

文章编号:1000-582X(2012)03-060-07

# 炼钢-连铸-热轧一体化批量计划编制模型及实现

刘 怡<sup>a</sup>, 郑 忠<sup>a</sup>, 陈 开<sup>a</sup>, 高小强<sup>b</sup>

(重庆大学 a. 材料科学与工程学院; b. 经济与工商管理学院, 重庆 400044)

**摘 要:**为解决钢铁企业生产计划一体化编制时能保证生产物流在各工序间的协调有序和高效率运行,通过分析炼钢-连铸-热轧带钢各阶段的生产目标和工艺约束、物流变化及衔接关系,建立基于多目标优化的一体化批量计划数学模型。按照热轧带钢生产合同的要求,将一体化批量计划编制问题分解为热轧带钢的轧制单元计划、炼钢-连铸的组炉和组浇计划。各计划之间既有独立又存在耦合,先编制完成轧制单元计划与组炉计划,然后再将轧制单元计划与组炉计划共同作用于组浇计划,运用基于改进协同进化的遗传算法设计模型求解策略。以某钢铁企业的带钢生产计划编制数据为例进行模型的仿真运行,测试结果表明了模型的可行性,为钢铁企业的一体化批量计划编制提供了一种有效手段。

**关键词:**钢铁企业;生产;批量计划;一体化;进化算法

**中图分类号:**TP399;TH166

**文献标志码:**A

## Modeling and realizing of integrated batch planning for steelmaking-continuous casting and hot strip rolling

LIU Yi<sup>a</sup>, ZHENG Zhong<sup>a</sup>, CHEN Kai<sup>a</sup>, GAO Xiao-qiang<sup>b</sup>

(a. College of Materials Science and Engineering; b. College of Economics and Business Administration, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

**Abstract:** An integrated batch planning mathematical model based on multi-object optimization is proposed to solve the orderly and efficient flow of material between different working stations in iron and steel enterprises, where production technology constraints, material variations and coupling between steelmaking-continuous casting and hot rolling are analyzed first. According to the requirements of the hot rolling steel strip contracts, the integrated batch planning is divided into sub-plans of rolling plan, casting plan and furnace plan which are independent and coupling to each other, forming rolling plan and furnace plan simultaneously to influence casting plan. Heuristic method based on modified co-evolutionary algorithm is advanced to resolve this problem. The results of simulation and analysis in an iron and steel plant for strip steel production shows that it is feasible to provide effective guidance for integrated batch plan making.

**Key words:** iron and steel plants; production; batch planning; integration; evolutionary algorithms

收稿日期:2011-10-15

基金项目:国家 863 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)

作者简介:刘怡(1982-),男,重庆大学博士研究生,主要从事钢铁生产过程仿真与优化方法研究。

郑忠(联系人),女,重庆大学教授,博士生导师,(Tel)023-65111651,(E-mail)zhengzh@cqu.edu.cn.

钢铁企业面临小批量、多品种、高质量、交货期短等大量订单的客户需求,需要通过提高生产过程中连续与离散两种方式的衔接有序性和均衡性,优化配置生产资源,以实现最小化生产成本及最大化生产效益的目标。一体化批量计划是将炼钢-连铸-热轧工序的相对独立的生产批量计划编制,转变成在整个生产过程综合考虑各阶段计划的编制,形成相互关联的生产物流运行机制,使前后工序的生产协调一致,减少炉次等待时间,并充分利用高温板坯提高热装热送率,从而缩短生产制造周期,减少能耗,有效降低生产成本。

一体化计划编制是钢铁企业迫切需要研究与实现的优化问题,国内外学者对此做了大量研究工作,文献[1]把炼钢-连铸-轧制调度问题分解为三个独立的子问题,研究组炉、组浇和编制轧制算法,仅应用于小型钢铁厂;文献[2-3]对连铸-轧制调度问题运用多智能体方法求解;文献[4]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计划难以协调匹配的问题;文献[5]建立用组合批代替连铸作业计划和热轧计划的多收益旅行商模型,采用分组协同蚁群算法对其求解;文献[6]运用双层染色体遗传算法,建立一体化生产合同计划优化模型使交货提前/拖期率、热装比和组炉余材率的加权和最小;文献[7]从轧制计划中提炼出炉次计划和浇次计划并运用约束满足启发式算法求解;文献[8]提出了基于规则的轧钢生产计划排产启发式算法和连铸浇次最优化模型;文献[9]将一体化生产计划模型体系分为 5 个子系统来进行优化研究。以上研究在一体化计划编制、适当考虑了各阶段计划制定的约束及约束之间的关系方面进行了有益尝试并取得较好效果,但在综合考虑全局优化要求及物流在各阶段间的有效衔接来完整制定炉次计划、浇次计划和轧制计划方面还存在不足。

为此,笔者以生产合同为已知条件,实现各阶段计划生产产量最大化为目标,并且综合考虑一体化批量计划编制中所涉及的多工序之间的物流特征及其物流衔接方式,以及需满足的不同工序环节的生产约束,建立多目标优化模型;设计了一种以最大连浇炉数和炉次中最小化无委材来协调轧制计划、炉次计划和浇次计划的改进协同进化优化算法,来求解该模型,以体现一体化计划中各阶段的协同作用,实现炼钢-连铸的生产批量计划与热轧带钢生产批量计划的有效衔接。

## 1 问题描述及模型建立

钢铁企业生产计划实现过程主要由 3 部分组

成<sup>[10]</sup>,将一体化计划拆分为:先对用户订单进行质量、工艺设计等形成订单计划并由合同池管理来实现;再编制面向 ERP 层面的一体化生产计划,其含热轧计划、组浇计划、组炉计划和铁水供应粗计划;最后为生产作业计划,如铁水计划、炼钢-连铸计划、热轧作业计划等。在钢铁企业管控一体化系统建设框架下,对热轧带钢生产,也有将热轧带钢的批量计划就作为其生产作业计划执行。因此,笔者重点在于炼钢-连铸-热轧生产的热轧计划-组炉计划-组浇计划的一体化生产批量计划研究,其特点为以满足各阶段生产约束前提下的计划生产产量最大化为目标的建模,并采用协同进化算法的模型求解方法。

### 1.1 问题描述

钢铁企业是由各工序工位间的串并联方式结合构成的复杂生产系统,其中炼钢、连铸和热轧为 3 个重要阶段。在其生产过程中,主物流的表现形式分别由钢水、板坯、带钢 3 种构成;并且各阶段的作业方式不同:炼钢阶段中转炉和精炼炉为间歇式生产,连铸机为多炉连浇的连续式生产,热轧机也可视为带约束的板坯连续式生产。炼钢-连铸-轧制生产一体化批量计划是将炼钢、连铸、热轧 3 个不同的阶段视为一个整体,同时满足各阶段的生产约束条件,还需要考虑当前阶段对于上/下一阶段的约束,来统一制定生产计划,做到前后工序计划同步化,物流运行准时化,最大化热装热送比。在批量计划编制中,各阶段的最小单位为炉次,浇次和轧制单元。一体化批量计划编制流程及对应工艺流程如图 1 所示,连铸-热轧界面的衔接是经板坯库、保温坑或加热炉,其衔接方式为:冷坯装炉轧制(CCR),热坯装炉轧制(HCR),直接热坯装炉轧制(DHCR),直接热轧(HDR)。

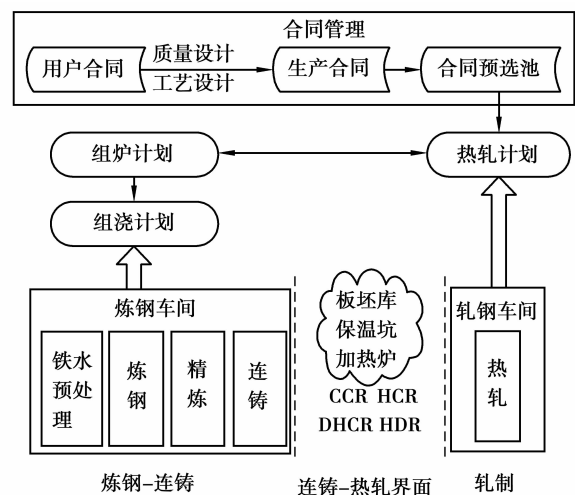


图 1 一体化批量计划编制及对应工艺流程

传统的钢铁生产中,炼钢、连铸和热轧三大工序的生产计划通常是分别制定和实施,对生产物流的衔接关系考虑较少,所追求的目标一般只是某一局部效果的最优化,因此一旦生产物流的衔接出现问题而直接影响生产效率、质量和成本。在制定钢铁企业一体化生产批量计划时,炼钢、连铸和热轧各阶段的生产约束条件都不一样,需要同时考虑组炉约束、组浇约束和制定轧制单元约束<sup>[11-13]</sup>,如表 1 所示,而且需要考虑各阶段的物流变化与衔接。

表 1 炼钢-连铸-热轧各阶段的生产约束

	轧制单元计划	组炉计划	浇次计划
对象	按生产合同确定的板坯,满足轧制工艺要求	按生产合同确定的板坯,满足炉次要求	炉次,满足连续浇铸工艺要求
工艺约束	一个轧制单元最大轧制长度(重量);宽度非增跳跃,同宽度轧制长度;厚度非减平稳变化;硬度平稳跳跃;交货期内完工	炉容(公称重量);钢种相同;板坯宽度一致;厚度一致;无委材;交货期相近并交货期内完工	组成同一浇次的炉次之间钢种差异在一定范围内;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并且变化次数有限;连浇炉数限制;交货期内完工

在轧制单元计划中,每一个轧制单元不仅要考虑轧制生产约束,还需要考虑前工序的浇次计划,使连铸板坯满足板坯的轧制要求,同时在做一体化时,它将影响组炉和组浇的制定。在炉次计划中按其约束组炉计划会使轧制单元计划中的板坯未能排入炉次中,而需要与轧制单元计划相协调从而降低无委材,同时在轧制计划中,轧制宽度是烫滚材由窄到宽再是主体材由宽到窄的跳跃,并且同一轧制单元计划内轧制同宽度的带钢有一定限制,而在浇次计划中的多炉连浇的板坯远远超过轧机同宽最大轧制长度,在炉次计划中要保证其同一炉次内的板坯宽度一致且一个浇次浇铸时板坯宽度调节有限;在组浇过程中因浇次计划的约束会使较少的炉数而未形成一个浇次,这些是造成轧制和炉次、浇次之间次序不匹配的重要原因,因此在编制一体化计划时,必须同时考虑各阶段约束并协调各目标,最终达到全局最优。

在各阶段物流单元的转换中,炼钢阶段为钢水,连铸后为板坯,两者的关系是根据组炉约束,多块板坯对应一个炉次。又根据组浇约束,多个炉次构成一个浇次;而轧制单元与浇次关系有 3 种:一对一,

多对一,多对多。由于连铸与热轧的工艺约束和单位时间产能的不匹配,因此在实际生产中铸机与轧制单元产能最大化条件下,需要连铸的多个浇次交叉向多个轧制单元提供板坯,并需要板坯库、保温坑及加热炉缓冲工位使连铸与热轧得以有效的衔接,来合理安排生产物流的衔接。

## 1.2 模型建立

一体化批量计划问题可以归结为典型的多旅行商问题,则表述为: $M$  个旅行商在  $N$  个城市行走,生产合同所对应的热轧带钢(或板坯或炉次)视为城市,城市之间的距离定义为两热轧带钢(或板坯或两炉次)组合在一起所对应的评价指标,而旅行商个数  $M$  则根据输入对象(如合同量)动态定义,旨在最小化  $M$  个数,即产能最大化。同时需要引入  $M$  个虚拟节点,各旅行商从各自的虚拟节点出发,保证  $M$  个闭合回路的形成,虚拟节点与各城市距离为零,一个旅行商所走路程表示一轧制单元(一个炉次或一个浇次)。

建立的一体化批量计划的数学模型设定为正常生产情况下的铸机组和轧机的产能大致相匹配,因此只考虑热坯装炉(HCR),直接热装(DHCR)和直接热轧(HDR),将板坯库、保温坑和加热炉作为缓冲。模型的已知条件为:根据生产合同(对用户合同进行质量设计和工艺设计,并按照交货期等对用户合同归并所形成)数据,明确所需要生产的带钢的钢种、规格及数量。为确保生产过程的整体性,以整体流程的全局优化为目标,并充分考虑炼钢-连铸-轧制系统之间的相互作用和耦合关系,建立优化函数。模型变量的含义: $N$  为生产合同的板坯总数; $M$  为炉次总数; $d_i$  为编制计划后合同  $i$  的实际交货期; $w_i$  为合同  $i$  的重量( $t$ ); $x_{ih}$  为合同  $i$  编制在炉次  $h$  中; $z_{il}$  为合同  $i$  编制在轧制单元  $l$  中; $L_{\text{Heat}}, U_{\text{Heat}}$  为一个炉次的最小最大炉容限制; $L_{\text{Cast}}, U_{\text{Cast}}$  为一个浇次的最小最大连浇炉数限制; $L_{\text{roll}}, U_{\text{roll}}$  为一个轧制单元的最小最大总长度(即重量); $W_i, G_i, H_i, S_i$  分别为合同  $i$  的宽度、厚度、硬度、钢种, $a, b, c, d, e, f$  分别为其对应的系数; $SH_i$  和  $WH_i$  分别为炉次  $i$  的钢种和宽度, $g, h$  分别为其对应的系数;

$$x_{ijh} = \begin{cases} 1 & \text{合同 } j \text{ 和合同 } i \text{ 编制在炉次 } h \text{ 中,} \\ 0 & \text{否;} \end{cases}$$

$$y_{ijk} = \begin{cases} 1 & \text{炉次 } i \text{ 和炉次 } j \text{ 编制在浇次 } k \text{ 中,} \\ 0 & \text{否;} \end{cases}$$

$$z_{ijl} = \begin{cases} 1 & \text{轧制单元 } l \text{ 中合同 } j \text{ 紧邻合同 } i \text{ 后,} \\ 0 & \text{否;} \end{cases}$$

$C_{ij}^l$  为轧制单元中合同  $j$  紧跟合同  $i$  的惩罚综合

系数;

$C$

$$C_{ij}^1 = \begin{cases} \infty & \text{if } i=j, \\ a|W_i - W_j| + b|G_i - G_j| + c|H_i - H_j| & \text{if } i \neq j; \end{cases}$$

$C_{ij}^2$  为合同  $i$  和合同  $j$  组合在一个炉次中的惩罚综合系数;

$$C_{ij}^2 = \begin{cases} \infty & \text{if } i=j, \\ d|S_i - S_j| + e|W_i - W_j| + f|G_i - G_j| & \text{if } i \neq j; \end{cases}$$

$C_{ij}^3$  为炉次  $i$  和炉次  $j$  组合在一个浇次中的惩罚综合系数;

$$C_{ij}^3 = \begin{cases} \infty & \text{if } i=j, \\ g|SH_i - SH_j| + h|WH_i - WH_j| & \text{if } i \neq j. \end{cases}$$

多目标优化函数为:

$$Z = \min(f_1, f_2, f_3, f_4), \quad (1)$$

$$f_1 = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1, i \neq j}^N C_{ij}^1 z_{ij}, \quad (2)$$

$$f_2 = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1, i \neq j}^N C_{ij}^2 x_{ij}, \quad (3)$$

$$f_3 = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1, i \neq j}^M C_{ij}^3 y_{ij}, \quad (4)$$

$$f_4 = \frac{U_{\text{Heat}} - \sum_{i=1}^N w_i x_{ih}}{U_{\text{Heat}}} + \frac{U_{\text{Cast}} - \sum_{i=1}^M y_{ik}}{U_{\text{Cast}}}, \quad (5)$$

s. t.

$$L_{\text{Heat}} \leq \sum_{i \in N} w_i x_{ih} \leq U_{\text{Heat}}, \quad (6)$$

$$L_{\text{Cast}} \leq \sum_{i \in M} y_{ik} \leq U_{\text{Cast}}, \quad (7)$$

$$L_{\text{roll}} \leq \sum_{i \in N} w_i z_{il} \leq U_{\text{roll}}, \quad (8)$$

$$L_{\text{Date}} \leq d_i \leq U_{\text{Date}}. \quad (9)$$

其中式(2)、(3)是以生产合同为输入对象的最小化组炉和轧制单元编制的惩罚;式(4)是以组好的炉次计划为输入对象的最小化组浇惩罚,其中式(2)–(4)使组炉、组浇和轧制单元编制满足炼钢、连铸和轧制各生产阶段的必要条件;式(5)为最小化炉次中无委材和浇次中未达最大连浇炉数之和,间接地使一体化批量生产计划更适合于热装热送,在现实生产中其最大化产量的条件下,使无委材最小化;主要的约束式(6)为一个炉次中的最小最大炉容限制;约束式(7)为一个浇次中的最小最大炉次数限制;约束式(8)为一个轧制单元的最小最大轧制总长度(以重量形式表示)限制;约束式(9)为合同  $i$  的实际交货期在交货期窗口内。

## 2 一体化批量计划编制模型求解

### 2.1 模型求解

一体化批量计划编制流程为:

1)以预定周期的热轧带钢计划的生产合同池内合同为输入对象,按轧制单元编制约束进行最小化惩罚编制轧制单元计划;

2)以所编制的轧制单元计划为对象并考虑最小化惩罚的组炉约束,其重点在于钢种相同,形成组炉计划;

3)在轧制单元计划和组炉计划的共同作用下,对编制好的炉次按最小化惩罚的约束条件最大化产量组浇;

4)通过系统评价来确定一体化批量计划,确保在产能最大化条件下有较高的热装热送比,并具有全局优化性。

### 2.2 算法实现

模型求解因为涉及多目标优化问题,采用 Pareto 方法得到一个由多个非支配解组成的 Pareto 最优解集。根据轧制单元编制和组炉求得的 Pareto 最优解集作为组浇的候选炉次集,组浇计划则以所求得的 Pareto 最优集为输入数据,得到多个组浇计划的解方案,从其中选取最优化的解作为组浇计划,最终组合得到较优的全局最优化解。

根据所建立的一体化批量计划模型,基于协同进化算法<sup>[14-15]</sup>的思想并加以修改,设计协同进化算法,按照各工序阶段的生产计划方式将整个种群划分为3个子群:轧制子群,组炉子群和组浇子群,以更好表征各阶段计划的独立性和耦合性。因轧制单元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;组炉以轧制子群染色体为输入,组炉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,因此建立的轧制子群和组炉子群中染色体内基因表示为生产合同带钢序号或板坯序号,且生产合同的带钢序号和板坯序号一一对应,两者为同一物流在不同工序上的表示形式不同而已;而组浇子群中的染色体内基因则是由组炉子群的炉次按照组浇原则所构成,其每一条染色体基因长度为相对应组炉子群中染色体所表示的组炉数。各子群先分别依次独立进行遗传进化,再按照以保证最大连浇炉数和炉次中最小无委材的最优来协调炉次、浇次和热轧计划的完成作为系统总目标计算相应的适应度函数值,从而进行一体化计划的协同优化计算,最终求得一体化计划的优化解。改进的协同进化算法流程如图2

所示。

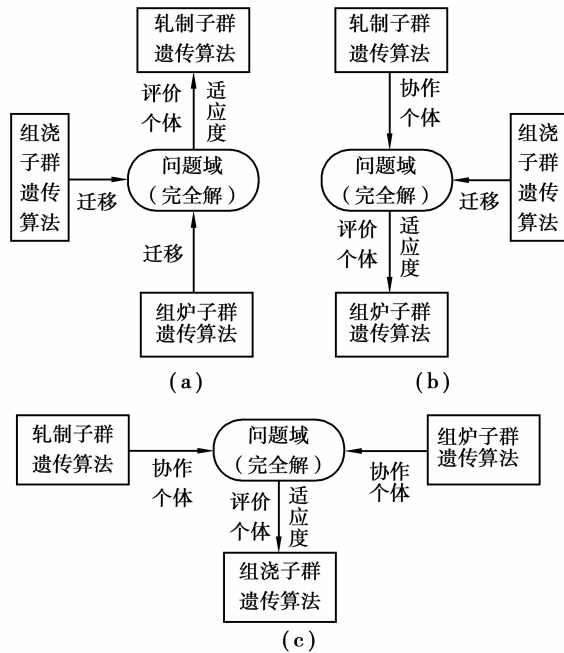


图 2 3 个子群的协同进化框架结构

根据上述部分讨论的模型建立和求解的关键技术,以下给出整个算法流程。

步骤 1:以预定生产周期的生产合同池为对象,根据满足轧制单元约束条件和组炉约束条件,用生产合同带钢序列号随机初始化轧制子群,根据生成的轧制子群染色体中基因随机初始化组炉子群染色体内基因,再由初始化的组炉子群中较优染色体根据组浇约束条件随机初始化组浇子群中染色体内基因。

步骤 2:执行轧制子群进行独立遗传进化算法,其中包括交叉算子和变异算子,保留较优的子代,如

图 2 中的(a)所示。

步骤 3:以轧制子群保留的较优子代对象,执行组炉子群的遗传进化算法,如图 2 中的(b)所示。

步骤 4:再以轧制子群和组炉子群中较优子代构成的 Pareto 最优解集中组炉子群的子代作为输入对象,执行组浇子群的遗传进化算法。在计算适应度时以轧制子群中和组炉子群中较优染色体作为共同评价标准,通过协同保留最优的组浇群中子代,如图 2 中的(c)所示。

步骤 5:满足评价要求或达到进化代数则终止算法,得到最优轧制单元计划、组炉计划和组浇计划,否则跳转到步骤 1,进行下一轮进化算法。

### 3 应用实例

以某钢铁企业的炼钢-连铸-热轧带钢的生产计划编制为对象进行模型测试。该厂板坯生产线包括 3 座转炉,2 座 LF 炉,1 座 RH 炉,1 台一流铸机,1 台两流铸机和热轧机组。以 1 天的带钢生产合同数据进行仿真计算,生产合同参数见表 2,需要生产 13 个生产合同共 520 块板坯,合同总量 9 571.8 t。仿真实验在 CPU 双核 3.0 GHz,内存为 2 G 的台式机上运行,模型能在 2 min 内得到优化解。以表 2 内生产合同数据为模型输入对象,并结合改进的协同进化算法设置相应参数:初始化各子群数目为 30,循环迭代进化 50 代,交叉概率 0.8,采用自适应变异概率以确保染色体的多样性,避免陷入局部最优。模型运行可编制出 7 个轧制单元,同时编制出相应的 8 个浇次和 64 个炉次。因篇幅有限图 3 所示的是部分轧制单元计划,界面显示了轧制单元所形成的“乌龟壳”形状。

表 2 生产合同参数规格

合同序号	合同量/t	板坯(带钢)数	钢种	宽度/mm	厚度/mm	硬度等级	计划长度/m
1	1 486.52	78	DX51D+Z	1 000	0.45	11	58 974
2	661.78	39	DX51D+Z	1 100	1.00	22	31 031
3	473.03	27	LSt12	911	1.00	11	18 683
4	530.08	25	P510L	1 200	4.00	21	9 907
5	338.17	16	Q235B	1 250	4.50	21	7 143
6	592.34	29	SAE1008	1 240	4.00	11	15 686
7	829.82	44	SAE1008	1 232	3.20	11	29 399
8	762.08	46	SAE1008M	1 015	2.75	11	39 729
9	1 100.83	64	SS330	1 000	2.00	11	47 196
10	347.68	19	St12	1 000	0.70	12	12 836
11	683.59	38	St12	1 000	1.00	21	31 191
12	361.33	19	St12	1 000	0.60	11	17 333
13	1 404.55	76	St12	1 050	1.95	33	42 888

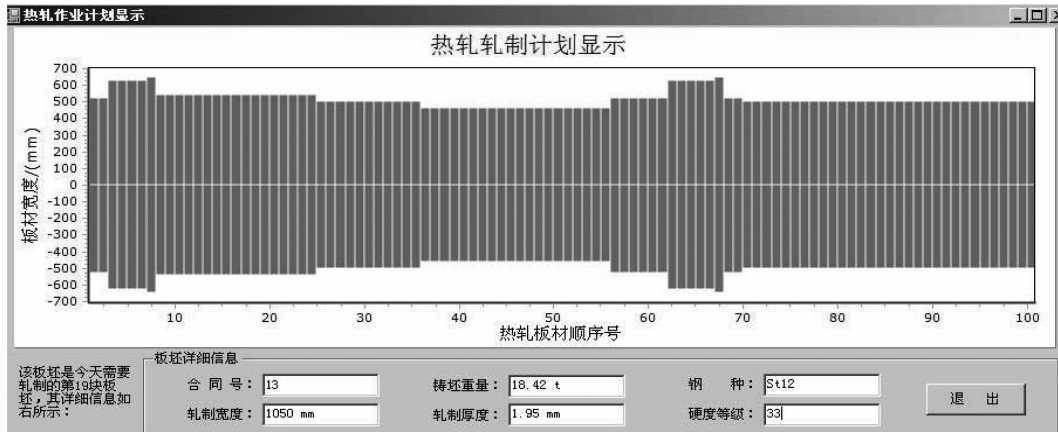


图 3 轧制单元计划结果显示

表 3 仅列出 2 个浇次内相应炉次,在 1 个炉次中所形成的最大无委材约为 40 t,每个浇次所形成最大连浇炉数为 9 炉,最小连浇炉数为 4 炉。所得数据满足实际生产中各工序 1 天的产能和工艺约束。因此,模型计算可得到合理的炼钢-连铸-热轧带钢的一体化计划,检验了模型的可行性。

表 3 组炉组浇部分数据结果

浇次序号	炉次序号	钢种	板坯宽度/mm	重量/t
1	1	SAE1008	1 250	148
1	2	SAE1008	1 250	148
1	3	SAE1008	1 250	148
1	4	SAE1008	1 250	149
1	5	SAE1008	1 250	145
1	6	SAE1008	1 250	145
1	7	SAE1008	1 250	145
1	8	SAE1008	1 250	145
1	9	SAE1008	1 250	145
2	10	St12	1 160	140
2	11	St12	1 160	140
2	12	St12	1 160	140
2	13	LSt12	1 000	130
2	14	LSt12	1 000	130
2	15	LSt12	1 000	130
2	16	LSt12	1 000	120

## 4 结 论

1) 针对炼钢-连铸-热轧一体化生产批量计划编制问题进行分析,通过对钢铁生产流程各阶段的生产目标和工艺约束,以及物流衔接特点的分析,建立以最小化轧制单元约束、组炉约束、组浇约束、炉次无委材和未达最大连浇炉数惩罚等为目标和约束的一体化生产批量计划数学模型。

2) 运用改进协同进化算法设计一体化批量计划编制流程,以最大连浇炉数和炉次中最小化无委材来协调炉次、浇次和轧制计划的方式求解多目标优化问题,使模型能够有效地协调各阶段生产,实现整体最优化。

3) 以某钢厂的生产合同数据和生产计划条件为应用测试案例,运行模型。模型实例结果表明该模型具有较强的可行性,可保证各工序生产物流的合理衔接和高效运行。

4) 下一步研究将考虑模型的统一抽象、优化及广泛的适应性。

### 参考文献:

[ 1 ] PARK H, HONG Y S, CHANG S Y. An efficient scheduling algorithm for the hot coil making in the steel mini-mill[J]. Production Planning & Control, 2002, 13 (3): 298-306.

[ 2 ] COWLING P I, OUELHADJ D, PETROVIC S. Dynamic scheduling of steel casting and milling using multi-agents[J]. Production Planning & Control, 2004, 15(2): 178-188.

[ 3 ] OUELHADJ D. A multi-agent system for the

- integrated dynamic scheduling of steel production[D]. Nottingham: The University of Nottingham, 2003.
- [4] 马天牧,张蕾,胡国奋,等. 冶铸轧一体化批量计划编制新技术[J]. 控制工程,2005,12(6):533-537.  
MA TIAN-MU, ZHANG LEI, HU GUO-FEN, et al. New technology of integrated batch planning [J]. Control Engineering of China, 2005,12(6):533-537.
- [5] 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[J]. 控制与决策, 2006, 21(9): 979-984.  
XU JIAN, LV ZHI-MIN, XU JIN-WU. Model and algorithm of integrative batch planning based on parallel strategy for steelmaking-continuous casting-hot rolling [J]. Control and Decision, 2006, 21(9): 979-984.
- [6] 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 CHUN-YUE, XU MEI-RONG, QU RONG-XI. 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.
- [7] 孙玲,李铁克. 炼钢-连铸-热轧批量计划的约束满足算法[J]. 计算机集成制造系统, 2007, 13(5):940-944.  
SUN LING, LI TIE-KE. Constraint satisfaction algorithm of batch planning for steel making-continuous casting-hot rolling [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2007, 13(5):940-944.
- [8] 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[J]. 北京科技大学学报,2008,30(5): 566-570.  
LIU QING, BAI SU-HONG, LU JUN-HUI, et al. Production plan schedule for the casting-rolling process in BOF special steel plants[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2008, 30(5): 566-570.
- [9] 李耀华,胡国奋,王伟,等. 炼钢-连铸-热轧一体化生产计划编制方法研究[J]. 控制工程,2005,12(6): 549-552.  
LI YAO-HUA, HU GUO-FEN, WANG WEI, et al. Research on the method of SM-CC-HR integrated production planning[J]. Control Engineering of China, 2005, 12(6):549-552.
- [10] 蔡洋,李铁克. 面向订单的钢铁企业生产管理一体化系统[J]. 北京科技大学学报, 2008, 30(3):302-306.  
CAI YANG, LI TIE-KE. Integrated system for make-to-order production management in iron and steel enterprises [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2008, 30(3):302-306.
- [11] 朱宝琳,于海斌,黄小原,等. 炼钢-热轧一体化计划问题研究[J]. 信息与控制, 2006, 35(4):537-540.  
ZHU BAO-LIN, YU HAI-BIN, HUANG XIAO-YUAN, et al. Integrated planning for steelmaking-hot rolling[J]. Information and Control, 2006, 35(4):537-540.
- [12] 杜斌,黄可为,朱俊. 宝钢生产计划及物流优化技术的研究与应用[C]//第七届(2009)中国钢铁年会论文集. 北京:冶金工业出版社,2009:355-361.
- [13] TANG L X, LUO J X. A new ILS algorithm for cast planning problem in steel industry [J]. ISIJ International, 2007, 47(3):443-452.
- [14] POTTER M A, DE JONG K A. Cooperative coevolution: an architecture for evolving coadapted subcomponents[J]. Evolutionary Computation, 2000, 8(1):1-29.
- [15] COELLO COELLO C A, LAMONT G B, VAN VELDHUIZEN D A. Evolutionary algorithms for solving multi-objective problems[M]. 2nd Edition. New York:Springer, 2007:152-168.

(编辑 王维朗)