

运输包装车辆装配系统直接与间接逆子结构动态分析方法实验验证

吕广庆, 庞冬梅, 周斌, 王雷

(暨南大学 包装工程研究所, 珠海 519070)

摘要: 针对“产品-包装-车辆”装配系统中的包装耦合体, 基于系统与部件水平的实测频率响应函数(FRF), 计算了装配耦合动刚度, 包括直接逆子结构法和间接逆子结构法。设计了一套实验模型并测量、计算和分析了其系统装配耦合动刚度, 实验验证了这 2 种方法在实际包装耦合体的设计及其缓冲防震性能分析上应用的有效性。

关键词: 车辆装配系统; 运输包装; 逆子结构; 实验验证

中图分类号: TB485.1; TB487 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2012)19-0022-03

Experimental Verification of Dynamic Analysis Method for Direct and Indirect Inverse Substructure of Assembly of Product-packaging-vehicle System

LYU Guang-qing, PANG Dong-mei, ZHOU Bin, WANG Lei

(Packaging Engineering Institute, Jinan University, Zhuhai 519070, China)

Abstract: Indirect and direct inverse sub-structure dynamic analysis were applied to calculate the coupling dynamic stiffness of a specific assembly of product-packaging-vehicle system on the basis of measured frequency response functions (FRFs) at system and component level respectively. A set of experimental model was designed and constructed, and a number of tests, computations and analysis were implemented to verify the effectiveness of engineering applications of the two methods for anti-shock design of a practical product-packaging-vehicle system.

Key words: vehicle assembly system; transportation packaging; inverse substructure; experimental verification

逆子结构动态分析方法是机械结构动力学领域的一项新的应用理论与技术方法^[1]。文献[2]首次将该方法应用于运输包装系统动态分析, 并提供了一套分析计算产品-包装耦合-运载体的分析计算公式^[3-4]及其离散化公式^[5]。为解决传统的直接逆子结构动态分析在实用中的困难, 还首次提出了“间接逆子结构动态分析方法”, 并给予了理论完备性校验^[6]。文献[7]针对逆子结构动态分析方法应用与运输包装系统动态设计进行了全面的分析和阐述。事实上, 该方法主要是根据运输包装系统中“产品-车辆”通过“包装”的“装配耦合”动态分析计算, 来确定包装耦合动刚度, 从而实现系统动态设计与优化。因而, 其相关研究成果对于复杂机械装配的动态质量检测也具有一定的指导意义。

收稿日期: 2012-06-30

基金项目: 珠海市科工贸与信息化局产学研项目(2011B 050102001)

作者简介: 吕广庆(1964—), 男, 河南罗山人, 美国 Alabama 大学和西安交通大学双博士, 暨南大学副教授, 主要研究方向为结构动力学、包装工程与工程声学。

笔者设计一套机械装配实验模型, 对文献[6]提出的间接逆子结构动态分析技术方法进行实验验证, 并与直接逆子结构动态分析方法进行比较, 以进一步核验这 2 种方法在实际运输包装车辆装配系统中的动态分析中应用的有效性与可行性, 从而为逆子结构动态分析方法的工程应用提供进一步的技术支持。

1 产品-包装装配耦合-车辆逆子结构动态分析

包装结构及其附加联结一起统称为包装耦合体, 在车辆运输系统中可视为“产品-车辆”之间的“装配耦合”, 并可简化为二级耦合的子结构模型, 见图 1a。在模型中, 包装耦合体的质量忽略不计, 其动态特性由具有动刚度 $K_s = k_s + i\omega c_s$ 的弹簧-阻尼元件表示。

各子结构非装配耦合状态下的频率响应函数称为部件水平 FRFs, 装配耦合状态下的频率响应函数称为系统水平 FRFs, 见图 1b。其中 a, b, c, o 和 i 分别代表 A 部件(子结构 A)、B 部件(子结构 B)、包装装配耦合体、A 部件输出响应和 B 部件输入激励。

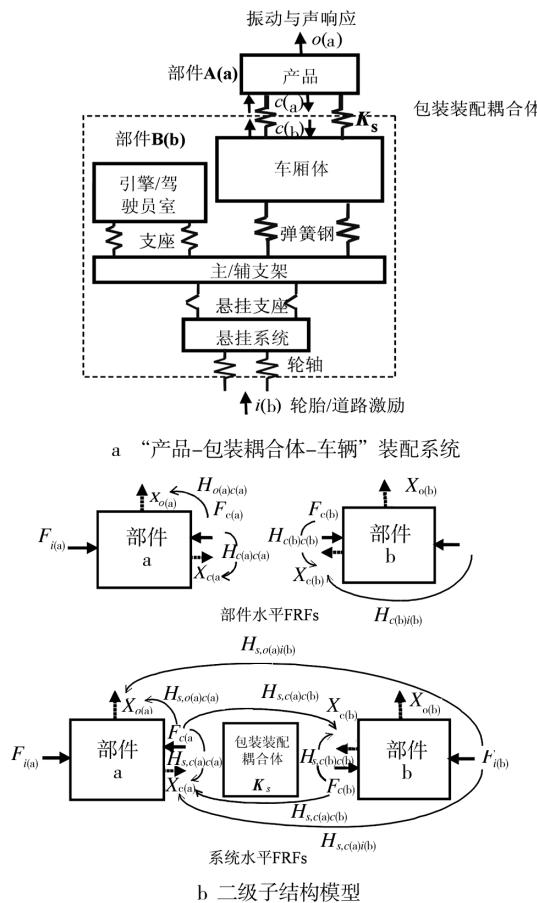


图 1 运输包装系统逆子结构动态分析模型

Fig. 1 Model of inverse substructure dynamic analysis
for transportation packaging system

对于图 1 中二级耦合子结构系统, 系统水平的 FRF($H_{s,o(a)i(b)}$)与部件水平的 FRF($H_{A,o(a)c(a)}$ 和 $H_{B,c(b)i(b)}$)具有如下关系^[2]:

$$H_{s,o(a)i(b)} = \{H_{A,o(a)c(a)}\}_{1 \times p} [C_{jj}]_{p \times p} \cdot$$

$$\{H_{B,c(b)i(b)}\}_{p \times 1} \quad (1)$$

$$C_{jj} = [H_{c(a)_j c(a)_j} + H_{c(b)_j c(b)_j} + K_{s,jj}^{-1}]^{-1} \quad (2)$$

式中:下标 s, p, j 分别为“系统水平”、“耦合点数”和每个耦合点的“自由度数”($j = 1-x$ 向、 $2-y$ 向、 $3-z$ 向); C_{jj} 具有包装耦合体综合动刚度的意义。产品与车辆之间的包装装配耦合动刚度 K_s 矩阵可由式(3)计算得到^[5]:

$$[K_s] = ([H_{s,c(a)c(a)}] [H_{s,c(a)c(b)}]^{-1} [H_{s,c(b)c(b)}] -$$

$$[H_{s,c(a)c(b)}])^{-1} \quad (3)$$

式(3)提供了直接由实际运输包装系统在包装装配耦合状态下的系统水平 FRFs($H_{s,c(a)c(a)}$, $H_{s,c(b)c(b)}$ 和 $H_{s,c(a)c(b)}$), 计算包装装配耦合动刚度的分析方法, 称其为“直接逆子结构动态分析方法”。

为避免上述直接逆子结构动态分析方法在实际测量系统水平 FRFs 中存在的困难, 文献[6]首次提出了“间接逆子结构动态分析方法”, 由式(4)计算包装装配耦合动刚度:

$$[K_s] = ([H_{B,c(b)i(b)}] [H_{s,o(a)i(b)}]^{-1} [H_{A,o(a)c(a)}] - [D]^{-1}) \quad (4)$$

$$[D] = [H_{A,c(a)c(a)}] + [H_{B,c(b)c(b)}] \quad (5)$$

显然, 计算 $[K_s]$ 所需的系统水平 FRF($H_{s,o(a)i(b)}$) 和部件水平 FRFs($H_{A,o(a)c(a)}$, $H_{B,c(b)i(b)}$, $H_{A,c(a)c(a)}$ 和 $H_{B,c(b)c(b)}$)都非常容易测得。

2 机械装配模型

式(3)和(4)分别表述的直接与间接逆子结构动态分析方法的理论完备性, 已在相应文献中进行了集总参数模型校验, 但尚缺乏实验验证。为了检验它们的实际应用有效性, 这里设计一套机械装配耦合模型, 分 A, B 两部分子结构, 见图 2。实物模型及其现场测试系统见图 3。

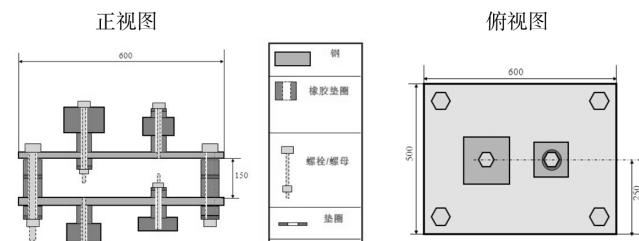


图 2 机械装配二级子结构模型

Fig. 2 Two-level substructure model of a mechanical assembly

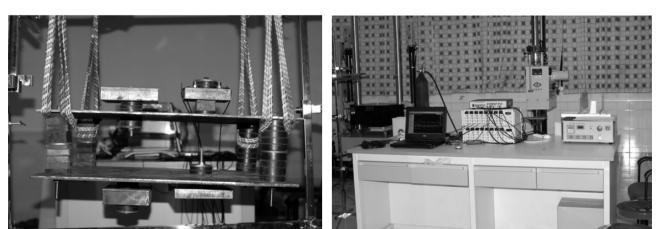


图 3 机械装配模型实物及现场测试系统

Fig. 3 Real model of the mechanical assembly and testing system

3 实验与计算结果

为了检验直接与间接逆子结构动态分析方法在辨识包装装配耦合动刚度这一关键动特性参数方面的有效性,基于在上述实验模型上测量得到的各FRFs数据,分别由式(3)和(4)计算出耦合动刚度矩阵的2个对角元素 K_{s11} 和 K_{s33} 的模值,并将它们与由 $K_s = k_s + i\omega c_s$ 计算的结果(给定值)进行比较,见图4。根据模型实测数据选择分析频率为0~200 Hz。

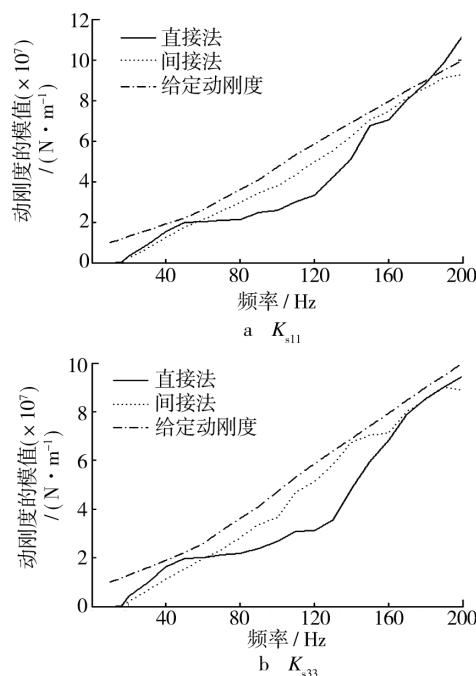


图4 直接与间接法计算的实测耦合动刚度与给定值的比较

Fig. 4 Measured dynamic stiffness calculated by direct and indirect schemes, compared with the given value

为计算上述结果的误差并予以定量比较,计算了2种方法之间及其与给定值之间的“相对误差”:

$$\text{相对误差} = \frac{1}{185} \cdot$$

$$\sum_{n=16}^{200} \frac{||\text{直接法或间接法 } K_s || - ||\text{给定 } K_s ||}{||\text{给定 } K_s ||} \times 100\% \quad (6)$$

为确保实验验证的准确性,上述实验进行了3次。3次实验得到的直接法的动刚度的模的“相对偏差”计算结果分别为16.317%, 25.165%, 19.692%;间接法计算的动刚度的模的“相对偏差”计算结果分别为6.318%, 11.297%, 6.825%。可见,用直接逆

子结构动态分析方法计算的动刚度模值的“相对误差”的平均值为20.4%;由间接逆子结构动态分析方法计算的“相对误差”均值为8.15%。这些误差量级在机械结构动态分析中是可接受的精度范围,且间接法的相对误差比直接法的相对误差小得多。因此,实验结果检验了直接法和间接法应用的可行性,且间接法更精确。

4 结语

基于直接与间接逆子结构分析方法,针对“产品-包装装配耦合-车辆”的运输包装系统,通过所设计的机械装配模型实验,以及对实验数据的计算分析结果,检验了2种逆子结构动态分析方法实际应用的有效性与可行性。结果表明,二者的实用精度都在工程应用的精度范围,且间接法比直接法更为精确。

参考文献:

- [1] ZHEN J T, LIM T C, LU G Q. Experimental Determination of Automotive System Response Characteristics[J]. *Automotive Engineering International Journal of Passenger Cars: Mechanical System*, 2001, 110(Section 6): 1755—1762.
- [2] 吕广庆, 王志伟. 产品-包装-运载体系统动态特性研究[J]. 包装工程, 2006, 27(1): 115—118.
LV Guang-qing, WANG Zhi-wei. Investigation on Dynamic Characteristics of a Product-packaging-carrier System[J]. *Packaging Engineering*, 2006, 27(1): 115—118.
- [3] 吕广庆, 王雷. 应用逆子结构方法确定包装耦合体动态特性[J]. 包装工程, 2006, 27(3): 49—51.
LV Guang-qing, WANG Lei. Applying Inverse Sub-structuring Approach to Determining Dynamic Characteristics of a Coupling Unit-of-packaging[J]. *Packaging Engineering*, 2006, 27(3): 49—51.
- [4] 吕广庆. 运输包装系统动特性分析计算[J]. 包装工程, 2006, 27(4): 12—14.
LV Guang-qing. Inverse Sub-structuring Analysis and Computations of Dynamic Characteristics of Transportation Packaging System[J]. *Packaging Engineering*, 2006, 27(4): 12—14.
- [5] 吕广庆. 离散化包装耦合体动刚度的逆子结构计算方法[J]. 振动与噪声控制, 2009, 27(2): 16—18.

(下转第66页)

- 的研究[J]. 包装工程, 2007, 28(7):31—33.
- SHI Cheng-ying, LIU Ye. Research of the Foaming Mechanism and Bubble Destruction Factors of Cushioning Foaming Material[J]. Packaging Engineering, 2007, 28(7):31—33.
- [8] 黄俊彦. 植物纤维类发泡材料的成型机理及生物发泡方法探讨[J]. 中国包装工业, 2010(11):30—32.
- HUANG Jun-yan. Discussion on the Forming Mechanism of Plant Fiber Foaming Material and the Method of Biological Foaming Method[J]. China Packaging Industry, 2010(11):30—32.
- [9] 杨文斌, 谢拥群. 植物纤维发泡包装材料的干燥[J]. 干燥技术与设备, 2007, 5(6):279—283.
- YANG Wen-bin, XIE Yong-qun. Drying of Plant Fiber Foaming Packing Material [J]. Drying Technology and Equipment, 2007, 5(6):279—283.
- [10] 李友良, 王家俊, 邵锋伟, 等. 废纸浆发泡缓冲包装材料的研究[J]. 包装工程, 2008, 29(11):5—7.
- LI You-liang, WANG Jia-jun, SHAO Feng-wei. Study on Making Foam Cushion Packaging Material by Waste Paper Pulp[J]. Packaging Engineering, 2008, 29(11):5—7.
- [11] 陈慧文. 废纸原料制备缓冲包装材料的工艺探索[J]. 造纸科学与技术, 2008, 27(3):43—47.
- CHEN Hui-wen. Study on the Preparation of Waste-paper Foamed Packing Material[J]. Paper Science & Technology, 2008, 27(3):43—47.
- [12] 吕艳娜, 张运展, 欧建志, 等. 用废纸制取包装缓冲材料的研究[J]. 包装工程, 2004, 25(6):78—79.
- LV Yan-na, ZHANG Yun-zhan, OU Jian-zhi. Study on Making Buffer Packaging Material by Wastepaper[J]. Packaging Engineering, 2004, 25(6):78—79.
- [13] 许洁, 巨杨妮, 王文明, 等. 废纸再生缓冲发泡材料的碳足迹及碳减排[J]. 包装学报, 2011, 3(3):11—14.
- XU Jie, JU Yang-ni, WANG Wen-ming. Carbon Footprint and Low Carbon Production Process of Waste Paper Fiber Foaming Buffer Material[J]. Packaging Journal, 2011, 3(3):11—14.
- [14] 邹君, 李庆春. 蔗渣纤维缓冲包装材料的研制[J]. 广西轻工业, 2008(6):37—38.
- ZOU Jun, LI Qing-chun. Bagasse Fiber Buffering and Packaging Material Development[J]. Guangxi Journal of Light Industry, 2008(6):37—38.
- [15] 巨杨妮, 张新昌. 基于复配发泡剂的纸纤维发泡缓冲包装材料制备工艺[J]. 包装工程, 2012, 33(5):43—46.
- JU Yang-ni, ZHANG Xin-chang. The Process of Paper Fiber Foaming Packaging Material Based on Composite Foaming Agent [J]. Packaging Engineering, 2012, 33 (5):43—46.
- [16] 张惠莹, 张晶, 江兴亮, 等. NaOH 预处理对废纸纤维发泡材料性能的影响[J]. 包装学报, 2012(3). (余不详)
- ZHANG Hui-ying, ZHANG Jing, JIANG Xing-liang. Influence of the Pretreatment with NaOH on the Property of Waste Paper Fiber Foamed Material[J]. Packaging Journal, 2012(3).
- [17] 吴有炜. 试验设计与数据处理[M]. 苏州: 苏州大学, 2002.
- WU You-wei. Experiment Design and Date Processing [M]. Suzhou: Suzhou University, 2002.

(上接第 24 页)

- LV Guang-qing, Indirect Inverse Substructure Computation on Dynamic Stiffness of Discrete Coupling Unit-of-packaging[J]. Noise and Vibration Control, 2009, 27 (2):16—18.
- [6] 吕广庆, 朱勇. 离散化包装耦合体动刚度的间接逆子结构分析计算方法[J]. 包装工程, 2008, 29(10):61—69.
- LV Guang-qing, ZHU Yong, Indirect Inverse Substructure Computation on Dynamic Stiffness of Discrete Cou-

- pling Unit-of-packaging [J]. Packaging Engineering, 2008, 29(10):61—69.
- [7] 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 (Published Online Oct. 2011).