

矩形脉冲激励下斜支承系统易损件的冲击特性研究

段宁宁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: 以考虑易损件的斜支承包装系统为研究对象, 建立了矩形脉冲激励下系统无量纲非线性冲击动力学方程。利用龙格-库塔数值分析方法求解冲击动力学方程, 以易损件加速度响应峰值与脉冲激励幅值之比为易损件的响应指标, 脉冲激励时间、系统频率比作为变量, 构建了易损件的三维冲击谱。分析讨论了系统支承角、脉冲激励幅值以及质量比等对冲击响应谱的影响规律。研究表明: 随脉冲激励幅值增加, 或随系统支承角减小, 易损件加速度响应峰值增加且波动加剧; 系统响应对低频率比较为敏感, 增加频率比可抑制易损件加速度响应峰值, 低频率比时增加质量比可降低易损件加速度响应峰值。研究结果可为斜支承包装系统的设计提供理论依据。

关键词: 易损件; 斜支承包装系统; 矩形脉冲激励; 冲击特性; 三维冲击谱

中图分类号: TB485.1; TB487 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2013)07-0021-04

Shock Characteristics of Vulnerable Components of Tilted Support System under Rectangular Pulse Excitation

DUAN Ning-ning¹, CHEN An-jun^{1,2}

(1. Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 2. National Light Industrial Packaging Products Quality Supervision and Inspection Center, Wuxi 214122, China)

Abstract: The dimensionless nonlinear dynamical equations of tilted support packaging system with vulnerable components were obtained under rectangular pulse excitation, and the numerical results of the shock response were studied using Runge-Kutta method. Three-dimensional shock response spectra was established with the ratio of the maximum shock response acceleration of the vulnerable components to the peak pulse acceleration, the pulse duration and the frequency ratio of system as three basic parameters. The effects of the angle of system, the peak pulse acceleration and mass ratio on the shock response spectra were discussed. The results showed that with the increase of the peak pulse acceleration, or the decrease of the angle, the maximum shock response acceleration of the vulnerable components increase rapidly, and the effect of low frequency ratio on response of system is particularly sensitive; increasing frequency ratio of the system can obviously decrease the maximum shock response acceleration of the vulnerable components, and the peak of the shock response of the vulnerable components decreases at low frequency ratio by increasing mass ratio. The purpose was to provide academic foundation for design of tilted support packaging system.

Key words: vulnerable component; tilted support packaging system; rectangular pulse excitation; shock characteristics; three-dimensional shock response spectra

自 20 世纪 60 年代, 斜支承系统应用于精密仪器设备的减振保护, 且减振效果优于线性系统。文献 [1-2] 建立了斜支承系统的竖向非线性振动控制方程, 分析讨论了系统支承角、初始振幅等对斜支承系

统自振的影响。文献[3]建立了基础位移激励下斜支承系统的几何非线性振动方程, 分析讨论了基础位移激励振幅、激励频率、斜支承弹簧倾角等因素对斜支承弹簧减振系统非线性振动的影响。文献[4-6]研

收稿日期: 2013-01-22

作者简介: 段宁宁(1988-), 女, 山东济南人, 江南大学硕士生, 主攻运输包装。

通讯作者: 陈安军(1962-), 男, 河南潢川人, 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。

究了半正弦波等典型脉冲激励下斜支承系统的冲击特性,探讨了系统加速度响应,二维冲击响应谱或三维冲击响应谱及其影响因素,但未考虑易损部件。文献[7-8]虽然考虑易损件,但研究的是系统振动特性或二维冲击响应谱,冲击特性及影响因素的分析有待进一步完善。

以考虑易损件的斜支承系统为研究对象,建立系统在矩形脉冲激励下的无量纲非线性冲击动力学方程,借助文献[9-11]评价方法,构建系统易损件的三维冲击响应谱,探讨脉冲激励幅值、系统支承角、质量比等因素对易损部件冲击特性的影响,为斜支承系统设计提供理论依据。

1 系统冲击动力学方程及其无量纲化

考虑易损件的斜支承系统力学模型见图1,系统

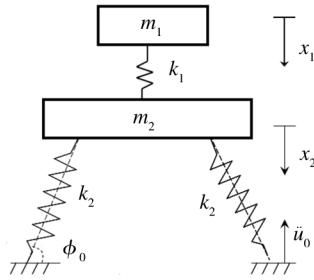


图1 斜支承系统力学模型

Fig. 1 Model of tilted support system

易损件及其包装件主体的质量分别记为 m_1, m_2 ,易损件与包装件主体间的连接刚度为 k_1 ,斜支承系统的刚度和原长分别为 k_2, l_0 ,弹簧未变形时的支承角为 φ_0 。

取系统静平衡位置为坐标原点,竖直向下为正方向,竖直方向系统自振动力学方程^[7-8]:

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 = k_1(x_2 - x_1) \\ m_2 \ddot{x}_2 = -2k_2 \left(a_0 x_2 + \frac{b_0}{l_0} x_2^2 + \frac{c_0}{l_0^2} x_2^3 \right) - k_1(x_2 - x_1) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $a_0 = \sin^2 \varphi_0$, $b_0 = -\frac{3}{2} \sin \varphi_0 \cos^2 \varphi_0$, $c_0 = \frac{1}{2}(1 - 6\sin^2 \varphi_0 + 5\sin^4 \varphi_0)$,运动方程与系统支承角有关,表现为几何结构非线性。

研究系统在矩形脉冲激励下的冲击特性,脉冲数学表达式为:

$$\ddot{u}_0 = \begin{cases} \ddot{u}_{0m} & 0 \leq t \leq t_0 \\ 0 & t > t_0 \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中, t_0 为脉冲激励时间。由式(1)、(2)可得系统冲击动力学方程:

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 - k_1(x_2 - x_1) = 0 \\ m_2 \ddot{x}_2 + 2k_2 \left[a_0(x_2 + u_0) + \frac{b_0}{l_0}(x_2 + u_0)^2 + \frac{c_0}{l_0^2}(x_2 + u_0)^3 \right] + k_1(x_2 - x_1) = 0 \end{cases} \quad (3)$$

初始条件为: $x_{1,2}(0) = 0, \dot{x}_{1,2}(0) = 0$ 。

引入 $y_1 = \frac{x_2 - x_1}{l_0}$, $y_2 = \frac{x_2 + u_0}{l_0}$ 为无量纲参数,频率参

数 $\omega_1 = \sqrt{\frac{k_1}{m_1}}$, $\omega_2 = \sqrt{\frac{2k_2}{m_2}}$,周期参数 $T = \frac{1}{\omega_2}$,无量纲时

间参数 $\tau = \frac{t}{T}$,无量纲脉冲激励时间参数 $\tau_0 = \frac{t_0}{T}$,频率

比 $\lambda_1 = \frac{\omega_1}{\omega_2}$,质量比 $\lambda_2 = \frac{m_1}{m_2}$,系统特征参数 $\beta = \frac{T^2}{l_0}$,无量纲脉冲激励幅值 $\beta \ddot{u}_{0m}$ 。系统在矩形脉冲激励下的无量纲非线性冲击动力学方程:

$$\begin{cases} \frac{d^2 y_1}{d\tau^2} + (a_0 y_2 + b_0 y_2^2 + c_0 y_2^3) + \lambda_1^2 \lambda_2 y_1 + \lambda_1^2 y_1 = 0 \\ \frac{d^2 y_2}{d\tau^2} + (a_0 y_2 + b_0 y_2^2 + c_0 y_2^3) + \lambda_1^2 \lambda_2 y_1 = \beta \ddot{u}_0 \end{cases} \quad (4)$$

初始条件变为: $y_{1,2}(0) = 0, \frac{dy_{1,2}(0)}{d\tau} = 0$ 。式(4)

中,无量纲矩形波脉冲数学表达式:

$$\ddot{u}_0 = \begin{cases} \beta \ddot{u}_{0m} & 0 \leq \tau \leq \tau_0 \\ 0 & \tau > \tau_0 \end{cases} \quad (5)$$

由冲击动力学方程(4)知,系统主体与易损件无量纲加速度响应与系统支承角、无量纲脉冲幅值、无量纲脉冲激励时间、系统质量比、系统频率比等因素有关。

2 易损件三维冲击响应谱

取易损件的加速度响应峰值与脉冲激励幅值之比 $\gamma = (\ddot{x}_1)_m / \ddot{u}_{0m}$ 为反映系统在矩形脉冲激励下的响应指标。由引入的系统无量纲参数 $y_1 = \frac{x_2 - x_1}{l_0}, y_2 = \frac{x_2 + u_0}{l_0}$,结合冲击动力学方程(4),经分析可得响应指标:

$$\gamma = \frac{\ddot{x}_m}{\dot{u}_{0m}} = \frac{\left(\frac{d^2y_2}{d\tau_2} - \frac{d^2y_1}{d\tau_2} - \beta \ddot{u}_0 \right)_m}{\beta \ddot{u}_{0m}} = \frac{(\lambda_1^2 y_1)_m}{\beta \ddot{u}_{0m}}$$

(6)

以无量纲脉冲激励时间 τ_0 , 系统频率比 λ_1 作为变量, 构建易损件的三维冲击响应谱, 探讨支承角、质量比、频率比、无量纲脉冲激励幅值、无量纲脉冲激励时间等因素对易损件冲击响应特性的影响。

利用四阶龙格-库塔数值分析方法, 通过求解无量纲冲击动力学方程(4), 无量纲脉冲激励时间取值范围为 $0 \leq \tau_0 \leq 30$, 频率比取值范围为 $0 \leq \lambda_1 \leq 6$ 。取质量比 $\lambda_2 = 0.01$, 支承角 $\varphi_0 = 60^\circ$, 不同无量纲脉冲激励幅值 ($\beta \ddot{u}_{0m}$ 取 $0.01, 0.05, 0.1, 0.15$) 易损件冲击响应谱见图 2; 取系统质量比 $\lambda_2 = 0.01$, 无量纲脉冲激励幅值 $\beta \ddot{u}_{0m} = 0.15$, 不同支承角 (φ_0 取 $60^\circ, 70^\circ, 80^\circ, 90^\circ$) 易损件冲击响应谱见图 3; 取支承角 $\varphi_0 = 60^\circ$, 无量纲脉冲激励幅值 $\beta \ddot{u}_{0m} = 0.05$, 不同质量比 (λ_2 取 $0.01, 0.05, 0.1, 0.2$) 易损件冲击响应谱见图 4。

3 易损件冲击响应特性影响因素分析及结论

1) 无量纲脉冲激励幅值的影响。由图 2 知, 在给定系统质量比和支承角的条件下, 低频率比时, 系统在矩形脉冲激励下, 易损件加速度响应峰值随脉冲激励幅值的增加波动加剧, 且出现多个峰值。

2) 系统支承角的影响。由图 3 知, 在给定脉冲

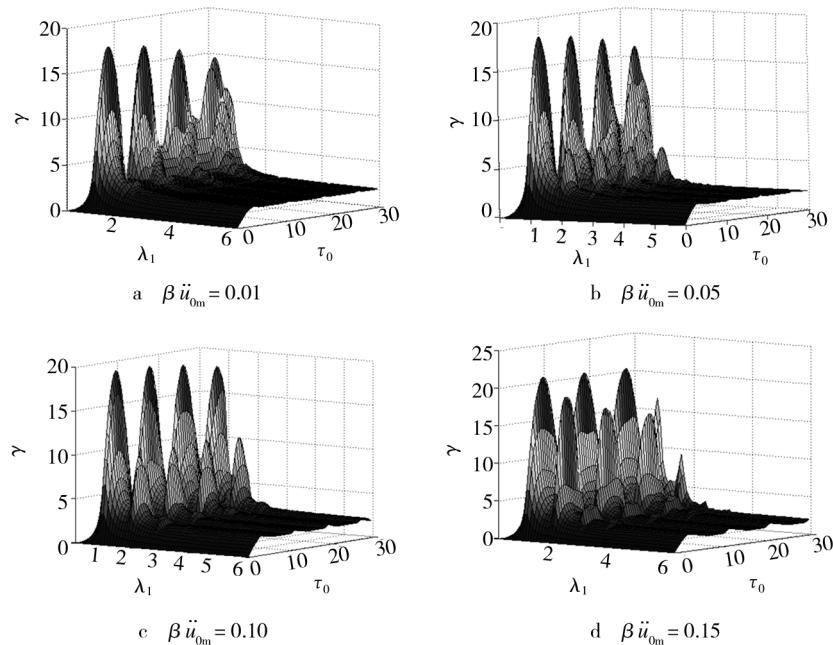


图 2 不同无量纲脉冲激励幅值对易损件冲击响应谱的影响

Fig. 2 Effect of dimensionless pulse excitation amplitude on shock response spectra of vulnerable components

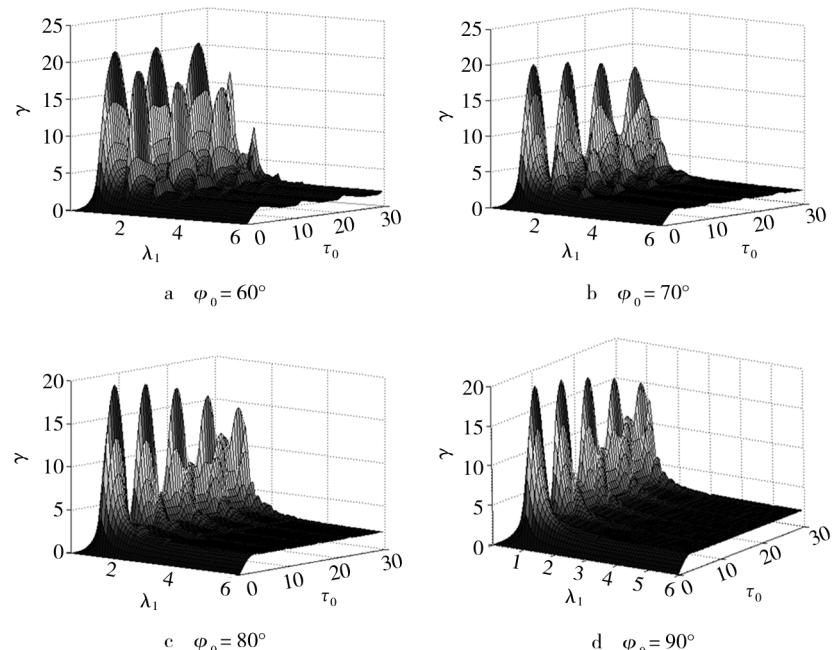


图 3 不同系统支承角对易损件冲击响应谱的影响

Fig. 3 Effect of system support angle on shock response spectra of vulnerable components

幅值和质量比的条件下, 与线性系统 ($\varphi_0 = 90^\circ$) 相比, 低频率比时易损件加速度响应峰值随支承角的减小波动加剧。

3) 系统质量比的影响。由图 4 知, 在低频率比

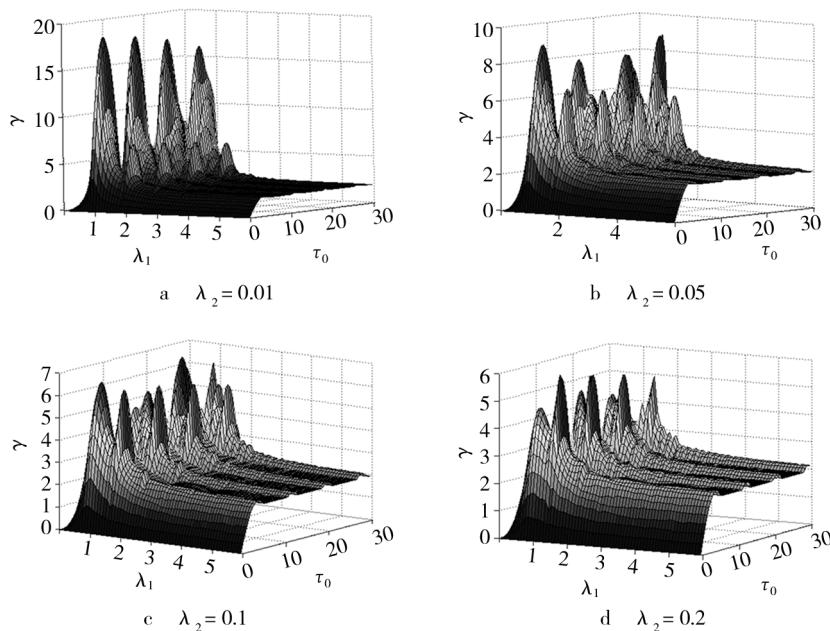


图4 不同系统质量比对易损件冲击响应谱的影响

Fig. 4 Effect of mass ratio on shock response spectra of vulnerable components

处,增加质量比可有效抑制易损件加速度响应峰值。

4) 系统频率比的影响。对考虑易损件的斜支承包装系统,矩形脉冲激励下的易损件加速度响应峰值对低频率比敏感,存在敏感区域。由此,系统频率比是关注的重要参数,在允许的条件下应尽可能地增加频率比(建议 $\lambda_1 > 5$),适当控制频率比对提高易损件的抗冲击性能具有重要的意义。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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. Study on Nonlinear Vibration Characteristics of Tilted Support Spring System [J]. Packing Engineering, 2009, 30(11):20-22.
- [3] 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.
- [4] 孔凡玲,陈安军. 半正弦脉冲激励下斜支承包装系统冲击特性的研究[J]. 包装工程, 2011, 32 (19): 47-49.
KONG Fan-ling, CHEN An-jun. Shock Characteristics Analysis of Packaging System with Tilted Support under the Action of Half-sinusoid Pulse [J]. Packaging Engineering, 2011, 32 (19): 47-49.
- [5] 孔凡玲,陈安军. 半正弦波脉冲激励下斜支承系统冲击特性[J]. 噪声与振动控制, 2012(2):41-44.
KONG Fan-ling, CHEN An-jun. Shock Characteristics Analysis of the System with Tilted Support under the Action of Half - sinusoidal Pulse [J]. Noise and Vibration on Control, 2012(2):41-44.
- [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] 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 Packging System Considering Vulnerable Parts [J]. Packaging Engineering, 2011, 32(19):5-7.
- [8] 陈安军. 半正弦脉冲激励下斜支承系统易损件冲击特性[J]. 噪声与振动控制, 2012(3):63-66.
CHEN An-jun. Shock Characteristics of Tilted Support System with Critical Components under the Action of Semi-sinusoid Pulse [J]. Noise and Vibration on Control, 2012 (3):63-66.
- [9] 王志伟,江吉海. 基于关键部件的产品损伤评价[J]. 包装技术与科学, 2010, 23(4):227-238.
WANG Zhi-wei, JIANG J H. Evaluation of Product Damage Based on Key Component [J]. Packaging Technology and Science, 2010, 23(4):227-238.
- [10] 王志伟,胡长英. 非线性包装缓冲系统的冲击谱和损伤边界曲线[J]. 包装技术与科学, 1999, 12(5):207-217.
WANG Zhi-wei, HU Chang-ying. Shock Spectra and Damage Boundary Curves for Nonlinear Package Cushioning System [J]. Packaging Technology and Science, 1999, 12 (5):207-217.
- [11] 王志伟. 双曲切线缓冲系统的冲击谱和损伤边界曲线[J]. 包装技术与科学, 2001, 14:149-157.
WANG Zhi-wei. Shock Spectra and Damage Boundary Curves for Hyperbolic Tangent Cushioning System and their Important Features [J]. Packaging Technology and Science, 2001, 14:149-157.