

DOI: 10.12326/j.2096-9694.2020159

基于贪心算法及局部枚举策略的人造板排样方案研究

刘 诚, 孙远升, 花 军, 贾 娜

(东北林业大学机电工程学院, 黑龙江哈尔滨 150040)



摘要: 人造板排样问题主要为“一刀切”约束下的矩形排样问题, 本文通过局部枚举求解的方法, 分析原料利用率、运算时间与工件排样顺序之间的关系, 并提出贪心排样方案。检测结果表明, 工件排样顺序对原料利用率影响较小, 原料利用率变化在0.05%以内, 但运算时间随着枚举空间扩大而呈现指数级上升; 与文献中二叉树排样算法对比, 本文算法可提高1.3%的原料板利用率, 降低30.8%的余料数量。

关键词: 人造板排样; 贪心算法; 枚举排样; “一刀切”检测

中图分类号: TS653; S784

文献标识码: A

文章编号: 2096-9694 (2021) 06-0055-07

Research on Wood-based Panel Cutting Program Based on a Greedy Algorithm with an Enumeration Strategy

LIU Cheng, SUN Yuan-sheng, HUA Jun, JIA Na

(College of Mechanical Electrical and Engineering, Northeast Forestry University, Harbin 150040, Heilongjiang, China)

Abstract: The cutting of wood-based panels is rectangular cutting under the restrained guillotine. It is solved by a local enumeration through a greedy strategy. The relationship among the utilization rate of the raw material board, the computing time, and the cutting sequence of the work pieces is analyzed. A greedy cutting algorithm is proposed. The experimental results show that the cutting sequence of the workpieces has little effect on the utilization rate of the raw board, and the utilization rate of the raw board changes within 0.05%, but the calculation time increases exponentially with the expansion of the enumeration space. Comparing with the literature, the algorithm can improve the raw material board utilization rate by 1.3%; the remaining material quantity is reduced by 30.8%.

Key words: wood-based panel cutting; greedy algorithm; cutting of enumeration; detection of guillotine

原料成本是板式家具企业生产成本的重要部分, 但一方面板式家具企业普遍存在人造板原料

利用率偏低的问题^[1], 另一方面随着市场对人造板制品需求的扩大, 木材供给面临严峻挑战^[2]。通过计算机对人造板进行排样提高原料利用率, 既能大幅度降低企业生产成本、扩大经济效益, 又能缓解木材供需不足的矛盾, 对人造板行业可持续发展具有重要意义。

人造板排样主要为二维矩形的排样问题, 其约束条件为工件可在平面内90°旋转, 且排样方案

收稿日期: 2020-10-30; 修改日期: 2021-05-08

基金项目: 教育部高等学校博士学科点专项科研基金 (博导类) 课题“基于CFD纤维分离运动特征与能量转换机理研究” (20130062110005)。

作者简介: 刘诚 (1975—), 男, 副教授。Email: lch@nefu.edu.cn

通讯作者: 花军, 男, 教授。Email: huajun81@163.com

满足板材锯切的“一刀切”要求（即每次锯切均将板料完全切割为两个独立矩形），以实现原料利用率的最优解。影响原料利用率最优解的变量较多，包括所有工件的尺寸、位置、摆放状态及排样顺序等，属于非确定性多项式（Non-deterministic Polynomial, NP）问题，研究者大都采取启发式算法对其进行近似求解。目前常见算法包括二叉树算法^[3-8]、分块填充算法^[9-10]、二阶段算法^[11-14]、最低水平线算法^[15-16]等。前三种排样采取“先分块，后排样”策略减小了解搜索范围，但可能出现解丢失问题；而最低水平线法目前用于求解非“一刀切”的矩形排样问题时，主要通过贪心算法进行排样择优（每次均搜索尺寸合适的工件，贪心搜索当前排样图形的最低水平线，进行摆放排样），空位搜索能力较好。智能搜索算法^[17-19]常与以上算法混合使用，排样计算时以启发式算法作为评价函数，在全局范围内对工件排样顺序进行寻优，导致运算时间相对较长。

本文采用最低水平线法中的贪心算法，提出“先排样，后检测”策略，使其满足“一刀切”要求（即先利用贪心算法求解最优排样方案，再对其进行“一刀切”检测），进而提供解搜索空间；通过局部枚举策略，改变枚举范围，分析工件板排样顺序的变化范围与原料利用率之间的关系，为人造板排样提供一种新的解决方案。

1 人造板排样模型建立及算法

1.1 人造板排样模型

设人造板原料长、宽尺寸为 L 、 B ，锯路宽度为 DL 。

对 N 块矩形工件排样顺序进行枚举，共有 $Nm = N!$ 种情况，组成集合 $Q = \{q_1, q_2, \dots, q_{Nm}\}$ ，以有序集 $q_i = \langle p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{iN} \rangle$ 表示第 i 种工件排样顺序，其中 p_{ij} 表示该排样顺序下第 j 块工件。设工件 p_{ij} 的长、宽尺寸为 l_{ij} 、 b_{ij} ，则可以得到集合 $p_{ij} = \{ \langle l_{ij}, b_{ij} \rangle, \langle b_{ij}, l_{ij} \rangle \}$ ，其中两个元素分别代表横放的工件与竖放的工件。

以板料左下角为原点、左边为 X 轴、下边为 Y 轴建立直角坐标系。设板料在 X 方向尺寸为 Hx ， Y 方向尺寸为 Hy ，且原料所占坐标集合为 $O_0 = \{ (x,$

$y) | -0.5DL \leq x \leq Hx + 0.5DL, -0.5DL \leq y \leq Hy + 0.5DL \}$ 。

设 q_i 中第 j 块工件板在原料板上排样时的左下角坐标为 (x_{ij}, y_{ij}) ，且在 X 方向尺寸为 hx_{ij} ， Y 方向尺寸为 hy_{ij} ，且该工件所占坐标集合为 $O_j = \{ (x, y) | x_{ij} - 0.5DL \leq x \leq x_{ij} + hx_{ij} + 0.5DL, y_{ij} - 0.5DL \leq y \leq y_{ij} + hy_{ij} + 0.5DL \}$ 。

将原料所占坐标集合按锯切刀路进行分割，设在第 k 次迭代将 D_k 分割为 D_k 、 D_{k+1} 两个坐标集合，且 $D_1 = O_0$ 。对 $D_k = \{ (x, y) | x_1 \leq x \leq x_2, y_1 \leq y \leq y_2 \}$ 分割存在两种情况：1) X 向锯切，得 $D_k = \{ (x, y) | x_1 \leq x \leq x_k, y_1 \leq y \leq y_2 \}$ 、 $D_{k+1} = \{ (x, y) | x_k + DL \leq x \leq x_2, y_1 \leq y \leq y_2 \}$ ；2) Y 向锯切，得 $D_k = \{ (x, y) | x_1 \leq x \leq x_2, y_1 \leq y \leq y_k \}$ 、 $D_{k+1} = \{ (x, y) | x_1 \leq x \leq x_2, y_k + DL \leq y \leq y_2 \}$ 。

在排样时要满足如下约束：①每两块工件板互不重叠，且邻近边间隔不小于 DL ；②工件板排样范围不能超出原料大小；③排样工件板应满足“一刀切”要求。在满足上述约束下，构建数学模型如下：

$$\max \frac{\sum_{j=1}^n r_{ij} \times c_{ij}}{Hx \times \max(y_{ij} + hy_{ij})} \quad (1)$$

$$\text{s. t. } \langle Hx, Hy \rangle \in \{ \langle L, B \rangle, \langle B, L \rangle \} \quad (2)$$

$$\forall q_i \in Q \quad (3)$$

$$\forall \langle hx_{ij}, hy_{ij} \rangle \in p_{ij} \quad (4)$$

$$\forall (O_s \cap O_t) = \emptyset \text{ 且 } 1 \leq s < t \leq N \quad (5)$$

$$\forall O_s \subset O_0 \text{ 且 } 1 \leq s \leq N \quad (6)$$

$$\exists O_s \subseteq D_k, \forall O_t \not\subseteq D_k \text{ 且 } 1 \leq s, t \leq N, t \neq s \quad (7)$$

式1为目标函数，求解目标为原料板的利用率最大；式2为板料摆放方式，包括横放、竖放2种情况；式3为工件排样顺序，包括 $N!$ 种情况；式4为每块工件摆放方式，包括横放、竖放2种情况；式5对①进行约束，即任意两块工件坐标集合交集为空，且间隔不小于刀路；式6对②进行约束，即任意工件坐标集合包含于原料坐标集合；式7对③进行约束，通过迭代将原料坐标集合分割为多个局部坐标集合，使每个局部坐标集合包含且仅包含1个工件坐标集合，进行“一刀切”判断检测。

模型求解，需通过枚举法对所有可能的排样方案进行计算。由上述分析可知，共存在 $m = 2^{N+1}N!$ 种排样方案。随着 N 的增大， m 呈指数级增长，故当工件量较大时，计算量巨大。通常 N 超过

10后,由于计算时间过长,排样无法求解。因此,本文采取局部枚举策略,对其进行优化求解,分析工件排样顺序对原料利用率的影响,同时提出基于贪心算法的人造板排样算法求解。

1.2 局部枚举策略

首先将工件初始排序, 随后进行局部枚举排序, 生成新的工件排样顺序的集合 Q , 在 Q 中选取一种工件排序, 在原料板上排样并计算利用率, 直至全部枚举排序完成排样后, 选取最优排样方案。通过改变局部枚举规模大小, 可以扩大或减小集合 Q 内的元素数量, 进而改变求解计算量, 比较不同局部枚举规模下的最优排样的利用率变化。

初始排序：为使枚举空间具有代表性，以工件的面积与方形系数为原则进行排序。所有工件先按照面积由大到小排序，同面积的工件按方形系数（矩形板材的窄边对长边的比值）由大到小排序。全部工件依照初始排序后得到工件初始序列 $q = \langle p_1, p_2, \dots, p_N \rangle$ 。这种排序的好处是大工件优先排样时产生的空位可以由后续小工件进行填补。

分组：将全部工件均分为 e 组，由首块工件开始，依次取出相同数量的工件作为一组，各组内工件数记为枚举级数 n （当 $e>1$ 时，最后一组中工件数可少于 n ），组成有序集 $B = \langle b_0, b_1, \dots, b_{e-1} \rangle$ ，其中 $b_i = \langle p_{i \times n + 1}, p_{i \times n + 2}, \dots, p_{i \times n + n} \rangle$ 表示第 i 组工件板。

局部枚举排样：全部工件分组后，不改变各组间排序，在组内对工件的排序进行枚举。计算可得枚举排样的数目为： $m = (N/e) n!$ ，其中 m 值随 n 值增大呈指数增长，且当 $n=N$ 时，排样方式变为完全枚举。

采用分组局部枚举排样能够在全局顺序上保持工件板初始排序的特点（即大板在先，小板在后），有利于对空位的填充。

局部枚举策略中，局部枚举排样的作用为：通过对工件初始排序进行局部枚举，可以在较小的局部枚举规模比较求解中，得到质量较高的排样解，同时降低解搜索空间。

1.3 基于贪心算法人造板排样模型

贪心算法在求解问题时，总是选择当前状况下的最优搜索，而不必考虑各种可能的整体排样情况；自顶向下以迭代方式相继做出贪心选择，每做一次贪心选择，就将所求问题简化为一个规模更小的子问题，节省寻找最优解的时间，可以得到某种意义上的局部最优解。本文贪心算法以局部枚举分组的工件排样情况为基础，以原料利用率作为最优解评价标准，最终得到问题的最优排样解^[20]。

1.3.1 贪心算法排样模型

建立矩阵 W 模拟人造板原料进行排样运算, W 中单个元素表示一个原料板最小单元, 以矩阵的行(列)数表示原料板长宽, 如图 1a 所示; 通过 W 的局部矩阵 U 记录工件排样情况, 以局部矩阵的行(列)数表示工件长宽, 如图 1b 所示; 通过更改局部矩阵中元素, 记录工件位置, 如图 1c 所示。

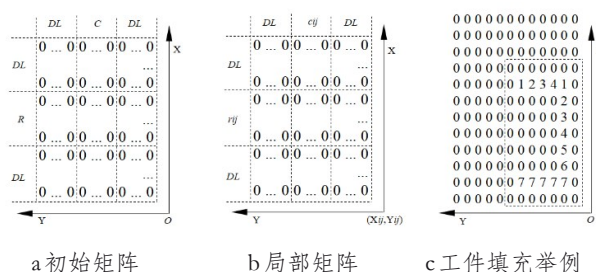


图1 矩阵排样填充示意图

Fig.1 Diagram of matrix filling

按各组工件排序进行依次排样，每个工件排样时以“右下角占优”和“利用率最大”为位置的选择原则；每块工件排样完成后，进行1次“一刀切”检测，满足要求则进行下一块工件板排样，“一刀切”检测可以通过迭代运算进行。过程如下：

- 1) 构建零矩阵 W ，以其右下角为原点，向左为 Y 正向，向上为 X 正向，行或列作为单位，建立坐标系；
- 2) 工件从右下角开始排样，每次均选择使当前利用率最大的位置，即从 W 的原点开始，从 X 正向寻找零矩阵 U ，若没有寻找到零矩阵 U 时，则将寻找位置向 Y 正向移动一列，从下向上重新寻找；
- 3) 当寻找到当前利用率最大解时，将工件板

信息记录到 U 内, 对 W 进行 1 次“一刀切”检测, 若不满足, 则重新寻找;

4) 将工件旋转 90° , 重新寻找排样位置, 之后与旋转前作比较, 选择原料板利用率大的排样位置, 进行下一个工件的排样;

5) 重复 2~4, 直至所有工件板排样完毕。

如图 2 所示为 10 块工件的简单排样。

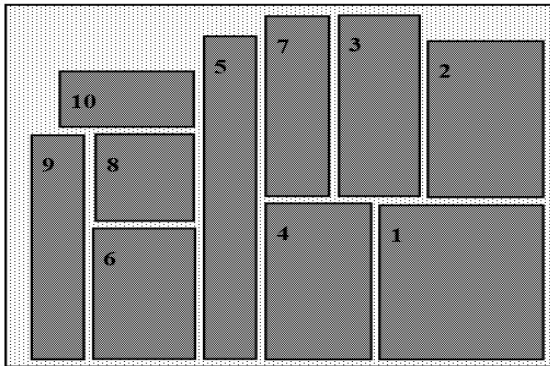


图 2 贪心搜索排样示意图

Fig.2 Diagram of greedy search cutting

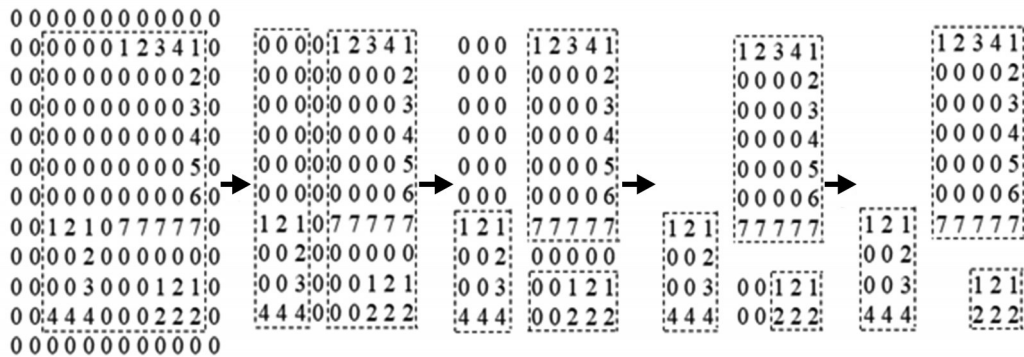


图 3 检测矩阵分割示例

Fig.3 Example of detection matrix segmentation

在求解人造板排样问题时, 为满足“一刀切”要求, 多数算法采取“先分块, 后检测”的排样方式, 使得解搜索空间范围减小, 最优解质量降低。本文算法则在贪心排样后进行刀路检测, 在排样计算中不必考虑“一刀切”约束, 简化了求解复杂度。

1.4 排样

设每个组工件的最优排序组成有序集 $G = \langle g_0, g_0, \dots, g_{e-1} \rangle$, 根据局部枚举得到的 e 组工件排序进行排样计算, 步骤如下:

1) 从分组有序集 B 中 b_0 开始, 依次在每组内对工件进行枚举排样, 并以贪心-检测排样法比较

贪心算法排样模型的特点: 1) 通过“右下角占优”和“利用率最大”作为搜索原则, 使每次搜索到的工件位置都是当前的最优位置; 2) 通过对矩阵内的元素进行逐列检测, 利于对排样空位进行搜索, 进而提高原料板利用率; 3) 仅需要对每块工件进行单次位置搜索, 搜索效率较高。

1.3.2 “一刀切”约束检测策略

在 W 中, 用 DL 行或列零元素表示刀路, 以 W 中不含贯穿刀路, 且内部含有非零元素局部矩阵为最小检测矩阵, 判断排样是否满足“一刀切”, 可递归检测, 步骤如下:

1) 对检测矩阵 (首次为 W) 进行逐行、列检测, 检测到矩阵内含有 DL 行或列零元素时, 便按照刀路对其进行分割, 将分割生成的 2 个矩阵分别再次检测; 直至分割生成矩阵全为最小矩阵;

2) 分割生成最小矩阵, 其数目应不超出排样工件总数, 且仅当二者相等时, 排样满足“一刀切”。分割过程如图 3 所示。

最优解, 计算其原料板利用率, 求得最优工件板排序 g_0 ;

2) 将当前组 g_i 向后传递, 加至 b_{i+1} 组工件的排序前, 一同参与排样;

重复步骤 1~2, 直至全部工件板排样完成。

2 基于贪心算法的人造板排样算法测试

2.1 测试硬件环境

采用 C++ 进行编程, 运算机器为 CORE i7 2.40 GHz CPU、8GB 内存的 PC 机。

2.2 局部枚举策略排样算例测试

局部枚举排样测试用于分析工件排样顺序与

原料利用率之间关系。算例采用文献^[18]中的7类经典测试算例（C1~C7），每一类中又分为3组，共21组测试算例，其中的矩形工件个数从16~197不等，在定宽无限高的矩形原料中排样，具体数据参阅文献^[18]。对21组工件板进行排样计算，记录取不同 n 值（ $n=1\sim6$ ）时原料板平均利用率及平均计算时间，分别绘制原料板利用率变化曲线图、计算时间变化曲线图，如图4所示。

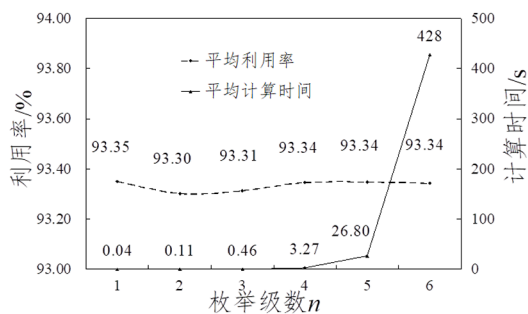


图4 平均利用率(时间)-枚举级数变化曲线
Fig.4 Curve of average utilization rates(time) and enumeration series

由图4可以看出，各组原料板利用率随 n 值增大呈波动变化；平均利用率随 n 值增大，变化较小（在0.05%以内）。当 $n>4$ 时，运算时间随 n 值增大呈指数延长；当 $n<4$ 时，运算时间较短且近似不变；当 $n=1$ 时，平均运算时间约为0.04 s。因此可以对算法模型取特殊值 $n=1$ ，此时运算效率较高。

2.3 对比二叉树算法的排样比较

文献3和5^[3,5]均通过二叉树排样算法，对“一刀切”矩形排样进行研究。测试算例工件信息见文献^[5]，其中给定7种工件各18个，在高度为200个单位、宽度不限的原料上排样，且刀路宽度为2个单位，求取原料使用长度最小的排样方案。结合文献，比较三种算法对该算例的最优排样结果如图5所示。

其中局部最优搜索的二叉树算法^[5]采用“最小靠左、最长靠下”原则排样，如图5a所示；优化二叉树算法^[3]通过余料整合进行优化排样，如图5b所示；本文算法中取 $n=1$ 进行排样求解，如图5c所示。三种算法排样的原料尺寸、原料利用率、余料数量列于表1。

由表1可知，本文算法c产生的余料数量相比算法a减少了72.7%，相比算法b减少了30.8%，说

明相比局部最优搜索二叉树排样，算法c在降低空位碎化现象上有明显效果，且由图5可知出算法c排样较为紧凑。算法c得到的最优排样利用率相比算法a提高了4.5%，比算法b提高了1.3%，说明算法c可以得到较高的排样利用率；同时，算法c的求解时间为0.027 s，而算法b、c没有给出求解时间。

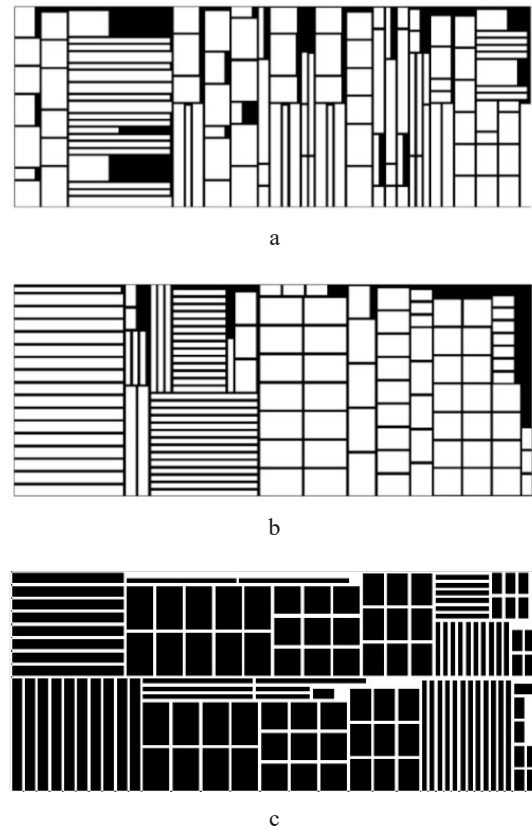


图5 三种算法的排样比较
Fig.5 Comparison of nesting of three algorithms

表1 三种算法的排样结果比较
Tab.1 Comparison of nesting results of three algorithms

序号	算法	原料尺寸 (单位为“1”)	利用率 / %	余料数量
a	局部最优搜索的二叉树算法	510×200	74.74	33
b	优化二叉树算法	489×200	77.94	13
c	贪心算法	481×200	79.24	9

2.4 自适应遗传算法的排样比较

文献^[16]通过遗传算法，对非“一刀切”矩形排样进行研究，求取原料利用率最大的排样方案。文献^[16]采用改进的自适应遗传算法（AAGA）对59块矩形工件（工件信息见文献^[16]中的表1）进行迭

代排样。由于 AAGA 算法在排样时没有引入刀路宽度参数，因此本文算法求解时不考虑刀路宽度损耗，即将刀路宽度设置为2个单位，全部工件尺寸缩小2个单位，原料板尺寸扩大2个单位，之后进行排样计算。基于贪心算法的排样数据如表2所示，得到的最优排样如图6所示。

表2 遗传算法的排样结果比较
Tab.2 Comparison of nesting results of genetic algorithm

算法	利用率/ %	求解时间/ s
贪心算法	96.70	0.16
AAGA 迭代 20 次	96.06	-
AAGA 迭代 100 次	96.69	-
AAGA 迭代 1000 次	97.54	-

由表2数据可知，本文贪心算法与AAGA算法迭代100次比较，排样求解所得利用率较为接近，最优利用率相差为0.01%。由于AAGA算法排样时没有考虑满足“一刀切”要求，使其在降低“空位碎化”现象上具有明显优势，可以获得更高的排样利用率，但求解排样的实际应用范围具有一定局限性。本文贪心算法排样在满足“一刀切”要求下，排样求解效果与AAGA算法迭代100次十分接近，且计算时间仅有0.16 s，文献^[16]中没有给出计算时间。综合以上分析，本文贪心算法可以获得与AAGA算法接近的排样效果，且排样满足“一刀切”要求。



图6 基于贪心算法的人造板排样测试算例的最优排样
Fig.6 Greedy-detection algorithm test case optimal nesting

3 结论

通过基于贪心算法及局部枚举策略的人造板排样试验，分析了局部枚举规模对原料板利用率、

计算时间的影响。
相比目前已有人造板排样算法，本文贪心算法具有如下优势：

- 1) 对人造板排样数学模型进行简化求解，降低计算复杂度，提高了原料利用率；
- 2) 局部枚举规模即工件排样顺序搜索范围，在一定情况下对排样利用率影响较小，进而表明本文贪心排样中板材初始顺序为“面积大到小”时，可以获得高质量排样解；
- 3) 相比二叉树算法，本算法在不考虑“一刀切”约束下进行最优排样求解，扩大了解搜索空间，进而提高求解质量，之后对其进行“一刀切”约束检测使其满足约束。

通过改变局部枚举规模（*n*值）扩大或缩小工件排样顺序的搜索范围，为人造板排样数学模型简化求解提供理论指导；采取“先排样，后检测”的排样策略，在人造板排样求解过程中扩大解的搜索范围，对人造板排样进行局部优化，减少了余料碎化，提高原料板利用率，可满足人造板排样生产需求。

参考文献：

[1] 吕斌, 贾东宇. 现代家居对人造板产品的新要求[J]. 木材工业, 2016, 30(2): 7-10.
LYU B, JIA D Y. New requirements for wood-based panel products in modern housing[J]. China Wood Industry, 2016, 30(2): 7-10.

[2] 叶克林. 当前我国人造板工业面临的新挑战[J]. 木材工业, 2016, 30(2): 4-6.
YE K L. New challenges faced by wood-based panel industry in China [J]. China Wood Industry, 2016, 30(2): 4-6.

[3] 戈鹏, 邱庆庆, 刘柱胜, 等. 一刀切问题的优化二叉树排样[J]. 计算机集成制造系统, 2011, 17(2): 329-337.
GE P, QIU Y Q, LIU Z S, et al. Optimized binary tree packing of guillotine problem[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2011, 17(2): 329-337.

[4] 曹大勇, 杨梅, 科托夫·弗拉基米尔·米哈伊拉维奇, 等. 二维一刀切装箱问题的两阶段启发式算法[J]. 计算机集成制造系统, 2012, 18(9): 1954-1963.
CAO D Y , YANG M, V. M.. Kotov, et al. Two-stage heuristic algorithm for two-dimensional guillotine Bin packing problem[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2012, 18(9): 1954-1963.

[5] Vassiliadis V S. Two-dimensional stock cutting and rectangle packing: binary tree model representation for local search optimization methods [J]. Journal of Food Engineering, 2005, 70(3): 257-268.

[6] Fleszar K. Three insertion heuristics and a justification improvement heuristic for two-dimensional Bin packing with guillotine cuts[J]. Computers & Operations Research, 2013, 40(1): 463-474.

[7] 李波, 王石, 施松新, 等. 基于启发式动态分解算法的矩形件优化排样[J]. 计算机应用, 2013, 33(7): 1908-1911.
LI B, WANG S, SHI S X, et al. Optimum packing of rectangles based

- on heuristic dynamic decomposition algorithm[J]. Journal of Computer Applications, 2013, 33(7): 1908-1911.
- [8] 潘卫平, 张瑞友. 矩形件简单块占角排样方式的动态规划[J]. 中国图象图形学报, 2019, 24(6): 934-945.
- PAN W P, ZHANG R Y. Dynamic programming algorithm for simple block corner-occupying pattern of rectangular blanks[J]. Journal of Image and Graphics, 2019, 24(6): 934-945.
- [9] Scheithauer G, Sommerweiß U. 4-Block heuristic for the rectangle packing problem[J]. European Journal of Operational Research, 1998, 108(3): 509-526.
- [10] 罗运贞, 潘立武. 约束剪切问题的三块排样方式及其生成算法[J]. 锻压技术, 2018, 43(10): 185-189.
- LUO Y Z, PAN L W. Three-block layout pattern and its generation algorithm of constrained cutting problem[J]. Forging & Stamping Technology, 2018, 43(10): 185-189.
- [11] 何双池, 陈学松. 二维矩形件排样的切割式填充算法[J]. 数学的实践与认识, 2019, 49(18): 132-139.
- HE S C, CHEN X S. Cut-filling algorithm of 2D rectangle packing[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2019, 49(18): 132-139.
- [12] Hifi M, Roucairol C. Approximate and exact algorithms for constrained (un) weighted two-dimensional two-staged cutting stock problems[J]. Journal of Combinatorial Optimization, 2001, 5(4): 465-494.
- [13] 曹炬, 周济, 余俊. 矩形件排样优化的背包算法[J]. 中国机械工程, 1994, 5(2): 11-12, 79.
- CAO J, ZHOU J, YU J. Knapsack algorithm for layout optimization of rectangular pieces on stock[J]. China Mechanical Engineering, 1994, 5(2): 11-12, 79.
- [14] 曾兆敏, 王祺, 潘立武. 冲压条带二维优化排样问题的一种启发式算法[J]. 锻压技术, 2018, 43(7): 204-208.
- ZENG Z M, WANG Q, PAN L W. A heuristic algorithm for two-dimensional optimal nesting problem of stamping strips[J]. Forging & Stamping Technology, 2018, 43(7): 204-208.
- [15] 彭碧涛, 周永务. 求解2D条带矩形 packing 问题的迭代启发式算法[J]. 软件学报, 2012, 23(10): 2600-2611.
- PENG B T, ZHOU Y W. Recursive heuristic algorithm for the 2D rectangular strip packing problem[J]. Journal of Software, 2012, 23(10): 2600-2611.
- [16] 许华杰, 檀洪森, 胡小明. 基于 AGA 和集中剩余矩形区域策略的排样方法研究[J]. 计算机应用研究, 2016, 33(11): 3235-3239.
- XU H J, TAN H S, HU X M. Research of packing method based on AGA and concentrated surplus rectangle area strategy[J]. Application Research of Computers, 2016, 33(11): 3235-3239.
- [17] 赵新芳, 崔耀东, 杨莹, 等. 矩形件带排样的一种遗传算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2008, 20(4): 540-544.
- ZHAO X F, CUI Y D, YANG Y, et al. A genetic algorithm for the rectangular strip packing problem[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2008, 20(4): 540-544.
- [18] Hopper E, Turton B C H. An empirical investigation of meta-heuristic and heuristic algorithms for a 2D packing problem[J]. European Journal of Operational Research, 2001, 128(1): 34-57.
- [19] Sotelo-Figueroa M A, Puga Soberanes H J, Carpio J M, et al. Improving the Bin packing heuristic through grammatical evolution based on swarm intelligence[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2014, DOI:10.1155/2014/545191.
- [20] 梁利东, 贾文友. 基于宽容分层策略的启发式排样算法[J]. 计算机应用, 2018, 38(4): 1195-1200.
- LIANG L D, JIA W Y. Heuristic packing algorithm based on forbearing stratified strategy[J]. Journal of Computer Applications, 2018, 38(4): 1195-1200.
- [21] 宋连超, 朱建良, 张彤. 矩形件排样优化贪婪算法及系统开发[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2007(1): 29-31, 35.
- SONG L C, ZHU J L, ZHANG T. Research and development on the greedy algorithm and system of the rectangular cutting stock problem [J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2007(1): 29-31, 35.

(本文编校 张 鹏、向 琴)



(上接第54页)

参考文献:

- [1] 金涛. 大未来: 论地热地板的实木化与实木地板的地热化[C]. 上海: 第七届地暖地板高峰论坛, 2018.
- [2] 邓有源. 上游地暖系统对地暖地板有哪些要求[C]. 上海: 第七届地暖地板高峰论坛, 2018.
- [3] 王宏棣, 赵秀, 刘一楠, 贾潇然. 地采暖用木质地板甲醛释放量检测方法探讨[J]. 木材工业, 2018, 32(3): 25-28.
- WANG H D, ZHAO X, LIU Y N, JIA X R. Test methods of formaldehyde emissions from wood-based flooring products used in ground heating system[J]. China Wood Industry, 2018, 32(3): 25-28.
- [4] ZHANG Y P, LUO X X, WANG X K, et al. Influence of temperature on formaldehyde emission parameter of dry building materials[J]. Atmospheric Environment, 2007, 41(15): 3203-3216.
- [5] 白雁斌, 刘兴荣. 模拟仓内温度对甲醛扩散的影响[J]. 中国公共卫生, 2003, 19(5): 577-578.
- [6] 卢金汉, 吕斌, 邹献武, 等. 地采暖用木质地板甲醛释放限量指标探讨[J]. 木材工业, 2019, 33(1): 34-37.
- LU J H, LYU B, ZOU X W, et al. Limit of formaldehyde emissions from wood-based floorings for ground with heating systems[J]. China Wood Industry, 2019, 33(1): 34-37.
- [7] 周定国, 韩书广. 温度对刨花板甲醛散发的影响[J]. 建筑人造板, 1997(4): 3-4.
- [8] 尹梦婷, 李伯涛, 吕斌, 等. 1 m³气候箱法测定人造板甲醛释放量的检出限及不确定度研究[J]. 木材工业, 2019, 33(5): 34-38.
- YIN M T, LI B T, LYU B, et al. Detection limits and uncertainty of formaldehyde emissions from wood-based panels with 1 m³ climate chamber[J]. China Wood Industry, 2019, 33(5): 34-38.
- [9] 赵秀, 王宏棣, 贾潇然, 时兰翠. 地采暖用木质地板甲醛释放承载量计算方法解析[J]. 木材工业, 2020, 34(6): 43-47.
- ZHAO X, WANG H D, JIA X R, SHI L C. Bearing capacity calculation method based on formaldehyde emission from wooden flooring used in ground heating systems[J]. China Wood Industry, 2020, 34(6): 43-47.
- [10] 谢宇. 回归分析[M]. 北京: 社会科学文献出版社, 2010: 95-112.

(本文编校 向 琴)