

基于伪白噪声法的食品缓冲衬垫振动仿真试验

Simulation study on vibration of food cushioning liner based on pseudo white noise method

陈 宁 张功学

CHEN Ning ZHANG Gong-xue

(陕西科技大学机电工程学院, 陕西 西安 710021)

(Shaanxi University of Science & Technology, College of Mechanical and Electrical Engineering, Xi'an, Shaanxi 710021, China)

摘要:通过伪白噪声法模拟食品运输工况中的受激励模型,建立针对某泡沫材料衬垫的常规七自由度的动力学模型,得到在虚拟激励下食品衬垫系统的垂直位移和偏转角位移响应。使用 MATLAB 软件进行编程产生随机高斯白噪声并进行滤波处理,用 ode45 模块对系统动力学微分方程求解。由解得的高阶矩阵的元素对应得到各数值参数的意义,即各支脚的垂直振动位移趋势一致且数值低于 0.007 5 m,偏转角位移为 0.006 0~0.007 8 rad,被运输食品垂直位移响应低于 0.006~0.007 m,验证了在该工况下缓冲衬垫的缓冲特性。在该激励作用和衬垫系统的减振作用下,被运输食品的完整性得到了有效保护,并且通过线性趋势和实测相吻合,达到了实操前仿真的目的。

关键词:滤波白噪声;振动仿真;垂直位移;食品缓冲衬垫

Abstract: By filtering the white noise method to simulate the incentive model in food transportation, a conventional seven degree of freedom dynamic model for a foam material liner is established, and the vertical displacement and deflection displacement response of the food lining system under virtual excitation excitation are obtained. The MATLAB software is used to program the random Gauss white noise and filter, and the ode45 module is used to solve the differential equation of the system dynamics. The vertical vibration displacement of all legs is consistent. The numerical value is less than 0.007 5 m, the deflection angle between 0.006 0~0.007 8 rad and the vertical displacement response of transported food is lower than 0.006~0.007 m, which validates the cushioning characteristics of the cushioning pad under this working condition. Under the action of vibration and damping, the food integrity of

transportation is effectively protected, and it is consistent with the linear trend and measured data, which achieves the purpose of pre operation simulation.

Keywords: filtering white noise; vibration simulation; vertical displacement; food cushion liner

随着社会不断发展,食品的运输量日益增加,食品在运输期间的完整性也越来越重要,减少食品在运输过程中的损坏对经济发展有着重要的影响。在食品运输领域众多学者有着大量的研究,比如邓成江等^[1]研究了卷烟工艺中激振的振动松散动体;马涌航等^[2-3]对包装材料进行了研究;吴旭填等^[4-5]对缓冲衬垫包装性能进行了研究和分析。但对于动力学模型、白噪声激励和食品运输这三者归纳综合研究却很少。食品运输工况同其他物品运输工况相类似,主要是于激励模型建立方法的研究;相比实际测量利用计算机模型相对方便且便于归纳,现主流的运输工况方法有 AR 模型法^[6]、滤波白噪声法^[7]和小波包法^[8]等。

设计合理的仿真方案不仅可以减少运输系统在实际时间空间的验证,大大缩短食品缓冲材料研发费用及对环境造成的危害,而缩短产品的运输周期,最终达到节约成本促进经济增长的目的。在国内外的研究过程中,大多数对现有的缓冲衬垫及结构设计都采用相关仪器设备进行测试,进而花费大量时间及财力,反之对于虚拟仿真研究则甚少且考虑因素单一。针对该类问题对缓冲衬垫的性能仿真研究十分必要。建立整体的虚拟仿真研究思路,为深入研究和评价食品缓冲衬垫特性有着重要意义。

王文军等^[9-10]对不同食品的运输保存做了相关防护保质性试验,其研究重点在于化学防护对食品运输过程中的保鲜,但较少考虑到物理振动过程中影响;巩桂芬等^[11]做了力学和结构方面的可行性仿真研究,其重点在于为食品运输过程中的缓冲包装进行结构设计,并进行了包装结构的基本性质测试,但没有将食品的物理特性考虑在内;张功学等^[12-14]

基金项目:国家科技重大专项项目(编号:2009ZX04001-014);陕西省科技厅自然科学基金基础研究计划项目(编号:2014JM7264)

作者简介:陈宁,男,陕西科技大学在读硕士研究生。

通信作者:张功学(1964—),男,陕西科技大学教授,博士。

E-mail:zhanggx@sust.com

收稿日期:2017-12-18

做了运输条件测试的仿真研究,其研究重点在于对路面激励及运输工具的仿真,没有对货运过程进行仿真试验。本研究使用在车辆运输领域已较为成熟的方法对食品运输过程中的物理振动展开探究,为开展相关综合性研究提供参考。

1 食品缓冲衬垫材料参数

仿真模型分为以某泡沫材料衬垫^[15]为运输缓冲模型和以伪白噪声法为运输激励环境模型。在运输缓冲泡沫材料模型中包括有食品缓冲包装和运输工具的刚度系数、质量和阻尼系数的匹配,如果食品缓冲包装材料质量相对较小,可忽略。运输激励环境模型为外部环境对运输缓冲模型的激励,这里采用以泡沫材料制作的方形缓冲衬垫为运输工具,缓冲衬垫的4个支脚分别受到计算机随机产生伪白噪声激励。将随机激励以时域顺序循环代入动力学方程,得到缓冲衬垫在该激励工况下的各项响应结果。在此以被运输食品所受的垂直位移响应着手,通过仿真结果得到相关的激励图,并采用优化结构设计,重新选择衬垫材料等手段为防止发生共振现象做准备。通过仿真得出缓冲衬垫在相应路面激励的共振区间及结合被运输食品的固有频率等特性,降低被运输食品在时域内加速度大于脆值而发生损坏现象。图1为某泡沫材质的缓冲衬垫。根据文献^[15]测得相关刚度阻尼系数见表1。

2 衬垫包装系统动力学模型

在衬垫食品包装运输系统中主要是建立运输工具及食品缓冲包装的动力学模型。运输缓冲系统的参数化动力学模型具体是由衬垫和被运输食品组成,在建模过程中以整车模型各部分起缓冲的振动特性的零件为支撑,将其转化为具体的动力学简易模型。

根据缓冲衬垫各支脚在不同激励下运行的状态不同,简化衬垫非阻尼刚度部分,对二轴运输车做如下假设:

① 衬垫在振动过程中基于本体在平衡位置做微小的振幅运动,而且排除变速运动;

② 模型中被运输食品假设为刚体并于衬垫为铰接,不考虑弹性刚度和阻尼性质;

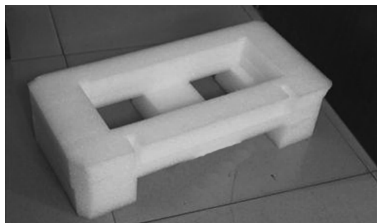


图1 实体泡沫材质的缓冲衬垫结构

Figure 1 Cushion structure of solid foam material

表1 某实体泡沫材质的缓冲衬垫参数

Table 1 Cushion parameters of a solid foam material

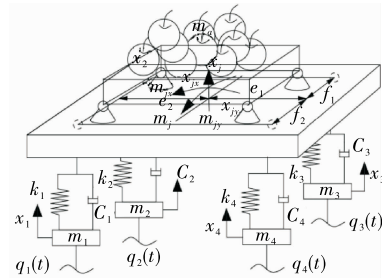
试样 编号	预压力/ g	固有频率/ Hz	刚度/ (N·m ⁻¹)	阻尼/ (N·s·m ⁻¹)	方差
1	400	34.625	18 932.1	2.685	0.011 5
2	1 400	26.125	37 722.5	7.640	0.052 0
3	2 500	18.750	34 697.8	8.924	0.108 0

③ 模型中所有支脚接触均为点接触,激励只作用于接触点上过实际平面且垂直向上;

④ 模型中所有简化后的弹簧的满足胡克定律中弹力和弹簧伸缩位移呈线性的要求;

⑤ 模型中所有简化后的阻尼器满足阻尼力由速度的变化而呈现线性改变。

具体食品运输的空间动力学模型见图2。



m_a . 被运输物品的质量, 2.5 kg m_j . 缓冲衬垫包装质量, 0.5 kg m_{jy} . 缓冲衬垫俯仰转动惯量, 0.75 kg·m² m_{jx} . 缓冲衬垫侧斜转动惯量, 0.75 kg·m² m_1, m_2, m_3, m_4 . 缓冲衬垫4支脚质量, 0.1 kg c_1, c_2, c_3, c_4 . 缓冲衬垫4支脚阻尼系数, 8.924 N·s/m k_1, k_2, k_3, k_4 . 缓冲衬垫4支脚刚度系数, 34 697.8 N/m e_1, e_2 缓冲衬垫4支脚横向连接点距离, 0.20 m f_1, f_2 . 缓冲衬垫4支脚纵向连接点距离, 0.15 m x_a . 被运输物品的垂直位移, m x_j . 缓冲衬垫的垂直位移, m x_{jy} . 缓冲衬垫绕其质心处的纵向角位移, rad x_{jx} . 缓冲衬垫绕其质心处的横向角位移, rad x_2, x_4, x_2, x_4 . 缓冲衬垫各支脚的垂直位移, m q_2, q_4, q_2, q_4 . 缓冲衬垫各支脚受位移激励, m

图2 食品运输的空间动力学模型

Figure 2 Spatial dynamics model of cushioning cushion

3 运输缓冲系统动力学方程建立

根据动力学模型的复杂程度以选择能量法为研究手段,故整车模型动力学中包括3种能量,分别为动能 T 、势能 V 和耗散能 D ,以下围绕这三部分列出整个系统的动力学公式。

整车的动能 T 为:

$$T = \frac{1}{2}(m_a + m_j)x_j^2 + \frac{1}{2}m_{jx}\dot{x}_{jx}^2 + \frac{1}{2}m_{jy}\dot{x}_{jy}^2 + \frac{1}{2}m_1\dot{x}_1^2 + \frac{1}{2}m_2\dot{x}_2^2 + \frac{1}{2}m_3\dot{x}_3^2 + \frac{1}{2}m_4\dot{x}_4^2. \quad (1)$$

整车的耗散能 D 为:

$$D = \frac{1}{2}c_1(\dot{x}_j - e_2\dot{x}_{jy} - f_2\dot{x}_{jx} - \dot{x}_1)^2 + \frac{1}{2}c_2(\dot{x}_j - e_2\dot{x}_{jy} + f_1\dot{x}_{jx} - \dot{x}_2)^2 + \frac{1}{2}c_3(\dot{x}_j + e_1\dot{x}_{jy} + f_1\dot{x}_{jx} - \dot{x}_3)^2 + \frac{1}{2}c_4(\dot{x}_j + e_1\dot{x}_{jy} - f_2\dot{x}_{jx} - \dot{x}_4)^2. \quad (2)$$

整车的势能 V 为:

$$V = \frac{1}{2}k_1(x_j - e_2x_{jy} - f_2x_{jx} - x_1)^2 + \frac{1}{2}k_2(x_j - e_2x_{jy} + f_1x_{jx} - x_2)^2 + \frac{1}{2}k_3(x_j + e_1x_{jy} + f_1x_{jx} - x_3)^2 +$$

$$\frac{1}{2} k_4 (x_j + e_1 x_{jy} - f_2 x_{jx} - x_4)^2. \quad (3)$$

抓住主要影响因素,忽略不影响或者较小影响,对式(1)、(2)、(3)求导,整理成为经典动力学表达式,见式(4)。

$$[m]\{\ddot{x}\} + [c]\{\dot{x}\} + [k]\{x\} = [k_q]\{q\}, \quad (4)$$

式中:

$[m]$ ——质量矩阵,kg;

$[c]$ ——阻尼矩阵,kg;

$[k]$ ——刚度矩阵,N·s/m;

$[k_q]$ ——路面激励矩阵,N/m。

其中:

$$[m] = \begin{bmatrix} m_a + m_j & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_{jy} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_{jx} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & m_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m_4 \end{bmatrix};$$

$$[k] = \begin{bmatrix} k(1,1) & k(1,2) & k(1,3) & k(1,4) & k(1,5) & k(1,6) & k(1,7) \\ k(2,1) & k(2,2) & k(2,3) & k(2,4) & k(2,5) & k(2,6) & k(2,7) \\ k(3,1) & k(3,2) & k(3,3) & k(3,4) & k(3,5) & k(3,6) & k(3,7) \\ k(4,1) & k(4,2) & k(4,3) & k(4,4) & 0 & 0 & 0 \\ k(5,1) & k(5,2) & k(5,3) & 0 & k(5,5) & 0 & 0 \\ k(6,1) & k(6,2) & k(6,3) & 0 & 0 & k(6,6) & 0 \\ k(7,1) & k(7,2) & k(7,3) & 0 & 0 & 0 & k(7,7) \end{bmatrix};$$

$$[c] = \begin{bmatrix} c(1,1) & c(1,2) & c(1,3) & c(1,4) & c(1,5) & c(1,6) & c(1,7) \\ c(2,1) & c(2,2) & c(2,3) & c(2,4) & c(2,5) & c(2,6) & c(2,7) \\ c(3,1) & c(3,2) & c(3,3) & c(3,4) & c(3,5) & c(3,6) & c(3,7) \\ c(4,1) & c(4,2) & c(4,3) & c(4,4) & 0 & 0 & 0 \\ c(5,1) & c(5,2) & c(5,3) & 0 & c(5,5) & 0 & 0 \\ c(6,1) & c(6,2) & c(6,3) & 0 & 0 & c(6,6) & 0 \\ c(7,1) & c(7,2) & c(7,3) & 0 & 0 & 0 & c(7,7) \end{bmatrix};$$

$$\begin{aligned} k(1,1) &= k_1 + k_2 + k_3 + k_4, \\ k(1,2) &= -k_1 e_2 - k_2 e_2 + k_3 e_1 + k_4 e_1, \\ k(1,3) &= -k_1 f_2 + k_2 f_1 + k_3 f_1 - k_4 f_2, \\ k(1,4) &= -k_1, k(1,5) = -k_2, \\ k(1,6) &= -k_3, k(1,7) = -k_4; \\ k(2,2) &= k_1 e_2^2 + k_2 e_2^2 + k_3 e_1^2 + k_4 e_1^2, \\ k(2,3) &= k_1 e_2 f_2 - k_2 e_2 f_1 + k_3 e_1 f_1 - k_4 e_1 f_2, \\ k(2,4) &= k_1 e_2, k(2,5) = k_2 e_2, \\ k(2,6) &= -k_3 e_1, k(2,7) = -k_4 e_1; \\ k(3,3) &= k_1 f_2^2 + k_2 f_1^2 + k_3 f_1^2 + k_4 f_2^2, \\ k(3,4) &= k_1 f_2, k(3,5) = -k_2 f_1, \\ k(3,6) &= -k_3 f_1, k(3,7) = k_4 f_2; \\ k(4,4) &= k_1; k(5,5) = k_2; k(6,6) = k_3; k(7,7) = k_4; \\ k(2,1) &= -k_1 e_2 - k_2 e_2 + k_3 e_1 + k_4 e_1, \\ k(3,1) &= -k_1 f_2 + k_2 f_1 + k_3 f_1 - k_4 f_2, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} k(4,1) &= -k_1, k(5,1) = -k_2, \\ k(6,1) &= -k_3, k(7,1) = -k_4; \\ k(3,2) &= k_1 e_2 f_2 - k_2 e_2 f_1 + k_3 e_1 f_1 - k_4 e_1 f_2, \\ k(4,2) &= k_1 e_2, \\ k(5,2) &= k_2 e_2, k(6,2) = -k_3 e_1, k(7,2) = -k_4 e_1; \\ k(5,3) &= -k_2 f_1, k(6,3) = -k_3 f_1, c(7,3) = k_4 f_2; \\ c(1,1) &= c_1 + c_2 + c_3 + c_4, \\ c(1,2) &= -c_1 e_2 - c_2 e_2 + c_3 e_1 + c_4 e_1, \\ c(1,3) &= -c_1 f_2 + c_2 f_1 + c_3 f_1 - c_4 f_2, \\ c(1,4) &= -c_1, c(1,5) = -c_2, \\ c(1,6) &= -c_3, c(1,7) = -c_4; \\ c(2,2) &= c_1 e_2^2 + c_2 e_2^2 + c_3 e_1^2 + c_4 e_1^2, \\ c(2,3) &= c_1 e_2 f_2 - c_2 e_2 f_1 + c_3 e_1 f_1 - c_4 e_1 f_2, \\ c(2,4) &= c_1 e_2, \\ c(2,5) &= c_2 e_2, c(2,6) = -c_3 e_1, c(2,7) = -c_4 e_1; \\ c(3,3) &= c_1 f_2^2 + c_2 f_1^2 + c_3 f_1^2 + c_4 f_2^2, \\ c(3,4) &= c_1 f_2, \\ c(3,5) &= -c_2 f_1, c(3,6) = -c_3 f_1, c(3,7) = c_4 f_2; \\ c(4,4) &= c_1; c(5,5) = c_2; c(6,6) = c_3; c(7,7) = c_4; \\ c(2,1) &= -c_1 e_2 - c_2 e_2 + c_3 e_1 + c_4 e_1, \\ c(3,1) &= -c_1 f_2 + c_2 f_1 + c_3 f_1 - c_4 f_2, \\ c(4,1) &= -c_1, c(5,1) = -c_2, \\ c(6,1) &= -c_3, c(7,1) = -c_4; \\ c(3,2) &= c_1 e_2 f_2 - c_2 e_2 f_1 + c_3 e_1 f_1 - c_4 e_1 f_2, \\ c(4,2) &= c_1 e_2, \\ c(5,2) &= c_2 e_2, c(6,2) = -c_3 e_1, c(7,2) = -c_4 e_1; \\ c(5,3) &= -c_2 f_1, c(6,3) = -c_3 f_1, c(7,3) = c_4 f_2. \end{aligned}$$

4 滤波白噪声激励及 MATLAB 仿真

滤波白噪声在路面激励和汽车虚拟 VPG 中已被普遍使用,但在衬垫虚拟激励中应用中较少,在此以 ISO/TC108/SC2N67 标准产生对于缓冲衬垫的空间功率谱密度。常用到滤波白噪声具体表达式:

$$G_q(n) = G_q(n_0) \left(\frac{n}{n_0} \right)^{-W}, \quad (5)$$

式中:

n_0 ——空间原始频率,0.1 m⁻¹;

$G_q(n)$ ——激励空间功率谱密度,m²;

n ——空间频率,m⁻¹;

$G_q(n_0)$ ——不平激励系数,m²;

W ——频率指数。

$$G_q(f) = \frac{G_q(n)}{u} = \frac{G_q(n_0) u n_0^W}{f^W}, \quad (6)$$

式中:

f ——时间频率,Hz;

$G_q(f)$ ——时间功率谱密度,m³/Hz;

u ——速度,m/s。

因为当 $n \rightarrow 0$ 时则 $G_q(n) \rightarrow 0$ 在现实中不存在,故引入空间截止频率 n_q ,通过空间截止频率 n_q 可将式(5)和(6)转化为:

$$G_q(n) = G_q(n_0)^2 \frac{1}{n^2 + n_q^2}, \tag{7}$$

$$G_q(f) = \frac{G_q(n_0) u n_0^2}{f_q^2 + f^2}, \tag{8}$$

$$\dot{q}(t) = -2\pi n_q q(t) + 2\pi n_0 \sqrt{G_q(n_0)} u w(t). \tag{9}$$

通过 MATLAB 编程并产生仿真得出高斯白噪声,见图 3;随机激励的高斯白噪声和经滤波后的白噪声见图 4。

结合之前缓冲衬垫的动力学模型,将滤波白噪声激励频谱于 MATLAB 软件中进行仿真。由于数据较多,设定步长为 500,解得高阶微分方程见图 5~7。

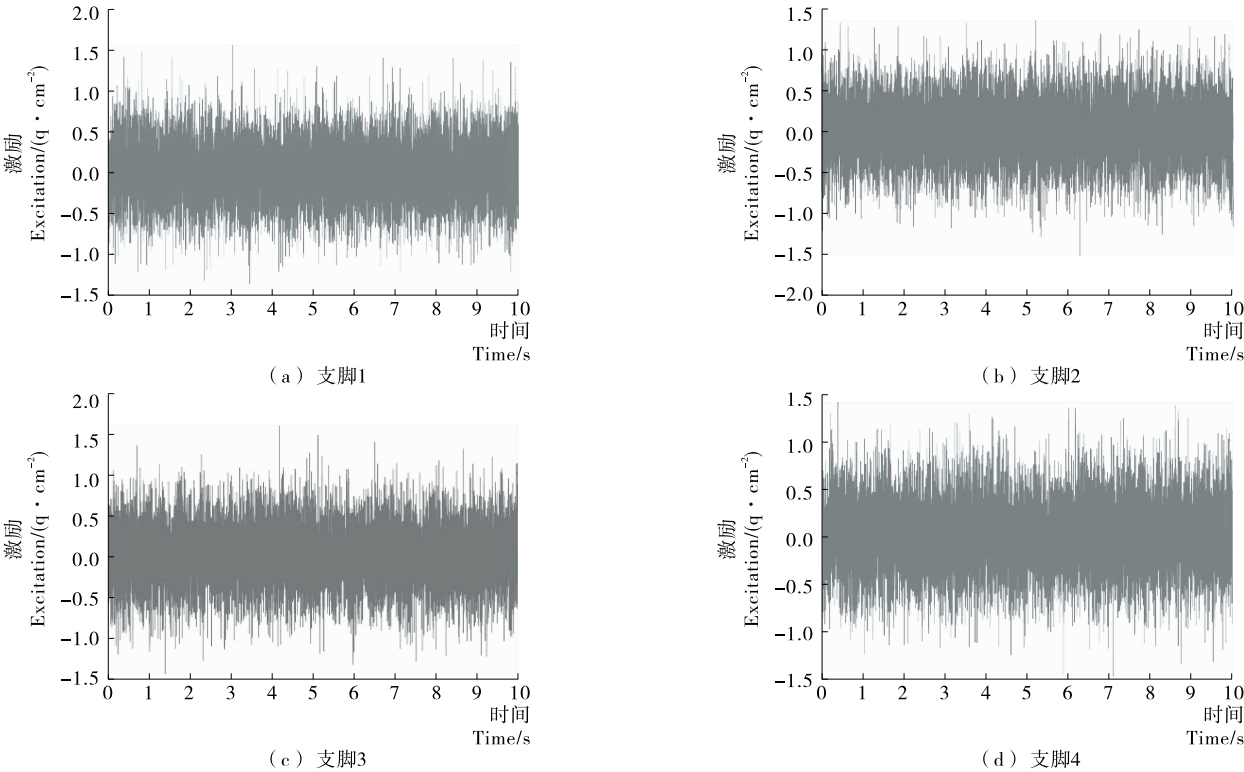


图 3 高斯白噪声激励
Figure 3 Gauss white noise excitation

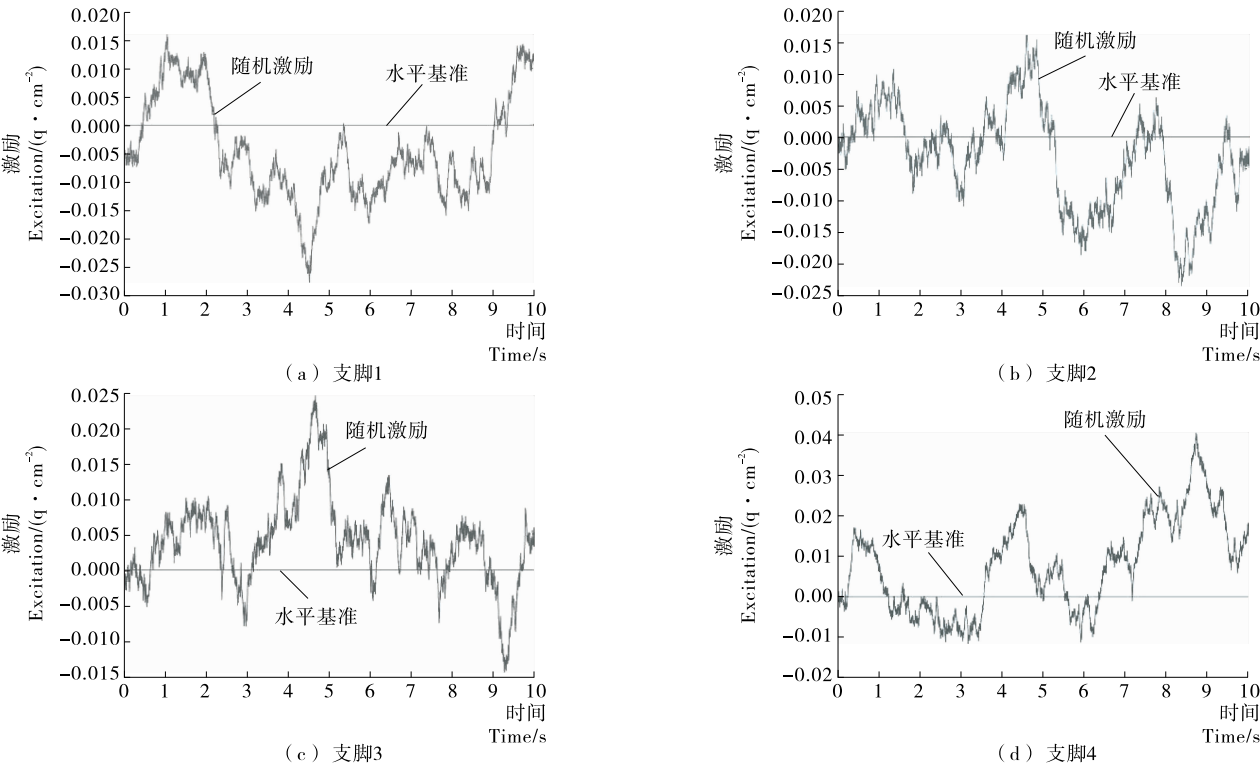


图 4 滤波白噪声激励
Figure 4 Filtering white noise excitation

由图 5~7 可知,以 4 个随机激励作为衬垫支脚的输入可以得到各支脚的垂直振动位移趋势一致,但在各时间节点会有不同的振幅偏差,其垂直位移的数值 $<0.0075\text{ m}$;衬垫平面两轴向角位移响应大致呈对称式,与测试样品的对称性相关,达到了仿真的效果,该材料在此工况作用下的偏转位移介于 0.0060 rad 与 0.0078 rad 之间;衬垫平面的垂直位移可以反映该衬垫缓冲性能好坏,被包装物所受垂直位移的响应为 $0.006\sim 0.007\text{ m}$,明显小于 4 支脚的垂直位移量。通

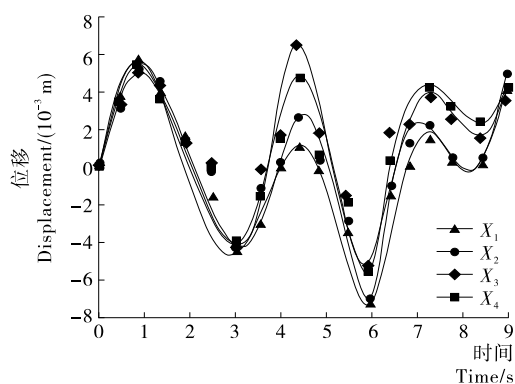


图 5 各支脚垂直位移响应

Figure 5 vertical displacement of each leg

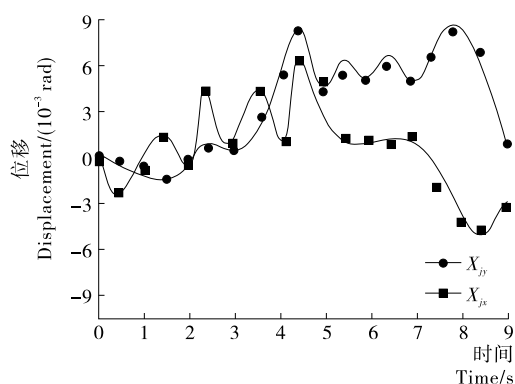


图 6 衬垫平面两轴向角位移响应

Figure 6 Cushion plane two axial angular displacement response

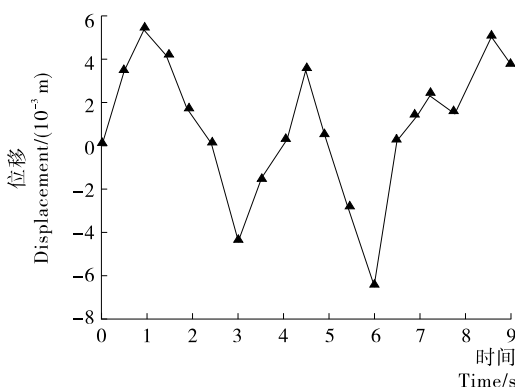


图 7 衬垫平面的垂直位移响应

Figure 7 The vertical displacement response of the liner plane

过结合运输包装体系的跌落和脆值法对照等综合分析可知,在该激励作用和食品运输系统的减振作用下,被运输食品得到了有效的防护,并且通过线性趋势和实测趋势基本吻合,达到了仿真的效果,验证了在该工况下缓冲衬垫的缓冲特性。

5 结论

通过滤波白噪声法模拟食品运输工况中的受激励模型,建立了针对某泡沫材料衬垫的常规七自由度的动力学模型,得到在虚拟激励下食品衬垫系统的垂直位移和偏转角位移响应。

(1) 在该激励作用和衬垫系统的减振作用下,被运输食品的完整性得到了有效保护,并且通过线性趋势和实测相吻合,达到了实操前仿真的目的。

(2) 对多因素综合影响下的食品运输领域仿真提供了创新性的发展,验证了运输动力学在食品运输领域的可行性,可为后续可行性试验操作提供依据。

参考文献

- [1] 邓成江, 赵银, 赵云飞, 等. 单振动电机激励的振动松散机振动物体动力学分析[J]. 食品与机械, 2017, 33(9): 90-93.
- [2] 马涌航, 刘建新, 陈湘宁, 等. 不同阻隔性包装材料对生菜保鲜效果的影响[J]. 食品与机械, 2017, 33(8): 122-125.
- [3] 王卓, 曾绍连, 林明润, 等. 机器人包装防护箱体的结构和震动特性分析[J]. 机器人技术与应用, 2016(4): 41-44.
- [4] 吴旭填. 如何正确使用船运货物衬垫[J]. 天津航海, 2002(4): 29-30.
- [5] 黄斯. 水果减振包装的研制及其在草莓, 猕猴桃和葡萄贮运中的应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2016: 21-56.
- [6] 赵旗, 王培德, 罗兰, 等. 路面激励 Simulink 模型的建立及其应用[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(1): 128-132.
- [7] 张功学, 叶东. 十一自由度汽车动力学模型及舒适性仿真[J]. 机械设计与制造, 2017(1): 43-46.
- [8] 罗静, 钟佑明. 小波包时频分析方法的研究及应用[J]. 重庆邮电大学学报: 自然科学版, 2009, 21(3): 379-387.
- [9] 王文军, 曾凯芳, 刘晓佳, 等. 不同保鲜剂对柑橘果实贮藏品质的影响[J]. 食品与机械, 2017, 33(4): 110-116.
- [10] 张海伟, 张晓晴, 张雨露, 等. 前处理方式对蓝莓贮藏品质的影响[J]. 食品与机械, 2016, 32(9): 105-108.
- [11] 巩桂芬, 陈宁. 螺旋横向运动式去皮裹果蔬产品的机械及力学研究[J]. 包装与食品机械, 2016, 34(5): 33-37.
- [12] 陈宁, 张功学, 巩桂芬. 卷簧式紧膜包装机械设计[J]. 包装工程, 2017, 38(7): 151-154.
- [13] MAHDI Nabil, ALEXANDER S Rattner. Inter thermal phase change foam: A framework for two-phase flow simulations with thermally driven phase change[J]. Software X, 2016, 5(3): 216-226.
- [14] COLE D J, CEBON D. Validation of an articulated vehicle simulation[J]. Vehicle System Dynamics, 1992, 21(1): 197-223.
- [15] 苏彬, 冯涛, 王晶, 等. 被包装物质量对泡沫材料刚度及阻尼系数的影响[J]. 食品与机械, 2012, 28(3): 159-161, 166.