

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2415788

# 碳纤维拉索缺陷的电磁层析成像有限元仿真<sup>\*</sup>

张苏嘉<sup>1,2</sup> 苏益凡<sup>1,2</sup> 周伟<sup>1,2</sup> 陈辰<sup>1,2</sup> 韩金保<sup>1,2</sup>

(1. 河北大学质量技术监督学院 保定 071002; 2. 河北大学计量仪器与系统国家地方联合工程研究中心 保定 071002)

**摘要:** 碳纤维复合材料具有高比强度、高比刚度、耐腐蚀和抗疲劳等优点,是大跨度结构拉索的理想型材料。本文基于电磁层析成像技术采用有限元方法对碳纤维拉索的断股和脱粘缺陷进行仿真研究,设计了一种8线圈圆周型传感器阵列,探究了传感器尺寸、激励电流大小与磁感应强度的关系,根据仿真电磁信号研究了LBP算法、Tikhonov算法和Landweber算法3种重建算法对不同拉索缺陷重建图像质量的影响。结果表明,在研究范围内随着传感器线圈直径的减小和激励电流的增大,磁感应强度逐渐增大,并在线圈直径为5 mm和激励电流为1 A时达到最大值;与其他图像重建方法相比,Tikhonov算法能够更好的平衡图像重建效果和成像质量,更适用于碳纤维拉索缺陷检测图像的重建过程。此外,在传感器阵列固定的情况下将拉索缺陷旋转,分析了不同投影角度对缺陷成像效果的影响。本研究旨在为实验条件下碳纤维拉索的传感器阵列设计和缺陷检测成像提供参考依据。

**关键词:** 电磁层析成像;碳纤维拉索;有限元仿真;传感器阵列;图像重建

**中图分类号:** TP391; TN06   **文献标识码:** A   **国家标准学科分类代码:** 520.6020

## Finite element simulation of electromagnetic tomography for defects in carbon fiber cables

Zhang Sujia<sup>1,2</sup> Su Yifan<sup>1,2</sup> Zhou Wei<sup>1,2</sup> Chen Chen<sup>1,2</sup> Han Jinbao<sup>1,2</sup>

(1. School of Quality and Technical Supervision, Hebei University, Baoding 071002, China; 2. National &amp; Local Joint Engineering Research Center of Metrology Instrument and System, Hebei University, Baoding 071002, China)

**Abstract:** Carbon fiber composites have excellent properties such as high specific strength, high specific stiffness, corrosion resistance and fatigue resistance, which are ideal construction materials for large-span structural cables. In this paper, a simulation study of broken strands and debonding in carbon fiber cables was carried out using the finite element method based on the electromagnetic tomography technique, and an 8-coil circumferential sensor array was designed to investigate the relationship between the sensor dimension, the magnitude of the excitation current and the magnetic induction intensity. The effects of three reconstruction algorithms, LBP algorithm, Tikhonov algorithm and Landweber algorithm, on the quality of reconstructed images of different cables defects were investigated based on the simulated electromagnetic signals. The results show that as the diameter of the sensor coils decreases and the excitation current increases within the studied range, the magnetic field intensity progressively increases. When the diameter of the sensor coils is 5 mm and the excitation current is 1 A, the magnetic field intensity reaches its maximum value. Compared with other image reconstruction methods, the Tikhonov is suitable for the reconstruction process of defect detection images in carbon fiber cables due to Tikhonov algorithm can better balance the image reconstruction effect and imaging quality. In addition, the effect of different projection angles on defect imaging was analyzed by rotating the cable defect with a fixed sensor array. The study aims to provide a reference basis for the design of sensor arrays and defect detection imaging of carbon fiber cables under experimental conditions.

**Keywords:** electromagnetic tomography; carbon fiber cables; finite element simulation; sensor array; image reconstruction

## 0 引言

传统钢索由于其自重较大,已成为制约斜拉桥跨度提

升的关键因素,此外,钢索长期受空气环境温度与湿度等作用容易出现腐蚀损伤。碳纤维复合材料(carbon fiber reinforced polymer, CFRP)因其比强度和比刚度高、耐腐

蚀、抗疲劳等性能优异,被广泛应用于风电、航空航天、能源、汽车等诸多领域。碳纤维拉索在延长桥梁服役寿命和降低全周期投资等方面表现出巨大的潜力,已在国内外一些中小跨度桥梁中成功应用,并在大跨度桥梁中有着广阔的应用前景<sup>[1-4]</sup>。在碳纤维拉索服役过程中,受到疲劳和外部冲击等载荷的影响,可能会出现断股和脱粘等损伤,对拉索的结构完整性造成潜在的影响,甚至会导致断索等严重事故。因此,为保证碳纤维拉索服役期间的可靠性,开展合适的拉索损伤的无损检测研究十分重要。

目前,常见的复合材料检测手段有声发射、超声检测、红外热成像检测和射线检测等<sup>[5-8]</sup>。但上述方法对在役碳纤维拉索的实际检测中存在一定的局限性,例如,声发射能够检测和评价整个结构中缺陷的状态,但受环境噪声影响较大;超声检测能有效检测材料内部的分层缺陷,但需要大量耦合剂以传输超声波;红外热成像检测能够实现远距离的非接触检测,但容易受环境温度影响。电磁层析成像(electromagnetic tomography, EMT)作为一种基于电磁感应原理的新型无损检测技术,具有成本低、非接触和可视化等优点<sup>[9]</sup>,可用于材料表面及近表面缺陷的动态监测及静态检测。因此,基于上述检测方法特点和碳纤维拉索服役条件,本文提出基于电磁层析成像技术的碳纤维拉索缺陷检测方法。

近年来,电磁层析成像技术在材料检测方面得到了有效发展,Yue等<sup>[10]</sup>采用单层传感器阵列,结合Z轴不同层截面的灵敏度矩阵,采用全变差正则化算法,实现了金属位置的三维检测。王成飞等<sup>[11]</sup>采用一种内外两层电磁线圈传感器阵列,对高铁空心轴内壁与外壁缺陷进行了电磁层析成像检测,并通过仿真与实验验证了该方法的可行性。曾星星等<sup>[12]</sup>将电磁层析成像技术应用于港机金属结构裂纹成像,提出了一种稀疏重建方法,通过仿真验证了该算法的优越性。Ma等<sup>[13]</sup>使用U型传感器阵列,对碳纤维缠绕氢气瓶罐多种类型的缺陷进行了电磁层析成像检测,并通过实验验证了该方法的可行性。然而,目前关于电磁层析成像的损伤检测研究大多集中于金属材料,对于碳纤维复合材料的研究较少。

在电磁层析成像系统中,传感器阵列的设计与检测对象相关,同时又决定了检测电磁信号的质量,对缺陷成像效果有显著影响。此外,根据测量值,通过图像重建算法能够实现被测物场空间的可视化。因此,选择合适的重建算法是物场空间重构的另一关键因素。王琦等<sup>[14]</sup>设计了一种新型的平面电磁层析成像传感器,并提出了基于L1正则化的稀疏成像算法,实现了铝板缺陷的精确定位。Wang等<sup>[15]</sup>通过对矩形传感器阵列与“O”型传感器阵列对平面缺陷成像的质量,发现矩形传感器阵列更适用于平面缺陷检测。Ma等<sup>[13]</sup>提出了一种复合灵敏度矩阵电磁成像方法,并将该方法应用于碳纤维缠绕氢气瓶罐缺陷的检测。徐笑等<sup>[16]</sup>提出了一种阵列旋转和改进D-S证据理论相结合

的平面电磁层析成像图像融合算法,通过对铝板缺陷进行检测,验证了该方法的有效性。

本文基于电磁层析成像技术采用有限元方法对碳纤维拉索缺陷进行仿真研究。采用控制变量法,确定线圈阵列尺寸及磁激线圈的电流,并采用不同图像重建算法对单一及多缺陷的拉索进行电磁信号成像,探究适用于碳纤维拉索的图像重建算法。同时,在传感器阵列固定的情况下将拉索缺陷旋转,分析缺陷与传感器存在不同投影角度时的成像效果。

## 1 电磁层析成像检测理论基础及仿真模型

### 1.1 电磁层析成像理论基础

电磁层析成像技术以电磁感应原理为基础,能够重建出被测空间中具有电导率或磁导率物质的分布信息。当电磁层析成像电磁场遵循稳态场变化规律且符合二维场分布,同时被测物质满足线性和各向同性要求时,电磁层析成像的电磁场物理模型满足式(1)的麦克斯韦方程组<sup>[11]</sup>:

$$\left\{ \begin{array}{l} \nabla \cdot \mathbf{H} = \sigma \mathbf{E} + j\omega \epsilon \mathbf{E} \\ \nabla \cdot \mathbf{E} = -j\omega \mathbf{B} \\ \nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \\ \nabla \cdot \mathbf{D} = 0 \end{array} \right. \quad (1)$$

式中: $\mathbf{H}$ 为磁场强度; $\mathbf{E}$ 为电场强度; $\mathbf{B}$ 为磁通密度; $\mathbf{D}$ 为电位移; $\omega$ 为角频率; $\epsilon$ 为介质的介电常数; $\sigma$ 为介质的电导率。

引入磁矢量势 $\mathbf{A}$ 求解电磁层析成像正演问题满足式(2):

$$\nabla \cdot \mathbf{A} = \mathbf{B} \quad (2)$$

将 $\mathbf{A}$ 代入式(1),可得式(3):

$$\frac{1}{\mu} \nabla^2 \mathbf{A} - j\omega \sigma \mathbf{A} = -\mathbf{J}_s \quad (3)$$

式中: $\mathbf{J}_s$ 为激励电流密度。利用有限元方法可以求解出矢量磁位 $\mathbf{A}$ 和磁感应强度 $\mathbf{B}$ 。

检测线圈输出的感应电压表达式为:

$$U = -\frac{d\varphi}{dt} = -n \frac{d(BS)}{dt} = -n \frac{d(Al)}{dt} = -n\omega l(\mathbf{A}_1 - \mathbf{A}_2) \quad (4)$$

式中: $\varphi$ 为通过检测线圈的磁通量; $n$ 、 $S$ 、 $l$ 分别为线圈匝数、横截面积及沿轴线的长度; $t$ 为时间; $\mathbf{A}_1$ 和 $\mathbf{A}_2$ 分别为检测线圈两端点处的磁矢位值。

### 1.2 碳纤维电导率张量

碳纤维复合材料的导电性主要由碳纤维控制,其电导率与纤维分布及纤维之间接触形成的导电通路有关。与其他各向同性材料相比,碳纤维复合材料各方向电导率不同,且差异较大,使碳纤维材料呈明显的电各向异性,其电导率可表示为三阶张量的形式,如式(5)所示。

$$\boldsymbol{\sigma} = \begin{pmatrix} \sigma_L \cos^2 \theta + \sigma_L \sin^2 \theta & \frac{\sigma_L - \sigma_T}{2} \sin(2\theta) & 0 \\ \frac{\sigma_L - \sigma_T}{2} \sin(2\theta) & \sigma_L \sin^2 \theta + \sigma_L \cos^2 \theta & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{CP} \end{pmatrix} \quad (5)$$

式中:  $\sigma_L$  为沿纤维方向电导率;  $\sigma_T$  为垂直纤维方向电导率;  $\sigma_{CP}$  为厚度方向电导率;  $\theta$  为纤维方向与参考  $x$  轴夹角。本研究中的碳纤维平行棒索通常采用拉挤成型工艺制成, 属于单向复合材料, 其纤维均沿  $x$  轴向排列, 其垂直纤维方向电导率与厚度方向电导率相等。因此, 为简化碳纤维拉索的电导率分布, 将其等效为连续各向异性材料, 设定其电导率为  $(\sigma_L, \sigma_T, \sigma_{CP}) = (10000, 100, 100) \text{ S/m}^{[17]}$ 。

### 1.3 传感器阵列及碳纤维拉索仿真模型

在有限元仿真软件中建立圆周型线圈传感器阵列和碳纤维拉索模型, 仿真模型三维结构示意图如图 1(a)所示。该模型中深灰色部分表示圆形传感器线圈及骨架, 浅灰色部分表示碳纤维拉索, 在拉索周围分布完全对称的 8 组圆形铜质线圈, 对线圈按顺时针分别进行编号(线圈 1~8)。碳纤维拉索模型的建立以实际工程尺寸为基础, 由 7 根半径为 3.5 mm 的碳纤维筋组成。成像区域半径为 11 mm, 用于表征碳纤维拉索缺陷的情况。预制的碳纤维拉索缺陷类型有断股和脱粘, 如图 1(b)所示。其中断股缺陷为表面缺陷, 宽度为 2 mm, 深度为 1 mm。脱粘缺陷为距离表面 1 mm 处的近表面缺陷, 宽度为 3 mm, 深度为 1 mm。

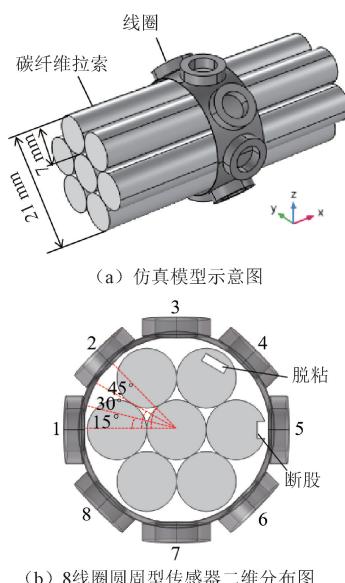


图 1 碳纤维拉索及传感器阵列仿真模型

## 2 传感器设计及正问题数据仿真分析

### 2.1 传感器参数对磁感应强度影响

线圈激励电流强度与线圈的直径是影响电流元磁感应

强度的重要因素。为了确定激励电流大小, 在线圈直径为 5 mm 的条件下, 控制电流在 0.2~1 A 范围内以 0.2 A 等间距递增变化, 得到沿线圈轴线方向碳纤维拉索内部的磁感应强度变化曲线, 如图 2 所示。同时, 为了得到适合本研究线圈的直径尺寸, 设置线圈激励电流 1 A, 控制线圈直径在 5~8 mm 范围内以 1 mm 等间距递增变化, 得到沿线圈轴线方向碳纤维拉索内部磁感应强度曲线, 如图 3 所示。

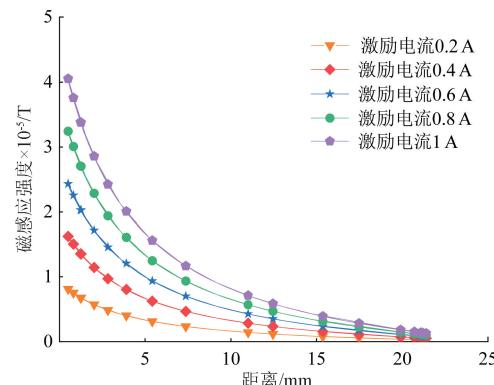


图 2 不同电流磁感应强度变化曲线

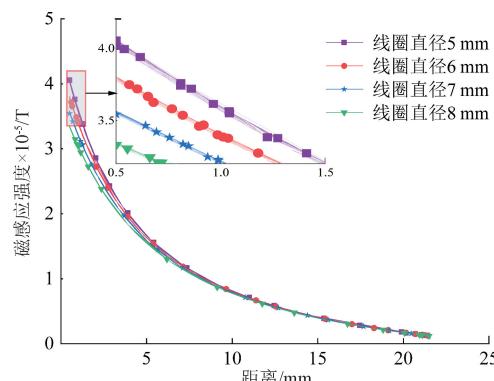


图 3 不同直径磁感应强度变化曲线

图 2 和 3 为激励电流与线圈直径变化时, 沿线圈轴线方向的磁感应强度变化情况。由图 2 可知, 磁感应强度沿线圈轴线方向在拉索内部呈指数衰减, 当线圈直径一定时, 激励电流越大, 磁感应强度的值越大, 与线圈轴线方向的距离从 0.5 mm 增加到 21.5 mm 时, 电流对磁感应强度的影响趋势由大变小, 最终趋于 0。同样的, 由图 3 可知, 当激励电流一定时, 线圈直径越小, 磁感应强度的值越大; 随着沿线圈轴线方向距离的增加, 直径大小对磁感应强度的影响逐渐减小。因此, 在实际检测中, 应根据检测对象的尺寸特征, 选择合适的激励电流及线圈直径。根据碳纤维拉索结构特征及上述仿真分析, 确定传感器参数为: 线圈直径 5 mm, 线圈高度 1.5 mm, 匝数 150, 激励电流 1 A, 激励频率为 1 MHz。

### 2.2 电压检测数据仿真研究

本研究选取单线圈循环激励模式, 即选取 1 个线圈作

为激励线圈, 其他线圈分别作为检测线圈, 将激励电流注入激励线圈, 在目标物体表面及附近产生涡流, 测量其余线圈的感应电压值, 依次进行循环检测。在无缺陷拉索及含断股缺陷拉索的物场中, 8个线圈进行循环激励和循环检测, 分别得到  $8 \times 7 = 56$  个感应电压值, 如图 4(a) 所示。以线圈 1 为激励线圈为例, 其余 7 个线圈为检测线圈, 得到的拉索的感应电压值, 如图 4(b) 所示。由于激励线圈与检测线圈位置存在偏差, 距离激励线圈较近的检测线圈磁场强度大, 感应电压值较大, 距离较远时感应电压值较小, 因此, 感应电压值的整体呈现出“U”型曲线。此外, 从图中还可以看出, 由于无缺陷拉索与含断股缺陷拉索对敏感场的响应不同, 因此, 基于响应特性的差异可以利用图像重建算法实现拉索缺陷的可视化。

### 2.3 灵敏度矩阵仿真研究

灵敏度矩阵反映了物场内电磁场随待测场内物质电导率或磁导率变化的影响情况, 是电磁层析成像正问题研究的主要内容之一, 也是逆问题中图像重建的基础和必要条件, 灵敏度的精确程度直接影响图像重建的质量。本文采用场量提取法<sup>[18]</sup>来获取灵敏度矩阵, 具体方法是在仿真软件模拟物场信息, 对空场进行有限元剖分, 将物场剖分成  $n$  个单元, 计算单个线圈激励情况下各剖分单元的磁场参数。电导率求解灵敏度矩阵如式(6)所示。

$$\mathbf{S} = -\omega^2 \mathbf{A}_A \mathbf{A}_B \quad (6)$$

式中:  $\omega$  为激励频率,  $\mathbf{A}_A$  和  $\mathbf{A}_B$  分别为在激励线圈和检测线圈单独施加单位电流时的矢量磁位。基于场量提取法原理, 在空场模型环境下, 采用三角形剖分方法对成像区域进

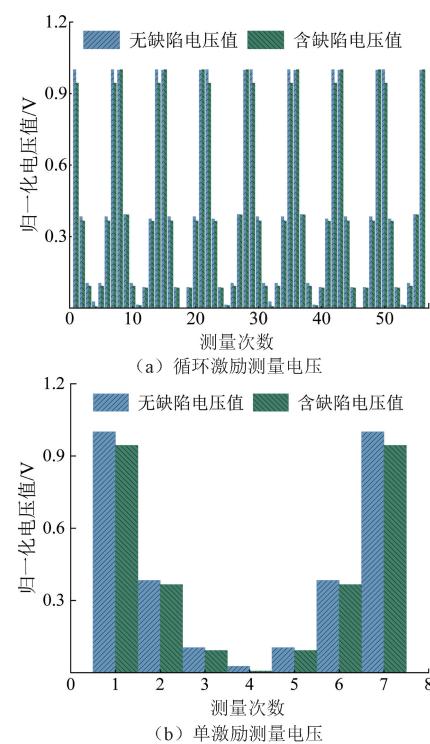


图 4 感应电压测量值

行等分割处理, 共得到 348 个三角形有限元子空间。将获取剖分点上的矢量磁位值, 带入式(6)进行求解, 部分灵敏度分布图如图 5 所示。图 5 表示线圈 1 为激励线圈, 线圈 2、3、4、5 为检测线圈得到的灵敏度分布图。

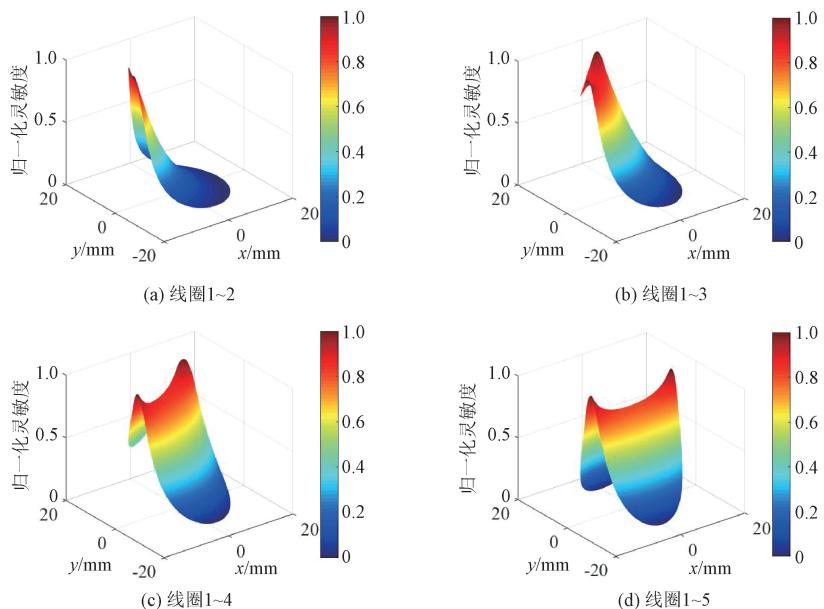


图 5 灵敏度分布

图 5 中成像区域不同颜色深浅反映了物场电导率的灵敏度, 颜色越深(红), 表明灵敏度越高, 对于成像区域电导率

的变化越敏感, 越有利于图像重建, 反之亦然。从图中可以看出, 靠近传感器的区域灵敏度较高, 在远离激励线圈与对

应检测线圈区域的灵敏度较低。因此检测对象接近传感器时成像效果较好,在物场中心时的检测效果较差<sup>[19]</sup>。

### 3 碳纤维拉索缺陷图像重建

#### 3.1 图像重建算法对比

图像重建算法是逆问题求解的关键,重建图像效果与质量能够反映出测量结果的准确度和系统的成像性能。本研究基于仿真计算得到的灵敏度、无缺陷和含缺陷碳纤

维拉索的感应电压检测数据,研究了不同重建算法对碳纤维拉索不同缺陷重建图像效果和质量的影响,以探究更适用于碳纤维拉索缺陷成像的算法。碳纤维拉索缺陷模型设置如表 1 所示,第 1 列为含缺陷的碳纤维拉索在检测区域内的位置与大小,其中白色部分为空气,浅灰色部分为含缺陷碳纤维拉索。第 2~4 列分别为 LBP 算法、Tikhonov 算法和 Landweber 算法 3 种图像重建算法<sup>[20-22]</sup>对碳纤维拉索断股和脱粘缺陷的成像效果。

表 1 碳纤维拉索缺陷图像重建对比

缺陷模型	图像重建算法		
	LBP	Tikhonov	Landweber

同时,为了进一步评价各图像重建算法对碳纤维拉索缺陷成像质量的影响,采用了相关系数(correlation coefficient, CC)作为评价指标来衡量各算法的性能<sup>[22]</sup>,相关系数表达式为:

$$CC = \frac{\sum_{i=1}^M \hat{g}_i - \bar{\hat{g}} g_i - \bar{g}}{\sqrt{\sum_{i=1}^M (\hat{g}_i - \bar{\hat{g}})^2 \sum_{i=1}^M (g_i - \bar{g})^2}} \quad (7)$$

式中: $g$  代表原始物场的二维图像的灰度值;  $\hat{g}$  表示重建图像中每个剖分单元的灰度值;  $\bar{g}$  为  $g$  的均值;  $\bar{\hat{g}}$  为  $\hat{g}$  的均值。

从表 1 的图像重建效果来看,LBP 算法、Tikhonov 算法和 Landweber 算法均可大致显示出碳纤维拉索缺陷的位置,但 LBP 算法得到的重建图像伪影较多,重建效果较差。Landweber 算法能通过图像粗略判断缺陷的深度,且边界相对比较清晰,但难以区分表面断股缺陷和近表面脱粘缺陷;Tikhonov 算法重建图像更接近原始模型缺陷分

布,但重建图像存在部分伪影。

图 6 为不同算法重建碳纤维拉索缺陷后得到的图像相关系数。从图中可以看出,无论是断股还是脱粘缺陷, Landweber 算法得到的重建图像的相关系数均高于其他两种算法。对于断股与脱粘缺陷,各算法得到的单一损伤扰动重建图像质量始终高于多损伤扰动的情况。此外, Landweber 算法得到的单一损伤扰动重建图像质量略高于 Tikhonov 算法,而 Tikhonov 算法和 Landweber 算法得到的多损伤扰动重建图像质量基本相同。因此,综合表 1 缺陷图像重建效果和图 6 重建图像相关系数,表明 Tikhonov 算法所反映的碳纤维拉索缺陷分布信息比其他算法更精确,更适用于碳纤维拉索缺陷检测图像的重建过程。

#### 3.2 传感器投影角度对成像质量的影响

在拉索缺陷中心连线与传感器中心连线之间存在夹角时,由于投影角度的差异,会影响有无缺陷拉索的敏感场响应特征,进而影响成像效果的质量。为探究投影角度

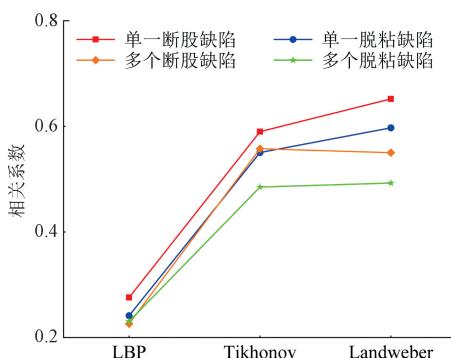


图 6 单一及多缺陷拉索的重建图像相关系数

表 2 不同夹角图像重建

旋转角度	断股缺陷	Tikhonov	脱粘缺陷	Tikhonov
15°				
30°				
45°				

的旋转,但 Tikhonov 重建算法依旧能够实现缺陷的较高质量成像。图 7 为断股与脱粘缺陷在不同投影角度下的重建图像相关系数。从图 7 中可以看出,脱粘(近表面)缺陷的相关系数均低于断股(表面)缺陷的相关系数,这是由于趋肤效应的存在。当旋转角度为 15° 和 30° 时,图像相关系数低于缺陷中心连线与传感器中心连线无夹角的情况(0° 和 45°)。这是因为,当线圈与缺陷中心存在一定角度

对成像效果的影响,对含缺陷的碳纤维拉索模型进行旋转操作。8 线圈圆周型传感器阵列相邻传感器之间中心轴线的夹角为 45°,因此拉索缺陷中心连线与传感器中心连线之间的夹角在 45° 范围内进行。且每一组的旋转角度应该相等,在保证圆周型传感器阵列不动的情况下,将物场中含断股与脱粘单一缺陷的碳纤维拉索模型按图 1(b)所示的方向旋转 15°、30°、45°。基于 Tikhonov 算法探究不同投影角度对断股与脱粘缺陷成像效果的影响,如表 2 所示,第 2 列为旋转一定角度的断股缺陷分布模型,第 4 列为旋转一定角度的脱粘缺陷分布模型。

从表 2 中可以看出,尽管对缺陷模型进行了不同角度

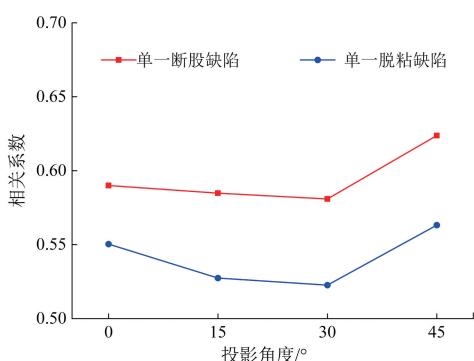


图 7 不同投影角度的重建图像相关系数

时,有效投影数据较少,冗余信息大,敏感响应低,进而导致成像效果质量相对降低。

#### 4 结 论

本文基于有限元方法建立了检测碳纤维拉索断股和脱粘缺陷的电磁层析成像模型,探究了传感器尺寸、激励电流大小与磁感应强度的关系。同时,分析了不同的重建算法和投影角度对不同拉索缺陷成像效果和重建图像质量的影响。结果表明,在研究范围内,随着传感器线圈直径的减小和激励电流的增大,磁感应强度逐渐增大。在线圈直径为 5 mm 和激励电流为 1 A 时,磁感应强度达到最大值。相比于其他算法,Tikhonov 算法的重建效果较好,边界部分清晰,断股缺陷与脱粘缺陷更接近原始模型分布,因此,Tikhonov 算法适用于碳纤维拉索缺陷的图像重建过程。此外,研究发现线圈投影角度会影响图像重建效果,在缺陷中心与传感器中心无夹角的情况下图像具有更高的质量。传感器阵列布置方式和有限元剖分方法也是影响检测灵敏度精度的因素,因此,应对检测灵敏度影响因素开展更多研究以提高图像重建质量。此外,本研究

只对碳纤维拉索缺陷截面进行了成像,基于二维成像结果实现碳纤维拉索缺陷的三维成像研究还有待进一步开展。

## 参考文献

- [1] FANG Y W, FANG Z, JIANG R N, et al. Transverse static and low-velocity impact behavior of CFRP wires under pretension [J]. Journal of Composites for Construction, 2019, 23(5): 04019041.
- [2] WANG L C, ZHANG J Y, XU J, et al. Anchorage systems of CFRP cables in cable structures—A review[J]. Construction and Building Materials, 2018, 160: 82-99.
- [3] 刘礼华,朱元林,秦斌,等.桥梁用碳纤维复合材料索应用进展[J].现代交通与冶金材料,2023,3(5):67-74.
- [4] 黄曼,王婕,周伟,等.单向CFRP表面缺陷的涡流检测与有限元仿真研究[J].电子测量技术,2023,46(19):182-187.
- [5] 张鹏飞,商雅静,周伟,等.碳纤维编织复合材料弯曲损伤破坏声发射监测[J].中国测试,2019,45(5):47-53.
- [6] 杨红娟,杨正岩,杨雷,等.碳纤维复合材料损伤的超声检测与成像方法研究进展[J].复合材料学报,2023,40(8):4295-4317.
- [7] 熊娟,喻星星,曹艳,等.碳纤维复合材料低能量冲击损伤红外热成像定量检测[J].无损探伤,2022,46(6):15-18.
- [8] 刘元林,赵国金,高帅帅,等.碳纤维复合材料缺陷无损检测方法研究[J].煤矿机械,2017,38(12):64-66.
- [9] XIANG J X, DONG Y G, YANG Y J. Multi-frequency electromagnetic tomography for acute stroke detection using frequency-constrained sparse bayesian learning[J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 2020, 39(12): 4102-4112.
- [10] YUE Y L, LIU Z, MIAO Y, et al. 3D electromagnetic tomography using a single layer sensor array[J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2021, 77: 101850.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] MA M, ZHANG Q, ZHANG R H, et al. EMT image reconstruction based on composite sensitivity matrix and its application in defect detection of carbon fiber wound hydrogen tank [J]. Progress in Electromagnetics Research M, 2023, 116: 177-191.
- [14] 王琦,崔莉莎,汪剑鸣,等.基于电磁层析成像的金属缺陷稀疏成像方法[J].仪器仪表学报,2017,38(9):2291-2298.
- [15] WANG Q, LI K, ZHANG R H, et al. Sparse defects detection and 3D imaging base on electromagnetic tomography and total variation algorithm[J]. Review of Scientific Instruments, 2019, 90(12): 124703.
- [16] 徐笑,黄云志,韩亮.基于阵列旋转和改进证据理论的平面EMT图像融合算法[J].仪器仪表学报,2022,43(10):136-144.
- [17] 曾辉耀,叶波,张依汀,等.单向碳纤维复合材料分层缺陷垂直涡流检测有限元仿真研究[J].传感技术学报,2020,33(1):45-50.
- [18] 唐凯豪,胡红利,李林,等.利用场量旋转变换的电容层析成像灵敏度系数简易计算方法[J].西安交通大学学报,2019,53(3):75-80,87.
- [19] 岳远里,刘泽,武建利,等.电磁层析成像中传感器阵列的优化设置[J].北京航空航天大学学报,2020,46(2):430-438.
- [20] 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,2018,39(5):679-683.
- [21] 李贤阳,阳建中,杨峻辉,等.深度运动图耦合正则化表示的行为识别算法[J].电子测量与仪器学报,2018,32(1):119-128.
- [22] 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.

## 作者简介

张苏嘉,硕士研究生,主要研究方向为碳纤维复合材料电磁无损检测。

E-mail: zhangsujia@163.com

周伟(通信作者),教授,博士生导师,博士,主要研究方向为特种设备与无损检测。

E-mail: zhouweihy@126.com