engineering applications of correlation and spectral analysis[M]. New York: Wiley-Interscience, 1980. 57-62.

[6] 王宏禹, 邱天爽. 自适应噪声抵消与时间延迟估计[M]. 大连: 大连理工大学出版社, 1999. 398-406.
WANG Hongyu, QIU Tianshuang. Adaptive noise cancellation and time delay estimation[M]. Dalian: Dalian University of Technology Press, 1999. 398-406.

[7] Hunaidi O, Chu W T. Acoustical characteristics of leak signals in plastic water distribution pipes[J]. Applied Acoustics(0003-682X), 1999, 58: 235-254.

[8] 雷林源. 城市地下管线探测与测漏[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2003. 146-149.
LEI Linyuan. Detection and leakage detection of city underground pipelines[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2003. 146-149.

[9] Fuller C R, Fahy F G. Characteristics of wave propagation and energy distributions in cylindrical elastic shells filled with fluid[J]. Journal of Sound and Vibration(0022-460X), 1982, 81: 501-518.

[10] Pinnington R J, Briscoe A R. Externally applied sensor for axisymmetric waves in a fluid filled pipe[J]. Journal of Sound and Vibration(0022-460X), 1994, 173: 503-516.

[11] Widrow B, Stearns S D. Adaptive signal processing[M]. New Jersey: Prentice-Hall, 1985. 99-113, 195-224, 231-263.

[12] Oppenheim A V, Schaffer R W, Buck J R. Discrete-time signal processing[M]. New Jersey: Prentice-Hall, 1999. 291-311.

[13] Piersol A G. Time delay estimation using phase data[J]. IEEE ASSP (0096-3518), 1981, 29(3): 471-477.