

DOI: 10.12326/j.2096-9694.2025120

基于木材纹理-力学性能协同优化的实木家具零部件下料方法研究

朱正坤^{1,2}, 康小燕^{1,2}, 肖 燊^{1,3}, 王孜豪⁴

(1. 江西环境工程职业学院, 江西赣州 341000; 2. 江西省林业局木竹家具绿色制造重点实验室, 江西赣州 341000; 3. 中南林业科技大学材料与能源学院, 湖南长沙 410004; 4. 江西铂源家具有限公司, 江西赣州 341000)



摘要: 针对实木家具下料过程中木材利用率低与零部件力学性能难以兼顾的问题, 提出了一种融合木材纹理-力学性能映射模型与动态分割策略的改进遗传算法。该方法通过量化木材纹理方向与零部件抗弯强度之间的映射关系, 将力学性能指标引入改进遗传算法的适应度函数; 创新性地应用 Bézier 曲线进行轮廓拟合与动态数控路径规划, 实现对异形零部件的高精度和高效率加工; 同时引入自适应变异算子, 以平衡算法全局探索与局部寻优能力。基于企业实际板材与零部件数据的研究结果表明, 与人工下料、商业下料软件及标准遗传算法相比, 改进遗传算法将木材利用率提升至 92.3%, 纹理匹配合格率达到 95.2%, 零部件平均抗弯强度提高 17.6% ($P < 0.01$), 且收敛时间控制在 8.2 min 以内, 满足实际生产需求。消融实验进一步验证了改进遗传算法中各模块的必要性与协同作用。本研究为实现实木家具下料过程的木材原料高效利用与产品性能协同优化提供了可行的智能化解决方案。

关键词: 实木家具; 零部件; 遗传算法; 木材纹理; 力学性能; 优化下料; 智能制造

中图分类号: TS664.1 文献标识码: A 文章编号: 2096-9694 (XXXX) XX-0001-09

Cutting Method of Solid Wood Furniture Components Based on Collaborative Optimization of Wood Texture and Mechanical Properties

ZHU Zhengkun^{1,2}, KANG Xiaoyan^{1,2}, XIAO Can^{1,3}, WANG Zihao⁴

(1. Jiangxi Environmental Engineering Vocational College, Ganzhou 341000, Jiangxi, China; 2. Key Laboratory of Green Manufacturing of Wood and Bamboo Furniture, Jiangxi Forestry Bureau, Ganzhou 341000, Jiangxi, China; 3. College of Materials and Energy, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, Hunan, China; 4. Jiangxi Boyuan Furniture Co., Ltd., Ganzhou 341000, Jiangxi, China)

Abstract: To address the problem of low wood utilization rate and difficulty in balancing the mechanical properties of components during the cutting process of solid wood furniture, an improved genetic algorithm that integrates a texture-mechanics mapping model and a dynamic segmentation strategy was proposed. The method quantifies the relationship between wood grain direction and component flexural strength, incorporating this mechanical performance indicator into the fitness function of the improved genetic algorithm. Bézier curves were applied for contour fitting and dynamic CNC path planning to

收稿日期: 2025-11-04; 修改日期: 2025-12-24

基金项目: 江西省现代家具产业创新联合体项目“江西省实木家具全屋定制发展现状、趋势及关键技术需求”(JXJLHT202302)。

作者简介: 朱正坤 (1996—), 男, 讲师。Email: 673707987@qq.com

通讯作者: 肖燊, 女, 讲师。Email: 17916370@qq.com

enable high-precision and efficient processing of specially shaped components. Furthermore, an adaptive mutation operator was introduced to balance global exploration and local optimization capabilities. Experiments results based on actual enterprise panel and components data demonstrated that, compared to manual cutting, commercial software (AutoNEST), and a standard genetic algorithm, the improved genetic algorithm increased the wood utilization rate to 92.3%, achieved a grain orientation matching rate of 95.2%, and improved the average component flexural strength by 17.6% ($P < 0.01$), and controls the algorithm convergence time within 8.2 minutes, meeting production requirements. The ablation experiment further verified the necessity and collaborative effect of each module in the improved genetic algorithm. This research provided a feasible intelligent solution for achieving efficient resource utilization and collaborative optimization of product performance in the cutting process of solid wood furniture.

Key words: genetic algorithm; wood grain; mechanical properties; cutting optimization; smart manufacturing

据《中国林业统计年鉴》数据显示，我国实木家具行业年木材消耗量已超过 5 000 万 m^3 ，且年均增长率约为 5%^[1-2]。作为林业资源消耗的主要领域之一，实木家具制造业的高质量发展对构建绿色家居生态体系至关重要。家具零部件下料作为制造流程的首道关键工序，其优化水平直接决定材料成本控制精度与资源利用效率。然而，当前生产企业普遍依赖人工经验或商用排料软件（如 AutoNEST、CutLogic 等）进行下料规划，这存在两大瓶颈：其一，排料方案多以规则矩形填充为主，对异形零部件的处理能力不足，导致木材利用率普遍偏低，相关研究也表明传统下料方式的材料浪费问题一直是行业关注的热点^[3]；其二，现有方法未能充分考虑木材各向异性特征，缺乏纹理方向与零部件受力状态的科学匹配机制，从而牺牲材料的潜在力学性能。这些现象本质上反映了当前下料过程仍处于“几何形状驱动”的阶段，未能与面向产品内在质量的“性能驱动”智能制造范式接轨。

以往研究已经证实纹理方向与木材力学强度间存在显著关联^[4-5]，但并未将其与下料优化模型相结合指导排料。王伟^[6]尝试利用有限元分析进行家具结构优化，但采用的方法依赖于特定软件平台，且计算复杂，难以直接应用于大规模排料场景。值得注意的是，上述研究大多将关注点置于孤立的结构分析或单纯的排料算法之上，未将木材的天然属性（纹理）、零部件的功能需求（力学

性能）与制造过程的效率目标（材料利用率）进行深度融合。因此，实现从“形状驱动”到“性能驱动”的转变，亟需在模型、算法与系统集成三个层面实现突破。

目前，实现协同优化面临两大挑战：其一，纹理-力学性能关系的可计算问题，需要建立一个既能反映木材学原理又便于算法求解的数学模型；其二，异形零部件的高效处理与算法搜索效率的平衡问题，需要保证排料精度且兼顾算法在复杂解空间中的搜索效率。综上所述，如何在保证材料高利用率的同时，通过纹理的智能匹配来提升零部件的力学性能，是当前实木家具智能制造领域一个亟待解决且缺乏系统解决方案的技术难题。

遗传算法是一种模拟自然界生物进化机制的优化方法，其优势在于能够有效解决复杂的问题，尤其是对于高维度、多峰值的非线性优化问题具有较好的全局搜索能力^[7]。鉴于此，本研究基于遗传算法，提出并验证一个面向实木家具零部件性能驱动下料的解决方案：首先，构建一个可量化的木材纹理-力学性能映射模型，将各向异性的材料特性转化为明确的优化目标，创造“性能驱动”的模型基础；其次，针对实木家具异形零部件轮廓复杂、传统排料算法处理精度不足的难题，将 Bézier 曲线拟合技术应用用于动态轮廓分割与数控路径生成，确保复杂零部件的精确加工；同时，结合自适应变异机制以平衡算法搜索能力；最终，通过将上述模型与定制化算法模块深度集成，实

现材料属性、功能需求与生产效率在排料环节的协同优化，并将该方法用于企业生产数据验证。为解决实木家具零部件下料算法优化的难题提供技术方案。

1 材料与方法

1.1 试验材料与数据

红栎 (*Quercus rubra*) 板材：规格为 1 200 mm × 600 mm × 30 mm，含水率控制在 8%~12%，

气干密度约为 0.74~0.76 g/cm³，顺纹抗弯强度均值为 105~115 MPa，共计 100 块。

零部件数据来源于江西某家具有限公司的 50 款实木家具产品，经拆解得到 320 个个体零部件（其中异形零部件 85 个）。包括桌腿、椅背、柜门等，其中包含 10 款具有复杂曲面的异形零部件，可分为 4 种典型轮廓类型，曲线椅背、异形扶手、波浪柜门、异形桌腿，具体如图 1 所示。

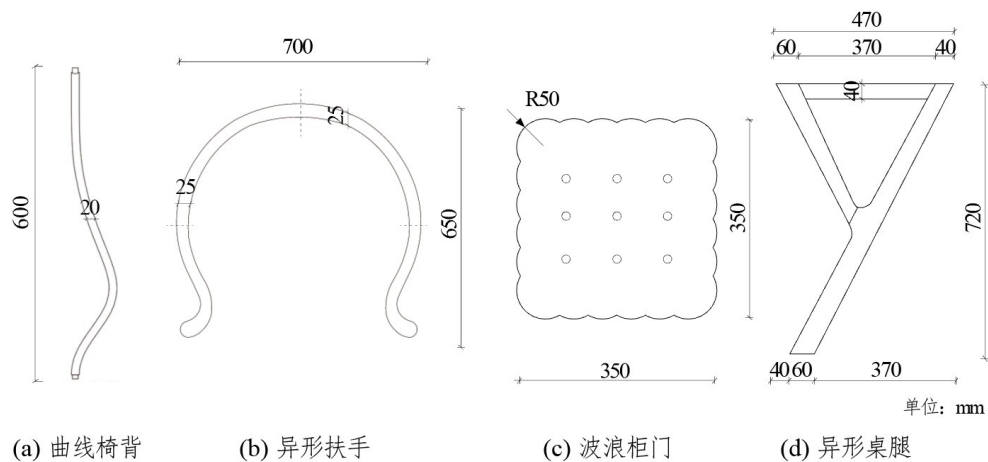


图1 家具异形零部件的4种典型轮廓类型

Fig.1 Four typical profile types of furniture irregular components

1.2 木材纹理-力学性能匹配原理及映射模型

根据木材各向异性力学原理，随着木材纹理方向与试件主受力方向夹角增大，抗弯强度逐渐衰减。当夹角为 0° 时，为纵向抗弯强度，强度值最大；当夹角为 90° 时，为横向抗弯强度，强度值最小。

纹理方向量化：采用扫描仪（600 dpi）获取板材表面图像，并截取局部分析区域（图 2a）。在

该区域内，应用灰度梯度法识别灰度变化明显的方向，即主导灰度梯度方向 y 。由于沿木材纹理方向灰度变化相对较缓，而垂直纹理方向的变化较为明显，因此 y 通常近似垂直于木材纹理方向（图 2b）。结合主成分分析拟合方向，研究进一步取 y 的正交方向作为木材纹理方向 x ，并计算木材纹理方向 β 与家具零部件主受力方向之间的夹角 θ ，测量精度误差控制在 $\pm 3^\circ$ 以内。

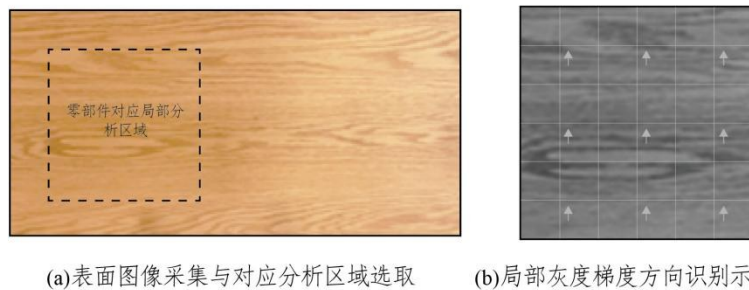


图2 基于灰度梯度分析的木材纹理方向量化原理示意

Fig.2 Schematic illustration of wood grain orientation quantification based on grayscale gradient analysis

木材纹理-家具零部件主受力方向夹角与抗弯强度的相关性，如图3所示。

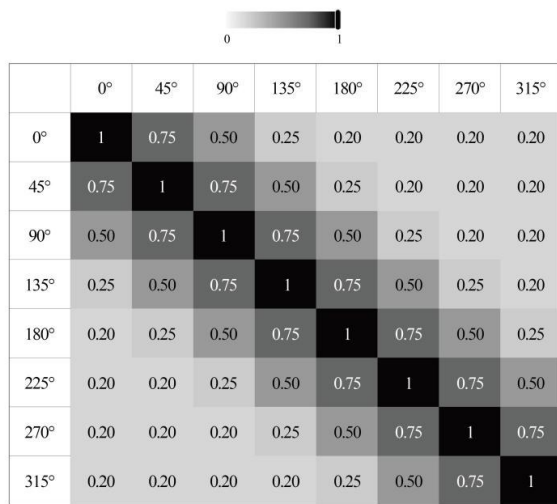


图3 木材纹理-家具零部件主受力方向夹角与抗弯强度的相关性

Fig.3 Correlation between the angle of wood grain-main loading direction of furniture components and bending strength

为建立木材纹理-家具零部件主受力方向夹角与力学性能的定量关系，引入抗弯强度损失率模型。根据经典木材力学与相关研究^[8-9]，当木材纹理方向与家具零部件主受力方向夹角增大时，材料抗弯强度呈下降趋势。本研究基于木材顺纹与横纹力学性能的显著差异，采用余弦函数关系构建强度损失率模型^[10-11]，其强度损失率 η 可简化表示为：

$$\eta = k \times [1 - \cos(2\theta)] \quad (1)$$

式中： k 为材料相关的经验系数。为确定红栎的经验系数，从试验板材中取样，制备木材纹理方向与家具零部件主受力方向夹角 θ 分别为 0° 、 30° 、 60° 、 90° 的试件，每种夹角各制备5个试件，按GB/T 1927.9—2021《无疵小试样木材物理力学性质试验方法 第9部分：抗弯强度测定》测试抗弯强度并计算强度损失率 η ，通过线性回归求得 $k=0.12$ ，拟合度 $R^2=0.93$ 。

该模型聚焦于纹理方向这一对木材力学性能影响显著的因素，基于木材顺纹与横纹力学性能差异的余弦函数关系构建。公式(1)中的 $\cos(2\theta)$ 能够准确捕捉当纹理方向与主受力方向平

行($\theta = 0^\circ$)或垂直($\theta = 90^\circ$)时，强度分别达到最大值和最小值的规律，相较于简单的线性或阈值模型，具有更强的物理意义和数学严谨性。当 $\theta \leq 15^\circ$ 时，强度损失率 $\eta \leq 5\%$ (图4)，符合家具零部件力学性能要求和合作企业的实木家具构件设计规范。因此，本研究定义 $\theta \leq 15^\circ$ 时为纹理匹配成功。

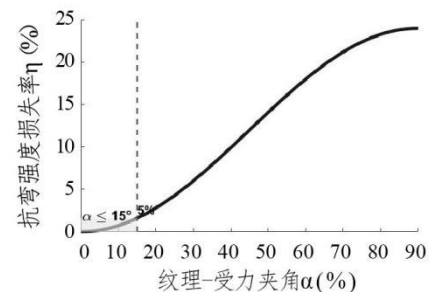


图4 木材纹理-力学性能映射模型的强度损失率曲线

Fig.4 Strength loss rate curve of mapping model of wood grain-mechanical properties

1.3 改进遗传算法设计

改进遗传算法的目标是在给定零部件集合(包括款式、数量、尺寸及异形复杂程度)和生产任务的前提下，寻求木材利用率 U (所有零部件总面积与所用板材总面积之比)与最大化纹理匹配度 T (木材纹理与家具零部件主受力方向夹角 θ 在允许范围内($\theta \leq 15^\circ$)的零部件数量占总零部件数量的比例)的协同优化。核心在于提出一种能够在这些既定、复杂的实际生产约束下，有效兼顾材料效率与零部件性能的下料方法。图5为改进遗传算法的流程。

1.3.1 适应度函数

构建改进遗传算法的适应度函数 F ，以协同优化上述两个目标。

$$F = \alpha \times U + \beta \times T \quad (2)$$

式中： α 和 β 为权重系数。在训练集上系统测试了权重 α 从0.5到0.8、步长为0.1的多个组合。

表1列出了其中4组具有代表性的结果及其对应的综合性能，通过帕累托前沿分析法^[12-13]分析这些解在目标空间中的分布，可以观察到当 $\alpha = 0.7$ 、 $\beta = 0.3$ 时，解在保持较高利用率(92.3%)的同时，获得了最高的纹理匹配度(0.95)，且 F 也最

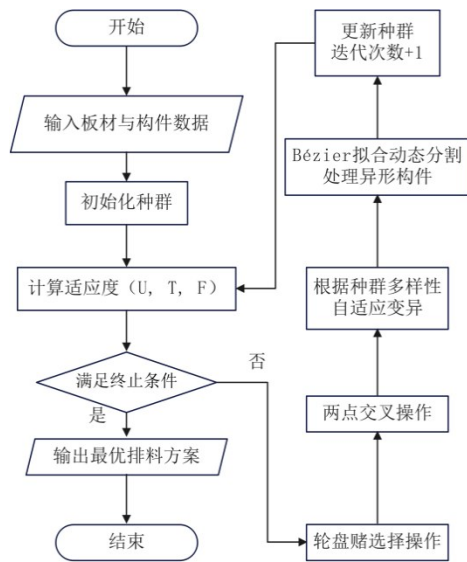


图5 改进遗传算法的流程

Fig.5 Flowchart of the improved genetic algorithm

大(0.929)，故将其确定为最优权重组合。该多目标优化策略能有效协调相互冲突的目标，是解决此类工程优化问题的有效方法^[14-15]。

表1 基于帕累托优化选择的适应度函数权重系数

Tab.1 Weight coefficient of fitness function based on Pareto optimization selection

权重组合(α, β)	木材利用率 U/%	纹理匹配度 T	综合适应度 F
(0.5, 0.5)	89.0	0.91	0.900
(0.6, 0.4)	90.2	0.89	0.896
(0.7, 0.3)	92.3	0.95	0.929
(0.8, 0.2)	92.5	0.82	0.896

1.3.2 染色体编码与初始化

染色体编码是指将待优化问题转化为可供计算机处理的二进制串或其他类型的编码形式。本研究采用实数编码与二进制编码混合的策略。染色体基因包括：每个零部件的放置坐标 (X, Y)、旋转角度 φ (0°~180°，步长 1°)，以及一个二进制标志位表示该位置是否满足纹理匹配约束。初始种群规模设为 100，采用随机生成与启发式规则（如按零部件面积降序排列）相结合的方法生成，以保证初始解的质量和多样性。

1.3.3 动态分割策略

为解决异形零部件的精确排料问题，提出基于 Bézier 曲线拟合的动态分割策略^[16]。根据异形零部件轮廓的几何特征，自适应地确定 Bézier 曲线的控制点数量与分段拟合策略，以确保在满足加工

精度的前提下，优化数据量和计算效率。

1) 轮廓拟合：对异形零部件轮廓进行三次 Bézier 曲线拟合，拟合公式为：

$$B(t) = (1-t)^3 P_0 + 3(1-t)^2 t P_1 + 3(1-t)t^2 P_2 + t^3 P_3, t \in [0, 1] \quad (3)$$

式中：P₀至P₃为控制点。通过最小二乘法求解控制点坐标，确保拟合误差≤0.5 mm。t为归一化的参数，用于定义 Bézier 曲线上点的位置。

2) 路径生成：沿拟合曲线以 5 mm 为间距进行等距采样，生成连续的数控加工路径，实现异形轮廓的精准、高效切割（图6）。

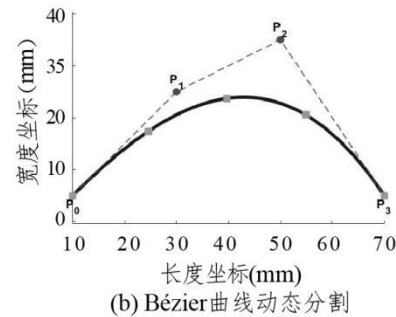


图6 Bézier曲线动态分割示意

Fig.6 Schematic diagram of dynamic segmentation of Bézier curve

1.3.4 自适应变异算子

为克服标准遗传算法易早熟收敛的缺陷^[17]，设计一种基于种群多样性（用于量化当前候选解集合的差异程度）的自适应变异算子。变异概率 P_m 动态调整：

$$P_m = P_{min} + (P_{max} - P_{min}) \times \exp(-\gamma \times D) \quad (4)$$

式中：P_{min}和P_{max}为变异概率的上下界（设为0.1和0.3）；γ为衰减系数；D为当前种群的归一化汉明距离多样性度量。其计算方式为：首先将种群中每个个体的染色体编码，实数部分离散化后与二进制部分拼接，编码后视为一个二进制串，然后计算所有个体两两之间对应基因位不同的比例，最后取这些比例的平均值并进行归一化处理，使 D ∈ [0, 1]。当种群多样性高时（D值大），采用较低变异率以保护优良个体；当种群多样性低（D值小）陷入局部最优时，提高变异率以增强全局探索能力。与传统的固定变异率或简单代际自适应策略相比，改进遗传算法将变异概率与实时的种

群多样性度量 D 直接关联，能够更敏锐地感知搜索状态的变化并作出响应，从而在进化早期鼓励

探索，在后期促进收敛，有效平衡改进遗传算法的全局搜索能力和局部开发精度（图7）。

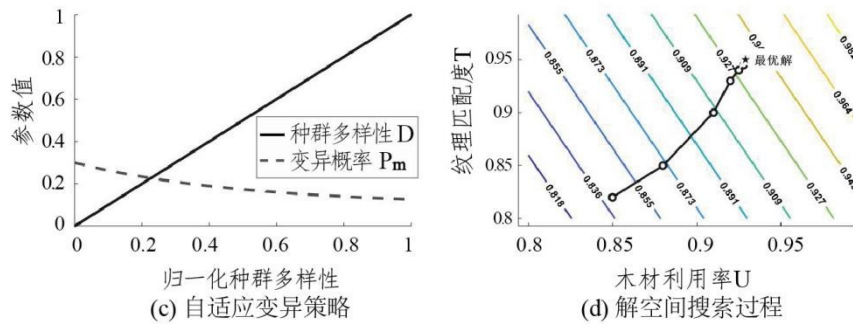


图7 自适应变异策略(变异概率与多样性关系)与解空间搜索过程示意

Fig.7 Adaptive mutation strategy (relationship between mutation probability and diversity) and solution space search process schematic

1.4 数据验证

1) 试验数据与验证流程：为保障改进遗传算法方案的泛化性与评估的严谨性，采用稳健的训练-验证流程。首先，基于全部板材数据确定纹理-力学性能映射模型的经验系数 ($k = 0.12$)；随后，随机选取70%的零部件 (224个) 作为训练集，用于通过帕累托前沿分析确定适应度函数的最优权重 ($\alpha = 0.7, \beta = 0.3$) 及其他算法参数；最终的排料性能评估在剩余的30%零部件 (验证集, 96个零部件) 上进行，确保性能指标能够客观反映方法在验证数据上的表现。

2) 实验平台与对照组：硬件平台为Intel Core i7-12700H CPU, 32 GB RAM, NVIDIA RTX 3060 GPU；软件环境为Python 3.9, 集成DEAP遗传算法库。为全面对比评估算法的性能，设置3个对照

组：C1 (人工组)：由3名具有10年以上经验的工人进行手动排料；C2 (商业软件组)：采用AutoNEST 2022商业软件，参数设置为默认排料间隙2 mm，并启用“材料节省”模式；C3 (基准算法组)：采用标准遗传算法，其适应度函数仅优化木材利用率，不包含纹理约束。

3) 评价指标：木材利用率、纹理匹配合格率 (Q)、算法计算时间、零部件平均抗弯强度 (依据GB/T 1927.9—2021从优化排料后零部件对应区域截取标准无疵小试样进行抗弯测试)。

2 结果与讨论

2.1 综合性能对比

基于验证集采用4种不同下料方法运行算法，各算法的评价指标列于表2。

表2 4种不同下料方法的评价指标

Tab.2 Evaluation indicators of 4 different cutting methods

组别	木材利用率 $U/\%$	纹理匹配合格率 $Q/\%$	计算时间/min	零部件抗弯强度/MPa
C1	73.1 ± 3.5	60.5 ± 7.2	120 ± 15	83.5 ± 4.1
C2	85.4 ± 2.1	—	5.5 ± 0.3	—
C3	88.7 ± 1.8	62.3 ± 5.6	6.8 ± 0.4	84.1 ± 3.8
改进遗传算法	92.3 ± 1.2	95.2 ± 2.1	8.2 ± 0.5	98.7 ± 3.2

表2显示，改进遗传算法的木材利用率显著高于所有对照组 (经 t 检验，与各组比较均 $P < 0.01$)，显示了动态分割策略与多目标优化在提升材料效率方面的优势。改进遗传算法的纹理匹配合格率高达95.2%，这直接体现为其零部件平均抗弯强度

(98.7 MPa) 显著优于C1和C3组 (提升约17.8%， $P < 0.01$)，由于C2组优化目标仅为材料利用率，不具备纹理方向识别与匹配功能，故未进行后续的零部件实物加工与物理力学性能测试环节。改进遗传算法的计算时间 (8.2 min) 长于C2和C3，但

其在 10 min 的生产节拍要求内（合作企业实际产线数据），实现了材料利用率的提升与抗弯强度的改善。

改进遗传算法框架的协同效应良好。首先，木材纹理-力学映射模型为改进遗传算法提供了明确的优化方向，使其排料方案在追求高利用率的同时，自然导向高力学性能的解空间区域；其次，动态分割策略确保异形零部件轮廓信息的完整性，避免因几何形状近似造成的材料浪费或强度削弱；最后，自适应变异机制保障了改进遗传算法能够高效地在这一复杂的多目标、多约束解空间中进行搜索，从而稳定地逼近帕累托最优前沿。

上述性能指标的协同优化，标志着下料过程从“形状驱动”到“性能驱动”的范式转变。传统方法（C1, C2, C3组）本质上是几何形状的被动排布，而本研究通过将量化的木材纹理-力学映射模型嵌入优化目标，使算法在空间布局的同时，主动筛选材料属性，引导解空间向高力学性能区域收敛，实现从“如何排得下”到“如何排得好”的方式转变。

2.2 算法收敛性分析

改进遗传算法与 C3 组遗传算法的收敛曲线，如图 8 所示。

图 8 显示，改进遗传算法在约 80 代后适应度函数趋于稳定，这表明算法具有良好的收敛性和鲁棒性，能够为生产提供稳定可靠的下料方案；另外，改进遗传算法的最终收敛值高于 C3 组，表明改进遗传算法所获得的排料方案在材料利用率与纹理匹配度等性能上更优。这些结果共同验证了自适应变异等改进策略在避免算法早熟收敛、

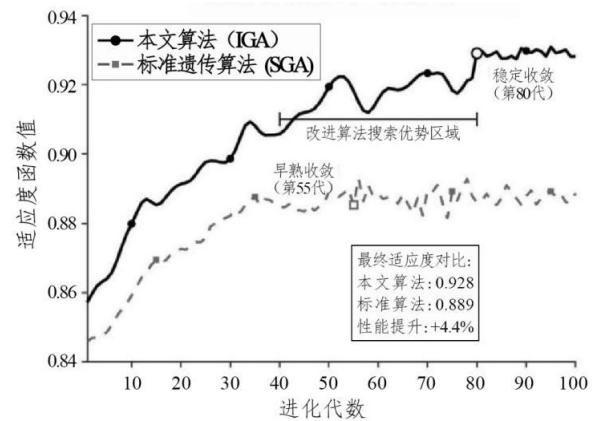


图 8 改进遗传算法与标准遗传算法(C3组)的收敛曲线
Fig.8 Convergence curves of improved genetic algorithm and standard genetic algorithm(C3 group)

引导搜索方向、提升解的质量方面的有效性。

2.3 算法消融实验分析

考虑到算法参数对结果有显著影响，为量化本研究各改进模块的贡献，设计系统的消融实验。构建以下 4 个消融对照组：

A1 (无动态分割)：用传统多边形逼近法替代 Bézier 曲线进行异形零部件轮廓拟合。

A2 (无自适应变异)：采用标准遗传算法的固定变异概率 ($P_m = 0.2$)。

A3 (无木材纹理-力学映射模型)：适应度函数中仅考虑纹理方向的几何匹配（即木材纹理匹配度 T 恒为 1），不引入力学性能量化指标。

A4 (仅优化利用率)：适应度函数仅包含木材利用率 U （即 $\alpha = 1, \beta = 0$ ），此为 C3 组的强化版，用于隔离木材纹理匹配的纯粹影响。

各组别在验证集上的消融实验性能对比结果，列于表 3。

表 3 改进遗传算法中各模块对下料方法的影响

Tab.3 The impact of various modules of improved genetic algorithm on the cutting method

组别	木材利用率 $U/\%$	纹理匹配合格率 $Q/\%$	抗弯强度/MPa	收敛代数
A1 (无动态分割)	85.1 ± 2.0	90.5 ± 3.0	92.1 ± 4.5	75
A2 (无自适应变异)	90.5 ± 1.5	92.8 ± 2.5	95.3 ± 3.8	110
A3 (无纹理-力学映射模型)	91.9 ± 1.3	94.8 ± 2.2	85.0 ± 4.0	82
A4 (仅优化利用率)	88.7 ± 1.8	62.3 ± 5.6	84.1 ± 3.8	70
完整模型	92.3 ± 1.2	95.2 ± 2.1	98.7 ± 3.2	80

表 3 显示，与完整模型相比，A1 组的材料利用率下降 7.8%，且异形零部件抗弯强度降低 6.7%。这表明 Bézier 曲线拟合对于实现异形零部件的高精

度、高效率排料至关重要。A2 组收敛代数增加了 37.5%，表明自适应变异机制是提升算法搜索效率、避免早熟收敛的关键。A3 组缺失木材纹理-力

学性能映射的量化关系，无法主动逼近“夹角最小化”这一性能最优解。A4组的“形状驱动”优化，忽视纹理匹配，仅追求利用率，导致纹理匹配合格率和抗弯强度均下降，这进一步证明，木材纹理-力学性能映射模型是实现“性能驱动”优化、提升零部件力学性能的核心。

本研究提出的“木材纹理-力学性能映射模型”“动态 Bézier 分割策略”与“自适应变异机制”三个核心改进模块，分别针对最终产品性能、异形

零部件处理能力和算法搜索效率，三者协同作用，共同实现材料利用率与零部件力学性能的协同优化。

2.4 异形零部件排料效果

为系统评估改进遗传算法在处理复杂几何形状零部件时的性能优势，选取企业实际生产中的4种典型异形零部件进行多指标对比分析。图9展示了改进遗传算法与人工排料在材料利用率、纹理匹配角度和抗弯强度三个关键指标上的差异。

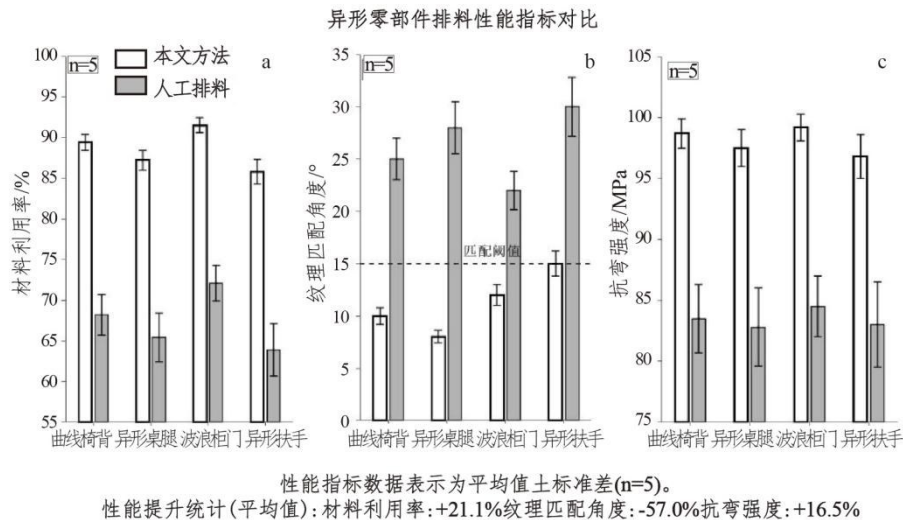


图9 异形零部件排料性能对比:改进遗传算法 vs. 人工排料

Fig.9 Performance comparison of specially shaped components nesting: improved genetic algorithm vs. manual method

从材料利用率来看(图9a),改进遗传算法在四种异形零部件上均优于人工排料,平均提升幅度达21.1% ($P < 0.01$),这表明动态分割策略在排料异形零部件时能有效减少空白区域,大幅提升材料利用效率。在纹理匹配精度方面(图9b),改进遗传算法将各零部件的纹理匹配角度控制在阈值 15° 以内,而人工排料的纹理角度普遍超过 20° ,平均降幅达57.0% ($P < 0.01$)。在抗弯强度方面(图9c),经改进遗传算法排料的四种异形零部件,其平均抗弯强度达到98.1 MPa,相比人工排料(83.5 MPa)提升16.5%。这一结果验证了木材纹理-力学性能映射模型的实际效果,表明通过优化纹理方向匹配可有效提升零部件的承载能力。

3 结论

1) 本研究通过构建量化的纹理-力学映射模型,引导算法在解空间中优先筛选高力学性能的

排布方案,结合基于 Bézier 曲线的动态分割策略,有效提升异形零部件的轮廓拟合精度与材料利用率,并进一步引入自适应变异机制,增强算法在复杂多目标优化问题中的搜索效率与收敛稳定性。

2) 改进遗传算法在木材利用率(92.3%)、纹理匹配精度(95.2%)和零部件抗弯强度(提升17.6%)等关键指标上均优于传统下料方法与基准算法。消融实验进一步验证了各改进模块的必要性与协同作用:纹理-力学映射模型是性能提升的核心,动态分割策略保障了异形零部件的处理能力,自适应变异机制则确保了算法的搜索效率。

本研究从“形状驱动”向“性能驱动”的范式转变出发,构建了一套兼具理论严谨性与工程实用性的下料优化方法,为实木家具智能制造提供了可嵌入生产系统的算法支持。未来工作将着眼于提升模型的泛化性与自适应性,探索算法对不同树种及含缺陷板材的适应性,并研究其与企

业数字化系统(如MES、ERP)的集成路径, 以应对大规模定制化生产中保证产品性能、质量与效率的挑战。

参考文献:

- [1] 王孟欣, 彭蓉, 张承宇, 等. 基于文献分析的中国林业产业发展研究现状[J]. 陕西林业科技, 2024, 52(1): 115-123.
WANG M X, PENG R, ZHANG C Y, et al. Bibliometric analysis of forestry industry development in China[J]. Shaanxi Forest Science and Technology, 2024, 52(1): 115-123.
- [2] 国家林业和草原局. “十四五”林业草原保护发展规划纲要[EB/OL]. (2021-12-14)[2025-10-23]. <http://www.forestry.gov.cn/>
- [3] 熊先青, 杨路洁, 马清如, 等. 实木家具异形零部件生产线平衡优化研究[J]. 木材科学与技术, 2023, 37(6): 20-27.
XIONG X Q, YANG L J, MA Q R, et al. Balance optimization of special part production line in solid wood furniture manufacture[J]. Chinese Journal of Wood Science and Technology, 2023, 37(6): 20-27.
- [4] 尚秀华, 张沛健, 罗建中, 等. 赤桉幼龄材物理力学性质研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2019, 47(5): 32-41.
SHANG X H, ZHANG P J, LUO J Z, et al. Physical and mechanical properties of *Eucalyptus camaldulensis* juvenile wood[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2019, 47(5): 32-41.
- [5] 宋楚翘, 付伟莲, 刘新有, 等. 木材榫卯节点界面力学研究综述[J]. 世界林业研究, 2024, 37(6): 66-71.
SONG C Q, FU W L, LIU X Y, et al. A review of interfacial mechanics of timber mortise-and-tenon joints[J]. World Forestry Research, 2024, 37(6): 66-71.
- [6] 王纬. 榫卯及家具结构基于Creo的三维参数化建模与有限元分析[D]. 福州: 福建农林大学, 2022.
- [7] 匡荻, 朱亚平, 吴青松, 等. 一种基于多链编码遗传算法的纸板下料优化方法[J]. 科技与创新, 2025(19): 84-87.
KUANG D, ZHU Y P, WU Q S, et al. An optimization method of paperboard cutting based on multi-chain coding genetic algorithm[J]. Science and Technology & Innovation, 2025(19): 84-87.
- [8] 邵卓平, 任海青, 江泽慧. 木材横纹理断裂及强度准则[J]. 林业科学, 2003, 39(1): 119-125.
SHAO Z P, REN H Q, JIANG Z H. Fracture perpendicular to grain of wood and strength criterion[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2003, 39(1): 119-125.
- [9] 范梓萱. 增强木材方形蜂窝结构力学性能和能量吸收研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2023.
- [10] 许威, 田野. 基于纤维解离纹理方向对木材压缩与弯曲力学特性的影响分析[J]. 包装工程, 2025, 46(7): 8-16.
XU W, TIAN Y. Analysis of effect of fiber dissociation texture direction on compressive and bending mechanical properties of wood[J]. Packaging Engineering, 2025, 46(7): 8-16.
- [11] 邵卓平, 江泽慧, 任海青. 线弹性断裂力学原理在木材中应用的特殊性 with 木材顺纹理断裂[J]. 林业科学, 2002, 38(6): 110-115.
SHAO Z P, JIANG Z H, REN H Q. The particularity of application of principles of linear-elastic fracture mechanics to wood and fracture parallel to grain[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2002, 38(6): 110-115.
- [12] 董祥千, 肖铮. 基于Puma算法引导帕累托前沿的高效多目标提示优化方法[J]. 计算机应用研究, 2025, 42(10): 3041-3052.
DONG X Q, XIAO Z. Puma-guided Pareto optimization for efficient multi-objective prompt generation[J]. Application Research of Computers, 2025, 42(10): 3041-3052.
- [13] Huang P Y, Wang G C, Wang S J. Pareto game of stochastic differential system with terminal state constraint[J]. Journal of Optimization Theory and Applications, 2025, 205(1): 8.
- [14] 徐浩然, 贺福强, 薛亚军, 等. 基于遗传算法的多功能木质板材配比[J]. 中国粉体技术, 2021, 27(2): 30-36.
XU H R, HE F Q, XUE Y J, et al. Multifunctional wood plate proportion based on genetic algorithm[J]. China Powder Science and Technology, 2021, 27(2): 30-36.
- [15] 李二超, 刘辰淼. Pareto解集旋转的分类多策略预测动态多目标优化[J]. 计算机工程与应用, 2024, 60(22): 87-104.
LI E C, LIU C M. Classification multi-strategy predictive dynamic multi-objective optimization with Pareto set rotation[J]. Computer Engineering and Applications, 2024, 60(22): 87-104.
- [16] BiBi S, Misro M Y, Abbas M, et al. Engineering oriented shape optimization of GHT-Bézier developable surfaces using a meta heuristic approach with CAD/CAM applications[J]. Scientific Reports, 2025, 15: 28617.
- [17] 朱正坤, 许艳青, 陈年. 基于木材微观特征的BP神经网络算法红木识别研究[J]. 林产工业, 2024, 61(1): 26-30, 60.
ZHU Z K, XU Y Q, CHEN N. Research on recognition of rosewood based on BP neural network algorithm based on microscopic characteristics of wood[J]. China Forest Products Industry, 2024, 61(1): 26-30, 60.