

快递运输包装随机振动信号采集与分析

周浩¹, 谭清方¹, 王志伟²

(1.深圳职业技术学院, 深圳 518000; 2.暨南大学 a.包装工程研究所 b.产品包装与物流广东普通高校重点实验室 c.产品包装与物流珠海市重点实验室, 广东 珠海 519070)

摘要: **目的** 研究中国南方快递运输包装车辆的随机振动特性, 为随机振动试验研究提供理论指导。**方法** 实地采集快递运输包装终端配送车辆在实际工况中遭受的随机振动信号, 通过经验模态分解, 对各固有模态函数(IMF)的时域、功率谱密度、Hilbert时频谱、Hilbert边际谱等进行分析。**结果** 经验模态分解将运输包装随机振动信号按频率高低依次分解成若干IMF分量, 前若干IMF分量代表原始信号中的高频瞬态振动信号, 后若干IMF分量代表原始信号中的低频振动信号, 进而实现高频与低频振动信号的有效分离。**结论** 希尔伯特-黄变换适用于快递运输包装随机振动信号的分析研究, 将在振动信号中间歇性的、加速度幅值较大且持续时间短暂的高频冲击信号进行分离, 为运输包装随机振动信号模拟提供新思路, 并对产品包装防护设计具有一定的理论指导意义。

关键词: 运输包装; 希尔伯特-黄变换; 随机振动; 包装防护

中图分类号: TB123; TH113 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2021)13-0199-06

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2021.13.027

Measurement and Analysis of Random Vibration on Express Terminal Delivery Vehicle Based on Hilbert Huang Transform

ZHOU Hao¹, TAN Qing-fang¹, WANG Zhi-wei²

(1.Shenzhen Polytechnic, Shenzhen 518000, China; 2a. Packaging Engineering Institute b.Key Laboratory of Product Packaging and Logistics of Guangdong Higher Education Institutes c.Zhuhai Key Laboratory of Product Packaging and Logistics, Jinan University, Zhuhai 519070, China)

ABSTRACT: The work aims to analyze the vibration characteristics of the express transport packaging vehicles in south China to provide theoretical guidance for the research of random vibration test. Vibration signal of one terminal delivery is measured for Hilbert Huang Transform. The instinct mode functions decomposed by empirical mode decomposition method are analyzed in aspects of time domain, power spectral density and Hilbert spectral. Empirical Mode Decomposition decomposes random vibration signals of transport packaging into several IMF components in order of frequency. It is very likely that the first several IMFs represent the high-frequency instantaneous events, while the second several IMFs represent the low-frequency vibration signals of the original signal. Thus, the high frequency and low frequency vibration signals can be separated effectively. The results show the applicability of HHT for random vibration on express logistics packaging. The impulsive shock events with big amplitude and short duration, which buried in vibration, can be extracted.

KEY WORDS: transport packaging; Hilbert Huang Transform; random vibration; protective packaging

收稿日期: 2020-12-11

基金项目: 深圳市教育科学规划 2020 年度课题(ybzz20007); 深圳职业技术学院教改项目(7019310031J); 广东省教育厅特色创新项目(6020210017K); 深圳职业技术学院专创融合示范课程建设项目《网络包装与电子商务》; 深圳职业技术学院教学改革项目: 高职院校专创融合课程开发与实践——以网络包装与电子商务为例

作者简介: 周浩(1984—), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为运输包装设计。

通信作者: 谭清方(1986—), 女, 硕士, 讲师, 主要研究方向为包装营销心理学。

路面不平、行驶速度突变等问题导致公路运输车辆会遭受不同强度的振动和冲击。包装件在运输物流过程中遭受的随机振动特性是进行运输包装可靠性试验的重要基础,国内外学者针对该领域做了很多研究。Singh, Chonhenchob, Garcia-Romeu-Martinez 等对美国^[1]、西班牙^[2]、巴西^[3]、泰国^[4]的货车运输,对印度^[5]、匈牙利^[6]、泰国^[4]的火车运输,对泰国、印度尼西亚^[7]的二轮、三轮摩托车运输,以及对美国的空运^[8]等随机振动信号进行了采集和分析。Rouillard^[9]对行驶在澳大利亚不同道路上的6种不同型号车辆的随机振动信号进行了采集和研究。Root^[10]、Baird^[11]、周然^[12-13]等对货车行驶在中国部分城际道路上的振动信号进行了采集和分析。Zhou等^[14]对5款行驶在中国南方高速公路和城市道路上的快递运输包装常用车型的振动信号进行了调查研究^[15]。

目前,随机振动特性分析主要运用概率统计方法,通过对振动信号的加速度幅值、均方根值(RMS, Root Mean Square)等统计参数的概率分布进行分析,以及对运用傅里叶变换得到振动信号的功率谱密度(PSD, Power Spectral Density)进行频谱分析等。振动信号的仿真模拟需建立在信号特性的深度解析和表征基础上,目前,随机振动信号的仿真模拟主要基于傅里叶变换、小波变换等传统信号处理和分析方法。适用于非线性、非平稳信号处理和解析的希尔伯特-黄变换(HHT, Hilbert Huang Transfer)被广泛应用于土木、机械工程等领域^[16],有关包装件振动激励信号的HHT研究尚未深入开展。文中通过实地采集快递运输包装车辆实际工况中的振动信号,运用HHT方法对实测信号进行分析,解析包装件随机振动激励信号的特性,旨在为随机振动激励信号仿真及产品包装可靠性评估试验、设计等提供科学指导。

1 HHT理论与方法

1.1 经验模态分解

HHT的第1部分是经验模态分解(Empirical Mode Decomposition)。经验模态分解能将非平稳信号分解成有限个且具有一定物理定义的固有模态函数和1个余项^[17]。经验模态分解(Intrinsic Mode Function)流程见图1,具体条件和步骤等不再赘述。

1.2 Hilbert变换

将IMF分量进行Hilbert变换,得到每个IMF分量的瞬时频谱,综合所有IMF分量的瞬时频谱,可得到Hilbert时频谱。通过Hilbert变换得到的瞬时频率具有直观的物理意义^[18]。对各IMF分量进行瞬时频率提取,得到 $X(t)$ 的解析表达式(不含趋势项)^[19]如下:

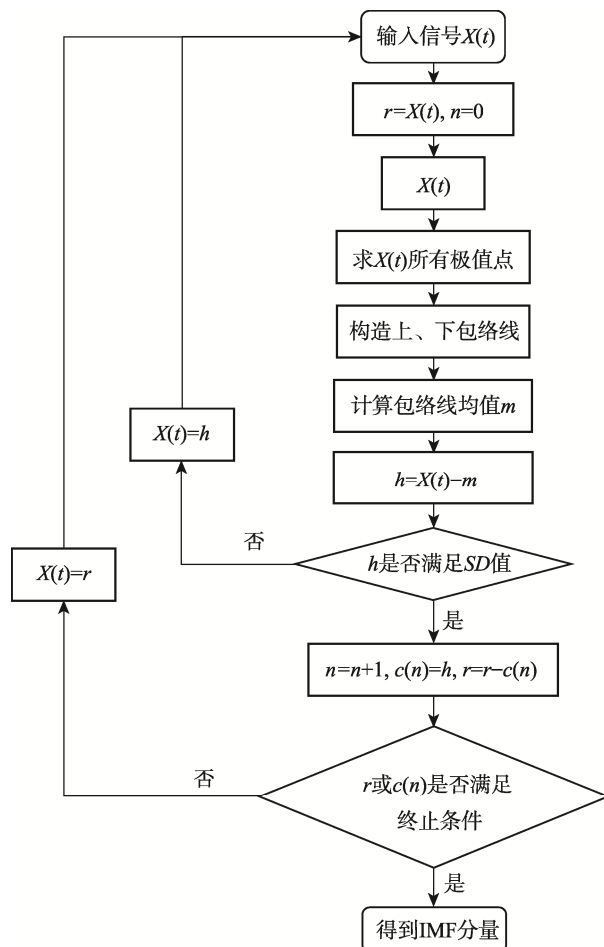


图1 经验模态分解流程

Fig.1 Workflow of EMD

$$X(t) = \text{Re} \sum_{i=1}^n b_i a_i \exp(j \int w_i(t) dt) \quad (1)$$

表示成时间、瞬时频率、幅值的三维时频谱图 $H(w, t)$, 即 Hilbert 时频谱如下:

$$H(w, t) = \text{Re} \sum_{i=1}^n b_i a_i \exp(j \int w_i(t) dt) \quad (2)$$

式中: b_i 为开关因子,当 $w=w_i$ 时, $b_i=1$,否则 $b_i=0$ 。通过对时间积分,可以进一步定义 Hilbert 边际谱:

$$h(w) = \int_{-\infty}^{+\infty} H(w, t) dt \quad (3)$$

Hilbert 时频谱定量描述了频率与时间的关系,边际谱表述了信号不同频率的能量分布和集中情况。

2 信号采集与分析

2.1 采集装置和参数设置

实验选用的振动信号采集设备为内置三轴向加速度传感器的便携式随机振动环境记录仪(SAVERTM 3X90),量程为50g,运用3MTM强力双面胶将信号

采集装置固定于车辆固定位置，采集车辆横向三轴向的随机振动信号，振动信号采集设备和 3M 双面胶见图 2。

同时开启装置的信号和时间触发采样模式，采样频率设置为 1000 Hz，单个振动事件记录时长为 2 s，信号触发采样阈值设置为 0.5g，时间触发采样间隔设置为 60 s，信号采集装置的详细参数设置见图 3。实验选用车型和信号采集设备安装位置见图 4，车辆行驶路线见图 5。

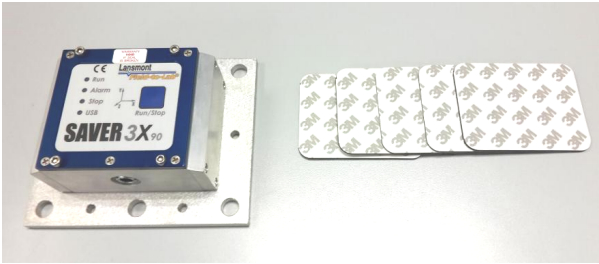


图 2 信号采集装置
Fig.2 Signal sampling equipment

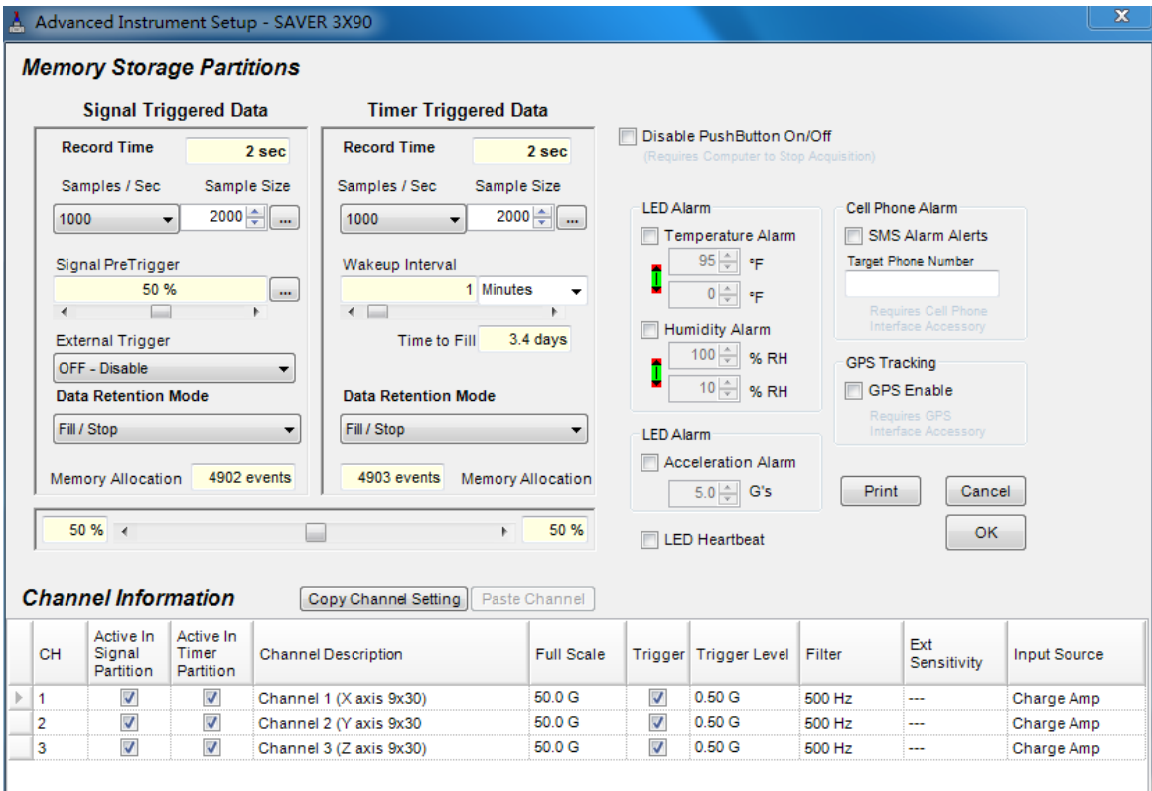


图 3 参数设置
Fig.3 Parameter settings



图 4 车型和设备安装位置
Fig.4 Vehicles and instrument location



图 5 车辆行驶路线
Fig.5 Route of the two-wheel electric bicycle

实验选取顺丰速运终端配送车辆——二轮电动自行车,实地采集该车辆在装载一定快递货物情况下,行驶在深圳市内某段城市道路上的振动信号,其时域图见图6。实测信号在120~180 s垂直方向的振动加速度见图6a,其在163~165 s的加速度放大图见图6b,信号中包含若干个间歇性出现的、加速度幅值较大($a_{\max}=2.73g$)且持续时间短暂的冲击信号。

2.2 经验模式分解

通过EMD将实测信号进行分解,得到11个固有模态函数和1个残余量。高频IMF分量被优先分解出来,IMF分量的频率随着标注数字的增大而递减,即分量c1的频率最高,c11频率最低。从IMF分量振动加速度幅值来看,IMF分量c1—c7信号的振动幅值较大,IMF分量c8—c11信号、残余量(res)的幅值较小,呈递减趋势。截取一段实测信号的固有模态函数,见图9。

将IMF分量c1—c4叠加,与原始信号中的高频成分较好匹配,由图8可知,该频率段的振动主要由道路坑洼不平、车速突变等间歇性问题造成,且频率相对较高。将IMF分量c5—c7叠加,与原始信号中的低频成分较好匹配,由图9可知,该频率段的振

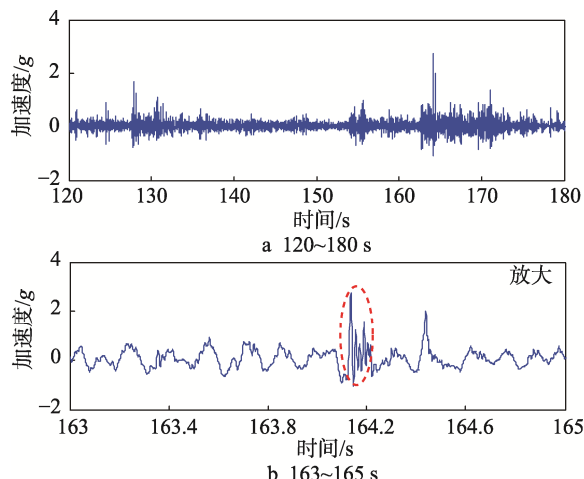


图6 实测信号加速度
Fig.6 Waveform of measured vibration signal

动代表车辆遭受的持续低频振动。将IMF分量c1—c7叠加,与原始信号非常匹配,见图10。研究表明,公路运输包装车辆遭受的随机振动信号中含有间歇性出现、振幅较大且持续时间短暂的高频冲击信号,并且经验模式分解能够有效地将高频冲击信号与低频的振动信号进行分离。

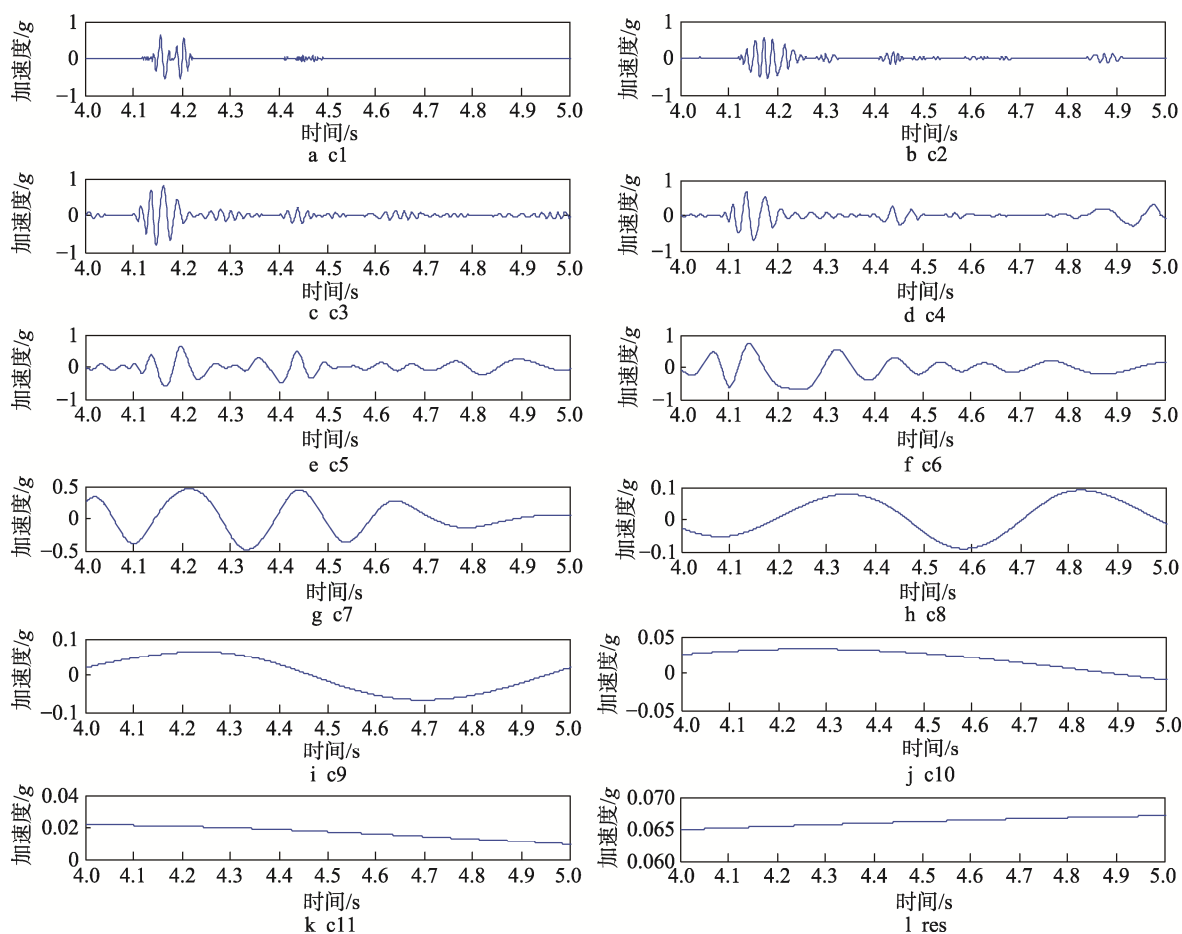


图7 实测信号IMF分量
Fig.7 IMFs

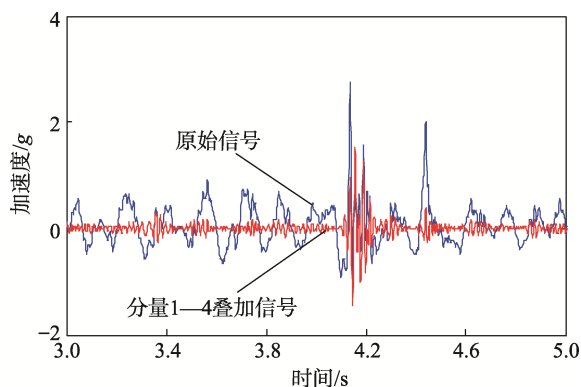


图 8 IMF 分量 c1—c4 叠加信号的时域
Fig.8 IMFs c1—c4

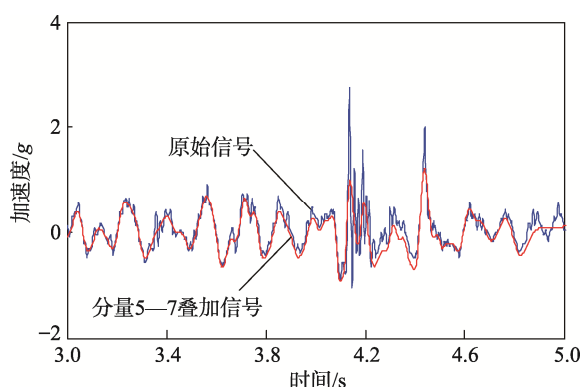


图 9 IMF 分量 c5—c7 叠加信号的时域
Fig.9 IMFs c5—c7

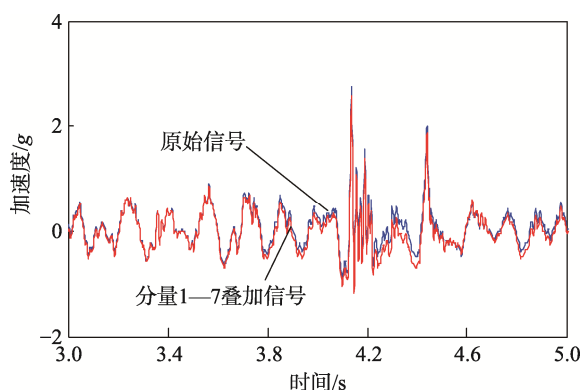


图 10 IMF 分量 c1—c7 叠加信号的时域
Fig.10 IMFs c1—c7

2.3 功率谱密度分析

实测信号、高频 IMF 分量 c1—c4 叠加信号、低频 IMF 分量 c5—c7 叠加信号的功率谱密度曲线见图 11, 高频 IMF 分量 c1—c4 叠加信号的 PSD 曲线在高频段 ($f > 20$ Hz) 与原始信号的 PSD 曲线非常匹配, 低频 IMF 分量 c5—c7 叠加信号的 PSD 曲线在低频段 ($f = 1 \sim 20$ Hz) 与原始信号的 PSD 曲线非常匹配, 3 条 PSD 曲线的交点发生在频率为 20 Hz 左右。振动能量主要集中在低频段, 高频段信号的振动能量要低一些。IMF 分量 c1—c4 的功率谱密度在低频段与原

始信号相差近 2 个数量级, IMF 分量 c5—c7 的功率谱密度在高频段与原始信号相差 1~2 个数量级, 实际处理时可忽略。

2.4 Hilbert 谱和 Hilbert 边际谱

对 IMF 分量 c1—c7 进行 Hilbert 变换, 得到信号的 Hilbert 时频谱, 见图 12。研究表明, 车辆随机振动信号的频率成分非常丰富, 低频振动大量存在, 分散的高频分量也同样存在。高频分量 (虚线) 代表原始信号中的瞬态冲击, 低频分量 (实线) 代表原始振动信号中的持续振动信号。Hilbert 边际谱见图 13,

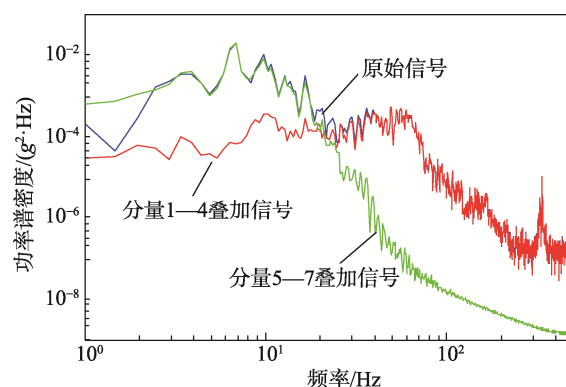


图 11 功率谱密度曲线对比
Fig.11 PSD comparison

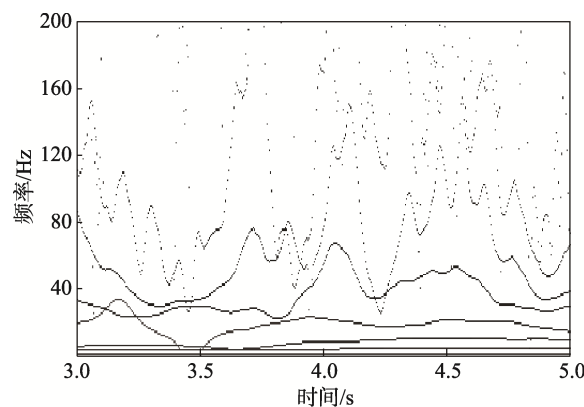


图 12 原始信号的 Hilbert 时频
Fig.12 Hilbert spectrum of original signals

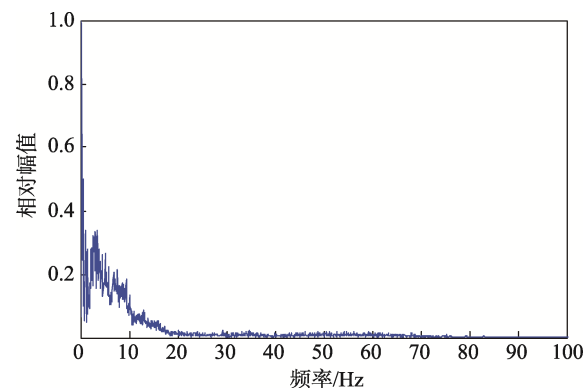


图 13 原始信号的 Hilbert 边际谱
Fig.13 Hilbert marginal spectrum of the original signals

表明实测车辆随机振动信号中, 车辆振动信号的低频段信号包含了绝大部分的能量。

3 结语

通过实地采集快递运输包装车辆随机振动信号, 并运用经验模态分解和 Hilbert 变换进行了分析研究, 得到如下主要结论: 希尔伯特-黄变换 (HHT) 适用于运输包装车辆随机振动信号的频谱特性分析, 该领域的研究者可拓展该方法在运输包装随机振动分析和仿真技术研究中的应用; 经验模态分解可将运输包装车辆振动信号按频率高低依次分解成若干 IMF 分量, 前若干 IMF 分量代表了原始信号中的高频瞬态信号, 后若干 IMF 分量代表原始信号中的低频振动信号, 该方法能够实现高频信号与低频信号的分离; 对于运输包装随机振动仿真, 可通过将能量水平适当、间歇性出现的高频冲击叠加到低频振动中, 实现基于不同振动来源的非高斯随机振动信号模拟, 并开展实证研究, 为产品可靠性试验评价提供科学指导。

参考文献:

- [1] SINGH J, SINGH S P, JONESON E. Measurement and Analysis of US Truck Vibration for Leaf Spring and Air Ride Suspensions, and Development of Tests to Simulate These Conditions[J]. *Packaging Technology and Science*, 2006, 19: 309—323.
- [2] GARCIA-ROMEU-MARTINEZ M A, SINGH S P, CLOQUELL-BALLESTER V A. Measurement and Analysis of Vibration Levels for Truck Transport in Spain as a Function of Payload, Suspension and Speed[J]. *Packaging Technology and Science*, 2008, 21: 439—451.
- [3] RISSI G O, SINGH S P, BURGESS G, et al. Measurement and Analysis of Truck Transport Environment in Brazil[J]. *Packaging Technology and Science*, 2008, 21: 231—246.
- [4] CHONHENCHOB V, SINGH S P, SINGH J, et al. Measurement and Analysis of Truck and Rail Vibration Level in Thailand[J]. *Packaging Technology and Science*, 2010, 23: 91—100.
- [5] SING S P, SANDHU A P S, SINGH J. Measurement and Analysis of Truck and Rail Shipping Environment in India[J]. *Packaging Technology and Science*, 2007, 20: 381—392.
- [6] BÖRÖCZ P, SINGH S P. Measurement and Analysis of Vibration Levels in Rail Transport in Central Europe[J]. *Packaging Technology and Science*, 2016, 30: 361—371.
- [7] KURNIAWAN M P, CHONHENCHOB V, SINGH S P. Measurement and Analysis of Vibration Levels in Two and Three Wheel Delivery Vehicles in Southeast Asia[J]. *Packaging Technology and Science*, 2015, 28: 823—837.
- [8] SINGH S P, SINGH J, SAHA K. Measurement and Analysis of Physical and Climatic Distribution Environment for Air Package Shipment[J]. *Packaging Technology and Science*, 2015, 28: 719—731.
- [9] ROUILLARD V. On the Synthesis of Non-Gaussian Road Vehicle Vibrations[D]. Melbourne: Monash University, 2007: 42—78.
- [10] ROOT D, JONESON E, HAN Xue-shan. PRC-Psd Vehicle Random Vibration Study[C]//18th IAPRI World Packaging Conference, 2012: 156—170.
- [11] BAIRD T, YOUNG D. The China Project: an Assessment of the China Shipping and Handling Environments[R]. ISTA PST Newsletter, 2004: 35—41.
- [12] ZHOU Ran, SU Shu-qiang, YAN Li-ping, et al. Effect of Transport Vibration Levels on Mechanical Damage and Physiological Responses of Huang Hua Pears (*Pyrus Pyrifolia* Nakai, cv Huang Hua)[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2007, 46: 20—28.
- [13] ZHOU R, YAN Li-ping, LI Bai-guo, et al. Measurement of Truck Transport Vibration Levels in China as a Function of Road Conditions, Truck Speed and Load Level[J]. *Packaging Technology and Science*, 2015, 28: 949—957.
- [14] ZHOU Hao, WANG Zhi-wei. Measurement and Analysis of Vibration Levels for Express Logistics Transportation in South China[J]. *Packaging Technology and Science*, 2018, 31(10): 665—678.
- [15] 周浩. 公路运输包装随机振动分析与模拟方法研究[D]. 广州: 暨南大学, 2017: 2.
ZHOU Hao. Study on Random Vibration Analysis and Simulation Method of Road Transport Packaging[D]. Guangzhou: Jinan University, 2017: 2.
- [16] 张谦, 舒悦, 王乐, 等. 往复压缩机故障诊断方法研究概述[J]. *流体机械*, 2018, 46(3): 37—41.
ZHANG Qian, SHU Yue, WANG Le, et al. Research on Fault Diagnosis Method of Reciprocating Compressors[J]. *Fluid Machinery*, 2018, 46(3): 37—41.
- [17] HUANG N E, SHEN Z, LONG R S, et al. The Empirical Mode Decomposition and Hilbert Spectrum for Nonlinear and Non-Stationary Time Series Analysis[J]. *Proceedings of the Royal Society A*, 1998, 454: 903—995.
- [18] 张义平. 爆破震动信号的 HHT 分析与应用研究[D]. 长沙: 中南大学, 2006: 15—20.
ZHANG Yi-ping. HHT Analysis of Blasting Vibration and ITS Application[D]. Changsha: Central South University, 2006: 15—20.
- [19] 戴桂平. 基于 EMD 时频分析的轧机扭振瞬态冲击特征提取[J]. *仪表技术与传感器*, 2009(9): 74—75.
DAI Gui-ping. Characteristic Extracted Method for Rolling Mill's Transient Torsional Vibration Signal Based on EMD[J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2009(9): 74—75.