

长输管线泄漏检测与定位方法分析^{*}

李炜 朱芸

(兰州理工大学电气与信息工程学院)

李炜等.长输管线泄漏检测与定位方法分析.天然气工业,2005;25(6):105~109

摘要 油气输送管道的泄漏,会造成损失和危害,及时检测出泄漏并确定泄漏点是至关重要的。为此,系统介绍了近几十年来国内外长输管线的泄漏检测及定位技术,并指出了各种方法的优缺点。随着石油、天然气等工业的发展,管道输送在国民经济中的地位越来越重要,研究出一种可靠、经济的检漏定位方法显得异常重要。文章对泄漏检测与定位技术未来可能发展方向也作了系统的阐述。

主题词 油气输送 长输管道 泄漏 检测 泄漏定位 方法 分析

目前,国际上已有多种长输管线泄漏检测和定位方法,根据测量手段、测量媒介、检测装置所处位置和检测对象的不同大体上可分为基于硬件及软件的方法^[1]、直接检测法与间接检测法^[2]、内部检测法与外部检测法^[3]、监测管壁状况和监测内部流体状态的方法^[4]。近年来较常用的是基于硬件和软件的方法,基于硬件的方法(hardware-based methods)是指利用由各种不同的物理原理设计的硬件装置,如基于视觉的红外线温度传感器,基于听觉的超声波传感器,基于嗅觉的碳氧检测装置等,将其携带或铺设在管线上,以此来检测管道的泄漏并定位;基于软件的方法(software-based methods)则是根据计算机数据采集系统(如SCADA系统)实时采集管道的流量、压力、温度及其他数据,利用流量或压力的变化、物料或动量平衡、系统动态模型、压力梯度等原理,通过计算对泄漏进行检测和定位。

一、基于硬件的检漏方法

1. 直接观察法

此种方法是依靠有经验的管道工人或经过训练的动物巡查管道。通过看、闻、听或其他方式来判断是否有泄漏发生。近年美国OIL TON公司开发出一种机载红外检测技术^[5],由直升飞机携带一高精度红外摄像机沿管道飞行,通过分析输送物资与周围土壤的细微温差确定管道是否泄漏。这类方法不能对管线进行连续检测,因此发现泄漏的实时性差。

2. “管道猪”^[6,7]

(1)磁通猪:对管壁施加一个强的磁场来检测钢管金属对磁场的损耗,用对泄漏磁通敏感的传感器检测局部金属损耗引起的磁场扰动所形成的漏磁。其使用方法简单、方便且费用低,对管道内流体不敏感,不论液体、气体或气液两相流体均能检测。但检测精确度低,对管材敏感。由于其局限性和检测要求的提高又出现了超声管道猪。

(2)超声猪:利用超声波投射技术,即短脉冲之间的渡越时间被转换为管壁的壁厚,当有泄漏发生时,钢管壁内的渡越时间减少为零,据此可判断泄漏的发生。超声猪的出现在一定程度上弥补了磁通猪的缺点。其检测精度高,能提供定量、绝对数据,并且很精确。但该方法使用比较复杂,费用高。

3. 探测球法^[8]

基于磁通、超声、涡流、录像等技术的探测球法是20世纪80年代末期发展起来的一项技术,将探测球沿管线内进行探测,利用超声技术或漏磁技术采集大量数据,并将探测所得数据存在内置的专用数据存储器中进行事后分析,以判断管道是否被腐蚀、穿孔等情况,即是否有泄漏点。该方法检测准确、精度较高,缺点是探测只能间断进行,易发生堵塞、停运的事故,而且造价较高。

4. 半渗透检测管法

这种检漏管埋设在管道上方,气体可渗透进入真空管,并被吸到监控站进行成分检测。美国谢夫

^{*} 本成果受到甘肃省自然科学基金(ZR-96-030)的资助。

作者简介:李炜,女,1963年生,副教授,毕业于甘肃工业大学理论与控制工程专业;现主要从事动态系统的故障诊断与容错控制方面的研究。地址:(730050)甘肃省兰州市。电话:(0931)2755549,13209460846。E-mail:maomao197814@sohu.com

隆管道公司在天然气管道上安装了这种监测系统(LASP)。LASP以扩散原理为基础,主要元件是一根半渗透的监测管,内有乙烯基醋酸酯(EVA)薄膜。这种膜的特点是对天然气和石油气具有很高的渗透率,但不透水。如果检测管周围存在油气,会扩散进去。检测管一端连有抽气泵,持续地从管内抽气,并进入烃类检测器,如检测到油气,则说明有泄漏发生。但这种方法安装和维修费用相对较高,另外,土壤中自然产生的气体(如沼气)可能会造成假指示,容易引起误报警。

5. 检漏电缆法

检漏电缆多用于液态烃类燃料的泄漏检测。电缆与管道平行铺设,当泄漏的烃类物质渗入电缆后,会引起电缆特性的变化。目前研制出以下几种。

(1) 渗透性电缆:这种电缆与泄漏油接触就会发生电缆间的阻抗变化,在管道一端通过对阻抗分布参数的测量,即可确定管道状态及泄漏位置。

(2) 油溶性电缆^[9]:是用非透水性但透油性材料制成的同轴电缆,沿管道铺设。从电缆一端发射脉冲,脉冲碰到被油浸透的电缆处会反射脉冲,通过检测反射脉冲信号,可检测管道泄漏位置。

(3) 碳氢化合物分布式传感电缆^[10]:这种电缆由报警模块和传感电缆两大部分组成,传感电缆包括一个具有导电作用的聚合体层和向内压缩的编织物保护层,当有泄漏发生时,该聚合体层接触到碳氢化合物溶剂和燃料就会膨胀,而外部的编织物保护层会限制膨胀,向内压缩,从而导致两侧传感线接触构成回路,通过测得传感导线回路电阻可确定泄漏的位置。

检漏电缆法能够快速而准确地检测管道的微小渗漏及其渗漏位置,但其必须沿管道铺设,施工不方便,且发生一次泄漏后,电缆受到污染,在以后的使用中极易造成信号混乱,影响检测精度,如果重新更换电缆,将是一个不小的工程。

6. 检漏光纤法

(1) 塑料包覆硅光纤检漏

这种光纤具有化学敏感性,因其使用了一种含有特定化学成分的可渗透硅质包层,当泄漏出的被监测物质与包层中的化学成分相遇时,即可发生化学反应,使包层折射率改变,光线就会从中逸出。此时,只要沿光纤有规律地发射短的光脉冲,当光脉冲遇到泄漏处时,一部分光线就会被反射回来,通过测量发射和反射脉冲间的时间差,即可确定泄漏地点。

(2) 分布式光纤声学传感器法^[11,12]

该方法是利用 Sagnac 干涉仪测量泄漏所引起的声辐射的相位变化来确定泄漏点的范围,这种传感器可以用于气体或液体运输管道。这种方法是把光纤传感器放在管道内,通过接收到的泄漏液体或气体的声辐射,来确定泄漏和定位。由于是玻璃光纤,所以不会被分布沿线管道的高压所影响,也不会影响管道内液体的非传导特性,而且光纤还不受腐蚀性化学物资的损害,寿命较长。在理论上,10 km 管道定位精度能达到±5 m,反应也较灵敏及时,但成本较高。

7. GPS(全球定位系统)时间标签法

GPS 系统包括三大部分:空间部分——GPS 卫星星座;地面控制部分——地面监控系统;用户设备部分——GPS 信号接收机。GPS 的基本定位原理是:卫星不间断地发送自身的星历参数和时间信息,用户接收到这些信息后,经过计算求出接收机的三维位置、三维方向以及运动速度和时间信息。采用 GPS 同步时间脉冲信号是在负压波的基础上强化各传感器数据采集的信号同步关系,通过采样频率与时间标签的换算分别确定管道泄漏点上游和下游的泄漏负压波的速度,然后利用泄漏点上下游检测到的泄漏特征信号的时间标签差就可以确定管道泄漏的位置^[13]。采用 GPS 进行同步采集数据,泄漏定位精度可达到总管线长度的 1% 之内,比传统方法精度提高近 3 倍^[14]。

8. 声发射技术法^[15,16]

当管道发生泄漏时,流体通过裂纹或者腐蚀孔向外喷射形成声源,然后通过和管道相互作用,声源向外辐射能量形成声波,这就是管道泄漏声发射现象。通过仪器对这些因泄漏引起的声发射信号进行采集和分析处理,就可以对泄漏以及其位置进行判断。美国物理声学公司(PAC)是专门从事声发射技术研究的高技术公司,它通过一次次的突破和创新,使声发射技术成功地解决了一个工程问题,声发射技术具有良好的应用前景。

二、基于软件的检漏方法

随着计算机、信号处理、模式识别等技术的迅速发展,基于 SCADA(管道数据采集与处理)系统的实时泄漏检测技术受到了人们越来越多的关注,并逐渐发展为检漏技术的主流和趋势。这类方法主要是对实时采集的温度、流量、压力等信号进行实时分析和处理,以此来检测泄漏并定位。

1. 基于信号处理的方法

(1) 体积或质量平衡法^[17]

管道在正常运行状态下,其输入和输出质量应该相等,泄漏必然产生量差。体积或质量平衡法是最基本的泄漏探测方法,可靠性较高。该方法可以直接利用已有的测量仪表,如流量计、温度计、压力表等,能连续监测管道,并发现微小泄漏。但是由于管道本身的弹性及流体性质变化等多种因素影响,首末两端的流量变化有时滞影响,所以精度不高。为了使误报率在可接受范围内,时间间隔应在1个小时到1天之间,那么泄漏检测的响应时间也是同样长,致使无法及时检测到泄漏而造成不必要的损失,且无法进行泄漏定位。

(2) 压力法

多数长输管道中间泵站均不安装流量计,只安装压力检测装置,因此就产生了只用压力信号检漏的方法。这类方法中有检测泄漏后产生的压力点分析法、泄漏时瞬态压力波动的负压波法和泄漏后的稳态压力梯度法等。

1) 压力点分析法(PPA)

该方法可检测气体、液体和某些多相流管道泄漏,依靠分析由单一测点测取数据,极易实现^[18]。管道发生泄漏后,其压力降低,破坏了原来的稳态,因此管道开始趋向于新的稳态。在此过程中产生了一种沿管道以声波传播的扩张波,这种扩张波会引起管道沿线各点的压力变化,并将失稳的瞬态向前传播^[19]。PPA在管道沿线设点检测压力,采用统计的方法分析检测到的压力值,一旦压力平均值降低超过预定值,系统就会报警。根据上下两站压力下降沿的时间差即可计算出泄漏点位置。美国谢夫隆管道公司(CPL)将PPA法作为其SCADA系统的一部分。试验结果表明,PPA具有优良的检漏性能,能在10 min内确定50 gal/min的漏失。但压力点分析法要求捕捉初漏的瞬间信息,所以不能检测微渗。压力点分析法已被证明是一种有效的检漏方法,已广泛应用于各种距离和口径的管道泄漏检测。

2) 压力梯度法

在稳定流动的条件下,压力分布呈斜直线,当泄漏发生时,漏点前的流量变大,压力分布直线斜率变大,漏点后,流量变小,相应斜率也变小,压力分布由直线变成折线状,折点即为泄漏点。根据上、下游管段的压力梯度,可以计算出泄漏位置。压力梯度法需要在管道上安装多个压力检测点,而且仪表精度及间距都对定位结果有较大的影响。当然,在管线上测量点越多,性能越好。这种以线性为基础的压力梯度法,不适合“三高”原油。

3) 负压波法

当管道发生泄漏时,泄漏处立即产生因流体物质损失而引起的局部液体密度减小,出现瞬时的压力降低,作为减压波源通过管线和流体介质向泄漏点的上下游以一定的速度传播,泄漏时产生的减压波就称为负压波。设置在泄漏点两端的传感器根据压力信号的变化和泄漏产生的负压波传播到上下游的时间差,就可以确定泄漏位置。该方法灵敏准确,无需建立管线的数学模型,原理简单,适用性很强。但它要求泄漏的发生是快速突发性的,对微小缓慢泄漏不是很有效。文献[20,21]认为压力波的传播速度是一个变化的物理量,受液体的弹性、密度、管材弹性等因素的影响,给出了改进的算法。同时提出了用小波变换技术提取瞬态负压波的信号边缘,对两端的测点信号进行特征点捕捉,获得了满意的效果。文献[22]对有关的计算进行了深入的讨论,使计算精度和定位精度得到了进一步的提高。

4) 小波变换法

小波变换即小波分析是20世纪80年代中期发展起来新的数学理论和方法,被称为数学分析的“显微镜”,是一种良好的时频分析工具。文献[23]介绍了小波分析在故障诊断中的应用,指出利用小波分析可以检测信号的突变、去噪、提取系统波形特征、提取故障特征进行故障分类和识别等。因此,可以利用小波变换检测泄漏引发的压力突降点并对其进行消噪,以此检测泄漏并提高检测的精度。文献[24~26]分别就这两点进行了较为详细的论述。文献[27]利用多尺度小波变换,突出小波变换系数的局部极值性,分析表明,检测信号的小波变换系数极值的奇异性准确地反映了管道检测信号的泄漏特征,并且从局部描述了管道泄漏信号的瞬态正则性。文献[28]同样利用小波变换对管道泄漏的压力信号进行分析,从而得到泄漏点。小波变换法的优点是不需要管线的数学模型,对输入信号的要求较低,计算量也不大,可以进行在线实时泄漏检测,克服噪声能力强,是一种很有前途的泄漏检测方法。但应注意,此方法对由工况变化及泄漏引起的压力突降难以识别,易产生误报警。

(3) 互相关分析法^[29]

设上、下两站的传感器接收到的信号分别为 $x(t)$ 、 $y(t)$ 。2个随机信号 $x(t)$ 和 $y(t)$ 有互相关函数 $R_{xy}(t)$ 。如果 $x(t)$ 和 $y(t)$ 的信号是同频率的周期信号或包含有同频率的周期成分,那么,即使 t 趋近于无穷大,互相关函数也不收敛并会出现该频率

的周期成分。如果 2 信号含有频率不等的周期成分,则两者不相关,及互相关函数为零。当没有泄漏发生时,互相关函数的值在零值附近。发生泄漏后,互相关函数之间很显著变化,以此检测泄漏。并根据互相关函数极值点位置进行泄漏点定位。用互相关分析法检漏和定位灵敏、准确,只需检测压力信号,不需要数学模型,计算量小。其对快速突发性的泄漏比较敏感,对泄漏速度慢、没有明显负压波出现的泄漏很难奏效。

2. 基于管道数学模型的方法

(1) Kalman 滤波器法^[30]

该方法假设将管道分成 N 段,假定在 $N-1$ 段各分段点上的泄漏量为 $q_1, q_2, \dots, q_{N-1}$ 。建立包含泄漏量在内的压力、流量状态空间离散模型,以上下游的压力和流量作为输入,以泄漏量作为输出,用扩展 Kalman 滤波器来估计这些泄漏量,运用适当的判别准则可进行泄漏检测和定位。但该方法的定位算法需假设流动是稳定的,且检测和定位精度与等分段数无关,还需要设置流量计。

(2) 状态估计器法

该方法属于一类时变的非线性系统,它是在假设泄漏量较小的情况下,建立管道内流体的压力、流量和泄漏量的状态方程,以被检测到的两站压力为输入,对两站流量的实测值和估计值的偏差信号做相关分析,便可得到定位结果。该方法仅适用于小泄漏量情形的检漏和定位。

(3) 系统辨识法^[31]

该方法用 ARMA 模型结构增加某些非线性项来构造管线的模型结构,或建立管道的“故障灵敏模型”及“无故障模型”,然后基于故障灵敏模型,用自相关分析算法实现泄漏检测;基于无故障模型,用适当的算法进行定位,最后进行泄漏量估计。该法需在管线上施加 M 序列激励信号,对大泄漏量的定位精度更高。

3. 基于知识的方法

(1) 基于神经网络和模式识别的方法

由于管道泄漏时未知因素很多,采用常规的数学模型存在一定的差异,而人工神经网络具有逼近任意非线性函数和从样本学习的能力,故在管道泄漏检测中得到越来越多的重视。文献[32]应用 LabVIEW 分析单传感器在泄漏管道不同位置拾取的泄漏信号的时频域特征,来构造人工神经网络的输入矩阵,能对管道泄漏状况进行分析检测与定位,实现了管道泄漏检测的单传感器定位,由于故障模式集

的有限性,泄漏检测准确性和定位精度不高,多泄漏情况下更差。文献[33]提出了将管道运行条件及泄漏信息作为输入,分别建立了用于检漏和定位的两套神经网络,其优点是抗噪声干扰能力强,灵敏、检测精度高,能检测到 1% 的微小泄漏,且保持很低的误报警率,但该技术在定位时只能定位到段,而不能进行更精确的定位。

(2) 统计检漏法

此方法不用管道模型,根据管道出入口的流量和压力,连续计算压力和流量之间关系的变化。无泄漏发生,仅管网工况变化时,流量和压力之间的关系不会发生变化;当泄漏发生时,流量和压力之间的关系总会变化。应用序列概率比方法和模式识别技术,可检测识别到这种变化^[1]。这种方法中,检漏门限值的选取是关键,它直接影响泄漏检测的灵敏度和系统的误报率。

利用 SCADA 系统采集来的数据进行少量的计算,通过文献[34]所述相关公式就能进行检漏和定位。该方法不受地形、周围温度的变化和测量误差的影响,具有较高灵敏度和检测精度。但由于受管网区段的影响,流体状态系数难以准确界定,因而定位精度不高。但荷兰 Shell 公司的 Atmos 系统就采用了此技术,应用效果良好。

三、结 论

衡量管道泄漏检测方法的优与劣主要有 9 个标准:灵敏度、定位精度、响应时间、误报率、评估能力、适应能力、有效性、使用与维护要求和费用问题^[2]。据以上的标准,许多检测方法都存在尚需解决的问题。比如小泄漏检测与定位问题、多泄漏点管网的泄漏检测与定位、原油管道与天然气管道泄漏检测与定位的区别,以及单一使用一种方法的缺陷都是今后研究的重点。

参 考 文 献

- 1 Jun Zhang. Designing a Cost-effective and Reliable Pipeline Leak-detection System. Pipelines International. 1997;26: Jan—Feb
- 2 常景龙等.输气管道泄漏检测技术的选择和优化.油气储运,2000;19(5):9~13,17
- 3 N C Butter BSC. Pipeline leak detection techniques. Pipes & Pipelines International, 1982; April
- 4 张布悦等.输油管线泄漏检测与定位技术综述.上海海运学院学报,2001;22(3)
- 5 张晓钟.油品储运检测诊断技术综述.油气储运,1995;4

- (6);44~47
- 6 陈积懋.管道无损检测与评价技术.石油化工设备技术,1997;18(1);59
- 7 De Read J R. Comparison between ultrasonic and magnetic flux pigs for pipeline inspection. *Pipes & Pipeline Int*, 1987;(1—2);7—15
- 8 Hennnigar G W. Advances in gas leak detection. *Pipe & Gas Journal*, 1985;212(11);39—42
- 9 [日]森村正直等主编,黄香泉译.传感器技术.北京:科学出版社,1988;405
- 10 Chet Sandberg. The application of a continuous leak detection system to pipeline and associated equipment. *IEEE Transaction on Industry Applications*, 1989;25(5);906—909
- 11 Kurmer J P *et al.* Applicability of a novel distributed fiber optic acoustic sensor for leak detection. *Distributed and Multiplexed Fiber Optic Sensors II*. SPIE, 1992;(1797);63—71
- 12 胡志新等.分布式光纤布拉格光栅在油气管道检测中的应用.应用光学,2000;21(4);35~37
- 13 夏海波等.基于GPS时间标签的管道泄漏定位方法.计算机测量与控制,2003;11(3);161~176
- 14 王朝晖.液体输送管线小泄漏诊断技术的研究.石油机械,2003;31(8);37~39
- 15 焦敬品等.管道声发射泄漏检测技术研究进展.无损检测,2003;25(10);519~522
- 16 焦敬品等.压力管道泄漏的声发射检测试验研究.北京工业大学学报,2002;29(2)
- 17 Dr Whaley R S *et al.* Tutorial on software based leak detection techniques. *Scientific Software — Intercomp. Pipeline Simulation Interest Group*, Oct 1992
- 18 Edward J. Farmer. 管道泄漏检测的新方法.自动化仪表,1992;10(3)
- 19 张仁忠等.系统思想在管道运输泄漏检测、精确定位中的应用.系统工程理论与实践,1999;(12)
- 20 王立宁等.热输油管道瞬态压力波法泄漏点定位研究.石油学报,2000;21(4)
- 21 李炜等.天然气管道泄漏点的定位检测方法研究.甘肃工业大学学报,2003;12(4)
- 22 苏维均等.负压波定位理论在输油管道泄漏检测系统中的应用.微计算机信息,2003;19(3)
- 23 周小勇,叶银忠.小波分析技术在故障诊断中的应用.上海海运学院学报,2001;22(3)
- 24 Ye H Wang *et al.* Application of wavelet transform to leak detection and location transport pipelines. *Engineering Simulation*, 1996;13
- 25 李炜等.基于小波变换的输气管道泄漏检测与定位方法研究.计算机工程与应用,2002;(9)
- 26 王海生等.基于小波分析的输油管道泄漏检测.信息与控制,2002;31(5)
- 27 夏海波等.小波分析在管道泄漏信号识别中的应用.石油大学学报(自然科学版),2003;27(2)
- 28 Marco Ferrante, Bruno Brunone. Pipe system diagnosis and leak detection by unsteady-state tests 2 wavelet analysis. *Advance in water resources*, 2003;(26);107—116
- 29 Beck S B M *et al.* Pipeline system identification through cross-correlation analysis. *J Process Mechanical Engineering*, 2002;(216)
- 30 董东等. Kalman 滤波器在长输管道泄漏检测中的应用.自动化学报,1990;16(4);303~309
- 31 陶洛文等.以辨识为基础的长输管线故障定位.北京大学学报(自然科学版),1986;2(4);69~75
- 32 黄文等.管道泄漏检测用人工神经网络技术.油气储运,2002;21(4);1~3
- 33 Salvatore Belsito *et al.* Leak detection in liquefied gas pipelines by artificial neural networks. *AIChE Journal*, 1998;44(12)
- 34 Yaqing Tu *et al.* A revised statistical deduction approach to pipeline leak detection. *IEEE IMTC — Instrumentation and Measurement Technology Conference*, 20—22 May, 2003

(修改回稿日期 2004-04-22 编辑 居维清)