

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2105694

## 阵列探头电容成像玻璃钢无损检测系统\*

王安泉<sup>1</sup> 李盈盈<sup>2</sup> 李晨<sup>2</sup> 袁新安<sup>2</sup> 李伟<sup>2</sup> 陈国明<sup>2</sup> 殷晓康<sup>2</sup>

(1. 中国石油化工股份有限公司胜利油田分公司技术检测中心 东营 257000;

2. 中国石油大学(华东)海洋油气装备与安全技术研究中心 青岛 266580)

**摘要:** 玻璃钢以优越的材料特性被广泛应用于油田地面工程的油气集输、原油存储及污水处理中。由于制造工艺复杂、质量控制难度大及现场工况恶劣等因素,油田玻璃钢构件中易存在渗水、破裂、脱粘等各类缺陷,造成油气生产安全隐患。为实现对油田玻璃钢构件高效准确无损检测,设计了阵列电容成像探头,构建了具备软件锁相与通道修正功能的阵列电容成像无损检测系统,利用含人工预制缺陷玻璃钢试块对系统进行了多通道测量值的修正,并对修正后的检测系统进行了玻璃钢试块缺陷成像测试。测试结果表明阵列检测系统适配阵列电容探头且运行稳定,可实现玻璃钢构件缺陷的快速精确成像检测。

**关键词:** 玻璃钢;无损检测;电容成像;缺陷检测

中图分类号: TH878; O426.9 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.40

## Capacitive imaging system with arrayed probe for the non-destructive evaluation (NDE) of glass fibre reinforced polymer (GFRP)

Wang Anquan<sup>1</sup> Li Yingying<sup>2</sup> Li Chen<sup>2</sup> Yuan Xin'an<sup>2</sup> Li Wei<sup>2</sup> Chen Guoming<sup>2</sup> Yin Xiaokang<sup>2</sup>

(1. Technology Inspection Center, Sinopec Group Shengli Oilfield Branch, Dongying 257000, China; 2. Centre for Offshore Engineering and Safety Technology, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China)

**Abstract:** At present, glass fibre reinforced polymer (GFRP) materials are widely used in oil and gas gathering and transportation, crude oil storage, and sewage treatment due to their superior material characteristics. Due to production complexity, difficulties in quality control and harsh environment, GFRP structures often contain defects (i. e. delamination, water intrusion and crack). Such defects in GFRP storage tanks and GFRP pipelines in oil fields may severely threaten the safety of oil and gas production. In this work, a capacitive imaging (CI) system with an arrayed sensor was designed to achieve efficient non-destructive evaluation (NDE) of GFRP structures used the oilfields with high accuracy. The proposed system, which includes a software based lock-in amplifier and a channel correction module, were tested using specimens with artificially prefabricated defects. The test results show that the system is compatible with arrayed capacitive probe and is promising in the efficient and high-accuracy NDE of GFRP structures.

**Keywords:** GFRP; non-destructive evaluation (NDE); capacitive imaging; defect detection

## 0 引 言

玻璃钢是以玻璃纤维作增强材料并由树脂作粘结剂复合而成的新型材料,具有轻质高强、耐腐蚀、高绝缘性能等特点,且可设计性和成型方式灵活<sup>[1]</sup>。由于材料性能优越,玻璃钢构件被广泛应用于油田表面工程中。例如,由于耐腐蚀性好、内壁光滑、对介质无二次污染、保温性能好等优势<sup>[2-3]</sup>,玻璃钢管道在石油天然气工业中的油气运输及注水中得到了广泛的应用,其用量约占非金属管道总量的

60%<sup>[4]</sup>。此外,玻璃钢储罐作为玻璃钢制品的一种,也被广泛用于原油及污水处理中<sup>[5]</sup>。但由于制造工艺复杂、质量控制难度大及现场工况恶劣等因素,油田玻璃钢构件中易存在渗水、破裂、脱粘等各类缺陷,造成油气生产安全隐患,需对关键玻璃钢构件的完整性进行无损检测。由于玻璃钢材料非导电、高散射、材料组分复杂等特性,常规无损检测技术难以实施。目前针对玻璃钢材料的无损检测技术研究集中在空气耦合超声、太赫兹、微波、射线等领域,但上述技术在油田现场受制于施工条件、安全要求等因素未得到广

收稿日期:2021-01-13

\* 基金项目:国家自然科学基金(52075549,52005512)、中央高校基本业务费自主创新项目(20CX05020A)资助

泛应用,因此现场对玻璃钢构件的无损检测技术需求迫切。

近年来,作为一种新型的非接触式、非侵入式无损检测技术,电容成像(capacitive imaging,CI)检测技术以其高精度、低成本及适用范围广等特点被应用于非金属材料及复合结构的无损检测中。基于电容效应的传感器技术自 20 世纪初问世以来取得了长足的发展,国内外电容非线性的边缘效应开始被广泛的应用于参数测量与检测系统。例如:Nassr 等<sup>[6]</sup>利用矩形极板对的共面电容式传感器实现了复合材料的分层缺陷及异物侵入的检测;Schlicker 等<sup>[7]</sup>利用多极板共面电容式传感器实现埋地物体的探测;Chen 等<sup>[8]</sup>利用贴片电极电容式探头感知线路绝缘包覆的性质变化,探测飞机雷达罩等多层复合材料中的液体侵入<sup>[9]</sup>;Morozov 等<sup>[10]</sup>利用共面电容式传感器对 CFRP 纤维冲击损伤进行无损成像;董恩生等对同面多电极传感器进行了设计优化并利用同面电容传感器对飞机复合材料构件进行了无损检测<sup>[11-12]</sup>;康宜华等<sup>[13]</sup>基于单电极电容传感器实现了金属材料表面缺陷的检测;代守强等<sup>[14]</sup>基于平面电容传感器搭建的缺陷检测系统实现对热障涂层厚度变化缺陷的有效检测。殷晓康等<sup>[15]</sup>在共面探头设计、检测系统开发等领域对共面电容成像技术进行了较为深入的研究,并探究了该技术在混凝土、复合材料、绝缘包覆金属结构等常规无损检测技术难以实施场合的可行性。

但截至目前,电容成像检测系统多采用单对电极探头<sup>[15]</sup>,虽可满足检测精度需求,但存在效率较低的问题,无法对较大面积实现快速扫描,制约了该技术在现场的应用。为了提高检测效率并支持多对电极分层电容成像技术研究,本文设计阵列电容成像探头,借助 LabVIEW 软件<sup>[16-21]</sup>构建具备软件锁相与通道修正功能的阵列电容成像检测系统,并利用人工预制缺陷试块对系统成像性能进行了测试。

### 1 电容成像原理与系统总体设计

典型的电容成像探头具有两个共面电极板,一个作为激励电极,另一个作为检测电极。在电容电极从平行到共面的变化过程中,极板间电场分布将从均匀场转变为非均匀边缘场,如图 1 所示。电容成像探头利用该非均匀边缘电场作为探测场,对于检测绝缘材料表面和内部缺陷以及导体材料表面缺陷进行直接成像检测。

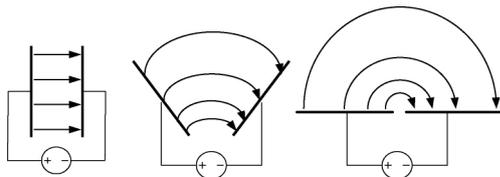
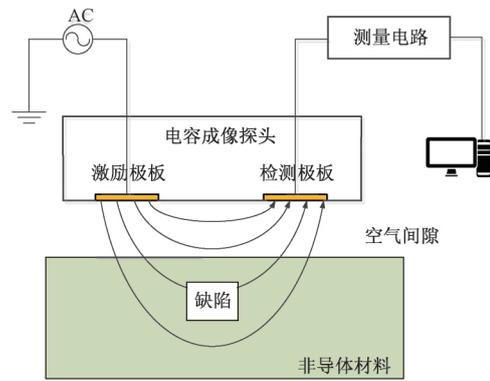


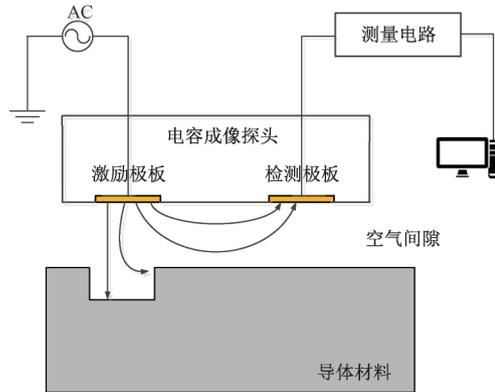
图 1 电容探头电场分布变化

电容成像技术有导电材料检测与非导电/弱导电材料检测两个工作模式,如图 2 所示。若被测试块为非导电材料,由探头产生的电场将在被测试块中形成特定的电场分

布。试块表面或内部出现的任何缺陷都会使电场产生扰动,并改变检测电极上的感应电荷量,如图 2(a)所示。若被测试块为导体,探测电场将穿透导体上方的绝缘涂层和气隙,并到达导体表面。由于被测导体试块的高导电性,电荷可以自由移动并积聚于导电表面,探测电场无法穿入导体内部,而终止于导体表面并在导体上表面产生等势面,如图 2(b)所示。因此,只有导体的表面特征(如腐蚀、开口裂缝等)会造成探测电场的扰动,并改变检测电极上感应电荷量。导体的任何内部特征都不会对探头输出结果产生影响。



(a) 非导电材料检测



(b) 导电材料检测

图 2 电容成像两种工作模式

现有电容成像检测系统通过三轴扫描台架带动单对电极电容探头进行平面扫描实现缺陷成像,如图 3 所示,检测速度较慢、成像效率低。

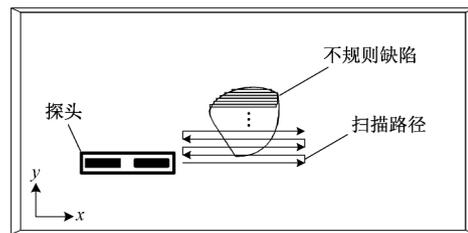


图 3 单电极对电容探头面扫描

本文所设计系统使用阵列式探头,实现阵列探头覆盖

区域一次扫描直接成像,大大提高检测效率。本文所开发阵列电容成像检测系统组成结构如图4所示。系统主要包括硬件和软件两部分。系统硬件主要包括阵列式电容探头、信号激励模块、多通道电荷放大模块、多通道采集模块以及计算机。系统软件主要包括数据采集与存储程序、多通道软件锁相程序、通道修正模块和数据三维绘图程序。

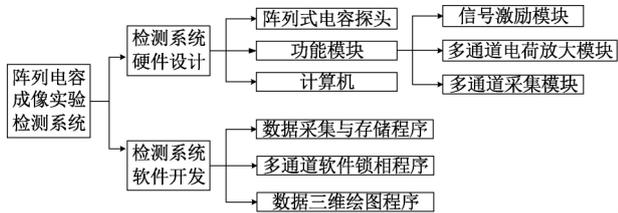


图4 阵列电容成像检测系统结构

## 2 阵列电容成像检测系统硬件设计

由于电容成像技术的共面电容极板通过边缘电场耦合,阵列电容探头每一通道待测电容值均极其微弱,通常在 $fF \sim pF$ 数量级之间。本文拟采用交流激励法测量阵列探头各通道微小电容。对阵列电容探头的每个电极对,当在激励和检测电极之间施加电势差时,被测试块中探测场覆盖区域内材料性质变化(缺陷的存在)将扰动探测场的分布并导致检测电极上感应电荷数量的微小变化。系统利用信号处理电路将检测电极上微弱的电荷信号转化为电压信号后进行放大、采集与处理后输出。阵列电容成像检测系统硬件组成如图5所示。

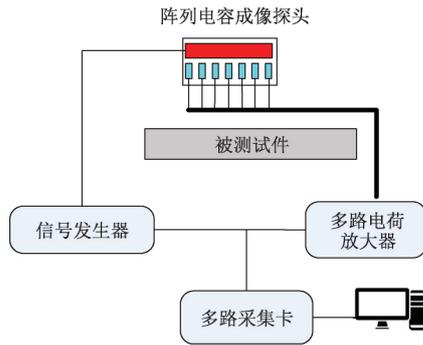


图5 阵列电容成像检测系统硬件图

### 2.1 阵列式电容成像探头

电容探头是电容成像系统的重要组成部分。单对电极电容成像探头设计需要综合考量探头穿透深度、信号强度以及检测灵敏度等性能指标,可根据检测需求确定电极形状、尺寸与间距等设计参数。然而对于阵列式电容成像,探头的设计需更多兼顾阵列方向的分辨率以及保证探头各通道输出的一致性。本节基于单对矩形极板电容探头设计了矩形阵列式电容探头,电容电极蚀刻在印刷电路板上,如图6所示。其中图6(a)为无中间接地屏蔽探头,图6(b)为有中间接地屏蔽探头。中间接地屏蔽探头可增大穿透深

度,但屏蔽电极的存在会引入负检测灵敏度,从而影响浅层或表层缺陷的成像性能,需根据检测性能进行合理取舍。为简化前端激励模块,阵列探头采用共同激励-分别检测的设计,探头包含7路相同的检测极板与1路共用激励极板。该设计可以通过改变检测矩形极板的宽度、相邻检测极板的间距有效的实现穿透深度及阵列方向分辨率调节。使用该探头进行一次线扫描可以获得一组(7条)检测曲线。将该组检测曲线进行插值可直接获得阵列探头扫描覆盖区域的电容图像,提高检测效率。



图6 阵列电容探头

### 2.2 信号处理模块

本文所开发的阵列电容成像检测系统如图7所示。其中信号发生器为泰克 AFG1022 函数发生器。其主要的性能指标包括  $1\text{ mV}_{pp} \sim 10\text{ V}_{pp}$  的电压输出以及  $25\text{ MHz}$  的带宽、 $1\text{ }\mu\text{Hz}$  的频率分辨和 14 位的垂直分辨率。阵列电容成像传感器作为电容式传感器输出阻抗高,负载能力差。因此需要在传感器与后接电路之间接入高输入阻抗、低输出阻抗的放大器,减轻负载效应。本系统采用科动 KD5018 型 8 通道双积分电荷放大器。KD5018 由电荷放大级、积分放大级、低通滤波器、高通滤波器、末级功放、电源组成,可有效实现阻抗转换及滤波。本系统所用的多路采集卡为 NI USB-6351 多功能 I/O 设备。采集卡通过 USB 连接电脑可实现最多 16 路单端模拟输入或 8 路差分模拟输入。

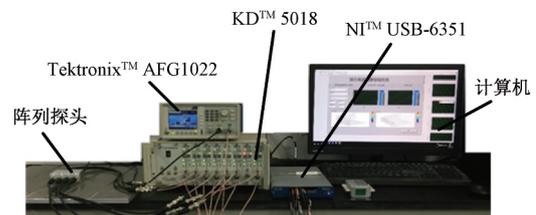


图7 阵列电容成像检测系统

系统将信号发生器(Tektronix AFG1022)所产生单频交流电压信号( $5\text{ kHz}$ 、 $10\text{ V}_{pk-pk}$ )作为激励施加到阵列电容传感器共用激励电极上;KD5018 电荷放大器用于将 7 路检测电极上的电荷信号转换为交流电压信号并输出。NI USB-6351 同步采集电荷放大器 7 路输出与激励参考信号。所采集信号由系统软件进行处理与显示。

## 3 阵列电容成像检测系统软件开发

系统软件是阵列电容成像检测系统重要组成部分。本

文基于虚拟仪器(VI)原理,利用 NI LabVIEW 编制易于改进和拓展的软件,控制系统硬件以实现电容成像检测。

所开发的阵列电容成像系统软件主要包括:多路采集、多路软件锁相、通道修正及信号显示功能。基于 LabVIEW 编写的阵列电容成像检测系统软件界面如图 8 所示,共包含 4 个显示窗口,其中幅值显示窗口分别显示 7 路检测信号的幅值信息,相位显示窗口分别显示 7 路检测信号的相位信息,幅值图像显示窗口和相位图像显示窗口分别显示由 7 路信号的幅值和相位插值而成的电容图像。

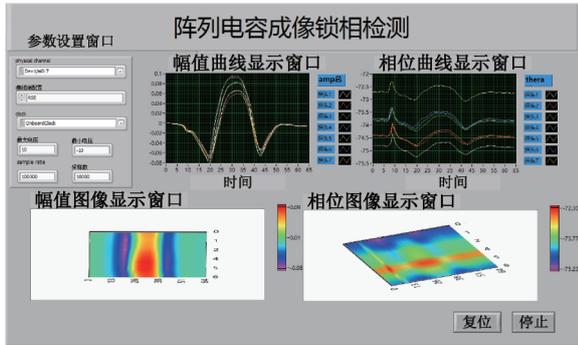


图 8 阵列电容成像软件锁相检测系统软件界面

### 3.1 多路采集程序设计

多路采集程序基于 NI DAQmx 软件驱动 USB-6351 采集卡,连接 NI 公司开发的数据采集功能子 VI 实现数据采集功能。基本流程包括:DAQmx 创建通道用于确定采集卡输入或输出的信号方式;DAQmx 定时设置采样时钟的来源、频率以及要采集或生成的采样数量;DAQmx 开始任务用于启动数据采集任务;DAQmx 读取设置的通道任务中的数据,本文开发的阵列电容探头采用 7 通道检测输出同时配合实现软件锁相需要采集激励信号作为参考信号,所以多路采集程序需输出 8 行矩阵数据,最后 DAQmx 停止任务,并清除任务释放资源。

### 3.2 多路软件锁相程序设计

锁相放大器(也称为相位检测器)作为后置放大器,可从干扰极大的环境中分离出特定频率信号,提高信噪比。正交锁相放大器的基本功能如图 9 所示,锁相放大器的两路直流输出分量 X 和 Y,并根据 X 和 Y 的值计算出被锁相信号幅值 V 和相位  $\theta$ 。

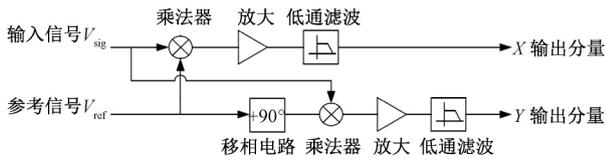


图 9 正交锁相基本功能

本文采用 NI 的软件锁相子 vi 实现 7 路软件锁相,从采集到的 8 行矩阵数据中抽取阵列探头每一路检测极板输出和参考信号组合后输入软件锁相子 vi,程序内部做正交锁相处理后直接输出被锁相信号的幅值与相位,同时幅值

信号在输出后放大 1 000 倍。

### 3.3 数据三维绘图程序设计

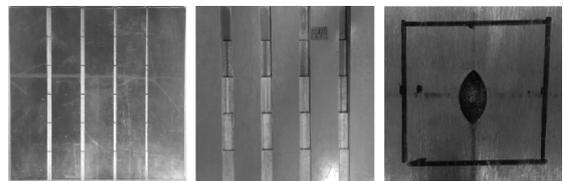
软件锁相后的 7 路幅值和相位信号被保存在指定路径的 TXT 文件中。为在扫描过程中实时监测成像检测结果,编制实时读写 7 路 TXT 幅值和相位文件的显示程序,将一维幅值和相位分别绘制在两个波形图中,并插值生成两个二维图像。

### 3.4 通道修正模块设计

为消除阵列探头单路激励多路测量的设计所引入的探测场偏移及探头连线与封装过程中所引入的杂散电容影响,需在系统软件中引入修正模块对阵列探头各路电容测量值进行修正,以确保各测量通道具有相同的基准值、增益与灵敏度。修正模块通过对标准参考试块无缺陷区域和参数已知缺陷的检测结果将阵列探头各路信号修正至同一基准并具有相同的灵敏度,保证成像结果的可靠性。修正模块的具体实施方法在 4.1 节通道修正部分详述。

## 4 阵列电容成像检测系统测试

为测试本文所开发阵列电容成像系统的性能,设计如图 10 所示带人工预制缺陷玻璃钢试块。其中试块 1(图 10(a)所示)表面带有 6、8、10 和 12 mm 四条不同宽度的槽,每条槽包含深度为 6 条阶梯状缺陷(深度为 1~6 mm);试块 2(图 10(b)所示)表面带有宽度为 20 mm,深度为 1~20 mm 的阶梯状缺陷;试块 3(图 10(c)所示)表面带有平底孔缺陷,其长轴长度 24 mm,短轴长度 15 mm,深度为 3 mm。3 块试块均为聚酯玻璃钢板。试块 1 所含阶梯状槽缺陷相对探头扫描方向较窄,用于系统通道修正。试块 2 与试块 3 用于修正后系统成像性能测试。在所有试验中,试块均由 2 mm 厚聚酯玻璃钢板覆盖,将表面缺陷转变为隐藏缺陷测试。



(a) 宽度变化阶梯槽 (b) 宽度固定阶梯槽 (c) 平底孔

图 10 被测试块

### 4.1 系统通道修正

选取试块 1 中阶梯槽试块表面 10 mm 宽 4 mm 深缺陷,利用采用图 6(b)所示不带中间屏蔽阵列探头进行线扫描,检测结果如图 11 所示。由于该缺陷宽度(10 mm)小于探头在扫描方向的宽度,阵列探头各通道检测曲线呈现单一峰值,便于后续通道修正的实施。

从图 11 的幅值信号窗口和相位信号窗口可知,阵列探头的 7 个通道均检测到隐藏于 2 mm 玻璃钢板下的槽状缺陷。但比较各条检测曲线,无论是幅值还是相位,7 个通道

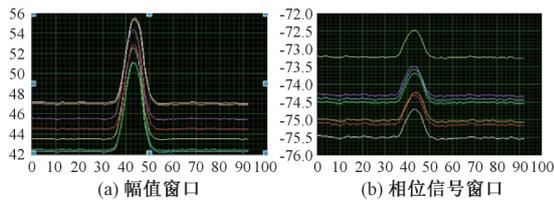


图 11 修正前窄槽缺陷阵列探头成像结果

的输出结果各不相同。7 条检测曲线不重合,将造成最终插值后的电容图像无法准确反映槽状缺陷形貌。需在系统软件中引入修正模块,提高检测精度,实现无失真成像。

以幅值修正为例,首先将幅值曲线转化为畸变率(VR)曲线,畸变率 VR 由式(1)求得:

$$VR = (V_m - V_0) / V_0 \quad (1)$$

式中:  $V_m$  为探头所在位置测量幅值;  $V_0$  为无缺陷位置测量幅值。VR 曲线将各通道曲线的基准值统一修正至零线位置。修正结果如图 12(a)幅值信号窗口所示。经该步修正后曲线基准统一,但缺陷中心位置畸变率仍有差异,即 7 条曲线顶端仍未重合,需进一步进行修正。提取缺陷中心畸变率值(VR 曲线峰值),以 VR 峰值最大通道为标准(此探头为 5 号检测极板),将其他通道 VR 曲线峰值通过与修正系数相乘,统一到最大 VR 曲线峰值。本例中,计算出的阵列探头各通道修正系数分别为:1.129 2、1.100 4、1.051 1、1.024 4、1.018 2 和 1.090 3。两步修正后的检测结果如图 12(b)所示。对比图 12(a)和(b)幅值图像显示窗口,修正后的缺陷更准确体现出槽状缺陷的真实形貌。两步修正过程实际考虑了探头设计、制作、被测对象及实验条件等所有因素,因此即使使用同一探头,但在试块材料或试验条件(提离距离等)变化的情况下,系统需要重新修正。

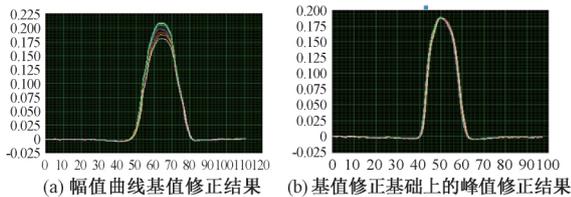


图 12 修正后窄槽缺陷阵列探头成像结果

#### 4.2 玻璃钢缺陷成像测试

针对试块 2 和试块 3 的测试试验与 4.1 节使用同一阵列探头,并保证了与 4.1 节试块材料及试验条件的一致性,故可采用修正后的系统直接测试。测试试验 1 以试块 2 中 20 mm 宽 3 mm 深槽状缺陷为目标,进行阵列电容成像。检测结果如图 13 所示。由于被测缺陷宽度大于探头在扫描方向的宽度,故幅值曲线顶端有一段较为平缓的区域而非单一峰值。由于图 13 显示修正后检测结果,故 7 通道幅值信号虽在曲线顶端略不重叠,但其余部分基本吻合,所形成图像也可清晰反映槽状缺陷形状。

测试试验 2 以试块 3 中平底孔为目标,进行阵列电容

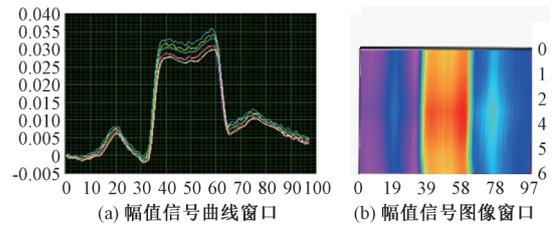


图 13 修正后宽槽缺陷阵列探头成像结果

成像。检测结果如图 14 所示。由于平底孔最宽部分宽度小于探头在扫描方向的宽度,故各通道幅值曲线均呈现单一峰值。由于平底孔在探头阵列方向上宽度变化,修正后幅值曲线除基值部分重合外,峰值及波形凸起宽度均有差异,故由此组曲线插值而成电容图像可反映平底孔缺陷轮廓。

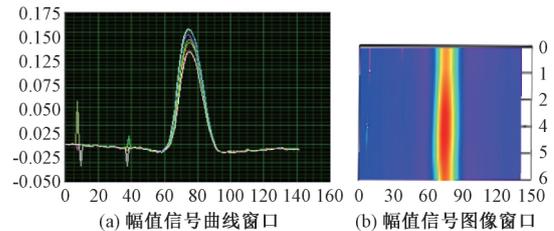


图 14 修正后平底孔缺陷阵列探头成像结果

## 5 结 论

本文面向油田现场玻璃钢构件无损检测需求,基于 NI 数据采集设备和 LabVIEW 虚拟仪器平台开发可提高检测效率的阵列电容成像检测系统,并利用含人工预制缺陷试块对系统进行测试,主要结论如下:所开发阵列电容成像检测系统使用高输入阻抗的电荷放大器和软件锁相放大器,具有较高信噪比,可实现缺陷的精确成像;系统适配多通道阵列探头且运行稳定,所采用阵列探头可将二维面扫描简化成线扫描,大幅提高缺陷扫查效率;系统包含通道修正模块,可去除阵列探头设计与制造过程中所引入的杂散电容影响,保证阵列探头各通道的一致性,实现较为准确的缺陷可视化检测。

后续研究将对系统各硬件模块进行便携设计,并进行适应性改进,提高现场适应性。同时,将优化探头设计参数并改进接线与封装方法,提升系统的灵敏度及分辨率,进一步推动电容成像无损检测技术作为缺陷筛查手段在油田现场的应用。

### 参考文献

- [1] 韩方勇, 李金武, 王一帆, 等. 玻璃钢管的微波无损检测技术[J]. 石油规划设计, 30(3):11-14, 54.
- [2] 杜秋平, 李宝山, 张贵喜, 等. 高压玻璃钢管道的性能特点及其在油田的应用[J]. 承德石油高等专科学校学报, 31(4):5-7.
- [3] 王冬林, 曹峰, 李昱坤, 等. 高压玻璃钢管在油田应用

- 的现状及展望[J]. 新技术新工艺, 2014(12):139-142.
- [4] 王燕. 先进复合材料在飞机上的应用[J]. 西飞科技, 2001(3):45-46.
- [5] 刘明辉, 彭立军, 郭小明. 大型储罐玻璃钢内防腐施工工艺[J]. 石油工程建设, 2013(2):10, 60-62.
- [6] NASSR A A, ELDAKHAKHNI W W. Non-destructive evaluation of laminated composite plates using dielectrometry sensors[J]. Smart Materials and Structures, 2009, 18(5):055014.
- [7] SCHLICKER D, WASHABAUGH A, SHAY I, et al. Inductive and capacitive array imaging of buried objects[J]. Insight, 2006, 48(5): 302-306.
- [8] CHEN T, BOWLER N. A capacitive probe for quantitative nondestructive evaluation of wiring insulation[J]. NDT& E International, 2012, 52:9-15.
- [9] CHEN T, BOWLER N. Analysis of a concentric coplanar capacitive sensor for nondestructive evaluation of multi-layered dielectric structures [J]. IEEE Transactions On Dielectrics and Electrical Insulation, 2010, 17(4): 1307-1318.
- [10] MOROZOV M, JACKSON W, PIERCE S G. Capacitive imaging of impact damage in composite material[J]. Composites Part B-Engineering, 2017, 113: 65-71.
- [11] 曹河, 董恩生, 范作宪, 等. 同面多电极电容传感器优化设计[J]. 计算机测量与控制, 2013, 21(6):1711-1714.
- [12] 徐勇超, 董恩生, 姜亦林, 等. 一种飞机复合材料构件损伤检测的新方法[J]. 玻璃钢/复合材料, 2010(3): 62-65.
- [13] 康宜华, 叶志坚, 孙燕华, 等. 一种电容传感器金属材料表面缺陷检测方法[J]. 传感器与微系统, 2014, 33(12):127-129.
- [14] 代守强, 陈棣湘, 田武刚, 等. 平面电容传感器热障涂层缺陷检测系统[J]. 中国测试, 2017, 43(1):78-83.
- [15] 殷晓康, 李晨, 李振, 等. 电容成像无损检测实验平台的开发[J]. 实验技术与管理, 2017, 34(3):90-96.
- [16] 彭倩, 李红岩. 单片机和 LabVIEW 的多数据无线监测系统[J]. 实验室研究与探索, 2016, 35(7): 127-130.
- [17] 张浩, 许靖锋, 吴彬. 基于 LabVIEW 串口通信的多通道风速风向测试系统[J]. 国外电子测量技术, 2020, 39(7):137-140.
- [18] 殷晓康, 周凯, 王雨婷. 空气耦合超声检测系统开发与测试[J]. 电子测量技术, 2020, 43(15):79-83.
- [19] 孟繁悦, 韩赞东, 石承昊. 多通道在线涡流检测系统研制[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(5):51-57.
- [20] 万勇, 万莉, 戴永寿. 基于 LabVIEW 的井控设备试压实验系统设计[J]. 实验室研究与探索, 2018, 37(12): 102-106.
- [21] 卿宗胜, 高云鹏, 吴聪, 等. 基于自适应 VMD 和改进功率谱估计的球磨机负荷特征提取[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(5):234-241.

#### 作者简介

殷晓康, 博士, 副教授, 主要研究方向为新型电磁无损检测技术及机械/结构完整性检测技术。

E-mail: xiaokang.yin@upc.edu.cn