

车间切割下料与分架集成 优化方法*

严都喜,冷杰武,张 浩

(广东工业大学广东省计算机集成制造重点实验室,广州 510006)

[摘要] 针对传统制造企业存在的切割下料与分架集成问题,通过分析制造企业架子数量、生产工艺等生产现场约束,提出了一种先求解下料问题,再调用分架算法完成子材落架的启发式算法。采用启发式策略对下料方案的切割顺序优化和单块子材落架的顺序优化,解决了制造车间下料与分架集成问题。通过实例验证了方法的实用性和有效性,满足实际生产约束和生产需求,实现了企业的智能化生产。

关键词: 集成优化;板构产品;切割下料;分架;启发式算法

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2019.07.043



严都喜

硕士研究生,研究方向为计算机集成制造,智能优化。

随着“工业 4.0”和“中国制造 2025”战略的提出,智能优化技术得到广泛应用。众多制造企业通过智能制造技术解决企业实际生产问题,完成企业的转型升级。切割下料问

题存在于制造行业的各个领域,如玻璃生产加工、板式家具等板式产品。传统的下料问题只考虑单一的下料过程优化,追求原材料的高利用率,而忽视了下料优化对后续加工过程的影响,因此单一的切割下料优化求出来的解是局部最优解。研究下料问题的同时,需与其他优化过程集成研究,形成集成优化问题。

现有 n 种规格的子材 $\{a_1, a_2, \dots, a_j, \dots, a_m\}$ 和 m 种规格的原材 $\{b_1, b_2, \dots, b_j, \dots, b_m\}$,子材 a_i 根据规则排布到原材 b_i 上形成下料方案 k ,根据子材的排布进行切割,切割后的子材分类装载到架子上,运送至下一加工设备进行加工。如在板材的生产加工过程中,子材的装载以流程卡为单位,即一个流程卡只有一种类型的子材,一种子材可以划分成一个或多个流程卡。一个架子可以装载一个或多个流程卡,由于企业场地和搬运成本的限制,装载架子的数

量 G 受到严格的控制,只有当装载到该架子的子材全部切割完毕并装载完成,架子才能移走,重新加载一个空的架子来存放另一流程卡子材。下料方案必须严格满足箱子或者架子的数量限制要求。子材的落架受到诸多因素的约束,需要设置一定的落架规则,选取不同的落架方案会影响架子的流转以及整个车间的加工效率(图 1)。

另外,由于架子的数量有严格要求,下料方案的切割顺序也是影响架子数量的原因之一,需要合理安排下料方案的切割顺序;在连续切割的下料方案中,子材的种类数目不能超过架子的数量。因此,下料之前要根据需求合理安排下料计划和生产调度计划,下料问题和分箱分架问题是一个集成问题,两者相互约束。

迄今为止,众多学者对该下料与分架集成问题做了相应研究,Zhang 等^[1]开发了基于数字孪生的分析解耦框架,以提供工程分析功能,并支持系统设计和解决方案评估的

* 基金项目:国家自然科学基金(51675108,51705091)。

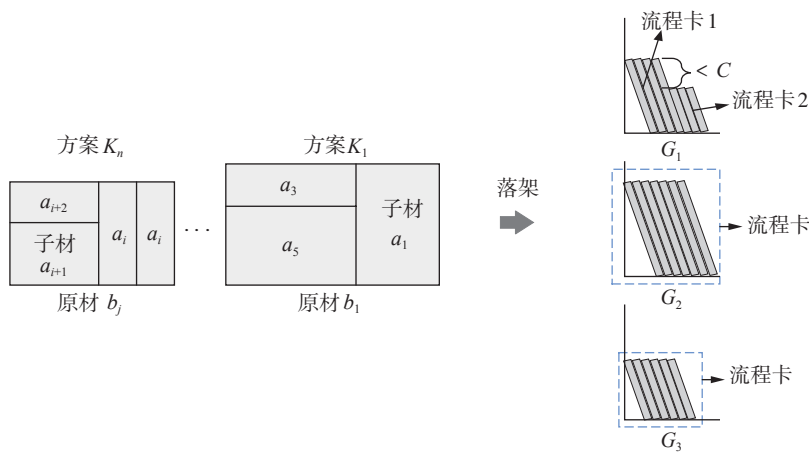


图1 落架示意图
Fig.1 Schematic diagram of distributing shelves

决策,为车间耦合问题提出新的解决理论和方法。Yanasse等^[2]考虑下料模式的排序,提出了一种分支定界方法,使用贪婪类型的策略来选择下一个分支的点,最大限度地减少生产运行期间需要的最大料箱数。Becceneri等^[3]在此基础上提出了一种最小成本节点的启发式方法和一种改进的分支定界精确求解算法,对切割模式进行最优排序,以实现最小化最大架子数。Foerster等^[4]针对订单分散最小化问题(OSMP),提出采用模拟退火算法(Simulated Annealing Method, SA-Method)来解决该问题,优化下料模式序列,实现订单分散最小化,也就是实现最小化最大架子数。Ragsdale等^[5]针对一维切割下料问题(CSP),提出了一种新型的CSP,结合遗传算法,求解最大架子数问题,同时结合一定的启发式方法,减少废料水平,提高利用率。Yuen等^[6]提出了两种精确求解方法来下料方案的排序问题:一种是基于下界;另一种是隐式穷举搜索过程,通过添加各种增强功能,搜索尽可能多的方案组合,实现下料方案的最优排序。Goncalves等^[7]提出有偏随机密钥遗传算法(Biased Random-Key Genetic Algorithm, BRKGA)结合局部搜索程序生成切割序列,设计了一种评估方案质量

的新型适应度函数,提高解的质量。Banda等^[8]采用动态规划方法求解最小化最大架子数量问题,利用某些属性简化问题,缩小问题搜索空间,该算法取得了非常好的试验结果。靳鹏^[9]研究了一维下料与调度联合优化问题,其中包含了下料与下料方案排序联合优化问题,建立了非线性整数规划模型,设计两阶段启发式算法求解问题。总体而言,针对切割下料与分箱分架问题的研究,呈现出不同的算法结构,并集中采用启发式规则来减少需要的架子数量。

本文提出一种满足子材落架约束的切割下料与分箱分架优化算法(Cutting Stock and Distributing Shelves Integration Optimization Method, CSDSIOM),解决了制造车间下料与分架集成问题,满足制造车间生产约束,加速了制造车间的生产流转,为企业智能化生产提供了较好的方案。

启发式策略基本原理

由于切割下料问题本身过于复杂,考虑因素较多,求解困难,很难把分箱分架约束直接放到下料问题中考虑,因此需要把分箱分架和切割下料问题单独考虑,本文提出采用递进式的启发式算法求解该问题。首先,求解不考虑分箱分架约束的切割下

料问题,根据具体的下料需求,利用启发式方法求解出下料方案,再调用多叉树深度贪心搜索算法,对列方案搜索排序,生成最优的切割序列,使最终获得的求解方案能满足分箱分架的约束。否则,需要对下料方案做一定的修正,返回求解的第一步,对子材进行重新分组,增加求解分组数量。获取新的下料优化方案,对方案进行最优排序,运用全局遍历的启发式策略,对方案中的每一块原材上的子材完成分流程卡过程,确定需要架子的在线数量、移动时间和次数,以此实现切割下料与分箱分架过程,完成工件成品源头的智能化生产。在满足各项约束的同时,提高原材利用率,加快产线的快速运行生产,提高产线效率和生产速率。算法主流程图如图2所示。

算法的启发式规则分析

1 下料方案生成

1.1 基于贪婪规则的列方案生成

首先,预处理子材,当子材规格超过一定规模时,对子材进行分组下料,然后采用降维策略,只考虑子材的面积,将二维排样问题降维成一维下料问题,生成所有的下料列方案。根据子材面积的大小,依次生成下料权值,面积大的子材对应的权值大。运用贪婪算法,同时追求单块原材的高利用率,每次均优先选择下料权值大的子材排布,当权值大的子材排布不下时,才选择权值稍小的子材进行排布,依此类推生成所有下料列方案。在下料方案形成过程中,需要考虑单块原材排版子材规格的数量约束,在一块原材上的子材规格数不能超过设定值。

设每种下料方案的重复次数为 X_m ($m=1, 2, \dots, M$),在方案 j 中,第 i 个子材的重复次数为 a_{ij} ($i=1, 2, 3, \dots, N$),第 i 个子材的需求量为 b_i ($i=1, 2, 3, \dots, N$),由可行下料方案可建立适合本问题的整数规划模型。

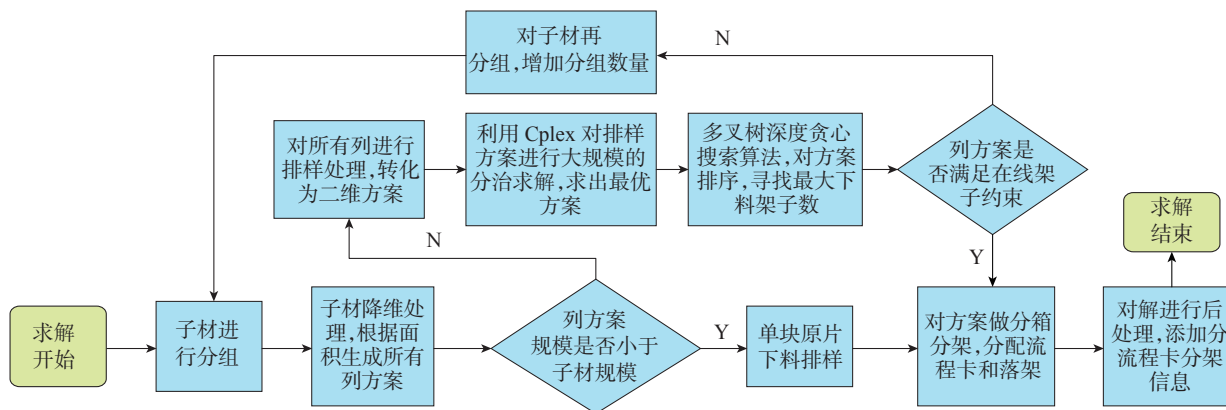


图2 算法主流程图

Fig.2 Algorithm main flow diagram

$$\text{目标函数: } \min Z = \sum_{j=1}^M X_j$$

$$\text{s.t.: } \sum_{j=1}^M a_{ij} X_j \geq b_i \quad (j=1, 2, \dots, N)$$

$$X_j \geq 0; \forall j, j \leq M;$$

决策变量: X_1, X_2, \dots, X_M 均为非负整数。

1.2 基于组化策略的列方案还原

当所有列方案生成之后,需要将对列方案全部还原,形成真实的二维排样方案。借鉴何霖等^[10]提出的基于组化策略的启发式搜索算法,求解卷型材矩形件排样优化问题的方法,以及张帆^[11]等提出的面向多规格板材的矩形工件优化方法;对单块原材的还原排样,根据列方案中的原材和子材,预先对子材进行组化处理,子材组化成长度和宽度两种不同方向的 Group,形成的所有 Group 均添加到 groupList 集合中。根据适应度值择优选择 Group 放置到原材,采用垂直或水平切割形成 0 块、1 块或 2 块次原材,对次原材继续放置 Group,若次原材排样失败,返回上一层,选择另一个 Group,重新放置切割。按照这种回溯、递归的启发式策略,将列方案还原成二维排样方案,排样方案满足一刀切约束。

1.3 求解最优排样方案

基于贪婪规则生成的列方案数量众多,简单的数学模型无法求解大

规模问题。本文通过调用 Cplex 引擎求解该整数规划问题。Cplex 在求解大规模整数规划问题的优势非常明显,其内部采用分支定界规则,能处理含有数百万个约束和变量的问题,可以不断缩小问题求解的范围,提供一种强大、迅捷的解决方案,快速获得问题的最优解。考虑列方案数量较多,为加快求解速度,将问题分解成 D 个子问题 ($D = \text{列方案数量} / 150000$),对子问题进行分治递归求解。根据列方案的整数规划数学模型,调用并集成 Cplex 求解引擎,找到原问题的最优解,即最优的排样方案。该阶段的优化目标是使所用的原材最少,在 Cplex 求解过程中,对子问题进行后处理与合并,便可获得最优的排样方案。

2 多叉树深度贪心搜索排序

由于企业产地受限,对装载子材的架子数量 G 做最大值限定。不同方案包含的相同子材,其下料切割顺序不能相间太大,否则因单个架子等待时间太长导致整个求解方案失败。

Cplex 求解出来的排样方案属于无规则序列。在算法搜索之前,需要对排样方案进行预处理。基于贪婪思想对所有的排样方案序列化,计算出单个下料列方案需要的架子数量,并设计了基于下料列方案添加架子的适应度择优排序的启发式规则。

依据下料方案适应度值 (fitness) 大小进行排序,使得连续切割的下料所包含的子材规格数不大于架子数量,具备相同子材的下料方案,保证其连续切割,以减少架子的使用数量。多叉树的搜索排序过程其实是实现了最优排序。切割时优先选择排序靠前的排样方案。在排样方案计算过程中,添加架子的适应度公式为:

$$\text{fitness}(1, S) = K \times 2 + N - Y$$

式中, K 表示装载完成的架子数, N 表示下一个方案相同架子数, Y 表示下一个方案新增架子数。

多叉树搜索时,对排样方案的枚举,采用节点方案推荐机制,考虑相同规格子材的排样位置,优先选择完全能完成装载架子的排样方案开始,然后根据完成度逐步搜索不能完成架子的排样方案。只有这样,才能寻找到一个可行解,并可以利用该可行解在搜索过程中实行可行性剪枝处理;一旦该方案不满足约束条件,剪去该节点排样方案。剪枝策略的设置,可以大大减小搜索范围和搜索时间。在递归搜索过程中,实时更新记录节点所需架子数和已搜索完成节点方案的全部架子数,当架子数超过最大数量时,不满足约束条件,不再继续搜索,提前回溯。每一次的递归搜索,都是优先选择能完成或极大能完成架子装载的排样方案。当

排样方案做了最优排序之后,若搜索方案均不满足架子约束,子材分解,添加分组数量,重新求解列方案。

3 分箱分架机制

通过多叉树贪心搜索排序之后,下料方案按照最优规则形成了切割序列,进一步对下料方案的子材做分箱分架处理。本文采用全局遍历的方法,遍历所有的排样方案,记录每一块原材上的子材信息,包括子材坐标、数量等,实现落架工序。将所有子材存放在子材 SampleMap 集合中,同种规格的子材划分成一个流程卡。在对子材划分流程卡时,均需要遍历后续的下料方案,寻找是否存在相同的子材,对该流程卡定义 cutindex 索引参数,跟踪记录在后续下料方案中出现相同规格子材的位置信息;当子材规格数量大于最大下料架子数时,即流程卡数量大于架子数量,需要对 SampleMap 中的子材,以流程卡为单位,将多余的子材划分出来,同时在 SampleMap 移除该流程卡的子材。

针对流程卡的移除,本文设计了先到先移除的启发式策略;实时对所有流程卡进行排序,具体排序规则为:规则 1,流程卡中子材全部到齐的排在最前面;规则 2,流程卡中子材数量较多的排在前面。

对于分配完流程卡的下料方案,全部添加到 allShelfList 方案集合中,进一步对 allShelfList 中的流程卡做后续处理,生成当前流程卡子材的数量、流程卡编号和落架编号等。在从工作区域移除架子的过程中,优先移除流程卡上子材已经全部到齐的架子,如果所有流程卡上子材均未到齐,选择移除子材数量较多的架子,根据这种策略,可以减少架子的使用数量。分架算法流程如图 3 所示。

试验结果

本文根据企业的实际生产情况,在排样过程中,添加了最小边距功

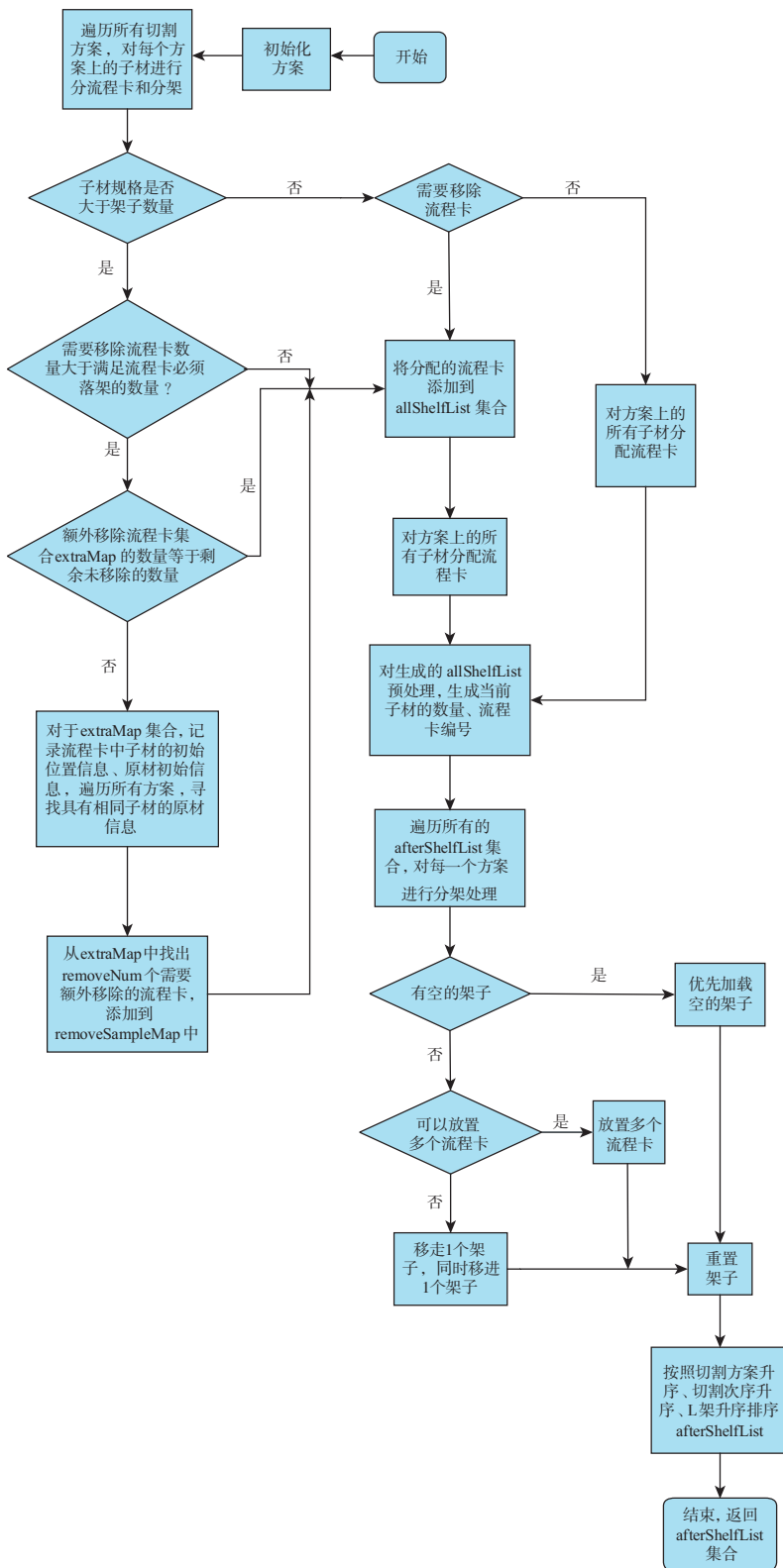


图3 分架算法流程图

Fig.3 Distributing shelves algorithm flow chart

能,即排布在原材四边的子材与原材

时,单块原材排放子材的种类数量为 3。为检验算法的有效性,本文以某

企业的实际生产订单为测试案例,对某玻璃生产企业的实际生产数据进行了测试,共测试 10 组数据,并与企业现有方法做了对比,企业现有方法不考虑落架,只有下料过程,测试结果如表 1 所示。

测试案例设置最大在线架子数量 $G=3$,所有测试结果均满足该约束条件,根据企业生产情况,每组订单原材使用不同。与企业现有方法对比,本文提出的方法最多可节约 11 块原材,原材节约效果明显。

为进一步分析,本文设置了不同的架子数量 G ,以分析架子数量对原材的使用以及下料方案数的生成数目的影响,测试数据依然使用以上 10 个实际生产订单数据,分别测试了 $G=3, 5, 10$ 和架子不受限制时的原材使用数量和下料方案数量,对每个测试案例测试 10 次,测试结果数据均按平均值给出,原材规格使用相同,测试结果如表 2 和表 3 所示。

从图 4 中可以看出,架子数量是影响下料方案的关键因素,随着在线架子数量的增加,对下料方案的约束力减小,下料任务更容易生成下料方案,多叉树搜索方案失败的概率极大减小,原材的使用数量逐步减少。同时,相对于同一个测试案例,在架子数量不受限制时,在第一步中子材组合生成的列数量更大,会导致下料方案数整体多于架子受限的情况,并且单块原材的利用率更高于受限时的单块原材利用率。

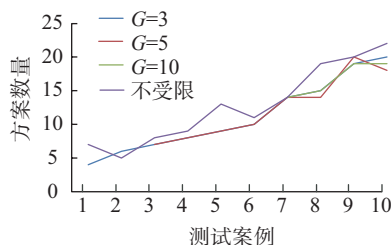


图4 方案数量变化趋势图

Fig.4 Plan number change trend chart

表1 使用原材数量与工厂实际生产对比结果

Table 1 Number of raw materials used is compared with the actual production of the factory

测试	子材种类数	平均需求量	工厂	CSDSIOM
测试 1	5	555	339	332
测试 2	5	365	337	334
测试 3	6	187	122	117
测试 4	8	111	209	205
测试 5	9	338	384	356
测试 6	10	135	208	205
测试 7	14	163	313	310
测试 8	15	159	296	285
测试 9	19	166	356	350
测试 10	20	118	286	275

表2 不同架子数需要原材数量计算结果

Table 2 Necessary raw material quantity calculation results of different shelf numbers

测试	子材种类数	$G=3$	$G=5$	$G=10$	不受限
测试 1	5	283	—	—	282
测试 2	5	289	—	—	286
测试 3	6	88	82	—	81
测试 4	8	83	82	—	81
测试 5	9	274	263	—	262
测试 6	10	163	155	—	154
测试 7	14	266	265	262	261
测试 8	15	251	247	246	245
测试 9	19	263	259	255	254
测试 10	20	249	243	239	237

表3 不同架子数生成的下料方案数量表

Table 3 Number of schemes generated by different number of shelves

测试	子材种类数	$G=3$	$G=5$	$G=10$	不受限
测试 1	5	4	—	—	7
测试 2	5	6	—	—	5
测试 3	6	7	7	—	8
测试 4	8	8	8	—	9
测试 5	9	9	9	—	13
测试 6	10	10	10	—	11
测试 7	14	14	14	14	20
测试 8	15	15	14	15	19
测试 9	19	19	20	19	20
测试 10	20	20	18	19	22

结论

本文研究了车间板构产品切割下料与分箱分架的集成优化问题,提出了先求解子材切割下料问题,然后再求解子材分架落架问题的启发式方法,通过对企业的实际生产数据进行测试并与之对比。结果表明,该算法能满足企业的生产实际需要,有效节约了资源,解决了实际成产问题,加快了企业智能化发展。

参考文献

[1] ZHANG H, LIU Q, CHEN X, et al. A digital twin-based approach for designing and multi-objective optimization of hollow glass production line[J]. IEEE Access, 2017,5: 26901–26911.

[2] YANASSE H H. On a pattern sequencing problem to minimize the maximum number of open stacks[J]. European Journal of Operational Research, 1997,100(3): 454–463.

[3] BECCENERI J C, YANASSE H H, SOMA N Y. A method for solving the minimization of the maximum number of open

stacks problem within a cutting process[J]. Computers and Operations Research, 2004, 31: 2315–2332.

[4] FOERSTER H, WASCHER G. Simulated annealing for order spread minimization in sequencing cutting patterns[J]. European Journal of Operational Research, 1998, 110(2): 272–281.

[5] RAGSDALE C, ZOBEL C W. The ordered cutting stock problem[J]. Decision Science, 2004, 35(1): 83–100.

[6] YUEN B J, RICHARDSON K V. Establishing the optimality of sequencing heuristics for cutting stock problems[J]. European Journal of Operational Research, 1995, 84: 590–598.

[7] GONCALVES J F, RESENDE M G C, COSTA M D. A biased random-key genetic algorithm for the minimization of open stacks problem[J]. International Transactions in Operational Research, 2016, 23(1–2): 25–46.

[8] BANDA M G D L, STUCKEY P J. Dynamic programming to minimize the maximum number of open stacks[J]. Inform Journal on Computing, 2007, 19(4): 607–617.

[9] 靳鹏. 配料企业下料与调度协调优化模型研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2013.

JIN Peng. Research on distributing enterprise cutting stock and scheduling coordination models[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2013.

[10] 何霖. 满足“一刀切”约束的卷型材矩形工件排样方法研究 [D]. 广州: 广东工业大学, 2014.

HE Lin. Layout method for rectangular workpieces of roll profile with one-size-fit constraint[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2014.

[11] 张帆, 刘强, 张浩, 等. 面向多规格板材的矩形工件排样优化方法 [J]. 计算机集成制造系统, 2015, 21(11): 2921–2928.

ZHANG Fan, LIU Qiang, ZHANG Hao, et al. Packing optimization of rectangle workpieces oriented to variable-sized bin[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2015, 21(11): 2921–2928.

通讯作者: 冷杰武, 博士, 副教授, 研究方向为数字孪生与制造服务区块链等, E-mail: jw leng@gdut.edu.cn.

Cutting Stock and Distributing Shelves Integration Optimization Method for Workshop

YAN Douxi, LENG Jiewu, ZHANG Hao

(Guangdong Provincial Key Laboratory of Computer Integrated Manufacturing System, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

[ABSTRACT] Aiming at the integration problem of cutting and distributing shelves in traditional manufacturing enterprises, by analyzing the production site constraints such as the number of manufacturing racks and production processes, a heuristic method is proposed to solve the cutting stock problem, and the distributing shelves algorithm is transferred to make the sub-material fall down. The heuristic strategy is used to optimize the cutting sequence of the cutting scheme and the sequential optimization of the single-piece material falling frame, which solves the problem of integration of the material and the rack in the manufacturing workshop. The practicality and effectiveness of the method are verified by examples, which meet the actual production constraints and production requirements, and realize the intelligent production of the enterprise.

Keywords: Integrated optimization; Plate production; Cutting stock; Distributing shelves; Heuristic algorithm

(责编 大漠)