

基于 EMD 技术的弹性波信号降噪技术

王闰臣¹, 李科², 吴佳晔³

(1. 四川交通职业技术学院, 成都 611130; 2. 四川升拓检测有限责任公司, 四川 自贡 643000;

3. 四川理工学院建筑工程学院, 四川 自贡 643000)

摘要:弹性波无损检测技术由于其优点,应用范围日益广泛。在成桥检测中,由于激振、接收条件的限制,使得弹性波信号的信噪比大幅降低,如何准确的判定初始信号成为重要的课题。另一方面,经验模态分解(EMD)算法在处理非周期、非平稳信号中以其优越性而得到广泛关注。因此,采用改善迭代停止准则以及引入智能分析极值点等方法,对传统 EMD 分解方法的弊端进行了改进。通过实际采样验证了改进后的 EMD 算法对弹性波检测信号的处理能力。

关键词:EMD 分解;弹性波检测信号;非线性非平稳信号

中图分类号:TU112

文献标志码:A

引言

弹性波检测技术以其高灵敏度的优势在现代检测技术中占有越来越重要的地位。其中检测信号的降噪处理对检测结果的准确性起着非常重要的作用。检测的信号都是以非周期非平稳信号为主,传统的信号处理方法如傅里叶变换、频谱分析等面对此类信号往往显得力不从心。而 EMD 算法以其巧妙的分解方法能够将非周期、非平稳的信号分解为若干个满足一定规则的信号,从而可以对这种分解信号进行传统信号的处理而达到降噪的目的,最后将处理后的各分量叠加就可得到降噪后的信号。

EMD 算法本身存在一定的不足,为了克服这些不足使其更加满足弹性波检测信号的去噪,本文在原有的基础上对 EMD 算法进行了改进。

1 EMD 算法

1.1 EMD 算法简介

1998 年 Huang N E 和 Wu zhaohua^[1-2] 等人首次提出

了 EMD 算法,此算法对非线性、非平稳信号序列的分析能起到非常好的效果。传统的信号分解方法如小波分解、傅立叶分解等都需要预先设定分解基本数,但 EMD 算法对信号的分解并不需要设定基函数,这与传统信号分解方法有本质的区别,它是根据自身的时间尺度特征。因此,EMD 方法作为一种新的信号处理方法在许多领域都得到了广泛的应用^[3-6]。

1.2 EMD 分解原理

EMD(经验模态分解)降噪技术的重点是经验模态分解即将信号分解为一组满足一定条件的 IMF 分量^[7-9],再根据情况对每一个 IMF 进行降噪处理。这里 IMF 必须满足如下两个性质:

(1) 信号的极值点数目和过零点数目相等或最多相差一个。

(2) 由局部极大值构成的上包络线和局部极小值构成的下包络线的均值趋近于零。

设 $S_{(t)}$ 为原始信号,且极大值与极小值的个数之和大于零点数。首先找出 $S_{(t)}$ 中的极大值与极小值点再用插值函数求出上下包络线,分别记为 $m_{u(t)}$ 、 $m_{d(t)}$,再求出

收稿日期:2014-10-28

基金项目:桥梁无损检测与工程计算四川省高校重点实验室项目(2013QZY02)

作者简介:王闰臣(1981-),女,江苏东海人,硕士生,主要从事公路工程检测方面的研究,(E-mail)313263891@qq.com

上下包络线的均值,记为 $m_{1(t)}$,

$$m_{1(t)} = \frac{m_{u(t)} + m_{d(t)}}{2} \tag{1}$$

然后将 $m_{1(t)}$ 从 $S_{(t)}$ 中减掉,得到新数列 $c_{1(t)}$,

$$c_{1(t)} = s_{(t)} - m_{1(t)} \tag{2}$$

再用 $c_{1(t)}$ 替换式(2)的 $S_{(t)}$ 重复上述过程,直到 $m_{1(t)}$ 趋近于零,得到数列 $x_{1(t)}, x_{1(t)}$ 即为第一阶 IMF 分量,也是原始信号 $S_{(t)}$ 的高频部分。再用 $S_{(t)}$ 减去此高频分量得到去除第一阶 IMF 分量的序列 $S_{1(t)}$,

$$s_{1(t)} = s_{(t)} - x_{1(t)} \tag{3}$$

将 $S_{1(t)}$ 替换 $S_{(t)}$ 重复上述过程 n 次得到 n 阶 IMF 分量和一个不可再分解或者满足一定准则的剩余量即为 $r_{(t)}$,原始信号即可表示为:

$$s_{(t)} = \sum_{i=1}^n x_{i(t)} + r_{(t)} \tag{4}$$

1.3 EMD 降噪处理流程

EMD 降噪处理的过程如图 1 所示。

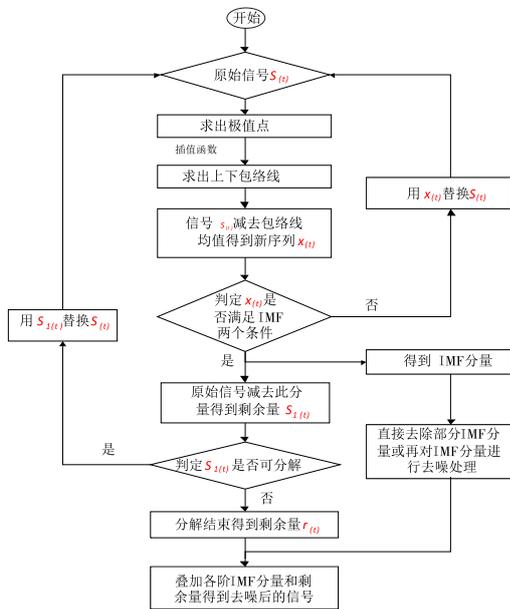


图 1 EMD 降噪过程

2 EMD 算法在弹性波检测中的应用

2.1 弹性波及应用

弹性波可以直接反映混凝土结构和材料的力学特性、几何条件和边界条件,具有作为土木工程无损检测得天独厚的条件,从而得到了广泛应用和飞速发展。

弹性波在介质中的传播随传播距离的增加而衰减,而这种传播后的波形能反应出介质的特性。其中如何得到高质量的检测信号显得尤为重要。

采用弹性波对四川交通职业技术学院内一 25 m 预

制梁进行了检测,并分别采用透过法和表面 P 波进行了测试,测距为 25 m(图 2)。



图 2 预制梁状况及测点

在桥梁整体弹性模量的测试中,透过法在端部激振、接收信号的质量是最好(图 3),然而,对于在役桥梁,由于测试条件限制,只能在侧壁进行测试波速(表面传播法),但是表面传播法的测试信号的信噪比非常低,其信号质量远低于透过法(图 4)。

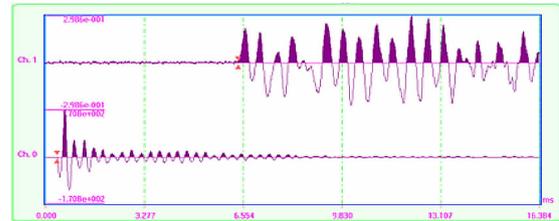


图 3 法测试波形

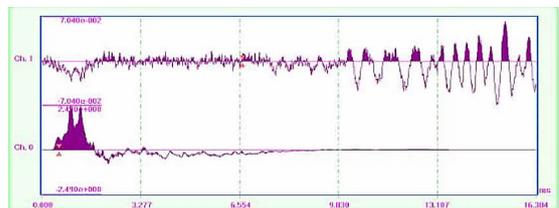


图 4 表面传播法测试波形

由图 4 可以看出 CH. 1 信号的杂波很多,信噪比较低且信号本身为非线性、非平稳信号,采用传统的平滑滤波无法分辨出与激振信号同相的首波信号(图 5)。

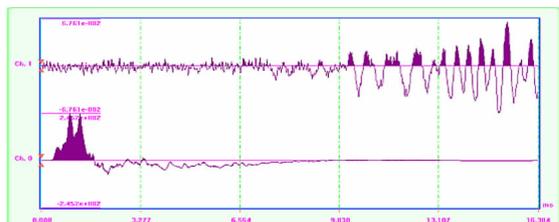


图 5 平滑滤波去噪法波形

2.2 EMD 降噪处理

采用 EMD 对侧壁激振的信号进行降噪处理,同时对两种检测方法得到的弹性模量进行比较,以验证 EMD 降噪的可靠性。算法实现过程中的部分设置:

(1)极值点选取:从序列中逐个找出极大值和极小值。

(2)停止准则^[10-11]:停止迭代必须满足 2 个必备条件:

①极值点数和过零点数最多相差 1 个;

②上包络和下包络的均值必须近似等于或者满足某种准则。

引进模幅值 $a_{(t)} = (m_{u(t)} - m_{d(t)})/2$ 和估计函数 $o_{(t)} = |m_{1(t)}/a_{(t)}|$, 为了让筛选迭代停止,当满足 $o_{(t)} < \theta_1$ 在整个段对于规定的部分 $(1 - \alpha)$, 当 $o_{(t)} < \theta_2$ 对于剩余的部分。一般设定 $\alpha \approx 0.05$, $\theta_1 \approx 0.05$, $\theta_2 \approx 0.5$ 这 3 个插值函数(三次样条插值^[12])。

图 5 为 EMD 去噪后的信号,去噪后的波形比较平滑,对信号的保真效果也比较理想。但图 6 的中数值点和毛刺都比较多,因此只能分解出前三阶 IMF 分量,导致信号中仍含有部分噪声。

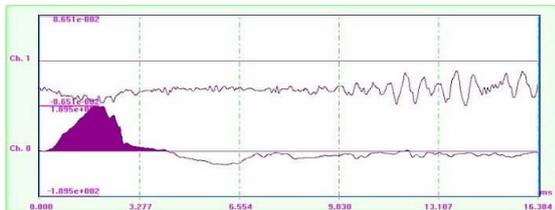


图 6 EMD 降噪结果

2.3 EMD 算法实现过程中的二次改进

采用 EMD 算法实现的参数设置会存在一些问题。首先,当数据比较大时所需迭代次数会增加导致无法完成迭代。其次,当信号中噪声分布不均匀时,如果逐个找出极值点进行插值会造成部分区域还存在比较多的杂波而部分区域却已过迭代。因此,需再次对 EMD 算法做出了三点改进。

首先,改进极值点的选取方法,使其具有智能选取极值点的能力。不再传统的逐个选出极值点,而是跳跃式选出极值点。虽然会损失一定的保真度,但只要合理的设置跳跃点数,其结果还是非常理想。

其次,改进迭代停止准则。在原有的基础上通过实际验证的方法修改了其中的部分参数,使迭代次数更加的合理。

最后,为了杜绝因过迭代而造成的卡机情况,设定了合理的迭代最高次数。

图 6 为改进后的 EMD 算法对弹性波检测信号降噪

的实现。处理过程中设置跳跃点数为 5,去除前五阶 IMF 分量。

图 7 中,三角形标注位置即为弹性波的到达时刻(激振、接收信号同相)。可以看出,改进后的 EMD 算法在弹性波检测信号中的降噪能力得到了很大的提升。

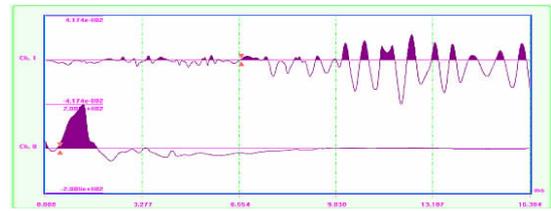


图 7 改进后 EMD 去噪结果

对于检测结果,根据单面传播法得到的 2 维弹性波和透过法得到的 3 维弹性波的波速,可以分别推求混凝土结构的弹性模量。从表 1 结果可以看出,两者非常吻合。

2 维:

$$V_{p2} = \sqrt{\frac{E_d}{\rho(1 - \mu^2)}}$$

3 维:

$$V_{p3} = \sqrt{\frac{E_d}{\rho} \cdot \frac{(1 - \mu)}{(1 + \mu)(1 - 2\mu)}}$$

式中, E_d 为混凝土的弹性模量, ρ 为混凝土密度, μ 为泊松比。

表 1 结构弹性模量的比较

方法	波速/(km/s)	E_d /GPa
透过法	4.172	30.26
单面传播法	4.060	30.55

3 结束语

本文对经验模态分解算法进行了研究、改进,并将其应用于弹性波检测信号的降噪。结果表明:基于经验模态分解法的降噪方法比传统降噪方法的降噪能力更好,普通的经验模态分解在实际的实现过程中存在一定弊端,容易造成过迭代,或者处理不完整的情况。通过改进算法中极值点的选取、迭代停止准则以及迭代次数的限制后,其数据的处理能力以及处理的数据量得到很大提高,同时对噪声的压制效果也非常好,解决了过迭代或者处理不充分的情况。

参考文献:

- [1] Huang N E, Shen Z, Long S R, et al. The empirical mode decomposition method and the Hilbert spectrum for non-

- stationary time series analysis[J]. Proc. Roy. Soc. London,1998,454A:903-995.
- [2] Zhao huawu, Norden E H. Ensemble empirical mode decomposition:a noise assisted data analysis method[J]. Advances in Adaptive Data Analysis,2009(1):1-41.
- [3] 陈冬娣.基于小波变换与经验模态分解的电机转子振动信号处理方法的研究[D].南京:南京师范大学,2013.
- [4] 施巍巍.经验模态分解法及其在语音识别算法中的研究[D].杭州:浙江理工大学,2014.
- [5] 王贺.基于集合经验模态分解和小波神经网络的短期风功率组合预测[J].电工技术学报,2013,28(9):137-144.
- [6] 陈伟,王尚旭.基于经验模态分解的属性优化方法[J].石油地球物理勘探,2013,48(1):121-127.
- [7] 刘霖雯,刘超.EMD新算法及其应用[J].系统仿真学报,2007,19(2):446-447.
- [8] 岳相臣.经验模态分解算法应用研究[D].西安:西安电子科技大学,2013.
- [9] 盖广洪.经验模态分解的一种改进算法[J].西安交通大学学报,2004,38(11):1199-1202.
- [10] 黄俊,何永勇.经验模态分解停止准则及在故障诊断中的应用[J].机械强度,2011,33(5):655-659.
- [11] 任玥,傅攀.改进的经验模态分解方法在滚动轴承故障诊断中的应用[J].理论与探索,2006(6):33-37.
- [12] 刘慧婷.EMD方法的研究与应用[D].合肥:安徽大学,2004.
- [6] 陈伟,王尚旭.基于经验模态分解的属性优化方法

Elastic Wave Signal Denoising Technology Based on EMD Technology

WANG Guichen¹, LI Ke², WU Jiaye³

(1. Sichuan Vocational and Technical College of Communications, Chendu 611130, China; 2. Sichuan Central Inspection Technology Co. Ltd. Zigong 643000, China; 3. School of Architecture Engineering, Sichuan University of Science & Engineering, Zigong 643000, China)

Abstract: Due to its advantages, Elastic wave nondestructive testing technique has been widely used. In the bridge monitoring, because of the limit of excitation and receiving condition, the signal to noise ratio of elastic wave signal is greatly reduced, how to accurately determine the initial signal has become an important topic. On the other hand, the empirical mode decomposition(EMD) algorithm has been widespread concerned because of its superior ability in dealing with non periodic and nonstationary signal. Therefore, the disadvantages of traditional EMD decomposition method are improved by improving the iterative stop criterion and introducing the intelligent analysis of extreme value point. Through the actual sampling, the processing ability for elastic wave detection signal of improved EMD algorithm is verified.

Key words: EMD decomposition; elastic wave test signal; nonlinear and non-stationary signal