

重点推介

铁路非高斯随机振动的数字模拟与包装件响应分析

朱大鹏, 李明月

(兰州交通大学, 兰州 730070)

摘要: **目的** 研究铁路振动环境的非高斯特性, 并分析包装件在非高斯随机振动环境条件下的响应情况。 **方法** 结合离散傅里叶变换与EARPG(1)模型, 模拟了铁路随机振动信号。根据采集的数据的PSD曲线计算幅值, 利用EARPG(1)模型生成了具有尖峰特征的模拟信号, 计算了相位并进行了相位整体平移, 根据幅值和相位, 合成了所需的非高斯随机振动信号。将包装件简化为单自由度系统, 分析了包装件在非高斯振动条件下的响应情况。 **结果** 铁路随机振动的峭度大于3, 偏斜度为0, 属于对称超高斯随机振动, 提出的模型可准确模拟出铁路振动的非高斯特性, 峭度和偏斜度的误差均小于3%, 包装系统的固有频率、阻尼比、激励峭度对系统的响应的峭度、均方根均有较大的影响。 **结论** 通过合理地选择包装系统的固有频率和阻尼比, 可有效减小系统的响应峭度和均方根, 提高包装系统的可靠性。

关键词: 非高斯随机振动; 峭度; 数字模拟; 包装系统响应分析

中图分类号: TB485.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2016)01-0001-05

Digital Simulation of Non-Gaussian Random Vibration of Railway and Packaging System Response Analysis

ZHU Da-peng, LI Ming-yue

(Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

ABSTRACT: The aims of this work were to study the non-Gaussian properties of random vibration during the railway transportation, and to analyze the response of packages excited by the non-Gaussian random vibration. A novel approach was proposed to synthesize railway non-Gaussian random vibration which incorporated discrete Fourier transform method with EARPG(1) model. The amplitude was obtained based on the PSD curves of collected data. The EARPG(1) model was used to generate spiky data, the phase was calculated and shifted. Based on the amplitude and phase, the non-Gaussian random vibration signal required was synthesized. The package was simplified to a SDOF system, and the acceleration response of the system under non-Gaussian vibration condition was analyzed. The kurtosis of railway random vibration was bigger than 3, and the skewness was 0. So the railway random vibration belonged to symmetrical super-Gaussian vibration. The model presented in this paper could simulate railway random vibration with accuracy, and both the kurtosis and skewness error were less than 3%. The simulation results indicated that the natural frequency, damping ratio and the excitation kurtosis affected the response kurtosis and RMS value. The response kurtosis and RMS value could be effectively decreased by the proper choice of natural frequency and damping ratio of package, and the reliability of package could be increased through proper packaging design.

KEY WORDS: non-Gaussian random vibration; kurtosis; digital simulation; response analysis of packaging system

分析和模拟运输过程中包装件的振动环境, 是确保运输包装安全的重要手段。文献[1]从振动与冲击

收稿日期: 2015-08-04

基金项目: 甘肃省教育厅高校科研项目(2014A-049)

作者简介: 朱大鹏(1977—), 男, 河南方城人, 博士, 兰州交通大学教授, 主要研究方向为运输包装、包装动力学、运输安全。

两个方面对公路运输动力学特性的研究现状进行了综述;贺志等^[2]提出了采用运输环境采集设备监控包装件物流运输过程的方法;文献[3]利用SAVER[®]记录了货物流通过程中的跌落冲击数据,应用冲击响应谱理论研究更加合理的包装设计;苏远等^[4]对公路运输环境进行了测试;路冰琳等^[5]对我国铁路运输环境进行了测试。美国、澳大利亚、巴西、西班牙、日本、印度等国对本国运输包装振动环境进行了测试和分析^[6-11]。传统的基于功率谱密度曲线的随机振动环境的再现技术,是基于振动数据的高斯分布基础之上的,即假定运输过程中,振动幅值符合高斯分布准则。事实上,运输环境中的随机振动往往属于非高斯分布,非高斯振动中的超高斯振动与高斯随机振动相比,大幅值的振动更多,更容易造成包装件的疲劳损坏,因此,非高斯随机振动模拟技术是国内外研究者的一个重要研究方向。

Rouillard V将非高斯随机振动分解为多个高斯分布的随机振动,用不同方差的高斯随机振动模拟非高斯随机振动^[12];静态转换法是生成非高斯随机数据的一种有效的方法,文献[13—14]采用三次多项式表达风压过程和高斯过程之间的转换关系,将非高斯风压场表达为一个虚拟的多变量高斯过程,从而采用谐波合成法生成了风压过程样本;Seong和Peterk利用指数峰值模型生成原始非高斯数据并提取相位信息,依据PSD曲线提取幅值信息,生成非高斯风压数据^[15];由于相位信息的变化不会影响到模拟数据的PSD值,因此,可考虑在一定的PSD条件下,通过谐波相位的合理选取来生成非高斯随机振动数值信号,同时确保信号的PSD曲线不受影响;蒋瑜和Steinwolf研究了在特定的PSD条件下,通过调制谐波相位的方法生成给定峭度和偏斜度的非高斯随机振动信号^[16-18],该方法生成的非高斯随机振动信号的PSD、峭度和偏斜度与测试的信号比较相符。

文中测试了西部地区的铁路运输过程中车辆中的随机振动,采用谐波相位调制的方法生成非高斯随机振动数字信号,将包装件看作是一个单自由度系统,分析不同激励峭度、不同系统参数条件下包装系统的响应情况,为非高斯随机振动条件下提高包装的可靠性提供理论依据。

1 随机振动的非高斯特性

为实现合理包装的目标,首先需对包装件的运输环境进行测试。我国铁路货物运输在整个货物运输

领域中占据重要地位。以兰州为中心,采用美国Lansmont公司生产的SAVER[®]3×90数据采集器,测试了兰州—西安、兰州—呼和浩特、兰州—拉萨、兰州—乌鲁木齐—阿拉山口线路的铁路棚车振动环境。基本参数设置为:采样频率2500 Hz,滤波器截止频率500 Hz,存储器存储满之后,后采集的较大数据覆盖之前存储的较小的数据。以兰州—呼和浩特的数据为例,选取一段实验中记录的垂向振动数据,经加汉宁窗处理,计算得到的PSD曲线见图1。

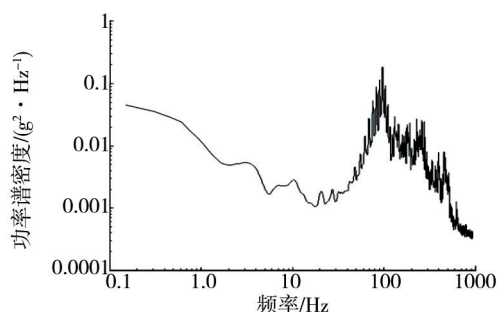


图1 铁路运输环境中垂向随机振动的PSD曲线

Fig.1 PSD curve of vertical random vibration in railway transportation environment

目前成熟的随机振动再现是基于FFT/IFFT技术的,即根据测得的PSD曲线,将随机振动信号表示为一系列不同频率的余弦信号的和的叠加的形式,即:

$$x(t) = \sum_{n=1}^N |A_n| \cos(2\pi n \Delta f t + \varphi_n) \quad (1)$$

各谐波的幅值 A_n 确定:

$$|A_n| = \sqrt{2\Delta f S(n\Delta f)} \quad (2)$$

式中: $S(n\Delta f)$ 为随机振动的PSD曲线上的频率为 $n\Delta f$ 处的值。式(1)中的相位 φ_n 为区间 $[0, 2\pi]$ 中的随机数,参数 Δf 为PSD曲线上的频率间隔。

根据图1的PSD曲线及式(1)、式(2)模拟的铁路随机振动的时域信号见图2b,为便于对比,图2a中还列出了一段真实的铁路随机振动信号。从图2a和b的对比可知,采用传统的基于PSD曲线和FFT/IFFT技术的随机振动模拟技术,不能准确再现真实铁路运输过程中的随机振动。图2a中,真实的随机振动信号中存在着很多幅值较大的尖峰信号,而在模拟信号中,由于相位 φ_n 的选取是随机的,经谐波叠加后,模拟信号幅值分布基本服从高斯分布,致使大部分的时域峰值信号的消失。尽管实测信号和模拟信号的PSD信息完全相同,但它们的时域信号的幅值概率密度分布具有很大的不同,数据经FFT/IFFT处理后,原始信号中的大量大幅值振动信号在模拟信

号中消失,这对包装件可靠性的分析带来了较大的误差,因此,除了PSD之外,有必要引入新的能表征随机振动非高斯特性的参数,以确保随机振动信号模拟的准确性。

对于非高斯分布的各类信号,除PSD之外,通常还引入偏斜度 S 和峭度 K 来表征信号的特性。其中,偏斜度的定义为:

$$S = \frac{M_3}{\sigma^3} \quad (3)$$

峭度 K 的定义为:

$$K = \frac{M_4}{\sigma^4} \quad (4)$$

其中, σ 为随机信号的标准差,参数的计算如下:

$$M_n = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [x(i\Delta t) - m]^n \quad (5)$$

$$m = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x(i\Delta t) \quad (6)$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [x(i\Delta t) - m]^2 \quad (7)$$

其中, Δt 为采样时间间隔。

偏斜度 S 为表明随机数据的幅值关于时间轴对称分布情况的参数,若幅值大于0的随机数据较多,而小于0的数据较少,则 $S>0$,否则 $S<0$,对于高斯分布的随机振动, $S=0$ 。峭度 K 是一个表征随机数据幅值概率分布曲线形状的参数,对于高斯分布的随机振动, $K=3$;若随机振动数据中分布有大量幅值较大的尖峰数据,则其概率分布曲线呈扁平状,此时 $K>3$,这类随机振动称为超高斯随机振动;若随机振动的幅值分布比较平均,无幅值较大的尖峰数据,则其概率分布曲线呈尖峰状,此时 $K<3$,这类随机振动称为亚高斯随机振动。

2 铁路超高斯随机振动的模拟

根据采集的铁路运输环境中的随机振动数据,根据式(3)与(4)进行分析计算,可得 $S \approx 0, K>3$,以图2a中记录的数据为例。计算可得, $K=5.1, S=-0.06$,故铁路运输过程中的随机振动为对称分布的超高斯随机振动。

结合离散傅里叶变换与EARPG(1)模型生成超高斯随机振动数据。根据文献[19]中的实验,随机振动数据的PSD曲线的幅值对模拟振动数据的非高斯特性无影响,合理地选择相位,可使合成数据中产生尖峰,从而使生成的模拟振动数据具备非高斯特性。为

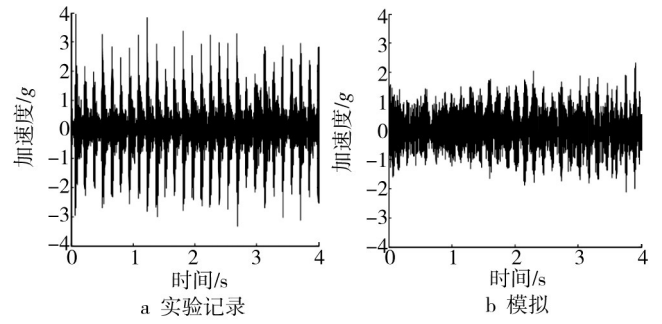


图2 实验记录的铁路随机振动和利用FFT/IFFT模拟的随机振动
Fig.2 Recorded railway random vibration data and simulated random vibration data using FFT/IFFT

此,首先可生成具有尖峰的时间序列,利用该时间序列的相位信息,可合成与该时间序列相似的非高斯数据。基于这一基本思路,模拟铁路超高斯随机振动的基本方法如下所述。

1) 记录实验数据 x_i ,对数据 x_i 进行离散傅里叶变换,傅里叶系数为:

$$A(\omega_k) = \sqrt{n} \sum_{i=1}^n x_i e^{-it\omega_k} \quad (8)$$

系数 $A(\omega_k)$ 是一个复数,它的幅值也可由PSD曲线的值直接获得。

2) 生成具呈非高斯分布,包含有大量尖峰的时间序列 y_i 。采用EARPG(1)模型^[13, 16]生成具有这种特性的时间序列:

$$y_i = ay_{i-1} + \begin{cases} 0 & \text{概率为 } b \\ E_i & \text{概率为 } 1 - b \end{cases} \quad t=1, 2, \dots, n \quad (9)$$

其中, a 是一个介于0与1之间的参数, E_i 是一个呈均匀分布的指数变量:

$$P\{E_i \leq p\} = \begin{cases} 1 - e^{-\lambda p} & p \geq 0 \\ 0 & p < 0 \end{cases} \quad (10)$$

改变参数 b, a, λ ,可改变 y_i 的波形。根据文献[16]中的实验结果,时间序列 y_i 中的各个尖峰的峰值的高度对合成信号的非高斯特性几乎没有影响,故在数值模拟中,只需确定参数 a 和参数 b 即可。

3) 非高斯随机振动数据的数字合成。利用数据 x_i 的傅里叶系数的幅值 $|A(\omega_k)|$,数据 y_i 的相位,并采用相位平移 δ ,合成具有非高斯特性的随机振动数据 z_i :

$$z_i = \sqrt{n} \sum |A(\omega_k)| e^{i[\varphi^{(y)}(\omega_k) + \delta(\omega_k)]} e^{it\omega_k} \quad (11)$$

其中, $|A(\omega_k)|$ 由式(8)求幅值求出,也可根据PSD曲线直接计算得出, $\varphi^{(y)}(\omega_k)$ 为时间序列 y_i 在频域的相位,由式(12)求出:

$$\varphi^{(y)}(\omega_k) = \arctan \frac{\sum_{t=1}^n y_t \cos(\omega_k, t)}{\sum_{t=1}^n y_t \sin(\omega_k, t)} \quad (12)$$

在数字信号合成过程中,相位的平移变化对信号的非高斯特性具有重要影响^[13,16],文中采用相位整体平移实现非高斯振动信号的生成:

$$\delta(\omega_k) = \begin{cases} d & -\pi \leq \omega_k < 0 \\ -d & 0 < \omega_k \leq \pi \end{cases} \quad (13)$$

经过以上3个步骤,可得非高斯随机振动的数字和合成信号,且实验记录的信号和合成信号具有完全相同的PSD曲线,编程优化参数 a, b, d ,可使记录的信号 x_i 和数字合成的信号 z_i 具有相同的峭度和偏斜度。文中选择的参数为: $a=0.85, b=0.97, d=\pi/6$,合成的数字信号见图3。从图3中的合成的时域数字信号来看,合成的信号和测试所得的信号相似度较好,它们的PSD曲线完全相同,而且具有相似的偏斜度和峭度,偏斜度和峭度的误差不超过3%。即利用合成的信号进行系统分析,是比较准确的。

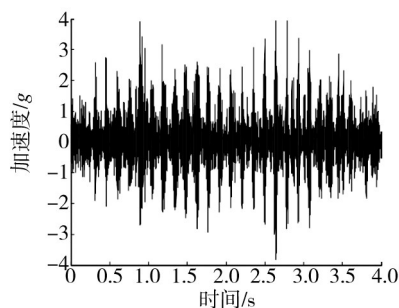


图3 合成的数字信号

Fig.3 Synthesized digital signal

3 系统响应分析

在非高斯激励条件下,研究包装件的响应,并分析不同的特性参数对包装件响应的影响,对于优化包装设计,提高包装件的可靠性,是非常有意义的。

将运输过程中的包装件简化为一个单自由度支座激励系统,见图4,激励为模拟的对称超高斯随机振动。图4所示的包装系统的运动方程式为:

$$R(t) + 2\xi\omega_n \dot{R}(t) + \omega_n^2 R(t) = z_t \quad (14)$$

其中: ω_n 为包装系统的固有频率; ξ 为阻尼比; z_t 为合成的非高斯振动信号; R 为系统的位移响应。根据式(14)所表示的系统,应用Matlab/Simulink建立该系统模型,利用文中建立的非高斯随机振动模拟方法

生成 z_t 作为模型的激励信号,生成响应信号 R ,并分析 R 的均方根、响应峭度。

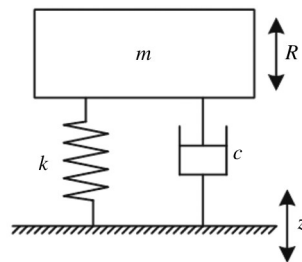


图4 简化的包装件模型

Fig.4 Simplified package model

分析过程中考虑系统参数 ω_n 和 ξ 的变化对系统响应的影响,考虑激励信号参数(峭度)的变化对系统响应的影响,可得出以下结论。

1) 对于线性包装系统,如果激励为非高斯随机振动,系统的响应也是非高斯随机振动,随着激励信号的峭度的增加,系统响应的峭度也相应增加。

2) 系统的参数对响应的峭度影响较大。随着系统固有频率的降低,响应的峭度降低;随着系统阻尼比的降低,系统响应的峭度也降低。

3) 包装系统的参数对响应的均方根影响较大,对于阻尼比,随着阻尼比的增加,系统响应的均方根减小;固有频率对系统响应的影响取决于它的大小与激励信号的频带范围,若固有频率位于非高斯激励信号的频带范围之内,则响应的均方根值较大,若将系统固有频率调整至激励信号频带范围之外,则系统响应的均方根值可大大降低。

4 结语

铁路运输是我国货物运输的一种重要方式。首先利用实验,采集了以兰州为中心的4条铁路线的运输环境的原始数据。由于运输环境中的随机振动信号具有明显的非高斯特性,故采用传统的基于PSD曲线的谐波叠加法模拟的随机振动信号具有一定的误差,无法再现随机振动信号中的大量尖峰信号。首先利用EARPG(1)模型生成具有尖峰特征的模拟信号 y_i ,计算信号 y_i 的相位 $\Phi^{(y)}$,根据实验数据的PSD曲线计算出幅值 $|A(\omega_k)|$,对相位进行整体平移,最终合成模拟的非高斯随机振动信号。编程优化各参数,最终可得所需的模型参数。采用该方法模拟出的非高斯随机振动信号与采集的实验数据具有相同的PSD曲线,同时具有相同的偏斜度和峭度。与传统的相位调制方法相比,提出的方法相位选择简单,可靠性好。

将运输过程中的包装件简化为单自由度支座激励系统,研究了系统参数、激励数据参数对系统响应的影响,为提高包装件在运输过程中的可靠性,优化包装设计,提供了理论依据。

参考文献:

- [1] 李海广,安振涛,李金明,等.弹药公路运输动力学特性研究综述[J].包装工程,2013,34(9):115—121.
LI Hai-guang, AN Zhen-tao, LI Jin-ming, et al. Research Overview on Dynamic Characteristics of Ammunition Highway Transportation[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(9): 115—121.
- [2] 贺志,周晟,向红,等.运输环境数据采集设备在家电物流中的应用[J].包装工程,2013,34(9):115—121.
HE Zhi, ZHOU Sheng, XIANG Hong, et al. Application of Transportation Environmental Data Recorder in Logistics of Household-appliances[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(9): 115—121.
- [3] 李蓓蓓.基于现场跟踪记录的流通环境跌落冲击分析[J].包装工程,2015,36(11):83—86.
LI Bei-bei. Analysis of Drop and Shock in Circulation Environment Based on Shock and Vibration Recorder[J]. Packaging Engineering, 2015, 36(11): 83—86.
- [4] 苏远,吕勇,赵德坚.公路运输环境因素的测试[J].包装工程,2007,28(9):1—4.
SU Yuan, LYU Yong, ZHAO De-jian. Measurement of Transportation Environment on Truck[J]. Packaging Engineering, 2007, 28(9): 1—4.
- [5] 路冰琳,陈振强.铁路运输随机振动数据的分析与研究[J].包装工程,2008,29(2):82—84.
LU Bing-lin, CHEN Zhen-qiang. Analysis and Research of the Data to Railway Random Vibration[J]. Packaging Engineering, 2008, 29(2): 82—84.
- [6] ROUILLARD V, SEK M A. Synthesizing Nonstationary, Non-Gaussian Random Vibrations[J]. Packaging Technology and Science, 2010, 23(8): 423—439.
- [7] ROUILLARD V, RICHMOND R A. Novel Approach to Analysing and Simulating Railcar Shock and Vibrations[J]. Packaging Technology and Science, 2010, 23(8): 423—439.
- [8] GARCIA-ROMEY-MARTINEZ M A, SINGH S P, CLO-QUELL-BALLESTER V A. Measurement and Analysis of Vibration Levels for Truck Transportation in Spain as a Function of Payload, Suspension and Speed[J]. Packaging Technology and Science, 2008, 21(8): 439—451.
- [9] 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(4): 231—246.
- [10] SINGH S P, SANDHU A P S, SINGH J, et al. Measurement and Analysis of Truck and Rail Shipping Environment in India[J]. Packaging Technology and Science, 2006, 20(6): 381—392.
- [11] LU F, ISHIKAWA Y, SHIINA T, et al. Analysis of Shock and Vibration in Truck Transportation in Japan[J]. Packaging Technology and Science, 2008, 21(8): 479—489.
- [12] ROUILLARD V. Quantifying the Non-stationarity of Vehicle Vibrations with the Run Rest[J]. Packaging Technology and Science, 2014, 27(3): 203—219.
- [13] 李璟,韩大建.大跨度屋盖结构非高斯风压场的一种模拟方法[J].工程力学,2009,26(5):80—87.
LI Jing, HAN Da-jian. A Simulation Method for Non-Gaussian Wind Pressure Field of Large-span Roof Structures[J]. Engineering Mechanics, 2009, 26(5): 80—87.
- [14] 李璟,韩大建.屋盖结构非高斯风压场两步快速模拟法研究[J].建筑结构学报,2010,31(4):78—85.
LI Jing, HAN Da-jian. Research on Two-step Fast Algorithm for Simulation of Non-Gaussian Wind Pressure Fields on Roof Structures[J]. Journal of Building Structures, 2010, 31(4): 78—85.
- [15] SEONG S H, PETERKA J A. Digital Generation of Surface-pressure Fluctuations with Spiky Features[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1998, 73(2): 181—192.
- [16] 蒋瑜,陈循,陶俊勇,等.超高斯伪随机振动激励信号的生成技术[J].振动工程学报,2005,18(2):179—183.
JIANG Yu, CHEN Xun, TAO Jun-yong, et al. The Technique of Generating Super-Gaussian and Quasi-random Vibration Exciting Signals[J]. Journal of Vibration Engineering, 2005, 18(2): 179—183.
- [17] 蒋瑜,陈循,陶俊勇,等.指定功率谱密度、偏斜度和峭度值下的非高斯随机过程数字模拟[J].系统仿真学报,2006,18(5):1127—1130.
JIANG Yu, CHEN Xun, TAO Jun-yong, et al. Numerically Simulating Non-Gaussian Random Processes with Specified PSD, Skewness and Kurtosis[J]. Journal of System Simulation, 2006, 18(5): 1127—1130.
- [18] STEINWOLF A. Shaker Random Testing with Low Kurtosis: Review of the Methods and Application for Sigma Limiting[J]. Shock and Vibration, 2010, 17(2): 219—231.
- [19] SEONG S H, PETERKA J A. Experiments on Fourier Phases for Synthesis of Non-Gaussian Spikes in Turbulence Time Series[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2001, 89(6): 421—443.