

## 炼钢与热轧调度方案动态协调方法研究

张春生<sup>1,2</sup>, 李铁克<sup>3</sup>

(1. 中国人民大学信息资源管理学院, 北京 100872; 2. 中国石油规划总院综合信息技术部, 北京 100083; 3. 北京科技大学东凌经济管理学院, 北京 100083)

**摘要:** 为解决炼钢-连铸与热轧生产调度方案之间协同联动、保障连续生产的问题, 提出以炼钢-连铸为动态调度主体、以热轧为辅助协调的动态协调策略, 将炼钢与热轧调度的动态协调问题分解为两个子问题, 以最大化每一炉次浇铸完工时间的一致性、最小化板坯连轧惩罚值以及最小化板坯轧制时间差异为优化目标, 建立炼钢-连铸动态调度模型及热轧动态协调模型。通过炼钢-连铸动态调度算法最小化出坯时间差异, 再通过热轧动态协调方法对不同送坯工艺要求的板坯进行轧制方案调整。仿真实验表明本文提出的模型和算法是可行的和有效的。

**关键词:** 炼钢-连铸; 热轧; 动态调度; 动态协调

**文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7059(2016)05-0019-07

## Study on the dynamic coordination between steelmaking-continuous casting scheduling and hot rolling scheduling

ZHANG Chun-sheng<sup>1,2</sup>, LI Tie-ke<sup>3</sup>

(1. School of Information Resources Management, Renmin University of China, Beijing 100872, China; 2. General IT Department, Petrochina Planning and Engineering Institute, Beijing 100083, China; 3. Dongling School of Economics and Management, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

**Abstract:** To implement the dynamic coordination between steelmaking-continuous casting scheduling and hot rolling and scheduling of keeping continuous production, a dynamic coordination strategy is proposed where steelmaking and continuous casting scheduling is the main part and scheduling of hot rolling is the associate one. The coordination problem between steelmaking and hot rolling is separated into two sub-problems. To maximum the completion time consistency in each charge of casting stage, and minimize the penalties for wrong sequence of the two continuous rolling slabs, and the rolling time difference of each rolling turn, a dynamic scheduling model for steelmaking-continuous casting and a dynamic coordinating model for hot rolling are established. The delivering time difference of slabs is minimized through steelmaking-continuous casting dynamic scheduling algorithm, and the rolling scheduling is adjusted via the dynamic coordinating algorithm for hot rolling which is according to slabs' requirement of delivering form. The simulation experiments show that the algorithm is feasible and effective.

**Key words:** steelmaking-continuous casting; hot rolling; dynamic scheduling; dynamic coordination

**作者简介:** 张春生(1982—), 男, 工程师, 博士; **收稿日期:** 2016-02-23

## 0 引言

直接轧制(HDR)、直接热装轧制(DHCR)、热装轧制(HCR)及冷装轧制(CCR)四种钢轧衔接方式使得炼钢生产与热轧生产既紧密联系又相互独立,需要更加灵活的计划方法对两部分进行优化与协调。钢铁企业一体化批量计划作为提升多工序间的生产整体协调性、减少炉次等待时间、提高热装热送率的重要方法,是钢铁企业迫切需要研究与解决的优化问题,国内外学者对此做了大量研究工作<sup>[1-3]</sup>。一体化批量计划解决了炼钢批量计划与热轧批量计划的衔接和匹配问题,为炼钢-连铸与热轧生产调度提供了基础,但计划制定过程中对作业计划层的生产工艺约束考虑较少,导致在作业调度层面可行性较差。综合考虑一体化批量计划和生产调度工艺约束的研究日益增多,如文献[4]利用聚类分析的方法将板坯和钢卷分别聚类为板坯簇和钢卷簇,在调度层面以启发方法对其进行调度;文献[5]结合炼钢和轧制工序影响因素,建立了基于板坯温度模型的混装一体化批量计划模型、作业调度模型,并开发了一体化管理系统。

以上研究多基于理想的静态生产环境,对生产实际当中时间、温度、质量等方面的随机扰动考虑较少。目前动态调度在炼钢-连铸阶段的研究日益丰富<sup>[6-8]</sup>,但普遍缺乏与热轧生产的联动。然而实际生产中炼钢工序或热轧工序出现的扰动都能导致一体化调度方案重新调整,企业需要同时考虑前工序或后工序的约束以及本工序动态调整对前后工序生产执行的影响。因此,在作业计划层面如何考虑钢轧衔接的因素,进行炼钢-连铸与热轧生产调度的动态协调是在实际中践行一体化生产的关键。为此,笔者基于对钢铁生产扰动类型的分析,提出前后工序协调联动的策略,进而建立动态协调的数学模型,并给出求解方法。通过企业实际生产数据进行仿真实验,结果表明本文的模型和算法是一个有效求解炼钢与热轧调度方案动态协调问题的方法。

## 1 钢铁生产扰动类型

钢铁生产过程中存在多种动态因素,时刻影响着生产调度的执行情况,以下对各种扰动因素进行分析。

(1) 机器故障。机器故障是钢铁生产过程中最常见且最复杂的动态因素,具有一定的代表性,其他一些动态事件,如开工时间延迟、加工时间延长等均可以转化为机器故障的情况进行处理。机器故障包含故障机器类型和故障时间两个重要因素,当断浇的情况无法避免时,还涉及到炼钢批量计划的调整。

(2) 产品质量异常。当炼钢-连铸-热轧某一环节的质量检测设备提示产品质量不合格时,需对不合格的钢水或板坯进行处理,主要的措施包括改判和回炉。改判必将影响本浇次内顺序或其他浇次内顺序变化,未加工炉次需要重调度;回炉与新插入一炉相同,未加工炉次要重新安排机器和时间。

(3) 温度扰动。温度扰动程度的度量由温度监控装置监测到的钢水实时温度与目标温度之差决定。根据经验数据,当温差超过一定范围将影响连铸机浇铸以及板坯轧制质量。当钢水处于精炼炉阶段,温度不够时,需要延长精炼加工时间;当钢水到达连铸机,温度较低时,需要回到精炼炉进行温度补偿。

(4) 时间扰动。时间扰动源于机器故障、加工时间的延长或缩短、温度补偿等因素,分为加工时间、开工时间、完工时间的变化,由时间差来度量其大小。当时间差较小时,进行局部的调整;当时间差较大时,则需要对机器和时间重新指派。

(5) 任务增减。由于某些原因有新订单插入到正在执行的浇次序列或轧制序列,或某个订单对应的炉次被临时取消,此时要求调度方案得到调整,以免造成断浇或生产的不连续。

(6) 浇铸异常类扰动。连铸机故障、钢水质量问题、误操作等事故可能导致浇铸异常。根据故障时炉次剩余钢水量的多少,采取相应措施,

包括:改钢改向;不改钢改向;回炉处理。

(7) 改钢类扰动。改钢类扰动是在炼钢过程中成分不合格时所发生的扰动。

(8) 热轧计划的变更。热轧工序由于某些扰动造成连铸出坯时间或顺序需要调整,主要包括:要求缓出坯,造成浇次内每炉次完工时间延长;要求暂不出坯,连铸机上待加工浇次顺序需要调整,如先对没有时限要求的冷坯浇次进行生产等。

由以上分析可知,钢铁生产扰动因素多种多样,难于控制,多集中在工艺复杂的炼钢-连铸阶段。机器故障扰动为代表性因素,很多动态因素可转化为机器故障。随机扰动对动态调度的影响分为3个等级:(1)只有时间或机器调整;(2)时间和机器同时调整;(3)批量计划需要调整。

## 2 动态协调策略

由于炼钢-连铸生产调度最为复杂,扰动因素最多,因此炼钢与热轧调度的协调优化以炼钢-连铸为主体对调度方案进行调整,热轧调度作为辅助进行协调。动态协调以降低扰动因素对调度方案的影响、最小化方案调整幅度为原则,保证生产的连续性和稳定性。由于时间的一致性是实现炼钢与热轧平稳生产的关键,炼钢-连铸调度最小的操作单位为板坯组成的炉次,热轧调度最小的操作单位为板坯,因此每一炉次浇铸的完成时间动态调度前后一致是优化的重点。在实际生产中,一个轧制计划中的板坯往往来自多个浇次计划,一个浇次计划中的板坯同样对应多个轧制计划,指派到不同班次生产的浇次计划、轧制计划通过HDR、DHCR、HCR及CCR四种传输方式进行衔接,以达到物流的连续和生产节奏的匹配。一般的板坯在工艺上对上传输方式没有要求,有些钢材产品对送坯路径有特殊限制,要求必须热装或必须冷装,因此在动态调度过程中需要对这些订单对应的炉次区别对待,方法为对有特殊送坯要求炉次的时间一致性设置较大的权重。

炼钢-连铸动态调度后,某些炉次的完成时间发生了调整,在热轧工序对相应的板坯加工时间进行调整。若板坯前后轧制时间差距较小,则在该轧制单元内交换板坯轧制位置;若时间差距较大,则在满足热轧组坯规则条件下交换不同轧制单元间相应的板坯。

## 3 动态协调模型

面向钢轧衔接的动态调度以未加工的工件为调度对象,以时间的衔接为目标,约束条件为炼钢-连铸调度、热轧调度的工艺限制。基于以上动态协调策略,问题模型分为炼钢-连铸动态调度模型与热轧动态协调模型,分步描述动态衔接的问题。

### 3.1 炼钢-连铸动态调度模型

目标函数:

$$\min f_1 = \sum_{h \in H^U} w_h \times |t_{h,n}^C - t_{h,n}^C| \quad (1)$$

约束条件:

$$t_{h,g+1}^S \geq t_{h,g}^S + p_{h,g} \\ (h,g) \in \{h,g | o_{h,g} \in O^U, g \in G \setminus \{n\}\} \quad (2)$$

$$t_{h,g}^C = t_{h,g}^S + p_{h,g} \quad (h,g) \in \{h,g | o_{h,g} \in O^U\} \quad (3)$$

$$(m_{h_1,g} \neq m_{h_2,g}) \vee (t_{h_1,g}^S \geq t_{h_2,g}^C \vee t_{h_2,g}^S \geq t_{h_1,g}^C) \\ (h_1, h_2, g) \in \{h_1, h_2, g | o_{h_1,g}, o_{h_2,g} \in O^U, \\ h_1 \neq h_2, g \in G \setminus \{n\}\} \quad (4)$$

$$t_{h,g+1}^S - t_{h,g}^C \leq \alpha_{h,g} \\ (h,g) \in \{h,g | o_{h,g} \in O^U, g \in G \setminus \{n\}\} \quad (5)$$

$$t_{H_q(k+1),n}^S = t_{H_q(k),n}^C \quad \forall k, k+1 \in H_q, q \in Q^U \quad (6)$$

$$t_q^S \geq T_q \quad \forall q \in Q^U \quad (7)$$

$$m_{h,n} = m_q \quad \forall h \in H_q, \forall q \in Q^U \quad (8)$$

$$t_{q^*}^S \geq t_q^C + \lambda \quad (q^*, q) \in \{q^*, q | m_{q^*} = m_q, T_{q^*} > T_q, q \in Q^U\} \quad (9)$$

上述式中: $h$ 为炉次序号, $h \in H^U$ , $H^U$ 为未加工炉次序号集合; $w_h$ 为炉次 $h$ 浇铸完工时间一致性的权重系数; $t_{h,n}^C$ 、 $t_{h,n}^C$ 表示动态调度前后炉次 $h$

浇铸完成时间;  $t_{hg}^S$ 、 $t_{hg}^C$ 、 $p_{hg}$  分别表示炉次  $h$  在生产阶段  $g$  的开始加工时间、结束加工时间及加工时长, 其中  $g$  代表生产阶段序号,  $g \in G = \{1, 2, \dots, n\}$ ,  $G$  为生产阶段的集合;  $o_{hg}$  为炉次  $h$  在第  $g$  阶段的操作,  $o_{hg} \in O^U$ ,  $O^U$  为未完工操作的集合;  $m_{hg}$  表示炉次  $h$  在生产阶段  $g$  的加工机器;  $\alpha_{hg}$  为钢水在前后生产阶段等待时间上限;  $q$  为浇次序号,  $q \in Q^U$ ,  $Q^U$  为未完成浇次集合;  $t_{H_q(k+1)n}^S$  为第  $q$  浇次中第  $k+1$  个炉次浇铸开始时间;  $t_{H_q(k)n}^C$  为第  $q$  浇次中第  $k$  个炉次浇铸完成时间;  $H_q$  为第  $q$  浇次中的炉次集合;  $t_q^S$ 、 $t_q^C$ 、 $T_q$  分别表示浇次  $q$  的开始加工时间、完工时间及计划开浇时间;  $m_q$  表示加工浇次  $q$  的连铸机;  $\lambda$  为相邻浇次之间的准备时间。

目标函数  $f_1$  表示最小化每一炉次浇铸完工时间重调度前后差异, 对于有送坯特殊要求的炉次, 浇铸完工时间一致性权重系数  $w_h$  设置较大; 对于一般炉次,  $w_h$  设置较小。约束条件函数式 (2) 表示同一炉次各生产阶段之间的时序约束; 式 (3) 表示炉次在各工序连续加工; 式 (4) 表示各操作占用时间和机器资源不能冲突; 式 (5) 表示炉次在各阶段间的等待时间约束; 式 (6) 表示同一浇次内连续浇铸约束; 式 (7) 表示浇次开浇时间约束; 式 (8) 表示同浇次的炉次指派给同一连铸机; 式 (9) 表示相邻浇次间存在调整时间。在扰动事件发生时刻, 对于正在加工的操作, 其加工机器和开工时间变量无法更改, 因此延用原值; 对于被扰动中断的操作, 其机器和时间变量是否重新赋值由扰动类型和程度决定。

### 3.2 热轧动态协调模型

当某一板坯浇铸完成时间差小于一定范围时, 只需在轧制单元内调整板坯轧制顺序; 当时间差大于一定范围时, 则需在轧制单元之间进行调整。热轧生产调度即为热轧批量计划, 因此在已有的热轧生产调度的 VRP (车辆路径问题) 模型的基础上, 以需要调整轧制顺序的板坯为调度对象, 建立热轧动态协调模型。

目标函数:

$$\min f_2 = \sum_{v \in V} \sum_{i \in I} \sum_{j \in I} C_{ij}^V \times x_{vij} \quad (10)$$

$$\min f_3 = \sum_{i \in I} w_i \times |t_i^R - t_i^Q| \quad (11)$$

约束条件:

$$|B_i - B_j| \leq D^B, |A_i - A_j| \leq D^A, \\ |R_i - R_j| \leq D^R, x_{vij} = 1 \quad (12)$$

$$\sum_{j \in I} L_j \times x_{vj} \leq L_{\max}^{B_i}, x_{vj} = x_{vj} = 1, B_i = B_j \quad (13)$$

$$L_{\min}^R \leq \sum_{i \in I} x_{vi} \times L_i \leq L_{\max}^R \quad (14)$$

$$\sum_{v \in V} x_{vi} \leq 1 \quad (15)$$

$$t_i^R \geq t_i^Q \quad (16)$$

上述式中:  $I$  为板坯  $i$  (或  $j$ ) 的集合,  $I = \{1, 2, \dots, N_I\}$ ;  $V$  为轧制计划  $v$  的集合,  $V = \{1, 2, \dots, N_V\}$ ;  $C_{ij}^V$  为轧制计划  $V$  中板坯  $i$  与  $j$  相邻引起的惩罚值;  $x_{vij}$  为布尔变量, 表示第  $v$  个轧制计划中若板坯  $j$  是板坯  $i$  的直接后继则为 1, 否则为 0;  $w_i$  为板坯  $i$  的轧制时间一致性的权重系数;  $t_i^R$ 、 $t_i^Q$  分别为板坯  $i$  动态调度前后轧制的时间;  $B_i$ 、 $A_i$ 、 $R_i$  分别为板坯  $i$  的轧制宽度、轧制厚度及轧制硬度;  $D^B$ 、 $D^A$ 、 $D^R$  分别为轧制计划中相邻板坯宽度、厚度、硬度允许变化的最大值;  $x_{vj}$  为布尔变量, 若第  $i$  个板坯在第  $v$  个轧制计划中则为 1, 否则为 0;  $L_i$  为板坯  $i$  的轧制长度;  $L_{\max}^{B_i}$  为轧制计划中板坯轧制宽度为  $B_i$  的最大同宽轧制长度;  $L_{\min}^R$ 、 $L_{\max}^R$  分别为一个轧制计划允许的最小和最大长度;  $t_i^Q$ 、 $t_i^R$  分别为板坯  $i$  动态调度前后浇铸的时间。

目标函数  $f_2$  表示最小化板坯连轧惩罚值; 目标函数  $f_3$  表示最小化动态调整前后板坯轧制时间差异。约束条件函数式 (12) 表示轧制计划中相邻板坯轧制宽度、厚度、硬度变化允许的最大值; 式 (13) 表示轧制计划的最大同宽轧制长度约束; 式 (14) 表示轧制计划允许的最大、最小轧制长度; 式 (15) 表示一个板坯最多只能被安排到一个轧制计划; 式 (16) 表示板坯在炼钢热轧生产的时序约束。

## 4 动态协调算法

基于以上动态协调策略,将炼钢与热轧调度方案动态协调问题的求解过程分解为炼钢-连铸动态调度算法及热轧动态协调算法分步进行求解。

### 4.1 炼钢-连铸动态调度算法

为了保证炼钢与热轧生产时间的一致性,炼钢-连铸动态调度首先确保浇次计划在连铸阶段的生产时间一致性,以此为基础对炉次在炼钢、精炼阶段的生产时间和机器进行指派。因此若连铸机未发生故障,则仅对炼钢、精炼阶段进行调整;若连铸机发生故障,则首先对浇次计划进行修复,尽量保持其原完工时间。连铸机故障可能造成断浇,未浇铸的炉次组成新的浇次或插入到其他浇次,对变动的浇次指派连铸机,调整其在连铸机上的加工顺序。

连铸方案修复方法为:对于未开浇的浇次,将其期望开浇时间非减排序,按连铸机剩余加工能力依次指派连铸机。同浇次炉次需满足约束式(6)和式(8),异浇次炉次开工时间需满足式(7)和式(9)。在某个炉次的变量值确定后,可通过约束传播更新其他炉次相应变量的值域<sup>[9]</sup>。

以修复后的连铸方案为基础,对炉次在炼钢、精炼阶段进行重调度,并依据工序间的时序约束以及等待时间约束对连铸阶段的浇次计划进行调整,具体步骤包括指派机器和消解时间约束冲突。

#### 4.1.1 指派机器

(1) 变量选择。计算每个操作的期望开工时间,将操作的集合 $O^U$ 按阶段顺序递增排序,属于同一阶段的操作按非减排序。

(2) 值选择。计算操作 $o_{h_g}$ 的最早开工时间和最迟完工时间,并计算该范围内所有机器的剩余生产能力,则 $m_{h_g}$ 为剩余生产能力最大的机器。若存在多个可选机器,则优先选择原机器。

#### 4.1.2 消解时间约束冲突

在明确炉次生产机器之后,需要对炉次的时间变量进行赋值并消解约束冲突。其过程为先

消除时序约束和资源占有约束的冲突,进而消除等待时间受限冲突,最后通过调整可行的炉次浇铸时间消解连续浇铸约束的冲突<sup>[10]</sup>。

(1) 时序、资源占有的冲突消解。按生产工序正向进行调整:对于任一阶段的机器确定需要加工的炉次集合,按炉次的原开工时间非减排序,根据约束式(2)~(4)、(6)~(9),由前一工序结束时间、同一机器上前一炉次结束时间以及机器可用时间计算操作 $o_{h_g}$ 的开工时间下界。

(2) 等待时间约束冲突消解。按生产工序逆向进行调整:计算等待时间,若与式(5)冲突,则延迟 $o_{ij}$ 的开工时间 $t_{h_g}^S \leftarrow t_{h_{g+1}}^S - \alpha_{h_g} - p_{h_g}$ 。而若不允許调整开工时间,则延长加工时间 $p_{h_g} \leftarrow t_{h_{g+1}}^S - \alpha_{h_g} - t_{h_g}^S$ 。

(3) 连续浇铸约束冲突消解。依据时序、析取及等待时间受限等约束调整炼钢、精炼阶段的加工时间可能引起连续浇铸的中断,为此需要通过控制连铸机拉速调整作业时间,避免断浇。为防止再次引发炼钢、精炼阶段的时序和等待时间冲突,在连铸阶段进行调整过程中应尽量减少开工时间的变动。

### 4.2 热轧动态协调算法

经过炼钢-连铸动态生产调度方案的处理,使浇铸工序的前后出坯时间尽量一致,若扰动仍使某些炉次的完成时间发生了变动,就需在热轧阶段对相应的板坯进行调整,并根据生产工艺对送坯方式的不同要求分别讨论。设置时间范围 $T^s$ 为一个生产班次的时间,若板坯在炼钢-连铸动态调度前后时间差 $|t_i^Q - t_i^Q| < T^s$ ,则在轧制单元内调整轧制顺序;若时间差 $|t_i^Q - t_i^Q| \geq T^s$ ,则需在轧制单元之间进行调整,具体步骤包括调整板坯轧制顺序和调整轧制时间。

#### 4.2.1 调整板坯轧制顺序

(1) 无热装或冷装要求的板坯。对于早出坯的情况,按约束式(12)~(15)检查是否能够插入当前轧制单元,若不能插入则送入保温坑存放,按原轧制计划执行。对于晚出坯的情况,从出坯时间开始在未完成轧制单元寻找插入位置,

满足约束式(12)~(15)时执行插入,否则放入冷坯库保存。

(2) 要求热装的板坯。若板坯 $i$ 要求热装,则增加约束 $0 < t_i^R - t_i^Q < \Psi$ (17), $\Psi$ 为出坯后轧制前最大等待时间。在出坯时刻正在轧制的轧制单元当中寻找插入位置,若满足约束式(12)~(15)、(17),则执行插入或与一般要求的板坯进行位置交换,否则放入加热炉或保温坑暂存。

(3) 要求冷装的板坯。若板坯 $i$ 要求冷装,则增加约束 $t_i^R - t_i^Q > \Omega$ (18), $\Omega$ 为出坯后轧制前最小等待时间。对于早出坯情况,轧制方案不受影响;对于晚出坯情况,在未完成的轧制单元中寻找插入位置,若满足约束式(12)~(15)、(18),则执行插入或与一般要求的板坯进行位置交换,否则放入冷坯库保存。

#### 4.2.2 调整轧制时间

在轧制单元及单元内轧制顺序确定后,需要调整每一块板坯的轧制时间。设定同一轧机上前一轧制单元的完成时间为 $t^F$ ,前后轧制单元之间的准备时间为 $\lambda^R$ ,板坯 $i$ 的轧制时长为 $P_i^R$ ,则

板坯轧制时间计算如下:

(1) 无热装或冷装要求的板坯。对于轧制单元内首个板坯 $i$ , $t_i^R = \max\{t_i^Q, t^F + \lambda^R\}$ ;对于其他板坯 $j$ , $t_j^R = \max\{t_j^Q, t_i^R + p_i^R\}$ , $x_{v,j,j} = 1$ 。

(2) 要求热装的板坯。对于轧制单元内首个板坯 $i$ , $t_i^R = \min\{t_i^Q + \Psi, t^F + \lambda^R\}$ ;对于其他板坯 $j$ , $t_j^R = \max\{t_j^Q, t_i^R + p_i^R\}$ , $x_{v,j,j} = 1$ 。

(3) 要求冷装的板坯。对于轧制单元内首个板坯 $i$ , $t_i^R = \max\{t_i^Q + \Omega, t^F + \lambda^R\}$ ;对于其他板坯 $j$ , $t_j^R = \max\{t_j^Q + \Psi, t_i^R + p_i^R\}$ , $x_{v,j,j} = 1$ 。

## 5 仿真实验

### 5.1 实验数据

某钢铁企业拥有转炉、精炼设备及连铸机各3台,加工3个浇次,共18个炉次;轧机1台,加工189块板坯,分为3个轧制单元。设炉次在前后工序间的等待时间上限 $\alpha_{h,g} = 20$  min,连铸机相邻浇次间生产准备时间 $\lambda = 10$  min,炉次中断后等待恢复加工的时间上限为20 min,炉次在炼钢阶段的加工时间为固定值,在精炼、连铸阶段的加工时间在一定范围变动,如表1所示。

表1 精炼、连铸加工时间上下限

Table 1 Maximum and minimum of the processing time during refining and casting stage

阶段	炉次编号																	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
精炼最大	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	50	60	60	60	60	60	60	60
精炼最小	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
连铸最大	47	47	47	47	47	47	47	47	47	47	53	53	53	53	53	40	40	40
连铸最小	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	27	27	27	27	27	20	20	20

### 5.2 实验结果

本文算法通过C#编程语言实现,计算环境为Pentium 4/CPU 3.00 GHz/RAM 1.50 GB的台式计算机。

实验随机生成故障机器和故障时间,在以下的实例中,初始调度甘特图如图1所示,经过炼钢、精炼阶段生产资源的合理配置,各炉次(HEAT)在连铸阶段形成3个浇次实现连浇。3号精炼炉在时刻288 min发生故障,故障时间为73 min,炉次16加工被中断(Breaking)。

故障发生后动态重调度的甘特图如图2所

示。可以看出,经过动态调度,炉次16连铸完成时间延迟15 min,造成炉次15部分板坯出坯延迟,炉次16~18也出现晚出坯现象。根据热轧动态协调算法对延迟出坯的板坯在轧制单元2与轧制单元3中进行优化调整,优先确保了有热装或冷装要求的板坯轧制时间,维持了热轧生产的稳定。

由上述实验结果可以得到以下结论:炼钢-连铸动态调度算法能够有效保持连铸完工时间的一致性,明显减小随机扰动对炼钢与热轧生产的影响。热轧动态协调算法通过对轧制时间变

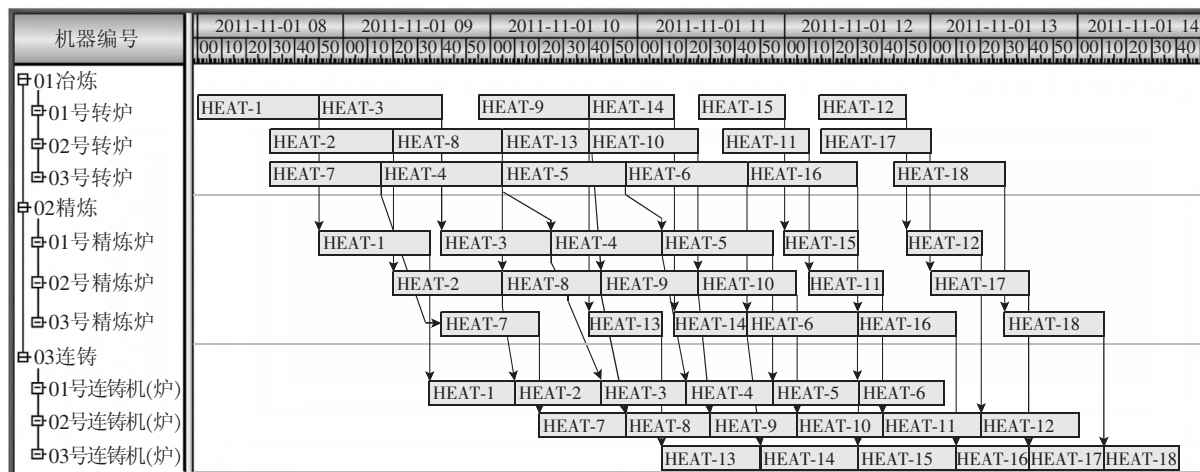


图1 初始调度甘特图

Fig. 1 Gantt chart for initial scheduling

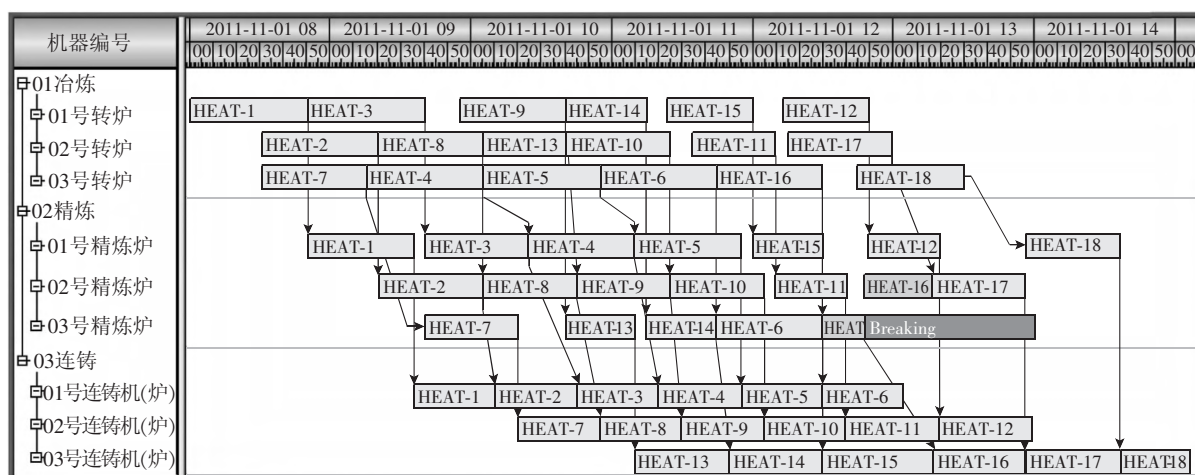


图2 重调度后甘特图

Fig. 2 Gantt chart for initial rescheduling

动的板坯进行优化调整,有效维持了热轧工序的稳定性,最终实现了炼钢与热轧调度方案的动态协调。求解算法具有较高的计算效率,能够满足实际生产调度实时性、连续性的需求,有利于企业实现炼钢与热轧的协调优化。

## 6 结论

由于炼钢-连铸与热轧两个工序在工艺上存在的差异以及二者衔接方式的多样性,使得动态环境下实现整个生产流程的协同联动十分困难,因此在调度层面进行炼钢与热轧调度的动态协调对实现钢铁生产一体化具有重要的实际意义。本文提出以炼钢-连铸为动态调度主体、热轧辅助协调的面向钢轧衔接的动态协调策略,考

虑不同订单对送坯方式的不同要求以及炼钢-连铸、热轧静态生产调度的约束,分别建立数学模型。在炼钢-连铸动态调度算法中,先对连铸方案进行修复,最大化出坯时间一致性,再通过机器重指派、时间约束冲突消解方法对炼钢、精炼阶段的操作进行调整。在轧制协调算法中对提前出坯或晚出坯的板坯依据冷装、热装等工艺要求进行全局优化调整。仿真实验验证了本文钢轧调度方案动态协调方法的可行性和有效性。

## 参考文献:

[1] 郑忠,刘怡,陈开,等. 炼钢-连铸-热轧生产计划编

(下转第30页)



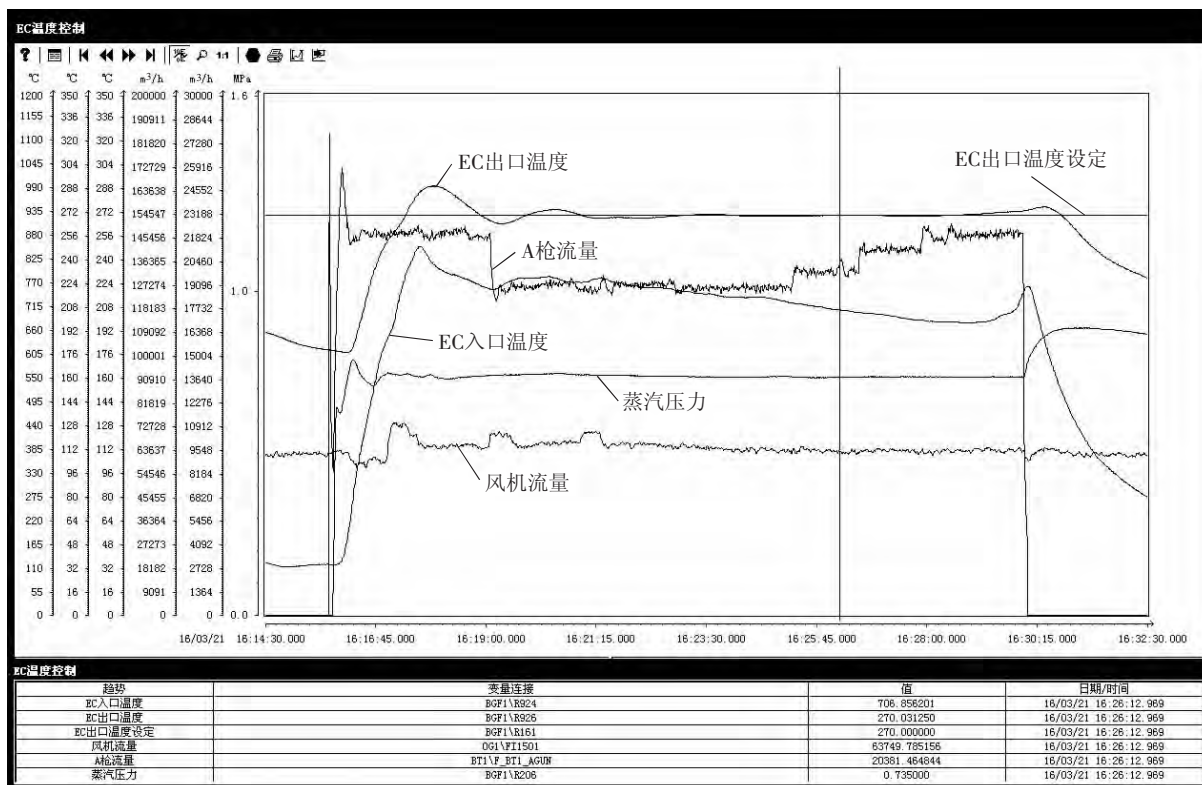


图 3 实际历史曲线

Fig. 3 History curve

能较好地控制出口温度,满足蒸发冷却器出口温度控制需求。

#### 参考文献:

[1] 许克豹,赵朝霞.转炉干法除尘系统烟气温度控制算

法[J].冶金自动化 2013 37(3):15.

[2] 吴晓峰,费敏锐.转炉干法除尘智能系统的设计应用[J].测控技术 2006 25(3):46.

[3] 顾树生,王建辉.自动控制原理[M].清华大学出版社 2014.

[编辑:薛 朵]

(上接第 25 页)

制的统一模型及智能算法[J].北京科技大学学报, 2013 35(5):687.

[2] 刘超,王森,周维,等.炼钢-连铸-热轧一体化生产计划排程方法研究[J].制造业自动化,2015,37(5):81.

[3] 张旭君,吕志民.炼铸轧集成计划与调度组批模型及算法[J].控制与决策 2013 28(8):1257.

[4] LIANG H L,LI S J. CC-DHCR planning and scheduling method based on slab cluster[J]. Journal of Advanced Manufacturing Systems 2008 7(2):249.

[5] 刘立钧,温治,苏福永,等.冶铸轧混装一体化调度管理系统研究及应用[J].冶金自动化,2014 38(1):28.

[6] 王晶,郑亚楠.考虑机器故障的炼钢连铸重调度模型与算法设计[J].冶金自动化 2015 39(2):28.

[7] 曾亮,王珊珊,叶理德.炼钢-连铸生产智能调度的二层规划方法[J].冶金自动化,2012 36(5):24;36(6):24.

[8] 王珊珊,曾亮,叶理德.炼钢-连铸动态调度中基于规则的时间调整方法[J].冶金自动化,2014 38(4):21;38(5):6.

[9] 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.

[10] 张春生,李铁克,王柏琳.炼钢机器故障下炼钢-连铸调度 DCSP 建模与算法[J].计算机工程与应用,2012 48(22):226.

[编辑:薛 朵]