

# 基于波束成型的Lamb波无基线损伤识别技术研究

李冬生 金盟道

(大连理工大学土木工程学院 辽宁大连 116024)

**摘要:**本文提出了一种基于波束成型的Lamb波无基线损伤识别方法,该方法利用激励-回波模式的分布式传感网络与时间窗函数进行损伤信号的提取,然后利用波束成型算法对结构进行损伤定位与成像。分别采用数值模拟和实验对该方法进行验证,结果证明所提出的方法能够有效地识别损伤。

**关键词:**Lamb波 无基线 波束成型 定位成像

**DOI:** 10.13211/j.cnki.pstech.2016.04.007

## 1 引言

Lamb波以其传播距离长,衰减小,能够检测大面积区域结构,从而作为一种有效的无损检测技术应用到板状结构健康监测领域中。Lamb波在传播过程中遇到裂缝、孔洞及分层等损伤时会发生反射、透射、散射等现象,产生损伤信号。如何提取出损伤信号,是结构损伤识别的关键,通常做法是将结构当前采集到的信号与结构健康状态下的数据相减,得到损伤信号。但在外部环境改变和操作条件不稳定等因素下,这些方法的实施过程中存在着许多技术挑战。为了克服这些问题,近些年Lamb无基线损伤识别技术被提出应用到损伤诊断领域,例如瞬时基线测量技术<sup>[1]</sup>,模态转换技术<sup>[2]</sup>,时间反转技术<sup>[3]</sup>。由于损伤散射信号经常被边界反射波覆盖,经常导致无法提取损伤信号。王强<sup>[4]</sup>提出一种新型传感阵列,能通过时间窗函数分离损伤信号,从而进行无基线损伤识别。此外,延时-叠加波束成型技术是一种既简单又有效的算法,主要应用于声发射源的定位,其特点是不需要确切的波达时间,并且对波速误差具有容忍性<sup>[5]</sup>。因此,本文采用一种激励-回波(pulse-echo)模式的分布式网络传感阵列采集信号,并通过时间窗函数提取损伤信号,最终利用波束成型算法进行损伤定位与成像,从而实现无基线损伤识别。通过有限元模拟和实验对提出的方法进行验证。

## 2 波束成型算法原理

波束成型是一种基于延时-叠加算法的方法,当采用网络传感阵列时,波束成型技术基本原理如图1所示。在近场,波源发出的波形信号被认为是球面波,因此阵列输出表达式为<sup>[6]</sup>:

$$b(r,t) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M w_m x_m(t - \Delta_m(r)) \quad (1)$$

式中 $M$ 表示传感器的数目, $w_m$ 是传感器 $S_m$ 的权重系数,且 $w_m=1$ 。 $x_m(t)$ 表示传感器 $S_m$ 采集的信号, $\Delta_m(r)$ 是传感器 $S_m$ 的延时时间。在信号叠加之前,如果聚焦点与波源一致, $\Delta_m(r)$ 会使信号调整到同一波前,传感阵列的能量输出会最大;如果聚焦点与波源不一致,信号就不会调整到同一波前,能量输出也就不会最大。根据图1, $\Delta_m(r)$ 的表达式为:

$$\Delta_m(r) = (r_d - r_m) / v \quad (2)$$

式中 $r_d$ 表示聚焦点到基准点的距离,其中基准点位置任意, $r_m$ 表示聚焦点到传感器 $S_m$ 的距离, $v$ 为波源传播速度。

为了简化Lamb波时域信号特征以及获得信号能量分布,采用希尔伯特变换处理信, $x_m(t)$ 的希尔伯特变换结果为:

$$\hat{x}_m(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{x_m(\tau)}{(t-\tau)} d\tau \quad (3)$$

$$X_m(t) = x_m(t) + i \hat{x}_m(t) = A_m(t) \cdot e^{i\theta(t)} \quad (4)$$

$$A_m(t) = \sqrt{x_m^2(t) + \hat{x}_m^2(t)}, \theta(t) = \arctan \frac{\hat{x}_m(t)}{x_m(t)} \quad (5)$$

式中 $A_m(t)$ 是 $x_m(t)$ 的模， $\theta(t)$ 是 $x_m(t)$ 的瞬时相位。将能量包络 $A_m(t)$ 代替原始信号 $x_m(t)$ 代入公式(1)，得：

$$b(r;t) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M w_m A_m(t - \Delta_m(r)) \quad (6)$$

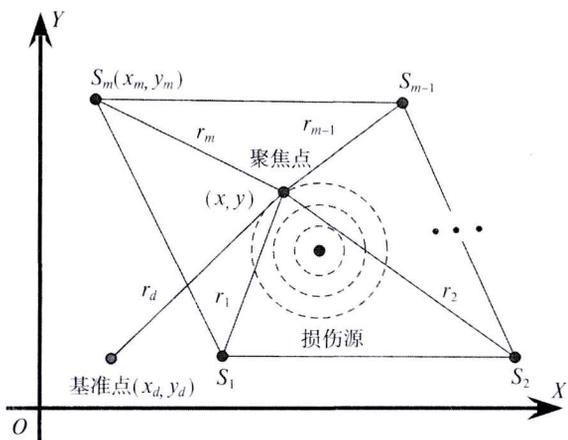
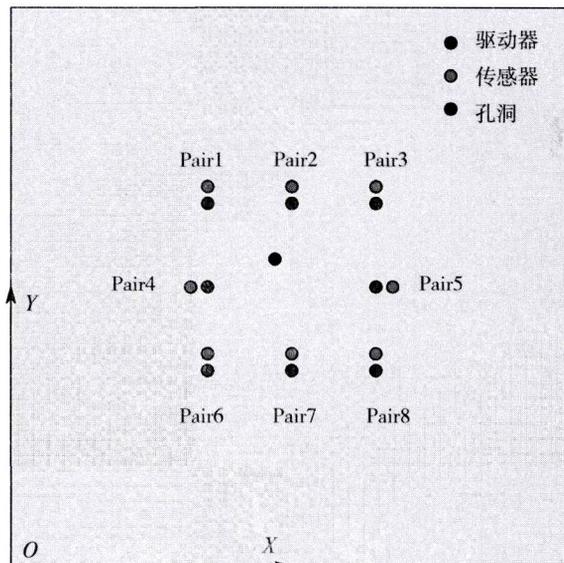


图1 波束成型算法原理图

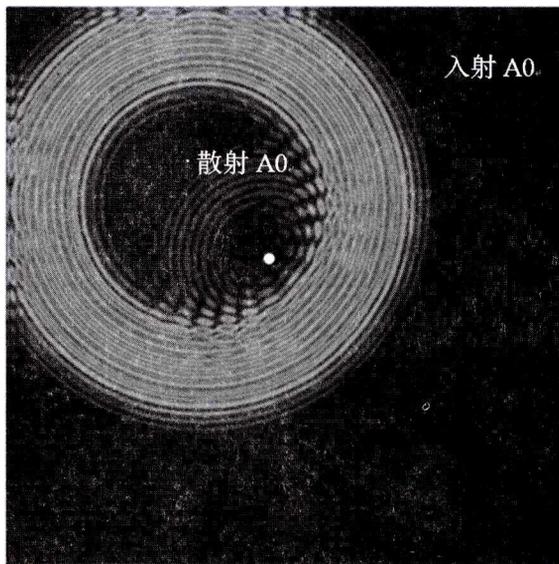
### 3 无基线损伤识别技术数值模拟

本文利用商用有限元软件ABAQUS进行数值模拟，模型为一材质均匀各向同性的铝板，尺寸为 $1000\text{mm} \times 1000\text{mm} \times 4\text{mm}$ ，弹性模量 $E=71\text{Gpa}$ ，泊松比 $\nu=0.33$ ，密度 $\rho=2700\text{Kg/m}^3$ 。模拟损伤是一个半径为 $10\text{mm}$ ，中心位置坐标为 $(470, 550)$ 的通透圆孔。传感网络布置如图2(a)所示。激励信号是经汉宁窗调制的五周期正弦波，其中心频率为 $40\text{KHz}$ 。利用单一模态激励法，进行荷载反对称加载，从而激励出单一模态 $A_0$ ，在频散曲线上获得其波速为 $2100\text{m/s}$ 。网格划分采用C3D8R实体单元，网格基本尺寸为 $2\text{mm}$ ，时间步长为 $0.1\mu\text{s}$ 。

$A_0$ 模态与厚度方向上通透的损伤相互作用时，只产生散射波 $A_0$ 模态，数值模拟位移云图如图2(b)所示。传感器采集到的Lamb波信号主要分为直达波 $A_0$ 模态、损伤散射 $A_0$ 模态、边界反射 $A_0$ 模态三部分，如图3所示。利用矩形时间窗函数对损伤信号进行截取，由于截取信号后在其频域里会出现高频部分，所以对截取信号再进行带通滤波处理，结构响应信号与损伤信号分别见图4、图5。通过波束成型技术进行损伤定位成像，结果如图6所示。



(a) 传感网络布置图



(b) Pair1检测时的结构位移云图

图2 有限元模型

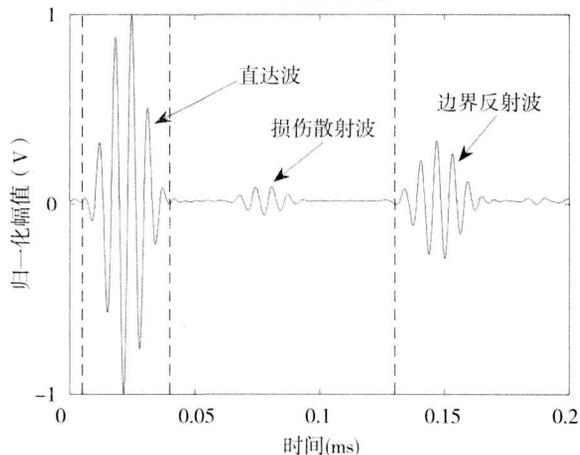


图3 采集的典型结构响应信号

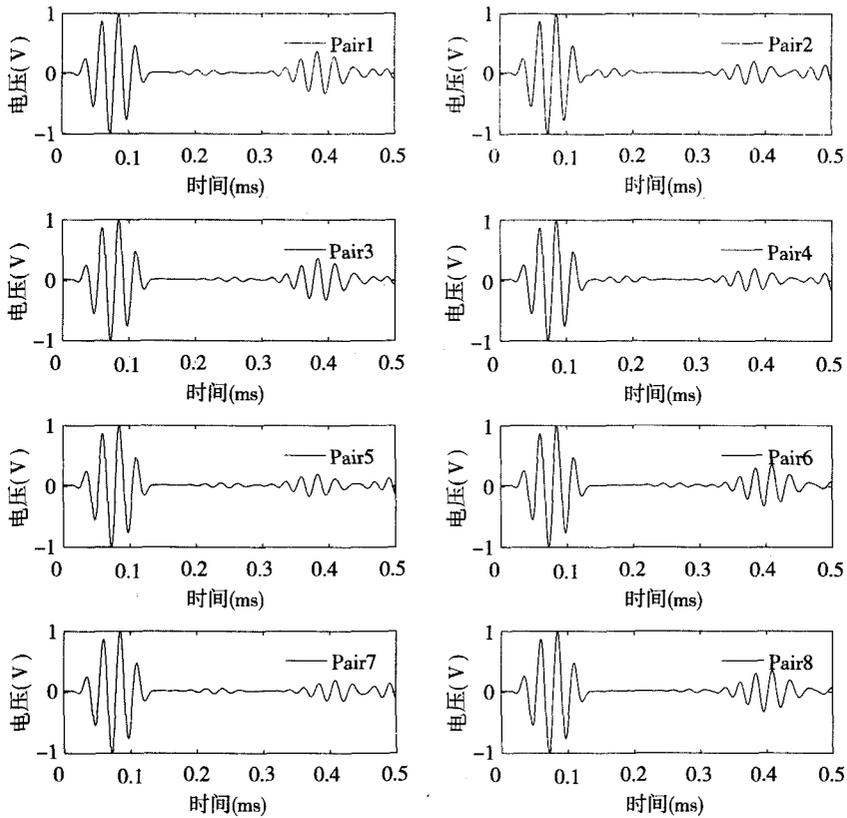


图4 数值模拟采集的结构响应信号

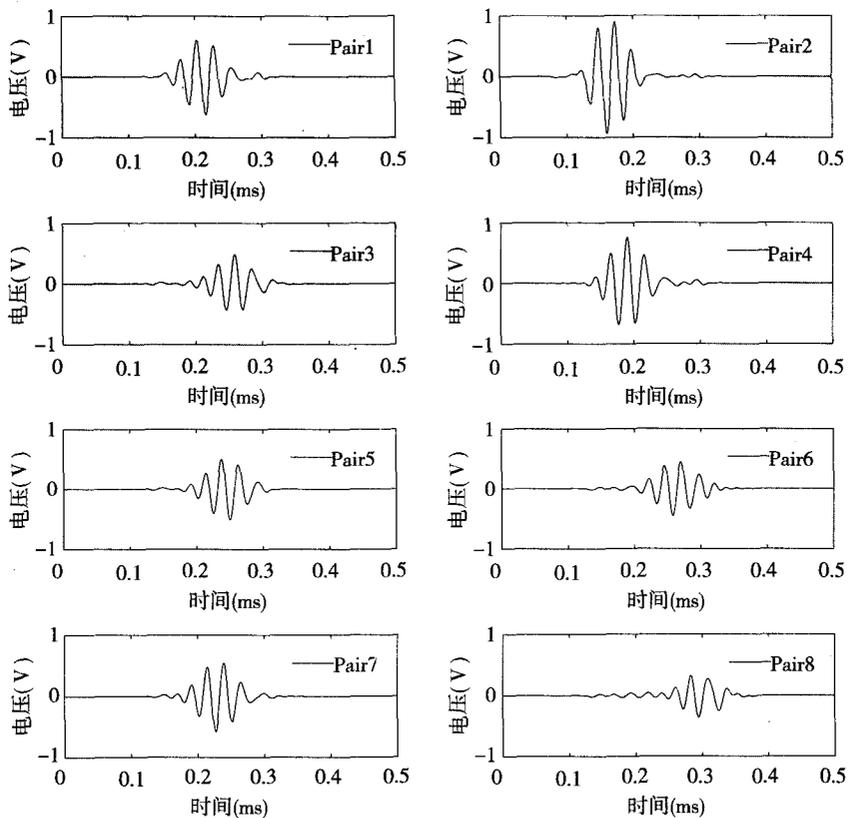


图5 数值模拟提取的损伤信号

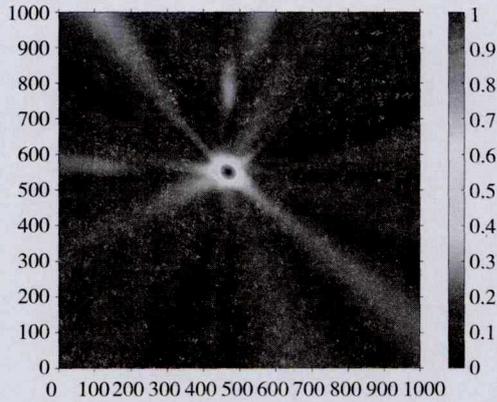


图6 数值模拟定位成像结果

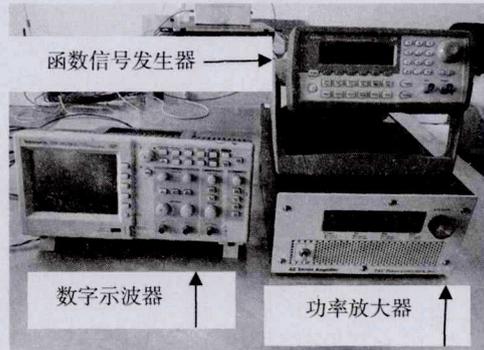
#### 4 实验验证

同数值模拟设置一样,采用 $1000\text{mm} \times 1000\text{mm} \times 4\text{mm}$ 均质各向同性的铝板进行实验研究,在铝板上布置8对传感器,传感器采用PZT-5压电陶瓷片,直径为 $20\text{mm}$ ,厚度为 $2\text{mm}$ ,人工制作贯通圆孔损伤,半径为 $10\text{mm}$ ,圆孔中心坐标为 $(470, 550)$ ,如图7(a)所示。当激励信号中心频率为 $40\text{kHz}$ 时,此型号压电陶瓷片在铝板中所激励的模态主要以 $A_0$ 模态为主, $S_0$ 模态的能量几乎为零。激励信号通过函数信号发生器发出,经功率放大器放大,作用到铝板上,再利用

数字示波器采集信号,采样率为 $5\text{MHz}$ ,如图7(b)所示。波束成型定位成像如图10所示。实验采集的结构响应信号和损伤信号见图8、图9。



(a) 带传感器阵列的铝板



(b) 实验仪器

图7 实验装备

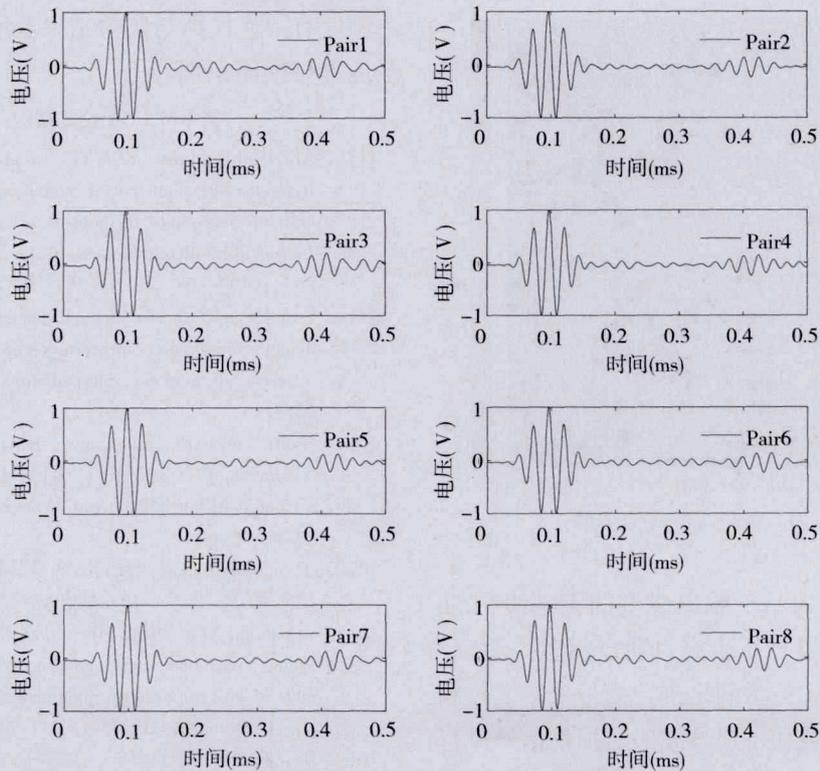


图8 实验采集的结构响应信号

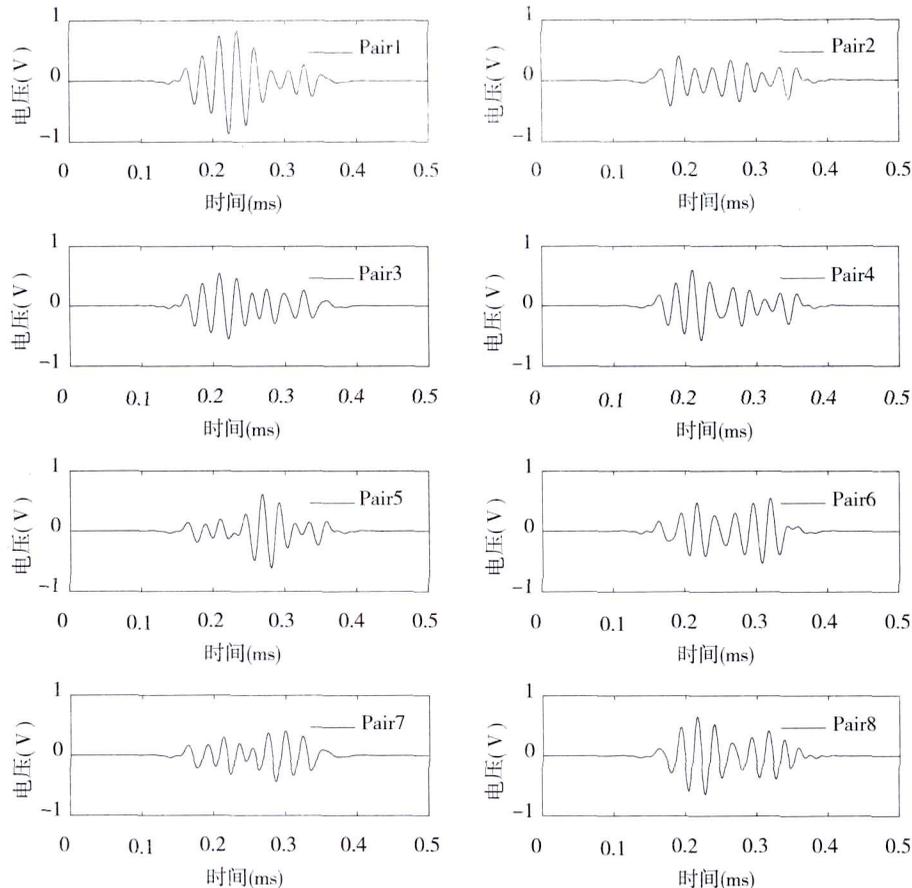


图9 实验提取的损伤信号

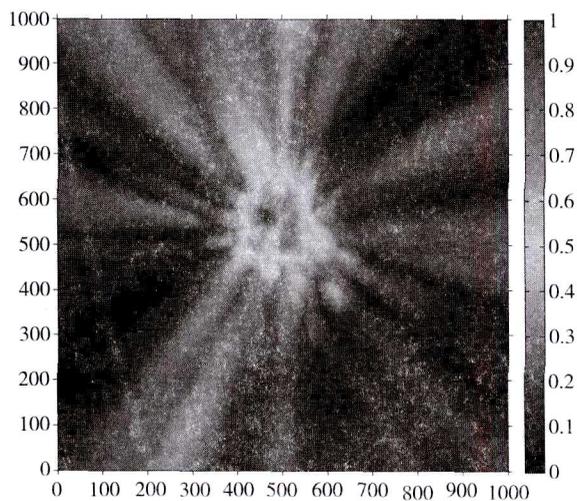


图10 实验定位成像结果

## 5 结论

本文对提出的基于波束成型的无基线Lamb波损伤识别技术进行了研究,通过设置一激励-回波模式的分布式传感网络进行信号采集,再利用矩形时间窗函数和带通滤波法对损伤信号进行截取处理,最后通过波束成型进行损伤定位成

型。有限元模拟与实验结果显示该方法能够有效地进行损伤识别。

### 参考文献

- [1] AbdollahBagheri, Kaiyuan Li and Piervincenzo Rizzo. Reference-free damage detection by means of wavelet transform and empirical mode decomposition applied to Lamb waves [J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2012, 24(2): 194-208.
- [2] Seung Bum Kim, Hoon Sohn. Instantaneous reference-free crack detection based on polarization characteristics of piezoelectric materials [J]. Smart Materials and Structures, 2007 (16): 2375-2387.
- [3] Hyun Woo Park, Hoon Sohn, Kincho H. Law, Charles R. Farrar. Time Reversal Active Sensing for Health Monitoring of a Composite Plate [J]. Journal of Sound and Vibration, 2007 (302): 50-66.
- [4] 王强. Lamb波时间反转方法及其在结构健康监测中的应用研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2009.
- [5] Denghong Xiao, Tian He, Qiang Pan, Xiandong Liu, Jin Wang, Yingchun Shan. A novel acoustic emission beamforming method with two uniform linear arrays on plate-like structures [J]. Ultrasonics, 2014(54): 737-745.
- [6] 陈亚农, 何田, 肖登红, 刘献栋. 非均匀温度场下声发射源定位方法[J]. 航空动力学报, 2012, 27(9): 2087-2092.