

基于声波的输气管道泄漏监测技术研究进展

李玉星^{1,2,3*}, 刘翠伟^{1,2,3,4}

1. 中国石油大学(华东), 储运与建筑工程学院, 青岛 266580;
2. 山东省油气储运安全省级重点实验室, 青岛 266580;
3. 青岛市环海油气储运重点实验室, 青岛 266580;
4. 广西高校北部湾石油天然气资源有效利用重点实验室(钦州学院), 钦州 535000

* 联系人, E-mail: lyx13370809333@163.com

2016-01-19 收稿, 2016-03-04 修回, 2016-03-08 接受, 2016-09-06 网络版发表

国家自然科学基金(51374231)、高等学校博士学科点专项科研基金(20110133110004)和广西高校北部湾石油天然气资源有效利用重点实验室开放课题基金资助

摘要 随着管道工业的迅速发展, 输气管道的泄漏不止造成能源浪费、污染环境, 还会对人们生命财产安全造成威胁, 对泄漏进行检测和定位具有非常重要的理论意义和应用价值, 其中声波法是当前研究的热点. 声波中的动态压力波幅值大, 包含频率范围宽, 因此基于动态压力波的泄漏定位技术是未来最有潜力的输气管道泄漏监测技术之一. 声波的产生和衰减对该方法的检测准确度和定位精度有决定性影响. 本文从声波法输气管道泄漏监测技术的原理、近5年研究状况、展望三个方面总结介绍基于声波的输气管道泄漏检测和定位研究现状及未来发展方向, 重点分析国内外对声波法泄漏监测技术的研究.

关键词 输气管道, 泄漏监测, 声波法

天然气清洁、高效, 我国的天然气消费量在2015年达到2600亿立方, 预计2020年达到4000亿立方, 目前我国已经形成了655条油气长输管线, 总里程达到 1.02×10^5 km, 一些已运行了20多年, 有的甚至达到40多年, 有些管道已经锈蚀、变薄, 甚至有些输油管线还与城市的管网交叉重叠, 里面存在很多隐患. 导致管道泄漏的原因很多, 如管道腐蚀和磨损, 自然破坏、第三方破坏等原因.

以西气东输管道为例, 气体管道距离长, 输量大, 其安全高效运行势在必行. 气体管道的泄漏不仅造成能源浪费, 还会造成环境污染, 甚至威胁人民生命财产安全, 为了减小输气管道泄漏带来的经济损失、人员伤亡和环境破坏, 泄漏监测方法作为保障管道安全的重要手段, 越来越受到人们重视. 基于此气体管道泄漏监测机制基础研究具有非常重要的经济、

社会和环保意义, 也是管道建设运行的迫切需求. 气体管道泄漏监测体系的建立可以为管道的安全运送提供技术保障, 进而为管道运行和维抢修提供理论保证.

目前可以应用于油气管道的泄漏监测方法有许多种^[1], 其分类方法也多种多样, 根据传感器的安装方式不同, 可以分为介入式监测和贴壁式监测; 根据监测周期的不同可以分为在线实时监测和定期密闭性测试; 根据所监测的泄漏后管内气体流动参数的不同, 主要包括质量/体积平衡法、应用统计法、负压波法、瞬态模型法、分布式光纤法和声波法等, 各种方法的对比具体见表1.

表1中, 评价一种泄漏监测方法的优劣, 主要通过以下几项指标:

(1) 灵敏度, 是指管道发生泄漏时, 采用的泄漏

引用格式: 李玉星, 刘翠伟. 基于声波的输气管道泄漏监测技术研究进展. 科学通报, 2017, 62: 650–658

Li Y X, Liu C W. Advances in leak detection and location based on acoustic wave for gas pipelines (in Chinese). Chin Sci Bull, 2017, 62: 650–658, doi: 10.1360/N972015-01452

表1 泄漏监测方法

Table 1 Evaluation indexes of leak detection and location methods

泄漏监测方法	灵敏度	定位精度	误报率	检测时间	适应能力	投资费用	维护费用	系统寿命
质量/体积平衡法	差	低	高	较长	无	低	低	长
应用统计法	较好	较高	低	中等	有	低	高	短
负压波法	较好	较高	高	短	有	低	低	长
瞬态模型法	较好	中等	很高	较长	有	较低	低	短
分布式光纤法	好	较高	较低	较短	有	很高	很高	长
声波法	好	高	低	很短	有	较高	低	较长

监测方法能够监测到的最小的泄漏量。

(2) 定位精度,是指泄漏监测方法估算的泄漏位置与实际的泄漏位置之间的差值的绝对值,有时用绝对值占整个管道管长的比表示。

(3) 误报率/漏报率,误报是指管道没有发生泄漏,而采用的监测方法认为发生了泄漏;漏报是指管道发生泄漏,但采用的监测方法没有发现。误报率(漏报率)是误报(漏报)次数与总的监测次数的比值。

(4) 检测时间,是指一种监测方法从泄漏发生到能检测出泄漏并能确定泄漏位置,所需要的时间。

(5) 适应能力,是指当管道工况发生变化或管道介质发生变化,监测方法的适用性。

(6) 费用,是指被测管道采用一种泄漏监测方法进行监测时,所需的固定投资和维护费用。

从表1中可以看出,分布式光纤法和声波法的综合应用效果较好,但是分布式光纤法各种评价指标尚可,安装成本和施工维护费用太高,声波法的安装费用虽然较高,维护费用却很低,且最大安装距离为50 km,满足国内输气管道阀室间距为30~50 km的条件,若能实现国产化,其安装成本也会大大降低。因此声波法的综合评价结果较好,是一种具有发展潜力的监测方法,也是现代监测技术中的热点问题。

由以上分析可知,声波法与传统的质量平衡法、负压波法、瞬态模型法等相比具有诸多优点:灵敏度高、定位精度高、误报率低、检测时间短、适应性强;测量的是管线流体中的微弱声压变化量,与管线运行压力的绝对值无关;响应频率更宽,监测范围更宽等。

针对声波法泄漏监测技术^[2,3],从20世纪30年代开始,人们对声波法泄漏监测技术进行了大量研究,声波法泄漏监测得以迅速发展。美国的声学系统集成公司(Acoustic System INC, ASI)开发出了声波管道

泄漏监测系统,加拿大国家研究委员会对自来水管发生泄漏时的声波信号进行了大量的研究,并取得了一定的效果,日本大阪气体公司和日本钢管公司开发出了用于天然气管道泄漏监测的声波传感器。在国内,泄漏监测技术研究在20世纪90年代刚刚起步,输气管道的泄漏诊断技术的研究起步更晚,总体上处于吸收、研制开发的阶段。国内对利用管道声波信号实现管道泄漏诊断和定位的研究也都在2000年以后,由于声波泄漏监测方法明显优于其他监测方法,天津大学、中国石油大学、北京化工大学、兰州工业大学、沈阳工业大学、东北大学、中国科学院声学所、中石化胜利油田以及中国计量科学研究院等单位在泄漏监测各方面都做了大量的工作和研究,研究取得一定的进展。

根据传感器的不同声波法又可以分为音频法(声波传感器即微型传声器或者麦克风)、振动检测法(加速度计)和动态压力波法(动态传感器),其中音频法是用微型传声器采集管道泄漏时产生的声音信号;振动检测法是用加速度计采集的管内气体压力脉动或者管壁振动加速度;动态压力波是采用动态压力传感器采集泄漏时气体在管内外压力差作用下冲出管道时产生的动态压力,是由质量损失导致的压力损失,动态压力又反过来在管内气体传播,传播速度为声速。三者都既可以进行介入式监测,也可以进行非介入式监测。介入式监测是指传感器与管内流动介质直接接触耦合,进而拾取信号;非介入式监测是指传感器与管壁直接接触耦合,进而拾取信号。从以上分析可以看出,声波法所包含的3种方法所采集的信号本质是相同的,均属于声音与振动信号,但由于所采用的传感器的工作原理不同,所采集的信号的表现形式明显不同。目前的研究主要集中于音频法和振动检测法,二者对短距离管道在允许安装距离

内具有非常好的泄漏检测及定位效果,但由于所采集的声音信号和振动加速度信号传播衰减较快,因此二者对短距离管道,尤其是单位数量级为米的管道适用,对长距离管道的应用效果亟需改善,而动态压力波虽然也存在信号衰减,但其幅值大,包含频率范围宽,基于此提出了基于动态压力波的泄漏监测技术。

本文对5年来输气管道声波法泄漏监测技术的研究进展做了总结,首先介绍声波法实现泄漏定位的基本原理,然后对声波产生机理、声波传播规律、声波传感器技术、声波信号处理方法等四个方面详细分析了近5年的研究进展,最后对声波法泄漏监测技术的未来发展趋势提出了展望。

1 声波法泄漏检测与定位原理

输气管道的泄漏监测是指对输气管道泄漏的检测和定位,对泄漏的检测即对泄漏的判断。

1.1 泄漏判断

当输气管道的某一点发生破裂,管内气体会从破裂点流出,导致管内气体的流动参数发生变化,泄漏点处的气体密度减小,压力降低,泄漏点两边相邻区域的气体在压差的作用下向泄漏点处补充,致使泄漏点相邻区域内的气体密度减小,压力降低,进而更远处的气体向泄漏点相邻区间补充,这种过程依次向管道上下游传播,从而形成声波在管道内的传播。安装在管道两端的声波传感器监听并采集传来的声波信号,通过对声波信号进行特征量提取,判断管道是否发生泄漏。

当管道处于正常工况时,声波传感器采集的信号被作为背景噪声,而管道一旦有泄漏发生,产生泄漏声波信号和正常工况下的背景噪声会一同传到声波传感器,经过对比和鉴别,迅速做出泄漏判断。

声波法泄漏检测的关键是寻找到泄漏信号的特征量并将其提取,特征量是将信号进行某种算法得到的物理量,管道发生泄漏和没有发生泄漏,特征量的值有明显的区别。故可以将未发生泄漏时的特征量值作为阈值,和管线运行时得到的特征量值作比较,进行泄漏判断。

在泄漏判断完成并报警以后,应对泄漏进行定位,具体的定位方法,目前研究的主流是基于声速以及时间差计算泄漏点位置的方法,当前的研究主要

集中于对声速的求解以及对时间差计算精度的改进。一年来,一种基于声波传播规律的泄漏定位方法正在兴起,该方法不需考虑声速与时间差的计算,为泄漏定位提供了新的思路。

1.2 传统的泄漏定位方法

输气管道发生泄漏,泄漏声波从泄漏点向管道两端传播,根据声波传播到管道起终点的时间差值和声波在管道中的传播速度即可确定泄漏点的位置^[2],具体原理如图1所示。

泄漏定位公式为

$$x = \frac{L(c - a_1) - (c - a_1)(c + a_2)\Delta t}{c - a_1 + c + a_2}, \quad (1)$$

式中, c 为声速, L 为首末端传感器之间的距离, a_1 为泄漏点与上游传感器之间管段内气体流速, a_2 为泄漏点与下游传感器之间管段内气体流速, Δt 为同一泄漏声波传播到首末站传感器的时间差值。

从上式中可以看出,泄漏位置确定的关键因素有两个: 声波在管道介质中的传播速度和泄漏声波传播到首末端传感器的时间差值。时间差一般通过互相关法求解。

互相关公式如下所示:

$$r_{12}(\tau) = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} q_1(t)q_2(t+\tau)dt, \quad (2)$$

式中, $q_1(t)$ 为传到管道一端的声波信号, $q_2(t)$ 为传到管道另一端的声波信号, T 为泄漏声波在首末传感器之间传播的周期, $T=L/c$, $\tau \in (-T/2, T/2)$, c 为声波在管道介质中的传播速度。

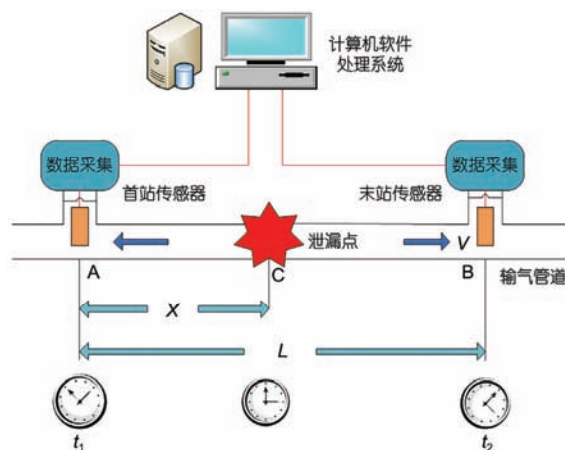


图1 (网络版彩色) 声波泄漏监测的原理图

Figure 1 (Color online) Schematic diagram of acoustic leak detection

管道未发生泄漏时,利用互相关公式得到的相关函数 $r_{12}(\tau)$ 将维持在某一值附近,泄漏发生后,设当 $\tau=\tau_0$ 时 $r_{12}(\tau)$ 将达到最大值,即:

$$r_{12}(\tau_0) = \max r_{12}(\tau). \quad (3)$$

通过求相关函数的极大值和极大值对应的时间,即可求得泄漏声波传播到首末站传感器的时间差值.

声波传播公式可用下式表达:

$$c = \sqrt{\frac{k_v p}{\rho}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{D k_v p}{e E_0}}} = \sqrt{k_v ZRT} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{D k_v p}{e E_0}}}, \quad (4)$$

式中, ρ 为气体的密度; k_v 为容积绝热系数; p 为气体压力; D 为管道直径; E_0 管材的弹性模量; e 为管壁厚度; Z 为压缩因子,取值李玉星等人^[5]做了细致的研究; T 为温度; R 为气体常数.

1.3 基于声波传播规律的泄漏定位方法

输气管道发生泄漏,泄漏声波从泄漏点向管道两端传播,传播规律符合指数衰减规律,根据声波正向和逆向传播的两个公式,可以得到声波从泄漏点向上下游传播时的幅值衰减特性(图2).

如图2所示,上游和下游声波幅值可分别通过以下两式表示:

$$p_1 = p_0 \exp\left(-\frac{\alpha + \xi M}{1 - M}|x|\right), \quad (5)$$

$$p_2 = p_0 \exp\left[-\frac{\alpha + \xi M}{1 + M}(L - |x|)\right], \quad (6)$$

则,新的定位公式为

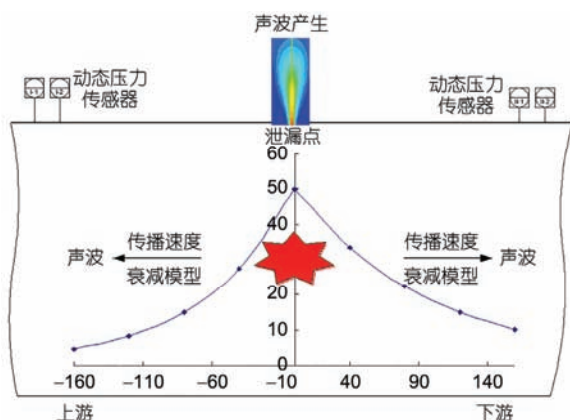


图2 (网络版彩色) 声波传播和衰减模型

Figure 2 (Color online) The propagation and attenuation model of acoustic wave

$$|x| = \frac{\ln(p_2/p_1) + \alpha^+ L}{\alpha^+ + \alpha^-}, \quad (7)$$

式中, α 为理论衰减因子; α^+ 为下游顺流衰减因子; α^- 为上游逆流衰减因子.

与传统泄漏定位方法相比,基于声波幅值的定位方法^[4]更简洁,更直接.传统定位方法中声波幅值用于求解时间差,新方法中声波幅值直接用于定位.但声波幅值与泄漏位置、泄漏量密切相关,声波传播规律的研究还与管道构件、气体流动等相关,因此针对该方法的研究并不成熟,且该方法的定位精度对声波衰减模型以及声波幅值的提取要求较高,因此在声波产生机理、声波传播规律、声波信号处理以及传感器技术等方面都需要进一步研究.

2 声波法泄漏检测与定位技术研究现状

由于声波法泄漏监测技术属于管道流动安全保障领域,涉及流体力学、气动声学、传感器、信号处理等多学科交叉,目前对该技术的研究主要集中于传统泄漏检测和定位方法的研究,尤其是声波信号的处理,即声波有效特征量的提取,同时对声波产生机理、声波传播特性和传感器技术也有介绍.这些基础研究也为基于声波传播规律的泄漏定位方法的研究提供了支持.

2.1 声波产生机理

采用声波法对输气管道泄漏进行监测时,最直接关心的参数即是声波幅值,同时为验证泄漏发生时声波是否产生,针对泄漏声波产生机理进行了研究.

由于气体泄漏流体力学行为的复杂性,流体管道泄漏声源的研究是从水管道开始的,Ben-Mansour等人^[6]针对输水管道的微小泄漏,采用计算流体力学软件基于三维湍流模型对内径为0.1 m的管道,泄漏量小于1 L/min的泄漏过程进行了模拟仿真,得到了泄漏声源产生机理,同时提出了平均功率谱密度法(PSD)和快速傅里叶变化法提取泄漏信号的特征.Xu等人^[7]对气体管道泄漏时的发声原理和声源特征进行了研究,并在气动声学的基础上模拟了泄漏声波场,对声波产生机理进行了分析,得到了泄漏声源特征.沈国清等人^[8]针对电站锅炉炉管泄漏点精确定位问题,对泄漏喷流形成的流场和声场进行了数值模拟,分别在空旷环境、实验室环境、模拟炉膛常温无噪声环境和模拟炉膛常温高噪声环境下进行了实验

研究. 结果表明: 泄漏喷流流场轴向速度是引起泄漏声波传播扰动的主要原因, 远场的噪声辐射具有指向性特征, 在孔口部区域声功率级最大, 且声功率级沿对称轴方向随与喷口距离的增大而逐渐扩散衰减, 泄漏声场的强度随孔直径的增大而增强; 相同孔直径、不同泄漏蒸汽工况下的声功率级基本相同. Liu等人^[9]采用仿真模拟和实验研究了输气管道泄漏声波的产生机理, 从理论上确定输气管道气动噪声的产生机理, 得到输气管道泄漏时声源波动方程, 通过仿真模拟得到声源产生的泄漏声波并分析其规律, 通过实验中的声波传感器测得模拟工况条件下的泄漏声波并对仿真模拟得到的泄漏声波进行对比分析和验证, 研究结果表明: 输气管道泄漏声波产生的根本原因是气体泄漏时产生的湍流脉动导致的四极子声源和偶极子声源, 仿真模拟和实验的方法可以研究输气管道泄漏声波的产生机理. Mostafapour等人^[10]对泄漏所引起的埋地管道非线性振动产生的声波信号进行了理论分析和实验分析, 将管道抽象成为埋在一个各向同性的, 同质的弹性介质中的圆柱筒体, 使用Donnell's的非线性的圆柱壳方程的标准式来模拟管道的自由振动和通过势函数来模拟管道周围介质对管道径向位移的影响, 使用Weaver-Unny模型来分析气固耦合作用, 通过将这些模型结合起来和使用Galerkin方法来得到管壁的径向位移, 进而得到声波产生的理论模型, 将理论模型的傅里叶变换结果与得到的实验结果相比较表明, 结果很一致并且观测到的误差不超过7%.

通过对泄漏声波产生机理的研究, 明确了输气管道泄漏时声波的产生.

2.2 声波传播规律

声波传播规律的研究可以确定声波的有效传播距离, 进而合理布置传感器位置, 从而为声波法的工程应用提供支撑.

针对气体管道声波传播规律的研究, Mostafapour等人^[11]模拟了由于泄漏造成的管道振动所产生的声发射, 经管壁传播的压力波可以通过安装在管壁上的传感器记录, 研究了声波的传播规律, 通过理论与实验分析了声波传播理论对高压天然气管道的泄漏检测效果. 潘碧霞等人^[12]对管道泄漏声发射信号进行传播特性研究, 可以为工程上进行传感器布设和采集参数确定提供参考依据. 介质类型、压力、

流量与泄漏孔径对产生的泄漏声发射信号幅值影响较大, 对泄漏声发射信号传播衰减规律无影响. 应用傅里叶变换和小波包分解等理论方法, 分析泄漏声发射信号在传播过程中经过法兰、阀门时的频率变化特征. Jin等人^[13]研究了管道泄漏声源特性和传播机理, 以天然气管道泄漏时的气动噪声为研究对象, 建立了声波在管道内的二维传播模型, 通过模拟结果与现场试验的比较分析, 表明天然气管道泄漏声波的超低频段可在管道内传播较远距离并能被声波传感器所探测, 从理论上验证了声波法在天然气管道泄漏检测领域的良好应用前景. 胡杨曼曼等人^[14]考虑了管道泄漏声发射信号既携带系统结构中的某些特征信息(泄漏孔大小和位置等), 同时又有很大的随机性和不确定性, 把次声波传感器接受泄漏次声信号的过程比拟为“听”的动作, 来研究在油气管道泄漏检测系统中次声波信号传播的规律. 将管壁状况检测的声发射检测方法和基于现代信号处理的检漏方法二者结合进行管道泄漏检测和泄漏点的定位. Liu等人^[15]提出了一种基于声波传播特性的泄漏定位方法, 并对其进行了实验研究, 该方法对声波传播规律进行了充分研究, 得到了时域、频域和时频域特征的衰减规律, 得到了声波传播的理论衰减因子以及实验修正因子, 研究结果表明, 在输气管道中泄漏声波的衰减遵从指数规律.

2.3 传感器技术

对声波法泄漏监测技术的应用, 传感器技术也是关键环节, 并可以将传感器技术分为传感器的类型选择以及传感器的布置方法.

针对传感器技术类型的选择, Lee等人^[16]提出了一种使用大范围超声波传感器和欧几里德矢量机的油气管道智能失效预测系统. 该系统使用无破坏性的检测(NDTs), 该系统精确度高, 永久安装的大范围超声波传感器通过提供操作平台持续监测危险管道部位. Akram等人^[17]采用远程超声波传感器与活跃的增量支持向量机分类方法相结合来对管线进行实时的泄漏预测和状态监控, 实验结果表明当使用批量练习时, 这种技术能获得相对较高的分类精度, 同时使用从实验室规模缺陷实验生成平台上得到的56个特征数据点降低了计算时间. Zhang等人^[18]采用动态压力变送器对长距离输油管线进行泄漏检测, 采用小波变换和经验模态分解方法对采集的泄漏信号

进行处理,对泄漏检测和定位误差的改进具有重要意义,尤其设计了一个新的基于动态压力传感器的长距离油气管道的泄漏检测系统.动态压力传感器可以获得管线沿线的动态压力信号,应用实例表明其比常规压力变送器有更高的灵敏度和泄漏判别效果,可以准确地识别泄漏和减少误报率,可以改善检测灵敏度和定位精确度.

针对传感器的布置方法,Goulet等人^[19]提出了充分利用传感器技术和数据解释技术对泄漏检测的模型误诊断进行改善,提出了针对泄漏误报情况的传感器布置方法,需要对各种不确定因素进行建模和测量.通过在整个输配水管网中使用模拟数据来测试这种方法的效果.研究表明泄漏检测能力可以达到50 L/min,或者更小.Park等人^[20]认为声源定位的准确性依赖于对声波到达的时间差异预测的精确性,实际情况中噪音总是阻止我们获得精确的时间差,因此提出了最小方差倒频法.实际中希望通过尽可能少的传感器来显示声源位置.一旦能够精确的获得到达时间差,就可以仅用3个传感器在2维平面中用双曲线确定声源位置.采用最小方差倒频法来精确的预估噪声中的到达时间差,也是一种通过3个传感器间到达时间差的相交双曲线来确定声源的方法.实验中成功的检测并定位管道中的泄漏点,指出了泄漏产生的地点.Yan等人^[21]研究了基于声传感器阵列的泄漏声源定位和气体泄漏检测技术,检测距离和分布方向可由实验证明,在泄漏中,气体喷射力与泄漏直径和长度有关.当测量距离不变时,实验的误差和泄漏与传感器的角度分布有关.当相对角度不变时,随距离的增加,目标误差有小幅增加但不超过 $\pm 5^\circ$.

2.4 声波信号处理方法

自从声波法泄漏监测技术应用以来,其研究主要集中于信号处理方法,一方面用于去除噪声进而提取有效特征量,从而提高泄漏准确度,另一方面用于计算时间差,从而提高定位精度.

针对泄漏特征量提取,Ni等人^[22]提出了一种基于特征熵的新型定位方法用以提取特征量.在这种方法中,小波包和信息熵的组合被称为“小波包特征熵”(WP-CE).经验模式分解和信息熵的组合被称为“经验模式分解特征熵”(EMD-CE).管道泄漏的位置由特征熵作为输入量与粒子群算法和支持向量机

(PSO-SVM)相结合来确定.在高噪声环境下,所采用泄漏定位方法的结果比基于物理参数的PSO-SVM要好.Sun等人^[23]提出了一种基于局部平均分解(LMD)均方根(RMS)熵和Wigner-Ville时频分析法的天然气管道泄漏孔径和位置识别方法.使用小波包能量分析并重构,利用LMD将该重构信号分解,计算出分量的RMS熵用于生成特征向量,并输入到支持向量机(SVM)以实现孔的识别.同时提出了一种基于互信息的自适应方法来选择明显的分量(PF),以及这些分量的时-频参数,这些时频参数再用Wigner-Ville分布(WVD)方法进行计算.通过分析时频参数得到的时间延迟.最后结合时间延迟与泄漏信号的传播速度确定泄漏位置.实验结果表明,所提出的方法可以有效地识别不同的泄漏孔,和泄漏的位置,且其精度优于直接互相关方法.王鑫^[24]分析了基于阈值降噪和小波分解的次声波管网泄漏检测算法,对仿真信号获得了良好的滤波效果,随后又结合小波分析和互相关分析两种算法的优点,确定了基于小波多尺度相关的算法,进一步提高了泄漏判断的准确度.刘翠伟等人^[25]采用基于希尔伯特-黄变换的时频分析方法对输气管道泄漏声波的能量分布进行了分析.研究结果表明:希尔伯特-黄变换能清晰地刻画声波信号的时频域特性,通过希尔伯特-黄变换可以得到输气管道泄漏声波信号的有效特征量.刘光晓等人^[26]总结了现阶段主要的时频域滤波方法,重点介绍了具有代表性的小波滤波和维纳滤波的滤波原理,验证了两种滤波方法的实际滤波效果,讨论了基于时域和频域滤波方法的不足,分析了滤波方法不能取得良好滤波方法的原因.在此基础上,引入了盲源分离技术,通过分离构造信号说明了盲源分离技术具有更好的适用性和更好的滤波效果,最后利用实验室采集的泄漏声波信号进行了实际分离.

针对泄漏定位精度的改进,Ozevin等人^[27]提出了一种新的基于声波在二维平面传播的管网泄漏定位方法.这种方法利用互相关函数,并引入几何连通性识别泄漏声波应该传播到传感器的路径来确定到达时间差.使用传感器阵列确定多维空间中的泄漏位置是一个有效的方法,并成功地在实验室聚丙烯管网中得到了验证.针对定位精度的改进,Ghazali等人^[28]通过比较不同信号的瞬时频率,主要采用希尔伯特变换,标准化的希尔伯特变换,直接正交化,Teager能量算子和倒频谱来分析信号的瞬时频率,对

泄漏进行区分和定位;通过研究证实了在检测管网泄漏时使用瞬时频率分析方法的有效性. Li等人^[29]在研究中,基于CTFS的定位方法用于频变声速的泄漏检测中,通过从泄漏点两侧收集到的声波信号利用一元傅里叶变换方程来推导得到CTFS方程.在CTFS达到最大值提取频率信息,然后通过用频率峰值与已知的频散曲线结合的方式来确定频变声波的速度.最后进行管线的定位.采用互相关时频谱方法(CTFS)对声波信号进行了处理,得到了时间差计算和声速计算的更为准确的方案,与传统的互相关法求解时间差相比,定位误差显著减小.

3 展望

2015年中俄东线天然气管道中国段的开工,不仅是中俄能源合作的里程碑,同时也标志着“中国四大能源进口通道战略拼图”的全面完成,也是标志着中国四大天然气进口通道格局已形成,包括中亚管道天然气管线(西北通道)、中缅管道天然气管线(西南通道)、中俄管道天然气管线(东北通道),以及沿海进口液化天然气管线(东南通道),再加上已建成或者待建设的西气东输三线、新粤浙管线以及广泛分布于各个城市的燃气管网等,我国的天然气管道工业在未来十年具有极好的发展前景.以中国-中亚天然气管道为例,其包含的四条线路总的设计输送能力将达到850亿立方米/年.在如此大输量的前提下,考虑到长输天然气管道的高压力,一旦泄漏必然造成大量的能源浪费以及严重的环境破坏.考虑到城市燃气管网分布的复杂性且都位于人口稠密区,一旦发生泄漏,后果不堪设想.同时,《中共中央关于制定国

民经济和社会发展第十三个五年规划的建议》指出:有序开放开采权,积极开发天然气、煤层气、页岩气.完善能源安全储备制度.实施城市地下管网改造工程.

因此输气管道的泄漏监测技术必是当前以及未来一段时间的研究热点,考虑到声波法具有诸多优势,对其的研究必然会为输气管道的安全提供理论基础和应用保障.虽然上述研究人员对声波法泄漏检测与定位技术进行了大量的研究,但在以下方面还需进行进一步研究,主要包括:(1) 动态压力波的应用,作为声波的一种,其幅值大,包含频率范围广,值得深入研究;(2) 基于声波传播规律的泄漏定位方法,对声波有效特征量的传播规律进行深入分析,建立更为精确的衰减模型;(3) 声波信号的提取及增强方法,尤其是小泄漏或者长距离时,声波信号变得微弱,从传感器测量的信号中提取有效特征量,并对原始信号进行增强;(4) 多个泄漏同时发生时的检测与定位,管道存在多个泄漏孔同时泄漏的状况需要引起足够重视;(5) 非介入式声波传感器的泄漏检测与定位,可以为声波法的推广应用提供支持,减少传感器在运行管道上的打孔安装;(6) 多相流管道的泄漏检测与定位,海底管道的泄漏检测与定位也是未来研究的重点方向;(7) 多种信号处理方法的结合,应用信息熵模型描述泄漏声发射信号的非平稳特征,并在此基础上综合应用小波、希尔伯特-黄变换、双谱等信号处理方法实现泄漏状态声发射信号特征参数的提取,以多传感器声发射信号特征参数为样本,从多源信息融合角度构建具有预警功能的泄漏状态定性识别模型.

参考文献

- 1 Murvay P S, Silea I. A survey on gas leak detection and localization techniques. *J Loss Prev Process Ind*, 2012, 25: 966–973
- 2 Meng L Y, Li Y X, Wang W C, et al. Experimental study on leak detection and location for gas pipeline based on acoustic method. *J Loss Prevent Proc Indust*, 2012, 25: 90–102
- 3 Liu C W, Li X J, Li Y X, et al. Leak detection and location for natural gas pipelines based on acoustic waves (in Chinese). *CIESC J*, 2014, 65: 4633–4642 [刘翠伟, 李雪洁, 李玉星, 等. 基于音波法的输气管道泄漏检测与定位. *化工学报*, 2014, 65: 4633–4642]
- 4 Liu C W, Li X J, Yan Y K, et al. A new leak location method based on leakage acoustic waves for oil and gas pipelines. *J Loss Prevent Proc Indust*, 2015, 35: 236–246
- 5 Li Y X, Yao G Z. *The Design and Management of Gas Transmission Pipeline* (in Chinese). Dongying: China University of Petroleum Press, 2009. 30–35 [李玉星, 姚光镇. 输气管道设计与管理. 东营: 中国石油大学出版社, 2009. 30–35]
- 6 Ben-Mansour R, Habib M A, Khalifa A, et al. Computational fluid dynamic simulation of small leaks in water pipelines for direct leak pressure transduction. *Comput Fluids*, 2012, 57: 110–123
- 7 Xu Q Q, Zhang L B, Liang W. Acoustic detection technology for gas pipeline leakage. *Proc Saf Environ Prot*, 2013, 91: 253–261

- 8 Shen G Q, Zhang S P, An L S, et al. Numerical simulation on boiler tube leakage detection and study on the location algorithm (in Chinese). *J Chin Soc Power Eng*, 2014, 34: 678–684 [沈国清, 张世平, 安连锁, 等. 电站锅炉炉管泄漏数值模拟及定位算法研究. *动力工程学报*, 2014, 34: 678–684]
- 9 Liu C W, Li Y X, Meng L, et al. Study on leak-acoustics generation mechanism for natural gas pipelines. *J Loss Prev Process Ind*, 2014, 32: 174–181
- 10 Mostafapour A, Davoudi S. A theoretical and experimental study on acoustic signals caused by leakage in buried gas-filled pipe. *Appl Acoust*, 2015, 87: 1–8
- 11 Mostafapour A, Davoudi S. Analysis of leakage in high pressure pipe using acoustic emission method. *Appl Acoust*, 2013, 74: 335–342
- 12 Pan B X, Xu C H, Cao G L, et al. Propagation characteristics of acoustic emission signals of pipeline leak (in Chinese). *Oil Gas Storage Trans*, 2013, 32: 1141–1145 [潘碧霞, 徐长航, 曹国梁, 等. 管道泄漏声发射信号的传播特性. *油气储运*, 2013, 32: 1141–1145]
- 13 Jin H, Zhang L B, Liang W, et al. Integrated leakage detection and localization model for gas pipelines based on the acoustic wave method. *J Loss Prev Process Ind*, 2014, 27: 74–88
- 14 Hu Y M M, Bao H, Wang J W. Research on propagation rule of infrasound wave signal of pipeline leak detection system (in Chinese). *Liaoning Chem Ind*, 2014, 43: 425–454 [胡杨曼曼, 鲍郃, 王佳伟. 管道泄漏检测系统中次声波信号传播规律研究. *辽宁化工*, 2014, 43: 425–454]
- 15 Liu C W, Li Y X, Fu J T, et al. Experimental study on acoustic propagation-characteristics-based leak location method for natural gas pipelines. *Process Saf Environ Prot*, 2015, 96: 43–60
- 16 Lee L H, Rajkumar R, Lo L H, et al. Oil and gas pipeline failure prediction system using long range ultrasonic transducers and Euclidean-support vector machines classification approach. *Expert Syst Appl*, 2013, 40: 1925–1934
- 17 Akram N A, Isa D, Rajkumar R, et al. Active incremental Support Vector Machine for oil and gas pipeline defects prediction system using long range ultrasonic transducers. *Ultrasonics*, 2014, 54: 1534–1544
- 18 Zhang Y, Chen S L, Li J, et al. Leak detection monitoring system of long distance oil pipeline based on dynamic pressure transmitter. *Measurement*, 2014, 49: 382–389
- 19 Goulet J A, Coutu S, Smith I F C. Model falsification diagnosis and sensor placement for leak detection in pressurized pipe networks. *Adv Eng Inform*, 2013, 27: 261–269
- 20 Park C S, Jeon J H, Kim Y H. Localization of a sound source in a noisy environment by hyperbolic curves in quefrency domain. *J Sound Vibration*, 2014, 333: 5630–5640
- 21 Yan R X, Qi L. The gas leak detection technology of the spacecraft on orbit based on acoustic sensor array. *Phys Proced*, 2015, 70: 384–387
- 22 Ni L, Jiang J C, Pan Y, et al. Leak location of pipelines based on characteristic entropy. *J Loss Prev Process Ind*, 2014, 30: 24–36
- 23 Sun J D, Xiao Q Y, Wen J T, et al. Natural gas pipeline leak aperture identification and location based on local mean decomposition analysis. *Measurement*, 2016, 79: 147–157
- 24 Wang X. Leakage detection of pipe network based on wavelet analysis and multi-scale correlation (in Chinese). Dissertation for Master Degree. Daqing: Northeast Petroleum University, 2013 [王鑫. 基于小波多尺度相关的次声波管网泄漏检测. 硕士学位论文. 大庆: 东北石油大学, 2013]
- 25 Liu C W, Li Y X, Meng L Y, et al. Time-frequency analysis of acoustic leakage signal based on hilbert-huang transform for natural gas pipelines (in Chinese). *J Vib Shock*, 2014, 33: 42–49 [刘翠伟, 李玉星, 孟令雅, 等. 基于希尔伯特-黄变换的输气管道泄漏音波时频特性分析. *振动与冲击*, 2014, 33: 42–49]
- 26 Liu G X, Meng L Y, Liu C W, et al. Analysis of filtering methods of leaky acoustic wave based on blind source separation technology (in Chinese). *J Vib Shock*, 2014, 33: 192–199 [刘光晓, 孟令雅, 刘翠伟, 等. 基于盲源分离技术的泄漏音波信号滤波方法分析. *振动与冲击*, 2014, 33: 192–199]
- 27 Ozevin D, Harding J. Novel leak localization in pressurized pipeline networks using acoustic emission and geometric connectivity. *Int J Pressure Vessels Piping*, 2012, 92: 63–69
- 28 Ghazali M F, Beck S B M, Shucksmith J D, et al. Comparative study of instantaneous frequency based methods for leak detection in pipeline networks. *Comput Fluids*, 2012, 57: 110–123
- 29 Li S Y, Wen Y M, Li P, et al. Leak location in gas pipelines using cross-time-frequency spectrum of leakage-induced acoustic vibrations. *J Sound Vibration*, 2014, 333: 3889–3903

Summary for “基于声波的输气管道泄漏监测技术研究进展”

Advances in leak detection and location based on acoustic wave for gas pipelines

LI YuXing^{1,2,3*} & LIU CuiWei^{1,2,3,4}

¹ College of Pipeline and Civil Engineering in China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China;

² Key Laboratory of Qingdao Oil and Gas Storage and Transportation Technologies, Qingdao 266580, China;

³ Key Laboratory of China National Petroleum Corporation Heavy Gas Transportation and Liquefied Natural Gas Technologies, Qingdao 266580, China;

⁴ Guangxi Colleges and Universities Key Laboratory of Beibu Gulf Oil and Natural Gas Resource Effective Utilization, Qinzhou University, Qinzhou 535000, China

* Corresponding author, E-mail: lyx13370809333@163.com

With the rapid development of pipeline industry, the leakages of gas pipelines cause great energy waste and environmental pollution, especially security problems. Therefore, it is significant to study leak detection and location methods. At present, many leak detection methods have been developed for gas pipeline leakages, such as methods based on mass/volume balance, negative pressure wave, transient model, distributed optical fiber and acoustic waves, etc. Among them the traditional negative pressure wave method detects leakages based on the change of the absolute pressure in pipeline monitored by the pressure transmitter, while the acoustic method is based on the dynamic pressure monitored by the acoustic sensors. All evaluation indexes are considered as equivalent references, and after comparative analysis it can be known that acoustic method is promising and actual. And nowadays in this field, acoustic method is one of the hot issues. The acoustic method can perform full-scale display of pressure fluctuations caused by the leakages. The fundamental principle of the acoustic leak detection technology for natural gas pipelines is that an acoustic pressure perturbation is generated when leakage occurs. It transmits through gas to both ends of the pipeline and is acquired by the dynamic pressure sensors installed to the pipeline, which will be signal-processed by computer to determine whether leakage occurs or not. The amplitude of dynamic pressure wave is large and it contains a wide frequency range. The leak location technology based on dynamic pressure waves is one of the most potential methods in the future. The generation and attenuation of the dynamic pressure waves are the key points which determine the detection accuracy and the location precision. The leak-acoustics generation mechanism influences the leak-acoustics characteristics and signal recognition. The main reason of leak-acoustics generation for natural gas pipelines is the sonic source fluctuations. The propagation characteristics of leakage acoustic waves in gas pipelines are necessary to study. The accuracy of the velocity and the time difference restricts the application of the acoustic leak detection and location method. Then the location method is proposed which is based on the propagation model and takes no account of the velocity and the time difference. This dissertation consists of the following three parts which contribute to make the research status and future development clear: the fundamentals of the acoustic method, the related researches of recent five years (domestic and overseas) and the outlook of the leak monitoring based on acoustic wave method of gas pipelines, especially the analyses about the researches on acoustic leak detection and location method. The conclusions can be concluded that acoustic leak detection method is an important way to protect pipelines from failure and to decrease the risks which can be executed timely and accurately.

gas pipeline, leak detection and location, acoustic method

doi: 10.1360/N972015-01452