

# 复杂包装耦合界面动态性预测的改进逆子结构理论

王 军<sup>1,3</sup>, 卢立新<sup>1,3</sup>, 王志伟<sup>2</sup>, 陈安军<sup>1,3</sup>, 唐亚丽<sup>1,3</sup>

(1. 江南大学 包装工程系, 江苏 无锡 214122; 2. 暨南大学 包装工程研究所, 广东 珠海 519070;  
3. 中国包装总公司 食品包装技术与安全重点实验室, 江苏 无锡 214122)

**摘要:** 以产品、包装、运载体组成的产品运输系统为研究对象, 在动态逆子结构理论基础上建立适合这一系统特性的改进理论, 研究包装界面动力学特性的反向建模技术并实验验证。结果表明: 新方法能有效预测复杂包装耦合界面动力学特性。研究结论为产品运输包装设计提供新的理论基础。

**关键词:** 产品运输系统; 包装界面; 逆子结构; 模型

中图分类号: TB485.1

文献标志码: A

文章编号: 1674-7100(2011)01-0015-04

## Modeling the Complex Packaging Interface by Improved Inverse Substructuring Method

Wang Jun<sup>1,3</sup>, Lu Lixin<sup>1,3</sup>, Wang Zhiwei<sup>2</sup>, Chen Anjun<sup>1,3</sup>, Tang Yali<sup>1,3</sup>

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

2. Packaging Engineering Institute, Jinan University, Zhuhai Guangdong 519070, China;

3. Key Laboratory of Food Packaging Techniques & Safety of China National Packaging Corporation, Wuxi Jiangsu 214122, China)

**Abstract:** The dynamics of product-transport-system was investigated. An improved inverse substructuring method was proposed to model the complex interaction between product and vehicle, the method was verified experimentally. The results indicated a new method for packaging interface modeling.

**Key words:** product-transport-system; packaging interface; inverse substructuring method; model

## 0 引言

产品物流破损现象十分严重, 我国每年因物流包装不善等原因造成的经济损失达千亿元, 物流包装防护技术与防护水平已成为影响我国经济发展的重要因素之一。包装防护结构设计的理论基础是研究包装系统的动力学特性, 其中, 核心工作之一是建立包装材料与结构本身的力学模型<sup>[1-6]</sup>。现有的模型多是针对内包装衬垫研究的, 缺少对整体包装耦合单元的力学特性分析。实际上, 产品、包装、运载体(车辆、轮船、

飞机等)一起构成产品运输系统, 完整的包装单元应包括缓冲衬垫、外包装箱、托盘及用于固定产品与运载体相连接的绳索、捆绑带、捆绑器等。在运输过程中, 外界激励通过运载体(车辆、飞机、轮船等)传递至产品, 当产品的动力学响应超过最大承受极限时即会导致产品破损。包装设计的目的是通过设计合适的包装单元来有效削弱产品的动力学响应, 从而保护产品免受破坏。

目前, 关于包装单元整体动力学特性的在线建模技术与理论研究十分欠缺, 相关报道还较少<sup>[7-9]</sup>。本文

收稿日期: 2010-11-10

基金项目: 江南大学创新团队基金资助项目(PIRTJIANGNAN 2010001)

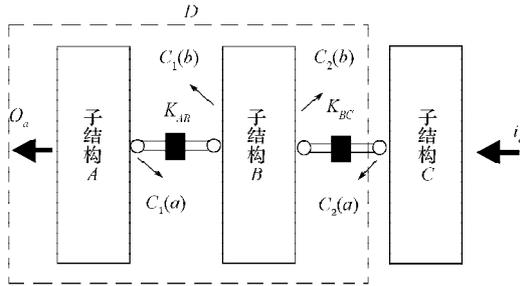
作者简介: 王 军(1982-), 男, 安徽巢湖人, 江南大学副教授, 博士, 主要研究方向为包装动力学, 食品包装安全,

E-mail: packie@126.com

以产品运输系统为研究对象，进行动力学反问题分析，建立基于频率响应函数（frequency response function, FRF）的包装耦合单元动态特性在线识别方法，以期为缓冲包装精确化设计提供理论指导。

### 1 包装单元动态耦合特性预测

对于任一复杂系统，将其分解为图1所示的3级子系统（A, B, C分别表示关键部件、产品、运载体）。



注： $i_c$ 表示激励， $o_a$ 表示输出， $c_1(x), c_2(x)$ 分别表示A, B和B, C耦合界面耦合点， $K_{AB}$ 表示关键部件与产品连接刚度， $K_{BC}$ 表示包装耦合单元等效刚度。

图1 三级耦合系统示意图

Fig. 1 One-coordinate coupled three-substructure system

对每个子系统（见图2，图中 $i(x)$ 表示激励， $o(x)$ 表示响应， $H_x$ 表示传递函数， $c(x)$ 表示耦合点拾振）而言，根据传递路径分析理论可得到其激励与响应间的FRF关系为：

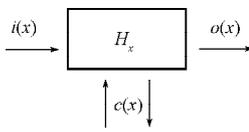


图2 子结构系统示意图

Fig. 2 A general substructure representation

$$\begin{pmatrix} X_{o(x)} \\ X_{c(x)} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} H_{x,o(x)i(x)} & H_{x,o(x)c(x)} \\ H_{x,c(x)i(x)} & H_{x,c(x)c(x)} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} F_{i(x)} \\ F_{c(x)} \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中： $X$ 为系统输出；

$H$ 为频率响应函数；

$F$ 表示激励。

为导出3级系统的FRF关系，首先将子结构A和B看作1个子结构D。对子结构D而言，系统的FRF可由子结构A和B的FRF表示如下：

$$\begin{bmatrix} H_{D,o(a)i(a)} & H_{D,o(a)c_1(x)} & H_{D,o(a)i(b)} \\ H_{D,c_1(x)i(a)} & H_{D,c_1(x)c_1(x)} & H_{D,c_1(x)i(b)} \\ H_{D,o(b)i(a)} & H_{D,o(b)c_1(x)} & H_{D,o(b)i(b)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{A,o(a)i(a)} & H_{A,o(a)c_1(x)} & 0 \\ H_{X,c_1(x)i(a)} & H_{X,c_1(x)c_1(x)} & H_{X,c_1(x)i(b)} \\ 0 & H_{B,o(b)c_1(x)} & H_{B,o(b)i(b)} \end{bmatrix}^{-1}$$

$$\begin{bmatrix} \alpha H_{A,o(a)c_1(a)} \\ H_{X,c_1(x)c_1(x)} \\ \beta H_{B,o(b)c_1(b)} \end{bmatrix} [D_{AB}] \cdot \begin{bmatrix} \alpha H_{A,c_1(a)i(a)} & H_{X,c_1(x)c_1(x)} & \beta H_{B,c_1(b)i(b)} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中： $D_{AB} = (H_{A,c_1(a)c_1(a)} + H_{B,c_1(b)c_1(b)} + K_{AB}^{-1})^{-1}$ ；

$$\alpha = \begin{cases} 1 & (x = a, X = A), \\ -1 & (x = b, X = B); \end{cases}$$

$$\beta = \begin{cases} 1 & (x = b, X = B), \\ -1 & (x = a, X = A). \end{cases}$$

再将子结构D和子结构C耦合，导出系统FRF与子结构D的FRF和子结构C的FRF的关系：

$$\begin{bmatrix} H_{S,o(d)i(d)} & H_{S,o(d)c_2(x)} & H_{S,o(d)i(e)} \\ H_{S,c_2(x)i(d)} & H_{S,c_2(x)c_2(x)} & H_{S,c_2(x)i(e)} \\ H_{S,o(e)i(d)} & H_{S,o(e)c_2(x)} & H_{S,o(e)i(e)} \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} H_{D,o(d)i(d)} & H_{D,o(d)c_2(x)} & 0 \\ H_{X,c_2(x)i(d)} & H_{X,c_2(x)c_2(x)} & H_{X,c_2(x)i(e)} \\ 0 & H_{C,o(e)c_2(x)} & H_{C,o(e)i(e)} \end{bmatrix}^{-1}$$

$$\begin{bmatrix} \alpha H_{D,o(d)c_2(d)} \\ H_{X,c_2(x)c_2(x)} \\ \beta H_{D,o(e)c_2(e)} \end{bmatrix} [D_{DC}] \cdot \begin{bmatrix} \alpha H_{D,c_2(d)i(d)} & H_{X,c_2(x)c_2(x)} & \beta H_{C,c_2(e)i(e)} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中： $D_{DC} = (H_{D,c_2(d)c_2(d)} + H_{C,c_2(e)c_2(e)} + K_{BC}^{-1})^{-1}$ ；

$$\alpha = \begin{cases} 1 & (x = d, X = D), \\ -1 & (x = e, X = C); \end{cases}$$

$$\beta = \begin{cases} 1 & (x = e, X = C), \\ -1 & (x = d, X = D). \end{cases}$$

将式(2)代入式(3)，可导出系统水平的FRF与3个子结构FRF的关系，这里给出对产品运输系统而言最为关键的从子结构C激励到子结构A响应的系统水平FRF，如式(4)所示：

$$H_{S,o(a)i(c)} = H_{A,o(a)c_1(a)} \left( H_{A,c_1(a)c_1(a)} + H_{B,c_1(b)c_1(b)} + K_{AB}^{-1} \right)^{-1} \cdot H_{B,c_1(b)c_2(b)} \left[ H_{B,c_2(b)c_2(b)} - H_{B,c_2(b)c_1(b)} \left( H_{A,c_1(a)c_1(a)} + H_{B,c_1(b)c_1(b)} + K_{AB}^{-1} \right)^{-1} H_{B,c_1(b)c_2(b)} + H_{C,c_2(e)c_2(e)} + K_{BC}^{-1} \right]^{-1} H_{C,c_2(e)i(c)} \quad (4)$$

由式(4)可知，系统水平FRF可完全由各子结构的FRF及子结构连接部的动刚度确定，这一结论为3级系统动力学分析提供了新的理论依据。

应用动态逆子结构理论<sup>[7]</sup>,可直接得到

$$K_{AB} = \frac{H_{S,c_1(a)c_1(b)}}{H_{S,c_1(a)c_1(a)}H_{S,c_1(b)c_1(b)} - H_{S,c_1(a)c_1(b)}^2}, \quad (5)$$

$$K_{BC} = \frac{H_{S,c_2(b)c_2(c)}}{H_{S,c_2(b)c_2(b)}H_{S,c_2(c)c_2(c)} - H_{S,c_2(b)c_2(c)}^2}. \quad (6)$$

式(6)给出了一种预测包装耦合界面动刚度特性的方法。这种方法需要测量3个系统的水平FRF,即 $H_{S,c_2(b)c_2(b)}$ , $H_{S,c_2(b)c_2(c)}$ , $H_{S,c_2(c)c_2(c)}$ ,当这些FRF在实践中便于测量且具有足够精度时,用式(6)进行包装耦合界面动刚度预测是准确的。然而实际上,产品与运载体的连接极其复杂,通常是面连接,耦合点难以选择,即使以耦合界面的某点等效替代,也难以进行激振或拾振,因此式(6)在实际包装应用中存在着局限性。从工程应用的角度考虑,需要一种更便于测量的预测包装耦合界面动刚度的方法。

对式(4)进行简单的矩阵运算<sup>[9]</sup>,可得:

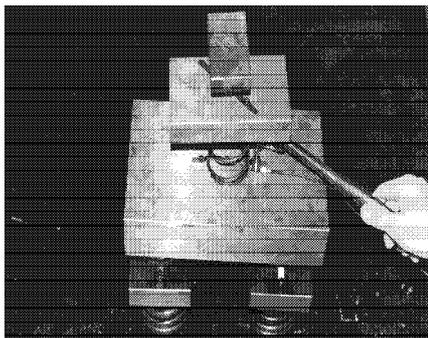
$$K_{BC} = \left[ H_{C,c_2(c)c_2(c)} H_{S,o(a)c_1(c)}^{-1} H_{A,o(a)c_1(a)} \left( H_{A,c_1(a)c_1(a)} + H_{B,c_1(b)c_1(b)} + K_{AB}^{-1} \right)^{-1} H_{B,c_1(b)c_2(b)} - H_{B,c_2(b)c_2(b)} + H_{B,c_2(b)c_1(b)} \left( H_{A,c_1(a)c_1(a)} + H_{B,c_1(b)c_1(b)} + K_{AB}^{-1} \right)^{-1} \cdot H_{B,c_1(b)c_2(b)} - H_{C,c_2(c)c_2(c)} \right]^{-1}. \quad (7)$$

式(7)给出了另一种测量包装耦合界面动刚度的方法,这一方法回避了在包装耦合界面激振或拾振困难的问题,通过测量7个部件水平FRF和1个系统水平FRF来预测包装耦合界面动刚度。对于包装系统而言,关键部件、产品主体以及运载体的FRF往往容易获取,因此,应用式(7)预测包装耦合界面的动刚度更便于实际操作。

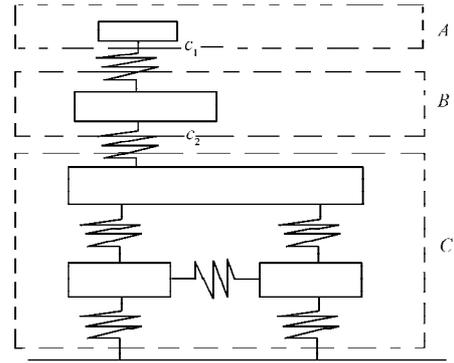
## 2 实验验证

### 2.1 实验模型

实验模型委托珠海中毅弹簧厂加工,系统模型如图3所示,各弹簧均可拆卸,便于测量各系统水平FRF和各部件水平FRF。



a) 实验模型



b) 模型结构

图3 实验模型图

Fig. 3 Prototype of experimental model

### 2.2 实验仪器与方法

实验仪器主要包括:DLF系列四合一放大器INV306U-5型智能信号采集处理分析仪,DASP标准版分析软件系统,均系北京东方振动和噪声技术研究所开发;LC-01系列冲击锤(配CL-YD-303力传感器,灵敏度为3.64 pC/N,最大冲击力为2 kN),江苏联能电子技术生产;CA-YD-103压电式加速度传感器(灵敏度为17.4 pC/g,频率范围0.5~10 kHz),江苏联能电子技术生产。

实验采用单输入单输出方法(力锤单点激励、加速度传感器单点拾振),加速度传感器用502胶水黏接。实验时,测量系统和C部件FRF采用原装支撑,测量A,B部件FRF采用自由支撑。测试系统连接见图4。

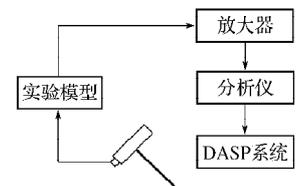


图4 测试系统图

Fig. 4 Sketch map of testing system

验证的思路见图5,首先测量需要的系统水平频率响应函数,再由系统水平频率响应函数通过逆子结构理论预测部件水平频率响应函数(耦合界面动刚度),最后将实验测量的部件水平频率响应函数与预测的部件水平频率响应函数进行比较。

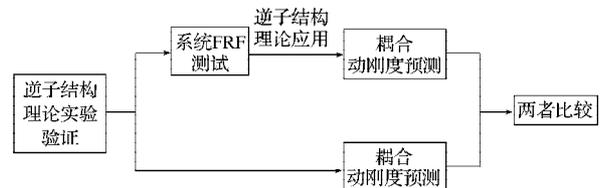
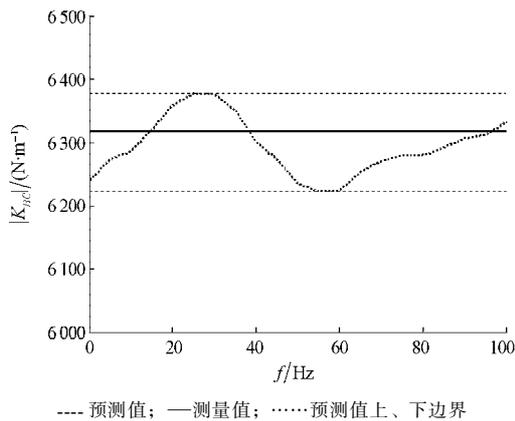


图5 实验验证方法示意图

Fig. 5 Sketch map of experimental validation

### 2.3 实验结果与分析

实验预测结果如图6所示。结果表明:预测值与测量值吻合性较好,所建立的方法能有效预测包装单元动刚度。



---- 预测值; — 测量值; ..... 预测值上、下边界

**图 6 包装单元耦合刚度在线预测**

**Fig. 6 Comparison of predicted and measured coupling stiffness for packaging interface**

### 3 结语

建立了产品运输系统动态逆子结构理论, 并实验验证了理论的正确性, 结论表明 3 级逆子结构理论能准确识别包装耦合界面动刚度, 从而为产品运输系统动力学分析提供了一套新的技术理论。

#### 参考文献:

- [1] 高德, 奚德昌, 王振林, 等. 瓦楞纸板的静态压缩非线性模型[J]. 包装工程, 1995, 16(4): 6-8.  
Gao De, Xi Dechang, Wang Zhenlin, et al. Static Compression Non-Linear Models of Corrugated Board/ Cushioning[J]. Packaging Engineering, 1995, 16(4): 6-8.
- [2] 高德, 奚德昌. 瓦楞纸板的动态压缩性能及模型[J]. 包装工程, 1995, 16(3): 5-10.  
Gao De, Xi Dechang. The Dynamic Compressive Property and the Model of Corrugated Fiberboard[J]. Packaging Engineering, 1995, 16(3): 5-10.

- [3] 高德. 瓦楞纸板缓冲性能理论及模型[D]. 杭州: 浙江大学, 1992.  
Gao De. Theoretical Study on Cushioning Performance and Model of Corrugated Fiberboard[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 1992.
- [4] Liang Y C, Wang Z, Yang X W, et al. Identification of Nonlinear Characteristics in Cushioning Packaging Using Neural Networks with Fuzzy Adaptive Control[J]. Mechanics Research Communications, 1997, 24(4): 447-455.
- [5] Liang Yanchun, Zhou Chunguang. Advances in Identification of Nonlinear Characteristics of Packaging Based on Computational Intelligence[J]. Mechanics Research Communications, 2000, 27 (1): 15-20.
- [6] 梁艳春, 王政, 杨晓伟, 等. 基于神经网络方法的包装件非线性特性识别的研究[J]. 力学学报, 1997, 29(4): 497-500.  
Liang Yanchun, Wang Zheng, Yang Xiaowei, et al. A Study of Identification of Nonlinear Characteristics in Cushioning Packaging Based on Neural Networks[J]. Acta Mechanica Sinica, 1997, 29(4): 497-500.
- [7] Zhen Jiantie, Lim Teik C, Lu Guangqing. 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(1/2): 1-30.
- [8] Wang Zhiwei, Wang Jun. Inverse Substructure Method of Three-Substructures Coupled System and Its Application in Product-Transport-System[EB/OL]. [2010-10-11]. <http://jvc.sagepub.com/content/early/2010/10/07/1077546310376083.abstract>.
- [9] Wang Jun, Lu Lixin, Wang Zhiwei. Modeling the Complex Interaction between Packaged Product and Vehicle[J]. Advanced Science Letters, 2010(accepted).

(责任编辑: 李玉珍)