

文章编号: 0253-2697(2014)01-172-06 DOI:10.7623/syxb201401022

天然气管道泄漏声源特性及传播机理数值模拟

金 浩 张来斌 梁 伟 叶迎春 丁其坤

(中国石油大学油气安全工程技术研究中心 北京 102249)

摘要:管道泄漏声源特性和传播机理决定了音波法在管道上的可检测性,管道泄漏引发的音波能量大小和其沿管道传播的衰减程度分别与泄漏口径大小、管道内压和管道长度等因素有关。以天然气管道泄漏时的气动噪声为研究对象,采用适用于高马赫数流场的 Möhring 声类比对其进行模拟计算,建立了不同压力、不同泄漏孔径条件下的天然气管道泄漏噪声仿真模型,得到了天然气管道泄漏声源的相关特性,利用试验数据验证了计算模型的准确性。以该声源模型为基础,建立了音波在管道内的二维传播模型,通过模拟结果与现场试验的比较分析,表明天然气管道泄漏音波的超低频段(低于 5 Hz)可在管道内传播较远距离并能被声波传感器所探测,从理论上验证了音波法在天然气管道泄漏检测领域的良好应用前景。

关键词:管道泄漏;音波法;Möhring 声类比;气动声学;仿真模型

中图分类号:TE973.6

文献标识码:A

Simulation research on leak source characteristics and propagation mechanism for natural gas pipeline

Jin Hao Zhang Laibin Liang Wei Ye Yingchun Ding Qikun

(Research Center of Oil and Gas Safety Engineering Technology, China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

Abstract: The detectability of acoustic methods for pipeline leakage is jointly determined by the characteristics of acoustic sources and the propagation mechanism of acoustic signals. The acoustic energy caused by pipeline leakage and the attenuation of its propagation along the pipeline are respectively related to the size of leakage hole and the operation pressure and length of pipeline. The aero-acoustic noise generated by pipeline leakage is simulated by using Möhring acoustic analogy, and an aero-acoustic simulation model for gas pipeline leakage associated with different pressures and leak-hole sizes are established. The characteristics of acoustic source in pipeline leakage are obtained, and the accuracy of the proposed simulation models is validated with experimental data collected with the pipeline leakage simulation platform. The aero-acoustic simulation model is then used to establish a two-dimensional propagation model for acoustic waves in pipeline, and the simulated data are compared with field data for validation. The results show that acoustic waves of ultralow frequency (< 5 Hz) can propagate in pipeline for a long distance and are capturable by acoustic sensor. The acoustic methods have a great application prospect in gas pipeline leak detection theoretically.

Key words: pipeline leakage; acoustic method; Möhring acoustic analogy; aero-acoustics; simulation model

输气管道在连续运行过程中,由于管壁受到腐蚀、冲刷、高压作用,加之第三方破坏等因素,管道破裂或穿孔等事故时有发生,严重威胁管道安全。在目前已有的天然气管道泄漏检测方法中^[1],音波法逐渐成为研究热点^[2-5]。国内外在此方面研究中主要集中在油气管道泄漏音波信号的预处理、特征提取和泄漏信号识别等方面^[6-9],对天然气管道泄漏声源特性^[10]及泄漏音波沿天然气管道传播衰减规律^[11]的研究却相对欠缺。

天然气管道泄漏噪声属于气动噪声,目前国内外

解决气动声学数值计算问题主要有直接计算^[12]、混合方法^[13,14]和半经验模型 3 种策略。天然气管道泄漏流场具有高马赫数和高雷诺数的特性,常用的 Lighthill 声类比方法不能很好地解决高速流场的声学模拟问题。针对目前国内外对天然气管道泄漏声源和声传播规律研究的不足,笔者采用混合方法中的 Möhring 声类比方法对天然气管道泄漏声源特性及传播机理进行了数值模拟分析,并将模拟结果与试验结果相比较,取得了良好的吻合效果,证明了此方法的准确性。

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 51005247)、北京市科技新星计划项目(2010B068)、中国石油科技创新基金项目(2012D-5006-0605)和中国石油大学(北京)基金项目(KYJJ2012-04-25)资助。

第一作者及通信作者:金浩,男,1986年10月生,2009年获北京理工大学学士学位,现为中国石油大学(北京)博士研究生,主要从事油气管道安全监测与智能诊断方面的研究。Email:jinhao19861018@126.com

1 CFD 仿真模拟

1.1 物理模型的建立及网格划分

管道泄漏物理模型^[15]包括 2 个部分:管道内部和泄漏喷流区(图 1)。模型中管段总长为 0.2 m,管径为 0.16 m,泄漏口位于管道中间正上方,泄漏喷流区的长度约为孔径长度的 5 倍。笔者采用 Gambit 软件建立模型并划分网格,为了能够精确计算泄漏口附近的流场参数,对泄漏口附近的网格进行了加密处理,整个模型的网格数目约为 $(50\sim 100)\times 10^4$ 个。

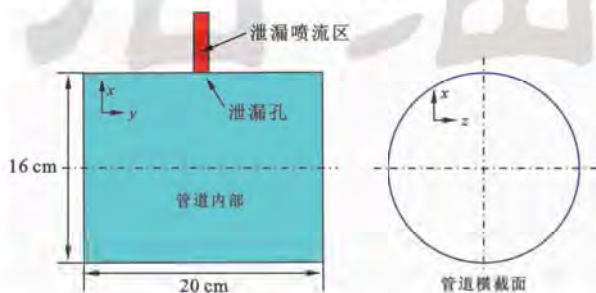


图 1 管道物理模型及坐标系

Fig. 1 Physical model and coordinate system of pipeline

1.2 CFD 模拟参数设置

CFD 模拟过程包括 2 部分:稳态模拟和瞬态模拟。稳态湍流模型采用标准 $k-\epsilon$ 方程,瞬态湍流模型采用大涡模拟。数值模拟的关键参数设置如下:管内介质是甲烷和乙烷组成的混合气体(甲烷、乙烷分别占 96% 和 4%)^[16];管道压力共设置 5 种情况,分别为:0.3 MPa、0.4 MPa、0.5 MPa、0.6 MPa 和 0.7 MPa;边界条件为:管道入口边界为压力进口,管道出口边界和泄漏喷口末端端面为压力出口,泄漏孔为内部面,其余各面设置为固面;管道入口和出口的湍流强度设置为 2.5%,泄漏口的湍流强度为 3%^[10]。

天然气管道泄漏产生的声音频率范围较广,频率范围为 2~15 KHz^[17],因为高频信号沿管道衰减极快,所以笔者针对中低频信号(0.5~500 Hz)的特性及传播规律开展研究。为了使模拟频率范围能够覆盖研究频段,模拟总时间为 2 s,时间步长设为 0.001 s,每步迭代 200 次。

1.3 CFD 仿真结果

压力为 0.7 MPa,泄漏孔径为 1 cm 时泄漏流场的压力云图和速度云图如图 2 所示。从图中可以看出当管道发生泄漏时,泄漏口附近压力由 0.7 MPa 迅速降低至 0.4~0.5 MPa,压降区域很小,跟泄漏孔径大小相当。泄漏口附近及喷注的平均速度已经接近甚至超过声速,最大速度达到 540 m/s(马赫数为 1.58),属于超音速,因此天然气管道泄漏噪声主要是由高速的喷

注引起,其声源主要包括单极子、偶极子和四极子声源。由于四极子能量与马赫数的平方成正比,单极子和偶极子声源与气体质量相关,在高速流场中可以忽略不计,所以天然气管道泄漏声源可以近似看成是由四极子声源引起的。

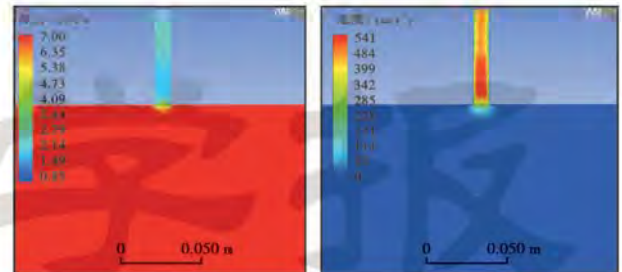


图 2 泄漏口附近流场压力云图和速度云图(管线压力为 0.7 MPa,泄漏孔径为 1 cm)

Fig. 2 Pressure and velocity cloud map near the leak hole (pressure is 0.7 MPa, leakage aperture is 1 cm)

2 天然气管道泄漏声源特性及传播机理模拟

2.1 天然气管道泄漏声场仿真模型

由 Lighthill 波动方程^[18]可知,声源是由流场密度、质点速度等因素决定。天然气管道发生泄漏时,管内天然气在巨大的压差作用下从泄漏孔喷出,产生的气动噪声沿管道内介质进行传播,声源主要包括以下 3 个方面:①高速气体喷注到静止或者相对低速的外部气体中,两种具有较大速度差的气体介质急剧混合,在边界层上形成湍流脉动并产生强喷流噪声;②喷注的速度极大,喷注气流本身会产生大量的漩涡而形成湍流,此时喷流气体本身成为声源,产生强湍流噪声;③泄漏口附近的高速度梯度区产生的强湍流噪声。设置泄漏声场模型如图 3 所示:

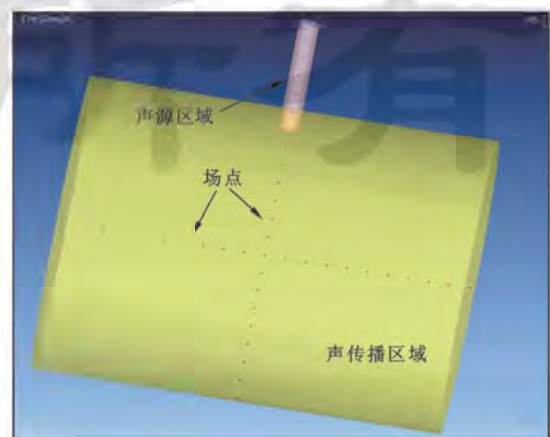


图 3 天然气管道泄漏声场仿真模型

Fig. 3 Gas pipeline leakage acoustic field simulation model

声源区域包括2部分:泄漏喷注区和泄漏口附近处。管道内部区域为声传播部分。在声源和声传播区域的中轴线布置大量场点,在场点上安装虚拟麦克风,对每个场点的相关声学量进行计算,分析研究泄漏声源处和声音传播频谱特性。应用ACTRAN声学软件对泄漏声场进行数值仿真计算,研究天然气管道泄漏声源特性及传播规律,具体流程如图4所示:

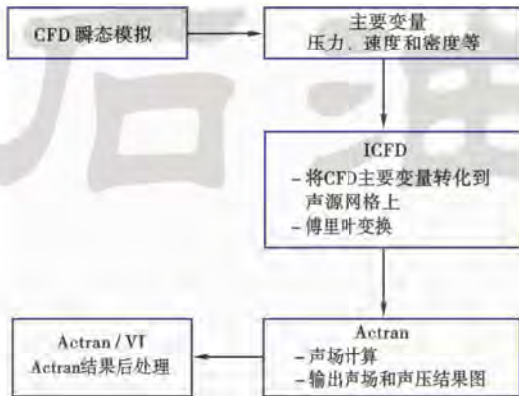


图4 声源声场模拟流程

Fig. 4 Sound field of sound source simulation process

2.2 Möhring 声类比

Möhring 声类比能够精确提取高马赫数和高雷诺数流场中的等效声源,从而对非线性声场和非均匀介质声传播进行精确计算,此外还考虑了音波与气流的相互作用。Möhring 声源项包括 Möhring 体声源项 R_v 和面声源项 R_s ,可分别表达为如下形式:

$$R_v =$$

$$\int_V \frac{\partial N_n}{\partial x} \text{FFT} \left[\frac{\rho}{\rho_0} \left(\omega v - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} - \frac{u}{\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial s} \right)_n \frac{\partial s}{\partial t} + \frac{\rho T}{\rho_0} \frac{\partial s}{\partial x} \right] dV + i\omega \text{FFT} \left\{ \int_V \left[\frac{N_n}{\rho_0} \left(\frac{\partial \rho}{\partial s} \right)_n \frac{\partial s}{\partial t} - \frac{\rho u_i N_n}{\rho_0^2} \frac{\partial \rho_T}{\partial x} \right] dV \right\} \quad (1)$$

$$R_s = i\omega \text{FFT} \left(\int_V N_n \frac{\rho u \cdot n_i}{\rho_0} dS \right) \quad (2)$$

式中: N_n 为有限元的形函数; ρ 和 ρ_0 分别为静密度和滞止密度, kg/m^3 ; u, v, w 分别为 y 轴和 z 轴方向的速度分量, m/s ; τ_{ij} 为黏性应力张量 ($i=1,2,3; j=1,2,3$), $\text{N}\cdot\text{s/m}^2$; s 代表熵, J/K ; ω 为角速度, rad/s ; n_i 为积分面法向单位矢量; T 是温度, K 。其中和 $\frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j}, \frac{\partial s}{\partial t}, \frac{\partial \rho_T}{\partial x_i}$ 有关的项分别代表黏性效应、熵变和密度波动,对于高速流场可以忽略不计。

2.3 天然气管道泄漏声源模拟结果及分析

2.3.1 不同管道运行参数声源特性影响分析

图5、图6分别为泄漏孔中心处场点在不同压力、相同泄漏孔径和相同压力、不同泄漏口径条件下的泄

漏声波频谱图,表1和表2为对应声压特征值统计,由此可得:

(1) 天然气管道泄漏产生的湍流气动噪声能级很大,泄漏音波产生后即向管道的上、下游迅速传播,在黏性不太大而频率不太高时,声波吸收系数与频率平方成正比^[19],因此低频声波能传播较远的距离,可作为泄漏检测的特征信号,理论上存在音波远距离检测泄漏和定位的可能性。

(2) 天然气管道泄漏噪声是一种宽频噪声,噪声能量主要集中在低频部分,约为 $0\sim 50\text{ Hz}$,声波频率越低,能量越高,声波能量随着频率的增加呈震荡衰减趋势。

(3) 泄漏噪声能量随着管道内压和泄漏孔径的增大而增大,但趋势有所不同,能量级增加量随着内压的

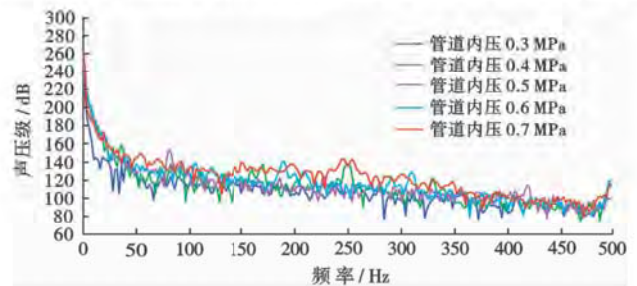


图5 不同管道内压下声压频谱(泄漏孔径为1 cm)

Fig. 5 Sound pressure spectrum figure under different pipeline pressures (leakage aperture is 1 cm)

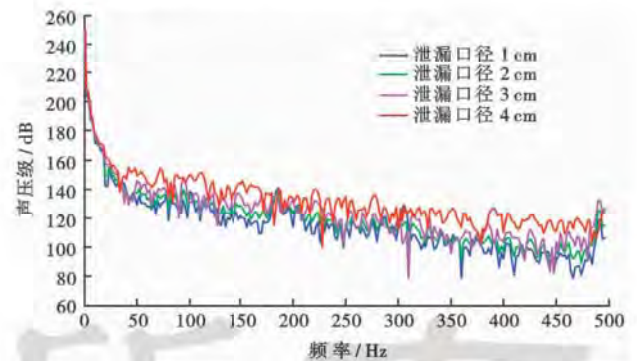


图6 不同泄漏孔径声源声压频谱(管线压力为0.7 MPa)

Fig. 6 Sound pressure spectrum figure under different leak hole sizes (pipeline pressure is 0.7 MPa)

表1 不同管道内压下声压特征值比较

Table 1 Comparison of sound characteristic value under different pipeline pressures

管道内压/ Mpa	总声压级/ dB	积分/dB	均值/dB	最大声压/ dB
0.3	215.9015	55 536.570 9	112.198 3	212.564 5
0.4	227.6438	56 482.008 1	113.647 3	227.529 7
0.5	227.8800	56 802.317 6	114.291 8	227.718 4
0.6	238.1917	57 539.668 8	116.245 0	238.141 6
0.7	238.2063	60 757.292 8	122.745 5	238.196 8

表 2 不同泄漏口径下声压特征值比较

Table 2 Comparison of sound characteristic value under different leak hole sizes

泄漏孔径/ cm	总声压级/ dB	积分/dB	均值/dB	最大声压/ dB
1	238.2063	60757.2928	122.7455	238.1968
2	242.7446	69098.4337	127.0544	243.1881
3	245.0625	71191.0682	129.6956	248.2345
4	246.2870	74494.4112	132.9065	250.3212

增大而增大,随泄漏孔径增大逐渐减小,说明噪声能量主要与流场密度波动、脉动压力变化、速度梯度变化等参数有关。

2.3.2 试验结果对比

为验证模拟结果的准确性,在油气管道泄漏模拟实验台上进行了近似工况条件下的试验研究。模拟实验所用管线内径为 20 cm、设计最大压力为 0.8 MPa,沿管线均匀布置了若干手动控制泄漏阀,孔径大小有 1 cm、2 cm 和 3 cm 3 种类型,管道流程如图 7。

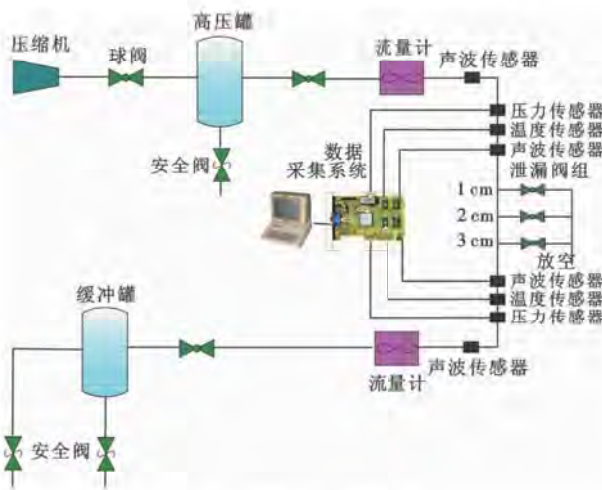


图 7 输气管线流程

Fig. 7 Gas pipeline flow chart

数据采集卡采用美国国家仪器公司的 PXI-4472 型数据采集卡,可同步采集 8 路模拟信号,音波传感器采用美国 PCB 公司的 106B51 型动态压力传感器,数据采集频率为 1000 Hz。利用 welch 法计算不同泄漏工况下的泄漏音波的功率谱密度,结果如图 8、图 9 所示。

图 8、图 9 和图 5、图 6 相比较,曲线的趋势基本一致,试验中通过音波传感器采集的音波数据计算所得声压级与仿真模拟结果处于同一数量级。由于试验条件所限,传感器无法布置到声源的中心处,因此试验数据的量值要小于仿真数据,但仿真数据得出的相关结论在试验数据上都能得到体现,这说明笔者的数值模

拟方法得当,可以对输气管道的泄漏噪声特性进行分析,并可为现场试验提供相关理论依据。

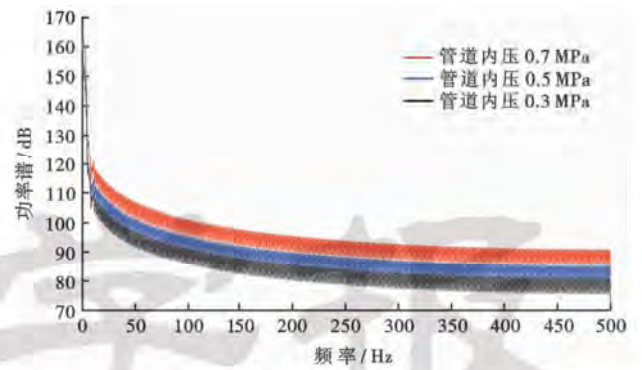


图 8 不同压力下泄漏声波功率谱(泄漏口径为 1 cm)

Fig. 8 Comparison of power spectrum between different pipeline pressure(leakage aperture is 1 cm)

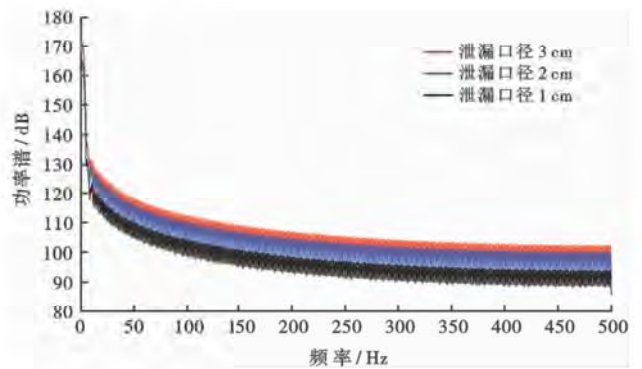


图 9 不同泄漏孔径下泄漏声波功率谱(管道内压为 0.7 MPa)

Fig. 9 Comparison of power spectrum between different leakage aperture(pipeline pressure is 0.7 MPa)

2.4 天然气管道泄漏音波传播规律

2.4.1 天然气管道泄漏音波传播模型

基于泄漏声场模型建立远距离声传播模型,声传播部分的长度为 3 km。为了减少计算量,采用二维模型来代替三维模型进行声传播计算分析,二维声场模型为经过管道中心线和泄漏孔中心点的平面,如图 10 所示。由于 CFD 结果为三维模型求解,为保证模拟的可靠性,在 ACTRAN 设置中定义了从 2 mm 厚度的 CFD 结果中提取结果,这样可以捕捉到湍流涡,进而保证了声传播模拟的准确性。



图 10 远距离声传播模型

Fig. 10 Long acoustic propagation model

图 11 为定义的场点中距离泄漏孔 0 km、0.5 km、1 km、2 km 和 3 km 位置处场点的声压频谱图。由于音波的扩散、散射和输送介质吸收等因素,音波在管道内部介质传播过程中发生衰减现象,随着传输距离的增加,各个频率的音波能量逐渐降低,并且高频部分衰减速度明显高于低频部分,泄漏口近处衰减比泄漏口远处衰减要快。

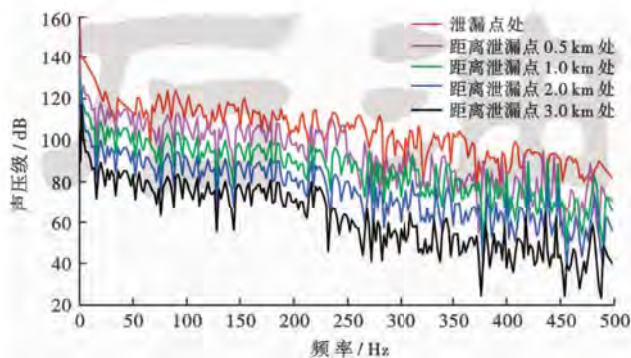


图 11 距离泄漏孔不同距离下场点声压频谱

Fig. 11 Field points spectrum figure under different distances from leak hole

2.4.2 试验结果对比

天然气管道泄漏声波传播规律验证试验是在中石油某研究中心的环形测试平台上完成。该平台包括一条长约 3 km 的环形埋地管道,管线的管径为 168 mm,管线压力约为 0.7 MPa。沿管线一共布置了 2 处泄漏点,其中泄漏点 1 分别距进站口和出站口约为 0.5 km 和 2.5 km,泄漏点 2 分别距进站口和出站口约为 1 km 和 2 km。在管道首、末端分别安装音波传感器,采集管道泄漏噪声传播 0.5 km、1 km、2 km 和 2.5 km 后的残余声波,图 12 为现场采集到的声波信号频谱图。

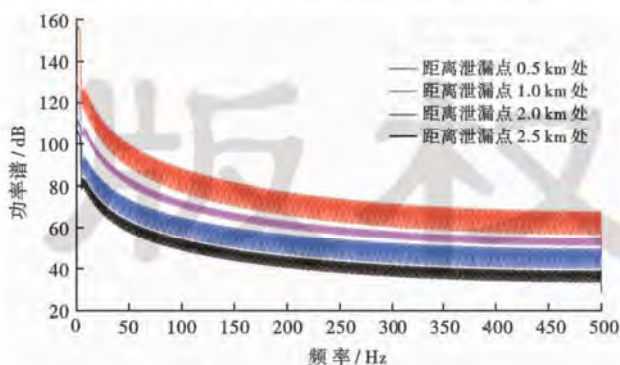


图 12 声传播现场测试采集的泄漏声波频谱

Fig. 12 Spectrum figure of leak acoustic waves in field test for sound propagation

鉴于实验条件所限,试验采集的泄漏声波传播距离与模拟条件并不完全相同,但通过比较图 11 和图 12 可以发现两者的曲线趋势基本一致,尤其是在 0~

10 Hz 频段,声波功率谱与真实情况基本吻合,其余频段声波量级略低于真实情况。模拟和现场验证试验说明天然气管道泄漏声波中的低频部分(低于 5 Hz)传播距离较远,可作为天然气泄漏诊断的特征频率,这可有效排除其他噪声的干扰(如电磁噪声的主频率在 50 Hz,外界干扰噪声主要集中在 20~20000 Hz),所以音波法适合于长输天然气管道泄漏检测。

3 结论

(1) 对音波法在天然气管道泄漏检测上的可检测性方面进行了模拟实验研究,建立了不同压力、不同泄漏孔径下的管道泄漏物理计算模型。

(2) 采用计算流体力学软件进行瞬态模拟,得到了三维天然气管道泄漏流场的计算结果。研究表明,对于高压天然气管道,泄漏产生的喷注速度接近甚至超过音速,因此天然气管道泄漏声源可以近似看成是由四极子声源引起的。

(3) 建立了天然气管道泄漏声源仿真模型,基于 Möhring 声类比方法提取流场中的等效声源,对天然气管道泄漏声源声场进行精确计算,并在声源内布置可定量求解声场参量的场点,得到声源声场的相关特征值,并与实验室的管道泄漏模拟实验台采集的数据进行对比分析,验证了该模型的准确性和可靠性。

(4) 基于声源模型建立了天然气管道泄漏声波传播模型,得出不同频率声波随传播距离的衰减规律,通过与近似工况下采集到的天然气管道泄漏声波信号功率谱图对比分析,验证了传播模型的可靠性,并得出低于 5 Hz 频段声波可传输较远距离,合理布置声波传感器可以满足管道泄漏检测的要求,从理论上验证了音波法在天然气管道泄漏检测上的可行性。

参考文献

- [1] Murvay P S, Silea I. A survey on gas leak detection and localization techniques[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2012, 25(6): 966-973.
- [2] Meng Lingya, Li Yuxing, Wang Wuchang, et al. Experimental study on leak detection and location for gas pipeline based on acoustic method[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2012, 25(1): 90-102.
- [3] Yang Zhao, Xiong Z, Shao Min. A new method of leak location for the natural gas pipeline based on wavelet analysis[J]. Energy, 2010, 35(9): 3814-3820.
- [4] Xu Qingqing, Zhang Laibin, Liang Wei. Acoustic detection technology for gas pipeline leakage[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2013, 91(4): 253-261.
- [5] 叶迎春, 张来斌, 梁伟. 天然气管道泄漏音波序列局部投影降噪研究[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2010, 34(1): 118-124.

- Ye Yingchun, Zhang Laibin, Liang Wei. Study of noise reduction of natural gas pipeline leakage acoustic series by local projection [J]. Journal of China University of Petroleum; Edition of Natural Science, 2010, 34(1): 118-124.
- [6] 赵立强, 王建林, 于涛, 等. 基于二代小波变换和多级假设检验的输油管道缓泄漏检测方法[J]. 石油学报, 2012, 33(5): 898-903.
- Zhao Liqiang, Wang Jianlin, Yu Tao, et al. A detection method for slow leakage of oil pipelines based on second generation wavelet transform and multistage hypothesis test [J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(5): 898-903.
- [7] Liang Wei, Zhang Laibin. A wave change analysis (WCA) method for pipeline leak detection using Gaussian mixture model [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2012, 25(1): 60-69.
- [8] 陈斌, 万江文, 吴银峰, 等. 神经网络和证据理论融合的管道泄漏诊断方法[J]. 北京邮电大学学报, 2009, 32(1): 5-9.
- Chen Bin, Wan Jiangwen, Wu Yinfeng, et al. A pipeline leakage diagnosis for fusing neural network and evidence theory [J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2009, 32(1): 5-9.
- [9] 张宇, 靳世久, 何静菁, 等. 基于动态压力信号的管道泄漏特征提取方法研究[J]. 石油学报, 2010, 31(2): 338-342.
- Zhang Yu, Jin Shijiu, He Jingjing, et al. Extraction method for pipeline leakage feature based on dynamic pressure signal [J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(2): 338-342.
- [10] 孟令雅, 刘翠伟, 李玉星, 等. 输气管道气动噪声产生机制及其分析方法[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2012, 36(6): 128-136.
- Meng Lingya, Liu Cuiwei, Li Yuxing, et al. Aero-acoustics generation mechanism and analysis methods for natural gas pipelines [J]. Journal of China University of Petroleum; Edition of Natural Science, 2012, 36(6): 128-136.
- [11] Kim M S, Lee S K. Detection of leak acoustic signal in buried gas pipe based on the time-frequency analysis [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2009, 22(6): 990-994.
- [12] 刘翠伟, 李玉星, 李雪洁, 等. 基于 CFD 模拟的输气管道阀门流噪声仿真[J]. 油气储运, 2012, 31(9): 657-662.
- Liu Cuiwei, Li Yuxing, Li Xuejie, et al. CFD simulation study on gas pipeline valve flow noise [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2012, 31(9): 657-662.
- [13] 潘甫生, 邓兆祥, 赵海军, 等. 低马赫数射流噪声的数值计算研究 [J]. 内燃机工程, 2009, 30(2): 34-38.
- Pan Pusheng, Deng Zhaoxiang, Zhao Haijun, et al. Study on numerical calculation method of jet noise at low mach number [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2009, 30(2): 34-38.
- [14] 徐俊伟, 吴亚锋, 陈耿. 气动噪声数值计算方法的比较与应用 [J]. 噪声与振动控制, 2012, (4): 6-10.
- Xu Junwei, Wu Yafeng, Chen Geng. Comparison and application on the aero-acoustics numerical computing methods [J]. Noise and Vibration Control, 2012, (4): 6-10.
- [15] Ben-Mansour M, Habib M A, Khalifa A, et al. Computational fluid dynamic simulation of small leaks in water pipelines for direct leak pressure transduction [J]. Computers & Fluids, 2012, 57(30): 110-123.
- [16] 李玉星, 姚光镇. 输气管道设计与与管理 [M]. 第二版. 东营: 中国石油大学出版社, 2009: 15-16.
- Li Yuxing, Yao Guangzhen. The design and management of gas transmission pipeline [M]. 2nd ed. Dongying: China University of Petroleum Press, 2009: 15-16.
- [17] Liang Wei, Zhang Laibin, Xu Qingqing, et al. Gas pipeline leakage detection based on acoustic technology [J]. Engineering Failure Analysis, 2013, 31: 1-7.
- [18] 孙晓峰, 周盛. 气动声学 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1994: 18-19.
- Sun Xiaofeng, Zhou Sheng. Aeroacoustics [M]. Beijing: National Defense Science and Technology Press, 1994: 18-19.
- [19] 黄竞, 何雅玲, 李茹. 声波衰减的数值模拟 [J]. 工程热物理学报, 2008, 29(2): 202-204.
- Huang Jing, He Yaling, Li Ru. Numerical simulation of sound wave attenuation [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2008, 29(2): 202-204.

(收稿日期 2013-08-16 改回日期 2013-11-18 编辑 宋宁)

版权所有