

文章编号: 1000-8152(2009)12-1452-03

## 钢铁一体化生产多目标合同计划建模与算法

於春月<sup>1,2</sup>, 王成恩<sup>1</sup>

(1. 东北大学 流程工业综合自动化教育部重点实验室, 辽宁 沈阳 110004;  
2. 沈阳大学机械工程学院, 辽宁 沈阳 110044)

**摘要:** 为了实现热装比最大等多个优化目标, 将炼钢-连铸-热轧一体化生产过程, 抽象为炼钢与热轧两大加工阶段, 建立了一体化生产多目标合同计划模型。以板坯热装比最大、交货提前/拖期率最小和组炉余材最少为优化目标, 综合考虑了炼钢产能、热轧产能、最小主体材产量、以及钢种、板坯和成品规格等约束条件。通过变异目标空间中的重合个体, 以及在每一代增加若干个新个体的方法, 对非支配排序遗传算法NSGA-II(non-dominated sorting genetic algorithm)进行了改进, 提高了种群的多样性。不同规模计划问题的计算结果表明了所建立模型和对NSGA-II算法的改进是有效的。

**关键词:** 钢铁一体化生产; 多目标优化; 合同计划; NSGA-II算法

中图分类号: TP29 文献标识码: A

## Multi-objective order-planning model and algorithm for integrated steel production

YU Chun-yue<sup>1,2</sup>, WANG Cheng-en<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Integrated Automation of Process Industry, Ministry of Education,  
Northeastern University, Shenyang Liaoning 110004, China;  
2. School of Mechanical Engineering, Shenyang University, Shenyang Liaoning 110044, China)

**Abstract:** In order to realize the maximal hot charge-ratio and other optimal objectives, an optimal multi-objective order-planning model is formulated for the integrated steelmaking-continuous casting-hot rolling(SM-CC-HR) production process in a steel plant, where the steelmaking and the hot-rolling are regarded as the key steps. The objectives are the maximum of the hot charge-ratio, the minimum of the earliness/delayed delivery-time and the minimum of the slabs which are surplus to the requirements for hot rolling. The main constraints, including steelmaking and hot-rolling production capacities, the low limit of staple materials output, steel grade, slab and product dimension, are all taken into consideration in the model. The NSGA-II algorithm(non-dominated sorting genetic algorithm) is improved by mutating the superposition individuals in the objective space and adding some new individuals on every generation so that the population diversity is improved significantly. Computation results of different order-planning problems indicate that the proposed mathematical model and the improvement on NSGA-II algorithm are efficient.

**Key words:** integrated steel production; multi-objective optimization; order planning; NSGA-II algorithm

### 1 引言(Introduction)

炼钢-连铸-热轧一体化生产<sup>[1]</sup>(以下简称一体化生产), 对各工序之间的生产计划协调与联合控制, 提出了更高的要求, 迫切需要研究与发展一体化生产计划与调度优化方法, 在满足产能、工艺等约束条件下, 保证炼钢、连铸、热轧3大生产过程协调进行, 实现热装比或直轧率最大等优化目标。现有关于

钢铁生产计划优化问题的研究, 多是在满足各工序产能约束条件下, 以定单交货提前/拖期惩罚最小为单一目标<sup>[2~4]</sup>, 或利用加权的方法, 将交货提前/拖期惩罚最小、库存成本最小等多个目标转化为单一目标<sup>[5]</sup>进行优化, 最终只获得一个解决方案, 这限制了生产实际应用的灵活性。另外, 还未见将热装比或直轧率最大作为一体化生产合同计划优化目标的研究

收稿日期: 2008-05-26; 收修改稿日期: 2008-12-09。

基金项目: 解放军总装备部武器装备预研基金项目(9140A18010106LN0101); 东北大学“985”工程“流程工业综合自动化科技创新平台”资助项目(SYPT-01-02)。

文献。因此,本文把热装比最大作为一个重要优化目标,建立了一体化生产合同计划多目标优化模型,并且利用改进的NSGA-II算法进行求解。

## 2 数学模型(Mathematical model)

热装比是指计划周期内,板坯非冷装的产量占总产量的比例。热装比越高,说明炼钢与热轧之间,板坯库的实时库存量越小,加热炉的生产效率越高,本文认为炼钢与热轧任务均被安排在同一天内的生产定单,能够实现板坯热装或直接热轧,进而计算出热装比。在炼钢阶段,本文将无主材占炼钢总量的比例最小作为另一个优化目标。本文依然考虑交货提前/拖期惩罚最小这个优化目标,将交货提前或拖期的生产定单总量占生产总量的比例最小作为又一个优化目标。

首先定义各个常量、中间变量和决策变量: $i = 1, 2, \dots, N$ , 定单序号, 共有 $N$ 个生产定单; $j = 1, 2, \dots, M$ , 计划周期内的日期序号, 共有 $M$ 天; $k = 1, 2, \dots, P$ , 钢种序号,  $N$ 个生产定单中共有 $P$ 个钢种; $l = 1, 2, \dots, Q$ , 板坯规格序号,  $N$ 个生产定单中共有 $Q$ 个板坯规格; $W_{Sj}$ , 第 $j$ 天的炼钢总能力; $W_{kj}$ , 第 $j$ 天冶炼钢种 $k$ 的能力; $W_{lj}$ , 第 $j$ 天浇铸规格 $l$ 的能力; $W_{Rj}$ , 第 $j$ 天的热轧总能力; $W_{zj}$ , 第 $j$ 天轧制主体的最小产量; $w_i$ , 定单 $i$ 的定货量; $S_{ik} = 1$ , 表示定单 $i$ 的钢种是 $k$ , 否则 $S_{ik} = 0$ ; $T_{il} = 1$ , 表示定单 $i$ 的板坯规格是 $l$ , 否则 $T_{il} = 0$ ; $Z_i = 1$ , 表示定单 $i$ 的钢材属于主体材, 否则 $Z_i = 0$ ; $A_i = 1$ , 表示定单 $i$ 不在交货期窗口内完工交货, 否则 $A_i = 0$ ; $B_i = 1$ , 表示定单 $i$ 在同一天内完成炼钢与热轧, 否则 $B_i = 0$ ; $E_j$ 表示第 $j$ 天的组炉余材总量; $X_{ij}$ 和 $Y_{ij}$ 为决策变量,  $X_{ij} = 1$ 表示安排定单 $i$ 在第 $j$ 天炼钢, 否则 $X_{ij} = 0$ ;  $Y_{ij} = 1$ 表示安排定单 $i$ 在第 $j$ 天轧制, 否则 $Y_{ij} = 0$ 。

建立生产合同计划优数学模型如下:

$$\min Z_1 = \sum_{i=1}^N w_i \times A_i / \sum_{i=1}^N w_i, \quad (1)$$

$$\max Z_2 = \sum_{i=1}^N w_i \times B_i / \sum_{i=1}^N w_i, \quad (2)$$

$$\min Z_3 = \sum_{j=1}^M E_j / \sum_{i=1}^N w_i \quad (3)$$

$$\text{s.t. } \sum_{i=1}^N w_i \times X_{ij} + E_j \leq W_{Sj}, \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^N w_i \times X_{ij} \times S_{ik} \leq W_{kj}, \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^N w_i \times X_{ij} \times T_{il} \leq W_{lj}, \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^N w_i \times Y_{ij} \leq W_{Rj}, \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^N w_i \times Y_{ij} \times Z_i \geq W_{zj}, \quad (8)$$

$$\sum_{j=1}^M X_{ij} = 1, \quad (9)$$

$$\sum_{j=1}^M Y_{ij} = 1, \quad (10)$$

$$\sum_{j=1}^M j \times Y_{ij} - \sum_{k=1}^P k \times X_{ik} \geq 0. \quad (11)$$

目标函数(1)~(3)分别表示: 交货提前/拖期率最小、热装比最大和组炉余材率最小。约束(4)~(7)分别表示每天的炼钢总量、每个钢种的炼钢总量、每种板坯规格的浇铸总量、热轧总产量,都不能超过某一上限; 约束(8)表示每天的主体材轧制总量,不能低于下限产量,以保证高附加值产品的产量和经济利润; 约束(9)(10)分别表示每个定单必须且仅能在某一天内浇铸或轧制; 约束(11)表示每个定单的轧制生产不能在炼钢之前进行。

## 3 改进的NSGA-II(Improved NSGA-II)

在多个有代表性的多目标进化算法<sup>[6~10]</sup>中, NSGA-II算法在保持个体多样性、解的分布和覆盖度方面, 属于一种综合性能良好的算法。为了保证算法搜索到最优前沿并有较好的收敛性, 以及提高种群的多样性, 本文对NSGA-II进行如下改进:

1) 对目标空间中重合的多个体, 只保留一个, 对其余的个体进行任意两个基因位互换, 即在每个个体的领域内进行小变异, 重新获得新个体。

2) 抛弃第 $i$ 个前沿子集中的个体, 按照初始种群生成方法, 随机生成 $N - |P_{t+1}|$ 个新个体加入 $P_{t+1}$ 。

MAXGEN表示循环次数, 改进的NSGA-II算法流程如下:

随机生成大小为 $N$ 的初始种群 $P_t$ ;

For  $t = 0$  to MAXGEN-1;

通过选择、交叉和变异, 生成子种群 $Q_t$ ;

生成种群 $R_t = P_t \cup Q_t$ ;

对 $R_t$ 进行非支配排序, 获得 $R_t$ 的前沿 $F = (F_1, F_2, \dots)$ ;

令 $P_{t+1}$ 为空,  $i = 0$ :

While  $P_{t+1}$ 中的个数不大于 $N$ ;

$i = i + 1$ :

将 $F_i$ 加入 $P_{t+1}$ ;

```

    End While;
    生成  $N - |P_{t+1}|$  新个体, 加入到  $P_{t+1}$ ;
     $t = t + 1$ ;
End For.

```

#### 4 实例分析(Experiment analysis)

本文选取了3个不同规模(80, 120和200个定单)的合同计划问题. 算法最大迭代次数是1000, 种群规模分别是50, 210和350, 交叉概率 $P_c = 0.7$ , 变异概率 $P_m = 0.01$ . 应用本文提出的改进NSGA-II算法和

原NSGA-II算法, 分别对每个问题求解10次, 每次求解, 两个算法都起始于同一个初始种群, 解集覆盖度见表1.  $C(N, I)$ 表示在原NSGA-II算法的解集中, 被改进NSGA-II算法的解支配(不好于原NSGA-II算法的解)的解, 所占的比例. 可以看出,  $C(N, I)$  都比 $C(I, N)$ 大, 而且大多数为1, 说明改进NSGA-II算法的所有解, 都优于原算法的解, 至少都不比后者差, 算法改进有效. 这是因为在离散的变量空间, 改进NSGA-II算法在每一代加入新个体, 可以使算法跳出局部最优, 并且增加种群的多样性.

表1 2种算法的解集覆盖度

Table 1 The coverage between the two algorithms' solution sets

计划问题	覆盖度	Run1	Run2	Run3	Run4	Run5	Run6	Run7	Run8	Run9	Run10
80定单	$C(I, N)$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.10
	$C(N, I)$	1.00	1.00	1.00	1.00	0.85	1.00	0.70	1.00	1.00	1.00
120定单	$C(I, N)$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	$C(N, I)$	1.00	1.00	1.00	0.90	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
200定单	$C(I, N)$	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	$C(N, I)$	1.00	1.00	0.65	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

#### 5 结论(Conclusions)

本文研究的意义在于: 在合同计划层次, 首次将热装比最大化作为优化目标之一, 建立了多目标合同计划优化模型, 并利用改进的NSGA-II算法进行求解. 获得了多个可供生产实际选择的合同计划, 在生产总量、钢种与规格上, 扩展了炼钢与热轧之间协调优化的空间, 有利于在作业计划层次上, 获得更高的热装比. 结果表明本文对算法NSGA-II的改进, 提高了解空间的多样性, 非劣解集具有很高的覆盖度.

#### 参考文献(References):

- [1] 徐心和, 陈雄, 郭令忠. 炼钢-连铸-热轧一体化管理[J]. 冶金自动化, 1997, 3(1): 1—5.  
(XU Xinhe, CHEN Xiong, GUO Lingzhong. Integrated management of steelmaking, continuous casting and hot strip rolling[J]. *Metalurgical Industry Automation*, 1997, 3(1): 1—5.)
- [2] ZHANG T, ZHANG Y J, WANG M G. Research on 3MO-based genetic algorithm for solving order planning[C] //Proceedings of the Fourth International Conference on Machine Learning and Cybernetics. Guangzhou: IEEE Press, 2005, 6: 3650—3655.
- [3] ZHU B L, YU H B, HUANG X Y. Research approaches on integrated planning for iron and steel enterprises[C]//International Conference on Systems, Man and Cybernetics. Taipai: IEEE Press, 2006, 6: 5024—5029.
- [4] 张涛, 王梦光, 唐立新. 钢厂合同计划的模型与算法[J]. 控制理论与应用, 2000, 17(5): 711—715.

(ZHANG Tao, WANG Mengguang, TANG Lixin. The model and algorithm for the order planning of the steel plant[J]. *Control Theory & Applications*, 2000, 17(5): 711—715.)

- [5] LIU S X, TANG J F, SONG J H. Order-planning model and algorithm for manufacturing steel sheets[J]. *International Journal Production Economics*, 2006, 100(1): 30—43.
- [6] SRINIVAS N, DEB K. Multi-objective optimization using non-dominated sorting in genetic algorithms[J]. *Evolutionary Computation*, 1994, 2(1): 221—248.
- [7] DEB K, PRATAP A, AGARWAL S. A fast and elitist multi-objective genetic algorithm: NSGA-II[J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2002, 6(2): 182—197.
- [8] HORN J, NAFPLIOTIS N, GOLDBERG D E. A niched pareto genetic algorithm for multiobjective optimization[C] //Proceedings of the First IEEE Conference on Evolutionary Computation. New Jersey: IEEE Press, 1994, 1: 82—87.
- [9] ZITZLER E, THIELE L. Multiobjective evolutionary algorithms: a comparative case study and the strength pareto approach[J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 1999, 3(4): 257—271.
- [10] ZITZLER E, THIELE L. Comparison of multiobjective evolutionary algorithms[J]. *Empirical Results, Evolutionary Computation*, 2000, 8(1): 173—195.

#### 作者简介:

於春月 (1974—), 女, 博士研究生, 目前研究方向为钢铁企业生产计划与调度优化、智能算法, E-mail: ycy\_neu@163.com;

王成恩 (1964—), 男, 教授, 博士生导师, 目前研究方向为复杂产品优化设计、制造执行系统、流程工业生产过程建模与控制, E-mail: wangc@ise.neu.edu.cn.