

基于 HHT 方法的公路运输振动信号时频分析

颜诗源, 李新俊, 吴勋, 张仕念, 何敬东

(北京市海淀区北清路 109 号 203 分队, 北京 100094)

摘要:目的 分析具有非线性、非平稳特征的公路运输振动信号的时频信息。方法 利用 Hilbert-Huang 变换算法,在对公路运输的振动信号进行 EMD 分解的基础上,开展 Hilbert 谱和各 IMF 的功率谱密度计算,并与常规的功率谱进行比较。结果 基于 IMF 分量的功率谱可以克服传统 Fourier 功率谱计算在低频偏低、高频偏高的误差。结论 基于 HHT 的公路运输振动信号时频分析方法是一种有效的运输振动非平稳信号分析手段。

关键词: 振动功率谱; Hilbert-Huang 变换; 时频分析

DOI:10.7643/issn.1672-9242.2014.05.005

中图分类号: TP311 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2014)05-0023-04

Frequency Analysis for Vibration Signal from Road Transportation Using HHT

YAN Shi-yuan, LI Xin-jun, WU Xun, ZHANG Shi-nian, HE Jing-dong

(Division 203, No. 109 Beiqing Road, Haidian, Beijing 100094, China)

ABSTRACT: **Objective** To study the time-frequency character of the vibration signal from road transportation which is nonlinear and non-stationary. **Methods** Using the Hilbert-Huang transformation algorithm, the vibration signal from road transportation was firstly decomposed by the EMD method, based on which its Hilbert spectrum and the power spectral density were calculated and compared to the traditional Fourier power spectral density. **Results** The power spectral density of the IMFs can overcome the error of low value in low frequency and high value in high frequency by the traditional Fourier method. **Conclusion** The HHT algorithm is a powerful method to analyze the time-frequency character of the nonlinear non-stationary vibration signal from road transportation.

KEY WORDS: vibration power spectrum; Hilbert-Huang transformation; time-frequency analysis

在振动信号的处理和归纳中,一般都将其近似作为线性平稳信号,如 GJB/Z 126—99 振动、冲击环境测量数据归纳方法^[1]、GJB/Z 222—2005 动力学环境数据采集和分析指南^[2]等,以及采用 Bootstrap

方法^[3]。真实的振动信号不可避免地存在非线性和非平稳性,在传统的以 Fourier 变换为基础的功率谱密度(PSD)振动载荷谱分析方法中的线性平稳假设,往往在低频幅值偏低,而在高频部分偏高^[4-5]。

收稿日期: 2014-06-05; 修订日期: 2014-06-22

Received : 2014-06-05; Revised : 2014-06-22

作者简介: 颜诗源(1981—),男,湖南人,博士,助理研究员,主要从事可靠性、环境等方面的研究。

Biography: YAN Shi-yuan(1981—), Male, from Hunan, Doctor, Assistant researcher, Research focus: reliability & environment.

其他常用的非平稳随机信号处理方法亦存在不足,如短时 Fourier 变换要求信号具有不变的分析带宽^[6],小波分析需要选定小波基函数、自适应差^[7]。

Hilbert-Huang 变换 (Hilbert-Huang Transform, HHT)^[8] 是 Norden E. Huang 等人提出的一种具有物理意义的固有模态函数 (Intrinsic Mode Function, IMF), 并假设任何复杂信号可以分解为一系列 IMF 分量。由于 IMF 存在有意义的瞬时频率, 因此成为分析非平稳信号的有力工具。

1 Hilbert-Huang 谱

1.1 Hilbert-Huang 变换

Norden E. Huang 等人在提出经验模态分解的 (Empirical Mode Decomposition, EMD) 基础上, 对 EMD 分解得到的 IMF 进行 Hilbert 谱分析, 该方法被称为 Hilbert-Huang 变换, 即 HHT。HHT 首先利用 EMD 方法将信号分解为 IMF, 然后对每一个 IMF 进行 Hilbert 变换, 得到对应的 Hilbert 谱, 最后汇总所有 IMF 的 Hilbert 谱得到原始信号的 Hilbert 谱。该方法利用 EMD 将信号中不同尺度的波动或趋势逐级分解开来, 基于这些分量进行的 Hilbert 变换可以反映信号能量在空间 (或时间) 各种尺度上的分布规律。该方法被认为是处理非平稳信号的有力工具之一。

HHT 首先对信号进行 EMD 处理, 得到信号的 IMF 及残差。EMD 分解的思路是: 对一原始信号 $x(t)$, 利用三次样条函数曲线插值的方法找出其上、下包络及包络的均值曲线 $m(t)$, 如果 $x(t)$ 与 $m(t)$ 之差 $h(t)$ 不满足 IMF 分量的条件, 则将 $h(t)$ 视为新的原始信号, 继续进行前述分解, 直到找到本阶的 IMF, 记为 $c(t)$ 。重复计算, 可以将 $x(t)$ 分解为多个 IMF 分量 $c_i(t)$ 和残差 $r(t)$ 之和:

$$x(t) = \sum_i c_i(t) + r(t) \quad (1)$$

对上述 IMF 分量 $c_i(t)$ 进行 Hilbert 变换, 即可得到每个 IMF 分量的瞬时频谱, 综合所有 IMF 分量的瞬时频谱就可得到一种新的时频描述方式, 即 Hilbert 谱。Hilbert 变换是一种线性变换, 它强调局部性质, 由它得到的瞬时频率是最好的定义, 避免了 Fourier 变换产生的许多事实上不存在的高、低频成

分, 具有直观的物理意义。 $c_i(t)$ 的 Hilbert 变换为:

$$H[c_i(t)] = c_i(t) \cdot \frac{1}{\pi t} = \text{P. V.} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{c_i(t-\tau)}{\pi t} d\tau \quad (2)$$

其中 P. V. 表示柯西主值积分。构造 $c_i(t)$ 的解析信号为:

$$z_i(t) = c_i(t) + jH[c_i(t)] = a_i(t) e^{-j\phi_i(t)} \quad (3)$$

式中: $a_i(t)$ 为瞬时幅值, $a_i(t) = \sqrt{c_i^2(t) + H^2[c_i(t)]}$; $\phi(t)$ 为瞬时相位, $\phi_i(t) = \tan^{-1} \{H[c_i(t)]/c_i(t)\}$ 。可以看出, 式(3)给出了幅值和相位的定义。定义瞬时频率为:

$$f_i(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d[\phi_i(t)]}{dt} \quad (4)$$

定义 $c_i(t)$ 的 Hilbert 谱为:

$$H_i(t, f) = \begin{cases} a_i(t) & f = f_i(t) \\ 0 & f \neq f_i(t) \end{cases} \quad (5)$$

如果直接对信号 $x(t)$ 进行整体 Hilbert 谱分析, 可以表示为:

$$x(t) = \text{Re} \left[\sum_i a_i(t) e^{j2\pi \int f_i(t) dt} \right] \quad (6)$$

式(6)表达了信号 $x(t)$ 联合的时频变化关系。根据式(5)和(6), 可以得到 $x(t)$ 的 Hilbert 谱:

$$H(t, f) = \sum_i H_i(t, f) \quad (7)$$

式(7)描述的 Hilbert 谱可看作是一种加权的联合幅值-频率-时间三维谱。又定义 Hilbert 边际谱为:

$$h(f) = \int_0^T H(t, f) dt \quad (8)$$

在式(8)的 Hilbert 边际谱中, 在某一频率上存在着能量就意味着具有该频率的振动存在的可能性, 具有该频率的波在信号整个持续时间内的某一时刻出现了, 而该振动出现的具体时刻在 Hilbert 谱中给出。

定义 Hilbert 能量谱为:

$$ES(f) = \int_0^T H^2(t, f) df \quad (9)$$

在分析中, 可能只对某些频率范围内的信号感兴趣, 即对某几个 IMF 分量的组合进行 Hilbert 变换, 结果成为局部 Hilbert 谱。

1.2 Hilbert-Huang 谱与 Fourier 功率谱的比较

对解析信号 $z_i(t)$ 两边做 Fourier 变换, 可以得到:

$$z_i(j\omega) = c_i(j\omega) + j\hat{c}_i(j\omega) \tag{10}$$

式中: $\hat{c}(j\omega)$ 为 $c_i(t)$ 的 Hilbert 变换, $\hat{c}(j\omega) = H[c_i(j\omega)]$, $\omega = 2\pi f$ 。如果只考虑正频率部分,那么式(10)可写为:

$$z_i(j\omega) = 2c_i(j\omega) = 2\int_{-\infty}^{+\infty} c_i(t)e^{-j\omega\tau}d\tau \quad \omega > 0 \tag{11}$$

典型的 Fourier 功率谱的定义为:设 $x(t)$ 为一平稳随机过程,若其自相关函数 $R_{xx}(\tau)$ 的傅立叶变换存在,即:

$$S_{xx}(\omega) = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{+\infty} R_{xx}(\tau)e^{-j\omega\tau}d\tau \tag{12}$$

则称 $S_{xx}(\omega)$ 为 $x(t)$ 的功率谱密度, ω 为频率。在工程中多用频率 f 作为功率谱密度的自变量,这时有下面关系成立:

$$S_{xx}(f) = 2\pi S_{xx}(\omega) \tag{13}$$

另外由于工程上负频率无意义,往往使用单边谱密度,其定义为:

$$G_{xx}(f) = 2S_{xx}(f) = 4\int_{-\infty}^{+\infty} R_{xx}(\tau)\cos 2\pi f\tau d\tau \quad f \geq 0 \tag{14}$$

功率谱密度描述了随机振动的频率结构,从物理意义角度上看,它是随机振动的能量按频率分析的度量,功率谱密度曲线下方的面积即为随机信号的均方值,即:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} S_{xx}(\omega)d\omega = R_{xx}(0) = E[x^2(t)] = \varphi_x^2 \tag{15}$$

对比式(8)、式(11)和式(14)可以看出,由于 IMF 分量 $c_i(t)$ 是原始信号的某一个包络,其幅值大于对应的原始信号,因而计算边际谱的幅值与 Fourier 功率谱幅值是不一致的。

2 公路运输振动数据分析

公路运输的振动响应一般随运输平台、公路路面等级、运输平台速度等不同而有一定差异。为了获取真实有效的振动响应数据,需要通过设计采集试验,获取在特定路面等级和运输速度组合下一定时间长度的振动数据。文中利用 LMS 振动采集系统,以 400 Hz 的采样率,在不同的路面等级下以不同的速度,采集匀速运动的卡车上的产品振动情况。以某点位 Z 方向的振动为例,其一段时域波形如图 1 所示。

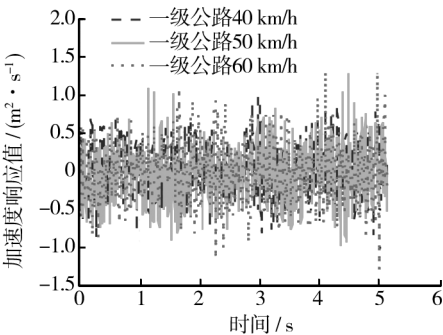


图 1 不同速度下振动时域

Fig. 1 Time domain waveform at different velocity

以其中一级公路 40 km/h 的振动信号为例,计算其 HHT 谱与边际谱,分别如图 2 和图 3 所示。

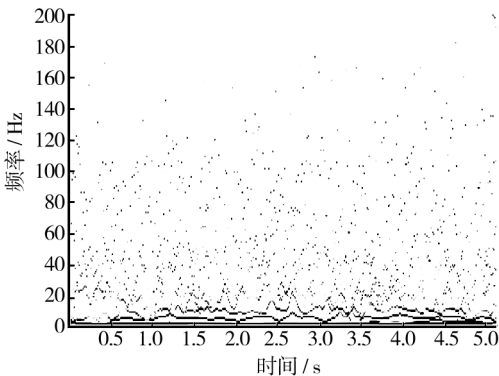


图 2 HHT 谱

Fig. 2 HHT spectrum

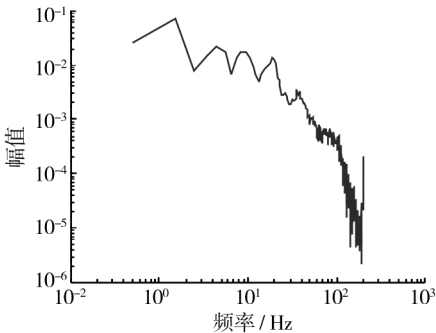


图 3 HHT 边际谱

Fig. 3 HHT marginal spectrum

其中 EMD 分解将原始信号分为 8 个 IMF 和 1 个残余量。将 $c_1(t)$, $r(t)$ 略去,分别作 $c_2(t) : c_8(t)$ 的 PSD 并求和,得到 $P = \sum_{i=2}^8 \text{PSD}[c_i(t)]$,与原始信号的 PSD 对比如图 4 所示。

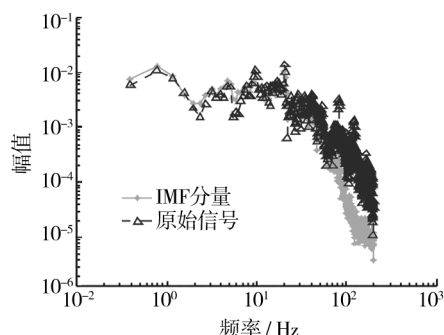


图4 IMF分量与原始信号的PSD对比

Fig.4 PSD comparison between IMF component and the original signal

从图4中可以看出,IMF分量中剔除了最高频的 $c_1(t)$ 及残差,基于IMF分量的在低频部分有所加强,而在高频部分得到了抑制。显然,该计算对传统功率谱密度计算中“低频幅值偏低,高频部分偏高”进行了有效修正。对比图3与图4,边际谱的频率与功率谱的频率峰值点基本是一致的,表示边际谱对信号能量特征的识别度较好。图2能反映出信号的时间-频率信息。

3 结语

文中对公路运输的振动信号引入HHT分析方法,对其进行经验模态分解,得到各阶IMF分量。通过对IMF分量与原始信号的Fourier功率谱分析,结果表明,通过合理选择IMF分量的范围,可以克服传统功率谱分析针对非平稳信号处理中低频偏低、高频偏高的误差。同时,振动信号的HHT边际谱频率与Fourier功率谱在统计意义上频率具有较好的拟合度,表明边际谱对随机振动信号的频率分辨率较好。采用HHT方法对公路运输振动信号进行分析处理,是一种有效的振动特征提取方法。

参考文献:

[1] GJB/Z 126—99, 振动、冲击环境测量数据归纳方法[S].

GJB/Z 126—99, The Inductive Methods for Environmental Measured Data of Vibration and Shock[S].

[2] GJB/Z 222—2005, 动力学环境数据采集和分析指南[S].

GJB/Z 222—2005, Guidelines for Dynamic Environmental Data Acquisition and Analysis[S].

[3] 张建军, 孙建勇, 常海娟. Bootstrap方法在小样本随机振动环境测量数据归纳中的应用研究[J]. 装备环境工程, 2013, 10(5): 70—76, 80.

ZHANG Jian-jun, SUN Jian-yong, CHANG Hai-juan. Application Research of Bootstrap Method in Small Sample Measured Data Reduction of Random Vibration[J]. Equipment Environmental Engineering, 2013, 10(5): 70—76, 80.

[4] 赵杨, 武岳, 曹曙阳, 等. 利用HHT方法对非平稳风力的时频分析[J]. 振动与冲击, 2011, 30(2): 5—9.

ZHAO Yang, WU Yue, CAO Shu-yang, et al. Time Frequency Analysis of a Non-stationary Wind Pressure with HHT Method[J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(2): 5—9.

[5] 朱玉琴, 肖勇, 苏艳. 装甲平台诱发环境振动数据处理技术与应用研究[J]. 装备环境工程, 2013, 10(3): 72—76.

ZHU Yu-qin, XIAO Yong, SU Yan. Application Research of Vibration Data Processing Technology for Armed Vehicle Platform Induced Environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2013, 10(3): 72—76.

[6] 胡广书. 数字信号处理理论、算法与实现[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.

HU Guang-shu. Digital Signal Processing, Theory, Algorithm and Implementation[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003.

[7] ANTONIADIS A, OPPENHEIM G. Wavelets and Statistics (Lecture Notes in Statistics) [M]. Berlin: Springer Verlag, 1995.

[8] HUANG Norden E, SHEN Zheng, LONG Steven R, et al. The Empirical Mode Decomposition and the Hilbert Spectrum for Nonlinear and Non-stationary Time Series Analysis[J]. Proc R Soc Lond, 1998, 454: 904—993.