

文章编号: 1001-0920(2004)06-0695-04

钢铁企业年度生产计划的研究

蒋圣平, 邹益仁

(中国科学院 自动化研究所, 北京 100080)

摘要: 针对多分厂、多机型的钢铁企业年度生产计划问题, 建立一个以提高经济效益为目的, 包含生产工艺、资源和能力等约束的多层递阶优化数学模型, 并研究了模型的算法。该算法首先从产品结构的角度将多层问题转换为两层模型, 然后对此两层模型利用遗传算法和二阶段法进行求解。仿真结果表明了该模型和算法的有效性和可行性。

关键词: 钢铁企业; 年度生产计划; 递阶优化; 遗传算法

中图分类号: TP391.9 **文献标识码:** A

On annual production planning for iron and steel enterprises

JIAN G Sheng-ping, ZOU Yi-ren

(Institution of Automation, Chinese Academy of Science, Beijing 100080, China. Correspondent: JIAN G Sheng-ping, E-mail: jpsaint@163.com)

Abstract: To the annual production planning problem for iron and steel enterprises with multi-plants and multi-machines, a mathematical model is proposed that belongs to a multi-level hierarchical optimal problem and an algorithm is discussed to solve the model. The model objective is to improve economic profit, and its constraints involve the work manufacture processes, resources and production capacity etc. The algorithm transfers the multi-level model into a bi-level one according to the structure of the products. Then the bi-level model is calculated by combining genetic algorithm with two-phase method. The simulation results show that this model and its algorithm are valid and feasible.

Key words: iron and steel enterprise; annual production planning; hierarchical optimal; genetic algorithm

1 引言

年度生产计划反映了企业在年度计划内生产发展的具体方向和水平, 规定了企业的产品类型, 并使它们与战略计划的目标相符, 其目的是追求最大的经济效益。由于生产工艺、市场需求及产品性质等的差异, 各企业制订生产计划的模型和方法也有不同。钢铁企业属于半连续型制造业, 其生产过程兼具连续和离散的性质, 具有以下特点^[1]: 1) 生产过程是多阶段并带有间歇性的分段连续, 其工艺路线基本单一; 2) 产品的市场需求是多品种、小批量的; 3) 生产主要集中在几条关键设备上; 4) 生产计划在很大

程度上受工艺条件和产品形状的制约。

目前, 钢铁企业生产计划的研究大多集中在调度方面, 而年度生产计划的研究却少有报道。传统的年度生产计划模型忽略了一些因素的影响而过于简单。本文以提高企业经济效益为目的, 充分考虑了企业工艺流程、半成品、多分厂、多机型设备的影响, 建立了一个集成能力供应计划和物料需求计划的年度生产计划模型, 并将遗传算法与二阶段法相结合进行求解。实例计算结果证明了该模型和算法的有效性和可行性。

收稿日期: 2003-06-26; 修回日期: 2003-09-02.

基金项目: 国家“九五”重点科技攻关计划项目(97-562-01-05).

作者简介: 蒋圣平(1977—), 男, 湖北公安人, 博士生, 从事生产计划、管理信息等研究; 邹益仁(1943—), 男, 北京人, 研究员, 博士生导师, 从事管理信息系统、计算机控制等研究。

2 问题描述与模型建立

某钢铁企业根据上级要求和合同,计划本年度生产 N 种产品,需要 M 种原材料.只考虑关键工艺和关键设备的影响,设生产过程涉及到 I 道工艺.将各分厂相同工艺的关键设备统一编号,记第 i 道工艺的关键设备数为 $D(i)$,生产成品 $F(i)$ 种,半成品 $S(i)$ 种,则 $F(i) = N, i = 1, 2, \dots, I$. 每一设备 j 的可用工时为 C_{ij} ,在此设备上加工成品或半成品 $k(k = 1, 2, \dots, F(i) + S(i))$ 的单位耗时为 c_{ijk} . 如果工艺 i 上设备 j 产出的半成品 k 是下一工艺某成品或半成品 l 的投入,则假定其投入产出比的上下限分别为 $a_{U(ijkl)}$ 和 $a_{L(ijkl)}, j = 1, \dots, D(i+1), l = 1, \dots, F(i+1) + S(i+1), 0 < a_{L(ijkl)} < a_{U(ijkl)}$;反之,则有 $a_{L(ijkl)} = a_{U(ijkl)} = +\infty$. 成品 $F(i)$ 的合同需求量为 Q_{ik} ,预测量为 P_{ik} , 每单位成品的售价为 $SP_{ik}(k = 1, 2, \dots, F(i))$, 每单位成品或半成品加工费用等折合为 $LP_{ik}(k = 1, 2, \dots, F(i) + S(i))$, 每单位原材料成本折合为 $CP_{ik}(k = 1, \dots, M)$. 将原材料视为第 0 道工艺第 1 台设备的产出, 则有 $D(0) = 1, F(0) = 0, S(0) = M$.

由于生产计划问题的复杂性,往往不允许采用整式建模方法,有关生产计划的文献普遍提倡递阶生产计划的方法^[2]. 本文按工艺过程分解的方法进行建模,考虑到工厂的要求是尽可能提高经济效益,因此确定模型的目标函数为获得效益 Z 最大. 定义决策变量 x_{ijk} 为第 i 道工艺第 j 台设备产出的第 k 种成品或半成品的数量,则年度生产计划模型(APP)为

$$\max Z_i = \sum_{k=1}^{F(i)} \sum_{j=1}^{D(i)} SP_{ik} x_{ijk} - \sum_{k=1}^{F(i)+S(i)} \sum_{j=1}^{D(i)} LP_{ik} x_{ijk} + Z_{i-1}. \quad (1)$$

$$\text{s. t. } \sum_{j=1}^{D(i)} x_{ijk} = Q_{ik}, k = 1, \dots, F(i); \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^{D(i)} x_{ijk} = P_{ik}, k = 1, \dots, F(i), P_{ik} \leq Q_{ik}; \quad (3)$$

$$\frac{\sum_{j=1}^{D(i+1)} \sum_{l=1}^{F(i+1)+S(i+1)} x_{(i+1)jl}}{\sum_{j=1}^{D(i)} \sum_{l=1}^{F(i)+S(i)} a_{U(ijkl)} x_{ijk}} \leq \sum_{j=1}^{D(i)} x_{ijk} \leq \frac{\sum_{j=1}^{D(i+1)} \sum_{l=1}^{F(i+1)+S(i+1)} x_{(i+1)jl}}{\sum_{j=1}^{D(i)} \sum_{l=1}^{F(i)+S(i)} a_{L(ijkl)}},$$

$$i < I, k = F(i) + 1, \dots, F(i) + S(i); \quad (4)$$

$$\sum_{k=1}^{F(i)+S(i)} C_{ijk} x_{ijk} \leq C_{ij}, j = 1, \dots, D(i); \quad (5)$$

$$x_{ijk} \geq 0, j = 1, \dots, D(i), k = 1, \dots, F(i) + S(i). \quad (6)$$

以上各式如无特别说明,均有 $i = 0, 1, \dots, I$, 且令 $Z_{-1} = 0$. 其中:约束(2)和(3)为成品的平衡约束,约束(4)为半成品的关联约束,约束(5)为企业生产能力约束,约束(6)为非负约束.

3 问题求解

模型(APP)是一个多层递阶优化问题,其层数与关键工艺有关.多层递阶分散控制的结构十分复杂,理论上和应用上都难以处理,一些学者仅对两层分散控制和三层规划问题作了初步研究^[3]. 要求解上述模型,必须对模型和算法进行改进. 本文的思路是:首先将模型(APP)转化为两层递阶优化问题,然后利用遗传算法和二阶段法进行求解.

3.1 模型转换

从产品结构的角度考虑,可将加工出来的产品分为成品和半成品两类.成品的需求量受外界环境控制,而半成品的需求量则取决于成品的数量.因此,可将成品的控制模型作为顶层,半成品的控制模型作为底层,将原材料因素考虑到低层模型中.具体模型如下:

顶层模型(BPPT)

$$\max Z_2 = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{D(i)} \sum_{k=1}^{F(i)} (SP_{ik} - LP_{ik}) x_{ijk} + Z_1. \quad (7)$$

$$\text{s. t. } \sum_{j=1}^{D(i)} x_{ijk} = Q_{ik}, k = 1, \dots, F(i); \quad (8)$$

$$\sum_{j=1}^{D(i)} x_{ijk} = P_{ik}, k = 1, \dots, F(i), P_{ik} \leq Q_{ik}; \quad (9)$$

$$\sum_{k=1}^{F(i)} C_{ijk} x_{ijk} \leq C_{ij}, j = 1, \dots, D(i). \quad (10)$$

顶层模型(BPPT)中,各式均有 $i = 1, \dots, I$. 其中:约束条件(8)和(9)为成品的平衡约束,约束条件(10)为企业生产能力约束.

低层模型(BPPB)

$$\max Z_1 = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{D(i)} \sum_{k=F(i)+1}^{F(i)+S(i)} LP_{ik} x_{ijk}. \quad (11)$$

$$\text{s. t. } \sum_{j=1}^{D(i)} x_{ijk} = \sum_{j=1}^{D(i+1)} \sum_{l=F(i+1)+1}^{F(i+1)+S(i+1)} \frac{x_{(i+1)jl}}{a_{L(ijkl)}},$$

$$\sum_{j=1}^{D(i+1)} \sum_{l=1}^{F(i+1)} \frac{x_{(i+1)jl}}{a_{L(ijkl)}},$$

$$i < I, k = F(i) + 1, \dots, F(i) + S(i); \quad (12)$$

$$\begin{aligned}
& \sum_{j=1}^{D(i)} x_{ijk} - \sum_{j=1}^{D(i+1)} \sum_{l=1}^{F(i+1)+S(i+1)} \frac{x_{(i+1)jl}}{aU(ijkl)}, \\
& \sum_{j=1}^{D(i+1)} \sum_{l=1}^{F(i+1)} \frac{x_{(i+1)jl}}{aU(ijkl)}, \\
& i < I, k = F(i) + 1, \dots, F(i) + S(i); \quad (13) \\
& \sum_{k=F(i)+1}^{C_{ijk}x_{ijk}} C_{ij} - \sum_{k=1}^{C_{ijk}x_{ijk}}, \\
& i = 1, \dots, I, j = 1, \dots, D(i). \quad (14)
\end{aligned}$$

低层模型(BPPB)中,约束条件(12)和(13)为半成品的关联约束,约束条件(14)为企业生产能力约束.所有的决策变量应满足非负约束.

这样,模型(APP)就变成一个两层线性规划问题,可采用遗传算法结合线性规划方法进行求解^[4].本文结合年度生产计划模型的特点,对遗传算法在编码、约束处理、适应度函数、选择操作等方面进行改进.

3.2 遗传算法

3.2.1 编码

常用的编码方式有二进制编码和浮点数编码.本文采用浮点数编码方式,其位串形式为

$$\text{Chrom} = [x_{ijk}], i = 1, \dots, I, \\
j = 1, \dots, D(i), k = 1, \dots, F(i).$$

为提高编码解集的有效性,在编码中考虑了约束(8)(10).通过对这些约束的分析和简化,不但可减少约束方程的数量,提高遗传操作的有效性,而且能提高整个算法的计算效率.

3.2.2 约束处理

各种约束处理技术经常使用惩罚策略.本模型的惩罚包含两部分:一是约束条件(8)(10)是否满足的惩罚;二是低层问题是否有解的惩罚.

对于前者,本文构造了新的动态惩罚函数 $p_i = [0, 1]$.为便于描述,将模型(BPPT)所有的约束化为如下标准形式:

$$f_i(x) = a_i x - b_i, i = 1, \dots, C_{\text{num}}, \quad (15)$$

其中 C_{num} 为模型(BPPT)的约束总数.令 gen 为当前代数, maxgen 为最大代数, D_{num} 为决策变量个数,对每一约束设置最大惩罚距离 $d_i, i = 1, \dots, C_{\text{num}}$,则惩罚函数可描述为

$$p_i(x, \text{gen}) = \begin{cases} 1, & f_i(x) < b_i; \\ 1 - \left(\frac{f_i(x) - b_i}{d_i} \right)^{E(\text{gen})}, & b_i < f_i(x) < b_i + d_i; \\ 0, & f_i(x) > b_i + d_i. \end{cases} \quad (16)$$

其中 $E(\text{gen}) = D_{\text{num}} \cdot \frac{\text{gen} - \text{maxgen}}{\text{maxgen}}$ 为约束满意程度. $p_i(x, \text{gen})$ 仅仅反映了个体对模型某一约束的

惩罚.为更全面反映对整个模型的惩罚程度,引入函数

$$p(j) = \sum_{i=1}^{C_{\text{num}}} p_i(x, \text{gen}), j = 1, \dots, N_{\text{ind}}, \quad (17)$$

其中 N_{ind} 为种群个体数.根据 $p(j)$ 可判断个体的优劣程度,使遗传算法在迭代初期从不可行域向可行域转化.

对于低层问题无解的惩罚,本文作了如下处理:假设个体 j 应用到模型(BPPB)时无解,则

$$Z_1(j) = -\text{Con1}, j \in \{1, \dots, N_{\text{ind}}\}, \quad (18)$$

其中 Con1 为一个很大的正数.对于其他有解的个体 $j, Z_1(j)$ 为模型(BPPB)的最优解.

3.2.3 适应度函数

为便于描述,将式(7)写成 $\text{Obj}(x) = g(x) + Z_1$.则对任意一个体 j ,其适应度函数为

$$\text{Fit}_j(\text{Obj}_j(x)) = g_j(x) p(j) + Z_1(j) + \text{Con2}, \quad (19)$$

其中 Con2 为大于 Con1 的正数,以保证适应度函数非负.

3.2.4 选择策略

选择操作需要确定个体的选择概率,本文采用基于排序的适应度分配方法^[5].该方法首先对目标值进行排序,然后根据个体在种群中的序位确定其选择概率.排序方法中选择概率不依赖于实际的目标值,克服了比例适应度计算的尺度问题,在选择压力太小的情况下,可避免搜索带迅速变窄而产生的过早收敛.

为保证个体的有效性,提高低层求解的效率,本文采用在缩小的采样空间中进行跨世代精英选择策略.具体做法是:首先根据上一代种群确定一个保留优良个体的新种群,该种群的空间缩小;然后对该种群进行变异和交叉,将上一代种群中的最优个体和次优个体直接复制到新种群中;最后将新种群插入到上一代种群中,从中选择最优的个体,形成新的种群.

4 仿真实验

某钢管厂本年度计划生产结构管和管线管两种产品,需要一种原材料,结构管需要 2 道工艺加工,管线管需要 3 道工艺加工,它们的加工路线如图 1 所示.

图 1 给出了每道工艺的设备数及其产出的产品和半成品数.该生产工艺涉及 11 个决策变量,为描述方便,将它们表示为 $x_0 \sim x_{10}$.模型的其他相关系数如表 1 表 4 所示.

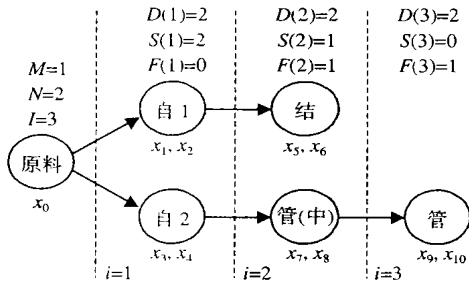


图 1 生产工艺路线

表 1 产品相关系数

	O_{ik}	P_{ik}	SP_{ik}	LP_{ik}
结构管	2.4	3.7	3.93	0.6
管线管	2.0	3.2	4.92	0.6

表 2 设备相关系数

	M_1	M_2	M_3	M_4	M_5	M_6
生产能力	30	30	30	30	60	60
效率(1)	0.073 3	0.99	0.069	0.08	0.04	0.041 6
效率(2)	0.08	0.11	0.080 4	0.105	—	—

表 3 投入产出比(1)

	x_0/x_1	x_0/x_2	x_0/x_3	x_0/x_4	x_1x_2/x_5
下限	0.70	0.80	0.73	0.82	0.60
上限	0.90	0.95	0.90	0.96	0.75

表 4 投入产出比(2)

	x_1x_2/x_6	x_3x_4/x_7	x_3x_4/x_8	x_7x_8/x_9	x_7x_8/x_{10}
下限	0.70	0.63	0.75	0.70	0.82
上限	0.82	0.80	0.85	0.85	0.95

该仿真问题为一个四层递阶优化模型. 设最大迭代数 $\max gen = 150$, 个体数 $N_{ind} = 30$, 采样空间缩小率为 $GGAP = 0.9$, 交叉概率 $P_c = 0.95$, 变异概率 $P_m = 0.3$. 其运行结果如表 5 和图 2 所示.

表 5 平均模拟结果

最优值	最大值	最小值	平均值	标准差	平均偏差
1.252 7	1.252 7	1.252 0	1.252 5	0.000 24	0.000 2

采用整式建模方法求得理想最优目标值为 1.252 7. 由表 5 和图 2 可见, 该模型和算法能在有限的迭代范围内求得问题的最优解, 具有良好的收敛性和稳定性, 通过最优解可确定出企业的物料需求和能力供应. 与整式建模方法相比, 该模型和算法在处理大中规模问题时, 减少了问题的规模, 加快了问题的求解速度, 有效地求得了问题的全局最优解.

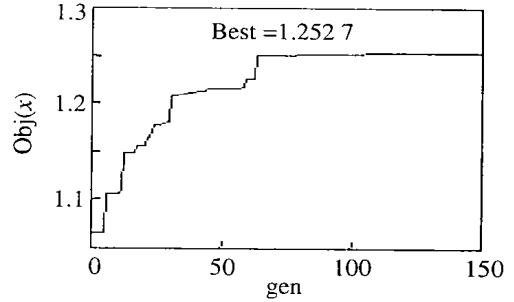


图 2 最优个体适应值变化趋势

实验表明, 采用最优个体保留策略有助于遗传种群的稳定性; 适当调整采样空间缩小率可提高算法的计算效率, 但太小的采样空间会降低种群的多样性; 调整约束满足程度函数可影响算法初期的收敛速度. 在二阶段法增加对松弛变量的分析, 可对实际加工情况进行调整.

5 结 论

本文根据实际的钢铁企业生产工艺, 建立了一个多层递阶的年度生产计划模型, 并从产品结构的角度进行模型转化, 生成一个两层优化模型, 利用遗传算法和二阶段法进行求解. 算法考虑到实际问题的差异, 构造了两种不同的惩罚函数, 并采用跨世代精英选择策略与最优个体保留策略相结合的方法, 提高了求解效率. 实验结果表明了该方法的有效性和可行性.

参考文献 (References):

- [1] 唐立新. CIMS 下生产批量计划理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [2] Qiu M M, Burch E E. Hierarchical production planning and scheduling in a multi-product: Multi-machine environment[J]. *Int J of Production Research*, 1997, 35 (11): 3023-3042.
- [3] 向丽. 递阶优化理论及其算法研究与进展[J]. *控制与决策*, 2001, 16(6): 854-858, 863.
(Xiang Li. Advances in theory and algorithms of hierarchical optimal problem [J]. *Control and Decision*, 2001, 16 (6): 854-858, 863.)
- [4] 刘树安, 尹新, 郑秉霖, 等. 二层线性规划问题的遗传算法求解[J]. *系统工程学报*, 1999, 14(3): 280-285.
(Liu S A, Yin X, Zheng B L, et al. Genetic algorithms based approach for bilevel linear programming problem[J]. *J of Systems Engineering*, 1999, 14(3): 280-285.)
- [5] 王小平, 曹立明. 遗传算法——理论、应用与软件实现[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2002.