

基于物流运输环境的打印机包装方案分析

曾台英, 于水源
(上海理工大学, 上海 200093)

摘要: **目的** 研究打印机物流包装方案在运输过程中对打印机的防护性能。**方法** 对打印机整体包装件进行模拟公路运输路况的随机振动试验, 得到产品的响应加速度谱密度曲线; 然后建立打印机物流包装的三维模型, 通过运用有限元软件 Ansys Workbench 中的随机振动分析模块 (Random Vibration) 对整体进行随机振动仿真分析, 得到打印机的响应加速度谱密度、总位移、各向应力、等效应力等。**结果** 由仿真得到的响应加速度谱密度与试验结果相对比, 其变化趋势一致, 验证了仿真的可靠性, 同时验证了该打印机包装方案具有良好的保护性能。**结论** 该打印机整体包装方案满足公路物流运输的防护要求, 同时提供了一种物流运输包装方案的可靠性验证方法。

关键词: 包装物流; 运输环境; 随机振动; 加速度功率谱密度

中图分类号: TB485.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2018)23-0151-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2018.23.026

Printer Packaging Scheme Based on Logistics Transportation Environment

ZENG Tai-ying, YU Shui-yuan
(University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

ABSTRACT: The work aims to study the protective performance of printer logistics packaging scheme for the printer during transportation process. Firstly, the random vibration test of the whole package of the printer was carried out to simulate the road condition of highway transportation, and the response acceleration spectral density curve of the product was obtained. Then, the 3D model for the logistics package of the printer was established. The Random Vibration analysis module (Random Vibration) in the finite element software Ansys Workbench was used for the Random Vibration simulation analysis on the whole to obtain the response acceleration spectral density, the total displacement, the stress in each direction and equivalent stress, etc. The response acceleration spectral density obtained from the simulation was compared with the experimental results, and its change trend was consistent. This verified the reliability of the simulation and that the current printer packaging scheme had good protection performance. The printer's overall packaging solution satisfies the protection requirements for highway logistics and transportation, and provides a method for verifying the reliability of logistics transportation packaging solutions.

KEY WORDS: packaging logistics; transportation environment; random vibration; acceleration power spectral density

包装件在物流运输过程中, 其产品经常受到冲击、振动, 振动会导致设备及其内部结构的动态位移, 这些动态位移和响应的速度、加速度可能引起或加剧结构疲劳, 以及结构、组件和零件的机械磨损。然而陆地运输环境比海上运输或空中运输给产品带来的损害更为严重, 而且所有海上和空中运输的前后, 都

必须要经过陆地运输, 因此陆地运输为最基本的运输环境。

陆地运输又包括公路运输和铁路运输, 而公路运输对产品带来的损害比铁路运输更为严重, 公路运输的环境是一种宽带振动, 它是由于车体的支撑、结构与路面平度的综合作用产生的。产品的运输一

收稿日期: 2018-06-22

基金项目: 上海市科学技术委员会科研计划 (14440502600)

作者简介: 曾台英 (1978—), 女, 博士, 上海理工大学讲师、硕导, 主要研究方向为包装运输动力学。

般是指从制造厂到用户以及用户之间所经受的经典环境。对于运输过程中产品包装的保护性则是目前研究的热点,如现有的包装方案是否能够适应运输过程中的外部环境;外界对包装件产生的激励是否能够使得产品完好无损等^[1]。基于此,文中以惠普 Deskjet 1112 打印机的整体包装方案为研究对象,进行运输包装测试,利用 Ansys Workbench15.0 软件进行仿真,将 ISTA 3A 模拟公路运输的加速度作为外界的激励输入,模拟包装件整体的随机振动过程,分析物流运输包装的动态响应,检验现有包装方案的可靠性。

1 随机振动试验

随机振动试验的目的在于验证产品是否能承受寿命周期内的振动与其他环境因素叠加的条件并正常工作,随机振动试验的环境条件是根据包装件物流运输标准,选择包装运输测试模式中的“ISTA 3A”模式为该次模拟公路运输路况的运输测试标准^[2],将该模式作为包装产品的外部激励。并且按要求将打印机整体包装件放置振动台中央用固定杆加固,是为了模拟更真实的运输环境,将 2 个传感器分别放置在振动台台面和产品的顶端。试验中采用国际领先的 L.A.B HV 系列 M7000 液压振动台进行试验,该振动台广泛用于模拟集装箱等运输工具或大包装产品在实际环境中所遭受的振动^[3]。通过导入实际的现场记录数据来更好地复现实际物流环节已知的各种破坏性因素,试验布置见图 1。

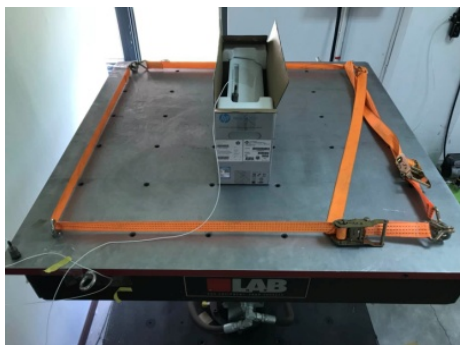


图 1 随机振动试验
Fig.1 Random vibration test

试验采取包装运输测试 (ISTA 3A) 模式,其输入功率谱密度值见表 1。

试验得到的打印机的响应加速度谱密度见图 2。

从图 2 中可以看出,整个试验过程中产品的响应加速度谱密度均在控制线范围之内,表明其随机振动试验的结果是可靠的。

表 1 ISTA 3A 加速度谱密度 (PSD)
Tab.1 ISTA 3A acceleration spectral density (PSD)

编号	频率/Hz	加速度谱密度/($\text{g}^2 \cdot \text{Hz}^{-1}$)
1	1	0.0007
2	3	0.02
3	5	0.02
4	7	0.001
5	12	0.001
6	15	0.004
7	24	0.004
8	28	0.001
9	36	0.001
10	42	0.003
11	75	0.003
12	200	4×10^{-6}

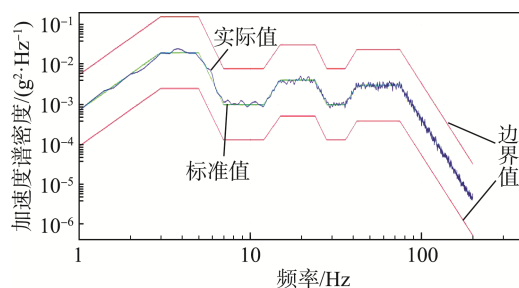
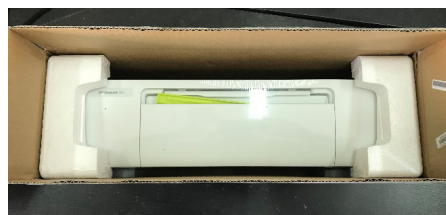


图 2 打印机响应加速度谱密度
Fig.2 Response acceleration spectral density of printer

2 打印机包装件模型的建立

2.1 打印机包装方案

文中研究的打印机运输物流包装方案见图 3,其内缓冲为发泡聚苯乙烯 EPS 材料,外包装结构为瓦楞纸箱包装。



a



b

图 3 打印机整体包装
Fig.3 Printer's whole package

2.2 模型

在 UG NX10.0 软件中进行三维建模，根据打印机整体包装方案模型主要包括打印机、缓冲衬垫、瓦

楞外箱，并对模型进行一定简化，最终模型见图 4。为了与后续 Ansys Workbench 进行对接^[4]，将三维模型按指定 .x_t 格式导出、保存。

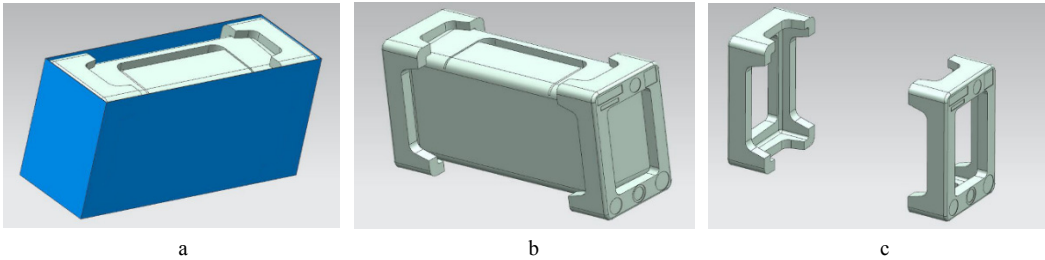


图 4 产品整体三维模型
Fig.4 Overall 3D model of the product

3 有限元仿真分析

3.1 模型导入

有限元模型是一组仅在节点处连接、仅靠节点传力、仅在节点处受约束的单元组合体，它是力学模型离散化的结果，是一个供数值计算的数字化模型^[5]。文中使用的有限元模型是用 UG NX10.0 建立好的三维模型按照一定的格式导出后，再导入 Ansys Workbench15.0 中的 Geometry 模块进行模型的激活，将激活后的模型导入 Modal 模块进行模态分析^[6]。然后设置产品包装材料的参数，其具体参数数值见表 2^[7-8]。其中，ABS/PC 材质为打印机外壳材质。

表 2 产品包装材料参数
Tab.2 Parameters of product packaging material

材料	密度/ (g·cm ⁻³)	泊松比	弹性模量/ MPa	剪切模量/ MPa	屈服强度/ MPa
瓦楞纸	0.142	0.34	207	94	5.82
ABS/PC	157.85	0.30	20 000	862	45
EPS	12.0	0.31	1.52	0.58	38.6

3.2 网格划分及设置接触

网格是计算机辅助工程模拟过程中不可分割的一部分，合理的网格密度、单元形状比和疏密过渡是得到准确结果的保证，网格直接影响到求解精度，求解收敛性和求解速度。根据算法的不同，网格的划分可以分为协调分片算法和独立分片算法两大类。协调分片算法的分片面及边界考虑零件实体间的相互影响，采用小公差，常用于考虑几何体的小特征；而独立分片算法的分片不是太严格，通常用于统一尺寸的网格。机械结构的分析适用于协调分片算法划分网格，文中六面体域网格就属于协调分片算法。

文中在模型的网格划分上采取了对整体进行自动划分网格（Automatic），局部采取了六面体域网格

（Hex Dominant）。自动划分网格可以针对几何模型的复杂性，自动检测实体，对可以扫掠的实体采用扫掠方法划分六面体网格，对于不能扫掠划分的实体采用协调分片算法划分四面体网格。对于产品的内装物需要进行进一步的网格划分，文中在打印机和缓冲衬垫的网格划分上选择了六面体域网格，该网格划分实际上是在模型的外面生成六面体单元，而里面是四面体单元，先在外表面生成一个平面网格然后经过向内拖拉形成块状或者锥状，最后在内部添加锥形四面体单元，该方法适用于块状的几何体^[9]。网格划分的节点数为 96 265，单元数为 32 450，雅可比率平均值为 0.89，基本单元尺寸及极限尺寸均为默认值。网格划分结果见图 5。

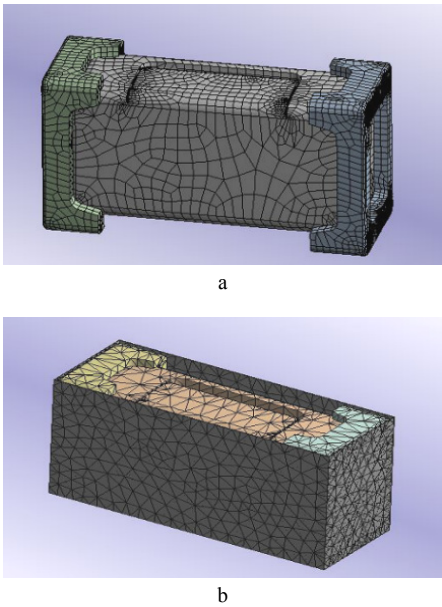


图 5 划分网格后的几何模型
Fig.5 Geometric model after meshing

产品的整体是一个装配体，需要进行接触设置。对于打印机与缓冲衬垫在切向采取绑定接触，在法向

上采取无摩擦接触,2个相互接触的物体之间,只存在2种运动:法向分开和切向相对移动。缓冲衬垫与外箱的上下面接触为光滑无摩擦接触,与外箱内侧面接触为法向不分离接触。设置全部接触均为非对称接触,接触算法为罚函数法^[10]。

3.3 模态分析

根据实际运输的情况,采取包装运输测试(ISTA)中3A模式中的随机振动加速度功率谱密度作为仿真的外部激励^[11]。模态分析是各种动力学分析的基础,

而通过模态分析得到的固有频率和振型反映了包装件的振动特性,而模态振型(或模态位移量)是结构节点或测点的函数,模态振型值一定是用位移表示(应变模态除外),在产品的设计之前预先避免可能引起的共振,结构的振动特性决定了结构对于各种动力载荷的响应情况,这是进行随机振动分析的必要条件^[12]。通过模态分析得到包装件的各阶固有频率和模态振型,提取前六阶固有频率和模态振型见图6。

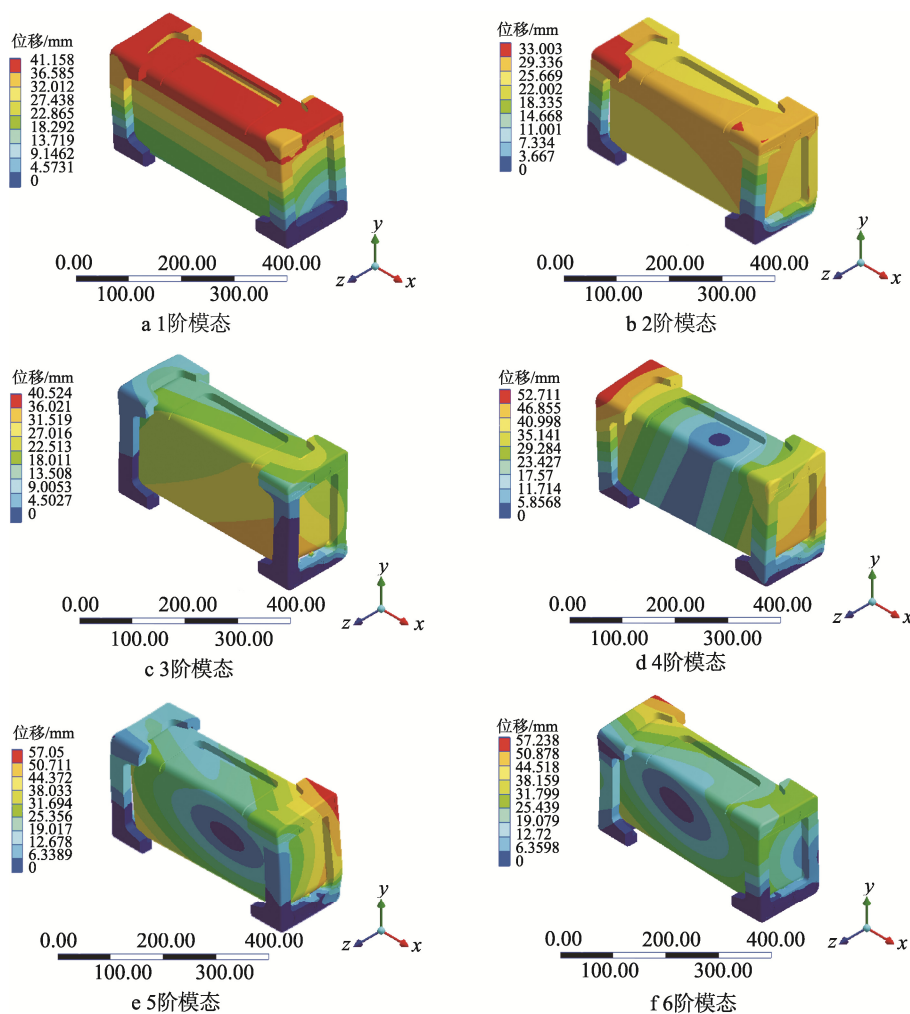


图6 各阶模态振型

Fig.6 Different order modal shape

1阶振型是模型顶部的前后方向摇动,2阶振型是左右方向的摆动,3阶振型是以几何体中心为圆心的收缩变形,4—6阶振型表示的是弯曲与扭转变形^[13—14]。

3.4 随机振动分析

随机振动分析仿真条件与随机振动测试试验的条件相同,将“ISTA 3A”标准中的加速度谱密度值(PSD)作为随机振动仿真中的外部激励,然后将包装件的底部设置固定约束,尽量做到与随机振动试验

环境相一致。

在Ansys Workbench中进行随机振动分析,其主要步骤如下所述^[15—17]。

1) 首先进行参数设置。在Random Vibration模块中,选择PSD Base Excitation里面的PSD G Acceleration,保证其与振动试验的加速度功率谱密度单位的统一,设置完成之后进行求解。

2) 求解与分析。分别设置 x 、 y 和 z 3个方向的参数,进行下一步分析,分别求解出3个方向的Directional Deformation上的变形量,见图7。

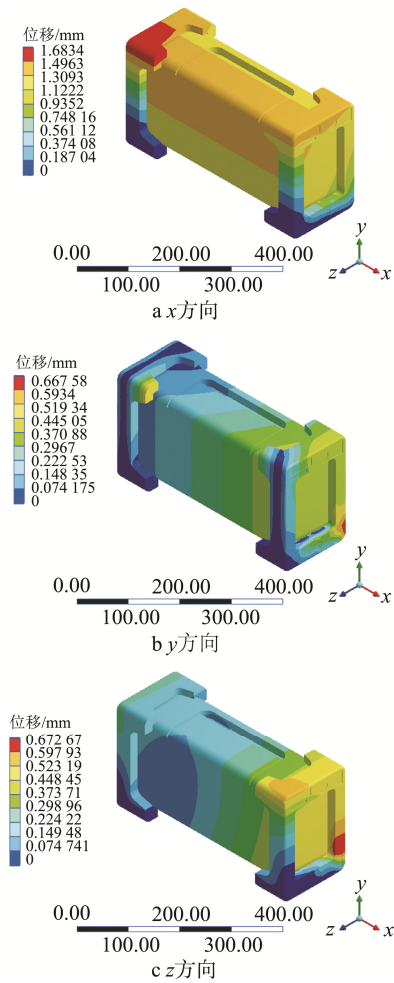


图 7 不同方向上的变形
Fig.7 Deformation of different directions

试验测试时打印机状态为竖立放置，其在 x 方向上的具有最大变形量，从图 7 中分析可得，图 7a 所示 x 方向上的最大变形为 1.68 mm，图 7b 所示 y 方向上的最大变形为 0.66 mm，图 7c 所示 z 方向上的最大变形为 0.67 mm，对比在各个坐标轴的最大变形可得 x 方向的总体位移最大， x 方向上其缓冲衬垫的变形见图 8。

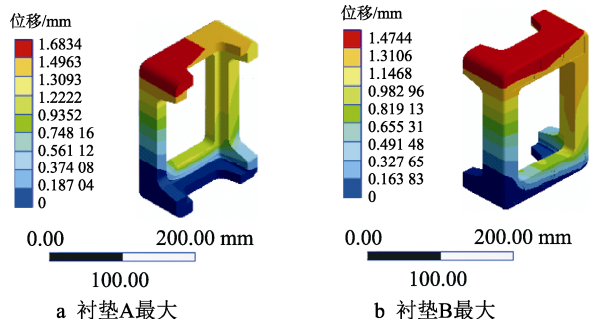


图 8 衬垫最大变形
Fig.8 Maximum deformation of the cushion

由图 9 可知，打印机受到的最大应力为 0.200 29 MPa，最大受力位于打印机的右下角，而打印

机外壳 ABS/PC 材料的许用应力为 24.5 MPa，缓冲衬垫的应力见图 9b, c，因此在 ISTA 3A 这种随机振动的条件下，产品的最大应力小于许用应力，内装物打印机是安全的。

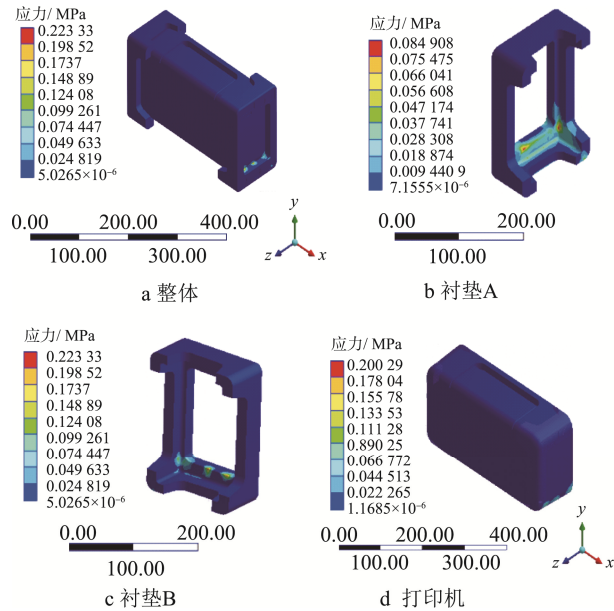


图 9 产品应力
Fig.9 Product stress

3.5 随机振动仿真结论

根据模态分析和振动分析结果表明，打印机产品整体包装件在公路的运输过程中不会发生共振现象，随机振动过程中产生的最大应力均小于材料许用应力值，选择 Response PSD 对其进行设置，在 Geometry 中选择打印机查看仿真过程中打印机的响应，见表 4。

表 4 产品的响应加速度谱密度
Tab.4 Response acceleration spectral density of the product

编号	频率/Hz	加速度谱密度/($\text{g}^2 \cdot \text{Hz}^{-1}$)
1	1	0.0007
2	3.1311	0.02
3	5.3438	0.012
4	7.5566	0.001
5	11.922	0.0019
6	14.376	0.0042
7	24.106	0.0041
8	28.465	0.001
9	35.248	0.0089
10	43.272	0.0037
11	75.402	0.0026
12	200	5.126×10^{-6}

通过试验得到的产品加速度谱密度和通过仿真

分析得到的产品加速度谱密度进行对比分析,见图9。从图9中可以清晰地看出2条曲线就基本处于重合的趋势,试验得到产品的加速度谱密度为 $4 \times 10^{-6} \sim 0.02 \text{ G}^2/\text{Hz}$,仿真得到产品的加速度谱密度为 $5.126 \times 10^{-6} \sim 0.02 \text{ G}^2/\text{Hz}$,试验和仿真的误差为 6.7%,满足国家标准《宽带随机振动试验方法 GB 2433·11—82》中关于工程问题不应超过 25%的要求^[18],仿真的结果比较可靠。对于存在的一定误差可能的原因:计算机建模过程中对三维模型的简化,产品与缓冲衬垫还有外包装三者之间的接触问题,以及实验室环境及人为因素等问题导致。可以认为仿真过程是可靠,误差为合理误差。

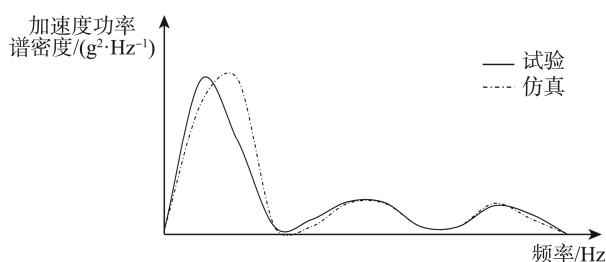


图 10 产品加速度谱密度曲线对比
Fig.10 Comparison of product's acceleration spectral density curve

4 结语

文中对产品的整体进行了随机振动试验,得到了产品试验阶段的加速度谱密度。然后对产品的整体进行了三维建模,使用 Ansys Workbench 里面的随机振动分析模块(Random Vibration)对整体进行随机振动仿真分析,得到整体件的响应加速度谱密度、总位移、各向应力、等效应力等。通过试验结果和仿真得到的结果进行对比后验证了仿真的可靠性,了解到了产品的受力和形变情况,得知产品的最大受力出在打印机和缓冲衬垫的左下角,但是在材料的最大承受能力范围之内,因此该打印机的整体包装还是非常安全的,其内容物打印机在运输过程中不会受到损伤。通过对产品的整体进行了有限元仿真分析,能够很明了地看到整体结构的各类性能,为产品的检测提供了极大的帮助,相比较于传统测试,有限元仿真分析能够大量的节省生产成本、缩短产品的研发周期,对于运输包装的设计方案提供有效的验证方法。

参考文献:

- [1] 王桂英, 吴月. 包装动力学研究进展及研究方向分析[J]. 森林工程, 2015, 31(1): 78—83.
WANG Gui-ying, WU Yue. Analysis on the Research Progress and Direction of Packaging Dynamics[J]. Forest Engineering, 2015, 31(1): 78—83.

- [2] 张卫红, 陈振强, 赵新伟. 运输包装振动试验方法的使用和选择[J]. 中国包装工业, 2015(9): 38—39.
ZHANG Wei-hong, CHEN Zhen-qiang, ZHAO Xin-Wei. Use and Selection of Vibration Test Method for Transport Packaging[J]. China Packaging Industry, 2015(9): 38—39.
- [3] 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 MDOF Package Cushioning System Made of Polyethylene[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(3): 69—72.
- [4] 丁玉平, 钱怡. 基于 ANSYS Workbench 的整体包装件动态缓冲特性仿真分析[J]. 包装工程, 2014, 35(11): 18—22.
DING Yu-ping, QIAN Yi. Dynamic Cushioning Property Simulation Analysis of the Overall Package Based on ANSYS Workbench[J]. Packaging Engineering, 2014, 35(11): 18—22.
- [5] 褚志刚, 夏金凤, 王光建, 等. 循环对称结构重根模态振型相关性修正[J]. 机械工程学报, 2014, 50(23): 59—65.
CHU Zhi-gang, XIA Jin-feng, WANG Guang-jian, et al. Correlation Correction for Doublet Mode Shapes of Cyclic Symmetric Structures[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(23): 59—65.
- [6] 李勤建, 高翠琢, 边国辉. 组件的模态分析和随机振动分析[J]. 半导体技术, 2012, 37(10): 810—814.
LI Qin-jian, GAO Cui-zhuo, BIAN Guo-hui. Modal Analysis and Random Vibration Analysis on a Module[J]. Semiconductor Technology, 2012, 37(10): 810—814.
- [7] NYGARDS M. Modelling the Out-of-Plane Behaviour of Paperboard[J]. Nordic Pulp&Paper Research Journal, 2009, 24(1): 72—76.
- [8] BAUM G A, BRENNAN D C, HABEGER C C. Orthotropic Elastic-Constants of Paper[J]. Tappi, 1981, 64(8): 97—101.
- [9] 许京荆. ANSYS Workbench 工程实例详解[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2015.
XU Jing-jing. ANSYS Workbench Project Example Details[M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2015.
- [10] 余剑武, 柳波, 罗红, 等. 玻璃振动模压中变幅杆高温模态分析及实验研究[J]. 声学技术, 2018, 9(1): 51—56.
YU Jian-wu, LIU Bo, LUO Hong, et al. High Temperature Modal Analysis and Experimental Study of the Ultrasonic Horn for Glass Vibration Molding[J]. Technical Acoustics, 2018, 9(1): 51—56.
- [11] 林强, 董斌. 基于 ANSYS Workbench 对矿用两级斜齿轮减速机的模态分析[J]. 机械传动, 2017, 41(1): 146—150.
LIN Qiang, DONG Bin. Modal Analysis of Two Stage Helical Gear Mining Reducer Based on ANSYS Workbench[J]. Journal of Mechanical Transmission,

- 2017, 41(1): 146—150.
- [12] CHEN M T, ALI A. An Efficient and Robust Integration Technique for Applied Random Vibration Analysis [J]. Computers and Structures, 1998, 66(6): 785—798.
- [13] 曾庆平, 洪育成, 徐皖生. 基于 ANSYS Workbench 的电机转轴的随机振动分析[J]. 内燃机与配件, 2018(4): 59—61.
ZENG Qing-ping, HONG Yu-cheng, XU Wan-sheng. Random Vibration Analysis of Motor Shaft Based on ANSYS Workbench[J]. Internal Combustion Engine & Parts, 2018(4): 59—61.
- [14] 刘习军, 贾启芬. 工程振动理论与测试技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2014.
LIU Xi-jun, JIA Qi-fen. Engineering Vibration Theory and Testing Techniques[M]. Beijing: Higher Education Press, 2014.
- [15] 田金琛, 钱怡. 某包装件的有限元建模及动态性能研究[J]. 包装与食品机械, 2014, 32(4): 1—4.
TIAN Jin-chen, QIAN Yi. Vibration Characteristic Experimental Research and Simulation Analysis of Stew Package[J]. Packaging and Food Machinery, 2014, 32(4): 1—4.
- [16] 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.
- [17] 崔睿, 张广文. 智能座便器包装的跌落仿真研究[J]. 机械工程与自动化, 2017(2): 91—92.
CUI Rui, ZHANG Guang-wen. Optimization and Dropping Simulation Analysis of Intelligent Implement Packaging[J]. Mechanical Engineering & Automation, 2017(2): 91—92.
- [18] 陈秀士. 随机振动多点控制[J]. 环境条件与试验, 1984(4): 37—40.
CHEN Xiu-shi. Random Vibration Multi-point Control[J]. Environmental Conditions and Tests, 1984(4): 37—40.