文章编号：1674－2869(2025)01－0080－05

Lamb波全聚焦成像的薄板结构损伤识别方法

王高平，李致远，关可庆，苑东旭
武汉工程大学机电工程学院，湖北 武汉 430205

摘 要：针对大型各向同性板状结构在使用过程中易出现疲劳、裂纹，从而导致工程结构被破坏的问题，提出了一种针对板状结构损伤识别的Lamb波全聚焦成像方法，将相位相干算法应用于结构的缺陷检测以增强成像的信噪比和分辨率。首先根据COMSOL仿真分析得出实验的可行性，通过对回波信号进行延时处理，扩大损伤点信号幅值的贡献，在MATLAB软件中对单个和多个圆形通孔损伤进行识别成像。结果表明，Lamb波全聚焦成像方法能够对损伤进行识别，且在相位相干成像算法的加权下，有效抑制结构噪声的影响，提高了信噪比并且对多个相邻损伤的分辨能力得到了加强，最大误差率不超过4.1%，达到提高板状结构损伤检测能力的目的。

关键词：Lamb波；薄板结构；损伤检测；全聚焦成像方法；相位相干
中图分类号：V252.2 **文献标识码**：A **DOI**：10.19843/j.cnki.CN42-1779/TQ.202401014

Lamb wave total focusing imaging method for damage identification in thin plate structures

WANG Gaoping, *LI Zhiyuan*, *GUAN Keqing*, *YUAN Dongxu*
School of Mechanical and Electrical Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, China

Abstract: To address the issue of fatigue and cracks that commonly occur in large isotropic plate structures during operation, which can lead to structural damage, we proposed a Lamb wave total focusing imaging method for damage identification in plate structures. This method applies a phase coherence algorithm to detect defects in structures to enhance the signal-to-noise ratio and resolution of imaging. The feasibility of the experiment was firstly analyzed based on COMSOL simulation, and the contribution of the signal amplitude at the damage point was enlarged by delaying the echo signal, and the single and multiple damages were identified and imaged in MATLAB software. The results show that the Lamb wave total focusing imaging method can effectively identify damages. And under the influence of the phase coherent imaging algorithm, it can mitigate structural noise, improve the signal-to-noise ratio, and enhance the resolution for adjacent damages, with a maximum error rate not exceeding 4.1%. This method significantly boosts the damage detection capability in plate structures.

Keywords: Lamb wave; thin plate structure; damage detection; total focusing imaging method; phase coherence

在大型工业制造领域，如桥梁、飞机和轮船中广泛使用各种各向同性的板类结构。高强度的工作环境对材料的耐久性和稳定性要求极高[1-2]。Lamb波在大型各向同性的板材结构健康检测方面有巨大的发展前景，成为结构健康检测领域的关注焦点[3]。超声相控阵技术利用多个阵元探头通过对声束的延迟发射，改变波束的聚焦点位置和偏转角度进而实现对整个物体的扫描。随着科

收稿日期：2024-01-17
基金项目：湖北省自然科学基金(2013CFB321)；武汉工程大学第十五届研究生教育创新基金(CX2023260)
作者简介：王高平，博士，副教授。Email：1980859690@qq.com
引文格式：王高平，李致远，关可庆，等. Lamb波全聚焦成像的薄板结构损伤识别方法[J]. 武汉工程大学学报，2025，47(1)：80-84，92.

学技术的增强，基于相控阵技术的后处理算法逐渐成为无损检测领域备受关注的研究方向之一。全聚焦方法（total focusing method，TFM）利用声波信号对成像区域中每个虚拟单元格进行聚焦，通过对声波的相干叠加最终生成图像。该方法充分利用各阵元所接收的信息，对超声回波信号进行处理，对被测区域内的任意点进行聚焦，实现区域内图像的表征，成像精度更高、缺陷检测能力更强[4]。2005年，Holmes等[5]提出了TFM损伤成像检测方法，通过实验发现TFM对于小缺陷有更好的检测精度和更大的检测覆盖率。该算法在更好地判断缺陷种类和大小的同时，解决常规相控阵技术无法对尺寸小于波长一半的缺陷进行检测的问题。但常规TFM仅考虑反射波幅值的数据特性，且Lamb波在传播过程中因其固有的频散特性引起波包弥散、幅值降低，最终导致成像质量下降。

相位相干成像（phase coherence imaging，PCI）是一种基于相位相干性的后处理成像加权算法。PCI利用声波信号中的相位信息进行成像，该算法可以对TFM的成像结果进一步处理，从阵列信号中提取相位信息构建加权因子，动态加权处理放大相位分布对幅值的贡献[6]。此外PCI处理后还能减小波束的宽度，提高成像效果，显著提升信噪比和分辨率。以COMSOL软件作为仿真工具，建立32阵元TFM模型，在MATLAB软件中根据TFM识别损伤。建立含有单损伤和双损伤铝板的损伤模型，并对损伤进行成像。

1　结构损伤定位及成像原理

1.1　TFM

TFM是基于全矩阵采集（full matrix capture，FMC）的后处理成像方法。超声阵列换能器包含n个阵元，各阵元依次发射脉冲信号，并且所有的阵元都参与回波信号的接收。第i个阵元发射的超声波信号被第j个阵元接收，得到回波信号$S_{ij}(i,j=1,2,\cdots,n)$。最后采集得到1个$n\times n$的数据集，成像原理如图1所示，全矩阵数据分布如图2所示。

实验以长方形铝板作为研究对象，坐标系中心点为铝板中点，横向x轴为待测物体表面长度方向，纵向z轴为待测物体宽度方向。将被检测区域划分为多个均匀排列的区域，P为待测物体上任意一点，通过计算点P与各个阵元之间的路径大小，获取不同点在每一列回波信号中所对应的幅值。将全矩阵数据集的各列信号进行叠加。成像原理如图3所示。



图1　全矩阵数据采集示意图

Fig. 1　Schematic diagram of full matrix data collection

	1	…	j	…	n
1	S_{11}	…	S_{1j}	…	S_{1n}
⋮	…	…	…	…	…
i	S_{i1}	…	S_{ij}	…	…
⋮	…	…	…	…	…
n	S_{n1}	…	…	…	S_{nn}

图2　采集得到的全矩阵数据

Fig. 2　The collected full matrix data

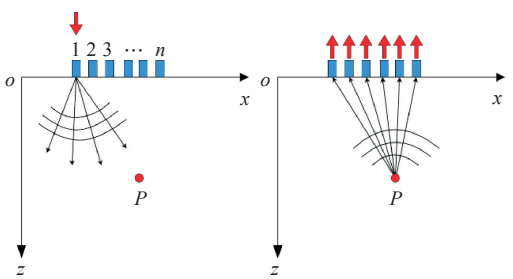

图3　TFM示意图

Fig. 3　Schematic diagram of TFM

P点坐标(x,z)的幅值$I(x,z)$表示为：

$$I(x,z)=\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}S_{ij}\left[t_{ij}(x,z)\right] \tag{1}$$

式中t_{ij}为第i个阵元发射信号后经过损伤反射回来的回波信号到第j个阵元处所需要的时间。

$$t_{ij}(x,z)=\frac{\sqrt{(x-x_i)^2+z^2}\pm\sqrt{(x-x_j)^2+z^2}}{c} \tag{2}$$

式中x_i、x_j分别是铝板发射阵元的横坐标和接收阵元的横坐标，c为声波在铝板中的传播速度。

1.2　PCI

PCI通过接收信号的相位信息，构建相位权重因子，通过动态加权处理有效降低图像中相位分布散乱的结构噪声幅值信号，保留相位分布一致的缺陷回波幅值，提高了缺陷回波的信噪比，成像效果也得到了增强[7]。

当激励信号经过缺陷时，声波信号发生反射或衍射，因此返回信号的相位就会集中在1个小频带内，相位的分布一致，相干性较高。而背景噪声的相位没有中心频率，噪声信号中的相位分布非

常散乱，相位之间的相干性比较低。

以虚拟聚焦点P处图像重建的PCI过程为例，对全矩阵采集到的数据进行Hilbert变换，其相位信息为：

$$|h|\mathrm{e}^{\varphi}=|h|\left(\cos\varphi+\mathrm{j}\sin\varphi\right) \tag{3}$$

其中，$|h|$为信号的模，φ代表信号相位。

通过分析采集到的信号的相位标准差，构建循环相干因子（circular coherence factor，CCF），其公式如下：

$$C_{\mathrm{CCF}}(x,z)=1-\sqrt{\left[\mathrm{var}\left(\cos\varphi\right)+\mathrm{var}\left(\sin\varphi\right)\right]} \tag{4}$$

其中，var(·)表示像素点坐标x、z到步进探头间距离的方差，其表达式如下：

$$\mathrm{var}\left(\cos\varphi(x,z,i)\right)=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(\cos\varphi\right)^{2}-\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\cos\varphi\right)^{2} \tag{5}$$

$$\mathrm{var}\left(\sin\varphi(x,z,i)\right)=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(\sin\varphi\right)^{2}-\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\sin\varphi\right)^{2} \tag{6}$$

利用CCF对图像进行加权处理，重建图像的幅值为I_{CCF}，表达式如下：

$$I_{\mathrm{CCF}}=\left|C_{\mathrm{CCF}}(x,z)\,I(x,z)\right| \tag{7}$$

CCF的取值范围是[0,1]，数值越小相干程度越差，数值越大相干程度越好。当相位分布散乱时，CCF数值较低，加权处理后噪声信号的幅值会大幅度降低；相反CCF数值越大的像素点，相应的幅值会得到加权放大。TFM仅利用回波信号中的幅值进行图像重建，而PCI能够对信号中的缺陷和噪声信号进行判别，在构建损伤检测图像时能够更有助于缺陷定位精度的提高。

2 数值仿真模拟实验

2.1 建立仿真模型

采用COMSOL仿真软件建立三维仿真模型，验证PCI对图像的增强效果。建立400 mm×400 mm×4 mm的铝板模型，铝板的材料选择软件材料库中的Aluminum，线性阵列中运用32个阵元，其中阵元以点作为激励源，阵元的直径为4 mm，阵元间隔6 mm，以铝板上边界中点位置为原点，以水平直线建立x轴，阵元均匀排列在x轴正负两侧。对铝板进行网格划分，网格大小选择为声波在铝板中传播速度的1/10。以所建立的坐标轴为基准，缺陷选择直径为2.5 mm的通孔缺陷，其圆心坐标分别为(100,100)和(150,100)。

同时对压电陶瓷换能器（piezoelectric ceramic transducer，PZT）进行分析，实验选用的PZT为PZT-30，具体的几何参数为2.5 mm×4.0 mm×0.8 mm，查阅材料得到PZT-30的相关特征属性[7]。

为了使PZT在工作状态下发挥最大性能，需要在不同频率下对PZT进行振型分析，得出在最大振幅时对应的谐振频率。为避免Lamb波的频散效应影响，激励信号的激发频率要小于铝板中对称模态S_0和反对称模态A_0的截止频率，才能保证激励单一模态下的Lamb波信号，铝板中Lamb波群速度频散曲线模态分布如图4所示，其中A_m和S_m分别表示Lamb波的第m种模态，m=0，…，4。

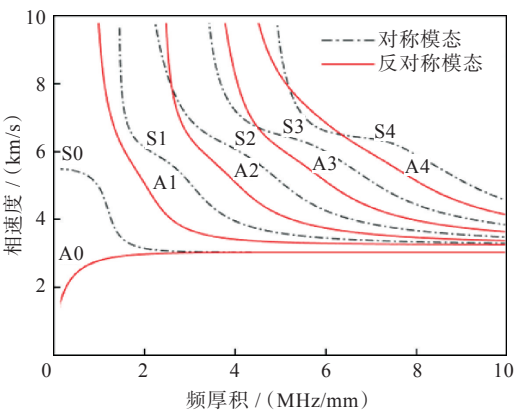

图4 群速度频散曲线

Fig. 4 Group velocity dispersion curve

对PZT的正、逆压电效应进行仿真分析，根据频散曲线图在140~180 kHz频率范围内均匀选取10个阶段的振动模型，每阶振动模型用解编号表示，PZT的位移量大小如图5所示。

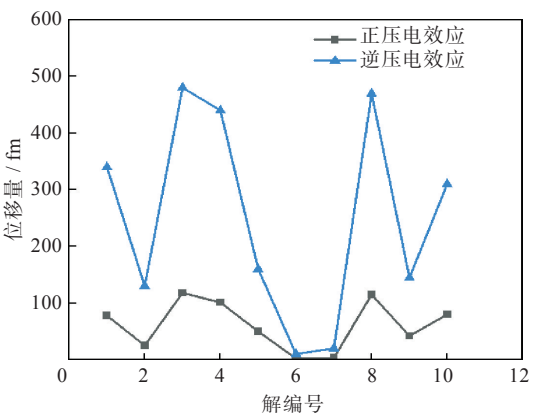

图5 正、逆压电效应PZT振动位移数据图

Fig. 5 Data plots of positive and inverse piezoelectric effect PZT vibration displacement

如图5所示，在解编号2到解编号4的正、逆压电效应中，即频率范围为145~155 kHz内，PZT的位移量呈现上升趋势，在解编号3位置处，即150 kHz时，位移量趋于稳定。在解编号5、6、7中位移量逐渐下降并在解编号8、9、10中位移量的变化情况难以控制，位移的大小决定了PZT的振动

幅度。综上，为使PZT在实验和仿真中保持最佳的工作性能，利于信号的采集和处理，故本次仿真和实验选择的激励信号频率为150 kHz[8]。

在激励信号的选择中多采用窄带激励信号激励超声波，窄带信号可以使声波信号的频率变得更集中。采用窄带激励作为激励信号时，Lamb波传播过程模态少，对比不同周期下的时域与频域图，信号中的带宽越窄，越能减少频散现象的出现，更易于分析[9]。实验选择加载汉宁窗的正弦函数调制信号$q(t)$，周期数为5，表达式如下：

$$q(t)=0.5\left(1-\cos 2\pi f_c t/5\right)\times\sin\left(2\pi f_c t\right) \quad (8)$$

式中f_c为中心频率。

2.2　仿真成像结果

对扫描区域进行最终成像，利用全聚焦成像对全矩阵数据做延时计算，图6(a-b)为TFM对铝板中单个和多个圆形通孔损伤进行成像的结果。观察得到图像的分辨率较差，在成像位置有较大的结构噪声，虽能够对损伤的位置进行确定但对多损伤中数量的判断和损伤面积的判定有一定的影响。

经过TFM直接成像后再使用PCI对回波幅值进行加权。将经过PCI处理后的效果图[图6(c-d)]与TFM成像进行对比，多损伤的定位位置更精确，对于损伤面积和数量判定也更加精准，图像噪声明显降低。

3　全聚焦成像实验分析

3.1　实验设计

为验证本文方法的可靠性，按照图7搭建实验平台。实验材料的铝板与仿真实验中的信息一致，在铝板上设置直径为2.5 mm的通洞缺陷，探头的中心频率与仿真中调制信号的中心频率一致，各探头阵元的位置与模拟实验中的阵元位置相匹配。通过依次激励各个换能器，记录其余通道接收回波的数据，将数据处理后进行成像，成像效果分别如图8(a-b)所示，通过PCI加权处理后的成像结果如图8(c-d)所示。

3.2　成像分析

PCI可以对多个损伤进行更好的成像识别。PCI处理后的阈值化处理图像如图9所示，圆圈位置为实际损伤位置，椭圆形圆点为检测到的损伤位置，损伤位置的坐标分别为(100，99)和(151，100)。从多损伤检测结果来看，缺陷的成像位置与实际缺陷位置的最大误差率不超过4.1%。图8(b)中的损伤面积相较于经过PCI加权处理后得到

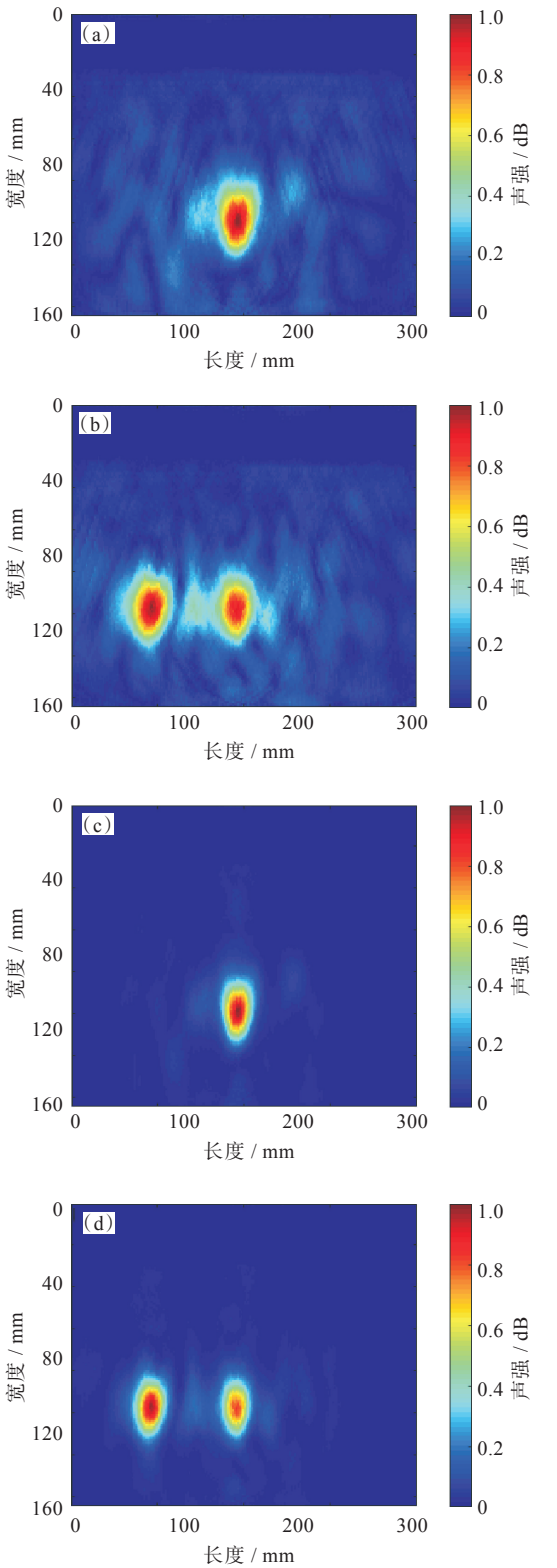

图6　不同成像方式下仿真数据成像效果图：(a)TFM单损伤，(b)TFM双损伤，(c)PCI加权处理后单损伤，(d)PCI加权处理后双损伤

Fig. 6　Imaging renderings based on simulation data under different methods: (a) single damage by TFM, (b) double damage by TFM, (c) single damage after PCI weighted processing, (d) double damage after PCI weighted processing

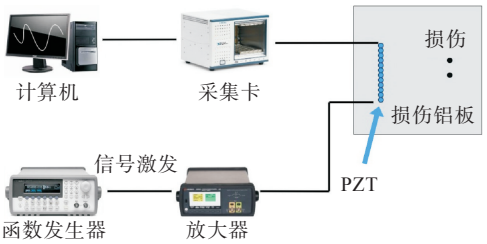

图7 实验示意图

Fig. 7 Experimental schematic diagram

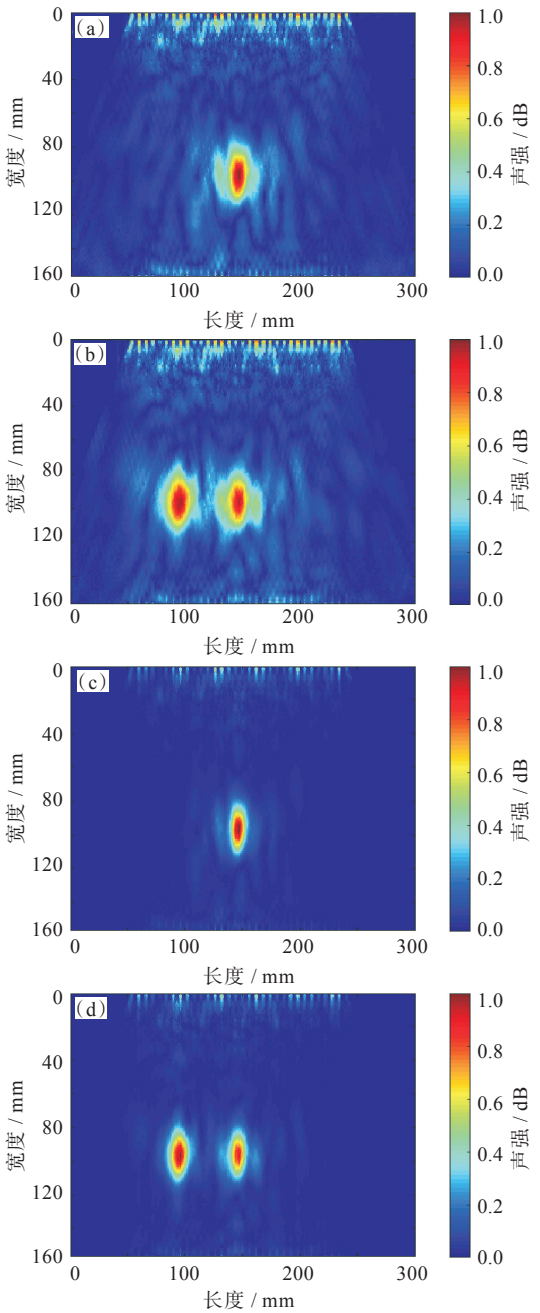

图8 不同成像方式下实验数据成像效果图:(a)TFM单损伤,(b)TFM双损伤,(c)PCI加权处理后单损伤,(d)PCI加权处理后双损伤

Fig. 8 Imaging renderings based on experimental data under different methods:(a) single damage by TFM, (b) double damage by TFM, (c) single damage after PCI weighted processing, (d) double damage after PCI weighted processing

的图8(d)缩小了46%,缺陷图像更符合实际。通过对PCI加权处理后获得的声波信息进行统计,得到缺陷处相干因子的权重值为0.85,噪声信号的相干因子最大权重值为0.39,缺陷位置的信号相位分布远大于噪声,对背景噪声起到有效的抑制作用,成像区域除缺陷外,其他伪影大幅度减少[10]。经PCI加权处理后的成像效果与仅使用TFM的效果进行了对比,结果如表1所示。

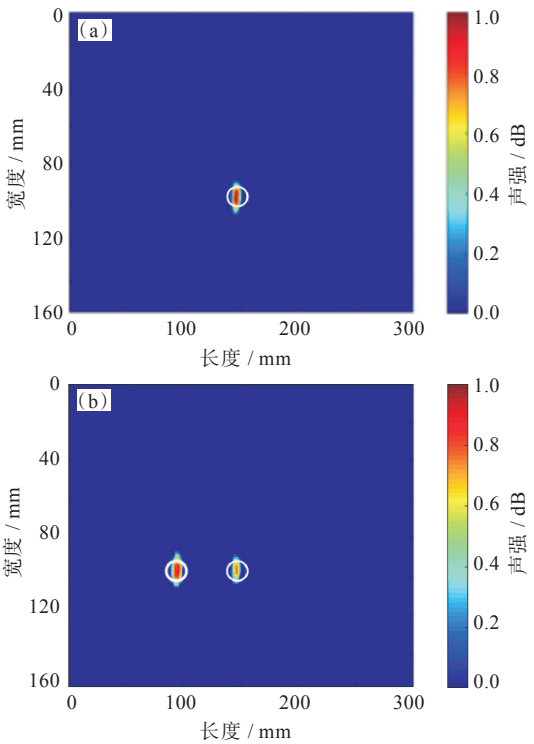

图9 不同数量缺陷经阈值处理后成像效果图:(a)单损伤,(b)双损伤

Fig. 9 Different defect types are imaged after threshold processing:(a)single damage, (b) double damage

表1 铝板结构损伤识别结果

Tab. 1 Results of aluminum plate structure damage identification

损伤实际位置	成像方法	损伤识别结果	成像面积 / mm^2	误差率 / %
(100,100)	TFM	(96,102)	16.30	7.0
(150,100)	TFM	(154,98)	18.20	9.7
(100,100)	PCI加权	(100,98)	8.04	3.6
(150,100)	PCI加权	(151,100)	7.25	2.5

对表1中数据结果进行对比可知,相较于全聚焦直接成像,结合相位相干算法后的成像结果能够提高波束的指向效果,对图像后处理的聚焦效果有很好的增强作用。同时对多个通孔损伤的定量和定位有了较好的提升,增强了损伤识别的成

(下转第92页)