

基于响应面法与 NSGA-II的重组竹翻转夹爪优化设计

于文吉^{1,2}, 石昌玉¹, 魏明³, 张亚慧², 曹永建⁴, 丁禹程¹, 杨春梅¹

(1.东北林业大学, 哈尔滨 150040; 2.中国林业科学研究院木材工业研究所, 北京 100091;

3.新港木业发展有限公司, 山东 临沂 276000; 4.广东省林业科学院, 广州 510520)

摘要: **目的** 解决纤维竹单板翻面问题, 同时保证竹单板的完整性及夹爪的轻量化。**方法** 设计一款专用翻转机械手, 将重组竹翻转夹爪作为研究对象, 提出一种基于响应面法与 NSGA-II相结合的优化设计方法; 建立夹爪模型, 进行有限元分析并进行优化实验方案的设计, 优化中将夹爪质量和最大变形量设定为目标, 其许用应力设定为约束, 对其进行多目标优化, 得到 Pareto 最优解集。**结果** 对重组竹翻转夹爪进行优化设计, 优化后单个夹爪的质量减少了 11.19%, 达到了轻量化目的。**结论** 优化改进后的重组竹翻转夹爪能够在保证其工作可靠的情况下, 实现重组竹翻转夹爪的轻量化, 同时减小对竹单板造成的破损, 为纤维化竹单板集装箱底板包装的规模化发展提供一定基础。

关键词: 纤维化竹单板; 响应面; NSGA-II; 轻量化; 重组竹翻转夹爪

中图分类号: TB486 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2023)19-0187-09

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.19.024

Optimization Design of Flipping Grippers for Bamboo Scrimber Based on Response Surface Methodology and NSGA-II

YU Wen-ji^{1,2}, SHI Chang-yu¹, WEI Ming³, ZHANG Ya-hui², CAO Yong-jian⁴,
DING Yu-cheng¹, YANG Chun-mei¹

(1. Northeast Forestry University, Harbin 150040, China; 2. Research Institute of Wood Industry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China; 3. Xingang Wood Industry Development Co., Ltd., Shandong Linyi 276000, China; 4. Guangdong Academy of Forestry, Guangzhou 510520, China)

ABSTRACT: The work aims to solve the flipping problem of fibrotic bamboo veneers and guarantee the completeness of bamboo veneers and the lightweight of grippers. A dedicated flipping manipulator was designed. A bamboo scrimber flipping gripper was used as the research object. An optimization design method based on the combination of NSGA II and response surface methodology was proposed. A gripper model was established to conduct finite element analysis and design an optimized experimental plan. The gripper mass and maximum deformation were set as goals in the optimization. Constrained by allowable stress, and multi-objective optimization was performed to obtain the Pareto optimal solution set. The optimized design of the bamboo scrimber flipping grippers reduced the weight of a single gripper by 11.19%, achieving the goal of lightweight. The optimized and improved bamboo scrimber flipping grippers can achieve lightweight, reduce power consumption, and reduce damage to bamboo veneers while ensuring its reliable operation.

KEY WORDS: fibrotic bamboo veneer; response surface; NSGA-II; light weight; bamboo scrimber flipping gripper

作为天然纤维增强生物质复合材料的竹子, 将竹材制成纤维化竹单板, 其原材料具有来源丰富、生长

周期短、零污染、抗压防水性强, 以及隔音减振效果和防火阻燃性能优异等优点, 符合集装箱底板包装的

综合性能要求,纤维化竹单板可作为优良的长时间运输集装箱包装材料。经过调查研究发现,纤维化竹单板可应用的领域越来越广,包含风电桨叶、建筑材料、湿地景区、包装运输材料、家庭的装潢装饰等^[1]。但是该产品在生产过程中由于无法同时保证加工质量和加工效率,进一步影响了集装箱竹底板规模化发展;影响竹底板加工质量的原因主要是人工铺装或通用机械手铺装加工速度慢,自动化水平低,无法实现连续化生产,无法满足社会对产品的需求量^[2-3]。本文设计一种纤维化竹单板青黄面翻转机械手,主要完成对竹青竹黄识别后的纤维化竹单板翻转,为下一步铺装工艺奠定好基础。

轻量化问题的研究,就是在保证机械结构的安全可靠前提下,使其质量减少,使得产品达到轻量化、小型化的目标^[4-5]。对零部件的尺寸优化设计,目前国内外已经有很多专家与学者都开展了诸多的研究。如梁其传等^[6]在一般的响应面优化和遗传算法优化的基础上,提出了一种结合稀疏网格模型与 MOGA 算法的优化方法,用于起重机主梁的结构优化。Zolpakar 等^[7]对多目标遗传算法传统的一些方法:随机搜索法、梯度法、模拟退火法和拉格朗日法进行了优缺点的分析。林冠屹等^[8]针对于自动化生产线上的专机机械手,运用多目标优化方法对响应面模型进行设计优化,并进行了拓扑优化进行去除材料的形状优化。邓援超等^[9]采用有限元对卸料机翻转框架进行了轻量化设计,在满足其工作性能和框架强度的基础上,整体框架质量减轻了 17%。邢广鹏等^[10]以工况下的总柔度为目标函数,以体积为约束函数对某发动机支架进行基于拓扑优化的结构设计,在满足强度、振动和外廓要求的前提下,对多工况载荷下航空发动机支架进行了轻量化设计。

本文在已有研究的基础上,将机械手的重组竹翻转夹爪作为轻量化优化的对象,将响应面法与非支配排序

遗传算法(Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm, NSGA-II)相结合,实现重组竹翻转夹爪的轻量化优化。

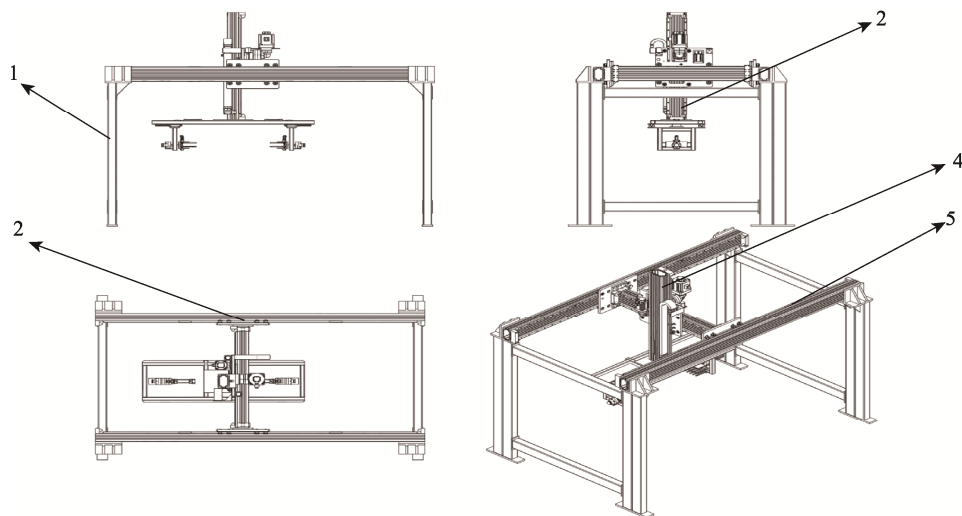
1 重组竹翻转夹爪结构与工作原理

疏解后的纤维化竹单板呈现纤维网状结构,青黄两面比较粗糙,但是浸胶干燥后纤维化竹单板就会呈现出“整体脆、局部硬”的状态,其实物如图 1 所示。采用传统的人工或通用机械手,在拿取或者夹取时会对竹单板造成不同程度的破损,影响板材整体效果,加工效率低下,且功耗较大,无法保证纤维化竹单板铺装自动化和夹持稳定性,因此需要一款专用的翻转机械手。



图 1 纤维化竹单板实物
Fig.1 Picture of fibrous bamboo veneer

翻转机械手由 5 部分组成,分别为支架、横向位移组件、纵向位移组件、旋转夹紧组件和垂直位移组件,其结构如图 2 所示。纤维化竹单板由进料检测装置传送到待翻转区域,当需要对纤维化竹单板进行翻面时,重组竹翻转夹爪进行横向位移调节直至达到单板长度的距离;进行纵向位移调节直至达到单板高度的距离,到达指定位置后,横向位移向内侧调节夹爪长度(L),夹爪进行夹紧、上提以及翻转动作,最后将竹材归位。该机械手的翻转工艺流程如图 3 所示。



1.支架; 2.纵向位移组件; 3.旋转夹紧组件; 4.垂直位移组件; 5.横向位移组件。

图 2 纤维化竹单板翻转机械手
Fig.2 Fibrotic bamboo veneer flip manipulator

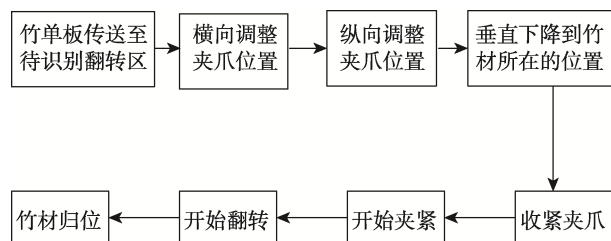


图 3 工作流程
Fig.3 Work flow chart

2 重组竹翻转夹爪有限元分析

2.1 建立三维模型

重组竹翻转夹爪是纤维化竹单板翻转机械手上的关键零部件,其主要作用是夹紧纤维化竹单板的 2 个横向端头,以便在旋转气缸的作用下实现纤维化竹单板竹青竹黄的翻面。利用 SolidWorks 软件对重组竹翻转夹爪进行三维建模,但由于设计变量无法被 ANSYS 软件辨别,需要 SolidWorks 和 Workbench 两者耦合,避免因格式问题导致模型导入的错误,这样可以使 Workbench 识别夹爪的参数化尺寸。重组竹翻转夹爪的结构如图 4 所示。本文中重组竹翻转夹爪主要的尺寸为长 400 mm、宽 50 mm、厚 10 mm。

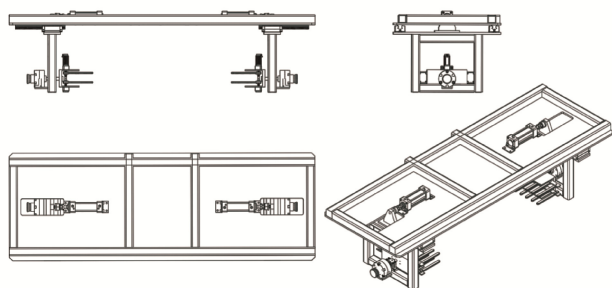


图 4 重组竹翻转夹爪结构
Fig.4 Structure of bamboo scrimber flipping gripper

在进行 SolidWorks 和 ANSYS Workbench 联合仿真时,需要对模型做一些前处理工作。对重组竹翻转夹爪的模型进行部分简化,其需遵守的原则是对夹爪的刚度影响不大,但是对夹爪复杂程度比较大的圆角、安装孔、倒角及部分小构件的影响较小。这样不仅能够缩短仿真分析的运算时间,还可以减小划分网格时出错的概率。

2.2 定义材料属性

重组竹翻转夹爪材料选用 Q235,其弹性模量为 1.9×10^5 MPa、泊松比为 0.288、密度为 7.86×10^3 kg/m³、许用应力 $[\sigma]$ 为 235 MPa。

2.3 划分网格和添加约束及载荷

先要确定竹单板的加持力,通过实验法确定夹爪

力的大小,该作用力既要保证不会对竹束造成破损的同时,还需确保在翻转时竹单板不会掉落。设定 200 N 的加持力,通过 ADAMS 软件验证了竹单板在该作用力下,翻转夹爪夹取翻转时不会出现掉落情况。

作为有限元分析时较为关键的步骤网格划分,本文应用了六面体网格的同时细化了局部网格,以保证最后计算的精度。网格过渡的速度选用缓慢过渡,对夹爪进行网格划分后总共产生 51 344 个单元,224 010 个节点,对夹爪安装板添加固定约束,在夹爪夹持面添加 200 N 载荷,网格划分结果如图 5 所示。

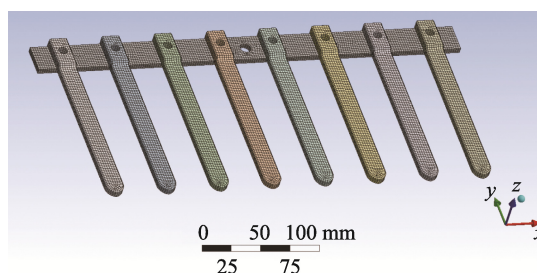


图 5 重组竹翻转夹爪网格
Fig.5 Grid of bamboo scrimber flipping gripper

2.4 结果分析

通过总变形图(图 6)可知,重组竹翻转夹爪的爪部为变形最大区域,根据其分析结果可知重组竹翻转夹爪在作业时,其最大变形量为 0.727 04 mm。通过应力云图(图 7)可知,在夹爪顶部与安装板连接处夹爪的应力最大,其最大应力为 103.63 MPa。但夹爪的材料选用的是 Q235 号钢,该材料的屈服强度为 235 MPa,比较可知夹爪所受的最大应力远小于该屈服强度,因此该材料选型符合设计要求。

在满足以上条件的前提下,还需对该翻转夹爪进行结构改进和轻量化的优化分析。

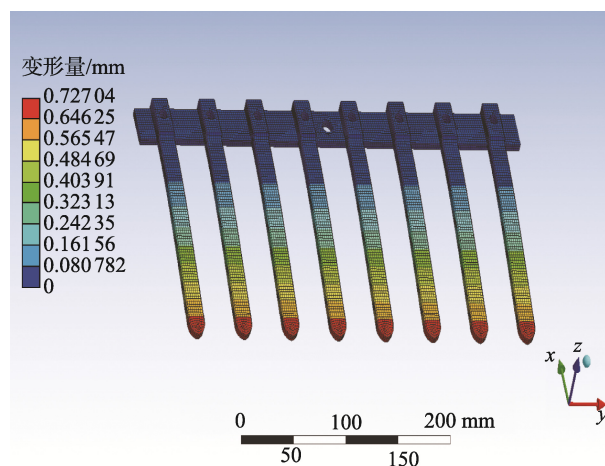


图 6 夹爪总变形
Fig.6 Total deformation diagram of gripper

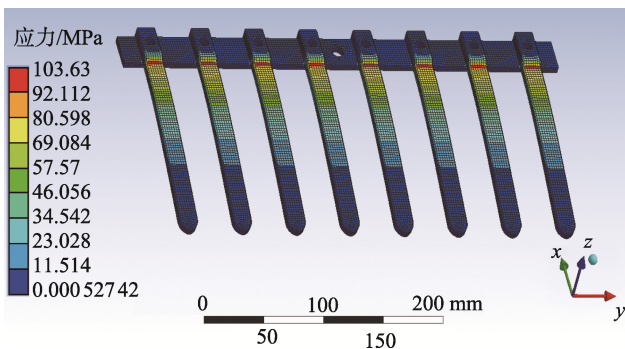


图7 夹爪等效应力云图

Fig.7 Equivalent stress diagram of gripper

3 基于非支配排序遗传算法与响应面分析法的优化流程

对于重组竹翻转夹爪的轻量化问题,是在重组竹翻转夹爪被轻量化设计的同时还要使其的最大变形量减小,在满足产品工作性能的前提下,通过优化设计使得产品轻量化、小型化。首先要确定目标响应和设计变量两者之间的关系,以确保本次优化设计的可靠性。然后采用轻量化优化方法,并且结合非支配排序遗传算法和响应面分析方法进行分析。

3.1 响应面法

响应面法即响应曲面设计方法,是一种集实验设计和数学建模于一体的优化方法。通过对代表性局部点进行实验,回归和拟合全局范围内因素与结果之间的函数关系,获得的每个因素都是最佳水平值^[11]。

响应面法具有简洁方便、实验次数少、收敛速度快、计算精度高等特点,目前已在众多领域得到广泛应用^[12]。在实际应用时,多项式响应面模型的形式是由工程经验确定的。在部分范围的设计变量里,低阶多项式近似通常被使用,例如线性函数或二阶模型拟合。本文选用二阶多项式逼近模型为工程实践中最常用的模型,函数如下:

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i x_i + \sum_{i=1}^n \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \beta_{ij} x_i x_j \quad (1)$$

式中: β 为未知系数; Y 为预测响应值; β_0 、 β_i 、 β_{ii} 分别为偏移项、线性偏移和二阶线性偏移系数; β_{ij} 为交互作用系数; n 为设计变量的数量; x 为设计变量。

求解模型中回归方程的每个系数,并用最小二乘法拟合确定。得到方程后,为确定方程的合理性,通过方程的偏回归系数和失配来检验。

3.2 非支配排序遗传算法

重组竹翻转夹爪的轻量化优化设计,其核心就是在对整体机构减轻重量的同时减小其最大的变形量,是典型的多目标优化问题,重点难点问题在于:

2个优化目标总体呈现的是负相关关系,寻找夹爪质量和变形量两者之间最佳的平衡点是本文优化内容的关键所在,因此将模型的质量和变形量作为本次目标响应。

多目标优化问题主要由多个目标函数和一些等式或不等式约束组成,它是优化多个子目标时在结果中找到一组满足其他约束的最优解。其数学模型如下:

$$\min f_r(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (2)$$

$$\max f_m(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (3)$$

$$\text{s.t. } g_i(x) \geq 0, i = 1, 2, \dots, p \quad (4)$$

$$h_j(x) \geq 0, j = 1, 2, \dots, q \quad (5)$$

式中: 函数 $f_i(x) = \{i = 1, 2, 3, \dots, m\}$ 为目标函数; $g_i(x)$ 和 $h_j(x)$ 为约束函数, $x = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}^T$ 为 n 维的设计变量。

在实际的优化过程中,多目标优化大多处理2个以上的优化目标。由于2个目标之间的负相关性,往往无法对这些目标来进行比较。因而找到一个同时使所有目标函数达到最优解决方案的概率是非常小的,基于此,通常存在多目标优化问题的解集,其中有1个解集无法在改进任何目标函数的同时不削弱其他目标函数,该解集即为非支配解(Pareto最优解)。优化时,在减小最大变形量和减小质量之间会存在矛盾,因而本文在寻找2个目标函数之间的Pareto最优解时采用了NSGA-II算法^[13]。

在优化过程中,通过NSGA-II算法对模型进行求解计算,流程如图8所示。

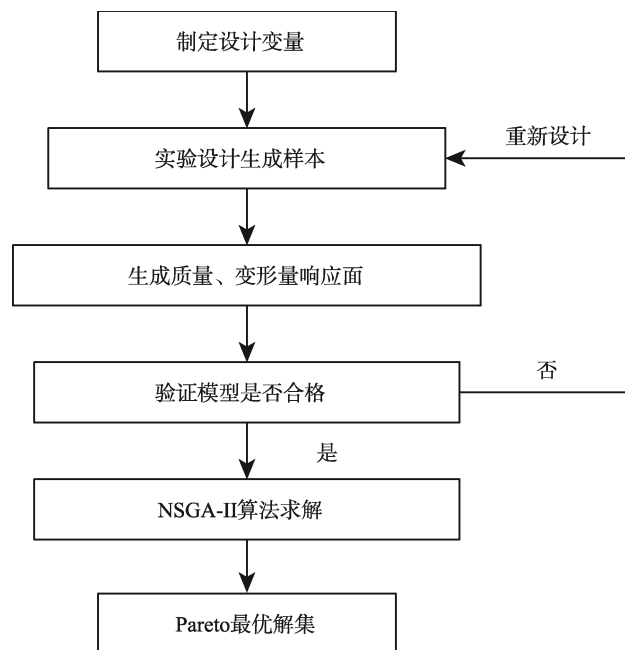


图8 NSGA-II算法与响应面分析法流程
Fig.8 NSGA-II algorithm and response surface analysis process

4 建立响应面模型

将减小重组竹翻转夹爪的质量和减小夹爪的最大变形量定义为优化目标; 将尺寸的取值范围定为约束条件; 将 P_1 、 P_2 、 P_3 、 P_4 4 个主要的尺寸作为本次设计的设计变量, 分别表示夹爪与纤维化竹单板接触面的长度 L 、宽度 w 、高度 h 和圆角 r 。综合考虑夹爪的工作环境和性能, 分别设置各个参数变化的上下限, 前提是不影响夹爪的工作性能。设计变量 $P = [p_1 \ p_2 \ p_3 \ p_4]^T$ 的约束条件如下:

$$L_i \leq P_i \leq H_i, i=1, 2, 3, 4 \quad (6)$$

式中: L_i 和 H_i 分别为设计变量的下限和上限。根据工厂实际尺寸限制, 设计变量的尺寸取值范围如表 1 所示。

表 1 设计变量尺寸取值范围
Tab.1 Size value range of design variables

设计参数	初始值/mm	参数上限/mm	参数下限/mm
P_1	300	330	270
P_2	50	55	45
P_3	10	11	9
P_4	6	6.6	5.4

实验设计是二阶响应面模型不可或缺的步骤, 依据表 1 的设计变量尺寸取值范围, 在 Design-Expert 软件里进行实验设计。本文采用 Central Composite Design (CCD) 设计实验点, 共设计了 25 个设计实验点。在 Design Expert 软件中, 通过方程对所获得的实验设计点的不同组合进行回归, 并对实验结果进行模拟, 并测试模型的准确性。

为了评估响应面模型能否精确反映平台的性能指标, 运用 R^2 和 R_{adj}^2 评价指标进行检验。根据计算可得, 质量和变形量的模型评价指标 R^2 和 R_{adj}^2 基本都超过 0.99, 接近 1, 如图 9、图 10 所示, 其拟合效果比较好, 精度经验证合格, 满足分析要求。

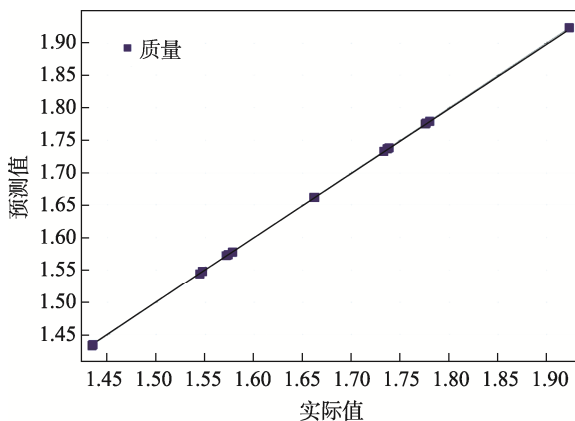


图 9 质量的实际值与预测值的拟合图
Fig.9 Fitting graph of actual and predicted mass

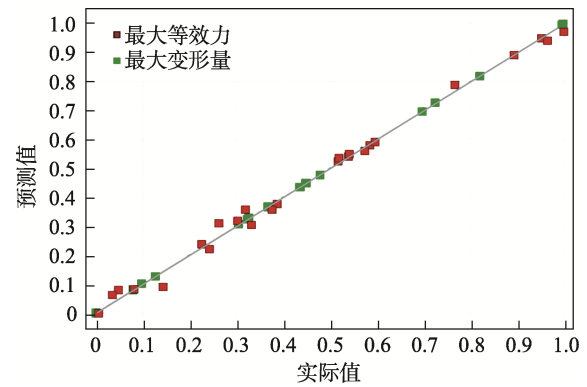


图 10 变形量的实际值与预测值的拟合图
Fig.10 Fitting graph of actual and predicted deformation

5 重组竹翻转夹爪 NSGA-II 算法优化结果与响应面分析

5.1 建立数学模型

夹爪进行优化的前提条件: 满足结构的刚度、强度以及工作性能, 对重组竹翻转夹爪进行结构优化时需要对其进行应变分析, 使其满足承载需要。再由夹爪的工作实际状况及空间位置确定设计变量范围。

根据设计要求, 重组竹翻转夹爪的尺寸参数作为设计变量, 约束条件为最大许用应力, 目标函数为质量和变形量, 建立重组竹翻转夹爪非支配多目标遗传算法优化模型。

$$\begin{cases} \min F[P] = \min(S, M) \\ \text{s.t. } S_{\max} \leq [\sigma] \\ P = (P_1, P_2, P_3, P_4) \\ \underline{P}_i \leq P_i \leq \overline{P}_i \quad i=1, 2, 3, 4 \end{cases} \quad (7)$$

式中: $S_{\max}$ 为夹爪变形量; $[\sigma]$ 为许用应力极限, 此处取 235 MPa; $\underline{P}_i$ 为设计变量下限; $\overline{P}_i$ 为设计变量上限。

5.2 多目标算法的改进

传统的 NSGA-II 算法主要运用模拟二进制交叉算子, 把交叉点的两边简单互换, 全局的搜索能力较差, 且更容易发生早熟收敛, 得到的优化 Pareto 解集大多会分布不均, 会减小种群的多样性。本文通过改进传统的 NSGA-II 算法, 将算数交叉算子引入并进行交叉操作。具体公式见式 (10)。

$$\begin{cases} X_i^{t+1} = \lambda X_i^t + (1-\lambda) X_j^t \\ X_j^{t+1} = \lambda X_j^t + (1-\lambda) X_i^t \end{cases} \quad (8)$$

式中: X_i^t 、 X_j^t 为第 t 代父代个体; X_i^{t+1} 、 X_j^{t+1} 为交叉后产生的 2 个子代个体; λ 为算数交叉算子, $\lambda \in [0, 1]$ 。

对算数算子进行优化改进, 可以让子代个体更好地遗传父代个体中较为优秀的基因, 见式 (11)。

$$\lambda = \begin{cases} \frac{i_r}{i_r + j_r} & i_r \neq j_r \\ \frac{i_d}{i_d + j_d} & i_d \neq j_d \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} X_i^{t+1} = X_i^t + \rho \xi \lambda (X_j^t - X_i^t) \\ X_j^{t+1} = X_j^t - \rho \xi \lambda (X_j^t - X_i^t) \end{cases} \quad (10)$$

式中: i_r 和 j_r 为个体非支配排序等级; i_d 和 j_d 为拥挤距离; ρ 为 n 维随机数变量, n 为设计变量个数; ξ 为 n 维变量, $\xi = \text{rand}(1, n)$ 。

通过改进交叉算子, 可使算法在进行前一阶段的运算时, 让子代的个体遗传得到比较优良的个体基因。在后一阶段, 可让子代个体遗传到分布较好的基因。

通过上述数学模型结合非支配多目标遗传算法程序, 进行反复迭代优化, 种群规模大小为 90、变异概率设置为 0.2、交叉概率为 0.8、最大迭代次数设置为 80 次。翻转夹爪优化的 Pareto 最优解集见图 11, 可知变形量与质量之间是相互冲突的, 无法找到一个最优点可以使得 2 个目标同时达到最优。

5.3 响应面模型的建立

本文运用 Workbench 对翻转夹爪进行优化分析, 优化运用响应面优化设计模块, DOE 实验设计法用

于设置实验样本的数量和设计参数的范围, 可生成设计空间, 计算每组采样点的相应输出参数值。通过多个设计点构建响应曲面, 进而分析所获得的响应面数据, 以实现参数优化。

运用了 DOE 模块, 实验类型选用 CCD (Central Composite Design), 更新设计点可获得 25 个样本点, 如表 2 所示。参数中的 $P_1 \sim P_7$ 分别为夹爪的长度、宽度、厚度、圆角、最大应力、变形量和质量。

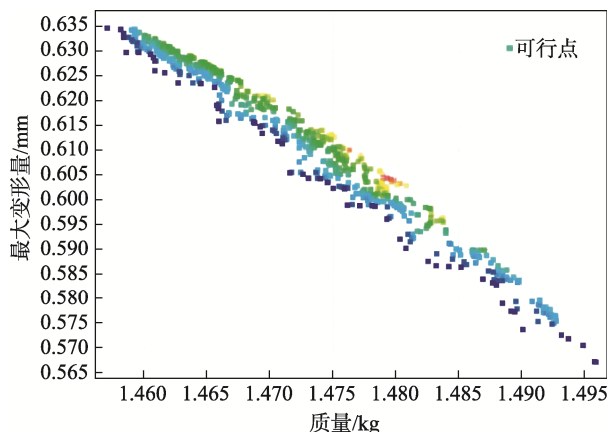


图 11 夹爪质量与变形量的关系
Fig.11 Relationship between gripper mass and deformation

表 2 样本点数据
Tab.2 Sample point data

序号	$P_1 (L) / \text{mm}$	$P_2 (W) / \text{mm}$	$P_3 (H) / \text{mm}$	$P_4 (R) / \text{mm}$	$P_6 (\text{变形量}) / \text{mm}$	$P_7 (\text{质量}) / \text{kg}$
1	300	50	10	6	0.813 2	1.662 3
2	270	50	10	6	0.593 42	1.544 6
3	330	50	10	5	1.081 6	1.780 1
4	300	45	10	6	0.904 06	1.547 5
5	300	55	10	6	0.762 56	1.775 8
6	300	50	9	6	1.104 9	1.547 9
7	300	50	11	6	0.616 77	1.776 7
8	300	50	10	5.4	0.813 87	1.662 2
9	300	50	10	6.6	0.812 64	1.662 5
10	278.87	46.479	9.295 8	5.577 5	0.870 05	1.434 7
11	321.13	46.479	9.295 8	5.577 5	1.328	1.578
12	278.87	53.521	9.295 8	5.577 5	0.777 6	1.572 4
13	321.13	53.521	9.295 8	5.577 5	1.182 5	1.737 4
14	278.87	46.479	10.704	5.577 5	0.577 45	1.573 7
15	321.13	46.479	10.704	5.577 5	0.879 82	1.738 7
16	278.87	53.521	10.704	5.577 5	0.513 66	1.733 3
17	321.13	53.521	10.704	5.577 5	0.780 22	1.923 3
18	278.87	46.479	9.295 8	6.422 5	0.868 53	1.435
19	321.13	46.479	9.295 8	6.422 5	1.325 9	1.578 3
20	278.87	53.521	9.295 8	6.422 5	0.777 88	1.572 3
21	321.13	53.521	9.295 8	6.422 5	1.182 9	1.737 3
22	278.87	46.479	10.704	6.422 5	0.577 15	1.573 9
23	321.13	46.479	10.704	6.422 5	0.879 42	1.738 9
24	278.87	53.521	10.704	6.422 5	0.513 82	1.733 2
25	321.13	53.521	10.704	6.422 5	0.780 44	1.923 3

ANSYS Workbench 中有 6 种响应曲面拟合方法。为此优化选择了 Kriging (克里金) 拟合方法。这种拟合方法主要适用于非线性工程的优化问题。它可以细化输入参数, 将细化的点分配给最需要改进的部分, 并确保优化的质量^[14-16]。当确定系数用于评估响应面的拟合精度时, Kriging (克里金) 拟合方法的 3

个输出参数系数为 1, 实现了最佳拟合效果。

完成设计样本点求解, 采用 3D 形式输出, 这样能够更明确地表示对应关系。根据图 12 可知, P_1 越大, 变形量越大, 质量也越大; 对 P_2 来说, 其对变形量的影响不是很大, P_2 越大, 质量会越大, 但影响不是很明显; P_3 越大, 变形量越小, 质量则越大。

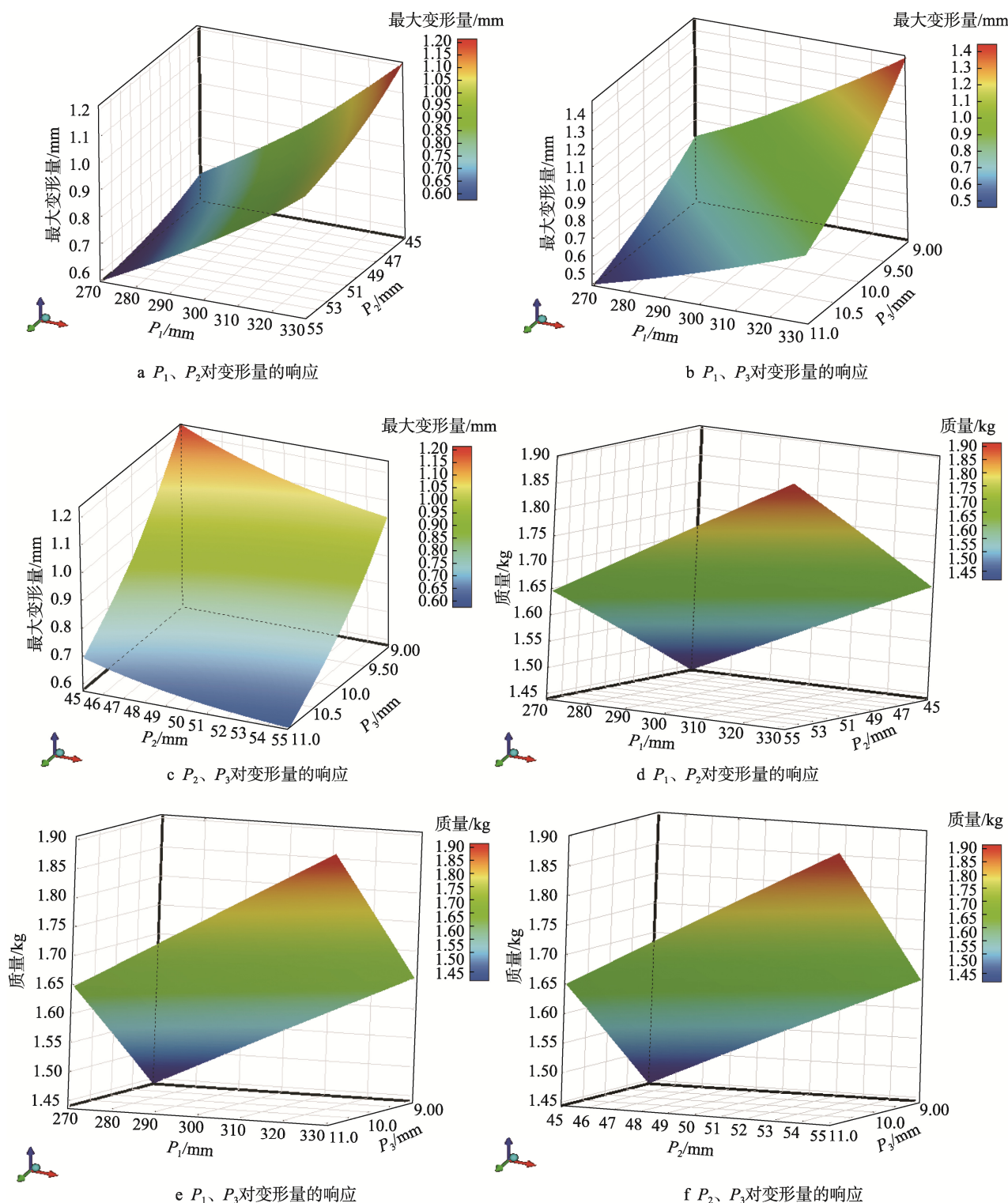


图 12 响应曲面
Fig.12 Response surface

为了更直观地看到输入参数对夹爪模型的质量和变形量的影响,给出了输出参数的局部灵敏度图,如图 13 所示。可看出设计变量 P_3 对模型的变形量和质量的影响明显大于其他 3 个变量的影响, P_3 可用作主要设计变量。当厚度增加时,变形量减小,质量增大,设计变量 P_2 和 P_4 对变形量和质量几乎没有影响。

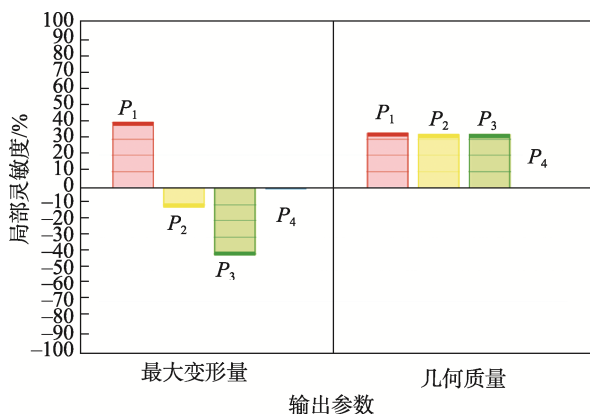


图 13 相关参数灵敏度
Fig.13 Correlation parameter sensitivity

质量和变形量 2 个参数相互制约,无法同时获得 2 个参数的最优结果。这是多目标优化的难点,只有比较结果后才能获得相对的“最优解”。

在定义输出参数优化目标时,将变形量求解目标定义为最小值;将质量解决方案目标定义为最小,目标重要性最高。通过求解计算,可得到 3 组候选设计点,根据表 3 可知,得出的 3 组候选优化方案的设计变量比较接近,因而 A、B、C 3 组方案都可作为最优方案。

表 3 候选方案
Tab.3 Candidate scheme

方案	P_1 (L) / mm	P_2 (W) / mm	P_3 (H) / mm	P_4 (R) / mm	P_6 (变形量) / mm	P_7 (质量) / kg
A	270.11	45.052	10.369	5.877 1	0.599 06	1.476 2
B	270.01	45.16	10.351	6.122 5	0.599 1	1.476 6
C	270.07	45.115	10.367	5.698	0.598 93	1.477 1

本文选择优化方案 B 作为最终优化方案。考虑加

工的要求,把一些尺寸进行圆整处理,取 $P_1=270$ mm、 $P_2=45$ mm、 $P_3=10$ mm、 $P_4=6$ mm。

5.4 优化后性能分析

为了验证优化设计结果的可行性和有效性,有必要检查优化模型。根据优化方案 B,表 4 中显示了优化前后重组竹翻转夹爪基本尺寸的比较。

表 4 优化前后夹爪基本尺寸对比
Tab.4 Comparison of basic dimensions before and after gripper optimization

基本尺寸	优化前	优化后	差值 / mm
P_1	300	270	30
P_2	50	45	5
P_3	10	10	0
P_4	6	6	0

尺寸优化后会减小与竹单板的接触面,为此在翻转夹爪的夹持面安装橡胶垫,添加橡胶垫后,可增大竹单板与夹爪的接触面积,进而减少对纤维化竹单板的破损,保证成板的质量。优化设计后,优化前后输出参数对比见表 5。

表 5 优化前后输出参数对比
Tab.5 Comparison of output parameters before and after optimization

优化设计	最大变形量/mm	质量/kg
优化前	0.813	1.662
优化后	0.599	1.476
变化率/%	26.32	11.19

从表 5 可看出,优化后单个重组竹翻转夹爪的变形量和质量都有所减小,单个夹爪的质量减小了 11.19%,同时对其结构进行优化设计后变形量下降了 26.32%。机械手中每个翻转夹爪的结构材质都完全相同,因此每个夹爪都会被优化。此次优化把模型的质量放在了首位,可见此次优化效果显著。同时根据图 14 可知,本次优化对减小翻转机械手整体的功耗有很大帮助。

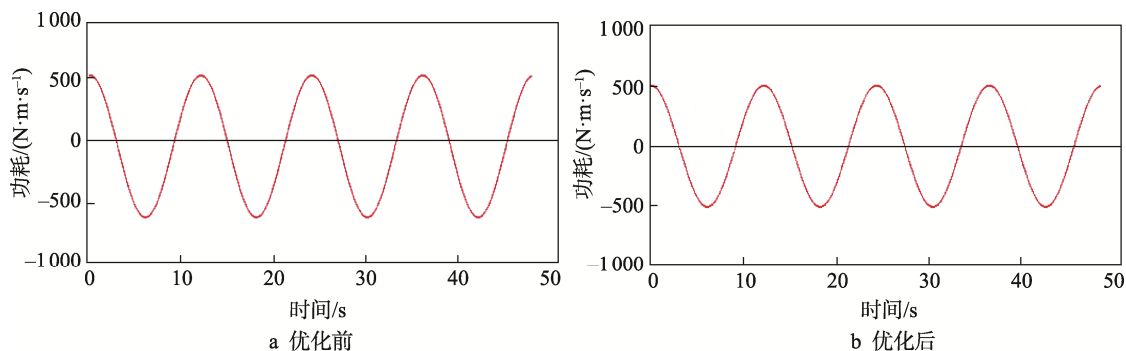


图 14 夹爪优化前后功耗对比
Fig.14 Comparison of power consumption before and after gripper optimization

6 结语

本文通过 SolidWorks 对机械手的重组竹翻转夹爪进行参数化建模,在 Workbench 中对其进行静力学分析,将重组竹翻转夹爪影响较大的尺寸设定为参数,以质量和变形量为目标进行响应面优化设计,建立数学模型。采用非支配排序遗传算法与响应面分析法进行优化,通过对优化后模型的优化和验证,可以得出以下结论:优化后,单个夹爪的质量减小了 11.19%,达到了重组竹翻转夹爪结构轻量化、小型化以及减小功耗的目的,同时减小了对竹单板的破损,为纤维化竹单板集装箱底板包装的规模化发展提供一定基础。

参考文献:

- [1] 于文吉. 我国重组竹产业发展现状与趋势分析[J]. 木材工业, 2012, 26(1): 11-14.
Yu Wen-ji. Current Status and Future Development of Bamboo Scrimber Industry in China[J]. China Wood Industry, 2012, 26(1): 11-14.
- [2] 于文吉, 余养伦. 我国木、竹重组材产业发展的现状与前景[J]. 木材工业, 2013, 27(1): 5-8.
YU Wen-ji, YU Yang-lun. Development and Prospect of Wood and Bamboo Scrimber Industry in China[J]. China Wood Industry, 2013, 27(1): 5-8.
- [3] 罗顺明, 韦建军. 木材加工自动化生产线在生产中的应用探讨[J]. 林产工业, 2021, 58(5): 89-91.
LUO Shun-ming, WEI Jian-jun. Application of Automatic Wood Processing Production Line in Production[J]. Forest Products Industry, 2021, 58(5): 89-91.
- [4] 郝志刚, 何杰, 艾文, 等. 基于响应面法的金属打包机箱体结构轻量化设计[J]. 机床与液压, 2021, 49(7): 102-106.
XI Zhi-gang, HE Jie, AI Wen, et al. Lightweight Design of Metal Baler Body Structure Based on Response Surface Method[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2021, 49(7): 102-106.
- [5] 张开拓, 管殿柱, 白硕玮, 等. 基于响应面分析法的龙门式折弯机轻量化设计[J]. 制造业自动化, 2019, 41(1): 57-60.
ZHANG Kai-tuo, GUAN Dian-zhu, BAI Shuo-wei, et al. Lightweight Design of Gantry Bending Machine Based on Response Surface Methodology[J]. Manufacturing Automation, 2019, 41(1): 57-60.
- [6] 梁其传, 易朋兴, 邱悦. 基于稀疏网格模型与 MOGA 算法的起重机主梁结构优化[J]. 现代制造工程, 2019(6): 79-83.
LIANG Qi-chuan, YI Peng-xing, QIU Yue. Optimization of the Main Beam of Bridge Crane Based on Sparse Grid Model and MOGA Algorithm[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2019(6): 79-83.
- [7] 林冠屹, 管殿柱, 宋占杰. 基于 ANSYS Workbench 的机械手夹爪钢构仿真与优化[J]. 制造业自动化, 2020, 42(11): 33-37.
LIN Guan-yi, GUAN Dian-zhu, SONG Zhan-jie. Simulation and Optimization of Gripper Steel Structure of Manipulator Based on ANSYS Workbench[J]. Manufacturing Automation, 2020, 42(11): 33-37.
- [8] 邓援超, 周谟林, 陈华, 等. 基于有限元对卸料机翻转框架的轻量化设计[J]. 包装工程, 2018, 39(1): 126-131.
DENG Yuan-chao, ZHOU Mo-lin, CHEN Hua, et al. Lightweight Design of Turn Frame for Unloading Machine Based on Finite Element Analysis[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(1): 126-131.
- [9] 邢广鹏, 孙志刚, 崔向敏, 等. 多工况载荷下航空发动机支架拓扑优化设计[J]. 航空动力学报, 2020, 35(11): 2248-2262.
XING Guang-peng, SUN Zhi-gang, CUI Xiang-min, et al. Topological Optimization Design of Aero-Engine Support Structure under Multiple Loading Conditions[J]. Journal of Aerospace Power, 2020, 35(11): 2248-2262.
- [10] 李莉, 张赛, 何强, 等. 响应面法在试验设计与优化中的应用[J]. 实验室研究与探索, 2015, 34(8): 41-45.
LI Li, ZHANG Sai, HE Qiang, et al. Application of Response Surface Methodology in Experiment Design and Optimization[J]. Research and Exploration in Laboratory, 2015, 34(8): 41-45.
- [11] 王强, 苏小平, 许金龙. 响应面法与多目标遗传算法在桥壳优化上应用[J]. 机械设计与制造, 2019(9): 71-76.
WANG Qiang, SU Xiao-ping, XU Jin-long. Application of Response Surface Methodology and Multi-Objective Genetic Algorithm in Optimization of Axle Housing[J]. Machinery Design & Manufacture, 2019(9): 71-76.
- [12] 王嵘冰, 徐红艳, 郭军. 自适应的非支配排序遗传算法[J]. 控制与决策, 2018, 33(12): 2191-2196.
WANG Rong-bing, XU Hong-yan, GUO Jun. Adaptive Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm[J]. Control and Decision, 2018, 33(12): 2191-2196.
- [13] KAYMAZ I. Application of Kriging Method to Structural Reliability[J]. Structural Safety, 2005, 27(2): 133-151.
- [14] SAKATA S, ASHIDA F, ZAKO M. An Efficient Algorithm for Kriging Approximation and Optimization with Large-Scale Sampling Data[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2004, 193(3): 385-404.
- [15] 卿启湘, 陈哲吾, 刘杰, 等. 基于 Kriging 插值和回归响应面法的冲压成形参数的优化及对比分析[J]. 中国机械工程, 2013, 24(11): 1447-1452.
QING Qi-xiang, CHEN Zhe-wu, LIU Jie, et al. Study on Comparison and Optimization of Sheet Forming Parameters Using Kriging Interpolation and Regression Response Surface Metamodeling Techniques[J]. China Mechanical Engineering, 2013, 24(11): 1447-1452.