

文章编号: 1009-038X(1999)04-0087-04

# 半正弦波冲击时正切型非线性包装系统的冲击响应

武冬雁, 王志伟

(无锡轻工大学机械工程系, 江苏无锡 214036)

摘要: 采用数值求解单自由度产品包装系统的非线性动力学方程, 得到了半正弦波冲击下正切型非线性包装系统的冲击谱曲线和边界破损曲线, 讨论了相关参数对它们的影响.

关键词: 正切型非线性; 缓冲包装; 冲击谱; 破损边界

中图分类号: TS09 文献标识码: A

在包装动力学研究中,除了广为使用的线性振动系统模型外,还大量存在不能作线性处理的非线性动力学问题.近年来,学术界对不同冲击波形下折线型非线性和立方非线性包装系统的冲击响应进行了广泛研究<sup>[1-3]</sup>.在实际应用中,有很大一类缓冲材料都近似地具有正切型弹性性质<sup>[4]</sup>,如预压后的聚乙烯泡沫塑料、泡沫橡胶、涂胶纤维、苯乙烯纸纤维等.所以,研究正切型非线性包装系统在脉冲激励下的响应具有重要的实际意义.文献[4]首次对后峰锯齿脉冲激励下正切型非线性系统的冲击响应进行了探讨.由于实际受到的脉冲激励除后峰锯齿波外还有半正弦波等,故作者继续研究半正弦波冲击时正切型非线性缓冲包装的冲击响应,探讨非线性参数对冲击谱和破损边界的影响.

## 1 运动微分方程及求解

图 1 为产品包装系统的动力学模型,图中  $m_0$  为产品质量,  $W$  为系统阻尼系数.又设缓冲系统具有正切型非线性特性,初始弹性系数为  $k_0$ ,压缩极限为  $db$ .则缓冲系统的运动微分方程为

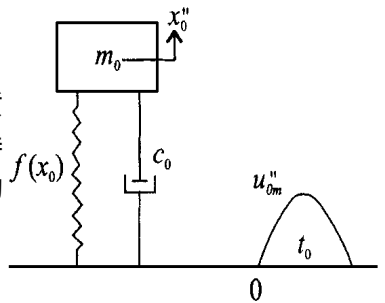


图 1 包装动力学模型

$$m_0 x''_0 + W(x'_0 - u'_0) + f(x_0 - u_0) = 0 \quad (1)$$

式中:

$$f(x_0 - u_0) = \frac{2k_0 db}{\pi} \tan \frac{\pi(x_0 - u_0)}{2db} \quad (2)$$

引入无量纲值:

收稿日期: 1998-10-10; 修订日期: 1999-05-21

作者简介: 武冬雁 (1976年 12月生), 女, 山西长治人, 硕士研究生.

$$x = \frac{x_0 - u_0}{L}, u = \frac{u_0}{L}, L = \frac{2db}{\pi}, f = \frac{t}{T}, T = \frac{m_0}{k_0}$$

$$x' = \frac{dx}{df}, x'' = \frac{d^2x}{df^2}, u' = \frac{du}{df}, u'' = \frac{d^2u}{df^2}$$

$$Y = \frac{W_0}{2 m_0 k_0}$$

方程 (1) 写成无量纲形式为:

$$x'' + 2Yx' + \tan \alpha x = -u'' \quad (4)$$

设系统基础受峰值为  $u''_{0m}$  脉宽为  $t_0$  的半正弦形加速度脉冲激励, 其无量纲化表述为:

$$u'' = \begin{cases} u''_m \sin \frac{\pi f}{f_0} & 0 \leq f \leq f_0 \\ 0 & f \geq f_0 \end{cases} \quad (5)$$

其中  $f_0 = \frac{t_0}{T}, u''_m = \frac{T^2}{L} u''_{0m}$ .

方程 (4) 为强非线性冲击振动方程, 本文采用四阶  $R-K$  法数值求解.

## 2 计算结果

### 2.1 冲击谱

反映机械冲击下包装件的加速度响应同冲击环境各要素之间关系的曲线即为冲击谱曲线. 在包装动力学研究中, 为评价产品在极限状态下的破损情况, 冲击谱常用最大冲击响应谱来表示. 图 2 所示即为半正弦波冲击下正切型非线性包装系统的最大冲击谱,

图中  $U = \frac{T^2}{L} = \frac{\pi m_0}{2k_0 db}, f_0 = \frac{1}{2\tau} \frac{k_0}{m_0}$ .

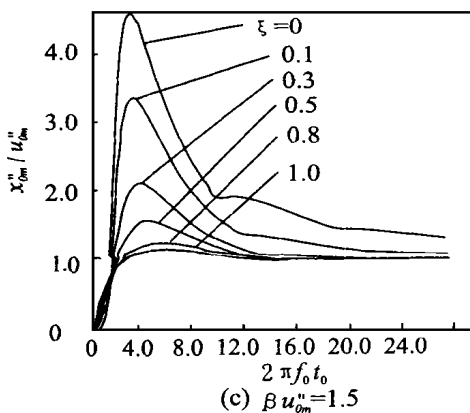
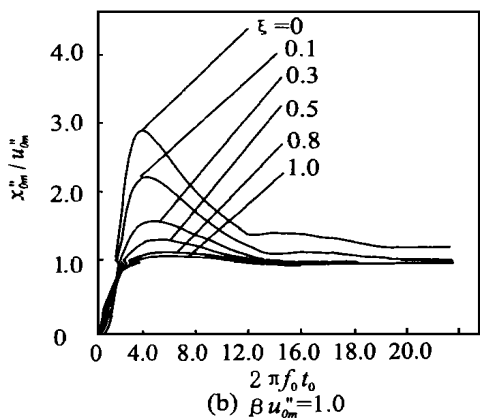
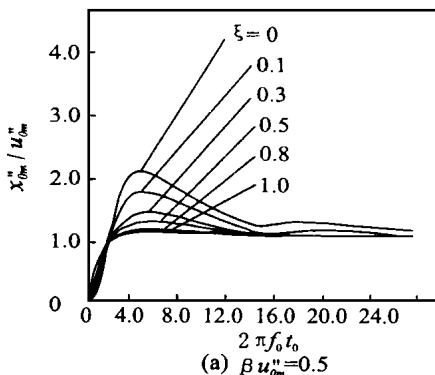


图 2 冲击谱曲线

### 2.2 破损边界曲线

破损边界曲线是用临界速度变化量和临界加速度来规范包装产品的破损规律. 图 3 给

出了无量纲情形下的破损边界曲线. 图中  $T = \frac{T}{L} = \frac{\pi}{2db} \frac{m_0}{k_0}$ ,  $A_c$  为产品脆值,  $U_{A_c}$  为无量纲脆值.

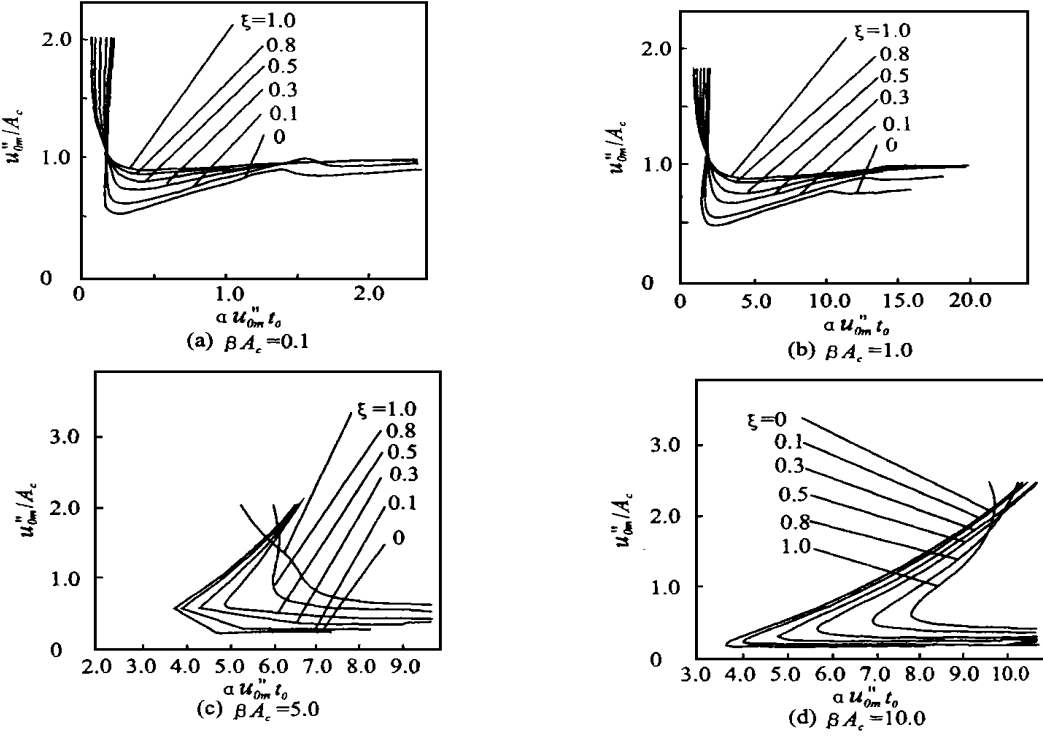


图 3 破损边界曲线

### 3 讨论

1)图 2(a~ c)冲击谱曲线表明:

① 半正弦脉冲激励下,正切型非线性包装系统与线性系统冲击谱曲线形状基本相同,在谱线达到峰值后,余谱逐渐下降,最后趋于 1.

② 阻尼比  $\zeta$  一定时,  $U_{u''_{om}}$  越大,冲击谱峰值越大,且这种影响随  $\zeta$  增大而减弱.

③ 由  $U_{u''_{om}} = \frac{m_0}{k_0} \frac{c}{2db} u''_{om}$  知,除系数基本参数  $k_0$  和  $m_0$  外,  $U_{u''_{om}}$  还与  $u''_{om}$  和  $db$  有关.  $u_{om}$  增大时,  $U_{u''_{om}}$  也增大,故冲击谱峰值随  $u''_{om}$  的增大而增大.  $db$  与  $U_{u''_{om}}$  成反比例关系,当  $db$  在材料原始厚度的 0.80~ 0.85 范围内变化时,  $U_{u''_{om}}$  随  $db$  的增大有一定程度的减小,故冲击谱峰值随  $db$  增大而减小.

④ 增大阻尼比  $\gamma$ ,可有效降低冲击谱峰值,且这种影响随  $U_{u''_{om}}$  增大而增强.

2)图 3(a~ d)破损边界曲线表明:

① 当  $U_{A_c}$  较小时(图 3(a)),曲线形状与线性系统破损曲线形状相似,临界速度线近似于铅垂线,临界加速度线呈平缓波动状;当  $U_{A_c}$  较大时,临界速度线向右倾斜.随  $U_{A_c}$  的增大,临界速度线右倾程度加大,并右移,安全区范围有效拓宽,但临界加速度线却向安全区缩小方向移动.

② 随  $\gamma$  增大, 临界加速度线波动幅度减小, 安全区范围增大.

③  $\gamma$  对临界速度线的影响较复杂. 若  $U_{Ac}$  较小 (图 3(a) (b)), 阻尼系数  $\zeta$  越小, 临界速度线向安全区增大方向移动 (右移); 若  $U_{Ac}$  较大 (图 3(c) (d)), 则在破损边界的不同区域, 存在一个最佳阻尼使得临界速度线最靠右边. 例如图 3(c) 中,  $u''_{0m}/A_c < 1$ . 对  $\gamma = 1$ ;  $1.3 < u''_{0m}/A_c < 1.6$  时,  $\gamma = 0.8$ ;  $1.6 < u''_{0m}/A_c < 1.9$  时,  $\gamma = 0.5$ .

## 4 结论

1) 除系统基本参数  $k_0$  和  $m_0$  外, 影响产品冲击谱曲线的主要因素有  $u''_{0m}$ ,  $\gamma$  和非线性参数  $d_b$ .  $u''_{0m}$  的减小,  $\gamma$  和  $d_b$  的增大对降低冲击谱峰值有利.

2) 在线性缓冲包装系统中, 冲击谱与激励峰值  $u''_{0m}$  无关. 而在非线性系统中, 激励峰值对冲击谱有显著的影响, 这是非线性系统有别于线性系统的一个重要特征.

3) 影响产品破损边界曲线的主要因素为  $U_{Ac}$  和  $\gamma$ , 在破损边界的不同区域, 存在一个最佳阻尼使安全区最大.

## 参考文献:

- [1] 肖艳萍, 王振林, 毛谦敏等. 矩形波冲击时双线性包装系统的产品损坏边界 [J]. 包装工程, 1997, 18(2, 3): 37~ 39
- [2] 奚雯, 吴长富, 王振林. 后峰锯齿波冲击时立方非线性包装系统的产品损坏边界 [J]. 包装工程, 1997, 18(2, 3): 40~ 42
- [3] 王志伟. 粘滞阻尼三次函数弹性缓冲包装系统的跌落冲击响应 [J]. 包装工程, 1996, 17(3): 4~ 7
- [4] 武冬雁, 王志伟. 后峰锯齿脉冲激励下正切型非线性包装系统的冲击响应 [J]. 包装工程, 1996, 20(1): 5~ 7

# The Shock Response of Tangent Nonlinear Packaging System under the Action of Half-sinusoid Pulse

W U Dong-yan, W AN G Zhi-wei

(Department of Mechanical Engineering, Wuxi University of Light Industry, Wuxi 214036)

**Abstract** Based on the nonlinear dynamical equation of product packaging system, the shock spectra and the damage boundary curve of tangent nonlinear packaging system under the action of half-sinusoid pulse are obtained using a numerical method, and the influence of various factors on shock response is discussed.

**Key words** tangent nonlinear; cushioning packaging; shock spectra; damage boundary