

结构设计制造

基于价值工程与振动冲击测试的包装结构优化设计

雷鸣¹, 雷敏², 肖大伟², 梁志涛¹, 曹志民¹, 尹诗³, 谢君翊⁴

(1.苏州大学文正学院, 苏州 215104; 2.苏州大学, 苏州 215006; 3.苏州新锐合金工具股份有限公司, 苏州 215121; 4.格兰富(中国)投资有限公司, 苏州 215126)

摘要: **目的** 为了满足价值工程节约成本的要求,对某出口海外的木包装容器结构进行优化设计。**方法** 首先对产品功能进行分析,设计新包装的结构方案,由原有的卧式包装优化为用材更少的立式包装,然后运用理论力学知识对泵体进行稳定性计算和底座强度分析,然后运用 CATIA 建立三维模型,运用有限元分析软件 Ansys Workbench 对模型进行强度校核,最后根据国际安全运输协会包装测试标准对样品进行振动、冲击、跌落测试。**结果** 新包装通过了振动冲击跌落测试,优化后的木包装容器满足抗冲击的强度要求,满足不会发生倾覆的功能要求,木材用料节约了 40%,铁支架材料节约了 100%,每年全球公司节约成本约 360 万元。**结论** 新包装在满足产品功能的基础上,大大节约了成本,满足了价值工程以最少费用换取所需要的功能的要求;同时也为跨国包装设计工程师提供一种包装解决方案和技术参考。

关键词: 木包装; 价值工程; 有限元分析; 振动冲击跌落测试; 优化设计

中图分类号: TH122; TB482 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2018)17-0118-06

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2018.17.019

Optimization Design for Packaging Structure Based on Value Engineering
and Vibration Shock TestsLEI Ming¹, LEI Min², XIAO Da-wei², LIANG Zhi-tao¹, CAO Zhi-min¹, YIN Shi³, XIE Jun-yi⁴

(1.Wenzheng College of Soochow University, Suzhou 215104, China; 2.Soochow University, Suzhou 215006, China; 3.Shareate Tools Ltd., Suzhou 215121, China; 4.Grundfos China Holding Co., Ltd., Suzhou 215126, China)

ABSTRACT: The work aims to optimize the structural design of some wooden packaging container exported overseas, so as to meet the cost-saving requirement of value engineering. The product function was analyzed firstly, and then the structural scheme of new package was designed. The original packaging was optimized from horizontal to vertical with less material. Then, the knowledge of theoretical mechanics was applied to calculate the stability of the pump body and analyze the base strength. Then, CATIA was used to create 3D models, and the finite element analysis software Ansys Workbench was applied to calibrate the model strength. At the last, the vibration, shock and drop tests of the samples were conducted according to the ISTA packaging test standards. The new package passed the tests above. The optimized wooden packaging container met the strength requirement of shock resistance and the function requirement of no overturning. The wood material was saved by about 40%, and the steel frame was saved by about 100%. About 3.6 million yuan of global companies was saved per year. On the basis of meeting product functions, the new package greatly saves the cost, and satisfies the requirement of value engineering to gain the required functions with the least expenses. At the same time, one package solution and technical reference are also provided for international packaging design engineers.

KEY WORDS: wooden packaging; value engineering; FEA analysis; vibration, shock and drop tests; optimization design

包装广泛地应用于工业产品领域,基本目的是保护产品生产使用过程中的质量与数量。在运输过程中,产品将受到各种运输问题的考验,如静态压力、

动态压力、摇晃翻滚、冲击撞击等,包装是抵抗考验的第一道门户,因此包装的强度设计很重要。为了保证产品的安全,许多包装在设计时存在过度设计的情

收稿日期: 2018-07-31

作者简介: 雷鸣(1987—),男,硕士,苏州大学文正学院助教,主要研究方向为包装工程、机电系统动态行为及控制。

况,盲目加大构件尺寸而浪费大量材料,包装设计的不合理,造成巨大的资源浪费^[1]。

木包装容器是指采用木材为主要原料制造,并用于产品包装的容器,在机械制造的工业产品领域被广泛应用。木包装容器相对瓦楞层合板容器,具有弹性好、在运输过程中抗冲击能力强,并且不生锈、不污染内装物,易于加工,回收容易,十分环保,便于吊装等许多优点。

工业产品一般比较笨重,需要长距离运输,用木包装是非常合适的包装方式,因此,木包装容器在包装容器中占有非常重要的地位。近年来许多学者专家对包装结构性能进行研究,M.M.Ratna、彭彪等^[2-5]学者将有限元分析方法、参数化设计方法应用于木质托盘的力学性能研究。洪芳华、朱利军等^[6]设计可调式托盘,适用自动化立体库的仓储要求。

价值工程^[7]是一门新兴的管理技术,用最低的总成本可靠地实现产品的必要功能,是降低成本提高经济效益的有效方法。为了满足价值工程节约成本的要求,从产品功能角度出发,文中对某产品木包装进行了优化设计。

1 新包装的结构方案设计

目前,某型号泵体采用卧式包装的形式,其质量较大(单台产品质量超过 1 t),且外形不规则,因此又用了一个大铁架(价值 268 元)来支持泵的安装。到客户现场之后,大铁架对于泵的系统是没有功能效用的。每年这种泵的消费量是 1 万台,那么因为这个铁架子而产生的额外成本是 268 万元。如果将包装优化设计去掉了仅仅铁架子,1 年就会产生约 268 万元的经济效益。同时还可以精简底座的木板,又可以节约一部分包装材料成本。

从成本节约的角度出发,希望底座最小化,因为底座是最消耗木材的。同时希望能去掉铁支架,因为铁支架并不能给客户带来直接的经济效益,仅仅实在运输过程中起到一个支撑作用。

基于这 2 点目标,设计了新型的包装方案,即将安装方式由卧式包装变为立式包装,见图 1,去除铁架的同时对木托盘进行了优化设计,使其底面积减半,从而实现优化设计的目的。

内装物品与包装采用螺钉联结。新旧包装的主要区别如下所述。

1) 安装方式。由卧式包装改为立式包装。

2) 底座优化。旧包装的底座面积减少,底部支撑梁变少,包装底座进行了优化设计。

3) 铁支架去除。旧包装的支撑铁架被去除。

包装容器设计,需先确定好方案,然后进行尺寸

细化和强度分析,然后采购样品,进行振动冲击试验,试验通过之后才能进一步的推广。



图 1 新旧包装的实物比较
Fig.1 Comparison of old and new package in kind

2 稳定性分析和有限元仿真

由于泵体呈细长机身机构,整体泵的重心较高,从安全角度考虑,需要对新的包装进行稳定性计算。按照正常的马路上运输工况,文中对包装与产品整体进行运输时倾覆危险评估。

文中设计了力学模型,见图 2。由于立式包装重心在整体高度 2/3 的位置,根据理论力学评估包装在运输过程中是否存在倾覆危险。包装与产品固定在一起,如果侧翻,会绕着包装底盘与地面接触的棱而翻转。

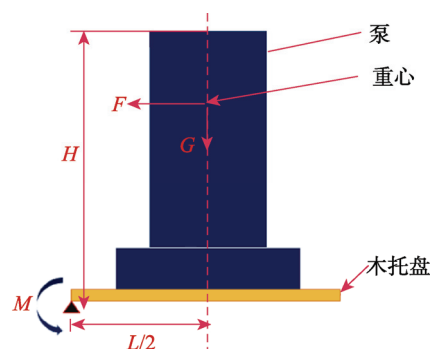


图 2 稳定性计算模型
Fig.2 Model for stability calculation

文中选择了重心最高、质量最大的包装进行强度

计算和测试。对产品种类的尺寸进行了归类,根据产品尺寸设计了 3 款尺寸大小不同的包装。包装成本主要集中在底座的横梁和地板上,根据泵体的尺寸系列,包装尺寸设计^[8]见表 1。

力学模型见图 2,设包装底盘最短边为 L ,则包装中心到底盘边缘的距离为 $L/2$;设包装的高度为 H ,

重心距地面的高度为 $2/3 \times H$;设运输时的道路加速度为 a ,重力加速度为 g 。重力产生的力矩 $M_1 = G \times L/2$,冲击力产生的倾覆力矩为 $M_2 = H \times F \times 2/3$,冲击力 $F = Ma$, $a = 1 \text{ m/s}^2$,如果 $M_1 - M_2 > 0$,则包装不会翻转,包装稳定性计算结果见表 2,从力矩角度分析包装是安全的。

表 1 包装尺寸
Tab.1 Packaging size

型号	旧包装尺寸/cm	新包装尺寸/cm	质量/kg	材料节省比例/%
A	100×150×85	100×85×150	1218	43.3
B	110×170×100	110×100×170	1430	41.2
C	120×200×120	120×120×200	1770	40

表 2 包装稳定性计算结果
Tab.2 Calculation results of packaging stability

型号	加速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	重力力矩 M_1 /($\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$)	倾覆力矩 M_2 /($\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$)	计算结果
A	1	6083.81	1065.75	$M_1 - M_2 > 0$ (安全)
B	1	7857.98	1179.75	$M_1 - M_2 > 0$ (安全)
C	1	10611.75	885.00	$M_1 - M_2 > 0$ (安全)

木材是各向异性材料,木箱的材料使用情况见表 3。为了防止木材开裂,文中在与泵脚接触的地方设计了一层厚度 18 mm 的胶合板,胶合板具有很好的缓冲作用,供应商提供的胶合板的理化性能见表 4。

表 3 木箱构建的材料使用情况
Tab.3 Using conditions of materials for wooden container

顶盖	侧板	底板	底部横梁
实木	实木	胶合板+实木	实木

表 4 组合式包装箱用胶合板的理化性能
Tab.4 The physicochemical properties of plywood for foldable packing case

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/GPa	
			纵向	横向	纵向	横向
$12 < d \leq 18$	≤ 18	≥ 0.7	≥ 26	≥ 20	≥ 4.5	≥ 3.5

为考虑底盘的强度,对包装跌落工况进行了有限元仿真^[9-11],跌落时对底部横梁的瞬间冲击考验最大,见图。文中采用 CATIA 建立三维模型,运用有限元软件 Ansys Workbench 17.0,按照 ISTA 3E 2009 标准和使用工况设置边界条件对模型进行强度分析^[11],包装结构采用自动网格划分方式,共有单元数 67 792,节点数 170 986。

底板为胶合板,胶合板横向静曲强度为 20 MPa,实木选用松木,密度为 559 kg/m^3 ,弹性模量为 10 GPa,泊松比为 0.49,屈服强度为 70 MPa^[12],泵体与底板用 5 颗自攻螺钉配钻连接,见图 3。底部横梁采用马尾松实木,根据《机电产品木包装设计》^[13]查询木材参数,可知顺纹抗拉压强度为 100.9 MPa。由有限元仿真结果可知,底部托盘横梁的等效应力

为 60.3 MPa ($< 100.9 \text{ MPa}$),木材强度满足跌落测试强度。

3 包装测试

在批量生产前,为了保证产品的质量与机械系统的稳固性,文中增加了一根支撑横梁在底部作为加固,根据 ISTA 3E 2009 测试标准,在中国包装科研测试中心苏州实验室,对新优化设计包装做了包装测试,主要测试包括斜面冲击测试(图 4)、旋转棱跌落测试(图 5)、随机振动测试(图 6)。

斜面冲击测试,主要要点是将样品放置在倾斜角度为 100 mm 的实验台上,使其自由滑下时冲击速度为 1.1 m/s,对包装的 4 个侧面都需进行冲击测试,

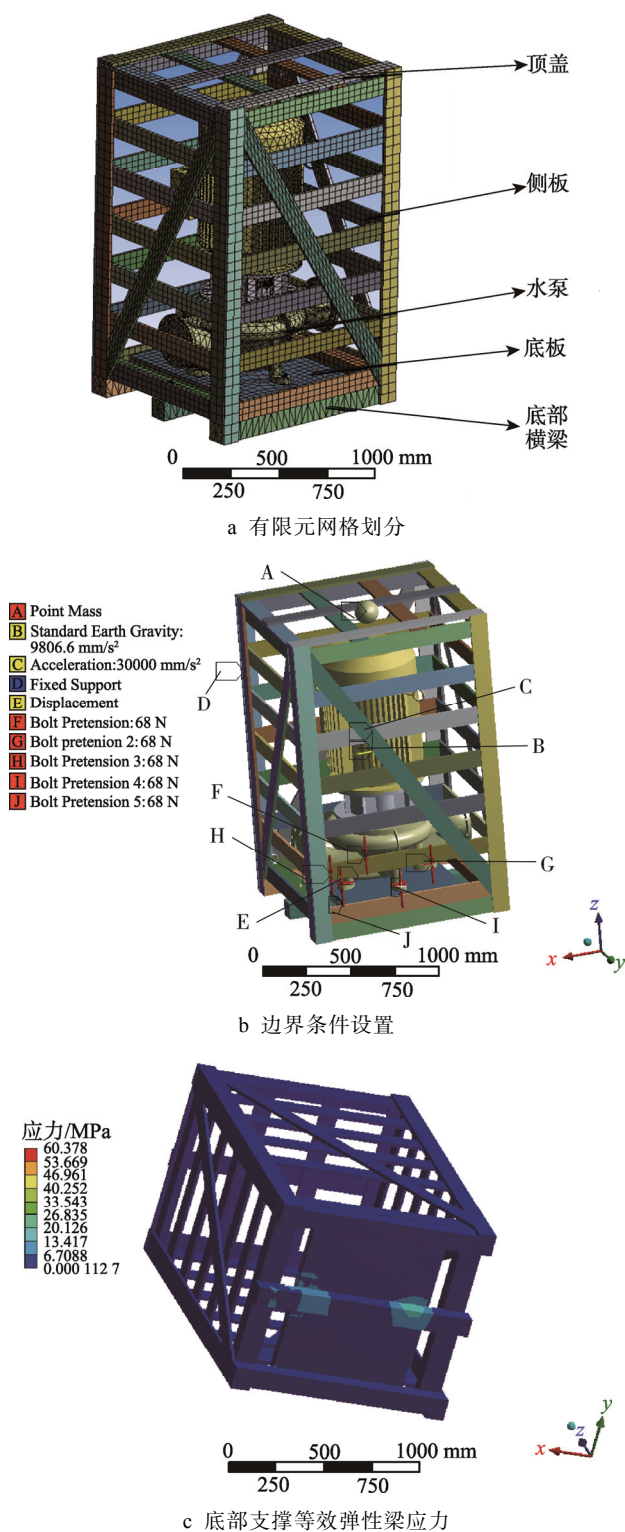


图 3 包装有限元分析
Fig.3 FEA for package

斜面冲击测试考察整体包装的抗冲击能力，模拟运输急停时包装强度及是否会倾倒。

旋转棱跌落测试，主要要点是将托盘一边垫高 100 mm，另外一边抬高 200 mm，使其自由落下，考察底部横梁在跌落过程中是否会断裂。

振动测试模拟运输路况，文中采用了随机振

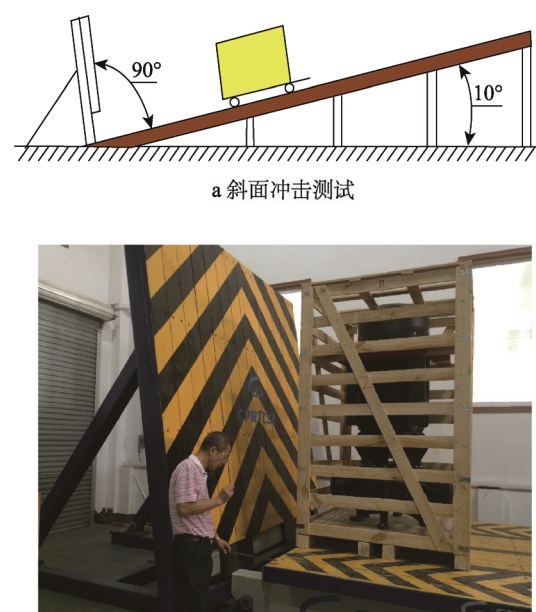


图 4 斜面冲击测试
Fig.4 Inclined shock test

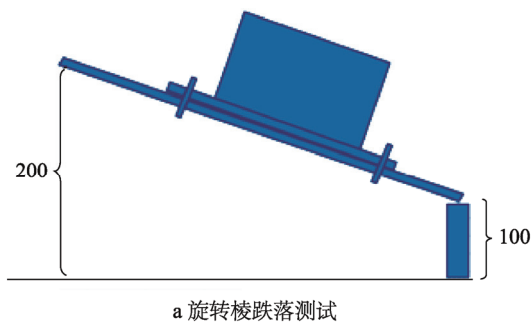


图 5 旋转棱跌落测试
Fig.5 Rotational edge drop test

动^[14—15]试验方法。参考 ISTA 3E 2009 标准测试后，考察整机是否出现松动破损情况。由于整体物件质量超过 1 t，测试部分在中国包装科研测试中心苏州实验室进行专业测试，见图 6。整机测试结束后，包装

无明显损坏,能有效保护内部机器,测试通过。

中国包装科研测试中心苏州实验室
THE LABORATORY OF CHINA PACKAGING RESEARCH & TEST CENTER (SUZHOU)

No:2015-its-163



2.3 Random Vibration Test Package Number: 1#

Place the package's face 3 down on the center of the platform and fix the protective shelves and steel bars around the package. Start vibration system to conduct the vertical random vibration test. Grms: 0.54; Duration time: 4h.

Frequency/ Hz	PSD/ ($\text{g}^2 \cdot \text{Hz}^{-1}$)	Frequency/ Hz	PSD/ ($\text{g}^2 \cdot \text{Hz}^{-1}$)
1	0.0072	25	0.0036
3	0.018	30	0.00072
4	0.018	40	0.0036
6	0.00072	80	0.0036
12	0.00072	100	0.00036
16	0.0036	200	0.000018

图 6 包装测试实验室的振动测试报告

Fig.6 Vibration test report from packaging lab

4 结语

1) 优化设计的木包装容器满足价值工程节约成本的要求。新包装在满足产品功能的基础上,木材用料节约了 40%,铁支架材料节约 100%,大大节约了成本,满足了价值工程以最少费用换取所需功能的要求。

2) 文中在样品生产前,设计阶段运用了有限元仿真技术,大大减少了产品研发周期,然后进行振动冲击测试,使优化设计的木包装容器能应用于生产实际。首先运用 CATIA 建立三维模型,再运用理论力学对产品进行了稳定性计算,再运用 Ansys Workbench 有限元分析软件对产品进行了跌落时的强度分析。通过强度校核和 CAE 模拟之后,对产品做了测试,测试结果显示满足使用工况。

3) 针对木包装容器的优化设计提供了一种解决方案和技术参考,对后续其他设计者在产品价值工程设计方面具有借鉴意义。

参考文献:

- [1] 彭国勋. 论我国木包装的发展趋势[J]. 中国包装, 2010, 30(5): 13—14.
PENG Guo-xun. Research on the Development Trend of Wood Packaging in China[J]. China Packaging, 2010, 30(5): 13—14.
- [2] RATNAM M M. Study of Three-dimensional Deformation of a Pallet Using Phase-shift Shadow Moiré and Finite-element Analysis[J]. Experimental Mechanics, 2005, 45(1): 9—17.
- [3] 彭彪, 陈满儒. 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, CHEN Man-ru. Parameterized Design and Application of Wooden Pallet[D]. Xi'an: Shaanxi University of Science and Technology, 2013.
- [4] 廖英杰. 线性粘弹性塑料托盘的大挠度特性与变形协调研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2013.
LIAO Ying-jie. The Research of Linear Viscoelastic Plastic Pallet Big Deflection Distortion Character and Coordination[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2013.
- [5] 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 Testing & Standard Establishment of Wood-Plastic Pallets[D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2015.
- [6] 洪芳华, 朱利军, 顾逸峰, 等. 可调式两用钢制托盘的设计与应用[J]. 中国物流与采购, 2015(11): 74—75.
HONG Fang-hua, ZHU Li-jun, GU Yi-feng, et al. Design and Application of Adjustable Dual-purpose Steel Pallet[J]. China Logistics & Purchasing, 2015 (11): 74—75.
- [7] 王隆太. 先进制造技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2015.
WANG Long-tai. Advanced Manufacturing Technology [M]. Beijing: China Machine Press, 2015.
- [8] 金仁刚, 金会栋. 出口防震运输木包装箱研究与设计[J]. 包装工程, 2008, 29(5): 58—59.
JIN Ren-gang, JIN Hui-dong. Research and Design of Shockproof Transportation Wooden Packaging Box for Export[J]. Packaging Engineering, 2008, 29(5): 58—59.
- [9] 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.
- [10] 杜宝江, 刘坡. 虚拟联动仿真技术的实现与应用[J]. 包装工程, 2013, 34(9): 6—9.
DU Bao-jiang, LIU Po. Realization and Application of Virtual Linkage Simulation Technology[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(9): 6—9.
- [11] 韩占华, 郭飞. 自动化在包装机械中的应用和展望[J]. 包装与食品机械, 2011, 29(3): 49—52.

- HAN Zhan-hua, GUO Fei. Application and Prospects of the Automation in the Packaging Machinery[J]. Packaging and Food Machinery, 2011, 29(3): 49—52.
- [12] 李晓刚, 薛婉婉, 邹圣扬, 等. 非固定箱式托盘结构优化设计[J]. 中国包装工业, 2015(22): 25—26.
- LI Xiao-gang, XUE Wan-wan, ZOU Sheng-yang, et al. Structural Optimization Design of Non Fixed Box Pallet[J]. China Packaging Industry, 2015(22): 25—26.
- [13] 彭国勋. 机电产品木包装设计[M]. 北京: 印刷工业出版社, 2014.
- PENG Guo-xun. Wood Packaging System Design with Mechantronics Products[M]. Beijing: Printing Industry Press, 2014.
- [14] 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 and Development of the Balancing Device of Incubator Shaker Based on Dynamic Balancing Theory[D]. Suzhou: Soochow University, 2015.
- [15] 闻邦椿, 刘树英, 陈照波, 等. 机械振动理论及应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2009.
- WEN Bang-chun, LIU Shu-ying, CHEN Zhao-bo, et al. Theory and Application of Mechanical Vibration[M]. Beijing: Higher Education Press, 2009.