

# 一种基于声波的管道泄漏点定位检测仪的开发

沈功田<sup>1</sup> 刘时风<sup>2</sup> 王玮<sup>3</sup>

(1. 中国特种设备检测研究院 北京 100013;

2. 北京声华兴业科技有限公司 北京 100029;

3. 南昌航空大学 教育部无损检测重点实验室 南昌 330063)

**摘要** 采用基于声学的方法和相关定位原理开发研制了一种管道泄漏点定位的检测仪。该仪器采用专用低频传感器、泄漏声信号波形的高速采集、基于网络的无线数据通讯和基于 USB 的数据快速传输、GPS 授时等多项先进的电子技术,可对不同材质和不同介质的管道泄漏实现现场实时定位检测和远程无线定位检测。经试验和现场应用证明,该系统在 0.4MPa 的压力下可以实现对 50m 管道 1mm 泄漏孔和 100mm 管道 3mm 孔的泄漏点定位检测。

**关键词** 声波 管道 泄漏 定位 检测仪

## Development of A Type of Pipeline Leakage Locating Instrument Based on Acoustic Waves

Shen Gongtian<sup>1</sup> Liu Shifeng<sup>2</sup> Wang Wei<sup>3</sup>

(1. China Special Equipment Inspection and Research Institute Beijing 100013;

2. Soundwel Corporation Beijing 100029 China;

3. Key Laboratory on NDT of the Ministry of Education University of Nanchang Aviation Nanchang 330063 China)

**Abstract** A type of pipeline leakage locating instrument is developed based on acoustic method and correlation location of continuous signals. This instrument can realize on-site real-time leakage location test and remote wireless leakage location test for pipelines of different materials and different medium using multiple advanced electronic techniques such as low frequency acoustic emission sensor, high speed acquisition of waveform of leakage signals, wireless data communication based on Internet, data high speed transmission based USB, time control based on GPS positioning and so on. Through the tests and field application, it is proved that this system can detect the leakage point of 1mm hole for 50m pipeline and 3mm hole for 100m pipeline under 0.4MPa compressed air pressure.

**Keywords** Acoustic wave Pipeline Leakage Location Testing Instrument

我国现有 7 万多公里的城市埋地燃气输送管道,其中有 40% 已运行 20 年左右,不少管道已进入事故高发阶段。由于管线的老化,不可避免的腐蚀、自然或人为损坏等因素,管道泄漏事故频频发生,曾多次发生由泄漏引发的恶性事故。城市燃气管道常埋在地下,因此使泄漏检测变得困难。如果泄漏得不到及时发现并加以制止,不仅造成能源浪费、经济损失,而且可产生爆炸、火灾、环境污染

等灾难性事故,造成巨大的生命和财产损失。然而,目前我国在城市埋地燃气管道检测监测技术方面非常落后,在泄漏检测方面,没有能够快速确定埋地管道泄漏的部位的技术和仪器,有些管道一旦发生泄漏,往往需要花费大量的物力、人力和时间来寻找泄漏点,为管道的安全运行带来事故隐患。

针对我国城市埋地燃气管道泄漏检测的现状、存在问题和市场需求,国家于 2006 年 10 月向中国

特种设备检测研究院和北京声华兴业科技有限公司下达“十一五”科技支撑课题,开展埋地燃气管道泄漏声学方法检测关键技术研究,研制便携式埋地燃气管道泄漏点定位检测仪样机,填补国内空白,以提高我国埋地燃气管道检测技术水平。

## 1 基于声波的泄漏检测仪器国内外概况

在埋地燃气管道和自来水管道的泄漏检测定位仪器的制造方面,国内为空白,国外主要有英国 RADCOM 公司的 Soundsens 多探头相关仪、德国 SEBA KMT 公司的 Correlux 多功能相关仪,法国 METRAVIB RDS 便携式油气检测仪,英国帕尔玛公司的 Soundsens “i” 多探头相关仪和瑞士 GUTERMANN 公司的 Aquascan700 相关泄漏检测仪。这些公司产品的共同特点是采用频率在 5kHz 以下,仅适用于自来水的泄漏检测,不能用于泄漏信号频率较高的燃气管道泄漏检测的要求。据报道,瑞士 WAGMET 公司的 LOG3000 相关仪能用于燃气管道泄漏检测,但实际应用效果较差,很难给出较精确的定位<sup>[1]</sup>。

## 2 基于声波的管道泄漏检测原理

流体穿过管壁漏孔外泄时,会激发广谱的音频信号,而一些小于 50kHz 的较低频声波信号可以沿管道壁传输较远的距离,通过安装在管道外壁的声波传感器可以较远距离探测到这些泄漏信号,并采集到信号的连续波形,如采用两个传感器进行探测,通过两个波形的相关分析即可以得到泄漏源的位置<sup>[2]</sup>。

埋地管道泄漏探测技术包括监测和检测两种。泄漏监测技术是对管道从不泄漏到发生泄漏这一新生过程的监测,一般采用固定装置进行实时监测,一旦发生泄漏就发出警报。管道的泄漏检测技术一般采用移动式的仪器设备进行,一种是进行定期检验发现已经产生和有可能产生泄漏的部分,另一种是管道已发生泄漏,采用仪器发现管道的泄漏点<sup>[3]</sup>。

管道泄漏声发射信号是一种连续型信号,频带范围主要分布在 1~80kHz。管道泄漏时产生的声发射信号具有以下特点:

- ① 泄漏声发射信号是由管中流体介质泄漏时与管道及周围介质相互作用激发的,是一种连续型信号,因此监测仪器不需要采用较高的采样频率;
- ② 泄漏声发射信号沿管道向上、下游传播,接收并分析该信号,可以获得泄漏源大小位置等信息;
- ③ 管道泄漏声发射信号受诸多因素的影响,如泄漏孔径大小和形状以及介质压力、管道周围介质、

环境噪声等,因此,声发射信号本质上属于一种非平稳随机信号;

④ 根据导波理论,泄漏声发射信号具有多模态特性,并且在管道内传播时存在频散现象<sup>[4]</sup>。

基于声波的管道泄漏点定位原理如图 1 所示,A、B 为两个声发射传感器,其中泄漏点位于两个传感器之间。将 A、B 两个传感器接受到的信号作互相关,得出信号传到 A、B 两个位置时的时间差  $\Delta t$ ,从而得到如下的公式:

$$X=[D-(v \times \Delta t)]/2$$

式中  $X$ ——泄漏点距参考传感器 A 的距离;

$D$ ——两个传感器之间的距离;

$v$ ——声波传播的速度;

$\Delta t$ ——从相关函数得出的泄漏信号到达传感器的时间差<sup>[5]</sup>。

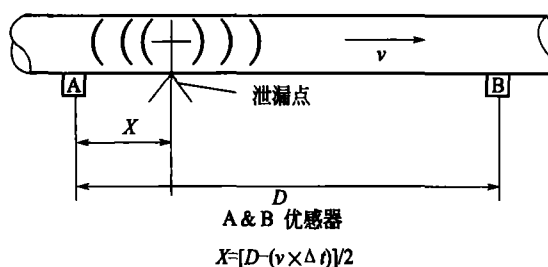


图 1 基于声波的管道泄漏点定位原理

## 3 基于网络技术的管道泄漏定位检测仪硬件的开发

开发的埋地管道泄漏点定位检测仪的结构如图 2 所示,图 3 为埋地管道泄漏点定位检测仪实物,仪器系统由一台笔记本电脑和多个分别安装在管道上的传感器与泄漏信号采集模块组成,通过 GPS 天线校准时间,确保漏点的高精度定位;主机可以通过 CDMA 无线模块保持实时在线控制各信号采集模块,各信号采集模块也可通过 CDMA 无线模块向笔记本电脑传输采集到的数据;另外,采集模块上设有 USB 通讯接口,可采用 USB 线与笔记本电脑进行快速数据传;通过在笔记本电脑上的数据分析软件,可对泄漏信号进行相关定位分析,给出泄漏点的位置和泄漏量的大小。

该仪器采用自制高灵敏度专用传感器,接收远距离泄漏产生的微弱声波信号;信号采集单元拥有大容量的 FLASH 存储器,可存储 100 次超长采样波形;可设定白天或夜间任意时段工作,程控设置 100 次定时检测,实现长期无人值守最佳时刻自动检测;可扩展,更多的采集器可加入系统,组成任意多通道测点;效率高,实现一次操作完成泄漏探测与漏点定位。

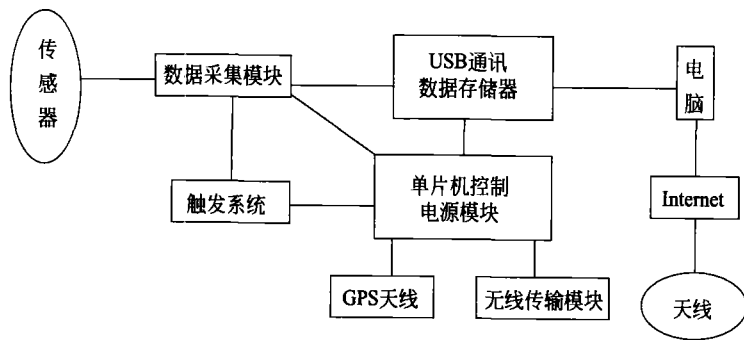


图2 埋地管道泄漏点定位检测仪的方框图

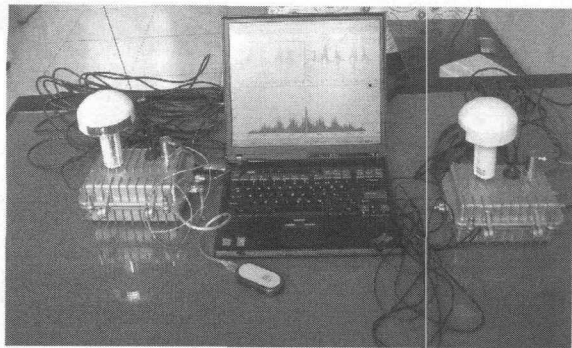


图3 埋地管道泄漏点定位检测仪

在实际的泄漏检测过程中,检测到的信号往往是经过多次反射和波形变换的复杂信号,信号由传感器接收并转换成电信号,然后输入给波形数据采集模块,实际检测时可根据检测目的和环境选择不同类型、不同频率和灵敏度的传感器。

数据采集模块包括放大器、模数转换模块。传感器输出的信号的电压只有微伏到毫伏的数量级,放大器将信号放大到一定程度传输给模数转换模块,模数转换模块将连续变化的模拟量转换为离散的数字量,然后进行滤波、采样、量化和编码,最终将数字信号传输给主处理器。

主处理器包括CPU和CPLD。CPU一般由逻辑运算单元、控制单元和存储单元组成,进行分析、判断、运算并控制计算机各部分协调工作。CPLD为复杂可编程逻辑器件,它借助集成开发软件平台,用原理图、硬件描述语言等方法,生成相应的目标文件,通过下载电缆将代码传送到目标芯片中,实现设计的数字系统。

GPS时钟同步控制模块包括GPS天线模块和RTC实时时钟模块。泄漏检测按照检测长度划分为若干区段,在区段两端安置传感器,各个传感器之间相距几百米,每个探头均连着GPS同步时钟,GPS天线接受GPS时钟同步信号,做相应的处理得到时钟同步信号和绝对时间戳并发送给采集单元,采集单元接收处理后的GPS同步信号,达到同步整个分布式采集系统。

无线传输模块是将传感器采集到的信号传输到仪器主机,或者用来传输主机发出的命令。本仪器采用的无线传输模块为CDMA模块。USB离线数据传输功能设置的目的是为了防止仪器无线传输模

块失效而开发的有线传输模块。数据存储器是记忆设备,用来存放程序和数据。它根据控制器指定的位置存入和取出信息。由于泄漏检测是长时间检测,所以电源模块显得尤为重要,在节约电源的同时,也配置了一款能充电,容量大的电池。供电模块由充电电源,锂电池组组成。

#### 4 基于网络技术的管道泄漏定位检测仪软件的开发

管道泄漏声波信号定位分析软件是管道泄漏检测定位仪最重要的组成部分之一,它能处理和分析采集到的泄漏声波信号,考虑到开发环境和操作使用方便,兼容性好等因素,确定操作系统采用Windows 2000、Windows XP及后续版本,操作环境在简体中文、英文和繁体中文下运行。

管道泄漏检测的目的就是发现管道上的泄漏点位置和泄漏的强度。由于探测到的管道泄漏信号是连续型信号,因此泄漏点的定位只有采用相关定位方法才能得到信号的时差,从而由时差来计算出泄漏点的位置。由于信号的衰减,探测到的信号及其微弱,因此,为了提高信噪比,专门开发了基于波形的谱分析和小波分析的方法来对波形信号进行降噪处理,然后再进行相关定位以提高检测的灵敏度。另外,该软件还具有测量信号均方根电压(RMS)的功能,通过测量RMS可以评估介质的泄漏强度。

图4为埋地管道泄漏点定位检测分析软件的界面,其主要包括5个窗口。左边的窗口是设备管理器;右上方两个窗口是波形窗口,显示被分析数据的波形和采集信息;中部下方的窗口是定位分析窗口,显示根据当前数据分析的定位结果;右下方是管道分布窗口,显示根据各个传感器载入数据所计算出来的RMS最大值,每条线表示一个传感器。

考虑到现场工程检测和实验室试验数据分析的需要,再根据系统声波信号采集模块的实际情况,开发的声波信号离线采集分析软件具有如下的功能:

- ① 文件读取、存储等管理功能;
- ② 两个传感器的离线全波形的显示;

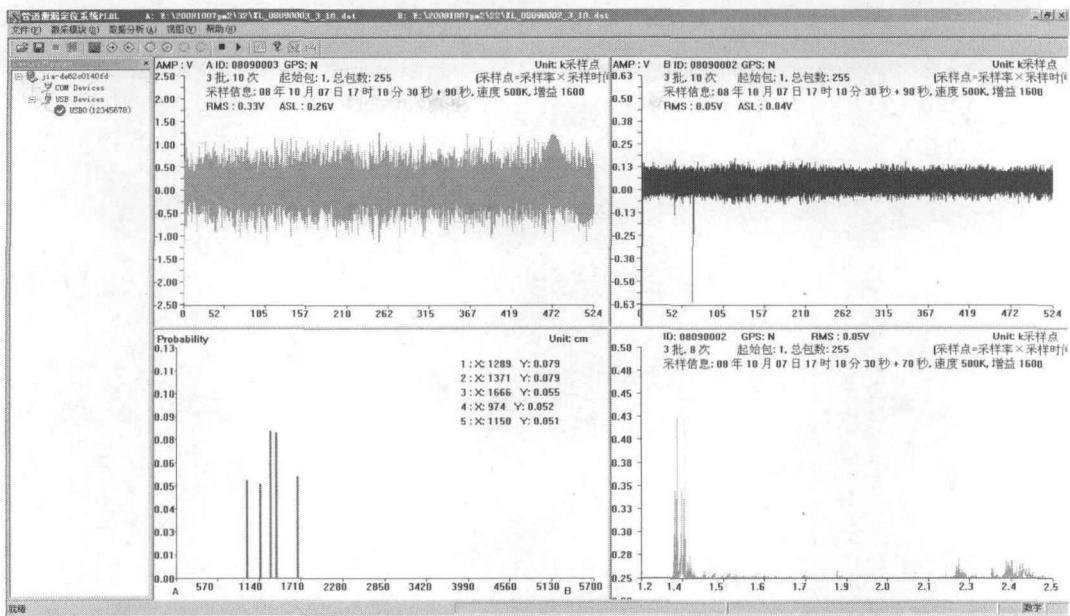


图4 埋地管道泄漏点定位检测分析软件界面

③ 两个传感器的离线波形参数的采集和列表显示;

④ 两个传感器的离线波形特征参数的统计、关联分析与显示;

⑤ 两个传感器的声发射源(泄漏点)的离线相关定位分析与显示。

右边传感器 B 距离 43.6m 处来模拟管道的实际泄漏。采用传感器为 2 个 SR40 型传感器, 泄漏点使用  $\Phi 1\text{mm}$  孔径的放气阀放气, 介质为 0.4MPa 的压缩空气。图 6 为相关定位结果, 泄漏点离传感器 A 的距离为 12.82m, 误差为 2cm。

第二种试验采用  $\Phi 273\text{mm} \times 8\text{mm}$  的管道, 试段全长为 231m、埋深 1.5~5m 不等。用球阀控制的泄漏孔在离管道左边传感器 A 66m, 距离右边传感器 B 165m 处来模拟管道的实际泄漏。采用传感器为 2 个 SR40 型传感器, 泄漏点使用  $\Phi 3\text{mm}$  孔径的放气阀放气, 介质为 0.4MPa 的压缩空气。图 7 为相关定位结果, 泄漏点离传感器 A 的距离为 65.4m, 误差为 0.6m。

## 5 现场试验应用

第一种试验采用  $\Phi 159\text{mm} \times 6\text{mm}$  的管道, 试段全长为 65m、埋深 50cm, 如图 5 所示。用球阀控制的泄漏孔在离管道左边传感器 A 距离 12.8m, 距离

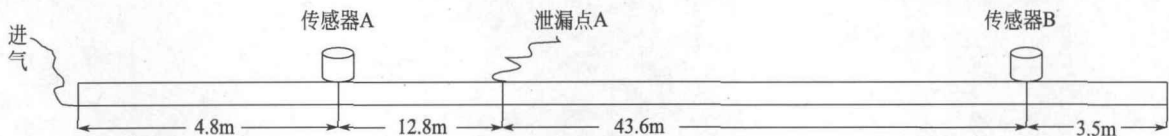


图5 管道泄漏试验装置

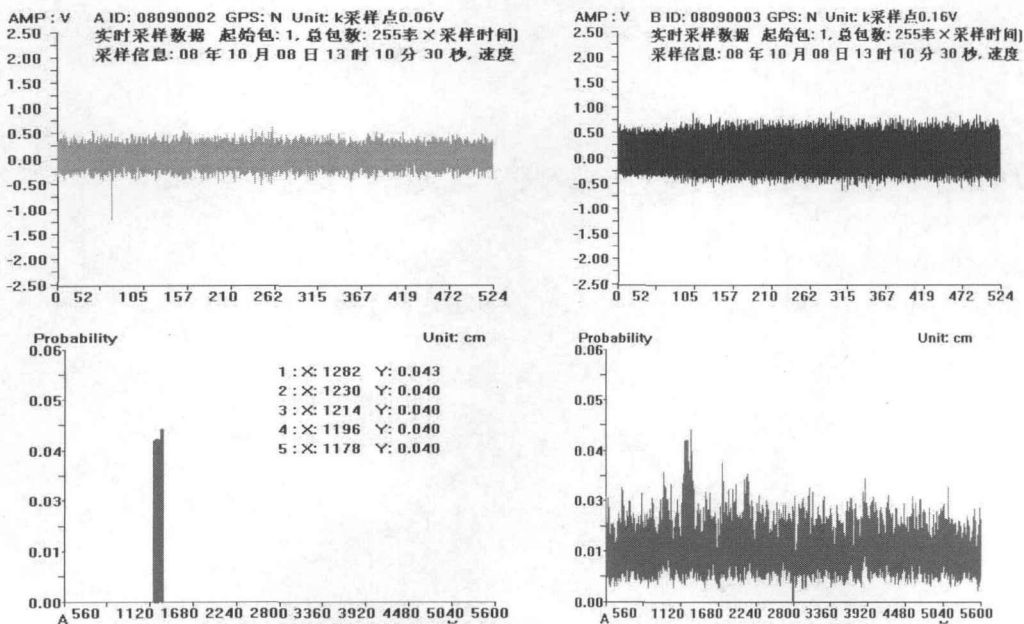


图6  $\Phi 159\text{mm} \times 6\text{mm} \times 65\text{m}$  管道上  $\Phi 1\text{mm}$  泄漏孔相关定位结果

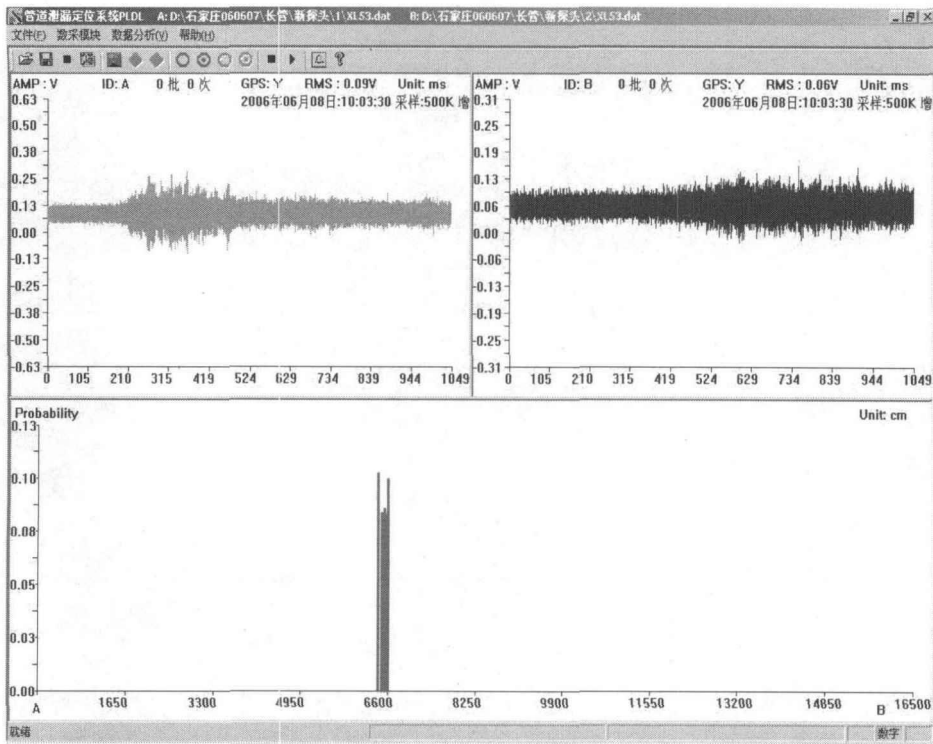


图7  $\Phi 273\text{mm} \times 8\text{mm} \times 231\text{m}$  管道上:  $\Phi 3\text{mm}$  泄漏孔相关定位结果

## 6 结论

通过对研制的仪器进行现场测试和进行多种情况下埋地管道气体泄漏的检测试验,得到如下结论:

- ① 相关定位是进行埋地燃气管道泄漏点定位的有效方法;
- ② 基于波形的小波分析重构可以提高埋地燃气管道泄漏点定位的灵敏度;
- ③ 适用于埋地燃气管道泄漏点定位的频率主要位于  $10 \sim 60\text{kHz}$  的范围;
- ④ 泄漏产生的声发射信号是通过管道内空气介质传播的,声速在  $300 \sim 350\text{m/s}$  的范围内;
- ⑤ 在内压不变的情况下,泄漏声发射信号强度随着泄漏孔直径的增加而增加;
- ⑥ 已开发完成的埋地压力管道泄漏点定位检测仪器样机的技术特点为泄漏定位的精确度  $\leq$  探测器间距的 2%, 最大为  $\pm 3\text{m}$ ;

在管道  $0.4\text{MPa}$  的压力下,  $50\text{m}$  传感器间距可探测到  $1\text{mm}$  孔的泄漏信号,  $100\text{m}$  传感器间距可

探测到  $3\text{mm}$  孔的泄漏信号;

硬件采用数字化电路,具有基于网络远程控制与数据传输的功能;

软件采用 Windows 2000、Windows XP 及后续版本的操作系统;兼容性好,易于升级。

## 参考文献

- [1] 陈华敏. 管道泄漏检测技术进展[J]. 安全与环境工程, 2003, 10(3):58~61.
- [2] 沈功田等. 埋地管道泄漏监测检测技术[J]. 无损检测, 2006, 28(5): 261~265.
- [3] 陶雪荣等. 在用埋地管道检测技术现状与发展[J]. 中国特种设备安全, 2004, 21suppl:41~45.
- [4] 王朝晖. 声发射技术在管道泄漏检测中的应用. 中国石油大学学报(自然科学版)[J], 2007, 5(31):87~90.
- [5] 沈功田, 耿荣生, 刘时风. “连续声发射信号的源定位技术”. 无损检测, 第 24 卷, 第 4 期, P164-167, 2002 年 4 月。

基金项目: 本研究由国家自然科学基金项目 60534050 和国家“十一五”科技支撑计划 2006BAK02B01 资助。