基于正切非线性与双曲正切非线性串联包装系统冲击优化设计

任伟箐
（南京理工大学，南京 210094）

摘要：目的 对典型正切非线性与双曲正切非线性系统进行优化设计。**方法** 建立正切非线性与双曲正切非线性串联系统跌落冲击模型。引入小虚拟质量，提出串联系统的响应算法。考虑物品最大加速度响应值必须小于给定的许用值，以及材料的费用越少越经济等因素，设计串联结构的优化方案。**结果** 运用串联结构得到了比较经济的方法。**结论** 通过对计算结果与试验结果进行对比，验证了优化方案的正确性。

关键词： 正切非线性；双曲正切非线性；串联系统；冲击；虚拟质量
中图分类号： TB485.1 **文献标识码：** A **文章编号：** 1001-3563(2014)21-0027-03

Impact Optimization Design of Tangent Nonlinear and Hyperbolic Tangent Nonlinear Cascade Packaging System

REN Wei-qing
(Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China)

ABSTRACT: Objective To optimize the design of typical tangent nonlinear and hyperbolic tangent nonlinear systems. **Methods** A drop impact model was established for the tangent nonlinear and hyperbolic tangent nonlinear cascade system. A response algorithm was proposed for the cascade system by introducing small virtual mass. Taking into account that the maximum acceleration response value should be lower than the given allowable value and that the lower the material cost, the more economical the system is, an optimized scheme of the cascade structure was designed. **Results** A more economical method was achieved using the cascade structure. **Conclusion** Comparison of the calculation results and test results verified the correctness of the optimized scheme.

KEY WORDS: tangent nonlinear; hyperbolic tangent nonlinear; cascade systems; impact; virtual mass

正切非线性[1]、双曲正切非线性[1]和立方非线性[2]等包装系统为工程经常遇到的情况，这些模型是建立本构关系的基础。文献[3—4]对瓦楞纸板、发泡聚乙烯等进行了力学行为研究，得到了可靠的本构方程，并介绍了其运用。近年来，卢富德等人[6—9]提出了虚拟质量方法，对串联缓冲包装系统进行求解。文中对典型正切非线性与双曲正切非线性系统进行冲击响应分析，并对其进行优化设计。

1 正切非线性与双曲正切非线性串联模型

发泡聚乙烯材料的本构模型，可以简化为正切非线性关系[7]，其关系式为：

$$f_1(\varepsilon,\dot{\varepsilon}) = a_1\tan(a_2\varepsilon) + a_3\dot{\varepsilon} \quad (1)$$

式中：a_1，a_2与a_3为待识别参数。

蜂窝纸板的本构模型可以简化为双曲正切非线

收稿日期： 2014-08-20
作者简介： 任伟箐（1993—），女，山西太谷人，南京理工大学本科生，主攻艺术设计。

性关系，其关系式为：

$$f_2(\varepsilon,\dot{\varepsilon}) = b_1\tanh(b_2\varepsilon) + b_3\dot{\varepsilon} + b_4\tan(b_5\varepsilon) \quad (2)$$

式中：b_1，b_2与b_3为待识别参数；$b_1\tanh(b_2\varepsilon)$为屈服阶段；$b_4\tanh(b_5\varepsilon)$为材料的压实阶段，这一项考虑了实际缓冲材料厚度有限，为双曲正切非线性缓冲材料的修正项。

式(1)与式(2)中的参数按照文献[7]的方法识别，得到正切非线性缓冲材料的本构参数：a_1=0.0894 MPa，a_2=1.91，a_3=112.3 Pa·s。双曲正切非线性缓冲材料的本构参数：b_1=0.8 MPa，b_2=33.75，b_3=212.5 Pa·s，b_4=0.003 MPa，b_5=1.87。

设质量为m的重物从高度H处跌落于由正切非线性缓冲材料和双曲正切非线性组成的串联系统上，质量块运动坐标y_1建立在其与第1块缓冲材料的最早接触处，把第1块与第2块缓冲材料界面的运动记为y_2，见图1。

由Newton-law得缓冲包装系统运动方程：

$$m\ddot{y}_1 + Af_1\left(\frac{y_1-y_2}{h_1},\frac{\dot{y}_1-\dot{y}_2}{h_1}\right) = 0 \quad (3)$$

式中：A为缓冲材料的面积；h_1为正切非线性缓冲材料的厚度。

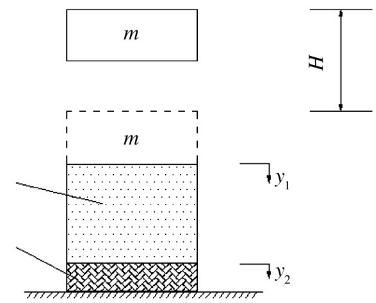

图1 正切非线性与双曲非线性缓冲材料串联示意

Fig.1 Cascade system of tangent nonlinear and hyperbolic tangent nonlinear cushioning materials

由于缓冲材料的质量远小于物品的质量，在对缓冲材料进行本构关系时，不考虑材料的质量。图1所示的串联系统在2种材料的交界面处力相等，即：

$$f_1\left(\frac{y_1-y_2}{h_1},\frac{\dot{y}_1-\dot{y}_2}{h_1}\right) = f_2\left(\frac{y_2}{h_2},\frac{\dot{y}_2}{h_2}\right) \quad (4)$$

式中：h_2为双曲正切非线性缓冲材料的厚度。

式(3)的初始条件为：

$$\dot{y}_1(0) = \sqrt{2gH},\dot{y}_2(0) = 0,$$
$$y_1(0) = y_2(0) = 0 \quad (5)$$

综合以上，得此串联系统的运动方程为：

$$\begin{cases} m\ddot{y}_1 + A\left\{a_1\tan\left[a_2\frac{y_1-y_2}{h_1}\right] + a_3\frac{\dot{y}_1-\dot{y}_2}{h_1}\right\} = 0 \\ a_1\tan\left(a_2\frac{y_1-y_2}{h_1}\right) + a_3\frac{\dot{y}_1-\dot{y}_2}{h_1} = b_1\tanh\left(b_2\frac{y_2}{h_2}\right) + b_3\frac{\dot{y}_2}{h_2} + b_4\tan\left(b_5\frac{y_2}{h_2}\right) \\ \dot{y}_1(0) = \sqrt{2gH},\dot{y}_2(0) = 0,y_1(0) = y_2(0) = 0 \end{cases} \quad (6)$$

运用参考文献[10]的方法，引入小虚拟质量m_1<0，则式(6)变为：

$$\begin{cases} m\ddot{y}_1 + A\left\{a_1\tan\left[a_2\frac{y_1-y_2}{h_1}\right] + a_3\frac{\dot{y}_1-\dot{y}_2}{h_1}\right\} = 0 \\ m\ddot{y}_2 - A\left\{a_1\tan\left[a_2\frac{y_1-y_2}{h_1}\right] + a_3\frac{\dot{y}_1-\dot{y}_2}{h_1}\right\} + A\left\{b_1\tanh\left(b_2\frac{y_2}{h_2}\right) + b_3\frac{\dot{y}_2}{h_2} + b_4\tan\left(b_5\frac{y_2}{h_2}\right)\right\} = 0 \\ \dot{y}_1(0) = \sqrt{2gH},\dot{y}_2(0) = 0,y_1(0) = y_2(0) = 0 \end{cases} \quad (7)$$

2 结果与讨论

2.1 算例

正切非线性与双曲正切非线性串联缓冲包装系统，其参数m=6 kg，质量块从高度H=0.6 m处落在串联结构缓冲系统上，求系统响应。运用文献[10—12]的方法，得到正切非线性的优化解为：h_1=0.04 m，A_1=0.0087 m^2。当最大加速度$\ddot{y}_{1m}$=99.96 g时，串联结构的优化解为：h_1=0.01 m，h_2=0.01 m，A=0.006 m^2；当最大加速度$\ddot{y}_{1m}$=87.55 g时，物品最大加速度与串联结构尺寸的关系见图2，即h_1为0.008~0.03 m，A_1为0.008~0.03 m^2，由最大加速度$\ddot{y}_{1m}$与材料尺寸之间的关系，P点为最优解。在最优解的情况下，原材料可节省65.52%。

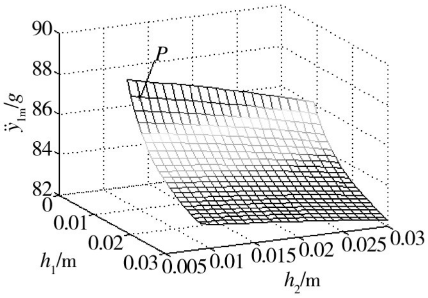

图2 物品最大加速度与串联结构尺寸的关系

Fig.2 The relationship between the maximum acceleration and the tandem structure size of items

2.2 试验验证

选用发泡聚乙烯材料的厚度为0.01 m,蜂窝纸板的厚度为0.01 m,面积为6 cm × 10 cm,质量为6 kg的重锤在高度为0.6 m处自由落下,求重锤的响应。

因为文中涉及的本构关系是没有塑性应变的本构,因此本构关系只适用于压缩阶段,而不适合回弹阶段。计算值只给出了压缩阶段的结果,如图3中的实线,最大值为87.62 g,试验曲线最大值为95.33 g。两者相对误差为8.09%。

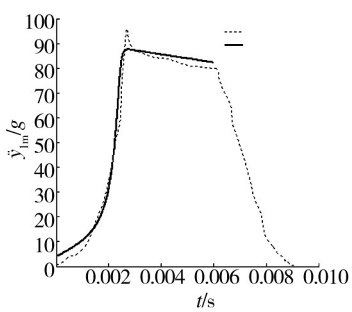

图3 试验验证曲线

Fig.3 The test verification curve

3 结语

运用虚拟方法,提出了串联系统动力学的算法,并对串联结构进行了优化设计。算例表明,运用此优化方法分别得到了正切非线性系统和串联系统优化模型的最优解,串联结构的缓冲效果明显优于单独的缓冲材料。利用此设计方法,可有效地避免欠包装和过度包装。

参考文献:

[1] 高德,卢富德. 考虑转动的双曲正切与正切组合模型缓冲系统冲击响应研究. 振动工程学报,2012,25(1):6—11.
GAO De, LU Fu-de. The Shock Response of Hyperbolic Tangent and Tangent Comprehensive Model on Cushion System Considering Rotary Motion[J]. Journal of Vibration Engineering, 2012, 25(1): 6—11.

[2] 卢富德,高德,梁爱锋. 立方非线性双层包装在矩形方波冲击下破损边界曲线的研究[J]. 包装工程,2008,29(12):7—10.
LU Fu-de, GAO De, LIANG Ai-feng. Study of Damage Boundary Curve of Cubic Non- linear Double Layer Package under Rectangular Pulse[J]. Packaging Engineering, 2008, 29(12): 7—10.

[3] 高德,卢富德. 聚乙烯缓冲材料多自由度跌落包装系统优化设计[J]. 振动与冲击,2012,31(3):69—72.
GAO De, LU Fu-de. Optimization Design of MDOF Package Cushioning System Made of Polyethylene[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(3): 69—72.

[4] 卢富德,高德. C楞瓦楞纸板动态缓冲模型及应用[J]. 功能材料,2012,43(1):39—41.
LU Fu-de, GAO De. Cushion Model and Its Application of C-flute Corrugated Paperboard[J]. Journal of Functional Materials, 2012, 43(1): 39—41.

[5] 卢富德,陶伟明,高德. 具有简支梁式易损部件的产品包装系统跌落冲击研究[J]. 振动与冲击,2012,31(15):79—81.
LU Fu-de, TAO Wei-ming, GAO De. Drop Imact Analysis on Item Packaging System with Beam Type Elastic Critical Component[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(15): 79—81.

[6] LU Fu-de, TAO Wei-ming, GAO De. Virtual Mass Method for Solution of Dynamic Response of Composite Cushion Packaging System[J]. Packaging Technology and Science, 2013, 26(S1): 32—42.

[7] LU Fu-de, GAO De. Impact Responses of Composite Cushioning System Considering Critical Component with Simply Supported Beam Type[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2014(15): 1—5.

[8] 卢富德,陶伟明,高德. 串联缓冲结构压缩响应虚拟质量分析[J]. 浙江大学学报(工学版),2012,46(8):1431—1436.
LU Fu-de, TAO Wei-ming, GAO De. Compression Responses of Series Cushioning Structures by a Virtual Mass Method [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2012, 46(8): 1431—1436.

[9] 卢富德,陶伟明,高德. 瓦楞纸板串联缓冲系统动力学响应[J]. 振动与冲击,2012,31 (21):31—34.

(下转第63页)

[3] 韩翠艳，李大纲. 干式复合机张力控制的研究[J]. 包装工程，2004，25(4)：184—186.
HAN Cui-yan，LI Da-gang. Study on Tension Control of Dry Compound Machine[J]. Packaging Engineering，2004，25(4)：184—186.
[4] 禹恒洲，鲁五一，郭爱红，等. 复合机恒张力控制系统[J]. 电气传动，2007(3)：37—40.
YU Heng-zhou，LU Wu-yi，GUO Ai-hong，et al. Compound Device Constant Tension Control System[J]. Electric Drive，2007(3)：37—40.
[5] 宋晓亮，张伟，许卓. 立式铝箔分切机主控制系统分析[J]. 制造业自动化，2012，34(12)：127—129.
SONG Xiao-liang，ZHANG Wei，XU Zhuo. Vertical Analysis of Main Control System for Aluminum Foil Slitting[J]. Manufacturing Automation，2012，34(12)：127—129.
[6] FUNATO H，KAWAMURA A. Proposal of Variable Active-passive Reactance[C]// IECON′，1992 Proceedings，1992：381—388.
[7] FUNATO H，KAWAMURA A. Analysis of Variable Active-passive Reactance[C]// PCC-Yoko Hama′ 1993，1993：647— 652.
[8] 蔡建，詹永富，胡秉飞. 复合材料密封包装容器干燥控湿设计研究[J]. 包装工程，2014，35(3)：112—116.
CAI Jian，ZHAN Yong-fu，HU Bing-fei. Moisture-proof and Humidity-control Design of Sealed Composite Packages[J]. Packaging Engineering，2014，35(3)：112—116.
[9] 江谷. 复合软包装材料与工艺[M]. 南京：江苏科学技术出版社，2003.
JIANG Gu. Materials and Technology of Compound Soft Packaging[M]. Nanjing：Jiangsu Science and Technology Press，2003.
[10] 刘海江，段思斌. Pesemel 全自动钢卷包装生产线工艺研究分析[J]. 包装工程，2013，34(21)：61—65.
LIU Hai-jiang，DUAN Si-bin. Pesmel Fully Automatic Coil Packaging Line[J]. Packaging Engineering，2013，34(21)：61—65.
[11] JACSENS L，DEVLIEGHERE F，VANDER S C，et al. Effect of High Oxygen Modified Atmosphere Packaging on Microbial Growth and Sensorial Qualities of Fresh-cut Produce[J]. International Journal of Food Microbiology，2001，71(2-3)：197—210.
[12] BONIFACIO G，LO S A，MARINO P，et al. A New DSP Controlled Shunt Active Filter for Non Ideal Supply Conditions [C]// IEEE PESC′ 2000：2000
[13] HINGORANI N G. Introducing Custom Power[J]. IEEE Spectrum，1995，32(6)：41—48.
[14] 杨祖彬，曾莉红. 基于食品安全的我国食品包装机械技术发展路径探讨[J]. 包装工程，2011，32(13)：117—121.
YANG Zu-bin，ZENG Li-hong. Discussion on Technical Development Path of China's Food Packaging Machine Based on Food Safety[J]. Packaging Engineering，2011，32(13)：117—121.
[15] 蔡锦达，蒋振飞. 基于WebSocket的印刷包装机械远程监控方法的研究[J]. 包装工程，2013，34(15)：87—90.
CAI Jin-da，JIANG Zhen-fei. Remote Monitoring and Control Method for Printing and Packaging Machinery Based on WebSocket[J]. Packaging Engineering，2013，34(15)：87—90.

（上接第29页）

LU Fu-de，TAO Wei-ming，GAO De. Dynamic Response of a Series Cushioning Packaging System Made of Multi-layer Corrugated Paperboard[J]. Journal of Vibration and Shock，2012，31(21)：30—32.
[10] 卢富德，陶伟明，高德. 串联缓冲系统冲击响应与结构优化分析[J]. 浙江大学学报（工学版），2012，46(10)：1773—1777.
LU Fu-de，TAO Wei-ming，GAO De. Impact Response of Series Cushioning System and Structure Optimization Analysis [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science)，2012，46(10)：1773—1777.
[11] 卢富德，高德. 考虑蜂窝纸板箱缓冲作用的产品包装系统跌落冲击研究[J]. 振动工程学报，2012，25(3)：335—341
LU Fu-de，GAO De. Study on Drop Impact of Packaging System Considering the Cushioning Action of Honeycomb Paperboard Box[J]. Journal of Vibration Engineering，2012，25(3)：335—341.
[12] 彭颋，薛飞，周强. 道路不平顺激励下车辆运输非线性包装系统动力学响应[J]. 包装工程，2014，35(7)：17—21.
PENG Ting，XUE Fei，ZHOU Qiang. Dynamic Response of Transport Nonlinear Packaging Systems to Uneven Road Excitation[J]. Packaging Engineering，2014，35(7)：7—10.