

# 海底管道微泄漏检测器研制与应用

郭世旭,陈世利,黄新敬,徐天舒,靳世久

(天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室,天津300072)

**摘要:**针对现有技术海底管道微泄漏检测上的局限性,设计了一种双层耐压的球形检测器结构,利用计算流体仿真方法确定了球体在管道经济流速下能够通过极端垂直管道的关键参数,包括管径比 $\lambda$ 与流速 $v$ ;设计了基于ARM-Linux的多传感器数据采集与存储硬件系统;在长度为200 m陆地实验管道上对研制的内检测器进行了试验,结果表明,该检测器在大于经济流速的范围内可顺利通过垂直管段,且可检测到0.7 L/min的模拟泄漏量。

**关键词:**海底管道;微泄漏;球形检测器;计算流体仿真;泄漏检测

中图分类号:TE88

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2015)09-0182-05

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2015.09.046

## Design and application of a leak detector for submarine oil pipelines

GUO Shi-xu, CHEN Shi-li, HUANG Xin-jing, XU Tian-shu, JIN Shi-jiu

(State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instrument, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** Due to the limitation of the existing technology for small leakage detection on submarine oil pipelines, a spherical leak detector with double-deck and pressure proof is designed. Based on the CFD methods, the key parameters that could pass through the vertical segment of a pipe at the economical velocity range are confirmed, including diameter ratio  $\lambda$  and flow velocity  $v$ . A multi sensor data acquisition and storage system are designed based on the ARM-Linux. A simulation test of the sample detector is carried out on a 200 m land pipeline loop. The results show that the detector could pass through the vertical segment of the 8-inch (DN200) pipe, and it could detect the small leak rates of 0.7 L/min.

**Key words:** submarine pipelines; small leakage; spherical detector; CFD; leak detection

随着全球油气资源需求的快速增长和陆上油气资源的日渐枯竭,海洋油气开发的需求愈加迫切,而海底管道则被称为“海洋油气田的生命线”<sup>[1]</sup>。对于海底管道泄漏事故,通常出现大片海面油膜时已是大的泄漏,对于微泄漏,不易发现且难以确定泄漏点位置,极易诱发大的泄漏事故。

陆地管道目前比较成熟的泄漏检测方法主要有负压波法<sup>[2]</sup>、音波相关法<sup>[3]</sup>以及内检测法<sup>[4]</sup>。负压波检测法可有效检测大的突发性的泄漏(泄漏量大于总流量的1%油管泄漏,大于总流量5%的气管道泄漏),对微小泄漏不敏感;美国ASI公司的音波相关法,无中继最大检测范围为50 km,在平台间距较大时,其灵敏度与定位精度都受到极大限制,可检测大于6 mm孔径,对于微小泄漏,则无能为力。管道内检测器(Pig)利用搭载其上的各种无损检测设备实现腐蚀等缺陷及管道泄漏的检测,由于检测器与管壁紧密贴合,里程轮与管壁摩擦产生的摩擦噪声不利于对微小泄漏声信号的分辨,且对管道变形十分敏感,存在较高的卡堵风险,对于海底管道,在

洋流作用下更容易发生几何变形,并有长达数百米的立管系统<sup>[5]</sup>,限制了其在海底管道上的应用。对于海底管道,目前应用较多的检测方法有水面监视法、分段密封法、检漏电缆法,以及通过ROV或潜水员携带水听器对可疑点进行检测的声学检测法<sup>[6-8]</sup>,这些方法均对管道微泄漏不灵敏,且检测成本较高。

针对目前泄漏检测方法在海底管道微泄漏检测方面的局限性,笔者提出并设计了一种球形的管道内检测器结构(后文简称内检测器),该球形结构通过性好,检测灵敏度高,并利用计算流体仿真分析确定了检测器的外形参数,使其能够在极端垂直管道下具有良好的通过性;设计了基于ARM-Linux的多传感器数据采集存储硬件电路;对研制的检测器进行了模拟试验。

## 1 球形检测器机械结构设计

### 1.1 流体动力学分析

陆地管道通常有爬坡甚至垂直管段,海底管道

在海底到平台之间通常有上百米的竖直管段,须保证有足够的推力使内检测器顺利通过最极端的竖直管段。利用计算流体分析软件 Ansys Fluent 计算流体对球体的推力,其几何模型与边界条件如图 1 所示。

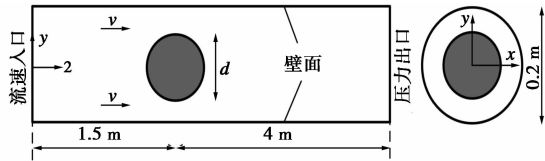


图 1 计算流体仿真几何模型与边界条件

管道内径设置为油气输送最常用的 8 英寸 (0.2 m),球体直径为  $d$ ,管内的平均流速为  $v$ ,入口设置为流速入口,出口设置为压力出口,球体上下游分别设置为 1.5 m 与 4 m,保证流体充分发展,其他边界设置为壁面无滑移,粗糙系数为 0.5。利用 ICEM 划分流体域 3D 六面体网格,利用多个 O 网格对计算域进行划分,对球体表面及壁面附近进行网格加密, $d=0.08$  m,管径比  $\lambda = d/D = 0.4$  时的网格剖面图如图 2 所示,网格整体质量  $> 0.7$ 。

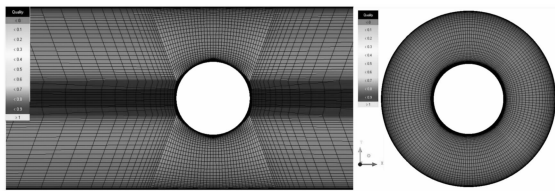


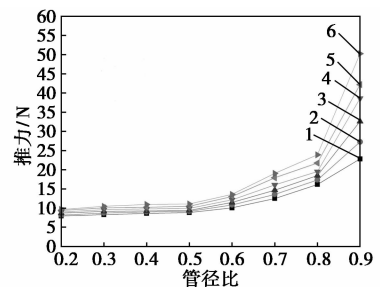
图 2 计算域六面体结构网格剖面图

为了提高油气输送的经济效率,油管道输送的经济流速通常在  $0.49 \sim 2.25$  m/s 之间<sup>[9]</sup>,流速  $v$  取值为  $0.5 \sim 1.5$  m/s (雷诺数  $Re = 20\,000 \sim 60\,000$ )。取不同的球体直径  $d$ ,使管径比在  $0.2 \sim 0.9$  之间。管内流体设置为水,密度为  $999.4$  kg/m<sup>3</sup>,动力黏度

为  $0.001$  Pa·s。计算阻流体在流体中的受力时,为了获得更好的计算精度,选择基于时间平均 Navier-Stokes 方程的标准  $k-\omega$  湍流模型<sup>[10]</sup>,应用 SIMPLE 算法进行压力修正,且用二阶迎风差分格式对动量方程进行离散。针对不同管径比  $\lambda$  及流速  $v$ ,计算了 48 组 3D 仿真数据,每次计算均保证  $x, y, z$  方向上的动量残差达到  $10^{-5}$ ,以达到收敛条件。利用式 (1) 可得到沿  $z$  方向的球面上的受力<sup>[11]</sup>:

$$F_z = \int \vec{z} \cdot \vec{F}_p + \int \vec{z} \cdot \vec{F}_v \quad (1)$$

其中,  $F_p$  是压强差产生的力,等于各面元法向上压强对面元面积乘积的矢量和,  $F_v$  是粘性力,是各面元切向上粘性力的矢量和。不同管径比及流速下流体对球体的推力影响如图 3 所示。



1— $v=0.5$  m/s; 2— $v=0.7$  m/s; 3— $v=0.9$  m/s;  
4— $v=1.1$  m/s; 5— $v=1.3$  m/s; 6— $v=1.5$  m/s

图 3 流体对球体的推力与管径比及流速的关系

从图 3 可以看出,流体对球体的推力随着流速及管径比的增大而增大。但当管径比  $< 0.6$  时,推力随着管径比及流速增大变化不明显;当管径比  $> 0.7$  后,推力值随着流速增加迅速增大;当管径比达到 0.9 后,推力值增大明显,这是由于过大的阻挡面积,压强差的作用更加明显,而过大的管径比,在球体经过弯头处时不易通过,且由于球体后部尾流

(上接第 181 页)

- [2] Kalghatgi K, Horváth C. Rapid peptide mapping by high-performance liquid chromatography [J]. Journal of Chromatography A, 1988, 443: 343-354.
- [3] Blackler A R, Speers A E, Wu C C. Chromatographic benefits of elevated temperature for the proteomic analysis of membrane proteins [J]. Proteomics, 2008, 8: 3956-3964.
- [4] Stöber W, Fink A. Controlled growth of monodisperse silica range [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 1968, 26: 62-69.
- [5] Stöber W. Method of producing monodisperse silica spradioactive tracer: US, 3634558 [P]. 1972-01-11.
- [6] Unger K, Giesche H, Kinkel J. Spherical SiO<sub>2</sub> particles: US, 4775521 [P]. 1987-07-10.

- [7] Issaeva T, Kourganov A, Unger K. Super-high-speed liquid chromatography of proteins and peptides on non-porous Miera NPS-RP packings [J]. Journal of Chromatography A, 1999, 846: 12-23.
- [8] Barder J T, DuBois D P. Process for forming highly uniform silica spheres: US, 4893369 [P]. 1990-01-16.
- [9] 董鹏,任平,朱英,等.表面无孔的胶体微球及其制备方法:中国,02125734.4 [P]. 2004-02-18.
- [10] Nozawa K, Gailhanou H, Raison L, et al. Smart control of monodisperse stöber silica particles: Effect of reactant addition rate on growth process [J]. Langmuir, 2005, 21: 1516-1523.
- [11] 王斐,耿信笃.无孔反相色谱填料对高负载整体蛋白的高速和高分离度分离 [J]. 科学通报, 2010, 55(11): 992-995. ■

区域的不稳定性,易造成球体滚动的不稳定,因此,管径比取值在 0.7~0.8 之间比较合适,一方面有随着流速增大而增大明显的推力,另一方面又有良好的通过性及滚动稳定性。

### 1.2 检测器内部结构布局

根据上节分析及球体耐压密封、内部空间布局等综合因素,选取球体外径为 160 mm,对于 200 mm 内径管道,管径比为 0.8。设计的检测器结构如图 4 所示。

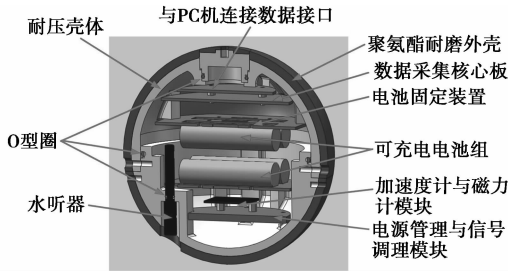


图 4 球形检测器内部结构示意图

其外部为 5 mm 厚的聚氨酯层,起减震耐磨作用,内部是铝制的耐压壳体,设计耐压 10 MPa,整个球体分为上下两个半球,采用径向密封方式。其内部包括检测泄漏声信号的水听器以及信号调理模块、姿态传感模块(加速度计及磁力计)、锂电池组、电源管理模块、基于 ARM 的数据采集存储模块、数据传输接口模块。考虑滚动稳定性,将最重的电池布放于球体中部,设计的几何中心坐标为(-0.912, 18.075, -0.040),重心坐标为(-0.92, 18.01, 0),两者最大偏差 <0.4%。整个球体质量为 3.1 kg,根据上节仿真数据,流体在 0.5 m/s 流速时的推力为 16.18 N,而球体在水中的浮力为 21.02 N(柴油中为 17.65 N),因此该球体即使在最小流速 0.5 m/s 情况下,仍可有足够的推力通过极端竖直管段。

### 1.3 内检测器在水平管道内运动状态分析

由于大多数管道是水平平直管段,且不会有大的弯曲,因此下面分析检测器在水平管段的运动情形。

检测器在水平平直管段内,其受流体推动的流速云图如图 5 所示。球体在流体作用下,上下部分受力不均匀,上半部分流速大于下半部分,因此上半部分的受力也大于下半部分,流体产生的合推力作用点位于球的上半部分,产生顺时针力矩,球体表面与管段底面有摩擦力,产生逆时针力矩,当流体速度到达一定程度,顺时针力矩克服逆时针力矩,球体便

可向前滚动。

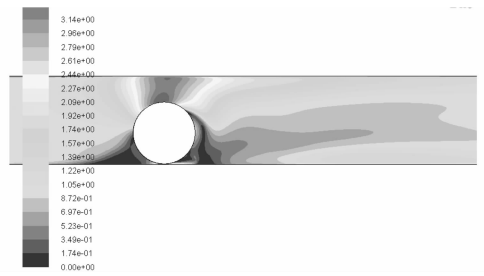


图 5  $\lambda = 0.7$  和  $v = 1 \text{ m/s}$  的流速云图

检测器中三轴加速度计记录的信号包括重力加速度在三轴方向上的分量,以及滚动引起的加速度产生的分量。设球在初始状态时三轴加速度与竖直方向的夹角分别为  $\theta_1$ 、 $\theta_2$ 、 $\theta_3$ ,则重力分量在三轴的分量为:

$$\begin{aligned} a_x &= g \cos \theta_1 \\ a_y &= g \cos \theta_2 \\ a_z &= g \cos \theta_3 \end{aligned} \quad (2)$$

式中, $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  为球体滚动起来后竖直方向与各轴的夹角,呈现周期性的变化。

由于滚动在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向上的速度可表示为:

$$\begin{aligned} V_x &= r\omega \cos \alpha + v_{x_0} \\ V_y &= r\omega \cos \beta + v_{y_0} \\ V_z &= r\omega \cos \gamma + v_{z_0} \end{aligned} \quad (3)$$

式中, $v_{x_0}$ 、 $v_{y_0}$ 、 $v_{z_0}$  为在三轴方向上微小的震动量。

由式(2)、式(3)可得各轴上的合加速度为:

$$\begin{aligned} A_x &= g \cos \theta_1 - r\omega \sin \alpha \\ A_y &= g \cos \theta_2 - r\omega \sin \beta \\ A_z &= g \cos \theta_3 - r\omega \sin \gamma \end{aligned} \quad (4)$$

式中, $\omega$  为球体在滚动过程中的角速度,当流体环境相对稳定时,其值也趋于稳定; $r$  为球体半径; $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  在球体滚动过程中在 0 到  $2\pi$  之间周期性地变化,因此,测到的加速度值也呈现周期性的变化,1 个周期对应球滚动 1 周,因此,在流动稳定的短距离长直管道上,可用检测到的加速度周期数  $n$  乘以球体周长来计算球体运动的距离。

## 2 数据采集与存储系统设计

内检测器在管道内流体的推动下滚动,利用声传感器、加速度计、磁力计不断采集记录沿途多传感器信号,待检测完成后,传输到 PC 机,由上位机软件处理解算,因此一个稳定可靠的多传感器采集存储硬件系统十分重要。系统采用 ARM11 为处理器

模块,系统硬件框架如图6所示。

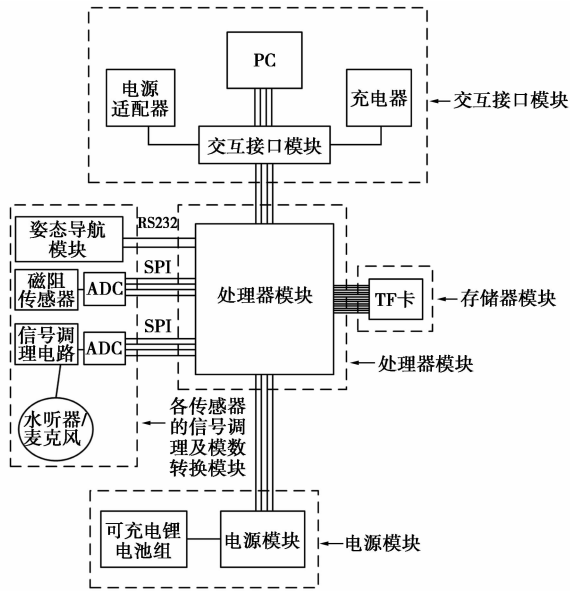


图6 硬件系统框图

系统包括各传感器信号调理及模数转换模块、电源模块、处理器模块、存储模块、交互接口模块。由水听器 & 麦克风感测管道泄漏产生的声信号,由磁阻传感器感测磁场信号,经AD转换传输至处理器模块,由姿态模块经过RS232接口输出加速度及角加速度信息,各传感器数据存储至TF卡中,其中声传感器的采样率为44 kHz,磁传感器为100 Hz,姿态模块为50 Hz。可充电锂电池组容量为34AH,系统可连续工作50 h。采集到的数据通过USB2.0协议高速传输到上位机进行分析。

### 3 球形检测器试验应用

#### 3.1 试验环境

研制的内检测器在徐州某试验环道上进行了多次模拟泄漏及收发球试验,该实验环道长148 m,管道规格为外径219 mm,壁厚6 mm,管内介质为水,管内压力 $\leq 1$  MPa,流量 $\leq 120$  m<sup>3</sup>/h,管道设有收发球筒。为了检验球形内检测器的通过能力,在管道设置有不同角度的弯管段,以及最极端的垂直管段,弯头曲率半径为1.5 D,另外设置有2处模拟泄漏点。

图7是研制的160 mm内检测器在该环道上进行的某次试验照片,其中上图为设置的垂直管段,该垂直管段高为1.3 m;左下图为管道上设置的模拟泄漏点,由球阀与模拟泄漏堵头组成,模拟泄漏堵头可设置不同的泄漏孔径,右下图是在收球筒中成功

回收到球形内检测器的情形。



图7 研制的内检测器环道试验

#### 3.2 球形检测器通过性实验

通过关闭主管道上截断阀的大小程度,控制管道内流体流速,并通过流量计读取流量值,设置的流速分别为0.3、0.5、0.7、1.0 m/s。实验结果表明,在流速为0.3 m/s时,检测器可正常在水平管道滚动,但到达垂直管段处时,其在该管段底部晃动碰撞管壁,不能够通过垂直管段,当缓慢开大截止阀,流速达到0.5 m/s时(此时根据仿真结果合力达到6.2 N),球形检测器顺利地通过垂直管段,但球体在垂直管段顶部的弯头处通过不顺畅,分析原因是推力不够大,在球体碰到上部弯头管壁时会产生反弹力,阻碍其通过弯头部分。而当流速达到0.7 m/s时(此时合力为14.3 N),球体非常顺利通过垂直管段及上部弯头,并在收球筒顺利收到该检测器。

#### 3.3 泄漏点检测及定位实验

根据3.2节实验结果,选取管道流速为1 m/s,此时管内压力为0.5 MPa,在泄漏点处分别设置0.4、0.8、1.2 mm孔径的泄漏堵头。在发球前打开泄漏控制阀,使其自由泄漏,待其稳定后,用固定容积的量杯,测量1 min内泄漏的容量,记录泄漏量后进行发球、收球流程,待收到球后,将数据下载到PC机。

图8是1 mm泄漏孔下采集到的泄漏声波段信号波形,管道压力为0.5 MPa,测得的泄漏量为0.7 L/min。图8(a)是归一化后的原始信号波形,从波形图可以看出,在发出球后的24s左右,信号时域上出现强度上的突变,经过小波去噪等信号处理,得到红色部分的信号图,可以看出泄漏部分的信号

得到了增强,噪声信号得到了抑制,可以从时域上清楚地分辨泄漏信号。

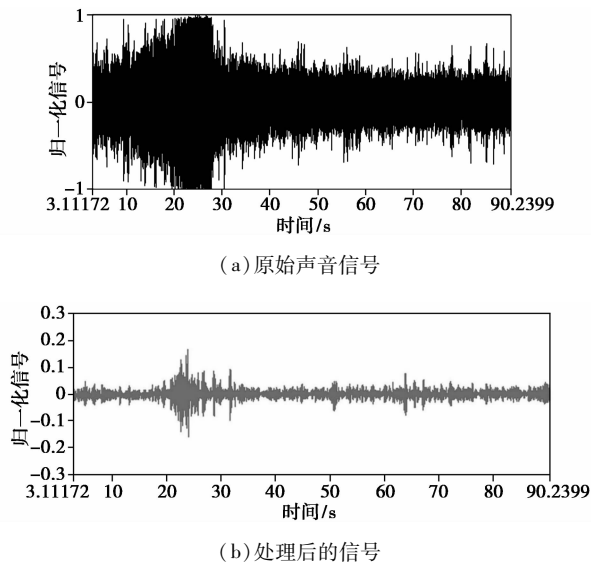


图8 1 mm 泄漏孔下采集到的泄漏声信处理信号

识别出了泄漏信号,需要对泄漏发生的位置进行定位,利用短距离平直管道的定位原理,计算模拟泄漏点1处的距离。该次试验中采集到的三轴加速度数据如图9所示。由图9可以看出,三轴输出均出现周期性的变化,在泄漏发生的24s时,共有41个周期,球体的周长为0.502 m,则泄漏点距首端的距离为 $41 * 0.502 = 20.582$  m,实际的泄漏点位置距首端为19.99 m,相对误差 $<3\%$ 。但该定位方法仅适合于水平直管段,考虑到大部分输油管道都为水平管段,且曲率半径都较大,因此该方法有一定的适用性,对竖直管段则不适用。

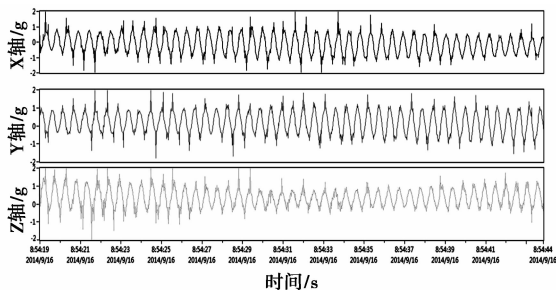


图9 三轴加速度数据

## 4 结束语

检测微小泄漏对海底管道发生大的泄漏事故可以起到预防作用。针对现有泄漏检测方法在海底管道检测领域灵敏度不高、易卡堵的问题,提出了一种基于球形检测器的检测方法,利用计算流体力学方法计算了不同管径比及流速下流体对球体的推力,认为管径比在0.7~0.8之间较为合适。设计研制了双层的内检测器结构以及内部的硬件电路。在长度为148 m的实验环道上进行实验,结果表明该检测器样机在流速 $>0.7$  m/s时,可顺利收球,且可检测到管道压力为0.5 MPa情况下,1 mm孔径的0.7 L/min的泄漏,并利用内部的加速度计进行了模拟泄漏点的定位,定位误差 $<3\%$ 。

## 参考文献

- [1] 王疆戈. 世界油气管道现状[J]. 中国石化,2004,(7):18-19.
- [2] Tian C, Yan J, Huang J, et al. Negative pressure wave based pipeline leak detection: Challenges and algorithms[C]. Suzhou, China: IEEE, 2012.
- [3] Fuchs H V, Riehle R. Ten years of experience with leak detection by acoustic signal analysis[J]. Applied Acoustics, 1991, 33(1): 1-19.
- [4] Gloria N B S, Areiza M C L, Miranda I V J, et al. Development of a magnetic sensor for detection and sizing of internal pipeline corrosion defects[J]. NDT&E International, 2009, 42(8): 669-677.
- [5] 黄鑫. 海底管线设计分析[D]. 天津: 天津大学, 2004.
- [6] 钟仕荣. 一种新型的海底输油管道检漏技术[J]. 油气储运, 2008, (11): 53-57.
- [7] 王福胜. 海底管道泄漏如何检测[J]. 中国船检, 2005, (6): 70-71.
- [8] 刘涛, 童赛美, 韦献宝. 海底管道泄漏点精确声学测向及定位技术研究[J]. 海洋技术, 2013, 32(3): 55-58.
- [9] Tang Haiyan. Determination of economical flowing velocity of product oil in pipeline[J]. Petroleum Planning & Engineering, 2007, 18(2): 33-34.
- [10] Zaidi H, Fohanno S, Tafiari R, et al. Turbulence model choice for the calculation of drag forces when using the CFD method[J]. Journal of Biomechanics, 2010, 43(3): 405-411.
- [11] Ansys Inc. ANSYS FLUENT Theory Guide. 14. 0[M]. Canonsburg: 2011: 734-736. ■