

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2106570

基于 LabVIEW 的管道泄漏监测与定位系统*

秦程 任亮 王嘉健 贾子光 姜涛

(大连理工大学 建设工程学部 大连 116024)

摘要: 为了及时对管道泄漏进行处理和定位,解决管道泄漏监测系统误报漏报率高、定位不精准的问题。提出了改进的负压波与流量平衡法联合的泄漏监测与定位方法,采用 LabVIEW 和 MATLAB 联合编程的方式,开发了实时的管道泄漏监测与定位系统。首先,该系统控制 NI 公司解调仪 SM130 以及电磁流量计,实现了同步采集光纤光栅传感器和电磁流量计信号,实时监测管道压力与流量状态参数。当传感器监测到负压波信号且上下游流量差超过阈值,进行及时的泄漏预警。最后调用 MATLAB 编写的定位方法进行定位,以及与 MySQL 数据库连接,进行数据管理。试验证明,针对泄漏预警的功能,本系统能够准确识别真实泄漏,保持良好的监测可靠性;针对泄漏定位的试验,提出基于传感器阵列的多组次定位取平均值的方式,并在重复试验中验证了定位的精度和稳定性。该系统交互性能良好,符合未来管道自动化管理发展的进程,具有重要的工程实用价值。

关键词: 管道泄漏;定位;负压波;传感器阵列;LabVIEW

中图分类号: TP277;TN702 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.4017

Pipeline leak monitoring and location system based on LabVIEW

Qin Cheng Ren Liang Wang Jiajian Jia Ziguang Jiang Tao

(Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: In order to deal with and locate the pipeline leakage in time and solve the problem of misreporting and omission rate and inaccurate positioning of the current pipeline leakage monitoring system, a leak monitoring and positioning method combined with negative pressure wave and flow balance method is proposed, and a combination of LabVIEW and MATLAB is used to develop the real-time pipeline leakage monitoring and location software. Firstly, the software controls the NI demodulator SM130 and the electromagnetic flowmeter, realizes the synchronous acquisition of fiber Bragg grating sensor signals and electromagnetic flowmeter signals, which can monitor the pipe pressure and flow state parameters timely. Leak warning is provided when sensor detects negative pressure wave signal and the flow difference between upstream and downstream exceeds the threshold value. Finally, it calls the positioning method written by MATLAB to locate the leakage and connect with MySQL database for data management. The test proves that the system can accurately identify the real leakage and maintain good monitoring reliability for the function of leak warning. For the leak locating test, the averaging method of multi-group locating based on sensor array is put forward, and the accuracy and stability of locating are verified in repeated tests. Its advantages of good interactive performance and strong scalability are in line with the development process of future pipeline automation management and have important engineering practical value.

Keywords: pipeline leakage detection; localization; negative pressure wave; sensor array; LabVIEW

0 引言

管道是一条生命线,关系国家民生资源。但随着管道服役年限的增加,管道泄漏现象时常发生,从而导致严重的经济损失和人员伤亡^[1]。因此,建立一种行为有效的管道

泄漏监测及定位系统是意义深远的,但目前该系统主要存在如下3个问题:第一,普遍缺乏统一的数据采集平台,无法实现多种信号同步实时采集,无法实现多种方法联合监测,易出现误报漏报现象^[2]。第二,大多数检测方法使用电类传感器,其自身抗干扰能力和稳定性较差,在检测过程中

收稿日期:2021-05-01

* 基金项目:国家自然科学基金(51678109)项目资助

易发生爆炸且定位精度较低^[3]。第三,监测系统扩展性普遍较差,无法实现多种定位算法,局限性较大,亦无法提高定位结果的可信度^[4-5]。文献[6]中设计了一套基于SCADA系统的管道泄漏监测系统,该系统在中石油管道秦京输油气分公司进行了实际运用,拥有良好的定位精度和泄漏监测的灵敏度。但是,由于SCADA系统调用机制较为复杂,信号处理功能调用LabVIEW进行实现,造成资源浪费和管理不便。文献[7]基于WPF设计了管道泄漏监测系统,该系统运行效率较高,并降低了各功能模块之间的耦合性。但是,WPF不支持跨平台使用,且专业人员较少,后期维护和更新成本较高。文献[8]基于Qt强大的可视化功能设计并实现了管道泄漏监测系统,但该系统对硬件要求较高,且过于庞大,编译时间长,运行效率较低。文献[9]基于VB设计了煤矿瓦斯抽采主管道泄漏监测与漏点定位系统,该系统降低了误报漏报率,提高了定位精度。但是,VB系统不支持多线程,具有局限性。

本文提出了改进的负压波与流量平衡法的结合的定位方法,在LabVIEW平台中实现了基于该方法的实时监测及定位系统,应用于解决缺乏统一数据采集平台的问题,以降低误报漏报现象并解决定位误差较大的问题,并且LabVIEW平台调用机制灵活、编程效率高、支持多线程等优点适用于实时系统的开发。

该系统可用于实时监测管道运行状态,能够及时对泄漏进行处理和定位,从而减少能源损失和环境污染,保护人

民群众生命财产安全。通过管道泄漏模拟试验,以证实该系统的泄漏预警功能以及定位结果的精度和稳定性。

1 改进的负压波与流量平衡检测方法

流量平衡法是基于管道内流体的质量恒定关系。未发生泄漏时,管道上下游流量差维持稳定;泄漏发生时,上下游流量差迅速变化,并超过设定的差值阈值,以此来判断泄漏。但该方法受限于流量计的精准性以及流量余量的影响,且不能进行泄漏定位,因此需要与其他方法联合使用^[10]。

传统的负压波定位方法因其定位原理简单,传感器布置方便,已经成为管道泄漏监测最常见的方法之一。该方法主要利用电类压力传感器,在管道输入端和输出端布置压力传感器,通过计算负压波波速和负压波到达压力传感器的时间差进行泄漏计算。但是,压力信号易受外部干扰,因此易导致较大的定位误差。

近些年来,光纤光栅传感器,因其具有耐腐蚀,抗电磁干扰,可远距离传输等优点,已经成为管道监测的最常用的传感器^[11-14],并且在多次泄漏试验中验证了传感器的可靠性。

本文提出的改进的负压波与流量平衡法结合的监测与定位算法,其定位流程如图1所示。沿管道方向布置FBG管径夹传感器阵列以及L_{MAG}电磁流量计,采集管道内压力信号以及流量信号,通过实时监测管道内压力变化以及上下游流量差值进行泄漏判断。

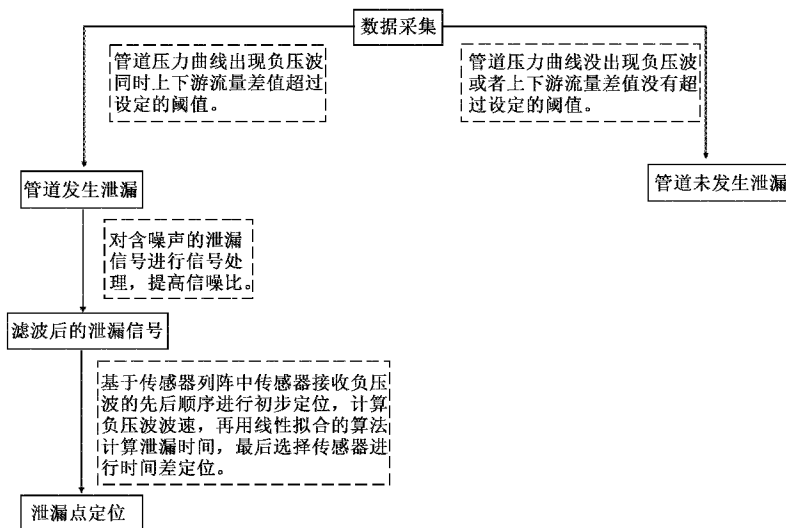


图1 改进负压波与流量平衡方法

该算法共设置两种泄漏预警触发机制(负压波识别、流量异常)。管道发生泄漏时,管道内压力下降,管道径向应变出现连续下降,通过监测管道径向应变来识别负压波,并且根据管道内流体质量守恒的原理,泄漏点上游会迅速补充泄漏的流量,泄漏点下游流量会略有下降,因此采集管道上下游流量,通过计算上下游流量差值即可判断管道内状态。

识别负压波的原理是将采集传感器信号的前 n_1 个管道径向应变数据的均值作为阈值,当满足有 m_1 个连续数据低于阈值时,即为识别到负压波曲线,且第1个小于阈值的点为阈值拐点^[15]。当采集的上下游流量差值大于阈值,即判断流量异常。若压力及流量信号同时异常则认定为真实泄漏,需进行定位分析。

泄漏发生时,负压波信号向两端传递,传感器距离泄

漏点远近依次测量到负压波曲线,因此泄漏位置一定位于最先监测到负压波的传感器之间,基于此原理利用传感器阵列可以初步定位出泄漏区间段,再根据泄漏位置区间选择左右两邻域区间段的传感器计算负压波波速,选取不同间距的传感器计算时间差后进行泄漏定位,以提高定位精度,其定位计算原理如图2所示。

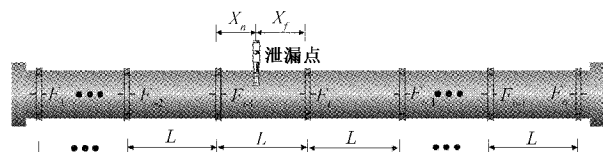


图2 泄漏定位计算

其中工业现场数据往往包含外界噪声,泵机振动,管道产生的干扰等,这些都会对识别阈值拐点位置造成不利影响。因此想要得到精确定位结果,必须对信号进行滤波处理^[16]。

小波变换具有多尺度、多分辨率的特点,有更好的时频定位特性,能使信号关键特性更加明显。但是,在不同的尺度下,小波变换的极值点会稍有偏移,从而影响滤波效果,因此在使用小波变换时应该使用多尺度综合观察,以选择信噪比较高的信号进行定位分析。

如图2所示,传感器间距为 L ,泄漏点距 F_{i-1} 的距离为 X_n ,距离 F_i 的距离为 X_f ,泄漏点位置计算公式如下:

$$x_n = \frac{(t_{i+1} - t_i) \cdot v + L}{2} \quad (1)$$

式中: v 代表负压波波速; t 代表负压波到达传感器的时间。

负压波波速是计算泄漏位置的关键参数,但是管道内液体会掺入少量气体,负压波波速受到含气率、内压、介质流动状态等影响而变化,且并非定值^[17]。本算法利用传感器阵列将对负压波波速的计算转变成计算负压波到达传感器的时间,为减小负压波向上下游传播测量误差,选择泄漏区间段左右两邻域的两组传感器(F_i 和 F_{i+1} ; F_{i-1} 和 F_{i+2})进行负压波波速的计算,计算公式如下。

$$v = \frac{L}{t_{i+2} - t_{i+1}} + \frac{L}{t_{i+1} - t_i} \quad (2)$$

泄漏定位时,唯一需要测量的参数是负压波到达传感器的时间,本文中提出利用线性拟合的方式进行时间的计算。由于管道泄漏前和泄漏瞬间管道内压力呈线性变化,因此计算负压波到达传感器的时间可通过线性拟合的方式进行计算。

选取泄漏前 n_2 个数据做线性拟合,得到泄漏前的直线方程;选取泄漏后 m_2 个数据做线性拟合,得到泄漏后直线方程。求解得到交点,对应横坐标即为所求的负压波到达传感器的时间。

至此,负压波波速与负压波到达传感器的时间差都已

计算完成,即可利用传统负压波的定位方式进行最终泄漏位置的计算。

如图3所示,线性拟合后计算得到泄漏前直线方程 $S_1 = a_1 t + b_1$;泄漏后直线方程 $S_2 = a_2 t + b_2$ 。最后,求解两条直线的交点(g_i),便可获得传感器监测到负压波到达的时间,根据式(1)~(3)即可得到得泄漏位置。

$$t = \frac{a_1 - a_2}{b_2 - b_1} \quad (3)$$

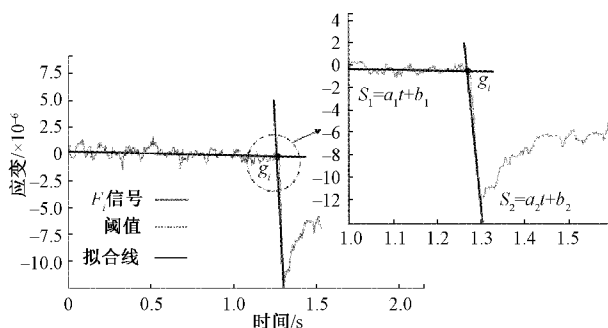


图3 线性拟合算法

2 系统实现

如今LabVIEW广泛应用于工业自动化、测试测量、图像处理、运动仿真、信号处理等领域,是目前应用最广泛的监测软件平台。

虚拟仪器技术相较于传统的仪器有很多优点,比如可以集成多种信号的采集,可以根据不同的需求自定义仪器界面,价格低廉并且可以随着计算机硬件的发展而更新,且虚拟仪器技术具有开放性、可重复使用、交互性更强等特性。

本文提出的管道泄漏监测与定位系统,在LabVIEW平台实现软硬件相结合,系统总体设计如图4所示。

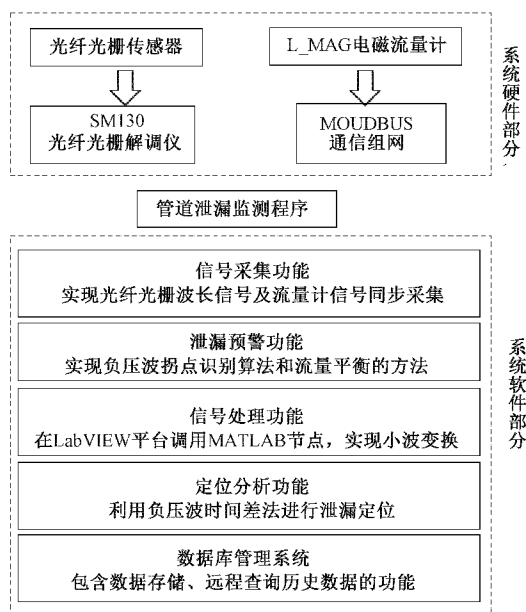


图4 系统总体设计

2.1 硬件设备

硬件主要包括 SM130 光纤光栅解调仪、光纤光栅 (FBG) 管径夹传感器、L_MAG 电磁流量计以及监控主机。

其中, SM130 提供了开放式的基于 LabVIEW 的数据采集程序, 此程序可以解调并实时采集 FBG 管径夹传感器的波长信号, 采集频率为 1 000 Hz。

L_MAG 流量计拥有数字显示和组网通信传输数据两种方式, 可以用 RS-485 屏蔽双绞线连接所有流量计, 与监测系统进行组网通信, 获取流量数据。

监控主机安装的实时监测系统提供了采集数据、泄漏预警、信号处理、定位分析、历史查询等功能。

Wang 等^[18]研制了 FBG 管径夹传感器, 该传感器对管道压力变化灵敏, 可通过管道应变准确反应管道内部的压力改变。如图 5 所示, 传感器与管道外表面紧密贴合, 故传感器通过测量径向应变即可反映管道内压力变化。

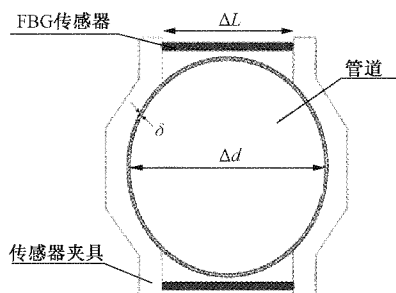


图 5 传感器示意图

2.2 软件功能实现

系统采用 LabVIEW2020 作为软件平台进行开发, 功能采用模块化编程, 各个功能模块相互独立, 松耦合。软件内部使用状态机架构, 这种结构更适用于实时监测的软件^[19]。针对不同的工程应用, 可以对功能模块进行定制扩展; 并且代码具有可重用性, 可以适用于各工况管道项目的监测。

1) 采集数据功能的实现

在 LabVIEW 中调用 VISA 配置、读取、写入、关闭函数与流量计实时通信, 平台 (主站) 向流量计 (从站) 写入命令帧, 从站收到主站命令后传输响应帧。响应帧包含流量信息, 通过字符串截取和转换得到瞬时流量数据, 在监测主机中实时监测瞬时流量与初始流量之间的差值; 调用 TCP 连接、写入、读取、关闭函数使上位机与下位机建立通信数据连接, 实时采集并监测 FBG 传感器波长信号。采集流程如图 6 所示。

2) 泄漏监测功能的实现

在 LabVIEW 中使用 Threshold Detector. vi, 该 VI 位于 Signal Process 选板的 Signal Operator 子线板。

如图 7 所示, 对输入信号进行阈值检测, 该输入信号数值突然下降, 通过设定阈值以及宽度, 宽度是信号需要满足的连续低于阈值的个数。本次试验设置阈值为数值 4,

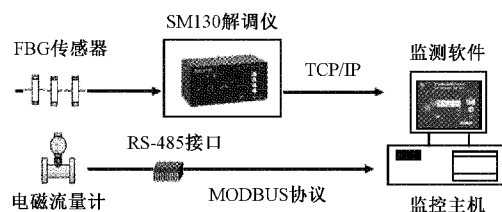


图 6 数据采集流程

宽度为 5, 准确识别到阈值拐点, 即第 5 s 的信号。利用该方法可以识别管道内压力突然下降, 即可以识别负压波信号。但实际管道运行过程中传感器应变数据上下波动, 阈值和宽度设置过大和过小都会影响泄漏预警的灵敏度, 易出现误报漏报的现象, 因此与流量信号共同用于实时的泄漏监测。

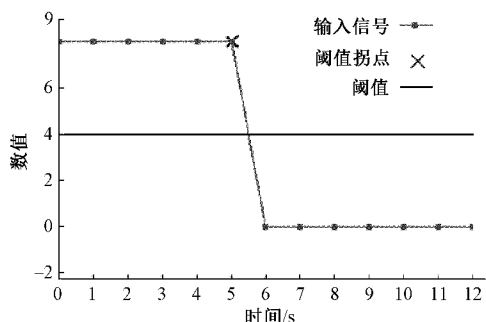


图 7 阈值拐点与线性拟合拐点识别

针对管道内流量的监测, 实时计算上下游流量差值的绝对值。通过设定阈值, 当计算得到的上下游流量差值超过阈值且检测到负压波曲线, 则进行泄漏预警。由于流量信号与传感器信号同步测量, 因此可以对两种信号进行同步计算。

3) 信号处理功能的实现

在 MATLAB 中编写信号处理代码, 进行小波变换的操作。在 LabVIEW 中可以直接调用 MATLAB Script 节点, 程序框图分为输入、输出以及代码 3 部分, 输入端为定位传感器的原始信号以及小波滤波参数; 输出端为经小波滤波后的信号, 且可以选择不同的小波名称、级数等参数进行处理, 以观察并选择最适宜的滤波参数, 提高监测信号信噪比, 为后期定位分析提供保障。

4) 定位分析功能的实现

本系统装载 MATLAB2016, 在 MATLAB 中编写线性拟合的算法, 可在 LabVIEW 直接调用, 程序框图如图 8 所示。

此外, 本系统可以实现多种定位方法, 通过调用 MATLAB 程序即可, 针对不同工况兼有可移植性和可复用性。

3 试验平台搭建

如图 9 所示, 管道试验平台由高功率水泵、球阀、自力

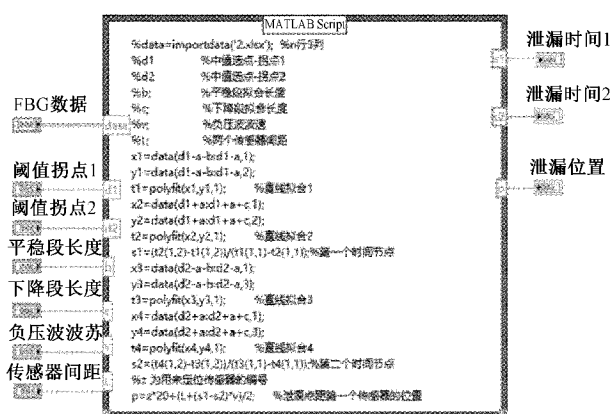


图8 定位功能程序框图

式调压阀、电磁流量计等组成,管道总长度 97 m,材料为厚度 2 mm 的白钢管,管径为 DN80,管道内液体介质选择水,钢管焊接法兰后用螺栓连接。

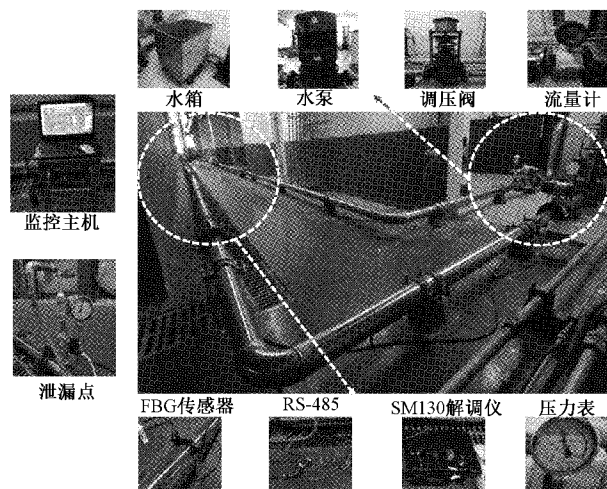


图9 管道泄漏监测与定位试验平台

沿管道长度方向等距布置 5 个 FBG 管径夹传感器,间距 20 m,共设置 2 个泄漏点 L_1 (32 m)、 L_2 (47 m)。管道头部、中部和尾部各设置 1 个电磁流量计。

FBG 传感器连接到 SM130 解调仪,共 5 组传感器,解调仪通过网线与监控主机相连;3 个电磁流量计通过组网,经 RS-485 转换后连接到监控主机。

4 系统测试及试验

4.1 泄漏监测功能

针对系统泄漏监测功能,在实验平台进行测试。本系统实现了同步采集管道流量和应变数据。通过调整 FBG Sensor Num 的值获取对应编号的传感器信号;通过 VISA 串口与多个电磁流量计组网通信,共设置 3 个 Serial Port,实时传输头部、中部、尾部的流量数据。波长数据采用双精度数值格式,由波形图表控件直接显示;瞬时流量数据采用列表框和仪表实时显示,如图 10 所示。



图10 管道实时监测界面

本次试验为提高泄漏监测的灵敏度并且降低识别负压波的误报现象,负压波识别程序中的阈值检测识别参数阈值 n_1 取 50,宽度 m_1 取 50。初始流量为 27,流量阈值差值设置为 2,单位是 m^3/h 。

现对 L_2 进行试验,打开电磁阀瞬间识别到负压波曲线,流量数据出现异常,系统判断出管道发生泄漏。泄漏指示灯闪烁且实现自动触发预警警铃,泄漏数据保存到文件中供历史查询,效果如图 11 所示。

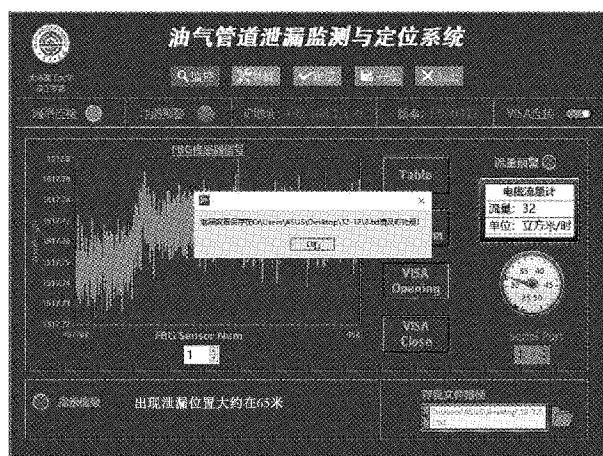


图11 管道泄漏预警界面

4.2 定位功能测试

采集的泄漏数据(3 000 个)将自动导入信号处理模块中。在滤波模块中进行信号处理。界面左侧提供可选的控件,界面右侧分别显示对应传感器含噪声信号以及滤波后的信号,通过选择不同的小波名称和滤波级数来观察滤波效果。

本次选择“sym6”小波进行 4 级滤波,效果如图 12 所示。滤波结束后可保存滤波后的泄漏数据,供后续使用。数据保存后点击定位分析按钮,进行最终定位计算。

在定位界面会根据选择定位传感器,拟合参数进行线性拟合计算泄漏位置。通过观察,本次线性拟合参数 n_2 设

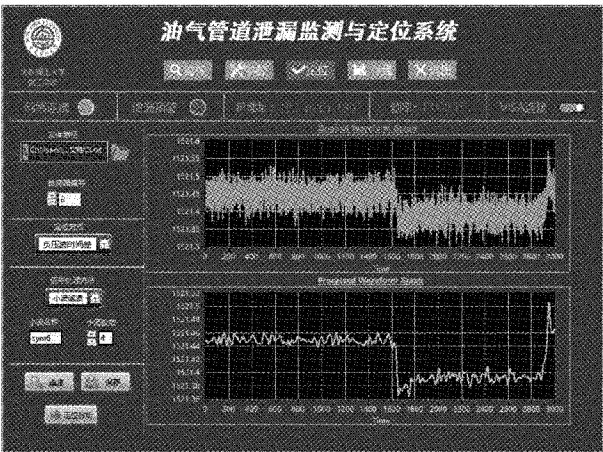


图 12 信号处理界面

置为 1 000;参数 m_2 设置为 50,得到定位界面如图 13 所示。

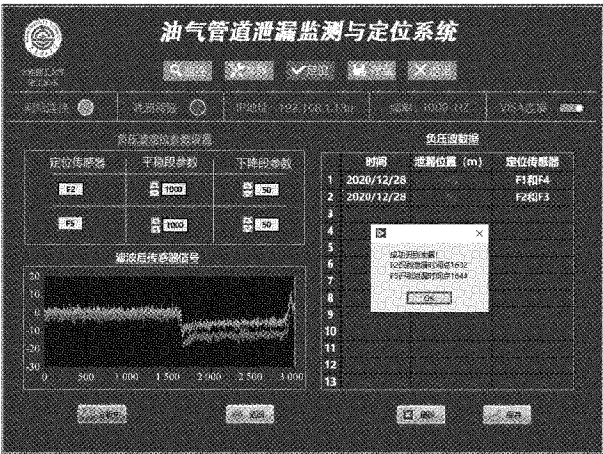


图 13 定位分析界面

基于传感器阵列对 L_2 单次泄漏进行定位分析,定位结果如表 1 所示。

表 1 L_2 泄漏多组次定位结果

定位传感器	定位结果/m	定位误差/m
F1 与 F5	44.0	3.0
F1 与 F4	48.0	1.0
F2 与 F5	46.5	0.5
F2 与 F3	49.0	2.0
F3 与 F4	51.5	4.5
平均值	47.8	0.8

当使用 F2 与 F5 进行泄漏定位时,定位结果为 46.5 m,误差为 0.5 m,当使用 F3 与 F4 定位时,定位误差为 4.5 m。不同传感器组合定位的误差主要因为传感器自身灵敏度的差异以及线性拟合时选取拟合数据个数的不同。本次泄漏定位平均值为 47.8 m,定位误差为 0.8 m,定位误差率为 0.82%。因此,定位分析时充分利用传感器阵列的优势,进行多组次传感器定位并取均值,可以显著提高定位精度。

为验证该方法的定位稳定性,设计了 4 种试验工况进行重复泄漏试验,分别为不同泄漏位置与不同泄漏流量,工况如表 2 所示。

表 2 泄漏试验工况

泄漏位置	泄漏流量/ ($L \cdot \min^{-1}$)	管道内压力/ MPa	次数
L_1	100	0.6~0.7	5
L_1	50	0.6~0.7	5
L_2	100	0.6~0.7	5
L_2	50	0.6~0.7	5

在系统中进行多组次取平均值计算最终泄漏位置,定位结果如表 3 所示,可得如下结论。

1)针对不同位置、不同流量的泄漏,利用多组次定位

表 3 泄漏定位结果

次数	流量/ ($L \cdot \min^{-1}$)	L_1 泄漏/ m	误差	相对误差/ %	L_2 泄漏/ m	误差/ m	相对误差/ %
1	100	33.0	1.0	1.0	48.2	1.2	1.2
2	100	31.5	0.5	0.52	47.8	0.8	1.0
3	100	31.2	0.8	0.82	47.4	0.4	0.41
4	100	33.6	1.6	1.6	46.5	0.5	0.52
5	100	32.4	0.4	0.41	47.2	0.2	0.21
1	50	34.8	2.8	2.9	44.9	2.1	2.2
2	50	35.2	3.2	3.3	48.2	1.2	1.2
3	50	34.5	2.5	2.6	44.3	2.7	2.8
4	50	29.4	2.6	2.7	50.1	3.1	3.2
5	50	30.0	2.0	2.1	49.5	2.5	2.6

取均值的方式兼有定位的精度和稳定性,100 L/min 的泄漏量两个泄漏点定位误差最大值分别 1.6%与 1.2%,50 L/min 泄漏量两个泄漏点定位误差最大值分别为 3.3%与 3.2%。该系统对大泄漏定位精度较高,并且能够针对较小泄漏进行定位。系统满足管道泄漏监测可靠性、精确度的要求。

2)本系统实现了实时监测管道内部压力以及流量的参数变化,试验中成功识别真实泄漏工况 L_1 与 L_2 ,未出现漏报的现象,并且在正常状态下未出现误报现象。因此,本系统具有泄漏预警的可靠性,并有效的降低了误报漏报率。

如图 14 所示,在稳定状态下电磁流量计采集的上下游流量差基本保持稳定状态。发生泄漏时,上下游流量差迅速增大且超过设定的流量差值阈值,流量出现异常。

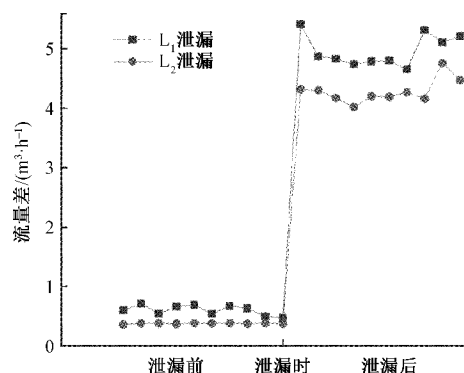


图 14 泄漏前后流量数据对比

4.3 数据管理功能

本系统在 LabVIEW 平台借助 DCT 工具包与数据库 MySQL 进行连接,可进行对历史数据的查询,按日期进行查询结果其如图 15 所示。



图 15 数据查询界面

5 结 论

本文基于提出的改进负压波与流量平衡法联合监测

与定位算法,在 LabVIEW 中实现了对管道进行实时的监测和定位的系统,实时监测管道内流量与压力的状态。在管道泄漏试验平台中对该系统进行了功能验证试验,试验结果表明该系统具有良好的稳定性、灵敏度和定位精度,有效地降低了误报漏报率,具有对泄漏及时预警的可靠性。此外,在不同泄漏位置与泄漏流量的定位试验中验证了其定位精度和定位稳定性。因此该系统可以广泛运用于管道泄漏监测领域,对管道智能化管理具有重要的意义。

参考文献

- [1] 梁永宽,杨馥铭,尹哲祺,等. 油气管道事故统计与风险分析[J]. 油气储运, 2017,36(4):472-476.
- [2] 独秀,魏亚楠,黄建成,等. 基于虚拟仪器的管道泄漏监测与定位系统设计[J]. 电子测量技术, 2019, 42(4):129-134.
- [3] 张梅,张双双,袁宏永,等. 燃气管道泄漏的次声源定位算法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2020,34(3): 187-194.
- [4] 刘浩,谭亮,程晶晶. 一种基于物联网技术的管道漏失检测电路设计[J]. 国外电子测量技术, 2020,39(5): 94-98.
- [5] 吴斌,蔡栋生,杭利军,等. 基于 LabVIEW 的光纤管道泄漏定位软件开发[J]. 仪器仪表学报, 2008, 29(10):2096-2099.
- [6] 汪冈伟,宋建河,郑月好,等. 利用 SCADA 系统实现管道泄漏检测与定位[J]. 油气储运, 2004(10): 46-50,59-64.
- [7] 任世杰,马纪伟,温卫中,等. 基于 WPF 的管道泄漏监测系统软件设计[J]. 辽宁化工, 2018, 47(1): 67-70.
- [8] 周韶彤. 基于小波分析的海底油气管道泄漏检测监测系统研究[D]. 舟山:浙江海洋大学, 2019.
- [9] 裴为华. 瓦斯抽采主管道泄漏监测与漏点定位系统实验研究[D]. 徐州:中国矿业大学, 2014.
- [10] 张骏甲,富宽,刘胜楠,等. 基于流量平衡法的泄漏识别改进算法[J]. 管道技术与设备, 2017(4):19-22,28.
- [11] 陈述,李素贞,黄冬冬. 埋地热力管道泄漏土体温度场光纤监测[J]. 仪器仪表学报, 2019,40(3):138-145.
- [12] JIA Z G, REN L, LI H N, et al. Performance study of FBG hoop strain sensor for pipeline leak detection and localization[J]. Journal of Aerospace Engineering, 2018, 31(5): 04018050.
- [13] 任亮,崔晓蕾,姜涛,等. 基于光纤光栅应变传感器的油气管道腐蚀监测[J]. 石油工程建设, 2015,41(3): 6-10.
- [14] REN L, JIA Z G, LI H N, et al. Design and experimental study on FBG hoop-strain sensor in pipeline monitoring [J]. Optical Fiber Technology,

- 2014, 20(1):15-23.
- [15] 姜涛. 基于光纤应变传感技术的管道健康监测[D]. 大连:大连理工大学, 2019.
- [16] 王立坤, 王洪超, 熊敏, 等. 长距离输油管道泄漏监测技术分析研究建议[J]. 油气储运, 2014, 33(11): 1198-1201.
- [17] 张树文, 高凌霄. 微含气液体管道压力波波速特性实验[J]. 管道技术与设备, 2016(1):1-3, 11.
- [18] WANG J J, REN L, JIANG T, et al. A novel gas pipeline burst detection and localization method based on the FBG caliber-based sensor array[J]. Measurement, 2020, 151: 107226.
- [19] 李宏男, 杨礼东, 任亮, 等. 大连市体育馆结构健康监测系统的设计与研发[J]. 建筑结构学报, 2013, 34(11):40-49.

作者简介

秦程, 硕士研究生, 主要研究方向为负压波定位算法及管道泄漏监测与定位系统。

E-mail:qc_dalian@mail.dlut.edu.cn

任亮(通信作者), 博士, 教授, 主要研究方向为光纤传感器、结构健康监测。

E-mail:renliang@dlut.edu.cn