

软计算求解分布式多工厂单件制造业的提前/拖期生产计划问题*

周金宏 汪定伟

(东北大学信息科学与工程学院系统工程系·沈阳, 110006)

摘要: 描述了分布式多工厂单件制造企业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 0-1 规划数学模型; 设计了基于模糊规则量化的方法求解模糊决策, 并将模糊决策嵌入到遗传算法中的软计算方法求解模型, 使得算法具有比分枝定界法更快速的寻找优解的能力以及更广泛的适应范围. 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; 分布式多工厂; 提前/拖期生产计划; 单件制造业; 供应链

文献标识码: A

Soft Computing for Earliness and Tardiness Production Planning of Multi-location OKP Manufacturing Systems

ZHOU Jinhong and WANG Dingwei

(Department of Systems Engineering, School of Information Science and Engineering, Northeastern University · Shenyang, 110006, P.R. China)

Abstract: Earliness and tardiness production planning with due-date for 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 transport costs. By using the fuzzy rule quantification method, a fuzzy logic based decision making approach is proposed to improve the computational performance. Then a fuzzy decision embedded genetic algorithm is developed. The results demonstrate that it can get a satisfactory solution and have potential to practical production applications.

Key words: soft computing; fuzzy logic; genetic algorithm; multi-location planning; earliness and tardiness production planning; one kind of production (OKP); supply chain

1 引言(Introduction)

随着制造全球化的发展, 形成了分布式多工厂的网络化全球制造. 在这种制造环境下, 研究基于分布式多工厂单件制造业的准时化生产计划问题, 在理论研究、生产实际中都有着广阔的发展前景^[1,2].

目前虽然文献[3,4]将准时化(JIT)思想和制造资源计划(MRP II)方法成功结合并将交货期问题扩展到生产计划层, 解决了单件制造业的准时化生产计划问题. 但是, 这些模型都是针对传统的单个企业并且利用分枝定界算法求得模型的最优解. 由于分枝定界法对于规模比较大的问题不能在可以接受的时间内求得最优解, 因此必须研究有效的算法.

本文以一个在不同的地点具有多个工厂的单件全球制造企业为背景, 建立了其准时化生产计划模型, 并设计了一种嵌入量化模糊决策遗传算法的软计算方法求得模型的近优解. 通过计算实例, 结果表

明了模型和所提出算法的有效性和可行性.

2 问题的描述与模型的建立(Problem and models)

考虑一个具有分布式多工厂的全球单件制造企业(OKP)在各地总共设有 M 个工厂(如装配厂), 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, 即生产过程不允许中断. 设其在计划期 $[1, T]$ 内的接受订单总数为 N , 订单 i ($i = 1, 2, \dots, N$) 的客户请求位于 i 地点, 其订货价值为 w_i , 客户希望的交货期 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} , 工序总数为 Q_{ij} , 单位价值生产成本 s_{ij} , 产品运输花费时间 τ_{ij} , δ 为单位时间单位价值的运费成本. 在本文中, 考虑运输费用为运输天数

* 基金项目: 国家自然科学基金(69684005), 863 计划 CIMS 主题(863-511-9844-011)和西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室共同资助项目.

收稿日期: 1999-12-21; 收修改稿日期: 2000-11-06.

的线性函数.在计划期 $[1, T]$ 内,工厂 j 第 g 道工序在 t 时段的可用资源能力为 $R_{jg}(t)$ ($t = 1, 2, \dots, T; g = 1, 2, \dots, Q_j$), $q_{yg}(h)$ 为订单 i 在工厂 j 生产并完工交货前第 h 时段对工序 g 的资源能力需求.

由于客户的要求与工厂的可用资源能力往往不平衡,工厂经常不能按客户要求交货,这样会造成工厂提前或者拖期生产,但是产品提前/拖期生产要受到惩罚,设单位时间单位价格的提前与拖期惩罚为 α 和 β .通常,提前与拖期的惩罚与订单的价值成正比.

所以,模型优化的目标是在计划期内充分利用各个工厂有限的制造资源,制定合理的生产计划,使得提前/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 $x_{ij}(t)$:

$$x_{ij}(t) = \begin{cases} 1, & \text{若订单 } i \text{ 在工厂 } j \text{ 生产,} \\ & \text{并经过运输后在第 } t \text{ 时段交货给客户,} \\ 0, & \text{其他.} \end{cases}$$

模型(CP):

$$\min F(x) =$$

$$\left(\sum_i \sum_j \left[\alpha w_i \sum_{t=1}^{d_i-1} (d_i - t) x_{ij}(t) + \beta w_i \sum_{t=d_i+1}^T (t - d_i) x_{ij}(t) \right] + \sum_j w_i \sum_{t=1}^T S_{ij} x_{ij}(t) + \sum_i w_i \sum_{t=1}^T \delta \tau_{ij} x_{ij}(t) \right) \quad (1)$$

s. t.

$$\sum_j \sum_t x_{ij}(t) = 1, \quad i = 1, \dots, N, \quad (2)$$

$$\sum_i \sum_{h=1+\tau_{ij}}^{1+\tau_{ij}+p_{ij}-1} q_{yg}(h - \tau_{ij} - t + 1) x_{ij}(h) \leq$$

$$R_{jg}(t), \quad j = 1, \dots, M, \quad g = 1, \dots, Q_j, \quad t = 1, \dots, T, \quad (3)$$

$$\sum_j \sum_t (t - \tau_{ij}) x_{ij}(t) \geq \sum_j \sum_t (v_{ij} + p_{ij}) x_{ij}(t), \quad i = 1, \dots, N, \quad (4)$$

$$\sum_t (t - \tau_{ij}) x_{ij}(t) \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, N; \quad j = 1, 2, \dots, M, \quad (5)$$

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

约束条件(2)表示任何订单只能在某一个工厂的某一个时刻完工,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)是指产品生产需要满

足最早允许开工期约束条件.

3 模型求解(Solution procedure for model)

模型(CP)求解的关键是解决多个订单在同一时段对同一资源时的资源需求冲突问题.本文提出的软计算算法分两部分进行,基本思想是:利用遗传算法得到订单的资源分配优先权顺序,然后用基于量化模糊规则的模糊决策算法来安排订单的生产工厂、完工和交货时间.

3.1 基因编码(Gene representation)

根据本问题的特点,遗传算法的基因编码采用一种带有资源分配优先权的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,在这种编码方式中,订单编号用自然数表示,代表整个全球型企业接收到的所有订单;工厂分隔符用相应的自然数表示,代表其后的订单与之前的订单分配在不同的工厂.

例如,如果一个为 8 个订单分配在 3 个工厂的问题,其一个基因序列: $[6, 2, 3, 9, 8, 5, 10, 4, 1, 7]$, 相当于 $[6, 2, 3, *, 8, 5, *, 4, 1, 7]$, 表示 3 个子基因: $F1: 6, 2, 3$; $F2: 8, 5$; $F3: 4, 1, 7$. 其中 $F1: 6, 2, 3$ 表示订单 6, 2, 3 分配在工厂 1 生产,且订单 6 有第一优先权分配资源;订单 2 有第二优先权分配资源;订单 3 最后分配资源.

3.2 模糊逻辑操作(Fuzzy logic operations)

首先,根据基因序列分解得到各个工厂所分配的订单的子基因,可以看出,一个子基因中所有订单均在同一工厂安排生产.假设该子基因的资源分配优先权序列为 $X = [x_1, x_2, x_3, \dots, x_n]$. 当 $x_1, x_2, \dots, x_{k-1}$ 订单已经安排完毕,则如何安排拥有第 k - th 优先权的订单 i (即 $x_k = i$) 的生产,存在如下 5 种可能的决策:

决策 1: 安排订单 i 在其交货期 d_i 交货;

决策 2: 安排订单 i 早于 d_i 交货,但是尽可能靠近交货期 d_i ;

决策 3: 安排订单 i 晚于 d_i 交货,但是尽可能靠近交货期 d_i ;

决策 4: 安排订单 i 早于 d_i 交货,但是需要推迟一些先前已经安排完毕的订单;

决策 5: 安排订单 i 晚于 d_i 交货,但是需要提前一些先前已经安排完毕的订单.

以上决策的选择考虑了以下 6 个因素:

因素 1: 工厂在订单 i 交货期 d_i 的资源可利用率;

因素 2: 工厂早于交货期 d_i 的资源可利用率;

因素 3: 工厂晚于交货期 d_i 的资源可利用率;

因素 4: 工厂早于交货期 d_i 的资源可利用率与晚于交货期 d_i 资源可利用率的比率;

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 的价值与工厂已经安排的先序订单的价值的比率。

虽然上述的 6 个因素可以通过大量的计算得出精确的数值,但是为了能快速选择 5 个决策中的某个决策,本文利用了所定义模糊数的模糊逻辑的计算方法^[5,6],定义了相应的模糊数 $\bar{F}_i (i = 1, 2, \dots, 6)$ 和对应的隶属函数 $\mu_{\bar{F}_i}, i = 1, 2, \dots, 6$. 限于篇幅,这里省略了各个隶属函数详细的计算过程. 通过计算出上述因素 1 ~ 6, 可以利用量化的模糊规则得出模糊决策。

设 $\mu_D (i = 1, 2, \dots, 5)$ 为模糊决策的隶属函数, 根据解决本问题的专家知识和经验, 利用上述 6 个模糊因素, 有:

$$\mu_{\bar{D}_1} = \mu_{\bar{F}_1}, \quad (7)$$

$$\mu_{\bar{D}_2} = \mu_{\bar{F}_1}^c \otimes \mu_{\bar{F}_2} \otimes \mu_{\bar{F}_5}^c, \quad (8)$$

$$\mu_{\bar{D}_3} = \mu_{\bar{F}_1}^c \otimes \mu_{\bar{F}_3} \otimes \mu_{\bar{F}_5}^c, \quad (9)$$

$$\mu_{\bar{D}_4} = \mu_{\bar{F}_1}^c \otimes \mu_{\bar{F}_2}^c \otimes \mu_{\bar{F}_4}^c \otimes \mu_{\bar{F}_5}^c \otimes \mu_{\bar{F}_6}, \quad (10)$$

$$\mu_{\bar{D}_5} = \mu_{\bar{F}_1}^c \otimes \mu_{\bar{F}_3}^c \otimes \mu_{\bar{F}_4}^c \otimes \mu_{\bar{F}_5}^c \otimes \mu_{\bar{F}_6}. \quad (11)$$

其中, $\mu^c = 1 - \mu$, $\otimes$ 符号是一个算子。

$$\mu_1 \otimes \mu_2 = \mu_1 \times \mu_2, \quad (12)$$

于是得到 $\mu_{\bar{D}_1}, \mu_{\bar{D}_2}, \mu_{\bar{D}_3}, \mu_{\bar{D}_4}, \mu_{\bar{D}_5}$, 则决策 k 可以由下式得出:

$$k = \arg \max \{ \mu_{\bar{D}_1}, \mu_{\bar{D}_2}, \mu_{\bar{D}_3}, \mu_{\bar{D}_4}, \mu_{\bar{D}_5} \}. \quad (13)$$

上述的模糊逻辑操作含义可以解释为: (7) 说明当工厂的资源可以满足订单 i 安排在其交货期 d_i 完工并交付时, 选择决策 1; (8) 表示决策 2 的选择是由于工厂没有足够的资源将订单 i 安排在其交货期 d_i 完工并交付, 但是, 安排早于交货期 d_i 生产时资源能够得到满足, 并且其最小的提前惩罚很可能小于最小拖期惩罚; (10) 意味着决策 4 的选择是由于工厂没有足够的资源将订单 i 安排在其交货期 d_i 和安排早于交货期 d_i 生产完工, 但是晚于交货期 d_i 的资源的可用性大于早于交货期 d_i 的资源的可用性, 订单 i 的价值大于所有其之前已安排的订单的总价值, 并且其最小的提前惩罚是很可能小于最小拖期

惩罚. 决策 3, 5 被选择的原因与决策 2, 4 类似。

由于决策 4, 5 的安排计划运算操作的复杂性以及单件制造业 (OKP) 的订单的一些特点, 为了简化计算, 有如下定理:

定义 将所有订单按其价值由低向高递增排序得到序列 $[w_1, w_2, w_3, \dots, w_j, \dots, w_N]$, 表示 $w_1 \leq w_2 \leq w_3 \leq \dots \leq w_j \leq \dots \leq w_N$.

定理 安排订单 x_s 在工厂中的生产, 其决策 4, 5 能被选择, 仅当 s 为 $1, 2, \dots, (m-1)$ th 优先权时, 如果 $X = [x_1, x_2, \dots, x_s, \dots, x_N]$ 为订单的资源分配优先友权序列, 且 m 的取值由下式决定: $w_{x_s} \leq (1 - \gamma_1) \sum_{j=1}^{s-1} w_j$. 限于篇幅, 证明略。

3.3 软计算算法描述 (Soft computing algorithm)

整个软计算算法是由遗传算法和模糊逻辑算法组成, 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, 分解为相应的子基因, 调度安排订单的生产并求出目标值, 然后遗传算法就可以进行遗传运算. 本文采用的是常规的遗传算法, 只是在算法中分别选取了 4 种不同的交叉因子, 包括部分匹配 (PX) 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. 基本步骤略。

4 仿真结果及分析 (Computational results and analysis)

上述算法用 VC++ 6.0 实现, 在 Pentium II 350, 128M 计算机对问题进行了计算. 在仿真实验中对问题随机生成 50 组数据, 以 10 个订单, 3 个工厂, 2 道瓶颈问题为例, 结果如表 1. 其中 SA_PX, SA_OX, SA_CX, SA_UN 分别表示运用 PX, OX, CX 和 UN 交叉因子的遗传算法, 从仿真结果可以看出 4 种交叉因子存在一定的差异, PX 和 UN 交叉因子各次迭代结果优于其它两种交叉因子. 同时, 随机产生不同规模的问题, 然后分别利用上述软计算算法 (SA) 和分枝定界法 (B&B) 求解这些问题, 一些比较结果如表 2 所示。

表 1 计算结果

Table 1 Computational results

迭代数	3000 代	5000 代	达优率 (%)
SA_PX	143.0	140.0	72
SA_OX	152.2	147.2	62
SA_CX	167.6	150.1	56
SA_UN	145.0	141.0	64

表 2 不同规模问题结果比较

Table 2 Comparison of different scale problems

问题 $N \times M \times T$	B&B 计算时间/分	SA 达优率(%)	SA 时间/分 (3000 代)
$6 \times 3 \times 10$	5.10	92	13.00
$10 \times 3 \times 20$	37.36	70	33.00
$15 \times 4 \times 10$	42.83	64	35.00
$20 \times 4 \times 30$	大于 6 小时	62	50.50

仿真结果显示软计算算法能够以较大的机率搜索到问题的最优解.分枝定界算法虽然能够保证得到问题的最优解,但是对于大规模问题,其花费的时间会随问题的规模增长呈指数上升,因而不能在有效的时间内求得问题的最优解.因此,对于大多数实际的分布式生产计划问题,尤其是大规模问题,采用软计算算法是有效.它可以在比较短的时间搜索到问题的近优解.在有些必须得到问题最优解的情况,可以首先利用软计算算法得到问题一个近优解,然后将这个解作为分枝定界算法的初始值,再利用分枝定界法求解问题的最优解.

5 结论(Conclusion)

全球环境下分布式多工厂的生产计划问题是供应链生产计划中研究热点.本文将交货期和分布式多工厂问题扩展到带能力约束的单件制造业生产计划中,建立了分布式多工厂的准时化生产计划模型;设计了基于模糊规则量化的方法求解模糊决策,并将模糊决策嵌入到遗传算法的软计算算法,使得算

法具有比分枝定界法更快速的寻优能力以及更好的适应范围.结果表明了该模型和算法的有效性和可行性.

参考文献(References)

- [1] Gupta S. Supply chain management in complex manufacturing [J]. IIE Solutions, 1997, 3(10): 18-23
- [2] Rohit Bhatnagar and Pankaj Chandra. Models for multi-plant coordination [J]. European J. of Operational Research, 1993, 67(3): 141-160
- [3] Wang Dingwei. Earliness/tardiness production planning approaches for manufacturing systems [J]. Computers and Industrial Engineering, 1995, 3(3): 425-436
- [4] Wang Wei and Wang Dingwei. JIT production planning approach with fuzzy due data for OKP manufacturing systems [J]. J. of System Engineering, 1998, 13(2): 63-69 (in Chinese)
- [5] Zadeh L A. Fuzzy logic, neural networks and soft computing [A]. Communications of the ACM [C], Shanghai, 1994, 37: 77-84
- [6] Wang D, Fang S C and Nuttle H L. Soft computing for multi-customer due-date bargaining [J]. IEEE Trans on SMC Part C: Application and Reviews, 1999, 29(3): 331-335

本文作者简介

周金宏 1974 年生, 东北大学博士研究生. 研究方向: 供应链管理, 面向敏捷制造企业资源计划, 计算机应用. Email: zhoujinhong@huawei.com

汪定伟 1949 年生, 东北大学博士, 曾在美国北卡罗来拉州立大学做博士后研究工作. 现为东北大学教授, 博士生导师. 主要研究方向: 生产计划与调度理论, 建模与决策, 智能优化方法. 已出版著译 4 本, 在国内、外杂志发表 100 余篇论文.