

DOI:10.19650/j.cnki.cjsi.J2412560

基于超声导波虚拟时间反转的多层异质金属粘接结构损伤定位*

刘 稳, 刘立帅, 项延训, 轩福贞

(华东理工大学上海市智能感知与检测技术重点实验室 上海 200237)

摘要:多层异质金属粘接结构由于其优异的比强度,被广泛用于承压设备、船舶、核装备等关键领域的核心部件,其长期服役在复杂苛刻的环境中,难免产生各种缺陷和损伤,进而影响装备服役安全。超声导波检测是一种潜在的无损检测方法,但是多层金属粘接结构中金属与非金属粘接层之间阻抗差异大,导致 Lamb 波传播特性复杂,很难通过基于时间信息的导波定位方法进行缺陷的检测和定位。故本文提出一种适用于多层结构的损伤存在概率成像方法并结合虚拟时间反转技术,对多层异质金属粘接结构的内表面缺陷进行无基准的检测和定位。结果表明,在几何尺寸为 300 mm 的板中,定位的缺陷坐标和实际缺陷位置中心坐标仅仅相差 2.74 mm,实现了对多层异质金属粘接结构内表面损伤的精准定位成像。

关键词: 多层异质金属粘接结构;虚拟时间反转;损伤指数;缺陷定位

中图分类号: TH70 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.99

Damage localization in multilayer heterogeneous metal bonded structures based on virtual time reversal of ultrasonic guided wave

Liu Wen, Liu Lishuai, Xiang Yanxun, Xuan Fuzhen

(Shanghai Key Laboratory of Intelligent Sensing and Detection Technology, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

Abstract: Due to its excellent specific strength, multilayer heterogeneous metal bonded structures are widely used as core components in key areas such as pressurized equipment, ships, and nuclear equipment, etc. Their long-term service in complex and harsh environments inevitably produces a variety of defects and damages, which in turn affects the safety of equipment in service. Ultrasonic guided wave inspection is a potential non-destructive testing method. However, the impedance difference between metal and non-metal bonding layers in multi-layer metal bonding structures complicates the propagation characteristics of Lamb waves, making defect detection and localization using time-based guided wave methods challenging. Therefore, this paper proposes a probabilistic imaging method of damage existence applicable to multilayer structures and combines it with the virtual time reversal technique to detect and localize the defects on the inner surfaces of multilayer heterogeneous metal-bonded structures without benchmarks. The results show that in a plate with a geometry of 300 mm, the difference between the coordinates of the localized defects and the center coordinates of the actual defect location is only 2.74 mm, which realizes the accurate localization of the damage on the inner surface of the multilayered heterogeneous metal bonded structure.

Keywords: multilayer heterogeneous metal bonded structures; virtual time reversal; damage index; defect localization

0 引言

多层异质金属粘结结构 (multilayer heterogeneous

metal bonded structures, MLHMBs) 具有较高的比强度、比模量和特殊性能,已广泛应用于航空航天、航海和核工业领域^[1-2]。然而,在生产和服役过程中,粘结结构会受到工艺、加工和恶劣服役环境的影响,导致材料表面、粘结

收稿日期: 2024-02-29 Received Date: 2024-02-29

* 基金项目: 国家重点研发计划 (2021YFC3001802)、国家自然科学基金 (12327807, 12025403) 项目资助

层和深层部件出现缺陷,如粘结层脱粘、气孔、内壁腐蚀等缺陷。缺陷的存在会严重影响服役设备的结构完整性,在核工业等特殊行业,甚至会导致核泄漏^[3-4]。因此,无损检测对确保 MLHMS 的安全性十分必要。现有的 MLHMS 研究,采用涡流脉冲热成像技术检测铅-钢金属粘接结构的脱粘缺陷和内部缺陷^[5-6],但由于测量深度有限,且涡流加热过程本身的高温会对粘接层造成不可预知的破坏,因此限制了其应用。超声导波因为能长距离传播,并且对传播路径附近的异质性保持高灵敏度,是被广泛认为定量识别复合结构损伤的最令人鼓舞的工具之一。尽管近年来,相关的基于 Lamb 波的复合材料层合板中缺陷检测方法被广泛报道^[7-10]。但针对多层异种金属粘接结构的超声导波缺陷检测却鲜有报道。相比较于单层结构而言,金属层与非金属粘接层明显的阻抗差异导致超声导波在此结构中传播特性复杂,还有多层本身导致其频散曲线往左下方移动,这进一步加剧了导波的频散和多模态。

传统基于缺陷散射飞行时间(time of flight, TOF)的定位方法,通过从不同的执行器-传感器对中提取 TOF,再利用延迟叠加集成 TOF 来重建缺陷的位置。一旦应用到多层结构中,由于其传播特性复杂和频散严重,很难找到不被其他导波模式污染的特定模式,损伤特征识别困难,严重影响到 TOF 的提取精度,限制了该方法在多层异种金属粘接结构的应用。因此不需要提取损伤散射时间信息的层析成像算法在这里更有优势。传统超声层析成像通过布置传感器的密集阵列,例如圆形、方形或矩形等,采用适当的数学模型与重建成像技术,反演出缺陷位置和尺寸,甚至损伤程度的图像重构,已被广泛应用于无损检测领域^[11-12]。Hay 等^[13]在传统超声层析成像的基础上提出损伤概率重构算法(reconstruction algorithm for probabilistic inspection of damage, RAPID),只需要比较损伤前后的信号特征参数,根据信号差异系数评估损伤存在的概率,成功应用于铝板结构中腐蚀模拟缺陷的损伤定位成像,具有较强的实际可操作性。然而损伤概率重构算法中的损伤指数(damage index, DI),比如相关系数^[14-15],能量比^[16],都是通过计算测试信号与基线信号之间的差异性所得,即需要基准信号,这限制了它的使用范围。采用 RAPID 进行无基准损伤定位往往更受研究者的关注。这其中,时间反转作为一种无基准技术已被广泛研究。Fink^[17]首次引入了时间反转(time reversal, TR)不变性的概念。时间反转方法的原理是基于声波的互易性,这意味着,如果介质完好无损,则输入信号可以在激发位置很好的重建。重建信号与原始输入信号的差异性可能表明缺陷的存在。Gangadharan 等^[18]利用传统的 TR 方法检测金属结构中的缺口,实现了无基线损伤成像。然而由于时间反转方法需要生成和记录

两次 Lamb 信号来计算每个传感路径的 DI,当使用密集阵列进行融合成像时,这使得该过程非常耗时。为了克服这一缺点,蔡建等^[19]提出了一种虚拟时间反转算法,该算法消除了对第 1 次接收信号反转之后再次激发和接收的需要,通过使用前向响应和输入信号获得的传递函数来完成虚拟的时间反转操作。

因此,本文首先研究了 MLHMS 中超声导波的传播特性,针对 MLHMS 这一特殊结构,将虚拟时间反转和 RAPID 技术相结合,在无基准下实现了对 MLHMS 内表面缺陷的精准识别和定位。

1 原 理

1.1 损伤概率成像算法

RAPID 可以通过计算损伤前后信号的差异来识别损伤,不需要波速等参数,尤其是在复杂传播特性的结构中,这一点显得尤为重要。该技术一般由信号比较和图像重建两部分组成。在信号对比部分,传统的基于信号能量差异性的损伤指数,对基准信号 $x_{ij}(t)$ 和损伤信号 $y_{ij}(t)$ 的信号能量进行计算:

$$DI = 1 - \frac{(Eu - Ed)}{Eu} \quad (1)$$

其中, Eu 和 Ed 分别为未损坏和损坏时 Lamb 波响应信号的能量值。根据各传感路径对应的 DI 值,对相邻区域的损伤概率分布进行重构。为了准确定位损伤,需要将所有传感路径对应的概率分布图进行叠加,则可得检测区域内任一点 (x, y) 的损伤分布概率为^[20]:

$$P(x, y) = \left(\sum_{k=1}^n P_{k(x, y)} \right)^b = \left(\sum_{k=1}^n D^2 W_k [R_k(x, y)] \right)^b \quad (2)$$

式中: $P_{k(x, y)}$ 是第 k 条传感路径在 (x, y) 位置出现损伤的概率, b 是图像增强因子,可以增强损伤区域的图像对比度,通常其值设置大于 1,这里设置为 3。

$W_k [R_k(x, y)]$ 表示加权分布函数:

$$W_k [R_k(x, y)] = \begin{cases} \frac{\gamma - R_k(x, y)}{\gamma - 1}, & R_k(x, y) < \gamma \\ 0, & R_k(x, y) \geq \gamma \end{cases} \quad (3)$$

其中, $R_k(x, y)$ 为离散点 (x, y) 到传感路径 $S_i \sim S_j$ 的距离, γ 是一个大于 1 的常数,是控制收发路径影响区域的比例因子,这里设置为 1.005^[14]。对所有路径的数据进行融合处理,其中 $P(x, y)$ 值较高的区域表示损伤的存在。

1.2 虚拟时间反转技术

根据声互易性原理,时间反转方法可实现在声源位置的信号重构,根据时反重构信号与原始激发信号的差异程度构造时反损伤指数,识别传播路径上的缺陷,从而

实现无基准的损伤定位成像。下图为时间反转重构信号的原理图,如图1所示。首先将压电片1作为激励传感器,在结构中输入激发信号 $I(w)$,作为接收传感器的压电片2接收到响应信号 $U_2(r, w)$,根据信号系统学表述为:

$$U_2(r, w) = I(w) K_{12}(w) G(r, w) \quad (4)$$

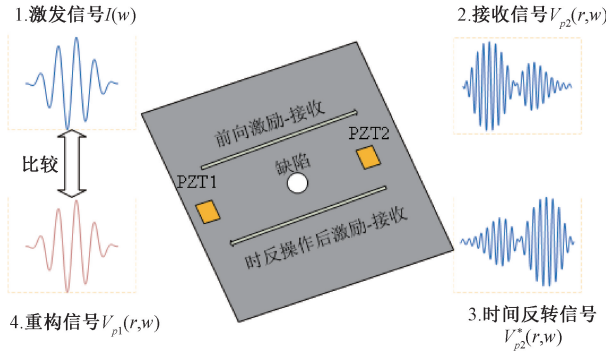


图1 时间反转重构信号模型示意图

Fig. 1 Schematic of the time-reversal reconstruction signal model

其中, $K_{12}(w)$ 表示压电片1和2的机电耦合系数乘积, $G(r, w)$ 表示结构的频率响应传递函数。由于信号在时域内取反转等同于在频域上取共轭,那么时反响应信号可写为:

$$U_2^*(r, w) = I^*(w) K_{12}^*(w) G^*(r, w) \quad (5)$$

将时反响应信号 $U_2^*(r, w)$ 由压电片2再次激发。根据互易性原理,在激励与接收传感器确定的结构中,互换激励和接收传感器位置后具有相同的响应传递函数,因此,将压电片1作为接收传感器时接收到的响应信号为:

$$\begin{aligned} U_1(r, w) &= U_2^*(r, w) K_{12}(w) G(r, w) = \\ I^*(w) K_{12}^*(w) K_{12}(w) G(r, w) G^*(r, w) &= \\ I^*(w) K(w) G(r, w) G^*(r, w) \end{aligned} \quad (6)$$

式中: $K(w)$ 表示 $K_{12}(w)$ 与 $K_{12}^*(w)$ 的乘积,虚拟的时间反转方法在上述信号模型中不考虑压电片的机电耦合系数,第一次响应信号可简化为:

$$U_2(r, w) = I(w) G(r, w) \quad (7)$$

由此得到传播路径上的频率响应传递函数:

$$G(r, w) = \frac{U_2(r, w)}{I(w)} \quad (8)$$

互换传感器位置后具有相同的传递函数,代入传递函数进行简化得到:

$$U_1(r, w) = U_2^*(r, w) \frac{U_2(r, w)}{I(w)} \quad (9)$$

由此表明,只需要进行一次激发与接收,通过数学计算完成时间反转和第2次激发接收过程,然后将频域信

号经过傅里叶逆变换还原到时域,即可得到与物理时间反转相同的重构信号。

时间反转重构信号与原始激发信号经过归一化处理后可得到相同波形的两个信号,通过比较两信号间的差异程度对传播路径上是否存在损伤进行识别与判断。根据互相关原理构建时反损伤指数^[21]:

$$DI = 1 - \frac{\left| \int_{t_1}^{t_2} I(t) U(t) dt \right|}{\sqrt{\int_{t_1}^{t_2} I(t)^2 dt \cdot \int_{t_1}^{t_2} U(t)^2 dt}} \quad (10)$$

其中, $I(t)$ 与 $U(t)$ 是已知原始激发信号和时反重构信号, t_1 与 t_2 表示两对比信号的始末时间。当结构中没有损伤时,激发信号与重构信号差别较小,时反损伤指数接近于0。当结构中存在损伤时,激发信号与重构信号的匹配程度较差,时反损伤指数发生变化,而且DI值越大表示传播路径上存在损伤的概率值也越大。通过这种方法,可以在不依赖基准信号的情况下,采用RAPID对结构缺陷进行重构成像。

2 数值模拟

2.1 仿真设置

在商业有限元软件 ABAQUS 上进行仿真模拟。采用3+2层试样,即3层金属铜-钢-铝和中间粘接层环氧树脂,其中第1层铜板尺寸为300 mm×300 mm×1 mm;第2层钢板尺寸为300 mm×300 mm×1 mm,第3层铝板尺寸为300 mm×300 mm×2 mm。层与层之间的接触面设置为tie,激发汉宁窗调制的正弦波信号,中心频率300 kHz,周期数5 cyc,幅值 1×10^{-6} m。为了获得足够的精度,元素的尺寸约为0.025 mm×0.025 mm×0.025 mm,使得Lamb的每个波长至少有20个元素^[22-23],使用8节点三维简化集成线性单元C3D8R对板结构进行建模,使用8 ns的时间步长来确保导波产生的精度^[24]。

2.2 多层结构导波能量分布研究

通过在铜板上表面的节点上施加离面位移载荷,读取沿着板厚方向每个单元的离面位移曲线,分别取其位移平方值的时域积分并作归一化处理。以每个单元中心点位置坐标表示单元位置,绘制归一化能量沿板厚变化的曲线,如图2所示。从能量分布曲线中可以看出,就本文所给结构而言,结构中导波能量主要分布在铜板层,导波信号能量沿着厚度方向分布不均,总体沿着深度分布逐渐减小,能量在每一金属层分布较为均匀,铜板钢板与铝板的能量近似成比例关系,在两个粘接层位置处,能量分布有明显的突然减小。

2.3 含缺陷多层结构导波信号分析

在不同层设置大小相同并且同为1/2倍层厚深度的

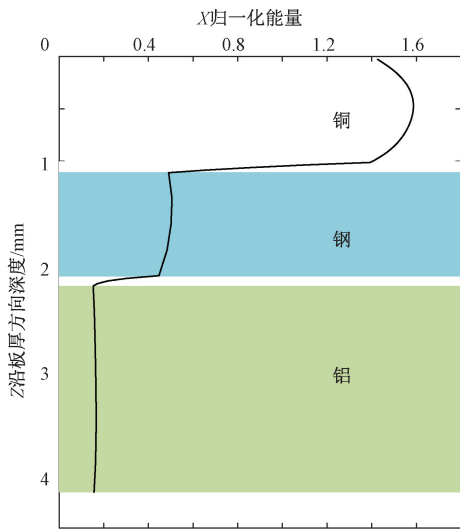


图2 Lamb波能量沿板深度分布示意图

Fig. 2 Schematic of Lamb wave energy distribution along the depth of the plate

缺陷,如图3所示。激发传感器位于第1层铜板的上表面,后续称为外表面,则第3层铝板的下表面称为内表面。

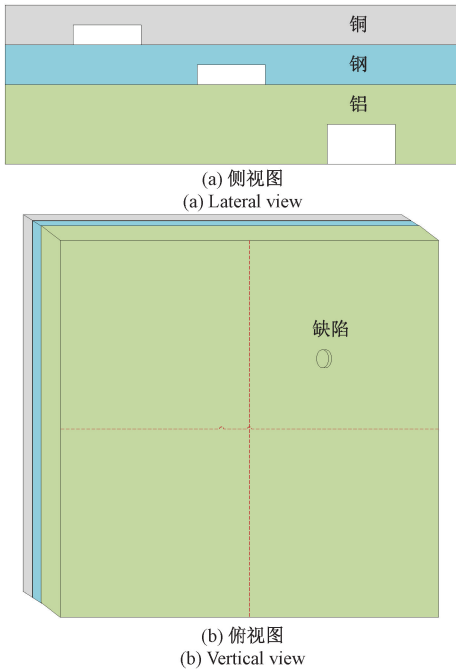


图3 仿真缺陷设置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the simulation defect setup

提取基准板与缺陷板各层中间节点的位移信号进行对比分析,如图4所示。当缺陷位于第1层铜板上,其缺陷路径上的回波信号更加偏离基准值,即信号差异值较大,在实际检测中容易检测。而位于第3层铝板内表面

的盲孔缺陷,更靠近基准值,在实际工况中较难检测到。这个结果也符合上节的论断,由于导波主要能量集中在第1层铜板上,所以当检测不同层存在的缺陷时,能量分布大的层中缺陷引起的差异性较大。而位于第3层内表面的缺陷,由于本身第3层导波能量分布较小,其缺陷有无对信号的影响较小,即表现为缺陷信号偏离基准信号很小,检测较为困难。

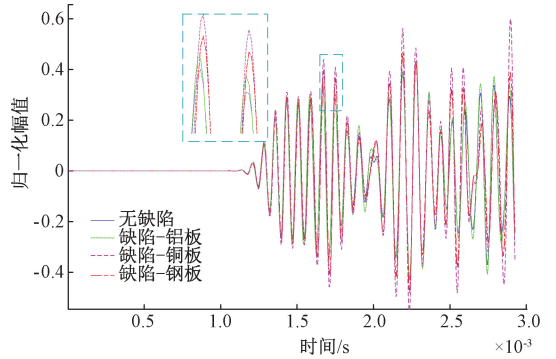


图4 缺陷位于不同层时信号对比图

Fig. 4 Comparison of signals when defects are located in different layers

进一步分析超声传播场:图中白圆圈表示缺陷位置,图中白色菱形图标表示激励传感器位置,均为外表面激发。分别在第1层和第3层开盲孔缺陷如图3所示,从不同视角分析观察缺陷位于不同层的散射场云图,如图5和6所示。

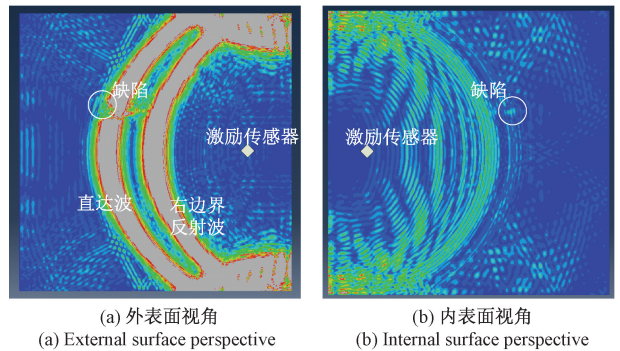


图5 盲孔位于第1层时不同视角云图

Fig. 5 Cloud image of different views when the blind hole is located in the first layer

由图5和6可知,靠近激发传感器位置的声波为右边界的反射回波,外表面激发时,外表面视角中第1层的导波能量明显大于内表面视角的第3层,验证了2.2节导波能量在不同金属层的分布不均。如图5所示,当第1层铜板有盲孔缺陷时,外表面视角来看第1层有明显的散射回波,内表面视角的第3层也有较弱的散射波。值得注意的是,当第3层存在盲孔缺陷时,其内表面视角的

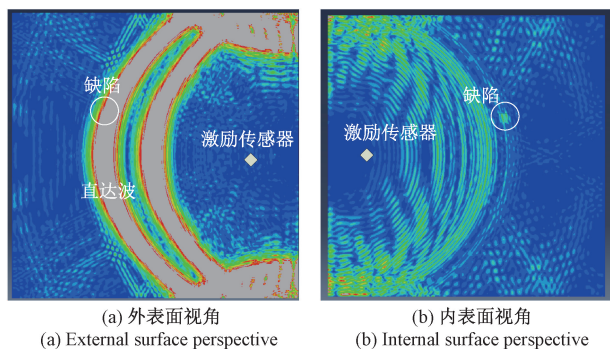


图6 盲孔位于第3层时不同视角云图

Fig. 6 Cloud image of different views when the blind hole is located in the third layer

第3层可发现有微弱的散射波,但外表面视角的第1层并未发现相应的缺陷散射回波,即第3层内部出现缺陷时,其散射回波很难透过两个粘接层之后传播到带有传感器的第1层外表面,外表面存在缺陷时同理。进一步分析得出,这是由于金属与非金属的粘接层声阻抗严重不匹配造成的,缺陷处的散射回波基本只在缺陷所处层内传播,很难透过两个粘接层之后传播到其他金属层。这也进一步验证了:基于提取缺陷反射波时间信息的检测成像手段在多层金属粘接结构中可能会失效,因为实际操作中,很有可能检测不到缺陷微弱的散射回波信号,其时间信息更难以提取。然而本文所提的损伤概率重构成像算法其不考虑时间信息,利用透射波信号则可避免上述问题。

3 实验验证

3.1 试样制备与实验平台

本文采用3+2层金属粘接试样,即3层金属钢-铝-铜-和中间粘接层环氧树脂,尺寸和仿真一致。在铝板上加工大小为 $\Phi 10$ mm的盲孔模拟腐蚀坑缺陷,内表面盲孔深度1.5 mm。实验测量系统包括超声测试系统,示波器、可调衰减器、功率放大器、压电片组成的传感器阵列以及各种连接线,如图7所示。通过超声测试系统产生激励脉冲信号,再通过粘接在待测试样表面的压电片将信号传播到待测构件中。

实验激发频率为300 kHz,周期数为5。由于声波在采集过程中不可避免的会受到噪声干扰,并且有可能收到采集系统电路的串扰影响或其他频率干扰,为了使重构信号更加接近原始激发信号,需要对经过虚拟时间反转处理后的重构信号进行滤波处理。

3.2 基于飞行时间的椭圆定位成像结果

基于飞行时间的椭圆定位成像算法以激发和接收传

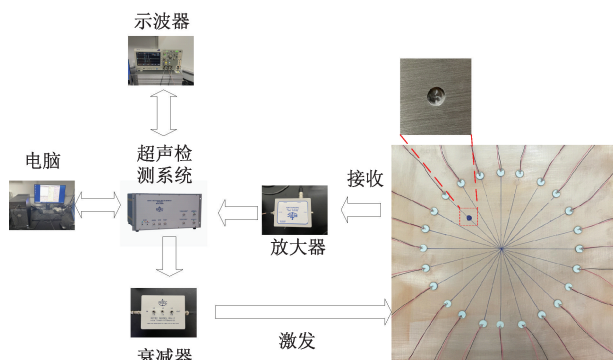


图7 实验测量系统组成示意图

Fig. 7 Schematic diagram of experimental measurement system components

感器对作为椭圆的焦点,通过分析基准信号与缺陷信号的差值信号来确定损伤特征的时间信息,结合传播群速度确定椭圆轨迹,依次激发和接收多个传感器,确定多个携带缺陷信息的椭圆路径,多个椭圆轨迹的交叉处为缺陷位置。利用该算法多层金属结构中的盲孔缺陷进行损伤识别与定位研究,如图8所示,图中白色圆圈代表缺陷所处实际位置。

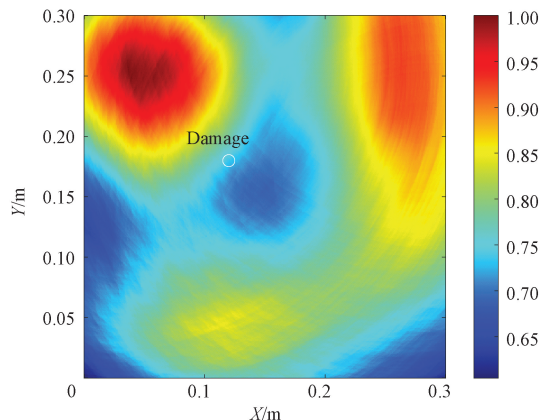


图8 基于飞行时间的椭圆定位方法(阈值处理前)

Fig. 8 Time-of-flight based elliptical localization method (before thresholding)

对图8进行阈值处理后得到图9。如图8和9所示,采用基于飞行时间的椭圆定位方法对多层结构定位时,很有可能造成多个缺陷的误判,即使经阈值处理后,其定位结果与缺陷实际位置仍偏差过大,即无法准确地对多层结构中的缺陷进行有效识别和定位成像。这其中,无法准确地提取出缺陷的散射波传播时间是造成定位失效的主要原因。与单层结构不同,Lamb波在多层异质粘接结构传播中,首先声阻抗严重不匹配(粘接层的存在)使得声波在界面处发生严重的反射,折射,衰减等,其次则是多层结构本身造成Lamb频散曲线往左下方移动,即频散更

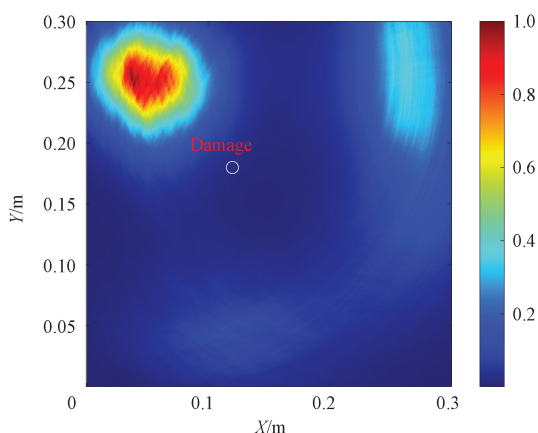


图 9 基于飞行时间的椭圆定位方法(阈值处理后)

Fig. 9 Time-of-flight based elliptical localization method (after thresholding)

加严重,传播模态更加复杂,提取单模态 Lamb 波的传播时间更加困难。另外,在多层结构中,导波能量分布不均且待检测缺陷位于第 3 层其能量占比较小,加剧了散射回波很难透过两个粘接层传播到带有传感器的外表面。

3.3 损伤概率重构成像结果

根据式(10),需要找到合适的位置来截断原始激励信号和重建信号。一般而言,信号截断的宽度为原始激发信号宽度,将原始激励信号的最大值与重构信号最大值对齐后,Liu 等^[25-26]给出了不同周期下截取信号的范围,信号周期数 5,截取下限距离峰值点为 9/4 周期,上限距离峰值点为 11/4 周期。本文激发依次激发和接收压电传感器,完成所有传播路径信号的采集并储存在计算机。以传感路径 1~10 为例,首先通过超声测量系统得到原始激发和接收信号如图 10 所示,通过式(9)计算得到该传播路径下虚拟时间反转重构信号如图 11(a)所示,截取一定长度的重构信号并与激发信号对齐如图 11(b)所示。通过式(10)计算得出 1~10 传播路径下的时反损伤指数为 0.169 8。同理可得到传感路径 8~16 的虚拟时间反转重构信号如图 12 所示,计算得到 8~16 传播路径下的时反损伤指数为 0.249 7。

为了尽量避免边界反射的影响,文中采取的是截取直达波信号进行处理。当遇到边界反射不可能完全用直达波消除时,可通过在板中间位置增加传感器以增加更多中间的传感路径,这样不仅可以很容易将边界反射波去除,成像效果还可以进一步提升。

由时间反转损伤指数的计算式(10)中,若是重构信号与原始激发信号足够差异性大的话,那么可以认定存在缺陷的概率值大,由于在实验中环境等因素的干扰,即使没有缺陷的路径其损伤指数也可能不为 0,但是只要这个值相对较小,当所有的路径融合处理后其对结果的

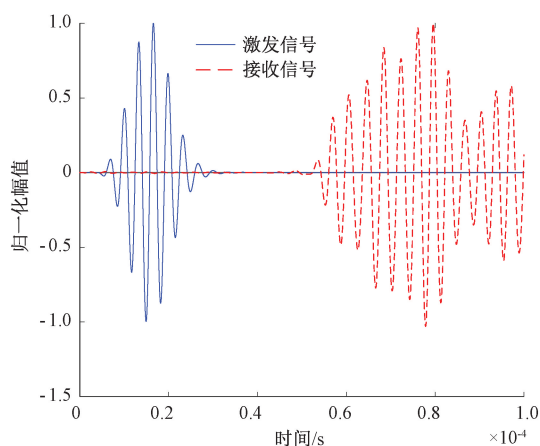


图 10 传感路径 1~10 的激发信号和接收信号

Fig. 10 Excitation signals and received signals for sensing paths 1~10

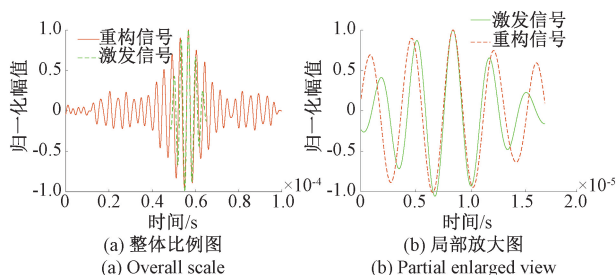


图 11 传感路径 1~10 的虚拟时间反转重构信号以及原始激发信号

Fig. 11 Virtual time-reversal reconstructed signals and original excitation signals of sensing paths 1~10

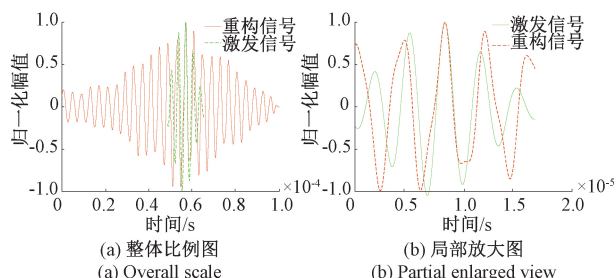


图 12 传感路径 8~16 的虚拟时间反转重构信号以及原始激发信号

Fig. 12 Virtual time-reversal reconstructed signals and original excitation signals of sensing paths 8~16

影响不大。根据虚拟时间反转方法计算所得每个传感路径的 DI 值并进行损伤识别,然后融合来自各个路径的损伤概率分布以构建最终的损伤概率图,如图 13 所示。对图 13 进行阈值处理后得到图 14。本文中的损伤概率图像是通过对所有路径上概率求和获得的。

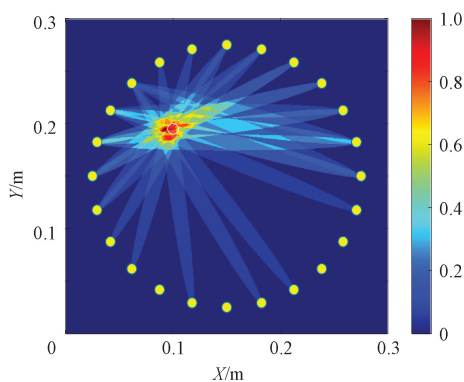


图 13 损伤概率重构图(阈值处理前)

Fig. 13 Damage probability reconstruction map (before thresholding)

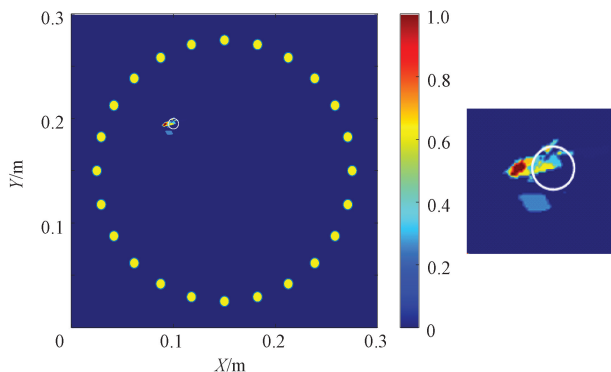


图 14 损伤概率重构图(阈值处理后)

Fig. 14 Damage probability reconstruction map (after thresholding)

如图 13 和 14 所示,图中像素值较高的区域靠近结构中实际存在的缺陷(空心圆圈处),即新提出的基于虚拟时间反转的损伤识别算法能够直观的定位出多层异质金属粘接结构中存在的盲孔缺陷。以图中像素值最高点的坐标到实际缺陷位置坐标的距离为定位偏差,阈值处理后的图中幅值最强区域的坐标即为定位的缺陷坐标,这 and 实际缺陷位置中心坐标仅仅相差 2.74 mm,具有良好的定位精度和准确性。

4 结 论

基于虚拟时间反转方法,提出了一种适用于多层异质金属粘接结构的损伤存在概率算法,对多层金属结构进行仿真和实验研究,提取传播路径的时反损伤指数,得到了损伤概率图像,验证了该方法的可行性与准确性。利用仿真模拟,得出了多层金属结构中,位于某一层的缺

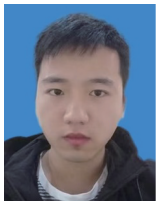
陷其损伤散射信号难以透过中间非金属粘接层传播到其他金属层,故基于反射/散射时间信息的成像方法不再有效。实验结果表明,新提出的定位成像算法结果精确,图像清晰。该方法简单,快速,能够将结构损伤位置可视化,具有一定的实际工程应用价值。

参考文献

- [1] BALDAN A. Adhesively-bonded joints and repairs in metallic alloys, polymers and composite materials: Adhesives, adhesion theories and surface pretreatment[J]. *Journal of Materials Science*, 2004, 39(1): 1-49.
- [2] DELZENDEHROOY F, AKHAVAN-SAFAR A, BARBOSA A Q, et al. A comprehensive review on structural joining techniques in the marine industry[J]. *Composite Structures*, 2022, 289: 115490,1-38.
- [3] XIAO X, ZHOU G ZH, WANG K Q, et al. Study on in-service inspection of nuclear fuel assembly failure using ultrasonic plate wave[J]. *Sensors*, 2022, 22(19): 7606.
- [4] YI W G, LEE M R, LEE J H, et al. A study on ultrasonic testing for nondestructive evaluation of thermal fatigue crack in pipelines[J]. *Key Engineering Materials*, 2006, 321: 747-750.
- [5] LI X X, GAO B, TANG G P, et al. Feasibility study of debonding NDT for multi-layer metal-metal bonding structure by using eddy current pulsed thermography[C]. 2016 IEEE Far East NDT New Technology & Application Forum (FENDT). Nan Chang, China: IEEE, 2016: 214-217.
- [6] LI X X, GAO B, ZHU Y Y, et al. Periodic pulsed thermography for inner defects detection of lead-steel bonded structure[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2018, 18(11): 4679-4688.
- [7] FENG B, RIBEIRO A L, RAMOS H G. A new method to detect delamination in composites using chirp-excited Lamb wave and wavelet analysis[J]. *NDT & E International*, 2018, 100: 64-73.
- [8] MUNIAN R K, MAHAPATRA D R, GOPALAKRISHNAN S. Lamb wave interaction with composite delamination[J]. *Composite Structures*, 2018, 206: 484-498.

- [9] SHOJA S, BERBYUK V, BOSTRÖM A. Delamination detection in composite laminates using low frequency guided waves: Numerical simulations [J]. *Composite Structures*, 2018, 203: 826-834.
- [10] GAO F, HUA J D, WANG L F, et al. Local wavenumber method for delamination characterization in composites with sparse representation of Lamb waves[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2021, 68(4): 1305-1313.
- [11] 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): 149-155.
- WANG Q, YAN X J, CHEN X H, 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): 149-155.
- [12] LEONARD K R, MALYARENKO E V, HINDERS M K. Ultrasonic Lamb wave tomography [J]. *Inverse Problems*, 2002, 18(6): 1795-1808.
- [13] HAY T R, ROYER R L, GAO H D, 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.
- [14] 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.
- [15] MUSTAPHA S, YE L, DONG X J, et al. Evaluation of barely visible indentation damage (BVID) in CF/EP sandwich composites using guided wave signals [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2016, 76-77: 497-517.
- [16] IHN J B, CHANG F K. Pitch-catch active sensing methods in structural health monitoring for aircraft structures [J]. *Structural Health Monitoring*, 2008, 7(1): 5-19.
- [17] FINK M. Time reversal of ultrasonic fields. I. Basic principles [J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, 1992, 39(5): 555-566.
- [18] GANGADHARAN R, MURTHY C R L, GOPALAKRISHNAN S, et al. Time reversal technique for health monitoring of metallic structure using Lamb waves[J]. *Ultrasonics*, 2009, 49(8): 696-705.
- [19] 蔡建, 石立华, 袁慎芳. 基于虚拟时间反转的高分辨率复合材料板结构损伤成像[J]. *复合材料学报*, 2012, 29(1): 183-189.
- CAI J, SHI L H, YUAN SH F. High-resolution damage imaging for composite plate structures based on virtual time reversal [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2012, 29(1): 183-189.
- [20] LIU Y, ZHOU S, NING H, et al. An inverse approach of damage identification using Lamb wave tomography[J]. *Sensors*, 2019, 19(9): 2180.
- [21] 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.
- [22] YANG B, XUAN F ZH, CHEN SH 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.
- [23] ALKASSAR Y, AGARWAL V K, ALSHRIHI E. Simulation of Lamb wave modes conversions in a thin plate for damage detection [J]. *Procedia Engineering*, 2017, 173: 948-955.
- [24] TUA P S, QUEK S T, WANG Q. Detection of cracks in plates using piezo-actuated Lamb waves [J]. *Smart Materials and Structures*, 2004, 13(4): 643-660.
- [25] LIU ZH, 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.
- [26] LIU Z, ZHONG X, DONG T, et al. Delamination detection in composite plates by synthesizing time-reversed Lamb waves and a modified damage imaging algorithm based on RAPID: Time Reversal; Lamb Waves; Composite Plate; Delamination; RAPID [J]. *Structural Control and Health Monitoring*, 2017, 24(5): e1919.

作者简介



刘稳,2018 年于燕山大学获得学士学位,现为华东理工大学机械与动力工程学院博士研究生,主要研究方向为:超声相控阵成像、超声导波定位检测等。

E-mail:1104347846@ qq. com

Liu Wen received his B.Sc. degree from Yanshan University in 2018 and is currently a Ph.D. candidate at the School of Mechanical and Power Engineering, East China University of Science and Technology (ECUST). His main research interests include ultrasonic phased-array imaging, and ultrasonic guided-wave localization detection.



项延训(通信作者),2000 年于同济大学获得学士学位,2003 年于同济大学获得硕士学位,2011 年于华东理工大学获得博士学位,现为华东理工大学教授,主要研究方向为材料微损伤非线性超声检测、超声导波检测及成像、声学超材料与声场调控技术、检测数据挖掘与机器学习。

E-mail:yxxiang@ ecust. edu. cn

Xiang Yanxun(Corresponding author), received the B.Sc. degree from Tongji University in 2000, the M.Sc. degree from Tongji University in 2003, and the Ph.D. degree from East China University of Science and Technology (ECUST) in 2011, and is now a professor at ECUST, with the following main research interests: Nonlinear ultrasonic detection of material microdamage; ultrasonic guided wave detection and imaging; acoustic metamaterials and acoustic field modulation techniques; detection data mining and machine learning.