

引用格式: 陈尧, 熊政辉, 罗俊威, 等. 复杂型面航空构件自动化超声成像检测技术研究进展[J]. 航空材料学报, 2025, 45(6): 33-44.

CHEN Yao, XIONG Zhenghui, LUO Junwei, et al. Research progress of automated ultrasonic imaging detection technology for complex aircraft components[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2025, 45(6): 33-44.

复杂型面航空构件自动化超声成像检测 技术研究进展

陈尧¹, 熊政辉^{1,2}, 罗俊威¹, 王翰扬¹, 袁锦钊¹, 卢超^{1*}

(1. 南昌航空大学无损检测技术教育部重点实验室, 南昌 330063; 2. 大连理工大学无损检测研究所, 辽宁 大连 116024)

摘要: 传统的超声自动化无损检测对复杂型面航空构件的检测是个极大的挑战。复杂型面会干扰声束的焦点形成, 在声束入射时产生的波形转换更为复杂, 这都将导致超声检测能力下降, 获得的回波信噪比显著降低。在智能制造背景下, 航空构件快速低成本制造被严重制约。本文分析复杂型面介质的超声波传播问题, 归纳复杂型面构件的自动化超声检测技术难点。并阐述基于工业机器人的超声C扫描成像检测、面向复杂型面的相控阵超声成像检测、基于柔性相控阵超声探头的成像检测三种复杂型面自动化超声成像检测的发展现状, 以及剖析各自的优势和局限性, 评述其面临的机遇与挑战。介绍复杂航空构件超声检测中, 面向自动化检测的先进成像算法开发和缺陷的智能识别分类的未来技术需求, 提出智能制造背景下亟待突破的基于数字孪生的检测路径规划和海量通道相控阵超声传感器设计制造的关键检测技术。

关键词: 超声成像; 自动化; 复杂航空构件; 相控阵; C扫描; 柔性阵列探头; 工业机器人

doi: 10.11868/j.issn.1005-5053.2024.000173

CSTR: 32420.14.j.issn.1005-5053.2024.000173

中图分类号: V216; TG115.28

文献标识码: A

文章编号: 1005-5053(2025)06-0033-12

Research progress of automated ultrasonic imaging detection technology for complex aircraft components

CHEN Yao¹, XIONG Zhenghui^{1,2}, LUO Junwei¹, WANG Hanyang¹, YUAN Jinzhao¹, LU Chao^{1*}

(1. Key Laboratory of Nondestructive Testing (Ministry of Education), Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China; 2. NDT & E Laboratory, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, China)

Abstract: Traditional ultrasonic automated non-destructive testing is a great challenge in the inspection of aviation components with complex surfaces. Complex surfaces can interfere with the formation of the focus in the sound beam, and the waveform transformation generated when the sound beam is incident is more complex. All these will lead to a decrease in the ultrasonic testing capability and a significant reduction in the obtained echo signal-to-noise ratio. Under the background of intelligent manufacturing, the development of rapid and low-cost manufacturing of aviation components has been seriously restricted. The paper analyzes the ultrasonic propagation of complex surface media, and summarizes the technical difficulties of automatic ultrasonic detection of complex surface components. The paper also describes the development status of three kinds of automatic ultrasonic imaging detection of complex surfaces, which are based on flexible phased array ultrasonic probe, ultrasonic C-scan imaging detection based on industrial robot and phased array ultrasonic imaging detection for complex surfaces. The advantages and limitations of three kinds of automated ultrasonic imaging detection are analyzed, and the challenges faced by various ultrasonic imaging technologies are reviewed. The key technology to break through the automatic ultrasonic imaging detection of complex aerospace components under the background of intelligent manufacturing is proposed. The paper introduces the future technical requirements for the development of advanced imaging algorithms for automated inspection and the intelligent recognition and classification of defects in the ultrasonic

testing of complex aviation components. The key detection technologies based on digital twin detection path planning and the design and manufacture of massive channel phased array ultrasonic sensors, which are urgently needed to be broken through under the background of intelligent manufacturing, have been proposed.

Key words: ultrasonic imaging; automated; complex aircraft component; phased array; C-scan; flexible array probe; industrial robot

先进航空构件快速低成本制造能够显著缩短生产周期、降低产品价格,是我国航空产业显著提升航空产品核心竞争力的必经之路,也是世界范围内各大航空企业与日俱增的发展目标及需求。在航空构件实际加工中,需要对该构件坯料进行超声检测。但是坯料表面一般较为粗糙,并且统一批次的坯料表面一致性较差,需要对其进行打磨形成易于超声检测的表面。如果自动化超声检测能够在扫查过程中适应粗糙且时刻变化的表面,就能够省去多余的打磨环节,实现航空构件的快速低成本制造。

然而,航空领域中所涉及的复杂型面、复杂结构构件往往存在待检测面曲率较大、形状和尺寸不一等问题,导致传统自动化超声无损检测技术在其中很难发挥作用,严重制约航空构件快速低成本制造的发展^[1]。目前,手动超声检测仍然是许多复杂零部件质量评价的首选方法。尽管也有多轴 C 扫描检测等程式化超声检测装备,但也只应用于涡轮盘、机匣焊缝等形状规则的管板类构件,难以适用于具有扭转表面结构的航空叶片等构件^[2-3]。

综上所述,随着我国航空智能制造产业的飞速发展,复杂航空构件自动化超声成像检测已成为制约快速低成本制造发展的关键性技术。正因如此,《智能检测装备产业发展行动计划(2023-2025年)》已将大尺寸复杂航空构件智能化检测装备研发列为重点突破目标^[4],故亟须复杂航空构件质量管控研制行之有效的新型智能超声成像检测技术及装备。在此背景下,本文在分析复杂构件自动化超声检测技术难点的基础上,对面向复杂型面的超声成像检测三种关键技术进行剖析和阐述,并对各类超声成像技术面临的挑战进行展望,最后对复杂型面航空构件超声无损检测的未来发展趋势进行总结。

1 复杂型面航空构件自动化超声检测技术难点分析

1.1 复杂检测面引起的耦合失效

按照耦合方式分类,超声检测可分为接触耦合法和介质耦合法两类。由于探头直接通过一层薄

薄的耦合剂与构件表面直接接触,接触耦合法射入构件的声波能量更强,回波波高和信噪比也更高。基于上述特点,接触耦合法通常应用于板材、管道等表面形状比较简单的超声检测。

然而,当被检构件表面为复杂型面的航空叶片、复合材料 R 区时,由于超声探头表面为硬质材料且具有一定尺寸,探头会与构件表面产生间隙,声波难以有效射入构件内部,导致探头耦合不良。即使采用耦合剂将间隙进行填充,也会因为耦合剂与构件材料之间的声阻抗差异,导致检测波形及图像的严重失真,甚至产生伪缺陷回波。为避免检测探头耦合失效,相关检测标准规定:被检构件与检测探头之间的间隙应不大于 0.5 mm^[5-6]。

考虑到接触耦合法容易引起耦合失效问题,航空构件生产、维修过程中通常不采用该方法进行自动化检测,而是使用楔块进行人工检测,如图 1(a)^[7]所示,通过楔块检测可以改善耦合质量并且成像质量要好于接触耦合法,如图 1(b)^[7]所示,但该方法对楔块有一定损耗。

1.2 非规则双层介质声传播规律复杂

航空轮盘、壁板等构件通常采用水浸或喷水等介质耦合法实施自动化检测,为自动化检测提供良好的超声耦合,使声波从水等耦合介质中能够更有效地射入被检构件。虽然耦合介质能够提供良好的耦合,但耦合介质与被检构件形成的界面会改变声束的传播路径。以水作为耦合介质为例,由于水和构件之间存在声阻抗差异,超声波传播至水-构件组成的界面时,会产生折射、反射、波形转换等复杂情况。

当被检对象为管、板、盘等具有规则表面的构件时,水-构件之间的界面为直线或规则圆弧,并且在检测过程中界面不会变化。水耦合自动化超声 C 扫描检测过程中,仅需要根据超声探头聚焦特性,使声波传播方向与界面保持一定的人射角度,就能够根据 Snell 定律计算射入构件的声波路径、波型等,进而确定适用检测的参数。迄今为止,水浸超声 C 扫描检测已在具有规则表面航空构件的自动化检测中具有非常成熟的应用。对于自动化相控阵超声检测而言,由于界面形状规则,因而可

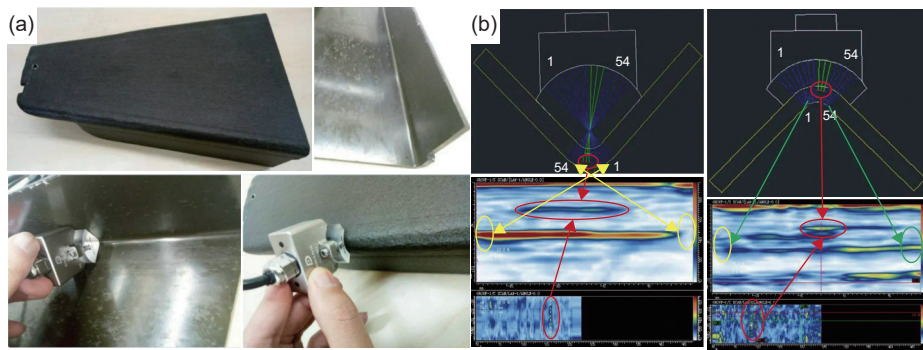


图 1 复合材料 R 角检测^[7] (a)探头在 R 角内侧、外侧检测时探头和工件位置实物图；
(b)复合材料 R 角内侧、外侧检测原理与成像结果

Fig. 1 Detection of the R angle of composite^[7] (a)physical diagram of the position of the probe and workpiece, when the probe is detected on the inside and outside of the R angle; (b)principles and imaging results of detecting the inner and outer sides of the R-angle in composite

以根据检测需求实施探伤作业^[8]。因此，规则表面航空构件的自动化相控阵超声检测也在逐步普及。

然而，当被检对象为叶片、壁板加强筋等具有非规则曲面形状表面的构件时，由于在自动化扫描中界面实时发生变化，造成已知界面双层介质成像转变为未知界面双层介质成像，从而导致检测的失败，严重影响自动化检测的质量。

2 基于工业机器人的超声 C 扫描成像检测

2.1 超声 C 扫描成像检测原理

超声 C 扫描成像检测是水浸超声检测与机械运动装置相结合的自动化无损检测技术，如图 2(a)所示，超声 C 扫描成像检测时，根据构件尺寸和型面，设定水浸探头的扫描路径和扫描范围，然后通

过机械运动装置移动水浸探头对构件进行自动化扫描，将每个扫描位置上采集的脉冲回波信号取闸门，给对应位置赋值，在赋值后进行伪色彩成像，生成用于直观呈现构件俯视截面的“C 扫描视图”^[9-10]。

由图 2(b)^[10]所示的系统组成来看，除额外添加的机械运动控制和装置外，超声 C 扫描成像检测系统所用超声板卡、探头与常规水浸超声检测系统是相同的。因此，从超声 C 扫描成像检测原理角度看，该技术非常适用于表面为平面，且上下表面平行构件的自动化检测。当然，该技术也适用于盘、环、棒类等表面为规则形状的构件的自动化检测。综上，该技术已更广泛应用于板、盘、环、棒状具有规则表面航空构件的自动化检测。鉴于其操作灵活、使用方便、安全性高、检测成本低廉等优势，超声 C 扫描成像检测也在其他工业领域发挥着重要作用^[11-13]。

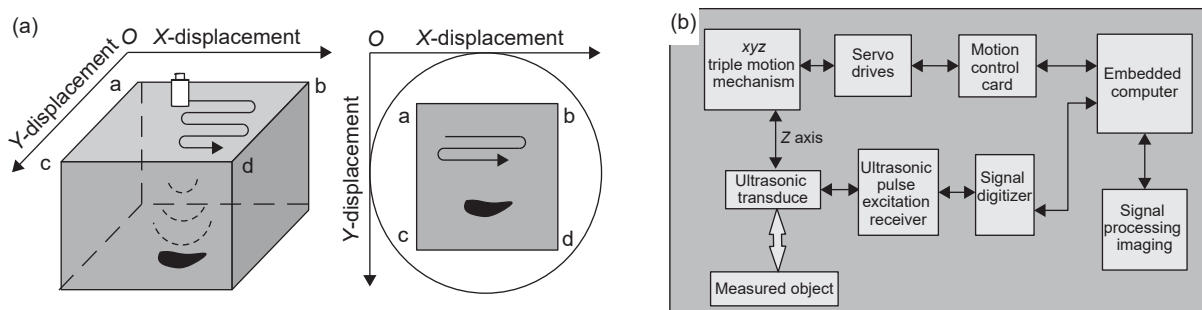


图 2 超声 C 扫描成像检测原理和系统组成 (a)超声 C 扫描成像检测原理图；(b)超声 C 扫描成像检测系统组成^[10]

Fig. 2 Principle and system composition of ultrasonic C-scan imaging detection (a)principle schematic of ultrasonic C-scan imaging testing; (b)composition of ultrasonic C-scan imaging detection system^[10]

2.2 复杂型面构件的 C 扫描成像检测应用

有效、可靠的自动化水浸超声检测应至少满足两个基本要求：(1)各扫描路径上超声探头所发声

束方向与构件表面外法线方向基本一致，确保探头有效的接收回波信号^[14]；(2)在整个检测过程中探头声束形成的声场必须 100% 覆盖被检构件，避免

漏检状况的出现^[15]。由于超声 C 扫描成像检测基于单压电晶片探头,需要该探头在复杂型面构件表面进行曲线运动来满足其入射方向与构件表面法线重合。根据 Zhang 等^[15]的研究,在测试曲面的曲率半径一定的情况下,当探头的入射方向与曲面法线的偏离角度为 2°时,超声回波振幅约下降了 70%,而当该角度大于 4°时,超声回波则几乎消失。为了减小入射偏角带来的影响,利用复杂型面构件的计算机辅助设计模型(computer aided design, CAD)来进行超声 C 扫描成像检测的路径规划。但是当面对模型未知的复杂型面构件时,该方法会失效。

随着工业机器人的蓬勃发展,将超声 C 扫描成像检测与工业机器人相结合的方式为超声 C 扫描成像检测提供了新的思路^[16-17]。赵新玉等^[18]提出了一种基于曲面点云重构的超声自动检测轨迹规划方法,将线激光轮廓仪配合机械手多轴系统获取构件曲面点云并进行拟合,然后通过规划七轴插补算法获得复杂曲面构件的七轴运动轨迹。该方法基于轮廓测量的结果生成检测轨迹,不受工件变形和装夹不准造成位姿变化的影响,从而让超声 C 扫描成像检测能够适应复杂曲面检测。赵新玉等^[19]在此基础上将超声回波的处理算法与曲面点云重构的超声自动检测轨迹规划方法相结合,得到航空叶片的 C 扫描图像。为了能够在一定程度上提高超声 C 扫描成像检测的精度,廉盟等^[20]提出非接触式超声自动扫描测厚方法来对构件进行测量,利用超声回波声时差的快速精确提取、入射偏角自动辨识与误差补偿、超声耦合间隙随形自适应调整等技术,实现对大型复杂型面构件检测。

2.3 超声 C 扫描成像检测的技术难点

尽管在工业机器人的辅助下,超声 C 扫描成像可适用于复杂型面航空构件的无损评价,但受限于技术水平等因素,超声 C 扫描成像检测仍存在一些亟待突破的技术难点。

(1)毛坯件与其 CAD 模型不匹配:当前的大多数检测系统都依赖于对构件形状的完全了解^[21]。所以知道构件精确的 CAD 模型是至关重要的。但是毛坯件从设计到制造出来,每一个环节都有可能该构件与 CAD 模型存在着一定的尺寸误差,导致其 CAD 模型不能完全正确地表示出该构件的形状和大小^[22-24],最终影响超声 C 扫描成像检测的效果。(2)工业机器人的发展还不成熟:超声 C 扫描成像检测对精度的要求较高,而如今机械臂的智能化水平程度较低,在面对轨迹突变点时会导致探

头的位姿较差,易造成检测时耦合不佳而出现漏检问题,对测量结果会产生一定的干扰^[25]。虽然目前工业相机的精度能够满足超声 C 扫描成像检测所需的要求,但工业相机的扫描速度依旧不能满足现场需求。(3)路径规划算法缺乏考虑超声与构件的相互作用:现有的路径规划算法大部分继承机械加工中的走刀、打磨等路径规划算法,在规划路线时普遍缺乏对于超声探头声场覆盖区域和声传播路径的考量。(4)成像显示不直观:超声 C 扫描成像检测的图像显示的是超声波振幅的分布,但它只能显示缺陷的水平投影位置,不能显示缺陷的深度,所以不能十分直观地显示缺陷在工件中具体的位置^[26-27]。

3 面向复杂型面的水耦合相控阵超声成像检测

3.1 复杂型面构件相控阵超声成像检测应用

相控阵超声技术的基本思想来源于雷达电磁波相控阵技术^[28]。与常规超声检测中采用的单压电晶片探头不同,超声相控阵由多个晶片排列组成。该技术通过对各阵元施加电子发射延时,可以实现激发的声束在声场中偏转、聚焦和扫描,或使用后处理算法对特定方向回波信号增强^[29-30]。与常规超声检测相比,相控阵超声声场灵活可控,可以进行大范围、多焦点和多角度的扫描,增加缺陷检出率,提高检测的可靠性^[31-32]。按照声束控制原理,相控阵超声成像的类型分为主动聚焦成像模式和后处理聚焦成像模式。主动聚焦成像模式是通过对各阵元施加发射延时,控制声束的聚焦和偏转,利用物理声束聚焦控制方式来进行成像。后处理聚焦成像则是通过图像重建处理,实现非聚焦扫描声束超声阵列信号虚拟聚焦的成像,该方法有效地降低传统相控阵超声受焦点影响的特点,提高成像质量。

在超声水浸检测复杂型面的部件时,传统超声检测采用的单阵元探头焦点位置和入射方向固定,检测结果受复杂型面的干扰较大。例如,当声束入射方向与曲面法线的偏离角度大于 4°时,超声回波几乎消失^[15]。而相控阵超声波束覆盖范围大,能够主动控制声场的聚焦和偏转,相比于传统超声检测在面对复杂型面的检测时具有更强的适应性和更高的声束可达性。但无论是常规超声检测还是相控阵超声检测,都需要了解非规则界面轮廓信息和介质界面-探头之间的位置关系^[33-34]。在实际无损检测中,非规则双层介质的截面往往是未知的。对

此, Camacho 等建立 Pulse-Echo、Pitch-Catch 和 Plane Wave 三种常用相控阵超声发射模式下的未知非规则界面轮廓测量方法^[35], 实现了复杂型面构件盲测工况下的相控阵超声动态声场聚焦。此后, Camacho 等^[36]将上述方法拓展至复杂型面构件的全聚焦成像检测中, 结合自动聚焦虚拟源成像与全聚焦法(TFM-AVSI), 实现如图 3(a)所示的成像检测结果。此外, 陈尧等^[37]提出一种快速频域复杂型面构件合成孔径聚焦方法, 为盲测工况下复杂型面构件超声检测提供一种解决方案。同时, 一些研究者还提出了其他的复杂型面构件检测方法, Robert 等^[38]提出表面自适应技术(surface adaptive ultrasounds, SAUL), 利用如图 3(b)所示的迭代算法重新自动计算聚焦法则, 通过多次发射形成和被检测构件表面平行的入射波前, 使声波垂直入射进入 R 区内部用以确保检测质量。为解决大尺寸复杂型面构件的自动路径规划问题, Franklin 等^[39]提出结合数字孪生的路径规划模型, 根据探头所发的声场规划扫描点及扫描路径, 实现如图 3(c)所示的构件截面全聚焦成像。

3.2 相控阵超声成像检测的技术难点

众所周知, 相控阵超声探头激发的声场具有一定的指向性, 这就要求相控阵超声探头对复杂型面结构扫查时具有动态实时调节探头姿态的功能, 以保障探头所发主声束轴线方向平行于被检构件法线。因此, 超声 C 扫描成像存在的技术难点, 仍然是相控阵超声成像检测的难点。此外, 由于相控阵超声的发射、接收和图像重建更为复杂和精细, 要求重建的界面精度和探头聚焦法则的计算更为精确, 这将对仪器的算力和从业人员的素质提出更高的要求。最后, 现有的商用相控阵超声仪器更多支持传统的超声相控阵算法, 对于高级的相控阵超声后处理算法支持有限。因此, 尽管具有很多可靠的检测方法, 但难以应用到复杂型面航空构件自动化超声检测的工业应用中。

4 基于柔性探头的相控阵超声成像检测

4.1 柔性阵列探头成像检测原理及发展现状

图 4 为复杂型面构件的柔性阵列探头相控阵聚焦和全聚焦成像检测原理。由图 4(a)^[40]、(b)^[41]可知, 检测时柔性阵列探头与曲面构件贴合, 按照构件型面上探头各阵元中心与焦点的距离计算延时, 根据惠更斯原理, 能够通过控制阵元发射和接收延时, 实现曲面介质内部的声场聚焦和偏转

控制, 建立曲面柔性相控阵声场聚焦模型^[41-43], 形成复杂型面构件的相控阵超声检测工艺。由图 4(c)可知, 柔性相控阵全聚焦是根据曲面构件上各阵元中心和焦点间的位置, 通过采用一个阵元发射全部阵元采集的方式, 将得到的回波信号进行延时叠加, 最终实现接触检测下复杂型面的全聚焦图像重建。

柔性阵列探头成像检测属于接触耦合检测, 有效解决基于刚性探头或楔块难以实现复杂型面构件耦合的问题。相比于超声 C 扫描和水耦合相控阵检测技术, 柔性阵列探头在自动化检测过程中可不必考虑耦合介质对成像质量的影响, 更有利于实现对声场控制和图像重建。因此, 发展基于柔性探头的接触耦合式相控阵超声成像检测, 也是解决复杂型面构件自动化检测问题的另一思路。

柔性阵列探头成像检测的概念, 由 Chatillon 等^[44]于 2000 年提出, 解决刚性探头或楔块难以有效耦合曲面构件的问题。同时, 还针对曲面构件柔性阵列成像检测问题, 提出探头阵元位置变化状况下的阵元发射和接收延时法则。此后, 国内外相关研究者围绕柔性阵列探头研发、声场控制及成像理论应用取得了一定研究进展。

柔性阵列探头研发方面, 相关研究者相继提出有机压电薄膜^[45]、压电陶瓷嵌入聚合物^[46]、电容式微机械^[47]、压电陶瓷纤维构^[48]等方案, 有效提升柔性探头的压电性能、柔韧性、耐用性。值得一提的是, Hu 等^[49]在 2018 年提出一种新型可拉伸的柔性面阵列探头, 不仅具有纤薄柔韧的力学性能, 还具有优异的机电耦合、高信噪比、低介电损耗, 可紧密贴合被检构件表面, 能够为复杂型面构件高分辨率成像检测提供良好的检测信号。

声场控制及成像理论应用方面, 研究者们开展界面曲率半径、声阻抗差异对阵元发射声场的影响研究。陈虎等^[50]建立柔性相控阵水钢界面波束聚焦模型, 得到插入式管座角焊缝内的声场分布, 得到柔性探头检测弯曲管道的延时法则。何成等^[51]将复杂曲面根据其形状分为凹面、凸面、凹面与凸面相结合三种类型, 并利用仿真多技术分析与控制平台(CIVA)仿真结果归纳出三类型面构件的延时法则规律。实际应用方面, 2022 年 Jin^[52]等开发了一种新型柔性相控阵探头及半自动扫描设备, 旨在提高扫描的稳定性和检测数据的一致性, 并将其应用于检测工业中各种形状管道。

4.2 柔性阵列探头成像检测的技术难点

尽管在复杂型面航空构件无损评价方面具有

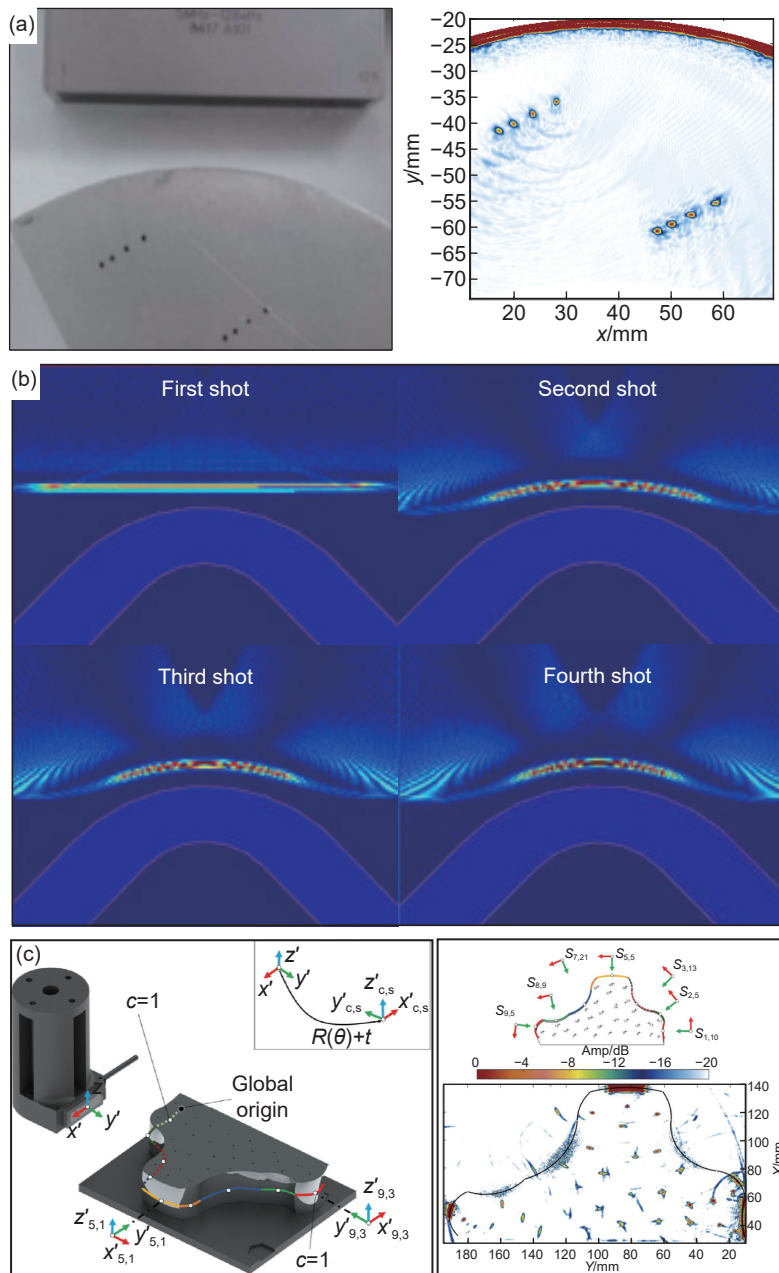


图 3 复杂型面构件相控阵超声成像检测应用示意图 (a)阵列与元件(左)和 TFM-AVSI 成像(右)^[36]; (b)模拟对凸面构件 SAUL 处理的每次迭代的入射波前图^[38]; (c)CAD 配置文件上传、离散化和探头放置的示意图(左)和用于在全局求和中生成每个图像的探针位置示意图(右)^[39]

Fig. 3 Schematic diagram of application of phased array ultrasonic imaging detection of complex surface components (a)picture of the array and component(left)and TFM-AVSI image(right)^[36]; (b)simulate the incident wavefront plot for each iteration of the SAUL treatment of the convex member^[38]; (c)schematic of CAD profile upload, discretization, and probe placement(left) as well as schematic of the probe positions used to generate each image in the global summation(right)^[39]

显著优势,但柔性阵列探头成像检测仍存在探头易磨损、探头尺寸有限、缺少位置传感器、声场控制及成像缺乏自适应性等问题。

柔性探头普遍存在易磨损的力学特性,采用接触法进行复杂型面自动化检测时,探头的使用寿命会严重降低,导致需要频繁更换探头,无形中增加检测的成本;鉴于现有相控阵超声检测系统所提供

的通道数通常为 15~256 通道,因此,柔性探头的尺寸通常不超过 50 mm^2 ,难以有效适用于大尺寸航空构件的自动化检测;现有柔性探头普遍缺少位置传感器,难以在复杂型面的探头移动中将各阵元位置反馈给检测系统,自适应地控制声场及成像。综上所述,复杂型面航空构件的柔性阵列探头成像检测,存在上述需要突破的问题和技术难点。

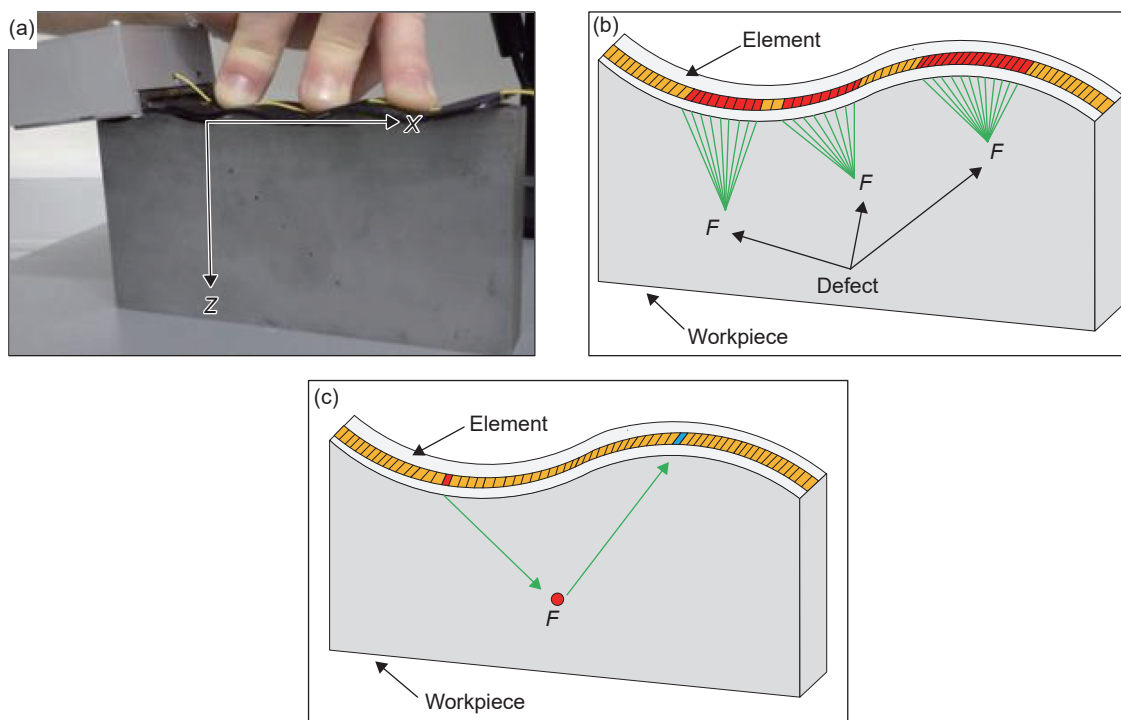


图4 柔性相控阵探头工作原理图 (a)柔性探头检测实物图^[40]; (b)曲面检测的扫描原理示意图^[41];
(c)曲面工件检测的柔性相控阵聚焦原理

Fig. 4 Principle schematic of the operation of a flexible phased array probe (a) physical diagram of flexible probe detection^[40];
(b) schematic diagram of the scanning principle of surface detection^[41]; (c) flexible phased array focusing principle
for curved workpiece inspection

5 复杂型面超声检测的技术需求和 发展趋势

5.1 面向自动化检测的先进成像算法开发

当大尺寸复杂型面构件为被检对象时,由于相控阵超声探头尺寸有限,其所发声场难以有效覆盖到整个构件,因而现有全聚焦成像仅能显示探头所扫描位置的局部图像,检测时往往需要上万个扫描位置,才能有效覆盖大尺寸复杂型面构件所有待检区域。对于手动全聚焦检测来说,操作人员仅需通过观测探头所在位置的局部超声图像或信号,就能对该构件内部缺陷进行评判。不同于手动检测,全自动超声检测的目标是单个检测人员能够同时管控多个超声扫查设备,判别海量的局部大尺寸复杂型面局部的超声图像存在困难。因而其需求的输出结果是:反映整个构件缺陷信息的3D全景超声视图^[53-54],能够帮助检测人员快速判别和定位缺陷。

水耦合全聚焦检测工况下,相控阵探头所发声波会在水-构件之间形成的非规则界面上传播,引起声波传播路径等特性的改变,需要修改单层介质的飞行时间法则(time of flight, TOF)^[55-57]。如何将各个扫描位置上获得的局部超声图像进行融合,克

服非规则界面对相控阵超声成像的影响,形成呈现构件缺陷全貌的全景超声视图,是推进自动化超声成像检测进程中亟待解决的难题。因此,未来的自动化超声成像检测系统中,必须具备测量复杂型面轮廓和复杂构件超声图像融合的功能,旨在生成与CAD模型相仿的3D超声全景视图,更为直观地显示复杂型面构件及其内部缺陷,为后续缺陷的自动识别和评判提供可靠的数据支撑。

5.2 缺陷的智能化识别与分类

随着人工智能、大数据等技术的飞速发展,缺陷的智能化识别与定量已成为自动化超声成像检测的重要需求。超声检测中的缺陷识别,依赖信号/图像中所框定闸门的回波波高。对于平板、管材、棒材、盘环件来说,闸门的框定是非常容易实现的。但是,对于复杂型面构件来说,由于构件中上下表面的位置在不断变化,给复杂型面构件的闸门框定带来了极大的困难。因此,发展基于动态闸门框定的智能化缺陷识别算法,是突破未来复杂型面构件自动化超声成像检测的一个重要方向。

此外,鉴于构件的材质及制作工艺不同,复杂型面构件内部会产生类型各异的缺陷。因此,针对各类构件生产过程中所出现缺陷的特点,以及各类缺陷的信号/图像回波特征,开展基于深度学习的

缺陷类别判定,也是亟待突破的自动化超声成像检测技术难点。特别是在新材料、新工艺不断推陈出新的航空制造领域,复杂型面构件的缺陷智能分类技术将会发挥更大的作用,为各领域的可持续发展做出更大的贡献。

5.3 基于数字孪生的检测路径规划技术

超声水浸检测过程中,为获得优异、可靠的检测效果,通常需要根据构件型面结构特点调整探头聚焦法则、探头水程以及超声图像重建法则等检测参数。当被检对象为平板、管材、棒材、盘环等构件时,这些检测参数大多是相对固定的,只需要检测前在标准试块上完成校准即可确保检测质量。然而,当被检对象的型面很复杂时,上述检测参数则是随扫描位置变化的,导致一次扫描很难获得良好的检测结果。

数字孪生技术的发展,为解决复杂型面构件自动化检测过程中的检测参数动态设计和定制提供新的解决思路。正如 Franklin 等的研究^[39],通过数字孪生技术可根据构件轮廓及材质特点,结合各扫描位置的探头声场特征,计算各检测路径上的探头聚焦法则、探头水程和图像重建策略,得出最优检测路径。综上所述,结合数字孪生技术,通过离线仿真运算规划复杂型面构件的最优检测路径,也是未来发展的技术趋势。

5.4 海量通道相控阵超声传感器及系统研发

二维柔性阵列超声传感器凭借随形贴合结构表面的优势,将是未来解决大尺寸曲面构件快速自动化超声成像检测难题的一个重要解决思路。对于大尺寸曲面构件而言,发展贴合质量良好、耐用性高、价格低廉的超高声场覆盖二维柔性阵列超声传感器,将会解决以往硬质相控阵超声探头需要水耦合的不足,也会解决水耦合给成像检测质量带来的不利因素。尤其是当大尺寸复杂型面构件作为被检对象时,采用具有几万、甚至几十万通道的大面积柔性面阵传感器覆盖整个复杂型面构件进行检测时,将避免传统相控阵探头声场覆盖范围受限的不足,也会解决传统自动化检测中探头扫查速度较慢的问题,带来成像质量和效率的显著提升。

然而,即便是超大声场覆盖范围的二维柔性阵列超声传感器研发成功,当下相控阵超声成像检测系统的通道数仍然难以满足上述检测需求。目前,现有系统所提供的通道数通常为 16~256 通道,当然也有 2048 通道的超大通道相控阵检测系统。但是,从复杂型面构件,尤其是大尺寸构件的自动化、智能化检测仍亟需几万、甚至是几十万海量通道的

相控阵超声系统,解决现有系统通道数难以满足检测效率和质量的问题,还需要研究者开发集成化程度更高的海量通道相控阵超声检测系统,为突破大尺寸曲面构件自动快速检测提供硬件基础。

6 结束语

随着航空工业的发展,复杂型面构件的超声成像仍为超声自动化检测方向的难点问题。首先,本文通过对复杂型面介质的超声波传播问题的展开分析,归纳复杂型面构件的技术难点。传统的硬质材料探头无法直接贴合复杂型面介质表面,需要解决耦合问题。复杂界面会让入射的超声波波前发生畸变,在成像时需要额外补偿声束传播路径的变化。在超声成像过程中,界面会形成天然的凸/凹透镜,会对体积型和面积型缺陷回波的成像分辨率造成影响。复杂型面构件的表面在不同扫查方向上都是不规则的。在扫查过程中,归纳复杂型面构件的技术难点。需要实时计算探头所对的界面轮廓,以及探头相对界面轮廓的位姿。在成像过程中界面轮廓的获取以及延时矩阵的计算,会给现有的算法水平和硬件算力提出更高的要求。

对于传统三轴扫查系统灵活度不够的问题,基于工业机器人的超声 C 扫描成像系统检测被提出,通过机械臂提供更高的自由度,使得超声探头能够将声波垂直入射曲面内部。进一步,针对水浸自动化扫查工况下,单阵元超声探头声场覆盖小,回波易丢失的问题,面向复杂型面的相控阵超声成像检测被提出,采用声场覆盖面积大的相控阵探头,以及高质量的超声相控阵后处理算法,能够使得超声扫查系统具备更强的界面适应能力,并提供高分辨率,直观的超声截面图像。为了满足一线工业无损检测需求,针对水浸系统笨重无法一线部署的问题,基于柔性相控阵超声探头的成像检测能够贴合复杂构件表面,在便携设备上满足复杂界面超声检测的需求。本文对以上三类技术发展现状和优缺点进行概述,并展示目前已取得的相关成果。

最后,从复杂型面航空构件自动化超声成像检测技术的算法软件和超声回波采集的硬件系统的未来发展趋势进行展望。在算法软件方面,面向自动化检测的先进后处理成像算法可以与自动化扫查技术结合,利用后处理成像算法高分辨率、低伪影的优势提供与 CAD 模型相仿的 3D 超声全景视图,展现出更高维度的缺陷信息。缺陷的智能化识别与分类,需要克服曲面构件上下表面回波位置不

断变动的问题,做到快速聚焦具体缺陷信息,省去人工筛查扫查结果的耗时操作。在扫查路径规划阶段,基于数字孪生的检测路径规划技术能够通过联合机械臂和超声仿真自我迭代扫查路径,根据不同型面的构件,以及不同的扫查探头,得出优秀的扫查路径,能够大幅提升自动化水浸超声成像的扫查质量。在超声回波采集的硬件系统方面,海量通道相控阵超声柔性传感器及系统能够提供超大声场覆盖,做到一次贴合即检测完成,省去沉重的自动扫查系统,并为在一线快速高效检测复杂构件提供了可能。

参考文献:

- [1] 曹欢庆,朱启民,赵培含,等.复杂型面结构超声成像检测研究进展[J].仪器仪表学报,2024,45(6):42-53.
CAO H Q, ZHU Q M, ZHAO P H, et al. Survey on ultrasonic imaging of complex-shaped structures[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(6): 42-53.
- [2] HOYLE E, SUTCLIFFE M, CHARLTON P, et al. Virtual source aperture imaging with auto-focusing of unknown complex geometry through dual layered media[J]. NDT & E International, 2018, 98: 55-62.
- [3] 罗忠兵,曹欢庆,林莉.航空复材构件R区相控阵超声检测研究进展[J].航空制造技术,2019,62(14):67-75.
LUO Z B, CAO H Q, LIN L. Progress in study of phased array ultrasonic testing on CFRP radii in aerospace component[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2019, 62(14): 67-75.
- [4] 佚名.智能检测装备产业发展行动计划(2023-2025年)[J].中小企业管理与科技,2023,(4):1-6.
- [5] 国家能源局.承压设备无损检测第3部分:超声检测:NB/T 47013.3—2015[S].北京:北京标准出版社,2015.
National Energy Administration. Nondestructive testing of pressure equipments part 3: ultrasonic testing: NB/T 47013.3—2015[S]. Beijing: Standards Press of China, 2015.
- [6] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.无损检测,超声检测,相控阵超声检测方法:GB/T 32563—2016[S].北京:北京标准出版社,2016.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the PRC & Standardization Administration of China. Non-destructive testing, ultrasonic testing, test method for phased-array ultrasonic testing: GB/T 32563—2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.
- [7] 张祥林.复合材料R角部位缺陷检测技术与超声C扫描检测工艺技术研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2012.
- ZHANG X L. Compound materials R angle spot flaw examination technology and supersonic C scanning examination processing technology research[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2012.
- [8] 陆琦,张乐,游玉刚.汽轮机转子叶轮超声波相控阵检测装置设计及验证[J].国防制造技术,2015(4):36-40.
LU Q, ZHANG L, YOU Y G. Design and verification of ultrasonic phased array detection device for steam turbine rotor impeller[J]. Defense Manufacturing Technology, 2015(4): 36-40.
- [9] 孔傲,骆琦,陈运,等.分区合成C扫成像方法在水冷板超声检测中的应用[J].无损检测,2024,46(4):26-30.
KONG A, LUO Q, CHEN Y, et al. Application of zoned synthetic C-scan imaging method in ultrasonic testing of water-cooled plates[J]. Nondestructive Testing, 2024, 46(4): 26-30.
- [10] 肖婷,李杨,赵岩,等.基于超声C扫描技术的形貌重构[J].无损探伤,2022,46(4):10-14.
XIAO T, LI Y, ZHAO Y, et al. Reconstruction of morphology based on ultrasonic C-scan technique[J]. Nondestructive Testing Technology, 2022, 46(4): 10-14.
- [11] 江健,郭天太,吴思源,等.曲面构件一体化超声自动检测方法研究[J].传感技术学报,2006,19(2):383-387.
JIANG J, GUO T T, WU S Y, et al. Research of integrated ultrasonic auto detecting method on curved surfaces[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2006, 19(2): 383-387.
- [12] 刘海波,廉盟,周连杰,等.面形自适应超声在机测厚方法研究[J].机械工程学报,2018,54(18):11-17.
LIU H B, LIAN M, ZHOU L J, et al. Research on shape adaptive thickness on machine measurement using ultrasonic[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(18): 11-17.
- [13] 周正干,李文涛,李洋,等.相控阵超声水浸C扫描自动检测系统的研制[J].机械工程学报,2017,53(12):28-34.
ZHOU Z G, LI W T, LI Y, et al. Development of ultrasonic phased array immersion C-scan automatic detection system[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(12): 28-34.
- [14] 吴思源,周晓军,江健,等.超声检测中曲面重构和路径规划方法研究[J].浙江大学学报(工学版),2006,40(5):763-767.
WU S Y, ZHOU X J, JIANG J, et al. Research of surface reconstruction and path generation by ultrasonic inspection[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2006, 40(5): 763-767.
- [15] ZHANG Y, CHEN K, GUO P, et al. Profile tracking for multi-axis ultrasonic inspection of model-unknown free-

- form surfaces based on energy concentration[J]. *Measurement*, 2021, 172: 108867.
- [16] ZHEN X, YONG Y, GUANG X C, et al. Profile tracking with ultrasonic alignment for automatic non-destructive testing of complex structures[J]. *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, 2018, 49: 134-142.
- [17] 罗雄彪, 陈铁群. 超声无损检测的发展趋势[J]. 无损检测, 2005(3): 148-152.
LUO X B, CHEN T Q. Development trends of ultrasonic testing[J]. *Nondestructive Testing*, 2005(3): 148-152.
- [18] 赵新玉, 温欣, 段晓敏. 检测机械手轨迹突变点识别方法[J]. *机械工程学报*, 2020, 56(18): 15-21.
ZHAO X Y, WEN X, DUAN X M. Recognition method for testing manipulator trajectory change-point[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2020, 56(18): 15-21.
- [19] 赵新玉, 李鹏飞, 段晓敏, 等. 曲面工件自动超声检测轨迹规划[J]. *机械工程学报*, 2022, 58(24): 41-48.
ZHAO X Y, LI P F, DUAN X M, et al. Motion planning of curved surface for automatic ultrasonic testing[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2022, 58(24): 41-48.
- [20] 廉盟. 大型薄壁件壁厚超声自动测量方法与关键技术[D]. 大连: 大连理工大学, 2019.
LIAN M. Methods and key technologies of automatic ultrasonic thickness measurement of large thin-wall parts[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019.
- [21] MOROZOV M, PIERCE S G, MACLEOD C N, et al. Off-line scan path planning for robotic NDT[J]. *Measurement*, 2018, 122: 284-290.
- [22] GAO Y H, WU D, NAN C G, et al. Normal direction measurement in robotic drilling and precision calculation[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, 76(5/8): 1311-1318.
- [23] MINEO C, PIERCE S G, NICHOLSON P I, et al. Robotic path planning for non-destructive testing—a custom MATLAB toolbox approach[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2016, 37: 1-12.
- [24] 李雄兵, 徐志农, 胡宏伟, 等. 曲面工件超声测量中探头自动对正的研究[J]. 中国机械工程, 2008, 19(11): 1289-1292.
LI X B, XU Z N, HU H W, et al. Probe's auto-alignment in curved components ultrasonic survey[J]. *China Mechanical Engineering*, 2008, 19(11): 1289-1292.
- [25] WANG Y Q, LIAN M, LIU H B, et al. Incident angle identification based on first-echo energy attenuation in ultrasonic thickness measurement[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2018, 65(11): 2141-2149.
- [26] 李彦军. 航空发动机叶片超声 C 扫三维成像技术研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2018.
LI Y J. Three-dimensional imaging technology of ultrasonic C scanning for the aircraft engine blade[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2018.
- [27] 王应焘, 李彦军, 芮执元, 等. 超声检测缺陷三维成像技术[J]. 无损检测, 2019, 41(12): 7-11.
WANG Y T, LI Y J, RUI Z Y, et al. 3-D imaging technology of ultrasound defect detection[J]. *Nondestructive Testing*, 2019, 41(12): 7-11.
- [28] 陈乐. 超声相控阵全聚焦成像检测缺陷的定位定量优势分析[J]. 上海煤气, 2023(2): 5-8.
CHEN L. The positioning and quantitative advantage analysis of the ultrasonic phased array total focusing imaging defect[J]. *Shanghai Gas*, 2023(2): 5-8.
- [29] 杨萍, 周经纤, 荆戈, 等. 超声相控阵发射声场的计算与分析研究[J]. 机械制造, 2013, 51(6): 14-16.
YANG P, ZHOU J X, JING G, et al. Calculation and analysis of the sound field of ultrasonic phased array emission[J]. *Mechanical Engineering*, 2013, 51(6): 14-16.
- [30] 王卫华, 金博, 邓宝刚, 等. 超声相控阵检测技术与常规超声波检测技术[J]. 设备管理与维修, 2022(18): 89-90.
WANG W H, JIN B, DENG B G, et al. Ultrasonic phased array detection technology and conventional ultrasonic detection technology[J]. *Plant Maintenance Engineering*, 2022(18): 89-90.
- [31] 詹绍正, 宁宁, 王丹. 超声相控阵技术在航空复合材料结构无损检测中的应用及发展[J]. 无损检测, 2015, 37(4): 19-23.
ZHAN S Z, NING N, WANG D. Application and development of ultrasonic phased array testing for aviation composite materials[J]. *Nondestructive Testing*, 2015, 37(4): 19-23.
- [32] 李衍. 超声相控阵与全聚焦法成像特性比照评析[J]. 无损探伤, 2021, 45(1): 1-6.
LI Y. Comparative analysis of imaging characteristics of ultrasonic phased array and total focusing method[J]. *Non-destructive Testing Technology*, 2021, 45(1): 1-6.
- [33] LUKOMSKI T. Full-matrix capture with phased shift migration for flaw detection in layered objects with complex geometry[J]. *Ultrasonics*, 2016, 70: 241-247.
- [34] LUKOMSKI T. Non-stationary phase shift migration for flaw detection in objects with lateral velocity variations[J]. *Insight-Non-Destructive testing and Condition Monitoring*, 2014, 56(9): 477-482.
- [35] CAMACHO J, CRUZA J F, BRIZUELA J, et al. Automatic dynamic depth focusing for NDT[J]. *IEEE Trans-*

- actions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2014, 61(4): 673-684.
- [36] CRUZA J F, CAMACHO J. Total focusing method with virtual sources in the presence of unknown geometry interfaces[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2016, 63(10): 1581-1592.
- [37] 陈尧, 冒秋琴, 石文泽, 等. 基于虚拟源的非规则双层介质频域合成孔径聚焦超声成像[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(6): 48-55.
- CHEN Y, MAO Q Q, SHI W Z, et al. Frequency domain synthetic aperture focusing technique for irregular two-layered medium based on virtual source[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(6): 48-55.
- [38] ROBERT S, CASULA O, ROY O, et al. Real-time non-destructive testing of composite aeronautical structures with a self-adaptive ultrasonic technique[J]. Measurement Science and Technology, 2013, 24(7): 074011.
- [39] FRANKLIN J F R M, PIERRE B. Global total focusing method through digital twin and robotic automation for ultrasonic phased array inspection of complex components[J]. NDT & E International, 2023, 137: 102833.
- [40] LANE C J L. The inspection of curved components using flexible ultrasonic arrays and shape sensing fibres[J]. Case Studies in Nondestructive Testing and Evaluation, 2014, 1: 13-18.
- [41] 郑艳芳. 复杂曲面构件缺陷的柔性超声相控阵检测关键技术研究[D]. 长春: 吉林大学, 2020.
- ZHENG Y F. Research on key technologies of flexible ultrasonic phased array testing for complex curved components defects[D]. Changchun: Jilin University, 2020.
- [42] 李尧, 夏子颀, 李晓兵, 等. 柔性无损检测超声线阵换能器的仿真研究[J]. 建模与仿真, 2024, 13(3): 2223-2232.
- LI Y, XIA Z Y, LI X B, et al. Simulation study on flexible nondestructive testing ultrasonic linear array transducer[J]. Modeling and Simulation, 2024, 13(3): 2223-2232.
- [43] 王中亚, 刘欣平, 史猛, 等. 柔性相控阵动态聚焦理论与仿真[J]. 声学技术, 2019, 38(5): 585-589.
- WANG Z Y, LIU X P, SHI M, et al. Dynamic focusing theory and simulation study of flexible phased array[J]. Technical Acoustics, 2019, 38(5): 585-589.
- [44] CHATILLON S, CATTIAUX G, SERRE M, et al. Ultrasonic non-destructive testing of pieces of complex geometry with a flexible phased array transducer[J]. Ultrasonics, 2000, 38(1/8): 131-134.
- [45] HARVEY G, GACHAGAN A, MACKERSIE J W, et al. Flexible ultrasonic transducers incorporating piezoelectric fibres[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2009, 56(9): 1999-2009.
- [46] WANG Z, XUE Q T, CHEN Y Q, et al. A flexible ultrasound transducer array with micro-machined bulk PZT[J]. Sensors, 2015, 15(2): 2538-2547.
- [47] ZHUANG X F, LIN D S, ORALKAN O, et al. Flexible transducer arrays with through-wafer electrical interconnects based on trench refilling with PDMS[C]//2007 IEEE 20th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems(MEMS). Hyogo: IEEE, 2008: 73-76.
- [48] MACKERSIE J W, HARVEY G, GACHAGAN A, et al. Development of an efficient conformable array structure [C]//Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation: Proceedings of the 35th Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation. Chicago: AIP, 2009: 785-791.
- [49] HU H J, ZHU X, WANG C H, et al. Stretchable ultrasonic transducer arrays for three-dimensional imaging on complex surfaces[J]. Science Advances, 2018, 4(3): 39-79.
- [50] 陈虎, 钱盛杰, 黄辉, 等. 基于柔性相控阵的插入式管座角焊缝 CIVA 仿真[J]. 无损检测, 2019, 41: 38-45.
- CHEN H, QIAN S J, HUANG H, et al. Flexible phased array CIVA simulation of inserted fillet welds[J]. Nondestructive Testing, 2019, 41: 38-45.
- [51] 何成, 王宗江, 夏玉秀, 等. 基于柔性阵列探头的铸铝金具相控阵超声检测技术研究[J]. 热力发电, 2023, 52(10): 53-62.
- HE C, WANG Z J, XIA Y X, et al. Research on phased array ultrasonic testing technology of cast aluminum fittings based on flexible array probes[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(10): 53-62.
- [52] LIM S J, KIM Y L, CHO S, et al. Ultrasonic inspection for welds with irregular curvature geometry using flexible phased array probes and semi-auto scanners: a feasibility study[J]. Applied Sciences, 2022, 12(2): 748.
- [53] 杨贵德, 詹红庆, 陈伟, 等. 相控阵三维全聚焦成像检测技术[J]. 无损检测, 2018, 40(5): 64-67.
- YANG G D, ZHAN H Q, CHEN W, et al. Phased array 3D total focusing imaging detection technology[J]. Nondestructive Testing, 2018, 40(5): 64-67.
- [54] HUANG Q, ZENG Z. A review on real-time 3D ultrasound imaging technology[J]. BioMed Research International, 2017, 2017: 6027029.
- [55] OLOFSSON T. Phase shift migration for imaging layered objects and objects immersed in water[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2010, 57(11): 2522-2530.

- [56] ROSE J L. 固体中的超声波[M]. 何存富, 吴斌, 王秀彦, 译. 北京: 科学出版社, 2004.

ROSE J L. Ultrasonic waves in solid media[M]. Translated by HE C F, WU B, WANG X Y. Beijing: Science Press, 2004.

- [57] 徐娜, 何方成, 周正干. 基于动态孔径聚焦的L型构件相控阵超声检测[J]. 北京航空航天大学学报, 2015, 41(6): 1000-1006.

XU N, HE F C, ZHOU Z G. Ultrasonic phased array inspection of L-shaped components based on dynamic aperture focusing[J]. Journal of Beijing University of

Aeronautics and Astronautics, 2015, 41(6): 1000-1006.

收稿日期: 2024-11-20; 录用日期: 2025-09-08

基金项目: 军委装备发展部“慧眼行动”(71B4A64C); 国家自然科学基金(62161028, 12064001); 江西省杰出青年基金项目(20232ACB214012); 江西省自然科学基金(重点)项目(20212ACB204014)

通讯作者: 卢超(1971—), 男, 博士, 教授, 研究方向为声学检测与仪器, 联系地址: 江西省南昌市丰和南大道696号(330063), E-mail: luchaoniat@163.com

(本文责编: 高磊)