

炼钢-连铸生产启发式调度方法

俞胜平[†], 柴天佑

(东北大学 流程工业综合自动化国家重点实验室, 辽宁 沈阳 110819)

摘要: 实际炼钢-连铸生产存在着多阶段、多并行机, 以及在精炼阶段具有多重精炼方式, 从而大大增加了炼钢-连铸生产调度难度. 目前已有的炼钢-连铸生产调度研究由于仅仅针对简单生产方式而难以应用于目前大型炼钢-连铸生产调度. 而实际生产过程中的以人工为主的调度方法速度慢、优化程度低, 极易造成炉次在设备间的冗余等待时间过长, 导致钢水温度下降, 甚至造成连铸断浇事故. 本文针对中国宝钢某大型炼钢厂的多重精炼方式且存在着可重入调度下的炼钢-连铸生产调度问题进行研究, 提出了多种调度顺序方法和设备指派方法, 通过仿真实验对多种调度顺序方法和多种设备指派方法组合而成的各种启发式方法进行了研究. 最后将本文提出的性能最好的启发式方法应用于该大型炼钢厂的炼钢-连铸生产调度, 钢水平均日冗余等待时间得到显著降低.

关键词: 炼钢-连铸; 生产调度; 启发式方法; 可重入调度

中图分类号: TP273

文献标识码: A

Heuristic scheduling method for steelmaking and continuous casting production process

YU Sheng-ping[†], CHAI Tian-you

(State Key Laboratory of Synthetical Automation for Process Industries, Northeastern University, Shenyang Liaoning 110819, China)

Abstract: There are multi-converter, multi-refining machine and multi-continuous caster, multi-stage refining and reentrant line in the steelmaking-continuous casting (SMCC) production process, which leads to the difficult scheduling. Existing scheduling researches only focus on simple production mode and are difficult to apply to the actual production process. Manual scheduling method is low efficient and easily leads to too long waiting time, the molten steel temperature drop, and even causes casting break. The paper researches the scheduling problem of SMCC production process in the largest iron and steel company (BaoSteel) in China. A variety of scheduling sequence methods and equipment assignment methods are proposed. Many heuristic methods are studied by means of simulation experiments for various scheduling sequence methods and multi device assignment methods. At the end of this paper, the best proposed method is applied to the SMCC production in the large iron and steel enterprises. The real-time application show that the proposed method can dramatically shorten the redundant waiting time for molten steel.

Key words: steelmaking and continuous casting; scheduling; heuristic algorithm; reentrant

1 引言(Introduction)

炼钢-连铸生产经过冶炼、精炼和浇铸三大阶段, 将高温铁水浇铸形成板坯. 在整个生产过程中, 钢水温度是重点控制的工艺参数. 为了减少或避免高温钢水在各工序之间除了正常的运输时间而导致温度下降, 在生产过程中应尽量减少钢水在工序之间的等待时间, 以保证钢水在各工序开始加工时温度满足生产工艺要求, 从而防止因钢水温度损失而需要升温处理甚至是钢种变更所带来的原材料消耗、能源消耗和生

产效率较低等问题.

炼钢-连铸生产调度问题是一类考虑工序间运输时间、生产工艺路径存在回环、且最后阶段为同一浇次内炉次连续加工的一类特殊的生产调度问题. 已有对炼钢-连铸生产调度方法研究主要集中在运筹学和智能方法. 文献[1]提出了炼钢-连铸生产调度的三阶段策略: 微排程、粗排程和解除机器冲突, 对于解除机器冲突建立了一个非线性规划模型, 将非线性规划模型转换为线性规划模型后采用标准的软件包进行求

收稿日期: 2015-10-21; 录用日期: 2016-08-10.

[†]俞胜平. E-mail: spyu@mail.neu.edu.cn; Tel.: +86 24-83681047-8013.

本文责任编辑: 阳春华.

国家自然科学基金项目(61104174, 61174187, 61473074, 61333006, 61603262)资助.

Supported by National Natural Science Foundation of China (61104174, 61174187, 61473074, 61333006, 61603262).

解. 文献[2-3]将炼钢-连铸生产调度问题看做多阶段的混合flow shop问题, 建立整数规划模型, 采用拉格朗日方法和前向动态规划方法进行求解. 文献[4]针对复杂的炼钢-连铸生产调度问题提出了一种分解策略, 将最初的混合整数线性规划问题分解为线性规划问题, 大大降低了问题的求解难度. 文献[5]在析取图的基础上采用交错图来对炼钢-连铸生产调度问题进行描述, 并采用束搜索算法进行求解. 文献[6]研究了炼钢-连铸生产调度问题的模型和算法, 提出了四阶段的启发式方法: 调度连铸机上的浇次、将炉次分配到转炉和精炼炉、对转炉和精炼炉上的炉次进行排序、确定炉次在设备上的具体作业时间. 文献[7]将炼钢-连铸生产调度问题看作混合flow shop问题, 提出一种新的基于蚁群算法和非线性优化方法的迭代式算法, 该算法分为两个阶段, 第1阶段确定炉次的加工设备和在设备上的加工顺序, 第2阶段确定炉次在设备的作业时间. 文献[8]将炼钢-连铸生产调度归结为混合flow shop问题进行了研究, 建立了混合整数规划模型, 采用拉格朗日松弛方法对设备能力约束进行松弛, 将松弛问题变为两个子问题进行研究. 文献[9]将炼钢-连铸生产调度归结为混合flow shop问题进行了研究, 采用鲁棒优化和模糊规划方法对调度中的不确定性进行了描述. 在鲁棒优化框架下, 采用鲁棒相对优化模型来保证各种要求下的生产调度可行性. 同时, 基于两阶段的模糊规划框架对不确定下的生产调度进行研究. 文献[10]针对具有混合flow shop特征的炼钢-连铸生产调度问题, 建立了混合整数数学模型, 提出了一种启发式方法和两种改进策略, 最后提出性能更好的一种人工蜂群算法. 目前已有的炼钢-连铸生产调度研究将炼钢-连铸生产调度简单抽象为具有一重精炼或二重精炼的混合flow shop问题, 对问题做了极大的简化, 而对目前现代大型炼钢厂复杂的多台转炉、多台精炼炉、多台连铸机, 多重精炼混合的多种精炼模式, 以及可重入生产线的炼钢-连铸生产调度问题的研究甚少, 难以适用于目前大型炼钢-连铸生产调度过程的需要. 而目前实际生产过程中以人工为主的调度方法速度慢、优化程度低, 极易造成炉次在设备间的冗余等待时间过长, 致钢水温度下降, 甚至造成连铸断浇事故.

本文针对中国宝钢某大型炼钢厂的三重精炼方式和可重入生产线下的炼钢-连铸生产调度问题进行研究, 该炼钢厂在精炼工序经过的处理包括多重精炼方式、多重精炼混合, 并存在炉次多次需要同一种精炼类型处理的可重入生产情况. 以炉次在相邻阶段等待时间总和最小为目标, 建立了炼钢-连铸生产调度的混合整数规划模型, 针对多种启发式方法进行研究, 提出了基于启发式方法的炼钢-连铸生产调度方法.

2 炼钢-连铸生产调度问题描述 (Problem description of scheduling for SMCC)

2.1 炼钢-连铸生产工艺过程 (SMCC production process)

炼钢-连铸生产过程是将铁水经过冶炼、精炼和浇铸形成板坯. 钢水在设备之间由天车和台车进行运输. 在转炉炼钢过程中, 高炉产出的铁水运输到转炉后和废钢一起倾倒入转炉中. 然后, 通过加热将转炉中的铁水和废钢加工成均匀的液态钢水, 去除其中的杂质并使其钢水的含碳量达到期望的比例. 同时, 转炉产出的钢水要达到一定的出钢温度要求. 精炼是把钢水进行脱气、脱氧、脱硫, 均匀化钢水的成分和温度、去除夹杂物、控制成分和升温. 浇铸是将高温钢水经由连铸机固化、冷却、拉流、切割转变成各种尺寸、表面无缺陷的、内在组织和温度受控的板坯, 并为热轧阶段或其它阶段提供原料. 图1为中国宝钢某大型炼钢厂的三重精炼方式下的生产工艺过程, 该炼钢厂共有5类主体加工设备: 转炉类、RH精炼类、LF精炼类、IR-UT精炼类和连铸类.

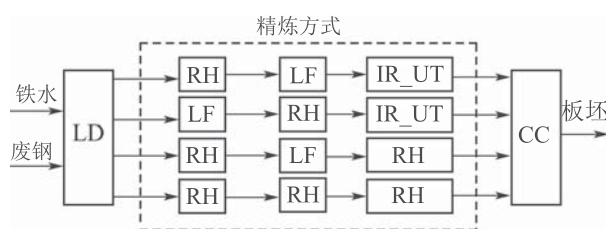


图1 炼钢-连铸生产工艺流程图示意图

Fig. 1 Workflow of SMCC production process

从图1可以看出, 该炼钢厂的生产工艺路径十分复杂, 三重精炼是指钢水在精炼工序需要经过3次处理, 这3次处理的精炼类型可能是同一种精炼类型, 也可能是不同的两种精炼类型, 或者是不同的3种精炼类型. 当三重精炼的钢水经过同一种精炼类型加工时, 则加工路线出现了“回环”情况. 因此, 该炼钢厂的炼钢-连铸生产调度问题不同于flow shop/job shop/混合flow shop/柔性job shop等调度问题, 比已有研究的炼钢-连铸生产调度问题复杂.

“炉次”是指在同一转炉设备内加工的一炉钢水, 冶炼后经钢包载运到精炼设备进行精炼, 然后到连铸机大包回转台, 最后从钢包中被倒入连铸机的中间包进行浇铸. 一个炉次的钢水正好是一台转炉一炉冶炼的钢水, 并且恰好装入一个钢包中进行运输. 在同一台连铸机上连续浇铸的炉次的有序集合称为一个“浇次”, 该集合中确定了炉次的个数及各炉次在浇次中的先后浇铸顺序.

2.2 符号和参数定义(Symbol and parameter definition)

1) 索引.

i, i_1, i_2 : 浇次序号;

j, j_1, j_2 : 炉次序号;

k, k_1, k_2 : 操作序号;

g : 设备类型号; $g = 1, \dots, G$, G 表示设备类型总数, $g = G$: 表示连铸机类型;

m, m_1, m_2 : 设备序号.

2) 参数.

θ : 浇次个数;

J_i : 第 i 个浇次的总炉次数, $i = 1, \dots, \theta$;

N_{ij} : 第 i 个浇次的第 j 个炉次的加工阶段总数;

o_{ijk} : 第 i 个浇次的第 j 个炉次的第 k 个操作;

g_m : 第 m 台设备的设备类型号;

m_{ijk}^* : 第 i 个浇次的第 j 个炉次的第 k 个操作的指定加工设备序号;

M_g : 类型 g 的设备总数;

M : 设备总数;

α_{ijk} : 第 i 个浇次的第 j 个炉次的第 k 个操作的加工设备类型号;

P_{ijk} : 第 i 个浇次的第 j 个炉次的第 k 个操作的处理时间;

$T_{m_1}^{m_2}$: 第 m_1 台设备与第 m_2 台设备之间的运输时间;

S_i : 第 i 个浇次的开浇时间;

U : 非常大的正整数.

3) 决策变量.

x_{ijk} : 操作 o_{ijk} 的开工时间;

y_{ijk}^m : 0/1 变量, 当且仅当第 i 个浇次的第 j 个炉次的第 k 个操作在第 m 台设备上加工时, $y_{ijk}^m = 1$; 否则 $y_{ijk}^m = 0$;

$z_{i_1, j_1, k_1}^{i_2, j_2, k_2}$: 0/1 变量, 当且仅当同一台设备上第 i_1 个浇次的第 j_1 个炉次的第 k_1 个操作在第 i_2 个浇次的第 j_2 个炉次的第 k_2 个操作之前加工时, $z_{i_1, j_1, k_1}^{i_2, j_2, k_2} = 1$; 否则 $z_{i_1, j_1, k_1}^{i_2, j_2, k_2} = 0$.

2.3 炼钢-连铸生产调度模型建立(Scheduling model establishment of SMCC)

在炼钢-连铸生产过程中炉次在各工序间的间隔时间, 除了运输时间外, 等待时间要尽量的小. 定义 w_{ijk} 为操作 o_{ijk} 开始加工之前的等待时间, 其值为操作 x_{ijk} 与 $x_{i, j, k-1}$ 之间间隔时间与所加工设备运输时间 $T_{m_{i, j, k-1}}^{m_{ijk}}$ 的差值, 即

$$w_{ijk} = x_{ijk} - (x_{i, j, k-1} + P_{i, j, k-1}) - T_{m_{i, j, k-1}}^{m_{ijk}}, \quad k = 2, \dots, N_{ij}. \quad (1)$$

定义炉次 L_{ij} 的等待时间 W_{ij} 为炉次各个操作的等待时间总和, 即 $W_{ij} = \sum_{k=2}^{N_{ij}} w_{ijk}$, 本文建立所有炉次的等待时间总和最小为调度目标:

$$\min \sum_{i=1}^{\theta} \sum_{j=1}^{J_i} W_{ij}. \quad (2)$$

调度模型考虑的约束条件如下:

1) 每个浇次准时开浇:

$$x_{i, 1, N_{i1}} = S_i, \quad i = 1, \dots, \theta. \quad (3)$$

2) 同一个浇次内的相邻炉次时间必须连续浇铸:

$$x_{i, j+1, N_{i, j+1}} = x_{i, j, N_{ij}} + P_{i, j, N_{ij}}, \quad i = 1, \dots, \theta; j = 1, \dots, J_i - 1. \quad (4)$$

3) 同一个炉次的后一个操作必须等到其前一个操作加工结束之后才能开工:

$$x_{i, j, k+1} - x_{ijk} - P_{ijk} - T_{m_1}^{m_2} + U(2 - y_{ijk}^{m_1} - y_{i, j, k+1}^{m_2}) \geq 0, \quad i = 1, \dots, \theta; j = 1, \dots, J_i - 1. \quad (5)$$

4) 同一个设备上加工的相邻炉次之间不能出现作业时间冲突, 即同一台设备上加工的相邻两个操作, 必须等到前一个操作加工结束之后才能开始下一个操作的加工:

$$x_{i_2, j_2, k_2} - x_{i_1, j_1, k_1} - P_{i_1, j_1, k_1} + U(3 - y_{i_1, j_1, k_1}^m - y_{i_2, j_2, k_2}^m - z_{i_1, j_1, k_1}^{i_2, j_2, k_2}) \geq 0, \quad i_1, i_2 = 1, \dots, \theta; j_1, j_2 = 1, \dots, J_i; k_1, k_2 = 1, \dots, N_{ij} - 1; m = 1, \dots, M; o_{i_1, j_1, k_1} \neq o_{i_2, j_2, k_2}. \quad (6)$$

5) 每一个炉次操作仅且只能在所属加工设备类型中的一台设备上加工:

$$\sum_{g=1}^{\alpha_{ijk}} M_g \sum_{m=\sum_{g=1}^{\alpha_{ijk}-1} M_g+1} y_{ijk}^m = 1, \quad i = 1, \dots, \theta; j = 1, \dots, J_i; k = 1, \dots, N_{ij}, y_{ijk}^m = 0, \quad i = 1, \dots, \theta; j = 1, \dots, J_i; k = 1, \dots, N_{ij}; g_m \neq \alpha_{ijk}. \quad (7)$$

6) 同一台设备上加工的两个操作, 存在着唯一的加工顺序:

$$z_{i_1, j_1, k_1}^{i_2, j_2, k_2} + z_{i_2, j_2, k_2}^{i_1, j_1, k_1} + U(2 - y_{i_1, j_1, k_1}^m - y_{i_2, j_2, k_2}^m) \geq 1, \quad i_1, i_2 = 1, \dots, \theta; j_1, j_2 = 1, \dots, J_i; k_1, k_2 = 1, \dots, N_{ij}, m = 1, \dots, M; o_{i_1, j_1, k_1} \neq o_{i_2, j_2, k_2}, \quad (8)$$

$$z_{i_1, j_1, k_1}^{i_2, j_2, k_2} + z_{i_2, j_2, k_2}^{i_1, j_1, k_1} - U(2 - y_{i_1, j_1, k_1}^m - y_{i_2, j_2, k_2}^m) \leq 1, \quad i_1, i_2 = 1, \dots, \theta; j_1, j_2 = 1, \dots, J_i; k_1, k_2 = 1, \dots, N_{ij}, \quad (9)$$

$$m = 1, \dots, M; o_{i_1, j_1, k_1} \neq o_{i_2, j_2, k_2}. \quad (10)$$

7) 每一个炉次操作在连铸工序必须在指定的加工设备上加工:

$$y_{i,j,N_{ij}}^{m_{i,j,N_{ij}}} = 1, i = 1, \dots, \theta; j = 1, \dots, J_i. \quad (11)$$

8) 每一个浇次内的炉次在连铸机上的加工顺序必须按照指定的加工顺序加工:

$$z_{i,j,N_{ij}}^{i,j+1,N_{i,j+1}} = 1, \\ i = 1, \dots, \theta; j = 1, \dots, J_i - 1. \quad (12)$$

9) 变量取值约束:

$$x_{ijk} \geq 0, \\ i = 1, \dots, \theta; j = 1, \dots, J_i; k = 1, \dots, N_{ij}, \quad (13)$$

$$y_{ijk}^m \in \{0, 1\}, \\ i = 1, \dots, \theta; j = 1, \dots, J_i; \\ k = 1, \dots, N_{ij}; m = 1, \dots, M, \quad (14)$$

$$z_{i_1, j_1, k_1}^{i_2, j_2, k_2} \in \{0, 1\}, i_1, i_2 = 1, \dots, \theta; j_1, j_2 = 1, \dots, J_i; \\ k_1, k_2 = 1, \dots, N_{ij}; o_{i_1, j_1, k_1} \neq o_{i_2, j_2, k_2}. \quad (15)$$

3 炼钢-连铸生产调度问题求解策略(Scheduling strategy for SMCC)

上述建立的调度模型为MINLP模型, 包含着大量的约束方程、离散变量和连续变量, 采用数学规划方法和智能优化方法均难以在有效时间内进行快速求解, 无法满足现场对实时性的要求. 因此本文采用启发式方法对该类复杂问题其进行快速的次优化求解. 本文启发式方法求解过程为首先选择需要调度的炉次(操作), 然后为该炉次(操作)选择加工设备, 最后确定炉次(操作)的作业时间. 在启发式方法求解过程中, 最主要的问题包括炉次(操作)的调度顺序、炉次(操作)的加工设备指派.

4 炼钢-连铸生产调度启发式方法(Heuristic scheduling method for SMCC)

4.1 调度顺序(Scheduling sequence methods)

1) 操作预开工时间从晚到早的顺序依次选择炉次操作对其进行调度(Seq1).

本文将炉次操作当作最小单元来调度, 调度顺序确定就是对所有的操作确定其调度的先后顺序. Seq1是按照操作的预开工时间从晚到早的顺序确定操作的调度顺序. 因为每个浇次所在的连铸机、开浇时间和操作在设备上的处理时间均已知, 因此可以计算得到炉次在连铸机上的每个操作的预开工时间:

$$x_{i,1,N_{i1}} = S_i, i = 1, \dots, \theta, \quad (16)$$

$$x_{i,j,N_{ij}} = x_{i,j-1,N_{i,j-1}} + P_{i,j-1,N_{i,j-1}}, \\ i = 1, \dots, \theta; j = 2, \dots, J_i. \quad (17)$$

根据炉次在连铸机上的预开工时间, 可以逆推计算炉次在非连铸工序上的预开工时间:

$$x_{ijk} = x_{i,j,k+1} - T_{m_1}^{m_2} - P_{ijk}, \\ i = 1, \dots, \theta; j = 1, \dots, J_i. \quad (18)$$

对于式(18), 若操作 $o_{i,j,k+1}$ 为连铸机上的操作, 则 $o_{i,j,k+1}$ 的加工设备 m_2 已知, 但 o_{ijk} 的加工设备 m_1 未知, 所以式(18)中的 $T_{m_1}^{m_2}$ 未知, 导致炉次预开工时间 x_{ijk} 无法计算. 本文将类型 α_{ijk} 的所有设备中与 m_2 之间运输时间的最小值作为 $T_{m_1}^{m_2}$ 的取值, 即

$$T_{m_1}^{m_2} = \min_{m = \sum_{g=1}^{\alpha_{ijk}-1} M_g + 1, \dots, \sum_{g=1}^{\alpha_{ijk}} M_g} \{T_m^{m_2}\}, \quad (19)$$

当操作 $o_{i,j,k+1}$ 和 o_{ijk} 均为非连铸工序的操作时, $o_{i,j,k+1}$ 的加工设备 m_1 和 o_{ijk} 的加工设备 m_2 均未知, 所以式(18)中的 $T_{m_1}^{m_2}$ 未知, 本文将类型 α_{ijk} 的所有设备中与类型 $\alpha_{i,j,k+1}$ 的所有设备之间的运输时间最小值作为 $T_{m_1}^{m_2}$ 的取值, 即

$$T_{m_1}^{m_2} = \min_{m = \sum_{g=1}^{\alpha_{ijk}-1} M_g + 1, \dots, \sum_{g=1}^{\alpha_{ijk}} M_g, m' = \sum_{g=1}^{\alpha_{i,j,k+1}-1} M_g + 1, \dots, \sum_{g=1}^{\alpha_{i,j,k+1}} M_g} \{T_m^{m'}\}. \quad (20)$$

综上所述, 根据式(18)–(20)就可以计算出所有操作的预开工时间, 然后就可以按照操作预开工时间从晚到早的顺序依次选择炉次操作对其进行调度.

2) 根据式(16)–(17)计算炉次在连铸机上的预开工时间, 然后按照炉次在连铸机上预开工时间的升序顺序逐个选择单个炉次进行调度, 并对该炉次的所有操作按照工艺过程逆序选择逐个调度(Seq2).

3) 根据式(16)–(17)计算炉次在连铸机上的预开工时间, 然后按照炉次在连铸机上预开工时间的逆序顺序逐个选择单个炉次进行调度, 并对该炉次的所有操作按照工艺过程逆序选择逐个调度(Seq3).

4.2 设备指派(Device assignment methods)

炉次操作的设备指派就是为炉次操作选择其在非连铸工序的加工设备, 减少作业冲突时间、连铸断浇时间和炉次在相邻设备间的等待时间. 本文提出基于规则优先级的设备指派方法: 操作间作业时间冲突值最小规则、设备间运输时间最小规则和随机选取规则, 也就是首先按照冲突时间最小规则为操作指派设备; 当指派结果为多台设备时, 则从这些设备中按照运输时间最小规则为操作指派设备; 如果指派结果仍然为多台设备时, 则从这些设备中随机选取一台设备为操作的加工设备.

1) 操作间作业时间冲突值最小规则.

假设设备 m 上已指派的操作为 o_{i_1, j_1, k_1} , 开工时间为 x_{i_1, j_1, k_1} . 假设将操作 o_{ijk} 指派到设备 m 上进行加工,

且其在设备 m 上的开工时间 x_{ijk} :

$$x_{ijk} = x_{i,j,k+1} - T_m^{m_2} - P_{ijk}. \quad (21)$$

令 f_{ijk}^m 为设备 m 上 o_{ijk} 和 o_{i_1,j_1,k_1} 之间的作业时间冲突值, 其值为

$$f_{ijk}^m = \min\{x_{ijk} + P_{ijk}, x_{i_1,j_1,k_1} + P_{i_1,j_1,k_1}\} - \max\{x_{ijk}, x_{i_1,j_1,k_1}\}. \quad (22)$$

当 $f_{ijk}^m \leq 0$ 时, o_{ijk} 和 o_{i_1,j_1,k_1} 在设备上没有发生作业时间冲突, 则操作 $o_{i,j,k+1}$ 在设备 m 上的等待时间 w_{ijk} 等于0; 当 $f_{ijk}^m > 0$ 时, o_{ijk} 和 o_{i_1,j_1,k_1} 在设备上发生作业时间冲突, 则操作 $o_{i,j,k+1}$ 在设备上的等待时间为

$$w_{i,j,k+1} = x_{i,j,k+1} - T_m^{m_2} - x_{i_1,j_1,k_1}. \quad (23)$$

因为 $x_{i,j,k+1} = x_{ijk} + P_{ijk} + T_m^{m_2}$, 所以

$$w_{i,j,k+1} = (x_{ijk} + P_{ijk} + T_m^{m_2}) - T_m^{m_2} - x_{i_1,j_1,k_1} = (x_{ijk} + P_{ijk}) - x_{i_1,j_1,k_1} = f_{ijk}^m. \quad (24)$$

可以看出, 当 o_{ijk} 和 o_{i_1,j_1,k_1} 在设备上发生作业时间冲突时, 操作 $o_{i,j,k+1}$ 在设备 m 上的等待时间即为作业时间冲突值 f_{ijk}^m . 因此在设备指派过程中从可以加工炉次操作的多台可选设备中选择使得操作间作业时间冲突值最小的设备作为操作的加工设备, 则可以保证操作在设备上的等待时间尽量最小, 从而使得同一炉次在相邻设备之间的操作加工等待时间尽量最小. 基于操作间作业时间冲突值最小规则的指派方法就是从 $M_{\alpha_{ijk}}$ 台可选设备中选操作作业冲突时间最小的设备为 o_{ijk} 的加工设备, 即

$$y_{ijk}^m = 1, \quad m = \arg \min_{m_1 = \sum_{g=1}^{\alpha_{ijk}-1} M_g + 1, \dots, \sum_{g=1}^{\alpha_{ijk}} M_g, k < N_{ij}} \{T_{m_1}^{m_2}\}. \quad (25)$$

2) 运输时间最短规则.

假设设备 m 上已指派的操作为 o_{i_1,j_1,k_1} , 可知

$$x_{i_1,j_1,k_1} = x_{i_1,j_1,k_1+1} - T_{m_1}^{m_2} - P_{i_1,j_1,k_1}. \quad (26)$$

当 $T_{m_1}^{m_2}$ 越小时, 则操作 o_{i_1,j_1,k_1} 的开工时间 x_{i_1,j_1,k_1} 越大, 则根据式(22)可知, 其他操作与 o_{i_1,j_1,k_1} 发生作业时间冲突的可能性就越小. 根据以上分析可知, 当操作间作业时间冲突值越小时, 会使炉次在设备上产生的等待时间尽量最小, 从而满足炉次在相邻设备间的操作加工等待时间尽量最小. 基于设备间运输时间最短规则的指派方法为从能够加工操作的 $M_{\alpha_{ijk}}$ 台可选设备中选取与其后续工序设备间运输时间最短的加工设备作为操作 $o_{ijk}(k < N_{ij})$ 的设备, 即

$$y_{ijk}^m = 1,$$

$$m = \arg \min_{m_1 = \sum_{g=1}^{\alpha_{ijk}-1} M_g + 1, \dots, \sum_{g=1}^{\alpha_{ijk}} M_g, k < N_{ij}} \{T_{m_1}^{m_2}\}. \quad (27)$$

3) 设备总冲突时间最小规则.

令 Π_m 为设备 m 上的操作集合, $\Pi_m = \{\pi_m^1, \pi_m^2, \dots, \pi_m^l, \dots, \pi_m^{b_m}\}$, π_m^l 为设备 m 上加工的第 l 个操作, b_m 为设备 m 上加工的操作总数. 令 F_m 为设备 m 上所有炉次的作业时间冲突值总和:

$$F_m = \sum_{l_1=1}^{b_m-1} \sum_{l_2=l_1+1}^{b_m} \max\{0, \min(x_{\pi_m^{l_1}} + P_{\pi_m^{l_1}}, x_{\pi_m^{l_2}} + P_{\pi_m^{l_2}}) - \max(x_{\pi_m^{l_1}}, x_{\pi_m^{l_2}})\}. \quad (28)$$

设备总冲突时间最小规则是指在对操作 o_{ijk} 进行设备指派时, 从能够加工操作的 $M_{\alpha_{ijk}}$ 台设备中选择设备总冲突时间最小的设备作为操作 $o_{ijk}(k < N_{ij})$ 的加工设备, 即:

$$y_{ijk}^m = 1, \quad m = \arg \min_{m_1 = \sum_{g=1}^{\alpha_{ijk}-1} M_g + 1, \dots, \sum_{g=1}^{\alpha_{ijk}} M_g, k < N_{ij}} \{F_{m_1}\}. \quad (29)$$

4) 设备负荷最小规则.

令 E_m 为设备 m 的设备负荷, 其值等于设备上加工的炉次的处理时间总和:

$$E_m = \sum_{l=1}^{b_m} P_{\pi_m^l}. \quad (30)$$

设备负荷最小规则是指在对操作 o_{ijk} 进行设备指派时, 从能够加工操作的 $M_{\alpha_{ijk}}$ 台设备中选择设备负荷最小的设备作为操作 $o_{ijk}(k < N_{ij})$ 的加工设备, 即

$$y_{ijk}^m = 1, \quad m = \arg \min_{m_1 = \sum_{g=1}^{\alpha_{ijk}-1} M_g + 1, \dots, \sum_{g=1}^{\alpha_{ijk}} M_g, k < N_{ij}} \{E_{m_1}\}. \quad (31)$$

5) 开工时间最晚规则.

因为每个浇次的开浇时间已知, 所以在对每个炉次操作的设备指派过程中, 均是对每个炉次的操作时按逆序进行设备指派. 在对操作进行设备指派时, 选择使得操作开工时间最晚的设备作为操作的加工设备, 可用使得操作在设备上的冲突时间和运输时间均偏向最小化. 开工时间最晚规则是指在对操作 o_{ijk} 进行设备指派时, 从能够加工操作的 $M_{\alpha_{ijk}}$ 台设备中选择使得操作开工时间最晚的设备作为操作 $o_{ijk}(k < N_{ij})$ 的加工设备, 即

$$y_{ijk}^m = 1, \quad m = \arg \max_{m_1 = \sum_{g=1}^{\alpha_{ijk}-1} M_g + 1, \dots, \sum_{g=1}^{\alpha_{ijk}} M_g, k < N_{ij}} \{x_{ijk}(m_1)\}, \quad (32)$$

式中 $x_{ijk}(m_1)$ 表示操作 o_{ijk} 在设备 m_1 的开工时间。

6) 随机选取规则。

随机选取规则是指从 $M_{\alpha_{ijk}}$ 台可选设备中任意选取一台设加工备作为操作 $o_{ijk}(k < N_{ij})$ 的设备, 即

$$y_{ijk}^m = 1, \\ m = \text{random}\{m_1 | m_1 \in \{\sum_{g=1}^{\alpha_{ijk}-1} M_g + 1, \dots, \sum_{g=1}^{\alpha_{ijk}} M_g\}\}. \quad (33)$$

根据上述指派规则, 建立如下基于规则优先级的设备指派方法:

1) 规则优先级1(A_{g1}): 操作间作业时间冲突值最小规则、设备间运输时间最短规则、随机选取规则;

2) 规则优先级2(A_{g2}): 设备间运输时间最短规则、操作间作业时间冲突值最小规则、随机选取规则;

3) 规则优先级3(A_{g3}): 设备总冲突时间最小规则、运输时间最短规则、随机选取规则;

4) 规则优先级4(A_{g4}): 设备负荷最小规则、随机选取规则;

5) 规则优先级5(A_{g5}): 开工时间最晚规则、随机选取规则。

4.3 启发式方法(Scheduling method based on heuristic algorithm)

根据上述的调度顺序和设备指派规则优先级的不同组合可以得到如表1所示启发式调度方法。

表1 各种启发式调度方法
Table 1 Heuristic scheduling methods

序号	重调度顺序	指派规则优先级	启发式方法
1	$Seq1$	A_{g1}	H_{11}
2	$Seq1$	A_{g2}	H_{12}
3	$Seq1$	A_{g3}	H_{13}
4	$Seq1$	A_{g4}	H_{14}
5	$Seq1$	A_{g5}	H_{15}
6	$Seq2$	A_{g1}	H_{21}
7	$Seq2$	A_{g2}	H_{22}
8	$Seq2$	A_{g3}	H_{23}
9	$Seq2$	A_{g4}	H_{24}
10	$Seq2$	A_{g5}	H_{25}
11	$Seq3$	A_{g1}	H_{31}
12	$Seq3$	A_{g2}	H_{32}
13	$Seq3$	A_{g3}	H_{33}
14	$Seq3$	A_{g4}	H_{34}
15	$Seq3$	A_{g5}	H_{35}

本文提出如下的启发式算法过程:

步骤1 令 O 为所有炉次操作的集合, O 中的炉次操作总数为 q ;

步骤2 根据式(16)–(20)计算 O 中所有炉次操

作的预开工时间;

步骤3 根据调度顺序方法选择需要调度的炉次操作 o_{ijk} ;

步骤4 若 o_{ijk} 为连铸机上加工的操作, 则其加工设备为指定的连铸机设备 m_{ijk}^* , 即 $y_{ijk}^{m_{ijk}^*} = 1$, 否则根据设备指派方法为操作 o_{ijk} 进行设备指派, 选择加工设备;

步骤5 若 O 中的所有操作调度结束, 则转到步骤6; 否则转到步骤3;

步骤6 算法结束。

5 仿真实验(Simulation experiment)

5.1 仿真实验设计(Simulation experiment design)

5.1.1 仿真参数设计(Simulation parameter design)

本文仿真实验时, 每个阶段均有3台并行机设备, 同类设备处理时间相同。根据对炼钢–连铸整个生产过程的分析, 本文选择以下仿真参数对调度方法进行研究:

1) 炉次数量 S : 表示调度计划中的炉次数量大小程度。 S_1 表示小规模炉次数量, S_2 表示中等规模的炉次数量, S_3 表示大规模的炉次数量。令 ε 表示炉次数量的多少, 则根据 ε 值确定炉次数规模: 对于小规模炉次数 S_1 , $\varepsilon \in [15, 30]$; 对于中等规模的炉次数 S_2 , $\varepsilon \in [60, 90]$; 对于大规模的炉次数 S_3 , $\varepsilon \in [120, 180]$ 。

2) 精炼方式 R : 表示炉次在精炼阶段处理的精炼方式。 R_1 包括: $RH \rightarrow LF \rightarrow IR-UT$; R_2 包括: $LF \rightarrow RH \rightarrow IR-UT$; R_3 包括: $RH \rightarrow LF \rightarrow RH$; R_4 包括: $RH \rightarrow RH \rightarrow RH$; R_5 包括: $RH \rightarrow LF \rightarrow IR-UT$ 和 $LF \rightarrow RH \rightarrow IR-UT$; R_6 包括: $RH \rightarrow LF \rightarrow IR-UT$, $LF \rightarrow RH \rightarrow IR-UT$ 和 $RH \rightarrow LF \rightarrow RH$; R_7 包括: $RH \rightarrow LF \rightarrow RH$ 和 $RH \rightarrow RH \rightarrow RH$; R_8 包括: $RH \rightarrow LF \rightarrow IR-UT$, $LF \rightarrow RH \rightarrow IR-UT$, $RH \rightarrow LF \rightarrow RH$ 和 $RH \rightarrow RH \rightarrow RH$ 。

5.1.2 仿真实例设计(Simulation case design)

根据上述对仿真参数的分析可知, 需要设计 $3 \times 8 = 24$ 种仿真情况充分研究启发式调度方法在上述各种情况下的优化效果。因此, 本文设计上述组合的24类仿真实例, 并且对每种仿真例子分别随机产生10组数据, 进行仿真研究。仿真实验过程中, 炉次在设备上的处理时间采用表2所示数据。

表2 设备处理时间

Table 2 Equipment processing time

设备	LD	RH	LF	IR-UT
处理时间	35	20	30	30

5.1.3 仿真结果评价(Simulation results evaluation)

对于仿真实验结果, 采用相对增长比指标(rela-

tive percentage increase, RPI)来反映各种调度方法的性能. 这个指标用来判断各种启发式方法得到的调度计划性能指标值相对最优性能指标值的相对增长比例. RPI值越小则说明调度方法越好, 其值计算如下:

$$\text{RPI}(R^n) = R^n - R^*/R^*, \quad (34)$$

其中: R^n 为第 n 种启发式方法得到的调度计划结果的性能指标值, R^* 为最优目标值. 由于调度计划最优目标值无法得到, 因此 R^* 选择所有启发式调度方法得到的目标值中的最优值.

5.2 仿真实验结果(Simulation results)

根据炉次数规模和精炼方式的不同组合, 产生

24种问题(见表3), 对这24种问题采用表1所示的各种启发式方法对240组仿真实例进行仿真. 图2-5所示为各种启发式方法给出的目标值的箱线图. 每个盒子表示出了上四分位数、中位数和下四分位数. 箱线图描述了各种启发式方法得到的目标值的分布情况. 24种问题启发式方法的RPI值见表3所示. 从表3可以看出: 在精炼方式相同的情况下, 随着炉次数规模的增大, 各种启发式方法的性能逐渐变差. 这是因为随着炉次数规模增大, 炉次在设备上冲突的可能性大大增加, 从而使得炉次在设备上的等待时间变长. 针对每种问题, 方法 H_{13} 性能最优越. 方法 H_{31} 性能次于 H_{13} , 但在大多数情况下均比其他方法优越.

表 3 各种启发式方法的RPI值

Table 3 RPI values of heuristic methods

问题	仿真参数	H_{11}	H_{12}	H_{13}	H_{14}	H_{15}	H_{21}	H_{22}	H_{23}	H_{24}	H_{25}	H_{31}	H_{32}	H_{33}	H_{34}	H_{35}
P1	$S_1 - R_1$	6971	14252	0	7842	7855	0	4235	0	2254	3904	0	4237	4675	2547	2880
P2	$S_1 - R_2$	6972	12752	0	7914	8178	0	3568	0	2106	3834	0	3694	4824	1791	2651
P3	$S_1 - R_3$	31	50	0	31	31	3	14	0	8	10	0	9	16	5	15
P4	$S_1 - R_4$	7	13	0	7	7	1	5	0	1	1	0	7	5	1	2
P5	$S_1 - R_5$	22	40	0	25	25	0	14	1	9	17	0	17	21	9	16
P6	$S_1 - R_6$	24	34	0	31	28	1	11	0	8	15	0	10	18	13	13
P7	$S_1 - R_7$	8	11	0	8	8	1	3	0	1	4	0	3	3	2	4
P8	$S_1 - R_8$	25	39	0	29	29	0	7	0	4	11	0	9	15	13	11
P9	$S_2 - R_1$	78676	146664	0	81865	81860	0	45273	0	10527	30849	0	48649	49904	10003	13987
P10	$S_2 - R_2$	78678	136073	0	82178	82475	0	40680	0	10349	30513	0	43014	44734	9851	18391
P11	$S_2 - R_3$	98	131	0	98	99	14	30	0	22	38	2	35	39	17	20
P12	$S_2 - R_4$	6	9	0	6	6	0	3	0	1	2	0	3	3	1	1
P13	$S_2 - R_5$	78	130	0	81	80	0	40	0	9	38	0	43	47	13	23
P14	$S_2 - R_6$	88	124	0	87	88	1	35	0	10	38	0	30	43	13	13
P15	$S_2 - R_7$	9	12	0	10	10	1	4	0	1	4	0	3	3	1	3
P16	$S_2 - R_8$	45	61	0	46	45	1	10	0	7	22	0	12	20	7	5
P17	$S_3 - R_1$	328839	605826	0	335391	335476	0	183960	0	19460	118191	0	199503	183521	31568	27274
P18	$S_3 - R_2$	328839	560979	0	336208	336729	0	163869	0	18875	114112	0	184053	167922	32933	28826
P19	$S_3 - R_3$	203	275	0	203	203	33	65	0	42	73	2	71	67	27	26
P20	$S_3 - R_4$	7	10	0	7	7	1	4	0	1	4	0	4	3	1	1
P21	$S_3 - R_5$	156	264	0	157	158	0	86	0	14	79	0	85	85	18	30
P22	$S_3 - R_6$	165	229	0	166	166	1	77	1	18	84	0	60	63	12	6
P23	$S_3 - R_7$	14	18	0	15	15	2	4	0	3	7	1	4	4	2	4
P24	$S_3 - R_8$	89	116	0	90	89	1	33	0	12	42	0	26	31	8	5

图2-4为各种问题下各种启发式算法的运行时间比较情况. 调度顺序Seq1的各种启发式方法的运行时间比其他调度顺序下的各种启发式方法的运行时间少很多, 主要原因是在调度顺序Seq1的各种启发式方法对炉次作业时间进行冲突解消时不会对其他炉次产生影响, 而在非调度顺序Seq1的各种启发式方法对炉次作业时间进行冲突解消时会对其他炉次产生影响, 导致需要进行反复的冲突解消处理,

从而增加了算法求解时间. 在调度顺序Seq1下的各种启发式方法中, 算法 H_{13} 的运行时间最长. 在调度顺序Seq2下的各种启发式方法中, 算法 H_{23} 的运行时间最少. 在调度顺序Seq3下的各种启发式方法中, 算法 H_{33} 的运行时间最少. 在所有各种启发式方法中, 算法 H_{13} , H_{23} 和 H_{33} 的运行时间比较接近. 这是因为这3种算法的设备指派方法相同, 并且都是在对所有操作完成设备指派之后再对操作的作业时间

冲突进行解消。

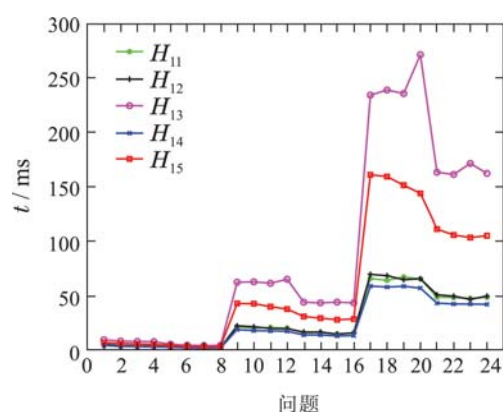


图2 H_{11} – H_{15} 算法的运行时间

Fig. 2 Running time of H_{11} – H_{15}

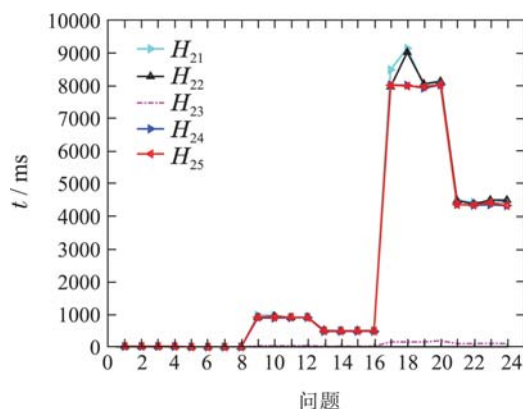


图3 H_{21} – H_{25} 算法的运行时间

Fig. 3 Running time of H_{21} – H_{25}

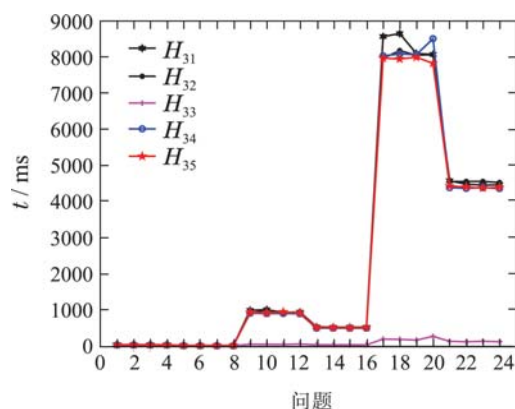


图4 H_{31} – H_{35} 算法的运行时间

Fig. 4 Running time of H_{31} – H_{35}

6 调度方法在实际生产调度系统中的应用 (Application of scheduling method in actual production scheduling system)

中国宝钢某大型炼钢厂现有250 t转炉3座(4LD, 5LD, 6LD); 精炼设备6台: 3台RH(5RH-1, 5RH-2, 3RH)、2台LF(LF-1, LF-2)、1台IR-UT; 连铸机3台(4CC, 5CC, 6CC). 其中炉次在非连铸机设备上的标

准处理时间如表3所示. 炉次在连铸机上的浇铸时间与如下因素有关: 炉次的钢水的总重量, 炉次输出板坯的平均厚度, 炉次奇流板坯和偶流板坯的平均左、右宽度、连铸机的拉速.

图5为将本文研究的性能最好的启发式方法 H_{13} 嵌入实际生产调度系统编制出的生产调度计划显示界面. 基于本文提出的调度方法应用于中国某大型钢铁企业的炼钢–连铸生产调度系统, 在3台转炉—3台连铸机、日平均生产炉数为66炉的生产模式下, 平均日等待时间从原来人工调度的234 min下降到本文方法应用之后的166 min; 在缩短调度时间、减少钢水冗余等待时间方面取得了显著成效.

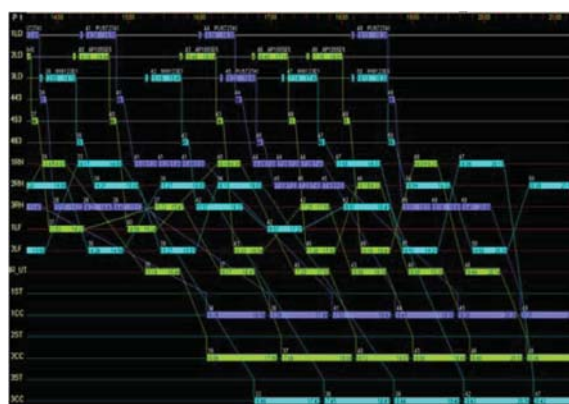


图5 启发式方法编制结果在生产调度系统中的界面显示

Fig. 5 The interface display of the production scheduling

7 结论(Conclusions)

炼钢–连铸生产过程是现代钢铁企业生产流程中的核心工序, 由于工艺复杂、设备繁多使得炼钢–连铸生产调度计划的编制难度较大. 已有炼钢–连铸生产调度方法研究大多数是对简单生产情况进行了研究, 没有对多多阶段、多并行机, 以及多重精炼的生产方式进行研究, 难以应用于目前大型炼钢–连铸生产调度的需要. 而目前实际生产过程中的以人工为主的调度方法速度慢、优化程度低, 极易造成炉次在设备间的冗余等待时间过长, 导致钢水温度下降, 甚至造成连铸断浇事故. 本文针对中国上海宝钢股份有限公司某大型炼钢厂的三重精炼方式且存在着可重入调度下的炼钢–连铸生产调度问题进行研究, 对各种启发式方法进行了研究, 通过仿真研究指出了各种启发式方法的优缺点. 并将本文提出的性能最好的启发式方法应用于该大型钢铁企业的炼钢–连铸生产调度, 在3台转炉—3台连铸机、日平均生产炉数为66炉的生产情况下, 平均日等待时间从原来人工调度的234 min下降到本文方法应用之后的166 min.

参考文献(References):

- [1] TANG L X, LIU J Y, RONG A Y, et al. A mathematical programming model for scheduling steelmaking-continuous casting production [J]. *European Journal of Operational Research*, 2000, 120(2): 423 – 435.
- [2] TANG L X, LUHP B, LIU J Y, et al. Steel-making process scheduling using Lagrangian relaxation [J]. *International Journal of Production Research*, 2003, 40(1): 55 – 70.
- [3] TANG L X, XUAN H, LIU J Y. Hybrid backward and forward dynamic programming based lagrangian relaxation for single machine scheduling [J]. *Computers and Operations Research*, 2007, 34(9): 2625 – 2636.
- [4] HARJUNKOSKI I, GROSSMANN I E. A decomposition approach for the scheduling of a steel plant production [J]. *Computers and Chemical Engineering*, 2001, 25(11/12): 1647 – 1660.
- [5] PACCIARELLI D, PRANZO M. Production scheduling in a steelmaking-continuous casting plant [J]. *Computers and Chemical Engineering*, 2004, 28(12): 2832 – 2835.
- [6] MISSBAUCER H, HAUBER W, STADLER W. A scheduling system for the steelmaking-continuous casting process. A case study from the steel-making industry [J]. *International Journal of Production Research*, 2009, 47(15): 4147 – 4172.
- [7] ATIGHEHCHIAN A, BIJARI M, TARKESH H. A novel hybrid algorithm for scheduling steel-making continuous casting production [J]. *Computers and Operations Research*, 2009, 36(8): 2450 – 2461.
- [8] MAO K, PAN Q K, PANG X F, et al. A novel Lagrangian relaxation approach for a hybrid flowshop scheduling problem in the steelmaking-continuous casting process [J]. *European Journal of Operational Research*, 2014, 236(1): 51 – 60.
- [9] YE Y, LI J, LI Z K, et al. Robust optimization and stochastic programming approaches for medium-term production scheduling of a large-scale steelmaking continuous casting process under demand uncertainty [J]. *Computers and Chemical Engineering*, 2014, 66(4): 165 – 185.
- [10] PAN Q K, WANG L, MAO K, et al. An effective artificial bee colony algorithm for a real-world hybrid flowshop problem in steelmaking process [J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2013, 10(2): 307 – 321.

作者简介:

俞胜平 (1976–), 男, 讲师, 目前研究方向为生产计划与调度、MES、智能优化算法等, E-mail: spyu@mail.neu.edu.cn;

柴天佑 (1947–), 男, 中国工程院院士, 教授, 博士生导师, 目前研究方向为自适应控制、多变量智能解耦控制、流程工业过程综合自动化等, E-mail: tychai@mail.neu.edu.cn.