

# 基于 MEEMD-HT 的高速列车转向架蛇行失稳特征分析

叶运广, 宁 静, 种传杰, 崔万里, 刘 棋

(西南交通大学机械工程学院, 四川 成都 610031)

**摘 要:**为研究高速列车蛇行失稳时转向架横向、纵向和垂向的时频能特征,针对集合经验模态分解(EEMD)的模式分裂问题,提出一种改进的集合经验模态分解-Hilbert 变换(MEEMD-HT)方法,首先对列车速度 330~350 km/h 时转向架蛇行失稳状态下的横向、纵向和垂向振动信号进行 MEEMD 分解,再通过 HT 分析 MEEMD-HT 能量谱和边际谱,并将 MEEMD-HT 分析结果与集合经验模态分解-Hilbert 变换(EEMD-HT)对比。结果表明:列车蛇行失稳时,横向失稳现象最为明显,频率、能量分布高度集中,振动最为剧烈,纵向、垂向相对次之,但失稳现象显著;同时,MEEMD-HT 方法能够体现出信号的时频能细节分布特征,优于传统的 EEMD-HT 方法。

**关键词:**高速列车;蛇行失稳;改进的集合经验模态分解;Hilbert 变换

**文献标志码:**A      **文章编号:**1674-5124(2016)09-0120-06

## Feature analysis of high-speed train bogie hunting instability based on modified ensemble empirical mode decomposition and Hilbert transformation

YE Yunguang, NING Jing, CHONG Chuanjie, CUI Wanli, LIU Qi

(School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract:** To investigate the features of lateral, longitudinal and vertical time-frequency and energy of high-speed train bogie in the hunting instability, in allusion to mode splitting problem of ensemble empirical model decomposition (EEMD), a modified ensemble empirical mode decomposition and Hilbert transformation(MEEMD-HT) method is presented in this paper. Firstly, the lateral, longitudinal and vertical vibration signals of the train bogie in the hunting instability state at 330-350 km/h were decomposed by MEEMD. Then, the MEEMD-HT energy spectrum and marginal spectrum were analyzed by HT. Meanwhile, the analysis results of MEEMD-HT were compared with that of traditional ensemble empirical mode decomposition-Hilbert transformation (EEMD-HT). The results show that when the train is in the hunting instability state, the lateral instability is the most obvious and the distribution of frequency and energy is highly centralized, the longitudinal and vertical are better than lateral despite of obvious instability. Details of time-frequency-energy of hunting motion signal will be discovered through MEEMD-HT method, which is superior to that of traditional EEMD-HT.

**Keywords:** high-speed train; hunting instability; modified ensemble empirical mode decomposition; Hilbert transformation

**收稿日期:**2015-12-10; **收到修改稿日期:**2016-01-23

**基金项目:**国家自然科学基金项目(51475387);中央高校基本业务费专项基金项目(2682014CX033);  
四川省科技创新苗子工程项目(2015102)

**作者简介:**叶运广(1988-),男,重庆市人,硕士研究生,专业方向为智能化状态监测及故障诊断。

**通信作者:**宁 静(1976-),女,四川成都市人,副教授,博士,研究方向为智能化状态监测及故障诊断。

## 0 引言

由于机车轮对具有一定锥度,当其沿着钢轨滚动并且速度达到某一临界值时,外界自激频率与列车系统固有频率接近,就会产生共振,此时轮对绕着轨道中心线一边横移一边摇头向前运动,即蛇行运动<sup>[1-2]</sup>。当列车发生蛇行运动时,如果不对列车速度加以控制,其振幅就会随着时间不断增大,发生蛇行失稳,轻则影响乘坐舒适性,重则导致列车脱轨。目前为止,国内外学者对列车蛇行失稳的研究取得了大量成果<sup>[3-5]</sup>,但大多数都是对转向架蛇行失稳下的横向振动特性进行研究,对于纵向和垂向振动特性研究甚少,为保证列车高速安全运行,对其蛇行失稳下纵向、垂向振动特性研究尤为重要。

由于 HHT(hilbert huang transformation)具有自适应性等优势,所以广泛应用于振动信号的分析中<sup>[6]</sup>。列车高速运行时,振动信号通常夹杂着冲击信号,由于集合经验模态分解(ensemble empirical mode decomposition, EEMD)具有自适应性和抑制模态混叠的作用<sup>[7]</sup>,在处理此类信号时有着独特的优势,但其存在计算量大、运算耗时和模态分裂等缺点<sup>[8-9]</sup>,而改进的集合经验模态分解(modified ensemble empirical mode decomposition, MEEMD)能解决这些问题。基于此,本文从列车实际监测数据角度出发,结合 MEEMD 与 HT 方法对高速列车转向架蛇行失稳下构架的横向、纵向、垂向时频能特征进行分析。

## 1 MEEMD-HT

HHT 包括经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)和 Hilbert 变换(hilbert transformation, HT)两个步骤,本文采用 MEEMD 分解代替 EMD 分解。

### 1.1 MEEMD

为了更好地解决模态混叠问题, Huang<sup>[7]</sup>提出了通过向原信号加入白噪声的 EMD 分解,即 EEMD,能有效抑制 EMD 分解中的模态混叠,但加入的白噪声幅值过低,模态混叠问题不能完全解决,幅值过高,则会增加计算量,并且造成信号中的高频成分难以分解及白噪声在信号中残余过大等问题。同时, EEMD 分解得到经验模态函数(intrinsic mode functions, IMF)分量不一定标准,可能出现模态分裂问题。鉴于此,文献[8]提出了能抑制模态混叠、解决模态分裂,同时又能提高运算效率的一种改进的 EEMD 算法,即 MEEMD。

对于非平稳信号  $x(t)$  的 MEEMD 分解步骤如下:

1) 向原始信号  $x(t)$  中,分别加入均值为零的白噪声信号  $n_i(t)$  和  $-n_i(t)$  即:

$$\begin{cases} x_i^+(t) = x(t) + a_i n_i(t) \\ x_i^-(t) = x(t) - a_i n_i(t) \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $a_i$ ——添加噪声信号的幅值,  $i=1, 2, 3, \dots, n$ ;

$n$ ——添加白噪声对数;

$n_i(t)$ ——添加的白噪声信号,其均方根值应与  $x(t)$  均方根值接近,或不高于  $x(t)$  的 0.3 倍。

2) 分别对  $x_i^+(t)$  和  $x_i^-(t)$  进行 EEMD 分解,得到 IMF 分量序列,即  $c_i^+(t)$  和  $c_i^-(t)$ , 如下:

$$\begin{cases} x_i^+(t) \xrightarrow{\text{EEMD}} c_i^+(t) \\ x_i^-(t) \xrightarrow{\text{EEMD}} c_i^-(t) \end{cases} \quad (2)$$

3) 将  $x_i^+(t)$  和  $x_i^-(t)$  平均处理,从而最大可能地消除残余白噪声。

$$c_i(t) = 0.5(x_i^+(t) + x_i^-(t)) \quad (3)$$

4) 由于  $c_i(t)$  不一定为标准 IMF 分量,且可能存在模态分裂等问题,可称为预本征模态函数(Pro-IMF),需再对这组分量进行 EMD 分解:

$$c_i(t) \xrightarrow{\text{EMD}} d_i(t) + q_i(t) \quad (4)$$

$$h_k(t) = [q_{k-1}(t) + c_k(t)] \xrightarrow{\text{EMD}} d_k(t) + q_k(t) \quad (5)$$

式中:  $d_i(t)$ ——第 1 阶 Pro-IMF 分量经 EMD 分解后的第 1 阶 IMF 分量;

$q_i(t)$ ——残余分量;

$h_k(t)$ ——第  $k$  个 Pro-IMF 分量,  $k=2, 3, 4, \dots, m$ ;

$d_k(t)$ —— $h_k(t)$  分解得到的第 1 个 IMF 分量,  $k=2, 3, 4, \dots, m$ 。

5) 最后得到 MEEMD 表达式为

$$x(t) \xrightarrow{\text{MEEMD}} \sum_{l=1}^m d_l(t) + r(t) \quad (6)$$

式中:  $d_l(t)$ ——最终 IMF 分量;

$r(t)$ ——残余分量。

### 1.2 Hilbert 变换

对于 1.1 中 MEEMD 分解得到的每个 IMF 分量进行 HT, 得到  $y_i(t)$ :

$$y_i(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{c_i(\tau)}{t-\tau} d\tau \quad (7)$$

之后可得到瞬时幅度  $a_i(t)$ 、瞬时相位  $\varphi_i(t)$ 、瞬时频率  $\omega_i(t)$ :

$$a_i(t) = \sqrt{y_i^2(t) + c_i^2(t)} \quad (8)$$

$$\varphi_i(t) = \arctan \frac{y_i(t)}{c_i(t)} \quad (9)$$

$$\omega_i(t) = \frac{d\varphi_i(t)}{dt} \quad (10)$$

即可得到:

$$x = \sum_{i=1}^n a_i(t) e^{j \int \omega_i(t) dt} \quad (11)$$

式(11)即为幅度关于时间和瞬时频率的函数  $H(\omega, t)$ , 简称 Hilbert 谱。

## 2 实验工况

该试验数据来源于 XX 线动车组科学实验, 信号采样频率为 2 500 Hz, 列车速度信息由车载无线 GPS 提供, 加速度信息由 2 车 1 位构架横向加速度传感器提供, 线路采用德国博格式无砟轨道技术, 钢轨为定长 100 m 的国产钢轨。其中一趟数据的转向架构架时间-速度曲线与时间-加速度曲线如图 1 所示, 时间全长为 2 491 s。该实验列车在速度为 330~350 km/h 时, 反复出现蛇行失稳。

据 TB/B 3188—2007《铁道客车行车安全监测诊断系统技术条件》, 当转向架构架横向振动加速度峰值连续 6 次以上达到或者超过  $8 \sim 10 \text{ m/s}^2$  (与转向架的设计相适应) 时, 即判定为蛇行失稳<sup>[9]</sup>, 如图 2 所示。本文以构架横向振动加速度峰值连续 6 次超过  $8 \text{ m/s}^2$  的数据段作为标准, 选取该时间段构架横向、垂向、纵向加速度进行分析。由于蛇行振动频带为  $2 \sim 12.07 \text{ Hz}$ <sup>[10]</sup>, 根据香农采样定理和经验选取采样频率为 250 Hz, 再进行  $2 \sim 12.07 \text{ Hz}$  带通滤波, 样本数据长度为 5 000 采样点, 共 30 个样本。

## 3 实验结果分析

### 3.1 信号的 MEEMD 分解

分别对转向架蛇行失稳下构架的横向、垂向、纵向加速度信号进行 MEEMD 分解, 如图 3 所示, 其同一频段的振动特性区别很大, 利用 MEEMD 分解得到的 IMF 分量能反映不同频段的信息特征。

### 3.2 MEEMD 时频能特征分析

高速列车在运行过程中, 当其发生蛇行失稳异常运动时, 其振动信号的频率分布会发生变化, 某些频段的能量也必定发生变化<sup>[12]</sup>, 振动信号通过 MEEMD 分解后, 得到的各阶 IMF 分量刚好可以反映频段信息。

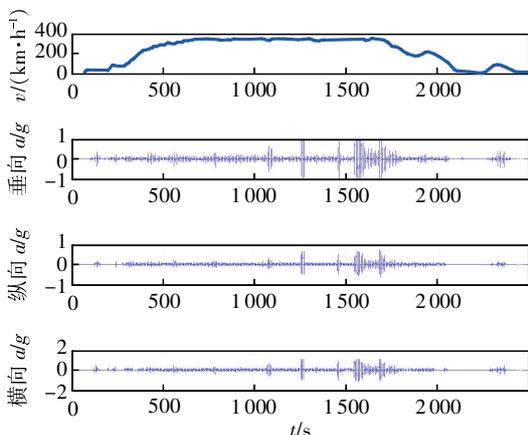


图 1 转向架构架时间-速度、时间-加速度图

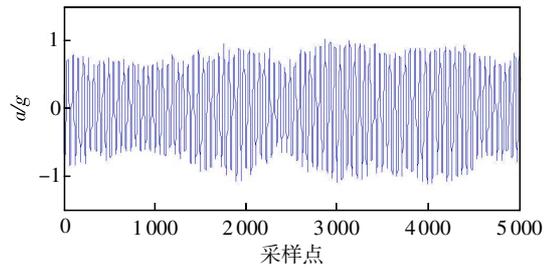


图 2 转向架蛇行失稳时横向加速度信号图

利用 IMF 能量、频率分布特征, 可以有效地揭示高速列车蛇行失稳特征。对转向架垂向、横向、纵向振动信号的前 6 阶 IMF 分量进行快速傅里叶变化 (FFT), 求得其频域信息, 如图 4 所示。

同时计算各阶 IMF 分量能量与 IMF 分量总能量的百分比, 计算步骤如下:

1) 选取适当的 IMF 分量, 计算其 IMF 分量的能量:

$$E_i = \int |c_i(t)|^2 dt \quad (12)$$

2) IMF 分量百分比  $p_i$ :

$$p_i = \frac{E_i}{E} \quad (13)$$

式中  $E$  为总能量 ( $E = \sum_{i=1}^n E_i$ )。

从而求得各阶 IMF 分量的能量百分比, 表 1 为 IMF 分量的能量百分比和频率分布, 由于篇幅限制, 分别只给出 2 个样本值。

分析各 IMF 的频域、能量特征得知, 当高速列车转向架出现蛇行失稳时, 振动信号经 MEEMD 分解后, IMF 分量频率从高到低依次分布。其中横向振动信号中 IMF1 分量能量接近总能量, 能量比  $>98\%$ , 频率主要分布在  $3.9 \sim 4.7 \text{ Hz}$  内; 纵向振动信号能量主要集中在 IMF1、IMF2 上, 其中 IMF1 分量能量比在  $40\%$  左右, 频率主要分布在  $1.6 \sim 4.7 \text{ Hz}$  和  $7.8 \sim 11.5 \text{ Hz}$  内, IMF2 能量比在  $60\%$  左右, 频率主要分布在  $3.9 \sim 4.8 \text{ Hz}$  内; 垂向振动信号能量集中在 IMF1 和 IMF2 上, 其中 IMF1 能量比在  $50\%$  左右, 频率主要分布在  $4.8 \sim 13.2 \text{ Hz}$  内, IMF2 能量比在  $45\%$  左右, 频率主要分布在  $3.9 \sim 5.1 \text{ Hz}$  内。可见, 列车转向架蛇行失稳时, 其振动信号频率丰富, 横向、纵向和垂向振动信号的频率、能量信号分布差异明显。其中横向振动信号频率、能量高度集中; 纵向振动信号频率、能量分布相对集中; 垂向振动信号能量、频率分布相对分散。

### 3.3 信号的 MEEMD-HT 谱与 EEMD-HT 谱分析

将转向构架横向、纵向和垂向实测信号通过 MEEMD-HT 方法和 EEMD-HT 方法分析, 结果如图

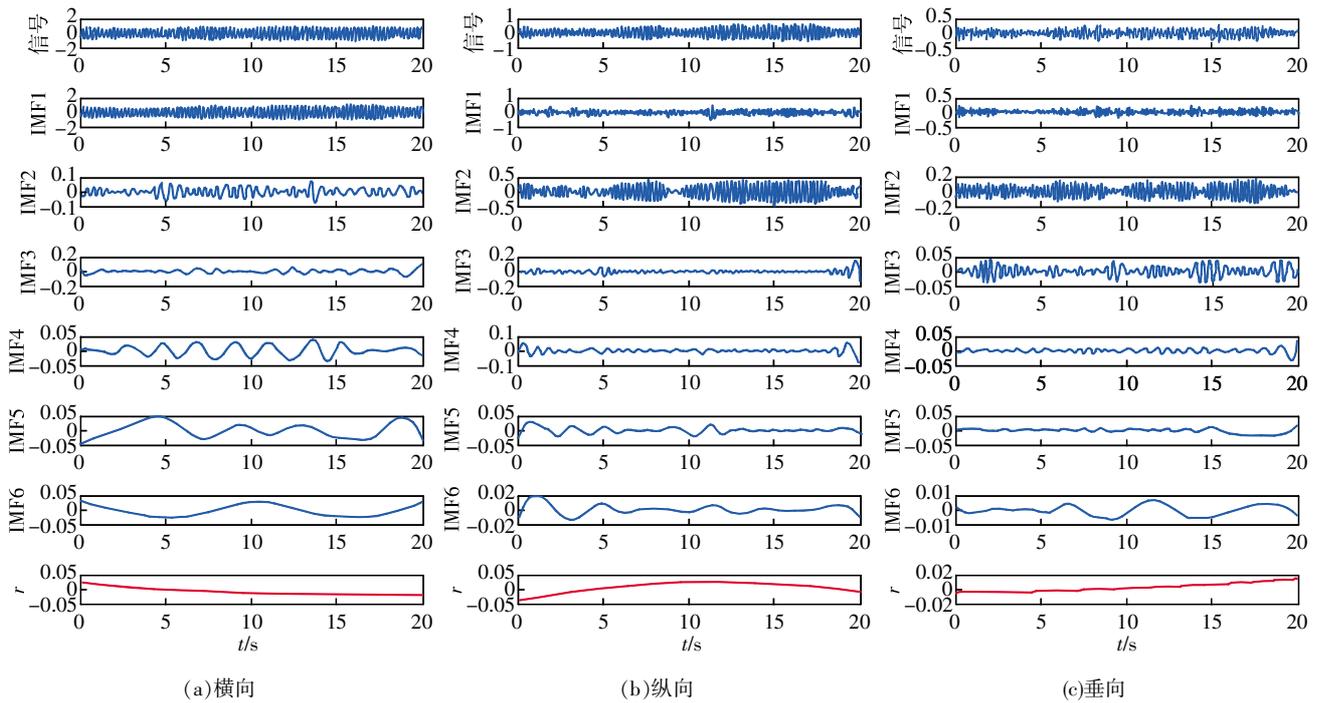


图 3 转向架横向、纵向和垂向振动信号的 MEEMD 分解结果

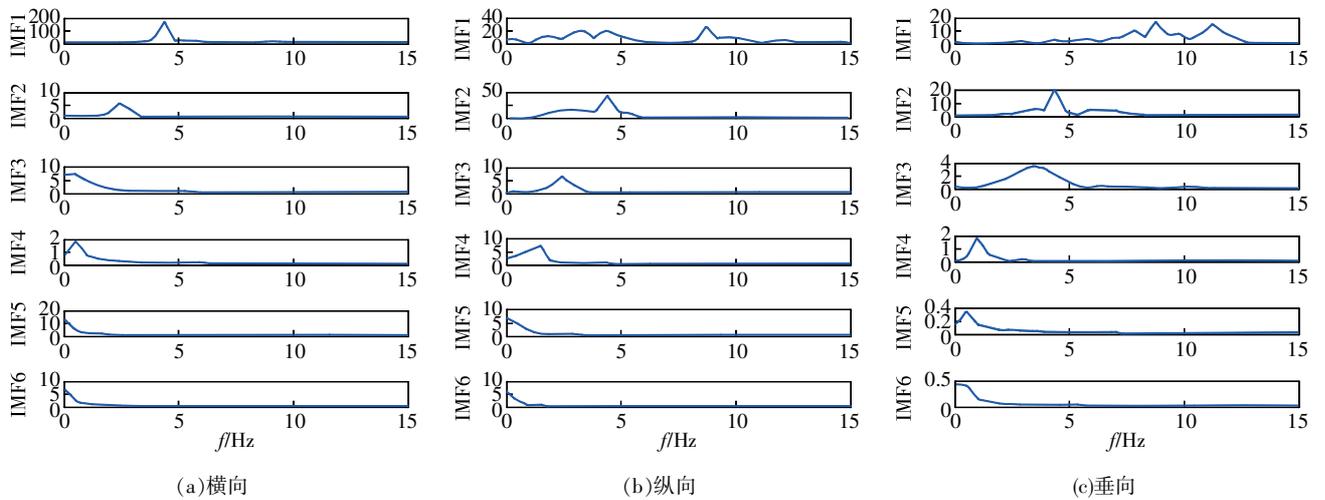


图 4 转向架横向、纵向和垂向振动信号的 IMF 分量频率

5 所示。从图中得知,与 EEMD-HT 时频能量谱相比, MEEMD-HT 能量谱能清晰表达能量随时间、频率的分布细节,更能清楚展示信号的特征,而 EEMD-HT 谱遗漏了很多频率成分。相比之下,MEEMD-HT 方法能抑制模态混叠、解决模态分裂问题,优于传统的 EEMD-HT 方法。

### 3.4 信号的 MEEMD-HT 边际谱分析

分析图 5 和图 6 得知,列车蛇行失稳状态下,横向振动频率、能量高度集中,主要在 5 Hz 左右;纵向振动频率、能量相对集中,主要分布在 5 Hz 与 9.375 Hz

左右;垂向振动频率、能量相对分散,主要分布在 5 Hz 和 10.31 Hz 左右。同时也说明列车蛇行失稳对转向架横向影响最大,其次是纵向,最后是垂向。

## 4 结束语

高速列车蛇行失稳时,其振动复杂,本文以速度 330~350 km/h 转向架蛇行失稳时横向、纵向、垂向振动信号为研究对象,结合 MEEMD 和 HT 方法对列车时频能特征分析,结论如下:

1) 列车蛇行失稳时,转向架横向和纵向失稳现象明显,其中横向振动最为剧烈,振动频率和能量高

表1 IMF分量能量百分比及其频率分布<sup>1)</sup>

| 测点方向 | IMF1            |        | IMF2            |        | IMF3            |        | IMF4            |        | IMF5            |        | IMF6            |        |
|------|-----------------|--------|-----------------|--------|-----------------|--------|-----------------|--------|-----------------|--------|-----------------|--------|
|      | $f_i/\text{Hz}$ | $E_i$  | $f_j/\text{Hz}$ | $E_j$  | $f_k/\text{Hz}$ | $E_k$  | $f_l/\text{Hz}$ | $E_l$  | $f_m/\text{Hz}$ | $E_m$  | $f_n/\text{Hz}$ | $E_n$  |
| 横向   | 4.395           | 0.9920 | 2.441           | 0.0021 | 0.585           | 0.0022 | 0.488           | 0.0009 | 0.412           | 0.0018 | 0.266           | 0.0010 |
|      | 4.362           | 0.9890 | 2.464           | 0.0032 | 0.496           | 0.0018 | 0.362           | 0.0012 | 0.396           | 0.0030 | 0.235           | 0.0018 |
| 纵向   | 7.789           | 0.3793 | 4.395           | 0.6047 | 2.441           | 0.0103 | 1.465           | 0.0036 | 0.766           | 0.0015 | 0.385           | 0.0005 |
|      | 7.763           | 0.4028 | 4.328           | 0.5763 | 4.409           | 0.0082 | 1.468           | 0.0128 | 0.724           | 0.0009 | 0.392           | 0.0006 |
| 垂向   | 8.789           | 0.5128 | 4.395           | 0.4539 | 3.418           | 0.0217 | 1.077           | 0.0044 | 0.878           | 0.0062 | 0.531           | 0.0010 |
|      | 8.782           | 0.4940 | 4.280           | 0.4828 | 3.425           | 0.0163 | 0.968           | 0.0064 | 0.768           | 0.0003 | 0.519           | 0.0001 |

注:1) $E_i$ 为各IMF分量能量百分比, $f_i$ 为平均频率。

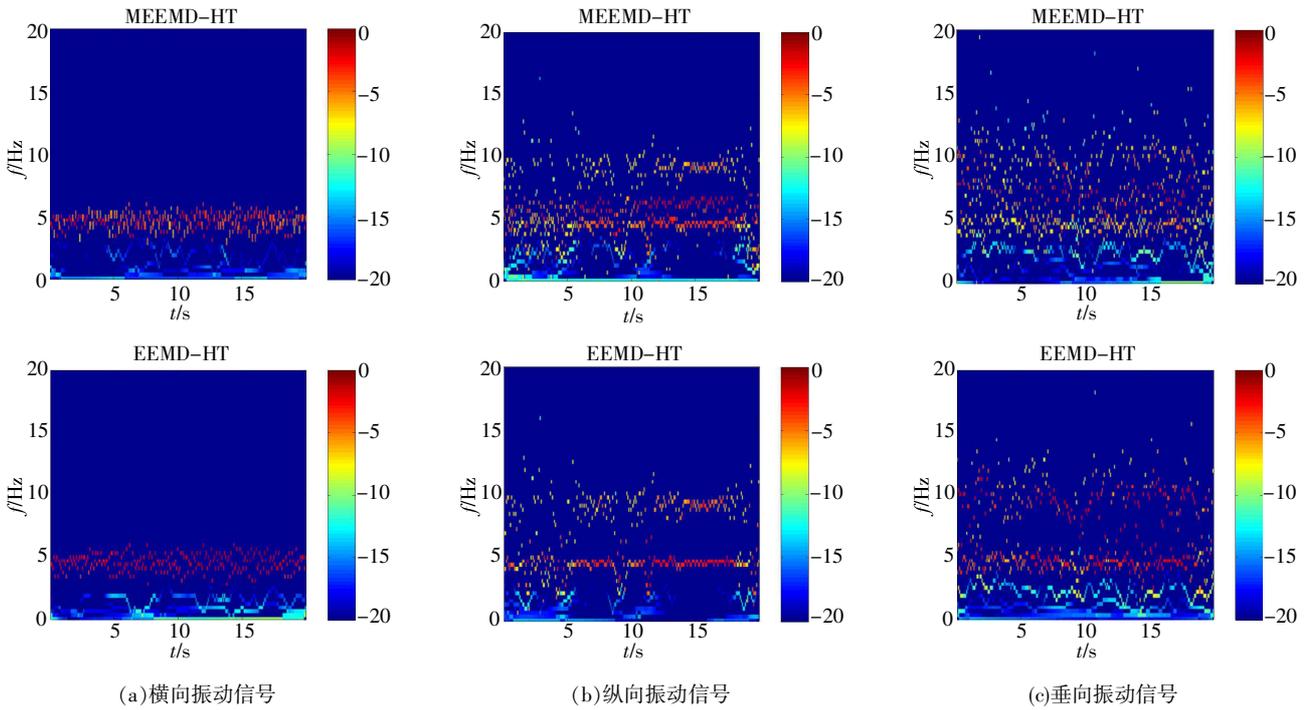


图5 振动信号MEEMD-HT与EEMD-HT比较

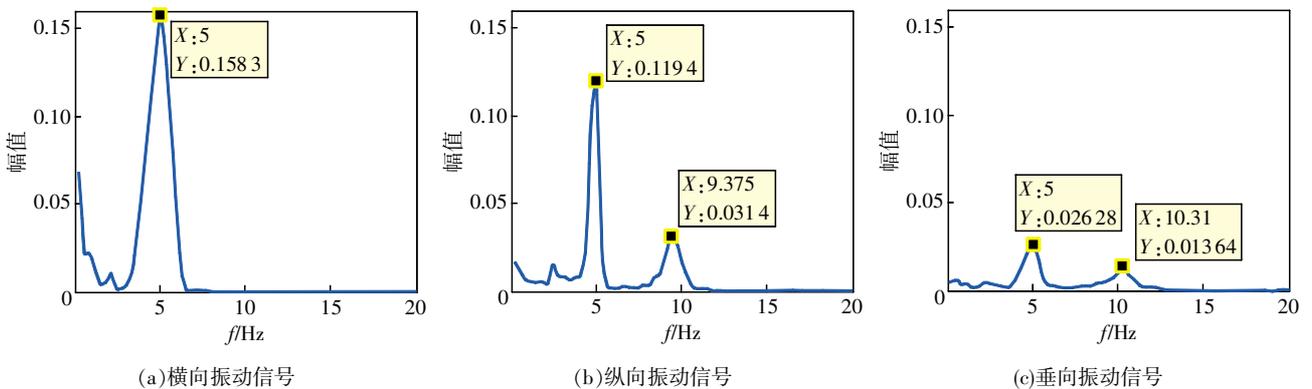


图6 振动信号MEEMD-HT边缘谱

度集中,平稳性最差;纵向振动相对缓和,频率、能量相对分散,平稳性优于横向平稳性;垂向也有失稳现象,但振动频率和能量分散,平稳性优于横向和纵向平稳性。

2) 与传统的EEMD-HT方法相比,MEEMD和HT结合方法得到的Hilbert能量谱能更清楚表达出振动信号的时频能分布情况,能更好地展示信号能量随时间、频率变化的细节特征。

## 参考文献

- [1] 张卫华,李艳,宋冬利. 高速列车运动稳定性设计方法研究[J]. 西南交通大学学报,2013,48(1):1-9.
- [2] 池茂儒,张卫华,曾京,等. 蛇行运动对铁道车辆平稳性的影响[J]. 振动工程学报,2008,21(6):639-643.
- [3] 孙丽霞,姚建伟. 高速铁道车辆蛇行脱轨安全性评判方法研究[J]. 中国铁道科学,2013,34(5):82-92.
- [4] 刘峰,延九磊,董孝卿,等. 转向架横向稳定性的实时在线监测[J]. 铁道机车车辆,2010,30(2):5-8.
- [5] ZHAI W M, WANG K Y. Lateral hunting stability of railway vehicles running on elastic track structures[J]. American Society of Mechanical Engineers,2010,5(4):1-9.
- [6] HUANG N E, SHEN Z, LONG S R. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and nonstationary time series analysis[J]. Proc Royal Soc London,1998,454(1971):903-995.
- [7] WU Z H, HUANG N. Ensemble empirical mode decomposition: A noise assisted data analysis method[J]. Advances in Adaptive Data Analys,2009,1(1):1-41.
- [8] 郑旭,郝志勇,金阳,等. 基于 MEEMD 的内燃机辐射噪声贡献[J]. 浙江大学学报(工学版),2012,46(5):954-956.
- [9] 郑近德,程军圣,杨宇. 改进的 EEMD 算法及其应用研究[J]. 振动与冲击,2013,32(21):21-26.
- [10] 铁道车辆动力学性能评定和实验鉴定规范:GB/T 5599—1985[S]. 北京:中国标准出版社,1985.
- [11] 蔡里军. 基于 FPGA 的高速列车转向架蛇行失稳检测装置[D]. 成都:西南交通大学,2012.
- [12] YANG Y, YU D J, CHENG J S. A rolling fault diagnosis method based on EMD energy entropy and ANN[J]. Journal of Sound and Vibration,2006,294(1/2):269-277.

(编辑:李妮)

(上接第 119 页) 特性,结果表明:递归滤波器的最优阶数为 9 阶;弹性模量对测压管道的幅频特性影响不大,弹性模量高的测压管道在谐振点处的增益高于弹性模量低的管道。研究结果对采用管道引压方式测量坦克散热窗风压有一定的参考意义。

## 参考文献

- [1] 柳振杰,刘坤,陈环. 基于模拟环境的特种车辆热平衡试验研究[J]. 装备环境工程,2013,10(1):45-48.
- [2] 韩玉阁,宣益民. 坦克动力舱内的热特性[J]. 红外技术,2000,22(3):23-26.
- [3] 梁国伟,蔡武昌,等. 流量测量技术与仪表[M]. 北京:机械工业出版社,2002:4-367.
- [4] 蔡武昌,孙淮清,纪纲. 流量测量方法和仪表选用[M]. 北京:化学工业出版社,2001:6-20.
- [5] 马文勇,刘庆宽,刘小兵,等. 风洞试验中测压管路信号畸变及修正研究[J]. 实验流体力学,2013,27(4):71-77.
- [6] YOSHIDA A, TAMURA Y, KURITA T. Effects of bends in a tubing system for pressure measurement[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2001,89(s14-15):1701-1716.
- [7] 周暄毅,顾明. 单通道测压管路系统的优化设计[J]. 同济大学学报,2003,31(7):798-802.
- [8] HOLMES J D, LEWIS R E. Optimization of dynamic pressure measurement systems. I. Single point measurements[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics,1987,25(3):249-273.
- [9] 沈宇键,何昕,郝志航. 时域递归滤波算法中 K 系数确定方法的研究[J]. 系统工程与电子技术,2001,23(3):61-65.
- [10] 陈波,骆盼育,杨青山. 测压管道系统频响函数及对风效应的影响[J]. 振动与冲击,2014,33(3):130-134.
- [11] HUANG T M, RGJ F. A comparison of recursive filter and spectral methods for digital correction of pressure measurements distorted by tubing response[C]//Proceedings of Fifth UK Wind Engineering Society Conference, 2002:169-172.
- [12] 李学来,郭荣伟. 振荡管内气柱谐振的研究[J]. 航空学报,1999,20(2):1-3.

(编辑:李妮)