

油气管道变形检测技术

辛君君,董甲瑞,黄松岭,赵 伟

(清华大学 电机系 电力系统国家重点实验室,北京 100084)

摘 要:为了确保油气管道的安全运行,管道变形检测技术显得十分重要。介绍了国内外用于油气管道变形检测的主要方法、原理以及各自的特点,包括通径检测器法、超声波法和管内摄像法等。结合具体的检测方法,简单介绍了国内外采用不同方法的变形检测仪器及其研究现状。

关键词:油气管道;变形检测;综述

中图分类号:TG115.28

文献标识码:A

文章编号:1000-6656(2008)05-0285-04

Deformation Inspection of Petroleum and Gas Pipeline

XIN Jun-Jun, DONG Jia-Rui, HUANG Song-Ling, ZHAO Wei

(State Key Lab of Power Systems, Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Deformation inspection of petroleum and gas pipeline is very important for the operation security of pipelines. Some deformation inspection methods of petroleum and gas pipeline and their principles and features were introduced respectively, including pipeline caliper method, ultrasonic method and camera method and so on. The instruments and equipments using different methods for deformation inspection were introduced and the research status were presented.

Keywords: Petroleum and gas pipeline; Deformation inspection; Survey

管道作为天然气、石油等介质的长距离输送设施,被敷设于世界各地的陆地、海洋等各种环境之中。大部分油气管道是埋地管道,由于地震、地层的移动、地壳变迁、热输变形、第三方施工破坏等原因,常使管道产生不同程度的变形,如管道凹陷、椭圆变形、弯曲和下沉。这些变形会使输油阻力增大,导致油气传输率下降,为保持正常输油量,须增加能耗;变形也会造成管道强度降低和管形变化,形成安全隐患。严重的地方可能导致管道破裂,造成停产,带来经济损失。为了确保管道安全运行,需要长距离更换管道,但如果通过检测取得完整可靠的管道变形资料,则局部换管就可以消除地下隐患,避免事故发生。另外在对油气管道进行缺陷检测前,为保证缺陷检测器顺利通过管道,需先对管道进行变形检

测,而且,管道由于变形引起的事故比管道缺陷事故更加频繁。因此定期对油气管道进行变形检测非常重要,通过获得的变形位置及变形量等可指导正确维修,并防止灾害发生。

检测管道的局部变形和长距离、大范围的管线变形所用方法有所不同,主要的变形检测对象有①内径变形(局部变形),其检测技术为通径检测器法、超声波法、管内摄像法、激光三角测量法、激光光源投射成像法和光纤陀螺法。②弯曲、下沉(长距离、大范围的管线变形),其检测技术有通径检测器法、光纤陀螺法和光纤光栅传感器法。下面分别介绍国内外检测油气管道变形的的主要方法及相关仪器。

1 通径检测器法

通径检测器,又称测径仪,广泛应用于检测管道几何变形,可以检测出影响管道有效内径的几何异常现象,如凹坑、椭圆变形、内径的一般变化和弯管上的皱折等,并确定其位置和程度。

早期开发的通径检测器由两个半球形皮碗驱

收稿日期:2007-03-28

基金项目:国家高技术发展研究计划(863计划)资助项目(2007AA06Z223)

作者简介:辛君君(1984—),男,清华大学电机系,硕士生,主要研究方向为电磁测量及无损检测。

动,两皮碗之间有伞状测径杆及里程轮,伞状杆沿圆周分布,各杆均贴靠在管壁上,并随着管壁的几何形变发生偏移。若管壁有几何变形,如凹陷、偏圈或褶皱,则变形处的各杆将产生转动,变形大则转动幅度也大,里程轮可记下变形位置,然后通过电子仪器记录下杆的转动并存储在计算机内。近几年推出的电子测径仪,其尾部装有电磁场发射器,通过电磁波测出发射器与管壁之间的距离,并转变成电信号存储起来。将运行后的数据取出并加以分析和显示,就可以确定管道的变形及相应的位置。该通径检测器的优点是测量元件不与管壁直接接触,能减少许多机械故障,而且对管壁的清洁度要求不高,应用范围广泛^[1]。目前测径仪测径范围为 100~1 500 mm,灵敏度通常为管径的 0.2%~1%,精度大约为 0.1%~2%^[2]。

通径检测器是最先用于管道几何变形检测的,第一台检测仪器是 TDW Kalipor 清管器^[3]。这种设备带有一圈伞状感测臂和里程轮,其感测臂装在一个中心柱上,沿圆周分布,各自均贴靠在管壁上。在中心柱端部装有一支记录笔,停放在记录纸带上,其记录纸带在两个里程轮之间走动。里程轮由步进电机带动,不同的里程对应记录纸带相应位置。若管壁有几何变形,变形处的感测臂会产生转动,变形大转动幅度就大,并使中心柱移动一定距离,记录笔便会在纸带上留下曲线。当检测器运行到管道终端后取出时,管道内径变化的程度和位置可从纸带上看出来。EPS 公司生产的几何形状检测清管器,能检测并记录管道的变形情况,其主要的检测功能有管道凹凸变形、椭圆变形和确定变形管段位置等。其检测灵敏度为管径的 5%,可通过直径减少 25%的管段和通过曲率半径为 1.5R(R 为管道半径)的 90°弯头。在每小时 3~15 km 速度范围内应用,不影响检测精度^[4]。

我国通径检测器的研究始于 1980 年,曾有用软质清管器拖带空心铝筒的方法来检测管道变形情况。但是这一方法不可靠,而且无法测得径向的变化量和变形处的位置。1988 年中国石油天然气总公司管道科学与天津激光技术研究所合作研制出了 Dg500 型原油管道有效通径检测仪,该仪器全长(不计发射机)1 096 mm,带有里程轮和伞状测径传感器。自带的电源可连续工作约 300 h。检测器直径为 529 mm,可用于检测直径为 340~500 mm 的管道。主要技术指标为测径范围(5%~0.35%)D

(管道直径),测径精度 $\leq \pm 2.5\% D$,测径灵敏度 5% D,测距灵敏度 1.5 m,测距精度 $\leq 0.5\% L$ (测距范围,一般 ≤ 76 km),可通过最大变形 35% D,可通过最小弯曲半径 1.5D,检测速度 0.2~2 m/s^[5]。

1993 年 10 月中国石油天然气管道技术公司采用电子数据采集及处理系统,成功研制出了 DN-700 型电子式管道通径检测器,并成功用于鲁宁线邹城-贾汪段的现场试验。该仪器分为三部分,即变形检测部分、里程检测部分和记录仪部分。检测部分不与管壁接触就能连续记录管道截面形状变化的性质、大小和相应的位置,对管壁无损伤,可进行在线检测,并能安全通过管内较大变形与障碍,一次可连续检测 150 km,主电源可连续运行 100 h 以上,后备电池保证存储数据不丢失。检测器直径为 720 mm,可应用于实际管道的直径范围为 540~710 mm。它能检测管道变形的种类有变形直管段、变形弯头、凹陷、椭圆度和环焊缝等。其主要性能指标为:灵敏度 0.25% D,精度 $\leq 1\% D$,定位精度 $\leq \pm 1.5$ m,可检测的最大变形 25% D,可检测的最小变形 1% D^[6]。

通径检测器法目前在工程实际中使用较多,而且技术也较成熟。但是该方法精确度不高,检测速度慢,还要受自身电源使用时间的影响,对推进系统也有较高的要求。

2 超声波法

超声波法检测管道变形主要是利用超声波的脉冲反射原理。该方法原理简单,能够对厚壁大管径管道进行精确检测,而且检测数据简单,无需校验。其缺点是受超声波波长的限制,该方法只适合厚壁管,对薄壁管的检测精度较低;当变形较复杂时,将会出现多次反射,难以识别信号和确定变形。另外由于超声波在空气中衰减很快,使用时一般需要在探头和被测物体之间施加耦合剂,所以用于天然气管道时,需要在一个液体段(通常为凝胶)的两端运行两个常规清管器,超声波检测器放入液体段中运行,否则无法进行检测^[7]。

英国 King's College London 大学用超声波法检测排水管道的变形。建立了检测模型,通过超声传感器可以得到管道内壁的三维图形,根据这些图形可以检测到管道的变形和异常,并且整个检测过程是在管道内充满水的情况下进行的。该方法对于研究油气管道的变形检测有一定的参考价值^[8]。

国外生产管道超声智能检测爬机产品的公司有德国 Pipetronix、日本钢管株式会社 NKK(Nippon Kokan)和美国 TDW(T D Williamson)。NKK 研制的超声波检测清管器能再现管道内壁表面的图像。该公司还开发研制了不需要耦合剂(即能用于天然气管线)的轮式干耦合超声波检测器,目前正开发可用于长距离天然气管道的检测器。

目前,超声波法的发展主要有两个方向:① 减少超声波探头直径,降低各探头间的周向间距,以大大提高对微弱变形的检测精度。② 提高对伪信号的识别能力,提高检测精度。

3 管内摄像法

在国外基于 CCTV(Closed-Circuit TV)摄像的管道变形检测技术已使用了近 40 年,目前使用仍然很广泛。它的基本原理是通过不断地对管壁四周进行摄像,然后对拍摄的图像进行监视、分析得到的管道变形情况。这种检测方法比较直观,但由于受人眼分辨率的限制,若不对图像进行处理,对 $<10\%D$ 的变形就很难辨识;若将拍摄的图像制成录像带然后进行分析,其分辨率会更低,只能达到 $20\%D$ 左右^[3]。

近几年英国 King's College London 大学对这种方法作了改进,在 CCTV 摄像头前加设了特殊的光学头,使得测量精度和速度大大提高。使用该方法后的变形检测精度可达管径的 0.2% 。但该系统也存在一些不足之处,即管道直径与摄像镜头处形成的对边角最大不能超过摄像镜头的视角;另外,该装置光学投影头需要光源,这不利于管道内远距离及自动化检测^[9]。

4 激光三角测量法

激光三角法(Laser Triangulation)是一种高效准确、非接触式的光电检测方法。它包括激光扫描探头、运动控制和定位系统、数据采集和分析系统三个部分。它利用光学三角测量原理,即从光源发出一束激光照射在待测物体表面上,用光电效应传感器接收从物体表面漫反射的光线,将光信号转换成电信号,成像点在传感器上的位置随被测物体表面位置变化而发生移动。通过像移和实际位移之间的关系式,计算得到管道内径尺寸的变化^[10]。

激光三角法具有测试速度快、检测效率高、精度高、采样点密集、空间分辨力高、实时处理能力强、非接触和使用方便等优点,可提供定量检测结果和被

检管道任意位置横截面显示图、轴向展开图和三维立体显示图。与其它非接触式的检测方法相比,激光三角法对待测表面要求较低,且具有较大的偏置距离和测量范围,可广泛应用于三维形貌的检测。

虽然激光三角法有很多优点,但光电探测器一次只能对管道内表面某一个点进行成像,若要进行全方位的成像检测,需要附加旋转装置。为此,1987 年美国 Quest Integrated Inc 公司研制了一套激光轮廓检测系统^[11,12],用于军舰上锅炉管道的检测。目前,激光三角测量系统的主要问题是受入射光束的聚焦深度限制,大范围检测效果不好。针对以上问题,国内有学者提出采用中心光斑很小的无衍射贝塞耳光束作为入射光束,以提高系统分辨率^[13]。

目前,激光三角法的发展趋势主要有:引入新的光学器件和先进的传感器技术,提高检测速度和精度;改进系统的硬件架构,如采用多传感器信息融合,更好地获取深度信息;通过与智能控制系统结合,同时开发更快更好的处理算法,最大程度地实现光电三角法的柔性测量。

5 激光光源投射成像法

激光光源投射成像法是一种检测管道变形的新方法,其原理是利用激光投射装置向管道内壁投射光环,通过透镜收集管道内表面对此光环所产生的反射,并在二维探测器上形成环形图像。该环形图像可显示出管道内壁横截面的形状。若管道内壁光滑,则其环形图像规则;反之则图像形状不规则,产生畸变。只要对图像进行分析处理,便可得到管道轮廓的尺寸和位置等参数,从而得到管道的变形情况^[14]。

激光光源投射成像法可以避免附加复杂的机械装置,没有激光三角测量法所存在的光源点状成像所造成的缺点。同时激光光源不必绕管道轴线旋转就可以实现全方位成像。但该光电传感技术目前还处于实验开发阶段,如用于中型及大型管道内表面的检测,可实现 $\pm 0.1\text{ mm}$ 的分辨率^[15]。目前还未见相关的产品报道。

6 光纤陀螺法

光纤陀螺法是基于光纤陀螺技术的管道变形检测方法,它是检测长距离和大范围管线变形的办法。该技术可确定管道内几何异常的位置和变形程度,其显著优点是测量精度高。使用的干涉型光纤陀螺仪是一种新型角速度传感器,具有极高的灵敏度和

较高机械强度。近几年来,国内外对于光纤陀螺的研究和应用越来越广泛^[16]。其测量原理基于光的 Sagnac 效应。光纤陀螺相对惯性空间转动而产生的 Sagnac 相位差 $\Delta\phi$ 可表示为:

$$\Delta\phi = \frac{2\pi LD}{c\lambda} \cdot \Omega \quad (1)$$

式中 L ——光纤环内光纤总长度;

D ——光纤环的平均直径;

c ——真空中的光速;

λ ——光在真空中的波长;

Ω ——光纤陀螺在运行过程中产生的角速度。

通过相位解调提取顺/逆时针两光束的相位差 $\Delta\phi$,即可得出光纤陀螺在运行过程中的角速度 Ω ^[17]。

当陀螺仪沿被测对象的表面运行时,被测对象的变形使陀螺仪沿运行路径产生角速度,通过对光纤陀螺仪输出的角速度和线速度进行记录和计算机处理,便可绘出陀螺仪的实际运动轨迹,从而定量计算出被测对象的变形量。不过该方法还处于可行性研究阶段,实际工程应用中还有一些问题没有解决。

7 光纤光栅传感器法

文献[18]中提出了一种新型的利用光纤光栅传感器进行管线弯曲变形检测的方法。即使用光纤光栅传感器沿被检测管道内部等距离推进,逐点获取被检测管道离散点空间弯曲曲率信息,然后根据这些曲率信息重建管道的空间三维形状,从而确定其空间位置及管线弯曲变形情况。

具体方法是将两根布拉格光纤光栅呈 90° 粘贴在一种细径弹性基材上,形成直径 5 mm 的弯曲变形检测传感器。将传感器封装在特殊的定心机构里,定心机构带动传感器沿被检测管线间歇式前进。在前进过程中,用光纤光栅解调仪每隔 50 mm 等间隔点上采样传感器的波长读数,经计算得到相应各点的形变和空间曲率信息。然后运用基于等距离离散点曲率信息的空间曲线重建方法重建出管道的空间位置形状。通过对空间位置形状的分析,即可得到管道的变形情况^[18]。

由于光纤光栅信号是波长解调型的,不受电磁干扰的影响。所以光纤光栅传感器法虽然还处于研究阶段,但具有良好的应用前景。

8 总结

可行的检测油气管道变形方法有多种,实际生产实践中使用较多的是通径检测器法、超声波法和

管内摄像法。激光三角法、激光光源投射成像法和光纤光栅传感器法等方法检测精度较高,且不受管道周围和管道内部环境的影响,是精确测量的发展方向。随着高像素摄像技术、激光光源投射成像技术、图像处理及显示技术的发展,油气管道变形检测技术将向高效、准确、非接触以及高清晰可视化方向发展。

参考文献:

- [1] 许 估. 管道内检测技术简述[J]. 城市煤气, 1997, (9): 21—24.
- [2] 石永春, 刘剑锋, 王文娟. 管道内检测技术及发展趋势[J]. 工业安全与环保, 2006, 32(8): 46—48.
- [3] 周 舰, 丁克勤, 冯其波. 埋地聚乙烯管道变形检测技术探讨[J]. 中国测试技术, 2006, 32(1): 34—37.
- [4] 张锦生. 对国外几何形状检测清管器的分析[J]. 油气储运, 1985, 4(1): 62—64.
- [5] 徐今伟. Dg500 型原油管道有效通径检测仪的研制与鉴定[J]. 油气储运, 1989, 8(4): 39—41.
- [6] 徐今伟. DN-700 型电子式管道通径检测器[J]. 油气储运, 1998, 17(5): 54—56.
- [7] 沈功田, 景为科, 左延田. 埋地管道无损检测技术[J]. 无损检测, 2006, 28(3): 137—141.
- [8] Olga Duran, Kaspar Althoefer, Lakmal D. Seneviratne. A Sensor for Pipe Inspection: Model, Analysis and Image Extraction[C]. IEEE International Conference on Image Processing (ICIP). Barcelona, Spain; Institute of Electrical and Electronics Engineers Computer Society, 2003: 597—600.
- [9] Francisco Gomez, Kaspar Althoefer, Lakmal D. Seneviratne. Modeling of Ultrasound Sensor for Pipe Inspection[C]. Proceedings-IEEE International Conference on Robotics and Automation. Taipei, Taiwan, China; Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 2003: 2555—2560.
- [10] 王晓嘉, 高 隽, 王 磊. 激光三角法综述[J]. 仪器仪表学报, 2004, 25(4): 601—604.
- [11] Richard D. Roberts. Laser profilometry as an inspection method for reformer catalyst tubes[J]. Materials Evaluation, 1999, 57(4): 420—422.
- [12] Tom Cowling, Phillip D Bondrant, Steve Lalumandier. Innovative furnace tube inspection system[J]. Materials Evaluation, 1999, 57(4): 447—449.
- [13] 周莉萍, 赵 斌, 李 柱. 无衍射光束在激光三角测量系统中的应用研究[J]. 激光技术, 1998, 22(1): 22.
- [14] 陈 颖, 俞 朴. 光电传感技术用于管道无损检测[J]. 光电子技术, 1999, 19(4): 265—269.

(下转第 294 页)