

## 基于 Ansys Workbench 的快装箱多目标优化设计

李光, 王文雅, 孙彬青, 周彧  
(天津科技大学, 天津 300222)

**摘要:** **目的** 研究快装箱在压力作用下的静态特性, 并对其结构进行多目标优化设计。**方法** 通过 Ansys Workbench 建立快装箱的几何模型和有限元模型, 对快装箱进行静态分析。以快装箱的各箱板厚度和各钢边厚度为设计变量, 以快装箱的质量、最大变形量和最大等效应力为目标函数建立多目标优化的数学模型, 对快装箱进行多目标优化设计, 并且分析对比优化前后的结果。**结果** 通过分析获得的优化前后快装箱的箱板厚度和钢边厚度都有所减小, 在保证强度和刚度的条件下, 使得总质量减少了 9.018%。**结论** 经分析快装箱的多目标优化设计是合理的, 在满足使用要求的前提下, 减少了总质量, 节约了材料, 降低了成本。

**关键词:** 快装箱; 有限元分析; 多目标优化; 最优解集

**中图分类号:** TB485.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2016)23-0029-05

## Multi-objective Optimization Design of Plywood Box Based on Ansys Workbench

LI Guang, WANG Wen-ya, SUN Bin-qing, ZHOU Yu  
(Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300222, China)

**ABSTRACT:** The work aims to study the static characteristics of plywood box under pressure and carry out multi-objective optimization design on its structure. The geometry model and finite element model of plywood box was created via Ansys Workbench and the static analysis on the plywood box was conducted. The mathematical model of multi-objective optimization was established with plywood box board thickness and steel edge thickness as the design variables and with the mass, maximum deformation and maximum equivalent stress of plywood box as the objective functions. Through the said model, the multi-objective optimization design on plywood box was done, and the results before and after the multi-objective optimization were analyzed and compared. Through the analysis on the plywood box board thickness and the steel edge thickness before and after the optimization, both thicknesses had been reduced. Under the condition of ensuring the strength and rigidity, the total mass was reduced by 9.018%. Through the analysis, the multi-objective optimization design of plywood box is reasonable, and the total mass is reduced, the materials are saved and the costs are decreased on the premise of meeting the usage requirements.

**KEY WORDS:** plywood box; finite element analysis; multi-objective optimization; optimal solution set

随着大中型机电产品运输包装业务的持续增长, 对运输包装容器的要求也越来越高。由于快装箱具有连接安全可靠、拆装方便快捷、可重复利用、外观简洁美观等优点, 在现代包装工业的运输包装

领域占据大量市场。快装箱使用高品质胶合板为主要材料, 节省木材, 而且在胶合板的制作过程中采用高温高压、免熏蒸处理, 符合检验检疫的要求, 具有很好的市场前景。

收稿日期: 2016-07-16

基金项目: 大学生创新创业训练计划 (201510057066)

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

快装箱的箱体是由底板、顶盖、2 个侧板和 2 个端板组成的,利用冲压机将带齿的镀锌钢带压入 6 个面板胶合板之中,通过舌形锁扣与钢边的长方形留孔进行咬合来完成箱板与箱板之间的组装连接。国内外学者对快装箱在力学性能、仿真分析和结构优化等方面开展了一系列的研究,取得了一些研究成果。如丁毅<sup>[1-2]</sup>等对快装箱连接件舌扣和顶盖进行了力学分析;Masood<sup>[3]</sup>, Hicks<sup>[4]</sup>和 Koichiro<sup>[5]</sup>将有限元分析方法应用到包装系统的设计中;舒祖菊<sup>[6]</sup>利用有限元和参数识别的方法识别出快装箱材料的弹性模量和泊松比等参数;曾珊珊<sup>[7]</sup>利用 Ansys 对快装箱箱板在受力情况下的蠕变非线性过程进行模拟;宋海燕<sup>[8]</sup>利用 Ansys 对拼装箱的 3 个设计参数(钢边的厚度、胶合板厚度、胶合板材质)分别进行动态跌落测试和静态堆码实验的仿真分析;康柳<sup>[9]</sup>通过 SolidWorks Simulation 对卡扣包装箱进行静态力和跌落测试。为了获得更好的快装箱结构,研究人员也将新的算法应用到优化设计中来,多目标优化方法由于可获得满足设计需求的优化解集,为设计提供更多参考,因此得到了广泛应用<sup>[10]</sup>。Eckart 等<sup>[11-12]</sup>详细阐述了多目标进化算法及其应用;Leung<sup>[13]</sup>将多目标遗传算法应用于纸箱空间的优化;程彬彬<sup>[14]</sup>基于 Ansys Workbench 对龙门铣床横梁进行多目标优化设计;毛君<sup>[15]</sup>基于改进遗传算法对掘进机截割机构进行多目标优化设计。

快装箱设计既要考虑其结构尺寸等设计变量,又要考虑其力学性能和材料成本,是典型的多目标优化问题。对快装箱进行多目标优化设计,在保证可满足快装箱使用要求的情况下,实现质量、成本、结构、安全等方面的最优组合。

## 1 快装箱静力分析

### 1.1 建立几何模型

建立合理的几何模型是有限元分析的基础,为了保证分析的准确性,文中选用 Ansys Workbench 的 DM 模块建立快装箱的几何模型。快装箱的几何尺寸为 740 mm×390 mm×650 mm;组成快装箱的 6 块胶合板通过舌型锁扣钉合而成,其中前后板的尺寸为 740 mm×390 mm×8 mm,左右侧板的尺寸为 390 mm×650 mm×8 mm,上下板的尺寸为 740 mm×650 mm×8 mm;钢边的宽度为 20 mm、厚度为 1 mm。快装箱的几何模型见图 1。

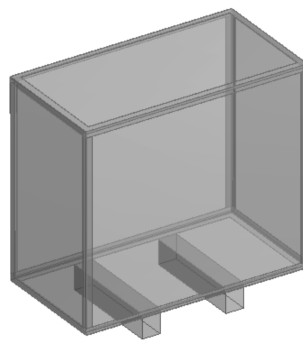


图 1 快装箱的几何模型

Fig.1 Geometry model of plywood box

### 1.2 定义材料属性

快装箱涉及到 3 种材料,其中 6 个面板材料为胶合板、连接处的钢边以及底部的木垫块。在 Engineering Data 中定义胶合板、钢边和垫块的材料属性,材料参数见表 1。

表 1 材料参数  
Tab.1 Material parameter

|     | 密度/(kg·m <sup>-3</sup> ) | 泊松比  | 弹性模量/GPa |
|-----|--------------------------|------|----------|
| 胶合板 | 541                      | 0.25 | 2.116    |
| 钢边  | 7800                     | 0.3  | 200      |
| 垫块  | 600                      | 0.25 | 5.52     |

### 1.3 接触设置

Ansys Workbench 中共有 5 种接触类型可供选择,并且带有接触侦测的功能,即可以自动侦测并且建立各部件间的相互接触。根据快装箱各个部分之间的装配方式,设置接触关系。胶合板与钢边之间、胶合板与垫块之间均定义为绑定(Bonded)接触。

### 1.4 网格划分

Ansys Workbench 提供很多网格划分(Mesh)的方法,但是网格划分得越精细,相应的计算量就越大。为了方便计算,采用 Physics Preference 物理结构自动网格划分,为了使计算更精确,设置全局网格控制 Relevance 为 100,尺寸(Sizing)中 Relevance Center 为 Fine。通过划分网格生成快装箱的有限元模型,见图 2,共含有 204 677 个节点、46 335 个单元。

### 1.5 定义载荷和约束

模拟快装箱在压力试验中上压板受到压缩,选

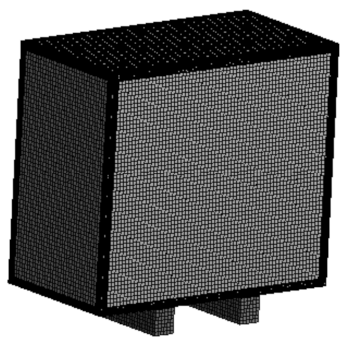


图 2 快装箱有限元模型

Fig.2 Plywood box finite-element model

用 11 559 N 的分布载荷均匀地作用在快装箱有限元模型框架的上表面,方向为垂直向下。在快装箱进行压力试验的过程中,快装箱平放在工作台上,受到上压板向下的压力,由于垫块与工作台的底面相互接触,底部的垫块是不会发生任何位移的,所以垫块的下表面设置为固定约束。

### 1.6 静力分析结果

对有限元模型通过 Ansys Workbench 求解,得到了快装箱的总变形和等效应力云图,见图 3。通过图 3 可以看出,快装箱的最大变形发生在快装箱侧板的中间位置,快装箱受到的最大等效应力发生在底部钢边与底板的连接处,远离载荷和约束的面板和钢边的应力值偏低,有相当大的优化空间。

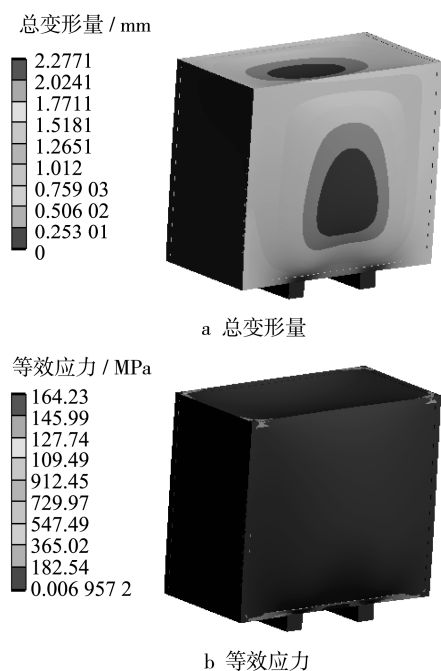


图 3 快装箱的云图分析结果

Fig.3 Analysis results of nephogram of plywood box

## 2 快装箱多目标优化

快装箱的优化是十分复杂的,需要考虑各种因素,例如环境、载荷、几何特征、材料参数、施工过程、费用等,因此在进行问题的描述时,要抓住主要问题的主要方面,删繁就简,写出最适合的数学模型,才能实施优化。进行多目标优化设计的价值和有效性主要取决于所用数学模型的准确性和选取相应的寻优算法。

### 2.1 数学模型

以快装箱胶合板的底板厚度  $d_1$ 、前后板厚度  $d_2$ 、侧板厚度  $d_3$ 、侧面钢边厚度  $d_4$  和底面钢边厚度  $d_5$  为设计变量,以快装箱的总质量、最大变形量、最大等效应力为目标函数,建立快装箱多目标优化数学模型。即在满足强度要求,并且在变形量尽量小的条件下,来寻求最优的胶合板的厚度和钢边的厚度,使得快装箱的质量最小。

### 2.2 多目标遗传算法

快装箱的优化方法采用多目标遗传算法,简称 MOGA, MOGA 算法通过“Pareto 最优个体”对群体里所有的个体进行排序,根据排列的次序进行选择,从而使排在前面的 Pareto 最优的个体有更多的机会可遗传到下一代的群体。经过这样一定代数的循环,能够快速找到多目标优化问题的 Pareto 最优的参数,能够避免繁琐的试验过程,从而提高优化效率。

设置最大允许的 Pareto 比例为 80%,即收敛准则为:群体中至少有 80%的样本包含在此迭代得到的 Pareto 优化前沿则停止迭代;设置种群数量为 100,最大的迭代次数为 20。

### 2.3 优化结果

由局部灵敏度可以直观地看到每个设计变量在整个变化范围内对目标变量的影响程度,见图 4,图 4 中矩形的高度比例代表该变量对目标变量的影响程度,矩形越高代表该设计变量对目标函数的影响程度越大。

从图 4 可以得出,快装箱的总质量与 5 个设计变量成正比关系,快装箱的最大总变形量和最大等效应力与 5 个设计变量成反比关系。其中,对快装

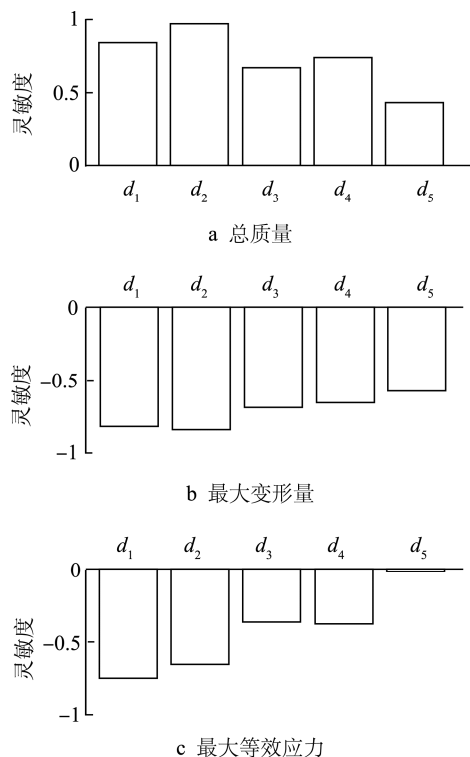


图 4 局部灵敏度

Fig.4 Local sensitivity figure

箱的总质量影响最大的是前后板的厚度  $d_2$ , 其次是底板厚度  $d_1$ 、侧面钢边厚度  $d_4$ 、侧板厚度  $d_3$ , 对总质量影响最小的是底面钢边的厚度  $d_5$ 。前后板厚度  $d_2$  和底板厚度  $d_1$  对快装箱的最大变形量影响较大, 其次是侧板厚度  $d_3$  和侧面钢边厚度  $d_4$ , 对最大变形量影响较小的是快装箱底面钢边厚度  $d_5$ 。对快装箱的最大等效应力影响最大的是底板厚度  $d_1$ , 其次是前后板厚度  $d_2$ 、侧面钢边  $d_4$ 、侧板厚度  $d_3$ , 底面钢边厚度  $d_5$  对最大等效应力影响较小。

Pareto 最优解集根据需要设置不同的权重值来选择合适的优化方案。在 Design Explorer 中可以通过设置目标函数的重要性来决定权值以选取最优解集。对优化问题中较关注的变量设置其重要性为 Higher, 关注度较低的变量设置为 Lower。最后得到 3 个最佳候选点, 相应参数见表 2。

对比以上 3 种情况下的优化设计得出的最优解集, 选取候选设计点 1 作为快装箱多目标优化设计的最优解。用数学模型来表示, 相对应的设计变量为  $x=(7.5, 6.9934, 6.9489, 0.417\ 65, 0.450\ 42)^T$ ,

表 2 优化设计的候选点

Tab.2 Candidate point of optimization design

| 候选点 | 底板厚度/mm | 前后板厚度/mm | 侧板厚度/mm | 侧面钢边厚度/mm | 底面钢边厚度/mm | 质量/kg  | 最大总变形量/mm | 最大等效应力/MPa |
|-----|---------|----------|---------|-----------|-----------|--------|-----------|------------|
| 1   | 7.5     | 6.9934   | 6.9489  | 0.417 65  | 0.450 42  | 11.643 | 2.4785    | 171        |
| 2   | 8.6315  | 6.0446   | 7.1227  | 0.416     | 0.515 02  | 11.56  | 1.844     | 168        |
| 3   | 7.98    | 6.2475   | 6.9604  | 0.668 27  | 0.574 12  | 11.514 | 2.6614    | 176        |

目标函数为  $F=(11.634\text{ kg}, 2.4785\text{ mm}, 171\text{ MPa})$ 。

### 3 快装箱优化后静力分析

通过 Ansys Workbench 的 Design Explorer 对快装箱结构进行优化设计, 得到在满足强度要求并且使快装箱的变形量尽量最小的条件下合适的胶合板厚度和钢带的厚度, 见表 3。通过对比优化前后的结果, 优化后底板厚度减小了 6.25%, 前后板厚度减小了 12.58%, 侧板厚度减小了 13.13%, 侧面钢边厚度减小了 0.58%, 底面钢边厚度减小了 54.96%。

将优化后的设计变量结果整合后输入快装箱的模型参数中, 重新进行静力学分析, 得到优化后的快装箱变形云图和等效应力云图, 见图 5。

优化结果表明, 通过对快装箱厚度以及钢带厚

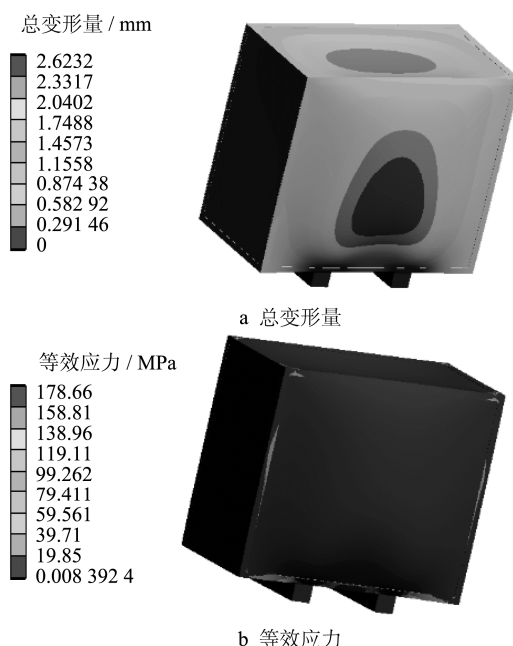


图 5 优化后快装箱的云图分析结果

Fig.5 Analysis results of nephogram of optimized plywood box

度的优化设计,使得快装箱的整体质量减少了 9.018%。此时快装箱的最大总变形量为 2.4785 mm,最大等效应力为 171 MPa,虽然比优化前略有增加,但仍在允许的范围之内,小于钢边屈服强度 345 MPa。该设计在满足快装箱使用要求的前提下,优化了快装箱的质量,达到了节约材料、降低成本的目的。

#### 4 结语

应用 Ansys Workbench 对快装箱进行几何模型的建立和有限元分析。选取快装箱的底板厚度、前后板厚度、侧板厚度、侧面钢边厚度、底面钢边厚度为设计变量,选取快装箱的质量、最大总变形、最大等效应力为目标函数,建立多目标优化的数学模型。采用多目标遗传算法对快装箱进行多目标优化,得到了在满足强度要求并且在使快装箱的变形量尽量最小的条件下合适的胶合板厚度和钢带的厚度。通过对比优化前后的各项参数,最终得到的优化结果在满足快装箱使用要求的前提下,快装箱的质量减少了 9.018%,达到了节约材料、降低成本的目的。

#### 参考文献:

- [1] 汪如红, 丁毅, 许曼. 快装箱连接件舌扣受力分析与研究[J]. 包装工程, 2010, 31(5): 62—65.  
WANG Ru-hong, DING Yi, XU Man. Stress Analysis and Research on Quickly Assembling Box's Tongue[J]. Packaging Engineering, 2010, 31(5): 62—65.
- [2] 丁毅, 于志慧, 许曼, 等. 快装箱顶盖力学模型的建立及研究[J]. 包装工程, 2011, 32(21): 62—63.  
DING Yi, YU Zhi-hui, XU Man, et al. Establishment and Study of Mechanical Model of Quickly Assembling Box Cover[J]. Packaging Engineering, 2011, 32(21): 62—63.
- [3] MASOOD S H, RIZVI S. An Investigation of Pallet Design Using Alternative Materials for Cold Room Applications[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2006, 29(1): 1—8.
- [4] HICKS B J, MULINEUX G, SIRETT D. A Finite Element-Based Approach for Whole-System Simulation of Packaging Systems for Their Improved Design and Operation[J]. Packaging Technology and Science, 2009, 22(4): 209—227.
- [5] KOICHIRO A, KAWORU Y, HIROSHI O. Ultra-Large Scale Fracture Mechanics Analysis Using a Parallel Finite Element Method with Submodel Technique[J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2015(5): 44—55.
- [6] 舒祖菊. 快装箱的有限元仿真与优化设计[D]. 西安: 陕西科技大学, 2009.  
SHU Zu-ju. Finite Element Simulation and Optimization Design of Plywood Box[D]. Xi'an: Shaanxi University of Science & Technology, 2009.
- [7] 曾珊珊, 张智杰, 向颖. 快装箱箱板的蠕变非线性分析[J]. 包装工程, 2012, 33(11): 63—65.  
ZENG Shan-qi, ZHANG Zhi-jie, XIANG Ying. Non-linear Creep Analysis of Plywood Box's Board[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(11): 63—65.
- [8] 宋海燕, 杨帆, 王斌. 基于 Ansys 的拼装箱力学性能研究及优化设计[J]. 包装工程, 2016, 37(3): 25—29.  
SONG Hai-yan, YANG Fan, WANG Bin. Mechanical Properties and Optimization Design of Splice Box Based on Ansys[J]. Packaging Engineering, 2016, 37(3): 25—29.
- [9] 康柳, 刘婧, 张佳娟, 等. 基于 SolidWorks 的卡扣快装箱有限元分析[J]. 包装工程, 2015, 36(3): 65—69.  
KANG Liu, LIU Jing, ZHANG Jia-juan, et al. Finite Element Analysis of Quickly Assembled Box with Buckles via Solidworks[J]. Packaging Engineering, 2015, 36(3): 65—69.
- [10] 安伟刚. 多目标优化方法研究及其工程应用[D]. 西安: 西北工业大学, 2005.  
AN Wei-gang. Study on Multi-objective Optimization and its Application in Engineering[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2005.
- [11] ECKART Z. Evolutionary Algorithms for Multiobjective Optimization: Methods and Applications[D]. Zurich: Swiss Federal Institute of Technology, 1999.
- [12] ECKART Z, THIELE L. Multiobjective Evolutionary Algorithms: A Comparative Case Study and the Strength Pareto Approach[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 1999, 3(4): 257—271.
- [13] LEUNG S, WONG W K, MOK P Y. Multiple-objective Genetic Optimization of the Spatial Design for Packing and Distribution Carton Boxes[J]. Computers & Industrial Engineering, 2008, 54(4): 889—902.
- [14] 程彬彬, 黄美发, 吴常林, 等. 基于 Ansys Workbench 的龙门铣床横梁多目标优化设计[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2015(2): 10—12.  
CHENG Bin-bin, HUANG Mei-fa, WU Chang-lin, et al. Multi-objective Optimization Design of Gantry Milling Machine Beam Based on Ansys Workbench[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2015(2): 10—12.
- [15] 毛君, 潘德文, 谢苗, 等. 基于改进遗传算法的掘进机截割机构的多目标优化设计[J]. 机械强度, 2016, 38(2): 271—275.  
MAO Jun, PAN De-wen, XIE Miao, et al. Multi-objective Optimization Design for Cutting Mechanism of Road Header Based on Improved Genetic Algorithm[J]. Journal of Mechanical Strength, 2016, 38(2): 271—275.