

文章编号: 1673- 9620 (2008) 03- 0074- 05

管道泄漏检测及定位技术的研究现状与发展方向^{*}

王晓宇^{1,2}, 王树立²

(1 常州轻工职业技术学院 信息工程系, 江苏 常州 213164; 2 江苏工业学院 机械与能源工程学院, 江苏 常州 213016)

摘要: 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。然而, 石油、天然气具有易燃、易爆的特点, 一旦发生泄漏, 极易造成火灾、爆炸等恶性事故。因此对输配管网的实时泄漏检测和定位显得异常重要, 也是目前亟待解决的问题。系统介绍了泄漏检测和定位方法的研究现状, 并指出了泄漏检测和定位技术的发展方向。

关键词: 油气输送; 管道; 泄漏检测; 泄漏定位

中图分类号: X 937

文献标识码: A

Status Quo of the Study and Direction of Pipeline Leak Detection and Location

WANG Xiao- yu^{1,2}, WANG Shu- li²

(1. Department of Information Engineering, Institute of Light Industry Technology, Changzhou 213164, China; 2. School of Mechanical and Energy Engineering, Jiangsu Polytechnic University, Changzhou 213016, China)

Abstract: With the development of industry of petroleum and natural gas, the transport pipelines play more and more important roles in national economy. With the characteristics of flammability and explosive, the leakage of pipelines will cause fire and blasting accidents, So it is very important to detect the leakage and locate the leakage position in time. The domestic and foreign leak detection and location techniques are introduced systematically; the advantages and disadvantages of every technique are pointed out. Also, the developing direction of leak detection and location techniques is described.

Key words: oil/gas transmission; pipelines; leak detection; leak location

目前, 国际上已有多多种输运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; 基于软件的方法则是根据计算机数据采集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,

* 收稿日期: 2007- 05- 16

基金项目: 江苏省社会发展课题 (BS2007028)

作者简介: 王晓宇 (1981-), 女, 江苏常州人, 硕士生; 联系人: 王树立。

通过计算对泄漏进行检测和定位。管道泄漏不仅给生产、运营单位造成巨大的经济损失,而且会对环境造成破坏,严重影响沿线居民的身体健康和生命安全,因此必须加强泄漏检测技术与定位技术的研究。

国外从20世纪70年代就开始对管道泄漏检测技术进行了研究。国内管道泄漏技术的研究起步较晚,但发展很快。

1 泄漏检测定位方法

根据测量手段不同将泄漏检测方法分为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^[5]。按基于硬件和软件的方法分类泄漏检测定位技术的主要方法如图1所示。

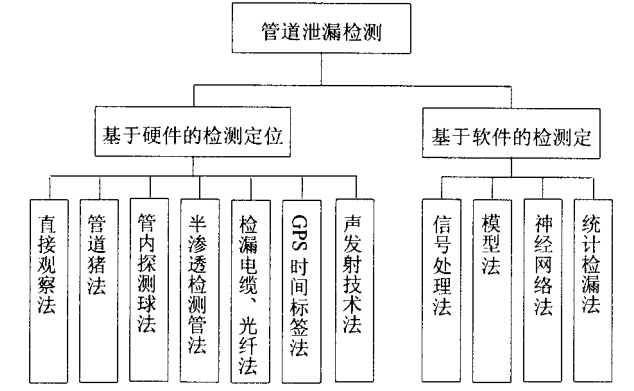


图1 管道泄漏检测定位的主要方法
Fig 1 The main methods of pipeline leakage detection and location

1.1 基于硬件的检漏方法

基于硬件的检漏方法包括直接观察法、管道猪、管内探测球法、半渗透检测管法、检漏电缆和光纤法、GPS(全球定位系统)时间标签法、声发射技术等。文献[6~17]分别对这些方法进行了详细介绍,各种方法各有其优缺点。其中直接观察法不能对管线进行连续检测,因此发现泄漏的实时性差,只能作为一种辅助检漏手段;管道猪这类

方法优点是检测精度高,能提供准确的定量、绝对数据,缺点是使用比较复杂,费用高,使用性较差;管内探测球法优点是检测准确、精度较高,缺点是探测只能间断进行,只适用大型管道检漏,且易发生堵塞、停运的事故,造价较高;半渗透检测管法,检漏电缆、光纤法方法有一共同特性就是将检漏管或检漏电缆、光纤铺设于管道外,通过对渗漏气体进行分析或分析渗漏气体与电缆或光纤的包覆材料发生反应引起相关参数的改变,来进行泄漏检测与定位,这类方法共同的特点是安装和维修费用很高,这类方法已逐渐淘汰。

GPS(全球定位系统)时间标签法中的GPS系统包括3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^[14]。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^[15],具有和好的发展前景。

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,声源向外辐射能量形成声波,即为管道声发射现象。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,就可以对泄漏及其位置进行判断^[16,17],这就是声发射检漏技术。在检测埋地管道方面,声发射技术较其他一些检测方法具有更高的灵敏度,对泄漏源的定位也很精确,具有良好的应用前景。

1.2 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。这类方法主要是对采集的温度、流量、压力等信号进行实时分析和处理,进行泄漏检测与定位。

1.2.1 基于信号处理的方法

(1) 体积或质量平衡法

体积或质量平衡法^[18]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因素影响, 首末两端的流量变化有时滞现象, 所以精度不高。为使误报率在可接受范围内, 应根据 1 h 到 1 d 之间的参量变化进行泄漏检测, 这又造成无法及时检测到泄漏而造成不必要的损失, 且该方法无法进行泄漏定位。

(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。

压力点分析法 (PPA): PPA^[19, 20]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, 系统运行结果表明, 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。

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。

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 [21~23] 对该方法进行了进一步的讨论, 对影响定位精度的因素进行了分析, 给出了改进的算法, 使检测、定位精度得到了进一步的提高。

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。小波变换法^[21~29]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。该方法的缺点是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

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, 互相关函数之间变化很显著, 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^[30]。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难以检测。

1. 2. 2 基于管道数学模型的方法

基于管道数学模型的方法主要有 Kalman 滤波器法^[31]、状态估计器法和系统辨识法^[32]等, 这些方法均是根据管道的特点进行相应的假设, 建立数学模型, 输入管道运行参数通过计算和相应的准则进行泄漏检测与定位。这类方法的特点是投资少、使用方便, 缺点是检漏的准确性和精度较差, 需要进一步改进。

1. 2. 3 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 [33] 应用 Lab-VIEW 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[34]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,但该技术定位时只能定位到段,而不能进行更精确的定位。基于人工神经网络的检漏法是一种有前途的和正在发展的方法。

1.2.4 统计检漏法

统计决策法是一种新型的管道泄漏检测方法。它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。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。荷兰Shell公司的Atmos系统就采用了此技术,该系统运行良好。

2 泄漏检测的性能指标

泄漏检测的性能指标包括检测性能指标和诊断性能指标。其中检漏性能指标包括泄漏检测的灵敏度、泄漏检测的及时性、泄漏的误报率和漏报率3个基本指标;而诊断性能指标包括正常工序操作和泄漏的区分能力、泄漏辨识的准确性两个基本指标。

3 问题与展望

管道的泄漏检测与定位具有十分重要的现实意义,尽管已经取得很大的进步,工程实践中已得到应用,取得了一定的经济效益,同时也暴露了许多尚需解决的问题。

(1) 近年来,随着计算机技术、控制理论、信号处理、模式识别、人工智能等学科的发展及大量应用,基于软件的管道泄漏检测方法为各种现代检

测技术的应用提供了平台,实现了管道的实时监测和及时报警,而基于硬件的方法具有定位精度高、误报警率低的优点。因此,将基于硬件的方法和基于软件的方法更有效地结合互补是研究的热点和趋势。

(2) SCADA系统不仅能为泄漏检测提供数据源,而且能对管道的运行状况进行监控,是管道自动化的发展方向,因此,泄漏检测系统与全线远程数据采集和监控(SCADA)系统的充分结合是管道检漏技术发展的重点。

(3) 目前的检漏与定位技术难以很好地解决现场检测灵敏度与误报警之间的矛盾及定位精度不高等问题,特别是对小流量泄漏检测与定位更是如此。因此,提高检测精度是研究的重点之一。

(4) 目前管道泄漏检测和定位技术的侧重点是单点单管的泄漏检测,而管道实际运行中存在的多点、多管耦合泄漏,这方面的研究还不深入,应该将其作为重点研究解决的问题。

(5) 基于神经网络的检漏方法在目前使用的检漏技术中已初露头角,并在实际应用中取得了很好的效果,因此,不断完善神经网络方法并提高泄漏检测与定位系统的自适应性也是一个研究方向。

目前的泄漏检测和定位手段是多学科多技术的集成,特别是随着传感器技术、模式识别技术、通信技术、信号处理技术和模糊逻辑、神经网络、专家系统、粗糙集理论等人工智能技术等发展,为泄漏检测定位方法带来了新的活力,可对诸如流量、压力、温度、密度、粘度等管道和流体信息进行采集和处理,通过建立数学模型或通过信号处理,或通过神经网络的模式分类、或通过模糊理论对检测区域或信号进行模糊划分,从而提取故障特征等基于知识的方法进行检测和定位。将建立管道的数学模型和某种信号处理方法相结合、将管外检测技术和管内检测技术相结合、将智能方法引入检测和定位技术实现智能检测、机器人检测和定位等作为研究方向。

参考文献:

- [1] Zhang Jun. Designing a cost-effective and reliable pipeline leak detection system [J]. Pipelines International, 1997, 42 (1): 20-26.
- [2] 常景龙,李铁. 输气管道泄漏检测技术的选择和优化[J]. 油气储运, 2000, 19 (5): 9-13, 17.
- [3] Butter N C BSC. Pipeline leak detection techniques [J]. Pipes

- & Pipelines International, 1982, 4: 70– 92.
- [4] 张布悦, 王柱增, 刘吉东, 等. 输油管线泄漏检测与定位技术综述 [J]. 上海海运学院学报, 2001, 22 (3): 13– 16, 21.
- [5] 李炜, 朱芸. 长输管线泄漏检测与定位方法分析 [J]. 天然气工业, 2005, 25 (6): 105– 110.
- [6] 张晓晓. 油品储运检测诊断技术综述 [J]. 油气储运, 1995, 4 (6): 44– 47.
- [7] 陈积懋. 管道无损检测与评价技术 [J]. 石油化工设备技术, 1997, 18 (1): 58– 62.
- [8] De Read J R. Comparison between ultrasonic and magnetic flux pigs for pipeline inspection [J]. Pipes & Pipeline Int, 1987, (1– 2): 7– 15.
- [9] Hennigar G W. Advances in gas leak detection [J]. Pipe & Gas Journal, 1985, 212 (11): 39– 42.
- [10] (日) 森村正直. 传感器技术 [M]. 黄香泉, 译. 北京: 科学出版社, 1988 405.
- [11] Chet Sandberg. The application of a continuous leak detection system to pipeline and associated equipment [J]. IEEE Transaction on Industry Applications, 1989, 25 (5): 906– 909.
- [12] Kurmer J P. Applicability of a novel distributed fiber optic acoustic sensor for leak detection [J]. Distributed and Multiplexed Fiber Optic Sensors ⑤. SPIE, 1992, (1797): 63– 71.
- [13] 胡志新, 张陵. 分布式光纤布拉格光栅在油气管道检测中的应用 [J]. 应用光学, 2000, 21 (4): 35– 37.
- [14] 夏海波, 张来斌, 王朝晖. 基于 GPS 时间标签的管道泄漏定位方法 [J]. 计算机测量与控制, 2003, 11 (3): 161– 176.
- [15] 王朝晖, 张来斌. 液体输送管线小泄漏诊断技术的研究 [J]. 石油机械, 2003, 31 (8): 37– 39.
- [16] 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– 522.
- [17] 焦敬品, 李涌, 何存富, 等. 压力管道泄漏的声发射检测试验研究 [J]. 北京工业大学学报, 2003, 29 (2): 144– 146.
- [18] Dr Whaley R S, Nicholas R E, Van Reet J D. Tutorial on software based leak detection techniques. Scientific software intercomp [J]. Pipe Line Simulation Interest Group, 1992, (10): 120– 132.
- [19] Farmer, Edward J. 管道泄漏检测的新方法 [J]. 国外油气储运, 1992, (5): 37– 39.
- [20] 张仁忠, 彭侠夫, 路艳洁, 等. 系统思想在管道运输泄漏检测、精确定位中的应用 [J]. 系统工程理论与实践, 1999, 12 (12): 122– 127.
- [21] 王立宁, 李健, 靳世久. 热输油管道瞬态压力波法泄漏点定位研究 [J]. 石油学报, 2000, 21 (4): 6, 93– 96
- [22] 李炜, 陈希平, 毛海杰, 等. 天然气管道泄漏点的定位检测方法研究 [J]. 甘肃工业大学学报, 2003, 29 (4): 84– 87.
- [23] 苏维均, 廉小亲, 于重重, 等. 负压波定位理论在输油管道泄漏检测系统中的应用 [J]. 微计算机信息, 2003, 19 (3): 43– 44.
- [24] 周小勇, 叶银忠. 小波分析技术在故障诊断中的应用 [J]. 上海海运学院学报, 2001, 22 (3): 116– 119, 126.
- [25] Ye Hao, Wang Guizeng, Fang Chongzhi. Application of wavelet transform to leak detection and location transport pipelines [J]. Engineering Simulation, 1996, (13): 1025– 1032.
- [26] 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– 904, 907.
- [27] 王海生, 叶昊, 王桂增. 基于小波分析的输油管道泄漏检测 [J]. 信息与控制, 2002, 31 (5): 456– 460.
- [28] 夏海波, 张来斌, 王朝晖, 等. 小波分析在管道泄漏信号识别中的应用 [J]. 石油大学学报 (自然科学版), 2003, 27 (2): 78– 80, 86.
- [29] Marco Ferrante, Bruno Brunone. Pipe system diagnosis and leak detection by unsteady– state tests 2 wavelet analysis [J]. Advance in Water Resources, 2003, (26): 107– 116.
- [30] Beck S B M, Curren M D, Sims N D, et al. Pipeline system identification through cross– correlation analysis [J]. Process Mechanical Engineering, 2002, (216): 715– 723
- [31] 董东, 王桂增, 方崇智. Kalman 滤波器在长输管道泄漏检测中的应用 [J]. 自动化学报, 1990, 16 (4): 303– 309.
- [32] 陶洛文, 方崇智, 肖德云. 以辨识为基础的长输管线故障定位 [J]. 北京大学学报 (自然科学版), 1986, 2 (4): 69– 75.
- [33] 黄文, 毛汉领. 管道泄漏检测用人工神经网络技术 [J]. 油气储运, 2002, 21 (4): 1– 3.
- [34] Salvatore Belsito, Paolo Lombardi, Paolo Andreussi. Leak detection in liquefied gas pipelines by artificial neural networks [J]. AIChE, 1998, 44 (12): 45– 72.