

DOI: 10.13382/j.jemi.B2104608

EMT 系统在磁性催化物分布检测中的应用^{*}

金 伟 何 敏 庞 薇 姚亚林
(上海海事大学物流工程学院 上海 201306)

摘 要:研究了电磁层析成像技术(EMT)在生物柴油制备过程中磁性催化物的分布检测上的应用。为了能够有效应用磁性催化物的导磁特性,在一种 8 线圈 TMR-线圈结构的传感器阵列的基础上设计了仿真实验,比较了不同粒径大小的催化剂分布的成像结果,研究表明,该线圈结构适用于磁性催化物的分布检测。为了改进传统成像算法成像质量差、成像速度慢的缺点,研究了匹配追踪算法(CoSaMP)在图像重建上的应用,并与传统的 Tikhonov 算法和 Landweber 算法进行比较,结果表明 CoSaMP 算法有更好的边缘处理能力和更快的成像速度,与其他两种算法相比,图像误差平均降低了 30.4%,成像速度提高了 46%,有效提高了重建图像质量与速度。

关键词:电磁层析成像;隧道磁电阻;压缩感知;图像重建

中图分类号: TP23;TN27 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4010

Application of EMT system in magnetic catalysis distribution detection

Jin Wei He Min Pang Wei Yao Yalin
(Logistics Engineering College, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China)

Abstract:The application of electromagnetic tomography (EMT) in the detection of the distribution of magnetic catalysts in biodiesel preparation is studied. Based on a sensor array with 8-coil TMR coil structure, the simulation experiment is designed, and the imaging results of catalysts with different particle sizes are compared. The research shows that the coil structure is suitable for the distribution detection of magnetic catalysts. In order to improve the shortcomings of the traditional imaging algorithm, the application of the matching pursuit algorithm (CoSaMP) in image reconstruction is studied, and compared with the traditional Tikhonov algorithm and Landweber algorithm, the results show that the CoSaMP algorithm has better edge processing ability and faster imaging speed. Compared with the other two algorithms, the image error is reduced by 30.4% on average, and the imaging speed is increased by 46%, which effectively improves the quality and speed of reconstructed image.

Keywords:electromagnetic tomography; tunnel magnetoresistance; compressed sensing; image reconstruction

0 引 言

磁性材料作为一种基础功能材料,其应用范围渗透到人类生产与生活的方方面面^[1],随着绿色环保经济可持续发展的观念逐渐深入人心,磁性材料在工业环保上的应用优势开始显现出来;生物柴油作为一种绿色能源对改善人类生活环境、实现经济可持续发展有着重大的意义,然而在制备生物柴油的催化过程中传统的均性催

化剂不易分离还会产生大量的废酸废碱对环境造成影响,因此现在的工业生产上多采用磁性固体碱催化剂,这种催化剂不仅对设备和环境产生的影响较小还可以多次重复使用^[2-3]。在此背景下,为了能够更好地回收磁性催化剂,对其在生物柴油制备过程中的分布检测就显得尤为重要。

电磁层析成像技术(electrical induction tomography, EMT)是一种基于电磁感应原理的过程层析成像技术,广泛应用于多相流检测、缺陷检测、医学成像等各种行业领

域^[4-6],具有非侵入、无辐射、可视化、响应速度快等优势。近年来,Wang等^[7]首次将磁敏感元件(tunneling magneto resistance, TMR)应用到 EMT 系统中,验证了 TMR-线圈传感器阵列在检测流化床中磁性催化物分布的可行性,在此基础上,本文研究了这种新型 TMR-传感器在生物柴油制备过程中磁性催化物的分布检测上的应用。由于生物柴油使用的磁性固体碱催化剂呈颗粒状,且粒径较小,常为 4~8 mm 不等,因此对于 EMT 重建图像的质量要求较高,此外,为了更好地促进固体新相的生成,需要及时调整催化颗粒的分布,这就需要 EMT 图像重建能够具有一定的快速性。线性反投影算法是最早应用于图像重建的一种算法,它具有算法简单成像速度快等优点,但成像精度较低^[8],为改进图像成像质量,又提出了 Landweber 迭代法^[9]和 Tikhonov 正则化算法^[10],虽然一定程度上提高了图像重建的质量,但是由于 Landweber 算法需要经过多次迭代才能达到极小值点,收敛速度较慢,而 Tikhonov 算法其正则化参数对成像质量的影响较大,具有一定的局限性^[11]。在此背景下,本文将压缩感知算法应用于 EMT 的图像重建上,此类算法可以在远低于 Nyquist 采样频率的情况下,将原始的电磁参数分布重构出来,即只需要很少的测量数据就可以准确成像^[12]。由于 EMT 技术研究相对较晚,目前只有少数学者在此领域对基于压缩感知的图像重建算法进行了研究,如汪剑鸣等^[13]、曾星星等^[14]分别研究了分裂布雷格曼方法(split bregman, SB)算法和空间追踪(subspace pursuit, SP)算法在电磁层析图像重建上的应用。匹配追踪算法(compressive sampling matching pursuit, CoSaMP)也是压缩感知算法的一种,并且由于 CoSaMP 算法在迭代的过程中会剔除一些不相关的列向量所以该算法的收敛速度快,可以极大提高 EMT 系统的成像速度。

本文基于一种新型的磁传感器—TMR 传感器设计了用于检测生物柴油制备过程中磁性固体催化物的分布检测的传感器线圈结构,并且针对经典图像重建算法成像速度慢、成像质量较差的情况,首先论证了压缩感知算法在 EMT 图像重建上的可行性,接着采用 CoSaMP 算法对磁导率分布进行重构成像,并分析在不同尺寸的磁性催化颗粒分布情况下不同的图像重建算法成像质量和速度的差别,验证了 CoSaMP 算法的高效性。

1 EMT 用于磁性固体碱催化剂检测的数学模型

基于 EMT 的磁性固体碱催化剂的检测系统的数学模型如式(1)所示。

$$v = F(\mu) \quad (1)$$

式中: μ 表示磁导率分布; v 表示检测线圈的测量值; F 表

示由系统决定的非线性函数。由于不能确定测量值 v 是否包含在 F 的值域里,所以无法对式(1)进行直接求解,因此可将式(1)用二阶泰勒公式展开为:

$$v = F(\mu_0) + \frac{\partial F}{\partial \mu} \bigg|_{\mu_0} (\mu - \mu_0) + o(\mu - \mu_0) \quad (2)$$

式中: $\frac{\partial F}{\partial \mu}$ 表示灵敏度矩阵,即由被测场磁导率变化引起感应线圈上检测值的变化率; μ_0 代表原始的磁导率分布,即空场时的磁导率分布; μ 为待测的磁导率分布。当被测物场的磁导率分布变化充分小时,式(2)可转化为:

$$v - F(\mu_0) = \frac{\partial F}{\partial \mu} \bigg|_{\mu_0} (\mu - \mu_0) \quad (3)$$

再将被测物场离散化,则对于一个有 m 个独立测量值, n 个有限单元的 EMT 系统可表现为式(4)所示的矩阵形式:

$$\mathbf{B}_{m \times 1} = \mathbf{S}_{m \times n} \mathbf{G}_{n \times 1} \quad (4)$$

式中: $\mathbf{B}$ 为测量的数据向量; $\mathbf{S}$ 为灵敏度矩阵; $\mathbf{G}$ 表示磁导率分布的像素点。

2 EMT 传感器阵列结构和灵敏度矩阵的获取

2.1 传感器阵列结构及 EMT 系统参数设置

传感器结构设置对 EMT 检测系统尤为重要,本文为实现对生物柴油炼化过程中的磁性固体催化剂的分布检测应用了一种八线圈环形 TMR-线圈传感器结构^[15],其在 COMSOL Multiphysics 5.5 中的仿真模型如图 1 所示。

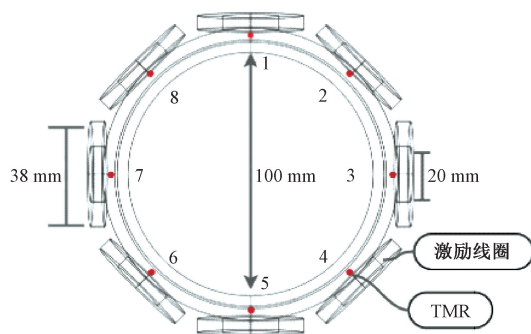


图1 传感器阵列结构

Fig. 1 Sensor structure

图1中圆形成像区域直径为100 mm,编号1~8分别对应8个激励线圈,各线圈的大小形状均相同,线圈内直径为20 mm,外直径为38 mm,线圈高度为5 mm,匝数为200匝,对应的编号为1~8的8个测量点为法向磁感应强度的测量探针,用以模拟 EMT 系统中 TMR 测量敏感轴方向的磁感应强度。

此环形 TMR-线圈传感器仍旧采用传统的单线圈激励模式:在仿真过程中首先让激励线圈 1 激励,记录下 TMR 传感器即图 1 探测点 2~8 处的磁感应强度,接着按照此操作,依次激励线圈 2~8 并记录对应探测点组的磁感应强度值,可得到 $8 \times 7 = 56$ 个独立的磁感应强度测量值,即可获得传感器范围内的磁导率分布情况。

生物柴油主要是由植物油、动物油、废弃油脂转化而成的脂肪酸甲醇或乙醇,这也是 EMT 仿真模型中物场的主要物质来源,针对 EMT 系统在绿色环保上的应用,本文仅考虑将废弃油脂作为生物柴油转化原材料的情况,其电导率约为 0.0054 S/m ,相磁导率为 1,关于磁性固体催化物,其体积较小,粒径在 4 mm 到 8 mm 之间,其电导率约为 $7.02\text{e}^{-4}\text{ S/m}$,相对磁导率为 7 800。其参数如表 1 所示,可以看出原料的导磁特性与磁性催化物的导磁特性差异较大,因此可以通过磁导率分布判断该区域内磁性催化剂的分布情况。

表 1 模型参数设置

Table 1 Model parameter setting

模型参数	电导率(S/m)	相对磁导率	介电常数
生物柴油	0.005 4	1	1
磁性固体催化物	0.000 702	7 800	1

2.2 基于磁导率的灵敏度矩阵的建立

在电磁层析成像技术中,灵敏度矩阵作为图像重建的基础,决定了重建图像质量的优劣,获取灵敏度矩阵的方法一般分为以下 3 种:场量提取法、模拟扰动法和测量扰动法。本文采用的是模拟扰动法来获取灵敏度矩阵。

如图 2 成像区域的二维剖分图所示,在 Comsol 中,将待测物场剖分成 25×25 的网格单元,每个网格代表一个像素点,其中落在圆形物场内的像素个数为 489 个,利用一个半径为 2 mm ,相对磁导率为 7 800 的圆形扰动块来模拟实际系统中据有导磁性的催化剂,在仿真中,此圆形扰动块按照自左向右、自上而下的顺序规则移动,记录下 TMR 传感器的检测数据,按照式(5)求出灵敏度矩阵:

$$S_{i,j} = \frac{B_{i,j}|_k - B_{i,j,empty}}{\Delta\mu}$$

(5)

式中: k 表示成像区域中像素点的编号, i 和 j 分别表示激励线圈的编号和 TMR 编号, $B_{i,j}|_k$ 表示第 k 个像素位置处有圆形扰动物时,全部激励—检测组合下测点的磁感应强度矩阵, $B_{i,j,empty}$ 表示成像区域为空场时,全部激励—检测组合下测点的磁感应强度矩阵, $\Delta\mu$ 表示加入圆形扰动物后,与空场时相比像素点处的相对磁导率的变化量。

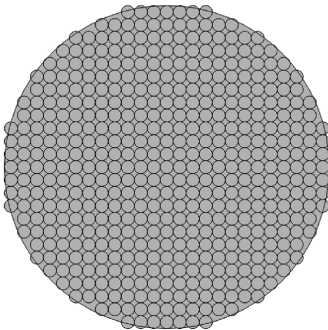


图 2 圆形成像区域的像素剖分图
Fig. 2 A pixel section of a circular imaging region

3 EMT 图像重建

EMT 的图像重建又称为 EMT 的逆问题,其本质是根据检测线圈的测量值和先验灵敏度矩阵,利用图像重建算法重构出被测物场中的电导率和磁导率分布图像。常用的 EMT 图像重建算法包括线性反投影算法、Tikhonov 正则化算法等非迭代类算法和 Landweber、共轭梯度算法等迭代类算法,而压缩感知算法作为近年来发展起来的新的图像重建算法,能够以远低于 Nyquist 采样频率^[16]实现对目标信号的重构,因此尤其适合解决 EMT 系统这种由于传感器结构的限制而不能采集足够的先验数据的情况。

3.1 压缩感知算法在 EMT 图像重建上的应用

压缩感知理论(compressed sensing, CS)是 Donoho 等^[17]提的一种新的信息获取理论:如果信号在某个变换域是稀疏的,那么只需要少量的信号采样就可以精确恢复出原始信号。压缩感知理论主要涉及 3 个方面:信号的稀疏表示、观测矩阵的选取和信号重构这 3 个部分。

信号的稀疏表示定义为:将 n 维的采样信号 s 投影到某种新的变换基下时,得到的新的信号 x 的非零项的数量远远少于原始信号的个数,可用式(6)表示:

$$s = \psi x$$

(6)

式中: s 表示 n 维的原始信号,稀疏基 $\psi \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 是一个正交矩阵, x 的非零元素数量为 $k(k \ll n)$,也可称信号 x 是 k 稀疏的。

接着通过选择观测矩阵 $\Phi \in \mathbb{R}^{m \times n}$,将高维信号 x 投影到低维空间,得到观测值 y :

$$y = \Phi s = \Phi \psi x = Ax$$

(7)

式中: A 表示 $m \times n$ 的感知矩阵,满足约束等距性质(restricted isometry property, RIP)^[18],即:

$$(1 - \delta_k) \|x\|_2^2 \leq \|Ax\|_2^2 \leq (1 + \delta_k) \|x\|_2^2$$

(8)

式中: $\delta_k \in (0, 1)$ 表示观测矩阵 Φ 的约束等距常数。

信号重构是压缩感知中最重要的一步,信号重构的

过程就是利用重构算法重构出原始信号的过程。由于式(9)是一个欠定方程,无法直接求解,通常将它转化为最小 l_0 范数优化问题,即:

$$\hat{x} = \operatorname{argmin} \|x\|_0, t, y = Ax \quad (9)$$

式中: $\|x\|_0 = \sum_{i=1}^n |x_i|^0$ 。

直接求解式(9)是一个 NP-hard 问题,因此最小 l_1 范数法、匹配追踪算法、迭代阈值法等重构算法相继被提出。

在生物石油制备过程中,其磁性催化剂通常呈稀疏分布,分散在多个区域中,在此背景下,可将压缩感知技术应用在 EMT 的图像重建上。

根据压缩感知理论中信号稀疏表示原理,将 EMT 中需要重建的磁导率分布 G 视为待重构的原始信号,本文选取离散余弦变换基(DCT)对此信号做稀疏处理:

$$G = \Psi_{DCT} x \quad (10)$$

式中:

$$\Psi_{DCT} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{n}} & \frac{1}{\sqrt{n}} & \cdots & \frac{1}{\sqrt{n}} \\ \frac{2}{\sqrt{n}} & \frac{2}{\sqrt{n}} & \cdots & \frac{2}{\sqrt{n}} \\ \frac{2}{\sqrt{n}} \cos \frac{\pi}{2n} & \frac{2}{\sqrt{n}} \cos \frac{\pi}{2n} & \cdots & \frac{2}{\sqrt{n}} \cos \frac{\pi}{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{2}{\sqrt{n}} \cos \frac{(k-1)\pi}{2n} & \frac{2}{\sqrt{n}} \cos \frac{(k-1)\pi}{2n} & \cdots & \frac{2}{\sqrt{n}} \cos \frac{(k-1)\pi}{2n} \end{bmatrix} \quad (11)$$

由于灵敏度矩阵 S 本身就具有较高的随机性^[19],因此感知矩阵 $\lambda = S\Psi_{DCT}$ 满足约束等距特性,因此可将 EMT 中的灵敏度矩阵 视为压缩感知中的观测矩阵,则在 EMT 系统中,式(7)可变换为:

$$B = SG = S\Psi_{DCT} x = \lambda x \quad (12)$$

式中: B 表示经过稀疏处理后的磁导率信号 G ,在观测矩阵 S 的作用下得到的更低维的测量数据向量。

EMT 逆问题可转化为对式(12)的求解,本文选用匹配追踪算法对式(12)进行间接求解。

3.2 CoSaMP 算法

匹配追踪算法又称 CoSaMP 算法是用于压缩感知的迭代类算法,在算法中引入了“回溯”思想,计算信号残差与感知矩阵包含原子的相关性,并从中挑选出最大的 $2K$ 个列向量来扩充支撑集,并剔除一些不相关的列向量以提升算法的收敛速度,最后通过不断迭代求解最终的支撑集,CoSaMP 算法具体步骤如下:

输入:感知矩阵 $\lambda = S\Psi_{DCT}$,测量向量 B ,稀疏度 K ;

输出:系数估计 $\hat{x}$,残差 γ ;

初始化:信号残差 $\gamma^{(0)} = B$,初值 $x^{(0)} = 0$,索引集合 $\Lambda^{(0)} = \phi$,迭代次数 $t = 1$;

1):计算残差 $\gamma^{(t-1)}$ 和感知矩阵 $S\Psi_{DCT}$ 的内积: $\text{abs}[(S\Psi_{DCT})^T \gamma^{(t-1)}]$,选择 $2K$ 个最大值,将对应的序列号 j 构成 J_{2K} ;

2)更新索引集 $\Lambda^{(t)} = \hat{\Lambda}^{(t-1)} \cup \{J_{2K}\}$,更新重建原子集合: $\lambda_{\Lambda^{(t)}} = \lambda_{\Lambda^{(t-1)}} \cup \{\lambda_{J_{2K}}\}$;

3)由最小二乘法得到: $\hat{x}^{(t)} = \operatorname{argmin} \|B - \lambda_{\Lambda^{(t)}} \hat{x}^{(t)}\| = (\lambda_{\Lambda^{(t)}}^T \lambda_{\Lambda^{(t)}})^{-1} \lambda_{\Lambda^{(t)}}^T B$;

4)从 $\hat{x}^{(t)}$ 中挑选出绝对值最大的 K 项记为 $\hat{x}^{(tK)}$, $\lambda_{\Lambda^{(t)}}$ 中的 K 项列序号记为 $\Lambda^{(tK)}$,对应的 K 个列向量记为 $\lambda_{\Lambda^{(tK)}}$;

5)更新残差: $\gamma^{(t)} = B - \lambda_{\Lambda^{(tK)}} \hat{x}^{(tK)}$,并且 $t = t + 1$;

6)若 $t > K$,或残差为0,即 $\gamma^{(t)} = 0$,则停止迭代,输出重构信号 $\hat{G} = \Psi_{DCT} \hat{x}$,若 $t \leq K$,则跳转到1)。

输出的 $\hat{G}$ 表示 G 的稀疏逼近,即所求式(4)的解。

4 仿真结果分析

为验证算法的有效性,本文在 COMSOL Multiphysics 中模拟了生物柴油炼化过程中处于不同位置的磁性催化剂分布情况,并用 Tikhonov 算法、Landweber 迭代法和 CoSaMP 算法对其分别成像。

本文将磁性催化物在生物柴油制备过程中的分布情况分为两种,分别是分散型分布和聚集型分布,分散型分布指的是磁性催化物均匀散落在反应器的各处,聚集型分布指的是的催化物集中分布在反应器的某个位置。由于催化物颗粒的粒径不均匀,本文研究了催化物粒径为 4 mm 和 8 mm 时的分布情况,具体位置分布和成像结果如图 3 所示,仿真模型由上到下编号分别为 1~6,其中仿真模型平面图中的小圆代表圆球状催化物,编号 1~3 的半径均为 2 mm,编号 4~6 的半径为 4 mm,编号 2、5 为聚集型分布,其余为分散型分布。

观察图 3 可以得知,磁性催化剂的位置分布都可以基于 3 种算法来检测,然而直观来看,不论是粒径为 4 mm 的催化剂还是粒径为 8 mm 的催化剂分布,CoSaMP 算法的成像结果伪影最少,并且对催化剂的位置形状还原也最好,说明 CoSaMP 算法相较于其他两种算法有较好的边缘处理能力,方便后续对催化剂形状及质量的监测。

在图 3 的重建图像中,颜色较亮部分表示存在磁性物体的区域,颜色较深部分表示生物柴油分布区域,图片亮部周围的阴影则是由于噪声和算法引入的伪影。为了

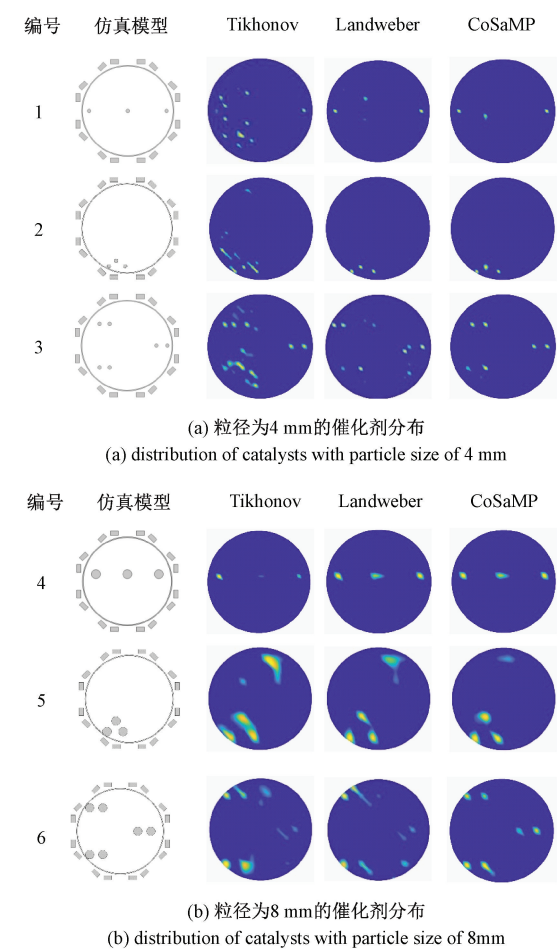


图 3 6 种模型的重建结果

Fig. 3 Reconstruction results of six models

定量评价算法性能,本文使用图像相对误差^[20](relative error, RE)对成像质量进行评价,其计算公式如下:

$$RE = \frac{\| G^* - G \|}{\| G \|} \tag{13}$$

式中: G^* 为磁导率的计算分布, G 表示磁导率的实际分布。

各个模型在 3 种重建算法下成像的相对误差比较如图 4 所示,相较于其他两种算法,用 CoSaMP 算法重建的图像有更小的相对误差,由此可证明 CoSaMP 算法在成像质量上的优越性。表 2 为 3 种算法为了得到图 4 成像结果所需的成像时间,从表中可以看出 Landweber 算法由于需要多次迭代,因此在成像上所需要的时间最长,而 CoSaMP 算法在迭代过程中舍弃不相关原子来提升收敛速度,因此所需的迭代时间较短,成像速度是 3 种算法中最快的,因此更加适用于生物柴油制备过程中的催化剂分布检测。

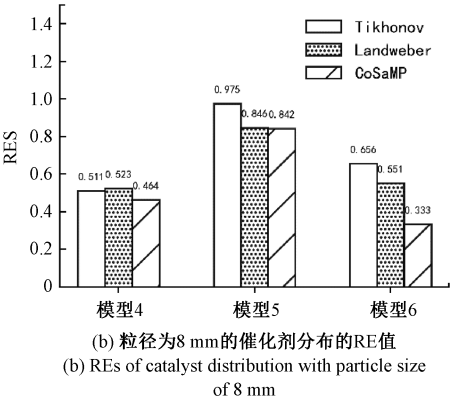
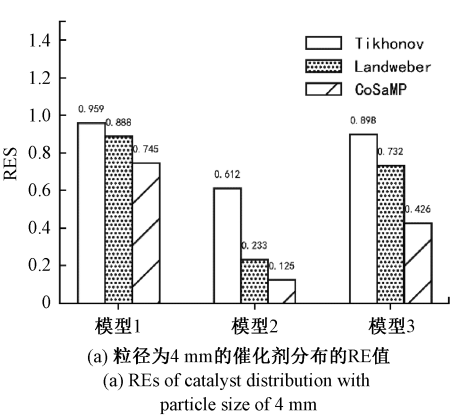


图 4 不同算法下成像的相对误差

Fig. 4 Relative error of imaging under different algorithms

表 2 不同算法的成像时间

Table 2 Imaging time of different algorithms (s)

模型	Tikhonov	Landweber	CoSaMP
模型 1	2.15	3.24	1.25
模型 2	2.11	3.35	1.26
模型 3	2.33	3.25	1.73
模型 4	2.26	3.21	1.46
模型 5	2.35	3.21	1.43
模型 6	2.33	3.19	1.52

5 结 论

本文研究了 EMT 技术在生物柴油炼化过程中磁性固体催化物的分布检测上的应用,由于生物柴油和磁性催化物的导电特性相似,无法根据检测物场的导电性分布测出磁性催化物的分布位置,转而设计了一种 8 线圈 TMR-线圈结构的传感器阵列,利用在 Comsol 软件上进行的仿真实验验证了该传感器阵列的有效性。基于 CoSaMP 算法,实现了生物柴油制备过程中对不同尺寸磁性催化物分布检测的可视化,仿真结果表明,与传统的 Tikhonov 正则化算法和 Landweber 迭代算法相比 CoSaMP 算法的成像结果伪影更少,说明该算法有更好的边缘处

理能力,成像质量更好,并且由于在迭代过程中去除相关性小的原子,CoSaMP 算法相较于其他两种算法收敛速度更快,能够有效提高检测的准确性和快速性。下一步将深入研究 TMR-线圈结构的传感器阵列,将激励线圈同样作为检测线圈,与 TMR 的检测线圈结合起来共同构建灵敏度矩阵,同时进一步优化成像算法,提高检测质量和速度。

参考文献

- [1] 赵国平,莫尊理,王博,等. 磁性 Fe₃O₄ 纳米复合材料的研究进展[J]. 化工新型材料, 2015, 43(6): 10-13.
ZHAO G P, MO Z L, WANG B, et al. Research progress of magnetic Fe₃O₄ nanocomposites[J]. New Chemical Materials, 2015, 43(6): 10-13.
- [2] 田龙,鲁云凤. 生物柴油的超声波辅助固体碱催化制备研究[J]. 太阳能学报, 2017, 38(10): 2712-2716.
TIAN L, LU Y F. Biodiesel preparation through solid base catalyst under ultrasonic assistant [J]. Acta Energetica Sinica, 2017, 038(10): 2712-2716.
- [3] 朱向阳,倪善,毕秦岭,等. 铁氧体磁性纳米催化剂的制备及其在资源能源领域的应用[J]. 化学进展, 2019, 31(Z1): 381-393.
ZHU X Y, NI SH, BI Q L, et al. Preparation of ferrite magnetic nano-catalysts and their applications in the field of resources and energy[J]. Progress in Chemistry, 2019, 31(Z1): 381-393.
- [4] MA L, HUNT A, SOLEIMANI M. Experimental evaluation of conductive flow imaging using magnetic induction tomography [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2015, 72: 198-209.
- [5] 王成飞,刘泽,霍继伟,等. 电磁层析高铁空心轴缺陷检测方法研究[J]. 国外电子测量技术, 2020, 39(6): 132-136.
WANG CH F, LIU Z, HUO J, et al. Research on defect detection method for high-speed train hollow shaft by electromagnetic tomography [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2020, 39(6): 132-136.
- [6] DELUSSI M, NAZZARO V, RICCI K, et al. EEG functional connectivity and cognitive variables in premanifest and manifest huntington's disease: EEG low-resolution brain electromagnetic tomography (LORETA) study[J]. Frontiers in Physiology, 2020: 1655.
- [7] WANG C, HE H, CUI Z, et al. A novel EMT system based on TMR sensors for reconstruction of permeability distribution[J]. Measurement Science and Technology, 2018, 29(10): 104008.
- [8] SUN B, YUE S, CUI Z, et al. A new linear back projection algorithm to electrical tomography based on measuring data decomposition[J]. Measurement Science & Technology, 2015, 26(12): 125402.
- [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.
LIU X L, LIU Z, ZHU SH. The modified Landweber iteration algorithm in the reconstruction of electromagnetic tomography image reconstruction[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(13): 3971-3980.
- [10] 温丽梅,周苗苗,李明,等. 改进的 Tikhonov 正则化图像重建算法[J]. 计量学报, 2018(5): 679-683.
WEN L M, ZHOU M M, LI M, et al. Improved Tikhonov regularization method for image reconstruction[J]. Jiliang Xuebao/Acta Metrologica Sinica, 2018, 39(5): 679-683.
- [11] LIU X, LIU Z. A novel algorithm based on L1-Lp norm for inverse problem of electromagnetic tomography [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2019, 65: 318-326.
- [12] 许佳薇,韩军,丁良华. 改进的压缩感知红外图像去噪算法[J]. 电子测量技术, 2021, 44(5): 107-111.
XU J W, HAN J, DING L H. Improved compressed sensing infrared image denoising algorithm [J]. Electronic Measurement Technology, 2021, 44(5): 107-111.
- [13] 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.
WANG J M, YANG W M, WANG Q, et al. a new method for detecting metal defects based on planar array electromagnetic sensor [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2018, 31(1): 6-12.
- [14] 曾星星,何敏,张健,等. EMT 用于金属结构裂纹图像重建的仿真研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(1): 186-192.
ZENG X X, HE M, ZHANG J, et al. Simulation study on EMT image reconstruction of metal structure flaw[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(1): 186-192.
- [15] 王超,邹萍,崔自强,等. 基于 TMR 的磁导率 EMT 的传感器阵列设计[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2019, 52(6): 5-13.
WANG CH, ZOU P, CUI Z Q, et al. Design of an EMT-TMR sensor array for the measurement of magnetic permeability[J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2019, 52(6): 5-13.
- [16] YAN H, WANG Y, WANG Y F, et al. Electrical capacitance tomography image reconstruction by improved

- orthogonal matching pursuit algorithm [J]. IET Science Measurement & Technology, 2020, 14(3): 367-375.
- [17] DONOHO D L. Compressed sensing [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 52(4): 1289-1306.
- [18] CANDLES E J. The restricted isometry property and its implications for compressed sensing [J]. Comptes Rendus Mathématique, 2008, 346(9-10): 589-592.
- [19] 张立峰, 刘昭麟, 田沛. 基于压缩感知的电容层析成像图像重建算法[J]. 电子学报, 2017, 45(2): 353-358.
ZHANG L F, LIU ZH L, TIAN P. Image reconstruction algorithm for electrical capacitance tomography based on compressed sensing [J]. Acta Electronica Sinica, 2017, 45(2): 353-358.
- [20] 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.
WANG Q, ZHANG J W, ZHANG R H, et al. Research on electromagnetic imaging of metal defects based on the Bayesian statistical model [J]. Chinese Journal of

Scientific Instrument, 2020, 41(1): 47-55.

作者简介



金伟 (通信作者), 2019 年于南京林业大学获得学士学位, 现为上海海事大学硕士研究生, 主要研究方向为电磁层析成像技术。

E-mail: 2422194262@qq.com

Jin Wei (Corresponding author) received her B. Sc. degree from Nanjing Forestry University in 2019. Now she is a M. Sc. student at Shanghai Maritime University. Her main research interest includes electromagnetic tomography technology.



何敏, 2002 年于天津大学获得博士学位, 现为上海海事大学教授, 主要研究方向为电磁层析成像技术。

E-mail: minhe@shmtu.edu.cn

He Min received her Ph. D. degree from Tianjin University in 2002. Now she is a professor at Shanghai Maritime University. Her main research interest includes electromagnetic tomography technology.