

引用格式:韩宝坤,蒋相广,刘西洋,等. 基于声波法的天然气管道泄漏检测与定位系统研究[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2018, 37(4):102-110.

HAN Baokun, JIANG Xiangguang, LIU Xiyang, et al. Natural gas pipeline leakage detection and location system based on acoustic wave method[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2018, 37(4):102-110.

# 基于声波法的天然气管道泄漏检测与定位系统研究

韩宝坤,蒋相广,刘西洋,纪瑶,鲍怀谦

(山东科技大学机械电子工程学院,山东青岛266590)

**摘要:**天然气因清洁、安全、经济,渐渐成为主流能源。但是人为与非人为因素导致的泄漏事故时有发生。为提高天然气管道运输安全,采用多软件联合仿真并结合实验研究的方法,探究一条低成本检测与定位天然气管道泄漏的新途径。声源仿真基于气动声学中偶极子与四极子声源理论,信号处理基于小波变换理论,泄漏检测与定位基于时延定位法。在仿真实验的基础上,搭建实验台,通过仿真与实验相结合,验证此方法的可行性。结果表明,运用多软件联合仿真声源数据的方法,捕捉定位泄漏声源,研究管道安全问题,可以减少实验次数,提高检测效率,为后期实际工程应用提供理论依据。

**关键词:**管道泄漏;声波法;联合仿真;LabVIEW;互相关;小波变换;多算法融合

中图分类号:TE8 文献标志码:A 文章编号:1672-3767(2018)04-0102-09

DOI:10.16452/j.cnki.sdkjzk.2018.04.013

## Natural Gas Pipeline Leakage Detection and Location System Based on Acoustic Wave Method

HAN Baokun, JIANG Xiangguang, LIU Xiyang, JI Yao, BAO Huaiqian

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China)

**Abstract:** Natural gas has gradually become the mainstream energy for its cleanness, safety and economy. However, leakage accidents occur frequently due to human and natural factors. In order to improve the safety of natural gas pipeline transportation, a new method of low-cost detection and location of natural gas pipeline leakage was explored by using multi-software co-simulation and experimental research. The theory of dipole and quadrupole sound source in aero acoustics was adopted in simulating sound source; wavelet transform theory was adopted in processing signals; and time delay localization method was adopted in detecting and locating leakage. An experimental platform was built on the basis of simulation experiment and the proposed method was verified by combining simulation and experiment. Results show that the multi-software sound source simulation method can reduce the number of experiments and improve detection efficiency in capturing leakage sound source and researching pipeline safety issues, thus providing theoretical and preliminary preparations for practical engineering application in the later stage.

**Key words:** pipeline leakage; acoustic method; co-simulation; LabVIEW; cross correlation; wavelet transform; multi-algorithm fusion

收稿日期:2017-08-16

基金项目:山东省自然科学基金项目(ZR2012AM011)

作者简介:韩宝坤(1971—),男,山东莱芜人,教授,博士生导师,主要从事声信号处理及应用方向的研究工作。

蒋相广(1989—),男,山东泰安人,硕士研究生,主要从事声学应用的研究,本文通信作者。

E-mail:17864288817@163.com

由于天然气清洁、安全、经济等优势,渐渐成为城市生活主流能源。但是人为与非人为因素导致的泄漏,甚至重大财产、人员伤亡事故时有发生<sup>[1]</sup>。据博燃网统计分析,2017 年上半年我国共发生天然气爆炸事故 389 起,同比增长 2.4%,共造成 500 多人受伤,58 人死亡(死亡率同比增长 93.9%)<sup>[2]</sup>。为提高天然气管道运行安全,健全管网系统,减少各类事故,加快建成现代化城市,研究并设计管道泄漏检测与定位系统非常必要。国内外学者已做多方面研究,韩宝坤<sup>[3]</sup>、叶迎春<sup>[4]</sup>、刘翠伟<sup>[5]</sup>等均采用 CFD 软件与专业声学软件相结合,研究输气管道噪声与泄漏声源特性。闫成稳等<sup>[6]</sup>通过仿真与实验对比的方法,分析气体管道泄漏声源特性。以上主要是对声源做仿真研究,很少利用仿真数据探究泄漏检测与定位。张洪铭等<sup>[7]</sup>利用二维管道模型仿真漏泄信号,编程实现管道泄漏检测与定位系统。但采用二维声源模型的仿真结果与实际情况近似度差,数据精度较低。

本研究通过多软件联合仿真三维模型的声源,研究城市中低压天然气管道泄漏检测与定位问题,弥补二维模型数据的不足。利用已有声源仿真的方法研究声源数据,借鉴二维模型数据导入 LabVIEW 编程检测与定位系统的方法,基于三维模型,最终探究一条低成本检测与定位天然气管道泄漏的新途径<sup>[8-9]</sup>。

## 1 天然气管道泄漏检测与定位原理

### 1.1 时延法定位

当管道某处突然发生泄漏时,由于管道内外巨大压差,天然气从破坏口处喷射而出。剧烈的紊流以及流体与管壁相互作用产生宽频声波,声波将沿管道分别往上下游传播。基于低频波波长长、频率低和衰减慢等特点,传播距离相对较远,因此本文主要研究低频波<sup>[10]</sup>。该波以声速分别经过  $t_1$ 、 $t_2$  到达上下游的声波传感器。根据  $t_1$  与  $t_2$  之差即可通过时延法确定泄漏位置  $L_x$ ,定位原理图如图 1 所示<sup>[11]</sup>。

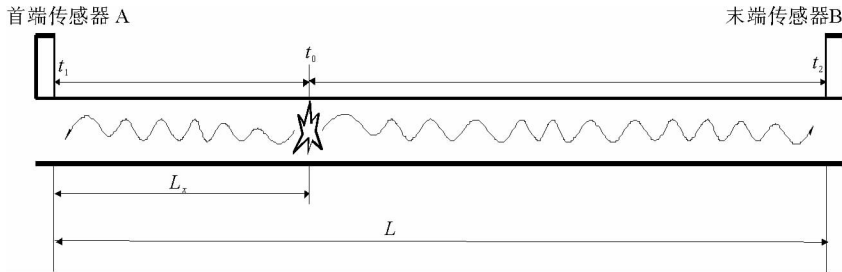


图 1 次声波法泄漏定位原理

Fig. 1 Leakage location principle of acoustic wave method

$$\int_{L_x}^0 \frac{1}{v(x) - a(x)} dx - \int_{L_x}^L \frac{1}{v(x) + a(x)} dx = \tau_0 \quad (1)$$

式中:  $a(x)$ —流体中声波传播速度,是沿程  $x$  的函数, m/s;  $L$ —两声波传感器之间的距离, m;  $v(x)$ —管道内流体流速, m/s;  $\tau_0$ —一对传感器检测到的信号时间差, s;  $L_x$ —距首端上游的位置, m。

受实际工况的限制,用某段平均声速  $\bar{a}$  替代  $a(x)$ ,某段平均流速  $\bar{v}$  替代  $v(x)$ <sup>[12]</sup>,定位公式(1)可简化为:

$$\frac{L_x}{\bar{a} - \bar{v}} - \frac{L - L_x}{\bar{a} + \bar{v}} = \tau_0 \quad (2)$$

进一步推出:

$$L_x = \frac{L + \bar{a} \times \tau_0}{2} \quad (3)$$

式中:  $\bar{a}$ —某段平均声速, m/s;  $\bar{v}$ —某段流体介质平均流速, m/s。

某段管长  $L$  可以通过测绘或者查询管道建设资料得知,流体速度、声波速度由相关实验或公式确定。因此影响实际定位精度的主要因素是  $\tau_0$ ,主要由去噪水平、互相关分析等确定其值。

### 1.2 互相关分析法确定 $\tau_0$

互相关分析提供较多有用信息,工程应用广泛,如提取混淆在噪声中的特征信号以及声波传播时差问题。其不但可以从含噪声信号中找出目标信号两部分之间的函数关系,而且可确定两信号之间的函数关系,并根据相关性进行检测和提取。管道首末两端传感器对同一泄漏点进行信号采集,将模拟信号转换成数字信号,因此采用互相关法确定  $\tau_0$ 。首先说明相关系数  $\rho_{xy}$ ,其数学表达式为:

$$\rho_{xy} = \frac{E[(x - \mu_x)(y - \mu_y)]}{\delta_x \delta_y} \tag{4}$$

其中:  $E[(x - \mu_x)(y - \mu_y)]$  表示  $x$  和  $y$  的协方差;  $\mu_x$  和  $\mu_y$  分别表示  $x$  和  $y$  的均值,且  $\mu_x = E(x)$ ,  $\mu_y = E(y)$ ;  $\delta_x$  和  $\delta_y$  分别为  $x$  和  $y$  的标准差,且  $\delta_x = \sqrt{E[(x - \mu_x)^2]}$ ,  $\delta_y = \sqrt{E[(y - \mu_y)^2]}$ 。

相关系数用来描述两个信号之间相关程度,  $|\rho_{xy}| \leq 1$ ,绝对值越逼近 1,两者相关性越好。互相关函数用来表示两个信号在不同时间、不同地点或经过不同途径后的相互依赖程度。记首末两端信号分别为  $x(t)$  和  $y(t + \tau)$ ,则互相关函数  $R_{xy}(\tau)$  的表达式为:

$$R_{xy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t)y(t + \tau)dt \tag{5}$$

计算两信号相关性时,为排除信号本身幅值的影响,用前所述无量纲相关系数描述,并进行互相关函数的归一化处理,其互相关系数函数为:

$$\rho_{xy}(\tau) = \frac{\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T [x(t) - \mu_x][y(t + \tau) - \mu_y]dt}{\sigma_x \sigma_y} = \frac{R_{xy}(\tau) - \mu_x \mu_y}{\sigma_x \sigma_y} \tag{6}$$

实际工程中,互相关系数函数归一化后为:  $R_{xy}(\tau) = R_{xy}(\tau) \sqrt{R_{xx}(0)R_{yy}(0)}$  式中,  $R_{xx}(0)$  和  $R_{yy}(0)$  分别为  $x(t)$  和  $y(t)$  在零点的自相关函数<sup>[13]</sup>。

利用特定计算方法,找出互相关函数出现极值时与之对应延时量  $\tau_0$ ,这是互相关分析中最为关键的。实际工程管道测试中,硬件系统噪声、环境噪声不可避免,噪声影响相关峰值,而且天然气泄漏信号的非平稳性、连续性、宽频性等特征,也影响互相关法计算时延的准确性。直接对传感器采集的声压信号进行互相关分析,其峰值常常出现在时间延迟为零处。针对直接进行互相关分析出现的问题,首先对信号进行预处理,其中最重要的是信号去除噪声。

### 1.3 小波去噪

#### 1.3.1 小波变换

小波去噪是以小波变换理论为基础,结合实际工程应用,逐步建立起的去噪声方法。由于小波变换发展十分迅速,以及小波对数据处理能力的提升,使其尤其适用于非平稳信号的时频域处理,小波去噪也获得重大突破。小波变换是指信号由某一个基小波函数平移、伸缩得到一组小波函数叠加表示。基函数定义如下:

$$\psi_{a,\tau}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t - \tau}{a}\right), a, \tau \in R; a > 0. \tag{7}$$

其中,  $\psi(t)$  是一平方可积函数,满足条件:  $\int_R \psi(t)dt = 0$ 。

管道泄漏孔处由于湍射流与管壁的相互作用,声信号开始阶段主要是冲击波形式,多表现为含有许多尖峰或突变的信号。因此合理选择小波基函数可以最大程度还原泄漏信号<sup>[14]</sup>。

声波传感器采集导入计算机的信号是数字信号,因此使用离散小波变换分析,其离散形式定义为式(8)<sup>[15]</sup>。

$$WT_f(a_0^j, k\tau_0) = \int f(t) \{a_0^{-\frac{j}{2}} \psi[a_0^{-j}t - k\tau_0]\}^* dt, j = 0, 1, 2, \dots, k \in Z. \tag{8}$$

传感器采集的原始泄漏信号(函数)分解为尺度函数与小波函数的线性组合。原始泄漏信号函数中,原始泄漏信号函数空间剖分如图 2(图中只显示三级剖分)所示。

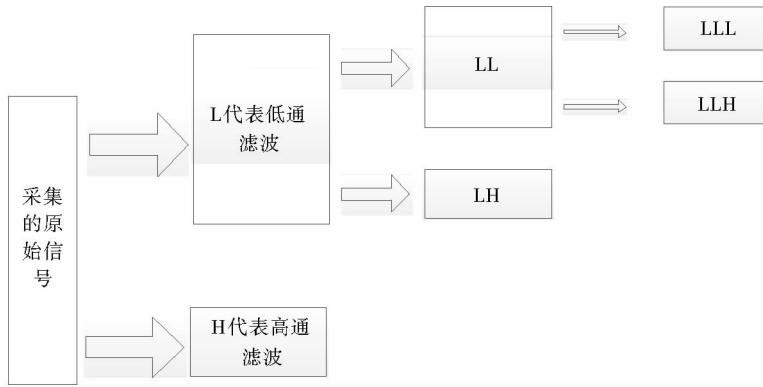


图 2 小波分析的空间剖分  
Fig. 2 Space division of wavelet analysis

### 1.3.2 去噪过程

小波去噪的基本过程:①传感器接受的泄漏信号进行小波变换,将信号分解到各层次的尺度中;②各尺度下设定小波系数阈值,并选择多算法融合阈值函数进行量化处理;③利用选择出的各尺度细节,经过小波逆变换重建原始泄漏信号,最终去除各种噪声。图 3 是小波去噪过程简图<sup>[16-19]</sup>。

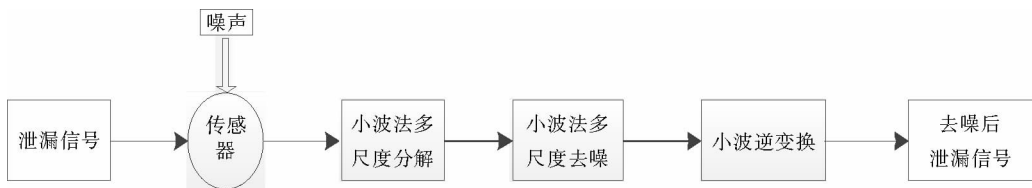


图 3 小波去噪过程图  
Fig. 3 Flow chart of wavelet denoising

定义多算法融合阈值函数为:

$$y = \begin{cases} (1 - \alpha) \operatorname{sgn}(x)(|x| - \alpha T) + \alpha(x - T + \frac{2T}{1 + e^{2x/T}}), & |x| \geq T \\ \alpha(x - T + \frac{2T}{1 + e^{2x/T}}), & |x| < T \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $\alpha$  是加权因子(定义式为  $\alpha = \frac{T}{|x| \times \exp(\sqrt{\frac{|x| - T}{|x| + T}})}$ );  $T$  为阈值函数的阈值。

## 2 泄漏检测与定位的仿真实验

该方法采用软件为主、硬件配合的原则,以降低成本,增强系统灵活性。软件平台基于美国仪器仪表公司的 LabVIEW(Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench),图形化编程语言采用 G 语言<sup>[8]</sup>。采用 FLUENT 加 Virtual Lab Acoustics 联合仿真的方式进行仿真泄漏信号,将仿真信号加上环境噪声导入 LabVIEW,利用 G 语言调用 MATLAB 脚本,编写信号去噪声程序<sup>[9]</sup>和天然气管道泄漏检测与定位系统的各个模块<sup>[10]</sup>。

由于主要研究气体管道泄漏,且空气与天然气类似,出于安全性和便于试验,采用空气作为天然气替代介质。

### 2.1 传感器信号的仿真与合成

通过三维制图软件物理建模,ICEM 划分结构网格,CFD 仿真流场数据,然后将流场速度脉动数据导入

声学软件(Virtual. Lab Acoustics)<sup>[20]</sup>进行声场仿真。最终获得原始无噪声泄漏声源数据(声压、声强、声功率级等)。其结构网格模型如图4(图中结构网格主要借鉴参考文献[3])所示。

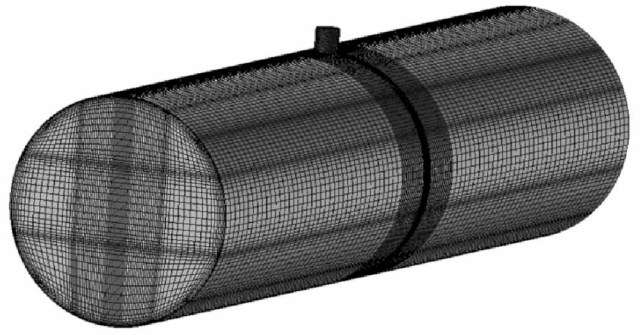


图4 管道泄漏结构网格模型

Fig. 4 Mesh model of pipeline leakage structure

通过仿真软件(Virtual. Lab Acoustics)获得原始无噪声泄漏声源信号如图5所示,转化为时域信号后使用“数据读取 VI”将原始无噪声信号导入 labVIEW。管道声波法泄漏检测与定位中,噪声为随机分布,通常认定为高斯白噪声,利用“加(函数)VI”使原始无噪声信号与高斯白噪声叠加出需要研究的信号——“传感器采集信号”。最终得到的仿真信号如图6所示。

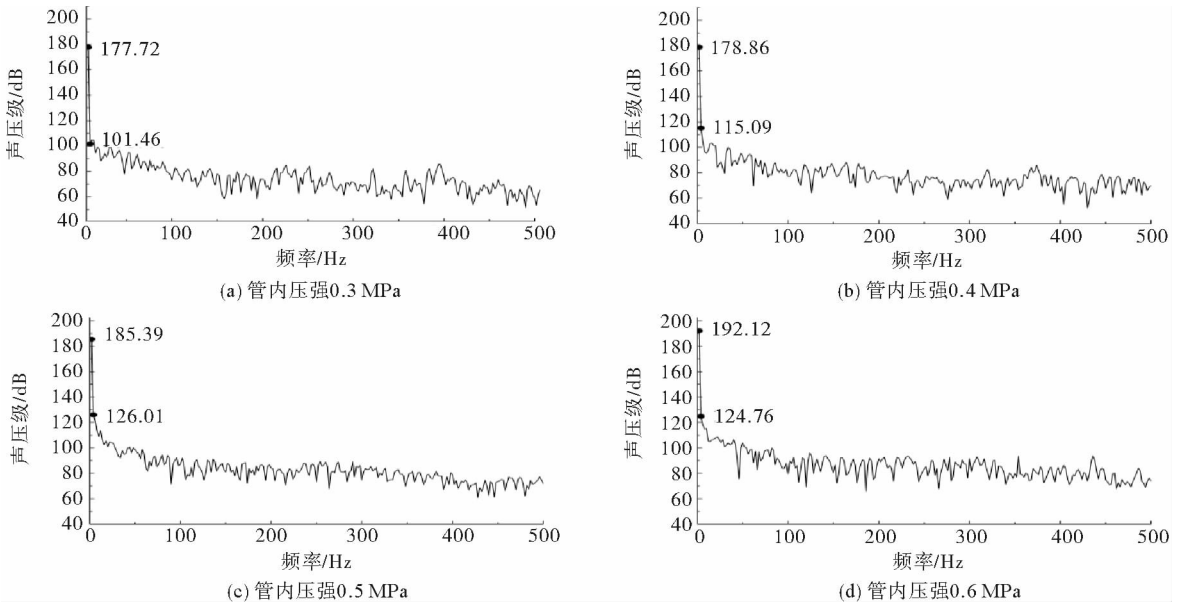


图5 泄漏孔径 5 mm 下声压级

Fig. 5 SPL under leak aperture 5 mm

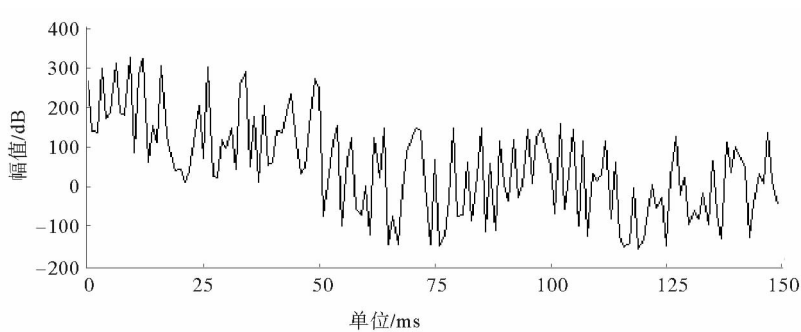


图6 仿真传感器采集的信号

Fig. 6 Simulation signal collected by sensor

### 2.2 labVIEW 调用 MATLAB 去噪

选用“传感器采集信号”作为原始含噪信号,通过 labVIEW 中的 MATLAB Script 脚本节点,调用基于 1.3 小节理论编程的 MATLAB 程序,进行信号前处理。后面板程序框图如图 7 所示。

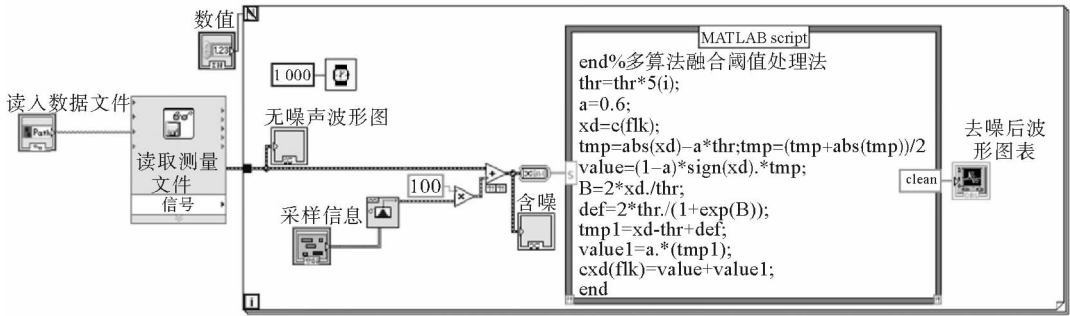


图 7 信号去噪后面板程序框图

Fig. 7 Block diagram of the rear panel for signal denoising

### 2.3 系统定位模块

本模块主要根据 1.2 节互相关函数理论结合 LabVIEW“互相关 VI”计算出  $\tau_0$ , 再代入定位公式(3), 来编程 labVIEW 定位模块,其定位程序后面板如图 8。

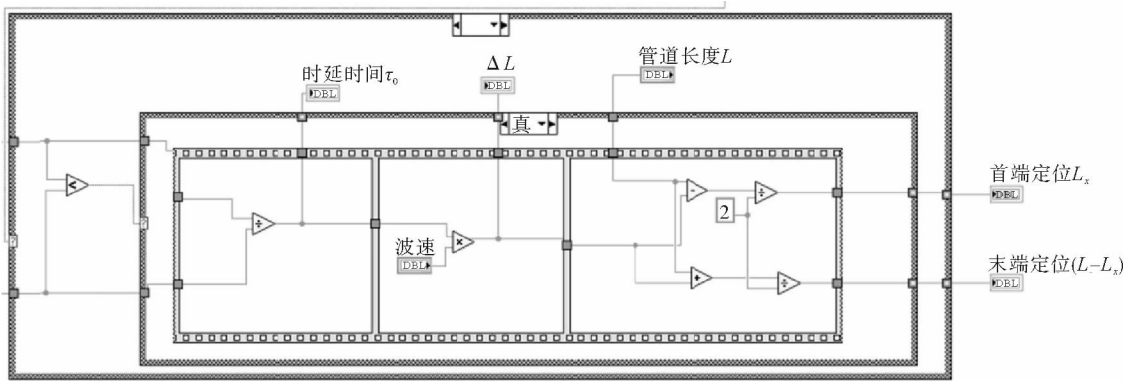


图 8 定位程序后面板

Fig. 8 Location program rear panel

## 3 泄漏检测与定位实验研究

### 3.1 实验台系统

如图 9 所示,根据相似原理搭建气体管道泄漏试验台,实验台系统主要由三部分组成,分别为动力单元、数据采集单元、数据分析计算部分:

- 1) 动力单元:有冠豹 V-0.25/8 压缩机和型号 SHLY AR4000-06 减压阀,为实验提供恒定气源。
- 2) 数据采集单元:主要是 PCB 声波传感器、采集卡、华云仪表的涡街流量计、压力表。
- 3) 数据分析计算部分:主要是高配置计算机和上位机软件平台(labVIEW)。

实验基本思路:压缩机产生中低压空气,通过减压阀的配合产生稳定气源。气体在管道内流动,采集此时声信号,第二步打开泄漏孔,气体经泄漏孔喷泄而出,采集此时声信号,将声信号导入 labVIEW, G 语言调用 MATLAB 去噪,然后进行数据互相关计算与分析,最终确定是否发生泄漏并定位泄漏孔的位置。

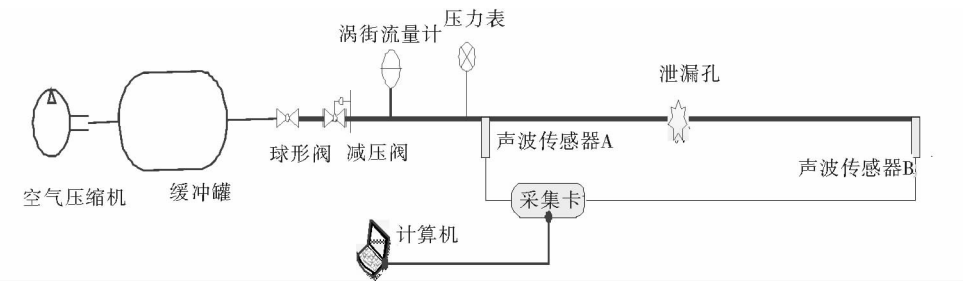


图 9 管道泄漏检测与定位实验系统原理图

Fig. 9 Schematic diagram of experiment system of pipeline leakage detection and location

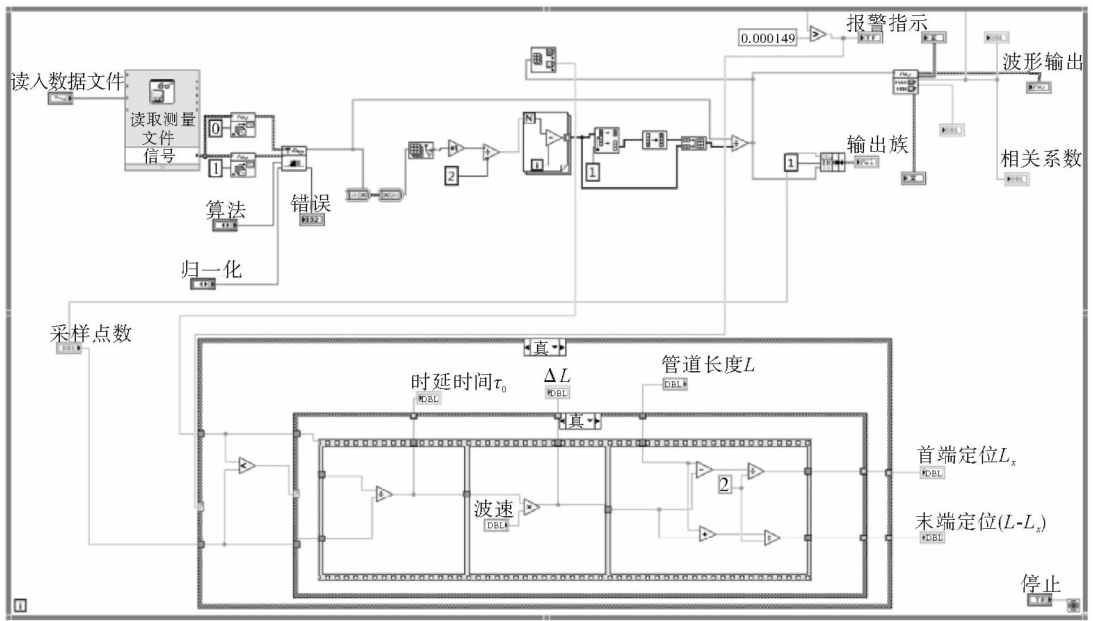


图 10 互相关分析与检测定位后面板

Fig. 10 Cross correlation analysis and detection and location rear panel

### 3.2 labVIEW 程序构成

labVIEW 程序主要由五个子模块构成,分别是数据采集模块、信号去噪模块、互相关分析与检测定位模块、定位公式实现模块、数据记录存储模块。现主要介绍互相关分析与检测定位模块,其后面板如图 10 所示。

LabVIEW 有专门的互相关计算 VI,利用 VI 建立管道时延计算程序。首先读取去噪后信号,然后利用 VI 计算首尾端信号的互相关性并判断是否泄漏,最后通过定位程序输出定位距离。

### 3.3 程序测试

登录 G 语言编写的天然气管道检测与定位系统,如图 11 所示。对长 200 cm、泄漏孔位于中间点( $L_x = 100\text{ cm}$ )

的管道进行测试。分别将仿真、实验的滤噪后信号进行互相关运算与定位分析。由图 12(a)知,互相关曲线在 1 点处达到峰值,说明泄漏信号到达两个传感器的时间差  $\tau_0$  是约 1 个时间点。由图 12(b)知,互相关曲线

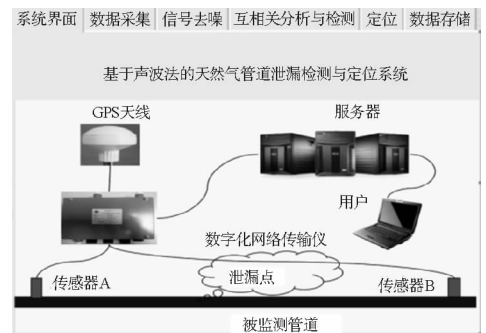


图 11 天然气管道检测与定位系统界面

Fig. 11 Interface of gas pipeline detection and location system

在 2.5 点处达到峰值, 泄漏信号的时延值  $\tau_0$  约 2.5 个时间点。

根据时延值流入定位程序, 可得到泄漏孔距离首末端传感器的距离。仿真结果  $\tau_0 = 1.172 \text{ ms}$ ,  $L_x = 80.063 \text{ cm}$ 。室内实验结果  $\tau_0 = 2.233 \text{ ms}$ ,  $L_x = 62.037 \text{ cm}$ 。物理模型与实际管道泄漏孔都位于中间点, 即  $L_x = 100 \text{ cm}$ 。误差存在的原因是由于声源仿真实理想化边界条件, 以及各软件之间的数据流动与转换, 导致仿真数据定位出现偏差。而室内实验受传感器精度、环境噪声和温度影响, 以及人为操作误差, 都会导致定位距离出现误差。进一步优化仿真边界条件、数据流和数据链接, 减少测量误差, 提高定位精度。

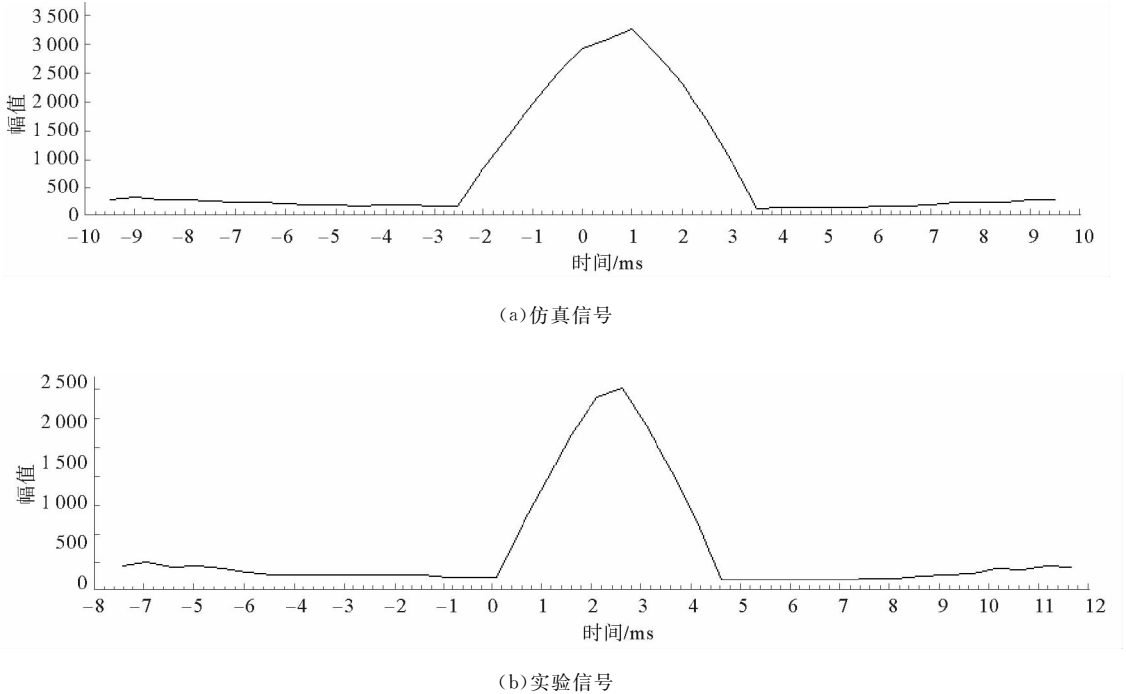


图 12 相关分析波形图

Fig. 12 Correlation analysis of signals

## 4 结论

天然气管网建设不断扩大, 加强天然气管道泄漏检测与维护越发重要。为节省检测成本, 提高检测效率, 采取仿真与实验相结合的方法, 对管道泄漏信号特性及其检测定位进行研究。

1) 运用多软件联合仿真, 对三维管道泄漏声源模型进行泄漏检测和定位, 提高了检测效率, 降低了检测成本。

2) 搭建实验台, 将实验结果、仿真结果与模型实际泄漏点, 进行对比分析, 表明该方法是可行的, 能够较好地对中低压天然气管道泄漏进行检测与定位。

3) 天然气管道泄漏检测与定位仿真系统工作量较大且是系统工程, 为进一步提高检测和定位精度, 需要进一步研究模型的精确度及软件之间的数据链接等。

### 参考文献:

- [1] 郑洪龙, 黄维和. 油气管道及储运设施安全保障技术发展现状及展望[J]. 油气储运, 2017, 36(1): 1-7.  
ZHENG Honglong, HUANG Weihe. Development status and prospect of safety insurance technologies for oil & gas pipelines and storage and transportation facilities[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2017, 36(1): 1-7.
- [2] 张卫芳. 2017 上半年我国燃气爆炸事故分析报告[R/OL]. [http://safety.gasshow.com/New\\_20170629/374368.html](http://safety.gasshow.com/New_20170629/374368.html), (2017-08-15).
- [3] 韩宝坤, 闫成稳, 鲍怀谦, 等. 输气管道泄漏流场特性分析[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2017, 36(6): 32-38.  
HAN Baokun, YAN Chengwen, BAO Huaqian, et al. Analysis on flow characteristics of gas pipeline leakage[J]. Journal of



- Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2017, 36(6): 32-38.
- [4] 叶迎春, 张来斌, 王金江, 等. 输气管道泄漏声源特性及其变化规律[J]. 天然气工业, 2016, 36(8): 124-131.  
YE Yingchun, ZHANG Laibin, WANG Jinjiang, et al. Characteristics and variation rules of acoustic source of gas pipeline leaks [J]. Natural Gas Industry, 2016, 36(8): 124-131.
- [5] 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): 373-381.  
LIU Cuiwei, LI Yuxing, WANG Wuchang, et al. Theoretical study and experimental study on leak detection for natural gas pipelines based on acoustic method[J]. Acta Acustica, 2013, 38(3): 373-381.
- [6] 韩宝坤, 闫成稳, 鲍怀谦, 等. 气体管道泄漏声源特性研究[J]. 声学技术, 2017, 36(2): 110-115.  
HAN Baokun, YAN Chenwen, BAO Huaiqian, et al. Study on leakage acoustic source characteristics of gas pipeline[J]. Technical Acoustics, 2017, 36(2): 110-115.
- [7] 张洪铭, 陈先锋, 刘杰, 等. 基于 LabVIEW 的长输天然气管道泄漏检测与定位研究[J]. 安全与环境学报, 2016, 16(1): 147-151.  
ZHANG Hongming, CHENG Xianfeng, LIU Jie, et al. Leak detection of the long distance natural gas pipelines and its location based on the LabVIEW[J]. Journal of Safety and Environment, 2016, 16(1): 147-151.
- [8] 曹会国. 基于 LabVIEW 相关分析的研究[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2007, 26(2): 74-77.  
CAO Huiguo. Research on LabVIEW-based correlation analysis[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2007, 26(2): 74-77.
- [9] 杨艳, 屈宝存, 齐伟, 等. 基于虚拟仪器的石油管道泄漏检测技术研究[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2010, 33(3): 142-144.  
YANG Yan, QU Baocun, QI Wei, et al. Research on detection of leakage in crude oil pipeline based on virtual instrument technology[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2010, 33(3): 142-144.
- [10] 杨理践, 李佳奇, 高松巍. 基于虚拟仪器的天然气管线泄漏声波监测与定位系统[J]. 仪表技术与传感器, 2010(7): 19-21.  
YANG Lijian, LI Jiaqi, GAO Songwei. Acoustic monitoring and positioning system of natural gas pipeline based on virtual instrument[J]. Instrument Technique and Sensor, 2010(7): 19-21.
- [11] 宋培培, 贾瑞生, 崔云洁, 等. 基于时差估计的管道漏点定位方法[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2017, 36(3): 104-113.  
SONG Peipei, JIA Ruisheng, CUI Yunjie, et al. Pipeline leakage location method based on time delay estimation[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2017, 36(3): 104-113.
- [12] 郭乔. 输油管道次声波法泄漏检测与定位技术研究[D]. 西安: 西安石油大学, 2015: 8-11.
- [13] 李博. 虚拟仪器技术在管道泄漏故障诊断中的应用研究[D]. 西安: 西安石油大学, 2010: 12-14.
- [14] 阳子轩. 复杂管道泄漏检测技术[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2011: 38-40.
- [15] EHRENTREICH F. Wavelet transform application in analytical chemistry[J]. Analytical and Bioanalytical Chemistry, 2002, 372(1): 115-121.
- [16] 武伟强, 赵会军, 王克华, 等. 次声波法输气管道泄漏检测系统的信号处理[J]. 油气储运, 2012, 31(5): 376-378.  
WU Weiqiang, ZHAO Huijun, WANG Kehua, et al. Optimization of infrasound wave-based leak detection and positioning system for oil pipeline[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2012, 31(5): 376-378.
- [17] 毛小虎, 郝永梅, 严欣明, 等. 基于离散小波分析的城市燃气管道泄漏检测定位[J]. 化工设备与管道, 2014, 51(3): 56-59.  
MAO Xiaohu, HAO Yongmei, YAN Xinming, et al. Detection and location for leakage occurred in urban gas pipeline based on discrete wavelet transform analysis[J]. Process Equipment & Piping, 2014, 51(3): 56-59.
- [18] 东方. 基于离散小波变换的方波消噪[J]. 科技风, 2015(11): 1-5.  
DONG Fang. Square wave denoising based on discrete wavelet transform[J]. Technology Wind, 2015(11): 1-5.
- [19] SCLABASSI R J. Wavelet denoising via sparse representation[J]. Science in China (Series F: Information Sciences), 2009, 52(8): 1371-1377.
- [20] 詹福良, 徐俊伟. Virtual Lab Acoustics 声学仿真计算从入门到精通[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2013: 408-414.