

油气长输管道泄漏检测技术研究

任顺顺

西南石油大学石油与天然气工程学院, 四川 成都 610500

摘 要:管道泄漏检测技术是长距离油气输送管道正常运营的重要保障。归纳总结了国内外油气管道泄漏检测技术,并进行了简单介绍。目前,可以实现连续在线检测的方法主要有实时瞬态模型法、序贯概率比检验法、负压波法、分布式光纤检测法和声发射检测法。详细分析了这五种技术的原理、优缺点和工程应用情况,并在误报率、泄漏孔的大小、泄漏位置等几个方面进行了对比分析,为油气管道检漏方案的选择提供借鉴。

关键词:油气长输管道;泄漏检测;在线检测

DOI:10.3969/j.issn.1006-5539.2014.06.006

0 前言

管道运输是石油和天然气最主要的运输方式。由于管道腐蚀、老化、周围环境的恶劣、施工损坏和人为破坏等原因,管道泄漏时有发生。油气泄漏不仅会造成资源浪费和财产损失,还会污染环境,危及人的安全。虽然管道检漏技术不能降低管道泄漏发生的几率,但是选择高效的检测手段可以最大限度地降低泄漏带来的损失和危害。油气管道检漏的方法较多,每种方法各有优缺点,使用范围也不相同。分析比较各种检漏方法,以便于选用有效的检漏方法,从而快速、准确的检测泄漏点,为维修提供准确信息。

1 管道泄漏检测方法概述

油气管道泄漏检测方法较多,可分为两种:内部检测法和外部检测法^[1-4]。内部检测法是通过检测管道内介质的运行参数,如压力、温度、黏度、流速等,来推断管道是否泄漏。外部检测法是一种非算法的物理检测方法,通过检测管道外的泄漏物来判断泄漏。表 1 总结简述了国内外主要的内部检测法和外部检测法^[1-4]。

长输管道能够长期连续稳定运营,因此检漏系统需要具备连续在线检测的能力。检测技术较成熟,又可以实现连续在线检测的方法主要有实时瞬态模型法、序贯概率比检验法、负压波法、分布式光纤检测法和声发射

检测法^[2,4]。以下对这五种方法进行详细的阐述与分析。

表 1 内部检测法和外部检测法的主要类型

类型	工作原理	
内部检测法	质量 / 体积平衡法	根据介质流入与流出管道的流量差来判断泄漏,当流量差超过预设的警戒值,就判定为泄漏
	压力流量变化法	监测管道出入口的压力和流量,当变化量超过设定值后,就发出有潜在泄漏点的信号
	实时瞬态模型	在一定边界条件下,求解管道内流场,建立管道水力模型,根据实测值与模型计算值的偏差判断泄漏
	压力点分析法	管道泄漏后,会产生压力降。根据压力的变化来判断泄漏
	序贯概率比检验	通过统计分析学分析管道工况的变化,来推断管道是否泄漏
外部检测法	负压波法	传感器接受压力数据并输往中央处理器进行分析,从而判断是否泄漏
	光纤电缆检漏法	利用在管道沿线敷设的光纤电缆来检测泄漏
	导电高聚合物检漏法	利用探测导线检测电缆中的水蒸气,进而判断管道绝缘层的浸水点和泄漏点,适用于绝缘管道的检测
	声发射检漏法	管道泄漏后,管壁上产生应力波。通过检测应力波来判断泄漏
	气体采样法	通过检测管道沿线的空气来判断管道是否泄漏,仅适用于输气管道
	红外线法	通过红外摄像装置记录管道周围热辐射效应或管道上方空气光谱,利用光谱分析检测泄漏及泄漏位置

收稿日期:2014-04-10

作者简介:任顺顺(1987-),男,河北石家庄人,硕士研究生,主要从事油气集输工艺及腐蚀与防护研究。

2 常用的在线检测方法

2.1 实时瞬态模型法

实时瞬态模型法是国际上重点研究、应用较多的管道检漏方法^[2,5]。建立该模型需要提供管道参数和流体参数,从而列出连续性方程、运动方程和能量方程,得到流体在任一时刻的流速、压力、流体、密度随时间变化的方程组^[6]。SCADA系统将管道两端实时采集的流量、压力、温度等现场数据作为边界条件。在此边界条件下,求解管内流程,然后将计算值与实测值比较,当两者差值达到或超过某一值时,则判定为泄漏。

该模型是一种反映流体流量、压力、密度和温度关系的理想模型。这种检漏方法可以估计泄漏点的大小和对泄漏点进行定位,适用于输气输油管线、陆地管线和海上管线,能够区分泄漏和偷油,是一种较为成熟的检漏方法^[4]。当流体性能较稳定、管线仪表精度较高时,该方法会表现出精准的检漏性能。但是,瞬态模型检漏法也有不足之处:误报率高,精度依赖于现场仪表和SCADA系统的质量,灵敏性受制于流体的黏度、密度等特性。

2.2 序贯概率比检验法

序贯概率比检验法(Sequential Probability Ratio Test,简称SPRT)是一种统计决策方法,20世纪40年代由统计学家Wald提出^[7]。该方法使用序贯概率比检验方法对压力、流量进行分析,计算出检验参数,然后与允许的误报警率和失报警率进行比较,从而判断是否泄漏。对不同时刻运行参数进行采样分析,减少误报警率。利用压力插值法,列出泄漏定位公式对泄漏进行定位。采用最小二乘法对定位公式求解,可以提供定位的精度。在SCADA系统存在的基础上,采用这种检漏方法较为经济。SPRT检漏方法误报率低,能够辨认泄漏和偷盗情况,适用于稳态和瞬态,不受周围环境的影响,不受流体性质的影响。因此,SPRT方法广泛应用于海上、陆地的输油输气管线。值得注意的是,当泄漏量较小时,定位精度较差。另外,该方法的准确性、灵敏性还依赖于现场仪表和SCADA系统的质量^[4,7]。

2.3 负压波法

负压波法对仪表设备要求简单,是国内应用较多的管道检漏技术。图1为负压波检漏法定位示意图^[8]。当管道泄漏后,泄漏点压力突然降低。管道泄漏产生的压力波从泄漏点分别向上下游传播。安装在管道两端的传感器接收压力数据后,输往中央处理器分析数据,从而判断泄漏和确定泄漏点^[8-9]。

管道运营中,正常调节管道中的泵和阀门时,产生噪声信号。这种噪声信号干扰传感器,最终导致误报警。

因此,必须采用有效的方法消除噪声干扰信号。常用的方法有小波变换滤波、统计处理、自适应滤波、卡尔曼滤波等^[10]。

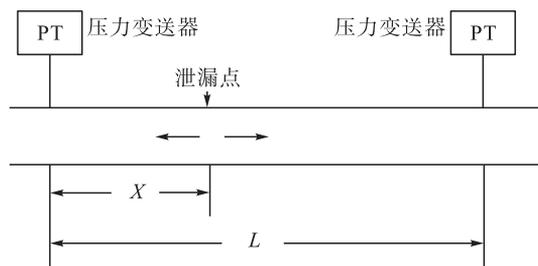


图1 负压波泄漏定位示意图

该方法需要高速采样的硬件系统,否则可能错过检测出泄漏的机会。该方法具有如下优点:安装费用不高,其灵敏性不受现场仪表的质量影响,定位精度高,检测性能对流体的黏度、密度等特性不敏感,不受环境影响,能够识别偷盗行为。因此,负压波法广泛应用于输油输气管道。负压波法对多相流管道的应用,目前尚处于试验研究阶段^[4]。

2.4 分布式光纤检测法

国外对光纤检测法的研究已经超过40年,并取得了显著成果和广泛应用。分布式光纤检测法的类型较多,但技术成熟,能够实时监控长输管道的方法只有干涉法。干涉式光纤检测技术根据光纤检测的物理场的不同,主要分为分布式温度传感法和分布式声波(振动)传感法^[2,4,11]。

2.4.1 分布式温度传感法

该方法的基本原理是根据管道中输送的流体泄漏后,会改变管道周围的温度,沿管道敷设的光纤检测温度的变化,当温度变化量超过一定的范围,就认为管道泄漏。该方法适用于输送气体和输送液体管道,但光纤敷设的位置不同。沿输送气体管道敷设时,光纤电缆位于管线之上,输送液体管道正好相反。

2.4.2 分布式声波(振动)传感法

该方法的基本原理是管道泄漏后,会产生声波,光纤检测到声波(或振动),系统便会报警。澳大利亚FFT公司基于模态分布调制干涉技术研制了一种对声波、振动敏感的分布式光纤管道安全防御系统。FFT公司称该系统在40 km管段内检测,定位精度为 ± 50 m。该系统已成功应用于美国New Yoke Gas Group和印度尼西亚Gulf Resources Ltd的长输管道上^[4]。

分布式温度传感法和分布式声波(振动)传感法报警迅速、定位精度高,可应用于输油、输气和多相流管道。具体使用哪种方法更有效,取决于管道泄漏产生的信号。例如,油品温度跟环境温度相差不大时,采用分布式温度传感法是不可取的。分布式温度传感法适用于输

气管道和热油管道。如果管线经常出现偷油、偷气事件,应该采用分布式声波(振动)传感法。

2.5 声发射检测法

管道泄漏后由于管道内外压力不同,在泄漏点会形成射流。这种射流影响管内流体的正常流动,造成流体与管道及周围介质的相互作用,从而使流体向外辐射能量,并在管壁上产生应力波。这种应力波可以描述材料结构的某种状况,因此它也被认为是一种声发射现象。这种声发射信号反映了泄漏孔的大小、形状等信息,并从泄漏点向管道上下游传播^[12-14]。安装在管道两端的传感器接收到声发射信号后,经过识别、分析,就可以判断管道是否泄漏。声发射检测法的原理,见图 2。

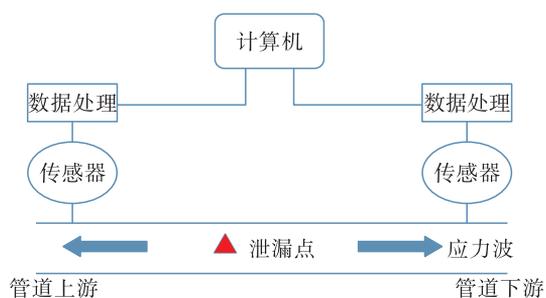


图 2 声发射泄漏检测示意图

此检测方法能够实现连续检测,而且对监测仪器的采样频率要求不高,也就是说泄漏刚发生到泄漏后,都能检测泄漏信息^[12]。声发射检测法的关键技术是泄漏源的定位方法和去噪方法。根据声发射信号的特点以及为了确保定位的精度,适合采用小波变换、神经网络去噪方法和基于信号幅度衰减的定位方法。

3 检漏方法对比分析

以上五种管道泄漏检测方法各有优缺点,适用情况也不相同。到底哪种方法能够迅速检测出泄漏,准确定位,而又花费少呢?这确实难以抉择。表 2 从适用的流体,能否检测出打孔偷盗情况,误报率/漏报率,灵敏度,是否受输送流体性能的影响,定位精度,评估泄漏孔的大小,是否依赖 SCADA 系统和仪表安装费用,维修费用等方面,对五种检测方法进行对比分析。

从表 2 可以看出,检漏系统的性能指标较多,而且这五种常用的检漏方法都有缺点,这给长输管道检漏方案的制定带来了难度。因此,针对长输管道检漏方案的制定,提出两点建议:第一,管道业主方需要详细了解管道的信息,从而对这些检测系统的性能指标进行优先次序排列。例如,若管道已经运营,打孔偷盗事件十分频繁,业主方应该首先挑选出定位精度高、灵敏度高的检测方法,再对这些方法从误报率低、费用少等几方面进行筛选。若管道刚刚建成,而且使用了 SCADA 系统,SCADA

系统和仪表的精度很高,这种情况采用序贯概率比检验法不失为一种明智的选择。若管道运营时间较长,点腐蚀较为严重,这时应该优先考虑的性能指标有灵敏度、不受孔大小的限制、定位精度。第二,单一的检漏方法都有缺点,往往难以满足管道检漏系统的性能要求;多种方法结合使用可以增强检测系统的综合性能^[15-16]。比如,序贯概率比检验法与负压波法相结合对管道进行检测。负压波法定位精度高,序贯概率比检验法灵敏度高、误报率低,两种方法结合使用,提高了检漏系统的整体性能。

表 2 检漏法的性能指标对比表

性能指标	实时瞬态模型法	序贯概率比检验法	负压波法	分布式光纤检测法	声发射检测法
适用的流体	气体、液体	气体、液体、多相流	气体、液体、多相流	气体、液体、多相流	气体、液体
能否检测出打孔偷盗情况	能	能	能	分布式声波(振动)传感法可以	能
误报率/漏报率	误报率高	误报率低	漏报率高	误报率较高	误报率较低
灵敏度	低,建立模型所需的参数多	中等,灵敏性依赖于现场仪表和 SCADA 系统的质量	高	非常高	非常高
是否受输送流体性能的影响	是,受流体特性影响	否	否	否	否
定位精度	低	较高,泄漏量小时,定位精度差	高	非常高	非常高
评估泄漏孔的大小	评估准确度高	评估准确度高	需要做测试校正试验	不能评估	可以
是否依赖 SCADA 系统和仪表	是	是	否	否	否
安装费用	高	中等	低	非常高	中等
维修费用	高	中等	低	中等	中等

4 结论

长输管道检漏方法较多,其中实时瞬态模型法、序贯概率比检验法、负压波法、分布式光纤检测法和声发射检测法能够实现连续在线检测。这五种方法工作原理不同,各有优缺点,这给管道业主制定检漏方案带来难度。综合比较分析了五种检测方法的各性能指标,为管道检测方法的选择提出了建议。

参考文献:

- [1] 王延年,朱强,赵则祥.长输油气管道泄漏检测方法研究进展[J].石油机械,2007,35(5):49-53.

- Wang Yannian, Zhu Qiang, Zhao Zexiang. Advancement in the Study of Leakage Detection Method for Long-distance Oil and Gas Transportation Pipeline[J]. China Petroleum Machinery, 2007, 35(5):49-53.
- [2] 李玉星,彭红伟,唐建峰,等.天然气长输管道泄漏检测方案对比[J].天然气工业,2008,28(9):101-104.
- Li Yuxing, Peng Hongwei, Tang Jianfeng, et al. Comparative Study on Leakage Detecting Techniques for Long-distance Natural Gas Pipelines[J]. Natural Gas Industry, 2008, 28(9): 101-104.
- [3] Elliott J, Fletcher R, Wrigglesworth M, et al. Seeking the Hidden Threat: Applications of a New Approach in Pipeline Leak Detection [C]. SPE 118070 Presented at the Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference, 3-6 November, 2008, Abu Dhabi, UAE. New York: SPE, 2008.
- [4] Zhang J, Hoffman A, Murphy K, et al. Review of Pipeline Leak Detection Technologies [C]. Prague: ATMOS International PSIG Annual Meeting, 2013.
- [5] 孟令雅.基于瞬态模型法的输气管道泄漏监测与定位技术[J].北京交通大学学报,2008,32(3):73-77.
- Meng Lingya. Research on Leak Detection and Position for Natural Gas Pipeline Based on Transient Model Method [J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2008, 32(3):73-77.
- [6] 刘恩斌,彭善碧,李长俊,等.基于瞬态模型的油气管道泄漏检测[J].天然气工业,2005,25(6):102-104.
- Liu Enbin, Peng Shanbi, Li Changjun, et al. Leakage Detection of Oil and Gas Pipelines by Transient Model [J]. Natural Gas Industry, 2005, 25(6):102-104.
- [7] 崔谦,靳世久,王立坤,等.基于序贯检验的管道泄漏检测方法[J].石油学报,2005,26(4):123-126.
- Cui Qian, Jin Shijiu, Wang Likun, et al. Detection Method for Pipeline Leakage Based on Sequential Probability Ratio Test [J]. Acta Petrolei Sinica, 2005, 26(4):123-126.
- [8] 郭炳睿.基于负压波法的泄漏检测研究[D].山东:中国石油大学,2009.
- Guo Bingrui. Research of the Leakage Detection Based on Negative Pressure Wave Method [D]. Shandong: China University of Petroleum, 2009.
- [9] 李长俊,刘恩斌,梁党国,等.基于负压波原理的输油管道泄漏检测技术研究及应用[C].北京:中国国际石油天然气安全技术管理高层研讨会,2005.
- Li Changjun, Liu Enbin, Liang Dangguo, et al. Research on Leak Detection for Oil Transportation Pipeline Based on Negative Pressure Wave Method [C]. Beijing: Papers of Seminar Forum on Oil & Gas Safety Technology & Management, 2005.
- [10] 马小林,王泽根,谢静文.负压波在管道泄漏检测与定位中的应用[J].管道技术与设备,2013,(3):17-19.
- Ma Xiaolin, Wang Zegen, Xie Jingwen. Application of Negative Pressure Wave in Pipeline Leakage Detection and Localization [J]. Pipeline Technology and Equipment, 2013, (3):17-19.
- [11] 冷建成,周国强,吴泽民,等.光纤传感技术及其在管道监测中的应用[J].无损检测,2012,34(1):61-65.
- Leng Jiancheng, Zhou Guoqiang, Wu Zemin, et al. Optical Fiber Sensing Technology and Its Applications in Pipeline Monitoring [J]. Nondestructive Testing, 2012, 34(1):61-65.
- [12] 王朝晖,张来斌,辛若家,等.声发射技术在管道泄漏检测中的应用[J].中国石油大学学报(自然科学版),2007,31(5):87-90.
- Wang Zhaohui, Zhang Laibin, Xin Ruojia, et al. Application of Acoustic Emission Technique in Pipeline Leakage Detection [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2007, 31(5):87-90.
- [13] 焦敬品,何存富,吴斌,等.管道声发射泄漏检测技术研究进展[J].无损检测,2003,25(10):519-523.
- Jiao Jingpin, He Cunfu, Wu Bin, et al. Advance in Acoustic Emission Techniques for Pipeline Leak Detection [J]. Non-destructive Testing, 2003, 25(10):519-523.
- [14] 赵方生.基于音波的输气管道泄漏检测及定位试验研究[D].东营:中国石油大学,2010.
- Zhao Fangsheng. Experimental Study on Leak Detection and Location for Gas Pipeline Based on Acoustic Method [D]. Dongying: China University of Petroleum, 2010.
- [15] 李炜,朱芸,毛海杰,等.SPRT检验法和小波变换法在管道泄漏检测中的应用[J].计算机测量与控制,2005,13(9):903-907.
- Li Wei, Zhu Yun, Mao Haijie, et al. Pipeline Leak Detection Based on SPRT and Wavelet Transform [J]. Computer Measurement & Control, 2005, 13(9):903-907.
- [16] 李炜,朱芸,毛海杰.基于综合方法应用的管道泄漏检测研究[J].化工自动化及仪表,2005,32(2):51-53.
- Li Wei, Zhu Yun, Mao Haijie. Studying of Oil Pipeline Leaks Detection and Location Based on Synthesized Method [J]. Control and Instruments in Chemical Industry, 2005, 32(2):51-53.