

# 次声波技术在管道泄漏检测中的应用

丁小勇 宋保强 吕永强 中国石油北京油气调控中心

**摘要:** 次声波具有频率低、波长长、衰减小等特点,能够在传播长距离后仍然保留较强的能量。次声波管道泄漏检测系统有效监控范围大,不受现场环境的限制。系统由一个负责数据处理的主站和若干个数据采集分析系统组成,数据分析系统采集次声信号,通过企业内局域网或3G网络方式传送至主站系统。主站信号处理软件能够对采集的信号进行实时处理,准确地将泄漏信号提取出来,通过计算泄漏信号到达相邻两个分站的时间差异实现精确定位,发布报警信号。目前该检测系统报警定位误差为 $\pm 50$  m,系统响应时间不超过40 s,误报率为3.83%,有效率为96.17%,漏报率为零。

**关键词:** 管道泄漏;检测系统;次声波;数据采集;定位精度

doi:10.3969/j.issn.1006-6896.2015.10.040

次声波泄漏检测系统基于声学、流体力学、现代信号处理等相关理论,该技术的主要优点是在运行前期不需要建立管道的数学模型,更符合我国管道敷设面积广、管线跨距长的实际情况,因此有着更为广泛的应用和较好的发展前景。

## 1 几种泄漏检测方法

国内油气管道发展迅猛,随着使用年限的增长,管道出现老化、腐蚀、穿孔、泄漏等现象,因此如何及时、快速地检测管道是否发生泄漏,对企业的稳定生产和安全运行非常重要<sup>[1]</sup>。目前,各种类型管道探测器向多样化、高分辨率、尺寸规格系列化及智能化方向发展,应用较多且较为成熟的检测方法有流量检测法、光纤检测法、负压波检测法和次声波检测法。

### 1.1 流量检测法

流量检测法是管道泄漏检测领域最早期的方法,通过检测管道输入端的输入流量与管道输出端的输出流量差,来判断管道是否发生泄漏,原理很简单。该方法存在以下缺点:①无法实现定位,即无法准确有效地发现泄漏点,不利于快速发现泄漏点并及时维修;②受流量检测仪表精度的限制,一般需要管道泄漏达到一定数量级,仪表才能检测出来并报警。

### 1.2 光纤检测法

管道发生泄漏时会在泄漏点出现温度变化,采用光纤光栅和分布式光纤温度传感检测技术,可实现管道全线温度的连续检测,通过检测管道周围的温度场异常变化及时发现泄漏,并进行漏点精确定位<sup>[2]</sup>。该方法存在以下缺点:①人员活动多的环境

会对光纤的温度检测产生干扰,容易产生误报,报警准确率低,但在人烟稀少的环境下报警准确;②设备成本高,施工要求及维护要求高。

### 1.3 负压波检测法

利用负压波技术原理进行管道泄漏检测和定位。管道泄漏时会造成泄漏点压力下降,这种压力下降信号会沿着管道向两端传播,传播的速度取决于管道内介质<sup>[3]</sup>。检测系统通过对比两站间接收到负压波的时间差,计算出泄漏点的位置。该方法存在以下缺点:①系统只能检测到泄漏量较大的泄漏,对于泄漏量较小的泄漏无法检测;②定位精度很差,误差达数公里;③对管道的首末端压力差有要求,对首末端压差大的输油管道有效果,对首末端压差小的输气管道没有效果。比如在天然气管道上,由于天然气首末端压力差几乎为零,负压波法完全不适用。

### 1.4 次声波检测法

次声波具有频率低、波长长、衰减小等特点,能够在传播长距离后仍然保留较强的能量。次声波管道泄漏检测系统有效监控范围大,管道发生泄漏产生的次声信号与管道工况和泄漏量无直接关系。

输油管线所处环境多数比较恶劣,长输管线泄漏检测系统必须具有灵活应用的功能来适应各种不同的应用场合,同时必须具有非常高的系统稳定性来保证系统可靠地运行。

## 2 次声波管道泄漏检测系统

次声波泄漏检测系统由一个负责数据处理的主站和若干个数据采集分析系统组成,如图1所示。

数据分析系统采集次声信号,通过企业内局域



网络或3G网络方式传送至主站系统。主站信号处理软件能够对采集的信号进行实时处理,准确地将泄漏信号提取出来,通过计算泄漏信号到达相邻两个分站的时间差异实现精确定位,发布报警信号。GPS(Global Positioning System)校时设备保证所传输数据的同步<sup>[4]</sup>。

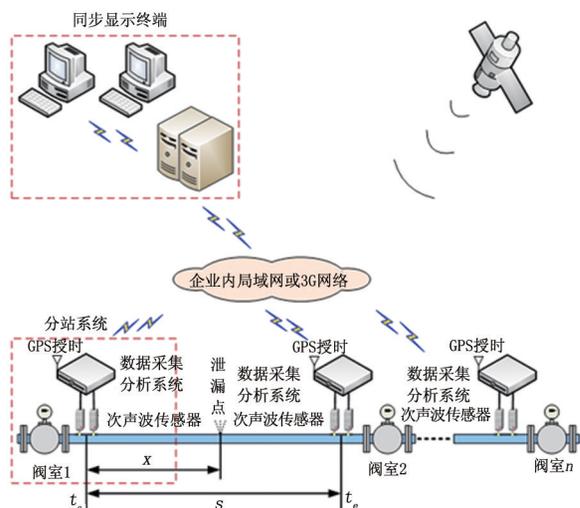


图1 次声波管道泄漏检测系统示意图

图1中  $x$  表示泄漏点到管道起始端传感器的距离 (m);  $s$  表示管道两端传感器之间的长度 (m)。由图1可以推算出对泄漏点的定位计算

$$x = \frac{s - v \cdot \Delta t}{2} \quad (1)$$

式中  $v$  为次声波在管道介质中的传播速度 (m/s);  $\Delta t$  为管道两端传感器收到管道泄漏信号的时间差 (s)。

### 3 次声波泄漏检测系统主要技术

#### 3.1 多通道数据采集

基于不同通道数据的灵敏度不同,小流量管道泄漏信号(尤其是停输时的泄漏信号)也能够被检测到,降低了漏报率。此外,多通道数据异常信号信息的融合也可以有效地提高泄漏信号的识别率。图2为同一个泄漏信号经过不同的通道采集信号对比,发现第二通道的信号更容易检测出来,信号的精度更高。

#### 3.2 信号的特征提取

由于管道内的干扰信号较多,因此被检测出的异常信号也多,需要对信号从时域和频域进一步分析,提取特征。

当管道发生异常的时候,声波传感器在管道上采集的信号在波形上与没有发生异常时有明显的不同,因此可以提取信号在时域中的波形特征来构造特征向量。反映管道振动波形特征的指标可以构造

为以下几种(将它们称为信号的统计特征):

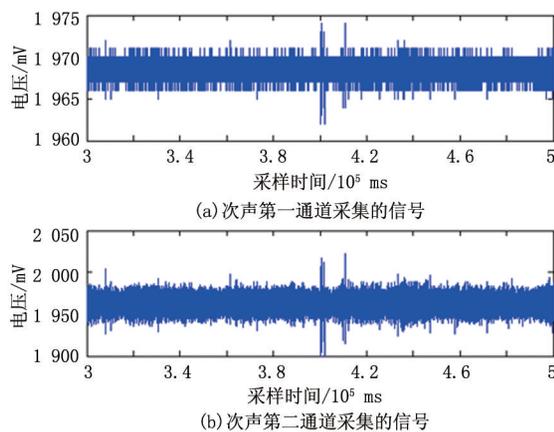


图2 两通道次声信号对比

(1) 反映强弱变化的参数。

$x(n)$ : 表示在时域上某一时刻的数字信号;

$\bar{x}$ : 表示这组数据的平均值。

峰值  $X_{\max} = \max\{|x(n)|\} (n = 0, 1, 2 \dots)$  (2)

平均峰值  $X_{\text{am}} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^N |x(n)|$  (3)

方差  $X_{\text{avr}} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} (x(n) - \bar{x})^2$  (4)

均方幅值  $X_{\text{rms}} = \sqrt{X_{\text{avr}}}$  (5)

方根幅值  $X_r = \left[ \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} |x(n)|^{1/2} \right]^2$  (6)

(2) 反映波形变化的参数。

波形指标  $S = \frac{X_{\text{rms}}}{X_{\text{am}}}$  (7)

(3) 反映剧变冲击特性的参数。

峰值因子  $X_c = \frac{X_{\max}}{X_{\text{rms}}}$  (8)

脉冲因子  $X_{\text{inf}} = \frac{\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} (x(n) - \bar{x})}{X_{\text{avr}}^2 - 3}$  (9)

裕度因子  $L = \frac{X_{\max}}{X_r}$  (10)

(4) 反映波幅分布情况的参数。

峭度  $X_k = \left[ \sum_{n=0}^{N-1} x(n)^4 \right]^{-1/4}$  (11)

峭度因子  $X_{\text{kf}} = \frac{X_k}{\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} |x(n)|}$  (12)

式中  $X_{\max}$  为峰值 (mm);  $X_{\text{am}}$  为平均峰值 (mm);  $X_{\text{avr}}$  为方差 ( $\text{mm}^2$ );  $X_{\text{rms}}$  为均方幅值 ( $\text{mm}^{-2}$ );  $X_r$  为方根幅值 (mm);  $S$  为波形指标, 无因次;  $X_c$  为峰值因子, 无因次;  $X_{\text{inf}}$  为脉冲因子, 无因次;  $L$  为裕度因子, 无因次;  $X_k$  为峭度, 无因次;  $X_{\text{kf}}$  为峭



度因子, 无因次;  $N$  为数字信号数。

同时管道在泄漏及非泄漏的情况下, 信号能量在频域上的分布也有明显的不同。因此, 设信号的谱图沿频率轴方向分几个区域之后, 每个矩形面积的平均功率分别为  $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n$ , 则功率谱的特征可以用如下的  $n$  维向量来描述  $\rho=(\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n)$ , 如图3所示。

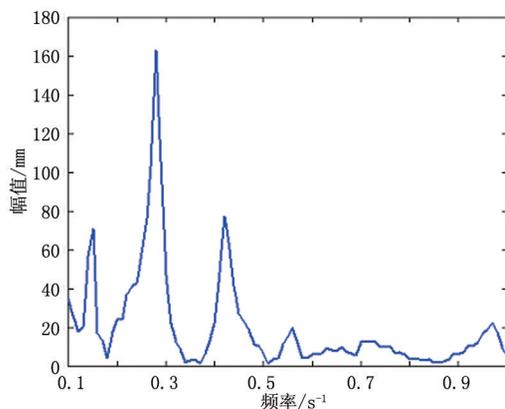


图3 次声信号的频谱

可以定义新的  $n$  维特征向量  $\rho=(\rho'_1, \rho'_2, \dots, \rho'_n)$ , 其中

$$\rho'_i = \frac{\rho_i}{\sum_{i=1}^n \rho_i} \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (13)$$

不同的模型其高峰频率处不同, 因此也可将高峰能量比作为输入矩阵的向量

$$\rho'_m = \frac{\sum_{j=1}^n \rho_j}{\sum_{i=1}^n \rho_i} \quad (i=1, 2, \dots, n; j=k-st/2, \dots, k+st/2; st=1000/df) \quad (14)$$

式中:  $\rho$  为平均功率 (W);  $k$  为高峰能量处频率 (Hz);  $st$  为某一时刻频率 (Hz);  $df$  为频率间隔值 (s)。

将上述信号的统计特征和能量特征构成一组特征向量, 既包含信号的时域特征又包含信号的频域特征, 因此能较全面地反映信号中所包含的信息<sup>[5]</sup>。

### 3.3 提高定位精度

泄漏信号的时间差跟每个分站所采集的信号时间点有关。由于各个分站位于管线的不同位置, 各自都有着独立的时钟。为了准确定位, 要求每个时钟必须同步, 同步的精度达毫秒级。GPS具有全天候不受任何天气的影响, 全球覆盖 (高达98%), 三维定点、定速、定时、高精度, 快速、省时、高效率, 应用广泛、多功能和可移动定位等特点, 因此系统中的每个分站都要进行GPS高精度授时, 精度越高的GPS所需要的费用自然也越高。考虑到降

低用户的使用成本, 目前误差在几十米内是可以接受的范围。

不同管径、不同输送介质、不同输送压力的管道其声速都是不一样的<sup>[6]</sup>, 因此需要根据实际情况进行声速调整, 通过管道的高压端或低压端的操作信号来获得声速  $V$ 。

## 4 应用案例

某公司研发的次声波管道泄漏检测系统于2012年4月1日在济邯成品油管线投入使用。该管线布控长度约为86.48 km, 共设置4个分站节点, 如图4所示。



图4 分站安装示意图

从系统试运行至今, 已经报警了多起盗油案例, 帮助油田工作人员顺利地找到了盗油阀门, 减少了大量的经济损失。目前该检测系统报警定位误差为  $\pm 50$  m, 系统响应时间不超过40 s, 误报率为3.83%, 有效率为96.17%, 漏报率为零。

次声波管道泄漏检测系统在济邯成品油管线上的长期运行结果表明: 该系统灵敏度高、适应性强、报警快速、定位准确, 能够实现管道泄漏检测和定位报警, 保障长输管道的安全运行。

### 参考文献

- [1] 李长俊. 天然气管道输送[M]. 北京: 石油工业出版社, 2000: 11.
- [2] 胡志新, 张陵, 乔学光, 等. 分布式光纤布拉格光栅在油气管道检测中的应用[J]. 应用光学, 2000, 21(4): 35-37.
- [3] 苏维均, 廉小亲, 于重重, 等. 负压波定位理论在输油管道泄漏检测系统中的应用[J]. 微计算机信息, 2003, 19(3): 1-6.
- [4] 臧春喜, 郭彦懿, 白春华, 等. 基于LabVIEW的次声波测试系统[J]. 仪表技术, 2005(1): 18-19.
- [5] 王立坤. 原油管道泄漏检测若干关键技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2002.
- [6] 杜功焕, 朱哲民, 龚秀芬, 等. 声学基础[M]. 南京: 南京大学出版社, 2001: 3.

[第一作者简介] 丁小勇: 工程师, 2003年毕业于中国石油大学(华东)油气储运专业, 主要从事长输成品油管道调度工作。

13810189648、xiaoyongding@petrochina.com.cn

收稿日期 2015-04-08

(栏目主持 樊韶华)

