

文章编号: 1671-1637(2024)06-0121-14

单模态 Lamb 波检测板类结构损伤识别成像方法

田 亮^{1,2,3}, 王宇宁¹, 樊立龙², 赵 健², 司志远¹

(1. 天津城建大学 土木工程学院, 天津 300384; 2. 中国铁建大桥工程局集团有限公司, 天津 300300; 3. 清华大学 土木水利学院, 北京 100084)

摘要:采用单模态 Lamb 波对带矩形预制贯穿裂缝的钢板进行了损伤检测, 将激励和接收换能器以稀疏阵列的形式布置于带损伤钢板上, 基于 ABAQUS 软件建立了 Lamb 波在钢板中传播的数值模型, 搭建了相应的试验平台, 并通过数值模拟与试验分析了 Lamb 波在钢板中的传播特征; 基于 MATLAB 开发了钢板损伤定位程序, 根据激励-接收换能器阵列的差值信号确定了椭圆轨迹, 进而通过多组椭圆轨迹的交汇点确定了钢板的损伤位置, 将多组椭圆轨迹进行数据融合, 实现了钢板损伤定位并将其图像化显示; 结合 Lamb 波损伤检测的数值仿真结果和试验数据, 进一步对比了不同数据融合方法对钢板损伤定位精度的影响。研究表明: 采用 200 kHz 的激励信号频率和双侧对称激励方式可以有效保证 Lamb 波的单模态特征, 从而避免 Lamb 波传播时的频散效应和多模态干扰; 对于单损伤钢板, 幅值全加法和幅值全乘法的损伤成像误差均在 5 mm 以内, 对于双损伤钢板, 幅值全加法的成像结果出现难以区分的赝像, 损伤成像误差高达 30 mm, 而幅值全乘法的成像结果接近真实损伤位置, 最大误差仅为 4 mm, 且损伤成像对比度更明显, 表明幅值全乘法在预测钢板多损伤时更有优势; 数值模拟与试验信号得到的双损伤钢板的定位误差在 2 mm 以内, 验证了数值模型具有良好的损伤预测精度。

关键词:桥梁工程; Lamb 波; 椭圆定位; 损伤成像; 数据融合; 无损检测

中图分类号: U443.31 文献标志码: A DOI: 10.19818/j.cnki.1671-1637.2024.06.008

Imaging method for damage identification of plate structures detected by single mode Lamb waves

TIAN Liang^{1,2,3}, WANG Yu-ning¹, FAN Li-long², ZHAO Jian², SI Zhi-yuan¹

(1. School of Civil Engineering, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China; 2. China Railway Construction Bridge Engineering Bureau Group Co., Ltd., Tianjin 300300, China; 3. School of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The damage detection of steel plates with prefabricated rectangular through-cracks was carried out by using single mode Lamb waves. The excitation and receiving transducers were arranged in a sparse array on the damaged steel plates. A numerical model of Lamb waves propagation in the steel plate was established based on ABAQUS software, and a corresponding experimental platform was built. Through numerical simulation and experiments, the propagation characteristics of Lamb waves in the steel plate were analyzed. A steel plate damage

收稿日期: 2024-05-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(51708346); 中国铁建股份有限公司科技重大专项(2020-A01); 中国铁建股份有限公司科研重大专项(2023-A01); 中国铁建大桥工程局集团有限公司科技创新项目(DQJ-2024-B05); 天津市科技计划项目(22YDTPJC00210)

作者简介: 田 亮(1984-), 男, 河北石家庄人, 天津城建大学副教授, 工学博士, 从事高性能钢桥结构疲劳与断裂研究。

引用格式: 田 亮, 王宇宁, 樊立龙, 等. 单模态 Lamb 波检测板类结构损伤识别成像方法[J]. 交通运输工程学报, 2024, 24(6): 121-134.

Citation: TIAN Liang, WANG Yu-ning, FAN Li-long, et al. Imaging method for damage identification of plate structures detected by single mode Lamb waves[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2024, 24(6): 121-134.

localization program was developed based on MATLAB. The elliptic trajectory was determined based on differential signals of the excitation and receiving transducer. Then, damage position of the steel plate was determined according to the intersection points of multiple sets of elliptic trajectories. The multiple sets of elliptic trajectories were fused to locate and visualize the steel plate damage. Based on the numerical simulation results and experimental data of the Lamb wave damage detection, the influences of different data fusion methods on the accuracy of steel plate damage localization were further compared. Research results indicate that using an excitation signal frequency of 200 kHz and a bilateral symmetrical excitation method can effectively ensure the single mode characteristics of Lamb waves, thereby avoiding dispersion effects and multimodal interference when Lamb waves propagate. For steel plates with single damage, damage imaging errors for both the amplitude summation method and the amplitude multiplication method are within 5 mm. For steel plates with double damage, imaging results of the amplitude summation method will exhibit an indistinguishable pseudoscopic image, with a damage imaging error up to 30 mm. However, imaging results of the amplitude multiplication method are still close to the true damage location, with a maximum error of only 4 mm. Moreover, the contrast of damage imaging is more obvious, indicating that the amplitude multiplication method has more advantages in predicting multiple damage in the steel plate. The localization error of steel plates with double damages obtained from numerical simulation and experimental signals is within 2 mm, which verifies the good damage prediction accuracy of the numerical model. 2 tabs, 16 figs, 31 refs.

Key words: bridge engineering; Lamb wave; elliptic localization; damage imaging; data fusion; non-destructive detection

Author resume: TIAN Liang(1984-), male, associate professor, PhD, sjtu_tl@126.com.

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (51708346); Major Science and Technology Project of China Railway Construction Corporation Limited (2020-A01); Major Scientific Research Project of China Railway Construction Corporation Limited (2023-A01); Technology Innovation Project of China Railway Construction Bridge Engineering Bureau Group Co., Ltd. (DQJ-2024-B05); Science and Technology Project of Tianjin (22YDTPJC00210)

0 引 言

金属板类结构在土木、船舶、航空等领域应用众多,由于经常受到各类周期性荷载的反复作用,尽管荷载幅值往往低于材料的弹性极限,但在结构的疲劳敏感部位仍不可避免地萌生裂纹或损伤,因此,适时对结构进行损伤检测是保证其安全服役的重要措施。Lamb波作为一种先进的超声导波无损检测技术,与传统超声波相比,在传播过程中具有能量衰减小、能耗低、传播距离远、灵敏度高优势,常用于各类大型板类结构的无损检测。Lamb波对结构损伤的可视化是通过损伤成像实现的,常用损伤成像方法主要包括椭圆定位法^[1-3]、概率损伤检测重构算法(Reconstruction Algorithm for Probabilistic Inspection of Damage, RAPID)^[4-6]、全聚焦法(Total Focus

Method, TFM)^[7-9]、时间反转法^[10]等,其中椭圆定位法计算原理简单,损伤定位精度高,已成为结构健康监测与无损检测领域的研究热点。

国内外相关学者在Lamb波损伤检测中取得了一系列进展。Ihn等^[11]采用压电传感器的间距捕捉法获得了采集信号的损伤指数,该损伤指数与Lamb波特定模态下的能量密度相关,从而能根据能量密度变化来分析损伤特征并表征成像;Hameed等^[12]采用基于Gabor小波的连续小波变换(Continuous Wavelet Transform, CWT)处理损伤引起的复杂信号,并通过换能器网络处理损伤信号,得到了检测单元中的损伤信息,最后通过外切圆和最小二乘法进行不同检测阶段的定量评估;Dai等^[13]针对含孔边腐蚀损伤的多孔铝合金结构,采用基于压电传感器的在线成像检测算法,通过归一化幅值表征了

Lamb 波健康信号与损伤信号之间的相关性,并采用均匀化算法重构损伤图像,实现了多孔结构腐蚀损伤的定位和量化;Kim 等^[14]通过数值模拟研究了 Lamb 波在裂纹板中传播的过程,采用信号相位变化和归一化振幅方法成功量化了 Lamb 波检测损伤信号,并通过研究裂纹尺寸、入射角以及信号激励器和接收器之间的距离,深入分析了这些因素对 Lamb 波损伤检测的影响;Shi 等^[15]对 Lamb 波检测正交异性钢桥面板疲劳裂纹进行了数值仿真和试验研究,通过采用小波变换算法,从接收的 Lamb 波信号中提取标准化特征值,并开展参数化分析,探讨了裂纹类型、Lamb 波传播距离和激励频率对波形特征的影响,结果显示,随着疲劳寿命和裂纹长度的增加,波形特征变化明显,在不同裂纹类型和长度下,Lamb 波也呈现不同的变化;杨晓华等^[16]研究了 Lamb 波的频散效应对损伤定位精度的影响,采用小波分析提取多组频率下的信号,进而通过加权平均法获得损伤到 2 个换能器之间的距离,最终由椭圆定位原理确定了铝合金板的损伤位置;许颖等^[17]采用时间概率密度法对复合材料层压板进行了损伤检测,发现该方法可明显降低损伤定位误差,有效提高了复合材料的损伤识别精度;骆英等^[18]采用激光多普勒测振仪和压电片搭建了试验检测平台,采用卷积神经网络自动提取 Lamb 波的损伤特征信息,构建了结构损伤区域与 Lamb 波信号特征之间的映射关系,从而实现了板类结构的损伤智能识别;姜跃栋等^[19]对 Lamb 波检测信号进行了 Hilbert 变换,得到了信号包络,进而确定了无损信号与差信号之间的波包时间,最终通过椭圆定位法获得了损伤位置;王高平等^[20]根据 Lamb 波时间反转聚焦原理,消除了 Lamb 波的频散效应,通过椭圆定位法计算了损伤位置到传感器之间的距离,最终实现了板类结构损伤的精确定位;石林泽等^[21]采用卷积神经网络分析了 Lamb 波信号,并检测了钢桥面板的疲劳裂纹扩展尺寸,通过小波函数对 Lamb 波信号进行卷积处理,提取了相应的信号特征,接着对信号的时域与频域进行优化处理,利用卷积神经网络对 Lamb 波信号特征进行机器学习,并结合先验知识实现了钢桥面板疲劳裂纹尺寸的准确识别。上述研究工作对推动板类结构的 Lamb 波损伤检测起到了积极作用。

本文以带预制贯穿裂缝的钢板为研究对象,首先分析了 Lamb 波在钢板中的传播特性与频散曲线,由此确定了合适的信号激励频率;进而基于

ABAQUS 软件模拟了 Lamb 波在钢板中的传播过程,并结合椭圆定位法与数据融合法,采用 MATLAB 开发了针对板类结构的损伤定位程序,实现了钢板损伤的精确定位与图像化显示;最后搭建了试验检测平台,以带预制贯穿裂缝的钢板作为试验对象,采用 Lamb 波对钢板损伤开展了试验检测,并与数值仿真结果进行了对比验证。

1 Lamb 波传播特性与多模态

Lamb 波在板类结构中的传播由横波和纵波组成,由于受到板类结构上下表面以及内部不连续界面的限制,导致产生多次反射而发生波形转换,且板的上下表面应力均为 0。通过改变 Lamb 波的发射角度与频率,会对应产生不同的模态^[22],Lamb 波在板中传播有 2 类模态:对称模态 S 与反对称模态 A,如图 1 所示。在板上下表面的同一位置施加同向压电信号可获得反对称模态 A,施加反向压电信号可获得对称模态 S。

基于 Lamb 波的多模态和频散特性,可得到激励信号的激励频率以及各模态的群速度与相速度曲线。以频厚积(频率与板厚的乘积)作为横坐标,计算得到 Lamb 波在钢板中的传播频散曲线,如图 2 所示,其中:A0~A7 分别为不同频厚积下的反对称模态频散曲线;S0~S7 分别为不同频厚积下的对称

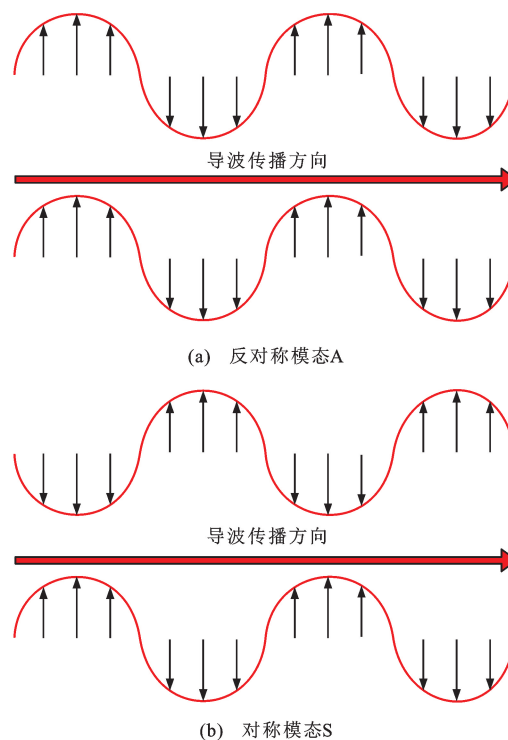


图1 Lamb 波传播示意

Fig. 1 Schematics of Lamb wave propagations

模态频散曲线。由图2可知:随着频厚积的增加,Lamb波对称模态与反对称模态的数量均增加;当频厚积低于A1模态的截止频厚积时,只存在对称模态S0和反对称模态A0,更易确定激励信号的

频率;而当频厚积高于一定阈值时,Lamb波出现多组模态相互叠加,难以准确识别检测信号中的损伤波包,导致损伤定位精度降低,甚至无法确定损伤位置。

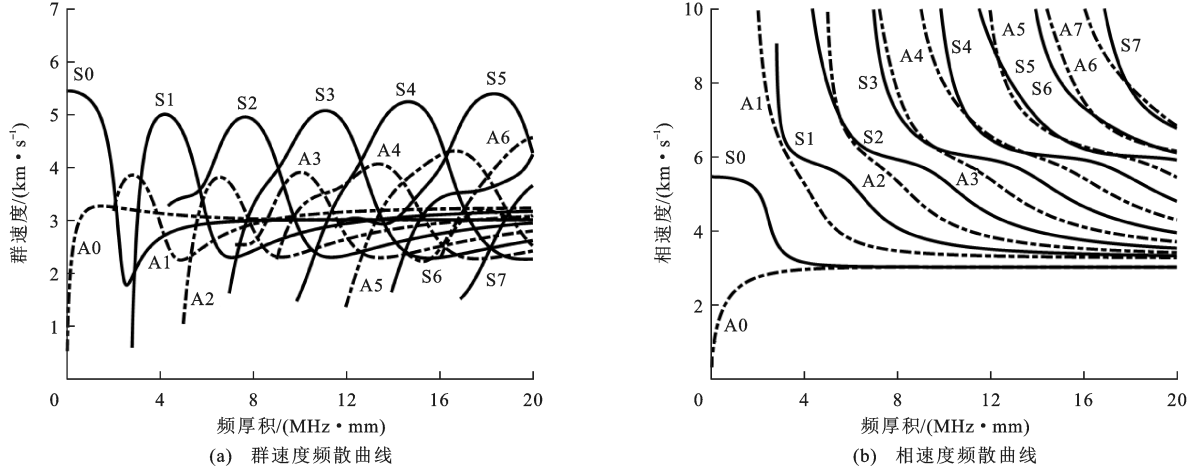


图2 Lamb波频散曲线

Fig. 2 Lamb wave dispersion curves

2 椭圆定位法与数据融合

2.1 椭圆定位法

椭圆定位法的基本原理是把换能器假设为椭圆的2个焦点,焦点之间的距离为恒值,损伤位于椭圆的轨迹之上^[23],定位原理如图3所示,其中: T_i 与 T_j 分别为第*i*个激励换能器和第*j*个接收换能器; d_{ij} 为激励换能器与接收换能器之间的距离,代表椭圆焦距; r_i 、 r_j 分别为 T_i 、 T_j 与损伤位置 D 之间的距离,损伤位置 D 引起的反射路径长度为 $r_i + r_j$ 。通过布置多组换能器,可形成多个近似椭圆,其轨迹相交处即为损伤位置,这可提高椭圆定位法的鲁棒性,降低损伤定位偏差,并减小检测盲区。

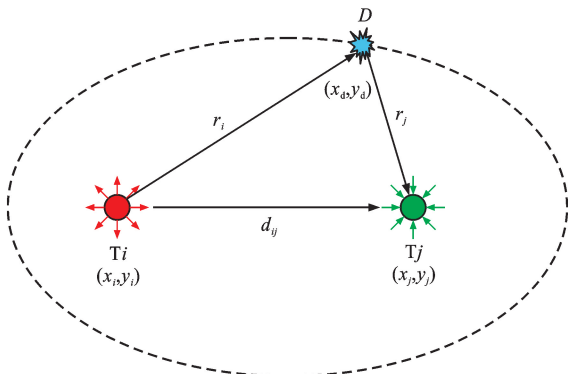


图3 椭圆定位法原理

Fig. 3 Principle of elliptical localization method

2.1.1 飞行时间椭圆定位法

飞行时间(Time of Flight, TOF) t_{ij} 定义为

Lamb波从第*i*个激励换能器激发经过损伤位置 D 到达第*j*个接收换能器所传播的时间。激励换能器 T_i 与接收换能器 T_j 的椭圆焦点坐标分别为 (x_i, y_i) 和 (x_j, y_j) ,损伤位置 D 的坐标为 (x_d, y_d) , v_g 为Lamb波在材料中的群速度,飞行时间 t_{ij} 计算公式为

$$t_{ij} = \frac{r_i + r_j}{v_g} = \frac{\sqrt{(x_i - x_d)^2 + (y_i - y_d)^2} + \sqrt{(x_j - x_d)^2 + (y_j - y_d)^2}}{v_g} \quad (1)$$

根据椭圆的定义,椭圆上任意一点到2个焦点的距离之和等于椭圆的长轴长度。由图3可知,椭圆的长半轴 a_{ij} 为

$$a_{ij} = \frac{r_i + r_j}{2} = \frac{t_{ij} v_g}{2} \quad (2)$$

椭圆的半焦距 c_{ij} 为

$$c_{ij} = \frac{d_{ij}}{2} = \frac{\sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}}{2} \quad (3)$$

根据椭圆长半轴、短半轴与半焦距之间的关系,其短半轴 b_{ij} 为

$$b_{ij} = \sqrt{a_{ij}^2 - c_{ij}^2} \quad (4)$$

由此可得,椭圆轨迹方程为

$$\frac{x^2}{a_{ij}^2} + \frac{y^2}{b_{ij}^2} = 1 \quad (5)$$

式中: x 和 y 分别为沿椭圆轨迹的横、纵坐标。

2.1.2 时间延迟椭圆定位法

当信号飞行时间不容易确定时,可将损伤信号中的损伤波包时间与直达波包时间做差值,即可得到信号延迟时间 Δt 。Lamb波的激发和接收存在

2条传播路径:第1条路径是 Lamb 波从激励换能器 T_i 发出,传至损伤位置 D ,所需时间为 t_1 ,再从损伤位置 D 传至接收换能器 T_j ,所需时间为 t_2 ;第2条路径是 Lamb 波直接从激励换能器 T_i 传到接收换能器 T_j ,所需时间为 t_3 。信号在板中的传播速度与材料的弹性模量有关,但微小损伤对材料属性的影响很小,因而 Lamb 波在损伤前后波速 v_g 不变,延迟时间 Δt 计算公式为

$$\Delta t = t_1 + t_2 - t_3 = \frac{r_i + r_j - d_{ij}}{v_g} \quad (6)$$

2.2 数据融合

单组换能器只能得到1条椭圆轨迹,无法确定损伤的具体位置。通过布置多组换能器形成阵列以获取多条椭圆轨迹,并融合损伤信号数据,可以有效提高损伤检测的灵敏度和精度,实现损伤的精确定位。换能器阵列采集的损伤信号按以下2种方法进行数据融合^[24]。

2.2.1 幅值全加法

采用换能器阵列检测板类结构时,可获得多组试验信号,将含有损伤信息的试验信号减去无损试验信号,可确定含有损伤信息的差值信号。板中某一特定检测位置的坐标为 (x, y) ,该检测位置在不同飞行时间 t_{ij} 由换能器对 i 和 j 得到的差值信号幅值为 $Q_{ij}[t_{ij}(x, y)]$,将幅值数据对应相加,即可得到损伤缺陷结果 $U_a(x, y)$ 为

$$U_a(x, y) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1, i \neq j}^N Q_{ij}[t_{ij}(x, y)] \quad (7)$$

式中: N 为换能器阵列个数。

幅值全加法确定的损伤位置与无损位置区分度不高,容易产生膺像,但由于其简单方便,且运算速度较快,仍不失为椭圆定位法中常用的数据融合方法^[25]。

2.2.2 幅值全乘法

幅值全乘法与幅值全加法不同,它是将换能器阵列中不同激励接收换能器对 i 和 j 的差值信号幅值 $Q_{ij}[t_{ij}(x, y)]$ 对应相乘,数据融合后得到损伤缺陷结果 $U_s(x, y)$ 为

$$U_s(x, y) = \prod_{i=1}^N \prod_{j=1, i \neq j}^N Q_{ij}[t_{ij}(x, y)] \quad (8)$$

幅值全乘法能提高损伤位置图像的对比度,得到的损伤图像更清晰,但由于计算量较大,导致运算速度相对较慢。本文构建了换能器阵列,分别采用幅值全加法和幅值全乘法对损伤信号进行了数据融合,实现了损伤位置的二维成像^[26]。

3 损伤定位数值仿真

3.1 Lamb 波传播特征

采用 ABAQUS 软件建立钢板实体模型,其尺寸及材料性能参数如表1所示。假设压电陶瓷换能器与钢板黏性耦合,忽略粘接层的剪切延迟效应^[27],通过集中力替代压电陶瓷换能器激发 Lamb 波信号。Lamb 波信号的周期数、中心频率是影响波识别敏感程度的关键参数。为了有效抑制 Lamb 波的频散效应,选择具有适当周期数的窄带宽信号,一般采用 Hanning 窗函数。Hanning 窗调制的正弦脉冲信号具有窄的主瓣和低的旁瓣,这使得能量在中心频率附近更加集中,从而提高了对信号的识别灵敏度,激励 Lamb 波信号在板类结构中传播时,能量耗散相对较小,能够有效抑制 Lamb 波能量的衰减和波的散射^[28]。这使得板类结构更容易传播 Lamb 波,同时降低信号处理难度,也可以提高接收信号效果,3.5个周期的 Hanning 窗函数图像显示,中心波峰幅值最大,呈对称分布,与两侧波峰幅值差异明显。

表1 钢材尺寸及性能参数

Table 1 Steel dimensions and performance parameters

参数	尺寸/mm	杨氏模量/GPa	泊松比	密度/(kg·m ⁻³)
数值	500(长)×500(宽)× 5(厚)	206	0.33	7 850

由图2(a)可知,当钢板厚度为5mm时,对称模态 S1 的截止频率为480kHz,反对称模态 A1 的截止频率为400kHz。当 Lamb 波中心频率低于480kHz,仅存在对称模态 S0 和反对称模态 A0。对称模态 S0 群速度的频率在0~240kHz内变化较为平缓,在240~480kHz内变化较为明显;反对称模态 A0 群速度的频率在0~180kHz内变化较为明显,在180~400kHz内变化较为平缓。为同时满足2种模态的稳定性,激励信号中心频率选定为200kHz,因此,选择3.5个周期200kHz的 Hanning 窗函数作为中心信号,如图4所示。Hanning 窗函数 $F(t)$ 的表达式为

$$F(t) = A[H(t) - H(t - n/f_c)] \cdot [1 - \cos(2\pi f_c t/n)] \sin(2\pi f_c t) \quad (9)$$

式中: $H(\cdot)$ 为 Heaviside 阶梯函数; t 为时间; n 为信号周期; f_c 为信号中心频率; A 为信号幅值。

为避免 Lamb 波多模态与频散效应对模拟结果的影响,在模型同一位置上下表面施加环形集中力,以获得单一对称模态 S0 的 Lamb 波。采用显示动

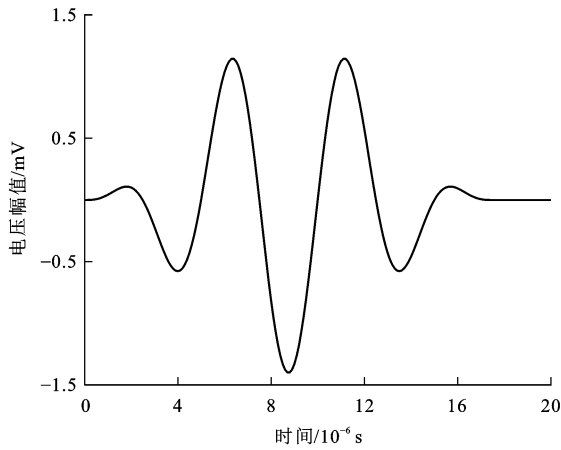


图 4 Hanning 窗函数时域

Fig. 4 Time-domain of Hanning window function

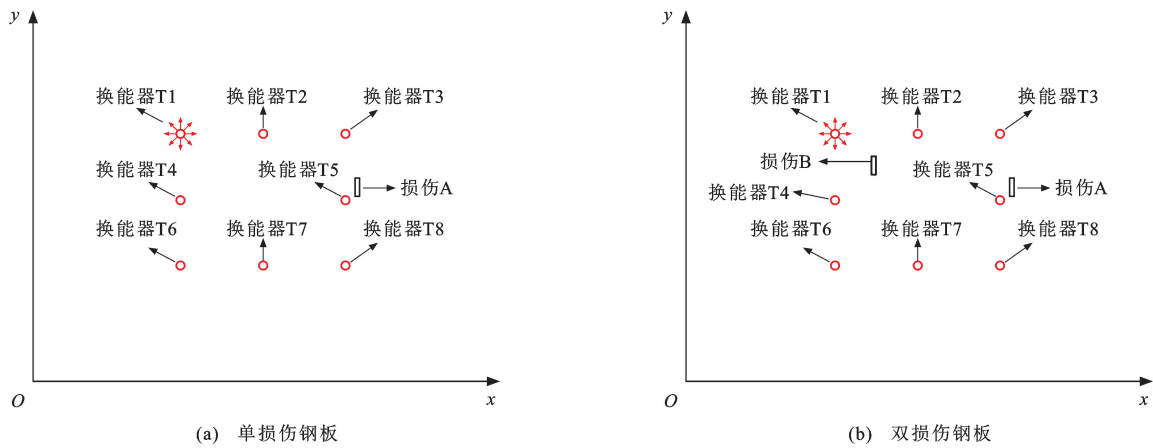


图 5 钢板换能器及损伤布置

Fig. 5 Transducer and damage arrangements on steel plates

表 2 换能器在钢板中的坐标

Table 2 Coordinates of transducers in steel plates

换能器编号	x/mm	y/mm
T1(T1')	160	340
T2(T2')	250	340
T3(T3')	340	340
T4(T4')	160	250
T5(T5')	340	250
T6(T6')	160	160
T7(T7')	250	160
T8(T8')	340	160

当 Lamb 波信号从 T1(T1') 激励端发出时,其他位置的接收端 T2(T2')~T8(T8') 依次接收信号;当信号从 T2(T2') 激励端发出时,T1(T1') 以及 T3(T3')~T8(T8') 的换能器作为接收端依次接收信号,以此类推,一共采集到 56 组 Lamb 波信号,数值仿真采用的激励信号如图 6 所示。选取从 T1

力算法进行计算,单元类型为三维 8 节点减缩积分单元 C3D8R,同时精细划分结构化网格,最小网格尺寸为 1 mm,确保波长至少通过 10 个单元^[29]。时间步长选为 1.0×10^{-7} s,保证网格内参与迭代计算的节点在 Lamb 波的传播范围之内^[30]。采用人工预制矩形通缝代表损伤,损伤 A 和 B 的长度分别为 40 和 25 mm,宽度均为 5 mm,损伤 A 和 B 中心的位置坐标分别为 (350,260) 和 (200,310) mm,单损伤钢板仅包括损伤 A,双损伤钢板包括损伤 A 和 B。构建换能器阵列检测钢板损伤,换能器在钢板中的布置如图 5 所示,位置坐标如表 2 所示,其中 T1 为位于钢板正面的换能器,其坐标为 (160,340) mm,T1' 为位于钢板反面同一位置坐标处的换能器。

(T1') 到 T2(T2') 的信号进行分析,采集得到的单、双损伤钢板信号如图 7 所示,可以看出,损伤信号与无损信号的部分波形相同,模态 S0 直达波包最先出现,存在较大波形差异的信号即为损伤波包,各个损伤波包代表不同的损伤位置;损伤波包最大幅值与

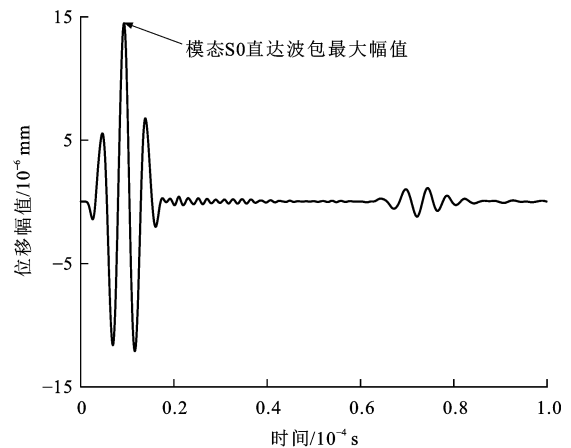


图 6 Lamb 波激励信号

Fig. 6 Lamb wave excitation signal

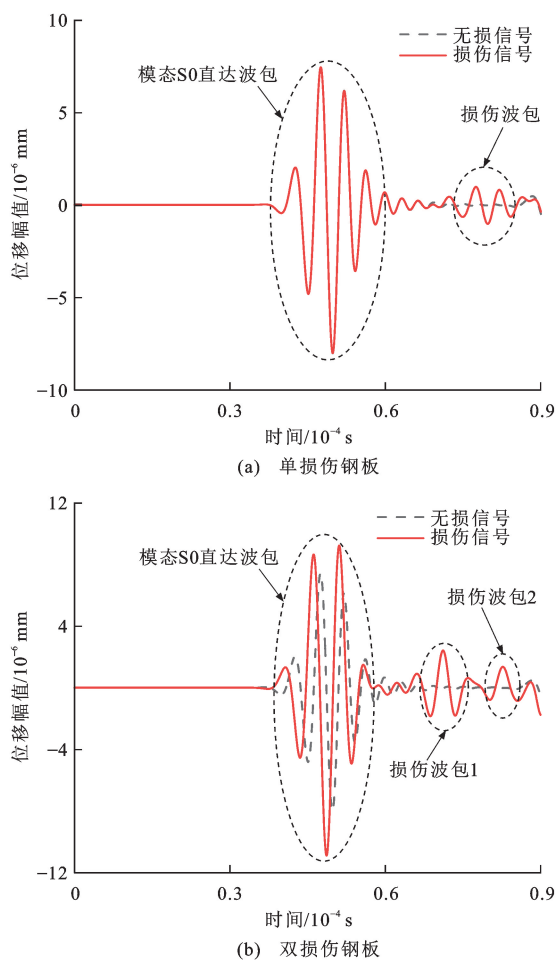


图7 仿真模型接收信号

Fig. 7 Simulation model receiving signals

激励信号直达波包最大幅值的时间差即为损伤波包的飞行时间^[31]。

图8、9分别为单、双损伤钢板在 1.0×10^{-5} 、 2.0×10^{-5} 、 3.0×10^{-5} 、 4.0×10^{-5} 、 5.0×10^{-5} 、 6.0×10^{-5} s时刻的Lamb波传播过程,可以看出:无论是单损伤还是双损伤钢板,Lamb波信号从激励换能器发出后,均以圆形波的形式向四周传播,当遇到损伤或者钢板边界时Lamb波发生反射,圆形波也随之变成椭圆波;Lamb波在双损伤钢板中的传播特征比单损伤钢板更加复杂,随着Lamb波向四周传播,能量逐渐减弱,接收换能器处的应力幅值随之减小;对于单损伤钢板,在遇到损伤之前,其应力幅值由0.93 MPa减小为0.18 MPa,双损伤钢板也表现出类似的传播特征;损伤及钢板边界会对Lamb波产生二次激励效应,使得回波应力幅值先增加后减小,这在单、双损伤钢板内Lamb波的传播过程中均有体现。

3.2 数值模拟损伤成像

以椭圆定位法为基础处理Lamb波损伤信号,

单损伤钢板的采集信号中,第1个波包为模态S0直达波包,其到达时间为 4.7×10^{-5} s;第2个波包为损伤波包,到达时间为 7.7×10^{-5} s,激励信号的半波时间为 1.0×10^{-5} s。将模态S0直达波包时间减去激励信号半波时间,得到激励信号的飞行时间为 3.7×10^{-5} s。同样,损伤波包到达时间减去激励信号半波时间,可得到损伤波包的飞行时间为 6.7×10^{-5} s。根据数值模拟中激励传感器和接收传感器的位置确定椭圆焦点,进而确定其焦距、长半轴及短半轴。最终,通过多组椭圆轨迹的交点确定钢板损伤的具体位置。

将钢板离散为 $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ 的网格单元,以左下角为坐标原点建立平面直角坐标系。令Lamb波从激励换能器 T_i 到接收换能器 T_j 传播路径中包含损伤信息的试验信号减去无损试验信号,可得到含有损伤信息的差值信号。进一步将钢板中某一检测位置 (x, y) 在不同飞行时间 t_{ij} 的差值信号幅值 $Q_{ij}[t_{ij}(x, y)]$ 累加或者累乘,最终得到钢板损伤位置的幅值全加图和幅值全乘图。同样的处理方法也适用于双损伤钢板,通过幅值全加法与幅值全乘法进行损伤成像,不同数据融合方法得到的损伤图像不尽相同。Lamb波检测单、双损伤钢板的成像结果分别如图10、11所示,幅值全加法和幅值全乘法得到的损伤概率密度分别在 $0 \sim 10$ 和 $0 \sim 40$,其中矩形部位代表真实损伤,损伤概率密度越大,越接近真实损伤位置。当钢板只存在单损伤时,幅值全加法和幅值全乘法得到的损伤位置分别为 $(351, 255)$ 和 $(355, 261)$ mm,与真实损伤位置 $(350, 260)$ mm的误差在5 mm以内,表明2种方法得到的损伤成像结果与真实位置均比较吻合;当钢板存在双损伤时,幅值全加法的成像结果出现难以区分的赝像,相比单损伤钢板的定位误差较大,达30 mm,而幅值全乘法预测的损伤位置都在真实损伤附近,相比幅值全加法的预测精度较高,最大误差仅为4 mm,表明幅值全乘法在预测钢板多损伤时具有优势。

通过对上述单、双损伤钢板成像的对比分析可知,幅值全加法可在较大范围内检测损伤位置,但损伤定位精度较差,尤其对于多损伤钢板,会出现难以区分的赝像;而幅值全乘法可实现损伤的精确定位,成像对比度高,检测效果较好。总之,2种方法均能在实际损伤位置附近进行损伤成像,将幅值全加法与幅值全乘法相结合,可以大大提高损伤定位精度与效率。

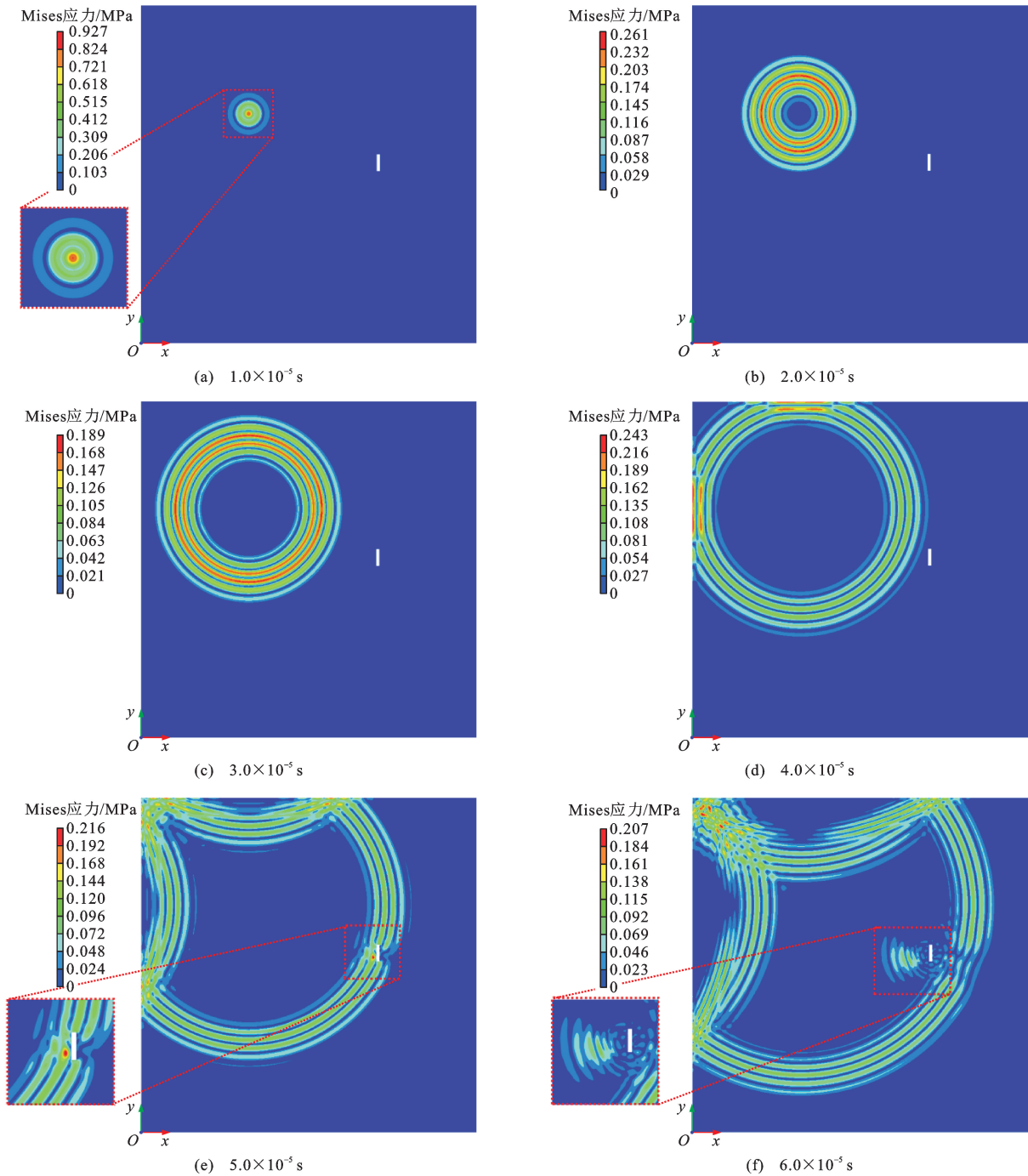


图8 Lamb波在单损伤钢板中的传播过程

Fig. 8 Propagation processes of Lamb waves in steel plate with single damage

4 损伤检测试验

4.1 试验装置搭建

搭建钢板损伤检测试验平台,试验装置包括普源信号发生器、普源数字示波器、Aigtek 功率放大器、压电陶瓷换能器等,如图 12 所示。与数值仿真相同,损伤检测试验同样采用一发一收的信号采集模式,Lamb 波信号由信号发生器发出,传至功率放大器,将其激励信号电压放大,以便驱动压电陶瓷换

能器,压电陶瓷换能器将电信号转换为机械振动,激发产生 Lamb 波在钢板中传播,传至损伤位置并与损伤发生相互作用,最终信号被接收换能器接收,进一步传至数字示波器并显示记录。

将一组压电陶瓷换能器通过耦合剂附着在钢板上下表面,其位置与 T1(T1')、T2(T2')换能器相同。信号发生器调制 Hanning 窗函数 3.5 个周期正弦信号,激励频率为 200 kHz。Lamb 波从 T1(T1')激励端压电陶瓷换能器发出,其他位置的压电

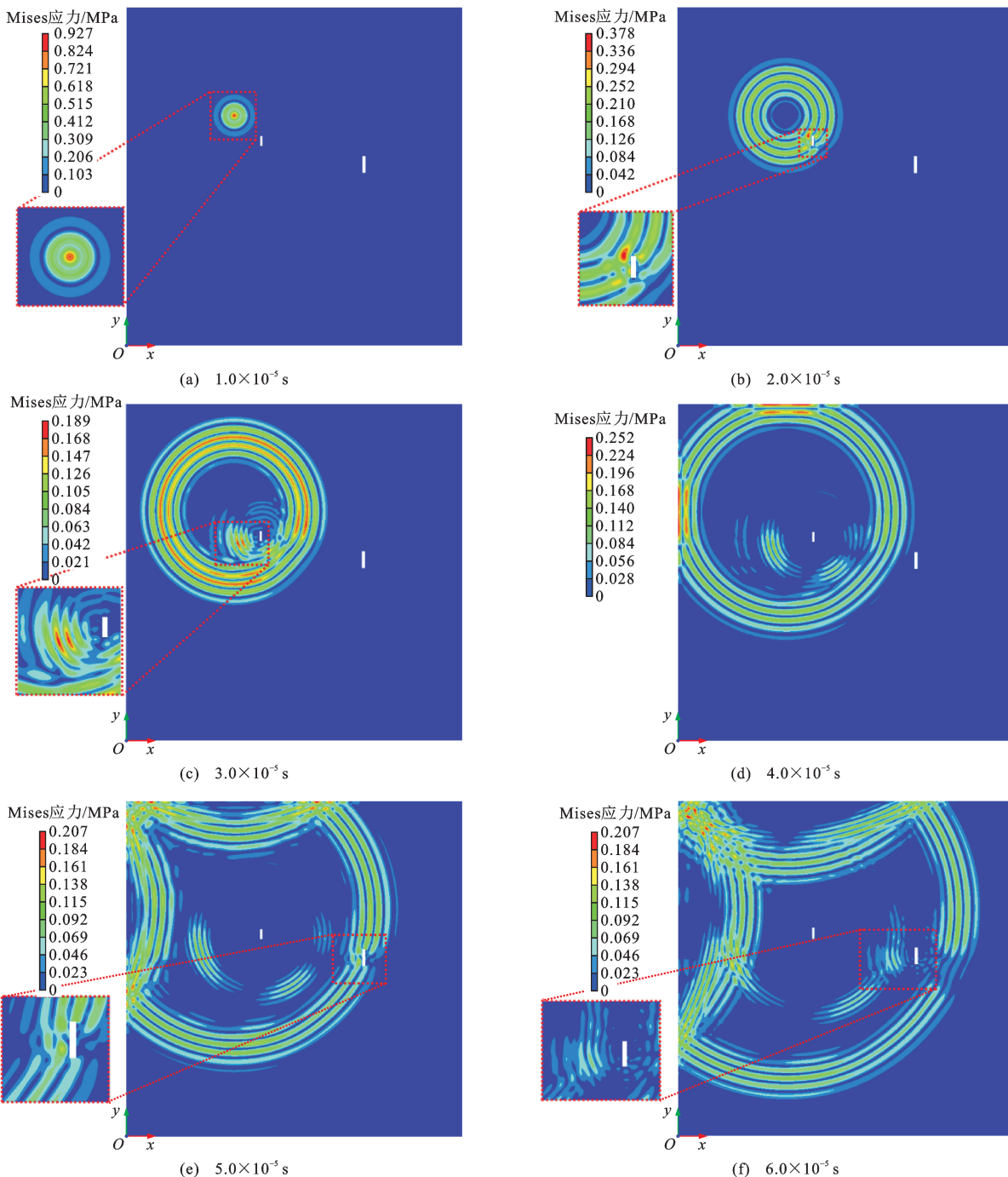


图 9 Lamb 波在双损伤钢板中的传播过程

Fig. 9 Propagation processes of Lamb waves in steel plate with double damages

陶瓷换能器依次作为接收端;将 T2(T2')压电陶瓷换能器作为激励端, T1(T1')以及 T3(T3')~T8(T8')位置的换能器依次作为接收端,以此类推,共得到 56 组 Lamb 波信号。由于试验采集的 Lamb 波信号往往受到试验设备、环境以及试验材料等因素的影响,包含大量噪声信息,导致损伤波包被噪声波包所掩盖,给损伤精确定位带来困难。为获得较为清晰的信号,需过滤掉噪声信号,本文通过 MATLAB 软件中的 Filter Designer 工具箱进行带

通滤波处理。

试验信号经过带通滤波处理,所得单、双损伤钢板的 Lamb 波接收信号如图 13 所示,从图中直接区分损伤信号和健康信号较为困难。为有效识别损伤信息,采用时间延时椭圆定位法,直接将损伤信号与无损信号进行差处理,然后对差信号进行 Hilbert 变换得到差信号包络,如图 14 所示。由差信号包络可以明显观察到模式 S0 直达波包、损伤波包以及边界回波,由损伤波包出现的时间可进一步确定损伤

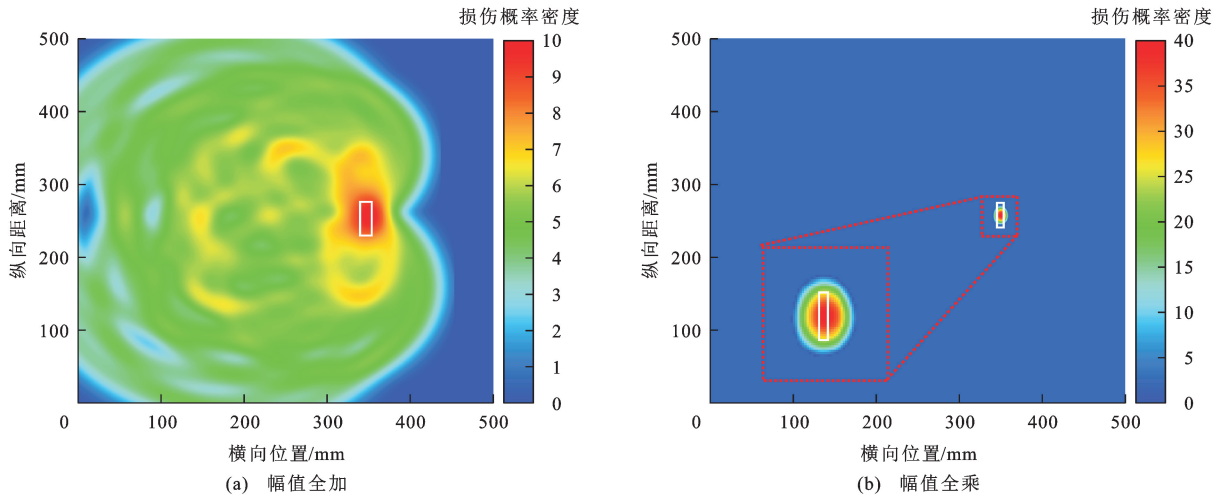


图 10 数值模拟单损伤成像

Fig. 10 Numerical simulations of single damage imaging

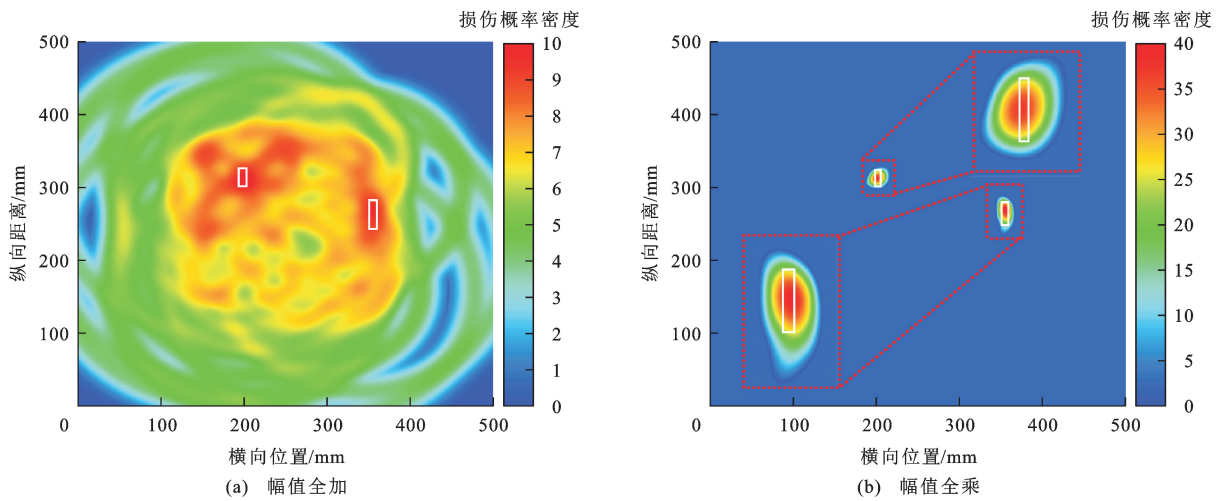


图 11 数值模拟双损伤成像

Fig. 11 Numerical simulations of double damages imaging



图 12 Lamb 波检测试验装置

Fig. 12 Lamb wave detection experiment device

的具体位置。

4.2 试验损伤成像

经过处理试验采集的信号,最终得到了差信号包络。对于单损伤钢板,损伤波包的到达时间为

7.0×10^{-5} s。根据激励换能器和接收换能器的位置确定椭圆的焦点、焦距和长半轴,进而通过多组椭圆轨迹的交汇点确定钢板的损伤位置。同样将多组椭圆轨迹进行数据融合处理,得到钢板单、双损伤成

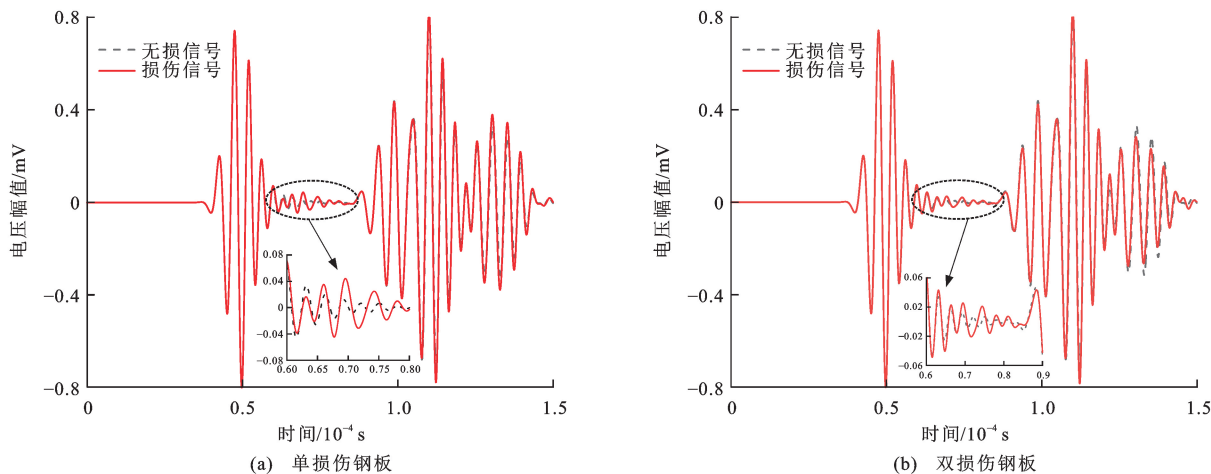


图 13 试验接收信号

Fig. 13 Experimental reception signals

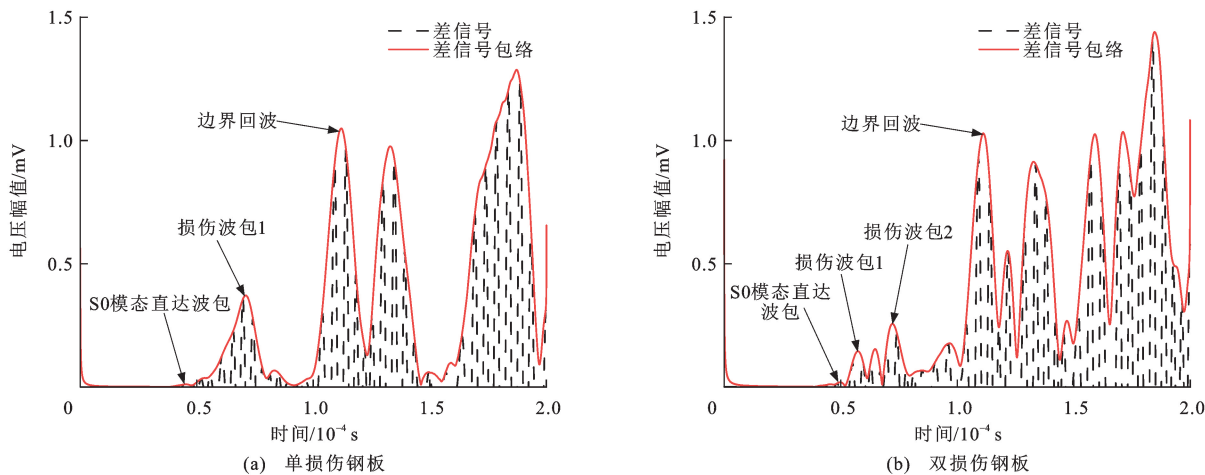


图 14 差信号包络

Fig. 14 Differential signal envelopes

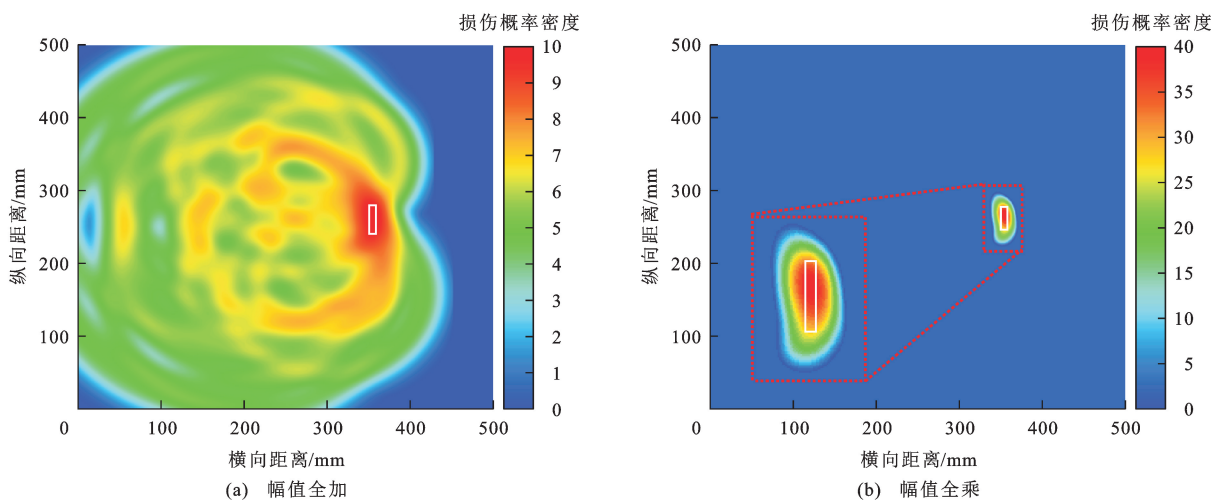


图 15 试验单损伤成像

Fig. 15 Experimental single damage imagings

像,分别如图 15、16 所示。当检测单损伤钢板时,由幅值全加法和幅值全乘法得到的损伤位置坐标分别

为(352,262)和(357,270) mm,与真实损伤位置(350,260) mm 的最大误差在 10 mm 以内;当钢板

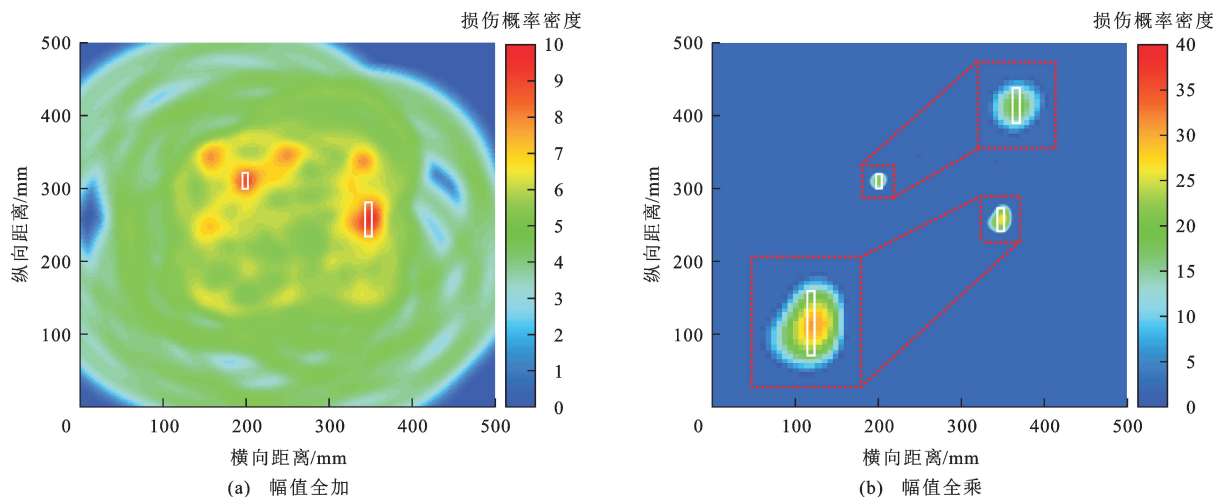


图 16 试验双损伤成像

Fig. 16 Experimental double damages imagings

存在双损伤时,幅值全加法的损伤定位精度较差,难以准确定位,最大误差约为 40 mm,而幅值全乘法依然可以得到较高的损伤定位精度,最大误差约为 6 mm。总体而言,由试验信号得到的损伤定位误差稍大于数值仿真结果,这是由于试验过程中设备、材料以及数据采集等一系列误差导致的,但数值仿真与试验数据得到的损伤成像规律相同,成像结果基本一致,定位误差在可接受范围内,验证了数值模型具有良好的损伤预测精度。

数值仿真与试验结果表明,模态直达波首先出现,边界回波与损伤波包也随之出现,但边界回波与损伤波包距离非常接近。为避免误将边界回波判定为损伤波包,将激励换能器与接收换能器位置远离钢板边界,接收信号中损伤波包与边界回波不会发生混叠,可以显著提高检测效率和精度,适用于 Lamb 波检测大型板类结构的疲劳损伤。

实际工程中的空间结构往往较为复杂,使得声波的反射情况也更加复杂,因此,需要在不同位置布置多组传感器,获取大量试验信号数据,全面分析信号变化趋势并准确识别其传播规律,以确定合适的换能器布置网络和激励信号频率,这将有助于提高椭圆定位的准确性,并降低损伤缺陷的定位误差。

5 结 语

(1)采用 200 kHz 的激励信号频率以及双侧对称激励方式可以有效保证 Lamb 波的单模态特征,从而避免 Lamb 波传播时频散效应和多模态的干扰,通过构建换能器阵列激发单模态 Lamb 波可以有效检测钢板损伤,结合椭圆定位法和数据融合方

法能够快速确定钢板损伤位置并图像化显示。

(2)对于单损伤钢板,采用幅值全加法和幅值全乘法得到的损伤成像结果与实际损伤位置均比较吻合,最大定位误差在 5 mm 内;对于双损伤钢板,幅值全加法的损伤成像结果易出现膺像,而幅值全乘法的损伤定位精度更高。

(3)数值仿真与试验检测得到钢板损伤成像结果基本一致,损伤定位误差在 2 mm 以内,验证了数值模型具有良好的预测精度,同时表明基于 Lamb 波的数值仿真和试验检测方法在板类结构的损伤识别中具有应用潜力。

(4)下一步可将 Lamb 波结合人工智能、无人机和机器视觉等技术,进一步研发适用于多种复杂环境和空间结构的小型便携式无损检测设备,实现无人巡检和智能化评估,有望在服役钢结构桥梁疲劳损伤检测和管养策略优化方面发挥更大作用。

参 考 文 献 :

References :

- [1] 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.
- [2] GANGADHARAN R, BHATM R M, MURTHY C R L, et al. A geodesic-based triangulation technique for damage location in metallic and composite plates[J]. *Smart Materials and Structures*, 2010, 19(11): 115010.
- [3] HONG Ming, SU Zhong-qing, LU Ye, et al. Locating fatigue damage using temporal signal features of nonlinear Lamb waves[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2015, 60/61: 182-197.
- [4] WU Zhan-jun, LIU Ke-hai, WANG Yi-shou, 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.
- [5] LIU Ke-hai, MA Shu-yi, WU Zhan-jun, et al. A novel probability-based diagnostic imaging with weight compensation for damage localization using guided waves[J]. *Structural Health Monitoring*, 2016, 15(2): 162-173.
- [6] SU Chen-hui, JIANG Ming-shun, LIANG Jian-ying, et al. Damage localization of composites based on difference signal and Lamb wave tomography[J]. *Materials*, 2020, 13(1): 218-218.
- [7] LI Jun-han, WANG Shao-feng, MAO Xin, et al. Accelerating algorithm for total focusing method imaging based on optimization of full matrix data [J]. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2023, 59(2): 161-170.
- [8] MANSUR RODRIGUES FILHO J F, BÉLANGER P. Global total focusing method through digital twin and robotic automation for ultrasonic phased array inspection of complex components[J]. *NDT and E International*, 2023, 137: 102833.
- [9] LUO Zhong-bing, ZHANG Song, JIN Shi-jie, et al. Heterogeneous ultrasonic time-of-flight distribution in multidirectional CFRP corner and its implementation into total focusing method imaging [J]. *Composite Structures*, 2022, 294: 115789.
- [10] 张海燕,孙修立,曹亚萍,等.基于时间反转理论的聚焦 Lamb 波结构损伤成像[J]. *物理学报*, 2010, 59(10): 7111-7119.
ZHANG Hai-yan, SUN Xiu-li, CAO Ya-ping, et al. Structural damage imaging based on time-reversal theory for focusing of Lamb waves[J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, 59(10): 7111-7119. (in Chinese)
- [11] IHN J B, CHANG Fu-kuo. Pitch-catch active sensing methods in structural health monitoring for aircraft structures[J]. *Structural Health Monitoring*, 2008, 7(1): 5-19.
- [12] HAMEEDM S, LI Zheng, CHEN Jian-lin, et al. Lamb-wave-based multistage damage detection method using an active PZT sensor network for large structures[J]. *Sensors*, 2019, 19: 2010-2010.
- [13] DAI Wei, WANG Xiang-yu, ZHANG Meng, et al. Corrosion monitoring method of porous aluminum alloy plate hole edges based on piezoelectric sensors[J]. *Sensors*, 2019, 19: 1106.
- [14] KIM S, KIM N H, LEE S. Study on Lamb wave propagation in a cracked plate using numerical simulations[J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2023, 37(8): 4217-4225.
- [15] SHI Lin-ze, CHENG Bin, LI De-rui, et al. Fatigue crack monitoring in OSDs using Lamb wave longitudinal transmission[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2024, 212: 108245.
- [16] 杨晓华,刘学君,马广婷.基于多频率数据融合的 Lamb 波损伤定位研究[J]. *声学技术*, 2017, 36(2): 133-139.
YANG Xiao-hua, LIU Xue-jun, MA Guang-ting. Research on multi-frequency data fusion based Lamb wave damage localization[J]. *Technical Acoustics*, 2017, 36(2): 133-139. (in Chinese)
- [17] 许颖,陈锐,卢苗苗,等.考虑材料各向异性的纤维增强聚合物基复合材料板损伤 Lamb 波检测和定位[J]. *复合材料学报*, 2019, 36(2): 389-399.
XU Ying, CHEN Rui, LU Miao-miao, et al. Detection and location of damage in fiber reinforced plastics plates by Lamb wave considering material anisotropy[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2017, 36(2): 389-399. (in Chinese)
- [18] 骆英,毛雨欣.一种基于 Lamb 波的智能结构损伤识别方法[J]. *实验力学*, 2022, 37(3): 305-314.
LUO Ying, MAO Yu-xin. An intelligent structural damage recognition method based on Lamb wave [J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2022, 37(3): 305-314. (in Chinese)
- [19] 姜跃栋,张伦伟,杨国标.基于 Lamb 波的金属薄板载荷定位方法[J]. *无损检测*, 2016, 38(4): 26-30.
JIANG Yue-dong, ZHANG Lun-wei, YANG Guo-biao. Load localization method for a metallic plate based on Lamb wave[J]. *Nondestructive Testing*, 2016, 38(4): 26-30. (in Chinese)
- [20] 王高平,李波,徐志勇,等.基于 ABAQUS 的 Lamb 波时间反转薄板损伤研究[J]. *压电与声光*, 2021, 43(3): 346-351.
WANG Gao-ping, LI Bo, XU Zhi-yong, et al. Study on damage detection of thin plate by time reversal method based on ABAQUS[J]. *Piezoelectrics and Acoustooptics*, 2021, 43(3): 346-351. (in Chinese)
- [21] 石林泽,程斌,董华能,等.基于卷积神经网络的钢板面板疲劳裂纹识别方法研究[J]. *桥梁建设*, 2023, 53(4): 62-69.
SHI Lin-ze, CHENG Bin, DONG Hua-neng, et al. A research on fatigue crack identification for steel bridge deck plates based on convolutional neural network[J]. *Bridge Construction*, 2023, 53(4): 62-69. (in Chinese)
- [22] 许西宁,余祖俊,朱力强.图解法求解 Lamb 波频散方程[J]. *电子测量与仪器学报*, 2012, 26(11): 966-971.
XU Xi-ning, YU Zu-jun, ZHU Li-qiang. A graphical method to solve a dispersion equation of Lamb wave[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2012, 26(11): 966-971. (in Chinese)
- [23] 关立强,祝伟光,李义丰. Lamb 波时间反转椭圆定位和层析成像混合技术研究[J]. *南京大学学报(自然科学)*, 2019, 55(2): 191-201.
GUAN Li-qiang, ZHU Wei-guang, LI Yi-feng. Research on hybrid techniques of time-reversal ellipse location and tomographic imaging of Lamb wave[J]. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)*, 2019, 55(2): 191-20. (in Chinese)
- [24] 刘增华,樊军伟,何存富,等.基于全向型 S_0 模态磁致伸缩传感器的无参考缺陷成像方法研究[J]. *机械工程学报*, 2015, 51(10): 8-16.
LIU Zeng-hua, FAN Jun-wei, HE Cun-fu, et al. Research on baseline-free damage imaging method employing omnidirectional S_0 mode magnetostrictive transducers[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2015, 51(10): 8-16. (in Chinese)
- [25] 刘增华,穆云龙,宋国荣,等.复合材料板 Chirp 激励的 Lamb 波成像技术研究[J]. *仪器仪表学报*, 2015, 36(9): 1961-1971.

- LIU Zeng-hua, MU Yun-long, SONG Guo-rong, et al. Research on Lamb wave imaging technique for composite plate based on chirp excitation[J]. Chinese Journal of Scientific Instrumentation, 2015, 36(9): 1961-1971. (in Chinese)
- [26] LIU Zeng-hua, YU Feng-xiang, WEI Ru, et al. Image fusion based on single-frequency guided wave mode signals for structural health monitoring in composite plates[J]. Materials Evaluation, 2013, 71(12): 1434-1443.
- [27] 骆 英, 徐彩军, 徐晨光, 等. 去除 Lamb 波频散的线性映射法[J]. 实验力学, 2018, 33(5): 734-742.
- LUO Ying, XU Cai-jun, XU Chen-guang, et al. On the linear mapping method for removing frequency dispersion of Lamb wave[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2018, 33(5): 734-742. (in Chinese)
- [28] 张伟晔. 基于 S0 模态 Lamb 波的钢结构裂纹损伤识别研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2019.
- ZHANG Wei-ye. Research on crack damage identification on steel structures based on S0 mode of Lamb waves[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2019. (in Chinese)
- [29] YANG Bin, XUAN Fu-zhen, CHEN Shao-jie, 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.
- [30] 杨 斌, 胡超杰, 轩福贞, 等. 基于超声导波的压力容器健康监测 I: 波传导行为及损伤定位[J]. 机械工程学报, 2020, 56(4): 1-10.
- YANG Bin, HU Chao-jie, XUAN Fu-zhen, et al. Structural health monitoring of pressure vessel based on guided wave technology. Part I: wave propagating and damage localization[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(4): 1-10. (in Chinese)
- [31] 胡暮平. 基于 Lamb 波非线性指标的裂纹扩展监测技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2020.
- HU Mu-ping. Study on the crack propagation monitoring technique based on nonlinear index of Lamb wave[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2020. (in Chinese)