

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2020.12.001

基于 ISTA 的混合激励 EMT 金属探伤系统研究*

孙春光, 何 敏*, 曾星星, 冯肖维

(上海海事大学 物流工程学院, 上海 201306)

摘要:针对 EMT 金属结构探伤中传统传感器结构和算法的图像重建质量不佳问题,对 EMT 探伤系统的激励方式和图像重建算法进行了研究。通过分析 EMT 采集数据的原理,设计了混合激励的 6 线圈传感器,比较了混合激励与单独激励的检测数据量;根据 EMT 技术的数学模型,得到了感应电压与电导率分布之间的关系,构造了混合激励下的灵敏度矩阵;分析了常规 EMT 图像重建算法的不足,根据金属缺陷的非平滑特征,引入了基于小波变换的迭代软阈值算法;以 ANSYS Maxwell 软件为仿真平台,采用单独激励和混合激励对不同形状缺陷进行了实验,并使用不同算法获得了重建图像;设计了一套基于迭代软阈值算法的混合激励 EMT 探伤系统,使用了两种激励方式采集不同缺陷的数据,对比了 Tikhonov 正则化算法,改进了 Landweber 迭代算法和迭代软阈值算法的图像重建效果。研究表明:混合激励的成像效果优于单独激励;在混合激励下,ISTA 的图像重建质量要好于其他两种算法。

关键词:电磁层析成像;Landweber 迭代算法;Tikhonov 正则化算法;迭代软阈值算法;金属探伤

中图分类号:TH878;TG115.28

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2020)12-1393-07

ETM metal detection system based on ISTA in hybrid excitation

SUN Chun-guang, HE Min, ZENG Xing-xing, FENG Xiao-wei

(College of Logistics Engineering, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China)

Abstract: Aiming at the problem of poor image reconstruction quality of traditional sensor structures and algorithms in electromagnetic tomography (EMT) metal structure flaw detection, the excitation method and image reconstruction algorithm of the EMT flaw detection system were studied. By analyzing the principle of data collected by EMT, a 6-coil sensor with mixed excitation was designed, and the amount of detection data of mixed excitation and single excitation was compared. According to the mathematical model of EMT technology, the relationship between induced voltage and conductivity distribution was obtained, and the sensitivity matrix under mixed excitation was constructed. The shortcomings of conventional EMT image reconstruction algorithms were analyzed. Based on the non-smooth features of metal defects, an iterative soft threshold algorithm (ISTA) based on wavelet transform was introduced. ANSYS Maxwell software was used as a simulation platform. Experiments with different shape defects using separate excitation and mixed excitation were performed, and the reconstructed image was obtained using different algorithms. A mixed excitation EMT flaw detection system based on iterative soft threshold algorithm was designed. Two excitation methods were used to collect data of different defects. The image reconstruction effects of Tikhonov regularization algorithm, improved Landweber iterative algorithm and iterative soft threshold algorithm were compared. The results indicate that the imaging effect of mixed excitation is better than that of single excitation; under mixed excitation, the image reconstruction quality of ISTA is better than the other two algorithms.

Key words: electromagnetic tomography (EMT); landweber iterative algorithm; Tikhonov regularization algorithm; iterative soft threshold algorithm (ISTA); metal flaw detection

收稿日期:2020-04-09

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61503241)

作者简介:孙春光(1994-),男,河南周口人,硕士研究生,主要从事金属缺陷的电磁层析成像技术研究。E-mail:sunchunguangstyle@outlook.com

通信联系人:何敏,女,博士,教授。E-mail:minhe@shmtu.edu.cn

0 引 言

经济的发展离不开高质量的金属材料,但在生产、加工、使用过程中,金属材料表面很可能会出现多种缺陷,尤以裂纹占比最大。在工业生产中,这些缺陷严重时将造成重大人员伤亡及财产损失,极大影响企业的生产和经营。

无损检测技术,如射线检测、磁粉检测、超声波检测等技术相继在金属探伤中得到应用^[1-5]。信息技术的高速发展需要智能化的检测方法,其中探伤的图像化、可视化是无损检测技术的一个重要研究方向^[6]。电磁层析成像(EMT)技术属于过程层析成像(process tomography, PT)的一种^[7],将其用于金属材料探伤过程,不仅符合其电磁检测的基本特性,更由于其拥有的图像重建理论和方法,可满足探伤可视化的需求。

EMT 用于金属探伤和成像的研究中,传感器的设计、图像重建质量的提高等问题也是研究重点^[8]。采用混合激励的 EMT 金属探伤传感器,可增加独立的测量信息。

笔者在分析线性反投影(LBP)算法、Landweber 迭代算法^[9]、截断奇异值分解(TSVD)算法^[10]、Tikhonov 正则化算法^[11]、迭代软阈值算法(ISTA)后,经过软件仿真和硬件实验对比,最后使用 ISTA 构建 EMT 金属探伤系统。

1 EMT 金属探伤系统的构建与混合激励的分析

1.1 EMT 金属探伤和成像系统结构

EMT 金属探伤和成像系统的工作原理可描述为:将 EMT 传感阵列放置于金属体表面,在传感阵列的部分线圈上施加激励信号,并产生激励磁场^[12],被测金属体表面的缺陷情况将影响激励磁场,采集传感阵列中检测线圈上的感应电压,可以获得被测金属表面电导率分布,即裂纹的位置信息,根据图像重建算法实现被测金属体表面缺陷的可视化。

此处使用的 EMT 探伤和成像系统由控制器、激励源、信号调理电路、传感器、多路选通模块、上位机 6 部分组成。系统结构框图如图 1 所示。

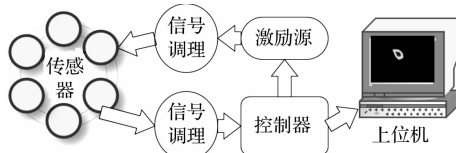


图 1 系统结构框图

图 1 中,控制器使激励源输出一定频率的正弦信号,经过信号调理电路的放大、滤波后施加在传感器的激励线圈上,检测线圈的感应电压经过信号调理电路的整流、滤波,变成直流信号,经过控制器的模数转换后,送入上位机进行图像重建。

1.2 混合激励的 6 线圈传感器

过程层析成像技术的基本原理是 Radon 变换和 Radon 逆变换。设 $f(x, y)$ 为定义在二维空间 R^2 上的连续有界函数,一般将函数 $f(x, y)$ 称为图像。图像重建属于逆问题求解,而该逆问题具有病态性,从检测数据方面降低病态性的方法是增加传感器线圈数量,但该方法增加了成本和系统的复杂性。

笔者使用混合激励方式采集数据,在不增加传感器线圈数量的情况下,仅通过修改程序即可调整激励方式,进而获得更多测量数据,降低了 EMT 系统的病态性,使 $f(x, y)$ 更加逼近真实的物场信息,最终提高了图像质量。

此处使用的传感器采用 6 线圈结构,传感器实物如图 2 所示。

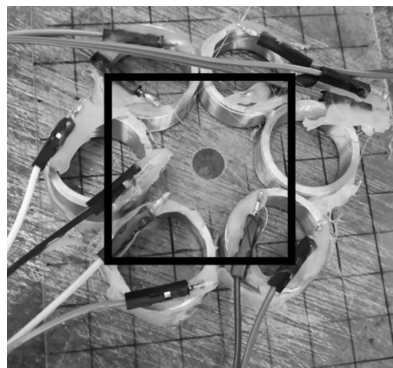


图 2 传感器实物

为了使所有线圈在同一水平面上,传感器线圈按照圆形排列,被固定在 2 mm 厚的透明、非导磁、非导电塑料底座上;传感器有效测量范围为方形框线内。

测量过程描述如下:首先将 6 线圈传感器放在无缺陷金属板上,获得“空场”测量数据,然后将具有设定好缺陷的金属板(材料特性与无缺陷金属板相同)放在传感器下方,再次采集测量数据,经过归一化计算后得到灵敏度矩阵 S ;将传感器放在被测金属表面,获得检测数据 B ,在上位机中使用图像重建算法获得电导率分布矩阵 G ,即缺陷分布情况。

实际检测时,在常规 6 线圈检测方法中,若使用单线圈激励,例如将 1 号线圈作为激励线圈,2-6 号线圈作为检测线圈,共有 30 种电压数据;若使用相邻线圈激励模式,例如将 1 号和 2 号作为激励线圈,分别检

测余下线圈,共 24 种电压数据。单独使用时,获得的独立测量信息较少。

此处使用的 6 线圈传感器,不但将单线圈激励与相邻线圈激励相结合,而且增加了相对激励和间隔一个线圈的双线圈激励。在使用相对激励时,例如将 1 号和 4 号线圈作为激励线圈,余下线圈作为检测线圈,共有 12 种检测数据;当采用间隔一个线圈的双线圈激励时,例如将 1 号和 5 号线圈作为激励线圈,共有 24 种数据。

该方法的优点是:(1)在不修改硬件结构时,激励组合方式由程序决定,增加了系统控制的灵活性;与单独一种激励模式相比,增加了独立测量的数据,采集到的物场信息更丰富;(2)同时增加了系统的容错能力,当某个线圈发生断路故障时,其他检测线圈采集到的数据仍能重建图像,增强了系统的鲁棒性。

因该系统用于静态检测金属表面裂纹,对实时性要求不高,可以增加线圈数量和激励方式。但根据系统实际使用情况,从检测数据到图像重建不能消耗太长时间,故线圈数量和激励组合方式不能过多。经实验测试,该方案约 5 s 刷新一次图像,可以满足现场使用需求。

2 金属缺陷的图像重建

2.1 EMT 数学模型

EMT 正问题是已知被测材料电导率分布,求检测线圈上的感应电压和灵敏度矩阵,正问题可以用下式表示:

$$V_{ij} = \iint_D \sigma(x, y) F[(x, y), \mu(x, y), \sigma(x, y)] dx dy \quad (1)$$

式中: V_{ij} —线圈 i 和线圈 j 之间的检测电压; D —检测区域的面积; σ —被测材料的电导率; F —灵敏度分布函数。

研究中通常使用有限元法求解 EMT 问题,假设满足如下条件:(1)敏感场为似稳场;(2)敏感场呈二维分布状态;(3)被测材料是线性的和各向同性的。

此时 EMT 问题中的敏感场满足的 Maxwell 方程组如下所示:

$$\begin{cases} \nabla \times H = \sigma E + j\omega \varepsilon E \\ \nabla \times E = -j\omega B \\ \nabla \cdot B = 0 \\ \nabla \cdot D = 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: B —磁感应强度; E —电场强度; H —磁感应强

度; D —电位移矢量; σ —被测材料电导率; ω —激励信号的频率; ε —介电常数。

将上式变形可以得到下式:

$$\begin{cases} B = \mu H \\ D = \varepsilon E \\ J = \sigma E \end{cases} \quad (3)$$

式中: μ —被测材料的磁导率; J —激励信号的电流密度。

矢量磁位和磁感应强度有如下关系:

$$\nabla \times A = B \quad (4)$$

式中: A —矢量磁位; B —磁感应强度。

将式(4)代入式(2),并结合式(3)经推导可得到下式:

$$\frac{1}{\mu} \nabla^2 A - j\omega \sigma A = -J_s \quad (5)$$

式中: J_s —线圈的电流密度。

根据有限元法可以得到磁感应强度 B 和矢量磁位 A ,最后得到检测线圈上的电压为:

$$U_d = - \frac{d\psi}{dt} = -n \cdot \frac{d(B \cdot S)}{dt} = -n \cdot \frac{d(A \cdot l)}{dt} \quad (6)$$

式中: ψ —传感器线圈上的磁通链; S —检测线圈的面积; l —线圈轴向长度; n —线圈匝数; t —时间; $\frac{d\psi}{dt}$ —磁通链对时间的微分。

金属缺陷检测属于 EMT 逆问题求解。通常检测系统的非线性模型为:

$$v = F(\sigma) \quad (7)$$

式中: σ —电导率的分布情况; v —检测线圈上的电压矩阵; F —EMT 系统固有的非线性不适定函数关系^[13]。

式(7)可以用下式表示:

$$v = F(\sigma) = F(\sigma_0) + \left. \frac{\partial F}{\partial \sigma} \right|_{\sigma_0} (\sigma - \sigma_0) + o(\|\sigma - \sigma_0\|_2) \quad (8)$$

式中: $\frac{\partial F}{\partial \sigma}$ —灵敏度矩阵; σ_0 —没有缺陷时的电导率分布矩阵。

式(8)可以简化为:

$$v - F(\sigma_0) = S(\sigma - \sigma_0) \quad (9)$$

式中: S —灵敏度矩阵, $S = \frac{\partial F}{\partial \sigma}$ 。

式(9)经化简可得:

$$B = SG \quad (10)$$

式中: B —被测金属电导率的变化引起检测线圈电压的变化量, $B = v - F(\sigma_0)$; G —和图像信息有关的电导率分布矩阵。

2.2 混合激励下的灵敏度矩阵

灵敏度矩阵的优良对图像重建效果有较大影响,常规 EMT 系统的灵敏度矩阵往往使用单一的激励得到^[14]。笔者将多种激励时的灵敏度矩阵合并在一起,降低了系统的病态性。

设 S_1 为单激励时的灵敏度矩阵, $x_{i,j}$ 为灵敏度矩阵 S_1 中的元素,则有以下式:

$$S_1 = \begin{bmatrix} x_{1,1} & x_{1,2} & x_{1,3} & \cdots & x_{1,225} \\ x_{2,1} & x_{2,2} & x_{2,3} & \cdots & x_{2,225} \\ x_{3,1} & x_{3,2} & x_{3,3} & \cdots & x_{3,225} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{30,1} & x_{30,2} & x_{30,3} & \cdots & x_{30,225} \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$x_{i,j} = \frac{V_{i,j} - V_{i,em}}{V_{i,em}} \quad (12)$$

式中: $V_{i,j}$ —第 i 种激励时第 j 个像素点检测到的电压; $V_{i,em}$ —空场条件下,第 i 种激励时的检测电压。

当传感器为两线圈激励时,设灵敏度矩阵为 S_2 ,其中 $y_{i,j}$ 为 S_2 中的元素,则有以下式:

$$S_2 = \begin{bmatrix} y_{1,1} & y_{1,2} & y_{1,3} & \cdots & y_{1,225} \\ y_{2,1} & y_{2,2} & y_{2,3} & \cdots & y_{2,225} \\ y_{3,1} & y_{3,2} & y_{3,3} & \cdots & y_{3,225} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{60,1} & y_{60,2} & y_{60,3} & \cdots & y_{60,225} \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$y_{i,j} = \frac{V_{i,j} - V_{i,em}}{V_{i,em}} \quad (14)$$

式中: $V_{i,j}$ —第 i 种激励时第 j 个像素点检测到的电压; $V_{i,em}$ —空场条件下,第 i 种激励时的检测电压。

最终得到灵敏度矩阵 S 的表达式为:

$$S = [S_1 \ S_2]^T \quad (15)$$

根据式(11,15)可以明显看出,混合激励比单激励时的灵敏度矩阵信息更丰富,降低了系统的病态性。

2.3 常规图像重建算法

EMT 的图像重建中,检测电压个数 m 远小于像素点个数 n ;因此,图像重建属于不适定逆问题,导致灵敏度矩阵 S 不是方阵,不能根据 S 的逆矩阵求式(10)中的电导率分布矩阵 G 。

通常解决不适定问题的方法是正则化,主要有两种方式:(1) 利用关于被研究对象某些先验信息,从物理上引入定性或定量的约束以限制解集;(2) 从数学方面提供解的补充信息或适当修改解的定义。

EMT 技术中通常将该逆问题的求解转化为目标

泛函的极值优化,即:

$$\min f(G) = \frac{1}{2} \|B - SG\| \quad (16)$$

传统的线性反投影算法虽然简单、重建速度快,但成像质量相对较差,严格来说,仅是一种定性的算法;截断奇异值分解(TSVD)算法是截断较小的奇异值从而提高系统的稳定性,但会损失一部分有效信息;Tikhonov 正则化是基于 2 范数的优化方法,适用于重建连续的、光滑的信号图像,而金属裂纹通常是突变的、不连续的;Landweber 迭代法从数值最优化而言,本质上属于最速下降法,在迭代过程中不断修正电导率分布矩阵。

改进 Landweber 迭代算法是将 Tikhonov 正则化计算结果作为迭代初值,提高迭代计算的起点,其迭代格式为:

$$\begin{cases} G_0 = (S^T S + \mu I)^{-1} S^T B \\ G_{k+1} = G_k - \alpha_k S^T (S G_k - B) \end{cases} \quad (17)$$

式中: I —单位矩阵; μ —正则化参数,一般是经验值; α_k —松弛因子,和迭代步长有关。

其中: α_k 一般有 2 种方法确定:固定值法、最优步长法。

(1) 固定值法中,由收敛条件 $\|\alpha_k S^T S\| \leq 2$ 确定 $\alpha_k = \frac{2}{\lambda_{\max}}$,此处 $\lambda_{\max}$ 为 $S^T = S$ 的最大特征值;

(2) 最优步长法是将电压误差向量的泛函 $\|B - S G_{k+1}\|^2$ 最小化后求解得到的,因迭代过程中需要不断计算最优步长,导致计算量比较大。

实际求解中,通常将 α_k 设为固定常数 α ,此时的迭代格式如下所示:

$$G_{k+1} = G_k - \alpha S^T (S G_k - B) \quad (18)$$

可见上述方法仍然不能解决收敛速度较慢、半收敛的问题。因此,将这些算法用于电磁层析成像系统中,还都有待改善。

2.4 迭代软阈值算法

被测金属的缺陷一般只是整个检测区域的较小部分,因此所求的电导率分布矩阵是稀疏的,虽然迭代算法常用来重建稀疏信号,但仅用迭代无法得到准确结果;而借助凸优化理论将稀疏正则化问题转化为凸优化问题,需要计算大量矩阵数据。因此,寻找基于梯度运算、只有简单矩阵相乘的算法是必然选择,而迭代软阈值算法刚好符合这个要求。

笔者首次将 ISTA 引入到 EMT 金属探伤中,通过

测量稀疏信号的噪声,再使用软阈值方法即可重构信号。该算法属于小波变换域,会对所有小波系数作等程度的衰减,并且求解过程简单,在声发射法检测压力管道泄露中已有应用^[15],在 CT 图像重建中也有成功运用^[16],此处用来解决 EMT 图像重建的逆问题。

已知灵敏度矩阵 $\mathbf{S}$ 和测量数据 $\mathbf{B}$,求电导率分布矩阵 $\mathbf{G}$,构造目标函数如下式所示:

$$f(\mathbf{G}) = \frac{1}{2} \|\mathbf{B} - \mathbf{S}\mathbf{G}\|_2^2 + \lambda \|\mathbf{G}\|_1 \quad (19)$$

式中: $\|\mathbf{G}\|_1$ - 惩罚函数; $\|\cdot\|_2$ - 范数; λ - 正则化项。

根据 Majorization-Minimization 优化框架^[17],优化后的目标函数如下所示:

$$u(\mathbf{G}, \mathbf{Z}) = \frac{1}{2} \|\mathbf{B} - \mathbf{S}\mathbf{G}\|_2^2 + \lambda \|\mathbf{G}\|_1 - \frac{1}{2} \|\mathbf{S}\mathbf{G} - \mathbf{S}\mathbf{Z}\|_2^2 + \frac{1}{2} \|\mathbf{G} - \mathbf{Z}\|_2^2 \quad (20)$$

式中: $\mathbf{Z}$ - 第 n 次计算的电导率分布矩阵 $\mathbf{G}^n$,在每次迭代中通过收缩阈值更新 $\mathbf{G}$ 。

其中: $\|\mathbf{S}\|_2 < 1$ 。由此可以得到下式:

$$\begin{aligned} u(\mathbf{G}, \mathbf{Z}) &\geq f(\mathbf{G}) \\ u(\mathbf{Z}, \mathbf{Z}) &= f(\mathbf{Z}) \end{aligned} \quad (21)$$

式(21)中的 $u(\mathbf{G}, \mathbf{Z})$ 可简化为:

$$u(\mathbf{G}, \mathbf{Z}) = \frac{1}{2} \|\mathbf{G} - [\mathbf{Z} + \mathbf{S}^T(\mathbf{B} - \mathbf{S}\mathbf{Z})]\|_2^2 + \lambda \|\mathbf{G}\|_1 + K \quad (22)$$

其中:

$$K = \frac{1}{2} (\|\mathbf{B}\|_2^2 + \|\mathbf{Z}\|_2^2 - \|\mathbf{S}\mathbf{Z}\|_2^2 - \|\mathbf{S}^T\mathbf{B} - \mathbf{S}^T\mathbf{S}\mathbf{Z} + \mathbf{Z}\|_2^2)$$

与 $\mathbf{G}$ 无关,于是式(22)可等价如下式:

$$u^*(\mathbf{G}, \mathbf{G}^*) = \frac{1}{2} \|\mathbf{G} - \mathbf{G}^*\|_2^2 + \lambda \|\mathbf{G}\|_1 \quad (23)$$

其中: $\mathbf{G}^* = \mathbf{Z} + \mathbf{S}^T(\mathbf{B} - \mathbf{S}\mathbf{Z})$, 可得到 ISTA 优化问题的表达式为:

$$\arg \min_{\mathbf{G}} \frac{1}{2} \|\mathbf{G} - \mathbf{G}^*\|_2^2 + \lambda \|\mathbf{G}\|_1 \quad (24)$$

通过求解可得下式:

$$\mathbf{G}^{n+1}(\mathbf{G}^*, \lambda) = \begin{cases} \mathbf{G}^* + \lambda & \mathbf{G}^* < -\lambda \\ 0 & |\mathbf{G}^*| < \lambda \\ \mathbf{G}^* - \lambda & \mathbf{G}^* > \lambda \end{cases} \quad (25)$$

其中: $\mathbf{G}^* = \mathbf{G}^n + \mathbf{S}^T(\mathbf{B} - \mathbf{S}\mathbf{G}^n)$, 根据 Majorization-Minimization 优化框架的流程进行迭代,即可求得灵敏度分布矩阵 $\mathbf{G}$ 。

3 仿真与分析

为了对比混合激励和常规激励条件下不同图像重建算法的金属缺陷成像效果,笔者使用 Ansoft Maxwell 软件^[18]进行仿真实验,根据前文传感器结构的介绍搭建了 6 线圈传感器模型。

仿真模型中的缺陷如图 3 所示。

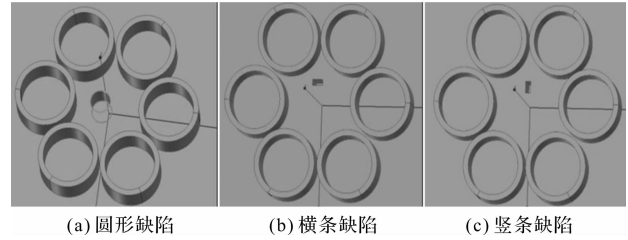


图 3 仿真模型中的缺陷

线圈匝数均为 200, 正弦激励信号的峰值为 5 Vpp、频率为 10 kHz, 传感器线圈内侧为有效检测范围, 分别采用混合激励和单线圈激励来检测圆形缺陷、横条缺陷、竖条缺陷的被测金属, 最后用不同算法进行图像重建。

在仿真实验中, 6 线圈传感器分别使用单线圈激励和混合激励, 使用扰动法获得不同激励下的灵敏度矩阵, 然后分别使用 Tikhonov 正则化算法、改进 Landweber 迭代算法、ISTA, 对不同形状缺陷的测量数据进行图像重建。

仿真数据的重建图像如图 4 所示。

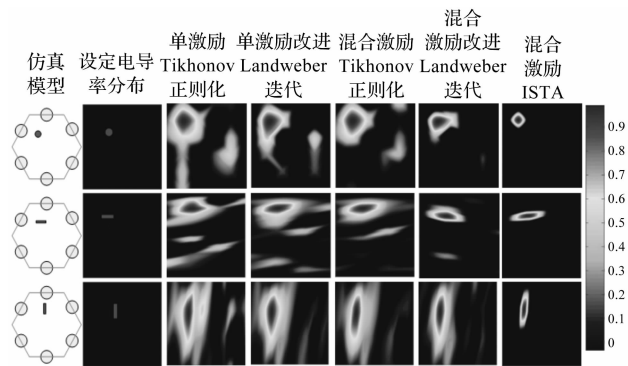


图 4 仿真数据的重建图像

图 4 中, 颜色较深的部分代表缺陷的位置和形状, 不同的颜色代表不同的电导率。可以看出:

(1) 在缺陷相同时, 相同激励下, 改进 Landweber 迭代算法比 Tikhonov 正则化算法成像效果稍微有所改善;

(2) 在缺陷相同时, 使用相同算法, 混合激励的图像重建效果明显比单激励图像完整;

(3)在缺陷相同时,混合激励下,ISTA 效果在 3 种算法中最优。

4 实验验证

为进一步验证仿真实验的结论,笔者根据仿真模型设计了实验 EMT 探伤和成像系统。

系统实物如图 5 所示。

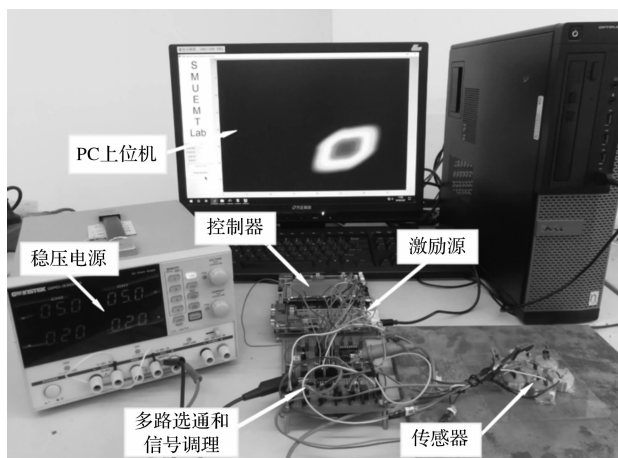


图 5 系统实物

系统具体工作原理如下:

STM32 控制器控制激励源,使其输出峰值为 5 V_{pp}、频率为 10 kHz 的正弦信号,通过信号调理电路进行放大、滤波得到纯净的正弦激励信号,控制器控制多路选通开关,使激励信号施加到相应的激励线圈上,检测线圈因电磁感应产生相应的电压,感应电压经过信号调理电路的整流、滤波作用变成直流信号,送入控制器进行模数转换并获得数字信号,最后通过串口传送给上位机,使用图像重建算法获得被测金属的缺陷情况。

实验中的圆形缺陷半径为 4 mm,长条缺陷宽度为 2 mm,长度为 10 mm,分别采用单独激励和混合激励,最后使用不同图像重建算法获得图像。

实验数据的重建图像如图 6 所示。

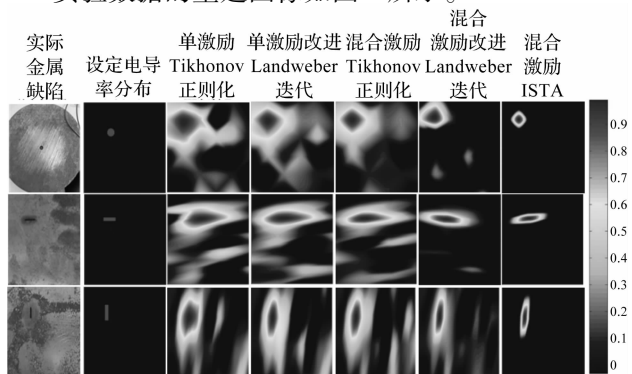


图 6 实验数据的重建图像

图 6 结果显示:在缺陷相同时,使用相同算法,混合激励的重建图像明显优于单激励;而都采用混合激励时,迭代软阈值 (ISTA) 算法图像重建效果最好,由此验证了仿真实验的结论。

为了定量比较两种激励方式和不同图像重建算法的成像效果,笔者引用图像相对误差概念^[19],其计算公式如下:

$$IE = \frac{\|\hat{G} - G\|}{\|G\|} \quad (26)$$

式中:G—设定的物场电导率分布; $\hat{G}$ —计算电导率分布。

实验中重建图像的相对误差如图 7 所示。

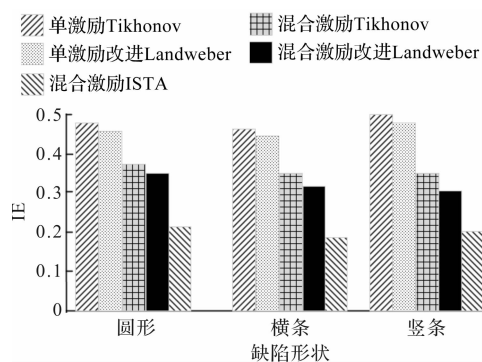


图 7 实验中重建图像相对误差

由图 7 可以看出:在相同缺陷下,使用相同算法时,混合激励的图像重建误差小于单激励;而都采用混合激励时,ISTA 的图像重建相对误差最小。

由此可以证明:在 EMT 系统中,混合激励和迭代软阈值算法能明显改善图像重建效果。

5 结束语

本文采用混合激励的 EMT 金属探伤和成像系统,建立了该激励下的灵敏度矩阵,降低了图像重建逆问题的病态性,增加了系统的容错能力,提高了鲁棒性;然后对比了 Tikhonov 正则化算法、改进 Landweber 迭代算法和迭代软阈值算法 (ISTA);经对比仿真结果可知:在其他条件相同时,混合激励比单线圈激励的图像重建效果好;在其他条件相同时,ISTA 比其余两种算法成像效果完整。

最后笔者搭建了硬件实验平台,使用实物测量的数据经不同图像重建算法进行了比较,验证了仿真实验的结论。

参考文献 (References):

- [1] 林隆荣,伏喜斌,黄学斌,等. 复合材料缺陷的红外热成像

- 检测研究[J]. 机电工程, 2019, 36(6): 628-632.
- [2] WANG Hong-min, WANG Meng. Research on detection method of small size weld bead defects based on reluctance measurement[J]. **IEEE Access**, 2019(7): 164068-164079.
- [3] DANG Chang-ying, GAO Jian-min, Wang Zhao, et al. Multi-step radiographic image enhancement conforming to weld defect segmentation[J]. **IET Image Processing**, 2015, 9(11): 943-950.
- [4] SHEN Zhi-yuan, CHEN Shu-ting, ZHANG Lei, et al. Direct-write piezoelectric ultrasonic transducers for non-destructive testing of metal plates[J]. **IEEE Sensors Journal**, 2017, 17(11): 3354-3361.
- [5] 刘思凯, 王忠旭, 马占云, 等. 碳钢厚板对接焊缝相控阵检测技术与射线检测技术对比[J]. 压力容器, 2017, 34(10): 70-74.
- [6] 周志新. 机械裂纹无损检测方法综述[J]. 机电工程, 2017, 34(10): 1138-1143.
- [7] LIU Ze, LI Wen, XUE Fang-qi, et al. Electromagnetic tomography rail defect inspection[J]. **IEEE Transactions on Magnetics**, 2015, 51(10): 1-7.
- [8] TSUKADA K, HAYASHI M, NAKAMURA Y, et al. Small eddy current testing sensor probe using a tunneling magnetoresistance sensor to detect cracks in steel structures[J]. **IEEE Transactions on Magnetics**, 2018, 54(11): 1-5.
- [9] 刘向龙, 刘 泽, 朱 盛. 电磁层析成像图像重建中的修正 Landweber 迭代算法[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(13): 3971-3980.
- [10] SHI Jun-wei, CAO Xu, LIU Fei, et al. Greedy reconstruction algorithm for fluorescence molecular tomography by means of truncated singular value decomposition conversion[J]. **Journal of the Optical Society of America A: Optics and Image Science**, 2013, 30(3): 437-477.
- [11] XU Feng, DESHPANDE M. Iterative nonlinear tikhonov algorithm with constraints for electromagnetic tomography[J]. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, 2012, 5(3): 707-716.
- [12] 付 妍, 董 峰, 谭 超. 电磁层析成像系统敏感场激励特性仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(8): 73-79.
- [13] XIAO Jun, LIU Ze, Zhao Peng-fei, et al. Deep learning image reconstruction simulation for electromagnetic tomography[J]. **IEEE Sensors Journal**, 2018, 18(8): 3290-3298.
- [14] 汪剑鸣, 杨伟明, 王 琦, 等. 基于平面阵列电磁传感器的金属缺陷检测新方法[J]. 传感技术学报, 2018, 31(1): 6-12.
- [15] 王少峰, 刘朋真, 王建国, 等. 基于小波包熵与 Gabor 小波变换的管道连续型泄漏源定位[J]. 仪表技术与传感器, 2017(9): 98-102.
- [16] 吴俊峰, 牟轩沁, 张砚博. 一种快速迭代软阈值稀疏角CT重建算法[J]. 西安交通大学学报, 2012, 46(12): 24-29.
- [17] REN Bang-yue, HAO Yan-song, WANG Hua-qing, et al. A sparsity-promoted method based on majorization-minimization for weak fault feature enhancement[J]. **Sensors (Basel, Switzerland)**, 2018, 18(4): 1-19.
- [18] 李玉川, 何 敏. 电磁成像金属探伤传感结构激励模式的仿真研究[J]. 机电工程, 2014, 31(7): 828-832.
- [19] 王 琦, 张静薇, 张荣华, 等. 基于贝叶斯统计模型的金属缺陷电磁成像方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(1): 47-55.

[编辑:冯黎雅]

本文引用格式:

孙春光, 何 敏, 曾星星, 等. 基于ISTA的混合激励EMT金属探伤系统研究[J]. 机电工程, 2020, 37(12): 1393-1399.

SUN Chun-guang, HE Min, ZENG Xing-xing, et al. ETM metal detection system based on ISTA in hybrid excitation[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2020, 37(12): 1393-1399.《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>