

## 基于GMFM的脉冲涡流检测 亚表面腐蚀缺陷成像技术

齐勇<sup>1,2</sup>, 李勇<sup>1</sup>, 刘相彪<sup>1</sup>, 陈振茂<sup>1</sup>, 赵宏达<sup>1</sup>

(1.西安交通大学航天航空学院,机械结构强度与振动国家重点实验室,陕西西安,710049;  
2.94354部队,山东济宁,272400)

**摘要** 将磁场梯度测量技术和脉冲涡流检测技术有效融合,集中探究基于脉冲涡流磁场梯度信号的亚表面腐蚀缺陷成像手段及其优势性。首先,采用三维有限元仿真分析了脉冲涡流磁场梯度信号在亚表面腐蚀缺陷成像中的有效性和优势性,模拟仿真结果显示磁场梯度信号对于缺陷边缘的检测具有优势。基于模拟仿真结果,搭建了一套脉冲涡流检测实验系统,通过成像实验比较了基于两类信号的亚表面腐蚀缺陷扫描结果,并进一步研究了该类缺陷的成像技术。成像结果表明采用磁场梯度信号可实现对缺陷边缘的高效成像,基于磁场梯度测量的脉冲涡流检测技术较传统脉冲涡流检测技术,具有高效、高灵敏度的优势。

**关键词** 电磁无损检测;磁场梯度测量技术;脉冲涡流检测技术;缺陷成像;亚表面腐蚀缺陷

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2013.05.015

**中图分类号** TG115.28 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2013)05-0063-04

## Research of Pulsed Eddy Current Testing for Defect Imaging Based on Gradient Magnetic Field Measurement

QI Yong<sup>1,2</sup>, LI Yong<sup>1</sup>, LIU Xiang-biao<sup>1</sup>, CHEN Zhen-mao<sup>1</sup>, ZHAO Hong-da<sup>1</sup>

(1.State Key Laboratory for Strength and Vibration of Mechanical Structures, School of Aerospace, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, 710049, China; 2. Unit 94354, Jining 272400, Shandong, China)

**Abstract:** PECT is widely used in aviation, nuclear power, etc. In this paper, PECT integrated with Gradient Magnetic Field Measurement (GMFM) is proposed particularly for imaging of hidden corrosion in this paper. Simulation results indicate that GMFM is advantageous in detection of defect edges, which has potential benefit for defect imaging. A PECT system has been built. Signals are obtained when the PECT probe scans over a hidden corrosion, and defect images are derived in post processing. It has been found from the experimental results that the GMFM-based PECT has advantages over conventional PECT in terms of high sensitivity and efficiency in defect imaging of hidden corrosion.

**Key words:** electromagnetic nondestructive testing; gradient magnetic field measurement; pulsed eddy current testing; defect imaging; hidden corrosion

脉冲涡流<sup>[1-6]</sup>是一种新兴的电磁无损检测技术, 磁场梯度测量技术是一种测量磁场扰动大小的有效

收稿日期:2013-01-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51007069)

作者简介:齐勇(1983-),男,辽宁鞍山人,硕士生,主要从事电磁无损检测理论和实验研究。

E-mail:yong.l@mail.xjtu.edu.cn

方法,具有对微观磁场变化提取灵敏度高优势<sup>[7]</sup>。本文作者在前期研究中,主要探究了磁场梯度信号与传统磁场差分信号的不同点<sup>[8-9]</sup>。磁场差分信号为缺陷信号与参考信号之差,反映涡流激发磁场的大小和变化;磁场梯度信号可以理解为磁场在空间位置上的变化率。涡流在缺陷处受到扰动,涡流分布变化进而导致磁力线发生偏转,空间上磁场梯度数值将发生突变。无缺陷处,磁力线受到扰动较小,磁场梯度理论上保持不变。

本文将磁场梯度测量技术和脉冲涡流检测技术进行融合,探究了其实现手段,并与传统检测技术进行了对比。

## 1 基于 $A_r$ 法的脉冲涡流检测磁场梯度信号有限元计算方法

针对磁场梯度信号和传统磁场信号在有限元计算方法上的不同,本文对基于退化磁矢位法( $A_r$ )计算磁场程序<sup>[10]</sup>进行了拓展,以实现有限元计算。有限元分析中,采用棱边元时,可取规范条件  $\phi=0$ ,则导体区域的控制方程<sup>[10]</sup>应为:

$$\nabla \cdot \frac{1}{\mu} \nabla \cdot \mathbf{A} + \sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

对计算区域(见图1)可分割为衰减区域、混合区域、正常区域。其中:衰减区域为仅由变形矢量磁位  $A_r$  记述的区域;混合区域为  $A_r$  和仅依赖电流源的  $A_s$  相混合的一层有限元区域;正常区域为由通常矢量磁位  $\mathbf{A} = \mathbf{A}_r + \mathbf{A}_s$  记述的区域;导体区域为包含在正常区域中的导体区域。

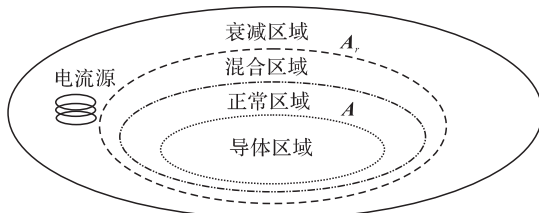


图1  $A_r$ 法计算区域的划分

Fig.1  $A_r$  method to calculate the division of the area

$A_r$  称为变形磁矢位,  $A_s$  是仅仅由电流源所产生的磁矢位。故  $A_r$  方法的控制方程为:

衰减区域和混合区域:

$$\nabla \cdot \frac{1}{\mu} \nabla \cdot \mathbf{A}_r = 0 \quad (2)$$

正常区域方程为式(1)。

$A_r$  方法的边界条件为公式(3)~(4):

$$n \cdot \mathbf{A} = n \cdot (\mathbf{A}_r + \mathbf{A}_s) \quad (3)$$

$$n \cdot \frac{1}{\mu} (\nabla \cdot \mathbf{A}) = n \cdot \left( \frac{1}{\mu} \nabla \cdot \mathbf{A}_r + H_s \right) \quad (4)$$

六面体棱边元方法对  $A_r$  方法的控制方程(1)和(2)进行离散,利用定长时间步 Crank-Nicholson 直接积分法解决瞬态问题,基于  $A_r$  方法的低频电磁场控制可写成:

$$\mathbf{K}\{\mathbf{A}\} + \mathbf{C} \left\{ \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \right\} = \mathbf{M}\mathbf{I}(t) \quad (5)$$

方波激励电流傅立叶变换为不同频率正弦电流的叠加:

$$I(t) = \sum_{n=0}^N \tilde{F}_n e^{jw_n t} \quad (6)$$

式中:  $w_n$  为正弦激励角频率;  $\tilde{F}_n$  为电流振幅。式中:  $\mathbf{K}, \mathbf{C}, \mathbf{M}$  是全局系数矩阵。由公式(5)~(6)推导出脉冲涡流信号:

$$B(t) = \sum_{n=1}^N \tilde{F}_n \{ \tilde{B}_{n0} \} e^{jw_n t} \quad (7)$$

磁场梯度信号是磁场在不同空间位置上的变化率,由式(7)出发,可推导出磁场梯度信号公式:

$$dB(t) = \sum_{n=1}^N \tilde{F}_{1n} \{ \tilde{B}_{1n0} \} e^{jw_n t} - \sum_{n=1}^N \tilde{F}_{2n} \{ \tilde{B}_{2n0} \} e^{jw_n t} \quad (8)$$

## 2 基于 GMFM 的脉冲涡流检测仿真

### 2.1 建立模型

模型参数为:测试试件为铝板,其导电率为 34 MS/m,尺寸为 200 mm × 200 mm × 4 mm,相对磁导率为 1;设定缺陷为下表面腐蚀缺陷,缺陷尺寸为:20 mm × 8 mm × 2.5 mm;激励线圈为圆柱形,内径为 5 mm,外径为 10 mm,高为 5 mm,匝数为 300 匝。激励电流频率为 100 Hz,最大幅值为 0.5 A,设计提高 0.5 mm。线圈内部设置了不同高度的 2 个传感器同时采集磁场信号,传感器高度差为 0.5 mm。图 2 为所建立模型示意图。

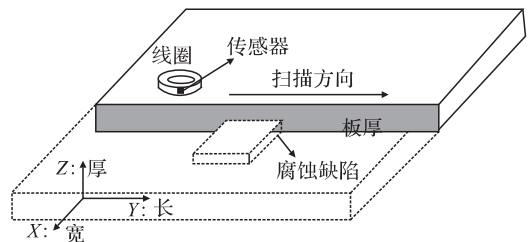


图2 三维有限元模型示意图

Fig.2 Schematic illustration of 3D FEM model

线圈沿  $Y$  轴缺陷长度方向进行扫描,缺陷中心为坐标原点。从距离缺陷中心 -28 mm 处开始扫描,扫描至距离缺陷中心 28 mm 处结束,设置 21 处扫描点。在每一处扫描点,不同高度的 2 个传感器同时采集磁场  $Z$  分量信号,信号做差得到磁场梯度信号。同样采集各扫描点的无缺陷信号作为参考信

号,参考信号与对应位置的缺陷信号做差,即为磁场差分信号。

## 2.2 仿真结果分析

试件的缺陷与感应信号的峰值具有一定的关系,提取信号峰值作为特征,建立峰值与扫描点位置的关系,为了便于比较缺陷扫描所得图形的灵敏性,后续处理中对各图形进行了归一化处理,见图3,线圈在远离缺陷位置,采集信号为无缺陷信号,归一化峰值近似为0。当线圈沿试件长度方向靠近缺陷时,信号的峰值逐渐增大,第6个点线圈中心进入缺陷,线圈位于缺陷的中心位置时,峰值最大。观察扫描图形发现:未进入缺陷时峰值较小,峰值曲线近乎水平,当进入缺陷后,峰值具有明显的跳动量,在缺陷区域,信号峰值较为密集,变化量较小,计算扫描点坐标对应进入缺陷和离开缺陷的位置,即可计算出裂纹的长度。

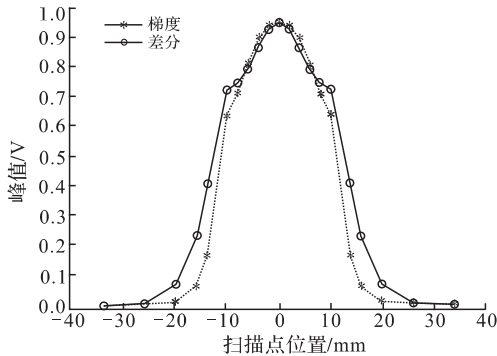


图3 缺陷区域峰值扫描波形

Fig.3 The peak scanning of The defective area

提取进入缺陷的区域波形进行更为细致的对比,见图4。磁场梯度信号峰值变化量约为0.33,磁场信号峰值变化量约为0.24,故磁场梯度信号对缺陷的响应具有较大灵敏度,且由图可以看出,磁场梯度信号在缺陷边缘处的变化量较大,采用磁场梯度测量对缺陷的检测和定量评估具有优势。

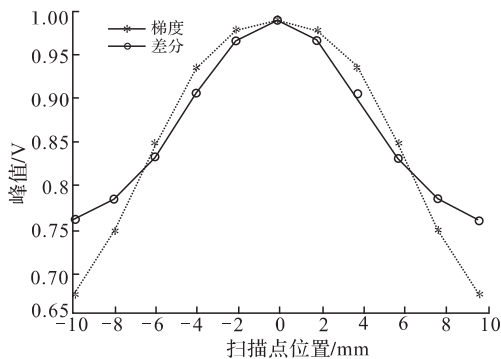


图4 缺陷区域峰值扫描波形

Fig.4 The peak scanning of the defective area

## 3 脉冲涡流磁场梯度信号缺陷成像

### 3.1 脉冲涡流检测实验系统

设方波激励频率为100 Hz,信号峰值为3.5 V,信号占空比为0.5。激励信号功率放大10倍。放大电路将采集所得的两路磁场信号放大10倍。由于所拾取的磁场信号噪声主要集中在高频部分,因此采用滤波电路对信号进行低通滤波,截止频率为15 kHz。最后,前置处理所得信号通入数据采集卡实现数据采集。LabVIEW程序对实验信号进行显示、实时处理以及分析。

在检测探头中放置了2个Hall传感器,型号为SS495A(均置于激励线圈底部中心位置),传感器在Z方向上具有高度差,底部传感器用于采集磁场信号,2个传感器信号做差处理,用于提取磁场梯度信号,保证了两种信号在同样实验条件下进行对比。为了模拟下表面缺陷,在300 mm×200 mm×4 mm的铝制金属板上加工了人工腐蚀缺陷,腐蚀缺陷尺寸为20×20×2.5 mm<sup>3</sup>,外径15 mm,内径10 mm,高度20 mm,匝数1500匝,传感器Z向高度差1 mm,其余参数同仿真参数一致。

### 3.2 实验成像结果及分析

裂纹区域采集的磁场梯度信号见图5,信号与磁场差分信号相似,具有明显的峰值特征。

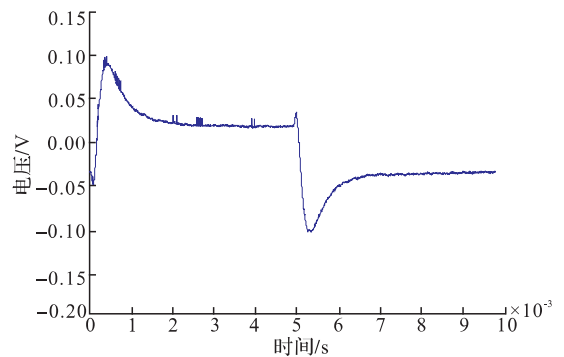


图5 磁场梯度信号

Fig.5 PECT of gradient field signals

探头沿缺陷长度方向进行扫描,LabVIEW采集程序同时输出磁场信号和磁场梯度信号峰值扫描波形,分别求取了归一化峰值扫描波形及其一阶导数,见图6。远离缺陷时,峰值在一定范围内震荡,缺陷中心位置,峰值达到最大值。实验信号峰值波形与仿真波形基本一致。峰值扫描波形与仿真波形的总体趋势一致,一阶导数波形曲线具有2个极值点,分别对应探头进入缺陷位置和离开缺陷位置,梯度信号极值点数值更大,对缺陷的边缘更灵敏,验证了仿真的正确性。

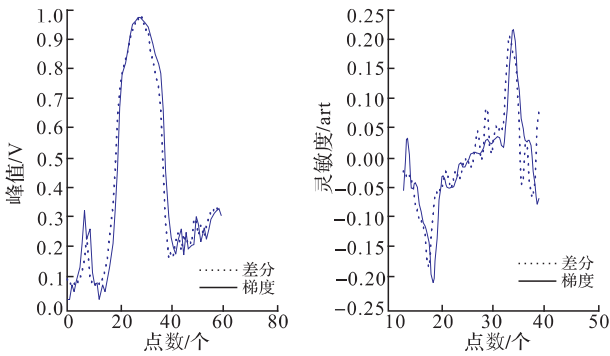


图6 归一化扫描波形及其一阶导数

Fig.6 The normalized peak value by scanning of the defect area and its first derivative

由于扫描波形不能直观给出缺陷形状和尺寸,本文研究了脉冲涡流缺陷成像技术,步骤如下:①采集无缺陷处的磁场差分信号和磁场梯度信号,并作为参考信号存储在 LabVIEW 程序中;②探头对亚表面腐蚀缺陷进行二维扫描,同时,程序按照设定路径对路径上各信号采集点上所拾取的信号及其峰值进行记录,并存储扫描峰值波形;③采用 Matlab 软件对获取数据进行二维 3 次样条插值,提高成像分辨率,实现缺陷成像。本实验沿缺陷长度方向进行扫描,间隔 1 mm 采集一次信号。沿缺陷的宽度方向扫描 17 条曲线。探头扫描路径覆盖了整个缺陷区域。磁场梯度信号和磁场差分信号缺陷成像见图 7~图 8,图中实线框显示了实际亚表面腐蚀缺陷形状。

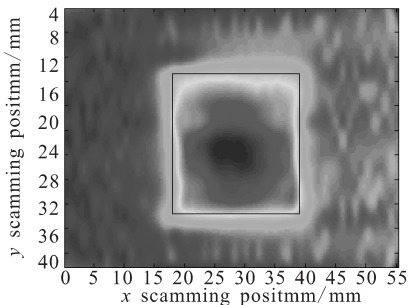


图7 磁场梯度信号缺陷成像图

Fig.7 The gradient field signals imaging

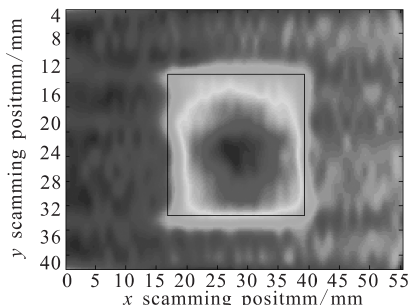


图8 磁场差分信号缺陷成像图

Fig.8 The differential signals imaging

比较图 7 和图 8 的成像结果可以发现,基于磁

场梯度测量的成像结果可更有效且清晰地描述缺陷轮廓,与之相比,磁场差分信号的成像结果不能有效反映缺陷边缘,造成缺陷形状的误判,增加后续缺陷重构的困难度及误差。成像结果进一步证明了仿真结果。

## 4 结语

本文首先拓展了基于  $A_r$  法计算电磁场程序,实现了脉冲涡流磁场梯度信号的有限元计算,针对亚表面腐蚀缺陷脉冲涡流检测,进行了三维有限元仿真,通过分析仿真结果发现,磁场梯度信号对缺陷边缘更加灵敏。基于仿真研究,搭建了实验系统,通过实验研究,集中探究了基于 GMFM 的亚表面腐蚀缺陷脉冲涡流成像技术。研究发现:与传统脉冲涡流磁场信号相比,磁场梯度信号对缺陷边缘的响应更灵敏,缺陷成像结果更精确,有利于实现缺陷高灵敏度、高精度的定量评估。

### 参考文献(References):

- [1] 杨宾峰,张辉,赵玉丰,等.基于新型脉冲涡流传感器的裂纹缺陷定量检测技术[J].空军工程大学学报:自然科学版,2011,12(1):73-77.  
YANG Bin Feng, ZHANG Hui, ZHAO Yu Feng, et al. Quantification of crack defect using a new pulsed eddy current sensor[J]. Journal of air force engineering university: natural science edition, 2011, 12(1): 73-77. (in Chinese)
- [2] 齐勇,李勇,陈振茂,等.一种新型脉冲涡流提离交汇点的实验研究[J].空军工程大学学报:自然科学版,2012,13(6):80-84.  
QI Yong, LI Yong, CHEN Zhen mao, et al. Experimental investigation on a new lift-off intersection point of pulsed eddy current testing[J]. Journal of air force engineering university: natural science edition, 2012, 13(6): 80-84. (in Chinese)
- [3] 杨宾峰,罗飞路.脉冲涡流检测系统影响因素分析[J].无损检测,2008,30(2):104-106.  
YANG Bin Feng, LUO Fei Lu. Analysis of influence factors on pulsed eddy current testing system [J]. Nondestructive testing, 2008, 30(2): 104-106. (in Chinese)
- [4] 张辉,杨宾峰,王晓锋,等.脉冲涡流检测中参数影响的仿真分析与实验研究[J].空军工程大学学报:自然科学版,2012,13(1):52-57.  
ZHANG Hui, YANG Bin Feng, WANG Xiao Feng, et al. Simulation analysis and experimental research on parameter influence in pulsed eddy current nondestructive testing technique [J]. Journal of air force engineering university: natural science edition, 2012, 13(1): 52-57. (in Chinese)