

# 炼钢 — 连铸 — 热轧生产计划编制的统一模型及智能算法

郑 忠<sup>1)</sup>, 刘 怡<sup>1)</sup>✉, 陈 开<sup>1)</sup>, 高小强<sup>2)</sup>

1) 重庆大学材料科学与工程学院, 重庆 400030      2) 重庆大学经济与工商管理学院, 重庆 400030

✉ 通信作者, E-mail: liuyi61616@163.com

**摘 要** 为使钢铁企业主体工序炼钢—连铸—热轧之间的生产协调有序、提高生产计划水平和加强生产资源配置效益, 运用统一建模思想进行轧制单元计划、炉次计划和浇次计划的抽象描述, 从注重共性的角度统一各阶段批量计划的目标函数, 通过对目标函数的组合来实现各阶段计划的有效衔接. 设计基于 Multi-agent 的协同进化算法进行模型求解, 编制炼钢—连铸—热轧一体化计划. 以某钢铁企业的生产计划制定实例进行模型测试, 仿真计算结果表明模型的有效性.

**关键词** 钢铁厂; 生产控制; 计划编制; 进化算法; 多智能体系统

**分类号** TF087; F406.2

## Unified modeling and intelligent algorithm of production planning for the process of steelmaking, continuous casting and hot rolling

ZHENG Zhong<sup>1)</sup>, LIU Yi<sup>1)</sup>✉, CHEN Kai<sup>1)</sup>, GAO Xiao-qiang<sup>2)</sup>

1) College of Material Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China

2) College of Economics and Business Administration, Chongqing University, Chongqing 400030, China

✉ Corresponding author, E-mail: liuyi61616@163.com

**ABSTRACT** In order to make mutual coordination in the main process of steelmaking, continuous casting and hot rolling, improve the production plan level and enhance resource allocation benefits in steel enterprises, a unified model was applied to describe the rolling plan, charge plan and cast plan. Meantime, object functions during various plans were integrated from the perspective of universality to connect the production plan in each stage. The model was solved to make the integrated planning by a designed co-evolutionary algorithm based on a multi-agent system. Model test was performed in a steel enterprise according to its production plan, and the simulation results show that the model is effective.

**KEY WORDS** iron and steel plants; production control; planning; evolutionary algorithms; multi-agent systems

钢铁生产规模大、流程复杂、工序间衔接紧密, 并且以满足多品种、小批量、高质量的大量生产订单的市场要求来组织生产. 在生产运行过程中, 计划水平高低直接影响到基于流程的生产运行效率的高低, 合理进行订单管理、有效配置生产资源以及制定可行生产计划, 有利于提高设备利用率和加强各阶段生产的协调. 作为生产关键工序的炼钢—连铸—热轧一体化生产批量计划更是至关重要.

国内外研究者在炼钢—连铸—热轧一体化生产计划编制方面已做了一些工作, 如 Cowling 和 Rezig<sup>[1]</sup> 引入“虚拟板坯”使连铸和热轧相关联, 运用数学规划和启发算法对所建立的网络模型进行求解; Park 等<sup>[2]</sup> 以小型钢铁厂为研究对象把炼钢—连铸—热轧调度问题分解为炉次、浇次和轧制单元三个独立的子问题, 并运用启发式算法分别求解; 刘青等<sup>[3]</sup> 针对特钢流程连铸—轧钢工序提出基于规

收稿日期: 2011-12-11

基金项目: 国家高技术研究发展计划资助项目 (2007AA04Z161); 国家自然科学基金钢铁联合基金资助项目 (50574110); 重庆市科技攻关重点项目 (CSTC2011AB3053)

则的启发式算法求解计划排产问题;孙福权等<sup>[4]</sup>采用模糊专家系统和运筹学模型的混合算法对一体化管理的生产计划编制匹配问题进行研究;孙玲等<sup>[5]</sup>运用启发式算法和参数控制策略对炼钢—连铸—热轧一体化生产批量计划进行研究;马天牧等<sup>[6]</sup>提出基于模型控制和参数控制的两环控制策略来解决冶铸轧一体化批量计划编制问题;张文学和李铁克<sup>[7]</sup>将板坯分类组合形成元组,给出了一体化编制策略并建立基于粒子群的问题约束满足优化模型.这些代表性工作主要是针对特定问题的解决方案,而在关于此类问题建模方法的共性化特征研究方面还有待更深入的探讨,以拓展模型方法的适应性.

本文是从炼钢—连铸—热轧一体化批量计划模型的通用性出发,根据统一建模的思想,将各阶段重要的约束归纳成生产能力、品种质量规格的约束和各阶段间的衔接约束,以目标函数惩罚的方式来建立其目标函数,既可通过附加项的组合在同时满足轧制单元计划、炉次计划和浇次计划生产约束条件下来实现一体化计划编制,也可实现单一的计划编制.对于模型的求解设计了引入基于 Multi-agent 的协同进化算法,编制出各阶段相互独立又耦合的一体化生产计划.力求通过对一体化批量计划共性问题的把握,建立一个有较强适用性的模型,既能进行炼钢—连铸—热轧一体化计划编制,又能体现各分段计划特点,满足各具体分段计划编制的要求.

1 炼钢—连铸—热轧过程生产问题描述及模型建立

1.1 问题描述

在钢铁生产工艺流程中炼钢—连铸—热轧是最重要的三大工序,由于板坯热轧的连续性要求高,因此本文的热轧主要针对热轧带钢而言.各工序不仅有着顺序加工特点(如图 1 所示),还存在着物流平衡、能量平衡和时间平衡,需要将这三个阶段工序实现一体化的管理.

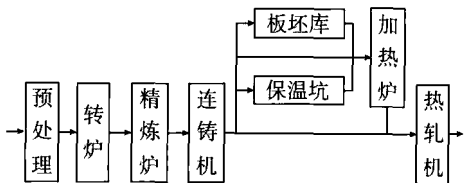


图 1 炼钢—连铸—热轧流程的生产工艺

Fig.1 Manufacturing process of steelmaking, continuous casting and hot rolling

在各阶段生产过程中,主物流的表现形式分别

是钢水、钢坯(板坯)和钢材(带钢);并且各阶段的作业方式不同.炼钢阶段对转炉和精炼炉为间歇式生产,连铸机为多炉连浇的准连续式生产,热轧机为带约束的板坯的准连续式生产.因此在编制一体化生产批量计划时不仅需要满足各阶段工艺要求的约束,而且需要考虑各阶段的物流变化与衔接,将板坯作为物流统一描述的最小单元,一个炉次可视为多块“虚拟板坯”构成,而一个浇次由多个炉次组成,从而可统一物流的表征形式.炼钢—连铸—热轧各工序的生产计划的主要约束<sup>[8-9]</sup>包括以下几个方面.

(1) 轧制单元的生产约束:一个轧制单元最大轧制长度(重量);同宽度轧制长度(重量);宽度非增跳跃;厚度平稳变化;硬度平稳跳跃;交货期内完工.

(2) 组炉的生产约束:炉容限制;钢级相同;板坯宽度一致;厚度一致;无委材最小化;交货期相近并在交货期内完工.

(3) 组浇的生产约束:组成同一浇次的炉次之间钢级差异在一定范围内;炉次之间的板坯厚度相同;板坯的宽度变化在一定范围内且非增;连浇炉数限制;交货期内完工.

根据上述约束条件的物流组织过程对应于轧制单元计划<sup>[10]</sup>、炉次计划和浇次计划<sup>[11]</sup>,当编制一体化批量计划时,需要同时考虑自身约束和工序间的衔接-匹配关系.

1.2 生产批量计划统一模型建立

生产批量计划是以生产合同计划为输入,根据生产合同安排设定时间内的生产任务.钢铁生产批量计划优化属于约束优化问题,针对炼钢—连铸—热轧一体化生产批量计划编制特点,根据 1.1 节对一体化批量计划编制的三个不同阶段计划的约束分析,进行归类抽象描述,将容量限制作为强制约束条件,其他优化目标相关的约束转换为相应模型的目标函数进行统一建模,即将基于约束的轧制单元计划、炉次计划和浇次计划的优化目标统一成三个方面:(1) 生产能力,使其生产能力最大化;(2) 对品种质量规格的要求,满足生产工艺条件;(3) 时间匹配和品种质量规格的匹配,使各阶段生产相互衔接.

建立各阶段批量计划的数学模型为

$$\begin{cases} \min f_i = f_i(1) + f_i(2) + f_i(3), \quad i = 1, 2, 3; & (1) \\ \text{s.t. 物流对象的容量限制等.} & (2) \end{cases}$$

式(1)中, $f_i(1)$ 、 $f_i(2)$ 分别为对应热轧、炼钢和连铸各阶段不同的生产能力、品种质量规格要求的目标, $f_i(3)$ 为各阶段不同计划间协同性衔接关系的目

标, 具体描述如表 1 所示. 本文一体化生产计划编制顺序是从产品角度出发, 先制定轧制单元计划, 再炉次计划, 最后浇次计划. 通过引入  $f_i(3)$  实现了制定轧制单元计划时考虑炉次计划, 制定炉次计划时考虑浇次计划, 制定浇次计划时考虑轧制单元计划, 使得炼钢 — 连铸 — 热轧三个阶段的计划有机的衔接, 从而形成一体化生产批量计划. 在计划编制过程中, 若只考虑主目标函数  $f_i(1)$  和  $f_i(2)$ , 不考虑目标函数  $f_i(3)$  则可独立编制炉次、浇次和轧制单元计划.

数学模型中除式 (1) 的目标函数外, 还需要考虑式 (2) 的强制约束条件, 如表 2 所示.

表 1 统一建模的目标函数

Table 1 Objective functions of the unified model

$f_i$	$f_i(1)=\omega \sum_{h=1}^N (U-\sum_{i=1}^N X_{ih})$	$f_i(2)=\sum_{h=1}^N \sum_{i=1}^N \sum_{j=1, i \neq j}^N C_{ij} Y_{ijh}$	$f_i(3)=\omega (\sum_{i=1}^N (1-\sum_{h=1}^N Z_{ih})+\sum_{q=1}^Q \text{mod}(U_q, U))$
轧制单元计划, $f_1$	每个轧制单元轧制总长度最大化, 即轧制总长度与最大轧制长度差值最小化; $N$ : 合同板坯数; $U$ : 轧制单元最大总长度 (重量); $X_{ih}$ : 板坯 $i$ 编制在轧制单元 $h$ 中的重量, $X_{ih} = w_i x_{ih}$ , 当板坯 $i$ 编制在轧制单元 $h$ 中时 $x_{ih}$ 值为 1, 否则为 0	不满足轧制单元生产工艺要求惩罚; $Y_{ijh}$ : 轧制单元 $h$ 中板坯 $j$ 紧邻板坯 $i$ 后值为 1, 否则为 0; $C_{ij}$ : 轧制单元中板坯 $j$ 紧跟板坯 $i$ 的惩罚综合系数, $C_{ij} = \begin{cases} \infty, & \text{if } i=j; \\ a W_i-W_j +b H_i-H_j +c G_i-G_j , & \text{if } i \neq j; \end{cases}$ $W_i$ 、 $H_i$ 和 $G_i$ 分别为板坯 $i$ 轧制的宽度、厚度和硬度	预定时间段内和不满足编制轧制单元最小轧制长度约束而未被选中的带钢惩罚、相同品种和规格的板坯重量达到组炉后炉次的最大炉容限制后剩余板坯重量的惩罚; $Z_{ih}$ : 板坯 $i$ 编制在轧制单元 $h$ 中时值为 1, 否则为 0; $Q$ : 组炉后炉次的品种和规格数; $U_q$ : 相应规格 $q$ 对应的板坯重量; $U$ : 炉次最大炉容
炉次计划, $f_2$	每炉按合同生产量最大化, 即转化为无委材生产最小化; $N$ : 合同板坯数; $U$ : 炉次最大炉容; $X_{ih}$ : 板坯 $i$ 编制在炉次 $h$ 中的重量, $X_{ih} = w_i x_{ih}$ , 当板坯 $i$ 编制在炉次 $h$ 中时 $x_{ih}$ 值为 1, 否则为 0, $w_i$ 为板坯 $i$ 的重量	不满足板坯组炉生产工艺要求惩罚; $Y_{ijh}$ : 板坯 $i$ 和板坯 $j$ 编制在炉次 $h$ 中时值为 1, 否则为 0; $C_{ij}$ : 板坯 $i$ 和板坯 $j$ 组合在一个炉次中的惩罚综合系数, $C_{ij} = \begin{cases} \infty, & \text{if } i=j; \\ d S_i-S_j +e W_i-W_j +f H_i-H_j , & \text{if } i \neq j; \end{cases}$ $S_i$ 、 $W_i$ 和 $H_i$ 分别为板坯 $i$ 的钢种、宽度和厚度	预定时间段内和不满足组炉的最小炉容约束而未被选中的板坯惩罚、相同品种和规格的炉次达到浇次最大炉次限制后剩余炉次数惩罚; $Z_{ih}$ : 板坯 $i$ 编制在炉次 $h$ 中时值为 1, 否则为 0; $Q$ : 组炉后炉次的品种和规格数; $U_q$ : 相应品种规格 $q$ 的炉数; $U$ : 一个浇次的最大连浇炉数
浇次计划, $f_3$	每个浇次按连浇炉数与最大连浇炉数差值最小化; $N$ : 炉次数; $U$ : 浇次最大连浇炉数; $X_{ih}$ : 炉次 $i$ 编制在浇次 $h$ 中时值为 1, 否则为 0	不满足连浇的生产工艺要求惩罚; $Y_{ijh}$ : 炉次 $i$ 和炉次 $j$ 编制在浇次 $h$ 中时值为 1, 否则为 0; $C_{ij}$ : 炉次 $i$ 和炉次 $j$ 组合在一个浇次中的惩罚综合系数, $C_{ij} = \begin{cases} \infty, & \text{if } i=j; \\ g SH_i-SH_j +h WH_i-WH_j , & \text{if } i \neq j; \end{cases}$ $SH_i$ 和 $WH_i$ 分别为炉次 $i$ 的钢种和浇铸宽度	预定时间段内和不满足连浇的最小炉次数约束而未被选中的炉次惩罚、相同规格的浇铸板坯重量达到轧制单元内同宽度带钢轧制的最大长度限制后剩余板坯惩罚; $Z_{ih}$ : 炉次 $i$ 编制在浇次 $h$ 中时值为 1, 否则为 0; $Q$ : 浇铸的板坯的规格数; $U_q$ : 相应规格 $q$ 对应的板坯重量; $U$ : 轧制单元内轧制同宽度带钢的最大长度 (重量)

注: mod(,) 为求余函数,  $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$ 、 $e$ 、 $f$ 、 $g$ 、 $h$  和  $\omega$  分别为其对应的系数.

表 2 统一模型的约束条件

Table 2 Constraint condition of unified model

计划	约束	说明
轧制单元计划	$L_R \leq \sum_{i \in N} w_i z_{il} \leq U_R, \sum_{i \in N} w_i z_{il} \leq U'_R$	一个轧制单元的最小 ( $L_R$ ) 和最大 ( $U_R$ ) 轧制总长度 (重量) 限制; 同宽度带钢轧制的最大 ( $U'_R$ ) 长度 (重量) 限制
炉次计划	$L_H \leq \sum_{i \in N} w_i x_{ih} \leq U_H$	一个炉次中的最小 ( $L_H$ ) 和最大 ( $U_H$ ) 炉容限制
浇次计划	$L_C \leq \sum_{i \in N} y_{ik} \leq U_C$	一个浇次中的最小 ( $L_C$ ) 和最大 ( $U_C$ ) 炉次数限制

## 2 算法设计

炼钢—连铸—热轧一体化计划编制是 NP (non-deterministic polynomial) 难问题, 传统的算法难以有效地求解. 随着近年来智能算法的发展和良好的应用效果, 本文根据钢铁生产计划问题本质上的分阶段性、复杂性而采用与之适应的基于 Multi-agent 系统架构的协同进化算法来进行统一求解.

### 2.1 Multi-agent 系统实现架构

Multi-agent 系统是一种分布式自主系统, 它特别适用于多个实体相互共同求解某个共同的问题. 本文利用 Multi-agent 系统的层次化结构<sup>[12]</sup>来构架一体化计划编制模型的求解算法. 当编制一体化生产计划时, 需要集成化的轧制单元、炉次和浇次编制的优化方案, 不追求局部每个计划的目标惩罚最小化, 而寻求一体化生产批量计划的全局优化.

基于 Agent 的建模是一种由底而上的建模方法. Agent 是整个系统的基本抽象, 把一体化计划编制模型抽象为轧制单元 Agent、炉次 Agent 和浇次 Agent, 并由管理 Agent 以最小化各 Agent 的目标函数进行调整, 如图 2 所示, 各 Agent 按其自身目标函数  $f_i(1)$  和  $f_i(2)$  并通过  $f_i(3)$  来协同相对应的 Agent. 轧制单元 Agent 与炉次 Agent 的目标协同后经协同进化算法制定轧制单元计划, 炉次 Agent 与浇次 Agent 的目标协同后经协同进化算法制定炉次单元计划, 浇次 Agent 与轧制单元 Agent 的目标协同后经协同进化算法制定浇次计划.

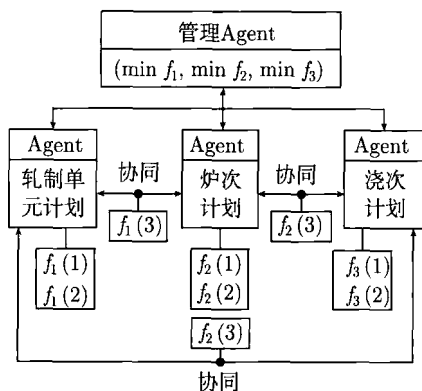


图 2 基于 Multi-agent 的一体化批量计划目标间协同关系

Fig.2 Coordination of integrated batch plan objectives based on multi-agent

### 2.2 协同进化算法

协同进化<sup>[13-14]</sup>是将待求解的问题映射为相互作用的各子群组成的系统, 在进化过程中通过对个体评价时采用相对适应值计算, 从而达到整个群体协同进化的目的. 协同进化的特点正好与 Multi-agent 系统的特点相适应, 因此把两者相集成来解

决一体化计划编制问题, 其中轧制单元 Agent、炉次 Agent 和浇次 Agent 内部的子群组合成协同进化算法中的三个子群, 各子群内染色体分别表征轧制单元、炉次和浇次计划. 通过合作型协同进化的方法来代替传统 Multi-agent 间的合同网协议方法, 实现 Multi-agent 系统的协作功能. 把协同进化算法中的每个子群作为具有局部感知和协作的 Agent, 在进化过程中, 各 Agent 内部的子群依次进化, 进化的子群为 Agent 提供行为决策支持, 即子群中适应度值最大的染色体决定了该 Agent 的行为选择, 子群的进化不断调整 Agent 的行为代表, 并由管理 Agent 对各 Agent 计划目标函数的调整来达到一体化计划编制的全局优化的目的, 最终联合各 Agent 内保存的最优个体得到所求解问题的一个完整解.

参与协作的轧制单元 Agent、炉次 Agent 和浇次 Agent 都拥有一个独立的进化算法的种群, 其中遗传操作如下.

(1) 染色体编码方式: 轧制单元计划编制是以预定周期的合同池内生产合同为输入对象, 轧制子群中染色体内基因表示为生产合同的板坯序号, 其长度为合同池内板坯数量; 炉次计划编制以轧制单元子群染色体为输入对象, 炉次子群中染色体内基因表示为板坯序号, 其初始长度为轧制子群染色体长度, 浇次子群中的染色体内基因则是由炉次子群的炉次所构成, 其染色体基因长度为相对应炉次子群中染色体所表示的炉次数.

(2) 遗传算子: 交叉算子采用两点交叉方式, 即在两条染色体内随机地在基因长度范围内产生两个交叉点, 并将位于交叉点之间的基因段互换. 变异算子采用两点变异方式, 即在一条染色体内随机地在基因的长度范围内产生两个变异点, 并将选中的变异点交换位置.

(3) 适应度函数: 采用统一建模中各阶段对应的优化函数目标值联合其他计划共同求得相对适应度值.

(4) 选择机制: 采用精英选择和轮盘赌选择相结合的混合策略.

炼钢—连铸—热轧一体化生产批量计划编制其流程如图 3 所示.

算法详细实现步骤如下.

Step 1: 初始化算法参数及染色体, 以生产合同池内一定时间内完工的生产合同为输入条件, 用生产合同带钢序列号随机初始化轧制单元子群, 需满足轧制单元约束条件.

Step 2: 轧制单元子群进行遗传操作, 其中相

邻轧制对象按宽度、厚度和硬度的顺序进行罚值计算, 保留较优子代。

Step 3: 以轧制单元子群中较优子代随机初始化炉次子群, 执行炉次子群的遗传操作, 保留较优子代。

Step 4: 利用炉次子群中较优子代随机初始化浇次子群, 执行浇次子群的遗传操作。

Step 5: 对各子群对应的目标函数进行综合评价, 判断达到进化代数则终止算法, 得到最优轧制单元计划、炉次计划和浇次计划组合而成的一体化计划; 否则跳转到 Step 2, 进行下一次协同进化算法。

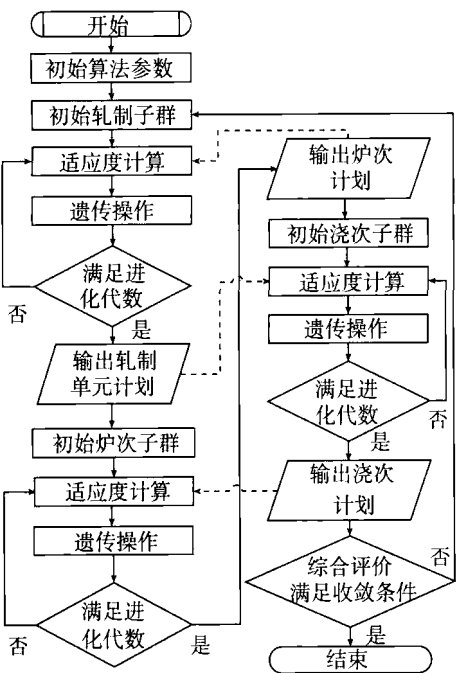


图 3 一体化生产批量计划编制模型算法求解流程图

Fig.3 Flow chart of solving the model for integrated batch planning

2.3 进化操作中不可行染色体修复策略

由于进化算法的初始种群建立、交叉和变异算子的随机性, 可能所得到的子代染色体不能满足生产工艺的强制约束而导致该子代染色体成为不可行解, 因此使用附加的修复策略, 将不可行解转换为可行解, 具体修复方法如下。

Step 1: 在该计划编制的染色体内以基本单元 (一个轧制单元、炉次或浇次) 为单位, 按基本单元的容量按从大到小进行排序, 选中违反容量限制的基本单元 A。

Step 2: 在基本单元 A 中, 从小到大搜索选择一个物流对象 a 待修复,  $C=\{a\}$ , 其重量大于该基本单元中超出容量限制的那部分多余重量且

适当考虑物流对象 a 与其前后基因之间关系形成的惩罚值较大; 如果未找到这样的生产物流对象, 则选择多个重量较小的生产物流对象形成对象集  $C=\{a,b,\cdots\}$ , 直到该基本单元满足最大容量限制要求。

Step 3: 将取出的生产物流对象集 C 中的物流对象 a 与其他基本单元中最小的生产物流对象 q 进行互换, 然后进行重新判断是否满足约束条件, 如果互换后都满足约束要求并且  $C=\emptyset$  则转向 Step 4; 否则直接将物流对象 a 插入到离满足最大容量限制最远的一个基本单元中相应基因位上, 如果  $C\neq\emptyset$  则转向 Step 3。

Step 4: 如果所有基本单元都满足约束要求, 则修复结束; 否则转向 Step 1。

3 仿真实例

本文以某钢铁联合企业为研究对象进行测试。目前该企业对应板坯生产线拥有三座有效容量 130~140 t 转炉、两台铸机和一条热轧生产线, 热轧机组单位产能 350~450 t·h<sup>-1</sup>, 实际作业率在 60%~80%, 轧制单元长度限制 60 km。系统使用 VC++ 编程实现算法, 以某天批次实际生产合同共 457 卷带钢对应的板坯为模型, 输入条件如表 3 所示。

表 3 生产合同参数规格

Table 3 Parameters of production contracts

钢种	板坯数	宽度/mm	厚度/mm	硬度等级
Q235A	110	1050~1250	1.4~4.0	21
Q235B	168	1000~1250	1.5~3.0	21
DX51D+Z	119	930~1100	1.0~1.8	11
St12	29	1000~1175	1.5~2.5	11
St13	31	1100~1240	1.8~4.0	11

仿真过程中协同进化算法参数设置: 每个子群大小为 30, 交叉概率为 0.9, 变异概率为 0.04, 最大协同进化代数为 50, 在 CPU Intel T5470 1.6 GHz, 2 GB 内存, Windows XP 系统的环境下进行多次实验, 该算法能在 3 min 内完成得到 6 个轧制单元计划、63 个炉次计划和 7 个浇次计划, 而人工编制一体化生产计划则需要约 45 min。

在充分满足各阶段生产工艺约束的条件下, 该系统模型运行制定的一体化生产计划中, 由实验结果表 4 和表 5 可知, 经优化协调后编制出 6 个轧制单元及轧制单元板坯数, 平均轧辊利用率达到了 96.5%, 较实际生产过程轧辊的平均利用率 91.6%略高; 所编制出的 7 个浇次、63 个炉次及浇次对应的

炉次, 浇次计划中连浇炉数最大为 10 炉, 最小为 8 炉, 满足中间包经济生产炉数, 在浇次内所有炉次所形成的最大无委材约为 52.2 t, 所得数据满足实际组炉组浇工艺约束. 图 4 所表示的某轧制单元计划主体材轧制宽度和厚度的变化情况, 满足轧制生产工艺约束. 仿真实例计算结果检验了模型和算法的合理性、可行性和有效性.

表 4 轧制单元计划结果表  
Table 4 Result of rolling units planning

轧制单元序号	板坯数	轧制单元长度/km	轧辊平均利用率
1	76	58.32	96.5%
2	76	57.54	
3	77	58.15	
4	75	57.11	
5	77	58.68	
6	76	57.82	

表 5 炉次 - 浇次计划结果表  
Table 5 Result of charge-cast planning

浇次序号	炉次数	浇铸宽度/mm	钢种	无委材/t
1	9	1250	Q235A	19.8
2	10	1150	Q235A/B	
3	9	1250	Q235B	38.1
4	10	1150	Q235B	
5	8	1150	DX51D+Z	13.5
6	8	1150	DX51D+Z	
7	9	1250	St12/St13	52.2

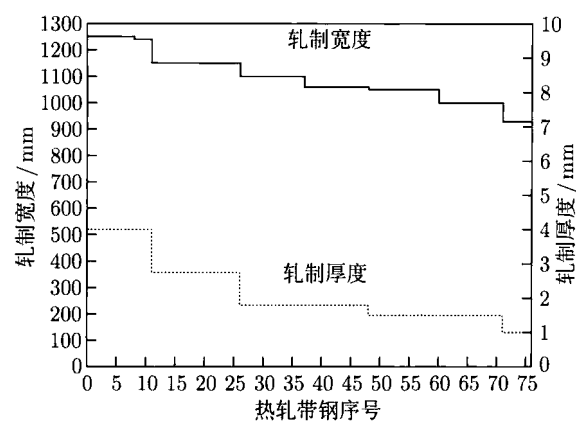


图 4 某一轧制单元宽度和厚度变化

Fig.4 Change in width and thickness of one rolling unit

对国内冶铸轧一体化计划编制相关文献进行比较和分析, 可以看出文献 [7] 和文献 [8] 以元组为基础从全局优化角度系统地制定出一体化批量计划, 模型目标考虑了轧制和连浇约束, 简化了炉次计划, 该建模思路的模型的适应性可能会受到限制. 本系统采用适应性较强的统一建模研究方法, 编制的轧制单元计划、炉次计划和浇次计划能充分发挥

各阶段产能最大化, 增加各阶段物流的衔接性, 减少无委材, 提高生产作业率, 实现冶铸轧一体化生产批量计划的编制.

4 结论

(1) 通过对炼钢 — 连铸 — 轧制生产工艺过程的约束分析, 运用统一建模思想把轧制单元计划、炉次计划和浇次计划的共性归纳表征为统一的三个目标函数, 即生产能力、满足生产工艺条件的品种质量规格的要求、各阶段间的时间匹配和品种质量规格的匹配, 以及统一模型中需考虑的以各阶段物流对象的容量限制为代表的强制约束条件.

(2) 采用基于 Multi-agent 的协同进化算法来对模型进行求解, 协同进化的三个子群分别对应三个 Agent 并进行独立的遗传操作, 由管理 Agent 基于目标函数的评估来协调各阶段计划, 从而得到优化的一体化生产计划.

(3) 通过某钢铁厂炼钢—连铸—热轧板坯的生产计划制定的实例数据来检验模型及算法, 测试结果表明了模型和算法的有效性. 研究结果提供了一种灵活、通用的炼钢—连铸—热轧一体化生产计划编制模型方法.

参 考 文 献

[1] Cowling P, Rezig W. Integration of continuous caster and hot strip mill planning for steel production. *J Scheduling*, 2000, 3(4): 185

[2] Park H, Hong Y, Chang S Y. An efficient scheduling algorithm for the hot coil making in the steel mini-mill. *Prod Plann Control*, 2002, 13(3): 298

[3] Liu Q, Bai S H, Lu J H, et al. Production plan schedule for the casting-rolling process in BOF special steel plants. *J Univ Sci Technol Beijing*, 2008, 30(5): 566 (刘青, 白素宏, 卢军辉, 等. 转炉特钢流程连铸—轧钢生产排产系统. 北京科技大学学报, 2008, 30(5): 566)

[4] Sun F Q, Zheng B L, Cui J J, et al. The research of production planning of integrated management in steelmaking-hot rolling. *Acta Autom Sin*, 2000, 26(3): 409 (孙福权, 郑秉霖, 崔建江, 等. 炼钢—热轧一体化管理的生产计划编制问题研究. 自动化学报, 2000, 26(3): 409)

[5] Sun L, Li T K. Constraint satisfaction algorithm of batch planning for steel making-continuous casting-hot rolling. *Comput Integr Manuf Syst*, 2007, 13(5): 940 (孙玲, 李铁克. 炼钢—连铸—热轧批量计划的约束满足算法. 计算机集成制造系统, 2007, 13(5): 940)

[6] Ma T M, Zhang L, Hu G F, et al. New technology of in-

- egrated batch planning (IBP). *Control Eng China*, 2005, 12(6): 533  
(马天牧, 张蕾, 胡国奋, 等. 冶铸轧一体化批量计划编制新技术. 控制工程, 2005, 12(6): 533)
- [7] Zhang W X, Li T K. Integrated batch planning optimization based on particle swarm optimization and constraint satisfaction for steel production. *Comput Integr Manuf Syst*, 2010, 16(4): 840  
(张文学, 李铁克. 基于粒子群和约束满足的钢轧一体化批量计划优化. 计算机集成制造系统, 2010, 16(4): 840)
- [8] Xu J, Lü Z M, Xu J W. Model and algorithm of integrative batch planning based on parallel strategy for steelmaking-continuous casting-hot rolling. *Control Decis*, 2006, 21(9): 979  
(许剑, 吕志民, 徐金梧. 基于并行策略的冶铸轧一体化组批模型及算法. 控制与决策, 2006, 21(9): 979)
- [9] Lu Y M, Xu A J, He D F, et al. Hot-rolling batch planning method available to improve DHCR proportion. *J Univ Sci Technol Beijing*, 2011, 33(10): 1301  
(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. 北京科技大学学报, 2011, 33(10): 1301)
- [10] Ning S S, Wang W. Model and algorithm for hot rolling lot planning. *J Syst Simul*, 2007, 19(3): 691  
(宁树实, 王伟. 热轧批量计划编制模型及其算法. 系统仿真学报, 2007, 19(3): 691)
- [11] Tang L X, Luo J X. A new ILS algorithm for cast planning problem in steel industry. *ISIJ Int*, 2007, 47(3): 443
- [12] Wong T N, Leung C W, Mak K L, et al. Dynamic shopfloor scheduling in multi-agent manufacturing systems. *Expert Syst Appl*, 2006, 31(3): 486
- [13] Potter M A. *The Design and Analysis of a Computational Model of Cooperative Coevolution* [Dissertation]. Fairfax: George Mason University, 1997
- [14] Coello Coello C A, Lamont G B, Van Veldhuizen D A. *Evolutionary Algorithms for Solving Multi-objective Problems*. 2nd Ed. New York: Springer Press, 2007