

国内外管道

泄漏检测技术

进展

本文对国内外最新泄漏检测技术进行了跟踪 将泄漏检测技术分为直接检测技术和间接检测技术两种 其中直接检测技术分为8种,间接检测技术分为9种。本文分析了各种检测技术的检测原理、优缺点以及现场应用情况;对各种检测方法进行了比较,得到各种检测方法的适用范围。并对检漏技术的发展方向进行了展望。

王 信¹ 刘建国¹ 马伟东¹ 贺志刚² 岑广远² 喻西崇³

- (1. 吉林石油集团公司工程建设有限责任公司,吉林 松原 138000;
2. 北京安东奥尔工程技术有限责任公司,北京 100102;
3. 中国科学院力学所,北京 100080)

管道作为气体、石油等介质的长距离输送设施,安全是管道运行最基本的条件 因而在管道规划、设计、施工、操作及维护的各个阶段都要根据相应的法规采取安全措施,对泄漏事故的早期发现及防止泄漏的扩散应尤为重视。

1 管道泄漏原因

为了有效而及时地发现泄漏点,对泄漏发生的原因应有足够的了解,以利于分析判断,管道泄漏一般由下列原因造成:

- (1) 管道材质不良,材质开裂、存在砂眼和腐蚀造成泄漏;
- (2) 管道涂层损坏、脱落,造成管道腐蚀穿孔,发生泄漏;

第一作者:王信,1966年出生,1989年毕业于中国地质大学建筑材料专业 现任吉林石油集团公司工程建设有限责任公司副总工程师。

- (3) 管道接头安装不良造成泄漏;
- (4) 阀门泄漏;
- (5) 地下工程施工时损坏管道导致泄漏;
- (6) 高层建筑工程重压,使地基下沉,致使管道开裂;
- (7) 由于地质构造原因使地基下沉,造成管道开裂(如地震,地下水位下降等);
- (8) 在路段上的管道由于重载车辆的通行而造成开裂;
- (9) 人为盗油造成管道穿孔。

2 国内外研究现状

随着管道的建设,泄漏检测技术也得到不断发展,从最简单的人工分段巡视发展到较为复杂的计算机软硬件结合方法,从陆地上检测发展到海底检测,甚至利用飞机在空中进行检测。

根据不同的分类依据,管道检漏方法有多种分类。从应用性质角度划分,分为两类,即不影响输油工艺操作的在线检测和输油过程停运或部分改变的检测;根据检测位置不同,可分为管外检测法和管内检测法。根据检测对象的不同,大致分为两种,即直接检漏法和间接检漏法。管外检测和在线检测多用于突发性泄漏,而管内检测和停运检测适用于检测管道腐蚀状况及微小泄漏。内部检漏法多采用

磁通、超声、涡流、录像等技术,检漏较准确,但只适用于较大口径管道,易发生堵塞、停运等事故,费用高。外部检测法中沿管巡视法、流量差法、压力差法和负压差法等费用较低,但精度较差;聚合物电缆检测法准确,速度快,但连续使用性差,费用很高。最近被工程界认为很有前景的是SCADA模型法,可快速检测出较大管道泄漏故障,但需沿管道安装复杂控制传感系统。本文重点阐述直接检漏法和间接检漏法。

2.1 直接检漏法

2.1.1 检漏电缆系统法

检漏电缆系统法主要有以下几种。

一种是沿管线埋设带有易被碳氢化合物溶解的绝缘材料的两芯电缆。这种电缆与渗漏油接触就会发生阻抗变化,在管道一端通过对阻抗分布参数的测量处理就可确定管道状态及渗漏位置。

另一种是沿管道铺设由透油不透水材料制成的同轴电缆。从电缆一端发射脉冲波,碰到被油浸透的电缆会反射脉冲,通过检测反射脉冲信号,可检测管道泄漏位置。这种方法的优点是不需在管道上设置任何地面检测设备。

还有一种是LASP空气取样系统。该系统不受运行瞬态的影响,系统灵敏度很高,以扩散原理为基础,主要部件是一根半渗透检测管(透油不透水)。如果这种检测管周围存在石油蒸气,并达到一定浓度后,石油蒸气将扩散到检测管中,气流带着蒸气通过管子进入探测器,从而确定泄漏是否发生。

这三种方法的共同点是都具有很高的灵敏度,但又同时存在造价高、缺乏连续性、设备更换困难的缺点,限制了它们的推广使用。

2.1.2 导电高聚物检漏法

这种方法主要应用于绝缘管道的检漏。这种检测系统可以探测管道绝缘层的浸水点和泄漏点。外包导电高聚物的导线作为探测电缆的一部分用来探测沿线的浸水及泄漏位置,探测电缆中的探测导线通过检测电缆中水蒸气的存在,判断是否泄漏,使操作者在管道腐蚀前及时采取修补措施。

这种系统由探测电子元件、探测电缆、辅件和系统图四个主要部分组成。使用一台控制装置,可监视457.7m的电缆。如果在这个范围内管道发生破

损,就会发出警报,控制装置闭锁,显示出破损位置。如果管道超过此长度,需使用跨接电缆,将新增控制箱和探测系统的起点连接起来。该系统显示了良好的检漏性能,对天然气和石油管道都一样有效。

2.1.3 油检测元件法

这种方法沿管道外层设置一种导电性粉体元件,当泄漏的油接触到该元件时,其电阻会发生急剧变化,在管道端部通过测量处理电阻变化参数,就可以确定泄漏位置。

2.1.4 油溶性压力管法

将充满压缩空气的油溶性软管缠在管道外围,有溶油漏出时软管溶解产生漏洞,压缩空气外泄,管内压力下降,由此即可判断发生了泄漏。这种方法只能使用一次,发现泄漏后该处软管即被损坏,更换非常困难。

2.1.5 气体法

这种方法通过检测在输油管道沿线有无可燃性气体来判断是否泄漏。煤气管道常采用此法检漏。

2.1.6 机载红外线法

这一技术是近年由美国OILTON公司开发的。方法是用直升机吊起一精密红外摄像机沿管道飞行,通过判读输送油料与周围土壤的细微温差成像确定是否有油料泄漏。利用光谱分析可检测出较小泄漏位置。这种方法可用于长管道,微小泄漏的检测。

2.1.7 封入气体压力检测法

这种方法是在双层管的两管间隙内密封一定压力的氮气,内管泄漏时,氮气压力上升;而外管泄漏时,氮气压力下降,由此即可检漏。如果双层管较长,可利用两隔开管段间的压力差检漏。这种方法只能用于少量的双层管段,应用范围较小。

2.1.8 水面监视法

对于海底管道及横穿各种水路的管道,可采用监视布设管道上方水面的方法来检漏。当发现水面有油污出现时,即可判断泄漏产生。根据当时的水流、密度等参数,可估算泄漏位置。这种方法的精度较差,一般难以满足工业要求,只能进行粗略判断。

2.2 间接检漏法

2.2.1 质量平衡检漏法

质量平衡检漏法是一种人们较熟悉的检漏法,其工作原理为对于一条分批输送一种或多种石油产

品的完整管道,在一段时间内,测量的流入质量可能不等于测得的流出质量。这种差异归因于流量测量误差和对管道内所存油品质量估计。

经现场试验测试,质量平衡检漏法的有效性得到了验证。

2.2.2 水力坡降线法

水力坡降线法是技术上不太复杂,大家又比较熟悉的方法之一。这种方法是根据上游站和下游站的流量等参数,计算出相应的水力坡降,然后分别按上游站出站压力和下游站进站压力绘图,其交点就是理论的泄漏点。但是,这种方法要求管道的流量、压力和温度测量精确。对于间距长达几十公里或百公里的长输管道,由仪表精度造成的误差可能使泄漏点偏移几公里到几十公里,给寻找实际泄漏点带来困难。因此,这种方法已较少采用。

2.2.3 音频检漏法

通过音频传感器对输油管道进行检测,在发现存在泄漏音频信号时,沿管道选两个测量点,根据两个测量点音频频谱中两个频率分量的功率强度可计算出泄漏的位置。但因为背景噪声的影响,这种方法的精度难以保证,妨碍了它的工业应用。

2.2.4 声信号分析法

德国 IBP 和 TWS 协作,开发并实验了一种有效的相关分析法检漏的声学技术(德文缩写为 LOKAL)。油品在高压下通过漏孔时,会发出噪声,检测这些噪声就可以判断是否存在管道穿孔。LOKAL 的特点是在管线上借助漏孔两侧的传感器对漏孔定位。

然而,这种方法会受到背景噪声的影响,因而 LOKAL 对信号进行了频率域选择性处理,以提高对干扰噪声和管道系统共振抑制能力。声信号检漏法的精确度高达 90%,是一种有效的微漏检测法,但无法用于长输管道。

2.2.5 统计检漏法

该方法根据在管道的入口和出口测取的流体的流量和压力,连续计算泄漏的统计概率。当泄漏确定后,可通过测量流量和压力及统计平均值估算泄漏量,用最小二乘方算法进行泄漏定位。

运行经验表明,这种管道检漏统计系统不仅适用于气体和液体管道,也适用于多级入口和多级出口管道,在正常的管道运行期间,该系统可检测出

很小的泄漏量。由于该系统无需复杂的管道模型,只需很少的工作就可使该系统满足于各种运行要求。该系统可根据入口和出口所测的压力及流量进行设计,计算技能低于传统的软件系统,系统的维护简单易行。

2.2.6 基于神经网络的检漏方法

基于人工神经网络检测管道泄漏的方法,不同于已有的基于管道准确流动模型描述的泄漏检漏法,它能够运用自适应能力学习管道的各种工况,对管道运行状况进行分类识别。

人工神经网络模型是由大量的简单计算单元广泛连接而组成的一个非线性动力学系统,它具有高度的并行分布式处理、联想记忆、自组织及自学习能力和极强的非线性映射能力。能够通过对管道泄漏应力波和正常管道信号的自学习,自联想建立对于管道故障的自判断能力,适应工业现场对于管道连续在线检测的要求,同时管道泄漏检测系统也能根据环境变化和误报警更正,自动更新网络参数,适应不同的管网和应用场合。

神经网络具有较好的抗干扰能力,灵敏度可根据现场应用条件灵活设置,传感器安装简单不干扰管道流动和正常生产,仪器成本低,结构简单,因此这种方法易于推广。

理论分析和实践表明,这种检漏方法能够迅速准确的预报出管道运行情况,检测管道运行故障并且有较强的抗恶劣环境噪声干扰的能力。基于神经网络学习计算研制的管道泄漏检测仪器,简洁实用,能适应复杂工业现场。神经网络检测方法可推广应用到管道堵塞、积沙、积蜡、变形等多种故障的检测中,对于管网故障诊断有广泛的应用前景。

2.2.7 压力波检漏技术

压力波检漏技术是目前各国优先发展的新型检漏技术,这种技术以检测压力波为依据。当管道发生泄漏事故时,在泄漏处由于有物质损失,会引起局部密度减小,进而造成压力降低。而由于管道中流体不能立即改变流速,就会在泄漏处和其任一端流体之间产生压差,该压差引起液流自上而下流至泄漏处附近的低压区,在临近泄漏区域和其上、下游之间又产生新的压差。事故这一连锁作用的结果是使低压波离开泄漏处沿管道上下传播,该低压波称为“扩张波”,又称“压力波”。

管道的泄漏,一般可分为两个阶段,即泄漏瞬变阶段和泄漏稳定阶段。当管道发生泄漏时,泄漏流量迅速达到最大时间约为 $1\sim 2s$,产生比较明显的减压波向泄漏点的上、下游同时传播,引起管道的水力瞬变,以后在自动调节的作用下,泄漏量逐渐减少并趋于一个稳定值,全线逐渐建立起泄漏情况下的稳定工况。压力波检测法就是利用在管道两端安装的压力检测装置接收管道的瞬变压力信息,判断泄漏事故并确定漏点位置的。这种检漏技术的应用,首先是要选择合适的压力传感器及相应的硬件,另一个重要问题是计算机软件的研制。按我国的国情,在整个石油工业系统内,自动化仪表和微型机计算机的普及率已具备了相当水平,为检测技术的应用创造了有利的条件。

试验结果表明,压力波检测法检测管道的泄漏是一个有效而且实用的技术。这种方法具有感漏精度高,漏点定位准确和反应迅速的优点。但对于缓慢增加的泄漏反应弱,甚至无效。尽管如此,这种方法也不失为一种优良的方法。随着我国管道运输业的飞速发展,它将有广阔的应用前景。

2.2.8 两种新型负压波检漏技术

负压波法是近年来国际上颇受重视的管道泄漏检测方法,它利用管道突然泄漏时,会引发在流体中传播的瞬态负压波,通过捕捉负压波到上下游的时间差来定位。基于负压波的传播理论,提出了两种定位方法,第一,设计了一种能够快速捕捉负压波前锋到达压力测量点的波形特征点的微分算法,并基于此种算法进行漏点定位;第二,将极性相关引入漏点定位技术中,通过确定相关函数峰值点的方法,进行漏点定位。

根据实际需要,设计了一套原油输送管道泄漏检测系统,安装在胜利石油管理局的一条输油管道上。该系统可以实时地检测原油外输和接收站的流量、压力、温度和输油泵的转速,系统两端的数据传输终端可以将数据互传,便于主处理机进行两端数据的综合处理,以确定泄漏是否发生,并计算漏点的位置。

这两种定位方法是对泄漏时的压力时间序列分别从微分和积分、瞬态和稳态两个方面进行的处理,提取特征值。微分运算体现信号变化的趋势,具有灵敏度高,反应速度快的优点;而积分运算体现信

号变化的过程,反应信号变化的速度稍慢,较微分运算稳定,因随机干扰可以被积分过程抵消。这两种方法配合使用,相互参照,能够提高泄漏点定位的准确度。

2.2.9 压力点分析(PPA)检测法

PPA法是利用压力波原理发展的一种新型检漏方法,具有许多优点。PPA是在大量研究管道发生泄漏前后能量和动量平衡特性基础上提出来的。该方法依靠分析,由单一测点取得数据,极易实现。在站场或干线某位置上安装一个压力传感器,泄漏时漏点产生的负压波向检测点传播,引起该点压力(或流量)变化,分析比较检测点数据与正常工况的数据,可检测出泄漏。再由负压波传播速度和负压波到达检测点的时间可进行漏点定位。

由于PPA分析法紧紧围绕伴随泄漏必然出现的物理现状,因此它具有非常高的性能。同时PPA具有使用简便、安装迅速的特点。

3 各种检测方法的评价

(1) 直接检漏法虽然灵敏度高,但大都存在造价昂贵、检测不连续的缺点。以检测电缆法为例,它能够快速而准确的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。另外还有检测元件法,油溶性压力管法,封入气体压力检测法都属于这种情况。所以这些检漏方法的应用受到了限制,只适合于短距离管道,且灵敏度要求高的敏感地区。因此直接检漏法可以与间接检漏法配合使用,相互补充。

(2) 在直接检漏法中,机载红外探测检漏技术是一种非常有效的检漏方法。这种方法具有检测迅速,精度高,可用于微小泄漏检测的特点。由于检测仪仅为红外线摄像装置,不需其他测量仪表,精度所受的干扰降到最小,所以在检测中几乎不存在误差。这种方法存在的缺点是无法进行全天候作业,机载红外检测方法如果与另外一套实时泄漏检测系统配合使用,在长距离管道的泄漏检测中,一定可以收到令人满意的效果。

(3) 间接检漏法是目前管道检漏中普遍采用的方

法。它们大都采用软硬件结合的方法,具有快速、准确、自动化强的特点。但由于原理和控制不同,又各有特点和工作范围。

其中质量平衡检漏法是较早采用的检漏方法,它可以直接利用以有的测量仪表,如流量计、温度计、压力表等。这种方法能连续检测管道,并最终发现微小泄漏。但亦存在缺点,首先,这种方法不能用于泵的启动、停止、管线转换等操作数分钟内压力变化的非常状态;其次,管道泄漏定位精度对流量测量误差非常敏感,在提高检漏精度和更换高精度流量计的经济性和可行性上存在矛盾。最重要的一点是此法不能用于泄漏点定位。总之,质量平衡法可用于大距离、大口径管道的泄漏检测。

水力坡降法技术上不太复杂,要求准确的测出管道的流量、压力和温度值,否则在长距离管线上,造成的误差可能使泄漏点偏移几公里到几十公里,给寻找实际泄漏点带来困难。实际上,在工业应用中,这种方法已很少采用。

声信号对小泄漏很敏感。相比较而言,声信号检漏系统的检测微漏有效性是所有检漏系统中最有效的。但由于噪声强度在管段上衰减很快,且受背景噪声的影响,为保证检测精度,需提高声音传感器的密度。这样就增加了投资,也给控制带来了困难,同时它检测不出微渗,也检测不出管壁磨蚀损失的严重程度,做不出管壁即将穿孔破裂而及时处理的警报。所以声信号检漏法适用短距离油田管网的微漏检测。

压力波法是近年来国际上颇受重视的管道泄漏检测方法。它利用管道突然泄漏时引发在流体中传播的瞬态压力波,通过捕捉压力波传播到上下游的时间差来定位。基于这种原理,已发展了数种检漏技术。这些方法都具有软硬件结合,复杂而有效的管道动力模型。其中,压力点分析法(PPA)作为一种最有效的检漏方法,愈来愈被人们所认识。但是,不论是PPA法,还是其他压力波检测法,都要求捕捉初漏的瞬间信息,所以不能用于检测微渗,但可以用直接检测法实现。压力波检测法已广泛应用于各种情况的管道泄漏检测,包括长距离、短距离、大口径、小口径管道。

基于神经网络的检测方法是一种具备自动化、

智能化特点的新型检漏方法。它的发展依赖于高速计算机、通讯技术和数学科学的发展,是未来检测技术的发展方向。基于神经网络的检漏方法具有自学习能力,能够靠自身的能力不断充实自己,改善检漏性能。

4 结果与讨论

(1) 根据工作环境、工作对象不同,选择合适的检漏方法。如在检测长距离管道中,应采用飞行检测、压力点分析法、压力波法、质量平衡法等,而在油田管网或场内管网的短距离管道输送中,宜采用PPA法、压力波法、噪声检漏法和空气取样法等。

(2) 直接检漏法虽然存在许多缺点,但其高度的灵敏性比其他间接检漏法无法替代的,尤其在检测微渗中。直接检漏法还将继续存在,它与间接检漏法配合使用,能够使管道得到很好的控制。

(3) 单一的检漏装置很难满足实际工作的需要,所以在应用中,一定要考虑各种检漏方法的特点,采用几种检测方法配合使用,组成可靠性和经济性综合的检漏系统。

(4) 结合我国的油田实际情况,对盗油现象,管道泄漏检测技术的应用以压力波法、PPA法为主,到晚上可减小阈值,提高系统的灵敏度,同时质量平衡检测法也为大多数油田所采用。对于生活条件较好的管道地区,可部分采用人工巡检的方法。这些方法的综合使用对遏制盗油现象和发展我国的管道事业做出了贡献。

(5) 展望检漏技术的发展方向,笔者认为随着科学技术的发展,卫星检漏将提上日程。最近几年,卫星定位技术、遥感技术、GPS技术等得到了很大的发展,同时,卫星发射费用不断降低,为管道泄漏检测卫星的发射提供了保障。一颗探测卫星能够覆盖全国的管道网,可以保证实时、准确的进行管道检测。高精度的遥感摄像机能够检测到任何的管道泄漏量。

(6) 管道运输业的发展不会离开检漏技术的发展,随着科学的进步,不同学科的成果会大量应用于管道泄漏的检测中。最终,人们能够圆满的解决这个困难,全程、实时、准确的控制管道。