

悬挂式弹簧包装系统的冲击特性研究

王蕾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: 以悬挂式弹簧缓冲包装系统为研究对象, 建立了矩形脉冲激励下系统几何非线性无量纲动力学方程, 得到了系统的最大冲击响应谱。讨论了无量纲脉冲激励幅值、悬挂角度以及系统阻尼等对冲击谱的影响规律。研究表明, 无量纲脉冲激励幅值、悬挂角度、系统阻尼等对系统冲击响应峰值影响显著, 增加系统阻尼可有效降低系统加速度响应峰值。研究结论可为悬挂式弹簧缓冲系统的设计提供理论依据。

关键词: 悬挂弹簧系统; 几何非线性; 冲击谱; 冲击特性

中图分类号: TB485.3; TB487 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2011)09-0033-04

Study on Shock Characteristics of Suspension Spring Packaging System

WANG Lei¹, CHEN An-jun^{1,2}

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

Abstract: The geometric nonlinear dimensionless dynamical equations of suspension spring system were developed and the maximum shock response spectra were obtained under the action of rectangular pulse. The effects of the dimensionless peak pulse acceleration and damping ratio on the shock spectra were discussed. The results showed that the effects of dimensionless pulse peak, the angle of suspension spring and the damping ratio of the system are particularly noticeable; the damping can obviously decrease the maximum shock response acceleration of the system. The purpose was to provide reference for design of shock absorber with suspension spring system.

Key words: suspension spring system; geometric nonlinear; shock spectrum; shock characteristic

包装动力学中, 由于包装材料的多样性、包装产品的复杂性以及运输环境的多变性等因素, 存在着大量的非线性问题, 而这些非线性问题大多是指缓冲材料的非线性^[1]。材料非线性可用三次非线性、正切型、双曲正切型等形式近似表征, 文献[2-5]对在典型激励作用下的振动及冲击特性进行了评价, 将破损边界理论拓展到了非线性系统。实际应用中, 存在着由于系统结构参数变化而引起的几何非线性问题, 如文献[6]讨论的斜支承弹簧包装系统, 文献[7-8]研究的悬挂弹簧系统。悬挂式弹簧包装系统以弹簧作为缓冲减振元件, 将包装件悬吊在外包装容器中, 使产品在各个方向都能得到缓冲保护。

目前, 悬挂弹簧系统研究主要是振动特性分析。

吴晓、杨立军^[7]等用非线性理论对悬挂弹簧几何非线性减振系统的固有振动特性进行了分析; 吴晓、罗佑新^[8]等探讨了基础位移作用下悬挂弹簧的非线性固有振动特性, 而对该系统冲击特性的研究未见报道。

笔者取悬挂弹簧包装系统为研究对象, 建立系统在矩形脉冲激励下的冲击动力学方程, 研究系统响应加速度与脉冲激励幅值、脉冲激励时间、弹簧悬挂角以及系统阻尼的关系, 并结合系统冲击响应谱, 探讨系统在矩形脉冲激励下的冲击特性。

1 系统模型的建立

悬挂弹簧减振系统见图 1, 上下各有 4 个具有相

收稿日期: 2011-03-08

作者简介: 王蕾(1985-), 女, 黑龙江人, 江南大学硕士生, 主攻运输包装。

通讯作者: 陈安军(1962-), 男, 河南人, 江南大学教授, 主要从事包装动力学、机器人动力学及控制的研究。

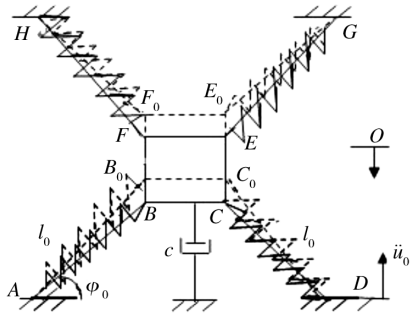


图1 悬挂弹簧系统力学模型

Fig. 1 The model of suspension spring system

同刚度系数和原长的弹簧支承包物品,虚线位置表示弹簧未变形时位置,弹簧的刚度为 k , $\angle GHF_0 = \angle HGE_0 = \angle DAB_0 = \angle ADC_0 = \varphi_0$ 为初始悬挂角,弹簧原长 $HF_0 = GE_0 = AB_0 = DC_0 = l_0$ 。静平衡时,设重物的重心下移 x_0 ,记悬挂角 $\angle DAB = \angle ADC = \varphi_1$, $\angle GHF = \angle HGE = \varphi_2$,弹簧的长度变为 $AB = CD = l_1$, $HF = GE = l_2$,且:

$$l_1 = \sqrt{l_0^2 \cos^2 \varphi_0 + (l_0 \sin \varphi_0 - x_0)^2} \quad (1)$$

$$l_2 = \sqrt{l_0^2 \cos^2 \varphi_0 + (l_0 \sin \varphi_0 + x_0)^2} \quad (2)$$

静平衡方程:

$$4k(l_0 - l_1) \sin \varphi_1 - 4k(l_2 - l_0) \sin \varphi_2 = mg \quad (3)$$

取静平衡位置为原点,建立坐标系,以向下为正方向,当重物位移为 x 时,弹簧长度分别为 $AB = CD = l_3$, $HF = GE = l_4$,且:

$$l_3 = \sqrt{l_1^2 \cos^2 \varphi_1 + (l_1 \sin \varphi_1 - x)^2} \quad (4)$$

$$l_4 = \sqrt{l_2^2 \cos^2 \varphi_2 + (l_2 \sin \varphi_2 + x)^2} \quad (5)$$

考虑系统的阻尼,设阻尼系数为 c ,垂直方向的阻尼动力学方程:

$$m\ddot{x} = mg - c\dot{x} - 4k(l_0 - l_3)(l_1 \sin \varphi_1 - x)/l_3 - 4k(l_4 - l_0)(l_2 \sin \varphi_2 + x)/l_4 \quad (6)$$

将式(4)和(5)代入到式(6)中,运用泰勒级数展开式,略去高次项,得近似动力学方程:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + 8k\left(\frac{a_0}{2}x + \frac{b_0}{2l_0^2}x^3\right) = 0 \quad (7)$$

式中: $a_0 = 2\sin^2 \varphi_0$; $b_0 = 1 - 6\sin^2 \varphi_0 + 5\sin^4 \varphi_0$ 。

设系统外激励为矩形波脉冲:

$$\frac{d^2 u_0}{dt^2} = \ddot{u}_0 = \begin{cases} \ddot{u}_{om} & 0 \leq t \leq t_0 \\ 0 & t > t_0 \end{cases} \quad (8)$$

在该激励下系统冲击动力学方程:

$$m\ddot{x} + c(\dot{x} + \dot{u}_0) + 8k \cdot$$

$$\left[\frac{a_0}{2}(x + u_0) + \frac{b_0}{2l_0}(x + u_0)^3 \right] = 0 \quad (9)$$

初始条件: $x(0) = 0$, $\frac{d^2 x(0)}{dt} = 0$ 。对系统进行无量纲化处理,得无量纲冲击动力学方程:

$$\frac{d^2 y}{d\tau^2} + 2\zeta \frac{dy}{d\tau} + (a_0 y + b_0 y^3) = \beta \ddot{u}_0 \quad (10)$$

式中:无量纲参数 $y = \frac{x + u_0}{l_0}$; $\omega = \sqrt{\frac{4k}{m}}$,为系统频率参数;

$T = \frac{1}{\omega}$,为系统周期参数; $\tau = \frac{t}{T}$,为无量纲时间;

$\tau_0 = \frac{t_0}{T}$,为无量纲脉冲激励时间; $\zeta = \frac{c}{2\sqrt{4km}}$,为系

统阻尼比; $\beta = \frac{T^2}{l_0}$,为系统特征参数。初始条件变为:

$$y(0) = 0, \frac{dy(0)}{d\tau} = 0。$$

由系统的冲击动力学方程可知,倾角、脉冲激励幅值、激励周期和阻尼比对方程的解都有影响。为了探究这些因素对系统冲击特性的规律,利用四阶龙格-库塔法分析系统在矩形波脉冲激励下的特性。

2 计算结果

2.1 加速度响应

当 $\beta \ddot{u}_{om} = 0.1$, $\tau_0 = 0.5$, $\zeta = 0$,且弹簧悬挂角 φ_0 取 $45^\circ, 55^\circ, 60^\circ, 70^\circ, 80^\circ, 90^\circ$ 时,系统加速度响应见图 2a;当 $\tau_0 = 0.5$, $\xi = 0$, $\varphi_0 = 60^\circ$ 时,不同无量纲脉冲幅值 $\beta \ddot{u}_{om} = 0.1, 0.3, 0.5$ 情况下,系统加速度响应见图 2b;当 $\beta \ddot{u}_{om} = 0.1$, $\zeta = 0$, $\varphi_0 = 60^\circ$ 时,不同无量纲激励周期 $\tau_0 = 0.5, 1, 1.5$ 情况下,系统加速度响应见图 2c;当 $\beta \ddot{u}_{om} = 0.1$, $\tau_0 = 0.5$, $\varphi_0 = 60^\circ$,不同阻尼比 $\zeta = 0, 0.01, 0.05, 0.1, 0.5, 0.8$ 情况下,系统加速度响应见图 2d。

2.2 冲击响应谱

取系统加速度响应峰值与脉冲激励幅值之比 $\gamma = (\ddot{x}_m / \ddot{u}_{om})$ 作为反映系统在冲击作用下的响应指标,无量纲脉冲激励时间 $\tau_0 (\omega t_0)$ 作为变量,建立系统在矩形脉冲激励下系统的冲击响应谱。将系统弹簧悬挂角的范围取为 $45^\circ \leq \varphi_0 \leq 90^\circ$,无量纲脉冲激励时间 $0 \leq \tau_0 \leq 20$,无量纲脉冲幅值 $\beta \ddot{u}_{om}$ 取 $0.1, 0.3, 0.5$ 。不考虑阻尼影响,当 $\varphi_0 = 60^\circ$ 时,不同无量纲激励幅值 $\beta \ddot{u}_{om}$ 对系统冲击谱的影响见图 3a;不同悬挂角 φ_0 对系统冲击谱影响见图 3b。悬挂角 $\varphi_0 = 60^\circ$ 时,

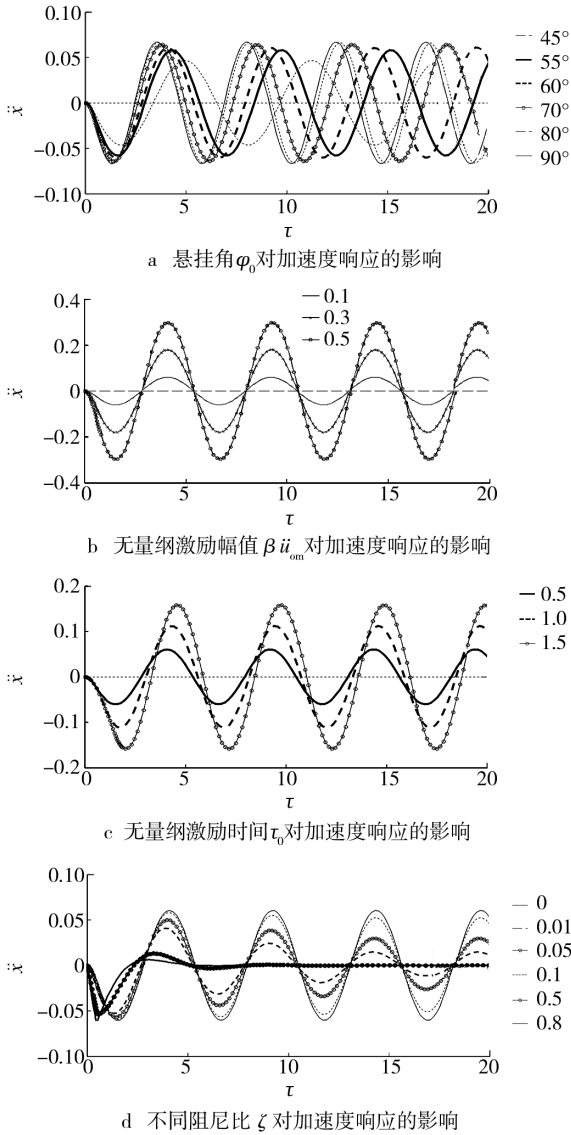


图2 矩形脉冲激励下系统的加速度响应
Fig. 2 The acceleration response of suspension spring system under action of rectangular pulse

$\beta\ddot{u}_{om}$ 分别取 0.1, 0.3, 0.5, 阻尼对系统冲击响应谱影响见图 4。

3 冲击响应特性分析

由图 2—4 知, 系统悬挂角、无量纲激励幅值、无量纲激励时间和阻尼比对悬挂式缓冲包装系统的冲击特性均有一定的影响, 其影响规律如下。

1) 由图 2 知, 无阻尼条件下, 给定脉冲激励幅值、脉冲激励时间, 与线性系统($\varphi_0 = 90^\circ$)相比, 随弹簧悬挂角减小, 系统加速度响应周期变长, 频率变小, 加速度响应幅值下降, 减振效果优于线性系统; 给定

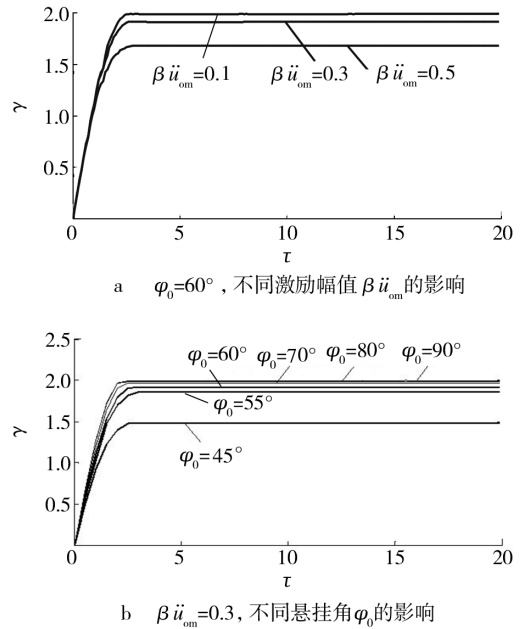


图3 无阻尼条件下系统的冲击谱

Fig. 3 The shock spectra of suspension spring system with no damping

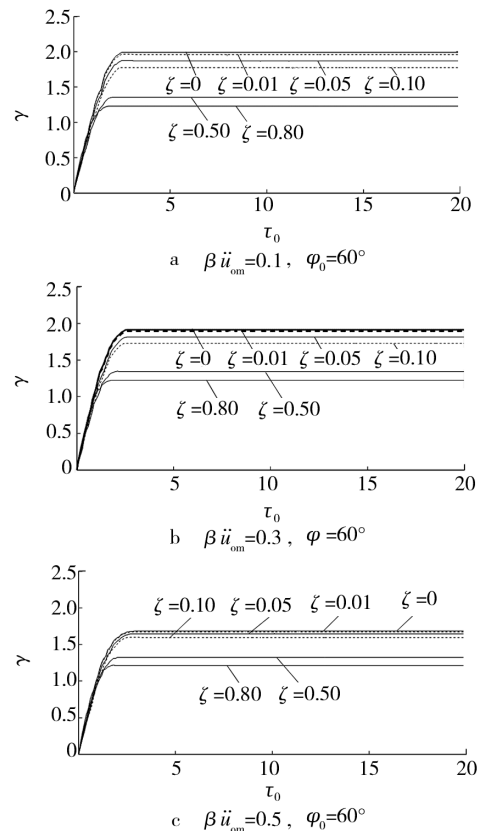


图4 阻尼对系统冲击谱的影响

Fig. 4 The effect of damping ratio on shock spectra of suspension spring system

脉冲激励时间及悬挂角,随无量纲激励幅值增大而增大;给定脉冲激励幅值及悬挂角,系统加速度响应幅值随脉冲激励时间增加而增大;给定脉冲激励幅值、脉冲激励时间及悬挂角,增大系统阻尼可以有效降低系统加速度响应幅值。

2) 由图 3 知,无阻尼条件下,脉冲激励幅值和系统悬挂角对系统冲击响应谱均有影响,增加脉冲激励幅值,系统响应谱下降,系统加速度响应幅值增量减小;与线性系统相比,随系统悬挂角减小,加速度响应幅值有所减小。

3) 由图 4 知,增加系统阻尼,可有效降低系统加速度响应幅值,且当脉冲激励幅值增大时,效果更加明显。

参考文献:

- [1] 孙勇,张明辉. 包装动力学中的非线性问题[J]. 包装工程,1995,16(1):5-10.

(上接第 8 页)

优势互补,探索最佳的工艺流程和配方,正是可食性复合包装膜研究和应用的发展趋势。

4) 采用其它的成膜容器,例如传热较快且均匀的不锈钢板。

参考文献:

- [1] BRANDENBERG A H, WELLER C L, TESTIN R F. Edible Films and Coatings from Soy Protein[J]. Journal of Food Science,1993 (5):1086-1089.
- [2] 郭新华,张子勇,欧仕益. 提高大豆分离蛋白膜机械强度和阻湿性能的研究[J]. 食品工业科技,2005,26(3):148-150.
- [3] 李建昌,李静茹. 大豆分离蛋白膜工艺参数的设计[J]. 现代食品科技,2009,25(5):481-483.
- [4] AYDINLI Meltem, TUTAS Mehmet. Water Sorption and Water Vapor Permeability Properties of Polysaccharide(Locust Bean Gum) Based Edible Film[J]. Lebensm-WissU-Technol,2000(33):63-67.
- [5] KAYA S,KAYA A. Micriwave Drying Effects on Properties of Whey Protein Isolate Edible Films[J]. Food Engineering,2000(43):91-96.
- [6] 张子德,陈志周,于志彬,等. 可食性大豆分离蛋白成膜工艺研究[J]. 中国食品学报,2005,5(4):17-21.
- [7] MARINIELLO L, PIERRO P D, ESPROSITO C, et al. Preparation and Mechanical Properties of Edible Protein Soy Flour Films Obtained in the Absence or Presence of

- [2] 杨冰,卢立新. 基础位移激励下包装系统的非线性振动分析[J]. 包装工程,2008,29(2):64-66.
- [3] WANG Zhi-wei, HU Chang-ying. Shock Spectra and Damage Boundary Curves for Non-linear Package Cushioning Systems[J]. Packaging Technology and Science,1999,12:207-217.
- [4] 王军,王志伟. 半正弦脉冲激励下考虑易损件的正切型包装系统冲击特性研究[J]. 振动与冲击,2008,27(1):167-168.
- [5] 贡晓婷,王志伟. 双曲正切包装系统在后峰锯齿脉冲作用下的冲击特性[J]. 振动与冲击,2000,19(1):43-45.
- [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(10):225-227.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] Transglutaminase[J]. Journal of Biotechnology,2003,102:192-194.
- [8] GENNADIOS A, BRANDERBERG Alice H, WELLER C L, et al. Effects of pH on Properties of Wheat Gluten and Soy Protein Isolate Films[J]. Journal of Agriculture and Food Chemistry,1993,41(11):1835-1839.
- [9] 陈志周. 可食性大豆分离蛋白膜生产工艺研究[D]. 保定:河北农业大学,2004.
- [10] 张华江,迟玉杰,孙波,等. 大豆分离蛋白食品包装薄膜的制备条件研究[J]. 食品科学,2010,31(4):280-285.
- [11] 李建昌,李静茹. 大豆分离蛋白膜工艺参数的设计[J]. 现代食品科技,2009,25(5):481-483.
- [12] 姜爱莉,孙利芹. 大豆蛋白膜的制备及其性质研究[J]. 郑州工程学院学报,2003,24(4):67-69.
- [13] 康宇杰,欧仕益. 可食性大豆分离蛋白膜的研究进展[J]. 中国粮油学报,2003,18(4):38-42.
- [14] 张华江,迟玉杰,孙波,等. 大豆分离蛋白食品包装薄膜的制备条件研究[J]. 食品科学,2010,31(4):280-285.
- [15] 宋臻善,叶君,熊捷. 可食性 SPI/HPC 膜的性能[J]. 粮油食品科技,2006,14(3):27-28.
- [16] 陈志周,张子德,牟建楼,等. 大豆分离蛋白成膜性研究[J]. 农业工程学报,2007,23(1):212-216.
- [17] 郭新华,张子勇,欧仕益,等. 大豆复合蛋白膜的性能研究[J]. 包装工程,2005,26(1):62-64.
- [18] 大豆分离蛋白蛋白与小麦面筋蛋白共混的可食性复合包装膜研究[J]. 包装工程,2006,27(2):45-47.