

炼钢连铸生产调度的优先级策略混合遗传算法

徐兆俊^a, 郑忠^a, 高小强^b

(重庆大学 a. 材料科学与工程学院, b. 经济与工商管理学院, 重庆 400045)

摘要: 针对炼钢连铸生产调度计划的可执行性要求, 考虑到生产中的设备选择及作业时间的不确定性问题, 提出一种利用任务可执行设备的加工权重赋值方法来量化描述现实生产中加工设备间的匹配关系, 并以设备选择优先级策略的形式引入遗传算法的交叉、变异过程, 按照生成可行解、再进行种群优化的分步决策方式形成混合遗传算法. 以某炼钢厂的实际生产调度数据为例进行仿真实验, 其结果表明了所提出算法的有效性.

关键词: 炼钢连铸; 生产调度; 设备匹配关系; 优先级策略; 混合遗传算法

中图分类号: F224; TF3

文献标志码: A

HGA combined with priority strategy for production planning of steelmaking-continuous casting

XU Zhao-jun^a, ZHENG Zhong^a, GAO Xiao-qiang^b

(a. College of Material Science and Engineering, b. College of Economics and Business Administration, Chongqing University, Chongqing 400045, China. Correspondent: ZHENG Zhong, E-mail: zhengzh@cqu.edu.cn)

Abstract: Aiming at the executability of the production plan of steelmaking-continuous casting, considering the uncertainty of choosing the equipment and the operating time in the production process, a method of representing the equipment matching relations by assigning the weight value to these available equipment is proposed. This method is transformed into the priority strategy which is introduced into the process of the crossover and the mutation. The hybrid genetic algorithm is formed with the stepwise decision of obtaining the feasible solution first and then optimizing the population. Simulation experiments based on the production scheduling data in a steel plant are carried out, and the result shows the effectivity of the proposed algorithm.

Keywords: steelmaking-continuous casting; production planning; equipment matching relations; priority strategy; hybrid genetic algorithms

0 引言

炼钢连铸生产调度是钢铁企业生产管理的重要组成部分. 在现实生产中, 生产环境和生产条件存在多种不确定性, 会导致生产调度计划难以执行或执行的效果受限. 因此, 研究可执行生产调度计划的合理高效制定方法, 对提升生产系统的整体运行效率以及降低物耗、能耗和成本等具有重要意义; 同时, 该问题也是一类典型的混合流水车间调度(HFS)问题, 相关研究进展也可为此类调度问题提供新的解决思路.

近年来, 炼钢连铸生产调度问题作为研究热点, 主要围绕建模及模型求解方法进行. 建模方法主要有数学规划建模、图形化建模和仿真建模等^[1], 其中数学规划建模是最常用的模型描述方法. 问题的优化

求解方法主要有最优化方法和近似优化方法. 最优化方法包括数学规划、分枝定界和拉格朗日法^[2]等数学方法, 这类方法对于小规模的生产调度问题能够有效求解. Bellabdaoui等^[3]建立了混合整数线性规划模型, 用于描述炼钢生产中的工艺约束并求解炼钢连铸生产调度问题, 模型对除连铸工序外的作业时间作了标准化处理. 近似优化方法主要包括多种智能计算方法(遗传算法^[4-6]、蚁群算法^[7]、蜂群算法^[8]等)、启发式方法、人工智能方法以及多种方法的混合方法^[9-10]等. 朱道飞等^[4]构建了一种改良遗传算法来求解炼钢连铸生产调度问题, 模型中对于加工设备的选择是通过启发式规则确定的. 近似优化求解方法具有较高的求解效率, 更加面向实际应用, 但求解结果的

收稿日期: 2015-07-06; 修回日期: 2015-09-30.

基金项目: 国家自然科学基金项目(51474044, 50574110, 50174061); 重庆市科技攻关重点项目(CSTC2011AB3053).

作者简介: 徐兆俊(1993-), 男, 博士生, 从事冶金信息与系统工程的研究; 郑忠(1963-), 女, 教授, 博士生导师, 从事冶金信息与系统工程、钢铁冶金、生产调度与优化、元胞自动机仿真等研究.

合理性还需进一步检验。

目前, 不确定条件下的生产调度问题开始受到关注。文献[11-13]中主要采用随机变量、模糊理论和粗糙集理论等对不确定问题进行处理。徐新黎等^[11]研究了用广义粗糙集理论描述不确定变量的建模方法, 并用差分进化算法求解; 俞胜平等^[13]采用模糊数表示不确定加工时间信息, 建立了炼钢连铸生产调度问题的模糊规划模型并进行求解。这类研究主要集中于生产调度中时间不确定性问题。对于设备选择的不确定性问题, 一般是假设设备分派不受限制或者采用启发式分派规则的简化处理方法, 这样可能会导致生产调度计划难以执行等问题。

本文针对以炼钢连铸为代表的一类混合流水线车间生产调度计划制定问题, 提出一种有针对性的不确定性问题建模方法及求解算法, 采用作业时间分布函数的随机变量取值方法来描述作业时间的不确定性; 对于设备选择的不确定性问题, 提出了赋予设备任务加工权重值的量化描述方法, 并以设备选择优先级策略的形式结合遗传算法形成了模型的优化求解算法。最后, 以某炼钢厂的生产调度问题为实例进行仿真实验, 验证了本文模型和算法的有效性。

1 炼钢连铸生产调度问题描述

炼钢连铸生产调度是在生产批量计划的基础上, 以计划期内若干浇次中的炉次为最小计划单位, 在满足生产工艺约束的前提下, 追求综合评价函数的效果最佳, 安排 N 个炉次到 M 道工序中的若干设备 K 上进行生产。即确定炉次 i 从转炉到连铸的生产过程中, 选择适当的工序设备 $C_{i,j,k}$ 以执行炼钢-精炼-连铸等加工任务, 并且确定炉次在设备上加工的开始时间 $t_{i,j,k}^S$ 、加工时间 $t_{i,j,k}$ 和结束时间 $t_{i,j,k}^E$ 。其中

$$C_{i,j,k} = \begin{cases} 1, & \text{炉次 } i \text{ 被分配到工序 } j \text{ 的设备 } k \text{ 加工;} \\ 0, & \text{炉次 } i \text{ 未被分配到工序 } j \text{ 的设备 } k \text{ 加工。} \end{cases}$$

且有 $i \in (1, N)$, $j \in (1, M)$, $k \in (1, K_j)$, K_j 为工序 j 上所有设备的集合。

生产调度的优化目标: 考虑到现实生产中的准时生产原则, 以及过长等待时间会对钢水冶金性能产生影响, 设定以最小化连铸机偏离预定开浇时间和炉次在工序前等待时间共同引起的惩罚费用为生产调度的优化目标。

约束条件: 主要包括连铸机连浇、钢水生产工艺等常规生产的约束条件。并且, 为了描述生产过程中存在的设备选择和作业时间的不确定性问题, 本文考虑用设备任务加工权重值非零来表示可选设备的约束; 用根据现实作业时间统计分布中取随机数的方式

来表示作业时间的随机约束。

2 炼钢连铸生产调度模型的建立

模型的基本假设: 1) 已知批量计划; 2) 已知连铸机的预定开浇时间(取连铸机在最早可开浇时刻后的预定开浇时间的经验值); 3) 炉次沿生产流程加工时, 物流时间由3部分构成, 即在工序前的等待时间、在工序上的作业时间和运送至下一个工序的运输时间; 4) 已知炉次在各工序上作业时间及工序间运输时间的分布规律(由现实生产作业时间统计得到); 5) 已知计划编制时刻的各设备最早可用时间。

炼钢连铸生产调度计划模型如下:

模型的决策变量为 $C_{i,j,k}$, $t_{i,j,k}^S$, $t_{i,j,k}$, $t_{i,j,k}^E$;

目标函数为

$$\min Z = \alpha_1 \times f_1 + \alpha_2 \times f_2. \quad (1)$$

其中: α_1 为铸机偏离预定开浇时间所产生的惩罚费用系数, α_2 为炉次在生产中等待时间所产生的惩罚费用系数, 分别根据生产统计数据确定; 以 f_1 表示各连铸机偏离预定开浇时间量的总和, f_2 表示各浇次内的所有炉次在生产过程中等待时间的总和, 计算如下:

$$f_1 = \sum_{q=1}^L |T_q - T'_q|. \quad (2)$$

这里: q 为连铸机编号, 共有 L 台连铸机; T_q 和 T'_q 分别为连铸机 q 的预计开浇时间和实际开浇时间。

$$f_2 = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^{\Omega_j} \mu'_{i,j,k}. \quad (3)$$

这里: Ω_j 为炉次 i 在工序 j 上可用设备的集合, $\Omega_j \subseteq K_j$; $\mu'_{i,j,k}$ 为炉次 i 在工序 j 设备 k 上作业前的等待时间。

约束条件如下:

1) 各浇次内炉次的连浇约束为

$$t_{i',M,k}^S = t_{i,M,k}^E + t_{M,k}^\delta. \quad (4)$$

其中: i' 为同一设备上加工炉次 i 的紧后炉次; $t_{M,k}^\delta$ 为流程末尾的连铸工序 M 设备 k 上相邻炉次间因辅助作业产生的间隙时间, 主要是钢包回转台通过转动将待浇侧钢水包转动到浇铸侧所需的时间。

2) 炉次在工序前等待时间有限约束为

$$\mu'_{i,j,k} \leq \mu_{i,j,k}, \quad (5)$$

其中 $\mu_{i,j,k}$ 为炉次 i 在工序 j 设备 k 上作业前的最大允许等待时间。

3) 机器能力析取约束, 即机器同时只能加工一件任务, 有

$$t_{i,j,k}^S \geq t_{i,j,k}^E + t_{j,k}^\delta, \quad (6)$$

其中 $t_{j,k}^\delta$ 为工序 j 设备 k 上相邻炉次间因辅助作业产生的间隙时间。

4) 炉次在每道工序上最多被加工一次, 即

$$\sum_{k=1}^{\Omega_j} C_{i,j,k} \leq 1. \quad (7)$$

5) 同一炉次要等到前一工序加工完才可进行下一工序加工, 即

$$t_{i,j,k}^S \geq t_{i,j',k'}^E + d[(j', k'), (j, k)]. \quad (8)$$

其中: j' 为同一炉次的工艺路径中工序 j 的紧前工序, $d[(j', k'), (j, k)]$ 为炉次 i 在工序 j' 设备 k' 和工序 j 设备 k 之间的运输时间.

6) 设备最早可用约束, 即各设备上第一炉次的开始作业时间晚于该设备的最早可用时间, 有

$$T_{j,k} \geq T'_{j,k}. \quad (9)$$

其中: $T_{j,k}$ 为工序 j 设备 k 上第一炉次的开始作业时间, $T'_{j,k}$ 为初始时刻工序 j 设备 k 的最早可用时间.

7) 可选设备约束, 即炉次只能选择紧后工序上任务加工权重非零的设备进行加工, 有

$$\omega[(j', k'), (j, k)] \geq 0, \quad (10)$$

其中 $\omega[(j', k'), (j, k)]$ 为炉次从工序 j' 设备 k' 转至紧后工序 j 设备 k 上的任务加工权重.

8) 生产中时间不确定性约束, 即设备加工时间和设备间运输时间在一定范围内波动, 有

$$d[(j', k'), (j, k)]_{\min} \leq d[(j', k'), (j, k)] \leq d[(j', k'), (j, k)]_{\max}, \quad (11)$$

$$t_{i,j,k}^{\min} \leq t_{i,j,k} \leq t_{i,j,k}^{\max}. \quad (12)$$

其中: $d[(j', k'), (j, k)]_{\min}$ 和 $d[(j', k'), (j, k)]_{\max}$ 分别为工序 j' 设备 k' 与工序 j 设备 k 之间的最小和最大运输时间; $t_{i,j,k}^{\min}$ 和 $t_{i,j,k}^{\max}$ 分别为炉次 i 在工序 j 设备 k 上最小和最大加工时间.

3 模型的求解方法

3.1 模型求解算法流程

模型求解算法流程如图 1 所示. 算法流程包括模型初始化、可行解产生和种群优化 3 个阶段. 其中可行解产生和种群优化阶段构成了模型的分步决策优化求解过程.

在模型初始化阶段, 输入钢厂制造流程网络的结构信息、批量计划信息以及算法所涉及各种参数信息 (包括从生产数据库统计的作业时间分布、遗传算法参数等), 并且初始化遗传算法迭代器; 在可行解产生阶段, 根据确定的染色体编码, 依据时间分布规律随机产生作业时间, 根据逆流程的倒推计算和设备上的冲突消除编写相应算法得到无时间冲突的生产调度计划. 考虑到生产过程中存在的作业时间的不确定性, 允许上述过程循环进行, 通过作业时间的多次随机产生, 形成用于优化解搜索的由确定染色体编码所

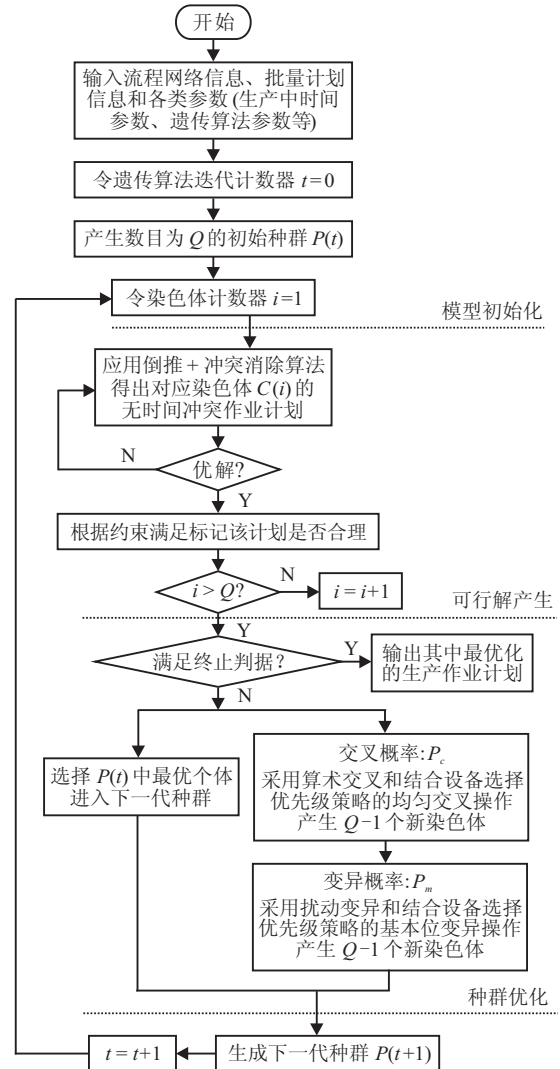


图 1 模型求解流程

表达的解空间; 在种群优化阶段, 通过对解空间的搜索, 以及结合现实环境中设备选择优先级策略的遗传操作, 进行种群进化, 直至产生优化解并输出.

3.2 设备匹配关系的量化描述方法及设备选择的优先级策略

在现实生产过程中, 由于生产流程布局差异和设备状态的变化, 各工序的设备之间的匹配关系是动态变化的. 为此, 设计了一种用任务加工权重 $\omega[(j', k'), (j, k)]$ 来量化描述这类可加工设备之间动态匹配关系的方法. $\omega[(j', k'), (j, k)]$ 代表炉次从工序 j' 设备 k' 转至紧后工序 j 设备 k 的任务加工权重, 其值的大小体现了设备间的可达状态以及设备选择的优先级高低.

在生产中, 设备之间的匹配状态往往与设备间的布置距离和路径长短密切相关. 因此, 以设备间运输时间大小来表征设备间的匹配状态, 具体量化方法可用如下准则表示:

准则 1 若因生产布局或设备故障等导致工序 j 设备 k 为工序 j' 设备 k' 的不可达设备, 则

$$\omega[(j', k'), (j, k)] = 0;$$

准则2 若工序 j 上仅有设备 k 为工序 j' 设备 k' 的可达设备, 则

$$\omega[(j', k'), (j, k)] = 1;$$

准则3 若工序 j 上存在多个工序 j' 设备 k' 的可达设备 $k_1, k_2, \dots, k, \dots$, 则

$$\omega[(j', k'), (j, k)] = \frac{d}{d[(j', k'), (j, k)]},$$

$$d = \min(d[(j', k'), (j, k_1)], \dots, d[(j', k'), (j, k)], \dots),$$

由此可知, $\omega[(j', k'), (j, k)]$ 最大值为 1, 此时工序 j' 设备 k' 和工序 j 设备 k 为设备匹配状态。

基于以上量化描述方法, 通过任务加工权重 $\omega[(j', k'), (j, k)]$ 可以形成设备选择的优先级策略, 即任务加工权重 $\omega[(j', k'), (j, k)]$ 值越大, 代表选择该设备进行任务加工的优先级越高, 进而再将任务加工权重以优先级策略形式引入遗传算法的交叉、变异操作中, 增加了遗传算法向着可行有序方向进化的概率, 有利于产生优化解。

3.3 结合设备选择优先级策略的混合遗传算法

3.3.1 分段组合编码方式

针对生产过程中执行计划的设备选择不确定, 构造了包含连铸机开浇时间和各炉次加工路径信息分段组合实数编码方式, 其中第 1 部分包含 L 台连铸机的开浇时间; 第 2 部分包含 M 个炉次任务的加工路径, 即在各个工序上设备选择的信息。如染色体

$$C = \{(T_1, T_2, \dots, T_L), (1201, 3211, \dots, 3122)\}.$$

其中: T_1 代表 1# 连铸机开浇时间为第 T_1 min; T_L 代表 L # 连铸机的开浇时间为第 T_L min; 1201 代表 1# 炉次的生产路径为: 1# 转炉-2# LF-1# 连铸机; 3122 代表 N # 炉次的加工路径为: 3# 转炉-1# LF-2# RH-2# 连铸机。

基于以上的编码方式, 在算法求解过程中对其解码, 便可得到各炉次沿生产流程的设备选择信息。通过按作业时间的统计分布随机产生加工时间和运输时间, 再采用倒推和冲突消除算法, 便可得到对应染色体的无时间冲突的调度计划。

3.3.2 适应度函数

混合遗传算法的适应度函数值计算公式为

$$y = \frac{C_{\max} - Z}{C_{\max}}. \quad (13)$$

其中: Z 为模型目标函数值, C_{\max} 为一足够大正数。

3.3.3 选择操作

在遗传算法中, 选择操作通过适应度选择优质个体而抛弃劣质个体。Potts 等^[14]概括了 23 种选择方法, 其中常见的有轮盘赌、最优个体保存、排序选择等。

本文采用最优个体保存策略以保证遗传过程中所得到的最优个体不会被交叉和变异操作破坏, 这是遗传算法收敛性的重要保证条件^[15]。

3.3.4 结合设备选择优先级策略的遗传操作

鉴于构成解的染色体是由连铸机开浇时间和计划执行设备的两段编码构成, 并且两段编码数据结构有所不同, 因此, 染色体采用分段遗传操作方式进行: 连铸机开浇时间部分的编码采用算术交叉和扰动变异的方法; 而计划执行设备部分的编码, 是通过将设备选择优先级策略引入遗传操作中, 依据各设备上任务加工权重值确定均匀交叉操作中的交叉概率和基本位变异操作中的变异概率。遗传操作算法流程描述如下。

Step 1: 将上代种群 $P(t)$ 中除最优个体外的剩余染色体存入集合 $\Omega_{P(t)}$ 中, 并且令染色体交叉计数器 $i_c = 1$ 。

Step 2: 交叉操作。从集合 Ω_c 中随机抽取两个父代染色体 C_1 和 C_2 , 并以概率 P_c 进行交叉, 得到两个子代染色体 C'_1 和 C'_2 。

Step 3: 从集合 $\Omega_{P(t)}$ 中删除染色体 C_1 和 C_2 , 并将染色体 C'_1 和 C'_2 存入集合 $\Omega_{P(t+1)}$ 中。若集合 $\Omega_{P(t)}$ 不为空, 则令 $i_c = i_c + 2$, 返回 Step 2; 否则执行 Step 4。

Step 4: 令染色体变异计数器 $i_m = 1$ 。

Step 5: 变异操作。从集合 $\Omega_{P(t+1)}$ 中抽取父代染色体 C'_1 , 并且以概率 P_m 进行变异, 得到子代染色体 C''_1 。

Step 6: 从集合 $\Omega_{P(t+1)}$ 中删除染色体 C'_1 , 并将染色体 C''_1 存入集合 $\Omega_{P(t+1)}$ 中。若集合 $\Omega_{P(t+1)}$ 不为空, 则令 $i_m = i_m + 1$, 返回 Step 5; 否则结束, 集合 $\Omega_{P(t+1)}$ 中的染色体与上代种群中的最优个体共同组成新一代种群 $P(t+1)$ 。

关键遗传操作部分的实现方法如下。

1) 交叉操作。

① 模型中将连铸机偏离预定开浇时间总量作为优化目标之一, 故开浇时间的编码采用算术交叉操作以控制其变化范围, 避免多次交叉后造成大幅偏离预定开浇时间的现象, 从而提高作业计划的合理性和可执行性。有

$$CT'_1 = \alpha \times CT_1 + (1 - \alpha) \times CT_2, \quad (14)$$

$$CT'_2 = \alpha \times CT_2 + (1 - \alpha) \times CT_1. \quad (15)$$

其中: α 为 $[0, 1]$ 之间的随机数, CT_1 、 CT_2 为父代染色体的开浇时间编码, CT'_1 、 CT'_2 为子代染色体的开浇时间编码。

② 各炉次加工路径的编码采用均匀交叉法, 即

两个父代对应的每一位基因都以交叉概率 $p(j')$ 进行交换. 炉次 i 的两个父代染色体子串中对应于工序 j' 的基因位值 P_1 和 P_2 的交叉概率 $p(j')$ 值为

$$p(j') = \omega[(j', P_2), (j, O_1)] \times \omega[(j', P_1), (j, O_2)]. \quad (16)$$

$p(j')$ 值的大小取决于交叉后子代染色体中工序 j 设备 O_1 对应于工序 j' 设备 P_2 的加工权重值 $\omega[(j', P_2), (j, O_1)]$ 和工序 j 设备 O_2 对应于工序 j' 设备 P_1 的加工权重值 $\omega[(j', P_1), (j, O_2)]$. 对 $p(j')$ 值的非零效核可以保证交叉后的子代染色体的合法性. 同时, $p(j')$ 值越大, 表示该部分编码将以更大的概率向设备匹配状态更佳的加工路径演化, 有利于产生优化解.

2) 变异操作.

① 各铸机开浇时间编码变异. 增加或减少一个随机扰动, 即

$$T'_q = T_q + \beta. \quad (17)$$

其中: β 为 $[a, b]$ 之间的随机量, $[a, b]$ 为人工设定的较小扰动区间, 以避免多次变异后铸机开浇时间大幅偏离预定开浇时间.

② 炉次生产路径编码采取基本位变异, 即随机指定某些基因位 (除对应于连铸工序的基因位) 进行变异. 对于炉次 i 的染色体子串执行变异操作时, 其对应于工序 j 的基因位值 P 变异成该工序上其他设备 K 的变异概率 $p(K)$ 为

$$p(K) = \omega[(j', O), (j, K)] \times \omega[(j, K), (j'', Q)], \quad (18)$$

其中 j'' 为同一炉次的工艺路径中工序 j 的紧后工序.

$p(K)$ 值大小取决于变异后子代染色体中工序 j 设备 K 对应于工序 j' 设备 O 的加工权重值 $\omega[(j', O), (j, K)]$ 和工序 j'' 设备 Q 对应于工序 j 设备 k 的加工权重值 $\omega[(j, K), (j'', Q)]$. 对 $p(K)$ 值的非零判断可以有效核变异后的新染色体是否合法. 同时, $p(K)$ 值越大, 表示该部分编码将以较大概率向设备匹配状态更佳

的加工路径演化, 有利于解的更优化.

4 应用实例与结果分析

4.1 实例对象设置

以某炼钢厂的生产调度计划编制实例进行算法的检验和应用测试. 该炼钢厂有转炉炼钢-LF 精炼-RH 精炼-连铸 4 个主要生产工序, 其生产流程简图如图 2 所示. 统计生产实际数据得到了各钢种在各工序上加工时间和设备间运输时间的分布规律. 依据现实生产中某段时间的浇次计划进行仿真实验, 如表 1 所示. 遗传算法参数设置为: 种群大小 200, 进化代数 100, 交叉概率 $P_c = 0.8$, 变异概率 $P_m = 0.01$, $a = -2, b = 2$. 在 CPU 为 2.2 GHz, 内存为 2G 的计算机上进行多次实验, 混合遗传算法均能在 50 s 内得到优化的生产作业计划, 如图 3 所示.

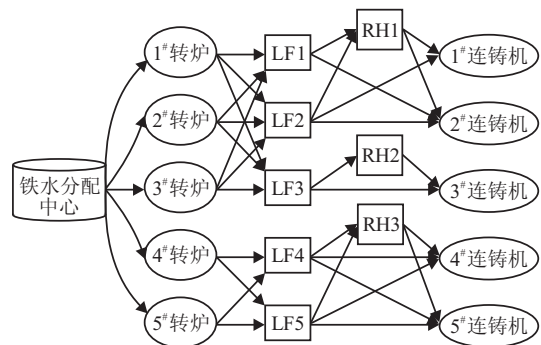


图 2 某炼钢厂生产流程简图

表 1 浇次计划

浇次编号	浇次内炉数	钢种	工艺路线	加工铸机号
1	6	A	BOF-LF-CC	1#
2	5	B	BOF-LF-CC	1#
3	5	C	BOF-LF-RH-CC	2#
4	5	D	BOF-LF-CC	3#
5	4	E	BOF-LF-RH-CC	3#
6	7	F	BOF-LF-RH-CC	4#
7	8	G	BOF-LF-CC	5#

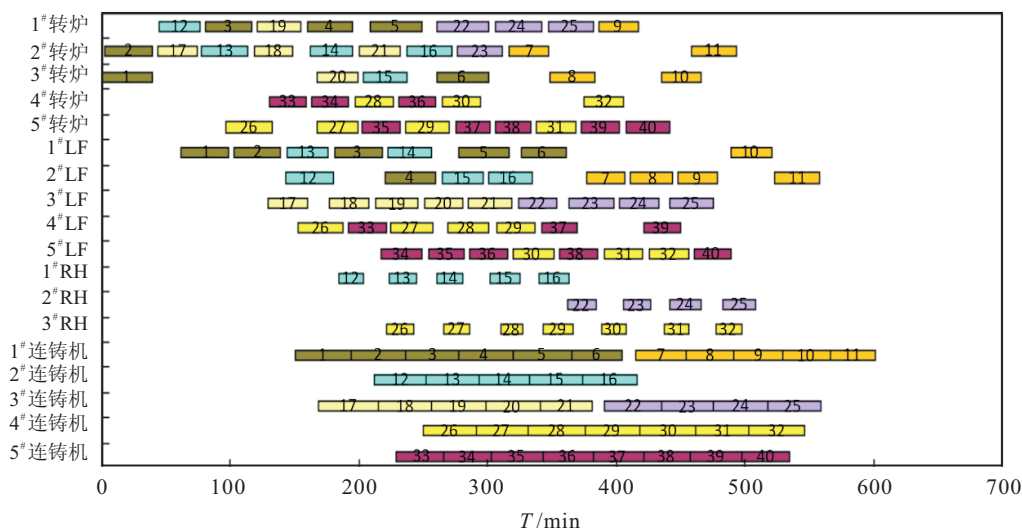


图 3 混合遗传算法编制的生产作业计划 Gantt 图

4.2 优化算法与生产实际作业时间统计分析

图 4 为计划内各炉次 ($1 \leq i \leq 40$) 从转炉出钢至连铸机开始浇铸的流程作业时间的仿真计算值与生产实际值的比较, 包括结合设备选择优先级策略的混合遗传算法 (HGA) 仿真计算值, 与未结合设备选择优先级策略的基本遗传算法 (SGA) 仿真计算值, 以及生产实际值的比较。

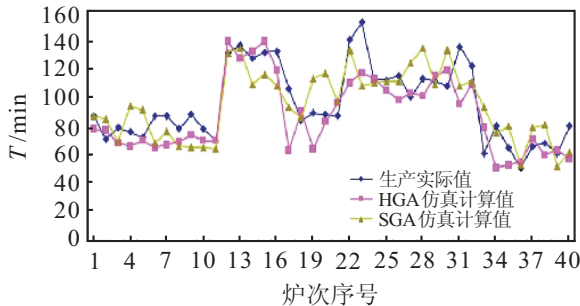


图 4 各炉次从转炉出钢至连铸机开始浇铸的流程作业时间的仿真计算值与生产实际值的比较

表 2 给出了仿真计算与生产实际的流程作业时间的统计平均值. 由比较可知, HGA 和 SGA 的计算值均优于生产实际, 且 HGA 优化效果更为明显. 这是因为现实生产中并未对生产计划进行优化, 造成了现实生产中炉次往往有更长的运输距离及较长的等待时间. 同时, 图 4 还显示出作业时间的仿真计算值 HGA 方法比 SGA 方法更趋于平稳, 这是因为在未经优化的 SGA 遗传操作中, 设备选择的随机性更大, 造成了个别炉次加工任务的生产路径更为复杂且不尽合理, 从而增加了全流程作业时间。

表 2 仿真计算与生产实际的流程作业时间的统计平均值

作业时间统计平均值/min	经过 RH 精炼	未经过 RH 精炼
生产实际	124.8	82
SGA 仿真计算值	118.1	80.4
HGA 仿真计算值	114.4	72.8

4.3 混合遗传算法与基本遗传算法优化性能分析

在现实生产中, 选择不同的加工路径会对运输环节产生不同的影响, 如设备匹配较差的加工路径通常具有更长的运输距离或者更复杂的运输中转环节, 物流更容易在途中因等待而导致较大的温降. 因此, 可以用工序间设备匹配率来衡量物流在运输环节能否顺畅运行。

相邻工序间设备匹配率的计算公式为

$$\eta_{j'-j} = \frac{\text{工序 } j' \text{ 和工序 } j \text{ 间为设备匹配状态的路径总数}}{\text{工序 } j' \text{ 和工序 } j \text{ 间总路径数}}$$

其中设备匹配指炉次选择紧后工序上任务加工权重值 $\omega[(yj', k'), (j, k)]$ 最大的设备生产, 即 $\omega[(j', k'), (j, k)] = 1$ 。

本文对引入优先级策略的混合遗传算法 (HGA) 和未引入优先级策略的基本遗传算法 (SGA), 在相同的输入条件下分别进行了 10 次仿真实验, 其中对转炉-LF 间设备匹配率 $\eta_{\text{BOF-LF}}$ 、LF-CC 间设备匹配率 $\eta_{\text{LF-CC}}$ 和终解适应度函数值 y_E 的比较结果如表 3 所示。

表 3 仿真实验结果对比

评价指标	算法	实验编号										平均值	方差
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
$\eta_{\text{BOF-LF}}$	SGA	0.3	0.3	0.4	0.55	0.25	0.425	0.4	0.55	0.475	0.3	0.395	1.15×10^{-2}
	HGA	0.4	0.55	0.55	0.35	0.55	0.475	0.4	0.55	0.425	0.5	0.475	5.83×10^{-3}
$\eta_{\text{LF-CC}}$	SGA	0.525	0.55	0.5	0.525	0.525	0.65	0.65	0.525	0.6	0.5	0.555	3.31×10^{-3}
	HGA	0.675	0.7	0.675	0.55	0.675	0.7	0.675	0.55	0.6	0.65	0.645	3.31×10^{-3}
y_E	SGA	0.901	0.926	0.92	0.877	0.929	0.912	0.929	0.917	0.942	0.916	0.917	3.21×10^{-4}
	HGA	0.916	0.927	0.917	0.935	0.921	0.909	0.929	0.917	0.919	0.921	0.921	5.57×10^{-5}

由对比实验结果可知, 最终解的适应度函数平均值相当, 因而两种遗传算法在减少钢水等待时间和保证准时生产上的优化性能相当. 但是, 由于在遗传过程中未引入设备选择优先级策略的简单遗传算法, 生产设备的选择具有更大的随机性, 使得各项性能指标值的变化幅度较大, 并且在工序间设备匹配率上相对较低. 而引入设备选择优先级策略的混合遗传操作, 在进化过程中, 染色体以较大概率向着设备匹配关系更好的生产路径演变, 最终解的设备匹配率比简单遗传算法平均高出 15%, 解的合理性更优。

5 结 论

从有利于炼钢连铸生产调度计划可有效执行的角度, 针对现实生产中存在的设备选择和作业时间的不确定性问题, 提出了基于设备选择优先级策略的炼钢连铸调度计划制定的建模方法, 以及相应的混合遗传求解算法. 该模型采用作业时间分布函数的随机变量取值方法来描述生产作业时间的不确定性; 并提出了用任务可执行设备的加工权重赋值来对现实生产中加工设备间匹配关系进行量化描述以解决设备选择的不确定性; 同时将设备选择优先级策略引入

遗传算法的遗传操作中形成混合遗传算法进行模型的优化求解. 通过生成可行解、再进行解的优化的分步决策方式搜索解空间, 能够便捷得到优化的可执行的炼钢连铸调度计划. 针对某炼钢厂炼钢连铸调度计划编制的实例进行仿真计算, 结果表明了所提出的优先级策略混合遗传算法具有优化炉次加工路径、缩短流程作业时间、提高设备匹配率的效果, 验证了本文模型和算法的有效性. 进一步的研究将立足于把该算法扩展到现实生产扰动下的炼钢连铸动态调度问题领域, 以更好地适应复杂生产的需求.

参考文献(References)

- [1] 刘民. 基于数据的生产过程调度方法研究综述[J]. 自动化学报, 2009, 35(6): 785-806.
(Liu M. A survey of data-based production scheduling methods[J]. Acta Automatica Sinica, 2009, 35(6): 785-806.)
- [2] 毛坤, 潘全科, 庞新富. 求解炼钢-连铸生产调度问题的拉格朗日算法[J]. 系统工程学报, 2014, 29(2): 233-245.
(Mao K, Pan Q K, Pang X F. Lagrangian algorithm for steelmaking-continuous casting production scheduling[J]. J of Systems Engineering, 2014, 29(2): 233-245.)
- [3] Bellabdaoui A, Teghem J. A mixed-integer linear programming model for the continuous casting planning[J]. Int J of Production Economics, 2006, 104(2): 160-270.
- [4] 朱道飞, 郑忠, 高小强. 炼钢-连铸作业计划的遗传优化模型[J]. 钢铁, 2008, 43(7): 26-31.
(Zhu D F, Zheng Z, Gao X Q. Optimization model based on genetic algorithms for production planning of steelmaking and continuous casting process[J]. Iron and Steel, 2008, 43(7): 26-31.)
- [5] Lei D M. Simplified multi-objective genetic algorithms for stochastic job shop scheduling[J]. Applied Soft Computing, 2011, 11(8): 4991-4996.
- [6] 陈立, 唐秋华, 陈伟明, 等. 融合约束满足和遗传优化的炼钢连铸生产调度[J]. 计算机集成制造系统, 2013, 19(11): 2834-2846.
(Chen L, Tang Q H, Chen W M, et al. Production scheduling of steelmaking-continuous casting integrated hybridizing constraint satisfaction and genetic optimization[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2013, 19(11): 2834-2846.)
- [7] 贾兆红, 李丹, 李龙澍. 求解差异工件批调度问题的改进型蚁群算法[J]. 控制与决策, 2014, 29(10): 1758-1764.
(Jia Z H, Li D, Li L S. Improved ant colony algorithm for solving batch scheduling problem with on-identical job sizes[J]. Control and Decision, 2014, 29(10): 1758-1764.)
- [8] 马文强, 唐秋华, 张超勇, 等. 基于离散人工蜂群算法的炼钢连铸调度优化方法[J]. 计算机集成制造系统, 2014, 20(3): 586-594.
(Ma W Q, Tang Q H, Zhang C Y, et al. Steel-making continuous-casting scheduling method based on DABC algorithm[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2014, 20(3): 586-594.)
- [9] 王新, 贾志强, 尚宏美. 基于遗传算法和贪婪算法的作业车间调度[J]. 机械工程师, 2015, 20(1): 118-120.
(Wang X, Jia Z Q, Shang H M. Job shop scheduling based on genetic algorithm and greedy algorithm[J]. Mechanical Engineer, 2015, 20(1): 118-120.)
- [10] Mittebthal, Madabhushi R, Arif I R. A hybrid simulated annealing approach of single machine scheduling problems with non regular penalty functions[J]. Computer Operation Research, 1993, 20(2): 103-111.
- [11] 徐新黎, 施莉娜, 范丽霞, 等. 基于广义粗糙集的流程工业车间调度研究[J]. 控制与决策, 2012, 27(1): 8-14.
(Xu X L, Shi L N, Fan L X, et al. Research on process industry shop scheduling based on generalized rough set[J]. Control and Decision, 2012, 27(1): 8-14.)
- [12] Horng S C, Lin S S, Yang F Y. Evolutionary algorithm for stochastic job shop scheduling with random processing time[J]. Expert Systems with Applications, 2012, 39(3): 3603-3610.
- [13] 俞胜平, 庞新富, 柴天佑, 等. 加工时间不确定的炼钢连铸生产调度问题研究[J]. 控制与决策, 2009, 24(10): 1467-1472.
(Yu S P, Pang X F, Chai T Y, et al. Research on production scheduling for steelmaking and continuous casting with processing time uncertainty[J]. Control and Decision, 2009, 24(10): 1467-1472.)
- [14] Potts C J, Terr I D. Development and evaluation of an improved genetic algorithm based on migration and artificial selection[J]. IEEE Trans on Systems, Man, and Cybernetics, 1994, 24(1): 73-86.
- [15] 葛继科, 邱玉辉, 吴春明, 等. 遗传算法研究综述[J]. 计算机应用研究, 2008, 25(10): 2911-2916.
(Ge J K, Qiu Y H, Wu C M, et al. Summary of genetic algorithms research[J]. Application Research of Computers, 2008, 25(10): 2911-2916.)

(责任编辑: 李君玲)