

天然气长输管道泄漏检测方案对比^{*}

李玉星¹ 彭红伟¹ 唐建峰¹ 邓雷颖² 王风波²

(1.中国石油大学·东营 2.中国石化胜利油田有限公司孤岛采油厂)

李玉星等.天然气长输管道泄漏检测方案对比.天然气工业,2008,28(9):101-104.

摘要 大口径、长距离天然气输送管道的泄漏检测和定位技术日益受到人们的重视。总结评价了用于天然气长输管道泄漏检测和安全预警的各种技术方案,讨论了其基本原理、适用范围、技术成熟度、优点和缺点以及工程应用情况;采用灵敏度、定位精度等7项技术指标对各种泄漏检测方法进行了评价和对比。目前,声波泄漏检测技术和分布式光纤泄漏检测技术由于具有诸多方面的优点,是近年来国内外泄漏检测技术研究的重点和热点,这两种技术已初步应用于实际,并取得了良好的效果。重点对这两种泄漏检测技术的原理、适用范围、所能达到的技术指标、优、缺点以及工程案例进行了详细讨论、分析和对比,可为我国天然气长输管道泄漏检测和安全预警系统的开发和研究提供技术依据。

关键词 天然气管道 泄漏 检测方法 对比 分布 光纤 声波

一、主要的泄漏检测方法及其对比

目前,国际上已有的输气管道泄漏检测的方法有两类:一类是基于磁通、涡流、摄像等投球技术的管内检测法,此类方法虽然泄漏检测和定位较为准确,但不能实现在线实时检测并极易发生管道堵塞、停运等严重事故。另一类是基于管线压力、温度、流量、声音以及震动等物理参数发生变化的外部检测法。这里只对外部检测法进行讨论和分析。

1.主要的泄漏检测方法

(1)质量或体积平衡法^[1]

根据质量/体积平衡,管道内介质的流进与流出应相等。当泄漏程度达到一定量时,入口与出口就形成明显的流量差,当流量差超出一定的范围就可判定为泄漏。此方法可判定泄漏,但由于气体的可压缩性和流量测量的非同步性,其误报率和漏报率都很高,检测的灵敏性和定位精度很低。因此,该方法不能满足实际需要,只能与其他方法配合使用。

(2)统计决策法^[2-3]

统计决策法是壳牌公司开发出的一种不带管道模型的新型检漏方法。它使用序贯概率比检验(SPRT)方法对实测的压力、流量值进行分析,计算

连续发生泄漏的概率,并利用最小二乘法进行泄漏点定位。该方法使用统计决策论的观点较好地解决了实时模型中误报警的问题,且不用计算复杂的管道模型,但目前该方法还很不成熟,存在许多未解决的问题。

(3)瞬态模型法^[4-5]

瞬态模型法是近年来国际上着力研究的泄漏检测方法。其基本思想是建立管内流体流动的数学模型,在一定边界条件下求解管内流场,然后将计算值与管端的实测值相比较,当实测值与计算值的偏差大于一定范围时,就认为发生了泄漏。该方法要求建立准确的管道模型,由于影响管道动态仿真计算精度的因素众多,误报率高是该方法在实际应用中一个难以解决的问题。

(4)分布式光纤检测法^[6-7]

分布式光纤传感技术是近年来发展的一个热点,它在实现物理量测量的同时可以实现信号的传输,在解决信号衰减和抗干扰方面有着独特的优越性。该技术是根据管道中输送的物质泄漏会引起周围环境温度的变化并引起沿管道敷设的光纤发生振动,当温度或振动超过一定的范围,就可以判断发生了泄漏。该技术在管道监控系统中极具应用潜力,

^{*} 本文受到教育部新世纪人才支持计划项目(编号:NCET-07-084)的资助。

作者简介:李玉星,1970年生,教授;1992年毕业于原石油大学(华东)储运专业,1997年获中国石油大学(北京)储运博士学位,现主要从事水合物、天然气输送、气液混输及集输系统优化研究工作。地址:(257061)山东省东营市石油大学储建学院储运工程系。电话:(0546)8399022,13325066197。E-mail:liyxx@mail.hdpu.edu.cn

能够实现预报警,但是这种泄漏检测系统造价非常昂贵,施工很不方便。该技术在海外已应用于管道泄漏检漏,在国内尚处于试验研究阶段。

(5)音波检测法^[8-9]

音波检测法是现代检测技术中的一个热点,也是很有发展潜力的一种检测方法。它是基于物体间的相互碰撞均会产生振动,发出声音,形成声波的原理所开发的泄漏检测系统。当管道发生破裂时产生的音波沿着管道内流体向管道上下游高速传播,安装在管段两端的音波传感器监听并将捕捉到的音波波形,并与计算机数据库中的模型比较,确定管道是否发生了泄漏及泄漏量等数值,同时根据管道在两端捕捉到的泄漏信号的时间差计算得到泄漏位置。其定位原理^[10]如图1所示。

该方法可以实现连续的在线检测,并能检测到很小的泄漏量,具有灵敏性高,误报率低,定位精度高,适应性好的优点。

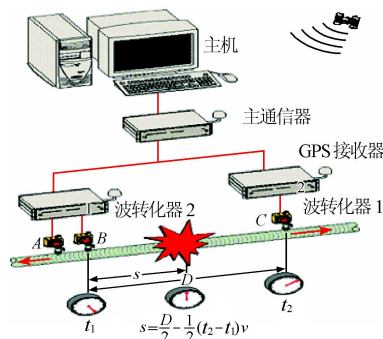


图1 音波泄漏检测示意图

2.各种泄漏检测方法的对比研究

用泄漏检测的各项性能评价指标分析了几种主要的泄漏检测方法的性能(表1),根据天然气长输管道泄漏检测的实际情况,综合比较各种泄漏检测技术的各种指标以及工程应用情况可知:分布式光纤检测法和音波检测法具有诸多方面的优点,是比较具有前途的泄漏检测技术。

表1 各种泄漏检测方法的性能指标对比

检测方法	灵敏度	定位精度	误报率	检测时间	适应能力	费用	技术成熟度
质量/体积平衡法	差	低	很高	较短	无	低	较成熟
统计决策法	较好	较高	低	中等	有	中等	不成熟
瞬态模型法	高	中等	很高	较慢	有	较低	成熟
分布式光纤法	较高	中等	中等	较短	有	很高	较成熟
音波法	高	很高	较低	很短	有	较高	较成熟

二、分布式光纤检测法与音波检测法的对比研究

1.分布式光纤检测法

分布式光纤传感器的主要技术方法有光时域反射(OTDR)法、干涉法、布拉格光栅法(FBG)、波长扫描法和连续波调频法等。但实际上主要应用的有光时域反射(OTDR)法和干涉法。

(1)光时域反射法^[11](OTDR)

它的基本原理是光源发出的光在沿光纤向前传输的过程中产生后向散射,后向散射光强在向后传播过程中随着距离增长而按一定规律衰减,在光速不变的情况下,距离与时间成正比。因此,根据探测器探测到的后向散射光强及其到达探测器的时间,就可以知道沿光纤路径上任一点的初始后向散射光强。光的后向散射包括瑞利散射、喇曼散射和布里渊散射3种形式,从而发展了基于这3种原理的分布式光纤泄漏检测方法。基于OTDR技术的分布

式光纤传感技术已经较为成熟,市场上也有相应的产品,在油管监控领域进行了初步的、试验性的应用,但用于长输管道的泄漏检测还存在一些不足:①由于后向散射光较弱,其检测距离短,且不能做到实时监控。②只能进行表态或参数变化很少的监控,系统应用范围狭窄,缺乏实用性。

(2)干涉法

干涉式光纤传感技术利用光纤受到所检测物理场感应,如温度、压力或振动等,使导光相位产生延迟,经由相位的改变,造成输出光的强度改变,进而得知待测物理场的变化。干涉式分布光纤传感技术相对于OTDR技术的优点是它的动态范围大、灵敏度高,可实现管道小泄漏检测。干涉法中主要应用的有Sagnac干涉技术和模态分布调制干涉技术。

1)基于Sagnac效应的分布式光纤传感技术

基于Sagnac效应的分布光纤声学传感器系统由光源、光纤环、光电转换器、耦合器、锁相放大器、信号处理和PZT相位调制器几部分组成。1991年,

Kurmer^[11]等人开发了基于 Sagnac 光纤干涉仪原理的管道流体泄漏检测定位系统。试验结果表明:在 0.14 MPa 压力下,泄漏孔径为 2.0 mm 时,可检测出 0.3% 的泄漏量,定位误差小于 1%。但这种方法还不成熟,国内外对它的研究都还处于试验阶段。

2) 模态分布调制干涉技术

澳大利亚 FFT (Future Fibre Technologies) 公司开发出基于模态分布调制干涉技术的油气管道检测系统 (FFT Secure Pipe™), 这套系统在油气储运领域的应用受到了世界各国的极大关注,它能够用于天然气长输、分输管道的泄漏检测系统。该系统的原理如图 1 所示。

该系统由 FFT Microstrain/Locator Sensors (包括激光收发模块)、NI Data Acquisition (数据处理板) 和专用 Locator DAQ 信号处理板等专门装置和专利技术组成。其检测原理是利用激光的模态分布

调制(有效改变强度)干涉现象,系统的核心技术是光纤振动传感器。这套系统已成功应用于美国 New York Gas Group 的长输管道和印度尼西亚的 Gulf Resources Ltd 的长输管道上。FFT 公司称该系统在 40 km 管段内进行泄漏检测,定位精度为 ±50 m。

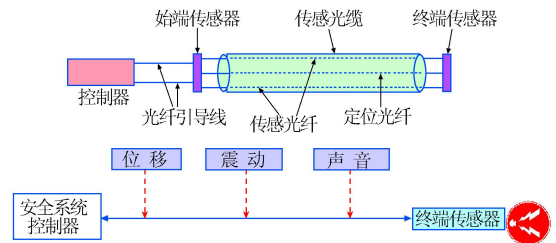


图 2 FFT Secure Pipe™ 管道安全防御系统传感示意图

(3) 各种光纤泄漏检测方法的比较

FFT 公司将各种光纤泄漏检测系统进行比较^[12],结果如表 2 所示。

表 2 FFT 管道安全防御系统与其他相关技术的比较表

设计要求	模态分布调制干涉	光时域反射	其他的干涉测量法
现场硬件要求	每 40 km 需安装 1 套控制器	每 25 km 需要 2 套系统	因方法而异
可利用现有光缆	可以	不可以	不可以
分布式传感	是,光缆全长都是传感器	是,光缆全长都是传感器	是,光缆全长都是传感器
预报警	有	无	有
误报率(FAR)	低	较高	较低
事件检测率	较高	中等	中等
泄漏检测	可能	可能	可能
事件识别	能够	不能	可能
技术成熟度	很成熟	成熟	不成熟

从表 2 可以看出,基于模态分布调制的干涉技术,具有高灵敏度、动态范围大、误报率低、定位精度高、泄漏预报警、技术相对比较成熟等特点,适合于我国天然气长输送管道泄漏检测和定位的要求。

2. 音波检测法

音波检漏系统一般由音波传感器、GPS、现场数据采集处理器、中心数据汇集处理器和监控主机组成。该系统的核心技术是高灵敏度的音波检测传感器、背景噪音的识别和滤除算法、成熟可靠的系统数据库模型等。

音波检测法的工程应用情况^[13-14]:美国 ASI 公司已采用音波检漏技术 20 多年,开发了 WaveAlert VII 音波管道泄漏检测系统。该系统在美国、澳大利亚和我国台湾地区等国家和地区的 20 多个压力管道工程上得到应用。我国的西气东输管道工程也引进该系统在山西段和苏浙沪段进行了现场试验,山

西段试验结果如下:泄漏点定位的平均误差为 ±17.5 m (检测间距为 41 km),最小为 ±12 m,最大不超过 ±24 m。系统报警响应时间平均为 80 s,最快为 56 s,最慢为 105 s。泄漏点的最小报警孔径为 5.2 mm (小于 0.001% 泄漏率)。

ASI 的音波测漏系统是唯—具有认证记录的泄漏检测系统,该系统具有诸多方面的优点:灵敏度高,反应时间快,定位准确,在通讯中断的情况下也能进行泄漏检测;系统调试后可靠性高,不需要额外的流量和温度的测量;安装、操作和维护都很简易等等。该系统广泛应用于工程实际,是一种成熟、可靠的泄漏检测方法。

3. 两种泄漏检测方法的对比

在参考国外文献资料的基础上,对音波检测法和分布式光纤检测法进行了综合对比,结果见表 3。

表 3 各种泄漏检测方法的技术对比表

对比项目	音波检测法	分布式光纤检测法
监控对象	管线内部情况,如音波和管道外部情况检测	对管道外部情况(周围地质变化状况、施工带来的振动、应变)的检测
预警类型	能够实现预警	能够实现预警
无中继最大检测范围	0~50 km	0~60 km
40 km 内定位精度	±30 m	±50 m
发展前景	音波和人工神经网络相结合的泄漏检测技术最具有研究意义,在未来的管道检测中将得到广泛的应用	利用一根或几根光纤对天然气管线内介质的温度、压力、流量、管壁应力进行分布式在线测量,这在管道监控系统中将极具应用潜力
经济性	安装数据传输和音波传感器以及配套的软件系统,投资高	安装数据传输和光纤传感器以及配套的软件系统,投资高
主要优点	以实现连续的在线检测,并且能检测到很小的泄漏量,具有很好的灵敏性,误报率低,定位精度高,适应性好,检测距离长	可以用于管道敷设环境的地况检测,为重大地质异常变化情况提供提前预警,定位精度高,误报率低,检测距离长
主要缺点	易受外界的干扰影响,对消噪滤波要求高	施工维护不便,光纤震动传感器属精密电子仪器,精确性要求高,精确度直接影响检测效果

三、结 论

(1)在各种泄漏检测方法中,分布式光纤检测法和音波检测法具有很多优点,是常用泄漏检测的方法,技术较为成熟,在工程实际中都有应用实例。

(2)基于模态调制的干涉式分布式光纤传感技术较为成熟,市场上已有相应的产品,其他干涉技术在管道泄漏检测方面还不是很成熟,仍处于理论研究和试验阶段。

(3)音波泄漏检测法是现代检测技术中的一个热点,也是世界上唯一有认证记录的泄漏检测技术。这种方法可以实现连续的在线检测,并且能检测到很小的泄漏量,具有很好的灵敏性,误报率低,定位精度高,适应性好,安装费用和维护费用也较低。

(4)综合比较光纤检测法和音波泄漏检测法的各项指标可以看出,音波泄漏检测法是最好的一种泄漏检测法。音波和人工神经网络相结合的泄漏检测技术最具有研究意义,该技术将会在未来的天然气管道的泄漏检测中得到广泛的应用。

参 考 文 献

[1] 王朝辉,张来斌,夏海波.国内外油气管道泄漏检测技术的发展现状[J].油气储运,2001,20(1):1-5.
 [2] 付道明,孙军,贺志刚,等.国内外管道泄漏检测技术研究进展石油机械[J].2004,32(3):48-51.
 [3] 苏欣,袁宗明,范小霞,等.油气长输管道检漏技术综述[J].石油化工安全技术,2005,21(4):14-17,26.
 [4] 李文军,王学英.油气管道泄漏检测与定位技术的现状及展望[J].炼油技术与工程,2005,35(9):49-52.

[5] 吴小庆,王宇,江茂泽.关于输气管道的一个泄漏点的检测问题[J].西南石油学院学报,2006,28(3):27-29.
 [6] BUERCK J,ROTH S,KRAEMER K,MATHIEU H. OTDR fiber-optical chemical sensor system for detection and location of hydrocarbon leakage[J].Journal of Hazardous Materials,2003,102:13-28.
 [7] MACLEAN A,MORAN C,JOHNSTONE W,et al. Detection of hydrocarbon fuel spills using a distributed fiber optic sensor [J].Sensors and Actuators A: Physical, 2003,109(1-2):60-67.
 [8] SEAFORD H. Acoustic leak detection through advanced signal-processing technology [J]. Noise & Vibration Worldwide,1994(5):17-18.
 [9] 吴明,孙万富,周诗崇.油气储运自动化[M].北京:化学工业出版社,2006:253.
 [10] FUCHS H,RIEHLE V. Ten years of experience with leak detection by acoustic signal analysis [J].Applied Acoustics,1991,33(1):1-19.
 [11] KURMER J P,KINGSLEY S A,LAUDO J S,et al. Applicability of a novel distributed fiber optic acoustic sensor for leak detection [J].SPIE,1993,1797:63-71.
 [12] Anon [EB/OL]. http:// sensor. eccn. com/pub/tech-view. asp? id=6537.
 [13] RAE MIN, LEE JOORR-HYUM. Acoustic emission technique for pipeline leak detection [J].Key Engineering Materials,2000,186(4):888-892.
 [14] Anon [EB/OL]. http:// www. wavealert. com/Pages/more1. html.

(修改回稿日期 2008-07-25 编辑 罗冬梅)