

文章编号:1671-6833(2010)01-0001-05

基于第二代小波变换的结构损伤检测研究进展

孙增寿, 范科举, 张 波

(郑州大学 土木工程学院, 河南 郑州 450001)

摘 要: 小波变换可以对非稳态信号进行详细的时频分析, 已广泛应用于机械、航空航天、土木等工程领域中, 特别是在结构损伤识别和健康监测中的应用尤为突出. 在第一代小波变换基础上提出的第二代小波变换, 具有算法简单、运算速度快、能够准确匹配信号的局部特征等优点. 笔者综合论述了第二代小波变换理论及其在结构损伤检测中的应用, 并对其未来发展进行展望.

关键词: 第二代小波变换; 损伤识别; 健康监测

中图分类号: P315.975 **文献标识码:** A

0 引言

工程结构在使用过程中, 受环境腐蚀、运行荷载、疲劳及突发撞击等因素影响, 往往会使结构本身产生或大或小的损伤, 人们总是期望对结构损伤的发生与发展做到防微杜渐, 防患于未然. 因此, 如果能及早地发现这些损伤并进行处理, 不仅可以避免重大灾难性事故的发生, 而且可以挽回巨大的经济损失. 近年来, 不同领域的相关学者对此进行了大量研究, 提出了一些实用有效的方法. 其中, 利用小波相关理论来分析和评价结构特性是众多方法中较为理想的方法之一, 它利用了小波变换中优越的时-频局部化特性检测结构响应信号中的损伤信息^[1-2].

Daubechies 在第一代小波变换基础上提出了第二代小波变换, 第二代小波变换秉承经典小波变换的时-频局部化特性, 具有对信号的自适应性, 可以对非稳态信号进行多分辨率分析的优点. 而且它不依赖于傅立叶变换, 可通过设计预测系数和提升系数, 得到具有某种特性的小波基函数, 使小波函数始终能够匹配信号的局部特征^[3]. 可根据工程应用的需要, 构造出适用于所分析信号的小波函数; 可以增加原来小波的消失矩, 使小波更加光滑; 也可以使原有小波具有更加理想的形状, 从而构造出更加符合待分析信号特性的小波滤波器组. 这为结构损伤检测提供了一个新的分

析手段, 使得针对不同类型的损伤特征构造相应的小波基函数成为现实.

1 第二代小波理论

小波分析方法是继傅立叶变换后的又一新的数学分析方法和信号处理工具. 1981年, 法国物理学家 Morlet 在分析地震数据时首先提出了小波分析的概念, 此后小波分析逐步引起不同领域相关学者的高度重视, 并致力于小波的损伤识别研究. 随着时间推移, 第一代小波变换理论逐步成熟, 并在工程实际中被推广应用, 但在完善第一代小波的过程中, 发现它存在下列缺点: 其一, 第一代小波变换过程中, 不同尺度上逼近信号特性存在差异, 采用一个母小波伸缩和平移而产生的小波函数难以准确匹配各个尺度逼近信号的局部特征; 其二, 第一代小波变换产生的结果通常为浮点数, 由于计算机的字长有限, 因此变换前后会引起失真, 无法实现无损压缩; 其三, 第一代小波变换依赖于傅立叶变换, 有大量的卷积运算, 运算速度相对较慢; 其四, 硬件实现复杂, 内存占用大. 1994年 Daubechies^[4]提出了基于时域运算的信号分析方法——第二代小波变换, 它不依赖于傅立叶变换; 易于实现快速算法和逆变换; 可实现非线性小波变换; 特别是能够针对不同类型的故障特征构造相应的小波基函数, 准确匹配信号的局部特征.

提升模式是构造第二代小波的常用方法^[5],

收稿日期: 2009-09-30; 修订日期: 2009-10-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50878198)

作者简介: 孙增寿(1963-), 男, 郑州大学教授, 博士, 主要从事结构损伤检测和健康监测研究, E-mail: zengshou@

zzu.edu.cn.

基于提升模式的第二代小波变换的分解过程由剖分、预测和更新三部分构成。

剖分:剖分的目的是将信号 $s_0[n]$ 分割成相互关联的两部分,即 $even_1[n]$ 和 $odd_1[n]$,且 $even_1$ 和 odd_1 的相关性愈强,剖分的效果愈好。剖分通常采用惰性的剖分方法,即

$$\begin{cases} even_1(n) = s_0(2n) \\ odd_1(n) = s_0(2n+1) \end{cases} \quad (1)$$

预测:预测就是用 $even_1(n)$ 预测 $odd_1(n)$,预测误差为

$$d_1[n] = odd_1[n] - P(even_1[n]) \quad (2)$$

式中: $P(\cdot)$ 表示预测算子。

更新:更新的目的是用 $d_1[n]$ 修改 $even_1[n]$,以使得修改后的 $even_1[n]$ (记为 $s_1[n]$) 维持原始数据集 s_0 中的某些整体性质,如均值等。并且,只

包含信号 $s_0[n]$ 的低频成分,即

$$s_1[n] = even_1[n] + U(d_1[n]) \quad (3)$$

这里, $U(\cdot)$ 表示更新算子。但要在空间域完成这个过程,即要使 $s_1[n]$ 的包络线成为信号 $s_0[n]$ 的一条平滑拟合曲线。数学上,就是要使 $s_1[n]$ 与 $s_0[n]$ 具有相同的低阶消失矩。

至此,提升方法实现了信号在一个尺度上的小波分解。细节信号 $d_1[n]$ 即为尺度 1 上的小波系数,反映了原始信号中的高频成分。而逼近信号 $s_1[n]$ 为尺度 1 上的尺度系数,反映了原始信号中的低频部分。因此可以构造具有某种特性的小波函数和尺度函数,对信号进行多次分解,可将输入信号分解到任意尺度。提升方法在 j 尺度上的分解与重构如图 1 所示。

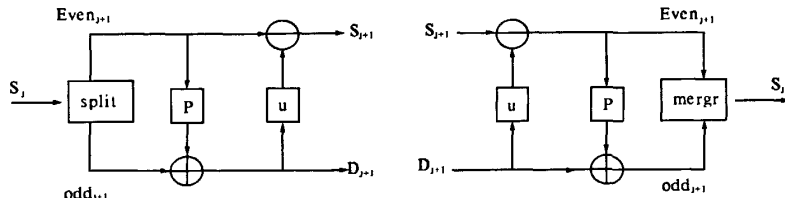


图 1 提升方法分解与重构

Fig. 1 Decomposition and reconstruction of the lifting scheme

2 第二代小波变换在结构损伤检测中的应用

从第一代小波变换到第二代小波变换,小波理论已广泛应用于机械、电子信息、医学、航空航天和土木工程等领域,特别是在故障诊断和结构损伤检测方面。就结构损伤检测而言,我们期望更早、更及时地发现结构的局部损伤,以避免局部损伤长期积累而带来的重大灾难性事故。损伤检测通常包括以下 4 个层面^[6]:①损伤是否存在;②损伤位置判定;③损伤严重程度;④结构安全性预测。

2.1 结构损伤判定

结构损伤判定就是通过一定方式来判断结构是否存在损伤,可以直接通过结构响应信号进行判别,也可以通过反映结构整体特性的特征参数(如频率、振型、曲率和挠度等)的变化进行识别。

2.1.1 直接基于第二代小波变换系数的损伤判定

当旋转机械出现故障时,其构件的阻尼、刚度、弹性力等都会发生很大变化,呈现非线性,因

此,振动信号也具有非平稳性。段晨东^[3]等通过研究预测系数和提升系数与低通和高通滤波器系数之间的关系,根据信号特征构造了基于插值细分方法的双正交小波,利用第二代小波对称、紧支撑和冲击震荡衰减的特点,有效提取出具有冲击响应特性的故障特征。何正嘉^[7]等也采用插值细分方法构造双正交小波,其尺度函数和小波函数为紧支冲击型,与冲击故障信号特征相似,可通过瞬态冲击信号的识别和检测达到结构损伤识别的目的,并成功应用于烟气轮机早期碰磨故障的非线性识别和诊断。

关于上述基于提升小波变换系数的损伤判定方法,可通过下列谐波函数进行阐述:

$$f(t) = \begin{cases} \sin(2\pi t) + \sin(4\pi t) + \sin(10\pi t) & (0 \leq t \leq 10s) \\ \sin(1.998\pi t) + \sin(4\pi t) + \sin(10\pi t) & (10 < t < 20s) \end{cases} \quad (3)$$

此谐波函数如图 2 所示,在前 10 s 中包含 1 Hz、2 Hz 和 5 Hz 3 个频率,而在后 10 s 中仅 1 Hz 的频率改变为 0.999 Hz。从图 2 可以看出,1 Hz 频率的微小变化在谐波函数的时程曲线上是很难分辨的;为此,对谐波函数进行第二代小波变换,图 3 为经过第二代小波变换后重构得到的高频系

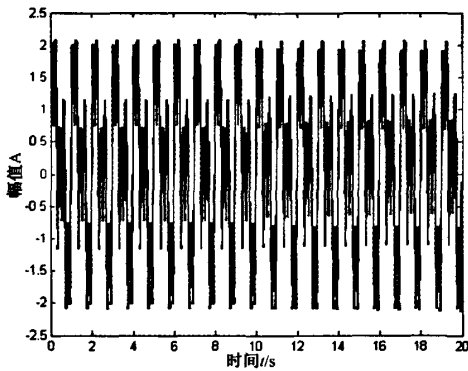


图2 谐波函数图形

Fig.2 Harmonic function

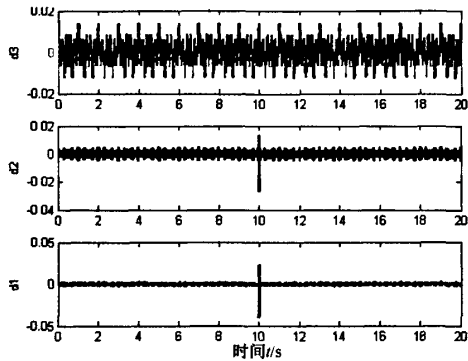


图3 第二代小波变换后重构的高频系数

Fig.3 Reconstructed high frequency coefficients after the second generation wavelet

(注:d1为重构得到的第一层高频系数;d2为重构得到的第二层高频系数;d3为重构得到的第三层高频系数)

数,可以明显看出谐波函数在10s处有一突变。

在实际损伤检测中,噪声对检测水平具有较大影响。姜洪开^[8]等针对强噪声背景下齿轮箱故障特征的提取问题,设计了一种提取信号时域特征的自适应冗余第二代小波,它不需要剖分运算,利用冗余预测器和更新器直接对每层逼近信号进行预测和更新运算,较好地保留信号的时域特征,较为理想地提取出齿轮箱发生磨损故障时的时域调制波形和周期性冲击脉冲。

2.1.2 第二代小波变换与其它指标结合的损伤判定

文献[9-10]根据超高压电网故障电流的变化特点,利用db4提升小波和神经网络构造新的小波神经网络故障选线和选相模型,数值仿真和华东电网实际故障滤波数据的测试显示,模型具有很高的故障识别率和收敛速度,提高了故障

诊断系统的识别能力和计算速度。

冯彩红^[11]等则将第二代小波变换和矢谱技术相结合,提出全息第二代小波变换技术,它融合了转子同源两通道信息,能够唯一地确定转子振动的频谱结构和强度,比较准确地捕获机械故障特征,并且能够得到运动方向和相位角等诊断信息。

普通提升小波只能依据信号特征来设计预测滤波器,而不能设计更新滤波器。文献[12]以提升小波为基础,根据信号分解后的熵来选择预测滤波器系数和更新滤波器系数,将自适应提升方法应用于往复压缩机的气阀故障检测中,不仅有效地降低了噪声影响,而且有效地锁定信号的局部特征,为气阀故障的特征提取与诊断提供了新的有效方法。自适应提升步骤如下:

(1)分解原始信号为细节信号和逼近信号,迭代选择M阶预测滤波器,使预测后细节信号的熵最小。熵计算公式如下:

$$H(w) = \sum_i |w_i|^2 \log_2 |w_i|^2 \quad (4)$$

式中: w_i 为预测后的细节信号。

(2)使用第一步选择的预测滤波器系数,迭代选择N阶更新滤波器,使更新后的预测信号的熵最大,熵值仍通过式(4)计算。

2.2 结构损伤位置识别

结构损伤位置识别主要通过识别结构局部是否存在损伤来实现,关键是从结构响应信号中提取对损伤敏感的结构损伤指标^[6]。目前基于第二代小波分析的结构损伤指标主要有脉冲响应参数、小波系数、小波熵和Lipschitz指数等。文献[13-14]应用第二代小波变换预测器和更新器相互独立的特点,以预测方差最小为原则,确定每个变换样本的最佳预测器,使预测器能够适应信号的局部特征,达到损伤位置识别的目的。预测器的选择过程为:

设计3个不同的候选预测器:

$$N=1: d(k) = x_0(k) - c(k) \quad (5)$$

$$N=3: d(k) = x_0(k) - [-c(k-1)/8 + c(k) + c(k+1)/8] \quad (6)$$

$$N=5: d(k) = x_0(k) - \left\{ \frac{3}{128} [c(k-2) - c(k+2)] - c(k+2) - \frac{11}{64} [c(k-1) - c(k+1)] + c(k) \right\} \quad (7)$$

式中: N 为预测所用相邻 $c(k)$ 的个数。预测时,分别用上述3个预测器计算 $d(k)$,取 $[d(k)]^2$ 最小

的作为最佳预测器.这一方法克服了传统小波去噪中降噪信号丢失部分细节信息的缺点,不仅有效地去除故障诊断振动信号的噪声,而且能够保留信号的局部信息,准确定位结构的损伤位置.

周瑞^[15]等建立了改进的冗余提升小波变换算法,不进行剖分,直接利用构造的算子进行预测和更新,各层分量和原始信号的数据长度相同,保留了更多的时域信息,能够较理想地提取故障特征,锁定信号局部突变的特性,弥补了冗余提升小波变换算法可能导致分析结果误差传播的不足.

LI Zhen^[16]等将基于冲击脉冲法和改进冗余方案结合起来对滚动轴承实施在线健康检测.在不同环境状况下,更好地显示了实际轴承振动信号,为结构损伤位置判定提供了又一好的方法. CAO Hong - rui^[17]等则把提升模式与马氏距离(MD)相结合对端铣刀具进行破损检测.

2.3 结构损伤检测中的信号降噪

在结构损伤检测和设备故障诊断过程中,通过数据采集装置所得到的振动信号往往包含有各种干扰和噪声,只有有效地滤除干扰和噪声,提高信噪比,提取淹没在噪声中的有用信息,才能获得正确的分析结果,准确识别损伤位置和损伤时间.利用第二代小波变换进行信号降噪已经取得了一些令人满意的研究和应用成果,主要方法有阈值法、模板大值法和平移不变量法等.段晨东^[3]等提出的一维信号小波降噪分三步进行:(1)对信号进行多尺度小波分解;(2)对分解得到的细节信号(高频部分)进行阈值处理;(3)将逼近信号和阈值处理后的细节信号进行小波重构,得到降噪后的有用信号.但不同类型小波的降噪效果与对偶消失矩和小波消失矩的数目有关,而第二代小波的自适应性为选择合适的降噪小波提供了保障,在滚动轴承和齿轮箱振动信号的降噪处理中取得满意的效果.陈香朋^[18]等采用第二代小波变换对地震信号进行去噪,也提出了类似的三步:小波分解、小波系数缩减(切除噪声部分)和缩减小波系数的合成,但用的是软阈值法,其方程为:

$$d_{\tau} = \text{sign}(d(n))(|d(n) - \tau|)$$

$$= \begin{cases} 0, & |x| \leq \tau \\ d(n) - \tau, & x > \tau \\ d(n) + \tau, & x < -\tau \end{cases} \quad (8)$$

$$\tau = \sigma \sqrt{2 \ln N}$$

$$\sigma = 1/0.6745 \text{ Med}(|d|)$$

式中: τ 是计算域值; σ 是噪声的标准偏差估计; N 表示细节信号的采样数; $\text{Med}(\cdot)$ 是中值函数.具

体去噪处理时,首先对地震记录做第二代小波变换,对每一层细节信号按上述的软阈值法进行处理,削减小波系数中的噪声部分,从而实现信号去噪.

Ergun Ercelebi^[19]以心电图信号为研究对象,通过信噪比和峰值误差对不同降噪方法的效果进行比较,认为基于提升模式的离散小波变换有着较好的降噪效果.

3 结论

结构损伤检测的核心问题是损伤识别与评价.近年来,许多学者致力于基于第二代小波的损伤识别方法研究,一些成果已经成功应用于机械设备和航空航天设备的故障诊断中,但在土木工程结构损伤检测中的研究和应用才刚刚起步.从文中所述不难看出,第二代小波变换具有优越的时频局部化特性和对信号的自适应性,可以用于需要海量数据处理的大型结构在线健康检测系统,提高运算速度,降低存储量.所以,如何将第二代小波应用于土木工程结构损伤检测已成为一个迫切需要解决的重要课题.另外,第二代小波变换在结构响应信号去噪方面的良好表现,将有助于提高结构损伤识别的精度和准确度.同时损伤程度判定依然需要进一步的研究,第二代小波和信息熵、人工神经网络等方法结合起来建立对损伤敏感、抗噪性能强的结构损伤指标,可能是解决此问题的一个工具,同时也可以识别损伤位置.今后的研究应注重交叉学科之间的相互借鉴,汲取其它学科中用的精华部分,以促进本学科的发展.

结构损伤识别包括损伤的检测、定位和程度判定,一个完整的损伤识别方法必须能够对结构的全寿命进行研究和预测,这可能涉及到结构疲劳、断裂、概率统计等方面的知识,是今后发展的主要方向之一.

参考文献:

- [1] SURACE C, RUOTOLO R. Crack detection of a beam using the wavelet transform. In: Proceedings the 12th International Modal Analysis Conf[C]. Honolulu: Hawaii, 1994. 1141 - 1147.
- [2] SUN Z, CHANG C C. Structural damage assessment based on wavelet packet transform[J]. J Structure Engineering, 2002, 128(10): 1354 - 1361.
- [3] 段晨东,李凌均,何正嘉. 第二代小波变换在旋转机械故障诊断中的应用[J]. 机械科学与技术, 2004, 23(2): 224 - 225.

- [4] DAUBECHIES W S. Factoring wavelet transform into lifting steps[J]. Math Anal Appl. 1998,4(3):247-269.
- [5] 飞思科技产品研发中心. 小波分析理论与 MATLAB-BR2007 实现[M]. 北京:电子工业出版社,2007:375-381.
- [6] 孙增寿,韩建刚,任伟新. 基于小波分析的结构损伤检测研究进展[J]. 地震工程与工程振动,2005,25(2):93-99.
- [7] 何正嘉,陈雪峰,段晨东,等. 早期故障预示的若干方法及应用[J]. 振动工程学报,2004,17(5):309-312.
- [8] 姜洪开,何正嘉,段晨东,等. 自适应冗余第二代小波设计及齿轮箱故障特征提取[J]. 西安交通大学学报,2005,39(7):715-718.
- [9] 王忠民,乐全明,杨光亮,等. 基于提升小波和神经网络的超高压电网故障类型识别[J]. 华东电力,2006,34(2):29-33.
- [10] 郑华珍,乐全明,郁惟镛,等. 基于小波理论的超高压电网故障时刻提取[J]. 电网技术,2005,29(19):33-38.
- [11] 冯彩红,韩捷,李凌均. 全信息小波包分析及其在旋转机械故障中的应用[J]. 机械强度,2006,28(5):639-642.
- [12] 马波,高金吉,江志农. 自适应提升小波在往复机械故障检测中的应用[J]. 流体机械,2007,35(4):23-27.
- [13] 段晨东,何正嘉,姜洪开. 非线性小波变换在故障特征提取中的应用[J]. 振动工程学报,2005,18(1):129-132.
- [14] 唐贵基,王誉蓉,胡爱军,等. 基于第二代小波变换的旋转机械振动信号去噪[J]. 噪声与振动控制,2007,(1):51-53.
- [15] 周瑞,鲍文,左国华,等. 基于改进冗余提升方案的汽轮机组振动故障特征提取[J]. 中国电机工程学报,2008,28(18):88-93.
- [16] LI Z, HE Z J, ZI Y Y, et al. Bearing condition monitoring based on shock pulse method and improved redundant lifting scheme[J]. Mathematics and computers in simulation,2008,79:319-338.
- [17] CAO H R, CHEN X F, ZI Y Y, et al. End milling tool breakage detection using lifting scheme and Mahalanobis distance[J]. Machine Tools & Manufacture,2008,48(2):141-80.
- [18] 陈香朋,曹思远. 第二代小波变换及其在地震信号去噪中的应用[J]. 石油物探,2004,43(6):547-550.
- [19] ERGUN E. Electrocardiogram signals de-noising using lifting-based discrete wavelet transform[J]. Computers in Biology and Medicine,2004,34:479-493.

New Development of Research on the Second Wavelet Transform Based Structural Damage Detection

SUN Zeng-shou, FAN Ke-ju, ZHANG Bo

(School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: Wavelet transform can conduct a detailed time-frequency analysis to non-steady-state signal and has been widely used in mechanical, aeronautical, civil engineering and so on. It is particularly conspicuous that wavelet analysis is applied in structural health monitoring and damage identification. The second generation wavelet transform had been raised on the basis of the first generation wavelet transform. It has much more advantages. Its algorithm is simple and the calculation is fast. It is able to suit fairly the partial feature of the signal and so on. This paper reviewed and summed up the second generation wavelet transform theory and its application in structural damage identification. And its future development has been pointed out.

Key words: second generation wavelet transform; damage identification; health monitoring