

DOI: 10.13382/j.jemi.B2205814

# 基于磁弹效应的悬跨管道应力检测方法研究\*

黄新敬 陈 乾 马金玉 李 健 封 皓

(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:**为了实现管道悬跨检测,并适应现场管道内检测器的快速移动状态以及对应力传感器阵列低功耗的要求,本文提出了一种弱交流磁化条件下基于磁弹效应的管壁应力检测方法。首先通过有限元仿真研究了管道悬跨的受力特性并确定了应力传感器部署方案。其次建立了阻抗法钢材应力测量模型,设计并制作了应力传感器,最后开展了实验验证。结果表明管道顶部和底部的轴向应力可以灵敏地表征管道悬跨状态;弹性应力变化范围为0~50 MPa时,传感器线圈阻抗与应力呈负线性单调关系,且灵敏度系数的线性拟合优度大于0.92;灵敏度随着激励频率增加而增加,当激励频率在30 kHz时,平均灵敏度系数为 $-0.018 \Omega/\text{MPa}$ ;单个传感器功耗不超过0.1 mW。

**关键词:**管道悬跨;应力测量;磁弹效应;管道力学分析

**中图分类号:** TP27;TH86 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8010

## Research on spanning pipeline stress measurement based on magnetoelastic effect

Huang Xinjing Chen Qian Ma Jinyu Li Jian Feng Hao

(State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** In order to detect pipeline spanning and adapt to the fast-moving state of in-pipeline detectors in the field and the low power consumption requirements of stress sensor arrays, this paper proposes a method of measuring the pipe wall stress based on magnetoelastic under weak alternating current. Firstly, stress characteristics of spanning pipeline are studied via finite element simulation, and the stress sensor deployment scheme is determined. Secondly, steel stress measurement model of electrical impedance method is established, and stress sensor is designed and fabricated. Finally, experimental verification is carried out. The results show that the axial stress at the top and bottom of the pipeline can sensitively characterize the spanning pipeline state; when the elastic stress varies from 0~50 MPa, the sensor coil impedance and the stress have a negative linear relationship, and the linear fitting goodness of the sensitivity coefficient is greater than 0.92; the sensitivity increases as the excitation frequency increases, and when the excitation frequency is 30 kHz, the average sensitivity coefficient is  $-0.018 \Omega/\text{MPa}$ ; the power consumption of a single sensor is less than 0.1 mW.

**Keywords:** pipeline spanning; stress measurement; magnetoelastic effect; pipeline mechanical analysis

## 0 引言

海底管道由于洋流侵蚀或海床起伏而失去地基土的支撑,会发生悬跨,并且悬跨在海底管道整个服役过程中始终存在、并不断发展和恶化。悬跨的出现改变了管道的载荷形式和受力状态,是许多海底管道破裂事故的直接原因。海底管道一旦破裂,将造成严重的环境污染甚

至生态灾难,以及昂贵的维修费用,因此有必要对海底管道悬跨进行检测。

海底管道悬跨检测方法可分为外检测法和内检测法。外检测法包括潜水员摸排法以及利用遥控式水下机器人(remotely operated vehicle, ROV)和自治式水下机器人(autonomous underwater vehicle, AUV)携带多波束测深仪、侧扫声纳、水下摄像机等<sup>[1-3]</sup>,对海底管道进行成像,判断管道悬跨的存在。潜水员法工作水深和距离有限,

收稿日期: 2022-09-13 Received Date: 2022-09-13

\* 基金项目: 国家自然科学基金(62073233)项目资助

ROV 和 AUV 都需要母船实时跟踪支持<sup>[4-5]</sup>, 检测周期长、成本高。外检测法可以识别出比较明显的悬跨, 但无法检测早期悬跨以及悬跨管道的弯曲应力状态。

内检测法采用内检测器, 如管道柱形内检测器 (pipeline inspection gauge, PIG)<sup>[6]</sup> 和管道球形内检测器 (spherical detector, SD), 对悬跨管道的振动、俯仰角、弯曲度等进行移动式巡检, 具有不受外部海底环境约束、检出性高、效率高等优势。文献[7]利用 PIG 对管道施加连续的正弦扫频载荷, 通过分析加速度谱, 确定管道是否发生悬跨以及跨度。文献[8]提出了利用 SD 记录的加速度数据来检测悬跨管道振动, 并通过数学分析和实验证明了加速度模量平方的交流分量可用于确定管道振动频率。文献[9]提出了一种利用 SD 和磁接近开关测量悬跨弯曲管道俯仰角的方法; 该方法要求 SD 能够定轴稳定地转动。文献[10-11]通过结构优化实现了 SD 围绕加速度计某个轴稳定旋转, 在气体管道中实现了利用加速度信号频率和直流分量表征管道弯曲度; 在输液管道中, 由于液体推力比较大, SD 滚动速度基本和流速相同, 因此加速度特征对输液管道俯仰角的灵敏度极低。

以上方法均是通过检测海底管道的形状改变来实现悬跨检测, 但存在成本高、传感器灵敏度低等一系列问题, 还可以通过检测弯曲应力来检测管道悬跨。目前常用的无损应力检测方法<sup>[12-15]</sup>主要包括涡流法、电阻应变片法、光纤光栅法、射线衍射法与磁弹效应法等。考虑到管道是铁磁性的, 具有非常明显的磁弹效应, 即, 管壁的磁畴会随着其受到的应力而产生变化, 外在表现为磁化、磁导率、附近磁场的改变以及磁各向异性等, 因此可以通过磁测应力来实现海底管道悬跨检测。磁测应力方法主要包括磁记忆法、磁巴克豪森法、磁各向异性法。这类方法的传感器必须搭载在 PIG 上才能实现对管壁应力的测量, 而 PIG 在管道内前后压差的作用下移动速度高达 1~5 m/s<sup>[16]</sup>, 给这些传统磁测应力方法带来了很大挑战。

磁记忆法通过检测试件表面的切向磁信号或法向磁信号来确定应力集中区, 不需要对管道施加额外的交流或直流磁化激励<sup>[17-18]</sup>。磁记忆法易受背景磁场干扰, 不能准确表征铁磁材料应力, 尚不能用于管道应力检测<sup>[19]</sup>。磁巴克豪森法需要利用电磁铁对被测试件施加低频变化的强幅励磁, 以产生比较明显的磁巴克豪森噪声<sup>[20-22]</sup>, 在相对静止状态下该噪声与应力存在良好的线性关系。磁巴克豪森法难以匹配现场管道 PIG 的快速移动状态以及对低功耗的要求。磁各向异性法利用钢材磁特性随着磁化方向与应力方向的夹角变化而变化的现象来确定主应力方向, 利用磁特性大小与应力大小的关系来确定应力幅值<sup>[23]</sup>。磁各向异性传感器以四磁极居多<sup>[24-26]</sup>, 也发展出了三磁极<sup>[25]</sup>、五磁极<sup>[27]</sup>、六磁极<sup>[25]</sup>、九磁极<sup>[28]</sup>传感器。磁各向异性传感器结构较为复杂, 对内

检测器的加工装配要求较高, 磁极多就要求与管壁的接触点多, 容易因接触不良导致测量不准确等问题, 只有少数尝试用于管道应力集中检测<sup>[24]</sup>, 不能用于管壁应力的快速移动检测。

基于磁弹效应的应力检测方法设备具有小巧简易、低成本、灵敏度较高等优势, 适用于铁磁性材料应力状态的接触或非接触式定期检测与评估。但是上述研究没有考虑传感器在长距离、快速移动式管道应力检测中的功耗与检测速度问题。

本文从悬跨管道受力特点和磁测应力原理入手, 研究适用于管道长距离移动式应力检测的方法。首先采用有限元方法分析了不同悬跨状态管道的应力分布特点; 其次基于磁弹效应建立了阻抗法传感器的线圈阻抗与钢材应力之间的数学关系模型; 然后设计了用于管道应力测量的阻抗法传感器, 搭建了悬跨管道应力测量实验系统, 并对传感器磁化方向与线圈激励频率进行了测试优化; 最后对该方法的灵敏度系数、拟合优度、激励频率、功耗等进行了测试分析。

## 1 悬跨管道受力分析

### 1.1 仿真模型

使用 COMSOL 有限元仿真软件建立的海底悬跨管道力学分析模型如图 1 所示, 管道两端由海床土支撑, 中央部分在洋流作用下悬空。管道按照真实尺寸建模, 外径  $D_1$  为 219 mm, 内径  $D_2$  为 207 mm, 中间悬跨段长度  $L_p$  为 12~60 m。管道总长为  $L_t$ , 管道左端到中心区域的长度为  $L_0 = 0.5L_t$ ; 单侧海床土体的长度  $L_s = 0.6L_p$ , 宽度  $W_s = 20D_1$ , 高度  $H_s = 10D_1$ 。选取整个模型的 1/4 进行对称仿真, 对称面为  $zOy$  和  $xOy$ 。模型中常见材料参数如表 1 所示。

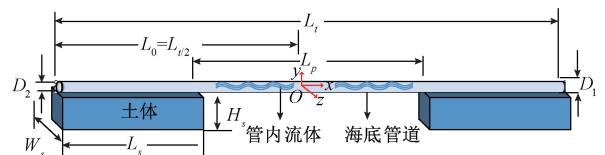


图 1 海底悬跨管道力学分析模型示意图

Fig. 1 Schematic of stress analysis model of subsea spanning pipeline

海底土壤与管道之间存在接触, 因此需要在管道与海底土壤之间建立接触对。以管道与海底土壤接触的部分为源边界, 海底土壤上表面与管道接触的局部区域为目标边界。这个区域的宽度设置为  $2D_1$ 。根据海底管道的实际受力状态可知: 海床土体底部、左端和管道左端直接接触基岩, 因此基本不存在位移的变化, 边界条件设置为全约束; 海底土的右端与海底管道直接相邻, 边界条件

设置为自由边界条件;土体两侧的边界条件为横向约束和纵向自由。

表 1 仿真模型参数

Table 1 Simulation model parameters

参数	值
管道类型	X65
弹性模量/GPa	200
泊松比	0.3
钢管密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	7 850
屈服强度	413.8
管内流体密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	800
土壤类型	软粘土
土壤密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	2 000
海水密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	1 000

1.2 仿真结果分析

以 12 m 管道为例,仿真结果如图 2 所示。其中图 2 (a)~(c)分别表示悬跨管道的应力、挠度和俯仰角的云图。可以看出,海底土壤承载的管道部分与海底均匀接触,没有应力集中,因此,应力、位移、俯仰角都为 0;在管道与土壤的临界接触区,管道下壁会出现 10 MPa 左右的应力变化,管道的挠度和俯仰角也从 0 开始变化;临界接触区与中心悬跨区之间的管段,其应力和挠度呈现逐渐增大的趋势,而俯仰角呈现先增大后减小的变化规律,最大俯仰角为 0.08°;管道中央区域的悬跨程度最大,因此这里的应力和挠度最大,应力可达 15~20 MPa,挠度可达 7 mm。下面对不同长度悬跨管道的应力进行分析,研究管道悬跨状态与应力的关系。

如图 3 所示,管道应力观测路径轴向路径选取  $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$ ,分别位于管道顶部、侧边和底部;周向路径选取管道中部的周向半圆路径  $c_1$ 。为了对比不同悬跨长度的管道的应力分布,绘图时轴向距离  $X$  对悬跨长度  $L_0$  归一化。 $X=0\sim 0.6L_0$  区间的管段被下方的海床支撑。 $X=0.6L_0$  的位置为管道与土体的临界接触区域。 $X=0.6L_0\sim L_0$  区间内管道处于悬跨状态。

路径  $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$  上的三轴应力分布如图 4(a)~(i) 所示。可以看出,  $\sigma_y$  和  $\sigma_z$  在  $a_1$ 、 $a_2$  和  $a_3$  上均在临界接触区域发生突变,在其余管段约为 0 MPa。轴向应力  $\sigma_x$  变化规律与  $\sigma_y$  和  $\sigma_z$  不同。在  $X=0\sim 0.6L_0$  区间,管段由海床支撑,路径  $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$  上的  $\sigma_x$  较小接近 0;在  $X=0.6L_0$  附近,  $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$  路径上的  $\sigma_x$  都会有突变,其中  $a_1$  与  $a_3$  上应力突变较大,突变方向相反。在  $X=0.6L_0\sim 1L_0$  区间,管段发生悬跨,且越靠近中部,悬跨应力越大。在悬跨区,对于 12~60 m 跨度的悬跨管道,在路径  $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$  上轴向应力  $\sigma_x$  的变化范围分别为  $-15\sim -40$  MPa,  $0\sim 2$  MPa,  $15\sim 80$  MPa。在路径  $a_1$  和  $a_3$  上,轴向应力  $\sigma_x$  对

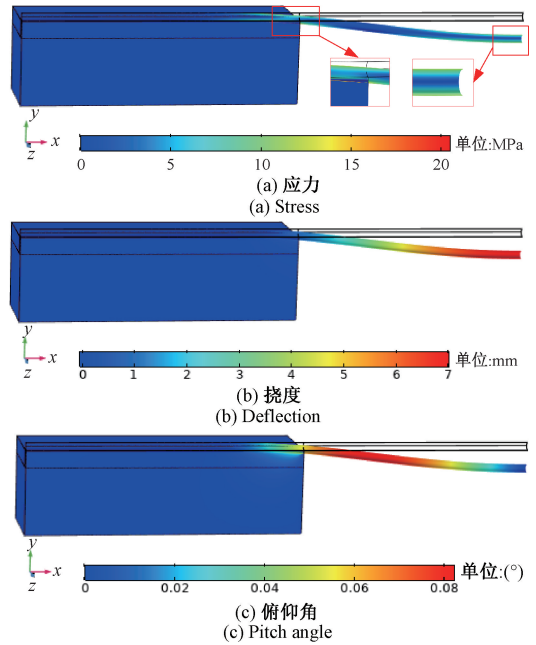


图 2 12 m 海底悬跨管道应力、挠度和俯仰角分布特征  
Fig. 2 Distribution characteristics of stress, deflection and pitch angle of a 12 m spanning pipeline

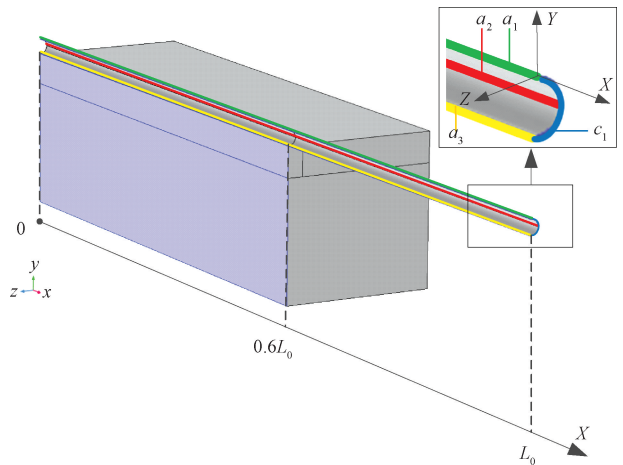


图 3 应力观测路径示意图  
Fig. 3 Schematic of stress observation paths

悬跨程度非常敏感,而路径  $a_2$  上,轴向应力  $\sigma_x$  对悬跨程度不敏感。不同悬跨长度管道的环向路径  $c_1$  上的三轴应力计算结果如图 4(j)~4(l) 所示。可以看出,只有  $\sigma_x$  会跟随周向角度  $\theta$  的变化而产生较大的变化,下管壁的轴向应力  $\sigma_x$  大于上管壁的  $\sigma_x$ 。

由以上分析可知,管道顶部  $a_1$  和底部  $a_3$  路径上的轴向应力  $\sigma_x$  均能灵敏地反映管道的悬跨状态,其中管道底部路径  $a_3$  上的  $\sigma_x$  对悬跨变化的灵敏度最高。在后续检测海底管道悬跨状态时,可以将悬跨管道顶部和底部的轴向应力  $\sigma_x$  作为表征参数。基于这一思路,本文采用

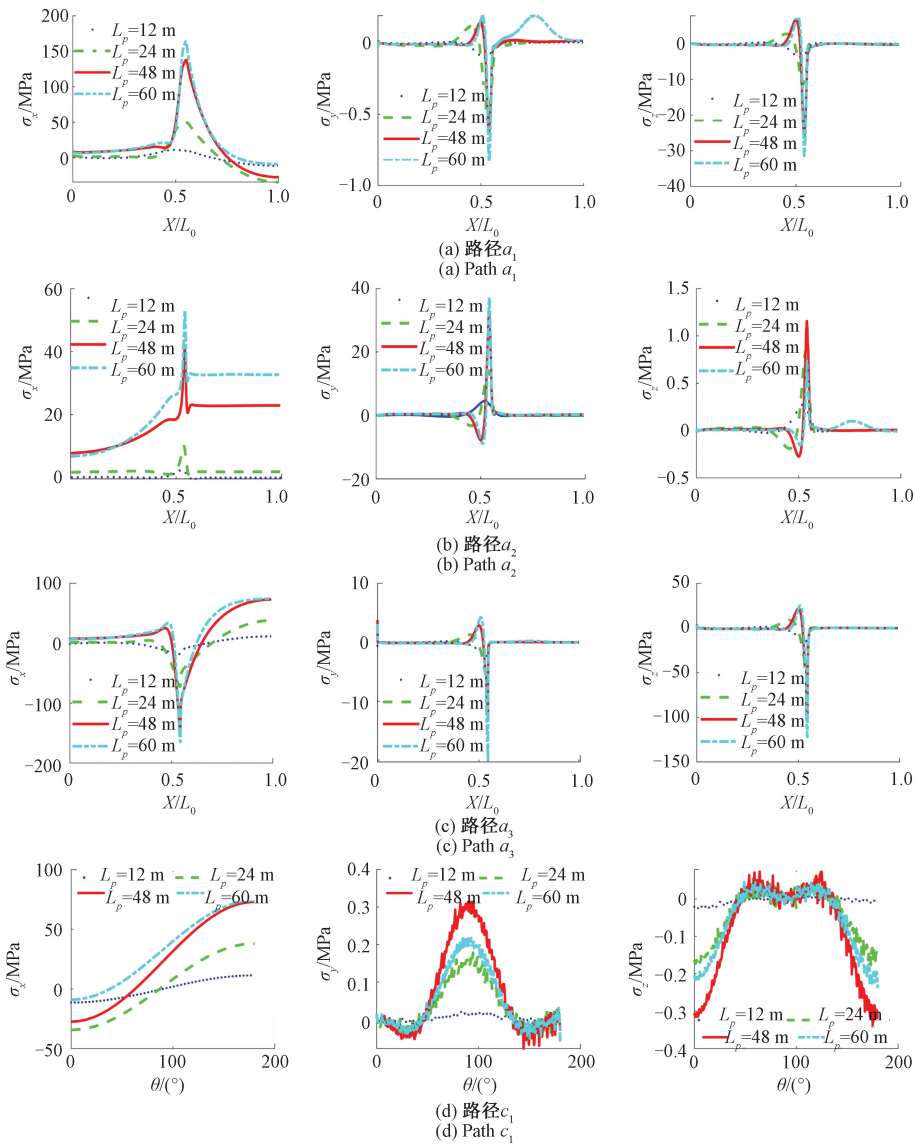


图 4 管壁不同路径的三轴应力分布

Fig. 4 Triaxial stress distribution of different paths in pipe wall

磁弹效应和磁各向异性原理检测悬跨管道应力,并把管道顶部和底部作为应力测量区域。

## 2 测量原理

应力检测的磁路模型如图 5(a) 所示,励磁电流  $i$  产生的磁通经过磁芯、空气间隙、被测管壁、空气间隙、磁芯构成闭合回路。在回路中,激励线圈匝数为  $N_e$ ,磁芯的磁阻为  $R_m$ ,磁导率为  $\mu_m$ ,管壁的初始磁阻为  $R_s$ ,初始磁导率为  $\mu_s$ 。

经过线圈磁通量  $\phi_i$  表达式为:

$$\phi_i = \frac{N_e i}{R_m + R_s} \quad (1)$$

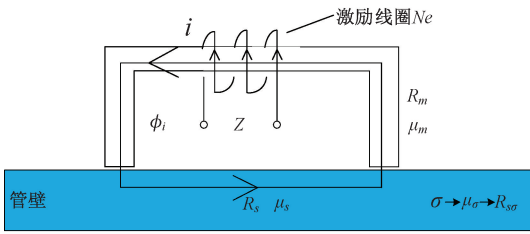
其中,  $R_s = l/S\mu_s$ ,  $l$  为磁路长度;  $S$  为磁通截面积,  $\mu_s$  为初始磁导率。初始磁导率  $\mu_s$  与应力作用下磁导率  $\mu_\sigma$  的关系式为<sup>[29]</sup>:

$$\frac{\mu_\sigma - \mu_s}{\mu_s} = -2\lambda_s \sigma \mu_s / B_s^2 \quad (2)$$

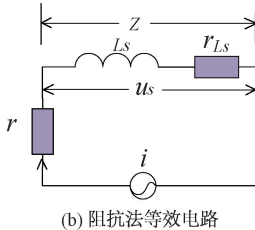
其中,  $B_s$  为饱和磁感应强度;  $\lambda_s$  为钢管钢材的饱和磁致伸缩系数;  $\sigma$  为钢材应力; 当应力为拉应力时,  $\sigma$  和  $\lambda_s$  取正值; 当应力为压应力时,  $\sigma$  和  $\lambda_s$  取负值。

阻抗法应力检测模型等效电路如图 5(b) 所示。阻抗分析仪提供的微弱正弦电流信号作为激励源, 激励电流为  $i = I \sin \omega t$ , 其角频率为  $\omega$ , 通过输出电阻  $r$  与电感  $L_s$  进行分压, 其中  $r_{L_s}$  为线圈的电阻。

当对钢管施加应力时, 其磁阻从最初的  $R_s$  变为  $R_{\sigma s}$ ,



(a) 应力检测的磁路模型  
(a) Magnetic circuit model for stress detection



(b) 阻抗法等效电路  
(b) Equivalent circuit of impedance method

图 5 应力检测原理示意图

Fig. 5 Schematic of stress detection principle

引起的激励线圈磁通量变化可表示为:

$$\Delta\phi_i = \frac{N_e i}{R_m + R_{\sigma\sigma}} - \frac{N_e i}{R_m + R_s} \quad (3)$$

由此引起的  $u_s$  变化可表示为:

$$\Delta u_s = N_e \frac{d\Delta\phi_i}{dt} \quad (4)$$

由于使用的磁芯为高磁导率,所以磁阻远小于管壁磁阻  $R_{\sigma\sigma}$  和  $R_s$ ,即  $R_m^2$  可忽略,同时  $R_{\sigma\sigma} \approx R_s$ ,结合式(2)~(4)可知, $\Delta u_s$  可表示为:

$$\Delta u_s = \frac{N_e^2 I \omega \cos \omega t}{(R_s + 2R_m) R_s} (R_s - R_{\sigma\sigma}) \quad (5)$$

另一方面,线圈阻抗模值变化可由式(6)表示:

$$\Delta |Z| = \sqrt{r_{L_s}^2 + (\omega L_{\sigma\sigma})^2} - \sqrt{r_{L_s}^2 + (\omega L_s)^2} \quad (6)$$

其中,  $L_s$  为未施加应力时线圈的电感值,  $L_{\sigma\sigma}$  为施加应力后的线圈电感值。由于  $r_{L_s}$  跟  $\omega L_s$ 、 $\omega L_{\sigma\sigma}$  比很小,可忽略,所以可认为线圈阻抗模值变化等同于感抗模值的变化,即式(7):

$$\Delta |Z| \approx \omega \Delta L_s = \omega \left| \frac{\Delta u_s}{di/dt} \right| \quad (7)$$

由于  $R_m \ll R_s$ ,结合磁阻表达式  $R_s = l/S\mu_s$ 、式(2)、式(5)~(7)可得式(8):

$$\Delta |Z| = \frac{N_e^2 \omega}{(R_s + 2R_m) R_s} (R_s - R_{\sigma\sigma}) = \frac{N_e^2 \omega \mu_s^2 S}{l} \frac{-2\lambda_s \sigma}{B_s^2 - 2\lambda_s \sigma \mu_s} \quad (8)$$

$B_s$  取值范围为 0.5~1 T,  $|\lambda_s|$  取值范围  $1 \times 10^{-7} \sim 1 \times 10^{-8}$ ,  $|\sigma|$  取值范围为  $0 \sim 5 \times 10^7$  Pa,  $\mu_s$  取  $2.5 \times 10^{-4} \sim 5 \times 10^{-4}$  H/m,可知  $B_s \gg 2\lambda_s \sigma \mu_s$ ,结合式(8),可得式(9):

$$\Delta |Z| = \frac{-2N_e^2 \omega \mu_s^2 S \lambda_s \sigma}{l B_s^2} \quad (9)$$

这是理论上阻抗变化量与应力的关系。由式(9)可知,线圈阻抗与应力之间成负线性关系,且激励频率越高,阻抗变化量关于应力变化的灵敏度越高。

### 3 实验

#### 3.1 实验方法

如图 6(a) 所示,实验钢管材质为 X52,管长 12 m,外径 108 mm,壁厚 4 mm。管道两端被管托支撑,处于悬跨状态。管道中央应力测试区域上下表面贴有布拉格光纤光栅,用于监测管壁应力,作为真值。通过给钢管中央悬挂不同质量的重物,使管道上表面处于不同程度的压缩状态,管道下表面处于不同程度的拉伸状态。实验中,传感器分别固定在管道中央的上下表面,阻抗分析仪向传感器的线圈施加交流励磁信号,产生的磁通量经过磁芯、空气间隙、被测管壁、空气间隙、磁芯构成闭合回路。当管道应力发生变化时,管壁磁导率会发生改变,从而导致管壁的磁阻改变,从而引起经过线圈的磁通量发生改变,最终使线圈阻抗发生变化,这种变化可以通过阻抗分析仪的上位机读取,以表征不同载荷下的应力。阻抗分析仪为恒流源模式,开路激励电压为 1 V<sub>pp</sub>。

图 6(b) 所示为用于管道应力测量的传感器结构示意图,图 6(c) 为传感器实物图。传感器主要由顶丝、线圈、磁芯、铝外壳、铁垫块组成。其中顶丝用于固定传感器,使其处于竖直状态,传感器、铁垫块与管壁构成磁通回路,线圈线径 0.17 mm,匝数 110。由于管道的应力状态为二维应力状态,在壁厚方向为均匀应力,因此,在管道内壁和外壁进行应力测量,其结果是相同的。现场海底管道外部是海水,内部是油,其磁导率和介电常数与空气很接近。现场管道应力测量采用内检测方式,因此管道外海水的存在以及管道内是油还是空气对管道应力内检测没有影响。为了便于实验开展,该测试在管道外表面及外部进行,且管道放置在空气中,在自身重力作用下发生弯曲。

#### 3.2 实验内容

为了探究传感器磁化方向对实验结果的影响,对不同摆放方向的传感器的应力测试效果进行实验验证。测试中,线圈激励频率初步设为 20 kHz,激励电压幅值 1 V<sub>pp</sub>。磁化方向和应力符号有 4 种组合:如图 6(d) 所示,传感器磁化方向平行于压应力方向;如图 6(f) 所示,传感器磁化方向垂直于压应力方向;如图 6(e) 所示,传感器磁化方向平行于拉应力方向;如图 6(g) 所示,传感器磁化方向垂直于拉应力方向。在管道中央分别悬挂

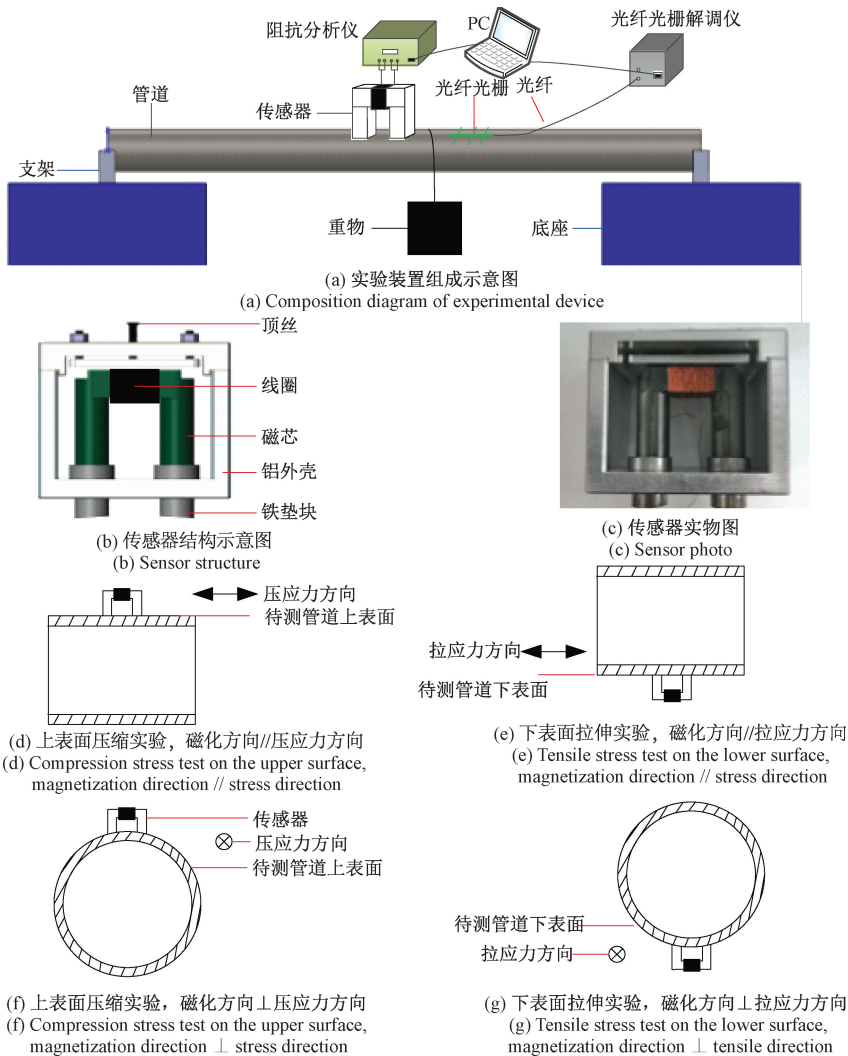


图 6 管道应力测量实验装置

Fig. 6 Pipeline stress measurement experimental apparatus

0、5、15、25、35 kg 的重物,使管道处于不同程度的弯曲应力状态。由光纤光栅测得管道上表面中央应力相对于加载前的变化量分别为 0、4.5、14、23.3、32.6 MPa,管道下表面中央应力加载值相对于加载前的变化量分别为 0、6.3、20、32.5、46.4 MPa。光纤光栅测得的应力变化量表明,在相同的悬跨弯曲程度下,管道底部的应力变化量比管道顶部的应力变化量大,这与前面的有限元仿真结果相符合。

在确定磁化方向之后,考虑到励磁频率会对应力表征灵敏度产生影响以及激励频率决定了管道内检测器移动的最大速度,为了确定最优频率,对管道进行了扫频磁测实验,激励频率为 1~30 kHz。每改变一次悬挂重物的质量,即,每改变一次管道的应力状态,就扫频测试一遍传感器线圈阻抗。悬跨的重物和产生的应力变化量与前述相同。为了便于分析,测量的阻抗值都减去了 0 kg、0 MPa 应力加载下的初始值。

在确定了磁化方向与励磁频率之后进行了特定激励频率和特定传感器摆放方向的管道应力测量实验。图 7 (a)所示为管道应力测量实物图。如图 7(b)所示,当钢管上表面为压缩状态时,传感器磁化方向与压应力方向平行;如图 7(c)所示,当钢管下表面为拉伸状态时,传感器磁化方向与拉应力方向垂直,管道中央应力加载方法和加载值与前述相同。然后在每个应力加载值下分别连续记录 3 次阻抗值取平均作为该应力状态下的传感器线圈阻抗。为了验证实验的重复性,进行了两遍应力加载实验。

## 4 结果与讨论

### 4.1 磁化方向测试结果

图 8 所示为传感器不同摆放方向是,即管道在不同

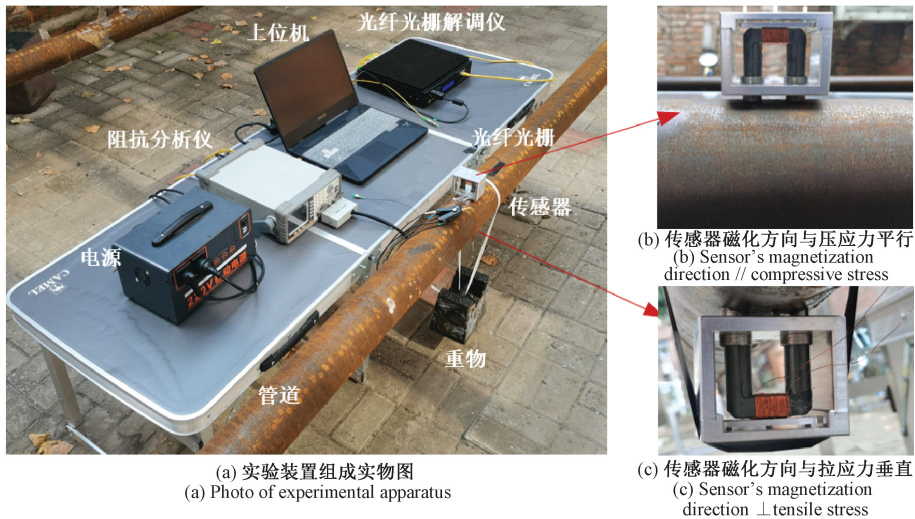


图 7 管道应力测量实验

Fig. 7 Pipeline stress measurement experiment

交流磁化方向作用下线圈阻抗随拉压应力的变化曲线。可以看出,不同方向摆放的传感器线圈的阻抗随拉压应力的绝对值的增加均单调下降。当磁化方向与压应力方向垂直时,线圈阻抗随着与压应力的增大而减小,磁化方

向与压应力方向平行比二者垂直时,阻抗法的应力灵敏度较高。当拉应力与磁化方向平行时,阻抗随拉应力增加而下降,磁化方向与拉应力方向垂直时比二者平行时,阻抗法的应力灵敏度较高。

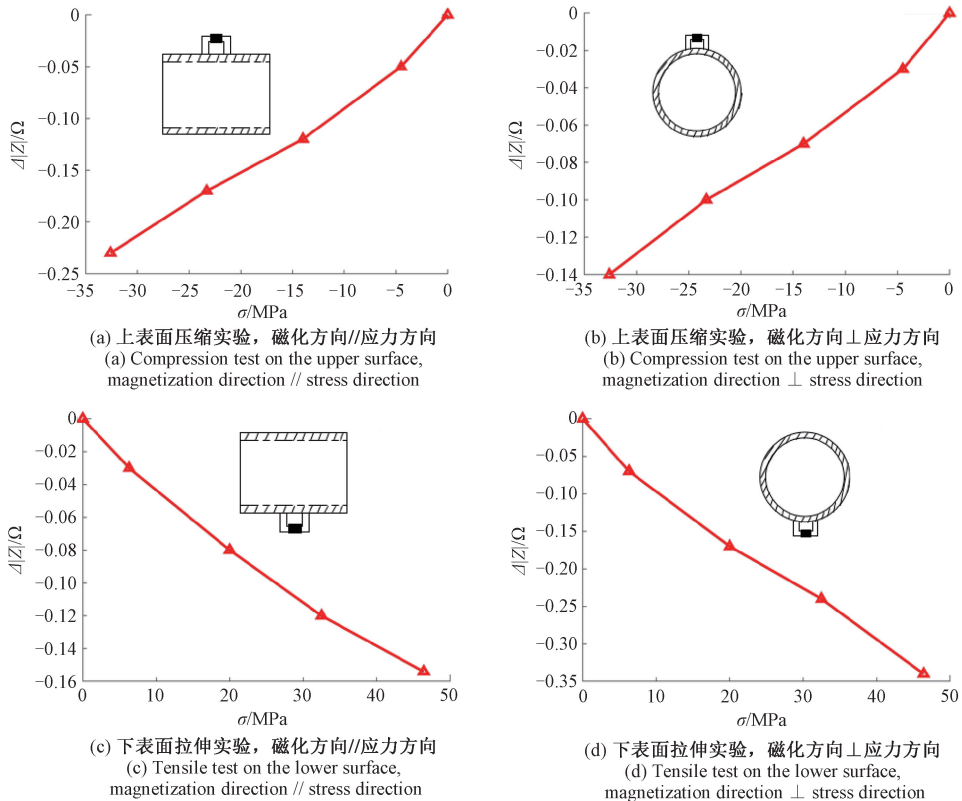


图 8 传感器线圈阻抗随应力变化的曲线

Fig. 8 Curves of sensor coil impedance vs stress

上述测试结果表明,当管道上下表面分别受到压应力与拉应力时,线圈阻抗与应力呈负相关,验证了前述理

论分析结果。为了获得更高的灵敏度,在测量拉应力时,传感器磁化方向应垂直于拉应力方向;测量压应力时,传

传感器磁化方向应平行于压应力方向。因此,在管道应力测量时每一测点应该放置互相垂直的两个传感器,一个沿着管道轴向、一个沿着管道环向,以保证管壁拉压应力的测量灵敏度。

### 4.2 扫频测试结果

由图 9 可知,在各种频率激励下,无论管道上下表面是在拉伸状态还是压缩状态下,线圈的阻抗随应力的增

大而减小。可以发现,在应力变化范围相同的条件下,激励频率为 1~30 kHz 时,激励频率越高,阻抗变化量越大;这与前述测量原理部分理论分析的结果相符。随着频率从 20~30 kHz 增加,对应的应力阻抗曲线的阻抗增量越来越小,意味着当频率继续增加时灵敏度增量会越来越小。考虑实验效果与效率,这里选择 30 kHz 作为后续阻抗法测量应力实验的线圈激励频率。

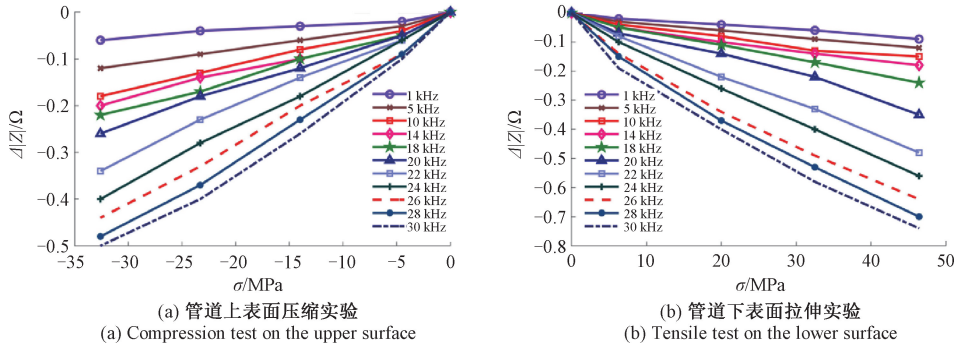


图 9 不同激励频率下线圈阻抗随应力变化的曲线

Fig. 9 Curves of coil impedance vs stress with different excitation frequencies

### 4.3 应力测量结果

对阻抗测量结果与加载应力值进行线性拟合,结果如图 10 所示。其中图 10(a)与(b)为钢管上表面压缩实验结果,图 10(c)与(d)为钢管下表面拉伸实验结果。可以看出,在钢管上表面压缩与下表面拉伸实验中,传感器

线圈输出的阻抗均随着拉应力与压应力的绝对值的增加而线性下降,并且管壁下表面的应力比管壁上表面要大,同时阻抗变化量也更大,与之前仿真结果一致。由此验证了基于阻抗分析法测量管道悬跨应力的可行性。

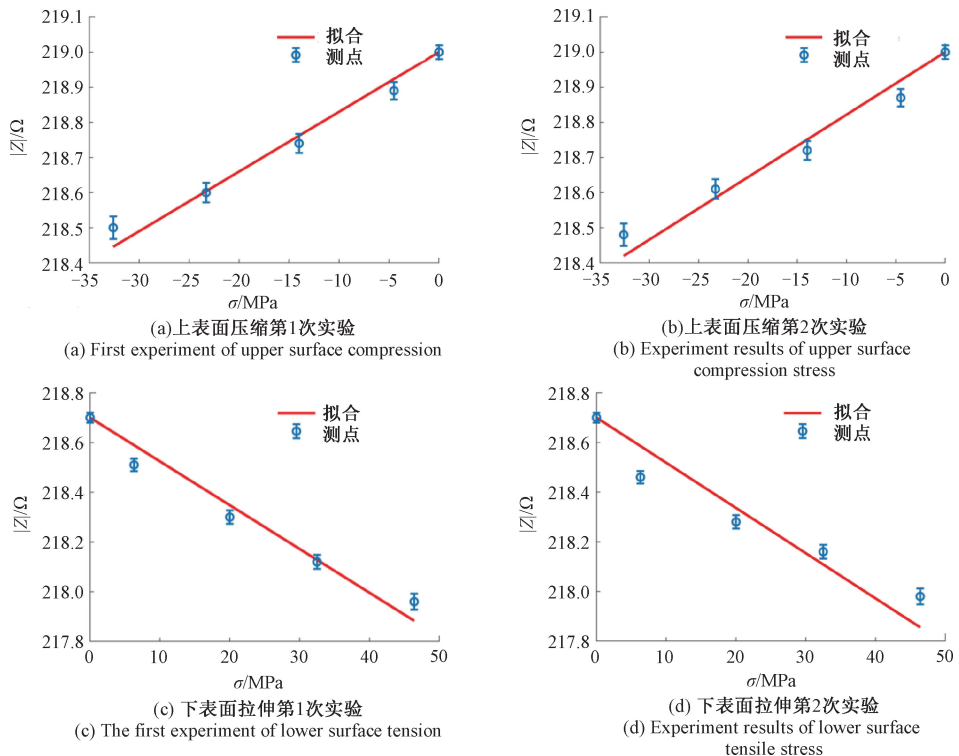


图 10 线圈阻抗与管道应力的测试数据

Fig. 10 Test data of coil impedance vs pipe wall stress: The first



将图 10 所示拟合曲线的灵敏度系数  $k$  与线性拟合优度  $R^2$  统计在表 2 中,来分别衡量应力测量灵敏度与稳定性、线性度。可以看出,管道底部拉伸应力引起的阻抗变化量大于管道顶部压缩应力引起的阻抗变化量,管道底部的拉伸应力变化量也大于管道顶部的压缩应力变化量,无论是拉应力还是压应力,阻抗对应力的灵敏度系数  $k$  都很接近,系数平均值为  $-0.018 \Omega/\text{MPa}$ 。拉压相邻两次实验的  $k, R^2$  值相差很小,且所有实验的  $R^2$  值都在 0.92 以上,说明该方法应力测量的稳定性和线性度较好。线圈激励频率能达到 30 kHz,能够匹配现场管道 PIG 的快速移动状态。同时线圈功耗很低,在 1 V<sub>pp</sub> 电压激励幅值下,平均功耗小于 0.1 mW,满足现场管道内检测对传感器阵列低功耗的要求,能够用于实际的长输管道悬跨应力的移动式测量中。

表 2 拟合灵敏度系数  $k$ , 线性拟合优度  $R^2$

Table 2 Fit sensitivity coefficient  $k$ , linear fitting goodness  $R^2$

实验次序	$\Delta\sigma/\text{MPa}$	$\Delta Z /\Omega$	$k(\Omega/\text{MPa})$	$R^2$
第 1 次压缩实验	32.6	0.50	0.017	0.986
第 2 次压缩实验	32.6	0.52	0.018	0.973
第 1 次拉伸实验	46.4	0.75	0.019	0.967
第 2 次拉伸实验	46.4	0.72	0.018	0.922

## 5 结 论

本文针对管道悬跨状态检测需求开展了悬跨应力测量研究。通过有限元仿真研究了管道悬跨的受力特性;通过理论分析建立了阻抗法钢材应力测量模型,得出线圈阻抗关于应力的表达式,表明二者呈负线性关系且灵敏度随着激励频率增加而增加。设计并制作了管道悬跨应力传感器,开展了悬跨管道应力测量实验,验证了上述仿真和理论分析结果。研究表明:

1) 管道底部和顶部的轴向应力可以灵敏地表征管道悬跨状态。为了获得更高灵敏度,在测量拉应力时,传感器磁化方向应垂直于应力方向,而测量压应力时,传感器磁化方向应平行于应力方向。因此每一测点应该沿环向和轴向放置两个传感器,以保证管壁拉压应力的测量灵敏度。

2) 传感器阻抗关于应力的线性拟合优度大于 0.92,传感器激励频率越高,应力测量灵敏度越高。所设计的传感器激励频率在 30 kHz 时,平均灵敏度系数为  $-0.018 \Omega/\text{MPa}$ ,而单个传感器平均功耗小于 0.1 mW。该传感器能够满足现场管道 PIG 的快速移动状态以及对传感器阵列低功耗的要求。

## 参考文献

[1] 王雷. 海底管道悬空检测及治理技术研究[D]. 青

岛:中国石油大学,2014.

WANG L. Research on suspended detection and treatment technology of subsea pipelines[D]. Qingdao: Dissertation of China University of Petroleum, 2014.

- [2] 崔双民,张传隆,王瑜,等. 多波束测深技术在海底管道悬空裸露检测中的应用研究[J]. 石油工程建设, 2012, 38(5): 58-60.
- CUI SH M, ZHANG CH L, WANG Y, et al. Research on the application of multi-beam bathymetry technology in the detection of exposed subsea pipelines[J]. Petroleum Engineering Construction, 2012, 38(5): 58-60.
- [3] 魏荣灏,陈铁鑫,郭晨. 侧扫声纳在海底管道悬空调查中的应用[J]. 海洋测绘, 2014, 34(2): 63-65.
- WEI R Y, CHEN T X, GUO CH. Application of side scan sonar in subsea pipeline suspended survey[J]. Ocean Mapping, 2014, 34(2): 63-65.
- [4] ERFANDO T, SEPTRIADY D A, APRIAND T S. Free span investigation of the longest subsea gas pipeline in Indonesia using remotely operated vehicle ROV [C]. Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference, OnePetro, 2019: 1-11.
- [5] FERNANDES V H, NETO A A, RODRIGUES D D. Pipeline inspection with AUV[C]. IEEE/OES Acoustics in Underwater Geosciences Symposium (RIO Acoustics), 2015, 1-5.
- [6] 诸海博,徐晓甲,宋华东,等. 管道内检测技术及系统发展综述[J]. 管道技术与设备, 2018, 151(3): 23-25.
- ZHU H B, XU X J, SONG H D, et al. Overview of in-pipe inspection technology and system development[J]. Piping Technology and Equipment, 2018, 151(3): 23-25.
- [7] NINGSHENG L, HANG Z, SHIMIN Z. Experiment for identifying free span of buried gas pipeline under internal excitation load [J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2019, 69: 215-222.
- [8] LIN G, ZHOUMO Z, XINJING H, et al. Vibration detection of spanning subsea pipelines by using a spherical detector [J]. IEEE Access, 2019, 7: 7001-7010.
- [9] 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 buckling deformation detection technology of submarine pipeline[D]. Tianjin: Tianjin University, 2018.
- [10] LIN G, ZHOUMO Z, XINJING H, et al. Low-cost and high-efficiency method for detecting vertical bends of subsea pipelines [J]. IEEE Access, 2020, 8:

- 33926-33933.
- [11] 周明, 黄新敬, 郭霖, 等. 悬跨管道弯曲度检测特征提取方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(8): 135-141.  
ZHOU M, HUANG X J, GUO L, et al. Research on feature extraction method for curvedness detection of spanning pipeline[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(8): 135-141.
- [12] 隋子豪, 李星辉, 何赉泽, 等. 基于柔性正交矩形涡流线圈的铝合金应力测试[J]. 中国测试, 2020; 1-9.  
SUI Z H, LI X H, HE B Z, et al. Stress measurement of aluminum alloy based on flexible orthogonal rectangular eddy current coil[J]. China Measurement & Test, 2020; 1-9.
- [13] 周明, 黄新敬, 陈乾, 等. 基于弱交流磁化的钢材应力检测方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(11): 23-31.  
ZHOU M, HUANG X J, CHEN Q, et al. Research on steel stress measurement based on weak AC magnetization[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(11): 23-31.
- [14] VIKAS D, SANIAY L. Recent research progress on residual stress measurement using non-destructive testing[J]. Materials Today: Proceedings, 2021, 47: 3282-3287.
- [15] ZHENG J Y, ZHOU C Y, ZHENG G F, et al. Study on plasticity modification for measuring high residual stress by hole-drilling method[J]. Instrumentation, 2018(4): 55-62.
- [16] 刘海潇, 何利民, 陈建恒, 等. 管道清管器运行速度控制技术进展[J]. 化工进展, 2020, 39(6): 2327-2335.  
LIU H X, HE L M, CHEN J H, et al. Research progress of pipeline pigs speed control technology[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2020, 39(6): 2327-2335.
- [17] 石明江, 陈瑞, 冯林. 基于磁记忆的金属管道缺陷检测方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(1): 44-53.  
SHI M J, CHEN R, FENG L. Metal pipeline defect detection method based on magnetic memory[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(1): 44-53.
- [18] 苏三庆, 刘馨为, 王威, 等. 金属磁记忆检测技术研究新进展与关键问题[J]. 工程科学学报, 2020, 42(12): 1557-1572.  
SU S Q, LIU X W, WANG W, et al. Multiple pulses matching method for lightning radiation sources [J]. Chinese Journal of Engineering, 2020, 42(12): 1557-1572.
- [19] 王国庆. 基于磁记忆的油气管道应力损伤检测机理及应用研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2017.  
WANG G Q. The study on testing mechanism and application for stress damage of oil and gas pipeline base on magnetic memory [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2017.
- [20] 靳阳. 基于巴克豪森效应的管道应力内检测技术研究[D]. 北京: 中国石油大学, 2018.  
JIN Y. Research on pipeline stress internal detection technology based on barkhausen effect [D]. Beijing: China University of Petroleum, 2018.
- [21] 陈金忠, 马义来, 靳阳. 基于巴克豪森效应的管道应力内检测辅助装置[J]. 油气储运, 2020, 39(10): 1192-1196.  
CHEN J ZH, MA Y L, JIN Y. Auxiliary device for pipeline stress internal detection based on Barkhausen effect [J]. Gas Storage and Transportation, 2020, 39(10): 1192-1196.
- [22] 蒋政培, 凌张伟, 王敏. 磁巴克豪森噪声技术在应力评估中的研究进展[J]. 无损检测, 2018, 40(8): 67-74.  
JIANG ZH P, LIN ZH W, WANG M. Research progress of magnetic barkhausen noise technology in stress assessment[J]. Nondestructive Testing, 2018, 40(8): 67-74.
- [23] 张富臣, 李红梅, 景宗福, 等. 铁磁钢材应力致磁各向异性定量检测特性研究[J]. 华中科技大学(自然科学版), 2019, 47(5): 22-26.  
ZHANG F CH, LI H M, JING Z F, et al. Study on the quantitative detection characteristics of stress-induced magnetic anisotropy of ferromagnetic steel[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2019, 47(5): 22-26.
- [24] 曾杰伟, 苏兰海, 徐立坪, 等. 逆磁致伸缩效应钢板内应力检测技术研究[J]. 机械工程学报, 2014(8): 17-22.  
ZENG J W, SU L H, XU L P, et al. Research on internal stress detection technology of inverse magnetoelastic effect steel plate [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014(8): 17-22.
- [25] LI L X, QIU Z C, GAO Q, et al. Research on stress detection of ferromagnetic materials based on magnetic anisotropy method [J]. Instrument Technology and Sensors, 2019(9): 118-121.
- [26] 吕志鹏. 基于磁各向异性技术的管道应力检测方法研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2020.  
LYU ZH P. Research on pipeline stress detection method based on magnetic anisotropy technology[D]. Shenyang:

Shenyang University of Technology, 2020.

- [27] 石延平, 张永忠, 文西芹, 等. 差动式逆磁致伸缩应力传感器的设计[J]. 传感器技术, 2003(1): 22-24, 27.  
SHI Y P, ZHANG Y ZH, XI W Q, et al. Design of differential inverse magnetostrictive stress sensor[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2003(1): 22-24, 27.
- [28] 辛伟, 梁琳, 丁克勤, 等. 基于磁各向异性的铁磁构件残余应力磁测理论与方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(11): 137-146.  
XIN W, LIANG L, DING K Q, et al. Research on the theory and method of magnetic measurement of residual stress in ferromagnetic components based on magnetic anisotropy[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(11): 137-146.
- [29] 王社良, 王威, 苏三庆, 等. 铁磁材料相对磁导率变化与应力关系的磁力学模型[J]. 西安科技大学学报, 2005, 25(3): 288-291.  
WANG SH L, WANG W, SU S Q, et al. A magneto-mechanical model on differential permeability and stress of ferromagnetic material[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2005, 25(3): 288-291.

## 作者简介



**黄新敬**, 分别于 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** 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.



**陈乾**, 在 2020 年于合肥工业大学取得学士学位, 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应力检测、管道安全预警。

E-mail: chengqian\_tju@foxmail.com

**Chen Qian** received his B. Sc. from Hefei University of Technology in 2020. 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 stress detection and pipeline safety warning.