缓冲包装设计引起的易损件移动现象的力学原理

乔杨[1]，王军[1,2]
（1.江南大学，无锡 214122；2.江苏省先进食品装备制造技术重点实验室，无锡 214122）

摘要：目的 研究产品在物流运输搬运过程中易损件会发生转移的行为。**方法** 提出轻型小机电产品包装冲击动力学模型，建立基于 2 个易损件的产品冲击动力学方程，得到易损件的峰值加速度与刚度比的关系图，并且采用 Runge-Kutta 法进行数值求解，获取 2 个易损件在半正弦激励脉冲激励下的冲击时域响应、冲击谱和破损边界曲线。**结果** 产品在不同的刚度比下，各个部件出现损坏的先后顺序不同，谁先坏本质上取决于哪个部件的峰值加速度响应首先达到其脆值。**结论** 研究揭示了易损件随着冲击激励和包装材料特性发生移动的现象和本质原因。

关键词： 易损件；脆值；Runge-Kutta 法
中图分类号： TB485.1 **文献标识码：** A **文章编号：** 1001-3563(2017)21-0074-05

Mechanical Principle of Quick-wear Parts Moving Phenomenon Caused by Cushioning Packaging Design

QIAO Yang[1], *WANG Jun*[1,2]
(1.Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 2.Jiangsu Key Laboratory of Advanced Food Manufacturing Equipment and Technology, Wuxi 214122, China)

ABSTRACT: The work aims to study the quick-wear part of products to be transferred during the logistics, transportation and handling processes. A package impact dynamic model of small lightweight electromechanical products was proposed and the product impact dynamic equation based on two quick-wear parts was established. The diagram of relaship between the peak acceleration and the stiffness ratio of the quick-wear parts was obtained. Runge-Kutta method was used to make numeric solution. The impact time-domain response, shock spectrum and damage boundary curves of two quick-wear parts under impulsive excitation with semi-sinusoidal excitation were obtained. At different stiffness ratios of the product, the order of damage was different for each component. The part that was damaged first in nature depended on the peak acceleration of a component that first reached its fragility. The study reveals the phenomenon and the essential reason that the quick-wear parts are transferred with the impact excitation and the packaging material characteristics.
KEY WORDS: quick-wear part; fragility; Runge-Kutta method

产品在整个物流运输搬运流程中，有来自环境的各种因素的作用。其物流环境中的任一个因素危害超过产品易损件所能承受的最大冲击加速度时，产品易损件都会有不同程度的损坏或者变形，以致产品失效[1—3]。在防止产品失效的各包装因素中，包装材料以及包装结构扮演着重要角色，对于防护产品起着至关重要的作用。如何防止产品损坏，选择适宜的包装材料和最佳的包装结构，首先需要了解产品发生损害的机理，通过理论的指导研究形成一套完整的理论[4—5]，然后综合实际需要，总结出一整套的科学理论。在科学理论的指导下进行更为适合地包装设计，从而对产品进行更加有效的防护[6]。文中主要目的在于建立关于2个易损件的动力学模型，探讨易损件在外部激励下，冲击对易损件的影响。总结出到达产品易损件的冲击加速度，在外部冲击下，在不同的包装结构下的变化规律。

收稿日期： 2017-08-05
作者简介： 乔杨（1982—），男，江南大学硕士生，主攻运输包装。
通讯作者： 王军（1982—），男，江南大学教授，主要研究方向为运输包装。

1　基于 2 个易损件的产品包装系统模型

易损轻型小机电产品广泛应用在生活的各个方面，如手机、卡片照相机、笔记本电脑、电脑一体机等。这些产品在世界各地广泛应用，因而运输环境更为复杂[7]。这些产品的主要特点是由多个零部件组成，在产品系统中既有机械部件，又有电路系统，产品本身有不止一个易损件。传统的包装设计理论在评价产品破损时，通常为了简化运算将整个产品作为一个质点来评价。根据此理论产品的脆值就集中在产品的重心位置。这种做法完全忽略了多个部件的影响。忽略了易损件对整个产品的影响。整个产品是由多个部件组成的，每个部件的自身的脆值又是不一样的，而产品的破损是以任何一个部件的破损为标志的[8]，换言之，任何一个部件的破损都表示产品的损坏。这样简单地将产品作为整体来处理是不科学也不准确的，文中以2个易损件为研究对象来分析各影响因素。

在考虑易损件时，易损件和产品主体之间的作用很小，在外部冲击下，两者之间的阻尼作用可以忽略不计。关于2个易损件的包装动力学模型[9—11]见图1。其中，m_1, m_2, m_3分别为主易损件和次易损件以及产品的主体质量，k_1, k_2分别为产品主体部分和易损件相连接的等效弹簧系数。k_3, c 分别为缓冲垫弹簧系数及阻尼。对于双易损件的产品包装系统动力学方程见式（1）。

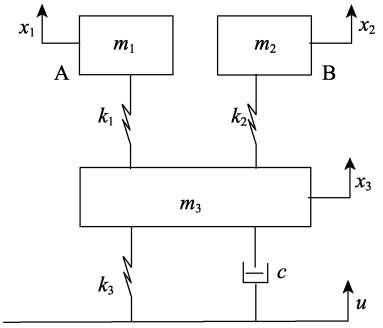


图 1　产品包装系统动力学模型

Fig.1 Dynamic model of product packaging system

$$\begin{cases} m_1x_1'' = k_1(x_3 - x_1) \\ m_2x_2'' = k_2(x_3 - x_2) \\ m_3x_3'' = k_3(u - x_3) + c(u' - x_3') - k_1(x_3 - x_1) - k_2(x_3 - x_2) \end{cases} \tag{1}$$

式中：$u'' = u''_{0\mathrm{m}} \sin\dfrac{\pi t}{t_0}\Delta H(t, t_0)$。

2　基于易损件的产品包装系统冲击动力学方程与求解

2.1　基于易损件的产品包装系统动力学方程

当考虑双易损件时，由于2个易损件之间没有直接的作用关系，那么当考虑 A 部件时，可以简化物理模型，见图2，考虑 B 部件时同理。在文中，主要研究脉冲激励下2个易损件的响应问题，并且重点考虑包装材料或结构的改变对不同易损件损坏顺序的影响，即改变缓冲包装，理论上是否会造成易损件的转移。为方便计算，将易损件与主体间的连接视为线性系统。为此，基于单个易损件的产品包装系统动力学方程见式（2）。

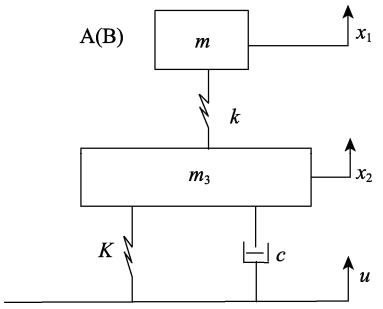


图 2　产品包装系统动力学简化模型

Fig.2 Simplified dynamic model of product packaging system

$$\begin{cases} mx_2'' + k\left(x_2 - x_1\right) \\ m_3x_1'' + cx_1' + Kx_1 + k\left(x_1 - x_2\right) = cu' + Ku \end{cases} \tag{2}$$

式中：$u'' = u''_{0\mathrm{m}} \sin\dfrac{\pi t}{t_0}\Delta H(t, t_0)$。

根据基于2个易损件的包装系统动力学模型和包装系统动力学方程，得到易损件峰值加速度响应与刚度比的关系，见图3。A, B 这2个不同的易损件在半正弦激励脉冲作用下，其峰值响应加速度随刚度比的变化而变化。可以看出，不同部件在同一刚度比时的峰值响应加速度不同，并且随着刚度比的变化而变化。说明对于同一产品上不同的易损件而言，当缓冲包装材料或结构发生改变时，在确定激励条件下峰值加速度达到脆值的顺序可能不同，即发生损坏的先后顺序不同。

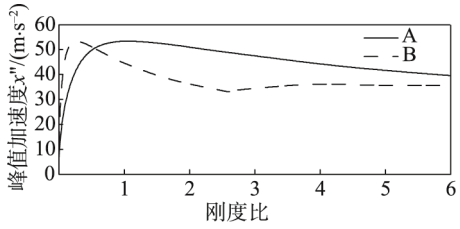


图 3　易损件峰值加速度响应和刚度比关系

Fig.3 Relation between peak acceleration response and stiffness ratio of quick-wear parts

2.2　Runge–Kutta 法

为了得到更为准确的数据，采用四阶 Runge- Kutta 法进行数值求解。四阶 Runge-Kutta 基本算法为：

$$x_{k+1} = x_k + (k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4)/6 \tag{3}$$

其中：

$$\begin{cases} k_1 = hf(t_k, x_k) \\ k_2 = hf(t_k + h/2, x_k + k_1/2) \\ k_3 = hf(t_k + h/2, x_k + k_2/2) \\ k_4 = hf(t_k + h, x_k + k_3) \end{cases} \tag{4}$$

式中：h 为计算步长。

根据易损件的产品包装系统动力学方程组，采用 Matlab 自带函数 ode45进行求解。

3　基于易损件的包装系统冲击响应特性

根据四阶 Runge-Kutta 法求解方程组式（1），然后对易损件的产品包装系统冲击响应特性进行分析。选取系统参数为：m_3=9.9 kg, m_1=0.1 kg, m_2=0.3 kg, k_1=1000 kg/s^2, k_2=4000 kg/s^2, c=0.1 N/s, u''_{0m}=30 m/s^2。

3.1　时域特性

首先讨论针对易损件的2个自由度包装系统，在进行半正弦脉冲激励冲击下的冲击响应特性。不同刚度比时，系统在半正弦脉冲外部激励下，不同易损件的时域响应见图4，其中脉冲时间 t_0=0.5 s。

从图4可以看出，刚度比在包装系统的冲击响应中起着重要的作用。当刚度比较小时，A 部件的峰值加速度响应值高于 B 部件的峰值响应加速度值；当刚度比较大时，A 部件的峰值加速度响应值小于 B 部件的冲击响应加速度峰值。假设 A, B 部件的脆值分别为4.5 g 和5 g，那么随着刚度比的增大，A, B 部件发生损坏的顺序发生了变化，由 A 先损坏转移为 B 先损坏。

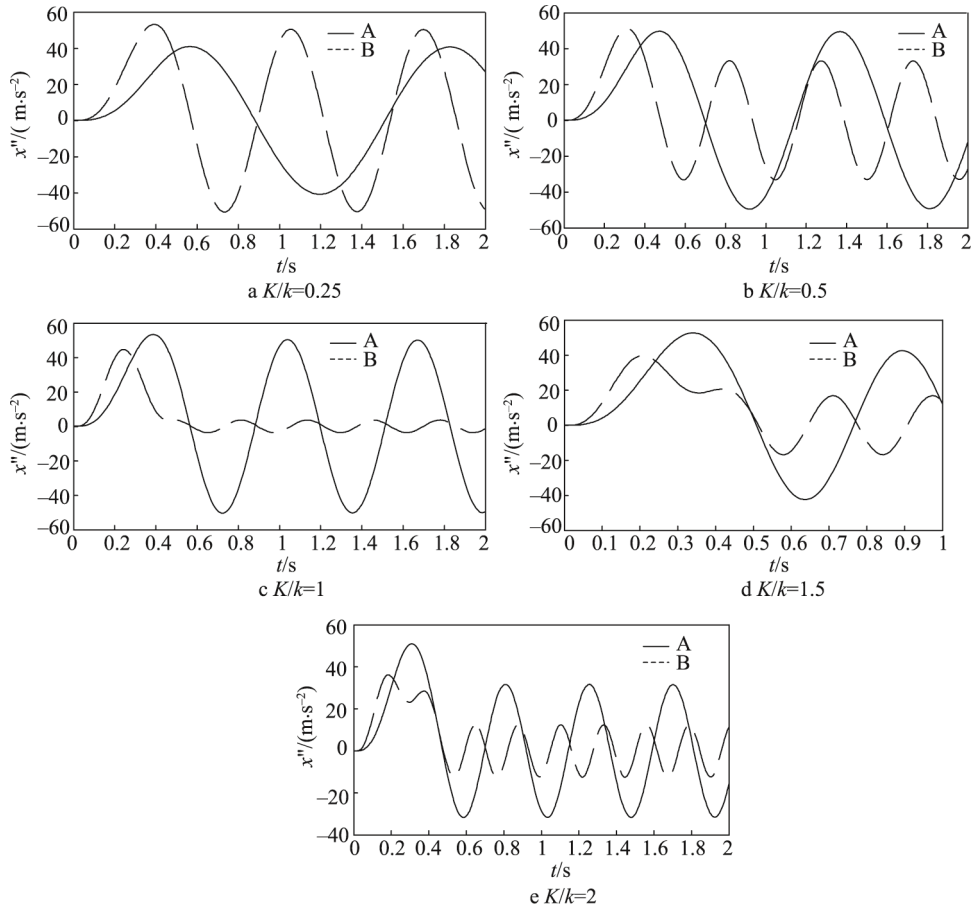


图 4　针对易损件的包装系统冲击时域响应

Fig.4 Impact time-domain response of packaging system of the quick-wear parts

3.2　冲击响应谱

该节考虑了易损件的冲击谱对刚度比的敏感性。由图5可知，易损件在不同的外部脉冲激励时间下，最大冲击谱对刚度比的影响非常大。假设 A，B 部件的脆值分别为4.5g 和5g，那么 A, B 部件在不同脉冲激励时间下发生损坏的情况不同，并且随着刚度比的变化也会发生变化。在0.5 s 半正弦脉冲激励下，刚度比 K/k=0.25时，B 损坏，A 未损坏；刚度比 K/k=0.5，A 与 B 都会发生损坏；刚度比 $K/k\geqslant$1时，A 损坏，B 未损坏。

3.3　破损边界曲线

在一定冲击速度下易损件的破损问题可以通过破损边界曲线[12—16]进行描述和论证。由图6可知，刚度比对易损件破损边界的影响非常明显，不同的刚度比下，破损边界的差异很大。假设 A, B 部件的脆值分别为4.5g 和5g，临界变化速度分别都为20 m/s，因此 A, B 部件在不同刚度比时发生损坏的情况不同。刚度比 K/k=0.25时，B 损坏，A 未损坏；刚度比 K/k=0.5时，A 与 B 都会发生损坏；刚度比 K/k=1时，A 损坏，B 未损坏。

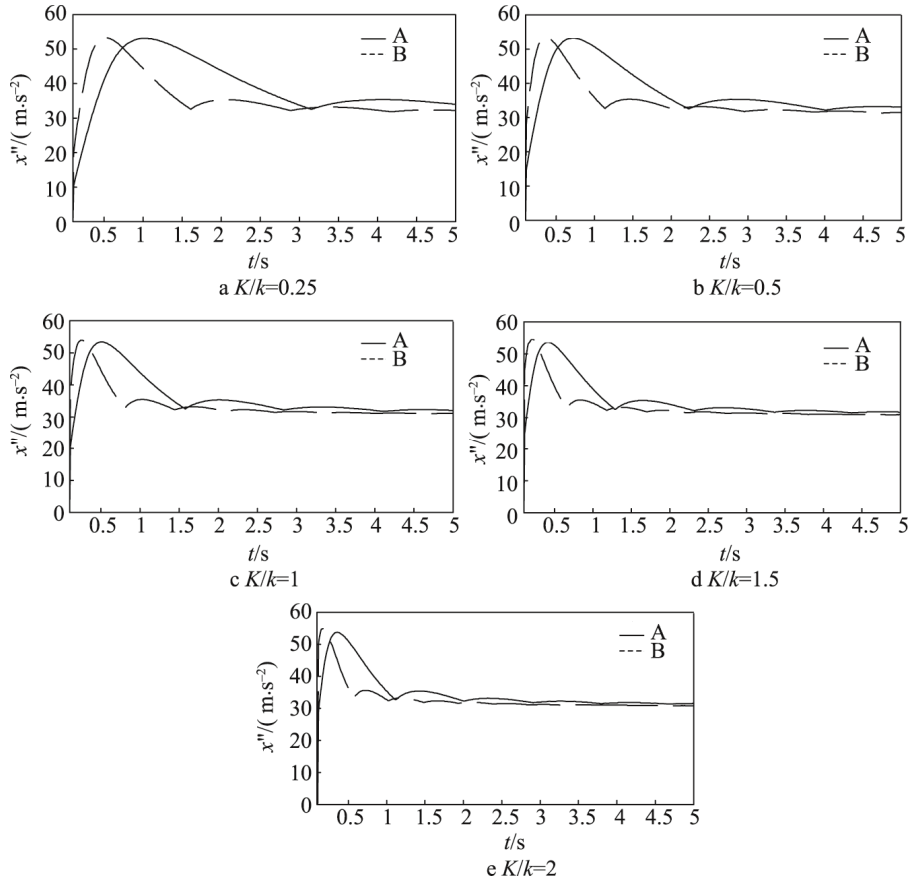


图 5　易损件冲击谱

Fig.5 Shock spectrum of quick-wear parts

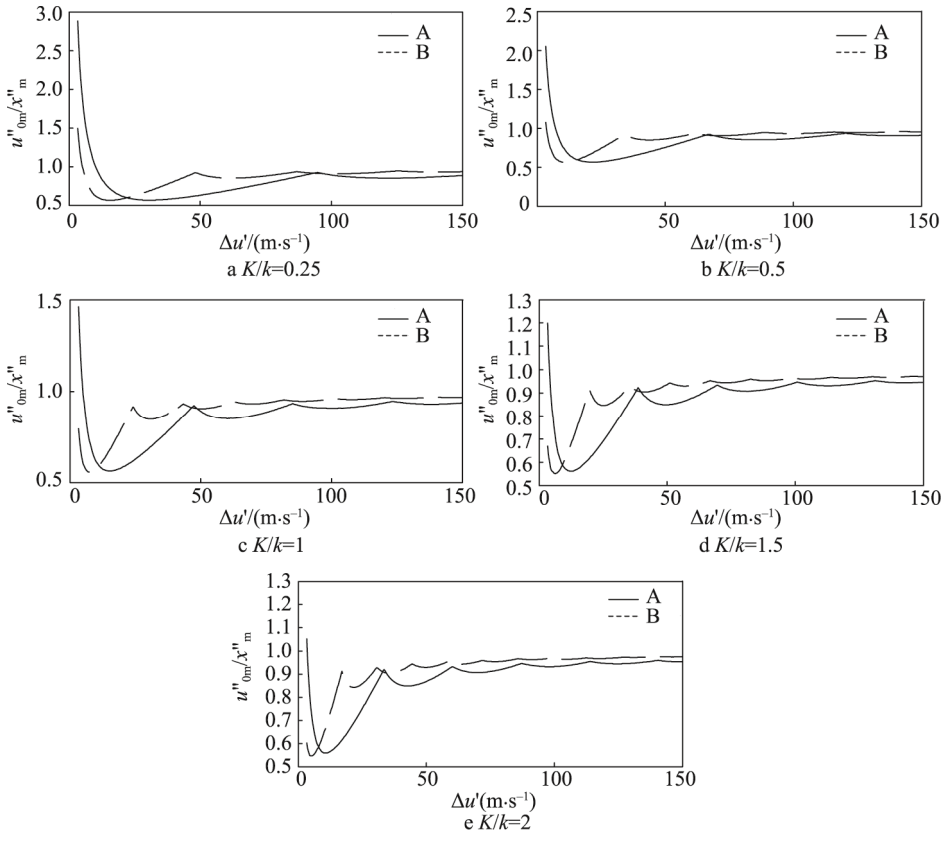


图 6　易损件破损边界曲线

Fig.6 DBC of quick-wear parts

4 结语

从产品刚度比与易损件峰值加速度的关系出发，分别从时域特性、冲击响应谱、破损边界曲线等方面进行了理论分析。最终得出，产品在不同刚度比下各个部件出现损坏的先后顺序不同，即对于相同的产品而言，易损件随着冲击激励或者包装材料结构的不同而发生转移。此理论为设计者在进行包装设计时提供了新思路。设计包装时不单要关注产品本身的许用脆值，更要关注产品多个易损件的脆值，避免因设计不当使易损件发生转移造成的损坏，进而避免设计失效。包装设计者在了解了易损件会发生转移的理论后，进行包装设计时充分考虑多个易损件的保护，防止出现最容易发生损坏的零件虽未破损，但次易损件发生破损的现象。提高产品防护包装设计的有效性，进而缩短产品开发周期，降低包装开发成本。如果包装工程师在进行产品设计时，仅仅考虑易损件的保护，而未注意到易损件会发生转移，产品包装有可能会因保护不当造成产品的损坏，因此该理论对于指导产品包装设计具有重要的意义。

参考文献：

[1] 许文才, 向明. 商品运输的安全装载问题[J]. 包装工程, 2001, 22(1): 21—22.
XU Wen-cai, XIANG Ming. The Safe Stowage of Commodity Transportation[J]. Packaging Engineering, 2001, 22(1): 21—22.

[2] 金国斌. 中国物流包装中存在的问题与发展策略探讨[J]. 包装学报, 2011, 3(2): 1—6.
JIN Guo-bin. Research on Existing Problems and Developing Tactics for Logistic Packaging[J]. Packaging Journal, 2011, 3(2): 1—6.

[3] 叶翀, 庄文娟, 陈婷. 我国物流包装的发展现状及问题初探[J]. 物流工程与管理, 2012, 34(5): 3—5.
YE Chong, ZHUANG Wen-juan，CHEN Ting. Development Status and Problems of Logistics Packing in China[J]. Logistics Engineering and Management, 2012, 34(5): 3—5.

[4] 都腊梅, 衷友伟. 缓冲包装理论技术的发展及方向[J]. 湖南包装, 2000(4): 9—11.
DU La-mei, ZHONG You-wei. The Development and Direction of Cushioning Packaging Technology and Theory[J]. Hunan Packaging, 2000(4): 9—11.

[5] LIU Y, WANG S H. Experimental Study of Bamboo Fiber Cushion Packaging Materials for the Express Packaging[J]. Applied Mechanics & Materials, 2013, 300/301: 1348—1351.

[6] 彭国勋, 吴舟平. 瓦楞包装设计[M]. 北京: 印刷工业出版社, 2007.
PENG Guo-xun, WU Zhou-ping. The Equality of Corrugated Packaging Design[M]. Beijing: Printing Industry Press, 2007.

[7] 孟宪文, 计宏伟, 王怀文, 等. PC 主机运输包装件的防振缓冲性能评价[J]. 振动与冲击, 2007, 26(8): 162—164.
MENG Xian-wen, JI Hong-wei, WANG Huai-wen, et al. Anti Vibration Cushioning Performance Evaluation of PC main Transport Package[J]. Journal of Vibration and Shock, 2007, 26(8): 162—164.

[8] 王军, 卢立新, 王志伟. 产品破损评价及防护包装力学研究[J]. 振动与冲击, 2010, 29(8): 43—45.
WANG Jun, LU Li-xin, WANG Zhi-wei. Product Damage Evaluation and Protective Packaging Dynamics[J]. Journal of Vibration and Shock, 2010, 29(8): 43—45.

[9] 郭勇, 卢富德, 高德, 等. 基于 MATLAB/GUI 缓冲包装动力学优化设计[J]. 振动与冲击, 2014, 33(2): 81—83.
GUO Yong, LU Fu-de, GAO De, et al. Development of Software for Optimization Design of Cushioning Packaging System Based on MATLAB/GUI[J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(2): 81—83.

[10] 李光, 阮丽, 高德, 等. 非线性运输包装系统动力学建模研究进展[J]. 包装工程, 2015, 36(19): 1—6.
LI Guang, RUAN Li, GAO De, et al. Research Progress of Dynamic Modeling of Nonlinear Transport Packaging System[J]. Packaging Engineering, 2015, 36(19): 1—6.

[11] YUAN C, ERINC M, GIELEN S, et al. Thermo-mechanical Model Optimization of HB-LED Packaging[J]. Journal of Light & Visual Environment, 2011, 35(3): 214—221.

[12] BURGESS G J. Product Fragility and Damage Boundary Theory[J]. Packaging Technology and Science, 1988, 15(10): 5—10.

[13] LU L X, WANG Z W. Dropping Bruise Fragility and Bruise Boundary of Apple Fruit[J]. Transaction of ASABE, 2007, 50(4): 1323—1329.

[14] LINK R E, BURGESS G J. Effects of Fatigue on Fragility Testing and the Damage Boundary Curve[J]. Journal of Testing and Evaluation, 1996, 24(6): 419—426.

[15] 宋宝丰, 袁志庆. 缓冲包装设计中构建破损边界曲线的新途径[J]. 包装学报, 2013, 5(3): 46—50.
SONG Bao-feng, YUAN Zhi-qing. A New Way of Constructing Damage Boundary Curve in Cushioning Packaging Design[J]. Packaging Journal, 2013, 5(3): 46—50.

[16] 王振林, 吴长富, 奚德昌. 物品包装系统位移损坏边界[J]. 振动工程学报, 1998(4): 434—442.
WANG Zhen-lin, WU Chang-fu, XI De-chang. The Displacement Damage Boundary of Product Packing System[J]. Journal of Vibration Engineering, 1998(4): 434—442.