

# 基于 MATLAB/GUI 缓冲包装动力学优化设计

郭勇<sup>1</sup>, 卢富德<sup>2</sup>, 高德<sup>3</sup>, 王振林<sup>3</sup>

(1. 浙江中能工程检测有限公司, 杭州 311106; 2. 浙江大学 航空航天学院, 杭州 310027;

3. 浙江大学 宁波理工学院机电与能源学院, 浙江 宁波 315100)

**摘要:** 基于缓冲材料宏观本构模型, 建立不同缓冲材料组成的串联力学模型。介绍求解串联缓冲系统动力学响应的虚拟质量方法及包装结构优化设计方法。利用 MATLAB/GUI 编制用于缓冲系统结构设计的界面程序, 并脱离 MATLAB 平台。为缓冲包装动力学设计提供直接方法。

**关键词:** 缓冲系统; 本构模型; 串联缓冲系统; 优化设计; 虚拟质量方法

**中图分类号:** TB 485.3; O 322 **文献标识码:** A

## Development of software for optimization design of cushioning packaging system based on MATLAB/GUI

GUO Yong<sup>1</sup>, LU Fu-de<sup>2</sup>, GAO De<sup>3</sup>, WANG Zhen-lin<sup>3</sup>

(1. Zhejiang Zhongneng Engineering Test Co., Ltd, Hangzhou 311106, China;

2. School of Aeronautics and Astronautics, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

3. School of Mechanic and Energy, Ningbo Institute of Technology, Zhejiang University, Ningbo 315100, China)

**Abstract:** A mechanical model was established for the series cushioning system made of different buffer materials on the basis of macroscopic constitutive relationships identified by experiment data. The virtual mass method was introduced and then the optimization design procedures were presented. A windows software package was made by using MATLAB/GUI, which can be isolated from the main software MATLAB. A series of programmes mentioned in the paper give direct methods to optimize packaging structure design.

**Key words:** cushioning system; constitutive relationship; series cushioning system; optimization design; virtual mass method

缓冲材料吸收外来能量抵抗冲击<sup>[1-2]</sup>。基于试验数据的本构模型为缓冲材料优化设计奠定了基础<sup>[1-5]</sup>。实际缓冲系统由两层或两层以上缓冲材料或结构组成<sup>[6]</sup>, 文献[7-9]对复合缓冲包装系统动力学响应进行系列研究, 提出优化设计方法。以上文献为串联形式缓冲系统冲击响应求解奠定了理论基础与有效方法, 但在实际缓冲包装设计中, 需具有满足实际条件的缓冲包装设计软件, 才能为缓冲设计提供便利有效方法。

本文将此优化方法用于实际缓冲结构设计中, 利用 MATLAB/GUI 开发出图形界面程序, 可为缓冲包装动力学设计提供直接方法。

## 1 串联力学模型及优化设计

缓冲包装动力学系统中将产品与缓冲材料同入外包装箱。外包装箱不仅方便产品运输与储存, 且在遇到冲击与振动激励时变形会保护产品。因此, 对缓冲包装系统应按缓冲材料与瓦楞纸板或蜂窝纸板组成串联结构进行研究<sup>[6]</sup>。串联力学示意图见图 1。由牛顿定律获得系统动力学方程为:

$$\left. \begin{aligned} m\ddot{y}_1 + Af_1\left(\frac{y_1 - y_2}{h}, \frac{\dot{y}_1 - \dot{y}_2}{h}\right) &= 0 \\ m\ddot{y}_2 - Af_1\left(\frac{y_1 - y_2}{h}, \frac{\dot{y}_1 - \dot{y}_2}{h}\right) + Af_2\left(\frac{y_2}{h_2}, \frac{\dot{y}_2}{h_2}\right) &= 0 \\ y_1(0) = y_2(0) = 0, \dot{y}_1(0) = \dot{y}_2(0) &= \sqrt{2gH} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中:  $f_1, f_2$  分别为缓冲材料、外包装箱结构本构关系;  $m$  为产品质量;  $H$  为跌落高度;  $y_1$  为产品位移;  $y_2$  为两种缓冲材料界面处位移;  $g$  为重力加速度;  $h$  为缓冲材料厚

基金项目: 国家“十二五”重大科技支撑计划项目(2011BAD24B01); 浙江大学宁波理工学院基金(1149957G720)

收稿日期: 2012-11-19 修改稿收到日期: 2013-02-15

第一作者 郭勇男, 总工程师, 1971年6月生

通讯作者 高德男, 教授, 1963年6月生

度;  $A$  为缓冲材料面积;  $h_2$  为外包装箱底面缓冲结构厚度;  $m_1$  为虚拟质量。  $m_1$  远小于  $m$ , 可使缓冲系统总能量几乎不变<sup>[9]</sup>, 不影响缓冲系统响应。

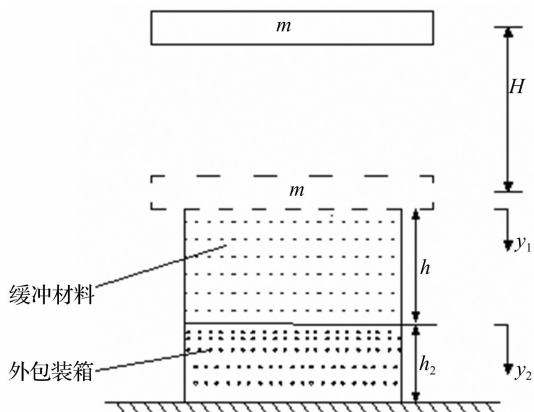


图1 缓冲包装系统动力学示意图

Fig. 1 A composite packaging cushioning system of two layers of different materials

缓冲材料体积直接决定包装成本大小。文献[4, 6]按缓冲材料体积最小为最优目标, 包装产品响应加速度小于许用值为限制性条件, 提出缓冲系统设计优化目标函数:

$$\left. \begin{aligned} F(A, h) &= \min(Ah) \\ \text{s. t. } \ddot{y}_{1m} &\leq \frac{G_m}{n_s} \\ 0 < A &\leq A_d, \quad h > 0 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中:  $A_d$  为包装产品底面积;  $G_m$  为产品易损度;  $n_s$  为设计安全系数;  $\ddot{y}_{1m}$  为产品最大加速度。

由于成形外包装箱缓冲结构厚度已确定, 因此式(2)中仅缓冲材料面积  $A$  与厚度  $h$  为待求量。求解优化函数的步骤为: ① 计算泡沫缓冲材料单位体积静态吸收能量  $S_e$ , 估算初始体积  $V_0 = mgH/S_e$ ; ② 缓冲材料体积按  $V = V_0 + \Delta V$  迭代; ③ 令  $A = A_0 + \Delta A$ ,  $h = V/A$ ; ④ 若  $h > \sqrt{A}/1.33$ , 返回 ③, 否则求解式(1), 若  $G < G_m$ , ( $G = \ddot{y}_{1m}/g$ ), 输出  $A$  及  $h$ , 否则返回 ② 继续迭代。求解框图见图 2。

## 2 缓冲系统界面程序制作

在优化设计程序基础上, 利用 MATLAB/GUI 程序<sup>[12]</sup>, 将求解缓冲包装动力学结构步骤做成软件包用于缓冲设计。通过句柄实现图形、文本框、编辑文本、函数间逻辑关系, 建立缓冲包装动力学优化软件, 见图 3。缓冲吸能材料包括发泡聚乙烯 EPE、发泡聚苯乙烯 EPS、发泡聚丙烯 EPP 及生物基材料; 外包装箱可选择 6 种瓦楞纸板箱及蜂窝纸板箱。在参数区域输入质量  $m$ , 跌落高度  $H$ , 易损度  $G_m$  及安全系数  $n_s$ , 即可方便求

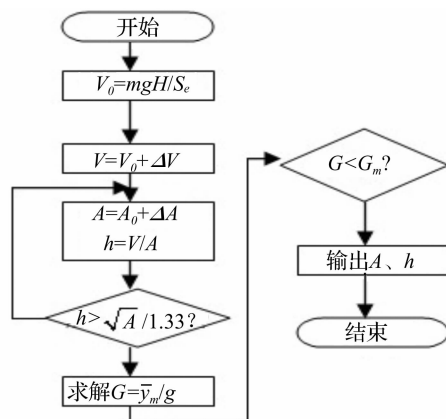


图2 优化设计框图

Fig. 2 Procedures for computing optimum design of series cushioning system

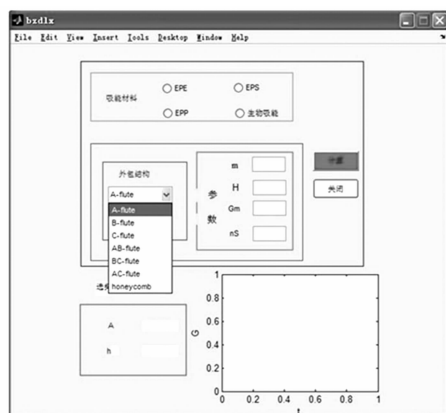


图3 缓冲包装优化设计界面

Fig. 3 Interface for cushioning packaging optimization design software

解缓冲包装结构优化结果。

## 3 算例

产品质量  $m = 6$  kg, 跌落高度  $H = 0.5$  m, 易损度  $G_m = 110$  g ( $g$  为重力加速度), 安全系数  $n_s = 1.1$ , 产品最大底面积  $A_0 = 0.02$  m<sup>2</sup>, 缓冲材料用发泡聚乙烯, 求解最优缓冲结构<sup>[6]</sup>, 见图 4。吸能材料选 EPE, 外包装箱选蜂窝纸板箱 (honeycomb), 输入质量  $m$ 、跌落高度  $H$ 、易损度  $G_m$  及安全系数  $n_s$ , 点击计算按钮即得最优结构为面积  $A = 0.0142$  m<sup>2</sup>,  $h = 0.01$  m。图 4 中右下图为加速度 - 时间曲线, 其中缓冲系统峰值加速度为 99.7702 g, 小于易损度 110 g。

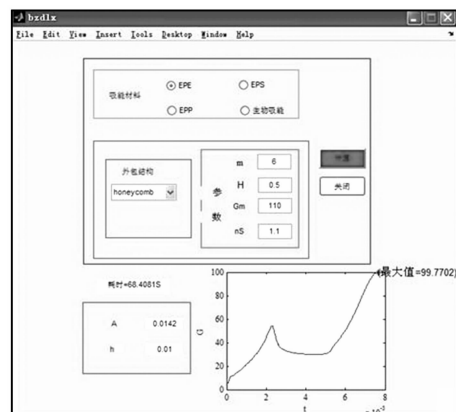


图4 缓冲优化设计求解结果

Fig. 4 Optimization structure results for cushioning packaging

见图 4。吸能材料选 EPE, 外包装箱选蜂窝纸板箱 (honeycomb), 输入质量  $m$ 、跌落高度  $H$ 、易损度  $G_m$  及安全系数  $n_s$ , 点击计算按钮即得最优结构为面积  $A = 0.0142$  m<sup>2</sup>,  $h = 0.01$  m。图 4 中右下图为加速度 - 时间曲线, 其中缓冲系统峰值加速度为 99.7702 g, 小于易损度 110 g。

## 4 结 论

基于缓冲材料宏观本构模型,利用 MATLAB/GUI 开发出用于求解缓冲包装结构的动力学软件,并可脱离 MATLAB 程序。该软件方便、易操作,输入相关参数,可计算获得满足一定条件的缓冲材料结构。从而大大方便包装缓冲结构设计,更好用于实践。

### 参 考 文 献

- [ 1 ] Liu Q, Subhash G. A phenomenological constitutive model for foams under large deformation[J]. *Polymer Engineering and Science*, 2004, 44(5): 463 - 473.
- [ 2 ] Avalle M, Belingardi G, Ibba A. Mechanical models of cellular solids: parameters identification from experimental tests[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2007, 34(1): 3 - 27.
- [ 3 ] Jeong K Y, Chon S S, Munshi M B. A constitutive model for polyurethane foam with strain rate sensitivity[J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2012, 26(7): 2033 - 2038.
- [ 4 ] 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.
- [ 5 ] 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.
- [ 6 ] 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.
- [ 7 ] 卢富德, 陶伟明, 高德. 串联缓冲结构压缩响应虚拟质量分[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.
- [ 8 ] Lu F D, Tao W M, Gao D. Virtual mass method for solution of dynamic response of composite cushion packaging system [J]. *Packaging Technology and Science*, 2013, 26(S1): 32 - 42.
- [ 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): 30 - 32.  
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, 1789.  
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, 1789.
- [ 11 ] 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 impact analysis on item packaging system with beam type elastic critical component [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2012, 31(15): 79 - 81.
- [ 12 ] 郭 勇, 王振林. 基于 MATLAB/GUI 的非线性包装系统破损边界计算软件设计[J]. *包装工程*, 2012, 33(17): 57 - 59.  
GUO Yong, WANG Zhen-lin. Development of damage boundary computation software for nonlinear packaging system based on MATLAB/GUI [J]. *Packaging Engineering*, 2012, 33(17): 57 - 59.