

## 考虑机器检修的热轧钢管批量计划方法

吴子轩, 李铁克<sup>†</sup>, 张文新, 王柏琳

(北京科技大学 东凌经济管理学院, 北京 100083; 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:** 本文从无缝钢管生产实际中提取并定义了周期性机器检修环境下的钢管热轧批量计划问题, 基于无缝钢管生产的特殊性, 将该问题抽象为一类考虑机器检修和机器调整时间的单机调度问题, 并建立了以最小化机器闲置和机器调整时间为目标的数学模型. 针对批量间的机器调整时间取决于钢管规格的变化这一特性, 提出了最小调整时间排序规则, 证明了该规则在不考虑检修计划时具有最优性. 进而, 以此为基础建立了循环求解框架, 并设计了两阶段启发式算法. 基于实际生产数据设计了多种问题规模的实验, 验证了算法的有效性, 并从实际应用角度对结果进行了分析.

**关键词:** 无缝钢管; 热轧批量计划; 机器检修; 机器调整时间; 启发式算法

**中图分类号:** TP273      **文献标识码:** A

## Methods of hot-rolled batch planning for seamless steel tube with machine maintenance

WU Zi-xuan, LI Tie-ke<sup>†</sup>, ZHANG Wen-xin, WANG Bai-lin

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

**Abstract:** In this paper, a hot-rolled batch planning problem for seamless steel tube was extracted and defined from actual production under the condition of periodic machine maintenance. Due to the particularity of the seamless steel tube production, the problem was abstracted into a single machine scheduling problem with machine maintenance and setup times, and its mathematical model was established to minimize the total idle time and total setup time. Based on the feature that the setup time between batches depends on the specifications of steel tubes, a minimum rolling mill setup time rule was proposed, and it was proved to be optimal when the maintenance plan is not considered. In addition, a solving strategy and a cyclic solving architecture were furthermore established based on it, and a two-stage heuristic algorithm was designed. Finally, based on actual production data, experiments of different scale were carried out to evaluate the performance of the algorithm. The experimental results show that the algorithm can get a near optimal solution in a short time. Moreover, these results had been accordingly analyzed from practical point of views as well.

**Key words:** seamless steel tube; hot-rolled batch planning; machine maintenance; setup times; heuristic algorithm

### 1 引言(Introduction)

热轧无缝钢管作为一种主要钢材被广泛应用于工业制造领域, 其通常被按照外径、壁厚、钢种、长度等参数划分成不同的规格, 并根据合同要求采用不同的工艺成批量生产. 过去由于工艺的限制, 钢厂多采用单品种大批量的方式组织生产, 往往造成库存积压或拖期交付. 随着近年来先进设备的引进, 生产技术得到很大提升, 在技术上能够实现多品种变批量生产. 但是, 当前钢铁企业多采用粗放型的生产管理模式,

在进行生产组织时并未能与先进的生产技术相结合. 因此, 如何根据最新的先进生产技术, 设计科学的生产管理模式, 制定高效的生产计划, 这成为了无缝钢管热轧生产管理所面临的且亟需解决的新课题.

热轧批量计划问题吸引了较多研究者的关注<sup>[1-6]</sup>, 近年来的研究多见于板材等热点钢材, 其中贾树晋<sup>[1]</sup>和Liu<sup>[4]</sup>将热轧批量计划问题归结为多目标奖金收集车辆路径问题, 杨业建<sup>[2]</sup>将之归结为不确定旅行商数的多旅行商问题. 王海凤<sup>[5]</sup>和Tang<sup>[6]</sup>从生产调度

收稿日期: 2017-03-06; 录用日期: 2017-06-12.

<sup>†</sup>通信作者. E-mail: tiekeli@163.com.

本文责任编辑: 张化光.

国家自然科学基金项目(71701016, 71231001), 中央高校基本科研业务费项目(FRF-BD-16-006A), 北京市自然科学基金项目(9174038), 教育部人文社会科学青年基金项目(17YJC630143)资助.

Supported by National Natural Science Foundation of China (71701016, 71231001), Fundamental Research Funds for Central Universities (FRF-BD-16-006A), National Natural Science Foundation of Beijing (9174038) and Humanity and Social Science Youth foundation of Ministry of Education of China (17YJC630143).

的角度研究了钢管热轧批量计划问题, 研究认为在机器设置时间序列相关的前提下, 热轧批量应当被合理排序生产. 其中, 文献[5]在假设组批完成的前提下, 以规格跳跃惩罚最小为目标, 基于邻域搜索的思想设计了一种节点互换算法解决批量排序问题. 文献[6]以最小化最大完工时间为目标, 针对大样本优化设计了一种两阶段启发式邻域搜索算法. 上述研究打下了很好的理论基础, 对本文具有参考价值.

在无缝钢管生产中, 热轧工序是生产的关键, 它既包含了无缝钢管生产工艺中最核心的技术, 也决定了整个作业区的生产节奏和生产能力. 热轧工艺是在再结晶温度以上进行的轧制, 具有高温、高速、高磨损的特点, 因此, 定期的机器检修是钢厂普遍采取的一种设备管理方式, 具体包括对轧制机组进行预防性维护和热工具更换等. 因此, 有必要根据机器检修计划进行批量计划, 但上述研究均未考虑这点. 由于热轧工序由热轧机组完成, 全过程连续无等待, 生产线平衡匹配, 批量排列排序加工, 因此可以把热轧机组视为单台机器, 把批量视为工件, 这样, 本文问题可抽象为一种考虑机器检修的单机调度问题.

文献[7-11]是目前针对考虑周期性检修计划的单机调度问题的典型研究. 文献[7]研究了带有可用性约束和序列相关设置成本的单机调度问题, 建立了考虑周期性机器检修的混合整数规划模型. 文献[8]进一步完善了文献[7]的模型并针对问题提出一种适用更大样本规模的启发式算法, 算法将求解过程分为插入阶段和序列优化阶段进行, 该文献对本文问题的求解思路具有借鉴意义. 文献[9]研究了在固定检修计划下的单机调度最佳作业排序问题. 文献[10]和文献[11]以最小化最大完工时间为目标研究了带有周期性检修计划的单机调度问题, 并提出了启发式算法解决问题. 此外, 文献[12]针对圆钢热轧批量调度问题, 考虑了机器检修对生产连续性的影响, 建立了多目标的整数规划模型. 文献[13]针对考虑机器设置时间和成本的单机调度问题进行综述, 具有较大参考价值. 上述文献对本文具有重要的借鉴价值, 但由于热轧钢管生产工艺复杂, 存在多种轧制规格切换和集约化生产的需求, 且经典研究文献所进行实验的样本规模普遍较小, 已有研究成果很难直接应用在本文所研究的批量计划的制定中.

尽管周期性机器检修计划是热轧生产管理的重要内容, 也是热轧钢管批量计划制定的重要影响因素, 但在作者掌握的范围内, 尚未找到直接考虑此问题的公开发表文献, 因此有针对此问题展开研究的必要性.

## 2 问题描述(Problem description)

考虑机器检修计划的无缝钢管热轧批量计划编制问题可以描述如下: 给定热轧钢管的批量集合, 根据热轧钢管生产特征, 将批量编入轧制计划周期, 使其

在保证机器的周期性检修的基础上, 优化某计划目标. 由引言中所述, 该问题等价于一类特殊的考虑周期性机器检修计划并存在规格顺序依赖的机器调整时间的单机调度问题. 下面对问题的两个特征(机器检修、调整时间)和优化目标进行描述与分析.

### 1) 周期性的检修计划.

周期性检修是由钢厂制定的, 在固定时间位、固定周期上执行的预防性设备维护. 为了明确问题, 本文将检修计划周期作为轧制计划周期, 具体定义如下:

**定义 1** 轧制计划周期(rolling plan period, RPP): 一个轧制计划周期由本次周期检修计划和从本次检修结束到下次检修计划开始前的机器可生产时间组成.

### 2) 规格顺序依赖的机器调整时间.

在钢管生产中, 机器调整时间依赖于相邻批量的规格顺序. 根据轧制规程要求, 轧制不同规格钢管前需要为连轧和张减定径机组设置不同的孔型系统, 并涉及机器参数的设置、机架数量的增减和热工具的准备工作, 在以往的技术条件下需要付出较长的停机时间和设置成本. 目前以某大型国有钢厂新建产线所引进的新热轧机组为代表的钢管轧制技术, 能够根据生产需求实现部分机架的快速装卸和机器参数的数控在线设置, 进而使得轧制计划周期内生产更多规格批量成为可能. 热轧机组的机器调整时间在实际生产中通常由固定和可变两部分组成. 固定部分是发生规格切换所必须付出的时间, 可变部分则由相邻批量规格跳跃差决定. 例如: 批量A的工厂定义规格参数为6, 批量B的规格参数为8, 若先生产A再生产B, 它们之间所需的调整时间为 $\Delta t = (0.1 \times |6 - 8| + 1) \times 30 = 1.2 \times 30 = 36$ 分钟, 若A与B同为规格6, 则调整时间为零.

基于上述分析, 本文给出规格切换和批量加工时间的定义.

**定义 2** 规格切换(specification changeover, SC): 当两个相邻批量的规格相异时发生规格切换, 轧制机组需要做出技术调整并产生切换时间, 规格差异是将规格参数转化为数字形式表示后求绝对差值的结果.

**定义 3** 批量加工时间(batch processing time, BPT): 一个完整的批量加工时间由机器调整时间(SETUP)和批量内所有钢管总轧制时间组成.

RPP和BPT的关系如图1所示.

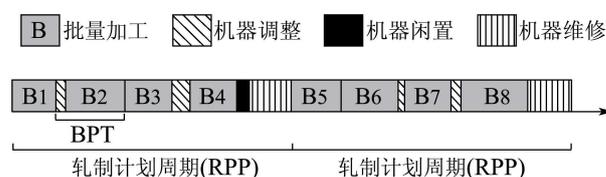


图1 RPP和BPT示意图

Fig. 1 Diagram of RPP and BPT

3) 问题优化目标.

考虑到机器检修计划和机器调整时间对生产调度的影响, 本文将考虑以下两个目标:

① 最小化机器闲置时间. 对于不考虑机器检修的批量计划问题, 机器可以连续利用, 因此一般研究中不将其作为优化目标. 但在实际生产中, 批量只允许在检修计划以外的可加工时间段内排产, 且批量在加工过程中不允许中断, 因此批量加工计划期与各检修计划期之间可能产生机器闲置时间, 因而有必要考虑最小化机器设备的闲置时间. 图2是对3个批量B1, B2, B3进行批量计划的示意图, 由图2可知, 机器闲置时间可以通过对批量加工顺序的调整来实现优化.

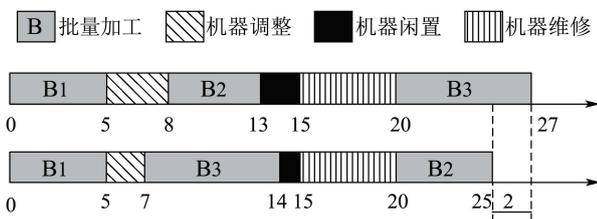


图2 考虑机器检修的批量计划示意图  
Fig. 2 Diagram of batch planning

② 最小化机器调整时间. 在无缝钢管的轧制生产中, 若相邻批量发生规格切换, 则需要对机器进行调整, 规格跳跃的幅度越大调整时间越长. 因此, 合理安排批量的生产顺序, 将有助于减少机器的调整时间.

上述两个目标虽然优化的对象不同, 但都是针对时间的优化, 为了方便模型化表述和求解, 可使用加权的方式将其转化为单一目标. 因此, 考虑机器检修的钢管热轧批量计划问题即是通过在各轧制计划周期中合理安排批量生产顺序, 达到最小化机器闲置时间和调整时间的目标, 实现产能利用最大化.

3 问题建模(Modeling)

3.1 模型假设(Model hypothesis)

对于考虑机器检修和机器调整的钢管热轧批量计划问题, 根据生产实际提出以下合理假设: 1) 仅考虑由批量间规格切换所引发的机器设备调整, 机器完成检修后的紧邻批量加工无需再进行机器调整; 2) 在生产过程中, 机器的调整成本与相邻批量钢管规格参数差的绝对值成正比. 其中, 规格差是按照工厂对尺寸差异的界定转化为数字表示; 3) 不考虑突发设备故障或现场事故等情况造成的意外生产中断.

3.2 符号定义(Notation)

为了便于模型的描述和建立, 给出符号和变量的定义如下:

1) 索引与集合.  $I$  为所有计划轧制批量编号的集合,  $I = \{1, 2, \dots, n\}$ ;  $i$  为轧制批次编号,  $i \in I$ ;  $J$  为待排产批量的集合  $J = \{1, 2, \dots, m\}$ , 其中  $m$  为批量

总数;  $j$  为批量编号,  $j \in J$ ;  $R$  为RPP的集合,  $R = \{1, 2, \dots, l\}$ ;  $r$  为RPP编号,  $l$  为RPP总数,  $r \in R$ .

2) 参数定义.  $\alpha$  为机器调整成本的权重,  $\beta$  为机器闲置时间的权重;  $d_i$  为批量  $i$  钢管的规格参数;  $s_{i' i}$  为批量  $i$  的机器调整时间,  $i'$  为  $i$  的前序批量,  $s_{i' i} = b + a \cdot |d_i - d_{i'}|$  (若  $|d_i - d_{i'}| \neq 0$  则  $b \neq 0$ , 否则  $b = 0$ );  $a \cdot |d_i - d_{i'}|$  为机器调整时间的可变部分,  $b$  为机器调整时间的固定部分.  $t_{i' i}$  为批量  $i$  的BPT,  $p_i$  为由订单给出的批量  $i$  的钢管总轧制时长,  $i'$  为  $i$  的前序批量,  $t_{i' i} = s_{i' i} + p_i$ ;  $T$  为RPP的时长,  $st_r$  为第  $r$  个RPP时段的机器闲置时间;  $c_i^r$  为从第  $r$  个RPP开始至  $r$  内批量  $i$  结束所经历的时间.

3) 决策变量.

$$x_{i' i} = \begin{cases} 1, & \text{若 } i' \text{ 是 } i \text{ 的前序,} \\ 0, & \text{否则,} \end{cases}$$

当  $i$  是某RPP首批时表示为  $x_{0i} = 1$ , 当  $i$  是某RPP末批表示为  $x_{i0} = 1$ ;

$$w_{ri} = \begin{cases} 1, & \text{若批量 } i \text{ 属于第 } r \text{ 段RPP,} \\ 0, & \text{否则.} \end{cases}$$

3.3 问题模型(Problem model)

针对问题建立以产能利用最大化为目标的混合整数规划模型, 模型具体如下:

$$\min F = \alpha \cdot \left[ \sum_{r=1}^{l-1} \sum_{i'=1}^{n-1} \sum_{i=2}^n (s_{i' i} \cdot w_{ri}) + w_{li} \cdot \sum_{i'=1}^{n-1} \sum_{i=2}^n s_{i' i} \right] + \beta \cdot \left( T - \sum_{i'=1}^{n-1} \sum_{i=2}^n (t_{i' i} \cdot w_{ri}) \right), \quad (1)$$

$$\text{s.t. } \sum_{i=1}^n x_{0i} \cdot w_{ri} = 1, \quad \forall r \in \mathbb{R}, \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^n x_{i0} \cdot w_{ri} = 1, \quad \forall r \in \mathbb{R}, \quad (3)$$

$$\sum_{r=1}^l \sum_{i=1}^n x_{0i} \cdot w_{ri} = l, \quad (4)$$

$$\sum_{r=1}^{l-1} \sum_{i=1}^n x_{i0} \cdot w_{ri} = l, \quad (5)$$

$$c_{i'}^r - c_i^r + (T + t_{i' i}) \cdot x_{i' i} \leq T, \quad i, i' \in I, r \in \mathbb{R}, \quad (6)$$

$$t_{0i} \cdot x_{0i} \leq c_i^r \leq T - c_{i0}^r \cdot x_{i0}, \quad i \in I, r \in \mathbb{R}, \quad (7)$$

$$x_{i' i} \in \{0, 1\}, \quad i \in I, \quad (8)$$

$$w_{ri} \in \{0, 1\}, \quad i \in I, r \in \mathbb{R}. \quad (9)$$

目标函数(1)表示最小化设备调整及最小化机器空闲以达到产能利用最大化的目标. 其中

$$\sum_{r=1}^{l-1} \sum_{i'=1}^{n-1} \sum_{i=2}^n (s_{i' i} \cdot w_{ri}) + w_{li} \cdot \sum_{i'=1}^{n-1} \sum_{i=2}^n s_{i' i}$$

表示最小化机器调整时间,

$$\sum_{r=1}^{l-1} (T - \sum_{i'=1}^{n-1} \sum_{i=2}^n (t_{i'i} \cdot w_{ri}))$$

表示最小化机器闲置时间,  $\alpha$ 和 $\beta$ 分别是机器调整时间和机器设置时间的权重.

约束(2)–(5)表示每个检修计划开始前及结束后有且仅有一个批量被加工,且在批量计划内总共包含 $l$ 段RPP;约束(6)和约束(7)表示一个RPP的总时间不超过 $T$ ,且轧制过程具有连续性;约束(8)和约束(9)为整数变量的取值约束.

#### 4 问题分析(Problem analysis)

本文是一种考虑机器检修和顺序依赖调整时间的单机调度问题,其中仅考虑周期性机器检修计划的单机调度问题是本文问题的一个特例,文献[11]证明它属于强NP难问题.因此,本文研究的问题也属于NP难问题,此类问题难以在多项式时间内求得问题的最优解.在实际生产中,精确算法极难求此类问题<sup>[7–8]</sup>,相关研究多根据问题特征采用启发式算法<sup>[4–8]</sup>.

##### 4.1 问题性质与求解策略(Properties and solving strategies)

由于现实中涉及规模较大且成品规格、数量各异的批量,加上问题NP难的特点,同时针对机器调整时间和空闲时间进行优化十分困难.为降低求解复杂性、提高求解效率,必须针对问题特征分解复杂的求解过程.以往研究常采用车辆路径问题的求解思路来解决问题,例如文献[4–6],但本文的问题特征有别于以往研究,本文的批量计划编制涉及多个轧制计划周期.如果将批量看作物品,将每个轧制计划周期看作箱体,由于每个批量只能属于一个轧制计划,每段轧制计划可以包含一个或多个批量,那么将批量编入轧制计划的过程就等价于一类特殊的装箱问题<sup>[16]</sup>.因此,最小化机器闲置时间和机器调整时间的目标即可转化成如何将批量合理装入轧制计划周期,使得每个轧制计划周期的可加工时间(箱体空间)得到最大化利用.贪心策略<sup>[15]</sup>是求解装箱问题的一种方式,在这种策略指导下所做出的每个选择都是当前状态下局部最优的选择.虽然基于这种策略未必总能得到全局最优解,但对于部分现实问题,基于贪心策略设计的算法往往能高效得到问题的近优解.因此,本文将采用以下策略指导求解:

**策略1** 先使某项局部目标达到最优,再优化整体目标.

**策略2** 基于已有资源,依次串行优化每个轧制计划周期,使得局部可加工时间相继得到最大化利用.

其中,策略1为初始策略,即基于特定规则将批量编入轧制计划周期,让问题取得一个局部最优解作为初始解.策略2为优化策略,即对于策略1的初始解,依次对每个轧制计划周期进行优化搜索,且根据不同阶

段的性质,优化搜索可能包含一个或多个搜索过程.

通过对机器调整时间的分析,作者设计了规则1,并且发现,当不考虑机器检修计划时,规则1能够最小化机器调整时间.详见规则1和定理1的最优性证明.

**规则1** 最小轧机调整时间排序规则(minimum rolling mill setup time rule, MRMST): 给定待排产批量集合,将集合内批量按产品规格的升序或降序排列,而后顺序填入轧制计划集合中.

**定理1** 在仅考虑机器设置时间的无缝钢管热轧批量计划中,使用MRMST能够在 $O(n \log n)$ 内得到具有最小总机器设置时间的批量计划.

**证** 给定热轧批量计划 $I = \{1, 2, 3, \dots, n\}$ ,批量计划中各个批量的完工时间为 $c_i = c_{i-1} + s_{i-1,i} + p_i (i \in I)$ ,  $c_n$ 可进一步转化为

$$\begin{aligned} c_n &= (s_{01} + s_{12} + s_{23} + \dots + s_{n0}) + \\ & (p_1 + p_2 + p_3 + \dots + p_n) = \\ & \sum_{i=2}^n s_{i-1,i} + \sum_{i=1}^n p_i, \end{aligned}$$

调整时间 $s_{i,i'} = b + a \cdot |d_i - d_{i'}|$ 是个变量,加工时间 $p_i$ 是订单给定的常量.因此,最小化机器总设置时间就是 $\min \sum_{i=2}^n s_{i-1,i}$ ,可表示成 $\min \sum_{i=2}^n |d_i - d_{i-1}|$ .显然,

$$\begin{aligned} \sum_{i=2}^n |d_i - d_{i-1}| &= \\ |d_2 - d_1| + |d_3 - d_2| + \dots + |d_i - d_{i-1}| &\geq \\ \max - \min. \end{aligned}$$

若将批量计划 $I$ 中的各批量按对应产品规格的升序或降序排列,则有 $\sum_{i=2}^n |d_i - d_{i-1}| = \max - \min$ ,即该差值数列取得最小值,等于最大和最小规格的数值之差.可得到轧制批量计划 $I$ 的总最小机器设置时间 $\min \text{Setup}_I$ .

##### 4.2 问题的求解框架(Solving framework)

根据MRMST可将总机器调整时间降为最低并在多项式时间内计算出结果,因此在批量计划时,策略1中的规则将采用规则1,这样得到的初始轧制计划集合具有最小的总机器调整时间.这种做法有助于提高初始解的质量,缩短生成计划的时间.而后采用策略2进一步调整每个轧制计划周期内批量的顺序,以降低空闲时间、提高总机器利用率,达到目标整体优化的效果.

为实现整体优化,基于上述策略可进一步设计出该问题的两阶段循环求解框架:在第1阶段,基于规则实现问题的局部最优化,得到问题的初始解;在第2阶段,设计若干个符合问题特征的搜索过程,对每个轧制计划周期进行迭代搜索.算法框架的伪代码如下,其中 $N$ 为第2阶段的搜索过程数量.

[循环求解框架]

Initialize /\*阶段1, 基于策略1产生达到局部最优的初始解\*/

While ( $n \neq N$ ) do /\*阶段2, 基于策略2进行整体优化搜索\*/

For each ( $r \in \mathbb{R}$ ) /\*针对各轧制计划周期\*/

Call searching-procedure ( $n$ ); /\*根据需要进行不同的搜索过程\*/

End For

Update solutions;

$n = n + 1$ ;

End While

### 5 求解算法(Solving algorithm)

基于第4节的分析, 本文基于两阶段算法框架, 设计了一种分阶段多过程启发式算法: 在第1阶段, 将待排产批量按照MRMST规则进行排序并编入轧制计划中, 得到具有最小总机器调整时间的初始批量计划. 在第2阶段, 执行两个搜索过程, 通过使用不同的搜索策略和利用算法性质, 在总机器调整时间稳定的前提下缩减总机器空闲时间, 最终达到目标函数的整体优化.

#### 5.1 初始排序阶段(Initial sorting phase)

初始阶段使用基于规则的排序算法(rule based sorting algorithm, RSA)进行. 首先使用MRMST将待排序批量集合进行排序, 得到总机器调整时间最小的排序批量集合. 而后将排序批量集合中的元素依次排入各轧制计划周期中, 得到初始批量计划.

算法伪代码:

Set  $r = 1$ , 从数据库中获取待排批量集合  $J$  并按规格的升序排列; /\*根据规则1进行

Set  $R_r = \emptyset$ ;

While ( $J \neq \emptyset$ ) do

If ( $t_{vi} < T - c_i^r$ ) do

Insert  $j_i$  to  $R_r$ ; Remove  $j_i$  from  $J$ ; /\*将所有排序后的批量装入轧制计划周期中\*/

Else

$r = r + 1$ , set  $R_r = \emptyset$ ;

End If

End While

初始排序阶段的复杂度主要在于执行MRMST规则,  $m$ 是批量规模, 由定理1可知其为 $O(m \log m)$ .

#### 5.2 排序优化阶段(Sorting optimization phase)

排序优化阶段基于策略2设计排序搜索算法(greedy based sequencing-improvement algorithm, GSA)对初始批量计划进行优化. GSA主要用于缩短机器空闲时间, 平衡调整时间和空闲时间的关系, 以提升总作业

时间(机器利用率), 达到优化目标函数值的目的.

GSA在优化过程中使用批量前插和批量交换两种操作. 批量前插(batch insert forward, BIF)是将属于当前轧制计划之后的某个轧制计划内的某一批量插入到当前轧制计划中最后的位置. 批量交换(batch interchange, BI)是将属于当前轧制计划内的某个批量与当前轧制计划之后的某个轧制计划内另一个批量进行轧制序号交换. BIF与BI操作的示意图如图3所示.

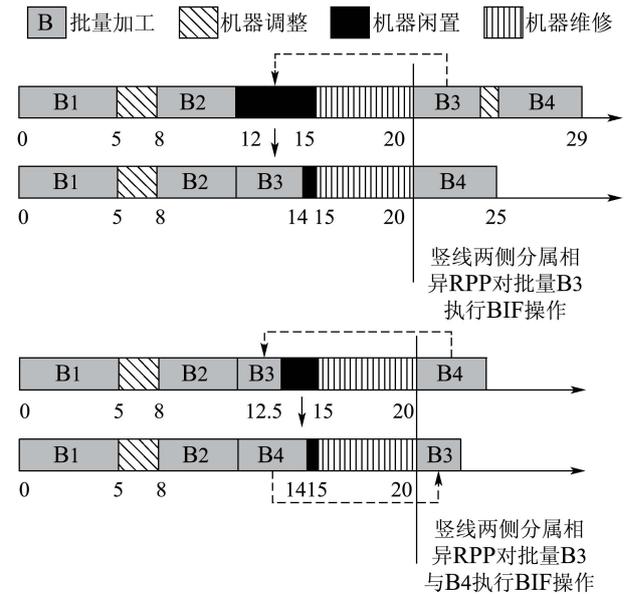


图3 BIF与BI操作示意图

Fig. 3 Diagram of BIF and BI operation

虽然无缝钢管的品类和规格繁多, 但由冶金行业的市场需求特点可知, 相当一部分的订单需求将集中在若干种常见规格的产品上, 即在一定时间范围内, 某些规格的产品可能出现大量的待排序批量. 当利用MRMST进行预排后, 很可能出现某种规格的批量群横跨两个相邻的轧制计划. 针对这一问题特征, 可进一步将排序优化阶段分为同规格排序优化和异规格排序优化两个子过程, 并嵌入求解架构中.

#### 5.2.1 同规格排序优化过程(Optimization for the same specification)

由于同规格排序优化过程是紧随阶段1展开的, 可以总结出以下两条算法性质.

**性质 1** 在基于MRMST的初始解上, 当相同规格的批量群横跨两个相邻的轧制计划时, 针对这种规格在两相邻轧制计划间执行BIF和BI操作, 总机器调整时间保持不变, 总机器设置时间可能得到优化.

**性质 2** 在基于MRMST的初始解上, 当前轧制计划最后1个批量的规格与其相邻轧制计划第1个批量规格相异时, 无需在两轧制计划间执行同规格BIF和BI操作.

因此, 为更好继承RSA阶段的排序成果, 本文利用

性质1降低排序优化对机器总调整时间的影响, 思路如下: 针对跨越检修计划期(当前的 $R_r$ 和其后的 $R_{r+1}$ )中的同规格批量, 将 $R_{r+1}$ 中大小最能填补 $R_r$ 的机器空闲的批量前插至 $R_r$ 中最后位置, 再针对两相邻轧制计划周期中的同规格批量执行迭代交换搜索操作, 目标是使 $R_r$ 的机器空闲最小. 算法伪代码如下所示:

Set  $r = 1$ , 从数据库中获取初始批量集合 $I$ 和轧制计划周期集合 $R$ ;

**While** ( $r \neq (l - 1)$ ) **do**

    计算 $R_r$ 的机器空闲时间 $st_r$ , 记 $R_r$ 中最后一个批量的规格为 $spec$ , 临时变量 $u = st_r$ 和 $v = 0$ ;

**For each**  $\{i \in R_{r+1}\}$  /\*根据性质1执行同规格批量前插搜索\*/

**If** ( $d_i == spec$  and  $st_r - p_i > 0$  and  $st_r - p_i < u$ )  
**do** {set  $u = st_r - p_i$  and  $v = i$ }

**End For**

**If** ( $v \neq 0$ ) **do**

        {将轧制编号为 $v$ 的批量前插到 $R_r$ 中最后的位置}

**For each**  $\{i \in R_r$  and  $d_i == spec\}$  /\*根据性质1执行同规格批量交换搜索\*/

        计算 $R_r$ 的机器空闲时间 $st_r$ , 记 $R_r$ 中最后一个批量的规格为 $spec$ , 临时变量 $u = st_r$ 和 $v = 0$ ;

**For each**  $\{i'' \in R_{r+1}$  and  $d_{i''} == spec\}$

**If** ( $p_{i''} > p_i$  and  $st_r + p_i - p_{i''} < u$ ) **do**

                {set  $u = st_r + p_i - p_{i''}$  and  $v = i''$ }

**End For**

**If** ( $v \neq 0$ ) **do**

            {将轧制编号为 $v$ 的批量与 $R_r$ 中轧制编号为 $i$ 的交换位置}

**End For**

**End While**

Update  $I$  and  $R$ ;

由算法伪代码可以看出, 前插搜索最多执行 $\sum_{r=1}^{l-1} |R_{r+1}|$ 次, 交换搜索最多执行 $\sum_{r=1}^{l-1} |R_r| \cdot |R_{r+1}|$ 次, 其中 $l$ 和 $|R_r|$ 是算法的输入参数, 因此同规格排序优化过程的复杂度受制于交换搜索, 为

$$O\left(\sum_{r=1}^{l-1} |R_r| \cdot |R_{r+1}|\right).$$

### 5.2.2 异规格排序优化过程(Optimization for different specifications)

异规格排序优化过程是在前一阶段批量排序的基础上, 并在保证目标函数值得到优化的前提下, 缩减当前批量计划周期 $R_r$ 中尚存的机器空闲时间. 算法将对后续所有批量展开前插搜索, 将最合适的批量前插至当前轧制计划 $R_r$ 的末尾. 异规格BIF操作的示意图

如图4所示.

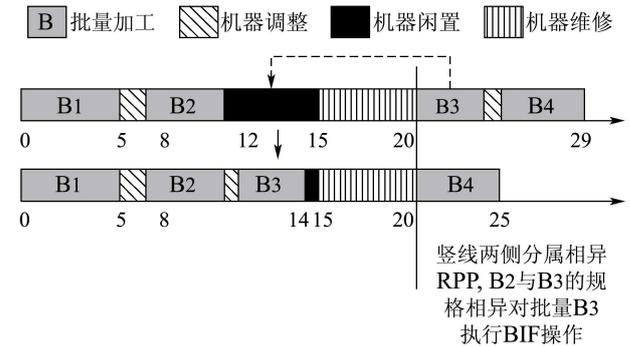


图4 异规格BIF操作示意图

Fig. 4 Diagram of BIF operation with different specifications

算法伪代码如下所示:

Set  $r = 1$ , 从数据库中获取初始批量集合 $I$ 和轧制计划周期集合 $R$

**While** ( $r \neq (l - 1)$ ) **do**

**For** ( $k = 1; k \leq 20; k ++$ ) **do**

        计算 $R_r$ 的机器空闲时间 $st_r$ , 记 $R_r$ 中最后一个批量的轧制序号为 $w$ , 临时变量 $u = st_r$ 和 $v = 0$ ;

**For each**  $i$  after  $R_r$

**If** ( $st_r - p_i - s_{wi} > 0$  &  $st_r - p_i - s_{wi} < u$ ) **do**

                set  $u = st_r - p_i - s_{wi}$  and  $v = i$ ;

**End For**

**If** ( $v \neq 0$ ) **do**

            将轧制编号为 $v$ 的批量前插到 $R_r$ 中最后的位置;

**End For**

**End While**

Update  $I$  and  $R$ ;

由算法伪代码可以看出, 异规格排序优化过程的搜索操作最多能执行 $\sum_{r=1}^{l-1} (n - \sum_{r'=1}^r |R_{r'}|)$ 次, 其中 $l$ 和 $|R_r|$ 是算法的输入参数,  $n$ 是批量规模, 因此异规格排序优化过程的复杂度为 $O(\sum_{r=1}^{l-1} (n - \sum_{r'=1}^r |R_{r'}|))$ .

### 5.3 算法总体复杂度分析(Algorithm complexity analysis)

基于前述可知, 同规格排序优化过程的复杂度为

$$O\left(\sum_{r=1}^{l-1} |R_r| \cdot |R_{r+1}|\right),$$

异规格排序优化过程的复杂度为

$$O\left(\sum_{r=1}^{l-1} (n - \sum_{r'=1}^r |R_{r'}|)\right).$$

将公式都转化为使用模型变量 $n$ 和 $l$ 表示, 则上述复杂度可分别表示为 $O(n^2l)$ 和 $O(n \cdot l)$ , 易见,  $1 \leq l \leq n$ , 且在实际中,  $l$ 远小于 $n$ , 因此, 同规格排序优化和异规格排序优化过程的复杂度均不超过 $O(n^2)$ , 而RSA复杂

度为 $O(n \log n)$ , 所以两阶段启发式算法的总体复杂度不超过 $O(n^2)$ .

## 6 数据实验(Experiment)

### 6.1 实验设计(Experimental design)

为了验证模型及算法的可行性和有效性, 本文基于某典型国有大型无缝钢厂2015年9-11月批量数据, 按模型参数要求对数据进行整理, 随机从中抽取由50, 80, 100, 120, 150和180个批量组成的6组样本, 样本中涉及的工艺参数均采用行业标准, 适用于国内各钢铁企业. 批量主要的属性信息包括: 批量ID、规格、产品数量等. 针对每组批量样本分别采用本文提出的RSA和两阶段(RSA+GSA)启发式算法以及对比算法进行求解, 并分别给出求解结果. 文献[7-8]研究的问题与本文问题具有一定相似性, 是近年考虑机器检修的调度问题之经典文献. 文献[7]为求解小规模问题提出一种两阶段启发式求解算法, 首先在Insert-jobs阶段遍历所有工件, 利用最小化最大总完工时间的评价

函数生成加工序列, 而后在local-search阶段设置了两层循环, 在最后一个分区中遍历交换所有能使目标函数值得到改善的工件. 文献[8]为求解规模更大的问题提出了一种三过程启发式算法. 本文选用文献[7-8]提出的算法作为实验的对比算法, 根据其特征分别命名为最小化总完工时间算法(minimize makespan algorithm, MMA)和3阶段算法(three phase algorithm, TPA). MMA和TPA的复杂度皆为 $O(n^2)$ .

根据该钢厂实际生产情况设置模型参数, 分别取 $a = 0.1 \times b$ ,  $b = 30$ ;  $\alpha = 0.5$ ,  $\beta = 0.5$ . 本文使用的算法程序在.Net Framework 3.5环境下采用Microsoft Visual C#编写, 原始批量数据从工厂制造执行系统(manufacturing execution system, MES)中读取并转换而来. 算法运行的硬件环境为Intel i7-3840QM 3.8GHZ CPU/16.00GB.

### 6.2 实验结果分析(Result analysis)

实验结果如表1所示.

表1 实验结果列表  
Table 1 Experimental result

批量总数	算法	总RPP数	总调整时间	总空闲时间	目标函数值	计算时长/ms
1	RSA	2	297	89	192.8	50
2	MMA	2	948	225	586.5	76
3	RSA+GSA	2	264	46	155.0	65
4	TPA	2	522	316	418.8	332
5	RSA	3	297	334	315.5	49
6	MMA	3	1470	358	914.0	85
7	RSA+GSA	3	297	3	150.2	78
8	TPA	3	870	129	499.5	478
9	RSA	3	297	137	216.8	45
10	MMA	3	1650	7	828.3	88
11	RSA+GSA	3	297	63	180.2	77
12	TPA	3	1167	534	850.5	711
13	RSA	4	297	641	468.8	45
14	MMA	4	1551	311	931.0	95
15	RSA+GSA	4	405	10	207.5	88
16	TPA	4	1089	568	828.5	1018
17	RSA	5	297	802	549.3	54
18	MMA	5	1824	832	1328.2	112
19	RSA+GSA	4	369	13	190.8	114
20	TPA	5	1443	848	1145.5	1078
21	RSA	5	231	580	405.7	53
22	MMA	5	2250	165	1207.7	138
23	RSA+GSA	5	540	14	277.0	127
24	TPA	6	1752	1082	1417.0	1818

由表1可分析出以下结论:

1) 在机器总调整时间上, 使用基于MRMST规则的RSA得到的排序结果平均比MMA得到的结果短80.8%左右, 使用RSA+GSA得到的排序结果平均比TPA得到的结果短66%左右. 这主要因为RSA使用的MRMST规则在仅考虑机器调整时间的批量计划问题中是可以得到最优解的, 而机器总调整时间又是构成目标函数的重要组成部分, 因此使用MRMST规则至少能够得到问题的一个局部最优解. 而在MMA和TPA的实验设置中, 样本中工件之间的顺序相关调整时间是随机生成的矩阵, 不具有工艺相关性, 也非线性关系, 且其面对的样本规模都远小于本文问题背景实际涉及的规模, 在本问题中无法充分利用其中的性质和特征, 优化具有较大的随机性, 很难在热轧批量排序问题上发挥最大效用. 因此, RSA能够有效地大幅降低机器调整时间, 为第2阶段优化奠定良好基础.

2) GSA在RSA排序的基础上针对机器空闲时

间的优化是有效的, 虽然在部分情况下造成机器调整时间的上浮, 但目标函数值在每个样本规模上都取得了优化, 平均优化幅度在82.5%左右. 这说明本文根据问题和算法性质将排序优化阶段分为两个过程并设置各自的操作是有效的, GSA继承了RSA得到的较小机器调整时间的成果, 并降低了机器空闲时间, 最终使得总目标函数值也得到40.2%左右的优化.

3) 在目标函数值上, RSA比MMA优异约63.5%, RSA+GSA比TPA优异约75.1%.

4) 在算法时耗方面, 面对实验的问题规模, 3种算法都能在极短时间内求解出结果. RSA+GSA的耗时小幅高于MMA, 但远低于TPA, 在实际生产中已完全满足辅助管理决策的要求. RSA+GSA在算法复杂度上不超过MMA和TPA的 $O(n^2)$ .

为更好观察与分析各算法的运行过程, 表2列出了针对由150个批量组成的实验样本在各算法下的优化过程.

表2 针对150批样本的实验详情

Table 2 Details of experiments for 150 batches

算法	RPP	批量数量	作业时间	调整时间	空闲时间	总调整时间	总空闲时间	目标函数值	
1		1	38	8337	99	204	99	204	151.3
2		2	35	8291	33	316	132	520	326.0
3	RSA	3	36	8436	66	138	198	658	428.0
4		4	34	8397	99	144	297	802	549.3
5		5	7	1695	0	—	297	802	549.3
6		1	60	7716	804	120	804	120	462.0
7	MMA	2	34	8088	366	186	1170	306	738.0
8		3	27	8003	306	331	1476	637	1056.7
9		4	23	8208	237	195	1713	832	1272.7
10		5	6	2333	111	—	1824	832	1328.2
11	RSA+GSA	1	40	8533	99	8	99	8	53.3
12		2	38	8605	33	2	132	9	70.7
13		3	35	8499	138	3	270	13	141.3
14		4	37	7307	99	—	369	13	190.8
15	TPA	1	59	8109	477	54	477	54	265.3
16		2	33	8083	330	227	807	281	544.0
17		3	28	8180	255	205	1062	486	774.0
18		4	23	8044	234	362	1296	848	1072.0
19		5	7	2740	147	—	1443	848	1145.5

分析表2可以得到:

1) 对比RSA与RSA+GSA在各轧制计划段中的机器空闲时间, RSA+GSA针对机器空闲时间的优化是卓有成效的. RSA+GSA的求解策略能保证在

调整时间不变或不大幅提高的前提下, 有效缩短机器空闲时间, 最终使目标函数值得到优化.

2) 结合表1和表2的情况看, RSA始终能取得最少的机器调整时间, 这说明MRMST规则在考虑机

器周期性检修和机器设置时间顺序相关的批量调度问题中,也具有应用价值.与MMA对比,使用MRMST的RSA能创建出更好的初始解.

3) 在该算例中,使用RSA+GSA最终得到的批量计划使用了4个轧制计划周期,而RSA, MMA和TPA都需要使用5个,这也印证了RSA+GSA在求解该类问题时的有效性.

与企业实际状况相比,目前企业主要依靠计划员制定批量计划.以批量规模为80的样本为例,人工计划的机器闲置时间为468 min,空闲时间为13 min,在数值上尚存优化的空间.但凭借人工经验编制批量计划约需1~2 h,耗时较高,若应用本文方法将显著提高计划编制的质量和效率,有效地支持决策.

此外,冶金行业的工艺和管理特点决定其往往讲求集约生产,即在一段时间内集中、持续生产某种规格产品.钢管厂的集约生产将有助于工厂降低生产成本、管理难度和事故发生率.由于本文研究的是中短期批量排序问题,因此还可从集约生产的角度衡量批量计划的结果.为度量批量的集约化生产程度,本文定义一种集约化度(intensive degree, ID)指标:若批量 $i$ 与其紧邻批量 $(i-1)$ 和 $(i+1)$ 的规格皆不相同,则批量 $i$ 属于非集约化生产.一个轧制计划集合 $I$ 中,集约化生产的批量数占总批量数的比例称为批量集合 $I$ 的ID.仍以150个样本的批量计划结果为例,经计算使用RSA+GSA得到的批量计划集约化度为98%,使用TPA得到的批量计划集约化度为95.3%,而使用MMA得到的批量计划集约化度为92%.这是因为RSA+GSA在算法设计时利用了定理1和性质1的内容,有效增强了批量排序的集约性,间接避免了因为目标函数值的优化而造成集约性大幅下降.TPA在每次插入新工件后,都会执行一次组内优化搜索降低调整时间,这间接增强了集约性.而MMA在算法设计中,无论是初始解的生成还是排序优化阶段都没有集约生产的考虑.

总体而言,本文提出的两阶段启发式算法相较参考文献[7-8]提供的算法在处理此类冶金背景的批量计划问题时具有明显优势.这主要是因为:第一,参考文献采用随机数的方式产生实验样本和设置时间,工件的设置和工件之间所需的设备调整时间不具有工艺相关性,也不能体现无缝钢管的市场需求特点.第二,参考文献的算法直接围绕最小化最大总完工时间为目标产生初始解并使用简单的遍历交换搜索寻优,这既不能充分利用本文问题特征和性质,也没有考虑集约化生产的需要.第三,两篇

参考文献都是对经典问题的探索性研究,提出的算法是针对相对较小样本的优化,因此应用在“热轧批量计划”这种大规模优化问题上很难发挥效用.

## 7 结论(Conclusions)

本文在最小化机器空闲时间和机器调整时间的目标下,研究并建立了考虑机器检修的无缝钢管热轧批量计划模型,通过对问题分析,提出了适用于此类问题的求解策略和循环求解架构,并证明了一种能使问题达到局部最优解的排序规则.基于分析结果设计了两阶段启发式求解算法,首先利用排序规则生成问题的初始解,然后根据问题性质进行排序优化搜索.数据实验表明,与求解相似问题的算法比较,本文提出的两阶段启发式算法能有效利用本文问题特征和性质,在较短的时间范围内产生满意的结果.

在未来的研究中,拟在当前基础上面向更长计划时间考虑交货期等订单交付因素,对此类因素下的问题性质做进一步解析分析,进而设计符合新问题特征的构造启发式或元启发式算法.

## 参考文献(References):

- [1] JIA Shujin, LI Weigang, DU Bin. Multi-objective optimization model and algorithm for the hot rolling batch scheduling problem [J]. *Journal of Wuhan University of Science and Technology*, 2015, 38(1): 16–22.  
(贾树晋, 李维刚, 杜斌. 热轧轧制计划的多目标优化模型及算法 [J]. 武汉科技大学学报自然科学版, 2015, 38(1): 16–22.)
- [2] YANG Jianye, JIANG Zheyi, ZHANG Xinxin. Mathematical model and solving algorithm for the lot planning of slab hot rolling [J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2012, 34(4): 457–463.  
(杨业建, 姜泽毅, 张欣欣. 板坯热轧批量计划数学模型及求解算法 [J]. 北京科技大学学报, 2012, 34(4): 457–463.)
- [3] JIA Shujin, ZHU Jun, DU Bin, et al. Pareto max–min ant system algorithm and its application to hot rolling batch planning problem [J]. *Control Theory & Applications*, 2012, 29(2): 4–11.  
(贾树晋, 朱俊, 杜斌, 等. Pareto最大最小蚂蚁算法及其在热轧批量计划优化中的应用 [J]. 控制理论与应用, 2012, 29(2): 4–11.)
- [4] LIU S. Model and algorithm for hot rolling batch planning in steel plants [J]. *International Journal of Information & Management Sciences*, 2010, 21(3): 247–264.
- [5] WANG Haifeng, XUE Meimei, LI Tieke, et al. Modeling and algorithm of hot rolling seamless steel tube production scheduling based on constraint satisfaction [J]. *Metallurgical Industry Automation*, 2013, 37(3): 39–42.  
(王海凤, 薛美美, 李铁克, 等. 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, 37(3): 39–42.)
- [6] TANG L, HUANG L. Optimal and near-optimal algorithms to rolling batch scheduling for seamless steel tube production [J]. *International Journal of Production Economics*, 2007, 105(2): 357–371.
- [7] 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.

- [8] ÁNGEL-BELLO F, ÁLVAREZ A, PACHECO J, et al. A heuristic approach for a scheduling problem with periodic maintenance and sequence – dependent setup times [J]. *Computers & Mathematics with Applications*, 2011, 61(4): 797 – 808.
- [9] YIN Y, XU J, CHENG T C E E, et al. Approximation schemes for single-machine scheduling with a fixed maintenance activity to minimize the total amount of late work [J]. *Naval Research Logistics*, 2016, 63(2): 172 – 183.
- [10] LOW C, JI M, HSU C J, et al. Minimizing the makespan in a single machine scheduling problems with flexible and periodic maintenance [J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2010, 34(2): 334 – 342.
- [11] CUI W W, LU Z. Minimizing the makespan on a single machine with flexible maintenances and jobs' release dates [J]. *Computers & Operations Research*, 2017, 80: 11 – 22.
- [12] XU Shaoyun, LI Tiede, WANG Lei, et al. Hot – rolling batch scheduling algorithm for round steel production with machine repair [J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2014, 20(10): 2502 – 2511.  
(许绍云, 李铁克, 王雷, 等. 考虑机器检修的圆钢热轧批量调度算法 [J]. *计算机集成制造系统*, 2014, 20(10): 2502 – 2511.)
- [13] ALLAHVERDI A, NG C T, CHENG T C E E, et al. A survey of scheduling problems with setup times or costs [J]. *European Journal of Operational Research*, 2008, 187(3): 985 – 1032.
- [14] JI M, HE Y, CHENG T C E E. Single-machine scheduling with periodic maintenance to minimize makespan revisited [J]. *Computers & Operations Research*, 2007, 34(6): 1764 – 1770.
- [15] JOHNSON D S, DEMERS A, ULLMAN J D, et al. Worst-case performance bounds for simple one-dimensional packing algorithms [J]. *Siam Journal on Computing*, 1974, 3(4): 299 – 325.
- [16] HEMMELMAYR V, SCHMID V, BLUM C. Variable neighbourhood search for the variable sized bin packing problem [J]. *Computers & Operations Research*, 2012, 39(5): 1097 – 1108.

#### 作者简介:

**吴子轩** (1991–), 男, 博士研究生, 研究方向为生产计划与调度,

E-mail: zixuan.wu@sina.com;

**李铁克** (1958–), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为生产计划与

调度, E-mail: tiekeli@163.com;

**张文新** (1966–), 男, 副教授, 研究方向为先进制造管理, E-mail:

zhangwx@manage.ustb.edu.cn;

**王柏林** (1983–), 女, 博士, 曾在博士后流动站做过研究工作, 研

究方向为智能优化方法, E-mail: wangbl@ustb.edu.cn.