

多点耦合包装系统动态逆子结构理论试验验证

洪翔¹, 王军^{1,2}, 卢立新^{1,2}, 王志伟³, 朱勇³

(1. 江南大学, 无锡 214122; 2. 中国包装总公司 食品包装技术与安全重点实验室, 无锡 214122; 3. 暨南大学 产品包装与物流广东普通高校重点实验室, 珠海 519070)

摘要: 将产品-包装-运载体系统作为整体考虑, 建立了二级多点动态逆子结构理论与模型。推导了用系统水平 FRF 来预测部件水平 FRF 的表达式。用弹簧-质量块组成的实际模型进行了实验验证。实验结果验证了用系统水平 FRF 预测部件水平 FRF 的可行性与准确性。

关键词: 逆子结构; 多点耦合; 产品包装运输系统

中图分类号: TB485.3; TB487 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2013)03-0001-04

Experimental Varification of Inverse Substructure Theory for Multipoint Coupled Packaging System

HONG Xiang¹, WANG Jun^{1,2}, LU Li-xin^{1,2}, WANG Zhi-wei³, ZHU Yong³

(1. Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 2. Key Laboratory of Food Packaging Technology and Safety, Wuxi 214122, China; 3. Key Laboratory of Product Packaging and Logistics of Guangdong Higher Education Institutes, Jinan University, Zhuhai 519070, China)

Abstract: Two levels multipoint dynamic inverse substructure theory and model was established by considering product-packaging-carrier as an integral. The system level FRFs were used to predict the component level FRFs, and corresponding formula was deduced. In order to validate the theory, a physical model was constructed and the experiment was conducted. The experimental result showed that using system level FRFs predict component level FRFs is feasible and correct.

Key words: inverse substructure; multipoint couple; product-transport system

产品在运输过程中会受到各种冲击与振动, 造成产品损坏, 需根据产品的实际运输环境进行缓冲包装的设计。国内外学者针对产品缓冲包装的冲击与响应做了大量研究^[1-2], 逐步完善了脆值^[3-5]、冲击响应谱等理论方法^[6-10]。在产品运输流通过程中, 产品-包装-运载体组成一个复杂的系统, 运载体所受到的路面激励将被传递到包装内的产品上。由此, 若能正确评价振动与冲击的传递路径和各耦合环节对包装产品动态响应的贡献, 无疑对包装设计具有重要意义。

近年来, Lim 等人^[11]针对复杂耦合系统, 提出了基于频率响应函数的动态逆子结构理论, 并给出了利用系统水平 FRF 预测耦合界面动刚度的方法, 并进行了数值验证。随后, Lim 等人^[12]应用该套理论对车辆结构进行试验, 考察振动的传递和车辆的频率响应特性, 进一步验证了该套理论的正确性。王志伟、王军等人^[13-15]结合包装动力学的基本理论, 将逆子结构理论引入运输包装领域, 发展了产品-包装-运载体的动态逆子结构理论与实验方法。

实际上, 产品-包装-运载体系统各耦合界面处多

收稿日期: 2012-12-10

基金项目: 国家自然科学基金(51205167); 教育部高等学校博士学科点专项科研基金(20120093120014); 江苏省普通高校研究生科研创新计划(2011)

作者简介: 洪翔(1987-), 男, 山东青岛人, 江南大学硕士生, 主攻运输包装。

通讯作者: 王军(1982-), 男, 安徽巢湖人, 博士, 江南大学副教授, 主要研究方向为包装动力学。

为多点连接,甚至面连接,将其处理为多点耦合系统更加符合实际。为此,笔者拟对多点耦合包装运输系统逆子结构方法展开实验研究,验证其工程应用的精度,为产品包装运输系统动力学分析提供一套新的技术理论方法。

1 多点耦合动态逆子结构理论模型

对于任意一个子系统来说,存在一个系统输入 $i(k)$, 一个系统输出 $o(k)$, 以及与其他子系统耦合处产生的输入与输出 $c(k)$, 见图 1。

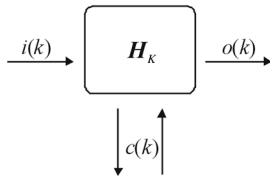


图 1 子结构输入输出与耦合示意图

Fig. 1 Input, output and coupling of a substructure

据此,可以得到其控制方程为:

$$[M_k]\{\ddot{X}_k\} + [C_k]\{\dot{X}_k\} + [K_k]\{X_k\} = \{F_k\} \quad (1)$$

式中: $\{X\}$ 为子结构的位移响应; $\{F\}$ 为激励; $[M]$ 为结构质量; $[C]$ 为耦合界面阻尼; $[K]$ 为耦合界面刚度。当子结构数目增多时, 响应变量均变为矩阵或向量。求解式(1)可得:

$$[H_K] = \frac{\{X_k\}}{\{F_k\}} = (-\omega_k^2[M_k] + j\omega_k[C_k] + [K_k])^{-1} \quad (2)$$

式中: $\omega_k = 2\pi f_k$, 为激励频率。

由此,即可以得出图 1 中子系统 k 的激励与位移响应间的 FRF 关系:

$$\begin{Bmatrix} \ddot{X}_{o(k)} \\ \ddot{X}_{c(k)} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{K,o(k)i(k)} & H_{K,o(k)c(k)} \\ H_{K,c(k)i(k)} & H_{K,c(k)c(k)} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} F_{i(k)} \\ F_{c(k)} \end{Bmatrix} \quad (3)$$

采用上述基本理论,建立针对图 2 所示模型的二级多点逆子结构理论模型。

根据式(3),可以写出子结构 A 与子结构 B 所构成的整个系统的 FRF:

$$\begin{Bmatrix} X_{S,o(a)} \\ X_{S,c(x)} \\ X_{S,o(b)} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{S,o(a)i(a)} & H_{S,o(a)c(x)} & H_{S,o(a)i(b)} \\ H_{S,c(x)i(a)} & H_{S,c(x)c(x)} & H_{S,c(x)i(b)} \\ H_{S,o(b)i(a)} & H_{S,o(b)c(x)} & H_{S,o(b)i(b)} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} F_{S,i(a)} \\ F_{S,c(x)} \\ F_{S,i(b)} \end{Bmatrix} \quad (4)$$

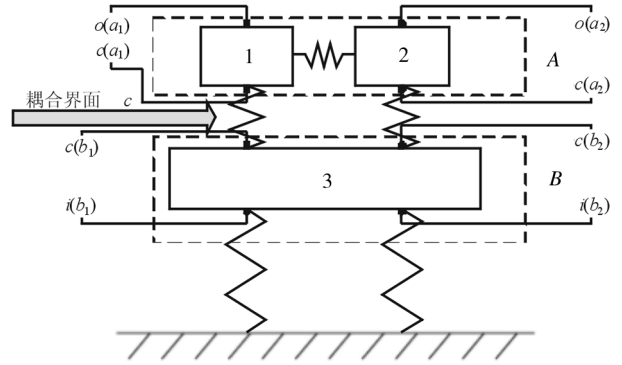


图 2 多点耦合二级逆子结构系统

Fig. 2 Multipoint coupled two-substructure system

式中: $x = a, b$; $\{X_S\}$ 构成了子结构 A 与子结构 B 的位移响应向量; $\{F_S\}$ 构成了子结构 A 与子结构 B 的激励向量; $[H_S]$ 为系统水平的 FRF 矩阵。当 x 取值为 a 或 b 时,即代表子结构 A 或 B 的相应耦合点。

事实上,根据线性系统理论,系统 S 中各部件的系统激励可以分为外部激励和内部耦合反力两部分^[11]。基于这一点,应用逆子结构理论,可以得出:

$$\begin{bmatrix} H_{S,o(a)i(a)} & H_{S,o(a)c(x)} & H_{S,o(a)i(b)} \\ H_{S,c(x)i(a)} & H_{S,c(x)c(x)} & H_{S,c(x)i(b)} \\ H_{S,o(b)i(a)} & H_{S,o(b)c(x)} & H_{S,o(b)i(b)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{A,o(a)i(a)} & H_{A,o(a)c(x)} & O \\ H_{X,c(x)i(a)} & H_{X,c(x)c(x)} & H_{X,c(x)i(b)} \\ O & H_{B,o(b)c(x)} & H_{B,o(b)i(b)} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \alpha H_{A,o(a)c_1(a)} \\ H_{X,c_1(x)c_1(x)} \\ \beta H_{B,o(b)c_1(b)} \end{bmatrix} \cdot [D_{AB}] \begin{bmatrix} \alpha H_{A,c(a)i(a)} & H_{X,c(x)c(x)} & \beta H_{B,c(b)i(b)} \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中, O 为相应阶数的零矩阵,且:

$$\alpha = \begin{cases} +1 & x = a, X \text{ 代表 } A \\ -1 & x = b, X \text{ 代表 } B \end{cases} \quad (6)$$

$$\beta = \begin{cases} -1 & x = a, X \text{ 代表 } A \\ +1 & x = b, X \text{ 代表 } B \end{cases} \quad (7)$$

$$[D_{AB}] = (H_{A,c(a)c(a)} + H_{B,c(b)c(b)} + K_{AB}^{-1})^{-1} \quad (8)$$

$$K_{AB} = (H_{S,c(a)c(a)} H_{S,c(a)c(b)}^T H_{S,c(b)c(b)} - H_{S,c(a)c(b)})^{-1} \quad (9)$$

以上即用部件水平 FRF 表示的系统水平 FRF,以及子结构耦合界面动刚度。继续应用动态逆子结构理论^[11],可以进一步得到采用系统水平 FRF 得到的子结构 A 与子结构 B 的部件水平 FRF,以及动刚度 K_{AB} 矩阵。需指出,式(9)中的各个 FRF 均为矩阵,以 $H_{S,c(a)c(a)}$ 为例:

$$\mathbf{H}_{S,c(a)c(a)} = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_{S,c(a_1)c(a_1)} & \mathbf{H}_{S,c(a_1)c(a_2)} \\ \mathbf{H}_{S,c(a_2)c(a_1)} & \mathbf{H}_{S,c(a_2)c(a_2)} \end{bmatrix} \quad (10)$$

应用逆子结构理论可以进一步解出:

$$\mathbf{H}_{A,c(a)c(a)} = \mathbf{H}_{S,c(a)c(a)} (\mathbf{H}_{S,c(b)c(b)} - \mathbf{H}_{S,c(a)c(b)})^{-1} \cdot (\mathbf{H}_{S,c(a)c(a)} \mathbf{H}_{S,c(b)c(a)}^{-1} \mathbf{H}_{S,c(b)c(b)} - \mathbf{H}_{S,c(a)c(b)}) \quad (11)$$

$$\mathbf{H}_{B,c(b)c(b)} = (\mathbf{H}_{S,c(a)c(a)} \mathbf{H}_{S,c(b)c(a)}^{-1} \mathbf{H}_{S,c(b)c(b)} - \mathbf{H}_{S,c(a)c(b)}) (\mathbf{H}_{S,c(a)c(a)} - \mathbf{H}_{S,c(a)c(b)})^{-1} \mathbf{H}_{S,c(a)c(b)} \quad (12)$$

$$\mathbf{H}_{A,o(a)c(a)} = \mathbf{H}_{S,o(a)c(a)} \{ \mathbf{I} - [\mathbf{I} + \mathbf{Q}_1^{-1} \mathbf{Q}_b \mathbf{Q}_1 (\mathbf{Q}_a + \mathbf{I})]^{-1} \} \quad (13)$$

$$\mathbf{H}_{B,c(b)i(b)} = [\mathbf{I} + (\mathbf{Q}_1 \mathbf{Q}_a \mathbf{Q}_1^{-1} + \mathbf{I}) \mathbf{Q}_b] \mathbf{H}_{S,c(a)i(b)} \quad (14)$$

其中:

$$\mathbf{Q}_1 = \mathbf{H}_{S,c(a)c(a)} \mathbf{H}_{S,c(b)c(a)}^{-1} \mathbf{H}_{S,c(b)c(b)} - \mathbf{H}_{S,c(a)c(b)} \quad (15)$$

$$\mathbf{Q}_a = (\mathbf{H}_{S,c(a)c(a)} - \mathbf{H}_{S,c(a)c(b)})^{-1} \mathbf{H}_{S,c(a)c(b)} \quad (16)$$

$$\mathbf{Q}_b = (\mathbf{H}_{S,c(b)c(b)} - \mathbf{H}_{S,c(a)c(b)}) \mathbf{H}_{S,c(a)c(b)}^{-1} \quad (17)$$

2 试验验证

2.1 试验模型

试验模型由江南大学机械加工中心加工制造,各部件可拆卸,以便测量各个部件水平 FRF 以及系统水平 FRF,组装后的模型见图 3。

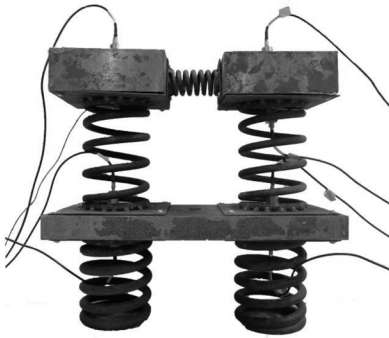


图 3 试验模型

Fig. 3 The physical model for experiment

2.2 仪器与方法

试验仪器:DLF-4 型四合一电荷电压滤波积分放大器,北京东方振动和噪声技术研究所(东方所);306DF 型智能信号采集处理分析仪,东方所;DASP2003 专业版采集分析软件,东方所;MSC-3 (ICP/LEMO)力锤,配 YD305 石英电荷传感器,东方所;INV9812 型电荷加速度传感器,东方所。

试验过程采用力锤单点激励、加速度传感器多点拾震的测量方法,加速度传感器用 502 胶水固定在相应位置。子结构 A 在测量时使用自由支撑,子结构 C 在测量时使用原装支撑,整个系统测量时亦使用原装支撑。

试验需首先测量出各个部件的系统水平传递函数,利用式(9)–(15)计算出子结构 A 与 B 的部件水平的传递函数,然后再与实际试验得到的子结构 A 与 B 的部件水平传递函数进行比较。

3 试验结果与分析

试验测量得到的部分系统水平 FRF 与部件水平 FRF 见图 4。

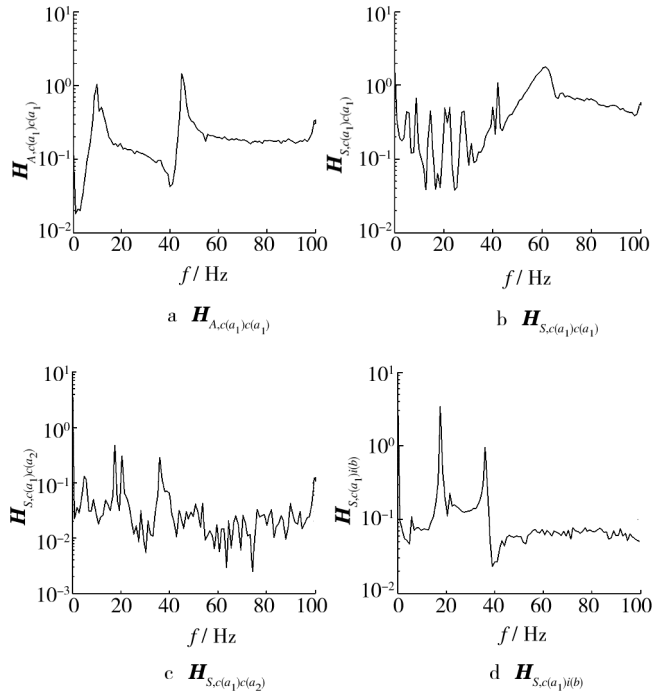


图 4 试验所得部分 FRF

Fig. 4 Some FRF obtained from the practice experiment

应用式(11)–(15)可计算得到子结构 A 和 B 的部件水平 FRF,并与图 4 中的实验值对比,见图 5。

需指出,图 4 与 5 中, $c(x)$ 表示子结构 A 或子结构 B 的耦合界面; $i(x)$ 表示输入; $o(x)$ 表示输出;下标 1 或 2 表示图 2 中的弹簧耦合连接点(左为 1,右为 2)。

预测值与理论值十分吻合,验证了所建立的二级多点动态逆子结构理论的正确性。

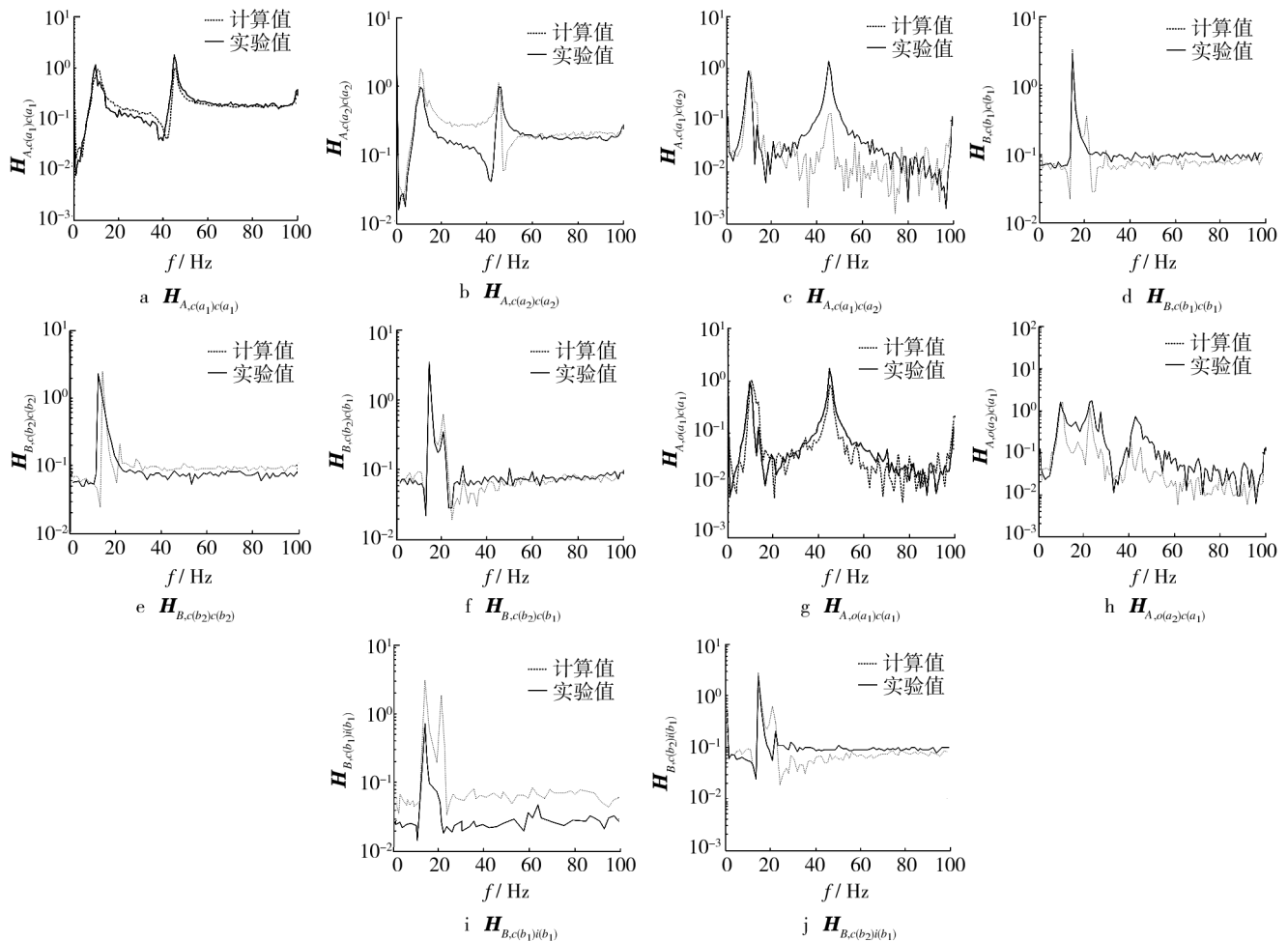


图5 实验值与理论计算值的对比

Fig. 5 Comparison between the experimental value and the calculated value

4 结语

针对运输包装系统建立了二级多点动态逆子结构理论,得到了用系统水平 FRF 来预测部件水平 FRF 的方法,实验验证了理论的正确性,研究结果为运输包装的动态力学分析提供了新的思路。

参考文献:

- [1] MINDLIN R D. Dynamics of Package Cushioning[M]. Bell Telephone Laboratories, 1945.
- [2] NEWTON R. Fragility Assessment Theory and Practice[M]. California: Monterey Research Laboratory, Inc, Monterey, 1968.
- [3] 宋宝丰. 关于振动脆值定义及应用的探讨[J]. 包装工程, 1996, 17(2): 1-5.

SONG Bao-feng. Some Discussion about the Definition and Application of Vibration Fragility[J]. Packaging Engineering, 1996, 17(2): 1-5.

- [4] 宋宝丰. 根据冲击响应谱(SRS)确定产品冲击脆值新概念[J]. 包装工程, 2004, 25(1): 16-17.

SONG Bao-feng. The New Concept of Determining Product Shock Fragility Based on Shock Response Spectra (SRS) [J]. Packaging Engineering, 2004, 25(1): 16-17.

- [5] 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, 11(4): 57-65.

WANG Zhen-lin, WU Chang-fu, XI De-chang. The Displacement Damage Boundary of Product Packaging System[J]. Journal of Vibration Engineering, 1998, 11(4): 57-65.

- [6] 洪翔, 卢立新. 后峰锯齿脉冲激励下双曲正切包装系统的非线性动力学特性研究[J]. 包装工程, 2012, 33(11): 60-62.

(下转第 54 页)

- 社,2002.
- MENG Yan-jing. Variable Frequency Drive Principle and Design[M]. Xi'an: Shaanxi People's Press, 2002.
- [2] 周志文, 薛华. 变频调速器在张力控制系统中的应用[J]. 真空, 2003(1): 33-35.
- ZHOU Zhi-wen, XUE Hua. VVVF Tension Control System [J]. Vacuum, 2003(1): 33-35.
- [3] 陈宝江, 李磊, 米佳, 等. 一种包装机械手充填重量的单片机检测系统[J]. 包装工程, 2007, 28(6): 7-9.
- CHEN Bao-jiang, LI Lei, MI Jia, et al. A MCU Weight Measuring System for a Kind of Packaging Manipulator[J]. Packaging Engineering, 2007, 28(6): 7-9.
- [4] 欧长劲, 吴海列, 卢康. 模糊神经网络张力控制系统[J]. 轻工机械, 2006, 24(4): 102-105.
- OU Chang-jin, WU Hai-lie, LU Kang. Fuzzy Neural Network Tension Control System [J]. Light Industry Machinery, 2006, 24(4): 102-105.
- [5] 李辉, 郝艳芬. Excel 2003 VBA 办公应用[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2006.
- LI Hui, HAO Yan-fen. Excel 2003 VBA Office Applications [M]. Beijing: People's Posts and Telecommunications Press, 2006.
- [6] 王磊, 冯茜, 王占林. 电线加塑过程中恒张力控制的新系统[J]. 轻工机械, 2008, 26(3): 64-66.
- WANG Lei, FENG Qian, WANG Zhan-lin. Wire and Plastic Process with Constant Tension Control of the New System [J]. Light Industry Machinery, 2008, 26(3): 64-66.
- [7] 罗刚君. EXCEL VBA 程序开发自学宝典[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009.
- LUO Gang-jun. EXCEL VBA Program Development Self-study Bible[M]. Beijing: Electronics Industry Press, 2009.
- (上接第 4 页)
- HONG Xiang, LU Li-xin. Nonlinear Dynamic Characteristics Research of Hyperbolic Tangent Packaging System under the Action of Final Peak Saw Tooth Shock Pulse[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(11): 60-62.
- [7] 洪翔, 卢立新, 王军. 矩形脉冲激励下双曲正切包装系统非线性动力学特性研究[J]. 包装工程, 2011, 32(17): 1-3.
- HONG Xiang, LU Li-xin, WANG Jun. Nonlinear Dynamic Characteristics Research of Hyperbolic Tangent Packaging System under the Action of Rectangular Acceleration Pulse [J]. Packaging Engineering, 2011, 32(17): 1-3.
- [8] 王军, 卢立新, 王志伟. 三次非线性多层堆码包装系统关键部件三维组合冲击谱研究[J]. 振动与冲击, 2011, 30(1): 188-190.
- WANG Jun, LU Li-xin, WANG Zhi-wei. 3-D Combined Shock Response Spectrum of a Cubic Nonlinear Stacked Packaging System with Critical Components [J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(1): 188-190.
- [9] 王军, 卢立新, 王志伟. 双曲正切包装系统关键部件三维冲击谱研究[J]. 振动与冲击, 2010, 29(10): 99-101.
- WANG Jun, LU Li-xin, WANG Zhi-wei. Three-dimensional Shock Spectrum of a Hyperbolic Tangent Nonlinear Packaging System with Critical Component [J]. Journal of Vibration and Shock, 2010, 29(10): 99-101.
- [10] 王军, 王志伟. 半正弦脉冲激励下考虑易损件的正切型包装系统冲击特性研究[J]. 振动与冲击, 2008, 27(1): 167-168.
- WANG Jun, WANG Zhi-wei. 3-Dimensional Shock Response Spectra Characterizing Shock Response of A Tangent Packaging System with Critical Components [J]. Journal of Vibration and Shock, 2008, 27(1): 167-168.
- [11] ZHEN J, LIM T C, LU G. Determination of System Vibratory Response Characteristics Applying a Spectral-based Inverse Sub-structuring Approach. Part I: Analytical Formulation [J]. International journal of Vehicle Noise and Vibration, 2004, 1(1): 1-30.
- [12] ZHEN J, LIM T C, LU G. Determination of System Vibratory Response Characteristics Applying a Spectral-based Inverse Sub-structuring Approach. Part II: Motor Vehicle Structures [J]. International Journal of Vehicle Noise and Vibration, 2004, 1(1): 31-67.
- [13] WANG Zhi-wei, WANG Jun. Inverse Substructure Method of Three-substructures Coupled System and Its Application in Product-transport-system [J]. Journal of Vibration and Control, 2011, 17(6): 943-951.
- [14] WANG Zhi-wei, WANG Jun, ZHANG Y B, et al. Application of the Inverse Substructure Method in the Investigation of Dynamic Characteristics of Product Transport System [J]. Packaging Technology and Science, 2012. (In Press)
- [15] 王军. 产品破损评价及其防护包装动力学理论研究 [D]. 无锡: 江南大学, 2009.
- WANG Jun. Theoretical Study on Product Damage Evaluation and Protective Packaging Dynamics [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2009.