

文章编号: 1001-0920(2006)09-0979-05

## 基于并行策略的冶铸轧一体化组批模型及算法

许剑, 吕志民, 徐金梧

(北京科技大学 高效轧制国家工程研究中心, 北京 100083)

**摘要:** 针对直接热装和直轧工艺的特点, 提出在冶铸轧一体化组批时用组合批代替传统的连铸作业计划和热轧作业计划, 并建立了时序条件多收益旅行商M PCTSP-TC 模型。该模型基于并行策略, 一次可以求出若干个组合批, 构造了分组协同蚁群算法, 并用该算法对所提出的模型进行求解。结果表明, 所建立的模型和算法可以最大化地求出较优的组合批, 每个组合批都能满足模型的约束条件, 而且排出一个组合批的平均时间为9.6 s, 远远低于人工排产所需的时间。

**关键词:** 直接热装; 直轧; 并行策略; 一体化组批; 蚁群算法

**中图分类号:** TG76; F237 **文献标识码:** A

## Model and Algorithm of Integrative Batch Planning Based on Parallel Strategy for Steelmaking-continuous Casting-hot Rolling

XU Jian, LV Zhimin, XU Jinwu

(National Engineering Research Center for Advanced Rolling Technology, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China. Correspondent: XU Jian, E-mail: xujian0259@163.com)

**Abstract:** According to characteristics of direct hot charging rolling (DHCR) and direct rolling (DR) process, the concept of combinational batches is proposed to replace the traditional casting work planning and hot rolling work planning during integrative batch planning for steelmaking-continuous casting-hot rolling. Then, multiple prize-collecting travelling salesman problem-temporal constraint (M PCTSP-TC) model is given, which bases on parallel strategy and can synchronously produce several combinational batches. Finally, a grouping coordination ant colony algorithm is proposed for solving the model. The result shows that applying the proposed model and algorithm can yield optimal combinational batches to high degree and each combinational batch satisfies the constraints of the model, and the average computation time of productting a combinational batch is 9.6 seconds, which is obviously less than the time of manual work.

**Key words:** Direct hot charging rolling; Direct rolling; Parallel Strategy; Integrative batch planning; Ant colony algorithm

### 1 引言

直接热装(DHCR)和直轧(DR)工艺作为现代化钢铁企业节能降耗、缩短工艺流程、降低库存和提高成材率的重要途径, 越来越受到人们的关注。由于DHCR/DR工艺取消了位于连铸工序与热轧工序之间的缓冲环节(板坯库或保温坑), 将炼钢、连铸和热轧3大工序直接相连, 使钢铁生产成为一个有机系

统。这对于生产管理, 特别是冶铸轧一体化组批提出了更高的要求。

近年来, 国内外大型钢铁企业和研究机构对热轧计划和调度<sup>[1~3]</sup>以及一体化计划调度<sup>[4~6]</sup>进行了大量的研究和报道, 但真正基于DHCR/DR工艺, 尤其针对宽板带生产线的DHCR/DR一体化计划和调度的报道却很少, 且大部分由于忽略了很多生产约

收稿日期: 2005-07-06; 修回日期: 2005-10-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(70371057)。

作者简介: 许剑(1973—), 男, 河南安阳人, 博士生, 从事智能计划调度理论和优化方法等研究; 徐金梧(1949—), 男, 浙江宁波人, 教授, 博士生导师, 从事复杂系统优化理论及方法、智能控制与故障诊断等研究。

束,只能适用于简单生产模式(如只能有一台连铸机进行DHCR生产)。我国目前还处于钢铁工业一体化生产计划系统开发的起步阶段,虽然理论研究已经取得一定的成果,但与实际应用还有一定距离<sup>[7]</sup>。

本文对宽板带轧线DHCR/DR冶铸轧一体化计划和调度的核心环节——DHCR/DR冶铸轧一体化组批进行了深入研究,采用并行策略建立了时序条件多收益旅行商模型M PCTSP-TC (Multiple Prize-collecting Travelling Salesman Problem-temporal Constraint)。该模型充分考虑了炼钢、连铸、热轧3个工序的生产约束,同时兼顾了不同表面质量和优先级合同的排产。最后构造了改进的蚂蚁算法,并用该算法对所提出的模型进行求解。

## 2 问题描述

DHCR/DR一体化组批是以中期(5日或1周)合同计划为基准和搜索空间,制定出能同时满足热轧工序和炼钢-连铸工序各种约束的较优的生产批量计划,使生产能够在各个工序连续进行。DHCR/DR冶铸轧一体化组批与HCR生产批量计划既有联系,又有很大区别。DHCR/DR冶铸轧一体化组批必须同时考虑冶、铸、轧3个阶段的所有生产约束,且考虑的侧重点不同。各阶段需要考虑的约束按重要程度依次为:

1) 热轧约束: 钢种过渡约束(轧制硬度过渡), 表面质量要求, 轧制宽度过渡, 轧制厚度过渡, 同宽轧制公里数, 逆宽轧制公里数, 总轧制公里数, 合同交货期;

2) 炼钢-连铸约束: 钢种约束, 板坯浇铸宽度, 炉容(公称重量)约束, 浇次模变次数和模变规则(比如必须宽窄等), 中间包寿命约束。

DHCR/DR一体化组批的结果不再是传统的浇次(炉次计划)和热轧计划,而是DHCR/DR组合批。该组合批在不同工序表现为不同的形式: 在炼钢-连铸阶段表现为浇次计划(炉次计划); 在热轧阶段表现为热轧单元。组合批内部连铸单元与热轧单元的比率根据单台连铸机产能与轧线产能的比值不同有3种,分别为1:1, 1:n和n:1(见图1)。前面的数字表示组合批内连铸单元的个数,即同时供料铸机数;后面的数字表示组合批内热轧单元的个数。

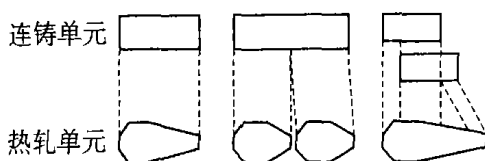


图1 组合批内连铸单元与热轧单元的比率

## 3 DHCR/DR一体化组批模型

### 3.1 组批策略

在实际编制组合批时,一般都是从预选池的 $n$ 个任务中编制出 $k_0$ 个组合批。这 $k_0$ 个组合批包含了 $m$ 个任务,剩余 $n-m$ 个任务则进入下一个预选池。对这个问题一般有两种处理策略,一种为串行策略,即一次只能编制一个组合批,顺序编制;一种为并行策略,即一次可以编制出若干个组合批。串行策略方法简单,容易实现,但可能导致先编制的计划好,后编制的计划很差;并行策略克服了串行策略的缺陷,但模型会比较复杂。本文采用并行策略。

主轧材直接决定着轧制单位的结构,即决定着冶铸轧组合批的结构,所以在编制过程中采用“由里向外”的方式。即首先选择主轧材,然后从选定的主轧材开始正向编制其他主轧材和次主轧材,逆向编制烫辊材。因为在一个轧制单位内烫辊材铸坯宽度、钢种与主轧材往往不一致,而连铸机又很难适应这种变化,同时在轧制单位结构中,烫辊材部分所占比重较小,一般是质量要求较低的几个品种,因此将多个轧制单位的烫辊材集中浇铸,然后入库保温,完成轧制单位之间的过渡。作者将另文详述烫辊材部分编制模型及算法,本文重点讨论主体材部分的编制。

### 3.2 预处理

为了缩小搜索空间,减少运算时间,在中期合同计划模块中将同一钢级、同一浇铸宽度、同一表面质量级、同一轧制宽度组、同一轧制厚度组、优先级相近和交货期相近的虚拟板坯按一定重量和板坯块数要求组合在一起,作为组批时的最小单位,称为元组。

### 3.3 模型设计

DHCR/DR一体化组批可归结为一种收益旅行商问题PCTSP。PCTSP最先由Balas提出,其基本原理是:有向图中的每条弧对应着一个费用或广义距离,每个节点对应着一个惩罚值,表示该点没有被周游的惩罚,同时每个节点有一个价值,表示该点被周游的收益。PCTSP就是从一点出发寻找一个最有利可图的简单子回路,使得总费用最小,总收益大于预先设定的常数。

#### 3.3.1 M PCTSP-TC模型概述

本文在PCTSP基础上提出了M PCTSP-TC (Multiple Prize-collecting Travelling Salesman Problem-temporal Constraint)模型,即有 $k_0$ 个商人,同时从 $k_0$ 个不同的节点出发,寻找最有利可图的 $k_0$ 个回路,使得这 $k_0$ 个商人的总费用最小,总收益大于预先设定的常数。该模型同时增加了时序条件,将简单静态有向图扩展为具有时序条件的动态

赋权有向图 节点不再是静态的,而是随着时间变化有两种可能的状态(活动或非活动状态),时间是广义时间,可用轧制长度或重量表示 这样就可以将商人周游分为几个时间段,用来编制组合批的不同部分(烫辊材、主轧材和次主轧材等).在每个时段只有符合该时段编制条件的节点是活动的 有向图上每条弧还有一个与边弧费用和弧终点优先级有关的权值

节点的状态与节点的表面质量级属性密切相关 节点的质量级分为 3 级,按要求高低依次为一级、二级和三级 其中质量要求为一级的节点只能作为主轧材,质量要求为二级的节点不能作为烫辊材,质量要求为三级的节点原则上可以放在任何区域 但是,在实际生产中质量要求为三级的合同很少,通常作为烫辊材使用 节点的优先级为 1, 2, ..., 数字越大优先级越高,前 3 级分别对应着表面质量级三、二、一,紧急合同可以赋 4 级以上

### 3.3.2 MPCTSP-TC 模型数学描述

在具有时序条件的动态赋权有向图  $G = (V, A, T)$  中,  $V$  是节点的集合,编号从 1 到  $n$ ,  $V$  中每个节点  $i$  对应着一个价值  $p_i$ ,表示该点被周游的收益;还对应着一个状态变量  $fg_i$ ,表示该节点是否被激活,该变量为布尔变量,取值 1 代表被激活,取值 0 代表没有被激活 这样每个节点就有 11 个属性:钢级  $g_i$ , 浇铸宽度  $cw_i$ , 表面质量级  $sq_i$ , 轧制宽度组  $rw_i$ , 轧制厚度组  $rt_i$ , 轧制硬度  $rr_i$ , 优先级  $pr_i$ , 交货期  $dt_i$ , 轧制长度  $rl_i$ , 价值  $p_i$  和状态  $fg_i$ .  $A$  是边弧的集合  $\{arc(i, j)\}$ ,  $A$  中每条弧  $arc(i, j)$  对应着一个费用  $c_{ij}$  和一个权值  $\eta_j$ .  $T$  是时间序列,控制着图中哪些节点处于活动状态,取值为 1 和 2,分别表示主轧材编制阶段和次主轧材编制阶段,在每个阶段只有活动的节点才能被周游

用布尔变量  $x_{ijk}$  和  $y_{ik}$  分别表示弧  $arc(i, j)$  和节点  $i$  是否被子巡游  $C_k = (V_k, A_k) (V_k \subseteq V, A_k \subseteq A)$  周游,  $k = 1, 2, \dots, k_0$ , 即

$$x_{ijk} = \begin{cases} 1, & \text{边弧 } arc(i, j) \text{ 包含在 } A_k \text{ 内;} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

$$y_{ik} = \begin{cases} 1, & \text{节点 } i \text{ 包含在 } V_k \text{ 内;} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

则数学模型为

$$(P) \min (W - \sum_{k=1}^{k_0} \sum_{i \in V_k} p_i y_{ik} - \sum_{i \in V_k} \sum_{j \in V_k \setminus \{i\}} c_{ij} x_{ijk}), \quad (3)$$

其中  $W$  是一个很大的数,

$$p_i = f(pr_i, dt_i), \quad (4)$$

$$C_{ij} = C_{1_{ij}}(cw_i, cw_j) + C_{2_{ij}}(g_i, g_j) + C_{3_{ij}}(rw_i, rw_j) + C_{4_{ij}}(rt_i, rt_j) + C_{5_{ij}}(rr_i, rr_j). \quad (5)$$

$$s.t. \quad fg_i = \begin{cases} 1, & sq_i \leq T; \\ 0, & \text{其他;} \end{cases} \quad (6)$$

$$x_{ijk} = y_{ik}, \quad \forall i \in V, k = 1, 2, \dots, k_0; \quad (7)$$

$$x_{ijk} = y_{jk}, \quad \forall j \in V, k = 1, 2, \dots, k_0; \quad (8)$$

$$y_{ik} \leq 1, \quad \forall i \in V; \quad (9)$$

$$L_{\min} \leq \sum_{i \in V} y_{ik} \cdot rl_i \leq L_{\max}, \quad \forall k = 1, 2, \dots, k_0; \quad (10)$$

$$y_{ik} \leq R \cdot H_{\max}, \quad \forall k = 1, 2, \dots, k_0; \quad (11)$$

$$\sum_{i \in V_k} y_{ik} \cdot dl_{is} \leq C_{\max}, \quad \forall k = 1, 2, \dots, k_0, s = 1, 2, \dots, s_0; \quad (12)$$

$$Mrl \leq Mrl_{\max}; \quad (13)$$

$$NB_k \leq NB_{\max}; \quad (14)$$

$$NG_k \leq NG_{\max}; \quad (15)$$

$$\sum_{k=1}^{k_0} \sum_{i \in V_k} \sum_{j \in V_k \setminus \{i\}} x_{ijk} \leq y_h, \quad \text{对每个 } h \in V \setminus \{i\} \text{ 和每个 } S \subset V: 1, h \in S. \quad (16)$$

目标函数(3)表示总收益最大;式(4)为节点的价值函数,与节点的优先级和交货期有关;式(5)为费用函数,其中  $C_{1_{ij}}$  为相邻元组铸机模变费用,  $C_{2_{ij}}$  为相邻元组异钢种连浇费用,  $C_{3_{ij}}$  为相邻元组轧制宽度过渡费用,  $C_{4_{ij}}$  为相邻元组轧制厚度过渡费用,  $C_{5_{ij}}$  为相邻元组轧制硬度过渡费用;约束(6)表示时序控制条件;约束(7)和(8)表示从一个节点出发或进入该节点的边弧最多为 1 条;约束(9)表示一个定点最多被 1 个子巡游走到;约束(10)中  $L_{\min}$  和  $L_{\max}$  分别为轧制单位带钢最小、最大轧制长度值,该式为背包限制条件;约束(11)中  $R$  为组合批内连铸单元与热轧单元的比率,  $H_{\max}$  为中间包寿命,该式为连浇炉数限制条件;约束(12)中  $s$  为宽度系列,  $dl_{is}$  表示第  $i$  个节点轧制宽度为  $w(s)$  的轧制长度,  $C_{\max}$  为同一轧制宽度的产品最大轧制长度值,该式为同宽公里数约束条件;约束(13)中  $Mrl$  为逆宽轧制公里数,  $Mrl_{\max}$  为逆宽最大轧制公里数限制值,该式为逆宽轧制公里数约束条件;约束(14)中  $NB$  表示连铸模变的次数,  $NB_{\max}$  为同一个冶铸轧组合批中所允许的最大模变次数;约束(15)中  $NG$  表示异钢种连浇的次数,  $NG_{\max}$  为同一个冶铸轧组合批中所允许的最大

异钢种连浇次数, 约束(16) 是为了避免出现子回路

### 4 一体化组批模型求解

M PCTSP-TC 模型是选择和排序的综合问题, 它是典型的离散型组合优化NP 难问题 在求解这类问题方法中, 蚁群算法由于其分布式计算、鲁棒性等特点, 已被证明是极为有效的<sup>[8,9]</sup> 本文给出一种改进的蚁群算法——分组协同蚁群算法(Grouping Coordination ant Colony A lgorithm) 来求解一体化组批M PCTSP-TC 模型 算法步骤如下:

#### Step1 蚂蚁分组

将整个蚁群分成  $m_0$  组, 每组  $k_0$  只蚂蚁, 即蚂蚁总数为  $m = m_0 k_0$  蚂蚁在巡游时以组为单位, 组内  $k_0$  只蚂蚁分别从不同的  $k_0$  个节点出发, 协同工作, 且共用一个禁忌表, 以避免同组蚂蚁选择重复的节点  $k_0$  的大小依赖搜索空间的大小及规格分布, 首先预选一个较大值  $k_{max}$ , 经优化求解后, 若无法得到  $k_0$  个有效的组合批, 则令  $k_0 = k_0 - 1$ , 重新优化求解  $k_{max}$  由下式确定:

$$k_{max} = \text{int}(k_a \cdot RL / L_{min}). \quad (17)$$

式中: int 表示取整; RL 为全部元组的轧制长度总和;  $L_{min}$  为一个组合批带钢最小轧制长度;  $k_a$  为小于 1 的系数, 根据元组的规格分布设定

#### Step2 选择蚂蚁巡游起点

选择蚂蚁巡游起点就是选择主轧材开始节点 在算法中引入  $k_0$  个虚节点, 编号为  $n + 1, n + 2, \dots, n + k_0$  每次迭代时每组的  $k_0$  只蚂蚁分别从不同的虚节点出发, 虚节点的所有坐标值均为 0, 该点到其他节点的费用也为 0 该点到其他节点的边弧的权值为

$$\eta_{ij} = \frac{rw_j \cdot cw_j \cdot pr_i}{(B + rt_j) sq_j},$$

$$\forall i = n + 1, \dots, n + k_0, j = 0, 1, \dots, n. \quad (18)$$

式中  $B$  为一个较大的数, 为了平衡轧制厚度的级差, 算法中  $B$  取值 20 节点的优先级为 1, 2, 3, 4, 数字越大优先级越高, 前 3 级分别对应着表面质量级三、二、一, 紧急合同可以赋 4 级

#### Step3 蚂蚁开始巡游

蚂蚁在选择下一个节点时, 根据边弧信息素浓度和能见度作出概率选择 本文采用一种与真实蚁群更加相符的带有侦察子群的状态转移规则, 这样可以增加解的多样性, 有利于算法跳出局部最优 在有向图  $G = (V, A, T)$  中, 任意两节点  $i, j$  之间的距离为费用  $C_{ij}$ , 信息素的浓度为  $\tau_{ij}(t)$ ,  $t$  为迭代次数 第  $t$  代蚂蚁  $k$  的转移概率为

$$P_{ij}^k(t) =$$

$$\begin{cases} \frac{\eta_{ij}}{\sum_{l \in Z} \eta_{il}}, k \in S, Q < Q_0, j \notin Z; \\ \arg \max [ [\tau_{ij}^k(t)]^\alpha [\eta_{ij}^k]^\beta ], Q > Q_1, j \notin Z; \\ P_{ij}^k(t), \text{其他} \end{cases} \quad (19)$$

$$\eta_j = \begin{cases} \frac{rw_j \cdot cw_j \cdot pr_i}{(20 + rt_j) \cdot sq_j}, i = n + 1, \dots, n + k_0, \\ j = 0, 1, \dots, n; \\ \frac{pr_i}{1 + C_{ij}}, i = 1, 2, \dots, n, j = 0, 1, \dots, n. \end{cases} \quad (20)$$

式中:  $Z$  表示已访问过节点的集合;  $\eta_j$  称为边弧的能见度(权值);  $\alpha$  为信息素浓度的重要程度;  $\beta$  为能见度的相对重要程度;  $Q$  是一个  $[0, 1]$  随机变量, 在蚂蚁  $k$  选择下一个节点之前由随机试验获得,  $Q_0$  和  $Q_1$  是事先设定的阈值, 且  $Q_0 < Q_1, Q_0, Q_1 \in [0, 1]$ ;  $S$  是侦察子群 每个蚂蚁按以下流程完成周游:

- 1) 随机试验获得  $Q$ ;
- 2) 根据式(6) 确定活动节点集;
- 3) 如果本节点为虚节点, 则无需进行约束检查, 直接转 4); 否则依据约束(7) ~ (15), 从活动节点集中删除不满足约束条件的节点, 确保最后得出的解都是“合法”的解;

4) 蚂蚁  $k$  以式(19) 和(20) 计算转移概率, 在当前“合法”的活动节点集中选择下一个周游节点

循环进行 1) ~ 4), 直到蚂蚁  $k$  的周游长度满足背包限制条件(10), (11), 或合法活动节点集为空 所有的蚂蚁都完成一次周游后, 完成一次迭代

#### Step4 寻找精英蚂蚁组

计算并记录本代精英蚂蚁组(评价值最小的蚂蚁组) 及对应的最经济巡游路径

#### Step5 信息素更新

每进行一次迭代后, 只有精英蚂蚁组在它们访问过的边弧  $\text{arc}(i, j)$  上释放信息素 边弧信息素更新公式为

$$\tau_{ij}(t + 1) = \rho \cdot \tau_{ij}(t) + \Delta\tau_{ij}(t), \quad (21)$$

$$\Delta\tau_{ij}(t) = \begin{cases} 1/C_{min}(t), \text{精英蚂蚁组访问过 } \text{arc}(i, j); \\ 0, \text{其他} \end{cases} \quad (22)$$

式中:  $\Delta\tau_{ij}(t)$  表示第  $t$  代精英蚂蚁组访问过支路  $\text{arc}(i, j)$  后释放的信息浓度,  $\rho$  为信息素挥发因子,  $0 < \rho < 1$ ;  $C_{min}(t)$  表示第  $t$  代精英蚂蚁组评价值, 用式

(3) 计算

#### Step6 迭代终止判断

判断是否满足迭代终止条件, 满足, 转 Step 7; 否则转 Step 3, 重复进行蚂蚁周游

#### Step7 局部优化后输出最优解



经上述优化后, 会得到满足约束的较好的若干个组合批, 但也有可能会出现相同规格的元组过于分散在不同的组合批中。为了尽可能将相同规格的元组集中生产, 需要在组合批与组合批、组合批与剩余元组之间交换元组。交换规则如下:

1) 从第1个组合批开始, 依次与后面的组合批进行元组交换; 然后再与剩余元组交换

2) 交换时, 寻找对应的相同或相似片断, 在对应位置分别互换

3) 互换后的组合批必须满足模型所有约束, 且总评价值减小, 否则禁止互换

## 5 计算结果及分析

为验证一体化组批模型及算法, 对某冶金企业2005年4月份合同进行模拟。从该月合同中选出可以直装钢种67 000 t作出中期(5日)合同计划, 去掉只能作为烫辊材的合同后, 对选出的合同(虚拟板坯)进行聚类, 将钢级、浇铸宽度、表面质量级、轧制

宽度、轧制厚度相同、优先级和交货期相近的虚拟板坯按转炉公称重量(250 t)组合成一个炉次, 不够整炉的用无委材填充, 共组成240炉。其中: 37炉SPA-H, 129炉Q345A, 74炉SPHC。

模型中主要参数设定如下: 主轧材长度 30 km; 整个组合批(不包括烫辊材部分)长度为95~105 km; 同宽公里数限制为30 km; 逆宽轧制公里数限制为10 km; 不允许异钢种连浇, 中间包经济炉数为7~11; 一个浇次最多允许模变一次, 且从宽到窄, 最大模变量为150 mm。组合批内连铸单元与热轧单元的比率为2:1。铸机模变、异钢种连浇及宽度、厚度、硬度跳跃成本列表(略)。所有的轧制长度均为当量长度。

蚁群算法主要参数设定如下:  $\alpha=1, \beta=5, \rho=0.9, m_0=10, Q_0=0.3, Q_1=0.9$ , 迭代次数为炉次数的2倍。用C++语言在PIII733MHz计算机上求解, 计算结果如表1和表2所示。

表1 DHCR/DR 组合批(不包括烫辊材部分)编制结果

钢种	总重量/t	总长度/km	总炉数	组批个数	剩余长度/km	剩余炉数	组批率/%	最大长度/km	最小长度/km	平均长度/km	计算时间/s	平均时间/s
SPA-H	8 500	233.2	37	2	29.6	4	89.2					
Q345A	32 250	813.6	129	8	8.9	1	99.2	104.9	95.4	101.7	134	9.6
SPHC	18 500	459.4	74	4	44.3	6	91.9					
合计	60 000	1 506	240	14	82.8	11	95.4					

表2 优化结果中某个典型组合批组成(不包括烫辊材部分)

序号	钢种	浇铸宽度/mm	轧制宽度/mm	轧制厚度	表面质量级	优先级	炉数	重量/t	实际轧制长度/km	当量长度/km
1	Q345A	1 700	1 700	8	1	3	4	1 000	9.4	15.7
2	Q345A	1 700	1 650	7	1	3	2	500	5.6	9.2
3	Q345A	1 700	1 600	6	2	2	3	750	10.0	14.3
4	Q345A	1 550	1 550	5	2	2	5	1 250	20.7	29.5
5	Q345A	1 550	1 535	7	2	2	5	1 250	14.5	24.8
6	Q345A	1 550	1 520	5.65	2	2	2	500	7.5	10.7
合计							21	5 250	67.7	104.2

由表1可以看出, 可以同时排出14个组合批, 组批率达到95.4%, 且每个钢种剩余炉数都很少, 剩余长度都不足以再组成一个组合批, 由此判定该模型及算法可以最大程度地求出有效的组合批; 排出一个组合批平均计算时间为9.6 s, 而人工排出一个组合批一般需要30~60 min, 计算速度较快。由组合批编制结果及表1和表2可知, 轧制宽度、轧制厚度和轧制硬度都满足跳跃规范, 轧制长度都在总轧制长度约束范围内, 且最大限度地接近轧制计划的最大能力, 这有利于充分发挥轧线的生产能力; 同时钢种连浇、铸机模变都满足规范, 连浇炉数都在中间包经济炉数范围内, 这有利于充分发挥铸机产能和节约中间包成本。

## 6 结 语

本文分析了基于直接热装(DHCR)和直轧(DR)工艺的一体化生产中冶铸轧一体化组批问题, 建立了基于并行策略的M PCTSP-TC组批模型。该模型不仅考虑了轧制工序对轧制宽度、轧制厚度、硬度的跳跃及各种轧制长度约束, 而且考虑了异钢种连浇、铸机模变约束, 同时考虑了合同表面质量要求及优先级要求。鉴于DHCR/DR工艺的特殊性, 将组合批中烫辊材集中编制, 以降低问题的难度。构造了分组协同蚁群算法, 并用其对模型进行求解。实际生产数据排产结果表明, 本文建立的模型和算法可以同时求出若干个较优组合批, 计算速度较快, 可应用于生产实际。该模型简化后可推广到其他诸如CSP或窄带生产线。(下转第990页)

- accuracy in Fuzzy Modeling: An Overview [A] *Chapter of Interpretability Issues in Fuzzy Modeling* [C] Springer, 2003: 3-22
- [4] Jin Y. *Advanced Fuzzy Systems Design and Applications* [M] New York: Physical-verl, 2003
- [5] Kaynak O, Jezernik K, Szeghegyi A. Complexity Reduction of Rule Based Models: A Survey [A] *Proc of IEEE Int Conf on Fuzzy Systems* [C] Honolulu, 2002: 1216-1222
- [6] Guillaume S. Designing Fuzzy Inference Systems from Data: An Interpretability-oriented Review [J] *IEEE Trans on Fuzzy Systems*, 2001, 9(3): 426-443
- [7] Jin Y, Seelen von W, Sendhoff B. An Approach to Rule-based Knowledge Extraction [A] *Proc IEEE Conf Fuzzy System* [C] Alaska, 1998: 1188-1193
- [8] Setnes M, Babuska R, Kaymak U, et al Similarity Measures in Fuzzy Rule Base Simplification [J] *IEEE Trans on Systems Man and Cybernetics*, 1998, 28(3): 376-386
- [9] Ishibushi H, Nakashima T, Murata T. Performance Evaluation of Fuzzy Classifier Systems for Multidimensional Pattern Classification Problems [J] *IEEE Trans on Systems, Man, and Cybernetics — Part B: Cybernetics*, 1999, 29(5): 601-618
- [10] Michalewicz Z. *Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs* [M] 3rd ed Heidelberg: Springer-Verlag, 1996
- [11] Paredis J. *Coevolutionary Computation, Artificial Life 2* [M] MIT Press, 1995: 355-375
- [12] Potter M A, De J K A. Cooperative Coevolution: An Architecture for Evolving Coadapted Subcomponents [J] *Evolutionary Computation*, 2000, 8(1): 1-29
- [13] Carlos Andres Pena-Reyes, Moshe Sipper. Fuzzy CoCo: A Cooperative Coevolutionary Approach to Fuzzy Modeling [J] *IEEE Trans on Fuzzy Systems*, 2001, 9(5): 727-737.
- [14] Gustafson D, Kessel W. Fuzzy Clustering with a Fuzzy Covariance Matrix [A] *Proc of IEEE Conf on Decision and Control* [C] San Diego, 1979: 761-766
- [15] Corcoran A L, Sen S. Using Real-valued Genetic Algorithms to Evolve Rule Sets for Classification [A] *Proc 1st IEEE Conf on Evolutionary Computation* [C] Orlando, 1994: 120-124

(上接第983页)

## 参考文献(References)

- [1] Park H, Hong Y, Chang S Y. An Efficient Scheduling Algorithm for the Hot Coil Making in the Steel Mill [J] *Production Planning and Control*, 2002, 13(3): 298-306
- [2] Tang L X, Liu J Y, Rong A Y, et al A Multiple Traveling Salesman Problem Model for Hot Rolling Scheduling in Shanghai Boshan Iron and Steel Complex [J] *European J of Operational Research*, 2000, 124(2): 267-282
- [3] 李耀华, 王伟, 徐乐江, 等 热轧生产轧制计划模型与算法研究 [J] *控制与决策*, 2005, 20(3): 275-279  
(Li Y H, Wang W, Xu L J, et al Rolling Plan Model and Algorithm in Hot Rolling Plant [J]. *Control and Decision*, 2005, 20(3): 275-279.)
- [4] Peter C, Wafa R. Integration of Continuous Caster and Hot Strip Mill Planning for Steel Production [J] *J of Scheduling*, 2000, 3(4): 185-208
- [5] 朱宝琳, 于海斌 冶铸轧生产调度模型及算法研究 [J] *计算机集成制造系统*, 2003, 9(1): 33-36  
(Zhu B L, Yu H B. Production Scheduling Model and Algorithm for Steel Making-continuous Casting-hot Rolling Processes [J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2003, 9(1): 33-36)
- [6] 吕志民, 徐金梧 一种适用于热送热装生产计划优化的方法 [J] *北京科技大学学报*, 2002, 24(6): 675-678  
(Lv Z M, Xu J W. Optimization Method for Hot Charge Rolling Manufacture Plan [J] *J of University of Science and Technology Beijing*, 2002, 24(6): 675-678)
- [7] 郑秉霖, 胡琨元, 常春光 一体化钢铁生产计划系统的研究现状与展望 [J] *控制工程*, 2003, 10(1): 6-10  
(Zheng B L, Hu K Y, Chang C G. Status and Expectation of Research on Integrated Planning for Steel Production [J]. *Control Engineering of China*, 2003, 10(1): 6-10)
- [8] Marc Gravel, Wilson L Price, Caroline Gagne. Scheduling Continuous Casting of Aluminum Using a Multiple Objective Ant Colony Optimization Metaheuristic [J] *European J of Operational Research*, 2002, 143(1): 218-229
- [9] Merkle D, Middendorf M, Schneck H. Ant Colony Optimization for Resource-constrained Project Scheduling [J] *IEEE Trans on Evolutionary Computation*, 2002, 6(4): 333-346