

DOI: 10.13382/j.jemi.B2003757

悬跨管道弯曲度检测特征提取方法研究

周明¹ 黄新敬² 郭霖² 曾周末²(1. 国家管网集团东部原油储运有限公司 徐州 221008; 2. 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:悬跨弯曲严重威胁着海底管道安全,可以使用不易卡堵、收发便捷的球形内检测器开展准实时检测。通过在球形内检测器内合理布置加速计及其质量分布,实现了球形内检测器在管道内的定轴转动,建立了加速度计的精确输出模型,实现了对加速度交流分量频率和直流分量的提取,用于指征管道向下弯曲。通过峰值检测或连续小波变换从加速度数据中提取直流分量,可以实现对管道弯曲的高灵敏检测。若加速度频谱特征峰为单峰,则管道没有发生悬跨弯曲;若特征峰存在展宽现象,则管道发生了悬跨弯曲。对于12 m的管道,弯曲检测分辨率可以达到1 cm。

关键词:海底管道;悬跨;弯曲检测

中图分类号: TP27; TH86 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8040

Research on feature extraction method for curvedness detection of spanning pipeline

Zhou Ming¹ Huang Xinjing² Guo Lin² Zeng Zhoumo²(1. National Pipeline Network Group Eastern Crude Oil Storage and Transportation Co., Ltd., Xuzhou 221008, China;
2. State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Bend due to spanning seriously threatens the safety of subsea pipelines. Quasi-real-time detection of pipeline spanning can be achieved by using spherical detectors (SDs) with low blockage risk and convenient launch/retrieve procedures. In this paper, via rationally arranging the accelerometer and mass distribution, the fixed-axis rotation of the SD is realized, the accurate output model of the accelerometer is formulated, and the AC component's frequency and DC component of the recorded acceleration are accurately extracted and then used to indicate the downward bend of the spanning pipeline. By extracting the DC component from the acceleration data through peak detection or continuous wavelet transform, high-sensitivity detection of pipeline bend can be achieved. If the characteristic peak of the acceleration spectrum is a single peak, the pipeline has no bend; if the characteristic peak has a broadening phenomenon, the pipeline has bend. For a 12 m pipe, the bend detection resolution can reach 1 cm.

Keywords: subsea pipeline; spanning; bend detection

0 引言

海底管道是将海上石油和天然气运输到陆地的最有效方式。随着海洋油气资源开发的蓬勃发展,海底管道的总长度迅速增加,其安全问题也愈加突出。海底管道由于洋流的冲刷会发生悬跨,悬跨管道由于失去了地基土的支撑,在自重载荷下会发生向下弯曲^[1-2]。随着冲蚀的持续发展,管道跨度长度不断增加,管道弯曲程度也越

来越严重。弯曲应力一旦超过管道钢的屈服极限,管道将发生断裂。弯曲既是海底管道破裂的重要原因,也是破裂发生前的重要预警特征。因此,必须实时监测或准实时检测管道弯曲,以便及时对其进行维修和加固。

在水下环境对海底管道进行检测和监测是一项非常具有挑战性的任务^[3-4]。水下机器人,例如遥控式水下机器人(remotely operated vehicle, ROV)和自主式水下机器人(autonomous underwater vehicle, AUV),可以通过声学或光学成像来发现海底管道的各种弯曲变形^[5-6]。但是,

由于部署成本高,检测周期长,水下机器人无法实现对海底管道弯曲的实时监测或准实时检测。分布式光纤^[7-9]可以通过实时测量管壁应变来监视管道弯曲。但是,大多数海底管线在铺管时并没有铺设光纤,而将光纤铺设到已有的海底管道上非常困难^[10]。

管道内检测法具有效率高,不受外部环境约束的优点。主流的管道内检测器有圆柱形管道内检测器(pipeline inspection gauge, PIG)和球形内检测器(spherical detector, SD)两种。PIG^[11-12]已经被广泛用于陆上管道。但是,PIG 由于体积庞大,且和管壁紧密接触,卡阻风险高,因此其在海底管道中的应用受到限制。球形内检测器^[13-14]的直径小于管道内径,可以在管道内流体的推动下自由滚动前进,因此球形内检测器具有收发球方便和阻塞风险低等优点。通过模拟和多次现场实验,已经充分验证了球形内检测器在管道内的通过能力,尤其是通过垂直管道的能力^[15]。多种类型的管道检测应用充分展示了球形内检测器的可靠性和准实时检测优势,如管道定位^[16],管道拐点和磁异常检测^[17],管道螺旋焊缝-环焊缝交点检测^[18],管道振动检测^[19]和管道屈曲检测^[20]等。因此,球形内检测器在管道形位缺陷检测方面显示出了巨大潜力。

悬跨管道因失去地基土的支持,在自身重力作用下会发生向下弯曲。而弯曲管段的不同部分的俯仰角不同。球形内检测器在管道内流体的推动下滚动前进。当球形内检测器从平直管道进入弯曲管段时,由于所受推力与重力沿着管轴分量的合力发生了改变,球体滚动速度会发生变化,并被其携带的加速度计的输出信号反映出来。球形内检测器记录的加速度信号是重力加速度和向心加速度的矢量和在三个敏感轴上的分量。如果球形内检测器的滚动状态不稳定,则很难从加速度计信号中提取出弯曲特征。

本文将研究通过合理配重,使球形内检测器绕固定轴稳定旋转前进,从而保证球形内检测器的加速度计输出模型的稳定性和精确性。然后分析加速度计与球形内检测器一起向前滚动时的输出数学模型,揭示管道弯曲特征与球形内检测器加速度信号特征之间的关系。最后提出提取管道弯曲特征的数据处理方法,并进行实验验证。

1 测量原理

旋转的球形内检测器的转动惯量越大,其角动量越大,角动量越不容易被外力矩改变,因此其稳定旋转的轴是转动惯量最大的轴。球形内检测器的外壳比配重轻得多,因此其转动惯量主要由配重决定。而扁圆形的配重绕旋转轴的转动惯量远小于绕其他两个直径轴的转动惯

量。对于其他配重情况,3个轴的转动惯量之间没有显著差异。为了使旋转轴唯一且稳定,应该使用扁圆柱形钨盘配重来最大化转动惯量,并使钨盘轴成为球形内检测器的旋转轴。在这种情况下,球形内检测器的旋转轴不易因外界干扰而改变。即使发生旋转轴偏斜,旋转轴也可以在很短的时间内重定向到旋转轴。

如图 1 所示,球形内检测器中垂面上安装有一个扁圆柱形钨盘,集中了球体 90% 以上的重量,使得球体绕钨盘轴的转动惯量远远大于绕其他两个正交轴的转动惯量。因此,球形内检测器被管道内流体推动时得以绕钨盘轴稳定地滚动前进。一个三轴加速度计被固定在钨盘上,它的一个敏感轴 Y 与球形内检测器的旋转轴平行,另外两个敏感轴之一与加速度计到转轴的垂线的夹角为 θ ,加速度计到旋转轴的距离为 r 。球形内检测器滚动时,加速度计的输出为:

$$a_x = g \sin(\omega t + \theta) + \cos\theta \omega^2 r \quad (1)$$

$$a_y = 0 \quad (2)$$

$$a_z = -g \cos(\omega t + \theta) + \sin\theta \omega^2 r \quad (3)$$

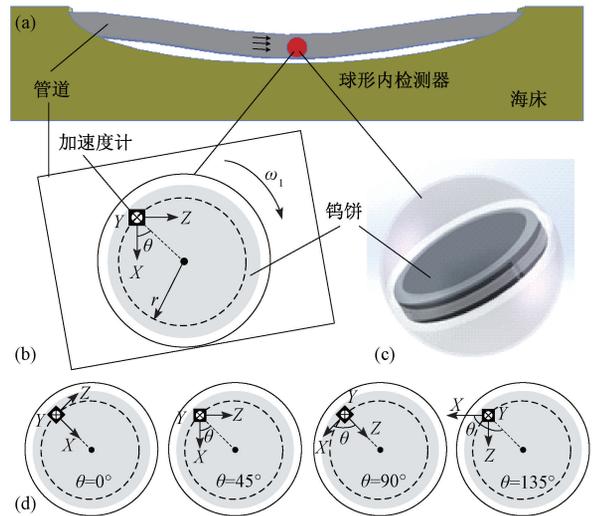


图 1 利用球形内检测器检测海底管道弯曲的过程示意图: (a) 球形内检测器在下弯管道内滚动前进; (b) 加速度计的安装方式; (c) 球内的配重钨盘; (d) θ 取不同值

Fig. 1 Schematic of detection process: (a) SD in a curved pipe; (b) posture of accelerometer; (c) counterweight of tungsten disc; (d) different θ s

其中, $\omega = 2f$, f 是球形内检测器的滚动频率。加速度计的输出中同时包含了直流分量 \bar{a} 和交流分量。其中, 直流分量 \bar{a} 是向心加速度, 交流分量是重力加速度在两个轴上的投影, $\bar{a}_x = g \sin(\omega t + \theta)$, $\bar{a}_z = g \cos(\omega t + \theta)$, $\bar{a}_y = \cos\theta \omega^2 r$, $\bar{a}_z = \sin\theta \omega^2 r$ 。与旋转轴平行的敏感轴的加速度分量为 0, 并且与旋转有关的信息完全转移到其他两个敏感轴。 \bar{a}_x 、 \bar{a}_z 的幅度相同, 并且与滚动角频率 ω 无关, 由

重力加速度常量 g 决定;而 \bar{a}_x 、 \bar{a}_z 与 ω 相关,并且也会受到 r 和 θ 的影响。当球形内检测器通过弯曲的管道时,滚动速度将发生变化,从而导致加速度的 \bar{a} 分量的频率和 \bar{a} 分量的值发生变化。 r 和 θ 会影响直流分量对滚动速度的敏感性。可以通过提取 \bar{a}_x 、 \bar{a}_z 分量、根据其频率变化或提取 \bar{a}_x 、 \bar{a}_z 分量根据其幅度变化来识别管道弯曲。

由式(1)和(3)可以看出,当加速度计位于球形内检测器的中心、 $r=0$ 时, \bar{a}_x 、 $\bar{a}_z \equiv 0$, 无法指示管道弯曲。当 $r \neq 0$ 时,可以通过直流分量 \bar{a}_x 、 \bar{a}_z 识别管道弯曲。 r 应该尽可能大,以确保加速度的直流分量足够大,可以更加灵敏地反映管道的弯曲程度。 $\theta=0^\circ$ 时, $\bar{a}_z \equiv 0$, 而 $\bar{a}_x \neq 0$, 管道的弯曲信息完全包含在 \bar{a}_x 中。当 $\theta=90^\circ$ 时, $\bar{a}_x \equiv 0$, 而 $\bar{a}_z \neq 0$, 管道的弯曲信息被完全包含在 \bar{a}_z 中。当 θ 为其他值时,为了便于分析,对各个分量做如式(4)和(5)所示的运算。

$$|\bar{a}_x \mp \bar{a}_z| = \omega^2 r \sqrt{1 - \cos 2(\theta \mp 45^\circ)} \quad (4)$$

$$\bar{a}_x \mp \bar{a}_z = \sqrt{2} g \sin(\omega t + \theta \mp 45^\circ) \quad (5)$$

由式(4)可知, θ 会影响 $|\bar{a}_x \mp \bar{a}_z|$ 的幅值,即,会影响直流分量对管道弯曲的敏感度。当 $\theta=135^\circ$ 或 45° 时, $|\bar{a}_x - \bar{a}_z|$ 或 $|\bar{a}_x + \bar{a}_z|$ 达到最大。其中,当 $\theta=135^\circ$ 时, \bar{a}_x 、 \bar{a}_z 分量大小相等、符号相反, a_x 和 a_z 波形曲线沿相反方向弯曲,为了增大灵敏度,应使用二者直流分量之差;当 $\theta=45^\circ$ 时, \bar{a}_z 分量大小相等、符号相同, a_x 和 a_z 波形曲线沿相同的方向弯曲,为了增大灵敏度,应使用二者直流分量之和。由式(5)可知, θ 对的幅值没有影响,即, θ 不会影响交流分量频率对管道弯曲的敏感度,且的幅值是或 \bar{a}_z 的幅值的 $\sqrt{2}$ 倍。

2 实验和数据

实验装置如图2所示,一条4 in 12 m 长的钢管的两端被支撑起来,形成悬跨。使用气泵将空气注入管道并推动球形内检测器向前滚动。使用三通阀控制气流速度以调节驱动力,以便在管道不弯曲时球形内检测器能够以恒定速度通过钢管。将一条聚氯乙烯管连接到钢管的上游作为缓冲,以帮助球形内检测器在进入钢管之前就完成加速过程。球形内检测器的发射高度 h 可以被调整,以使内检测器进入钢管时的速度大约等于其在钢管中的稳定滚动速度,以加快内检测器在缓冲管段里的加速过程。测试了球形内检测器对钢管不同程度弯曲的检测效果。管道的弯曲程度以挠度 γ 定义,即,管道底线中点偏离两端连线的距离。采用 $\theta=135^\circ$ 的安装配置来测试球形内检测器对不同 γ 的管道向下弯曲的检测性能。对于向下弯曲试验,将钢管的两端支撑得足够高,以使钢管可以自由向下弯曲而不接触地面。在管道的1/3和2/

3位置的底部填充两组铝块,通过调整两组铝块的厚度,来改变 γ ,即改变钢管的弯曲程度。

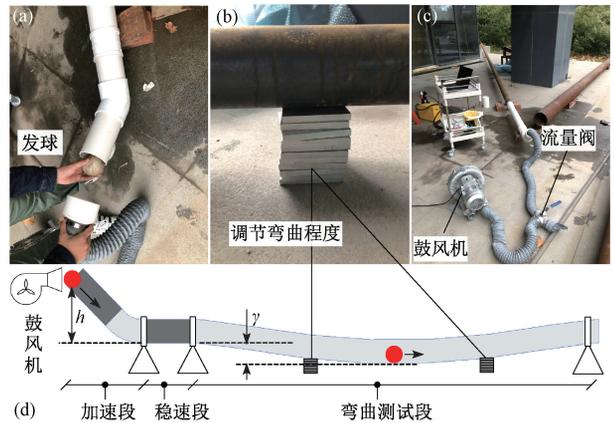


图2 管道弯曲检测实验照片和示意图

Fig. 2 Photos and schematic of experiments

球形内检测器能够稳定地定轴转动是其能够检测出悬跨管道弯曲特征的前提。为了证明布置钨盘能够保证球形内检测器寻稳定地定轴转动,测试了不同质量分布的球形内检测器在管道内的滚动稳定性:实心球、有钢柱和有钨盘。利用所记录的加速度信号来评价球形内检测器的稳定性,评价指标为加速度幅值的波动,波动越小、定轴性越好,不同实验室次数的波动越小、稳定性越好。将加速度信号分为4个部分,分别为1~5、6~10、11~15和16~20 s,用于稳定性分析,结果如表1所示,包括每个部分的平均振幅、平均振幅的方差和方差的平均值。从表1的平均幅度变化可以看出,稳定顺序为有钨盘球形内检测器>实心球球形内检测器>有钢柱球形内检测器,即质量集中在中间钨盘的球形内检测器滚动状态最稳定。有钨盘球形内检测器的加速度幅值变化非常小,可以认为其在管道中是定轴滚动的。

将加速度计安装在大约为球形内检测器半径的1/2处,令 $\theta=135^\circ$,如图1(d)所示。调节管道弯曲程度,使得 $\gamma \approx 0, 1, 2, 3, 4, 5$ cm。令球形内检测器依次滚动通过不同弯曲程度的管道,同时记录三轴加速度数据,原始数据如图3所示。可以看到,旋转轴上的加速度分量几乎为零,证明了通过在球形内检测器的中垂面布置钨盘,可以控制球形内检测器绕钨盘轴线做定轴滚动。由于加速度计不在旋转轴上,其在随球旋转的过程中会受到向心加速度,另外两个敏感轴的输出的直流分量的弯曲程度可以用来指示管道的向下弯曲程度。由于球形内检测器旋转速度发生了改变,另外两个敏感轴加速度的交流分量频率大小也可以用来指示管道的向下弯曲。

表 1 不同配重的球形内检测器运动稳定性对比

Table 1 Motion stability comparison of SDs with different counterweights ($g=9.8 \text{ m/s}^2$)

类型	实验序号	1~5 s 平均幅度	6~10 s 平均幅度	11~15 s 平均幅度	16~20 s 平均幅度	平均幅度变化
实心球	1	0.937 8	0.915 3	0.870 4	0.803 1	0.045 9
	2	0.951 0	0.985 7	0.735 7	0.903 1	0.104 1
	3	0.932 7	0.950 0	0.995 9	0.999 0	0.022 4
有钢柱	1	0.789 8	0.736 7	0.445 9	0.266 3	0.193 9
	2	0.781 6	0.758 2	0.521 4	0.396 9	0.150 0
	3	0.604 1	0.555 1	0.435 7	0.288 8	0.109 2
有钨盘	1	1.013 3	1.021 4	1.018 4	1.009 2	0.005 1
	2	1.026 5	1.032 7	1.019 4	1.017 3	0.007 1
	3	1.016 3	1.023 5	1.017 3	1.021 4	0.002 0

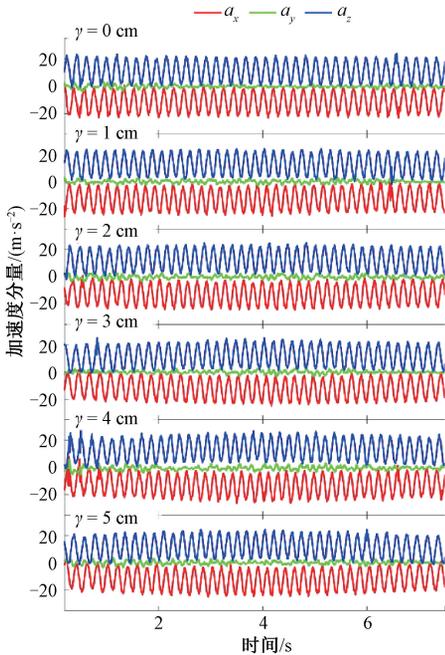


图 3 球形内检测器通过弯曲管道时记录的原始加速度信号

Fig. 3 Original acceleration signals recorded by the SD passing through curved pipes

可以看到,管道的弯曲程度越大,球形内检测器的滚动速度的变化也越大,所记录的加速度的直流分量将具有更明显的弯曲特征。当 $\gamma=0 \text{ cm}$ 时,管道不会弯曲,球形内检测器滚动速度不变,加速度数据的直流分量接近于 0。随着 γ 从 0 增加到 5 cm,管道弯曲得更加严重,加速度的直流分量也增加了,加速度的波形整体出现了向上或向下漂移。从原始数据虽然可以观察到管道的弯曲特征,但不是很直观,且分辨率不是很高。例如,很难观察到球形内检测器从两个相邻弯曲程度钢管中经过时所记录的加速度信号有何不同。现场管道动则数十公里,检测数据量巨大,需要设计合理的悬跨管道弯曲度特征提取算法,以便计算机自动处理。

3 管道弯曲度特征提取结果与讨论

从检测原理可知,当球形内检测器经过下弯管道时,由于其滚动速度改变,其所记录的加速度信号的直流分量的大小和交流分量的频率均发生改变。直流分量的改变是由于加速度计所在的位置的向心加速度发生了变化,交流分量的频率改变是由于重力加速度在 x 和 z 轴上的投影频次发生了改变。因此,可以采用两种方法提取管道下弯特征:1) 提取加速度信号的直流分量;2) 计算加速度信号的频谱。其中,直流分量的提取,采用了如下两种方法:1) 检测加速度信号的峰和谷,计算相邻峰谷值的平均值作为直流分量,结果如图 4 所示,这里使用的是 $|\bar{a}_x - \bar{a}_z|$;2) 采用连续小波变换,只保留第一层小波系数重构直流分量,结果如图 5 所示。对加速度信号交流分量做傅里叶变换,获得加速度信号的频谱,如图 6 所示,这里使用 $\tilde{a}_x - \tilde{a}_z$ 计算频谱图。

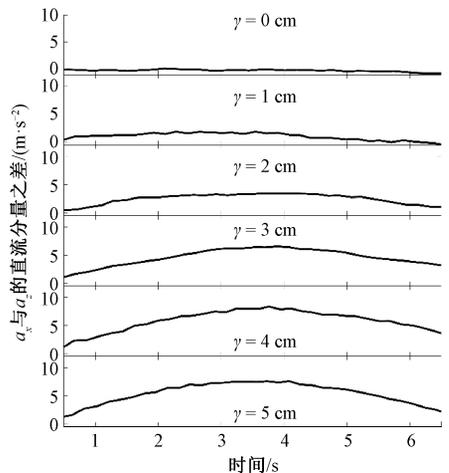


图 4 峰峰值检测法得到的不同弯曲程度时加速度直流分量

Fig. 4 DC acceleration components obtained by peak-to-peak detection method

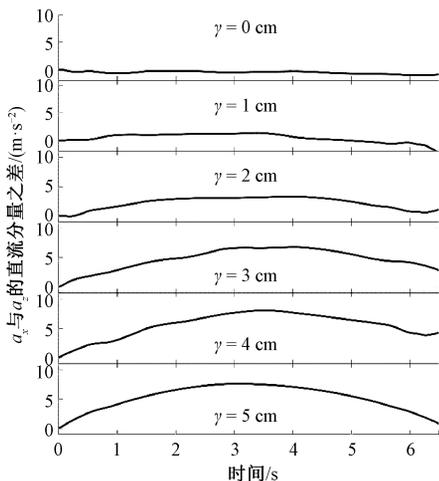


图 5 小波分解重构得到的不同弯曲程度时加速度直流分量

Fig. 5 DC acceleration components obtained by wavelet decomposition and reconstruction

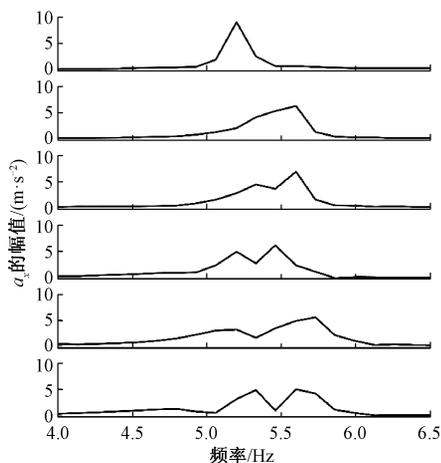


图 6 不同弯曲程度时加速度某一分量的频谱

Fig. 6 Frequency spectra of acceleration component

由图 4 和 5 可以看出,峰值检测法和小波分解法均可以提取出直流分量,小波分解法提取的直流分量更加平滑一些;小波分解能够自动滤除高频噪声。但是小波分解需要试取不同的小波基,需要提前人工试选对管道弯曲形貌保存比较完好的小波基。图 5 所示为采用 sym5 小波基分离加速度信号直流分量的结果。将直流分量提取出来以后,直流分量的弯曲特征比原始加速度波形的弯曲特征更加明显。差分直流分量随挠度 γ 的增加而显著增加,并且可以用来分辨出 12 m 管道的挠度变化量。与使用原始滚动信号时相比,使用直流分量时的弯曲检测分辨率更高。因此,在现场管道弯曲检测中,原始数据可用于识别严重弯曲,而对于轻微弯曲,则必须提取直流分量以提高灵敏度和分辨率。

从图 6 可以看出,当管道平直时,球形内检测器的滚动频率不发生变化,加速度信号的频谱是单峰的;当管道发生弯曲时,球形内检测器的滚动频率发生变化,加速度信号是一个调频信号,因此它的频谱由单窄峰变成宽峰甚至多峰;管道弯曲越严重,加速度波形被调频得越严重,频谱峰展宽得越明显。因此,可以利用加速度信号的频谱特征来判断管道是否发生弯曲。对加速度任一敏感轴(非旋转轴)的信号做频谱分析,如果频谱曲线有一个很窄的单峰,则说明球形内检测器滚动速度为恒定值、管道没有发生弯曲;如果频谱曲线有一个较宽的峰或者多个峰,即特征峰不是很尖锐,则说明球形内检测器滚动速度不恒定、管道发生了弯曲。

4 结 论

本文通过配重实现了球形内检测器的定轴转动,推导了球形内检测器滚动过程中的加速度计的输出数学模型,分析了加速度波形特征参数与管道悬跨弯曲特征之间的关系。主要结论如下,通过在球形内检测器的中垂面布置钨盘,可以控制球形内检测器绕钨盘轴线做定轴滚动;将三轴加速度计的敏感轴之一布置为与该旋转轴平行,加速度计不在旋转轴上时,则另外两个敏感轴输出的交流分量频率大小和直流分量的弯曲程度可以用来指示管道的向下弯曲。其他两个敏感轴与加速度计到旋转轴垂线的夹角不会影响交流分量频率对管道弯曲的敏感度,但是会影响直流分量对管道弯曲的敏感度;当该夹角为 135° 或 45° 时,两个敏感轴输出的直流分量之差或和,对管道弯曲的敏感度最高。通过峰值检测或连续小波变换从加速度数据中提取直流分量,可以实现对管道弯曲的高灵敏检测。提取加速度交流分量并做傅里叶变换,如果频谱特征峰为单峰,则管道没有发生悬跨弯曲;如果频谱特征峰存在展宽现象,则管道发生了悬跨弯曲。对于 12 m 的管道,弯曲挠度检测分辨率可以达到 1 cm。

本文所提出的利用球形内检测器的运动特性实现对悬跨管道弯曲度检测,具有不易卡堵、收发球便捷、可密集投放、准实时检测等优势。给出了精确的配重方案和加速度计输出模型,明确了球形内检测器结构的设计要点,保证了高质量的信号采集和高区分度的弯曲特征提取。本方法的不足之处在于,仍然属于一种定性检测,虽然可以及时发现管道安全隐患,但是不能定量评价管道弯曲挠度、俯仰角、应力等分布,不能给出精确的管道悬跨状态、安全等级和加固方案。后续将研究如何利用球形内检测器实现对上述管道悬跨状态参数的测量,将定性检测和定量测量相结合,提高球形内检测器的精确检测能力。

参考文献

- [1] 谢英, 麻秀芬, 宁海峰. 海底悬跨管道形成及破坏机理[J]. 油气储运, 2017, 36(12): 1436-1442.
XIE Y, MA X F, NING H F. Formation and damage mechanism of free spanning submarine pipeline[J], Oil & Gas Storage and Transportation, 2017, 36(12): 1436-1442.
- [2] SHITTU A A, KARA F, ALIYU A, et al. Review of pipeline span analysis [J]. World Journal of Engineering, 2019, 16(1): 166-90.
- [3] DAVIS P, BROCKHURST J. Subsea pipeline infrastructure monitoring: A framework for technology review and selection [J]. Ocean Engineering, 2015, 104: 540-548.
- [4] HO M, EL-BORGI S, PATIL D, et al. Inspection and monitoring systems subsea pipelines: A review paper[J]. Structural Health Monitoring, 2020, 19(2): 606-645.
- [5] 梁浩, 李海川, 郝兴国, 等. 海底管道失效原因及基于 ROV 的海底管道巡检技术[J]. 海管与船运, 2014, 34(4): 439-441.
Liang H, Li H CH, Hao X G, et al. Reason for subsea pipeline failure and ROV-based inspection technology of subsea pipeline[J]. Subsea pipeline & Shipping, 2014, 34(4): 439-441.
- [6] FERNANDES V H, NETO A A, RODRIGUES D D. Pipeline inspection with AUV [C]. 2015 IEEE/OES Acoustics in Underwater Geosciences Symposium (RIO Acoustics), 2015: 1-5.
- [7] NIE X, YANG Y, CUI Y, et al. Long-term monitoring system of submarine pipeline vibration based on fiber grating sensor technology [C]. 28th International Ocean and Polar Engineering Conference, 2018: 230-237.
- [8] 迟延光, 白清, 王宇, 等. 管道应力危害 BOTDR 分布式光纤检测系统[J]. 传感技术学报, 2018, 31(11): 1775-1780.
Chi Y G, Bai Q, Wang Y, et al. Distributed optical fiber system for pipeline strain hazard inspection using BOTDR[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2018, 31(11): 1775-1780.
- [9] ZHAO X F, LI L, BA Q, et al. Scour monitoring system of subsea pipeline using distributed Brillouin optical sensors based on active thermometry [J]. Optics and Laser Technology, 2012, 44(7): 2125-2129.
- [10] 武瑞娟, 竺柏康, 涂敦昌. 光纤传感技术在海底管道运行监测的应用 [J]. 中国水运, 2017, 17(5): 303-306.
WU R J, ZHU B K, TU Q CH. Optic fiber sensing technology applications in subsea pipeline operation monitoring [J]. China Water Transport, 2017, 17(5): 303-306.
- [11] HENDRIX M H W, IJSSELDIJK H P, BREUGEM W P, et al. Experiments and modeling of by-pass pigging under low-pressure conditions [J]. Journal of Process Control, 2018, 71: 1-13.
- [12] GUAN L, OSMAN A, GAO Y, et al. Analysis of rolling motion effect on SINS error modeling in PIG [C]. Proceedings of IEEE/ION PLANS, 2016: 681-686.
- [13] 周乾, 曾周末, 黄新敬, 等. 基于主动声学的管道球形内检测器示踪定位方法 [J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(8): 217-225.
ZHOU Q, ZENG ZH M, HUANG X J. et al. Tracing and localization method of spherical inner detector for pipelines based on active acoustics [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(8): 217-225.
- [14] 郭世旭. 基于球形内检测器的长输管道微小泄漏检测关键技术研究 [D]. 天津: 天津大学, 2015.
GUO SH X. Study on key technique of small leakage detection based on spherical leak detector for the long-distance oil pipeline [D]. Tianjin: Tianjin University, 2015.
- [15] 陈世利, 高春倩, 郭世旭, 等. 球形内检测器在海底立管内通过性仿真研究 [J]. 计算机工程与应用, 2015, 51(19): 265-270.
CHEN SH L, GAO CH Q, GUO SH X, et al. Research on passability of spherical inner detector in vertical segment of submarine pipeline [J]. Computer Engineering and Applications, 2015, 51(19): 265-270.
- [16] HUANG X J, CHEN SH L, GUO SH X, et al. A 3D localization approach for subsea pipelines using a spherical detector [J]. IEEE Sensors Journal, 2016, 17(6): 1828-1836.
- [17] HUANG X J, CHEN G R, ZHANG Y, et al. Inversion of magnetic fields inside pipelines: Modeling, validations, and applications [J]. Structural Health Monitoring, 2018, 17(1): 80-90.
- [18] LI J, LI M Z, HUANG X J, et al. Crosspoint Localization of Spiral and Girth Welds of Spiral Steel Pipelines [J]. IEEE Access, 2020, 8: 160387-160395.
- [19] GUO L, ZENG ZH M, HUANG X J, et al. Vibration detection of spanning subsea pipelines by using a spherical detector [J]. IEEE Access, 2018, 7: 7001-7010.
- [20] 薛亚萌. 海底管道屈曲变形检测技术研究 [D]. 天津: 天津大学, 2018.
XUE Y M. Research on bucking deformation detection technology of subsea pipelines [D]. Tianjin: Tianjin

University, 2018.

作者简介



周明分别在 1992 年、2007 年、2015 年于中国石油大学(华东)、中国石油大学(北京)、天津大学获得工学学士、工程硕士和工学博士学位,现为国家石油天然气管网集团东部原油储运有限公司仪表技术专家、高级工程师,研究方向为输油管道检测仪表和自动控制、管道运行安全监测和故障诊断、管道模拟仿真与运行优化。

E-mail: zmxhy1997@126.com

Zhou Ming received her B. Sc., M. Sc., and Ph. D. degrees from China University of Petroleum (East China), China University of Petroleum (Beijing), and Tianjin University in 1992, 2007, and 2015, respectively. Now she is an instrument expert in automation and a senior engineer at National Pipeline Network Group Eastern Crude Oil Storage and Transportation

Co., Ltd. Her main research interests include detection instrument and automation of oil pipelines, security monitoring and fault diagnosis of pipeline operation, pipeline simulation and operation optimization.



黄新敬(通信作者),分别在 2010 年和 2016 年于天津大学获得学士学位和博士学位,现为天津大学精密仪器与光电子工程学院副教授、硕士生导师,研究方向为管道缺陷检测、管道安全预警和新型管道内检测器。

E-mail: huangxinjing@tju.edu.cn

Huang Xinjing (Corresponding author) received his B. Sc. and Ph. D. degrees both from Tianjin University in 2010 and 2016, respectively. Now he is an associate professor and M.Sc. supervisor at the School of Precision Instruments and Opto-electronic Engineering, Tianjin University. His main research interests include pipeline defect detection, pipeline safety warning and new type pipeline detector.