

文章编号:1000-582X(2012)11-086-06

考虑生产组织约束的钢铁企业合同计划

芦永明,王丽娜,陈宏志,赵永丽,潘秋娟,薛向荣

(混合流程工业自动化系统及装备技术国家重点实验室;冶金自动化研究设计院,北京 100071)

摘要:针对典型钢铁生产流程 A,分析实现流程高效运行的铁钢界面、脱磷与脱碳转炉、精炼设备以及铸轧界面的生产组织约束。建立了考虑生产组织约束的钢铁企业合同计划模型,模型中充分考虑了不同生产线的排产紧凑与协调以及合同投产日期的优化,之后采用禁忌搜索算法对模型进行了求解。最后,从钢厂 A 中随机选取 3 组不同规模的实际生产合同,并对其进行仿真实验。仿真结果表明:所建立的合同计划模型与求解算法能够有效协调和优化生产,实现钢铁制造流程高效运行。

关键词:钢铁企业;高效生产;生产组织;合同计划;协调优化;数学模型

中图分类号:TF 089; F406.2

文献标志码:A

Order planning for iron and steel enterprise considering production organization constraints

LU Yongming, WANG Lina, CHEN Hongzhi, ZHAO Yongli, PAN Qiujuan, XUE Xiangrong

(State Key Laboratory of Hybrid Process Industry Automation System and Equipment Technology; Automation Research and Design Institute of Metallurgical Industry, Beijing 100071, China)

Abstract: To realize efficient operation, the production organization constraints of ironmaking/steelmaking interface, desulphurization basic oxygen furnace and decarburization basic oxygen furnace, refining equipment and casting/rolling interface of typical steel production process A are analyzed. Order planning model of iron and steel enterprises considering production organization constraints is established. The scheduling compact and coordination and the optimization of commissioning date of different production lines are fully considered in the model. Then, the model is solved by tabu search. Finally, three different sizes of actual production contracts which are randomly selected from the steel plant A are simulated. The results prove the presented model and algorithm can harmonize and optimize the production effectively and also realize the process running efficiently.

Key words: iron and steel plants; high-efficient production; production organization; order planning; coordination and optimization; mathematical models

钢铁制造流程高效运行不但要考虑不同工序界面的协调匹配,还要考虑不同生产线之间的协调优化,其根本是实现流程时间效率和能量效率的高效

化,从而达到流程运行时间短、铁水/钢水温降少、铸坯热送热装率高的目的。

文献[1]将钢铁企业一体化生产计划与调度分

收稿日期:2012-07-08

基金项目:国家科技支撑计划资助项目(2012BAC02B06)

作者简介:芦永明(1982-),男,博士,主要从事钢铁制造流程生产、物流、能源和环境优化方面的研究;
(E-mail)luyongming2001@qq.com。

为 4 个层次,分别是:1)合同计划;2)作业批量计划;3)作业静态调度;4)作业动态调度。一直以来,研究作业批量计划与静态调度的文章较多,文献[2-4]在批量计划层次研究了炼钢—连铸—热轧一体化生产,文献[5]研究了连铸—热轧区段有利于提高直接热送热装比例的热轧批量计划,文献[6]和[7]分别采用数学模型和智能算法方法研究了钢铁企业静态调度问题。而近年来,钢铁企业合同计划层次的研究逐渐被得到关注,钢铁企业生产合同计划是以订单合同为对象,确定各个生产合同在各生产线上的投产日期,其优化结果作为炉次、浇次和轧制批量计划的合同池。钢铁企业合同计划直接关系到一体化生产计划的全局优化效果,是制订一体化生产计划首先要解决的优化问题。文献[8]采用禁忌搜索算法研究了钢铁企业合同计划问题,文献[9]研究了考虑生产路径柔性的钢铁合同计划编制问题,文献[10]为了实现热装比最大等多个优化目标,将炼钢—连铸—热轧一体化生产过程,抽象为炼钢与热轧两大加工阶段,建立了一体化生产多目标合同计划模型,并对非支配排序遗传算法 NSGA-II(non-dominated sorting genetic algorithm)进行了改进,在此基础上对模型进行了求解。文献[11]在合同计划层次上,解决了一体化生产过程中连铸与热轧工序之间在钢种和规格上的匹配问题。文献[12]建立了钢厂合同计划编制的整数规划模型,并提出用基于可重复自然数编码和三变异算子的遗传算法对模型进行了求解。文献[13]建立了以最小化延迟成本、均衡生产能力以及最大限度降低库存成本为目标的数学模型,并在此基础上采用粒子群优化算法(PSO)对模型进行了求解。文献[14]建立了基于整数规划的合同计划模型,并采用遗传算法对模型进行了求解。文献[15]建立了合同计划整数规划模型,并分别采用粒子群算法和禁忌搜索算法以及混合算法对模型进行求解,数值结果表明,混合 PSO/Ts 算法更为有效。文献[16]面向炼钢、连铸和热轧生产过程,建立了以最大化热装比、最小化提前/拖延率和最小化组炉余材率为目标的合同计划优化模型。

目前针对钢铁企业合同计划的研究都基本上基于某一区段、单一生产线的角度上考虑合同计划优化问题,而缺乏从钢铁生产整体流程上考虑生产组织的约束。钢铁制造流程的优化运行需要在各单体工序生产节奏协调匹配的基础上优化其生产组织,而生产组织的模式与合同计划的安排密不可分,钢铁企业合同计划只有充分考虑流程高效运行下生产

组织的约束才能使流程连续-紧凑、动态-有序运行,从而实现企业高效稳定生产。

笔者针对典型钢铁生产流程 A,在充分分析钢铁界面、脱磷与脱碳转炉、精炼设备以及铸轧界面生产组织约束的基础上,建立考虑生产组织约束的钢铁企业合同计划模型,模型中充分考虑钢铁制造整体流程中不同生产线的排产紧凑与协调以及合同投产日期的优化,之后采用禁忌搜索算法对模型进行求解,进而达到从钢铁制造整体流程上优化生产组织,实现流程高效运行。

1 典型流程及其生产组织

1.1 流程配置

国内某全板带型钢厂 A 高炉-热轧区段(如图 1 所示)流程配置为:2 座高炉,4 台 KR 脱硫设备,2 座脱磷转炉,3 座脱碳转炉,6 台精炼设备(3 台 RH 设备,2 台 CAS 设备,1 台 LF 设备),3 台连铸机(2 台 2150 连铸机,1 台 1650 连铸机),2 条热轧线(其中每条热轧线对应 3 座加热炉)。脱碳转炉与连铸“一一对应”组织生产,2250 mm 轧机对应 1[#]和 2[#]脱碳转炉—连铸生产线,形成 2250 mm 轧线,1580 mm 轧机对应 3[#]脱碳转炉—连铸生产线,形成 1580 mm 轧线。

1.2 生产组织

(1) 铁钢协调生产组织。

由于钢铁企业铁钢产能和生产节奏的不匹配,常常造成铁水铸铁、铁水包备包或等待等铁钢生产的不协调。钢铁企业应尽可能地优化生产组织、协调铁钢生产,以避免铁水铸铁和降低铁水包备包或等待个数,从而降低产品生产时间和铁水/钢水温降,使流程高效运行。一般而言,铁水包等待或备包数目应不大于 2。

(2) 脱磷与脱碳转炉的生产组织。

分析钢厂 A 生产流程可知,其脱磷与脱碳转炉基本的生产组织模式有脱磷与脱碳转炉“2 对 3”和“1 对 1”生产组织 2 种模式。其中脱磷与脱碳转炉“2 对 3”组织模式中,2 座脱磷转炉与 3 座脱碳转炉对应供应钢水。脱磷与脱碳转炉“1 对 1”组织模式中,2 座脱磷转炉分别与 2 座脱碳转炉对应,而另一座转炉采用常规冶炼法(即在同一个转炉内进行脱磷和脱碳处理)冶炼。

(3) 精炼设备的生产组织。

钢厂 A 中有 3 条转炉—连铸生产线,共 6 台精炼设备,其中包括 3 台 RH 设备、2 台 CAS 设备、1 台 LF 设备。由于精炼设备个数有限,因此炼钢车

间精炼设备的生产组织必须满足某一时刻同时采用 RH 设备生产的个数不大于 3、同时采用 CAS 设备

生产的个数不大于 2、同时采用 LF 炉生产的个数不大于 1。

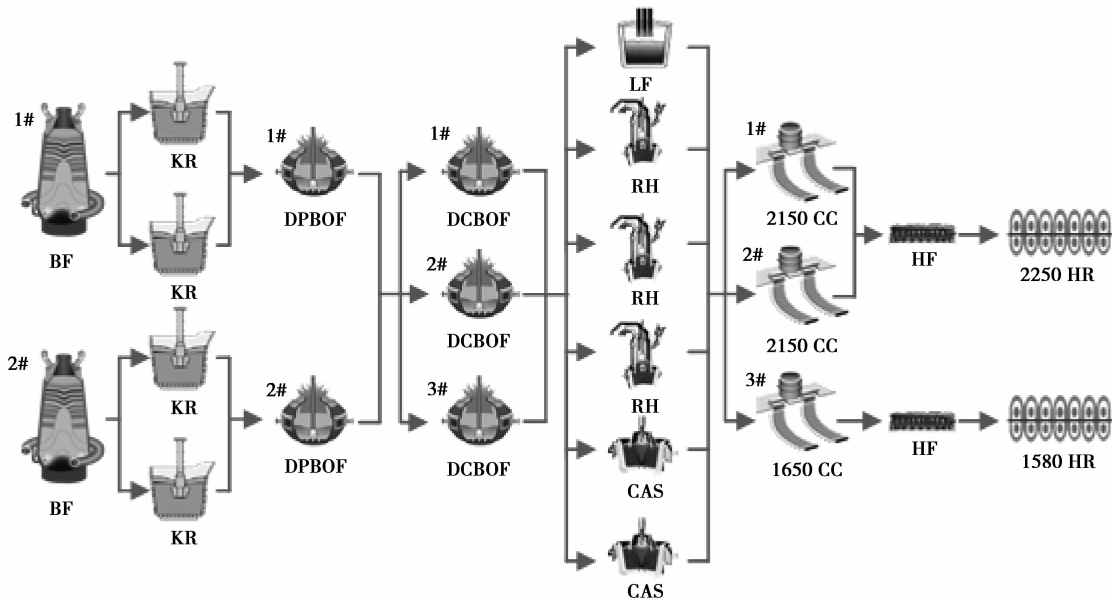


图 1 全板带型钢厂 A 高炉—热轧区段流程配置

(4) 铸轧协调生产组织。

连铸—热轧区段的生产组织不但要考虑轧制成本,还要考虑铸坯的热送热装比例等。因此,连铸—热轧区段的生产组织需要满足最小生产批量以保证连铸机连浇炉数、减少无委材量的同时提高铸坯热送热装比。

2 生产组织协调优化

2.1 炼钢车间需铁节奏

设 T_{CC1} 、 T_{CC2} 、 T_{CC3} 分别为 3 台连铸机的浇铸周期; n_1 、 n_2 、 n_3 分别为 3 台连铸机的连浇炉数; ΔT_1 、 ΔT_2 、 ΔT_3 分别为 3 台连铸机的断浇准备时间; \bar{T}_{CC1}^R 、 \bar{T}_{CC2}^R 、 \bar{T}_{CC3}^R 分别为 3 台连铸机的平均需钢节奏, 则: $\bar{T}_{CC1}^R = (T_{CC1} \times n_1 + \Delta T_1) / n_1$; $\bar{T}_{CC2}^R = (T_{CC2} \times n_2 + \Delta T_2) / n_2$; $\bar{T}_{CC3}^R = (T_{CC3} \times n_3 + \Delta T_3) / n_3$ 。假设转炉平均处理时间不大于连铸浇注周期, 则炼钢车间的需钢节奏由连铸平均浇铸周期所决定, 设 \bar{T}_{CC}^R 为炼钢车间的需钢节奏, 则: $\bar{T}_{CC}^R = (\bar{T}_{CC1}^R \times \bar{T}_{CC2}^R \times \bar{T}_{CC3}^R) / (\bar{T}_{CC1}^R \times \bar{T}_{CC2}^R + \bar{T}_{CC2}^R \times \bar{T}_{CC3}^R + \bar{T}_{CC1}^R \times \bar{T}_{CC3}^R)$ 。

2.2 一个浇次内脱碳转炉的生产节奏

设 \bar{T}_{DCBOF}^R 为一个浇次内脱碳转炉的生产节奏, \bar{T}_{CC}^R 为一个浇次内连铸平均浇铸周期, 则: $\bar{T}_{CC}^R = (T_{CC1} \times T_{CC2} \times T_{CC3}) / (T_{CC1} \times T_{CC2} + T_{CC2} \times T_{CC3} + T_{CC1} \times T_{CC3})$ 。脱碳转炉与连铸机“一一对应”组织生产, 一个浇次内脱碳转炉的生产节奏是由本浇次

内连铸平均浇铸周期所决定的, 因此 $\bar{T}_{DCBOF}^R = \bar{T}_{CC}^R$ 。

2.3 铁钢界面铁水供求协调优化

设 \bar{T}_{BF} 为高炉出铁节奏。由以上分析可知, 铁钢界面铁水需求节奏是由连铸平均浇铸周期, 即 \bar{T}_{CC}^R 所决定的, 而供铁节奏是由高炉出铁节奏, 即 \bar{T}_{BF} 所决定的。设 δ 为铁钢界面铁水供求节奏协调因子, 则设: $\delta = \bar{T}_{BF} / \bar{T}_{CC}^R$ 。

在钢铁企业实际生产中, 可通过调节 δ 来协调铁钢界面的铁水供求节奏。一般地, 要求高炉稳定生产, 即 \bar{T}_{BF} 稳定。因此, 可通过调节 3 台连铸机的浇铸周期从而调节 \bar{T}_{CC}^R , 以达到调节 δ 的目的。

通过分析计算可以得到 δ 随 \bar{T}_{CC}^R 的变化趋势(如图 2 所示), 当 $\delta > 1.0$, 即 $\bar{T}_{CC}^R < 16.75$ 时, 需备铁水包以完成 10 炉连浇; 相反, 当 $\delta < 1.0$, 即 $\bar{T}_{CC}^R > 16.75$ 时, 铁水包需等待以完成 10 炉连浇。笔者假设可允许的铁水包最大备包数目和铁水包最大等待数目均为 2, 则通过计算可得 δ 需满足:

$$\delta \in (0.769, 1.429) \quad (1)$$

2.4 脱磷、脱碳转炉生产组织协调优化

设 \bar{T}_{DPBOF}^R 为脱磷转炉平均供钢节奏, λ 为脱磷转炉和脱碳转炉的钢水供求节奏协调因子。则: $\lambda = \bar{T}_{DPBOF}^R / \bar{T}_{DCBOF}^R = \bar{T}_{DPBOF}^R / \bar{T}_{CC}^R$ 。

在钢铁企业实际生产中, 可以通过调节 λ 来协调脱磷转炉和脱碳转炉的供需钢水节奏, 以实现连续-紧凑、动态-有序生产的目。

通过分析计算可以得到 λ 随 \bar{T}_{cc}^R 的变化趋势(如图 3 所示),其中当 $\lambda > 1.0$ 时,脱磷与脱碳转炉“1 对 1”组织生产;相反,当 $\lambda < 1.0$ 时,脱磷与脱碳转炉“2 对 3”组织生产。笔者假设采用脱磷与脱碳转炉“2 对 3”生产组织模式,则 λ 必须满足:

$$\lambda \in (0, 1] \quad (2)$$

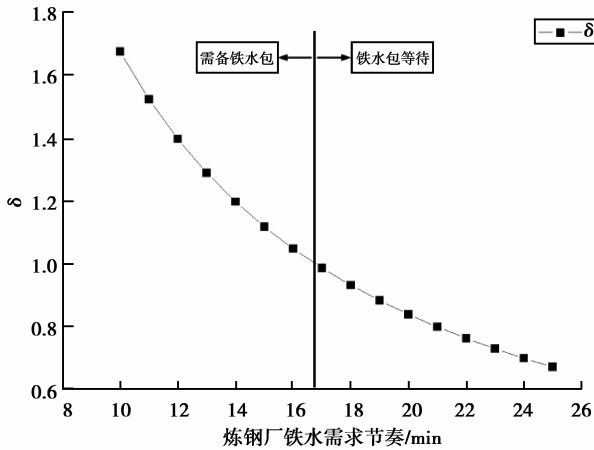


图 2 δ 随 \bar{T}_{cc}^R 的变化趋势

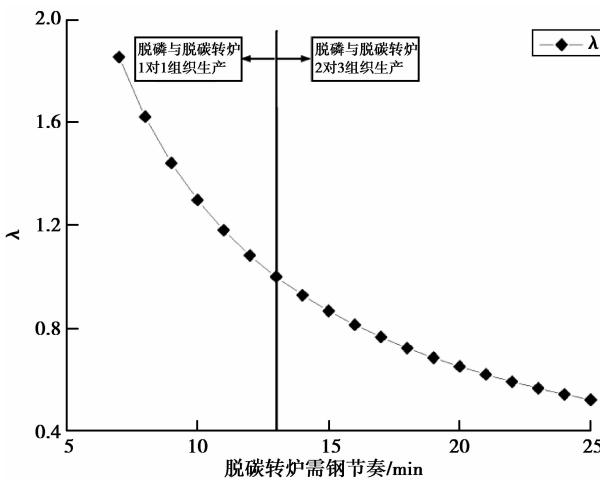


图 3 λ 随 \bar{T}_{cc}^R 的变化趋势

3 数学模型及其求解算法

3.1 数学模型

设: t 为合同计划时间窗口; T 为 1[#]、2[#] 和 3[#] 炼钢一连铸生产线合同生产总时间; T_1 为 1[#] 炼钢一连铸生产线上的合同生产时间; T_2 为 2[#] 炼钢一连铸生产线上的合同生产时间; T_3 为 3[#] 炼钢一连铸生产线上的合同生产时间; R 为生产线之间的合同生产时间差; F 为合同提前或拖延费用; q_i 为合同 i 的订货量; d_i 为合同 i 的交货期; x_i 为合同 i 的投产时间; t_i 为合同 i 的生产周期; N_k^{RH} 为 k 时刻 RH 精

炼设备的使用个数, $k \in T$; N_k^{LF} 为 k 时刻 LF 精炼设备的使用个数, $k \in T$; N_k^{CAS} 为 k 时刻 CAS 精炼设备的使用个数, $k \in T$; V 为 $V = \{1, 2, \dots, N\}$, 原始合同集合; U 为 $U = \{1, 2, \dots, M\}$, 分解组合后合同集合; R 为工序集合; Q_{smj} 为 s 工序对于合同 m 在 j 时间段内的产能, $s \in R, m \in U$; W_m 为原始合同经过分解组合后进行生产的中间合同 m 的合同量, $m \in U$; W_m^{\min} 为原始合同经过分解组合后中间合同 m 的最小批量限制, $m \in U$; δ 为铁钢界面铁水供求节奏协调因子; λ 为脱磷转炉和脱碳转炉的钢水供求节奏协调因子;

$$\begin{cases} X_{smj} = 1, & \text{合同 } m \text{ 在 } j \text{ 时间段内在工序 } s \text{ 上生产} \\ 0, & \text{否则} \end{cases}, s \in R, m \in U.$$

则面向生产流程的钢厂合同计划模型可以描述如下:

$$\text{Min } T = T_1 + T_2 + T_3, \quad (3)$$

$$\text{Min } R = |T_1 - T_2| + |T_2 - T_3| + |T_3 - T_1|, \quad (4)$$

$$\text{Min } F = \sum_{i \in V} |x_i - (d_i - t_i)| \times q_i, \quad (5)$$

s. t. :

$$W_m \times X_{smj} \leq Q_{smj}, s \in R, m \in U; \quad (6)$$

$$W_m \geq W_m^{\min}, m \in U; \quad (7)$$

$$0 \leq N_k^{RH} \leq 3 \text{ 且 } 0 \leq N_k^{LF} \leq 1 \text{ 且 } 0 \leq N_k^{CAS} \leq 2, \quad (8)$$

$$k \in t; \quad (8)$$

$$\delta \in (0.769, 1.429); \quad (9)$$

$$\lambda \in (0, 1]. \quad (10)$$

目标函数(3)表示所有合同的生产时间最短;式(4)表示所安排的 1[#]、2[#]、3[#] 炼钢一连铸生产线上的合同总生产时间尽可能均衡;式(5)表示所有合同提前或拖延总惩罚值最小;约束条件(6)表示每个生产时间段内,订单生产量不能超过相应工序的产能限制;式(7)为最小生产批量约束,即为了保证最大可能连浇和较高热送热装率等,要求经过分解组合后的合同满足最小批量限制;式(8)为精炼设备的生产组织约束,即合同计划时间内,某一时刻 3 条转炉一连铸生产线的 RH 精炼设备使用个数不超过 3、LF 精炼设备的使用个数不超过 1、CAS 精炼设备使用个数不超过 2;式(9)表示铁水包最大备包数目为 2 时 δ 的取值范围;式(10)表示采用脱磷与脱碳转炉“2 对 3”模式组织生产时 λ 的取值范围。

3.2 求解算法

模型求解过程中采用禁忌搜索算法分两步求解。第一步:对 1[#]、2[#]、3[#] 炼钢一连铸生产线上的合同进行优化分配,即铸机合同平衡,使 3 条生产线生产时间尽可能相当;第二步:对分配到各条生产线上的合同进行投产日优化,使得合同的提前或拖延

总惩罚值最小。整个求解过程中忽略不同生产线拉速变化对合同生产时间的影响,且保证合同排产紧凑,以确保合同生产总时间 T 最小。

1) 初始可行解。

首先针对大量小批量、多品种合同,确定其精炼工艺并对合同进行预处理,即根据产品钢种和规格对订单合同进行分解和重新合并,之后根据产品规格、炼钢—连铸生产线产品大纲中的钢种以及生产组织模式,将合同分配到 1[#]、2[#]、3[#] 炼钢—连铸生产线和相应的轧线上,并确定合同在连铸机和轧线上的生产时间,最后以浇次产量为单位对合同进行重新分解和合并,并确定合同开始和结束生产时刻,从而最终形成初始可行解。

2) 铸机合同平衡。

①邻域确定。由于不同生产线所生产的钢种和规格都有所不同,因此每个合同所能分配的生产线集合也不尽相同。假设将合同 c_1 移动到其可分配的生产线之一 L_2 为一次插入(即 $\langle c_1, L_2 \rangle$),则禁忌搜索算法的搜索邻域即为所有合同插入的集合。例如合同集合为 $\{c_1, c_2, c_3\}$,假设 c_1, c_2 和 c_3 可分配的转炉—连铸生产线分别为 $c_1 = \{L_1, L_2, L_3\}$ 、 $c_2 = \{L_1, L_2\}$ 、 $c_3 = \{L_3\}$,则搜索邻域为 $\{\langle c_1, L_1 \rangle, \langle c_1, L_2 \rangle, \langle c_1, L_3 \rangle, \langle c_2, L_1 \rangle, \langle c_2, L_2 \rangle, \langle c_3, L_3 \rangle\}$;

②领域搜索。当搜索领域确定后,比较每次插入得到的新的合同计划,并接受不被禁忌的 R 值最好的插入或者被禁忌但是能改变历史最优值的插入。

③禁忌表。禁忌表记录了搜索过程中禁忌的操作,为一维数组,笔者采用 First-In-First-Out 原则修改禁忌表。禁忌长度是禁忌对象在不考虑藐视准

则的情况下不允许被选取的最大次数,禁忌长度的选取与问题特征和经验有关,它决定了算法的复杂度。笔者选取的禁忌长度为 10。

④藐视准则。采用 Best-So-Far 原则,如果禁忌最优解优于最优解,则选禁忌最优解为当前解;否则,取非禁忌最优解为当前解。

⑤终止条件。当经过 5 次搜索找不到更优的目标值时,搜索终止。

3) 投产日优化。

①邻域确定。投产日优化也采用插入式领域搜索,假设合同 c_1, c_3 属于同一生产线上的合同,若 $\langle c_3, c_1 \rangle$ 表示将合同 c_3 插入到合同 c_1 之前,则投产日优化的搜索领域为同一生产线上不同合同之间所有插入的集合。例如,生产线 1 上分配的合同有 $L_1 = \{c_1, c_3\}$ 、生产线 2 上分配的合同有 $L_2 = \{c_2, c_6\}$ 、生产线 3 上分配的合同有 $L_3 = \{c_5, c_4\}$ 。则投产日优化的禁忌搜索领域为 $\{\langle c_3, c_1 \rangle, \langle c_1, c_3 \rangle, \langle c_2, c_6 \rangle, \langle c_6, c_2 \rangle, \langle c_5, c_4 \rangle, \langle c_4, c_5 \rangle\}$ 。

②领域搜索。当投产日优化的搜索领域确定后,比较每次插入得到的新的合同计划,并接受不被禁忌的 F 值最好的插入或者被禁忌但是能改变历史最优值的插入。

③禁忌表、藐视准则和终止条件。禁忌表、藐视准则和终止条件的设置同上。

4 仿真实例

从钢厂 A 中选取 3 组不同规模的实际生产合同,并对其进行合同计划仿真实验,实验结果如表 1 所示。

表 1 合同计划仿真实验结果

合同组	合同规模/份	合同量/t	目标函数	迭代次数	最终结果	产量/(t·h ⁻¹)
第 1 组	1 000	177 086.7	T	—	403.45 h	1 316.79
			R	7	0.40 h	
			F	36	748 856.72	
第 2 组	1 500	242 160.8	T	—	557.38 h	1 303.38
			R	13	1.80 h	
			F	49	733 322.40	
第 3 组	2 800	407 895.6	T	—	947.42 h	1 291.59
			R	16	0.52 h	
			F	107	552 630.42	

以上 3 组合同数据的铸机合同平衡计算结果和投产日优化计算结果如图 4 和图 5 所示。

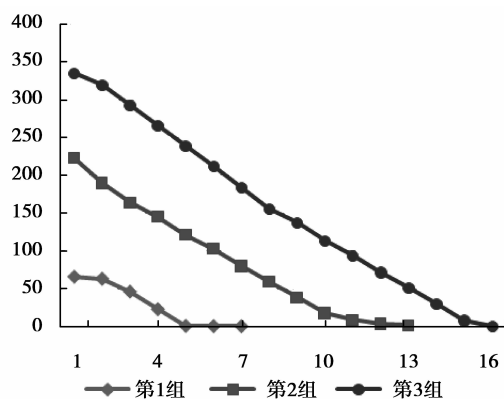


图 4 目标函数 2 计算结果 (R)

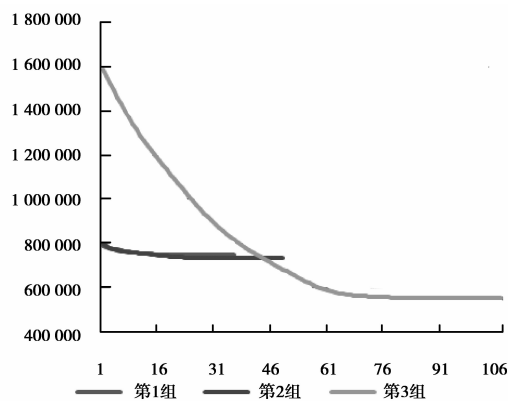


图 5 目标函数 3 计算结果 (F)

仿真结果表明:在考虑生产组织约束的前提下,合同计划模型能够有效协调和优化生产,实现钢铁制造流程连续紧凑、动态有序、高效稳定运行。

5 结 论

1)通过分析钢厂 A 生产流程,提出了实现流程高效运行的铁钢界面、脱磷与脱碳转炉、精炼设备以及铸轧界面生产组织约束。

2)基于企业高效生产,建立了考虑流程生产组织约束的钢铁企业合同计划模型,并充分考虑了不同生产线的排产紧凑与协调以及合同投产日期的优化,最后给出了相应的模型求解算法。

3)从钢厂 A 中选取 3 组不同规模的实际生产合同,并对其进行仿真实验。结果表明:所建立的合同计划模型与求解算法能够有效协调和优化生产,实现钢铁制造流程连高效运行。

参考文献:

- [1] 芦永明,徐安军,贺东风,等. 炼钢-连铸-热轧一体化生产计划与调度综述[J]. 冶金自动化(增刊 1),2011: 770-774.
LU Yongming, XU Anjun, HE Dongfeng, et al. Review on SM-CC-HR integrated production planning and scheduling[J]. Metallurgical Industry Automation (Sup1), 2011: 770-774.
- [2] 刘怡,郑忠,陈开,等. 炼钢连铸热轧一体化批量计划编制模型及实现[J]. 重庆大学学报, 2012, 35(3): 60-66.
LIU Yi, ZHENG Zhong, CHEN Kai, et al. Modeling and realizing of integrated batch planning for steelmaking-continuous casting and hot strip rolling[J]. Journal of Chongqing Univeresity, 2012, 35(3): 60-66.
- [3] Tang L X, Luo J X. A new ILS algorithm for cast planning problem in steel industry [J]. ISIJ International, 2007, 7(3):443-452.
- [4] 芦永明,徐安军,贺东风,等. 基于一体化生产的炼钢-连铸批量计划与调度[J]. 信息与控制, 2011, 40(5): 715-720.
LU Yongming, XU Anjun, HE Dongfeng, et al. Batch planning and scheduling of steelmaking-continuous casting based on integrated production[J]. Information and Control, 2011, 40(5):715-720.
- [5] 芦永明,徐安军,贺东风,等. 一种有利于提高 DHCR 比例的热轧批量计划编制方法[J]. 北京科技大学学报, 2011, 33(10):1301-1306.
LU Yongming, XU Anjun, HE Dongfeng, et al. Hot-rolling batch planning method available to improve DHCR proportion[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2011, 33(10):1301-1306.
- [6] Tang L X, Liu G L. A mathematical programming model and solution for scheduling production orders in Shanghai Baoshan Iron and Steel Complex [J]. European Journal of Operational Research, 2007, 182(3):1453-1468.
- [7] 贺东风,田乃媛. 基于混合遗传算法的两流薄板坯连铸连轧流程生产调度系统[J]. 北京科技大学学报, 2005, 27(2):240-244.
HE Dongfeng, Tian Naiyuan. Continuous casting and rolling process scheduling system of two-strand thin slabs based on hybrid genetic algorithm[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2005, 27(2):240-244.
- [8] 高聪,唐立新,唐建勋,等. 禁忌搜索算法解决钢铁企业生产合同计划优化问题[J]. 东北大学学报:自然科学版, 2009, 30(7): 944-947.

- Compost maturity assessment using calorimetry, spectroscopy and chemical analysis [J]. *Compost Science & Utilization*, 2000, 8(2): 124-134.
- [13] Droussi Z, D'orazio V, Provenzano M R, et al. Study of the biodegradation and transformation of olive-mill residues during composting using FTIR spectroscopy and differential scanning calorimetry [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 164(2/3): 1281-1285.
- [14] Champagne P, Li C J. Enzymatic hydrolysis of cellulosic municipal wastewater treatment process residuals as feedstocks for the recovery of simple sugars [J]. *Bioresource Technology*, 2009, 100(23): 5700-5706.
- [15] Zhu J J, Wang Y L, Cai K Y, et al. Preparation of a novel biodegradable β -cyclodextrin-containing polymer [J]. *Journal of Chongqing University: English Edition*, 2009, 8(4): 1671-8224.
- [16] Kim H C, Dempsey B A. Effects of wastewater effluent organic materials on fouling in ultrafiltration [J]. *Water Research*, 2008, 42(13): 3379-3384.
- [17] Ji F, Li C L, Dong X D, et al. Separation of oil from oily wastewater by sorption and coalescence technique using ethanol grafted polyacrylonitrile [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 164(2/3): 1346-1351.
- (编辑 郑洁)
-
- (上接第 91 页)
- GAO Cong, TANG Lixin, TANG Jianxun, et al. Tabu search for real order planning problem in steel industry [J]. *Journal of Northeastern University: Natural Science*, 2009, 30(7): 944-947.
- [9] 徐端, 屠乃威, 孙亮亮, 等. 考虑生产路径柔性的钢铁合同计划编制研究 [J]. *控制工程*, 2009, 16(4): 502-506.
- XU Duan, TU Naiwei, SUN Liangliang, et al. On order planning with production path flexibility [J]. *Control Engineering of China*, 2009, 16(4): 502-506.
- [10] 於春月, 王成恩. 钢铁一体化生产多目标合同计划建模与算法 [J]. *控制理论与应用*, 2009, 26(12): 1452-1454.
- YU Chunyue, WANG Chenen. Multi-objective order-planning model and algorithm for integrated steel production [J]. *Control Theory & Applications*, 2009, 26(12): 1452-1454.
- [11] 於春月, 许美蓉, 曲蓉霞. 冶铸轧一体化生产合同计划优化问题研究 [J]. *东北大学学报: 自然科学版*, 2008, 29(11): 1548-1551.
- YU Chunyue, XU Meirong, QU Rongxia. On the production order planning of integrated steel production SM-CC-HR-FF [J]. *Journal of Northeastern University: Natural Science*, 2008, 29(11): 1548-1551.
- [12] 张涛, 王梦光, 唐立新. 钢厂合同计划的模型与算法 [J]. *控制理论与应用*, 2000, 17(5): 711-715.
- ZHANG Tao, WANG Mengguang, TANG Lixin. The model and algorithm for the order planning of the steel plant [J]. *Control Theory and Applications*, 2000, 17(5): 711-715.
- [13] Liu S X, Tang J F, Song J H. Order-planning model and algorithm for manufacturing steel sheets [J]. *International Journal of Production Economics*, 2006, 100(1): 30-43.
- [14] Zhang Tao, Wang M G, Tang L X, et al. The method for order planning of the steel plant based on the MTO management system [J]. *Control and Decision*, 2000, 15(6): 649-653.
- [15] Zhang T, Shao Z F, Zhang Y J, et al. A hybrid particle swarm optimization algorithm for order planning problems of steel factory [J]. *Lecture Notes in Computer Science*, 2010, 6145: 574-581.
- [16] Yu C Y, Qu R X. Multi-objective order planning model and algorithm for integrated steel production [C] // *Proceedings of the 15th Annual International Conference on Management Science and Engineering*, September 10-12, 2008, Long Beach, CA. Piscataway: IEEE Press, 2008, 1: 400-405.
- (编辑 王维朗)