

基于逆子理论的洗衣机运输系统动态特性分析

孙中振¹, 王军^{1,2}, 卢立新^{1,2}

(1. 江南大学, 无锡 214122; 2. 江苏省食品先进制造装备技术重点实验室, 无锡 214122)

摘要: **目的** 获取产品运输包装系统各部件的动态特性。 **方法** 采用多级系统分布解耦法, 结合二级刚性耦合系统逆子结构理论, 推导由产品、车辆部件水平和系统水平频响传函预测关键部件频响传函的理论公式。搭建电机-洗衣机-车辆三级刚柔耦合运输系统, 对理论方法进行验证。 **结果** 通过在线实验验证, 基于理论预测得到的关键部件频响传函和测试值相吻合。 **结论** 研究结果为产品运输包装设计 and 优化提供了参考依据。

关键词: 刚柔耦合系统; 洗衣机运输包装系统; 逆子理论; 频响传函

中图分类号: TB485.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2015)19-0023-04

Dynamic Characteristics of Washing Machine Transport System Based on Inverse Sub-structuring Theory

SUN Zhong-zhen¹, WANG Jun^{1,2}, LU Li-xin^{1,2}

(1. Jiangnan University, Wuxi 214122, China;

2. Jiangsu Key Laboratory of Advanced Food Manufacturing Equipment and Technology, Wuxi 214122, China)

ABSTRACT: This study aimed to acquire the dynamic characteristics of the components of the product transportation packaging system. With help of distributed decoupling method and inverse sub-structuring theory of two-level rigid coupling system, the theoretical formula was deduced for predicting the frequency response function of key components according to the frequency response function of products, the vehicle component level and the system level. The motor-washing machine-vehicle system was set up to verify the correctness of the theory. Based on online test and verification, the predicted frequency response function of key components based on the theory was consistent with the test value. The study results can provide reference for designing and optimizing transport packaging.

KEY WORDS: rigid-flexible coupled system; transport and package system of washing machine; theory of inverse sub-structuring; frequency response function

产品运输包装设计的主要依据是包装件在运输过程中所受到的动态响应, 而传统产品包装动力学的研究主要集中在基于单自度假设的产品脆值和破损评价上, 不能准确获取实际多自由度产品包装运输系统中各部件的动态响应。由此, 对产品包装运输系统的逆子结构理论研究受到众多学者的广泛关注。借助频率响应传递函数(FRF)作为系统动态

特性的评价指标, Sek^[1]等采用多输入单输出的测量方法获取了产品包装系统的FRF。为了解决包装件动态特性难以测量难题, Zhen和Lim^[2-4]推导了由系统FRF预测部件FRF的逆向子结构理论。Wang等^[5-7]相继建立了二级单点和多点耦合系统的逆子结构理论, 并通过分布解耦技术将理论进一步扩展到三级单点和多点系统。Zhang和Wang^[8]在二级和三级耦合

收稿日期: 2015-05-02

基金项目: 国家自然科学基金(51205167); 教育部博士点基金(20120093120014)

作者简介: 孙中振(1989—), 男, 山东枣庄人, 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, 江南大学教授、硕导, 主要研究方向为运输包装。

系统逆子结构理论的基础上,搭建了冰箱-车辆车载系统验证理论在实际产品包装运输过程中应用的有效性,Wang等^[9-11]针对系统中难以获取激励点和响应点频响传函的问题,推导了不含两测点的间接逆子结构传函预测公式。

文中是基于部件间的刚性连接形式,建立由系统FRFs和部分部件FRFs预测难以测量部件FRFs的三级刚柔耦合系统逆子结构理论,并搭建相应的电机-洗衣机-车辆三级刚柔耦合系统对理论进行验证。

1 三级刚柔耦合逆子理论

三级刚柔耦合系统模型见图1,系统S由部件A,B,C组成,其中部件A和B是刚性连接,耦合界面为 c_1 ,部件B和C是柔性连接,耦合界面为 c_2 ,刚度为 K_{BC} 。

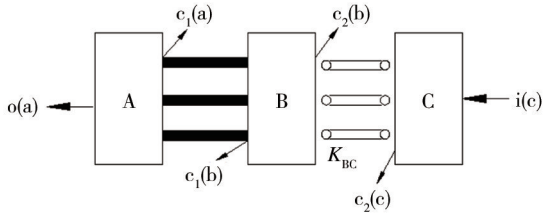


图1 三级刚柔耦合模型

Fig. 1 Three-substructure rigid-flexible system

根据多级系统分布解耦技术方法^[12-13],将部件B和部件C看做一部件D,耦合系统即转变为由部件A和部件D组成的二级刚性连接系统。借助二级刚性耦合系统逆子理论^[14-15],可以通过部件D和系统S的频响传函预测部件A的频响传函:

$$[H_A]_{c_1(a)c_1(a)} = ([H_D]_{c_1(d)c_1(d)}^{-1} - N)^{-1} [H_D]_{c_1(d)c_1(d)} \quad (1)$$

$$[H_A]_{o(a)c_1(a)} = [H_S]_{o(a)i(d)} [H_D]_{c_1(d)i(d)}^{-1} \cdot ([H_A]_{c_1(a)c_1(a)} + [H_D]_{c_1(d)c_1(d)}) \quad (2)$$

$$N = [H_D]_{c_1(d)c_1(d)}^{-1} [H_S]_{c_1(d)c_1(d)} [H_D]_{c_1(d)c_1(d)}^{-1} \quad (3)$$

式中: 传函矩阵 $[H_S]_{c_1(d)c_1(d)}$, $[H_S]_{o(a)i(d)}$, $[H_S]_{c_1(d)i(a)}$ 和由子结构A,B,C组成系统中的 $[H_S]_{c_1(b)c_1(b)}$, $[H_S]_{o(a)i(b)}$, $[H_S]_{c_1(b)i(a)}$ 对应相等。在由部件B和C组成的柔性子系统D中,根据二级柔性逆子结构理论公式^[10]分别求解上述部件D的FRF:

$$[H_D]_{c_1(d)c_1(d)} = [H_D]_{o(b)i(b)} = [H_B]_{o(b)i(b)} - [H_B]_{o(b)c_2(b)} M [H_B]_{c_2(b)i(b)} \quad (4)$$

$$[H_D]_{c_1(d)i(d)} = [H_D]_{o(b)i(c)} = [H_B]_{o(b)c_2(b)} M [H_C]_{c_2(c)i(c)} \quad (5)$$

$$M = ([H_B]_{c_2(b)c_2(b)} + [H_C]_{c_2(c)c_2(c)} + [K_{c_2}]^{-1})^{-1} \quad (6)$$

为求得子结构B与C之间的刚度 $[K_{c_2}]$,现将子结构A和B看做一个子结构E。在由子结构E和子结构C组成的二级耦合系统中,根据二级多点耦合系统逆子结构理论可得:

$$[K_{c_2}] = ([H_S]_{c_2(e)c_2(e)} [H_S]_{c_2(c)c_2(c)}^{-1} [H_S]_{c_2(e)c_2(c)} - [H_S]_{c_2(e)c_2(c)})^{-1} \quad (7)$$

式中: $[H_S]_{c_2(e)c_2(e)}$, $[H_S]_{c_2(e)c_2(c)}$, $[H_S]_{c_2(c)c_2(c)}$ 分别和 $[H_S]_{c_2(b)c_2(b)}$, $[H_S]_{c_2(c)c_2(b)}$, $[H_S]_{c_2(b)c_2(c)}$ 对应相等。将式(4)~(7)带入(1)~(3),可以得到由系统水平和部件B,C的频响函数求解子结构A的频响函数理论方法:

$$[H_A]_{c_1(a)c_1(a)} = (Q^{-1} - Q^{-1} [H_S]_{c_1(b)c_1(b)} Q^{-1})^{-1} - Q \quad (8)$$

$$[H_A]_{o(a)c_1(a)} = [H_S]_{o(a)i(c)} R^{-1} \cdot [[H_S]_{c_1(b)c_1(b)} Q (Q - [H_S]_{c_1(b)c_1(b)})^{-1} + Q] \quad (9)$$

$$Q = [H_B]_{o(b)i(b)} - [H_B]_{o(b)c_2(b)} S [H_B]_{c_2(b)i(b)} \quad (10)$$

$$R = [H_B]_{o(b)c_2(b)} S [H_C]_{c_2(c)i(c)} \quad (11)$$

$$S = ([H_B]_{c_2(b)c_2(b)} + [H_C]_{c_2(c)c_2(c)} + [K_{c_2}]^{-1})^{-1} \quad (12)$$

式(8)~(12)为三级多点刚柔耦合包装运输系统逆子结构理论公式,由此可以更准确地对产品包装运输系统的动态响应进行分析。

2 电机-洗衣机-车辆运输系统动态实验

2.1 设备

信号采集与分析系统采用东方振动和技术研究所开发的306DF型信号采集与分析仪、DLF-4型合一电荷电压滤波放大器、DASP 2003专业版分析系统。激励系统采用由东方振动和技术研究所生产的MSC-3(ICP/LEM0)中型力锤,力锤采用力传感器5T,从激振力的能量量级和频带宽度考虑,选择铝制锤头。响应装置选择由东方振动和技术研究所生产的电荷型加速度传感器INV 9812,灵敏度为50 pC/g。

洗衣机是山东小鸭集团生产的XPB45-4588S型号的洗衣机,尺寸为565 mm × 365 mm × 580 mm,质量为10 kg,电机为220 V/30 W普通电机,质量为3 kg。外包装为无底的A/B瓦楞纸箱,衬垫为EPS。车辆为长城风骏轻型皮卡。

2.2 测量方法

洗衣机部件B与电机部件A的耦合界面称为 c_1 ,与运载车辆C间的耦合界面称为 c_2 ,其中洗衣机与电机的3个刚性耦合点分别为 $c_1(b_1), c_1(b_2), c_1(b_3)$,分布见图2,与运载车辆的4个耦合点分别为 $c_2(b_1), c_2(b_2), c_2(b_3), c_2(b_4)$,分布见图3。电机的3个刚性耦合点分别为 $c_1(a_1), c_1(a_2), c_1(a_3)$,响应点为 $o(a)$,分布见图4。运载车辆与洗衣机的4个耦合点分别为 $c_2(c_1), c_2(c_2), c_2(c_3), c_2(c_4)$,激励点为 $i(c)$,分布见图5。车载产品传函测试系统见图6。



图2 洗衣机部件传函测试传感器分布
Fig.2 Sensor distribution of testing FRFs for washing machine

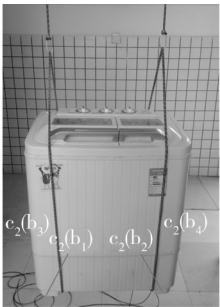


图3 洗衣机部件传函测试系统
Fig.3 Testing system for FRFs of washing machine

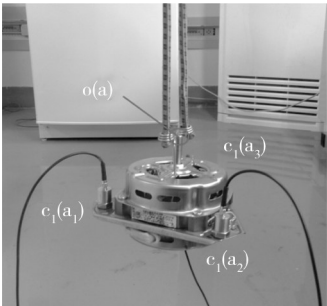


图4 电机部件传函测试系统
Fig. 4 Testing system for FRFs of electric machinery

敲击前需要调试传感器的灵敏度,检测测试系统的互异性和非线性特征。采用单输入多输出的测量

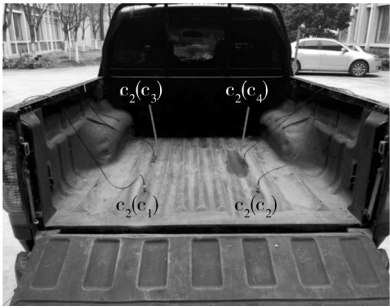


图5 车辆部件传函测量系统
Fig. 5 Testing system for FRFs of parts of vehicle



图6 车载系统传函测试系统
Fig.6 Testing system for FRFs of vehicle system

方法,并结合变时基采样形式,采样频率为1000 Hz,激励频率选择8000 Hz。选择多次触发采样,每个测点连续敲击10次,敲击力度保持适中,切勿连击。

将采样的力信号加力窗处理,加速度信号加指数窗,并将10次数据进行求平均处理,以便去掉信号中的噪音。测试流程见图7。

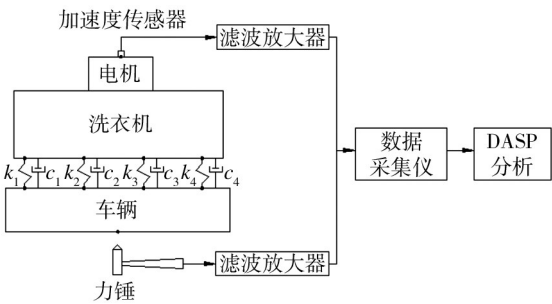


图7 系统测试流程
Fig.7 Flow chart of system test

2.3 结果与讨论

通过上述方法分别测得系统S(车载系统)频响传函,部件A(电机)的频响传函,部件B(洗衣机)的频响传函,部件C(车辆)的频响传函。将系统S、部件B和部件C的频响传函带入到三级多点刚柔耦合逆子理论公式(8)—(12),得到部件A的预测频响传函。最后

将得到的预测频响传函和通过测量获取的部件A频响传函进行对比,结果见图8。

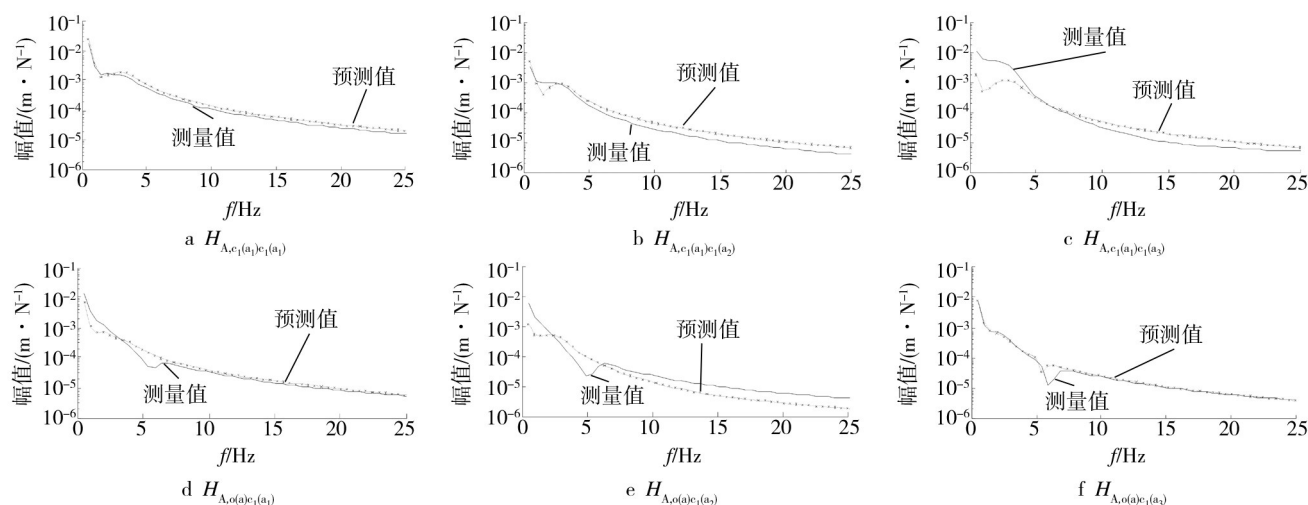


图8 洗衣机运载系统子结构A传函预测值与测量值对比

Fig.8 Comparison between predicted and measured FRFs of substructure A of delivery system for washing machine Z

从图8可以看出,通过逆子理论公式获得的部件A,B的预测频响传函和实际测量得到的结果基本一致,其中存在的误差主要是由系统、部件的非线性和计算过程中存在的大量逆矩阵引起的。

3 结语

借助分布解耦合和二级刚性耦合逆子理论,推导了三级刚柔耦合系统逆子理论方法。实验结果不仅验证了三级刚柔耦合系统逆子结构理论的正确性,还可以进一步证实三级刚柔耦合系统逆子结构理论在实际应用中的有效性。

参考文献:

- [1] SEK M A, ROUILLARD V, PARKER A J. A Study of Nonlinear Effects in a Cushion-product System on Its Vibration Transmissibility Estimates with the Reverse Multiple Input-Single Output Technique[J]. Packaging Technology and Science, 2013, 26: 125—135.
- [2] 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—30.
- [3] 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): 31—67.
- [4] LIM T C, LI J. A Theoretical and Computational Study of the FRF-based Substructuring Technique Applying Enhanced Least Square and TSVD Approaches[J]. Journal of Sound and Vibration, 2000, 231: 1135—1157.
- [5] WANG Z W, WANG J, 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, 25: 351—362.
- [6] WANG Z W, WANG J. Inverse Substructure Method of Three-substructures Coupled System and its Application in Product-transport-system[J]. Journal of Vibration and Control, 2011(17): 943—951.
- [7] ZHANG Y B, WANG Z W. Investigation of Frequency Response Function of Product-transport System Based on Multi-coordinate Coupled Inverse Substructure Method[J]. Packaging Technology and Science, 2014, 27: 364—375.
- [8] ZHANG Y B, WANG Z W. Dynamic Characteristics Analysis of Refrigerator-truck Transport System by Using Inverse Substructure Method[J]. Packaging Technology and Science, 2014, 27: 883—900.
- [9] WANG J, SUN G H, LU L X, et al. Indirect Inverse Substructuring Theory for Coupling Dynamic Stiffness Identification of Complex Interface Between Packaged Product and Vehicle Transport System[J]. Packaging Technology and Science, 2015, 28: 141—155.
- [10] 王军, 王志伟, 卢立新, 等. 多部件耦合包装系统逆子结构分析一般性理论[J]. 振动与冲击, 2014(7): 58—62.

WANG Jun, WANG Zhi-wei, LU Li-xin, et al. Generalized
(下转第63页)

- Paperboard[J]. Packaging Engineering, 2008, 29(1): 56—58.
- [8] 孙德强, 孙玉瑾, 郑波波, 等. 六边形蜂窝芯异面类静态压缩力学行为的仿真分析[J]. 包装工程, 2014, 35(1): 18—22.
SUN De-qiang, SUN Yu-jin, ZHEN Bo-bo, et al. Simulation Analysis the Out-of-plane Quasistatic Compression of Hexagonal Honeycomb Cores[J]. Packaging Engineering, 2014, 35(1): 18—22.
- [9] 张文峰, 张安宁. 基于ANSYS 8.0的蜂窝纸板力学性能研究[J]. 包装工程, 2006, 27(2): 57—58.
ZHANG Wen-feng, ZHANG An-ning. Research on Static Properties of Honeycomb Paperboard Based on ANSYS 8.0[J]. Packaging Engineering, 2006, 27(2): 57—58.
- [10] 王志伟, 姚著. 蜂窝纸板冲击压缩的试验研究和有限元分析[J]. 机械工程学报, 2012, 48(12): 49—55.
WANG Zhi-wei, YAO Zhu. Experimental Investigation and FEM Analysis for Impact Compression of Honeycomb Paperboards[D]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(12): 49—55.
- [11] CHUNG J, WAAS A M. Compressive Response of Circular Cell Polycarbonate Honeycombs Under Inplane Biaxial Static and Dynamic Loading, Part I: Simulations[J]. International Journal of Impact Engineering, 2002, 27(10): 1015—1047.
- [12] CHUNG J, WAAS A M. Compressive Response of Circular Cell Polycarbonate Honeycombs Under Inplane Biaxial Static and Dynamic Loading, Part II: Simulations[J]. International Journal of Impact Engineering, 2002, 27(7): 729—754.
- [13] TIMOSHENKO S P, GERE J M. Theory of Elastic Stability[M]. New York: Dover Publications, 2009.
- [14] 王冬梅, 廖强华. 蜂窝纸板静态压缩力学性能建模研究[J]. 包装工程, 2006, 27(4): 129—132.
WANG Dong-mei, LIAO Qiang-hua. Research on the Mechanical Performance Modeling of Honeycomb Paperboard under Quasi-static Compression[J]. Packaging Engineering, 2006, 27(4): 129—132.
- [15] 高士龙. 基于FEM的不规则纸芯结构的蜂窝纸压缩性能分析[J]. 包装工程, 2008, 29(1): 53—55.
GAO Shi-long. Analysis of Compression Performance of the Paper Honeycomb Core With Anomalous Structure Based on FEM[J]. Packaging Engineering, 2008, 29(1): 53—55.

(上接第26页)

- Inverse Substructuring Method for Multi-component Coupled Packaging System[J]. Journal of Vibration and Shock, 2014(7): 58—62.
- [11] 洪翔, 王军, 卢立新, 等. 多点耦合包装系统动态逆子结构理论试验验证[J]. 包装工程, 2013, 34(3): 1—4.
HONG Xiang, WANG Jun, LU Li-xin, et al. Experimental Verification of Inverse Substructure Theory for Multipoint Coupled Packaging System[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(3): 1—4.
- [12] WANG J, HONG X, QIAN Y, et al. Inverse Sub-structuring Method for Multi-coordinate Coupled Product Transport System[J]. Packaging Technology and Science, 2014, 27: 385—408.
- [13] 王军, 卢立新, 王志伟, 等. 多级耦合系统界面动态特性预测的间接逆子结构理论[J]. 包装工程, 2011, 32(21): 1—3.
WANG Jun, LU Li-xin, WANG Zhi-wei, et al. Indirect Inverse Substructure Method for Dynamic Characteristic Prediction of Multi-level Coupled System Interface[J]. Packaging Engineering, 2011, 32(21): 1—3.
- [14] 孙中振, 王军, 卢立新. 二级多点刚性耦合包装系统逆子结构理论及验证[EB/OL]. 北京: 中国科技论文在线[2015]. <http://www.paper.edu.cn/releasepaper/content/201503—245>.
SUN Zhong-zhen, WANG Jun, LU Li-xin. The Dynamic Characteristics of Washing Machine Transport System Based on Inverse Sub-structuring Theory[EB/OL]. Beijing: Science-paper Online[2015]. <http://www.paper.edu.cn/releasepaper/content/201503—245>.
- [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.