

改进的希尔伯特-黄变换(HHT)在多模式 Lamb 波检测中的应用

王 杜,毛国均,黄 辉

(宁波市特种设备检验研究院,宁波 315020)

摘要:Lamb 波的主要特点在于它的多模式和频散,在任一给定的激发频率下,至少存在两种 Lamb 波模式。各模式的频散特性使 Lamb 波检测变得非常复杂,所以,Lamb 波检测的关键在于缺陷信号特征参数的提取和精确的信号解释。首先采用 HHT 直接对多模式 Lamb 波检测信号进行了分析,通过分析,得出了直接对多模式 Lamb 波信号进行 EMD 分解来得到信号的瞬时频率和瞬时幅值的方法是不适合的结论。采用改进后的 HHT 方法进行分析,有效消除了噪声干扰和各模式 Lamb 波的相互干扰,得到的信号时频集聚性较好,有利于特征参数的提取和进一步分析。针对不同大小和深度的孔型人工缺陷的检测试验,分别提取了信号瞬时幅值的峰值和瞬时频率的均值作为检测信号的特征参数进行线性回归分析,发现采用瞬时幅值的峰值作为孔型缺陷检测的特征参数比采用瞬时频率的均值这一参数要好。同时提出可采用瞬时幅值的峰值回归直线的斜率 K 来标定特征参数对缺陷孔径变化的敏感性,从而可对未知缺陷的大小进行预判。

关键词:无损检测;Lamb 波;希尔伯特-黄变换;时频分析

中图分类号:TG115.28

文献标志码:A

文章编号:1000-6656(2012)08-0022-07

Applied Research for Improved Hilbert-Huang Transform(HHT) in the Multi-Mode Lamb Wave Detection

WANG Du, MAO Guo-Jun, HUANG Hui

(Ningbo Special Equipment Inspection and Research Institute, Ningbo 315020, China)

Abstract: The main characteristics of Lamb waves are multi-mode and dispersion, in any given excitation frequency, there are at least two Lamb wave modes. The dispersion characteristics of each mode make Lamb wave detection become very complex, so extraction for characteristic parameters of the signal and accurate signal interpretation is the key of Lamb wave detection. The signal of multi-mode Lamb wave detection was analyzed directly by HHT, and the conclusion was obtained that the approach of using multi-mode Lamb waves signal by EMD decomposition to extract the instantaneous frequency and instantaneous amplitude directly was not suitable. The noise and the mutual interference of Lamb wave modes was effectively eliminated by improved HHT, and the time-frequency clustering of the signal was good, and it was of benefit to characteristic parameters extraction and further analysis. Testing for different size and depth of the hole type artificial defects, the peak of instantaneous amplitude and the mean of instantaneous frequency were extracted respectively for linear regression analysis, it was discovered that the peak of instantaneous amplitude was a better characteristic parameter than the mean of instantaneous frequency for the detection of hole type defect. And the sensitivity of the change of the defect diameter could be calibrated by the regression line slope K of the peak of instantaneous amplitude, which could be used to predict the size of unknown defects.

Keywords: Nondestructive testing; Lamb wave; Hilbert-Huang transform; Time-frequency analysis

收稿日期:2011-08-11

作者简介:王 杜(1981—),男,工程师,主要从事压力容器、管道的无损检测及信号处理研究。

与常规超声波无损检测相比,兰姆波检测具有快速高效的特点,非常适用于板形结构的大面积无损检测、大型结构健康监测以及管道的结构安全监控系统中^[1-2]。但是由于兰姆波理论及检测机理的复杂性,此项技术至今仍未取得重大突破,还存在许多不一致的观点和未解决的问题,大大限制了它在工业生产中的应用。

Lamb 波的主要特点在于它的多模式和频散,在任一给定的激发频率下,至少存在两种 Lamb 波模式。各模式的频散特性使 Lamb 波检测变得非常复杂,所以,Lamb 波检测的关键在于缺陷信号特征参数的提取和精确的信号解释。Lamb 波信号的模式识别和分析处理常常采用时频分析方法,如短时傅里叶变换(Short-Time Fourier Transform, STFT)和小波变换(Wavelet Transform, WT)、Gabor 变换以及二次型时频分布。但是它们不是存在时窗和频率窗分辨率矛盾的问题,就是引进交叉项干扰,为后期信号的解释增加了难度^[3]。

1996 年,NASA 的 Norden E Huang 等人独创性地提出了希尔伯特-黄变换(Hilbert Huang Transform, HHT)^[4],它被称为是近年来对以傅里叶变换为基础的线性和稳态谱分析的一个重大突破。HHT 是分析非线性与非稳态数据的又一新时频分析方法,可用于地震工程、地球物理探测、潜艇设计、结构缺陷检测、卫星资料分析、血压变化和心律不整等各项研究。HHT 方法是目前第一种不需要利用特定函数形式(如傅里叶变换的三角函数,小波变换的小波基函数等)对数据进行分解的具有自适应能力的先进时频域信号处理方法。该方法提出后引起信号处理界的广泛关注并获得了 2001 年度 NASA 的研究与设计大奖。HHT 方法首先在海洋工程得以应用,随后扩展到地震信号处理、土木工程和结构健康监测等领域^[5-6]。

笔者拟采用 HHT 时频分析方法对多模式 Lamb 波检测信号进行分析,提取检测特征参数,并对不同大小和深度孔型人工缺陷进行检测。

1 HHT 原理

HHT 分析主要分两步进行,第一步通过经验模态分解 EMD(Empirical Mode Decomposition)把输入信号分解成有限个数的固有模态函数 IMF(Intrinsic Mode Function);第二步通过希尔伯特变换,求出各阶 IMF 的瞬时频率 IF(Instantaneous Frequency),再用以求解信号的时频分布。

2 试验装置及步骤

试验装置原理框图如图 1 所示。试验中采用自行开发的 12 位 A/D100MHz 采样的超声无损检测系统作为超声发生和接收设备。采用中心频率为 2.5 MHz 的可变角探头(型号为 2.5P10×12,0°~80°),入射角为 40°,一发一收方式,两探头入射点相距为 206 mm。在 3 块厚度为 4.8 mm 的钢板中激励 Lamb 波并检测,钢板尺寸为 500 mm×316 mm。第一块钢板(B1 板)上制作的缺陷分别为直径 1,2,3,4 mm 的通孔;第二块钢板(B2 板)上制作的缺陷分别为直径 1,2,3,4 mm,深度 2.4 mm 的盲孔;第三块钢板(B3 板)上制作的缺陷分别为直径 1,2,3,4 mm,深度 1.2 mm 的盲孔。

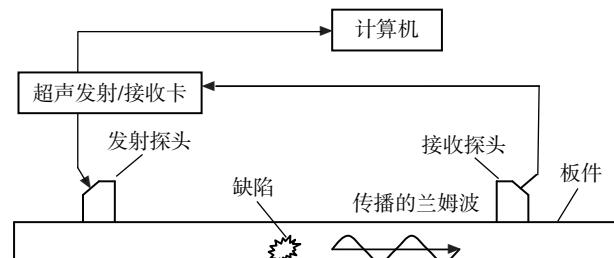


图 1 试验装置示意图

3 HHT 在 Lamb 波信号分析中的应用

3.1 直接采用 HHT 分析

采用 HHT 直接对检测信号进行分析,以 B1 板为例,无缺陷时的检测信号及其 EMD 分解结果,如图 2 所示。图 2 从上到下分别是检测信号的时域波形图和它的前四阶 IMF 分量,四阶以后的 IMF 分量由于能量非常微弱所以没有给出。经过计算,前三阶 IMF 信号的分解信号与原信号的相关系数为 0.996,证明了 EMD 对原信号分解得相当好,且前

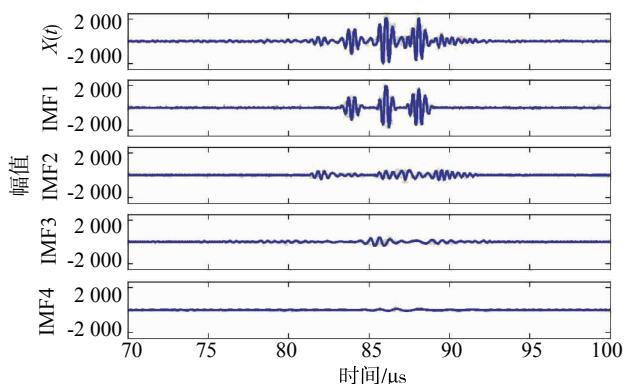


图 2 B1 板无缺陷时的检测信号及其前四阶 IMF

三阶 IMF 占原信号成分的主要部分。

图 2 中时域波形图的纵坐标单位为采样单位,根据试验中采样卡的参数可知 2048 采样单位相当于 1 V,所以如果要把数据转化为以电压为单位,则需要把采集的数据除以 2048。因为并不影响数据的分析结果,下文所有时域波形图以及瞬时幅值图、Hilbert 边际谱图的纵坐标单位均为采样单位。而为了便于比较分析傅里叶变换后得到的信号功率谱图,纵坐标数据都经过了尺度变换,不具有绝对意义,只具有相对意义。

图 3 为 B1 板无缺陷时检测信号的功率谱图及其前三阶 IMF 的功率谱图。从能量上看,第一阶 IMF 分量占信号能量的绝大部分,因此对这阶 IMF 分量(记作 IMF1)作进一步分析。

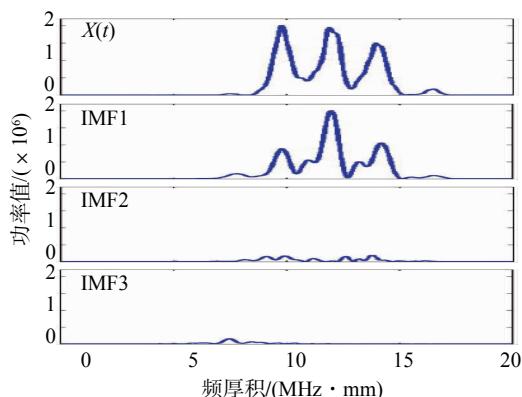


图 3 B1 板无缺陷时检测信号的功率谱图及
其前四阶 IMF 的功率谱图

进一步通过 HHT 分析工具箱(由 Matlab 语言编写)来得到 IMF1 分量的瞬时幅值图、瞬时频率图、Hilbert 边际谱、时频 Hilbert 谱图,从而完成对信号的时频分析。IMF1 的瞬时幅值如图 4(b)所示。由图可知,IMF1 的瞬时幅值与原信号时域波形图上的包络基本相符。进一步分别对比 B1,B2,B3 板中的无缺陷以及有各种孔径大小的缺陷时检

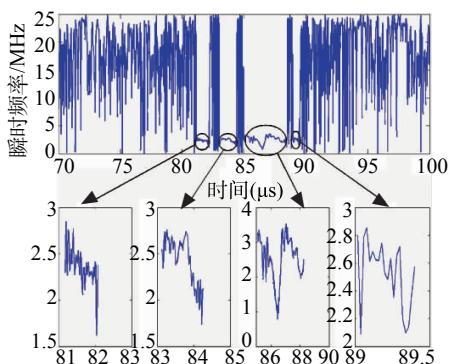


图 5 IMF1 的瞬时频率图

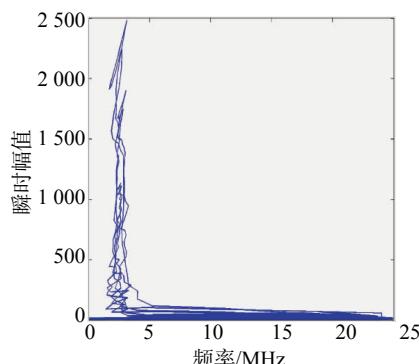


图 6 IMF1 的 Hilbert 边际谱图

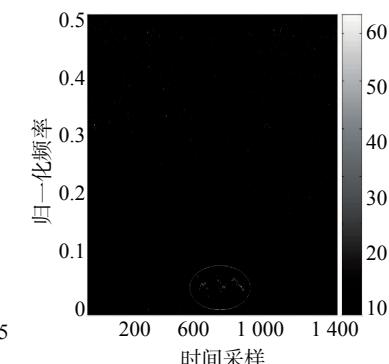


图 7 IMF1 的时频 Hilbert 谱图

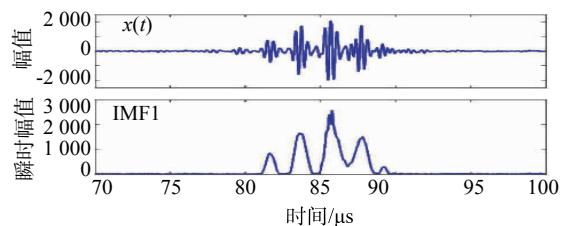


图 4 B1 板无缺陷时检测信号的时域波形图
和 IMF1 的瞬时幅值图

测信号的 IMF1 的瞬时幅值图时发现,各时间段出现的峰值大小规律凌乱,而且出现的时间段也毫无规律可循。原因可能是 IMF1 并不是从原信号中分解出来的具有唯一模式的 Lamb 波成分,这在对其进行傅里叶谱分析中也可以看出来。与原信号一样,它也是由几种模式的 Lamb 波成分叠加在一起组成的,尽管它表现出平稳性,这样就使得瞬时幅值的变化无规律可循。

图 5~7 分别是 IMF1 的瞬时频率图、Hilbert 边际谱图以及时频 Hilbert 谱图。通过图 5 上半部分发现大量的噪声干扰,虽然它们的能量很小,但是却存在于在整个时间段,而且噪声的频带比较宽,降低了有用信号的瞬时频率分辨率。图 5 下部分是各部分有用信号的瞬时频率图的局部放大图,由其可见,信号的瞬时频率是随时间变化的,且在探头中心频率(2.5 MHz)附近上下无规则变化。图 6 也反映了噪声对信号 Hilbert 边际谱图的影响,它们虽遍布整个频带,但是能量相对很小。同时发现有用信号频带上的 Hilbert 边际谱规律杂乱,这也可能和 IMF1 实际包含了几种 Lamb 波模式有关。图 7 也发现上述问题,有用信号部分分辨率太低,被大量噪声湮没。

由此可见,采用直接对多模式 Lamb 波信号进行 EMD 分解得到第一阶 IMF 分量,然后对 IMF1 进行 Hilbert 变换得到 IMF1 的瞬时幅值图、瞬时频

率图、Hilbert 边际谱、时频 Hilbert 谱图,进而完成对信号的时域分析、频域分析以及时频分析的方法是不适合的。因为大量的噪声干扰不说,而且多模式的 Lamb 波也会相互干扰,从而不能提取有效的特征参数进行无损检测分析与评价。

3.2 改进后的 HHT 分析

针对以上问题,必须对多模式 Lamb 波的 HHT 方法处理过程进行改进。Yang^[7]等人认为当有如下两种情况之一,即当各阶 IMF 的频率都比较高时以及当信号被高频噪声污染时,需要采用带通滤波技术对原信号进行处理后才进行 EMD 分解。因为当信号存在上述两种情况之一时,提取的前几阶 IMF 分量往往不是包含着相互混叠的信号成分,就是包含有高频噪声的无用信号。这也说明对于多模式或者多成分的信号,特别是当这些模式或成分频率相近以及含有高频噪声时,不能对原信号直接进行 EMD 分解得到第一阶 IMF。他们的做法是,①先对分析信号进行傅里叶变换,作出频谱图,并找到各功率谱峰值。②从高频到低频设计带通滤波器,滤波器个数与频谱峰值个数相同。先采用高频的带通滤波器对信号进行带通滤波,得到信号中的高频成分,再对高频成分进行 EMD 分解,得到的第一阶 IMF 作为原信号的第一阶 IMF 分量。③从高频到低频依次采用设计好的带通滤波器对原信号进行带通滤波,分别对得到的信号进行 EMD 分解,再把各自得到的第一阶 IMF 分别作为原信号的第二阶,第三阶, ..., 第 i 阶 IMF 分量。

由于试验的检测信号为多模式 Lamb 波,所以需要进行带通滤波之后才能进行 HHT 分析。根据图 8 中信号的功率谱图可以知道,信号的频谱峰值有四个,且频带比较接近。高频成分功率谱峰值很小,可见能量很弱,为次要信号成分,另外三种频率成分的功率谱峰值较大,为主要信号成分。前面功率谱图的横坐标均为频厚积(MHz · mm),考虑到滤波器的设计,这里功率谱图的横坐标为频率

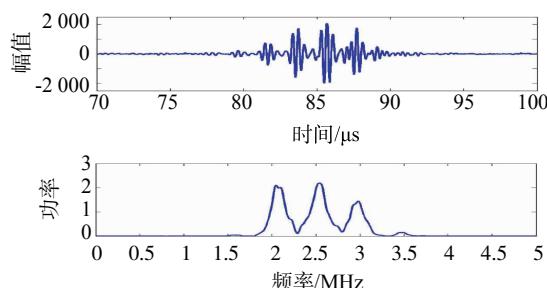


图 8 B1 板无缺陷时检测信号的时域波形图和功率谱图

(MHz),如果要转化到频厚积-功率空间,只需要把频率坐标量乘以板厚(试验板厚为 4.8 mm)即可。

这样就可以设计四个带通滤波器分别对信号进行滤波。滤波器选用 Butterworth 带通滤波器,Matlab 软件中有自带的 Butterworth 带通滤波器函数,其调用格式为: $[b,a] = butter(n, [\omega_L, \omega_H])$ 。其中 $[\omega_L, \omega_H]$ 为带通截止频率; b, a 分别为滤波器传递函数分子和分母系数向量。截止频带设计如表 1 所示。

表 1 带通滤波器中各带通频率的选择

IMFj	B1 板		B2 板		B3 板		MHz
	ω_L	ω_H	ω_L	ω_H	ω_L	ω_H	
1	3.32	3.69	3.30	3.67	3.22	3.61	
2	2.81	3.32	2.75	3.30	2.69	3.22	
3	2.30	2.81	2.28	2.75	2.28	2.69	
4	1.72	2.30	1.72	2.28	1.72	2.28	

分别对经过带通滤波后得到的信号进行 EMD 分解,各自得到的第一阶 IMF 分量分别作为原信号的前四阶 IMF 分量,分别记作 IMF1, IMF2, IMF3 和 IMF4,结果如图 9 所示。

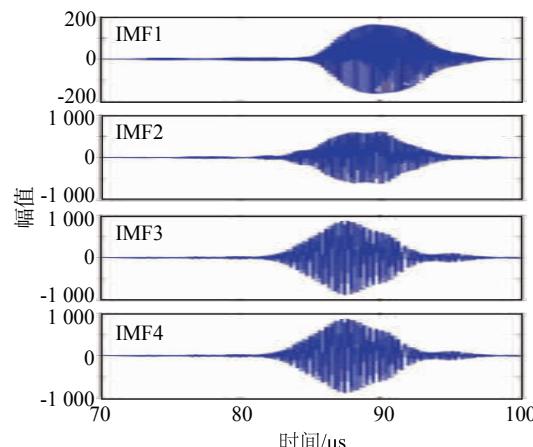


图 9 B1 板无缺陷时检测信号的前四阶 IMF

分别对这四阶 IMF 分量进行 Hilbert 变换,求得各自的瞬时频率、瞬时幅值,从而可以绘出这四阶 IMF 分量的瞬时幅值图、瞬时频率图、Hilbert 边际谱图、时频 Hilbert 谱图,如图 10~13 所示。由图可知,采用带通滤波后得到信号的 IMF 分量的瞬时频率、瞬时幅值与直接对多模式 Lamb 波信号进行 EMD 分解后得到的 IMF 分量的瞬时频率、瞬时幅值相比单纯了许多,而且几乎没有噪声干扰。这样有利于提取参数进行无损检测与评价。

图 13 用灰度图来表示时频 Hilbert 谱图,白色

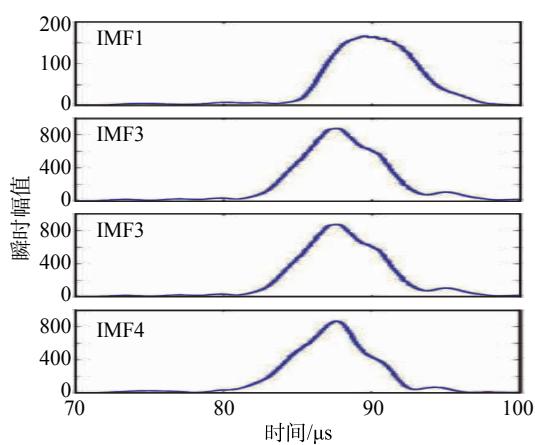


图 10 B1 板无缺陷时检测信号的前四阶 IMF 的瞬时幅值图

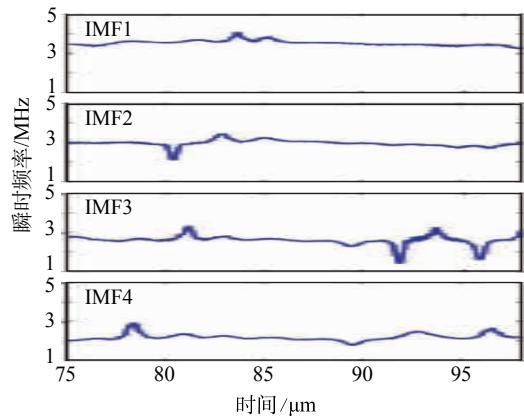


图 11 B1 板无缺陷时检测信号的前四阶 IMF 的瞬时频率图

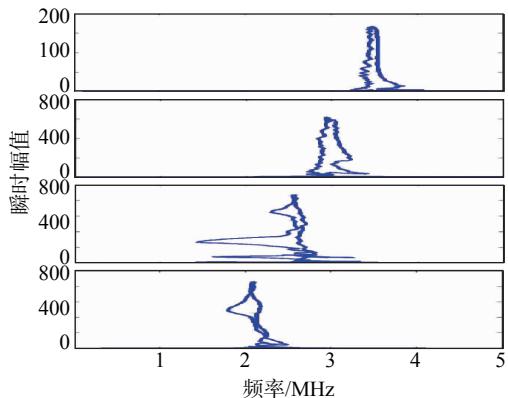
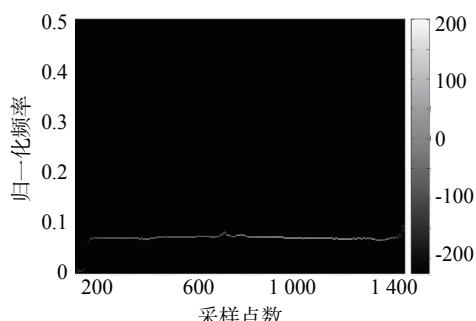


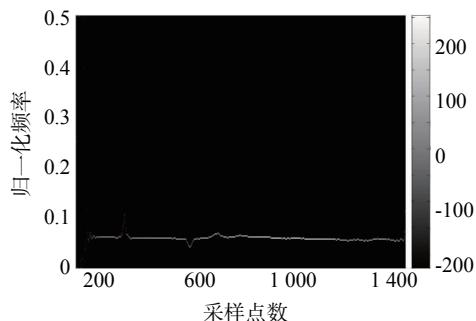
图 12 B1 板无缺陷时检测信号的前四阶 IMF 的 Hilbert 边际谱图

亮度越大的部分说明信号的能量越高。由图可知,信号的时频集聚性较好,基本观察不到图 7 所示的干扰噪声。将图中的纵坐标归一化频率乘以采样频率 50 MHz 即可得到信号的真实频率,横坐标表示的是采样点数,采样点数除以采样频率(试验采样频率为 50 MHz)就得到采样的时间。

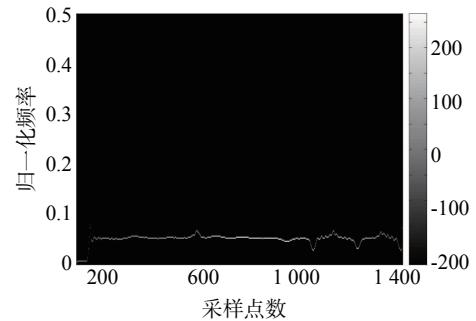
分别对 B1 板中有不同类型通孔缺陷时的检测信号进行以上处理,再按照同样的步骤来对 B2 和



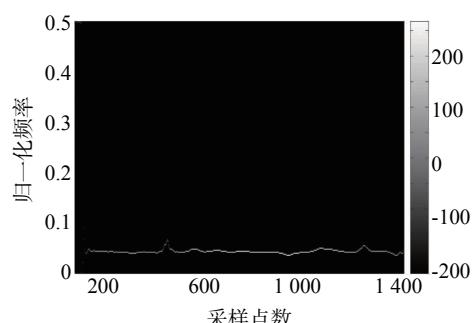
(a) IMF1



(b) IMF2



(c) IMF3



(d) IMF4

图 13 B1 板无缺陷时检测信号的前四阶 IMF 的时频 Hilbert 谱图

B3 板中检测到的无缺陷和有不同类型缺陷时的检测信号进行处理。由于瞬时幅值表示的是信号幅度大小(或能量强弱)在整个时间段上每一时刻的变化情况,瞬时频率表示的是信号频率在整个时间段上

每一时刻的变化情况,所以可以采用它们作为特征参数来表征不同缺陷状况下检测信号的变化情况。

分别提取瞬时幅值图中的峰值和瞬时频率图中的均值作为特征参数。由于瞬时频率在边界附近的误差很大,所以求均值时去掉首尾边界处十分之一的数值。得到 B1 板中有不同直径大小的缺陷通孔时前四阶 IMF 的瞬时幅值的峰值数据,并对这些数据点进行线性回归分析,得到各自的线性回归系数 R^2 ,结果如图 14 所示。可知后三阶 IMF 分量(信号的主要成分)的线性回归系数很高,尤其是 IMF4 和 IMF2。这说明随着通孔缺陷直径的增大,这三阶 IMF 的瞬时幅值的峰值变化基本上是线性递减的。IMF1(信号的次要成分)的线性回归系数较其它三阶 IMF 分量低,说明随着通孔缺陷直径的增大,其瞬时幅值的变化表现出比较大的非线性。

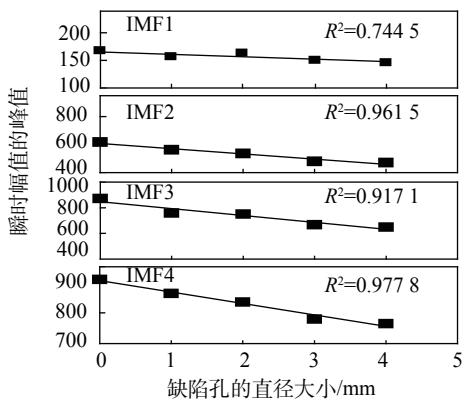


图 14 B1 板中检测信号的前四阶 IMF 的瞬时幅值的峰值的线性回归分析

图 15 是 B1 板中有不同直径大小的缺陷通孔时前四阶 IMF 的瞬时频率均值数据,并对这些数据点进行线性回归分析的结果。由图可知,各阶 IMF 分量的瞬时频率均值数据的线性度都不好,表明在

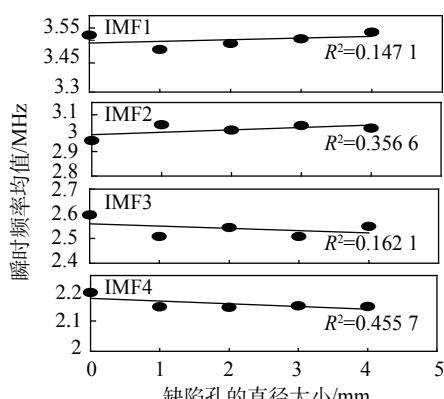


图 15 B1 板中检测信号的前四阶 IMF 的瞬时频率均值的线性回归分析

通孔缺陷的直径变大时,各阶 IMF 分量的瞬时频率均值基本上呈非线性变化,但都在某一频率附近变动。这也说明瞬时频率均值这一特征参数无明显规律,不能用以对试验中的缺陷进行评估分析。

进一步分析可知,对于线性回归系数高的数据系列,可以通过回归直线来对其它未试验的数据点进行预测,且线性回归系数越高,预测的准确度也越高。这样就可以利用线性回归系数高的 IMF 分量,通过有限的试验数据点,由瞬时幅值的峰值来推断未知缺陷孔径的大小。回归直线的变化趋势可用直线的斜率 K 来表示。 K 值有正负,正 K 值表示信号的瞬时幅值的峰值随缺陷通孔直径的变大是增大的,负 K 值表示信号的瞬时幅值的峰值随缺陷通孔直径的变大是减小的。显然 K 值绝对值越大的 IMF 分量,对缺陷孔径的变化越敏感。对于其它类型的缺陷变化情况,同样可以采用这种方法来提取相应的特征参数,以对缺陷进行评估分析。

分别对 B2 板和 B3 板中的检测信号进行以上处理。表 2 是从 B1,B2,B3 板检测信号中分解提取的前四阶 IMF 的瞬时幅值峰值以及瞬时频率均值随缺陷孔径大小变化的线性回归系数(分别记作 R_a^2 和 R_f^2)值,以及各自线性回归直线的斜率(分别记作 K_a 和 K_f)的数值。

表 2 线性回归分析数据

参数	板号	IMF1	IMF2	IMF3	IMF4
R_a^2	B1 板	0.7455	0.9615	0.9171	0.9778
R_a^2	B2 板	0.9614	0.9009	0.9256	0.6918
R_a^2	B3 板	0.7536	0.1277	0.0659	0.5628
K_a	B1 板	-4.7366	-37.571	-53.706	-37.248
K_a	B2 板	-10.624	-35.095	-47.521	-27.21
K_a	B3 板	-10.956	-11.609	-6.2868	-17.899
R_f^2	B1 板	0.1471	0.3566	0.1621	0.4557
R_f^2	B2 板	0.5023	0.1653	0.8589	0.077
R_f^2	B3 板	0.087	0.0954	0.3457	0.3299
K_f	B1 板	0.0068	0.0098	-0.0092	-0.0089
K_f	B2 板	-0.0075	0.0122	-0.0019	0.0046
K_f	B3 板	0.0061	-0.0062	-0.0083	0.0136

从表 2 中可以看出,对于瞬时幅值峰值和瞬时频率均值这两个特征参数,无论是哪一阶 IMF 分量,在同一试验条件下,前者的线性回归系数都要远高于后者,这说明前者的线性度即特征参数随缺陷孔径增大而变化的单调性要明显好于后者。所以试验中应该选用瞬时幅值的峰值作为特征参数。特征

参数选定后,再来考虑特征参数对缺陷孔径变化的敏感性问题,显然这可以用线性回归直线的斜率 K 来判定。即 K 值的绝对值越大,表明特征参数所对应的 IMF 分量对缺陷孔径的变化越敏感。

对于 B1 板(缺陷为通孔模拟缺陷时),IMF4, IMF3, IMF2 的 R_a^2 都很高,相比较而言 IMF1 的 R_a^2 较低,这说明后三阶 IMF(信号中的主要成分)的瞬时幅值的峰值随缺陷孔径变化的线性度比较好,预测准确性也较高,而 IMF1(信号中的次要成分)不适合于这类缺陷的检测。IMF3 的 $|K_a|$ 最大, IMF2 和 IMF4 的 $|K_a|$ 次之, IMF1 的最小,这说明 IMF3 对于此类缺陷孔直径的变化最为敏感。对于这几种 IMF 分量,综合考虑可选用 IMF3 作为最优 IMF 检测分量。对于 B2 板和 B3 板可采用同样的方法来分析得到最优 IMF 检测分量。

4 结论与展望

通过试验可知,直接对多模式 Lamb 波信号进行 EMD 分解来得到信号的瞬时频率和瞬时幅值的方法是不合适的,必须先对信号进行带通滤波后再对得到的信号进行 EMD 分解得到各自的第一阶 IMF 分量,最后对这些 IMF 分量进行 Hilbert 变换才能得到原信号有效的前四阶 IMF 分量的瞬时频率和瞬时幅值以及时频 Hilbert 谱图。分别选取瞬时幅值的峰值和瞬时频率的均值作为检测信号的特征参数进行线性回归分析,发现采用瞬时幅值的峰值作为孔型缺陷检测特征参数比采用瞬时频率的均值要好。同时提出可采用瞬时幅值的峰值回归直线的斜率 K 来标定特征参数对缺陷孔径大小变化的

敏感性,从而可对未知缺陷的大小进行预判。对于狭缝类面状缺陷,由于 Lamb 波通过这些缺陷时会产生波型转换,因此采用 HHT 分析检测信号时特征参数的选取需要进一步深入地研究。

参考文献:

- [1] Worden K, Manson G, Allman D. Experimental validation of a structural health monitoring methodology: Part I. Novelty detection on a laboratory structure[J]. Journal of Sound and Vibration, 2003, 259(2):323.
- [2] Demma A, Cawley P, Lowe M Roosenbrand. The reflection of guided waves from notches in pipes: a guide for interpreting corrosion measurements[J]. NDT&E International, 2004(37):167—180.
- [3] 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, 2005:4—6.
- [4] Huang N E, Shen Z, Long S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for non-linear and no—stationary time series analysis[J]. Proc R Soc Lond A, 1998(454):903—995.
- [5] 程军圣,于德介,杨宇. 基于 EMD 和奇异值分解技术的滚动轴承故障判断方法[J]. 数据采集与处理, 2004, 19(2):204—209.
- [6] Wei Huang, Zheng Shen, Norden E Huang. Engineering analysis of biological variables: an example of blood pressure over 1 day[J]. Proc Natl Acad Sci U S A, 1998, 95(9):4816—4821.
- [7] Yang J N, Lei Y. System identification of linear structures using Hilbert transform and empirical mode decomposition[C]. Proceedings of the 18th International Modal Analysis Conference. San Antonio, TX, USA, 2000:213—219.

第二届国际声发射大会暨展览会通知(一号通知)

由国际声发射学会(ISAE)主办,中国机械工程学会无损检测分会以及中国特种设备检测研究院承办的“第二届国际声发射大会暨展览会”将于 2013 年 10 月 29 日~11 月 02 日在上海华夏宾馆召开,届时还将举办声发射展示会。地址:上海市徐汇区漕宝路 38 号(近沪闵路)。在展示与声发射相关技术与产品的同时,会议还将举办一系列高层次、高水平的专题报告和交流活动,有利于对赞助商和厂商的宣传和交流。

参会对象:国内外相关无损检测科研单位、高科技智能管理软件和设施企业单位、设备供应商、公司技术骨干、各相关专业人士。

筹备会联系方式:

(1) 联系单位:中国无损检测学会秘书处

联系人:季敬元,王莹寰;地址:上海市虹口区辉河路 100 号 3 号楼 6 楼;电话:021-65550277;传真:021-65550277;邮编:200437;电子邮件:chsnndt2008@163.com。

(2) 联系单位:中国特种设备检测研究院

联系人:吴占稳;地址:北京市朝阳区和平街西苑 2 号楼;电话:010-59068313;传真:010-59068023;邮编:100013;电子邮件:wcae2013@163.com。