

Duffing 振子在长输天然气管道泄漏检测中的应用

王洪超¹, 王立坤¹, 蔡永军¹, 马云宾¹, 巩玉良²

(1. 中国石油管道科技研究中心 油气管道输送安全国家工程实验室, 河北 廊坊 065000;

2. 中国石油天然气股份有限公司 西南管道公司, 贵阳 550081)

摘要: 为了及时发现天然气管道泄漏, 在管段上下游安装声波变送器, 实时获取管道内的声波信号, 采用功率谱估计的方法对泄漏声波信号进行分析, 可确定泄漏声波频率在 16~20 Hz 之间。然后分析研究了 Duffing 振子检测方法中驱动力相位、频率与相轨迹状态之间的关系, 并建立了基于 Duffing 振子的天然气管道泄漏检测系统, 通过设置不同的驱动力相位, 将管道内声波信号进行频率变换后输入到检测系统可以判断是否存在泄漏声波的频率成分, 从而实现天然气管道的泄漏检测; 为了验证方法的有效性, 在实际天然气管道建立了测试系统, 开展了多次不同孔径的管道泄漏测试, 将泄漏声波信号输入检测系统, 均可检测到泄漏声波; 现场测试结果表明该方法对多种孔径的泄漏均具有较好的检测效果, 可解决天然气管道较小泄漏的检测问题。

关键词: 天然气管道; 泄漏声波; 杜芬振子; 相轨迹

Application of Duffing Oscillator on Leak Detection of Long Distance Gas Pipeline

Wang Hongchao¹, Wang Likun¹, Cai Yongjun¹, Ma Yunbin¹, Gong Yuliang²

(1. PetroChina Pipeline R&D Center/National Engineering Laboratory for Pipeline Safety, Langfang 065000, China;

2. PetroChina Southwest Pipeline Company, Guiyang 550081, China)

Abstract: In order to detect the leakage of gas pipeline, acoustic transmitters are installed in the two ends of the pipeline segment to obtain the acoustic signal in the pipe. The frequency of leakage acoustic is between 16~20 Hz which is analyzed by power spectrum estimation method. Then the relationship between Duffing oscillator's driving force phase, frequency and phase trajectory is analyzed. So a natural gas pipeline leakage detection system based on Duffing oscillator is established. Convert acoustic signal frequency and then input the signal into the Duffing oscillator detection system with different driving force phase can determine whether there is frequency component of leakage acoustic of natural gas pipeline. At last, a test system was established and several tests with different leakage apertures are experimented. The field test results show that the method can detect the gas pipeline leakage of various leakage apertures.

Keywords: gas pipeline; acoustic of leakage; Duffing oscillator; phase trajectory

0 引言

我国已建成西气东输天然气管道(3条线)、中缅天然气管道和中俄东线天然气管道北段,形成了西北、西南和东北3个方向的陆上能源进口通道,再加上川气东送和陕京天然气管道(4条线),骨干天然气网络已经初具规模。天然气具有易燃易爆的特点,而且长输天然气管道压力高、口径大,一旦泄漏会有大量气体瞬间喷涌而出,极易产生爆炸,造成人员伤亡等次生灾害和经济损失。如2018年6月10日23时13分许,中石油中缅天然气管道黔西南州晴隆县沙子镇段K0975-100 m处发生泄漏燃爆事故,造成1人死亡、23人受伤,直接经济损失2145万元。为了及时发现天然气管道泄漏,防止重大事故的发生,国内外研究者开展大量研究,主要集中在天然气管道泄漏引起的温度和

声波变化监测方法两个方面。

天然气泄漏的温度监测方法利用了泄漏后高压气体气化带来的温度下降现象,主要采用管道的伴行光缆实现管道的分布式温度监测^[1-2],但是受管道伴行光缆自身特性(铠装、穿硅管等)、埋深、距离管道距离不确定以及温度在土壤中的传播衰减大等因素影响,管道泄漏带来的温度变化不能快速传播至管道伴行光缆,导致该方法的检测灵敏度低和响应时间慢,并且对于无伴行光缆的管道无法应用,目前国内仅在中俄东线开展了短距离应用。天然气泄漏的声波监测利用了高压气体泄漏产生的声波可以在管道内部传播较远距离的现象,在管道站场、阀室安装声波变送器实时获取管道内声波变化实现天然气管道的泄漏监测^[3-6]。基于声波法的天然气泄漏监测技术在国内西气东输苏浙沪段进行了应用,但对小泄漏监测效果不佳,在国内

收稿日期: 2020-09-19; 修回日期: 2020-11-02。

基金项目: 中国石油重大研发专项油气管道线路及站场感知技术研究(2019E-2002)。

作者简介: 王洪超(1982-),男,河北黄骅人,硕士,高级工程师,主要从事油气管道泄漏监测技术方向的研究。

引用格式: 王洪超, 王立坤, 蔡永军, 等. Duffing 振子在长输天然气管道泄漏检测中的应用[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(5): 34-39.

也没有大量应用。因此, 还需开展天然气小泄漏声波的监测技术研究, 满足实际工业应用需求。

1 天然气管道泄漏声波特征

由于天然气自身具有高可压缩性, 当管道发生泄漏时, 管道两端的压力变化并不明显, 但是声波信号会出现明显变化。图 1~2 为相同位置安装的压力变送器和声波变送器在相同时间段内获取的压力和声波信号, 从图中可看出压力信号并无明显的升高或下降, 仅有微小的变化, 而声波信号红框内部分出现了较大的振幅变化, 该部分声波信号即为管道泄漏产生的声波信号, 泄漏声波信号在开启泄放阀门后一直存在, 至关闭泄放阀门后消失。由此可见, 天然气管道泄漏后产生的泄漏声波信号特征明显, 泄漏过程中持续存在, 如果检测到存在泄漏声波, 即可认为管道存在泄漏。

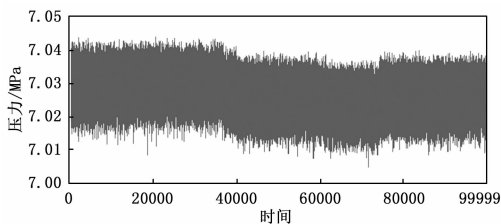


图 1 管道泄漏压力信号曲线

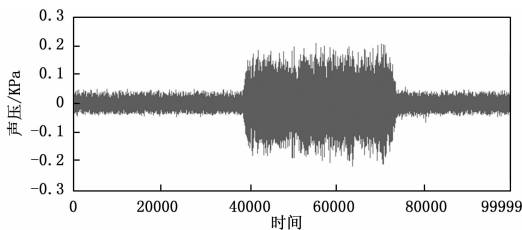


图 2 管道泄漏声波信号曲线

通常情况下声波变送器安装在管道站场和部分阀室, 相邻站场和阀室之间的距离至少为 20 km, 管道泄漏后产生的声波信号在管道中经过较长距离的传播, 高频成分衰减很大, 声波变送器获得的声波信号只包含泄漏声波的低频成分。同时, 管道正常运行时存在由气体摩擦和压缩机等产生的背景噪声, 图 3~4 为管道正常运行时背景噪声的时域和功率谱图, 图中清晰可见存在频率 65 Hz 左右的低频分量, 对于天然气泄漏检测, 该部分信号为背景干扰信号。因此, 滤除泄漏声波信号高于 50 Hz 的成分, 对滤波后的声波信号进行功率谱估计可知泄漏声波主要集中在 16~20 Hz 之间, 图 5~6 给出了 2" 阀门泄漏产生的泄漏声波信号时域和功率谱图, 在 2" 阀门泄漏的功率谱中可明显看出存在 16~20 Hz 的频率成分, 信号的频率特征相较于时域特征更加明显, 采用检测声波信号频率特征的方法能够有效检测到泄漏声波。

2 Duffing 振子检测原理

信号频率检测的最常规方法是基于傅里叶变换的功率

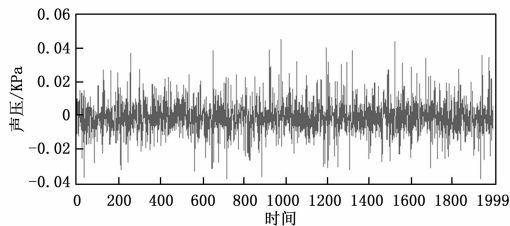


图 3 管道运行背景噪声时域图

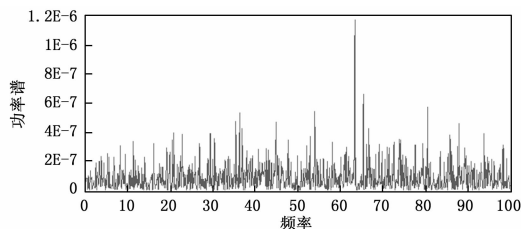


图 4 管道运行背景噪声功率谱图

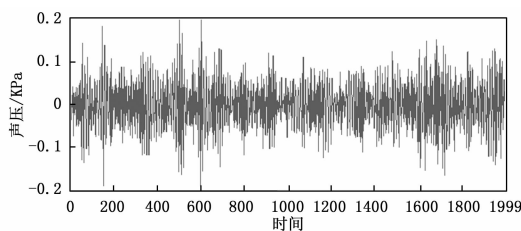


图 5 2" 阀门泄漏声波时域图

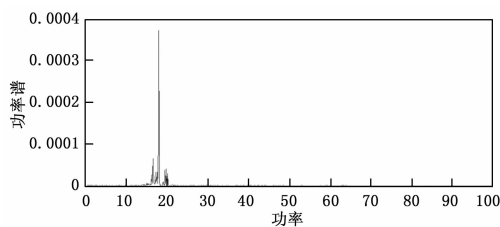


图 6 2" 阀门泄漏声波功率谱图

谱估计, 但是当信号能量较弱时, 信号频率特征会淹没在背景噪声中, 对于天然气管道的小泄漏, 泄漏声波信号弱, 功率谱估计方法难以检测出存在小的管道泄漏。而 Duffing 振子作为一种非线性系统, 可以实现微弱周期信号的检测, 具有对噪声免疫和微弱信号敏感的特点, 可用于检测天然气管道小泄漏产生的声波信号。该方法的基本检测原理是: 设置 Duffing 振子参数使检测系统处于接近临界点的混沌状态, 加入特定频率的待检测信号, 当信号强度足够大时会使检测系统由混沌状态进入大尺度周期状态, 即可认为存在特定频率信号。常用的 Duffing 振子检测系统可使用非线性微分方程表示为:

$$\ddot{x} + k\dot{x} - x + x^3 = A\cos(t) + s(t) \quad (1)$$

其中: k 是阻尼比, $-x + x^3$ 是非线性恢复力, $s(t)$ 为含噪声的待检测信号, $A\cos(t)$ 是内置驱动力, 驱动力角频率为 1 rad/s, 相位为 0, 改变 A 的值可使检测系统处于混沌

状态、临界点和大尺度周期状态。利用式 (1) 中的方程检测周期信号时, 设置 A 的值使检测系统接近临界点, 输入待检测信号, 如果系统进入大尺度周期状态, 即可认为待检测信号中存在角频率为 1 rad/s、相位为 0 的周期信号。

文献 [7-8] 中研究了 Duffing 振子对正弦信号的检测方法, 实现了噪声环境下微弱信号的检测。但在实际使用时待检测信号 $s(t)$ 中的角频率和相位往往与内置驱动力不同, 直接将 $s(t)$ 输入到检测系统并不能实现信号检测的目的, 需要对 $s(t)$ 的角频率和相位进行变换以匹配检测系统的固有值 (角频率为 1 rad/s、相位为 0), 才能实现周期信号的准确检测。

3 待检测信号频率及相位的变换

假设待检测信号 $s(t)$ 的频率为 f_d , 角频率为 ω_d , 相位为 φ_d , 不考虑噪声的影响 $s(t)$ 可表示为:

$$s(t) = A_d \cos(\omega_d t + \varphi_d) \quad (2)$$

令 $t_\omega = \omega_d t$ 可在时间尺度上进行变换得到角频率为 1 rad/s 的信号^[9-10]:

$$s(t_\omega) = A_d \cos(t_\omega + \varphi_d) \quad (3)$$

令 $s(t)$ 采样率为 f_s , 则对于 k 个采样数据, 时间尺度变换后的时间 t_ω 为:

$$t_\omega = \left(0, \frac{\omega_d}{f_s}, \frac{2\omega_d}{f_s}, \dots, \frac{k\omega_d}{f_s} \right) \quad (4)$$

文献中 [10] 采用龙格库塔方法以步长 $\frac{\omega_d}{f_s}$ 求解非线性方程, 但是 $\frac{\omega_d}{f_s}$ 往往不是整数, 在实际计算中会引起 $s(t_\omega)$ 取值出现位置偏差, 使得龙格库塔方法并不是严格按照固定步长计算, 会导致计算结果发生错误, 引起检测失败。这里仍以 $\frac{1}{f_s}$ 作为计算步长, 采用 3 次样条插值算法对 $s(t_\omega)$ 进行重构得到新的待检测信号 $s'(t'_\omega)$, 其中 $t'_\omega = \left(0, \frac{1}{f_s}, \frac{2}{f_s}, \dots, \frac{k\omega_d}{f_s} \right)$, 然后再采用龙格库塔法求解非线性方程即可得到 Duffing 振子的相轨迹。

下面在考虑相位对检测结果的影响, 当内置驱动力的相位与待检测信号的相位相同时, Duffing 振子进入大尺度周期状态^[10-11]。如果改变待检测信号的相位与内置驱动力一致, 可以通过调整信号输入到检测系统的起始时刻实现, 但是这种方式会导致不同相位信号长度的不一致, 带来计算的不便。这里设置式 (1) 中的内置驱动力 $A \cos(t)$ 的相位为 φ , 当 $\varphi = \varphi_d$ 时, Duffing 振子进入大尺度周期状态^[10-11]。因此可通过改变内置驱动力相位的方式保持待检测信号与内置驱动力相位保持一致, 并考虑对待检测信号频率的变换, 式 (1) 可改写为:

$$\ddot{x} + k\dot{x} - x + x^3 = A \cos(t + \varphi) + s'(t'_\omega) \quad (5)$$

4 Duffing 振子的检测过程

使用 Duffing 振子检测方法首先要设置式 (5) 中的参

数使检测系统接近临界点, 这里设置 k 为 0.5, A 为 0.82 (A 为 0.826 时 Duffing 振子处于临界点), 则式 (5) 改写为:

$$\ddot{x} + k\dot{x} - x + x^3 = A \cos(t + \varphi) + s'(t'_\omega) \quad (6)$$

在实际应用中待检测信号相位并不确定, 而且待检测信号往往是一个窄带信号, 这里通过在一定范围内改变内置驱动力相位 φ 和待检测信号频率 f_d 的值依次求解式 (6), 其中待检测信号频率 $f_d \in [f_0, f_1]$, 内置驱动力相位 $\varphi \in [0, 2\pi]$, 当 Duffing 振子相轨迹进入大尺度周期状态, 就可以确定检测出了特定频率的信号。

Duffing 振子检测的计算流程见图 7, 具体步骤为:

- (1) 设置内置驱动力的初始相位, 这里设置为 0;
- (2) 判断相位是否超出范围, 这里最大值设为 2π 。如果超出, 结束本待检测信号的检测, 认为不存在管道泄漏;
- (3) 设置待检测信号的初始检测频率, 这里设置为 16 Hz;
- (4) 判断检测频率是否超出范围, 这里最大值为 20 Hz。如果超出, 内置驱动力相位增加 0.1, 跳转至执行步骤 (2);
- (5) 重构待检测信号, 求解检测系统非线性方程, 得到待检测信号的相轨迹;
- (6) 判断待检测信号相轨迹状态。当相轨迹处于混沌状态时, 检测频率增加 1 Hz, 跳转至执行步骤 (4), 当相轨迹处于大尺度周期状态时, 认为存在天然气管道泄漏, 结束本待检测信号的检测;
- (7) 输入新的待检测信号, 跳转至执行步骤 (1)。

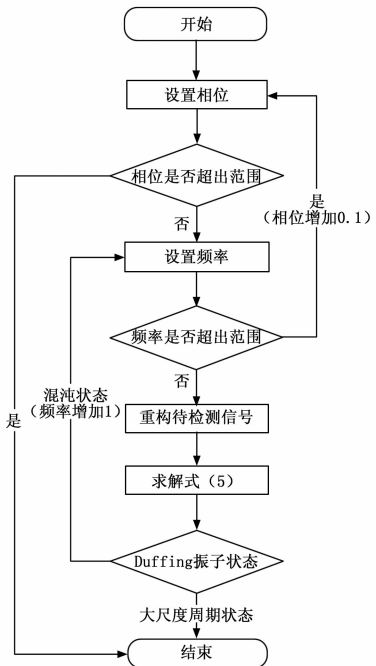


图 7 Duffing 振子检测流程图

将图 3、5 中的管道背景噪声和泄漏声波依次输入检测系统, 当泄漏声波信号频率以 18 Hz 进行变换, 内置驱动

力相位设置为 0 时, 可得到大尺度周期状态的相轨迹图, 见图 8, 即可认为检测到了天然气管道泄漏。而对于背景噪声, 将待检测信号频率和内置驱动力相位设置为任意值, 相轨迹均处于混沌状态, 即不存在天然气管道泄漏, 见图 9。

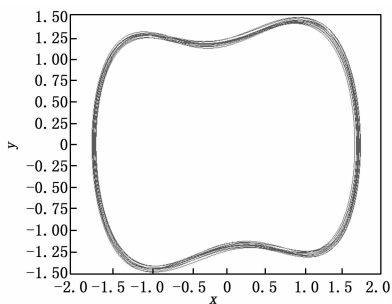


图 8 泄漏声波信号的相轨迹图, 相位=0

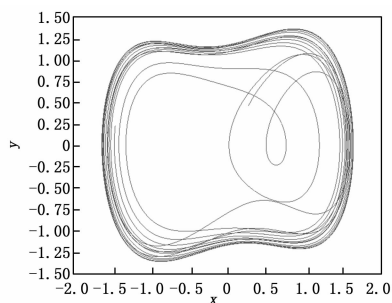


图 9 管道运行背景噪声相轨迹图

5 实验结果与分析

为了验证 Duffing 振子对天然气管道泄漏声波信号检测的有效性, 在天然气管道开展模拟泄漏测试, 获取真实的泄漏信号检验方法的有效性。天然气管道的模拟泄漏实验在中石油大沈线天然气管道进行, 大沈线干线全长 423 km, 管径 711 mm。实验管段位于 2# 阀室—松岚站—4# 阀室, 总长为 21.91 km, 其中 2# 阀室到松岚站约 11.61 km, 管道运行压力约为 7.1 MPa。实验系统由 2 个子站系统和 1 套中心站系统组成, 见图 10。

力变送器(不参与检测, 只用于查看测试时压力)、声波变送器和数据采集单元。压力变送器和声波变送器采用在管道原有压力表处增加三通的方式安装, 这种方式不需要在管道上开孔, 仅需 2 个三通和若干连接件即可实现变送器的安装, 部署快捷简便。子站数据采集单元由工控机和数据采集卡组成, 工控机采用研华 UNO 3082, 数据采集卡为美国 NI 公司的 PCI 6251, 工控机采用 24 V 直流电源供电, 可直接使用阀室 RTU 机柜内的直流电源, 数据传输只需将工控机使用网线接入管道现有通信系统, 无需增加额外供电和通信设备。子站数据采集卡采样率设置为 200 Hz, 工控机控制采集卡实时采集并将数据上传至中心站。

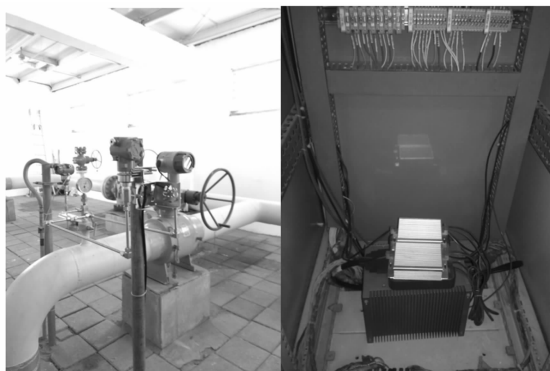


图 11 子站安装的声波变送器、压力变送器和数据采集单元

中心站安装在松岚站内, 由 1 台工作站组成, 实时获取子站上传来的声波信号, 将声波信号实时显示并进行分析判断管道是否发生泄漏。



图 12 中心站获取的声波、压力信号

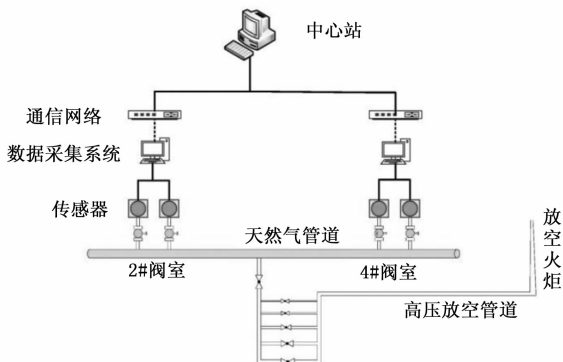


图 10 天然气管道模拟泄漏测试系统示意图

管道的泄漏实验选择在松岚站内开展, 实验前在松岚站发球筒的高压放空阀处安装了一套模拟泄漏装置, 泄漏的天然气管道通过模拟泄漏装置经高压放空管道引至放空火炬排放, 见图 13。模拟泄漏装置采用 5 种不同尺寸的阀门(1/4"、1/2"、3/4"、1" 和 2")。通过开启不同尺寸的阀门可以模拟不同孔径的天然气管道泄漏, 每次泄漏持续 2~5 分钟。

本次实验共获得 13 组声波数据, 见表 1。由于天然气管道泄漏信号需要传播较远距离, 信号频率基本在 20 Hz

子站系统分别安装在 2# 阀室和 4# 阀室, 主要包括压

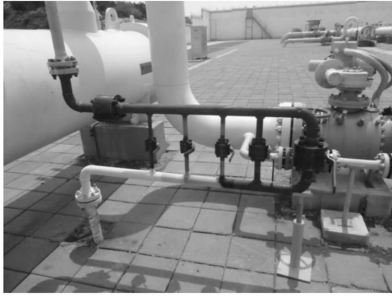


图 13 天然气管道模拟泄漏装置

以内, 并且为了减少管道背景噪声和工频干扰对检测结果的应用, 在待检测信号输入 Duffing 振子检测系统前, 首先采用低通滤波器对泄漏声波信号进行滤波处理, 滤除 50 Hz 以上的频率成分。从时域和频域进行分析可知, 2" 阀门的泄漏声波在时域和频域变化都很明显 (图 5~6), 1/2" 及以上阀门的泄漏声波可在频域进行区分 (图 14~17), 然而 1/4" 阀门的泄漏声波在时域和频域变化均不明显 (图 18~19), 难以识别。

表 1 现场测试记录表

序号	开阀时刻	关阀时刻	泄放阀尺寸
1	10:13:06	10:15:00	1/2"
2	10:18:40	10:21:10	3/4"
3	10:23:40	10:24:50	1"
4	10:28:35	10:30:28	2"
5	11:15:50	11:18:35	1"
6	11:23:50	11:25:50	3/4"
7	11:28:40	11:31:40	1/2"
8	11:33:50	11:37:20	1/4"
9	11:40:30	11:47:00	1/2"
10	11:47:15	11:50:00	3/4"
11	11:53:00	11:56:00	1"
12	11:58:15	12:01:30	2"
13	12:03:40	12:07:00	1/4"

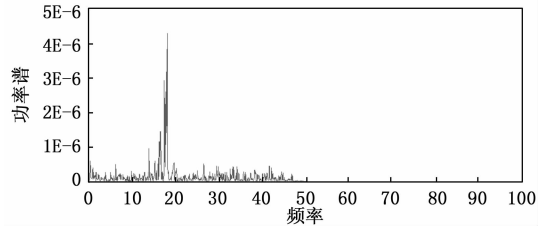


图 15 1" 阀门泄漏声波功率谱图

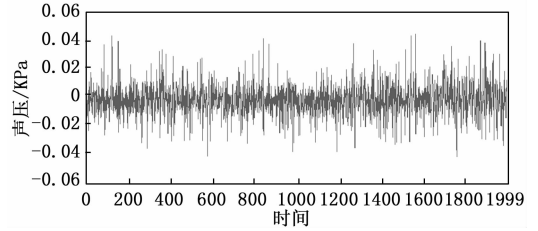


图 16 1/2" 阀门泄漏声波时域图

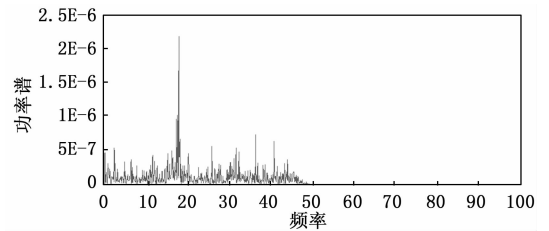


图 17 1/2" 阀门泄漏声波功率谱图

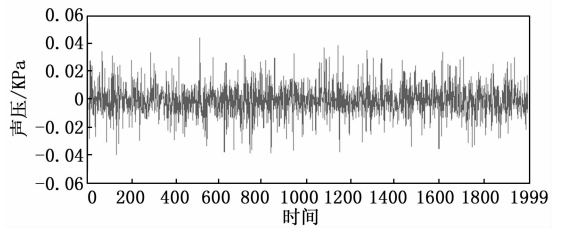


图 18 1/4" 阀门泄漏声波时域图

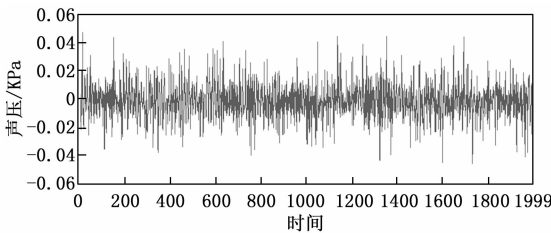


图 14 1" 阀门泄漏声波时域图

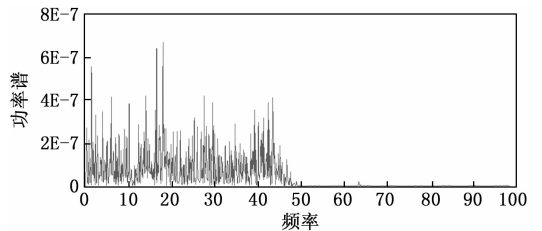


图 19 1/4" 阀门泄漏声波功率谱图

将不同尺寸阀门的泄漏声波和管道背景噪声分别输入式 (6), 设置待检测信号频率 f_d 的范围为 16~20 Hz, 内置驱动力相位 φ 的范围为 $0 \sim 2\pi$ 。结果显示当待检测信号频率 f_d 为 18 Hz, 内置驱动力相位 φ 与待检测信号相位一致时, 泄漏声波信号均可得到进入大尺度周期状态的相轨迹图, 而背景噪声使相轨迹一直处于混沌状态, 见图 20~

23。与传统的功率谱估计方法相比, Duffing 振子检测方法可以分辨出更加微弱的周期信号, 如本次测试中最小的泄漏孔径 1/4" 阀门产生的泄漏声波, 采用功率谱估计的方法声波信号已经完全淹没在了背景噪声中, 而 Duffing 振子还能够轻松的检测到 18 Hz 的周期信号。因此 Duffing 振子检测方法能够检测信号微弱的天然气管道泄漏, 可有效用于

天然气管道的泄漏检测。

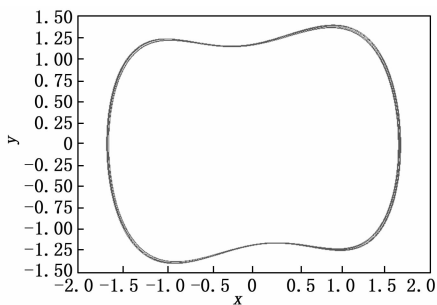


图 20 1" 阀门泄漏声波信号相轨迹图, 相位=3

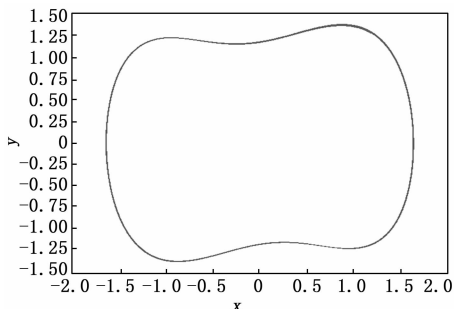


图 21 1/2" 阀门泄漏声波信号相轨迹图, 相位=2

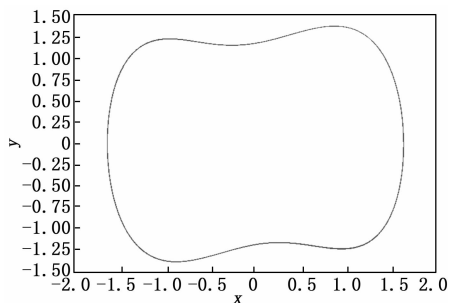


图 22 1/4" 阀门泄漏声波信号相轨迹图, 相位=1.9

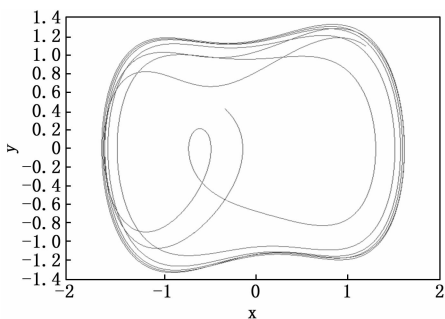


图 23 管道运行背景噪声相轨迹图

6 结束语

使用 Duffing 振子方法进行天然气泄漏声波信号的检测, 通过在一定范围内改变内置驱动力的相位和待检测信号频率, 对待检测信号进行频率变换后求解式 (6) 可以得

到不同相位和检测频率的相轨迹, 当相轨迹处于大尺度周期状态时, 即可认为检测到了管道泄漏, 如果在设定的相位和频率范围内, 相轨迹均处于混沌状态, 即管道不存在泄漏。在实际管道开展的现场测试证明天然气管道泄漏后产生的泄漏声波可以传播较远距离, 声波频率很低, 以 18 Hz 的频率成分为主。通过简单的功率谱估计实现利用声波变送器可以实现 1/2" 及以上阀门泄漏声波的检测, 但是对于 1/4" 阀门产生的声波时域和频域特征均不明显。采用 Duffing 振子对周期信号敏感、噪声免疫的特点, 可以实现 1/4" 阀门泄漏的检测, 经验证该方法对多种尺寸的泄漏均适用, 取得了较好的效果。

采用检测泄漏声波的方法检测天然气管道泄漏, 只需要在现有管道站场、阀室安装声波变送器, 采集管道内声波并上传至中心站进行分析处理, 系统结构简单, 利用管道现有的供电和通信条件即可实现系统建设, 安装部署快捷。结合 Duffing 振子对微弱周期信号检测灵敏度高特点, 可切实解决天然气管道小泄漏检测困难的问题, 具有在天然气管道泄漏检测推广应用的前景, 中未来需进一步开展更小泄漏孔径的测试研究。

参考文献:

- [1] 高文傲, 刘洋, 李登科, 等. 基于光纤监测技术的燃气管道泄漏研究 [J]. 中国安全科学学报, 2019, 29 (8): 67-72.
- [2] 王新, 王巨洪, 王中华, 等. 分布式光纤测温技术在中俄东线天然气管道的可行性 [J]. 油气储运, 2020, 39 (6): 1-5.
- [3] 戚元华, 林伟国, 吴海燕. 基于时域统计特征的天然气管道泄漏检测方法 [J]. 石油学报, 2013, 34 (6): 1195-1199.
- [4] 李凤, 王文和, 易俊, 等. 负压波-声波耦合天然气管道泄漏检测与定位 [J]. 工业安全与环保, 2019, 45 (2): 32-35.
- [5] 肖启阳, 李健, 孙洁娣, 等. 基于 EWT 及互时频的天然气管道泄漏定位 [J]. 仪器仪表学报, 2016, 37 (12): 2735-2742.
- [6] 王秀芳, 朱道鸿, 葛延良. 基于 VMD-EV 的天然气管道小泄漏信号去噪研究 [J]. 压力容器, 2019, 36 (3): 69-73.
- [7] 任志玲, 刘银报, 史旭鹏. 基于 Duffing 振子的弱正弦信号检测的改进 [J]. 计算机测量与控制, 2011, 19 (6): 1301-1303.
- [8] 兀旦晖, 李秦君, 杨萍. 噪声对基于 Duffing 方程弱信号检测的影响研究 [J]. 计算机测量与控制, 2010, 18 (1): 61-63.
- [9] 时培明, 孙彦龙, 韩东颖. 基于双耦合混沌振子变尺度微弱信号检测方法研究 [J]. 计量学报, 2016, 37 (3): 310-313.
- [10] 赖志慧, 冷永刚, 孙建桥, 等. 基于 Duffing 振子的变尺度微弱特征信号检测方法研究 [J]. 物理学报, 2012, 61 (5): 60-68.
- [11] 姚海洋, 王海燕, 张之琛, 等. 双 Duffing 振子逆向联合信号检测模型 [J]. 吉林大学学报 (工学版), 2018, 48 (4): 1282-1290.