◇ 研究报告 ◇

天然气管道泄漏的声-压耦合识别方法*

李 凤† 王文和 游 赟 易 俊

(重庆科技学院 重庆 401331)

摘要:为了提高对城市燃气管道泄漏检测的准确性,该文提出了一种基于声波与压力波耦合的识别方法,并通 过实验考察了它的可行性。实验发现管道的气体泄漏引起了两个显著特征,即泄漏噪声与压力下降。泄漏噪 声的强度随泄漏量增大而增大,但噪声的频率基本保持不变;管道内压力降低的速率与泄漏量大小正相关。据 此发展了一种基于相关算法的泄漏耦合识别方法,通过判别泄漏噪声与压力降是否同时出现,以及相关函数 值大小与阈值对比,来判别泄漏是否发生及其大小。实验验证了耦合识别方法的有效性,并展示了比单一信号 识别方法更好的抗干扰能力。

关键词:天然气;管道泄漏;声波;压力波;耦合方法
 中图法分类号:TE973.6 文献标识码:A 文章编号:1000-310X(2020)03-0402-07
 DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2020.03.012

Leakage detection approach of gas pipeline coupling leakage noise and pressure drop

LI Feng WANG Wenhe YOU Yun YI Jun

(Chongqing University of Science & Technology, Chongqing 401331, China)

Abstract: In order to improve the detection accuracy of gas pipeline, a new approach is developed in this paper by coupling the feature of leakage noise and pressure drop. Experiments are conducted to assess the feasibility of the new approach. Two physical features, leakage noise and pressure drop, are observed simultaneous once the leakage occurs. With the increase of mass-flow rate, the strength of leakage noise increases but its frequency stays the same, and the decreasing speed of pressure inside the pipeline also increases. Based on the fact, the coupling approach of leakage detection is put forward using correlation algorithm. By identifying whether the leakage noise and the pressure drop occur at the same time, and comparing the correlation coefficient with the threshold value, the leakage can be recognized and the leakage mass-flow rate can be predicted. Experiments demonstrate the availability of the coupling approach, and show better anti-interference ability of the new approach compared with the recognition using single signal.

Keywords: Gas pipeline; Leakage detection; Acoustic wave; Pressure wave; Coupling approach

²⁰¹⁹⁻⁰⁸⁻⁰¹ 收稿; 2019-10-23 定稿

^{*}国家自然科学基金项目 (51704054), 重庆市省部级重点项目 (cstc2017jcyjBX0011), 重庆市教委科学技术研究基金项目 (KJ1713332), 重庆市教委科学技术研究项目 (KJ1501337)

作者简介: 李凤 (1992-), 女, 重庆人, 硕士, 研究方向: 城市燃气管道泄漏检测技术。

[†]通信作者 E-mail: lif.cc@qq.com

0 引言

天然气管网是城市重要的基础设施,是社会生 活与生产的基本保障。但天然气管道的泄漏不仅会 造成资源浪费和环境污染,还会直接威胁人们的生 命财产安全^[1-2]。由于管道的老化、腐蚀、外力破 坏和焊缝缺陷等原因,天然气管道泄漏事故屡见不 鲜^[3-4]。因此,如何准确识别泄漏并可靠定位天然 气管道的泄漏位置,成为了油气安全工程领域的重 要课题。

经过数十年的发展,天然气泄漏的识别方法 取得了一些进展。典型的泄漏检测方法有瞬态模 型法^[5]、分布式光纤法^[6]、声波法^[7]和负压波法^[8] 等。几种检测方法采用了不同的识别与定位原理, 也从实验室研究逐步进入推广应用阶段,例如ASI 公司的WaveAlert型声波泄漏检测系统^[9]、赵林 等^[10]设计的光纤负压波管道泄漏监测系统。刘翠 伟等^[11]从泄漏检测的灵敏度、误报率和性价比等8 个指标,对比分析了当前主要的泄漏检测方法的优 缺点,指出声波法的各项指标都达到目前的最高标 准,其误报率仍有待进一步提高。因此,基于声波识 别的泄漏检测方法是未来的重要发展方向^[12]。

为了提高声波法的准确性,本文在之前声波识 别方法基础上,提出以下两点改进:(1)采用管道外 壁、磁力夹固定的活动式声波传感器,利用声波在 管壁固体内传播衰减小、速度快的优点,也避免了 在管内、管上打孔安装困难且要求传感器尺寸小等 问题,降低了声波传感器的安装成本;(2)为了降低 单一声波法的误报率问题,提出了一种基于声波-压 力波耦合的判别方法,基于多信息融合来提高泄漏 识别的准确性。

全文内容如下:首先,展开了管道的泄漏特性 实验,探索气体管道泄漏的主要特征;其次,基于对 泄漏特征的认识,提出了一种声-压耦合的泄漏检测 方法;最后,通过实验测量研究,考察该方法的可行 性及其抗干扰能力。通过本文的研究,试图为天然 气管道泄漏识别方法的工程应用提供基础参考。

1 管道泄漏特性实验

1.1 实验平台简介

为了考察气体管道泄漏的主要特征,本文设计 了如图1所示的实验平台并开展研究。实验管架平 台选择了型号为DN150、长度为15 m、粗糙度为 0.015的管道,工作介质为经干燥过滤后的压缩空 气,工作压力选定1.1 MPa。泄漏口设置在管道中 间位置处,连接MEMS4000型体积流量计,用以测 量和控制泄漏口的流量。

在管道内的泄漏口前后布置了两个常规的静态压力传感器,其有效量程为0~2 MPa,测量精度为0.25% FS。在管外壁上放置了两个通道的动态声波传感器,通过磁力夹固定于管道外壁,型号为RS-2A型动态传感器,其量程为181 dB,最高采样频率为400 kHz,测量精度为2% FS。采用LabVIEW编写的数据采集程序,配合NI数据采集 卡、信号放大器等完成数据采集。



图1 管道泄漏检测实验平台

Fig. 1 Experiment platform of pipeline leakage detection

1.2 管道泄漏的特性

实验过程中,对管道系统打压到1.1 MPa,待管内压力稳定,开启数据采集系统1s后,快速打开模拟泄漏口,测量管道泄漏过程的声-压特性,结果如图2所示。图2给出了其中典型的4组数据,展示了管壁的动态声波信号和管道内的静态压力信号。声波测量采用了动态传感器,采样频率为20kHz;压力测量采用了静态传感器,采样点较少但能够满足观测管道内压力的需求。

在图2中, 红线为管内压力的变化量(即压力 降),黑线为归一化处理的动态声波信号。在泄漏发 生之前,管道内的压力稳定,管壁的噪声信号可以忽 略不计。打开泄漏口后,管道内的压力出现匀速的 持续下降,而管壁的声音信号也显著增大。由此可 见,管道泄漏同时出现两种显著的信号特征,即出现 显著的压力降和巨大噪声,二者出现的时间是同步 的。图2(a)~(d)所示的为泄漏量依次增大。随着泄 漏量的增大,压力曲线的斜率增大,表明管道内压力 降低的速度在增大;管壁的噪声强度也在显著增大。



图 2 管道泄漏的声-压特性

Fig. 2 Acoustic-pressure characteristics of pipe leakage

为了直观展示噪声强度和压力降与泄漏量的 关系,图3与图4分别统计了平均的噪声强度和压 力降低速度。随泄漏量的增大,管壁的平均噪声 强度依次为81 dB、86.3 dB、90 dB和94.4 dB,而 压力降的速度依次为-0.84 kPa/s、-1.26 kPa/s、 -1.81 kPa/s和-2.94 kPa/s。可以看到,尽管实验 的泄漏为微小泄漏,但由于管道内外的巨大压差,其 产生的泄漏噪声和压降都十分显著,且二者随泄漏 量的增长而非线性增大。

因此,在微小泄漏条件下,能观测到两种显著 的泄漏特征,表现为管壁的泄漏噪声和管道内的压 力降。随着泄漏量的增大,噪声强度和压力降都出 现非线性增大。因此,声波和压力降可作为泄漏检 测的关键性指标。



图3 不同泄漏量下的平均噪声强度

Fig. 3 Average acoustic intensity at different leakage levels



图4 不同泄漏量下的压力降速度

Fig. 4 Pressure drop rate under different leakage amounts

采用经典的离散傅里叶变换(Discrete Fourier transform, DFT),对图2所示的动态声波信号展开 了频谱分析,试图明确泄漏的声源特性,如图5所 示。可以看到,不同流量下噪声的频率特性基本 一致,主要频率在5 kHz~9 kHz 频带范围内,其 中存在一个约7 kHz的主导频率。随着泄漏量的增 大,主导频率的幅值也在增加。因此,管道泄漏时 产生的气动噪声存在特定的频率(带),该主导频率 对应的音色是泄漏的特有声音,可以作为分辨泄漏 噪声与环境噪声的一个依据。也就是说,管道泄漏 的噪声具有相似的频谱特性而与泄漏量的大小无 关。当然,本文的本实验点样较少,不能确定普遍 的、精确的主导频率特征,需要更多的参数化实验 研究。



Fig. 5 Spectrum of acoustic signals at different leakage levels

2 耦合泄漏识别方法研究

本文实验结果表明,管道泄漏伴随着两种显著的特征——泄漏噪声与压力降,且二者发生的时间 是同步的。因此,在实验或者工程实践中,若能够检 测到管壁的声强和管内流场的压力降同时跃升,则 可确定管道发生了泄漏。基于这一特性,两种信息 融合有望提高泄漏识别的准确性。

2.1 声-压耦合法的原理

本文耦合检测方法的基本思想是,考察是否同时发生泄漏噪声与压力降,可采用相关算法予以判

别。假设声波传感器测到的信号为*A*(*t*),压力传感器测得的信号为*P*(*t*),它们都可表示为时均与波动 值之和:

$$A(t) = \bar{a}(t) + a(t), \qquad (1)$$

$$P(t) = \bar{p}(t) + p(t), \qquad (2)$$

其中, $\bar{a}(t)$ 和a(t)分别为声波的时均和波动信号, $\bar{p}(t)$ 和p(t)分别为压力波的时均和波动信号,同理 $\bar{A}(t)$ 和 $\bar{P}(t)$ 为对应的时均值。通过梯度运算(∇)可 求压力降低的速率。

对 A(t) 和 P(t) 的波动值进行相关性运算:

$$R_{AP} = \lim_{T \to \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^{T} |A(t) - \bar{a}(t)|$$
$$\cdot |\nabla (P(t) - \bar{p}(t))| \cdot \mathrm{d}t, \qquad (3)$$

式(3)中, *R_{AP}(t*)为波动信号的相关函数。将公式(1)和公式(2)代入到公式(3)得

$$R_{AP} = \lim_{T \to \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^{T} |a(t)| \cdot |\nabla p(t)| \cdot \mathrm{d}t.$$
 (4)

上述是针对两列无限长的、连续信号之间的相 关性考察,而在实际的测量或应用中,由传感器测量 的信号通常为离散信号。考虑在时间间隔 Δt 内的 离散信号,采样频率为 f_s ,N表示在 Δt 时间间隔内 的采集点数,即采样数。上述公式可转化为

$$R_{AP}(\Delta t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} |a_i(t)| \cdot |\nabla p_i(t)|,$$
$$N = \Delta t / f_s.$$
(5)

相关函数 $R_{AP}(\Delta t)$ 表明两种信号在时间间隔 Δt 内的波动或变化值的乘积,用以判别泄漏的压力波和 声波是否同时产生。如果未同时发生,则 $R_{AP}(\Delta t)$ 的理论值为0。

在无泄漏工况下,由于背景噪声以及压力波动, 实际 $R_{AP}(\Delta t)$ 值不为0。但声强和管内压力波动值 都较小,故在一定的阈值 $[R_{AP}]$ 范围内, $[R_{AP}]$ 可通 过实验或工程实践确定大小,当 $R_{AP}(\Delta t) > [R_{AP}]$, 可判别泄漏的发生。要实现上述计算非常简单,在 嵌入式终端上进行简单的加法和乘法的编程即可 实现。

2.2 可行性与抗干扰实验

为了考察声-压耦合识别方法的可行性以及其 在实际工作中的抗干扰能力,设置了一组存在泄漏 并且有外加扰动的实验方案,如图6所示。图6中展 示了噪声和管压信号的变化曲线,第一个连续的噪 声信号为正常的泄漏现象,而后人为增加了3种典 型干扰,依次为多次敲击管道(干扰1)、连续的环境 噪声(干扰2)和管网泄压(干扰3)。其中,"干扰1" 为随机敲击管道;"干扰2"为人工播放的高速噪声; "干扰3"为实验结束时,通过气罐对管网泄压,尽量 避免了气动噪声,用以模拟燃气管网的压力调节或 流量变化等引起的压力波动。

为了方便观察两种信号单独作为泄漏识别的 信号源的效果,图7中展示了两种情况的计算结 果:图7(a)为公式(5)中设压力梯度值恒等于1,即 $|\nabla p_i(t)| = 1$,此时的相关函数曲线仅与噪声信号 相关,记相关函数值为 $R(\Delta t)^1$;图7(b)为公式(5) 中设噪声信号值等于1,即取 $|a_i(t)| = 1$,此时的 相关函数曲线仅与压力梯度相关,记相关函数值为 $R(\Delta t)^2$ 。



图6 管道泄漏及3种典型干扰的实验







Fig. 7 Acoustic wave or pressure drop is taken as the calculation result of leak detection signal source

从图 7(a) 中可以看到, 仅采用声波信号作为泄漏识别的信号源, 判别噪声的幅值, 则无法排除"干扰1"和"干扰2"带来的噪声影响。在实际的工程实践中, 管道受到敲击、碰撞等短暂噪声(类似于"干扰1")的影响, 或者受到公路、建筑工地等环境噪声(类似于"干扰2")的影响, 基本上是不可避免的。因此, 采用声波信号作为单一识别源的泄漏检测方法可能产生误判。

从图7(b)中可以看到,仅采用压力作为泄漏识 别的信号源,则无法排除因压力变化的"干扰3"型 扰动。例如,由于管网调压、流量变化和泵站启停 等多种因素,供气管内的压力出现了较大波动。此 时,采用压力信号作为单一识别源的泄漏检测方法 可能产生误判。

由此可见,单独采用声波作为泄漏识别的信号 源,在一些情况下无法区分泄漏噪声与外来噪声,而 单独区分压力变化也无法分辨管内压力降是否由 泄漏引起。因此,单一信号识别方法在抗干扰方面 存在一定的不足。

基于这一认识,本文提出了声波和压力耦合的 泄漏识别方法,采用公式(5)计算的耦合相关函数 如图8所示。可以看到,泄漏现象能够被耦合算法 所捕捉,准确地识别了泄漏的起始和终止时间点。 然而,由于干扰信号无法同时触发噪声和压力波 动,由外部环境噪声引起的"干扰1"和"干扰2"型 扰动,以及由管道压力调节引起的"干扰3"型压力 波动,都能够被很好地过滤掉。由此可见,泄漏识别 方法不仅保留了声波的识别能力,而且显著提高了 抗干扰能力。



图 8 带外部干扰的实验条件下的相关函数 $R_{AP}(\Delta t)$ 值 Fig. 8 $R_{AP}(\Delta t)$ under experimental conditions with external interference

当然,在实际的工程实践中,不同形式的外部 干扰可能同时出现。例如管道压力波动时,也遇到 了环境噪声干扰,则无论是单个还是耦合法都无法 避免误判。针对这种小概率干扰形式,需要结合阈 值 [*R*_{AP}]来排除误判,依据为外部干扰信号的强度 通常比泄漏信号低很多,可过滤掉相关函数值小于 阈值的信号来排除非泄漏因素的扰动。相关函数的 阈值 [*R*_{AP}],则需要根据实验或者工程实践确定。

因此,与单一的声波或压力变化的识别方法相 比,耦合法中两种信号相互起到了门函数的作用,既 能保持声波法较好的识别能力,也对非泄漏因素起 到了过滤的作用,从而提高了抗干扰能力。总体上, 耦合识别方法能够降低多种干扰对检测系统造成 的误判,提高泄漏检测的准确性。

3 结论

本文实验研究了燃气管道泄漏的物理特征,提 出了一种基于声波-压力波耦合的泄漏识别方法,通 过实验研究考察了它的可行性与抗干扰性。结论 如下:

(1)管道的气体泄漏引起了两个显著特征,即泄漏噪声与管内压力降。泄漏噪声的强度随泄漏量增大而增大,但噪声的频率基本保持不变;管道内压力降低的速率与泄漏量大小正相关。

(2)根据泄漏噪声与压力降同时发生的特点,提 出了一种基于相关算法的泄漏耦合识别方法。通过 判别泄漏噪声与压力降是否同时出现,以及相关函 数值大小与阈值对比,来判别泄漏是否发生;而相关 函数值的大小反映了泄漏的流量大小。

(3)泄漏实验表明,耦合识别方法既能保持声波 法较好的识别能力,也能够排除环境噪声的干扰和 常规的压力变化,展示了比单独的噪声或压力波的 识别方法更好的抗干扰性。该结果证实了耦合方法 相较于单一信号识别的优越性。



- [1] 梁永宽,杨馥铭,尹哲祺,等.油气管道事故统计与风险分析 [J].油气储运,2017,36(4):472-476.
 Liang Yongkuan, Yang Fuming, Yin Zheqi, et al. Accident statistics and risk analysis of oil and gas pipelines[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2017, 36(4):472-476.
- [2] Han Z Y, Weng W G. An integrated quantitative risk analysis method for natural gas pipeline network[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2010, 23(3): 428–436.
- [3] 杨凯, 吕淑然, 高建村, 等. 城市燃气管道泄漏多因素耦合致 灾机制研究 [J]. 安全与环境学报, 2018(2): 576–582.
 Yang Kai, Lyu Shuran, Gao Jiancun, et al. Research on the disaster-resulting mechanism of the multi-factors in addition to the urban gas pipeline leakage[J]. Journal of Safety and Environment, 2018(2): 576–582.
- [4] Ahmed W, Hasan O, Tahar S, et al. Towards the formal reliability analysis of oil and gas pipelines[M]//Intelligent Computer Mathematics. Cham: Springer International Publishing, 2014: 30–44.

- [5] 刘恩斌, 彭善碧, 李长俊, 等. 基于瞬态模型的油气管道泄漏 检测 [J]. 天然气工业, 2005, 25(6): 102–104, 179.
 Liu Enbin, Peng Shanbi, Li Changjun, et al. Leakage detection of oil and gas pipelines by transient model[J].
 Natural Gas Industry, 2005, 25(6): 102–104, 179.
- [6] 赵亚,王强,翟永军,等.基于小波包能量谱的分布式光纤燃气管道泄漏监测及实验分析[J].应用光学,2018,39(2):295-230.

Zhao Ya, Wang Qiang, Zhai Yongjun, et al. Monitoring and experimental analysis of distributed optical fiber pipeline leakage based on wavelet packet energy spectrum[J]. Journal of Applied Optics, 2018, 39(2): 295–230.

- [7] Lingya M, Li Y, Wang W, 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.
- [8] 靳世久,王立宁,李健. 瞬态负压波结构模式识别法原油管道 泄漏检测技术 [J]. 电子测量与仪器学报, 1998(1): 59-64.
 Jin Shijiu, Wang Lining, Li Jian. Instantaneous negative pressure wave pattern recognition method in leak detec-

tion of crude petroleum transported pipeline[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 1998(1): 59–64.

[9] 刘晓宇,李媛. 音波测漏系统在燃气管道中的应用 [J]. 自动化 与仪表, 2008, 23(11): 54–56.

Liu Xiaoyu, Li Yuan. Application of wave alert system on gas pipe[J]. Automation & Instrumentation, 2008, 23(11): 54–56.

- [10] 赵林, 王纪强, 李振. 光纤负压波管道泄漏监测系统 [J]. 红外 与激光工程, 2017, 46(7): 121–126.
 Zhao Lin, Wang Jiqiang, Li Zhen. Optical fiber negative pressure wave pipeline leakage monitoring system[J]. Infrared and Laser Engineering, 2017, 46(7): 121–126.
- [11] 刘翠伟,李玉星,王武昌,等. 输气管道声波法泄漏检测技术 的理论与实验研究 [J]. 声学学报, 2013, 38(3): 124–133.
 Liu Cuiwei, Li Yuxing, Wang Wuchang, et al. Theoretical study and experimental study on leak detection for natural gas pipeline based on acoustic method[J]. Acta Acustica, 2013, 38(3): 124–133.
- [12] 李玉星. 天然气输送管道的泄漏检测与定位 [M]. 东营: 中国 石油大学出版社, 2014.