

# 多级耦合系统界面动态特性预测的间接逆子结构理论

王军<sup>1,2,3</sup>, 卢立新<sup>1</sup>, 王志伟<sup>3</sup>, 陈安军<sup>1</sup>, 孙昊<sup>1</sup>

(1. 江南大学, 无锡 214122; 2. 教育部生态纺织重点实验室, 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:** 建立了多级复杂耦合系统动力学模型, 基于耦合系统传函特性, 建立了子系统耦合界面动态特性在线预测的间接逆子结构方法, 结合简单的四级包装系统模型进行了数值仿真和验证。结果表明: 所建立方法具有很好的完备性。研究结论为复杂系统动力学特性分析提供了一种新的技术方法。

**关键词:** 耦合系统; 界面; 连接参数; 频率响应函数

**中图分类号:** TB485.1; TB487 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2011)21-0001-03

## Indirect Inverse Substructure Method for Dynamic Characteristic Prediction of Multi-level Coupled System Interface

WANG Jun<sup>1,2,3</sup>, LU Li-xin<sup>1</sup>, WANG Zhi-wei<sup>3</sup>, CHEN An-jun<sup>1</sup>, SUB Hao<sup>1</sup>

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

**Abstract:** Multi-level coupled system dynamics models were established. An indirect inverse substructure method was developed for online prediction of dynamic characteristics of subsystem coupled interface based on transfer function characteristics of coupled system. Numerical simulation and verification was carried out combining with simple four levels packaging system model. The results showed that the method established has very good readiness. The purpose was to provide a new technical method for dynamics characteristics analysis of complex system.

**Key words:** coupled system; interface; joint parameter; FRF

准确获取包装系统中各处界面的动态特性参数是防护包装设计的基础和依据, 人们对此开展了广泛的研究, 在诸如包装界面非线性动态力学特征及其模型表征<sup>[1-2]</sup>、非线性特征参数的识别<sup>[3-5]</sup>等领域取得了丰硕的成果, 为运输包装的精确化设计提供了丰富的理论基础和技术支撑。然而, 随着集装化运输方式的兴起, 产品的运输防护对包装系统动力学特性的在线设计与分析提出了新的课题, 特别是对由产品、包装、车辆组成的复杂耦合系统各处界面特征的在线测试技术的研究十分迫切。为此, 王志伟等人率先将动

态逆子结构理论<sup>[6]</sup>这一动力学分析的新方法引入包装系统特性的在线分析, 建立了三级动态逆子结构理论并分析了产品运输系统动力学特性<sup>[7]</sup>。王军<sup>[8-9]</sup>等人以包装单元整体(内包装、外包装、托盘、捆绑等组成的整体)为建模对象, 基于传递路径分析理论提出了改进的动态逆子结构技术方法, 并成功在线识别了包装耦合界面的动态特性, 为包装系统在线优化设计提供了一定的理论基础和依据。笔者将在上述研究的基础上分析四级系统耦合界面的在线识别技术。

**收稿日期:** 2011-09-08

**基金项目:** 教育部生态纺织重点实验室开放基金(KLET1011); 中央高校基本科研业务费项目(JUSRP11009); 江苏省品牌特色专业建设项目(2011); 产品包装与物流广东普通高校重点实验室开放基金资助

**作者简介:** 王军(1982—), 男, 安徽人, 博士, 江南大学副教授, 主要从事包装动力学研究。

# 1 四级耦合系统及其界面力学行为

四级耦合系统见图 1, 系统由 4 个子系统 A, B, C, D 通过 3 处耦合界面耦合而成。

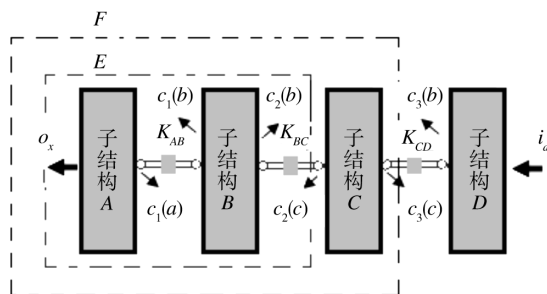


图 1 四级耦合系统

Fig. 1 Four levels coupled system

对任一子系统, 其传递特性可描述为:

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

对子系统 A 与子系统 B 组成的子系统 E, 根据传递路径分析理论, 可得到如下传递关系:

$$\begin{bmatrix} H_{E,o(a)i(a)} & H_{E,o(a)c_1(x)} & H_{E,o(a)i(b)} \\ H_{E,c_1(x)i(a)} & H_{E,c_1(x)c_1(x)} & H_{E,c_1(x)i(b)} \\ H_{E,o(b)i(a)} & H_{E,o(b)c_1(x)} & H_{E,o(b)i(b)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{A,o(a)i(a)} & H_{A,o(a)c_1(x)} & 0 \\ H_{X,c_1(x)i(a)} & H_{X,c_1(x)c_1(x)} & H_{X,c_1(x)i(b)} \\ 0 & H_{B,o(b)c_1(x)} & H_{B,o(b)i(b)} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \alpha H_{A,o(a)c_1(x)} \\ H_{X,c_1(x)c_1(x)} \\ \beta H_{B,o(b)c_1(x)} \end{bmatrix} [D_{AB}] \cdot \begin{bmatrix} \alpha H_{A,c_1(a)i(a)} \\ H_{X,c_1(x)c_1(x)} \\ \beta H_{B,c_1(b)i(b)} \end{bmatrix}^T \quad (2)$$

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

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

同理, 对 E 和 C 组成的子系统 F, 有:

$$\begin{bmatrix} H_{F,o(e)i(e)} & H_{F,o(e)c_2(x)} & H_{F,o(e)i(c)} \\ H_{F,c_2(x)i(e)} & H_{F,c_2(x)c_2(x)} & H_{F,c_2(x)i(c)} \\ H_{F,o(c)i(e)} & H_{F,o(c)c_2(x)} & H_{F,o(c)i(c)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{E,o(e)i(e)} & H_{E,o(e)c_2(x)} & 0 \\ H_{X,c_2(x)i(e)} & H_{X,c_2(x)c_2(x)} & H_{X,c_2(x)i(c)} \\ 0 & H_{C,o(c)c_2(x)} & H_{C,o(c)i(c)} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \alpha H_{E,o(e)c_2(x)} \\ H_{X,c_2(x)c_2(x)} \\ \beta H_{C,o(c)c_2(x)} \end{bmatrix} [D_{EC}] \cdot \begin{bmatrix} \alpha H_{E,c_2(e)i(e)} \\ H_{X,c_2(x)c_2(x)} \\ \beta H_{C,c_2(c)i(c)} \end{bmatrix}^T \quad (3)$$

$$\text{式中: } D_{EC} = (H_{E,c_2(e)c_2(x)} + H_{C,c_2(c)c_2(x)} + K_{EC}^{-1})^{-1}; \alpha = \begin{cases} 1 & (x=e, X=E) \\ -1 & (x=c, X=C) \end{cases}; \beta = \begin{cases} -1 & (x=e, X=E) \\ 1 & (x=c, X=C) \end{cases}.$$

最后将 F 与子结构 D 耦合, 得到:

$$\begin{bmatrix} H_{S,o(f)i(f)} & H_{S,o(f)c_3(x)} & H_{S,o(f)i(d)} \\ H_{S,c_3(x)i(f)} & H_{S,c_3(x)c_3(x)} & H_{S,c_3(x)i(d)} \\ H_{S,o(d)i(f)} & H_{S,o(d)c_3(x)} & H_{S,o(d)i(d)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{F,o(f)i(f)} & H_{F,o(f)c_3(x)} & 0 \\ H_{X,c_3(x)i(d)} & H_{X,c_3(x)c_3(x)} & H_{X,c_3(x)i(d)} \\ 0 & H_{D,o(d)c_3(x)} & H_{D,o(d)i(d)} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \alpha H_{F,o(f)c_3(x)} \\ H_{X,c_3(x)c_3(x)} \\ \beta H_{D,o(d)c_3(x)} \end{bmatrix} [D_{FD}] \cdot \begin{bmatrix} \alpha H_{F,c_3(f)i(f)} \\ H_{X,c_3(x)c_3(x)} \\ \beta H_{D,c_3(d)i(d)} \end{bmatrix}^T \quad (4)$$

式中:  $D_{FD} = (H_{F,c_3(f)c_3(x)} + H_{D,c_3(d)c_3(x)} + K_{FD}^{-1})^{-1}$ ;

$$\alpha = \begin{cases} 1 & (x=f, X=F) \\ -1 & (x=d, X=D) \end{cases}; \beta = \begin{cases} -1 & (x=f, X=F) \\ 1 & (x=d, X=D) \end{cases}.$$

将式(2)、(3)代入(4)得到从子系统 D 激励到 A 响应的系统水平传递函数:

$$H_{S,o(a)i(d)} = H_{A,o(a)c_1(a)} (H_{A,c_1(a)c_1(a)} + H_{B,c_1(b)c_1(b)} + K_{AB}^{-1})^{-1} H_{B,c_1(b)c_2(b)} (H_{B,c_2(b)c_2(b)} - H_{B,c_2(b)c_1(b)} \cdot (H_{A,c_1(a)c_1(a)} + H_{B,c_1(b)c_1(b)} + K_{AB}^{-1})^{-1} H_{B,c_1(b)c_2(b)} + H_{C,c_2(c)c_2(c)} + K_{BC}^{-1})^{-1} H_{C,c_2(c)c_3(c)} ((H_{C,c_3(c)c_3(c)} + H_{C,c_3(c)c_2(c)} (H_{B,c_2(b)c_2(b)} - H_{B,c_2(b)c_1(b)} (H_{A,c_1(a)c_1(a)} + H_{B,c_1(b)c_1(b)} + K_{AB}^{-1})^{-1} H_{B,c_1(b)c_2(b)} + H_{C,c_2(c)c_2(c)} + K_{BC}^{-1})^{-1}) H_{C,c_2(c)c_3(c)} + H_{D,c_3(d)c_3(d)} + K_{CD}^{-1})^{-1} H_{D,c_3(d)c_3(d)} \quad (5)$$

对(5)进行矩阵求逆运算, 得到:

$$K_{CD} = [H_{S,o(a)i(d)}^{-1} H_{D,c_3(d)i(d)} H_{A,o(a)c_1(a)} \cdot (H_{A,c_1(a)c_1(a)} + H_{B,c_1(b)c_1(b)} + K_{AB}^{-1})^{-1} H_{B,c_1(b)c_2(b)} \cdot [H_{B,c_2(b)c_2(b)} - H_{B,c_2(b)c_1(b)} (H_{A,c_1(a)c_1(a)} + H_{B,c_1(b)c_1(b)} + K_{AB}^{-1})^{-1} H_{B,c_1(b)c_2(b)} + H_{C,c_2(c)c_2(c)} + K_{BC}^{-1}]^{-1} H_{C,c_2(c)c_3(c)} - [H_{C,c_3(c)c_3(c)} + H_{C,c_3(c)c_2(c)} [H_{B,c_2(b)c_2(b)} - H_{B,c_2(b)c_1(b)} (H_{A,c_1(a)c_1(a)} + H_{B,c_1(b)c_1(b)} + K_{AB}^{-1})^{-1} \cdot H_{B,c_1(b)c_2(b)} + H_{C,c_2(c)c_2(c)} + K_{BC}^{-1}]^{-1} H_{C,c_2(c)c_3(c)}] - H_{D,c_3(d)c_3(d)}]^{-1} \quad (6)$$

式(6)右侧除了  $H_{S,o(a)i(d)}$  外全部为部件水平传递函数或部件间耦合连接动刚度。在实际工程应用中, 各部件水平频率响应函数(FRF)往往便于测量,  $H_{S,o(a)i(d)}$  为完整装配后的系统水平传函, 不受其他部件间耦合连接的制约和限制(比如由于子系统间面连接方式导致的难以激振和拾振问题等), 工程测量简便, 因此应用式(6)在线预测部件间耦合动刚度, 在复

杂耦合系统中有较好的工程应用前景。

## 2 数值验证

### 2.1 模型

采用集总参数模型验证上述理论,模型见图 2,模型参数见表 1。

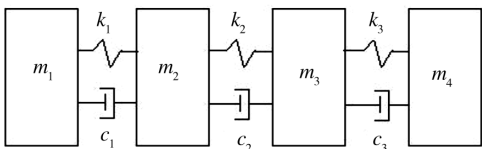


图 2 集总参数模型

Fig. 2 Lumped parameter model

表 1 集总参数模型参数

Tab. 1 Parameters of lumped parameter model

| 质量/kg |       |       |       | 弹簧系数<br>/(N · m <sup>-1</sup> ) |       |       | 阻尼系数<br>/(N · s · m <sup>-1</sup> ) |       |       |
|-------|-------|-------|-------|---------------------------------|-------|-------|-------------------------------------|-------|-------|
| $m_1$ | $m_2$ | $m_3$ | $m_4$ | $k_1$                           | $k_2$ | $k_3$ | $c_1$                               | $c_2$ | $c_3$ |
| 10    | 22    | 18    | 16    | 5 000                           | 4 000 | 6 000 | 5                                   | 5     | 10    |

### 2.2 结果

应用式(6)计算  $m_3, m_4$  间耦合连接的动刚度,并将结果与给定值对比,预测值与给定值完全吻合,见图 3,从而证明了所建立理论的正确性。其中,  $K_{34} =$

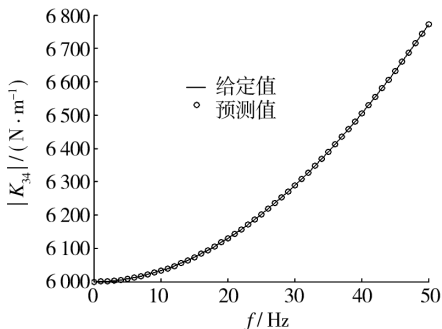


图 3 多级耦合系统耦合刚度预测理论校验

Fig. 3 Verification of coupled stiffness prediction theory of multi-level coupled system

$$k_3 + j(2\pi f c_3)。$$

## 3 结语

基于耦合系统 FRF 特性,将动态逆子结构理论拓展到四级耦合系统,并得到了预测耦合界面动态特性参数的新方法,研究结果对复杂耦合系统动态优化

设计具有一定的参考价值。

1) 动态逆子结构理论能用于包装耦合体在线动力学行为的预测,并且具有很好的低频精度。

2) 产品、包装、运载体组成的复杂系统所涉及的子系统的准确划分是其动力学行为分析的关键,与此相应的多级系统动态逆子结构理论的建立是核心问题,建立的四级系统动态逆子结构理论是对传统动态逆子结构理论的有益拓展。

3) 实际工程应用中的测试误差及其控制是制约动态逆子结构应用的主要因素,需要针对实际工程对象寻找便于测量的系统特性函数。

### 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.
- [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.
- [3] LIANG Yan-chun, WANG Zheng, YANG Xiao-wei, 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.
- [4] 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.
- [5] LIANG Yan-chun, ZHOU Chun-guang. Advances in Identification of Nonlinear Characteristics of Packaging Based on Computational Intelligence[J]. Mechanics Research Communications, 2000,27(1):15—20.
- [6] ZHEN Jian-tie, LIM Teik C, LU Guang-qing. Determination of Aystem 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.
- [7] WANG Zhi-wei, 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>.
- [8] WANG Jun, LU Li-xin, WANG Zhi-wei. Modeling the Complex Interaction between Packaged Product and Vehicle[J]. Advanced Science Letters, 2011(in print).
- [9] WANG Jun, LU Li-xin, WANG Zhi-wei. Improved Inverse Substructuring Method for Product-transport-system[J]. Applied Packaging Research, 2010(4):241—253.