

特殊钢厂炼钢-连铸调度模型

王闯^{1,2)}, 刘青^{1,2)}✉, 王彬^{1,2)}, 王宝^{1,2)}, 穆衍清^{1,2)}, 谢飞鸣³⁾, 王柏琳^{2,4)},
卢新春^{2,3)}, 张立强⁵⁾, 白素宏⁵⁾

1) 北京科技大学钢铁冶金新技术国家重点实验室, 北京 100083 2) 北京科技大学冶金与生态工程学院, 北京 100083

3) 方大特钢科技股份有限公司, 南昌 330012 4) 北京科技大学东凌经济管理学院, 北京 100083

5) 河北钢铁集团石家庄钢铁有限责任公司, 石家庄 050031

✉ 通信作者, E-mail: qliu@ustb.edu.cn

摘要 针对特殊钢厂的炼钢-连铸调度问题, 建立了多目标调度模型. 在模型求解过程中, 对静态调度策略和动态调度策略进行了探讨. 在静态调度部分, 结合炼钢厂运行原则, 并根据炼钢炉和连铸机作业周期的不同对应关系, 对生产模式进行了分类, 给出了相应的求解方法. 在动态调度部分, 给出了基于规则的动态调度策略以及具体的时间调整方法. 最后, 根据某转炉特殊钢厂的实际情况, 在三台连铸机同时生产的情形下, 对三个浇次的调度计划进行了仿真计算. 通过与实际生产数据的比较, 表明了所采用方法的有效性.

关键词 钢铁厂; 特殊钢; 炼钢; 连铸; 调度; 数学模型; 计算机仿真

分类号 TF758

Scheduling model of steelmaking-continuous casting processes in special steel plants

WANG Chuang^{1,2)}, LIU Qing^{1,2)}✉, WANG Bin^{1,2)}, WANG Bao^{1,2)}, MU Yan-qing^{1,2)}, XIE Fei-ming³⁾,
WANG Bai-lin^{2,4)}, LU Xin-chun^{2,3)}, ZHANG Li-qiang⁵⁾, BAI Su-hong⁵⁾

1) State Key Laboratory of Advanced Metallurgy, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

2) School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

3) Fangda Special Steel Technology Co., Ltd., Nanchang 330012, China

4) Dongling School of Economics and Management, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

5) Shijiazhuang Iron Steel Co., Ltd., Hebei Iron and Steel Group, Shijiazhuang 050031, China

✉ Corresponding author, E-mail: qliu@ustb.edu.cn

ABSTRACT A multi-objective scheduling model was developed to solve the steelmaking-continuous casting scheduling problem of a special steel plant. Static scheduling and dynamic scheduling were investigated in the solving process of the model. The production modes in static scheduling were classified and the corresponding solving methods were formulated in combination with the running principles of steelmaking workshops and on the basis of the operation cycles of steelmaking furnaces and casters, while time-adjusting methods based on scheduling rules were described for the process of dynamic scheduling. A case in a BOF special steel plant, in which three casters are producing at the same time, was used to test the methods, and the scheduling plans of three casts were calculated and compared with actual production data. The comparison result indicates the validity of the methods.

KEY WORDS iron and steel plants; special steel; steelmaking; continuous casting; scheduling; mathematical models; computer simulation

收稿日期: 2012-02-23

基金项目: 教育部博士学科点专项基金资助项目 (20090006110024); 中央高校基本科研业务费专项 (FRF-BR-09-020B)

随着科技的进步和市场竞争的日益激烈,钢铁工业向着高效、低成本和稳定生产的方向发展^[1].生产计划和调度在钢厂的高效稳定生产过程中扮演着重要角色,是现代化钢铁生产管理系统的核心功能^[2].炼钢-连铸区段在钢铁生产过程中占有重要地位,铁水经炼钢炉、精炼装置和连铸机,变成钢坯.生产调度的目标就是通过编制合理的生产调度计划,充分利用现有的设备资源,减少过程等待时间并消除生产过程的作业冲突,实现连铸机的最大连浇,从而获取最大的经济效益.

除了一般机械工业的生产调度限制外,由于钢铁生产在高温下进行,发生由液态钢水到固态钢坯的转变,再加上物质量和时间等严格的连续性要求^[3],使得炼钢-连铸调度问题非常复杂^[4].近年来,国内外学者对钢厂计划调度问题进行了大量研究.文献^[5]采用动态模拟对从连铸到热轧的调动实践进行了评估,通过及时更新调度计划,达到稳定生产、提高能源效率的目的;为消除调度顺行与提高能源效率之间的冲突,文献^[6]将智能体方法应用于钢铁制造系统,使得操作简捷易行,经济效益提高;文献^[7]采用一种启发式算法,达到了提高钢厂生产效率、减少产品滞留时间的目的;针对炼钢-连铸调度问题,文献^[8]提出一种 HANO 算法;文献^[9]将拉格朗日松弛法应用于炼钢-连铸-热轧生产调度模型中,并进行了大规模复杂调度问题的求解;文献^[10-11]采用遗传算法来解决炼钢厂的炼钢-连铸调度问题,满足了生产实际的需求;文献^[12]建立了一个将温度预测和生产调度集成的模型,使得钢水质量合格、连铸连浇及达到节约能源的目的.

上述研究对于一般情形下的钢铁生产调度问题的性质与方法进行了有益的探索.然而对于特殊钢厂,由于钢种及其工艺路线的严格限制,增加了调度的难度,使得已有的智能算法在模型求解过程中并不能很好的应用.本文针对特殊钢厂的实际调度问题,建立了多目标优化调度模型.模型经过静态调度得出初始调度计划;而当生产出现异常时,采用动态调度策略对初始调度计划进行调整.最后以国内某特殊钢厂炼钢-连铸调度计划的制定实例来验证模型的有效性.

1 炼钢-连铸生产调度模型

1.1 问题描述

生产调度实质上是在批量计划的基础上得出生产调度计划,是生产作业计划的执行及其调整过程.钢厂炼钢-连铸生产调度是指根据生产计划,确

定各个浇次计划在相应连铸机上的开浇时刻以及各个炉次计划在相应设备上作业开始及结束时刻,即生产调度计划;同时,执行生产调度计划,并根据实际生产过程中的不确定性因素,对其进行重新编排的过程.调度的目标是使各生产炉次在各工序上时间、温度和成分符合要求,生产高效、低耗、连续和稳定运行^[12].

特殊钢厂炼钢-连铸生产过程主要包括冶炼、二次冶金(精炼)和连铸三个工序,生产钢种主要有常规钢和品种钢.由于在生产不同的钢种时,需要采用不同的精炼设备,使得特殊钢厂具有多条工艺路线.此外,不同连铸机生产不同钢种时,对应的中间包寿命(一个中间包所能生产的最大炉次数)也不相同.因此,特殊钢厂炼钢-连铸生产过程具有设备多、模式多、路线多和扰动多的特点,致使调度过程制约条件众多.特殊钢厂炼钢-连铸生产工艺流程及主要设备如图 1 所示(本文不考虑模铸).由于生产钢种的不同,炼钢厂冶炼工序生产设备可能为转炉或电炉,精炼工序生产设备可能为 Ar 站、LF 或 VD 或 RH 或 VOD 等,连铸工序生产设备为连铸机.其中,BOF(basic oxygen furnace)为转炉,EAF(electric arc furnace)为电弧炉,Ar 站(argon blowing station)为氩站,LF(ladle furnace)为钢包精炼炉,RH(Ruhrstahl Heraeus)为循环真空脱气设备,VD(vacuum degassing)为真空脱气设备,VOD(vacuum oxygen decarburization)为真空吹氧脱碳设备,CC(continuous caster)为连铸机.

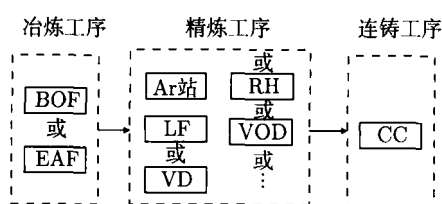


图 1 特殊钢厂炼钢-连铸生产工艺流程及主要设备

Fig.1 Production process and main equipment for steel-making-continuous casting in the special steel plant

1.2 模型假设

钢铁制造流程是一个复杂过程系统,钢铁生产过程是一个准连续或间歇生产过程^[13].在炼钢厂实际生产过程中,充足的原材料供应、稳定的设备状况是生产稳定、顺行的前提.通过调研发现,炼钢厂的各生产设备的作业周期都会在一定范围内波动.为此,作如下假设:(1)生产稳定,铁水供应充足;(2)各设备运行正常,无故障;(3)生产浇次计划已知(浇次数已知,各浇次内炉次数已知).

1.3 符号说明

为叙述方便, 引入下列符号: LT (ladle turret)—钢包回转台; m —总浇次数; n —总炉次数; L —总设备数; i —浇次号, $i=1, 2, \dots, m$; n_i —第 i 浇次所包含的炉次数, 满足 $\sum_{i=1}^m n_i = n$; j —炉次号, $j=1, 2, \dots, n_i$; k —工序代码, $k=1, 2, 3$ (分别对应冶炼、精炼和连铸工序); l —设备号, $l=1, 2, \dots, L$; c_i —浇次 i 由于生产所对应的炼钢炉不同, 被分成的区间个数; n_{i,c_i} —浇次 i 被分成的第 c_i 区间内所包含炉次数; $t_{i,j,k}^S$ —第 i 浇次第 j 炉次在工序 k 作业开始时刻; $t_{i,j,k}^{S*}$ —第 i 浇次第 j 炉次在工序 k 实际作业开始时刻; $t_{i,j,k}^E$ —第 i 浇次第 j 炉次在工序 k 作业结束时刻; $t_{i,j,k}^{E*}$ —第 i 浇次第 j 炉次在工序 k 实际作业结束时刻; $t_{i,j,k}^{SE}$ —第 i 浇次第 j 炉次在工序 k 作业周期; $t_{i,j,k,\max}^{SE}$ —第 i 浇次第 j 炉次在工序 k 的最大作业周期; $t_{i,j,k}^{SE*}$ —第 i 浇次第 j 炉次在工序 k 实际作业周期; $t_{i,j,LT}^R$ —钢包回转台转动时间; t_{LT}^{SE} —回转台待浇时间; t_{CC1}^{SE} —CC1 的浇注周期 (CC1 指 1 号连铸机); $t_{i,j,(k,k-1)}^T$ —第 $k-1$ 工序到第 k 工序间的运输时间 ($k=2, 3$); t_i^S —第 i 浇次的计划开浇时刻; t_{EA} —同一台连铸机生产浇次之间的设备调整时间; t_{EA}^* —同一台连铸机生产浇次之间的实际设备调整时间; $t_{i,(j,j+1),k}^{G*}$ —同一设备上第 j 炉次结束时刻与下一炉次开始时刻间的实际间隔时间。

1.4 模型构建

在浇次计划的基础上, 基于以上问题描述及模型假设, 建立如下炼钢-连铸生产调度模型。

$$\min z_1 = \sum_{i=1}^m (t_{i,n_i,3}^E - t_{i,1,3}^S), \quad (1)$$

$$\min z_2 = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n_i} [(t_{i,j,3}^S - t_{i,j,LT}^R - t_{i,j,(2,3)}^T - t_{i,j,2}^E) + (t_{i,j,2}^S - t_{i,j,(1,2)}^T - t_{i,j,1}^E)], \quad (2)$$

$$\min z_3 = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n_i} t_{i,j,1}^{SE}}{t_{m,n_m,1}^E - t_{1,1,1}^S}. \quad (3)$$

s.t.,

$$t_{i,j,k}^S - t_{i,j,k-1}^E \geq 0 \quad (i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n_i; k=2, 3), \quad (4)$$

$$t_{i,j,k}^E = t_{i,j,k}^S + t_{i,j,k}^{SE} \quad (i=1, 2, \dots, m; j=2, 3, \dots, n_i; k=1, 2, 3), \quad (5)$$

$$x_{i,j,k,l} = \begin{cases} 1 & \text{第 } i \text{ 浇次的第 } j \text{ 炉次被安排到第} \\ & \text{ } k \text{ 工序的第 } l \text{ 台设备上,} \\ 0 & \text{其他,} \end{cases} \quad (i=1, 2, \dots, m; j=2, 3, \dots, n_i; k=1, 2, 3), \quad (6)$$

$$\sum_{l=1}^L x_{i,j,k,l} = 1 \quad (i=1, 2, 3, \dots, m; j=2, 3, \dots, n_i; k=1, 2, 3), \quad (7)$$

$$x_{i',j',k,l} \cdot x_{i,j,k,l} (t_{i',j',k}^S - t_{i,j,k}^E) \geq 0 \quad (i, i'=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n_i; j'=1, 2, \dots, n_{i'}; k=1, 2, 3; j^l j'^l \text{ 为同一设备生产的两个相邻炉次, } j \text{ 为 } j' \text{ 前一炉次}), \quad (8)$$

$$t_{i,j,3}^E = t_{i,j-1,3}^S + t_{i,j-1,3}^{SE} \quad (i=1, 2, \dots, m; j=2, 3, \dots, n_i), \quad (9)$$

$$t_{i',1,3}^S = t_{i,n_i,3}^E + t_{EA} \quad (i=1, 2, \dots, m; \text{浇次 } i' \text{ 与 } i \text{ 为同一台连铸机生产相邻浇次, 且 } i' \text{ 位于 } i \text{ 后}). \quad (10)$$

式 (1) 是基于缩短整个炼钢-连铸过程生产计划的生产时间建立的目标函数; 式 (2) 是基于缩短过程等待时间建立的目标函数 (过程等待时间指生产过程中除了各设备作业时间及工序间运输时间之外的非生产时间); 式 (3) 是基于提高冶炼工序作业率而建立的目标函数. 式 (4)~(10) 为目标函数对应的约束条件. 其中, 式 (4) 表示某一炉次在某一工序作业结束时刻早于其在下一工序作业开始时刻; 式 (5) 表示各设备连续生产约束; 式 (6) 和式 (7) 表示一台设备不能同时生产多个炉次; 式 (8) 为设备析取约束; 式 (9) 为同一个浇次内不同炉次之间满足连铸机连浇约束; 式 (10) 表示连铸机生产的不同浇次之间有一个设备调整时间。

在炼钢-连铸调度模型的基础上, 利用静态调度策略, 可以对模型进行求解得出合理的调度时刻表, 并且当生产出现异常时, 根据动态调度策略, 能够采取相应的处理措施, 从而使实际调度过程高效、稳定地进行。

2 静态调度模型的求解算法

钢厂生产系统的运行, 应遵循基本的运行原则^[14], 主要包括“炉机对应”原则、“能耗最小”原则、“拉速决定流量”原则、“连浇”原则. 根据“炉机对应”原则, 在炼钢系统中, 主要生产工序——炼钢工序和连铸工序, 应确立明确的对应关系, 才能使生产模式简捷优化, 生产组织便利顺畅. 根据“能耗最小”原则, 应充分利用调度功能, 减少各工位钢水等待时间以及钢水在不同工位之间的运输时

间. 另外, 由于连铸机的开机需要较大的花费, 因此在保证钢水成分、温度合格的前提下, 应尽量实现多炉连浇. 炼钢车间保证全部连铸机能够实现多炉连浇的必要条件是冶炼工序的生产能力大于连铸工序的生产能力.

各设备作业周期范围可通过对生产过程各工位作业时间的解析得到. 在无作业冲突的情况下, 全部采用最小作业周期; 若遇到作业冲突, 各作业周期应采用能够消除冲突的最小值. 这样即可达到在无冲突情形下缩短过程生产时间和等待时间的目标.

实际生产中, 炉机匹配关系应遵循“炉机对应”原则. 根据炼钢炉(本文以转炉为例)和连铸机作业周期的不同对应关系, “炉机对应”下的生产模式可分为“一炉对一机”和“定炉对定机”生产模式. 各生产模式下的模型求解方法, 下面分别予以阐述.

2.1 一炉对一机模式下的求解算法

若各转炉的冶炼周期短于对应连铸机的浇注周期, 则可实现“一炉对一机”的简捷生产模式, 如图 2 所示. 其中, SR(secondary refining)为二次冶金设备, BOF1 为 1 号转炉, 其余类同.

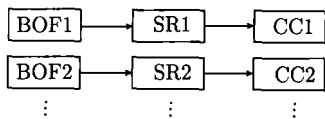


图 2 生产模式 I

Fig.2 Production mode I

对于这种较为简单的模式, 在按中间包使用寿命生产的前提下, 各连铸机可以实现最大炉数连浇. 结合式 (9) 和式 (10) 及以下各式, 各工序作业时刻可由连铸工序逆向倒推计算.

$$t_{i,1,3}^S = t_i^S, \quad (11)$$

$$t_{i,j,k}^S = t_{i,j,k}^E - t_{i,j,k}^{SE}, \quad (12)$$

$$t_{i,j,k-1}^E = t_{i,j,k}^S - t_{i,j,(k,k-1)}^T. \quad (13)$$

2.2 定炉对定机模式下的求解算法

如果一个炼钢车间至少存在一个转炉, 其冶炼周期长于对应连铸机的浇注周期, 而其余转炉的冶炼周期短于对应连铸机的浇注周期, 若要实现所有连铸机尽可能多炉连浇, 则需要在各转炉之间平衡生产能力. 由于不同浇次钢水的生产设备(如转炉)可能相同, 使得不同浇次之间会有一定的相互影响. 因此, 不同连铸机生产的各浇次钢水都存在合理的开浇时刻. 这种情形下的生产模式即为“定炉对定机”模式.

图 3 为一类典型的“定炉对定机”生产模式, 该模式下的某炼钢车间有两座转炉, 两个 Ar 站, 一座 LF, 两台连铸机, 生产钢种有常规钢(工艺路线为 BOF→Ar 站→CC)和品种钢(工艺路线为 BOF→LF→CC).

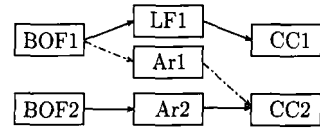


图 3 生产模式 II

Fig.3 Production mode II

此种生产模式较为复杂, 其中 BOF1 的冶炼周期短于 CC1 的浇注周期 (BOF1 的生产能力大于 CC1 的生产能力), BOF2 的冶炼周期长于 CC2 的浇注周期 (BOF2 的生产能力小于 CC2 的生产能力). 因此, 若要满足两台连铸机均能多炉连浇, 需要平衡两座转炉的生产能力. 生产方法为: BOF1 主要为 CC1 提供钢水, 同时为满足 CC2 连浇, 还要为 CC2 提供一部分钢水; BOF2 全部为 CC2 提供钢水. 因此, BOF1 与 BOF2 所生产炉次被划分为多个区间, 每个区间炉次数可由以下各式确定 (以浇次 1、2 为例, 假设将浇次 1 安排到 CC1 生产, 浇次 2 安排到 CC2 生产; 本文仅给出 BOF1 与 BOF2 前两区间的炉次数计算公式, 后续各区间所含炉次数计算方法与之相同).

$$n_1 = n_{1,1} + n_{1,2} + \dots + n_{1,c_1}, \quad (14)$$

$$n_2 = n_{2,1} + n_{2,2} + \dots + n_{2,c_2} + c'_2, \quad (15)$$

$$c'_2 = c_2 \text{ 或 } c_2 - 1, \quad (16)$$

$$n_{2,1} \leq \frac{(t_{Ar,max}^{SE} - t_{Ar,min}^{SE}) + (t_{LT,max}^{SE} - t_{LT,min}^{SE})}{t_{BOF2}^{SE} - t_{CC2}^{SE}} + 1, \quad (17)$$

$$n_{2,2} = \frac{(t_{Ar,max}^{SE} - t_{Ar,min}^{SE}) + (t_{LT,max}^{SE} - t_{LT,min}^{SE})}{t_{BOF2}^{SE} - t_{CC2}^{SE}} +$$

$$\frac{t_{2,n_{1,1}+2,1}^S - t_{2,n_{1,1},1}^E}{t_{BOF2}^{SE} - t_{CC2}^{SE}} + 1, \quad (18)$$

$$n_{1,1} \geq \frac{t_{BOF2}^{SE}}{t_{CC1}^{SE} - t_{BOF1}^{SE}}, \quad (19)$$

$$n_{1,1} = \frac{t_{2,n_{2,1}+1,1}^E + (t_{CC1}^{SE} - t_{BOF1}^{SE})}{t_{CC1}^{SE}}, \quad (20)$$

$$n_{1,2} = \frac{t_{2,n_{2,1}+n_{2,2}+2,1}^E - t_{2,n_{1,1}+1,1}^E + (t_{CC1}^{SE} - t_{BOF1}^{SE})}{t_{CC1}^{SE}} + 1. \quad (21)$$

现对以上各式作简单说明. CC2 所生产炉次钢水主要由 BOF2 提供, 但 BOF2 冶炼周期长于 CC2 浇注周期, 故需增加过程缓冲时间来保证 CC1 与 CC2 连浇. $n_{2,1}$ 为在缓冲时间范围内由 BOF2 所生产最大炉次数, 第 $n_{2,1}+1$ 炉则改由 BOF1 提供, 第 $n_{2,1}+2 \sim n_{2,1}+n_{2,2}+1$ 炉则继续由 BOF2 提供, 其余含义相同. 因为 CC1 的浇注周期长于 BOF1 冶炼周期, 所以 BOF1 能够提供一部分钢水供 CC2. $n_{1,1}$ 为 BOF1 提供给 CC2 第一炉钢水之前, 需要提供给 CC1 的炉次数. 因此, CC1 与 CC2 存在合理的开浇时刻, CC1 的开浇时刻可根据 CC2 的开浇时刻进行确定. c_2 为 BOF1 提供给 CC2 的炉次总数.

设定 CC2 的开浇时刻, 由以下各式可得出 CC1 合理的开浇时刻:

$$t_{1,n_{1,1}+1,1}^S = t_{2,n_{2,1}+1,1}^E \quad (22)$$

根据式 (11)~(13), $t_{1,n_{1,1}+1,3}^S$ 可由 $t_{1,n_{1,1}+1,1}^S$ 计算得出, 则 CC1 的开浇时刻可通过下式计算:

$$t_{1,1,3}^S = t_{1,n_{1,1}+1,3}^S - n_{1,1} \cdot t_{CC1}^{SE} \quad (23)$$

再结合式 (11)~(13), 各炉次在各设备上的作业时刻即可确定.

3 基于规则推理的动态调度算法

实际生产过程中, 原定的生产计划常常会由于异常而不能被严格执行, 需要实时调整. 动态调整的目标是尽量满足连铸机连浇, 利用缓冲设备处理生产过程异常状况, 尽量减少对原定计划的修改. 实际生产情况的多变性和不稳定性, 使得动态调度非常困难.

在钢铁生产过程中, 动态调度问题受诸多因素的影响, 具有多目标、多约束的特点^[15], 需要根据对各设备运行状况的监控, 快速应对设备故障等异常情况. 生产过程的随机扰动因素很多, 有任务扰动、设备扰动、生产工艺扰动和时间扰动等^[16]. 调度规则由于具有计算量小、效率高和实时性好等优点, 适用于动态调度^[17]. 为此, 可根据各钢厂具体情况, 按照现场生产的经验, 建立针对不同异常情况下所采取处理策略的方法库. 当遇到异常情况时, 可根据方法库中的对策进行相应的处理, 以提高运行效率, 减少生产中断. 同样, 在生产系统维护过程中, 也应采取一定的措施协调炼钢-连铸工序集之间的关系, 调控系统运行节奏^[18], 使生产稳定有序运行.

在炼钢-连铸生产过程中, 经常会发生扰动, 原定的作业计划可能需要经常调整. 在实际调度过程

中, 减少对原定调度计划的修改能够使整个炼钢厂生产稳定顺行, 而生产炉次的设备变更无疑会增加设备调整费用, 并且需要重新调整生产计划, 对生产带来不稳定因素. 因此, 在调度过程中, 若设备未出现故障, 应尽量不调整各炉次生产设备. 针对不同的扰动, 应采取如下调度规则^[19-21] 进行调整.

规则 1 若某一炉次出钢时刻延迟, 延迟时间在精炼工序缓冲范围内, 即满足

$$t_{i,j,1}^{E*} - t_{i,j,1}^E \leq t_{i,j,2,\max}^{SE} - t_{i,j,2}^{SE} \quad (24)$$

$(i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n_i),$

则利用精炼工序进行缓冲, 而不改变连铸工序作业时刻和后续炉次作业时刻.

规则 2 若某一炉次出钢时刻延迟, 延迟时间不在精炼工序缓冲范围内, 即不满足式 (24), 则该炉次在经过精炼工序缓冲后, 再通过降低前一炉次在连铸机的拉速, 通过连铸工序进行缓冲:

$$t_{i,j,2}^{E*} = t_{i,j,2}^S + t_{i,j,2,\max}^{SE} \quad (i = 1, 2, \dots, m; j = 2, 3, \dots, n_i), \quad (25)$$

$$t_{i,j-1,3}^{E*} = t_{i,j-1,3}^E + (t_{i,j,1}^{E*} - t_{i,j,1}^E) - (t_{i,j,2,\max}^{SE} - t_{i,j,2}^{SE}) \quad (i = 1, 2, \dots, m; j = 2, 3, \dots, n_i). \quad (26)$$

后续炉次在各工序作业时刻需要相应延迟. 同一炉次不同工序间的作业时刻按式 (27) 进行调整, 同一设备上同一浇次及相邻浇次的前后炉次之间的作业时刻可分别按式 (28) 和 (29) 进行调整.

$$t_{i,j,k+1}^{S*} = t_{i,j,k}^{E*} + t_{i,j,(k,k+1)}^T \quad (i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n_i; k = 1, 2), \quad (27)$$

$$t_{i,j+1,k}^{S*} = t_{i,j,k}^{E*} + t_{i,(j,j+1),k}^{G*} \quad (i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n_i - 1; k = 1, 2, 3), \quad (28)$$

$$t_{i+1,1,k}^{S*} = t_{i,n_i,k}^{E*} + t_{EA}^* \quad (i = 1, 2, \dots, m - 1; k = 1, 2, 3). \quad (29)$$

规则 3 若某一炉次出钢延迟时间大于精炼工序和连铸工序缓冲时间之和, 即满足

$$t_{i,j,1}^{E*} - t_{i,j,1}^E > (t_{i,j,2,\max}^{SE} - t_{i,j,2}^{SE}) + (t_{i,j,3,\max}^{SE} - t_{i,j,3}^{SE}) \quad (i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n_i), \quad (30)$$

则连铸机停浇.

规则 4 若某一炉次在连铸机上作业结束时刻延迟, 则此设备上后续炉次作业时刻相应延迟, 可按式 (27)~(29) 进行调整.

规则 5 由于各浇次开浇时, 中间包内衬温度比钢水温度低, 需要吸收热量, 因此各浇次开浇第一炉次, 需要根据不同的钢种相应提高出钢温度; 由于提高出钢温度而造成的炼钢炉作业周期延长、出钢时刻延迟, 可按规则 1、2 和 3 进行判断, 对生产计划作出相应调整。

规则 6 若某一炉次在某一工序上作业结束时刻提前, 则在生产允许范围内, 可通过减少过程等待时间, 提前下一工序开始作业时刻, 并调整后续炉次作业时刻, 以加快生产节奏, 增加产量。下一工序作业开始时刻调整方法为

$$t_{i,j,k}^{S*} = t_{i,j,k}^S - (t_{i,j,k-1}^E - t_{i,j,k-1}^{E*})$$

$$(i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n_i; k = 2, 3). \quad (31)$$

后续炉次作业时刻按式 (27)~(29) 进行调整。

根据以上调整规则, 通过实时调整调度计划, 则可达到动态调度的目的。

4 仿真实例

根据前文所述的模型及求解方法, 以某特钢厂转炉-连铸生产工艺流程为背景, 对模型进行仿真检验。该钢厂有三座转炉、三个氩站 (一个备用)、两座 LF 和三台连铸机, 生产钢种有常规

钢和品种钢。本文采用 Microsoft Visual C# 语言进行仿真, 实验环境为 Pentium(R) Dual-Core CPU/3.20HZ/2.00GB/Windows 7。

生产品种钢时需要经过 LF 工序精炼; 若生产常规钢, 钢水只进行吹 Ar 精炼。实际生产过程没有固定的模式, 通过对生产流程的深入解析, 本文对其生产模式进行优化, 采用如图 4 所示的较为简捷合理的生产模式。

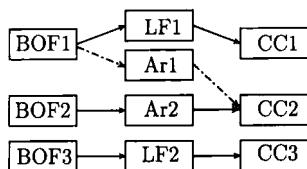


图 4 优化的生产模式

Fig.4 Optimized production mode

本文对三台连铸机 (各生产一个浇次) 同时进行生产的情况进行仿真实验。其中 1 号浇次为 CC1 所生产浇次, 包含 15 个炉次, 生产钢种为 SUP9 (品种钢); 2 号浇次为 CC2 所生产浇次, 包含 25 个炉次, 生产钢种为 HRB335 (常规钢); 3 号浇次为 CC3 所生产浇次, 包含 15 个炉次, 生产钢种为 60Si2Mn (品种钢)。图 5 为三个浇次对应的部分甘特图。

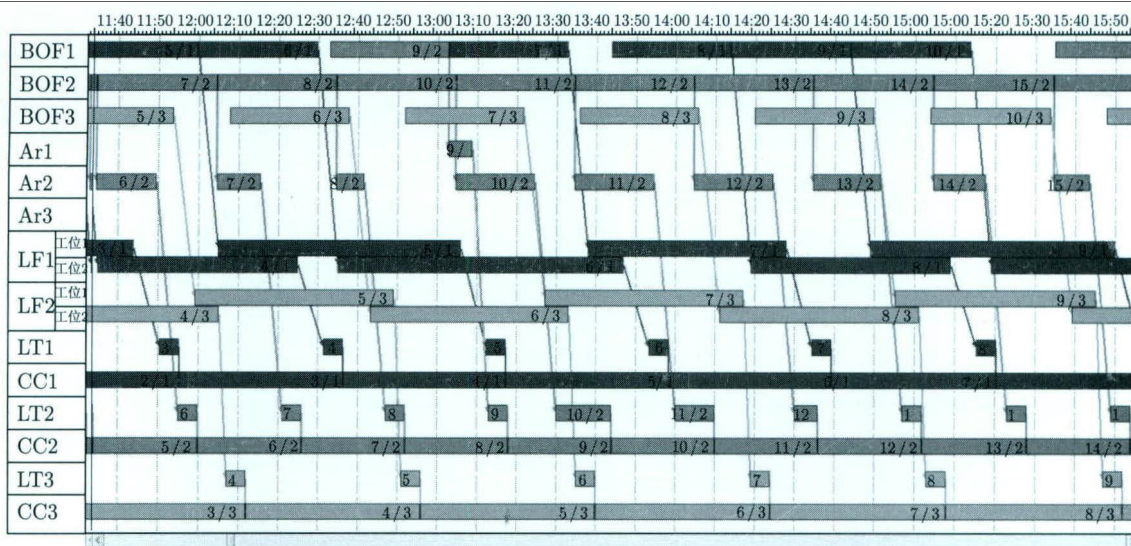


图 5 生产调度甘特图

Fig.5 Production scheduling Gantt chart

表 1 为仿真结果与实际结果的对比情况。经验证, 实例仿真求解出的三个浇次内, 三台连铸机均以最小作业周期进行生产, 生产过程总时间为 1925 min, 低于实际生产过程的总时间 2109 min, 生产过程总时间缩短 8.7%; 各工序各设备作业时刻无冲突, 过程等待总时间为 191 min, 低于实际

生产过程等待总时间 339 min, 生产过程等待时间缩短 43.7%; 转炉平均作业率为 88.1%, 高于实际生产转炉平均作业率 79.0%, 转炉作业率提高 11.5%。仿真过程中, 排出三个浇次的调度计划所需时间不足 1 min, 完全满足实际调度的需要。实例仿真结果表明模型及所采用求解方法的有效性。

表 1 仿真结果与实际情况对比

Table 1 Comparison between simulation and actual production data

| 浇次结果 | 钢种 | 炉次数 | 总时间/ min | 等待时间/ min | 转炉作业率/ % |
|------|------------|-----|-------------|--------------|-------------|
| 1 | 仿真 SUP9 | 15 | 615 | 98 | 84.9 |
| | 实际 SUP9 | 15 | 692 | 107 | 75.0 |
| 2 | 仿真 HRB335 | 25 | 650 | 93 | 96.5 |
| | 实际 HRB335 | 25 | 695 | 134 | 81.0 |
| 3 | 仿真 60Si2Mn | 15 | 660 | 0 | 82.9 |
| | 实际 60Si2Mn | 15 | 722 | 98 | 81.0 |

5 结论

(1) 针对特殊钢厂的炼钢-连铸调度问题, 在浇次计划的基础上, 以缩短生产时间和过程等待时间、提高转炉作业率为目标, 建立了炼钢-连铸生产调度模型。

(2) 在静态调度计划的求解过程中, 根据炼钢厂系统运行原则, 按照炼钢炉与连铸机作业周期的不同对应关系, 对生产模式进行了分类, 并给出相应的求解方法。

(3) 在动态调度过程中, 通过对调度过程中动态事件进行分类, 归纳了在生产出现异常情况下的动态调整规则, 并给出时间调整方法。

(4) 某特钢厂炼钢-连铸生产的实例仿真结果表明, 得出的调度计划无设备、时间冲突, 减少了生产时间及不必要的物流滞留时间, 使生产组织顺畅, 符合实际生产要求。

参考文献

- [1] Yin R Y. Development of steelmaking and continuous casting technology and prospect of this technology in 2010 in China. *Steelmaking*, 2008, 24(6): 1
(殷瑞钰. 我国炼钢-连铸技术发展和 2010 年展望. 炼钢, 2008, 24(6): 1)
- [2] Tang L X, Liu J Y, Rong A Y, et al. A review of planning and scheduling systems and methods for integrated steel production. *Eur J Oper Res*, 2001, 133: 1
- [3] Tang L X, Liu J Y, Rong A Y, et al. Mathematical programming model for scheduling steelmaking-continuous casting production. *Eur J Oper Res*, 2000, 120: 423
- [4] Missbauer H, Hauber W, Stadler W. A scheduling system for the steelmaking-continuous casting process: a case study from the steel-making industry. *Int J Prod Res*, 2009, 47(15): 4147
- [5] Storck J, Lindberg B. Assessment of best scheduling practice in continuous casting and hot rolling of stainless steel strip by system dynamics simulation. *Key Eng Mater*, 2007, 344: 897
- [6] Mohanty P P. An agent-oriented approach to resolve the production planning complexities for a modern steel manufacturing system. *Int J Adv Manuf Technol*, 2004, 24: 199
- [7] Bellabdaoui A, Flordaliso A, Teghem J. A heuristic algorithm for scheduling the steelmaking continuous casting process. *Pac J Optim*, 2005, 1(3): 447
- [8] Atighehchian A, Bijari M, Tarkesh H. A novel hybrid algorithm for scheduling steelmaking continuous casting production. *Comput Oper Res*, 2009, 36: 2450
- [9] Zhu B L, Yu H B. Production scheduling model and algorithm for steelmaking-continuous casting-hot rolling processes. *Comput Integr Manuf Syst*, 2003, 9(1): 33
(朱宝琳, 于海斌. 炼钢-连铸-热轧生产调度模型及算法研究. 计算机集成制造系统. 2003, 9(1): 33)
- [10] Li T K, Zhou J, Sun L. Model and algorithm for steelmaking-continuous casting scheduling in DHCR and CCR environment. *Syst Eng Theory Pract*, 2006, 26(6): 117
(李铁克, 周健, 孙林. 连铸连轧和冷装热轧并存环境下的炼钢-连铸生产调度模型与算法. 系统工程理论与实践, 2006, 26(6): 117)
- [11] Li T K, Su Z X. Two stage genetic algorithm for SM-CC production scheduling. *Chin J Manage Sci*, 2009, 17(5): 68
(李铁克, 苏志雄. 炼钢连铸生产调度问题的两阶段遗传算法. 中国管理科学, 2009, 17(5): 68)
- [12] Ponten H J, Grob S. Cast in time and quality: energy savings through integrated heat temperature forecast and scheduling model. *Iron Steel Technol* 2011, 8(1): 82
- [13] Yin R Y. *Metallurgical Process Engineering*. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2009
(殷瑞钰. 冶金流程工程学. 北京: 冶金工业出版社, 2009)
- [14] Liu Q, Tian N Y, Yin R Y. Operation principle and control strategy for steelmaking workshop system. *Chin J Process Eng*, 2003, 3(2): 171
(刘青, 田乃媛, 殷瑞钰. 炼钢厂系统的运行原则与调控策略. 过程工程学报, 2003, 3(2): 171)
- [15] Pang X F, Yu S P, Liu W, et al. Research and development of steelmaking and continuous casting dynamic intelligence scheduling system. *Control Eng China*, 2005, 12(6): 553
(庞新富, 俞胜平, 刘炜, 等. 炼钢连铸动态智能调度系统的研究与开发. 控制工程, 2005, 12(6): 553)
- [16] Zheng Z, Zhu D F, Gao X Q. An approach of production scheduling and replanning in a steelmaking-continuous casting plant. *J Chongqing Univ*, 2008, 31(7): 820
(郑忠, 朱道飞, 高小强. 钢厂炼钢-连铸生产调度及重计划

- 方法. 重庆大学学报, 2008, 31(7): 820)
- [17] Qian X L, Tang L X, Liu W X. Dynamic scheduling: a survey of research methods. *Control Decis*, 2001,16(2): 141
(钱晓龙, 唐立新, 刘文新. 动态调度的研究方法综述. 控制与决策, 2001, 16(2): 141)
- [18] Liu Q, Huang X W, Fu P Y, et al. Scheduling model based on productive process analysis for fully continuous casting of steel // *Metallurgy Research*. Beijing, 2005: 184
(刘青, 黄星武, 富平源, 等. 基于过程解析的全连铸生产调度模型// 冶金研究. 北京, 2005: 184)
- [19] Liu Q. *Research on Mode Optimization of Modern BOF Steelmaking Workshop for Long Products: the Effect of High Efficiency Continuous Casting Technology on Running Control for Modern BOF Steelmaking Workshop* [Dissertation]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2002
(刘青. 现代长材型转炉炼钢厂的模式优化研究: 方坯高效连铸对转炉炼钢厂运行优化的影响 [学位论文]. 北京: 北京科技大学, 2002)
- [20] Zhang G B. *Developing of Computer Aided Production Scheduling System in Xinjiang Bayi BOF Steel-making Plant* [Dissertation]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2002: 3
(张国波. 新疆八钢转炉炼钢厂计算机辅助生产调度系统的开发 [学位论文]. 北京: 北京科技大学, 2002: 3)
- [21] Zha X Y. *Research on Running Control and Schedule Model for BOF Steelmaking Workshop of Bayi Steel* [Dissertation]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2004: 3
(查晓燕. 新疆八钢转炉炼钢厂运行控制与调度模型的研究 [学位论文]. 北京: 北京科技大学, 2004: 3)