

光纤负压波管道泄漏监测系统

赵 林,王纪强,李 振

(山东省光纤传感技术重点实验室 山东省科学院激光研究所,山东 济南 250103)

摘 要:管道泄漏引发的负压波信号及其沿管道衰减程度与管道工况、长度及泄漏孔直径等因素有关。针对传统负压波监测方法定位精度低、可靠性差等问题,提出了一种光纤负压波管道泄漏监测方法。由泄漏负压波在管道中传播规律,通过提高传感器布设密度,降低信号衰减强度,得到了更清晰的负压波下降沿拐点信息。根据泄漏点所在传感器区间不同,提出了自适应负压波波速数值计算方法。在实验室分别对光纤与传统负压波泄漏监测方法进行对比分析,实验结果显示,在泄漏量为管道总运输量 5% 的工况下,光纤监测法泄漏定位误差小于 1.6%,较传统的监测方法能获得更高的管道泄漏监测灵敏度及定位精度,具有更加广阔的应用前景。

关键词:管道泄漏; 负压波; 光纤传感; 波速矫正

中图分类号: TE88 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0722002

Optical fiber negative pressure wave pipeline leakage monitoring system

Zhao Lin, Wang Jiqiang, Li Zhen

(Laser Research Institute of Shandong Academy of Sciences, The Key Laboratory of Optical Fiber Sensing Technology of Shandong Province, Jinan 250103, China)

Abstract: Negative pressure wave signal caused by pipeline leakage and attenuation along the pipe was relative to pipe length, working condition and leaking hole diameter. In order to solve the problems of low precision and poor reliability in traditional monitoring methods, a negative pressure wave-based pipeline leak monitoring method using optical fiber pressure sensors was proposed. According to the propagation law of negative pressure wave in the pipeline, by increasing the density of sensors along the pipeline, the signal attenuation would be reduced, and a clearer negative pressure wave falling inflection information could be acquired. According to the leak difference in sensor section, a new adaptive method based on leaking distance was proposed for calculating the velocity of negative pressure wave. Finally, the optical fiber and traditional negative pressure wave leakage monitoring methods were analyzed respectively, experimental results showed that the leakage location error of fiber optic monitoring method was less than 1.6% when the leakage was 5% of the total pipeline transportation. Compared with traditional monitoring method, fiber optic monitoring method could obtain higher sensitivity and

收稿日期:2016-11-05; 修订日期:2016-12-03

基金项目:山东省科技发展计划(2014GZX201016)

作者简介:赵林(1981-),男,助理研究员,硕士,主要从事光纤传感及管道监测技术方面的研究。Email:linzhao1225@126.com

positioning accuracy, has more broad application prospects.

Key words: pipeline leak; negative pressure wave; optical fiber sensing; velocity correction

0 引言

随着中国经济的腾飞和运输工业的蓬勃发展,管道运输已成为继公路、铁路、水运和航空之后第五大交通运输方式^[1]。由于管龄的增长,老化腐蚀、地质灾害及人为破坏等原因引起的管道泄漏事故时有发生,在造成经济损失和资源浪费的同时,对环境也造成了巨大威胁^[2-3]。

目前国内外对管道泄漏检测方法主要包括:瞬变压力信号法、流量平衡法和基于模型的方法等^[4-6]。而瞬态负压波泄漏检测法由于实现简单、易维护,一直以来是长输油气管道泄漏检测领域的研究热点和主要技术手段之一。靳世久等通过对管道泄漏压力波特征信息的分段积分处理,提出了一种基于瞬态负压波结构模式识别的管道泄漏检测方法,有效去除了噪声干扰,突出了特征信息^[7];张洪铭等设计了一套基于 LabVIEW 的长输天然气管道泄漏检测系统,在管道长度 500 m、压力 0.4 MPa 的实验环境下检测定位误差小于 4%^[8];刘恩斌等通过对监测负压波信号小波分析后进行泄漏检测和定位,并将负压波流速计算、GPS 校时等先进技术引入系统中,检测泄漏定位误差小于±1%^[9]。从实际应用情况来看,传统的负压波泄漏检测系统由于易受野外供电及信号传输等因素的限制,同时为避免人为破坏,在管道两端加压站分别安装的压力传感器由于间距较大,负压波信号长距离传输衰减严重,检测灵敏度低、定位精度差成为制约其在管道运输行业发展的瓶颈。

文中通过泄漏产生的负压波信号及传播规律的实验研究,提出一种光纤负压波管道泄漏监测方法。利用管道沿线通信光缆为信号传输媒介,通过提高传感器布设密度,缩短传感器间距,降低负压波信号衰减强度,从而大幅提高泄漏监测灵敏度及定位精度,为管道运输安全提供技术保障^[10]。

1 理论依据

1.1 泄漏监测及定位原理

管道发生泄漏时,管道内外压差变大,流体迅速

流失,导致泄漏点处局部液体密度减小,压力瞬间降低。管道中的流体由于流动连续性不会立刻改变流速,引起泄漏点上、下游区域内的流体向泄漏区域迅速填充,这种流体的补充导致泄漏点相邻区域流体密度减小、压力降低,这种压力下降的趋势逐渐向管道两端扩散,形成负压波^[11]。因此,通过在管道两端分别安装压力传感器,实时监测管道负压波信号,泄漏点不同,负压波到达两端压力传感器时间差也不同。根据管道长度、负压波传播速度及时间差,即可实现管道泄漏点的定位^[12]。负压波泄漏监测及定位原理如图 1 所示。

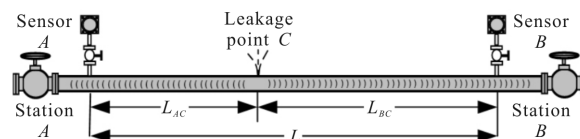


图 1 泄漏检测原理^[13]

Fig.1 Leak detection principle^[13]

设两端压力传感器之间管道长度为 L , 泄漏点为 C , 泄漏点 C 产生的负压波信号传到传感器 A 的时刻为 t_A , 传到传感器 B 的时刻为 t_B 。理想状况下, 设负压波在流体介质中的传播速度为 v , 全程传播时间为 t_L , 则

$$t_L = t_A + t_B \quad (1)$$

设 Δt 为 t_A 与 t_B 的时间差, 则

$$\Delta t = t_A - t_B \quad (2)$$

由公式(1)、(2)得:

$$t_A = \frac{t_L + \Delta t}{2} \quad (3)$$

则泄漏点 C 与传感器 P_A 点的距离 L_{AC} 为:

$$L_{AC} = v \cdot t_A = \frac{L}{t_L} \cdot \frac{t_L + \Delta t}{2} = \frac{L + v \Delta t}{2} \quad (4)$$

1.2 负压波信号衰减规律

假定压力传感器被分别安装在管道的入口与出口, 若不计管线中液体流动对负压波传播能量损失影响, 当在距离入口 x 处发生泄漏时, 根据一般的能量传播损失过程, 在泄漏点处负压波幅值沿管线近似以指数形式衰减, 即管道入口与出口负压波压力变化如下式所示:

$$P_{in} = P_x e^{-\alpha x}$$

$$P_{out} = P_x e^{-\alpha(L-x)} \quad (5)$$

式中： P_x 为泄漏点处的负压波压力值，Pa； P_{in} 、 P_{out} 分别为管线入口与出口负压波压力值，Pa； α 为负压波衰减系数，主要由管道内径、摩擦系数、压缩因子、负压波波速等因素确定。

2 系统结构

针对长输油气管道具体应用，对光纤传感与负压波监测技术进行有效融合，建立光纤负压波管道泄漏监测及定位系统模型如图 2 所示。

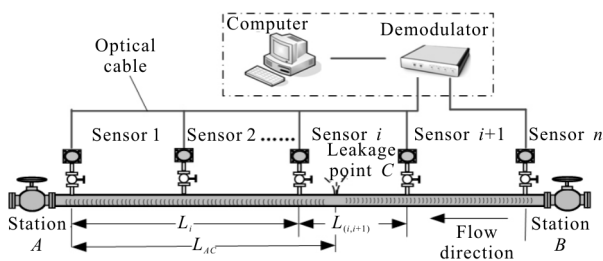


图 2 光纤压力传感器负压波管道泄漏监测系统结构

Fig.2 Negative pressure wave-based pipeline leak monitoring system structure using optical fiber pressure sensors

利用距离泄漏点 C 最近的两只压力传感器作为泄漏点定位基准传感器，同样大小的泄漏量，由于缩短了传感器间距，提高了传感器捕获负压波信号强度，因此能获取更加清晰准确的负压波下降沿拐点信息，改进后的管道泄漏定位公式如公式(6)所示：

$$L_{AC} = L_i + \frac{L_{(i,i+1)} + v\Delta t}{2} \quad (6)$$

对泄漏点左右两侧两个区间段，通过分别计算压力传感器监测负压波信号时间差，可实现对泄漏点所在区间段波速的近似精确计算，降低了长输管道由于温度变化等因素导致的由于波速变化带来的系统定位误差，具体泄漏区间段波速计算公式如公式(7)所示：

$$v = \frac{v_{left} + v_{right}}{2} = \left(\frac{L_{(i-1,i)} + L_{(i+1,i+2)}}{t_{(i-1,i)} + t_{(i+1,i+2)}} \right) / 2 \quad (7)$$

其中，若 $i=1$ ， $v=v_{right}$ ；若 $i+1=n$ ，则 $v=v_{left}$ 。

同时，由于新的方法采用了多传感器阵列结构，有效避免了传统监测方法一只传感器失效系统即无法正常使用的弊端，提高了系统的整体可靠性。详细的系统算法流程图如图 3 所示。

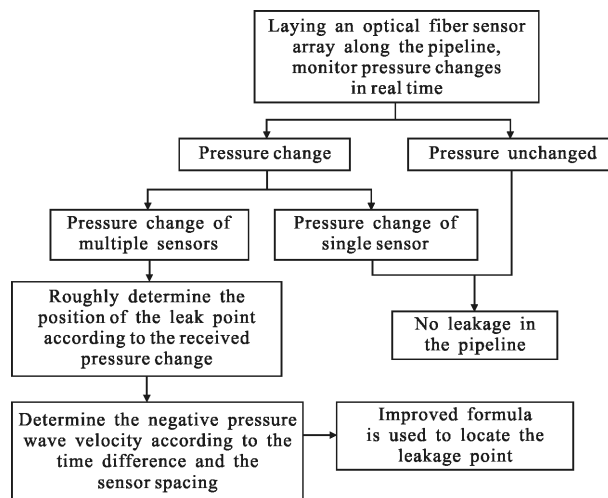


图 3 管道泄漏监测系统流程图

Fig.3 Flow-chart of pipeline leak detection system

3 管道泄漏实验平台

根据设计规则和研究目的，建立管道实验平台，如图 4、5 所示，详细实验参数见表 1。

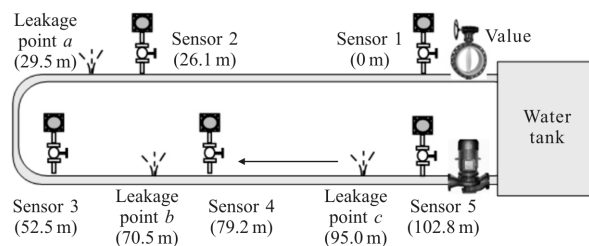


图 4 管道实验平台模型

Fig.4 Pipeline experimental platform model

表 1 管道泄漏实验平台参数

Tab.1 Pipeline leak test platform parameters

Pipe parameter	Value
Diameter/mm	100
Length/m	112
Material	Carbon steel
Wall thickness/mm	2
Leak hole diameter/mm	32(Adjustable)
Pressure range/MPa	0-0.4(Adjustable)
Water tank capacity/m	1×1.4×1.5

系统采样频率 1 kHz，精度 1 pm。传感器为山东微感光电子有限公司研发的光纤压力传感器，量程 0~1 MPa，测量精度 0.1%FS。

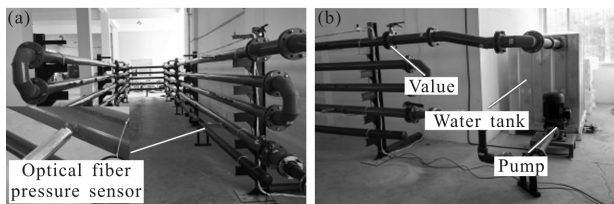


图 5 管道实验平台

Fig.5 Pipeline experimental platform

4 负压波衰减实验研究

开启加压泵,调整尾端阀门开度,保持管道内部压力 0.3 MPa,依次开启关闭泄漏阀门 *c*、*b*、*a*,监测不同泄漏点负压波信号产生及传播规律。图 6 所示是光纤传感器 1 在开闭不同泄漏阀时所监测的连续负压波信号。

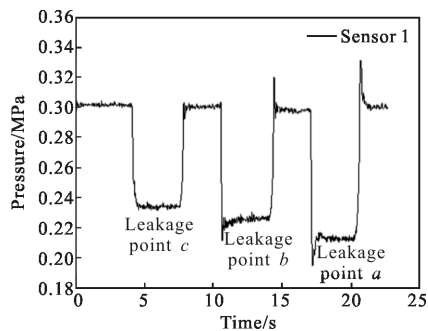


图 6 不同泄漏点产生负压波信号

Fig.6 Different leaks generate negative pressure wave signal

由实验数据可以看出,随着泄漏点与检测传感器距离的缩短,监测负压波信号逐渐增强,下降沿拐点信号更加清晰,由此可获得更加精确的泄漏点信息。

5 多传感器管道泄漏定位

开启加压泵,调整尾端阀门开度,保持管道内部压力稳定 0.3 MPa,打开泄漏阀门 *c*,泄漏量约占管道总运输量 5%,各传感器监测负压波原始信号如图 7(a)所示。对传感器监测负压波信号进行小波变换,同时对有效区间段进行放大及信号滤波处理,局部放大滤波后的负压波信号如图 7(d)所示。

由数据可见,未进行滤波处理之前,各传感器监测管道压力信号波动较大,负压波信号较强,但负压波拐点不清晰;对局部信号进行放大滤波处理后,传感器监测压力信号趋于稳定,负压波下降沿拐点清晰可见,且各传感器监测负压波拐点存在明显时间差^[14]。

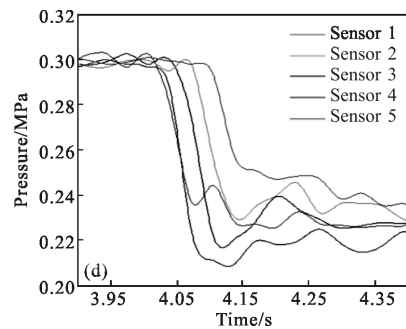
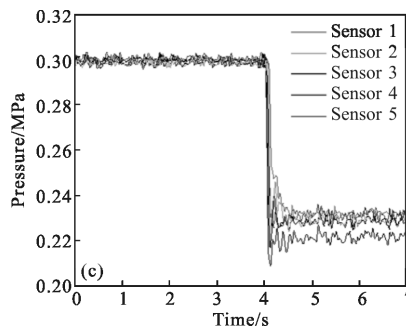
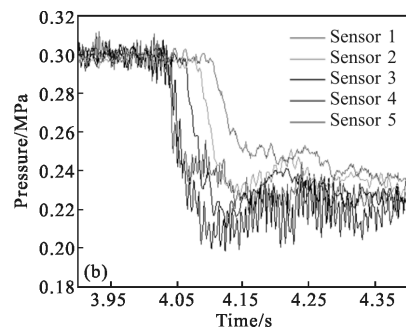
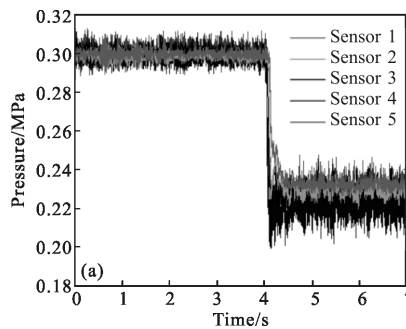


图 7 传感器 1~5 检测负压波信号进行小波降噪

Fig.7 De-noising by wavelet transform: in each sensors 1-5 detects negative pressure wave signals

对各传感器监测负压波信号分别采用传统方法与光纤方法进行对比分析。各传感器监测负压波信号下降沿拐点的选取统一采用固定阈值法,即固定阈值 k ,当 $X_{n-1}-X_n > k$ 时($k=0.007$),则 n 为所选择的负压波信号拐点,由此计算各传感器监测负压波信号拐点对应时间如表 2 所示。

表 2 传感器监测负压波信号拐点

Tab.2 Sensor monitoring negative pressure wave signal inflection point

Sensor number	1	2	3	4	5
Inflection point/ms	4.110	4.088	4.066	4.043	4.034

采用传统监测及定位方法, 负压波在水中传播速度约 1 200 m/s^[15], 传感器 1 与传感器 5 距离 102.8 m, 捕获信号拐点时间差 0.076 s。根据公式(4)计算泄漏点 c 距传感器 1 的距离为:

$$L_{1c} = \frac{L+v\Delta t}{2} = \frac{102.8+1\ 200\times 0.076}{2} \text{ m}=97.0 \text{ m}$$

采用光纤负压波管道泄漏监测及定位方法, 由公式(7), 由于 $i+1=n$, 故 $v=v_{\text{left}}$, 负压波在传感器 3 与传感器 4 之间的传播速度为:

$$v=v_{\text{left}} = \frac{L_{i-1,i}}{t_{i-1,i}} = \frac{L_{34}}{t_{34}} = \frac{26.7 \text{ m}}{0.023 \text{ s}} = 1\ 161 \text{ m/s}$$

泄漏点所在区间两传感器之间的距离及监测时间差分别为 23.6 m 及 0.009 s, 由公式(6)计算泄漏点距传感器 5 的距离为:

$$L_{1c}' = L_{14} + \frac{L_{45}+v\Delta t}{2} = 79.2 \text{ m} + \frac{23.6+1\ 161 \text{ m/s}\times 0.009 \text{ s}}{2} = 96.2 \text{ m}$$

泄漏点 c 距传感器 1 的实际距离为 95.0 m。由此得出两种方法的定位精度及误差对比如表 3 所示。

表 3 泄漏定位误差对比

Tab.3 Leakage location error contrast

Leakage point	Detection method	Location distance/m	Distance error/m	Location error
c (95.0 m)	Traditional method	97.0	2.0	1.95%
	Fiber method	96.2	1.2	1.17%

同理, 对泄漏点 a 及泄漏点 b 采用相同的试验分析方法, 计算监测泄漏点定位误差如表 4 所示。

表 4 泄漏定位误差对比

Tab.4 Leakage location error contrast

Leakage point	Detection method	Location distance/m	Distance error/m	Location error
a (29.5 m)	Traditional method	31.2	1.7	1.65%
	Fiber method	31.1	1.6	1.56%
b (70.5 m)	Traditional method	68.3	2.2	2.14%
	Fiber method	69.1	1.4	1.36%

实验结果显示, 采用光纤负压波管道泄漏监测及定位方法, 通过增加传感器布设密度, 实时校正管道内部负压波传播速度, 由于管道压损降低, 系统能捕获更加精确的负压波下降沿拐点信息, 进而能更加有效的提高系统定位精度。

6 结束语

随着管道工业的发展, 对管道泄漏监测与定位的要求也越来越高。文中通过对负压波泄漏监测及定位技术的实验研究, 将光纤传感技术引入长输油气管道泄漏监测领域, 提出了以管道沿线通信光缆为信号传输媒介, 通过提高传感器布设密度, 降低负压波信号衰减强度, 进而提高泄漏定位精度的方法。实验结果表明, 泄漏量为管道总运输量 5% 的工况下, 光纤监测法泄漏定位误差小于 1.6%, 优于目前传统监测方法定位误差 2.2%, 在确保数据采集实时性和泄漏定位可靠性的同时, 有效克服了传统负压波泄漏监测技术定位精度低、可靠性差的弊端, 具有更加广阔应用前景。同时, 光纤传感器本质绝缘, 抗干扰能力强, 更适用于易燃、易爆等恶劣环境下的使用。光纤传感技术在管道泄漏监测领域的应用对保障整个管道系统的正常运行提供了一种新的技术手段。

参考文献:

- [1] Wang Likun, Wang Hongchao, Xiong Min, et al. Analysis and proposal on leak detection of long-distance oil pipeline [J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2014, 33(11): 1197-1201. (in Chinese)
- [2] Girgin S, Krausmann E. Historical analysis of U.S. onshore hazardous liquid pipeline accidents triggered by natural hazards [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2016, 40: 578-590.
- [3] Bariha N, Mishra I M, Srivastava V C. Hazard analysis of failure of natural gas and petroleum gas pipelines [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2016, 40: 217-226.
- [4] Hang L J, He C F, Wu B. Novel distributed optical fiber acoustic sensor array for leak detection [J]. *Optical Engineering*, 2008, 47(5): 41-45.
- [5] Liu Cuiwei, Li Xuejie, Li Yuxing. Leak detection and location for natural gas pipelines based on acoustic waves[J]. *CIESC Journal*, 2014, 65(11): 4633-4642. (in Chinese)
- [6] 许斌, 刘广文, 谭东杰. 管道泄漏监测系统及方法: 中国:

- 201410010630.7[P]. 2014-05-07.
- [7] Jin Shijiu, Wang Lining, Li Jian. Instantaneous negative pressure wave pattern recognition method in leak detection of crude petroleum transported pipeline [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrument*, 1998, 12(1): 59-64. (in Chinese)
- [8] Zhang Hongming, Chen Xianfeng, Liu Jie. Leak detection of the long distance natural gas pipelines and its location based on the LabVIEW [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2016, 16(1): 147-151. (in Chinese)
- [9] Liu Enbin, Li Changjun, Peng Shanbi. Leakage detection for oil pipeline based on negative pressure wave theory [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2009, 41(11): 285-287. (in Chinese)
- [10] Jiang Xiaofeng, Lin Chun, Xie Haihe, et al. MEMS F-P interferometry pressure sensor [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(7): 2257-2262. (in Chinese)
- [11] Sun Liang, Wang Jianlin, Zhao Liqiang. Analysis on detectable leakage ratio of liquid pipeline by negative pressure wave method[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2010, 31(4): 654-658. (in Chinese)
- [12] Liu Zhanliang, Geng Yanfeng, Ma Ying. Improved algorithm for leakage points localization in hot oil transportation pipeline[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2008, 29(3): 467-469. (in Chinese)
- [13] Y Libo, S Liying. Leakage detection and location for long range oil pipeline using negative pressure wave technique [C]//the 4th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, 2009, 148(5): 3220-3224.
- [14] Cui Hongliang, Liu Ye, Yu Miao, et al. Application of wavelet denoising in distributed optical fiber interferometric vibration detection and location system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(10): 71-76. (in Chinese)