

DOI:10.13475/j.fzxb.20200500907

纬编织造车间生产调度方法研究

周亚勤, 王攀, 张朋, 张洁

(东华大学 机械工程学院, 上海 201620)

摘 要 为解决纬编织造车间生产订单品种繁多、工艺复杂等问题,构建综合考虑织造车间因素的生产调度模型。研究了“订单拆分-设备选择-任务排序”的织造车间调度方法设计订单拆分规则,对重要客户交货期紧急的订单进行拆分处理;基于产品工艺相似性设计启发式规则,对产品加工设备进行选择;设计结合邻域搜索策略的遗传算法,对设备加工任务进行优化排序。结果表明:通过提出的调度方法,保证了产品交货期内的加工时间富裕度,减少了设备改机时间,实现了产品完工时间与总拖期时间最小化目标。以生产实例进行算法仿真分析,验证本文方法及算法的有效性,并对不同规模案例与其他算法的求解结果进行比较,验证了改进遗传算法的优越性。

关键词 纬编生产; 织造车间; 生产调度; 订单拆分; 改进遗传算法

中图分类号:TS 108; TH 186 文献标志码:A

Research on production scheduling method for weft knitting workshops

ZHOU Yaqin, WANG Pan, ZHANG Peng, ZHANG Jie

(College of Mechanical Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China)

Abstract A weft knitting workshop is order-oriented with a wide range of product types and complex processes for the production, a comprehensive production scheduling model for weft knitting workshop was constructed to address the problems. The scheduling method of "order split-equipment selection-task sequencing" was adopted for this study. Order splitting rules was firstly made to split the orders of important customers with urgent delivery dates. Based on product process similarity, heuristic rules was established to select product processing equipment. Genetic algorithm combined with variable neighborhood search strategy was designed to optimize the sorting of equipment processing tasks. Through the proposed scheduling method, the abundance of processing time during the product delivery period is guaranteed, the time for equipment modification is reduced, and the goal of minimizing product completion time and total delay time is achieved. Simulation analysis of the algorithm is carried out in a weft-knitting enterprise to verify the effectiveness of the rules and algorithms proposed in this paper. By comparing the results of different scale cases with that from using other algorithms, the superiority of the improved genetic algorithm is verified.

Keywords weft knitting production; weft knitting workshop; production scheduling; order split; improved genetic algorithm

纬编织造车间生产具有以下特点:针织纬编面料种类繁多,工艺多样;面向订单生产,客户订单数量大小不一,交货期十分严格;设备加工工艺柔性,织造车间有多类型纬编机,同类型设备具有多台,可加工一定工艺范围内的多种产品类型,且加工不同产品时,设备的产能不同;织造设备在加工不同产品类型时,需更换设备机架和针筒,改机时间长。综合

以上分析,可将织造车间生产调度问题抽象成面向订单生产的考虑设备产能和改机时间的非等同并行机调度问题。研究这类生产调度模型和方法具有一定的理论意义和工程应用价值,优化的织造车间生产调度方案可大大减少设备改机时间,提高生产效率,保证产品交货期。

在非等同并行机调度问题上,国内外学者进行

收稿日期:2020-05-06 修回日期:2020-12-30

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51435009)

第一作者:周亚勤(1977—),女,副教授,博士。主要研究方向为智能制造、生产计划与调度。E-mail:zhouyaqin@dhu.edu.cn。

了大量的探索与研究,并取得了许多成果。Maria等^[1]考虑设备的准备时间、容量约束以及作业分批属性等,构建了非等同并行机调度模型,并设计了融入启发式规则的粒子群算法进行求解。Jose等^[2]考虑设备容量以及订单交货期等约束,建立了具有准备时间的批处理机调度模型,结合具有最佳拟合的启发式算法,取得了很好的优化效果。Suhaimi等^[3]以最小化加权时间为优化目标,考虑设备的辅助加工时间约束,采用拉格朗日松弛算法进行研究。赵晴瑶^[4]建立了带准备时间序列的不相关并行机调度模型,并基于改进果蝇优化算法对该问题进行求解。周亚勤等^[5]综合考虑批量和辅助时间等实际生产工况,提出一种生物免疫算法对该调度模型进行了优化求解。

尽管调度问题在不同领域取得了不错的进展,但在针织领域织造车间的研究较少。王静安等^[6]对以往织造车间生产模型进行改进,提出了一种更加实用的织造车间织机调度优化模型,并采用遗传算法进行求解,但并未考虑设备加工特性约束。孙延^[7]构建了织造排产与调度的数学模型,并将所提出的蚁群算法应用于纺织企业织造车间,但未结合具体生产实例进行仿真分析。孟朔等^[8]构建了以满足订单交货期为主优化目标、最小化订单产品翻改等为次优化目标的织机调度模型,并结合改进的非支配遗传算法求解该调度问题。Yilmaz等^[9]考虑了依赖于序列相关的设置时间、作业分批属性以及机器加工特性等约束,构建了单一优化目标的大规模织机调度模型,并将其所提出的改进遗传算法应用于该调度问题中,得到了较好的优化结果。

本文结合纬编织造车间生产实际需求,综合考虑订单可拆分特性、产品特定加工设备组、设备不同产品间改机时间等约束,构建织造车间生产调度优化模型,设计基于改进遗传算法的织造车间生产调度方法,实现考虑产品加工时间富裕度的订单拆分,考虑工艺相似性的产品加工设备选择和设备加工任务优化排序,使得织造车间加工任务的总完工时间最短和总拖期时间最小。

1 织造车间生产调度模型的建立

1.1 问题描述

纬编织造车间在某个调度周期内,共接收到客户确认过的订单 k 个,每个订单中均包含多种产品,且每种产品的数量大小以及交货期存在着差异。现车间共配备有 m 台生产设备,每个订单产品均可在

1台或多台设备上生产,生产时间会随着所选设备而变化。同时,设备前后生产不同面料类型的订单任务时,需要一定的改机时间,因此,织造车间的调度问题在于如何将不同的客户产品合理地安排在设备上生产,并使产品总完工时间和拖期时间最小等性能指标达到最优。

1.2 模型假设

织造车间生产调度模型需要满足如下基本假设。

- 1) 调度开始(0时刻),所有机器都处于可用状态,所有订单任务均处于可加工状态。
- 2) 纱线原料充足且满足订单产品的生产需求。
- 3) 不考虑设备的故障以及动态插单、取消订单等扰动问题。
- 4) 设备可生产的产品种类以及其对应的产能均已知。
- 5) 不考虑产品的库存以及运输成本等。
- 6) 经订单预处理后的订单任务均只包含1种产品,且同一设备在同一时间仅能生产1个订单任务。
- 7) 某一订单任务只要开始加工就不允许停止,直到该任务完成加工为止。
- 8) 车间的其他与生产相关的信息均已知。

1.3 目标函数与约束条件

结合实际生产情况,织造车间生产调度模型需综合考虑订单可拆分特性、产品特定加工设备组、设备不同产品间改机时间、设备产能、交货期等约束,以产品完工总时间和总拖期时间最小为目标,以实现产品按期交货。

1.3.1 优化目标

织造车间生产调度以产品完工总时间最小和拖期时间最小为目标,建立优化目标函数如式(1)和式(2)所示。

$$f_1 = \min(\max_{j \in J} (P_{T_j} + G_{T_j})) \quad (1)$$

$$f_2 = \min\left(\sum_{i=1}^n \beta_i \max(E_{T_{ij}} - D_i, 0) X_{ij}\right) \quad (2)$$

式中: f_1 表示最小化最大完工时间; P_{T_j} 表示设备 j 上的总加工时间; G_{T_j} 表示设备 j 上的改机总时间; f_2 表示最小化总拖期时间; β_i 为客户重要度系数,其取值范围为 $[1, 10]$; $E_{T_{ij}}$ 表示第 i 个订单任务在第 j 台设备上的加工结束时间; D_i 为第 i 个订单任务的交货期时间; X_{ij} 为决策变量,当订单任务 i 在设备 j 上生产时,则 $X_{ij}=1$,否则 $X_{ij}=0$ 。

1.3.2 约束条件

织造车间生产调度模型满足如下约束条件。

1) 交货期约束为

$$E_{Tij} \leq D_i \quad (3)$$

$$U_e = \frac{D_e - T_{e\max}}{D_e} \times 100\% \quad (4)$$

式中: U_e 表示产品 e 的交货期松弛度; D_e 表示产品 e 的交货期; $T_{e\max}$ 表示产品 e 在可加工设备集合 Ω_e 上所需生产时间的最大值。

2) 订单拆分数量约束为

$$\delta_e = \left\lceil \frac{Q_e}{C_{\text{avg}} T} \right\rceil + k \quad (5)$$

式中: δ_e 表示产品 e 的拆分数量; Q_e 表示产品 e 的数量; C_{avg} 表示可加工产品 e 的设备集合平均日产能; T 表示计划周期时间; $\lceil \cdot \rceil$ 表示取整, 且 $k \geq 1$ (取整数)。

3) 加工唯一性约束为

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} X_{ij} = 1 \quad (6)$$

4) 加工时间约束为

$$S_{T(i+1)j} - S_{Tij} \geq P_{Tij} \quad (7)$$

$$E_{Tij} + G_{Tjii'} Y_{jii'} = S_{Tij} \quad (8)$$

式中: S_{Tij} 表示第 i 个订单任务在第 j 台设备上的加工开始时间; P_{Tij} 表示第 i 个订单任务在第 j 台设备上的加工时间; $G_{Tjii'}$ 表示设备 j 先后加工订单任务 i 与订单任务 i' 时所需的改机时间; $Y_{jii'}$ 为决策变量, 当第 j 台设备前后分配的订单任务的面料类型不同时, $Y_{jii'} = 1$, 否则 $Y_{jii'} = 0$ 。

5) 改机约束为

$$G_{Tjii'} = G_{Tjii'} Y_{jii'} \quad (9)$$

6) 设备产能约束为

$$P_{Tij} = \frac{Q_i}{Q_j} X_{ij} \quad (10)$$

式中: Q_i 表示第 i 个订单任务数量; Q_j 表示第 j 个订单任务在第 j 台设备上加工时, 设备所对应的产能。

2 模型的求解

2.1 订单拆分

由于纬编生产企业接收到的订单具有产品种类繁多、生产工艺复杂、多客户以及交货期严格等特点, 不合理的调度方案易导致车间订单的堆积以及设备改机次数的增多, 严重时甚至造成订单拖期。考虑到车间设备产能的限制, 车间生产要素分配不均易造成设备产能的浪费以及降低车间生产效率, 针对不同客户重要度的差异, 针织企业会优先安排重要度高的客户的产品进行生产。同时为最大限度地保证完成该计划周期内的所有订单, 企业计划人

员会对重要客户交货期紧张的订单进行拆分处理, 从而保证产品交货期内的加工时间富裕度, 具体的预处理操作过程如下。

第 1 步: 将该计划周期内不同客户的订单组成订单产品集合 N_1 。

第 2 步: 将 N_1 中产品按客户重要程度以及交货期进行排序, 并按照式 (4) 对每个产品的交货期松弛度进行计算。

第 3 步: 对于交货期松弛度小于 0 且客户等级大于 8 的产品, 按照式 (5) 进行等量拆分, 并优先安排生产。

第 4 步: 将经过预处理操作后的订单产品建立订单任务序列, 用于织造车间生产调度。

2.2 订单任务设备选择

设备选择是指为经过订单拆分后的订单任务选择合适的加工设备的过程。本文基于产品加工工艺的相似性, 设计启发式规则为每个订单任务进行设备选择, 从而使设备的利用率均衡以及减少订单的拖期时间, 其主要规则如下。

规则 1: 订单任务选择可加工设备集合中分配有相同面料类型订单任务的设备集合, 并在该设备集合中选择该订单任务加入时交货期松弛度最大的设备。如果该订单任务分配到的设备集合上的交货期松弛度均小于 0, 则转到规则 2。

规则 2: 订单任务在可加工设备集合中选择该订单任务加入时所造成拖期时间最短的设备进行加工。

2.3 订单任务优化排序

遗传算法是基于染色体群的具有并行搜索能力的算法, 已广泛应用于织造车间的生产调度中^[6,8-9], 本文将采用遗传算法进行设备上订单任务排序的优化求解, 并针对传统遗传算法局部搜索能力弱以及收敛速度慢等缺陷, 提出改进遗传算法对订单优化排序问题进行求解, 得到更加优化的排序结果。改进遗传算法的流程图如图 1 所示。

1) 编码。本文对订单任务及设备采取双层实数编码形式, 上层为订单任务编码, 是订单拆分后形成的所有订单任务的排列; 下层为设备编码, 根据订单任务设备选择规则, 为上层的各订单任务选择设备, 或者在订单任务可加工设备中任选一台设备, 形成第 2 层设备编码, 同设备上任务的加工顺序遵循第 1 层的排列顺序。例如, 上层订单任务编码为 164872935, 下层设备编码为 143322114, 则设备 1 上的订单任务加工顺序为 1, 9, 3。

2) 种群初始化。采用 2.2 节启发式规则与随机生成相结合的方式产生初始种群, 且 2 种方法产生

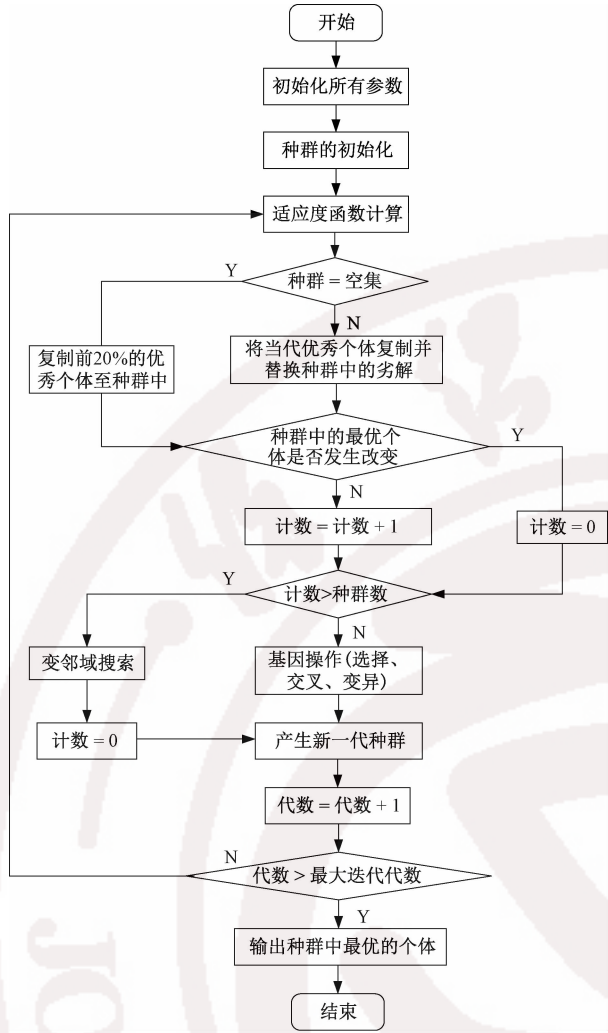


图 1 改进遗传算法流程图

Fig. 1 Improved genetic algorithm flow chart

初始解的比例均设置为 50%。

3) 适应度函数。考虑到 2 个优化目标时间量纲的不一致性, 故将 2 个优化目标函数进行归一化处理, 然后对 2 个目标函数求和后取倒数作为适应度函数。定义的适应度函数为

$$f = \frac{1}{w_1 \frac{f_1}{a_{f1}} + w_2 \frac{f_2}{a_{f2}}} \quad (11)$$

式中: f 表示适应度函数; w_1 、 w_2 分别为完工时间和延期时间的加权系数值; a_{f1} 表示所有个体最大完工时间之和的均值; a_{f2} 表示所有个体拖期时间之和的均值。

4) 交叉变异。考虑到设备生产柔性, 即不同订单任务可在多台设备上加工生产的特点, 本文采用 2 点交叉^[10]以及单点变异^[11]的方式, 通过随机选择 2 个交叉点交换交叉区间的基因片段以生成子代, 然后在子代中随机选择一个变异点, 针对设备层进行单点变异。

5) 局部搜索策略。为提高遗传算法的局部搜

索能力, 本文采取以下 3 种邻域结构操作方法在当前最优染色体上进行局部搜索, 以寻找更优个体。插入操作: 首先在最优解染色体上随机选取 2 个基因位置 R_1 与 R_2 ($R_1 < R_2$), 将 R_2 处的基因插入到 R_1 处基因之前, R_1 及其后面的基因则按原来的顺序进行顺延。逆序操作: 通过在最优染色体上随机选取 2 个基因位 R_1 与 R_2 ($R_1 < R_2$), 然后对 R_1 与 R_2 之间的基因片段进行反转操作。打乱互换操作: 随机选择一些基因位置, 通过打乱这些基因的顺序以产生新的染色体。例如, 一个染色体的编码是“26735148”, 随机选取 4 个基因位置 2、3、6、7, 其对应的基因顺序是“6714”, 然后将基因顺序进行随机打乱, 便可得到“27635418”等新的染色体。

6) 算法关键参数的选取。由于遗传算子中交叉概率 P_c 和变异概率 P_m 对算法的运行效率影响较大, 若采用固定的交叉概率和变异概率则易使算法陷入局部最优, 为加快算法的收敛速度以及避免算法陷入局部最优, 本文采用改进的自适应交叉概率以及变异概率。自适应交叉概率与自适应变异概率的设置如下式所示。

$$P_c = \begin{cases} P_{c_max} - \frac{(P_{c_max} - P_{c_mid})(f_c - f_{min})}{f_{avg} - f_{min}}, & f_c < f_{avg} \\ P_{c_min} + \frac{(P_{c_mid} - P_{c_min})(f_{max} - f_c)}{f_{max} - f_{avg}}, & f_c \geq f_{avg} \end{cases} \quad (12)$$

式中: P_{c_max} 、 P_{c_mid} 、 P_{c_min} 分别表示最大、中等以及最小的交叉概率; f_{max} 、 f_{avg} 、 f_{min} 分别表示当前种群中所有个体的最高适应度值、平均适应度值以及最低适应度值; f_c 表示进入交配池中的 2 个个体中适应度值较大的个体。

$$P_m = \begin{cases} P_{m_max} - \frac{(P_{m_max} - P_{m_mid})(f_m - f_{min})}{f_{avg} - f_{min}}, & f_m < f_{avg} \\ P_{m_min} + \frac{(P_{m_mid} - P_{m_min})(f_{max} - f_m)}{f_{max} - f_{avg}}, & f_m \geq f_{avg} \end{cases} \quad (13)$$

式中: P_{m_max} 、 P_{m_mid} 、 P_{m_min} 分别表示最大、中等以及最小的变异概率; f_m 表示要进行变异操作个体的适应度值。

3 实验验证

3.1 案例背景

以上海某针织企业纬编生产车间的实际生产情况为背景进行案例测试, 其中车间设备信息如表 1 所示, 订单信息如表 2 所示。

表 1 车间设备信息(节选)

Tab. 1 Partial workshop equipment information

设备代号	数量/台	设备号	日产能/kg
M1	2	M01/M02	45
M2	2	M03/M04	60
M3	2	M05/M06	50
M4	2	M07/M08	40

表 2 车间订单信息(节选)

Tab. 2 Partial workshop order information

订单编号	产品编号	客户重要度	产品数量/kg	面料类型	交货期/d
D181121001	1	10	115	罗纹	16
D181121001	2	10	80	提花	14
D181121001	3	10	750	平纹	10
...
D181121004	11	6	165	罗纹	23
D181121004	12	6	196	提花	12
...
D181121008	30	8	810	提花	14
D181121008	31	8	75	罗纹	28
D181121008	32	8	65	平纹	23

3.2 仿真结果对比及分析

本文改进遗传算法的求解方法采用 C# 语言编程实现,程序运行环境为 visual studio 2013, CPU 为 AMD Ryzen5 PRO 2 500 U @ 2 GHz, 内存为 8 GB, Windows 10 操作系统。取该求解方法的初始种群规模为 80, 算法的交叉概率 $P_{c_max} = 0.9$, $P_{c_mid} = 0.65$, $P_{c_min} = 0.35$; 变异概率 $P_{m_max} = 0.1$, $P_{m_mid} = 0.05$, $P_{m_min} = 0.01$, 最大迭代次数取 150, 变邻域搜索次数取 80, 阈值 θ 取 8。

1) 订单拆分结果分析。订单拆分数量的大小对本文提出的算法搜索效率影响较大, 过大或过小都不利于算法搜索效率的提高。为确定不同订单合理的拆分数目, 分别取式(5)中 k 的大小为 $\{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$, 算法运行 20 次得到的目标函数值和设备的平均改机次数(同一设备在生产不同类型的产品时, 需要进行的机器调整次数)如表 3 所示。可知, 当 k 取 3 时, 目标函数值最优, 且设备的改机次数较少, 综合考虑目标函数值和设备改机次数, 选取 k 值为 3。

表 3 不同 k 值对优化结果的影响

Tab. 3 Influence of k on optimization results

k	目标函数值 f	平均改机次数
1	3.6	3.0
2	4.2	3.5
3	5.3	3.0
4	4.8	3.8
5	3.8	4.2
6	2.3	4.8

2) 初始解对比实验。本节以经过订单预处理操作后形成的 40 个订单任务为实际案例, 进行 25 次迭代实验, 对比随机规则、文献[12]的启发式规则以及本文提出的车间启发式规则, 产生初始解的质量如图 2 所示。可以得出, 本文提出的车间启发式规则, 在迭代过程中所产生的初始解平均值的的质量明显优于其他 2 种方法, 该方法不仅保证了种群的多样性(随机规则), 且改善了初始解的质量(车间启发式规则)。

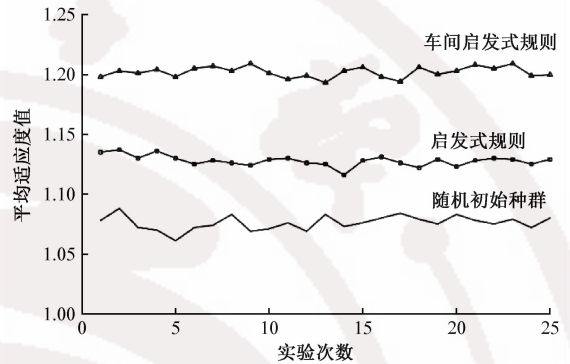


图 2 初始解结果对比图

Fig. 2 Comparison of initial solution results

3) 算法收敛性分析。图 3 示出改进遗传算法在求解这 40 个订单任务案例时的收敛曲线。由图可知, 算法具有快速收敛的特性, 且在进化初期适应度值迅速增加, 最后算法大概在迭代次数为 55 时趋于稳定, 并收敛至一稳定的最优值。图 4 示出算法部分调度结果甘特图。可知, 最大完工时间为 26 d 左右, 且仅有 2 个订单任务拖期, 拖期仅为 1 d, 同时是不重要客户的订单任务, 而企业以前采用 Excel 表格进行订单任务机台预排时, 订单任务的总完工时间平均为 32 d 左右, 采用本文算法生产效率可提高 18%, 由此可以验证本文所提算法对于求解该调度问题的有效性。

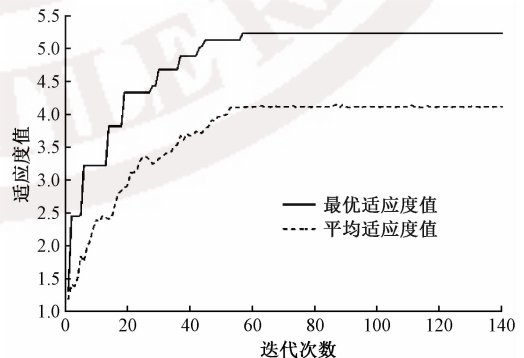


图 3 种群迭代变化图

Fig. 3 Population iteration graph

为对本文所提出的改进遗传算法性能进行测试, 利用不同规模下的算例进行仿真实验。算例由

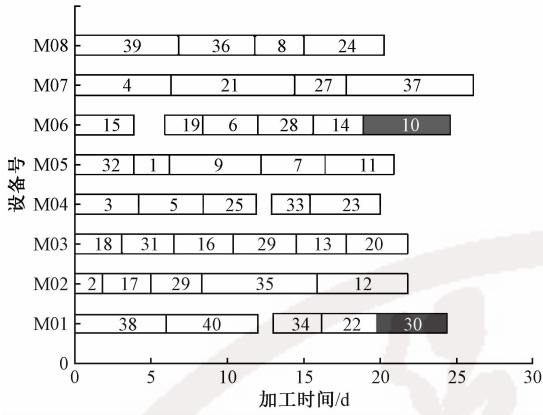


图 4 部分调度结果甘特图

Fig. 4 Partial scheduling results Gantt chart

设备类型、设备数量以及订单任务数量 3 部分组成,如:4 * 5 * 20 表示 4 种不同类型的设备,5 台设备以及 20 个订单任务,并以订单任务数为 20、30,以及设备数为 4、5、6 组成正交试验,生成了 6 组不同的算例,然后分别采用遗传算法(GA)、自适应遗传算法(SAGA)、变邻域遗传算法(VGA)以及改进的遗传算法(IGA)对算例进行求解。其中,GA 未加入任何改进策略,SAGA 去掉了变邻域搜索策略,VGA 则采用固定的交叉及变异概率。

表 4 不同算法仿真结果对比

Tab. 4 Comparison of simulation results of different algorithms

案例规模	适应度函数值 f								平均收敛代数			
	GA		SAGA		VGA		IGA		GA	SAGA	VGA	IGA
	best	avg	best	avg	best	avg	best	avg				
4 * 4 * 20	3.65	2.65	3.71	2.87	4.95	4.14	5.13	4.34	91.5	65.0	70.2	50.4
4 * 5 * 20	3.71	2.67	3.81	2.91	4.95	4.18	5.19	4.36	89.3	60.2	64.3	44.2
4 * 6 * 20	3.74	2.68	3.82	2.95	4.98	4.23	5.21	4.39	87.1	58.7	64.2	41.9
4 * 4 * 30	3.63	2.59	3.68	2.84	4.93	4.09	5.11	4.28	99.4	76.4	78.1	59.1
4 * 5 * 30	3.66	2.62	3.72	2.86	4.97	4.15	5.17	4.33	94.5	71.8	72.6	56.7
4 * 6 * 30	3.70	2.64	3.74	2.89	5.01	4.15	5.20	4.37	91.6	65.3	66.4	50.2

4 结 论

本文围绕针织企业织造车间调度问题展开研究,构建了考虑订单拆分特性的织造车间多目标调度优化模型,提出“订单拆分-设备选择-任务排序”的织造车间调度方法,并通过企业的实际生产案例进行案例仿真,通过订单拆分结果分析、种群初始解对比实验和算法与其他算法进行比较,得出本文提出的订单拆分规则和任务设备选择规则可以改善算法初始解的质量,提出的改进遗传算法具有很好的收敛性。结果表明,本文提出的方法相较于人工排产具有较大的优越性,且改进遗传算法在性能上优于其他算法,能有效指导织造车间生产排程。

考虑到不同算法的随机性,对算例分别运行 15 次,得到目标函数值的最优适应度值解(best)、平均适应度值解(avg)以及算法的平均收敛代数,求解结果如表 4 所示。由对比结果分析可得,SAGA 相较于 GA 在最优值寻优方面提升不大,但 SAGA 求解的平均适应度值较 GA 有较大的提升,最大提升程度为 10.07%,表明 SAGA 算法求解结果更具稳定性。同时 VGA 算法相较于 GA 算法在最优值以及平均值方面均有很大提升,这表明 VGA 算法具有很好的局部寻优能力。IGA 算法求解的最优适应度值以及平均适应度值均优于其他 3 种算法,在最优适应度值方面分别平均提升 40.4%、37.7%、4.1%,在平均适应度值方面分别平均提升 65.5%、50.5%、4.5%。从求解稳定性方面来看,本文提出的 IGA 算法求解质量不会随着案例规模的变化而有较大的波动性,这表明 IGA 算法在求解织造车间调度问题上具有很好的稳定性。从算法收敛性的角度来看,本文提出的 IGA 算法相比于其他 3 种算法平均早 25 代左右收敛至最优值,由此可以得出在相同迭代次数的前提下,IGA 算法具有更好的优化能力以及收敛能力,同时验证了本文所提改进策略的有效性。

考虑到企业车间在实际生产过程中的不稳定性,紧急插单、设备故障以及原材料延期等扰动事件的发生使车间生产变得更为复杂,如何进一步完善模型,以及考虑各种扰动事件发生下对织造车间动态调度问题的研究是下一步重要的研究方向。

FZXB

参考文献:

[1] MARIA H, PURUSHOTMAN D, MAHBOD A. Scheduling non-identical parallel batch processing machines to minimize total weighted tardiness using particle swarm optimization[J]. Computers & Industrial Engineering, 2017, 113:425-436.

[2] JOSE E C A, JOSEPH Y T L. Scheduling unrelated parallel batch processing machines with non-identical job

- sizes and unequal ready times [J]. *Computers and Operations Research*, 2017, 78: 117-128.
- [3] SUHAIMI N, NGUYEN C, DAMODARAN P. Lagrangian approach to minimize makespan of non-identical parallel batch processing machines [J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2016, 101: 295-302.
- [4] 赵晴瑶. 基于改进果蝇优化算法的混合流水车间调度方法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2018: 39-50.
ZHAO Qingyao. Study on scheduling method of mixed flow shop based on improved fruit fly optimization algorithm [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2018: 39-50.
- [5] 周亚勤, 李蓓智, 杨建国. 考虑批量和辅助时间等生产工况的智能调度方法 [J]. *机械工程学报*, 2006(1): 56-60.
ZHOU Yaqin, LI Beizhi, YANG Jianguo. Intelligent scheduling method considering production conditions such as batch and auxiliary time [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2006(1): 56-60.
- [6] WANG Jingan, PAN Ruru, GAO Weidong, et al. An automatic scheduling method for weaving enterprises based on genetic algorithm [J]. *Journal of The Textile Institute*, 2015, 106(12): 1-11.
- [7] 孙延. 基于蚁群算法的纺织企业生产调度技术研究[J]. *电子设计工程*, 2015, 23(18): 116-118.
SUN Yan. Research on production scheduling technology of textile enterprises based on ant colony algorithm [J]. *Electronic Design Engineering*, 2015, 23(18): 116-118.
- [8] 孟朔, 潘如如, 高卫东, 等. 采用主目标进化遗传算法的织造排程研究[J]. *纺织学报*, 2019, 40(8): 169-174.
MENG Shuo, PAN Ruru, GAO Weidong, et al. Study on weaving schedule using master objective evolutionary genetic algorithm [J]. *Journal of Textile Research*, 2019, 40(8): 169-174.
- [9] YILMAZ E D, OZMUTLU H C. Solution method for a large-scale loom scheduling problem with machine eligibility and splitting property [J]. *Journal of The Textile Institute*, 2017, 108(12): 2154-2165.
- [10] 白俊峰, 贾志浩, 白一辰. 基于改进遗传算法的车间调度问题研究[J]. *现代制造技术与装备*, 2019(12): 198-200.
BAI Junfeng, JIA Zhihao, BAI Yichen. Research on workshop scheduling based on improved genetic algorithm [J]. *Modern Manufacturing Technology and Equipment*, 2019(12): 198-200.
- [11] 卢颖涛. 针织企业染整车间调度方法研究[D]. 上海: 东华大学, 2019: 23-25.
LU Yingtao. Research on dyeing and finishing workshop scheduling methods for knitting enterprises [D]. Shanghai: Donghua University, 2019: 23-25.
- [12] 何桂霞. 特殊工艺约束下最小完工时间并行多机调度问题的研究[J]. *浙江工业大学学报*, 2010, 38(1): 63-66, 94.
HE Guixia. Study on minimum completion time parallel multi-machine scheduling problem under special process constraints [J]. *Journal of Zhejiang University of Technology*, 2010, 38(1): 63-66, 94.