

悬挂式缓冲系统易损件冲击响应特性

李辉¹, 陈安军^{1,2}

(1.江南大学, 无锡 214122; 2.国家轻工业包装制品质量监督检测中心, 无锡 214122)

摘要: **目的** 以考虑易损件的悬挂系统为对象, 研究跌落冲击条件下易损件响应规律。**方法** 建立系统无量纲动力学模型, 利用四阶龙格库塔法分析易损件的位移和加速度响应。讨论系统悬挂角、频率比、阻尼比和无量纲冲击速度等参数对易损件位移、加速度响应的影响。**结果** 系统的悬挂角、频率比以及主体与基础连接处的阻尼对易损件响应影响显著, 随着系统悬挂角的增加, 易损件加速度响应幅值增加, 位移响应幅值减少, 响应周期缩短。增加频率比可有效抑制易损件响应幅值。**结论** 在跌落冲击条件下, 悬挂系统的设计应选择适当的悬挂角、频率比等相关参数, 以满足产品防护的需要。

关键词: 悬挂系统; 易损件; 位移响应; 加速度响应

中图分类号: TB485.1; TB487 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2017)11-0074-05

Shock Response Characteristics of Quick-wear Parts for Suspension Cushioning System

LI Hui¹, CHEN An-jun^{1,2}

(1.Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 2.China National Light Industry Package Quality Supervising and Testing Center, Wuxi 214122, China)

ABSTRACT: The work aims to study the response regularity of quick-wear parts under drop impact conditions with the suspension system of quick-wear parts considered as the object. Dimensionless dynamic model was built and the fourth order Ronge-Kutta method was adopted to analyze the displacement and acceleration response of quick-wear parts. The effects of such parameters as suspension angle, frequency ratio, damping ratio and dimensionless shock velocity of the system on the displacement and acceleration response of the quick-wear parts were discussed. The effects of suspension angle, frequency ratio and damping at the joint between the main body and the base on quick-wear parts response are noticeable. With the increase in the system's suspension angle, the acceleration response amplitude of quick-wear parts would be increased, the displacement response amplitude would be decreased and the response cycle would be shortened. The increase in frequency ration could effectively restrain the response amplitude of quick-wear parts. Under the drop impact conditions, in order to design the suspension system, proper suspension angle, frequency ration and other relevant parameters should be selected, so as to meet the requirements for product protection.

KEY WORDS: suspension system; quick-wear parts; displacement response; acceleration response

产品的流通过程中, 冲击和振动是引起破损的重要因素。较低脆值产品可利用斜支承^[1-10]或悬挂结构^[11-22]对其进行有效的防护。斜支承系统的研究中, 吴晓^[2-4]、陈安军等^[5]分析了系统的非线性自振特性, 陈安军^[6-7]探讨了典型脉冲激励下系统的冲击特性, 许佩霞^[8]、段宁宁等^[9-10]研究了考虑易损件的两自由度斜支承系统振动、冲击特性和破损评价, 斜支承系

统的研究相对较为全面。对于悬挂系统, 吴晓等^[11-12]研究了系统的固有振动特性, 文献[14—18]研究了系统的冲击特性、典型脉冲激励下的冲击特性及破损评价。在跌落冲击条件下, 宋爽等^[19-22]利用变分迭代法获得了系统的响应近似解析解。现有悬挂系统的相关研究模型基本考虑为单自由度, 未考虑易损部件, 因此悬挂系统的研究需进一步拓展。

收稿日期: 2016-11-06

作者简介: 李辉 (1991—), 男, 江南大学硕士生, 主攻运输包装。

通讯作者: 陈安军 (1962—), 男, 江南大学教授, 主要研究方向为包装动力学。

文中以考虑易损件的悬挂系统作为研究对象, 将系统简化为两自由度力学模型。跌落冲击条件下, 建立系统的动力学方程并进行无量纲处理。利用四阶龙格库塔数值分析方法求解动力学方程, 探讨系统悬挂角、频率比、阻尼比以及跌落冲击速度等参数对易损件位移、加速度响应的影响规律。

1 动力学模型

考虑易损件的悬挂系统力学模型见图 1。\$m_1\$ 和 \$m_2\$ 分别为易损件及产品主体的质量; \$k_1\$ 为主体与易损件连接处等效线弹性系数; \$c_1\$ 为主体与易损件连接处等效阻尼系数; \$c_2\$ 为主体与基础连接处运动方向等效阻尼系数; \$l_0\$ 为悬挂弹簧初始长度; \$k\$ 为弹簧弹性系数; \$\varphi_0\$ 为初始悬挂角。

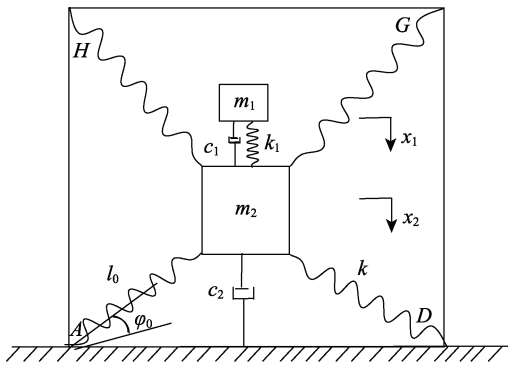


图 1 考虑易损件的悬挂系统模型
Fig.1 The model of the suspension system with vulnerable component

取静平衡位置为坐标原点, 向下为正, 在文献[14—22]的基础上, 考虑易损件悬挂系统跌落冲击动力学方程为:

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 + k_1(x_1 - x_2) + c_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) = 0 \\ m_2 \ddot{x}_2 + c_2 \dot{x}_2 + 8k[a_0 x_2 + (b_0 / l_0^2) x_2^3] - k_1(x_1 - x_2) - c_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: \$x_1, x_2\$ 为易损件及产品位移; \$\dot{x}_1, \dot{x}_2\$ 为易损件及产品速度; \$\ddot{x}_1, \ddot{x}_2\$ 为易损件及产品加速度; \$a_0 = \sin^2 \varphi_0\$; \$b_0 = (1 - 6\sin^2 \varphi_0 + 5\sin^4 \varphi_0)/2\$。跌落冲击初始条件为:

$$\begin{cases} x_1(0) = x_2(0) = 0 \\ \dot{x}_1(0) = \dot{x}_2(0) = \sqrt{2gH} \end{cases} \quad (2)$$

式中: \$H\$ 为系统跌落高度。引入无量纲参数: 易损件及产品的无量纲位移 \$y_1 = x_1 / l_0, y_2 = x_2 / l_0\$; 无量纲时间 \$\tau = t / T\$; \$t\$ 为时间参数; 易损件及产品的频率 \$\omega_1 = \sqrt{k_1 / m_1}, \omega_2 = \sqrt{8k / m_2}\$; 产品周期参数 \$T = 1 / \omega_2\$。系统无量纲动力学方程:

$$\begin{cases} y_1'' + \lambda_2^2(y_1 - y_2) + 2\zeta_1\lambda_2(y_1' - y_2') = 0 \\ y_2'' + 2\zeta_2 y_2' + a_0 y_2 + b_0 y_2^3 - \lambda_1 \lambda_2^2(y_1 - y_2) - 2\zeta_1 \lambda_1 \lambda_2(y_1' - y_2') = 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: \$y_1' = dy_1 / d\tau, y_2' = dy_2 / d\tau\$, 它们分别表示易损件及主体的无量纲速度; \$y_1'' = d^2 y_1 / d\tau^2, y_2'' = d^2 y_2 / d\tau^2\$, 它们分别表示易损件及主体的无量纲加速度; 易损件与主体连接处阻尼比 \$\zeta_1 = c_1 / 2\sqrt{k_1 m_1}\$; 主体与基础连接处阻尼比 \$\zeta_2 = c_2 / 2\sqrt{8k m_2}\$; 易损件与主体质量比 \$\lambda_1 = m_1 / m_2\$, 频率比 \$\lambda_2 = \omega_1 / \omega_2\$。跌落冲击初始条件为:

$$\begin{cases} y_1(0) = y_2(0) = 0 \\ y_1'(0) = y_2'(0) = V = \sqrt{2g m_2 H / 8k l_0^2} \end{cases} \quad (4)$$

2 易损件位移响应

应用四阶龙格-库塔法求解式(3), 分析弹簧悬挂角度 \$\varphi_0\$、频率比 \$\lambda_2\$、阻尼比 \$\zeta_2\$ 以及无量纲冲击速度 \$v\$ 等对易损件跌落冲击位移响应的影响。

2.1 绝对位移响应

取 \$\lambda_1 = 0.01, \zeta_1 = \zeta_2 = 0, v = 0.3, \lambda_2 = 3\$, 不同悬挂角 \$\varphi_0\$ 为 \$60^\circ, 70^\circ, 80^\circ, 90^\circ\$ 时易损件位移响应见图 2a; 取 \$\varphi_0 = 60^\circ, \lambda_1 = 0.01, \zeta_1 = \zeta_2 = 0, v = 0.3\$, 不同频率比 \$\lambda_2\$ 为 \$0.5, 1, 3, 5\$ 时易损件位移响应见图 2b; 取 \$\varphi_0 = 60^\circ, \lambda_1 = 0.01, \zeta_1 = 0, v = 0.3, \lambda_2 = 3\$, 不同阻尼比 \$\zeta_2\$ 为 \$0.05, 0.1, 0.3, 0.5\$ 时易损件位移响应见图 2c; 取 \$\varphi_0 = 60^\circ, \lambda_1 = 0.01, \lambda_2 = 3, \zeta_1 = \zeta_2 = 0\$, 不同无量纲跌落冲击速度 \$v\$ 为 \$0.1, 0.3, 0.5, 0.7\$ 时易损件位移响应见图 2d。

2.2 相对位移响应

易损件无量纲相对位移为 \$x_1 = y_1 - y_2\$。通过求解无量纲动力学方程, 相关参数的选取同 2.1 节, 悬挂角、频率比、阻尼比及无量纲跌落冲击速度对易损件相对位移响应的影响见图 3。

3 易损件加速度响应

相关参数的选取同 2.1 节, 悬挂角、频率比、阻尼比及无量纲跌落冲击速度对易损件加速度响应的影响见图 4。

4 易损件跌落冲击响应的影响因素

1) 系统悬挂角。无阻尼条件下, 由图 2a、图 3a、图 4a 可知, 随系统悬挂角增加, 易损件位移响应幅值减少, 相对位移响应幅值增加, 相应周期缩短, 易损件加速度响应幅值增加。

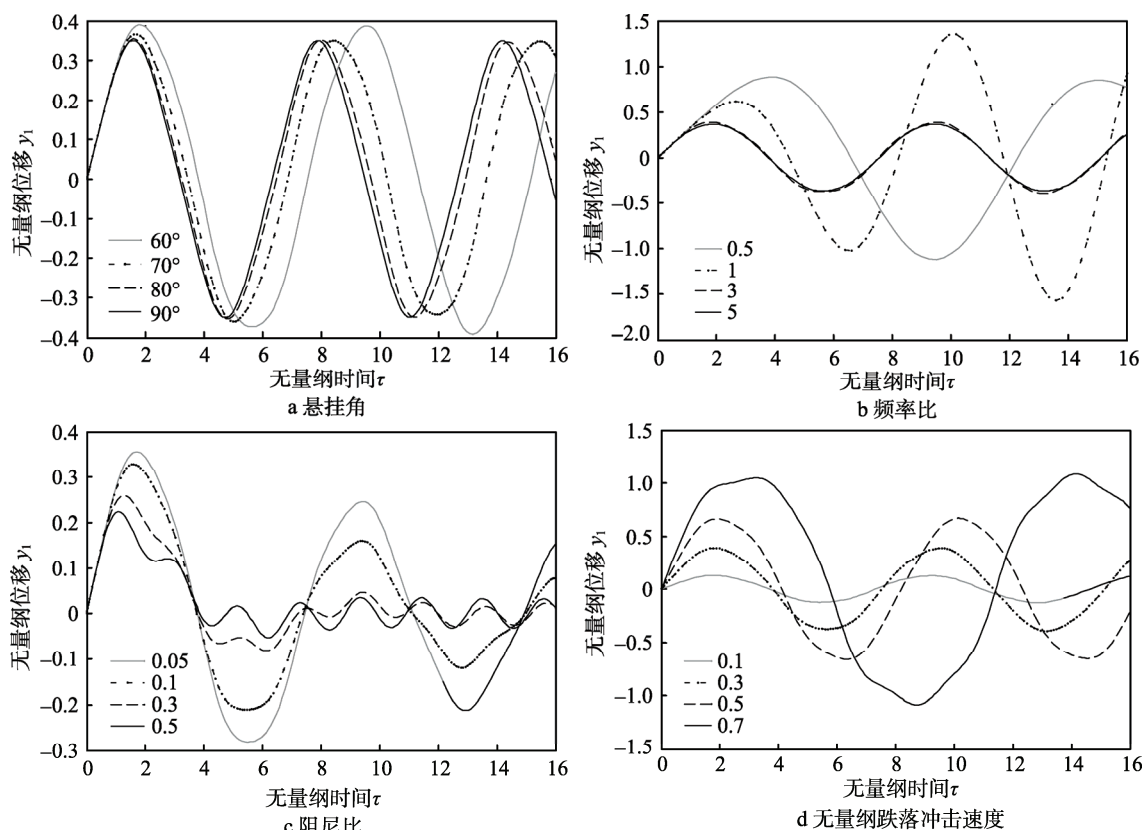


图2 参数不同时易损件的位移响应

Fig.2 The displacement response of vulnerable component with different parameters

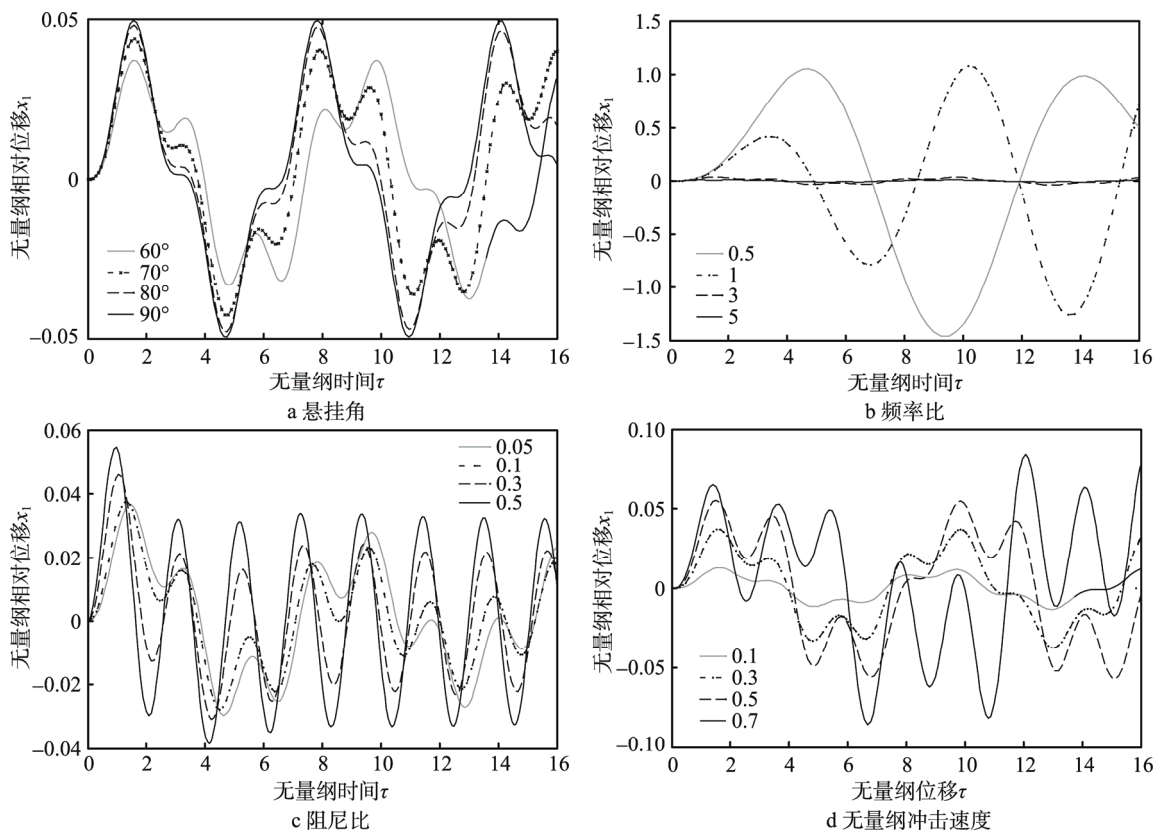


图3 参数不同时易损件相对位移响应

Fig.3 The relative displacement response of vulnerable component with different parameters

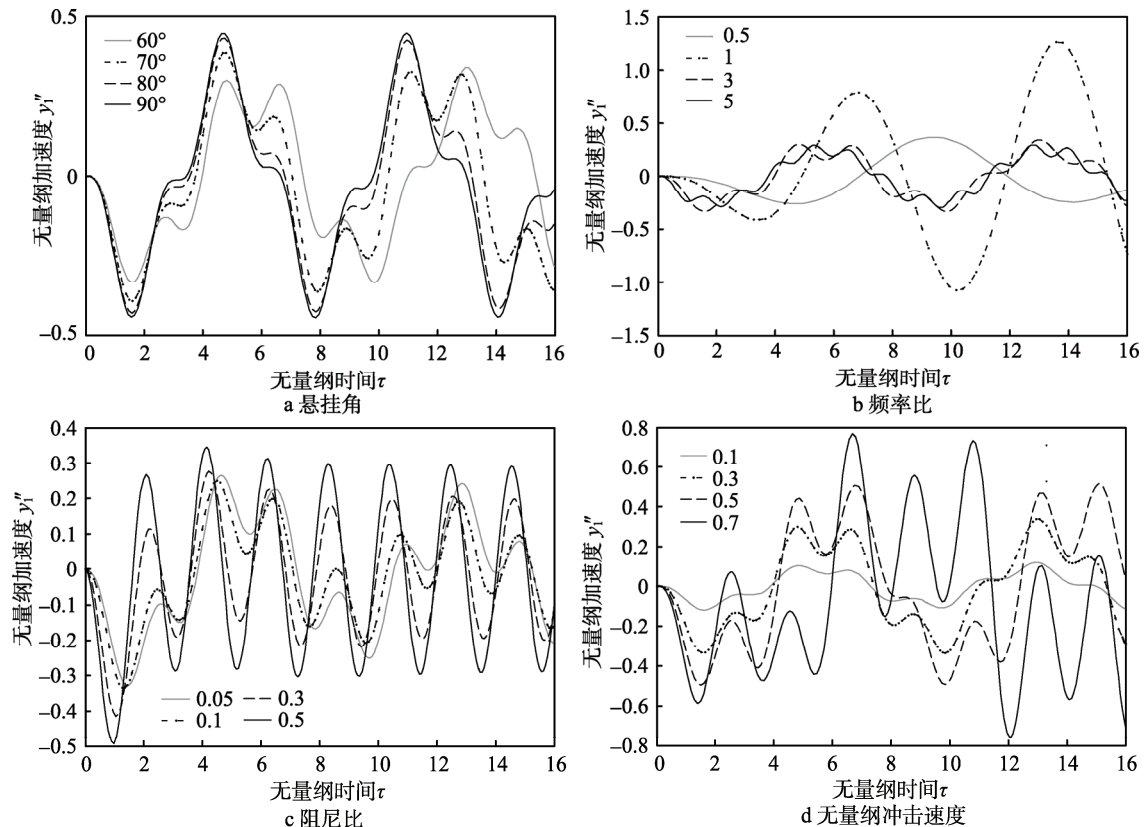


图4 易损件的加速度响应

Fig.4 The acceleration response of vulnerable component

2) 频率比。无阻尼条件下, 由图 2b、图 3b、图 4b 可知, 频率比为 1 时, 易损件响应幅值最大, 易损件的位移响应对频率比较敏感, 增加频率比, 可有效抑制系统响应幅值。

3) 阻尼比。由图 2c、图 3c、图 4c 可知, 易损件位移响应和加速度响应对主体与基础连接处阻尼比影响较为敏感, 随 ζ_2 增加, 可减少位移响应的幅值, 但相对位移和加速度响应幅值出现先减少再增加的过程。

4) 无量纲冲击速度。无阻尼条件下, 由图 2d、图 3d、图 4d 可知, 易损件位移和加速度响应幅值随无量纲冲击速度的增加而增加。

5 结语

建立了考虑易损件悬挂系统无量纲跌落冲击动力学模型, 利用了四阶龙格库塔数值分析方法求解动力学方程, 分析了系统的悬挂角、频率比、阻尼比以及无量纲跌落冲击速度等参数对易损件响应规律的影响。数值分析结果表明, 系统的悬挂角、频率比以及主体与基础连接处的阻尼比对易损件响应影响显著; 减少悬挂角, 可有效抑制加速度响应幅值, 延长系统的响应周期; 增加频率比可有效减少易损件响应幅值, 系统设计中应选择频率比大于 5; 恰当地选择主体与基础连接处阻尼比可抑制易损件的位移响应

幅值。该研究结论可为悬挂系统的设计提供理论依据。

参考文献:

- [1] 张英世. 斜支承弹簧系统的振动[J]. 机械强度, 1992, 14(2): 54—59.
ZHANG Ying-shi. Vibration of Tilted Spring Support[J]. Journal of Mechanical Strength, 1992, 14(2): 54—59.
- [2] 吴晓, 罗佑新, 杨立军. 基础位移激励下斜支承弹簧减振系统的振动[J]. 振动与冲击, 2009(11): 115—117.
WU Xiao, LUO You-xin, YANG Li-jun. Vibration of Shock Absorber System with Tilted Support Spring under Displacement Excitation of Foundation[J]. Journal of Vibration and Shock, 2009(11): 115—117.
- [3] 吴晓, 杨立军. 斜支承弹簧减振系统的固有振动[J]. 空间结构, 2008, 14(4): 50—52.
WU Xiao, YANG Li-jun. Study on the Natural Vibration of Nonlinear Vibration Reduced System with Inclined Spring Support[J]. Spatial Structures, 2008, 14(4): 50—52.
- [4] 吴晓, 罗佑新, 吴扬. 斜支承弹簧减振系统竖向非线性自振研究[J]. 振动与冲击, 2008, 27(8): 85—87.
WU Xiao, LUO You-xin, WU Yang. Study on Vertical Nonlinear Vibration of Shock Absorber System with Tilted Support Spring[J]. Journal of Vibration and Shock, 2008, 27(8): 85—87.
- [5] 陈安军. 斜支承弹簧包装系统非线性振动特性分析[J]. 包装工程, 2009, 30(11): 20—22.

- CHEN An-jun. Analysis of Nonlinear Vibration Characteristics of Packaging System with Tilted Support Spring[J]. Packaging Engineering, 2009, 30(11): 20—22.
- [6] 陈安军. 矩形脉冲激励下斜支承弹簧系统冲击特性的研究[J]. 振动与冲击, 2010, 29(10): 225—227.
CHEN An-jun. Shock Characteristics of a Tilted Support Spring System under Action of a Rectangular Pulse[J]. Journal of Vibration and Shock, 2010, 29(10): 225—227.
- [7] 陈安军. 考虑易损件的发动机斜支承减振系统冲击特性研究[J]. 机械科学与技术, 2014, 33(7): 1083—1086.
CHEN An-jun. The Shock Characteristics of the Motor-Tilted Support System with Vulnerable Parts[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2014, 33(7): 1083—1086.
- [8] 许佩霞. 考虑易损件的斜支承包装系统振动特性的研究[J]. 包装工程, 2011, 32(19): 5—7.
XU Pei-xia. Study of Vibration Characteristics of Tilted Support Packaging System Considering Vulnerable Parts[J]. Packaging Engineering, 2011, 32(19): 5—7.
- [9] 段宁宁, 陈安军. 矩形脉冲激励下斜支承系统易损件的冲击特性研究[J]. 包装工程, 2013, 34(7): 21—24.
DUAN Ning-ning, CHEN An-jun. Shock Characteristics of Vulnerable Components of Tilted Support System under Rectangular Pulse Excitation[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(7): 21—24.
- [10] DUAN N N, SONG S, CHEN A J. The Dynamic Evaluation of Tilted Support Spring Nonlinear System with Critical Components under the Action of a Rectangular Pulse[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2014(6): 1—6.
- [11] 吴晓, 罗佑新, 杨立军, 等. 基础位移作用下悬挂弹簧的非线性固有振动[J]. 北京理工大学学报, 2009, 29(12): 1041—1043.
WU Xiao, LUO You-xin, YANG Li-jun, et al. Nonlinear Suspension Spring Natural Vibration Based on Foundation Displacement[J]. Journal of Beijing University of Science and Technology, 2009, 29(12): 1041—1043.
- [12] 吴晓, 杨立军. 悬挂弹簧几何非线性减振系统的固有振动特性[J]. 振动与冲击, 2008, 27(11): 71—72.
WU Xiao, YANG Li-jun. Natural Vibration Characteristics of Suspension Spring Geometric Nonlinear Damping System[J]. Journal of Vibration and Shock, 2008, 27(11): 71—72.
- [13] 徐筱. 悬浮式缓冲包装系统分析与研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2005.
- XU Xiao. Suspension Cushion Packaging System Analysis and Research[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2005.
- [14] WANG L, CHEN A J. The Damage Boundary Curve of the Suspension Packaging System under Rectangular Pulse[J]. Applied Mechanics and Materials, 2012 (5): 70—73.
- [15] WANG L, CHEN A J. The Shock Response Spectra of the Suspension Packaging System under Rectangular Pulse[J]. Journal of Applied Packaging Research, 2012, 5(4): 237—246.
- [16] 王蕾, 陈安军. 悬挂式弹簧包装系统的冲击特性研究[J]. 包装工程, 2011, 32(9): 33—36.
WANG Lei, CHEN An-jun. Study on Shock Characteristics of Suspension Spring Packaging System[J]. Packaging Engineering, 2011, 32(9): 33—36.
- [17] 王蕾, 陈安军. 矩形脉冲激励下悬挂式弹簧系统冲击特性的研究[J]. 振动与冲击, 2012, 31(11): 142—144.
WANG Lei, CHEN An-jun. Shock Characteristics of a Suspension Spring System under Action of a Rectangular Pulse[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(11): 142—144.
- [18] 王蕾. 悬挂式缓冲包装系统动力学性能的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2012.
WANG Lei. Research on Dynamic Characteristic of Suspension Cushioning Packing System[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2012.
- [19] 宋爽, 陈安军. 基于变分迭代法的悬挂式弹簧系统的跌落破损评价[J]. 包装工程, 2013, 34(13): 36—39.
SONG Shuang, CHEN An-jun. Dropping Damage Evaluation of Suspension Spring System Based on Vibrational Iteration Method[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(13): 36—39.
- [20] 宋爽, 王蕾, 陈安军. 悬挂式弹簧系统跌落冲击问题的变分迭代法[J]. 噪声和振动控制, 2013, 33(6): 36—39.
SONG Shuang, WANG Lei, CHEN An-jun. Vibrational Iteration Method for Analyzing Dropping Shock of Suspended Spring System[J]. Noise and Vibration Control, 2013, 33(6): 36—39.
- [21] SONG S, CHEN A J. Vibrational Iteration Method of Dropping Shock Response for the Suspension Spring Packaging System[J]. Shock and Vibration, 2015(12): 1—6.
- [22] SONG S, DUAN N N, CHEN A J. Application of Vibrational Iteration Method for Dropping Damage Evaluation of the Suspension Spring Packaging System[J]. Abstract and Applied Analysis, 2014(1): 1—7.