

# 基于 ANSYS 强度仿真与动力学测试的包装结构优化设计

雷鸣<sup>1</sup>, 吴颖<sup>1\*</sup>, 彭芳<sup>1</sup>, 王卫华<sup>1</sup>, 张士强<sup>1</sup>, 许诚<sup>2</sup>

(1.苏州城市学院, 江苏 苏州 215104; 2.苏州市计量测试院, 江苏 苏州 215100)

**摘要:** **目的** 在保障机械结构强度的前提下, 对消费量大的某泵用木包装结构进行优化设计, 对机械强度进行 CAE 有限元仿真, 并进行振动跌落冲击测试, 以降低成本提高产品价值。**方法** 首先分析产品的使用功能, 设计新型包装方案, 将原有铁底板支撑结构优化改为用材更少的 V 型木质支撑结构, 建立力学模型, 进行底强度分析以及稳定性计算; 然后运用 SolidWorks 建立 3D 模型, 运用 ANSYS Workbench 进行仿真评估; 最后生产出新型包装, 并根据包装测试标准进行了测试。**结果** 新的包装结构用 V 型木质取代了铁底板支撑, 节约了 100% 的铁质包装材料, 并通过了冲击振动跌落测试。优化设计的新包装式能满足运输过程中的冲击振动跌落等产品保护要求, 满足运输稳定性的功能要求。**结论** 本文以价值工程理念为指导, 优化设计的新包装结构, 在满足产品功能的同时节约了成本, 是价值工程在包装优化领域极好的运用, 为机械工程领域包装工程师提供了设计参考和解决方案。

**关键词:** 包装设计; 力学强度仿真; 优化设计; 样品测试; 价值工程

中图分类号: TH122; TH140.8 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2023)21-0253-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.21.031

## Optimization Design of Packaging Structure Based on Strength Analysis of ANSYS and Dynamic Testing Verification

LEI Ming<sup>1</sup>, WU Ying<sup>1\*</sup>, PENG Fang<sup>1</sup>, WANG Wei-hua<sup>1</sup>, ZHANG Shi-qiang<sup>1</sup>, XU Cheng<sup>2</sup>

(1. Suzhou City University, Jiangsu Suzhou 215104, China; 2. Suzhou Institute of Metrology, Jiangsu Suzhou 215100, China)

**ABSTRACT:** The work aims to optimize the design of wooden packaging structure with a large consumption in a certain type of pump on the premise of ensuring the strength of mechanical structure, simulate the mechanical strength by CAE finite element method and carry out the vibration drop impact test to reduce the cost and improve the product value. Firstly, the use function of the product was analyzed and a new packaging scheme was designed. The original steel support structure was optimized to V-shaped wooden support structure and a mechanical model was established to analyze the bottom strength and calculate the stability. Then, SolidWorks was used to construct a 3D model and ANSYS Workbench was adopted for simulation and evaluation. Finally, a new packaging was produced and tested according to the packaging test standards. The new packaging structure replaced the iron baseboard support with V-shaped wood, saving the cost of iron packaging material 100%, and passed the impact, vibration and drop tests. The optimized design of the new packaging type could meet the protection requirements of the impact and vibration drop during the transportation process and satisfy the functional requirements of transportation stability. Guided by the value engineering, the optimized design of the new packaging structure reduces the cost while achieving the required function, which is an excellent application of value engineering in packaging optimization and provides design reference and solutions for packaging

收稿日期: 2023-01-10

基金项目: 2022 年教育部高等学校科学研究发展中心中国高校产学研创新基金项目(2022BL082); 2022 年江苏省高校实验室研究会立项资助研究课题(GS2022BZZ36); 2021 年度江苏省高等学校基础科学(自然科学)研究面上项目(21KJD460006)

\*通信作者

engineers in mechanical engineering field.

**KEY WORDS:** packaging design; mechanical strength simulation; optimization design; sample test; value engineering

包装在机械制造领域使用量特别大,对包装结构进行优化设计可以极大地节约成本<sup>[1]</sup>。在运输途中,颠簸路况的会导致产品受到振动、冲击、摇晃跌落等运输问题的考验<sup>[2]</sup>,包装起到保护产品的重要作用。在设计包装结构时,许多原始的方案采用木质材料与铁质材料结合的方式,存在过度保护从而增加产品成本的现象,包装使用量特别大,不合理的过度设计将增加巨大的成本浪费。

价值工程设计理念被广泛应用于机械工程优化设计领域,价值工程的价值可以表达为  $V=F/C$ 。其中,  $V$  表示价值;  $F$  表示功能;  $C$  表示成本。可见在保障产品功能不变的前提下,减少研究对象的成本可以提高产品在生命周期中的价值。节约成本可以有效提高产品价值,本文中对某外企使用量巨大的产品包装进行结构优化设计和测试<sup>[3-5]</sup>。

木包装具有不生锈、抗冲击能力强、易于加工、十分环保等许多优点。机械制造领域的产品比较笨重,大部分机械产品的包装都选用木包装。彭国勋<sup>[1]</sup>、兰葱<sup>[6]</sup>、樊博<sup>[7]</sup>等学者对包装工程的设计方法和木质托盘的力学性能进行了大量研究。本文基于价值工程理念,运用机械制图软件和有限元分析软件设计新型包装结构,并进行振动跌落冲击测试<sup>[8-9]</sup>。

### 1 新包装结构方案设计

首先对产品的优化进行了方案设计。以某泵用包装为研究对象,该样品外形不规则,包装采用立式包装形式,几何尺寸(长×宽×高)为 740 mm×820 mm×1 400 mm。由于外形不规则,为了方便运输,原始包装设计增加了支撑用铁底板,如图 1a 所示,该铁底板仅用于运输过程中的包装支撑。如图 1b 所示,如果将改包装结构优化设计去掉支撑用铁底板(成本约 110 元),换成价格更便宜的木质 V 形块支撑(成本约 10 元),全球年消费量估算约 82 万个,每个节约 100 元,那么估算 1 年将会节约成本约 8 200 万元,而且节约还会逐年累加,产生较大的经济效益。

基于优化结构节约成本的目标,本文创新性设计了 V 形支撑的包装结构方案,去掉支撑用铁底板,将支撑方式由铁板支撑变为 V 形木块支撑,支撑位置由中间支撑变更为泵体两端法兰支撑,新旧包装结构实物图比较如图 1 所示。本文还根据产品系列的尺寸,设计了不同大小的系列化设计,并进行强度分析,然后加工样品,并进行振动跌落冲击试验验证。

### 2 防倾覆稳定性分析

本文对产品进行了力学防倾覆稳定性分析。文中的泵类产品呈细长结构,立式包装整体重心较高,因

此为了保障运输安全,需对新包装结构进行稳定性分析和运输倾覆危险评估<sup>[10-12]</sup>。本文根据泵类产品尺寸,设计了 4 款尺寸不同但样式相同的包装。文中选择了最大最高的包装为稳定性评估研究对象,其尺寸为 950 mm×870 mm×1 520 mm,整体质量为 560 kg。

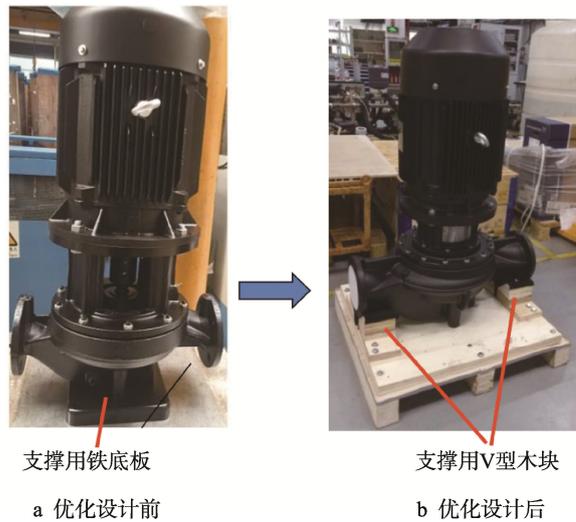


图 1 新旧包装结构实物图比较  
Fig.1 Comparison between old and new physical packaging structures

根据理论力学知识,产品包装的力学模型如图 2 所示。产品重心在整体 2/3 竖直高度,设如果运输过程中侧翻,整体以接地的边为轴线产生翻转。包装长为  $L$ ,高为  $H$ ,重心高度为  $2/3H$ ,设汽车运输时加速度为  $a$ ,重力加速度为  $g$ 。重力力矩为  $M_1=G \times L/2$ ,冲击力力矩为  $M_2=2/3H \times F$ ,冲击力为  $F=ma$ ,取  $a=1 \text{ m/s}^2$ ,包装不侧翻的条件为  $M_1 > M_2$ ,计算结果得重力力矩  $M_1$  为 2 660.00 N/m,倾覆力矩  $M_2$  为 567.47 N/m,  $M_1 > M_2$ ,故不会倾覆,新设计的结构安全。

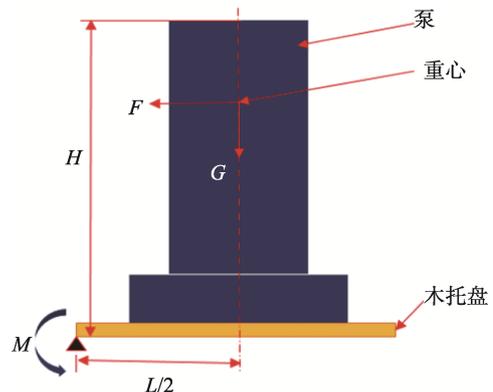


图 2 稳定性计算模型  
Fig.2 Model for stability calculation

木材包装材料主要采用实木和胶合板, 胶合板可以缓解运输过程中的冲击, 混合使用有助于减少木材开裂。底板材质选用胶合板, 底部横梁材质选用实木, 支撑用的 V 形块选用胶合板。木质胶合板的理化性能见表 1。

### 3 三维建模和有限元仿真

本文绘制了新包装结构的三维模型, V 形块支撑泵体的进水口和出水口与法兰相切, 泵体底部中间用 4 颗自攻螺钉配钻连接, 限制泵体的自由度。CAE 有限元仿真技术 (Computer Aided Engineering) 被广泛应用于产品结构强度设计过程中, 为了解底盘的强度, 本文运用 ANSYS Workbench 对包装强度进行了

仿真<sup>[13-14]</sup>, 如图 3 所示。按照使用工况和 ISTA 3E 设置边界条件对模型进行强度仿真<sup>[11]</sup>, 自动划分网格方式, 共有单元数 19 132, 节点数 40 199。

如图 3 所示, 静态情况下最大总变形量为 0.505 mm, 最大静等效应力为 8.87 MPa。查询松木木材参数如表 2 所示<sup>[12-13]</sup>。松木材料的屈服强度为 70 MPa, 胶合板横向静曲强度为 20 MPa。包装的目标是保护商品的安全。根据仿真结果, 泵体的最大应力出现在两端法兰处, 最大应力为 8.87 MPa。泵体材质为 304 不锈钢, 其屈服强度为 205 MPa。底部托盘横梁的等效应力为 8.87 MPa (<20 MPa), 满足支撑强度要求。在底部托盘上部再加上 AA 瓦楞层合板, 就可以有效地保护泵体侧面。在静态条件下, 法兰两端的最大应力远远小于其屈服极限, 因此新包装 V 形块支撑满足保护产品的要求。

表 1 木包装用胶合板的理化性能  
Tab.1 Physical and chemical properties of plywood for wooden packaging

木包装底板厚度 $d/mm$	含水率/%	胶合强度/MPa	静曲强度/MPa		弹性模量/MPa	
			纵向	横向	纵向	横向
$12 < d \leq 18$	$\leq 18$	$\geq 0.7$	$\geq 26$	$\geq 20$	$\geq 4.5 \times 10^3$	$\geq 3.5 \times 10^3$

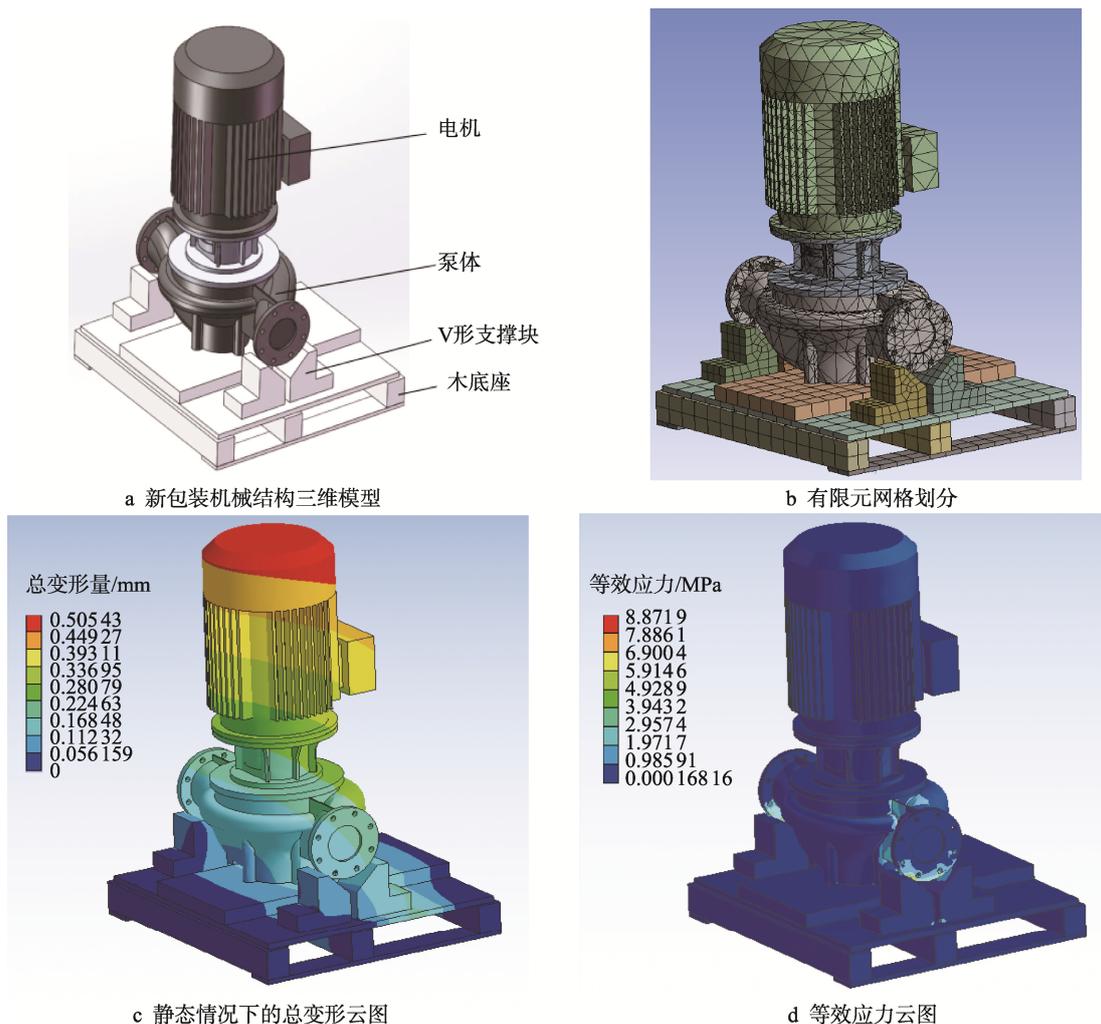


图 3 包装有限元分析  
Fig.3 Finite element analysis for packaging

表 2 松木材质参数  
Tab.2 Properties of pine

密度/ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	弹性模量/ GPa	泊松比	屈服 强度/MPa	顺纹抗拉压 强度/MPa
559	10	0.49	70	100.9

泵体跌落时的动应力云图如图 4 所示。本文运用 LS-DYNA 模拟跌落测试, 泵体跌落时会受到较大的动应力, 根据 ISTA3E 测试标准, 设置边界条件模拟泵体从 200 mm 的高度跌落。根据仿真结果可知, 最大动应力出现在 V 形支撑块与泵法兰接触处, 最大动应力为 132.79 MPa, 小于泵体的屈服强度 205 MPa。因此在跌落时, 包装内部的泵体是安全的。对底部木质托盘部分强度进行分析, 根据底部中间梁的颜色可判断底部托盘受到的冲击应力小于 59.02 MPa, 该应力小于松木顺纹抗拉压强度。仿真结果显示底部托盘具有较好的强度可靠性。

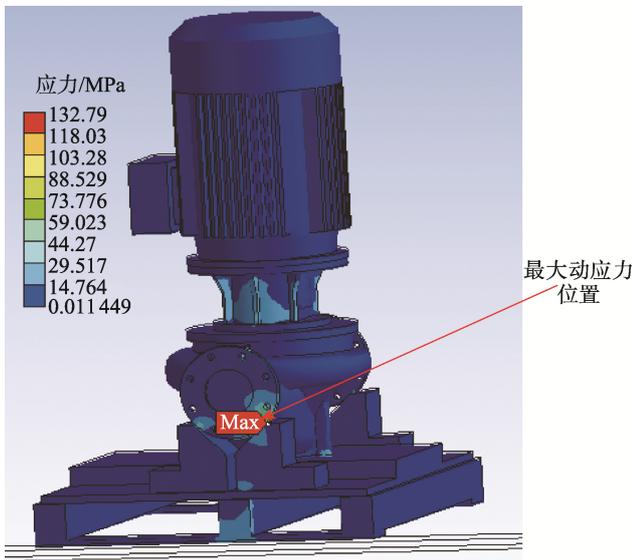


图 4 泵体跌落测试时动应力云图  
Fig.4 Dynamic stress cloud map of pump body during drop test

### 4 包装测试

为了产品安全, 本文对优化设计的新包装结构进

行了动力学测试<sup>[15-18]</sup>, 主要测试包括斜面冲击测试、旋转棱跌落测试、随机振动测试。该测试在苏州广博力学环境实验室有限公司进行。

测试目的: 测试包装在正常运输状况下是否可以保护产品完好无损。

测试样品型号: TP125-400/4-A-F-A-BAQE 400D 50 Hz。

测试的环境: 温度为 10~12 °C, 相对湿度为 40%~44%。

样品的技术状态: 本次试验的样品外观、机构完好。

试验标准: ISTA3E、GB/T 4857.23—2012《包装运输包装件随机振动试验方法》<sup>[8]</sup>。

试验条件如下。

1) 斜面冲(撞)击试验条件: 4 个侧面, 速度为 1.1  $\text{m/s}^2$ , 1 次/向。

2) 跌落试验条件: 4 个边, 跌落高度为 200 mm, 1 次/边。

3) 试验顺序: 初始外观检查—斜面冲击测试—跌落—振动测试—跌落—外观检查。

试验步骤如下。

1) 试验前, 在室温下对需要测试的样品进行检查。

2) 将样品放置在 SMJ-1000 斜面冲击台台面上, 按照斜面冲击测试条件的要求分别对样品施加规定的斜面冲击测试应力。

3) 对样品的 2 个边进行跌落测试。

4) 将样品固定在 C-12000-120/SC-1212 电动振动试验系统台面上, 样品具体安装状态见图 6, 按照振动测试条件, 施加规定的测试应力。

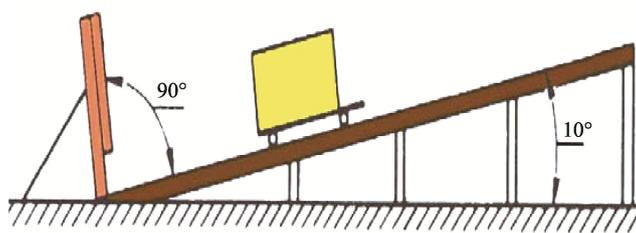
5) 振动测试后, 对样品的另 2 个边进行跌落试验。

6) 试验后, 在室温条件下对测试后的样品进行检查。

主要试验过程如下。

1) 斜面冲击测试如图 5 所示。将要求试验的包装试样放置在倾角为 10°的冲击试验台上, 最大撞击速率为 1.1  $\text{m/s}$ 。重点检查整个包装在货物急停时的抗冲击能力, 还需要检查产品在整个包装材料内的稳定性。包装的 4 个侧面都必须完成斜面撞击试验。

2) 跌落测试如图 6 所示。底座一边垫高 100 mm, 另一边拉高 200 mm, 使其自由跌落, 重点检查底座在跌落的过程中支撑块出现断裂的情况。



a 斜面冲击测试示意图



b 斜面冲击实物测试

图 5 斜面冲击测试  
Fig.5 Inclined impact test

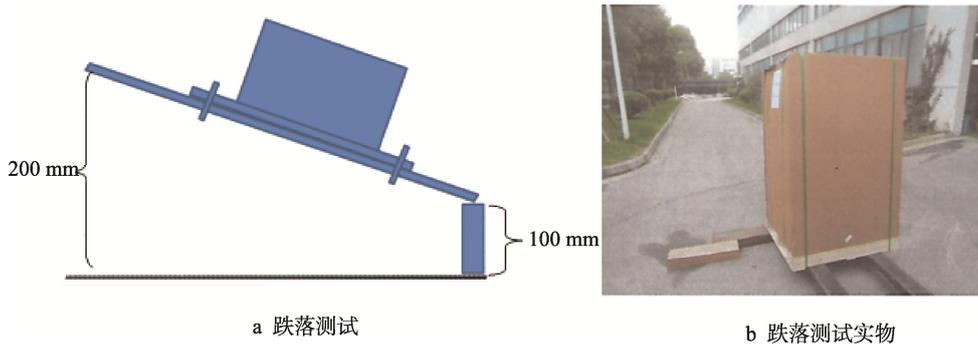


图 6 跌落测试  
Fig.6 Drop test

3) 振动测试如图 7 所示。主要模拟运输路况对包装的破坏情况<sup>[19]</sup>, 本文参考 ISTA 3E 标准采用随机振动试验方法。随机振动试验条件如表 3 所示, 试验中试验设备运行正常, 施加的试验应力曲线如图 8 所示。表 3 中 PSD 即功率谱密度 (Power Spectral Density), RMS 即均方根 (Root Mean Square)。整机测试结束后, 包装无损坏, 测试通过。

表 3 随机振动试验条件  
Tab.3 Random vibration test parameters

频率/Hz	PSD 值/(g <sup>2</sup> ·Hz <sup>-1</sup> )	方向	时间/h	RMS 值
1	0.000 05	z	4	0.52g
4	0.01	z	4	0.52g
16	0.01	z	4	0.52g
40	0.001	z	4	0.52g
80	0.001	z	4	0.52g
200	0.000 01	z	4	0.52g

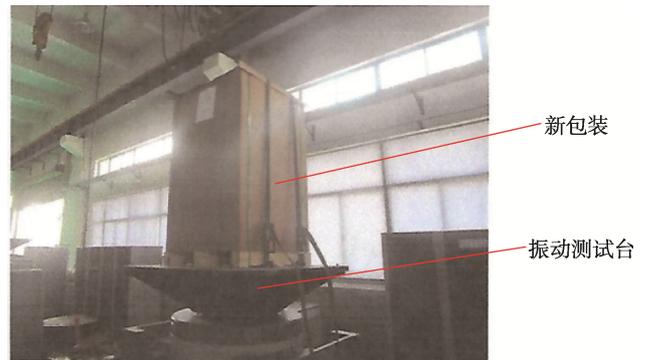


图 7 实验室内振动测试台上的新包装  
Fig.7 New packaging on vibration test board in laboratory

试验结果: 本次试验的具体操作和施加的试验应力符合 ISTA3E 和 GB/T 4857.23—2012 包装测试标准; 试验后样品外包装正常, 底座未发现裂纹, 侧面未发现明显损坏, 包装内含产品的功能与性能正常, 新型木包装结构通过了包装测试。

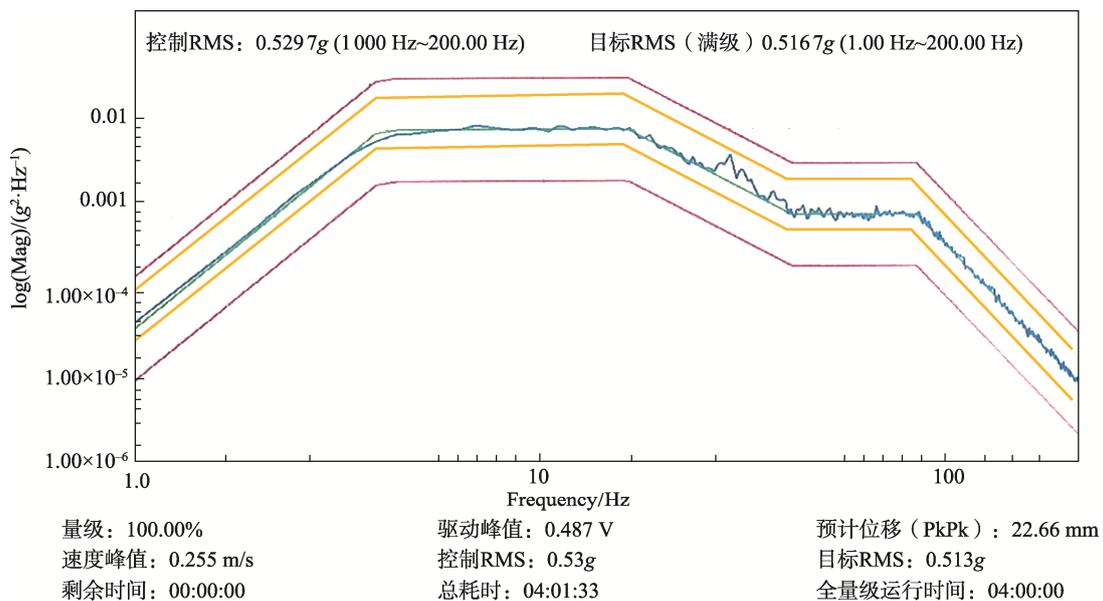


图 8 振动测试应力曲线  
Fig.8 Vibration test stress curve

## 5 结语

1) 本文基于价值工程理念,对年消耗量大的包装结构进行了优化设计,为企业和社会极大地节约了加工和使用成本。新包装在保障产品功能的前提下,铁板用料节约100%,改用更便宜的V形木块支撑。优化后极大地节省了成本,满足价值工程以较少的费用增大产品价值的要求。

2) 本文在样品生产前,运用SolidWorks建立三维模型,用机械设计方法对产品结构进行了防倾覆设计和理论力学计算分析,还运用了ANSYS Workbench有限元仿真技术,对新包装和内部泵体进行了有限元仿真分析,通过仿真确定方案的可行性,可缩短产品研发周期。

3) 本文对新设计的样品进行了冲击、跌落、振动测试验证。测试结果显示优化设计后的新结构能够满足应用工况,使新设计的包装结构能推广应用于生产。本文的设计方案和设计测试方法为包装工程师提供了木包装设计的一些设计参数和行业标准的应用,具有参考意义。

### 参考文献:

- [1] 彭国勋. 机电产品木包装系统设计[M]. 北京: 印刷工业出版社, 2014: 117-118.  
PENG Guo-xun. Wood Packaging System Design with Mechatronics Products[M]. Beijing: Printing Industry Press, 2014: 117-118.
- [2] 孙福佳, 杨明, 陈然, 等. 小型航天精密仪器运输包装箱设计及试验[J]. 包装工程, 2022, 43(23): 259-267.  
SUN Fu-jia, YANG Ming, CHEN Ran, et al. Design and Experiment of Distribution Packaging Box for Small-Sized Aerospace Precision Instrument[J]. Packaging Engineering, 2022, 43(23): 259-267.
- [3] JORDANJL, CASEM D T, BRADLEY J M, et al. Mechanical Properties of Low Density Polyethylene[J]. Journal of Dynamic Behavior of Materials, 2016, 2(4): 411-420.
- [4] 杨勤, 郑文海, 张亚平. 基于价值工程与用户使用体验的产品优化设计研究[J]. 包装工程, 2020, 41(20): 74-78.  
YANG Qin, ZHENG Wen-hai, ZHANG Ya-ping. Product Optimization Design Based on Value Engineering and User Experience[J]. Packaging Engineering, 2020, 41(20): 74-78.
- [5] 张安龙, 阎毓, 王先宝, 等. 新型供气式低压射流曝气器的结构设计与模拟优化[J]. 中国造纸, 2022, 41(2): 77-85.  
ZHANG An-long, YAN Yu, WANG Xian-bao, et al. Structure Design and Simulation Optimization of a New Air-Supplied Low Pressure Jet Aerator[J]. China Pulp & Paper, 2022, 41(2): 77-85.
- [6] 兰葱. 木塑托盘性能检测及标准建立[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2015.  
LAN Cong. Performance Test and Standard Establishment of Wood-Plastic Pallet[D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology, 2015.
- [7] 樊博. 隔离开关模块木包装设计及其可靠性分析[D]. 西安: 陕西科技大学, 2020.  
FAN Bo. Design and Reliability Analysis of Wood Packaging for Disconnecter Module[D]. Xi'an: Shaanxi University of Science & Technology, 2020.
- [8] 雷鸣, 雷敏, 肖大伟, 等. 基于价值工程与振动冲击测试的包装结构优化设计[J]. 包装工程, 2018, 39(17): 118-123.  
LEI Ming, LEI Min, XIAO Da-wei, et al. Optimal Design of Packaging Structure Based on Value Engineering and Vibration Impact Test[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(17): 118-123.
- [9] 袁舜, 潘帅, 卢泓坤, 等. 基于SolidWorks和ANSYS的铁路卷状货物横向限位钢制座架设计[J]. 包装工程, 2022, 43(21): 130-136.  
YUAN Shun, PAN Shuai, LU Hong-kun, et al. Design of Steel Seat Frame for Railway Coiled Cargo Transportation Based on SolidWorks and ANSYS[J]. Packaging Engineering, 2022, 43(21): 130-136.
- [10] 雷鸣. 基于动平衡理论的恒温振荡器自动平衡装置研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2015.  
LEI Ming. Research on Automatic Balancing Device of Thermostatic Oscillator Based on Dynamic Balance Theory[D]. Suzhou: Soochow University, 2015.
- [11] 韩立东. 卷钢座架强度的理论计算与试验结果的对比[J]. 包装工程, 2020, 41(7): 147-151.  
Han Li-dong. Comparative Study on Theoretical Calculation and Test Results of the Strength of a Reinforced Frame[J]. Packaging Engineering, 2020, 41(7): 147-151.
- [12] 彭彪. 木托盘的参数化设计及其应用[D]. 西安: 陕西科技大学, 2013.  
PENG Biao. Parametric Design of Wooden Pallet and Its Application[D]. Xi'an: Shaanxi University of Science & Technology, 2013.
- [13] 黄见远. 实用木材手册[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2012.

- HUANG Jian-yuan. Practical Wood Handbook[M]. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 2012.
- [14] 丁毅, 苏杰, 陈立民. 基于 ANSYS Workbench 的轻质托盘承载性能分析[J]. 包装与食品机械, 2012, 30(2): 67-69.  
DING Yi, SU Jie, CHEN Li-min. Analysis of Load Bearing Properties for the Lightweight Pallet Based on ANSYS Workbench[J]. Packaging and Food Machinery, 2012, 30(2): 67-69.
- [15] 李海连, 李建永, 罗春阳, 等. 大型精密仪器运输包装箱设计及试验[J]. 包装工程, 2018, 39(17): 124-128.  
LI Hai-lian, LI Jian-yong, LUO Chun-yang, et al. Design and Test of Large-Scale Precision Instrument Transportation Packaging Box[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(17): 124-128.
- [16] 余意, 韩勇, 潘迪, 等. 基于有限元法儿童座椅包装件的跌落优化分析[J]. 包装工程, 2020, 41(23): 115-123.  
YU Yi, HAN Yong, PAN Di, et al. Drop Optimization Analysis of Child Seat Package Based on Finite Element Method[J]. Packaging Engineering, 2020, 41(23): 115-123.
- [17] 卜杨, 张新昌. 基于 Ansys Workbench 的吸尘器振动与跌落仿真[J]. 包装工程, 2017, 38(13): 122-127.  
BU Yang, ZHANG Xin-chang. Vibration and Drop Simulation of Vacuum Cleaner Based on Ansys Workbench[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(13): 122-127.
- [18] 路乐意, 孙忠伟, 卢强, 等. 电机包装件跌落分析及仿真[J]. 微电机, 2021, 54(4): 108-110.  
LU Le-yi, SUN Zhong-wei, LU Qiang, et al. Dropping Impact Analysis and Simulation of a Motor Package[J]. Micromotors, 2021, 54(4): 108-110.
- [19] 陈甲伟. 机电产品包装箱的性能分析与状态监测[D]. 南京: 南京林业大学, 2021.  
CHEN Jia-wei. Performance Analysis and Condition Monitoring of Mechanical and Electrical Products Packing Box[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2021.

责任编辑: 曾钰婵