

文章编号: 1006-5911(2003)01-0033-04

炼钢-连铸-热轧生产调度模型及算法研究

朱宝琳, 于海斌

(中国科学院沈阳自动化研究所, 辽宁 沈阳 110016)

摘要: 基于一体化管理思想, 在已编制的炼钢-连铸生产调度模型及轧制批量计划的基础上, 建立了炼钢-连铸-热轧一体化生产调度模型, 将拉格朗日松弛法应用于模型中, 利用拉格朗日松弛法较好的分解特性, 使大规模复杂调度问题的求解成为可能。最后, 用实例说明模型和算法的有效性。

关键词: 拉格朗日松弛法; 准时制; 一体化; 炉次; 浇次; 轧制单元

中图分类号: TP14 **文献标识码:** A

0 引言

现代化钢铁企业的发展趋势是设备的大型化、生产过程的连续化、高速化和自动化。面对小批量、多品种、高质量、低价格的市场需求, 企业面临日益严峻的挑战。近年来, 围绕节能而出现的连铸坯热送、热装和直接轧制三种工艺, 将炼钢、连铸到轧钢的工序直接连接, 使钢铁生产成为一体化的有机系统^[1,2]。工艺的改进对生产管理, 特别是一体化调度的编制提出了更高的要求。科学的确定生产调度, 可充分提高设备的生产效率, 减少工序等待时间, 降低物耗和能耗, 从而降低成本, 提高产品竞争力。国外的许多大型钢铁企业, 如韩国的 POSCO 公司、日本的新日铁公司及美国 DANASH 公司等, 从 80 年代起致力于开发炼钢-连铸-热轧一体化生产, 并利用热装热送技术, 使局部优化转变为整体工序的优化。目前, 针对一体化生产的报道较多, 但有关炼钢-连铸-热轧一体化调度模型的报道较少, 也未见到有效的最优数学模型。

拉格朗日松弛法作为一种优化方法, 已成功地运用于许多领域的调度问题, 被证明是极为有效的^[3]。本文在炼钢-连铸调度模型^[4,5]及热轧生

产计划^[6]的基础上, 建立了一体化生产调度模型, 并运用拉格朗日松弛法对一体化模型进行求解。最后, 以实例说明模型和算法的有效性。

1 问题描述

炼钢、连铸、热轧作为钢铁生产流程的三大关键工序, 它们之间不仅存在物流和资源平衡问题, 更存在时间平衡问题。在市场经济条件下, 对于一体化生产调度问题, 需要从输入的用户合同开始, 形成满足用户要求、各工序的工艺约束的生产批量来组织生产计划。传统的钢铁生产中, 冶炼、铸造和轧钢三大工序相互独立, 生产计划分别制定与实施, 工序间有大量的在制品库存进行生产缓冲, 三者相互作用影响很小。其中炼钢和连铸部分受到冶炼、炉外精炼和浇铸周期及连铸机更换结晶器周期的约束, 轧制部分受支撑辊更换周期和工作辊更换周期中对成品的宽度、厚度、硬度等跳跃差的限制。因此, 在生产管理方面, 只针对某一具体工序进行管理和研究, 而对其上下工序则考虑不多。其目标只是单一环节、单一工序或某一局部的合理化或最优化。

连铸-连轧生产是综合近年来炼钢、连铸和轧钢的最新技术成果而发展起来的一项新的生产方

收稿日期: 2002-04-01; 修订日期: 2002-05-31。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(69974039, 59990470)。

作者简介: 朱宝琳(1972-), 男, 辽宁海城人, 中国科学院沈阳自动化研究所博士研究生, 主要从事生产计划、调度及优化算法研究。

E-mail: zbl@ms.sia.ac.cn

式,其重要标志是连铸坯热送、热装和连铸—直接轧制技术。连铸—连轧生产的发展,极大地推动了钢铁工业技术和管理的革命,同时也对生产管理技术,特别是计划与调度提出了更高的要求 and 更大的挑战。连铸—连轧生产的连接方式主要有如下几种:
 1 CC—HCR(连铸—热送装炉轧制,见图1); ° CC—DHCR(连铸—直接装炉轧制,见图2); » CC—DR(连铸—直接轧制,见图3); ¼ CC—CCR(连铸—冷坯装炉轧制,见图4)。

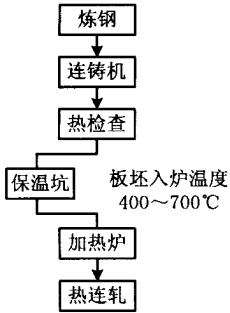


图1 CC-HCR生产流程

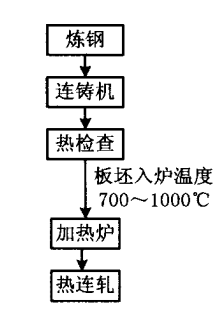


图2 CC-DHCR生产流程

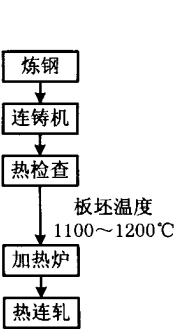


图3 CC-DR生产流程

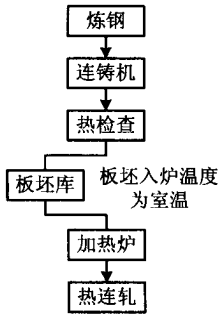


图4 CC-CCR生产流程

在连铸—连轧生产中,特别是在 CC—DHCR (见图2) 或 CC—DR (见图3) 两种生产方式中,实现了冶、铸、轧三大工序的直接连接,对这样一个高度综合化、高度集成化、高度连续化的生产系统,传统的的生产管理模式已经不适用,必须采用新的管理,即以计算机技术为基础的一体化生产管理。

在本文所建立的一体化调度模型中,针对 CC—DHCR 或 CC—DR 生产方式,重点分析了炼钢、连铸、热轧等工艺特点,考虑了生产工艺和工序间的连续生产、合同的准时交货等问题,在目标函数中引进了准时制(JIT)思想。在进行作业调度时,基于炉次、浇次及轧制单元等批量计划,建立了一体化生产调度模型,分别对轧机上的轧制单元进行排序与调度,运用所建立的优化模型消除机器冲突,并通过炉次、连铸板坯(简称板坯)、轧制单元之间的相互联系,将炉次所对应的连铸板坯进行轧制批量计划组

合,使炼钢、连铸和热轧工序密切相连,最终形成炼钢—连铸—热轧一体化生产调度。

2 炼钢—连铸—热轧一体化生产调度模型

炼钢—连铸—热轧一体化生产系统的调度问题实质是,在批量计划(炉次、浇次和轧制计划)的基础上,以炉次(或板坯)为最小计量单位,追求某一评价函数最佳情况下的一类多工件、多工序,多机的特殊的 job—shop 排序问题。其结果是确定在何时、何种设备上、以何种顺序安排钢水到连铸机、热轧机等各个工序。炼钢—连铸生产调度模型是以炉次为最小单位^[5],而热轧生产调度是以板坯为最小单位^[6],轧制单元、炉次、板坯的对应关系如图5所示。

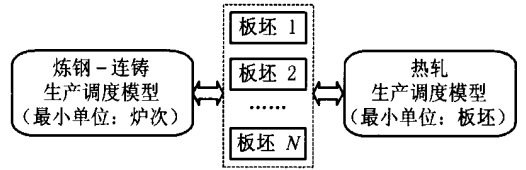


图5 轧制单元、炉次、板坯的对应关系图

基于炼钢—连铸生产调度模型、热轧生产工艺、板坯和炉次对应关系及 JIT 思想建立的一体化生产调度模型须满足以下条件: 1 批量计划(炉次和轧制单元)已编制; ° 不改变子调度前后顺序; » 每台轧机同时只能加工一块板坯。

$$\min Z = \sum_{i=1}^N \left\{ \sum_{j \in \pi_i} \sum_{SP(i,j) \in \pi_j} \left\{ \alpha_i E_i + \beta_i T_i + cr_{ij} (x_{iSP(i,j)} - x_{ij} - T_{ij} - t_j, SP(i,j)) \right\} + \sum_{l=1}^L \sum_{i \in \Omega_l, j \in \pi_l \cap \omega, SI(i,j) \in \Omega_l} r_{lj} (x_{SI(i,j)} - x_{ij} - T_{ij}) \right\} \quad (1)$$

$$s. t. \quad x_{SI(i,j),j} - x_{ij} \geq T_{ij} \quad (i \in \Phi, j \in \pi_k, SI(i,j) \in \Phi) \quad (2)$$

$$x_{i,SP(i,j)} - x_{ij} \geq T_{ij} + t_j, SP(i,j) \quad (i \in \Phi, j \in \pi_k, SP(i,j) \in \pi_k) \quad (3)$$

$$x_{SI(i,j),j} - x_{ij} \geq T_{ij} + S_{SI(i,j),j} + \mu \quad (i \in \Omega_l, j \in \pi_k \cap \omega, SI(i,j) \in \Omega_l, l, g = 1, 2, \dots, L, l \neq g) \quad (4)$$

$$\sum_i \delta_{kl} \leq M_{kl} \quad (5)$$

$$x_{ij} \geq 0 \quad (i \in \Phi, j \in \pi_k) \quad (6)$$

$$\delta_{kl} = \begin{cases} 1, & \text{如果第 } k \text{ 个炉次的第 } i \text{ 块板坯安排在} \\ & \text{第 } l \text{ 个轧制单元生产;} \\ 0, & \text{否则;} \end{cases}$$

式中: Φ —全部板坯集合, $\Phi = \{1, 2, \dots, N\}$; Ω_l —第 l 个轧制单元的板坯集合, $l \in \{1, 2, \dots, L\}$; 对于任

何 $j \neq l, j, l \in \{1, \dots, L\}, \Omega_1 \cap \Omega_2 = \emptyset$ 且 $\Omega_1 \cup \Omega_2 \cup \dots \cup \Omega_L = \Phi; \omega$ —全部连轧机集合, $\omega \subset \pi; L$ —轧制单元总数; D_i —板坯 i 的合同交货期; C_i —板坯 i 的实际完工时间; π —全部机器集合; π_i —第 i 块板坯使用的所有机器集合; N —板坯总数; $SI(i, j)$ —板坯 i 在机器 j 上直接相邻的下块板坯—紧邻板坯; $SP(i, j)$ —板坯 i 在机器 j 上的后道工序—紧邻后序机器。

rl_l —轧制单元 l 连轧断开单位时间损失惩罚费用系数; cr_{ij} —板坯 i 在机器 j 单位等待时间的惩罚费用系数; E_i —第 i 块板坯的提前期, 定义为: $\min(0, x_{ij} + T_{ij} - D_i)$; T_i —第 i 块板坯的拖后期, 定义为: $\max(0, x_{ij} + T_{ij} - D_i)$, 其中, $j \in \pi_i \cap \omega; \alpha_i, \beta_i$ —板坯 i 的提前、拖期权值; T_{ij} —板坯 i 在机器 j 上的处理时间; $t_{j, SP(i, j)}$ —板坯 i 从机器 j 到机器 m 上的运输时间; μ —轧制单元的间隔时间; $S_{SI(i, j), j}$ —轧制单元在机器 j 上的调整时间; 变量 x_{ij} —板坯 i 在机器 j 的开始加工时间。

目标函数 (1) 表示板坯提前和拖期惩罚费用 (保证板坯准时交货), 连轧断开损失惩罚费用 (保证同一轧制单元中的板坯连轧), 板坯等待处理时间的惩罚费用等四个部分的总费用之和最小; 约束 (2) 表示对于在同一工序中的同一机器上处理的相邻板坯, 要等待前一板坯处理结束, 才开始下一板坯; 约束 (3) 表示同一板坯的相邻工序要等前一工序处理结束才开始下一工序; 约束 (4) 表示同一连轧机不同轧制单元之间需要调整时间和间隔时间, 即同一连轧机的上一个轧制单元的最后一块板坯的换辊时间和紧邻后一个轧制单元的第一块板坯的轧制时间之间要留一定的调整和间隔时间; 约束 (5) 表示 K 个炉次中编于 L 个轧制单元的板坯数要低于轧机的生产能力 (即 M_{kl})。

3 拉格朗日松弛法在一体化模型中的应用

3.1 拉格朗日松弛法

在求解复杂调度问题的方法中, 特别是对于复杂的整数规划问题, 拉格朗日松弛法 (LR) 已被证明是极为有效的^[7, 8]。由于 LR 较好的分解特性, 使一些问题的求解较为简便。

引入非负乘子 π_{kl} 松弛约束 (5), 由此得到松弛问题 (Relaxation Problem, RP):

$$\min Z' = \{Z + \sum_{kl} \pi_{kl} (\sum_i \delta_{ikl} - M_{kl})\} \quad (7)$$

在式 (2), (3), (4), (6) 条件下, 原问题的对偶问题可描述如下:

$$\max_{kl} \{ \min_x (Z') \} \quad (8)$$

即

$$\max_{kl} \{ -\pi_{kl} M_{kl} + \min \sum_i \{ \alpha_i E_i + \beta_i T_i + \sum_j r_{lj} l(x_{SI(i, j)j} - x_{ij} - T_{ij}) + \sum_j cr_{ij} (x_{iSP(i, j)} - x_{ij} - T_{ij} - t_{j, SP(i, j)}) + \sum_{kl} \pi_{kl} \delta_{ikl} \} \} \quad (9)$$

由于每块板坯是相互独立的, 对于所有板坯求和的最小值, 即为单块板坯的最小值之和。因此, 针对每块板坯的子问题可表示如下:

$$\min \{ \alpha_i E_i + \beta_i T_i + \sum_j r_{lj} l(x_{SI(i, j)j} - x_{ij} - T_{ij}) + \sum_j cr_{ij} (x_{iSP(i, j)} - x_{ij} - T_{ij} - t_{j, SP(i, j)}) + \sum_{kl} \pi_{kl} \delta_{ikl} \} \quad (10)$$

对于给定的每一块板坯, 式 (10) 可以继续分解为工序级等子问题。每个子问题可以采用动态规划方法求解。

3.2 求解对偶问题

对偶问题可以用次梯度 (sub-gradient) 求解。 π_{kl} 用以下公式进行修正:

$$\pi^{n+1} = \pi^n + \alpha^n g(\pi^n) \quad (11)$$

式中: n —迭代次数; $g(\cdot)$ — P 问题的次梯度; α^n —第 n 代的迭代步长。

3.3 构造可行解

一般情况下, 对偶问题的解是不可行的。约束在一定的范围内可能被违反, 为了构造可行解, 采用调度表格法, 将每一块板坯的各道工序的开工时间, 按一定的顺序排成一个表, 根据此表确定板坯在机器上的加工。如果约束 (5) 被违反, 用一个贪婪启发式算法决定哪块板坯开工, 哪块板坯延迟。

3.4 可行解的最优性估计

当可行解被求出后, 相应的目标函数 Z 即为最优值 Z^* 的上界, 而对偶问题的目标函数 $Z^{*'}$ 为 Z^* 的下界, Z 和 $Z^{*'}$ 的差定义为对偶间隙, 相对对偶间隙 $(Z - Z^{*'})/Z^{*'}$ 为判断可行解质量的一个量度。

4 数值实验

下面用一个实例说明一体化模型的合理性及算法的有效性。炼钢- 连铸- 热轧工艺路线如图 6 所示 (包括 2 台转炉、2 台精炼炉、2 台连铸机、2 台轧机), 共 4 个轧制单元, 8 个炉次, 40 块板坯进行计划

安排,模型基础参数如表1所示, $\phi = \{1, 2, \dots, 40\}$, $\Omega_1 = \{1, 2, \dots, 10\}$, $\Omega_2 = \{11, 12, \dots, 20\}$, $\Omega_3 = \{21, 22, \dots, 30\}$, $\Omega_4 = \{31, 32, \dots, 40\}$, $L = 4$, $k = 8$, $N = 40$, 令 $t_{jSP(i,j)} = S_{SI(i,j)} = \mu = 5 (i \in \phi, j \in \pi_k, SI(i, j) \in \phi, SP(i, j) \in \pi_k)$, 其中, 板坯在轧机上的加工时间是从生产实际中得到的。

表1 轧制单元炉次、板坯对应关系

| 轧制单元号 | 板坯号 | 炉次号 |
|-------|-------|-----|
| 1 | 1-5 | 1 |
| | 6-10 | 2 |
| 2 | 11-15 | 3 |
| | 16-20 | 4 |
| 3 | 21-25 | 5 |
| | 26-30 | 6 |
| 4 | 31-35 | 7 |
| | 36-40 | 8 |

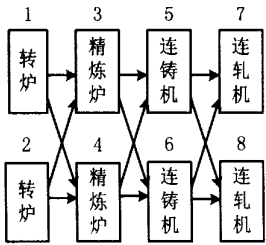


图6 炼钢-连铸-热轧工艺路线

炼钢-连铸-热轧一体化调度问题的求解程序是在Pó 800上用Visual C++开发的。通过上述一体化优化模型,并结合拉格朗日松弛法,对实例进行求解,得到最优值 $Z = 467$, 对偶值 $Z^* = 442$, 对偶间隙 = 5.7%。这个结果与一般方法计算后的结果(如利用动态规划结合枚举法得到 $Z = 547$)相比较更接近最优解。另外,由于一些板坯的属性相同或相似,使可行解的构造受拉氏乘子影响较大,并导致对偶间隙偏大,这与一体化调度问题的结构和构造可行解的启发式方法有关。

5 结束语

本文在炼钢-连铸调度模型的基础上建立了一体化生产调度模型,重点分析了炼钢、热轧等工序的

工艺特点,并考虑了生产工艺和工序间的连续生产、合同的准时交货等问题,符合生产实际情况。为便于求解,采用了拉格朗日松弛法对模型分解,使原调度问题分解为两层优化,上层优化拉格朗日乘子,下层用动态规划求解子问题,使求解得到很大简化。最后,通过实例计算证明模型和算法的有效性。

参考文献:

- [1] TANG Lixin, et al. Analysis of modeling factor of integrated lot planning for SM-CC-HRM [J]. Iron and Steel, 2000, (5): 74-76 (in Chinese). [唐立新,等. 炼钢-连铸-热轧集成批量计划因素分析[J]. 钢铁, 2000, (5): 74-76.]
- [2] SUN Fuqian, ZHENG Binglin, TANG Lixin, et al. Steelmaking, continuous casting and hot charge rolling integrated scheduling management [J]. Iron and Steel, 1998, (12): 71-75 (in Chinese). [孙福权,郑秉霖,唐立新,等. 炼钢-连铸-热轧一体化集成调度管理[J]. 钢铁, 1998, (12): 71-75.]
- [3] WANG Zhaohui, CHEN Haoxun, HU Baosheng. Scheduling for batch chemical processes using Lagrangian Relaxation-based approach [J]. Acta Automation Sinica, 1998, (1): 1-7 (in Chinese). [王朝晖,陈浩勋,胡保生. 用Lagrangian松弛法解化工批处理调度问题[J]. 自动化学报, 1998, (1): 1-7.]
- [4] TANG Lixin, YANG Zihou, WANG Mengguang. Research on steelmaking and continuous casting production scheduling [J]. Acta Automation Sinica, 1998, (1): 9-14 (in Chinese). [唐立新,杨自厚,王梦光. 基于准时制的炼钢-连铸生产调度问题的研究[J]. 自动化学报, 1998, (1): 9-14.]
- [5] TANG Lixin, LIU Jiying, YANG Zihou. A mathematical programming model for scheduling steelmaking-continuous casting production [J]. European Journal of Operational Research, 2000, (120): 423-435.
- [6] TANG Lixin, LIU Jiying, RONG Aiyong, et al. A multiple traveling salesman problem model for hot rolling scheduling in Shanghai Baogang Iron & Steel Complex [J]. European Journal of Operational Research, 2000, (124): 267-282.
- [7] HOITOM P D J, LUH P B. A practical approach to job-shop scheduling problems [J]. IEEE Trans. Robotics and Automation, 1993, 9 (1): 1-13.
- [8] LUH P B, et al. An effective approach for job-shop scheduling with uncertain processing requirements [J]. IEEE Trans. Robotics and Automation, 1999, 15 (2): 329-339.

Production Scheduling Model and Algorithm for Steelmaking-Continuous Casting-Hot Rolling Processes

ZHU Bao-lin, YU Hai-bin

(Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China)

Abstract: An integrated production scheduling model based on the integration idea and batch planning is established, including steel-making, continuous-casting, continuous-rolling procedure, etc. We explore the use of Lagrangian Relaxation to the model, by which the complex scheduling problem can be decomposed into subproblems and solved effectively. It is proved that the model and algorithm can be applied to actual production.

Key words: Lagrangian Relaxation; just in time; integrated management; charge; cast; rolling unit