

# 基于 Ansys 仿真的双频涡流管道裂纹检测中干扰信号的剔除

冯婷婷<sup>1,2</sup>, 罗飞路<sup>1</sup>, 何贇泽<sup>1</sup>

(1. 国防科学技术大学, 长沙 410073; 2. 海军电磁兼容研究检测中心, 上海 200235)

**摘要:**依据涡流检测的阻抗分析原理和仿真差动探头检测时的双频阻抗数据, 在 Ansys 仿真基础上对数据进行相位旋转相减的混频算法处理, 实现支撑板干扰下的缺陷信号识别。分析表明, 该算法具有较强的通用性, 能有效地识别支撑板干扰时的缺陷信号。

**关键词:**涡流检测; 双频涡流; 阻抗分析; 相位旋转; 混频算法

中图分类号: TG115. 28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2009)03-0173-04

## Getting Planar Information of Weak Signal in Dual-Frequency Eddy Current Testing

FENG Ting-Ting<sup>1,2</sup>, LUO Fei-Lu<sup>1</sup>, HE Yun-Ze<sup>1</sup>

(1. National University of Defense and Technology, Changsha 410073, China;

2. Center of Research and Measurement for EMC of Navy, Shanghai 200235, China)

**Abstract:** The research of arithmetic on the basis of emulation mode in Ansys aimed to eliminate the support signal and extract the defect signal. According to the theory of impedance analysis, it simulated dual-frequency eddy current testing by the differential sensor and gets impedance data. On the basis of these data phase rotation and subtraction mixing method were applied and the extraction of the defect signal from a combination of the support signal was realized. The analysis indicated that this method was universal and was effective to distinguish between the defect signal and the support signal.

**Keywords:** Eddy current testing; Dual-frequency eddy current; Impedance analysis; Phase rotation; Mixing arithmetic

双频涡流检测技术广泛应用于飞机、舰船和核电站等军、民用设施在役管道的裂纹无损检测<sup>[1]</sup>。将双频信号经分频处理后所得的两组不同频率下的检测信号序列, 经过转换、形变等一系列信号混频算法, 可以从支撑板等干扰信号中, 有效分离出缺陷或裂纹的信号, 从而达到在役检测的目的。

### 1 管道差动双频涡流传感器的检测原理

差动式涡流传感器由一对反向连接的线圈组成, 安置在间隔很小的同一轴线上。当移动传感器经过不连续处时, 线圈的阻抗变化不平衡, 产生了一个阻抗差<sup>[2]</sup>。随着探头进入缺陷区域和离开缺陷区

域, 则可在阻抗平面图上绘制一个包含相位和幅值信息的 8 字图, 用来判断缺陷的性质, 其原理如图 1。

当管道周围有支撑板时, 支撑板信号将会与缺陷信号混叠在一起, 若通过单频激励下差动传感器的阻抗电压变化, 很难分辨两者。此时, 双频激励和后续一系列分频、混频的处理, 可以较好地将支撑板信号和缺陷信号分开。

### 2 管道差动双频涡流检测的 Ansys 仿真

涡流检测原理的实质是电磁能量与被检测试件的交互作用, 这种作用在理论上可用麦克斯韦方程组表示。除极少数简单情况下, 这些方程的解析解通常是无法求得的。随着数字计算机的出现, 数值计算方法得到了迅速的发展, 也促进了电磁场问题的分析。

收稿日期: 2008-05-28

作者简介: 冯婷婷(1980—), 女, 工程师, 硕士研究生, 专业为测试计量技术与仪器, 研究方向为电磁无损检测。

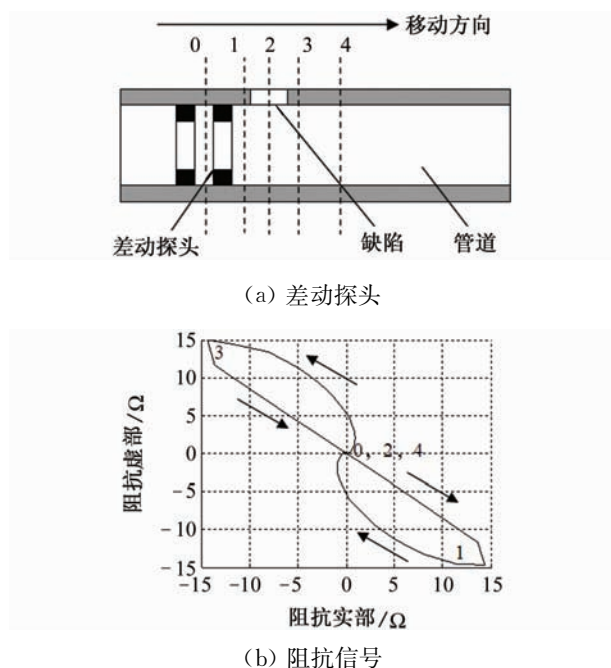


图1 差动探头8字显示原理

在利用有限元法求解电磁场方程时,首先需要列出方程,将区域进行离散化,建立有限元方程式,然后根据边界条件,解最终的联立方程,求出区域内离散点磁矢量势。

笔者在阻抗分析原理上,应用 Ansys,对有支撑板的管道进行差动传感器的双频涡流仿真。

## 2.1 全周向轴对称缺陷的建模

双频涡流检测仿真试验是由被检管道试件与差动检测探头组成,被测试件是套有支撑板的圆柱形薄壁管,差动探头由两个相距很近的铜线圈反接组成,整个模型是轴对称的。在进行全周向缺陷仿真时,可对其建立二维模型,只需要分析柱状模型的半截面,就能得出整个模型的情况。建立的二维模型如图2。被检件是一段内半径为19.7 mm,外半径为22.2 mm,长280 mm的薄壁管;管壁外是长80 mm,厚10 mm的周向支撑;缺陷为深2.2 mm,宽2 mm的周向缺陷,缺陷位于支撑板正下方,管壁外侧;差动线圈为反接的两个轴向铜线圈,内半径为15 mm,外半径为19 mm。管内除了线圈皆充满空气,为了

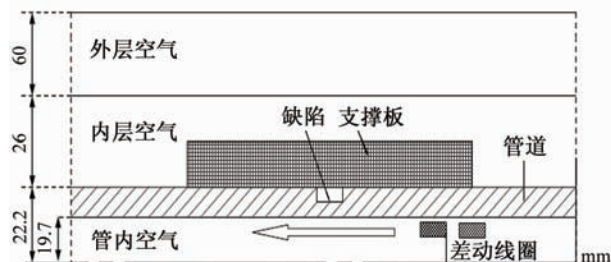


图2 双频涡流检测管道缺陷二维模型

灵活网格划分、减少计算量、节约计算时间,同时确保仿真精度,在管外自由区建模时设置两层圆柱环形空气,内层空气的环半径为26 mm,外层空气的环半径为60 mm。在外层空气的边缘设置远场边界条件。差动探头的移动方向如图2中空箭头所示。

由于双频涡流检测采用的是阻抗分析法,因此,建模仿真时需要求得差动线圈的阻抗差。采用直接法,通过分析单元节点的磁矢量势  $\mathbf{A}$  进行计算,差动线圈的阻抗为<sup>[3]</sup>:

$$Z_{\text{差动}} = Z_a + Z_b = \frac{j\omega 2\pi J_s}{I_s^2} \left[ \sum_{i=1}^{N_b} r_{ci} \Delta_i \mathbf{A}_{ci} - \sum_{j=1}^{N_a} r_{cj} \Delta_j \mathbf{A}_{cj} \right] \quad (1)$$

式中  $I_s$  为电流值;  $\omega$  为激励角频率;  $J_s$  为电流密度;  $N_a$  为线圈 a 的匝数;  $N_b$  为线圈 b 的匝数;  $r_{ci}$  为轴到单元面心的距离;  $\Delta_i$  为单元面积;  $\mathbf{A}_{ci}$  为单元面心的磁矢量势。

## 2.2 全周向轴对称缺陷的仿真

被检管材的特征频率为<sup>[4]</sup>:

$$f_g = \frac{5.066}{\mu_r \sigma d_i W} \quad (2)$$

式中  $\mu_r$  为薄壁管材的相对磁导率;  $\sigma$  为薄壁管材的电导率,  $\text{m}/\Omega \cdot \text{mm}^2$ ;  $d_i$  为管内径, cm;  $W$  为管壁厚, cm;  $f_g$  为管道的特征频率, kHz。

另有经验公式为<sup>[5]</sup>:

$$f = \frac{2 \cdot f_{g(\text{管})}}{\frac{d_i}{d_o} \left( 1 - \frac{d_i}{d_o} \right)} \quad (3)$$

式中  $f$  为检测频率, kHz;  $d_o$  为管材的外径, cm。计算出主频检测范围为 2.057 2~12.343 2 kHz, 选取主频为 10 kHz, 通常辅频为主频的 1/2。以主激励频率 10 kHz 仿真, 在缺陷附近的对称位置, 以步进为 1 mm 的距离移动差动探头, 探头移动的方向如图2中空箭头所示, 仿真计算 108 个位置的差动线圈阻抗。图3为探头移动时绘制的阻抗图, 阻抗

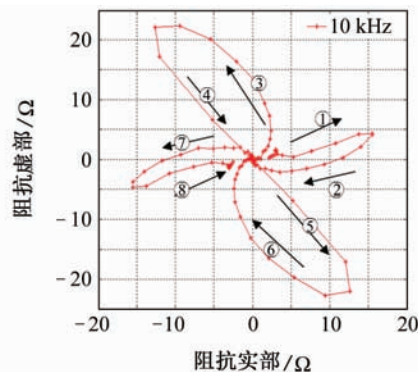


图3 探头移动时绘制的阻抗图

图的绘制顺序如图中箭头所示,其中①②⑦⑧为支撑边缘信号,③④⑤⑥为缺陷下降沿和上升沿信号。同样,可以仿真辅助激励频率 5 kHz 下的阻抗图。将主频 10 kHz 和辅频 5 kHz 激励下的阻抗图绘制在同一个极坐标系中,发现它们形状相似,但相位和幅值不同,如图 4。

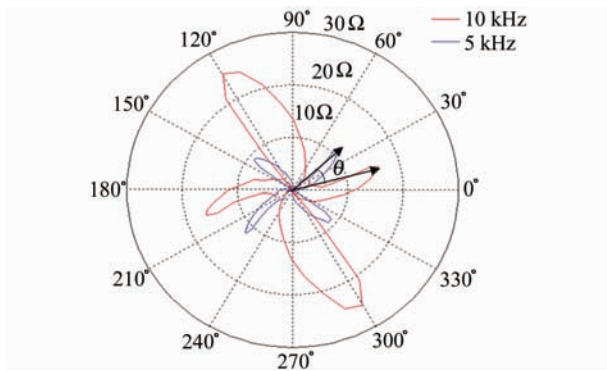


图 4 主频和辅频激励下的阻抗图

### 3 相位旋转相减混频算法

#### 3.1 算法描述

该算法主要是将辅频输入信号进行形变,使其幅值、相位和位置尽量接近主频信号,选择此时的形变参数。从主频信号中剔除形变后的辅频信号,以获得缺陷信号。但此时的缺陷信号有略微的改变,但不影响对缺陷的判断。其流程图如图 5。

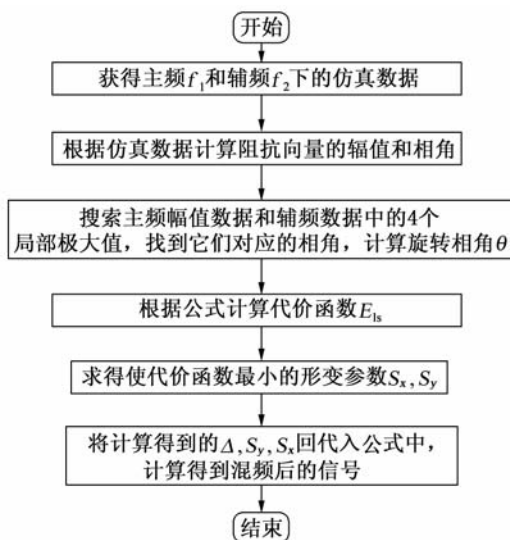


图 5 混频算法流程图

主要计算公式为式(4)和(5)<sup>[3]</sup>。式中  $x_{\text{输出}}$ ,  $y_{\text{输出}}$  为混频后的实部和虚部输出信号; $x_{\text{主频输入}}$ ,  $y_{\text{主频输入}}$  为主频激励的实部和虚部输入信号; $x_{\text{辅频输入}}$ ,  $y_{\text{辅频输入}}$  为辅频激励的实部和虚部输入信号; $s_x, s_y$  为

缩放比例参数; $T_x, T_y$  为平移参数; $\theta$  为旋转参数。

$$x_{\text{输出}} = x_{\text{主频输入}} - [(s_x x_{\text{辅频输入}} \cos \theta + s_y y_{\text{辅频输入}} \sin \theta) - T_x] \quad (4)$$

$$y_{\text{输出}} = y_{\text{主频输入}} - [(-s_x x_{\text{辅频输入}} \sin \theta + s_y y_{\text{辅频输入}} \cos \theta) - T_y] \quad (5)$$

以上只有  $x_{\text{主频输入}}$ ,  $y_{\text{主频输入}}$ ,  $x_{\text{辅频输入}}$  和  $y_{\text{辅频输入}}$  是已知的,其它参数需要估算后确定。

#### 3.2 参数选择的估算法则

参数的选择采用最小平方估算。定义  $C_p$  为主频输入信号矢量,  $C_a$  为辅频输入信号矢量,  $C'_a$  为形变后的辅频输入信号矢量。则  $C'_a = C_a \cdot A(s_x, s_y, T_x, T_y, \theta)$ ,  $A$  为式(4)和(5)中的形变函数,  $s_x, s_y, T_x, T_y$  和  $\theta$  为待估参数。

定义代价函数为式(6),其中  $\|\cdot\|^2$  表示欧氏空间的平方估算:

$$E_{ls} = \|C'_a - C_p\|^2 = \|C_a \cdot A - C_p\|^2 \quad (6)$$

最佳的形变参数是使得代价函数  $E_{ls}$  获得最小的值的参数。获得  $E_{ls}$  最小值的方法一般是分别求偏导数,通过解以下方程,可以获得待估算参数:

$$\begin{cases} \frac{\partial E_{ls}}{\partial s_x} = 0 & \frac{\partial E_{ls}}{\partial s_y} = 0 \\ \frac{\partial E_{ls}}{\partial T_x} = 0 & \frac{\partial E_{ls}}{\partial T_y} = 0 \\ \frac{\partial E_{ls}}{\partial \theta} = 0 \end{cases}$$

计算机编程时,获得代价函数最小的办法之一是“最速下降法”,即选择初始化的 5 个参数,使得参数变化时代价函数的值是“下降的”,逐步迭代,获得代价函数的最小值,每一次步进迭代时,代价函数的梯度由当前的参数值确定,步进的方向就是梯度方向。

### 4 算法应用

将混频算法应用于以上仿真数据,进行支撑板信号的剔除。由于选择了合适的频率,10 kHz 下和 5 kHz 下的相角曲线的走势基本相似,两曲线只是相差一个基本稳定的值  $\theta$  (相角差的均值),旋转后的相角曲线比旋转前更贴近主频相角曲线(图 6)。

经过混频算法中的旋转、形变放大、相减后得到的过程信号阻抗图和最终剔除了支撑板信号的阻抗图如图 7 所示。其中①号黄实线为主频 10 kHz 激励下的阻抗曲线。②号绿实线为辅频 5 kHz 激励时的阻抗曲线。③号红实线为经过混频算法后最终剔除了支撑信号的缺陷阻抗曲线。绿虚线和紫红十字线都为混频算法中的过程阻抗曲线。此时支撑



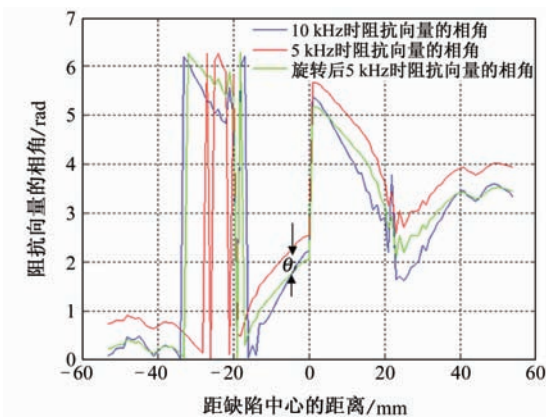


图6 阻抗向量的相角

板信号已经基本剔除,红色混频信号的阻抗图与单主频检测无支撑板管道时获得的缺陷信号形状和相位一致,幅值略有减小,但不影响对缺陷信号的判读。

## 5 结语

在阻抗分析的基础上,将相位旋转相减算法应用于双频涡流检测仿真数据,有效地去除了支撑板干扰信号,有利于缺陷信号的正确判读。该算法具有较强的通用性,在实际检测中也有很好的借鉴作用和广阔的应用前景。

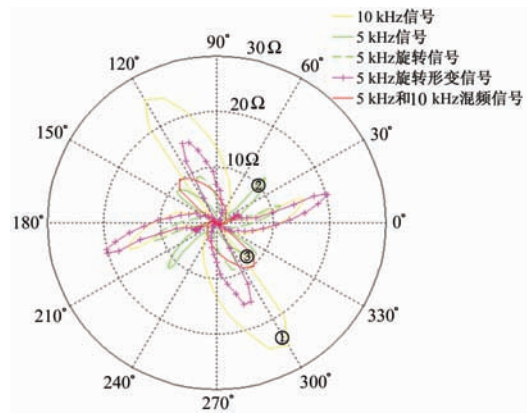


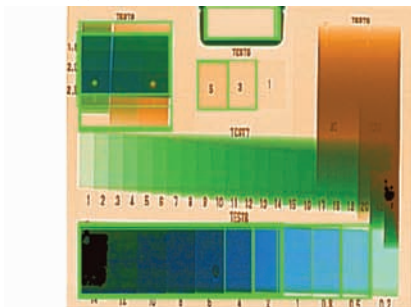
图7 过程信号和混频信号的阻抗图

## 参考文献:

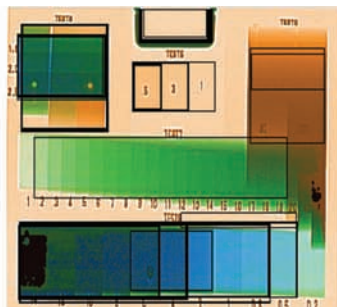
- [1] 林俊明. 多频涡流检测原理及应用[J]. 无损检测, 1996, 18(1): 23—26.
- [2] 孙朝明, 徐彦霖, 刘宝. 有限元方法在涡流传感器设计中的应用[J]. 传感器技术, 2005, 24(10): 80—85.
- [3] 美国无损检测手册译审委员会. 美国无损检测手册·电磁卷[M]. 上海: 上海世界图书出版公司, 1999.
- [4] 任吉林, 林俊明, 等. 电磁检测[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [5] 邹建伟. 多频涡流技术在冷凝铜管检测中的应用[J]. 湖南电力技术, 1992, (3): 31—36.



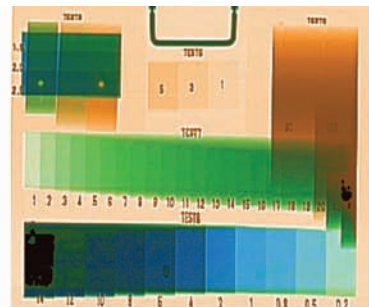
(上接第 172 页)



(a) 测试体 B 实测图像



(b) 基于 HSI 空间矩形提取效果图



(c) 基于 RGB 空间矩形提取效果图

图6 测试体 B 实测及提取后图像

边逼近的矩形提取方法,实现了 X 射线安检设备测试图像自动分割。对识别中产生的冗余多边形信息根据实际图像特点进行特征筛选,提高了识别的准确性和有效性。试验结果表明,基于 HSI 多边形逼近的矩形提取方法相较于 RGB 空间中的轮廓提取方法检测结果更完整、全面且准确率较高。

## 参考文献:

- [1] 林生佑, 石教英. 基于 HVS 的彩色图像边缘检测算子[J]. 中国图象图形学报, 2005, 10(1): 43—47.

- [2] Douglas D H, Peucker T K. Algorithms for the reduction of the number of points required to represent a digitized line or its caricature[J]. The Canadian Cartographer, 1973, 10(2): 112—122.
- [3] Teh C H, Chin R T. On the detection of dominant points on digital curves[J]. IEEE Tr PAMI, 1989, 11: 859—872.
- [4] 刘敏. 基于三维道格拉斯改进算法的地貌自动综合研究[D]. 西安: 西北大学, 2007.
- [5] 许如初, 张智平. 确定任意多边形顶点凹凸性的快速算法[J]. 华中理工大学学报, 1997, 25(1): 103—104.