

斜支承弹簧系统跌落冲击响应及影响因素分析

严敏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: 以斜支承弹簧系统为研究对象, 建立了跌落冲击条件下系统无量纲非线性动力学方程。利用龙格-库塔数值分析方法求解动力学方程, 讨论了无量纲跌落冲击速度、系统支承角及阻尼等对系统响应的影响。研究表明, 随着无量纲跌落冲击速度的增加, 系统位移响应峰值和加速度响应峰值增加; 随着支承角的减小, 位移响应峰值增大, 加速度响应峰值减小; 阻尼对系统响应影响显著, 对系统加速度峰值影响存在最佳阻尼比, 最佳阻尼比随系统支承角减小而减小。通过适当地选取阻尼比及支承角可有效地改善系统的抗冲击能力。

关键词: 斜支承系统; 数值分析; 跌落冲击; 响应峰值

中图分类号: TB486; O322 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2013)23-0068-04

On Dropping Shock Response and Influencing Factors of Tilted Support Spring System

YAN Min¹, 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: Dimensionless nonlinear vibration equations of tilted support spring system under dropping condition were established. The dynamic equations were solved by using Runge-Kutta method. The influence of dimensionless dropping impact speed, the support angle of system, and damping ratio on the system response were discussed. The result showed that the maximum shock response displacement and the maximum shock response acceleration increases with increasing of dimensionless dropping impact speed; with decreasing of support angle, the maximum shock response displacement increases and the maximum shock response acceleration decreases; damping ratio has significant influence on the system response and optimum damping ratio exists for the maximum shock response acceleration, which decrease with decrease of support angle. It was concluded that impact resistance of system can be enhanced effectively by suitable selection of damping and the angle of the system.

Key words: tilted support system; numerical analysis; dropping impact; peak response

斜支承弹簧系统由于自身的几何非线性, 与线性系统相比具有良好的减振效果, 应用于汽车发动机减振和精密仪器设备的缓冲包装^[1-2]。文献[2-4]建立了无阻尼斜支承系统竖向非线性振动方程, 采用 L-P 摄动法或数值分析研究系统自振解和自振频率, 并讨论了系统支承角对减振效果的影响; 文献[5-6]讨论了基础位移激励下系统响应的近似解。以上研究直观描述了斜支承弹簧系统的振动响应、自振频率及良好的减振特性, 为斜支承系统的应用提供了一定的理

论指导。产品流通过程, 跌落冲击可导致产品的破损, 跌落冲击条件下系统的动力学评价受到广泛的关注^[7-11]。文献[7]利用变分迭代理论, 得到斜支承弹簧系统跌落冲击一阶近似解析表达, 但未考虑系统阻尼的影响, 且对系统响应峰值相关影响因素未详细讨论。

笔者以斜支承弹簧系统为研究对象, 引入相关无量纲参数, 建立系统无量纲动力学方程, 讨论系统支承角、无量纲跌落冲击速度(与跌落高度相关)以及系统阻尼等对系统响应及响应峰值的影响, 进一步为系

收稿日期: 2013-04-18

作者简介: 严敏(1986-), 女, 湖南人, 江南大学硕士研究生, 主攻运输包装。

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

统设计与应用提供理论基础。

1 系统无量纲动力学方程

斜支承弹簧系统简化力学模型见图 1, 记 m 为产

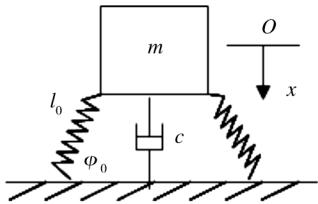


图 1 斜支承系统模型

Fig. 1 The model of tilted support system

品质量, k 为斜支承弹簧刚度, c 为系统阻尼系数, l_0 为弹簧原长, φ_0 为初始支承角。取静平衡位置为坐标原点, 经分析竖直方向系统非线性自振动力学方程为^[4]:

$$\frac{d^2x}{dt^2} + 2\zeta\omega \frac{dx}{dt} + \omega^2 \left(a_0x + \frac{b_0}{l_0}x^2 + \frac{c_0}{l_0^2}x^3 \right) = 0 \quad (1)$$

式中: $\zeta = c/(2\sqrt{4km})$ 为系统阻尼比; $\omega = \sqrt{4k/m}$ 为系统频率参数; $a_0 = \sin^2 \varphi_0$, $b_0 = -3\sin \varphi_0 \cos^2 \varphi_0/2$, $c_0 = (1-6\sin^2 \varphi_0+5\sin^4 \varphi_0)/2$ 。

引入无量纲参数: $y = x/l_0$ 为无量纲位移, $\tau = t/T$ 为无量纲时间, 其中 $T = 1/\omega$ 为周期参数。经分析跌落条件下系统无量纲动力学方程及初始条件分别为:

$$\frac{d^2y}{d\tau^2} + 2\zeta \frac{dy}{d\tau} + a_0y + b_0y^2 + c_0y^3 = 0 \quad (2)$$

$$y \Big|_{\tau=0} = 0, \frac{dy}{d\tau} \Big|_{\tau=0} = \frac{\sqrt{2gh}}{l_0\omega} = v_0 \quad (3)$$

式中: v_0 为与跌落高度相关的无量纲初始速度。

2 跌落冲击响应及影响因素

由式(2)知, 斜支承系统跌落冲击条件下的无量纲动力学方程与系统支承角 φ_0 、无量纲跌落冲击速度 v 及阻尼比 ζ 等因素有关, 表现为几何非线性。取文献[7]系统的相关数据, 弹簧刚度 $k = 200\,000 \text{ N/m}$, 产品质量 $m = 30 \text{ kg}$, 弹簧原长 $l_0 = 0.075 \text{ m}$, 无量纲跌落冲击速度在 $0 < v \leq 0.3$ 范围内取值(当无量纲跌落冲击速度取 0.3 时, 对应跌落高度接近 0.7 m), 系统支承角在 $60^\circ \leq \varphi_0 \leq 90^\circ$ 范围内取值。

应用龙格-库塔数值分析法求解动力学方程(2)。

无阻尼条件下, 系统支承角 $\varphi_0 = 80^\circ$ 时, 不同无量纲跌落冲击速度(v 分别取 0.1, 0.2, 0.3)对系统无量纲位移、加速度响应见图 2。随无量纲跌落冲击速度的增

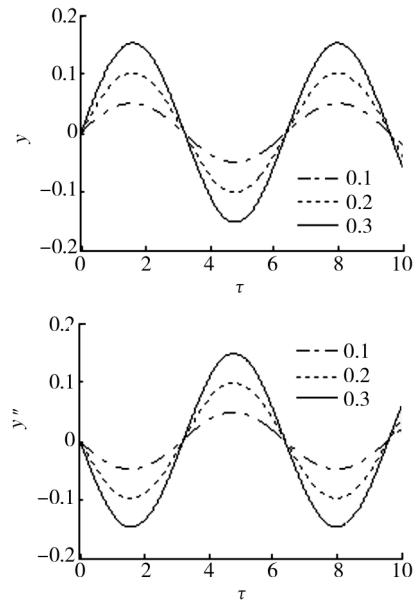


图 2 无量纲跌落冲击速度对系统响应的影响($\varphi_0 = 80^\circ, \zeta = 0$)

Fig. 2 Effect of dimensionless dropping impact speed on the system responses($\varphi_0 = 80^\circ, \zeta = 0$)

加, 系统位移及加速度响应峰值增加; 无阻尼条件下, 无量纲跌落冲击速度 $v = 0.3$ 时, 系统无量纲位移、加速度响应见图 3, 随支承角增加, 系统响应周期变小,

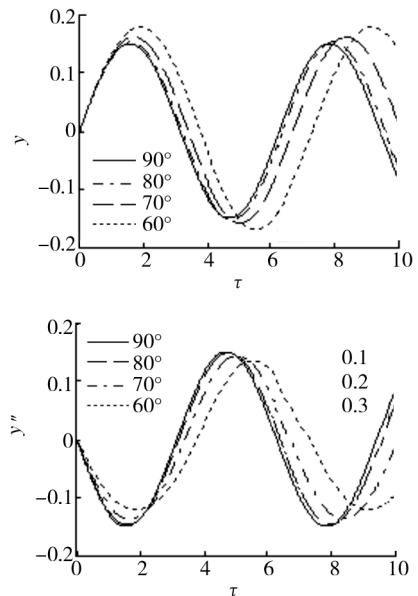


图 3 支承角对系统响应的影响($v = 0.3, \zeta = 0$)

Fig. 3 Effect of tilted support angle on the system responses($v = 0.3, \zeta = 0$)

响应频率加快,随支承角减小,系统位移响应峰值增加,加速度响应峰值减小;不同支承角及无量纲跌落冲击速度条件下,系统振动频率见表1。由表1知,在相同支承角条件下,随无量纲跌落冲击速度增加,系统振动频率略有减小,但影响不大;在相同跌落冲击速度条件下,随系统支承角减小,振动频率减小,运动周期增大。

表1 斜支承系统的自振频率

Tab. 1 The natural frequency of tilted support system

无量纲 跌落冲 击速度	支承角						
	60°	65°	70°	75°	80°	85°	90°
0.10	0.8654	0.9060	0.9395	0.9659	0.9849	0.9963	1.0000
0.15	0.8645	0.9054	0.9392	0.9657	0.9848	0.9963	1.0000
0.20	0.8632	0.9046	0.9387	0.9655	0.9847	0.9963	1.0000
0.25	0.8616	0.9036	0.9382	0.9652	0.9845	0.9962	1.0000
0.30	0.8595	0.9023	0.9374	0.9648	0.9844	0.9962	1.0000

包装设计中,产品位移及加速度响应峰值是关注的重要参数,斜支承系统支承角、无量纲跌落冲击速度以及系统阻尼等参数对系统响应峰值的影响需进一步讨论。无阻尼条件下,系统无量纲位移及加速度峰值随支承角及无量纲跌落冲击速度变化见图4。

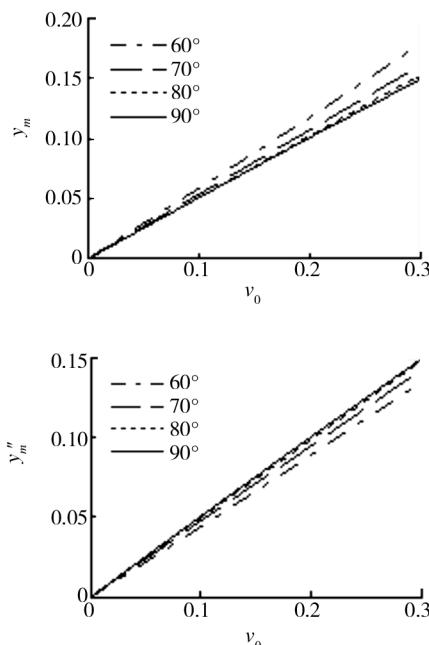


图4 无量纲跌落冲击速度与系统响应峰值的关系($\zeta=0$)

Fig. 4 Effect of dimensionless dropping impact speed on the system peak response($\zeta=0$)

由图4知,在相同支承角条件下,无量纲位移和加速度响应峰值随无量纲跌落冲击速度增加而增加;相同无量纲跌落冲击速度下,与线性系统($\varphi_0=90^\circ$)相比随支承角减小位移峰值增加,加速度峰值下降。

为讨论系统阻尼对系统位移及加速度响应峰值的影响,取无量纲跌落冲击速度 $v=0.3$,系统支承角 φ_0 分别取 $60^\circ, 70^\circ, 80^\circ, 90^\circ$ 等不同值。不同阻尼比对系统无量纲位移及加速度响应峰值的影响见图5。

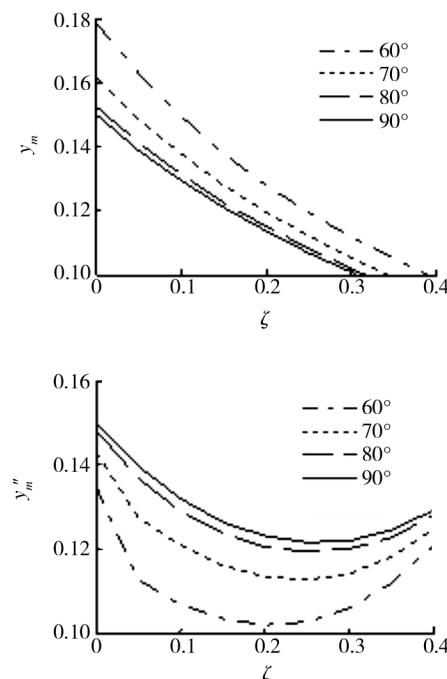


图5 系统阻尼比与无量纲响应峰值的关系($v=0.3$)

Fig. 5 Effect of damping ratio on response amplitude($v=0.3$)

由图5知,阻尼对系统位移响应峰值有明显抑制作用,随阻尼增加,系统位移峰值下降明显;对系统加速度响应峰值影响存在最佳阻尼比,且最佳阻尼比随支承角的增大而略有增大,数值计算表明当无量纲跌落冲击速度 $v=0.3$,系统支承角 φ_0 分别为 $60^\circ, 70^\circ, 80^\circ, 90^\circ$ 时,最佳阻尼比分别为 $0.205, 0.240, 0.260, 0.265$ 。

3 结语

跌落冲击条件下,系统支承角是影响系统响应的重要参数。数值分析表明,相同跌落冲击速度下,随支承角减小,系统响应周期增大,频率下降;与线性系统($\varphi_0=90^\circ$)相比,随支承角减小位移响应峰值增加,

加速度响应峰值下降。在考虑通过减小支承角降低加速度响应峰值的同时,应注意较大的位移响应峰值可能产生触底现象,系统设计建议支承角范围 $70^\circ \leq \varphi_0 < 90^\circ$ 。

阻尼对系统位移响应峰值有明显抑制作用,随阻尼增加,系统位移峰值明显下降;对系统加速度响应峰值影响存在最佳阻尼比,数值计算表明,在跌落冲击速度一定的条件下,最佳阻尼比随支承角的减小而略有减小,系统设计中阻尼是关注的重要参数,选择恰当的阻尼比可有效地抑制加速度响应峰值,起到良好的减振效果。

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, 杨立军. 斜支承弹簧非线性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 Structure, 2008, 14(4): 50-52.
- [3] 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 Natural Vibration of Shock Absorber System with Tilted Support Spring [J]. Journal of Vibration and Shock, 2008, 27(8): 85-87.
- [4] 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 Characteris-
- [5] 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, 28(11): 115-117.
WU Xiao, LUO You-xin, YANG Li-jun. Study on the Vibration of Inclined Spring Support System under Basic Displacement Excitation [J]. Journal of Vibration and Shock, 2009, 28(11): 115-117.
- [6] 孔凡玲. 斜支承包装系统动力学特性研究[D]. 无锡:江南大学, 2012.
KONG Fan-lin. Research on the Dynamic Characteristic of Packaging System with Tilted Support [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2012.
- [7] 严敏, 陈安军. 跌落工况下斜支承系统响应分析的变分迭代法[J]. 包装工程, 2012, 33(13): 71-74, 79.
YAN Min, CHEN An-jun. Variational Iteration Method for Response Analysis of Inclined Support Packaging System under Dropping Condition [J]. Packaging Engineering, 2012, 33(13): 71-74, 79.
- [8] 王志伟, 胡长鹰. 阻尼对非线性缓冲包装系统跌落冲击的影响[J]. 包装工程, 1997, 18(5): 1-3.
WANG Zhi-wei, HU Chang-ying. The Effect of Damping on Dropping Shock of Nonlinear Cushioning System [J]. Packaging Engineering, 1997, 18(5): 1-3.
- [9] WANG Zhi-wei. On Evaluation of Product Dropping Damage [J]. Packaging Technology and Science, 2002, 15: 115-120.
- [10] WANG Zhi-wei. On Dropping Damage Boundary Curve [C]//A PVC2001 Proceeding, Hangzhou, 2001: 58-62.
- [11] WANG Zhi-wei, JIANG J H. Evaluation of Product Dropping Damage Based on Key Component [J]. Packaging Technology and Science, 2010, 23: 227-238.

(上接第 47 页)

- [13] 贾芳, 李慧勇, 王继才, 等. 食品包装用 PVC 瓶盖垫片中增塑剂 DEHP 的迁移研究[J]. 包装工程, 2011, 32(1): 60-62.
JIA Fang, LI Hui-yong, WANG Ji-cai, et al. Study on Migration of DEHP in PVC Gasket of Food Packaging [J]. Packaging Engineering, 2011, 32(1): 60-62.
- [14] 郭春海, 陈瑞春, 马育松, 等. 食品接触材料聚乙烯和聚丙烯中 9 种抗氧化剂在食品模拟物中的迁移规律研究[J]. 包装工程, 2011, 32(17): 20-24.

ties of Packaging System with Tilted Support Spring [J]. Packaging Engineering, 2009, 30(11): 20-22.

- [15] 金岭, 董文丽, 孙智慧. 聚碳酸酯中双酚 A 的毒性及迁移规律研究进展[J]. 包装工程, 2013, 34(9): 122-126.
JIN Ling, DONG Wen-li, SUN Zhi-hui. Research Progress of Toxicity and Migration Rule of Bisphenol A in Polycarbonate [J]. Packaging Engineering, 2013, 34(9): 122-126.
- GUO Chun-hai, CHEN Rui-chun, MA Yu-song, et al. Establishment of Qualitative and Quantitative of Fluorescent Whitening Agents in plastics [J]. Packaging Engineering, 2011, 32(17): 20-24.