

# 基于虚拟仪器的原油管道泄漏监测系统

作者: 李庄 王立坤 周琰

职务: 博士研究生

单位: 天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室

**摘要:** 近年来我国原油泄漏事故频仍, 造成巨大经济损失和环境污染, 所以需要一个能够及时发现并精确定位的监测系统。我们使用 National Instruments 公司的虚拟仪器开发平台 LabVIEW 和数据采集卡, 不间断采集压力、流量、温度等参数, 监视管道运行状况, 并利用电话线路构成通信网络, 建立了一个实时性较好的监测系统。对于突发的原油泄漏, 我们综合运用了包括小波分析在内的多种信号处理方法, 能够及时准确地定位泄漏点。本系统已经成功地应用于胜利油田和华东输油管理局等集输管网和长输管线, 取得了可观的经济效益。

**关键词:** 原油管道, 泄漏, 虚拟仪器, 小波分析

## A Virtual Instrument-Based Oil Pipelines Leak Monitoring System

**Abstract:** Raw oil leakage has been an important problem these years in China, which will cause serious consequences, such as economic loss and environmental pollution. Thus a monitoring system which can detect the leakage and locate the leak point is required. National Instruments' graphical programming language, LabVIEW and DAQ board are used to acquire pressure, flow rate and temperature continuously, monitoring the condition of the pipeline. And with telephone communication net, a real-time monitoring system is established. Several methods of signal processing, including wavelet analysis are utilized. The system has played a big role in the pipeline network in Shengli Oil Field and long pipelines of East China Oil Bureau.

**Key words:** oil pipelines, leakage, virtual instrument, wavelet analysis

### 一、泄漏监测与定位的原理

随着管道的建设, 各种监测技术也在不断发展, 目前应用于管道泄漏监测的主要有压力梯度法、负压力波法、流量平衡法、超声波检测法等物理方法和一些化学方法, 这些方法的特点和应用场合各不相同。国外虽然有比较成熟的技术, 但是不能够适应中国原油输送的特点, 而且价格昂贵。在国内, 多家大学和油田均做过一定研究, 但到目前为止, 只有天津大学研制的系统成功地应用于现场, 取得了显著的经济效益。

我国近年来的原油泄漏主要是因为人为破坏造成的, 特点是持续时间短、泄漏量较大, 属于突发性事故, 我们采用负压力波检测法。1997 年我们为华东石油管理局濮阳-滑县的管线设计了一套泄漏监测系统, 是在 DOS 操作系统下用 C 语言实现的, 其主要缺点是无法实现多任务, 数据采集和通信不能同时进行。从 2000 年初至今, 我们使用 LabVIEW 平台, 设计并不断完善了基于虚拟仪器的原油管道泄漏监测系统, 已经成功地安装于临盘-济南和沧州-临邑的两条管线上。

负压力波法是一种声学方法, 所谓压力波实际是在管输介质中传播的声波。当管道发生泄漏时,

由于管道内外的压差，泄漏点的流体迅速流失，压力下降。泄漏点两边的液体由于压差而向泄漏点处补充。这一过程依次向上下游传递，相当于泄漏点处产生了以一定速度传播的负压力波。根据泄漏产生的负压波传播到上下游的时间差和管内压力波的传播速度就可以计算出泄漏点的位置。定位的原理如图 1 所示，L 为管道长度，X 为泄漏点，t<sub>1</sub>、t<sub>2</sub> 为负压波传播到上下游的时间。图 2 为采集到的负压波波形，纵坐标单位为 MPa。

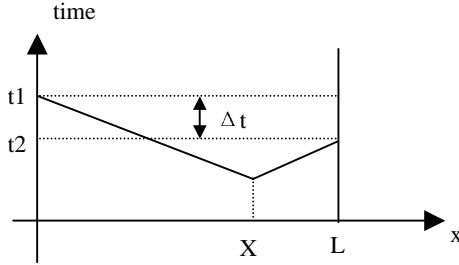


图 1 负压波定位原理

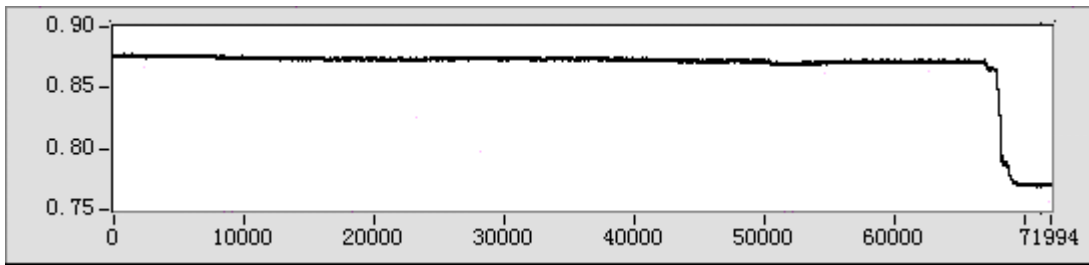


图 2 负压波波形

常规的负压波法定位公式为：

$$X = \frac{L + a\Delta t}{2} \quad (1)$$

其中 a 为管输介质中压力波的传播速度，Δt 为上、下游传感器接收压力波的时间差。

此公式的前提是压力波速为常数，但是声波的速度与媒质的密度、压力、比热和管道的材质都有关。由于国外大多是轻质油，常温输送即可，原油的密度沿管线变化不大，所以波速可以看作常数。而我国的原油具有高粘度、高含蜡和高凝点的特点，必须加热输送。由于管道传输距离长，散热明显，一般沿程的温度变化约十几到二十几摄氏度，所以压力波的传播速度并不是一个常数，受温度影响很大。考虑到液体的弹性、密度和管材的弹性的因素，压力波传播速度 a 重新写为：

$$a(t) = \sqrt{\frac{K(t) / \rho(t)}{1 + \frac{K(t)}{E} \cdot \frac{D}{e} \cdot C_1}} \quad (2)$$

其中 K 为液体的体积弹性系数，ρ 为液体的密度，E 为管材的弹性模量，D 为管道直径，e 为管壁厚度，C<sub>1</sub> 为与管道约束条件有关的修正系数。其中体积弹性系数 K 和密度 ρ 都是温度的函数。所以采集压力的同时还要采集管道的温度用来校正压力波的传播速度。

流量在监测中也是一个重要的参数。因为我国很多原油管道都不是密闭输送，收油端直接接入大罐，本身压力就很低，再加之大罐的滤波作用，压力的变化可能会淹没在一片噪声之中。若同时监测流量的变化，也可以及时发现泄漏，弥补压力灵敏度低的缺点。另外，除了泄漏，泵站内部的操作，如调泵、调阀，也会产生负压波。我国的现状要求只能在站内安装一台压力变送器，所以仅靠压力就不能判断负压波是站内产生的还是站外产生的。而流量变化对于泄漏和站内操作具有不同性质，通过分析流量变化就可以甄别负压波的来源。

基于以上考虑，我们采取压力流量联合判断的方法，分别在管道的出口和进口加装合适量程的压力变送器、温度变送器和流量变送器，不间断采集原油的压力、温度和流量，监视管道的运行状况。压力变送器和温度变送器输出标准的 4~20mA 电流模拟信号，流量变送器输出的是脉冲。由于模拟量的采集速率不是很高，大约为几百 Hz，脉冲的频率约为 700 多 Hz，我们选用低价的多功能卡 PCI-6023E，利用其两路模拟量单端输入和一个通用 24 位计数器。从功能、价格和开发周期等因素来考虑，这款采集卡都非常适合我们的要求。对于微弱信号的提取效果明显，可以观察到万分之几 MPa 的微小变化。在临-济线和沧-临线上共使用了 10 块 PCI-6023E，连续工作的稳定性很好。

为了节约存储空间，我们采用二进制格式保存文件。压力和温度每小时一个文件，流量因为是累积量，每一天一个文件，供泄漏定位和查阅历史数据之用。

## 二、精确捕捉压力波传播到上下游的时间差

精确获得泄漏引发的压力波传播到上下游传感器的时间差，需要准确地捕捉到泄漏负压波信号序列的对应特征点。由于不可避免的工业现场的电磁干扰、输油泵的振动等，采集到的压力波信号序列附加了大量噪声，如何从噪声当中准确地提取出信号的特征点是定位的关键。

首先，因为不同条件（管径、温度、压力、输送工艺、环境噪声等）下的信号具有不同的特征，我们利用 LabVIEW 中丰富的信号处理函数对信号的特征作了深入的研究分析和预处理，使得系统能够针对不同的信号做出相应的处理。例如，在沧州首站，启泵的时候信号中含有比较有规律的尖锐噪声，虽然幅度并不大（只有约千分之一兆帕），却因为压力比较低而非常明显，如图 3。针对这样的情况，我们使用了中值滤波器。中值滤波器能够平滑尖锐噪声，又能保持信号的边沿，而且计算速度非常快，可以用于在线处理。对比下面两图，可以看到滤波的效果。

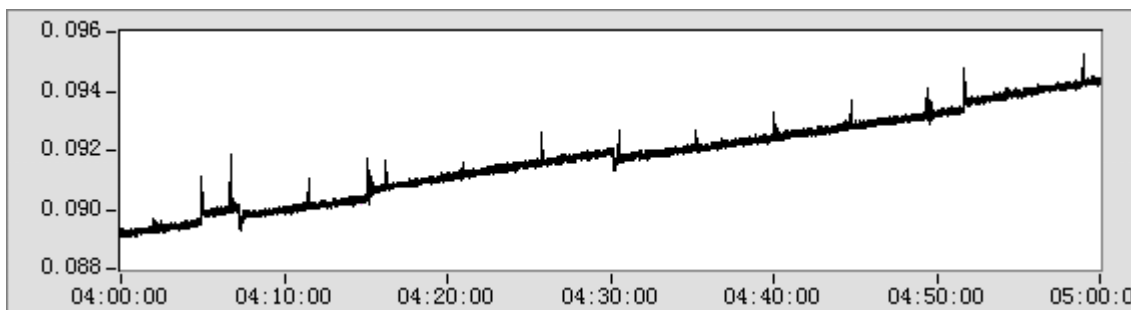


图 3 含有脉冲噪声的负压波信号

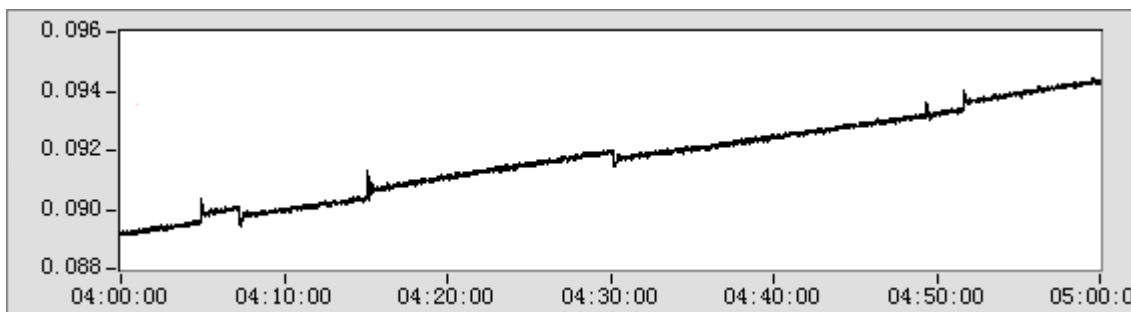


图 4 上图的信号经过中值滤波器之后的波形

对信号作了一定预处理之后，我们采用 Signal Processing 软件包里提供的小波分析的动态库来捕捉压力波变化的特征点。将含有负压波信号的数据通过两通道滤波器，分为低频概貌和高频细节两路输出，负压波的位置就是高频细节当中最小值对应的索引值。图 5 为图 2 所示信号的高频结果。因为我们仅分析信号，不作重构，所选择参数设计更为灵活的双正交的滤波器组，而不必考虑对偶

滤波器组是否收敛。利用 Wavelet and Filter Bank Design Toolkit 提供的 Design Panel 和 1D Test Panel, 我们在现场对于不同的信号可以方便地调整滤波器参数, 观察滤波效果, 大大提高了应用的效率。

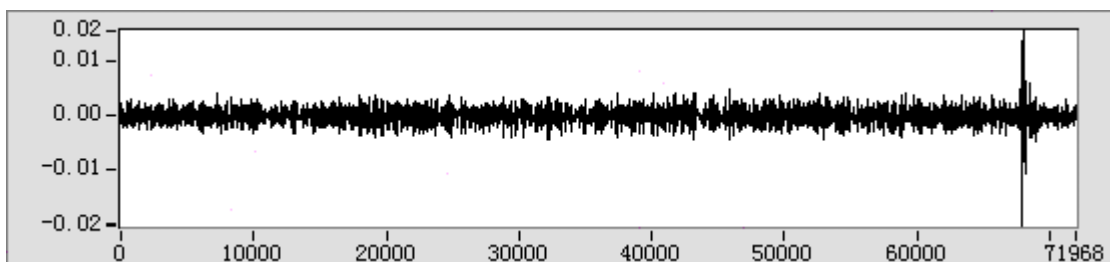


图 5 图 2 的信号通过两通道滤波器后的高频结果

### 三、系统的软件设计

以沧州-临邑长输管线的泄漏监测系统为例介绍一下整个系统的设计。

系统的组成如图 6, 由安装于沧州、东光、德州和临邑的四套装置和沧州处调度室的中心计算机组成。各站的装置包括各种传感器、计算机、信号调理装置、信号采集卡和调制解调器等。

因为管道全线长 180 公里，两座泵站之间的距离一般是 60 公里左右，所以只能通过电话网络实现数据通信。LabVIEW 的函数库里没有现成的函数可供调用，我们综合运用 Serial Port VIs, In Port, Out Port 和 Call Library Function 调用自己编写的动态链接库，控制调制解调器实现远程的数据通信，各个子站的数据都可以实时传到中心站，线路中断能够自动重新连接。主程序每一分钟调用一次泄漏判断子程序，该子程序综合运用负压波法、压力梯度法和流量差法分析采集到的工况数据，判断是否有泄漏发生。

沧州站和沧州处调度室仅有几百米的距离，两台计算机之间建立了以太网，使用 TCP/IP 实现数据传输。现场还有其他 PLC 系统，我们用 DDE 实现 LabVIEW 和 Excel 之间的数据交换，作为与其他系统的接口。

用户对系统的操作都设计为菜单操作，包括参数设置、文件处理、历史数据、泄漏定位和退出系统等几项。每一项菜单还有报警、都通过 VI Server 的方法动态调用，这样既节省内存，又使程序结构清晰，模块化好。

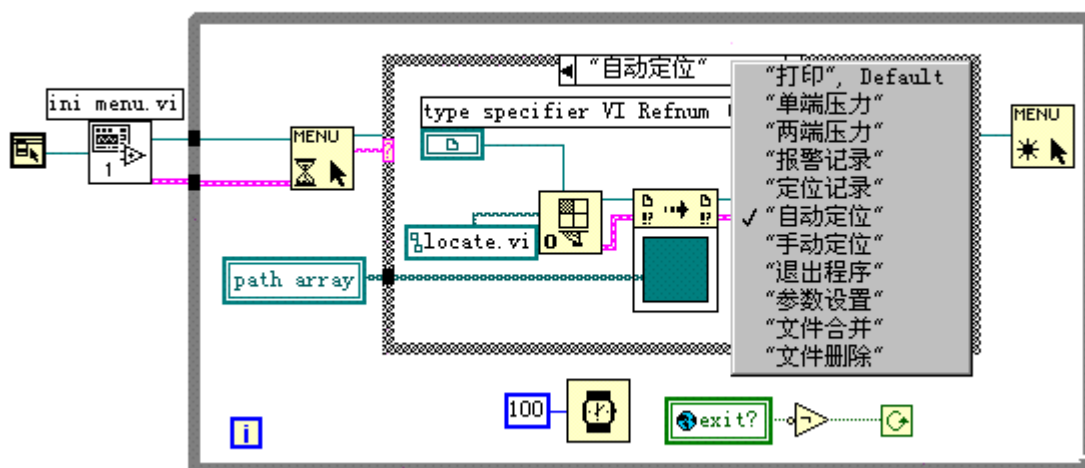


图 9 用动态调用实现菜单操作

图 7 和图 8 为中心计算机的主界面和定位程序的操作界面。

## 总结

作为虚拟仪器开发平台,和其他同类产品相比,LabVIEW 在数据采集、存储、显示、信号处理、数据传输等方面显示了强大的功能,尤其是其数据采集和信号处理的优势提高了我们的工作效率。我们综合运用了数字滤波、中值滤波、频谱分析等各种信号处理函数,使用起来只需连连线;小波分析软件包也为现场应用提供了很大的方便;另外我们选用的 PCI-6023E 数据采集卡价格并不比其他同类产品高,而且性能非常出色,在 LabVIEW 当中有多种方法可供调用。同时,Advanced Functions 和其他通信函数扩展了 LabVIEW 的性能,使系统设计更加灵活。模块化的设计使编程简单明了,我们仅用了两个多月的时间就在实验室完成了全部程序的编制,在现场调试阶段,也可以很快作出调整,实现用户的要求。系统反映灵敏,报警时间小于 200 秒;定位精度比原来用 C 语言设计的系统大大提高,最大定位误差小于被测管长的 2%。还能够估算泄漏量,具有和其他程序的接口,方便扩展。据统计,在胜利油田临盘-济南管线,2001 年 3 月 5 日至 4 月 12 日,共监测到泄漏 39 次,抓获盗油车辆 8 辆。在沧州-临邑管线 2001 年 4 月 9 日至 5 月 13 日,抓获盗油车辆 17 辆,发现阀门 40 多处,为国家挽回经济损失数十万元。

天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室经过多年的探索,对我国各地的原油、成品油管道作了深入的理论研究和丰富的现场实验,研制的泄漏检测系统能够适应各种不同的工况特点。除了前文提到的应用之外,本系统还将应用于中(原)-洛(阳)的全线改造、辽河油田曙光-锦西等管线,在我国的石油生产和运输领域具有广阔的前景。本实验室对天然气管道泄漏也作了一定研究,随着我国天然气管道的发展,美国国家仪器公司的产品在天然气管道泄漏系统上也将获得成功应用。

## 参考文献

- [1] 李庄,原油输送 SCADA 系统若干关键技术的研究,天津大学硕士研究生论文,2001
- [2] 王立宁,原油输送管道泄漏检测理论及其监测系统的研究,天津大学博士研究生论文,1998
- [3] LabVIEW User Manual, National Instruments, 1998
- [4] Shie Qian, Dapang Chen, Joint Time-Frequency Analysis, Prentice Hall, 1996
- [5] Signal processing Toolset Reference Manual, National Instruments, 1999