

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2417420

基于二级控制 64 极板平面阵列传感器的 ECT 系统<sup>\*</sup>

曹 蕊 田汉民 田学民 马旭蕾 刘维龙

(河北工业大学电子信息工程学院 天津 300401)

**摘 要:** 针对电容层析成像系统中 16 及以下极板平面阵列传感器测量数据少、检测精度相对低,而 64 极板三级控制复杂的问题,实现了一种基于 64 极板二级控制密集型平面阵列传感器的电容层析成像系统,通过硬件二级选线控制和软件敏感电极测量法,显著提高了电容层析成像速度和精度。理论计算及实测结果表明,二级控制的 64 极板密集型平面阵列传感器的电容层析成像精度达到 95% 以上,速度达到 2 s 左右,证明了该设计在复合材料无损检测领域的可行性和有效性。

**关键词:** 电容层析成像;密集型平面阵列传感器;敏感电极法;LBP

**中图分类号:** TN98      **文献标识码:** A      **国家标准学科分类代码:** 510.99

## ECT system based on secondary control 64 plate planar array sensor

Cao Rui Tian Hanmin Tian Xuemin Ma Xulei Liu Weilong

(Electronic Information Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of limited measurement data and relatively low detection accuracy of planar array sensors with 16 and below electrode plates in the capacitance tomography system, as well as the complexity of three-level control of 64 electrode plates, a capacitance tomography system based on 64 electrode two-level control dense planar array sensors has been developed. Through hardware two-level line selection control and software sensitive electrode measurement method, the speed and accuracy of capacitance tomography imaging have been significantly improved. Theoretical calculations and experimental results show that the capacitance tomography imaging accuracy of the 64 electrode dense planar array sensor with secondary control reaches over 95%, and the speed reaches about 2 s, proving the feasibility and effectiveness of this design in the field of non-destructive testing of composite materials.

**Keywords:** electrical capacitance tomography; dense planar array sensor; sensitive electrode method; LBP

## 0 引 言

现代航空器中复合材料生产、服役过程中的气孔、分层、隐裂、应变等损伤可通过近年来出现的电容层析成像技术(electrical capacitance tomography, ECT)实现非侵入性、快速、低成本的检测<sup>[1]</sup>,而其检测速度、灵敏度的关键因素之一是足够数量、尺度优化的多极板平面阵列电容传感器。

2015 年, Taylor 等<sup>[2]</sup>构建了一个包含 50 个极板的平面阵列传感器系统。其底部基板配备了 81 个方形阵列电极,内部 7×7 个电极用于层析成像。外侧电极用于接地屏蔽,顶部则是第 50 个电极,覆盖了整个测量区域。实验验证了该传感器及其算法能够有效检测 1.27 mm 材料层中的空隙结构。然而该电极选择电路使用了多达 12 个芯片,包括 2 个 CD4053 芯片、8 个 HCT4514 芯片和 2 个 CD4556 芯片,多层级选通控制电路在增加设计复杂度的同时引入

了大量噪声;2021 年,马敏等<sup>[3]</sup>针对单平面传感器信号强度不足和检测数据量较少的问题,提出了一种双平面电极阵列传感器,并搭建了一个 32 电极的传感器系统进行检测,实验结果证明,在检测信号强度及重构图像精度方面,该传感器均得到大幅提升,但其采用了两套电极选择电路,每套电路由两片一级复用模拟开关 CD4067BE 芯片组成,控制方法较为复杂;同年,杨博韬<sup>[4]</sup>在分析单层传感器结构特点后,提出了一种 3 层 12 电极的多层平面阵列传感器,采用双电极模式激励,实验结果表明,在其他条件保持不变的情况下,该新型传感器采集数据更多、图像重建质量更高,但该传感器极板尺寸相对较大,面对小尺度被测材料难以满足检测需求,且该装置抗干扰性及测量灵敏度有待提升;2023 年, Zhang 等<sup>[5]</sup>提出一种利用旋转传感器阵列获取更多电容数据的采集策略,通过比较不同旋转角度下测得

收稿日期:2024-11-21

<sup>\*</sup> 基金项目:中国中车重大项目(2023CKA362-1)资助

电容数据从而得到的重建图像,证明了随着旋转角精细度的提高,可产生质量更高的重建图像。然而,旋转是一项机械任务,需要额外的时间来完成,因此该方法只适用于有足够时间的检测情况。

通过上述学者对于平面阵列传感器的研究可知,传感器结构的发展趋势为极板微型化、密集化,并通过增加极板数量、使用双面传感器及旋转传感器等手段增加有效测量数据,数据采集电路通过设计性能优异的多路复用模块实现,从而提高 ECT 系统检测精度及速度。本文针对电容层析成像系统中 16 及以下极板平面阵列传感器测量数据少、检测精度相对低,而目前报道采用三级复用器的多极板平面阵列传感器,获得检测信号强度及重构图像精度的同时,又面临电路选通控制的层级多、引入噪音大,以及测量数据指数性上升影响图像重建速度的问题,设计了一种基于 64 极板二级控制密集型平面阵列传感器的电容层析成像系统。在不改变敏感区域的情况下,缩小极板面积,增加检测电容值,从而提高重建图像精度。同时通过优化软件数据分析算法,提高检测速度,使测量精度与速度均满足无损检测需求。

## 1 系统整体结构

平面电容层析成像系统包括平面阵列传感器、数据获取单元以及上位机 3 个部分,如图 1 所示。平面阵列传感器由多个均匀分布的平面电极构成,用于检测复合材料电容值;数据采集单元主要用于处理传感器检测数据,并通过串口或蓝牙传输至上位机;计算机成像系统用于接收采集数据并结合图像重建算法还原介电常数分布真值,实现对复合材料的可视化检测。

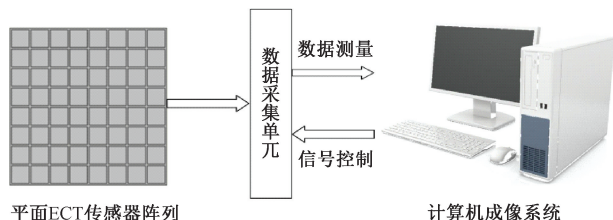


图 1 平面 ECT 整体系统结构图

Fig. 1 Overall system structure diagram of flat ECT

基于电容的边缘检测效应<sup>[6]</sup>,当传感器上方的被测复合材料内部存在缺陷(如孔洞损伤),则缺陷处介电常数异变,使得检测电容信号发生改变。

## 2 基于二级控制 64 极板密集型平面阵列的 ECT 系统设计

### 2.1 选通电路硬件设计

由于电容测量芯片通常仅有 1 对测量电极,而复用器芯片常为  $1 \times 8, 1 \times 16$ ,因而若要实现从 64 个极板中选择任意两个极板进行测量,需引入多枚复用器芯片并合理连接。

Taylor<sup>[2]</sup>的多路复用模块分为三级,第一级由 8 个 HCT4514 芯片组成,负责连接传感器极板与下一级模拟开关,但由于 HCT4514 芯片仅支持 16 选 1,当激励电极与检测电极处于同一芯片时,无法实现两通道选通测量,因此选用 2 个 CD4053 芯片作为二级模拟开关,利用 2 路 64 通道分别将激励电极和检测电极与测量芯片接通。第三级模拟开关由 2 个 CD4556 芯片组成,主要负责实现 HCT4514 芯片的使能选通,该方案具体电路图如图 2 所示。

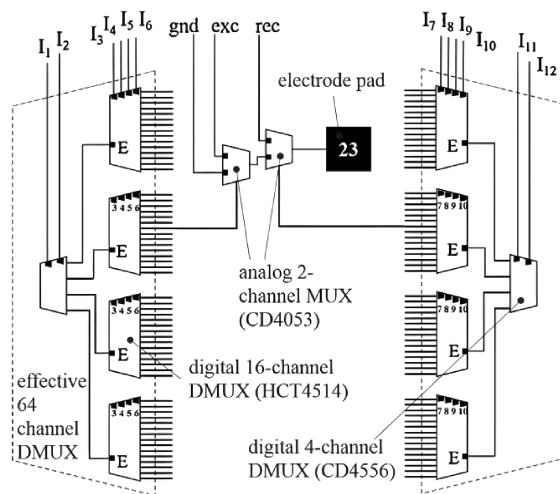


图 2 Taylor 的三级 64 路复用方案电路图

Fig. 2 Taylor's three-level 64 channel multiplexing scheme circuit diagram

相对于 Taylor 的三级 64 路复用方案电路图,本文提出了基于二级控制的 64 路选 2 的多路复用方案。

本方案第一级模拟开关不再采用 Taylor 方案中  $1 \times 8$  模拟开关 HCT4514,改用  $8 \times 16$  矩阵模拟开关芯片 CH446Q,如图 3 所示,CH446Q 芯片的 16 个模拟信号输入输出端口 X 端与传感器极板相连,共需 4 片 CH446Q 芯片,芯片的 Y 端与后续测量电路相连;本系统选用单刀四掷开关 CH444G 作为二级开关,负责 CH446Q 和电容检测芯片 PCAP02 之间的电路选通,共需两片 CH444G,芯片 S 端分别与 CH446Q 的 Y 端相连,芯片 Y 端与 PCAP02 的测量端口相连。

多路复用模块实现的功能是将 64 极板平面阵列传感器的两个电极依次接入微电容检测芯片 PCAP02 的两个检测端 PC6 和 PC7,整体流程如图 4 所示。首先对于模拟开关所有芯片进行初始化,之后等待主控模块向 CH444G 芯片发送指令并打开指定通道,对于 CH446Q 芯片进行外部复位后等待开启指令,收到主控模块信号后打开指定通道将激励电极和检测电极连接到电容测量芯片 PCAP02 检测端口 PC6、PC7,开始电容测量,检测到所有电极对间电容数据测量完毕后跳出该程序,将数据发送至上位机。

基于上述设计,搭建了密集型平面阵列传感器检测系统,其整体结构如图 5 所示。以 STM32F103ZET6 芯片为

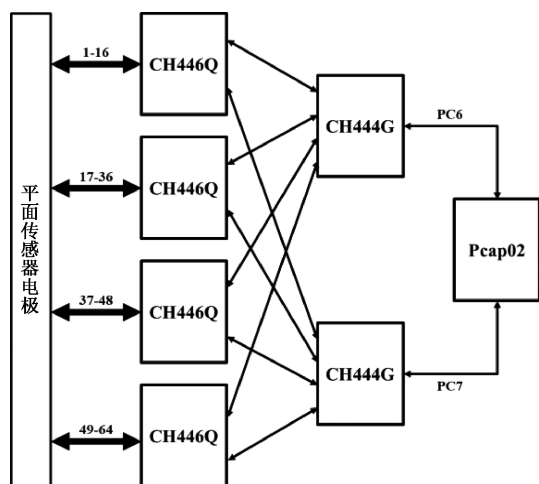


图 3 多路复用方案框图

Fig. 3 Block diagram of multiplexing scheme

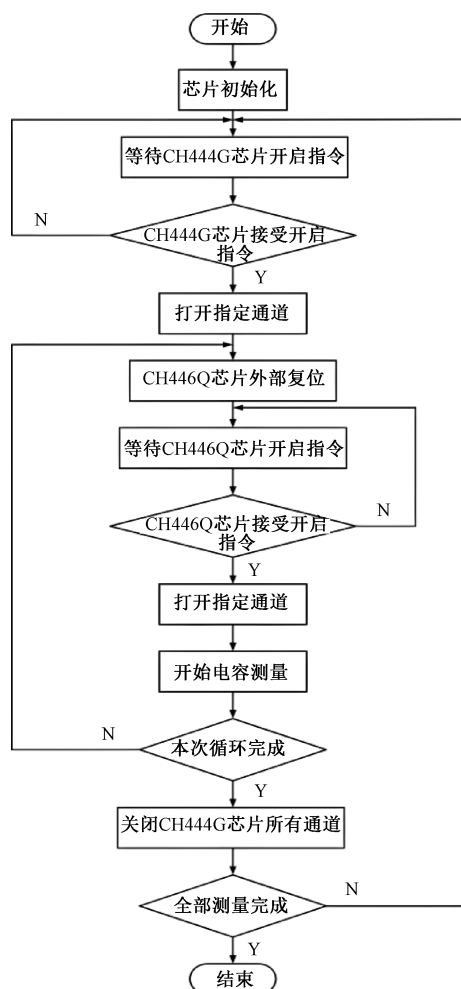


图 4 多路复用模块软件流程图

Fig. 4 Software flowchart of multiplexing module

控制核心,通过 SPI 通信实现与电容测量芯片 PCAP02 间的寄存器配置及数据通讯,通过模拟开关单元实现对 64 极

板两两电极对间电容值的测量,该部分通道选通同样由主控芯片控制。微电容检测芯片将传感器采集电容值转换成 24 bit 数据存放在内部寄存器中,主控芯片从该寄存器中读取数据并转换为十进制结果通过串口以二进制形式发送 ASCII 码输出至上位机,上位机根据 UART 协议将其转换为对应数值,数据经处理后结合图像重建算法生成图像。同时电容数据也可直接显示至 OLED 屏幕用于实时监测。

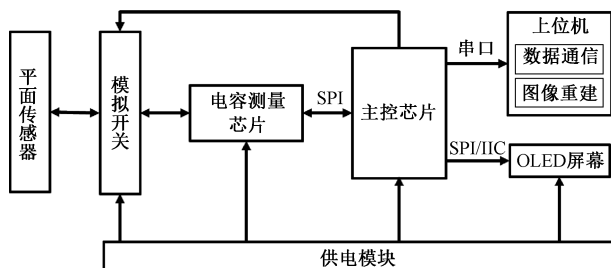


图 5 检测系统整体结构图

Fig. 5 Overall structure diagram of the detection system

供电模块主要包括两级降压处理,由于本系统所涉及的电源均为 5 V 和 3.3 V,故采用 LM2596-5.0 芯片将输入的 12 V 电压转换为 5 V 电压,用于为模拟开关芯片 CH446Q 及单刀四掷开关 CH444G 等供电,利用 AMS1117-3.3 芯片将 5 V 电压转换为 3.3 V 电压,用于为主控芯片及微电容检测芯片 PCAP02 等供电。

考虑到本系统对电路稳定性要求较高,另设计了后备电池电路用于应对突发断电导致的数据丢失情况,利用两个 IN4148 二极管 D1、D2,当外部电源工作时,二极管 D1 导通,并向 VBAT 连接的器件供电,当外部电源断开时,二极管 D2 导通,同时 D1 截止,由电池继续像器件供电。对于电路保护方面,采用肖特基二极管反接,在电源接反时阻止电流通过,防止对电路中其他元件造成损坏。

## 2.2 64 极板平面阵列的尺度优化

通过计算放置已知形状参数的介质在不同极板边长、极板间距的 64 电极平面式电容传感器的理论极间电容值得介质重建图像与该介质图像的相关系数,本文实现了 64 极板平面阵列的尺度优化。

首先,本文利用有限元分析软件对传感器进行仿真分析,搭建 16 电极及 64 电极的平面式电容传感器,初始极板边长为 10 mm,极板间距为 1 mm,如图 6 所示,两传感器敏感区域相同,均为 87 mm×87 mm。传感器模型分为 4 部分:基板、电极板、空气域和被测物。基板材料为 FR4,相对介电常数为 4.5;在基板表面敷铜实现多电极阵列;被测物相对介电常数设置为 3。

所测得的电容数据通过式(1)进行归一化:

$$C_{i,j} = \frac{C_f - C_m}{C_f - C_e} \quad (1)$$

式中:  $C_f$  为满场状态下测量电容值,  $C_m$  为被测物存在缺陷时的物场测量电容值,  $C_e$  为空场状态下的电容值。



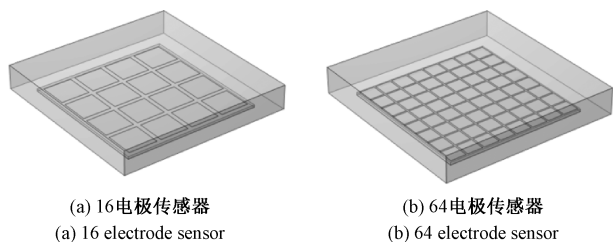


图 6 平面阵列电容传感器模型

Fig. 6 Model of planar array capacitive sensor

然后,通过 ECT 正反问题运算,获得介质重建图像。

ECT 正问题运算是是指在给定被测域介质分布条件下,求取每一对电极之间的电容值的过程<sup>[7-8]</sup>。

由高斯通量定理可得:

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{1}{V} \iint_D \epsilon(x, y) \nabla \varphi(x, y) ds \quad (2)$$

式中:  $Q$  表示极板表面的感应电荷,  $V$  表示两极板之间的电势差,  $\epsilon(x, y)$  表示被测物体横截面上的介质分布,  $\varphi(x, y)$  表示被测量物体横断面的电场分布。

两极板间电容:

$$C_{i,j} = \iint_D \epsilon(x, y) S_{i,j}[x, y, \epsilon(x, y)] dx dy \quad (3)$$

式中:  $i, j$  分别表示激励电极和检测电极的编号,  $D$  表示被测物横截面的面积,  $S_{i,j}$  表示坐标  $(x, y)$  和介质分布  $\epsilon(x, y)$  的函数,用于表示坐标  $(x, y)$  处电容  $C_{i,j}$  对介质常数的敏感程度。其中,  $S_{i,j}$  不仅受坐标位置的影响,也受该位置介电常数的影响,通常为了便于求解,可忽略这种现象,因此式(3)可简化为:

$$C_{i,j} = \iint_D (x, y) S_{i,j}(x, y) dx dy \quad (4)$$

式中:  $S_{i,j}(x, y)$  为电容  $C_{i,j}$  的灵敏度函数,对电容分量和介电常数分布向量进行离散化和归一化,即可得到 ECT 的正问题模型<sup>[9]</sup>:

$$\mathbf{C} = \mathbf{S}\mathbf{G} \quad (5)$$

式中:  $\mathbf{C}$  表示归一化后的电容矩阵,  $\mathbf{C} \in \mathbb{R}^N$ ,  $N$  表示独立的电容值测量数目( $N = nx(n-1)/2$ ,  $n$  为电极数目),  $\mathbf{S}$  表示归一化后的灵敏度矩阵,  $\mathbf{G}$  表示归一化介电常数分布矩阵,对应于重建图像的灰度值矩阵。

ECT 的反问题运算即图像重建<sup>[10]</sup>,是指根据测量电容数据  $\mathbf{C}$  和求得的灵敏度矩阵  $\mathbf{S}$ ,反演被测域内介质的分布  $\mathbf{G}$  的过程<sup>[11]</sup>,其线性模型为:

$$\mathbf{G} = \mathbf{S}^{-1}\mathbf{C} \quad (6)$$

本文采用线性反投影(linear backprojection, LBP)算法进行图像重建。LBP 算法是最早应用于 ECT 图像重建的算法。由于敏感场  $\mathbf{S}$  并非方阵,因此其逆矩阵  $\mathbf{S}^{-1}$  并不存在,不能直接求解。LBP 算法将  $\mathbf{S}^T$  视为从电容向量空间到介电常数向量空间的相关映射,即采用矩阵  $\mathbf{S}$  的转置代替其逆,从而给出近似解,如式(7)所示<sup>[12]</sup>。

$$\mathbf{G} = \mathbf{S}^T\mathbf{C} \quad (7)$$

该算法通过累加被测域内某一点的全部投影线从而反推出该点的密度值,运算简单、成像迅速。

以图像相关系数(correlation coefficient, CORR)作为优化指标,以 PCAP02 芯片电容检测范围、灵敏度及复合材料 3~5 的介电常数变化区间进行优化设计,本文获得 64 电极平面传感器的最优极板边长为 10 mm、极板间距为 1 mm。介质重建图像与该介质图像的相关系数其定义公式为<sup>[13]</sup>:

$$CORR = \frac{\sum_{i=1}^m (G_i - \bar{G})(G_i - \bar{G})}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (G_i - \bar{G})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^m (G_i - \bar{G})^2}} \quad (8)$$

式中:  $G$  表示模型设定的介电常数分布,  $G_i$  表示重建图像的介电常数分布;  $\bar{G}$  和  $\bar{G}$  分别表示  $G$  和  $G_i$  的平均值。

其中,考虑到密集型平面阵列传感器测量电容数目的增大,本文采用基于敏感电极的测量方法<sup>[14-15]</sup>,通过删除冗余电容数据,保留在成像过程中具有显著影响的电容值,可以在减少数据量的同时又降低噪声叠加情况。该方法只测量灵敏度更高的边相邻电极对和角相邻电极对之间的电容值,如图 7 所示,当极板 1 作为激励极板时,仅需检测 1-2、1-9、1-10 极板间的 3 个电容值,而传统方法则需检测 1-2、1-3、1-4...1-64 极板间的 63 个电容值<sup>[16]</sup>。对于  $8 \times 8$  阵列传感器,敏感电极法仅需检测 210 组数据,相较于传统测量方法的 2 016 组数据,大大提高了测量速度。

8	16	24	32	40	48	56	64
7	15	23	31	39	47	55	63
6	14	22	30	38	46	54	62
5	13	21	29	37	45	53	61
4	12	20	28	36	44	52	60
3	11	19	27	35	43	51	59
2	10	18	26	34	42	50	58
1	9	17	25	33	41	49	57

图 7 平面阵列电容传感器

Fig. 7 Planar array capacitive sensor

#### 1) 裂缝缺陷

图 8 及表 1 对比显示了  $4 \times 4$  传感器、 $8 \times 8$  传感器对具有长 9 cm、宽 1 cm、高 0.5 cm 裂缝缺陷的复合材料的理论重建图像及客观评价指标。由重建图像及相关系数可知,采用本文的密集型传感器及敏感电极测量法获得理论重建图像效果显著优于相对稀疏的  $4 \times 4$  传感器,而测量次数仅从  $4 \times 4$  传感器单激励测量法的 120 次增加到密集型传感器敏感电极测量法的 210 次。

#### 2) 孔洞缺陷

图 9 及表 2 对比显示了  $4 \times 4$  传感器、 $8 \times 8$  传感器对

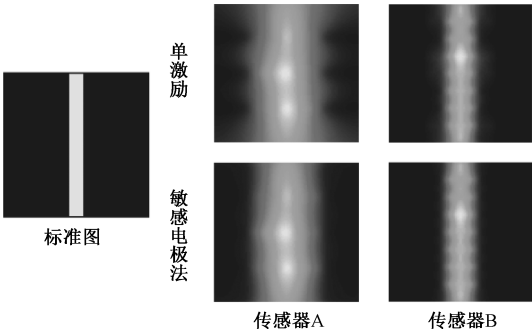


图8 裂缝缺陷 LBP 算法重建

Fig. 8 Reconstruction of crack defects using LBP algorithm

表1 裂缝缺陷的相关系数

Table 1 Correlation coefficient of crack defects

裂缝缺陷	传感器 A (单激励)	传感器 B (单激励)	传感器 A (敏感电极)	传感器 B (敏感电极)
CORR	0.859 7	0.962 5	0.895 6	0.975 0

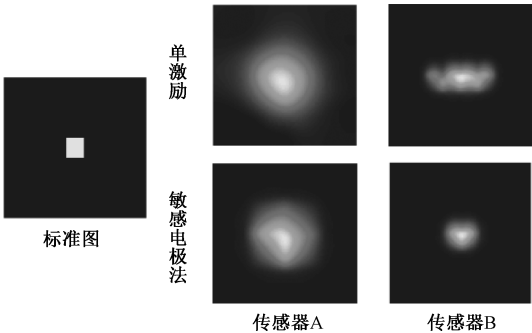


图9 孔洞缺陷 LBP 算法重建

Fig. 9 Reconstruction of hole defects using LBP algorithm

表2 孔洞缺陷的相关系数

Table 2 Correlation coefficient of hole defects

孔洞缺陷	传感器 A (单激励)	传感器 B (单激励)	传感器 A (敏感电极)	传感器 B (敏感电极)
CORR	0.880 4	0.944 3	0.901 3	0.969 0

2 cm,宽 2 cm,高 0.5 cm 孔洞缺陷的复合材料重建图像及客观评价指标。从成像结果及相关系数来看,传感器 B 与标准图更接近,敏感电极法所测数据成像效果更好。

综上所述,在其他条件保持不变的情况下,密集型平面阵列传感器 B 的检测效果明显优于传感器 A,同时结果表明,删除冗余数据的敏感电极测量法不仅减少了测量电容数目,而且提升了重建图像质量。

3 系统硬件验证

基于以上参数,本文开发的 ECT 检测系统实验平台如图 10 所示,整体由下位机和上位机两部分组成,下位机硬件系统包括主控单元、电容数据采集单元、多路复用单元

等。下位机软件系统包括电容采集程序、多路复用程序、串口通信程序等,基于 KEIL 平台进行编程及调试,利用通用定时器 TIM2 获取电容检测及传输整体耗时。



图10 ECT 检测系统实验平台

Fig. 10 ECT detection system experimental platform

其中,软件系统采用 Visual Studio 2022 设计上位机平台,将下位机测量的电容数据通过 USB 串口传输至 ECT 上位机,实时存储数据并自动生成图像,如图 11 所示。以 64 极板平面阵列传感器系统为例,下位机每测量 210 组数据,向上位机传输一次。

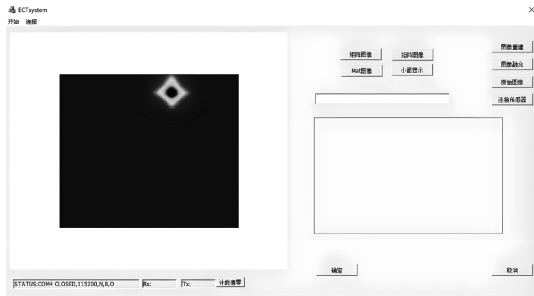


图11 上位机界面

Fig. 11 Upper computer interface

考虑到实物验证部分环境噪声的影响,本系统在下位机软件中加入多次测量数据取均值程序。多路复用模块选通激励电极和检测电极,循环测量 3 次数据并将计算所得均值保存至数组,直至 210 个数据测量计算完毕,开始向上位机传输。

利用搭建的 ECT 检测系统进行实验,被测物为长 2 cm,宽 1 cm,高 1 cm 的小木块,介电常数为 3,与常见航空用复合材料近似,将被测物放置在传感器上方不同位置,采用敏感电极法测量电容数据,将物场电容值与空场电容值做差,结果如图 12 所示。

通过分析图 12 木块缺陷测得的电容值与空场电容值差值图中的峰值可知,两组传感器 A、B 对于不同分布的缺陷均可检测出其所处位置。如图 12(a)所示,变化较大的位置主要有 3 处,对应横坐标分别为 1、13、25 这 3 处数据点,这 3 组数据点对应的电极对为 4×4 阵列传感器 1-2、1-5、1-6 三组电极对,说明缺陷处于 1 号、2 号、5 号及 6 号

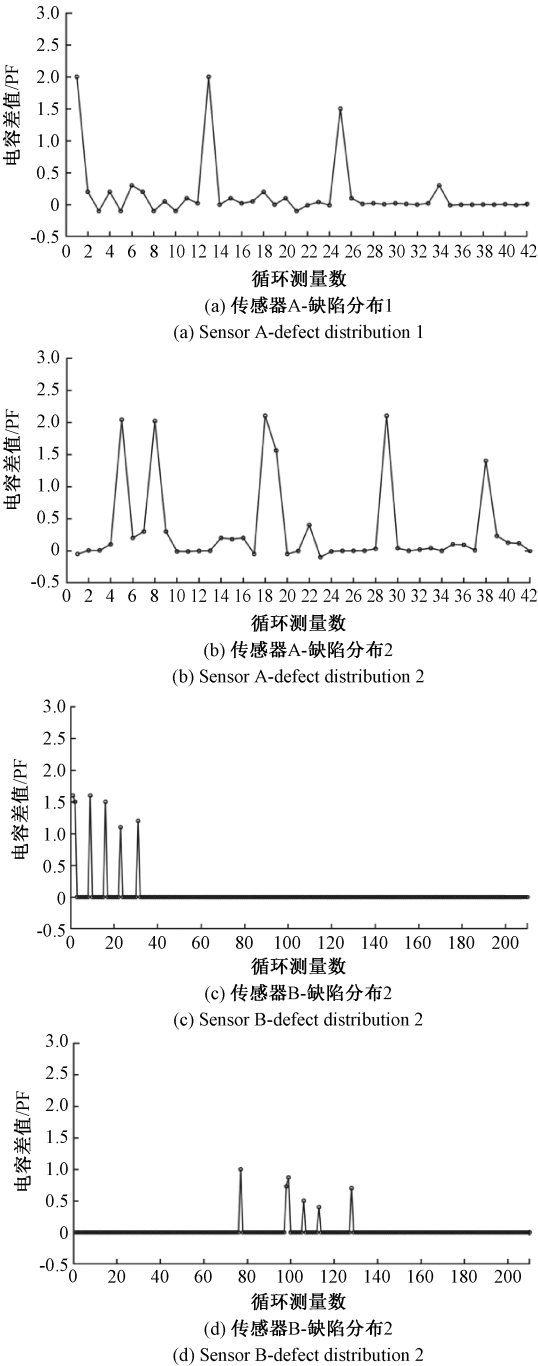


图 12 木块缺陷电容差值图

Fig. 12 Diagram of capacitance difference due to defects in wooden blocks

极板之间,这与实际位置相符;在信号强度方面,对于同一缺陷,传感器 A 比传感器 B 的变化量大 0.5 PF 左右,这是由于二者敏感区域相同,传感器 A 极板面积更大,因此其信号强度更大。由于本系统所选用微电容检测芯片 PCAP02 分辨率在 aF 级别,可检测 1 fF~100 nF 电容值,因此可实现基于传感器 B 的高精度检测;在检测精度方面,传感器 A 测得物场数据在无缺陷数据点仍存在电容起伏,

影响重建图像质量,而传感器 B 测得物场数据在无缺陷数据点与空场数值一致,检测精度更高。

将上述测量数据结合图像重建算法生成最终图像,成像效果如图 13 和表 3 所示。

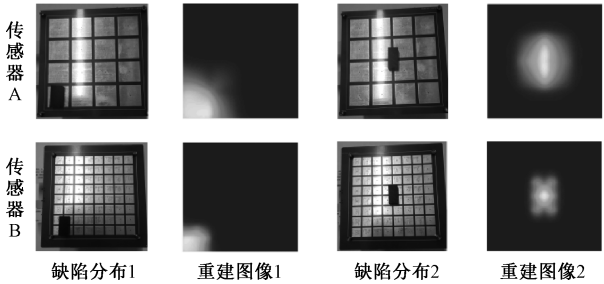


图 13 木块缺陷成像效果

Fig. 13 Imaging effect of wooden block defects

表 3 木块缺陷的相关系数

Table 3 Correlation coefficient of wood block defects				
木块缺陷	传感器 A (缺陷 1)	传感器 B (缺陷 1)	传感器 A (缺陷 2)	传感器 B (缺陷 2)
CORR	0.891 3	0.956 6	0.887 4	0.959 7

由图 13 及表 3 可以看出,对于不同缺陷分布类型,传感器 B 的图像重建效果均优于传感器 A,在相同缺陷情况下,传感器 B 重建图像受噪声影响更小,CORR 值更大,即检测精度更高。在系统检测速度方面,64 极板平面阵列传感器 B 测量 210 组数据仅需 2 s,完全满足复合材料无损检测快速、高精度的需求。综上所述,密集型平面阵列传感器 B 总体效果远远优于传感器 A,证明了其在复合材料无损检测领域应用的可行性。

## 4 结 论

本文提出一种基于 64 极板二级控制密集型平面阵列传感器对复合材料进行无损检测的方法,设计二级选线控制多路复用模块,采用敏感电极法采集电容数据,搭建 4×4、8×8 阵列平面 ECT 检测系统。通过仿真分析和实验验证对不同类型、不同分布的缺陷进行检测,结果表明:基于二级选线控制的 8×8 平面阵列传感器检测系统成像效果优于 4×4 平面阵列传感器,并且在提升精度的基础上,敏感电极测量法减少了冗余数据,多路复用模块的优化设计提高了检测速度,整体系统实现了无损检测精度与速度的平衡。

## 参考文献

- [1] 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.
- [2] TAYLOR S H, GARIMELLA S V. Shape-energy evolutionary reconstruction algorithm for electrical capacitance tomography in a high-aspect-ratio domain[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2015, 233: 349-359.
- [3] 马敏, 郭鹏飞, 董永智. 基于双平面电容传感器的复合材料缺陷检测[J]. 计算机应用与软件, 2021, 38(1): 82-86.
- MA M, GUO P F, DONG Y ZH. Defect detection of composite materials based on dual plane capacitive sensors[J]. Computer Applications and Software, 2021, 38(1): 82-86.
- [4] 杨博韬. 电容层析成像多层传感器设计与图像重建的研究应用[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2021.
- YANG B T. Research and application of multilayer sensor design and image reconstruction in electrical capacitance tomography [D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2021.
- [5] ZHANG M M, LIU Y J, SOLEIMANI M. Planar array of electrical capacitance tomography with rotation[J]. IEEE Sensors Journal, 2023, 23(12): 13548-13554.
- [6] 张志远, 颜华, 周英钢, 等. 改进灵敏度矩阵的复合材料粘接缺陷 ECT 检测[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(11): 17-23.
- ZHANG ZH Y, YAN H, ZHOU Y G, et al. Improved sensitivity matrix for ECT detection of adhesive defects in composite materials[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(11): 17-23.
- [7] 马敏, 梁雅蓉. 基于多尺度自适应特征聚合网络的 ECT 图像重建[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(6): 264-272.
- MA M, LIANG Y R. ECT image reconstruction based on multi-scale adaptive feature aggregation network[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(6): 264-272.
- [8] 张立峰, 张明. 一种电容层析成像图像重建优化算法[J]. 计量学报, 2021, 42(9): 1155-1159.
- ZHANG L F, ZHANG M. An optimization algorithm for image reconstruction of electrical capacitance tomography[J]. Journal of Metrology, 2021, 42(9): 1155-1159.
- [9] 马敏, 郭琪, 闫超奇. 基于广义正则化的 ECT 图像重建算法[J]. 系统仿真学报, 2017, 29(8): 1851-1857, 1872.
- MA M, GUO Q, YAN CH Q. ECT image reconstruction algorithm based on generalized regularization[J]. Journal of System Simulation, 2017, 29(8): 1851-1857, 1872.
- [10] 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. Flat array capacitance imaging algorithm based on FCM optimization[J]. Journal of Metrology, 2020, 41(2): 231-237.
- [11] 马敏, 高晓波. 自适应加权的多特征融合 ECT 图像重建算法[J]. 电子测量技术, 2022, 45(21): 130-135.
- MA M, GAO X B. Adaptive weighted multi feature fusion ECT image reconstruction algorithm [J]. Electronic Measurement Technology, 2022, 45(21): 130-135.
- [12] 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 in composite material components based on ECT[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(8): 1783-1791.
- [13] 季庆庸, 刘亚楠, 邓晨肖, 等. 基于 ECT 的航空复合材料缺陷检测研究[J]. 计量学报, 2019, 40(6): 952-957.
- JI Y Y, LIU Y N, DENG CH X, et al. Research on defect detection of aerospace composite materials based on ECT[J]. Journal of Metrology, 2019, 40(6): 952-957.
- [14] CAO ZH H, LI J M, SONG ZH, et al. Analytic hierarchy process-based capacitive sensor array redundant capacitance elimination method [J]. Measurement, 2024, 224: 113849.
- [15] WEN Y T, ZHANG ZH D, ZHANG Y Y, et al. Redundancy analysis of capacitance data of a coplanar electrode array for fast and stable imaging processing[J]. Sensors, 2017, 18(1): 31.
- [16] XU ZH, JIANG Y D, WANG B L, et al. Sensitivity distribution of CCERT sensor under different excitation patterns[J]. IEEE Access, 2017, 5: 14830-14836.

## 作者简介

曹蕊, 硕士研究生, 主要研究方向为无损检测。

E-mail: 15176215592@139.com

田汉民(通信作者), 副教授, 博士, 主要研究方向为无损检测、图像处理等。

E-mail: 642154752@qq.com