

主动 Lamb 波结构损伤监测中的非线性信号提取

潘 群¹, 王 强²

(1. 常州工学院 计算机信息工程学院, 江苏 常州 213002; 2. 南京邮电大学 自动化学院, 江苏 南京 210023)

摘 要: 基于非线性 Lamb 波信号的损伤监测研究是近几年发展起来的热点。受频散及多模特性的影响, 非线性 Lamb 波目标模式信号的分析 and 提取较难。采用时频处理法, 结合频散曲线, 研究了主动 Lamb 波结构损伤监测中的非线性信号提取法, 并进行了实验验证。实验结果表明, 该方法可有效分辨和提取出期望的基频和非线性二倍频模式信号, 进一步模拟损伤实验验证了非线性特征信号对结构状态变化的敏感性。

关键词: Lamb 波; 非线性信号提取; 损伤监测; 时频分析; 频散

中图分类号: TN911.72; TB302.5

文献标识码: A

Nonlinear Signal Extraction Process for Active Lamb Wave Based Structural Damage Monitoring

PAN Qun¹, WANG Qiang²

(1. School of Computer & Information Engineering, Changzhou Institute of Technology, Changzhou 213002, China;

2. College of Automation, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China)

Abstract: The nonlinear Lamb wave based damage detection method has become a focus recently. However, the extraction and process on expected mode signal were usually difficult due to the dispersive and multi-mode characters of Lamb wave. Time-frequency process technique and dispersive curves were adopted to develop the extraction method of nonlinear Lamb wave in active damage monitoring which was also validated experimentally. The results indicate that the developed method could distinguish and extract the expected modes effectively. Further simulated damage monitoring experiments validated that nonlinear characteristic signals were sensitive to the structural variation.

Key words: Lamb wave; nonlinear signal extraction; damage monitoring; time-frequency analysis; dispersion

0 引言

主动 Lamb 波结构健康监测技术是近些年发展起来的多学科交叉前沿技术方向之一, 该技术利用 Lamb 波传播距离远、对结构微小损伤敏感等特点, 通过集成在板壳类结构内部或表面的驱动器/传感器网络, 在结构中激发并采集 Lamb 波结构响应信号, 采用先进信号处理方法实时在线获取结构的健康信息, 并对结构的健康状态进行评估^[1-4]。在现有损伤诊断方法中, 大多数研究都是根据 Lamb 波信号传播过程中在损伤处的线性反射、散射情况, 提取损伤特征信息进行监测和评估。然而, 当结构几何特征和材料属性较复杂时, 这些线性信息的提取较难, 且因 Lamb 波自身多模及频散特性的影响, 监测效果会降低。

已有研究表明, 结构的几何非线性和材料非线

性均会引起 Lamb 波信号中非线性成分的变化^[5-6], 因此, 根据非线性 Lamb 波信号特征参数变化, 可及早感知损伤引起的结构改变, 从而实现损伤监测。这一新技术方法不再依靠反射、散射等线性物理变化, 因此可克服结构复杂性带来的信号分析处理难的问题。在非线性 Lamb 波损伤监测过程中, 对非线性信号的准确提取是首要前提。本文对该技术问题进行了研究, 采用时频分方法, 并结合频散曲线提取和分析非线性 Lamb 波目标模式信号及其变化情况, 为后续损伤监测提供依据。

1 板结构中的 Lamb 波

Lamb 波是在板壳类结构中传播的一种导波, 最早由 H. Lamb 于 1917 年发现, 其波长与板厚存在多模和频散特性, 可用 Rayleigh-Lamb 波方程来进行描述^[1-2], 即

收稿日期: 2013-11-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11202107); 教育部高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20113223120008); 江苏省高校自然科学基金资助项目(11KJB130002); 南京邮电大学自制实验仪器设备基金资助项目(2012XZZ07)

作者简介: 潘群(1980-), 男, 江苏常州人, 讲师, 硕士, 主要从事信号处理、计算机测控系统方面的研究。王强(1980-), 男, 江苏句容人, 副教授, 博士, 主要从事结构健康监测、先进智能传感技术、信号与信息处理等方面的研究。E-mail: wangqiang@njupt.edu.cn。

$$\frac{\tan \beta d}{\tan \alpha d} = - \left[\frac{4\alpha\beta k^2}{(k^2 - \beta^2)^2} \right]^{+1} \quad (1)$$

式中: $\alpha^2 = (\omega^2/c_1^2) - k^2$, $\beta^2 = (\omega^2/c_2^2) - k^2$, c_1 为横波波速, c_2 为纵波波速; d 为板厚度; ω 为角频率; $k = \omega/c_3$ 为波数, c_3 为 Lamb 波的相速度。

式(1)上标“ ± 1 ”中“+”对应对称模式 S, “-”对应反对称模式 A。对式(1)求解可得 Lamb 波的频散曲线, 典型的铝板结构频散曲线如图 1 所示。由图可看出, Lamb 波存在多种模式, 且各模式信号传播的群速度与相速度随着频厚积的变化而改变。因此, 为降低频散和多模效应带来的信号复杂性, 绝大多数研究中均采用窄带激励信号, 以激发出单一模式为主的 Lamb 波信号^[1-4], 本文研究中采用了余弦调制正弦窄带信号作为激励信号。

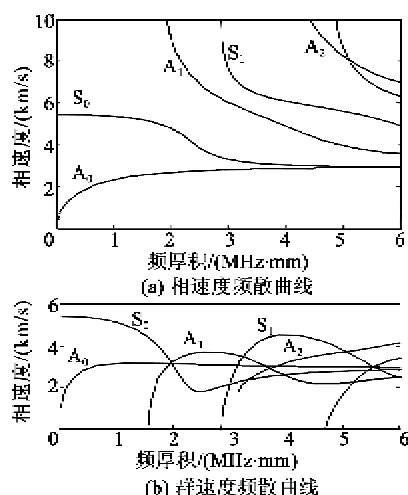


图1 铝板结构中 Lamb 波传播频散曲线

2 非线性 Lamb 波的提取方法与过程

结构的几何非线性和材料非线性高次项部分会使结构中传播的基频 Lamb 波信号驱动产生非线性信号, 即倍频信号。然而, 非线性 Lamb 波信号能量一般非常微弱, 加上多模和频散特性的影响, 这些信号分散成多个模式分别传播, 因此, 很难进行捕获和分析处理。

考虑到 Lamb 波各模式的传播速度与频率相关, 因此在传感器上获得的结构响应信号是关于时间和频率的二维信息, 将信号进行变换并转换至时频域中, 可得各模式信号随频率变化的传播时频谱图($F(\omega, t)$ 为时频域转换信号)。同时, 对于 Lamb 波频散曲线(见图 1), 在结构板厚及信号传播距离已知的前提下, 根据距离 L 、速度 v 和传播时间 t 三者关系 $t = L/v$ 可得, 各模式信号的理论 t 及随频率 ω 分布情况。因此, 借助于该理论传播时间频散曲线, 可对传感信号时频处理结果中的基频信号成分

$F(\omega_0, t)$ 及二倍频非线性信号成分 $F(2\omega_0, t)$ 进行对照分析, 区分出信号成分中各模式信号的到达时间及变化趋势等信息。考虑到模式变换、边界反射等因素的影响, 在分析过程中, 仅选择基频信号和二倍频信号中的第一到达模式为对象, 考察其幅值随结构状态变化的响应情况(见图 2)。

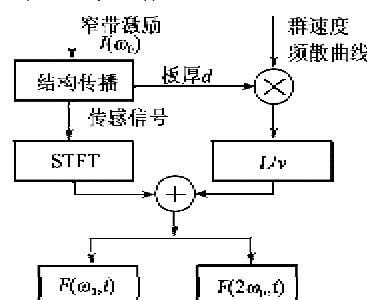


图2 非线性 Lamb 波信号时频提取方法与过程

鉴于本文采用了窄带激励信号, 因此研究中选用了短时傅里叶变换(STFT)作为时频分析工具, 其表达式^[1]为

$$F(\omega, t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i\omega\tau} f(\tau) h(\tau - t) d\tau \quad (2)$$

式中: f 为传感信号; h 为窗函数。

3 实验验证

3.1 实验设备及实验过程

为了验证非线性 Lamb 波信号的提取及其对损伤的敏感性, 本文进行了实验研究。实验对象选用了典型 $600 \text{ mm} \times 600 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ 的 T6061 金属铝板结构。传感器采用了 4 片直径为 $\varnothing 8 \text{ mm}$ 的 P5 PZT 压电陶瓷片, 其中 0# 压电片为激励器, 1#、2# 和 3# 压电片作为传感器, 其布局情况如图 3 所示。

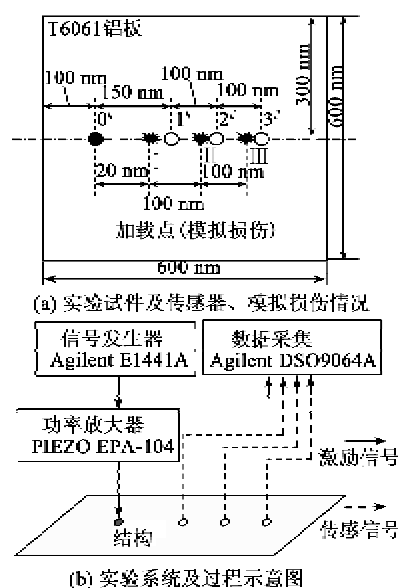


图3 非线性 Lamb 波提取实验试件及设备

实验中采用了质量加载的形式模拟结构在大应力作用下的几何变形及损伤情况,加载点设置在接近3个传感器的直线位置上(见图3(a))。选择激励信号时,为同时兼顾时间分辨率和频率分辨率,采用了中心频率为1.2 MHz的25周期正弦调制信号,其时频域波形如图4所示。此时激发出的基频 S_1 模式信号和非线性二倍频 S_2 模式信号具有相同的相速度和群速度,具有累加效应^[5-5, 8-9],便于信号捕获。实验过程如图3(b)所示,激励信号由信号发生器产生并进行功率放大后加载到激励器上,同时采用Agilent DSO9064A数字存储式示波器同步采集传感信号,设定同步触发源为激励信号。

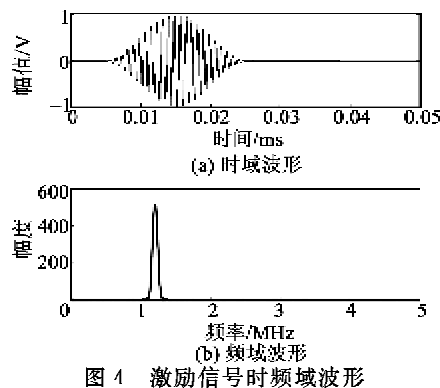


图4 激励信号时频域波形

3.2 实验结果分析

图5为实验得到的典型结构响应信号。该信号为2#压电传感器输出信号。显然,由于Lamb波多模、频散效应及传播过程中的模式变换、边界反射等因素的综合作用,信号复杂,直接在时间域中进行信号分析和目标模式提取难。采用前文所述的STFT时频分析信号提取方法(窗函数与激励信号调制窗相同),得到的处理结果如图6所示。根据激励器到2#传感器的距离及频散曲线,可计算出各模式信号随频率的理论传播时间曲线(即 $t=L/v$),将理论曲线与传感信号的STFT处理结果叠加,可分辨出2#传感信号中各个峰值所在的时频域位置

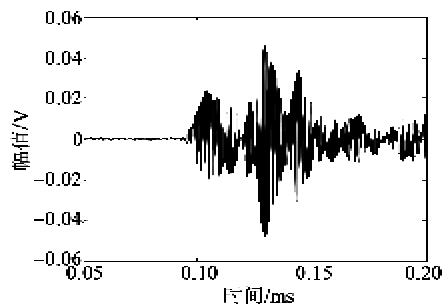


图5 2#传感器获得的典型传感信号波形

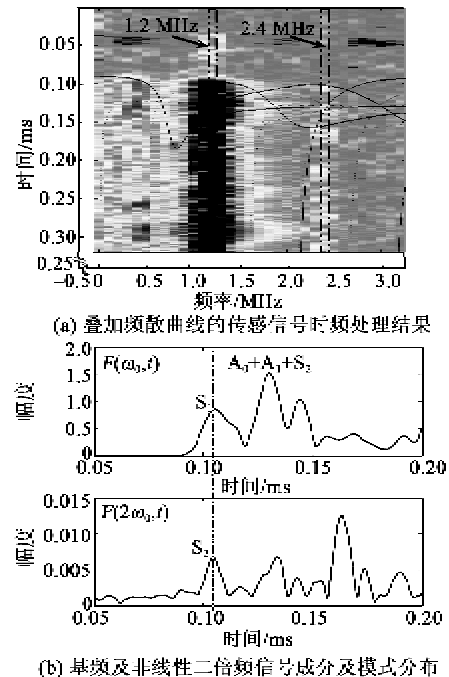


图6 结构响应信号非线性成分时频处理提取结果

及对应的模式。从中提取出基频1.2 MHz及二倍频2.4 MHz的信号成分,对照频散曲线,可定量的分辨出信号中的各个峰值对应模式和能量大小,如图6(b)所示的2组信号(能量包络)。按前文分析,仅选取基频和非线性二倍频的第一到达模式(即图6中 S_1 和 S_2 模式)为考察对象,分析其能量随结构状态变化而改变的情况。

图7为结构不同状态下各传感器获得的Lamb波基频 S_1 模式信号及非线性二倍频 S_2 模式信号幅

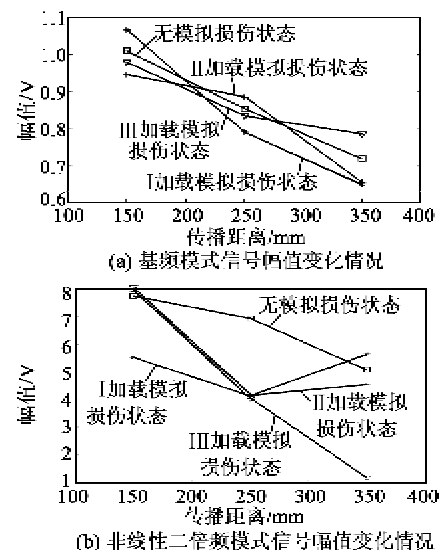


图7 不同损伤状态下基频及二倍频非线性模式信号幅值随传播距离的变化情况

(下转第820页)