

DOI: 10.13382/j.jemi.B2306837

基于磁传感器阵列的管道移位变形内检测*

李健¹ 刘天一¹ 王佳霖¹ 刘珊^{1,2} 黄新敬¹

(1. 天津大学精密测试技术及仪器全国重点实验室 天津 300072; 2. 北华航天工业学院机电工程学院 廊坊 065000)

摘要:海底管道的结构变形会增加管道断裂风险,从而造成极大的经济损失。本文提出一种基于球形内检测器和多通道磁传感器阵列的管道移位变形检测方法。根据磁机械效应,分析管道移位变形导致的管壁应力及管道内磁通密度变化规律。设计了检测器结构布局及磁阵列采集方案,实现了管道内空间旋转磁通密度的高覆盖率采样。设计算法将旋转磁信号转换为管道坐标系下的平动磁信号,提取管道内等高线的磁数据,实现了多通道磁信息融合,提高了磁异常检出率。最后,开展了管道竖向加载和等效横向加载等移位变形的内检测试验。结果表明,管道在纵向受力变形状态下,管道内等高线上磁通密度纵向分量的离散度降低 136.1 μT ;管道在等效横向受力变形状态下,管道内等高线上磁通密度横向分量的离散度降低 123.1 μT ;球形内检测器所测得的磁通密度离散度能够反映出管道不同方向的移位变形,且管道变形越大,磁通密度离散度越小。

关键词:管道弯曲;管道内磁通密度;磁阵列;球形内检测器

中图分类号: TN06 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4010

Pipeline displacement and deformation detection based on magnetic sensor array

Li Jian¹ Liu Tianyi¹ Wang Jialin¹ Liu Shan^{1,2} Huang Xinjing¹

(1. State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. School of Mechanical and Electrical Engineering, North China Institute of Aerospace Technology, Langfang 065000, China)

Abstract: The structural deformation of subsea pipelines increases the risk of pipeline fracture, which can cause significant economic losses. This paper proposes a pipeline displacement and deformation detection method based on a spherical inner detector equipped with a multi-channel magnetic sensor array. The stress in the pipe wall and the change of the magnetic flux density inside the pipeline caused by the displacement deformation of the pipeline are analyzed according to the magneto-mechanical effect. The structure layout of the detector and the magnetic signal acquisition scheme are designed. The collection of spatial rotational magnetic flux density information inside the pipeline is realized, and the rotational magnetic signal is converted into translational magnetic signal in the pipeline coordinate system. By extracting the magnetic data on the contour lines inside the pipeline, multiple channels of signals are integrated to increase the space sampling coverage of the magnetic signal inside the pipeline. Finally, internal inspection tests were conducted on pipeline vertical and equivalent lateral loading-induced displacement deformation. The results showed that under longitudinal force deformation state, the magnetic flux density longitudinal component dispersion decreased by 136.1 μT on the contour line inside the pipeline; under equivalent lateral force deformation state, the magnetic flux density lateral component dispersion decreased by 123.1 μT on the contour line inside the pipeline. The magnetic flux density dispersion measured by the spherical internal detector can reflect the displacement deformation of the pipeline in different directions, and the larger the deformation of the pipeline, the smaller the magnetic flux density dispersion.

Keywords: pipeline bending; internal magnetic field of the pipeline; magnetic array; spherical inner detector

收稿日期: 2023-08-21 Received Date: 2023-08-21

* 基金项目: 国家自然科学基金(62073233)、天津市自然科学基金(21JCQNJC00690)、河北省教育厅高等学校科学研究项目(QN2020179, ZC2021004)资助

0 引言

管道因热屈曲、悬跨、地基沉降以及外力拖拽而发生移位变形时,变形管段普遍伴有应力集中现象,并随着时间推移不断发展恶化,大大增加了管道疲劳断裂风险^[1]。海底油气管道在复杂的海洋环境中,受到洋流冲刷与海床运动的影响,容易发生漂移、悬跨等移位变形,埋地管道受埋地管道土压力,管道受到使用载荷,动载荷等多种载荷影响产生管道沉降变形,同时造成管道的横向变形和横截面变形,导致管道发生破裂^[2]。管道受力移位变形已经成为管道事故发生的重要原因^[3],检测管道应力变化对于检测管道位移形变具有重要意义。因此,对在役管道进行周期性、高效率、低成本的移位变形检测是保证管线能够长期稳定运行的重要环节^[4],有助于降低管道事故风险、延长管道的服役年限。

检测管道移位变形的的方法,主要包括分布式传感法,水下机器人法(对海底管道)和内检测法这3类。分布式传感法主要在海底和陆地管道上铺设紧贴管壁的光纤光缆,通过检测光纤光缆的形变,结合梁大变形理论中应变与挠度的关系,来实现管道移位变形检测^[5]。光纤检测形变分为 ϕ -OTDR法,B-OTDR法,光纤光栅法(fiber Bragg grating, FBG)等。 ϕ -OTDR法利用强相干激光器作为光源,在光纤内部产生瑞利散射,通过分析和检测背向瑞利散射光的相位变化,实现对光纤形变的检测;B-OTDR法利用激光脉冲对光纤进行扫描,反射光在光纤中发生干涉形成布里渊散射信号,通过检测布里渊散射光的相位变化,得到管壁上光纤的应变^[6];光纤光栅离散地粘贴在管壁,导入宽带光源,光栅反射光谱形成布拉格反射峰^[7],光纤受到应变时,反射峰的位置发生偏移,通过测量反射峰位置和振幅变化从而实现光纤的形变检测。

水下机器人法主要有遥控潜水器(remotely operated vehicle, ROV)和自治式无缆水下机器人(autonomous underwater vehicle, AUV)两种,其搭载多种检测设备,识别管线并记录位置,通过多传感器数据融合实现对海底管道移位变形的检测。外检测法普遍存在检测难度大、检测成本高、单次检测周期长等问题^[5],人们发展出了管道内检测法,目前主要分为柱形内检测器(PIG)和球形内检测器(SD)两种检测器平台^[8]。内检测法使用的检测器在管道内压力或流体的驱动下进行移动式检测^[8],携带惯性测量单元(inertial measurement unit, IMU)和电磁发射机进行定位^[9],具有检测效率高、不受管外环境约束、成本较低等优点。PIG本身为圆柱形,携带传感器沿管道环向排布,在近壁位置对管道全方位检测,但其体型庞大结构复杂,存在较高卡堵风险;SD是一种可以携带

多种传感器的球形内检测器,由于其直径小于管道内径,体积占用管道空间较小且外壳为球体,具有较好的通过性^[10]。其在管道内流体的推动下滚动行进,能够胜任多种类型的管道检测任务^[11-12]。

本课题组提出了一系列基于SD的管道内检测方法^[13-21],通过分析所记录的声、磁、加速度等多种传感数据,实现对管道走向及移位变形的检测。研究了管道内磁场分布规律,推导了考虑磁屏蔽模型的管道内磁场坐标与地球坐标系的变换关系,实现了对管道地理坐标的测量;为了实现精确的SD传感模型的建立,提出了提高SD姿态稳定性能的措施,通过优化设计SD的转动惯量比,使SD稳定地绕着唯一的法向轴滚动^[17];Huang等^[15]通过SD搭载磁传感器,利用SD滚动的运动学原理,建立了任意旋转轴的旋转磁场的磁反演方法;利用J-A力耦模型,对管道磁机械效应开展了研究,分析了屈曲管道受力状态下,材料相对磁导率和应力之间的函数关系^[19];通过SD搭载单个磁传感器测量管道内部磁场,通过比较管道受力弯曲后内磁场单一性峰值和双峰特性,从而测量出管道的侧向屈曲^[20]。

基于前期的研究,单个磁传感器能够采集到管道较大变形引起的磁异常信息,但是其测量轨迹的空间覆盖密度低,磁场测量不完全,容易丢失管道内微弱的磁异常特征^[21]。此外,上述研究也没有对SD滚动状态下磁场数据进行坐标变换及有效信息提取,不能直观反映测得滚动磁场与管道静态坐标系下空间位置的对应关系。因此,本文提出多通道磁传感器阵列方案,有效提高SD磁信息空间采样率。通过建立滚动坐标系与管道坐标系关系,利用磁传感器旋转角度与扫描轨迹对应高度的几何关系,提取管道内等高线上的磁通密度数据,实现对管道内空间高密度多通道数据采集及等高线数据提取。根据磁机械效应,分析管道移位变形状态下管内磁通密度分布特征;设计管道自然悬跨、竖向移位、横向移位的SD检测实验,分析管道在不同受力状态下,管道内等高线磁通密度离散变化规律。

1 理论分析

1.1 磁机械效应

移位变形管道伴有应力分布变化。管道内部存在背景磁场以及经过磁化后的剩磁,由于磁机械效应^[17],管道的磁化状态也会随着应力的改变而改变。最终,管道内磁通密度分布会随着移位变形的发生而呈现特殊的变化规律。经典的J-A力磁耦合模型描述了磁化与应力之间的关系,如式(1)所示:

$$\frac{dM}{d\sigma} = \frac{\sigma}{\xi E}(M_{an} - M) + c \frac{dM_{an}}{d\sigma} \quad (1)$$

其中, σ 为应力, M 为磁化强度, E 为铁磁性材料杨氏模量, ξ 铁磁性材料能量相关系数, c 为初始磁化率与初始无滞后磁化率的比值, M_{an} 为无滞后磁化。同时, 磁化强度 M , 无滞后磁化 M_{an} 及不可逆磁化 M_{irr} 之间存在关系如式(2)所示:

$$\begin{cases} M = c(M_{an} - M_{irr}) + M_{irr} \\ dM_{irr} = \frac{1}{\xi} \frac{\sigma}{E} (M_{an} - M_{irr}) d\sigma \end{cases} \quad (2)$$

基于磁机械效应原理可知, 铁磁材料所受应力变化能够导致其磁化强度发生变化, 从而影响空间磁通密度变化, 因此, 可通过测量管道内磁通密度变化检测出管道因受力导致的移位变形。

利用 COMSOL 建立有限元仿真模型。管道长 1 m, 内径 0.05 m, 壁厚 10 mm。在管道中心分别施加 0、5 000、10 000 N 竖直向下的力, 管道产生移位变形。由图 1(a) 可见, 在管道中部受力时, 管壁各个地方的应力变化不同; 由图 1(b) 可见, 管道中部受力时, 管壁各个地方的磁化模不同, 磁化分布不同; 图 1(c) 为仿真管道内部 10 个等距截面上的磁通密度模, 可见管道内部不同位置处的磁通密度发生了不同的变化。

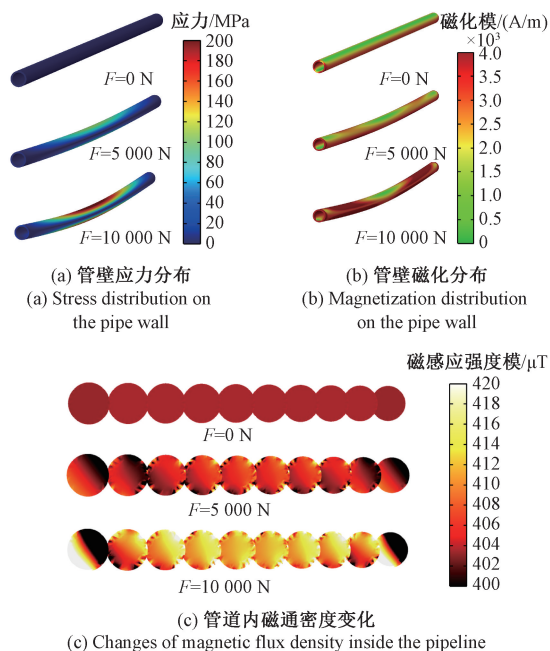


图 1 移位变形管道的力磁耦合仿真

Fig. 1 Simulation of magnetomechanical coupling in displaced and deformed pipelines

1.2 磁阵列及坐标变换

SD 内部硬件结构如图 2 所示, SD 内赤道处安装圆形电路底板, 底板边缘处附近分布 8 个磁传感器, 加速度计置于 SD 中心, 用于计算 SD 在管道内的旋转姿态与 SD

里程。球壳直径为 80 mm, 小于实验管道直径的 80%, 以保持良好的通过性。内部采用钨块和钨柱配重, 整体平均密度约为 1.4 g/cm^3 , 转动惯量比 $\eta = I_x/I_z = I_y/I_z \approx 1.7$ 。这样 SD 能够在管道内实现稳定的定轴滚动^[22]。

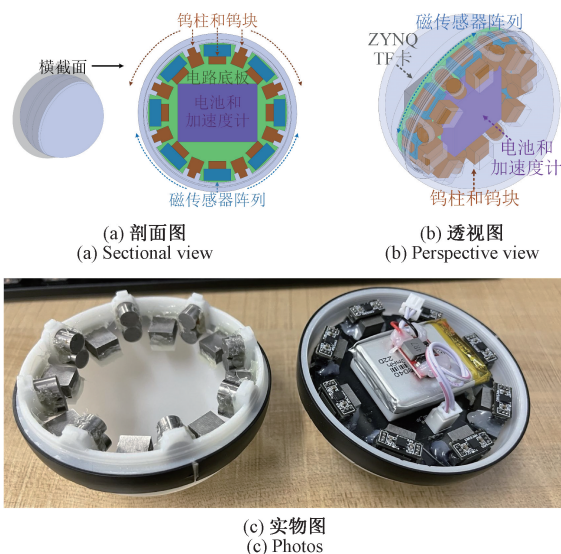


图 2 SD 结构

Fig. 2 SD structure

SD 滚动过程中, 磁传感器随之转动, 采集到的是在不同位置和旋转角度时的磁通密度数据。因此, 需要将传感器旋转坐标下的滚动磁通密度数据变换为管道坐标系下的平动磁通密度数据。定义管道坐标系 $O_1-X_1Y_1Z_1$, 磁传感器坐标系 $O_2-X_2Y_2Z_2$, SD 坐标系 $O_3-X_3Y_3Z_3$ 分别如图 3 所示。加速度计固定于球心, 因此加速度坐标系同 SD 坐标系 $O_3-X_3Y_3Z_3$ 。管道俯仰角为 θ 。

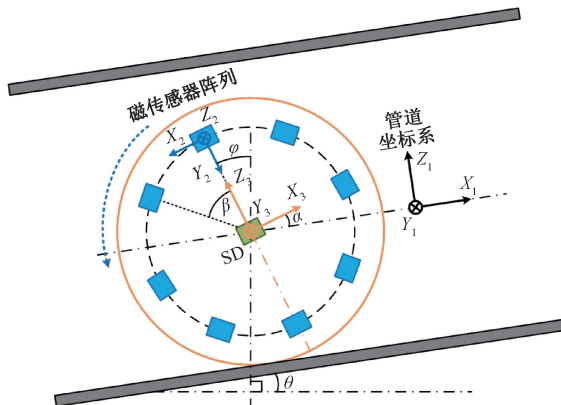


图 3 坐标系变换关系

Fig. 3 Relationship diagram of coordinate system transformation

传感器在 SD 内的位置在装配时已经固定, 且 SD 能够实现在管道内稳定的定轴旋转, 即 SD 坐标系的 Y 轴平行于管道坐标系的 Y 轴, 磁传感器绕着 SD 的滚动轴进行

转动,因此仅需考虑在二维平面上的旋转,即从SD二维坐标系 $O_3-X_3Z_3$ 转变到管道二维坐标系 $O_1-X_1Z_1$,建立旋转矩阵如下:

$$\mathbf{R}_{13}(t) = \begin{bmatrix} \cos(\alpha(t)) & 0 & -\sin(\alpha(t)) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(\alpha(t)) & 0 & \cos(\alpha(t)) \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\alpha(t) = \varphi - \theta = -(\arctan(a_x(t)/a_y(t)) + \pi/2) - \theta \quad (4)$$

其中, φ 为第1个传感器坐标系 Y 轴与重力方向的夹角。

对于磁传感器坐标系到SD坐标系,磁传感器坐标系的 X 轴平行于SD坐标系的 Y 轴,即磁传感器坐标系的 Z 轴数据与SD坐标系 Y 轴数据等价,二维坐标变换矩阵为:

$$\mathbf{R}_{32}^i = \begin{bmatrix} -\cos(\beta^i) & \sin(\beta^i) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -\sin(\beta^i) & -\cos(\beta^i) & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中, β_i 是第 i 个传感器 Y 轴与球坐标系 Z 轴的夹角,即 $\beta^i = 45^\circ \times i$; $\mathbf{R}_{32}^i$ 是第 i 个传感器的二维坐标变换矩阵,由此可得整体变换:

$$\mathbf{B}_1(t) = \mathbf{R}_{13}(t)\mathbf{B}_3(t) = \mathbf{R}_{13}(t)\mathbf{R}_{32}^i\mathbf{B}_2^i(t) \quad (6)$$

其中, $\mathbf{B}_1(t)$ 为管道坐标系下的三轴磁通密度, $\mathbf{B}_2^i(t)$ 为第 i 个磁传感器坐标系 $O_2-X_2Y_2Z_2$ 下的三轴磁通密度, $\mathbf{B}_3(t)$ 为SD坐标系 $O_3-X_3Y_3Z_3$ 下的滚动三轴磁通密度。

1.3 等高线数据提取

转换后的平动磁通密度为单个磁传感器在类摆线轨迹上测得的数据,其在类摆线运动的过程中依然存在周期性的上下移动。分别提取各通道磁传感器旋转至特定角度处的磁通密度数据,即在磁传感器阵列的覆盖面积中设定空间等高线,提取各个传感器在等高线位置的磁通密度数据并重新整合为一条曲线,从而得到管道内各等高线上的磁通密度 $B_c(t)$ 。SD 按照角速度 ω 进行滚动,第 i 个传感器的扫描轨迹对应的高度 h^i 为:

$$h^i = R(\cos(\omega t^{h^i} - \beta^i) + 1) \quad (7)$$

其中, R 为SD的半径, t^{h^i} 为第 i 个传感器滚动到 h^i 高度的时间,因此可得,高度 h 的磁通密度数据即为各个传感器 t^{h^i} 时刻的数据。

处理后的整合磁通密度 $B_c(t)$ 相当于磁传感器在各等高线上做直线平移运动的测量结果,传感器轨迹和等高线数据提取点如图4所示。

1.4 空间采样密度效果验证

为了验证利用磁传感器阵列提高空间采样密度的优势,进行了如图5所示的钢板磁异常测量实验。磁传感器阵列搭载在圆柱体上,在钢板上滚动行进,模拟SD的

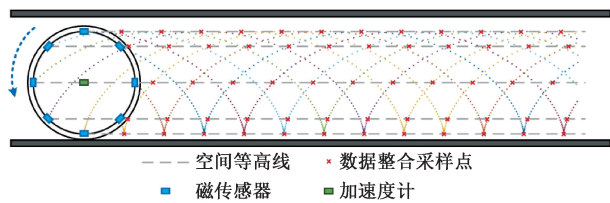
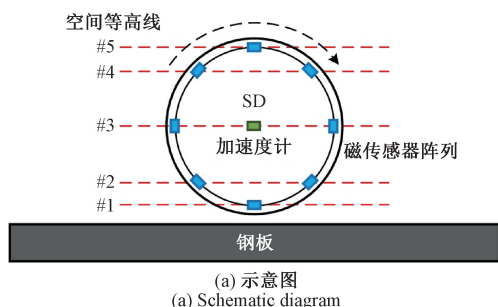


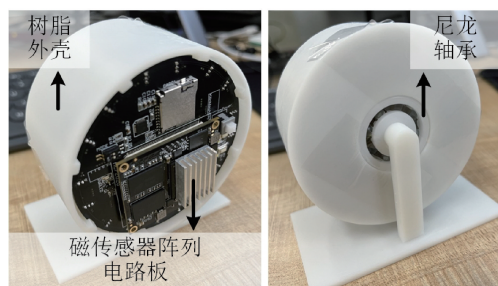
图4 传感器阵列等高线数据整合示意图

Fig. 4 Schematic diagram of contour data integration of the sensor array data

定轴滚动,并记录旋转磁通密度。装置行进总路程为70 cm,在距离起点约30 cm处使用磁铁对钢板进行磁化,产生磁异常。



(a) 示意图
(a) Schematic diagram



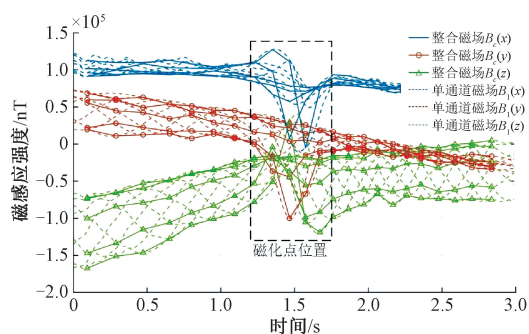
(b) 实验照片
(b) Experimental photos

图5 空间磁通密度高密度采样的优势验证实验

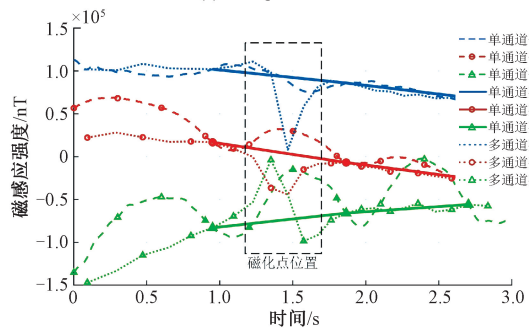
Fig. 5 Experimental verification of the advantages of high-density sampling of spatial magnetic flux density

磁阵列测量结果如图6(a)所示,可以看出在磁阵列滚动至磁化点时,磁通密度数据 B_c 出现明显波动变化,可以有效检测出磁特征点。同时需要注意的是,同轴向的空间等高线磁通密度数据 B_c 并非每一条都发生了明显波动,距离钢板较近的等高线磁通密度波动明显,而部分距离钢板较远的磁通密度曲线几乎没有变化,证明在距离钢板不同高度位置的磁通密度差异较大。

将多通道测量结果与仅使用某一单通道磁传感器记录的数据对比,如图6(b)所示。该单传感器在阵列滚动过程中的类摆线运动轨迹恰好距离磁化点较远,测得的单通道平动磁通密度数据如图6中段虚线所示,在传感器的类摆线运动过程中周期性波动,无法反映出磁化点



(a) 多通道数据
(a) Multiple channel data



(b) 单通道数据
(b) Single channel data

图 6 磁化钢板测得磁通密度

Fig. 6 Magnetic field of a locally magnetized steel plate

的磁特征。证明了单传感器在实际检测中容易丢失管道的磁特征,体现了多通道磁传感器阵列相对于单通道传感器在空间磁通密度测量上的优势,测量结果更准确,不易丢失磁特征。

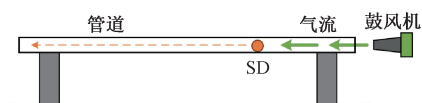
2 实验设计

2.1 实验设计

基于 SD 的管道位移变形检测实验的装置如图 7 所示。管道材质为 X52 碳钢,长 12 m,直径 108 mm,壁厚 3 mm。实验过程中,SD 于管道一端置入,在鼓风机的气流的推动下滚动行进,于管道另一端回收。SD 在管道内保持定轴滚动行进,同时采集管道内的磁通密度数据,得到管道内静态空间磁通密度分布。分别对管道施加不同的载荷,使管道发生不同程度的弯曲、承受不同程度的弯曲应力,对比管道在不同移位变形情况下的空间磁通密度分布规律和特点,证明通过高密度空间磁通密度测量实现检测管道移位变形的有效性。

2.2 实验过程

1) 悬跨管道内磁通密度测量:对自然悬跨状态下的管道进行磁化,改变其初始内部磁通密度。如图 8(a)所示,使用 SD 测量自然悬跨管道内的初始磁通密度。



(a) 实验示意图
(a) Schematic diagram



(b) 实验照片
(b) Experiment photos

图 7 管道内空间磁通密度测量实验

Fig. 7 Magnetic field measurement inside a steel pipe using the SD

2) 管道竖向受力变形检测:如图 8(b)所示,在管道中部悬挂重物,使得管道产生竖向变形,使用 SD 测量其内部的空间磁通密度。

3) 管道等效横向受力检测:如图 8(c)所示,首先使管道沿轴旋转 90°,在管道中部悬挂重物以向其施加向下的力,管道内空间磁通密度在竖向力的作用下发生变化。然后去掉重物并将管道反转 90°恢复为绕轴旋转前的状态,则此时管道内空间磁通密度等同于在管道中部施加横向载力后的变化结果,使用 SD 测量其内部的空间磁通密度。

2.3 数据处理流程

SD 采集到旋转磁通密度数据之后,按照如图 9 所示的流程处理数据。

1) 数据预处理:对原始磁数据进行矫正,消除软硬磁干扰;对磁传感器数据进行零相位滤波,在避免相位延迟的同时去除数据的扰动和噪声等。

2) 坐标变换:利用各个磁传感器的装配角 β ,以及加速度数据计算出的 SD 转动姿态角 α ,对各通道磁数据进行坐标变换,将滚动磁通密度 B_2 变换为平动磁通密度 B_1 。

3) 等高线磁数据提取:平动磁通密度为单个磁传感器在类摆线轨迹上测得的数据,利用等高线提取算法,提取类摆线上等高线处的磁数据,等效于磁传感器在各等

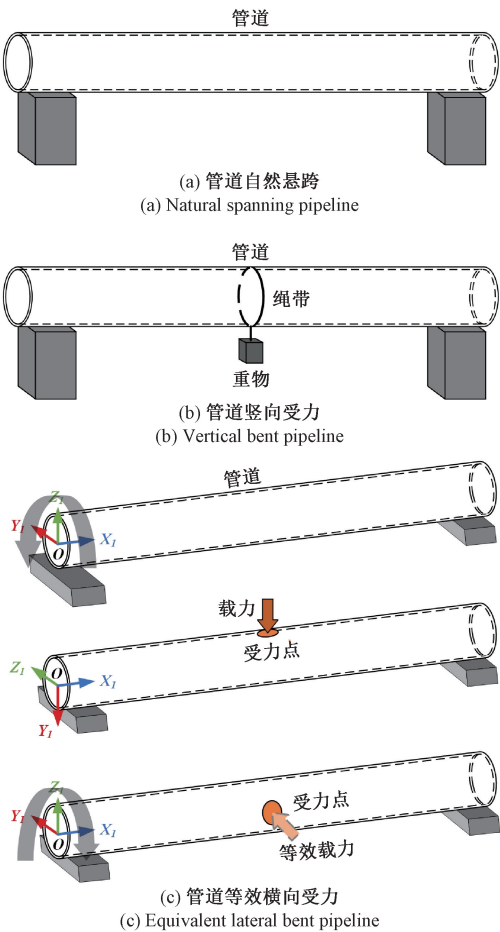


图8 管道受力示意图

Fig. 8 Schematic diagram of pipeline stress

高线上做直线平移运动。

4) 空间磁通密度绘制:利用加速度计检测得到的SD的行进里程,将转换后的管道内磁通密度数据从时间基准对齐变换为空间基准对齐,得到管道内各条与管轴平行的直线上的磁通密度。

3 结果与讨论

管道受力变形检测实验中使用无磁性重物悬挂在管道中部来改变管道的受理状态。自然悬跨状态下管道中部挠度为4 cm,增加80 kg重物后管道中部的挠度为9 cm。分别取这两种不同载力情况下距离管端2~10 m稳定受力管段的数据进行分析,将测量到的磁通密度数据绘制如图10所示。

观察图10等高线磁通密度分布情况,纵向受力和横向受力后管道内磁通密度与自然悬跨状态下的相比,磁通密度 B_{cx} 和 B_{cy} 分量的离散度和平均磁通密度发生了较为明显的变化。计算得到管道内空间磁通密度在三轴

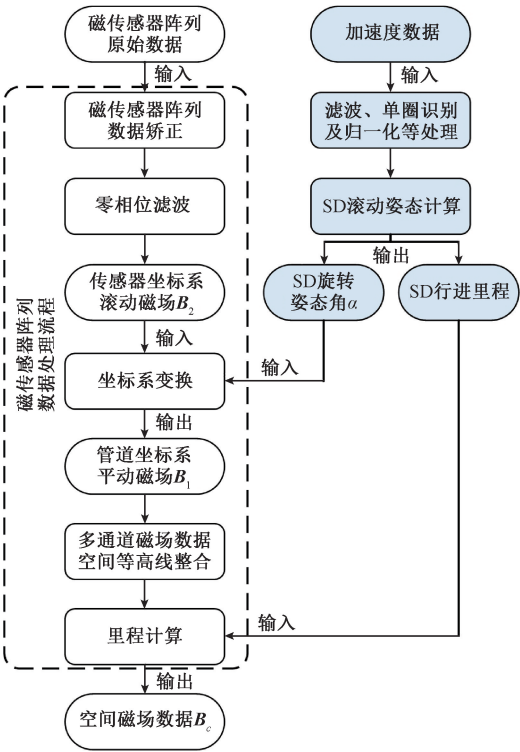


图9 磁数据处理流程

Fig. 9 Flow chart of magnetic data processing

方向上的整体平均磁通密度 B_c 、空间等高线间的 B_c 离散极值差,如表1所示。具体分析纵向受力和横向受力对磁通密度的影响。

表1 竖直受力管道内部磁通密度变化
Table 1 Changes in magnetic flux density inside the pipeline under vertical force

受力状态	磁分量	平均值	离散度极值
自然悬跨	B_{cx}	0.189 2	0.028 6
	B_{cy}	0.738 8	0.228 7
	B_{cz}	0.326 7	1.000 8
增加重物	B_{cx}	0.183 1	0.015 8
	B_{cy}	0.660 7	0.300 6
	B_{cz}	0.275 2	0.869 1

注:单位100 μT 。

由表1中的统计分析可以看出,管道在竖向受力后,空间等高线磁通密度 B_{cx} 分量离散程度减小,下降136.1 μT ,平均磁通密度 B_{cy} 和 B_{cx} 分量整体正向降低,这些变化能够作为管道移位变形定性检测的重要依据。由表2中的统计分析可以看出,管道在横向受力发生移位变形后,其内部空间磁通密度发生明显变化,等高线间磁通密度 B_{cx} 和 B_{cy} 分量的离散度都减弱,其中受力方向 B_{cy} 下降123.1 μT ,且整体平均磁通密度都正向降低。管道在横向受力后和发生竖向移位变形后,其内部的磁通密度都有变化,共性特征为:与管道移位变形方向

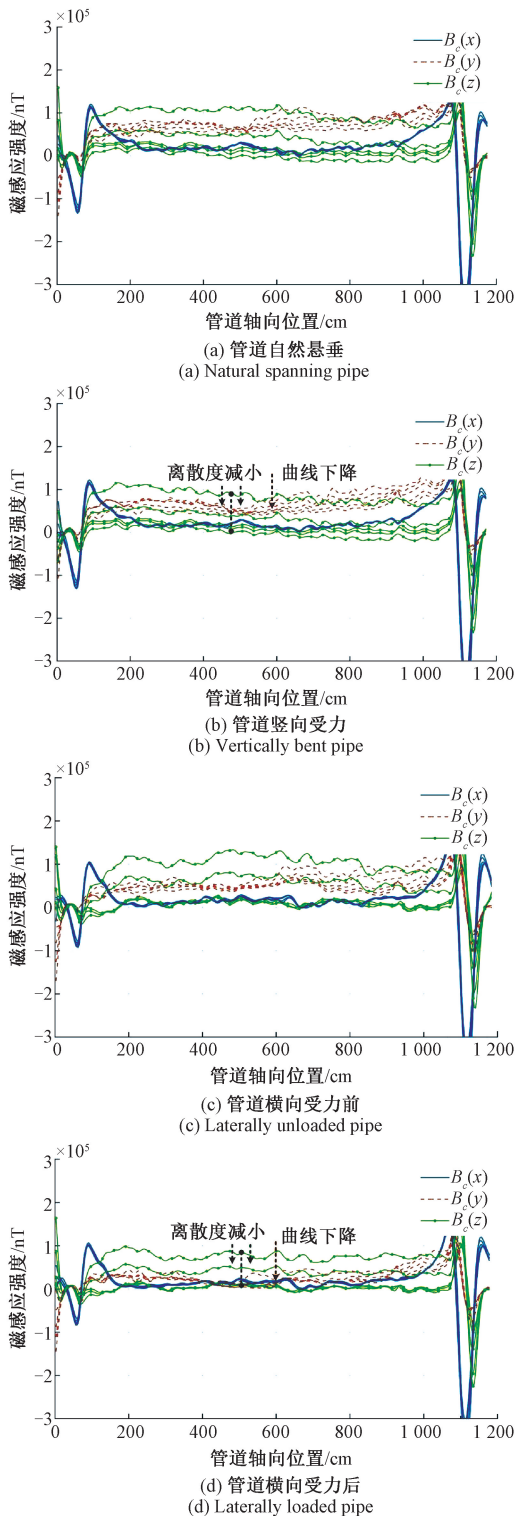


图 10 管道在不同受力情况下等高线上的磁通密度 B_c 。
Fig. 10 Magnetic flux density B_c on the contours
inside the pipeline under different loads

同向的磁通密度分量的离散度会发生明显下降。实验结果证明,利用 SD 进行管道内空间磁通密度测量,能够有

效检测管道的移位变形。

表 2 横向受力磁化管道内部磁通密度变化
Table 2 Changes in magnetic flux density inside
the pipeline under lateral force

受力状态	磁分量	平均值	离散度极值
自然悬跨	B_{cx}	0.146 4	0.027 4
	B_{cy}	0.538 2	0.279 2
	B_{cz}	0.401 7	0.982 4
增加重物	B_{cx}	0.137 3	0.036 7
	B_{cy}	0.235 2	0.156 1
	B_{cz}	0.255 0	0.724 4

注:单位 100 μT

4 结 论

本文根据磁机械效应,分析了移位变形管道在受力情况下其内部磁通密度的空间分布特征,提出一种利用磁传感器阵列对管道内部空间磁通密度进行测量并提取管道移位变形磁特征,进而实现对管道任意方向形变移位检测的方法。

为实现对管道内磁通密度的高密度采集,本文开发了多通道磁传感器阵列 SD,具有空间覆盖度高、不易丢失局部磁特征的优势。针对 SD 滚动状态下,管道内不同等高线磁通密度测量这一难点,开发了旋转阵列磁测数据处理算法,将各个磁传感器在摆线轨迹上测得的旋转磁通密度整合为管道内空间等高线上的平动磁通密度。最后,利用多通道磁传感器阵列 SD 以及旋转阵列磁测数据处理算法,开展了管道自然悬跨、竖向移位、等效横向移位检测实验。

实验结果表明,管道内空间磁场测量 SD 能够通过磁通密度离散度变化可靠地识别出管道竖向与横向移位变形。管道在纵向受力变形状态下,管道内等高线上磁通密度纵向分量的离散度降低 136.1 μT ;管道在等效横向受力变形状态下,管道内等高线上磁通密度横向分量的离散度降低 123.1 μT 。管道受力变形程度越大,磁通密度离散度越小,且敏感度高的磁分量与移位变形方向相同。通过管道内空间磁场测量能够实现管道任意方向移位变形的可靠检测。充分发挥 SD 所搭载的磁传感器阵列空间采样密度高及 SD 在管道内通过性好的优势,进一步优化 SD 重量和功耗,该方法将广泛应用于现场管道缺陷的快速检测中。

参考文献

[1] 李秋扬, 赵明华, 张斌, 等. 2020 年全球油气管道建设现状及发展趋势 [J]. 油气储运, 2021, 40(12): 1330-1337.
LI Q Y, ZHAO M H, ZHANG B, et al. Current

- situation and development trends of global oil and gas pipeline construction in 2020 [J]. Oil and Gas Storage and Transportation, 2021, 40 (12): 1330-1337.
- [2] GONG X N, SUN ZH J, YU J L. Analysis of displacement of adjacent buried pipeline caused by ground surcharge[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(2): 305-310.
- [3] 林行素, 鞠成伟. 长输管道失效机理及其故障树分析[J]. 装备制造技术, 2010 (9): 168-171.
- LIN X S, JU CH W. Failure mechanism of long-distance pipeline and its fault tree analysis [J]. Equipment Manufacturing Technology, 2010 (9): 168-171.
- [4] 王佳豪, 柳文欣, 杨奕. 管道泄漏检测与定位技术研究及应用现状[J]. 石油工业, 2023, 39(1): 47-50.
- WANG J H, LIU W X, YANG Y. Research and application status of pipeline leakage detection and location technology [J]. Petroleum Industry, 2023, 39 (1): 47-50.
- [5] 毅力琦, 丁克勤, 钱才富, 等. 长输管道沉降变形分布式监测方法[J]. 无损检测, 2011, 33(11): 55-57.
- YI L Q, DING K Q, QIAN C F, et al. Distributed monitoring method for settlement and deformation of long-distance pipelines [J]. Non-Destructive Testing, 2011, 33 (11): 55-57.
- [6] 许滨华, 何宁, 何斌, 等. 基于分布式光纤传感器的管道受弯变形监测试验研究[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(8): 20-30.
- XU B H, HE N, HE B, et al. Experimental research on pipe bending deformation monitoring based on distributed optical fiber sensors [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40 (8): 20-30.
- [7] 李昌航, 何欣, 张黎, 等. 寒区管道光纤光栅变形监测技术试验研究[J]. 昆明理工大学学报(自然科学版), 2020, 45(4): 115-119.
- LI CH H, HE X, ZHANG L, et al. Experimental research on fiber grating deformation monitoring technology for pipelines in cold regions [J]. Journal of Kunming University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2020, 45 (4): 115-119.
- [8] 辛佳兴, 陈金忠, 李晓龙, 等. 油气管道内检测技术研究前沿进展 [J]. 石油机械, 2022, 50 (5): 119-126.
- XIN J X, CHEN J ZH, LI X L, et al. Frontier progress in research on internal inspection technology of oil and gas pipelines [J]. Petroleum Machinery, 2022, 50 (5): 119-126.
- [9] 杨理践, 李晖, 靳鹏, 等. 管道地理坐标测量系统 SINS 安装误差标定 [J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(1): 40-48.
- YANG L J, LI H, JIN P, et al. Calibration of installation error for pipeline geographic coordinate measurement system SINS [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36 (1): 40-48.
- [10] 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. Simulation study on the passability of spherical internal detectors in submarine risers [J]. Computer Engineering and Applications, 2015, 51 (19): 265-270.
- [11] 王怀君, 耿冰, 袁振斌. 浅谈智能球技术在供水管道检测中的应用 [J]. 净水技术, 2019, 38(S1): 340-341, 373.
- WANG H J, GENG B, YUAN ZH B. Discussion on the application of smart ball technology in water supply pipeline inspection [J]. Water Purification Technology, 2019, 38 (S1): 340-341, 373.
- [12] 苏林. 长输管道智能球检漏技术应用 [J]. 管道技术与设备, 2017(1): 30-31, 46.
- SU L. Application of intelligent ball leakage detection technology in long distance pipeline [J]. Pipeline Technology and Equipment, 2017(1): 30-31, 46.
- [13] 黄新敬. 海底管道地理坐标测量技术研究 [D]. 天津: 天津大学, 2016.
- HUANG X J. Research on geographic coordinate measurement technology for submarine pipelines [D]. Tianjin: Tianjin University, 2016.
- [14] 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, 2017, 17(6): 1828-1836.
- [15] 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.
- [16] ZHANG Y, XUE Y M, HUANG X J, et al. Characterizations of magnetic field distributions inside buckling pipelines [J]. Applied Computational Electromagnetics Society Journal, 2018, 33 (12): 1475-1482.
- [17] GUO L, ZENG ZH M, HUANG X J, et al. Vibration detection of spanning subsea pipelines by using a spherical detector [J]. IEEE Access, 2019, 7: 7001-7010.
- [18] ZHANG Y, XUE Y M, HUANG X J, et al. Pipeline inclination measurements based on a spherical detector

- with magnetic proximity switches [J]. IEEE Access, 2018, 6: 39936–39943.
- [19] 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 detection technology for buckling deformation of submarine pipelines [D]. Tianjin:Tianjin University, 2018.
- [20] 李明泽. 海底管道地理坐标精确测量关键技术研究 [D]. 天津:天津大学, 2020.
- LI M Z. Research on key technologies for precise measurement of geographical coordinates of submarine pipelines [D]. Tianjin:Tianjin University, 2020.
- [21] LI J, LI M Z, HUANG X J, et al. Lateral pipeline buckling detection via demagnetization and interior magnetic measurement [J]. IEEE Access, 2020, 8: 7949-7957.
- [22] GUO L,ZENG ZH M,HUANG X J, et al. Performance enhancements of the spherical detector for pipeline spanning inspection through posture stabilization [J]. Measurement; Journal of the International Measurement Confederation, 2020, 165.

作者简介



李健, 2001 年获天津大学博士学位, 现为天津大学精密仪器与光电工程学院教授、博士生导师, 主要研究方向为无损检测技术、检测技术与仪器、信号处理。

E-mail: tjupipe@tju.edu.cn

Li Jian received his Ph. D. degree from Tianjin University in 2001. Now he is a professor and Ph. D.

supervisor at the School of Precision Instruments and Opto-Electronic Engineering, Tianjin University. His main research interests include non-destructive testing technology, testing technology and instruments, signal processing.



刘天一, 在 2021 年于天津大学获得学士学位, 现为天津大学精密仪器与光电子工程学院硕士研究生, 主要研究方向为管道内检测器和管道移位变形监测。

E-mail: lty1895@tju.edu.cn

Liu Tianyi received his B. Sc. degree from Tianjin University in 2021 and 2016. Now he is a M. Sc. candidate at the School of Precision Instruments and Opto-Electronic Engineering, Tianjin University. His main research interests include pipeline internal detectors and pipeline displacement deformation monitoring.



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、博士生导师, 主要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 Ph. D. 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.