

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2210148

油气管道柔性测径传感器设计及其结构优化^{*}

张 行^{1,2}, 唐步云^{1,2}, 刘 彤³, 董绍华^{2,4}

(1. 中国石油大学(北京)机械与储运工程学院 北京 102249; 2. 中国石油大学(北京)管道技术与安全研究中心 北京 102249; 3. 国家管网集团北京管道有限公司北京输油气分公司 北京 100101; 4. 应急管理部油气生产安全与应急技术重点实验室 北京 102249)

摘 要:油气管道测径技术是检测管内通路变化、保障管道安全的重要手段。针对传统薄铝盘测径板无法检测多处缺陷且不可重复使用等问题,本文设计了一种柔性测径传感器,其通过置于聚氨酯柔性测径盘中的电阻应变片测量遇阻时的应变变化,实现管内缺陷量化检测。结合 ABAQUS 软件建立应变片和聚氨酯密封盘的耦合模型,分析产生拉压变形时的应变输出特性,并基于敏感栅应变趋势,寻找应变片最优放置位置。通过柔性测径传感器性能检测实验台,对柔性测径传感器的功能进行测试。最后结合 BP 神经网络与遗传算法得出使传感器检测性能最佳的结构参数。研究结果表明,对于 DN200 的管道,当测径盘外径为 97.5% 的管道内径,测径盘厚度 19 mm,测径盘瓣间距 8 mm 时,柔性测径传感器能较好表征凹陷的几何尺寸,对于油气管道变形检测作业具有一定的工程应用价值。

关键词:柔性测径传感器;管道变形检测;油气管道;结构优化

中图分类号: TH7 TE973 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Design and structural optimization of the flexible sizing sensors for oil and gas pipelines

Zhang Hang^{1,2}, Tang Buyun^{1,2}, Liu Tong³, Dong Shaohua^{2,4}

(1. China University of Petroleum, Beijing, College of Mechanical and Transportation Engineering, Beijing 102249, China;

2. Pipeline Technology and Safety Research Center, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China;

3. Beijing Oil & Gas Transmission Sub-company, Pipe China Beijing Pipeline Co., Ltd., Beijing 100101, China;

4. Key Laboratory of Oil and Gas Safety and Emergency Technology, Ministry of Emergency Management, Beijing 102249, China)

Abstract: The oil and gas pipeline sizing technology is an important tool for detecting changes in the pipe diameter and ensuring pipeline safety. To address the problems that the traditional thin aluminum discs cannot detect multiple defects and cannot be reused, this article designs a flexible sizing sensor, which measures the strain change when the resistance is encountered through the resistive strain gauges placed in the flexible polyurethane sizing discs to achieve quantitative detection of defects in the pipe. The coupling model between the strain gauges and the polyurethane sealing disk is formulated with ABAQUS software, and the strain output characteristics are analyzed when tensile and compressive deformations are generated. The function of the flexible sizing sensor is tested by a flexible sizing sensor performance testing experiment bench. Finally, the BP neural network and the genetic algorithm are combined to derive the structural parameters that make the sensor detection performance optimal. For the DN200 pipeline, research results show that when the outside diameter of the sizing disc is 97.5% of the inner diameter of the pipe, the thickness of the sizing disc is 19 mm, and the sizing disc flap spacing is 8 mm. The flexible sizing sensor can better characterize the size of the depression, which has certain engineering application value for oil and gas pipeline deformation detection operations.

Keywords: flexible sizing sensors; pipe deformation detection; oil and gas pipelines; structure optimization

0 引言

油气管道是国民经济的能源动脉。管道变形作为在役管道疲劳化最常见的损伤形式,易使介质输送阻力加大、内检测设备卡堵,甚至造成管道破裂进而引发管道事故^[1-5]。新建管道的测径通路验收,以及在役管道内部变形的检测,都需要使用管道检测设备以保障管道安全运营,其中最常用的就是管道测径清管器。

传统检测管道变形的工具为常规清管器上加装的薄铝盘,薄铝盘可塑性强,可有效记录管道内部的最大变形,但无法检测管内多处缺陷,且铝盘不可重复利用^[6]。随着传感技术的快速发展,目前的管道内检测技术发展集成通径检测和无损检测的组合式检测方式,在通径探测臂上携带不同传感器来量化管道变形,其检测功能更加全面。辛佳兴等^[7]将机械臂与涡流传感器相结合研制了管道复合检测探头,该探头可增加对管道环向检测的覆盖面积,同时可对1 mm的管道径向变形量实现有效检测。李睿等^[8]研制了一种适用于大口径的新型高密度聚氨酯内检测器,通过在测径臂处安装角位移传感器以检测管道内径变化。清华大学 Piao 等^[9-10]在新型高速管道检测仪表上安装传感器阵列,提出了新的脉冲涡流传感方法,解决了检测传感器响应时间长、剧烈运动导致检测灵敏度低的问题。这种组合式的油气管道变形检测器受限于探测臂结构、数量等问题,结构相对复杂,检测精度高但运行成本也较高,且在管内多变流场等复杂环境中易引发检测器关键零部件脱落等机械故障的风险。

针对上述问题,本文提出一种柔性测径传感器,可有效检测管内多处缺陷,且不易损伤管壁。结合 ABAQUS 有限元分析软件建立柔性测径传感器仿真模型,模拟该传感器在缺陷管道内实际运行情况。分析当其产生拉伸及压缩变形时,输出应变特性的差异性,进而讨论应变片与柔性测径盘的内置关系对柔性测径传感器检测灵敏度的影响,从而确定不同厚度下应变片的最佳内置位置,并通过搭建柔性传感器性能检测实验台分析其动态精度。建立“三因素三水平”试验训练库,通过 BP 神经网络构建柔性测径传感器各结构参数-应变输出特性预测模型,并利用遗传算法确定其最优参数组合。

1 柔性测径传感器有限元模型

以柔性测径传感器为检测部件的油气管道柔性测径清管器,其结构设计如图1(a)所示,基本组成包括钢制骨架、导向板、密封皮碗、间隔皮碗及柔性测径传感器,在

满足常规管道清洁作业的同时还可对管内变形处进行检测。

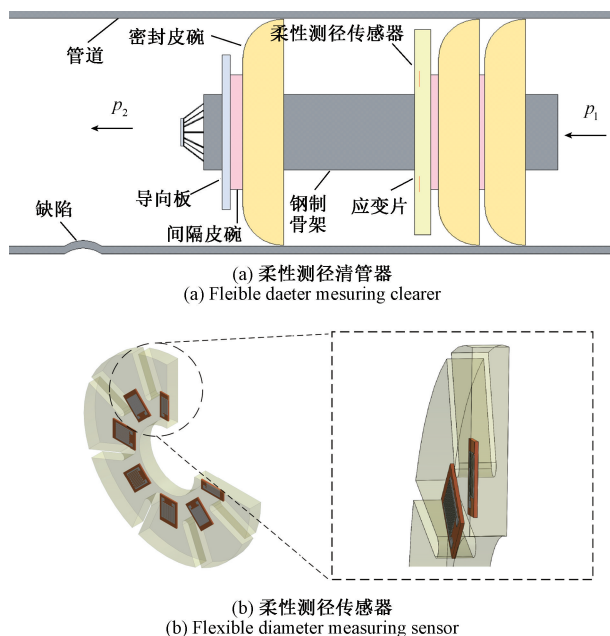


图1 柔性测径传感器与清管器示意图

Fig. 1 Diagram of the flexible sizing sensor and pipe the cleaner

管内环境与介质类型、介质流速、管内温度以及压力等因素密切相关,高精度的检测臂在复杂的管内环境中可靠性较低,本文设计的结构较为简单的柔性测径传感器,其本质实则是一个类似于传感器的具备测试管道变形的执行机构,可根据管径的不同来对柔性传感器进行系列化设计,将应变片通过浇筑的方式内置于柔性测径盘中使其不易受大多数复杂环境的影响。柔性测径传感器主要由内置电阻式应变片的超弹性柔性测径盘构成,如图1(b)所示,柔性测径盘为聚氨酯材质,其外径略小于管道内径,正常运行情况下不会与管壁产生接触,只有凹陷超过管道内径的5%时才会被检测到。其工作原理为:当柔性测径清管器在无变形管段运行时,柔性测径传感器不与管壁发生接触。当柔性测径清管器越过管道变形处时,柔性测径传感器由于与管内缺陷发生碰撞而产生变形,输出与管道缺陷有确定关系的应变信号;转换元件为电阻式应变片,将敏感元件输出的应变信号基于应变效应转换成电信号。变换电路对应变片输出的电压信号进行放大调制,使其在辅助电源电脑终端可完整采集柔性传感器越过管内缺陷的始末过程。待柔性测径清管器完全通过变形管段后,应变数据恢复平稳不发生波动,直至运行至下一缺陷处。

基于柔性测径传感器的油气管道内检测技术,其检测精度受管道服役环境影响较小,既可以满足对管内多

个变形处进行测量,同时能够降低引发管道故障的风险。此外,该传感器具备结构简单、通过性强、可重复利用的优势,可广泛适用于不同管径下的管道变形检测。

1.1 应变片模型

电阻应变片结构主要由基底、敏感栅、覆盖层等组成^[11],其结构如图 2(a)所示。凭借体积小、重量轻、易于与试件表面共形等优点,电阻式应变片已应用于航空航天、医疗、建筑、汽车等领域^[12-14]。

敏感栅是将弹性体应变转换为电阻变化的元件,实际敏感栅的形状为栅栏状,考虑越过管内缺陷时敏感栅整体变形与其形状并无直接关联,并且为使在有限元仿真过程中其非线性收敛性更强,将敏感栅形状简化,其结构如图 2(b)所示。根据柔性测径盘通过管内缺陷时的应变模拟分析^[6],并结合其他学者提出的可提升应变片综合性能的主要结构参数^[15-18],选择敏感栅的长 L_s 为 18 mm,宽 W_s 为 7 mm,厚度 T_s 为 0.02 mm,各部分结构尺寸材料参数如表 1 所示。

电阻应变片各部分的性能特性及各部分之间的内在关系对应变片的检测性能有着直接影响。因此,分别构建柔性测径盘及应变片三维有限元仿真模型,当应变片被内置于不同深度位置时越过管内缺陷,分析敏感栅在管内缺陷 4 个典型位置的应变输出特性,其示意图如图 2(c)所示。

测径盘的厚度为 t_g ,在 $(0, t_g)$ 内可做无穷分割,即可划分无限个分割单元 Δx ,如图 2(d)所示,则应变片可放置在 $\Delta x d$ 深度处。讨论应变片内置于 $0.1 t_g, 0.2 t_g, 0.25 t_g, 0.3 t_g, 0.4 t_g, 0.5 t_g, 0.75 t_g$ 时,当柔性测径传感器越过管内缺陷最高处,敏感栅的应变输出特性及应变灵敏度的变化规律。

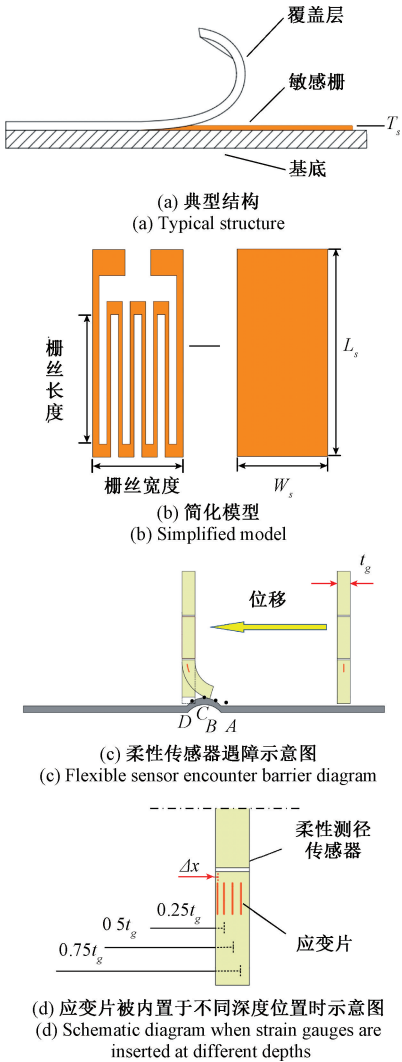


图 2 应变片和柔性测径传感器

Fig. 2 Strain gauges and flexible sizing sensors

表 1 应变片各部分结构尺寸及材料参数

Table 1 Structural dimensions and material parameters of each part of the strain gauge

部位	结构尺寸/mm	材料	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模量/MPa	泊松比
覆盖层	18×7×0.01	酚醛树脂	1 400	4 820	0.40
敏感栅	18×7×0.02	康铜	8 900	160 000	0.31
基底	18×7×0.03	三氧化二铝	2 770	3 500	0.33

1.2 柔性测径盘模型

本文使用的柔性测径盘如图 3(a)所示,依照测径盘实际形状,以“U”形将盘分割成 8 瓣。该测径盘的外径 D_g 为管道内径 D 的 95%,其值为 196.64 mm; D_r 表示刚体的外径,即测径盘的内径,为 51 mm; T_r 表示每瓣之间的距离,为 10 mm; t_g 是测径盘的厚度,为 20 mm。在柔性测径盘根部中心位置放置应变片,柔性测径盘截面圆心至应变片端部距离 L_g 为 28 mm。柔性测径盘为聚氨酯材料,硬度为 70

HS,材料常数 C_{10} 为 0.773 7, C_{01} 为 0.386 8。

1.3 管道及管内缺陷模型

本文以 8 英寸管道为应用对象,管道外径 D_p 为 219 mm,管道的壁厚 t 为 6 mm。管内缺陷的形态、大小通常由深度、长度和宽度决定,针对不同管径的管道,其缺陷深度有着不同的评价标准^[19-25],本文使用的缺陷如图 3(b)所示, H 是缺陷的深度,为 15 mm。从管道的轴向看,逆时针方向是正方向,缺陷的中心位于 270°。

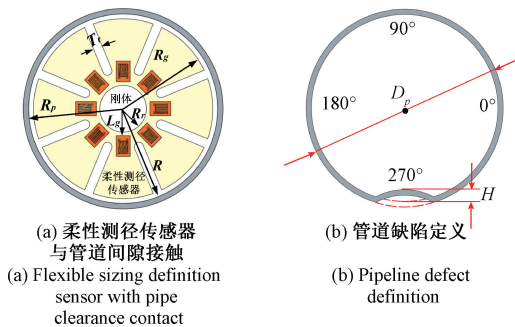


图 3 管内示意图
Fig. 3 In-pipe diagram

1.4 柔性测径传感器有限元模型及含缺陷管道的有限元模型

本文结合 ABAQUS 有限元软件构建柔性测径传感器仿真模型^[26],参考应变片浇筑内置于柔性测径盘的 实际过程,柔性测径盘内部依据应变片结构尺寸进行镂空 处理,仿真模型采用六面体单元网格,在与管道缺陷接触 的柔性测径传感器边缘进行倒角处理并进行网格加密, 有助于非线性材料收敛,该模型共计 139 751 个网格单 元。管道整体仿真模型采用六面体单元网格,共计 15 795 个网格单元,管道缺陷处,采用四面体单元进行局 部网格划分,共计 5 059 个网格单元,含缺陷管道模型如 图 4(a)所示。

管道模型的杨氏模量设为 2.01 MPa,泊松比为 0.3。由于管段在整体过程中无轴向位移,管道外壁及 缺陷处受到完全约束,对管道缺陷处做简化处理。柔性 测径传感器在含缺陷管道运行时的有限元模型如图 4(b) 所示。

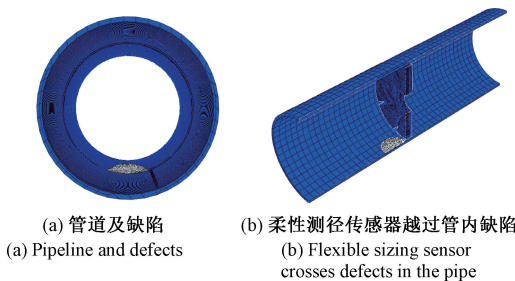


图 4 有限元模型
Fig. 4 Finite element model

2 柔性测径传感器过管道缺陷运行分析

2.1 验证应变片模型的合理性

将栅栏状敏感栅简化为板状,能使仿真过程中应变 片的非线性收敛性更强。所以为了验证该简化分析的合

理性与有效性,采用 ABAQUS 有限元软件分别建立等强 度梁、栅栏状敏感栅以及板状敏感栅三维模型,各部分的 力学性能如表 2 所示,等强度梁左端施加全约束,右端施 加 20 N,各部分均采用六面体实体单元 C3D8R 划分 网格。

表 2 各部分力学性能及几何尺寸

Table 2 Mechanical properties and geometric dimensions of each part

组成部分	材料	弹性模量/GPa	泊松比	几何尺寸/mm
等强度梁	40CrNiMoA	210	0.3	50×10×2
栅栏状敏感栅	康铜	160	0.31	10×7×0.02
板状敏感栅	康铜	160	0.31	18×7×0.02

等强度梁及敏感栅应变云图如图 5 所示,分析可知 敏感栅的形状对等强度梁的应变几乎没有影响。由图 5 可知,栅栏状敏感栅所受最大应变为 $1.341\times10^{-3}\varepsilon$,最小 应变为 $2.874\times10^{-4}\varepsilon$,板状敏感栅所受最大应变为 $1.290\times10^{-3}\varepsilon$,最小应变为 $3.184\times10^{-4}\varepsilon$,两种形状的敏 感栅的应变分布均成“条纹状”。取其单元平均应变作 为敏感栅的测量值,栅栏状与板状的应变对比如表 3 所 示,其单元平均应变误差为 2.48%,小于 5%,即敏感栅的 简化模型合理有效。

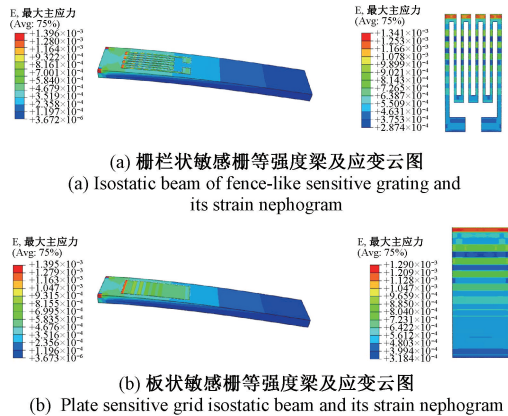


图 5 栅栏状敏感栅和板状敏感栅

Fig. 5 Fence-like sensitive grilles and plate sensitive grilles

表 3 栅栏状与板状敏感栅应变对比表

Table 3 Bar and plate sensitive grid strain comparison table

栅栏状敏感栅总应变值 / ε	板状敏感栅总应变值 / ε	栅栏状敏感栅单元平均应变值 / $(\times10^{-3}\varepsilon)$	板状敏感栅单元平均应变值 / $(\times10^{-3}\varepsilon)$	单元平均应变误差 /%
5.34	10.44	0.606	0.591	2.48

2.2 柔性测径传感器越过管道缺陷过程的应变分析

因柔性测径盘中每一瓣均有相同的应变片浇筑其内,故仅需选取其中某一瓣进行模拟仿真和实验测试。阵列中其它瓣若遇管内凹陷等变形情况,其应变情况基本相同。分析柔性测径传感器越过管道缺陷过程中应变的变化情况,当应变片被内置于 $0.5t_g$ 深度处,柔性测径传感器越过管内缺陷的始末过程及 4 个典型位置对应的敏感栅应变云图如图 6 所示。

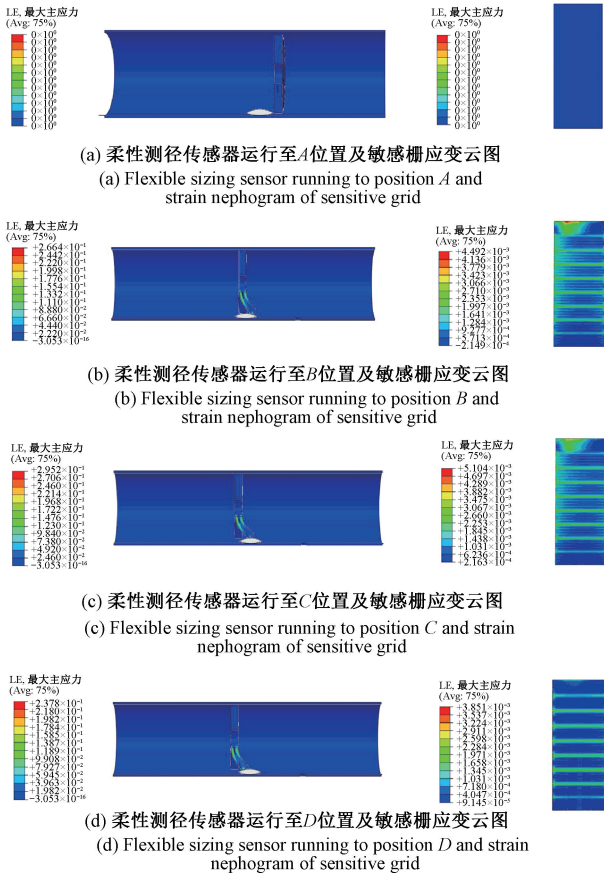


图 6 柔性测径传感器及敏感栅模拟过程及结果

Fig. 6 Flexible sizing sensors and simulation process and results for sensitive grids

柔性测径传感器接触管内缺陷前,不与管壁发生碰撞,无应变变化。当传感器运行至管内缺陷处,底瓣开始接触缺陷表面并紧贴其轮廓被向上“抬起”,柔性测径传感器产生变形,应变随之增大。当传感器运行至缺陷顶点处时,底瓣径向上升到最大高度,柔性测径传感器变形达到最大。随后,底瓣沿缺陷轮廓“落下”,柔性测径传感器变形逐渐恢复,应变随之减小。当完全越过管内缺陷,柔性测径传感器恢复原状,底瓣所受应变也恢复至 0。

由图 6 可知,敏感栅在越过管内缺陷始末过程中,其表面分布呈“条纹状”且边界处的应变值更大。条纹处

的应变随缺陷高度的升高而增大,当运行至缺陷最高处时敏感栅的应变值达到最大,其值为 $5.104 \times 10^{-3} \varepsilon$,而后随柔性测径传感器的回落而减小。敏感栅条纹处周围应变变量也有相同增长或下降的趋势。

3 柔性测径传感器检测灵敏度的研究

3.1 应变类型对柔性测径传感器应变输出特性的影响

在柔性测径传感器越过缺陷的过程中,底瓣发生弯曲变形,其拉伸面沿着其半径方向的应变为拉应变;其压缩面沿着其半径方向的应变为压应变;在柔性测径盘厚度中心处受弯,沿其半径方向的应变为弯曲应变。将应变片置于 $0.25t_g$ 拉应变处、 $0.5t_g$ 弯曲应变处及与 $0.25t_g$ 处沿厚度中心对称的 $0.75t_g$ 压应变处时,在管道缺陷最高处,柔性测径传感器及敏感栅的应变云图如图 7 所示。

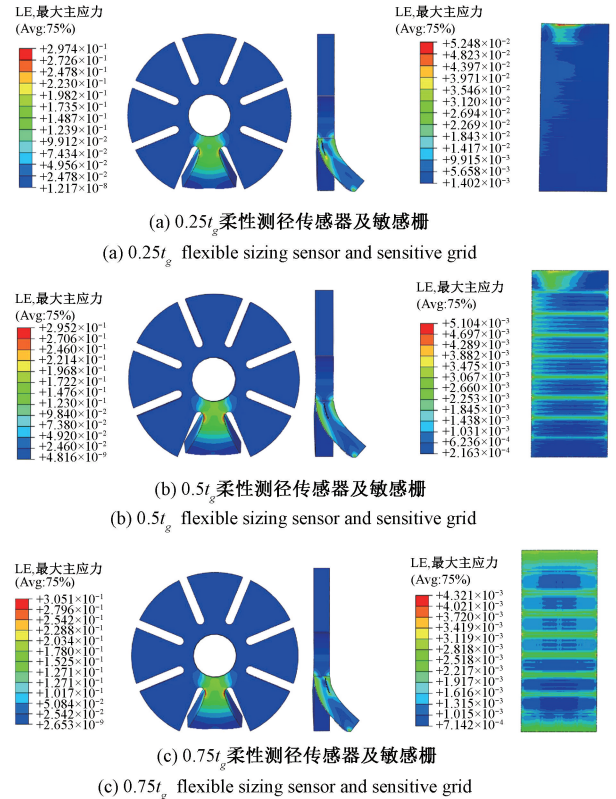


图 7 应变片置于拉、弯、压区域不同深度处的应变分布

Fig. 7 Strain distribution of strain gauges placed at different depths in the tension, bending and compression regions

柔性测径传感器过缺陷时的应变分布呈“水波纹”状,并沿圆盘半径方向向边缘方向逐级递减。当应变片置于 $0.25t_g$ 拉应变深度处时,除与测径盘接触边缘处发生应变突变外,敏感栅应变分布整体均匀;在 $0.5t_g$ 弯曲应变深度处和 $0.75t_g$ 压应变深度处,敏感栅应变分布呈明显“条纹状”,且在置于弯曲应变处时,条纹更加细化。

随着应变片放置厚度的加深,敏感栅最大应变从 $5.248 \times 10^{-2} \varepsilon$ 减小至 $4.321 \times 10^{-3} \varepsilon$ 。

应变片在实际检测过程中,敏感栅的整体变形量会引起应变片阻值发生相应变化,在有限元分析中,以敏感栅单元平均应变作为应变片测量值。当应变片置于 $0.25t_g$ 拉应变处、 $0.5t_g$ 弯曲应变处及 $0.75t_g$ 压应变处时,柔性测径传感器从刚接触缺陷至缺陷最高处的单元平均应变—时间变化曲线如图8所示。可以看出,在柔性测径传感器向前运动的过程中,随着缺陷深度的加深,敏感栅单元平均应变也随之增大。其中,当应变片置于在 $0.25t_g$ 拉应变处时,敏感栅在缺陷最高处的单元平均应变远大于应变片置于 $0.75t_g$ 压应变时的值,而应变片置于 $0.5t_g$ 弯曲应变时,敏感栅单元平均应变值最小。据此,应在拉应变范围内寻找更优放置位置。

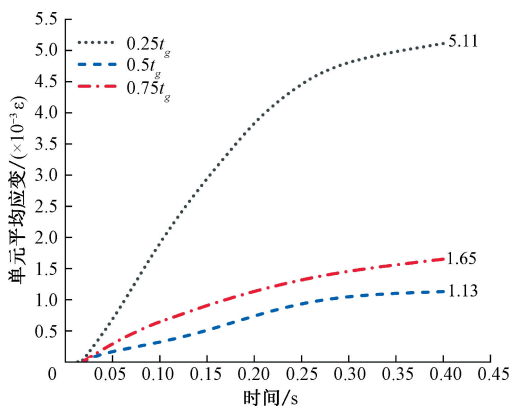


图8 应变片置于 $0.25t_g$ 、 $0.5t_g$ 、 $0.75t_g$ 时单元平均应变—时间变化曲线

Fig. 8 Cell average strain value-time variation curve when strain gauges are placed at $0.25t_g$, $0.5t_g$, $0.75t_g$

3.2 柔性测径传感器检测灵敏度与应变片内置位置关系

将柔性测径盘厚度从 $0 \sim 0.5t_g$ 拉应变区域内进行五等分,应变片置于 $0.1t_g$ 、 $0.2t_g$ 、 $0.3t_g$ 、 $0.4t_g$ 深度处,柔性测径传感器越缺陷的模拟仿真结果如图9所示。

应变片置于 $0.1t_g$ 时,应变片映射到柔性测径盘外表面区域应变变化更小,这是由于应变片材质比聚氨酯材质硬度更大,其附近区域更难弯曲,随着应变片放置深度的加深,柔性测径盘外表面小应变区域愈来愈小。其敏感栅应变分布整体均匀,随拉应变逐渐减小,敏感栅上应变分布逐渐显现条纹状。

不同加载条件下引起柔性测径传感器输出应变的变化称为柔性测径传感器的灵敏度。图10显示了当管内缺陷高度分别为12、15和18 mm,柔性测径传感器越过管内缺陷最高处位置时,敏感栅的单元平均应变与时间的变化曲线,通过对结果进行数据分析和线性拟合,对比分析单元平均应变随缺陷深度变化曲线,得到柔性测径传感器检测灵敏度与应变片内置位置关系。

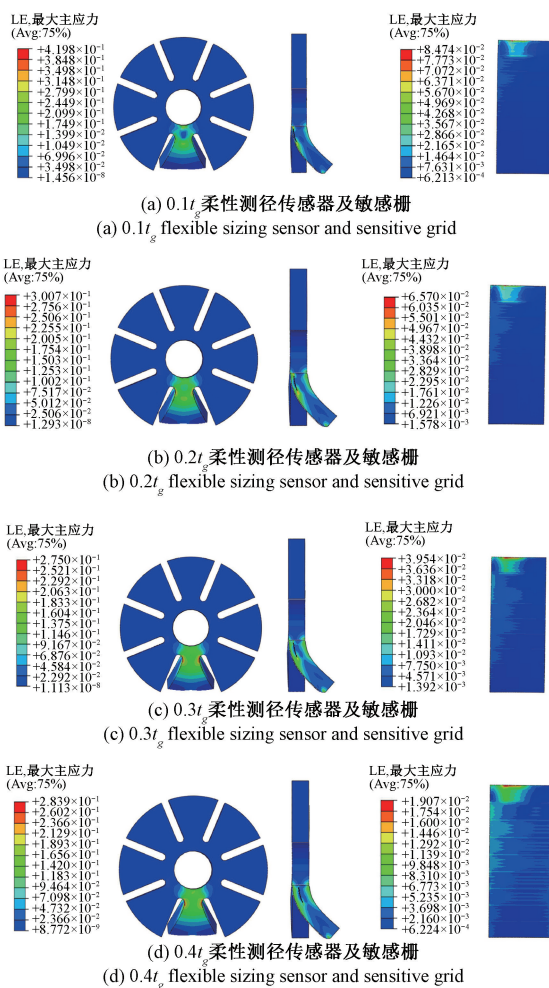


图9 应变片置于拉区域不同深度处的应变分布

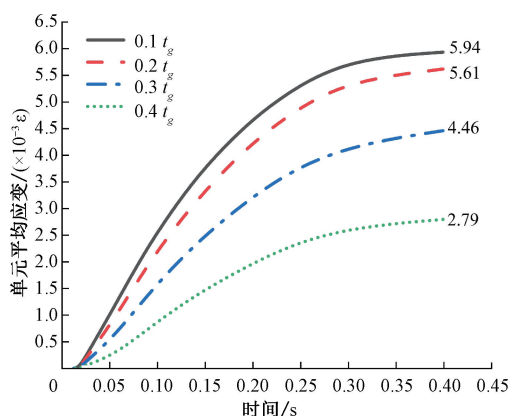
Fig. 9 Strain distribution of strain gauges placed at different depths in the tensile strain region

由图10(a)所示,应变片置于 $0.1t_g$ 时,敏感栅在缺陷最高处的单元平均应变达到极值,为 $5.94 \times 10^{-3} \varepsilon$,且随着应变片内置深度的增加,敏感栅单元平均应变逐渐减小,且减小的程度愈来愈大。由图10(b)拟合曲线可得,在越过相同高度管内缺陷下,应变片内置于 $0.1t_g$ 、 $0.2t_g$ 、 $0.3t_g$ 、 $0.4t_g$ 深度处4条曲线的斜率分别为 0.2856×10^{-3} 、 0.2703×10^{-3} 、 0.2461×10^{-3} 、 $0.1999 \times 10^{-3} \varepsilon/\text{mm}$ 。

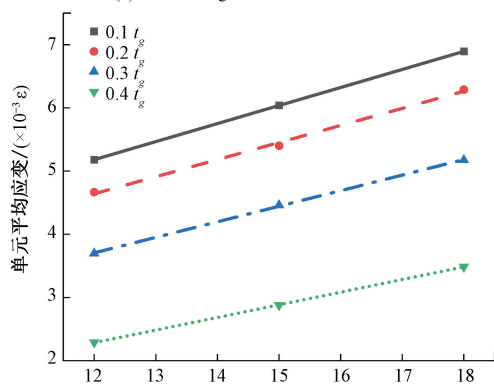
因此,当应变片放置 $0.1t_g$ 处时,柔性测径传感器检测应变灵敏度更优,故将应变片置于 $0.1t_g$ 处作为后续柔性测径传感器的结构参数优化分析。

3.3 柔性测径传感器功能测试

选用型号为 BX120-10AA 的应变片用于本次实验,该应变片基底尺寸为 $18 \text{ mm} \times 7 \text{ mm}$,敏感栅尺寸为 $10 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 。柔性测径盘用硬度 70HS 的聚氨酯材质制成,其外径 D_g 为 196 mm、内径 D_r 为 51 mm、厚度 T_r 为 10 mm,与仿真模型中一致。夹具是一对由刚性材质制成的阶梯状



(a) 单元平均应变时间变化曲线
(a) Unit average strain-time variation curve



(b) 灵敏度拟合曲线
(b) Sensitivity fitted curve

图 10 应变片置于拉应变区域曲线

Fig. 10 Strain gauges placed in the tensile strain area curve

圆台,其外径 D_f 为 60 mm,内径 d_f 为 50 mm,内孔直径 d_h 为 8 mm。

柔性测径传感器过凸起缺陷前后过程可分为 4 个阶段:遇缺陷前的平缓运行阶段、过凸起缺陷的越峰阶段及回落阶段、离开缺陷后的振荡回稳阶段,如图 11 所示。

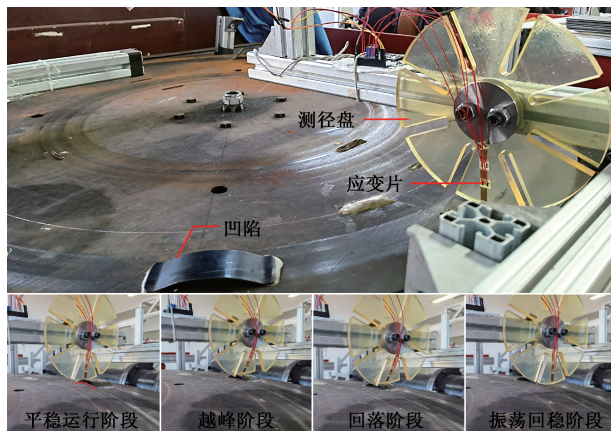


图 11 柔性测径传感器过缺陷过程

Fig. 11 Process diagram of over defect of flexible caliper sensor

在柔性测径传感器 0.3 m/s 的速度越过 10 mm 高度缺陷过程中,应变片采集输出电压信号如图 12 所示。根据该电压-时间曲线,可以表征出应变片测量的缺陷高度值,应变片拟合值与实际值相比,检测误差为 0.508%,表明该柔性测径传感器检测效果较好。

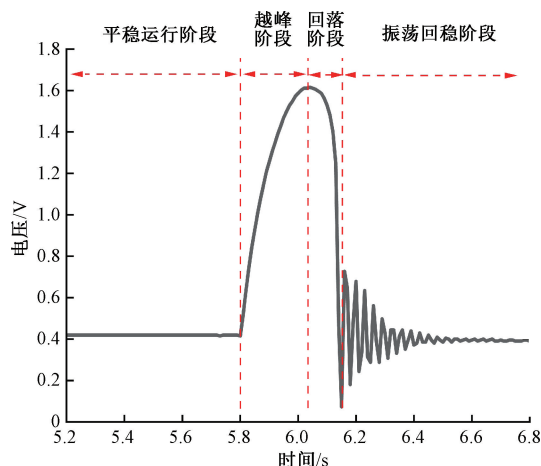


图 12 柔性测径传感器过 10 mm 凸起缺陷应变片电压信号图

Fig. 12 Flexible sizing sensor over 10 mm raised defect strain gauge voltage signal

4 柔性测径传感器模型优化算法

4.1 训练数据库及验证数据库的建立

为使柔性测径传感器识别及量化管内缺陷时具有更高的检测灵敏度,需要对柔性测径传感器的结构尺寸进行优化和调整,其关键尺寸有外径 D_g ,厚度 t_g ,每瓣之间的间隙 T_g 。因此,结合 BP 神经网络及遗传算法,综合分析以上参数对敏感栅测得的单元平均应变的影响,得到最终所需要的最优参数。

神经网络建立的目的是通过训练集建立柔性测径传感器几何参数与其单元平均应变之间的非线性关系,并将这种非线性关系进行保存^[27]。为了对神经网络预测性能进行验证,改变其 3 个参数,即外径、厚度、瓣间距等,构建优化模型,因优化参数为 3 个,每个参数具有 3 组不同数值,1 个输出参量为单元平均应变,取 27 组仿真模拟数据作为训练样本,如表 4 所示。

4.2 基于 BP 神经网络的预测模型的建立及误差分析

选用表 4 中的 27 组试验数以及试验结果作为 BP 神经网络的训练样本建立不同参数下柔性测径传感器最大单元平均应变的预测模型。将输入层神经元数量设置为 3,与柔性测径传感器几何参数对应;输出层神经元设置为 1,为优化参数单元平均应变。设置不同隐含层节点

表 4 柔性测径传感器几何参数 BP 神经网络训练样本集
Table 4 Training sample set of BP neural network for geometric parameters of flexible sizing sensors

样本编号	训练样本			单元平均 应变/ ε
	外径 /mm	厚度 /mm	瓣间距 /mm	
1	93% D	12	10	2.99×10^{-3}
2	93% D	12	12	2.09×10^{-3}
3	93% D	12	14	1.99×10^{-3}
4	93% D	15	10	3.52×10^{-3}
5	93% D	15	12	2.48×10^{-3}
6	93% D	15	14	2.42×10^{-3}
7	93% D	18	10	4.57×10^{-3}
8	93% D	18	12	3.14×10^{-3}
9	93% D	18	14	3.04×10^{-3}
10	95% D	12	10	3.04×10^{-3}
11	95% D	12	12	2.28×10^{-3}
12	95% D	12	14	3.06×10^{-3}
13	95% D	15	10	4.11×10^{-3}
14	95% D	15	12	3.16×10^{-3}
15	95% D	15	14	4.20×10^{-3}
16	95% D	18	10	5.20×10^{-3}
17	95% D	18	12	4.19×10^{-3}
18	95% D	18	14	5.47×10^{-3}
19	97% D	12	10	3.02×10^{-3}
20	97% D	12	12	2.26×10^{-3}
21	97% D	12	14	2.21×10^{-3}
22	97% D	15	10	4.17×10^{-3}
23	97% D	15	12	2.83×10^{-3}
24	97% D	15	14	2.87×10^{-3}
25	97% D	18	10	5.81×10^{-3}
26	97% D	18	12	4.17×10^{-3}
27	97% D	18	14	3.99×10^{-3}

数,进行输出结果测试,选择最优隐含层节点数。最终确定隐含层节点数为 10 个。

通过 MATLAB 进行神经网络的训练。BP 神经网络的系统误差为 0.048 56。通过决定系数 R 量化该模型的预测能力。根据图 13,计算得到预测结果的决定系数 R 为 0.903 97,较为接近 1,可以判定该 BP 神经网络的性能较好,适用于遗传算法寻优。

4.3 基于遗传法参数寻优

利用 MATLAB 编写遗传算法程序,遗传算法参数设为初始种群规模 50,最大计算代数 200,交叉概率 0.4,变异概率 0.02。设定柔性测径传感器外径范围为 90% ~

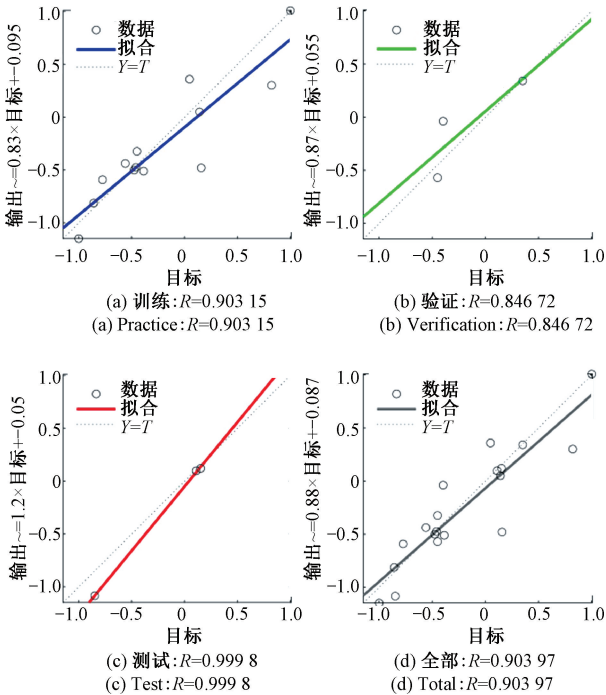


图 13 训练过程中 BP 神经网络的拟合效果

Fig. 13 Fitting effect of BP neural network during training

100% D,厚度范围为 0~20 mm,瓣间距范围为 0~20 mm。200 次迭代后,得到优化后柔性测径传感器的最佳几何参数,如表 5 所示。

表 5 优化最终结果表
Table 5 Optimization final results table

序号	外径 /mm	厚度 /mm	瓣间距 /mm	最大单元平均 应变值/ ε
1	97.5% D	19	8	6.2×10^{-3}

为验证遗传算法寻优结果,采用优化出的几何参数进行仿真模拟,如图 14 所示,通过比较模拟结果和遗传算法优化结果,验证优化模型参数的合理性。结果表明,模拟单元平均应变值为 $6.28 \times 10^{-3} \varepsilon$,误差为 1.27%,且应变灵敏度达到最佳,表明遗传算法寻优结果可靠。

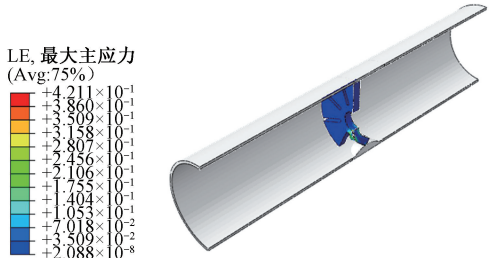


图 14 寻优参数仿真模拟结果图

Fig. 14 Simulation results of optimization-seeking parameters

5 结 论

本文为解决传统测径清管器测径铝盘不可重复利用、不能对管内多个内凹陷变形进行检测的缺点,设计了以柔性测径传感器为检测单元的柔性测径清管器方案,形成了柔性测径传感器原理样品,并进行了功能验证及实验测试。研究表明,所设计的柔性测径传感器可以较好的表征缺陷的尺寸,且表面应变沿半径方向呈“水波纹”状逐级递减分布,而内置应变片应变分布呈“条纹”状。当应变片内置于拉伸变形区域时,柔性测径传感器应变输出更优,且越接近拉伸面其检测灵敏度越高,越有利于提升柔性测径传感器的检测性能。通过BP神经网络和遗传算法对柔性测径传感器结构参数进行了优化,最终优化尺寸为柔性测径传感器的外径为管道内径的97.5%,厚度为19 mm,瓣间距为8 mm。本研究对于油气管道的变形检测作业具有一定应用参考价值,但由于实验条件与时间的限制,研究中忽略了温度等因素对应变片的影响,造成结果可能与实际有一定误差。在后续工作中,考虑对耦合模型进一步优化。

参考文献

- [1] 胡朋,陈金忠,康小伟,等. 长输油气管道内检测数据的比对[J]. 无损检测, 2021, 43(7): 90-94.
HU P, CHEN J ZH, KANG X W, et al. Internal inspection data comparison in long distance oil and gas pipelines [J]. Nondestructive Testing, 2021, 43(7): 90-94.
- [2] 李晓龙,陈金忠,马义来,等. 油气管道复合变形内检测技术研究[J]. 石油机械, 2021, 49(8): 152-158.
LI X L, CHEN J ZH, MA Y L, et al. A composite in-line detection technology for oil and gas pipeline deformation [J]. China Petroleum Machinery, 2021, 49(8): 152-158.
- [3] 杨理践,耿浩,高松巍. 长输油气管道漏磁内检测技术[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(8): 1736-1746.
YANG L J, GENG H, GAO S W. Magnetic flux leakage internal detection technology of the long distance oil pipeline [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(8): 1736-1746.
- [4] 杨理践,赵东升,耿浩,等. 漏磁信号增强算法研究[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(2): 176-186.
YANG L J, ZHAO D SH, GENG H, et al. Research on the MFL signal enhancement algorithm [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(2): 176-186.
- [5] 杨理践,邢燕好,张佳,等. 基于电磁超声导波的铝板裂纹缺陷检测方法[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(4): 150-160.
YANG L J, XING Y H, ZHANG J, et al. Crack defect detection of aluminum plate based on electromagnetic ultrasonic guided wave [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(4): 150-160.
- [6] 张行,刘彤,刘思敏,等. 管道柔性测径清管器的设计及测径盘性能分析[J]. 石油机械, 2021, 49(8): 132-141.
ZHANG H, LIU T, LIU S M, et al. Design of flexible caliper pig and analysis of gauging plate performance of pipeline [J]. China Petroleum Machinery, 2021, 49(8): 132-141.
- [7] 辛佳兴,李晓龙,朱宏武,等. 油气管道涡流变形检测探头研制[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(33): 13654-13659.
XIN J X, LI X L, ZHU H W, et al. Development of the eddy current deformation detection probe in oil and gas pipeline [J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(33): 13654-13659.
- [8] 李睿,郑健峰,富宽,等. 大口径管道投产前聚氨酯测径内检测器研制与应用[J]. 油气储运, 2020, 39(6): 638-644.
LI R, ZHENG J F, FU K, et al. Development and application of polyurethane inner diameter detector for large diameter pipelines before service [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2020, 39(6): 638-644.
- [9] PIAO G, GUO J, HU T, et al. A novel pulsed eddy current method for high-speed pipeline inline inspection[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2019, 295: 244-258.
- [10] PIAO G, GUO J, HU T, et al. Fast reconstruction of 3D defect profile from MFL signals using key physics-based parameters and SVM[J]. NDT & E International, 2019, 103: 26-38.
- [11] 蔡元奇,张悦,石祥宇,等. 电阻应变片原位温度补偿方法[J]. 武汉大学学报(工学版), 2020, 53(7): 591-596.
CAI Y Q, ZHANG Y, SHI X Y, et al. Method of in-situ temperature compensation for resistance strain gauge [J]. Engineering Journal of Wuhan University,

- 2020, 53(7): 591-596.
- [12] 王楷焱,王灵犀,任晓雪,等. 一种基于电阻应变片的发动机悬置传递力测试研究[J]. 沈阳工程学院学报(自然科学版), 2021, 17(2): 79-83, 91.
WANG K Y, WANG L X, REN X X, et al. Research on test method of engine mount force based on resistance strain gauge [J]. Journal of Shenyang Institute of Engineering (Natural Science), 2021, 17(2): 79-83, 91.
- [13] 徐智超,周延辉,赵振刚,等. 一种带温度补偿的光纤 Bragg 光栅应变传感器设计及工程应用[J]. 仪表技术与传感器, 2017(3): 5-8.
XU ZH CH, ZHOU Y H, ZHAO ZH G, et al. Optical fiber Bragg grating strain sensor with temperature compensation design and engineering [J]. Instrument Technique and Sensor, 2017(3): 5-8.
- [14] 江舒,李涛,林杰俊,等. 船用光纤光栅应变传感器开发与应用研究[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(6): 35-42.
JIANG SH, LI T, LIN J J, et al. Development and application of the FBG strain sensor for ship [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(6): 35-42.
- [15] 宋瑞如,艾廷廷,李成刚,等. 应变片敏感栅参数对结构振动及寿命的影响[J]. 沈阳航空航天大学学报, 2021, 38(1): 1-7.
SONG R R, AI Y T, LI CH G, et al. Effect of strain gage sensitive grid parameters on structural vibration and life [J]. Journal of Shenyang Aerospace University, 2021, 38(1): 1-7.
- [16] 余航,舒安庆,丁克勤. 电阻应变片敏感栅栅丝尺寸对测量精度影响的研究[J]. 中国仪器仪表, 2021(4): 71-75.
YU H, SHU AN Q, DING K Q. Research on the influence of the size of strain gauge sensitive grid wire on measurement accuracy [J]. China Instrumentation, 2021(4): 71-75.
- [17] 温开旭,龙兴明,罗海军,等. 电阻应变电桥的激励源对测试灵敏度的影响[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版), 2017, 34(6): 89-92.
WEN K X, LONG X M, LUO H J, et al. Influence of excitation source of resistance strain bridge on test sensitivity [J]. Journal of Chongqing Normal University (Natural Science), 2017, 34(6): 89-92.
- [18] 冷建成,钱万东,周临风. 基于应力监测的油气管道安全预警试验研究[J]. 石油机械, 2021, 49(6): 139-144.
LENG J CH, QIAN W D, ZHOU L F. Experimental study on safety warning of oil and gas pipeline based on stress monitoring [J]. China Petroleum Machinery, 2021, 49(6): 139-144.
- [19] ZHANG H, DONG J, CUI C, et al. Stress and strain analysis of spherical sealing cups of fluid-driven pipeline robot in dented oil and gas pipeline [J]. Engineering Failure Analysis, 2020, 108: 104294.
- [20] SUN M, ZHAO H, LI X, et al. A new evaluation method for burst pressure of pipeline with colonies of circumferentially aligned defects[J]. Ocean Engineering, 2021, 222: 108628.
- [21] QIN G, CHENG Y F. A review on defect assessment of pipelines: Principles, numerical solutions, and applications [J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2021, 191: 104329.
- [22] XIE M, TIAN Z. A review on pipeline integrity management utilizing in-line inspection data [J]. Engineering Failure Analysis, 2018, 92: 222-239.
- [23] 崔凯燕,王晓霖,杨文,等. 基于内检测评价的管道安全维修决策[J]. 中国安全科学学报, 2019, 29(2): 172-177.
CUI K Y, WNAG X L, YANG W, et al. ILI assessment based policy-making on pipeline safety maintenance [J]. China Safety Science Journal, 2019, 29(2): 172-177.
- [24] ZHANG H, TIAN Z. Failure analysis of corroded high-strength pipeline subject to hydrogen damage based on FEM and GA-BP neural network [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2022, 47(7): 4741-4758.
- [25] 马欣,李杰,薛涛,等. 含内腐蚀凹陷的压力管道应力应变研究[J]. 塑性工程学报, 2018, 25(3): 267-273.
MA X, LI J, XUE T, et al. Study on stress and strain of pressure pipe with inner corrosion depression [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2018, 25(3): 267-273.
- [26] 陈玟,张京英,李晓峰,等. 基于数值仿真对传感器安装位置的分析评估[J]. 图学学报, 2015, 36(6): 868-871.

CHEN M, ZHANG J Y, LI X F, et al. Assessment of sensor positions based on numerical simulation [J]. Journal of Graphics, 2015, 36(6):868-871.

- [27] XIN J, CHEN J, LI C, et al. Deformation characterization of oil and gas pipeline by ACM technique based on SSA-BP neural network model [J]. Measurement, 2022, 189: 110654.

作者简介



张行(通信作者),2011 年于中国石油大学(北京)获得学士学位,2016 年于中国石油大学(北京)获得博士学位,现为中国石油大学(北京)博士生导师、副教授,主要研究方向为油气智能装备设计理论及服役可靠性、油气设施监测技术与数据利用、油气管道完整性技术等。

E-mail: zhanghang@cup.edu.cn

Zhang Hang (Corresponding author) received his B. Sc. degree and Ph. D. degree both from China University of Petroleum, Beijing in 2011 and 2016, respectively. He is currently a Ph. D. advisor and an associate professor at China University of Petroleum, Beijing. His main research interests include oil and gas intelligent equipment design theory and service reliability, oil and gas facility monitoring and inspection technology and data utilization, oil and gas pipeline integrity technology, etc.



唐步云,2022 年于中国石油大学(北京)获得学士学位,现为中国石油大学(北京)硕士研究生,主要研究方向为油气智能装备设计理论及服役可靠性。

E-mail: 2022210724@student.cup.edu.cn

Tang Buyun received his B. Sc. degree from China University of Petroleum, Beijing in 2022. He is currently a master student

at China University of Petroleum, Beijing. His main research interests include oil and gas intelligent equipment design theory and service reliability.



刘彤,2018 年于辽宁石油化工大学获得学士学位,2022 年于中国石油大学(北京)获得硕士学位,现于国家管网集团北京管道有限公司北京输油气分公司工作,主要研究方向为油气管道完整性管理。

E-mail: liutong0061@163.com

Liu Tong received her B. Sc. degree from Liaoning Petrochemical University in 2018, and received her M. Sc. degree from China University of Petroleum, Beijing in 2022. She is currently working at Beijing Oil & Gas Transmission Sub-company, Pipe China Beijing Pipeline Co., Ltd. Her main research interests include oil and gas pipeline integrity management.



董绍华,2001 年于中国石油大学(北京)获得博士学位,现为中国石油大学(北京)安全与海洋工程学院博士生导师、二级教授,主要研究方向为安全工程、管道完整性管理技术、管道运行维护技术、管道安全评价技术、管道内检测技术等。

E-mail: shdong@cup.edu.cn

Dong Shaohua received his Ph. D. degree from China University of Petroleum, Beijing in 2001. He is currently a Ph. D. advisor and a professor (T2) in the College of Safety and Ocean Engineering at China University of Petroleum, Beijing. His main research interests include safety engineering, pipeline integrity management technology, pipeline operation and maintenance technology, pipeline safety evaluation technology, in-pipeline inspection technology, etc.