

引用格式: 张伟, 樊俊铃, 詹绍正, 等. 航空装备超声原位无损检测技术研究进展[J]. 航空材料学报, 2025, 45(6): 1-12.
ZHANG Wei, FAN Junling, ZHAN Shaozheng, et al. Research progress of ultrasonic *in-situ* nondestructive testing technology for aircraft structure[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2025, 45(6): 1-12.

航空装备超声原位无损检测技术研究进展

张伟, 樊俊铃*, 詹绍正, 杨鹏飞, 贾文博

(中国飞机强度研究所 强度与结构完整性全国重点实验室, 西安 710065)

摘要: 损伤检测是航空装备研制和外场运营维护的关键环节, 直接影响装备的研制进程和服役安全。近年来, 国内外学者和科研机构在超声检测领域开展了大量研究工作, 基于此, 本文围绕航空装备研制和运营中的损伤原位检测需求, 简要分析航空装备典型结构损伤及其原位检测的特点和要求, 重点总结近年来国内外在超声检测前沿理论与方法、先进检测传感器设计及专用检测装置研发等方面的最新研究进展, 并结合技术研究和工程实践中出现的新问题、新思路和新导向, 对非均质材料损伤检测技术、面向复杂型面结构的换能器设计方法、新型非接触检测装置研发与工程应用等方面的主要挑战和未来发展趋势进行总结和展望。

关键词: 航空装备; 结构损伤; 原位无损检测; 超声检测理论; 传感器设计; 装置研发

doi: 10.11868/j.issn.1005-5053.2025.000019

CSTR: 32420.14.j.issn.1005-5053.2025.000019

中图分类号: TB559; V216

文献标识码: A

文章编号: 1005-5053(2025)06-0001-12

Research progress of ultrasonic *in-situ* nondestructive testing technology for aircraft structure

ZHANG Wei, FAN Junling*, ZHAN Shaozheng, YANG Pengfei, JIA Wenbo

(National Key Laboratory of Strength and Structural Integrity, Aircraft Strength Research Institute of China, Xi'an 710065, China)

Abstract: Damage detection is a critical link of aviation equipment development, field operation and maintenance, which directly affects the development process and service safety of aircraft structure. In recent years, domestic and foreign scholars and scientific research institutions have carried out a lot of research works in the field of ultrasonic nondestructive testing. Based on this, this paper, guided by the needs of damage detection in the development and operation of aviation equipment, briefly analyzes the characteristics and requirements of typical structural damage of aviation equipment and *in-situ* detection. This paper focuses on summarizing the latest research progress of ultrasonic theories and methods, advanced detection sensor designs and special detection device research and development. Furthermore, incorporating new issues, ideas and directions emerging from technological research and engineering practice, this paper summarizes and forecasts the main challenges and future development trends in areas such as damage detection technologies for heterogeneous materials, transducer design methods for complex-shaped structures, and the equipment research and development and engineering application of new non-contact testing devices.

Key words: aviation equipment; structural damage; *in-situ* nondestructive testing; ultrasonic detection theory; sensor design; equipment research and development

先进航空装备一直是我国装备制造领域的重点发展方向, 近年来, 随着歼-20、运-20等新型军用飞机批量服役, C919、C929等民用飞机加速研制, 航空装备结构安全备受关注。但航空装备研制过

程中新材料、新结构、新工艺的逐步应用以及服役过程中受到的高机动、大过载、全天候长时服役和多源意外冲击等因素给装备的安全性和可靠性带来了严峻挑战^[1]。

损伤检测是航空装备型号研制和外场运营维护的关键环节, 高效精准的损伤检测技术能够保证及时发现和监控型号研制和运营过程中的结构变化情况, 准确获取损伤的发生时刻、位置及扩展规律, 为设计和制造部门提供可靠的信息反馈。同时, 研制和运营维护中积累的损伤检测数据, 能够为航空装备运营服役过程中检查维护计划制定和战场快速抢修进行技术积累和先期验证, 如规定的检查手段、检查门槛值和检查间隔等。随着航空装备型号研制及外场运营服役进程的持续推进, 着力开展面向内场研制和外场检修维护的结构损伤高效高精度检测技术及装置研究, 形成覆盖研制端到服役端的全链条原位检测能力已刻不容缓。

近年来, 国内外学者和科研机构在航空装备损伤检测领域开展了大量研究工作, 检测对象涵盖材料、元件、组部件到整机的各个层级, 研究方向涉及超声、射线、涡流、红外、渗透、磁粉、太赫兹、目视等多种检测技术。其中, 超声检测技术由于具有灵敏度高、检测速度快、成本低和对人体无害等优点, 一直是航空装备损伤检测领域的研究和应用热点。基于此, 本文首先简要分析航空装备典型结构损伤及其原位检测的特点和要求, 随后, 重点综述国内外在超声检测前沿理论与方法、先进检测传感器设计及专用检测装置研发等方面的最新研究进展, 最后, 对航空装备超声原位无损检测技术面临的主要挑战和未来发展趋势进行总结和展望。

1 航空装备典型损伤及其原位检测

1.1 航空装备典型结构损伤类型

航空装备长期在力、热、噪声、振动、雨雪、沙尘、盐雾等复杂交变载荷和严酷环境下服役, 机体结构不可避免地会产生各类损伤, 不同材料和结构类型的损伤特征也有所差异, 图1为航空装备金属和复合材料结构的典型损伤类型^[2-4]。对于铝合金、镁合金、钛合金等金属材料, 根据结构部位的不同, 可分为板材损伤、蒙皮损伤、铆钉损伤、螺栓损伤及广布疲劳损伤等, 根据损伤类型的不同, 可分为裂纹、应力腐蚀、环境腐蚀和磨损等, 一般而言, 应力集中部位是裂纹的高发区, 如孔边、耳片内壁、螺栓根部、倒角等, 蒙皮、铆钉等与大气环境长期接触的部位则易产生各类腐蚀损伤^[2-3]。对于复合材料结构, 由于固有的多相非均质和层间各向异性, 加之人工铺贴和热固化成形等工艺因素的影响, 其损伤类型、形成机制和损伤扩展规律比金属材料复杂得多, 具有极强的多尺度特征, 损伤表现形式既有基体裂纹、纤维断裂、纤维拔出等微米量级的细微观损伤, 也有层间分层、界面脱粘、开裂等毫米级的宏观损伤。总体而言, 根据损伤类型的不同, 复合材料结构的典型损伤主要有纤维断裂、基体裂纹、分层、树脂基体开裂、界面脱粘(板-板脱粘、板-芯脱粘)、蜂窝芯压塌断裂及冲击损伤等^[4]。

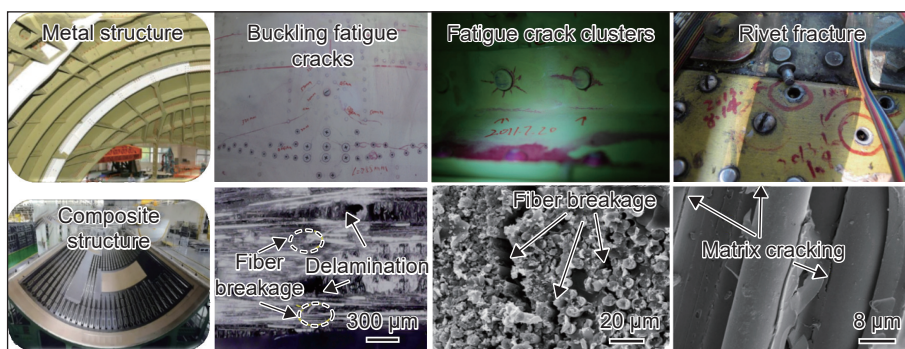


图1 航空装备典型结构损伤^[2-4]

Fig. 1 Typical structural damages of aircraft^[2-4]

1.2 航空装备原位检测特点与要求

航空装备原位检测是指不拆解/拆卸主要结构、设备和系统, 不影响其状态和性能的前提下, 在固有安装位置上进行的检测或检查。由于不对结构进行拆卸、分解和安装, 原位检测即能节省拆卸安装时间, 又可避免因人为拆装不当导致的故障和意外损伤^[5]。

图2为航空装备典型的原位检测场景, 相比于传统的离位拆解检测方式, 航空装备原位检测的特点主要体现在以下几方面: (1)被检结构构型和装配状态多样, 检测传感器和检测面选择受限, 如机身筒段、发动机风扇叶片等曲面结构, 机翼、油箱等封闭空间结构, 螺栓、铆钉等紧固件结构, 加强筋、多层蒙皮等连接结构; (2)检测空间狭小, 实施

方式和检测设备使用受限,如发动机舱、进气道、排气道等小尺寸筒段结构;(3)作业现场环境复杂,检测范围和工作效率受限,如结构强度试验中作动筒和承载框架占位、胶布带和应变片覆盖,上翼面、垂尾、平尾等结构检测需进行高空作业等。同

时,原位检测需要严格遵照相关检测大纲、检测程序和工艺规范的要求,综合考虑现场检测环境、作业和操作空间、实施方式、检测窗口期、结构复杂构型和装配状态等因素的影响,侧重于保证损伤检测的时效性、可靠性、规范性、经济性和安全性。

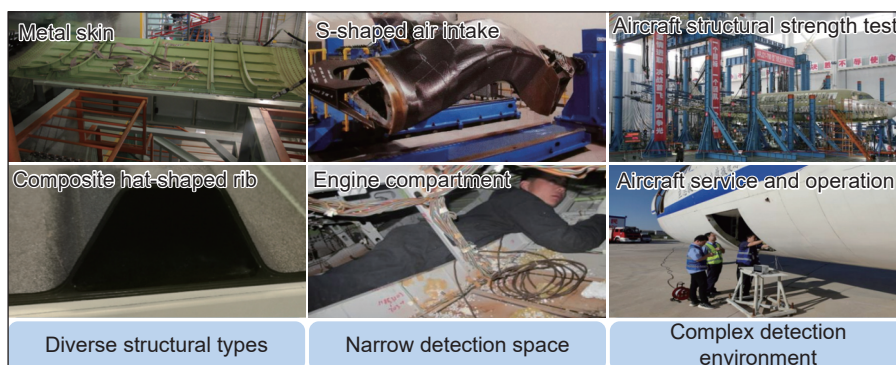


图2 航空装备典型原位检测场景

Fig. 2 Typical *in-situ* nondestructive testing scenarios of aircraft structure

2 超声检测前沿理论与方法研究

2.1 相控阵超声检测技术

21世纪以来,相控阵超声一直是超声检测领域的研究热点,由于采用多个阵元的发射/接收延时控制,相控阵超声可灵活实现超声波束的聚焦、偏转和扫描,进行多角度扫查及多模式成像显示,损伤检出率和检测效率显著提升。近年来,国内外学者在相控阵超声信号处理和损伤成像等方面开展了大量研究工作^[6-19],为相控阵超声检测技术的发展和应用奠定了坚实的理论基础。

在超声信号处理方面,难点在于如何在回波信号中提取出损伤相关的特征信息。目前,应用于超声信号处理和特征参量提取的方法很多,除时域方法外,频域分析、时频域分析等先进信号处理技术也逐渐被引入。时域分析是目前最为常用的信号处理技术之一,主要包括声速法^[6]、声阻抗法^[7]和衰减系数法^[8]等。频域分析方法多种多样,按照频率依从性变量的不同,可分为幅度谱、相位谱、功率谱及倒频谱等,按照考察的声学参数的不同,可分为相速度谱和衰减谱等。此外,由于时域或频域分析技术采用的是全局变换的处理方式,难以反映超声波这类非平稳信号的局部特征,近年来,各种时频局部化方法被引入超声信号分析和特征参量提取过程中,主要有以Wigner-Ville分布^[9]、Coben双线性变换^[10]和Hilbert-Huang变换^[11]为代表的双线性分析方法和以Gabor变换^[12]、短时傅里叶

变换^[13]、S变换^[14]和小波变换^[15]为主的线性分析方法等。

在损伤成像方面,挑战在于检测效率和成像精度的同步提升。相比于传统超声检测技术,相控阵超声具有分辨率高、成像速度快、灵敏度高优势,但电子扫查、定点聚焦和动态聚焦等传统成像方法在成像质量和速度方面还有待进一步提升。近年来,合成孔径聚焦^[16]、压缩感知^[17]、时间反转^[18]、全聚焦^[19]等先进成像技术成为国内外关注的热点。其中,合成孔径聚焦和压缩感知等成像技术主要利用晶片编组或数据压缩等方式减小数字采样压力,成像速度较快,但信号稀疏采样会导致图像部分失真。时间反转成像技术则主要通过时间反转处理构造出聚焦点的声场,进而提高成像分辨率和信噪比,但反复的迭代运算导致成像速度较慢。全聚焦成像技术克服了传统相控阵的波束指向性限制,可实现整个检测区域的高分辨率聚焦,被认为是相控阵超声成像的“黄金标准”,但全聚焦成像时需大量的信号采样和迭代运算,成像效率较低,且成像质量不可避免地会受到介质散射、电噪声、声束旁瓣等干扰。此外,针对复杂构型结构的动态孔径全聚焦、频域全聚焦、声线示踪全聚焦等改进全聚焦成像方法也是目前国内外的研究热点。

2.2 激光超声检测技术

激光超声是一种基于热弹或热蚀激发机制的新型超声检测技术,具有非接触无需耦合、极端环境适用性强、扫描速度快等优势^[20]。近年来,国内

外学者在激光超声理论模型、响应机制、信号接收、损伤信息解耦等方面开展了系统性研究。

在理论模型构建和响应机制分析方面,解析法最早用于激光激发超声过程的数学描述,最早利用汉克尔-拉普拉斯变换反演描述了脉冲激光入射到样品表面激发的超声波,激光激发超声波的计算形式得到实践和推广^[21],随后,热-弹耦合模型^[22]、本征函数扩展法^[23]、各向同性固体介质瑞利波解析模型^[24]等解析方法相继提出,为激光超声应用于无损检测领域奠定了理论基础。随着研究工作的持续深入,有限元仿真在处理复杂多物理场问题上的优势凸显,能够灵活处理复杂几何构型中纵波、横波、表面波的传播行为和响应机制,如环形结构中的波传播特征^[25]、非连续表面对瑞利波传播的影响^[26]、远场裂纹深度与声反射系数间的响应规律^[27]、激光产生的瑞利波与表面裂纹相互作用的时域和频域特征^[28]、损伤深度与表面波中心频率及最大振幅之间的关系^[29]等。

在信号接收和损伤信息解耦方面,其核心是如何实现响应信息高效采集和损伤高精度成像。目前,激光超声检测主要采用压电传感和光学测量两类信号采集方式。压电传感主要利用常规超声探头、相控阵探头、空气耦合换能器等超声传感器直接对声信号进行接收,但灵敏度会随着样品与换能器之间距离的增大而降低,通常要求传感器相隔几毫米到几十毫米,无法实现真正的非接触检测。光学测量技术基于干涉法或非干涉法,利用光学系统接收结构表面的反射光或散射光,通过其中细微的光程变化进行信号解调分析,得到激光超声波形,进而实现损伤解耦成像^[30]。近年来,激光超声检测技术已实现带涂层金属板件、增材制造件、叶片损伤、复合材料损伤等各类材质结构的内部缺陷和表面裂纹的高效非接触检测。

2.3 其他超声检测技术

作为新兴的非接触检测技术,电磁超声具有精度高、不需要耦合剂、非接触、适于高温检测以及容易激发各种超声波形等优点,近年来,国内外学者在电磁超声换能器设计优化和信号处理方法等方面开展了大量研究工作^[31-43]。在电磁超声换能器设计方面,研究工作主要集中于激励模式选择、阻抗匹配网络设计及磁铁和线圈配置方式等,如通过优化磁铁布置方式和数量提高激励强度^[31]、减小线圈导线间距以抑制信号旁瓣和提高超声波声束指向性^[32]、在线圈和磁场之间添加硅钢背板提升试件表面涡流和动态磁场^[33]以及通过建立考虑

开路电压、线圈阻抗和阻抗匹配网络的电磁耦合方式提高换能效率^[34]。在信号处理方面,最新的研究工作涉及聚焦方式选取、信号滤波降噪、特征提取与分类等,如在传统简单螺旋线圈和曲折线圈的基础上提出点聚焦和线聚焦,将超声信号聚集于特定位置,实现更准确的超声检测^[35-36]、采用多个线圈排列组合的相控阵传感器进一步提高检测灵敏度^[37]、利用伪随机码激励控制、正交相敏、基于静态小波包的信息融合等后处理算法^[38-39]及FPGA、DSP等硬件电路进行滤波降噪^[40-41],此外,应用神经网络^[42]、神经模糊推理机^[43]等人工智能技术实现损伤特征提取与分类也是国内外学者的热点研究方向。

相比于传统超声检测技术,导波具有传播距离远、速度快等优势,适用于管道、复合材料板壳等外形规则的大型构件损伤检测。但由于导波在边界和损伤处产生的回波信号极其复杂,会产生多种模式的导波以及噪声,采用先进的信号处理技术提高信噪比、实现损伤信息精准解耦就显得十分重要,也是目前国内外学者的重点研究方向。如利用再分配能量密度谱对裂纹特征进行提取^[44]、使用小波变换和滤波技术将不同模式的导波信号进行分离并实现复合材料弹性参数的测量^[45]。此外,希尔伯特变换、频散补偿等信号处理技术也逐步应用于超声导波信号处理与分析领域。

除以上检测技术外,近年来,非线性超声、空气耦合超声、机器人辅助检测、智能超声检测等检测技术也取得了长足的发展和进步,为推动超声检测理论体系的发展和完善奠定了坚实的基础。表1总结了各种超声检测技术的优缺点及应用场景^[19-20, 31, 45]。

3 超声换能器设计与专用检测装置开发

3.1 先进超声换能器设计

换能器是超声检测的基础和核心,也是决定损伤检测精度、效率和可靠性的重要因素。近年来,各类新型超声换能器不断涌现,工作原理和结构形式多种多样,按工作原理可分为压电换能器、电磁换能器、电容换能器、声光换能器、磁致伸缩换能器等,按组合模式可分为单点式、线阵列、面阵列、环形阵列等,按耦合方式可分为接触式和非接触式等。

检测灵敏度和效率提升一直是超声换能器设计的核心目标,宽频带和多元阵列设计是实现这一目标的重要解决途径。在灵敏度提升方面,基于新

表1 各种超声检测技术的优缺点及典型应用场景^[19-20, 31, 45]
 Table 1 Advantages, limitation and typical application scenarios of ultrasonic testing techniques^[19-20, 31, 45]

| Technique | Advantage | Limitation | Application scenario |
|-------------------------------------|--|--|---|
| Phased array ultrasonic | Highly controllable and flexible beam steering; fast inspection speed and high efficiency | Require coupling medium; relatively high equipment cost; demand strong theoretical knowledge from operators | Suitable for inspecting a wide range of materials, including metals, non-metals and composites |
| Laser ultrasonic | Non-contact inspection; high inspection speed, precision and sensitivity; robust performance in extreme environments | Signal amplitude is low and susceptible to background noise; complex equipment and technology | Especially ideal for components with complex geometries and inspections in extreme environments |
| Electromagnetic acoustic transducer | Non-contact inspection; broader inspection range compared to conventional piezoelectric transducers; enable electromagnetic characterization of materials | Signals are prone to attenuation and scattering; relatively high manufacturing cost; limited theoretical and practical research, still in early development stages | Applicable in specialized areas such as electromagnetic-acoustic coupling in metallic structures and electromagnetic property analysis of materials |
| Guided wave | Low energy attenuation over long propagation distances; large-area inspection possible with few transducers and high accuracy; excitation at a single point can inspect an entire structure | Dispersion characteristics increase inspection complexity; multi-mode behavior causes echo signal overlap, making defect identification difficult | Ideal for lap joints, skin and honeycomb delamination detection, and corrosion monitoring in metals and composite materials |
| Nonlinear ultrasonic | Highly sensitive to damage or defects much smaller than the fundamental wavelength; mixing techniques can overcome limitations of second-harmonic methods for damage localization and characterization | Second-harmonic signals are easily contaminated by nonlinearities in the measurement system; cannot localize localized structural damage | Suitable for detecting micro-cracks in plates, assessing high-temperature creep behavior and remaining life, and evaluating structural integrity of plates subjected to repeated cyclic loading |
| Air-coupled ultrasonic | Non-contact inspection; capable of testing components that are difficult for conventional ultrasound to penetrate, such as honeycomb structures | Significant ultrasonic attenuation at the air-specimen interface, resulting in low sensitivity and resolution | Applicable to honeycomb/foam-core composites, multi-layer adhesive-bonded structures, and other highly attenuating materials |

型复合材料设计的相控阵超声换能器与传统压电换能器相比具有更宽的频带范围, 检测灵敏度显著提升^[46], 采用具有铁电和压电特性的多孔聚丙烯材料取代固/气匹配层, 新型空气耦合超声换能器具有更高的横向分辨力和信噪比^[47], 通过改变磁铁和线圈的类型和布置方式, 电磁超声换能器的能量转换效率、声场指向性和信噪比都会有不同程度的提升^[48-49]。在检测效率提升方面, 多阵元集成设计是

最为直接和有效的手段之一, 随着精密加工和电子封装技术的快速发展, 压电相控阵超声换能器的阵元数量可到达几百个, 聚焦能力和声束覆盖面积大幅增加, 此外, 近年来激光阵列及空气耦合阵列等非接触阵列超声传感器也相继涌现, 极大提升了航空装备结构损伤原位检测效率, 如图3所示^[50-51]。

对于航空装备原位检测, 结构复杂构型、装配状态和原位检测环境对超声换能器设计提出了更

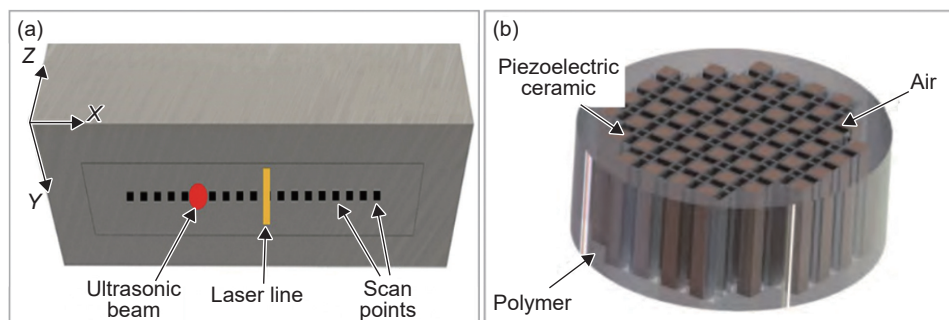


图3 非接触阵列超声换能器 (a)激光阵列换能器^[50]; (b)空气耦合阵列换能器^[51]

Fig. 3 Non-contact array ultrasonic transducer (a)laser array transducer^[50]; (b)air coupled array transducer^[51]

高的要求,各种专用换能器应运而生。如图4所示^[52-54],针对大曲率曲面结构及L型、R型、T型等拐角结构中声波随型入射困难的问题,国内外学者通过改进换能器几何构型、分布形式和耦合介质等手段,设计开发了弧面阵列换能器^[52]、可弯折柔性阵列换能器^[53]及环形阵列换能器^[54]等,针对螺接、铆接等连接结构,设计研制了环阵列、菊花阵列、扇形阵列等特殊构型换能器,实现了复杂装配

状态下紧固件结构的不拆解原位检测,针对高温、高频振动、高噪声等严酷环境下的原位检测,采用钛酸铋厚膜制备的高温压电超声换能器工作温度可达600℃,钛酸镆、钛酸镧和钛酸钽等压电超声换能器工作温度均可达到1300℃以上,此外,空气耦合超声、激光超声、电磁超声及激光电磁超声等换能器因具有无需耦合、非接触等特点在复杂构型结构和严酷环境等检测场景下优势更为明显。

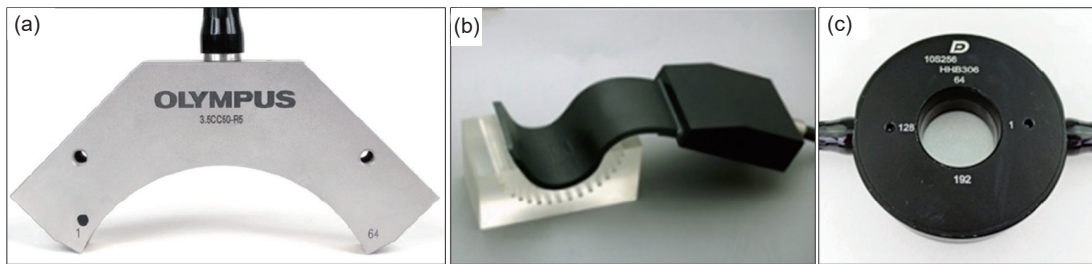


图4 异型阵列超声换能器 (a)弧面阵列换能器^[52]; (b)柔性阵列换能器^[53]; (c)环形阵列换能器^[54]
Fig. 4 Irregular array ultrasonic transducers (a)curved surface array transducer^[52]; (b)flexible array transducer^[53]; (c)circular array transducer^[54]

在线实时监测是先进超声换能器设计的另一重要方向,其中,超声导波技术凭借对损伤敏感、传播范围远的优点,已成为航空装备原位在线无损检测和结构健康监测领域研究热点。长期以来,超声导波检测技术主要借助常规超声换能器进行信号激励和采集,近年来,随着对导波理论研究的不断深入和在线检测需求的不断增长,国内外学者研制了多种用于超声导波在线监测的专用换能器^[55-60],主要包括锆钛酸铅压电陶瓷换能器^[55]、光纤光栅换能器^[56]、聚偏二氟乙烯换能器^[57]、磁致伸缩换能器^[58]、空气耦合换能器^[59]、脉冲激光仪^[60]和激光多普勒测振仪^[61]等,其中,聚偏二氟乙烯超声导波换能器由于具有可裁剪、压电性能优异等特点已应用于铝合金结构损伤在线检测,取得了较好的效果^[57]。

3.2 专用超声检测装置开发

随着超声检测技术的快速发展和应用,近年来,国内外科研机构面向航空装备研制和服役过程中的典型检测场景,设计研发了一系列新型超声检测装置。总体而言,研究工作主要聚焦以下几方面:(1)通过集成化和小型化设计,进一步提高狭小空间结构的可达性和损伤可检性;(2)通过融合自动化和智能化设计,着力提升大尺寸结构检测效率和可靠性;(3)通过激光超声、空气耦合超声等非接触检测装置研发,提高超声检测技术的复杂环境适用性。

在集成化和小型化设计方面,随着微机电和计

算机技术的不断发展,超声检测设备的软件与硬件集成度越来越高。国内外商用便携式相控阵超声检测设备已实现数据的高速同步采集、处理分析和高精度实时成像,设备主机质量可控制在5kg以内,Waygate Technologies公司^[62]通过高度集成化设计将整个相控阵系统的电子器件直接集成到滚轮探头中,仅需平板电脑设置检测参数并显示检测结果,极大提升了飞机发动机舱、进/排气道等狭小空间结构的检测可达性和便捷性。

在自动化和智能化设计方面,随着机器人、无人机及人工智能技术的成熟和应用,检测过程自动化和损伤评判智能化的趋势愈发明显^[63-64]。如图5所示^[64],近年来,机器人辅助超声检测技术快速发展,航空装备原位自动化检测过程中采用协作机器人作为扫查定位机构或检测执行机构,在机翼翼面、机身曲面壁板等大型构件检测方面展现了更高的效率、更好的灵活性、可控性和复杂型面适应性,有效减少了人工检测的工作强度和时间成本。同时,采用无人机携带超声传感器对大型航空装备垂尾、平尾等结构进行原位检测的研究工作也逐步开展,技术人员高空作业安全风险显著降低。此外,支持向量机、无监督学习、卷积神经网络等人工智能算法为航空装备损伤精准识别与高精度定量表征提供了新的研究思路,智能评判算法与自动化检测的融合设计有望突破传统检测模式,实现航空装备原位检测的全过程自动化和损伤信息管控

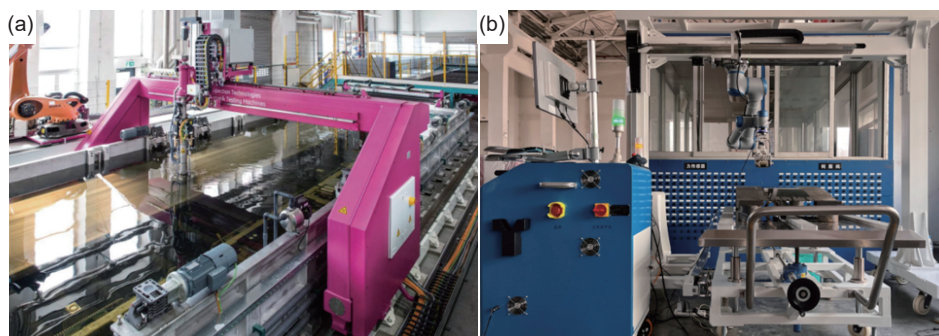


图5 机器人辅助自动化超声检测装置 (a)机翼翼面自动化检测^[64]; (b)机身曲面壁板自动化检测

Fig. 5 Robot assisted automated ultrasonic testing device (a)automated testing of wing surfaces^[64]; (b)automated detection of curved wall panels on the fuselage

智能化。

在复杂环境适用性设计方面,非接触超声检测手段在复杂环境下具有更为明显的技术优势。如图6所示^[59,65],近年来,国内外科研机构开发了大型空气耦合超声^[59]、激光超声^[65]等非接触超声检测系统,检测对象涉及增材制造、蜂窝夹层复合材

料、高温合金多种结构形式,应用场景涉及高温加载、高频振动和高噪声等严酷环境,由于无需耦合介质,非接触检测系统可避免与被检结构的直接接触,并可通过增大检测距离、增加防护装置等方式降低严酷环境对检测系统的影响,进一步扩展超声检测技术的适用范围和应用场景。

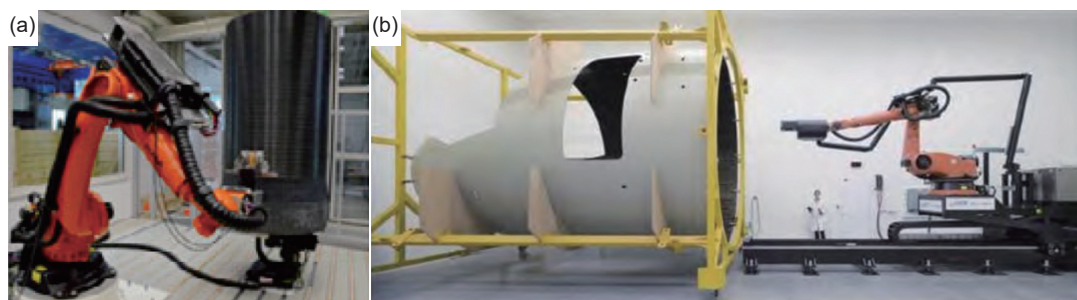


图6 非接触超声自动化检测装置 (a)空气耦合超声^[59]; (b)激光超声^[65]

Fig. 6 Non-contact ultrasonic automated detection device (a)air coupled ultrasound^[59]; (b)laser ultrasound^[65]

4 航空装备超声原位检测挑战与发展趋势

4.1 面临的主要挑战

随着新型航空装备研制和服役进程的持续推进,结构损伤原位检测的重要性日益凸显。面向航空装备超声原位检测重大需求,国内外在相控阵超声、激光超声、电磁超声、空气耦合超声、非线性超声等检测技术前沿理论、先进换能器设计及专用检测装置开发等方面开展了广泛研究,取得了一定的研究成果,但依然存在诸多亟待解决的问题和挑战。

(1)在理论研究方面,针对多相非均质材料和复杂型面结构的理论模型构建、信号分析方法和损伤解耦策略有待进一步深入。现有研究主要沿用传统的均质化模型和信号分析方法,较少考虑多相

非均质和复杂型面结构中的超声波传播行为和响应特性,尚未完全澄清复杂几何型面、细微观结构、损伤与超声波间的耦合作用机制,导致陶瓷基复合材料、三维编织复合材料、3D打印材料等新材料的损伤检测信噪比低,损伤信息解耦困难。

(2)在换能器设计方面,面向变厚度/变曲率/变角度R区和L区等拐角部位的超声换能器声场仿真分析、晶片布局方式、外形和耦合介质设计有待进一步加强。现有研究中采用弧面阵列换能器、柔性阵列换能器和高分子柔性耦合介质等方式,一定程度解决了大曲率结构声波随型入射困难的问题,但对于变曲率、变角度结构部位仍缺少有效的换能器解决方案。

(3)在检测装置开发方面,专用原位超声检测装置的自动化水平和复杂环境适用性有待进一步提升。自动化相控阵超声检测装置由于定位和控

制精度、轨迹规划算法、扫查范围等因素的限制,大多应用于平面或曲率较小的结构部位,对于多细节装配结构的适用性较差。激光超声、电磁超声和空气耦合超声等新型非接触检测装置的工程应用验证还处于起步阶段,在装置小型化和自动化集成方面还难以满足现场原位检测要求。

4.2 未来发展趋势

自20世纪20年代科学家首次将超声检测技术应用于工业领域,经过多年来的持续探索,超声检测理论体系逐渐完善,应用领域不断拓展,技术内涵愈发丰富,各种新型超声检测技术和装置相继涌现,损伤检测能力、精度和效率大幅提升。21世纪以来,随着计算机、电子封装、机械设计、人工智能等前沿技术的不断进步和航空产业的蓬勃发展,航空装备超声原位检测技术也迎来了新的发展机遇。

(1) 自动化和损伤评判智能化

超声检测技术与自动化设计和人工智能技术相结合,通过机械装置搭载超声传感器对结构进行自动化扫查,并运用深度学习等算法对检测数据进行分析 and 诊断,可以进一步提高检测的效率和准确性。同时,自动化和智能化的检测技术还可以减少人为因素的干扰,提高检测的可靠性和稳定性。如可以利用智能机器人搭载原位超声检测设备,对航空装备进行远程、实时检测和在线分析。

(2) 技术/装备专用化和定制化

航空装备的种类和型号越来越多,对检测技术的要求也越来越严格,原位超声检测技术将朝着更加精细化和个性化的方向发展。针对不同型号的航空装备,需根据不同结构部位的材料类型、结构特点和检测要求,采用更加专用化和定制化的检测方案,开发专用检测装备,进一步提高原位检测的准确性、经济性、可靠性和适用性。

(3) 多学科交叉融合与创新

原位超声检测技术还将与其他无损检测技术相结合,可实现更加全面和高效的检测。如将原位超声检测技术与红外检测技术、X射线检测技术等相结合,形成多模态无损检测系统,实现对航空装备全面、准确的检测。此外,还可以针对航空装备的特定需求和问题,开展针对性的技术创新和研发工作,推动超声原位无损检测技术的不断发展和完善。

(4) 原位检测标准化与规范化

随着原位超声检测技术在航空领域的广泛应用,技术标准化和规范化也将成为未来的主要发展

趋势。通过制定统一的技术标准和规范,可以确保检测结果的准确性和可比性,提高检测效率和质量。同时,还可以推动原位超声检测技术的国际交流与合作,促进技术的共同进步和发展。

5 结束语

百年航空,百年检测。航空装备超声原位无损检测技术应航空工业对结构完整性与服役安全性的严苛要求而萌生,并伴随航空器设计理念、材料体系与制造工艺的持续演进而不断深化其理论内涵与技术外延。自20世纪初超声技术首次应用于工业探伤以来,历经从单一A扫描向多维成像、从接触式耦合向非接触激发、从人工判读向智能诊断的范式跃迁,已然成为贯穿航空装备全寿命周期,涵盖研制验证、强度试验、外场维护乃至战场抢修等关键环节。

当前,以第五代战斗机、大型运输机及国产民用干线客机为代表的先进航空装备加速列装与研制,其机体结构广泛采用高比强/比刚度的复合材料、增材制造构件及异质集成结构,服役环境日趋复杂(高机动、大过载、全天候、多源冲击)。此类新材料、新构型与新工况对损伤检测提出了更高维度的技术需求:一方面,需在不拆解主承力结构、不影响系统功能的前提下,对狭小舱室、复杂曲面或高空作业等典型原位场景中实施高效检测;另一方面,亟须突破对非均质、各向异性材料内部多尺度损伤(如微米级基体开裂、纤维断裂与毫米级层间分层、界面脱粘)的高灵敏度、高分辨率识别与定量表征瓶颈。

面向这一重大工程需求,构建覆盖“研制-试验-服役”全链条、贯通“元件-部件-整机”多层级的超声原位无损检测能力体系已刻不容缓。本文以实际工程问题为导向,系统剖析了航空装备金属与复合材料结构的典型损伤模式及其原位检测的独特约束条件,并重点综述了近年来国内外在超声检测前沿理论、先进换能器设计以及专用检测装置研发等领域取得的关键进展。然而,现有技术体系在应对多相非均质介质中超声传播建模的精确性、变厚度/变曲率复杂几何边界处的声场适配性,以及新型非接触检测装置在工程现场环境下的鲁棒性与小型化集成等方面仍面临严峻挑战。

航空装备超声原位无损检测技术的发展将呈现四大核心趋势:其一,深度自动化与智能化融合,依托协作机器人、无人机等载体实现复杂构型结构

的自主路径规划与稳定扫查,并深度融合深度学习、迁移学习等人工智能算法,实现损伤特征的自动提取、精准识别与智能评判;其二,高度专用化与定制化演进,针对特定机型、特定结构部位(如R/L拐角区、紧固件连接区)的材料-几何-载荷耦合特性,发展“一机一策、一部一法”的定制化检测方案与专用传感装备,以提升检测的针对性、可靠性与经济性;其三,强化多学科交叉与多模态融合,推动超声技术与红外热成像、X射线、涡流及太赫兹等无损检测方法的有机集成,构建多物理场信息互补、多尺度特征融合的综合诊断体系,实现对结构健康状态的全面、高置信度评估;其四,加速标准化与规范化建设,亟须建立统一的原位超声检测工艺规程、信号数据格式、损伤定量评价准则及设备性能验证标准,以确保检测结果的可重复性、可比性与工程适用性,为航空装备的设计优化、寿命管理与维修决策提供坚实、可靠的数据基石。

参考文献:

- [1] 张国庆,滕超逸. 航空航天先进结构材料技术现状及发展趋势[J]. 航空材料学报, 2024, 44(2): 1-12.
ZHANG G Q, TENG C Y. Current status and development trend of advanced structural materials technology in aerospace field[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2024, 44(2): 1-12.
- [2] 张学军,陈冰清. 航空典型金属材料增材制造组织、缺陷、表面、构型研究进展[J]. 航空材料学报, 2024, 44(1): 1-14.
ZHANG X J, CHEN B Q. Research progress on microstructure, defects, surface, and configuration of additive manufactured typical aviation metals[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2024, 44(1): 1-14.
- [3] 车枫,孟亦圆,林莉,等. Z2CND18.12N奥氏体不锈钢低周疲劳损伤的EBSD分析[J]. 材料工程, 2024, 52(6): 177-183.
CHE F, MENG Y Y, LIN L, et al. EBSD analysis of low-cycle fatigue damage in Z2CND18.12N austenitic stainless steel[J]. Journal of Materials Engineering, 2024, 52(6): 177-183.
- [4] MOROKOV E, LEVIN V, CHERNOV A, et al. High resolution ply-by-ply ultrasound imaging of impact damage in thick CFRP laminates by high-frequency acoustic microscopy[J]. *Composite Structures*, 2021, 256: 113102.
- [5] 臧云飞,张海兵,朱龙翔,等. 原位静态无损检测技术在航空装备中的应用[J]. 无损探伤, 2024, 48(4): 1-5.
ZANG Y F, ZHANG H B, ZHU L X, et al. Application of *in-situ* static non-destructive testing technology in aviation equipment[J]. *Nondestructive Testing Technology*, 2024, 48(4): 1-5.
- [6] MA Z Y, ZHANG W, DU P C, et al. Nondestructive measurement of elastic modulus for thermally sprayed WC-Ni coatings based on acoustic wave mode conversion by small angle incidence[J]. *NDT & E International*, 2018, 94: 38-46.
- [7] 林莉,罗明,郭广平,等. 碳纤维复合材料孔隙率超声声阻抗法检测[J]. 复合材料学报, 2009, 26(3): 105-110.
LIN L, LUO M, GUO G P, et al. Ultrasonic determination of carbon fiber composite porosity using acoustic impedance[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2009, 26(3): 105-110.
- [8] MYLAVARAPU P, WOLDESENBET E. A predictive model for ultrasonic attenuation coefficient in particulate composites[J]. *Composites Part B*, 2010, 41(1): 42-47.
- [9] RODRÍGUEZ M A, SAN EMETERIO J L, LÁZARO J C, et al. Ultrasonic flaw detection in NDE of highly scattering materials using wavelet and Wigner-Ville transform processing[J]. *Ultrasonics*, 2004, 42(1/9): 847-851.
- [10] 赵培洪,平殿发,邓兵,等. 魏格纳-维尔分布交叉项抑制方法综述[J]. 探测与控制学报, 2010, 32(1): 23-29.
ZHAO P H, PING D F, DENG B, et al. Review of cross-term suppression methods in Wigner-Ville distribution [J]. *Journal of Detection & Control*, 2010, 32(1): 23-29.
- [11] KAŽYS R, TUMŠYS O, PAGODINAS D. Ultrasonic detection of defects in strongly attenuating structures using the Hilbert-Huang transform[J]. *NDT & E International*, 2008, 41(6): 457-466.
- [12] 高清维. Gabor变换时频分析、信号空域滤波及高帧率超声成像方法研究[J]. 安徽大学学报(自然科学版), 2017, 41(2): 1.
GAO Q W. Research on Gabor transform time-frequency analysis, signal spatial filtering and high frame rate ultrasonic imaging method[J]. *Journal of Anhui University (Natural Science Edition)*, 2017, 41(2): 1.
- [13] BOINET M, MARLOT D, LENAIN J C, et al. First results from coupled acousto-ultrasonics and electrochemical noise techniques applied to gas evolving electrodes [J]. *Electrochemistry Communications*, 2007, 9(9): 2174-2178.
- [14] STOCKWELL R G, MANSINHA L, LOWE R P. Localization of the complex spectrum: the S transform[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1996, 44(4): 998-1001.
- [15] MOSTAVI A, KAMALI N, TEHRAN I N, et al. Wavelet based harmonics decomposition of ultrasonic signal in assessment of plastic strain in aluminum[J]. *Measure-*

- ment, 2017, 106: 66-78.
- [16] JENSEN J A, NIKOLOV S I, GAMMELMARK K L, et al. Synthetic aperture ultrasound imaging[J]. *Ultrasonics*, 2006, 44: 5-15.
- [17] LIU J, HE Q, LUO J W. A compressed sensing strategy for synthetic transmit aperture ultrasound imaging[J]. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 2017, 36(4): 878-891.
- [18] LU Y, YI L, WANG D, et al. Conjunctive and compromised data fusion schemes for identification of multiple notches in an aluminium plate using Lamb wave signals[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2010, 57(9): 2005-2016.
- [19] 杨宁, 陆铭慧, 张萍, 等. 基于分割环阵的 CFRP 分层缺陷超声全聚焦成像[J]. *仪器仪表学报*, 2024, 45(1): 200-210.
- YANG N, LU M H, ZHANG P, et al. Ultrasonic total focusing method of carbon fiber reinforced plastics delamination defects based on segmented annular arrays[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2024, 45(1): 200-210.
- [20] 胡平, 艾琳, 邱梓妍, 等. 金属增材制造构件的激光超声无损检测研究进展[J]. *中国激光*, 2022, 49(14): 297-308.
- HU P, AI L, QIU Z Y, et al. Laser ultrasonic nondestructive testing on metal additive manufacturing components [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(14): 1402803.
- [21] MCDONALD F A. Practical quantitative theory of photoacoustic pulse generation[J]. *Applied Physics Letters*, 1989, 54(16): 1504-1506.
- [22] MCDONALD F A. On the precursor in laser-generated ultrasound waveforms in metals[J]. *Applied Physics Letters*, 1990, 56(3): 230-232.
- [23] SHI Y N, WOOH S C, ORWAT M. Laser-ultrasonic generation of Lamb waves in the reaction force range[J]. *Ultrasonics*, 2003, 41(8): 623-633.
- [24] ROYER D, CHENU C. Experimental and theoretical waveforms of Rayleigh waves generated by a thermoelastic laser line source[J]. *Ultrasonics*, 2000, 38(9): 891-895.
- [25] NGUYEN K L, TREYSSÈDEF, HAZARD C. Numerical modeling of three-dimensional open elastic waveguides combining semi-analytical finite element and perfectly matched layer methods[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2015, 344: 158-178.
- [26] BLANCO M, ZDUNEK K. Performance and optimization of switched diversity systems for the detection of signals with Rayleigh fading[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 1979, 27(12): 1887-1895.
- [27] HASSAN W, VIRONE S W. Finite element analysis of Rayleigh wave interaction with finite-size, surface-breaking cracks[J]. *Ultrasonics*, 2003, 41(1): 41-52.
- [28] ZHOU Z G, ZHANG K S, ZHOU J H, et al. Application of laser ultrasonic technique for non-contact detection of structural surface-breaking cracks[J]. *Optics & Laser Technology*, 2015, 73: 173-178.
- [29] GUO H L, ZHENG B, LIU H. Numerical simulation and experimental research on interaction of micro-defects and laser ultrasonic signal[J]. *Optics & Laser Technology*, 2017, 96: 58-64.
- [30] 刘永强, 杨世锡, 甘春标, 等. 基于非线性激光超声的微裂纹检测及定位[J]. *振动. 测试与诊断*, 2019, 39(3): 645-651.
- LIU Y Q, YANG S X, GAN C B, et al. Detection and location of small crack using nonlinear laser ultrasonic[J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2019, 39(3): 645-651.
- [31] CAI Z C, YAN Y, TIAN G Y. Enhancement of Lamb-EMAT signal using a modified one-side pitch-catch design[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 138556-138566.
- [32] XIE Y D, LI J Y, HUANG P, et al. A novel design of window function modulated meander-line-coils EMATs for unidirectional Rayleigh waves generation and side-lobe suppression[J]. *NDT & E International*, 2021, 123: 102501.
- [33] REN W D, HE J P, DIXON S, et al. Enhancement of EMAT's efficiency by using silicon steel laminations back-plate[J]. *Sensors and Actuators A*, 2018, 274: 189-198.
- [34] SHI W Z, WU Y X, GONG H, et al. Enhancement of lift-off performance and conversion efficiency using a copper backplate for a spiral coil EMAT in generating and receiving shear waves[J]. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, 2018, 56(2): 173-194.
- [35] NAKAMURA N, ASHIDA K, TAKISHITA T, et al. Inspection of stress corrosion cracking in welded stainless steel pipe using point-focusing electromagnetic-acoustic transducer[J]. *NDT & E International*, 2016, 83: 88-93.
- [36] JIA X J, OUYANG Q. Influence of aperture angles and design focal depths on the performance of point-focusing shear vertical wave electromagnetic acoustic transducers [J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2018, 143(5): 2892.
- [37] ZHANG T, YANG X Q, LI M, et al. Enhancing unilateral EMAT performance through topological optimization of Halbach permanent Magnet arrays[J]. *NDT & E International*, 2024, 146: 103172.

- [38] SUN H Y, PENG L S, HUANG S L, et al. Analytical model and optimal focal position selection for oblique point-focusing shear horizontal guided wave EMAT[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 258: 120375.
- [39] SI D, GAO B, GUO W, et al. Variational mode decomposition linked wavelet method for EMAT denoise with large lift-off effect[J]. *NDT & E International*, 2019, 107: 102149.
- [40] BOUGHEDDA H, HACIB T, LE BIHAN Y, et al. Cracks characterization of non-ferromagnetic material using EMAT probe and PLSR technique[J]. *Progress in Electromagnetics Research C*, 2020, 103: 199-209.
- [41] THOMAS S, OBAYYA S, PINTO D. Surface defect detection in non-ferromagnetic material using an EMAT[J]. *Materials Science and Engineering*, 2009, 12: 1-10.
- [42] DIXON S, EDWARDS C, PALMER S B. High accuracy non-contact ultrasonic thickness gauging of aluminium sheet using electromagnetic acoustic transducers[J]. *Ultrasonics*, 2001, 39(6): 445-453.
- [43] LIU H B, LIU T R, LI Y P, et al. Uniaxial stress *in-situ* measurement using EMAT shear and longitudinal waves: transducer design and experiments[J]. *Applied Acoustics*, 2021, 175: 107781.
- [44] VALLE C, LITTLES J W. Flaw localization using the reassigned spectrogram on laser-generated and detected Lamb modes[J]. *Ultrasonics*, 2002, 39(8): 535-542.
- [45] HE M Y, WANG M A, WU D, et al. CFRP composite fatigue damage pattern recognition using ultrasonic guided waves[J]. *Composite Structures*, 2025, 371: 119459.
- [46] WONG C M, CHEN Y, LUO H S, et al. Development of a 20-MHz wide-bandwidth PMN-PT single crystal phased-array ultrasound transducer[J]. *Ultrasonics*, 2017, 73: 181-186.
- [47] KACHANOV V K, SOKOLOV I V, KARAVAEV M A. Selecting optimum air gap length in air-coupled ultrasonic through-transmission testing of products made of polymer materials[J]. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2025, 61(5): 505-516.
- [48] KYUNG L, WOONG K, YOUNG K. Omnidirectional lamb waves by axisymmetrically-configured magnetostrictive patch transducer[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2013, 60(9): 1928-1934.
- [49] HAO K S, HUANG S L, ZHAO W, et al. A new frequency-tuned longitudinal wave transducer for nondestructive inspection of pipes based on magnetostrictive effect[C]//2010 IEEE Sensors Applications Symposium (SAS). Limeric: IEEE, 2010: 64-68.
- [50] PIERIS D, STRATOUDAKI T, JAVADI Y, et al. Laser induced phased arrays (LIPA) to detect nested features in additively manufactured components[J]. *Materials & Design*, 2020, 187: 108412.
- [51] ZHOU J J, LIU Q Y, WANG X M, et al. Development of the lens-focused air-coupled ultrasonic transducer for non-destructive testing[J]. *Ultrasonics*, 2025, 149: 107590.
- [52] HABERMEHL J, LAMARRE A, ROACH D, et al. Ultrasonic phased array tools for large area composite inspection during maintenance and manufacturing[C]//Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation: Proceedings of the 35th Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Chicago (Illinois): AIP, 2009: 832-839.
- [53] BRATH A J, SIMONETTI F. Phased array imaging of complex-geometry composite components[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2017, 64(10): 1573-1582.
- [54] 蔡庆生, 邓宇, 陈奇礼, 等. 中心自聚焦圆环阵探头: CN213181407U[P]. 2021-05-11.
- [55] ZHENG Y B, LIU K H, WU Z J, et al. Lamb waves and electro-mechanical impedance based damage detection using a mobile PZT transducer set[J]. *Ultrasonics*, 2019, 92: 13-20.
- [56] OKABE Y, FUJIBAYASHI K, SHIMAZAKI M, et al. Delamination detection in composite laminates using dispersion change based on mode[J]. *Smart Materials and Structures*, 2010, 19(11): 115013.
- [57] REN B Y, LISSENDEN C J. PVDF multielement lamb wave sensor for structural health monitoring[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2016, 63(1): 178-185.
- [58] KWUN H, KIM S Y, LIGHT G M. The magnetostrictive sensor technology for long range guided wave testing and monitoring of structures[J]. *Materials Evaluation*, 2003, 61(1): 80-84.
- [59] HARB M S, YUAN F G. Barely visible impact damage imaging using non-contact air-coupled transducer/laser Doppler vibrometer system[J]. *Structural Health Monitoring*, 2017, 16(6): 663-673.
- [60] PARK B, SOHN H, MALINOWSKI P, et al. Delamination localization in wind turbine blades based on adaptive time-of-flight analysis of noncontact laser ultrasonic signals[J]. *Nondestructive Testing and Evaluation*, 2017, 32(1): 1-20.
- [61] TIAN Z H, YU L Y, LECKEY C. Rapid guided wave delamination detection and quantification in composites using global-local sensing[J]. *Smart Materials and Structures*, 2016, 25(8): 085042.

- [62] 包文. 基于 FPGA 的便携式超声成像算法设计与实现 [D]. 成都: 电子科技大学, 2025.
BAO W. Design and implementation of portable ultrasound imaging algorithm based on FPGA [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2025.
- [63] SINIARSKI M, SYNASZKO P, DRAGAN K. Development of an open-source robotic NDT solution for automated composite repair testing [J]. *Fatigue of Aircraft Structures*, 2023, 2023(15): 146-154.
- [64] 周正干, 孙广开. 先进超声检测技术的研究应用进展 [J]. *机械工程学报*, 2017, 53(22): 1-10.
ZHOU Z G, SUN G K. New progress of the study and application of advanced ultrasonic testing technology [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2017, 53(22): 1-10.
- [65] 孙广开, 周正干, 陈曦. 激光超声技术在先进复合材料

无损检测中的应用研究 [J]. *失效分析与预防*, 2016, 11(5): 276-282.

SUN G K, ZHOU Z G, CHEN X. Application research of laser ultrasonic technology in nondestructive testing of advanced composite materials [J]. *Failure Analysis and Prevention*, 2016, 11(5): 276-282.

收稿日期: 2025-02-18; 录用日期: 2025-09-08

基金项目: 中国科协青年人才托举工程(2022QNRC001); 强度与结构完整性全国重点实验室自主研究课题(LSSIZZYJ202403); 企业创新青年人才托举计划(2021-1-2); 航空科学基金(20200009023004)

通讯作者: 樊俊铃(1985—), 男, 博士, 研究员, 研究方向为飞机结构损伤检测与维修, 联系地址: 陕西省西安市雁塔区电子二路 86 号(710065), E-mail: fanling850129@163.com

(本文责编: 高磊)