

基于 Ansys Workbench 的机电产品木质包装箱的结构优化

沈仙法¹, 崔小龙²

(1.三江学院, 南京 210012; 2.南京林业大学, 南京 210037)

摘要: **目的** 为了节约木材资源, 降低包装箱的生产成本, 优化某型机电产品木质包装箱的结构尺寸。**方法** 根据产品的外形尺寸、质量分布和运输要求, 利用 UG 软件设计木质包装箱的结构, 将其主要承载构件——枕木和纵梁的三维模型导入 Ansys Workbench 中, 然后建立枕木和纵梁的优化模型进行迭代分析求解, 获得枕木和纵梁截面尺寸、最大挠度和体积的最优解, 再对优化前后的枕木和纵梁结构进行有限元分析比较。**结果** 在满足弯曲强度和刚度的条件下, 枕木的最优截面宽度和高度为 0.044 m 和 0.032 m, 纵梁的最优截面宽度和高度为 0.148 m 和 0.158 m; 优化后枕木和纵梁的总体积分别降低了 41.324% 和 8.661%, 包装箱总质量降低了 34.79 kg, 实现了减少木材用量的优化目标。**结论** 合理增大枕木和纵梁的截面高度可提高其刚度, 适当减小枕木和纵梁的截面宽度可显著降低其体积和质量。

关键词: 木质包装箱; 有限元法; Ansys Workbench; 结构优化

中图分类号: TB484.2; TB482.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2020)13-0104-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2020.13.014

Structural Optimization of Wood Packaging Boxes for Mechanical and Electrical Products Based on Ansys Workbench

SHEN Xian-fa¹, CUI Xiao-long²

(1.Sanjiang University, Nanjing 210012, China; 2.Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

ABSTRACT: The work aims to optimize the structure size of the wooden packaging box of a mechanical and electrical product for saving wood resources and reducing production cost of packaging boxes. The structure of the wooden packaging box was designed by UG according to the overall dimension, quality distribution and transportation requirements of the product. The 3D models of sleepers and longitudinal beams, which were the main load-bearing parts, were imported into Ansys Workbench. Then, the optimization models of sleepers and longitudinal beams were established for iterative analysis and solution to obtain the optimal solution of cross-section size, maximum deflection and volume of sleepers and longitudinal beams. Finally, the finite element analysis and comparison of sleepers and longitudinal beams were carried out before and after optimization. The optimal section width and height of the sleeper were 0.044 m and 0.032 m, and the optimal section width and height of the longitudinal beam were 0.148 m and 0.158 m under the condition of meeting the bending strength and rigidity. The total volume of the optimized sleepers and longitudinal beams were reduced by 41.324% and 8.661%, respectively, and the total mass of the packaging box was reduced by 34.79 kg, which realized the optimization goal of reducing wood consumption. Reasonable increase of cross-section height of sleepers and longitudinal beams can improve their rigidity, and the proper decrease of their cross-section width can significantly reduce their volume and mass.

KEY WORDS: wood packaging box; finite element method; Ansys Workbench; structural optimization

收稿日期: 2019-10-20

基金项目: 江苏省高校自然科学研究项目 (17KJB460011, 14KJB460022)

作者简介: 沈仙法 (1974—), 男, 博士, 三江学院副教授, 主要研究方向为机械系统动态设计及优化。

机电产品运输包装容器中,木质包装箱因具有承载荷载大、耐压强度高、抗碰裂和制作方便等优点,得到了广泛使用。这些木质包装箱使用后大多被废弃,给我国宝贵的木材资源造成了极大浪费。另外,木质包装箱的生产厂家一般都是凭借经验来设计和制作包装箱,设计的强度和刚度往往过高,从而导致木材过度使用。

目前,国内外学者对包装箱结构优化进行过一系列研究。崔小龙和黄先宝等^[1-3]采用有限元法对包装箱结构进行模态分析,得到了包装箱的结构优化方案。丁毅等^[4]制定了某厂产品木质包装箱的优化方案,阐述了包装箱的优化设计方法和步骤。敖文刚和 BENJAMIN F 等^[5-6]采用有限元法对板材包装结构和网箱托盘进行了结构优化。石军键^[7]采用有限元法分析了木箱在 4 种工况下的受力和变形情况,并根据分析结果对钢架木箱的结构进行了优化。

综上所述,采用有限元法更有利于分析传统工程力学的受力和强度问题,更有利于工程技术人员进行包装箱的结构设计优化和强度验证等工作,使复杂工程问题简单化,从而可降低包装箱的设计及试验成本,减少结构设计的不合理现象。为此,文中将以某型机电产品木质包装箱为研究对象,对其进行有限元优化和分析,实现减少木材用量的目标,降低包装箱质量,节约成本。

1 机电产品包装箱三维建模

首先根据某型机电产品的结构外形尺寸、质量分布以及包装运输要求完成包装箱的结构设计,然后利用 UG 软件,建立木质包装箱的三维模型,见图 1。

底架是木质包装箱的主要承载结构,底架上枕木

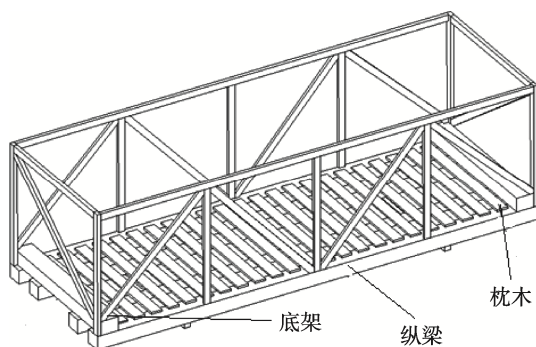


图 1 包装箱三维模型

Fig.1 3D model of the packaging box

和纵梁是其重要构件。包装箱底架上共有 23 根枕木,4 根纵梁。为有利于仿真,根据其结构将产品施加给枕木和纵梁的载荷设为均布载荷,再对其进行力学模型简化和优化分析。包装箱设计的额定装载质量为 8 t,堆码工况下,机电产品重量均布施加在枕木上,再作用在纵梁上。

2 木质包装箱主要构件有限元模型

将木质包装箱枕木和纵梁的三维模型利用 UG 接口程序直接转换成 Ansys Workbench 可以识别的 *.x_t 文件格式,并导入 Ansys Workbench 软件中。

2.1 单元类型

有限元分析过程中,不同分析对象需采用不同单元类型。单元类型是否合理直接影响到计算结果的准确性,所以选择合适的单元类型非常重要。根据木质包装箱的几何结构特点,该次采用 Beam188 单元。此单元有 2 个节点,每个节点有 6—7 个自由度,这种单元主要适合分析细长到中等粗短的梁结构。

2.2 材料参数

机电产品包装箱设计材质为松木,松木是一种增强纤维复合材料,属于各向异性材料。对于各向异性材料,其正应力不仅产生正应变,而且会产生剪应变。同样,剪应力除了产生剪应变外,还要产生正应变。这种拉剪耦合效应由其物理特性所决定。松木的各向异性通过 9 个工程弹性常数^[8]来确定和表现,见表 1。

2.3 网格划分

Ansys 软件中提供了自动划分法、四面体单元划分法、六面体单元为主法、扫掠划分法和多域扫掠法等多种网格划分方法^[9-10]。根据分析构件的几何特点,枕木和纵梁均采用扫掠划分法划分网格。

3 主要构件结构优化与分析

3.1 结构优化设计方法与步骤

结构优化设计是一种寻找或确定最优设计方案的技术^[11],这种方案需满足所有设计要求,且最有效(如体积、质量和应力最小)。其具体优化设计流程见图 2。

表 1 松木力学参数

Tab.1 Mechanical parameters of pine

密度/(kg·m ⁻³)	弹性模量/MPa			剪切模量/MPa			泊松系数		
	纵向	横向	弦向	纵横向	横弦向	纵弦向	纵横向	横弦向	纵弦向
450	9171	460.4	831.6	521.7	44.48	666.7	0.558	0.337	0.472

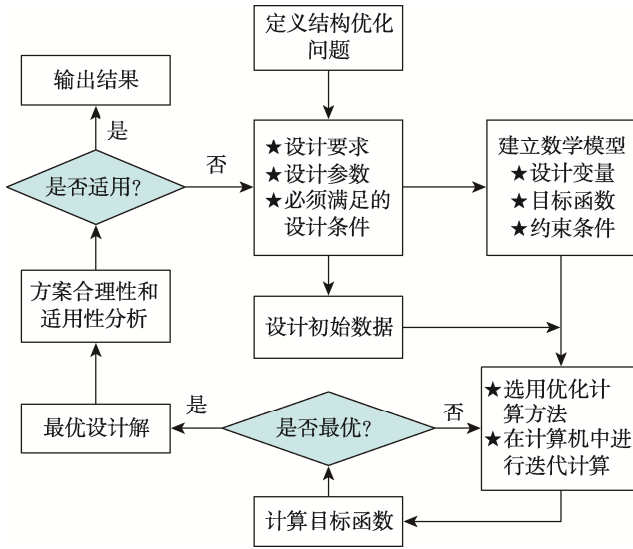


图2 优化设计流程
Fig.2 Flow of optimization design

3.2 底架枕木优化设计

3.2.1 枕木优化模型和求解方法

枕木是包装箱底架中直接承载构件,其力学性能对包装箱承载量有直接影响。为节约材料,直接减小枕木结构尺寸一定会影响包装箱的力学性能,因此,在满足枕木力学性能条件下,在 Ansys Workbench 中对枕木结构进行优化,从而可节省木材用量。枕木力学模型见图 3,图 3 中 $a_1=0.355\text{ m}$, $c_1=0.75\text{ m}$, $l_1=1.46\text{ m}$, $q_1=2.33\text{ kN/m}$, $b_1=0.12\text{ m}$, $h_1=0.02\text{ m}$ 。

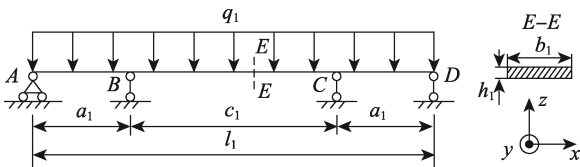


图3 枕木力学模型
Fig.3 Mechanical model of the sleeper

优化时,设枕木总体积最小为优化目标,其大小取决于枕木的长度、宽度和高度。其中枕木长度根据机电产品的外形长度已经确定为 1.46 m,故将枕木截面宽度和高度设为设计变量。根据木质包装运输要求、工程实际经验和枕木的力学性能,约束条件为枕木的材料截面宽度不大于 300 mm,高度不大于 60 mm,枕木的最大挠度和最大弯曲应力不超过其许用挠度 $[\delta_1]$ 和许用弯曲应力 $[\sigma]$ ^[12],则枕木的优化数学模型为:

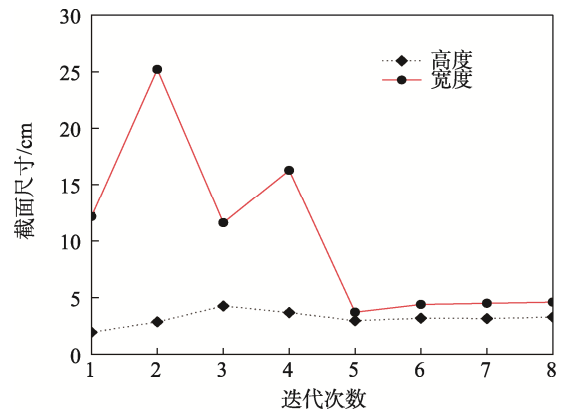
$$\begin{cases} \text{Min } V_1(X) = 1.46b_1h_1 \\ X = [x_1, x_2] = [b_1, h_1] \\ \text{条件} \\ 0 \leq b_1 \leq 0.3\text{ m} \\ 0 \leq h_1 \leq 0.06\text{ m} \\ \delta_{\max 1} \leq [\delta_1] = 10\text{ mm} \\ \sigma_1 \leq [\sigma] = 20\text{ MPa} \end{cases} \quad (1)$$

式中: V_1 为枕木总体积; b_1 和 h_1 为枕木截面宽度和高度; $\delta_{\max 1}$ 为枕木最大挠度; σ_1 为枕木最大弯曲应力。

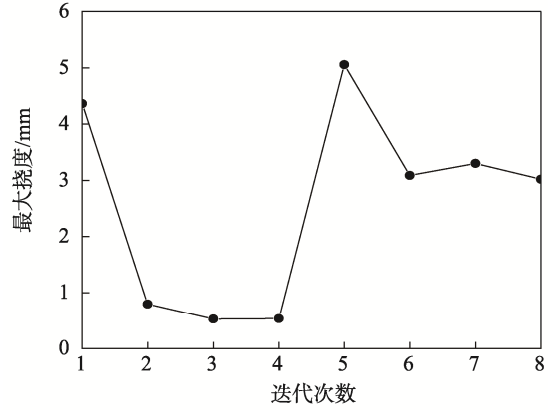
目前,优化问题数学模型的求解方法主要有 3 种:数学解析法、图解法数和数值迭代法^[13-15]。其中数值迭代法是依靠计算机的数值计算特点而出现的,其具有一定逻辑结构并且按照一定格式进行反复迭代,从而逐步逼近其最优解。该次优化采用了数值迭代法进行求解。

3.2.2 枕木优化结果与分析

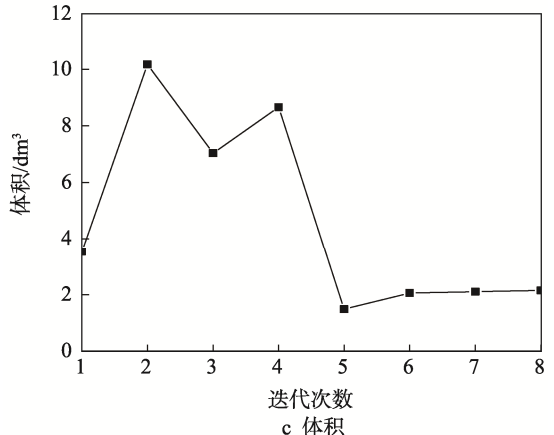
底架截面宽度与高度、最大挠度和枕木体积随着迭代过程的变化曲线见图 4。由图 4 中可以看出在第



a 截面尺寸



b 最大挠度



c 体积

图4 枕木迭代变化曲线

Fig.4 Varying curves of sleeper iterations

表 2 枕木优化结果
Tab.2 Optimized results of the sleeper

设计变量	截面宽度/m	截面高度/m	最大挠度/mm	体积/dm ³
初始值	0.12	0.02	4.441	3.50
下限值	0	0	0	
上限值	0.3	0.06	0.01	
最优解	0.044	0.032	3.086	2.06
变化率/%	-63.33	60	-30.51	-41.32

6 次迭代时产生了最优解。第 6 次迭代后，其曲线变得更平缓，并逐渐与优化目标值相接近。底架枕木的优化结果见表 2。

从表 2 可看出，枕木截面宽度的最优解为 0.044 m，比优化前的 0.12 m 缩短了 63.333%；枕木截面高度的最优解为 0.032 m，比优化前 0.02 m 增高了 60%；枕木最大挠度最优解为 3.086 mm，比优化前减小了 30.511%；单根枕木体积最优解为 $2.056 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ ，总体积为 0.047 m³，比优化前降低了 41.324%，枕木总质量下降了 14.99 kg。

3.2.3 枕木优化后有限元分析

优化前后枕木的结构位移和等效应力云图见图 5 和图 6，与优化前相比可知，优化前后枕木的最大变形和最大弯曲应力都有所变化。枕木优化前后的最大挠度与最大弯曲应力见表 3。

由表 3 可得出，优化后枕木最大挠度比优化前减小了 30.511%，这是由于枕木高度尺寸的明显增加；优化后最大弯曲应力比优化前增加了 5.31%，这是由于大幅减小了枕木的宽度尺寸。因为松木的许用弯曲应力为 20 MPa^[8]，所以优化后枕木最大弯曲应力虽然

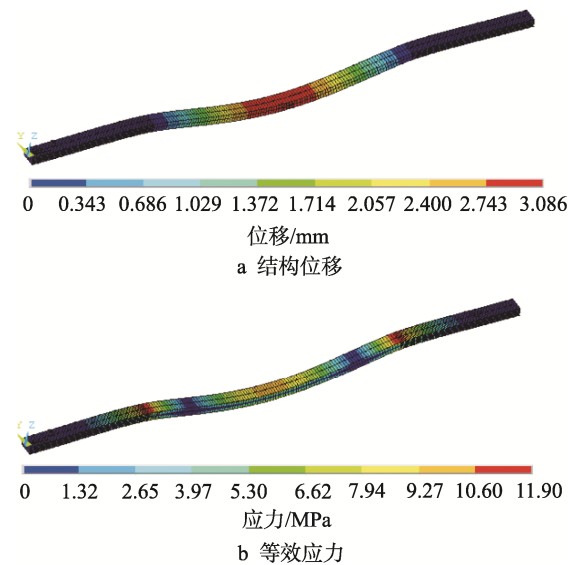


图 6 优化后枕木分析结果
Fig.6 Analysis results of optimized sleeper

表 3 枕木力学参数对比
Tab.3 Comparison of mechanical parameters of the sleeper

力学指标	最大挠度/mm	最大弯曲应力/MPa
优化前	4.441	11.3
优化后	3.086	11.9
变化率/%	-30.51	5.31

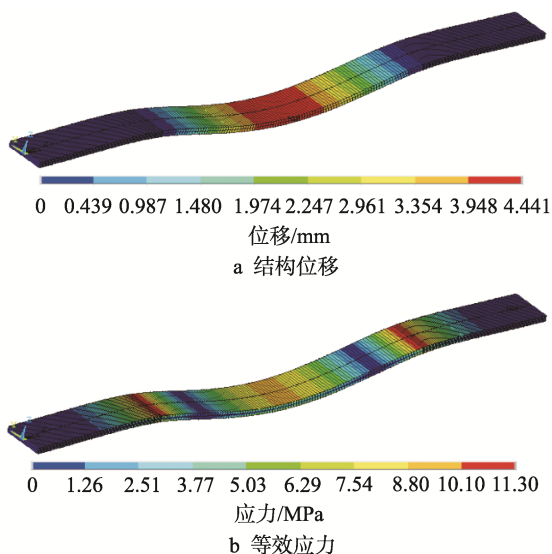


图 5 优化前枕木分析结果
Fig.5 Analysis results of sleeper before optimization

大于优化前，但是仍远小于松木的许用弯曲应力，故优化后底架枕木满足弯曲强度要求。

从表 2 和表 3 可看出，枕木最佳截面宽度为 0.044 m，最佳截面高度为 0.032 m。优化后枕木增加了截面高度，减小了截面宽度，从而降低了枕木体积和质量。

3.3 底架纵梁优化设计

3.3.1 纵梁优化模型与求解方法

底架纵梁的力学模型见图 7。图 7 中 $a_2=1.015 \text{ m}$ ， $c_2=2.94 \text{ m}$ ， $l_2=4.97 \text{ m}$ ， $q_2=3.31 \text{ kN/m}$ ， $b_2=0.17 \text{ m}$ ， $h_2=0.15 \text{ m}$ 。

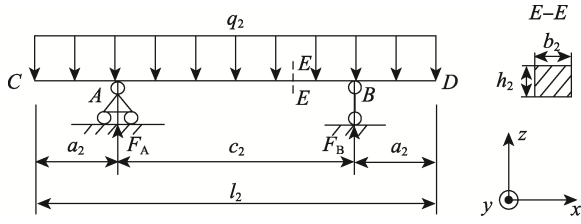


图7 纵梁力学模型

Fig.7 Mechanical model of the longitudinal beam

同样按照优化设计目的,设纵梁总体积最小为优化目标,纵梁截面高度和宽度为设计变量,纵梁的截面宽度在 120~300 mm 之间、高度在 100~160 mm 之间、最大挠度和最大弯曲应力不超过其许用挠度 \$[\delta_2]\$ 和许用弯曲应力 \$[\sigma]\$ 为约束条件,则纵梁的优化数学模型为:

$$\begin{cases} \text{Min } V_2(X) = 4.97b_2h_2 \\ X = [x_3, x_4] = [b_2, h_2] \\ \text{条件} \\ 0.12\text{ m} \leq b_2 \leq 0.3\text{ m} \\ 0.1\text{ m} \leq h_2 \leq 0.16\text{ m} \\ \delta_{\text{max}2} \leq [\delta_2] = 3.4\text{ mm} \\ \sigma_2 \leq [\sigma] = 20\text{ MPa} \end{cases} \quad (2)$$

式中: \$V_2\$ 为纵梁总体积; \$b_2\$ 和 \$h_2\$ 为纵梁截面宽度和高度; \$\delta_{\text{max}2}\$ 为纵梁最大挠度; \$\sigma_2\$ 为纵梁最大弯曲应力。优化方法仍采用数值迭代法进行求解。

3.3.2 纵梁优化结果与分析

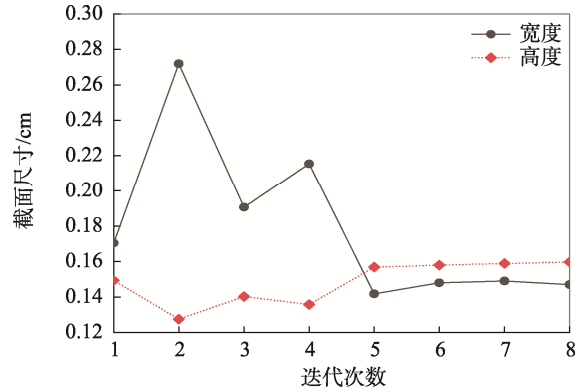
纵梁截面宽度与高度、最大挠度和纵梁体积随迭代次数的变化曲线见图 8。从图 8 中可以发现,在第 6 次迭代时产生了最优解。纵梁优化结果见表 4。

由表 4 可得出,纵梁截面宽度最优解为 0.148 m,比优化前减少了 12.941%; 截面高度最优解为 0.158 m,较优化前增大了 5.333%; 纵梁挠度最优解为 3.37 mm,比优化前降低了 0.561%; 优化后单根纵梁最优体积为 0.116 m³,总体积为 0.464 m³,比优化前下降了 8.661%,纵梁总质量下降了 19.8 kg。

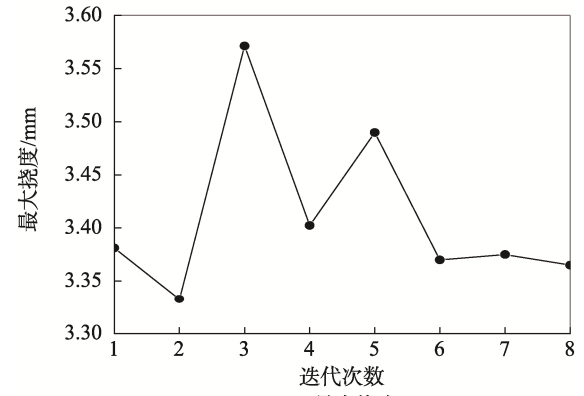
3.3.3 优化后纵梁有限元分析

优化前后纵梁结构位移和等效应力云图见图 9 和图 10,与优化前相比,在相同工况条件下,纵梁优化前后的最大挠度和最大弯曲应力也发生了变化。纵梁优化设计前后的最大挠度和最大弯曲应力见表 5。

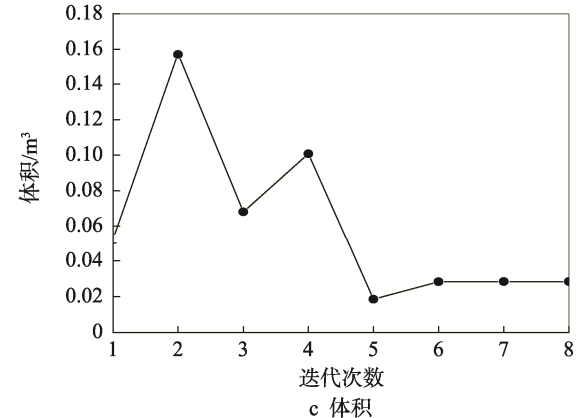
从表 5 可以看出,优化后纵梁的最大挠度为 3.37 mm,比优化前降低了 0.561%,这是因为增加了纵梁的高度尺寸。优化后纵梁的最大弯曲应力为 3.04 MPa,比优化前增大了 3.754%,这是由于减小了纵梁的宽度尺寸,但其仍小于最大许用弯曲应力,故优化后的结构满足其强度要求。



a 截面基本尺寸



b 最大挠度



c 体积

图8 纵梁迭代变化曲线

Fig.8 Varying curves of the longitudinal beam with iterations

表4 纵梁优化结果

Tab.4 Optimum results of the longitudinal beam

设计变量	截面宽度/m	截面高度/m	最大挠度/mm	总体积/m ³
初始值	0.17	0.15	3.389	0.127
下限值	0.12	0.1	0	
上限值	0.3	0.16	3.4	
最优解	0.148	0.158	3.37	0.116
变化率/%	-12.94	5.33	-0.56	-8.66

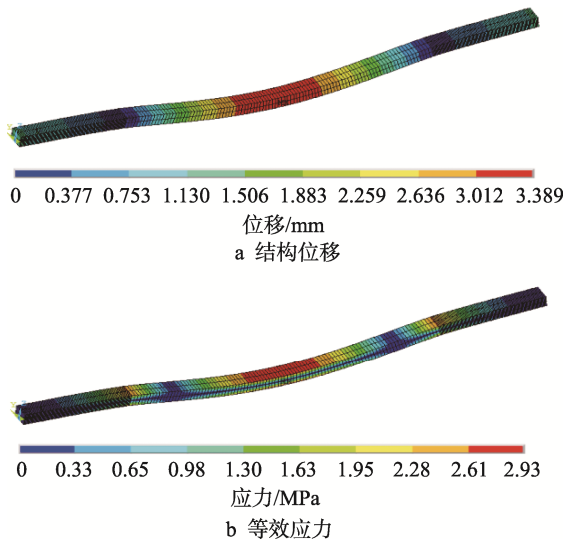


图 9 优化前纵梁分析结果

Fig.9 Analysis results of longitudinal beam before optimization

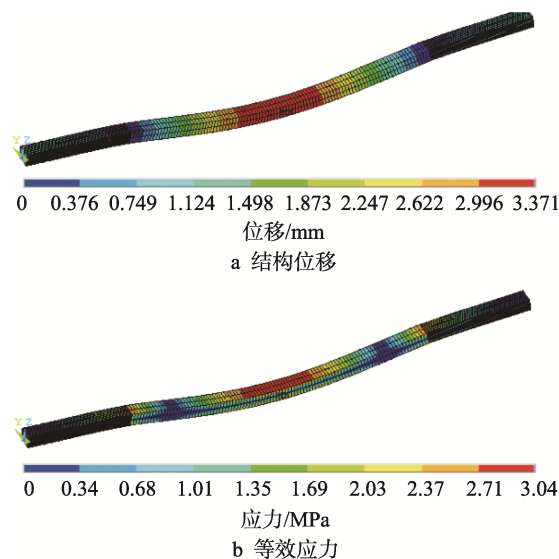


图 10 优化后纵梁分析结果

Fig.10 Analysis results of optimized longitudinal beam

表 5 纵梁力学参数对比

Tab.5 Comparison of mechanical parameters of the longitudinal beam

力学指标	最大挠度/mm	最大弯曲应力/MPa
优化前	3.389	2.93
优化后	3.37	3.04
变化率/%	-0.56	3.75

由表 4 和表 5 可以得出,优化后纵梁的最佳截面宽度为 0.148 m,最佳截面高度为 0.158 m,故在满足纵梁许用弯曲应力的前提下,合理降低截面宽度,增大截面高度,可增加刚度,降低纵梁体积和质量,从而节约纵梁的木材用量。

4 结语

根据某型机电产品的外形尺寸、质量分布和运输要求,利用 UG 设计了木质包装箱的结构,将包装箱的枕木和纵梁导入 Ansys Workbench 中,建立优化设计模型并进行迭代分析,然后再对其进行有限元分析和比较。结果显示,枕木的最优截面宽度和高度分别为 0.044 m 和 0.032 m,总体积比优化前降低了 41.324%;纵梁的最优截面宽度和高度分别为 0.148 m 和 0.158 m,总体积比优化前下降了 8.661%;包装箱的总质量降低了 34.79 kg。可以得出,在满足弯曲强度和刚度的条件下,合理增大枕木和纵梁的截面高度可提高其刚度,适当减小枕木和纵梁的截面宽度,可以明显降低其体积和质量,从而节约包装箱的木材用量,实现包装箱的优化目标。该优化设计方法为机电产品木质包装箱的结构优化起到了一定的技术指导作用。

参考文献:

- [1] 崔小龙,王泉中,蒋身学.基于 Ansys 的机电产品包装箱底架模态分析与研究[J].包装与食品机械,2014,32(6):35—39.
CUI Xiao-long, WANG Quan-zhong, JIANG Shen-xue. Modal Analysis and Research of Chassis of Electromechanical Product Packaging Box Based on ANSYS[J]. Packaging and Food Machinery, 2014, 32(6): 35—39.
- [2] 黄先宝,王泉中,蒋身学.基于 ANSYS 的框架包装箱优化设计[J].林产工业,2014,41(3):46—47.
HUANG Xian-bao, WANG Quan-zhong, JIANG Shen-xue. Optimum Design of Frame Packing Box Based on ANSYS[J]. Forestry Industry, 2014, 41(3): 46—47.
- [3] 邱鹏飞,王泉中,蒋身学.基于 Ansys 的大型机电产品包装箱底架有限元分析[J].木材加工机械,2014,25(1):45—48.
QIU Peng-fei, WANG Quan-zhong, JIANG Shen-xue. Finite Element Analysis of Underframe of Packaging Box of Large-scale Mechanical and Electrical Products Based on ANSYS[J]. Wood Processing Machinery, 2014, 25(1): 45—48.
- [4] 丁毅,高雁,曾珊瑚.木质包装箱结构优化设计[J].包装工程,2005,26(5):131—132.
DING Yi, GAO Yan, ZENG Shan-qi. Structural Optimization Design of Wooden Packing Box[J]. Packaging Engineering, 2005, 26(5): 131—132.
- [5] 敖文刚,宋泽良,程惠峰,等.板材包装结构强度分析与优化[J].包装工程,2017,38(13):133—136.
AO Wen-gang, SONG Ze-liang, CHENG Hui-feng, et al. Strength Analysis and Optimization of Plate

- Packaging Structure[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(13): 133—136.
- [6] BENJAMIN F. Corrugated Box Compression A Literature Survey[J]. Packaging Technology and Science, 2013, 21(1): 6—20.
- [7] 石军键, 李光. 不同工况下钢架木箱有限元分析及优化设计[J]. 包装与食品机械, 2016, 34(2): 37—40.
SHI Jun-jian, LI Guang. Finite Element Analysis and Optimization Design of Steel Frame Wooden Box under Different Working Conditions[J]. Packaging and Food Machinery, 2016, 34(2): 37—40.
- [8] 崔小龙. 某型机电包装箱静动态力学性能分析及结构优化[D]. 南京: 南京林业大学, 2014: 9—10.
CUI Xiao-long. Static and Dynamic Mechanical Properties Analysis and Structural Optimization of Packaging Box for an Mechanical and Electrical Product[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2014: 9—10.
- [9] 江民圣. ANSYS Workbench19.0 基础入门与工程实践[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2019: 57—74.
JIANG Min-sheng. ANSYS Workbench19.0 Basic Introduction and Engineering Practice[M]. Beijing: People's post and Telecommunications Press, 2019: 57—74
- [10] 楚飞, 雷宇, 高瀚, 等. 基于 ANSYS Workbench 的顶驱提环侧连接板的拓扑优化设计[J]. 机械设计与研究, 2019, 35(1): 189—191.
CHU Fei, LEI Yu, GAO Han, et al. Topology Optimization Design of Side Connecting Plate of Top Drive Based on ANSYS Workbench[J]. Machine Design and Research, 2019, 35(1): 189—191.
- [11] 孙靖民, 梁迎春. 机械优化设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008: 22—24.
SU Jing-min, LIANG Ying-chun. Mechanical Optimal Design[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2008: 22—24.
- [12] 单祖辉, 谢传峰. 工程力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004: 227—267.
SHAN Zu-hui, XIE Chuan-feng. Engineering Mechanics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2004: 227—267.
- [13] 曾攀. 有限元分析及应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008: 50—69.
ZENG Pan. Finite Element Analysis and Application [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2008: 50—69.
- [14] 王玉璞, 程文明. D24 施工便梁有限元分析及优化设计[J]. 机械设计与制造, 2018(4): 5—8.
WANG Yu-pu, CHENG Wen-ming. Finite Element Analysis and Optimization Design of D24 Construction Beams[J]. Machinery Design & Manufacture, 2018(4): 5—8.
- [15] 沈仙法, 王海巧. 基于 ANSYS 的履带喷雾车车架结构优化分析[J]. 现代制造工程, 2017(8): 48—52.
SHEN Xian-fa, WANG Hai-qiao. Optimization Analysis of Frame Structure of Tracked Spray Vehicle Based on ANSYS[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2017(8): 48—52.