

引文: 石彤, 刘啸奔, 张琳, 等. 管道 IMU 弯曲应变解算算法优化与全尺寸试验验证[J]. 油气储运, 2024, 43(11): 1269–1276.

SHI Tong, LIU Xiaoben, ZHANG Lin, et al. Optimization of IMU-based bending strain solving algorithm and full-scale experimental validation[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2024, 43(11): 1269–1276.

管道 IMU 弯曲应变解算算法优化与全尺寸试验验证

石彤¹ 刘啸奔¹ 张琳² 王军³ 李睿² 谢婷¹ 冯庆善² 黄启玉¹

1. 中国石油大学(北京)·油气管道输送安全国家工程研究中心·石油工程教育部重点实验室·城市油气输配技术北京市重点实验室; 2. 国家石油天然气管网集团有限公司; 3. 湖南湘投天然气投资有限公司

摘要:【目的】基于惯性导航(Inertial Mapping Unit, IMU)内检测器的管道弯曲应变识别技术目前已被国内外广泛应用。IMU 内检测器通过陀螺仪获取的俯仰角、航向角等进行解算并获取管道全线弯曲应变, 由于内检测器实际运行时存在因自身尺寸等原因造成的检测轨迹线偏移, 导致 IMU 检测弯曲应变与管道真实弯曲应变之间存在一定的误差。【方法】基于实际内检测器尺寸建立无异常振动等干扰的 IMU 内检测器仿真模型, 构建管径 508 mm 管道不同弯曲应变条件下的仿真数据库, 提出基于神经网络-决策树深度学习模型的解算优化算法, 开展了误差分析与弯曲应变解算算法研究。开展全尺寸管道弯曲应变牵拉试验, 验证解算优化算法的可行性与准确性。【结果】随着管道弯曲应变增大, IMU 内检测器检测弯曲应变与管道真实弯曲应变之间的误差随之增大。解算后弯曲应变数据的均方误差、误差协方差、误差标准差分别由 0.007 0、0.004 9、0.070 2 降低至 0.001 2、0.001 6、0.012 6, 而表示相关性的决定系数由 0.443 增至 0.981。采用全尺寸牵拉试验验证该算法, 弯曲应变与应变片检测真弯曲应变之间误差分别降低了 79.6%、79.4%、76.0%。【结论】通过有限元模拟与全尺寸牵拉试验数据验证了所提出解算优化算法的可行性与准确性, 可为基于 IMU 内检测的管道真弯曲应变获取提供技术支撑与指导。(图 9, 表 2, 参 25)

关键词: 惯性导航; 真实弯曲应变; 仿真重构; 全尺寸试验; 误差分析; 解算算法

中图分类号: TE88

文献标识码: A

文章编号: 1000-8241(2024)11-1269-08

DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2024.11.008

Optimization of IMU-based bending strain solving algorithm and full-scale experimental validation

SHI Tong¹, LIU Xiaoben¹, ZHANG Lin², WANG Jun³, LI Rui², Xie Ting¹, FENG Qingshan², HUANG Qiyu¹

1. China University of Petroleum (Beijing)//National Engineering Research Center for Pipeline Safety//MOE Key Laboratory of Petroleum Engineering//Beijing Key Laboratory of Urban Oil and Gas Distribution Technology; 2. China Oil & Gas Pipeline Network Corporation; 3. Hunan Xiangtong Natural Gas Investment Co. Ltd.

Abstract: [Objective] The pipe bending strain identification technology based on an inertial mapping unit (IMU) in-line detector has seen extensive applications in China and abroad. IMUs obtain bending strains along entire pipelines through a solving process, using pitch angles and heading angles acquired by a gyroscope. However, deviations from the detection path may occur during the practical in-line detector operation, due to the sizes of IMUs and other factors, leading to inevitable errors between the bending strains identified by IMUs and the actual pipeline conditions. [Methods] A simulation model was developed for IMU in-line detectors based on their actual size, without abnormal vibrations and other interferences. In addition, a simulation database was created for pipelines with a diameter of 508 mm under varying bending strain conditions. Moreover, a solving algorithm optimized through an ANN-ExtraTree deep learning model was introduced. These tools were leveraged for error analysis and to delve into the bending strain solving algorithm. Furthermore, full-scale pulling experiments were conducted on pipeline bending strains, to verify the feasibility and accuracy of the optimized solving algorithm. [Results] This study revealed that as pipeline bending strain increased, the errors between IMU detections and true bending strains grew. The mean square error, error covariance and error standard deviation of

the bending strain data derived from the optimized solving process decreased from 0.007 0, 0.004 9, 0.070 2 to 0.001 2, 0.001 6, 0.012 6 respectively, while the coefficient of determination, indicating correlation, rose from 0.443 to 0.981. Furthermore, the full-scale pulling experiments conducted to validate the algorithm revealed substantial reductions in errors between bending strains computed by the optimized solving algorithm and those detected by a strain gauge at 79.6%, 79.4%, and 76.0%, respectively. **[Conclusion]** The proposed optimized solving algorithm is verified feasible and accurate through finite element simulations and full-scale pulling experiments. The study findings provide technical support and guidance for accurately identifying bending strains along pipelines based on IMU. (9 Figures, 2 Tables, 25 References)

Key words: inertial mapping unit (IMU), true bending strain, simulation reconstruction, full-scale experiment, error analysis, solving algorithm

随着中国管道不断建设与发展,已形成覆盖全国的管道网络布局^[1-3]。目前中国早期建设管道已经运行多年,由于各种自然不可抗力因素的干扰对管道造成局部的形变及位移,进而产生弯曲应变^[4-5]。当应变超过管道材料的极限时,可能会导致管道失效断裂,发生泄漏并造成人员伤亡和经济损失^[6-7]。因此,为保障管道安全运行,检测管道的应力应变状态是一项极为重要的工作^[8-10]。

随着惯性导航(Inertial Mapping Unit, IMU)技术的成熟,基于 IMU 原理的管道内检测器被逐渐利用于检测管道弯曲应变^[11]。IMU 内检测器通过检测管道中心线坐标与俯仰角、航向角等姿态数据^[12],获得管道各位置弯曲应变情况^[13]。中国石油管道公司自主研发了高精度 IMU 内检测器,可获取管道弯曲应变状态^[14-15]。由于 IMU 内检测器在检测过程中存在异常振动、轨迹线偏移等复杂情况,导致其检测弯曲应变与真实结果存在一定的差异^[16]。Wang 等^[17]通过摄像头与 IMU 组成的单目视觉惯性导航系统进行机器导航,提出了一种 IMU 自标定方法进一步修正检测数据。李睿等^[18-19]将 IMU 系统用于冻土区管道检测,提出基于 IMU 数据的弯曲应变及位移的方法,对位移发散问题进行了修正;此外,还利用 GPS 定位与里程轮数据对管道位置进行了修正,提高了检测准确性。

当前国内外研究者对 IMU 检测数据进行了解算分析^[20-21],但尚未进行 IMU 内检测器运行轨迹线与管道真实中心线偏差带来的弯曲应变误差分析,更未开展相关解算方法研究。为此,基于实际 IMU 内检测器尺寸建立重构仿真模型,分析 IMU 内检测器检测弯曲应变数据与真弯曲应变数据之间的误差,采用机器学习算法开展映射研究,并通过全尺寸牵拉试验验证算法合理性与准确性。

1 基于惯性测绘的管道弯曲应变解析方法

管道弯曲曲率可由管道中心线在水平面的投影和垂直平面的投影分别计算得出^[22]:

$$k = \sqrt{k_h^2 + k_v^2} \quad (1)$$

式中: k 为管道总曲率, m^{-1} ; k_h 为管道在水平面的曲率, m^{-1} ; k_v 为管道垂直平面的曲率, m^{-1} 。

设管道中心线曲线方程为 $y=f(x)$, 且 $f(x)$ 具有二阶导数, 则根据微积分公式可计算曲率得^[19]:

$$\begin{cases} k_h = \frac{|y''_h|}{(1+y_h'^2)^{\frac{3}{2}}} \\ k_v = \frac{|y''_v|}{(1+y_v'^2)^{\frac{3}{2}}} \end{cases} \quad (2)$$

根据一阶导数 y'_h 、 y'_v 和二阶导数 y''_h 、 y''_v 分别计算出该点的曲率 k_h 与 k_v , 再由式(1)计算出管道总曲率 k , 由下式计算得到管道弯曲应变^[22]:

$$\varepsilon = \frac{D}{2} k \quad (3)$$

式中: ε 为管道弯曲应变; D 为管道外径, m 。

除了应用 IMU 内检测器检测到的管道中心线数据之外, 还可利用被检管道坐标系下内检测器获取的姿态信息^[23]解算管道弯曲应变。管道曲率及弯曲应变与内检测器的姿态存在^[24]如下关系:

$$\begin{cases} k_h = \Delta\varphi/\Delta s \\ k_v = \Delta\alpha\cos\varphi/\Delta s \\ \varepsilon = \frac{D}{2} \sqrt{(\Delta\varphi/\Delta s)^2 + (\Delta\alpha\cos\varphi/\Delta s)^2} \end{cases} \quad (4)$$

式中: φ 为 IMU 内检测器沿管道垂直切线方向的俯仰角, ($^\circ$); Δs 为里程变化, m ; $\Delta\alpha$ 为 IMU 内检测器沿管道水平切线方向的航向角变化, ($^\circ$)。

2 IMU 检测仿真与误差分析

2.1 模型建立

基于非线性有限元软件 ABAQUS 建立无异常干扰的 IMU 内检测器三维重构模型。IMU 内检测器包括皮碗、内检测器前端装置、密封圈、中轴等部分。其中皮碗及密封圈均采用与真实检测器一致的聚氨酯材料^[25],其密度为 $1\,005\text{ kg/m}^3$ 、摩擦因数为 0.18。内检测器前端防撞装置、检测器中轴等结构均采用与实际装备一致的碳钢,其泊松比 0.3、弹性模量 210 GPa 、密度 $7\,850\text{ kg/m}^3$ 。

清管器骨架采用 C3D8R 单元,清管器皮碗采用 C3D8RH 单元。对 IMU 内检测器进行网格加密,整个内检测器共包含 22 982 个单元,全部模型体采用结构化网格划分(图 1)。

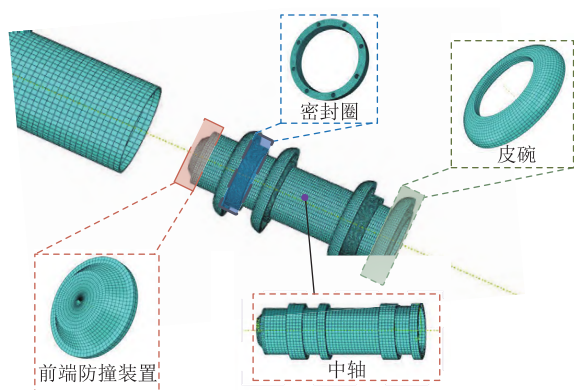


图 1 IMU 内检测器各部分结构及整体示意图
Fig. 1 Breakdown and overall structure of IMU in-line detector

管道材料选择与试验管道一致的碳钢,在模型中管道可为 IMU 内检测器提供管壁边界。当管道发生弯曲应变后,固定管道两端参考点的全部自由度来固定管道本体。IMU 内检测器参考点与检测器表面设置耦合约束,通过对参考点施加位移实现清管器在管道内部的运行(图 2)。

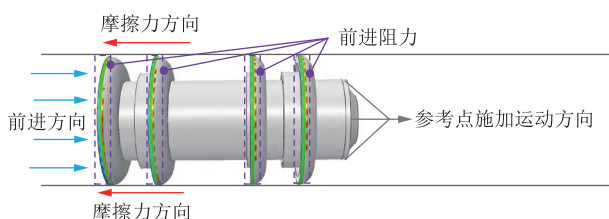


图 2 IMU 内检测器在管道中运行示意图
Fig. 2 Schematic diagram of IMU in-line detector operating within a pipeline

2.2 检测数据与真弯曲应变误差分析

建立了不同管道尺寸、弯曲变形长度下内检测

器中心线检测结果数据库。选取管径 508 mm、长变形段 20 m、弯曲偏移量 200 mm 的工况进行 IMU 检测数据误差分析,对比了该工况下 IMU 内检测器重构模型获取管道中心线与真实管道中心线变形坐标数据(图 3)。

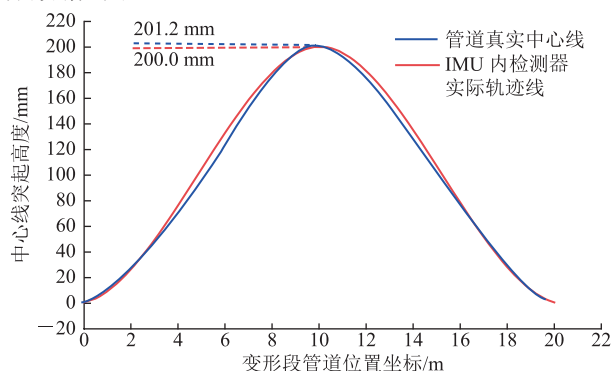
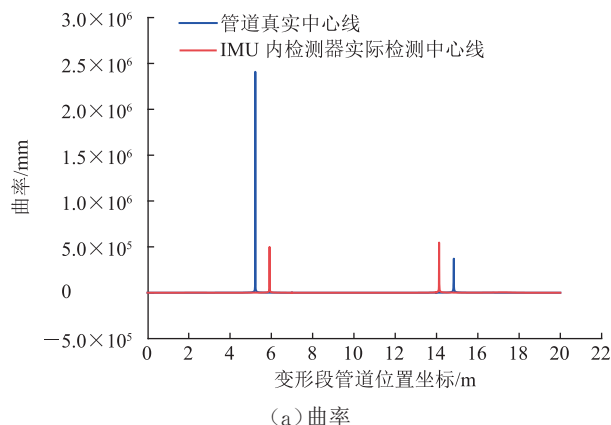


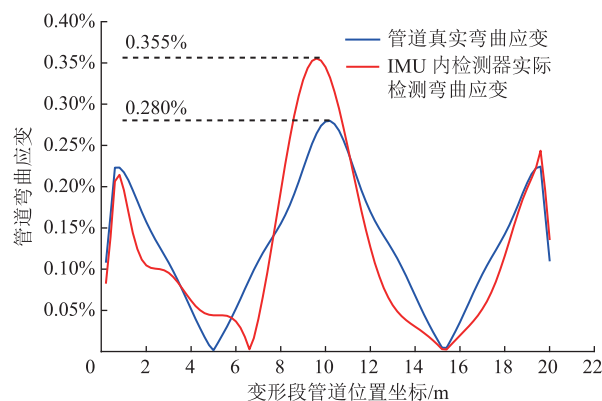
图 3 同一工况下 IMU 内检测器实际检测轨迹线与真实管道中心线对比图

Fig. 3 Comparison between actual IMU detection path and real pipeline centerline under the same conditions

根据式(3)计算变形管段弯曲应变,弯曲应变与真实弯曲应变之间存在 0.075% 误差,对比了上述工况下弯曲变形段曲率、弯曲应变数据(图 4)。



(a) 曲率



(b) 弯曲应变

图 4 同一工况下 IMU 内检测器检测与真实曲率、弯曲应变对比图

Fig. 4 Comparison between IMU detections and real curvatures/bending strains under the same conditions

3 解算优化算法

3.1 ANN-ExtraTree 深度学习模型

人工神经网络-决策树(ANN-ExtraTree)模型是包含多个隐藏层的混合深度学习模型。ANN 深度学习模型可以自动计算各特征量权值,结合 ExtraTree 模型选取最优特征,将二者优势结合进行管道真实弯曲应变值映射。构建了 ANN-ExtraTree 深度学习模型(图 5),3 个隐藏层用于计算各特征量权值,加入激活函数解决梯度消失的问题,隐藏层中

选择激活函数 ReLU,其函数表达式为:

$$f(z_i) = \max(0, z_i) \quad (5)$$

式中: z_i 为第 i 层各节点输出值(z 在本模型中指 a 、 b 、 c ; 其中 $a_1 \leq a_i \leq a_{32}, b_1 \leq b_i \leq b_{64}, c_1 \leq c_i \leq c_{128}$)。

非输出层(a 、 b 层)的全连接层采用 L2 正则化(L2 Regularization)技术,正则化因子均设置为 0.005,通过这些层的权重上施加惩罚,达到权重衰减(Weight Decay)的目的,降低模型复杂度,削弱噪声影响,从而有效防止过拟合。特征提取后数据输入 ExtraTree 模型进行训练,得到管道弯曲应变预测值。

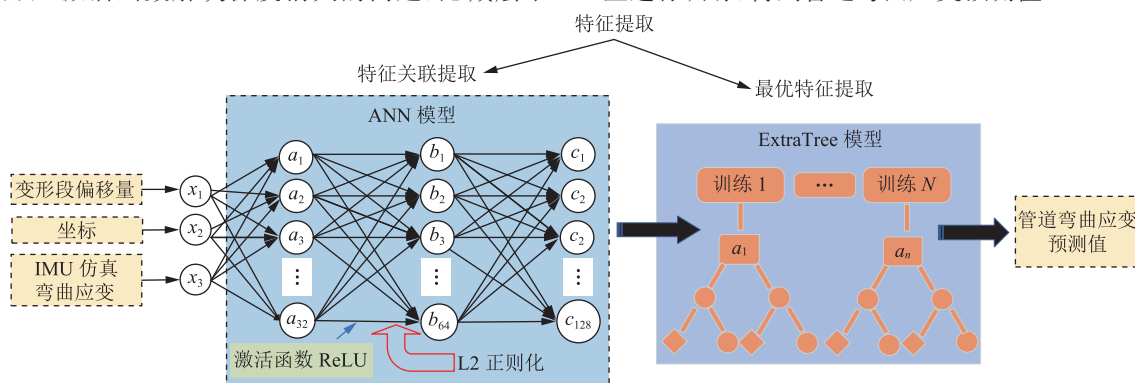


图 5 ANN-ExtraTree 深度学习模型逻辑示意图
Fig. 5 Logic diagram of ANN-ExtraTree deep learning model

设计了管道弯曲应变解算优化方法流程(图 6)。管道规格保持不变的情况下,管道弯曲应变由管道变形段长度、偏移量决定,因此将变形段偏移量、坐标及 IMU 仿真弯曲应变作为输入值。对数据进行归一化处理输入 ANN-ExtraTree 模型中,得到管道真实弯曲应变值。

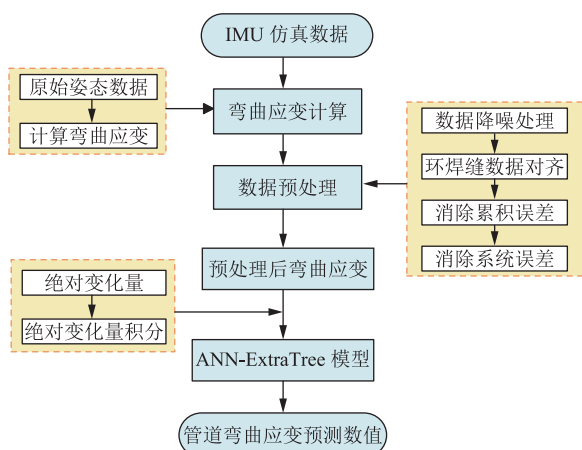


图 6 基于 ANN-Extratree 深度学习模型的管道弯曲应变解算优化方法流程图
Fig. 6 Flow chart of optimized solving process for pipeline bending strain based on ANN-Extratree deep learning model

3.2 模型评估

选取管径为 508 mm 的 3 个长变形管段(20 m、

25 m、30 m)、偏移量为 0~300 mm 的管道建立 IMU 检测仿真数据库并开展算法训练,数据库含数据样本 5 800 条,其中训练集 4 800 条、测试集 1 000 条。ANN-ExtraTree 激活函数选择 ReLU,各层神经元数量分别为 32、64、128,决策树最大深度设置为 17。对比 IMU 内检测器实际检测数据与优化算法计算数据的均方误差、误差标准差、误差协方差、决定系数(图 7),其中均方误差、误差协方差、误差标准差分别由 0.007 0、0.004 9、0.070 2 降低至 0.001 2、0.001 6、0.012 6;与真实

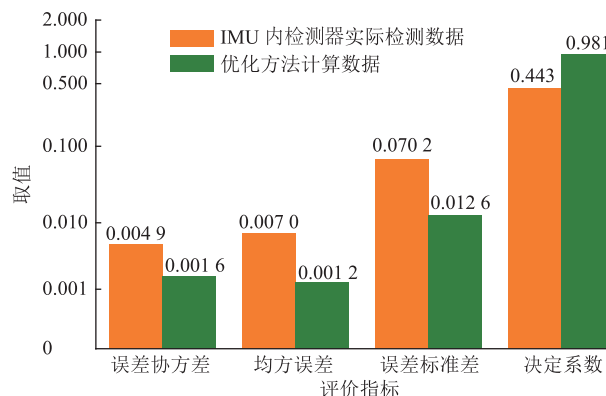


图 7 IMU 内检测器实际检测数据与优化算法计算数据评价指标对比图
Fig. 7 Comparison of evaluation indexes between actual IMU detections and calculation data by optimized algorithm

弯曲应变相关性的决定系数由 0.443 增至 0.981,验证了该算法的映射适用性。

4 牵拉试验与算法应用

4.1 试验装置及方案

牵拉试验以全尺寸管道为对象,管径 508 mm、壁厚 10 mm、长度 100 m,其中弯曲变形段 20 m。加载弯曲载荷至预设工况,牵拉 IMU 内检测器获取检测数据(图 8)。

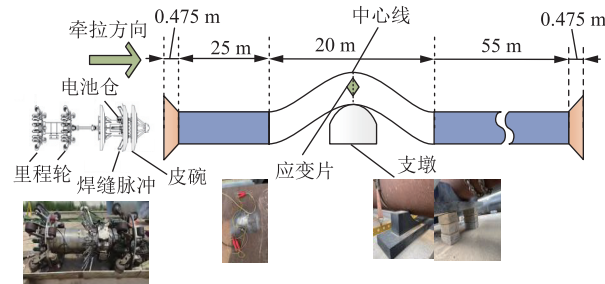


图 8 牵拉试验示意图
Fig. 8 Setup of pulling experiment

设置 4 组管道弯曲应变工况,首先在管道为直管段时进行基础工况测试,其他工况的管道弯曲应变段分别设计为 0.1%、0.2%、0.3%。各工况下,开展 A、B 两次牵拉试验。利用 IMU 内检测器测得的姿态信息对管道弯曲应变进行解算,分析 IMU 内检测器在不同工况下管道弯曲应变数据。

4.2 试验结果

由牵拉试验检测结果(表 1)可知,针对弯曲应变变形段相同工况条件下 IMU 内检测器检测弯曲应变基本一致。

表 1 不同试验工况下 IMU 检测弯曲应变表
Table 1 Bending strains detected by IMU under different experimental conditions

工况序号	组别	设计弯曲应变	偏移量/mm		IMU 检测最大弯曲应变
			设计	实际	
1	A	0	0	0	0
	B	0	0	0	0
2	A	0.1%	68	70	0.140%
	B	0.1%	68	70	0.139%
3	A	0.2%	124	129	0.265%
	B	0.2%	124	129	0.264%
4	A	0.3%	180	188	0.409%
	B	0.3%	180	188	0.411%

4.3 优化算法验证

利用优化算法进行相应工况真实弯曲应变计算,选取长度为 20 m 的中间变形段为例,其偏移量分别为 68 mm、124 mm、180 mm,对比了各工况弯曲应变修正前后与应变片检测结果(图 9)。

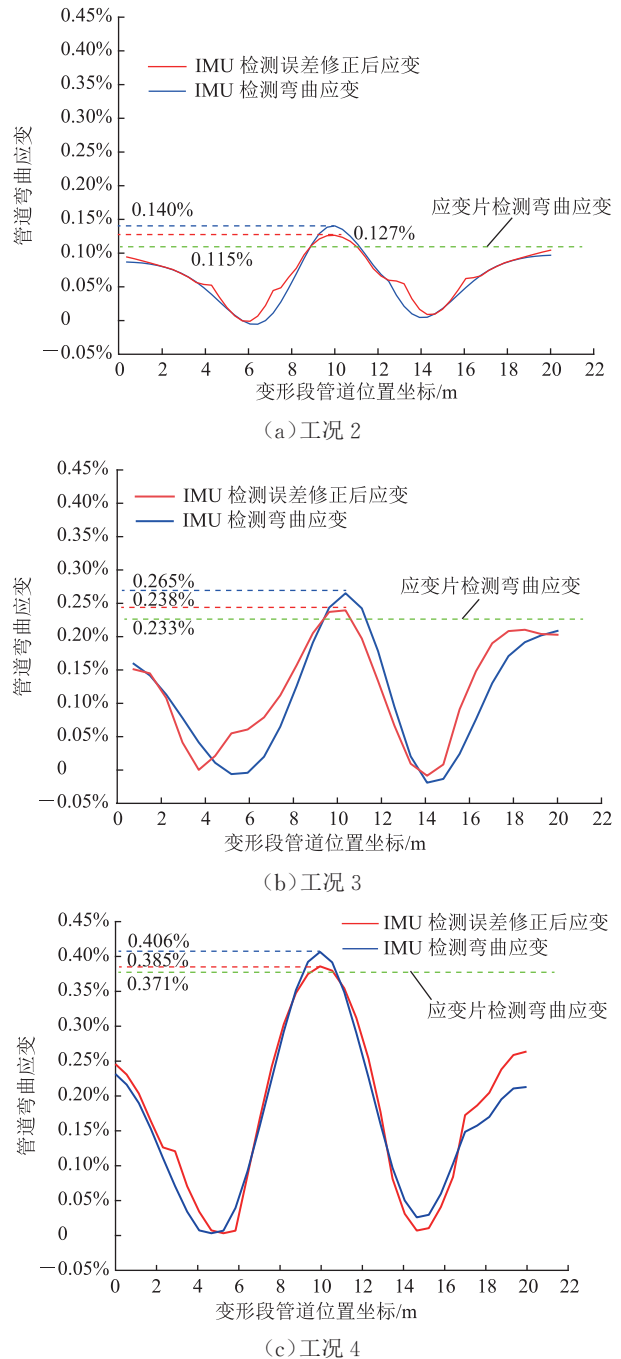


图 9 不同工况下 IMU 检测优化后弯曲应变与真弯曲应变数据对比图

Fig. 9 Comparison of bending strains detected by improved IMU and real bending strains under different conditions

将基于 ANN-ExtraTree 的解算优化算法计算结果与管道最大弯曲变形处张贴应变片数据相对比(表 2),验证了解算优化算法的适用性。

表 2 IMU 检测解算优化弯曲应变最大值与应变片检测结果对比表

Table 2 Comparison of bending strain maximums by IMU (improved) detection algorithm and measurements with a strain gauge

工况序号	组别	IMU 检测最大弯曲应变	修正后弯曲应变	应变片检测数据	误差		平均误差缩小比
					修正前	修正后	
1		0	0	0	0	0	0
2	A	0.140%	0.127%	0.115%	0.024 5%	0.005 0%	79.6%
	B	0.139%	0.127%				
3	A	0.265%	0.241%	0.233%	0.031 5%	0.006 5%	79.4%
	B	0.264%	0.238%				
4	A	0.406%	0.380%	0.371%	0.039 0%	0.009 5%	76.0%
	B	0.411%	0.381%				

5 结论

建立无异常振动等干扰的 IMU 内检测器重构仿真模型,构建 IMU 内检测器对不同管道弯曲应变的检测轨迹数据库。基于 IMU 重构仿真与真实弯曲应变数据进行误差分析,提出基于 ANN-ExtraTree 的弯曲应变解算优化算法。开展全尺寸管道弯曲应变牵拉试验,验证解算优化算法的可行性与准确性。研究结果表明:

1)当管径 508 mm、弯曲应变段长度 20 m、管道弯曲偏移量为 200 mm 时,IMU 检测弯曲应变大于真实弯曲应变 0.075%。随着弯曲偏移量(即管道弯曲应变)增大,IMU 检测弯曲应变与管道真实弯曲应变之间的误差随之增大。

2)优化算法计算数据的均方误差、误差协方差、误差标准差分别由 0.007 0、0.004 9、0.070 2 降低至 0.001 2、0.001 6、0.012 6;与真实弯曲应变相关性的决定系数由 0.443 升高至 0.981。

3)开展了全尺寸管道牵拉试验,各组工况修正后检测弯曲应变与应变片检测真实弯曲应变之间误差分别降低了 79.6%、79.4%、76.0%,验证了所提出解算优化算法的可行性与准确性。

参考文献:

[1] 高振宇,张慧宇,高鹏. 2022 年中国油气管道建设新进展[J]. 国际石油经济,2023,31(3): 16-23. DOI: 10.3969/j.issn.1004-7298.2023.03.003.

GAO Z Y, ZHANG H Y, GAO P. New progress in China's oil

and gas pipeline construction in 2022[J]. International Petroleum Economics, 2023, 31(3): 16-23.

[2] 郑洪龙,黄维和. 油气管道及储运设施安全保障技术发展现状及展望[J]. 油气储运,2017,36(1): 1-7. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2017.01.001.

ZHENG H L, HUANG W H. Development status and prospect of safety insurance technologies for oil & gas pipelines and storage and transportation facilities[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2017, 36(1): 1-7.

[3] 史建峰,王晓霖,帅健. 管道完整性数据管理技术的研究进展与发展对策[J]. 焊管,2016,39(4): 13-16, 26. DOI: 10.19291/j.cnki.1001-3938.2016.04.004.

SHI J F, WANG X L, SHUAI J. Research progress and development countermeasures of pipeline integrity data management technology[J]. Welded Pipe and Tube, 2016, 39(4): 13-16, 26.

[4] 李平. 埋地油气管道地质灾害监测系统研究与应用[J]. 科技创新与应用,2022,12(2): 168-170. DOI: 10.19981/j.CN23-1581/G3.2022.02.047.

LI P. Research and application of geological hazard monitoring system for buried oil and gas pipelines[J]. Technology Innovation and Application, 2022, 12(2): 168-170.

[5] 刘鹏,李玉星,张宇,孙明源,张玉,张炎. 典型地质灾害下埋地管道的应力计算[J]. 油气储运,2021,40(2): 157-165. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2021.02.006.

LIU P, LI Y X, ZHANG Y, SUN M Y, ZHANG Y, ZHANG Y. Stress calculation of buried pipelines affected by typical

- geological hazards[J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2021, 40(2): 157-165.
- [6] 帅健, 王晓霖, 左尚志. 地质灾害作用下管道的破坏行为与防护对策[J]. *焊管*, 2008, 31(5): 9-15. DOI: 10.3969/j.issn.1001-3938.2008.05.002.
- SHUAI J, WANG X L, ZUO S Z. Breakage action and defend measures to pipeline under geological disaster[J]. *Welded Pipe and Tube*, 2008, 31(5): 9-15.
- [7] 张宏, 季蓓蕾, 刘燊, 吴锴, 张东, 施宁, 等. 地质灾害段管道结构安全数字孪生机理模型[J]. *油气储运*, 2021, 40(10): 1099-1104, 1130. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2021.10.003.
- ZHANG H, JI B L, LIU S, WU K, ZHANG D, SHI N, et al. Digital twin mechanism model for the structural safety of pipelines in geohazards area[J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2021, 40(10): 1099-1104, 1130.
- [8] 方威伦, 刘啸奔, 张宏, 陈朋超, 李睿, 赵晓明. 基于 IMU 数据的冻土区管道融沉风险段识别方法[J]. *油气储运*, 2022, 41(3): 288-294. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2022.03.006.
- FANG W L, LIU X B, ZHANG H, CHEN P C, LI R, ZHAO X M. Identification method for thaw settlement segments of pipelines in permafrost regions based on IMU data[J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2022, 41(3): 288-294.
- [9] 刘燊, 刘啸奔, 李睿, 李博, 陈朋超, 张宏. 基于机器学习的冻土区融沉变形管段识别方法[J]. *石油机械*, 2022, 50(3): 106-114. DOI: 10.16082/j.cnki.issn.1001-4578.2022.03.015.
- LIU S, LIU X B, LI R, LI B, CHEN P C, ZHANG H. Identification of thaw settlement deformation pipe section in frozen soil area based on machine learning[J]. *China Petroleum Machinery*, 2022, 50(3): 106-114.
- [10] WANG F, LI G Y, MA W, MU Y H, ZHOU Z W, MAO Y C. Permafrost thawing along the China-Russia Crude Oil Pipeline and countermeasures: A case study in Jiagedaqi, Northeast China[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2018, 155: 308-313. DOI: 10.1016/j.coldregions.2018.08.018.
- [11] 苏林, 马雪莉, 薛鹏. 管道惯性测绘系统研制及应用[J]. *管道技术与设备*, 2020(2): 22-24. DOI: 10.3969/j.issn.1004-9614.2020.02.007.
- SU L, MA X L, XUE P. Development and application of inertial mapping system for pipeline[J]. *Pipeline Technique and Equipment*, 2020(2): 22-24.
- [12] 李睿, 赵晓明, 赵连玉, 陈鹏超, 冯庆善. 长输管道中心线及应变位移检测系统[J]. *石油科技论坛*, 2016, 35(增刊 1): 197-200, 256-257. DOI: 10.3969/j.issn.1002-302x.2016.z1.065.
- LI R, ZHAO X M, ZHAO L Y, CHEN P C, FENG Q S. Central line and strain & displacement inspection system of long distance pipelines[J]. *Petroleum Science and Technology Forum*, 2016, 35(S1): 197-200, 256-257.
- [13] 栾野. 基于惯性导航的管道与特征位置检测方法研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2021.
- LUAN Y. Research on detection method of pipeline and characteristic position based on inertial navigation[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2021.
- [14] 丁楠, 陈浩, 孙静, 肖丽. 智能管道建设数据整合方法及问题探讨[J]. *石油工业技术监督*, 2021, 37(7): 45-48. DOI: 10.3969/j.issn.1004-1346.2021.07.013.
- DING N, CHEN H, SUN J, XIAO L. Data integration methods of intelligent pipeline construction and discussion on problems existing in data integration[J]. *Technology Supervision in Petroleum Industry*, 2021, 37(7): 45-48.
- [15] CHEN P C, WANG T H, DONG P, LI R, ZHAO X M. Research on strain and displacement ILI technology for oil & gas pipeline[J]. *Guangzhou: 2017 3rd International Conference on Electronic Information Technology and Intellectualization*, 2017: 863-873.
- [16] ZHANG P H, HANCOCK C M, LAU L, ROBERTS G W, DE LIGHT H. Low-cost IMU and odometer tightly coupled integration with Robust Kalman filter for underground 3-D pipeline mapping[J]. *Measurement*, 2019, 137: 454-463. DOI: 10.1016/j.measurement.2019.01.068.
- [17] WANG Z H, CHENG X H. Adaptive optimization online IMU self-calibration method for visual-inertial navigation systems[J]. *Measurement*, 2021, 180: 109478. DOI: 10.1016/j.measurement.2021.109478.
- [18] 李睿, 刘贺子, 陈朋超, 宋乔, 张逸夫, 赵晓利, 等. 冻土区管道弯曲应变及位移监测方法[J]. *油气储运*, 2017, 36(4): 393-397, 408. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2017.04.006.
- LI R, LIU H Z, CHEN P C, SONG Q, ZHANG Y F, ZHAO X L, et al. Bending strain and displacement monitoring method for pipelines in permafrost zones[J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2017, 36(4): 393-397, 408.
- [19] 李睿, 冯庆善, 张军政, 张海亮, 韩小明, 刘成海. 基于惯性导航

- 的管道中心线测量方法[J]. 油气储运, 2013, 32(9): 979-981. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2013.09.012.
- LI R, FENG Q S, ZHANG J Z, ZHANG H L, HAN X M, LIU C H. Measurement method of pipeline central line based on inertial navigation[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2013, 32(9): 979-981.
- [20] 孙鹏, 谢裕喜, 张勇, 吴骏, 唐小华. 管道内检测数据对齐方法与应用[J]. 油气储运, 2021, 40(2): 151-156. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2021.02.005.
- SUN P, XIE Y X, ZHANG Y, WU J, TANG X H. Alignment method of pipeline in-line inspection data and its application[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2021, 40(2): 151-156.
- [21] 刘伟. 管道本体数据与内检测数据的对齐方法研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2018.
- LIU W. Research on alignment method of pipeline ontology data and internal inspection data[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2018.
- [22] FENG Q S, LI R, ZHANG H. Modeling and calculation of dent based on pipeline bending strain[J]. Journal of Sensors, 2016, 2016: 8126214. DOI: 10.1155/2016/8126214.
- [23] NOURELDIN A, ARMSTRONG J, EL-SHAFIE A, KARAMAT T, MCGAUGHEY D, KORENBERG M, et al. Accuracy enhancement of inertial sensors utilizing high resolution spectral analysis[J]. Sensors, 2012, 12(9): 11638-11660. DOI: 10.3390/s120911638.
- [24] LIU S C, ZHENG D Z, WANG T H, DAI M X, LI R, FENG Q S. A novel algorithm for pipeline displacement and bending strain of in-line inspection based on inertia measurement technology[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2018, 10(12): 1-10. DOI: 10.1177/1687814018816755.
- [25] JIANG J X, ZHANG H, JI B L, YI F N, YAN F, LIU X B. Numerical investigation on sealing performance of drainage pipeline inspection gauge crossing pipeline elbows[J]. Energy Science and Engineering, 2021, 9(10): 1858-1871. DOI: 10.1002/ese3.955.
- (编辑: 曾力波)
-
- 基金项目:** 国家重点研发计划“中俄管道重大风险防控与安全保障关键技术”, 2022YFC3070100; 北京市科协“青年人才托举工程”项目“高钢级管道环焊缝可靠性评价方法研究”, BYESS2023261; 国家自然科学基金资助项目“火驱服役环境多场耦合作用下低铬套管钢失效机理研究”, 52304013; 国家管网科学研究与技术开发项目“高钢级管道环焊缝失效机理研究”, WZXGL202105; 国家管网科学研究与技术开发项目“高钢级管道环焊缝缺陷检测评价技术研究”, WZXGL202104; 中国石油大学(北京)科研基金资助项目“掺氢管道环焊缝失效机理与评价方法研究”, 2462023BJRC005; 国家管网集团科技研发项目“X80 管道材料与环焊缝性能分散性机理及控制要求研究”, CLZB202301.
- 作者简介:** 石彤, 男, 1997 年生, 在读博士生, 2020 年毕业于中国石油大学(华东)油气储运工程专业, 现主要从事油气装备失效分析与完整性管理方向的研究工作。地址: 北京市昌平区府学路 18 号, 102249。电话: 17863972020。Email: shitong0409@163.com
- 通信作者:** 刘啸奔, 男, 1991 年生, 副教授, 博士生导师, 2018 年博士毕业于中国石油大学(北京)安全科学与工程专业, 现主要从事油气储运设施结构强度理论、完整性评价相关技术的研究工作。地址: 北京市昌平区府学路 18 号, 102249。电话: 010-89731239。Email: xiaobenliu@cup.edu.cn
- Received: 2024-02-26
 - Revised: 2024-03-23
 - Online: 2024-07-03

