

基于超声导波的航空航天结构 损伤诊断成像技术研究进展*

郑跃滨¹, 武湛君¹, 雷振坤¹, 高东岳², 周凯¹, 张佳奇¹, 杨正岩¹, 邹建超¹

(1. 大连理工大学工业装备结构分析国家重点实验室, 大连 116024;

2. 中山大学航空航天学院, 广州 510275)

[摘要] 超声导波损伤诊断成像技术是近年来无损检测/结构健康监测领域的研究热点,它能够直观反映航空航天结构上的损伤位置及严重程度。概述了超声导波诊断成像技术的一般流程,介绍了8种具有代表性成像算法的研究现状,包括相控阵成像、空间-波数滤波器成像、逆时偏移成像、时间反转成像、延迟叠加成像、基于模型成像、层析成像和概率成像,对比了这些成像算法的应用范围和优缺点,最后结合实际工业应用需求讨论了超声导波诊断成像技术面临的挑战和发展方向。

关键词: 超声导波; 损伤诊断成像; 健康监测; 无损检测; 航空航天结构; 复合材料结构

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2020.18.024



郑跃滨

博士研究生,研究方向为超声导波、结构健康监测、传感器优化与设计。

航空航天飞行器在实际服役过程中要长期承受复杂的载荷条件,甚至可能遭受意外的冲击载荷,容易出

现不易察觉的损伤。同时,超出最初设计寿命的飞行器面临着老化问题,其结构可靠性有所下降^[1]。当前应用新型材料(如高性能轻质合金^[2]和复合材料^[3])的新一代航空航天飞行器处于高速发展中,如何评估材料内部损伤仍存在挑战^[4]。因此,发展应用于航空航天结构的损伤诊断技术一直备受关注。凭借对损伤敏感,传播范围远的优点,超声导波技术成为无损检测(Non-destructive testing, NDT)和结构健康监测(Structural health monitoring, SHM)领域的一个研究热点^[5-6]。该技术以导波作为损伤信息的传递媒介,先用激励传感器在结构上激发导波,再用接收传感器采集与损伤相互作用后的导波响应信号,随后分析信号获取金属或复合材料结构上的损伤情况,从而保证结构的可靠性和完整性^[7-10]。

超声导波技术通过捕捉损伤引起的导波信号变化对结构的损伤状况进行评估,适用于不同类型损伤,包括金属结构的断裂、变形、腐蚀,复合材料结构的层间分层和基体开裂,热防护材料的脱粘,接头结构的连接失效等^[5,11]。采用成像技术,综合考虑损伤对结构全局的影响,能够直观地定位损伤及反映损伤严重程度^[12]。近年来,超声导波损伤诊断成像技术已从实验室探索逐步迈向大型真实结构(如全尺寸复合材料尾翼^[13-14]和复合材料机身壁板^[15])应用,并取得了良好效果。根据不同成像原理及计算过程,有多种导波诊断成像技术,如相控阵(Phased array)成像方法、空间-波数滤波器(Spatial-wavenumber filter)成像方法、逆时偏移成像(Reversal-time migration)方法、时间反转(Time reversal)成像方法、延迟叠加(Delay-and-sum)成像方法、基

* 基金项目: 国家重点研发计划(2018YFA0702800); 国家自然科学基金(11772081, 51805068)。

于模型成像(Model-based imaging)方法、层析成像(Tomography)方法以及基于概率的损伤图像重建算法(Reconstruction algorithm for probabilistic inspection of defects)。

针对超声导波诊断成像技术,本文在分析和总结近20年国内外研究成果的基础上,梳理出其中应用广泛的成像技术并做简要综述。

基本原理

超声导波通常是指有限介质中传播的超声波。当结构在某一个或几个方向有限时,超声波在结构边界间多次反射并相互叠加后将形成超声导波。超声导波传播载体称为波导结构,包括板类、管类、杆类等。超声导波通过捕捉导波与损伤作用后的散射信号实现诊断,以是否需要激励装置分为主动式和被动式两种。被动式超声导波技术无激励,仅采集外部作用(如撞击)引起的结构响应^[16]。主动式成像算法经改进后,可用于被动撞击的诊断成像^[17-18]。图1是主动式超声导波诊断成像技术的一般流程。

(1)首先将传感器预先布置于结构选定位置,组成传感器阵列或网络;(2)经激励器激发信号,导波在结构中传播,遇到损伤等结构空间不连续处发生散射(包括反射、折射、衍射、模态转换等现象),经传感器采集得到;(3)利用相应信号处理技术,提取散射波中如能量、波速、相位、频谱等信号变化特征;(4)将所提取信号特征代入成像算法;(5)融合多组数据,输出诊断图像。

1 板状结构中的超声导波

飞行器结构中的关键构件多为薄壁板壳结构,如机身壁板、机翼尾翼、贮箱等,研究人员已给出一些此类结构中导波传播问题的解。本节主要简述各向同性和各向异性板中的导波传播问题,常用求解方法可选择势函数法和子波法,详细求解过程可参考文献[11]。

各向同性板中传播的超声导波满足 Navier 运动位移方程:

$$\mu \nabla^2 \mathbf{u} + (\lambda + \mu) \nabla \nabla \cdot \mathbf{u} = \rho \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} \quad (1)$$

其中, ρ 为密度; λ 和 μ 为拉梅常数; \mathbf{u} 表示位移; t 表示时间。引入应力

自由边界条件,可得到瑞利-兰姆(Rayleigh-Lamb)频散方程

$$\frac{\tan(k_s h)}{\tan(k_l h)} = - \left[\frac{4k^2 k_l k_s}{(k^2 - k_s^2)^2} \right]^{\pm 1} \quad (2)$$

$$k_l^2 = \left(\frac{\omega}{c_l} \right)^2 - k^2, \quad k_s^2 = \left(\frac{\omega}{c_s} \right)^2 - k^2 \quad (3)$$

$$c_l = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}}, \quad c_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (4)$$

其中, h 为板厚一半,上标“+”和“-”分别表示对称模态和反对称模态; ω 和 k 分别是角频率和波数。由于上述频散方程很难求得解析解,通常使用数值方法求解频散曲线。

对于 N 层各向异性的复合结构板,导波传播时更加复杂。用位移场描述复合材料板中导波,每一层满足 Navier 位移方程,即

$$\mu^{(n)} \nabla^2 \mathbf{u}^{(n)} + (\lambda^{(n)} + \mu^{(n)}) \nabla \nabla \cdot \mathbf{u}^{(n)} =$$

$$\rho^{(n)} \frac{\partial^2 \mathbf{u}^{(n)}}{\partial t^2} \quad (n=1, 2, \dots, N) \quad (5)$$

其中, $\rho^{(n)}$ 、 $\lambda^{(n)}$ 和 $\mu^{(n)}$ 分别代表第 n 层密度和拉梅常数。将各层边界条件

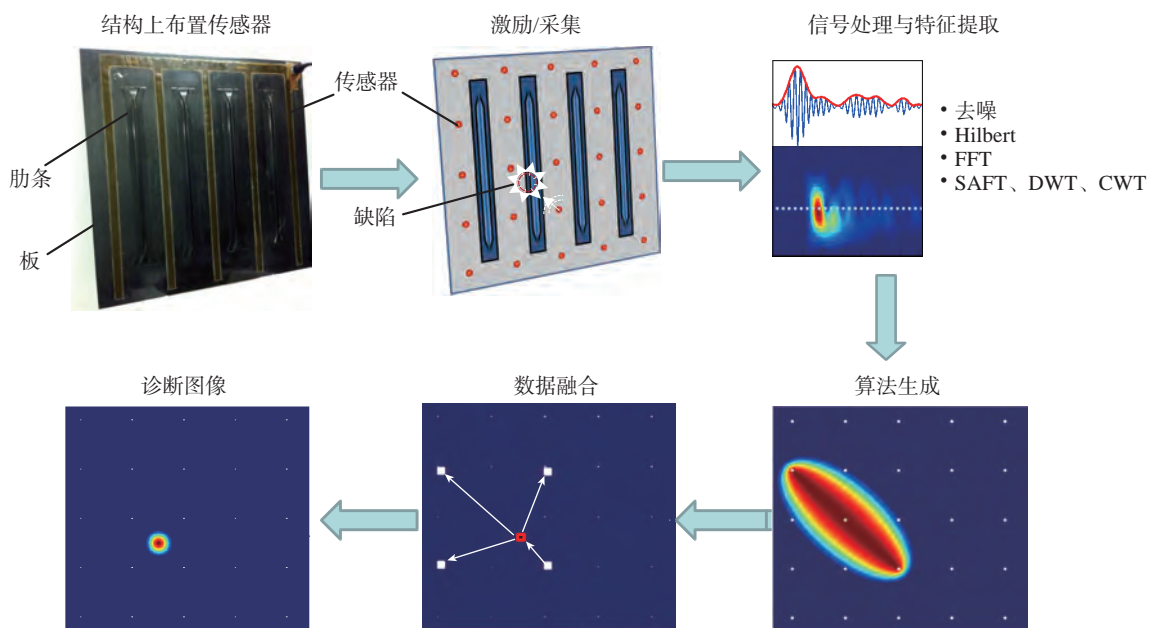


图1 主动式超声导波诊断成像技术流程图

Fig.1 Flowchart of active damage diagnostic imaging approach based on ultrasonic guided waves

带入方程(5)中,得到 N 层各向异性的复合结构板的频散方程为

$$\left| A(\omega, k, \lambda^{(n)}, \mu^{(n)}, h_{(n)}) \right| = 0 \quad (6)$$

通常采用转换矩阵法、全局矩阵法、有限元及半解析有限元求解方程(6),此外需特别注意复合材料结构中导波的衰减问题^[11]。

2 传感器布置

传感器是 NDT/SHM 中数据采集系统的关键组件。有多种类型的传感器可实现超声导波的激励或接收,包括: 锆钛酸铅压电陶瓷 (Piezoelectric, PZT) 传感器^[19]、光纤光栅 (Fiber grating) 传感器^[20]、聚偏二氟乙烯 (Polyvinylidene difluoride) 传感器^[21]、磁致伸缩 (Magnetostrictive) 传感器^[22]、空气耦合 (Air-couple) 传感器^[23]、脉冲激光仪 (Pulsed-laser)^[24] 和激光多普勒测振仪 (Scanning laser doppler vibrometer, SLDV)^[25]。前 3 种类型可用于在线监测,其中 PZT 由于成本低、功耗小,且兼具激励和接收信号功能,因此应用广泛^[19]。PZT 可通过粘贴方式安装在结构表面,也可以嵌入至复合材料结构的内部^[26-27]。后 4 种类型属于离线测量,其中 SLDV 的时空分辨率高,但操作复杂,能量转化率低^[6]。

导波中主要有两种激励/接收形式: 脉冲回波 (Pulse-echo)^[28-29] 和单发单收 (Pitch-catch)^[28,30]。以 PZT 为例,如图 2 所示,图 2 (a) 中是脉冲回波形式,传感器均布置在损伤的同一侧,选择一个激励器 (Actuator) 激发导波信号,其他接收传感器 (Sensor) 采集回波信号。阵列形式不局限于线型,也可以是其他形状的阵列。阵列中两个相邻传感器的间距较小,通常为毫米级,是一种密集传感器阵列。图 2 (b) 中是单发单收形式,或单发多收,损伤在传感器围成的凸包区域内部,选择一个激励器 (Actuator) 激发导波信号,其他接收传感器 (Sensor) 采集,这种传感

器布置方式可扩展至整个结构形成的网络。网络中两个相邻传感器的间距较大,通常为分米级,称为稀疏的分布式传感器网络。

3 信号处理与特征提取

由于导波的多模态和频散特性^[31],加上噪声、环境变化以及边界反射等多种因素,造成传感器所接收信号波形复杂。信号处理技术对诸如去噪、数据压缩、特征提取等数据预处理过程至关重要^[32]。常用信号处理方法包括可用于提取包络的希尔伯特变换 (Hilbert Transform)^[33]、可用于去噪的快速傅里叶变换 (Fast Fourier transform)^[34]、可用于时频分析的短时傅里叶变换 (Short-time Fourier transform, STFT) 和小波变换 (Wavelet transform)^[35]。其中,小波变换克服了 SFTF 窗口大小不随频率变化的缺点,可实现多分辨率处理,是信号时频分析的重要工具。小波变换分为离散小波变换 (Discrete wavelet transform, DWT) 和连续小波变换 (Continuous wavelet transform, CWT), Yu 等^[36]采用 DWT 对信号去噪, Qiu 等^[37]使用 CWT 提取单频分量。Pai 等^[35,38]对比并讨论了 STFT、希尔伯特-黄变换 (Hilbert-Huang transform) 和共轭对分解 (Conjugate-pair decomposition) 等时频域分析方法。除时频域分析外, Yu 等^[39]使用二维 FFT 得到波数域信息,对损伤引起的入射波、反射波和模态转换波实现了空间-频

率-波数联合分析。近年来,稀疏表示理论中的匹配追踪 (Matching pursuits, MP) 算法已被用来对导波信号进行去噪和特征提取^[40]。Raghavan 等^[41]改进 MP 算法,弥补频散效应,分离多模态反射波,从而简化了导波信号的特征提取难度。此外,多重信号分类 (Multiple signal classification, MUSIC) 方法可以有效去噪并提取特征信号^[42],该方法基于特征值分解技术,其中大特征值指向声源信号,小特征值对应噪声源。He 等^[43]将 MUSIC 与时间反转结合,实现了高定位精度的多损伤成像。

4 损伤成像算法

常用损伤成像算法主要有 8 种,包括相控阵、空间-波数滤波器、时间反转、延迟叠加成像、逆时偏移成像、基于模型成像、层析成像以及基于概率成像,根据传感器布置密度可分为密集阵列成像与稀疏阵列成像,根据算法求解过程可分为反演求解与正向求解。

4.1 密集阵列成像与稀疏阵列成像

采用密集传感器阵列的成像算法能实现导波回波信号的聚焦,提高信噪比,比如相控阵^[44]、空间-波数滤波器 (相控阵的变种形式)^[45]、时间反转^[46]以及逆时偏移成像^[47]等方法。密集传感器阵列可以方便地对结构中不可达区域实现损伤检测。由于阵列相对损伤是非对称分布,采集不到完整的散射波信息,若反射回

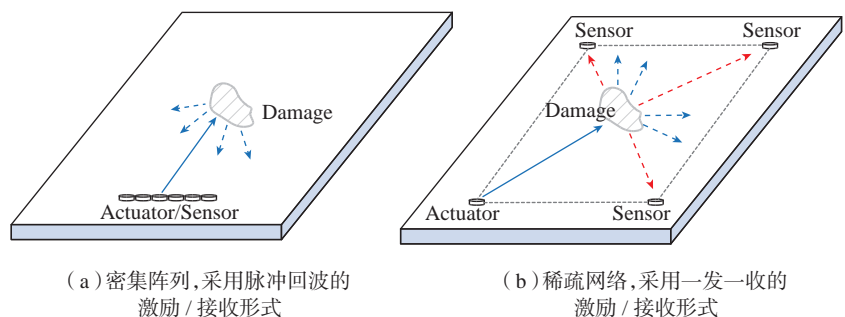


图2 传感器布置方案

Fig.2 Configuration of sensor arrangement

波特征不明显,则成像结果往往不够理想。

稀疏传感器网络适用于带有加筋肋等特征的复杂结构,经扩展后,可以覆盖整个待测区域^[12]。采用一发一收形式,获取散射信号后,采用如时间反转^[48]、延迟叠加^[49]、基于模型成像^[50]以及基于概率成像^[12]等方法均能够有效地实现损伤诊断。若在单个凸包的包围线(图2(b)虚线)上布置足够多传感器,能够采集到近乎全向的损伤散射信息,那么采用层析成像方法可以获得高精度的诊断图像^[51]。但随着传感器数量增多,对导波系统软硬件带来的负担也越大。

4.2 反演求解与正向求解

算法求解过程是诊断成像中的关键步骤,可以分为反演和正向求解。从反演波动方程出发的逆向求解,多数情况下的解不唯一,而正向时解是唯一的,二者差异主要体现在求解的计算效率、难易程度和准确性。

将损伤成像过程看作反问题时,已知测量数据 y 、模型与测量数据之间的关系(即波动方程 D),根据方程 $y=Dx$ 反演出“最佳”模型 x ,求解算法称为反演算法,其中逆时偏移成像、模型成像以及层析成像属于此类。反问题涉及求解病态方程,常用反演方法有:(1)优化方法,即寻找最佳模型,使其模拟数据在一定范数条件下尽可能接近测量数据,如基于模型成像的求解,此时将反演问题转换为最优化问题^[50];(2)代数方法,将方程 $y=Dx$ 使用级数展开法进行线性化,再迭代求解,如用于层析成像的代数重建技术^[52]。基于波动方程反演的成像方法往往具有高分辨率和高精度的优势,但计算效率也不可忽视,计算时间过长不利于现场的实时测量,甚至可能会影响后续与诊断结果相关的具体决策实施。

相控阵、延迟叠加以及基于概率的成像算法在求解时通常不涉及到复杂的波动方程反演,属于正向算法。相控阵可看作是密集阵列的延迟叠加,二者均仅涉及简单的时移和求和运算,计算效率高,实现简单。概率成像方法背后的物理模型是,损伤距离传感路径越近,则损伤对该传感路径及其散射信号影响越大,使用概率量化这种影响,映射于离散化结构作为网格节点幅值,待融合所有路径后作归一化处理,所得每个网格节点处的图像幅值大小可有效反映该处存在损伤的概率^[53]。该方法计算复杂度为 $O(n)$,因此计算效率高,且在复杂结构中避免了对信号传播历程进行解释。

采用时间反转方法进行成像时,通常须与其他成像算法结合。例如,与延迟叠加成像结合^[37],或与概率成像结合^[54],均属于正向求解。需注意的是,成像前有两种实现时间反转的方式,一种是涉及到两次激励/接收过程的硬件实现方式^[55];另一种是采用传递函数的虚拟软件实现方式^[56]。

5 数据融合

采用稀疏传感器网络的成像算法还涉及到成像融合过程。由于单条传感路径的信号数据中除包含损伤散射波外,还有其他干扰数据,如噪声、边界的多次回波以及其他无关模态波等,融合多条传感路径的图像,可以保留与损伤相关的信息,抑制无关信息,增强信噪比。聚合多角度的散射信息还可以更好地勾勒出损伤全貌^[57]。因此,数据融合处理过程综合考虑了损伤对全局的影响,可减少损伤识别的不确定性、不完整性,从而提高成像的鲁棒性和可靠性。最后,将融合后数值赋予结构对应的所有离散化网格节点当作图像像素值,像素值大小指示损伤存在的概率值。通常有3种数据融合范式,析取、合取和折衷融合,融合后数

据 P 的通用公式可分别表示为^[58]:

$$P = \sum_{i=1}^N p_i - \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{i < j}^j p_i p_j - \sum_{i=1}^{N-2} \sum_{i < j}^{N-1} \sum_{j < k}^N p_i p_j p_k - \prod_{i=1}^N p_i \quad (7)$$

$$P = \prod_{i=1}^N p_i \quad (8)$$

$$P = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N p_i \quad (9)$$

式中, N 为数据总条数, p_i 代表第 i 条路径的感知信息。析取融合可能“悲观地”夸大了损伤的存在可能性,而合取融合可能“乐观地”缩小了损伤的存在可能性。折衷融合则平衡了所有传感路径的贡献,提高了数据鲁棒性和可靠性^[58],但缺点在于有时会出现明显的伪像^[59]。Lu等^[60]在数据融合时结合逻辑运算,消除了边界反射波造成的伪像。Leonard等^[61]提出3种数据均值合成方案,改善了层析成像的重建图像质量。

超声导波诊断成像技术

早期损伤检测中通常采用几何的声源定位方法,包括三角测量法、四点圆弧法等,通过提取飞行时间(Time-of-flight, TOF)组成非线性方程,求解后得到目标声源位置^[62]。此类几何定位法通常得到确定的目标声源特征参数如声源的几何坐标 (x, y) ,与之相比,诊断成像方法使用概率化的图像幅值 $p(x, y)$ 来表征特征参数,例如,当 $p(x_1, y_1) > p(x_2, y_2)$ 时,认为损伤位于 (x_1, y_1) 处的概率大于其位于 (x_2, y_2) 处的概率。考虑真实应用场景下客观的损伤全貌往往无法达到,采用带“概率”含义的损伤识别参数去描述或许更符合检测损伤的本质。

在损伤成像算法中,根据成像算法的求解过程将导波诊断成像技术

分为两类：一类是反演求解；另一类是正向求解。在初期的导波诊断成像技术研究中，研究人员通过借鉴医学影像及地震勘探技术，发展了导波的层析成像和逆时偏移成像等反演算法。此类涉及波动方程的反演算法具有较高的精度，但计算效率有所欠缺。随后研究人员发展了能够用于实时成像的正向算法，如延迟叠加成像和基于概率成像方法，大大提高了诊断效率和灵活性，只是成像精度往往不如反演算法。面对不同的结构特点和损伤形式，除了要权衡成像精度和计算效率，还需要明确各成像方法所采用的模型、适用范围及优缺点，从而选取合适的成像算法。

1 相控阵

相控阵是一种由多个独立换能器元件(通常为 PZT 元件)组成的阵列,可通过电子控制系统实现各元件的精准时序控制,形成新的波阵面,实现缺陷检测^[63]。主要原理是将各单元发射超声波至某聚焦点或扫查方向的波程差转为相位差,相位差再由时序控制弥补,从而控制总声场的声束焦点和轴线。相控阵波束成型可以看作是一种时空滤波过程,由一系列来自不同方向的波经过相移加权后聚焦,使各阵元激励的波阵面发生同相叠加(In-phase stacking),可显著提高信噪比。1940 年代相控阵

技术被开发出来用于雷达定位和跟踪,并很快在声纳技术、医学影像、地震学、海洋学以及工业 NDT 等领域得到快速发展。近年来,基于导波的相控阵成像技术已成功实现了多种结构的损伤识别,包括各向同性金属结构^[44,64-66]以及各向异性复合材料结构^[67-71]。

波束成型基于以下假设:(1)阵列中所有阵元 \vec{S}_n ($n=0,1,\dots,N$)位于同一平面上,并作为点状的全向发射源和接收器;(2)不考虑导波的频散和多模态,波在指定方向上以恒定波速 c 传播^[36]。当检测目标处于近场时,传播波阵面为曲面,此时需要为每个超声元件分配单独的方向矢量 \vec{r}_n ,如图 3 (a)。阵列原点 $\sum \vec{S}_n=0$,在各阵元对波束指向处 $P(r, \theta)$ 的响应 $f_n(t)$ 上首先施加对应的时间延迟 Δt_n ,再乘以权系数 w_n , N 个阵元叠加后成为相控阵输出为 $z(t)$,上述过程可表示为

$$z(t) = \sum_{n=0}^{N-1} w_n f_n(t - \Delta t_n) \quad (10)$$

$$f_n(t) = \frac{A}{\sqrt{|\vec{r}_n|}} e^{j(\omega t - \vec{k}_n \cdot \vec{r}_n)} \quad (11)$$

式中, \vec{k}_n 为波数, ω 为角频率, \vec{r}_n 为阵元 \vec{S}_n 至目标 $P(r, \theta)$ 的方向矢量, A

是目标 $P(r, \theta)$ 处振子的位移振幅。当前阵元 \vec{S}_n 相对于阵列原点的波程差即为 $|\vec{r}| - |\vec{r}_n|$,则时间延迟 Δt_n 为:

$$\Delta t_n = \frac{|\vec{r}| - |\vec{r}_n|}{c} \quad (12)$$

若图 3 (a) 中 $|\vec{r}| \gg |\vec{S}_n|$, 有 $|\vec{r}| \approx |\vec{r}_n|$, 此时认为检测目标处于远场^[72], 每个阵元到目标的方向矢量近似平行, 波阵面可近似为平面, 成为图 3 (b)。经过阵列原点处可以得到一条垂直于偏转方向的伪激励线, 图 3 (b) 可看出伪阵元位置是当前阵元 \vec{S}_n 在伪激励线的投影, 因此 \vec{S}_n 在偏转方向单位矢量 $\vec{\phi} = \vec{r}/|\vec{r}|$ 的投影长度即为 \vec{S}_n 相对于阵列原点的波程差, 根据波程差和传播速度可计算得到时间延迟 Δt_n 为:

$$\Delta t_n = \frac{\vec{\phi} \cdot \vec{S}_n}{c} \quad (13)$$

如果阵列是图 3 (b) 所示的线阵, 则这样的投影过程可解释为将阵列旋转至伪激励线。基于平行射线近似原理, 伪激励线到远场目标的波程一致, 因此所有伪阵元在偏转方向上的波阵面将发生相干涉, 其他形状阵列同理。波束成型后的合成信号再根据波速映射为扫查区域的诊

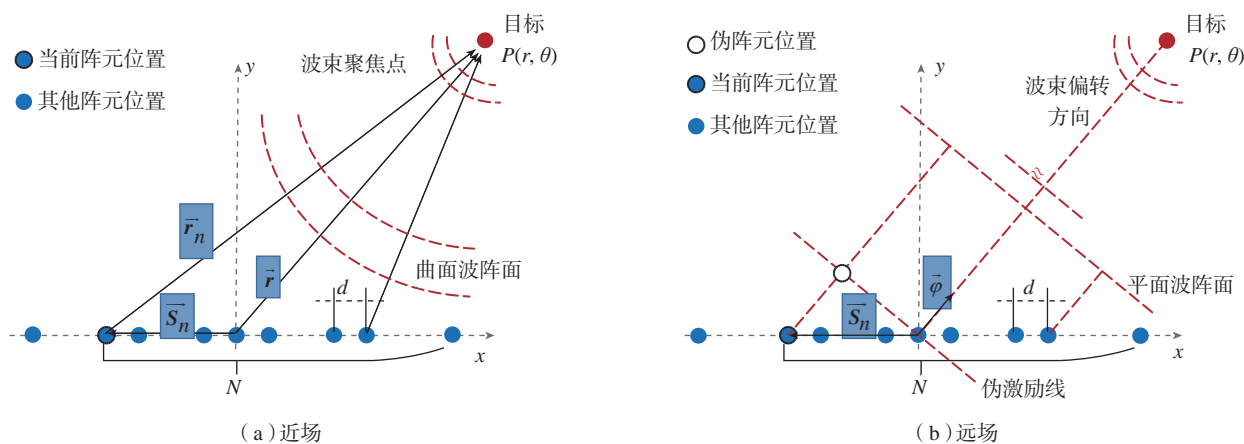


图3 相控阵示意图

Fig.3 Illustration of phased array

断图像。

波束成型方式可分为3种,包括:阵元移动或阵列位置改变的物理波束成型^[64]、模拟电路延迟的电子波束成型^[29]以及数字信号处理的虚拟波束成型^[44,65-71]。第1种物理波束成型技术的灵活性较差,后两种是常用的波束成型技术。电子波束成型在各阵元上针对每个偏转方向独立地延迟,再被同步激励,并遍历所有偏转方向,因此聚焦效果最强,信噪比最高。而在虚拟波束成形中,通常是一个阵元激发,所有阵元接收,重复以上操作,完成遍历所有阵元的全矩阵采集(Full matrix capture, FMC)。虚拟波束成形避免了昂贵且复杂的硬件系统,如电子移相器或脉冲移位器和多路复用器等,且每个阵元每次仅需激励一次,大大减少了扫描时间。

采用虚拟波束成型方法, Giurgiutiu等^[44]开发了一种线型相控阵,嵌入式超声结构雷达(Embedded-ultrasonics structural radar, ESR),可以实现 $0^{\circ}\sim 180^{\circ}$ 的大面积损伤探测。对于各向同性结构,若阵列元件表面激励均一旦所有元件频率响应一致,远场处由全向声源阵列产生的位移场可认为是平面波阵面^[73]。而对于各向异性结构,尤其是多层复合板,不能再将声源视为全向型,但解析计算分析和有限元模拟结果表明,点状声源传播在远场中仍为平面波阵面^[74]。基于上述, Leleux等^[71]使用相控阵探头在带加筋肋的碳环氧复材板上检测损伤,激励0.5MHz(12周期) S_0 导波模式,控制波束探查方向,成功识别出板的结构特征(边缘、加筋肋、制孔)及撞击损伤并定位,最大定位误差为 $\pm 10\text{mm}$ 。各向异性复合材料的慢度(速度的倒数)与角度相关, Yan和Rose^[69]认为非圆形的慢度图(Slowness map)导致波矢方向与能量流方向不一致,可能会引起严重

的偏斜效应,进而影响导波相控阵的声束转向性能。选择具有准各向同性性质及其邻域的导波模式可抑制各向异性影响,后续试验中 Yan等^[69]使用相控阵分别在 $[(0/90)_s]_2$ 和 $[(0/45/90/-45)_s]_2$ 两种铺层形式的碳纤维环氧复合材料板上实现了损伤诊断成像。Vishnuvardhan^[67]和Rajagopalan^[68]等发展了频域相位叠加的相控阵算法,采用一种单发多收(Single transmitter multi-receiver)的环形阵列,针对准各向同性石墨-环氧树脂复合材料板的撞击分层损伤和复合材料层合板的钻孔损伤均取得良好检测效果。然而上述方法均仅限于探测无严重偏斜角的方向。Tian^[75]和Yu等^[76]考虑了偏斜效应,允许在各向异性复合材料中形成相控阵波束,并通过非接触式的SLDV系统实现了CFRP复材板中多损伤的相控阵诊断成像,使用SLDV可以看作是对物理波束成型方式的发展。

为保证损伤诊断准确性,提高波束成型质量,工作集中于优化波束指向性^[73],研究内容包括:

(1)最小化主波束(主瓣)宽度,主瓣方向的宽度会影响最终损伤图像的分辨率,主瓣越锐利,意味着能量更精确地集中于偏转方向,周向分辨率就越高;

(2)消除栅瓣,栅瓣是除偏转方向外其他方向上出现的强次级信号,会导致图像出现重影,应完全消除;

(3)抑制旁瓣,出现旁瓣表明超声能量向除偏转方向以外的方向发生了泄漏,应尽可能抑制旁瓣。

通过调整以下参数可以优化波束指向性^[77-78]:阵列形状^[65,79-81]、阵元直径 D (由阵元个数 N 与阵元间距 d 决定,通常与波长 λ 一同考虑,用 D/λ 表示)^[72]、幅值权重 w_n ^[82-85]等。通常,增加阵元直径 D (线阵时称为孔径),会提高远场分辨率,进而改善成像效果。然而增加直径 D 将导致近场区域扩大。因此,阵元直径

D 作为一个关键参数,一般须根据结构类型和关键缺陷位置来仔细选择。另外,由于 SH_0 具有非频散特性,是近年来研究热点, Huang等^[86]采用全向SH波压电元件实现了 SH_0 相控阵高分辨率成像,成功识别了直径2mm的通孔损伤。

2 空间-波数滤波器

波数是在传播方向上单位长度内的波长数量,即波动的空间频率,包含了波动的传播速度、方向和波长等物理信息。采用空间-波数滤波器,当滤波器波数谱的方向与目标声源波数谱的方向一致时,声源的阵列空间采样信号可以通过,否则无法通过,此处考虑声源处于远场(图3(b))^[45]。针对近场盲区,刘彬^[87]优化空间-波数滤波器的权重,在近场损伤识别情形下取得良好效果。

通过空间-波数滤波器可以对结构上的空间波场提取特定波数信息^[35,88-90]。Yu等^[89]使用SLDV,结合空间-频率-波数联合分析方法,获取由损伤引起的反射波、透射波以及模态转换波。由于空间-波数滤波器是在波数域中解构信号,因此具备分离特定波数模态、提取微弱散射信号的能力,还能够有效抑制复材结构由各向异性引起的模态混叠现象^[70,90-92]。在复合材料结构上, Sohn等^[90]用SLDV获得空间波场后,从波场中用空间-波数滤波器分离出损伤引起的驻波成分,成功识别分层和脱粘损伤。Michaels等^[91]使用空间-波数滤波器从全波场信息中去除了入射波场,并分别提取 A_0 和 S_0 模态的损伤散射波场。然而SLDV不适用于实施现场的在线监测,为此,研究人员发展了基于压电阵列的空间-波数滤波损伤成像方法^[70,93-95]。王瑜等^[93]改进了空间-波数滤波器,使用线型压电阵列获得损伤的角度-时间诊断图像。在对声源成像时,采用空间-波数滤波器仅能获得声源的角度或方位信息,与相控阵类

似还需借助波速或布置多阵列才能实现距离定位。在飞机复合材料油箱上, Qiu 等^[95]布置十字压电阵列实现了损伤成像和定位。类似相控阵的波束指向性问题, 研究人员还研究了基于空间-波数滤波器压电阵列的波束优化方法^[96-97]。Engholm 等^[96]提出了基于空间-波数滤波器的最小方差无失真响应波束成形 (Minimum variance distortionless response beam forming, MVDRBF) 方法, 模拟和试验结果验证了该方法能够抑制导波多模态, 减小旁瓣, 提高成像分辨率。此外, Qiu^[17]和 Ren 等^[18]使用空间-波数滤波成像方法分别实现了对单撞击源和多撞击源的在线监测。

3 逆时偏移成像

逆时偏移成像 (Reversal-time migration, RTM) 源于石油勘探和地球物理学等领域^[98], Lin 等^[47,99-100]等将 RTM 应用于板结构的损伤检测, 数值模拟和试验结果表明 RTM 能够准确评估单个或多个微小损伤的位置及严重程度。RTM 基本原理是: 根据惠更斯原理, 将散射波场逆推偏移 (与时间反转概念类似) 至损伤作为次级波源发出散射波的时刻, 此时空间波场的振幅、相位等特征信息, 将为损伤评估提供有效依据。RTM 包括 3 个步骤^[47,99-100]:

(1) 从激励源外推生成前向波场。材料属性和结构信息作为先验知识, 利用激励信号, 根据波动方程在每个时间步和网格点上生成前向的波场并存储为外推的入射波场。

(2) 根据散射信号外推生成散射波场。首先将传感器所获取的散射信号在时域上反转, 分配至每个传感器上重新激励, 随后在每个时间步和网格点上作为波动方程的边界值条件, 生成反向的波场, 最后存储为外推的散射波场^[101]。此步骤类似于时间反转法, 可以自适应补偿导波信号的频散效应。

(3) 应用成像条件对损伤成像。有多种成像条件用来确认损伤引起散射的发生时刻, 常用的激励时刻成像条件的定义为^[47,99-100]: 入射波场遇到损伤边界的同一时刻产生散射波场, 因此在这两个波场时间相同、相位一致之处就是损伤边界位置。

前两个步骤中入射波场和散射波场均可通过模拟或波动方程实现外推偏移。外推算法中的数值方法可分为 3 类: 有限差分法, 求和法和变换法^[100]。除选取激励时刻, 还可以采用最小熵原理^[102]和零延迟互相关^[101,103]等作为成像条件, 获取空间波场的缺陷信息。

时间偏移过程可以在堆叠图像之后完成, 称为叠后 RTM, 若在堆叠之前完成偏移过程则称为叠前 RTM。早期方法主要应用叠后 RTM, 但叠后 RTM 缺点是仅能精确识别具有小倾斜角直至与阵列水平的损伤^[104]。为兼顾其他倾斜角的损伤, 研究人员发展了叠前 RTM, 并通过数值模拟和试验验证了该方法的有效性^[100,105]。在 RTM 过程中考虑材料各向异性带来的影响, RTM 也可应用于复合材料的损伤成像^[102,104-106]。其中, 通常用 Mindlin 板理论近似复合材料板结构中波传播的波动方程, 将损伤处设为非均匀区域, 降低损伤区域的弯曲刚度和横向剪切刚度, 模拟波传播时遇到分层损伤的散射行为^[102,104-106]。

由于 RTM 需捕获波场信息, 因此传感器阵列中两个相邻阵元间距应小于激励波长的一半, 以满足空间奈奎斯特采样率。实际应用中可通过适当的插值获取无传感器位置的散射场, 既减少传感器密度, 也能一定程度上保证成像分辨率^[100,105]。用激光多普勒测振仪采集波动场信息是一种替代方案^[107], 但用于在线监测的现场实施有一定困难。

4 时间反转技术

时间反转 (Time reversal, TR)

是基于波动方程的时反不变和空间互易原则^[108]。互易原则意味着对于每个由声源发射, 被不均匀介质反射、折射或散射的波, 理论上都存在一组能够精确回溯所有这些复杂路径的波, 并与原始声源同步。Ing 等^[46]基于该原则研制了密集阵列组成的时间反转镜 (Time reversal mirror, TRM), 用于聚焦传播的超声信号, 提高了传感信号的信噪比, 减少了有限结构边界的杂散反射效应。TRM 可以应用于检测异常反射, 特别是医学成像领域。在导波领域中, 最初时间反转技术是作为一种信号处理工具引入的, 用以补偿导波频散引起的信号失真现象, 提高导波信号的质量^[46,109-110]。当导波在介质中传播时, 波包中速度快的频率分量先达, 速度较慢的后达, 导致接收信号在时域中相对于激发信号加宽, 峰值减小。在 TR 过程中, 接收信号先在时域中反转 (即频域中取共轭), 然后从接收位置重新发射。反转后, 初次激励 / 接收过程中速度慢后达的波分量在第 2 次激励 / 接收过程中将首先到达初始激励位置。因此, 波包中所有以不同速度传播的分量将在初始激励位置精确回归并同时收敛, 从而减弱信号失真, 补偿导波的频散效应^[111]。

由于 TR 过程中无需结构先验知识和基准信号, 因此还被当作逆推工具, 用于导波损伤检测^[55,112-113], 其中 TR 实现通常涉及两次激励和接收过程^[114]。首先, 一个传感器 A 激励出信号 $f(t)$, 导波在结构传播, 并由另一个传感器 B 接收, 记为 $v(t)$ 。然后, 将接收到的信号在时间上反转, 记为 $v(-t)$, 重新发送到传感器 B 作再次激励。最后, 对比 A 接收到的重构信号 $f'(t)$ 与原始激励 $f(t)$ 的一致性。当传播路径或其附近有缺陷时, 非线性被引入 TR 过程, 线性互易原则遭到破坏, 因此 $f'(t)$ 与 $f(t)$ 出现偏差, 否则二者应保持一

致。由于复材结构中的分层损伤容易引入非线性,因此TR技术成为无基准复合材料NDT/SHM的有效手段^[55,113,115-118]。在TR过程中影响重构信号准确度的因素有多种,包括激励信号类型、激励模态、结构边界影响等内容^[55,112,119-120]。为提高TR信号的聚焦能力,Poddar等^[121]和Agrahari^[122]研究了诸如频率、脉冲带宽、传感器尺寸、粘接层厚度、板厚等多个参数,这些实施TR过程中所涉及到的参数会影响重构信号的质量。

复合材料结构上通常带有加筋肋、隔框等非对称型结构特征,导波在其中传播时容易发生模态转换,又由于能量耗散现象,散射信号往往振幅较小,常容易被边界反射、噪声等干扰所淹没。将损伤当作二次散射源,由互易原则,各传感器发出的TR信号能够同时到达散射源处,同相叠加,形成自适应聚焦,而非散射源处无法聚焦。由于具备聚焦能力,TR能有效提高复合材料结构中散射信号的信噪比。结合其他成像方法,近年来研究人员发展了基于TR的复合材料结构诊断成像技术^[37,102,117-118,123-126]。TR过程有两种实现方式,一种是硬件,一种是软件。硬件实现中传感器需轮流激励-传感,两次激励/接收过程增加了检测时间。Watkins等^[120]提出了一种改进的TR方法,对于任何信号路径,激励器始终作为激励器,而传感器始终作为传感器,相比传统TR提高了检测效率。在一块对称交叉铺层的碳-环氧复材板上,Watkins等^[120]用改进TR方法有效评估了不同严重程度碰撞损伤。TR的软件实现方法又被称为虚拟时间反转方法(Virtual time reversal, VTR),VTR能降低TR的操作复杂程度,并提高检测效率。Wang等^[127]提出一种VTR方法,用时间延迟代替了时间反转的“先达后发、后达先发”原则,再将

延迟后的信号叠加实现聚焦,之后Michaels等^[49]将其进一步发展为延迟叠加(Delay and sum)成像方法。Liu等^[117]提出一种使用传递函数的新VTR方法,结合基于概率的损伤检测重构算法,对CFRP复材板中的分层损伤实现了诊断成像。

5 延迟叠加成像

延迟叠加(Delay-and-sum, DAS)是一种经典有效且应用广泛的损伤成像算法。最初Wang等^[127]提出一种合成时间反转成像方法,用时间延迟代替时间反转中“先达后发、后至先发”原则,再将延迟后的信号叠加实现聚焦。Michaels等^[49,128-130]扩展了Wang等^[127]的方法,将其进一步发展为DAS成像方法。

损伤在散射信号 $S(t)$ 中显示为波包,其飞行时间 τ_p 取决于从激励器到损伤处再由损伤处到接收器的距离之和。如图4(a)所示,第 i 条路径相对于损伤 (x, y) 处的导波飞行时间 τ_p 为:

$$\tau_p(x, y) = \frac{\overline{D_{Ai}} + \overline{D_{is}}}{c_g} \quad (14)$$

式中, c_g 是导波模态的群速度, $\overline{D_{Ai}}$ 是成像点 (x, y) 到激励器 A_i 的距离, $\overline{D_{is}}$ 是成像点 (x, y) 到传感器 S_i 的距离。如果在时域中波包的时域平移量等于飞行时间 τ_p ,它将完全反向传

播到时域激励起点,如图4(b)。对于图4(a)其他非损伤处,如 $p^o(x, y)$,由式(14)求得波包时域平移量 τ_{p^o} ,反向传播 τ_{p^o} 后,波包将滞后于时域激励起点, $p^s(x, y)$ 则相反。满足精确反向传播的损伤轨迹是一个椭圆,激励器和接收器是椭圆的两个焦点,如图4(a)。融合 N 条路径,图像幅值 $P(x, y)$ 由各路径散射信号在飞行时间处的幅值叠加得到

$$P(x, y) = \sum_{i=1}^N S_i(\tau_p(x, y)) \quad (15)$$

上述原理与椭圆三角定位类似,因此DAS成像方法有时也被称为椭圆成像方法。需注意的是,椭圆三角定位依赖于两个不确定参数,即波速和飞行时间,而DAS成像方法中飞行时间由式(14)计算,减少了提取飞行时间时的误差不确定性。

DAS仅需在结构上布置稀疏传感器的网络,且算法简单,计算效率高,具备在实时监测中快速定位损伤的优点,有着广泛研究和应用。但这些优点也伴随着成像性能上的短板,由于DAS仅简单地融合信号时域特征,导致重建图像容易出现光斑大,信噪比差及伪像严重等问题^[131]。为解决上述问题,研究人员开发了将单点TOF振幅替代为时间窗内信号能量作成像幅值^[128],时域信号加窗^[129],融合多频率图像^[49],加

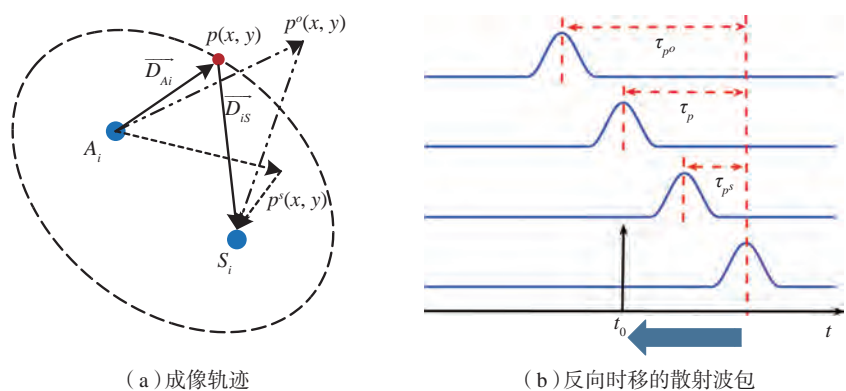


图4 DAS成像原理

Fig.4 Principle of DAS imaging

入边界反射波信息^[132]及使用匹配追踪补偿多模态信号频散^[133]等多种改进算法,抑制噪声或不必要边界回波的干扰,从而改善成像质量。Croxford^[134]和Lu等^[135]引入双曲线算法,两个接收传感器成对,分组接收同一个激励源的散射信号后作互相关,损伤落在由恒定时间差形成的双曲线轨迹上,以此获得更多路径信息,提高定位精度。提取散射信号时环境变化的影响不应忽视,为此科研人员还研究了温度^[130,136]、应力^[137]等环境条件变化时使用DAS诊断成像时的补偿策略和方法。Yu等^[138]通过弹性动力学有限积分模拟方法和试验展示了DAS算法定量裂纹损伤的能力。另外,最小方差(Minimum variance, MV)成像作为DAS成像的一种重要变种形式,可以大幅度减少伪像问题^[139-141]。这种自适应算法与相控阵中变迹(Apodization)的原理类似^[82],其引入反比于成像点与激励源及成像点与传感器两个距离间的乘积,作为视向矢量,通过矩阵求逆,得到能显著抑制图像伪影的最佳权重,但需特别注意MV算法对模型误差的敏感性^[139],图5^[139]为原始数据相同时分别使用传统DAS算法与MVDR算法所得成像结果的对比。

针对各向异性复合材料结构,DAS算法中在计算延迟时间时需

考虑传播时群速度的角度相关性,即慢度图,数值模拟和试验研究结果表明当所选模式及其对应的慢度图已知时,该方法可实现损伤的准确定位^[27,37,131,136,142-145]。Qiu^[146]和Shan^[147]等通过将结构划分为多个子区域,开发多损伤监测策略和流程,证实了DAS算法同样适用于复杂结构上的多损伤情况。Qiu等^[37]使用Shannon连续复小波变换提取窄带信号,根据慢度图修正DAS算法,对碳纤维层合板结构进行撞击损伤监测和定位。根据导波在空心球体和圆柱体中的传播理论,Yang等^[148]采用坐标变换改进DAS算法,对储氢容器的圆柱箱体区域和顶盖区域的损伤实现了有效定位。

6 模型成像

导波在传播过程中,遇到结构边界、加筋肋、损伤等不连续处会发生散射,根据相互作用方式可能有反射、透射、折射和衍射等现象,对上述过程建立传播-散射模型。根据模型可以生成包含散射信号的字典库,并作为模型数据库。数据库中包含结构中每个位置点作为潜在散射源时的模拟散射信号,与测量数据中的散射信号比较或计算,得到每个位置点作为散射源的概率大小,融合生成诊断图像,上述成像过程称为基于模型成像^[149]。该成像技术使用互相关^[150-151]、反卷积^[152]以及稀疏重

建^[50,153-154]等方法进行求解。其中应用较广泛的是稀疏重建方法,该方法基于近年来信息领域重要成果-压缩感知理论^[155-156]。

下文以稀疏重建的求解方法为例,简述基于模型的导波诊断成像过程。首先通过波的传播-散射模型建立字典库 D 。假设 $D\{x(t), T, p, R\}$ 为波的传播-散射模型函数,结构离散化为 M 个网格点,结构上布置传感器网络,共有 N 条传感路径。选择其中一条传感路径 T_i-R_i ,现有一个激励波形 $x(t)$,从结构上的激励点 T_i 处被激发,传播至某一潜在散射源点 p_j 处,经散射再传播至接收点 R_i 后生成的波形为 $D_i\{x(t), T_i, p_j, R_i\}$ 。假定传感路径 T_i-R_i 真实的散射信号是波被所有 P 个网格点上潜在散射源散射后波形的线性叠加,即

$$y_i = \sum_{j=1}^M x_j D\{x(t), T_i, p_j, R_i\} + e_i \quad (16)$$

其中, y_i 表示真实测量散射信号; x_i 为图像幅值,代表潜在散射源的概率大小; e_i 为噪声或误差项。进一步将 N 条传感路径组合成一个线性方程组为

$$y = Dx + e \quad (17)$$

式中, $y \in \mathbf{R}^N$, $D \in \mathbf{R}^{N \times M}$, $e \in \mathbf{R}^N$ 。通常传感器网络是稀疏的,因此有 $N < M$,即该线性方程组为欠定的。此类欠采样问题可加入先验信息如稀疏假设进行求解,进而完成图像重建。稀疏假设认为正常服役条件下的结构,大部分区域是无损伤的,仅有少量离散位置出现损伤^[50]。采用该假设的稀疏重建主要有两种求解方法^[50]:迭代贪心算法和 l_1 范数优化求解。最小化 l_1 范数要比迭代贪心算法有更好的重构性能^[50],这里选择基于 l_1 范数优化的基追踪降噪(Basis pursuit denoising, BPDN),形式为:

$$\min_x \|y - Dx\|_2^2 + \lambda \|x\|_1 \quad (18)$$

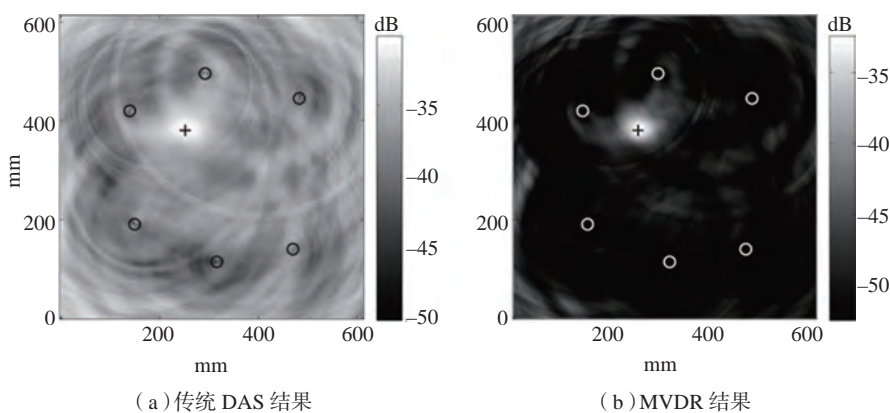


图5 DAS成像结果
Fig.5 Results of DAS imaging

式中, $\|x\|_1 = |x_1| + |x_2| + \dots + |x_M|$, λ 是正则化参数。BPDN 将模型转化为二次规划问题, 求解 x 可得到重建结果。为简化模型, 通常假定散射体是点散射源^[50]。Levine 等^[131] 将模型中散射体建模为点散射源线性组成的微小缺陷, 提出使用分块稀疏重建方法减少伪像, 提高多损伤情况的诊断能力, 该方法在复合材料结构上取得良好效果。Hua 等^[157] 在建立字典库时将模型中点散射源扩展为占据一定物理范围的损伤散射源, 基于扩展的字典库提出了一种改进的稀疏重建成像方法, 复合材料结构损伤检测试验结果表明, 改进方法提高了成像性能, 同时可定量评估损伤轮廓。Xu 等^[158] 使用加权稀疏重建方法, 有效减少了图像边缘的伪像。

建立合理精确的传播-散射模型, 生成准确的字典库, 有助于生成准确的成像结果^[159]。为此, 研究人员建立了考虑频散特性^[160]、多模态^[161]、多频率^[162]、多径信号^[152,163]、幅值调制^[164]、模态转换^[165] 以及环境操作条件 (Environmental and operational conditions, EOC)^[166] 等因素的模型字典库。基于模型成像的计算复杂度通常较高, 计算效率远不如 DAS 算法^[149]。Nokhbatolfighahai 等^[167] 提出一种基于结合稀疏重建和 DAS 的算法, 旨在提高计算效率、成像准确度和分辨率, 数值模拟和试验结果表明该方法在多损伤情形下尤其有效。

7 层析成像

计算机层析成像 (Computerized Tomography, CT) 技术能够对材料内部组成分布实现可视化检查。“Tomography”一词源自希腊语, 其中“tomo”表示切片, “graphy”表示图像^[168]。CT 技术的基本思想是: X 射线通过体内组织的能力不同, 更容易通过密度小的软组织, 而遇到密度大的组织会被稍稍阻挡 (“衰减”), 反演求解组织密度与投影数据的模

型可以得到切面上密度分布的图像, 从而显示出密度异常的组织。层析成像的数学基础, Radon 变换, 由 Radon 于 1917 年证明^[169]。CT 技术经 Hounsfield^[170] 成功实现后, 迅速在医学临床上得到广泛应用, 随后又被扩展至地球物理勘探^[171] 和工业 NDT^[172]。导波层析成像技术类似于医学 CT, 仅把媒介 X 射线替换成导波^[173]。在该方法中, 通常在待测区域包围线 (图 2 (b) 虚线) 上密集布置传感器, 其原理是将导波的 TOF (或能量衰减) 作为投影数据, 再与传播路径和结构的声速参数 (或能量吸收参数) 分布组成模型方程, 求解后可对结构损伤情况进行评估^[174-175]。

在初期导波层析成像应用中, 多直接引入医学 CT 的求解方法, 其理论依据为傅里叶切片定理^[176]。20 世纪 90 年代初, Hutchins^[177] 和 Levent 等^[178] 分别使用平行束投影技术, 通过所提取 A_0 模态的 TOF 变化来重构板结构缺陷。Jansen 等^[179] 分别将导波信号的 TOF 延迟和能量衰减当作投影数据, 对复合材料结构的分层损伤实现了层析成像。然而, X 射线波长范围在 0.01~10nm 之间, 其在物体内部以直线传播, 比导波在结构中传播规律简单得多。这种直射导波层析成像仅在缺陷特征尺寸大于波长 λ 时适用, 忽略了波场衍射和折射的影响^[174]。Malyarenko^[180] 引入弯曲射线追踪方法, 适用导波发生强散射的情形。对于可用射线层析成像进行重建的最佳目标, Williamson^[181] 证明了其尺寸近似为第一菲涅尔区的宽度 $\sqrt{L/\lambda}$, 其中 L 是激励器到传感器的直接路径长度。射线层析成像的重建方法是以代数重建技术 (Algebraic reconstruction technique, ART)^[182] 和同步迭代重建技术 (Simultaneous iterative reconstruction techniques, SIRT)^[51] 为代表的迭代法。

采用射线假设, 是对波场方程

作高频近似^[180]。复合材料结构的早期缺陷尺寸通常较小, 缺陷在投影方向的尺寸并不大于低频导波的波长, 采用射线假设将会出现较大误差。Mindlin 板理论可在低于 A_1 模态截止频率下准确表征 A_0 模态^[103,183]。结合 Born 近似, 研究人员利用 Mindlin 板理论发展了板结构中导波的散射模型, 为基于波动方程反演的衍射层析成像方法 (Diffraction tomography) 打下了理论基础^[183-184]。基于上述理论, Rohde 等^[185-186] 在计算机模拟和试验中验证了该方法的有效性。Chan 等^[187] 进一步通过数值模拟和试验证实了衍射层析成像方法能够有效评估复材板结构的分层损伤。根据远场波束成型与衍射层析成像之间的关系^[188], Belanger 等^[189] 开发了一种无基准导波衍射层析成像方法。由傅里叶衍射定理^[176], 通常使用滤波反投影 (Filtered back-projection, FBP) 算法和傅里叶插值法^[176] 求解衍射层析的重建图像。从导波层析成像的实际应用角度出发, Zhao 等^[175] 对比了层析成像中 FBR 和 ART 求解算法在重构图像质量和效率等方面的差异。Zhao 等^[175] 指出 FBR 须配置圆形环绕的传感器阵列, 要求数据量多且投影角度完整, 否则将出现更多伪影, 而 ART 对数据量和投影角度要求不如 FBR 苛刻, 且在噪声干扰情况下性能更优, 但主要缺点是求解过程需要迭代, 导致计算速度较慢。

结合衍射层析和射线层析, Huthwaite 等^[190] 提出了一种鲁棒性胸部超声层析成像的混合算法 (Hybrid algorithm for robust breast ultrasound tomography, HARBUT), 针对板结构中尺寸小、对比度高的缺陷, 通过迭代 HARBUT 进而提高重建精度。另外, 为提高求解效率, 或受实际应用制约, 传感器数量和投影角度可能不足, 导致投影数据处于欠采样状态。通过扩展

HARBUT^[191-192],或开发结合压缩感知的层析成像方法^[193],均可以补偿欠采样引起的混叠,从而提高诊断图像的鲁棒性和准确度。

8 概率成像

之前的几种算法通常需要导波在结构中传播的先验知识,如导波传播的模式、该模式传播的群速度、慢度图以及 TOF 等,由于理论近似误差或噪声干扰,这些先验知识与实际导波传播过程的先验知识有一定程度上的偏差^[62],这种偏差造成的不确定性将影响诊断成像的效果。然而真实结构(尤其是复合材料结构)的复杂性导致超声导波的传播趋于复杂,回波信号难以解释。为此,研究人员提出了一种基于概率的损伤检测重构算法(Reconstruction algorithm for probabilistic inspection of defects, RAPID)^[194-195]:

(1)引入信号损伤指数(Damage index, DI)来表征损伤引起的信号变化程度,通常对基准信号和当前状态之间的信号差异进行量化得到。当某条传感路径距离损伤越近时,则损伤引起的该路径 DI 越大,反之当传感路径距离损伤越远,则损伤引起的该路径 DI 越小;

(2)引入空间概率分布函数 $W[R]$ 作为路径加权函数,用来表征损伤对传感路径的影响程度,传感路径与损伤的相对距离 R 越近,该传感路径受影响越大,则该路径在成像融合时的权值 $W[R]$ 越大,反之当传感路径与损伤的相对距离 R 越远,该路径的权值 $W[R]$ 越小。

综合信号损伤指数 DI 和路径加权函数 $W[R]$ 二者的影响, RAPID 公式表示为:

$$P(x, y) = \sum_{i=1}^N p_i(x, y) = \sum_{i=1}^N DI_i W_i [R_i(x, y)] \quad (19)$$

式中, N 是总路径数; DI_i 是第 i 条传感路径的信号损伤指数; $W_i [R_i]$ 是第

i 条传感路径对应的非负路径加权函数,代表第 i 条传感路径受损伤影响的范围。此处将 $W_i [R_i]$ 定义为随成像点 (x, y) 与第 i 条传感路径的相对距离 R_i 线性递减的路径加权函数,表示为:

$$W_i [R_i] = \begin{cases} \frac{\beta - R_i}{\beta - 1}, & R_i < \beta \\ 0, & R_i \geq \beta \end{cases} \quad (20)$$

$$R_i(x, y) = \frac{|D_{Ai}| + |D_{iS}|}{|D_i|} \quad (21)$$

其中, D_i 是第 i 条传感路径中激励器 A_i 到传感器 S_i 的距离, $\overline{D_{Ai}}$ 是成像点 (x, y) 到激励器 A_i 的距离, $\overline{D_{iS}}$ 是成像点 (x, y) 到传感器的距离(图 6(a))。 $W_i [R_i]$ 的等值线是一组以激励器和传感器为焦点的椭圆(图 6(b))。 $W_i [R_i]$ 也可以选用其他影响形式的函数^[56,117]。

以各条路径 DI_i 值乘加权函数的形式融合得到成像点 (x, y) 的幅值,幅值越高,代表出现损伤概率的越大。尽管并非严格意义上的概率值,但归一化后可有效衡量损伤存在的概率情况。很多文献中将它称为基于概率成像(Probability-based diagnostic imaging, PDI)方法,或者加权分布诊断成像方法^[12,196]。此外,也有文献将 RAPID 视为层析成像(Tomography)的一种快速实现方

法^[197-198]。 RAPID 在成像过程中无需导波在结构中传播的先验知识,同时避免了对真实结构中复杂时间历程的解释,计算效率高并且适合自动处理,能够有效识别复材等各种复杂结构上的损伤^[117,118,199-201]。此外, RAPID 技术还显示了识别飞行器管路截面损失^[202-204]和多损伤^[205]的潜力。

为取得良好诊断效果,研究人员进行了一系列深入研究,相关研究结果表明传感路径布设、路径加权函数、激励中心频率、信号损伤指数 DI 及数据长度等是影响 RAPID 技术识别效果的重要因素^[53,195,198,206-207]。其中,在不同应用场景下如何选取对损伤敏感的 DI 至关重要。为此,除了常用的信号相关指数^[194-195,206],国内外学者还发展了多种 DI^[11,12,201],包括信息熵^[199,206]、信号分形维数^[197]、信号能量差异^[208]等。另外, RAPID 技术的定位精度受传感路径布设和路径加权函数这两种因素综合影响(式(19))。 Michaels^[209]指出当传感路径过少时,与同等条件下 DAS 算法相比, RAPID 的诊断性能、抗噪能力会明显下降,并认为应用 RAPID 时需要布设足够多的传感器,如 8~16 个传感器。更多的传感器,意味着更多的传感路径,布置纵横交错的路径可以更好地满足传感器网络覆盖密

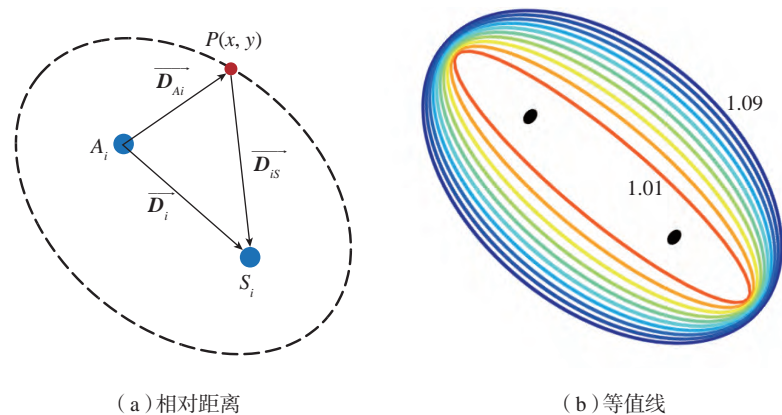


图6 RAPID算法示意图
Fig.6 Illustration of RAPID algorithm

度要求。但过多的传感路径又会增加数据传输、采集和处理的负担,同时与在线测量系统轻量化小型化的目标相背离。为此,Wang等^[53]提出一种虚拟路径(Virtual sensing paths)方法来增加路径数量,旨在提高定位精度。同时,Wang等^[53,206]还观察到在多路径交叉点或传感器位置处容易出现“伪损伤”。Sharif-Khodaei等^[143]在使用RAPID算法对一块复材板上进行缺陷诊断时也遇到了类似情况。关于这个困扰RAPID技术的“伪损伤”问题,Liu等^[12]指出,在数据融合过程中,多路径交叉点的权值会显著高于待测区域其他成像点的权值,因此同样的损伤指数变化下,诊断成像时映射到该点的几率更大。为此,Liu等^[12]引入了同时考量传感路径与路径加权函数影响的单位权值分布函数,并提出一种路径加权函数的优化选择方法,有助于降低选取参数时对人工经验的依赖。在此基础上,Liu等^[196]提出一种权值补偿的加权分布诊断成像方法,在不增加传感器和传感路径数量前提下,补偿路径交叉点与其他成像点的

权值差异,尽可能抑制“伪损伤”对成像结果的影响,加筋肋复合材料板上的损伤诊断试验结果表明该方法能有效提高定位精度。

9 成像技术对比

上述8种导波损伤诊断成像技术的特点及优缺点比较见表1。通常对于不同的结构形式,应在综合考虑传感器可布置区域、待测损伤与导波作用方式及各成像方法优缺点等方面的基础上,选择合适的成像方法进行研究和应用。

主要挑战和发展方向

基于超声导波的NDT/SHM技术在近年来取得了长足的进步,超声导波诊断成像技术作为其中一项重要研究热点,涉及到超声导波技术多方面内容,包括导波传播理论和数值求解^[210]、传感器激励问题^[211-212]、模态选择与频散补偿方法^[133]和先进导波信号处理技术^[213]等,是超声导波技术的应用集大成者,但在真实飞行器结构上得到更广泛应用,仍面临不少问题。近年来,波动理论与建模方法、计算机信息科学、自动化等

技术的飞速发展,为超声导波诊断成像技术带来了新的契机。超声导波诊断成像技术在今后可能面临的挑战及其对应的发展方向概述如下:

(1)应用对象方面。在飞行器结构中,除板、管外,桁条^[210,214]及起落架^[215]等也可作为波导结构。针对此类复杂波导结构问题,还需从理论方法、数值模拟、试验研究等方面求解导波传播问题,为高质量成像奠定基础。

(2)成像算法实现方面。真实飞行器结构不仅几何形式复杂,且待测区域面积大,现阶段单一的导波诊断成像方法往往难以兼顾计算效率和成像精度。需融合多种成像方法,在效率和精度二者之间寻找平衡点,开发能够快速完成检测且提供高质量图像的混合诊断策略。

在飞行器结构的真实服役环境下,力热振噪等因素对导波信号和诊断成像效果的影响不可忽视。发展无基准成像方法和带环境补偿的成像方法是两种可行的解决途径,部分相关研究已在实验室环境中取得良好效果^[118,137],但在工程真实环境下

表1 基于超声导波的不同损伤诊断成像技术

Table 1 Damage diagnostic imaging approaches based on ultrasonic guided waves

技术	传感器布置形式	适用散射信号特征形式	适用范围	优点	缺点
相控阵	密集阵列	反射	简单结构	具备聚焦能力,高精度	前处理硬件复杂,需保证时延剖面精确度
空间-波数滤波器	密集阵列	反射	简单结构	波数域处理	计算复杂,涉及多域转换
逆时偏移成像	密集阵列	反射	简单和复杂结构	消除频散效应,适用多损伤	需结构先验知识及保证波场采集完整性
时间反转成像	密集阵列或稀疏网络	反射,透射,折射,模态转换	简单和复杂结构	具备聚焦能力,适用无基准方法	依赖时反算子稳定性
延迟叠加成像	稀疏网络	折射	大面积结构	算法简单易实现,无需提取 TOF	依赖波速,受环境影响大
基于模型成像	稀疏网络	折射	简单和复杂结构	适用多损伤,受外部环境因素小	依赖于模型建立合理性,涉及反演求解时计算效率低
层析成像	密集网络	透射,折射,衍射	结构热点区域	高精度	工程应用有局限,反演求解计算用时长
基于概率成像	较密集网络	折射,模态转换	复杂和 大面积结构	算法简单,无需提取 TOF 和 结构先验知识	成像效果与参数选择相关,成像精度受传感器网络密度影响

还有待验证。这两种途径的实现能够降低误报率、漏报率,提高导波技术的工程适用性。

此外,随着复合材料结构在航空航天领域呈现规模化应用趋势,其材料物理参数和损伤类型的多样化使导波成像技术面临新的挑战。在大数据和人工智能快速发展的时代背景下,要提高导波诊断成像技术的诊断精度和诊断规模,可以结合统计学习与模式识别等人工智能方法,挖掘缺陷与信号特征联系,构建数据与图像间多层级的机器学习模型,不断提高模型的泛化能力。

(3)工业应用方面。超声导波技术需要采集高质量的损伤信息,但仅有高质量数据可能不足以对结构进行整体状态评估。理想情况下,诊断效果与传感器数量成正比,但在实际航空航天工业应用中需要考量数据获取的难易程度,制约因素在于传感器部署可行性和仪器设备成本。一方面,研究传感器优化布置方法可以在不影响成像质量的前提下降低传感器数量、提高计算效率,从而降低系统成本;另一方面,开发高度自动化的成像技术,能够降低导波仪器设备的经验依赖程度和操作成本。因此,在发展成像技术时考虑上述因素,有助于推动将来导波技术在航空航天工业的更广泛应用。

结论

航空航天领域在结构效率和安全性上具有标准高、要求高的特点,是研究和应用无损检测/结构健康监测技术最频繁的领域。航空航天飞行器中多数结构部件为波导结构,导波技术作为一种全局损伤诊断技术在航空航天结构具有广泛应用前景。本文以航空航天结构为出发点,介绍了超声导波诊断成像的一般流程,综述了8种代表性导波成像方法的研究进展,并对比了这些算法的应用范围及优缺点,最后结合航空航

天工业应用需求,讨论了导波诊断成像技术面临的挑战并展望其发展趋势。超声导波诊断成像技术是导波技术的应用集大成者,深入研究各成像算法有利于导波技术提高工业应用成熟度,促进未来航空航天结构的智能化进程。

参考文献

- [1] GIURGIUTIU V, ZAGRAI A, BAO J J. Piezoelectric wafer embedded active sensors for aging aircraft structural health monitoring[J]. Structural Health Monitoring: an International Journal, 2002, 1(1): 41–61.
- [2] 吴凯, 张铁军, 姚为, 等. 航天新型高性能材料的研究进展[J]. 宇航材料工艺, 2017, 47(6): 1–9.
WU Kai, ZHANG Tiejun, YAO Wei, et al. Research progress of new high performance aerospace materials[J]. Aerospace Material & Technology, 2017, 47(6): 1–9.
- [3] 杜善义. 先进复合材料与航空航天[J]. 复合材料学报, 2007, 24(1): 1–12.
DU Shanyi. Advanced composite materials and aerospace engineering[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2007, 24(1): 1–12.
- [4] 范玉青, 张丽华. 超大型复合材料机体部件应用技术的最新进展——飞机制造技术的新跨越[J]. 航空学报, 2009, 30(3): 534–543.
FAN Yuqing, ZHANG Lihua. New development of extra large composite aircraft components application technology—advance of aircraft manufacture technology[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2009, 30(3): 534–543.
- [5] 王奕首, 卿新林. 复合材料连接结构健康监测技术研究进展[J]. 复合材料学报, 2016, 33(1): 1–16.
WANG Yishou, QING Xinlin. Progress on study of structural health monitoring technology for composite joints[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2016, 33(1): 1–16.
- [6] 何存富, 郑明方, 吕炎, 等. 超声导波检测技术的发展、应用与挑战[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(8): 1713–1735.
HE Cunfu, ZHENG Mingfang, LÜ Yan, et al. Development, applications and challenges in ultrasonic guided waves testing technology[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(8): 1713–1735.
- [7] 武湛君, 渠晓溪, 高东岳, 等. 航空航天复合材料结构健康监测技术研究进展[J]. 航空制造技术, 2016, 59(15): 92–102.
WU Zhanjun, QU Xiaoxi, GAO Dongyue, et al. Research progress on structural health monitoring technology for aerospace composite structures[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 59(15): 92–102.
- [8] 袁慎芳, 邱雷, 吴键, 等. 大型飞机的发展对结构健康监测的需求与挑战[J]. 航空制造技术, 2009, 52(22): 62–67.
YUAN Shenfang, QIU Lei, WU Jian, et al. Challenge in structural health monitoring of large aircraft development[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2009, 52(22): 62–67.
- [9] REN Y, QIU L, YUAN S F, et al. Multi-damage imaging of composite structures under environmental and operational conditions using guided wave and Gaussian mixture model[J]. Smart Materials and Structures, 2019, 28(11): 115017–115031.
- [10] QING X L, LI W Z, WANG Y S, et al. Piezoelectric transducer-based structural health monitoring for aircraft applications[J]. Sensors, 2019, 19(3): 545–571.
- [11] SU Z Q, YE L. Identification of damage using lamb waves: From fundamentals to applications[M]//Lecture Notes in Applied and Computational Mechanics. London: Springer-Verlag London, 2009.
- [12] WU Z J, LIU K H, WANG Y S, et al. Validation and evaluation of damage identification using probability-based diagnostic imaging on a stiffened composite panel[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2015, 26(16): 2181–2195.
- [13] 高东岳. 复合材料飞机尾翼结构健康监测技术研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2014.
GAO Dongyue. Study of structural health monitoring for a composite horizontal tail of aircraft[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2014.
- [14] GAO D Y, WANG Y S, WU Z J, et al. Design of a sensor network for structural health monitoring of a full-scale composite horizontal tail[J]. Smart Materials and Structures, 2014, 23(5): 055011.
- [15] 刘科海. 飞行器关键构件的超声导波损伤诊断成像方法研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2016.
LIU Kehai. Damage diagnostic imaging using ultrasonic guided waves for key

components in aerospace structures[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2016.

[16] WU Z J, XU L T, WANG Y S, et al. Impact energy identification on a composite plate using basis vectors[J]. *Smart Materials and Structures*, 2015, 24(9): 095007.

[17] QIU L, LIU B, YUAN S F, et al. Impact imaging of aircraft composite structure based on a model-independent spatial-wavenumber filter[J]. *Ultrasonics*, 2016, 64: 10–24.

[18] REN Y Q, QIU L, YUAN S F, et al. A diagnostic imaging approach for online characterization of multi-impact in aircraft composite structures based on a scanning spatial-wavenumber filter of guided wave[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2017, 90: 44–63.

[19] 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.

[20] WU Z J, QING X P, CHANG F K. Damage detection for composite laminate plates with a distributed hybrid PZT/FBG sensor network[J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2009, 20(9): 1069–1077.

[21] 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.

[22] 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.

[23] 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: an International Journal*, 2017, 16(6): 663–673.

[24] 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.

[25] TIAN Z, YU L, LECKEY C. Rapid guided wave delamination detection and quantification in composites using global-local

sensing[J]. *Smart Materials and Structures*, 2016, 25(8): 085042–085052.

[26] QING X, BEARD S, KUMAR A, et al. Advances in the development of built-in diagnostic system for filament wound composite structures[J]. *Composites Science and Technology*, 2006, 66(11–12): 1694–1702.

[27] YANG B, XUAN F Z, CHEN S J, et al. Damage localization and identification in WGF/epoxy composite laminates by using Lamb waves: Experiment and simulation[J]. *Composite Structures*, 2017, 165: 138–147.

[28] GORGIN R, WU Z J, GAO D Y, et al. Damage size characterization algorithm for active structural health monitoring using the A0 mode of Lamb waves[J]. *Smart Materials and Structures*, 2014, 23(3): 035015.

[29] KUDELA P, RADZIENSKI M, OSTACHOWICZ W, et al. Structural health monitoring system based on a concept of Lamb wave focusing by the piezoelectric array[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2018, 108: 21–32.

[30] IHN J B, CHANG F K. Pitch-catch active sensing methods in structural health monitoring for aircraft structures[J]. *Structural Health Monitoring: an International Journal*, 2008, 7(1): 5–19.

[31] ZHOU K, ZHENG Y B, ZHANG J Q, et al. A reconstruction-based mode separation method of Lamb wave for damage detection in plate structures[J]. *Smart Materials and Structures*, 2019, 28(3): 035033.

[32] STASZEWSKI W J. Intelligent signal processing for damage detection in composite materials[J]. *Composites Science and Technology*, 2002, 62(7–8): 941–950.

[33] CROXFORD A J, WILCOX P D, DRINKWATER B W, et al. Strategies for guided-wave structural health monitoring[J]. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2007, 463: 2961–2981.

[34] OSTACHOWICZ W, KUDELA P, MALINOWSKI P, et al. Damage localization in plate-like structures based on PZT sensors[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2009, 23(6): 1805–1829.

[35] PAI P F, SUNDARESAN M J. Space-wavenumber and time-frequency analysis for damage inspection of thin-walled structures[J]. *Structural Health Monitoring: an International Journal*, 2012, 11(4): 452–471.

[36] YU L Y, GIURGIUTIU V. In-

situ optimized PWAS phased arrays for Lamb wave structural health monitoring[J]. *Journal of Mechanics of Materials and Structures*, 2007, 2(3): 459–487.

[37] QIU L, YUAN S F, ZHANG X Y, et al. A time reversal focusing based impact imaging method and its evaluation on complex composite structures[J]. *Smart Materials and Structures*, 2011, 20(10): 105014.

[38] PAI P F, DENG H G, SUNDARESAN M J. Time-frequency characterization of Lamb waves for material evaluation and damage inspection of plates[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2015, 62/63: 183–206.

[39] YU L Y, TIAN Z H. Lamb wave structural health monitoring using a hybrid PZT-laser vibrometer approach[J]. *Structural Health Monitoring: an International Journal*, 2013, 12(5–6): 469–483.

[40] HONG J C, SUN K H, KIM Y Y. Waveguide damage detection by the matching pursuit approach employing the dispersion-based chirp functions[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, 2006, 53(3): 592–605.

[41] RAGHAVAN A, CESNIK C E S. Guided-wave signal processing using chirplet matching pursuits and mode correlation for structural health monitoring[J]. *Smart Materials and Structures*, 2007, 16(2): 355–366.

[42] SCHMIDT R. A signal subspace approach to multiple emitter location and spectral estimation[D]. Stanford: Stanford University, 1982.

[43] HE J Z, YUAN F G. Lamb wave-based sub wave length damage imaging using the DORT-MUSIC technique in metallic plates[J]. *Structural Health Monitoring: an International Journal*, 2016, 15(1): 65–80.

[44] GIURGIUTIU V, BAO J. Embedded-ultrasonics structural radar for in situ structural health monitoring of thin-wall structures[J]. *Structural Health Monitoring: an International Journal*, 2004, 3(2): 121–140.

[45] PUREKAR A S, PINES D J, SUNDARARAMAN S, et al. Directional piezoelectric phased array filters for detecting damage in isotropic plates[J]. *Smart Materials and Structures*, 2004, 13(4): 838–850.

[46] ING R K, FINK M. Time-reversed Lamb waves[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, 1998, 45(4): 1032–1043.

- [47] LIN X, YUAN F G. Damage detection of a plate using migration technique[J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2001, 12(7): 469–482.
- [48] CAI J, SHI L H, YUAN S F, et al. High spatial resolution imaging for structural health monitoring based on virtual time reversal[J]. *Smart Materials and Structures*, 2011, 20(5): 055018.
- [49] MICHAELS J E, MICHAELS T E. Guided wave signal processing and image fusion for in situ damage localization in plates[J]. *Wave Motion*, 2007, 44(6): 482–492.
- [50] LEVINE R M, MICHAELS J E. Model-based imaging of damage with Lamb waves via sparse reconstruction[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2013, 133(3): 1525–1534.
- [51] MALYARENKO E V, HINDERS M K. Fan beam and double cross hole Lamb wave tomography for mapping flaws in aging aircraft structures[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2000, 108(4): 1631–1639.
- [52] PRASAD S M, BALASUBRAMANIAM K, KRISHNAMURTHY C V. Structural health monitoring of composite structures using Lamb wave tomography[J]. *Smart Materials and Structures*, 2004, 13(5): N73–N79.
- [53] WANG D, YE L, LU Y, et al. Probability of the presence of damage estimated from an active sensor network in a composite panel of multiple stiffeners[J]. *Composites Science and Technology*, 2009, 69(13): 2054–2063.
- [54] MIAO X T, WANG D, YE L, et al. Identification of dual notches based on time-reversal lamb waves and a damage diagnostic imaging algorithm[J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2011, 22(17): 1983–1992.
- [55] PARK H W, SOHN H, LAW K H, et al. Time reversal active sensing for health monitoring of a composite plate[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2007, 302(1–2): 50–66.
- [56] WANG J Z, SHEN Y F. An enhanced Lamb wave virtual time reversal technique for damage detection with transducer transfer function compensation[J]. *Smart Materials and Structures*, 2019, 28(8): 085017.
- [57] 张海燕, 刘倩玮, 范仕轩, 等. 图像合成在超声兰姆波层析成像中的应用[J]. *上海大学学报(自然科学版)*, 2007(4): 430–433.
- ZHANG Haiyan, LIU Qianwei, FAN Shixuan, et al. Application of image compounding in ultrasonic Lamb wave tomography[J]. *Journal of Shanghai University (Natural Science)*, 2007(4): 430–433.
- [58] SU Z Q, WANG X M, CHENG L, et al. On selection of data fusion schemes for structural damage evaluation[J]. *Structural Health Monitoring*, 2009, 8(3): 223–241.
- [59] CLARKE T, CAWLEY P. Enhancing the defect localization capability of a guided wave SHM system applied to a complex structure[J]. *Structural Health Monitoring: an International Journal*, 2011, 10(3): 247–259.
- [60] LU G T, LI Y R, SONG G B. A delay-and-Boolean-ADD imaging algorithm for damage detection with a small number of piezoceramic transducers[J]. *Smart Materials and Structures*, 2016, 25(9): 095030.
- [61] LEONARD K R, HINDERS M K. Lamb wave tomography of pipe-like structures[J]. *Ultrasonics*, 2005, 43(7): 574–583.
- [62] KUNDU T. Acoustic source localization[J]. *Ultrasonics*, 2014, 54(1): 25–38.
- [63] 詹湘琳, 韩红斌, 周德新. 民用飞机复合材料结构件超声相控阵无损检测技术进展[J]. *航空制造技术*, 2014, 57(15): 124–127.
- ZHAN Xianglin, HAN Hongbin, ZHOU Dexin. Progress of ultrasonic phased array nondestructive testing technique for civil aviation composite structures[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2014, 57(15): 124–127.
- [64] SICARD R, CHAHBAZ A, GOYETTE J. Guided Lamb waves and L-SAFT processing technique for enhanced detection and imaging of corrosion defects in plates with small depth-to-wavelength ratio[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, 2004, 51(10): 1287–1297.
- [65] WILCOX P D. Omni-directional guided wave transducer arrays for the rapid inspection of large areas of plate structures[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, 2003, 50(6): 699–709.
- [66] R A J A G O P A L A N J, BALASUBRAMANIAM K, KRISHNAMURTHY C V. A single transmitter multi-receiver (STMR) PZT array for guided ultrasonic wave based structural health monitoring of large isotropic plate structures[J]. *Smart Materials and Structures*, 2006, 15(5): 1190–1196.
- [67] VISHNU VARDHAN J, MURALIDHARAN A, KRISHNAMURTHY C V, et al. Structural health monitoring of anisotropic plates using ultrasonic guided wave STMR array patches[J]. *NDT & E International*, 2009, 42(3): 193–198.
- [68] R A J A G O P A L A N J, BALASUBRAMANIAM K, KRISHNAMURTHY C V. A phase reconstruction algorithm for Lamb wave based structural health monitoring of anisotropic multilayered composite plates[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2006, 119(2): 872.
- [69] YAN F, ROSE J L. Guided wave phased array beam steering in composite plates[C]//*Proceedings of Health Monitoring of Structural and Biological Systems*, International Society for Optics and Photonics. San Diego, 2007.
- [70] PUREKAR A S, PINES D J. Damage detection in thin composite laminates using piezoelectric phased sensor arrays and guided lamb wave interrogation[J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2010, 21(10): 995–1010.
- [71] LELEUX A, MICHEAU P, CASTAINGS M. Long range detection of defects in composite plates using lamb waves generated and detected by ultrasonic phased array probes[J]. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 2013, 32(2): 200–214.
- [72] GIURGIUTIU V. Structural health monitoring with piezoelectric wafer active sensors[M]. Amsterdam: Elsevier Academic Press, 2007.
- [73] YU L Y, GIURGIUTIU V. In situ 2-D piezoelectric wafer active sensors arrays for guided wave damage detection[J]. *Ultrasonics*, 2008, 48(2): 117–134.
- [74] VELICHKO A, WILCOX P D. Modeling the excitation of guided waves in generally anisotropic multilayered media[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2007, 121(1): 60–69.
- [75] TIAN Z, LECKEY C A C, YU L. Phased array beam forming and imaging in composite laminates using guided waves[C]//*Proceedings of Health Monitoring of Structural and Biological Systems 2016*. Colorado: International Society for Optics and Photonics, 2016.
- [76] YU L Y, TIAN Z H. Guided wave phased array beam forming and imaging in composite plates[J]. *Ultrasonics*, 2016, 68: 43–53.
- [77] DRINKWATER B W, WILCOX

- P D. Ultrasonic arrays for non-destructive evaluation: A review[J]. *NDT & E International*, 2006, 39(7): 525–541.
- [78] 崔媛智. 基于 Lamb 波频率调谐和相控阵的金属板损伤检测研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2016.
- CUI Yuanzhi. Research of metal plate damage detection based on Lamb wave frequency tuning and phased array[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2016.
- [79] MALINOWSKI P, WANDOWSKI T, TRENDAFILOVA I, et al. A phased array-based method for damage detection and localization in thin plates[J]. *Structural Health Monitoring: an International Journal*, 2009, 8(1): 5–15.
- [80] WANDOWSKI T, MALINOWSKI P, OSTACHOWICZ W M. Damage detection with concentrated configurations of piezoelectric transducers[J]. *Smart Materials and Structures*, 2011, 20(2): 025002.
- [81] LIU Z H, SUN K M, SONG G R, et al. Damage localization in aluminum plate with compact rectangular phased piezoelectric transducer array[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2016, 70–71: 625–636.
- [82] STERNINI S, PAU A, LANZA DI SCALEA F. Minimum-variance imaging in plates using guided-wave-mode beamforming[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2019, 66(12): 1906–1919.
- [83] ENGHOLM M, STEPINSKI T. Adaptive beam forming for array imaging of plate structures using Lamb waves[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2010, 57(12): 2712–2724.
- [84] KWON H S, LEE S S, KIM J Y. Beam pattern improvement by compensating array nonuniformities in a guided wave phased array[J]. *Smart Materials and Structures*, 2013, 22(8): 085002.
- [85] HUA J D, LIN J, ZENG L, et al. Minimum variance imaging based on correlation analysis of Lamb wave signals[J]. *Ultrasonics*, 2016, 70: 107–122.
- [86] HUANG Q, CHEN M T, SU Z Q, et al. A high-resolution structural health monitoring system based on SH wave piezoelectric transducers phased array[J]. *Ultrasonics*, 2019, 97: 29–37.
- [87] 刘彬. 基于空间-波数滤波器的结构健康监测成像方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2015.
- LIU Bin. Research on spatial-wavenumber filter based structural health monitoring and imaging method[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2015.
- [88] RUZZENE M. Frequency-wavenumber domain filtering for improved damage visualization[J]. *Smart Materials and Structures*, 2007, 16(6): 2116–2129.
- [89] YU L Y, LECKEY C A C, TIAN Z H. Study on crack scattering in aluminum plates with Lamb wave frequency-wavenumber analysis[J]. *Smart Materials and Structures*, 2013, 22(6): 065019.
- [90] SOHN H, DUTTA D, YANG J Y, et al. Automated detection of delamination and disbond from wave field images obtained using a scanning laser vibrometer[J]. *Smart Materials and Structures*, 2011, 20(4): 045017.
- [91] MICHAELS T E, MICHAELS J E, RUZZENE M. Frequency-wavenumber domain analysis of guided wavefields[J]. *Ultrasonics*, 2011, 51(4): 452–466.
- [92] TIAN Z H, YU L Y, LECKEY C, et al. Guided wave imaging for detection and evaluation of impact-induced delamination in composites[J]. *Smart Materials and Structures*, 2015, 24(10): 105019.
- [93] 王瑜, 袁慎芳, 邱雷. 基于改进空间滤波器的复合材料结构损伤成像方法[J]. *复合材料学报*, 2011, 28(1): 186–193.
- WANG Yu, YUAN Shenfang, QIU Lei. Improved spatial filter based damage imaging method on composite structures[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2011, 28(1): 186–193.
- [94] 刘彬, 邱雷, 袁慎芳, 等. 基于多维阵列和空间滤波器的损伤无波速成像定位方法[J]. *复合材料学报*, 2014, 31(3): 835–844.
- LIU Bin, QIU Lei, YUAN Shenfang, et al. Damage imaging and localization method based on multi-dimension arrays and spatial filter without wave velocity[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2014, 31(3): 835–844.
- [95] QIU L, LIU B, YUAN S F, et al. A scanning spatial-wavenumber filter and PZT 2-D cruciform array based on-line damage imaging method of composite structure[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2016, 248: 62–72.
- [96] ENGHOLM M, STEPINSKI T, OLOFSSON T. Imaging and suppression of Lamb modes using adaptive beam forming[J]. *Smart Materials and Structures*, 2011, 20(8): 085024.
- [97] KWON H S, KIM J Y. An analytical filter design method for guided wave phased arrays[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2016, 81: 433–446.
- [98] BAYSAL E, KOSLOFF D D, SHERWOOD J W C. Reverse time migration[J]. *Geophysics*, 1983, 48(11): 1514–1524.
- [99] LIN X, YUAN F G. Detection of multiple damages by prestack reverse-time migration[J]. *AIAA Journal*, 2001, 39: 2206–2215.
- [100] LIN X, YUAN F G. Experimental study applying a migration technique in structural health monitoring[J]. *Structural Health Monitoring: an International Journal*, 2005, 4(4): 341–353.
- [101] HE J Z, YUAN F G. Damage identification for composite structures using a cross-correlation reverse-time migration technique[J]. *Structural Health Monitoring: an International Journal*, 2015, 14(6): 558–570.
- [102] 严刚, 周丽. 基于频率-波数域偏移的损伤被动成像识别研究[J]. *固体力学学报*, 2011, 32(S1): 273–279.
- YAN Gang, ZHOU Li. Passive imaging and identification of damages using migration technique in frequency-wavenumber domain[J]. *Acta Mechnica Solida Sinica*, 2011, 32(S1): 273–279.
- [103] 严刚, 周丽. 基于 Mindlin 板理论的偏移损伤成像数值仿真研究[J]. *力学学报*, 2010, 42(3): 499–505.
- YAN Gang, ZHOU Li. A simulation study on migration technique for damage imaging based on mindlin plate theory[J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2010, 42(3): 499–505.
- [104] WANG L, YUAN F G. Damage identification in a composite plate using prestack reverse-time migration technique[J]. *Structural Health Monitoring: an International Journal*, 2005, 4(3): 195–211.
- [105] ZHOU L, YUAN F G, MENG W J. A pre-stack migration method for damage identification in composite structures[J]. *Smart Structures and Systems*, 2007, 3(4): 439–454.
- [106] HE J Z, YUAN F G. A quantitative damage imaging technique based on enhanced CCRTM for composite plates using 2D scan[J]. *Smart Materials and Structures*, 2016, 25(10): 105022.
- [107] HE J Z, ROCHA D C, LESER P E, et al. Least-squares reverse time migration

- (LSRTM) for damage imaging using Lamb waves[J]. *Smart Materials and Structures*, 2019, 28(6): 065010.
- [108] FINK M. Time reversal of ultrasonic fields. I. Basic principles[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, 1992, 39(5): 555–566.
- [109] ING R K, FINK M. Time recompression of dispersive Lamb waves using a time reversal mirror – Application to flaw detection in thin plates[C]//*Proceedings of 1996 IEEE Ultrasonics Symposium*. San Antonio, 1996.
- [110] PRADA C, FINK M. Separation of interfering acoustic scattered signals using the invariants of the time–reversal operator. Application to Lamb waves characterization[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1998, 104(2): 801–807.
- [111] 王强, 严夏君, 陈小惠, 等. 无基准 Lamb 波时间反转损伤概率成像监测方法[J]. *仪器仪表学报*, 2013, 34(7): 1588–1594.
- WANG Qiang, YAN Xiajun, CHEN Xiaohui, et al. Baseline free Lamb wave damage probability imaging monitoring method based on time reversal theory[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2013, 34(7): 1588–1594.
- [112] XU B L, GIURGIUTIU V. Single mode tuning effects on lamb wave time reversal with piezoelectric wafer active sensors for structural health monitoring[J]. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 2007, 26(2–4): 123–134.
- [113] SOHN H, PARK H W, LAW K H, et al. Combination of a time reversal process and a consecutive outlier analysis for baseline–free damage diagnosis[J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2007, 18(4): 335–346.
- [114] 蔡笑风, 刘继方, 李永峰, 等. 复合材料 Lamb 波时间反转检测方法研究现状[J]. *无损检测*, 2018, 40(11): 64–69.
- CAI Xiaofeng, LIU Jifang, LI Yongfeng, et al. Research status of Lamb wave time–reversal method for composite materials[J]. *Nondestructive Testing*, 2018, 40(11): 64–69.
- [115] GANGADHARAN R, MURTHY C, GOPALAKRISHNAN S, et al. Time reversal health monitoring of composite plates using Lamb waves[J]. *International Journal of Aerospace Innovations*, 2011, 3(3): 131–142.
- [116] SOHN H, PARK H W, LAW K H, et al. Damage detection in composite plates by using an enhanced time reversal method[J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 2007, 20(3): 141–151.
- [117] LIU Z H, YU H T, FAN J W, et al. Baseline–free delamination inspection in composite plates by synthesizing non–contact air–coupled Lamb wave scan method and virtual time reversal algorithm[J]. *Smart Materials and Structures*, 2015, 24(4): 045014.
- [118] MUSTAPHA S, YE L. Propagation behaviour of guided waves in tapered sandwich structures and debonding identification using time reversal[J]. *Wave Motion*, 2015, 57: 154–170.
- [119] PARK H W, KIM S B, SOHN H. Understanding a time reversal process in Lamb wave propagation[J]. *Wave Motion*, 2009, 46(7): 451–467.
- [120] WATKINS R, JHA R. A modified time reversal method for Lamb wave based diagnostics of composite structures[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2012, 31: 345–354.
- [121] PODDAR B, KUMAR A, MITRA M, et al. Time reversibility of a Lamb wave for damage detection in a metallic plate[J]. *Smart Materials and Structures*, 2011, 20(2): 025001.
- [122] AGRAHARI J K, KAPURIA S. Effects of adhesive, host plate, transducer and excitation parameters on time reversibility of ultrasonic Lamb waves[J]. *Ultrasonics*, 2016, 70: 147–157.
- [123] WANG Q, YUAN S F. Baseline–free imaging method based on new PZT sensor arrangements[J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2009, 20(14): 1663–1673.
- [124] CIAMPA F, MEO M. Impact detection in anisotropic materials using a time reversal approach[J]. *Structural Health Monitoring*, 2012, 11(1): 43–49.
- [125] ZENG L, LIN J, HUANG L P. A modified lamb wave time–reversal method for health monitoring of composite structures[J]. *Sensors*, 2017, 17(5): 955.
- [126] 王强, 袁慎芳. 复合材料板脱层损伤的时间反转成像监测[J]. *复合材料学报*, 2009, 26(3): 99–104.
- WANG Qiang, YUAN Shenfang. Time reversal imaging method for composite delamination monitoring[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2009, 26(3): 99–104.
- [127] WANG C H, ROSE J T, CHANG F K. A synthetic time–reversal imaging method for structural health monitoring[J]. *Smart Materials and Structures*, 2004, 13(2): 415–423.
- [128] MICHAELS J E. Enhanced differential methods for guided wave phased array imaging using spatially distributed piezoelectric transducers[C]//*Proceedings of AIP Conference*, American Institute of Physics. Brunswick, 2006.
- [129] MICHAELS J E, CROXFORD A J, WILCOX P D. Imaging algorithms for locating damage via in situ ultrasonic sensors[C]//*Proceedings of 2008 IEEE Sensors Applications Symposium*. Atlanta, 2008: 63–67.
- [130] MICHAELS J E. Detection, localization and characterization of damage in plates with an in situ array of spatially distributed ultrasonic sensors[J]. *Smart Materials and Structures*, 2008, 17(3): 035035.
- [131] LEVINE R M, MICHAELS J E. Block–sparse reconstruction and imaging for Lamb wave structural health monitoring[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2014, 61(6): 1006–1015.
- [132] KIM H W, YUAN F G. Enhanced damage imaging of a metallic plate using matching pursuit algorithm with multiple wave paths[J]. *Ultrasonics*, 2018, 89: 84–101.
- [133] KIM H, YUAN F G. Adaptive signal decomposition and dispersion removal based on the matching pursuit algorithm using dispersion–based dictionary for enhancing damage imaging[J]. *Ultrasonics*, 2020, 103: 106087.
- [134] CROXFORD A J, WILCOX P D, DRINKWATER B W. Guided wave SHM with a distributed sensor network[C]//*Proceedings of Health Monitoring of Structural and Biological Systems 2008*. San Diego: International Society for Optics and Photonics, 2008.
- [135] LU G T, LI Y R, WANG T, et al. A multi–delay–and–sum imaging algorithm for damage detection using piezoceramic transducers[J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2017, 28(9): 1150–1159.
- [136] FENDZI C, RÉBILLAT M, MECHBAL N, et al. A data–driven temperature compensation approach for Structural Health Monitoring using Lamb waves[J]. *Structural Health Monitoring: an International Journal*, 2016, 15(5): 525–540.
- [137] CHEN X, MICHAELS J E, LEE S J, et al. Load–differential imaging for detection and localization of fatigue cracks using Lamb

- waves[J]. *NDT & E International*, 2012, 51: 142–149.
- [138] YU L Y, LECKEY C A. Lamb wave-based quantitative crack detection using a focusing array algorithm[J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2013, 24(9): 1138–1152.
- [139] HALL J S, MICHAELS J E. Minimum variance ultrasonic imaging applied to an in situ sparse guided wave array[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, 2010, 57(10): 2311–2323.
- [140] HALL J S, MCKEON P, SATYANARAYAN L, et al. Minimum variance guided wave imaging in a quasi-isotropic composite plate[J]. *Smart Materials and Structures*, 2011, 20(2): 025013.
- [141] HALL J S, MICHAELS J E. Adaptive dispersion compensation for guided wave imaging[C]// *Proceedings of AIP Conference*. Puertollano, 2012.
- [142] NG C T, VEIDT M. A Lamb-wave-based technique for damage detection in composite laminates[J]. *Smart Materials and Structures*, 2009, 18(7): 074006.
- [143] SHARIF-KHODAEI Z, ALIABADI M H. Assessment of delay-and-sum algorithms for damage detection in aluminium and composite plates[J]. *Smart Materials and Structures*, 2014, 23(7): 075007.
- [144] RÉBILLAT M, MECHEBAL N. Damage localization in geometrically complex aeronautic structures using canonical polyadic decomposition of Lamb wave difference signal tensors[J]. *Structural Health Monitoring: an International Journal*, 2020, 19(1): 305–321.
- [145] DAFYDD I, SHARIF KHODAEI Z. Analysis of barely visible impact damage severity with ultrasonic guided Lamb waves[J]. *Structural Health Monitoring: an International Journal*, 2019, 19(4): 1104–1122.
- [146] QIU L, LIU M L, QING X L, et al. A quantitative multidamage monitoring method for large-scale complex composite[J]. *Structural Health Monitoring: an International Journal*, 2013, 12(3): 183–196.
- [147] SHAN S B, QIU J H, ZHANG C, et al. Multi-damage localization on large complex structures through an extended delay-and-sum based method[J]. *Structural Health Monitoring: an International Journal*, 2016, 15(1): 50–64.
- [148] YANG B, XIANG Y X, XUAN F Z, et al. Damage localization in hydrogen storage vessel by guided waves based on a real-time monitoring system[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, 44(40): 22740–22751.
- [149] 徐冠基, 许才彬, 杨志勃, 等. 碳纤维层合板 Lamb 波损伤检测的加权块稀疏成像法[J]. *西安交通大学学报*, 2019, 53(6): 176–182.
- XU Guanji, XU Caibin, YANG Zhibo, et al. Weighted group-sparse imaging method for lamb wave damage detection of CFRP laminates[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2019, 53(6): 176–182.
- [150] EBRAHIMKHANLOU A, DUBUC B, SALAMONE S. Damage localization in metallic plate structures using edge-reflected lamb waves[J]. *Smart Materials and Structures*, 2016, 25(8): 085035.
- [151] OSTIGUY P C, QUAEGBEUR N, MASSON P. Comparison of model-based damage imaging techniques for transversely isotropic composites[J]. *Structural Health Monitoring: an International Journal*, 2017, 16(4): 428–443.
- [152] HALL J S, MICHAELS J E. Multipath ultrasonic guided wave imaging in complex structures[J]. *Structural Health Monitoring: an International Journal*, 2015, 14(4): 345–358.
- [153] LEVINE R M. *Ultrasonic guided wave imaging via sparse reconstruction*[D]. Atlanta: Georgia Institute of Technology, 2014.
- [154] 许成, 张海燕. 稀疏重建的兰姆波结构损伤定位[J]. *声学技术*, 2016, 35(6): 537–541.
- XU Cheng, ZHANG Haiyan. Damage localization with Lamb waves via sparse reconstruction[J]. *Technical Acoustics*, 2016, 35(6): 537–541.
- [155] DONOHO D L. Compressed sensing[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2006, 52(4): 1289–1306.
- [156] FIGUEIREDO M A T, NOWAK R D, WRIGHT S J. Gradient projection for sparse reconstruction: Application to compressed sensing and other inverse problems[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2007, 1(4): 586–597.
- [157] HUA J D, GAO F, ZENG L, et al. Modified sparse reconstruction imaging of lamb waves for damage quantitative evaluation[J]. *NDT & E International*, 2019, 107: 102143.
- [158] XU C B, YANG Z B, ZHAI Z, et al. A weighted sparse reconstruction-based ultrasonic guided wave anomaly imaging method for composite laminates[J]. *Composite Structures*, 2019, 209: 233–241.
- [159] HARLEY J B, MOURA J M F. Data-driven matched field processing for Lamb wave structural health monitoring[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2014, 135(3): 1231–1244.
- [160] MESNIL O, RUZZENE M. Sparse wave field reconstruction and source detection using Compressed Sensing[J]. *Ultrasonics*, 2016, 67: 94–104.
- [161] XU C B, YANG Z B, CHEN X F, et al. A guided wave dispersion compensation method based on compressed sensing[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2018, 103: 89–104.
- [162] GOLATO A, SANTHANAM S, AHMAD F, et al. Multifrequency and multimodal sparse reconstruction in Lamb wave based structural health monitoring[C]// *Structural Health Monitoring and Inspection of Advanced Materials, Aerospace, and Civil Infrastructure 2015*. San Diego: International Society for Optics and Photonics, 2015.
- [163] GOLATO A, AHMAD F, SANTHANAM S, et al. Multipath exploitation for enhanced defect imaging using Lamb waves[J]. *NDT & E International*, 2017, 92: 1–9.
- [164] GAO F, HUA J D, ZENG L, et al. Amplitude modified sparse imaging for damage detection in quasi-isotropic composite laminates using non-contact laser induced Lamb waves[J]. *Ultrasonics*, 2019, 93: 122–129.
- [165] HAMIDI S, SHAHBAZPANAHI S. Sparse signal recovery based imaging in the presence of mode conversion with application to non-destructive testing[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2016, 64(5): 1352–1364.
- [166] HUA J D, ZENG L, GAO F, et al. Dictionary design for Lamb wave sparse decomposition[J]. *NDT & E International*, 2019, 103: 98–110.
- [167] NOKHBATOLFOGHAI A, NAVAZI H M, GROVES R M. Use of delay and sum for sparse reconstruction improvement for structural health monitoring[J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2019, 30(18–19): 2919–2931.
- [168] WILLIAMS R A, BECK M S. *Process tomography: principles, techniques, and applications*[M]. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1995.
- [169] RADON J. On the determination of functions from their integral values along certain

- manifolds[J]. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 1986, 5(4): 170–176.
- [170] HOUNSFIELD G N. Computerized transverse axial scanning (tomography): Part 1. Description of system[J]. *The British Journal of Radiology*, 1973, 46(552): 1016–1022.
- [171] DINES K A, LYTLE R J. Computerized geophysical tomography[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1979, 67(7): 1065–1073.
- [172] 王增勇, 汤光平, 李建文, 等. 工业 CT 技术进展及应用[J]. *无损检测*, 2010, 32(7): 504–508.
- WANG Zengyong, TANG Guangping, LI Jianwen, et al. Development and application of industrial CT[J]. *Nondestructive Testing*, 2010, 32(7): 504–508.
- [173] JANSEN D P, HUTCHINS D A. Lamb wave tomography[C]//*Proceedings of IEEE Symposium on Ultrasonics*. Honolulu, 1990: 1017–1020.
- [174] 张海燕, 周全, 吕东辉, 等. 各向同性薄板中横穿孔缺陷的超声兰姆波层析成像[J]. *声学学报*, 2007, 32(1): 83–90.
- ZHANG Haiyan, ZHOU Quan, LÜ Donghui, et al. Ultrasonic Lamb wave tomography of through hole flaws in isotropic thin plates[J]. *Acta Acustica*, 2007, 32(1): 83–90.
- [175] ZHAO X, ROYER R L, OWENS S E, et al. Ultrasonic Lamb wave tomography in structural health monitoring[J]. *Smart Materials and Structures*, 2011, 20(10): 105002.
- [176] KAK A C, SLANEY M, WANG G. Principles of computerized tomographic imaging[J]. *Medical Physics*, 2002, 29(1): 107–108.
- [177] HUTCHINS D A, JANSEN D P, EDWARDS C. Lamb-wave tomography using non-contact transduction[J]. *Ultrasonics*, 1993, 31(2): 97–103.
- [178] LEVENT DEGERTEKIN F, PEI J, KHURI-YAKUB B T, et al. Insituacoustic temperature tomography of semiconductor wafers[J]. *Applied Physics Letters*, 1994, 64(11): 1338–1340.
- [179] JANSEN D P, HUTCHINS D A, MOTTRAM J T. Lamb wave tomography of advanced composite laminates containing damage[J]. *Ultrasonics*, 1994, 32(2): 83–90.
- [180] MALYARENKO E V, HINDERS M K. Ultrasonic Lamb wave diffraction tomography[J]. *Ultrasonics*, 2001, 39(4): 269–281.
- [181] WILLIAMSON P R. A guide to the limits of resolution imposed by scattering in ray tomography[J]. *Geophysics*, 1991, 56(2): 202–207.
- [182] MCKEON J C P, HINDERS M K. Parallel projection and cross hole Lamb wave contact scanning tomography[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1999, 106(5): 2568–2577.
- [183] ROSE L R F, WANG C H. Mindlin plate theory for damage detection: Source solutions[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2004, 116(1): 154–171.
- [184] WANG C H, CHANG F K. Scattering of plate waves by a cylindrical inhomogeneity[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2005, 282(1–2): 429–451.
- [185] ROHDE A H, VEIDT M, ROSE L R F, et al. Imaging flexural in homogeneities using plate—wave diffraction tomography[C]//*Proceedings of AIP Conference*. Vancouver, 2007.
- [186] ROHDE A H, VEIDT M, ROSE L R F, et al. A computer simulation study of imaging flexural inhomogeneities using plate—wave diffraction tomography[J]. *Ultrasonics*, 2008, 48(1): 6–15.
- [187] CHAN E, ROSE L R F, WANG C H. A comparison and extensions of algorithms for quantitative imaging of laminar damage in plates. II. Non-monopole scattering and noise tolerance[J]. *Wave Motion*, 2016, 66: 220–237.
- [188] SIMONETTI F, HUANG L. From beam forming to diffraction tomography[J]. *Journal of Applied Physics*, 2008, 103(10): 103110.
- [189] BELANGER P, CAWLEY P, SIMONETTI F. Guided wave diffraction tomography within the born approximation[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2010, 57(6): 1405–1418.
- [190] HUTHWAITE P, SIMONETTI F. High-resolution guided wave tomography[J]. *Wave Motion*, 2013, 50(5): 979–993.
- [191] SHI F, HUTHWAITE P. Ultrasonic wave-speed diffraction tomography with under sampled data using virtual transducers[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2018, 65(7): 1226–1238.
- [192] DRUET T, TASTET J L, CHAPUIS B, et al. Autocalibration method for guided wave tomography with under sampled data[J]. *Wave Motion*, 2019, 89: 265–283.
- [193] CHANG M, YUAN S F, GUO F Y. Corrosion monitoring using a new compressed sensing-based tomographic method[J]. *Ultrasonics*, 2020, 101: 105988.
- [194] HAY T R, ROYER R L, GAO H, et al. A comparison of embedded sensor Lamb wave ultrasonic tomography approaches for material loss detection[J]. *Smart Materials and Structures*, 2006, 15(4): 946–951.
- [195] ZHAO X L, GAO H D, ZHANG G F, et al. Active health monitoring of an aircraft wing with embedded piezoelectric sensor/actuator network: I. Defect detection, localization and growth monitoring[J]. *Smart Materials and Structures*, 2007, 16(4): 1208–1217.
- [196] LIU K, MA S, WU Z, et al. A novel probability-based diagnostic imaging with weight compensation for damage localization using guided waves[J]. *Structural Health Monitoring: an International Journal*, 2016, 15(2): 162–173.
- [197] MOUSTAFA A, SALAMONE S. Fractal dimension-based Lamb wave tomography algorithm for damage detection in plate-like structures[J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2012, 23(11): 1269–1276.
- [198] ZENG L, LIN J, HUA J, et al. Interference resisting design for guided wave tomography[J]. *Smart Materials and Structures*, 2013, 22(5): 055017–055028.
- [199] WANG D, YE L, LU Y, et al. A damage diagnostic imaging algorithm based on the quantitative comparison of Lamb wave signals[J]. *Smart Materials and Structures*, 2010, 19(6): 065008.
- [200] MEMMOLO V, MONACO E, BOFFA N D, et al. Guided wave propagation and scattering for structural health monitoring of stiffened composites[J]. *Composite Structures*, 2018, 184: 568–580.
- [201] MOIX-BONET M, WIERACH P, LOENDERSLOOT R, et al. Damage assessment in composite structures based on acousto-ultrasonics—evaluation of performance[M]//*Smart Intelligent Aircraft Structures (SARISTU)*. Cham: Springer International Publishing, 2016: 617–629.
- [202] VAN VELSOR J K, GAO H, ROSE J L. Guided-wave tomographic imaging of defects in pipe using a probabilistic reconstruction algorithm[J]. *Insight—Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, 2007, 49(9): 532–537.
- [203] QING X P, BEARD S, SHEN S B, et al. Development of a real-time active pipeline

integrity detection system[J]. *Smart Materials and Structures*, 2009, 18(11): 115010.

[204] LIU K H, WU Z J, JIANG Y Q, et al. Guided waves based diagnostic imaging of circumferential cracks in small-diameter pipe[J]. *Ultrasonics*, 2016, 65: 34–42.

[205] GAO D Y, WU Z J, YANG L, et al. Guide waves-based multi-damage identification using a local probability-based diagnostic imaging method[J]. *Smart Materials and Structures*, 2016, 25(4): 045009.

[206] WANG D, YE L, SU Z Q, et al. Probabilistic damage identification based on correlation analysis using guided wave signals in aluminum plates[J]. *Structural Health Monitoring: an International Journal*, 2010, 9(2): 133–144.

[207] SHEEN B, CHO Y. A study on quantitative lamb wave tomogram via modified RAPID algorithm with shape factor optimization[J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2012, 13(5): 671–677.

[208] QING X P, CHAN H L, BEARD S J, et al. An active diagnostic system for

structural health monitoring of rocket engines[J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2006, 17(7): 619–628.

[209] MICHAELS J E. Effectiveness of in situ damage localization methods using sparse ultrasonic sensor arrays[C]//*Proceedings of Health Monitoring of Structural and Biological Systems 2008*. San Diego: International Society for Optics and Photonics, 2008.

[210] YANG Z Y, WU Z J, ZHANG J Q, et al. Acoustoelastic guided wave propagation in axial stressed arbitrary cross-section[J]. *Smart Materials and Structures*, 2019, 28(4): 045013.

[211] ZHOU K, XU X, ZHAO Z, et al. Excitation of plane Lamb wave in plate-like structures under applied surface loading[J]. *Smart Materials and Structures*, 2018, 27(2): 025011–025020.

[212] ZHOU K, ZHOU Z H, YANG Z Y, et al. Axisymmetric and non-axisymmetric Lamb wave excitation using rectangular actuators[J]. *Smart Materials and Structures*, 2019, 28(11): 115024.

[213] YANG Y, PENG Z K, ZHANG W M, et al. Parameterised time-frequency analysis

methods and their engineering applications: A review of recent advances[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2019, 119: 182–221.

[214] ZHANG J Q, WU Z J, YANG Z Y, et al. Multimode guided waves-based structural defect localization longitudinally and cross-sectionally in T-bars[J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 2020, 33(4): 04020017.

[215] 叶婷. 飞机起落架 300M 钢材料典型结构的健康监测研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2011.

YE Ting. Research on health monitoring system for typical structure of 300M steel materials of aircraft's landing-gear[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011.

通讯作者: 武湛君, 教授、博士, 科技部重点研发计划项目首席科学家, 国家奖励办自然科学基金评审专家, 研究方向为耐极端环境复合材料设计与性能表征; 复合材料低温贮箱; 结构健康监测理论、方法与技术; 飞行器关键结构设计与分析; 纳米/智能材料与结构, E-mail: wuzhj@dlut.edu.cn.

Research Progress in Damage Diagnostic Imaging of Aerospace Structures Based on Ultrasonic Guided Waves

ZHENG Yuebin¹, WU Zhanjun¹, LEI Zhenkun¹, GAO Dongyue², ZHOU Kai¹, ZHANG Jiaqi¹, YANG Zhengyan¹, ZOU Jianchao¹

(1. State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. School of Aeronautics and Astronautics, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, China)

[ABSTRACT] Damage diagnostic imaging approach based on ultrasonic guided waves (UGW) is a research hotspot in the fields of non-destructive testing and structural health monitoring, which can directly reflect the damage location and severity on aerospace structures. This paper summarizes the general process of UGW diagnostic imaging technology, introduces the research status of eight representative imaging algorithms, including phased array imaging, space-wave number filter imaging, inverse-time migration imaging, time reversal imaging, delay-and-sum imaging, model-based imaging, tomographic imaging and probabilistic-based imaging, and compares the application scope, advantages and disadvantages of these imaging algorithms. Then, the challenge and development trend of UGW diagnostic imaging technology are discussed according to the actual industrial application.

Keywords: Ultrasonic guided waves; Diagnostic imaging; Structural health monitoring; Non-destructive testing; Aerospace structure; Composite structures

(责编 大漠)