

运输包装专题

## 非线性运输包装系统动力学建模研究进展

李光<sup>1</sup>, 阮丽<sup>1,2</sup>, 高德<sup>2</sup>, 卢富德<sup>2</sup>

(1. 天津科技大学, 天津 300222; 2. 浙江大学宁波理工学院, 宁波 315100)

**摘要:** **目的** 研究泡沫隔振材料的本构模型及其在运输过程中的振动情况。**方法** 运输包装系统涉及运载工具、道路条件、内装物品、包装防护结构等诸多因素, 构成一个多自由度的非线性复杂系统。围绕运输包装隔振系统, 以行业内的典型研究为例, 来探讨被包装物品在运输过程中的随机激励问题, 以及运输包装系统的动力学方程及易损件的响应这两方面的问题, 并在此基础上对运输包装系统力学性能相关方面的研究给出意见。**结果** 在运输过程中, 关于道路及运输包装系统耦合的研究还不够完善, 在产品运输防护领域仍有大量问题需要解决。**结论** 加强对运输包装耦合系统的响应分析的研究, 包括产品的响应分析、混合道路谱的试验方法等, 对运输包装的发展具有重大意义。

**关键词:** 本构模型; 随机激励; 隔振机理; 缓冲包装

**中图分类号:** TB485.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2015)19-0001-06

## Research Progress of Dynamic Modeling of Nonlinear Transport Packaging System

LI Guang<sup>1</sup>, RUAN Li<sup>1,2</sup>, GAO De<sup>2</sup>, LU Fu-de<sup>2</sup>

(1. Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300222, China;

2. Ningbo Institute of Science and Technology, Zhejiang University, Ningbo 315100, China)

**ABSTRACT:** This paper mainly studied the constitutive model and the vibration of the foam vibration isolation material during transportation. The transport packaging system is a nonlinear complex system with multiple degrees of freedom which involves many factors, such as delivery vehicles, road conditions, internal goods, packaging structure. This article focused on the topic of transport packaging isolation system, based on the typical research in the industry as an example to explore the issue of random excitation of packaged goods in the transport process, dynamic equation of transport packaging system as well as response of vulnerable parts, and on the basis of this exploration, the article proposed some advice on the mechanical performance of transport packaging system. For the transportation, the research on the coupling of the road, vibration isolation material and transport packaging system is not sufficient, and there are still problems to be solved in the field of product protection during transportation. It is of great significance to strengthen researches on the response analysis of coupling system including response analysis of products and test methods for mixed road spectrum for the development of transport packaging.

**KEY WORDS:** constitutive model; random excitation; vibration isolation mechanism; cushioning package

随着我国经济的不断发展, 物品总量不断攀升, 物品在运输过程中被损坏的现象时有发生, 由产品包装不当造成的损失十分巨大。导致物品破坏的因素主要是流通过程中受到道路的颠簸激励及运载工具

收稿日期: 2015-05-06

基金项目: 国家自然科学基金(11402232); 宁波市自然科学基金(2015A610092)

作者简介: 李光(1975—), 男, 山东潍坊人, 博士, 天津科技大学, 副教授, 主要研究方向为包装机械、包装动力学。

通讯作者: 高德(1963—), 男, 黑龙江人, 浙江大学宁波理工学院教授, 主要研究方向为包装动力学。

所产生的振动激励,使得被包装物处于循环交变载荷作用之下。为此,研究运输包装系统的动力学建模及响应,揭示包装件在物流运输过程中承受振动与冲击的内在规律,阐述缓冲防护包装材料承受的刚度、强度及稳定性的力学问题,寻求科学的包装防振原理,进行包装结构优化设计,为各类机电产品、家用电器等产品运输过程的防护提供重要的理论依据,实现科学包装具有重要意义。

典型的运输包装系统见图1,运输包装系统是一个复杂的多自由度非线性系统,主要由道路、运输工具、包装件等因素联合作用形成。运输包装系统的动力学响应分析可以简化为两部分:包装物品运输过程中的激励问题;包装件之间的振动传递关系,即动力学模型问题。

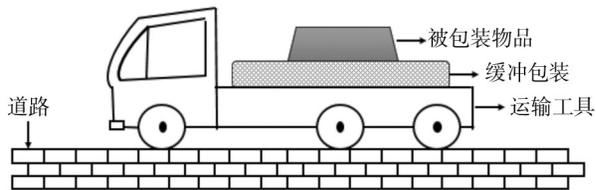


图1 运输包装系统

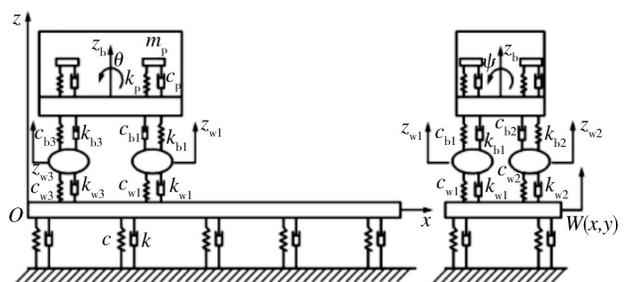
Fig.1 Transport packaging system

多年来,各国学者针对这2个问题进行了一系列研究,并取得了相应的进展,文中重点针对运输包装系统动力学模型问题研究进展进行综述。

## 1 包装物品运输过程中的激励问题

在实际运输过程中,运输工具振动的能量分布在较宽的频率范围内,在不同的频率点上能量分布也不均匀。由于影响因素过多、情况复杂多变,在某一时刻或较短时间内,振动具有很大的随机性,所以在实际流通环境中产生的振动是一种宽带的随机振动。只有在相对较长的时间段内,才能在频域范围内,统计出能反映实际情况的振动特性。针对流通过程中的激励问题, Sek M A<sup>[1]</sup>研究了包装性能测试的模拟方法,跟踪了产品运输路线,将相关数据转化为实验室参数用于模拟实际运输环境的试验,得到的规律在包装结构设计中获得了应用。 Rouillard V等<sup>[2]</sup>在线监测了运输车辆在道路不平顺激励下的随机振动信号,并用功率密度谱函数模拟了车辆的时域振动。 Rouillard V等<sup>[3]</sup>研究了货物、车辆的耦合问题与模拟方法,近似模拟了澳大利亚铁路运输的振动特性。 Rouillard V<sup>[4-5]</sup>使用路面轮廓数据产生车辆振动信号的

方法,把用统计模型与标准随机振动控制器相结合,提高了模拟路面振动实验室的精度,并讨论了用于包装开发和验证的可行性。以上研究,只是针对国外高等级公路的运输情况,并且只是在时域方面取得了较符合实际的结果。针对我国路面,张丙强<sup>[6-7]</sup>研究了车-路系统的动力,考虑路面激励、车的非匀速运动及车前后轮所受激励的相关性,建立了车路系统的垂向动力分析模型。而后建立了人体-车辆-路面系统三维耦合振动方程,并采用数值分析法对车辆舒适度进行了分析,并分析了模型中各参数对舒适度的影响。简化模型见图2,为研究建立货物运输系统模型提供了车路耦合随机激励理论依据。



## 2 运输包装系统的动力学模型及响应

### 2.1 集中质量模型

早在1945年, Mindlin R D<sup>[10]</sup>就率先提出了包装力学经典理论,把包装件简化为一个单自由度线性系统,把物品的响应加速度作为物品损失判据,即最大加速度-静应力曲线,而且这时所对应的加载情况为自由落体,并没有涉及振动工况物品运输包装系统的破损规律,见图3。对于被包装物品,在运输过程中,往往最先损坏内部的易损部件,例如电子产品失效来源于内部的一个或多个柔性部件的断裂破坏,这样的部件称为关键部件。1986年 Xi D C等<sup>[11]</sup>将这类含易损件物品的包装系统,简化为双层商品包装和含弹性元件产品的隔振动力学模型,见图4。此工作开启了多自由度系统包装建模的理论工作。此模型显然与实际的易损件连接不符,导致计算误差较大。

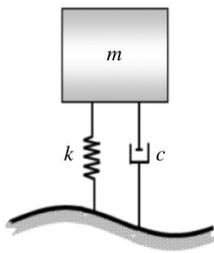


图3 单自由度包装物品简化模型

Fig.3 A simplified model of package with a single degree of freedom

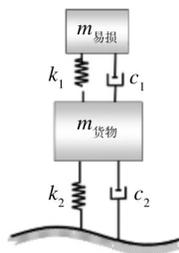


图4 含易损件的双自由度简化模型

Fig.4 A simplified model of vulnerable parts with two degrees of freedom

在上述的模型中,只考虑了单个物品,实际情况会是多个物品堆叠在一起进行运输,即多自由度的情况。Thakur K P<sup>[12]</sup>建立了多层堆码包装系统线性理论模型,并在此基础上进行动力学仿真分析,但该模型过于简单。Rouillard V<sup>[13]</sup>建立多层堆码运输包装系统的物理模型并进行了数值分析,同时考虑了垂直约束的张力和刚度影响,得到系统统一动力学方程并求解。试验验证表明,该模型可以准确地预测等效物理系统的动态行为。García R M<sup>[14]</sup>分析了集装箱运输中3个方向振动激励对产品破损的贡献,并建议对包装系统进行多轴振动测试模拟,以评价产品包装的可靠性。Bernad<sup>[15]</sup>用模态分析方法分析了弯曲模态对多层瓦楞包装系统动态响应的影响。王军、王志伟<sup>[16-17]</sup>研究了多层堆码包装在半正弦脉冲激励下的冲击特

性,见图5。高德等<sup>[18]</sup>考虑了包装件跌落过程中的转动因素,见图6,建立了正切及其组合的非线性多自由度系统的冲击模型,并获得了响应的数值解。高德、卢富德等<sup>[19-20]</sup>依据粘弹性力学理论,建立了发泡聚乙烯非线性多自由度缓冲包装系统模型,并运用混合罚函数方法,对多自由度缓冲包装系统进行了具有较高精度的优化设计。

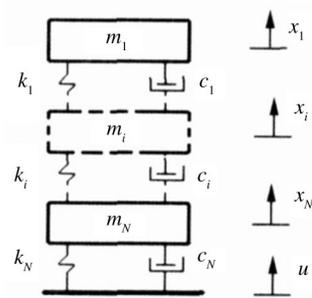


图5 多层堆码包装系统动力学模型

Fig.5 The dynamic model of multi-layer stacking packaging system

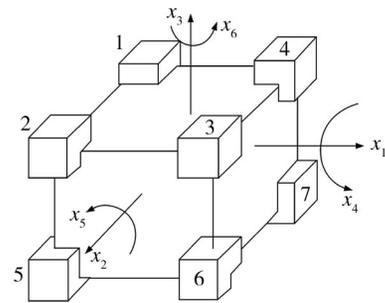


图6 含转动包装件模型简图

Fig.6 Diagram of rotary packaging structure

以上模型的建立为运输包装件动力学建模奠定了基础,但多数情况都是基于材料冲击本够模型为前提,而对于振动研究的较少。

### 2.2 易损件离散模型

为了使含易损部件的物品减振模型精确化,奚德昌<sup>[21-23]</sup>提出了将含易损弹性部件离散为简支梁或悬臂梁,并分析了包装系统承受简谐波位移激励时的响应,简化模型见图7—8。

基于此,Goyal S等人<sup>[24]</sup>研究了产品内部含电路板弹性元件的物品包装系统,此连续系统无法用一个变量表示,因此不能用质量-弹簧模型分析这类部件的响应。Suhir E<sup>[25]</sup>在分析电路板的响应过程中,将电路板简化为简支梁形式,把简支梁所能承受的最大应力作为部件的强度标准。Zhou C Y等人<sup>[26]</sup>将电路板简化

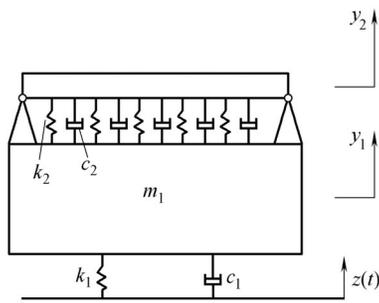


图7 具有简支梁式易损部件简化模型

Fig.7 The simplified model of vulnerable parts with simply supported beam

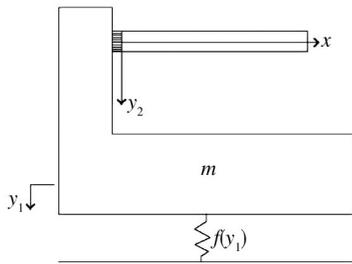


图8 具有简支梁式易损部件简化模型

Fig.8 The simplified model of vulnerable parts with simply supported beam

为简支梁形式,并分析集中质量、简支梁式的关键部件响应规律,得到了简支梁的响应与脉冲幅值和脉宽的相互关系。

高德、卢福德<sup>[27-28]</sup>研究了易损零件为悬臂梁、简支梁隔振包装系统的冲击响应,并考虑包装件跌落过程中的转动因素,建立了常用隔振包装材料多自由度隔振包装系统模型,运用混合罚函数方法,对多自由度隔振包装系统进行了具有较高精度的优化设计。对于运输包装的隔振问题,仅用最大加速度已不能诠释泡沫隔振系统所发生的隔振机理。研究运输包装系统在随机激励载荷作用下的振动响应,并把物品离散为梁式易损件与质量主体,探究易损件不发生随机共振的条件,进而分析隔振运输包装系统中的隔振机理,为物品采用泡沫隔振情况下的损坏理论提供支撑。

Li R等人<sup>[29]</sup>运用了叠加法分析了相邻两角支点的矩形电路板的弯曲问题,对矩形板的振动情况下进行了精确描述,并用有限元验证了其正确性。刘芳<sup>[30]</sup>建立电路板组件的三维有限元模型,采用基础激励法对电路板组件进行了随机功率谱分析,并将模拟获得的位移与实验测得的位移响应的功率谱密度和均方根值进行比较,校验了模型的正确性。Yau.Y.H等人<sup>[31]</sup>综

述了电子产品电路板的跌落冲击响应问题,比较了不同分析和数值建模方法以及有限元方法在此方面的应用。

上述方法大多基于冲击方面对电路板进行了研究,但简化为固支形式的电路板在振动激励下的响应求解还很少。

### 2.3 运输包装整体系统建模及其响应

在实际物品运输过程中,此系统实际上是一个复杂耦合结构系统,需要将关键部件、产品、包装、运载体以及运输环境等作为一个整体的复杂系统来进行研究。李晓刚<sup>[32]</sup>为了研究包装件在实际流通环境振动特性下的运动规律,以车辆、包装件构成的六自由度运输包装系统为基础,建立了路面、运输车辆以及包装件的动力学模型,见图9。在此系统中,没有考虑易损件的问题,同时也没有考虑多自由度非线性模型问题。针对这一问题,吕广庆、王志伟、王军等<sup>[33-36]</sup>从系统分析的角度,建立了用于确定产品-包装-运载体在系统与部件水平的动态特性的实验技术理论,首次提出了采用动态逆子结构分析法,以试验测量代替理论建模,由在线测量的激励-响应函数建立产品-包装-运载体系统的动态特性,具有较强的工程适用性。真实的运输包装系统是一个复杂的多自由度非线性系统,若再考虑路面随机激励,那么得到的动力学方程将是一个强非线性微分方程组。该方程组在求解过程中方程组的矩阵阶次随着系统自由度的增加而增加,存在着较大的数值积分难题(包括计算精度、计算效率以及数值病态等问题)。因此该问题一直是限制运输包装动力学建模理论发展的一个技术瓶颈。虽然王志伟、王军等将逆子结构理论引入运输包装领域,为运输包装动力学建模理论的发展带来了新的突破,但该方法同样无法避免计算效率以及计算精度问题。

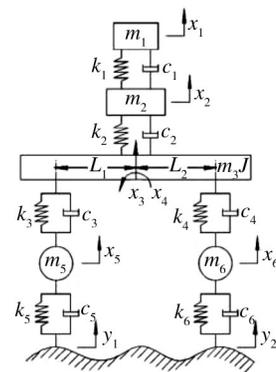


图9 六自由度运输包装系统振动模型

Fig.9 The six-DOF vibration model of transport packaging system

以上研究在冲击激励下建立包装系统模型及动力学求解,已有很多成功案例,相关的研究比较成熟。复杂包装系统的振动力学建模及动力学求解,虽已取得了一些有价值的成果,然而基本处于线性多自由度的范畴。

基于此,在物流运输中,物品的防护理论研究是一项十分复杂的工程,涉及物品本身、包装衬垫、包装箱、运载体、道路等多种因素。尽管许多学者从不同角度投入了不少的研究,但至今仍未能在物品包装防护系统理论研究上及可指导工程优化应用方面取得实质性的进展。

### 3 结语

由于运输包装系统的复杂性,在产品运输防护领域仍有大量问题需要解决:加强隔振材料在受到振动激励时的非线性力学行为研究,建立起适用于实际运输情况的振动本构模型;建立的运输包装系统动力学方程,在考虑道路-运输车辆-包装件的耦合问题的同时,融入多自由度非线性复杂问题;在动力学响应问题方面,寻求计算效率与计算精度更高的新方法。

基于以上分析,可以看出进行物品非线性运输包装系统动力学理论研究,不仅可以寻求包装物品的响应规律,同时也是实现科学包装并进行合理运输的理论基础。

### 参考文献:

- [1] SEK M A. A Modern Technique of Transportation Simulation for Package Performance Testing[J]. Packaging Technology and Science, 1996, 9(6): 327—343.
- [2] ROUILLARD V, SEK M A. Monitoring and Simulating Non-stationary Vibration for Package Optimization[J]. Packaging Technology and Science, 2000, 13(4): 149—156.
- [3] ROUILLARD V, RICHMOND R. A Novel Approach to Analysing and Simulating Railcar Shock and Vibrations[J]. Packaging Technology and Science, 2007, 20(1): 17—26.
- [4] ROUILLARD V. Generating Road Vibration Test Schedules from Pavement Profiles for Packaging Optimization[J]. Packaging Technology and Science, 2008, 21(8): 501—514.
- [5] ROUILLARD V, SEK M A. Creating Transport Vibration Simulation Profiles from Vehicle and Road Characteristics[J]. Packaging Technology and Science, 2013, 26: 82—95.
- [6] 张丙强,李亮. 人车路系统三维耦合振动分析及舒适度评价[J]. 计算力学学报, 2013, 30(2): 302—307.  
ZHANG Bing-qian, LI Liang. Dynamic Analysis and Comfort Evaluation of the Three-dimension Body-vehicle-road Coupled System[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2013, 30(2): 302—307.
- [7] 张丙强,李亮. 车辆-路面耦合振动系统模型与仿真分析[J]. 振动与冲击, 2010, 29(2): 35—38.  
ZHANG Bing-qian, LI Liang. Dynamic Model and Simulation of the Vehicle-road Coupled System[J]. Journal of Vibration and Shock, 2010, 29(2): 35—38.
- [8] 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.
- [9] 夏均忠,马宗坡,白云川,等. 路面不平度激励模型研究现状[J]. 噪声与振动控制, 2012(5): 1—5.  
XIA Jun-zhong, MA Zong-po, BAI Yun-chuan, et al. State of the Research on Model for Road Roughness Excitation[J]. Noise and Vibration Control, 2012(5): 1—5.
- [10] MINDLIN R D. Dynamics of Package Cushioning[J]. Bell System Technical Journal, 1945, 24(3/4): 353—461.
- [11] XI D C, CHEN Q H, PEN N L, et al. The Vibration and Shock Testing in China[C]// Proceeding of the 5th IAPRT World Conference on Packaging, 1986: 32—35.
- [12] THAKUR K P, PANG D. Simulating Complex Loading Patterns in the Stack of Packages[C]// Proceedings of the 10th IAPRI World Conference on Packaging. Melbourne, 1997.
- [13] ROUILLARD V, SEK M A, CRAWFORD S. The Dynamic Behavior of Stacked Shipping Units during Transport. Part 1: Model Validation[J]. Packaging Technology and Science, 2004, 17(5): 237—247.
- [14] GARC A-ROMEU M, SINGH S P, CLOQUELL V A. Measurement and Analysis of Vibration Levels for Truck Transport in Spain as a Function of Payload, Suspension and Speed [J]. Packaging Technology and Science, 2008, 21(8): 439—451.
- [15] BERNAD C, LASPALAS A, GONZ LEZ D, et al. Dynamic Study of Stacked Packaging Units by Operational Modal Analysis[J]. Packaging Technology and Science, 2010, 23(3): 121—133.
- [16] 王军,王志伟. 多层堆码包装系统冲击动力学特性研究组合冲击谱[J]. 振动与冲击, 2008, 27(8): 106—107.  
WANG Jun, WANG Zhi-wei. Combined Shock Spectrum of Linear Stacking Packaging System[J]. Journal of Vibration and Shock, 2008, 27(8): 106—107.
- [17] 王军,王志伟. 多层堆码包装系统冲击动力学特性研究破损边界[J]. 振动与冲击, 2008, 27(8): 108—109.  
WANG Jun, WANG Zhi-wei. Combined Damage Boundary Curve of Linear Stacking Packaging System[J]. Journal of Vibration and Shock, 2008, 27(8): 108—109.
- [18] 高德,卢富德. 考虑转动的双曲正切与正切组合模型缓冲系统冲击响应研究[J]. 振动工程学报, 2012, 25(1): 6—11.

- GAO De, LU Fu-de. The Shock Response of Hyperbolic Tangent and Tangent Comprehensive Model on Cushion System Considering Rotary Motion[J]. Journal of Vibration Engineering, 2012, 25(1): 6—11.
- [19] 高德, 卢富德. 聚乙烯缓冲材料多自由度跌落包装系统优化设计[J]. 振动与冲击, 2012, 31(3): 69—72.
- GAO De, LU Fu-de. Optimization Design of MD of Package Cushioning System Made of Polyethylene[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(3): 69—72.
- [20] GAO De, LU Fu-de. Nonlinear Dynamic Analysis of Series Cushioning System Made with Expanded Polyethylene and Corrugated Paperboard[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2013(376): 1—5
- [21] 郑志银, 奚德昌. 具有外伸式弹性部件的物品的防振[C]// 全国首次包装动力学与包装结构设计学术讨论会论文集. 杭州, 1987.
- ZHENG Zhi-yin, XI De-chang. The Articles Anti-vibration with Extended Elastic Component Items[C]// First National Packaging Dynamics and Packaging Structure Design Academic Discussion Papers. Hangzhou, 1987.
- [22] 彭南陵, 奚德昌. 具有简支梁式弹性零部件产品包装的减振[C]// 全国首次包装动力学与包装结构设计学术讨论会论文集. 杭州, 1987.
- PENG Nan-ling, XI De-chang. The Articles Anti-vibration with Simply Supported Beam Elastic Parts[C]// First National Packaging Dynamics and Packaging Structure Design Academic Discussion Papers. Hangzhou, 1987.
- [23] 奚德昌, 彭南陵. 具有简支梁弹性部件包装物品的防震[J]. 包装工程, 1989, 10(1): 42—48.
- XI De-chang, PENG Nan-ling. Shockproof of the Packaging for Elastic Parts with Simple Beam[J]. Packaging Engineering, 1989, 10(1): 42—48.
- [24] GOYAL S, BURATYNSKI E, ELKO G. Shock-protection Suspension Design for Printed Circuit Board[J]. Advancing Microelectronics, 2001(3/4): 7—13.
- [25] SUHIR E. Predicted Fundamental Vibration Frequency of a Heavy Electronic Component Mounted on a Printed Circuit Board[J]. ASME Journal of Electronic Packaging, 2000, 122(1): 3—5.
- [26] ZHOU C Y, YU T X. Analytical Models for Shock Isolation of Typical Components in Portable Electronics[J]. International Journal of Impact Engineering, 2009, 36(12): 1377—1384.
- [27] GAO D, LU F D, CHEN S J. Drop Impact Analysis of Cushioning System with an Elastic Critical Component of Cantilever Beam Type[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2013(379): 1—5.
- [28] 高德, 卢富德. 考虑转动的双曲正切与正切组合模型缓冲系统冲击响应研究[J]. 振动工程学报, 2012, 25(1): 6—11.
- GAO De, LU Fu-de. The Shock Response of Hyperbolic Tangent and Tangent Comprehensive Model on Cushion System Considering Rotary Motion[J]. Journal of Vibration Engineering, 2012, 25(1): 6—11.
- [29] LI R, WANG B, LI G. Benchmark Bending Solutions of Rectangular thin Plates Point-supported at Two Adjacent Corners [J]. Applied Mathematics Letters, 2015, 40: 53—58.
- [30] 刘芳, 孟光. 随机振动载荷下电路板组件三维有限元模拟[J]. 振动与冲击, 2012, 31(20): 61—64.
- LIU Fang, MENG Guang. Three-dimension Finite Element Simulation for a PCB Assembly under Random Vibration Loading[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(20): 61—64.
- [31] YAU Y H, HUA S N. A Comprehensive Review of Drop Impact Modeling on Portable Electronic Devices[J]. Applied Mechanics Reviews, 2011, 64: 1—17.
- [32] 李晓刚. 运输包装系统随机振动频域分析[J]. 包装工程, 2012, 33(15): 50—54.
- LI Xiao-gang. Random Vibration Frequency Domain Analysis of Transport Packaging System[J]. packaging Engineering, 2012, 33(15): 50—54.
- [33] 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.
- LYU Guang-qing, WANG Zhi-wei. Investigation on Dynamic Characteristics of a Product-packaging-carrier System[J]. Packaging Engineering, 2006, 27(1): 115—118.
- [34] 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(6): 351—362.
- [35] 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(5): 385—408.
- [36] WANG J, LU L X, QIAN P J, et al. Indirect Inverse Substructuring Method for Multibody Product Transport System with Rigid and Flexible Coupling[J]. Shock and Vibration, 2015, Article ID 106416.

欢迎订阅

欢迎投稿