

控制与决策

Control and Decision

顺序依赖的调整时间和拖期的无缝钢管热轧批量调度算法

汪洋, 李铁克, 王柏琳

引用本文:

汪洋, 李铁克, 王柏琳. 顺序依赖的调整时间和拖期的无缝钢管热轧批量调度算法[J]. *控制与决策*, 2021, 36(2): 505–512.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0723>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[基于多班教学优化的多目标分布式混合流水车间调度](#)

Multi-class teaching-learning-based optimization for multi-objective distributed hybrid flow shop scheduling

控制与决策. 2021, 36(2): 303–313 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0549>

[基于改进蛙跳算法的分布式两阶段混合流水车间调度](#)

An improved shuffled frog leaping algorithm for the distributed two-stage hybrid flow shop scheduling

控制与决策. 2021, 36(1): 241–248 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0472>

[基于改进多目标优化算法的分布式数据中心负载调度](#)

Multi-objective optimization of energy and performance management in distributed data centers

控制与决策. 2021, 36(1): 159–165 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0702>

[基于负荷平衡的柔性预约决策](#)

Flexible outpatient appointment decision model with loading balance

控制与决策. 2021, 36(1): 226–233 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1690>

[基于树形结构无界存档的多目标粒子群算法](#)

Multi-objective particle swarm optimization algorithm based on tree-structured unbounded archive

控制与决策. 2020, 35(11): 2675–2686 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0276>

顺序依赖的调整时间和拖期的无缝钢管热轧批量调度算法

汪 洋, 李铁克[†], 王柏琳

- (1. 北京科技大学 经济管理学院, 北京 100083;
2. 钢铁生产制造执行系统技术教育部工程研究中心, 北京 100083)

摘要: 无缝钢管热轧生产存在一类特殊的顺序依赖机器调整时间, 调整时间依赖于相邻轧制批量间的规格切换, 与批量间规格呈线性函数关系. 针对具有此类调整时间的热轧批量调度问题, 进一步考虑交货期要求, 探讨了调整时间与交货期之间的性质特征, 并以最小化总机器调整时间和最小化总拖期为目标, 基于进化算法框架设计了快速重排序邻域搜索多目标算法 (fast reordering neighborhood search multi-objective algorithm, FRNSM). 在算法初始阶段, 提出规格优化规则和交货时间优化规则, 对初始解进行局部优化; 邻域搜索阶段设计了基于同交货时间规格优化的快速重排序邻域搜索策略, 以优化机器调整时间和拖期; 针对问题多目标特征, 基于 Pareto 思想设计解的接受准则. 基于实际生产数据的实验结果表明, FRNSM 算法对此类问题具有很好的求解效果.

关键词: 无缝钢管; 热轧批量计划; 多目标优化; 机器调整时间; 拖期; 快速重排序搜索策略

中图分类号: TH165 文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2019.0723

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



引用格式: 汪洋, 李铁克, 王柏琳. 顺序依赖的调整时间和拖期的无缝钢管热轧批量调度算法 [J]. 控制与决策, 2021, 36(2): 505-512.

Hot-rolled batch scheduling algorithm for seamless steel tube with sequence-dependent setup times and tardiness

WANG Yang, LI Tie-ke[†], WANG Bai-lin

- (1. School of Economics and Management, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;
2. Engineering Research Center of MES Technology for Iron & Steel Production of Ministry of Education, Beijing 100083, China)

Abstract: There is a special type of machine sequence-dependent setup times existed in hot-rolled seamless steel tube production, which depends on the difference in specifications between adjacent batches, and has a linear function relationship with batch specification. For this kind of hot-rolled batch scheduling problems with sequence-dependent setup times, the constraint of order delivery requirements is further considered, and the property between adjustment time and delivery time is explored. Aiming at minimizing the total adjustment time and tardiness, a fast reordering neighborhood search multi-objective algorithm (FRNSM) is designed based on evolutionary algorithms. At initial stage of the algorithm, based on the characteristic of sequence-dependent setup times, the specification optimization rule and delivery time optimization rule are proposed to locally optimize the initial solution. At the neighborhood search stage, the fast reordering neighborhood search strategy is designed based on the specification optimization between the same delivery time to optimize the setup times and tardiness; for the problem with multiple objectives, the acceptance criteria of solution is designed based on the Pareto improvement strategy. The experimental results based on actual production data show that the FRNSM has obvious effect on solving this kind of problems.

Keywords: seamless steel tube; hot-rolled batch planning; multi-objective optimization; setup times; tardiness; fast reordering search strategy

0 引言

热轧批量调度是无缝钢管生产管理中的核心内容, 是根据生产工艺约束和客户交货时间要求对工

件进行组合形成轧批, 并对轧批排定生产顺序的过程. 无缝钢管由于规格众多, 在热轧生产时需频繁切换规格而产生特殊的机器调整时间, 调整时间值依赖

收稿日期: 2019-05-25; 修回日期: 2019-10-28.

基金项目: 国家自然科学基金项目(71231001, 71701016); 北京市自然科学基金项目(9174038); 教育部人文社会科学研究青年基金项目(17YJC630143); 中央高校基本科研业务费项目(FRF-BD-18-009A).

责任编辑: 李勇建.

[†]通讯作者. E-mail: tiekeli@ustb.edu.cn.

于相邻批量间的规格切换^[1]。此外,在当前钢铁市场环境下,客户对订单准时交货的要求较高,因此企业在编制热轧调度计划时有必要聚焦于拖期目标,以满足客户准时交货的要求。

热轧批量调度问题受到了研究人员的广泛关注。李铁克等^[2]将热轧批量调度问题归结为带软时间窗的车辆路径问题,建立单目标约束满足模型对问题求解;Pan等^[3]将热轧批量调度问题抽象为分配和排序问题,设计指派启发式和排序启发式算法求解。随着我国钢铁制造的转型升级,无缝钢管在航空、汽车、石油等行业得到广泛应用,但由于其发展时间短,目前研究成果较少。王海凤等^[4]针对无缝钢管热轧批量调度问题给出约束满足模型,利用节点互换算法求解;Tang等^[5]设计两阶段启发式邻域搜索算法求解大样本钢管热轧批量优化问题。考虑到板材与无缝钢管的热轧调度问题具有相似性,相关研究成果可以为无缝钢管研究提供借鉴和理论依据。

热轧批量调度问题将热轧机组视为一台机器,热轧批量视为工件,则可抽象为一类具有机器调整时间和拖期的单机调度问题。针对这类问题,目前很多学者从最小化(加权)拖期层面研究求解方法。Xu等^[6]提出混合进化算法,采用线性交叉算子并设计基于相似性和质量的种群更新策略;González等^[7]在混合遗传算法基础上改进邻域搜索策略,设计文化算法求解;Guo等^[8]设计改进组件模块的散点搜索算法,改进多样化生成模块、改进模块、参考集更新模块、子集生成模块和组合模块这5个模块;Chen^[9]提出基于种群的迭代变邻域下降搜索算法,每次迭代时利用新的成员更新方法生成解决方案。

上述文献考虑的调整时间并不具规律性,一般是任意值或给定的固定数值^[10],无法体现不同规格批量顺序对调整时间的影响。然而,从工艺角度来看,相邻工件间的机器调整时间往往取决于相邻工件的关键属性差别,如本文考虑的规格差异、体积差异、成分差异等等,这类问题的特点在印刷电路板组装行业、太阳能电池行业中的调度问题、船舶装配的运输车调度问题等^[11]中均有研究。本文所考虑的调整时间依赖于相邻批量(工件)的规格切换,具有函数特征^[1],具有不同于一般顺序依赖的机器调整时间的特殊性质。文献[1]从无缝钢管生产中提炼了这类函数特征,但是并未考虑订单交货期要求,而交货期是管理人员排产的重要考虑因素,也是影响下游客户满意度的关键要素。因此,有必要去探讨规格顺序依赖的机器调

整时间下的单机调度问题性质,进而结合性质设计求解算法。

由于机器调整时间关系到生产效率,有必要研究同时优化机器调整时间和拖期的方法,但是针对这类多目标的单机调度问题目前可供直接参考的文献较少。对于一般多目标方法的研究可从不同角度给出求解多目标问题的思路和方法。Jia等^[12]针对热轧批量调度问题,建立了奖金收集车辆路径问题的多目标模型,以最小化相邻板坯的宽度、厚度与硬度的跳跃惩罚和最大化板坯编入轧制计划为目标,设计了Pareto最大最小蚁群算法求解;de Siqueira等^[13]针对混合流水车间的调度问题,以最小化总完工时间和总加权拖期为目标,设计了多目标变邻域搜索元启发式算法;Gong等^[14]针对多目标车间调度问题设计了有效的文化算法,提出一种混合交叉算子提升搜索效率和避免算法早熟收敛。上述文献为顺序依赖的机器调整时间和交货期的单机调度问题提供了有效的调度方法。由以上调度方法可知,遗传算法、邻域搜索等智能优化算法能够有效解决此类问题,为本文的算法设计提供了依据。

综上,本文将无缝钢管热轧批量调度转化为一类具有规格顺序依赖的机器调整时间和考虑拖期的单机调度问题,研究的重点在于结合问题的特点,探讨考虑最小化机器调整时间和拖期双目标调度问题的求解方法。在接下来的内容中,首先在分析问题特殊性的基础上,设计局部优化规则;进而以进化算法为求解框架,在其中引入局部优化规则和改进的邻域搜索策略,针对上述双目标调度问题设计基于调度规则和邻域搜索的进化算法;最后通过多组数值实验验证算法的可行性和有效性。

1 问题描述

考虑无缝钢管规格顺序依赖的机器调整时间和拖期的热轧批量调度问题可以描述如下:给定热轧钢管批量集合及其规格等信息,热轧机组在同一时刻只允许加工一个批量,且在完成一个批量加工后,需要一定的机器调整时间来加工下一批量,机器调整时间依赖于相邻轧制批量间的规格顺序。热轧批量调度问题要求确定批量的轧制序列,在满足上述约束前提下优化特定目标。考虑到无缝钢管热轧工艺的特殊性,下面将对规格顺序依赖的机器调整时间和优化目标进行详细分析。

1) 轧制规格顺序依赖的机器调整时间。

无缝钢管在热轧阶段生产时需要多种孔型系统, 每个批量所采用的孔型系统依赖于批量规格. 若相邻批量规格不同, 则需切换孔型系统并调整相关参数和热工具数量, 其切换时间与前一完工批量的规格和后续批量规格是相关的. 切换规格时机器处于停机状态, 将该段时间消耗称为调整时间, 这类调整时间由固定部分和可变部分组成. 固定部分是发生规格切换时所必须付出的时间, 而可变部分由相邻规格的跳跃差决定, 随着规格的切换呈现出一定规律性, 可以将调整时间抽象为有关相邻规格差异绝对值的线性函数^[1]. 下式为调整时间 $w_{i,k}$ 的计算公式:

$$w_{i,k} = x_{i,k} \cdot (1 - y_{i,k}) \cdot (b + a \cdot |d_k - d_i|). \quad (1)$$

其中: i 和 k 为批量编号; $x_{i,k}$ 为0-1变量, 若批量 k 紧邻 i 加工则为1, 否则为0; $y_{i,k}$ 为0-1变量, 批量 k 和 i 规格相同时为1, 否则为0; d_i 和 d_k 分别为批量 i 和 k 的规格; a 和 b 为模型参数, 依据实际情况进行设置. 在算法的执行过程中, 依据式(1)计算机器调整时间.

2) 优化目标.

当前无缝钢管市场需求下, 热轧生产具有多品种小批量特征, 调度不合理将会导致规格频繁切换, 增加机器调整时间; 此外, 当前销售订单对交货期愈加严苛. 结合以上两点, 本文考虑以下目标:

① 最小化机器调整时间: 无缝钢管具有规格顺序依赖的特点, 不同规格批量的加工顺序影响生产效率, 因此以最小化机器调整时间为目标优化加工顺序. 下式为最小化机器调整时间:

$$\min \sum_{i=1}^n (1 - z_{0i}) \cdot w_{i-1,i}. \quad (2)$$

其中 z_{0i} 为0-1变量, 当批量 i 为首个批量时为1, 否则为0.

② 最小化拖期: 在订单给定的批量交货期内交货是维系客户关系、保障市场份额的关键所在, 并且热轧阶段的批量准时交货影响后续工序(如精整或热处理)的生产进度, 因此在优化目标中考虑最小化拖期以减少拖期惩罚, 目标函数如下式所示:

$$\min \sum_{i=1}^n \max(0, c_i - dl_i). \quad (3)$$

其中: dl_i 表示批量 i 的交货期; c_i 表示批量 i 的完工时间, 计算方式为

$$c_i = \sum_{i=1}^n ((1 - z_{0i}) \cdot w_{i-1,i} + p_i), \quad (4)$$

p_i 为批量 i 的加工时间.

无缝钢管热轧批量调度需要综合考虑上述两个目标, 合理安排生产顺序, 提高生产效率.

2 算法性能分析

无缝钢管热轧的机器调整时间具有规格顺序依赖的特点, 不同顺序批量的机器调整时间不同, 针对此特点并结合交货期可以得到以下定理.

定理1 给定序列 π_j , 对同规格连续批量采用最早交货时间优先规则(earliest due date, EDD)^[15] 排序, 新序列的拖期必然不劣于原序列 π_j .

证明 假设序列 π_j 中存在至少一个具有连续相同规格批量组成的局部序列, 将其定义为 G , 共包含 t 个批量 ($1 < t < n$), 且 G 中批量顺序违反了 EDD 规则, 也就是说, G 中至少存在两个相邻批量 i 和 k , i 排在 k 之前, 而 $dl_i > dl_k$.

设 i 在 h 时开始加工, 则存在以下几种情况:

1) 当 $p_i > p_k$ 时, i 和 k 有以下几种拖期情况:

① i 和 k 都拖期: 此时 i 和 k 的拖期时间为

$$E = E_i + E_k = (t + p_i - dl_i) + (t + p_i + p_k - dl_k).$$

仅对位置 i 和 k 的批量进行调换, 则新序列的拖期值为

$$E' = E'_i + E'_k = (t + p_k - dl_k) + (t + p_i + p_k - dl_i).$$

则调换顺序后改变值为

$$\Delta = E - E' = p_i - p_k.$$

因为 $p_i > p_k$, 故 $\Delta > 0$.

② i 拖期, k 不拖期: 由于 $dl_i > dl_k$, 且 k 在 i 后加工, 不存在该情况.

③ i 不拖期, k 拖期: k 的拖期时间为

$$E = E_k = t + p_i + p_k - dl_k.$$

交换 i 和 k 后,

$$E' = E'_i + E'_k = (t + p_k - dl_k) + (t + p_i + p_k - dl_i).$$

则

$$\Delta = E - E' = dl_i - (p_k + t).$$

由于 i 不拖期, 故 $dl_i > p_i + t$, 又 $p_i > p_k$, 故 $dl_i > p_k + t$, 所以 $\Delta > 0$.

④ i 和 k 都不拖期: 由于 i 和 k 都不拖期, 可知 $dl_i > dl_k \geq p_i + p_k + t$, 因为交换顺序后 i 和 k 总完工时间不变, 故都未产生拖期.

2) 当 $p_i < p_k$ 和 $p_i = p_k$ 时, 证明过程与1)相似, 此处不再赘述. 综上, 相同规格批量内利用 EDD 规则, 排序后拖期值不劣于原序列拖期值. \square

对于机器调整时间目标, 由于无缝钢管热轧机器调整时间具有规格顺序依赖特征, 吴子轩等^[1]提出了机器调整时间最优规则, 并给出以下引理.

引理1 若仅考虑最小化机器调整时间,则最小轧机调整时间排序规则(minimum rolling mill setup time rule, MRMST)可以得到最优调度解。

基于此引理,提出批量间规格距离最短规则:针对相同交货期的连续批量,依据规格距离确定批量顺序.该规则具有如下定理所述的局部调整时间最优性:

定理2 对序列 π_j 中交货时间相同的连续批量采用批量间规格距离最短规则排序,新序列的调整时间必然不劣于 π_j ,称其为局部调整时间最优。

证明 批量的拖期值为

$$E_i = \max\{0, c_i - dl_i\} = \max\{0, c_{i-1} + w_{i-1,i} + p_i - dl_i\}.$$

因为 p_i 和 dl_i 都为常量,且只调整当前连续批量间的顺序,所以连续批量外的上一相邻批量的完工时间也为常量,因此拖期值仅与 $w_{i-1,i}$ 有关.本规则的目的是缩短连续批量内所有 $w_{i-1,i}$ 值以及达到局部调整时间最优.由式(4)可知连续批量内的 c_{i-1} 在缩小,故顺序的调整不会增加拖期值,因此可转化为对机器调整时间的优化。

现假设不同交货期的相邻批量组为 G_1 和 G_2 ,记 G_1 中最后一个批量规格为 d_1 , G_2 中存在 k 个不同的规格(G_2 内只有一个规格时无需排序规则,相同规格时可以转化为不同规格进行排序,故此无需考虑这两种情况).对 G_2 中规格按升序排序(降序排序情况一样),所得规格序列为 $H = \{d_{21}, d_{22}, \dots, d_{2k}\}$,记 G_2 中调整时间为 C_{setup} .对如下情况进行分析:

1) $d_{21} \geq d_1$:在 G_2 中, $d_{21} - d_1 < d_{22} - d_1 < \dots < d_{2k} - d_1$,故将规格为 d_{21} 的批量作为首个批量,按规格距离最小规则可知剩余批量按规格顺序 $H = \{d_{22}, \dots, d_{2(k-1)}, d_{2k}\}$ 排序,则

$$C_{\text{setup}} = (d_{21} - d_1) + (d_{22} - d_{21}) + \dots + (d_{2k} - d_{2(k-1)}) = d_{2k} - d_1.$$

由引理1知机器调整时间最小。

2) $d_{2k} \leq d_1$:与1)证明过程相似,批量以规格降序规则排序,由引理1知此排列顺序为最优。

3) $d_{21} < d_1 < d_{2k}$:由引理1知,利用升序/降序规则的批量机器调整时间最小,故 G_2 中批量以 $H = \{d_{21}, d_{22}, \dots, d_{2k}\}$ 顺序排序,则

$$C_{\text{setup}} = |d_{21} - d_1| + (d_{22} - d_{21}) + \dots + (d_{2k} - d_{2(k-1)}) = d_1 - d_{21} + d_{2k} - d_{21}.$$

以批量间规格距离最短规则重新排序为 $H' = \{d'_{21}, d'_{22}, \dots, d'_{2k}\}$,故

$$C'_{\text{setup}} = |d'_{21} - d_1| + |d'_{22} - d'_{21}| + \dots + |d'_{2k} - d'_{2(k-1)}|,$$

所以

$$C'_{\text{setup}} < |d_{21} - d_1| + |d_{22} - d_{21}| + \dots + |d_{2k} - d_{2(k-1)}| < |d_{21} - d_1| + (d_{22} - d_{21}) + \dots + (d_{2k} - d_{2(k-1)}),$$

故 $C'_{\text{setup}} < C_{\text{setup}}$. □

3 求解算法

3.1 求解策略

本文研究的无缝钢管热轧批量调度问题是一类具有机器调整时间和交货期约束的单机调度多目标优化问题,如引言所述,智能优化算法是求解此类问题的有效途径^[6-9].进化算法(evolutionary algorithm, EA)是一种基于生物进化思想的智能优化算法,具有较高的鲁棒性和广泛的实用性,对于求解复杂组合问题具有较好的求解效果^[6].本文以EA为主体框架,设计了快速重排序邻域搜索多目标算法(fast reordering neighborhood search multi-objective algorithm, FRNSM).FRNSM基于定理1和定理2,设计了两种优化规则,并提出快速重排序邻域搜索策略,具体求解框架如图1所示。

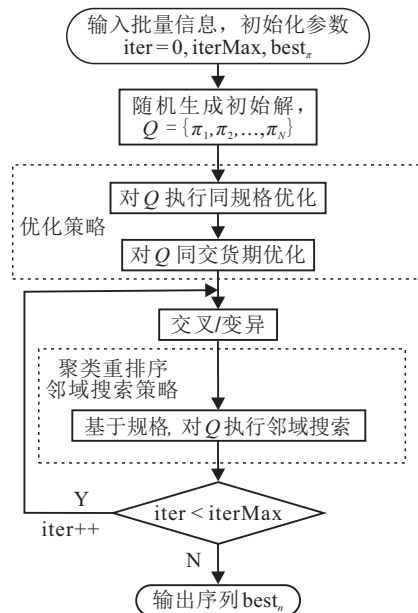


图1 算法流程

3.2 算法设计

3.2.1 编码方式

无缝钢管热轧批量调度的解是批量构成的序列,采取十进制的序列编码方式.例如,有10个待排产批

量的序列为 $3 \rightarrow 10 \rightarrow 8 \rightarrow 4 \rightarrow 9 \rightarrow 2 \rightarrow 1 \rightarrow 7 \rightarrow 6 \rightarrow 5$, 则对应的编码为 $\pi = [3, 10, 8, 4, 9, 2, 1, 7, 6, 5]$.

3.2.2 初始解生成

算法进化对初始解具有较强依赖性, 初始解质量影响算法进化效率和优化效果. 本文算法中首先利用最早交货期优先规则 (earliest due date, EDD) 形成序列 π_1 , 为了保持种群多样性, 采用随机方式生成 $N - 1$ 条序列 $\pi_2, \pi_3, \dots, \pi_{N-1}, \pi_N$, 构成初始种群 $Q = \{\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_{N-1}, \pi_N\}$.

3.2.3 局部优化规则

本文考虑规格切换的调整时间和拖期具有局部最优性质 (定理1和定理2), 基于性质设计了两类局部优化规则对初始解局部优化.

规则1 对于染色体 π_i 中具有相同规格的连续批量, 采用EDD规则进行重新排序.

规则2 给定序列 π_i , 若存在交货时间相同的连续批量, 则在该连续批中选择与前一完工批量规格距离最小的批量作为连续批的首个加工批量, 连续批内其余批量依次按距离最短规则进行排序.

3.2.4 交叉和变异

交叉和变异操作是进化算法的基础步骤, 目前存在多种方式. Kellegöz等^[6]的实验表明, PBX交叉方式在求解带拖期的单机调度问题中具有最优效果, 故本文算法将其作为交叉算子. 变异操作采用单条染色体随机交换不同位置的方式进行. 在交叉和变异操作中, 引入Pareto最优原则确保染色体的更新.

3.2.5 邻域搜索

邻域搜索一般采用交换和插入算子, 其对算法进化具有扰动作用, 但进化速度慢, 影响算法效率. 本文的无缝钢管热轧机器调整时间依赖于批量序列中规格顺序, 为了优化机器调整时间, 可以将同规格的批量集中轧制, 基于此思路设计了快速重排序邻域搜索策略. 在染色体 π_i 中, 以总拖期时间非增为约束条件, 依次搜索后续批量中与当前规格相同的批量并将其插入, 如果机器调整时间优化则更新, 直到批量重新排序完成后结束算法. 快速重排序邻域搜索在迭代过程中只搜索相同规格批量, 无需遍历所有批量, 大大减少了无用搜索消耗, 降低了算法搜索时间和调整时间, 使候选解快速向最优解逼近.

3.2.6 选择算子与适应度函数

本问题考虑最小化机器调整时间和拖期目标, 算法进化时需保持两个目标间的均衡. 因此, 为了在算法向最优解进化的同时确保解的质量, 采用父子锦标赛

方法设计选择算子, 并基于Pareto改进思想, 将机器调整时间和拖期 (式(2)、(3)) 作为适应度函数, 若父代被子代所支配, 则将父代个体替换为子代. 具体说明如下: 基于Pareto改进的选择算子, 若子代总调整时间和拖期均不大于父代, 且至少有一个适应度 (目标值) 小于父代, 则选择子代个体, 否则保留父代个体.

3.2.7 算法停止准则

算法停止准则为最大迭代次数, 算法运行到预先设定的最大迭代次数时终止搜索, 输出种群中的全局最优个体.

3.2.8 算法步骤

step 1: 初始化算法参数, 生成 $N \times m$ 维的初始种群 $Q = \{\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_{N-1}, \pi_N\}$.

step 2: 对 Q 中的染色体局部优化, 执行同规格交货时间优先规则和批量间规格距离最短规则.

step 3: 对 Q 执行交叉和变异操作以及快速重排序邻域搜索策略.

step 4: 判断终止条件是否成立, 若成立, 跳至 step 5; 否则, 跳至 step 3.

step 5: 记全局最优解为 $Best_{seq}$, 判断 π_i 是否为 Pareto 解, 如果成立, 则更新全局最优解并跳至 step 6; 否则, 跳至 step 3.

step 6: 输出 $Best_{seq}$, 算法结束.

4 实验数据

4.1 实验设计

为检验FRNSM算法在求解本文问题上的有效性, 基于某无缝钢厂实际批量数据设计了数值实验. 该无缝厂以周 (7天) 作为热轧批量计划的制定周期, 故选取一周的批量数据, 采用人工方式生成10组实验数据, 如表1所示. 批量属性主要包括批量ID、轧制规格、轧制支数、交货期等, 其中批量钢管数量变化范围为 [50, 250]. 设置算法种群大小为40, 迭代次数为100, 交叉概率为0.4, 变异概率为0.6; 调整时间模型参数值为 $a = 0.1$, $b = 1$. 钢厂中机器调整时间一般用分钟 (min) 计算, 交货期用天 (day) 计算, 因此在计算目标函数时转化为同一计量单位: min.

表1 基础数据参数组合

编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
批量	40	50	60	65	70	80	90	100	120	150
规格	10	15	15	20	20	25	25	30	35	40

对比算法设置如下:

1) 本文研究的无缝钢管热轧批量调度问题是考虑最小化机器调整时间和拖期的单机调度问题, 因此

将文献[7]的MA算法作为对比算法. 文献[7]并未考虑规格顺序依赖特点,且只考虑了最小化拖期的单一目标,因此对MA做了改进,引入了本算法中Pareto解的接受准则,本文中将其命名为IMA.

2) 文献[6]针对考虑批量拖期的单机调度问题提出一种混合进化算法(HEA),进化算法是求解单机调度类问题的经典算法,故将其作为对比算法. 同样对HEA进行改进,设计了多目标的Pareto解的接受准则,在本文中将其命名为IHEA.

3) 文献[13]和文献[14]研究多目标车间调度问题,背景与本文具有相似性,故将文献[13]的MOVNS

算法和文献[14]的EMA算法作为对比算法.

上述算法使用Visual C#编写,在Microsoft. Net Framework 3.5的软件环境下编译,在硬件环境为Intel Core i5-3470 CPU/3.20 GHz/6 GB/Window 7的计算机上实现.

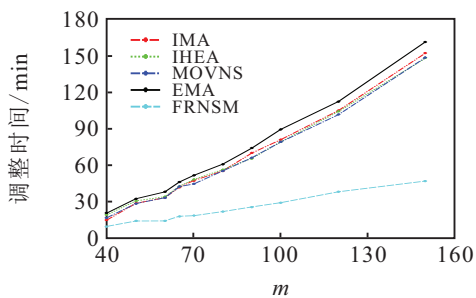
4.2 实验结果与分析

针对10种不同参数组合的算例,分别用5种算法进行求解,每个算例独立运行10次;平均值是多目标优化算法在数据实验中的常用指标,选取所有算例非支配解中各个目标的平均值作为目标函数值. 实验结果如表2所示.

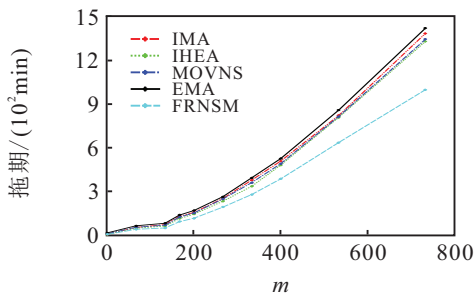
表2 算法对比实验结果

编号	IMA		IHEA		MOVNS		EMA		FRNSM	
	调整时间	拖期	调整时间	拖期	调整时间	拖期	调整时间	拖期	调整时间	拖期
1	15.37	7.69	19.66	7.53	17.24	11.18	21.05	16.72	10.12	6.35
2	29.01	54.63	31	49.4	28.81	55.6	32.74	65.64	14.52	41.52
3	33.68	74.91	34.43	64.16	33.56	69.4	38.34	82.76	14.6	50.57
4	42.21	130.37	42.94	115.16	42.66	124.92	46.42	138.73	18.42	93.44
5	47.68	157	48.48	145.31	44.86	153.17	51.88	169.75	18.86	117.1
6	55.53	252.52	56.66	233.73	55.52	248.98	61.06	264.62	22.24	193.13
7	70.13	378.99	65.78	336.27	66.24	361.32	74.11	394.35	26.02	279.69
8	81.11	508.73	79.3	481.19	79.16	490.68	89.48	525.51	29.53	386.43
9	105.06	819.72	104.2	807.2	101.64	812.95	112.4	856.53	38.45	634.74
10	152	1382.48	147.88	1327.36	148.38	1341.94	161.2	1417.67	47.23	996.59
平均值	63.18	376.7	63.03	356.73	61.81	367.01	68.87	393.23	24	279.96

结合表2数据,就5种算法在不同规模数据下的机器调整时间和拖期目标做了对比图,如图2所示,横轴表示批量数量,纵轴表示目标函数.



(a) 调整时间



(b) 拖期

图2 目标函数对比

结合表2和图2可以得出如下结论:

1) 针对不同规格和数量的批量数据,本算法在求解机器调整时间和拖期上都要优于对比算法,能够保证两个目标同时优化. 这主要是因为:

- ① 初始解生成时,本算法采用EDD生成一条染色体,其余染色体采用随机方式生成,对比算法全部使用随机方式生成具有一定的个体优越性;
- ② 本算法结合了定理1和定理2,执行过程中利用问题性质特点保证种群中个体的局部优化;
- ③ 基于定理2设计了同规格快速重排序邻域搜索策略,快速搜索相同规格批量,保证算法快速收敛和优化.

2) 在机器调整时间上,由图2(a)可知FRNSM曲线一直位于对比算法曲线下方,并且IMA、IHEA、MOVNS和EMA曲线的机器调整时间呈较快上升趋势,但FRNSM曲线保持平稳上升. 本算法基于定理2针对相同交货期的规格进行机器调整时间的局部优化并采取同规格快速重排序邻域搜索策略,随着批量数量和规格的增加,具有同一交货期的批量和规格也

相应增加,可以体现出这一性质针对机器调整时间的优化效果更加明显.

3) 针对拖期目标,由图2(b)可知FRNSM曲线一直位于IMA、IHEA、MOVNS和EMA曲线下方,且均随批量数量的增加保持较快上升趋势.这主要是因为热轧工序中机器加工能力受限,当超过最大加工临界点时拖期会呈大幅增加趋势,这也说明在制定热轧批量计划时,需要依据机器加工能力合理设计当前轧

制计划周期内的批量数量,否则会影响后续工序的生产进程.

选取规模为 $\{50 \times 15, 65 \times 20, 80 \times 25, 100 \times 30, 150 \times 40\}$ 的5组算例的非支配解做前沿解的分布图,如图3所示.从图3可以看出,FRNSM在不同规模下都要优于IMA、IHEA、MOVNS和EMA,且在多数规模下均存在较多非支配解数量,可以为决策者提供多种不同的解决方案.

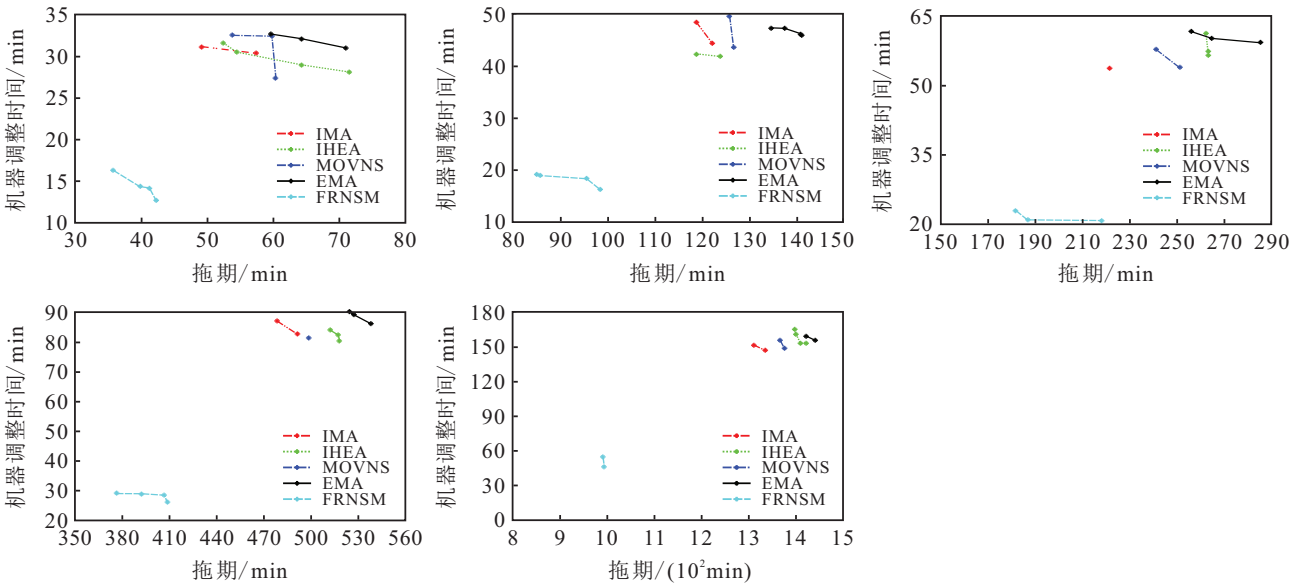


图3 前沿解分布图

为了计算本文算法和对比算法求解问题的效率,给出每种算法在10次算例中的平均运行时间,如表3所示,其中计算单位为s.

表3 计算时长

编号	IMA	IHEA	MOVNS	EMA	FRNSM
1	127.53	29.53	50.57	49.36	93.34
2	189.32	38.55	65.14	59.84	136.48
3	365.00	45.92	82.45	78.49	174.14
4	422.20	49.48	86.60	79.81	202.69
5	586.57	54.71	95.23	85.67	222.71
6	808.89	62.18	110.90	99.67	266.46
7	907.72	67.66	118.69	104.13	322.58
8	1425.06	80.32	140.90	127.35	368.96
9	2823.16	114.50	199.19	174.63	643.88
10	4904.57	124.56	217.91	193.18	796.40
平均值	1256.002	66.741	116.758	105.213	322.764

由表3可知,FRNSM的求解效率高于IMA,但是低于IHEA、MOVNS和EMA,主要因为FRNSM基于规格依赖特点在全邻域中执行同规格搜索,运算复杂度较高,但是该计算时间在批量计划制定过程中属于可接受范围,不影响无缝钢管的生产计划.

5 结 论

热轧批量调度是无缝钢管生产管理中的重要环节,热轧过程的机器调整时间具有特殊性,依赖于相邻批量的规格差异.文中分析了该特点,结合拖期约束,对不同加工顺序下调整时间和交货期间的关系进行了性质解析,并给出了局部最优性质,基于性质特征设计了针对此问题特点的局部优化规则和快速重排序邻域搜索策略,建立了以最小化机器调整时间和拖期为目标快速重排序邻域搜索多目标算法.结合调整时间和拖期优化规则对初始解进行优化,基于同交货时间规格优化的快速重排序策略在邻域搜索阶段对调整时间和拖期分别进行优化,同时考虑到本文的多目标特性,设计了基于Pareto解的接受准则.数据仿真实验验证了模型和算法的可行性和有效性.实验结果表明,不同问题规模下该算法能得到优化的调度方案,能够为无缝钢管热轧生产计划提供指导.

参考文献(References)

[1] 吴子轩,李铁克,张文新,等.考虑机器检修的热轧钢管批量计划方法[J].控制理论与应用,2017,34(9):

- 1250-1259.
(Wu Z X, Li T K, Zhang W X, et al. Methods of hot-rolled batch planning for seamless steel tube with machine maintenance[J]. *Control Theory & Applications*, 2017, 34(9): 1250-1259.)
- [2] 李铁克, 郭冬芬. 基于约束满足的热轧批量计划模型与算法[J]. *控制与决策*, 2007, 22(4): 389-393.
(Li T K, Guo D F. Model and algorithm for hot-rolling batch plan based on constraint satisfaction[J]. *Control and Decision*, 2007, 22(4): 389-393.)
- [3] Pan Q K, Chen Q D, Meng T, et al. A mathematic model and two-stage heuristic for hot rolling scheduling in compact strip production[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2017, 48: 516-533.
- [4] 王海凤, 薛美美, 李铁克. 基于约束满足的热轧无缝钢管生产排序模型与算法[J]. *冶金自动化*, 2013(3): 39-42.
(Wang H F, Xue M M, Li T K. Modeling and algorithm of hot rolling seamless steel tube production scheduling based on constraint satisfaction[J]. *Metallurgical Industry Automation*, 2013(3): 39-42.)
- [5] Tang L X, Huang L. Optimal and near-optimal algorithms to rolling batch scheduling for seamless steel tube production[J]. *International Journal of Production Economics*, 2006, 105(2): 357-371.
- [6] Xu H Y, Lü Z P, Yin A H, et al. A study of hybrid evolutionary algorithms for single machine scheduling problem with sequence-dependent setup times[J]. *Computers & Operations Research*, 2014, 50: 47-60.
- [7] González M A, Vela C R. An efficient memetic algorithm for total weighted tardiness minimization in a single machine with setups[J]. *Applied Soft Computing*, 2015, 37: 506-518.
- [8] Guo Q X, Tang L X. An improved scatter search algorithm for the single machine total weighted tardiness scheduling problem with sequence-dependent setup times[J]. *Applied Soft Computing*, 2015, 29: 184-195.
- [9] Chen C L. Iterated population-based VND algorithms for single-machine scheduling with sequence-dependent setup times[J]. *Soft Computing*, 2019, 23(11): 3627-3641.
- [10] Ángel-Bello F, Álvarez A, Pacheco J, et al. A single machine scheduling problem with availability constraints and sequence-dependent setup costs[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2011, 35(4): 2041-2050.
- [11] Allahverdi A. The third comprehensive survey on scheduling problems with setup times/costs[J]. *European Journal of Operational Research*, 2015, 246(2): 345-378.
- [12] Jia S J, Yi J, Yang G K, et al. A multi-objective optimisation algorithm for the hot rolling batch scheduling problem[J]. *International Journal of Production Research*, 2013, 51(3): 667-681.
- [13] de Siqueira E C, Souza M J F, De Souza S R. A multi-objective variable neighborhood search algorithm for solving the hybrid flow shop problem[J]. *Electronic Notes in Discrete Mathematics*, 2018, 66: 87-94.
- [14] Gong G L, Deng Q W, Chiong R, et al. An effective memetic algorithm for multi-objective job-shop scheduling[J]. *Knowledge-Based Systems*, 2019, 182: 104840.
- [15] Bilge Ü, Kurtulan M, Kıracı F. A tabu search algorithm for the single machine total weighted tardiness problem[J]. *European Journal of Operational Research*, 2007, 176(3): 1423-1435.
- [16] Kellegöz T, Toklu B, Wilson J. Comparing efficiencies of genetic crossover operators for one machine total weighted tardiness problem[J]. *Applied Mathematics & Computation*, 2008, 199(2): 590-598.

作者简介

汪洋(1992—), 男, 博士生, 从事智能调度的研究, E-mail: 1297791019@qq.com;

李铁克(1958—), 男, 教授, 博士生导师, 从事先进制造管理等研究, E-mail: tiekeli@ustb.edu.cn;

王柏琳(1983—), 女, 副教授, 博士, 从事智能优化算法等研究, E-mail: wangbl@ustb.edu.cn.

(责任编辑: 齐 霖)