

文章编号: 1001-0920(2009)01-0071-05

## 钢铁企业合同计划与余材匹配的集成优化方法

卢克斌<sup>1,2</sup>, 黄可为<sup>2</sup>, 汪定伟<sup>1</sup>, 张瑞友<sup>1</sup>

(1. 东北大学 信息科学与工程学院, 沈阳 110004; 2. 宝钢技术中心 自动化研究所, 上海 201900)

**摘要:** 钢铁企业的合同计划和余材匹配的集成优化是解决钢铁企业面向订单生产的关键技术. 由于该问题复杂, 涉及因素多, 求解难度大, 对此提出一个带有提前拖期惩罚的联合计划优化的数学模型, 并提出一种嵌有“优先适合启发式”的遗传算法. 该方法利用背包问题的求解思路改进了染色体的性能, 从而加快了遗传算法的求解速度. 将该模型及算法应用于实际钢铁企业的计划编排中, 取得了满意的效果.

**关键词:** 合同计划; 余材匹配; 最优化; 遗传算法; 优先适合启发式

**中图分类号:** TP391      **文献标识码:** A

## Integrated optimization approach of contract planning and surplus inventory matching of steel mill

LU Ke-bin<sup>1,2</sup>, HUANG Ke-wei<sup>2</sup>, WANG Ding-wei<sup>1</sup>, ZHANG Rui-you<sup>1</sup>

(1. College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China; 2. Institute of Automation, Baosteel Technology Center, Shanghai 201900, China. Correspondent: WANG Ding-wei, E-mail: dwwang@mail.neu.edu.cn)

**Abstract:** The integrated optimization of contract planning and surplus inventory matching is one of the key technologies of iron and steel corporations working to orders. Because of above complex problem includes many factors, it is difficult to be solved by using traditional approaches. We propose an integrated optimization model with earliness and tardiness penalties. A “first fit heuristic” embedded genetic algorithm is developed for the model solution. The recommended model and algorithm are applied to the practical contract plan making. The achieved results are satisfying.

**Key words:** Contract planning; Surplus inventory matching; Optimization; Genetic algorithms; First fit heuristics

### 1 引言

钢铁企业具有设备大型化、生产过程连续化、高速化和自动化的特点, 而钢材市场的需求却呈现出多品种、小批量、高品质、低价格的发展趋势. 由于最终产品的多样性和工艺复杂性, 钢材生产过程通常按照合同进行. 在这种条件下, 钢铁企业的生产经营面临着两个问题: 既要在复杂的工艺条件下保持生产的连续性, 又必须满足客户对产品品种、规格、数量和交货期上的特殊要求<sup>[1]</sup>. 因此, 当得到客户的订货合同后, 如何迅速地满足客户需要, 及时把货物交给客户, 同时使企业获得较大的经济效益, 便成为钢铁企业考虑的目标.

合同计划是以企业的生产合同信息作为驱动,

在满足各道工序生产能力的限制下, 对企业的可用资源进行优化分配, 安排合同在各道工序上的生产时间. 目前国内外已针对合同计划问题提出了不同的解决方法. Redwine 等<sup>[2]</sup>建立了以最小化合同总拖期目标的混合整数规划模型; Sasidhar 等<sup>[3]</sup>提出了基于多重 ARC 网的最大流模型.

Kalagnanam 等<sup>[4,5]</sup>认为, 生产过程中会有库存余材产生的工业, 存在着余材与合同匹配的问题, 并将该问题建立为一个有颜色约束的多背包问题. 此后, 余材匹配问题受到许多人的关注<sup>[6]</sup>. 胡琨元等<sup>[7-9]</sup>在合同计划和余材匹配问题的研究基础上, 提出了将库存匹配与生产计划联合进行优化, 力求做到全局最优.

收稿日期: 2007-11-16; 修回日期: 2008-03-16.

基金项目: 国家自然科学基金项目(70431003, 70771021); 国家支撑计划项目(2006BAH02A09).

作者简介: 卢克斌(1971—), 男, 江苏东台人, 高级工程师, 博士生, 从事冶金生产计划调度的研究; 汪定伟(1948—), 男, 江西彭泽人, 教授, 博士生导师, 从事建模与优化、生产计划与调度方法等研究.

由于集成优化问题的求解难度大,如何能够快速高效地获得满意解已成为实际生产中的首要需求<sup>[10,11]</sup>.近年来,采用启发式和局部搜索改进染色体性能的 Memetic 算法已成为一种广为使用的方法<sup>[12]</sup>.本文在文献[9,13,14]的工作基础上,建立了基于提前拖期计划的余材匹配和合同计划的集成优化模型,并提出一种嵌入“优先适合启发式”的遗传算法以求解上述问题.在实际钢铁企业的合同计划编排中取得了很好的效果.

## 2 问题的描述

对于某钢厂,已知计划期  $[1, T]$  内,第  $j$  时段的额定生产能力为  $E_j (j = 1, \dots, T)$ . 计划期内累计要完成  $N$  份合同,其中第  $i$  份合同的订货量为  $W_i (i = 1, \dots, N)$ . 订货要求的品种是  $k$ , 交货期在  $[u_i, v_i]$  之间,生产的准备费用为  $c_i$ ,单位重量产品的能力占用系数为  $i$ . 共有  $M$  个库存余材品种,其中第  $k$  个品种余材的库存量为  $S_k (k = 1, \dots, M)$ .

将合同的处理分为以下 3 种情况:

1) 从库存中选择品种与订货要求相同或相近的余材进行匹配. 如果第  $k$  种余材的库存量大于订货量,即  $S_k \geq W_i$ , 则可直接从库存中调用第  $k$  种余材交货; 否则, 可根据冶金产品标准中“以好充次”的原则, 从库存中选择相同产品序列但等级相对较高的余材替代交货, 或经过附加工序加工后交货, 但这种匹配方式会大大降低合同的期望收益. 设合同  $i$  选择库存中第  $k$  种余材交货时的损失费用为  $y_{ik}$ , 则

$$y_{ik} = \begin{cases} 0, & k = k; \\ k k, & k \text{ 与 } k \text{ 属于同一产品系列,} \\ & \text{且 } g(k) < g(k); \\ , & k \text{ 与 } k \text{ 不属于同一产品系列.} \end{cases}$$

其中:  $g(k)$  为第  $k$  种产品等级的量化指标,  $g(k)$  可以根据产品的技术手册查到.

2) 根据合同的订货量、交货期范围  $[u_i, v_i]$  及各时段内额定生产能力  $E_j$ , 安排合同的生产期限  $t_i$ . 合同提前完成会增加存储费用, 占用流动资金, 从而带来产品成本的提高; 而交货拖期则需向客户支付拖期惩罚. 设合同  $i$  单位时间的提前与拖期惩罚因子分别为  $i$  和  $i$ .

3) 撤销合同. 如果现有的余材数量和生产能力均不能保证满足某一合同, 则该合同将从计划期内撤消. 合同撤消后减少了企业在计划期内的收益, 还要支付给客户一定的赔偿费用, 因此必须考虑合同撤消的惩罚  $p_i$  (通常  $y_{ik} < c_i < p_i$ ).

由于钢铁企业的产品生产与交货过程均是按合同进行的, 本文的主要任务是确定合同对库存余材的匹配方案或计划生产日期, 目标是实现全部合同

的违约(提前/拖期/撤销)惩罚费用、生产准备费用及库存匹配费用的总和最小化.

定义决策变量  $x_{ij}$  和  $y_{ik}$  为

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{如果合同 } i \text{ 选择在第 } j \text{ 时段完成;} \\ 0, & \text{否则;} \end{cases} \quad (1)$$

$$y_{ik} = \begin{cases} 1, & \text{如果合同 } i \text{ 选择库存中第 } k \text{ 种余材交货;} \\ 0, & \text{否则.} \end{cases} \quad (2)$$

合同的库存匹配与生产计划编制集成优化模型为

$$\min f = \sum_{i=1}^N \{ i [u_i - t_i]^+ + i [t_i - v_i]^+ \} + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^T c_i x_{ij} + \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^M y_{ik} y_{ik} + \sum_{i=1}^N p_i \left[ 1 - \sum_{j=1}^T x_{ij} - \sum_{k=1}^M y_{ik} \right]; \quad (3)$$

$$\text{s. t. } \sum_{i=1}^N x_{ij} W_i \leq E_j, \quad j = 1, \dots, T; \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^N y_{ik} W_i \leq S_k, \quad k = 1, \dots, M; \quad (5)$$

$$\sum_{j=1}^T x_{ij} + \sum_{k=1}^M y_{ik} = 1, \quad i = 1, \dots, N; \quad (6)$$

$$t_i = \sum_{j=1}^T x_{ij} j + \left[ 1 - \sum_{j=1}^T x_{ij} \right] u_i, \quad i = 1, \dots, N. \quad (7)$$

其中  $[x]^+ = \max \{0, x\}$ .

在模型的目标函数(3)中,第1项是合同的提前/拖期惩罚费用;第2项是合同的生产准备费用;第3项是合同从库存中选择余材交货时的替代损失费用;第4项是合同被撤销时的惩罚费用. 在约束条件中,式(4)表示各时间段内的生产能力限制;式(5)表示匹配各类余材的库存总量限制;式(6)限定每份合同只能选择一种处理方式,即利用库存余材交货、或在计划期内排产、或在计划期内被撤销;式(7)代表合同  $i$  的交货时间:若被排产,则  $t_i$  等于计划生产的时间段;若利用库存交货或被撤销时,则肯定不存在提前/拖期惩罚,因此  $t_i$  的取值限定为交货期窗口的下限值  $u_i$ .

## 3 嵌入优先适合启发式的遗传算法

合同计划问题是在多重资源约束的条件下,挑选出生产成本最小的合同组合,其本质上是一种多维约束的背包问题. 由于实际背景中的合同规模较大,余材种类繁多,采用常规算法很难在可接受的时间内获得最优解.“优先适合启发式”是求解背包问题的一种常用方法,其基本思想是在满足资源约束的前提下,优先挑选“价格-资源消耗比”高的物

品<sup>[14]</sup>.

针对合同计划问题的特点, 优先适合启发式算法设计如下:

Step1: 首先判断解是否满足余材约束(5). 如果不满足, 则将合同按单位余材替代损失费用从大到小的顺序, 依次撤销选择余材交货的合同, 即令  $a_i = 0$ , 直至满足约束条件(5).

Step2: 将 Step1 中撤销的合同, 按照交货期惩罚  $(i[u_i - t_i]^+ + i[t_i - v_i]^+)$  最小的原则分配时间段, 即令  $b_i = t$ , 分配时要满足能力约束(4).

Step3: 判断解是否满足能力约束(4). 如果不满足, 则按照合同占用生产能力从大到小的顺序, 依次撤销排产, 直至满足约束(4).

Step4: 将 Step3 中撤销排产的合同, 按照替代损失费用由小到大的顺序安排库存余材交货, 但要同时满足约束条件(5).

由于启发式算法不能保证解的最优性, 这里采用遗传算法作为上层优化工具. 算法的具体设计如下:

1) 二部编码方案

采用分段整数编码, 前一部分反映匹配合同的库存情况, 后一部分反映合同的排产情况. 具体表示方法如下:

设染色体  $S = \{ a_1, \dots, a_N \mid b_1, \dots, b_N \}$ . 其中: 基因  $a_i (0 \leq a_i \leq M, i = 1, \dots, N)$  代表合同  $i$  匹配的余材的种类, 当  $a_i = 0$  时表示合同  $i$  没有选择库存余材交货; 基因  $b_i (0 \leq b_i \leq T, i = 1, \dots, N)$  代表安排合同  $i$  生产的期限, 当  $b_i = 0$  时表示合同  $i$  未排产.

2) 初始解的产生

为了保证初始解符合约束(6)的限制, 染色体的  $a_i$  和  $b_i$  不能同时大于 0, 因而按如下方法给出初始解:

Step1: 构造前一部分染色体. 在  $[0, 2M]$  范围内随机产生一个整数  $S$ , 如果  $S > M$ , 则  $a_i = 0$ ; 否则  $a_i = S$ .

Step2: 在前一部分染色体的指导下构造后一部分染色体. 如果  $a_i = 0$ , 则  $b_i = 0$ ; 否则在  $[0, T]$  范围内随机生成一个整数赋给  $b_i$ .

3) 适应度函数

采用正规化标定技术评价染色体的适应度. 设  $F_{\max}$  和  $F_{\min}$  分别为当前种群中最大目标值和最小目标值, 是一个限制在  $(0, 1)$  区间内的正实数, 则染色体的适应度为

$$F_i = \frac{F_{\max} - f_i + 1}{F_{\max} - F_{\min} + 1} \quad (8)$$

4) 选择策略

由父代和子代染色体构成扩展种群空间, 采用转轮法生成新的种群.

5) 遗传算子的选择

为保证子代染色体的合法性, 这里设计了特殊的遗传算子, 交叉和变异的过程中要同时考虑染色体的前半部分和后半部分对应的基因.

交叉时, 同时交换父代染色体中前半部分和后半部分对应基因位上的值.

变异时, 选择父代染色体中前后段相应基因位上的基因进行交换.

6) 调用优先适合启发式改进染色体

为了加快遗传算法的寻优速度, 对于所有遗传运算生成的新染色体, 运用“优先适合启发式”对其进行改进运算.

4 应用案例

为检验模型和算法的有效性, 对一些不同规模的源与生产实际的案例进行测试, 得到了令人满意的结果. 下面是其中一例.

设企业合同计划的计划期为 1 个月, 以半月为一个时间单位, 即  $T = 6$ , 合同池中的合同数为 50. 合同的交货期窗口和订货量已知. 合同的单位时间提前惩罚、单位时间拖期惩罚和撤销合同惩罚以及生产准备费用均与订货量成正比, 即

$$p_i = 0.15 w_i, \quad c_i = 0.3 w_i,$$

$$p_i = 1.8 w_i, \quad c_i = 0.4 w_i.$$

库存中余材的种类数为 6, 各种余材的数量如表 1 所示, 6 个时间段的生产能力如表 2 所示, 合同  $i$  选择第  $k$  种余材交货时的匹配损失费用如表 3 所示.

表 1 各种余材的库存量

库存量	余材 $k$					
	1	2	3	4	5	6
$S_k$	1000	1000	900	500	600	600

表 2 各时段的生产能力

生产能力	时段 $j$					
	1	2	3	4	5	6
$E_j$	2400	2400	2200	2200	2000	2000

表 3 各种余材匹配各合同的匹配成本

合同 $i$	余材 $k$					
	1	2	3	4	5	6
1	101	14	20	16	141	19
2	8	7	6	6	80	1
3	79	0	2	15	161	18
4	43	3	10	16	67	2
5	4	1	18	8	71	0

续表

合同 $i$	余材 $k$					
	1	2	3	4	5	6
6	8	9	22	3	105	1
7	86	0	1	16	3	19
8	11	0	2	4	52	3
9	31	7	3	7	82	3
10	62	8	15	0	87	12
11	16	4	2	13	2	1
12	19	14	1	41	144	1
13	54	1	17	6	83	4
14	5	5	13	18	59	0
15	2	9	14	21	88	0
16	2	5	18	21	53	0
17	23	1	14	19	38	0
18	23	4	16	24	62	5
19	46	8	14	31	114	0
20	72	11	8	19	38	2
21	17	3	5	5	38	0
22	34	0	18	7	90	3
23	4	4	8	31	42	0
24	0	16	19	21	172	0
25	87	11	19	7	113	24
26	36	8	15	12	33	0
27	37	7	6	3	53	3
28	80	1	25	22	132	4
29	59	10	20	23	183	5
30	60	1	0	7	83	9
31	41	3	0	3	58	0
32	85	0	20	3	79	6
33	34	10	7	11	94	2
34	7	6	13	5	38	1
35	65	2	11	31	121	9
36	113	7	8	25	32	11
37	65	5	13	26	29	5
38	31	17	2	25	26	0
39	16	0	2	8	2	3
40	23	0	13	15	86	6
41	12	2	7	4	39	1
42	16	7	10	3	109	1
43	61	4	12	3	125	4
44	8	1	2	11	14	1
45	68	6	6	23	45	4
46	0	10	11	18	72	0
47	54	0	21	22	22	13
48	36	4	0	5	30	8
49	43	7	15	1	37	7
50	22	3	5	2	49	0

遗传算法的种群规模为 100,交叉概率取 0.8,变异概率取 0.1,最大迭代次数为 100. 计算得到的解如表 4 所示,最优值为 19290.

表 4 集成优化的计算结果

合同 $i$	选择的余材 $k$	时段 $j$	合同 $i$	选择的余材 $k$	时段 $j$
2	4		24	6	
4		3	27	2	
5	6		32	4	
6	4		37		5
7	3		38	6	
9		1	39		5
11		2	41		1
13		1	42	6	
15		6	44		2
16	6		45		5
17		1	46	1	
18		3	47		3
20		1	50	6	
22	2				

从表 4 可看出,在 50 个合同中有 28 个合同入选. 通过选择部分合同匹配余材,并撤销部分成本过高的合同,使得合同的生产具有可行性,缓解了各道工序生产能力相对合同欠量紧张的矛盾,从而使得更多的合同能够列入计划并尽可能满足交货期的要求. 以上结果符合实际的需要. 由此可见,计算结果验证了模型和算法的有效性和可行性.

## 5 结 论

钢铁企业的合同计划与余材匹配的集成优化,对于提高企业经济效益和客户服务水平有着十分重要的意义. 本文提出的带有提前拖期惩罚的余材匹配与合同计划的集成优化模型,能够表达钢铁企业在多种资源约束下对顾客需要以及企业生产能力和成本因素的综合考量. 而提出的嵌入“优先适合启发式”的遗传算法,利用背包问题的求解思路改进了染色体的性能,从而加快了遗传算法的求解速度,为以上复杂优化模型的求解提供了一条可行的途径.

## 参考文献(References)

- [1] Rajagopalan S. Make to order or make to stock: Model and application [J]. Management Science, 2002, 48(2): 241-256.
- [2] Redwine C N, Wismer D A. A mixed integer programming model for scheduling orders in a steel mill [J]. J of Optimization Theory and Applications, 1974, 14(3): 305-318.
- [3] Sasidhar B. Multiple arc network model of production planning in a steel mill [J]. Int J of Production

- Economics, 1991, 22(3): 195-202.
- [4] Kalagnanam J R, Dawande M, Trumbo M, et al. Matching orders with surplus inventory in a steel mill [J]. Operations research, 2000, 48(4): 505-516.
- [5] Kalagnanam J R, Lee H S, Trumbo M E. Fast inventory matching algorithm for the process industry [P]. US Patent 6044361, 2000.
- [6] 聂义勇, 申志勇, 王宏, 等. 考虑库存余材利用的杆材下料方案[J]. 小型微型计算机系统, 2001, 7(22): 830-832.  
(Nie Y Y, Shen Z Y, Wang H, et al. ID cutting stock scheme with utilizing surplus in storage[J]. Mini-micro Systems, 2001, 7(22): 830-832.)
- [7] 胡琨元, 朱云龙, 汪定伟. 自适应 PBIL 算法求解合同优化匹配问题[J]. 系统工程, 2004, 12(22): 87-91.  
(Hu K Y, Zhu Y L, Wang D W. Adaptive PBIL algorithms for order optimal matching problems [J]. Systems Engineering, 2004, 12(22): 87-91.)
- [8] 胡琨元, 高政威, 汪定伟. 钢铁企业合同匹配多目标优化模型与算法[J]. 东北大学学报, 2004, 6(25): 527-530.  
(Hu K Y, Gao Z W, Wang D W. Optimal multi-objective model and algorithm for order matching problems in iron & steel plants [J]. J of Northeastern University, 2004, 6(25): 527-530.)
- [9] 胡琨元, 常春光, 郑秉林, 等. 钢铁企业中库存匹配与生产计划集成优化模型与算法[J]. 信息与控制, 2004, 33(2): 177-181.  
(Hu K Y, Chang C G, Zheng B L, et al. The model and algorithm for joint optimization of inventory matching and production planning in steel plant [J]. Information and Control, 2004, 33(2): 177-181.)
- [10] Shixin Liu, Jiafu Tang, Jianhai Song. Order-planning model and algorithm for manufacturing steel sheets[J]. Int J of Production Economics, 2006, 100(1): 30-43.
- [11] 黄可为, 卢克斌, 汪定伟. 炼钢组炉问题优化模型及其动态规划算法[J]. 东北大学学报, 2006, 27(2): 138-141.  
(Huang K W, Lu K B, Wang D W. Dynamic programming algorithm and optimization model of charge design for steel-making [J]. J of Northeastern University, 2006, 27(2): 138-141.)
- [12] Hwai-En Tseng, Wen-Pai Wang, Hsur Yi Shih. Using memetic algorithms with guided local search to solve assembly sequence planning[J]. Expert Systems with Applications, 2007, 33(2): 451-467.
- [13] Wang D W. Earliness/tardiness production planning approaches for manufacturing systems[J]. Computers & Industry Engineering, 1995, 34(3): 425-436.
- [14] 玄光南, 程润伟. 遗传算法与工程设计[M]. 北京: 科学出版社, 2000.  
(Xuan G N, Cheng R W. Genetic algorithm and engineering design[M]. Beijing: Science Press, 2000.)

(上接第 70 页)

- [9] Jin Y, Sendhoff B. Fuzzy preference incorporation into evolutionary multi-objective optimization [C]. Proc of the 4th Asia-Pacific Conf on Simulated Evolution and Learning. Melbourne, 2002: 26-30.
- [10] Branke J, Kau ler T, Schmeck H. Guidance in evolutionary multi-objective optimization[J]. Advances in Engineering Software, 2001, 32(2): 499-507.
- [11] Kalyanmoy Deb, Sundar J, Udaya Byaskara Rao N. Reference point based multi-objective optimization using evolutionary algorithms [J]. Int J of Computational Intelligence Research, 2006, 2(3): 273-286.
- [12] James Kennedy, Russell Eberhart. Particle swarm optimization[C]. Proc of the 4th IEEE Int Conf on Neural Networks. Piscataway, 1995: 1942-1948.
- [13] Joshua Knowles, David Corne. Properties of an adaptive archiving algorithm for storing nondominated vectors[J]. IEEE Trans on Evolutionary Computation, 2003, 7(2): 100-116.
- [14] Carlos A Coello Coello, Gregorio Toscano Pulido, Maximino Salazar Lechuga. Handling multiple objectives with particle swarm optimization[J]. IEEE Trans on Evolutionary Computation, 2004, 8(3): 256-279.
- [15] 徐玖平, 李军. 多目标决策的理论与方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.  
(Xiu J P, Li J. Multiple objective decision theory and methods [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005.)