

DOI: 10.13382/j.jemi.B2104302

阵列式电容传感器优化设计及灵敏特性分析*

温银堂^{1,2} 尹申辉^{1,2} 王震宇^{1,2} 张玉燕^{1,2} 宗乐文^{1,2}

(1. 燕山大学电气工程学院 秦皇岛 066004; 2. 燕山大学测试计量技术及仪器河北省重点实验室 秦皇岛 066004)

摘要: 平面电容传感器基于边缘效应工作,敏感场具有明显的软场特性,导致其检测能力易受外部因素影响而降低。为了改善敏感场分布特性,提升传感器的检测精度,提出了一种新型12电极平面阵列电容传感器,对其进行特性分析。首先,采用数值模拟方法建立三维敏感场模型,同时选取灵敏度值三维成像的方法分析子灵敏度和整体灵敏度分布特性。其次,利用评价指标 P 量化评判新型12电极传感器和矩形阵列传感器的敏感场分布均匀性。建立3种不同物场模型并结合Tikhonov正则化算法进行图像重建。最终结果表明新型传感器的 P 值减小3.6%,重建图像的平均相关系数增加7.2%。综合验证了新型12电极传感器有效改善了敏感场均匀性,提升了传感器的检测能力。

关键词: 平面电容传感器;边缘电场;敏感场分布;图像重建;相关系数

中图分类号: TP212;TN98 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4020

Optimal design and sensitivity analysis of array capacitance sensor

Wen Yintang^{1,2} Yin Shenhui^{1,2} Wang Zhenyu^{1,2} Zhang Yuyan^{1,2} Zong Lewen^{1,2}

(1. School of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China; 2. Hebei Province Key Laboratory of Measuring and Testing technologies and Instruments, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: Planar capacitive sensor works based on edge effect. The sensitive field exhibits obvious soft field characteristics, as a result, its detection ability is easily affected by external factors. In order to ameliorate the sensitive field distribution characteristics and improve the sensor's testing accuracy, this paper proposes a new type of 12-electrode coplanar array capacitive sensor and analyzes its characteristics. First, a numerical simulation method is used to set a three-dimensional sensitive field model, and the sensitivity value three-dimensional imaging method is selected to study the sub sensitivity and the overall sensitivity distribution characteristics. Then, the evaluation index P is used to quantify the uniformity of the sensitive field distribution of the new 12-electrode sensor and the rectangular array sensor. Three different object model experiments are implemented combined with the Tikhonov regularization algorithm for image restoration. The final result indicates that the P value of the new sensor is reduced by 3.6%, and the average correlation coefficient of the reconstructed image is increased by 7.2%. It is comprehensively verified that the new 12-electrode coplanar array sensor effectively improves the uniformity of the sensitive field distribution, enhancing the detection capability of the sensor.

Keywords: planar capacitive sensor; fringe electric field; sensitive field distribution; image reconstruction; correlation coefficient

0 引言

平面阵列电极传感技术是由电容层析成像(electrical capacitance tomography, ECT)技术演变而来的^[1-2],实现单一方向检测大固体物体。在测量空间受限

的情况下,平面电容成像技术比ECT更具优势,同时也具备非侵入性、响应快速、成本低廉等优点,在无损伤检测领域得到了广泛的应用^[3-5]。

当前关于平面成像技术的研究方向主要包括激励模式探究^[6],图像重建算法改进^[7-8]和敏感场建模^[9-10]等。电极结构的优化设计同样是改善传感器性能的有效方

法,许多学者开展研究并取得成果。马敏等^[11]研究极板参数对传感器性能的影响,研究表明随着极间屏蔽宽度的增加,会极大改善敏感场分布的不均匀性。Yin 等^[12]给出了灵敏度分布的快速计算方法,研究了灵敏度分布的影响因素,结果表明灵敏度分布可用于优化传感器结构参数和预测成像性能。Tholin-Chittenden 等^[13]研究传感器的设计模式,并以不同的方式组合五种新的电极结构,证明了平面阵列 ECT 可用于非金属类的地雷探测。Wei 等^[14]比较双平面与单平面电容传感器的敏感场分布,结果表明极板数量的增加使得后者成像效果更好。范文茹等^[15]设计 4 种不同形状的平面电容传感器,从信号强度和灵敏度等方面分析比较 4 种传感器,同时对含有不同损伤的 CFRP 板材进行检验,研究表明三角形传感器检测性能最优。综上可知,不同电极结构的敏感场分布不同,敏感场分布会影响其成像的辨识度。平面电容传感器的灵敏度分布是不均匀的^[16],直接导致后期的图像重建有较大误差。这种不均匀性与极板结构密切相关,研究改善敏感场的分布特性有助于提高检测精度。因此,如何通过设计传感器结构来改善敏感场的均匀性,需要进一步深入探讨。

本文针对 3×4 矩形阵列传感器的软场特性导致敏感场分布不均匀的问题,提出了一种新型 12 电极平面阵列电容传感器。从敏感场分布和图像重建效果方面对此传感器的传感性能进行了分析,验证新型 12 电极传感器在非金属材料无损检测的可行性。

1 工作原理

平面阵列传感器基于电容的边缘电场工作。检测时传感器上方产生感应电场,探测求解区域中被测物体介电特性的变化,导致电场线发生畸变,反映在电容值的变化,最终通过成像算法重构出被测物体的介电信息图像。

已知介电信息和传感器结构尺寸可以求解电极间的电容值,其边值问题为 Dirichlet 边界条件,用拉普拉斯方程表达其物理模型^[17]为:

$$\nabla[\varepsilon(x,y)\nabla\varphi(x,y)] = 0 \quad (1)$$

式中: φ 、 ε 分别表示电位和相对介电常数; ∇ 为梯度算子。

利用测得的电容数据推演出求解域中的介电信息,具体公式为:

$$\mathbf{C} = \mathbf{S}\mathbf{G} \quad (2)$$

式中: $\mathbf{C} \in \mathbf{R}^M$, $\mathbf{G} \in \mathbf{R}^N$, $\mathbf{S} \in \mathbf{R}^{M \times N}$ 。其中, \mathbf{C} 为测量的电容值, M 为独立测量的电容数目, N 为敏感单元个数。 \mathbf{S} 为敏感场,表征 \mathbf{C} 受介质分布 \mathbf{G} 变化的影响。

采用电势分布法快速计算敏感场 \mathbf{S} 的公式^[18]:

$$S_{i,j}(e) = - \int_q \frac{\nabla u_i}{V_i} \frac{\nabla u_j}{V_j} d\Omega \quad (3)$$

式中: $S_{i,j}(e)$ 为极板 i 和 j 在求解单元 e 处的灵敏度值; V_i 、 V_j 分别为 i 、 j 电极上的激励电压; ∇u_i 、 ∇u_j 分别为当 i 、 j 是源电极时的场强分布; Ω 为敏感单元 e 的面积; q 为求解区域。

2 传感器设计

敏感场分布均匀性影响着后期的图像重建质量,本文通过设计电极结构改善分布不均匀性,进而达到优化传感器性能,提高检测精度的目的。基于有限元分析软件 COMSOL 构建一种新型 12 电极平面阵列传感器,以传感器平面几何中心为圆心,同心设计两个圆形,内圆半径为 R_1 ,外圆半径为 R_2 。以传感器的水平中心线和垂直中心线为极间屏蔽,依据中心对称原则,将极板面划分为 12 个形状不规则的电极。排布方式和电极标号如图 1 所示。传感器的外壳尺寸为 165 mm×165 mm, R_1 为 40.4 mm, R_2 为 57.9 mm。为使电场线收敛于电极上方,在电极之间和边缘处添加屏蔽。为了与文献[19]所提出的 3×4 矩形阵列传感器进行对比分析,两种传感器极板数量相同,外壳尺寸保持一致,极间屏蔽均为 1 mm。

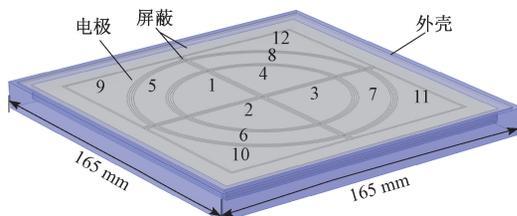


图 1 新型 12 电极平面阵列传感器

Fig. 1 A novel 12 electrode planar array sensor

3 敏感场建模及灵敏特性分析

3.1 敏感场模型

平面电容传感器的敏感场分布是不均匀的,对敏感区域进行分割是研究灵敏度分布的一种有效方法。建立三维敏感场模型,分层分块研究其分布特性。将传感器上方的敏感区域等分成 20 层,最靠近传感器表面的为第 1 层,按照顺序依次叠加,距离传感器表面最远为第 20 层。每层有 3 600 个小区域,共计 72 000 个敏感单元。根据式(3)可以得到电极 i 和 j 对于每个敏感单元 e 的灵敏度值 $S_{i,j}(e)$ 。新型传感器有 12 个电极,由电极的不同组合方式可知得到的敏感场矩阵 \mathbf{S} 维数为 66×72 000。

3.2 子灵敏度

定义任意两个电极之间的敏感场为子灵敏度。由

式(3)得到的敏感场数据量过大且直接分析数据不够直观,因此选取两个典型子灵敏度进行分析。对电极对1~4和电极对9~11间的灵敏度值采用三维成像的方法,得到第1层的三维分布图,如图2所示。

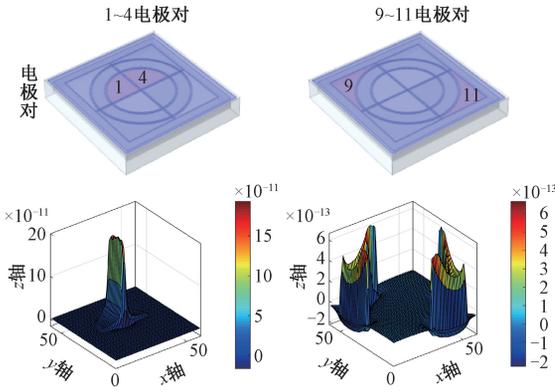


图2 子灵敏度分布
Fig. 2 Sub sensitivity distribution

由图2可知,相邻极板1~4的灵敏度值集中分布于

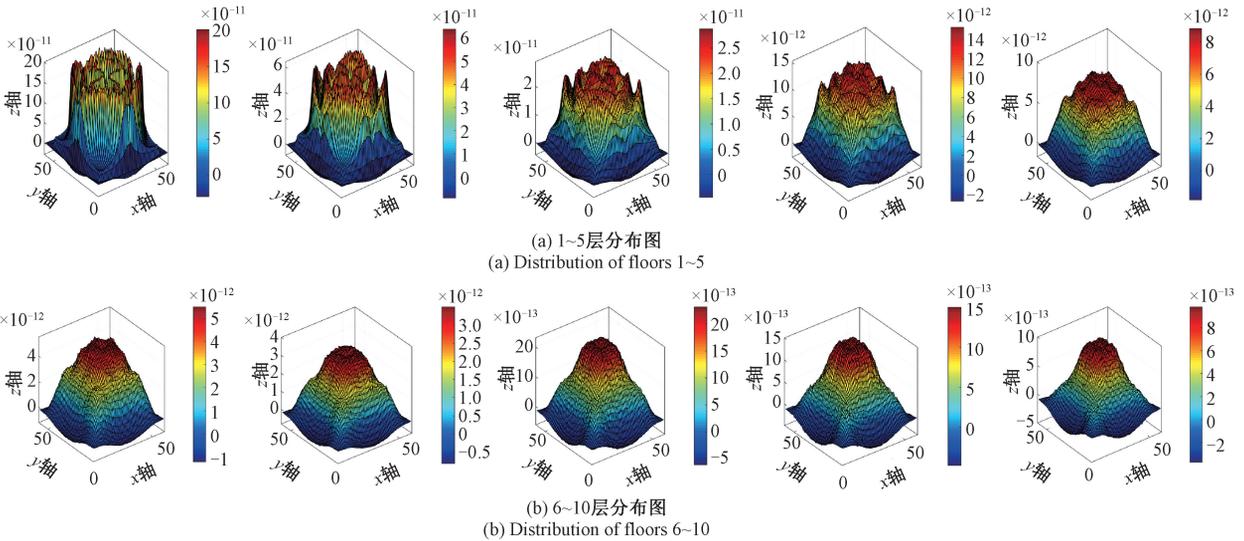


图3 整体灵敏度分布
Fig. 3 Overall sensitivity distribution

3.4 评价指标

敏感场的均匀性反映的是传感器对于敏感单元感应能力的分布差异,会影响成像保真度。

定义 n 个敏感单元的灵敏度平均值和标准差为:

$$S_{i,j}^{avg} = \frac{1}{n} \sum_{e=1}^n S_{i,j}(e) \quad (4)$$

$$S_{i,j}^{dev} = \left(\frac{1}{n-1} \sum_{e=1}^n (S_{i,j}(e) - S_{i,j}^{avg})^2 \right)^{1/2} \quad (5)$$

式中: $S_{i,j}^{avg}$ 为电极 i 和电极 j 间全部敏感单元灵敏度值的平均值, $S_{i,j}^{dev}$ 为电极 i 和电极 j 间全部敏感单元灵敏度值

的两电极中间,呈单峰状。相距最远极板9~11的灵敏度值主要分布于电极附近,呈驼峰状。灵敏度值大小与极板距离呈负相关。不同极板对对同一敏感单元的敏感系数不同,同一极板对对同一位置的灵敏度值也不同。这进一步表征 C 与 G 是极度非线性关系,使得 G 的精确求解十分困难。

3.3 整体灵敏度

子灵敏度仅仅揭示局部规律,为了获得整个传感器的敏感场变化规律,将所有子灵敏度求和得到整体灵敏度,前10层分布如图3所示,图3(a)为1~5层分布,图3(b)为6~10层分布图。

分析图3可知,整体灵敏度值随着层数的递增呈下降趋势,这是因为距离传感器表面越远,相应电势值越低。1~5层图像中极间屏蔽会使电场线更多地收敛于屏蔽附近,相应的灵敏度值较大导致灵敏度区存在明显的尖峰。6~10层中屏蔽对电场分布的影响逐渐弱化,没有出现局部尖峰,灵敏度分布较为均匀。

的标准差, n 为单元个数。 $S_{i,j}(e)$ 为极板 i 和极板 j 间第 e 个单元的灵敏度值,可由式(3)得到。

定义传感器优化设计指标 P 如下:

$$P = \frac{1}{M} \left(\sum_{i=1}^{11} \sum_{j=2}^{12} \left| \frac{S_{i,j}^{dev}}{S_{i,j}^{avg}} \right| \right) \quad (6)$$

式中: M 为电极对数, $M = n(n-1)/2$, n 为极板数。平面电容传感器有12个电极,因此 M 的值为66。

分析可知,新型传感器的6~10层获得的敏感场分布较为均匀,因此可以选用第6层的灵敏度值进行比较分析。结果如表1所示,可以得出新型传感器比矩形阵

列传感器的 P 值减小 3.6%。对于平面电容传感器来说, P 值越小, 传感器灵敏度分布均匀性越优, 求解域内各单元的灵敏度值越接近^[20]。因此, 新型 12 电极传感器性能更为优异。

表 1 均匀性评价指标 P

Table 1 Uniformity evaluation index

传感器	敏感场分布均匀性 P
矩形阵列传感器	4.188
新型 12 电极传感器	4.036 8

4 实验及结果分析

4.1 平面阵列成像系统

平面阵列电容成像系统包括电容传感器, 数据采集模块和图像重建模块, 如图 4 所示。传感器测量极板间的电容值。电容传感器有 12 个电极, 采用单电极激励的循环激励模式, 激励电压为 5 V 正弦交流电压, 如激励电极 1, 测量 1-2, 1-3, ..., 1-12 间的电容值, 激励电极 2, 测量 2-3, 2-4, ..., 2-12 间的电容值。完成一次测量可得 66 个独立电容值。电极表面添加绝缘盖板用来保护电极及内部电路。所有屏蔽与电极由铜制成, 盖板和外壳由丙烯酸塑料制成。数据采集模块为 ITS-M3C 高精度电容测量模块, 处理电信号, 采集频率^[21]为 1 MHz, 进行滤波, 放大等操作。图像重建模块采用 PC 实现, 以电容值作为投影数据, 依据成像算法重构被测物场信息。

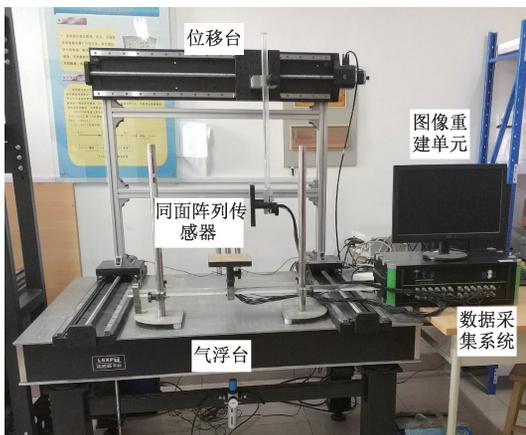


图 4 平面阵列检测系统

Fig. 4 Planar array detection system

4.2 物场测量实验

敏感场分布越均匀, 对于提升物场 G 的求解精度越有利。建立 3 个物场模型验证分析新型传感器的检测能力。被测物体为圆柱体, 高度 2 mm, 直径为 30 mm, 材质

为实验室现有的亚克力板, 介电常数为 3.7。更改圆柱体的数量和位置来设置不同的对象场条件。

模型 1 考察传感器中心物体的成像能力, 模型 2 在水平中心线上对称放置两个圆柱体, 模型 3 在模型 2 的基础上放置两个圆柱体在垂直中心线上。模型 2 和模型 3 考察传感器四周多个物体的检测能力。两个传感器外壳尺寸相等, 被测物摆放位置相同。传感器实物图如图 5、6 所示。



图 5 矩形阵列传感器

Fig. 5 Rectangular array sensor

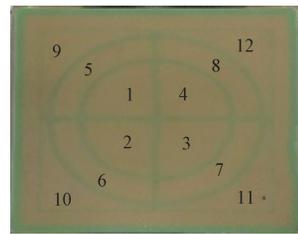


图 6 新型 12 电极传感器

Fig. 6 New 12 electrode sensor

4.3 结果及分析

1) 电容数据分析

模型 1 的测量电容曲线如图 7 所示, 通过分析电容数据特征, 可以得知被测物体的位置信息。由图 7 可知, 矩形阵列传感器的电容最大值对应第 46 个测量点, 相应的极板对为 6-7, 表示物体位于电极 6 和 7 中间, 与物体实际位置相符。新型传感器电容曲线有 4 个波峰, 横坐标分别为 1、3、12 和 22, 对应电极对分别为 1-2, 1-4, 2-3 与 3-4。表示物体位于 4 个电极中间, 同样与物场模型相符。同理, 经检验对于模型 2 和 3 而言, 两种传感器均可以判断出被测物体的大致位置。

2) 图像重建及质量评估

根据式 (3), 由测得的电容数据和灵敏度值, 通过 Tikhonov 正则化算法^[22]可以反推出被测物场的介质分布图像。由于成像结果中存在较大的伪影, 因此可以从彩色图像中提取红色分量, 以红色分量图中的高亮部分表示被测对象。此红色分量图更易于观察和获取面积比, 重建图像和红色分量图如图 8 所示。

选取红色分量图与实际介电常数分布的相关系数数量

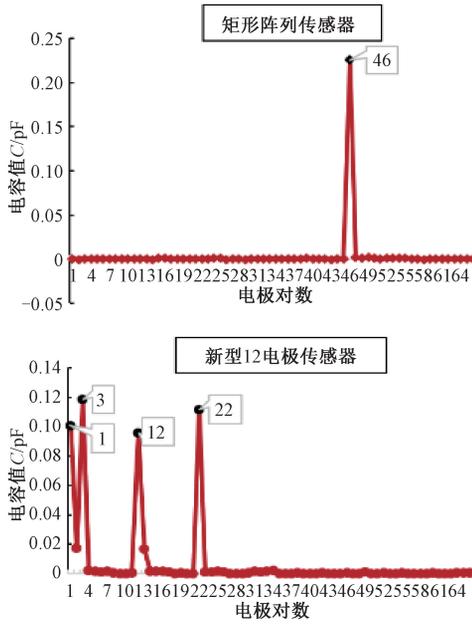


图 7 测量电容曲线

Fig. 7 Measuring capacitance value curve

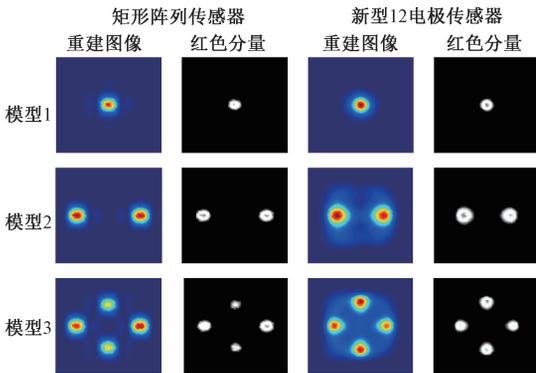


图 8 重建图像及红色分量

Fig. 8 Reconstruction image and red component image

化评判两种传感器的重建质量,相关系数越大,表明图像重建精度越高^[23]。相关系数 CC 定义如下:

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

式中: $\hat{\mathbf{g}}$ 为重建后的归一化介电常数向量; \mathbf{g} 为真实物场分布的归一化介电常数向量; $\bar{\hat{\mathbf{g}}}$ 和 $\bar{\mathbf{g}}$ 分别为 $\hat{\mathbf{g}}$ 和 \mathbf{g} 的平均值; t 为像素点个数。

评估结果如表 2 所示,相比于矩形阵列传感器,新型 12 电极平面阵列传感器在 3 种物场模型下的平均相关系数提升 7.2%,图像质量更高,平面阵列电极的检测能力得以提升。

表 2 相关系数评估结果

Table 2 Evaluation results of correlation coefficient

物场模型	矩形阵列传感器	新型 12 电极传感器	变化幅度/%
模型 1	0.922 4	0.930 2	0.8
模型 2	0.840 2	0.928 4	10.5
模型 3	0.713 4	0.786 3	10.2

5 结 论

针对平面电容成像技术中敏感场分布不均匀的问题,提出了一种新型 12 电极阵列电容传感器。建立三维敏感场模型并分析灵敏特性,同时比较了新型传感器和矩形阵列传感器的传感特性和成像能力。结果表明新型 12 电极传感器的 P 值减小了 3.6%,成像辨识度更好。本文不仅为平面阵列电极传感器的优化设计提供了新的研究思路,也改善了敏感场分布的不均匀性,使传感器的检测能力得到提升。

参考文献

[1] HYVONEN N, MUSTONEN L. Generalized linearization techniques in electrical impedance tomography [J]. Numerische Mathematik, 2017, 140(1): 95-120.

[2] SCANGOS K, WEINER R, COFFEY E, et al. An electrophysiological biomarker that predicts treatment response to ECT [J]. Biological Psychiatry, 2018, 83(9): S270-S271.

[3] CHEN D, HU X, YANG W. Design of a security screening system with a capacitance sensor matrix operating in single-electrode mode [J]. Measurement Science and Technology, 2011, 22(11):114026.

[4] YIN X, HUTHCHINS D A, CHEN G, et al. Preliminary studies on the design principles of capacitive imaging probes for non-destructive evaluation [J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2013, 42(3): 447-470.

[5] WEN Y, JIA Y, ZHANG Y, et al. Defect detection of adhesive layer of thermal insulation materials based on improved particle swarm optimization of ECT [J]. Sensors, 2017, 17(11):2440.

[6] YANG Y J, PENG L H, JIA J B. A novel multi-electrode sensing strategy for electrical capacitance tomography with ultra-low dynamic range [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2017, 53: 67-79.

[7] ZHANG Y Y, SUN Y R, WEN Y T. An imaging algorithm of planar array capacitance sensor for defect detection [J]. Measurement, 2020, 168: 108466.

[8] THOLIN-CHITTENDEN C, ABASCAL P J, SOLEIMANI

- M. Automatic parameter selection of image reconstruction algorithms for planar array capacitive imaging[J]. IEEE Sensors Journal, 2018, 18(15): 6263-6272.
- [9] WAIMAN R. The concept of 3D ECT system with increased border area sensitivity for crystallization processes diagnosis[J]. Sensor Review, 2021.
- [10] YE J, MAO M, WANG H, et al. Image reconstruction for ECT based on extended sensitivity matrix[J]. IEEE Sensors Journal, 2016, 16(8): 2466-2476.
- [11] 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 sensor [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2020, 39(3):25-29.
- [12] YIN X, CHEN G, LI W, et al. Design and characterization of planar capacitive imaging probe based on the measurement sensitivity distribution[J]. American Institute of Physics, 2013, DOI:10.1063/1.4789231.
- [13] THOLIN-CHITTENDEN C, SOLEIMANI M. Planar array capacitive imaging sensor design optimization[J]. IEEE Sensors Journal, 2017, 17(24): 8059-8071.
- [14] WEI H Y, QIU C H, SOLEIMANI M. Evaluation of planar 3D electrical capacitance tomography: From single-plane to dual-plane configuration [J]. Measurement Science & Technology, 2015, 26(6): 267-273.
- [15] 范文茹, 董永智. 面向 CFRP 板材的平面式电容传感器设计优化[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(7):63-71.
FAN W R, DONG Y ZH. Design and optimization of planar capacitive sensor for CFRP sheet [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(7):63-71.
- [16] HU X H, YANG W Q. Planar capacitive sensors-designs and applications[J]. Sensor Review, 2010, 30(1): 24-39.
- [17] 王睿怀, 高鹤明. 平面阵列电容式固体颗粒速度测量方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(5): 133-139.
WANG R H, GAO H M. Solid particle velocity measurement method based on planar array capacitive sensor [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(5):133-139.
- [18] YE J, YANG W, WANG C. Investigation of spatial resolution of electrical capacitance tomography based on coupling simulation [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2020, 69(11): 8919-8929.
- [19] 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.
- [20] 王莉莉, 陈德运, 于晓洋, 等. 电容层析成像系统传感器优化设计[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(3): 515-522.
WANG L L, CHEN D Y, YU X Y, et al. Sensor optimization design in electrical capacitance tomography system [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(3):515-522.
- [21] DESILVA C W. Concepts for sensor matching in mechatronic systems[J]. Instrumentation, 2020, 7(3):1-14.
- [22] LIU C, XU L J, CAO Z. Measurement of nonuniform temperature distribution by combining line-of-sight TDLAS with regularization methods [J]. Instrumentation, 2014, 1(3):43-57.
- [23] LIU X, WANG X, HU H, et al. An extreme learning machine combined with landweber iteration algorithm for the inverse problem of electrical capacitance tomography [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2015, 45: 348-356.

作者简介



温银堂, 2018 年于燕山大学获得博士学位, 现为燕山大学研究员, 博士生导师, 主要研究方向为复合材料无损检测。

E-mail: yzhang@ysu.edu.cn

Wen Yintang received his Ph. D. degree in 2018 from Yanshan of University. He is currently a researcher and Ph. D. supervisor at Yanshan University. His main research interest includes nondestructive testing of composite materials.