

文章编号: 1001-0920(2015)11-1921-09

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2014.1415

某一转炉或精炼炉故障下炼钢-连铸生产重调度方法及应用

庞新富^{1,2}, 高亮¹, 潘全科¹, 俞胜平³

(1. 华中科技大学 数字制造装备与技术国家重点实验室, 武汉 430074; 2. 沈阳工程学院 自动化学院, 沈阳 110136; 3. 东北大学 流程工业综合自动化国家重点实验室, 沈阳 110004)

摘要: 炼钢-连铸生产中会出现某一转炉或精炼炉故障, 目前已有的重调度方法没有考虑多重精炼或只进行了仿真研究, 难以有效应用到具有多重精炼的钢厂, 而采用人工调整方式则容易导致炉次等待时间过长或断浇. 为此, 通过引入炉次生产状态参数, 建立0-1混合整数规划重调度模型, 提出由“未加工”炉次的设备指派、“未加工”炉次的开工时间优化和浇铸时间调整3部分组成的重调度方法. 将该方法应用于某钢铁厂炼钢-连铸生产调度过程的实际工程应用验证了所提出方法的有效性.

关键词: 炼钢-连铸; 重调度; 设备故障; 多重精炼; 0-1混合整数规划

中图分类号: TP273

文献标志码: A

Rescheduling method of steelmaking and continuous casting with breakdown of converter or refining furnace

PANG Xin-fu^{1,2}, GAO Liang¹, PAN Quan-ke¹, YU Sheng-ping³

(1. State Key Laboratory of Digital Manufacturing Equipment and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. College of Automation, Shenyang Institute of Engineering, Shenyang 110136, China; 3. State Key Laboratory of Synthetical Automation for Process Industries, Northeastern University, Shenyang 110004, China. Correspondent: PANG Xin-fu, E-mail: pangxinfu@163.com)

Abstract: A converter or refining furnace failure upsets the plan in steelmaking-continuous casting(SCC) production, which makes the production plan infeasible. The existing methods for the SCC rescheduling do not consider multiple refining, but a simulation study, which can not be applied effectively to multi-refining steelmaking scheduling. Therefore, manual scheduling is taken to tackle the problem, which often results in the unacceptable waiting time between different facilities and breaking casting. By introducing status parameter of charges, the 0-1 mixed integer programming rescheduling model is established. A method is presented for the rescheduling problems, which includes three steps. Step one determines the allocation machines(converters and refining furnaces) for the unperformed charges. Step two determines the start time of unperformed charge on the converter, refining furnace and caster. Step three adjusts the start time of unperformed charge and performing charge on caster within a limited range. The dynamic scheduling system for SCC with the rescheduling method has been successfully applied to some steel plant, and its effectiveness is verified.

Keywords: steelmaking-casting; reschedule; equipment failure; multiple refining; 0-1 mixed integer programming

0 引言

钢铁企业的炼钢-连铸生产过程包含冶炼、精炼和连铸3个阶段. 炼钢-连铸区接收来自高炉的铁水, 转炉设备将冶炼好的铁水转化为钢水, 然后将钢水倒入钢包, 并载运到精炼设备进一步调整钢水的温度和成分. 精炼后的钢水被运送到指定的连铸机前倒入中

间包, 并经中间包流入连铸机连续浇铸成板坯. 在炼钢-连铸生产过程中, 如果某一转炉或精炼炉发生故障, 则指派在该故障设备上的炉次不能正常加工, 需要进行重调度, 该问题的解决对实际生产有着重要的意义.

目前, 许多学者针对炼钢-连铸静态调度问题进

收稿日期: 2014-09-12; 修回日期: 2015-04-30.

基金项目: 国家自然科学基金项目(51435009, 61174187, 61573178); 新世纪优秀人才计划项目(NCET-13-0106); 中国博士后基金项目(2015T80798, 2014M552040); 辽宁省教育厅科技项目(L2015372).

作者简介: 庞新富(1978-), 男, 讲师, 博士, 从事生产计划与调度方法及应用的研究; 高亮(1974-), 男, 教授, 博士生导师, 从事现代优化方法及其在设计制造中的应用等研究.

进行了大量研究^[1-11], 而对重调度的研究相对较少. 高效的重调度方法或策略对实际生产极为重要, 关于一般重调度的研究现状可参见文献 [12-14]. 目前, 炼钢-连铸生产重调度方法大部分只进行了仿真研究. 文献 [15] 提出了一个关于炼钢-连铸重调度的知识模型, 其知识汇聚了 10 种常见干扰事件, 并通过仿真验证了 3 种干扰场景, 但未涉及重调度问题的建模和方法; 文献 [16] 采用约束满足方法求解了 3 阶段 Hybrid flowshop (HFS) 型炼钢-连铸调度问题, 但未考虑运输时间和精炼类型的要求; 文献 [17] 针对浇铸时间可变的多阶段 HFS 型炼钢-连铸重调度问题, 采用改进遗传算法和启发式算法进行求解; 文献 [18] 针对 HFS 型炼钢-连铸重调度问题, 提出了一个带有实数编码的矩阵表示法的差分进化算法求解炼钢-连铸生产重调度问题, 并提出了渐进机制来提升算法效率; 文献 [19] 将炼钢-连铸调度抽象为多阶段 HFS 问题, 建立了连铸机故障下的炼钢-连铸重调度模型, 采用约束满足的算法进行求解. 上述方法研究了 3 阶段或多阶段 HFS 类型炼钢-连铸重调度问题, 这些方法难以用于具有多重精炼 (HJS 型调度问题) 的炼钢厂. 另外, 连铸机故障下炼钢-连铸重调度要分多种情况处理, 在复杂情况下, 需要对批量计划和调度计划同时进行调整.

针对 Hybrid jobshop (HJS) 型炼钢-连铸重调度问题, 文献 [20] 假设炉次在设备上加工时间和工序间运输时间的分布特征已知, 采用遗传算法和启发式算法进行了求解; 文献 [21] 针对 HJS 型炼钢-连铸重调度问题, 建立了基于时间索引变量的 0-1 整数规划模型, 提出了基于条件-偏转次梯度水平算法的 Lagrange 松弛方法, 采用动态规划对松弛后子问题的设备指派进行了精确求解, 并通过列表调度算法给出了炉次在设

备上的加工时间. 上述方法只进行了仿真研究, 并假设炉次在设备上的加工时间在一定区间内, 但我国钢铁企业实际生产操作水平无法给出这些基础数据; 另外, 上述方法都需要进行大量迭代运算, 其计算时间难以满足企业的生产需求. 文献 [22] 针对某一炉次不能按时开工造成大延时的 HJS 型炼钢-连铸生产重调度问题, 采用启发式与线性规划算法进行求解, 并应用于某大型炼钢厂, 但其采用的重调度求解策略不适合设备故障下的重调度问题.

本文针对实际具有 1-3 重精炼的 HJS 型炼钢-连铸生产调度过程中某一转炉或精炼炉设备故障下重调度问题, 通过引入炉次生产状态参数建立 0-1 混合整数规划重调度模型. 借鉴 Benders 分解^[23]思想, 提出由“未加工”炉次的加工设备指派, “未加工”炉次的开工时间优化决策和浇铸时间调整 3 部分组成的炼钢-连铸生产重调度方法. 基于上述方法开发了动态调度系统, 并应用于国内某大型钢铁企业炼钢-连铸生产调度过程, 取得了显著的应用效果.

1 问题描述

1.1 生产工艺过程

专业术语: 1) 炉次. 炉次是指在同一个转炉内冶炼的钢水, 冶炼后将钢水倒入钢包中, 由钢包载运钢水到精炼设备进行精炼, 再载运到连铸前并注入中间包中, 由于一个炉次的钢水恰好装入一个钢包中, 从炼钢到连铸工序前被调度工件均为炉次, 即炼钢和精炼设备加工工件均为炉次. 2) 浇次. 在同一台连铸机上连续浇铸的炉次集合称为一个浇次. 编制炼钢-连铸生产调度计划前, 每台连铸上所加工的浇次预先给定, 浇次内炉次加工顺序已知.

上海某炼钢厂的炼钢-连铸生产工艺过程如图 1 所示.

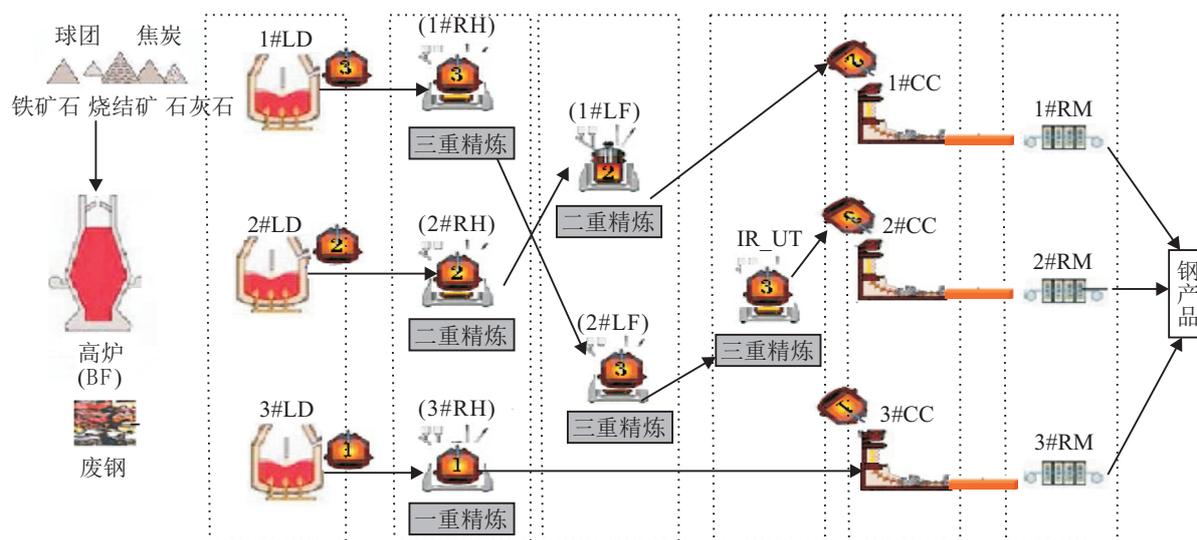


图 1 炼钢-连铸生产工艺过程

在图 1 中: 炼钢有 3 台 260 吨转炉(LD), 其作用是将高温铁水进行脱碳、脱磷、脱硫、脱氧, 去除有害气体和夹杂物、提高钢水温度, 并通过加入一定种类和数量的合金, 使得钢水的成份达到所炼钢种的规格; 精炼有 3 台 RH 精炼炉, 2 台 LF 精炼炉, 1 台 IR_UT 精炼炉, 其作用是将炼钢冶炼的钢水装入钢包, 在真空、惰性气体的容器内进行脱气、脱氧、脱碳, 将钢水温度、成份调整到浇注的工艺要求范围; 连铸有 3 台连铸机(CC), 其作用是将精炼后的钢水注入结晶器, 最终形成固态连铸坯, 为热轧工序或其他工序提供原料.

1.2 某一台转炉或精炼炉故障下重调度问题

在生产过程中出现转炉或精炼设备故障(连铸机故障不在讨论范围内), 故障设备存在可替换并行机, 故障开始时间和恢复时间可知, 每次只有一台设备发生故障.

以原调度表为基础, 在炉次的加工状态已知、故障设备的恢复生产时间已知、炉次的生产工艺路径不变、炉次所在连铸机及在连铸上加工顺序不变、炉次在转炉和精炼炉上的加工时间不变、在连铸机上的浇铸时间不超出限定范围、炉次的运输时间不变的条件下, 以浇次内的炉次连续浇铸为性能指标, 将同一个设备两个相邻炉次不能产生作业冲突作为约束方程, 确定各浇次中的“未加工”炉次在炼钢和精炼工序上的加工设备、开工时间和完工时间、“未加工”炉次在连铸机上的开工时间和完工时间、“在加工”炉次在连铸机上的完工时间, 形成新的调度计划.

1.3 重调度模型

1) 符号定义.

ϑ_{ij} 为炉次从转炉到连铸的阶段总数. 由输入表中炉次精炼方式给定, $\vartheta_{ij} = 1$ (1 台转炉)+精炼重数+1(1 台连铸机), $\vartheta_{ij} = 3, 4, 5, i$ 为浇次号, j 为炉次号.

$T_{ij}(k_g)$ 为炉次在第 g 类设备的第 k_g 台机器上的加工时间. 不同炉次在同一设备上的加工时间是不同的, 与钢种相关. 炉次在连铸机上的加工时间是一个给定范围.

$T_{ij}^S(k_5)$ 为炉次在连铸机 k_5 上的标准浇铸时间, 其值与该炉次的钢种相关.

$T_{ij}^H(k_5)$ 为炉次在连铸机 k_5 上的最长浇铸时间, 其值与该炉次的钢种相关.

$T_{ij}(k_{g(\theta)}, k_{g(\theta+1)})$ 为炉次从第 θ 阶段到 $\theta + 1$ 阶段的两加工设备间的运输时间. 任何一阶段 θ 指派的设备类型 g 已知, 运输时间为常量.

$\beta_{ij\theta}$ 为炉次在设备上(第 θ 阶段)的加工状态. $\beta_{ij\theta} = 2$ 表示加工“已完成”, $\beta_{ij\theta} = 1$ 表示“在加工”,

$\beta_{ij\theta} = 0$ 表示“未加工”.

$ST_{ij\theta}^g(k_g)$ 为“在加工”炉次在第 g 类设备的第 k_g 台机器上(第 θ 阶段)的开工时间.

$ET_{ij\theta}^g(k_g)$ 为“已完成加工”炉次在第 g 类设备的第 k_g 台机器上(第 θ 阶段)的完工时间.

T_{now} 为当前时刻系统时间.

$TF_g(\tilde{k}_g)$ 表示第 g 类设备的第 \tilde{k}_g 台机器是故障转炉或精炼炉时其恢复生产的时间.

$\Delta t_{j,j+1}(k_5)$ 为连铸机 k_5 上炉次 j 与炉次 $j + 1$ 间的断浇时间.

U 为足够大的有界正整数.

$x_{ij\theta}^g(k_g)$ 为“未加工”炉次在第 g 类设备的第 k_g 台机器上(第 θ 阶段)的开工时间, $\theta = 1, 2, \dots, \vartheta_{ij}, g = 1, 2, \dots, 5$.

$\delta_{ij\theta}^g(k_g)$: 若“未加工”炉次被指派到第 g 个转炉或精炼设备类的第 k_g 台机器上(第 θ 阶段)加工, 则为 1, 否则为 0. $\theta = 1, 2, \dots, \vartheta_{ij} - 1, g = 1, 2, 3, g = 4$ 为 IR_UT 精炼设备, 该设备只有一台, 故不需要进行决策.

2) 数学模型.

① 性能指标 1: 同一浇次内的相邻炉次需要连续浇铸.

连铸机 1(加工第 1 个浇次)、连铸机 2(加工第 2 个浇次)、连铸机 3(加工第 3 个浇次)上相邻炉次连续浇铸的性能指标分别为 J_1, J_2, J_3 , 且有

$$J_i = \sum_{j=1}^{N_i-1} \Delta t_{j,j+1}(i), i = 1, 2, 3. \quad (1)$$

其中

$$\begin{aligned} \Delta t_{j,j+1}(i) = & \frac{(2 - \beta_{i,j,\vartheta_{ij}})(1 - \beta_{i,j,\vartheta_{ij}})}{2} \times \\ & [x_{i,j+1,\vartheta_{i,j+1}}^5(i) - x_{i,j,\vartheta_{ij}}^5(i) - T_{ij}(i)] + \\ & (2 - \beta_{i,j,\vartheta_{ij}})\beta_{i,j,\vartheta_{ij}} \times \\ & [x_{i,j+1,\vartheta_{i,j+1}}^5(i) - ST_{i,j,\vartheta_{ij}}^5(i) - T_{ij}(i)], \end{aligned}$$

第 1 项表示炉次在连铸机上还未开始加工($\beta_{i,j,\vartheta_{ij}} = 0$), 第 2 项表示炉次在连铸机上正在进行加工($\beta_{i,j,\vartheta_{ij}} = 1$).

② 约束条件 1: 炉次的加工顺序约束.

根据炉次在设备上的加工状态 $\beta_{ij\theta}$ 建立重调度炉次加工顺序约束方程

$$\begin{aligned} & (2 - \beta_{ij\theta})(1 - \beta_{ij\theta}) \times \\ & \{x_{i,j,\theta+1}^g(k_{g(\theta+1)}) - x_{i,j,\theta}^g(k_{g(\theta)}) - T_{ij}(k_{g(\theta)}) - \\ & T_{ij}(k_{g(\theta)}, k_{g(\theta+1)}) + U(2 - \delta_{ij\theta}^g(k_{g(\theta)})) - \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \delta_{i,j,\theta+1}^g(k_{g(\theta+1)})\} + \\
& (2 - \beta_{ij\theta})\beta_{ij\theta} \times \\
& \{x_{i,j,\theta+1}^g(k_{g(\theta+1)}) - \text{ST}_{ij\theta}^g(k_{g(\theta)}) - \\
& T_{ij}(k_{g(\theta)}) - T_{ij}(k_{g(\theta)}, k_{g(\theta+1)}) + \\
& U(1 - \delta_{i,j,\theta+1}^g(k_{g(\theta+1)}))\} + \\
& (\beta_{ij\theta} - 1)\beta_{ij\theta}(2 - \beta_{i,j,\theta+1})(1 - \beta_{i,j,\theta+1}) \times \\
& \{x_{i,j,\theta+1}^g(k_{g(\theta+1)}) - \text{ET}_{ij\theta}^g(k_{g(\theta)}) - \\
& T_{ij}(k_{g(\theta)}, k_{g(\theta+1)}) + \\
& U(1 - \delta_{i,j,\theta+1}^g(k_{g(\theta+1)}))\} \geq 0, \\
& \forall i, j, \theta \in \{1, 2, \dots, \vartheta_{ij} - 1\}, \forall g(\theta) \in \{1, 2, 3, 4\}, \\
& \quad \forall g(\theta + 1) \in \{2, 3, 4, 5\}. \quad (2)
\end{aligned}$$

其中: 第 1 项表示炉次在相应的设备上未开始加工 ($\beta_{i,j,\vartheta_{ij}} = 0$); 第 2 项表示炉次在相应设备上正在加工 ($\beta_{i,j,\vartheta_{ij}} = 1$), 其开工时间 $\text{ST}_{ij\theta}^g(k_{g(\theta)})$ 为常数; 第 3 项表示炉次在相应设备上加工结束 ($\beta_{i,j,\vartheta_{ij}} = 2$), 其完工时间 $\text{ET}_{ij\theta}^g(k_{g(\theta)})$ 为常数, 炉次的下一阶段 ($\theta+1$) 未开始加工 ($\beta_{i,j,\theta+1} = 0$).

③ 约束条件 2: 同一台连铸机上相邻炉次不能产生作业冲突.

炉次 j 的连铸工序 ϑ_{ij} 指派到连铸机 k_5 上加工, 且加工顺序已知. 根据炉次在连铸机上的加工状态 $\beta_{i,j,\vartheta_{ij}}$, 可以分两种情况建立同一台连铸机上的相邻炉次不能产生作业冲突的约束方程

$$\begin{aligned}
& (2 - \beta_{i,j,\vartheta_{ij}})(1 - \beta_{i,j,\vartheta_{ij}}) \times \\
& \{x_{i,j+1,\vartheta_{i,j+1}}^5(k_5) - x_{i,j,\vartheta_{ij}}^5(k_5) - T_{ij}(k_5)\} + \\
& (2 - \beta_{i,j,\vartheta_{ij}})\beta_{i,j,\vartheta_{ij}} \times \\
& \{x_{i,j+1,\vartheta_{i,j+1}}^5(k_5) - \text{ST}_{i,j,\vartheta_{ij}}^5(k_5) - T_{ij}(k_5)\} \geq 0. \quad (3)
\end{aligned}$$

其中: 第 1 项表示炉次在连铸机上未开始加工 ($\beta_{i,j,\vartheta_{ij}} = 0$), 第 2 项表示炉次在连铸机上正在加工 ($\beta_{i,j,\vartheta_{ij}} = 1$).

④ 约束条件 3: 同一台转炉或精炼炉上的相邻炉次不能产生作业冲突.

炉次 j 在设备上的加工状态为 $\beta_{ij\theta}$, 假设紧后加工炉次为 j' . 分两种情况建立同一台转炉或精炼炉上的相邻炉次不能产生作业冲突的约束方程

$$\begin{aligned}
& (2 - \beta_{ij\theta})(1 - \beta_{ij\theta}) \times \\
& \{x_{i,j',\theta'}^g(k_{g(\theta')}) - x_{i,j,\theta}^g(k_{g(\theta)}) - T_{ij}(k_{g(\theta)}) + \\
& U(2 - \delta_{i,j',\theta'}^g(k_{g(\theta')}) - \delta_{ij\theta}^g(k_{g(\theta)}))\} + \\
& (2 - \beta_{ij\theta})\beta_{ij\theta} \times \\
& \{x_{i,j',\theta'}^g(k_{g(\theta')}) - \text{ST}_{ij\theta}^g(k_{g(\theta)}) -
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& T_{ij}(k_{g(\theta)}) + U(1 - \delta_{i,j',\theta'}^g(k_{g(\theta')}))\} \geq 0, \\
& i, i', g = 1, 2, 3, j = 1, 2, \dots, N_i, j' = 1, 2, \dots, N_{i'}, \\
& \theta = 1, 2, \dots, \vartheta_{ij} - 1, \theta' = 1, 2, \dots, \vartheta_{i'j'} - 1. \quad (4)
\end{aligned}$$

其中: 第 1 项表示炉次在相应的设备上未开始加工 ($\beta_{i,j,\vartheta_{ij}} = 0$); 第 2 项表示炉次在相应设备上正在加工 ($\beta_{i,j,\vartheta_{ij}} = 1$), 其开工时间 $\text{ST}_{ij\theta}^g(k_{g(\theta)})$ 为常数.

⑤ 约束条件 4: 在炼钢、精炼工序, “未加工”炉次每个阶段只在一台机器上加工, 且有

$$(2 - \beta_{ij\theta})(1 - \beta_{ij\theta}) \left(\sum_{k_g} \delta_{ij\theta}^g(k_g) - 1 \right) = 0,$$

$$\forall g \in \{1, 2, 3, 4\}, \forall i, j, \theta \in \{1, 2, \dots, \vartheta_{ij} - 1\}. \quad (5)$$

⑥ 约束条件 5: 设备指派决策变量的取值约束.

$$\delta_{ij\theta}^g(k_g) \in \{0, 1\},$$

$$\forall g \in \{1, 2, 3, 4\}, \forall k_g, \beta_{ij\theta} = 0. \quad (6)$$

⑦ 约束条件 6: 开工时间决策变量的下限约束.

“未加工”炉次在每台非故障设备上的开工时间必须大于当前时间, 且有

$$\begin{aligned}
& (2 - \beta_{ij\theta})(1 - \beta_{ij\theta})(x_{ij\theta}^g(k_g) + U(1 - \delta_{ij\theta}^g(k_g))) \geq 0, \\
& \quad \forall k_g \neq \tilde{k}_g. \quad (7)
\end{aligned}$$

⑧ 约束条件 7: “未加工”炉次在故障设备上的开始加工时间必须大于该故障设备的恢复时间, 且有

$$\begin{aligned}
& (2 - \beta_{ij\theta})(1 - \beta_{ij\theta}) \times \\
& (x_{ij\theta}^g(\tilde{k}_g) - \text{TF}(\tilde{k}_g) + U(1 - \delta_{ij\theta}^g(\tilde{k}_g))) \geq 0, \\
& \forall g \in \{1, 2, 3, 4\}, \forall i, j, \theta \in \{1, 2, \dots, \vartheta_{ij} - 1\}. \quad (8)
\end{aligned}$$

⑨ 约束条件 8: 炉次浇铸时间 $T_{ij}(k_5)$ 在 $[T_{ij}^S(k_5), T_{ij}^H(k_5)]$ 限定范围内, 且有

$$(2 - \beta_{i,j,\vartheta_{ij}})(T_{ij}(k_5) - T_{ij}^S(k_5)) \geq 0, \quad (9)$$

$$(2 - \beta_{i,j,\vartheta_{ij}})(T_{ij}(k_5) - T_{ij}^H(k_5)) \leq 0. \quad (10)$$

2 重调度方法

针对所提出的重调度模型, 提出由“未加工”炉次的加工设备指派、“未加工”炉次的开工时间优化决策和浇铸时间调整 3 部分组成的重调度策略, 如图 2 所示.

首先, 将浇铸时间固定, 采用启发式方法确定“未加工”炉次在炼钢、精炼工序上的加工设备; 然后, 以浇次内相邻炉次断浇时间最小、炉次在不同设备间等待时间之和最小为目标, 以同一设备上两相邻炉次不产生作业冲突为约束方程, 采用线性规划优化决策“未加工”炉次在转炉、精炼炉和连铸机上的开工时间; 最后, 在浇铸时间限定的范围内, 采用启发式方法调整“未加工”、“在加工”炉次的浇铸时间, 从而实现连浇.

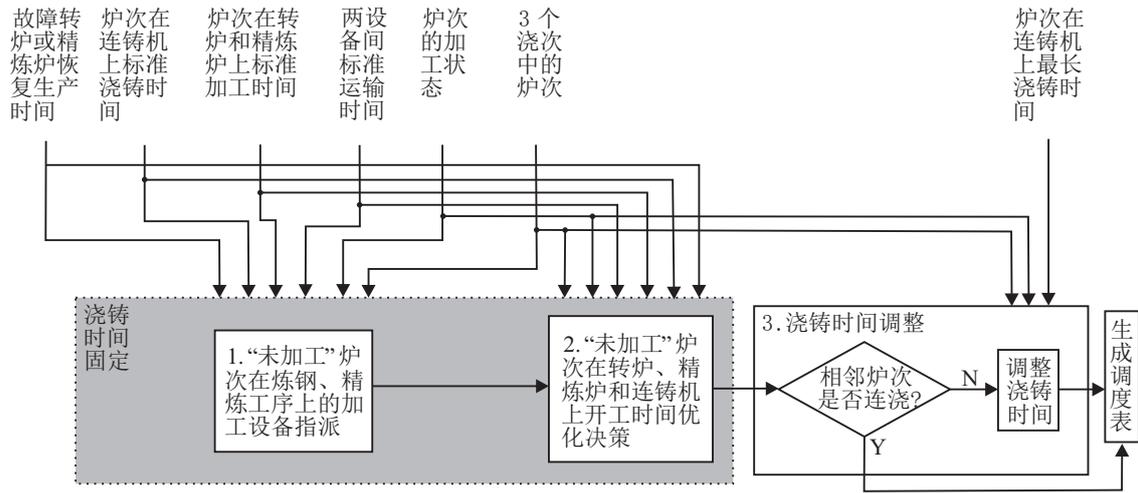


图 2 重调度策略结构

2.1 “未加工”炉次的加工设备指派

设备指派是“未加工”炉次在炼钢、精炼工序上指派的加工机器。

将浇铸时间固定为标准浇铸时间 $T_{ij}^S(k_5)$, 从而可得

$$\begin{aligned}
 & (2 - \beta_{i,j,\vartheta_{ij}})(1 - \beta_{i,j,\vartheta_{ij}}) \times \\
 & (x_{i,j+1,\vartheta_{i,j+1}}^5(k_5) - x_{i,j,\vartheta_{ij}}^5(k_5) - T_{ij}^S(k_5)) + \\
 & (2 - \beta_{i,j,\vartheta_{ij}})\beta_{i,j,\vartheta_{ij}} \times \\
 & (x_{i,j+1,\vartheta_{i,j+1}}^5(k_5) - ST_{i,j,\vartheta_{ij}}^5 - T_{ij}^S(k_5)) = 0, \\
 & k_5 = 1, 2, 3. \tag{11}
 \end{aligned}$$

不考虑约束 (9) 和 (10), 在设备指派过程中, 假设每个浇次内炉次严格连续浇铸, 因此不考虑约束 (3)。

假设除设备间正常运输时间外, 炉次在设备间无等待, 由式 (2) 得到如下约束:

$$\begin{aligned}
 & (2 - \beta_{ij\theta})(1 - \beta_{ij\theta}) \times \\
 & (x_{i,j,\theta+1}^g(k_{g(\theta+1)}) - x_{ij\theta}^g(k_{g(\theta)}) - \\
 & T_{ij}(k_{g(\theta)}) - T_{ij}(k_{g(\theta)}, k_{g(\theta+1)}) + \\
 & U(2 - \delta_{ij\theta}^g(k_{g(\theta)}) - \delta_{i,j,\theta+1}^g(k_{g(\theta+1)}))) + \\
 & (2 - \beta_{ij\theta})\beta_{ij\theta} \times \\
 & (x_{i,j,\theta+1}^g(k_{g(\theta+1)}) - ST_{ij\theta}^g(k_{g(\theta)}) - \\
 & T_{ij}(k_{g(\theta)}) - T_{ij}(k_{g(\theta)}, k_{g(\theta+1)}) + \\
 & U(1 - \delta_{i,j,\theta+1}^g(k_{g(\theta+1)}))) + \\
 & (\beta_{ij\theta} - 1)\beta_{ij\theta}(2 - \beta_{i,j,\theta+1})(1 - \beta_{i,j,\theta+1}) \times \\
 & (x_{i,j,\theta+1}^g(k_{g(\theta+1)}) - ET_{ij\theta}^g(k_{g(\theta)}) - \\
 & T_{ij}(k_{g(\theta)}, k_{g(\theta+1)}) + \\
 & U(1 - \delta_{i,j,\theta+1}^g(k_{g(\theta+1)}))) = 0, \\
 & \forall \theta \in \{1, 2, \dots, \vartheta_{ij} - 1\}, \forall i, j, g(\theta) \in \{1, 2, 3, 4\}, \\
 & \forall g(\theta + 1) \in \{2, 3, 4, 5\}. \tag{12}
 \end{aligned}$$

松弛在同一转炉或精炼炉上相邻炉次不能产生作业时间冲突约束 (4)、设备的可用时间约束 (7) 和式 (8), 松弛为“未加工”炉次在转炉、精炼炉上作业冲突最小, 并作为设备指派的目标

$$J_4 = F_{g,k_g}(j, \theta) = \sum_q f_{g,k_g}(j, q). \tag{13}$$

其中: $f_{g,k_g}(j, q)$ 表示炉次在机器 k_g 上加工时, 第 $q \in \Phi_{g,k_g}$ 个占用时间段的冲突时间; 机器 k_g 上第 q 个占用时间段为 $[\overline{T}_{st}^q, \overline{T}_{end}^q]$, 该时间段包含设备故障时间 $[T_{now}, TF(\tilde{k}_g)]$. 冲突值具体计算公式表示如下:

$$f_{g,k_g}(j, q) = \begin{cases} \min(x_{ij\theta}^g(k_g) + T_{ij}(k_g), \overline{T}_{end}^q) - \max(x_{ij\theta}^g(k_g), \overline{T}_{st}^q), \\ [x_{ij\theta}^g(k_g), x_{ij\theta}^g(k_g) + T_{ij}(k_g)] \cap [\overline{T}_{st}^q, \overline{T}_{end}^q] \neq \emptyset; \\ 0, \text{ other.} \end{cases} \tag{14}$$

当所指派设备在相应加工时间段内占用时, 为了得到冲突最小的粗调度, 计算每台可选设备上可能的时间冲突, 将炉次分配到冲突最小的机器上, 即

$$\min : J = J_4.$$

该式满足如下 4 个条件: 1) 炉次严格连续浇铸约束 (11); 2) 炉次在设备间无等待约束 (12); 3) 在炼钢、精炼工序中, “未加工”炉次所经过的每个阶段只能由一台机器 k_g 加工式 (5); 4) 设备指派决策变量的取值约束式 (6)。

下面给出基于调度规则正反向结合的设备指派算法。

当采用启发式算法进行设备指派问题时, 若有多个并行机可以加工该炉次, 则依次启用调度规则 $R_1 \sim R_4$ 为炉次指派的唯一加工机器。

1) 设备上作业冲突最小规则 R_1 。

考虑目标 J_4 , 优先选择与该设备已占用时间段

冲突最小的机器 k_g 加工, 即

$$R_1: \bar{k}_g = \arg \min_{k_g} F_{g,k_g}(j, \theta).$$

其中: $F_{g,k_g}(j, \theta)$ 为炉次在设备 k_g 上与该设备上已占用时间段的冲突时间之和, 表达式见式 (13) 和 (14).

2) 设备上加工炉次数最少规则 R_2 .

当规则 R_1 决策出炉次的可选设备有多个时, 考虑并行机设备均匀负荷, 通过计算各并行机设备上已经安排的炉次个数 $Q_{g,k_g}(\delta_{ij\theta}^g(k_g) = 1)$, 优先选择安排炉次数最少的机器 k_g , 即

$$R_2: \bar{k}_g = \arg \min_{k_g} \{Q_{g,k_g}(\delta_{ij\theta}^g(k_g) = 1)\}.$$

3) 运输时间最短规则 R_3 .

当规则 R_2 决策出炉次的可选设备有多个时, 考虑每个炉次制造周期最小, 优先选择标准运输时间最短的可行设备 $k_{g(\theta+1)}$, 即

$$R_3: \bar{k}_{g(\theta)} = \arg \min_{k_{g(\theta)}} \{T_{ij}(k_{g(\theta)}, k_{g(\theta+1)})\}.$$

4) 同类设备中随机选择规则 R_4 .

当规则 R_3 确定出炉次的可选设备有多个时, 从其中随机选择一台设备, 即

$$R_4: \bar{k}_g = \text{Rand}(k_g).$$

重调度的设备指派是一个正向与反向相结合的指派过程, 具体启发式设备指派算法步骤如下.

Step 1: 选取在连铸机上“未加工”和“在加工”的炉次 $\{L_{ij} | i = 1, 2, 3, j = 1, 2, \dots, N_i, \beta_{i,j} = 0, 1\}$.

Step 2: 连浇预排, 使同一浇次内的炉次在连铸机上连续浇铸.

计算炉次的浇铸开工时间 $x_{i,j,\vartheta_{ij}}^5(k_5)$, 并确保满足炉次在连铸机 k_5 上严格连续浇铸的约束 (11).

Step 3: 以炉次的开始浇铸时间 $x_{i,j,\vartheta_{ij}}^5(k_5)$ 为参考点, 逆向安排精炼、炼钢的加工设备.

1) 选择开浇时间最早炉次

$$j = \arg \{\min(x_{i,j,\vartheta_{ij}}^5(k_5))\};$$

2) 计算炉次在 $g(\vartheta_{ij} - 1)$ 类精炼设备第 $k_{g(\vartheta_{ij}-1)}$ 台机器上的开工时间 $x_{i,j,\vartheta_{ij}-1}^g(k_g)$, 并确保满足炉次在设备间无等待的约束式 (12);

3) 计算炉次在 $g(\vartheta_{ij} - 1)$ 类精炼设备第 $k_{g(\vartheta_{ij}-1)}$ 台机器上的冲突时间 $F_{g,k_g}(j, \vartheta_{ij} - 1)$ 、已经指派的炉次个数 $Q_{g,k_g}(\delta_{i,j,\vartheta_{ij}-1}^g(k_{g(\vartheta_{ij}-1)}) = 1)$, 获得精炼设备 $k_{g(\vartheta_{ij}-1)}$ 到连铸机 k_5 的标准运输时间 $T_{ij}(k_{g(\vartheta_{ij}-1)}, k_5)$;

4) 利用调度规则 $R_1 \sim R_4$, 将“未加工”炉次指派到第 $g(\vartheta_{ij} - 1)$ 类精炼设备的第 $k_{g(\vartheta_{ij}-1)}$ 台机器上, 决策出指派变量 $\delta_{i,j,\vartheta_{ij}-1}^g(k_g)$, 并确保满足炉次在炼

钢、精炼工序只能在一台设备加工的约束式 (5).

5) 如果 $\theta = \theta - 1 \geq 1$, 且 $\beta_{ij\theta} = 0$, 则继续逆推, 采用调度规则 $R_1 \sim R_4$ 指派设备, 直到 $\theta = \theta - 1 < 1$ (所有阶段已指派完) 或 $\beta_{ij\theta} \neq 0$ (炉次在设备加工结束或正在加工) 时, 停止计算.

Step 4: 正向确定炉次的加工设备 $\delta_{ij\theta}^g(k_g)$ 和开工时间 $x_{ij\theta}^g(k_g)$.

1) 从逆向预排调度计划中选择炉次 j , 该炉次为“未加工”炉次且满足其在设备上开工最早 $j = \arg \{\min(x_{ij\theta}^g(k_g)) | \beta_{ij\theta} = 0\}$, 若不存在, 则转至 Step 5.

2) 如果炉次 j 在转炉上已开始加工 $\beta_{ij1} \neq 0$, 则正向重新计算“未加工”炉次在精炼工序的加工机器 $k_{g(\theta)}$ 和开工时间 $x_{ij\theta}^g(k_g)$, 否则转至 Step 4 的 3).

① 如果前一阶段 $(\theta - 1)$ 处于设备加工结束时, 即 $\beta_{i,j,\theta-1} = 2$, 则炉次 j 的第 θ 阶段在设备上的开工时间

$$x_{ij\theta}^g(k_{g(\theta)}) =$$

$$\max(\text{Et}_{i,j,\theta-1}^g(k_{g(\theta-1)}) + T_{ij}(k_{g(\theta-1)}, k_{g(\theta)}), T_{\text{now}});$$

若前一阶段 $(\theta - 1)$ 处于设备正在加工时, 即 $\beta_{i,j,\theta-1} = 1$, 则炉次 j 的第 θ 阶段在设备上的开工时间为

$$x_{ij\theta}^g(k_{g(\theta)}) =$$

$$\text{ST}_{i,j,\theta-1}^g(k_{g(\theta-1)}) + T_{ij}(k_{g(\theta)}) + T_{ij}(k_{g(\theta-1)}, k_{g(\theta)}).$$

② 计算炉次 j 在机器 $k_{g(\theta)}$ 上与已占用时间段的总冲突时间 $F_{g_2,k_g}(j, \theta)$, 第 $k_{g(\theta)}$ 个机器上已经指派的炉次个数 $Q_{g,k_g}(\delta_{ij\theta}^g(k_{g(\theta)}) = 1)$, 获得设备 $k_{g(\theta-1)}$ 到设备 $k_{g(\theta)}$ 的标准运输时间 $T_{ij}(k_{g(\theta-1)}, k_{g(\theta)})$.

③ 采用调度规则 $R_1 \sim R_4$ 将炉次 j 的第 θ 阶段指派到第 $g(\theta)$ 类设备的第 $k_{g(\theta)}$ 台机器上加工. 对于剩余的“未加工”阶段, 重新进行连浇预排、逆向预排调度计划, 转至 Step 4 的 1).

3) 如果炉次 j 在转炉上未加工, 即 $\beta_{ij1} = 0$, 则保留逆向预排调度计划中该炉次已分派的加工设备 k_g 和制定的开工时间 $x_{ij\theta}^g(k_g)$. 对于剩余的“未加工”阶段, 重新进行连浇预排、逆向预排调度计划, 转至 Step 4 的 1).

Step 5: 设备指派结束.

通过上述启发式设备指派算法决策出“未加工”炉次在炼钢、精炼工序上的加工设备.

2.2 “未加工”炉次在转炉、精炼炉和连铸机上的开工时间优化

设备指派已经决策出了 0-1 整数设备指派变量 $\delta_{ij\theta}^g(k_g)$, 即炉次每个阶段的加工设备 k_g 已知. 由于设备指派过程中松弛了原问题的某些约束, 炉次在转炉

和精炼炉上可能存在作业时间冲突, 采用文献 [24] 中的优化方法, 决策出“未加工”炉次在转炉、精炼炉和连铸机上的开工时间 $x_{ij\theta}^g(k_g)$. 将浇铸时间固定, 以浇次内相邻炉次断浇时间最小为目标, 以同一设备上两相邻炉次不产生作业冲突为约束方程, 采用线性规划优化决策“未加工”炉次在连铸机上的开工时间; 以炉次在不同设备间等待时间之和最小为目标, 采用线性规划优化决策“未加工”炉次在转炉、精炼炉上的开工时间.

2.3 浇铸时间调整

在上述对重调度求解的过程中, 将炉次的浇铸时间固定为标准加工时间 $T_{ij}^S(k_5)$, 以浇次内相邻浇次的断浇时间最小为目标, 得到的调度计划可能存在断浇. 判断每个浇次内相邻炉次在连铸机是否连浇, 如果断浇, 则以每个炉次的开浇时间 $\{x_{i,j,\theta_{ij}}^5(k_5) | \beta_{i,j,\theta_{ij}} = 0\}$ 、炉次的加工状态 $\beta_{ij\theta}$ 和炉次在连铸机上的最长浇铸时间 $T_{ij}^H(k_5)$ 为输入, 在浇铸时间允许范围 (连铸机的拉速在一定范围可调) 内增加“未加工”、“在加工”炉次在连铸机上的加工时间, 使之连浇, 得到每个炉次新的开浇时间.

通过构造启发式方法, 调整连铸工序的生产时间 $T_{ij}(k_5)$ 和开始时间 $x_{i,j,\theta_{ij}}^5(k_5)$, 使连铸机连浇, 思想如下: 假设连铸机 2 上有 N_2 个炉次, 炉次 $N_2 - 1$ 与 N_2 之间存在断浇, 断浇时间为 $\Delta t_{N_2-1,N_2}(2)$, 通过调整连铸机 2 上 N_2 炉次前面所有炉次的处理时间达到连浇. 为了避免某一炉次浇铸速度调整过大, 使多个炉次浇铸速度平稳, 将断浇时间均分到前面 $N_2 - 1$ 个炉次上, 浇铸时间各增加 $\text{int}(\Delta t_{N_2-1,N_2}(2)/(N_2 - 1))$, 从而使连铸机 3 上的炉次连浇. 经调整后, 炉次浇铸的处理时间为 $T_{2,j}(2) + \text{int}(\Delta t_{N_2-1,N_2}(2)/(N_2 - 1))$, 如图 3 所示.

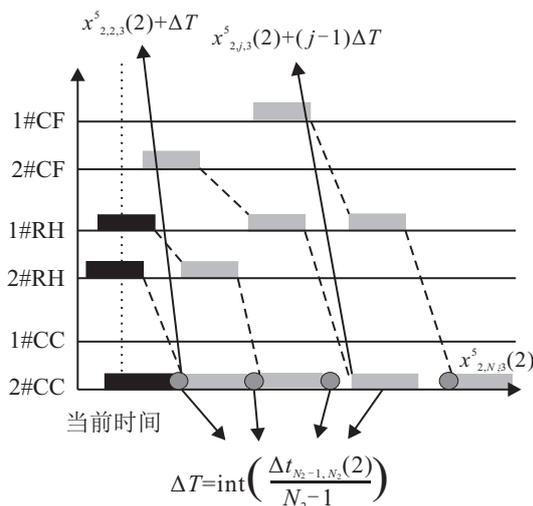


图 3 连浇优化处理

如果存在多处断浇, 则假设最后一个断浇处是

在炉次 j 和 $j + 1$ 上, 且连铸机 2 上的断浇总时间为 $\sum \Delta t_{j,j+1}(2)$, 令

$$\Delta T = \text{int}\left(\frac{\sum \Delta t_{j,j+1}(2)}{(N_2 - 1)}\right),$$

将炉次 1 到炉次 j 的浇铸时间增加 ΔT , 炉次 $j + 1$ 到炉次 N_2 的浇铸时间和浇铸操作开始时间不变.

3 工程应用

上海某炼钢厂有 3 座 260 吨转炉、6 台精炼炉 (包括 3 台 RH, 2 台 LF, 1 台 IR.UT)、3 台连铸机. 精炼工序分为 1~3 重精炼. 目前, 该厂由炉前调度员进行人工重调度, 调度计划调整慢、工序间等待时间较长、同类设备负荷不均衡, 容易造成物流堵塞或设备闲置, 严重时还会造成钢水冻结、连铸断浇. 采用 VC++ 和 Oracle 10g 数据库技术, 通过提出的重调度方法建立动态调度系统的重调度模块, 并将其应用于该大型钢厂炼钢-连铸的生产调度过程.

3RH 精炼设备在 $t_{\text{invalid}} = [16 : 35, 22 : 00]$ 出现设备故障, 原调度计划不能继续执行. 3RH 出现故障前的原调度计划甘特图如图 4 所示.

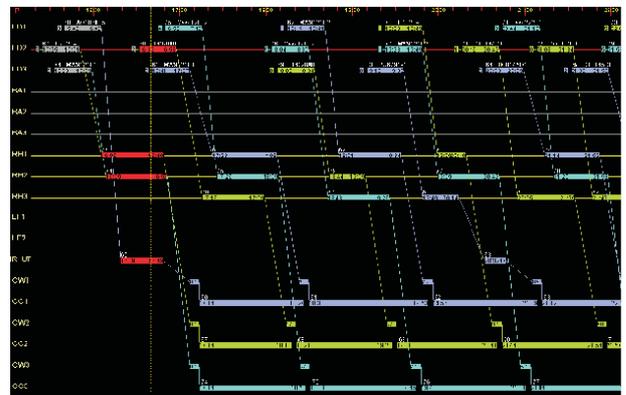


图 4 3RH 出现故障前的原调度计划甘特图

启用转炉或精炼炉故障下的重调度方法, 得到新的调度计划如图 5 和表 1 所示.

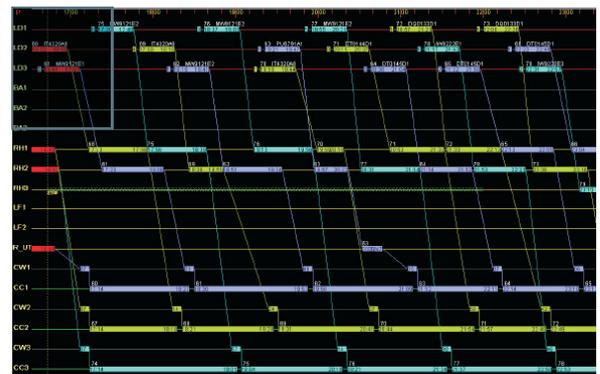


图 5 重调度结果甘特图

在表 1 中, “*”表示重调度后炉次加工设备、加工开始时间和加工结束时间的变化项.

重调度方法和人工调整 (调整方法略) 结果各项指标的统计如表 2 所示.

表 1 重调度结果

炉次	冶炼			精炼1			精炼2			连铸		
	开始	结束	设备	开始	结束	设备	开始	结束	设备	开始	结束	设备
1	15:31	16:06	1LD	16:19	16:49	IR_UT				17:14	18:30	1CC
2	16:32	17:07	3LD	17:23	18:08	2RH(*)				18:30	19:56	1CC
3	18:06	18:41	3LD(*)	18:51	19:34	2RH(*)				19:56	21:12	1CC
4	19:12(*)	19:47(*)	2LD(*)	19:57(*)	20:22(*)	2RH(*)	20:32	20:47	IR_UT	21:12	22:14	1CC
5	20:29(*)	21:04(*)	3LD	21:14	21:52	2RH(*)				22:14	23:13	1CC
6	21:23	21:58	3LD	22:13	22:51	1RH				23:13	00:04	1CC
7	22:14	22:49	2LD(*)	23:04	23:42	1RH				00:04	00:56	1CC
8	15:16	15:51	2LD	16:06	16:49	1RH				17:14	18:21	2CC
9	16:23	16:58	2LD	17:13(*)	17:56(*)	1RH(*)				18:21	19:31	2CC
10	17:41(*)	18:16(*)	2LD(*)	18:26(*)	18:51(*)	2RH				19:31	20:44	2CC
11	19:09(*)	19:44(*)	3LD(*)	19:59	20:19	1RH				20:44	21:57	2CC
12	20:02(*)	20:37(*)	2LD	20:52(*)	21:32(*)	1RH(*)				21:57	22:49	2CC
13	20:48(*)	21:23(*)	1LD(*)	21:33(*)	22:13(*)	1RH(*)				22:49	23:38	2CC
14	21:51	22:26	1LD	22:36	23:16	2RH				23:38	00:27	2CC
15	15:24	15:59	3LD	16:09	16:52	2RH				17:14	19:01(*)	2CC
16	17:11(*)	17:46(*)	1LD	17:56(*)	18:39(*)	1RH(*)				19:04(*)	20:21(*)	3CC
17	18:28(*)	19:03(*)	1LD(*)	19:13(*)	19:56(*)	1RH(*)				20:21(*)	21:37(*)	3CC
18	19:46(*)	20:21(*)	1LD(*)	20:31(*)	21:14(*)	2RH				21:37(*)	22:53(*)	3CC
19	21:08(*)	21:43(*)	2LD(*)	21:53(*)	22:31(*)	2RH				22:53(*)	00:10(*)	3CC
20	22:22(*)	22:57(*)	3LD(*)	23:10(*)	23:48(*)	3RH				00:10(*)	01:29(*)	3CC

表 2 重调度与人工调整结果对比

方法	总等待时间/min	平均等待时间/min	断浇时间	处理时间
重调度方法	39 (17 炉)	2.3	0	5 s
人工调整	189 (17 炉)	11	0	14 min

表 2 包括: 总等待时间、每个炉次的平均等待时间、断浇时间和调整调度表所需要的处理时间。

对于 20 个炉次的炼钢-连铸重调度问题, 本文所提方法可以在 10 s 以内得到较为有效的重调度计划, 人工调整 20 个炉次的调度计划所需时间约为 10 min; 在重调度计划中平均每个炉次在炼钢、精炼和连铸的总等待时间为 3 min, 小于人工调整的平均等待时间 9 min。

调度系统长期运行效果表明: 动态调整计划编制的时间为 4.5 s。在 3 座转炉对 3 台连铸机, 日平均炉数为 66 炉的生产模式下, 与手工配以一般的模型系统相比, 本文方法的平均日冗余等待时间从 814.76 min 下降到 (196.98 min, 166.56 min), 转炉日平均负荷率从 60.85% 上升到 (67.12%, 67.04%), 精炼日平均负荷率从 42.21% 上升到 (46.68%, 45.00%), 日综合平均设备负荷率从 50.44% 上升到 (56.26%, 55.16%), 平均每个计划的完成时间从 195.88 min 下降到 (176.22 min, 176.38 min)。

4 结 论

针对生产过程中会出现某台转炉或精炼炉发生故障, 且具有多重精炼的炼钢-连铸生产重调度问题,

通过引入炉次生产状态参数, 建立了 0-1 混合整数规划重调度模型, 提出了由“未加工”炉次的加工设备指派、“未加工”炉次的开工时间优化决策和浇铸时间调整 3 部分组成的重调度策略。基于该重调度方法建立的炼钢-连铸生产动态智能调度系统运行情况良好, 能够实现快速有效的动态调整。

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 J of Operational Research*, 2000, 120(2): 423-435.
- [2] 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.
- [3] Tang L X, Peter B Luh, Liu J Y, et al. Steel-making process scheduling using Lagrangian relaxation[J]. *Int J of Production Research*, 2002, 40(1): 55-70.
- [4] Pacciarelli D, Pranzo M. Production scheduling in a steelmaking-continuous casting plant[J]. *Computers and Chemical Engineering*, 2004, 28(12): 2823-2835.
- [5] Kumar V, Kumar S, Tiwari M K, et al. Auction-based approach to resolve the scheduling problem in the steel making process[J]. *Int J of Production Research*, 2006, 44(8): 1503-1522.
- [6] Bellabdaoui A, Teghem J. A mixed-integer linear programming model for the continuous casting

- planning[J]. *Int J of Production Economics*, 2006, 104(2): 260-270.
- [7] Tang L X, Xuan H. Scheduling a hybrid flowshop with batch production at the last stage[J]. *Computers and Operations Research*, 2007, 34(9): 2718-2733.
- [8] 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.
- [9] Missbauer H, Hauber W, Stadler W. A scheduling system for the steelmaking-continuous casting process: A case study from the steelmaking industry[J]. *Int J of Production Research*, 2009, 40(15): 4147-4172.
- [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 Trans on Automation Science and Engineering*, 2013, 10(2): 307-322.
- [11] 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 J of Operational Research*, 2014, 236(1): 51-60.
- [12] Aytug H, Lawley M A, McKay K, et al. Executing production schedules in the face of uncertainties: A review and some future directions[J]. *European J of Operational Research*, 2005, 161(1): 86-110.
- [13] Vieira G E, Hermann J W, Lin E. Rescheduling manufacturing systems: A framework of strategies, policies and methods[J]. *J of Scheduling*, 2003, 6(1): 36-92.
- [14] Ouelhadj D, Petrovic S. A survey of dynamic scheduling in manufacturing systems[J]. *J of Scheduling*, 2009, 12(4): 417-431.
- [15] Roy R, Adesola B A, Thornton S. Development of a knowledge model for managing schedule disturbance in steel-making[J]. *Int J of Production Research*, 2004, 42(18): 3975-3994.
- [16] Li T K, Guo D F. Constraint-based approach for steelmaking-continuous casting rescheduling[C]. *Lecture Notes in Computer Science*. Berlin: Springer, 2007: 1108-1117.
- [17] 庞新富, 俞胜平, 张志宇, 等. 炼钢-连铸生产优化重调度方法[J]. *系统工程学报*, 2010, 25(1): 98-103.
(Pang X F, Yu S P, Zhang Z Y, et al. Optimal rescheduling method for steelmaking-continuous casting[J]. *J of Systems Engineering*, 2010, 25(1): 98-103.)
- [18] Tang L X, Zhao Y, Liu J Y. An improved differential evolution algorithm for practical dynamic scheduling in steelmaking-continuous casting production[J]. *IEEE Trans on Evolutionary Computation*, 2014, 18(2): 209-225.
- [19] 王柏琳, 李铁克, 张春生, 等. 基于动态约束满足的考虑连铸机故障的炼钢连铸调度算法[J]. *计算机集成制造系统*, 2011, 17(10): 2185-2194.
(Wang B L, Li T K, Zhang C S, et al. Dynamic CSP based scheduling algorithm for steelmaking and continuous casting with continuous caster breakdown[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2011, 17(10): 2185-2194.)
- [20] 朱道飞, 郑中, 高小强. 炼钢-连铸作业计划的遗传算法优化模型[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.)
- [21] Mao K, Pan Q K, Pang X F, et al. An effective Lagrangian relaxation approach for rescheduling a steelmaking-continuous casting process[J]. *Control Engineering Practice*, 2014, 30: 67-77.
- [22] 庞新富, 俞胜平, 罗小川, 等. 混合Jobshop炼钢-连铸重调度方法及应用[J]. *系统工程理论与实践*, 2012, 32(4): 826-838.
(Pang X F, Yu S P, Luo X C, et al. Hybrid job shop rescheduling method and its application for steelmaking-casting[J]. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 2012, 32(4): 826-838.)
- [23] Benders J F. Partitioning procedures for solving mixed-variables programming problems[J]. *Numerische Mathematik*, 1962, 4(3): 238-252.
- [24] 庞新富, 俞胜平, 柴天佑, 等. 炼钢-连铸调度计划调整过程中确定作业时间的优化调度模型[J]. *仪器仪表学报*, 2008, 29(4S1): 389-394.
(Pang X F, Yu S P, Chai T Y, et al. Optimal model of ascertaining producing time and its application for schedule repairing in steelmaking-continuous casting[J]. *Chinese J of Scientific Instrument*, 2008, 29(4S1): 389-394.)

(责任编辑: 闫妍)