

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2412566

复杂型面结构超声成像检测研究进展*

曹欢庆^{1,2,3}, 朱启民^{1,2,3,4}, 赵培含^{1,2,3}, 何梓科^{1,2,3}, 郭师峰^{1,2,3,5}

(1. 中国科学院深圳先进技术研究院深圳市智慧传感与系统检测重点实验室 深圳 518055; 2. 中国科学院深圳先进技术研究院广东省机器人与智能系统重点实验室 深圳 518055; 3. 中国科学院大学 北京 100049; 4. 南方科技大学 深圳 518055; 5. 医学成像科学与技术系统中国科学院(全国)重点实验室 深圳 518055)

摘要:工程结构普遍具有复杂型面,而且此类区域是制造和服役阶段损伤甚至失效的高发区。超声无损检测是评估结构制造质量和服役安全性的重要手段,但复杂型面给超声检测带来了声耦合困难、随形扫描控制难、超声入射/接收难、超声传播行为复杂等挑战。本文分别从超声耦合策略、超声换能器、随形扫描控制、复杂型面轮廓重建、成像算法、复杂型面与材料复杂耦合的影响几大方面,概述了现有研究已取得的重要进展。最后探讨了复杂型面超声成像检测研究仍面临的挑战以及未来发展趋势,包括超复杂型面三维异形结构检测、高柔性二维阵列超声换能器、以及同时考虑宏/微观结构和材料自身声学特性的影响改进超声成像算法。

关键词: 复杂型面; 超声成像; 柔性阵列超声换能器; 表面轮廓重建; 信号后处理

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

Survey on ultrasonic imaging of complex-shaped structures

Cao Huanqing^{1,2,3}, Zhu Qimin^{1,2,3,4}, Zhao Peihan^{1,2,3}, He Zike^{1,2,3}, Guo Shifeng^{1,2,3,5}

(1. Shenzhen Key Laboratory of Smart Sensing and Intelligent Systems, Shenzhen Institute of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen 518055, China; 2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Robotics and Intelligent System, Shenzhen Institute of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen 518055, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. Key Laboratory of Biomedical; 5. Southern University of Science and Technology, Shenzhen 518055, China Imaging Science and System, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen 518055, China)

Abstract: Complex-shaped structures are commonly seen in industry, and they are high-risk regions of internal defect and even failure during manufacturing and service stages. Ultrasonic non-destructive testing is an effective method to evaluate the manufacturing quality and in-service safety of complex-shaped structures. However, complex surface profile brings challenges to ultrasonic testing, such as difficulties in ultrasonic coupling, surface-conformal scan control, ultrasound incidence and reception, and complex wave propagation behavior. This paper summarizes main research progresses in this field from several aspects, including ultrasonic coupling strategies, transducers, surface conformal scan strategies, surface profile reconstruction, imaging algorithms, and the coupling effects between complex-shaped surface profile and ultrasonic properties of materials. Finally, an outlook on future research trends in ultrasonic imaging of complex-shaped structures is provided, including the testing of three-dimensional structures with ultra-complex irregular surfaces, two-dimensional array transducers of high flexibility, and the improvement of ultrasonic imaging algorithms that consider both macro/micro structures and the ultrasonic properties of materials.

Keywords: complex shape; ultrasonic imaging; flexible ultrasonic array transducer; surface profile reconstruction; signal post-processing

收稿日期: 2024-03-01 Received Date: 2024-03-01

* 基金项目: 国家自然科学基金 (U2133213, 52071332, 12204505)、广东省基础与应用基础研究基金委员会 (2023B1515120090, 2022A1515011291, 2023B1515040008, 2023A1515110211)、深圳市科技创新委员会 (ZDSYS20190902093209795, JCYJ20220818101215033)、宁波市科学技术局 (2021Z027) 项目资助

0 引言

为满足特定的使役性能要求,航空/天飞行器、压力容器/管道、轨道交通等重大工业装备常具有凹凸曲面、拐角、倾斜面等复杂型面。相较于平面或微曲面等简单型面,复杂型面增加了结构制造工艺复杂程度,容易出现裂纹、分层、孔洞等制造缺陷,降低结构力学性能和结构完整性。而且,重大工业装备普遍服役环境严苛,复杂型面结构受到交变应力、温度、压力、湿热、辐射等极端服役环境影响的程度更加严重,更容易引发材料老化和内部缺陷扩展,甚至结构整体失效。因此,迫切需要发展面向复杂型面结构的无损检测技术,以便及时准确检测结构内部缺陷信息和定量评估结构使役性能,为阐明失效诱因、指导制造工艺改进、预警服役安全事故提供技术保障。

在众多无损检测方法中,超声检测凭借其适用范围广、检测灵敏度高、缺陷定位准确、使用成本低、便于现场使用等优点,成为复杂型面结构内部缺陷无损检测最常采用的手段。目前,主流的超声检测技术和设备主要是面向型面较为简单的结构开发的,并且已经实现了较为成熟的自动化检测。然而,复杂型面结构内部缺陷的超声检测仍面临诸多挑战,是超声无损检测领域的热点和难点问题之一。

本文从分析该领域面临的挑战入手,对近年来取得的突破性进展及其仍然存在的问题进行详尽地综述,并对未来的研究方向和发展趋势进行展望,旨在为相关研究和应用的深入开展提供参考。

1 复杂型面结构超声检测难点

复杂型面结构超声检测的复杂性,源自复杂型面会对超声入射、传播、接收、扫描、成像各检测环节产生影响,具体表现如下:

1) 稳定声耦合难:由于高频超声在空气中传播损耗大,而且空气与固体材料声阻抗失配程度严重,因此如何实现超声在换能器和被检结构之间有效传递,是执行超声检测首先要解决的难题。然而,目前主流的超声换能器普遍是由硬质的压电陶瓷和金属壳体制作而成,难以完美契合被检复杂型面结构表面,二者间的空气隙严重阻碍高频超声的传播,因此必须在二者之间填充透声材料以排除空气隙。此外,大曲率拐角区域普遍空间狭小,超声换能器难以直接接触,必须借助工装辅助实现稳定声耦合^[1-2](如图1所示)。

2) 随形扫描控制难:超声换能器激励的声束普遍指向性很强,即超声发射和接收灵敏度沿换能器表面法向

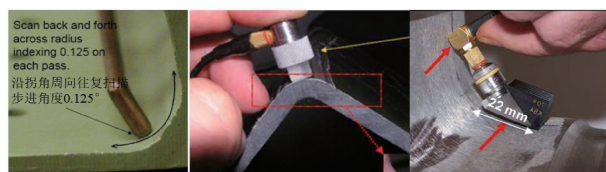


图1 大曲率拐角超声检测

Fig. 1 Ultrasonic testing of large curvature corner parts

最强,并随着传播方向偏离表面法向快速降低。所以,为实现最佳的超声检测效果,扫描过程中需实时调节超声换能器姿态,以保证声束中心线始终与被检结构表面法线重合。如图2所示,对于平面结构,当调节超声换能器姿态至垂直表面入射后,便可简单地通过线性栅格扫描实现全覆盖检测,扫描过程中无需再调节换能器位姿。而对于复杂型面结构,则需要根据被检型面几何特点合理规划随形扫描路径,以提高扫描效率,避免漏检。同时,为保证不同位置的检测灵敏度一致,不但要实时调节换能器的姿态以保证声束轴线始终垂直入射,还需调节换能器相对被检结构表面的距离以保持恒定,因而扫描控制相较于平面结构更为复杂。

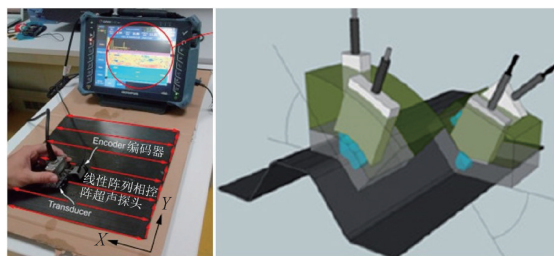
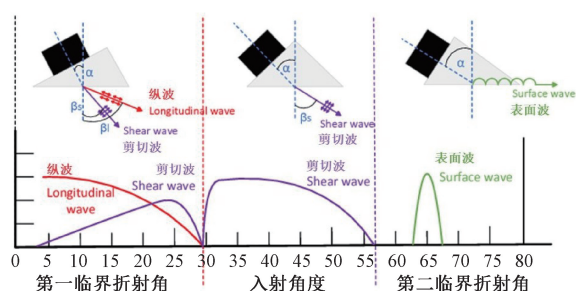


图2 平面和复杂型面结构超声扫描检测

Fig. 2 Ultrasonic scan over planar and complex-shaped structures

3) 超声入射/接收难:如前所述,复杂型面结构超声检测时,常需要在换能器与被检结构之间填充声耦合介质。由于被检结构和声耦合介质声学特性存在显著差异,二者间界面处出现声阻抗失配。超声在经过该界面时会因为界面反射而损失一部分能量。通常情况下,超声垂直表面入射时透射系数最高,更有利于提高超声检测灵敏度(如图3所示)。此外,界面折射还会导致倾斜入射超声传播路径偏折,当使用反射法检测取向与表面平行的平面型缺陷时,超声经缺陷镜面反射后无法原路返回,使用透射法对心检测时也难以接收到透射信号。

4) 超声传播行为复杂:若要实现超声聚焦成像检测,就不可避免地要使用倾斜入射超声,因此必须考虑超声在经过“声耦合介质/被检结构”声阻抗失配界面时发生折射所致超声传播路径偏折的影响,否则就会导致超声成像的定位精度和信噪比变差。超声在声耦合层上下

图3 超声波幅随入射角度变化^[3]Fig. 3 Variation of ultrasound amplitude with incidence angle^[3]

界面之间的往复反射,和在界面处发生波型转换,也会导致超声信号时域波形更加复杂,甚至干扰目标缺陷信号。此外,当被检结构自身为声学特性复杂材料时,复杂型面因素还会与之相互耦合,进一步加剧超声传播行为的复杂性。例如,碳纤维增强树脂基复合材料拐角区域的纤维方向随弧形表面连续弯曲,致使材料不同位置处的各向异性声速分布随纤维方向旋转,超声传播路径发生连续弯曲,增加了超声聚焦调控和目标信号解耦难度(如图4所示)。

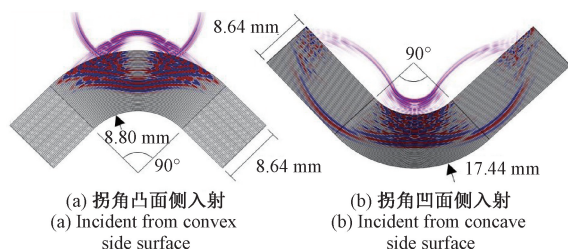


图4 多层各向异性复合材料拐角超声传播行为

Fig. 4 Wave propagation in multi-layered anisotropic composite corner parts

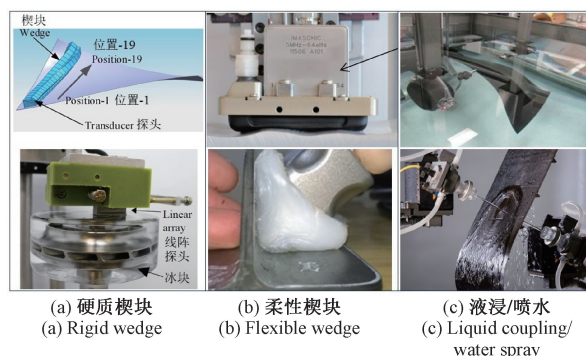
为解决上述挑战,现有研究主要从超声耦合策略、新型超声换能器、表面轮廓重建、随形扫描控制、超声成像算法几方面寻求突破,后文将据此分类介绍国内外研究进展。

2 超声耦合策略

直接接触超声检测方式可以避免“声耦合介质/被检结构”界面处超声反/折射所致透射声能损失和传播路径偏折的影响,有利于提高检测灵敏度和降低信号判读难度,因此目前仍是工程中普遍采用的超声检测方式之一。主流的压电陶瓷单晶片或相控阵超声换能器表面通常为平面,可简单地通过直接接触方式贴合平面结构表面,仅需在换能器和结构表面涂抹液体薄层即可排除空气隙。对于复杂型面结构,只有当换能器尺寸小于被检型面曲

率半径时才能实现紧密贴合,例如可使用笔式换能器检测大曲率拐角区域(图1)^[4]。

如图5所示,对于超声换能器与被检结构表面型面失配的情况,则需要在换能器前方安装契合二者表面型面的楔块,保证声耦合效果的同时,避免直接接触方式存在的近表面超声检测盲区。超声楔块通常是由透声性好的硬质树脂类材料制成,因而单一楔块只适用于一种几何规格的型面,通用性较差。对于不同类型的型面,或者表面型面随位置变化的情况,例如航空发动机叶片、飞机翼梁等,则需制作系列匹配不同位置型面的楔块,制作成本较高,同时频繁更换楔块也不便于连续自动化扫描^[5]。此外,使用硬质楔块时一般需要借助按压实现紧密贴合,但在复杂型面结构扫描检测的过程中很难保证按压力始终稳定,导致超声信号幅值波动,干扰缺陷信号判读。

图5 常用超声耦合方法^[5-6, 10-11]Fig. 5 Typical ultrasonic coupling methods^[5-6, 10-11]

将被检结构完全浸于水、油等液体耦合介质中,是实现任意类型复杂型面稳定声耦合的常用手段,广泛应用于超声C扫描设备。对于尺寸较大不便于整体液浸的情况,则是通过在换能器前方安装喷水装置,龙门式超声检测设备常采用这种声耦合方式。然而,由于水(声速1483 m/s)与金属材料(钢铁纵波声速5920 m/s)的声阻抗差异很大,“水/金属”界面的超声透射系数只有“硬质树脂楔块(Rexolite 纵波声速2340 m/s)/金属”界面的若干分之一。鉴于固态的冰块(纵波声速约4000 m/s)与金属的声速差异较之于水可显著降低,Simonetti和Fox^[6-7]提出将复杂型面金属结构浸于水中后整体冷冻成纯净无气泡且界面紧密结合的冰块的新型声耦合方式,降低“耦合层/复杂型面结构”界面声阻抗失配程度,提高超声透射系数,同时降低超声经过界面时的折射方向偏折程度。对于易吸湿类复合材料、内部结构容易充水、外场检测等不允许液浸和喷水的场景,可使用透声薄膜/橡胶包覆的水囊^[8-9],或者高分子材料制成的软质楔块^[10-11],凭借其柔性可变形的特点,辅助以夹持和扫描工装,可适应表面型面变化,实现扫描过程中始终紧密贴合表面。

对于高温/高压/辐射等极端环境,上述接触式超声耦合方式使用受限,非接触式超声检测更具优势,而且由于完全不需要超声耦合介质,检测方式更加灵活。例如,空气耦合超声使用的是穿透能力强的 kHz 级低频超声,广泛用于超声衰减严重的大厚度复合材料结构检测,但检测精度较低^[12-13]。激光超声利用激光直接照射到被检结构表面后产生的热弹和烧蚀效应,实现光致超声信号的激励,结合激光测振技术实现超声信号的接收^[14]。通过光纤调节阵列式激光相位,还可实现激光超声波束聚焦特性调控^[15]。

3 超声换能器

超声换能器是超声信号激励和接收的载体。目前,工业领域仍普遍使用的是由压电陶瓷材料制作的平面状硬质单晶片或相控阵超声换能器。为了适应复杂型面结构超声垂直入射检测需求,出现了为特定型面结构设计的异形超声换能器,例如用于小径管检测的柱面换能器,用于拐角检测的阵元沿圆弧周向线性排列的曲面阵列换能器^[16-18](如图6所示)。上述硬质异形换能器通常只能用于特定几何规格和型面类型的结构,通用性不强,难以实现型面随位置变化结构自动化扫描。

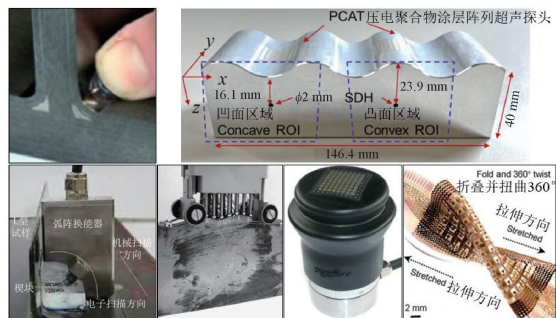


图6 面向复杂型面超声检测的换能器^[20, 27-28]

Fig. 6 Ultrasonic transducers for complex-shaped structure inspection^[20, 27-28]

近些年来,柔性超声换能器成为解决复杂型面结构检测难题的有效方法^[19]。直写式超声换能器通过将压电陶瓷或压电聚合物材料粉末均匀分散到溶液中,然后通过流延、溶液浇铸、旋涂、浸涂、直写式打印技术等薄膜成型工艺,直接在结构表面制成单一或阵列式压电传感器,极大地简化了传感网络制备过程,且具有轻质、复杂型面黏附性好、无需耦合剂等优点,大幅提高超声信号的稳定性和重复性^[20-22]。但由于这类压电超声传感器位置固定,仅适合于固定位置监测,而无法通过扫描覆盖更大检测范围^[23]。如图6所示,为了实现阵列式超声换能器随形扫描,起初的设计思路是将压电阵元之间用铰链连

接构成一维线性阵列,阵元间相对位置可自由移动^[24-25],以获得柔性贴合不同曲率型面的效果,克服了刚性换能器声耦合难题。为了进一步提升换能器的柔性变形能力,研究人员又提出了将阵元嵌入至柔性橡胶基体中的设计方案,可适应更大曲率型面。为了克服一维柔性线性阵列换能器无法用于三维弯曲型面的问题,法国CEA开发出了二维柔性相控阵超声换能器,阵元背部集成了位移传感器,可实时感知扫描过程中的位置变化,并据此实时调整聚焦法则,保证扫描过程中超声成像质量稳定^[26]。目前,该型换能器用于核电站支管接头(BOSS头)焊缝和管道弯头部位的检测。Hu等^[27]研发出甚至能够折叠的二维柔性换能器。需要指出的是,目前柔性相控阵超声换能器存在极限变形弯曲曲率,无法适应任意大曲率的试件,而且由于阻尼片较薄,柔性换能器的频带很窄,具有较大的表面盲区。加之制造成本高昂,柔性阵列换能器目前尚未获得广泛应用。

4 随形扫描控制

超声指向性强的特点,决定了超声换能器在扫描复杂型面结构时必须实时调节换能器姿态,以确保发射和接收灵敏度最强的主声束轴线方向始终垂直于被检结构表面各处。如图7所示,工程中仍广泛采用人工手持单晶片超声换能器执行检测,然而人工调节换能器方位的精度和稳定性难于保证,在扫描过程中容易出现信号不稳定的现象,影响缺陷检测灵敏度和定量精度。当倾斜入射角较大时,缺陷信号微弱甚至难以辨识。此外,由于单晶片超声换能器声束截面小,检测的范围窄,人工逐点式扫描效率很低。对于几何规格固定的型面,可通过设计匹配被检型面的夹持和扫描工装,实现换能器与被检结构之间相对位置恒定。例如,通过3个可调螺栓支撑换能器,实现凸面结构稳定扫描。Olympus公司面向曲面阵列换能器检测拐角场景设计的水浸边角楔块,可以紧密贴合拐角两侧直角边以提供稳定支撑,并可调节换能器与拐角之间的相对距离,以适应不同曲率拐角,确保换能器与拐角表面始终对心。

为避免人工操作的不足,提高超声检测效率,多自由度机械臂装置正越来越多地被用于复杂型面的自动化扫描^[29]。目前,常规解决方案是根据被检结构表面轮廓信息,通过计算机编程自动化规划随形扫描路径,同时实时调节换能器在各扫描位置点处的位姿,保证超声垂直覆盖整个复杂型面^[30-31]。在机器人运动控制领域,随形扫描路径规划和多自由度机械臂控制已是较为成熟的技术,与超声检测系统集成难度较低,但设备成本较高。

目前,大尺寸结构最常使用的相控阵超声检测技术是“漆刷采集”,该方法常使用平直线性阵列换能器,检测时所有阵元同时发射形成平面波,同时所有阵元各自独立地接收回波信号。该技术检测速度非常快,通过移动换能器阵列即可实现大面积扫描检测,已在形状较为简单的平板和弯曲程度不大的结构上获得广泛应用^[8]。但对于几何形状较为复杂或型面曲率变化较大的结构,平面波无法垂直入射,检测效果较差。利用相控阵超声可通过电子调节阵元激励/接收延迟时间调控超声波束聚焦/偏转的优势,法国原子能和替代能源委员会提出使用平面状线性阵列超声换能器的表面契合超声(surface-adaptive ultrasound, SAUL)技术,根据各阵元独立接收的构件表面反射回波之间的时间差计算出构件表面轮廓,据此实时计算和修正阵元激励延迟时间,最终合成与构件表面轮廓相契合的波阵面(图 7),无需预知构件表面轮廓信息,且无需借助多自由机械臂调节换能器表面法线与被检表面垂直,极大地拓展了普通线性阵列换能器用于变几何规格复杂型面结构检测的灵活性和通用性^[28,32-34]。非接触激光超声无需机械式移动发射和接收激光束,可简单地借助偏转振镜实现激光覆盖整个复杂型面,扫描方式更加灵活,包括全矩阵捕捉数据采集方式^[35-36]。

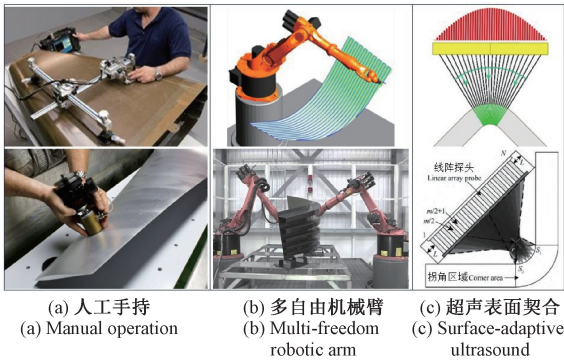


图 7 典型随形扫描方法^[28, 33]

Fig. 7 Typical surface-conformal scan methods^[28, 33]

5 复杂型面轮廓重建

预先获知被检结构的表面轮廓,是随形扫描控制和超声成像所需关键信息。目前主要有三种获取复杂型面轮廓的方式,第一种是直接利用被检结构的 CAD 设计图纸,但平时总会遇到无图纸的情况,而且诸如大尺寸复合材料这类整体成型的结构,容易受加工应力影响产生几何误差。第二类是利用激光轮廓仪、双目相机等机器视觉设备直接重建未知复杂型面,该方法已有成熟的商业化设备,而且光学测量型面精度较高,但需要将测量结果

转换至超声检测系统下的坐标系。采用这种方案的复杂型面超声检测系统需要执行两遍扫描,第一遍用于激光测量表面轮廓,第二遍才是根据测得表面轮廓执行超声检测,重复扫描制约检测效率提升,尤其是对于大尺寸结构。此外,涉密结构一般不允许直接测量型面信息,此类场景应用受限。第三类则是完全借助超声检测系统自身完成复杂型面轮廓重建与内部缺陷超声成像检测,如图 8 所示。例如,使用一维线阵或二维面阵超声换能器,以全矩阵捕捉方式完整采集沿不同方向传播的超声信号,超声数据中同时包含了被检结构表面和内部缺陷的回波信号,可借助合成孔径聚焦或全聚焦等超声信号后处理成像算法实现复杂型面上方耦合介质区域的超声成像,从图像中可提取“耦合介质/被检结构”界面轮廓信息用于进一步重建内部缺陷超声图像^[37-38],或者根据表面回波的波阵面快速重建复杂型面轮廓^[33]。受超声换能器声场只能覆盖有限角度范围影响,超声无法以垂直入射方式覆盖整个大曲率弧面或者大倾角斜面,倾斜入射至表面的超声无法原路返回而被接收,也难以被阵列换能器不同位置处阵元捕捉到,因而难以完整重建整个复杂型面轮廓^[39]。

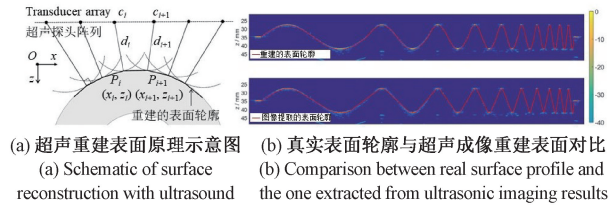


图 8 超声重建复杂型面轮廓^[33, 39]

Fig. 8 Complex surface profile reconstruction with ultrasound^[33, 39]

6 成像算法

工程中普遍采用的人工手持单晶片超声换能器的检测方法,常根据单一 A 扫描波形的变化判断缺陷有无和位置信息,显示方式不够直观且难于判读,检测结果受人员知识、经验和工作状态等主观因素影响较大。使用曲面或柔性阵列式超声换能器的随形检测方法,或者使用平直线性阵列超声换能器的表面契合法,普遍是以与表面轮廓契合的波阵面执行检测,使用的仅是沿表面法向传播的超声信息,加之声束未聚焦,检测分辨率低,主要适用于复合材料结构内部与表面平行的面积型分层缺陷检测,而用于具有全向散射特性的孔洞、裂纹尖端检测时,缺陷超声成像特征呈长弧形显示,定量误差大且易误判缺陷类型。

使用聚焦声束进行检测是提高超声成像分辨率的有

效手段。常用的水浸聚焦超声换能器是通过球冠状压电晶片实现几何聚焦,所以理论上只有当声束完全处于单一材料内时,超声才能准确汇聚于几何焦点处。当用于含耦合介质的复杂型面结构时,界面折射导致沿不同方向入射的超声传播路径偏折程度产生差异,声束无法实现准确聚焦,但聚焦质量变差程度取决于所检型面复杂程度。使用阵列式超声换能器时,可通过调节各阵元的激励延迟时间实现在超声激励阶段聚焦,或者先以全矩阵捕捉方式完整采集沿不同方向入射和反射的超声信号,然后借助超声信号后处理成像算法实现全深度高分辨率聚焦成像。

常用相控阵超声后处理成像算法主要包括“延迟与叠加”、相位迁移、基于波场的成像算法等,如图9所示。常见的合成孔径聚焦(synthetic aperture focusing technique, SAFT)、全聚焦(total focusing method, TFM)、相位相干(phase coherence imaging, PCI)^[40]成像技术均属于“延迟与叠加”类成像算法,应用的前提是要准确计算超声在发射/接收阵元与目标成像点之间的传播路径和时间。对于使用柔性阵列超声换能器直接贴合结构表面进行检测的情况,此时超声只在单一材料内部传播,无需跨越声阻抗失配界面,相应的超声传播路径为简单的直线。但由于常用柔性阵列换能器不具备阵元位置传感器,而且阵元之间的相对位置随贴合的型面变化,因而需要先借助机器视觉标定阵元位置。另一种方案则是将柔性阵列阵元位置定义为系数未知的多项式,然后通过模拟退火优化算法迭代更新阵元位置直至“延迟与叠加”聚焦成像对比度最高,最终成像结果即为聚焦状态,相应的阵元位置也为真实值^[9,41]。对于含耦合介质的情况,此时超声需要在耦合介质和被检结构构成的双层结构中传播,计算倾斜入射超声偏折路径主要有两种方式:第一种是将被检结构表面轮廓表示为多项式^[42],然后借助斯涅尔定律建立超声入射点位置关于阵元和目标点位置的函数,然后通过解析或数值方法求解入射点位置坐标^[43-44]。第二种是将被检结构表面离散化为系列网格点,然后依次计算超声经由各表面网格点在发射/接收阵元与目标成像点之间的传播路径和时间。根据费马原理,超声传播时间关于表面位置变化曲线中极值点对应的表面网格点即为实际的入射点。由于超声成像一般需要计算大量“阵元-成像点”组合之间的超声传播路径和时间,利用这种遍历计算方式寻找入射点位置计算量较大且耗时长。通过将虚拟源(virtual source, VS)技术与“延迟与叠加”成像算法结合,定义位于被检结构表面的虚拟声源,只需分别计算虚拟声源在单一耦合介质内与换能器阵元,以及在单一被检结构内与成像点之间的超声直线传播路径和时间,可实现将复杂的双层结构成像问题转化为简单的单层结构成像问题,无需耗时搜寻跨

界面传播偏折路径的入射点位置^[45-47]。当被检结构为多层介质时,上述超声传播路径和时间预测方法面临的计算难度大且效率低的瓶颈将随着层数的增加变得尤为突出。目前比较有效的解决手段之一是借鉴地震学领域的均方根速度模型(关于各层介质声速、沿各层界面法向传播距离与时间的均方根表达式),将多层结构中超声传播时间关于成像点位置的复杂函数关系式泰勒展开,并忽略二次项以后的高阶部分,建立关于均方根速度的解析表达式,实现超声传播时间近似值的快速计算^[48]。需要注意的是随着层界面处超声倾斜入射角度的增大,与真实传播时间之间的相对误差会逐渐增大^[49-50]。

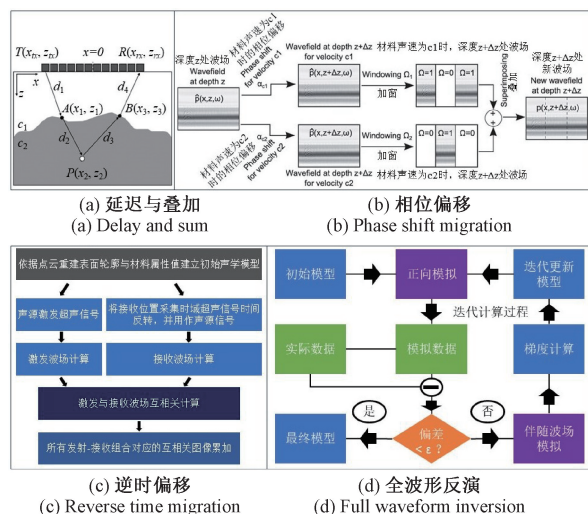


图9 复杂型面结构常用相控阵超声后处理成像算法^[39, 51-53]

Fig. 9 Typical phased array ultrasonic imaging algorithms for complex-shaped structures^[39, 51-53]

第二类相位迁移成像算法是将被检区域假设为一一系列沿深度方向等间隔分布的切片,然后利用波动方程将爆炸波场逐层外推,既考虑了双层结构声阻抗失配界面折射的影响,又不需要逐个计算“阵元-成像点”组合之间的复杂超声传播路径,最终实现整个检测区域的聚焦成像^[54-55]。需要指出的是相位迁移用于复杂型面结构成像检测的前提,是要预先获知波场外推过程中复杂型面轮廓对每个深度声速分布的影响情况^[53]。第三类是借鉴地震成像领域基于波场的超声成像算法,包括逆时偏移(reverse time migration, RTM)和全波形反演(full waveform inversion, FWI)成像。RTM成像是以Claerbout的时间一致性理论为基础,即反射界面是满足声源正传播场和接收回波逆传播场在时间和空间上一致的位置,所以可通过正、逆波场之间的互相关实现缺陷成像^[52,56]。成像原理决定了RTM天然具备处理超声多次反射、波型转换等复杂超声传播行为的能力,能够充分利用不同类型和传播路径下的超声信号完整刻画缺陷全貌,理论上

可获得优于“延迟与叠加”算法的成像效果,关键是如何获取高精度的速度模型。当耦合介质和被检复杂型面结构的声速已知时,结构表面轮廓就成为准确声速建模的关键,一般是先借助机器视觉重建被检型面轮廓,或者先单独对耦合介质区域执行 RTM 成像以获取型面轮廓^[38,51,57-58]。全波形反演先根据先验知识建立被检结构声速分布初始模型,然后以正演波场模拟生成的超声数据与实际采集超声数据之间的残差为目标函数,通过多次迭代更新声速分布模型直至目标函数最小化。由于声速分布在缺陷处突变,所以可以从全波形反演收敛时的声速分布图中分辨被检结构表面和内部反射界面,以及缺陷形貌信息^[59]。FWI 不需要预先获知精确的被检结构表面轮廓、声速信息,理论上可实现高分辨成像的完全自动化。但在实用化过程中,初始声速模型越接近实际,越有利于反演成像准确、快速收敛,而且实际超声数据往往存在多种因素干扰,容易导致反演寻优过程不收敛。

7 复杂型面与材料复杂耦合

工程中大部分复杂型面金属结构和常用的声耦合介质,均为声速不随传播方向变化的均质各向同性材料,超声在“耦合介质/被检结构”界面两侧保持直线传播,只在经过界面时因折射发生路径偏折,所以这类情况下的超声传播路径计算难度较小。但当被检结构自身的声学特性就很复杂时,声线示踪将变得非常困难。这类情况的典型代表是用作机身、机翼等飞机主承力结构的碳纤维增强树脂基复合材料(carbon fiber reinforced plastic, CFRP),以及风力发电机叶片用玻璃纤维复合材料(glass fiber reinforced plastic, GFRP)^[10]。高强度纤维单向排列于树脂基体构成单向带铺层,然后按照指定的角度顺序排列构成层合板结构。诸如拐角、变厚度楔形等 FRP 结构,复杂型面因素会与复合材料自身的多层结构和弹性各向异性相互影响,改变结构的声学特性,具体表现为:纤维方向不但在铺放平面内变化,还在厚度方向横截面内随表面轮廓切向连续变化。受此影响,弯曲单铺层的各向异性声速分布随空间位置连续变化,可视为非均质材料。此时,倾斜入射至复杂型面区域的超声除了在经过声学特性失配铺层间界面时改变传播方向和速度外,在弯曲单铺层内部也不再是以恒定声速直线传播,而是传播方向和声速均连续变化(如图 10 所示),超声传播行为较之于声速恒定的均质各向同性材料更加复杂^[60-62]。

需要指出的是,当超声垂直于表面入射时,超声将沿着垂直于纤维方向经过各铺层间界面,此时传播方向和声速均保持不变,FRP 复杂声学特性对超声传播行为的影响被最小化^[63-64]。此外,FRP 复合材料最常见的分层缺陷多沿层间分布,垂直入射超声被分层反射后可原路

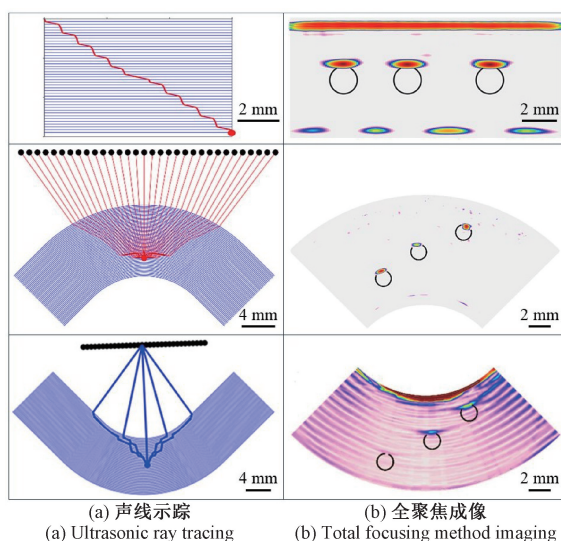


图 10 多层各向异性复合材料拐角声线示踪与成像结果^[65, 68]

Fig. 10 Ultrasonic ray tracing and total focusing method imaging of multi-layered anisotropic composite corner parts^[65, 68]

返回被有效接收。因此,不管是平面还是复杂型面 FRP 结构,工程中普遍采用超声垂直入射方式检测。若要实现“延迟与叠加”高分辨率聚焦成像,首先必须解决复杂型面、多层、各向异性 FRP 复合材料结构声线示踪难题。目前比较有效的方法是先将被检区域离散化为纤维方向恒定的微元,超声在单微元内保持直线传播,只在跨越不同纤维方向微元时改变传播方向,此时全局复杂超声传播路径可等效为超声经过各微元内部直线传播路径分段串联而成的多段线(图 10)。然后,借鉴计算机科学图论研究领域的 Dijkstra、A* 等路径搜索算法^[65],从大量离散化的微元直线路径分段中快速搜寻出满足费马原理的实际传播路径。现有研究已经实现了从凸面^[66-67]或凹面^[68]侧检测大曲率拐角、变厚度楔形复材结构、面外纤维褶皱^[69-72]等场景下的声线示踪和“延迟与叠加”超声成像。

8 总结与展望

从现有的国内外代表性研究工作的对比和分析来看,针对复杂型面结构超声成像检测涉及的超声耦合、换能器、随形扫描控制、复杂型面轮廓重建、成像算法各环节面临的挑战,均已形成了诸多有效的方法,未来还需在以下方向继续开展深入研究:

1) 现有研究涉及的复杂型面主要是凹凸曲面、拐角、倾斜面等,虽然较之于平面结构复杂,但仍属于较为规则的型面。实际工程中还存在大量更为复杂的三维异形结构,其同时包含多种复杂型面特征,例如增材制造领

域常见的晶格、腔体、薄壁等结构。前文所述超声检测技术对这类超复杂异形结构基本失效,目前主要是借助X射线CT成像进行检测。由于增材制造是以二维逐层堆叠的方式成型三维异形结构,所以在制造过程中逐层检测时,仍是平面结构的超声检测问题,结合激光超声非接触检测的优势,可大大降低超声扫描、入射/接收、成像难度,实现制造过程中气孔、未熔合、夹杂和裂纹等制造缺陷的连续监测。对于直接检测三维异形结构整体的情况,源自医学超声成像领域的超声CT成像技术是比较有潜力的解决方案^[33]。该技术使用排列成圆柱面或球面的超声换能器阵列包围浸于水中的被检结构,各换能器单元依次激励,同时所有换能器单元同时接收,以实现超声从不同方向入射,并能完整接收异形结构向三维空间随机散射的超声,然后借助超声层析成像算法实现高分辨率二维或三维成像。但该方法数据量大,计算耗时。

2) 二维柔性阵列超声换能器是医学超声成像领域的研究热点之一,凭借其随形贴合结构表面的优势,可极大地降低复杂型面结构检测难度,在工业检测领域也具有非常广阔的发展前景。目前,工业超声检测领域的成熟商用柔性阵列换能器仍以一维线性阵列为主,柔性变形能力不及医学成像领域竞品,适用的型面类型及复杂程度有限。因此,未来可进一步借鉴医学超声成像领域的先进设计技术,发展面向三维异形结构的高性能高柔性二维阵列超声换能器。

3) 工程中为了简化操作,主流的超声检测技术仍只关注表面复杂型面的影响,简单地将被检结构整体简化为均质各向同性材料。而航空/天复合材料、芯片封装器件、新能源电池等结构,不但表面型面和材料声学特性各异,内部结构也极为复杂,只考虑表面型面因素不可避免地会导致超声成像信噪比变差,产生定位/量误差。随着超声成像朝着多功能、多维度、高精度、微尺度方向发展,必须同等重视宏/微观结构和材料自身声学特性分布对超声传播行为的影响规律,有针对性地改进超声成像算法。

9 结 论

工业结构型面日益多样化、复杂化,复杂型面目前仍是超声检测领域的热点和难点问题。现有研究主要围绕超声耦合策略、超声换能器、随形扫描控制、复杂型面轮廓重建、成像算法、复杂型面和材料耦合带来的影响几大方面展开,本文旨在对目前已取得的研究进展和关键技术进行概述。最后,笔者认为如何在现有技术的基础上进一步解决超复杂型面三维异形结构超声检测难题需求迫切。其中,高柔性二维阵列超声换能器未来在复杂型面超声检测领域将扮演越来越重要的角色。此外,随着

超声成像朝着多功能、多维度、高精度、微尺度方向发展,必须综合考虑宏/微观结构和材料自身复杂声学特性对超声传播行为的影响,有针对性地改进成像算法,提升成像质量。

参考文献

- [1] 何方成,王铮,史丽军. 复合材料制件拐角部位超声检测技术[J]. 材料工程, 2011(7): 80-84.
HE F CH, WANG ZH, SHI L J. Ultrasonic testing technique for the inspection of defects in the corner of composites [J]. Journal of Materials Engineering, 2011(7): 80-84.
- [2] BULLINGE O, SCHNARS U, SCHULTING D, et al. Laminographic inspection of large carbon fibre composite aircraft-structures at Airbus[C]. 19th World Conference on Non-Destructive Testing, 2016:204-213.
- [3] SANIIE J, WANG B Y, HUANG X. Information transmission through solids using ultrasound[C]. IEEE International Ultrasonics Symposium, 2018:1322-1331.
- [4] LIU F F, LIU S P, ZHOU ZH G, et al. Detailed characterisation and evaluation of composite stiffener R-zones based on mono-pulse ultrasonic reflection behavior[J]. Ultrasonics, 2022, 124: 106732.
- [5] LI W T, ZHOU ZH G, LI Y. Inspection of butt welds for complex surface parts using ultrasonic phased array[J]. Ultrasonics, 2019, 96: 75-82.
- [6] SIMONETTI F, FOX M. Experimental methods for ultrasonic testing of complex-shaped parts encased in ice[J]. NDT & E International, 2019, 103: 1-11.
- [7] SIMONETTI F. Cryo-ultrasonic testing of curved components[J]. NDT & E International, 2023, 137: 102835.
- [8] RAU E, GRAUVOGL E, MANZKE H, et al. Ultrasonic phased array testing of complex aircraft structures[C]. 9th European Conference on Non-Destructive Testing, 2006:2900-2916.
- [9] HUNTER A J, DRINKWATER B W, WILCOX P D. Autofocusing ultrasonic imagery for non-destructive testing and evaluation of specimens with complicated geometries[J]. NDT & E International, 2010, 43(2): 78-85.
- [10] 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 ZH 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.
- [11] JEUNE L L, ROBERT S, DUMAS P, et al. Adaptive ultrasonic imaging with the total focusing method for inspection of complex components immersed in water[C]. *Qnde Conference*, 2015.
- [12] CHIMENTI D E. Review of air-coupled ultrasonic materials characterization [J]. *Ultrasonics*, 2014, 54(7): 1804-1816.
- [13] HILLGER W, OSTER R, SCHULLER J, et al. Automated air-coupled ultrasonic technique for the inspection of the EC145 tail boom[C]. *4th International Symposium on NDT in Aerospace*, 2012:275-287.
- [14] VANDENRIJT J F, LANGUY F, THIZY C, et al. Laser ultrasound flexible system for non-contact inspection of medium size and complex shaped composite structures made of carbon fiber reinforced polymer [J]. *Proceedings*, 2018, 2(8): 455.
- [15] PEI C X, YI D CH, LIU T H, et al. Fully noncontact measurement of inner cracks in thick specimen with fiber-phased-array laser ultrasonic technique [J]. *NDT & E International*, 2020, 113: 102273.
- [16] LIN L, CAO H Q, LUO ZH B. Characterization and optimization of acoustic field for curved array probe[J]. *Acoustical Physics*, 2020, 66(5): 469-476.
- [17] HABERMEHL J, LAMARRE A. Ultrasonic phased array tools for composite inspection during maintenance and manufacturing [C]. *Proceedings of the 17th World Conference on Nondestructive Testing*, 2008:653-658.
- [18] BOYCHUK A S, GENERALOV A S, STEPANOV A. Nondestructive testing of FRP by using phased array ultrasonic technology [C]. *Proceedings of the 12th International Conference of the Slovenian Society for Non-Destructive Testing*, 2013.
- [19] REN D Y, YIN Y G, LI CH Y, et al. Recent advances in flexible ultrasonic transducers; From materials optimization to imaging applications[J]. *Micromachines*, 2023, 14: 14010126.
- [20] LI Y H, YAO ZH J, JIANG CH, et al. Investigation on local monitoring paradigms of in-situ conformally fabricated piezopolymer coating-based array transducers; Ultrasonic bulk waves and local ultrasonic resonances[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2024, 208: 110999.
- [21] GUO SH F, CHEN SH T, ZHANG L, et al. Direct-write piezoelectric ultrasonic transducers for pipe structural health monitoring [J]. *NDT & E International*, 2019, 107: 102131.
- [22] GUO SH F, CHEN SH T, ZHANG L, et al. Design and fabrication of direct-write piezoelectric ultrasonic transducers for determining yielding of aluminum alloy[J]. *NDT & E International*, 2018, 98: 186-194.
- [23] 郭师峰, 李叶海, 李振, 等. 柔性超声传感结构健康监测技术现状与展望[J]. *振动、测试与诊断*, 2020, 40(3): 427-436, 620.
- GUO SH F, LI Y H, LI ZH, et al. The status and prospects of flexible transducers in ultrasonic waves-based structural health monitoring [J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2020, 40(3): 427-436, 620.
- [24] 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.
- [25] PHOENIX I S L. WrapIt offers new way to test curved composites[Z]. *Warrington, UK*, 2013.
- [26] TOULLELAN G, CASULA O, ABITTAN E, et al. Application of a 3D smart flexible phased - array to piping inspection [C]. *Proceedings of the 34th Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, 2008:794-800.
- [27] HU H J, ZHU X, WANG CH H, et al. Stretchable ultrasonic transducer arrays for three-dimensional imaging on complex surfaces [J]. *Science Advances*, 2018, 4(3): aar3979.
- [28] 张冬梅, 于光, 周正干, 等. 复合材料构件 R 区的超声相控阵检测实验 [J]. *北京航空航天大学学报*, 2013, 39(5): 688-692.
- ZHANG D M, YU G, ZHOU ZH G, et al. Ultrasonic phased array inspection for the corner of composite components [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2013, 39(5): 688-692.
- [29] XU C G. Robotic nondestructive testing technology[J]. *Soudage et Techniques Connexes*, 2022, 454:45.
- [30] ZHAO ZH C, XU T R, LI Y, et al. Profile and

- thickness constrained adaptive localization for manufacturing curved thin-walled parts based on on-machine measurement[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, 110(1/2): 113-123.
- [31] LU Z X, XU CH G, XIAO D G, et al. Nondestructive testing method for curved surfaces based on the multi-gaussian beam model[J]. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 2015, 34(4): 39.
- [32] 罗忠兵, 李飞龙, 苏慧敏, 等. CFRP 复杂几何结构超声表面契合法缺陷检测[J]. *机械工程学报*, 2022, 58(20): 312-318.
- LUO ZH B, LI F L, SU H M, et al. Surface adaptive ultrasonic testing on defects in CFRP radii[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2022, 58(20): 312-318.
- [33] ROBERT S, CASULA O, ROY O, et al. Real-time nondestructive testing of composite aeronautical structures with a self-adaptive ultrasonic technique[J]. *Measurement Science and Technology*, 2013, 24(7): 074011.
- [34] XU N, ZHOU ZH G. Numerical simulation and experiment for inspection of corner-shaped components using ultrasonic phased array [J]. *NDT & E International*, 2014, 63: 28-34.
- [35] CHEN J, XIAO J, LISEVYCH D, et al. Laser-induced full-matrix ultrasonic imaging of complex-shaped objects[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2019, 66(9): 1514-1520.
- [36] ZHANG Y J, ZHANG F Y, ZHANG W, et al. Laser-induced ultrasound imaging of multi metal laminate with complex interface[J]. *Materials & Design*, 2023, 232: 112095.
- [37] YANG H J, LI J, TIAN X X, et al. Parameter inversion and target localization in layered media containing solids based on acoustic ray tracing method[J]. *Measurement*, 2023, 213: 112719.
- [38] YANG H J, LI J, WU D L, et al. Imaging a defect in layered media with different shaped interfaces using reverse time migration without velocity model known a priori[J]. *Ultrasonics*, 2022, 124: 106750.
- [39] MALKIN R E, FRANKLIN A C, BEVAN R L T, et al. Surface reconstruction accuracy using ultrasonic arrays: Application to non-destructive testing [J]. *NDT & E International*, 2018, 96: 26-34.
- [40] TIAN J X, CHEN ZH H, LU CH, et al. Phase coherence weighted ultrasound total focusing method towards the improved imaging of CFRP defects [J]. *Composites Communications*, 2023, 43: 101736.
- [41] CHANG J J, CHEN Z H, HUANG Y Q, et al. Flexible ultrasonic array for breast-cancer diagnosis based on a self-shape-estimation algorithm[J]. *Ultrasonics*, 2020, 108: 106199.
- [42] WESTON M, MUDGE P, DAVIS C, PEYTON A. Time efficient auto-focussing algorithms for ultrasonic inspection of dual-layered media using full matrix capture[J]. *NDT & E International*, 2012, 47(4): 43-50.
- [43] SUTCLIFFE M, WESTON M, CHARLTON P, et al. Full matrix capture with time-efficient auto-focusing of unknown geometry through dual-layered media [J]. *Insight: Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, 2013, 55(6): 297-301,307.
- [44] SUTCLIFFE M, WESTON M, DUTTON B, et al. Real-time full matrix capture with auto-focussing of known geometry through dual layered media[C]. *51st Annual Conference of the British Institute of Non-Destructive Testing*, 2012,2012:177-184.
- [45] WANG J, ZHOU ZH G, YANG G P, et al. Virtual source total focusing method for crack detection in complex curved structure[J]. *NDT & E International*, 2023, 140: 1-13.
- [46] 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 visual source[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2019, 40(6): 48-55.
- [47] 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.
- [48] SHIH R C, CHANG Y F, CHANG C H, et al. Ultrasonic synthetic aperture focusing using the root-mean-square velocity [J]. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 2014, 33(1): 12-22.
- [49] 胡宏伟, 王泽湘, 彭凌兴, 等. 基于均方根速度的水浸超声合成孔径聚焦成像[J]. *仪器仪表学报*, 2016,

- 37(2): 365-370.
- HU H W, WANG Z X, PENG L X, et al. Immersion ultrasonic imaging using the synthetic aperture focusing technique based on the root mean square velocity[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(2): 365-370.
- [50] HU H W, JEONG H. An efficient ultrasonic SAFT imaging for pulse-echo immersion testing[J]. Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing, 2017, 37(2): 84-90.
- [51] RAO J, WANG J L, KOLLMANNSEBERGER S, et al. Point cloud-based elastic reverse time migration for ultrasonic imaging of components with vertical surfaces[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2022, 163: 108144.
- [52] HE J, RAO J, FLEMING J D, et al. Numerical ultrasonic full waveform inversion (FWI) for complex structures in coupled 2D solid/fluid media[J]. Smart Materials and Structures, 2021, 30(8): 085044.
- [53] LUKOMSKI T. Full-matrix capture with phased shift migration for flaw detection in layered objects with complex geometry[J]. Ultrasonics, 2016, 70: 241-247.
- [54] JI K P, ZHAO P, ZHUO CH J, et al. Efficient phase shift migration for ultrasonic full-matrix imaging of multilayer composite structures[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2022, 174: 109114.
- [55] WU H T, CHEN J, YANG K J, et al. Ultrasonic array imaging of multilayer structures using full matrix capture and extended phase shift migration[J]. Measurement Science and Technology, 2016, 27: 045401.
- [56] XU W J, YUAN M D, XUAN W M, et al. Quantitative inspection of complex-shaped parts based on ice-coupled ultrasonic full waveform inversion technology [J]. Applied Sciences, 2021, 11(10): 4433.
- [57] YANG X B, WANG K, XU Y F, et al. A reverse time migration-based multistep angular spectrum approach for ultrasonic imaging of specimens with irregular surfaces[J]. Ultrasonics, 2020, 108: 106233.
- [58] JI K P, ZHAO P, ZHUO CH J, et al. Ultrasonic full-matrix imaging of curved-surface components [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2022, 181: 109522.
- [59] GUASCH L, AGUDO O C, TANG M X, et al. Full-waveform inversion imaging of the human brain[J]. NPJ Digital Medicine, 2020, 3(1): 28.
- [60] 罗忠兵, 张松, 钱恒奎, 等. CFRP 复杂几何结构区相控阵超声检测建模与声传播规律[J]. 复合材料学报, 2021, 38(11): 3672-3681.
- LUO ZH B, ZHANG S, QIAN H K, et al. Modelling and wave propagation behavior of phased array ultrasonic testing on carbon fiber reinforced plastics components with complex geometry[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2021, 38(11): 3672-3681.
- [61] LIN L, CAO H Q, LUO ZH B. Total focusing method imaging of multidirectional CFRP laminate with model-based time delay correction[J]. NDT & E International, 2018, 97: 51-58.
- [62] YANG H J, YANG L, YANG Z Y, et al. Ultrasonic detection methods for mechanical characterization and damage diagnosis of advanced composite materials: A review[J]. Composite Structures, 2023, 324: 117554.
- [63] LIU F F, ZHOU ZH G, LIU S P, et al. Characterisation of composite skin-stiffener bonding interface and fine-defect evaluation using mono-pulse ultrasonic detection[J]. NDT & E International, 2022, 131: 102681.
- [64] 杨红娟, 杨正岩, 杨雷, 等. 碳纤维复合材料损伤的超声检测与成像方法研究进展[J]. 复合材料学报, 2023, 40(8): 4295-4317.
- YANG H J, YANG ZH Y, YANG L, et al. Progress in ultrasonic testing and imaging method for damage of carbon fiber composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2023, 40(8): 4295-4317.
- [65] LIN L, CAO H Q, LUO ZH B. Dijkstra's algorithm-based ray tracing method for total focusing method imaging of CFRP laminates [J]. Composite Structures, 2019, 215: 298-304.
- [66] LUO ZH B, KANG J L, CAO H Q, et al. Enhanced ultrasonic total focusing imaging of CFRP corner with ray theory-based homogenization technique [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2023, 36(1): 434-443.
- [67] LUO ZH B, ZHANG S, JIN SH J, et al. Heterogeneous ultrasonic time-of-flight distribution in multidirectional CFRP corner and its implementation into total focusing method imaging[J]. Composite Structures, 2022, 294: 115789.
- [68] CAO H Q, GUO SH F, ZHANG SH X, et al. Ray

tracing method for ultrasonic array imaging of CFRP corner part using homogenization method[J]. *NDT & E International*, 2021, 122: 102493.

- [69] VALSERO B L, SMITH R A, TAYONG R B, et al. Wrinkle measurement in glass-carbon hybrid laminates comparing ultrasonic techniques: A case study [J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2018, 114A: 225-240.
- [70] ZHANG H Y, REN Y, SONG J X, et al. The wavenumber imaging of fiber waviness in hybrid glass-carbon fiber reinforced polymer composite plates [J]. *Journal of Composite Materials*, 1995, 55 (30): 4633-4643.
- [71] LIU M L, LI Z, WANG SH Q, et al. Quantitative characterization of out-of-plane fiber wrinkling in thick CFRP with Double-side inverse-variance weight-synthetic ultrasonic imaging [J]. *Composites Part A. Applied Science and Manufacturing*, 2023, 166: 107376.
- [72] 周正干, 朱甜甜, 马腾飞, 等. 先进树脂基复合材料纤维褶皱缺陷阵列超声全聚焦成像[J]. *复合材料学报*, 2022, 39(9): 4384-4392.
- ZHOU ZH G, ZHU T T, MA T F, et al. Array ultrasonic total-focus imaging for advanced resin matrix composite fiber wrinkle defect arrays[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2022, 39(9): 4384-4392.

作者简介



E-mail:hq. cao@ siat. ac. cn

Cao Huanqing received his B. Sc. degree in 2012 from Dalian University of Technology, received his Ph. D. degree in 2020 from Dalian University of Technology. Now he is an associate research fellow in Shenzhen Institute of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences. His main research interests include ultrasound imaging theory and technology.



E-mail:sf. guo@ siat. ac. cn

Guo Shifeng (Corresponding author) received his Ph. D. degree in 2013 from National University of Singapore. Now he is a research fellow in Shenzhen Institute of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences. His main research interests include ultrasonic imaging and system, flexible ultrasonic sensors and network, automated ultrasonic testing.

曹欢庆, 2012 年于大连理工大学获得学士学位, 2020 年于大连理工大学获得博士学位, 现为中国科学院深圳先进技术研究院副研究员, 主要研究方向为超声成像理论和技术。

郭师峰(通信作者), 2013 年于新加坡国立大学获得博士学位, 现为中国科学院深圳先进技术研究院研究员, 主要研究方向为超声成像方法与仪器, 超声传感器及网络, 自动化超声检测。