

# 包络提取在冲击损伤成像方法中的应用\*

李明, 肖迎春, 韩 晖

(中国飞机强度研究所全尺寸飞机结构静力/疲劳航空科技重点实验室 西安, 710065)

**摘要** 为了提高复合材料冲击损伤的监测效率和定位精度,提出了一种基于希尔伯特-黄变换的损伤成像方法。利用希尔伯特-黄变换对信号包络进行提取后再成像,可以有效简化原始信号,同时提高模式走时提取精度和损伤监测效率。试验表明:在对复合材料层合板的冲击损伤进行成像的过程中,利用时域信号包络进行损伤成像可以明显改善成像效果,而不改变损伤定位精度;相对于短时傅里叶变换,希尔伯特-黄变换在信号包络提取和成像效果方面更具有优势。

**关键词** 兰姆波; 损伤成像; 时间反转; 冲击损伤

**中图分类号** TB302.5; TN911.72

## 引 言

对导波的时间反转研究表明<sup>[1-2]</sup>,在传感器上进行激励产生的信号,通过时域反转后再发送,就相当于一个先进后出的过程。根据声场互易性原理,不同路径到达的声信号将同时回到声源处,从而补偿了多途效应的损失,实现各路径的同相叠加,并使激励振幅得到了增强。这一理论的另一个优点就是解决了多路径复杂影响的问题,而且为任意非均介质提供了一个较好的聚焦方法<sup>[3]</sup>,即能够提供一种有效的方法来消除或减少边界和内部结构特性引起的反射。利用时间反转对波源的自适应聚焦原理并结合成像技术,就可以对损伤处兰姆波信号能量进行聚焦,从而达到增强损伤散射信号能量、提高传感信号信噪比的目的。Wang 等<sup>[4]</sup>在此方面做了大量研究。王强等<sup>[5-7]</sup>也将基于时间反转的损伤成像方法成功用于复合材料板结构的损伤监测中。

基于时间反转的损伤成像方法的一个关键技术就是提取模式峰值来计算模式走时。但是,由于兰姆波在板结构中的传播具有频散效应<sup>[8]</sup>,而且存在多种模式现象,导致了其形式复杂、模式阶数多、易于出现模式混叠等问题,使得需要提取的模式峰值不明显,难于从其他模式中识别出来,从而降低了损伤成像的监测效率和精度。

目前,对兰姆波模式提取的方法有模式匹配、时

频分析、时域跟踪、小波变换等。例如,文献<sup>[9]</sup>提出了一种基于时频分析的短时傅里叶变换(short time Fourier transform,简称 STFT)来对信号的包络和模式进行提取。但是,这些方法存在或者是对多模式波形处理复杂,不能有效提取单模式;或者是在处理过程中存在时、频率窗分辨力之间的矛盾或引进交叉项干扰等问题<sup>[10]</sup>。

笔者利用基于经验模式分解(empirical mode decomposition,简称 EMD)的希尔伯特-黄变换(Hilbert-Huang transform,简称 HHT)方法对时域信号进行分析,在不需要任何信号先验知识情况下进行信号特征提取,精确估计模式走时。通过对复合材料平板冲击损伤进行成像的试验表明,与 STFT 方法相比,HHT 可以更为准确地对兰姆波信号的时域包络进行提取,从而提高损伤成像的精度和可辨识度。

## 1 HHT 方法理论

HHT 是一种基于希尔伯特变换的新方法,可以用于分析非固定和非线性的信号处理<sup>[11]</sup>。该方法包含两个步骤:a.用 EMD 方法将复杂的数据集分解成为个数有限(通常是为数不多)的几个固有模式函数(intrinsic model function,简称 IMF)的线性叠加;b.对分解后的 IMF 进行希尔伯特变换,从而得到有意义的瞬时频率和希尔伯特时频谱。

\* 航空科学基金资助项目(20090923002)

收稿日期:2013-06-12;修回日期:2013-09-16

EMD 是一种非平稳信号自适应分解方法,其基本实现过程是用“筛”的方法把一个复杂信号分解为有限个 IMF 之和<sup>[12]</sup>,这样原始信号  $x(t)$  就可以被分解为  $n$  个 IMF 分量  $c_i(t)$  和一个残余分量  $r_n(t)$  之和,即

$$x(t) = \sum_{i=1}^n c_i(t) + r_n(t) \quad (1)$$

对式(1)中除残余分量  $r_n(t)$  外的每个 IMF 分量  $c_i(t)$  进行希尔伯特变换,可以得到如下的解析信号

$$x(t) = \sum_{j=1}^n \alpha_j(t) \exp(i \int \omega_j(t) dt) \quad (2)$$

式(2)可以揭示信号幅值和瞬时频率作为时间的函数在三维空间的表象,这种幅值函数的时频分布就称之为希尔伯特谱,用  $H(\omega, t)$  表示。因为希尔伯特谱定义了局部频率,因此它具有更高的频率分辨率。

有了希尔伯特谱,可定义希尔伯特边际谱为

$$h(\omega) = \int_0^T H(\omega, t) dt \quad (3)$$

其中:  $T$  为信号总长度。

希尔伯特-黄变换算法就是上述 EMD 方法和相应的希尔伯特谱信号分析方法的统称。因此,希尔伯特-黄变换方法对信号的类型没有特别的要求,是自适应的、高效的信号分析方法,特别适合于非线性和非平稳信号的分析<sup>[13]</sup>。

## 2 基于兰姆波的损伤监测

### 2.1 兰姆波概述

板中的兰姆波是一种在厚度与激励声波波长为相同数量级的声波中由纵波和横波合成的特殊形式应力波。根据薄板两表面质点的振动相位关系,兰姆波分为对称模式( $S$ 波)和反对称模式( $A$ 波),每种模式兰姆波又有不同的阶次,如对称模式包含  $S_0, S_1, S_2, \dots$  等波动分量;而反称模式包含  $A_0, A_1, A_2, \dots$  等波动分量。各波动分量都具有显著的“频散效应”,如图 1 所示,即在给定“频率半板厚乘积”条件下,应力波的传播相速度  $c_p$  和群速度  $c_g$  都随波动频率  $\omega$  的变化而发生改变。

在时间反转成像法中,兰姆波的群速度  $c_g$  是最关键的参数之一,也是表征损伤的一个关键信息,它可以确定信号在结构中的传播模式。根据式(4)可以对群速度进行求取

$$c_g = l_i / \text{TOF} \quad (i = 1, 2, \dots) \quad (4)$$

其中:  $l_i$  为传感器的间距,可以通过直接测量的方法得到; TOF 为模式走时,它是波群在复合材料板中

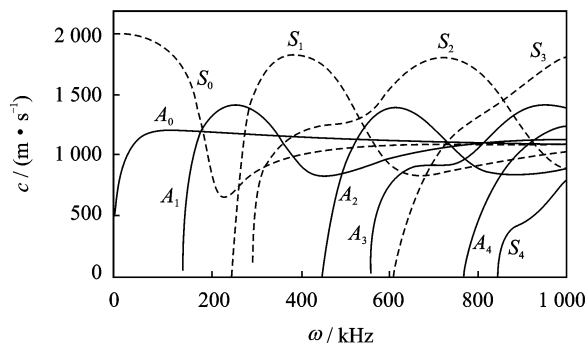


图 1 兰姆波的频散效应

Fig. 1 Dispersion of Lamb wave

的传播时间(time of flight,简称 TOF),需要根据传感器的响应信号进行求取。

由于兰姆波是以波包形式来传播的,但是其时域信号的波包则是由含了多个波峰波谷的调制正弦信号组成,如图 2 所示。因此,直接计算原始信号的 TOF 比较困难,而通过对原始信号进行处理求得整个信号的包络后,再根据各波包的峰值来求取各模式传播时间的方法,就可以使这一问题变得简单而准确。图 3 表示利用求取包络来获取兰姆波监测信号中波群传播时间信息的过程。

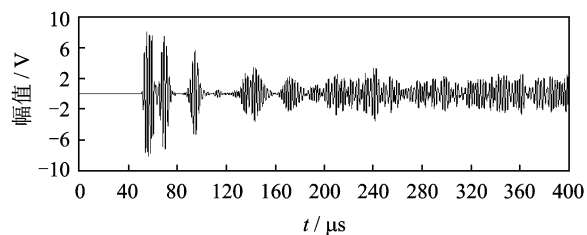


图 2 典型的兰姆波响应信号

Fig. 2 The typical response signal of Lamb wave

### 2.2 时间反转成像法

损伤成像法是将图像处理技术和时间反转理论相结合,应用于复合材料结构损伤监测中的一种综合方法。时间反转具有对波源进行自适应聚焦的能力,它可以显著提高兰姆波在板结构中有效成分的能量,从而提高其信噪比。

由于边界等散射体的存在,波在固体板中传播时存在多径效应<sup>[14]</sup>。这样,由同一个波源发射出的声波,会沿着各种路径传播,所有路径上的声波都会因为散射而发生反射和折射。这时,可以找到一组波沿着这些复杂的传播路径原路折回,并且在波源处同步聚焦,如同对时间轴进行了反转。在实际应用中,时间反转就是在频域里的复共轭,是一种信号聚焦技术,可以理解为:当波信号从波源发射并经历

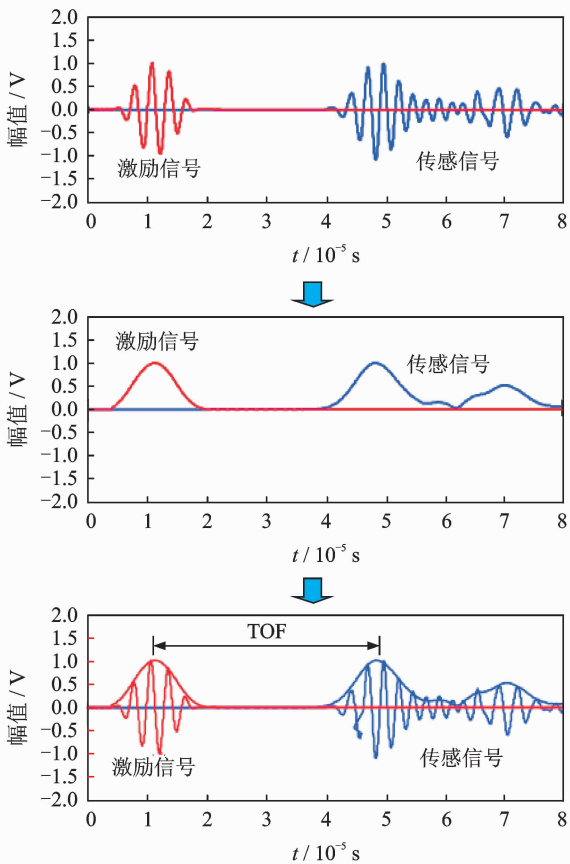


图 3 通过信号包络提取 TOF

Fig. 3 Extraction TOF by wave packet

了完全散射、反射和折射后,被传感阵列记录、时间反转后再发射到介质中,即先到后发、后到先发。二次发送的信号通过介质反向传播,并且在波源处聚焦。

借助图像处理技术可以对这一现象进行构图,即针对每组传感信号分别建立波动图,能量的最大和最小幅值分别对应灰度矩阵的最亮和最暗值。所有波动图像建立后,再将这些灰度图像进行叠加,从而形成完整的波动图像<sup>[4]</sup>。根据波动图像中灰度值的亮度,可以判断结构中损伤位置甚至形状。

考虑由  $N$  个压电传感器构成的分布式网络,各传感器的坐标为  $(x_i, y_i), i = 1, 2, \dots, N$ 。如图 4 所

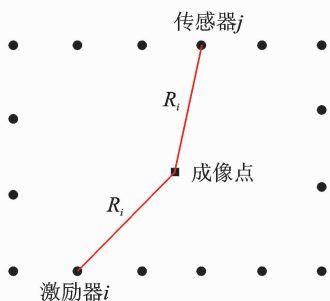


图 4 损伤成像原理

Fig. 4 Principle of damage imaging

示,  $(x, y)$  点处  $S$  的像素值可以描述为

$$S(x, y) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N A_{ij} f_{ij}^{(s)} \left( \frac{R_r + R_t}{c_g} \right) \quad (5)$$

其中:  $f_{ij}^{(s)}$  表示  $i$  作为激励器时,传感器  $j$  接收到的散射信号;  $R_r$  和  $R_t$  分别为传感器  $i$  和  $j$  与成像点的距离;  $c_g$  为信号在结构中传播群速度;  $A_{ij}$  为补偿系数,用于补偿每对传感器因路径不同而引起能量衰减的放大系数。

### 3 试验对比与分析

采用的试件为复合材料层合板,材质为 T700S/BA9916,铺层为  $[45/0/-45/90/0/45/0/-45/0/45/90/-45]_s$ ,外型尺寸为  $200 \text{ mm} \times 200 \text{ mm} \times 2.3 \text{ mm}$ 。在其表面粘贴 4 个直径为  $\phi 8 \text{ mm}$ ,厚度为  $0.45 \text{ mm}$  的 P-51 型压电陶瓷圆片,形成一个边长为  $120 \text{ mm}$  的正方形激励/传感监测网络,并建立坐标系如图 5 所示,各传感器位置坐标见表 1。利用落锤冲击试验装置在试件表面进行冲击以形成冲击损伤,冲击能量为  $12 \text{ J}$ ,设计冲击点坐标为  $(70, 90)$ 。采用超声 C 扫描系统对冲击损伤后的试件进行扫描,得到实际损伤中心位置坐标为  $(71, 92)$ ,扫描结果如图 6 所示。

试验采用的激励信号频率为  $70 \text{ kHz}$ ,采样率为  $10 \text{ MHz}$ 。由 4 个压电片组成的激励/传感网络形成 6 组独立监测信号。分别用 STFT 方法和 HHT 方法对响应信号求包络,结果如图 7 所示。

表 1 传感器位置坐标

Tab. 1 Coordinate of sensors

传感器	坐标/mm	
	$x$	$y$
PZT 1	40	40
PZT 2	160	40
PZT 3	160	160
PZT 4	40	160

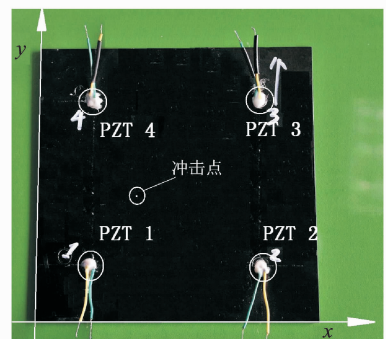


图 5 试件上的压电传感器布置及冲击点

Fig. 5 PZT sensors and impact point on specimen

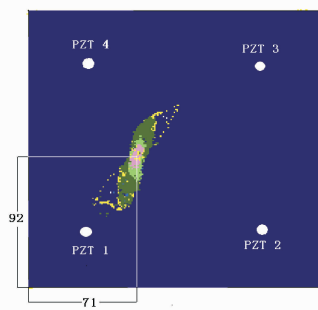
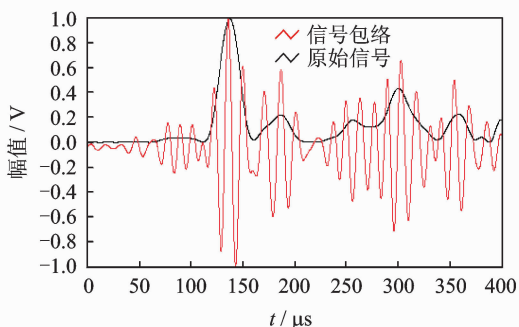


图 6 冲击损伤超声 C 扫描结果

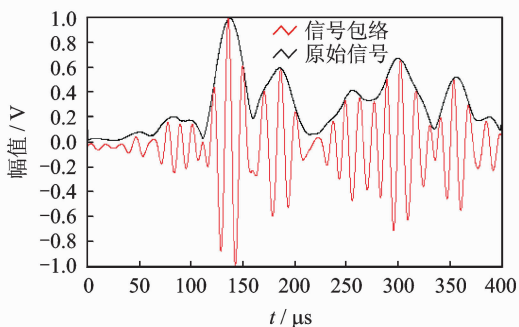
Fig. 6 C-scan result of the impact damage

损伤处聚焦,而此处的能量也最高,因此,灰度值最高处即为损伤的中心点。



(a) STFT提取信号包络

(a) Wave packet extraction by STFT



(b) HHT提取信号包络

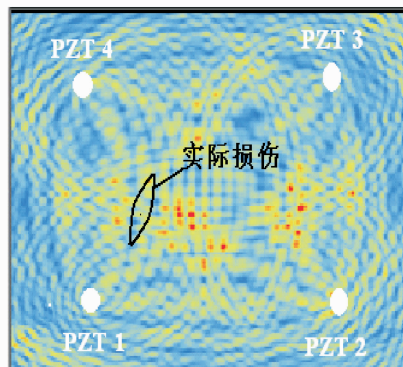
(b) Wave packet extraction by HHT

图 7 STFT 和 HHT 求取信号包络

Fig. 7 Wave packet extraction by STFT and HHT

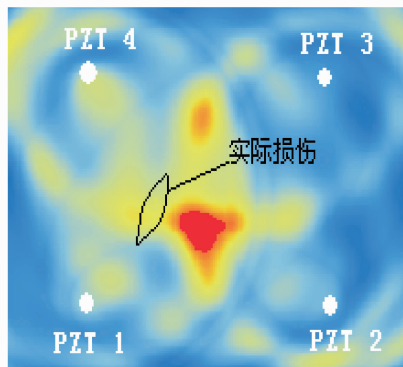
由图 7 可以看出,相比较 STFT, HHT 下的信号包络与原始信号更为吻合。

按照图 5 所示的坐标系建立成像区域,使其可以覆盖整个复合材料板,每个成像像素的点的尺寸为  $1\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ 。根据式(6),分别利用原始信号、STFT 和 HHT 结果对复合材料板成像。为防止频散效应带来的高阶模式混叠干扰,只选择对损伤较为敏感且易于分离的前两个波包进行损伤成像,结果如图 8 所示。图中白色实心圆代表压电传感器的位置,黑色空心圆代表实际损伤的位置。图像中不同的颜色代表不同的灰度值,而灰度值的大小则对应着能量的高低。根据时间反转理论,时反信号在



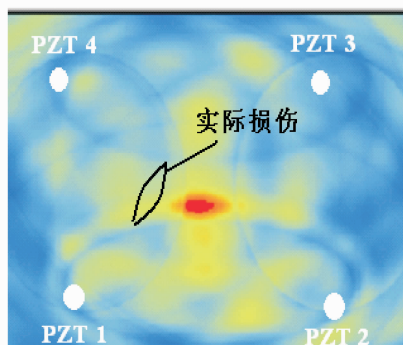
(a) 原始信号成像结果

(a) Imaging of raw signal



(b) STFT变换成像结果

(b) Imaging of STFT signal



(c) HHT变换成像结果

(c) Imaging of HHT signal

图 8 损伤成像结果对比图

Fig. 8 Comparison of damage imaging results

以超声 C 扫描结果作为基准,计算 3 种成像方法的损伤中心点与 C 扫描结果中心点的距离作为定位误差,如表 2 所示。

结合图 8 和表 2 的试验结果可以看出:通过求取信号包络,在不显著提高定位误差的前提下,基于时间反转的损伤成像结果得到了明显的改善,主要表现在成像更为简洁、损伤可辨识度得以提高;相对于 STFT,利用 HHT 进行成像的结果中,显示出

损伤的部分更为集中,减少了干扰损伤的出现;在定位精度方面,HHT方法也略高于STFT方法。

表2 各成像方法定位坐标及误差

Tab. 2 The location and error of damage imaging

成像方法	损伤中心坐标/mm		误差/mm
	$x$	$y$	
超声C扫描	71	92	—
原始信号	91	88	21
STFT	95	86	25
HHT	94	87	23

## 4 结束语

利用HHT可以准确有效地对兰姆波信号的时域包络进行提取,在简化时域信号、提高兰姆波TOF精度方面起到了极大的改善作用。通过对复合材料薄板的冲击损伤进行成像定位的试验表明:利用信号包络对复合材料薄板中的冲击损伤进行成像定位,可以在不显著提高定位误差的前提下,简化成像效果,提高损伤的可辨识度;相对于STFT,HHT的成像结果中,显示出损伤的部分更为集中,干扰损伤更少;在定位精度方面,HHT也比STFT具有一定的优势。

## 参 考 文 献

- [1] Montaldo G, Roux P, Deorde A. Generation of very high pressure pulses with 1-bit reversal in a solid waveguide[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2001,110:2849-2857.
- [2] Lingeitch J F, Song H C, Kuperman W A. Time reversed reverberation focusing in a waveguide[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2002,111:2609-2614.
- [3] Blomgren P, Papanicolaou G, Zhao H. Super-resolution in time-reversal acoustics[J]. Acoustic Society of America, 2002,111(1):230-248.
- [4] Wang C H, Rose J T, Chang F K. A synthetic time-reversal imaging method for structural health monitoring[J]. Smart Material and Structure, 2004,13(2):415-423.
- [5] 王强,袁慎芳. 复合材料脱层损伤的时间反转成像监测[J]. 复合材料学报,2009,26(3):99-104.  
Wang Qiang, Yuan Shenfang. Time reversal imaging method for composite delamination monitoring [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2009, 26 (3): 99-104. (in Chinese)
- [6] 邱雷,袁慎芳,张道越,等. 基于Shannon复数小波的复

合材料结构时间反转聚焦多损伤成像方法[J]. 复合材料学报,2010,27(2):101-107.

Qiu Lei, Yuan Shenfang, Zhang Xiaoyue, et al. Shannon complex wavelet and time reversal focusing based multi-damage imaging method on composite structures [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2010,27(2):101-107. (in Chinese)

- [7] Wang Qiang, Yuan Shenfang. Baseline-free imaging method based on new PZT sensor arrangement [J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2009,20(14):1663-1673.
- [8] Viktorov I A. Rayleigh and Lamb waves [M]. New York: Plenum Press, 1967:73-107.
- [9] Ihn J B, Chang F K. Detection and monitoring of hidden fatigue crack growth using a built-in piezoelectric sensor/actuator network: I. diagnostics [J]. Smart Material and Structure, 2004,13:609-620.
- [10] 李刚. 时频分析方法在智能结构损伤在线检测中的应用研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2005.
- [11] Huang N E, Shen Z, Long S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for on-linear and non-stationary time series analysis[J]. Proceedings of the Royal Society of London A, 1998,454:903-995.
- [12] 胡爱军,孙敬敬,向玲. 经验模态分解中的模态混叠问题[J]. 振动、测试与诊断,2011,31(4):429-434.  
Hu Aijun, Sun Jingjing, Xiang Ling. Mode mixing in empirical mode decomposition [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2011, 31 (4): 429-434. (in Chinese)
- [13] 张海涛,涂亚庆. 基于FFT的一种计及负频率影响的相位差测量新方法[J]. 计量学报,2008,29(2):168-171.  
Zhang Haitao, Tu Yaqing. A new method for phase difference measurement based on FFT with negative frequency contribution [J]. Acta Metroloica Sinica, 2008,29(2):168-171. (in Chinese)
- [14] Fink M, Prada C, Wu F. Self-focusing in inhomogeneous media with time-reversal acoustic mirror [C] // Proceedings IEEE 1989 Ultrasonics Symposium. Montreal, Canada:IEEE, 1989.



第一作者简介:李明,男,1980年4月生,工程师。主要研究方向为压电传感技术和结构健康监测技术。

E-mail:liakali@163.com

