

考虑柔性机器检修的钢管热轧批量调度方法

汪 洋^{1,2}, 吴子轩³, 李铁克^{1,2}, 王柏林^{1,2†}

(1. 北京科技大学 东凌经济管理学院, 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; 3. 厦门航空有限公司信息部, 福建 厦门 361006)

摘要: 本文从无缝钢管生产管理中提取并定义了周期性机器柔性检修环境下的钢管热轧批量调度问题, 针对无缝钢管热轧阶段的生产特点, 将其抽象为一类考虑机器调整时间序列相关和柔性机器检修的单机调度问题, 建立了以最小化机器调整时间和机器闲置时间为优化目标的数学模型. 分析闲置时间和检修时点的关系, 证明了闲置时间最小化性质, 结合问题特征设计了两阶段启发式算法. 算法第1阶段采用最小轧机调整时间规则获取具有最小机器调整时间的初始批量轧制序列, 第2阶段对初始轧制序列进行全局寻优搜索. 基于实际生产数据设计了多种问题规模的对比实验, 实验结果验证了模型和算法的有效性.

关键词: 机器柔性检修; 热轧批量调度; 序列相关; 启发式算法; 无缝钢管

引用格式: 汪洋, 吴子轩, 李铁克, 等. 考虑柔性机器检修的钢管热轧批量调度方法. 控制理论与应用, 2019, 36(9): 1536 – 1544

DOI: 10.7641/CTA.2019.80006

Methods of hot-rolled batch scheduling for seamless steel tube with flexible machine maintenance

WANG Yang^{1,2}, WU Zi-xuan³, LI Tie-ke^{1,2}, WANG Bai-lin^{1,2†}

(1. Donlinks School of Economics and Management, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;

2. Ministry of Education Engineering Research Center of MES Technology for Iron & Steel Production, Beijing 100083, China;

3. IT Department of Xiamen Airlines, Xiamen Fujian, 361006, China)

Abstract: A hot-rolled batch scheduling problem with periodic machine maintenance for steel tube was extracted and defined from the production management of seamless steel tube. According to the characteristic of the hot-rolled process, this problem was abstracted into a single machine scheduling problem with sequence-dependent setup cost and flexible machine maintenance, and a mathematical model was built with the objectives to minimize idle time and adjustment time of the machine. By analyzing the relationship between the idle time and the location of the maintenance, a property with respect to the idle time minimization was given. A two-stage heuristic algorithm was presented based on this property and other characteristics of the problem. At the first stage of the algorithm, a rule to minimize the rolling mill setup times was used, and the initial sequence with the smallest machine adjustment time was produced. At the second stage, a global optimization search was performed based on this initial rolling sequence to optimize the overall goal value. With the actual production data, computational experiment were carried out on the problems with various problem size, and experimental results showed that the model and algorithm had obvious effect on solving this problem.

Key words: flexible machine maintenance; hot-rolled batch scheduling; sequence-dependent; heuristic algorithm; seamless steel tubes

Citation: WANG Yang, WU Zixuan, LI Tiek, et al. Methods of hot-rolled batch scheduling for seamless steel tube with flexible machine maintenance. *Control Theory & Applications*, 2019, 36(9): 1536 – 1544

收稿日期: 2018-01-02; 录用日期: 2019-03-13.

†通信作者. E-mail: wangbl@ustb.edu.cn.

本文责任编辑: 张化光.

国家自然科学基金项目(71701016, 71231001), 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资助项目(FRF-BD-18-009A)资助.

Supported by the National Natural Science Foundation of China (71701016, 71231001), the Beijing Natural Science Foundation (9174038), the Humanity and Social Science Youth foundation of Ministry of Education of China (17YJC630143) and the Fundamental Research Funds for Central Universities (FRF-BD-18-009A).

1 引言

热轧无缝钢管作为一种重要的钢材被广泛应用在工业生产中, 钢厂一般按照钢种、外径、壁厚等参数将其划分为不同的规格, 并根据合同要求按照工艺成批量生产. 热轧凝聚了无缝钢管生产中最核心的工艺技术, 是生产的关键工序, 对整条产线生产能力和生产节奏起着决定性的作用. 热轧工序由热轧机组组成, 生产过程连续, 批量按顺序排序等待加工, 因此可将其抽象为单机生产环境. 由于热轧生产具有高温、高速、高磨损的特点, 会对机器产生一定程度的损耗, 故管理者需要制定周期性的机器检修计划, 避免生产过程中机器异常停机造成的不必要损失(如原料报废、生产拖期、安全事故等), 因此研究带机器检修的批量调度对热轧生产管理起着重要的作用.

近年来, 不少学者对热轧批量调度问题进行了研究. 文献[1–3]以无缝钢管研究为背景, 其中, Tang等人^[1]研究了带有序列相关设置成本的车间调度问题, 并以最小化最大完工时间为目标, 针对小规模问题设计了分支定界算法, 对大规模问题设计了两阶段启发式算法进行求解; 贾树晋等人^[2]和Liu等人^[3]将热轧批量调度问题抽象为奖金收集车辆路径问题, 并且以多目标蚁群系统算法求解; Pan等人^[4]以板带生产为背景, 研究板带热轧批量调度问题, 将其抽象为板带分配和板带排序两个子问题, 并针对这两个部分设计了指派启发式和排序启发式算法. 上述学者的研究内容对于本文研究的无缝钢管热轧批量调度问题具有重要的参考价值.

钢厂的生产管理中存在两种主要的周期性机器检修方式: 一种是固定时点的检修, 此检修方式开始和结束时刻固定, 每段轧制计划周期为常量(相邻两次检修结束之间的时段); 另一种是柔性时点的检修, 每次检修的开始时点在给定区间内待决策, 同时每段轧制计划周期为变量. 相比固定检修, 柔性检修在生产管理中更具灵活性. 一方面柔性检修的检修时点是个变量, 具体检修开始时刻受当前轧制计划内批量的完成情况而定, 能充分利用机器加工能力, 有效缩短机器闲置时间; 另一方面由于柔性检修时轧制计划周期为变量, 可最大化批量加工个数, 提高生产效率. 鉴于上述分析, 有必要研究考虑柔性检修方式的钢管热轧批量单机调度问题.

文献[5]证明了考虑机器检修的单机调度问题是一类NP(non-deterministic polynomial)难问题. 针对固定检修节点的单机调度问题, 文献[6]考虑了机器调整时间序列相关, 以最小化最大完工时间为目标, 提出了一种基于3种可替代弧时间索引模型迭代方案的精确算法. 文献[7]将机器调整时间序列相关作为重要约束条件, 提出改进的混合整数规划模型, 并在基础的变邻域搜索算法上提出改进的变邻域搜索算法. 文

献[8]考虑固定和柔性两种检修方式, 针对各自问题特征相应的最优排序性质, 并以最小化最大拖期为目标, 针对两种方式设计了两阶段启发式算法. 文献[9]考虑机器调整时间序列相关, 提出了一种规格切换最小的最优排序性质, 并设计了循环求解框架, 以最小化机器调整时间和机器闲置时间为目标, 针对问题特点设计了两阶段启发式算法求解. 针对柔性检修节点的单机调度问题, 文献[10]以圆钢为研究背景, 综合考虑机器调整时间序列相关、提前/拖期和柔性检修等因素, 设计了最小化最大完工时间和订单提前/拖期总时长的多目标的整数规划模型, 提出了改进的多目标粒子群算法对该模型求解. 文献[11]研究了具有多个检修时段的单机调度问题, 以最小化最大完工时间为目标, 设计了多种启发式算法对比求解, 并最终实验验证降序首次适应算法表现更优. 文献[12]考虑检修后工件加工可恢复和不可恢复两种情况, 对于可恢复情况证明利用最早交货期优先规则在多项式时间内可解, 针对不可恢复情况, 证明其为强NP难问题, 提出混合整数规划模型求解. 文献[13]考虑工件不可恢复的情况, 设计了两个混合二进制整数规划模型, 设计的启发式算法在大规模问题下可以获得近优解. 文献[14]设计了基于顺序和总调度策略的两种模糊遗传算法求解考虑资源约束的带柔性检修的单机调度问题. 上述文献分别从固定和柔性角度展开研究, 具有重要的参考价值, 但是由于无缝钢管实际生产中不同批量规格存在机器调整时间序列相关约束以及柔性检修的管理需求, 已有研究成果很难直接应用在此类问题上.

本文根据无缝钢管热轧生产特点, 研究考虑机器调整时间序列相关和机器柔性检修的热轧批量单机调度问题, 但是目前作者尚未在公开发表的文献中找到研究此类问题的相似文献, 故有必要对该问题展开研究. 对机器调整时间序列相关的特征和柔性机器检修进行抽象, 建立了最小化机器调整时间和闲置时间的数学模型, 并将问题转化为可变尺寸的装箱问题进行求解. 通过分析序列相关特点和柔性检修的性质, 设计了两阶段启发式算法框架优化目标函数, 最后, 通过数值实验验证了算法的可行性和有效性.

2 问题描述

考虑柔性机器检修的无缝钢管热轧批量调度问题可以描述为: 给定热轧钢管批量集合和机器检修计划, 依据批量在机器检修时间点外加工的特征, 将批量排入相应轧制计划周期内, 根据每个轧制计划周期中最后一个批量的完工时间对机器检修的开始时间进行决策. 下面对本问题特点和优化目标进行详细分析.

1) 柔性机器检修.

柔性机器检修是一种预防性设备维护, 其检修时长事先给定为固定值, 但具体检修开始时间和结束时

间在区间 $[U_m, V_m]$ 内变化, 其中区间 $[U_m, V_m]$ 中的下标 m 表示检修计划编号, U_m 表示机器检修最早开始时间, V_m 表示机器检修最晚结束时间, 检修时长 t 为常量且 $t < |V_m - U_m|$, 且每个轧制时间段内的机器调整时间和闲置时间都为变量.

图1为柔性检修计划示意图, 图中的RPP(rolling plan period)表示轧制计划周期^[9], 每段相邻的RPP间存在相关性关系, 即前一RPP中机器检修的完工时间决定当前RPP中首个批量的开始加工时间. 图中的Part1, Part2和Part m 表示轧制时间段, 其中Part1表示第1个轧制时间段内, 在第1次检修开始前存在闲置时间; Part2示第2个轧制时间段内的最后一个批量加工完成后即进行检修, 无闲置时间. Part1和Part2内在检修完成时间分别不超过区间 $[U_1, V_1]$ 和 $[U_2, V_2]$ 上限值前提下可以随意安排检修开始时间. Part m 表示在第 m 个轧制时间段内, 通过合理调整区间 $[U_m, V_m]$ 内的检修开始时间, 使得当前RPP中最后一个批量完成加工后便开始检修, 使机器闲置时间为0.

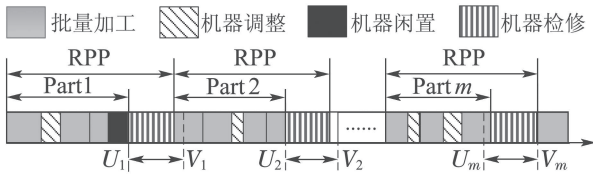


图1 柔性检修计划示意图

Fig. 1 Diagram of flexible machine maintenance

2) 规格顺序依赖的机器调整时间.

无缝钢管热轧生产工艺中, 批量加工具有连续性, 一旦开始便不可终止, 且机器检修时不可进行批量加工作业. 机器上切换加工不同规格的批量需要切换机器的孔型系统、机架类型等, 且需要调整相应机器参数设置, 其与规格顺序相关, 此时间段即为机器调整时间. 机器检修过程中会按照紧邻待加工批量的规格要求准备好相应的热工具并设置机器参数, 检修完成后首个批量可以直接生产. 由文献[9]定义的规格切换公式 $W_{i,i+1} = b + a|d_{i+1} - d_i|$ 可求得不同批量规格切换时的机器调整时间, 其中 $W_{i,i+1}$ 表示相邻批量 i 和 $i+1$ 切换生产时的机器调整时间, d_i, d_{i+1} 分别表示批量 i 和批量 $i+1$ 的外径, a, b 为模型参数, 依据实际情况进行设置.

3) 优化目标.

本文的优化目标是 minimized 机器调整时间和机器闲置时间, 虽然两者优化对象不同, 但都是以时间为优化指标, 因此采取加权方式将两者转化为单目标进行优化.

a) 最小化机器调整时间: 机器进行加工作业时, 若待加工的相邻批量间频繁切换不同规格或切换的

规格差值过大而造成机器的频繁调整, 则会导致机器调整时间增加, 因此需要对批量按规格进行预处理, 将同种规格的批量安排统一集中加工, 不同规格的批量按照一定的规则顺序进行加工, 最大程度优化机器调整时间, 提高机器使用效率.

b) 最小化机器闲置时间: 工厂实际生产作业中, 机器使用寿命有限, 需要定期进行检修和维护以确保安全生产和效率, 故只允许在机器检修时间外的轧制计划期间内安排生产活动, 并且禁止批量加工作业跨越检修计划, 因此在固定检修计划情况下, 每一RPP中的最后一个批量加工完成后和机器检修活动开始前可能产生闲置时间, 但由于本文中的检修时点存在柔性, 在区间范围内通过合理调整机器检修开始时间, 依据闲置时间大小排入合适批量到空闲时间段内, 以优化机器闲置时间.

图2是批量集合 $I = \{B_1, B_2, \dots, B_9\}$ 的调度示意图, 由图中调度结果可知, 对批量加工顺序以及区间内机器检修时点的调整能够有效优化机器闲置时间和总完工时间.

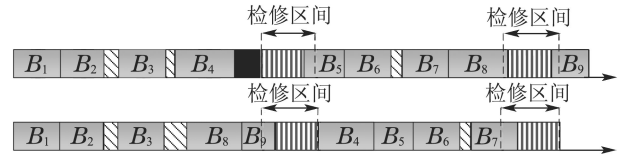


图2 考虑机器柔性检修的批量调度示意图

Fig. 2 Diagram of batch scheduling with flexible machine maintenance

3 问题建模

3.1 模型假设

对于本文问题提出如下假设: 1) 不考虑由机器发生随机故障或现场意外事故而导致的生产意外中断情况; 2) 检修完成后的首个批量在加工前无需进行机器调整, 故无机器调整时间; 3) 批量从0时刻开始加工, 批量加工过程不允许中断.

3.2 符号定义

1) 参数定义.

I 表示轧制批集合, $I = \{1, 2, \dots, n\}$, i 为轧制批次编号, $i \in I$; d_i 为批量 i 的外径; p_i 为批量 i 的加工时长; R 表示机器检修计划集合, $R = \{1, 2, \dots, r\}$; $[U_m, V_m]$ 为第 m 次机器检修计划的检修时间区间, 其中 U_m 为检修最早开始时间, V_m 为检修最晚结束时间, $m \in \mathbb{R}$; t 为机器检修时长, t 是常量; x_{0i} 表示检修后加工批量 i , x_{i0} 表示批量 i 加工完成后进行机器检修, 其中0表示机器检修.

2) 决策变量.

$D_{i[m]}$ 表示第 m 段RPP中批量 i 的加工开始时间, $C_{i[m]}$ 表示第 m 段RPP中批量 i 的加工完成时间; S_m 表

示第 m 次检修的开始时间, E_m 表示第 m 次检修的完成时间; $W_{i,i+1}$ 表示批量 i 和 $i+1$ 间切换加工时的机器调整时间.

$$\begin{aligned} x_{0i} &= \begin{cases} 1, & \text{若批量} i \text{ 是 RPP 首批,} \\ 0, & \text{否则;} \end{cases} \\ x_{i0} &= \begin{cases} 1, & \text{若批量} i \text{ 是 RPP 末批,} \\ 0, & \text{否则;} \end{cases} \\ y_{i,i+1} &= \begin{cases} 1, & \text{若相邻批量} i \text{ 和 } i+1 \text{ 之间存在机器检修,} \\ 0, & \text{否则;} \end{cases} \\ G_m &= \begin{cases} 1, & \text{若 } S_m = U_m, \\ 0, & \text{否则.} \end{cases} \end{aligned}$$

3.3 问题模型

$$\min f = \alpha \cdot \left[\sum_{m=1}^{r-1} |S_m - (p_{1[m]} + \sum_{i=2}^n (p_{i[m]} + W_{i-1,i}))| \cdot G_m \right] + \beta \cdot \sum_{i=2}^n W_{i-1,i} \quad (1)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{i=1}^n x_{i0} = r, \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^n x_{0i} = r, \quad (3)$$

$$S_m - U_m \geq 0, \quad m \in \mathbb{R}, \quad (4)$$

$$S_{m-1} + t + p_i < C_{i[m]} \leq V_m, \quad i \in I, \quad m \in \mathbb{R}, \quad (5)$$

$$S_{m-1} + t \leq D_{i[m]} < V_m - p_i, \quad i \in I, \quad m \in \mathbb{R}, \quad (6)$$

$$p_{1[m]} + \sum_{i=2}^n (p_{i[m]} + W_{i-1,i}) \leq S_m, \quad m \in \mathbb{R}, \quad (7)$$

$$\begin{aligned} D_{(i+1)[m]} &\geq (1 - y_{i,i+1}) \cdot (C_{i[m]} + W_{i,i+1}) + \\ &\quad (C_{i[m-1]} + t) \cdot y_{i,i+1}, \\ i, i+1 &\in I, \quad m \in \mathbb{R}, \end{aligned} \quad (8)$$

$$C_{i[m]} = D_{i[m]} + p_i, \quad i \in I, \quad m \in \mathbb{R}, \quad (9)$$

$$G_m = \max\{1 - (S_m - U_m), 0\}, \quad m \in \mathbb{R}, \quad (10)$$

$$\begin{aligned} W_{i,i+1} &= (1 - y_{i,i+1}) \cdot (b + a|d_{i+1} - d_i|), \\ i, i+1 &\in I. \end{aligned} \quad (11)$$

目标函数(1)采取加权方式以最小化机器闲置时间和机器调整时间为目标, 其中 $\sum_{m=1}^{r-1} |S_m - (p_{1[m]} + \sum_{i=2}^n (p_{i[m]} + W_{i-1,i}))| \cdot G_m$ 表示最小化机器闲置时间, $\sum_{i=2}^n W_{i-1,i}$ 表示最小化机器调整时间, α, β 分别为机器闲置时间和机器调整时间的权重; 约束(2)和约束(3)分别表示机器检修前和后只能进行一个批量的加工作业; 约束(4)表示在机器检修时间区间内安排检修; 约束(5)和(6)表示批量加工与检修活动都连续作业但相互独立; 约束(7)表示每一轧制计划中总的批量的完工时间不大于检修开始时间; 约束(8)表示同一时刻在

同一台机器上只允许一个批量的加工作业, 若在相邻批量间进行机器检修, 则检修结束后无需进行机器调整即可加工下一批量, 否则需要考虑机器调整时间; 约束(9)为批量完工时间约束; 约束(10)为 G_m 的取值约束; 约束(11)对机器调整时间进行了定义.

4 问题性质分析

通过对检修区间开始时间和检修开始时间之间关系的分析, 给出如下定理:

定理 依据最小化机器闲置时间的目标, 每一轧制计划中最后一个批量的完工时间在检修计划区间内是机器闲置时间为0的充要条件.

证 上述定理中, 假设第 m 个RPP中存在闲置时间 P_{idle} , 通过一定规则插入批量 i , 其完成时间为 $C_{i[m]}$, 存在如下几种情况:

1) $C_{i[m]} < U_m$: 假设 $S_m \neq U_m$, 机器闲置时间为 $P'_{\text{idle}} = S_m - C_{i[m]}$, 因为 $C_{i[m]} < U_m$, 故在检修计划区间内可以调整检修时间, 受约束(4)限制, 检修时间最小可以等于 U_m , 即 $S_m = U_m$, 又 $C_{i[m]} < U_m$, 所以 $P'_{\text{idle}} > 0$;

2) 当 $C_{i[m]} > V_m - t$ 时, 违背约束(7), 为不可行调度解, 故该情况不成立.

结合1)和2)可知, 只要闲置时间不为0, 则批量完工时间一定在检修计划区间外, 以反证法证明了定理的必要性.

3) $U_m \leq C_{i[m]} \leq V_m - t$: 该情况包括两方面, $C_{i[m]} = U_m$ 和 $U_m < C_{i[m]} \leq V_m - t$, 分别作分析:

① $C_{i[m]} = U_m$: 假设 $S_m \neq U_m$, 机器闲置时间为 $P'_{\text{idle}} = S_m - C_{i[m]} > 0$, 又 $C_{i[m]} = U_m$, 故为了降低闲置时间可以调整检修时间位置, 直到 $S_m = U_m$, 因此调整后的闲置时间为 $P''_{\text{idle}} = S_m - C_{i[m]} = U_m - C_{i[m]} = 0$, 此时闲置时间为0;

② $U_m < C_{i[m]} \leq V_m - t$: 此时 $S_m \neq U_m$, 因此依据最小化的目标, 可以调整检修时间直到 $S_m = C_{i[m]}$, 此时闲置时间为 $P'_{\text{idle}} = S_m - C_{i[m]} = 0$;

通过①和②证明了定理的充分性, 即只要满足最后一个批量在检修时间区间内, 闲置时间为0.

综上分析, 定理得证. 证毕.

由此定理可以看出, 批量排序过程中, 在闲置时间最小化目标指导下, 检修时间在检修区间内的位置和优化结果是相关的, 通过确定最优检修时间的位置可以缩小闲置时间. 在后文的算法设计和执行过程中, 此定理可以用来指导批量的排序与选择, 以此优化机器闲置时间, 减少冗余的计算过程.

5 求解算法设计

5.1 求解策略

本文是一种考虑机器检修时间柔性的单机调度问题, Chen^[13]已经证明带机器检修的单机调度问题是

一类NP难问题, 本文由于考虑了检修时间柔性和机器调整时间序列相关, 约束条件更为复杂, 故本问题也是一类NP难问题, 因此在多项式时间内难以利用精确算法求得问题精确解, 当前多利用启发式算法对此类调度问题求解。

热轧批量调度问题中, 批量具有不同大小的加工时长, 如果将其看作体积各异物品, 将轧制计划周期视作单独的箱体, 由于批量与轧制计划周期存在一对多的映射关系, 因此可以将本文问题视为一类装箱问题^[9]。传统装箱问题中一般考虑在箱体尺寸固定的情况下, 将物品排入箱体中寻求箱体剩余量最小化的最优方案, 但是本文考虑检修时点和轧制计划周期可变的情况, 其箱体尺寸在区间 $[t, |V_m - U_m|]$ 内变化, 因此将本文问题视为一类箱体尺寸可变的装箱问题(variable-sized bin packing problem, VSBPP)。

基于上述对问题的抽象和分析, 在箱体尺寸可变

的前提下, 如何安排物品的装入顺序, 最小化箱子使用数量(即最小化每个箱子的剩余空间)成为设计本文算法的关键。基于文中检修时点和轧制时长皆为柔性的特征, 并结合上一节对问题的分析, 设计了两阶段启发式算法, 算法在获取批量和检修基础信息后, 按照一定规则对批量排序, 决策所有批量的排列顺序以及具体检修位置。

第1阶段: 基于批量规格跳跃最小化思想, 按规格升序规则对批量排序, 在式(5)约束下将批量排入每段RPP中并同时决策相应RPP中的具体检修时间, 得到具有局部调整时间最优的初始批量序列集合。

第2阶段: 对初始序列集合中每段RPP内的闲置时间采用局域搜索方法进行寻优, 通过调整批量加工顺序以缩短闲置时间, 优化整体目标。

给出如图3所示的算法流程框架图。

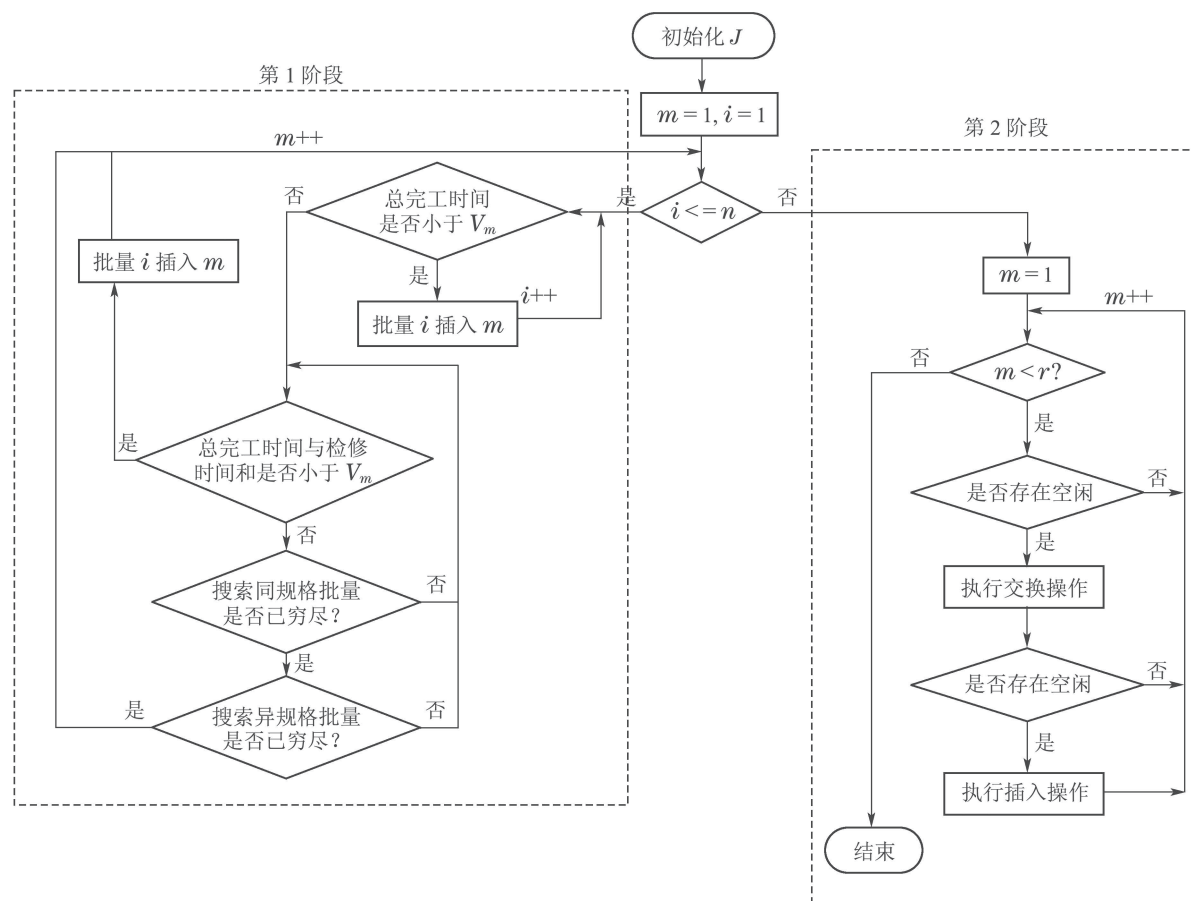


图3 两阶段算法流程框架图

Fig. 3 Flow chart of two-stage algorithm

5.2 初始排序阶段

在初始排序阶段, 采用基于规则的批量插入寻优算法(rule-based batch insertion optimization algorithm, RBIOA)。首先对所有批量按最小轧机调整时间排序规则^[9](maximum rolling mill setup time rule, MRMS-

T)进行预排序, 在满足式(5)约束条件下将批量按序排入相应RPP中, 并结合定理确定每段RPP中具体检修时间, 最终形成的初始序列会在局部范围内能达到较优状态。向RPP内插入批量 i 时, 如果其完工时间与检修时长之和大于检修区间最大值 V_m , 则无法插入批

量 i , 此时在全局范围内执行两种搜索方案: 同规格批量前插(batch insertion forward within same spec, BIFSS)和异规格批量前插(batch insertion forward within different spec, BIFDS). BIFSS指在剩余未排入RPP内与批量 i 的相同规格批量中搜索满足约束(5)的批量并插入到当前位置, BIFDS指搜索规格不同于批量 i 的规格的批量, 在满足约束(5)的前提下插入到当前位置.

将批量依次排入相应RPP时, 若当前批量不满足约束(5), 则执行BIFSS操作. 如图4(a)所示, 将批量 B_3 排入当前RPP时, 其违背约束(5)的条件, 故在剩余待排批量中搜索满足约束(5)且与 B_3 相同规格的批量, 如图中批量 B_8 符合条件, 将其排入到当前空余位置处, 由于其与 B_3 规格相同, 故机器调整时间仍为1; 若同规格批量中无符合条件的批量, 则执行BIFDS操作, 如图4(b)所示, B_6 符合约束(5)条件, 将其排入到当前RPP空闲位置处, 由于 B_6 规格与 B_3 规格不同且已对所有批量按规格升序规则做过预处理, 故排入 B_6 后的机器调整时间为3.

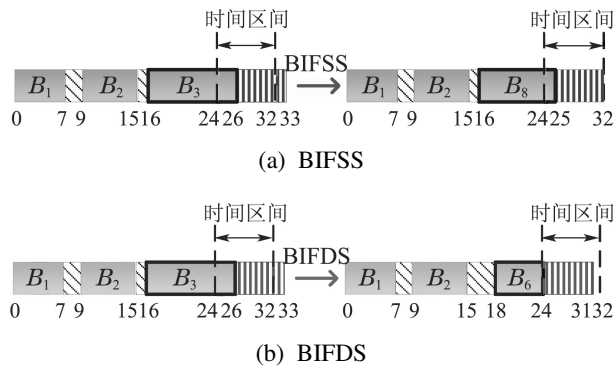


图4 BIFSS和BIFDS示意图

Fig. 4 Diagram of BIFSS and BIFDS

RBIOA算法伪代码:

Initialize I ; /*对集合 I 中批量按MRMST规则的规格升序规则排序*/

Set $r = 1$;

While ($r \neq R$) do

For each ($i \in I$) do

If ($C_{i[m]} + t \leq V_m$) do {Insert i to r , remove i from I } /*依据RPP中总轧制时长与最大检修时点的关系将批量排入RPP内*/

Else {Set spec = spec $_i$ and search k where spec $_k$ is equal to spec in I } /*记规格为spec, 获取当前批量规格, 执行BIFSS操作*/

If ($C_{(i-1)[m]} + p_k + t \leq V_m$) do {Insert k to r , remove k from I }

Else {Search l where spec $_l$ is not equal to spec in I } /*执行BIFDS操作*/

If ($C_{(i-1)[m]} + p_l + t \leq V_m$) do {Insert l to

r , remove l from I }

End For

End While

初始排序阶段算法的复杂程度主要在于执行BIFDS操作, 此操作最多执行 $\sum_{m=2}^r \sum_{d_i=1}^{n-d_i} (m \cdot d_i)$ 次, 故此阶段算法复杂度为 $O(\sum_{m=2}^r \sum_{d_i=1}^{n-d_i} (m \cdot d_i))$, 其中: m , n 为输入参数, d_i 为批量规格.

5.3 局域优化阶段

局域优化阶段在初始排序阶段的基础上设计了寻优搜索算法(optimization search algorithm, OSA), 基于定理中有关检修时间的性质, 对初始序列内RPP的闲置时间进行优化, 其目标是通过平衡总闲置时间和调整时间以优化整体目标函数. OSA使用两种方式对初始序列进行优化: 批量交换(batch interchange, BI)和批量交换与前插结合(batch interchange and insertion, BIAI).

依次判断所有RPP中是否存在闲置时间, 若存在闲置时间, 则先执行BI操作. BI操作是指通过交换当前RPP中最后一个批量与后续RPP中符合约束(5)批量的位置来达到缩小闲置时间的目的, 图5(a)展示了BI的操作过程. 如图所示, 当前RPP内批量 B_i 后存在闲置时间, 搜索到后续RPP中满足约束(5)的批量 B_{j+1} , 交换 B_i 和 B_{j+1} 的位置, 交换位置后机器闲置时间缩小. 在BI操作完成后, 若当前RPP内依然存在闲置时间, 则搜索后续RPP中满足约束(5)的批量作前插操作, 将交换与前插结合的过程统称为BIAI操作, 图5(b)作了BIAI操作示例图. 如图所示, 在交换完 B_i 和 B_j 位置后, 当前RPP内依然存在闲置时间, 因此在后续RPP中搜索到符合约束(5)条件的批量 B_{j+1} , 通过将其插入到空闲位置处能有效缩短机器闲置时间.

OSA算法伪代码:

获取初始阶段生成的轧制序列集合;

Set $r = 1$;

For each ($r \in R - 1$) do {计算当前RPP中机器闲置时间, 将其记作spare}

If (spare > 0) do {Search l in $r + 1$ } /*依据闲置时间值判断当前RPP内是否执行BI操作*/

If ($C_{i[m]} - p_i + p_l + t \leq V_m$) do {exchange l with i , update I } /*执行BI操作, 交换批量 l 和 i */

If (spare > 0) do {Search j in $r + 1$ } /*判断是否执行BIAI操作*/

If ($C_{k[m]} + p_j + t \leq V_m$) do {Insert j to r , update I } /*执行BIAI操作, 将批量 j 插入当前RPP中*/

End For

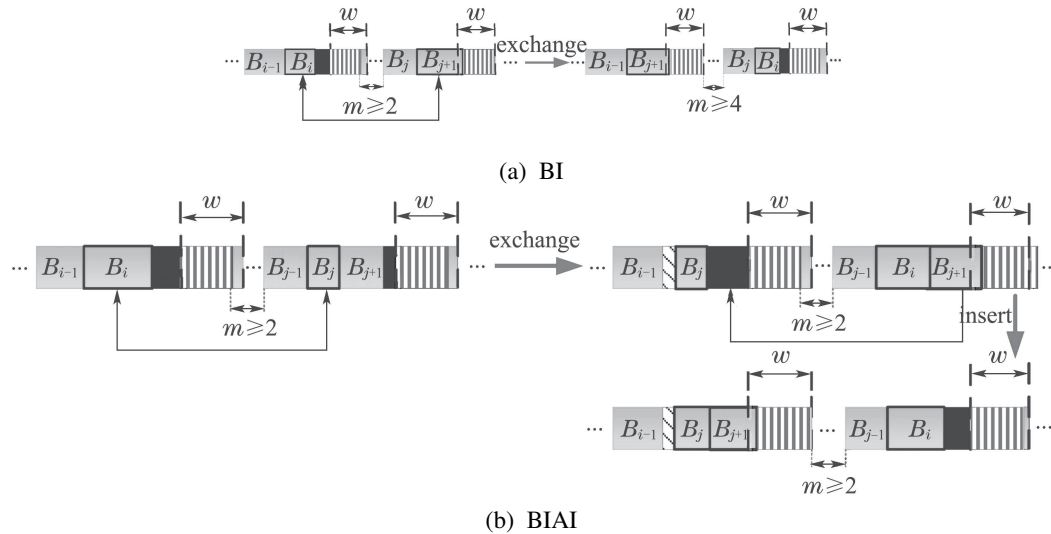


图5 BI和BIAI操作示例图
Fig. 5 Diagram of BI and BIAI

该阶段算法复杂度受限于BIAI操作, 该过程中算法最多执行 $\sum_{m=2}^r (m^2 + 2m)$ 次, 故此阶段算法复杂度为 $O(\sum_{m=2}^r (m^2 + 2m))$.

5.4 算法复杂度分析

基于上述分析, RBIOA和OSA的算法复杂度分别为 $O(\sum_{m=2}^r \sum_{d_i=1}^{n-d_i} (m \cdot d_i))$ 和 $O(\sum_{m=2}^r (m^2 + 2m))$, 实际生产环境下, 规格总量少于批量总量, 故将以上复杂度转化为 n 表示时, RBIOA和OSA的算法复杂度均不超过 $O(n^2)$.

6 数据实验

6.1 实验设计

为了验证本文所提算法在求解此类单机调度问题上的效果, 抽取了某国有大型无缝钢管厂2016年6-9月的批量数据并设计了对比实验, 其中批量属性主要包括: 批量ID、钢管数量和规格等, 其中, 批量基础参数信息如下所示: 10种规格; 批量变化范围为[50, 150], 每一批量中钢管数量变化范围为[40, 500].

基于上述参数设置了5组由10种规格组成50, 80, 100, 120和150个批量的样本数据, 并为模型设置了相关参数, 主要包括: 检修时间区间集合、检修区间范围和检修时长 t (依据工厂检修要求和检修计划进行配置, 本算法中设置 $t = 24$ h, 检修区间大小为25h), α 和 β 值 (可以依据不同管理要求进行权衡配置, 本算法中设置 $\alpha = \beta = 0.5$ 以及 a 和 b 值 (可基于钢厂的运行情况设置, 本文设置 $b = 30$, $a = 0.1 \cdot b$)).

利用RBIOA和两阶段启发式算法(RBIOA+OSA, 又可称为批量调度优化算法, optimization algorithm for batch scheduling algorithm, BSA)以及对比算法对

样本数据进行实验求解, 并给出详细实验结果. 因未直接搜索到同时考虑到机器调整时间序列相关和柔性检修的热轧批量单机调度问题的文献, 考虑到文献[11]和文献[13]与本文研究内容最相似, 两者都是基于柔性机器检修角度对单机调度问题进行分析, 研究的都是使时间最小化的单目标情况, 故将其作为本文的对比算法. 其中文献[11]采用先排序后指派的启发式算法, 此处将其命名为最小化最大完工时间算法 (minimize makespan algorithm, MMA); 文献[13]利用最长加工时间优先规则 (longest processing time, LPT) 求解考虑柔性检修的调度问题, 按批量加工时间降序规则获得初始加工序列, 安排批量在可用时间区间内加工以及确定检修的具体位置. MMA和LPT算法的复杂度分别为 $O(n \log n)$ ^[11] 和 $O(n^2 \log n)$ ^[13], 将其作为本文的对比算法, 验证RBIOA和BSA算法在求解机器检修的单机调度问题中的效果.

本文采用 Microsoft Visual C# 编写算法程序, 在 Net Framework 3.5 框架环境下实现, 硬件环境为 Intel Core i5-2410M CPU /2.30GHz/8GB/Window 7.

6.2 实验结果分析

实验结果如表1所示.

通过表1可以得出如下结论:

1) 针对目标函数中的机器调整时间部分, RBIOA算法得到的排序结果比MMA的结果平均优化82.4%, BSA的排序结果比LPT平均优化90.5%. 本文算法中先利用MRMST规则按机器调整时间最小化原则对批量进行预处理, 而MMA和LPT并未考虑设计相应减少机器调整时间的排序规则, 故机器调整时间会很大. 因此通过上述对比结果可以看出利用MRMST规则可以获得局部较优解, 为后续优化阶段的求解打下了良好的基础.

表1 实验结果列表
Table 1 Experimental result

批量总数	算法	RPP数	总调整时间/min	总闲置时间/min	目标函数值/min	计算时长/ms
50	RBIOA	2	333.4	41	187.2	10
	BSA	2	333.0	0	166.5	6
	MMA	3	1104.4	310	707.2	7
	LPT	3	1737.0	0	868.5	5
80	RBIOA	3	297.0	40	168.5	15
	BSA	3	297.0	0	148.5	10
	MMA	4	1575.0	93	834.0	10
	LPT	4	2736.0	0	1368.0	7
100	RBIOA	4	330.4	109	219.7	10
	BSA	4	297.0	0	148.5	11
	MMA	5	1751.6	149	950.3	12
	LPT	5	3318.0	0	1659.0	8
120	RBIOA	6	296.6	39	167.8	22
	BSA	6	297.0	0	148.5	16
	MMA	6	2105.6	110	1107.8	15
	LPT	7	3666.0	0	1833.0	9
150	RBIOA	6	297.0	34	165.5	19
	BSA	6	297.0	0	148.5	23
	MMA	7	2277.0	44	1160.5	19
	LPT	8	4917.0	0	2458.5	10

2) 针对目标函数的机器闲置时间部分, 利用优化阶段的搜索过程对其进行了优化. 算法中设置的检修周期为6天, 机器检修时长为24 h, 检修区间长度为25 h, 批量加工时间以小时计算, 可以看出基于该参数设置, 执行算法优化阶段后, BSA在RBIOA的基础上达到了较好的优化效果, 同时在当前批量规模和参数设置下LPT规则在只考虑机器闲置时间时能获得较好的解. 本算法设置的批量样本大小在[40, 500]间, 在该参数设置下, 由于检修具有柔性, 使得LPT算法排序的批量可以在对应的轧制计划中的柔性区间内加工完成, 产生了机器闲置时间是0的情况.

3) 在总体目标函数上, BSA比RBIOA平均优化了16.3%, 故对于本文算法BSA在最终排序结果上具有较好的效果. 相比于MMA和LPT算法, BSA比MMA平均优化了84%, 比LPT平均优化90.7%. 同时分析BSA和LPT在总体目标函数上的表现, 可以验证基于MRMST规则的RBA比不考虑机器调整时间的LPT算法更优.

4) 在算法耗时方面, RBIOA和BSA以及对比算法MMA和LPT都能在较短时间内求得结果, 由于本文算法涉及到优化阶段, 算法时间对比算法略长, 但同属于毫秒级的计算时间, 且算法复杂度不超过, 计算时间对于整体调度过程影响不大, 因此可将其忽略.

为了清晰直观的呈现实验结果, 绘制曲线图如图6所示.

通过图6可以得到如下结论:

1) 对图6(a)进行分析知在当前批量规模下RBIOA和BSA的总RPP个数相同, 优化阶段的BSA算法虽没有减少初始序列中的总RPP数量, 但是都要明显优于对比算法MMA和LPT的排序结果. RPP数量反映了机器使用效率, 在相同规模下RPP数量的减少, 可以看出在求解此类问题时, 本文算法在提升机器使用效率上具有一定的效果, 能有效缩短批量的总完工时间.

2) 分析图6(b)中的曲线走势, 可以发现BSA曲线一直位于RBIOA下方, 故从目标函数角度分析, BSA对初始阶段RBIOA算法产生的解起到了一定的优化作用, 同时由于两曲线的偏移量相差不大, 可以看出在优化阶段BSA并没有使机器调整时间大幅度波动而保证了整体目标值趋于平缓且达到了优化效果, 保证了目标函数指标的优化. 相比较于MMA和LPT的曲线走势, 可以发现BSA和RBIOA曲线远远的在其下方, 故看出本文算法在求解此类问题的求解效果上是卓有成效的.

总体而言, 针对考虑柔性机器检修的单机生产调度问题, 本文设计的RBIOA和BSA算法比文献[11]和文献[13]中的对比算法具有明显优势, 主要是因为: 第一, 对比文献的算法中未考虑设计降低由机器切换引起的调整时间的相关排序规则, 故机器调整时间难以得到优化, 影响最终排序结果; 第二, RBIOA算法充分结合机器检修柔性的性质和特点, 将其嵌入到算法

总体结构中,在初始批量排序和检修位置确定时已使目标函数达到较优状态,因此对比文献中的算法可以得到更好的优化效果。

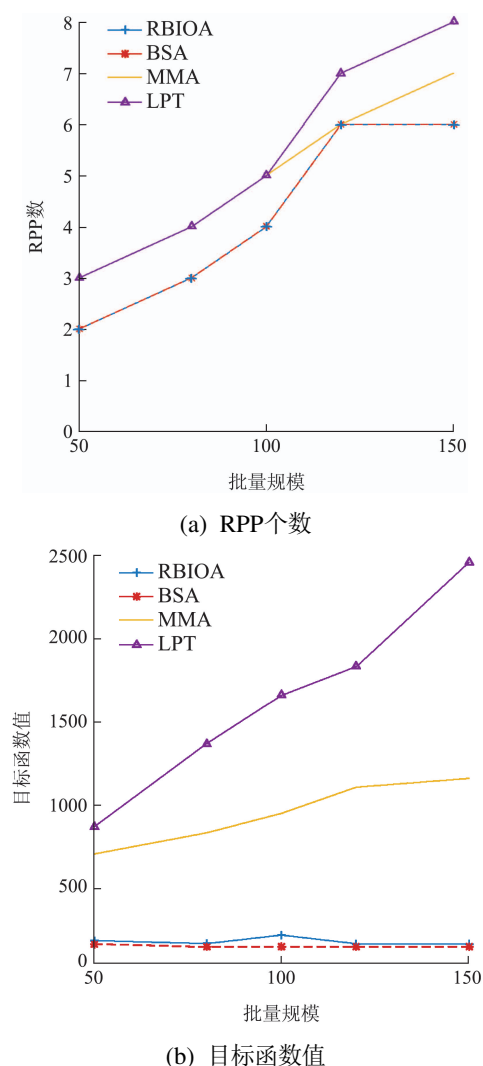


图6 实验结果图

Fig. 6 Diagram of experiment result

7 结论

机器检修是热轧生产过程中重要的管理过程,当前研究主要集中于固定检修情况,很少对钢管热轧中机器调整时间序列相关和柔性机器检修相结合的情况进行考虑.本文基于无缝钢管热轧批量调度问题研究了柔性机器检修的性质和特点,在最小化机器调整时间和闲置时间目标下,建立了考虑机器调整时间序列相关和柔性机器检修的热轧批量单机调度模型.通过对检修时点柔性特点的分析,证明了一种闲置时间较优的排序规则,并基于此规则设计了两阶段求解算法:首先基于排序规则生成问题的初始解,接着依据问题特征进行寻优搜索.通过实验结果表明文中所设计的算法可以充分结合问题性质和特征,在有效时间和规模范围内产生满意的结果。

参考文献:

- [1] TANG L, HUANG L. Optimal and near-optimal algorithms to rolling batch scheduling for seamless steel tube production. *International Journal of Production Economics*, 2006, 105(2): 357 – 371.
- [2] JIA Shujin, LI Weigang, DU Bin. Multi-objective optimization model and algorithm for the hot rolling batch scheduling problem. *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. 武汉科技大学学报, 2015, 38(1): 16 – 22.)
- [3] LIU S. Model and algorithm for hot rolling batch planning in steel plants. *International Journal of Information & Management Sciences*, 2010, 21(3): 247 – 264.
- [4] 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. *Applied Mathematical Modelling*, 2017, 48: 516 – 533.
- [5] LEE C Y, LIMAN S D. Single machine flow-time scheduling with scheduled maintenance. *Acta Informatica*, 1992, 29(4): 375 – 382.
- [6] NESELLO V, SUBRAMANIAN A, BATTARRA M, et al. Exact solution of the single-machine scheduling problem with periodic maintenances and sequence-dependent setup times. *European Journal of Operational Research*, 2018, 266(2): 498 – 507.
- [7] JOAQUÍN P, SANTIAGO P, SILVIA C, et al. Variable neighborhood search with memory for a single-machine scheduling problem with periodic maintenance and sequence-dependent set-up times. *Knowledge-Based Systems*, 2018, 145: 236 – 249.
- [8] SBIHI M, VARNIER C. Single-machine scheduling with periodic and flexible periodic maintenance to minimize maximum tardiness. *Computers & Industrial Engineering*, 2008, 55(4): 830 – 840.
- [9] WU Zixuan, LI Tiek, ZHANG Wenxin, et al. Methods of hot-rolled batch planning for seamless steel tube with machine maintenance. *Control Theory & Applications*, 2017, 34(9): 1250 – 1259.
(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. 控制理论与应用, 2017, 34(9): 1250 – 1259.)
- [10] WANG Lei, ZHAO Qihong, XU Shaoyun. Hot-rolling batch scheduling in round steel production with flexible maintenance planning. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2016, 42(3): 435 – 443.
(王雷, 赵秋红, 许绍云. 考虑柔性检修计划的圆钢热轧批量调度. 北京航空航天大学学报, 2016, 42(3): 435 – 443.)
- [11] LOW C, JI M, HSU C J, et al. Minimizing the makespan in a single machine scheduling problems with flexible and periodic maintenance. *Applied Mathematical Modelling*, 2010, 34(2): 334 – 342.
- [12] CUI W W, LU Z. Minimizing the makespan on a single machine with flexible maintenances and jobs' release dates. *Computers & Operations Research*, 2017, 80: 11 – 22.
- [13] CHEN J S. Scheduling of nonresumable jobs and flexible maintenance activities on a single machine to minimize makespan. *European Journal of Operational Research*, 2008, 190(1): 90 – 102.
- [14] TOUAT M, BOUZIDI-HASSINI S, TAYEB B S, et al. A hybridization of genetic algorithms and fuzzy logic for the single-machine scheduling with flexible maintenance problem under human resource constraints. *Applied Soft Computing*, 2017, 59: 556 – 573.

作者简介:

汪 洋 博士研究生, 研究方向为生产计划与调度, E-mail: fran_wangyang@qq.com;

吴子轩 博士, 研究方向为先进制造管理, E-mail: zixuan_wu@sina.com;

李铁克 教授, 博士生导师, 研究方向为生产计划与调度, E-mail: tiekeli@163.com;

王柏林 副教授, 研究方向为智能优化方法, wangbl@ustb.edu.cn.