

缓冲与隔振

七自由度缓冲衬垫包装的动力学仿真

陈宁, 张功学

(陕西科技大学, 西安 710021)

摘要: **目的** 针对常用四角衬垫的七自由度包装衬垫进行动力学分析, 为以后用该类型衬垫仿真奠定基础。**方法** 使用 Matlab 进行编程产生随机高斯白噪声, 并进行滤波处理, 然后使用 ode15s 模块对以能量法建立七自由度的衬垫包装系统进行动力学微分方程求解。**结果** 各支脚的垂直振动位移趋势一致, 且数值大小低于 8 mm, 偏转角位移介于 0.006~0.008 rad 之间, 被包装物垂直位移响应低于 6~6.8 mm, 验证了在该工况下缓冲衬垫的缓冲特性。**结论** 在该激励作用和包装系统的减振作用下, 被运输包装物得到了有效的防护, 并且线性趋势和实测相吻合, 仿真效果良好。

关键词: 伪白噪声法; 七自由度; 垂直位移; 缓冲衬垫

中图分类号: TB486 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2018)09-0001-06

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2018.09.001

Dynamic Simulation of Cushioning Pad Package with Seven Degrees of Freedom

CHEN Ning, ZHANG Gong-xue

(Shaanxi University of Science & Technology, Xi'an 710021, China)

ABSTRACT: The work aims to conduct the kinetic analysis on the packaging pad with seven degrees of freedom with respect to the four-corner cushion to lay the foundation for the simulation with such kind of pad. Matlab was used for programming to generate random Gauss white noise, and the white noise was filtered. After that, the ode15s module was used to solve the dynamic differential equation of the pad packaging system with seven degrees of freedom based on energy method. The vertical vibration displacement of all legs was consistent, with the numerical value less than 8 mm, the deflection angle displacement between 0.006 and 0.008 rad and the vertical displacement response of the package lower than 6~6.8 mm. In such case, the cushioning characteristics of the cushioning pad were verified under this working condition. Under the action of such excitation and the vibration of packaging system, the transported package is effectively protected and the simulation results are achieved through the matching of the linear trend and the measured data.

KEY WORDS: pseudo white noise; seven degrees of freedom; vertical displacement; cushioning pad

随着社会经济的发展, 货物运输量日益扩大, 但关于被运输物品尤以精密器件的运输过程在整个产品生命周期中的地位越来越重要, 避免货物在运输过程中被损坏对于经济发展有着重要的影响。在减振包装领域, 缓冲衬垫是很重要的一类减振防护材质。对此众多学者对货物运输防护^[1-7]进行了研究, 主要分为以下几个方向: 缓冲衬垫的结构设计优化, 缓冲材料的研发运用及运输环境的仿真。设计合理的仿真方

案不仅可以减少运输包装的验证步骤, 而且可以大大缩减缓冲材料的研发费用及减少对环境造成的危害, 从而达到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^[8-14]中, 大多数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, 从而花费了大量时间及财力, 反之对于虚拟仿真研究则甚少, 因此针对缓冲衬垫的性能进行仿真研究显得十分

收稿日期: 2017-12-19

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

作者简介: 陈宁 (1995—), 男, 陕西科技大学硕士生, 主攻机械系统动力学、车辆工程等。

通信作者: 张功学 (1964—), 男, 博士, 陕西科技大学教授, 主要研究方向为机械系统动力学、机械可靠性等。

必要。建立整体的虚拟仿真研究思路,为以后深入研究和评价缓冲包装件特性有着重要意义。

1 缓冲衬垫材料参数

仿真模型分为 2 部分,分别是以某泡沫材料衬垫^[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缓冲包装件和运输工具的刚度系数、质量和阻尼系数的匹配,如果缓冲包装材料质量相对较小,则可忽略。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,4 个支脚分别受到基于伪白噪声法随机形成的激励;分别从运输物品的被包装物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,并防止发生共振现象,或在时域内加速度大于脆值而发生损坏现象。某泡沫材质的缓冲衬垫见图 1,后期实验可以采用其他衬垫进行对比。根据文献测得相关的刚度阻尼系数见表 1。



图 1 实体泡沫材质的缓冲衬垫结构

Fig.1 Cushioning pad structure of solid foam material

表 1 某实体泡沫材质的缓冲衬垫参数

Tab.1 Cushioning pad 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)
1	400	34.625	18932.1	2.685
2	1400	26.125	37722.5	7.640
3	2500	18.750	34697.8	8.924

2 衬垫包装系统动力学模型

在衬垫包装运输缓冲系统中主要建立运输工具及缓冲包装件的动力学模型。运输缓冲系统的参数化动力学模型由衬垫和被包装物品组合组成,在建模过程中根据整车模型各部分以起缓冲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,见图 2。其中: x_a 为被运输物品的垂直位移 (m); x_j 为缓冲衬

垫的垂直位移 (m); x_{jy} 为缓冲衬垫绕其质心处的纵向角位移 (rad); x_{jx} 为缓冲衬垫绕其质心处的横向角位移 (rad); x_1, x_3, x_2, x_4 为缓冲衬垫各支脚的垂直位移 (m); q_1, q_3, q_2, q_4 为缓冲衬垫各支脚受到的位移激励 (m)。

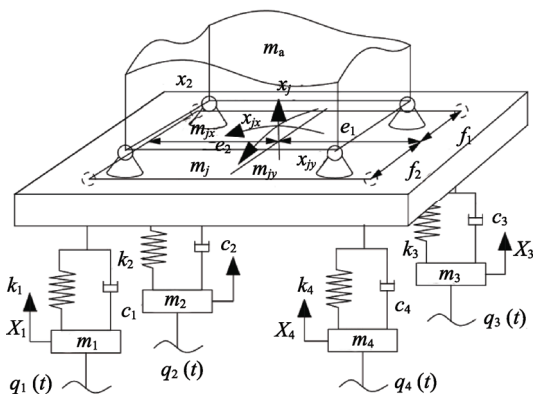


图 2 缓冲衬垫的空间动力学模型

Fig.2 Spatial dynamic model of cushioning pad

根据缓冲衬垫各支脚在不同的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: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;模型中的被运输物品假设为刚体,其与衬垫的连接方式为铰接,不考虑弹性刚度和阻尼性质;模型中所有支脚接触均为点接触,激励只作用于接触点上,且方向垂直向上;模型中所有简化后的弹簧满足胡克定律中弹力和弹簧伸缩位移呈线性的要求;模型中所有简化后的阻尼器的阻尼力与速度满足线性关系。

在仿真过程中采用表 1 中的试样 3 进行试验,具体参数见表 2。

表 2 包装系统参数

Tab.2 Packaging system parameters

参数	数值	说明
m_a	2.5 kg	被运输物品的质量
m_j	0.5 kg	缓冲衬垫包装质量
m_{jy}	0.75 kg·m ²	缓冲衬垫俯仰转动惯量
m_{jx}	0.75 kg·m ²	缓冲衬垫侧斜转动惯量
m_1, m_2, m_3, m_4	0.1 kg	缓冲衬垫包装四支脚质量
c_1, c_2, c_3, c_4	8.92 N·s/m	缓冲衬垫包装四支脚阻尼系数
k_1, k_2, k_3, k_4	34697.8 N/m	缓冲衬垫包装四支脚刚度系数
e_1, e_2, f_1, f_2	0.2, 0.15 m	缓冲衬垫包装四支脚连接点距离

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 3 部分列出整个系统的动力学公式。

二维整车模型动力学中主要包括 3 种能量, 分别为动能 T 、势能 V 和耗散能 D 。

整车的动能 T 为:

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

整车的耗散能 D 为:

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

整车的势能 V 为:

$$V = \frac{1}{2}k_1(x_j - e_2x_{jy} - f_2x_{jx} - x_1)^2 + \frac{1}{2}k_2(x_j - e_2x_{jy} + f_1x_{jx} - x_2)^2 + \frac{1}{2}k_3(x_j + e_1x_{jy} + f_1x_{jx} - x_3)^2 + \frac{1}{2}k_4(x_j + e_1x_{jy} - f_2x_{jx} - x_4)^2 \quad (3)$$

通过忽略对振动模型影响不大的变量, 达到简化公式、加快设计效率的目的, 有利于求解。对式 (1—3) 经求导整理成为经典动力学表达式, 具体见式 (4)。

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

式中: m 为质量矩阵; c 为阻尼矩阵; k 为刚度矩阵; k_q 为路面激励矩阵。

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

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

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

$$k(1,1) = k_1 + k_2 + k_3 + k_4, k(1,2) = -k_1e_2 - k_2e_2 + k_3e_1 + k_4e_1,$$

$$k(1,3) = -k_1f_2 + k_2f_1 + k_3f_1 - k_4f_2,$$

$$k(1,4) = -k_1, k(1,5) = -k_2, k(1,6) = -k_3, k(1,7) = -k_4,$$

$$k(2,2) = k_1e_2^2 + k_2e_2^2 + k_3e_1^2 + k_4e_1^2,$$

$$k(2,3) = k_1e_2f_2 - k_2e_2f_1 + k_3e_1f_1 - k_4e_1f_2, k(2,4) = k_1e_2,$$

$$k(2,5) = k_2e_2, k(2,6) = -k_3e_1, k(2,7) = -k_4e_1,$$

$$k(3,3) = k_1f_2^2 + k_2f_1^2 + k_3f_1^2 + k_4f_2^2, k(3,4) = k_1f_2,$$

$$k(3,5) = k_2f_1, k(3,6) = -k_3f_1, k(3,7) = k_4f_2,$$

$$k(4,4) = k_1, k(5,5) = k_2, k(6,6) = k_3, k(7,7) = k_4$$

$$k(2,1) = -k_1e_2 - k_2e_2 + k_3e_1 + k_4e_1,$$

$$k(3,1) = -k_1f_2 + k_2f_1 + k_3f_1 - k_4f_2,$$

$$k(4,1) = -k_1, k(5,1) = -k_2, k(6,1) = -k_3, k(7,1) = -k_4,$$

$$k(3,2) = k_1e_2f_2 - k_2e_2f_1 + k_3e_1f_1 - k_4e_1f_2, k(4,2) = k_1e_2,$$

$$k(5,2) = k_2e_2, k(6,2) = -k_3e_1, k(7,2) = -k_4e_1,$$

$$k(5,3) = -k_2f_2, k(6,3) = -k_3f_1, c(7,3) = k_4f_2$$

$$c(1,1) = c_1 + c_2 + c_3 + c_4, c(1,2) = -c_1e_2 - c_2e_2 + c_3e_1 + c_4e_1,$$

$$c(1,3) = -c_1f_2 + c_2f_1 + c_3f_1 - c_4f_2,$$

$$c(1,4) = -c_1, c(1,5) = -c_2, c(1,6) = -c_3, c(1,7) = -c_4,$$

$$c(2,2) = c_1e_2^2 + c_2e_2^2 + c_3e_1^2 + c_4e_1^2,$$

$$c(2,3) = c_1e_2f_2 - c_2e_2f_1 + c_3e_1f_1 - c_4e_1f_2, c(2,4) = c_1e_2,$$

$$c(2,5) = c_2e_2, c(2,6) = -c_3e_1, c(2,7) = -c_4e_1,$$

$$c(3,3) = c_1f_2^2 + c_2f_1^2 + c_3f_1^2 + c_4f_2^2, c(3,4) = c_1f_2,$$

$$c(3,5) = -c_2f_1, c(3,6) = -c_3f_1, c(3,7) = c_4f_2,$$

$$c(4,4) = c_1, c(5,5) = c_2, c(6,6) = c_3, c(7,7) = c_4$$

$$c(2,1) = -c_1e_2 - c_2e_2 + c_3e_1 + c_4e_1,$$

$$c(3,1) = -c_1f_2 + c_2f_1 + c_3f_1 - c_4f_2,$$

$$c(4,1) = -c_1, c(5,1) = -c_2, c(6,1) = -c_3, c(7,1) = -c_4,$$

$$c(3,2) = c_1e_2f_2 - c_2e_2f_1 + c_3e_1f_1 - c_4e_1f_2, c(4,2) = c_1e_2,$$

$$c(5,2) = c_2e_2, c(6,2) = -c_3e_1, c(7,2) = -c_4e_1,$$

$$c(5,3) = -c_2f_1, c(6,3) = -c_3f_1, c(7,3) = c_4f_2$$

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 中已是一种普遍使用的方法,但在包装虚拟激励中应用较少,在此以 ISO/TC108/SC2N67 计算缓冲衬垫的空间功率谱密度。常用到的滤波白噪声具体表达式为:

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

式中: $n_0=0.1 \text{ m}^{-1}$; $G_q(n)$ 为激励空间功率谱密度; n 为空间频率; $G_q(n_0)$ 为不平激励系数; W 为频率指数。

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

式中: $f=nu$; $G_q(f)$ 为时间功率谱密度; f 为时间频率; u 为速度。

根据条件引入空间截止频率 n_q , 当 $W=2$ 的条件下, 可将式 (5—6) 变为:

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

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

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

通过 Matlab 编程并产生随机激励的高斯白噪声和经滤波后的白噪声见图 3。

结合之前缓冲衬垫的动力学模型, 带入上述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, 则解得高阶微分方程, 见图 4。

通过观察图 5—7 和表 2 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, 其垂直位移的数值小于 8 mm。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, 验证了该材料在此工况作用下的偏转位移介于 0.006~0.008 rad 之间。衬垫平面的垂直位移反应了被包装物所受垂直位移的响应在 6~6.8 mm 之间, 明显小于四支脚的垂直位移量。综合可知, 在该激励作用和包装系统的减振作用下, 被运输包装物得到了有效的防护, 并且线性趋势和实测趋势基本吻合, 达到了仿真目的, 验证了在该工况下缓冲衬垫的缓冲特性。

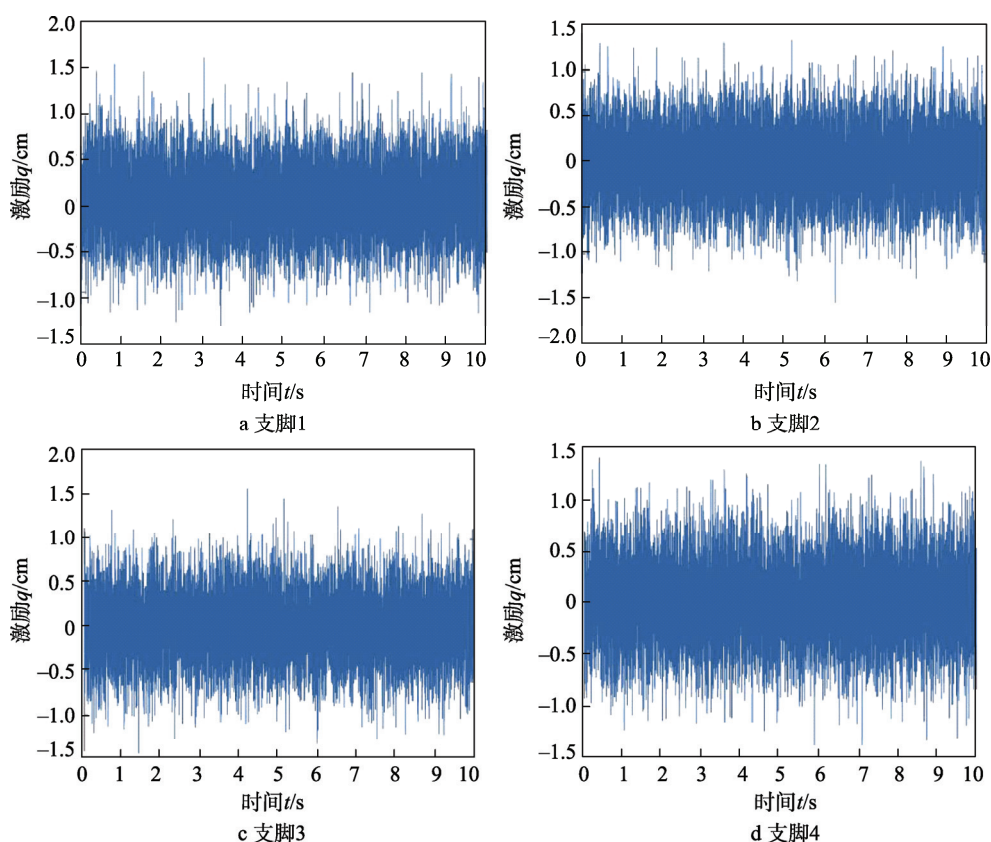


图3 高斯白噪声激励
Fig.3 Gauss white noise excitation

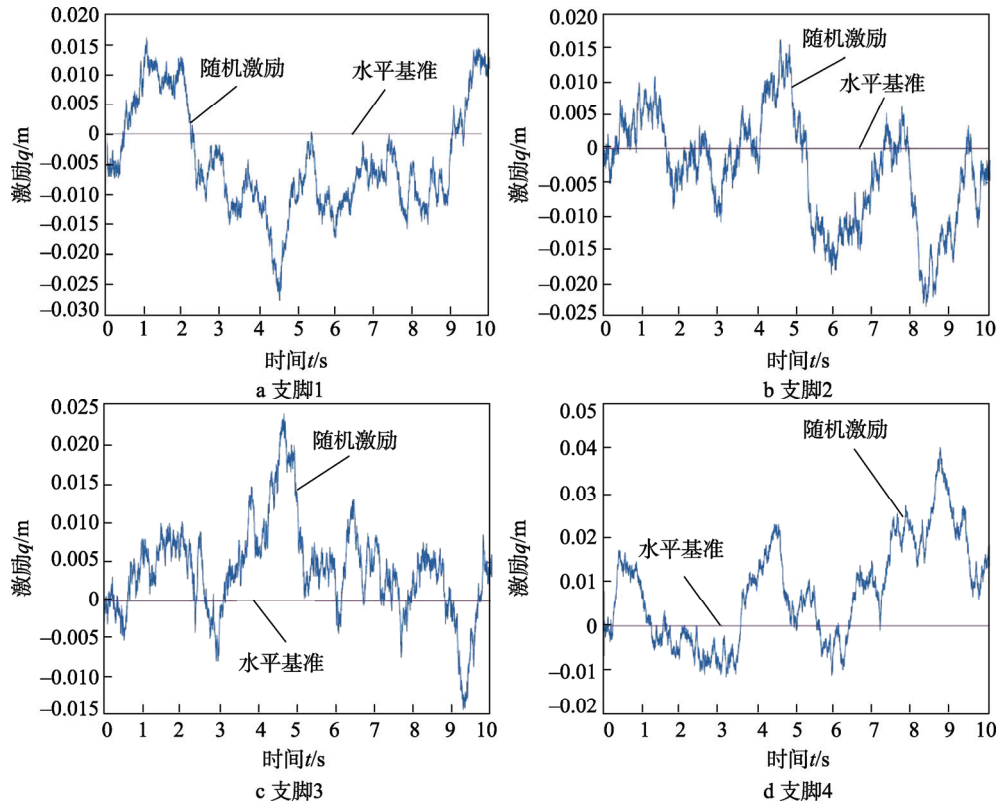


图 4 滤波白噪声激励
Fig.4 Filtering white noise excitation

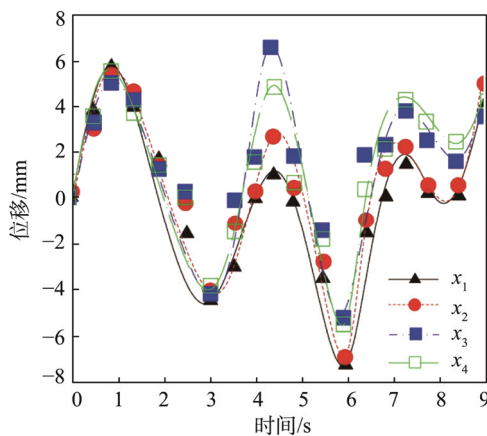


图 5 各支脚垂直位移响应
Fig.5 Vertical displacement response of each leg

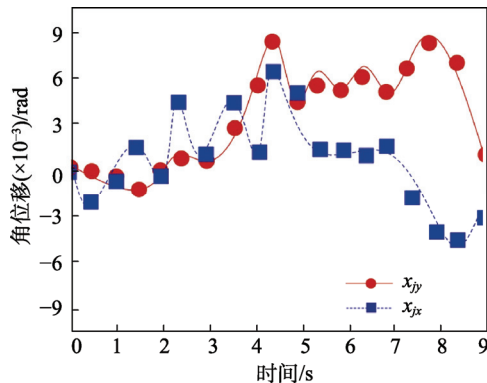


图 6 衬垫平面两轴向角位移响应
Fig.6 Two axial angular displacement response of pad plane

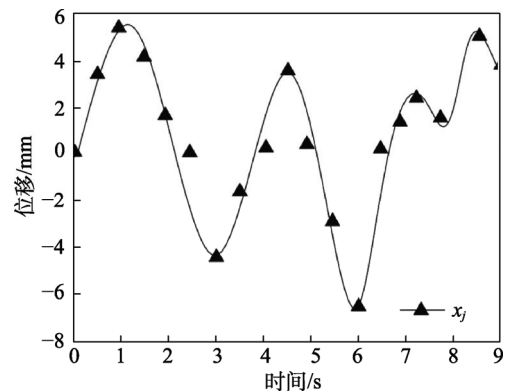


图 7 衬垫平面的垂直位移响应
Fig.7 Vertical displacement response of the pad plane

4 结语

通过伪白噪声法模拟运输工况中包装件的受激励模型, 同时建立七自由度的缓冲衬垫的动力学模型, 仿真得到在虚拟激励下衬垫包装系统的垂直位移和偏转角位移响应。通过仿真过程可以得到结论: 在该激励作用和包装系统的减振作用下, 被运输包装物得到了有效的防护, 并且线性趋势和实测相吻合, 仿真效果良好; 在后续研究应用中可以使用多参数化建模的思路针对不同材质的缓冲衬垫进行仿真试验, 为实际应用测试提供了可靠的模拟仿真思路; 为新型缓冲衬垫的结构研究及材料属性分析提供了新的思路。

参考文献:

- [1] 黎春红, 周宏胜, 张雷刚, 等. 不同内包装方式对模拟运输过程中水蜜桃品质的影响[J]. 现代食品科技, 2017(12): 1—7.
LI Chun-hong, ZHOU Hong-sheng, ZHANG Lei-gang, et al. The Influence of Different Inner Packaging Methods on the Quality of Peach in Simulated Transportation Process[J]. Modern Food Technology, 2017(12): 1—7.
- [2] 张涛涛. 西北地区铁路运输环境下的货物包装防护评价系统研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2014.
ZHANG Tao-tao. Research on the Evaluation System of Cargo Packaging Protection Under the Railway Transportation Environment in Northwest China [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiao Tong University, 2014.
- [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.
WANG Zhuo, CENG Shao-lian, LIN Ming-run, et al. Analysis of the Structure and Vibration Characteristics of the Robot Packaging Protection Box[J]. Robot Technology and Application, 2016(4): 41—44.
- [4] 马爽. 军品贮运包装要求及木箱结构 CAD 系统研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2002.
MA Shuang. Research on Packaging Requirements and CAD System of Military Military Storage and Transportation[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2002.
- [5] 巩桂芬, 陈宁. 螺旋横向运动式去皮裹包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.
GONG Gui-fen, CHEN Ning. Mechanical and Mechanical Study of Fruit and Vegetable Products with Spiral Transverse Movement and Peeled Wrapped Package[J]. Packaging and Food Machinery, 2016, 34(5): 33—37.
- [6] 张杨. 电子枪运输包装性能仿真分析[D]. 西安: 西安理工大学, 2009.
ZHANG Yang. Simulation and Analysis of the Performance of the Transportation and Packaging of Electronic Guns[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2009.
- [7] 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.
CHEN Ning, ZHANG Gong-xue, GONG Gui-fen. Spring Coiling Type Tight Film Packaging Machinery Design[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(7): 151—154.
- [8] 吴旭填. 如何正确使用船运货物衬垫[J]. 天津航海, 2002(4): 29—30.
WU Xu-tian. How to Correctly Use Shipping Cargo Liner[J]. Tianjin Sailing, 2002(4): 29—30.
- [9] 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.
HUANG Si. Research and Development of Vibration Packaging of Fruit and Its Application in Strawberry, Kiwi and Grape Storage and Transportation[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016.
- [10] 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.
ZHANG Gong-xue, YE Dong. Eleven Degree of Freedom Vehicle Dynamics Model and Comfort Simulation[J]. Mechanical Design and Manufacture, 2017(1): 43—46.
- [11] MAHDI N, ALEXANDER S R. Inter Thermal Phase Change Foam-A Framework for Two-phase Flow Simulations with Thermally Driven Phase Change[J]. Software X, 2016, 5: 216—226.
- [12] COLE D J, CEBON D. Validation of an Articulated Vehicle Simulation[J]. Vehicle System Dynamics, 1992, 21(1): 197—223.
- [13] VADURI S S V. Development of a Simulation for Preliminary Assessment of Ride[D]. Carolina: Clemson University, 1994.
- [14] VELMURUGAN P, SANKARANARAYANASAMY K, KUMARASWAMIDHAS L A, et al. Ride Comfort Analysis of Unsuspended Cabin Tractor Semi-trailer[J]. Int J Vehicle Structures & Systems, 2014, 6(4): 104—109.
- [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(3): 159—161.
SU Bin, FENG Tao, WANG Jing, et al. The Influence of the Quality of the Packaging on the Stiffness and Damping Coefficient of Foam Materials[J]. Food and Machinery, 2012(3): 159—161.