

HHT 在提取 Lamb 波特征参数中的应用

张 燕

(南京航空航天大学 金城学院,南京 211156)

摘 要:超声 Lamb 波被广泛用于薄板状结构的损伤检测,其频散特性为损伤信号特征参数的提取增加了难度,因此提出 HHT 方法对时域的 Lamb 波进行频域转换,以提取信号的能量和时间特征。首先,介绍了 Lamb 信号的特性及生成方式;其次,详细说明希尔伯特-黄变换(HHT)的实现方法及步骤,用 Matlab 进行了算法实现,获得 Lamb 波信号的 Hilbert 谱、瞬时能量密度谱和边际谱;最后,通过复合材料结构的损伤实验,分别对损伤前后的结构检测信号进行 HHT 变换,提取信号的能量参数和时间参数,对比分析证明 HHT 能有效提取损伤前后信号的能量衰减和时间延迟信息,为下一步进行损伤程度和位置的识别提供了数据依据。

关键词:Lamb 波;结构损伤检测;HHT;频域转换;能量衰减

中图分类号:TN911.7

文献标志码:A

文章编号:1672-058X(2021)04-0052-04

0 引 言

兰姆波 Lamb 是一种典型的超声波,它可以在均匀的平板结构内远距离的传播,并且能够敏感感知平板结构细微的损伤。当 Lamb 波在传播中碰到结构损伤,传播特性会明显发生改变。因此,超声波被广泛应用于板状材料结构的损伤检测^[1]。比如在航空飞行器的结构健康检测中,常采用 Lamb 波对机身机翼等大面积材料结构进行快速检测和数据提取,它的特点是可以对监控数据进行实时提取,快速分析得出结论。传统的 Lamb 波信息提取方法是 Cross-borehole 法,方法在很多工业技术工程上都取得不错的效果,但是其缺点是所需传感器数量多,排布密集^[2]。在大面积的结构损伤检测中,还有待进一步优化。

近年来,许多信号时频分析方法被研究并用于处理 Lamb 波信号。其中应用最普遍也较为成功的方法就是希尔伯特-黄变换,简称 HHT。算法是美国学者 Norden E. Huang 在 1998 年提出的一种新的

时频域信号分析方法,它的内容包括:任意一种信号都可以经过经验模式分解法(EMD)分解成固有模态函数(IMF),然后再对 IMF 函数进行 Hilbert 变换得到 Hilbert 谱^[3]。方法最早应用在海洋检测工程中,对非线性数据进行 HHT 谱分析得到了良好的效果,随后在土木工程结构损伤监测、地震信号分析等领域也验证了其效果。利用 HHT 对平板结构中 Lamb 波数据进行分析和处理,获取损伤检测中的时间延迟、能量损耗等特征,并且有效地避免了 Lamb 的反射和散射所带来的信号混叠。同时进行了实验验证和数据分析,证实了 HHT 在 Lamb 信号处理中的有效性和可实用性。

1 HHT 算法实现

1.1 兰姆波特特性介绍

在结构损伤检测中通常采用窄带脉冲信号作为激励信号,以便于得到信号能量集中而且成分简单的超声 Lamb 波^[4]。产生窄带脉冲信号经常采用 Hanning 加窗函数,加窗函数具有带宽窄,能量集中

收稿日期:2020-08-24;修回日期:2020-09-28.

作者简介:张燕(1982—),女,江苏南京人,讲师,硕士,从事计算机测控研究.

的特点,能够明显体现结构损伤的特征^[4],其表达式如下:

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

其中, A 是信号幅值, $H(t)$ 是 Heaviside 阶跃函数, f_c 是中心频率采用典型值 125 kHz, n 是波峰数, 该值的选取是降低信号处理复杂程度的关键, 为了减少信号混叠, 在项目中 $n=5$ 。

1.2 经验模式分解过程

HHT 方法可分为经验模态分解 (EMD) 和 Hilbert 变换两个步骤^[5]。

EMD 分解的核心理念是利用时间序列上、下包络的平均值来确定原始信号的“瞬时平衡位置”, 再进一步提取出固有模态函数 (IMF)。IMF 分量是一种数据序列, 需要同时满足两个条件: 所有极大值点形成的包络线和所有极小值点形成的包络线的平均值为零, 这样可以避免瞬时频率受到非对称波形的影响; 整个数据范围内, 极值点和零交叉点的数量需要相等, 最多相差一个。

根据文献[6-9], EMD 分解步骤具体解析如下:

① 根据 3 次样条函数对局部极大值点和极小值点进行拟合分别得到和上下包络线。

② 计算上包络线 $f_{\max}(t)$ 及下包络线 $f_{\min}(t)$ 的均值 $m(t) = [f_{\max}(t) + f_{\min}(t)]/2$ 。

③ 通过做减法, 得到第一个组件 $h(t) = f(t) - m(t)$; 如果 $h(t)$ 不满足固有模态函数的两个条件, 就把 $h(t)$ 当成原始信号, 再重复步骤①-③, 直到满足条件为止, 定义一个 IMF: $I_1(t) = h(t)$ 。剩余量 $r(t) = f(t) - I_1(t)$ 仍然包含具有更长周期组件的信息, 因此把它看作一个新的信号, 重复上述过程, 可以获得 $I_2(t), I_3(t), \dots$, 当 $r(t)$ 满足了单调序列或常值序列条件, 则停止筛选, 认定已完成提取内在模态函数的任务, 最后的 $r(t)$ 作为余项, 它是原始信号的趋势项。

根据以上步骤可将原始信号 $f(t)$ 分解成 n 个 IMF 分量及 1 个趋势项, 详见式(2):

$$f(t) = \sum_{i=1}^n I_i(t) + r(t) \quad (2)$$

EMD 分解会直接影响 HHT 方法的分析效果, 而在采用 EMD 分解方法时面临的难题是, 由于信号两端不可能同时处于极大值和极小值, 所以“筛”过

程中构成上、下包络的 3 次样条函数在数据序列的两端会有发散现象。再者, Hilbert 变换过程中, 信号的两端也会出现强烈的端点效应。因此, 为了确保包络线抵达端点, 需要对信号左右两端的极大值和极小值向外延拓^[10]。

在实际应用中, 几乎没有严格满足 IMF 两个筛选条件的信号, 或者要花费很长的筛选时间, 因此可以采用标准偏差 SD 作为结束筛选的条件, SD 的定义见式(3):

$$SD = \sum_{t=0}^T \left[\frac{|(h_{1(k-1)}(t) - h_{1k}(t))|^2}{h_{1(k-1)}^2(t)} \right] \quad (3)$$

式(3)中 $h_{1(k-1)}(t)$ 和 $h_{1k}(t)$ 代表两个连续筛选的结果。 SD 的典型值是 0.2 ~ 0.3, 也可以根据实际情况进行调整, 获取稳定性良好的线性的 IMF 分量。此外, 可以通过控制筛选次数来保证程序的执行时间及有效性。

1.3 Hilbert 谱

按照式(4), 将任一 IMF 分量 $I_j(t)$ 进行 Hilbert 变换:

$$I_{Hj}(t) = \frac{1}{\pi} P \int \frac{I_j(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (4)$$

式(4)中, P 是 Cauchy 主值。

根据式(5)构造解析信号 $Z_j(t)$:

$$Z_j(t) = I_j(t) + iI_{Hj}(t) = a_j(t) e^{i\theta_j(t)} \quad (5)$$

式(5)中, $a_j(t)$ 代表解析信号的瞬时幅值, $\theta_j(t)$ 代表相位。

IMF 分量的瞬时频率由式(6)表示:

$$\omega_j(t) = \frac{d\theta_j(t)}{dt} \quad (6)$$

在同一时频空间内, 表示各 IMF 分量的瞬时幅值与时间和瞬时频率的对应关系, 就得到信号的 Hilbert 谱 $H(\omega, t)$, 该频谱能够全面反映信号能量在时频域的分布^[11]。另外, 由式(7)和式(8)可以获得边际谱 $h(\omega)$, 它反映了信号中不同频率分量能量的大小, 还可以获取瞬时能量水平 $EI(t)$, 它反映了信号不同时刻能量的变化:

$$h(\omega) = \int H(\omega, t) dt \quad (7)$$

$$IE(t) = \int_{\omega} H^2(\omega, t) d\omega \quad (8)$$

实现 HHT 的流程图如图 1 所示。

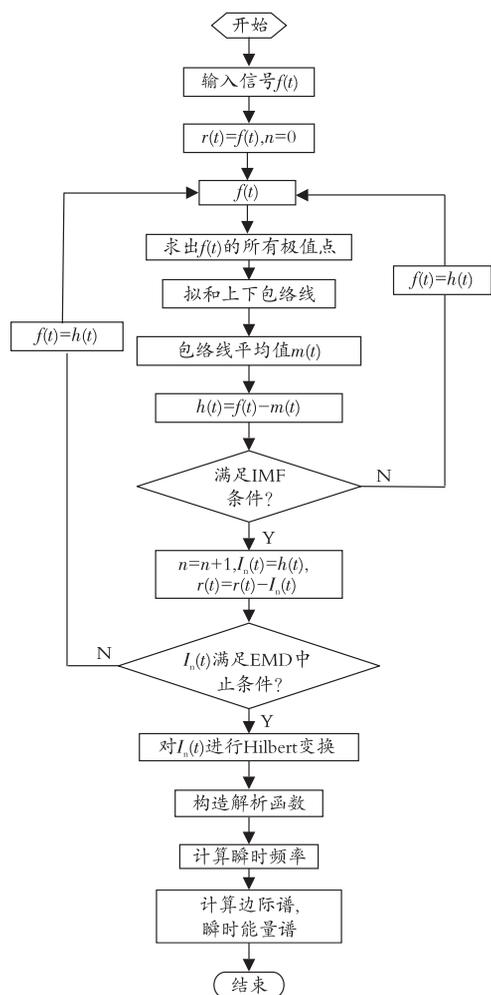


图 1 经验模式分解及 Hilbert 变换流程图

Fig. 1 Flowchart of empirical mode decomposition and Hilbert transform

2 实验验证

在结构损伤检测实验中采用复合材料层合板作为 Lamb 传播介质,其结构常会产生诸如脱层、孔洞以及裂纹等损伤,结构界面会在损伤部位发生变化,从而导致 Lamb 波在传播中发生能量变化、反射波等。

对 Lamb 波信号进行 HHT 分析,得到 Hilbert 谱、瞬时能量密度谱和边际谱,根据这些数据获取原始信号的特征参数组:Lamb 波传播速度、瞬时能量密度谱能量峰值、能量峰值所在时刻、边际谱中心频率及对应峰值等。在结构损伤检测实验中,可以根据实际需要合理选择这些参数。如图 2 显示了在无损伤平板结构和有损伤平板结构中的 Lamb 信号经过 HHT 处理,获取瞬时能量密度水平,从图 3 中可以发现:损伤信号的能量峰值相比无损信号有了明显

衰减,图 3 边际谱,到达峰值的时间也出现些许延迟。这些关键信息都是结构损伤检测中的判断依据。

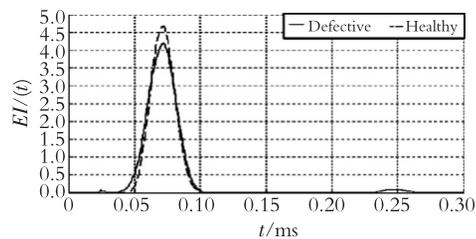


图 2 瞬时能量密度水平

Fig. 2 Instantaneous energy density level

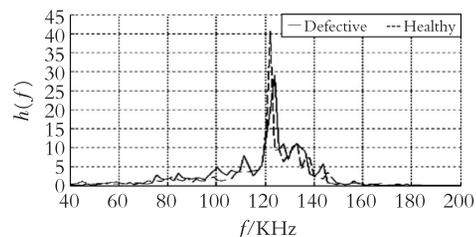


图 3 HHT 边际谱

Fig. 3 Marginal spectrum of HHT

3 结论

对超声 Lamb 波信号进行了 HHT 分析,详细介绍了希尔伯特-黄变换的建模方法和步骤,其经验模式分解方法可以有效滤除干扰信号的 IMF 分量,获取信号的能量和时间信息。复合材料板损伤实验证明了 HHT 方法具有良好的时频分辨率,尤其是瞬时能量密度和边际谱可以准确有效地提取信号的能量衰减信息和时间延迟信息,对于结构疲劳、微型损伤的早期在线检测提供了可行的方法。

参考文献 (References):

- [1] 潘群,王强. 主动 Lamb 波结构损伤监测中的非线性信号提取[J]. 压电与声光, 2014, 36(2): 814—817
PAN Q, WANG Q. Nonlinear Signal Extraction Process for Active Lamb Wave Based on Structural Damage Monitoring[J]. Piezoelectric and Acousto-optics, 2014, 36(2): 814—817 (in Chinese)
- [2] 胡勇,徐春广. HHT 在复合材料 Lamb 波检测中的应用[J]. 传感器与微系统, 2009, 28(4): 110—113
HU Y, XU C G. Application of Improved HHT in Multi-mode Lamb Wave Test for Laminated Composite Material [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2009, 28(4): 110—113 (in Chinese)
- [3] 张燕,龚立娇. Lamb 波频散特性的数值仿真研究[J]. 压电与声光, 2014, 11(5): 701—704
ZHANG Y, GONG L J. Numerical Simulation for Lamb Wave Dispersion Curves [J]. Piezoelectric and

- Acousto-optics, 2014, 11(5):701—704 (in Chinese)
- [4] 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(7):609—620
- [5] 王强, 孙丽华. 非线性 Lamb 波结构早期损伤监测研究 [J]. 压电与声光, 2016, 38(4):170—173
WANG Q, SUN L H. Early Structural Damage Based on Nonlinear Lamb Wave [J]. Piezoelectric and Acousto-optics, 2016, 38(4):170—173 (in Chinese)
- [6] 张海燕, 于建波, 孙修立. HHT 在 Lamb 检测信号分析中的应用 [J]. 振动、测试与诊断, 2010, 30(7):223—225
ZHANG H Y, YU J B, SUN X L. Application of Lamb Wave Detection Signal Based on HHT [J]. Journal of Vibration, Measurement and Diagnosis, 2010, 30(7):223—225 (in Chinese)
- [7] 李志浩. 薄板缺陷的 Lamb 波检测与信号处理 [D]. 辽宁大连: 大连理工大学, 2011
LI Z H, Inspection and Signal Processing of Lamb Wave to the Plate Defect [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2011 (in Chinese)
- [8] 李明, 肖迎春. 基于 HHT 的主动兰姆波金属疲劳裂纹损伤监测研究 [J]. 机械科学与技术, 2015, 34(7):910—914
LI M, XIAO Y C. Research on Fatigue Crack Monitoring by Active Lamb Wave Based on HHT [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2015, 34(7):910—914 (in Chinese)
- [9] HUANG N E. Hilbert-Huang Transform and Its Applications [M]. Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd, 2005
- [10] 郭明威, 倪世宏. 振动信号中 HHT/EMD 端点延拓方法研究 [J]. 振动与冲击, 2012, 8(6):62—65
GUO M W, NI S H. HHT/EMD End Extension Method in Vibration Signal Analysis [J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 8(6):62—65 (in Chinese)
- [11] 孟庆愿, 郑芬. HHT 在薄板超声 Lamb 波检测中的应用 [J]. 电子世界, 2015, 13(9):193—195
MENG Q Y, ZHENG F. Application of Lamb Detection in Thin Plate Structure Based on HHT [J]. Electronics World, 2015, 13(9):193—195 (in Chinese)

Application of HHT for Extracting Characteristic Parameter of Lamb Wave

ZHANG Yan

(Jincheng College, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211156, China)

Abstract: Lamb wave is widely used for damage detection of laminated structure. The dispersion characteristic of Lamb wave complicates the signal analysis procedure and this phenomena also brings difficulties in characteristic parameter extraction during damage detection. It is necessary to use a suitable time-frequency domain conversion method for the Lamb wave. Firstly, the propagation property and generation mode of Lamb are presented. Then Hilbert-Huang Transform (HHT) is introduced in detail in order to extract the Hilbert spectrum, instantaneous energy density spectrum and marginal spectrum of Lamb wave signal by Matlab. Finally, HHT is used to analyze the signals which are collected in the experiment before and after damage in order to extract characteristic parameter about energy and time. The experiment results and comparative analysis show that HHT is suitable to extract the energy attenuation and time delay information of the signal before and after the damage, which provides the data basis for the next step to identify the damage degree and location.

Key words: Lamb wave; structural damage detection; HHT; frequency domain conversion; energy attenuation

责任编辑:田静

引用本文/Cite this paper:

张燕. HHT 在提取 Lamb 波特征参数中的应用 [J]. 重庆工商大学学报(自然科学版), 2021, 38(4):52—55

ZHANG Y. Application of HHT for Extracting Characteristic Parameter of Lamb Wave [J]. Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2021, 38(4):52—55