

运输包装系统随机振动频域分析

李晓刚

(北京林业大学, 北京 100083)

摘要: 为了研究包装件在实际流通环境振动特性下的振动规律,以车辆、包装件构成的六自由度运输包装系统为基础,构建了在以白噪声为输入的路面不平激励下的振动模型,建立了路面不平激励的数学模型、运输车辆以及包装件的动力学模型。借助 Matlab/Simulink 仿真技术,对运输包装系统随机振动进行了频域分析,得到了内装产品及易损零件随机振动加速度响应的幅值频谱和功率谱密度。仿真结果表明了随机振动强弱程度与频率的关系,全面反映了随机振动规律,为缓冲包装设计提供了理论依据。

关键词: 运输包装系统; 路面不平激励; 随机振动; 频域分析; Matlab/Simulink

中图分类号: TB485.3; TB487 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2012)15-0050-05

Random Vibration Frequency Domain Analysis of Transport Packaging System

LI Xiao-gang

(Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to research the vibration regulation of package in the circulation environment, based on the 6DOF transport packaging system which was composed of vehicle and package, the vibration model with white noise for road irregular excitation was established. Mathematical model of road irregular excitation, dynamics models of vehicle and package were also established. With the Matlab/Simulink simulation techniques the random vibration frequency domain analysis of transport packaging system was carried out. The magnitude spectrum and power spectrum density of random vibration acceleration of product and fragile parts were obtained. The simulation results showed the relationship between random vibration strength and frequency and fully reflected the random vibration rules. The purpose was to provide theoretical basis for cushion packaging design.

Key words: transport packaging system; road irregular excitation; random vibration; frequency domain analysis; Matlab/Simulink

实际流通环境中的振动特性是造成包装件破损的主要因素之一。流通过程中的运输环节是振动危害比较集中的环节。在运输环节中,又以公路运输为主。公路运输过程中的振动主要来自于路面的凸凹不平,路面的起伏和凸凹不平具有不确定性、不可预见性和不可重复性,统称为随机性,由于路面的这种随机性,经过运输车辆的传递,使包装件及其内装产品产生的振动响应亦具有随机性。由路面随机激励引起包装件的随机振动规律必须通过概率统计方法才能得出振动规律。笔者以路面激励、运输车辆和包装件构成的六自由度动力学模型为基础,借助 Matlab/Simulink 仿真技术,对包装件及其内装产品的随机振动响应进

行频域分析,为缓冲包装设计提供理论依据。

1 运输包装系统振动模型

路面的凸凹不平是指路面相对于某个基准平面的高度,随道路走向而变化,称之为路面不平度^[1]。运输车辆运行时,路面不平激励引起车身振动。运输车辆是一个复杂的系统,当前后两桥先后经过一段不平的路面时,车身在铅垂平面内将产生垂直振动和仰俯振动,为简化计算,通常将车辆的后半部分简化为四自由度系统^[2]。车厢底板的振动传递至车身内的包装件,使其内装产品产生振动,为了分析内装产品

收稿日期: 2012-07-09

作者简介: 李晓刚(1977—),男,江西瑞昌人,在读博士,北京林业大学讲师,主要从事包装机械、运输包装教学和研究。

及其易损零件的响应,研究其破损的原因,将包装件简化为两自由度系统^[3]。因此,由路面不平激励、运输车辆和包装件构成的运输包装系统可简化为六自由度振动模型,见图 1。

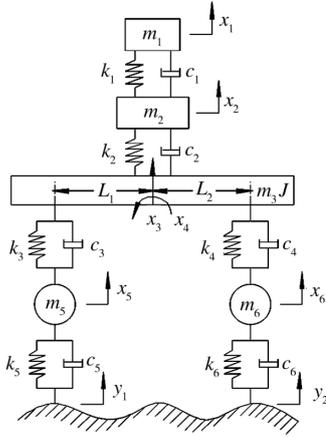


图 1 六自由度运输包装系统振动模型

Fig. 1 6 DOF vibration model of transport packaging system

在该系统中,车身看作刚体,前后桥看作质点,悬挂系统与轮胎质量忽略不计,车辆横向对称,左右两侧路面的统计特性相同。包装件固定在车厢底板上,相比车身,外包装箱的质量和阻尼忽略不计。图 1 中, $m_1, m_2, m_3, m_5, m_6, J$ 分别为易损零件、产品主体、车身、前后悬架的质量以及车身的转动惯量; $c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6$ 分别为易损零件与产品主体连接部分、缓冲材料、前后悬架以及前后轮胎的等效阻尼; $k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6$ 分别为易损零件与产品主体连接部分、缓冲材料、前后悬架以及前后轮胎的等效刚度系数; x_1, x_2, x_3, x_5, x_6 分别为易损零件、产品主体、车身、前后悬架的垂直位移, x_4 为车身绕过质心的水平轴线回转的角位移; y_1, y_2 分别为前后轮辙的不平激励; L_1, L_2 分别为前后车轴至车身质心的距离。

1.1 公路路面不平度模型

路面不平度是运输车辆行驶过程中的主要激励,影响车辆行驶的平顺性,也是包装件发生破损的间接危害因素之一,所以对于缓冲包装设计人员,研究分析路面不平度具有重要的意义^[4]。目前国内外研究最多的是公路路面不平度,通过获取路面的宏观统计参数,评价路面的平整程度,是运输车辆平顺性、货物安全性等性能研究的关键。

1.1.1 路面不平度数学描述

公路路面不平度的统计特性通常用路面位移功

率谱密度来描述^[5]:

$$G_q(n) = G_q(n_0) \left(\frac{n}{n_0} \right)^{-W} \quad (1)$$

其中: $G_q(n)$ 为路面位移功率谱密度; n 为空间频率(m^{-1}); n_0 为参考空间频率, $n_0 = 0.1 m^{-1}$; $G_q(n_0)$ 为 n_0 下的路面功率谱密度(m^3); W 为频率指数, $W = 2$ 。

1.1.2 路面不平度分析模型

影响运输车辆平顺性和货物安全性的路面不平激励主要是指路面高程的不平度,国内外很多学者的研究表明,车辆行驶速度恒定时,路面不平激励为一时域随机过程,均值为零,具有各态历经性,其概率服从高斯分布。对整个运输包装系统进行仿真研究时,需将平稳高斯随机的路面不平激励生成路面高程时域模型,主要方法有线性滤波法、随机序列法、谐波叠加法、AR 法、ARMA 法、小波分析法以及分形分析法等^[4]。

以路面时域随机激励为输入,分析运输车辆和包装件振动响应时,除了需要考虑路面的不平度,还需要考虑车速 u ,因此需将式(1)表示的路面空间频率功率谱密度转换为时间频率功率谱密度:

$$G_q(f) = \frac{1}{u} G_q(n) = G_q(n_0) \left(\frac{f}{n_0} \right)^{-W} u^{W-1} \quad (2)$$

其中: f 为时间频率, $f = un$; u 为车速。

线性滤波法因其物理意义清楚、计算方便、计算量小、速度快,目前使用比较普遍。其基本思想是将路面高程随机波动抽象为满足一定条件的白噪声,然后进行适当变换而拟合出路面随机不平度的时域模型。其数学模型为^[7]:

$$\dot{Y}(t) + f_{00} u Y(t) = \alpha \sqrt{u} W(t) \quad (3)$$

其中: $Y(t)$ 为路面高程随机位移激励; f_{00} 为下截止时间频率, $f_{00} = 2\pi n_{00}$, $n_{00} = 0.011 m^{-1}$; α 为与路面等级有关的常数, $\alpha = 2\pi n_0 \sqrt{G_q(n_0)}$; $W(t)$ 为均值为零的高斯白噪声; u 为车速。

1.2 运输车辆模型

由于包装件内装产品及其易损零件的振动对车身的影响微乎其微,因此,将图 1 所示的六自由度系统分解为 4 自由度运输车辆系统和二自由度包装件系统。路面高程随机激励 y_1 和 y_2 通过前后轮胎传递到车身,使车身产生随机振动响应 x_3 和 x_4 。根据动力学理论的拉格朗日方程,四自由度运输车辆系统的动力学方程为^[2]:

$$M\ddot{X} + C\dot{X} + KX = QU \quad (4)$$

其中: $U = [\dot{Y} \quad Y]^T = [\dot{y}_1 \quad \dot{y}_2 \quad y_1 \quad y_2]^T$ 。

1.3 包装件模型

考虑到内装产品中易损零件经受外界振动和冲击激励时更容易损坏,通常将包装件简化为二自由度系统,见图 2。

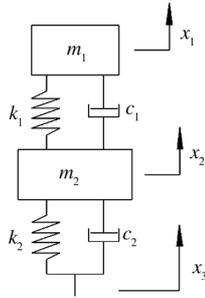


图 2 包装件动力学模型
Fig. 2 Dynamic model of package

易损零件和产品主体经受来自车身的振动激励 x_3 而产生振动响应 x_1 和 x_2 ,其运动微分方程为^[3]:

$$M\ddot{X} + C\dot{X} + KX = FU \quad (5)$$

其中: $U = [\dot{x}_3 \quad x_3]^T$ 。

2 运输包装系统随机振动频域分析

直接用图 1 所示的六自由度系统建立的振动微分方程,求解包装件内装产品及其易损零件的随机振动响应非常困难,因此,为了简化计算,将六自由度系统分成四自由度运输车辆模型和二自由度包装件模型,第 1 步建立路面不平度仿真模型,生成路面高程随机位移激励;第 2 步构建四自由度运输车辆的仿真模型,以路面高程随机位移激励为输入,求解出运输车辆车身输出的随机振动响应 x_3 和 x_4 ;第 3 步构建二自由度包装件的仿真模型,以运输车辆随机振动响应 x_3 和 x_4 为输入,求解出包装件内装产品及易损零件的随机振动响应 x_2 和 x_1 ;第 4 步对内装产品及其易损零件的随机振动响应进行频域分析,得到振动加速度幅值及能量与频率之间的关系,即幅值频谱和功率谱密度。整个运输包装系统的随机振动频域分析模型见图 3。

路面高程随机位移激励经过车辆车身和缓冲包装系统的传递,内装产品和易损零件产生的振动响应

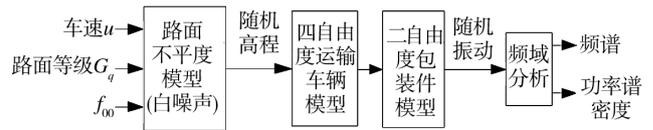


图 3 运输包装系统随机振动频域分析模型
Fig. 3 Random vibration frequency domain analysis model of transport packaging system

亦为随机过程。随机过程无法用确定性函数描述其时域内的运动规律,而必须用概率统计方法寻求频域内或其他域内的信息,以全面描述其振动规律。

为了探求随机过程在频域内的振动规律,需对车辆和包装件的随机振动响应 $x(t)$ 进行傅里叶变换。通常各态历经的平稳随机过程不满足绝对可积的条件而不能进行傅里叶变换,但如果满足均值为零的话,则满足傅里叶变换,可以得到幅值谱、相位谱等信息。对于一均值为零的各态历经的平稳随机过程 $x(t)$,有:

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \exp(-i2\pi ft) dt \quad (6)$$

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X(f) \exp(i2\pi ft) df \quad t \in [-\infty, \infty] \quad (7)$$

式中: f 为频率, $f = nf_0$, f_0 为基频; $X(f)$ 为 $x(t)$ 的连续谱密度函数,可以写成:

$$X(f) = |X(f)| \exp[i\varphi(f)] = A(f) - iB(f) \quad (8)$$

其中: $|X(f)|$ 为 $x(t)$ 的幅值谱; $\varphi(f)$ 为 $x(t)$ 的相位谱。

否则只能用平稳随机过程的自相关函数进行傅里叶变换,得到功率谱密度函数,给出随机过程中振动能量的大小与频率之间的关系。 $R_x(\tau)$ 为平稳随机过程 $x(t)$ 的自相关函数,对其进行傅里叶变换可得:

$$S_x(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} R_x(\tau) \exp(-i\omega\tau) d\tau \quad (9)$$

其中: $S_x(\omega)$ 为 $R_x(\tau)$ 的功率谱密度, $S_x(\omega) = \lim_{T \rightarrow \infty} \left[\frac{2\pi |X(\omega)|^2}{T} \right]$,表明随机过程的能量随频率的分布情况。

3 仿真分析

借助 Matlab/Simulink 仿真工具,根据式(3)~(5),构建路面不平激励仿真模型、四自由度运输车辆

仿真模型和二自由度包装件仿真模型,利用 Simulink 频谱和功率谱密度分析模块获得包装件内装产品和易损零件的响应频谱及功率谱。路面不平激励运输包装系统随机振动频域分析仿真模型见图 4。

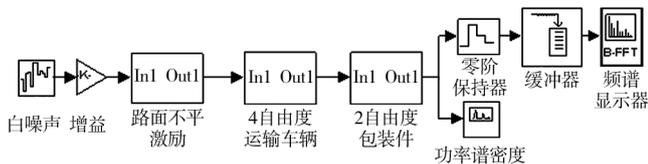


图 4 运输包装系统频域分析仿真模型

Fig. 4 Frequency domain analysis simulation model of transport packaging system

运行仿真,可得路面不平随机位移激励、运输车辆车身随机振动响应、包装件内装产品和易损零件随机振动响应及其频谱和功率谱,见图 5—10。

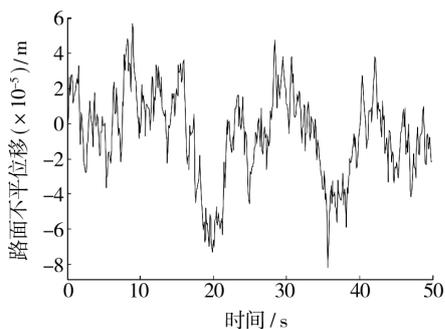


图 5 路面不平随机位移激励

Fig. 5 Road irregular random excitation

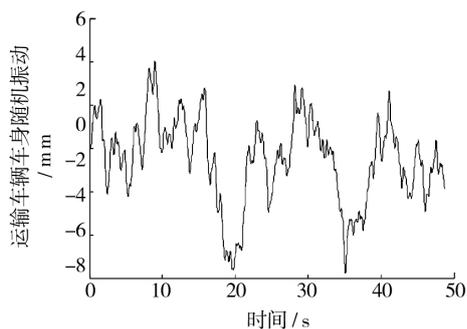


图 6 运输车辆车身随机振动

Fig. 6 Random vibration of transport vehicle body

从图 5—8 可以看出,在路面不平随机激励的作用下,运输车辆车身、包装件内装产品和易损零件时域内的振动响应均为随机过程,杂乱无章,无法反映出其振动规律。利用 Simulink 的频域分析模块,以

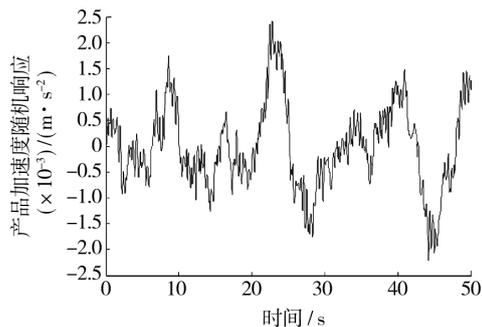


图 7 产品随机振动加速度响应

Fig. 7 Random vibration acceleration response of product

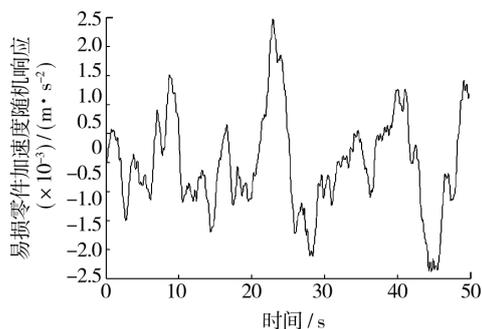


图 8 易损零件随机振动加速度响应

Fig. 8 Random vibration acceleration response of fragile part

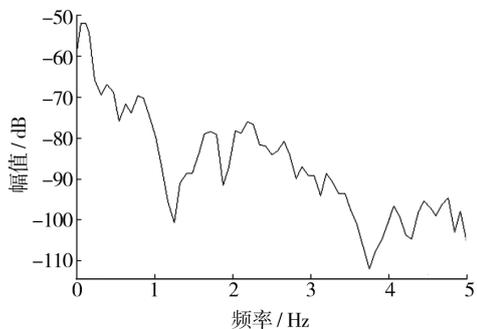


图 9 易损零件随机振动加速度幅值频谱

Fig. 9 Random vibration acceleration magnitude spectrum of fragile part

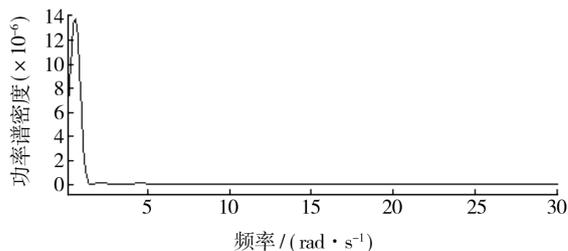


图 10 易损零件随机振动加速度功率谱密度

Fig. 10 Random vibration acceleration PSD of fragile part

一定采样频率对输入的内装产品及易损零件随机振动的连续信号进行采样,将连续信号转换成离散信号,然后对转换后的离散信号进行傅里叶变换,可以得到随机振动幅值和能量在频率域内的分布情况,见图9和10。从图中可以看出,在低频段,易损零件随机振动强度达到最大。

4 结语

流通过程中对包装件造成破损的不利因素主要来自于运输车辆,这种不利因素主要体现在车辆车身的振动,这种振动主要是由于车辆行驶的路面不平随机激励引起的,由于路面不平等级不同,因此引起车辆车身随机振动的强度也不同。利用 Matlab/Simulink 仿真技术,构建了六自由度运输包装系统仿真模型,对包装件的随机振动响应进行了频域分析,得到了随机振动强度和能量在频域内的分布情况。通过改变公路等级、车辆特性以及包装件特性等参数,可以获得不同等级路面不平激励下不同车辆不同包装件的随机振动频域分析结果,该结果可以研究包装件振动强度和规律,预测其破损和疲劳寿命。实际的运输包装系统是一个复杂的非线性系统,对系统进行合理简化后,与真实路面激励下实际包装件的振动响应肯定有所偏差,但作为初步的近似结果,还是具有一定现实意义,可以为缓冲包装设计提供理论依据,为运输包装系统的安全性评价提供科学的准则。

参考文献:

- [1] 陈龙,何草丰. 基于 Simulink 的路面不平度时域模型仿真研究[J]. 科技信息, 2012(7):367-402.
CHEN Long, HE Cao-feng. Simulation Study of Time-domain Road Roughness Modeling Based on Simulink [J]. Science & Technology Information, 2012(7):367-402.
- [2] 张秀梅,徐伟民. 路面多种激励下汽车运输包装产品动态响应的数值仿真[J]. 包装工程, 2006, 27(1):67-70.
ZHANG Xiu-mei, XU Wei-min. Numerical Simulation of Package Product Dynamic Response under Two Excitations[J]. Packaging Engineering, 2006, 27(1):67-70.
- [3] 李晓刚. 基于 Matlab/Simulink 的缓冲包装系统动态响应及影响因素分析[J]. 包装工程, 2011, 32(1):65-69.
LI Xiao-gang. Analysis of Dynamic Response and Influencing Factors of Cushioning Packaging Based on Matlab/Simulink[J]. Packaging Engineering, 2011, 32(1):65-69.
- [4] 段虎明,石峰,谢飞,等. 路面不平度研究综述[J]. 振动与冲击, 2009, 28(9):95-101.
DUAN Hu-ming, SHI Feng, XIE Fei, et al. A Survey of Road Roughness Study [J]. Journal of Vibration and Shock, 2009, 28(9):95-101.
- [5] GB/T 7031-1986, 车辆振动输入路面平度表示方法[S].
GB/T 7031-1986, Vehicle Vibration - Describing Method for Road Surface Irregularity[S].
- [6] 陈杰平,陈无畏,祝辉,等. 基于 Matlab/Simulink 的随机路面建模与不平度仿真[J]. 农业机械学报, 2010, 41(3):11-15.
CHEN Jie-ping, CHEN Wu-wei, ZHU Hui, et al. Modeling and Simulation on Stochastic Road Surface Irregularity Based on Matlab/Simulink [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(3):11-15.
- [7] 张永林,钟毅芳. 车辆路面不平度输入的随机激励时域模型[J]. 农业机械学报, 2004, 35(2):9-12.
ZHANG Yong-lin, ZHONG Yi-fang. Time Domain Model of Road Undulation Excitation to Vehicles [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2004, 35(2):9-12.
- [8] 胡志刚,张永林,宋少云. 包装物随机振动分析方法研究[J]. 包装工程, 2004, 25(6):58-74.
HU Zhi-gang, ZHANG Yong-lin, SONG Shao-yun. The Vibration Analysis Methods of Packaged Items under Stochastic Excitation [J]. Packaging Engineering, 2004, 25(6):58-74.
- [9] 彭国勋. 物流运输包装设计[M]. 北京:印刷工业出版社, 2012.
PENG Guo-xun. Logistics and Transport Packaging Design [M]. Beijing: Graphic Communications Press, 2012.