

文章编号:1674-2869(2018)03-0351-04

大口径输气管道的泄漏检测及去噪

倪鸿雁¹,陈绪兵^{*2,3},胡晶宇²,杨凯²

1. 中石化节能环保工程科技有限公司,湖北 武汉 430223;

2. 武汉工程大学机电工程学院,湖北 武汉 430205;

3. 化工装备强化与本质安全湖北省重点实验室(武汉工程大学),湖北 武汉 430205

摘要:针对大口径输气管道的泄漏问题,研究了次声波泄漏检测技术及次声波信号的去噪方法。首先,以 Lighthill 方程和 FW-H 方程描述了输气管道次声波的产生机理,并通过管道两端的传感器接收到次声波信号的时间差来准确定位泄漏点。其次,建立了输气管道 FLUENT 仿真模型,模拟了发生泄漏时管道内气体的压强与流速分布,发现在模拟泄漏口附近流场出现紊乱现象,形成强烈的漩涡并产生次声波。最后,采集了榆济线实验的次声波信号,通过 MATLAB 分析计算两种去噪算法的 S_{NR} 和 R_{MSE} ,并基于小波变换法编写了管道泄漏声波去噪软件对该次声波信号进行了处理,结果表明小波变换法去噪效果优于傅里叶变换法,将小波变换法用于次声波去噪处理具有良好的效果。

关键词:次声波;输气管道;泄漏检测;去噪;小波变换

中图分类号:TE88 **文献标识码:**A **doi:**10.3969/j.issn.1674-2869.2018.03.024

Leakage Detection and Denoising of Large Diameter Gas Pipeline

NI Hongyan¹, CHEN Xubing^{*2,3}, HU Jingyu², YANG Kai²

1. Sinopec Energy and Environmental Engineering Co., LTD, Wuhan 430223, China;

2. School of Mechanical and Electrical Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, China;

3. Hubei Key Laboratory of Chemical Equipment Intensification and Intrinsic Safety (Wuhan Institute of technology),
Wuhan 430205, China

Abstract: Aiming at the leakage problem of large diameter gas pipeline, we studied the infrasonic leakage detection technology and the denoising method of infrasonic signal. Firstly, the Lighthill equation and the FW-H equation were used to describe the generation mechanism of infrasonic wave in gas pipeline. The leakage point was accurately located by a sensor receiving the time difference of the infrasonic signals at both ends of the gas pipeline. Secondly, the FLUENT simulation model was established to simulate the pressure and velocity distribution of gas in the pipeline. It was found that the flow field was disorganized near the simulation leakage. A strong whirlpool and infrasonic waves were produced. Finally, the infrasonic signals of Yuji gas pipeline were collected, and the SNR and RMSE of two denoising algorithms were calculated by MATLAB. Based on wavelet transform, the infrasonic denoising software for gas pipeline leakage was compiled to deal with the infrasonic signals. The results showed that the denoising effects of wavelet transform were better than those of Fourier transform.

Keywords: infrasonic wave; gas pipeline; leakage detection; denoising; wavelet transform

收稿日期:2017-02-24

基金项目:湖北省自然科学基金(2014CFB790)

作者简介:倪鸿雁,硕士,高级工程师。E-mail:nihongyan139@qq.com

*通讯作者:陈绪兵,博士,教授。E-mail:chen.xubing@qq.com

引文格式:倪鸿雁,陈绪兵,胡晶宇,等.大口径输气管道的泄漏检测及去噪[J].武汉工程大学学报,2018,40(3): 351-354.

管道运输凭借成本低、可靠性高等优势已成为石油、天然气等能源物质主要的运输方式之一。而石油、天然气具有易燃易爆等特点,在进行管道运输时具有一定的泄漏风险,特别对于天然气,一旦发生泄漏,容易导致人员伤亡、环境破坏以及经济损失等重大问题^[1-2]。因此,为了降低管道运输风险,国内外油气企业、相关科研院所均开展了输气管道泄漏检测技术研究。

次声波泄漏检测技术是近年来研究的热点之一。如阚玲玲等^[3]基于声学 and 流体力学等理论,研究了天然气管道发生泄漏时次声波产生的机理、信号特点和采集方法。Muggleton等^[4]提出了由泄漏产生的声振耦合频散效应,发现传播距离对次声波的衰减影响不大。王少锋等^[5]通过对采集的泄漏信号进行小波降噪和重构后进行互相关分析定位泄漏源的位置。

本文从理论上分析了输气管道泄漏时次声波的产生机理与泄漏点的定位原理,并对管道内流场进行了 FLUENT 仿真分析,最后编写了管道泄漏声波去噪软件验证了小波变换法的去噪效果。

1 次声波产生机理与泄漏点定位原理

1.1 次声波产生机理

由于输气管道运行压力较高,当泄漏发生时,气体从泄漏点喷射流出,管道内气体产生压力和速度脉动,并在泄漏点附近形成强烈的湍流而产生喷射四极子声源。同时,因管道内存在阀门、弯头等扰流附件,气体在管道内传播时还会伴随产生偶极子声源。四极子声源与偶极子声源相互叠加,最终在管道内产生声波波动信号^[6-9]。不同频率的声波在管道中传播存在较大的差异性,其中次声波信号凭借在远距离传输时不易产生衰减的特点被广泛应用于输气管道泄漏检测。

借助声比拟理论,并通过 FW-H 方程和 Light-hill 方程可以描述输气管道泄漏时声波的产生和传播规律:

$$\frac{\partial^2(\rho - \rho_0)}{\partial t^2} - c_0^2 \nabla^2(\rho - \rho_0) = \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} T_{ij} \quad (1)$$

$$T_{ij} = \rho v_i v_j + p_{ij} - c_0^2(\rho - \rho_0) \delta_{ij} \quad (2)$$

$$p_{ij} = p_0 \delta_{ij} - t_{ij} \begin{cases} \delta_{ij} = 1, & \text{if } (i=j), \\ \delta_{ij} = 0, & \text{if } (i \neq j). \end{cases} \quad (3)$$

式(1)~(3)中: ρ 为管道气体密度; ρ_0 为自由气体的密度; c_0 为传播速度; δ_{ij} 为克罗内克符号; p_0 为流场静压; p_{ij} 为压力张量; v_i 、 v_j 为速度分量;

t_{ij} 为黏滞应力。

式(2)中 T_{ij} 为全空间内气体密度的动态情况,当管道未发生泄漏时,等式右边声源项为零,则表示无自发声波的解;当管道发生泄漏时,由于气体射流流场产生紊乱现象,即 $\rho v_i v_j$ 项不为零,必然有次声波产生。

1.2 泄漏点定位原理

当管道发生泄漏时,泄漏点产生的次声波信号沿管道向两端传播,并被布置在管道两端的次声波传感器实时接收,提取次声波传感器接收到的泄漏特征信号,以识别是否发生泄漏,并根据次声波信号到达管道两端的时间差,计算泄漏点的具体位置,输气管道泄漏点定位原理如图1所示。

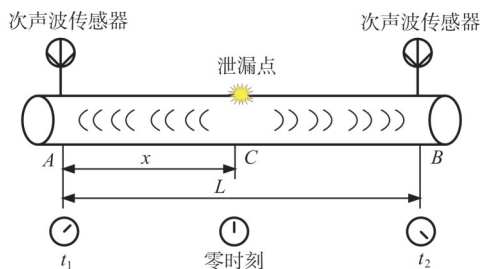


图1 管道泄漏点定位原理

Fig. 1 Location principle of pipeline leakage point

假设首站传感器所在位置为A,末站传感器所在位置为B,其间的距离为L,泄漏点为C,A与C之间的距离为x,同一泄漏的次声波信号从C点传到A点的所用时间为 t_1 ,从C点传到B点的所用时间为 t_2 ,则:

$$\begin{cases} t_1 = x/v \\ t_2 = (L-x)/v \\ \Delta t = t_1 - t_2 \end{cases} \quad (4)$$

若次声波在管道中的传播速度为 v ,则泄漏点的位置可以表示为:

$$x = (L + v\Delta t)/2 \quad (5)$$

2 输气管道泄漏流场仿真

以新疆煤制气外输管道工程(新粤浙)长输气管道为参考模型,建立了管道泄漏仿真模型如图2所示,该仿真模型管道长2 000 mm,管径1 210 mm,壁厚26.4 mm,管道内气体流速约为12.7 m/s,管道泄漏呈现大口径、高流速、强干扰等特性。

利用 FLUENT 软件可以对管道内部的流态进行模拟,得到管道内的气体压强和流速分布如图3~图4所示。

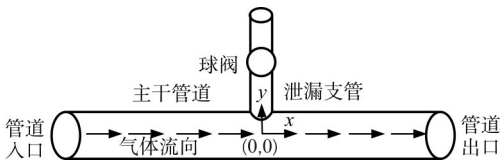


图2 输气管道仿真模型
Fig. 2 Simulation model of gas pipeline

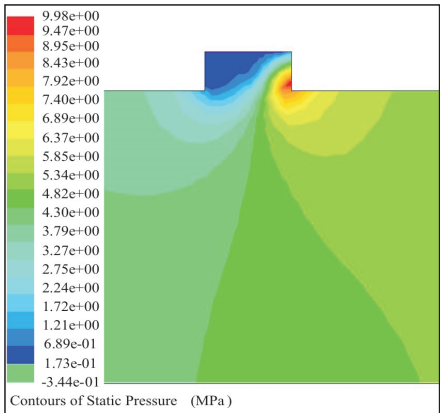


图3 管道内气体压强分布
Fig. 3 Distribution of gas pressure in pipeline

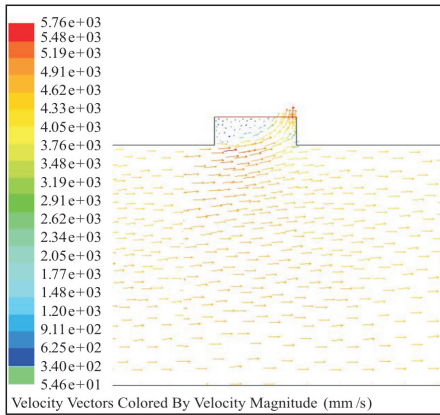


图4 管道内气体流速分布
Fig. 4 Distribution of gas velocity in pipeline

从仿真结果可以看出,当管道发生泄漏时,主管道和支管连接处靠近下游一侧气体压强偏大,气体在阀门前被压缩,达到一定压力后喷射流出,这种周期性的重复在支管内形成强烈的漩涡,根据涡声理论^[10],管道内势必有声波产生;同时,主管道和支管连接处靠近上游一侧流速减缓,泄漏口附近流场产生紊乱现象,而远离泄漏口的主干管道中心以及主管道下部仍然呈现层流特征,这与管道直径较大有一定关系。由于泄漏时存在复杂紊乱的流场,必然会产生强干扰噪声,因此需要深入研究次声波信号的去噪方法。

3 次声波信号的去噪方法

输气管道发生泄漏,泄漏气体冲击管道会产生振动。同时,管道运行时的正常操作如泵的调

节和开闭、阀门的启闭与切换等也会引起振动噪声。由于噪声信号的存在,使得次声波信号分辨率降低,降低了检测系统的灵敏度^[11-13]。因此,有必要对检测到的混杂振动信号进行分析,通过相关的信号处理,有效消除管道的背景噪声和已知干扰信号,抑制混杂振动信号中的噪声对泄漏检测信号影响,增大泄漏检测信号的信噪比。

次声波信号的降噪处理通常采用傅里叶变换法和小波变换法^[14-15]。小波变换法是由傅里叶变换发展而来的,其母函数的构造及分析都是在傅里叶变换的基础上产生的,所以它具有很多原始算法不具备的优势。傅里叶变换法和小波变换法去噪流程对比如图5所示。

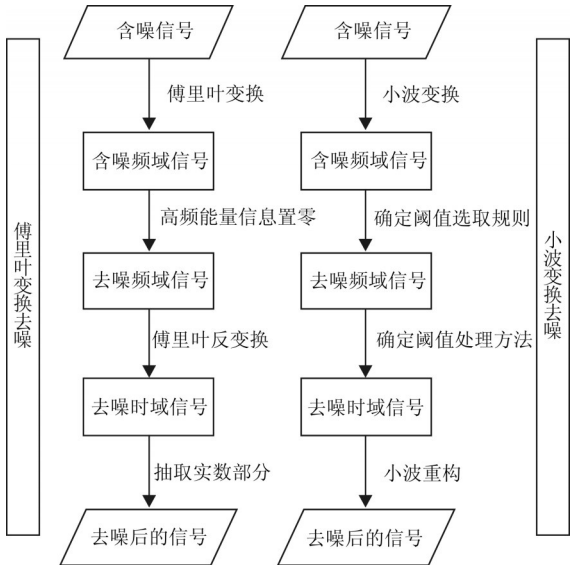


图5 傅里叶变换法和小波变换法去噪流程对比图
Fig. 5 Comparison of Fourier transform and wavelet transform denoising processes

对两种算法的去噪效果进行定量分析,可以从信噪比(S_{NR})及均方根误差(R_{MSE})两个指标进行比较。 S_{NR} 越大, R_{MSE} 越小,则信号去噪效果越好。计算公式如下:

$$S_{NR} = 10 \lg \left[\frac{\sum_n x^2(n)}{\sum_n [x(n) - \hat{x}(x)]^2} \right] \tag{6}$$

$$R_{MSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_n [x(n) - \hat{x}(n)]^2} \tag{7}$$

式(7)中: $x(n)$ 为实际无噪声信号; $\hat{x}(n)$ 为去噪方法处理后的估计信号; n 为采集信号数。

通过实验采集榆林到济南输气管线(榆济线)泄漏实验的次声波信号,通过MATLAB分析计算两种去噪算法的 S_{NR} 和 R_{MSE} ,结果如表1所示。

表 1 两种去噪算法的 S_{NR} 和 R_{MSE}
Tab. 1 S_{NR} and R_{MSE} of two denoising algorithms

算法	指标	
	S_{NR}	R_{MSE}
傅里叶变换	17.68	0.865
小波变换	20.62	0.421

由分析可知,小波变换法去噪效果明显优于傅里叶变换法。基于以上理论,设计并开发了管道泄漏声波去噪软件,该软件极大的减轻了信号处理的工作量,具有运用简便,计算准确等特点。将该软件对榆济线采集的 WAV 格式次声波信号进行处理,获得处理后的信号波形图,并通过 GDI+技术在软件界面中显示,如图 6 所示。

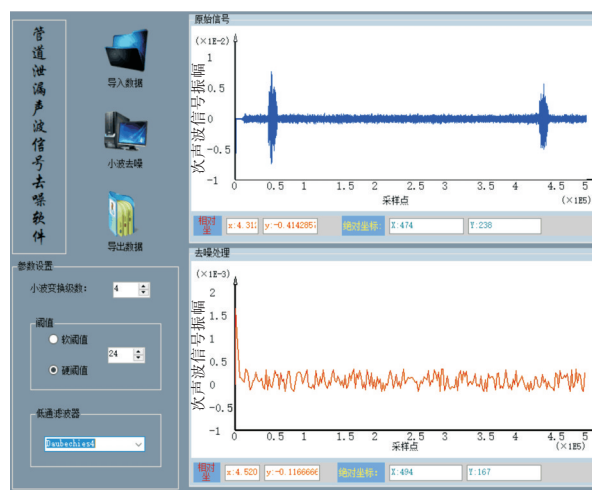


图 6 次声波信号软件去噪图

Fig. 6 Software denoising of infrasonic signal

以上去噪效果表明,小波变换法能够有效处理复杂背景下的非平稳强噪声信号。因此,将小波变换法用于输气管道泄漏产生的次声波信号进行去噪处理,具有良好的效果。

4 结 语

- 1)采用次声波法能够有效检测输气管道泄漏,并准确定位泄漏点。
- 2)FLUENT 仿真结构表明,当管道发生泄漏时,模拟泄漏口附近流场出现紊乱现象,并形成强烈的漩涡,必然会产生次声波和强干扰噪声。
- 3)小波变换去噪效果优于傅里叶变换法,将小波变换法用于输气管道泄漏的次声波去噪处理具有良好的效果。

参考文献:

[1] 刘翠伟,李玉星,王武昌,等. 输气管道泄漏音波产

生机理研究[J]. 振动与冲击, 2013, 32(7): 17-23.

[2] 金浩,张来斌,梁伟,等. 天然气管道泄漏声源特性及传播机理数值模拟[J]. 石油学报, 2014, 35(1): 172-177.

[3] 阙玲玲,梁洪卫,高丙坤,等. 基于次声波的天然气管道泄漏检测系统设计[J]. 化工自动化及仪表, 2011(6): 653-655.

[4] MUGGLETON J M , BRENNAN M J. The design and instrumentation of an experimental rig to investigate acoustic methods for the detection and location of underground piping systems [J]. Applied Acoustics, 2008, 69(11): 1101-1107.

[5] 王少锋,刘朋真,王建国. 基于小波分解的压力管道泄漏源定位研究[J]. 内蒙古科技大学学报, 2016 (3): 260-263,283.

[6] 陈池,赵会军,姜岩,等. 基于次声波的天然气管道泄漏检测[J]. 油气田地面工程, 2013, 32(4): 72-73.

[7] 王朝晖,张来斌,辛若家,等. 声发射技术在管道泄漏检测中的应用[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2007, 31(5): 87-90.

[8] ALMOHAMMADI K M , INGHAM D B , MA L, et al. Computational fluid dynamics (CFD) mesh independency techniques for a straight blade vertical axis wind turbine [J]. Energy, 2013(58): 483-493.

[9] JALILINASRABADY S, PALSSON H, SAEVARSD-OTTIR G. Experimental and CFD simulation of heat efficiency improvement in geothermal spas[J]. Energy, 2013,56: 124-134.

[10] YUAN L B, ZHOU L M, JIN W. Detection of acoustic emission in structure using Sagnac-like fiber-loop interferometer [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2005, 118(1): 6-13.

[11] 付俊涛,李玉星,孟令雅,等. 输气管道泄漏音波与干扰信号特征提取[J]. 石油化工高等学校学报, 2012, 25(2): 53-60.

[12] 林伟国,王晓东,戚元华,等. 管道泄漏信号和干扰信号的数字化判别方法[J]. 石油学报, 2014, 35(6): 1197-1203.

[13] 郭世旭,刘胜,陈秀丽,等. 管道微小泄漏内检测近场声信号特性研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2016(6): 834-844.

[14] 梁伟,张来斌,郭磊. 大口径天然气管道音波信号的降噪方法[J]. 振动、测试与诊断, 2012, 32(6): 970-974,1037.

[15] 方丽萍,刘翠伟,梁金禄. 输气管道泄漏音波和干扰信号基本特性检验[J]. 钦州学院学报, 2016(4): 14-20.