

# 苹果—瓦楞纸板缓冲跌落动力学模型

卢立新<sup>1,2</sup>

(1. 江南大学包装工程系, 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:** 基于瓦楞纸板受冲击压缩变形的特征, 提出一表征其非线性冲击力—变形模型, 结合其跌落冲击试验结果表征模型参数。在此基础上, 建立“富士”苹果—瓦楞纸板缓冲跌落动力学模型方程, 进行不同高度下的苹果缓冲跌落冲击响应的理论分析, 并与试验结果进行比较。结果表明, 试验结果与理论模型结果吻合性好, 所提出苹果—瓦楞纸板缓冲跌落冲击模型能合理地表征苹果缓冲跌落冲击动力学特征, 瓦楞纸板能显著降低苹果跌落的冲击加速度。研究结果为果品缓冲包装设计提供了理论基础。

**关键词:** 水果, 冲击试验, 冲击应力, 动力学模型

**中图分类号:** S126; O377; TB487

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-6819(2008)-9-0276-05

卢立新. 苹果—瓦楞纸板缓冲跌落动力学模型[J]. 农业工程学报, 2008, 24(9): 276—280.

Lu Lixin. Cushioning dropping modeling of a falling apple on the corrugated board[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(9): 276—280.(in Chinese with English abstract)

## 0 引言

果品加工、贮运过程中由环境因子刺激而引起的机械损伤和耐贮性下降是果品采后损耗的主要原因, 其中跌落冲击是引起果品机械损伤的最主要原因之一。因此如何采用科学有效的措施控制果品装、贮、运过程中的跌落碰撞损伤, 对提高果品质量, 延长果品贮藏期, 具有重大的工程价值。

大量研究表明<sup>[1-3]</sup>, 跌落冲击中的果品机械损伤量与其所承受的冲击加速度显著相关。为科学合理地实施果品缓冲包装, 建立果品缓冲包装系统、进行其跌落冲击的动力学特性研究是必需的。作为果品缓冲跌落冲击动力学的研究基础, 一些学者开展了果品刚性跌落冲击过程中的力学特性研究。Delwich<sup>[4]</sup>、Chen<sup>[5]</sup>、Yue<sup>[6]</sup>等对梨、桃、苹果等产品进行冲击和压缩试验, 采用冲击力、压缩力—变形特征预测果品坚实度。王俊<sup>[7]</sup>研究了桃下落冲击激励后果品的响应信号频谱特征。Zhang<sup>[8]</sup>、李小昱<sup>[9]</sup>分别通过梨、苹果的碰撞损伤试验, 建立了关于产品碰撞加速度—时间的数学模型。卢立新<sup>[10,11]</sup>对苹果进行不同高度的跌落试验, 得到其加速度—时间、冲击力—变形量、应力—应变以及跌落冲击弹性恢复系数等动态关系, 同时构建了苹果刚性跌落冲击模型, 分析其动力学特性。李小昱<sup>[12]</sup>试验研究了泡沫塑料、瓦楞纸缓冲材料弹性模量、厚度等物理特性对苹果碰撞损伤的影响。

对果品实施合理的缓冲包装是控制其运输过程中产生跌落损伤的主要技术手段, 而进行果品缓冲包装系统的动力学特性研究是实施缓冲包装的基础。本文基于瓦

楞纸板受冲击压缩变形的特征, 提出表征其非线性力—变瓦楞纸板受冲击压缩形模型, 结合其跌落试验结果进行模型参数表征。在此基础上, 建立“富士”苹果—瓦楞纸板缓冲跌落动力学方程, 进行跌落冲击响应的理论与试验对比分析, 验证模型的正确性。以期为果品的缓冲包装设计提供理论基础。

## 1 苹果—瓦楞纸板缓冲跌落冲击模型

### 1.1 瓦楞纸板跌落冲击力—变形模型

目前, 瓦楞纸板压缩力—变形特征的表征大都基于准静态压缩试验, 所得到的模型亦为准静态模型。实际瓦楞纸板的压缩变形同样经历弹—黏—塑性过程, 但由于其材料性质的复杂性以及现有弹—黏—塑性理论的局限, 直接建立瓦楞纸板压缩力—变形的弹—黏—塑性模型极为困难。事实上, 瓦楞纸板作为缓冲材料, 其有效的缓冲效能应体现在其黏弹性变形阶段。为此采用黏弹性模型进行瓦楞纸板压缩力—变形特征表征是有效的、合理的。

基于瓦楞纸板冲击压缩变形特征, 提出瓦楞纸板跌落冲击力—变形非线性黏弹性模型:

$$F = k_p x_p^3 + c_p x_p^2 \dot{x}_p \quad (1)$$

式中  $k_p$ ——瓦楞纸板弹性系数;  $c_p$ ——瓦楞纸板黏性系数;  $x_p$ ——瓦楞纸板的压缩变形。

上述模型主要基于如下考虑:

1) 根据瓦楞纸板跌落冲击力—变形特征, 瓦楞纸板的压缩变形具有非线性特征。

2) 对瓦楞纸板的进行准静态压缩试验, 其典型压缩力—变形特征曲线如图1所示。准静态压缩时, 由于压缩变形速率很小, 在初始压缩阶段可认为纸板处于弹性变形阶段。结果表明, 纸板的弹性变形具有非线性特征, 且可采用缓冲材料的典型三次型压缩力—变形关系加以表征。

收稿日期: 2008-01-13 修订日期: 2008-07-29

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划重点课题(2006BAD30B02)

作者简介: 卢立新(1966—), 男, 江苏宜兴人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事农产品与食品包装技术、包装动力学与运输包装、包装工艺与设备等研究。无锡 江南大学包装工程系, 214122。Email: lulx@jiangnan.edu.cn

3) 高速冲击压缩时, 纸板发生了非线性黏性变形。黏性力不仅与变形速率相关, 同时也应与压缩变形量相关 (否则无法满足初始压缩时的力-变形特征)。考虑到压缩变形的 1/2 幂项同样不能满足初始压缩时的力-变形特征, 故本文采用压缩变形的二次幂项加以表征。

同时为了比较一次幂与二次幂压缩变形项对黏性力的影响, 列出一一次幂项非线性黏弹性模型作为对比模型, 以比较模型 (1)、对比模型的正确性。对比模型为

$$F = k_p x_p^3 + c_p x_p \dot{x}_p \quad (2)$$

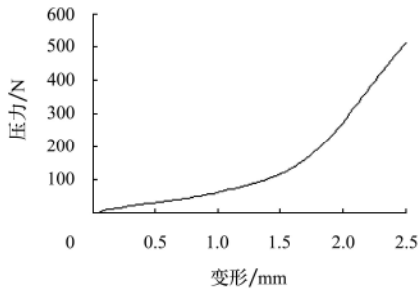


图 1 单层瓦楞纸板的准静态压缩力—变形曲线  
Fig.1 Quasi-static compress force versus deformation of single-layer corrugated board

### 1.2 单个红富士苹果—瓦楞纸板缓冲跌落冲击方程建立

单个红富士苹果缓冲跌落冲击动力学模型如图 2 所示。基于已建立的红富士苹果跌落冲击黏弹性模型<sup>[13]</sup>、瓦楞纸板冲击力—变形模型, 结合其跌落工况特征, 建立单个红富士苹果—瓦楞纸板缓冲跌落冲击方程:

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 + k_1(x_1 - x_p)^{3/2} + c_1(x_1 - x_p)^{9/2}(\dot{x}_1 - \dot{x}_p) - m_1 g = 0 \\ m_p \ddot{x}_p + k_p x_p^3 - k_1(x_1 - x_p)^{3/2} + c_p x_p^2 \dot{x}_p - c_1(x_1 - x_p)^{9/2}(\dot{x}_1 - \dot{x}_p) - m_p g = 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中  $m_1$ 、 $m_p$ ——分别为苹果、瓦楞纸板的质量;  $k_1$ 、 $c_1$ ——分别为苹果弹性系数、黏性系数;  $x_1$ ——苹果的压缩变形。

初始条件:

$$x_{1,p}(0) = 0; \quad \dot{x}_{1,p}(0) = \sqrt{2gh}$$

其中,  $h$ ——跌落高度。

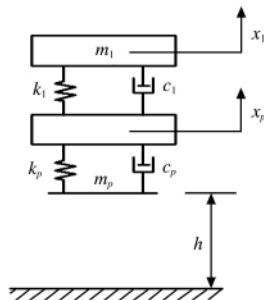


图 2 单个果品—瓦楞纸板跌落冲击动力学模型  
Fig.2 Dropping impact model of single apple and bottom-layer corrugated board

## 2 跌落试验

### 2.1 材料

瓦楞纸板: 采用 A 型单层瓦楞纸板 (厚 5 mm, 密度 0.135 g/cm<sup>3</sup>), 来源于苏州济丰石东包装纸业有限公司。实验采用直径 5 cm 的圆形试样。

苹果: 山东鲜销“富士”苹果。试验所选苹果试样形状规则, 表面无损伤, 质量在 236~275 g 之间, 其中同一高度试验时选用试样质量相差控制在 10g 内, 苹果的坚实度范围为 0.82~1.0 MPa。

### 2.2 试验仪器

采用自制品—瓦楞纸板缓冲跌落冲击试验系统 (图 3)。瓦楞纸板跌落冲击试验时, 将瓦楞纸板试样放置在铝托盘上; 将加速度传感器 (型号: CA-YD-127) 直接黏接在圆形冲击钢板中央上方; 钢板质量为 2.43 kg, 直径 8 cm。采用 INV306D 型智能信号采集与处理分析仪 (其放大器为 DLF-4 型) 进行信号采集与处理分析; 应用跌落激励自触发进行数据的采集, 采样频率为 10 000 Hz, 滤波频率为 1000 Hz。

苹果—瓦楞纸板缓冲跌落冲击试验时, 将联结加速度传感器 (型号: CA-YD-127) 的苹果试样替换冲击钢板放置在夹持器上, 进行跌落试验。

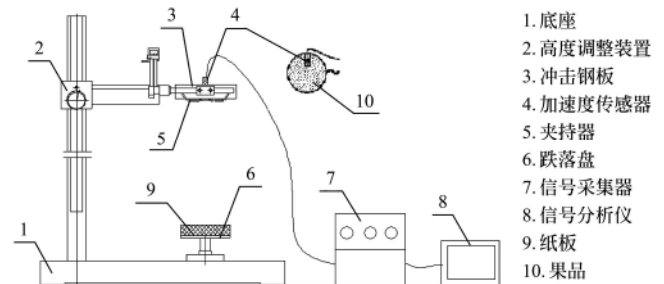


图 3 果品—瓦楞纸板跌落冲击试验系统  
Fig.3 Schematic of dropping impact system of fruit-corrugated board

### 2.3 试验方法

依据 GB/T 4857.2—1992 要求, 试验前对瓦楞纸板试样进行 24 h 以上的温湿度处理。温湿度处理条件为温度: 20℃、相对湿度: 50%。

#### 1) 瓦楞纸板跌落冲击试验

瓦楞纸板跌落冲击试验采用 4 个果品跌落高度: 0.1、0.2、0.3、0.5 m, 每个高度采用 5 个纸板试样进行跌落试验。

#### 2) 苹果—瓦楞纸板缓冲跌落冲击试验

跌落冲击试验之前, 测量苹果试样质量与坚实度。考虑到苹果的贮运排放方式, 苹果试样的跌落部位为试样圆表面, 即跌落方向与苹果果柄方向垂直。

加速度传感器与苹果联结方式, 采用专用刀具在试样的圆表面挖出深为 15 cm 左右的圆柱型洞, 并控制圆柱型洞直径, 将加速度传感器塞入圆柱型洞内以保证塞入传感器的紧密性。进行跌落试验, 保证加速度传感器的正确方位 (图 3)。

采用 4 个跌落高度: 0.1、0.2、0.3、0.5 m, 每个高

度下苹果试样跌落重复试验 10 次 (5 个试样), 每个试样试验 2 次, 即初始位置和旋转  $90^\circ$  后各试验一次。

### 3 结果与分析

#### 3.1 瓦楞纸板跌落冲击力-变形模型参数的表征

基于跌落试验测定加速度-时间信号数据, 可得到对应的力-变形数据, 进行模型参数拟合。模型参数识别方法参见文献[11]。其模型参数拟合结果见表 1。结果发现, 随着跌落高度的增加, 其模型参数相应减小。这一结果表明, 与许多黏弹性材料相似, 压缩变形速度影响瓦楞纸板的黏性、弹性特性。

任意选取跌落高度 0.1、0.5 m 为分析样本, 其试验结果与模型计算对比结果如图 4、5。以实验结果为依据, 进行本文模型、对比模型结果的相关性分析。应用 Matlab 分析工具, 计算得到跌落高度为 0.1、0.5 m 时本文模型与实验结果的相关系数分别为 0.9859、0.9668; 而相应跌落高度下的对比模型与实验结果的相关系数分别仅为

0.9235、0.9062; 即本文模型与试验结果的相关系数较高, 而对模型与试验结果的相关系数较低, 在跌落高度 0.2、0.3 m 时也有同样的结果。同时比较跌落冲击动力学特性重要参数—最大冲击加速度与最大冲击力, 发现对比模型与实验结果误差较大。故总体上采用本文提出的模型理论结果与试验值具有较高的吻合度, 而对对比模型误差较大。采用本文提出的瓦楞纸板跌落冲击力-变形非线性黏弹性模型表征瓦楞纸板跌落冲击特性是适当的。

表 1 瓦楞纸板力-变形模型参数拟合结果  
Table 1 Fitting results of force-deformation model parameters of corrugated board

| 跌落高度/m | $k_p \times 10^9 / \text{N} \cdot \text{m}^{-3}$ | $c_p \times 10^7 / \text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$ |
|--------|--|---|
| 0.1    | 44.413   | 13.942  |
| 0.2    | 14.250   | 8.965   |
| 0.3    | 10.031   | 6.572   |
| 0.5    | 4.930  | 5.078   |

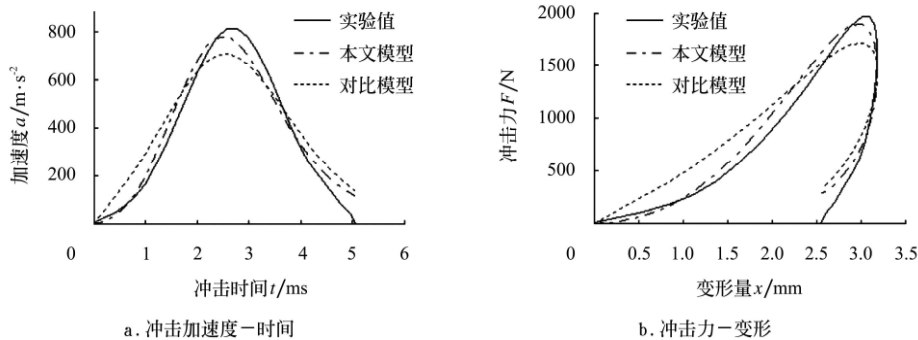


图 4 0.1 m 高度下瓦楞纸板跌落冲击试验与模型结果比较

Fig.4 Testing data compared to the model results of dropping impact for corrugated board at  $h=0.1$  m

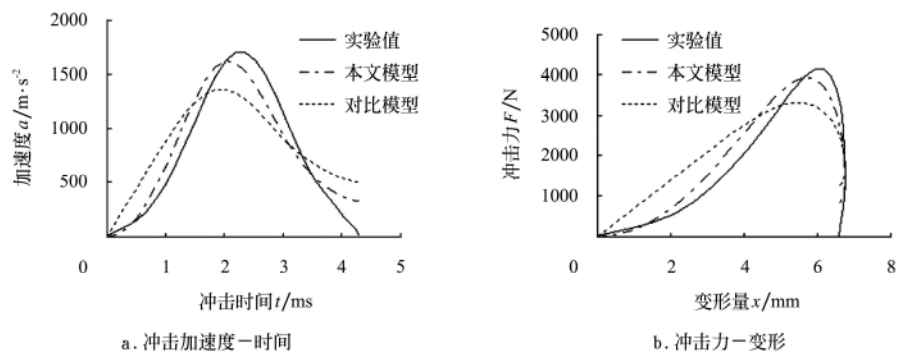


图 5 0.5 m 高度下瓦楞纸板跌落冲击试验与模型结果比较

Fig.5 Testing data compared to the model results of dropping impact for corrugated board at  $h=0.5$  m

#### 3.2 苹果-瓦楞纸板缓冲跌落理论与试验结果分析

苹果试样在不同跌落高度下的弹性系数、黏性系数值见文献[13]。

每一试验高度下的典型分析样本跌落冲击加速度响应的理论与试验结果如图 6。结果发现, 在试样的跌落冲击压缩阶段, 模型分析与试验结果吻合性很高; 加速度峰值的模型结果较试验结果稍有降低; 在跌落冲击回弹阶段, 两者存在一定偏差。同时, 随着跌落高度的增加, 试样跌落冲击加速度峰值增大, 而冲击持续的时间则相

应缩短。进一步分析实验结果与理论结果的相关性, 应用 Matlab 分析工具, 计算得到试验跌落高度下的理论与实验结果的相关系数均大于 0.9517, 即总体上理论与试验结果的吻合度较高。

进一步比较苹果刚性跌落、纸板缓冲跌落冲击时的加速度峰值变化 (图 7), 发现采用瓦楞纸板作为缓冲衬垫, 显著降低了跌落冲击加速度峰值; 同时延长了相应跌落冲击持续时间。这一结果表明瓦楞纸板试样具有一定的缓冲作用。

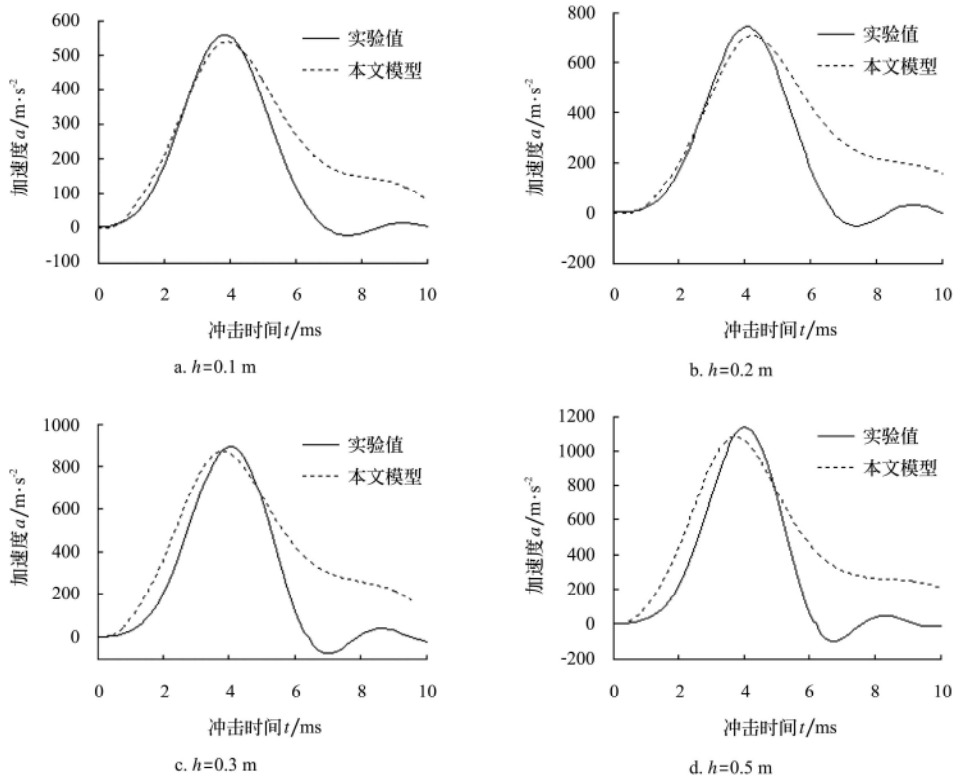


图6 单个红富士苹果—瓦楞纸板跌落冲击加速度响应理论与试验结果比较

Fig.6 Testing data compared to the model results of impact acceleration for single apple with bottom-layer corrugated board

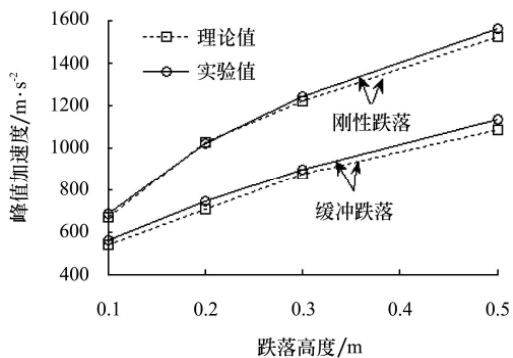


图7 单个红富士果品刚性跌落与缓冲跌落峰值加速度比较

Fig.7 Testing data compared to the model results of peak acceleration for single Fuji apple under rigid and cushioning dropping impacts

#### 4 结论

本文建立了苹果—瓦楞纸板缓冲跌落冲击模型, 进行理论分析与试验结果比较, 结果表明:

- 1) 所提出瓦楞纸板动态非线性力—变形模型, 能较准确地表征其跌落冲击力—变形特征;
- 2) 所建立的苹果—瓦楞纸板跌落冲击模型能合理地表征苹果缓冲跌落冲击动力学特征;
- 3) 所有瓦楞纸板衬垫显著降低了苹果跌落冲击加速度。

研究结果为果品缓冲包装设计与减损运输包装提供了理论基础。

#### [参 考 文 献]

- [1] Franke J E, Rohrbach R P. A nonlinear impact model for a sphere with a flat plate[J]. Transaction of the ASAE, 1981, 24(6): 1683—1686.
- [2] Kuwabara G, Kono K. Restitution coefficient in a collision between two spheres[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 1987, 26(8): 1230—1233.
- [3] 潘 见. 草莓振动损伤的流变力学初探[J]. 生物力学, 1990, 5(7): 63—70.
- [4] Delwich M J, MsDonald T, Bowers S V. Determination of peach firmness by analysis of impact[J]. Transaction of the ASAE, 1987, 30(1): 249—254.
- [5] Chen P, Ruiz-Altisent M, Barreiro P. Effect of impact mass on firmness sensing fruits[J]. Transaction of the ASAE, 1996, 39(3): 1019—1023.
- [6] Yen M, Wan Y. Determination of textural indices of guava fruit using discriminate analysis by impact force[J]. Transaction of the ASAE, 2003, 46(4): 1161—1166.
- [7] 王 俊, 腾 斌. 桃下落冲击力学特性及其与坚实度的相关性[J]. 农业工程学报, 2004, 20(1): 193—197.
- [8] Zhang X, Brusewitz G H. Impact force model related to peach firmness[J]. Transaction of the ASAE, 1991, 34(5): 2094—2098.
- [9] 李小昱, 王 为. 苹果碰撞响应数学模型的研究[J]. 农业工程学报, 1996, 12(4): 204—207.
- [10] 卢立新, 王志伟. 苹果跌落冲击动力学特性研究[J]. 农业工程学报, 2007, (2): 254—258.
- [11] 卢立新. 多层苹果刚性跌落冲击模型与冲击响应研[J]. 包装工程, 2007, 26(6): 27—29, 50.
- [12] 李小昱, 王 为. 缓冲材料降低苹果碰撞损伤的研究[J]. 西北农业大学学报, 1998, 26(3): 47—51.

[13] 卢立新. 果品跌落冲击行为及其缓冲包装的理论及试验研

究[D]. 江南大学, 2007.

## Cushioning dropping modeling of a falling apple on the corrugated board

Lu Lixin<sup>1,2</sup>

(1. Department of Packaging Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China ;

2. China National Light Industry Package Quality Supervising and Testing Center, Wuxi 214122, China)

**Abstract:** The dynamic nonlinear force versus deformation model of the corrugated board was proposed, and its model parameters were estimated in terms of the dynamics characteristics obtained by dropping compression tests. The cushioning dropping model of the falling apple on the corrugated board was developed. The cushioning dropping tests were conducted on fresh 'Fuji' apples at four heights: 10, 20, 30, 50 cm. Then, the dropping impact responses of theoretic model and tests for apples were obtained. Results show that the cushioning dropping model was good agreed with test data, and the corrugated board notably reduced the impact accelerations of apples. The cushioning dropping model provides the foundation of cushioning packaging design for apple fruit.

**Key words:** fruit, impact testing, impact resistance, dynamic model, cushioning