

文章编号: 1001-0920(2007)02-0225-05

基于启发式和演化计算的热轧计划编制方法

赵 军¹, 刘全利¹, 王 伟¹, 牛长胜²

(1. 大连理工大学 信息与控制研究中心, 辽宁 大连 116024; 2. 宝山钢铁股份有限公司 制造管理部, 上海 200941)

摘 要: 结合宝钢热轧厂计划编制的实际情况, 考虑板坯轧制区段对轧制表面等级的约束和板坯出炉温度、精轧温度、卷取温度对计划单元的影响, 建立了热轧计划编制的数学模型. 提出将计划单元个数预估计作为模型求解的初始步骤, 采用基于启发式和演化计算结合的混合算法, 将不可行个体转换为标准可行个体后再进行演化处理. 仿真试验表明该热轧计划编制方法能够达到较好的应用效果.

关键词: 轧制生产计划; 演化计算; 启发式

中图分类号: TF3 **文献标识码:** A

Method for hot rolling planning based on heuristic evolutionary computation

ZHAO Jun¹, LIU Quan-li¹, WANG Wei¹, NIU Chang-sheng²

(1. Research Center of Information and Control, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. Manufacturing Management Department, Baoshan Iron and Steel Company Limited, Shanghai 200941, China.

Correspondent: ZHAO Jun, E-mail: jun.z@163.com)

Abstract: Constraints between rolling section and surface grade in a plan unit and impacts due to temperature of discharging, finishing milling and coiling are considered in the practice in hot rolling factory. A rolling plan model which regards estimation of the number of plan units as the initial process is suggested. A hybrid algorithm based on heuristic evolutionary computation is proposed. The evolutionary operation is worked after infeasible individuals are converted into standard feasible solutions. A simulation result with real production data from Baoshan iron and steel company limited, Ltd shows that the model and algorithm suggested are feasible.

Key words: Rolling plan; Evolutionary computation; Heuristic approach

1 引 言

热轧是整个钢铁生产的关键工序, 热轧轧制计划的编制直接影响到钢卷生产的质量、效率、成本和对下游机组的原料供应. 热轧轧制计划编制需考虑多种约束下板坯的分组和排序, 是复杂的组合优化问题, 一般的数学规划方法很难求解, 板坯数量较大时, 该问题属于 NP-hard 问题^[1].

文献[1]详细介绍了热轧及其相关生产过程, 建立了计划编制的数学规划模型, 运用禁忌搜索算法求解, 并将方案应用于加拿大 Dofasco 钢铁厂. [2]提出了解决该问题的多旅行商并行策略, 应用改进遗传算法求解, 但当板坯数量较大时效果并不理想. 文献[3]将该问题归结为静态车辆路径问题. 文献[4]在文献[3]的基础上考虑了烫辊材计划与主体材

计划的混合编制, 采用单亲 GA 算法求解. 以上文献中均未考虑板坯在轧制单元中所处的区段问题, 这一因素直接影响到轧制表面质量的高低, 同时也是生产合同的要求. 另外, 相邻板坯间的出炉温度、精轧温度和卷取温度跳跃情况也对热轧生产的相关设备有着重要的影响.

宝钢热轧 1580 机组目前的生产计划编制任务主要采用人机交互的方式, 通过多次人工选择板坯和计算机界定规程的过程来完成. 该方法由于无法同时考虑多项约束条件, 普遍存在着板坯规程跳跃大、计划单元长度小、表面质量难以保证等缺点, 使得轧辊磨损快, 生产效率低, 轧机产能无法充分发挥.

本文根据宝钢热轧现场的实际情况, 除了考虑

收稿日期: 2005-11-03; 修回日期: 2006-02-27.

基金项目: 国家自然科学基金项目(60604026, 60534010).

作者简介: 赵军(1981—), 男, 太原人, 博士生, 从事生产计划与调度建模、智能优化算法等研究; 王伟(1955—), 男(满族), 辽宁鞍山人, 教授, 博士生导师, 从事自适应控制、模型预测控制等研究.

相邻板坯宽度、厚度、硬度组跳跃外,还考虑了板坯轧制区段与轧制表面等级之间的约束和出炉温度、精轧温度、卷取温度跳跃对计划编排的影响. 建立的热轧计划数学模型采用基于启发式和演化计算的混合算法进行求解,将计划单元个数预估计作为模型求解的初始步骤,并将不可行个体转化为标准可行个体再进行演化操作,有效地增加了个体多样性. 现场运行的板坯数据仿真结果表明了该方法的有效性.

2 计划单元编制的数学模型

2.1 问题描述

热轧计划编制问题可描述为:有 n 块板坯编制成为 M 个轧制单元进行轧制, M 值不确定,使得计划单元中主体材板坯的宽度由宽到窄变化且变化平缓,如图 1 所示. 相邻板坯的厚度、硬度组和各阶段温度的跳跃量尽量平缓,总轧制长度尽量大,表面等级满足轧制区段的约束等要求. 文献 [2,4] 在轧制约束中还提到轧制宽度、厚度和硬度不允许同时跳跃的条件,随着钢铁生产设备自动化水平的不断提高,当前宝钢热轧 1580 机组实际生产工艺能够做到对同时跳跃进行连续轧制,因此本文不考虑此约束条件,对轧制计划模型主要研究主体材的计划编制问题.

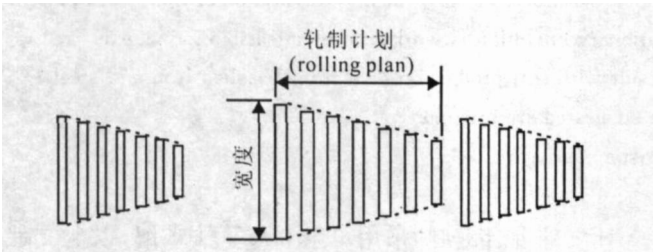


图 1 若干轧制计划单元

在板坯的轧制过程中,表面质量是热轧的重要指标之一,同时也是用户合同的要求. 带钢轧制表面等级与板坯轧制时轧辊的磨损程度有着直接的关系,板坯轧制前轧辊的磨损程度越大,相应轧制出钢卷的表面质量就越低. 热轧厂实际情况往往要求不同轧制表面等级的板坯必须在一定的轧制区段范围内轧制. 另外,表面等级要求低的板坯可以在等级要求较高的轧制区段范围内轧制,此类产出品称为“以优充次”. 在热轧计划的编制过程中,这一情况的优先级最低,即在各种轧制规程要求满足的情况下,应当尽量将板坯放入其额定表面等级限定的轧制区段中进行轧制.

计划编制中的另外一个重要指标是轧制单元的总轧制长度(称为轧制公里数). 从成本角度考虑,应当使每个轧制单元的轧制公里数尽可能大,这样

可以在满足合同要求的前提下减少换辊次数,达到降低生产成本的目的.

2.2 数学模型

假设给定 n 块板坯,相邻板坯间宽度、厚度、硬度组、各阶段温度的允许跳跃最大量和表面等级的轧制区段约束均已知. 建立数学模型如下:

$$\min \left(\sum_k \sum_i c_{ij} x_{ijk} + \alpha \frac{1}{K_M} \right),$$
$$M \in [M_{\min}, M_{\max}]; \tag{1}$$

$$\sum_k y_{ik} = 1, i = 1, 2, \dots, n; \tag{2}$$

$$\sum_p s_{ip} = 1, i = 1, 2, \dots, n; \tag{3}$$

$$\sum_i x_{ijk} = 1, j = 1, 2, \dots, n; \tag{4}$$

$$\sum_j x_{ijk} = 1, i = 1, 2, \dots, n; \tag{5}$$

$$L_{ik} \leq \sum_p s_{ip} R_p, i = 1, 2, \dots, n; \tag{6}$$

$$M_{\min} = \max \left(\text{int} \left[\frac{\sum_q T_q}{R_p} \right] + 1 \right),$$
$$p = 1, 2, \dots, m; \tag{7}$$

$$M_{\max} = \text{int} \left[\frac{\sum_q T_q}{R_1} \right] + 1. \tag{8}$$

其中: n 为需要编制计划的板坯总数; M 为轧制计划数; m 为表面等级的种类数; c_{ij} 为主体材中板坯 i 到板坯 j 的惩罚值; L_{ik} 为轧制计划 k 中板坯 i 之前所有板坯轧制长度; R_p 为表面等级为 p 的板坯轧制公里数要求; T_q 为待编计划的板坯中表面等级为 q 的所有板坯的总轧制长度; $\overline{K_M}$ 为 M 个轧制计划的平均轧制公里数; α 为轧制公里数的惩罚系数; $M_{\min}$ 为轧制单元的最小个数; $M_{\max}$ 为轧制单元的最大个数; $\text{int}[\]$ 为对 $[\]$ 中的数取整数;

$$x_{ijk} = \begin{cases} 1, & \text{轧制计划 } k \text{ 内板坯 } i \text{ 后直接生产板坯 } j, \\ 0, & \text{other;} \end{cases}$$

$$y_{ik} = \begin{cases} 1, & \text{轧制计划 } k \text{ 包含板坯 } i, \\ 0, & \text{other;} \end{cases}$$

$$s_{ip} = \begin{cases} 1, & \text{板坯 } i \text{ 的表面等级为 } p, \\ 0, & \text{other;} \end{cases}$$

$$c_{ij} = p_{ij}^w + p_{ij}^g + p_{ij}^h + p_{ij}^{ht} + p_{ij}^{\alpha} + p_{ij}^{\alpha},$$

$p_{ij}^w, p_{ij}^g, p_{ij}^h, p_{ij}^{ht}, p_{ij}^{\alpha}, p_{ij}^{\alpha}$ 分别为板坯间宽度、厚度、硬度组和出炉温度、精轧温度、卷取温度的跳跃惩罚值.

式(1)为模型的目标函数,使得一个计划中相邻的板坯在宽度、厚度、硬度组和各阶段的温度跳跃惩罚最小并使得平均轧制公里数最大. 式(2) 保证一块板坯只出现在一个轧制计划当中. 式(3) 保证一块板坯只有一种表面等级. 式(4) 和(5) 保证板坯处理的唯一性. 式(6) 表示表面等级为 p 的板坯在第 k 个轧制计划中,其前已轧制的公里数小于 R_p . 式(7) 和(8) 为利用表面等级轧制公里数约束得到的轧制单元最大个数和最小个数.

3 基于启发式和演化计算的求解方法

3.1 算法的编码

文献[3]在模型求解时将个体的长度取为 $M \times n$,将计划单元的编制看作有 n 个客户和 M 个车辆的静态车辆路径问题. 但是,本文在应用中发现,由于板坯数量较大而造成个体位数很长,算法的收敛速度很难保证. 本文采用自然数编码,即对于 n 块需编制计划的板坯采用 $1 \sim n$ 的自然数序列表示,在保证优化效果的前提下可以提高求解速度.

3.2 编码到解空间的转换和对不可行解处理的启发式方法

将 n 位的自然数序列对应成模型的一个可行解,本文采用如下方法:假设 n_i 为此 n 位序列中第 i 位的序号,则第 i 位的板坯应放入的轧制计划单元号为 $n_i \pmod{M} + 1$ ($\pmod$ 为求余数). 建立对应关系时按照各板坯在 n 位序列中的次序依次分配到各个轧制单元中,这样分配到每个计划单元中的板坯就形成了次序. 但是由于存在表面等级对轧制公里数的约束要求,这样的对应方式由于 n 位序列的任意性很可能会产生不可行解.

对于智能优化算法中不可行解的处理方式通常有以下几种:使用有效的编码方式防止不可行解的产生;通过适应度的调整加大对不可行解的惩罚力度;通过设计修正算子将不可行解转化为可行解等^[6,7]. 本文考虑到不可行解空间较大,通过加大惩罚力度往往效果不太理想,故设计启发式修正算子将不可行解转化为可行解. 具体而言,当板坯 i 分派到计划单元时,需检查板坯的表面等级轧制公里数的要求是否满足式(6),如果不满足则进行启发式修正,使之成为可行解. 依照此对应关系可将 n 位编码映射为唯一一组 M 个轧制计划单元. 详细处理步骤如下:

- Step1: 初始化 M 个轧制计划,各计划当前轧制长度 $L_1, L_2, \dots, L_M$ 为零, $i = 1$.
- Step2: 若 $i > n$,转至 Step6;否则选取 n 位自然数序列中的第 i 位(其板坯号为 n_i), 计算 $j = n_i \pmod{M} + 1$,将板坯 n_i 放入计划 j 中.

Step3: 更新 L_j , 计算计划 j 中当前表面等级高于(或等于) n_i 表面等级的所有板坯总轧制长度 Length_i , 若 L_j 满足式(6), 则 n_i 可直接放入 j 中, $i = i + 1$, 转至 Step2; 若 Length_i 满足式(6), 则 n_i 可放入 j 中, 但需要修正, 转至 Step4; 若两者均不满足, 则 n_i 不能放入 j 中, 需重新分配 n_i , 转至 Step5.

Step4: 计划 j 中按序号 i 的次序, 依次检查表面等级低于 n_i 表面等级且可满足式(6) 的板坯, 与 n_i 进行交换, 直到计划 j 中的所有板坯均满足表面等级轧制要求, $i = i + 1$, 转至 Step2.

Step5: 将除 j 外的所有计划当前轧制长度排序, 从最小长度计划开始, 将 n_i 试放入计划中, 完成 Step3 的操作, 直到板坯 n_i 可分配入计划中, $i = i + 1$, 转至 Step2.

Step6: 启发式修正结束.

3.3 标准可行解的转化和演化策略

按照 3.2 节的描述, 可将 n 位自然数序列映射为 M 个轧制计划. 但是有可能出现这样的情况: 排列不同的两个 n 位串经过启发式计算转化为可行解后, 映射成为两组相同的轧制计划. 这种情况的发生会降低种群分布的遍历性, 从而降低解的收敛速度并且容易陷入局部极小. 为此本文提出将映射好的可行解先转化为标准可行解再进行演化操作的方法. 标准可行解的转化过程可理解为 3.2 节所描述的启发式算法的逆过程, 即将已形成的 M 个轧制计划中的板坯生成一个 n 位自然数序列, 具体转化方法同 3.2 节所述. 仿真试验表明, 该方法可增加个体多样性, 有效防止陷入局部极小.

演化策略的制定直接影响演化计算的收敛性能. 对于自然数编码方式, 一般的演化策略会在个体内产生重复基因或者缺少基因的现象, 这种情况在模型求解时是不允许的. 另外, 模型中个体基因长度相对较大, 考虑到算法收敛速度, 本文采用基于顺序的子串交叉^[9] 和子串移位相结合的演化策略产生新个体.

基于顺序的子串交叉是从两个体中选取相同的自然数作为发生交叉的子串, 保持子串中基因的顺序不变, 将子串按位置放入另一个体中, 从而产生两个新个体. 子串移位是从个体中随机选取一子串, 将其移动到自身的某一位置. 基于顺序的子串交叉方式和子串移位方式分别如图 2 和图 3 所示.

演化操作之后, 采用锦标赛方法选取不重复的固定规模标准可行解作为下一代个体, 再次进入演化操作.

3.4 算法求解步骤

- Step1: 提取算法参数和要编制计划的板坯数

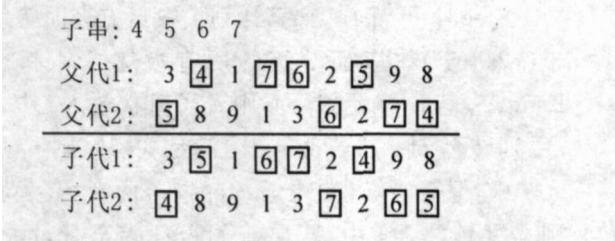


图 2 子串交叉方式

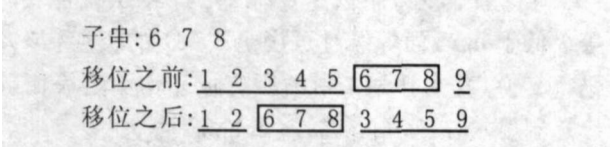


图 3 子串移位方式

据;

Step2: 应用式(7)和(8)对轧制计划个数进行预估计,并设 $M = M_{\min}$;

Step3: 随机产生一定数量的 n 位自然数序列;

Step4: 运用 3.2 节描述的启发式算子将自然数编码映射为 M 个轧制计划;

Step5: 判断算法迭代是否结束,若是,记录当前 M 值下的最优解,转至 Step6;否则将可行解标准化后进行锦标赛选择,选出不重复固定数量的标准可行解进行演化操作,转至 Step4;

Step6: 判断当前 M 个轧制计划中是否存在轧制违规,若存在,则 $M = M + 1$,转至 Step3;否则,算法得到当前 M 值下的最优解,算法结束.

4 仿真实验

为验证上述模型与算法的有效性,选取宝钢 1580 机组 309 块实际板坯数据进行实验,表面等级分为 4 个等级,轧制公里数约束分别为 60 km,90 km,120 km,160 km. 目标函数中宽度(mm)、厚度(10^{-2} mm)、硬度组跳跃惩罚系数参照文献[5]的设置,宽度反跳惩罚系数的选取如表 1 所示,出炉温度()、精轧温度()和卷取温度()跳跃惩罚系数的选取如表 2 ~ 表 4 所示,平均轧制长度惩罚系数依经验选取 $\alpha = 10\,000\,000$. 算法参数设置:种群个数为 80,迭代次数为 1 000 代,基于顺序的子串交叉概率为 0.7,子串移位概率为 0.2. 计算结果为 $M_{\min} = 4$, $M_{\max} = 9$,适应值下降曲线如图 4 所示,最优解中随机选取的 3 个轧制单元主体材宽度跳跃变化如图 5 所示.

由图 4 可以看出,当 $M = 4$ 时,迭代 681 代之后适应值降为 8 134 700 不再变化. 此时由于计划单元中存在违规,故将计划个数增加至 $M = 5$ 再利用混合算法求解,适应值从 8 134 700 开始,最终降至 5 225 400,此时计划单元 6 项指标均无违规发生,则 $M = 5$ 时得到模型最优解. 由图 5 可以看出,最优解中随机选取的计划单元板坯块数均大于 60 块,轧

表 1 宽度反跳惩罚系数

宽度反跳 / mm	惩罚值
0 ~ 3	5
3 ~ 5	10
5 ~ 10	200
> 10	∞

表 2 出炉温度跳跃惩罚系数表

出炉温度跳跃 /	惩罚值
0 ~ 5	1
5 ~ 10	3
10 ~ 15	6
15 ~ 20	12
20 ~ 30	30

表 3 精轧温度跳跃惩罚系数表

精轧温度跳跃 /	惩罚值
0 ~ 10	1
10 ~ 20	3
20 ~ 30	5
30 ~ 40	10
40 ~ 50	20
50 ~ 60	30

表 4 卷取温度跳跃惩罚系数表

卷取温度跳跃 /	惩罚值
0 ~ 10	1
10 ~ 20	3
20 ~ 30	5
30 ~ 40	7
40 ~ 50	10
50 ~ 60	15
60 ~ 70	20
70 ~ 80	30
80 ~ 90	40
90 ~ 100	50
100 ~ 110	70
110 ~ 120	90

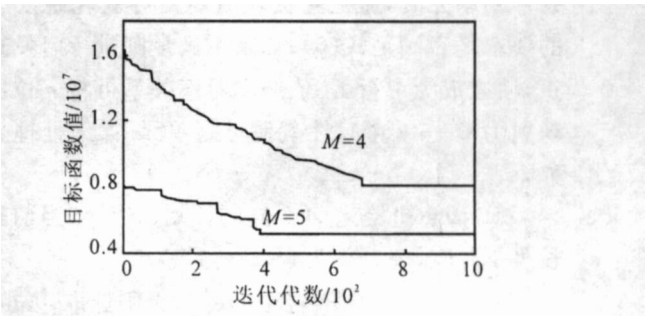


图 4 M = 4 和 M = 5 时目标适应值收敛曲线

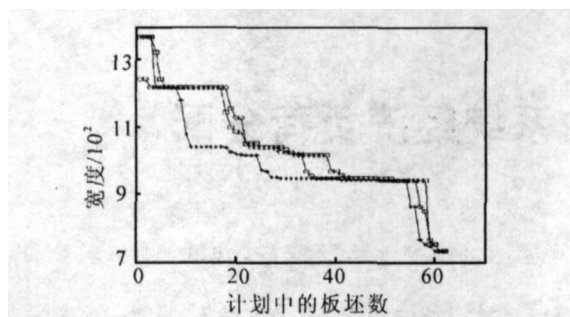


图 5 最优解中任选 3 个计划主体材宽度变化曲线
制宽度由宽到窄变化,经统计平均轧制公里数为 133 km.考虑烫辊材的添加,轧制单元总长度预计可超过 140 km,说明该模型算法是有效的,可用于生产实际.

5 结 语

针对宝钢热轧厂生产实际,在建立热轧计划编制模型时主要考虑了板坯轧制区段与轧制表面等级间的约束,并将板坯间出炉温度、精轧温度、卷取温度的跳跃因素和主体材宽度、厚度、硬度组的变化综合考虑,建立了宽度反跳和各阶段温度跳跃的惩罚系数表.利用混合算法求解时,将编码个体经启发式算法转化为轧制单元,再转化为标准可行解后进行演化计算.现场实际数据仿真表明了该模型算法的可靠性和实用性.

参考文献(References)

[1] Leo Lopez, Michael W Carter, Michel Gendreauu. The hot strip mill production scheduling problem: A tabu search approach [J]. European J of Operational Research, 1998, 106(2): 317-335.
[2] Tang L X, Liu J Y, Rong A Y, et al. A multiple traveling salesman problem model for hot rolling scheduling in shanghai baoshan iron & steel complex [J]. European J of Operational Research, 2000, 124(2): 267-282.

[3] 张涛,王梦光,杨建夏. 不确定计划数的轧制批量计划的模型和算法[J]. 系统工程学报, 2000, 15(1): 54-60. (Zhang T, Wang M G, Yang J X. The model and algorithm for the hot-milling batch planning with uncertain number [J]. J of System Engineering, 2000, 15(1): 54-60.)
[4] 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. Rolling plan model and algorithm in hot rolling plant[J]. Control and Decision, 2005, 20(3): 275-279.)
[5] Kosiba, E D, Wright J R, Cobbs A E. Discrete event sequencing as a traveling salesman problem [J]. Computers in Industry, 1992, 19(3): 317-327.
[6] Chu P C, Beasley J E. A genetic algorithm for the multidimensional knapsack problem [J]. J of Heuristics, 1998, 4(1): 63-86.
[7] Chu P C, Beasley J E. Constraint handling in genetic algorithms: The set partitioning problem [J]. J of Heuristics, 1998, 4(4): 323-357.
[8] Davis L. Applying adaptive algorithms to domains[C]. Proc of the Int Joint Conf on Artificial Intelligence. Los Angeles, 1985: 162-164.
[9] Mitsuo Gen, Chen R W. Genetic algorithm and engineering design [M]. New York: John Wiley and Sons, 1997.
[10] Grefenstette J, Gopal R, Rosmaita B, et al. Genetic algorithms for the traveling salesman problem [C]. Proc of the 1st Int Conf on Genetic Algorithms. Lawrence Erlbaum, 1985.
[11] 朱宝琳,于海斌. 炼钢-连铸-热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.)

(上接第 224 页)

[14] 郭秀清,严隽薇. 现代集成制造体系结构生命周期研究[J]. 同济大学学报, 2006, 34(1): 120-125. (Guo X Q, Yan J W. Research on lifecycle dimension of CIM architecture[J]. J of Tongji University, 2006, 34(1): 120-125.)

[15] 严隽薇,马达,王坚,等. 基于 ASP 模式的 VEMS 的研究[J]. 中南大学学报, 2005, 36(8): 533-537. (Yan J W, Ma D, Wang J, et al. Research on ASP mode based VEMS[J]. J of Central South University, 2005, 36(8): 533-537.)