

引文: 付双成, 余冰锋, 辛佳兴, 等. 基于偏置交流电磁场检测的管道裂纹内检测方法[J]. 油气储运, 2024, 43(11): 1260-1268.

FU Shuangcheng, YU Bingfeng, XIN Jiaying, et al. In-line inspection of pipeline crack based on biased AC field measurement[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2024, 43(11): 1260-1268.

## 基于偏置交流电磁场检测的管道裂纹内检测方法

付双成<sup>1</sup> 余冰锋<sup>1</sup> 辛佳兴<sup>2</sup> 丁融<sup>3</sup> 杨帆<sup>3</sup> 闫宏为<sup>3</sup> 陈金忠<sup>2</sup> 完小康<sup>2</sup>

1. 常州大学机械与轨道交通学院; 2. 中国特种设备检测研究院; 3. 国家管网集团西部管道有限责任公司

**摘要:**【目的】传统管道漏磁检测技术对于与磁力线夹角较小的裂纹缺陷检出能力不足, 为保障油气管道的安全运行, 亟需一种能够准确检出此类缺陷的检测方法。【方法】结合漏磁与交流电磁场检测技术的优势, 提出了一种基于偏置交流电磁场检测技术的管道裂纹内检测方法。根据偏置交流电磁场检测基本原理, 分析了裂纹角度对试件内部磁场及表面涡流场分布的影响规律, 通过建立有限元分析模型, 厘清了管道有无裂纹对其内部磁场及表面涡流场分布的影响, 并搭建了偏置交流电磁场检测实验平台, 验证了方法的可行性。【结果】对于内壁不同角度  $\theta$  的裂纹, 当  $0^\circ \leq \theta \leq 15^\circ$  时, 信号特征呈现出先波谷后波峰的分布; 当  $15^\circ < \theta \leq 90^\circ$  时, 发生相位翻转, 信号特征呈现出先波峰后波谷的分布。当内壁裂纹角度为  $0^\circ \leq \theta \leq 45^\circ$  时, 裂纹响应信号峰谷值  $U_{\max-\min}$  随内壁裂纹角度增大逐渐减小; 当内壁裂纹角度超过  $45^\circ$  时,  $U_{\max-\min}$  随内壁裂纹角度增大而增大。对于内外壁不同深度裂纹, 其响应信号特征均呈现出先波峰后波谷的分布,  $U_{\max-\min}$  随内外壁裂纹深度的增加逐渐增大。【结论】该方法可有效识别管道内壁宽 0.3 mm 的不同角度裂纹及宽 0.5 mm、角度  $90^\circ$  的不同深度裂纹, 且对外壁宽 0.5 mm、角度  $90^\circ$ 、不同深度裂纹的最小检测深度为  $30\% t$  ( $t$  为壁厚), 具备对管道内壁不同角度裂纹及内外壁不同深度裂纹的定量识别能力。(图 13, 表 2, 参 21)

**关键词:** 偏置交流电磁场检测; 裂纹检测; 裂纹角度; 裂纹深度; 有限元分析

中图分类号: TE832

文献标识码: A

文章编号: 1000-8241(2024)11-1260-09

DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2024.11.007

## In-line inspection of pipeline crack based on biased AC field measurement

FU Shuangcheng<sup>1</sup>, YU Bingfeng<sup>1</sup>, XIN Jiaying<sup>2</sup>, DING Rong<sup>3</sup>, YANG Fan<sup>3</sup>, LYU Hongwei<sup>3</sup>,  
CHEN Jinzhong<sup>2</sup>, WAN Xiaokang<sup>2</sup>

1. School of Mechanical Engineering and Rail Transit, Changzhou University; 2. China Special Equipment Inspection & Research Institute;  
3. PipeChina West Pipeline Co. Ltd.

**Abstract:** [Objective] The traditional magnetic flux leakage (MFL) testing technique for pipelines has been found to be insufficient in detecting crack defects with a small angle to the magnetic field lines. As a result, an inspection method that can accurately detect such defects is urgently needed to ensure the safe operation of oil and gas pipelines. [Methods] This paper introduces an in-line inspection method for pipeline cracks based on a biased AC field measurement (B-ACFM) technique, which combines the strengths of both MFL testing and ACFM. The initial study focused on examining the variations in internal magnetic field and surface eddy current field distributions of specimens based on crack angles, in alignment with the fundamental principle of B-ACFM. Subsequently, a finite element analysis model was developed to elucidate the impacts on internal magnetic field and surface eddy current field distributions in the presence or absence of cracks. Furthermore, an experimental platform was constructed to validate the viability of the proposed method utilizing B-ACFM. [Results] For cracks positioned at varying angles from  $0^\circ$  to  $15^\circ$  on the inner wall, the signal characteristics displayed a wave trough followed by a wave peak. Conversely, for angles spanning from  $15^\circ$  to  $90^\circ$ , a phase reversal occurred, manifesting as a wave peak followed by a wave trough in the signal features. Regarding inner wall cracks ranging from  $0^\circ$  to  $45^\circ$ , the peak-to-valley value ( $U_{\max-\min}$ ) of crack response signals exhibited a gradual decrease as the angle increased. However, beyond  $45^\circ$ ,  $U_{\max-\min}$  rose with increasing angle. In terms of cracks with differing depths within the inner and outer walls, the response signals presented wave peaks followed by wave troughs, and  $U_{\max-\min}$  steadily

ascended with increasing crack depth in both the inner and outer walls. **[Conclusion]** The suggested method showcases its efficacy in accurately detecting 0.3 mm wide cracks at various angles and 0.5 mm wide cracks angled at 90°, with differing depths in the inner pipeline wall. The established minimum detection depth is confirmed to reach 30% of the wall thickness for 0.5 mm wide cracks at a 90° angle in the outer pipeline wall. Furthermore, this method exhibits quantitative detection proficiency for cracks positioned at different angles on the inner pipeline wall and for those exhibiting varying depths within both the inner and outer pipeline walls. (13 Figures, 2 Tables, 21 References)

**Key words:** biased AC field measurement (B-ACFM), crack detection, crack angle, crack depth, finite element analysis

近年来,油气管网建设呈高速发展态势,《中长期油气管网规划》指出,至2025年底,中国油气管网规模预计将达到 $24 \times 10^4$  km<sup>[1]</sup>。管道易受外部环境冲击、内部运输介质压力波动及人为因素影响产生裂纹,对油气介质安全运输具有不良影响<sup>[2]</sup>。针对管道裂纹,常用的电磁无损检测方法有漏磁检测、交流电磁场检测(Alternating Current Field Measurement, ACFM)等<sup>[3]</sup>。然而,现有方法同时检测管道内壁不同角度裂纹及内外壁不同深度裂纹的能力不足<sup>[4]</sup>;漏磁检测对体积型缺陷有较高检出度,但难以识别类裂纹型缺陷<sup>[5]</sup>;ACFM适用于铁磁性材料近表面缺陷检测,但较难提取缺陷深度信息<sup>[6]</sup>。为解决单一电磁无损检测方法难以满足当前复杂缺陷检测要求的问题,通常需将多种方法结合使用<sup>[7-9]</sup>。Xu等<sup>[10]</sup>提出一种漏磁检测与涡流检测相结合的复合检测方法,通过对比两种检测信号,可有效识别铁轨表面及埋藏缺陷;李伟等<sup>[11]</sup>提出将ACFM与电磁超声检测相结合,通过探究复合检测探头中磁场畸变信号与回波信号,实现对铝板表面及外表面缺陷的量化;Guo等<sup>[12]</sup>提出了一种基于脉冲涡流和电磁超声的复合检测方法,利用复合检测探头实现了管道测厚及焊缝表面缺陷检测;Mishakin等<sup>[13]</sup>提出了将超声检测与涡流检测相结合的复合检测方法,利用波速变化量化奥氏体钢的损伤程度;Chang等<sup>[14]</sup>利用了一种基于ACFM与超声检测的复合检测探头,实现了对45钢与铝板表面及内部缺陷的定量识别。

在上述研究的基础之上,提出一种基于偏置交流电磁场检测(Biased Alternating Current Field Measurement, B-ACFM)的管道裂纹内检测方法。通过探究B-ACFM基本原理,分析了裂纹角度导致试件内部磁场及表面涡流场分布发生变化的规律;利用B-ACFM有限元分析模型,厘清了裂纹对管道内部磁场及表面涡流场分布的影响。根据所得规律研制B-ACFM传感器,搭建实验平台,对含有不同尺寸的裂纹试件进行动态扫查实验,从而验证该方法的可行性。

## 1 B-ACFM 原理

### 1.1 漏磁检测

在漏磁检测中,通过向U型磁轭磁极两端均匀缠绕的直流线圈施加直流激励电流,饱和磁化试件待测区域(图1);当试件无缺陷时,磁力线均匀分布在试件内部,试件表面无漏磁场产生;当试件有缺陷时,缺陷区域的磁导率很小、磁阻很大,使缺陷附近的磁力线发生畸变,泄漏至试件表面形成漏磁场,利用磁敏元件提取试件表面漏磁场信号,从而获取试件缺陷信息<sup>[15-17]</sup>。然而,漏磁检测对与磁力线夹角较小的裂纹缺陷检出能力不足,且难以识别类裂纹型缺陷。

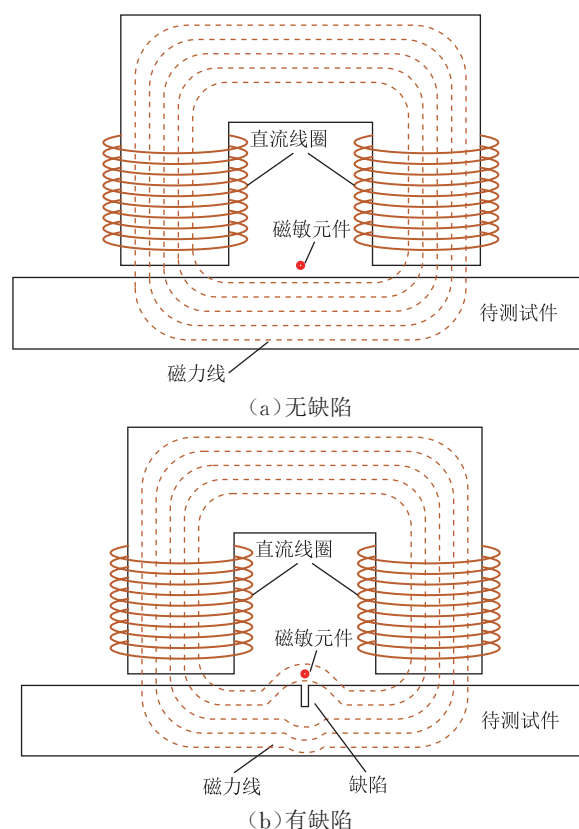


图1 漏磁检测原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of MFL testing

### 1.2 ACFM

ACFM基于电磁感应原理,通过对激励线圈施加

高频交流电,在待测试件表面可感应出交变电场。当试件无缺陷时,电导率是连续的,感应电流均匀分布在试件表面;当试件有缺陷时,因缺陷存在,导致缺陷区域的电导率不连续,感应电流流向发生偏转,向缺陷两端和底部绕过,进而引起空间磁场畸变(图2)<sup>[18-20]</sup>。ACFM 受趋肤效应影响,难以提取缺陷深度信息。

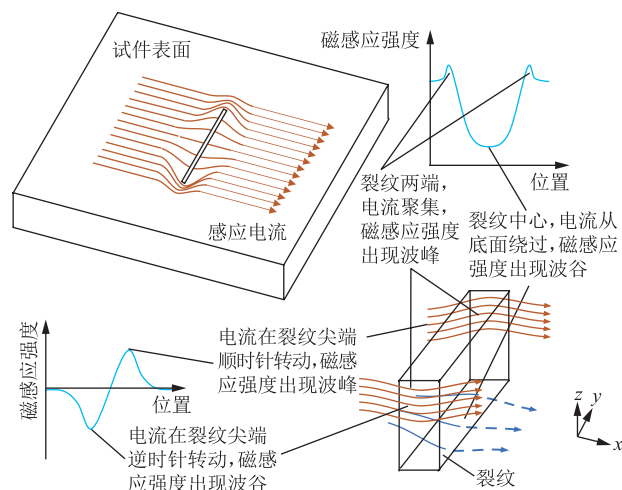


图2 交流电磁场检测原理示意图  
Fig. 2 Schematic diagram of ACFM

### 1.3 B-ACFM

根据漏磁检测与 ACFM 原理,提出基于 B-ACFM 的管道裂纹内检测方法,并据此设计复合电磁无损检测传感器(图3)。该传感器由 U 型磁轭、直流线圈、高频交流线圈及感应线圈组成。采用漏磁检测的 U 型磁轭结构,在磁轭两端对称均匀缠绕直流线圈,施加直流激励,饱和或近饱和磁化被测区域;在磁轭横梁均匀缠绕高频交流线圈,施加高频交流激励,使磁轭正下方试件表面产生两个异向涡流场。若试件中存在裂纹,裂纹将导致试件内部原磁路中磁通发生畸变,磁力线在裂纹两端发生偏转,绕过裂纹区域,泄漏至裂纹上方形成漏磁场;同时,裂纹导致所在区域电导率不连续,

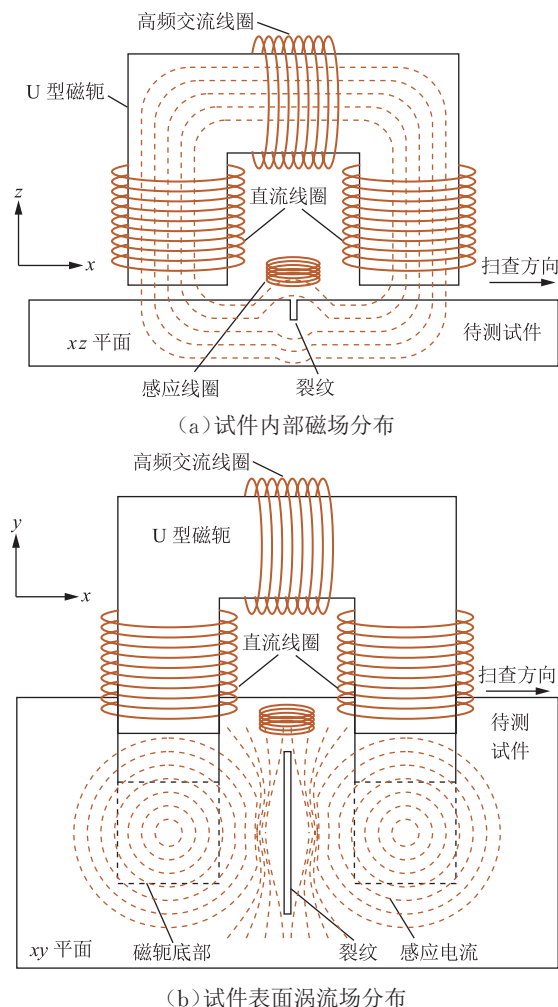
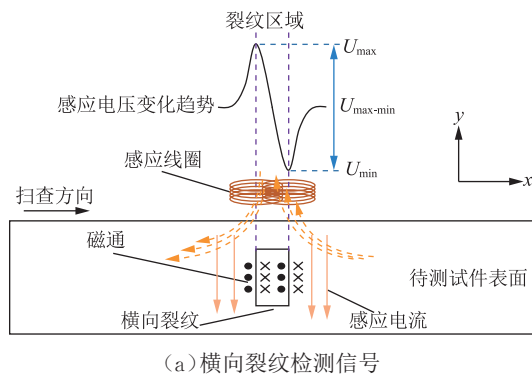


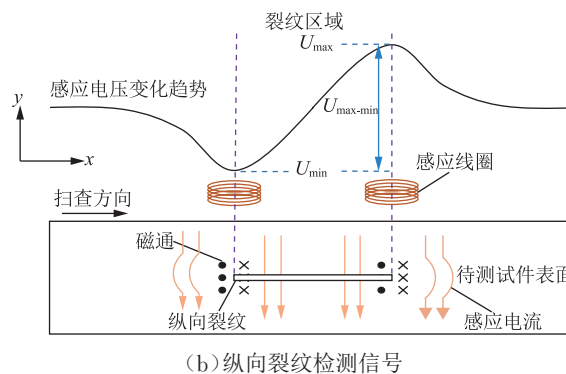
图3 偏置交流电磁场检测原理示意图  
Fig. 3 Schematic diagram of B-ACFM

使得感应电流流向发生偏转,向裂纹两端及底部绕过,感应电流在裂纹两端聚集。该方法具备对不同深度裂纹及与磁力线夹角较小裂纹缺陷的定量识别能力。

裂纹导致传感器在扫描试件过程中,其磁路中原有磁通发生畸变,引起感应线圈中的电压变化(图4)。B-ACFM 传感器扫描横向裂纹时,经过  $z$  轴负向进入感应线圈的磁通逐渐增大,使得产生的感应电压为正



(a) 横向裂纹检测信号



(b) 纵向裂纹检测信号

图4 感应线圈检测信号原理示意图  
Fig. 4 Schematic diagram of induction coil detection signal



值,并在裂纹边缘处达到波峰  $U_{\max}$ ;传感器逐渐扫查至裂纹中心时,经过  $z$  轴正负向进入感应线圈的磁通逐渐相等,使得产生的感应电压逐渐减小至 0;当传感器离开横向裂纹时,经过  $z$  轴正向进入感应线圈的磁通逐渐增大,使得产生的感应电压为负值,并在裂纹边缘处达到波谷  $U_{\min}$ 。其感应线圈中的感应电压  $U$  为:

$$U=-N\frac{d\Phi}{dt}=-N\frac{d(\mathbf{B}_l\cdot\mathbf{S})}{dt}\tag{1}$$

式中:  $N$  为感应线圈匝数;  $\Phi$  为线圈通过漏磁场的磁通量, Wb;  $t$  为时间, s;  $\mathbf{B}_l$  为漏磁场的磁感应强度, T;  $S$  为线圈的横截面积,  $\text{m}^2$ 。

B-ACFM 传感器扫查纵向裂纹时,感应电流在裂纹边缘逆时针偏转,感应线圈中产生的感应电压达到  $U_{\min}$ ;随着传感器向裂纹中心移动,感应电流逐渐趋于电磁平衡,使得产生的感应电压逐渐增大至 0;当传感器离开纵向裂纹时,感应电流在裂纹边缘顺时针偏转,感应线圈中产生的感应电压达到了波峰  $U_{\max}$ 。将线圈划分为  $n$  个与感应电流磁感应强度  $\mathbf{B}_l$  垂直的单位矢量  $d\mathbf{s}$ ,则感应线圈中的感应电压为:

$$U=-N\frac{\partial}{\partial t}\left(n\int_s\mathbf{B}_l d\mathbf{s}\right)=-N\frac{\partial}{\partial t}\left(n\int_s\frac{\mu_l I \mathbf{e}}{2\pi\rho} d\mathbf{s}\right)\tag{2}$$

式中:  $\mu_l$  为空气的磁导率, H/m;  $I$  为感应电流, A;  $\mathbf{e}$  为感应电流所产生的磁力线方向单位向量;  $\rho$  为线圈上任一点与感应电流中心的距离, m。

根据所获得的裂纹响应信号,即可求得 B-ACFM 传感器扫查裂纹时感应线圈中的裂纹响应信号峰谷值  $U_{\max-\min}$ :

$$U_{\max-\min}=U_{\max}-U_{\min}\tag{3}$$

2 B-ACFM 仿真分析

利用 ANSYS Maxwell 有限元分析软件,针对 B-ACFM 中的高频交流激励,在瞬态场下建立三维有限元分析模型,对管道有无裂纹进行仿真求解,分析管道内部磁场畸变及表面涡流场变化。

2.1 模型建立

当传感器尺寸相对于管道曲率较小时,用平面代替管道弧面进行求解分析,对仿真结果影响可忽略不计<sup>[21]</sup>。根据 B-ACFM 传感器结构,建立传感器的三维有限元模型(图 5),模型主要包括 U 型磁轭、直流线圈、

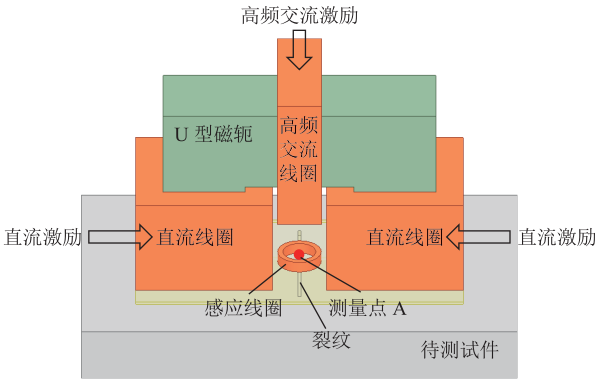


图 5 B-ACFM 传感器三维有限元模型示意图  
Fig. 5 Schematic diagram of 3D finite element model for B-ACFM sensor

高频交流线圈、感应线圈、待测试件、空气域(表 1)。为与实际情况一致,传感器距试件表面 0.5 mm,感应线圈置于 U 型磁轭正下方。直流线圈、高频交流线圈及感应线圈的材质均为铜,相对磁导率为 0.999 991,电导率为  $5.8\times 10^7$  S/m。直流线圈对称且均匀缠绕至磁极两端,共缠绕 400 匝,厚度为 5 mm、长度为 18 mm,激励电流为 2.625 A;高频交流线圈均匀缠绕至磁轭横梁,共缠绕 300 匝,厚度为 5 mm、长度为 8 mm,激励电流为 0.5 A,频率为 5 000 Hz;感应线圈内径 6 mm、外径 8 mm、高 2 mm;空气域为长方体。

表 1 B-ACFM 传感器三维有限元模型材料参数表  
Table 1 Material parameters of 3D finite element model for B-ACFM sensor

部件	材料	尺寸/mm			角度	相对磁导率	电导率/( $\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$ )
		长	宽	高			
U 型磁轭	铁氧体	50(外窗) 20(内窗)	15.0	35(外窗) 20(内窗)	15	—	1 000
待测试件	20 钢	80(试件) 24(裂纹)	50.0	10(试件) 1(裂纹)	90°	B-H 曲线	$2\times 10^6$

为提升仿真计算速度,对模型中裂纹区域进行局部网格加密(图 6),裂纹区域被细分为最大边长

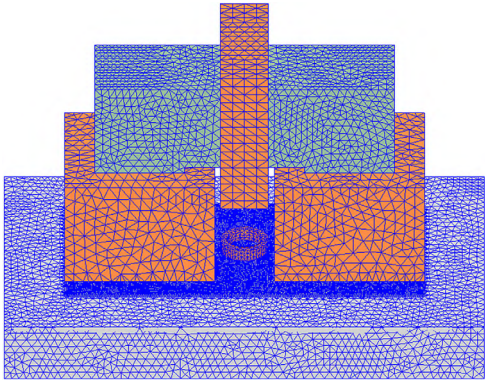
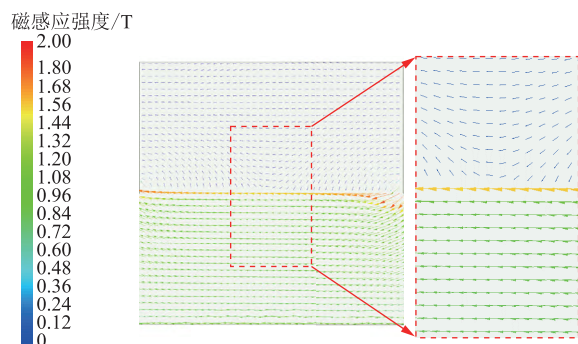


图 6 B-ACFM 传感器有限元模型网格划分示意图  
Fig. 6 Meshing of finite element model for B-ACFM sensor

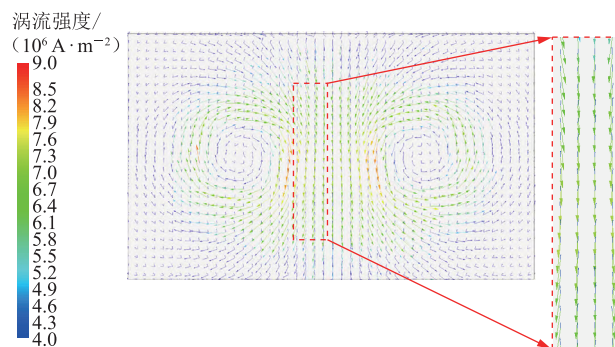
为 0.5 mm 的局部网格。传感器与试件间隙最大网格尺寸为 0.5 mm, 试件表面在 0.13 mm 的深度内被分为两层。感应线圈最大网格尺寸为 1 mm, 激励线圈最大网格尺寸为 3 mm, 其他区域最大网格尺寸为 2 mm。



(a) 管道内部磁场密度分布

## 2.2 仿真分析

由管道无缺陷时电磁分布情况(图 7)可见, 管道内部的磁力线均匀分布, 管道表面无漏磁场产生; 磁轭两端正下方出现两个异向涡流场, 均匀且对称分布, 感应电流均匀分布在管道表面。

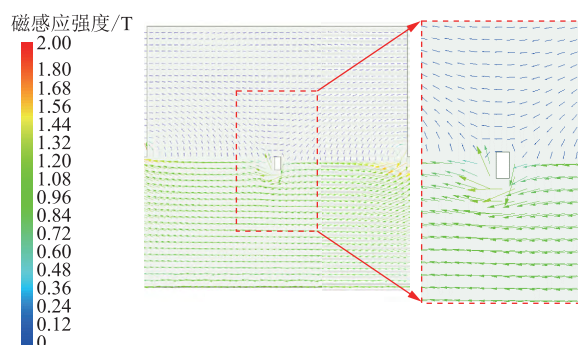


(b) 管道表面涡流密度分布

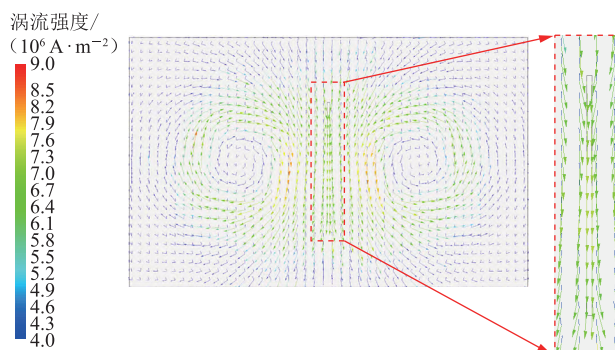
图 7 管道无缺陷时的电磁分布云图

Fig. 7 Electromagnetic distribution of pipeline without defect

从管道有缺陷时电磁分布情况(图 8)可见, 管道内部的磁力线从裂纹两端绕过裂纹区域, 泄漏至裂纹的上方形成漏磁场; 管道表面裂纹区域的感应



(a) 管道内部磁场密度分布



(b) 管道表面涡流密度分布

图 8 管道有缺陷时的电磁分布云图

Fig. 8 Electromagnetic distribution of pipeline with defect

## 3 实验验证

### 3.1 实验平台及试件

基于上述 B-ACFM 原理分析及仿真结果, 设计了偏置交流电磁场检测系统(图 9)。该系统主要由 B-ACFM 裂纹检测传感器、信号发生器、功率放大器、直流稳压电源、信号调理模块、数据采集卡、电子计算机、三轴工作台及裂纹试件组成。因感应线圈输出的电压信号极其微弱, 且信噪比低, 不利于采集, 故利用低通滤波与高通滤波组成的信号调理模块, 将 5 kHz 的裂纹检测信号进行滤波放大, 提高信噪比, 增加裂纹响应信号

电流流向发生变化, 在裂纹两侧发生偏转, 从一侧顺时针偏转, 另一侧则逆时针偏转, 与上述原理分析结果一致。

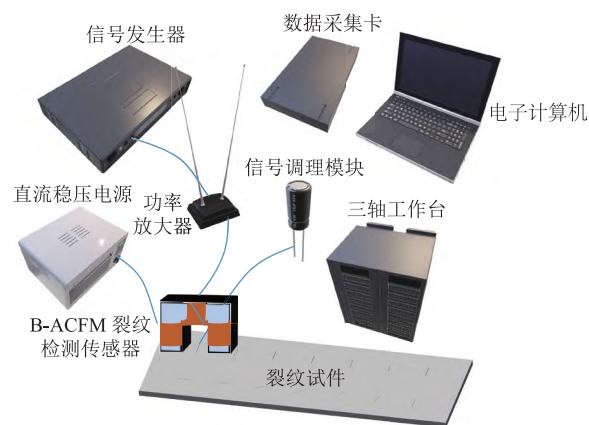


图 9 偏置交流电磁场检测系统示意图

Fig. 9 Schematic diagram of B-ACFM system

识别度。实验中,功率放大器对信号发生器产生的 3.5 V (峰-峰值)、5 kHz 正弦激励信号进行功率放大,加载至传感器高频交流线圈两端,在试件表面产生均匀交变电场;同时通过直流稳压电源产生 2.625 A 直流激励信号,加载至传感器直流线圈两端,饱和或近饱和磁化被测裂纹区域。计算机端的三轴工作台程序控制传感器直线扫查裂纹试件,使传感器中的感应线圈提取空间中磁场及涡流场变化,转为电压信号,并送入信号调理模块中滤波放大。Labview 数据采集程序及数据采集卡对处理后的电

压信号进行数据采集、显示及保存,以便进行后续处理。

利用机加工方式,加工具有不同角度及深度裂纹的试件(图 10),材料为 20 钢(表 2)。传感器恒定扫查速度为 20 mm/s,试件中预制不同角度的裂纹,其与扫查方向的夹角  $\theta$  分别为  $0^\circ$ 、 $15^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $75^\circ$ 、 $90^\circ$ ,尺寸均为  $24\text{ mm}\times0.3\text{ mm}\times1\text{ mm}$ (长 $\times$ 宽 $\times$ 深);试件中不同深度裂纹与检测方向均成  $90^\circ$  角,深度分别为 1 mm、2 mm、3 mm、4 mm、5 mm、6 mm、7 mm,尺寸均为  $24\text{ mm}\times0.5\text{ mm}$ (长 $\times$ 宽)。

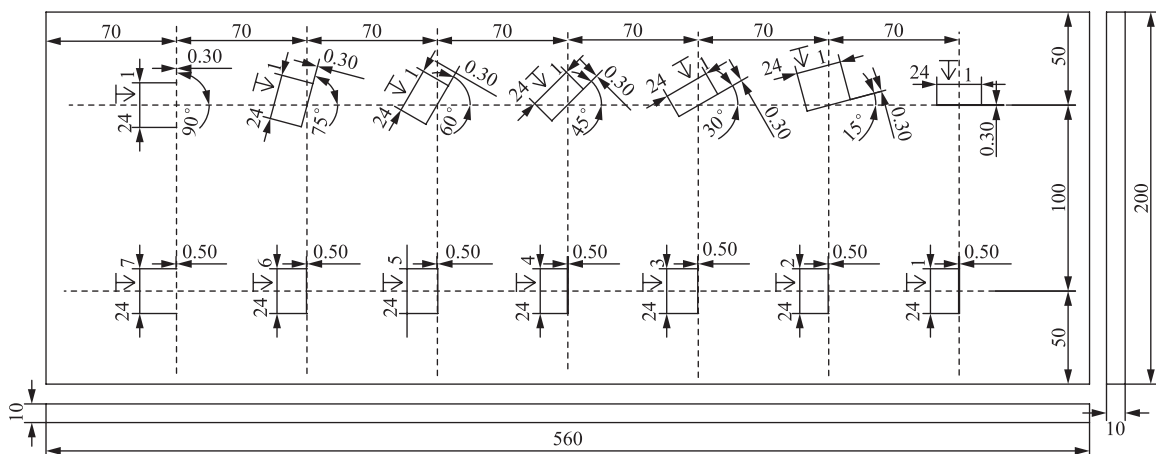


图 10 20 钢裂纹试件尺寸图(mm)  
Fig. 10 Crack dimensions of 20 steel specimens (mm)

表 2 20 钢试件预制裂纹参数表  
Table 2 Precrack parameters of 20 steel specimens

缺陷类型	编号	缺陷角度/( $^\circ$ )	缺陷尺寸/mm		
			长	宽	高
角度裂纹	A1	0			
	A2	15			
	A3	30			
	A4	45	24	0.3	1
	A5	60			
	A6	75			
	A7	90			
深度裂纹	B1				1
	B2				2
	B3				3
	B4	90	24	0.5	4
	B5				5
	B6				6
	B7				7

3.2 结果及讨论

3.2.1 内壁不同角度裂纹

由内壁不同角度裂纹感应线圈响应信号(图 11)可见,当传感器扫查至裂纹区域时,感应线圈中裂纹响应

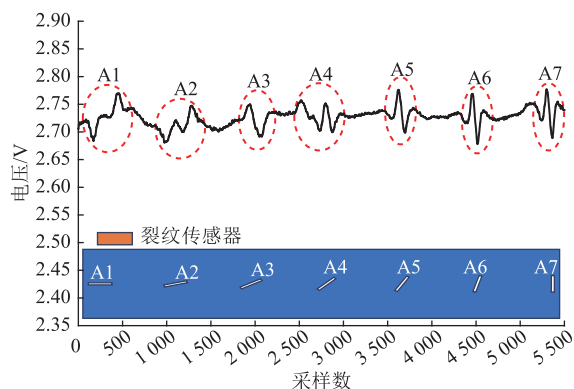
信号出现预期的信号畸变。对原始信号进行包络、滤波等预处理,可见当裂纹角度为  $0^\circ\leq\theta\leq15^\circ$  时,信号特征呈现先波谷后波峰形态;当裂纹角度为  $15^\circ<\theta\leq90^\circ$  时,信号特征相位发生翻转,呈先波峰后波谷形态。统计  $U_{\max-\min}$  随裂纹角度的变化规律,可见当裂纹角度由  $0^\circ$  依次增加至  $90^\circ$  时,  $U_{\max-\min}$  先减小后增大,极小值出现在裂纹角度  $45^\circ$  附近。

3.2.2 内外壁不同深度裂纹

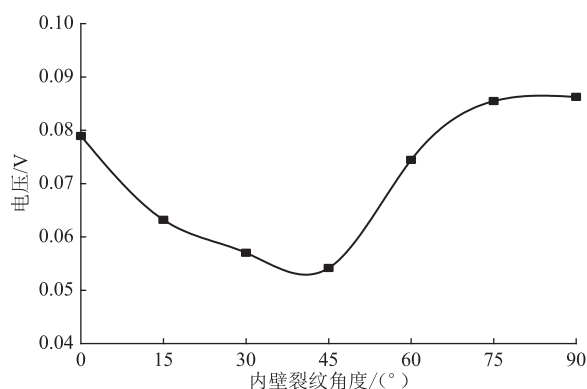
由内壁不同深度裂纹感应线圈响应信号(图 12)可见,当传感器扫查至内壁裂纹区域时,感应线圈中裂纹响应信号出现预期的信号畸变。对原始信号进行包络、滤波等预处理,可见获得的裂纹响应信号波形呈现先波峰后波谷的组合分布,且峰值与谷值近似对称分布。随内壁裂纹深度增加,其响应信号特征逐渐明显。对  $U_{\max-\min}$  进行统计,可见随内壁裂纹深度增加,  $U_{\max-\min}$  逐渐增大。

由外壁不同深度裂纹感应线圈响应信号(图 13)可见,当传感器扫查至外壁裂纹区域时,感应线圈中裂纹响应信号出现预期的信号畸变。对原始信号进行包络、滤波等预处理,获得的裂纹响应信号波形在





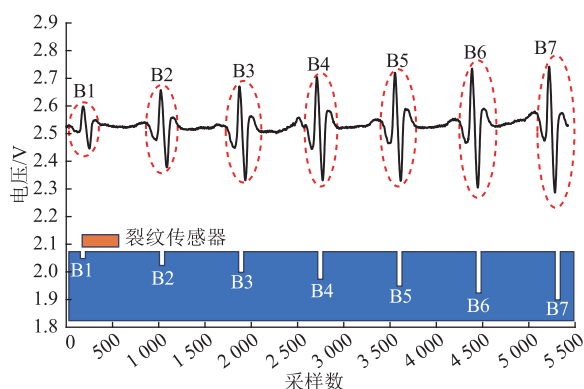
(a) 预处理后的响应信号



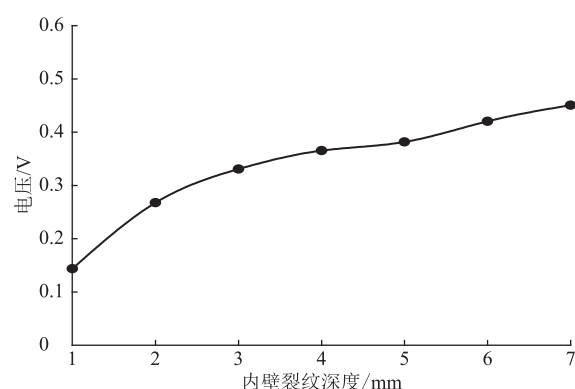
(b) 裂纹响应信号峰谷值

图 11 B-ACFM 传感器检测内壁不同角度裂纹时的感应线圈响应信号图

Fig. 11 Induction coil signals in response to cracks at different angles in the inner wall detected by B-ACFM sensor



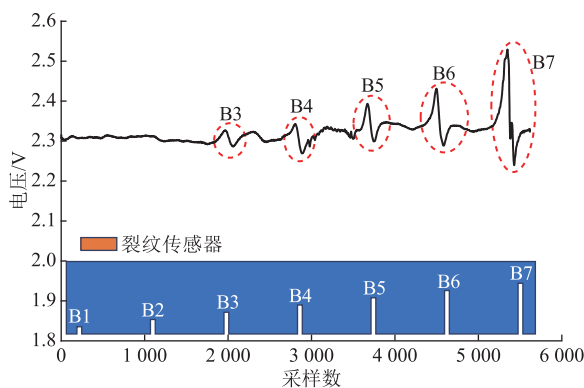
(a) 预处理后的响应信号



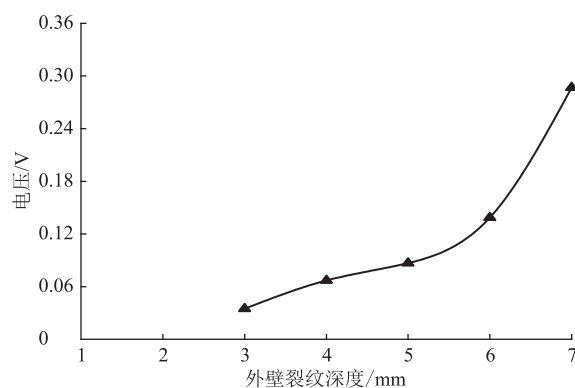
(b) 裂纹响应信号峰谷值

图 12 B-ACFM 传感器检测内壁不同深度裂纹时的感应线圈响应信号图

Fig. 12 Induction coil signals in response to cracks at different depths in the inner wall detected by B-ACFM sensor



(a) 预处理后的响应信号



(b) 裂纹响应信号峰谷值

图 13 B-ACFM 传感器检测外壁不同深度裂纹时的感应线圈响应信号图

Fig. 13 Induction coil signals in response to cracks at different depths in the outer wall detected by B-ACFM sensor

其裂纹两端呈现“波峰”与“波谷”的组合分布,且峰值与谷值近似对称分布。外壁裂纹深度为 1 mm、2 mm 时,传感器无裂纹响应信号或信号特征不明显,其余信号特征均呈先波峰后波谷形态,且随外壁裂纹深度增加,其响应信号特征逐渐明显,  $U_{\max-\min}$  逐渐增大。

## 4 结论

针对管道内壁不同角度裂纹和内外壁不同深度裂纹进行内检测研究,提出一种基于偏置交流电磁场检测的管道裂纹内检测方法。结果表明:

1) 在直流激励与高频交流激励共同作用下,裂纹

使试件内部原磁路中磁通发生畸变,磁力线在裂纹两端发生偏转,绕过裂纹区域,泄漏至裂纹上方形成漏磁场;同时,在试件表面,由于裂纹存在,导致该区域电导率不连续,使得感应电流流向发生偏转,向裂纹两端和底部绕过,感应电流在裂纹两端聚集。根据该规律,研制了一种基于偏置交流电磁场检测的复合电磁无损检测传感器,并搭建了实验平台,对含有一系列不同尺寸的 20 钢裂纹试件进行动态扫查实验,验证了该方法的可行性。

2) 实验研究发现,对于内壁不同角度裂纹,当裂纹角度为  $0^\circ \leq \theta \leq 15^\circ$  时,信号特征呈现出先波谷后波峰的分布;当裂纹角度为  $15^\circ < \theta \leq 90^\circ$  时,信号特征发生相位翻转,呈现出先波峰后波谷的分布。在裂纹角度  $0^\circ \leq \theta \leq 45^\circ$  范围内,随内壁裂纹角度增大,  $U_{\max-\min}$  减小;在裂纹角度  $45^\circ < \theta \leq 90^\circ$  范围内,随内壁裂纹角度增大,  $U_{\max-\min}$  增大。对于内外壁不同深度裂纹,其响应信号特征均呈现出先波峰后波谷的分布,随内外壁裂纹深度的增加,  $U_{\max-\min}$  增大。偏置交流电磁场检测方法具备对管道内壁 0.3 mm 宽的不同角度裂纹及 0.5 mm 宽的  $90^\circ$  不同深度裂纹的定量识别能力,对外壁 0.5 mm 宽的  $90^\circ$  裂纹的最小检测深度为壁厚的 30%。

## 参考文献:

- [1] 王乐乐,李莉,张斌,孙云峰,冯学书,高山卜. 中国油气储运技术现状及发展趋势[J]. 油气储运, 2021, 40(9): 961-972. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2021.09.001.
- WANG L L, LI L, ZHANG B, SUN Y F, FENG X S, GAO S B. Current status and development trend of oil and gas storage and transportation technologies[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2021, 40(9): 961-972.
- [2] 李佳音,杨理践,郑文学,刘斌. 基于平衡电磁技术的钢板表面裂纹深度检测方法[J]. 仪表技术与传感器, 2023(3): 104-109. DOI: 10.3969/j.issn.1002-1841.2023.03.018.
- LI J Y, YANG L J, ZHENG W X, LIU B. Surface crack depth detection method for steel plates based on balanced-field electromagnetic technique[J]. Instrument Technique and Sensor, 2023(3): 104-109.
- [3] 冯一環,张来斌,郑文培,刘海涛. 新型交流电磁场检测探头仿真和测试研究[J]. 中国测试, 2022, 48(11): 113-119. DOI: 10.11857/j.issn.1674-5124.2021040095.
- FENG Y J, ZHANG L B, ZHENG W P, LIU H T. Simulation and testing of a novel probe based on alternating current field measurement[J]. China Measurement & Test, 2022, 48(11): 113-119.
- [4] 辛佳兴,陈金忠,李晓龙,王长新,张雪伟,朱宏武. 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. DOI: 10.16082/j.cnki.issn.1001-4578.2022.05.016.
- XIN J X, CHEN J Z, LI X L, WANG C X, ZHANG X W, ZHU H W. Advances in oil and gas pipeline internal inspection technology[J]. China Petroleum Machinery, 2022, 50(5): 119-126.
- [5] 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. DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.2016.08.005.
- 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.
- [6] 袁新安,赵建超,李伟,张广泰,李肖. 基于 ACFM 的缺陷可视化检测实验系统设计及测试[J]. 实验室研究与探索, 2021, 40(9): 76-79. DOI: 10.19927/j.cnki.syyt.2021.09.017.
- YUAN X A, ZHAO J C, LI W, ZHANG G T, LI X. Design and testing of visual detection system of based on ACFM defects[J]. Research and Exploration in Laboratory, 2021, 40(9): 76-79.
- [7] RU G G, GAO B, LIU D, MA Q P, LI H R, WOO W L. Structural coupled electromagnetic sensing of defects diagnostic system[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2023, 70(1): 951-964. DOI: 10.1109/tie.2022.3148755.
- [8] YANG C R, GAO B, MA Q P, XIE L, TIAN G Y, YIN Y. Multi-layer magnetic focusing sensor structure for pulsed remote field eddy current[J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(7): 2490-2499. DOI: 10.1109/jsen.2018.2886816.
- [9] GAO B, HE Y Z, WOO W L, TIAN G Y, LIU J, HU Y H. Multidimensional tensor-based inductive thermography with multiple physical fields for offshore wind turbine gear inspection[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(10): 6305-6315. DOI: 10.1109/tie.2016.2574987.
- [10] XU P, CHEN Y X, LIU L L, LIU B L. Study on high-speed rail defect detection methods based on ECT, MFL testing and ACFM[J]. Measurement, 2023, 206: 112213. DOI: 10.1016/j.measurement.2022.112213.
- [11] 李伟,邵鑫宇,张伯莹,袁新安,殷晓康,杨伟超. 交流电磁场和电磁超声复合无损检测技术研究[J]. 机械工程学报, 2022, 58(16): 153-159. DOI: 10.3901/JME.2022.16.153.
- LI W, SHAO X Y, ZHANG B Y, YUAN X A, YIN X K,



- YANG W C. Research on composite ACFM and EMAT nondestructive testing technology[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(16): 153-159.
- [12] GUO W, GAO B, TIAN G Y, SI D. Physic perspective fusion of electromagnetic acoustic transducer and pulsed eddy current testing in non-destructive testing system[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2020, 378(2182): 20190608. DOI: 10.1098/rsta.2019.0608.
- [13] MISHAKIN V V, KLYUSHNIKOV V A, GONCHAR A V, KACHANOV M. On assessing damage in austenitic steel based on combination of the acoustic and eddy current monitoring[J]. International Journal of Engineering Science, 2019, 135: 17-22. DOI: 10.1016/j.ijengsci.2018.11.001.
- [14] CHANG J L, CHU Z Q, GAO X Y, SOLDATOV A I, DONG S X. A magnetoelectric-ultrasonic multimodal system for synchronous NDE of surface and internal defects in metal[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2023, 183: 109667. DOI: 10.1016/j.ymsp.2022.109667.
- [15] 齐洪洋, 杨志军, 林楠. 漏磁检测技术的研究进展[J]. 化工机械, 2021, 48(6): 810-812, 948. DOI: 10.3969/j.issn.0254-6094.2021.06.004.
- QI H Y, YANG Z J, LIN N. Research progress in magnetic flux leakage testing technology[J]. Chemical Engineering & Machinery, 2021, 48(6): 810-812, 948.
- [16] 邱增集, 王平, 贾银亮. 磁化方向对焊缝缺陷漏磁场的影响分析[J]. 电子测量技术, 2022, 45(3): 25-31. DOI: 10.19651/j.cnki.emt.2108117.
- QIU Z J, WANG P, JIA Y L. Analysis for MFL signal of weld defects affected by magnetization direction[J]. Electronic Measurement Technology, 2022, 45(3): 25-31.
- [17] WANG G, XIAO Q, GAO Z H, LI W H, JIA L, LIANG C, et al. Multifrequency AC magnetic flux leakage testing for the detection of surface and backside defects in thick steel plates[J]. IEEE Magnetics Letters, 2022, 13: 1-5. DOI: 10.1109/LMAG.2022.3142717.
- [18] 王景林, 任尚坤, 张丹, 张文君. 基于 ACFM 检测技术的表面裂纹特征评价方法研究[J]. 中国测试, 2019, 45(1): 40-46. DOI: 10.11857/j.issn.1674-5124.2018080018.
- WANG J L, REN S K, ZHANG D, ZHANG W J. Research on surface crack feature evaluation method based on ACFM detection technology[J]. China Measurement & Test, 2019, 45(1): 40-46.
- [19] FENG Y J, YANG F, ZHANG L B, ZHENG W P, LIU H T. A novel ACFM probe for oil and gas pipe in-line inspection[J]. Energy Reports, 2021, 7(S7): 1594-1600. DOI: 10.1016/j.egy.2021.09.064.
- [20] ZHAO S X, SUN L S, GAO J Q, WANG J Z, SHEN Y. Uniaxial ACFM detection system for metal crack size estimation using magnetic signature waveform analysis[J]. Measurement, 2020, 164: 108090. DOI: 10.1016/j.measurement.2020.108090.
- [21] 辛佳兴, 陈金忠, 李晓龙, 朱宏武, 王长新. 基于阵列涡流技术的管道变形检测数值分析[J]. 石油机械, 2022, 50(2): 115-122. DOI: 10.16082/j.cnki.issn.1001-4578.2022.02.017.
- XIN J X, CHEN J Z, LI X L, ZHU H W, WANG C X. Numerical analysis on pipeline deformation detection based on array vortex technology[J]. China Petroleum Machinery, 2022, 50(2): 115-122.
- (编辑: 张腾)
- 
- 基金项目:**“十四五”国家重点研发计划“超大口径天然气管道磁电融合内检测技术研究及装备研制”, 2022YFC3070102; 中国特种设备检测研究院重点项目“油气管道内表面缺陷检测自爬行机器人”, 2022 重点 01; 中国特检院青年科技英才项目, KJYC-2023-10。
- 作者简介:** 付双成, 男, 1976 年生, 教授, 2009 年博士毕业于中国石油大学(北京)化工过程机械专业, 现主要从事流体流动数值模拟、多相流分离技术与设备、过程装备结构优化等方向的研究工作。地址: 江苏省常州市武进区湖塘镇滆湖中路 21 号, 213164。电话: 15295086176。Email: fushch711@163.com
- 通信作者:** 辛佳兴, 男, 1994 年生, 工程师, 2023 年博士毕业于中国石油大学(北京)机械工程专业, 现主要从事油气管道在线检测技术方向的研究工作。地址: 北京市朝阳区和平西苑 2 号, 100029。电话: 18811526276。Email: jiaxingxin\_cup@163.com
- Received: 2023-10-26
  - Revised: 2023-11-29
  - Online: 2024-06-28

