

# Practice of Intelligent Sound Wave Leak Detection System in Long Distance Natural Gas Pipeline

Wei Zhou<sup>1</sup>, Run Luo<sup>1</sup>, Dan Hou<sup>1</sup>, Bo He<sup>1</sup>, Yong Hu<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>CNOOC Guangdong Natural Gas Co., Ltd., Zhuhai Guangdong

<sup>2</sup>Beijing Huanyushengwang Technology Co., Ltd., Beijing

Email: [yonghu\\_iacas@163.com](mailto:yonghu_iacas@163.com)

Received: Jul. 2<sup>nd</sup>, 2020; accepted: Jul. 17<sup>th</sup>, 2020; published: Jul. 24<sup>th</sup>, 2020

---

## Abstract

Pipeline leakage monitoring is of great significance to ensure the safe operation of natural gas long-distanced pipeline. This paper introduces the mechanism, composition and function of the intelligent sound wave leak detection system, and introduces the application of the system in Zhuhai Zhongshan Natural Gas Pipeline Project in detail. The results show that the intelligent acoustic wave leak detection system is accurate and effective in the long-distance natural gas pipeline testing, with high system robustness, quickly response, accurate positioning, and has practical significance.

## Keywords

Intelligent Sound Wave, Long-Distance Natural Gas Pipeline, Test, Application

---

# 智能音波测漏系统在长输天然气管道上的实践

周 巍<sup>1</sup>, 罗 润<sup>1</sup>, 侯 丹<sup>1</sup>, 何 波<sup>1</sup>, 胡 勇<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>中海广东天然气有限责任公司, 广东 珠海

<sup>2</sup>北京寰宇声望智能科技有限公司, 北京

Email: [yonghu\\_iacas@163.com](mailto:yonghu_iacas@163.com)

收稿日期: 2020年7月2日; 录用日期: 2020年7月17日; 发布日期: 2020年7月24日

---

## 摘 要

本文介绍了智能音波测漏系统的机制、组成及功能, 并详细介绍了该系统在珠海-中山天然气管道项目

\*通讯作者。

的安装、测试等应用情况。结果表明：智能音波测漏系统在长输天然气管道上测试准确、有效，系统鲁棒性高、响应快速，定位精确，具有现实意义。

## 关键词

智能音波，长输天然气管道，试验，应用

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

管道流体运输[1]具有高效、经济、安全等优点，因此成为天然气最主要的运输方式[2]。为避免管道泄漏造成的危害，开发稳定可靠的泄漏检测系统，建立预警报警机制，具有重要意义[3] [4]。

此次中海广东天然气有限责任公司(以下简称“广东管道”)音波测漏系统项目在利旧基础上，提高原系统性能[5]，促进技术国产化，现开展智能音波泄漏在线监测系统项目建设工作。

## 2. 音波检漏系统介绍

### 2.1. 管道泄漏声波产生机理

管道泄漏流体在达管道外部时形成涡流[6] [7]，产生不同频率的压力或声波[8]，并在管道内部输送介质、管道周围介质(如土壤)等媒介中快速传播，通过分析管道内部的声波，可以判断出管道是否发生泄漏。

泄漏声波是压力状态下的流体和多种介质相互作用的结果，频域范围宽。泄漏声波通常会经历产生、稳定两个阶段，不同阶段其频率、幅度特性不同。由于产生阶段一般持续时间较短，对于本检测方案而言，关注泄漏声波稳定阶段的特征。由于泄漏声波的频率特性与管道输送介质的压力、流速、泄漏处孔径大小、形状等众多因素相关，实际中泄漏情况多种多样，因此泄漏频率特性各异。资料显示输水管道泄漏频率为 16 Hz~20 kHz [9]，泄漏点附近低频分量幅度更大，而输油管道泄漏的音频特性研究较少。

泄漏声波在泄漏点处声波功率最大，并且此处声波强度与压差变化、泄漏口形状、流速、泄漏率等因素相关[10] [11] [12]。通常管道内部介质压力越大、泄漏口成扩张形状、流速快、泄漏率较大的泄漏点，声波强度越大。同一条管道中介质压力、管道材质等工况相同或相近，泄漏点的声功率与流速的  $n (n > 1)$  次方近似成正比关系。通过泄漏声音信号幅度强弱，可以大致判断出泄漏量的大小。

### 2.2. Dolphin 智能音波泄漏监测系统

Dolphin 智能音波泄漏监测系统主要由：安装在管道站场和阀室的分站和安装在调度中心的主站组成。分站包括次声波传感器、现场数据采集处理器、系统控制主机(运行系统监控软件)等。经过多年的积累建立了强大的比对数据库作为诸多不同现场信号参照系，同时产品更适应 TCP/IP 协议下的新一代网络和技术。

## 3. 信号处理

泄漏信号在传播的过程中会受到各种噪声干扰，由于小波变换具有多分辨率特性，因此 Dolphin 智能音波泄漏监测系统采用小波去噪的方法对泄漏信号进行预处理[13]。另外对于小泄漏引起的泄漏信号比较微弱，需要对微弱信号进行特征提取，提高泄漏识别和定位效果。

### 3.1. 小波变换用于信号去噪

二进小波适合对数字信号进行处理，对其尺度  $a$  和平移  $b$  离散化后( $a = 2^j$ ,  $b = a * k$ )产生的:

$$\Psi_{j,k}(t) = 2^{-\frac{j}{2}} \psi(2^{-j}t - k), j, k \in Z \quad (1)$$

$$WT(j, k) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \Psi_{j,k}(t) dt \quad (2)$$

式中:  $WT(j, k)$  为小波系数, 本系统对泄漏信号进行 20 层分解, 根据上述小波去噪调参方法对 2019 年 12 月 23 日的放气数据进行去噪, 对于不同站点、不同工况, 微小泄漏均表现较好效果, 可以保持泄漏波形不失真, 突出特征点, 有效去除噪声毛刺干扰。图中蓝色为原始采集信号, 红色为去噪后信号。

如图 1 所示南屏站点, 图 2 所示坦洲站点: 向上尖峰大幅值毛刺容易增加系统误报, 去噪后信号更清晰, 去除毛刺干扰, 系统体现更高鲁棒性。

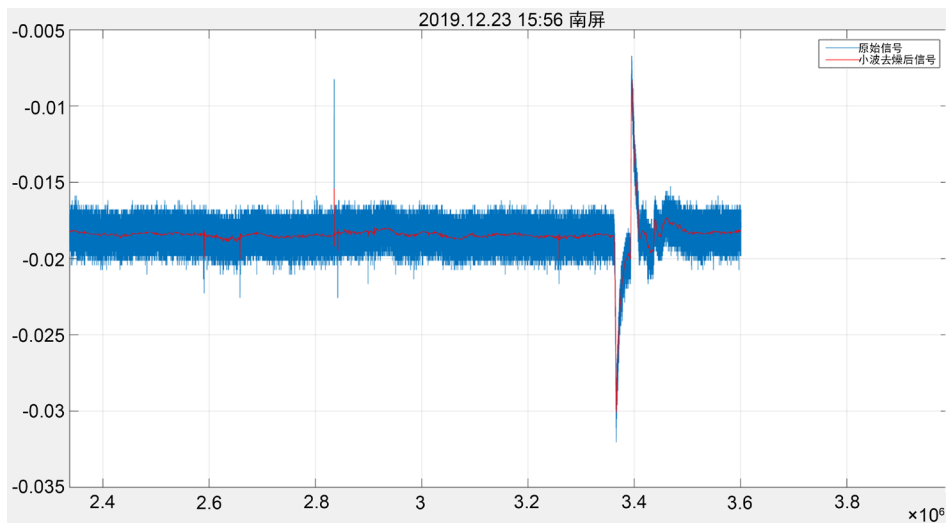


Figure 1. 2019.12.23 15:56 Nanping

图 1. 2019.12.23 15:56 南屏

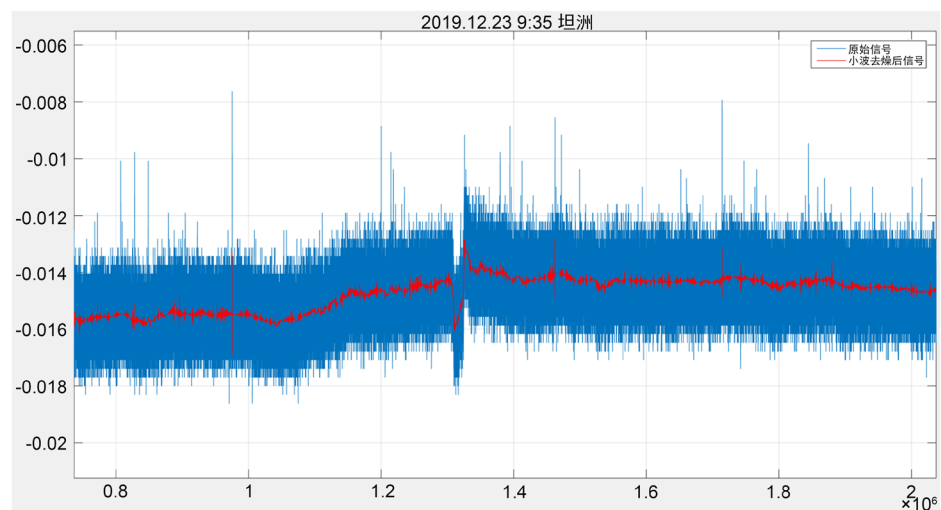


Figure 2. 2019.12.23 9:35 Tanzhou

图 2. 2019.12.23 9:35 坦洲

图 3 所示南屏站点的泄漏信号，去噪后信号可明显有别于去噪前泄漏信号，有利于泄漏信号的拐点确定。

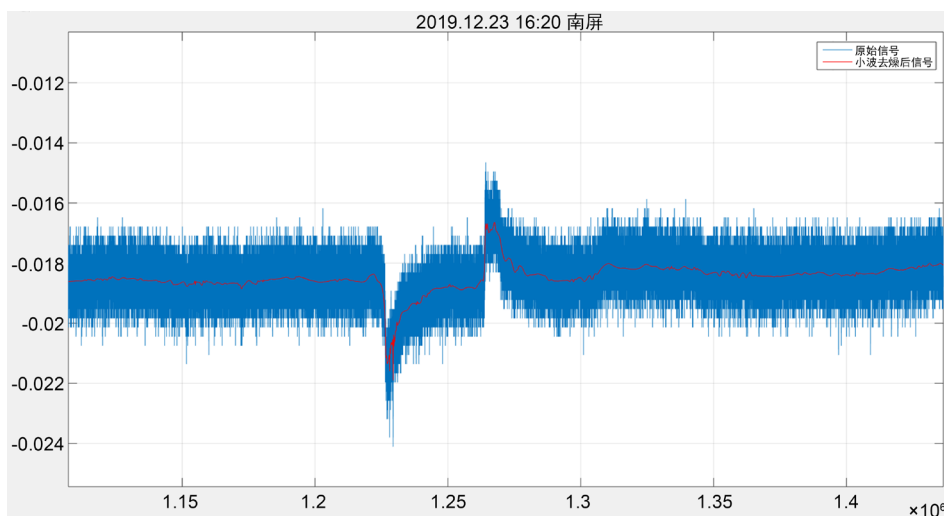


Figure 3. 2019.12.23 16:20 Nanping

图 3. 2019.12.23 16:20 南屏

### 3.2. 微弱信号提取

微小泄漏会被噪声淹没，需要进行微弱信号提取。通过偏度、峰度等多个指标选择最优观测信号作为 PCA 的输入，提取其流形成分；最后，通过 ICA 分离出源泄漏信号。提取信号的流形成分作为盲源分离算法的输入，避免了直接将最优观测信号作为输入将会引起信号源时频域波形的畸变，可有效排除其他干扰信号。

主成分分析(Principal component analysis: PCA)基本思路是寻找高维数据在低维空间重构误差最小意义下最优的投影子空间，从而用少数目的特征向量刻画样本的全局信息，最终达到降低原始空间维数的目的。设样本矩阵为  $X_{m \times n}$  ( $m$  个样本,  $n$  个特征), 首先对样本矩阵  $X$  均值中心化, PCA 希望找到一个方向  $w$ , 使得样本投影到方向  $w$  上方差最大(主方向), 优化目标为:

$$\hat{w} = \arg \min_{\|w\|^2=1} w^T X^T X w \quad (3)$$

提取前  $k$  个主方向构成载荷矩阵  $W = (w_1, \dots, w_k)$ , 则对原始样本特征提取后的结果为:  $X_{new} = XW$ 。如图 4。

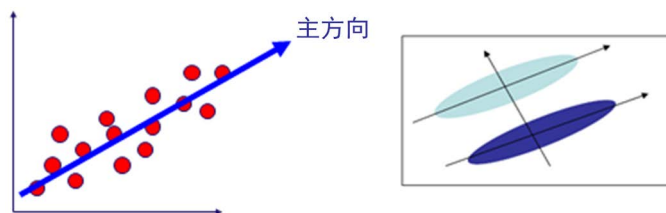


Figure 4. PCA Illustration

图 4. PCA 效果图

盲源分离(blind source separation, 简称 BSS)是一种无需源信号的特征及混合条件就能够从混合信号

中通过逆变换分离出源信号的方法, 要求待观测信号数应该大于或等于源信号数, 其中独立成分分析 (independent component analysis, 简称 ICA) 方法最终分离出来的源信号是互相独立的。

设  $s(t) = [s_1(t), s_2(t), \dots, s_M(t)]^T$  为  $M$  个源信号,  $x(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_N(t)]^T$  为  $N$  个观测信号。假设将  $M$  个  $s(t)$  信号进行混合, 形成  $N$  个  $x(t)$  信号, 其线性关系为

$$x(t) = As(t) \quad (4)$$

其中:  $A$  为系数  $\{a_{ij}\}$  未知混合矩阵。

ICA 方法就是需要从  $x(t)$  中分离出独立源信号  $s(t)$ 。设 ICA 方法还原出的信号为  $y(t) = [y_1(t), y_2(t), \dots, y_N(t)]^T$ , 其过程可描述为

$$y(t) = Wx(t) = Ws(t) \quad (5)$$

其中:  $y(t)$  为  $s(t)$  的近似估计;  $y_1(t), y_2(t), \dots, y_N(t)$  间相互独立;  $W$  为分离矩阵。

#### 4. 音波测漏系统放气实验

目前, 广东管道音波测漏系统项目已经建成四期, 共计 121.74 公里覆盖公司天然气输气管道干线。采用的是某音波测漏系统, 该系统在使用初期, 性能稳定且指标较好, 但后续出现了以下问题: ① 因为设备老化、盐雾腐蚀, 部分设备无法稳定运行; ② 由于管道新建增加分输, 系统需要不断更新扩容; ③ 设备为进口仪器, 国内无维修网点, 设备维护维修周期长; ④ 维修人员需从国外派遣, 技术服务不及时; ⑤ 产品为全球性专利产品, 由于技术垄断, 系统维护费用成本高等难题。

为解决公司已建音波测漏系统存在的问题, 现开展智能音波泄漏在线监测系统项目建设工作, 主要工作为: 软件开发、定制系统数据采集终端等硬件及安装调试等。本科研项目选取的试点应用段为珠中一期南屏分输站至南朗分输站段, 该段管道全长 41.75 km, 管径 660 mm, 运行压力 5~6 Mpa, 中间设有坦洲、金鼎、翠亨, 共计三个阀室, 其中坦洲阀室具有分输功能。站场(阀室)系统建设如图 5 所示。

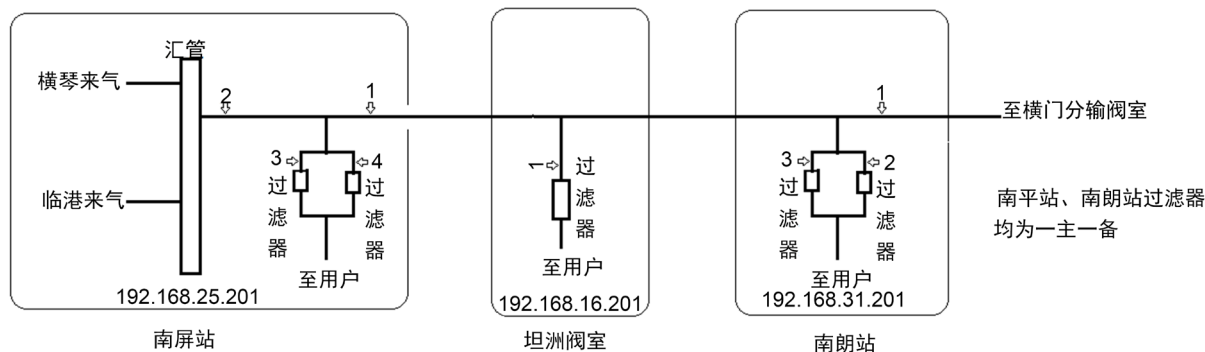


Figure 5. Station (valve chamber) system construction drawing

图 5. 站场(阀室)系统建设图

管道走向图如图 6 所示。

Dolphin 智能音波泄漏监测系统算法需要根据实际现场的数据信号进行调整识别来判断泄漏, 然而不同的管道参数、运行环境不同, 泄漏及其他操作产生的信号可能存在差异, 因此需要模拟泄漏实验, 为此提出选择该管道项目中的几条管道进行模拟放气泄漏实验, 采集相应的信号波形, 验证采集端对平稳工况的稳定性, 对异常工况的敏感性。调整检测、定位算法参数, 下面采用手轮转圈和孔板的两种模拟放气方式。

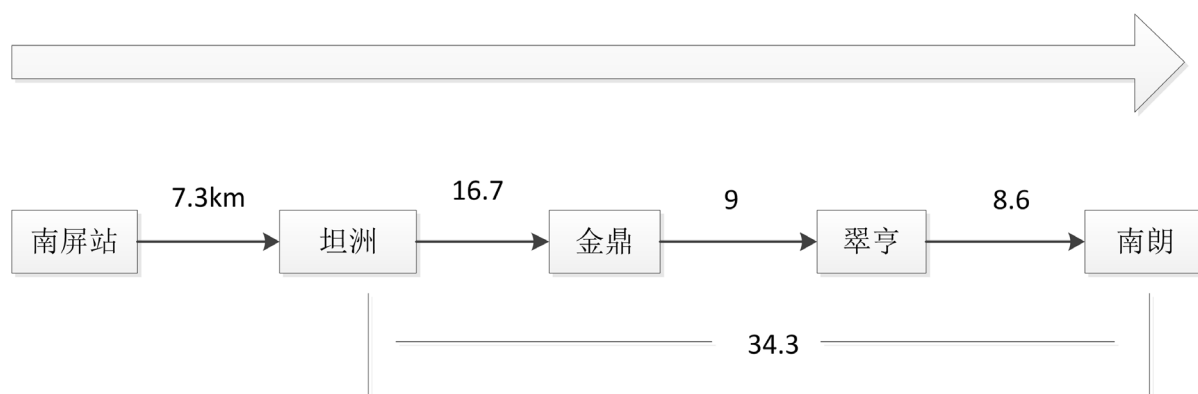


Figure 6. Pipeline route

图 6. 管道走向图

#### 4.1. 手轮转圈模拟泄漏操作

本次实验通过手轮转圈模拟泄漏在坦洲进行 4 次放气实验，南朗进行 5 次放气实验，金鼎进行 3 次放气实验，翠亨进行 2 次放气实验，南屏进行 4 次，放气实验记录(2019.12)如表 1 所示。

Table 1. Experimental record of hand wheel rotation deflation

表 1. 手轮转圈放气实验记录

序号	放气地点	放气方式	手轮圈数(圈)	各站是否有泄漏波形
1	坦洲	快开快关	5.7	有
2	坦洲	快开快关	4.75	有
3	坦洲	快开快关	4.27	有
4	坦洲	快开快关	4.1	有
5	南朗	快开快关	仪表底阀	无
6	南朗	快开快关	仪表底阀	无
7	南朗	快开快关	4	南朗有，坦洲和南屏有
8	南朗	快开快关	50调节阀40%开度	南朗有，坦洲和南屏无
9	南朗	快开快关	50调节阀	南朗有，坦洲有，南屏有轻微浮动
10	金鼎	快开快关	4	无
11	金鼎	快开快关	4.5	有
12	金鼎	快开快关	5	有
13	翠亨	快开快关	4.5	无
14	翠亨	快开快关	5	南朗有、坦洲有，南屏有轻微波形
15	南屏	快开快关	压力表底阀调节	无
16	南屏	快开快关	5	有
17	南屏	快开快关	5	有
18	南屏	快开快关	4	有

在坦洲阀室进行 4 次放气实验，实验数据如图 7 所示：坦洲 4 次放气实验泄漏信号明显，都传递到了南屏和南朗站。

在南朗站入站汇管对空排放管上进行 2 次放气实验，数据如图 8、图 9 所示：南朗站放气实验泄漏信号明显，但是该信号传递到坦洲阅室、南屏站时比较微弱。



Figure 7. 12.18 Data of Tanzhou outgassing experiment (Nanping Tanzhou)  
图 7. 12.18 坦洲放气实验(南屏 - 坦洲)数据

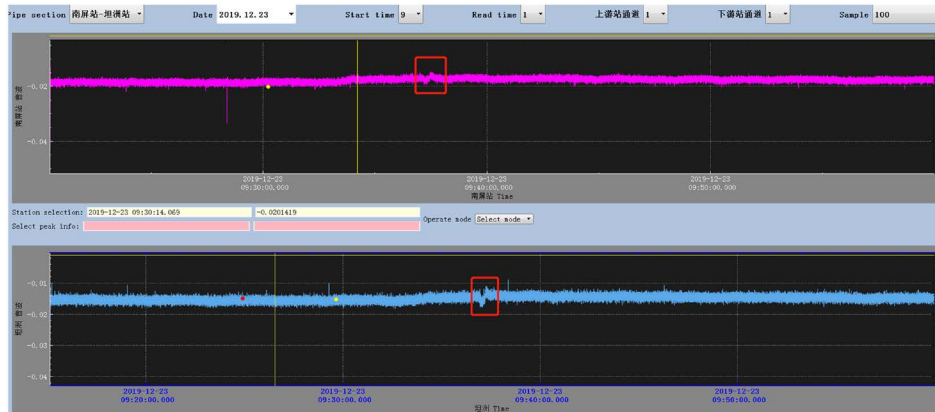


Figure 8. 12.23 data of Nanlong outgassing experiment (Nanping Tanzhou)  
图 8. 12.23 南朗放气实验(南屏 - 坦洲)数据

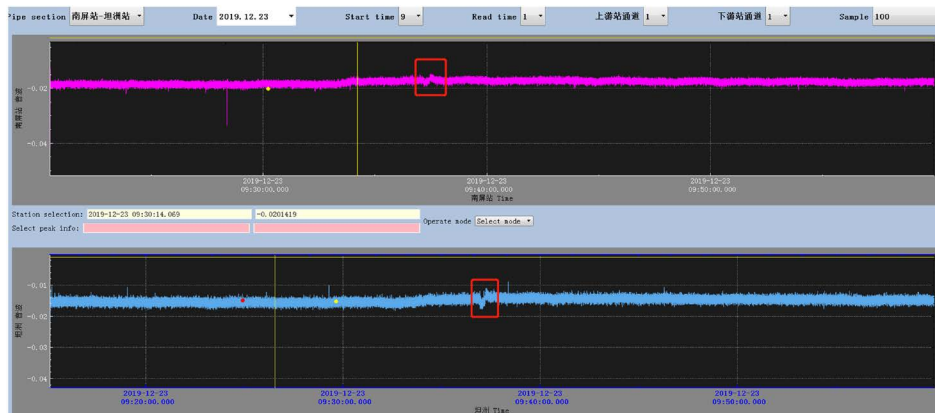


Figure 9. 12.23 data of Nanlong outgassing experiment (Tanzhou Nanlang)  
图 9. 12.23 南朗放气实验(坦洲 - 南朗)数据

## 4.2. 泄漏孔板模拟泄漏操作

根据现场实际考察，选在南朗综合站进站汇管放空管处进行改造，增加一套孔板测试装置。如图 10 所示。



**Figure 10.** The installation position of orifice plate device in Nanlang station is shown in the frame  
**图 10.** 南朗站孔板装置安装位置如框中

本次实验通过泄孔板模拟泄漏在南朗站进行放气实验，孔板如图 11 所示。



**Figure 11.** Leakage orifice plate  
**图 11.** 泄漏孔板实物

放气实验记录(2020.05)如表 2 所示：包含泄漏孔径、放气时长、定位误差等。

**Table 2.** Experimental record of air release from leakage orifice plate  
**表 2.** 泄漏孔板放气实验记录

序号	时间	泄漏孔径(mm)	放气时长	有无报警	定位误差/m
1	05.13 11:34:00	50 mm	30 s	有	69
2	05.13 15:25:00	30 mm	60 s	有	33
3	05.13 16:22:00	12 mm	60 s	无	-



## Continued

4	05.13 16:45:00	12 mm	60 s	有	68
5	05.14 11:11:00	10 mm	60 s	有	39
6	05.14 11:27:00	10 mm	90 s	有	34
7	05.14 13:40:10	8 mm	90 s	无	—
8	05.14 14:04:10	8 mm	90 s	有	38
9	05.14 14:16:00	8 mm	90 s	有	32
10	05.14 15:10:30	6 mm	120 s	无	—
11	05.14 15:26:30	6 mm	120 s	无	—
12	05.14 15:47:10	6 mm	120 s	无	—
13	05.14 17:03:00	8 mm	120 s	有	43
14	5.19 10:14:30	7 mm	100 s	无报警, 有波形	—
15	5.19 10:31:30	7 mm	90 s	无	—
16	5.19 14:06:30	7 mm	90 s	无	—
17	5.19 14:25:00	7 mm	90 s	有	34
18	5.19 14:36:00	7 mm	90 s	有	61
19	5.19 15:30:25	6 mm	90 s	无	—
20	5.19 15:47:00	6 mm	90 s	无	—
21	5.21 10:15:10	6 mm	90 s	有	49
22	5.21 10:27:00	6 mm	90 s	无	—
23	5.21 10:50:10	6 mm	90 s	无	—
24	5.21 11:06:10	6 mm	90 s	无	—
25	5.21 15:39:50	7 mm	90 s	有	49

15:25:00 放气 60 s, 孔径 30 mm, 实验数据如图 12 所示: 南朗、坦洲泄漏信号均十分明显, 有报警;

15:39:50 放气 90 s, 孔径 7 mm, 实验数据如图 13 所示: 南朗泄漏信号明显, 尽管坦洲信号微弱, 但是通过微弱信号提取技术, 可以有效提取信号特征, 提高泄漏报警效果。

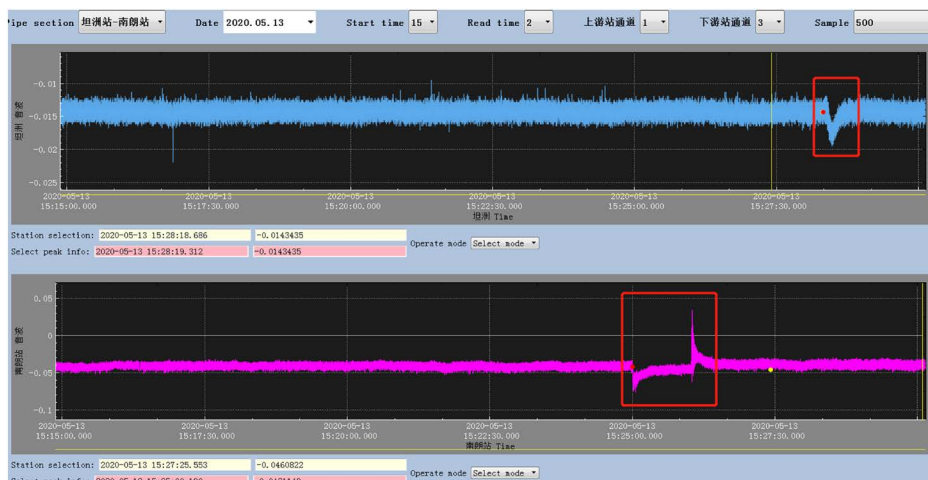


Figure 12. 15:25:00 Nanlang outgassing test data and alarm record

图 12. 15:25:00 南朗放气实验数据及报警记录

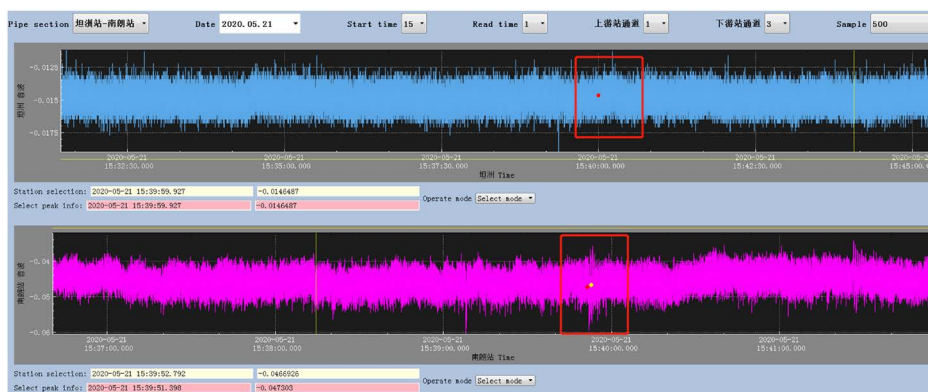


Figure 13. 15: 39:50 Nanlang outgassing experiment data and alarm record (7 mm test)

图 13. 15:39:50 南朗放气实验数据及报警记录(7 mm 测试)

### 4.3. 实验分析

通过两次实验(手轮转圈、泄漏孔板)分析,对仪表底阀放气产生泄漏信号不明显。在手轮转圈放气实验中,在中间阀室(金鼎)转圈 4.5 圈以下(6 mm 泄漏孔径左右)信号不明显。在末站南朗,目前可以检测到的最低泄漏孔径为 7 mm,主要原因是该站压力低,在同样孔径下产生的泄漏信号微弱。在南朗综合站站汇管放空管处加装孔板进行放气测试,传感器距离实际放气孔板至少 5 个弯头,放气产生的泄漏信号每经过一个弯头都会迅速衰减,极大影响泄漏信号的传输。

根据本项目的放气试验数据分析可得如下结论:

- 1) 本次放气试验依据原同类产品测试方案进行测试,当时模拟放气是采用转圈方式,最小转圈数量为 4 圈,在五个测试点全部能检测到信号,从敏感性角度来说,与原同类产品结果类似;
- 2) 公司依据孔板测试方案进行了不同孔径的放气测试: 50 mm、30 mm、12 mm、10 mm、8 mm、7 mm、6 mm。最小可检测孔径为 7 mm,在南朗放气点(低压、远离主管) 7 mm 泄漏孔径下测得的定位误差不得超过 50 米,从敏感性角度来说,与竞争公司系统结果类似;

Dolphin 智能音波泄漏监测系统可对微小泄漏信号检测、分析,通过泄漏实验校正,实现准确定位。

## 参考文献

- [1] 中国国家统计局. 2015 年中国统计年鉴[M]. 北京: 中国国家统计局, 2015: 8-11.
- [2] 靳世久, 孙家, 姜弘彦, 等. 强环境噪声下地下管道泄漏检测[J]. 天津大学学报: 自然科学与工程技术版, 1994(6): 782-787.
- [3] 王海伟. 音波测漏系统在输气管道的应用[J]. 管道技术与设备, 2014(2): 22-24.
- [4] Yang, G., Liu, Y., Wang, Y., *et al.* (2015) EMD Interval Thresholding Denoising Based on Similarity Measure to Select Relevant Modes. *Signal Processing*, **109**, 95-109. <https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2014.10.038>
- [5] Wade, W.R. and Rachford, H.H. (1988) Detecting Leaks in Pipe Lines in Pipe Lines Using SCADA Information. *Pipe Line Industry*, **68**, 64-66.
- [6] Wang, Z., Chang, J., Zhang, S., *et al.* (2015) An Improved Denoising Method in RDTs Based on Wavelet Transform Modulus Maxima. *IEEE Sensors Journal*, **15**, 1061-1067. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2014.2360559>
- [7] Li, S., Wen, Y., Li, P., *et al.* (2014) Modal Analysis of Leakage-Induced Acoustic Vibrations in Different Directions for Leak Detection and Location in Fluid-Filled Pipelines. *IEEE International Ultrasonics Symposium*, Chicago, IL, 3-6 September 2014, 1412-1415. <https://doi.org/10.1109/ULTSYM.2014.0349>
- [8] 郭静波, 蔡雄, 胡铁华, 张志文. 油气管道中智能机器人跟踪定位关键技术综述[J]. 仪器仪表学报, 2015(36): 481-498.
- [9] 魏明生, 童敏明, 訾斌, 唐守锋. 基于粒子群-拟牛顿混合算法的管道机器人定位[J]. 仪器仪表学报, 2012(33): 2594-2600.
- [10] 郭晨城, 文玉梅, 李平, 等. 采用 EMD 的管道泄漏声信号增强[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(6): 1397-1405.
- [11] Demirci, S., Yigit, E., Eskidemir, I.H., *et al.* (2012) Ground Penetrating Radar Imaging of Water Leaks from Buried Pipes Based on Back-Projection Method. *Ndt & E International*, **47**, 35-42. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2011.12.008>
- [12] 孙洁娣, 肖启阳, 温江涛, 等. 局域均值分解分析的管道泄漏孔径识别及定位[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(12): 2835-2842.
- [13] 曹欣雨. 自我健康监护仪软件系统设计及实现[D]: [硕士学位论文]. 长春: 长春理工大学, 2019.