

# 基于暂态磁场梯度信号的脉冲涡流 无损检测和定量评估技术

齐 勇<sup>1,2</sup>, 李 勇<sup>1</sup>, 陈振茂<sup>1</sup>, 肖美华<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, 西安 710049;

2. 中国人民解放军 94354 部队, 济宁 272400)

**摘 要:**脉冲涡流检测技术是目前对多层金属结构实施有效检测和定量评估的无损检测方法之一。传统脉冲涡流检测技术基于电磁感应原理, 采用感应线圈或磁场传感器采集暂态磁场信号, 以实现多层金属结构内部缺陷的定位、识别以及量化评估。文章提出一种新型脉冲涡流检测技术, 该技术主要基于已在核磁共振成像(MRI)领域得到应用的磁场梯度测量技术, 将磁场梯度信号测量与脉冲涡流检测相结合, 以实现多层金属结构脉冲涡流检测灵敏度的提高。基于 ETREE 解析法, 建立了所提方法的理论模型, 推导了脉冲涡流检测磁场梯度信号理论表达式。通过仿真和试验, 证明了该方法在多层金属结构亚表面材质劣化检测中的优势。

**关键词:**电磁无损检测; 脉冲涡流检测技术; 磁场梯度测量技术; 解析法; 亚表面材质劣化

中图分类号: TG115. 28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2012)10-0003-05

## Research on Pulsed Eddy Current Testing Using Measurement of Transient Gradient Magnetic Field

QI Yong<sup>1,2</sup>, LI Yong<sup>1</sup>, CHEN Zhen-Mao<sup>1</sup>, XIAO Mei-Hua<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. The Chinese People's Liberation Army of 94354 Division, Jining 272400, China)

**Abstract:** Pulsed Eddy Current Testing (PECT) is an effective Electromagnetic Nondestructive Evaluation (ENDE) technique for quantitative evaluation regarding the integrity of multi-layer conductors. Conventional PECT utilizes induction coils and solid-state magnetic field sensors which give the transient signals of net magnetic field for defect detection, classification and characterization. In this paper, we introduce Gradient Magnetic Field Measurement (GMFM), which has been intensively used in Magnetic Resonance Imaging (MRI), to PECT in an effort to improve the PECT sensitivity to multi-layer conductors. The closed-form expressions of GMFM-based PECT signals have been formulated via the Extended Truncated Region Eigenfunction Expression (ETREE) modeling. Through theoretical and experimental investigation, it is found that the proposed GMFM-based PECT is significantly advantageous over traditional PECT in terms of high detection-and-evaluation sensitivity to subsurface material degradation of multi-layer conductors.

**Keywords:** Electromagnetic nondestructive evaluation; Pulsed eddy current testing; Gradient magnetic field measurement; Analytical modeling; Subsurface material degradation

收稿日期: 2012-05-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51007069); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(0106-08142005, 0106-08143021)

作者简介: 齐 勇(1983—), 男, 助理工程师, 硕士研究生。主要研究方向为电磁无损检测理论和实验。

通讯作者: 李 勇(1978—), 男, 副教授, 主要研究方向为结构完整性和装备安全理论与技术。

脉冲涡流检测技术(Pulsed Eddy Current Testing, 简称 PECT)<sup>[1-3]</sup>是一种基于传统多频/扫频涡流检测技术的新兴电磁无损检测技术。脉冲涡流检测技术采用方波信号作为激励,由于方波激励信号可等效为不同频率正弦波的叠加,因此脉冲涡流检测信号具有丰富的频谱信息,有利于深层缺陷的检测,该技术已应用于核电设备、石油/化工管道、飞机机翼等多层金属结构的电磁无损检测中。目前,脉冲涡流检测是一种对多层金属结构实现有效检测和定量评估的无损检测方法之一,该技术多采用磁场测量技术,如利用固态磁场传感器拾取暂态磁场信号。Li 等人在建立脉冲涡流检测解析模型的基础上,实现了基于霍尔传感器的脉冲涡流检测探头,探究了脉冲涡流检测磁场信号在多层金属结构检测评估中的应用<sup>[4]</sup>;Tian 等人采用巨磁阻传感器(GMR),实现了基于磁场信号的脉冲涡流检测技术及其对多层金属结构缺陷的检测与分类识别<sup>[5]</sup>。

磁场梯度测量技术<sup>[6]</sup>是一种测量磁场扰动大小的有效方法,广泛应用于医学核磁共振成像(MRI),具有对微观磁场变化拾取灵敏度高等优势<sup>[7]</sup>。文章将磁场梯度测量技术与脉冲涡流检测技术相结合,以实现多层板亚表面材质劣化检测灵敏度的提高。通过仿真和试验,探究了基于暂态磁场梯度信号的脉冲涡流无损检测技术在多层板亚表面材质劣化检测中的优势性。

## 1 脉冲涡流检测磁场梯度信号的理论表达式

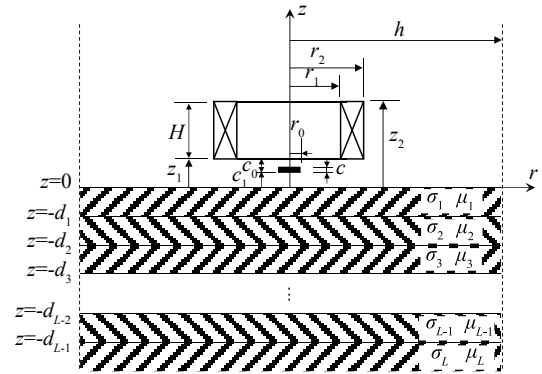
如图 1(a)所示,一个由盘式线圈与固态磁场传感器(如霍尔元件、巨磁阻传感器、磁通门等)构成的脉冲涡流检测探头放置于多层金属结构上方。

假设图 1(a)所建立的脉冲涡流检测模型中,多层金属结构各层材料为线性、均匀且各向同性的静止媒质。基于 ETREE 解析法<sup>[8]</sup>,线圈激发磁场( $B_{zv}^1$ )和涡流激发磁场( $B_{zv}^2$ )的  $z$  分量磁场信号理论解析式为<sup>[9-10]</sup>:

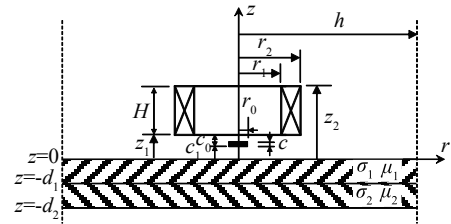
$$B_{zv}^1 = \frac{2\mu_0 NI(\omega)}{r_0 c H(r_2 - r_1)} \cdot \sum_{i=1}^{\infty} \frac{J_1(a_i r_0) \chi(a_i r_1, a_i r_2) F_i}{a_i^5 [h J_0(a_i h)]^2} \quad (1)$$

$$B_{zv}^2 = \frac{2\mu_0 NI(\omega)}{r_0 c H(r_2 - r_1)} \sum_{i=1}^{\infty} \frac{J_1(a_i r_0) \chi(a_i r_1, a_i r_2)}{a_i^5 [h J_0(a_i h)]^2} \cdot e^{-a_i c_1} (e^{-a_i c} - 1) (e^{-a_i z_2} - e^{-a_i z_1}) \frac{V_1}{U_1} \quad (2)$$

式(1)和(2)中  $\omega$  是脉冲涡流检测信号谐波角频率;



(a) 多层金属结构



(b) 双层金属结构

图 1 多层金属结构脉冲涡流检测模型示意图

$\mu_0$  是真空磁导率;  $J_n$  为贝塞尔函数;  $I(\omega)$  为激励电流强度;  $N$  为线圈匝数;  $h$  为涡流场边界距离;  $a_i$  为  $J_1(a_i h) = 0$  的正根;  $V_1/U_1$  为金属体电磁场反射系数,可由参考文献[4]中相关公式计算得到。公式中涉及的函数还包括:

$$F_i = \begin{cases} (e^{-a_i c_2} - e^{-a_i c_1}) (e^{-a_i z_1} - e^{-a_i z_2}) & c_2 > c_1 \geq z_2 \\ 2a_i c + (e^{-a_i c_2} - e^{-a_i c_1}) [e^{a_i(c_2+c_1-z_2)} - e^{a_i z_1}] & z_2 \geq c_2 > c_1 \geq z_1 \\ (e^{a_i c_2} - e^{a_i c_1}) (e^{-a_i z_1} - e^{-a_i z_2}) & z_1 \geq c_2 > c_1 \geq 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$\chi(x_1, x_2) = \int_{x_1}^{x_2} x J_1(x) dx = [x_1 J_0(x_1) - 2 \sum_{n=0}^{\infty} J_{2n+1}(x_1)] - [x_2 J_0(x_2) - 2 \sum_{n=0}^{\infty} J_{2n+1}(x_2)] \quad (4)$$

根据式(1)和(2),对  $B_{zv}^1$  和  $B_{zv}^2$  在  $z$  方向上求导,可得各磁场  $z$  方向分量梯度公式:

$$dB_{zv}^1 = \frac{2\mu_0 NI(\omega)}{r_0 c H(r_2 - r_1)} \cdot \sum_{i=1}^{\infty} \frac{J_1(a_i r_0) \chi(a_i r_1, a_i r_2)}{a_i^4 [h J_0(a_i h)]^2} \text{dev} F_i \quad (5)$$

$$dB_{zv}^2 = \frac{2\mu_0 NI(\omega)}{r_0 cH(r_2 - r_1)} \sum_{i=1}^{\infty} \frac{J_1(a_i r_0) \chi(a_i r_1, a_i r_2)}{a_i^4 [hJ_0(a_i h)]^2} \cdot e^{-a_i c_1} (1 - e^{-a_i c}) (e^{-a_i z_2} - e^{-a_i z_1}) \frac{V_1}{U_1} \quad (6)$$

其中:

$$\text{dev}F_i = \begin{cases} e^{-a_i c_1} (1 - e^{-a_i c}) (e^{a_i z_1} - e^{a_i z_2}) & c_2 > c_1 \geq z_2 \\ e^{a_i (c_1 - z_2)} (1 - e^{a_i c}) + e^{a_i (z_1 - c_1)} (e^{-a_i c} - 1) & z_2 \geq c_2 > c_1 \geq z_1 \\ e^{a_i c_1} (e^{a_i c} - 1) (e^{-a_i z_1} - e^{-a_i z_2}) & z_1 \geq c_2 > c_1 \geq 0 \end{cases} \quad (7)$$

由式(1)~(7)可见,虽然总磁场是  $B_{zv}^1$  和  $B_{zv}^2$  的叠加,总磁场梯度是  $dB_{zv}^1$  和  $dB_{zv}^2$  的叠加,然而由于线圈激发磁场与被测多层金属构件结构及材质无关,因此总磁场及其梯度信号对被测体结构和材质变化的响应仅与  $B_{zv}^2$  和  $dB_{zv}^2$  有关。对于双层非铁磁性金属结构(如图1(b)所示),其电磁场反射系数  $V_1/U_1$  为:

$$\begin{cases} \frac{V_1}{U_1} = \frac{(a_i - b_{1i})e^{-a_{1i}d_1}VU + (a_i + b_{1i})}{(a_i + b_{1i})e^{-a_{1i}d_1}VU + (a_i - b_{1i})} \\ VU = \frac{(b_{1i} + b_{2i})(b_{2i} - a_i)e^{-a_{2i}D} + (b_{1i} - b_{2i})(b_{2i} + a_i)}{(b_{1i} - b_{2i})(b_{2i} - a_i)e^{-a_{2i}D} + (b_{1i} + b_{2i})(b_{2i} + a_i)} \\ b_{ni} = \frac{a_{ni}}{\mu_{ni}}, a_{ni} = \sqrt{a_i^2 + j\omega\mu_0\mu_{ni}\sigma_n}, n = 1, 2 \\ D = d_2 - d_1 \end{cases} \quad (8)$$

下层板导电率的变化对金属体电磁场反射系数的影响可写为:

$$dVU = \frac{d\left(\frac{V_1}{U_1}\right)}{d\sigma_2} \bigg|_{\mu_{ni}=1} = \frac{j\omega\mu_0 a_i a_{1i}^2 (2a_{2i}m_1 - m_2)}{(n_1 + n_2)^2 \sqrt{a_i^2 + j\omega\mu_0\sigma_2}} \quad (9)$$

其中:

$$\begin{cases} m_1 = a_i [1 - \cosh(2Da_{2i})] + D(a_i^2 - a_{2i}^2) \\ m_2 = (a_{2i}^2 + a_i^2) \sinh(2Da_{2i}) \\ n_1 = a_{2i}(a_{1i}^2 + a_i^2) \cosh(Da_{2i}) + a_i(a_{1i}^2 + a_{2i}^2) \sinh(Da_{2i}) \\ n_2 = 2a_i a_{2i} \cosh(Da_{2i}) + (a_{2i}^2 + a_i^2) \sinh(Da_{2i}) \end{cases} \quad (10)$$

基于式(2),(6)和(9),下层板金属导电率变化对磁场梯度信号和磁场信号的影响可写为:

$$\frac{d(dB_{zv}^2)}{d(\sigma_2)} = \frac{2\mu_0 NI(\omega)}{r_0 cH(r_2 - r_1)} \cdot \sum_{i=1}^{\infty} \frac{J_1(a_i r_0) \chi(a_i r_1, a_i r_2)}{a_i^4 [hJ_0(a_i h)]^2} \cdot \quad (11)$$

$$\begin{aligned} & e^{-a_i c_1} (e^{-a_i z_2} - e^{-a_i z_1}) (1 - e^{-a_i c}) dVU \\ \frac{d(B_{zv}^2)}{d(\sigma_2)} &= \frac{2\mu_0 NI(\omega)}{r_0 cH(r_2 - r_1)} \cdot \sum_{i=1}^{\infty} \frac{J_1(a_i r_0) \chi(a_i r_1, a_i r_2)}{a_i^5 [hJ_0(a_i h)]^2} \cdot e^{-a_i c_1} (e^{-a_i c} - 1) (e^{-a_i z_2} - e^{-a_i z_1}) dVU \end{aligned} \quad (12)$$

由式(11)和(12)可知,在各特征函数展开式中,  $d(dB_{zv}^2)/d(\sigma_2)$  数值是  $d(B_{zv}^2)/d(\sigma_2)$  的  $a_i (a_i > 1, \text{正实数})$  倍,因此  $d(dB_{zv}^2)/d(\sigma_2)$  求解结果大于  $d(B_{zv}^2)/d(\sigma_2)$ , 表明:① 磁场梯度信号相比磁场信号对下层板导电率的变化更为灵敏。② 基于磁场梯度信号的脉冲涡流检测较传统脉冲涡流检测技术,具有较高灵敏度。需要指出,基于参考文献[4],暂态磁场梯度信号及其对被测体亚表面层材质劣化的响应可以通过对式(5)和(6)进行傅里叶逆变换,实现快速求解。

## 2 脉冲涡流检测磁场梯度信号的仿真研究

如图1(b)所示,二维轴对称脉冲涡流检测仿真模型由探头(盘式激励线圈和磁场传感器)和被测试件组成,试件为典型双层金属平板结构,上层板导电率为定值,下层板导电率变化,以模拟下层板材质劣化。因脉冲涡流信号可等效为不同频率涡流信号的叠加,故对所建立的脉冲涡流磁场梯度信号理论表达式的验证在频域中进行。仿真模型各参数为:激励线圈外半径  $r_2 = 24.64 \text{ mm}$ ;激励线圈内半径  $r_1 = 22.57 \text{ mm}$ ;激励线圈高度  $H = 6.62 \text{ mm}$ ;激励线圈匝数  $N = 804$ ;探头设计提离  $z_1 = 0.64 \text{ mm}$ ;磁场传感器底部高度  $c_1 = 0.64 \text{ mm}$ ;磁场传感器厚度  $c = 0.46 \text{ mm}$ ;上层金属板导电率  $\sigma_1 = 34 \text{ MS} \cdot \text{m}^{-1}$ ;下层金属板导电率  $\sigma_2 = 10 \sim 59.98 \text{ MS} \cdot \text{m}^{-1}$ ;上/下层金属板相对磁导率  $\mu_{1r}/\mu_{2r} = 1$ ;上层金属板厚度  $d_1 = 1.50 \text{ mm}$ ;下层金属板厚度  $d_2 - d_1 = 8 \text{ mm}$ ;激励电流频率  $f = 10 \sim 10\,000 \text{ Hz}$ ;激励电流幅值  $I = 0.50 \text{ A}$ ;磁场传感器半径  $r_0 = 0.91 \text{ mm}$ 。

同时采用 FEM-BEM<sup>[11]</sup> 法和 ETREE 法求取图1(b)模型磁场梯度信号,图2为下层金属板导电率分别 10, 40 和 60 MS/m 时,磁场梯度信号实部和虚部与激励频率关系曲线。图3为激励频率分别为 100, 1, 10 kHz 时,磁场梯度信号实部(图3(a)),虚部(图3(b))对下层金属板导电率变化的响应。由图2和图3可见,ETREE 和 FEM-BEM 两种方法计算结果基本吻合。通过进一步数据分析,发现计算结果相对误差在 1% 以内,从而验证了所建立的

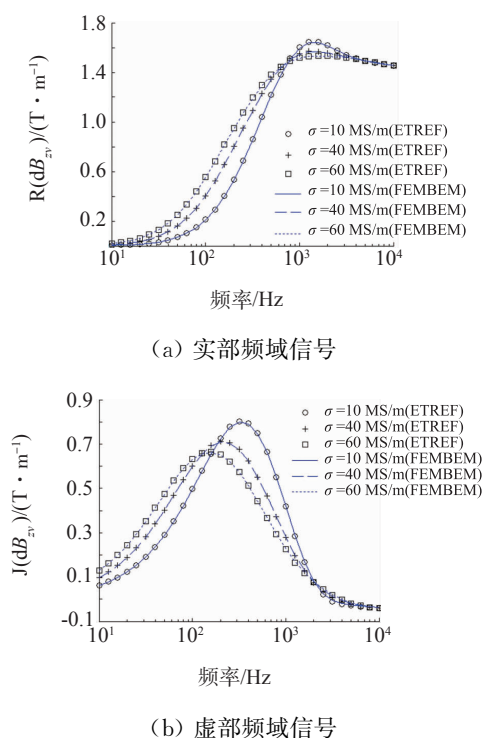


图2 不同导电率时的磁场梯度信号与激励频率曲线

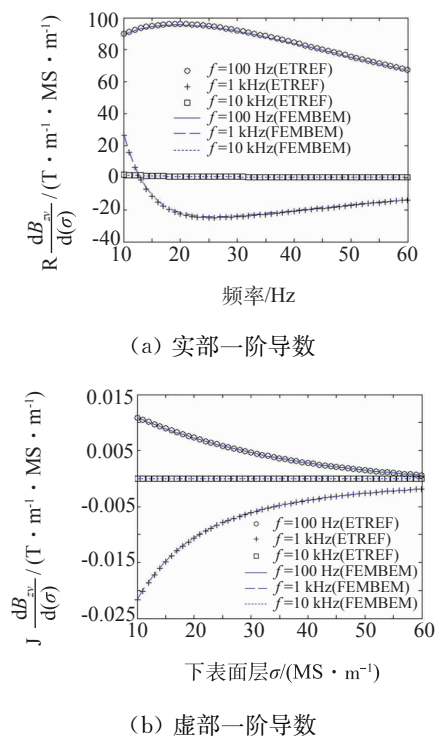


图3 不同激励频率时磁场梯度信号对下层金属板导电率变化的响应图

磁场梯度信号(式(6))及其对下层金属板导电率变化响应解析式(式(11))的正确性。然而,由于采用ETREE法求解信号无需对求解域进行网格剖分,能在1 s内得到计算结果,故较FEM-BEM法计算效率更高。

图4为磁场梯度信号和磁场信号实部、虚部对下层金属板导电率变化响应曲线。由图4可见,与磁场信号相比,磁场梯度信号对下层金属板导电率变化反应更为灵敏,可提升近两个数量级,体现了磁场梯度信号在金属部件亚表面层材质劣化定量评估中的优势。

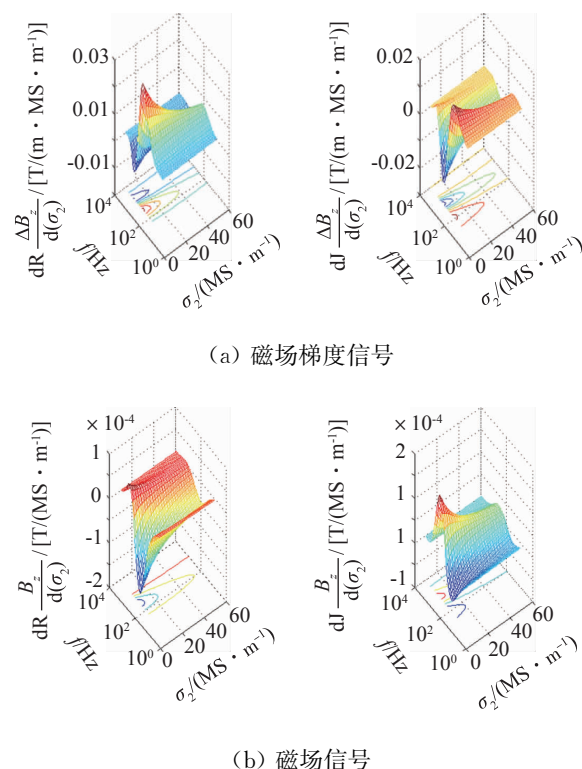


图4 磁场梯度信号和磁场信号实部、虚部对下层金属板导电率变化灵敏度曲线

### 3 脉冲涡流检测磁场梯度信号试验

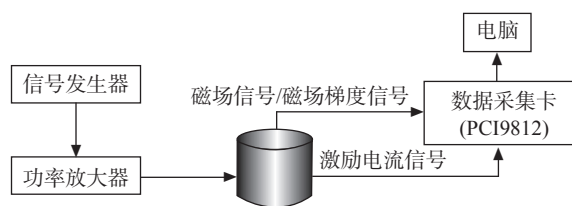
脉冲涡流试验平台及其系统框图如图5所示。试验中,为比较磁场信号和磁场梯度信号对亚表面层导电率变化的灵敏度,分别制作了两类脉冲涡流检测探头,各探头均由激励线圈和固态磁场传感器组成。激励线圈参数为:外径23 mm,内径20 mm,线圈高20 mm,匝数210,线径0.27 mm。检测探头分别采用两类巨磁阻传感器(均置于激励线圈底部中心位置):① NVE GMR-AA004-02 测量总磁场 $z$ 分量信号。② NVE GMR-ABL005 测量总磁场 $z$ 分量梯度信号。

功率放大器输出最大幅值为5 V的电压,以驱动激励线圈。鉴于NVE GMR传感器存在非线性和磁滞现象,输出的线圈驱动电压置入4 V直流分量,保证两个传感器均工作在线性区域。为模拟多层金属板亚表面材质劣化,选用典型双层金属板结





(a) 检测试验平台

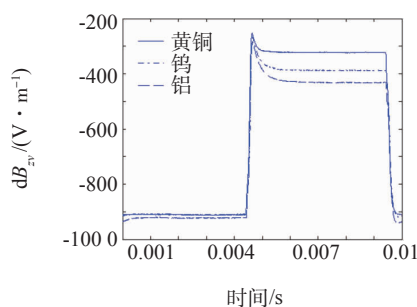


(b) 系统框图

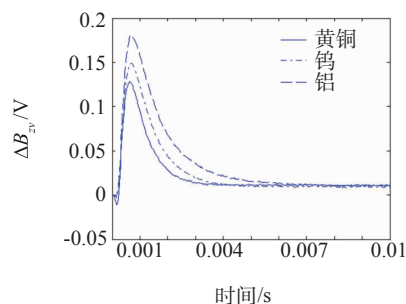
图5 脉冲涡流检测试验平台及其系统框图

构,上层金属板尺寸为  $60\text{ mm} \times 60\text{ mm} \times 1.5\text{ mm}$ , 材质为黄铜(导电率为  $14\text{ MS/m}$ );下层金属板尺寸为  $60\text{ mm} \times 60\text{ mm} \times 3\text{ mm}$ , 材质可变,分别为黄铜, 钨(导电率为  $20\text{ MS/m}$ )以及铝(导电率为  $34\text{ MS/m}$ )。各层板材料相对磁导率均为 1。

图 6(a)为下层板不同导电率的磁场梯度信号, 图 6(b)为下层板不同导电率的磁场差分信号(参考信号为空气中探头输出的磁场信号)。需要指出的是,各试验信号与仿真计算结果相近。由图 6 可见,



(a) 磁场梯度信号



(b) 磁场差分信号

图6 下层板不同导电率的磁场梯度信号和磁场差分信号

磁场梯度信号与磁场差分信号存在明显差异。磁场梯度信号幅值(绝对值)随下层板导电率的减小而减小,磁场差分信号幅值(绝对值)与下层板导电率呈递增关系。

为证明磁场梯度信号在多层板亚表面材质劣化检测中的优势,在信号处理中,分别提取磁场梯度信号和磁场差分信号的特征,即峰值(PV)<sup>[12]</sup>,并采用拟合函数,建立 PV 与亚表面层电导率  $\sigma$  间的关联规律,进而对该拟合函数进行求导,即  $d(PV)/d(\sigma)$ ,计算结果如图 7 所示。可见,  $d(PV_{\text{磁场梯度}})/d(\sigma)$  数值远大于  $d(PV_{\text{磁场差分}})/d(\sigma)$ ,表明磁场梯度信号对第二层金属板导电率变化灵敏度较大。该结果印证了前述理论仿真结论,体现了脉冲涡流磁场梯度信号在金属部件亚表面层材质劣化定量评估中的优势。

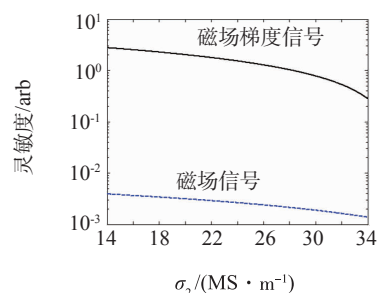


图7 磁场梯度信号和磁场信号对第二层金属板导电率变化的灵敏度对比

## 4 总结

基于 ETREE 解析法,推导了基于磁场梯度信号的脉冲涡流检测亚表面层材质劣化理论表达式,同时,通过与 FEM-BEM 仿真结果的对比,验证了所建立理论表达式的正确性。通过仿真和试验研究发现,与脉冲涡流磁场差分信号相比,脉冲涡流磁场梯度信号对金属部件亚表面材质劣化灵敏度较大,从而证明了基于暂态磁场梯度信号的脉冲涡流检测技术在金属部件亚表面层材质劣化定量评估中的优势。

## 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 张思全,陈铁群,朱佳震. 脉冲涡流检测技术的进展[J]. 无损检测, 2008, 30(11): 838—864.
- [3] 周德强,张斌强,田贵云,等. 脉冲涡流检测中裂纹的深度定量及分类识别[J]. 仪器仪表学报, 2009, 30(6): 1190—1194.

(下转第 45 页)

扫描阻抗变化频谱图。由图 4(a)可见,不同频率下,阻抗变化量是完全不同的,相同探头对于不同材料的工件,阻抗的变化规律也完全不同。通过频谱图直观显示出:对于 1 号试块,频率为 51~56 kHz 的范围内,缺陷处的实部和虚部的变化值都比较大,提高情况下的实部和虚部变化量小于最小缺陷处阻抗的实部、虚部的变化量,且变化方向相反。选用这一频率段,有利于区分缺陷和提高,且具有较高的缺陷检测灵敏度。

为获得更为精确的试验频率点,进行 2 次细化扫描,频率范围为 51~56 kHz,增量为 10 Hz,测量结果如图 4(b)所示。从图可见,频率为 51~52.5 kHz 时,缺陷检测灵敏度稍高。

确定最佳工作频率后,系统工作于单频激励模式下,激励源输出固定频率 52 kHz 正弦波,探头匀速扫过工件表面,实时检测结果如图 5 所示,从图 5 中可以很清楚地辨别出试块上的 5 个孔和 4 条缝模拟缺陷,两类缺陷能有效区分。说明选择该频率作为工作频率是适合该探头和工件的。



图 5 钢板连续扫描(52 kHz)

## 4 结论

试验结果表明,应用数字化阻抗分解设计的涡流检测系统,由于采用 DDS 技术,可以方便地实现激励信号的频率扫描输出,使用该测试系统能快速获取探头阻抗的频谱特性,为探头工作频率的确定提供了方便、实用、快捷的系统工具。该系统同时又能实现激励信号的单一频率输出或多频率输出,系统可以作为单频涡流检测系统或多频涡流检测系统使用,因此系统兼具频谱分析及检测功能,提高了实际检测过程中的工作效率。检测原始数据传送至计算机,方便后续的信号处理及其它功能的二次开发。

## 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,2008:75—77.
- [2] 蒋齐密,张新访,刘土光,等. 电涡流检测系统的参数设置依据[J]. 无损检测,2001,23(3):100—105.
- [3] 美国无损检测学会. 美国无损检测手册(电磁卷)[M]. 上海:世界图书出版社,1996.
- [4] Tomasz Chady, Masato Enokizono, Ryszard Sikora. Neural network models of eddy current multi-frequency system for nondestructive testing[J]. IEEE Transactions on Magnetics,2000,36(4):1724—1727.
- (上接第 7 页)
- [4] Li Y, Tian G Y, Simm A. Fast analytical modelling for pulsed eddy current evaluation[J]. NDT&E International,2008,41(6):477—483.
- [5] Tian G Y, Sophian A. Defect classification using a new feature for pulsed eddy current sensors [J]. NDT&E International,2005,38(1):77—82.
- [6] Harrell J W. Effect of AC gradient field on magnetic measurements with an alternating gradient magnetometer[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 1999,205(1):121—129.
- [7] Bartusek K, Gescheidtova E, Vesely J. Magnetic resonance technique of gradient magnetic field measurement[C]. Proceedings of the 25th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, Cancun, Mexico,2003:3282—3285.
- [8] Li Y, Theodoulidis T, Tian G Y. Magnetic field-based eddy-current modeling for multilayered specimens[J]. IEEE Transactions on Magnetics,2007,43(11):4010.
- [9] Li Y, Chen Z M, Qi Y. Generalized analytical expressions of liftoff intersection in PEC and a liftoff-intersection-based fast inverse model[J]. IEEE Transactions on Magnetics,2011,47(10):2931—2934.
- [10] Tian G Y, Li Y, Mandache C. Study of lift-off invariance for pulsed eddy current signals [J]. IEEE Transactions on Magnetics,2009,45(1):184—191.
- [11] Zuo Y, Chen Z M. Enhancement of sizing capability of ECT for deep cracks by using split TR probes[J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics,2010,33(3):1157—1164.
- [12] Abidin I Z, Li Y, Latif N A, et al. Advantages and applications of pulsed eddy current testing for comprehensive and reliable defect assessment[J]. NDT SPECTRA,2011(5):227—233.