

DOI: 10.13382/j.jemi.B2205076

改进灵敏度矩阵的复合材料粘接缺陷 ECT 检测*

张志远 颜 华 周英钢 王伊凡
(沈阳工业大学信息科学与工程学院 沈阳 110870)

摘 要:平面电容层析成像(ECT)技术对复合材料粘接缺陷的图像重建,通常要借助灵敏度矩阵完成。ECT 传感器的敏感场分布在一个三维空间,但用于缺陷检测的重建图像是二维的,因此存在不同层灵敏度矩阵的选取问题。探究了不同层灵敏度矩阵的选取,并提出了一种灵敏度矩阵改进方法。通过对负敏感区域的阈值处理和绝对值处理,改善了灵敏度矩阵的病态性和不均匀性,降低 ECT 正问题模化误差。仿真和实验结果表明,所提方法能够明显降低重建图像中的伪迹,提高重建缺陷的清晰度,进而降低缺陷误判或漏判的概率。

关键词:平面电容层析成像;粘接缺陷;灵敏度矩阵改进;阈值处理;绝对值处理

中图分类号: TB971 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.40

ECT detection of bonding defects of composite materials based on improved sensitivity matrix

Zhang Zhiyuan Yan Hua Zhou Yinggang Wang Yifan
(School of Information Science and Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

Abstract: The planar capacitance tomography (ECT) technique is usually used to reconstruct the image of bonding defects of composite materials by means of sensitivity matrix. The sensitive field of ECT sensor is distributed in a three-dimensional space, but the reconstructed image for defect detection is two-dimensional, so there is the problem of selecting the sensitivity matrix of different layers. The selection of sensitivity matrix in different layers is explored, and an improved method of sensitivity matrix is proposed. Through the threshold processing and absolute value processing of the negative sensitive region, the ill condition and non-uniformity of the sensitivity matrix are improved, and the modeling error of ECT forward problem is reduced. Simulation and experimental results show that the proposed method can significantly reduce the artifacts in the reconstructed image, improve the clarity of the reconstructed defects, and then reduce the probability of false or missed judgment.

Keywords: planar ECT; bonding defects; sensitivity matrix improvement; threshold processing; absolute value processing

0 引 言

先进复合材料成功地作为航天飞行器结构材料迄今已有几十年的历史,其中,新型的隔热复合材料也已经应用于飞行器热防护系统中^[1]。隔热复合材料通常是通过粘合胶粘接到飞行器的表面,如果粘接胶层出现缺陷,那么将会对飞行器的安全造成重大的隐患。

电容层析成像(electrical capacitance tomography, ECT)技术是 20 世纪 80 年代中后期形成和发展起来的

一种基于电容传感机理的过程层析成像技术,它具有成本低、响应速度快、非侵入、安全性好(非辐射)、应用广泛等优点^[2-3]。其中,平面 ECT 技术可以依据复合材料表面的胶层和缺陷具有不同介电常数的物理特性^[4],实现对胶层缺陷的二维图像重建,进而达到对复合材料粘接缺陷的检测目的。由于这一特性,平面 ECT 技术受到了国内外学者的广泛关注,并已经开展了相关的研究^[5-9]。

目前,对于平面 ECT 技术的研究,主要集中于传感器的优化设计和图像重建算法等方面^[10-13]。为了提高二

重建图像的质量,研究者们做了许多努力。文献[10]提出了改进初始值的 Landweber 迭代算法;文献[11]先采用 FCM 算法优化测量电容值,再用传统的 LBP 算法或 Landweber 迭代算法进行图像重建。虽然这些方法一定程度地提高了重建图像的质量,但是重建图像中仍存在着较多的伪迹,且缺陷处的灰度值偏低。因此,如何更好地实现对复合材料粘接缺陷的图像重建,仍需进一步地研究。

ECT 图像重建通常需要借助灵敏度矩阵才能完成。为此,本文另辟蹊径,从灵敏度矩阵入手,通过对不同层面灵敏度矩阵的选取、特别是灵敏度矩阵的改进,减少重建图像中的伪迹,提高缺陷处的灰度值,进而降低缺陷误判或漏判的概率。

1 平面 ECT 工作原理

平面电容传感器基于电容的边缘效应。电极板平行正对,内部会产生平行分布的电场线,如图 1 左图所示。但是在极板的两侧也会产生电场线,即边缘电场,这就是电容的边缘效应^[14],如图 1 右图所示。

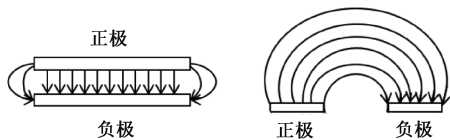


图 1 电容边缘效应

Fig. 1 Capacitance edge effect

用平面 ECT 技术检测复合材料粘接缺陷时需要将由 n 个极板组成的平面 ECT 传感器置于被测物体的表面。由于被测物体位于传感器的敏感空间,故而传感器能感知其介电常数的变化。ECT 传感器普遍采用单电极激励方式。采用单电极激励方式时,每次只有一个极板被施加激励电压充当激励电极,其他极板作为检测电极处于地电位。对于一个 n 极板的 ECT 传感器,极板 $1 \sim n-1$ 依次做激励电极,可以得到 $M = n(n-1)/2$ 个电容数据,又称投影数据。再通过适当的图像重建算法和传感器的灵敏度矩阵,由这些投影数据重建出反映介质分布的归一化介电常数(又称灰度)分布图像。

ECT 传感器中,极板的面积和数量会影响图像重建的效果。平面 ECT 传感器的面积通常依应用场景而定。当传感器的面积一定时,增加极板数目只能通过减少极板面积实现。增加极板数目可获得更多的投影数据,有利于获得更好的重建效果。但极板面积的减少会降低极板电容值,导致投影数据的信噪比降低。ECT 图像重建是一个病态、欠定的逆问题,重建图像对投影数据中的噪

声敏感,所以极板数量过多时重建质量反而下降。目前平面 ECT 传感器以 12 极板最为常见。因此,本文采用 12 极板平面 ECT 传感器,激励方式为单电极激励。

2 ECT 的图像重建

ECT 的图像重建实际上就是 ECT 的逆问题,通常借助于正问题模型进行求解。ECT 线性化正问题模型可以表示为:

$$\mathbf{C} = \mathbf{S}\mathbf{G} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{C}$ 为 M 维归一化的电容值向量, $\mathbf{S}$ 为 $M \times N$ 维归一化灵敏度矩阵, $\mathbf{G}$ 为 N 维归一化介电常数向量,即灰度值向量,又称投影数据向量。

ECT 传感器的敏感场是一个三维场。分层计算灵敏度需要在给定层面 z 坐标的前提下将该层面用正方形网格离散成 N 个单元,又称像素。ECT 传感器的灵敏度通常采用电场强度法计算。单电极激励方式下 $i-j$ 极板对的输出值对于单元 e ($e = 1, 2, \dots, N$) 的灵敏度 $s_{i,j}(e)$ 可表示为^[9]:

$$s_{i,j}(e) = -\frac{1}{U^2} \int_{\Omega_e} \mathbf{E}_i(x, y, z') \cdot \mathbf{E}_j(x, y, z') dx dy \quad (2)$$

式中: z' 为指定层面的 z 坐标,是常数; $\mathbf{E}_i(x, y, z')$ 是极板 i 为激励电极被施加电压 U ,其他极板为检测电极处于零电位时指定层面上的电场强度分布; $\mathbf{E}_j(x, y, z')$ 是极板 j 为激励电极被施加电压 U ,其他极板作为检测电极处于零电位时指定层面上的电场强度分布; Ω_e 表示单元 e 所对应区域。由于像素面积 A_e 很小,故而灵敏度 $s_{i,j}(e)$ 可采用式(3)计算。

$$s_{i,j}(e) = -\frac{A_e}{U^2} \mathbf{E}_i(x_e, y_e, z') \cdot \mathbf{E}_j(x_e, y_e, z') \quad (3)$$

式中: (x_e, y_e, z') 为单元 e 中心点的坐标。

计算灵敏度分布所需要的电场强度分布通常用有限元分析软件获得,且计算电场强度时传感器处于空场状态,没有被测物体。本文采用的是 COMSOL 有限元仿真软件。需要指出的是:为保证有限元分析精度,有限元剖分的网格数远远大于正逆问题中的像素数。

灵敏度矩阵的归一化处理方式如式(4)所示^[15]。

$$S_{i,j}(e) = s_{i,j}(e) / \sum_{e=1}^N s_{i,j}(e) \quad (4)$$

式中: $S_{i,j}(e)$ 为归一化后的极板对 $i-j$ 对于单元 e 的灵敏度。

线性反投影(linear back projection, LBP)算法和 Landweber 迭代算法是最具代表性的两种图像重建算法。LBP 算法计算简单、速度快实时性好,但重建质量较差。Landweber 迭代算法虽然成像速度较 LBP 算法慢一些,但是由于该方法可以对图像反复修正,因此可以获得比

LBP 算法成像更高质量的图像重建结果。Landweber 迭代算法的公式如式(5)所示^[16]:

$$\hat{\mathbf{G}}^{(k+1)} = \hat{\mathbf{G}}^{(k)} + \alpha \mathbf{S}^T (\mathbf{C} - \mathbf{S} \hat{\mathbf{G}}^{(k)}) \quad (5)$$

式中, $\hat{\mathbf{G}}^{(k)}$ 为第 k 次迭代所获得的图像灰度向量, α 为用来控制收敛速度的增益因子, 一般取 $\alpha = 2/\lambda_{\max}$, $\lambda_{\max}$ 为方阵 $\mathbf{S}^T \mathbf{S}$ 的最大特征值。

Landweber 迭代算法通常以 LBP 算法的重建结果为迭代初始值, 并通过 0、1 门限滤波保证重建灰度向量的任意元素都 $\in [0, 1]$ 。本文采用 Landweber 迭代算法进行图像重建, 迭代次数固定为 10 次。

3 基于平面 ECT 的粘接缺陷检测

3.1 传感器及其有限元模型

本文所建立的平面 ECT 传感器模型如图 2(a) 所示, 由 12 个电极板、基板和屏蔽组成, 可输出 $M=66$ 个电容值。电极板的材料为铜, 尺寸为 $41 \text{ mm} \times 30 \text{ mm} \times 0.1 \text{ mm}$, 极板间距为 3 mm ; 基板的材料是绝缘塑料, 尺寸为 $160 \text{ mm} \times 160 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$, 基板是电极板的载体; 屏蔽的材料也为铜, 底部屏蔽的尺寸为 $160 \text{ mm} \times 160 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$, 极板间屏蔽条的宽度为 1.5 mm , 极板外围屏蔽条的宽度为 5 mm 。被测材料为复合材料和胶层, 其中, 复合材料为相对介电常数为 $\varepsilon = 6.5$ 的玻璃纤维复合材料, 放置在传感器的表面, 尺寸为 $160 \text{ mm} \times 160 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$, 胶层为环氧

树脂, 位于复合材料的表面, 其相对介电常数为 $\varepsilon = 3.4$, 面积大小同复合材料一致, 厚度为 2 mm 。当胶层出现空洞缺陷时, 缺陷处的相对介电常数是 1。本文的有限元分析场域是 $200 \text{ mm} \times 200 \text{ mm} \times 70 \text{ mm}$ 的长方体, 该场域将平面 ECT 传感器完全包含在其中, 并在其前后左右 4 个方向上各拓展了 20 mm 的空气层, 在其上方和下方分别拓展了厚度为 57 mm 和 10 mm 的空气层。图 2(b) 给出了该场域的一个有限元剖分实例, 场域中除 ECT 传感器外别无他物。该实例采用了 COMSOL 的自由四面体网格剖分, 网格的疏密程度与电场强度变化的剧烈程度相适应。该网格被用来计算灵敏度分析时所需要的电场强度分布, 图 2(c) 是图 2(b) 的投影图。

通过 COMSOL 仿真计算, 可以得出各个极板对之间的电容值和所需要的灵敏度矩阵。本文灵敏度分布的计算是针对电极正上方 $160 \text{ mm} \times 160 \text{ mm} \times 18 \text{ mm}$ 的场域进行的。该区域被划分成 6 层, 每层皆包含 $40 \times 40 = 1\,600$ pixels, 对应着编号从 1~6 的 6 层灵敏度矩阵。每个灵敏度矩阵皆为 $66 \times 1\,600$ 的矩阵。其中, 紧贴电极表面的为第 1 层灵敏度矩阵。为行文方便, 称胶层完好时为满场; 胶层存在缺陷时为物场。由于期望胶层完好时, 重建图像的灰度值全是 0, 故而采用了式(6)所示的电容归一化公式:

$$C_{i,j} = (C_{i,j}^f - C_{i,j}^m) / (C_{i,j}^f) \quad (6)$$

式中: $C_{i,j}^m$ 为物场电容值, $C_{i,j}^f$ 为满场电容值。

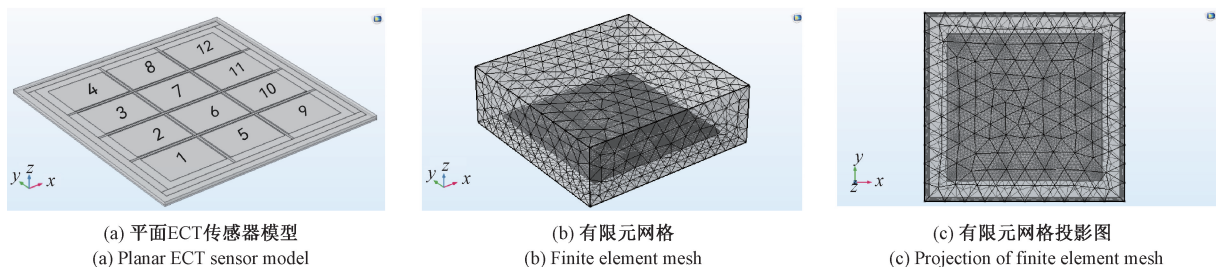


图 2 传感器模型及有限元网格图

Fig. 2 Sensor and finite element mesh

3.2 不同层面灵敏度矩阵的选取

ECT 传感器的敏感场分布在一个三维空间, 但用于缺陷检测的重建图像是二维的, 因此存在不同层灵敏度矩阵的选取问题。敏感场计算分析表明: 1) 不同极板组合、不同层面的灵敏度分布有显著差异; 2) 在高灵敏度区域和非灵敏区域 (即灵敏度值约为 0 区域) 之间有负敏感区域的存在; 3) 随着层号的增加, 灵敏度值会有明显下降, 灵敏度分布特征也会有所改变。式(7)所定义的灵敏度矩阵均匀性指标 P 可视为灵敏度分布的一种定量描述。

$$\begin{aligned} S_{i,j}^{avg} &= \frac{1}{N} \sum_{e=1}^N S_{i,j}(e) \\ S_{i,j}^{dev} &= \left\{ \frac{1}{N-1} \sum_{e=1}^N [S_{i,j}(e) - S_{i,j}^{avg}]^2 \right\}^{1/2} \\ P &= \frac{1}{M} \sum_{i,j} \left| \frac{S_{i,j}^{dev}}{S_{i,j}^{avg}} \right| \end{aligned} \quad (7)$$

式中: $S_{i,j}^{avg}$ 为 $i-j$ 极板对之间灵敏度的均值, $S_{i,j}^{dev}$ 为 $i-j$ 极板对之间灵敏度的标准差, N 为每一层面的像素数目。

由于逆问题的不适定性, 平面 ECT 传感器的灵敏度矩阵病态严重, 灵敏度矩阵的条件数很大。这意味着极

板电容有微小的测量误差时,也会对重建结果造成较大的影响。因此灵敏度矩阵的条件数也是评价灵敏度矩阵优劣的常用指标。表 1 给出了不同层灵敏度矩阵的均匀性指标 P 和条件数。从表 1 可以看出,第 5 层灵敏度矩阵的 P 值最小,条件数也最小。采用第 5 层灵敏度矩阵可望获得更好的重建结果。

表 1 各层灵敏度矩阵的评价指标

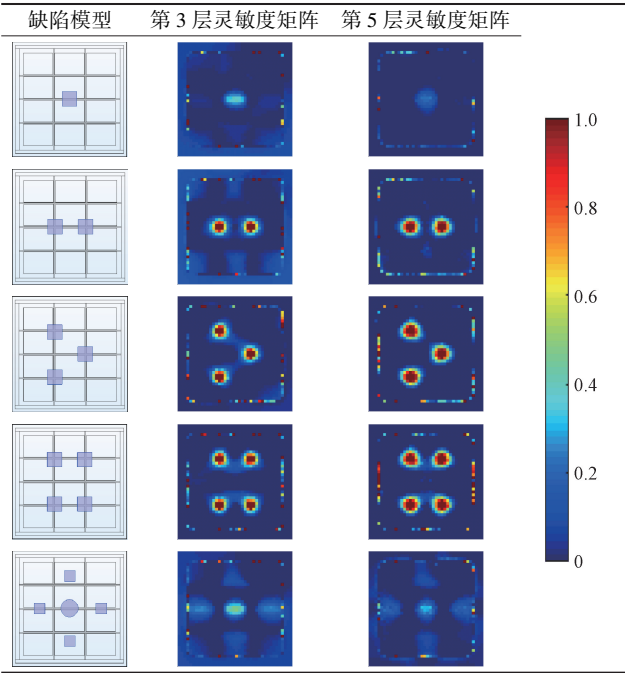
Table 1 Uniformity index of sensitivity matrix of each layer

	第 1 层	第 2 层	第 3 层	第 4 层	第 5 层	第 6 层
P	101.84	35.01	14.19	11.24	6.30	7.39
条件数	5 740.5	2 206.5	918.98	2 234.8	564.25	1 673.7

为研究不同层灵敏度矩阵对重建图像的影响,采用不同层灵敏度矩阵和 Landweber 迭代算法(迭代次数固定为 10 次)对表 2 中第 1 列的 5 种不同的缺陷模型进行了图像重建。缺陷模型从上至下的序号为模型 1~模型 5。其中,模型 1~模型 4 中的方形缺陷边长为 20 mm×20 mm,模型 5 中的方形缺陷边长为 15 mm×15 mm、圆形缺陷的半径为 12 mm,所有缺陷深度皆为 2 mm,缺陷处为相对介电常数 $\varepsilon = 1$ 的空气。重建结果也表明第 5 层灵敏度矩阵对应的重建图像最好。为节省篇幅,本文只给出了第 3 层和第 5 层重建结果对比,如表 2 中第 2 列和第 3 列所示。

表 2 不同灵敏度矩阵对应的重建图像

Table 2 Reconstructed images corresponding to different sensitivity matrices



由表 2 可以看出,虽然重建图像中存在着较多的伪迹,但在第 2 列和第 3 列重建图像中都可以观察到缺陷的存在;第 3 列的重建图像中的伪迹明显少于第 2 列,且前者的缺陷形状更接近缺陷模型,灰度值也更接近 1。因此,本文采用第 5 层的灵敏度矩阵进行平面 ECT 的图像重建。

重建图像的伪迹可能会被误判为缺陷,而缺陷处的灰度值过低,可能会导致缺陷的漏判。为进一步提高重建图像的质量,本文提出灵敏度矩阵改进法。

3.3 灵敏度矩阵的改进

本文将灵敏度矩阵中的负敏感区域视为高敏感区域和非敏感区域之间的异常跳变,提出一种针对负敏感区域的灵敏度矩阵改进方法。该方法的基本思想是用阈值处理来约束负灵敏度的取值范围,减小灵敏度的差异性,然后用绝对值对其进行翻转,处理这种异常跳变。该方法中的阈值处理是针对较大负灵敏度值的存在而设定的环节,用来避免较大负灵敏度值翻转后成为新的异常跳变。为避免传感器结构参数不同对灵敏度矩阵所产生的影响,阈值采用了相对量,而非绝对量。本文所提灵敏度矩阵改进方法可以简述如下。

1) 计算灵敏度矩阵每一行中负敏感区域的灵敏度平均值 $q_{i,j}(q_{i,j} < 0)$,然后用 $p \cdot q_{i,j}$ 作为阈值对负灵敏度区域进行约束, p 为大于 0 的小参数。

2) 采用式(8)处理每一行的灵敏度值。

$$S_{i,j}(e) = \begin{cases} S_{i,j}(e), S_{i,j}(e) \geq 0 \\ |S_{i,j}(e)|, 0 > S_{i,j}(e) \geq p \cdot q_{i,j} \\ p \cdot |q_{i,j}|, S_{i,j}(e) < p \cdot q_{i,j} \end{cases} \quad (8)$$

本文通过实验对比,选择 $p = 0.3$ 。这种处理方式可有效地改善灵敏度矩阵的均匀性和条件数。以第 5 层灵敏度矩阵为例,均匀性指标 P 由 6.30 降到了 2.69,条件数由 564.25 降到了 270.5。采用改进的灵敏度矩阵可望获得更好的重建结果。

3.4 灵敏度矩阵改进效果的验证

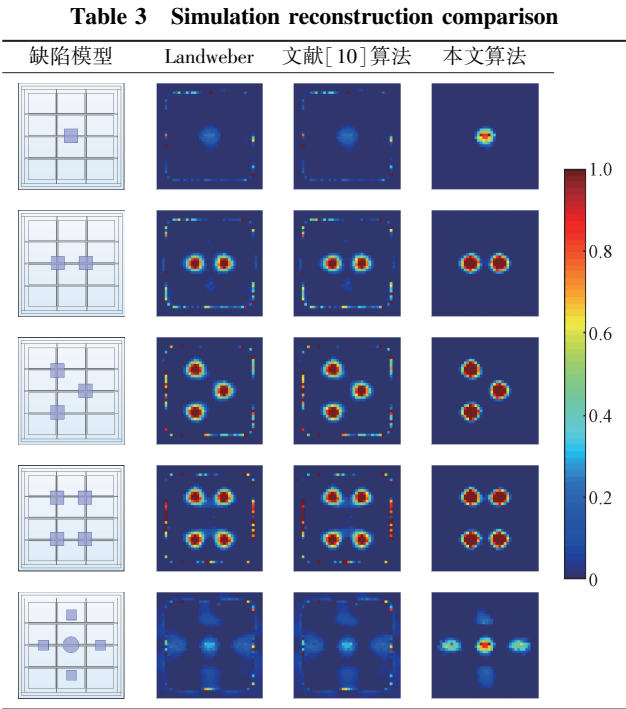
1) 仿真验证

采用 Landweber 迭代算法、文献[10]算法和本文提出的改进灵敏度矩阵 Landweber 迭代算法对 5 种缺陷模型进行了仿真数据重建。表 3 给出了 3 种算法对应的重建图像。缺陷模型在表 3 的第 1 列给出。由表 3 可以看出:本文方法给出的重建图像伪迹最少,缺陷也最清晰。

为定量评价重建图像质量,引入图像相关系数(correlation coefficients, CC)^[17]如式(9)所示:

$$CC = \frac{\sum_{i=1}^N [(\hat{G}_i - \bar{\hat{G}}) \cdot (G_i - \bar{G})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (\hat{G}_i - \bar{\hat{G}})^2 \cdot \sum_{i=1}^N (G_i - \bar{G})^2}} \quad (9)$$

表 3 仿真重建对比



式中： $\bar{G}$ 和 $\hat{G}$ 分别为缺陷模型和重建图像像素灰度值的平均值。 G_i 和 $\hat{G}_i$ 分别为缺陷模型和重建图像中像素 i 的灰度值。若像素 i 胶层完好则 $G_i = 0$ ，反之若像素 i 为缺陷，则 $G_i = 1$ 。显然 CC 值越接近于 1，重建图像质量越高。

为评价灵敏度矩阵的改进效果，定义正问题模化误差则如式 (10) 所示：

$$ME = \|C - SG\|_2 / \|C\|_2 \tag{10}$$

式中： G 为描述缺陷模型的灰度向量， S 为归一化灵敏度矩阵， C 为归一化电容向量。 ME 越小，越利于重建。

为了更好地评价重建图像对缺陷的重建效果，定义缺陷清晰度评价 TR 和伪迹干扰度评价 AID ，分别为缺陷区域和胶层完好区域重建灰度的平均值。显然 TR 越高，缺陷越清晰； AID 越接近于 0，伪迹干扰越小。

$$TR = \frac{\sum_{i=1}^N \hat{G}_i \cdot G_i}{\sum_{i=1}^N G_i}, AID = \frac{\sum_{i=1}^N \hat{G}_i \cdot (1 - G_i)}{\sum_{i=1}^N (1 - G_i)} \tag{11}$$

表 4 给出 3 种算法对应的质量评价指标。表 4 中的缺陷见表 3 的第 1 列。由表 4 可以看出：1) 本文算法对应的正问题模化误差 ME 明显小于其他两种算法的 ME ，即改进灵敏度矩阵有效地降低了正问题模化误差；2) 本文算法对应的 AID 、 TR 和 CC 指标明显优于其他两种算法的相应指标，即本文算法重建图像中缺陷清晰度更高、伪迹干扰度更小，重建图像与缺陷模型在灰度值上更接近。

表 4 图像质量评价指标 (仿真)

Table 4 Image quality evaluation index (simulation)

缺陷模型	Landweber				文献[10]算法				本文算法			
	ME	CC	TR	AID	ME	CC	TR	AID	ME	CC	TR	AID
1	3.066 0	0.304 0	0.163 7	0.009 6	3.066 0	0.304 3	0.164 0	0.009 6	1.044 3	0.869 0	0.363 3	0.002 3
2	0.985 0	0.765 3	0.747 0	0.026 4	0.985 0	0.757 9	0.752 6	0.026 9	0.609 1	0.876 8	0.918 2	0.014 7
3	0.829 0	0.746 6	0.784 1	0.037 4	0.829 0	0.742 5	0.789 9	0.037 9	0.631 8	0.873 7	0.920 4	0.020 4
4	0.972 9	0.732 6	0.765 7	0.046 8	0.972 9	0.728 1	0.771 2	0.047 2	0.649 2	0.872 6	0.904 4	0.025 7
5	3.578 1	0.317 4	0.141 3	0.027 1	3.578 1	0.321 9	0.142 9	0.027 5	1.521 7	0.700 9	0.245 1	0.010 0

2) 实验验证

为进一步验证本文提出的改进灵敏度矩阵方法的有效性，采用北京凌河机电有限公司的电容数据采集和自制的平面 ECT 传感器，组成了平面 ECT 系统，如图 3 所示。由于复合材料和胶层需要定制，且胶层上挖孔不易实现，所以采用了在传感器表面放置有机玻璃块的方式模拟胶层中的缺陷。这种简化实验模式也是平面 ECT 研究者常用的验证方式。平面 ECT 传感器的尺寸和布局与仿真中一致，有机玻璃块的尺寸为 20 mm×20 mm×50 mm。为行文方便，称传感器表面上有玻璃块(缺陷)时为物场，没有玻璃块(缺陷)时空场，玻璃块(缺陷)全部填满时称为满场。由于期望无缺陷时重建图像的灰

度值全是 0，故而采用了式 (12) 所示的电容归一化方式：

$$C_{i,j} = (C_{i,j}^m - C_{i,j}^o) / (C_{i,j}^f) \tag{12}$$

式中： $C_{i,j}^m$ 为物场电容值， $C_{i,j}^o$ 为空场电容值， $C_{i,j}^f$ 为满场电容值，且空场电容值和满场电容值皆为实测数据。

采用传统的 Landweber 迭代算法、文献[10]算法和本文提出的改进灵敏度矩阵的 Landweber 迭代算法对 3 种玻璃块布局进行了实测数据重建。表 5 给出了玻璃块布局 and 重建图像，布局从上至下的序号为 1~3。考虑到照片形变，布局示意图也在表 5 中给出。由表 5 可以看出，本文算法给出的重建图像伪迹最少，缺陷最清晰，即从视觉效果看本文算法给出的重建图像与玻璃块的真实分布最接近。



图 3 平面 ECT 实验系统
Fig. 3 Planar ECT experimental system

表 5 实验重建对比

Table 5 Experimental reconstruction comparison

缺陷布局	布局示意图	Landweber	文献[10]算法	本文算法

4 结 论

本文以平面 ECT 技术在复合材料粘接缺陷检测的应用为背景,建立了平面 ECT 传感器仿真模型和平面 ECT 实验系统。通过对多种缺陷模型的二维图像重建,研究了不同层灵敏度矩阵的选取以及灵敏度矩阵的改进问题。结果表明:

- 1) 不同层灵敏度矩阵的均匀性和条件数有明显差异,均匀性最好条件数最小的层面为最佳层面,对应的重建图像质量最佳。
 - 2) 采用阈值处理和绝对值处理相结合的方法改进灵敏度矩阵,可以降低正问题模化误差,减少重建图像中的伪迹,提高重建缺陷的清晰度,进而降低缺陷误判或漏判的概率。因此本文所提方法有较大的实用价值。
- 由于本文对灵敏度矩阵的改进是基于传感器的敏感场,并非针对某种特定的介质分布,因此,该方法对不同介电常数所形成的缺陷有良好的适应性。无论是仿真验证时的低介电常数缺陷,还是实验验证时的高介电常数

缺陷,本文算法都能给出了高质量的重建图像,也验证了本文算法的良好适用性。

参考文献

[1] 孙振起,吴安如. 先进复合材料在飞机结构中的应用[J]. 材料导报,2015,29(11):61-64,69.
SUN ZH Q, WU AN R. Application of advanced composite materials in aircraft structure [J]. Materials Guide, 2015,29 (11): 61-64,69.

[2] 王伊凡,朱海滢,熊啸岳,等. 基于自适应阈值滤波的三维 ECT 重建算法[J]. 沈阳工业大学学报,2020,42(3):313-317.
WANG Y F, ZHU H Y, XIONG X Y, et al. 3D ECT reconstruction algorithm based on adaptive threshold filtering [J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2020, 42 (3): 313-317.

[3] 王胜南,李敏艳. 基于 ECT 的气固两相流颗粒浓度在线无损检测[J]. 电子测量与仪器学报,2021,35(12):52-58.
WANG SH N, LI M Y. Online nondestructive detection of particle concentration in gas-solid two-phase flow based on ECT [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35 (12): 52-58.

[4] 郝魁红,范文茹,马敏,等. 平面式电容传感器阵列测量复合材料技术研究[J]. 传感器与微系统,2014,33(2):35-38.
HAO K H, FAN W R, MA M, et al. Research on composite material measurement technology with planar capacitive sensor array [J]. Sensors and Microsystems, 2014, 33 (2): 35-38.

[5] NASSR A A, EL-DAKHAKHNI W W. Damage detection of FRP-strengthened concrete structures using capacitance measurements [J]. Journal of Composites for Construction, 2009, 13(6):486-497.

[6] YIN X, HUTCHINS D A. Non-destructive evaluation of composite materials using a capacitive imaging technique[J]. Composites Part B, 2012, 43(3):1282-1292.

[7] 温银堂,赵丽梅,张玉燕,等. 基于 ECT 的复合材料构件胶层缺陷检测[J]. 仪器仪表学报,2015,36(8):1783-1791.
WEN Y T, ZHAO L M, ZHANG Y Y, et al. Defect detection of adhesive layer of composite components based on ECT [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36 (8): 1783-1791.

[8] 杨丽君,田洪刚,安立明,等. 基于同面电容成像的航天隔热复合材料粘接缺陷检测方法[J]. 兵工学报,2017,38(12):2488-2496.
YANG L J, TIAN H G, AN L M, et al. Detection method for bonding defects of aerospace thermal

- insulation composites based on coplanar capacitance imaging [J]. *Acta Ordnance Engineering Sinica*, 2017, 38 (12): 2488-2496.
- [9] 张玉燕, 孙东涛, 张振达, 等. 同面阵列电容成像传感空/满场设定方法研究[J]. *计量学报*, 2018, 39 (4): 531-535.
- ZHANG Y Y, SUN D T, ZHANG ZH D, et al. Research on space/full field setting method of coplanar array capacitive imaging sensor [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2018, 39 (4): 531-535.
- [10] YE Z, BANASIAK R, SOLEIMANI M. Planar array 3D electrical capacitance tomography [J]. *Insight Non Destructive Testing and Condition Monitoring*, 2013, 55 (12): 675-680.
- [11] TAYLOR S H, GARIMELLA S V. Design of electrode arrays for 3D capacitance tomography in a planar domain [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2017, 106: 1251-1260.
- [12] 温银堂, 贾瑶, 张玉燕, 等. 基于改进 ECT 的隔热材料胶层无损检测研究[J]. *仪器仪表学报*, 2016, 37 (7): 1596-1602.
- WEN Y T, JIA Y, ZHANG Y Y, et al. Research on nondestructive testing of thermal insulation adhesive layer based on improved ECT [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2016, 37 (7): 1596-1602.
- [13] 温银堂, 曹鹏鹏, 田洪刚, 等. 基于 FCM 优化的平面阵列电容成像算法[J]. *计量学报*, 2020, 41 (2): 231-237.
- WEN Y T, CAO P P, TIAN H G, et al. Planar array capacitance imaging algorithm based on FCM optimization [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2020, 41 (2): 231-237.
- [14] 马敏, 刘慧洁. 基于平面阵列电极传感器的 ECT 系统设计[J]. *传感器与微系统*, 2017, 36 (2): 82-83, 87.
- MA M, LIU H J. Design of ECT system based on planar array electrode sensor [J]. *Sensors and Microsystems*, 2017, 36 (2): 82-83, 87.
- [15] 马敏, 邓晨肖, 吴轲. 平面阵列电容传感器优化[J]. *传感器与微系统*, 2020, 39 (3): 25-29.
- MA M, DENG CH X, WU K. Optimization of planar array capacitive sensors [J]. *Sensors and Microsystems*, 2020, 39 (3): 25-29.
- [16] 张立峰, 戴力. 基于极限学习机求解正问题的 ECT 图像重建[J]. *仪器仪表学报*, 2021, 42 (10): 64-71.
- ZHANG L F, DAI L. ECT image reconstruction based on limit learning machine for solving forward problem [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2021, 42 (10): 64-71.
- [17] 严春满, 穆哲. 一种改进的梯度加速 Landweber 算法及其在 ECT 图像重建中的应用[J]. *电子测量与仪器学报*, 2021, 35 (6): 169-175.
- YAN CH M, MU ZH. An improved gradient accelerated Landweber algorithm and its application in ECT image reconstruction [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2021, 35 (6): 169-175.

作者简介



张志远, 2015 年于沈阳工业大学获得学士学位, 现为沈阳工业大学硕士研究生。主要研究方向为电容层析成像检测技术。
E-mail: 2471517105@qq.com

Zhang Zhiyuan received his B. Sc. degree from Shenyang University of Technology in 2015. Now he is a M. Sc. candidate in Shenyang University of Technology. His main research interest includes electrical capacitance tomography detection technology.



颜华 (通信作者), 分别在 1985 年和 1988 年于沈阳工业大学获得学士学位和硕士学位, 1999 年于东北大学获得博士学位, 现任沈阳工业大学教授。主要研究方向为层析成像检测技术、信号处理和虚拟仪器。
E-mail: yanhua_01@163.com

Yan Hua (Corresponding author) received her B. Sc. degree and M. Sc degree from Shenyang University of Technology in 1985 and 1988, and received her Ph. D. degree from Northeastern University in 1999. Now she is a professor at Shenyang University of Technology. Her main research interests include tomography detection technology, signal processing and virtual instrument.