

管道泄漏检测及定位算法的改进和应用

李 明¹, 李慧娜², 郭 辉², 杨 帆³,
高满仓⁴, 梁昌晶¹

(1. 中国石油华北油田分公司第五采油厂, 河北 辛集 052360; 2. 中国石油华北油田分公司第一采油厂, 河北 任丘 062552; 3. 河北华北石油工程建设有限公司炼化分公司, 河北 任丘 062552; 4. 中国石油集团渤海钻探工程有限公司井下作业分公司, 河北 任丘 062552)

摘 要: 为了提高现有输油管道负压波检测系统的灵敏度和检测性能, 在不增加硬件的基础上, 采用分段差值的方法确定是否发生泄漏, 基于相似性原理计算信号间的欧式距离, 由此确定压力信号至上、下游的时差, 并通过现场泄油试验进行验证。结果表明, 原有算法只能检测到突发泄漏, 但对于泄漏量小于1.1%的缓慢泄漏工况未能有效检测; 改进算法后可检测微小缓慢泄漏, 当采样点数移动步长为5时, 定位的绝对误差为0.52~2.47 km, 标准差为0.95 km, 定位结果误差较小。该方法适合资源受限的嵌入式管道泄漏检测方法的改进。

关键词: 管道; 泄漏; 定位; 相似性; 欧式距离

中图分类号: TE973.6

文献标识码: B

DOI: 10.19291/j.cnki.1001-3938.2023.03.006

Improvement and Application of Pipeline Leak Detection and Location Algorithm

LI Ming¹, LI Huina², GUO Hui², YANG Fan³, GAO Mancang⁴, LIANG Changjing¹

(1. CNPC No.5 Oil Production Plant of Huabei Oilfield Company, Xinji 052360, Hebei, China; 2. CNPC No.1 Oil Production Plant of Huabei Oilfield Company, Renqiu 062552, Hebei, China; 3. Refining & Chemical Branch Hebei Huabei Petroleum Engineering & Construction Co., Ltd., Renqiu 062552, Hebei, China; 4. CNPC Downhole Services Company of Bohai Drilling Engineering Co., Ltd., Renqiu 062552, Hebei, China)

Abstract: In order to improve the existing pipeline negative pressure wave detecting sensitivity and detection performance of the system, without any increase in hardware, on the basis of using segmented difference method to determine whether the leaking, based on the similarity theory to calculate the Euclidean distance between signals, determine signals to upload first, downstream of the jet lag, and is verified by field drainage experiment. The results show that the original algorithm can only detect the burst leakage, and can not detect the slow leakage condition with the leakage volume less than 1.1%. The improved algorithm can monitor small and slow leakage. When the moving step of sampling points is 5, the absolute error of location is 0.52~2.47 km, and the standard deviation is 0.95 km, and the error of location result is small. This method is suitable for the improvement of embedded pipeline leakage method with limited resources.

Key words: pipeline; leakage; location; similarity; Euclidean distance

0 前 言

准确预测管道泄漏位置, 一直是困扰石油石化行业的难题。随着仪器仪表精度的不断提升和自动化技术的飞速发展, 各种检测手段不断涌现, 如负压波检测法、声波检测法、流量平衡

法、小波分析法等^[1-5]。目前, 我国原油及成品油管道的检测方法主要以负压波法为主, 该方法只需通过采集管道内部的压力变化, 即可进行泄漏报警和定位, 具有灵敏度高、可靠性强、定位准确的特点。但随着打孔盗油事件的日益猖獗, 他们采用带压开孔、缓开阀门的方式避免压力突

降引发的泄漏系统报警,增加了泄漏检测和定位的难度,导致无法及时发现泄漏点。因此,为提高负压波法泄漏检测及定位精度,采用分段差值的方法对缓慢泄漏信号进行检测,基于压力信号时间序列相似性的原理,通过对比上、下游信号的欧式距离,确定信号时间差,以弥补负压波法在微小缓慢泄漏检测上的不足。

1 负压波技术原理

当管道发生泄漏时,在泄漏点处因流体迅速流失导致密度突变,管内出现减压现象,负压波从泄漏点沿上、下游传播,利用设置在管道上、下游站场和阀室的传感器捕捉压力信号,根据信号的变化程度和接收到信号的时差进行泄漏定位^[6],定位原理如图1所示。

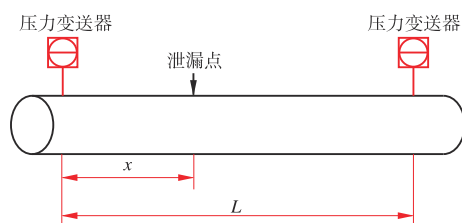


图1 负压波检测及定位原理图

定位公式为

$$x = \frac{1}{2\alpha} [L(\alpha - v) + (\alpha^2 - v^2)\Delta t] \quad (1)$$

式中: x ——泄漏点距上游的距离, m;

α ——负压波传播速度, m/s;

v ——管内流体速度, m/s;

Δt ——信号时差, s。

由于油品输送速度(经济流速一般为1~3 m/s)远小于负压波传播速度,故对公式(1)进行简化,忽略 v 的影响,公式简化为

$$x = \frac{L + \alpha\Delta t}{2} \quad (2)$$

对于 α 的计算结果,与介质的体积弹性系数、密度、弹性模量、修正系数等因素密切相关,一般工业应用中,原油介质 α 的取值范围为1 000~1 200 m/s。

因此,最终决定负压波法定位精度的因素是信号时差 Δt 的取值。关于负压波信号初至时刻的捕捉,通常采用小波变换、互相关分析和临域

差值法计算^[7-9],但这些方法对于大孔或突发性泄漏适用性较好。对于缓慢泄漏,压力信号经去噪后,单位时间内压力下降幅值较小,曲线较平滑,在一段较长的时间内无明显平台区,导致压力拐点识别困难,如图2所示。

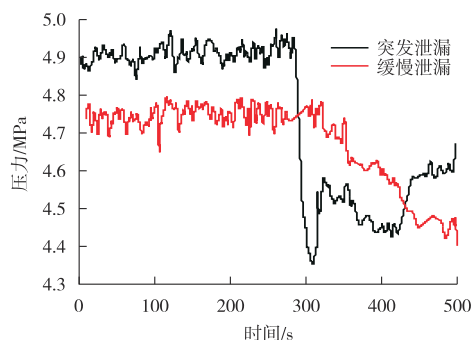


图2 两种不同泄漏方式的压力变化

2 基于分段差值的检测方法

以往的负压波泄漏检测通常是设置一个阈值,当前压力下降速率超过上一时刻的0.1%时,认为压力异常、发生泄漏,但这一阈值往往无法检测到缓慢泄漏,在此采用分段差值的方法提高检测灵敏度。

首先,取 n 个压力数据点,通过归一化处理将其转化为[0, 1]区间,得到时间序列 $s(t)$,将序列等分为30个区间,得到 $s_i(t)$;其次,计算每个区间内的最大值 $s_i(t)_{\max}$ 、最小值 $s_i(t)_{\min}$ 和平均值 $s_i(t)_{\text{avg}}$,用前一个区间内的最大值减去下一个区间内的最小值,即 $s_i(t)_{\max} - s_{i+1}(t)_{\min}$,共得到29个差值 d_i ;最后,当差值索引 k 达到极值时,且极值前区间的平均值均大于极值后区间的平均值,即 $s_{i < k}(t)_{\text{avg}} > s_{i > k}(t)_{\text{avg}}$,则确定发生了泄漏。

3 基于相似性的定位方法

3.1 基本原理

相似性表现为不同压力信号的相似程度^[10],刘炜等^[11-12]利用信号间的亮度、对比度和结构进行比较,得到了正常信号与泄漏信号的结构相似度,但不同压力窗口的选取对于定位结果影响较大。考虑到泄漏同源的特点,采用欧式距离计算上、下游泄漏信号的相似程度,距离越小,相似

程度越大,反之亦然。计算公式为

$$l = \sqrt{\sum_{i=1}^n (p_i^{\text{up}} - p_i^{\text{down}})^2} \quad (3)$$

式中: l ——欧式距离;

p_i^{up} 、 p_i^{down} ——分别为上、下游压力信号取值;

n ——采集到的数据点个数。

对于同一次泄漏事故,如不存在压力波动、流量波动、温度变化、开停泵等工况影响,上、下游泄漏信号的变化趋势应基本保持一致。因此,采集相同时刻的上、下游负压波信号,固定上(下)游信号,将下(上)游信号进行一定步长的平移,并分别计算不同平移点数下两信号的欧式距离,当欧式距离最小时,说明上、下游泄漏信号完全重合,此时的平移点数即为信号时差 Δt 。

3.2 计算方法

定义信号的采样频率为 f , 信号时长为 t , 则信号中的采样点数 $n = ft$, 此时上游信号为 $(p_1^{\text{up}}, p_2^{\text{up}}, \dots, p_{ft}^{\text{up}})$, 截取与上游相同长度、相同时刻的下游压力信号, 并进行 Δn 点数的平移, 此时下游信号为 $(p_{1+\Delta n}^{\text{down}}, p_{2+\Delta n}^{\text{down}}, \dots, p_{ft+\Delta n}^{\text{down}})$ 。

当泄漏点位于起点时, 负压波传播到下游的时间最长, 根据公式 (2), 此时 Δt 最小

$$\min \Delta t = -\frac{L}{\alpha} \quad (4)$$

同理, 泄漏点位于末点, Δt 最大

$$\max \Delta t = \frac{L}{\alpha} \quad (5)$$

由此确定 Δn 的取值范围

$$-\frac{fL}{\alpha} \leq \Delta n \leq \frac{fL}{\alpha} \quad (6)$$

将上、下游信号代入公式 (3) 得到

$$l_{\Delta n} = \sqrt{\sum_{i=1}^{ft} (p_{i+\Delta n}^{\text{down}} - p_i^{\text{up}})^2} \quad (7)$$

当取得的 Δn 正好使欧式距离 $l_{\Delta n}$ 最小, 则计算 $\Delta n/f$ 作为信号时差, 再代入公式 (2) 计算泄漏点位置。

4 实例分析

为了验证该方法的准确性, 利用华北油田采油四厂古一联—龙一联输油管道为例进行验证,

该管道全长 78.9 km, 管线规格 $\Phi 168 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$, 设计输量 $1.0 \times 10^5 \text{ t/a}$, 设计压力 4 MPa, 运行压力 3 MPa。利用中间的 51.1 km 处的分输站阀室进行泄油操作, 分别进行 3 快 3 慢 6 次试验, 通过调整阀门启闭时间模拟缓慢泄漏和突发泄漏。阀门开启后, 管内压力持续下降, 待压力保持平稳后, 关闭阀门, 每次试验间隔 10 min。传感器的采用频率 $f=20 \text{ Hz}$, 信号时长 $t=180 \text{ s}$, 单一信号序列长度为 3 600。

以其中一次缓慢泄漏为例, 分析改进后的泄漏检测及定位方法的准确性, 现场采集到的去噪后管道泄漏信号如图 3 所示。

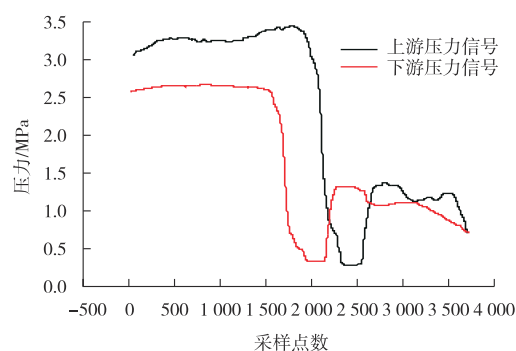


图3 输油管道泄漏信号

该组试验中, 上游信号在采样点 2 000~2 500 间发生突变, 下游信号在采样点 1 500~2 000 间发生突变, 说明负压波信号先到达下游传感器处, 泄漏点距离下游更近。分别对上、下游信号归一化处理后, 进行分段差值处理, 如图 4 所示。上、下游信号分别在索引达到 16 和 13 时, 差值达到极值, 而上游信号在索引为 23 和 24 时, 差值有所波动, 下游信号在索引为 20 时差值有所波动, 但这些波动较小, 因此可根据最大波动判断管道已发生泄漏。

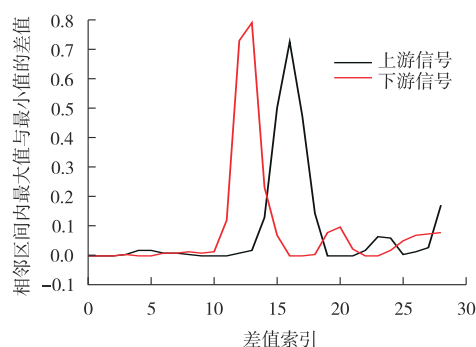


图4 压力分段差值处理

选取步长为10进行平移操作,计算上游信号和平移后下游信号之间的欧式距离,如图5所示。

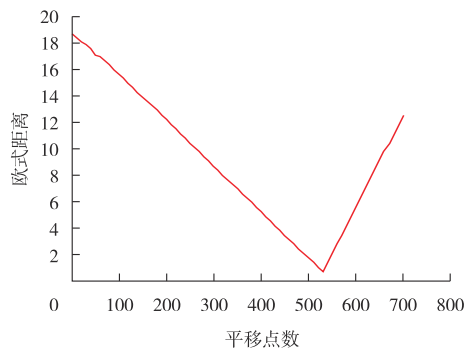


图5 平移点数-欧式距离关系图

随着采样点数的平移,两个信号间的欧式距离越来越小,当 $\Delta n=530$ 时,欧式距离最小,即为两信号的时差,时差为 $530/20=26.5$ s,泄漏定位结果为52.7 km,定位绝对误差为1.6 km。表1为对比不同步长下 Δn 计算结果。步长越短, Δn 的波动越小,但当缓慢泄漏持续时间较长时,较短步长需要更长的计算时间,综合考虑选择步长为5。

表1 不同步长下的 Δn 计算结果

步长	Δn	步长	Δn
1	524	11	539
2	524	12	540
3	525	13	533
4	524	14	532
5	525	15	540
6	540	16	544
7	539	17	527
8	520	18	540
9	528	19	532
10	530	20	540

表2 改进前后泄漏定位方法模拟试验结果

试验序号	开阀方式	泄漏量/($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	检测结果		泄漏点位置/m		定位绝对误差/m	
			改进前	改进后	改进前	改进后	改进前	改进后
1	快	1.50%Q	报警	报警	53.4	52.1	2.3	1.0
2	快	1.47%Q	报警	报警	50.4	51.9	-0.7	0.8
3	快	1.78%Q	报警	报警	40.9	52.2	-10.2	1.1
4	慢	1.10%Q	未报警	报警	37.2	52.5	-13.9	1.4
5	慢	1.05%Q	未报警	报警	63.4	52.6	12.3	1.5
6	慢	1.00%Q	未报警	报警	36.5	53.4	-14.6	2.3

(下转第40页)

在原有的负压波检测系统基础上增加了检测模块和定位模块,如图6所示。

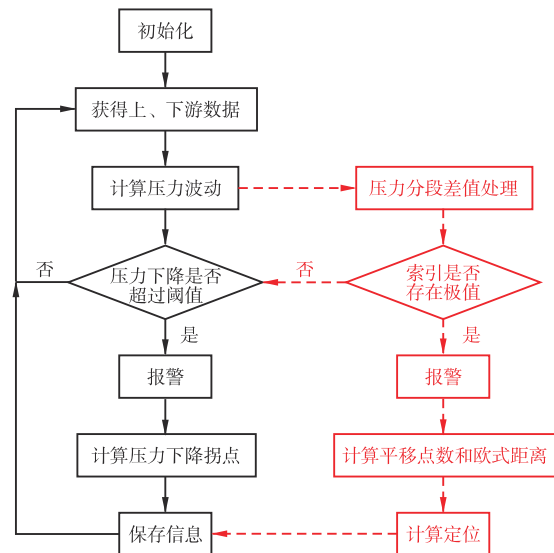


图6 负压波检测系统工作流程
(黑色为改进前,红色为改进后)

当上、下游检测到压力信号后,同时运行两种系统,并对比改进前后的模拟试验结果,见表2。原有系统中压力检测阈值设置为0.1%,只能检测到突发泄漏,对于3次缓慢泄漏中泄漏量小于1.10%Q(Q为泄漏体积流量, m^3/h)的工况均无法检测;定位结果中,原有方法的定位结果只有第2次快开阀门的误差较小,其余几次试验误差均较大,且快开阀门的定位精度普遍高于慢开阀门。基于相似性定位方法的绝对误差为0.8~2.3 km,标准差为0.95 km,定位结果误差较小,可行性较高。综上所述,采用分段差值和相似性对负压波法进行改进,可有效提升泄漏检测的可行性和可靠性,提高定位精度,该方法适合原资源受限的嵌入式管道泄漏检测方法的改进。