

# 一种基于交流电磁场的差分检测探头

汪光祖<sup>1</sup>, 李 伟<sup>1</sup>, 袁新安<sup>1</sup>, 李晓明<sup>2</sup>, 赵 强<sup>2</sup>, 陈 勇<sup>2</sup>

(1. 中国石油大学(华东) 海洋油气装备与安全技术研究中心, 青岛 266555;

2. 海洋石油工程股份有限公司, 天津 300461)

**摘 要:** 交流电磁场检测技术近年来广泛应用于各类结构缺陷的无损检测和定量评估中, 检测时探头抖动易引起干扰信号而造成的缺陷误判, 为解决此问题, 提出一种新型的差分检测探头。通过 COMSOL 软件建立交流电磁场检测探头的有限元仿真模型, 探究了提离抖动下特征信号的畸变规律, 分析了  $B_x$  背景磁场与检测位置的关系; 设计了一种基于差分磁传感器的检测探头, 搭建缺陷检测系统并进行试验。试验结果表明, 提出的差分检测探头能有效抑制提离干扰, 增强缺陷信号识别能力, 提高检测灵敏度。

**关键词:** 交流电磁场; 提离抖动; 差分检测探头; 缺陷识别

中图分类号: TG115.28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2023)02-0072-04

## A differential detection probe based on alternating current field measurement

WANG Guangzu<sup>1</sup>, LI Wei<sup>1</sup>, YUAN Xin'an<sup>1</sup>, LI Xiaoming<sup>2</sup>, ZHAO Qiang<sup>2</sup>, CHEN Yong<sup>2</sup>

(1. Center for Offshore Engineering and Safety Technology, China University of Petroleum (East China),

Qingdao 266555, China; 2. Offshore Oil Engineering Co., Ltd., Tianjin 300461, China)

**Abstract:** In recent years, alternating current field measurement (ACFM) technology has been widely used in non-destructive testing and quantitative evaluation of various structural defects. In order to solve the problem of misjudgment of defects caused by interference signals caused by probe jitter during defect detection, a novel differential detection probe is proposed. A finite element simulation model of ACFM probe is set up by COMSOL. The distortion law of the characteristic signals under lift-off jitter is investigated. The relationship between the  $B_x$  background magnetic field and the detection position is analyzed. Further, a probe based on differential magnetic sensors is designed. A defect detection system is built and related experiments are carried out. The experimental results show that proposed differential detection probe proposed in this paper can effectively suppress the lift-off interference, enhance identification ability of the defect signals, and improve the detection sensitivity.

**Key words:** ACFM; lift off jitter; differential detection probe; defect identification

交流电磁场检测 (ACFM) 技术是一种近年来发展快速的电磁无损检测技术, 具有非接触测量、无需去除表面涂层、定量评估等显著优势, 从而广泛应用于各类结构缺陷的无损检测中<sup>[1-4]</sup>。该法

的检测原理为: 在线圈中加载正弦交流信号, 靠近工件时在表面会产生感应电流, 如存在裂纹, 裂纹位置的电流会发生扰动导致空间磁场畸变, 而利用磁场传感器拾取畸变磁场信号即可实现裂纹的检测和评估<sup>[5-6]</sup>。

在实际检测过程中, 被检结构表面凹凸不平以及探头操作不当等因素会带来提离干扰信号<sup>[7-8]</sup>, 从而给缺陷识别和量化带来诸多挑战。因此, 如何有效抑制提离干扰、增强缺陷识别信号是交流电磁场检测领域的一个关键问题。YUAN 等<sup>[9]</sup>提出一种梯度算法, 对提离不敏感的  $B_z$  信号进行处理, 实现

收稿日期: 2022-08-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52005512); 山东省自然科学基金 (ZR201911040388); 中央引导地方科技发展专项资金项目 (YDZX2022082)

作者简介: 汪光祖 (1997—), 男, 硕士研究生, 主要从事电磁无损检测技术的研究工作

通信作者: 李 伟 (1980—), 男, 博士, 教授, liwei@upc.edu.cn

了焊缝表面微小缺陷的准确识别。赵建超等<sup>[10]</sup>开发了一套双频交流电磁场检测系统,有效抑制了提离扰动引起的干扰信号。上述学者通过信号处理实现了提离干扰的有效抑制,笔者对探头结构进行优化,提出一种基于交流电磁场的新型的差分检测探头,通过消除背景磁场达到抑制提离的效果,增强了缺陷的识别能力。

## 1 ACFM 仿真模型的建立与分析

### 1.1 建立仿真模型

利用有限元仿真软件 COMSOL 建立 ACFM 检测仿真模型(见图 1),模型由试件、U 型磁芯、激励线圈等组成。其中,试件的材料为铝;铝材料的电导率为  $3.744 \times 10^7 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$ ,相对磁导率为 1;试件上的裂纹尺寸为  $10 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$  (长 $\times$ 深 $\times$ 宽)。

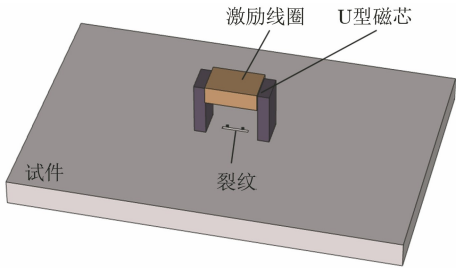


图 1 ACFM 检测仿真模型

### 1.2 提离抖动分析

保持试件位置不变,将由激励线圈和 U 型磁芯组成的检测探头沿着裂纹长度方向进行参数化扫描,步长设置为  $0.5 \text{ mm}$ 。首先探头以  $1 \text{ mm}$  的恒定提离高度经过裂纹区域,接着在远离裂纹区域的位置,通过改变提离高度来模拟探头抖动,最大抖动高度为  $5 \text{ mm}$ 。为了探究提离抖动对磁场信号的影响,提取磁芯正下方提离  $1 \text{ mm}$  处的磁场信号  $B_x$  和  $B_z$ (见图 2)。

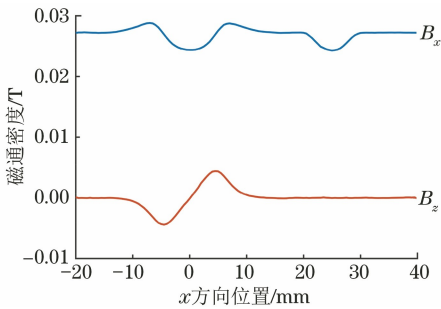


图 2 提离抖动下的畸变磁场仿真信号

由图 2 可知,保持恒定提离的情况下,探头经过裂纹时,  $B_x$  信号出现了明显的波谷,  $B_z$  信号出现

明显的波峰和波谷,这符合 ACFM 检测的基本原理。当提离发生变化时,  $B_x$  信号同样出现明显的波谷,而  $B_z$  信号没有发生畸变,说明  $B_x$  信号对提离抖动比较敏感,  $B_z$  信号对提离抖动不敏感。  $B_x$  信号是缺陷深度量化的特征信号<sup>[11]</sup>,因此,消除  $B_x$  信号的提离抖动影响对缺陷检测至关重要。

提离抖动引起  $B_x$  信号的畸变实际上是背景磁场发生了改变<sup>[9]</sup>。为了探究  $x$  方向背景磁场和检测点  $x$  方向位置(见图 3)的关系,提取不同检测点( $-9 \text{ mm}$  至  $9 \text{ mm}$ ,间隔  $1 \text{ mm}$ )的  $B_x$  背景磁场,不同检测点的  $B_x$  背景磁场分布曲线如图 4 所示。由图 4 可见,当检测点位于  $0 \text{ mm}$  位置时,  $B_x$  背景磁场最小,同时  $B_x$  背景磁场关于  $y$  轴对称分布,且在与  $y$  轴等距离检测点处的背景磁场大小相等,方向相同。因此可以在关于  $y$  轴对称等距分布的位置放置两个相同的传感器,构成差分结构来消除背景磁场,进而抑制提离干扰。

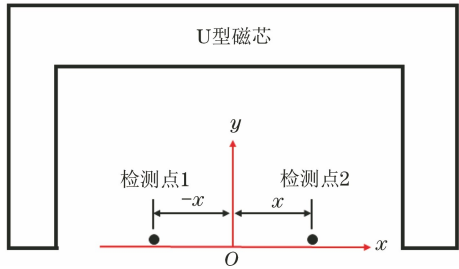


图 3 仿真分析时的检测点位置分布示意

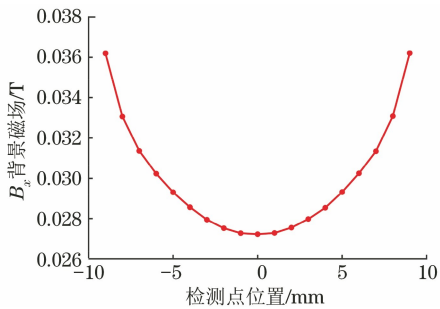
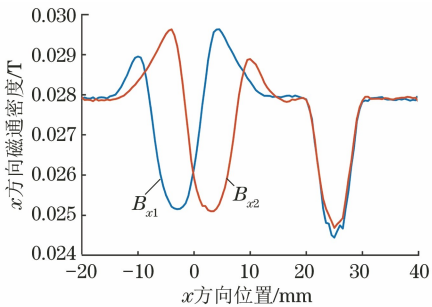
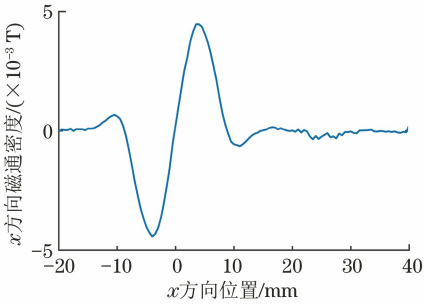


图 4 不同检测点的  $B_x$  背景磁场分布曲线(仿真)

图 5(a)所示为提取的 $\pm 3 \text{ mm}$ 位置的  $B_x$  磁场信号  $B_{x_1}$  和  $B_{x_2}$ ,可以明显看出,由于检测点位置不同,  $B_x$  信号在裂纹位置出现的畸变信号发生了明显滞后,而提离抖动是同步发生的,不同检测点的畸变信号并没有发生滞后。说明提离抖动导致不同检测点的背景磁场发生了同步变化,因此可以通过对两个检测点提取的特征信号进行差分,消除背景磁场的影响,从而达到抑制提离抖动的效果,  $B_x$  差分信号如图 5(b)所示。由图 5(b)可以看出,差分信号不仅消除了提离抖动引起的干扰信号,而且从幅



(a) 原始磁场信号



(b) 差分信号

图5 提离抖动下的  $B_x$  磁场(仿真)信号

值上增强了缺陷信号,有利于缺陷的准确识别。

## 2 探头结构设计

根据仿真可知,在磁芯正下方对称的位置放置两个相同的传感器可以抑制提离抖动,基于此,笔者设计了一种新型 ACFM 差分检测探头。该差分探头由壳体、激励模块、差分磁传感器、信号处理模块、雷莫接头和压盖组成(见图 6,7)。探头的激励模块包括 U 型磁芯和激励线圈,激励线圈(匝数为 400 匝)均匀缠绕在 U 型磁芯上。差分磁传感器选择隧道磁阻(TMR)磁场传感器,这是因为 TMR 传感器具有功耗低、灵敏度高、线性范围大等优点,适合于微弱信号的检测<sup>[12-14]</sup>。差分磁传感器由两个相同的单轴 TMR 传感器组成,用于测量对称位置的  $B_x$  磁场信号,考虑到传感器的实际结构,差分磁

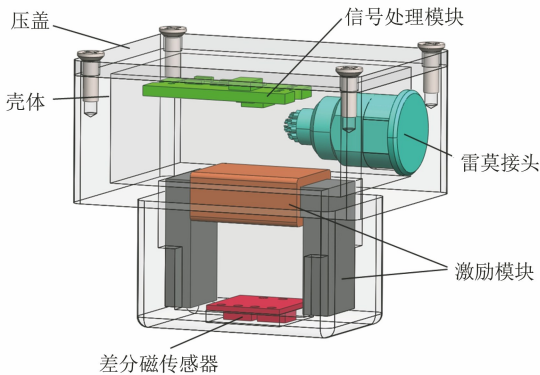


图6 差分探头结构示意图



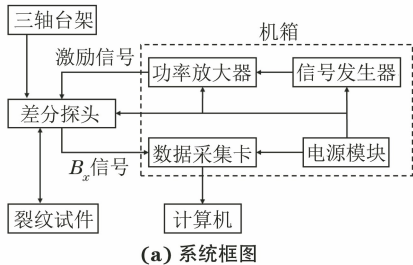
图7 差分探头实物

器输出的磁场信号往往十分微弱且含有噪声,不利于辨识,因此采用信号处理模块对信号进行进一步处理。信号处理模块包含放大电路和滤波电路,其中放大电路采用 AD620 型放大器<sup>[15]</sup>,对传感器输出的  $B_x$  磁场信号放大 50 倍;滤波电路采用 RC 低通滤波器,消除噪声干扰。雷莫接头用于传输探头和检测机箱之间的信号。

## 3 差分探头检测试验

### 3.1 检测系统

交流电磁场差分探头检测系统(见图 8)由三轴台架、控制箱、机箱、差分探头、计算机和裂纹试件组成。检测控制器调节三轴台架的运动状态,三轴台架驱动差分探头沿着试件表面扫查;机箱内部的信号发生器产生频率为 2 kHz,幅值为 10 V 的正弦交流电信号,通过功率放大器放大后,作为激励信号加载在差分探头的激励线圈上,使试件表面产生感应



(a) 系统框图



(b) 实物

图8 差分探头检测系统框图与实物



电流,进一步激发感应磁场;当差分探头扫过裂纹时,裂纹上方的空间磁场会发生畸变,差分磁传感器拾取畸变的磁场信号,通过雷莫接头传输至数据采集卡,转化为数字信号并检测时,显示在计算机上。

3.2 提离抖动试验

所用试件的材料为铝,表面加工有尺寸为 8 mm×4 mm×0.5 mm(长×深×宽)的人工裂纹,铝试件实物如图 9 所示。

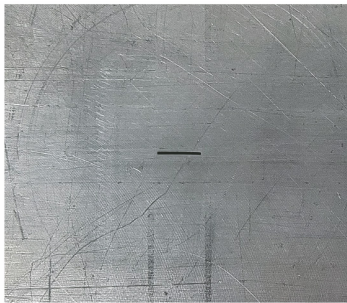


图 9 铝试件实物

利用交流电磁场差分探头检测系统进行提离抖动下的裂纹检测试验,三轴台架以 15 mm·s<sup>-1</sup>的速度驱动差分探头沿试件表面扫查,探头扫查路径如图 10 所示,试验时,以 1 mm 的恒定提离扫过裂纹,接着向上连续随机抖动多次以模拟探头抖动。差分磁传感器获取的原始特征信号如图 11 所示, $B_{x1}$  和  $B_{x2}$  分别是磁传感器上的两个 TMR 传感器采集并处理过的信号。由图 11 可知,当经过裂纹时, $B_x$  信号先后出现一个波谷;当探头向上抖动时,特征信号  $B_{x1}$  和  $B_{x2}$  出现了相同的波谷特征,但提离抖动引起的波谷信号是同步变化的,与仿真结论一致。

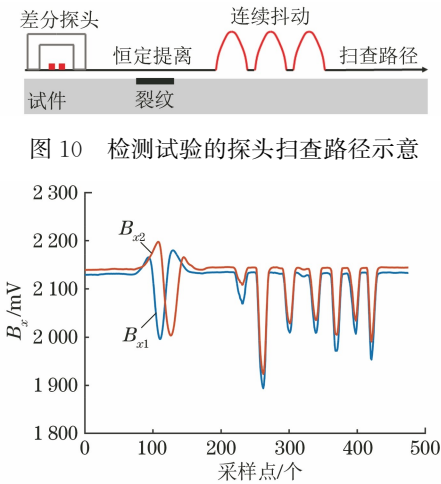


图 10 检测试验的探头扫查路径示意

进一步对两路信号进行差分运算,得到的差分信号如图 12 所示。可以看出,差分信号在很大程度上

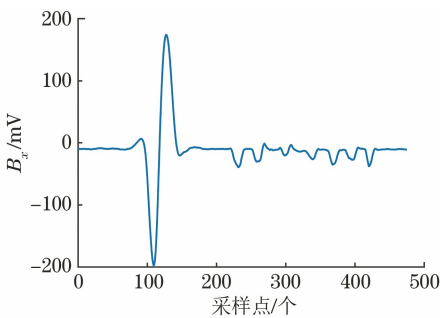


图 12 差分探头检测系统得到的差分信号

上对提离抖动引起的畸变信号进行了抑制,并增强了缺陷信号。相对于单个传感器的检测探头,笔者设计的差分检测探头有更高的检测灵敏度,降低了缺陷误判率。

4 结语

针对探头抖动造成的缺陷误判问题,设计了一种 ACFM 差分检测探头。首先利用仿真模型分析提离抖动下特征信号的畸变规律;然后基于对称分布的传感器有相同的背景磁场的特性,设计了相应的差分检测探头;最后搭建交流电磁场检测系统并开展提离抖动试验。仿真和试验结果表明, $B_x$  信号对提离抖动敏感, $B_z$  信号对提离抖动不敏感;该 ACFM 差分检测探头能有效抑制提离抖动引起的干扰信号,增强缺陷信号识别能力。

参考文献:

[1] 李伟,袁新安,陈国明,等. 基于外穿式交流电磁场检测的钻杆轴向裂纹在役检测技术研究[J]. 机械工程学报,2015,51(12):8-15.

[2] PAPAELIAS M P, LUGG M C, ROBERTS C, et al. High-speed inspection of rails using ACFM techniques[J]. NDT & E International, 2009, 42(4): 328-335.

[3] 葛运春,张翼,冷建成,等. 海洋平台钻机底座焊缝的交流电磁场检测[J]. 无损检测,2015,37(7):77-80,88.

[4] 刘正存,申德峰,王延东,等. 高压电缆附件铅封缺陷的交流电磁场检测[J]. 无损检测,2022, 44(4): 24-27.

[5] CHEN K, BRENNAN F P, DOVER W D. Thin-skin AC field in anisotropic rectangular bar and ACPD stress measurement [J]. NDT & E International, 2000, 33(5):317-323.

[6] 李伟. 基于交流电磁场的缺陷智能可视化检测技术研究[D]. 东营:中国石油大学,2007.

[7] LI W, CHEN G M, YIN X K, et al. Analysis of the lift-off effect of a U-shaped ACFM system[J]. NDT & E International, 2013, 53: 31-35.

[8] ZHOU Z M, ZHANG J, WAN F, et al. Structural optimisation of a standard alternating current field measurement excitation probe for concave and convex surfaces[J]. Insight, 2019, 61(9): 542-548.

[9] YUAN X A, LI W, YIN X K, et al. Identification of tiny surface cracks in a rugged weld by signal gradient algorithm using the ACFM technique [J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2020, 20(2): 380.

[10] 赵建超, 李伟, 袁新安, 等. 双频交流电磁场提高抑制算法[J]. 无损检测, 2021, 43(4): 5-9.

[11] 郑玲慧, 任尚坤, 王景林. ACFM 技术的表面裂纹识别和尺寸反演算法研究[J]. 测控技术, 2020, 39(5): 80-85, 106.

[12] 蒋维宇, 李伟, 张宗华, 等. 水下 ACFM 高灵敏度裂纹检测探头设计[J]. 中国海上油气, 2019, 31(6): 160-166.

[13] 张继楷, 杨芸, 康宜华, 等. TMR 传感器及其在电磁检测中的应用[J]. 无损检测, 2016, 38(12): 36-39, 67.

[14] 杨敏, 王凤森, 黄险峰. GMR 传感器和 TMR 传感器的性能对比[J]. 国外电子测量技术, 2019, 38(1): 127-131.

[15] 窦如凤, 井娥林. 基于 AD620 的微弱信号放大器设计[J]. 仪表技术与传感器, 2021(3): 45-47, 81.



(上接第 51 页)

一, 相位可直观反映缺陷的位置信息以及信号随深度的变化趋势。

(2) 频率对缺陷信号的相位变化有重要影响。当激励频率在 100~600 kHz 时, 外壁缺陷相位位于 0°~40°, 且随着频率增大, 不同深度的缺陷信号间的相位差明显; 内壁缺陷相位位于 50°~100°时, 相位随频率的增加呈线性滞后, 实际检测时, 内壁缺陷信号的相位滞后角度更接近 90°。

(3) 采用存在自然缺陷的包壳管进行验证试验, 结果表明缺陷信号的相位响应与理论分析结果相符。

参考文献:

[1] 任吉林, 林俊明. 电磁无损检测[M]. 北京: 科学出版社, 2008.

[2] 任尚坤, 孙大朋. 基于有限元仿真的核电站传热管涡流检测[J]. 无损检测, 2012, 34(4): 26-30.

[3] 曹刚, 柳祥梅. 换热器传热管通孔缺陷的涡流检测信号[J]. 无损检测, 2009, 31(8): 619-621, 624.

[4] 李明达, 周德强, 贝雅耀. 蒸汽发生器传热管涡流检测的相位特性[J]. 无损检测, 2019, 41(11): 17-21, 42.

[5] 伍颂, 赵建华. 火箭发动机用薄壁合金管涡流特性分析[J]. 宇航材料工艺, 2003, 33(2): 53-57.

欢迎网上投稿      欢迎订阅      欢迎刊登广告