

文章编号: 1001-0920(2001)06-0894-04

# 软计算求解分布式多工厂多顾客的 供应链准时化生产计划问题

周金宏, 汪定伟, 徐 洋

(东北大学 信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110004)

**摘 要:** 描述了分布式多工厂、多顾客的供应链准时化生产计划问题, 以实现最小化提前/拖期惩罚费用、生产成本、产品运输费用之和为目标建立了数学模型, 将遗传算法与模糊逻辑相结合, 设计了软计算方法求解模型, 采用基于规则方法的模糊规则量化方法求解模糊决策, 并将模糊决策嵌入遗传算法, 使得算法具有比分枝定界法更快的寻优能力和更广的适应范围。实例计算结果表明了该模型和算法的有效性和应用潜力。

**关键词:** 软计算; 模糊逻辑; 遗传算法; 供应链管理; 准时化生产; 单件制造业

中图分类号: O 22

文献标识码: A

## Soft Computing for JIT Production Planning of Supply Chain of Multi-location Manufacturing Systems

ZHOU Jin-hong, WANG Ding-wei, XU Yang

(School of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China)

**Abstract:** JIT production planning for supply chain of multi-location OKP manufacturing systems is studied and a linear 0-1 programming model is proposed. The objective is to find an optimal scheduling and to minimize the total sum of earliness and tardiness penalties, production costs and transportation costs. By using the fuzzy rule quantification method, a fuzzy logic based decision making approach is proposed to improve the computational performance. A fuzzy decision embedded genetic algorithm is developed. The results show that it can get a satisfactory solution.

**Key words:** soft computing; fuzzy logic; genetic algorithm; supply chain management; JIT production planning; OKP

### 1 引 言

远距离交通和信息技术的发展, 推动了生产全球化, 使企业的产供销形成国际化市场。企业的竞争方式已发展为整条供应链的竞争, 供应链管理便成

为研究的热点之一<sup>[1,2]</sup>。基于分布式多工厂、多顾客单件制造业生产方式下的供应链准时化生产计划, 是供应链研究中的一个重要问题<sup>[3]</sup>。文献[4]将准时化(JIT)思想和制造资源计划(MRP II)方法相结合, 解决了制造业准时化生产计划问题, 但是这些模

收稿日期: 2000-01-14; 修回日期: 2000-05-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(69684005); 机械制造系统工程国家重点实验室资助项目

作者简介: 周金宏(1974—), 男, 湖北荆门人, 博士生, 从事供应链管理、资源计划等研究; 汪定伟(1949—), 男, 江西彭泽人, 从事生产计划与调度、建模与决策等研究。

型都是针对传统的单个企业, 而不适用于供应链环境, 并且利用分枝定界法来求得模型的最优解。由于分枝定界法仅对中小规模的问题有效, 而对规模较大的问题不能在可接受的时间内求得最优解, 因此必须研究有效的算法。

本文以一条具有分布式多工厂、多顾客的单件制造业生产方式下的供应链为背景, 将准时化生产计划引入这种供应链环境, 建立了以降低供应链总成本为目标的多工厂、多顾客的优化模型, 设计出一种嵌入量化模糊决策的遗传算法的软计算方法, 以求得模型的近优解。实例计算结果证明了该模型和所提出算法的有效性和可行性。

## 2 问题描述与模型建立

考虑一条具有分布式多工厂、多顾客的单件制造业生产方式下的供应链, 供应链的生产工厂由  $M$  个分布在各地的单件制造企业组成, 这些工厂均有能力制造企业的各种产品。假设企业生产为连续生产, 产品一旦投产开工就连续生产加工直到产品生产完毕。设供应链生产计划中心在计划期  $[1, T]$  内接受  $N$  个顾客的订单, 并且订单不可拆分, 顾客  $i$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ ) 的订单价格为  $w_i$ , 顾客希望的交货期为  $d_i$ 。设订单  $i$  所订产品在工厂  $j$  的制造周期为  $p_{ij}$  ( $i = 1, 2, \dots, N; j = 1, 2, \dots, M$ ), 生产准备时间为  $v_{ij}$ , 生产所需资源总数为  $Q_{ij}$ , 单位价值生产成本为  $s_{ij}$ 。在计划期  $[1, T]$  内, 工厂  $j$  第  $g$  种资源在第  $t$  时段的可用资源能力为  $R_{ig}(t)$  ( $t = 1, 2, \dots, T; g = 1, 2, \dots, Q_{ij}$ ), 订单  $i$  在工厂  $j$  生产并在交货前第  $h$  时段对资源  $g$  的需求为  $q_{ijg}(h)$ , 所订产品从工厂  $j$  运输到顾客  $i$  所花费的时间为  $\tau_{ij}$ , 单位时间单位价值的运费为  $\delta$ , 考虑产品的运输费用为运输天数的线性函数。

由于供应链生产计划中心制定的各工厂生产任务通常不能与其生产能力相平衡, 因而导致生产工厂向顾客提前或拖期交货<sup>[3,4]</sup>。一般情况下, 提前和拖期罚款均与产品的单价成正比。设提前和拖期单位数量的惩罚因子分别为  $\alpha$  和  $\beta$ 。供应链生产计划中心优化的目标是: 在计划期内充分利用供应链中各工厂有限的制造资源, 合理地制定生产计划, 将订单分配到各工厂, 并将所分配的订单安排在各工厂的生产时间段, 使得整个提前/拖期惩罚费用、运输费用、生产成本费用三者的总额最小。

### 定义 1 模型变量

$$x_{ij}(t) = \begin{cases} 1, & \text{顾客订单 } i \text{ 在工厂 } j \text{ 生产} \\ & \text{经运输后在第 } t \text{ 时段交货} \\ 0, & \text{其它} \end{cases}$$

于是, 分布式多工厂、多顾客单件生产方式下的供应链准时化生产计划问题模型为

$$(CP): \min_x F(x) = \left\{ \begin{array}{l} N \quad M \quad T \\ i \quad j \quad t \end{array} \left[ \alpha w_i \sum_{t=d_i-1}^{d_i-1} (d_i - t) x_{ij}(t) + \beta v_i \sum_{t=d_i+1}^T (t - d_i) x_{ij}(t) \right] + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \sum_{t=1}^T w_i s_{ij} x_{ij}(t) + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \sum_{t=1}^T \delta \tau_{ij} x_{ij}(t) \right\} \quad (1)$$

$$s.t. \quad \sum_{j=1}^M \sum_{t=1}^T x_{ij}(t) = 1, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^N \sum_{h=\tau_{ij}}^{\tau_{ij}+p_{ij}-1} q_{ijg}(h - \tau_{ij} - t + 1) x_{ij}(h) \leq R_{ig}(t) \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^M \sum_{t=1}^T (t - \tau_{ij}) x_{ij}(t) \leq \sum_{j=1}^M \sum_{t=1}^T (v_{ij} + p_{ij}) x_{ij}(t), \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T (t - \tau_{ij}) x_{ij}(t) \leq 0 \quad (5)$$

$$i = 1, 2, \dots, N, \quad j = 1, 2, \dots, M \quad (5)$$

$$x_{ij}(t) = 0 \text{ or } 1 \quad (6)$$

其中, 约束条件 (2) 表示任何订单只能在某一工厂的某一时刻完工, 约束条件 (3) 是产品生产必须满足可用资源约束, 约束条件 (4) 是产品生产需要满足最早允许开工期约束。

## 3 模型求解

模型 (CP) 的关键是解决当多个订单在同一时段需要同一资源时的资源冲突问题。由于问题的复杂性, 本文提出的算法分两部分进行, 基本思想是: 首先利用遗传算法得到订单的资源分配优先权顺序, 然后用基于量化的模糊规则算法来调度安排订单的生产工厂、完工时间和交货时间。

### 3.1 基因编码

根据问题的特点, 遗传算法的基因编码采用一种扩展的自然数编码方式, 即使用订单号和相应的工厂分隔符作为基因的编码策略。例如一个有 8 个订单分配在 3 个工厂的问题, 其一个基因序列:  $[3, 6, 2, 9, 4, 8, 10, 5, 1, 7]$ , 即相当于  $[3, 6, 2, *, 4, 8,$

\* , 5, 1, 7], 可分解为 3 个子基因, 表示为

$$F_1: 3, 6, 2; F_2: 4, 8; F_3: 5, 1, 7$$

其中, 子基因  $F_1: 3, 6, 2$  表示订单 3, 6, 2 分配在工厂 1 生产, 订单 3 有第 1 优先权分配资源, 订单 6 有第 2 优先权分配资源, 订单 2 仅在其它所有订单分配完资源后才有权得到资源。

### 3.2 模糊逻辑操作

假设订单  $i$  被安排在工厂  $j$  生产, 订单  $i$  的最终交货期为  $d_i$ , 考虑运输时间  $\tau_{ij}$ , 于是顾客希望的生产完工期为  $d_i - \tau_{ij}$ , 令  $d_i^j = d_i - \tau_{ij}$ 。

首先, 根据基因序列分解得到子基因, 假设其资源分配优先权序列为  $X = [x_1, x_2, \dots, x_n]$ 。显然, 高优先权的订单最有可能安排在其交货期完工并交付; 由于资源的有限性, 低级别优先权的订单可能安排在其交货期之前或之后完工并交付, 即形成了提前/拖期生产。当  $x_1, x_2, \dots, x_{k-1}$  订单已安排完毕, 如何安排拥有第  $k$ -th 优先权的订单  $i$  (即  $x_k = i$ ) 的生产, 则存在以下 5 种可能的决策:

决策 1: 安排订单  $i$  在其生产完工期  $d_i^j$  完工;

决策 2: 安排订单  $i$  早于  $d_i^j$  完工, 但尽可能靠近  $d_i^j$ ;

决策 3: 安排订单  $i$  晚于  $d_i^j$  完工, 但尽可能靠近  $d_i^j$ ;

决策 4: 安排订单  $i$  早于  $d_i^j$  完工, 但需推迟一些先前已安排完毕的订单;

决策 5: 安排订单  $i$  晚于  $d_i^j$  完工, 但需提前一些先前已安排完毕的订单。

上述决策的选择主要取决于以下 6 个因素:

因素 1: 订单  $i$  安排在其完工期  $d_i^j$  完工时工厂资源的可利用率;

因素 2: 工厂早于  $d_i^j$  的资源可利用率;

因素 3: 工厂晚于  $d_i^j$  的资源可利用率;

因素 4: 工厂早于  $d_i^j$  的资源可利用率与晚于  $d_i^j$  的资源可利用率之比;

因素 5: 订单  $i$  的最小可能提前与最小可能拖期的比率;

因素 6: 订单  $i$  的价值与工厂已安排的先序订单的价值的比率。

上述 6 个因素可通过大量计算得出精确的结果。为能快速选择上述 5 个决策中的某个决策, 本文利用定义模糊数的模糊逻辑的计算方法<sup>[5,6]</sup>, 定义了相应的模糊数  $\tilde{F}_i (i = 1, 2, \dots, 6)$  和隶属函数  $\mu_{\tilde{F}_i} (i = 1, 2, \dots, 6)$ 。限于篇幅, 这里略去了各个隶属函数详细的计算过程。

通过计算上述因素 1~6, 可以利用模糊规则得出模糊决策。当问题的模糊因素较少时, 可采用传统的基于规则的决策方法, 而对于本文中的问题, 引入了 6 个模糊因素, 如果使用传统的决策方法, 即使每个模糊因素仅考虑为 3 个值: 小、中、大, 那么整个可能的组合对于传统的方法而言也是相当困难的。因此, 本文采用基于量化模糊规则模糊逻辑的决策方法<sup>[7]</sup>。

设  $\mu_{D_i}$  为模糊决策的隶属函数, 利用模糊因素 1~6, 根据解决问题的专家知识和经验, 有

$$\mu_{D_1} = \mu_{F_1} \quad (7)$$

$$\mu_{D_2} = \mu_{F_1} \odot \mu_{F_2} \odot \mu_{F_5} \quad (8)$$

$$\mu_{D_3} = \mu_{F_1} \odot \mu_{F_3} \odot \mu_{F_5} \quad (9)$$

$$\mu_{D_4} = \mu_{F_1} \odot \mu_{F_2} \odot \mu_{F_4} \odot \mu_{F_5} \odot \mu_{F_6} \quad (10)$$

$$\mu_{D_5} = \mu_{F_1} \odot \mu_{F_3} \odot \mu_{F_4} \odot \mu_{F_5} \odot \mu_{F_6} \quad (11)$$

$$\mu_1 \odot \mu_2 = \frac{\mu_1 \mu_2}{\Phi_+ (1 - \Phi (\mu_1 + \mu_2 - \mu_1 \mu_2))} \quad (12)$$

其中,  $\mu^c = 1 - \mu$ , 符号  $\odot$  为算子。于是得到  $\mu_{D_1}, \mu_{D_2}, \dots, \mu_{D_5}$ , 则决策  $k$  可由下式得出。

$$k = \arg \max \{ \mu_{D_1}, \mu_{D_2}, \dots, \mu_{D_5} \} \quad (13)$$

模糊逻辑算法(CP-FL)步骤如下:

步骤 1: 根据基因序列分解得到各个工厂所分配订单的子基因序列, 假设其资源优先权序列为  $X = [x_1, x_2, \dots, x_n]$ ;

步骤 2: 计算表征各个模糊因素模糊数的隶属函数  $\mu_{F_k}, k = 1, 2, \dots, 6$ ;

步骤 3: 计算表征各个模糊决策模糊数的隶属函数  $\mu_{D_k}, k = 1, 2, \dots, 5$ ;

步骤 4: 计算所选择的决策  $k$ ;

步骤 5: 使用所选择的决策  $k$  安排订单  $x_i$  的生产完工交付期  $d_x^j$ ;

步骤 6: 如果决策  $k$  成功执行, 则转步骤 7, 否则显示出错信息, 停止;

步骤 7: 判断该工厂的所有订单是否都已安排, 是则转步骤 8, 否则转步骤 2;

步骤 8: 计算下一个子基因。

### 3.3 遗传算法

#### 3.3.1 遗传算法描述

本文采用的是常规遗传算法(CP-GA), 限于篇幅, 这里不做详细表述。在算法中分别选取 4 种不同的交叉因子, 包括部分匹配(PMX)因子, 顺序(OX)因子, 循环(CX)因子和正则(UN)因子。变异因子采用逆序(CM)变异因子和互换(EM)变异因子。

### 3.3.2 混合算法描述

整个混合算法(CP-HA)由遗传算法(CP-GA)和模糊逻辑(CP-FL)算法组成,遗传算法用来产生基因、迭代寻优,模糊逻辑算法根据遗传算法产生的基因安排订单的生产并求出目标值,然后遗传算法便可进行遗传运算。其基本步骤如下:

步骤 1: 设定参数值: 种群数  $N_p$ , 最大迭代数  $N_G$ , 交叉概率  $P_c$ , 变异概率  $P_m$ ;

步骤 2: 随机产生  $N_p$  个初始种群, 最优解  $d_i^* = d_i$ ;

步骤 3: 判断是否满足停止准则, 如果满足则运算停止, 转步骤 8; 否则转步骤 4;

步骤 4: 将基因  $Z$  分解为  $M$  个子基因, 每个子基因分别调用模糊逻辑算法, 计算所安排订单的生产工厂、交货期和整个基因的目标函数值  $F(x)$ ;

步骤 5: 根据目标函数值计算适应值函数, 并计算每条基因的适应值;

步骤 6: 按基因的适应值计算其选取概率, 并按选取概率的大小随机选取基因进行复制;

步骤 7: 基因在交配池进行交叉和变异运算, 产生新一代, 并转步骤 3;

步骤 8: 输出结果, 结束。

## 4 仿真结果及分析

随机产生不同规模的问题, 算法用 VC++ 6.0 实现, 在 Pentium II 350, 64M 计算机上对问题进行计算。仿真实验以一条具有 3 个分布式工厂 10 个顾客供应链为例, 对问题随机生成 50 组数据。为了测试算法的性能, 本文在遗传算法中采用 4 种不同的交叉算子, 对相同问题以使用不同交叉因子的遗传算法的最小值为问题的最优解确定达优率。初始化种群的大小为 20, 最大迭代数为 5 000, 计算出不同迭代次数的情况, 结果如表 1 所示。

表 1 计算结果

迭代数	1 000	2 000	3 000	4 000	5 000	达优率(%)
HA-PMX	179.0	165.5	143.2	141.8	140.2	72
HA-OX	185.0	168.7	152.0	148.6	147.9	62
HA-CX	192.0	174.5	167.7	152.2	150.0	56
HA-UN	183.3	167.3	145.4	141.0	141.0	64

表 1 中, HA-PMX, HA-OX, HA-CX, HA-UN 分别表示混合算法中遗传算法运用 PMX, OX, CX, UN 交叉因子, 其参数设置为:  $P_c = 0.9$ ,  $P_m = 0.05$ 。

从仿真结果可以看出: 4 种交叉因子存在一定的差异, PMX 和 UN 交叉因子各次迭代结果均优于其它两种交叉因子, 其中 PMX 得到问题最好解的目标函数值为 140.2, 达优率为 72%。

混合算法(CP-HA)的计算速度是可以接受的, 在上述计算机上运行该例问题需要的时间为 20 s 左右。对于一条具有 5 个分布式工厂 50 个顾客供应链问题, 混合算法可在 15 min 得到最好可行解, 利用分枝定界法则需要 61 min 10 s。因此, 对于大多数实际的分布式生产计划问题, 采用混合算法是有效的, 它能在较短时间内搜索到问题的近优解。

## 5 结 论

分布式多工厂、多顾客的供应链准时化生产计划问题是目前的一个研究热点。本文建立了其单件制造业生产方式下的供应链准时化生产计划模型, 将遗传算法与模糊逻辑相结合, 设计了软计算算法求解模型, 遗传算法的基因编码采用扩展的自然数编码方式, 运用模糊规则量化的方法求解模糊决策, 并将模糊决策嵌入遗传算法, 使得算法具有比分枝定界法更快的寻优能力和更广的适应范围。实例计算结果表明了该模型和算法的有效性和应用潜力。

### 参考文献:

- [1] K Feldmann. Relevance of assembly in global manufacturing[J]. Annals of the CIRP, 1996, 45(1): 2-10
- [2] Gupta S. Supply chain management in complex manufacturing[J]. IIE Solutions, 1997, 3(1): 18-23
- [3] Rohit Bhatnagar, Pankaj Chandra. Models for multi-plant coordination[J]. E J of Operational Research, 1993, 67(1): 141-160
- [4] Wei Wang, Dingwei Wang, Andrew W H. JIT production planning approach with fuzzy due date for OKP manufacturing systems[J]. Int J of Production Economics, 1999, 58(2): 209-215.
- [5] L A Zadeh. Fuzzy logic, Neural networks and soft computing[J]. Commu of the ACM, 1997, 37(1): 77-84
- [6] H J Zimmernann. Fuzzy set theory and its applications[M]. Hingham: Kluwer-Nijhoff, 1985
- [7] D Wang, S C Fang, H L Nuttle. Soft computing for Multi-customer due-date bargaining[J]. IEEE Trans on SMC Part C: Appl and Rev, 1999, 29(4): 566-575.