

# 基于负压波的管道泄漏诊断

王可非 王桂增 杨军 方崇智

(清华大学自动化系, 北京, 100084)

张维东 张锦生 李北新

(东北输油管理局科研设计所, 沈阳, 110035)

**摘要** 本文介绍用波敏法进行管道泄漏诊断的原理和试验结果。波敏法是基于压力波传播规律, 并采用相关分析技术对从管道两端所采集到的压力信号进行处理以实现泄漏检测与定位的一种诊断方法。由于不需要流量信号, 且对负荷扰动具有较强的抗干扰能力, 因而具有较大的实用价值。

**关键词:** 长输管道 泄漏诊断 波敏法

## 1 概述

近年来, 国内外很多人在管线泄漏诊断方面进行了大量的工作, 其基本方法大致有下面几种。流量平衡法<sup>[1,4]</sup>是人们最容易想到的方法。在管线中间没有分支的情况下, 当管线出口流量小于入口流量时, 就可以判断是发生了泄漏。压力梯度法<sup>[6]</sup>是根据发生泄漏前后管线中压力梯度的变化进行泄漏诊断的一种方法。这种方法受仪表精度、工况扰动的影响比较大, 因此检测精度很受限制, 只是在大泄漏量时检测精度较高。辨识法<sup>[3,7]</sup>通过辨识管道的数学模型来进行泄漏诊断, 这种方法需要在管道系统上施加 M 序列信号, 且模型的辨识精度直接影响诊断精度。泄漏诊断的另外一类方法是状态估计方法<sup>[2,5]</sup>, 它通过估计管道沿线压力、流量的分布来进行诊断。它的缺点是需要测量流量信号, 且算法较复杂, 距实用还有一段距离。

由于流量计在输油管道中会造成损失, 且安装维修困难, 因此, 一般在实际管线上除首、末泵站外均不安装流量计。针对实际管线上没有流量测量信号的特点, 本文研究了一种基于压力传播的泄漏诊断方法——波敏法。这是 H. H. Brons 和 H. Schaffhaussen<sup>[8]</sup>首先提出来的, 它只需对管线两端的压力信号进行检测。本文中对这种方法进行了改进, 应用相关技术, 提高了诊断的灵敏度和精度。

## 2 波敏法基本原理

长输管线上设有许多泵站, 每两个泵站之间的距离为几十公里甚至上百公里, 泵站的作用是给原油加温、加压, 在每个泵站的入口和出口均设有压力检测点。泄漏诊断在两个泵站之间的管道上进行。

当管道上某一点突然发生泄漏时, 在泄漏处将引起压力突降, 形成一个负压力波。该波将以一定波速向管道两端传播, 经过若干时间后分别传到上、下游压力传感器处。根据上、下游端压力传感器检测到的压力波形变化就可以判断管道是否发生了泄漏。再根据负压波传到上、下游端的时间差进行泄漏定位, 这就是用波敏法进行泄漏诊断的基本原理。

上、下游端分别设置压力测点  $p_1, p_2$  (如图 1), 当管线在 X<sub>1</sub> 处发生泄漏时, 泄漏产生的负

压波即以一定波速  $a$  同时向上、下游传播,并将在  $t$  和  $t+\tau_0$  时刻分别被传感器  $p_1$  和  $p_4$  检测到.对  $p_1, p_4$  的压力信号进行相关处理

$$\Phi(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^{+T} p_1(t) p_4(t - \tau) dt \quad (1)$$

式中  $\tau \in (-\frac{L}{a}, \frac{L}{a})$ ,  $a$  为波速.  $L$  为  $p_1, p_4$  之间的距离.

未发生泄漏时,相关函数  $\Phi(\tau)$  将维持于某一值附近;当发生泄漏时,  $\Phi(\tau)$  将发生变化,当变化量达到一定数值,则认为发生了泄漏.而且,当  $\tau = \tau_0$  时,  $\Phi(\tau)$  将达到最大值,即

$$\Phi(\tau_0) = \max_{\tau \in (-\frac{L}{a}, \frac{L}{a})} \Phi(\tau) \quad (2)$$

理论上

$$\tau_0 = \frac{2X_1 - L}{a} \quad (3)$$

解出定位公式如下

$$X_1 = \frac{1}{2}(L + a\tau_0) \quad (4)$$

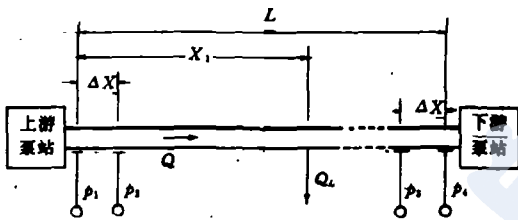


图1 压力测点设置示意图

其中  $\Delta t = \Delta X/a$ .

作如下相关函数

$$\Phi(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^{+T} y_1(t) y_2(t - \tau) dt \quad (7)$$

其中

$$\tau \in (-\frac{L - 2\Delta x}{a}, \frac{L - 2\Delta x}{a})$$

当  $\Phi(\tau)$  大于一定数值,就认为发生了泄漏,检测和定位方法同上.

### 3 波敏法计算机实现

实际系统中,检测到的压力信号送入计算机处理.计算机采集到的压力信号为  $p_i(k)$ ,  $i = 1, \dots, 4, k$ , 为当前时刻.为了提高相关分析的灵敏度,必须滤去  $y_1(k)$  和  $y_2(k)$  中的直流分量,为此,引入参考压差  $\Delta p_{12}^*(k), \Delta p_{34}^*(k)$

$$y_1(k) = p_1(k - n_0) - p_2(k) - \Delta p_{12}^*(k) \quad (8)$$

$$y_2(k) = p_3(k) - p_4(k - n_0) - \Delta p_{34}^*(k) \quad (9)$$

式中,  $n_0 = \text{int}(\frac{\Delta t}{T})$ ,  $T$ , 为采样周期.为了减小取整时带来的误差,  $\Delta t$  应该选择为采样周期的整数倍,换一句话说,要求两个压力测点之间的距离  $\Delta X$  满足

$$\Delta X = n_0 T, a \quad (10)$$

即要求  $\Delta X$  是压力波在一个采样周期内所走距离的整数倍. 这一点在设置压力测点位置的时候必须予以考虑.

参考压差  $\Delta p_{12}^*(k)$ ,  $\Delta p_{34}^*(k)$  为管道未发生泄漏时的  $p_1, p_2$  之间及  $p_3, p_4$  之间的压差, 其递推算式为

$$\begin{aligned}\Delta p_{12}^*(k) &= \lambda \Delta p_{12}^*(k-1) + (1-\lambda)[p_1(k) - p_2(k)] \\ \Delta p_{34}^*(k) &= \lambda \Delta p_{34}^*(k-1) + (1-\lambda)[p_3(k) - p_4(k)]\end{aligned}$$

式中,  $\lambda$  为滤波系数,  $\lambda \in (0, 1)$ , 它的选择体现了参考压差对实际压差的跟踪效果.

利用式(9)和(10)得到的时间序列  $\{y_1(k)\}$ ,  $\{y_2(k)\}$  计算相关函数:

$$\Phi_{y_1, y_2}^{(k)}(l) = \frac{1}{N} \sum_{j=k-N}^k y_1(j) y_2(j-l) \quad (11)$$

其中  $N$  为数据长度,  $l \in (-m, +m)$ ,  $m = \text{int}(\frac{L-2\Delta X}{aT_s})$ ,  $k$  为现在时刻. 为了实现在线实时监测, 采用递推算算法计算相关函数, 递推公式如下

$$\Phi_{y_1, y_2}^{(k)}(l) = \lambda \Phi_{y_1, y_2}^{(k-1)}(l) + (1-\lambda) y_1(k) y_2(k-l) \quad (12)$$

其中  $\lambda$  为加权系数,  $\lambda \in (0, 1)$ .

发生泄漏时, 必存在  $l_0 \in (-m, +m)$  使得

$$\Phi_{y_1, y_2}^{(k)}(l_0) = \max_{l \in (-m, m)} \Phi_{y_1, y_2}^{(k)}(l) \quad (13)$$

当

$$\Phi_{y_1, y_2}^{(k)}(l_0) \geq \Phi_{\text{ALARM}} \quad (14)$$

说明发生了泄漏.  $\Phi_{\text{ALARM}}$  为泄漏报警门限. 报警门限的选择要考虑两方面的问题: 一方面要保证报警的灵敏度, 尽量减少漏报警; 另一方面要保证一定的抗干扰能力, 最大限度地减少误报警. 为了消除干扰, 对压力采样信号要先进行平滑处理

$$p_i^*(k) = \lambda p_i^*(k-1) + (1-\lambda) p_i(k) \quad (15)$$

式中  $\lambda$  为滤波系数, 且  $\lambda \in (0, 1)$ .

$p_i(k)$  为采样值,  $p_i^*(k)$  为平滑后的数值,  $i=1, \dots, 4$ . 在程序中, 用  $p_i^*(k)$  来计算  $y_1(k)$  和  $y_2(k)$ . 在发生泄漏报警后, 用式(4)进行定位, 由于  $l_0 = \tau_0/T_s$ , 所以

$$\hat{X}_i = \frac{L + aT_s l_0}{2} \quad (16)$$

#### 4 实验室泄漏诊断试验

实验室实验管道系统如图 2 所示. 模拟管线长 120m, 内径 10mm. 已知压力波在水管线中的波速为 1222.2m/s. 在管道的一端, 设有两台水泵(图中的泵 1、泵 2). 在管道上 0m, 20m, 100m, 120m 处设有四个压力测点  $p_1-p_4$ , 采用 KY-G 型压阻式压力传感器, 精度为 0.15%. 另外, 在管道入口、出口处安装有两台 LW 型涡轮流量计  $Q_1, Q_2$ , 精度为 1%. 在 40m, 60m, 80m 处设有三个旁支管, 作为模拟泄漏点, 依次称为 1", 2", 3" 泄漏点, 其流量大小由球阀  $V_1, V_2, V_3$  来控制. 实验结果如下:

##### (1) 泄漏时的压力波形

图 3 记录了实验管道发生泄漏时  $p_1(t), p_2(t), p_3(t), p_4(t)$  的波形.

(2) 泄漏诊断

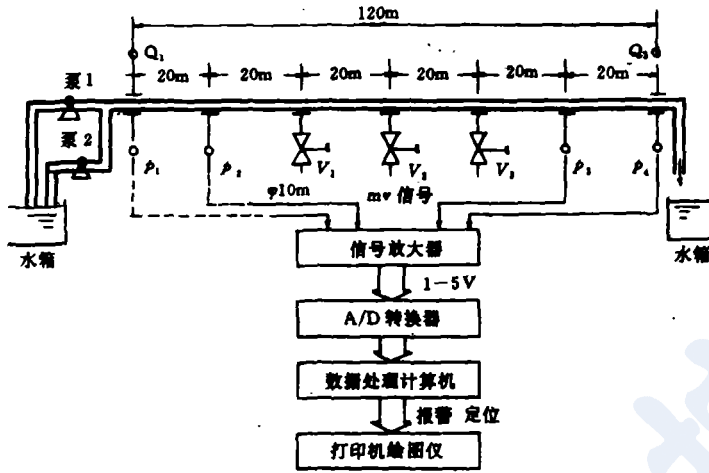


图2 实验管道系统图

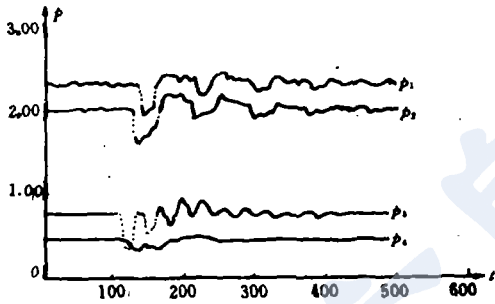


图3 实验管道发生泄漏时 $p_1-p_4$ 波形图

图4是在40m处发生1%泄漏时的诊断结果，图中纵坐标为相关函数 $\Phi(\tau)$ ，横坐标为 $\tau$ ，在发生泄漏前， $\Phi(\tau)$ 基本上在零值附近，发生泄漏后， $\Phi(\tau)$ 上升，并且 $\tau=\tau_0$ 点的 $\Phi(\tau)$ 值达到最大值，当 $\Phi(\tau_0)$ 超过报警门限时，发出报警并开始定位，且定位于39.0m。

(3) 模拟泵站扰动

本实验室管道系统装有两台水泵，采用加减水泵的办法模拟长输管线的工况变化。

图5为某一时刻相关函数 $\Phi(\tau)$ 沿 $\tau$ 的分布，可见工况扰动时相关函数 $\Phi(\tau)$ 的值很小。

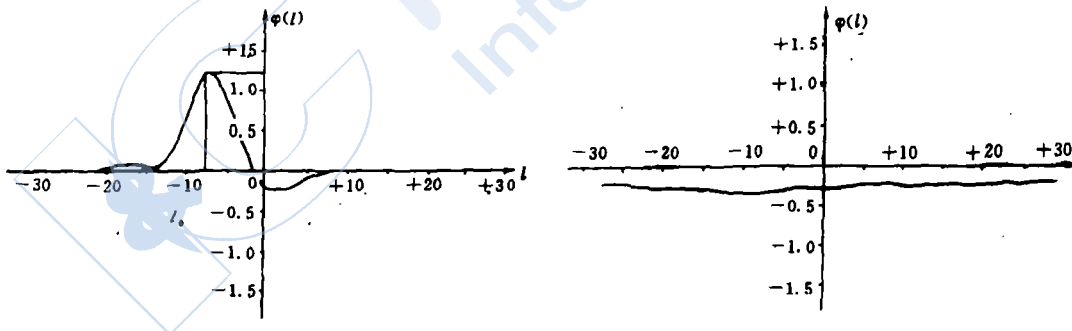


图4 40m处发生1%泄漏时的诊断结果，采样时间为5ms 图5 上游减压扰动时相关函数曲线

以上试验说明，用波敏法进行泄漏诊断具有较强的抗干扰能力。

从实验室已取得的结果可以看到，用波敏法进行长输管线的泄漏诊断是可行的。

## 参 考 文 献

- 1 王镛根,曹青,夏红云. 液体管道小泄漏检测和定位. 信息与控制, 1988; 17(2): 24-27
- 2 董东,王桂增. Kalman 滤波器在长输管线泄漏诊断中的应用. 自动化学报, 1990; 16(4): 303-309
- 3 秦泗钊,王桂增,陶洛文,方崇智. 长输管道的泄漏故障诊断. 中国自动化学会第二届过程控制科学报告会论文集, 浙江, 1988, 94-101
- 4 Isermann R. Process Fault Detection Based on Modeling and Estimation Methods—A Survey. Automatica, 1984; 20(4): 387-404
- 5 Billmann L, Isermann R. Leak Detection Method for Pipe-Lines. Pro of 9th IFAC Conference, Budapest, Oxford: Peryaman Press, 1984; 90-95
- 6 Seiders E J. Hydraulic Gradient Eyed in Leak Location. Oil & Gas Journal, 1979; (19)
- 7 Siebert H. A Simple Method for Detection and Locating Small Leaks in Gas Pipeline. Process Automation, 1981; 2(1): 90-95
- 8 Brons H H, Schaffhaussen H. European Method of Leak Detection and Location, Part-II. Pipeline Industry, 1972; 64-66

## A METHOD OF LEAK DIAGNOSIS BASED ON NEGATIVE WAVE PROPAGATION IN PIPELINE

WANG Kefei WANG Guizeng YANG Jun FANG Chongzhi

(Dept of Automation, Tsinghua Univ, Beijing)

ZHANG Weidong ZHANG Jinsheng LI Beixin

(Inst of Research and Design, Northeast Administration of Oil Transportation, Shenyang)

### Abstract

The principle and test results of wavealert method are presented in this paper. It is a method of leak diagnosis based on negative wave propagation with correlation analysis. It only requires pressure signals acquired from inlet and outlet of pipeline, and is capable of rejecting the effect of load disturbances on leak detection, so that is of great value to practice.

**Key words:** long-distance transport pipeline leak diagnosis wavealert method