

快速拆装钢丝捆扎箱结构优化设计

杨清桃, 王雪, 李晓刚

(北京林业大学, 北京 100083)

摘要: **目的** 设计一种可快速拆装的钢丝捆扎箱,在满足钢丝捆扎箱抗压性能的同时,箱体总体成本最低。**方法** 根据储运条件,初选箱体结构和构件尺寸,以箱档厚度为变量,构建箱体所用材料体积的目标函数,以箱体横档和立档均满足强度条件为约束条件,构建新的目标函数,求解出原目标函数变量的解。**结果** 通过拉格朗日乘子法优化计算,钢丝捆扎箱横档和立档厚度应分别大于35 mm和20.4 mm;借助SolidWorks软件的建模和有限元分析,对比实木板和胶合板2种箱板,箱档厚度为单档36 mm、单档21 mm、中间双档21 mm等2种箱板共6种箱型的应力、位移、质量和体积,发现胶合板箱综合情况最优,中间箱档采用双档21mm的结构;抗压试验和堆码试验验证了仿真实验的结果。**结论** 数学优化方法和计算机有限元分析方法,为快速拆装钢丝捆扎箱结构优化设计研究提供了很好的方法和手段,研究结果为钢丝捆扎箱在国内开拓市场提供了有力的理论和实践依据。

关键词: 钢丝捆扎箱; 优化设计; 拉格朗日乘子法; 有限元分析; 试验

中图分类号: TB485.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2014)15-0035-05

Optimization of Structural Design of Quick Disassembling Wirebound Box

YANG Qing-tao, WANG Xue, LI Xiao-gang

(Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

ABSTRACT: Objective In order to design a quick disassembling wirebound box to meet the requirements of compressive property and lowest overall cost. **Methods** According to the storage and transportation conditions, the box structure and member sizes were preliminarily designed. Objective function of box materials was built with the cleat thickness as a variable. And then a new objective function was built with the strength conditions of horizontal cleats and vertical cleats as constraint conditions. Finally, the variable of original objective function was solved. **Results** Through the Lagrange multiplier method, the thickness of horizontal cleats and vertical cleats must be greater than 35 mm and 20.4 mm, respectively. With the help of SolidWorks modeling and finite analysis, the stress, displacement, mass and volume of six kinds of solid wood boxes and plywood boxes with cleats thickness of single 36 mm, single 21 mm, and double 21 mm respectively were compared and the comprehensive situation of plywood box was found to be the optimal. So the plywood box with middle cleats of double 21 mm was selected. Compression test and stacking test verified the results of simulation test. **Conclusion** Mathematical optimization method and computer finite element method provided a good method and means for optimization of structural design of quick disassembling wirebound box. The research results also provided effective theoretical and practical basis for the development of wirebound box in the domestic market.

KEY WORDS: wirebound box; design optimization; lagrange multiplier method; finite analysis; test

收稿日期: 2014-04-28

基金项目: 北京林业大学国家级大学生创新训练计划项目(201310022036)

作者简介: 杨清桃(1991—),女,湖南人,北京林业大学本科,主攻运输包装。

通讯作者: 李晓刚(1977—),男,江西瑞昌人,北京林业大学讲师,主要研究方向为包装机械、运输包装。

钢丝捆扎箱是一种利用钢丝捆扎箱体的木质包装箱,结构简单,使用方便,具有较好的抗压性能和堆叠性能,可以循环使用,性价比较高,适用于体积小而重的机电类产品的储运以及农产品的周转^[1]。由于受到木材来源、箱体制造及组装等成本因素的影响,使钢丝捆扎箱在国内外的的发展受到很大制约。为此,基于成本的考虑,设计了一种可快速拆装^[2-4]的钢丝捆扎箱,并对其箱体结构进行优化^[5],通过仿真实验和真实试验对优化方案进行验证。

1 产品分析

钢丝捆扎箱多用于机电类产品的运输包装,因此,选用一款型号为ZDY型硬齿面圆柱齿轮减速器为设计对象(见图1),具体参数见表1。

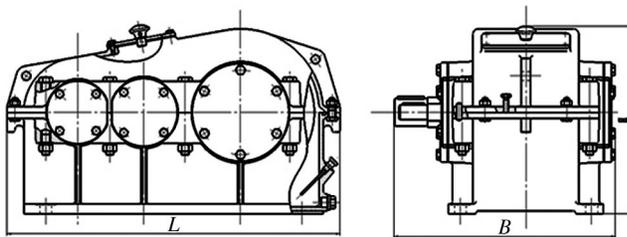


图1 减速器
Fig.1 Gera reducer

表1 减速器参数

Tab.1 Reducer parameters

中心距 a/mm	最大外长 L/mm	最大外宽 B/mm	最大外高 H/mm	质量 m/kg
200	604	502	507	228

由于产品较重,因而在运输存储过程中不得倾斜,堆码层数不能超过2层,采用叉车装卸。

2 初始设计

2.1 箱型选择

参考相关标准^[6-7],初步确定钢丝捆扎箱的结构为内档型,由侧板、顶板、底板、端板及箱档构成。为了实现快速拆装、重复折叠堆放及运输,利用钢丝将6块箱板钉接起来形成整体箱坯,见图2。

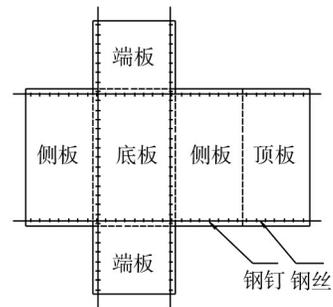


图2 可重复折叠堆放钢丝捆扎箱箱坯

Fig.2 Repeatably folded stacked wirebound box blank

2.2 材料选择

为了对比不同材质箱体的抗压强度和成本,钢丝捆扎箱材料选择分为以下2种方案。

1) 全实木箱体。箱板和箱档均为松木,其弹性模量 $E=11\text{ GPa}$,密度为 450 kg/m^3 。

2) 胶合板箱体。箱板为胶合板,箱档为松木。胶合板为各向异性材料,纵向弹性模量 $E_x=8.5\text{ GPa}$,横向弹性模量 $E_y=3.6\text{ GPa}$,密度为 600 kg/m^3 。

2.3 钢丝捆扎箱内尺寸

为确保减速器不会对木箱内表面造成挤压和冲击,减速器与木箱内表面必须留有一定的装箱间隙。则长、宽、高3个方向的间隙 Δ 均为 50 mm 。由此,钢丝捆扎箱内尺寸长、宽、高分别为: $L_n=L+2\Delta=704\text{ mm}$, $B_n=B+2\Delta=602\text{ mm}$, $H_n=H+2\Delta=557\text{ mm}$ 。

2.4 钢丝捆扎箱各构件尺寸

钢丝捆扎箱各构件包括侧板、顶板、底板、端板及箱档。由于减速器质量超过 227 kg ,根据国家标准^[7],箱板厚度选为 8 mm ,箱档尺寸不得小于 $21\text{ mm}\times 21\text{ mm}$,且箱档与箱档之间的连接方式采用榫连接,见图3。为了提高钢丝捆扎箱箱体的稳固性和抗压强度,在端板内表面加装横档和立档,见图4。钢丝捆扎箱箱体结构初步设计方案见图5。

3 优化设计

在堆码状态下,钢丝捆扎箱主要的受力构件为横档和立档,因此在满足横、立档强度条件下,保证钢丝捆扎箱所用材料体积最小,采用拉格朗日乘子法进行

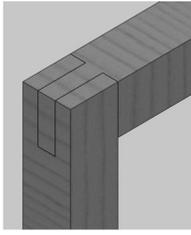


图3 榫接式箱档
Fig.3 Mortised cleat



图4 加装加强箱档的端板
Fig.4 End plate with reinforced cleats

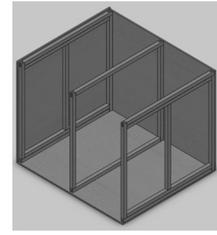


图5 钢丝捆扎箱结构初始方案
Fig.5 Initial design of wirebound box

优化设计。

3.1 拉格朗日乘子法

拉格朗日乘子法^[8]是解决条件极值问题的有效工具,是在 $g(x_1, x_2, \dots)=0$ 的约束条件下,求函数 $f(x_1, x_2, \dots)$ 极值的方法。其主要思想是引入一个新的参数(拉格朗日乘子 λ),将约束条件函数与原函数联系在一起,使之能配成与变量数量相等的等式方程,从而求出原函数极值各个变量的解。

3.2 优化计算

构造函数 $f(b)$ 表示钢丝捆扎箱所用材料的体积, $f(b)$ 为箱档厚度 b 的函数,则:

$$f(b)=2t[(L_n+2b) \times (H_n+2b)+(L_n+2b) \times (B_n+2b+2t)+(B_n+2b+2t) \times (H_n+2b+2t)]+b^2[6(B_n+H_n+2b)+4B_n+2(H_n-2b)] \quad (1)$$

式中: t 为箱板厚度, $t=8$ mm。

钢丝捆扎箱在储运过程中,承受的外部载荷分为顶盖载荷和堆码载荷。顶盖载荷主要是指横档所承受的载荷,载荷集度 $q_1=4$ kPa^[9]。堆码载荷主要是指立档所承受的载荷,载荷集度 $q_2=10$ kPa^[9],横档上的载荷近似均匀分布,则横档的强度条件为:

$$\sigma_{\max} = \frac{M}{Z} = \frac{\frac{1}{8}q_1 l_1^2 l}{\frac{b^3}{6}} = \frac{3q_1 l_1^2 l}{4b^3} \leq [\sigma] \quad (2)$$

式中: $[\sigma]$ 为木材的许用抗弯强度,取 $[\sigma]=10.5$ MPa; l_1 为横档长度, m; l 为横档中心间距, $l=(L_n+b)/2$, m; b 为箱档厚度, m。

将式(2)改写为:

$$g_1(b) = \frac{3q_1 l_1^2 l}{4b^3} - [\sigma] \leq 0 \quad (3)$$

立档承受堆码载荷是受压构件,则立档的强度条

件^[10]为:

$$[p] = \frac{300f_c}{\left(\frac{l_2}{b}\right)^2} A = \frac{300f_c}{l_2^2} b^4 \geq \frac{1}{2} q_2 a B \quad (4)$$

式中: $[p]$ 为许用压曲强度, MPa; f_c 为木材许用抗压强度,取 $f_c=7$ MPa; l_2 为立档长度, m; a 为立档中心间距, $a=l$, m; B 为木箱外宽, m。

将式(4)改写为:

$$g_2(b) = \frac{300f_c b^4}{l_2^2} - \frac{1}{2} q_2 a B \geq 0 \quad (5)$$

在满足式(3)和式(5)的前提下,求式(1)的最小值。利用拉格朗日乘子法构造函数 $F(b)$ 为:

$$F(b)=f(b)+\lambda_1 g_1(b)+\lambda_2 g_2(b) \quad (6)$$

式中: λ_1, λ_2 为拉格朗日乘子。

分别对 b, λ_1, λ_2 求偏导,即:

$$\frac{\partial F}{\partial b} = 0, \frac{\partial F}{\partial \lambda_1} = 0, \frac{\partial F}{\partial \lambda_2} = 0 \quad (7)$$

由于 $f(b)$ 为单调函数,所以 b 越小,体积就越小。根据内装物质量,箱档厚度 b 至少应大于 21 mm。在满足式(3)(5)的前提下,求 b 的最佳取值。计算式(3)(5),得 b 的取值范围分别为 $b \geq 35$ mm 和 $b \geq 20.4$ mm。从优化结果可以看出,箱档厚度 b 至少应大于 35 mm。

为了对比箱档厚度分别为 21, 36 mm 时钢丝捆扎箱的抗压能力,利用计算机软件^[11-14]进行建模和有限元分析。SolidWorks^[15-16]具有强大的 CAD 建模和分析功能,能够快速完成零件设计、装配以及有限元计算,设计水平和效率高。利用 SolidWorks 建立 3 种结构尺寸、2 种材质钢丝捆扎箱的计算机三维模型,利用有限元分析钢丝捆扎箱堆码 2 层时,底层钢丝捆扎箱箱体的应力、应变与位移分布情况,见图 6。对比发现,6 种钢丝捆扎箱最大应力和最大位移均出现在中间横档的中间位置。箱档厚度为 21 mm 时钢丝捆扎箱的最大应力和

位移要明显大于箱档厚度为36 mm的钢丝捆扎箱,且接近许用载荷,但后者的质量和体积却更大一些。为了在尽量不过多增大材料用量的情况下提高中间箱档的抗弯和抗压强度,在中间箱档处再增加1组横档和立档。仿真实验证明,改进后的钢丝捆扎箱中间箱档处的应力和位移大大减小,而且质量和体积增大较小,见图7。6种钢丝捆扎箱对比情况见表2。

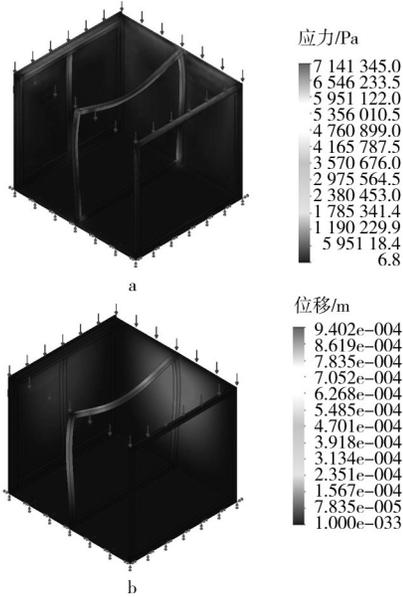


图6 单档钢丝捆扎箱应力、位移云图

Fig.6 Stress and displacement nephograms of wirebound box with single cleat

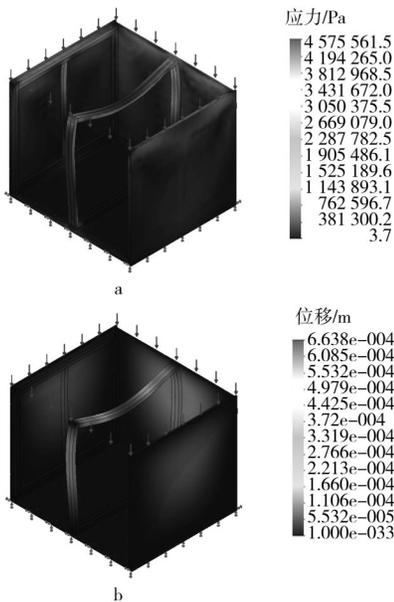


图7 双档钢丝捆扎箱应力、位移云图

Fig.7 Stress and displacement nephograms of wirebound box with double cleats

表2 6种钢丝捆扎箱对比

Tab.2 Comparison of six kinds of wirebound boxes

	箱档厚度/mm	应力/MPa	位移/mm	质量/kg	体积/m ³
全实木箱	21,单档	7.14	0.94	11.8	0.026 21
	36,单档	2.42	0.26	16.85	0.037 44
胶合板箱	21,双档	4.57	0.66	12.27	0.027 27
	21,单档	9.03	1.41	15.03	0.026 21
	36,单档	2.95	0.41	20.38	0.037 44
	21,双档	6.04	1.16	15.5	0.027 27

从对比情况的结果来看,钢丝捆扎箱结构优化设计选择胶合板箱,中间箱档采用双档,箱档截面尺寸为21 mm × 21 mm,其三维计算机模型和实物分别见图8和图9。

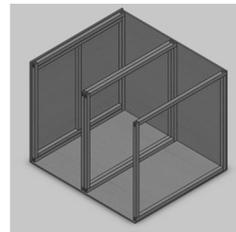


图8 胶合板箱模型
Fig.8 Plywood case model



图9 胶合板箱实物
Fig.9 Real plywood case

4 试验

4.1 材料及设备

试验材料:2种材质和2种结构的4类钢丝捆扎箱各3个。

试验设备:四川长江DCP-KY50k电脑测控抗压试验机。

4.2 结果与分析

将样箱放置在抗压试验机上、下压板之间,压板下降速度为10 mm/min。抗压试验记录木箱箱体出现损坏时的变形量,堆码试验设置为堆码1层,堆码载荷设置为2400 N,记录箱体的变形量,试验结果见表3。

从表3的对比结果可以看出,虽然胶合板箱变形量明显大于全实木箱,但中间箱档采用双档结构时变形量明显降低,与全实木箱单档结构变形量相差无几。试验结果验证了优化方案。

表3 抗压试验和堆码试验结果

Tab.3 Results of compression test and stacking test

	箱档厚度/mm	应力/MPa	位移/mm
全实木箱	21,单档	18.8	3.2
	21,双档	11.2	2.7
胶合板箱	21,单档	25.3	3.5
	21,双档	20.1	3

5 结语

综合考虑流通环境条件及成本等因素,利用数学优化方法,借助SolidWorks软件和试验手段,优化设计了一种可快速拆装钢丝捆扎箱。该钢丝捆扎箱采用数条钢丝将6块箱板联接起来,箱档之间采用榫连接方式,中间箱档采用双档结构加强箱体整体稳定性和强度,端板内侧箱档呈“工”字布局保证了钢丝捆扎箱端部抗压强度。钢丝末端连接采用螺母锁扣结构方便快速重复拆装,同时,能保证箱体的牢固性。优化方法采用拉格朗日乘子法,在满足钢丝捆扎箱承受顶盖载荷和堆码载荷的强度条件下,箱体材料用量最小。借助SolidWorks软件强大的建模和有限元分析功能,结合真实试验,验证了优化设计结果。该优化设计选择胶合板作为箱板材料,缓解了森林资源匮乏、木箱病虫害检验检疫和实木包装的高成本投入等问题,显著提高了钢丝捆扎箱的包装效率。与框架木箱和滑木箱相比,其结构更为简单,抗压性能优良,在军工、机电以及农业领域的应用具有明显优势,为钢丝捆扎箱重回国内市场提供了理论和实践依据。

参考文献:

- [1] 杨清桃,王雪,李晓刚. 钢丝捆扎箱研究综述[J]. 包装工程, 2014, 35(1): 148—153.
YANG Qing-tao, WANG Xue, LI Xiao-gang. Research Overview of Wirebound Box[J]. Packaging Engineering, 2014, 35(1): 148—153.
- [2] 潘太文. 一种可折叠木质包装箱: 中国, CN202686943U[P]. 2012-01-23.
PAN Tai-wen. A Collapsible Wooden Case: China, CN202686943U[P]. 2012-01-23.
- [3] 张海明. 一种方便拆装式的框架包装箱: 中国, CN202346028U[P]. 2012-07-25.

- ZHANG Hai-ming. A Easy-to-disassemble Wooden Framed Case: China, CN202346028U[P]. 2012-07-25.
- [4] 乔向东. 木质包装材料的替代与设计[J]. 常州信息职业技术学院学报, 2005, 4(4): 86—90.
QIAO Xiang-dong. The Substitutes and Design for Timber Packaging Materials[J]. Journal of Changzhou Vocational College of Information Technology, 2005, 4(4): 86—90.
- [5] 丁毅, 高雁, 曾珊珊. 木质包装箱结构优化设计[J]. 包装工程, 2005, 26(5): 131—135.
DING Yi, GAO Yan, ZENG Shan-qi. Optimum Structural Design of Wooden Packaging Box[J]. Packaging Engineering, 2005, 26(5): 131—135.
- [6] ASTM D 6573/D 6573M-2001, Standard Specification for General Purpose Wirebound Shipping Boxes[S].
- [7] GB/T 18924—2002, 钢丝捆扎箱[S].
GB/T 18924—2002, Wirebound Box[S].
- [8] 凌明伟. 拉格朗日乘数法求距离[J]. 科教文汇, 2013(9): 51—52.
LING Ming-wei. Making Use of Lagrange Multiplier Method to Solve Distance[J]. The Science Education Article Collects, 2013(9): 51—52.
- [9] 彭国勋. 物流运输包装设计[M]. 北京: 印刷工业出版社, 2012.
PENG Guo-xun. Logistics Transportation Packaging Design [M]. Beijing: Printing Industry Press, 2012.
- [10] 惠远鹏, 马占山. 包装木箱堆码设计计算[J]. 中国包装, 2012(5): 50—53.
HUI Yuan-peng, MA Zhan-shan. Stacking Design Calculation of Wooden Box Packaging[J]. China Packaging, 2012(5): 50—53.
- [11] 蔡丽娜, 王玉龙, 徐洁, 等. 框架木箱有限元受力分析[J]. 包装工程, 2010, 31(17): 13—15.
CAI Li-na, WANG Yu-long, XU Jie, et al. Finite Element Analysis to Stress of Wooden Framed Box[J]. Packaging Engineering, 2010, 31(17): 13—15.
- [12] 黄利强, 孙诚. 三维模拟计算机技术在木箱设计中的应用[J]. 株洲工学院学报, 2004, 18(5): 135—143.
HUANG Li-qiang, SUN Cheng. Application of Computer Simulation Technology in the Design of Wood Container[J]. Journal of Zhuzhou Institute of Technology, 2004, 18(5): 135—143.
- [13] 舒祖菊, 彭国勋. 快装箱的静力学有限元模型参数的识别[J]. 安徽农业大学学报, 2010, 37(1): 179—182.
SHU Zu-ju, PENG Guo-xun. Parameter Identification for

(下转第52页)

- ary Curves for Nonlinear Package Cushioning System[J]. Packaging Technology and Science, 1999, 12(5): 207—217.
- [6] 黄秀玲,王军,卢立新,等. 三次非线性包装系统关键部件冲击响应影响因素分析[J]. 振动与冲击, 2010, 29(10): 179—181.
HUANG Xiu-ling, WANG Jun, LU Li-xin, et al. Factors Influencing Shock Characteristics of a Cubic Nonlinear Packaging System with Critical Component[J]. Journal of Vibration and Shock, 2010, 29(10): 179—181.
- [7] 奚德昌,彭南陵. 具有简支梁弹性部件包装物品的防震[J]. 包装工程, 1989, 10(1): 42—48.
XI De-chang, PENG Nan-ling. Shockproof of the Packaging for Elastic Parts with Simple Beam[J]. Packaging Engineering, 1989, 10(1): 42—48.
- [8] 彭南陵,奚德昌. 具有简支梁弹性部件包装物品的缓冲[J]. 南昌大学学报, 1994, 16(1): 43—48.
PENG Na-ling, XI De-chang. Cushioning of Packaged Articles with an Elastic Element of Simply Supported Beam[J]. Journal of Nanchang University, 1994, 16(1): 43—48.
- [9] 卢富德,陶伟明,高德. 具有简支梁式易损部件的产品包装系统跌落冲击研究[J]. 振动与冲击, 2012, 31(5): 79—81.
LU Fu-de, TAO Wei-ming, GAO De. Drop Impact Analysis on Item Packaging System with Beam Type Elastic Critical Component[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(5): 79—81.
- [10] 高德,卢富德. 基于杆式弹性易损部件的非线性系统跌落冲击研究[J]. 振动与冲击, 2012, 31(15): 47—49.
GAO De, LU Fu-de. Drop Impact Analysis of Packaging System with Bar Type Elastic Critical Components[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(15): 47—49.
- [11] GAO De, LU Fu-de, CHEN S J. Drop Impact Analysis of Cushioning System with an Elastic Critical Component of Cantilever Beam Type[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2013, Article(379068): 1—5.
- [12] CHANDAR D D J, DAMODARAN M. Computational Fluid-structure Interaction of a Flapping Wing in Free Flight Using Overlapping Grids[C]// 27th AIAA Applied Aerodynamics Conference, 2009.
- [13] REZAZADEH G, MADINEI H, SHABANI R. Study of Parametric Oscillation of an Electrostatically Actuated Microbeam Using Variational Iteration Method[J]. Applied Mathematical Modeling, 2012, 36(1): 430—443.
- [14] WONG E H, MAI Y W. New Insight into Board Level Drop Impact[J]. Microelectronics Reliability, 2006, 46: 930—938.
- [15] 陈安军. 斜支承弹簧包装系统冲击特性研究[J]. 包装工程, 2010, 31(15): 1—3.
CHEN An-jun. Study on Shock Characteristic of Packaging System with Inclined Support Spring[J]. Packaging Engineering, 2010, 31(15): 1—3.
- [16] 陈安军. 非线性包装系统跌落冲击问题变分迭代法[J]. 振动与冲击, 2013, 32(18): 105—107.
CHEN An-jun. Variational Iteration Method for Dropping Shock Problem of a Cubic Non-linear Packaging System[J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(18): 105—107.

(上接第39页)

- Static FEM of Plywood Box[J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2010, 37(1): 179—182.
- [14] 毛兴,张胜文,童英红. 大型零件包装箱专用CAD/CAE系统的开发[J]. 江苏科技大学学报:自然科学版, 2006, 20(1): 69—72.
MAO Xing, ZHANG Sheng-wen, TONG Ying-hong. Development of Special CAD/CAE System for Packing Case of Large Parts[J]. Journal of Jiangsu University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2006, 20(1): 69—72.
- [15] 李扬,李光. 基于SolidWorks的托盘结构有限元分析及优化设计[J]. 包装工程, 2011, 32(19): 1—4.
LI Yang, LI Guang. Structural Finite Element Analysis and Optimum Design of Pallet Via SolidWorks[J]. Packaging Engineering, 2011, 32(19): 1—4.
- [16] 杨丹丹,季忠. 基于SolidWorks的滑木箱参数化设计[J]. 包装工程, 2009, 30(11): 16—19.
YANG Dan-dan, JI Zhong. Parametric Design of Skid Wooden Box Based on SolidWorks[J]. Packaging Engineering, 2009, 30(11): 16—19.