

田野,陈海艳,李坤,等.基于交变电磁场的管道裂纹检测方法[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2025,44(2):219-225.DOI:10.11956/j.issn.1008-0562.20240069
TIAN Ye, CHEN Haiyan, LI Kun, et al. Pipeline crack detection method based on alternating electromagnetic field[J]. Journal of Liaoning Technical University(Natural Science), 2025, 44(2): 219-225. DOI: 10.11956/j.issn.1008-0562.20240069

基于交变电磁场的管道裂纹检测方法

田野¹, 陈海艳¹, 李坤¹, 丁融¹, 杨理践^{2*}

(1. 管网集团(新疆)联合管道有限责任公司科技数字中心, 新疆 乌鲁木齐 830000;
2. 沈阳工业大学 信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110870)

摘要:为实现管道裂纹缺陷的有效检测,提出一种基于交变电磁场的裂纹检测方法,实现不同走向裂纹的有效检测。建立交变电磁场检测数学模型,结合“U”型传感器的基本结构研究交变电磁场的检测原理,分析管道表面产生的电磁场分布规律;通过有限元仿真提取周向与轴向裂纹引起的畸变磁场信号并进行特征分析;搭建实验平台,通过实验验证裂纹缺陷深度对检测信号的影响。研究表明:“U”型检测结构能够对管道表面周、轴向裂纹进行有效检测;当存在周向裂纹时,交流漏磁场起主导检测作用,当存在轴向裂纹时,涡流起主导检测作用,可根据二者 z 轴分量呈反向的信号特征实现裂纹走向的判断。研究结论为管道裂纹检测提供了新思路。

关键词: 交变电磁场; 裂纹缺陷; 管道内检测; 磁感应强度; 电磁场畸变

中图分类号: TE832

文献标志码: A

文章编号: 1008-0562(2025)02-0219-07

Pipeline crack detection method based on alternating electromagnetic field

TIAN Ye¹, CHEN Haiyan¹, LI Kun¹, DING Rong¹, YANG Lijian^{2*}

(1. Technology Digital Center, PipeChina (Xinjiang) United Pipeline Company Limited, Urumqi 830000, China; 2. School of Information Science and Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

Abstract: In order to realize the effective detection of pipeline crack defects, a crack detection method based on alternating electromagnetic field is proposed to realize the effective detection of cracks with different directions. The mathematical model of alternating electromagnetic field detection is established. Combined with the basic structure of U type sensor, the detection principle of alternating electromagnetic field is studied, and the distribution law of electromagnetic field generated on the surface of pipeline is analyzed. The distorted magnetic field signals caused by circumferential and axial cracks are extracted and analyzed by finite element simulation. The experimental platform is built to verify the influence of crack defect depth on the detection signal. The results show that the U type detection structure can effectively detect the circumferential and axial cracks on the surface of the pipeline. When there is a circumferential crack, the AC leakage magnetic field plays a dominant role in the detection. When there is an axial crack, the eddy current plays a dominant role in the detection. The judgment of the crack direction can be realized according to the reverse signal characteristics of the z -axis components of the two. The research conclusion provides a new detection idea for pipeline crack detection.

Keywords: alternating electromagnetic fields; crack defects; in-pipe inspection; magnetic induction intensity; electromagnetic field distortion

0 引言

油气管道具有经济高效的特点,已成为输送能源的主要方式,管道的安全运行保障了油气能

源的有效运输及充分利用^[1]。然而,埋在地下的管道服役环境特殊,输送介质性质不同,受土壤或介质腐蚀、地质变化、外部载荷等因素的影响,

收稿日期: 2024-03-25 修回日期: 2024-05-22 接受日期: 2024-05-31 责任编辑: 焦丽

基金项目: 辽宁省自然科学基金项目(2019-MS-243)

作者简介: 田野(1987-),男,湖北咸宁人,高级工程师,主要从事管道完整性管理方面的研究。E-mail: tianye04@pipechina.com.cn

通信作者: 杨理践(1957-),男,湖南长沙人,硕士,教授,主要从事管道内检测方面的研究。E-mail: yanglijian888@163.com

不可避免地在管道的内外壁出现腐蚀、变形甚至开裂等失效情况^[2-3]。其中,裂纹缺陷作为最主要的失效因素随着时间演变逐渐扩展,严重影响管道的承压能力与安全性能^[4-5]。由于油气介质易燃易爆特性,一旦发生泄漏将会迅速扩散甚至引起爆炸等灾难性事故。因此,对管道裂纹的有效检测对评估管道使用性能、维护管道安全和降低灾害风险具有重要意义。

以管道内检测器为实施载体的管道内检测技术是目前最有效的管道缺陷检测手段。在管道内,该技术借助输送介质的压力差进行检测,对铺设距离长,且地表不可见的长输油气管道具有良好的工程适用性^[6-8]。漏磁检测技术对金属损失、点蚀等具有一定体积的缺陷展现出良好的检测效能,但受到原理限制,对裂纹这种开口尺寸极小的缺陷检测效果欠佳^[9-10]。将超声、涡流等检测技术应用于管道内检测器能够提高裂纹的检测精度,但在耦合剂、检测速度以及功耗等方面都存在一定局限性^[11-14]。管道内裂纹的检测是缺陷检测研究领域的难题,亟待探索一种更适用于工程环境的检测方法。

交流电磁场检测技术是近些年来新兴的电磁无损检测方法,被广泛用于钢材损伤检测中^[15]。学者们在交流电磁场检测技术原理、传感器设计,以及信噪比提升方面均开展了深入研究。交流电磁场检测技术对局部范围的微小缺陷具有较高的灵敏度和良好的检测效果^[16-18],在管道裂纹在线检测中具有较好的发展前景。常规的交流电磁场检测技术仅对轴向裂纹敏感,旋转交流电磁场可实现多角度的表面裂纹检测^[19-20],但激励结构较为复杂,在管道在线检测场景中的应用存在一定局限性。

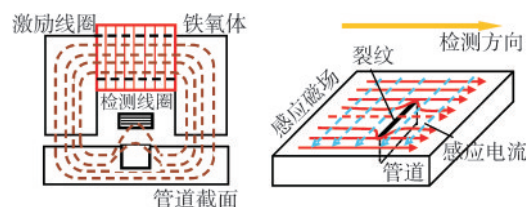
在已有研究的基础上,本文提出以单一结构实现管道不同走向裂纹检测的方法,研究交变电磁场的裂纹检测机理,建立“U”型检测探头的管道表面电磁场分布数值计算模型。通过有限元仿真与实验相结合,分析裂纹引起的畸变磁场信号特征与变化规律,并通过平台实验验证了方法的有效性,与理论分析的正确性。

1 裂纹检测原理

交变电磁场技术融合了涡流检测技术与交流漏磁检测技术的优势,以交流正弦信号为激励源,在被测管道表面感应出均匀分布的平衡电磁场。当被测管道表面存在裂纹时,电磁场为维持其连续性会在裂纹的干扰下发生畸变,畸变磁场引起的磁通量变化被检测线圈捕获以此实现裂纹的检测。

1.1 不同激励方式信号分布特征

交变电磁场的传感器由激励线圈、检测线圈和“U”型铁氧体构成,其中激励线圈与检测线圈空间正交排布。本节对交变电磁场检测技术对不同方向裂纹的作用机理进行说明。管道周向裂纹(裂纹延伸方向与检测方向垂直)在管道表面的电磁分布见图1。图1中,当管道存在周向裂纹时,管道表面感应磁场与裂纹缺陷延伸方向垂直,感应电流与裂纹缺陷延伸方向平行。在裂纹缺陷处,管道和空气的磁导率不连续,大部分磁通在管道内迂回流动,小部分泄漏到空气中。在管道上方的检测线圈中有磁通通过,进而产生感应电动势,使得检测信号不为0。

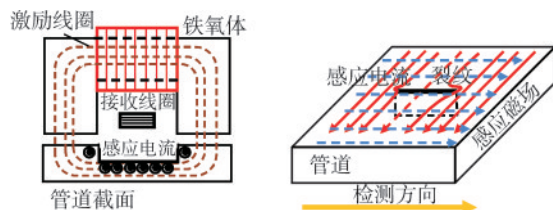


(a) 传感器电磁场分布 (b) 管道表面电磁场分布

图1 周向裂纹检测原理

Fig.1 schematic of detection of circumferential cracks

管道轴向裂纹(裂纹延伸方向与检测方向平行)在管道表面的电磁分布如图2所示。图2中,当管道存在轴向裂纹时,管道表面感应电流垂直于裂纹缺陷的延伸方向,此时感应磁场与裂纹缺陷延伸方向平行。由于管道与缺陷位置不连续,缺陷处的感应电流将绕过裂纹缺陷流动。感应电流在裂纹缺陷两端比较集中,干扰了空间磁场分布,破坏了管道表面电磁平衡,此时检测线圈中产生感应电动势,检测信号不为0。



(a) 传感器电磁场分布 (b) 管道表面电磁场分布

图2 轴向裂纹检测原理

Fig.2 schematic of detection of axial cracks

1.2 交变电磁场检测理论模型

由1.1节可知,交变电磁场传感器检测线圈提取的检测信号是裂纹引起的感应电流畸变与漏磁场共同作用的结果。首先分析传感器激励线圈产生的激励场。对激励线圈进行抽象化,如图3所示,以此建立数学模型,可求解得到磁芯中任意

一点 $P(x,y,z)$ 的磁感应强度。

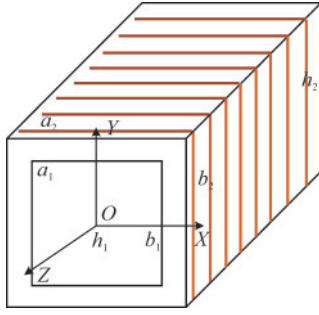


图3 激励线圈示意

Fig.3 schematic of excitation coil

取长方体所在一侧轴截面为坐标平面，以截面几何中心为坐标原点，激励线圈沿 X 轴方向的内外长度分别为 a_1 和 a_2 ，沿 Y 轴方向的内外长度分别为 b_1 和 b_2 ，沿 Z 轴方向的长度为 $h_1 \sim h_2$ ，建立直角坐标系 $OXYZ$ 。根据毕奥-萨伐尔定律，每一匝线圈在 P 点的磁感应强度为

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{v'} \frac{(x', y', z') \times e_R}{R^2} dv', \quad (1)$$

式中： μ_0 为真空磁导率，取 $4\pi \times 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m} \cdot \text{A}^{-1}$ ； e_R 为电流元指向待求场点的单位向量； R 为电流源到空间点 P 的距离；电流源点坐标表示为 (x', y', z') ； v' 为单位体积。

以 $B_{zi}(i=1,2,3,4)$ 分别表示矩形线圈各边在空间任意给定轴方向上的磁感应强度，则线圈产生的总磁感应强度为

$$B = B_{z1} + B_{z2} + B_{z3} + B_{z4}, \quad (2)$$

式中：

$$\begin{aligned} B_{z1} &= \frac{\mu_0 J}{4\pi} \times \int_{h_1}^{h_2} dz \int_{a_1}^{a_2} \left[\frac{x-x'}{(z-z')^2 + (x-x')^2} \left| \frac{k_1 x'-y}{R_1} + \frac{k_1 x'+y}{R_2} \right| \right] dx', \\ B_{z2} &= -\frac{\mu_0 J}{4\pi} \times \int_{h_1}^{h_2} dz \int_{a_1}^{a_2} \left[\frac{x+x'}{(z-z')^2 + (x-x')^2} \left| \frac{k_1 x'+y}{R_5} + \frac{k_1 x'-y}{R_6} \right| \right] dx', \\ B_{z3} &= \frac{\mu_0 J}{4\pi} \times \int_{h_1}^{h_2} dz \int_{a_1}^{a_2} \left[\frac{y'-y}{(z-z')^2 + (y-y')^2} \left| \frac{k_1 y'-x}{R_3} + \frac{k_1 y'+x}{R_4} \right| \right] dy', \\ B_{z4} &= \frac{\mu_0 J}{4\pi} \times \int_{h_1}^{h_2} dz \int_{a_1}^{a_2} \left[\frac{y'+y}{(z-z')^2 + (y-y')^2} \left| \frac{k_1 y'+x}{R_7} + \frac{k_1 y'-x}{R_8} \right| \right] dy'; \end{aligned}$$

J 为单位体积内的电流密度；由于模型为矩形线圈，线圈厚度相同，因此 $k_1=1$ ； $R_1 \sim R_8$ 分别为

$$\begin{aligned} R_1 &= \sqrt{(k_1 x'-y)^2 + (z-z')^2 + (x-x')^2}, \\ R_2 &= \sqrt{(k_1 x'+y)^2 + (z-z')^2 + (x-x')^2}, \\ R_3 &= \sqrt{(k_1 y'-x)^2 + (z-z')^2 + (y-y')^2}, \\ R_4 &= \sqrt{(k_1 y'+x)^2 + (z-z')^2 + (y-y')^2}, \\ R_5 &= \sqrt{(k_1 x'-y)^2 + (z-z')^2 + (x+x')^2}, \\ R_6 &= \sqrt{(k_1 x'+y)^2 + (z-z')^2 + (x+x')^2}, \\ R_7 &= \sqrt{(k_1 y'+x)^2 + (z-z')^2 + (y+y')^2}, \\ R_8 &= \sqrt{(k_1 y'-x)^2 + (z-z')^2 + (y+y')^2}. \end{aligned}$$

由此可依据所需磁感应强度设计线圈尺寸、匝数和线圈激励电流。在该激励场下，进一步分析管道表面裂纹引发的感应电磁场畸变情况。设管道轴、周向无限大，表面存在一处长为 $2a$ 、深为 b 、宽度为 h 的裂纹缺陷，裂纹两端点分别为 A 和 B ，以裂纹几何中心为原点建立坐标轴 $Oxyz$ ，沿 $-y$ 轴向有匀强电场 E_0 ，感应磁场 H_0 方向为 $-x$ 轴方向，缺陷模型如图4所示。

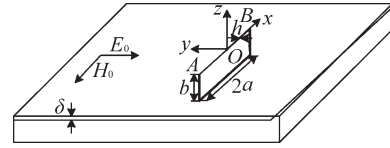


图4 缺陷模型

Fig.4 defect model

根据麦克斯韦方程组可得近表面电场 $\vec{E}$ 与磁场 $\vec{H}$ ，即

$$\frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial z^2} = k^2 \vec{E}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial z^2} = k^2 \vec{H}, \quad (4)$$

式(3)、式(4)中， $k^2 = j\omega\delta\mu$ ，其中，渗透深度 $\delta = 1/|k|$ ， ω 为角频率， rad/s ， μ 为磁导率， H/m 。

采用空气中的标量磁位势函数 $\Psi(x,y,z)$ 表示管道表面的磁场强度。设裂纹表面边缘磁场强度 Z 轴分量为 $H_{z0}(x)$ ，根据磁通连续性，在 z 平面内，

$\Psi(x,y,z)$ 的边界条件为

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial y^2} + \frac{k\mu_0}{\mu} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial z^2} = 2H_{z0}(x)\delta(y), \quad (5)$$

式中： $\delta(y)$ 为狄拉克德尔塔函数。

Born 条件下，在 $z=0$ 的平面内电场强度为0，进而可求解标量磁位势函数 $\Psi(x,y,z)$ 。

由 $\Psi(x,y,z)$ 可求得磁场强度 $H=\nabla\psi$, 再根据磁场强度和磁感应强度之间的关系, 可解算由缺陷引起的空间各点畸变磁感应强度, 进一步根据法拉第电磁感应定律得到感应电动势。

2 仿真分析

为进一步探究交变电磁场技术的检测信号理论特征并确定交流激励场最优参数, 利用 COMSOL 有限元分析软件建立基于“U”型传感器的交变电磁场有限元仿真模型, 见图 5。采用四面体网格对模型进行划分, 网格最大尺寸为 2 mm, 并对 1.2 中的理论分析进行计算。

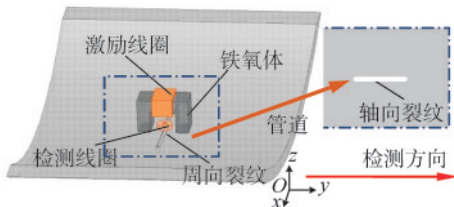


图 5 有限元仿真模型

Fig.5 finite element simulation model

在仿真模型中, 设置探头的激励线圈和检测线圈匝数均为 400, 材料均为铜; 被检管道长为 200 mm, 内径为 300 mm, 厚度为 10 mm, 管道材

料 B-H 参数见表 1; 管道内表面的裂纹长为 20 mm、深为 5 mm、宽为 1 mm。固定传感器检测方向与裂纹方向平行, 模拟轴向裂纹, 设置传感器提高值为 1 mm。

表 1 管道 B-H 参数

Tab.1 pipeline B-H parameters

序号	$B/(10^3 \cdot T)$	$H/(A \cdot m)$	序号	$B/(10^3 \cdot T)$	$H/(A \cdot m)$
1	0.5	0.39	8	6.0	1.73
2	1.0	0.82	9	7.0	1.77
3	2.0	1.30	10	8.0	1.8
4	2.5	1.44	11	9.0	1.83
5	3.0	1.51	12	10.0	1.84
6	4.0	1.61	13	15.0	1.95
7	5.0	1.69	14	20.0	2.01

2.1 激励频率对检测结果的影响

电磁检测技术受趋肤效应影响, 而激励频率是影响趋肤深度的主要参数, 因此对激励频率与检测结果的关系进行分析, 以确定最佳检测频率。以图 3 模型为基础, 设置激励电流为 50 mA, 激励频率为 0.5 ~3 kHz, 步进为 0.5 kHz。为了观测频率变化对渗透深度的影响, 在频域条件下, 选取裂纹中心处的 yOz 平面进行分析, 得到在不同频率下截面处磁场分布, 见图 6。

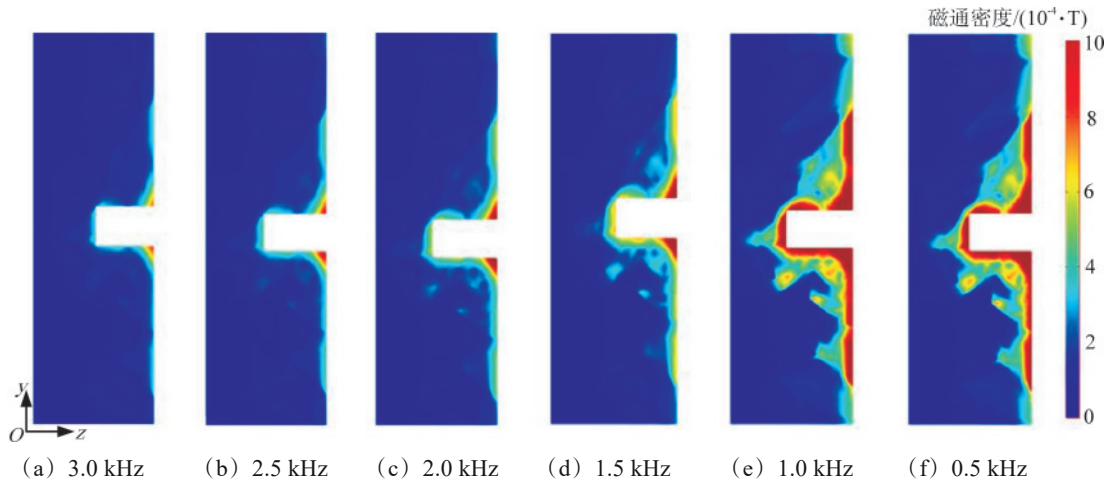


图 6 不同频率下的磁场分布

Fig.6 magnetic field distribution at different frequencies

由图 6 可见, 随着激励频率的降低, 管道表面的磁感应强度增大, 裂纹周围的畸变程度增强, 电磁场的渗透深度增加, 根据法拉第电磁感应定律, 磁场畸变产生的感应电动势也增加。为使检测信号的信噪比更明显, 并满足功耗要求, 确定激励频率为 1 kHz。

2.2 裂纹参数对检测结果的影响

为进一步分析裂纹参数对检测结果的影响,

将裂纹方向分别沿 x 轴正向和 y 轴正向进行参数化设置, 固定检测方向为 x 轴正向, 对应模拟轴向裂纹和周向裂纹。根据 2.1 的分析结果设置激励场参数为 50 mA、1 kHz。在频域下, 分别进行周向裂纹和轴向裂纹的检测以分析裂纹方向对检测效果的影响, 得到传感器下方管道截面的电磁分布, 见图 7、图 8。

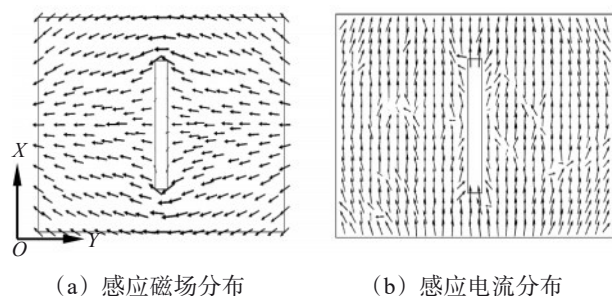


图7 周向裂纹仿真结果

Fig.7 simulation result of circumferential crack

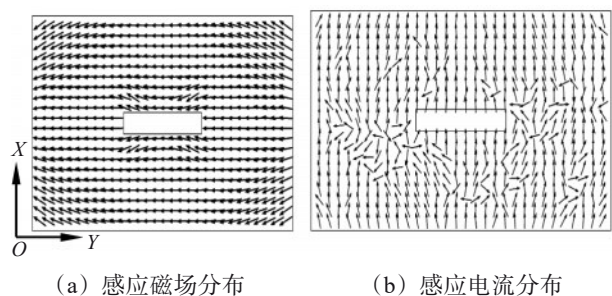


图8 轴向裂纹仿真结果

Fig.8 simulation result of axial crack

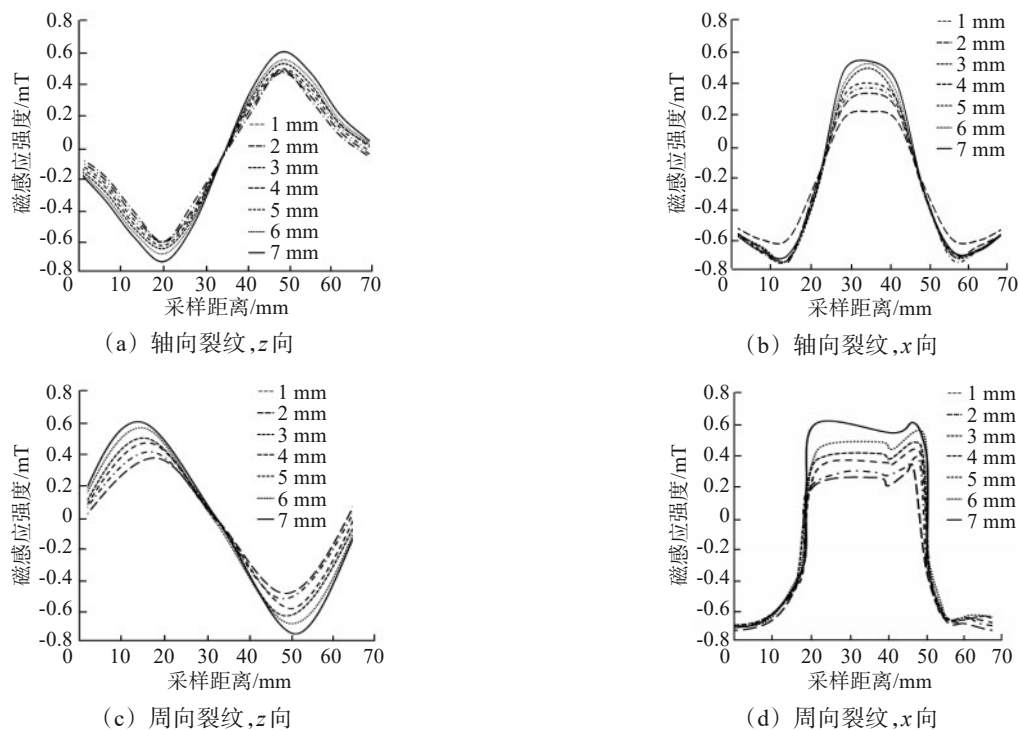


图9 不同深度裂纹的磁感应强度

Fig.9 simulation results of magnetic induction strength at different depths of cracks

由图9可见,检测轴向、周向裂纹的磁感应强度随裂纹深度的增加而增大,具体表现为: z 向磁感应强度峰峰值逐渐增大;轴向裂纹的 x 方向的磁感应强度单峰值增大,周向裂纹 x 向的磁感应强度近似平缓区的双峰值增加。结合2.2节中的仿真分析可知,裂纹深度增加导致裂纹边缘处的电磁场

分布更为密集,进而导致畸变磁场强度增大。此外,由于裂纹宽度恒定, z 向与 x 向的峰谷间距变化并不明显。

由此可以说明,基于“U”型结构的交变电磁场检测技术对不同走向的管道裂纹能够有效检测,且周向与轴向裂纹检测信号的 z 轴分量特征相反,

利用该特征可实现裂纹走向的有效判定。

3 实验分析

为开展交变电磁技术检测试验,搭建了实验平台。该平台主要由信号发生处理模块、PC 显示存储模块、交变电磁技术检测探头和待测管道组成。其中,检测探头由“U”型铁氧体、缠绕在“U”型铁氧体横梁上的激励线圈,以及位于探头几何中心的检测线圈组成,检测线圈与激励线圈相互正交;信号发生处理模块负责激励信号的功率放大和检测信号的滤波降噪,并将处理后的信号转换为数字信号,通过串口传输至人机交互界面进行波形显示。实验平台工作原理见图 10。

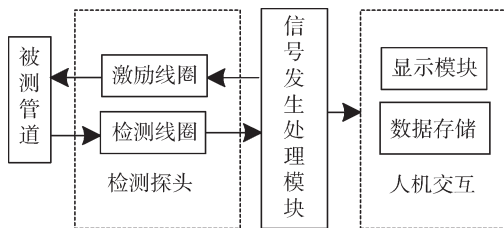


图 10 实验平台工作原理

Fig.10 working principle of experimental platform

实验对象选用一段材料为 Q235 的管道,长为 500 mm、外径 300 mm、厚度为 10 mm,且管壁内侧有机械加工的不同深度的裂纹。裂纹统一为长 6 mm、宽为 1 mm,深度依次为 1 mm、2 mm、…、8 mm,如图 11 所示。在实验过程中,传感器沿图 11 黄色线所示方向移动,模拟周向裂纹检测,每处裂纹的扫查均以裂纹几何中心为原点,左右两侧各 15mm 为移动路径。得到不同深度的周向裂纹在 x 向的特征信号曲线,见图 12。

从图 12 可以看出, x 向检测信号与裂纹尺寸呈正相关,即随着缺陷深度的增大, x 向检测信号的峰值逐渐增大。为分析不同深度裂纹缺陷信号峰值的增长幅度,运用最小二乘法对信号峰值和缺陷深度的关系进行拟合,结果见图 13。拟合函数为

$$Y_{ni} = 90X_{ni}^2 - 350X_{ni} + 808, \quad (6)$$

式中: X_{ni} 为裂纹深度; Y_{ni} 为信号峰值。

为了评估拟合效果,计算 Y_{ni} 的均方误差为 0.022 1,表明拟合效果较好。

从图 13 可以看出,当外界条件不变时,检测信号的幅值与裂纹的深度呈正相关,与仿真分析结果一致,说明在一定深度范围内,裂纹越深,畸变磁场信号越强。裂纹深度为 7 mm 时,拟合值与实际值偏差略大,可能是扫查过程中传感器与管道表面贴合不稳导致。此外,交流电磁场传感

器激励线圈与接收线圈的正交结构,使得在无缺陷情况下无感应电动势产生,而当有缺陷时则会产生明显峰谷信号。实际应用中,管道的环境复杂,扫查过程中传感器遇到管壁附着物或杂质时,可能会出现提离变化,导致检测信号信噪比降低,影响裂纹信号检出。下一步研究将聚焦于信号其他维度的特征分析,进行干扰信号分辨。

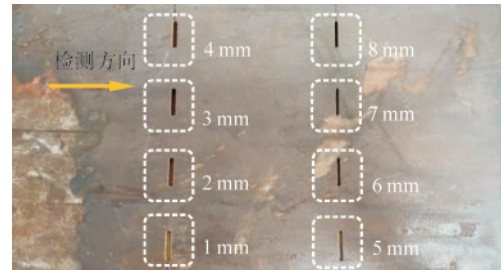


图 11 实验管道

Fig.11 experimental pipeline

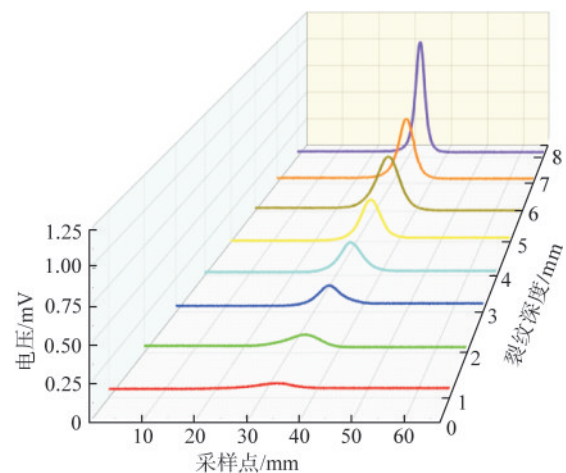


图 12 不同深度裂纹的检测信号

Fig.12 detection signals for cracks of different depths

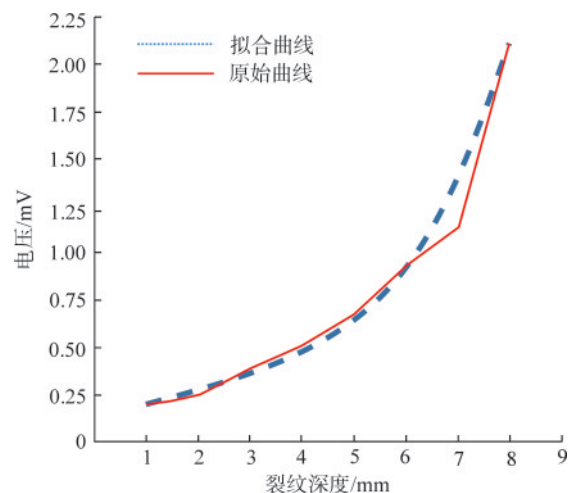


图 13 不同深度裂纹峰值拟合曲线

Fig.13 peak fitting curves for cracks of different depths

4 结论

(1) 针对管道裂纹检测问题, 基于交变电磁场机理, 建立了管道表面电磁场分布数值模型, 通过有限元分析揭示了裂纹引起的电磁场畸变信号特征及变化规律, 构建了交变电磁场检测方法。

(2) 平台实验验证结果表明: 采用“U”型结构的交变电磁检测技术可实现管道表面周向与轴向裂纹的有效检测; 管道表面无缺陷时, 传感器保持电磁平衡无信号输出; 对于相互正交的裂纹, z 轴分量信号彼此特征相反。

参考文献(References):

- [1] PROVORNAYA I V, FILIMONOVA I V, MISHENIN M V, et al. The influence of the pipeline system on the socio-economic development of oil and gas regions[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 823 (1):012021.
- [2] 徐昊, 石慧, 王远洋. 融合腐蚀速率与数据驱动的油气管道寿命预测[J]. 石油机械, 2023, 51(3):138-144.
XU Hao, SHI Hui, WANG Yuanyang. Pipeline lifetime prediction by integration of corrosion rate and data driving[J]. China Petroleum Machinery, 2023, 51(3): 138-144.
- [3] 吴明, 谢飞, 陈旭, 等. 埋地油气管道腐蚀失效研究进展及思考[J]. 油气储运, 2022, 41(6):712-722.
WU MING, XIE FEI, CHEN XU, et al. Research progress and thinking on corrosion failure of buried oil and gas pipelines[J]. Oil&Gas Storage and Transportation, 2022, 41(6): 712-722.
- [4] ZHANG Y, WENG W G. Bayesian network model for buried gas pipeline failure analysis caused by corrosion and external interference[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2020, 203: 107089.
- [5] ZHU X H, DENG Z L, LIU W J. Dynamic fracture analysis of buried steel gas pipeline using cohesive model[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2020, 128:105881.
- [6] 孙静, 孙谨, 章卫文, 等. 长输管道内检测技术研究进展[J]. 石油和化工设备, 2023, 26(2):30-33.
SUN Jing, SUN Jin, ZHANG Weiwen, et al. Research progress of internal inspection technology for long distance pipeline[J]. Petro & Chemical Equipment, 2023, 26(2):30-33.
- [7] AMBATI P, SUMAN RAJ K M, JOSHUVA A. A review on pipeline inspection robot[C]//3rd International Conference on Frontiers in Automobile and Mechanical Engineering (Fame 2020), Chennai, India. AIP Publishing, 2020: 060002.
- [8] MA Q P, TIAN G Y, ZENG Y L, et al. Pipeline in-line inspection method, instrumentation and data management[J]. Sensors, 2021, 21 (11):3862.
- [9] 李亚军, 胡朋, 陈金忠. 漏磁内检测技术在集输管道检测中的应用[J]. 中国特种设备安全, 2023, 39(4):28-32.
LI Yajun, HU Peng, CHEN Jinzhong. Application of magnetic flux leakage internal detection technology in gathering and transportation pipeline detection[J]. China Special Equipment Safety, 2023, 39(4):28-32.
- [10] 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 Lijian, GENG Hao, GAO Songwei. Magnetic flux leakage internal detection technology of the long distance oil pipeline[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(8):1736-1746.
- [11] DOBMANN G, BARBIAN O A, WILLEMS H. State of the art of in-line nondestructive weld inspection of pipelines by ultrasonics [J]. Russian Journal of Nondestructive Testing, 2007, 43(11): 755-761.
- [12] DA Y H, DONG G R, SHANG Y, et al. Circumferential defect detection using ultrasonic guided waves[J]. Engineering Computations, 2020, 37(6):1923-1943.
- [13] 李睿, 王长新, 富宽, 等. 油气管道裂纹涡流检测探头的研制[J]. 无损检测, 2023, 45(2):60-65.
LI Rui, WANG Changxin, FU Kuan, et al. Development of eddy current probe for crack inspection of oil and gas pipelines[J]. Nondestructive Testing, 2023, 45(2):60-65.
- [14] 杜金强, 何宇廷, 李培源, 等. 互扰对涡流阵列传感器裂纹检测性能影响[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2015, 43(11):22-26.
DU Jinqiang, HE Yuting, LI Peiyuan, et al. Influence of interference on crack inspection ability of flexible eddy current sensor array[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2015, 43(11): 22-26.
- [15] ZHAO J M, LI W, ZHAO J C, et al. A novel ACFM probe with flexible sensor array for pipe cracks inspection[J]. IEEE Access, 2020, 8:26904-26910.
- [16] YUAN X A, LI W, CHEN G M, et al. Inspection of both inner and outer cracks in aluminum tubes using double frequency circumferential current field testing method[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 127:16-34.
- [17] 高鹏, 沈宗凯, 吴林席, 等. 水下交流电磁场检测探头设计与结构优化[J]. 机电工程技术, 2024, 53(2): 116-118, 197.
GAO Peng, SHEN Zongkai, WU Linxi, et al. Design and structural optimization of underwater ACFM probe[J]. Mechanical & Electrical Engineering, 2024, 53(2): 116-118, 197.
- [18] 赵建超, 李伟, 袁新安, 等. 双频交流电磁场提离抑制算法[J]. 无损检测, 2021, 43(4):5-9.
ZHAO Jianchao, LI Wei, YUAN Xin'an, et al. Lift-off suppression algorithm for dual-frequency alternating current field measurement [J]. Nondestructive Testing, 2021, 43(4):5-9.
- [19] LI W, YUAN X A, CHEN G M, et al. High sensitivity rotating alternating current field measurement for arbitrary-angle underwater cracks[J]. NDT&E International, 2016, 79:123-131.
- [20] REPELIANTO A S, KASAI N Y, SEKINO K, et al. Flaw detection in aluminum plates using a rotating uniform eddy current probe with two pairs of excitation coils[J]. Metals, 2019, 9(10): 1069.