

DOI: 10.13382/j.jemi.B2307166

一种新型应用于平面电容层析成像系统的 电容阵列传感器设计*

郭志恒 任嘉铭

(辽宁石油化工大学信息与控制工程学院 抚顺 113000)

摘要:平面电容层析成像(ECT)技术适用于复合材料表面/亚表面缺陷探伤检测,或传感器安装受限制等无损检测应用领域。针对常规平面ECT系统所采用的方形结构阵列传感器灵敏度分布均匀性较差、中心区域成像质量不高的问题,提出了一种新型结构阵列平面电容传感器,该传感器由7个单元传感电极构成蜂巢结构阵列。新型结构阵列传感器由COMSOL™专业软件进行建模分析,并设定静电场边界条件,求解并获得传感器的电场分布、极间电容值以及计算灵敏度矩阵。通过与相同尺寸的3×3方形阵列传感器进行比较,来评估新型结构阵列传感器的关键性能,即极间电容变化值和灵敏度分布均匀性。此外,传感器实物采用印刷电路板技术设计制作,结合线性反投影算法进行图像重建,比较和验证两种结构传感器的成像性能。经过数值成像实验和实物重建图像测试,结果表明,新型结构阵列传感器有利于电容传感信号检测,改善了传感器灵敏度分布均匀性,提高了平面ECT系统中心区域成像质量。

关键词:平面电容传感器;蜂巢结构阵列;电容层析成像;灵敏度图

中图分类号: TN911.73 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.40

Design of a novel capacitance array sensor for capacitance tomography system

Guo Zhiheng Ren Jiaming

(College of Information and Control Engineering, Liaoning Petrochemical University, Fushun 113000, China)

Abstract: Planar electrical capacitance tomography (ECT) is suitable for non-destructive testing applications such as surface/subsurface defect detection of composite materials, or limited sensor installation. A new planar capacitive sensor with a new structure array is proposed aiming at the problems of poor sensitivity distribution uniformity and low imaging quality of the central region of the square array sensors used in conventional ECT systems. The sensor consists of a honeycomb array of seven sensing electrodes. The new structure array sensor is modeled and analyzed by COMSOL™ professional software, and the electrostatic field boundary conditions are set, and the electric field distribution, electrode capacitance value and sensitivity matrix of the sensor are obtained. By comparing with the 3×3 square array sensor of the same size, the key performance of the new structure array sensor, that is, the change value of the electrode capacitance and the uniformity of the sensitivity distribution, is evaluated. What's more, the physical sensor is manufactured using printed circuit board technology combined with linear back-projection algorithm for image reconstruction, and the imaging performance of the two structures of sensors is verified. The results of numerical imaging experiments and test of reconstructed images show that the new structure array sensor is beneficial to the detection of capacitive sensing signals, improves the uniformity of sensor sensitivity distribution, as well as the imaging quality of the central area of the ECT system.

Keywords: planar capacitive sensor; honeycomb structure array; electrical capacitance tomography; sensitivity map

0 引言

电容层析成像 (electrical capacitance tomography, ECT) 是一种为工业过程开发的成像技术^[1-7]。ECT 传感器对介质材料的介电常数变化敏感,例如水、油和复合材料。常规的 ECT 系统传感器主要有圆形/圆柱形或矩形结构。典型的传感电极阵列通常围绕目标物体(管道,容器或罐)布置。但在某些情况下,工业容器外围设备不允许接近,当工业过程测试区域受限时,不能使用常规的圆周 ECT 设备。如果工业过程设备只能单侧接近时,平面 ECT 传感器可以适用于这种设备。近年来平面电容传感器被广泛地研究,是因为其电极阵列可以容易地应用于工业过程检测。例如湿度监测,无损检测 (non-destructive testing, NDT), 材料表征和工业成像等^[8-12]。

在 ECT 系统中,通过 C/V 转换测量电路采集电极间电容,利用测量数据和重建算法进行图像重建。电容值变化量和对介电常数变化的灵敏度都是改善重建图像质量的关键点。然而,平面电容阵列经常存在相距远的电极间检测灵敏度降低和物体内部深层检测信号强度微弱的缺点。常规的 ECT 传感器设计主要考虑综合性能参数和检测条件,其中灵敏度分布均匀性是图像重建的关键性能,分布均匀性与灵敏度矩阵的条件数密切相关,通常灵敏度分布越不均匀,其灵敏度矩阵的条件数越大,系统的病态性越强,图像重建的稳定性越差。但只有很少的文献中,报道有关于平面电容传感器灵敏度分布的研究。温银堂等^[13]提出一种新型 12 电极平面阵列电容传感器并对灵敏度特性分析,研究证明新型 12 电极传感器可以有效改善敏感场均匀性。宋震等^[14]设计了一种平面 8 电极阵列传感器用于油水多界面检测,研究电极宽度、长度和电极间距对传感器敏感场分布的影响,证明了平面电容传感器检测油水界面的可行性。马敏等^[15]针对平面 44 电极阵列结构研究屏蔽层和电极间距对数据测量和成像效果的影响,证明了优化电极间距、加入边缘屏蔽和极间屏蔽可以提高平面电容传感器的检测能力。就电容传感器设计而言,其灵敏度均匀性是评估设计的关键参数^[16],与传统的电容阵列相比,设计满足敏感场强度和均匀性要求的平面传感器结构更加复杂,特别是有不同的特性被测物和特殊测量条件^[17]。不同的电极形状和分布结构生成各异敏感场,将导致不同的灵敏度分布和传感电容值变化范围,其对于成像性能相比其他受传感器尺寸限制的平面阵列设计参数(如电极大小和间距要受阵列大小限制,相对调整变化不大)产生更重要的影响^[18]。因此,对于平面电容传感器,需要进一步研究针对传感信号幅度范围、灵敏度均匀分布,设计传感器结构合理,成像性能优化的方案。

为了更好地满足平面 ECT 系统对于成像性能的要求,同时也解决安装空间限制的问题,本文设计了一种由 7 个正六边形单元电极构成的蜂巢结构阵列传感器,该传感器具有空间结构紧凑、对称的特点。在此项研究中,提出的新型结构的平面传感器阵列由 COMSOL™ 建模和仿真,在灵敏度均匀分布和信号幅度范围两个关键方面,分析了其传感器性能,并与常见的矩形阵列传感器进行比较分析,验证其优良的性能。

1 平面传感器结构和传感模型

1.1 传感原理

不同于平行板电容传感器,平面电容传感器电极位于一个共面平面内,利用产生的边缘电场作为主要探测电场,穿过被测物,检测其内部介电特性变化。如果待测物内部存在异常或缺陷,电场分布会随之产生波动改变,传感转换为电极间的电容变化,从而实现内部结构变化检测,平面电容传感器检测原理如图 1 所示。

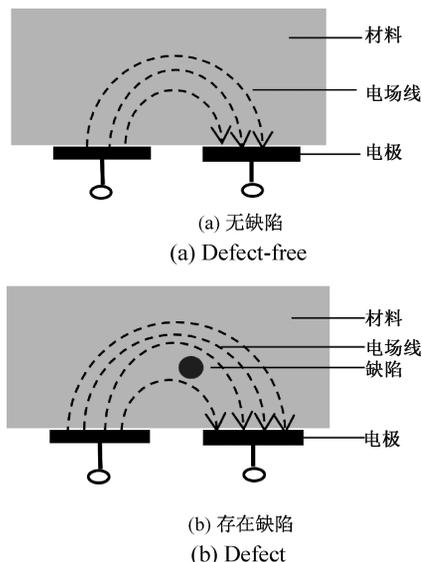


图 1 平面电容传感器检测原理

Fig. 1 Detection principle of planar capacitance sensor

在 ECT 系统中,单极激励模式为:一次仅激励一个电极,其他电极依次地连接入电容测量电路,剩余电极被接地,满足似稳场条件。边缘电场沿高度上衰减快,超过穿透深度(约为常规方形阵列尺寸 65%)不能感应介质变化^[17]。以 1.5 倍电极阵列尺寸为半径的球内作为敏感区域,其外部的电场强度设为 0。假设内部没有电荷时,介电常数的分布与被测量电容之间的关系可以从式(1)中的近场麦克斯韦方程导出。

$$\nabla[\varepsilon(r, \theta, \varphi) \nabla u(r, \theta, \varphi)] = 0 \quad (1)$$

式中: $\varepsilon(r, \theta, \varphi)$ 是介电常数分布, $u(r, \theta, \varphi)$ 敏感场内电

势分布。

灵敏度可基于敏感场电场分布来计算,ECT系统正向建模与灵敏度计算已深入研究^[19],灵敏度计算公式为:

$$S_{i,j}(k) = - \int_P \frac{E_i(k)}{V_i} \cdot \frac{E_j(k)}{V_j} dv_n \quad (2)$$

式中: $E_i(k)$ 、 $E_j(k)$ 分别为在电极 i 和 j 加电位 V_i 和 V_j , 其他电极接地时的电场分布, k 为第 k 个体素, P 为敏感区域。

激励和传感电极互异时,电极间灵敏度被表示为激励和传感电极施加单位电压激励生产电场的点积。灵敏度分布是无损检测(nondestructive testing, NDT)或成像技术中的关键问题之一,特别在ECT系统中,其建立了电容测量值和介电常数分布之间的关系。此外,作为常规的图像重建正向模型,在设计电容平面传感器时,考虑灵敏度均匀性和信号强度范围,将其用作评价传感器性能的主要标准。灵敏度分布均匀性评价指标,即变化参数(smooth video project, SVP)定义为^[19]:

$$SVP = \frac{S_{dev}}{S_{avg}} \quad (3)$$

$$S_{avg} = \frac{1}{m'} \sum_{k=1}^{m'} S_{i,j}(k) \quad (4)$$

$$S_{dev} = \left(\frac{1}{m'} \sum_{k=1}^{m'} (S_{i,j}(k) - S_{avg})^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

式中: S_{avg} 和 S_{dev} 是电极对间 N 个单元的灵敏度均值和方差, $S_{i,j}(k)$ 为传感器敏感区灵敏度分布值, m' 为传感器敏感区单元数。SVP 越小,灵敏度分布越均匀。

1.2 传感器仿真模型

有限元方法是研究分析电容传感器阵列性能的有效方法。ECT系统工作频率通常小于1 MHz,因此,利用COMSOL™多场耦合软件的准静电场模式适合此条件下电容传感器仿真建模。

本文设计的蜂巢结构的电容阵列传感器与常规的方形阵列传感器进行比较,以验证其性能的优越。在传感器设计中,根据应用条件来确定阵列结构中电极尺寸,对称结构的电极尺寸为中心到四周边缘距离的两倍。蜂巢阵列结构的单元六边形电极和方形阵列结构的正方形电极边长分别为10和17 mm,故蜂巢结构阵列和方形阵列的电极尺寸为别为17.3和17 mm,两者电极尺寸接近。穿透深度是平面电容传感器的关键指标,其与电极尺寸密切相关。在实际有效测量的穿透深度为两电极中心距的1/2^[20]。当电极间距增加,电场的辐射范围变大,穿透距离增大。但电容量变小,可检测的信号量变小。通过测试,当电极尺寸与电极间距的归一化值为5~16范围内较为合适。当电极间距取2 mm,考虑实验介质材料变化。相邻电极间电容值在0.78~7.8 pF,满足数据采集

系统测量范围。对于同一种阵列结构电容传感器,在相同电极间距条件下,较大电极覆盖面积,可获得较大极间电容,测量电路对应信噪比越大,有利于信号检测。设计的蜂巢阵列结构和方形阵列结构电极覆盖面积占比分别为50.5%和72.25%,并且两者单电极面积比为0.9。

上述两种结构传感器阵列的COMSOL™几何结构由双面印刷电路板构成。两者尺寸相同,为76 mm×76 mm,顶部和底部由中央60 mm×60 mm的方形传感区域和8 mm宽的外围屏蔽边缘组成。在 $z=0$ 平面上,绘制60 mm×60 mm(XY 平面)正方形并向下扩展(负 z 方向)1.5 mm厚长方体作为传感器的介电基板(FR4),其顶部包含嵌入式电极,两侧有屏蔽边缘。直角坐标下的三维模型如图2所示。

不同高度的待测介质材料(MUT)放置于面向电容阵列传感器的基板上方。基板材料为FR4,介电常数为4.4,电极铜箔厚度设定为0.1 mm,背板厚度为1.5 mm,待测介质介电常数为4.5。电极在基板上的排列由两个主要的几何参数确定,分别为电极尺寸(图2(a)中的“1”和图2(b)中的“a”)和电极间隙 S 。传感器制作选取为:蜂巢电极单元边长 $l=10$ mm;方形传感阵列的正方形边长 $a=17$ mm,两者电极间隔 $S=2$ mm。考虑仿真精度和运算量的限制,模型计算域选取半径100 mm的球体。

1.3 有限元网格划分与边界条件设置

在进行COMSOL™仿真时,网格设置确定了有限元网格的分辨率。由于电容传感器模型是三维模型,因此,选择自由四面体单元,定义精细的网格尺寸,划分电极附近的子域,以便获得更准确的结果。最后,选择网格最大和最小四面体尺寸分别为10和0.08 mm;生成合适分布的网格模型,该网格由约 1.86×10^6 个四面体单元组成,网格如图3所示。

在模型的所有外侧以及不同子域之间接口处设置边界条件。多电极和屏蔽屏的边界条件分别设置为端子和接地。作为激励电极的端子施加1 V电压,作为传感电极的其余端子施加0 V电压。

2 数值实验分析

2.1 极间电容

为了分析设计关键参数与平面传感器性能之间的关系,对两种结构的平面传感器进行了后处理和仿真数据分析。后处理模块的派生值计算包括全局矩阵值和点矩阵值计算,其可用于计算设计的蜂巢结构和方形结构传感器模型的互电容和电场强度幅值。

通过设置端子扫描计算求解,阵列中每个电极依次被激励求解,两种平面结构传感器电容(互电容、自电

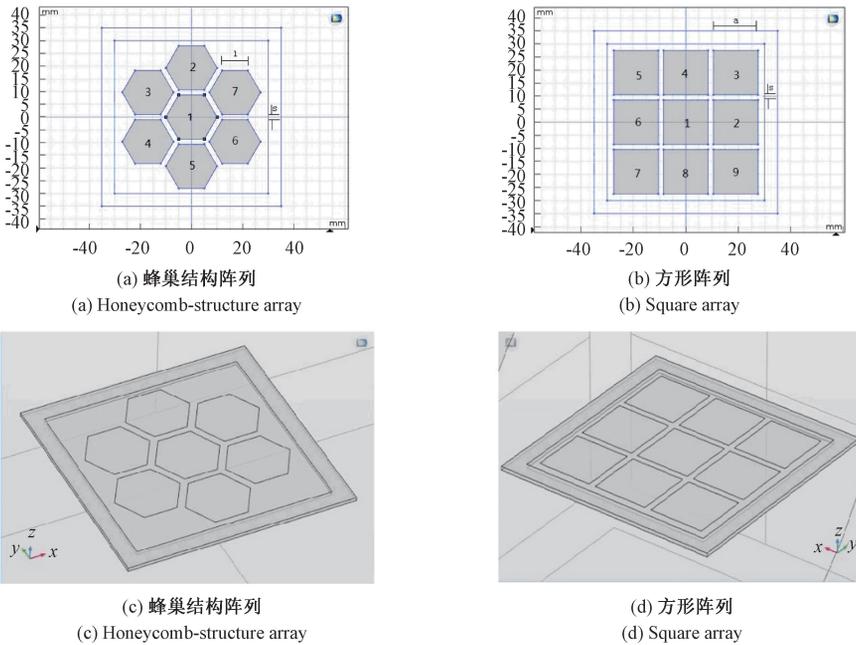


图 2 两种阵列结构的三维模型

Fig. 2 Three-dimensional models of two array structures

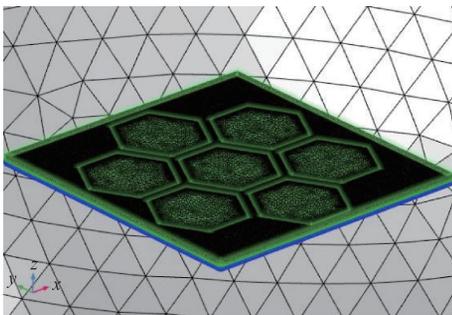


图 3 用于传感器仿真的精细有限元网格

Fig. 3 Fine finite element mesh for sensor simulation

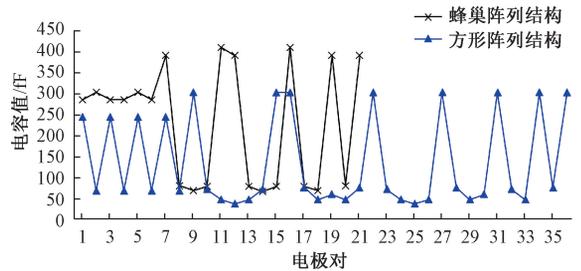


图 4 两种结构阵列全部极间电容值

Fig. 4 All inter-electrode capacitance values of the two structure arrays

容)能被计算和存储在全局矩阵内。极间电容(互电容)如图 4 所示。同样,在 XY 平面($Z=0$)敏感场内取多点的电场向量被计算存储在点矩阵内,并根据式(3)计算可用电极对的灵敏度。因为两种阵列结构都是中心对称结构,方阵结构有 6 种典型电极对灵敏度(1-2、1-3、2-3、2-4、2-5 和 2-6),而蜂巢结构也是旋转对称结构,只有 5 种典型灵敏度图,灵敏度图 2-5 与方阵结构的 2-6 位置上大致对应,电极 2-6 与 2-4 对称,灵敏度图类似。

为了提高成像速度,适应在线检测,采用二维成像进行比较。对高度划分为 8 层,分别计算各层灵敏度,图 5 为两种阵列结构各层 1-2 电极对间灵敏度平均值。根据图 5 可以分析出,灵敏度随高度的升高而快速衰减。在第 2 层(3 mm)~第 5 层(9 mm),两者灵敏度值接近,从第 6 层(11 mm)~第 8 层(15 mm),两者灵敏度差距变

大,两者的差值约为一个数量级,表明了蜂巢阵列 1-2 电极在穿透性能上要优于方形阵列 1-2 电极。在 3~11 mm 总体上呈现一定规律的衰减,中间层灵敏度分布比较均匀。在 5 mm 高度上,两种阵列结构 1-2 电极对灵敏度值接近,可以更好的比对两种阵列结构传感器的成像能力,因此选取第 3 层(高度为 5 mm)作为二维成像灵敏度。

从图 4 两种阵列的全部极间电容理论计算值得出,7 电极的蜂巢阵列和方形阵列都具有 $N(N-1)/2$ 个独立测量值。但其高幅度测量值的比率大于方形阵列传感器。7 电极蜂巢结构阵列具有 12 个高幅度电容值,其高幅度电容值与总测量数比率为 0.57,9 电极方形阵列高幅度电容值也为 12,相应的比率仅为 0.3。蜂巢结构电极与方形阵列结构单电极面积比率接近 0.9,但是极间

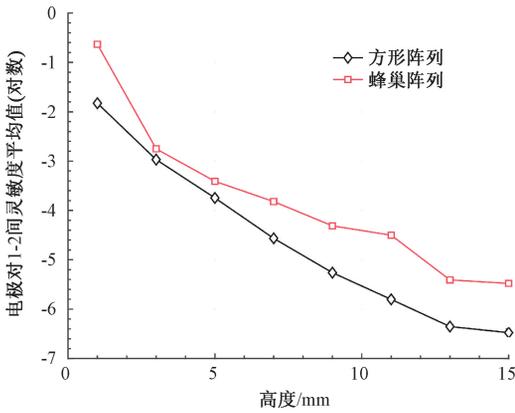


图5 两种阵列结构电极 1-2 间灵敏度平均值曲线
Fig. 5 The average sensitivity curves between 1-2 electrodes of two array structures

电容的平均值的比值高达 2.1,前者远大于后者。

可以看到,新型蜂巢结构阵列在相同电极间距,相同传感区域,稍小单元电极,具有较多的大幅值电容值和更大的平均电容值,有利于后续测量电路信号测量,提高检测电路分辨力。

2.2 灵敏度分布对比

为了比较上述两个结构传感器的灵敏度均匀性,选择典型的电极对间的灵敏度和整体灵敏度进行比较,6对典型灵敏度分布对比如图6所示。蜂巢结构阵列6对分布均较为均匀;方形阵列1-2,2-3均匀性稍好,而其他4对分布均匀性明显较差,主要是两电极接触面小并且为尖角。蜂巢阵列结构传感器在整体上分布的均匀性要由于方形阵列结构传感器。

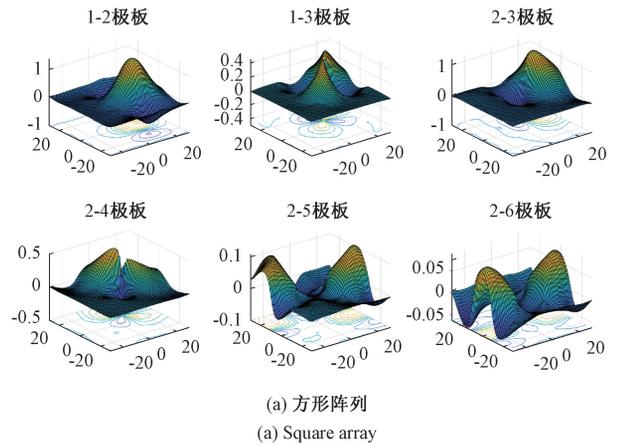
典型灵敏度分布的SVP由式(4)计算得到,并在表1中给出。从SVP数据看出,两种结构的S12(电极对1-2)和S23(电极对2-3)灵敏度分布的均匀性相近,而蜂巢结构的S23(电极对2-3),S24(电极对2-4)和S25(电极对2-5)要远远好于方形阵列的相应灵敏度。由蜂巢结构的对称性可知,电极对2-4与电极对2-6的灵敏度应该相同,COMSOL™计算得到的SVP分别是8.743和8.403,考虑误差因素,这一结果合理性得到验证。

表1 两种结构阵列5种典型灵敏度图的SVP

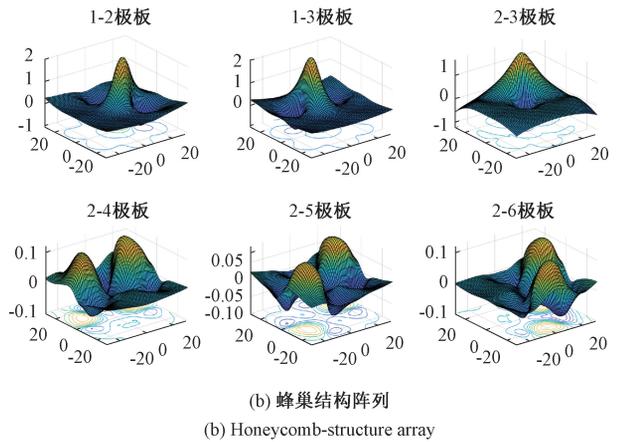
Table 1 SVP of five typical sensitivity maps of two kinds of structure arrays

灵敏度 SVP	S12	S13	S23	S24	S25	S26
蜂巢结构阵列	4.437	4.101	3.343	8.743	8.102	8.403
方阵结构阵列	3.922	12.592	3.267	12.089	17.231	45.378

将阵列传感器全部电极对灵敏度图求和得到总体灵敏度,其反映敏感场整体分布状况。图7和8分别为方形阵列和蜂巢阵列的总体灵敏度分布图。由图可见,蜂巢阵列灵敏度模型分布更均匀,中心区域的正灵敏区范



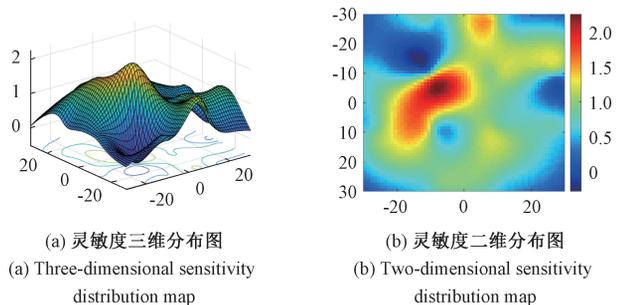
(a) 方形阵列
(a) Square array



(b) 蜂巢结构阵列
(b) Honeycomb-structure array

图6 两种阵列6对典型灵敏度图对比
Fig. 6 Comparison of six pairs of typical sensitivity maps of two arrays

围更大。



(a) 灵敏度三维分布图
(a) Three-dimensional sensitivity distribution map

(b) 灵敏度二维分布图
(b) Two-dimensional sensitivity distribution map

图7 方形阵列总体灵敏度分布图

Fig. 7 Overall sensitivity distribution of square array

根据对两阵列结构传感器对应的典型灵敏度图、整体灵敏度和SVP进行分析,蜂巢阵列结构传感器敏感场分布更加均匀,且中心灵敏度强度高,范围大。

采用蜂巢结构传感器,旋转且中心对称结构的中心与外围电极组合,以及两个相邻电极组合形成相对均匀

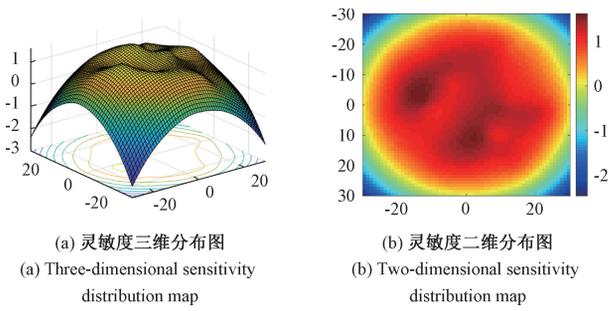


图 8 蜂巢阵列总体灵敏度分布图

Fig. 8 Overall sensitivity distribution of honeycomb array

的灵敏度分布。对比的常规方形阵列相邻电极接触面存在尖角,灵敏度均匀性较差,如 S13、S24、S25 和 S26。由此可见,蜂巢结构良好的对称性对灵敏度均匀分布有重要影响。

2.3 图像重建结果分析

数值实验建立 5 种典型测试原型模型,验证新型传

感器的性能。材料的介电常数设定为 10,其具体测试原型见表 2 中的原型分布。图像重建实验通过 COMSOL™ 传感器建模仿真获得的电容值作为投影数据,依据线性反投影(linear back projection, LBP)成像算法重建实验原型分布图像。为了评判两种阵列传感器的图像重建性能,引入图像相对误差(IE)和图像相关系数(CC)。通过两个评价指标来判断成像的质量。图像相对误差为:

$$IE = \frac{\|g - \hat{g}\|}{\|\hat{g}\|} \quad (6)$$

式中: g 为原型图像灰度向量; \hat{g} 是重建灰度向量。

图像的相关系数为:

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

式中: \bar{g} 和 $\bar{\hat{g}}$ 分别是 g 和 \hat{g} 的均值。重建图像相对误差越小,相关系数越大,则说明重建图像质量越好。

表 2 两种阵列结构传感器对应重建结果

Table 2 The two array structure sensors correspond to the reconstructed image

	测试原型 a	测试原型 b	测试原型 c	测试原型 d	测试原型 e
原型分布					
蜂巢阵列结构					
方形阵列结构					

根据表 2 中两种阵列结构传感器的重建图像,同时依据表 3 和 4 中的图像相对误差和相关系数对实验结果进行分析可得出:1)对于 5 种测试原型,蜂巢结构传感器总体上更好地重建原型分布,轮廓失真较小,并且在测试原型 a 时,相应的重建图像 IE 最小,CC 最大,两个指标分别为 64.902% 和 0.747;2)由重建图像和重建指标可

知,蜂巢结构传感器在中心及中间带区域的成像保真度和分辨率要优于方形阵列结构传感器,如测试原型 a 失真小,测试原型 d 重建图像上,下部可以与边缘明显分辨,另外,蜂巢阵列结构对应测试原型 a、d 和 e 的重建指标 IE 和 CC 相比好于方形阵列结构,尤其对于测试原型 e,IE 和 CC 优势更明显。

表 3 蜂巢阵列结构重建指标

Table 3 Honeycomb array structure reconstruction index

	测试原型 a	测试原型 b	测试原型 c	测试原型 d	测试原型 e
IE/%	64.902	79.504	88.742	67.225	79.996
CC	0.747	0.601	0.438	0.724	0.575

表 4 方形阵列结构重建指标

Table 4 Square array structure reconstruction index

	测试原型 a	测试原型 b	测试原型 c	测试原型 d	测试原型 e
IE/%	68.838	71.802	88.760	77.831	88.628
CC	0.707	0.721	0.492	0.622	0.448

3 实物原型实验

3.1 实物传感器及数据采集系统

为了验证上述数值分析的有效性,在研究中,采用 PCB 技术制作了 7 个六边形构成的蜂巢结构传感器和 3×3 方阵结构传感器,参数与数值模型的相同。设计制作的两种阵列结构电容传感器如图 9 所示。

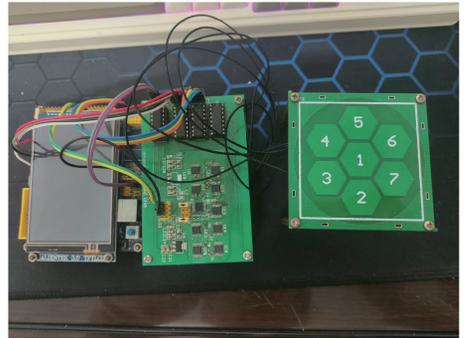


图 10 数据采集系统

Fig. 10 Data acquisition system



(a) 蜂巢结构

(b) 方阵结构

(a) Honeycomb-structure array

(b) Square array

图 9 两种结构阵列传感器实物

Fig. 9 Two kinds of structure array sensor physical objects

数据采集系统以 ARM 微处理芯片 (STM32F103) 为核心,控制多路模拟开关,实现多通道电容数据测量采集,每组通道接入的极间互电容采用 AD7746 电容数字转换芯片进行采集测量。平面阵列数据采集系统如图 10 所示。采集电路测量范围为 0.05~8 pF,测量电路信噪比近似范围 11.93~15.23 dB。

3.2 两种传感器输出信号对比

为了验证两种阵列结构电容传感器输出性能,实验以表 5 中测试原型 a 来进行输出信号比较,以空气为背景介质,橡皮(介电常数为 2.5)作为高相介质进行测量。通过两种阵列结构电容传感器测得电容变化值如图 11 所示。

3.3 实物成像测试

以直径 1.5 cm 的圆形橡皮物体作为高相介质,以空气作为背景介质进行实验测试。为了检验新型传感器各

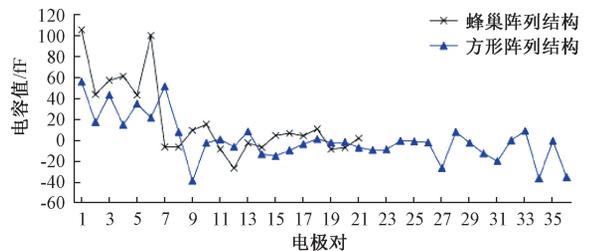


图 11 两种阵列测量电容变化值曲线

Fig. 11 Two kinds of array measurement capacitance curve

区域成像性能,实验时将橡皮物体分别置于两种阵列传感器中心区、四周中心带和顶角位置,具体如表 5 中原型分布所示。其中 a 为传感器中心,b 为正中心上方,c 为左上顶角。采用 LBP 算法进行图像重建。

从表 5 中的成像结果可以看出,蜂巢结构传感器与方形阵列传感器均可完成图像重建。根据表 5 中成像结果、表 6 和 7 中成像结果评价指标,在中心区前者成像质量明显优于后者,失真小,图像的相关系数大;在四周边缘区域两者都存在失真,蜂巢结构传感器由于电极数少,噪声干扰对其影响更为严重,轮廓失真明显,伪影较多,但是边缘能分辨位置间隙,而后者不能区分。总体上蜂巢结构传感器成像优于方形阵列传感器,这与数值实验结果是一致的。

表 5 实物成像测试重建结果

Table 5 Reconstruction results of physical imaging test

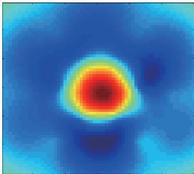
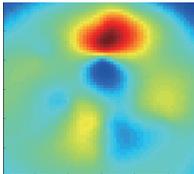
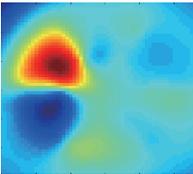
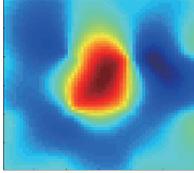
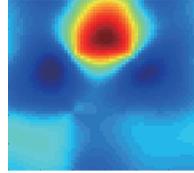
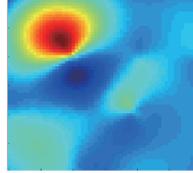
	测试原型 a	测试原型 b	测试原型 c
原型分布			
蜂巢阵列结构			
方形阵列结构			

表 6 实物成像结果图像相对误差

Table 6 Relative error of physical imaging results

	测试原型 a	测试原型 b	测试原型 c
蜂巢阵列结构	115.591	70.887 9	107.612
方形阵列结构	127.178	112.549	83.967 6

表 7 实物成像结果相关系数

Table 7 Correlation coefficient of physical imaging results

	测试原型 a	测试原型 b	测试原型 c
蜂巢阵列结构	0.777	0.672	0.291
方形阵列结构	0.471	0.625	0.417

4 结 论

本文研究了一种新型阵列结构平面电容传感器,对比常规方形阵列传感器,两者之间传感电容的幅值范围、灵敏度分布以及基于传感器图像重建性能。结果表明:设计的蜂巢结构传感器在较小电极覆盖面积和电极数量少的条件下,采用六边形电极形状和蜂巢结构阵列布局,使其在电容信号强度,灵敏度分布均匀性两方面具有优势,并且蜂巢阵列只有 7 个电极,一组成像数据为 21 个,比同尺寸方阵结构传感器少采集 1/3 以上数据,但是其成像性能上要优于后者,尤其在中心区域成像质量优势

明显,表明提出的蜂巢阵列结构可以改善平面电容传感器性能,中心区域成像效果也有明显改善。

参 考 文 献

- [1] CHE H Q, YE J M, YANG W Q, et al. Measurement of the gas-solid flow in a wurster tube using 3D electrical capacitance tomography sensor[C]. The Proceedings of the International Conference on Sensing and Imaging. Springer International Publishing, 2019: 367-383.
- [2] ROMANOWSKI A. Big data-driven contextual processing methods for electrical capacitance tomography[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018, 15(3): 1609-1618.
- [3] RYMARCZYK T, SIKORA J. Applying industrial tomography to control and optimization flow systems[J]. Open Physics, 2018, 16(1): 332-345.
- [4] LIU X, YANG W. Robot sensing based on electrical capacitance tomography sensor with rotation [J]. Measurement Science and Technology, 2023, 34(8): 085125.
- [5] 吴章友,杨道业,卞启涛,等. 三维电容层析成像传感器优化及循环流化床提升管轴向流动成像[J]. 化工进展,2021,40(12):6532-6539.

WU ZH Y, YANG D Y, BIAN Q T, et al. Optimization of three-dimensional ECT sensor and imaging of CFB riser in the axial direction [J]. Chemical Industry and

- Engineering Progress, 2021, 40(12): 6532-6539.
- [6] 段晨龙, 刘锡波, 周晨阳, 等. 基于电容层析成像技术(ECT)对干法重介流化床中分离机制的研究[J]. 煤炭学报, 2022, 47(2): 945-957.
DUAN CH L, LIU X B, ZHOU CH Y, et al. Research on the separation mechanism of dry dense medium separation fluidized bed based on electrical capacitance tomography[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(2): 945-957.
- [7] LUCAS J, HOLE S, BATIS C. Analytical capacitive sensor sensitivity distribution and applications [J]. Measurement Science and Technology, 2006, 17(9): 2467-2478.
- [8] TSAMIS E D, AVARITSIOTIS J N. Design of planar capacitive type sensor for "water content" monitoring in a production line[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2005, 118(2): 202-211.
- [9] GUPTA S, KIM H E, KIM H, et al. Planar capacitive imaging for composite delamination damage characterization [J]. Measurement Science and Technology, 2020, 32(2): 024010.
- [10] THOLIN-CHITTENDEN C, SOLEIMANI M. Planar array capacitive imaging sensor design optimization[J]. IEEE Sensors Journal, 2017, 17(24): 8059-8071.
- [11] PAN Z, WANG S, LI P, et al. An optimization method of planar array capacitance imaging [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2021, 327: 112724.
- [12] 马闻博, 孙衍山, 曾周末. 滑油磨粒大小的电容层析成像分析[J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31(12): 1984-1990.
MA W B, SUN Y SH, ZENG ZH M. Analysis of different size wear debris in oil by electrical capacitance tomography[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2017, 31(12): 1984-1990.
- [13] 温银堂, 尹申辉, 王震宇, 等. 阵列式电容传感器优化设计及灵敏特性分析[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(2): 229-234.
WEN Y T, YIN SH H, WANG ZH Y, et al. Optimal design and sensitivity analysis of array capacitance sensor [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(2): 229-234.
- [14] 宋震, 吕忠蕾, 麦洋. 基于平面电容的油水多界面检测方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(2): 178-187.
SONG ZH, LYU ZH L, MAI Y. Study on detection method of oil-interface based on planar capacitance[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(2): 178-187.
- [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 sensor [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2020, 39(3): 25-29.
- [16] YANG W. Design of electrical capacitance tomography sensors [J]. Measurement Science and Technology, 2010, 21(4): 042001.
- [17] HU X, YANG W. Planar capacitive sensors-designs and applications[J]. Sensor Review, 2010, 30(1): 24-39.
- [18] 刘再兴, 王海刚. 同心圆环区域电容层析成像传感器数目优化[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(10): 94-104.
LIU Z X, WANG H G. Optimization of the number of electrical capacitance tomography sensors with concentric annulus structure [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(10): 94-104.
- [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] 刘海青, 许锦峰, 姚恩涛, 等. 基于电容式传感器的建筑物围护结构含水率测试[J]. 传感器与微系统, 2008(7): 102-104.
LIU H Q, XU J F, YAO EN T, et al. Moisture test of building envelope based on capacitive sensor [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2008(7): 102-104.

作者简介



郭志恒, 分别在 1991 年和 1998 年于海军航空工程学院获得学士和硕士学位, 2009 年于东北大学获得工学博士学位。现任辽宁石油化工大学副教授、高级工程师, 主要研究方向为电学成像、智能仪器设计开发、多相流参数检测技术。

E-mail: guozhiheng@sohu.com

Guo Zhiheng received his B. Sc. degree and M. Sc. degree from the Naval Aviation Engineering College in 1991 and 1998, and received his Ph. D. degree from Northeastern University in 2009. Now he is an associate professor and senior engineer at Liaoning Petrochemical University. His main research interest includes electrical tomography, intelligent instrument design and development, and multiphase flow parameter detection technology.



任嘉铭(通信作者), 2020 年于辽宁工业大学获得学士学位, 现为辽宁石油化工大学硕士研究生, 主要研究方向为平面电容层析成像技术。

E-mail: 18524523900@163.com

Ren Jiaming (Corresponding author) received his B. Sc. from Liaoning University of Technology in 2020. Now he is a M. Sc. candidate in Liaoning Petrochemical University. His main research interest includes planar electrical capacitance tomography.