

屋顶盒包装机顶封曲臂的优化设计

黄巧, 石秀东, 李进, 王彬

(江南大学, 无锡 214122)

摘要: **目的** 对屋顶盒包装机的顶部封口机构曲臂进行优化设计。**方法** 首先, 通过 ADAMS 求解初始曲臂在工作时的极限载荷, 利用 HyperWorks 中 OptiStruct 模块对初始曲臂进行准静态分析, 得到模型应力云图与位移云图, 根据分析结果确定基于相对密度法的结构优化模型。然后, 应用 OptiStruct 创建以最小体积为目标函数的全局响应, 以最大应力和最大位移为约束条件的、与子工况相关的响应, 从而进行拓扑优化。最后, 利用 ABAQUS 对优化后的模型和连接件进行非线性有限元分析校核。**结果** 优化后模型的质量减少了 0.67 kg, 最大应力值为 48.71 MPa, 位移最大值为 0.04 mm。**结论** 对封口机构曲臂进行拓扑优化设计可行, 不仅可以减少质量成本, 也能满足结构的刚强度要求。

关键词: 顶部封口机构曲臂; 相对密度; 全局响应; 拓扑优化

中图分类号: TB486⁺.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2018)03-0146-05

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2018.03.028

Optimization Design of Top Sealing Crank Arm of Roof Box Packaging Machine

HUANG Qiao, SHI Xiu-dong, LI Jin, WANG Bin

(Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

ABSTRACT: The work aims to optimize the crank arm of the top sealing mechanism of the roof box packaging machine. Firstly, the limit load of the original crank arm during working was solved by ADAMS. The quasi-static analysis of the initial crank arm was carried out by OptiStruct module in HyperWorks. The stress contour and displacement contour of the model were obtained. According to the analysis results, the structural optimization model based on relative density method was determined. Then, optiStruct was used to create the global response with the minimum volume as objective function, and the response related to the sub conditions with the maximum stress and the maximum displacement as the constraints, for the purpose of topology optimization. Finally, the optimized model and the connector were checked for the nonlinear finite element analysis by ABAQUS. The results showed that the weight of optimized model was reduced by 0.67 kg, the maximum stress value was 48.71 MPa, and the maximum displacement was 0.04 mm. The topology optimization design of the crank arm of the sealing mechanism is feasible. It can not only reduce the quality cost, but also meet the stiffness and strength requirements of the structure.

KEY WORDS: crank arm of top sealing mechanism; relative density; global response; topology optimization

屋顶盒通常应用于液态奶的包装上^[1], 屋顶盒常采用纸基复合材料印制^[2], 纸张为结构层, 正反两面 PE 层同时作为阻隔层和热封层。考虑到屋顶盒的材料, 包装机顶部封口选择板式热封, 即利用热风枪将热量传递至封口处, 并施加一定的压力实现包装材料

的密封。曲臂作为封口机构的主要连接件, 对封合质量影响显著, 所以在对曲臂进行设计时, 需要确定一个合理的外形, 使得结构所用的材料最少且具有足够的强度刚度。

通过理论的分析计算, 同时参考实验、分析数据

收稿日期: 2017-07-10

基金项目: 国家科技支撑计划 (2015BAF12B00)

作者简介: 黄巧 (1992—), 女, 江南大学硕士生, 主攻现代机械设计与制造。

通信作者: 石秀东 (1965—), 男, 博士, 江南大学副教授, 主要研究方向为食品加工装备、机械装备动态设计技术。

对模型参数进行反复修改,直至达到设计要求,这种设计方法是机械设计的一个重要手段^[3]。与传统的经验设计不同,文中使用 HyperWorks 中 OptiStruct 模块与 ABAQUS 结合,对曲臂进行有限元分析及拓扑结构优化。这种结构优化方法对其他零件结构优化有一定参考价值,通过这种分析技术对产品进行结构轻量化设计,不仅可以提高零件的力学性能,同时也可为企业提高经济效益、节约成本^[4]。

1 OptiStruct 优化理论

1.1 OptiStruct 优化

OptiStruct 是 HyperWorks 中的模块之一^[5],是一个面向产品设计、分析和优化的有限元和结构优化求解器。HyperWorks 中的 HperMesh 模块能够建立质量相对较高的有限元分析模型。HyperWorks 中的 Hyperview 模块^[6]可以提供速度较快的仿真和数据后处理可视化环境。通过 OptiStruct 对结构进行优化设计,可以实现与 HyperWorks 中其他模块的无缝连接,这将大大提高优化设计的效率。OptiStruct 采用数学规划方法,先通过求解灵敏度来构造近似显示模型,然后采用小步长迭代找到最优解。

1.2 拓扑优化

OptiStruct 结构优化包含拓扑优化、形状优化和尺寸优化等^[7]。拓扑优化方法,即在模型需要优化的设计区域内找到最优材料分布或传力路径,从而在满足各种性能的条件下忽略对机构整体刚度影响较小的特征^[8-9],来获得质量最轻的设计结构。拓扑优化常用的材料插值模型方法和表达方式有密度法、变厚度法、均匀化和拓扑函数描述等^[10]。

2 封口曲臂的有限元分析

屋顶盒顶部封口机构见图 1,根据对曲臂运动轨迹的要求,利用作图法确定曲臂的主要几何参数后,根据经验建立的曲臂初始模型见图 1。

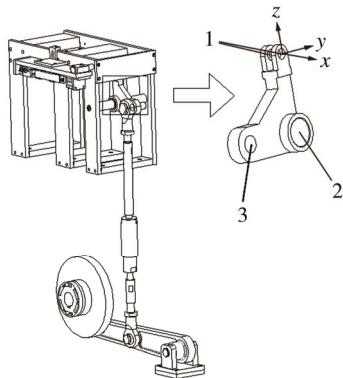


图1 顶部热封机构
Fig.1 Top heat sealing mechanism

2.1 封口曲臂的有限元模型建立

在 SolidWorks 三维软件中创建曲臂的实体初始模型,保存为 IGES 格式后导入 HyperMesh 中对曲臂进行网格划分。划分后的节点总数为 10 332 个,单元总数为 7834 个,其中八节点六面体单元为 7606 个,六节点五面体单元为 228 个。

2.2 材料属性设置

封口曲臂采用 0Cr18Ni9 材料,具体材料属性^[11]:弹性模量为 204 GPa,泊松比为 0.285,密度为 7.93×10^{-6} kg/mm³,屈服应力为 205 MPa,极限强度为 520 MPa。

2.3 边界约束与载荷设置

曲臂孔的分布见图 1,根据实际工况,对孔 1 处约束见图 1 中 y 方向上的运动,孔 2 处释放转动。应用 ADAMS 动力学软件,将图 1 所示的机构三维模型保存为 x_t 格式并导入到 Adams 软件中,先定义各个部件的材料属性,再添加各部件之间的运动副关系,最后给凸轮施加 1 s 转动一圈的转动驱动。运动学仿真后,在后处理中提取凸轮带动拉杆在曲臂处的载荷大小,可得施加在孔 3 处的极限载荷为 1894.5 N。

2.4 有限元分析

将加载后的求解模型导入 OptiStruct 中进行有限元分析,获得的应力云图、位移云图见图 2—3。由图 2—3 可知,曲臂最大应力为 42.2 MPa,在曲臂拐角处。最大位移为 0.03 mm,在受载处。从对求解模型的分析结果中可以看出,模型的整体应力都偏小。小于该材料的屈服应力 (205 MPa),有较大的裕量,

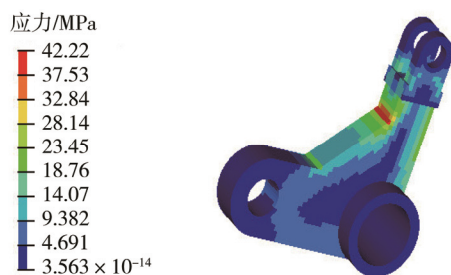


图2 初始模型应力云图
Fig.2 The stress contour of original model

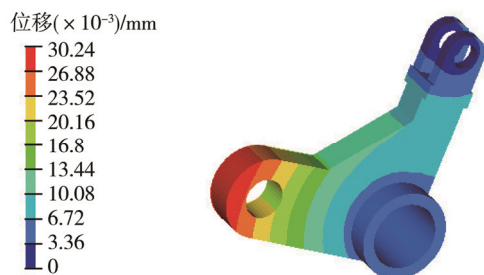


图3 初始模型位移云图
Fig.3 The displacement contour of original model

可以考虑进行轻量化设计来减轻曲臂的质量,同时可以对曲臂的最大位移量与最大应力量进行约束,从而减小机构对封口质量的影响。

3 封口曲臂的优化设计

图2中应力值较小处对曲臂的强度影响不大,即对该区域进行拓扑优化设计。考虑到其他零部件安装要求,将安装孔所处区域作为不可设计区域,其余部分为设计区域^[12]。拓扑优化模型见图4,图4中坐标系为右手笛卡尔坐标系,右手拇指指向 x 轴正方向并且食指指向 y 轴正方向时,中指是指向 z 轴正方向。

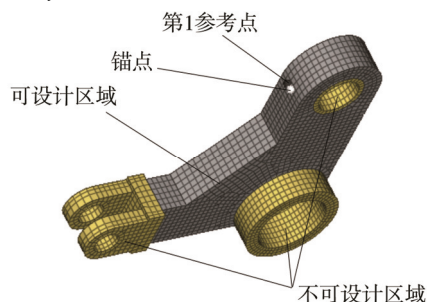


图4 拓扑优化模型

Fig.4 Topology optimization model

该次优化设计的数学模型可表述为:

$$\begin{aligned} \text{Minimize: } & f(X) = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ \text{Subject to: } & g(X) \leq 0 \quad j = 1 \dots m \\ & h_k(X) \leq 0 \quad k = 1 \dots m_h \\ & X_i^L \leq X_i \leq X_i^U \quad i = 1 \dots n \end{aligned} \quad (1)$$

式中: $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ 为曲臂优化的设计变量; $f(X)$ 为设计目标函数; $g(X)$ 和 $h(X)$ 为需要对曲臂进行约束的设计响应。

3.1 设计变量的选择

在优化的过程中是通过改变设计变量来达到提

高性能的目的,在文中,将设计空间内的每个单元的“单元密度”作为设计变量。“单元密度”与材料性能相关,在0~1之间连续取值。在优化过程中,如果单元的密度接近于1表示该单元所处的材料很重要,需要保留;如果单元的密度接近于0则表示该单元所处的材料不重要,可以去除。

3.2 定义约束条件

考虑到经过拓扑优化的模型,在去除部分材料后,曲臂的强度刚度会有所降低^[13],因此将应力范围作为约束条件。同时,考虑到曲臂的位移也将影响整个设备的工作精度,所以也将位移范围作为约束条件。取安全系数 S 为 1.49,定义最大应力值约束为 137.58 MPa,定义最大位移值约束为 0.18 mm。

3.3 定义模式组约束

模式组约束实际上通过对模型的设计空间施加对称约束来生成对称设计。在文中,定义锚点在右手笛卡尔坐标中的 $x-y$ 平面上,第1参考点为 $x-y$ 平面的法线上的一个点,则设计区域相对 $x-y$ 平面对称,定义中间平面选择的锚点和第1参考点见图4。

3.4 定义目标函数

在满足相关性能的前提下,所设计出来的总质量越轻越好,文中将曲臂的总质量最小作为目标函数。因为结构件是同一种材料,便于分析,所以定义总体积百分数最小为目标函数^[14-15]。

3.5 优化分析

将设置好的 hm 文件提交给 OptiStruct 进行求解计算,经过 88 次迭代计算后,模型达到在保证强度与刚度的要求下的最优解。在 Hyperview 中分别查看在第 10, 30, 50, 70 以及 88 次迭代结果的单元密度等面值云图,见图5。

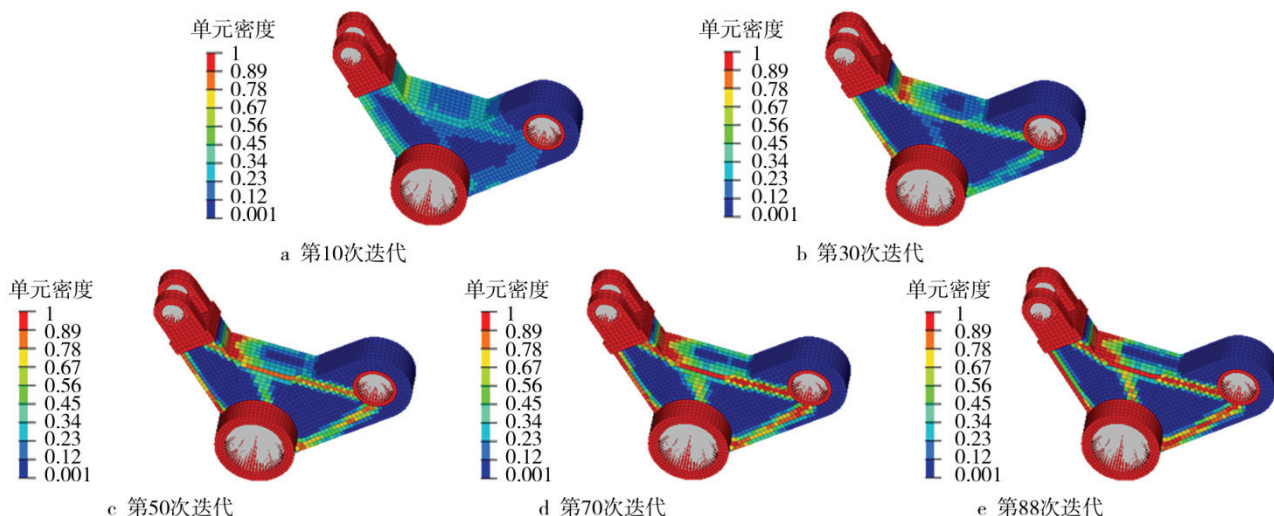


图5 单元密度等面值云图

Fig.5 Element density contour of equal value

在第 88 次迭代结果中为明显区别材料的变化, 在 0~1 中可分别取阈值为 0.1, 0.3, 0.58 时的优化模型见图 6。当阈值为 0.1 时, 优化结果中有材料堆积现象, 不能表明优化后的真实拓扑结构; 当阈值为 0.58 时结构材料的连续性开始破坏。根据图 6 分析, 取阈

值为 0.3 时能够得到清晰完整的图。利用 OSSmooth 模块, 将 88 次迭代后阈值为 0.3 的优化结果, 生成封闭的等值曲线, 从而生成的 IGES 模型文件, 即为在满足约束条件内的最优解, 迭代后的模型表面存在许多曲面, 鉴于制造工艺等形成的可实施方案见图 7。

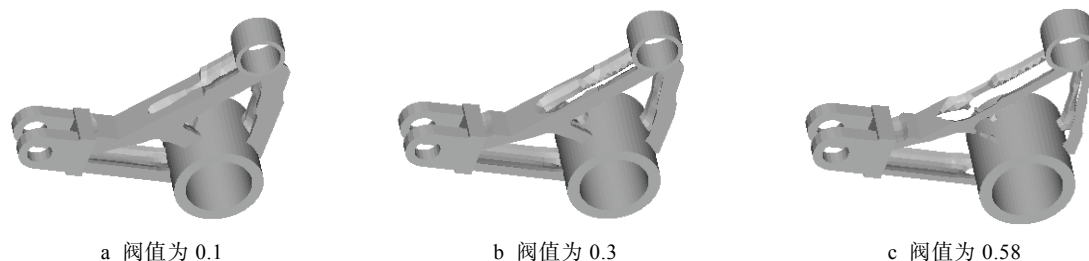


图 6 不同阈值的优化结果

Fig.6 The optimized results of different thresholds

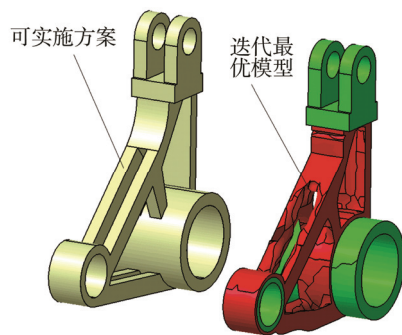


图 7 优化后模型

Fig.7 The model after optimization

4 优化模型校核

将图 7 中可实施方案作为最后优化后的模型, 为校核优化后的曲臂刚强度, 同时也为了校核与曲臂直接连接的销轴、轴承的刚强度, 各连接件分布在对应孔的位置, 对各连接件与优化后曲臂之间进行接触关系设置, 而接触分析就是一种典型的非线性问题, 因此, 利用 HyperMesh 与 ABAQUS 的接口功能, 将优化后相对较高质量的 INP 格式网络装配模型导入到有限元软件 ABAQUS 中进行非线性计算分析。经过计算分析, 应力云图、位移云图分别见图 8。由图 8

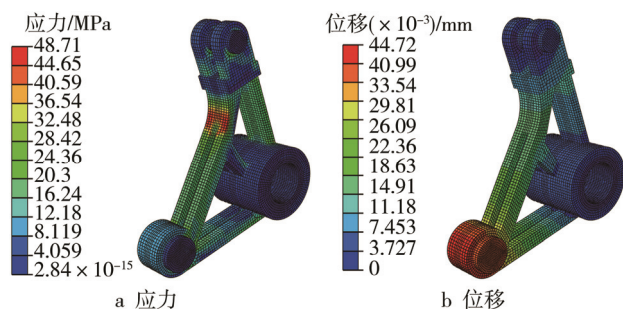


图 8 优化后模型的云图

Fig.8 The optimized model contour

可知, 优化后的模型应力最大值为 48.71 MPa, 分布在曲臂的弯曲处。与曲臂连接的轴承、销轴应力远远小于该材料的极限强度。优化后曲臂的最大位移为 0.04 mm, 在极限载荷作用的位置。

5 结语

从分析计算结果中可以得到, 初始模型质量为 1.567 kg, 优化后模型质量为 0.897 kg, 质量减少了 43%。应力最大值为 48.71 MPa, 远远小于材料的屈服应力, 最大位移为 0.04 mm, 达到优化设计要求, 同时还可以减少钢材, 节约质量成本。文中所优化的曲臂已在企业生产中得到了实际应用, 实践表明, 运用文中方法设计的曲臂运行良好, 达到了设计要求。这种 OptiStruct 的结构优化设计策略, 在设计初期, 根据设计经验在后期能同时满足设计工程师的设计精确要求与零件的刚强度要求, 这种优化设计方法对于其他结构的优化设计也能起到很好的作用。

参考文献:

- [1] 王玉林, 赵美林, 赵鹏. 无菌包装技术在屋顶盒包装机中的应用[J]. 包装工程, 2004, 25(4): 34—35.
WANG Yu-lin, ZHAO Mei-lin, ZHAO Peng. Application of Aseptic Packaging Technology in Roof Box Packaging Machine[J]. Packaging Engineering, 2004, 25(4): 34—35.
- [2] 李子华, 许铭, 何开旺, 等. 屋顶型复合纸液体饮料包装盒: 中国, 200720104714.2[P]. 2008-09-03.
LI Zi-hua, XU Ming, HE Kai-wang, et al. Roof Type Composite Paper Liquid Beverage Packaging Box: China, 200720104714.2[P]. 2008-09-03.
- [3] 张仁斌, 黄义勇, 成全胜. 基于 ABAQUS 的某微型车辆转向支架优化分析[J]. 机械设计与制造, 2012, 7(7): 34—35.
ZHANG Ren-bin, HUANG Yi-yong, CHENG Quan-

- sheng. Optimization Analysis of a Micro Vehicle Steering Gear Based on ABAQUS[J]. Mechanical Design and Manufacturing, 2012, 7(7): 34—35.
- [4] 邹德健, 裴承慧, 刘志刚, 等. 基于有限元的往复式刀具柠条平茬仿真及优化[J]. 江苏农业科技, 2017, 45(4): 172—176.
- ZOU De-jian, PEI Cheng-hui, LIU Zhi-gang, et al. Simulation and Optimization of Reciprocating Cutting of Caragana Korshinskii Based on Finite Element Method[J]. Jiangsu Agricultural Science and Technology, 2017, 45(4): 172—176.
- [5] 洪青泉, 赵康, 张攀, 等. OptiStruct&HyperStudy 理论基础与工程应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2013.
- HONG Qing-quan, ZHAO Kang, ZHANG Pan, et al. Theoretical Foundation and Engineering Application of OptiStruct & HyperStudy[M]. Beijing: China Machine Press, 2013.
- [6] 王钰栋, 金磊, 洪清泉, 等. HyperMesh & HyperView 应用技巧与高级实例[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.
- WANG Yu-dong, JIN Lei, HONG Qing-quan, et al. Application Skills and Advanced Examples of HyperMesh & HyperView[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2012.
- [7] GEA H C. A New Microstructure-based Design Domain Method[J]. Computer & Structures, 1996, 61(5): 781—788.
- [8] SIGMUND O, PETERSSON J. A Survey on Procedures Dialing with Checkerboards, Mesh Dependencies and Local Minimal[J]. Struc Opti, 1998(16): 68—75.
- [9] 杜鹏. 大型箱体结构拓扑优化设计研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2016.
- DU Peng. Topology Optimization Design of Large Box Structure[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2016.
- [10] TOKHI M O, MOHAMED Z. A Symbolic Approach[J]. Journal of Low Frequency Noise Vibration and Active Control, 1999, 18(2): 63—76.
- [11] GB/T 4237—2007, 不锈钢热轧钢板和钢带[S]. GB/T 4237—2007, Stainless Steel Hot Rolled Steel Sheet and Steel Strip[S].
- [12] 吕兆平. 某大微客动力总成悬置系统优化设计研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2010.
- LYU Zhao-ping. Optimization Design of Powertrain Mounting System of a Large Passenger Car[D]. Changsha: Hunan University, 2010.
- [13] 皮特. 基于 HyperWorks 的面棒机有限元分析及优化设计[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2014.
- PETER. Finite Element Analysis and Optimization Design of Bar Machine Based on HyperWorks[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2014.
- [14] LEE N K, LEE M S, KIM H Y, et al. Design of Engine Mount Using Finite Element Method and Optimization Technique[C]// International Congress & Exposition, 1998.
- [15] 廖抒华, 段守焱, 王金渡. Adams/Car 与 Insi-sht 在汽车前悬架仿真与优化中的联合应用[J]. 机械设计与制造, 2010(10): 137—139.
- LIAO Shu-hua, DUAN Shou-yan, WANG Jin-du. Simulation and Optimization of Automobile Front Suspension in the Combined Application of Adams/Car and Insi-sht[J]. Mechanical Design and Manufacture, 2010(10): 137—139.