

基于深度优先搜索算法的连铸过程调度方法的研究

孙亮亮¹, 刘 炜¹, 柴天佑^{1,2}

(1. 东北大学 教育部流程工业综合自动化重点实验室, 辽宁 沈阳 110004; 2. 东北大学 自动化研究中心, 辽宁 沈阳 110004)

摘要: 炼钢连铸过程是连接铁区生产和轧制生产的桥梁, 连铸是炼钢连铸过程的最后一道工序, 因此连铸过程的调度成为了整个钢铁生产过程降低生产成本, 保证生产有序进行的关键. 本文提出了以完成时间最小化为目标的调度数学模型, 通过对计划层编制的浇次计划属性与连铸机属性匹配构造出的浇次集合, 采用基于启发式的深度优先搜索算法进行求解, 摒弃了以往现场调度人员传统的经验调度方法, 该方法已经通过了国内某大型钢铁厂实际数据的测试, 不仅能够保证生产的顺利进行, 同时也能够有效的辅助现场调度人员有效的降低钢铁生产的生产周期, 提高钢铁生产的产能.

关键词: 炼钢连铸; 浇次计划; 深度优先搜索; makespan

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Scheduling continuous casting process by in-depth priority search algorithm

SUN Liang-liang¹, LIU Wei¹, CHAI Tian-you^{1,2}

(1. Key Laboratory of Process Industry Automation, Ministry of Education, Northeastern University, Shenyang Liaoning 110004, China;
2. Research Center of Automation, Northeastern University, Shenyang Liaoning 110004, China)

Abstract: Being the last process in steelmaking, the continuous casting process is the connecting bridge between the iron production process and the rolling production process; its scheduling is crucial for ensuring the whole production process operating in a well-organized rhythm with low production cost. According to properties of casting process and casting machines, we develop a schedule for continuous casting process, and then, apply the in-depth priority search algorithm to minimize the makespan of the continuous casting process. This algorithm doesn't use any traditional scheduling method. Field data in a domestic steel plant employing this approach for scheduling the continuous casting process shows smooth operations in production and reduced production cycles. This demonstrates that this easy-implemented algorithm efficiently assists plant workers in scheduling the continuous casting process to achieve high productivity.

Key words: steelmaking and continuous casting; cast planning; depth first search; makespan

1 引言(Introduction)

在钢铁生产过程中, 炼铁、炼钢、精炼和连铸属于连续型生产作业, 轧制作业属于离散型生产作业. 炼钢连铸过程是连接铁区生产和轧制生产的桥梁, 作为钢铁生产的瓶颈, 是钢铁生产重要的生产阶段, 按照炼钢连铸作业顺序可分为炼钢(CF)、精炼(RH, KIP, LF等)和连铸(CC)3个阶段, 如图1所示. 在炼钢连铸过程, 连铸机是炼钢连铸生产阶段的关键设备, 其作为轧制作业和炼钢作业的桥梁, 为了能够保持炼钢连铸作业的连续性, 需要连铸机按照一定的生产工艺要求合理有效的对待生产的浇次进行作业处

理, 安排浇次的连铸过程处理设备选择以及在同一连铸机上不同浇次的处理顺序的优化, 使得整个钢铁生产过程能够协调有序, 因此可以看到连铸机对浇次的处理起着承上启下的作用, 是炼钢连铸生产过程的瓶颈. 所以如何有效的在连铸过程分配待处理的浇次, 提高连铸机的效率就成为了本文研究的主要问题, 也是提高钢铁企业生产效率、降低生产成本、保证钢铁生产顺利进行的关键^[1,2]. 根据国内某钢厂的数据统计, 在考虑连铸机负荷平衡的基础上, 保证浇次连续浇注是保证合理有效地进行炼钢连铸的调度的前提, 单位时间内(min), 带来的直接

收稿日期: 2010-05-05; 收修改稿日期: 2010-08-16.

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(60534010); 国家创新研究群体科学基金资助项目(60521003); 长江学者和创新团队发展计划资助项目(IRT0421).

经济效益为5800美元,除了一般指派问题的特点,炼钢连铸过程的铸机分配还有如下的特点:

在钢铁生产计划调度过程,由ERP层下发的订单到计划层所做的炉次计划到浇次计划,为了保证在同一连铸机的浇次要连续浇铸的前提下,为了保证所有的连铸机的makespan最短,根据连铸机的属性以及不同浇次计划的属性进行设备的选择与顺序的优化,这个过程是一个多目标,多阶段的NP难题,求解时间会随着问题输入量的增大而成指数规模递增.传统的浇次调度的方法是调度人员按照一定的人工经验将待生产的浇次进行分配,指定生产连铸机,但是由于人工方法往往仅仅考虑连铸机的产能平衡问题,而不能更多地结合其它影响浇次计划分配效果的约束条件;同时,由于在炼钢连铸生产过程中,存在着很多不确定因素,例如连铸机定修时间的设定、浇铸时间的估算等,这些因素在人工进行浇次调度时没有被充分考虑,因此浇次分配不能实现最优化.

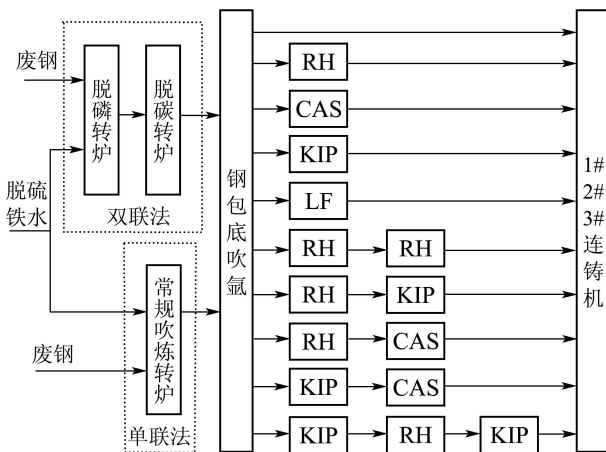


图1 炼钢生产过程

Fig. 1 The process of steelmaking

2 文献回顾(Literature review)

传统的浇次调度方法^[3,4]采用的是启发式算法,其具有调度计算量小、效率高和实时性好的优点,但是它有明显的缺点,对结果缺乏解释能力,由于实际生产环境是动态的、复杂的,具有变化的结构及目标,甚至还有调度的中断(连铸机定期维修,浇注时间不确定性,约束的刚性和柔性条件的混合等),很难断定实际的生产过程符合某一算法的标准形式,单独的模型和算法很难解决问题.随后的发展中,提出了各种基于智能的设备指派方法^[5~10],例如基于能力约束的Flow Shop调度方法的研究以及基于遗传算法的浇次调度问题的研究为解决炼钢连铸中浇次调度进行优化分配提供了可能,并成功解决炼钢连铸浇次分配问题.但在这些智能算法中,基于没

有考虑实际生产浇次分配时连铸机对柔性约束的要求,而仅仅是通过数学模型对问题的刚性约束进行求解,最优解往往与实际问题的解决方案不能完全吻合.

本文研究的浇次调度问题是在满足工艺约束条件下,最小化连铸机的makespan为目标,并将其目标转化为浇铸一批浇次所用总时间最短,按上述过程建立数学模型.同时利用基于规则的深度优先搜索算法进行快速求解.由于该模型面向多约束和多目标,实现一个相对最优解,所以可以优化炼钢连铸调度计划,并对一批浇次实现了自动优化调度.

3 问题描述及求解策略(Problem description and solution strategy)

3.1 问题描述(Problem description)

炼钢连铸生产工艺流程主要包括:炼钢、精炼和连铸.炼钢的主要任务就是按照所炼钢种的质量要求将炼钢原料(生铁、废钢)熔化,通过氧化作用及加入铁合金将其中的碳、锰、硫、磷及其他元素含量调整到规定的范围并达到一定的出钢温度准备浇铸.高炉铁水运输到炼钢炉后,和废钢一起倾倒入炼钢炉中.然后通过加热将炼钢炉中的铁水和废钢加工成均匀的液态钢水,去除其中的杂质和其中所含的碳使其达到希望的比例.钢铁生产一般用两类炼钢炉:转炉和电弧炉,其中转炉更为常见.根据原料来源特点,炼钢炉必须保证能消化所有高炉生产出来的铁水.而在炼钢炉的输出方面,每一炉生产的钢水都具有一个特定的钢级,炼钢炉每次加工的钢水都是一个满容量.炼钢炉生产出的钢水有时还需要进行精炼,钢水放置在钢包中,由天车、台车运送到精炼设备处,一个钢包的容量和一个炉次的容量相等.在精炼炉内通过添加金属成分等生产特定钢级的钢水.精炼过程中,每炉钢都经过规定数量的精炼工位加工,即可能一炉钢要经过多个精炼工位,而每一个精炼工位对其加工设备都有工艺精炼类型要求.精炼后的钢水运往连铸机进行加工,满足成份和温度要求的精炼钢水被注入连铸机上面的大包,钢水通过大包流入连铸机的结晶器拉制成具有一定钢级和规格的钢坯,并为热轧工序或其它工序提供原料.连铸机要尽量连续浇铸,否则就必须重新引杆开启铸机,每开启一次连铸机需要设备的调整时间和调整费用,而且会使产量降低.为了提高生产效率,降低生产成本,就需要把尽可能多的炉次计划在同一连铸机上进行连续浇铸.板坯有几个重要参数:宽度、厚度、长度、重量和钢级.

本文使用到的术语定义如下:

1) 炉次: 炼钢连铸生产的最小单元.指一炉铁水

经过转炉冶炼后, 顺序经过精炼过程和连铸过程的一个作业单位组. 它由多个连续的子生产单元组成. 在同一炉次中的板坯具有相近的宽度、交货期和钢种要求.

2) 炉次计划: 属于炼钢-连铸段的生产批量计划. 在炼钢-连铸生产阶段, 由于中间合同(热轧板坯)或最终合同(如热轧带钢)的需求在钢级、规格、物理特性、交货期等诸因素之间可能存在一定差别, 根据炼钢工艺的要求和组成同一炉次的合同的特征限制, 需要将合同进行组合, 形成不同的炉次计划, 使得每一个炉次内在保证最低冶炼炉容要求下, 合同之间最少的交货期差异, 最大的成材率和最低的生产成本以及最少的无委材.

3) CAST LOT: 钢厂内部的计划工艺号, 指具有相同出钢记号的炉次按宽度从大到小排列所形成的炉次集合.

4) 浇次: 是每次从开浇开始算起(也就是走完引锭杆, 不管是上装还是下装), 直到终浇出完尾坯, 这就可算一个浇次. 浇次要满足钢种连连浇规则并且在同一台连铸机上使用同一个中间包的一系列CAST LOT连续浇铸按宽度从大到小排成的浇注顺序. 同一台铸上连续浇铸的浇次的集合我们称之为连连浇Cast.

炼钢连铸生产过程中, 要求在满足生产工艺约束和连铸机参数约束条件下, 连铸机要尽量连续浇铸, 否则就必须重新引杆开启铸机, 每开启一次连铸机需要设备的调整时间和调整费用, 而且会使日产量降低. 因此, 为了提高生产效率, 降低生产成本, 就需要把尽可能多的炉次计划在同一连铸机上进行连续浇铸. 在连铸机上连续浇铸过程中, 与结晶器相连接的中间包的寿命是有一定的限制的, 使用同一中间包连铸的炉数不能超过中间包的寿命. 本文所讨论的问题是: 设有 I 个浇次, 考虑连铸机参数和生产工艺约束条件下, 将 I 个浇次分配到连铸机上, 让 I 个浇次在满足连铸机约束条件下在最短时间内浇注结束.

3.2 求解策略(Solution strategy)

由于连铸机设备对连连浇Cast有宽度、厚度的约束, 并且连铸机具有钢种(出钢记号)和板坯去向分配优先参数, 连铸机宽度、厚度、出钢记号和板坯流向作为刚性属性必须要与被浇注的浇次对应属性匹配, 否则浇次不能生产, 在属性对应的前提下, 考虑连铸机的最小化makespan问题, 将其目标转化为浇铸一批浇次所用总时间最短, 所以要将问题分成两步求解, 如图2所示.

首先, 按连铸机宽度、厚度和连铸机分配优先参

数约束对浇次进行连铸机归类, 归并为 M 集合: $S(q), q = 1, \dots, M$, 且 q 为满足铸机约束的个数, M 为铸机总数. 同时把只满足一台连铸机宽度、厚度、出钢记号和板坯去向约束的连连浇Cast集合 $S(1)$ 中的所有浇次指派到确定的铸机上; 其次, 将余下的满足多台连铸机宽度、厚度约束浇次集合 $S(2), \dots, S(M)$, 作为一个总的调度集合, 优化分配到连铸机上, 目标最小化makespan, 即转化成需求连铸机浇铸确定数目的连连浇Cast的总生产时间最小, 按此目标建立模型.

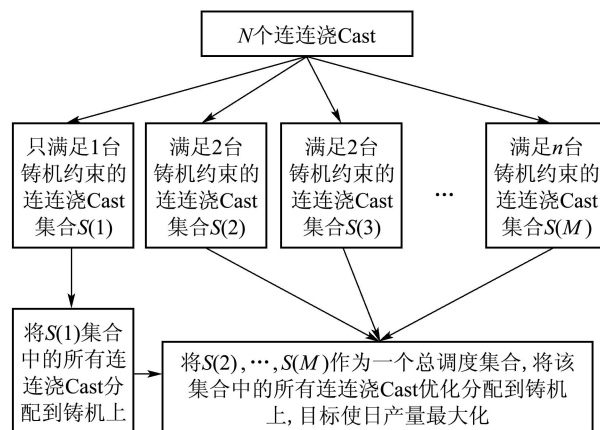


图2 连连浇Cast调度问题的求解策略

Fig. 2 The solving strategy of continuous casting batching scheduling

4 数学模型(Mathematical model)

4.1 符号定义(Symbol definition)

为了便于描述, 定义符号和变量如下:

M : 连铸机总数;

N : 当日指派 $S(1)$ 后, 剩余的连连浇Cast个数;

S_i : 连连浇Cast i 的序号;

x_{ij} : 连连浇Cast i 是否被安排在连铸机 j 上的变量; 如果在 $x_{ij} = 1$, 否则 $x_{ij} = 0$;

V_i : 连连浇Cast i 中所含的炉次数;

Tm_j : 连铸机 j 浇铸一炉钢的处理时间;

Tr_j : 连铸机 j 上两个连连浇Cast间的间隔时间;

$T_j(0)$: 连铸机 j 上当日已占用的生产时间, 通过 $S(1)$ 在连铸机 j 上占用时间可求;

$P_{1(i)}$: 第 i 个浇次的第一炉次的浇注时间;

$P_{k(i)}$: 第 i 个浇次的第 k 炉次的浇注时间;

C_{ij}^1 : 连连浇Cast i 被安排在连铸机 j 上未满足连铸机 j 宽度约束的惩罚费用; Wd 为浇次的铸坯宽度范围, Wd_j 为连铸机所允许的浇注宽度范围;

$$C_{ij}^1 = \begin{cases} 0, & Wd \subseteq Wd_j, \\ +\infty, & Wd \not\subseteq Wd_j. \end{cases}$$

C_{ij}^2 : 连连浇Cast i 被安排在连铸机 j 上未满足连铸机 j 厚度约束的惩罚费用; Td 为浇次的铸坯厚度范围, Td_j 为连铸机所允许的浇铸厚度范围;

$$C_{ij}^2 = \begin{cases} 0, & Td \subseteq Td_j, \\ +\infty, & Td \not\subseteq Td_j. \end{cases}$$

C_{ij}^3 : 连连浇Cast i 被安排在连铸机 j 上未满足连铸机 j 出钢记号的惩罚费用; Sd 为浇次的出钢记号范围, Sd_j 为连铸机所允许的出钢记号范围;

$$C_{ij}^3 = \begin{cases} 0, & Sd \subseteq Sd_j, \\ +\infty, & Sd \not\subseteq Sd_j. \end{cases}$$

C_{ij}^4 : 连连浇Cast i 被安排在连铸机 j 上未满足连铸机 j 板坯去向约束的惩罚费用; Fd 为浇次的铸坯板坯去向范围, Fd_j 为连铸机所允许的板坯去向范围;

$$C_{ij}^4 = \begin{cases} 0, & Fd \subseteq Fd_j, \\ +\infty, & Fd \not\subseteq Fd_j. \end{cases}$$

C_j : 连铸机 j 当日可用的生产时间;

Wt_1 : 第一炉钢水的总重量(t);

TH_1 : 为浇铸第一炉钢水的输出板坯的平均厚度(mm);

W_1^1, W_1^2 : 浇铸钢水的输出板坯的平均左、右宽度(mm);

Ls : 连铸机的标准拉速(m/min);

WT_k : 第 k 炉钢水的总重量(t);

TH_k : 浇铸第 k 炉钢水的输出板坯的平均厚度(mm);

W_k^1, W_k^2 : 浇铸第 k 炉钢水的输出板坯的平均左、右宽度(mm);

W_{k-1}^1, W_{k-1}^2 : 浇铸第 $k-1$ 炉钢水的输出板坯的平均左、右宽度(mm).

4.2 数学模型(Mathematical model)

数学模型如下:

min

$$Z = \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N (C_{ij}^1 + C_{ij}^2 + C_{ij}^3 + C_{ij}^4)x_{ij} + \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N [T_j(0) + Tm_j x_{ij} + Tr_j x_{ij} - Tr_j], \quad (1)$$

s.t.

$$\sum_{j=1}^M x_{ij} \leq 1, j = 1, \dots, M, \quad (2)$$

$$Q = \max\{\sum_{i=1}^N x_{ij} Tm_j\} \leq C_j, \quad (3)$$

$$P_{1(i)} = \frac{Wt_1 \times 10^6}{TH_1 \times \frac{W_1^1 + W_1^2}{2} \times 7.8 \times 2 \times Ls - 0.2}, \quad (4)$$

$$P_{k(i)} = \frac{(Wt_k \times 10^6 - TH_k \times 31.2 \times W_k^1 + W_k^2 + W_{(k-1)}^1 + W_{(k-1)}^2) / (TH_k \times \frac{W_k^1 + W_k^2 + W_{(k-1)}^1 + W_{(k-1)}^2}{4} \times 7.8 \times 2 \times Ls - 0.2) + \frac{8}{Ls - 0.2}}{Ls - 0.2}, \quad (5)$$

$$Tm_j = P_{1(i)} + \sum_{v_i} P_k(v_i). \quad (6)$$

目标函数(1)表示在满足连铸机宽度、厚度、出钢记号、板坯去向约束条件下, 该批次连连浇Cast分配后, 使得所有连铸机占用总时间最小, 即makespan最小. 函数(1)中前后量纲虽然不同, 但是为了取得最小值, 函数(1)前半部分只能为零, 才能满足浇次对连铸机性能匹配的特点, 故此量纲的不同对于浇次调度的分配不会产生结果的影响; 约束条件式(2)表示每个连连浇Cast只能安排在一台铸机上; 式(3)表示每台连铸机日生产能力限制, 式(4)表示当该炉次为连次的第一个炉的浇铸时间, 式(5)表示当该炉次为连次的第 k 个炉次的浇铸时间, 式(6)表示每个浇次在连铸机浇注时间.

5 基于启发式规则的深度搜索求解算法 (The in-depth search algorithm based on heuristic)

连连浇Cast调度问题, 属于流水车间(flow shop)调度问题, 可以采用遗传算法(GA)等智能优化算法, 或基于规则的启发式算法求解. 智能优化算法与基于规则的启发式算法都可以很好的解决这一问题, 但是两者各有利弊. 智能优化算法具有通用性, 可以找到最优解, 但是不一定能确保有解, 并且运行速度较慢. 而基于规则的启发式算法运行速度很快, 能够确保有解, 但是不一定能找到最优解, 并且通用性较差. 连连浇Cast分配阶段, 变量数相对来说比较小, 为了加快求解速度采用了基于启发式规则的深度搜索算法.

为了减小变量规模, 对一批的连连浇Cast进行分类. 分类的标准为连铸机的宽度范围、厚度范围、可浇铸的钢种和板坯去向. 同时指派只能在一台铸机上浇铸的连连浇Cast. 将余下作为一个总的调度集合, 每个分集合 $S(2), \dots, S(M)$ 中连连浇Cast至少满足两台铸机, 考虑到一个连连浇Cast满足连铸机参数的连铸机个数越少, 平衡负荷的能力越差, 故将满足连铸机个数最少的集合优先指派, 采用深度搜索算法指派该集合中的所有连连浇Cast. 依次指

派 $S(2), S(3)$ 到 $S(M)$.

Step 1 根据连铸机必须满足的刚性约束条件: 宽度范围、厚度范围、出钢记号和板坯去向, 将 K 个连连浇Cast划分为集合 $S(1), \dots, S(M)$; 把只满足一台连铸机的连连浇Cast划分到集合 $S(1)$ 中, 并指派 $S(1)$ 中的连连浇Cast到连铸机上;

Step 2 判断是否存在 $S(q) \notin \Phi, q = 2, \dots, M$. 若不存在, 转至Step8; 若存在, 则选择满足连铸机个数最少、未指派集合 $S(q)$, 继续下一步;

Step 3 从 $S(q)$ 中随机读取一个未作过根接点的连连浇Cast i 为根接点, 采用深度搜索算法进行计算. 判断在所有满足条件的连铸机中, 是否有唯一最小已占用时间的连铸机. 若是, 指派连连浇Cast i 到该连铸机上, 转至Step5; 若否, 继续下一步;

Step 4 有两个不同的连铸机已占用时间最小, 则考虑连铸机负荷平衡, 将这个连连浇Cast分配到相应连铸机上, 继续下一步;

Step 5 判断 $S(q)$ 中的每个连连浇Cast是否都作过根接点被访问过. 若否, 转至Step3; 若是, 继续下一步;

Step 6 在预分配 $S(q)$ 中所有连连浇Cast后, 选择可行路径中连铸机总生产最小的路径, 确定出 $S(q)$ 中所有连连浇Cast所指派的连铸机;

Step 7 判断是否所有的集合 $S(q) \notin \Phi, q = 2, \dots, M$, 都指派完? 若不是, 转至Step3; 若是, 继续;

Step 8 连连浇Cast调度结束.

深度优先搜索则记下完整的搜索树, 搜索树起到记录路径和状态判断的作用. 在深度优先遍历中要使用到栈来保存已访问的结点, 或保存已访问顶点的所有尚未访问过的邻接点. 本文中使用深度搜索算法指派一个集合中所有的连连浇Cast到连铸机上.

6 数据验证及工程应用(Data examination and engineering application)

6.1 应用背景(Application background)

国内某大型钢厂连铸设备有2台1450板坯连铸机(2流、宽度900~1450 mm、厚度都为220~230 mm, 主要钢种: IF钢、电工钢、低碳钢, 下工序: 1580热轧, 每次调宽量: ≤ 100 逆, 热轧侧压量: ≤ 300 逆), 1台1770板坯连铸机(2流、宽度900~1770 mm). 同样如果各工序设备全部运行, 连铸为瓶颈工序, 要保证连续浇铸. 板坯去向有冷轧、热轧和外卖3种方式; 同一连铸机优先分配参数中出钢记号权重大于板坯去向权重. 正在使用的计算机系统有终端过程控制计算机系统(L2)和区域管理计算机系统(L3). 目

前炼钢连铸区域调度只是实现了信息系统管理, 现有的连连浇Cast调度的方法是人工按一定规则进行归并, 指定生产连铸机, 即由人工针对组好的连连浇Cast按经验进行分配, 不能有效的进行优化分配.

6.2 应用效果(Application results)

在第5部分提出的方法通过Visual Studio .net 2005实现, 并在采用Intel Core 2 Duo 2.80 GHz CPU和4 GB memory的计算机上运行. 选取10组不同的即将分配处理的浇次, 分别在两台连铸机和3台连铸机的条件下进行连铸处理, 如表1所示某一组浇次的调度结果, 假设所有连铸机的起始时间相同, 计算连铸机负荷均衡率:

$$|\max(\text{end}T_i) - \min(\text{end}T_i)| / \min(\text{end}T_i), \quad (7)$$

其中 $\text{end}T_i$ 为连铸机 i 的处理结束时间. 来对不同情况所得出的结果进行评判, 如图3所示, 计算时间如图4所示.

表 1 一组浇次的调度结果

Table 1 The schedule of one group casts

浇次号	宽度	厚度	出钢记号	板坯去向	调度结果
1	1050	225	AP1056E1	3	1#CC
2	1250	225	JT6411A6	3	1#CC
3	1150	225	JT6411A6	3	1#CC
4	950	225	AP0740D5	2	2#CC
5	1250	230	AP0740D5	2	2#CC
6	1450	220	AP0740D5	2	2#CC
7	1350	220	AP0740D5	2	2#CC
8	1000	225	AP0740D5	1	3#CC
9	1100	230	AP0740D5	1	3#CC
10	1000	220	AP0740D5	1	3#CC

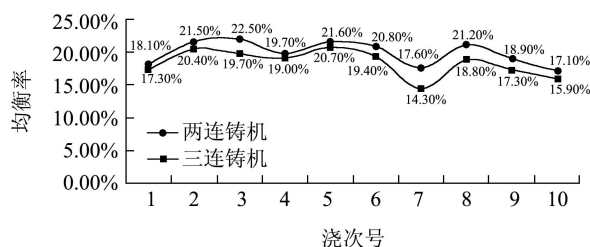


图 3 连铸机负荷均衡率

Fig. 3 The load balance rate of continuous casting

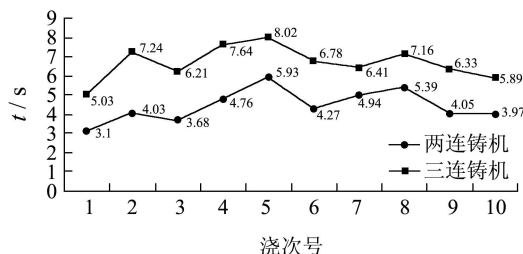


图 4 调度运算时间

Fig. 4 The scheduling operation time

7 结论(Conclusion)

本文通过由MES(manufactory executive system)层面下发的浇次,以在连铸生产过程中,最小化给定的一批浇次的makespan作为生产目标,考虑到板坯宽度、厚度、长度、流向、重量和钢级与连铸机属性的匹配建立了数学模型,并且通过基于启发式规则的深度优先搜索算法求解.通过国内某大型钢铁厂的现场数据进行了测试,并且通过负荷均衡率方式与现场传统的调度结果进行了比较,具有很好的应用效果,保证了钢铁生产的连续性,提高了产能,在同行业中具有应用推广的价值.

致谢 作者在此诚挚的感谢中国东北大学郑秉霖教授,庞新富同学;美国康涅狄格大学Peter B. Luh教授,王从从同学对这篇文章提出的宝贵的建议和意见.

参考文献(References):

- [1] XUE Y C, YANG Q W, SHAO H T. Optimum cast plan for steelmaking-continuous casting production scheduling[C] // *Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Control Applications*. [S.l.]: [s.n.], 2004, 2: 1394 – 1397.
- [2] TANG L X, LIU J Y, RONG A Y, et al. TA review of planning and scheduling systems and methods for integrated steel production[J]. *European Journal of Operational Research*, 2001, 133(1): 1 – 20.
- [3] SHAH M J, DAMIAN R, SILVERMAN J. Knowledge based dynamic scheduling in a steel plant[C] // *Proceedings of the sixth conference on Artificial intelligence applications*. [S.l.]: [s.n.], 1990, 1: 108 – 113.
- [4] WANG X Y, YU SH P, ZHENG B L. Intelligent scheduling system of steelmaking and continuous casting based on ERP/MES/PCS[C] // *The Sixth World Congress on Intelligent Control and Automation*. [S.l.]: [s.n.], 2006, 7381 – 7384.
- [5] HARJUNKOSKI I, GROSSMANN I E. A decomposition approach for the scheduling of a steel plant production[J]. *Computers and chemical engineering*, 2001, 25(11): 1647 – 1660.
- [6] TANG L X, LUH P B, LIU J Y, et al. Steel-making process scheduling using Lagrangian relaxation[J]. *International Journal of Production Research*, 2002, 40(1): 55 – 70.
- [7] PACCIARELLI D, PRANZO M. Production scheduling in a steelmaking-continuous casting plant[J]. *Computers and Chemical Engineering*, 2004, 28(12): 2823 – 2835.
- [8] BELLABDAOUI A, TEGHEM J. A mixed-integer linear programming model for the continuous casting planning[J]. *International Journal of Production Economics*, 2006, 104(2): 260 – 270.
- [9] OUELHADJ D, COWLING P I, PETROVIC S. Utility and stability measures for agent-based dynamic scheduling of steel continuous casting[C] // *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*. [S.l.]: [s.n.], 2003, 1: 175 – 180.
- [10] JIAN W, XUE Y C, QIAN J X. Optimum integrated cast plan for steelmaking-continuous casting production scheduling using improved genetic algorithm[C] // *Proceedings of the 2004 2nd IEEE International Conference on Industrial Informatics*. [S.l.]: [s.n.], 2004, 283 – 286.

作者简介:

孙亮亮 (1981—), 男, 博士研究生, IEEE会员, 感兴趣研究领域为钢铁行业的计划和调度、半导体行业的调度优化, E-mail: sll@engr.uconn.edu;

刘 炜 (1980—), 男, 博士研究生, IEEE会员, 主要研究方向为钢铁生产调度应用及过程仿真, E-mail: liuwei.neu@gmail.com;

柴天佑 (1947—), 男, 教授, 博士生导师, 中国工程院院士, IEEE Fellow, 主要研究方向为生产过程控制, E-mail: tychai@mail.neu.edu.cn.