

MC 模式下供应链动态调度的蚁群寻优分析<sup>①</sup>姚建明<sup>1</sup>, 刘丽文<sup>1</sup>, 蒲云<sup>2</sup>, 张秀敏<sup>3</sup>(1. 清华大学经济管理学院, 北京 100084; 2. 西南交通大学经济管理学院, 成都 610031;  
3. 华东师范大学商学院, 上海 200062)

**摘要:** 在对 MC 模式下供应链调度的基本运作特征描述及界定基础上, 分析了调度过程中主导矛盾的缓解思路; 通过将该思路引入动态调度的运作过程, 分析了 MC 模式下的供应链动态调度机理. 在调度求解过程中, 引入蚁群觅食的寻优机理并对其进行特定的算法设计及改进, 提出了供应链动态调度的蚂蚁寻优算法. 算法特点为在运算过程中不仅能够反映该生产方式独特的运作特征要求, 而且能够融入对主导矛盾的缓解思路. 通过仿真, 验证了算法的可行性.

**关键词:** 大规模定制; 供应链调度; 动态; 蚂蚁寻优算法; 仿真

**中图分类号:** F406.2; TH166

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1007-9807(2007)03-0007-08

## 0 引言

大规模定制(Mass Customization, MC)<sup>[1,2]</sup>模式下的供应链调度优化过程是一个典型的随机、动态过程<sup>[3~5]</sup>. 动态性源于 MC 模式下的随机性需求(Stochastic Demand)和供应链环境下各协作生产成员的随机性生产能力(Stochastic Production Ability)变动. 在该过程中蕴含着—个主导矛盾<sup>[6,7]</sup>, 即: 客户个性化需求满意水平同供应链系统的生产效率及综合收益之间的矛盾. 因而, 探索合理的矛盾缓和与解决思路以及动态调度的求解方法, 是在实现客户定制化满意水平基础上, 提升供应链调度过程运作效率的关键.

如果抛开 MC 这一独特的生产方式, 对于动态供应链调度问题而言, 已有诸多学者进行了探索<sup>[8~11]</sup>; Edgar Perea Lopez<sup>[8]</sup>针对多工厂分布式供应链建立了 MILP 动态优化模型, 其对调度动态性的解决方法是通过选取固定时间范围来近似描述其动态性; Chiung Moon<sup>[9]</sup>则从产品生产拖期时间的优化角度进行供应链调度的优化. 这些方法

均具有借鉴价值, 但在研究具有特定矛盾特征和复杂动态性的 MC 模式下的供应链调度时, 必须从新的角度分析方法的可行性与现实性. 在这一方面, 文献<sup>[6,7]</sup>曾针对 MC 模式下供应链动态调度的若干问题进行了分析, 并建立了优化模型, 但未深入分析动态调度的求解思路及算法.

在此基础上, 本文着重分析 MC 模式下供应链动态调度的求解思路. 核心问题是不仅要—在求解过程中反映该生产方式独特的运作特征要求, 而且要在求解过程中融入对主导矛盾的缓解思路. 为了实现这一目的, 本文首先简要分析了 MC 模式下供应链动态调度的基本特征及运作机理, 探索了将矛盾的缓和思路嵌入动态调度过程的运作规则. 进而, 引入了蚁群的觅食寻优思想, 通过对蚂蚁算法进行特定设计和改进来解决上述核心问题.

## 1 调度的基本运作特征及相关界定

为了合理方便的研究动态调度行为, 首先对 MC 模式下供应链生产运作的基本特征进行简要

① 收稿日期: 2005-01-11; 修订日期: 2007-04-09.

基金项目: 国家自然科学基金重点项目资助(70532004); 国家自然科学基金委创新研究群体科学基金资助(70321001); 教育部人文社科基金项目资助(06JC630017); 中国博士后科学基金—等奖助项目(20060400074).

作者简介: 姚建明(1974—), 男, 山西临猗人, 博士, 博士后, Email: jmyao@163.com.

概括及界定:1)本文所讨论的是制造型 MC 和供应链;2)文中所提“生产”均指广义的生产,指所有对操作对象有目的性的生产活动.原料供应、开发设计、零部件生产、装配、运输、仓储、销售等均属于这一范畴;3)MC 型企业在供应链中充当核心企业的角色.其核心竞争力体现在对定制产品的开发设计与对供应链相关协作成员的协同优化调度方面;4)由于在供应链环境下生产,按核心企业与供应链中其它成员的协作关系可划分为多种类型,反映了任务动态外包的灵活性;5)一个完整的定制产品生产过程不仅反映了产品生产时间上的衔接与同一生产阶段不同类型产品空间上的排列<sup>[2]</sup>,还反映了一个完整的供应链系统中各成员之间物品、资金、信息以及价值的合理流动.因此,一个成熟的 MC 生产过程应由包括产品维、生产过程维以及生产企业(供应链成员)维在内的三维模式描述;6)供应链环境实际上可以由分布在世界范围内的协作企业及客户网络构成.信息技术和交通工具的日益革新,为其高效运作提供了必备的条件.

## 2 调度过程中主导矛盾的缓解思路

### 2.1 基于时间阈值的订单分类思路

MC 模式所要解决的关键问题是以大批量的生产效率满足不同客户个性化定制需求<sup>[1,2]</sup>;针对制造型供应链而言,即要实现针对不同客户个性化订单合理、高效生产的前提下使供应链体系的综合收益最大化<sup>[6,7]</sup>.显然,它们构成了一个矛盾统一体.为了缓和动态调度过程中的这一主导矛盾,体现范围经济在 MC 中作用的发挥,文献<sup>[7]</sup>在对随机的客户订单进行了初级分类(根据定制产品生产不同阶段中,不同产品生产的组合方式分类)的基础上提出了时间阈值概念,即在供应链调度过程中,核心企业在接到某一客户订单后,须在权衡供应链系统各种因素的基础上,动态地提出一个等待其它订单到来的时间,用  $T_0$  表示.同时,为了更大限度地提升客户定制服务水平,努力实现“近似完全定制化”思想,在订单的初级分类基础上,还基于时间阈值对其进行了二次分类,即

**定义 1** 若核心企业在时间阈值  $T_0$  期内接到的订单中,其定制零件生产是采用独一无二的

设计与加工工艺进行,称其为特殊订单(Special Order, SO);

**定义 2** 订单中除上述特殊订单之外的其余订单,称其为一般订单(General Order, GO);

**定义 3** 对于客户定制产品交货期限要求较为严格,必须以最高时间优先级安排生产(即此类订单不受时间阈值  $T_0$  限制)的订单,称为紧急订单(Emergent Order, EO).

### 2.2 矛盾的缓解思路

可以看出,基于时间阈值对客户订单进行的再分类,一方面涵盖了客户定制化需求中的产品品质需求个性化(用产品的物理特征反映,映射到一般及特殊订单的分类)和产品时间需求个性化(由产品的交货期反映,映射到紧急和非紧急订单分类);另一方面,涵盖了 MC 模式下供应链调度过程中生产效率的实现(由生产对象的生产复杂度反映,映射到一般订单和特殊订单的分类;由同期生产批量反映,映射到时间阈值的确定).因而,在基于时间阈值的订单分类基础上合理规划和优化供应链的调度过程,是缓解以较高的生产效率来满足不同客户个性化定制需求矛盾的良好思路.

由于有紧急订单与特殊订单的存在,使得 MC 模式下供应链调度过程更加复杂与困难了.但作为一个真正意义上的定制型供应链体系而言,能够最大限度地满足客户需要的定制服务是必须的,只有这样,才能逐步树立良好的定制服务品牌,使得供应链协作关系良好发展与长久生存.而逐步减少紧急订单与特殊订单的数量也是相关企业通过改革及作业流程重组不断进行优化的目标.下文将把该时间阈值与订单分类思路引入供应链动态调度过程,分析其运行行为及相关求解思路.

## 3 供应链动态调度机理

### 3.1 MC 模式下供应链调度动态特征分析

文献<sup>[6]</sup>中指出在 MC 模式下的供应链调度过程中,客户需求的随机性与供应链各成员(节点)生产能力的随机性是导致调度动态性的基本原因.为了更直观地了解供应链节点的空余生产能力、产品生产时限以及产品生产成本之间的相互关系,这里选择了一个典型的供应链制造节点

进行了一个月的动态数据采样分析,结果如图 1 所示(图中数据均已经过了归一化处理).

图 1 可以看出,为满足不同客户定制化需求水平的要求,由多个客户端传递来的随机需求信息以及各节点的动态资源需求信息都可能使得供应链系统中各节点的空余生产能力状况曲线产生很大波动.空余生产能力的变动,必将导致同一产品在不同时刻生产时,其生产时限以及生产成本上的差异.而生产时限与空余生产能力的关系并

非是一种规则的反比例关系,这是由供应链协作关系的复杂性决定的.同时由于不同的定制产品生产所要求的产前准备、生产工序以及产后加工等过程都有可能不同,导致了生产成本曲线的波动性产生,尽管其走势基本上趋于平稳.这与一般的生产作业调度问题(比如 FSS、JSS)中的成本不变是不同的(详细分析参考文献[6]).由于上述特点必将影响供应链的调度问题,因而在算法设计中应对其解决思路有所体现.

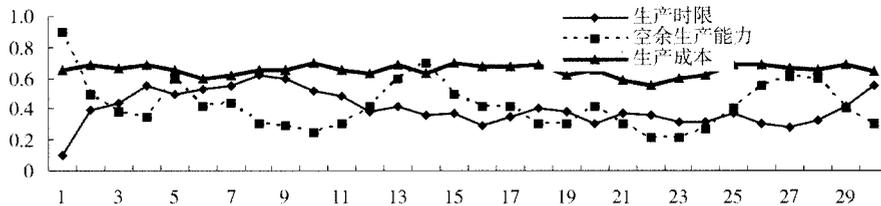


图 1 供应链中某制造节点一个月的动态数据采样结果(反映了同一节点在不同时刻对同一产品生产的三个参数变化情况)

Fig.1 Sampling result of the dynamic data of some manufacturing node in supply chain

(reflecting the changes of three production parameters of the same node to the same product in different time)

### 3.2 基于时间阈值和紧急订单的动态调度周期的确定

对于调度动态性的求解思路,一直是学术界的研究焦点,其关键在于如何用现有的研究方法对动态性进行适宜的描述与如何使其向静态问题转化. Edgar Perea Lopez<sup>[8]</sup>等学者在研究多工厂分布式供应链调度时,对调度动态调整周期的确定是通过微分

时间段来近似描述和求解,即以每天收到的订单为处理单元来组织生产.这样的解决思路难免有其机械性,更不适合于求解 MC 模式下的供应链动态调度问题.本文将采用动态采样的方法予以确定动态调度的运行周期和调整时刻.调整时刻的确定不是随机的,而是基于上述时间阈值和订单分类思路,有一定的规律性,如图 2 所示.

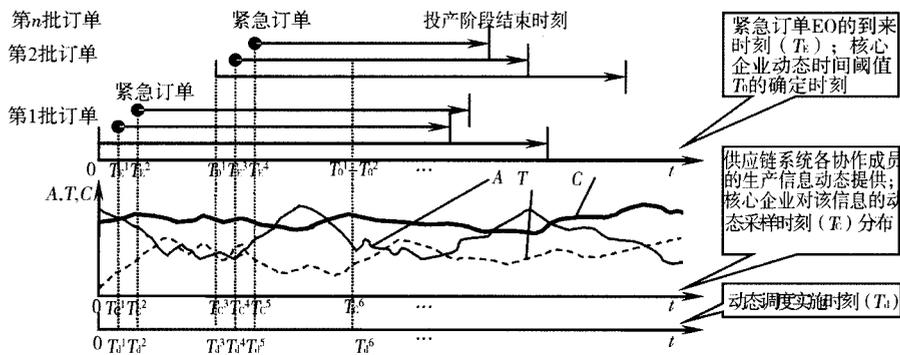


图 2 MC 模式下的供应链动态调度运行周期及调整时刻的确定示意

Fig.2 Determination of the operation period and adjustment moments of the supply chain scheduling in MC

注: 图中 A, T, C 分别指供应链体系中各协作成员的动态空余生产能力、动态产品生产时间和动态产品生产成

本.由图 2 可知,动态调度的调整可能在每一批订单所计算出的时间阈值时刻到来时以及每一个紧急订单到来时进行.由于客户提出紧急订货要求必然要为之付出较高额的代价,因而供应链系统为之进行调度调整必须考虑系统的综合收益.

图 3 为 MC 模式下供应链动态调度的调整流程.

由于任何时刻的调度调整都是基于供应链系统空余生产能力约束基础上的,因而不会出现多个调度命令之间相互冲突的现象.尽管这样,由于可能有大量的紧急订单存在,增加了供应链系统

的信息处理量及处理成本,使得整个调度过程趋于复杂化.这也是在前期研究成果中所提出的多级优化目标中,把减少紧急订单数量作为优化目标的原因之一.

### 4 动态调度的蚁群寻优算法

#### 4.1 算法的寻优机理及相关描述

研究表明,自然界中的蚁群虽没有视力却能够借助自身散发的信息素很快找到从巢穴到食物的最短路径.即便二者之间存在障碍物,也能以最

短的路径绕过.其运作机理为:若有一只蚂蚁随机地在巢穴与食物之间选择了较短路径,它能较早返回并在该路径上留下信息素.很明显,一段时间后,最短路径将具有较多的信息素,从而吸引其他蚂蚁也选择这条路径.进而,该路径上的信息素数量就会越来越多,这是正反馈.另一方面,由于经过较长路径的蚂蚁较少,信息素难以得到加强,会随时间逐渐挥发,最终遗弃该路径.由蚁群的寻优机理演化而来的蚂蚁算法具有良好的性能,如快速收敛到全局近似最优解,可以求解随机及动态问题等等.该方法在组合优化、动态路由及调度<sup>[12-15]</sup>等方面已逐步得到应用.

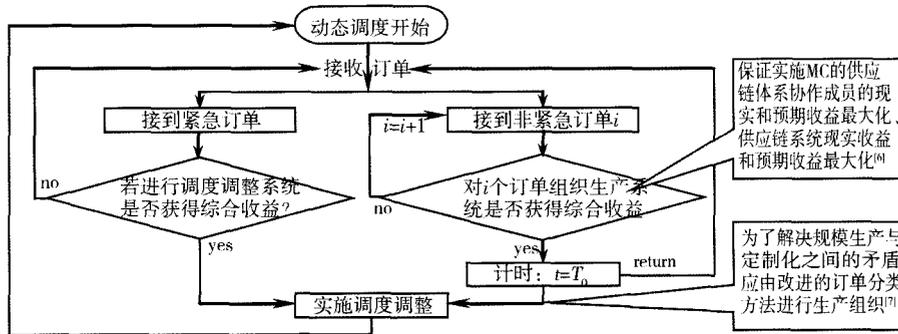


图3 MC模式下的供应链动态调度调整时刻确定流程

Fig. 3 Determination procedure of the supply chain dynamic scheduling moment in MC

但是,正如前文分析所示,MC模式下的供应链动态调度问题同一般的供应链调度问题和JSS、FSS问题相比具有较多的复杂性和新的运作特征,为了寻优计算的合理性与适用性,必须对蚂蚁算法进行相应的算法设计和改进.首先,对MC模式下的供应链动态调度过程进行如下描述及设定:

1)算法中,将供应链每个协作成员看作一个独立的生产单元,该单元在生产过程中每一时刻都拥有相对确定的运作参数.这里关心的是对供应链调度有直接影响的空余生产能力  $A(t)$ 、生产时限  $T(t)$ 及生产成本  $C(t)$ 等三个主要参数.表1反映了MC模式下供应链动态调度行为同蚂蚁觅食寻优行为之间的类比关系.

表1 MC模式下的供应链动态调度行为同蚂蚁觅食寻优行为之间的类比关系

Table 1 Similar relations between supply chain scheduling in MC and ants looking for food

MC模式下的供应链动态调度行为	动态调度开始	动态调度结束	定制产品生产各阶段的生产对象	供应链各协作成员	不同协作成员 $A(t)$ 、 $T(t)$ 及 $C(t)$ 的差异	单目标或多目标优化
蚂蚁觅食寻优行为	巢穴	食物	蚂蚁	觅食路径	路径长短差异	觅食时间及体力耗费优化

2)关于可行域的变动.以紧急订单(EO)到来所引起的调度调整为例,设供应链体系由协作成员集合  $M = \{m_1, m_2, \dots, m_n\}$  构成,在针对某一EO的调度调整时刻  $t_d$ ,  $M$  中有能力对EO某所须生产阶段提供生产的成员集合为  $M_{EO}$ ;而在  $t_d$  时刻,  $M$  中有空余(空闲)生产能力可以立即对EO的某阶段进行生产的成员集合为  $M_{EO}^*$ ;显然有

$M_{EO}^* \in M_{EO} \in M, (t = t_d)$ . 如果此时,  $M_{EO}$  中的成员想通过自身运作计划的调整(如提高设备利用率,加班生产等方式)转换为  $M_{EO}^*$  成员,则集合  $M_{EO}^*$  存在一个扩大的趋势.当这一过程趋于稳定时,供应链对EO的生产能力约束关系达到平稳.因而,此时寻优过程即是为EO的各生产阶段在可行域集合内搜索合适的生产成员,同时实现不同

阶段生产之间的衔接,使供应链体系对EO生产的综合收益最大化。

3)定制产品生产交货的准时问题.为了最大化地满足客户定制服务水平要求,定制产品交货期的准时性是毋庸置疑的(即对客户而言,准时送货将好于和优于提前或推迟送货).对于定制产品生产的每一阶段,均有其要求的期望交货期.因而,在调度的调整过程中,寻找各生产阶段中与期望交货期最为接近的协作成员将是优化的一个目标,这是构筑算法时须解决的问题。

4)供应链网络的生产堵塞问题.由前文分析可知,为了实现生产效率,定制产品的不同阶段均可划分为通用生产部分和定制生产部分.由于供应链协作生产的特点,定制产品生产的某些生产阶段可能跨越多个生产阶段,例如对于图4中B类,其起始生产即为成品组装.因而,多个订单同时进行生产,对于供应链网络中的某些节点可能存在生产流的堵塞问题(如图4中节点(3.3),由于有B类和C类生产同时进行),这也是构筑算法时所要考虑的问题。

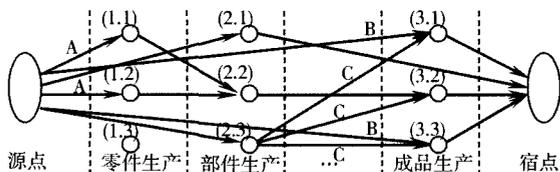


图4 MC模式下供应链动态调度算法运作的网络结构示意图

Fig. 4 Network structure of supply chain scheduling algorithm operation in MC

5)为了保证供应链体系作为一个系统而言其综合收益最大化,要求多个协作成员在调度调整之后,不得擅自变动其局部生产的交货期.当然,协作成员针对其他供应链协作关系的内部生产调整是可以的。

6)作为动态调度算法,对于由“紧急订单”和“时间阈值”确定的调度算法相同,不必分别讨论。

#### 4.2 算法的数学描述

如图4所示,设某一动态调度调整时刻的供应链网络均由源点、宿点及二者之间的协作成员节点构成.网络中的阶段划分将根据  $t_d$  时刻多个订单生产的实际要求动态确定.在算法进行中,蚂蚁将从源点通过网络移动到宿点,随后死亡.由于蚂蚁不返回,因而不同路径上的信息素含量将根据不同协作成员的生产参数智能确定.算法构造

如下:

1)蚂蚁的构造.为了使算法得以实现,本文在构造蚂蚁时须采取特殊方法,即:对蚂蚁的类别进行两步划分,第1步,按订单生产类型划分,每一类订单对应一类蚂蚁;第2步,同类订单中按生产的起始阶段进行划分,不同的起始阶段对应不同类型的蚂蚁.设  $t_d$  时刻,须调度调整安排的订单类型为  $n$  类,每一类中的不同生产起始阶段类别为  $m_i (i = 1, 2, \dots, n)$  类,则  $t_d$  时蚂蚁将构造为  $\sum_{i=1}^n m_i$  类,用  $A_{ij} (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m_i)$  表示。

2)可行域的确定.对每一类蚂蚁,由其生产特点决定了在网络中均有一些节点无须经过,为了加快算法收敛可将这些节点针对不同类型的蚂蚁设为禁入节点。

3)路径选择概率的设定.为了解决4.1小节中3)和4)的问题,蚂蚁对不同路径的选择概率应由两部分确定。

① 路径对蚂蚁的吸引概率.设  $t_d$  时刻  $A_{ij}$  的可行域是  $M_{ij}^*$  (协作成员构成的集合).  $M_{ij,kr}^*$  表示不同生产阶段  $k (k = 1, 2, \dots, K)$  中的第  $r (r = 1, 2, \dots, R)$  个协作生产成员.由于动态调度的优化目标为生产成本最小化,故设  $A_{ij}$  类蚂蚁在经过  $M_{ij,kr}^*$  后遗留信息素的量(由  $\pi_{ij,kr}^{(1)}$  表示)同生产成本成反比.则  $k$  中第  $r$  个协作成员对  $A_{ij}$  的第(1)类吸引概率为

$$P_A^{(1)} = \pi_{ij,kr}^{(1)} / \sum_{r=1}^R \pi_{ij,kr}^{(1)} \quad (1)$$

同时,为了解决4.1小节中问题3),设生产阶段  $kr$  对  $A_{ij}$  的期望生产时限为  $T_E$ ,由于供应链协作关系动态性的特点,某协作成员可能因为同时也和其他供应链网络达成了某种生产协定而需要按其自身的生产进程进行业务的竞标.设其竞标生产期限为  $T_S$ ,则设  $T_\Delta = |T_E - T_S|$ .为了满足定制产品的准时性和不同生产阶段的衔接性,  $T_\Delta$  越小越好.当然,有时  $T_\Delta$  的大小同生产成本有一定的关系,这个关系要求供应链系统进行统一权衡才能确定.设  $\pi_{ij,kr}^{(2)}$  为  $A_{ij}$  在  $kr$  中生产后因  $T_\Delta$  不同而遗留的信息素量,则设  $\pi_{ij,kr}^{(2)}$  同  $T_\Delta$  成反比,相应的第(2)类吸引概率为

$$P_A^{(2)} = \pi_{ij,kr}^{(2)} / \sum_{r=1}^R \pi_{ij,kr}^{(2)} \quad (2)$$

② 路径对蚂蚁的排斥概率. Varela 等学者<sup>[15]</sup>曾设想同类蚂蚁的信息素相互吸引, 不同类蚂蚁的则相互排斥. 为了解决 4.1 小节中问题 4), 本文需设定蚂蚁的排斥概率, 以解决算法中可能形成的某节点生产的堵塞问题. 设非  $A_{ij}$  类蚂蚁在某节点  $kr$  生产后留下的信息素量为  $\psi_{pq.kr}$ , 则其对  $A_{ij}$  的排斥概率为

$$P_R = \psi_{pq.kr} / \sum_{r=1}^R \psi_{pq.kr}; (p = i, q \neq j; p \neq i, q = j; p \neq i, q \neq j) \quad (3)$$

③ 蚂蚁选择路径的概率计算. 通过以上(1)、(2)分析, 本文设定  $A_{ij}$  选择节点  $kr$  生产的概率为

$$P_{ij.kr} = \alpha P_A^{(1)} + \beta P_A^{(2)} + \gamma(1 - P_R) \quad (4)$$

式中,  $\alpha, \beta, \gamma (0 < \alpha, \beta, \gamma < 1; \alpha + \beta + \gamma = 1)$  为算法运行的调整参数, 反映了吸引和排斥概率的期望权系数.

4) 关于信息素的更新规则. 与传统方法不同, 由于本文构造的蚂蚁只具有单向运动性, 因而对生产节点信息素的更新必须由算法自动完成. 这里为了表示简化, 由  $\Phi$  统一代表了上述  $\pi^{(1)}$ 、 $\pi^{(2)}$  和  $\psi$ . 更新规则为

$$\begin{aligned} \Phi(t+1) &= \Phi(t) + \Delta\Phi(t, t+1) - \xi\Phi(t) \\ &= (1 - \xi)\Phi(t) + \Delta\Phi(t, t+1) \end{aligned} \quad (5)$$

其中:  $\Phi(t)$  和  $\Phi(t+1)$  分别为蚂蚁所对应的生产任务第  $t$  次和第  $t+1$  次在某节点生产后遗留的总和信息素量;  $\Delta\Phi(t, t+1)$  为第  $t+1$  次遗留的信息素量;  $\xi (0 < \xi < 1)$  为信息素的挥发系数.

### 4.3 算法的步骤描述

以上两小节分析了 MC 模式下供应链动态调度蚂蚁算法的数学描述及相关表达式. 当每一个动态调度调整时刻到来时, 蚂蚁算法就执行一次, 从而动态调整定制生产任务在供应链各成员中的分配. 由于供应链成员相互之间具有非常复杂的协作与竞争关系, 因而找到调度优化的最优解是困难的. 实际上应该从多个方面进行权衡(本文从定制产品生产成本和交货期限两个方面考虑), 在调度之前提出一个可以主观接受的期望满意水平, 当算法收敛到使得各项优化指标达到该水平即可停止. 算法步骤如下:

**步骤 1** 核心企业根据图 4 流程确定动态调度调整时刻.

**步骤 2** 算法开始时, 按 4.1 小节中 2) 及 4.2

小节中 1)、2) 判断订单信息类别, 构造蚂蚁类别, 同时为每类蚂蚁设定相应的禁入节点, 从而确定其可行域.

**步骤 3** 根据现场采样数据分析确定产品各类别(对应不同的蚂蚁类别  $A_{ij}$ ) 在不同生产阶段的生产时期期望值  $T_E$ , 同时确定其生产成本, 确定  $T_\Delta$  同各类蚂蚁遗留信息素量的关系.

**步骤 4** 按历史经验及当时的现场数据分析确定调度各指标(如成本及交货期)优化的期望满意水平.

**步骤 5** 设定及调整  $\alpha, \beta, \gamma, \xi$  等参数的值.

**步骤 6** 在源点产生第  $t$  批次(初始时  $t = 1$ ) 蚂蚁, 每批次中包含各类蚂蚁(每类蚂蚁的数量按各订单类别数的  $x$  倍产生. 仿真分析, 对于小型供应链网络, 取  $3 < x < 10$  较合适), 使蚂蚁向宿点运动, 到达后全部消失. 按 4.2 小节中 4) 规则对各类可行域中生产节点信息素进行更新; 蚂蚁批次自动加 1, 即  $t = t + 1$ .

**步骤 7** 记录该批次中各节点通过的蚂蚁数量. 判断选择每个节点各类蚂蚁数量是否达到稳定值(即和前一批次相比选择该节点的蚂蚁数量无明显变化, 或者连续几个批次中选择该节点的蚂蚁数量均在某个值附近小范围内变动). 按所记录的各类蚂蚁在节点中分配数量情况分配对应的生产任务; 计算此时各种指标优化水平, 判断其是否达到期望满意水平. 如果达到, 则算法停止, 转步骤 8; 否则转步骤 6.

**步骤 8** 输出算法结果, 按结果实施生产调度.

说明: 1) 如果经过所有批次的运算, 蚁流仍无法达到稳定, 需要重新较大幅度的调整各类参数值, 即转到步骤 5; 2) 如果算法经过长时间执行后, 各项指标无法达到满意水平, 则应对期望满意水平进行相应的修正, 即转到步骤 4; 3) 当算法进行到一定时期达到稳定状态时, 说明消除了某些节点的堵塞问题. 也就是说即便该节点上的吸引信息素量很大, 也不会导致蚂蚁流的增加, 这是由于排斥概率在起作用.

## 5 算法仿真

仿真分析时, 采用如图 4 所示的供应链网络

结构和订单信息类的划分. 算法运行中参数选择为  $\alpha = 0.5$ ;  $\beta = 0.2$ ;  $\gamma = 0.3$ ;  $\xi = 0.05$ , 蚂蚁批次设定为 100. 以图中蚂蚁类型 A(即其可行域为节

点(1.1)和(1.2))和蚂蚁类型 C(其可行域为节点(3.1)、(3.2)和(3.3))为例, 其仿真结果的收敛趋势如图 5 所示.

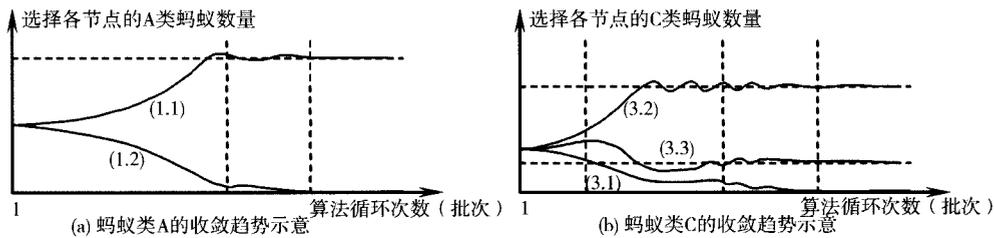


图5 蚂蚁类型 A 和 C 的仿真结果收敛趋势示意

Fig.5 Convergence tendency of the simulation results about ant classification A and C

由图 5 分析可知,对于蚂蚁类型 A,由于其可行域节点(1.1)和(1.2)没有其他生产任务同时进行,因而不存在生产拥塞问题,故经过若干批次运算后达到稳定状态时,几乎所有的蚂蚁选择了(1.1)进行生产.对于蚂蚁类型 C 其收敛情况较为复杂.初始时由于节点(3.2)和(3.3)对 C 的生产成本低于(3.1),因而其对 C 类蚂蚁的吸引较强,因而蚂蚁数量逐步上升;同时由于节点(3.3)对 B 类的生产成本小于节点(3.1),因而(3.3)中的另一类蚂蚁 B 逐步增多,对蚂蚁类 C 造成排斥.经过一段运算后,(3.3)中蚂蚁 C 的数量逐步下降,最终稳定在一个值.这是供应链节点生产拥塞的反映.而(3.2)对 B 类蚂蚁而言是禁入节点,因而蚂蚁类 C 收敛较快,较早达到稳定状态.对于节点(3.1)其经过的 C 类蚂蚁数量逐渐减少,最终完全放弃了这一节点.仿真试验还表明,根据 MC 模式下供应链调度的实际情况适当调整参数  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 、 $\xi$  的值可以得到较佳的算法收敛时间和效果,从而得到较为满意的调度结果.

## 6 结束语

MC 模式下的供应链调度问题兼有 MC 生产方式和供应链生产环境引发的双重复杂性.文章从客户满意的最大化定制角度出发,探索供应链环境下解决 MC 模式中规模生产同定制程度之间矛盾的缓解思路.并基于该思路分析了动态调度的实现问题.考虑到动态调度求解的复杂性,文章引入了性能优越的蚁群寻优算法,构筑了新型的算法运作机理及其相关运作参数,并通过仿真进行了算法的验证.文章意义体现在如下方面:1)提出的订单分类及时间阈值思路可以较好地缓解 MC 模式中的主导矛盾,实现供应链调度动态性的转化问题;2)文章探讨了 MC 模式下供应链调度中定制产品交货期的特殊特征,从而在算法的构筑上反映了这一特征;3)文章提出了供应链环境下有可能出现某节点的生产拥塞问题,进而在算法的设计上考虑了这一问题的解决.

## 参考文献:

- [1]B·约瑟夫 派恩 II. 大规模定制——企业竞争的新前沿[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 2000.  
Pine II B J. Mass Customization: The New Frontier in Business Competition[M]. Beijing: China People's University Press, 2000.
- [2]Jiao J, Ma Q, Tseng M M. Towards high value-added products and services: Mass customization and beyond[J]. Technovation, 2003, 23: 809—821.
- [3]Gerard P C. Managing supply chain demand variability with scheduling ordering policies[J]. Management Science, 1999, 45(6): 843—856.
- [4]Charles J C. Stochastic inventory system in a supply chain with asymmetric information: Cycle stocks, safety stocks, and consignment stock[J]. Operations Research, 2001, 49(4): 487—500.
- [5]Tormos P, Lova A. Tools for resource-constrained project scheduling and control: Forward and backward slack analysis[J]. Journal of Operations Research Society, 2001, 52: 779—788.
- [6]姚建明, 周国华. 大规模定制模式下供应链计划调度优化分析[J]. 管理科学学报, 2003, 6(5): 58—64.

- Yao Jian-ming, Zhou Guo-hua. Optimization analysis of supply chain planning and scheduling in mass customization[J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2003, 6(5): 58—64. (in Chinese)
- [7]姚建明, 蒲云, 张秀敏. 面向供应链的大规模定制时间阈值理论研究[J]. *工业工程与管理*, 2005, 10(2): 75—80.  
Yao Jian-ming, Pu Yun, Zhang Xiu-min. Research on time threshold value theory of mass customization in supply chain environment [J]. *Industrial Engineering and Management*, 2005, 10(2): 75—80. (in Chinese)
- [8]Edgar P, Ydstie B E, Ignacio E, *et al.* A model predictive control strategy for supply chain optimization[J]. *Computers and Chemical Engineering*, 2003, 27: 1201—1218.
- [9]Chiung M, Jongsoo K, Sun H. Integrated process planning and scheduling with minimizing total tardiness in multi-plants supply chain[J]. *Computers and Industrial Engineering*, 2002, 43(1): 331—349.
- [10]Hae L Y, Seok J C, Chiung M. Advanced planning and scheduling with outsourcing in manufacturing supply chain[J]. *Computers and Industrial Engineering*, 2002, 43(2): 351—374.
- [11]Bose S, Pekny J F. A model predictive framework for planning and scheduling problems: A case study of consumer goods supply chain[J]. *Computers and Chemical Engineering*, 2000, 24: 329—335
- [12]Bonabeau E, Dorigo M, Theraul A G. Inspiration for optimization from social insect behavior[J]. *Nature*, 2000, 406: 39—42.
- [13]马良, 项培军. 蚂蚁算法在组合优化中的应用[J]. *管理科学学报*, 2001, 4(2): 32—37.  
Ma Liang, Xiang Pei-jun. Applications of the ant algorithm to combinatorial optimization[J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2001, 4(2): 32—37. (in Chinese)
- [14]郝庆路, 罗欣, 杨叔子. 基于蚂蚁算法的混流车间动态调度研究[J]. *计算机集成制造系统—CIMS*, 2003, 9(6): 456—460.  
Gao Qing-lu, Luo Xin, Yang Shu-zi. Dynamic scheduling in hybrid flow shop using ant algorithm[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2003, 9(6): 456—460. (in Chinese)
- [15]Varela N. Ant Colony Optimization for Virtual-Wavelength-Path Routing and Wavelength Allocation[C]. *Proceedings of 1999 International Conference on Evolutionary Computation*, Washington DC, USA, 1999. 324—337.

## Analysis on ants optimization algorithm for supply chain dynamic scheduling in mass customization

YAO Jian-ming<sup>1</sup>, LIU Li-wen<sup>1</sup>, PU Yun<sup>2</sup>, ZHANG Xiu-min<sup>3</sup>

1. School of Economics and Management, Tsinghua University, Beijing 100084, China;
2. School of Economics and Management, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;
3. Business School, East China Normal University, Shanghai 200062, China

**Abstract:** Essential operation properties for supply chain dynamic scheduling in mass customization are described and defined. To relieve the dominant contradiction, train of thought for scheduling process is put forward on the basis of former work. Then this thinking is followed in the operation process of dynamic scheduling, and supply chain scheduling mechanism in mass customization is also analyzed. Optimization mechanism is introduced into the process while finding the scheduling solution, and ants optimization algorithm for supply chain dynamic scheduling is adopted to devise and improve its particular algorithm. Characteristic of the new algorithm lies in that in computation process it can not only reflect unique requirements for the operation characteristic of this manufacture mode, but will also compromise the relief train of thought for the dominant contradiction. Feasibility of the new algorithm ultimately gets validated through a simulation.

**Key words:** mass customization; supply chain scheduling; dynamic; ants optimizing algorithm; simulation