

# 基于波包络和相位失配的兰姆波缺陷定量反演方法

王红伟, 贾景堃, 潘国庆, 王漪梦, 赵宏伟, 李广振

(北京航天测控技术有限公司, 北京 100041)

**摘要:** 针对金属板中缺陷定量评价问题, 提出了一种基于波包络和相位失配的兰姆波缺陷定量反演方法; 通过有限元仿真, 研究了缺陷几何参数与兰姆波瞬时相位和波包络的关系; 结果表明, 兰姆波瞬时相位和波包络与缺陷尺寸参数的变化有较好的相关性, 根据两个特征参数计算的瞬时相位累积误差和幅值累积误差可以定量表征缺陷尺寸参数的变化; 在此研究基础上, 结合贝叶斯理论, 提出了一种基于波包络和相位失配的兰姆波缺陷定量反演方法; 开展金属板中缺陷反演实验, 验证了该方法对金属板中缺陷大小和位置反演的有效性和可行性, 其中平面槽型、阶梯槽型和圆形腐蚀缺陷的各种反演误差均小于 3%; 研究工作为金属板中缺陷定量识别与评价提供了可行方案。

**关键词:** 金属板; 波包络; 瞬时相位; 贝叶斯理论; 兰姆波

## Quantitative Inversion Method for Lamb Wave Defects Based on Wave Envelope and Phase Mismatch

WANG Hongwei, JIA Jingkun, PAN Guoqing, WANG Yimeng,

ZHAO Hongwei, LI Guangzhen

(Beijing Aerospace Measurement & Control Corporation Co., Ltd., Beijing 100041, China)

**Abstract:** For the quantitative evaluation of defects in metal plates, a quantitative inversion method for Lamb wave defects based on wave envelope and phase mismatch is proposed. The relationship between the defect geometrical parameters and the instantaneous phase and wave envelope of Lamb waves is investigated by finite element simulation. The results show that the instantaneous phase and wave envelope of Lamb waves have a good correlation with the variation of the defect size parameters, and the instantaneous phase cumulative error and amplitude cumulative error calculated by the two characteristic parameters can quantitatively characterize the variation of the defect size parameters. On this basis, a quantitative inversion method for Lamb wave defects based on wave envelope and phase mismatch is proposed in combination with Bayesian theory. Defect inversion experiments in metal plates are carried out to verify the validity and feasibility of the method on the inversion of defect size and location in metal plates, in which the various inversion errors of planar groove-type, stepped groove-type and circular corrosion defects are less than 3%. The research provides a feasible solution for the quantitative identification and evaluation of defects in metal plates.

**Keywords:** metal plate; wave envelope; instantaneous phase; Bayesian theory; Lamb wave

## 0 引言

金属板结构广泛应用于重要工程结构中<sup>[1]</sup>, 面对复杂多变的使用环境和工作条件, 及时地检测出金属板中的缺陷对预防事故的发生是非常重要的。目前, 工业的发展对检测技术提出了更高的要求, 不仅需要确定金属板中是否存在缺陷, 还需要判断缺陷所在的位置、尺寸大小等信息。因此, 发展一种有效的金属板缺陷特征参数定量识别方法十分必要。

兰姆波超声无损检测技术常被用于对金属板缺陷的定性及定量分析。当兰姆波在被测结构中传播时, 材料的声学特性和内部组织变化会对其传播产生一定影响, 即兰

姆波遇到缺陷会产生散射现象, 可以通过提取波中的散射信息对缺陷进行表征<sup>[2]</sup>。国内外学者通过多种方法对兰姆波中的缺陷散射信息进行描述, 包括兰姆波的传播特性<sup>[3-6]</sup>、散射特性<sup>[7-10]</sup>和特征参数<sup>[11-15]</sup>等。但这些方法对较小或形状复杂的缺陷表征能力不佳, 从中获取关于缺陷的完整信息具有一定的挑战性。目前, 在地震波数据的表征方面, 利用信号的波包络和瞬时相位信息的方法具有准确性高和鲁棒性强等特点<sup>[16-17]</sup>。例如, Hu<sup>[18]</sup>等人将瞬时相位与波包络相结合, 提出了一种基于相位和振幅的时频域失配分析方法, 进行地震成像研究。结果表明, 该方法不会丢失地震波场的瞬时相位信息, 提高了强反射区域的成像分辨率, 为地震成像工作提供了可行方案。将这种方法用

收稿日期: 2024-04-07; 修回日期: 2024-05-09。

基金项目: 装发一般共用技术项目(YZ-21003)。

作者简介: 王红伟(1989-), 女, 硕士, 高级工程师。

引用格式: 王红伟, 贾景堃, 潘国庆, 等. 基于波包络和相位失配的兰姆波缺陷定量反演方法[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(7): 246-251, 259.

于描述兰姆波中的缺陷散射信息, 有利于金属板缺陷信息表征工作。

在缺陷信息有效表征基础上, 需要进行缺陷参数量化方法研究, 其中基于模型的正演和反演方法引起了广泛关注。基于模型的方法可以看作是一个非线性逆过程, 依据可测参数值去预测或反推目标的状态参数, 即根据观测信息和物理模型, 求解或推算描述数据的目标参数。其中, 正演模型的建立主要通过有限元法<sup>[19-21]</sup>和边界元法<sup>[21-23]</sup>等数值计算方法。但在实验检测和实际应用中, 由于设备性能的局限性和环境的复杂性, 正演模型预测结果的准确性不高。为提高量化缺陷参数的准确度, 学者们提出了基于模型的反演方法。例如, Shi P<sup>[26]</sup>等提出了一种基于频域的反演方法, 对铝制框架和典型汽车悬挂臂结构中的不规则腐蚀缺陷几何参数进行了估计。实验结果表明, 该方法可以对不规则腐蚀缺陷进行反演, 且反演精度较高。目前, 基于模型的反演方法的计算效率和精度主要取决于以下两个因素: 一是预测模型与实际物理过程的吻合程度, 二是逆向算法的稳定性、精度和收敛速度。因此, 国内外围绕具有高稳定性和高精度的贝叶斯逆向算法进行了大量研究。

贝叶斯算法为缺陷反演提供了强大的理论基础<sup>[27]</sup>。该方法可以有效处理模型的不确定性, 能够应用于推断复杂问题的概率, 因此被广泛应用于结构中缺陷定量分析领域<sup>[28-29]</sup>。在缺陷反演过程中, 首先利用贝叶斯算法对包含缺陷信息的检测信号特征参数进行估计与预测, 然后将预测值作为损伤定位反问题的输入, 得到缺陷信息。例如, Cantero<sup>[30]</sup>等人提出了一种基于贝叶斯理论的全概率反演方法, 严格独立地对每个传感器的飞行时间进行稳健估计, 以此提高板结构损伤检测和定位的准确性。结果表明, 该方法能够有效地重建金属板内的损伤定位, 并且无需假设特定的先验时频变换模型。上述基于贝叶斯算法的缺陷反演方法具有较好的准确性和可行性, 可以将该方法用于金属板中缺陷的正确定位和量化。

综上所述, 本文将开展金属板缺陷量化分析兰姆波检测方法的研究, 结合贝叶斯理论, 提出一种基于波包络和相位失配的兰姆波缺陷定量反演方法, 以实现金属板中缺陷的定量评价。

## 1 基于波包络和相位失配分析的兰姆波缺陷表征方法

在兰姆波超声无损检测中, 可以通过提取波中的散射信息对缺陷进行表征。通过研究缺陷尺寸信息变化时检测信号的波包络和瞬时相位的变化趋势, 提出一种基于波包络和相位失配分析的兰姆波缺陷表征方法。

结构中缺陷的出现会导致兰姆波检测信号波包络和瞬时相位发生明显的变化, 出现波包络和瞬时相位失配现象。为量化金属板中缺陷检测信号波包络和瞬时相位的失配程度, 提出两个特征指标, 即幅值累积误差  $\chi_1(m)$  和瞬时相位累积误差  $\chi_2(m)$ 。其中:

$$\chi_1(m) = \int_{T_{\min}}^{T_{\max}} \left[ \ln \frac{E^y(t, m)}{E(t)} \right]^2 dt \quad (1)$$

$$\chi_2(m) = \int_{T_{\min}}^{T_{\max}} [\varphi^y(t, m) - \varphi(t)]^2 dt \quad (2)$$

式中,  $m$  为缺陷宽度或深度;  $T_{\max}$  为时间窗上截止时间;  $T_{\min}$  为时间窗下截止时间;  $E^y(t, m)$  为有缺陷时接收信号的波包络;  $E(t)$  为无缺陷时接收信号的波包络;  $\varphi^y(t, m)$  为有缺陷时接收信号的瞬时相位;  $\varphi^y$  为无缺陷时接收信号的瞬时相位。其中:

$$E(t) = \sqrt{f^2(t) + \hat{f}^2(t)} \quad (3)$$

$$\varphi(t) = \arctan \frac{\hat{f}(t)}{f(t)} \quad (4)$$

式中,  $f(t)$  为无缺陷时接收信号;  $\hat{f}(t)$  为接收信号的希尔伯特变换。

根据上述特征指标, 提取检测信号的波包络和瞬时相位信息, 研究两特征参数与缺陷尺寸参数变化的相关性, 实现对缺陷几何信息的表征。下面以有限元仿真为例, 对该方法进行进一步介绍。

利用 COMSOL 有限元仿真软件建立空气耦合兰姆波缺陷检测二维仿真模型, 如图 1 所示。其中, 铝板长度为 800 mm, 厚度为 3 mm, 在铝板表面有一槽型缺陷, 缺陷中心距铝板左边缘为 400 mm。激励信号为中心频率 400 kHz 的 5 周期汉宁窗调制的正弦信号, 调整激励接收传感器的角度为  $8^\circ$  以在板中激励  $A_0$  模态兰姆波。在模型中设置接收传感器与铝板距离的中点采集接收信号的幅值, 接收信号的采样率设置为 10 MHz, 采样长度设置为 300 s。

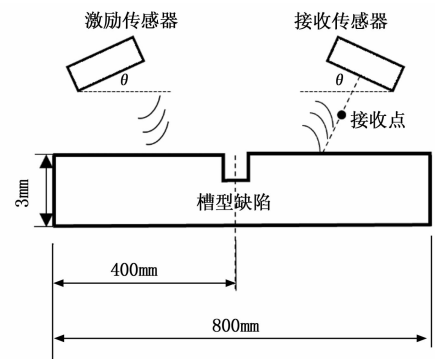


图 1 缺陷检测仿真模型

接收传感器获得的空气耦合兰姆波时域信号如图 2 所示。从图中可以看出, 时域波形中出现一个较小波包和一个较大波包, 根据  $A_0$  和  $S_0$  波的传播速度和传播路径计算可知, 较小波包为  $S_0$  模态兰姆波, 较大波包为  $A_0$  模态兰姆波。对比无缺陷时的接收信号, 可以发现无缺陷时的接收信号的  $A_0$  和  $S_0$  模态兰姆波的相位和波包络都发生明显的变化, 但无法对缺陷尺寸参数进行定量分析。

为进一步研究兰姆波的瞬时相位和波包络与缺陷尺寸参数变化的关系, 在图 1 所示仿真模型中, 在铝板上表面建立两个底槽型缺陷, 其一固定宽度为 4 mm, 深度从 0.2

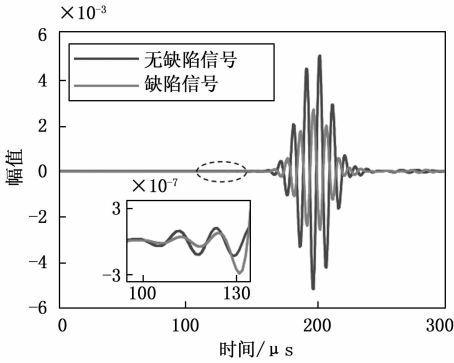


图 2 接收信号时域波形图

~1.6 mm 逐渐递增, 步长为 0.2 mm; 其二固定缺陷深度为 1.2 mm, 缺陷宽度的变化范围为 3~12 mm, 步长为 1 mm。通过提取上述不同尺寸缺陷接收信号的瞬时相位和波包络特征, 研究其与缺陷尺寸参数间的关系。

接收信号瞬时相位和波包络随缺陷尺寸的变化如图 3 和图 4 所示。从图中可以看出, 随着缺陷深度或宽度的增大, 接收信号瞬时相位和波包络逐渐减小, 但波包络对缺陷宽度尺寸变化的敏感性相对较差。

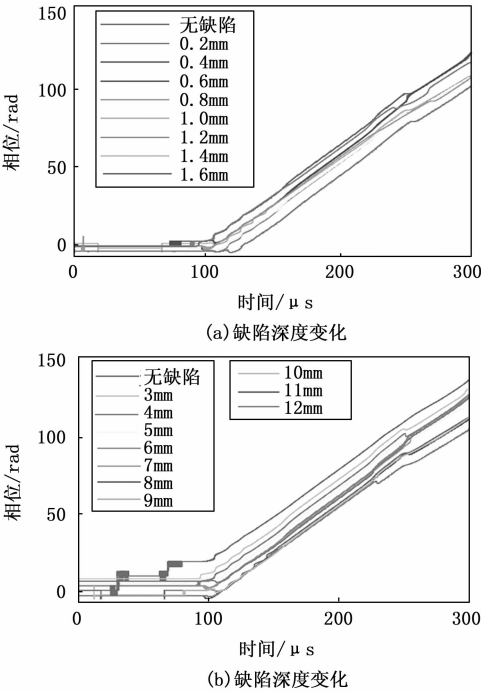
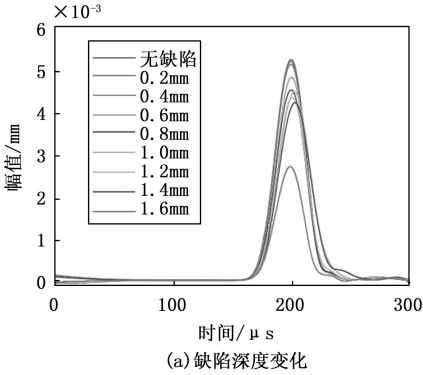


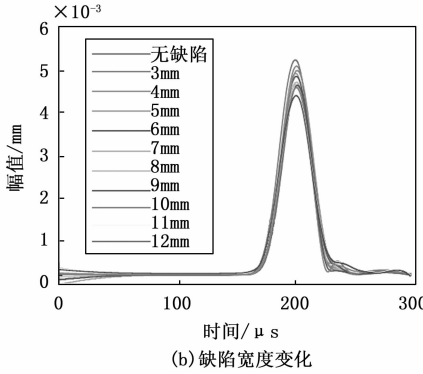
图 3 不同缺陷尺寸下的瞬时相位

为进一步量化不同缺陷尺寸与两特征参数的关系, 通过瞬时相位累积误差和幅值累积误差对缺陷尺寸参数的变化进行表征。两个特征指标随缺陷变化趋势如图 5 所示。从图 5 中可以看出, 瞬时相位累积误差和幅值累积误差随着缺陷尺寸的增大而逐渐增大, 不同宽度缺陷的幅值累积误差表现出余弦曲线变化趋势。

综上所述, 瞬时相位累积误差和幅值累积误差可以较

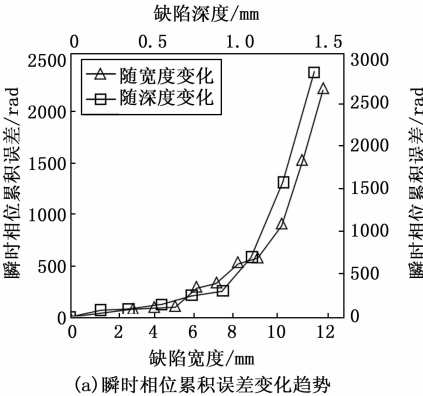


(a) 缺陷深度变化

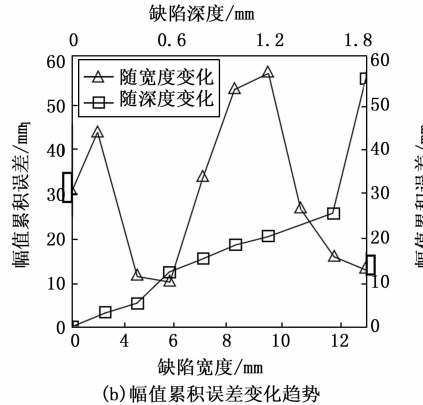


(b) 缺陷宽度变化

图 4 不同缺陷尺寸下的波包络



(a) 瞬时相位累积误差变化趋势



(b) 幅值累积误差变化趋势

图 5 特征指标随缺陷变化趋势

好地表征缺陷尺寸参数的变化。为得到更准确的缺陷尺寸

信息, 联合两个特征指标, 结合贝叶斯理论发展一种基于波包络和相位失配的兰姆波缺陷定量反演方法。

## 2 基于波包络和相位失配的兰姆波缺陷定量反演方法

在基于波包络和相位失配分析的兰姆波缺陷表征方法研究的基础上, 发展一种用于金属板中缺陷量化分析的贝叶斯反演方法。

贝叶斯理论通过建立先验分布和似然函数对部分未知的状态参数进行估计。在计算过程中, 根据贝叶斯公式对状态参数发生概率进行修正, 再利用拟合后验分布得到分布期望值和修正概率做出最优决策, 其中贝叶斯公式可表示为<sup>[27]</sup>:

$$p(m | d) = \frac{p(d | m)p(m)}{p(d)} \quad (5)$$

式中,  $d$  为检测数据;  $p(m)$  为参数  $m$  的先验概率分布;  $p(d)$  为检测数据  $d$  的概率;  $p(d | m)$  为参数  $m$  下获得检测数据  $d$  的概率。

反演过程的先验信息是基于对检测模型的预分析确定的, 先验分布对模型的后验分布具有重要影响。似然函数表示检测数据与模型数据之间的相似度, 它的大小反映反演误差。根据先验分布和似然函数可建立模型参数的后验概率密度分布。

基于波包络和相位失配的兰姆波缺陷定量反演方法流程图如图 6 所示。首先, 提取金属板中缺陷接收信号与候选模型的瞬时相位和波包络信息, 并通过使用权重因子拟合瞬时相位累积误差和幅值累积误差, 从而构建反演目标函数。其次, 通过设置反演阈值来调目标函数中不同信息的权重, 以降低反演对初始模型的依赖。最后, 采用马尔科夫链蒙特卡洛采样方法探索模型空间, 进而得到模型参数的后验概率密度分布, 以此获取全局最优解。

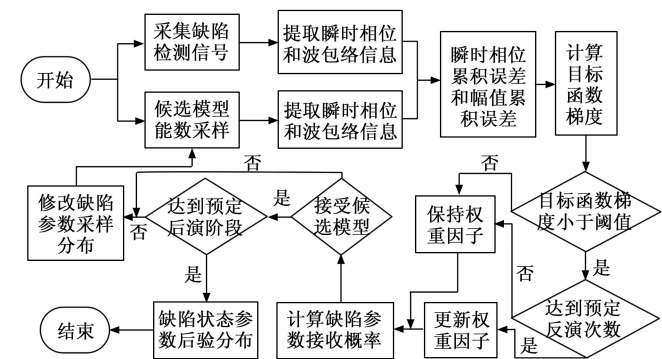


图 6 基于波包络和相位失配的兰姆波缺陷定量反演方法

首先, 根据瞬时相位累积误差和幅值累积误差函数, 构造用于缺陷反演的目标函数:

$$\Phi(m) = \frac{1}{2} \omega^n k_1 \int_0^T [\varphi^n(t, m) - \varphi(t)]^2 dt + \frac{1}{2} (1 - \omega^n) k_2 \int_0^T [\ln \frac{E^n(t, m)}{E(t)}]^2 dt \quad (6)$$

其中:  $\omega$  为权重因子, 且  $0 \leq \omega \leq 1$ ,  $n$  为反演阶段,  $k_1$  和  $k_2$  为归一化因子。

其次, 为了实现不同信息的自动调节, 采用伴随状态法求解目标函数的梯度来确定反演阈值, 并用其控制权重因子的变化。选取缺陷尺寸变化区间的最大梯度值为反演阈值。

完成多信息联合的目标函数构造后, 对于反演参数, 引入模型中缺陷几何参数变量  $X$ :

$$X = \{p_1, p_2, \dots, p_M\}^T \quad (7)$$

其中:  $p_i$  表示与参数  $m$  相关的搜索空间,  $M$  为缺陷参数的数量。

最后, 通过马尔科夫链蒙特卡洛方法进行参数采样, 每次参数更新接受上一模型参数的指导, 使采样模型更多的集中在高概率位置, 提高反演效率, 其采样方法如下:

1) 初始化缺陷参数  $X^0 = \{p_1^0, p_2^0, \dots, p_M^0\}$ ;

2) 计算当前缺陷参数模型与检测信号的瞬时相位差和波包络比;

3) 由上一次缺陷参数  $X_{n-1}$  得到候选参数  $X_{\text{cand}}$ , 其选取原则可表示为:

$$p_1^{\text{cand}} \in N(p_1^{n-1}, \sigma_1^2), p_2^{\text{cand}} \in N(p_2^{n-1}, \sigma_2^2) \dots p_M^{\text{cand}} \in N(p_M^{n-1}, \sigma_M^2) \quad (8)$$

4) 由公式 (8) 评估候选参数的可能性。

5) 如果候选参数可以满足下式, 则接受候选参数, 否则接受上一次缺陷参数。

$$\alpha \leq \min \left[ \frac{P(S | \Phi^{\text{cand}})}{P(S | \Phi^{n-1})}, 1 \right] \quad (9)$$

其中:  $\alpha$  为 0 到 1 之间的随机数。

6) 假设马尔科夫链在  $N_p$  次解后趋于稳定, 得到缺陷状态参数样本集  $\{X^0, X^1, X^2, \dots, X^{N_p}\}$ , 从样本集中获得用于估计参数后验分布的统计样本, 并将这些样本的均值作为缺陷参数的估计值。

## 3 实验结果与分析

基于波包络和相位失配的兰姆波缺陷定量反演方法, 建立了缺陷反演实验系统, 利用该反演方法对板中平底槽型、阶梯槽型和圆形腐蚀缺陷的几何和位置信息进行了反演, 验证了该方法的有效性。

金属板中缺陷定量的贝叶斯反演实验系统如图 7 所示, 主要包括 JPR-600N 高功率超声波激励接收器、空气耦合超声传感器、传感器支架、试件支架和计算机等。

在实验过程中, 通过电脑控制超声波激励接收器激励信号, 激励信号频率为 400 kHz, 采样率为 50 MHz, 空气耦合超声传感器偏转  $8^\circ$  对信号进行发出和接收, 接收信号经前置放大器输出并保存至计算机。传感器中心到铝板的法相距离为 15 mm。在反演过程中将缺陷的几何尺寸作为反演参数, 假设要估计的参数  $X = \{p_1, p_2, p_3\}$ , 其中  $p_1, p_2$  分别为缺陷的宽度和深度,  $p_3$  为缺陷中心距检测区域左端的距离。定义参数的搜索空间为  $P_1 = [0 \sim 10]$  mm,  $P_2 = [0 \sim 2.5]$  mm 和  $P_3 = [0 \sim 280]$  mm。将分别对平底槽型、

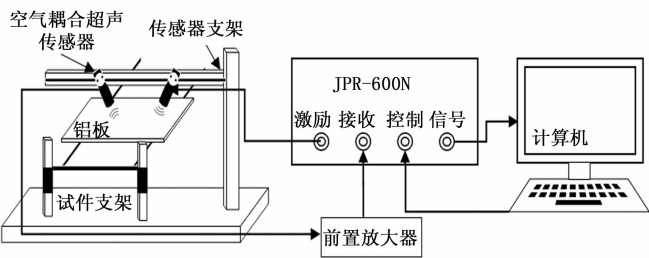


图 7 缺陷反演实验系统示意图

阶梯槽型和圆形腐蚀缺陷进行实验研究，各缺陷示意图如图 8 所示。

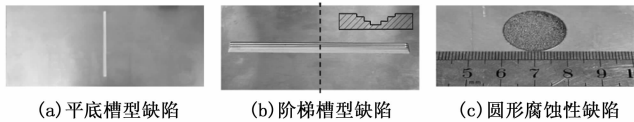


图 8 各缺陷示意图

通过提取实验信号中的瞬时相位和波包络信息对缺陷进行反演。其中，不同规格的平底槽型缺陷尺寸如表 1 所示，阶梯槽型缺陷的 3 层槽深都为 0.4 mm、槽宽分别为 12、8 和 4 mm，圆形腐蚀缺陷直径为 20 mm。

表 1 缺陷尺寸

	宽度/mm	深度/mm	位置/mm
缺陷 1	3	0.6	120
缺陷 2	6	1.2	140
缺陷 3	9	1.8	180

以平底槽缺陷为例，对反演结果进行详细说明。不同尺寸的平底槽缺陷的实验接收信号如图 9 (a) 所示，提取接收信号的瞬时相位和波包络如图 9 (b) 所示。以实际缺陷信号的瞬时相位和波包络作为目标信息来进行缺陷几何尺寸的反演工作，分别采用定权重和变权重多信息联合反演，其中定权重反演中相位权重和波包络权重各为 0.5。

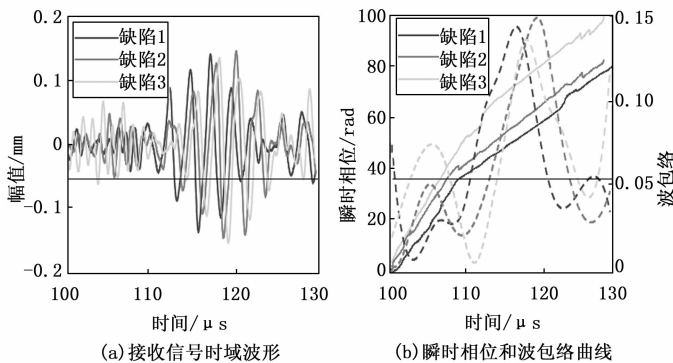


图 9 不同尺寸缺陷时域接收信号及对应瞬时相位和波包络曲线

以第二种尺寸的平底槽缺陷为例，将该缺陷的 3 个尺寸参数 (位置、宽度和深度) 做为目标信息，进行马尔科夫链蒙特卡洛反演。通过反演得到缺陷 3 个参数的后验分

布，对其进行正态拟合，并以各参数后验分布的均值作为最终反演结果，如图 10 所示。其中，缺陷宽度反演结果为 5.910 mm，缺陷深度为 1.189 mm，缺陷中心坐标为 137.2 mm。

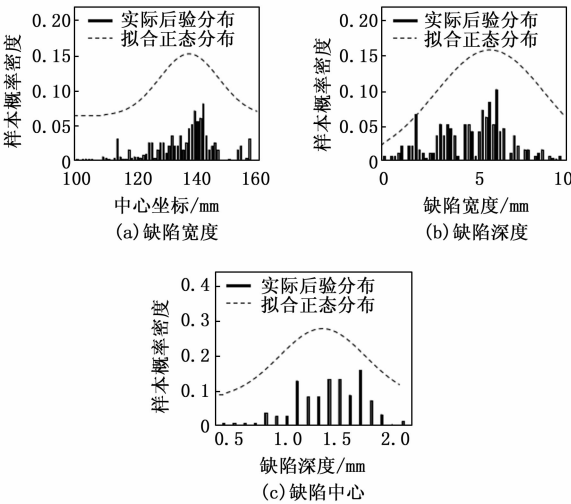


图 10 缺陷参数后验分布

最终得到平底槽型缺陷多信息联合反演结果如表 2 所示。从表中可以看出，两种反演策略得到的结果与实际较为接近，该反演方法可以对金属板中平底槽型缺陷尺寸参数和位置信息进行确定，且变权重策略反演精度高于定权重策略。后续将采用变权重策略对阶梯槽型和圆形腐蚀缺陷进行尺寸参数反演。

表 2 平底槽型缺陷反演误差

	宽度/mm		深度/mm		位置/mm	
	定权重	变权重	定权重	变权重	定权重	变权重
缺陷 1	2.976	3.029	0.6138	2.982	121.8	120.7
缺陷 2	6.035	5.910	1.191	1.189	136.6	137.2
缺陷 3	9.018	8.954	1.854	1.7777	183.6	181.7

对阶梯槽型和圆形腐蚀缺陷进行变权重多信息联合反演，缺陷真实缺陷轮廓示意图和反演缺陷轮廓结果如图 11 所示。从图中可以看出变权重反演策略较为准确的反演了阶梯槽型和圆形腐蚀缺陷轮廓，其中阶梯槽型缺陷最大深度反演准确，圆形腐蚀缺陷最大深度反演误差为 1.5%，缺陷反演误差分别为 3% 和 0.5%。

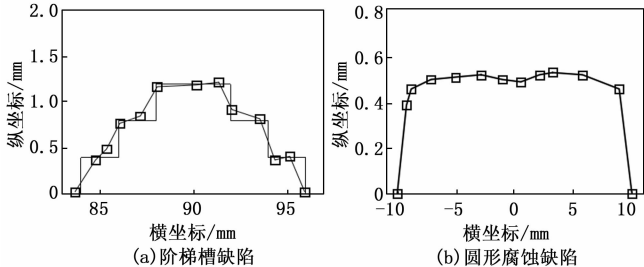


图 11 缺陷反演结果

综上所述,基于波包络和相位失配的兰姆波缺陷定量反演方法能够有效地实现对板中缺陷的位置和尺寸信息进行反演,为金属板中缺陷定量识别与评价提供可行方案。

#### 4 结束语

针对金属板中缺陷定量评价问题,本文进行金属板中缺陷尺寸参数和位置信息的空气耦合兰姆波定量评价方法研究,发展了一种基于波包络和相位失配分析的兰姆波缺陷反演方法,得到以下主要结论:

1) 通过有限元仿真研究了兰姆波检测信号中的波包络和瞬时相位与缺陷尺寸信息的相关性,结果表明,金属板缺陷信号的瞬时相位和波包络信息与缺陷尺寸信息的变化存在很强的关联性,基于该特性可以定量表征缺陷尺寸参数的变化;

2) 发展了一种基于波包络和相位失配的兰姆波缺陷定量反演方法,进行金属板中缺陷的空气耦合兰姆波超声检测实验。实验结果表明,该方法可以很好地实现对板中缺陷位置和尺寸信息的反演,各缺陷反演误差均小于3%。

#### 参考文献:

[1] 戴建. 基于机器视觉的钢板表面缺陷检测系统[J]. 冶金与材料, 2023, 43 (1): 157-159.

[2] GHAVAMIAN A, MUSTAPHA F, HANG B, et al. Detection, localisation and assessment of defects in pipes using guided wave techniques: a review [J]. *Sensors*, 2018, 18 (6): 4470.

[3] HAYWOOD-ALEXANDER M, DERVILIS N, WORDEN K, et al. Informative bayesian tools for damage localisation by decomposition of lamb wave signals [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2022, 535: 117063.

[4] SILITONGA D, DECLERCQ N F, POMAREDE P, et al. Ultrasonic guided waves interaction with cracks in the front glass of thin-film solar photovoltaic module [J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2023, 251: 112179.

[5] ZHANG N, ZENG L, LIN J, et al. A lamb wave-based crack evaluation method in plate-like structures using specular reflections and tip diffractions [J]. *Smart Materials and Structures*, 2020, 30 (2): 025015.

[6] LOPES K W, GONSALEZ-BUENO C G, INMAN D J, et al. Longitudinal wave scattering in thin plates with symmetric damage considering oblique incidence [J]. *Ultrasonics*, 2024, 136: 107161.

[7] LIU H, CHEN X, MICHAELS J E, et al. Incremental scattering of the A0 Lamb wave mode from a notch emanating from a through-hole [J]. *Ultrasonics*, 2019, 91: 220-230.

[8] TAKIUTI B E, MANCONI E, BRENNAN M J, et al. Wave scattering from discontinuities related to corrosion-like damage in one-dimensional waveguides [J]. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2020, 42: 1-17.

[9] GHADAMI A, BEHZAD M, MIRDAMADI H R. Damage identification in multi-step waveguides using lamb waves and scattering coefficients [J]. *Archive of Applied Mechanics*,

2018, 88: 1009-1026.

[10] CAO X, ZENG L, LIN J. Generalized scattering matrix method for Lamb wave scattering analysis at cascaded notches [J]. *Journal of Vibration and Control*, 2022, 28 (23/24): 3638-3651.

[11] CHEN H, ZHANG G, FAN D, et al. Nonlinear lamb wave analysis for microdefect identification in mechanical structural health assessment [J]. *Measurement*, 2020, 164: 108026.

[12] LI Z, HE C, LIU Z, et al. Quantitative detection of lamination defect in thin-walled metallic pipe by using circumferential lamb waves based on wavenumber analysis method [J]. *NDT & E International*, 2019, 102: 56-67.

[13] SEDAGHATI A, HONARVAR F, SINCLAIR A N. Lamb wave-based experimental and numerical studies for detection and sizing of corrosion damage in metallic plates [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2019, 233 (6): 2107-2120.

[14] NEUBECK R, KEXEL C, MOLL J. Matrix techniques for lamb-wave damage imaging in metal plates [J]. *Smart Materials and Structures*, 2020, 29 (11): 117003.

[15] ZHU W, XU Z, XIANG Y, et al. Nonlinear ultrasonic detection of partially closed cracks in metal plates using static component of lamb waves [J]. *NDT & E International*, 2021, 124: 102538.

[16] OH J W, ALKHALIFAH T. Full waveform inversion using envelope-based global correlation norm [J]. *Geophysical Journal International*, 2018, 213 (2): 815-823.

[17] TOHTI M, LIU J, XIAO W, et al. Full-waveform inversion of surface waves based on instantaneous-phase coherency [J]. *Near Surface Geophysics*, 2022, 20 (5): 494-506.

[18] HU Y, WU R S, HUANG X, et al. Phase-amplitude-based polarized direct envelope inversion in the time-frequency domain [J]. *Geophysics*, 2022, 87 (3): R245-R260.

[19] CUI R, SCALEA F. On the identification of the elastic properties of composites by ultrasonic guided waves and optimization algorithm [J]. *Composite Structures*, 2019, 223: 1-15.

[20] ORTA A H, KERSEMANS M, VAN DEN ABEELE K. On the identification of orthotropic elastic stiffness using 3D guided wavefield data [J]. *Sensors*, 2022, 22 (14): 5314.

[21] ORTA A H, DE BOER J, KERSEMANS M, et al. Machine learning-based orthotropic stiffness identification using guided wavefield data [J]. *Measurement*, 2023, 214: 112854.

[22] SUN J, LIU Y, YAO Z, et al. A data-driven multi-flaw detection strategy based on deep learning and boundary element method [J]. *Computational Mechanics*, 2023, 71 (3): 517-542.

[23] THANANJAYAN P, RAMU P, NATARAJAN S. Sbfem and bayesian inference for efficient multiple flaw detection in structures [J]. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 2023, 155: 226-250.

(下转第 259 页)