

# 基于预测兰姆波参考信号的缺陷概率成像

陈 晓<sup>1,2</sup>, 戴 杰<sup>1</sup>

(1. 南京信息工程大学电子与信息工程学院, 江苏南京 210044;  
2. 南京信息工程大学江苏省大气环境与装备技术协同创新中心, 江苏南京 210044)

**摘要:** 针对兰姆波缺陷概率成像需要从材质相同的无缺陷结构获得参考信号的问题, 提出一种基于参考信号理论预测的概率成像方法, 实现兰姆波缺陷定位. 该方法将初始信号和兰姆波的频散特性结合, 根据拟合得到的幅值衰减系数计算概率成像路径上的参考信号. 根据该方法计算得到的参考信号和对应路径上响应信号的希尔伯特谱定义缺陷表征指数, 结合兰姆波椭圆概率成像方法实现缺陷定位. 单一缺陷和双缺陷成像定位的实验结果表明, 该方法可以得到缺陷的概率图像, 对缺陷定位的误差小于 7.07 mm, 解决了需要测量兰姆波参考信号的问题, 定位准确、实用性好.

**关键词:** 概率成像; 兰姆波; 无损检测; 缺陷; 损伤; 频散; 希尔伯特谱

**中图分类号:** TN98 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2024)09-3262-10

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.12263/DZXB.20230878

## Probability Imaging for Defects Using Predicted Lamb Wave Reference Signal

CHEN Xiao<sup>1,2</sup>, DAI Jie<sup>1</sup>

(1. School of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210044, China; 2. Jiangsu Collaborative Innovation Center of Atmospheric Environment and Equipment Technology, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210044, China)

**Abstract:** To address the problem that Lamb wave defect probability imaging requires obtaining a reference signal from a non-destructive structures with the same material characteristics, a probability imaging method based on reference signal theoretical prediction was proposed to achieve Lamb wave defect localization. This method combines the initial signal with the dispersion characteristics of Lamb waves, and calculates the reference signal on the probability imaging path based on the fitted amplitude attenuation. The defect characterization index was defined based on the Hilbert spectrum of the calculated reference signal and the corresponding response signal on the path. Combining it with the Lamb wave elliptical probability imaging method achieved defect localization. The experimental results of this method for single- and double-defect imaging localization show that the method can obtain probability images of defects, and the absolute error for defect localization is less than 7.07 mm. This method solves the problem of measuring Lamb wave reference signals and can accurately locate defects, with good practicality.

**Key words:** probability imaging; Lamb wave; nondestructive testing; defect; damage; dispersion; Hilbert spectrum

### 1 引言

金属薄壁结构作为工业领域必不可少的关键部件, 在多变的外界环境中被广泛使用, 这也导致其极易出现孔洞、腐蚀、裂纹、分层等各种类型的缺陷. 超声兰姆波因其特有的传播方式, 在薄壁结构中表现出色而备受关注, 作为能在薄壁结构中传播较长距离的超声波, 具有高灵敏度、非破坏性等优点. 检测中兰姆波的位移幅度、频率、波数、到达时间等特性均可作为评估缺陷的特征参数, 以此为基础的缺陷检测和成像技术

开发为薄壁结构的维护和保养提供了有力支持<sup>[1-4]</sup>.

目前已有的兰姆波缺陷检测成像方法, 如时间反转法<sup>[5]</sup>、全聚焦成像算法<sup>[6]</sup>、概率成像法<sup>[7,8]</sup>等. 刘小峰等人<sup>[9]</sup>通过交叉递归率描述路径的损伤, 结合损伤概率成像算法实现缺陷的定位成像. Su 等人<sup>[10]</sup>提出基于频谱和兰姆波断层扫描的蜂窝夹层结构缺陷检测方法, 通过有损信号和参考信号之间频谱的差异性对缺陷进行定位成像. Zhao 等人<sup>[11]</sup>在识别兰姆波特征参数中引入温度补偿因子, 将温度补偿后的特征参数与参考特

性参数进行对比,实现早期疲劳裂纹损伤识别.以上方法是基于健康结构将参考信号和待检测结构的有损信号进行比较.然而在实际检测中,由于噪声、环境条件、结构材料等外界因素的限制和兰姆波频散多模的特点<sup>[12]</sup>,有损信号和参考信号之间无法保持测量环境一致,检测过程繁琐、效率不高、实用性不好. Duan 等人<sup>[13]</sup>通过构建兰姆波字典,利用兰姆波稀疏定义表示损伤因子,实现复合材料的损伤概率成像.但该方法需要先构建兰姆波字典作为参考信号,效率低. Sun 等人<sup>[14]</sup>提出基于兰姆波延迟因子的概率诊断成像算法,通过特定频率兰姆波的群速度计算信号包络的飞行时间,并与损伤信号进行比较,构建损伤指数,但该方法只适用于特定频率,在缺陷检测上存在一定局限性. Zhou 等人<sup>[15]</sup>通过使用移动换能器组构造超声兰姆波参考信号,实现板结构的损伤检测,但此方法需要在布置的阵列中不断移动换能器组,增加了实验的复杂性和不确定性. 常琦等人<sup>[16]</sup>通过二维波束聚焦概率成像实现对缺陷的检测定位,波束的准确性决定了损伤定位精度.然而对于超声兰姆波,由于频散特性,难以获得准确无误的波束概率分布,这无疑增加了缺陷检测成像的难度. 陈晓等人<sup>[17]</sup>把成像传感器阵列中相同传播距离路径上的功率谱密度值分组,将每组的功率谱密度最大值对应的路径视为无损路径来识别损伤位置.以上方法主要是为了克服时域信号的频散效应,实现导波的聚焦发射过程,但容易造成模式转换前后有效信息的缺失,导致成像的分辨率低等不足.

针对上述问题,结合兰姆波频散和衰减理论分析,提出基于兰姆波参考信号理论预测的缺陷概率成像方法实现板材中缺陷定位.通过待检测薄板中无缺陷路径初始信号结合频散传递特性和衰减特性对其他路径的信号进行预测,得到的预测信号作为对应路径的参考信号,并与该路径响应信号进行希尔伯特谱比较和构建缺陷表征指数,结合缺陷概率成像对缺陷进行成像定位.方法验证了单一缺陷和双缺陷检测成像的有效性.

## 2 理论和方法

### 2.1 参考信号预测

兰姆波传播一段距离后接收到的信号是初始信号经过频散和空间衰减后产生了时延信号.设初始信号为  $c_0(t)$ ,其频谱为  $C_0(\omega)$ ,则根据频散传递函数<sup>[2]</sup>,传播一段距离后得到的兰姆波参考信号  $c(t)$  可以表示为

$$c(t) = \frac{1}{2\pi} f(x) \int_{-\infty}^{+\infty} C_0(\omega) e^{-j\frac{x\omega}{cp(\omega)}} e^{j\omega t} d\omega \quad (1)$$

其中,  $t$  代表时间,  $x$  为离初始点的传播距离,  $\omega$  是角频率,  $j$  是单位虚数,  $cp(\omega)$  为对应频率  $\omega$  下的兰姆波的相速度,  $f(x)$  为信号的衰减函数.参考信号预测的原理如

图 1 所示,即用 A 点处的初始信号结合频散传递函数预测一段距离  $x$  后 B 点的参考信号.

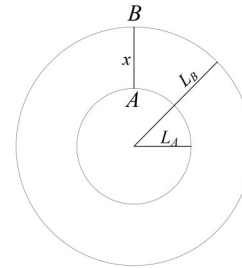


图 1 参考信号预测原理图

兰姆波信号在传播时幅值会随着传播距离的增大而衰减.以钢板为例,如图 2 所示,在传播路径上设置多个间隔 1 cm 信号接收点,分析不同接收点处时域信号的幅值大小来研究衰减函数  $f(x)$ . 钢板的材料参数见表 1.

表 1 钢板材料参数属性

材料	密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	弹性模量 $E/\text{GPa}$	泊松比 $\nu$
钢	7 850	210	0.3

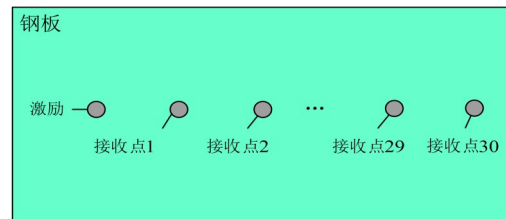


图 2 钢板间隔 1 cm 模型图

设激励点位于图中的左侧第 1 个点,激励信号  $A$  是由汉宁窗调制的包络信号<sup>[18]</sup>.

$$A = \frac{1}{2} \left[ 1 - \cos\left(\frac{2\pi f_c t}{n}\right) \right] \sin(2\pi f_c t) \quad (2)$$

其中,  $f_c$  代表中心频率,  $n$  代表周期数.当中心频率为 200 kHz、周期数为 10 时激励信号的时域和频域波形如图 3 所示.

为了便于分析信号传播时幅值的衰减特性,对所有时域信号进行希尔伯特变换,根据包络线得到时域信号的最大幅值点.其中,第 1~9 个信号接收点的时域信号和其对应的希尔伯特包络线如图 4 所示.从图中可以看出随着距离增加,不同接收点的响应信号都呈现出一定时延和幅值衰减特性.不同接收点处的幅值随距离变化如图 5 所示,它们之间并非简单的线性关系.经过数值分析,衰减函数  $f(x)$  的规律如下:

$$f(x) = \frac{A_m}{A_1} = e^{B_1 x^4 + B_2 x^3 + B_3 x^2 + B_4 x} \quad (3)$$

其中,系数  $B_1 = 742, B_2 = -584, B_3 = 167, B_4 = -24$ .图 5 给出钢板拟合曲线和数据点之间的对比曲线,可以看出衰减函数  $f(x)$  可以很好地描述衰减随距离变化的情况.

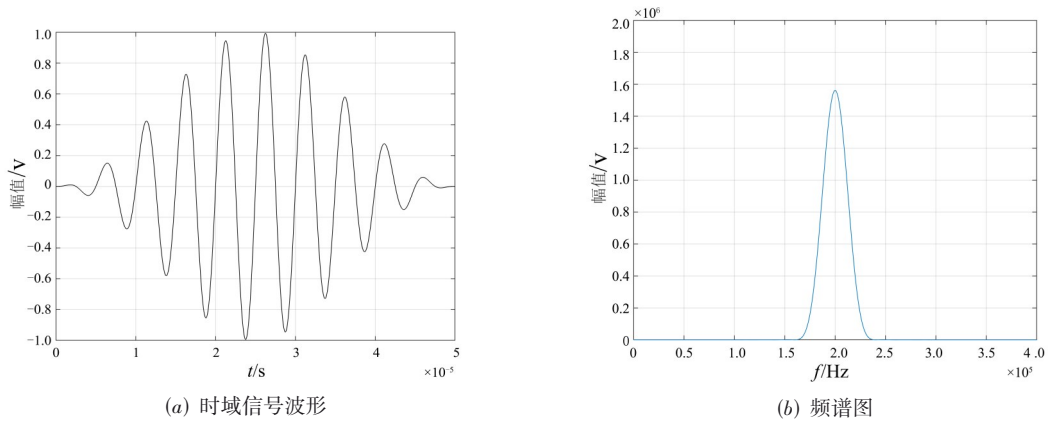


图3 10波峰中心频率200 kHz激励信号图

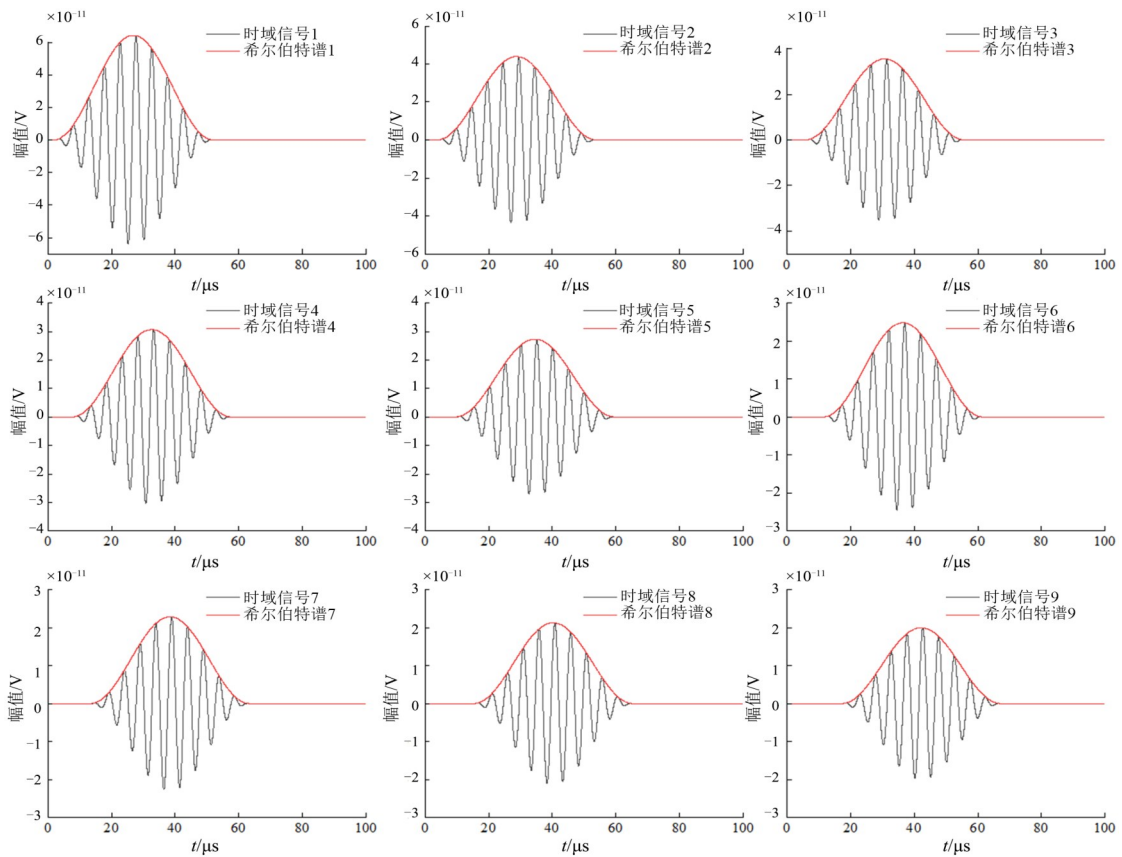


图4 钢板中信号接收点的时域信号和希尔伯特包络

### 2.2 缺陷概率成像

兰姆波缺陷概率成像算法是基于椭圆路径<sup>[19]</sup>分析的技术,通过对比从发射传感器到接收传感器,波传播路径上的响应信号和健康信号即参考信号的差异性来判定路径是否存在缺陷,其原理如图6所示.从图中可以看出,靠近传感器对的直接路径附近,椭圆路径图的颜色越深,表明缺陷存在的概率越大;离直接路径越远的区域,椭圆路径图的颜色越浅,表明缺陷存在的概率

越小.当缺陷位置位于椭圆路径外围之外,就认为该路径不存在缺陷.

基于参考信号预测的兰姆波缺陷概率成像算法步骤如下:

(1)在得到预测参考信号  $c(t)$  后,用希尔伯特变换<sup>[20]</sup>计算参考信号的希尔伯特谱  $C(t)$ :

$$C(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{c(\tau)}{t-\tau} d\tau \quad (4)$$

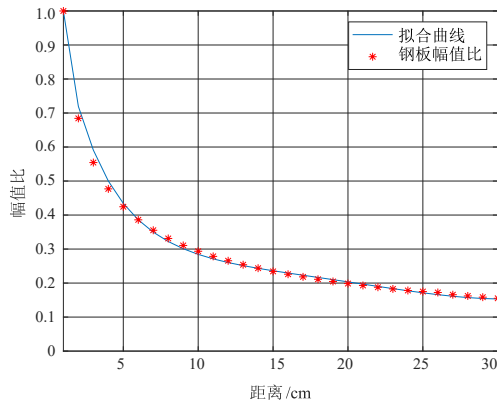


图5 曲线拟合图

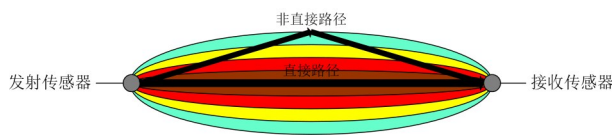


图6 椭圆路径原理图

其中,  $\tau$  是积分变量.

(2) 设每条路径的响应信号为  $y(t)$ , 计算每条路径上响应信号的希尔伯特谱  $Y(t)$ :

$$Y(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{y(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (5)$$

(3) 计算第  $i$  条路径的希尔伯特谱缺陷表征指数  $DI_i$ , 本文将缺陷表征指数  $DI_i$  定义为第  $i$  条路径上, 响应信号希尔伯特谱的最大值与该路径对应的频散传递预测信号希尔伯特谱最大值的比值平方, 公式如下:

$$DI_i = \left( 1 - \frac{\max(Y_i(t))}{\max(C_i(t))} \right)^2, (i = 1, 2, \dots, M) \quad (6)$$

其中,  $Y_i(t)$  为第  $i$  条路径响应信号的希尔伯特谱,  $C_i(t)$  为对应的第  $i$  条路径参考信号的希尔伯特谱,  $M$  是路径数.

(4) 计算第  $i$  条路径上成像区域内坐标点  $(x, y)$  处的空间分布函数:

$$W_i(x, y) = \frac{\sqrt{(x-x_l)^2 + (y-y_l)^2} + \sqrt{(x-x_n)^2 + (y-y_n)^2}}{\sqrt{(x_n-x_l)^2 + (y_n-y_l)^2}} - 1 \quad (7)$$

其中,  $(x_l, y_l)$  是第  $i$  条路径发射传感器的坐标,  $(x_n, y_n)$  是第  $i$  条路径接收传感器的坐标.

由于该算法的椭圆区域存在一定阈值, 超过阈值即认定该路径出现缺陷的概率为 0. 因此椭圆成像空间分布函数为分段函数, 即

$$R_i(x, y) = \begin{cases} W_i(x, y), & W_i(x, y) < \beta \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (8)$$

其中,  $\beta$  为椭圆最外围的阈值, 不同的阈值代表不同大小的椭圆区域, 可自行设定, 本文将其设置为 0.025.

(5) 对检测区域内的缺陷进行成像, 椭圆概率成像公式为

$$P(x, y) = \sum_{i=1}^M DI_i \times R_i(x, y) \quad (9)$$

其中,  $P(x, y)$  代表成像区域内坐标点  $(x, y)$  处的像素值,  $M$  是路径数,  $DI_i$  为第  $i$  条路径的希尔伯特谱缺陷指数.

### 3 实验结果与分析

为了验证该方法的有效性, 设置 1 个带矩形穿透缺陷的  $1 \text{ m} \times 1 \text{ m} \times 1 \text{ mm}$  钢板, 缺陷尺寸  $1 \text{ cm} \times 1 \text{ cm}$ . 采用双侧激励获得单一模式信号, 其激励方式如图 7 所示. 2 个激励传感器对称放置于板上下表面, 施加相位相差  $180^\circ$  的激励信号, 激励信号中心频率为  $200 \text{ kHz}$ . 根据频散曲线, 可在板中产生  $S_0$  模式的兰姆波信号. 同时, 为验证该方法在实际应用中的有效性, 利用信号发生器、超声波压电片、带缺陷的钢板、示波器等实验器材搭建实验平台, 进行相关实验.

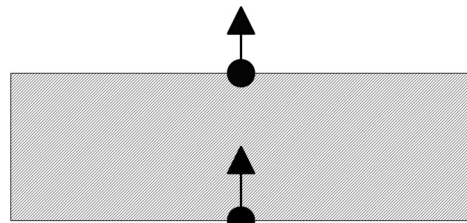


图7 双侧激励

如图 8 所示, 根据缺陷位置, 布置用于检测缺陷的传感器阵列. 本次实验时采用半径为  $15 \text{ cm}$  的圆形阵列, 沿着圆周边均匀布置 12 个超声波压电片. 每个超声波压电片既可发射激励信号又可接收响应信号. 把 12 个超声波压电片分别命名为 A~L. 每条路径用两端的超声波压电片对应字母表示. 比如 AB 指 A 是发射超声波压电片、B 是接收超声波压电片时 A 到 B 的直线路径.

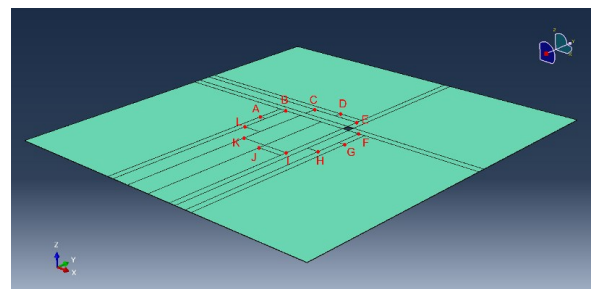
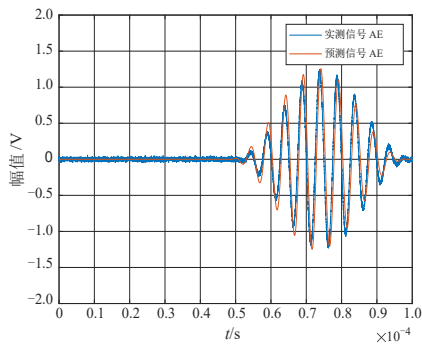


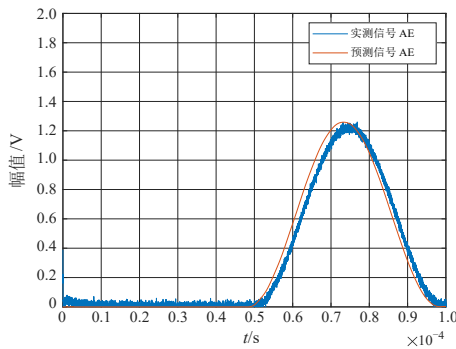
图8 单一缺陷实验图

图 9 是 AE 路径响应信号及其对应预测参考信号. 由于路径 AE 上不存在缺陷, 即信号在路径 AE 上未经过矩形穿透缺陷. 预测的参考信号 AE 和实际响应信号 AE

在时域和希尔伯特谱上存在高度吻合. 图 10 是 BF 路径上响应信号及对应预测参考信号. 由于 BF 路径上存在缺陷, 即信号在路径 BF 上经过矩形穿透缺陷, 其响应信号与预测参考信号在时域和希尔伯特谱上差异明显, 一部分能量被缺陷散射, 响应信号的希尔伯特谱整体上小于参考信号的希尔伯特谱. 图 11 是 AC 路径响应信号及对应预测参考信号. 由于 AC 路径上不存在缺陷, 其预测参考信号和实际响应信号在时域和希尔伯特谱上存在高度吻合. 图 12 是 DF 路径响应信号及对应预测参考信号. 由于 DF 路径上存在缺陷, 其响应信号与预测参考信号在时域信号和希尔伯特谱上差异明显.



(a) 时域信号



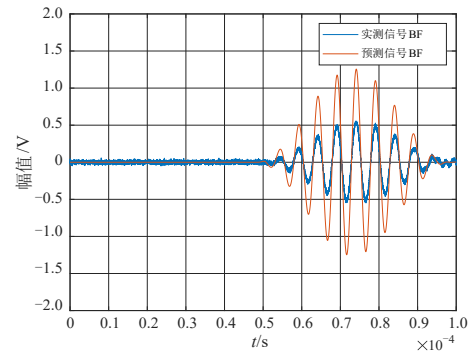
(b) 希尔伯特谱

图 9 AE 路径响应信号及其对应预测参考信号

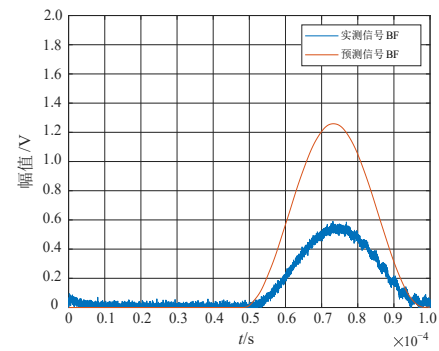
根据希尔伯特谱上出现的差异性, 用式(6)计算缺陷表征指数, 部分路径的缺陷指数柱状图如图 13 所示. 从缺陷指数图中可以明显看出基于频散传递函数预测参考信号的方法可突出缺陷路径信号差异性, 且缺陷路径 DF、EG、CF、EH 与其余的无缺陷路径的缺陷表征指数差异明显.

根据缺陷指数的差异性, 结合式(9), 对单一缺陷成像如图 14 所示. 图像中成像后得到的缺陷中心位置位于点 (80, 80) 处, 与实际缺陷的中心位置 (85, 85) 绝对误差为  $5\sqrt{2}$  mm, 可实现对缺陷的准确定位成像.

为验证该方法对多缺陷的检测成像能力, 本文还设置了 1 个带 2 个矩形穿透缺陷的  $1\text{ m} \times 1\text{ m} \times 1\text{ mm}$  钢板,

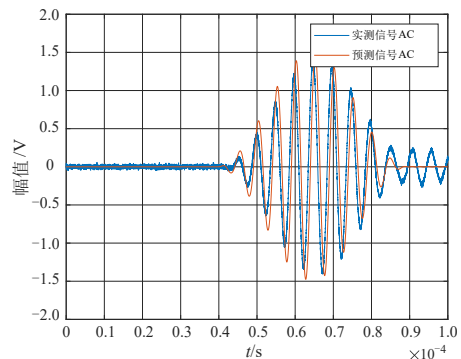


(a) 时域信号

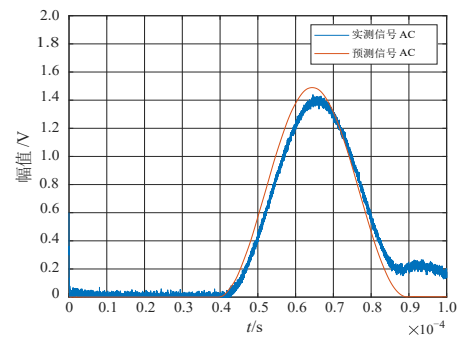


(b) 希尔伯特谱

图 10 BF 路径响应信号及其对应预测参考信号

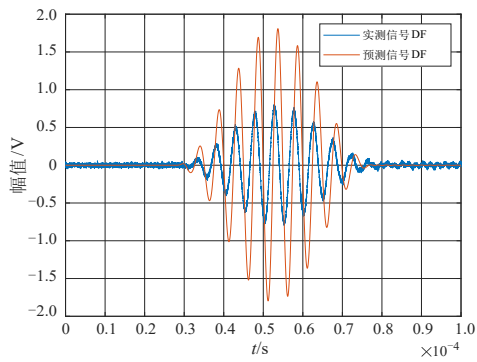


(a) 时域信号

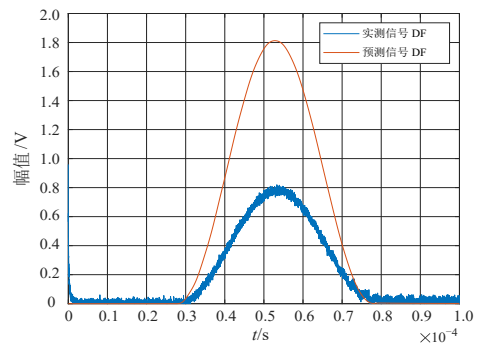


(b) 希尔伯特谱

图 11 AC 路径响应信号及其对应预测参考信号



(a) 时域信号



(b) 希尔伯特谱

图 12 DF 路径响应信号及其对应预测参考信号

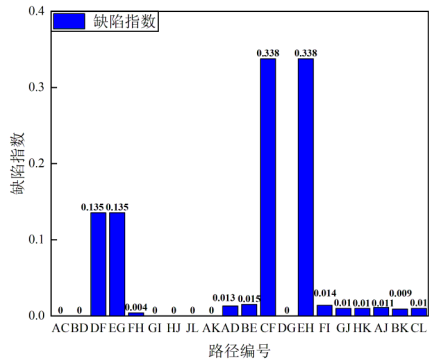


图 13 希尔伯特谱缺陷指数

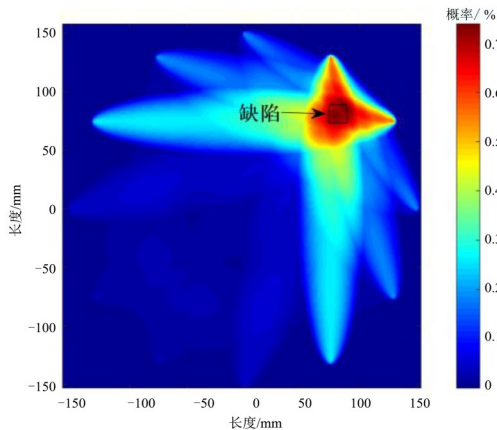


图 14 单缺陷成像图

如图 15 所示. 图 16 是 AD 路径响应信号及对应预测参考信号. 由于 AD 路径上不存在缺陷, 其预测参考信号和实际响应信号在时域波形的相位和幅值上存在高度吻合, 同样其希尔伯特谱也高度吻合. 图 17 是 CF 路径上响应信号及对应预测参考信号. 由于 CF 路径上存在缺陷, 即信号在路径 CF 上经过矩形穿透缺陷, 其响应信号与预测参考信号在时域和希尔伯特谱上差异明显, 一部分能量被缺陷散射, 响应信号希尔伯特谱整体上都小于参考信号的希尔伯特谱.

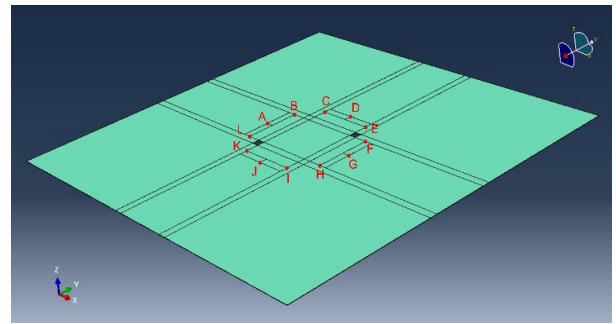
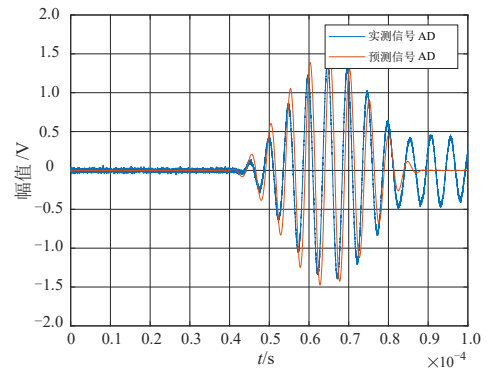
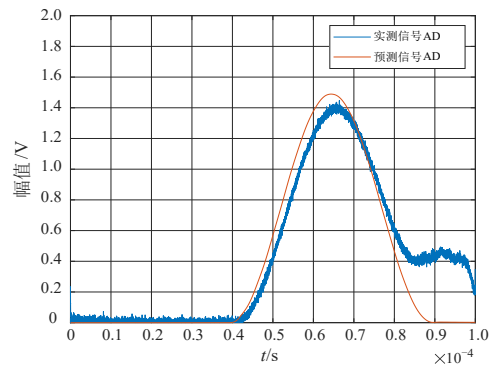


图 15 双缺陷实验图



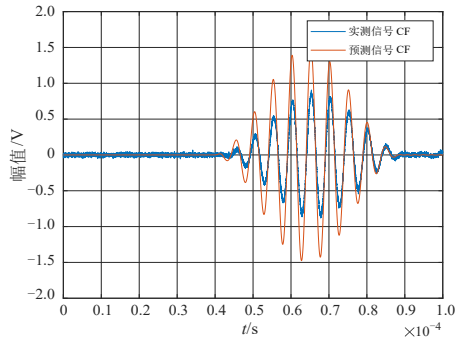
(a) 时域信号



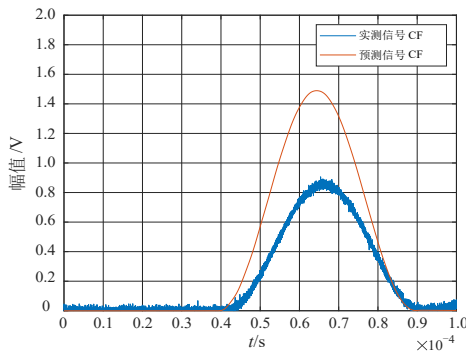
(b) 希尔伯特谱

图 16 AD 路径响应信号及其对应预测参考信号

从钢板中可以看出, 左边缺陷位于路径 IL 上, 因此, 本文还对路径 IL 上的响应信号与对应的预测参考信号

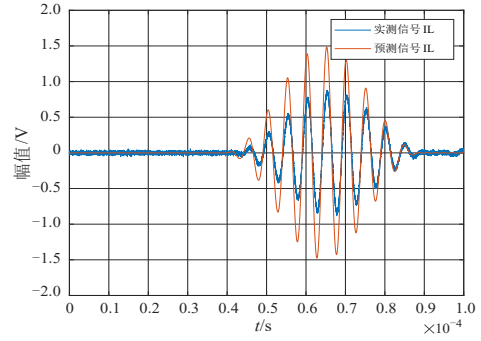


(a) 时域信号

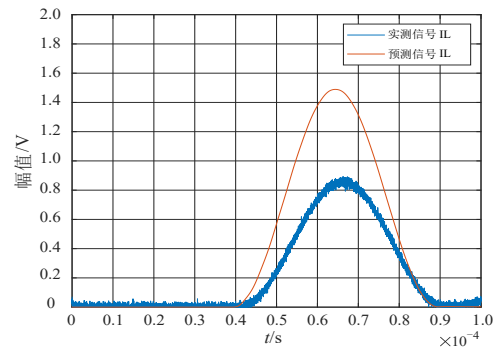


(b) 希尔伯特谱

图 17 CF 路径响应信号及其对应参考信号



(a) 时域信号



(b) 希尔伯特谱

图 18 IL 路径响应信号及其对应参考信号

进行比较分析,如图 18 所示. 其时域信号和对应的预测参考信号存在明显差异,同样二者的希尔伯特谱差异性也很明显. 根据希尔伯特谱上出现的差异性,用式(6)计算缺陷指数,其中部分路径的缺陷指数柱状图如图 19 所示. 从缺陷指数图中明显看出预测参考信号的方法可突出缺陷路径信号差异,缺陷路径 DF、JL、CF、DG、EH、IL、AJ、BK 的缺陷指数明显高于其他健康路径的缺陷指数.

根据缺陷指数之间的差异,结合成像公式对缺陷进行定位成像,成像结果如图 20 所示. 从图像中看出缺陷的成像定位与实际缺陷的位置吻合,左侧缺陷的成像中心位置位于(-89,-88)处,与设置的缺陷中心位置(-85,-85)绝对误差为 5 mm,右侧缺陷的成像中心位置位于(90,88)处,与设置的缺陷中心位置(85,85)绝对误差为  $\sqrt{34}$  mm,可以实现对双缺陷的准确定位成像.

为进一步验证该方法对缺陷的定位效果,表 2 方法与功率谱密度成像<sup>[21]</sup>、频谱概率成像算法<sup>[10]</sup>、自适应时间反演法<sup>[22]</sup>的结果做了对比. 与功率谱密度成像和频谱概率成像算法相比,预测参考信号法和自适应时间反演法不需要测量信号,无须在相同参数的无损薄板结构中获取无损信号. 预测参考信号法的缺陷定位误差为 7.07 mm,自适应时间反演法的缺陷定位误差为 17 mm,缺陷定位成像如图 21 所示. 与自适应时间反演法相比,预测参考信号法的缺陷定位误差明显减小.

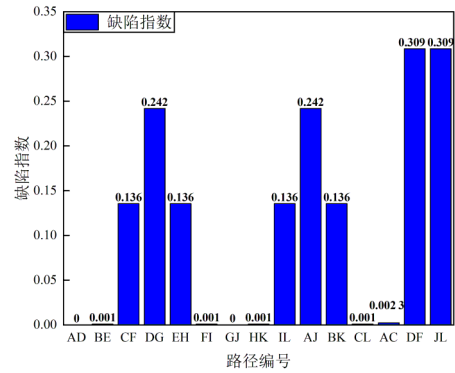


图 19 缺陷指数

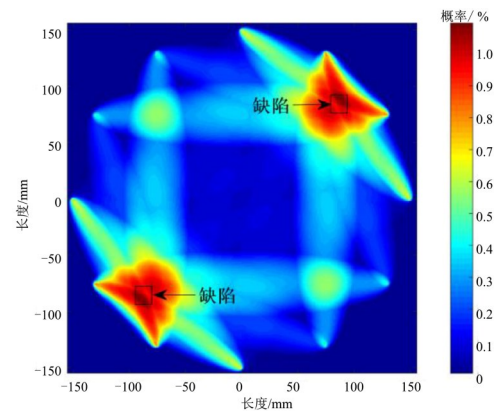


图 20 双缺陷概率成像图

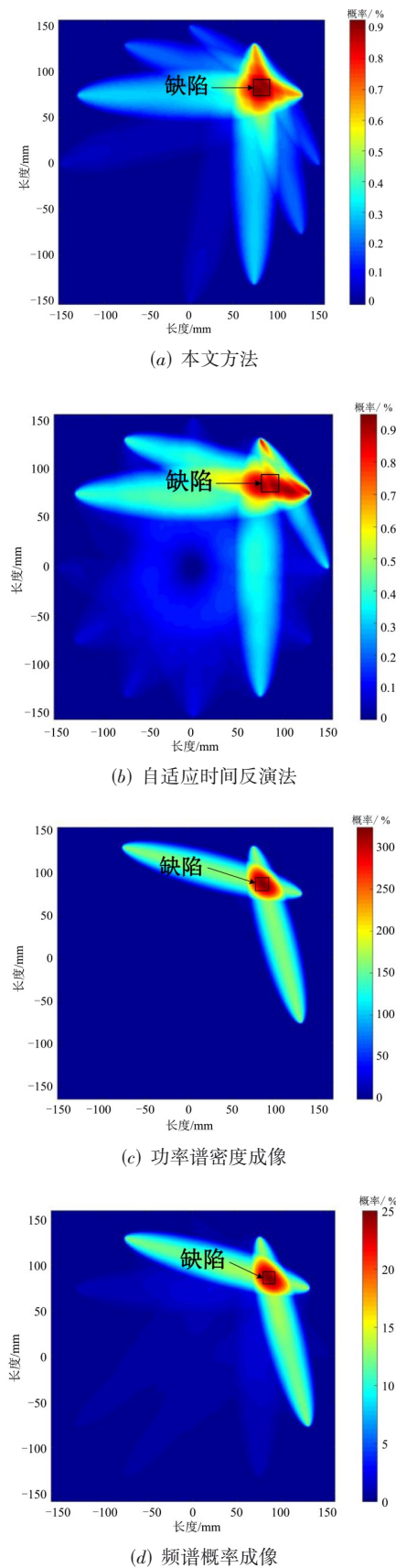


图 21 不同方法的缺陷定位成像图

表 2 缺陷定位的结果比对

算法	是否需要测量参考信号	误差/mm
预测参考信号法	否	7.07
自适应时间反演	否	17.00
功率谱密度成像	是	8.04
频谱概率成像	是	7.08

### 4 结论

本文提出基于兰姆波参考信号预测的概率成像方法实现了兰姆波对金属薄板缺陷定位<sup>[23]</sup>. 该方法将待检测薄板中无缺陷路径的初始信号和兰姆波的频散特性相结合, 根据拟合得到的幅值衰减系数计算概率成像路径上的参考信号. 构建缺陷表征指数, 结合缺陷概率成像对缺陷进行成像定位. 该方法解决了需要在相同参数的无损薄板结构中测量兰姆波参考信号问题. 实验测试证实了该方法能对缺陷进行准确定位成像, 提高了检测效率, 实用性好. 未来可结合图像处理如图像超分辨率<sup>[24]</sup>等其他学习算法<sup>[25]</sup>进一步改进成像效果, 提高缺陷定位精度.

### 参考文献

[1] 张鹏辉, 赵扬, 李鹏, 等. 超声成像检测技术研究进展综述[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(2): 0200003.  
ZHANG P H, ZHAO Y, LI P, et al. Research progress in ultrasonic imaging detection technology[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(2): 0200003. (in Chinese)

[2] 倪龙, 陈晓. 基于频散补偿和分数阶微分的多模式兰姆波分离[J]. 物理学报, 2018, 67(20): 406-415.  
NI L, CHEN X. Mode separation for multimode Lamb waves based on dispersion compensation and fractional differential[J]. Acta Physica Sinica, 2018, 67(20): 406-415. (in Chinese)

[3] ZHENG S P, LUO Y, XU C G, et al. A review of laser ultrasonic lamb wave damage detection methods for thin-walled structures[J]. Sensors, 2023, 23(6): 3183.

[4] 陈晓, 汪陈龙. 基于赛利斯模型和分数阶微分的兰姆波信号消噪[J]. 物理学报, 2014, 63(18): 282-290.  
CHEN X, WANG C L. Noise suppression for Lamb wave signals by Tsallis mode and fractional-order differential[J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(18): 282-290. (in Chinese)

[5] VALLÉE J C, PLOIX M A, BAQUÉ F, et al. Edge and Notch detection in a plate using time reversal process of leaky lamb waves[J]. Applied Sciences, 2021, 12(1): 228.

[6] LI F Z, LUO Y. Total focusing method damage imaging in frequency domain using laser-ultrasonic Lamb wave based on time-domain filtering in multi-band[J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 2021, 34(3): 404-424.

- [7] 王高平, 陈云, 李波, 等. Lamb 波概率加权成像的复合板损伤检测方法[J]. 噪声与振动控制, 2023, 43(4): 149-156. WANG G P, CHEN Y, LI B, et al. Composite plate damage detection method based on Lamb waves probability weighted imaging[J]. Noise and Vibration Control, 2023, 43(4): 149-156. (in Chinese)
- [8] 王丹宏, 叶波, 段启明, 等. 基于 Lamb 波能量和飞行时间的碳纤维复合材料疲劳损伤成像[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(4): 205-213. WANG D H, YE B, DUAN Q M, et al. Imaging of fatigue damage for carbon fiber reinforced polymer based on Lamb wave energy and time-of-flight[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(4): 205-213. (in Chinese)
- [9] 刘小峰, 张天瑀, 张春兵, 等. 基于交叉递归率的复材板损伤定位成像方法[J]. 中国机械工程, 2023, 34(8): 940-947. LIU X F, ZHANG T Y, ZHANG C B, et al. Location imaging of composite plate damage based on cross recurrence rate[J]. China Mechanical Engineering, 2023, 34(8): 940-947. (in Chinese)
- [10] SU C H, ZHANG W C, LIANG L H, et al. Damage imaging identification of honeycomb sandwich structures based on Lamb waves[J]. Materials, 2023, 16(13): 4658.
- [11] ZHAO G Z, LIU C C, JIANG M S, et al. Early fatigue crack damage identification by multi-classification support-vector machine based on Lamb wave and temperature compensation[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2022, 31(11): 9159-9172.
- [12] 陈晓, 倪龙. 用分数阶微分实现时频重叠多模式兰姆波的模式分离[J]. 声学学报, 2020, 45(2): 205-214. CHEN X, NI L. Mode separation for multimode Lamb waves overlapped in time and frequency domains by using fractional differential[J]. Acta Acustica, 2020, 45(2): 205-214. (in Chinese)
- [13] DUAN Q M, YE B, ZOU Y K, et al. Probability-based diagnostic imaging of fatigue damage in carbon fiber composites using sparse representation of Lamb waves[J]. Electronics, 2023, 12(5): 1148.
- [14] SUN L Y, WEI J T, PENG C, et al. Modified Lamb wave delay factor-based multiply-sum probabilistic diagnostic imaging algorithm of composite structures[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2023, 72: 6004713.
- [15] ZHOU K, YUAN H Q, YIN J S, et al. Damage detection in plate structures based on baseline construction of ultrasonic Lamb wave using designed mobile transducer set[J]. Measurement Science and Technology, 2023, 34(2): 025020.
- [16] 常琦, 孟瑶, 赵恒. 基于概率成像的二维波束聚焦冲击定位方法研究[J]. 电子学报, 2021, 49(7): 1339-1345. CHANG Q, MENG Y, ZHAO H. Research on two-dimensional beam focusing impact location based on probability tomography[J]. Acta Electronica Sinica, 2021, 49(7): 1339-1345. (in Chinese)
- [17] 陈晓, 戴杰. 基于相同传播距离路径的兰姆波无基准损伤概率成像[J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(8): 94-104. CHEN X, DAI J. Lamb wave baseline-free damage probability imaging based on same propagation distance path[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37(8): 94-104. (in Chinese)
- [18] 朱妍妍, 陈晓. 超声兰姆波检测电路板缺陷的有限元仿真研究[J]. 计算机与数字工程, 2022, 50(6): 1371-1376. ZHU Y Y, CHEN X. Research on finite element simulation for ultrasonic defect detection of circuit board[J]. Computer & Digital Engineering, 2022, 50(6): 1371-1376. (in Chinese)
- [19] 王莉, 刘国强, 肖迎春. 复合材料层合板损伤的椭圆环定位损伤概率成像[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(27): 391-396. WANG L, LIU G Q, XIAO Y C. Elliptical ring location probability-based diagnostic imaging algorithm of composites laminates panel[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(27): 391-396. (in Chinese)
- [20] 王洁, 谭冰冲, 陶星竹, 等. 基于希尔伯特变换和功率谱估计的薄缺陷厚度太赫兹检测[J]. 红外与毫米波学报, 2022, 41(3): 589-596. WANG J, TAN B C, TAO X Z, et al. Terahertz detection of thin defects thickness based on Hilbert transform and power spectrum estimation[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2022, 41(3): 589-596. (in Chinese)
- [21] SU C H, BIAN H H, JIANG M S, et al. Research on composites damage identification based on power spectral density and Lamb wave tomography technology in strong noise environment[J]. Composite Structures, 2022, 289: 115466.
- [22] LUO K, CHEN L, WENG H B, et al. Adaptive time-reversal method for delamination detection of composite plates based on reconstruction algorithm for probabilistic inspection of defects[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2023, 196: 110336.

- [23] 陈晓,戴杰.一种基于参考信号预测的兰姆波损伤概率成像方法:202311068545.1[P].2023-11-17.  
CHEN X, DAI J. A Lamb wave damage probability imaging method based on reference signal prediction: 202311068545.1[P]. 2023-11-17. (in Chinese)
- [24] 孙超文,陈晓.基于多尺度特征融合反投影网络的图像超分辨率重建[J].自动化学报,2021,47(7):1689-1700.  
SUN C W, CHEN X. Multiscale feature fusion back-projection network for image super-resolution[J]. Acta Automatica Sinica, 2021, 47(7): 1689-1700. (in Chinese)
- [25] 陈晓,夏颖.基于改进 MobileViT 网络的番茄叶片病害识别[J].电子测量技术,2023,46(14):188-196.  
CHEN X, XIA Y. Improved MobileViT network for tomato leaf disease identification[J]. Electronic Measurement Technology, 2023, 46(14): 188-196. (in Chinese)

#### 作者简介



陈 晓 男,1974年4月出生,河南邓州人.南京信息工程大学教授,IEEE高级会员,中国电子学会高级会员.在国内外发表学术论文130余篇.主要研究方向为设计、智能信息处理、声信号处理与成像、图像处理.中国电子学会会员编号:E190015856S.  
E-mail: chenxiao@nuist.edu.cn



戴 杰 男,1999年2月出生,江苏泰州人.南京信息工程大学电子与信息工程学院硕士研究生,主要研究方向为超声信号处理.  
E-mail: 1332509132@qq.com