

# 车辆振动信号的特征提取方法比较

廖庆斌<sup>1</sup>, 李舜韶<sup>1</sup>, 覃小攀<sup>2</sup>

(1. 南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016; 2. 吉林大学 汽车工程学院, 长春 130022)

**摘要:** 针对用于车辆振动信号分析的常用方法: 小波分析方法和 Hilbert-Huang 变换方法, 以及作者新近提出的时序多相关-经验模式分解方法, 通过仿真对比分析了它们各自的特点以及它们在振动信号特征提取中的适用性。非线性信号的仿真分析表明, 在没有噪声或分析对象背景噪声较小的情况下, 后两种方法能提取到特征信号, 小波分析不适合非线性信号的分析; 在强背景噪声下, 前两种方法均不能得到满意的特征信息, 而时序多相关-经验模式分解方法能提取到所需的目标信息。最后将时序多相关-经验模式分解方法用于某特种车辆特征信号的提取, 得到了满意的结果, 验证了该方法在车辆振动信号特征提取中的有效性。

**关键词:** 信息处理技术; 振动信号; 特征提取; 小波分析; Hilbert-Huang 变换; 时间序列多相关; 经验模式分解

**中图分类号:** TN911; U270      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1671-5497(2007)04-0910-06

## Comparison of feature extraction methods of vehicle vibration signal

Liao Qing-bin<sup>1</sup>, Li Shun-ming<sup>1</sup>, Qin Xiao-pan<sup>2</sup>

(1. College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China; 2. College of Automotive Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China)

**Abstract:** The vibration signals of a vehicle always carry the dynamic information of the vehicle. These signals are very useful for the health monitoring and fault diagnosis. However, in many cases, because these signals have very low signal-to-noise ratio (SNR), to extract feature components becomes difficult and the applicability of information drops down. The characters of feature extraction of vibration signal were compared, among the two popular methods named wavelet analysis (WA) and Hilbert-Huang translation (HHT) and the multi-correlation of time series and empirical mode decomposition (MCTS-EMD), via simulation. And the applicability of them was analyzed using the simulation signal. The HHT and MCTS-EMD can extract the feature signal in no interference of noise or the SNR is a large number, while the WA is not suit for the feature extraction of nonlinear signal. In the strong background noise, the WA and HHT can not work well, contrasting them; the MCTS-EMD can extract the wanted object information. At last, The MCTS-EMD method was used to extract the feature signal of some special vehicle, a satisfactory result can be get, this validity of MCTS-EMD was validated in the feature extraction of vehicle vibration signal.

**Key words:** information processing; vibration signal; feature extraction; wavelet analysis; Hilbert-Huang

**收稿日期:** 2006-06-22.

**基金项目:** 航空科学基金资助项目(04I52066); 国家自然科学基金资助项目(50675099).

**作者简介:** 廖庆斌(1979-), 男, 博士研究生. 研究方向: 振动、噪声的分析与控制. E-mail: qb\_liao@nuaa.edu.cn

**通讯联系人:** 李舜韶(1962-), 男, 教授, 博士生导师. 研究方向: 振动噪声分析与控制, 现代信号处理, 转子振动监测与诊断. E-mail: lishunming69@sohu.com

translation; multi-correlation of time series; empirical mode decomposition

作者就目前广泛应用于振动、噪声信号分析中的两种方法:小波分析(Wavelet Analysis, WA)方法和 Hilbert-Huang 变换(Hilbert-Huang Translation, HHT)方法以及作者提出的时序多相关-经验模式分解(Multi-Correlation of Time Series and Empirical Mode Decomposition, MCTS-EMD)方法<sup>[1]</sup>进行了对比分析。首先通过仿真信号考察3种方法在信号特征提取中的有效性,然后检验它们在噪声背景下对信号的分析能力,找出它们在信号特征提取中的各自特点。最后将 MCTS-EMD 应用到某特种车辆振动信号的特征提取当中,考察该方法在实际车辆运行中振动信号分析的可行性。

## 1 三种方法概述

小波分析,就是利用小波函数系,即通过基本小波函数在不同尺度的伸缩和平移,来表示或者逼近信号。小波分析方法在机械系统振动、噪声信号的分析及其特征提取中得到了广泛的应用<sup>[2,3]</sup>;HHT 是 Huang 等<sup>[4,5]</sup>于 1998 年提出的一种全新的信号处理方法,其核心是经验模式分解(Empirical Mode Decomposition, EMD)。HHT 及其改进方法在振动、噪声信号的分析中已经得到了若干应用<sup>[6,7]</sup>。

MCTS-EMD 方法是在 EMD 的基础上发展起来的一种信号特征提取方法。目的是为了弥补在强噪声背景下,HHT 不能有效的提取到机械系统振动信号中所需特征信息的不足。为了使得文献[1]中的方法能够应用到非平稳车辆信号的特征提取,在应用 MCTS-EMD 时,先取采样得到的一段时间序列,对其做多个周期的延拓,这样得到具有循环平稳特性的时间序列,然后对延拓得到的时间序列应用 MCTS-EMD 方法提取其特征信号。

在不减少原信号中信息量的同时,通过 MCTS 前处理,达到去除噪声干扰的目的,再通过相关性选择并依据确定的阈值,以达到选取各个真实 IMF 分量的目的,确保对信号特征成分的准确提取。

## 2 仿真信号分析

车辆运行时,受路面激励、风激励以及车辆运

行时各种传动部件激励等的影响,其振动信号往往是各种复杂的调制信号。在此,作者构造调幅-调频信号以及含噪声情况的调幅-调频信号进行仿真,然后对它们分别进行 WA、HHT 分析以及 MCTS-EMD 分析。

### 2.1 不含噪声的调幅-调频信号分析

考虑到车辆振动信号的复杂性,构造如下的调幅-调频的非线性信号:

$$s_1(t) = [1 + \sin(5\pi t)]\cos[20(\pi)t + 0.2\sin(10\pi t)] + \sin(80\pi t) \quad (1)$$

文献[8]对与式(1)描述类似的时间序列给出了详细的数学分析。由式(1)描述的时间序列图如图 1 所示,下面对这一信号分别做 WA、HHT 以及 MCTS-EMD 分析。

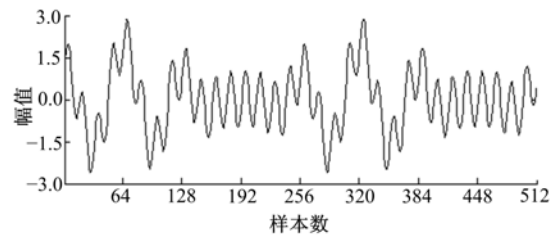


图 1 仿真信号无噪声情况下的时间序列图

Fig. 1 Time series of simulation signal in no noise

根据文献[9]的分析,选用正交小波中的 Daubechies 小波作为小波基函数,并采用 MATLAB 小波工具箱中的 db10 对由式(1)给出的时间序列做 5 层小波分解,然后对得到的细节信号进行重构,再对重构得到的信号做边际谱分析,得到如图 2 所示的边际谱图。

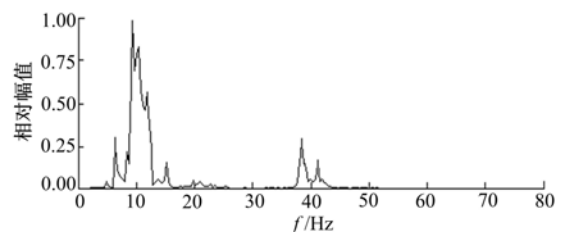


图 2 无噪声时由 WA 得到的边际谱

Fig. 2 Marginal spectrum from WA in no noise

对式(1)给出的时间序列做 HHT 分析,得到的边际谱如图 3 所示。接下来再对由式(1)给出的时间序列做 MCTS-EMD 分析,得到的边际谱如图 4 所示。

从图 2 的特征信号成分可以看出,小波分析

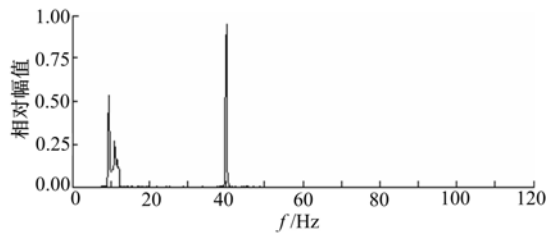


图 3 无噪声时由 HHT 得到的边际谱

Fig. 3 Marginal spectrum from HHT in no noise

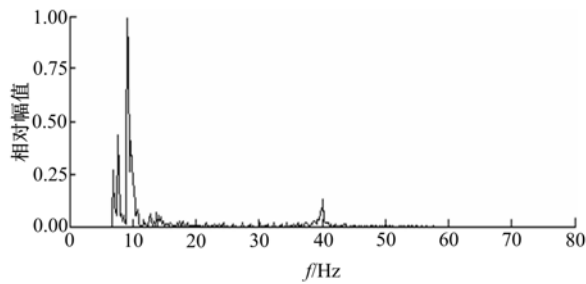


图 4 无噪声情况下由 MCTS-EMD 得到的边际谱

Fig. 4 Marginal spectrum from MCTS-EMD in no noise

不能从式(1)确定的时间序列得到正确的特征信号成分,这主要是由于小波分析本身是一种线性信号的分析方法,并不适合分析像式(1)那样的非线性信号。

图 3 和图 4 的特征信号成分都能正确地反应式(1)的特性。HHT 分析明确地表达了特征信号的瞬时频率变化,且谐波分量(40 Hz 频率分量)表达的也非常明确。从图 4 中可知,MCTS-EMD 分析同样具有好的效果。

### 2.2 噪声情况下的调幅-调频信号分析

将零均值的噪声加入到由式(1)构造的调幅-调频信号中,得到下式:

$$s_2(t) = [1 + \sin(5\pi t)] \cos[20(\pi)t + 0.2\sin(10\pi t)] + \sin(80\pi t) + n(t) \quad (2)$$

式中:  $n(t)$  为零均值、方差为 25 的随机噪声。

由式(2)描述的一段时间序列如图 5 所示,分别对它做 WA、HHT 以及 MCTS-EMD 分析。

由 WA 方法得到的边际谱如图 6。对由式(2)得到的时间序列做 HHT 分析,得到的边际谱如图 7 所示。由 MCTS-EMD 方法处理得到的边际谱如图 8 所示。

从图 6 可知,由于 WA 本身的特点以及仿真信号中加入的噪声信号,使得特征信号成分中出现了较多的虚假谐波分量。

在由 HHT 分析得到的图 7 中,由于仿真信

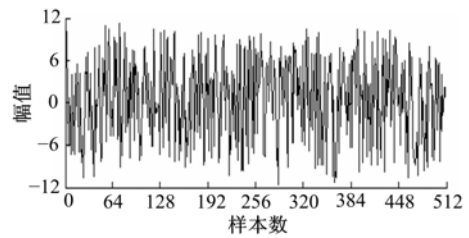


图 5 噪声情况下仿真信号的时间序列图

Fig. 5 Time series of simulation signal in the condition of noise

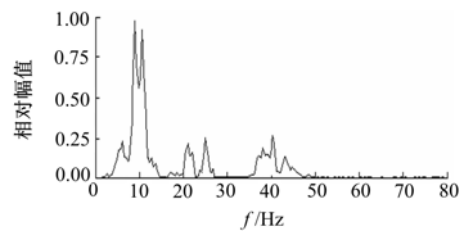


图 6 有噪声时由 WA 得到的边际谱

Fig. 6 Marginal spectrum from WA in the condition of noise

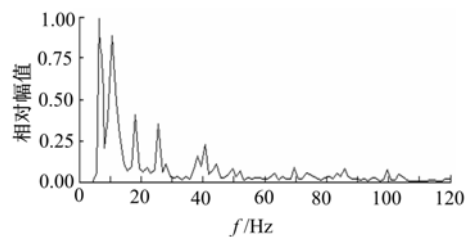


图 7 有噪声时由 HHT 得到的边际谱

Fig. 7 Marginal spectrum from HHT in the condition of noise

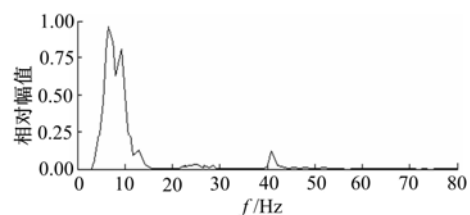


图 8 有噪声情况下由 MCTS-EMD 得到的边际谱

Fig. 8 Marginal spectrum from MCTS-EMD in the condition of noise

号加入了零均值噪声,使得特征信号中同样出现了较多的虚假谐波分量,因而从图 7 中不能得到有效的特征信号成分。图 8 中,出现了和无噪声情况一样的特征信号成分,这表明了 MCTS-EMD 分析方法同样能提取到特征信号成分,具有很好的鲁棒性。

2.3 仿真结果分析

从图 2 和图 6 可以看出,小波分析不仅不能有效地提取非线性信号中的特征信号成分,而且在强背景噪声下也不能有效地提取到信号中的特征信号成分。由图 3 和图 7 可知,当仿真信号中加入零均值的强噪声时,HHT 方法不能有效地

提取到信号中的特征信号成分。同样,通过图 4 和图 8 的对比可以知道,当仿真信号中加入强的零均值噪声时,MCTS-EMD 分析方法能够提取到信号中的特征成分。

结合 3 种方法的基本原理及以上分析,将它们各自的特点进行归纳,如表 1 所示。

表 1 3 种方法的原理和特点

Table 1 Principle and characterization of three methods

方法	基本原理	特点	
		优点	缺点
WA	首先通过确定的小波基函数对时间序列做小波分解,然后对重构后的细节分量做 Hilbert 变换的边际谱分析,以得到相应的特征信号。	建立在完备的数学基础之上,分解之后的各个分量能完全正交,可以避免冗余数据的引入。	对具体情况,难于选择合适的小波基函数。基函数一旦选定,具有不变性。适宜于线性信号的分析,对非平稳信号易产生虚假谐波,不适合用于非线性信号的分析。
HHT	假设信号是由一系列 IMF 函数组成,通过 EMD 分解,将信号表达为若干个 IMF 分量和一个余量的和,然后通过做 Hilbert 变换的边际谱分析得到相应的特征信号。	对不同的信号,可以自适应的选择分解基函数,得到相应的 IMF 分量。对非线性信号具有很好的分解能力。	建立在经验之上的分解方法,没有充分的数学基础。由于分解过程的自适应性,使得其对噪声敏感,故对同一故障,可能得到不同的 IMF 分量。
MCTS-EMD	首先对时序序列做多相关处理,再对得到的多相关序列做 EMD,再通过设定的阈值对得到的 IMF 分量做相关性选择,然后对选择得到的 IMF 分量做 Hilbert 变换的边际谱分析得到相应的特征信号。	预先对时间序列做多相关分析,可克服噪声对后继续分解过程的影响,使得分解具有很强的鲁棒性。分解后的相关性选择,可以避免由于 EMD 而生成的虚假谐波。	时序多相关分析增加了分析的计算量。

3 实际应用

车辆振动信号往往混叠有噪声信号,而对于特种车辆,由于恶劣的工作条件,使得振动信号中的信噪比往往很小,所以车辆振动信号的特征提取难度很大。作者尝试用 MCTS-EMD 方法来提取某特种车辆工作时,测量得到的振动信号中的特征信号成分。

图 9 是该特种车辆在某次高级公路路面上,

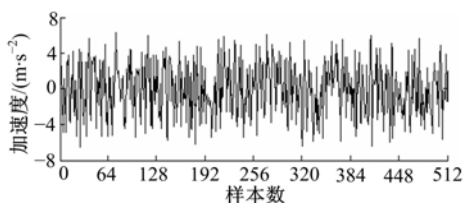


图 9 特种车工作时测量得到的振动信号

Fig. 9 Vibration signal measured form special vehicle at working condition

以 40~80 km/h 的车速行驶时采集的一段车辆振动信号。

应用 MCTS-EMD 方法得到的信号的特征成分如图 10 所示。从图 10 的边际谱图可以看到,在频率分别为 140 Hz、210 Hz 及 230 Hz 的 3 个频率点处出现了较大的相对幅值,故在这些频率成分中可能有特定的特征信号成分。通过对该车的模态实验分析可知,在这 3 个频率点处分别对应着该车的 3 个低阶模态。也就是说,车辆在该

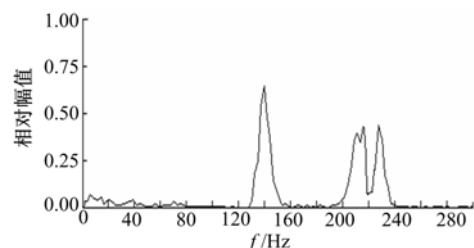


图 10 时序多相关处理后得到的一段时间序列

Fig. 10 Time series form tri-correlation of period of time

行驶状态下,出现了对应于低阶模态阶次的共振频率,对应该车的状况,分析可知这些频率成分是由该特种车辆上的分动箱上某部件的松动产生的。为了验证上述判断的正确性,在用户的要求下,生产厂商对该车进行了开箱检验,检验结果与上述分析是一致的。这也证实了 MCTS-EMD 方法在实际车辆振动信号特征提取中的有效性。

## 4 结 论

(1) 小波分析方法是一种分段线性的信号分析方法,不适用于一般的非线性信号的分析,且在强的背景噪声下,亦不能得到期望的特征信号成分。

(2) 在没有背景噪声干扰或者背景噪声较小时,HHT 方法和 MCTS-EMD 方法均能提取到信号中的特征成分,且能明确地表达出信号中瞬时频率的变化情况。

(3) 当时间序列中混叠有零均值的强背景噪声时,由 HHT 方法得到的特征信号成分中含有较多的虚假信息,不能有效地提取到分析对象中的特征成分。在这种情况下,MCTS-EMD 方法却能够得到满意的特征信号成分,证明了该方法在噪声背景下特征信号提取的有效性。

(4) 将 MCTS-EMD 方法应用到某特种车辆振动信号的特征成分提取中,成功地提取到了所需的特征信号成分,证明了该方法在实际应用中的可行性,为强噪声背景下车辆振动信号的分析提供了一种可供选择的措施。

### 参考文献:

- [1] 廖庆斌,李舜酩.一种旋转机械振动信号特征提取的新方法[J].中国机械工程,2006,17(16):1675-1679.  
Liao Qing-bin, Li Shun-ming. A novel method for feature extraction of rotating machinery vibration signals[J]. China Mechanical Engineering, 2006, 17(16):1675-1679.
- [2] Lin J. Feature extraction of machine sound using wavelet and its application in fault diagnosis[J]. NDT and E International, 2001, 34(1):25-30.
- [3] Peng Z K, Chu F L. Application of the wavelet transform in machine condition monitoring and fault diagnostics: a review with bibliography[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2004, 18(2):199-221.
- [4] Huang N E, Shen Z, Long S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[J]. Proceedings of Royal Society of London Series A, 1998, 454:903-995.
- [5] Huang N E, Shen Z, Long S R. A new view of nonlinear water waves; the Hilbert spectrum[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 1999, 31:417-457.
- [6] Peng Z K, Peter W T, Chu F L. An improved Hilbert-Huang transform and its application in vibration analysis[J]. Journal of Sound and Vibration, 2005, 286(1/2):187-205.
- [7] Shinde A, Hou Z. A wavelet packet based sifting process and its application for structural health monitoring[C]// Proceedings of the American Control Conference, 2004:4219-4224.
- [8] 杨世锡,胡劲松,吴昭同,等.旋转机械振动信号基于EMD的希尔伯特变换和小波变换时频分析比较[J].中国电机工程学报,2003,23(6):102-107.  
Yang Shi-xi, Hu Jin-song, Wu Zhao-tong, et al. The comparison of vibration signals' time-frequency analysis between EMD-based HT and WT method in rotating machinery[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(6):102-107.
- [9] Wang W J, McFadden P D. Application of orthogonal wavelets to early gear damage detection[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 1995, 9(5):497-507.