

考虑依赖关系和能力约束的多对多供应链订单分配研究

王剑^{1,2†}, 周壮^{1,2}, 黄琦^{1,2}, 夏薇^{1,2}

(1. 华中科技大学 自动化学院, 武汉 430074; 2. “图像信息处理与智能控制”教育部重点实验室, 武汉 430074)

摘要: 本文研究了一种多对多供应链中的相互依赖订单分配问题。其中, 来自需求方的需求由一系列相互依赖订单组成, 并同时考虑了供应商的能力约束以及订单多属性约束, 包括完成时间, 数量, 成本等。为了解决由于制造商依赖订单和供应商同时订单所导致的冲突, 本文采用了自动协商方法。在定义供应链相互依赖订单分配模型的基础上, 提出了一种两阶段协商协议和不同的协商策略。协商协议集成了投标和辩论两种协商流程, 实现了制造商和供应商之间的信息交流, 规定了协商双方的行为准则, 而协商策略则确定了制造商和供应商的决策规则。仿真实验验证了自动协商方法的可行性, 同时分析和比较了不同供应链环境下的订单分配效果。实验结果表明, 在不同供应链环境下, 通过协商的方法能够有效的消解冲突, 解决本文所研究的订单分配问题。

关键词: 供应链; 多对多; 订单分配; 相互依赖; 能力约束; 自动协商

中图分类号: F274

文献标志码: A

Order allocation problem in many-to-many supply chain considering interdependence and capacity constraints

Wang Jian^{1,2†}, Zhou Zhuang^{1,2}, Huang Qi^{1,2}, Xia Wei^{1,2}

(1.School of Automation,Huazhong University of Science and Technology,Wuhan 430074,China; 2.Key Laboratory for Image Information Processing and Intelligent controlling of Ministry of Education,Wuhan 430074,China)

Abstract: In this paper, we study the interdependent order allocation problem in the many-to-many supply chain. The demands from the demanders are interdependent orders. We also consider the ability constraints of the suppliers and different order issues such as the execution time, the quantity and the cost. In order to resolve the conflicts which caused by the interdependent orders and simultaneous orders, the automated negotiation approach is adopted. Firstly, the interdependent order allocation problem is defined. Then, the two-stage negotiation protocol and various negotiation strategies are developed. The negotiation protocol integrates the bidding negotiation and the argumentation-based negotiation to support the interactions between the manufacturers and the suppliers, and also prescribes the rules of negotiation that regulates the interaction acts while the negotiation strategy guides the negotiation partners' behavior. The simulation experiment results show that the order allocation problem can be resolved through the automated negotiation. It also numerically analyzes and compares the order allocation performances under different supply chain contexts. The experiment results show that the order allocation can be resolved through the negotiation under different supply chain contexts.

Keywords: supply chain; many-to-many; order allocation; order interdependence; capacity constraint; automated negotiation

0 引言

随着全球经济的高速发展, 整个供应链环境与需求朝着可变化、全球化方向发展, 顾客需求不确定性越来越大。此外, 制造商的需求, 供应商供应能力的不确定性的增加, 导致整个供应链不确定性

增加^[1]。在这种供应链环境下, 制造商不仅需要将自己的订单分配给合适的供应商, 还需要与供应商协调以满足双方的需求^[2-4]。因此, 供应链各成员如何合理分配订单对于解决订单分配问题十分重要。

在实际供应链中, 一般是多个制造商和多个供

收稿日期: 2017-xx-xx; 修回日期: 2017-xx-xx.

基金项目: 国家自然科学基金 (71671071, 71271094)

作者简介: 王剑 (1976—), 男, 副教授, 博士, 从事供应链建模、优化与仿真, 多 Agent 系统等研究; 周壮 (1994—), 男, 硕士生, 从事供应链建模、优化与仿真等研究。

†通讯作者. E-mail: wj0826_can@mail.hust.edu.cn

应商形成的网状供需关系,多个制造商将产生多个订单,订单分配问题较复杂。Kim 和 Cho^[3]提出了一种多 agent 的协商机制,来解决多个制造商如何将订单分配给多个供应商的问题。Yu 等人^[6]采用了 Stackelberg 博弈模型来解决多对多订单分配问题。此外,有些文献中考虑了供应商能力有限的情况,制造商可以选择将订单拆分成多个子订单再进行分配^[7],或者供应商可以通过形成联盟来共同完成某个订单^[5,6]。因此,本文在研究多对多供应链中订单分配问题时,不仅要从制造商的角度考虑其需求,还要从供应商的角度去考虑其生产能力的限制。

在实际的多对多供应链中,制造商在分配订单时通常需要满足订单的多属性约束,包括时间,数量,成本等^[2,8]。制造商协调多个属性之间的冲突,从而得出一个最优的生产计划^[5,6,9-11]。在目前的研究中,订单是相互独立的。但在实际供应链中,订单可能会因为某些约束存在更多相互依赖关系。Wang^[2]和 Lin^[9]指出,订单或服务可能会在执行过程中相互制约,存在着一定的时序关系。即在实际供应链中,制造商需要分配和协调一系列相互依赖的订单,这些订单分别完成同一个供应链上游需求的不同部分,且需要按时间顺序执行^[2,9,12]。例如,模具制造供应链中存在零件加工、表面处理、组装 & 测试等工艺过程。由于订单之间相互依赖,表面处理订单必须在零件加工订单完成之后才能开始执行,该订单完成之后,组装 & 测试订单才能开始^[2,9]。由于订单的相互依赖,制造商必须将所有的订单都成功分配给供应商才能整体获得利润^[13,14]。另一方面,考虑到供应链资源的有限性,当供应商在同一个生产周期内接收到多个订单,并且这些订单超过了其生产能力时,供应商将无法按时完成所有的订单^[3,5,7],这些冲突订单将被供应商拒绝,需由制造商重新分配,故而可能导致整个供应链效率降低^[3]。然而以前的研究都没有同时考虑到订单的相互依赖和能力约束的问题。因此,订单的相互依赖以及供应商的能力约束是本文的主要研究内容。

当同时考虑能力约束、相互依赖订单时,订单分配也变得更加复杂,产生的冲突也会更多。于是,消解冲突是成功分配订单的关键。为了能够有效的解决冲突,本文采用自动协商的方法来解决该订单分配问题。自动协商方法有如下优势:首先,通过自动协商,尤其在复杂的多对多协商环境中,协商各成员之间能够达成相互可接受的一致意见^[7]。其次,在动态供应链环境下,自动协商仍能保持高度

的灵活性和适应性^[3,15]。并且自动协商能够提供一个有效的协调机制,保证协商结果对于协商双方都是最优^[15,16]。基于以上特点,自动协商方法可以有效地解决本文所研究的订单分配问题。

目前对供应链订单分配的研究几乎都只是侧重于需求方的观点。事实上,双向选择是更加合理的。如果供应商收到多个具有重叠处理时间的订单并且这些订单超出其能力,供应商可以选择其能力中的一个或多个订单,然后拒绝相冲突的订单。这些冲突的订单可以由制造商重新分配给其他有能力的供应商。Marey 等人^[17]提出了一种基于辩论的谈判机制。在基于辩论的谈判过程中,谈判伙伴不仅可以交换请求和出价,还可以交换支持其要约的其他说服信息以达成双方的协议^[17]。因此,本文引入基于辩论的谈判机制,以帮助需求方与替代供应商争取达成新协议。

基于以上分析,本文主要研究了多对多供应链中的多属性、相互依赖订单的分配问题,同时考虑了供应商的能力约束。为了消解订单分配过程中产生的冲突,本文并采用了自动协商方法,并提出了两阶段协商协议和协商策略。

1 建模与分析

1.1 问题描述

由于本文不仅考虑了订单的相互依赖,还考虑了供应商的能力限制。同时,制造商需要协调订单的多个属性,包括成本,数量,开始时间和结束时间。因此订单分配问题变得更加复杂。订单分配流程如图 1 所示,分配过程可描述为:制造商收到上游顾客的需求信息后确定初始的订单需求,并与供应商通过协商交换信息,再结合自身实际和分配规则作出决策。制造商根据决策结果选择最合适的供应商并分配订单。由于供应商能力有限,在收到订单后需评估所有订单并确定是否存在冲突的同时订单,如果有冲突的同时订单,则拒绝冲突订单。制造商收到拒绝订单信息后将与其他有能力的供应商协商,并重新分配该订单。最后,制造商确定所有订单是否全部成功分配,如仍有冲突则需要调整订单需求并开始新一轮的协商。

1.2 符号定义

M_i : 表示制造商 i , 制造商的集合为 $I = \{1, 2, \dots, m\}$;

S_j : 表示供应商 j , 供应商的集合为 $J = \{1, 2, \dots, n\}$;

D_i : 制造商 M_i 的需求;

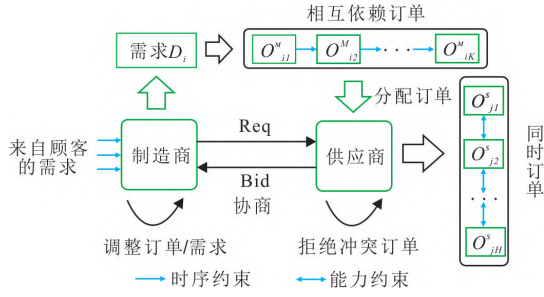


图1 订单分配流程

B_i : 需求 D_i 的开始时间;

F_i : 需求 D_i 的结束时间;

C_i : 需求 D_i 所需的总成本;

O_{ik}^M : 来自制造商 M_i 的第 k 个订单;

O_{jh}^S : 供应商 S_j 的订单, O_{jh}^S 表示供应商 S_j 第 h 个执行的订单;

K_i : 来自制造商 M_i 的需求的订单数量;

H_j : 供应商 S_j 收到的订单的数量;

Req_{ik} : 制造商 M_i 的第 k 个订单需求;

Bid_{ikj} : 供应商 S_j 为竞争订单 O_{ik}^M 确定的投标;

b_{ik}^M : 来自制造商 M_i 的订单 O_{ik}^M 的开始时间;

f_{ik}^M : 来自制造商 M_i 的订单 O_{ik}^M 的结束时间;

q_{ik}^M : 来自制造商 M_i 的订单 O_{ik}^M 的数量;

c_{ik}^M : 来自制造商 M_i 的订单 O_{ik}^M 的成本;

b_{ikj}^S : 供应商 S_j 对于订单 O_{ik}^M 投标的开始时间;

f_{ikj}^S : 供应商 S_j 对于订单 O_{ik}^M 投标的结束时间;

q_{ikj}^S : 供应商 S_j 对于订单 O_{ik}^M 投标的数量;

c_{ikj}^S : 供应商 S_j 对于订单 O_{ik}^M 投标的成本;

d_{ikj}^S : 供应商 S_j 对于订单 O_{ik}^M 投标的执行时间;

γ_{ikj} : 供应商 j 完成订单 O_{ik}^M 的单位生产力;

fc_{kj} : 供应商 j 完成订单 O_{ik}^M 的固定成本;

mc_{ikj} : 供应商 j 完成订单 O_{ik}^M 的可变单位成本;

rc_{ikj} : 供应商 j 完成订单 O_{ik}^M 的实际成本;

$earl_{ikj}$: 供应商 j 提前订单的边际生产成本;

$tard_{ikj}$: 供应商 j 延误订单的边际生产成本;

e_{ikj} : 供应商 j 提前订单的时间;

t_{ikj} : 供应商 j 延误订单的时间;

$penalty_j$: 供应商 j 因为拒绝订单而额外付出的总惩罚成本;

pr : 供应商的利润率;

pe : 拒绝订单的惩罚率;

t_{gap} : 估计执行时间与要求时间的差值;

决策变量:

x_{ikj} : 表示制造商 M_i 是否将订单 O_{ik}^M 分配给供应商 S_j ;

y_{ikj} : 表示供应商 S_j 是否拒绝订单 O_{ik}^M 。

1.3 数学模型

1.3.1 需求和订单

在多对多供应链环境中, 制造商 i 的需求 D_i 是连续产生的, 制造商的一个需求是由一系列相互依赖的订单组成的。每一个订单需要考虑四个属性: 开始时间, 结束时间, 数量和成本, 其定义为:

$$O_{ik}^M = [b_{ik}^M, f_{ik}^M, q_{ik}^M, c_{ik}^M], \forall i \in I, \forall k \in K_i \quad (1)$$

故制造商的需求定义如下:

$$D_i = \{O_{i1}^M, O_{i2}^M, \dots, O_{iK_i}^M\} = \{[b_{i1}^M, f_{i1}^M, q_{i1}^M, c_{i1}^M], [b_{i2}^M, f_{i2}^M, q_{i2}^M, c_{i2}^M], \dots, [b_{iK_i}^M, f_{iK_i}^M, q_{iK_i}^M, c_{iK_i}^M]\}, \forall i \in I \quad (2)$$

$$\text{s.t.} \quad b_{i1}^M \geq B_i \quad (3)$$

$$f_{iK_i}^M \leq F_i \quad (4)$$

$$\sum_{k=1}^{K_i} c_{ik}^M \leq C_i \quad (5)$$

由于来自制造商的订单是相互依赖的订单, 相邻的订单的执行时间不能有冲突, 即一个订单应该在前一个订单完成之后再开始, 在后一个订单开始前结束。因此, 相互依赖订单的必须满足以下条件:

$$f_{ik}^M \leq b_{i,k+1}^M, \forall i \in I, \forall k \in [1, K_i - 1] \quad (6)$$

另一方面, 考虑到供应商的能力有限, 如果制造商将多个订单同时分配给同一个供应商, 当这些订单超过了供应商的能力时, 供应商不能同时完成这些订单。当供应商 j 收到多个订单时, 可能会产生同时订单, 将这些订单按开始时间排序, O_{jh}^S 表示第 h 个执行的订单。同时订单定义如下:

$$O_j^S = \{O_{j1}^S, \dots, O_{jh}^S, \dots, O_{jH_j}^S\} = \{[b_{j1}^S, f_{j1}^S, q_{j1}^S, c_{j1}^S], \dots, [b_{jh}^S, f_{jh}^S, q_{jh}^S, c_{jh}^S], \dots, [b_{jH_j}^S, f_{jH_j}^S, q_{jH_j}^S, c_{jH_j}^S]\}, \forall j \in J \quad (7)$$

如果存在冲突的同时订单, 即相邻的订单执行时间有重叠, 那么有冲突的同时订单定义如下:

$$f_{jh}^S \geq b_{j,h+1}^S, \forall h \in [1, H_j - 1] \quad (8)$$

1.3.2 协商双方信息交换

制造商与供应商之间的协商是通过 Req (请求) 和 Bid (投标) 进行信息交换的。 Req_{ik} 表示制造商 i 的第 k 个订单 O_{ik}^M 的要求, 包括四个属性, 分别是开始时间、结束时间、数量和成本。 Bid_{ikj} 表示供应方 j 为竞争订单 O_{ik}^M 确定的投标, 包括相应的四个属性。 Req_{ik} 和 Bid_{ikj} 的定义如下:

$$Req_{ik} = [b_{ik}^M, f_{ik}^M, q_{ik}^M, c_{ik}^M] \quad (9)$$

$$Bid_{ikj} = [b_{ikj}^S, f_{ikj}^S, q_{ikj}^S, c_{ikj}^S] \quad (10)$$

1.3.3 决策模型

1) 制造商的目标函数

制造商希望通过招标的方式, 将订单成功分配给最合适的供应商, 并尽可能降低采购成本, 以获取最大利润。故制造商的目标是成本最小化, 用 G_i^M 表示制造商的目标, 其定义如下:

$$G_i^M = \min \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^{K_i} c_{ikj}^S * x_{ikj}, \forall i \in I, \forall k \in K_i, \forall j \in J \quad (11)$$

$$\text{s.t. } x_{ikj} = \begin{cases} 1, & M_i \text{ 将订单 } O_{ik}^M \text{ 分配给 } S_j \\ 0, & \text{否则} \end{cases} \quad (12)$$

$$\sum_{j=1}^J x_{ikj} = 1, \forall i \in I, \forall k \in K_i \quad (13)$$

$$\sum_{j=1}^J f_{ikj}^S * x_{ikj} < \sum_{j=1}^J b_{i,k+1,j}^S * x_{i,k+1,j}, \forall i \in I, \forall k \in K_i \quad (14)$$

其中, x 用来表示制造商是否将订单分配给供应商。公式 (13) 表示一个订单只能由一个供应商完成。考虑到相互依赖订单时间约束问题, 因此公式 (14) 给出了相互依赖订单之间的时间约束。

2) 供应商的目标函数

供应方的目标是通过合适的 *Bid* 竞争更多的订单才能获得更多的利润。用 G_j^S 表示供应方的目标, 其定义如下:

$$G_j^S = \max \left\{ \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^{K_i} (c_{ikj}^S - rc_{ikj}) * x_{ikj} - \text{penalty}_j \right\}; \quad \forall j \in J \quad (15)$$

$$\text{s.t. } rc_{ikj} = fc_{ikj} + mc_{ikj} * q_{ikj}^S + tard_{ikj} * t_{ikj} + earl_{ikj} * e_{ikj} \quad (16)$$

$$d_{ikj}^S = q_{ikj}^S / \gamma_{ikj} \quad (17)$$

$$f_{ikj}^S = b_{ikj}^S + d_{ikj}^S \quad (18)$$

$$t_{ikj} = \begin{cases} f_{ikj}^S - f_{ik}^M, & f_{ikj}^S > f_{ik}^M \\ 0, & \text{否则} \end{cases} \quad (19)$$

$$e_{ikj} = \begin{cases} f_{ik}^M - f_{ikj}^S, & f_{ikj}^S < f_{ik}^M \\ 0, & \text{否则} \end{cases} \quad (20)$$

$$c_{ikj}^S = (1 + pr) * rc_{ikj} \quad (21)$$

$$\text{penalty}_j = \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^{K_i} pe * c_{ik}^M * y_{ikj} \quad (22)$$

y_{ikj} 表示供应商 S_j 是否拒绝订单 O_{ik}^M 。 y_{ikj} 初

始值为 0, 在协商过程中如果供应商 S_j 拒绝了制造商分配的订单 O_{ik}^M , 则 $y_{ikj} = 1$ 。(见 2.1)

对于整个供应链来说, 订单分配的目标是平衡制造商和供应商的目标, 找到最佳的订单分配方案以最大地满足供应链中各成员的利润。为了协调供应链中制造商和供应商之间的冲突, 本文提出了一种两阶段协商机制来支持协商过程和消解冲突。

2 两阶段协商机制

自动协商在不同的供应链环境下有较好的灵活性和适应性, 同时还能提供一种高效的协商机制促使协商双方达成一致, 并保证双方的共同获利^[3,15,16]。因此, 本文针对多对多供应链中订单分配问题, 提出了一种两阶段协商机制来解决该订单分配问题, 实现协商双方的交互, 以及协商双方存在的冲突的消解。协商机制包括协商协议和协商策略两个部分。协商协议是协商双方之间交互必须遵守的行为准则, 它规定了协商步骤以及推进过程。协商策略规定了协商成员如何作出决策。

2.1 两阶段协商协议

由于制造商和供应商可以通过招标和投标实现信息交换, 再依据收到的信息做出决策分配订单^[3,6]。另一方面, 基于辩论的协商可以通过辩论使协商双方了解各自需求, 并要求对方做出让步, 以达成一致, 从而有利于提高协商效率^[2]。因此本文提出的一种两阶段协商协议包括两个阶段: 第一阶段是竞标阶段, 制造商选择合适的竞标分配订单; 第二阶段是辩论阶段, 基于辩论的协商机制来重新分配被拒绝的订单。图 2 表示了协商协议的流程。

第一阶段: 竞标阶段。这一阶段的目标是制造商为每一个订单选择一个最合适的供应商来完成。制造商根据上游顾客的订单信息来确定各自的需求 $D_i = \{O_{i1}^M, O_{i2}^M, \dots, O_{iK_i}^M\}$, 生成招标订单, 再向各个可能的供应商发送订单的请求信息 (*Req*)。当供应商收到来自制造商的招标信息后, 供应商根据需求信息对生产计划进行预调度, 依据供应商竞标策略 (见 2.2.2) 确定该招标订单的投标信息 (*Bid*)。

制造商收到来自各个供应商的投标之后, 制造商评估这些投标是否可行, 并依据供应商选择策略 (见 2.2.1) 选择最优的供应商来完成该订单, 并确定临时分配方案, 然后向相应的投标方发出临时中标通知, 与选择的供应商签订临时合同。如果有些订单没有合适的投标, 制造商将依据订单调整策略 (见 2.2.1) 调整 *Req*, 在订单的各个属性上做出一定的让步, 以获得更多合适的投标。

供应商收到制造商发过来的临时中标通知之后, 确定各个订单的生产计划, 再次评估是否有能力完成收到的所有订单。如果能完成, 则接受订单与制造商签订合同。如果不能完成收到的所有订单, 供应商则需要拒绝有冲突的同时订单。如果制造商的订单被拒绝, 则进入第二阶段与其他有能力完成该订单的供应商协商, 并重新分配该订单。

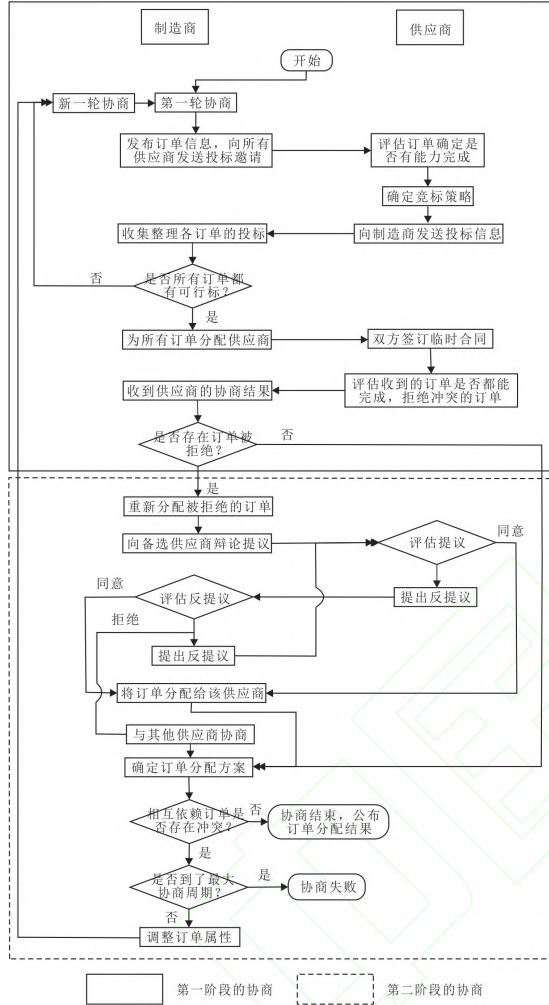


图2 两阶段协商协议

当制造商将所有的订单都成功分配出去后, 再根据临时分配方案逐个评估订单, 检验相互依赖之间是否存在冲突。如果有冲突产生, 制造商将依据需求调整策略 (见 2.2.1) 调整冲突的相互依赖订单的开始时间和结束时间, 并通过下一轮协商消解时间冲突。如果没有冲突, 制造商将给出最终订单分配方案, 与供应商签订最终合同, 协商结束。

第二阶段: 辩论阶段。通过基于辩论的协商, 制造商能合理地将被拒绝订单重新分配。制造商将提议发送给备选供应商。提议包括辩论信息, 用来告知自身的需求, 目前获得的供应商最优的 Bid 的方案, 以及需要供应商作出时间让步。供应商收到制造商的提议后, 评估提议并给出回应 (接受或反

驳)。如果供应商接受提议, 则该订单重新分配成功。当供应商不能按制造商的需求完成该订单, 将拒绝该提议或者发回一个反提议。制造商收到反提议后进行评估, 决定拒绝反提议, 或者进行反提议的辩论。协商最后会得到一个双方都满意的结果或以失败结束。本文提出的基于辩论的协议步骤如下:

例如供应商 S_h 收到多个冲突的同时订单 O_h^S , 为了避免同时订单的冲突, 于是拒绝 M_i 的订单 O_{ik}^M , M_i 通过辩论协商重新分配被拒绝的订单, 因此, $y_{ikh} = 1$ 。 M_i 与 S_s 协商重新达成一致, 如果协商成功, 则订单 O_{ik}^M 重新分配给供应商 S_s , 即 $x_{ikh} = 0, x_{iks} = 1$ 。

1. 制造商 M_i 发送订单 O_{ik}^M 的招标信息给次优的供应商 S_j 。每个招标信息包含订单的各个需求 Req , 供应商最优的投标的方案 Bid_{ikh} , 辩论要求作出时间让步的信息 $T = [\Delta b, \Delta f]$ 。根据辩论信息, 制造商需要供应商提前或延迟执行订单的开始时间和结束时间, 以得到一个更符合需求的投标方案。让步时间可以采用下面两个公式计算 (见 2.2.1)。

$$\Delta b = (c_{ik}^M - c_{ikh}^S) / (c_{ik}^M - c_{ikj}^S) * (b_{ik}^M - b_{ikj}^S) \quad (23)$$

$$\Delta f = (c_{ik}^M - c_{ikh}^S) / (c_{ik}^M - c_{ikj}^S) * (f_{ik}^M - f_{ikj}^S) \quad (24)$$

2. 供应商 S_j 收到来自制造商的提议后, 评估提议并给出回应 (接受或反驳)。如果供应商接受提议, 供应商 S_j 修改投标并将修改的投标信息发送给 M_i , $Bid_{ikj} = [b_{ikj}^S + \Delta b, f_{ikj}^S - \Delta f, q_{ijk}^S, c_{ikj}^S + \delta]$ 。当供应商不能按制造商的需求完成该订单时, 将会拒绝该提议, 并发回一个反提议。反提议中包括拒绝提议的原因, 并提出修改让步要求 T 。

3. 制造商收到反提议后评估反提议, 决定拒绝反提议, 或者进行反提议的辩论。如果 M_i 拒绝修改提议, 则继续与其他的供应商重新协商。如果 M_i 接受反提议, 则修改需要供应商让步的时间 T , 重新进入上一步的过程, 最后得到一个协商双方都满意的结果。

通过基于辩论的协商, 制造商能够将被拒绝的订单重新分配给其他供应商, 通过协调双方的需求, 有效的消解同时订单冲突。由于辩论协商给出了更多的信息, 提议和反提议更符合协商双方的期望, 因此能够较快达成一致。但是当被拒绝订单始终没有成功的重新分配出去, 那么制造商就要调整该订单的其他属性, 开始新一轮的协商。

2.2 协商策略

2.2.1 制造商协商策略

1) 需求调整策略

制造商确定其分配方案后,再逐个评估订单,检验相互依赖之间是否存在冲突。如果有冲突产生,则需要在下一轮协商过程中消解冲突。假设制造商 i 的订单 $O_{ia}^M, O_{i,a+1}^M$ 是冲突的相互依赖订单,即 $f_{ia}^M[t] > b_{i,a+1}^M[t]$ 。相互依赖订单之间的时间冲突 $\Delta t = f_{ia}^M[t] - b_{i,a+1}^M[t]$ 。为了消解冲突,制造商需要调整这两个冲突订单的执行时间,两个订单均作出一定的时间让步,前一个订单提前 $\Delta t'$ 单位时间结束,后一个订单延迟 $\Delta t'' = \Delta t - \Delta t'$ 单位时间开始。 $\Delta t'$ 的取值根据制造商或供应商的偏好取值。

于是,在下一轮协商中订单 O_{ia}^M 和 $O_{i,a+1}^M$ 各属性可进行如下调整:

$$b_{ia}^M[t+1] = b_{ia}^M[t] \quad (25)$$

$$f_{ia}^M[t+1] = f_{ia}^M[t] - \Delta t' \quad (26)$$

$$c_{ia}^M[t+1] = c_{ia}^M[t] + \delta(f_{ia}^M[t] - b_{ia}^M[t], f_{ia}^M[t+1] - b_{ia}^M[t+1]) \quad (27)$$

$$b_{i,a+1}^M[t+1] = b_{i,a+1}^M[t] + \Delta t'' \quad (28)$$

$$f_{i,a+1}^M[t+1] = f_{i,a+1}^M[t] \quad (29)$$

$$c_{i,a+1}^M[t+1] = c_{i,a+1}^M[t] + \delta(f_{i,a+1}^M[t] - b_{i,a+1}^M[t], f_{i,a+1}^M[t+1] - b_{i,a+1}^M[t+1]) \quad (30)$$

2) 订单调整策略

在投标和分配的过程中,如果没有 Bid 能够满足制造商的需求,那么制造商需要调整该订单的属性,做出一定的让步,以便在下一轮协商中,能有更多的供应商有能力竞标。用 t 表示协商轮数, $b_{ik}^M[t], f_{ik}^M[t], c_{ik}^M[t], q_{ik}^M[t]$ 分别表示在第 t 轮协商中订单 O_{ik}^M 的各属性值, $b_{ik}^M[t+1], f_{ik}^M[t+1], c_{ik}^M[t+1], q_{ik}^M[t+1]$ 则分别表示在第 $t+1$ 轮协商中订单 O_{ik}^M 的经过调整后的各属性值。函数 δ 用来计算在该订单属性上作出的让步^[6],其定义如下:

$$\delta(x, y) = (G - g)(x - y)/G \quad (31)$$

其中, G 表示总让步次数, g 表示本次让步的次数。

于是,经过让步该订单各属性可进行如下调整:

$$b_{ik}^M[t+1] = b_{ik}^M[t] + \delta(b_{ikj}^S[t], b_{ik}^M[t]) \quad (32)$$

$$f_{ik}^M[t+1] = f_{ik}^M[t] + \delta(f_{ikj}^S[t], f_{ik}^M[t]) \quad (33)$$

$$c_{ik}^M[t+1] = c_{ik}^M[t] + \delta(f_{ik}^M[t] - b_{ik}^M[t], f_{ik}^M[t+1] - b_{ik}^M[t+1]) \quad (34)$$

$$q_{ik}^M[t+1] = q_{ik}^M[t] + \delta(f_{ikj}^S[t] - b_{ikj}^S[t], f_{ik}^M[t] - b_{ik}^M[t]) \quad (35)$$

其中, $b_{ikj}^S[t]$ 和 $f_{ikj}^S[t]$ 分别表示在 t 轮协商中供应商给出的竞标开始时间和结束时间。当新的订单的

属性确定后,制造商评估新的订单需求,检验是否与相邻的相互依赖订单有时间冲突,如果有,则依据需求调整策略调整需求,消除冲突。

3) 供应商选择策略

当收到所有来自供应商的 Bid 后,制造商可以采取最优选择策略和联赛选择策略来选择最合适的 Bid 。最优选择策略是选择效用值最高的 Bid 。但是,如果制造商们选择 Bid 时只是从自身需求来看,很可能多个制造商将相似订单同时分配给了同一个竞争力最强的供应商,出现局部最优问题。为了避免局部最优,制造商可以采用联赛选择策略来选择供应商,即从所有的 Bid 中随机选择若干个 Bid ,再从这些 Bid 中选择效用值最高的 Bid 。采用联赛选择策略可以避免陷入局部最优,更快的达成一致。

2.2.2 供应商协商策略(竞标策略)

供应商收到来自制造商的需求信息后,需要根据订单数量和自身能力来估计所需要的执行时间,即 $d_{ikj}^S[t] = q_{ik}^S[t]/\gamma_{ikj}$, 其中 γ_{ikj} 表示供应商 j 的能力。然后再判断是否有能力按时完成订单,用 t_{gap} 表示估计执行时间与要求时间的差值,即 $t_{gap} = f_{ik}^M[t] - b_{ik}^M[t] - d_{ikj}^S[t]$ 。如果 $t_{gap} \geq 0$, 那么供应商能够按时完成订单;否则,供应商无法按时完成,必须提前开始或者延迟结束,则会产生额外的提前/延误成本。供应商将根据制造商的需求来确定其竞争的 Bid ,可采用如下方法给出:

$$f_{ikj}^S[t] = f_{ik}^M[t] \quad (36)$$

$$b_{ikj}^S[t] = f_{ikj}^S[t] - d_{ikj}^S[t] \quad (37)$$

$$c_{ikj}^S[t] = c_{ikj}^S[t-1] + \delta(f_{ikj}^S[t-1] - b_{ikj}^S[t-1], f_{ikj}^S[t] - b_{ikj}^S[t]) \quad (38)$$

3 数值分析

为了验证所建立的供应链订单分配模型和自动协商方法的可行性,本文使用 *MATLAB* 软件进行协商算法实现。算例选取制造商的数量 $m = 4$, 制造商可以连续产生多个需求,每个需求由 5 个相互依赖订单组成,需求调整策略中时间调整为 $\Delta t' = \Delta t'' = \Delta t/2$ 。供应商的相关参数初始数据如表 1 所示。实验中协商次数上限为 100 轮。本文模拟了不同的供应链环境下的订单分配,并从协商次数,协商成功率以及制造商总成本等方面对订单分配的效果进行分析。

3.1 订单数量与复杂程度对订单分配结果的影响

在订单分配过程中,来自制造商的需求是连续产生的。因此,首先研究制造商产生相互依赖订单

表 1 供应商相关参数设置

初始化订单 ($O_{i3}^M, O_{i4}^M, O_{i5}^M$)	生产力 ($day/unit$)	固定成本	可变成本 ($perunit$)	提前生产成本 ($perunit$)	延误生产成本 ($perunit$)
供应商 1	(45,0,0,0,0)	(500,0,0,0,0)	(40,0,0,0,0)	(12,0,0,0,0)	(20,0,0,0,0)
供应商 2	(0,37,0,0,0)	(0,800,0,0,0)	(0,70,0,0,0)	(0,18,0,0,0)	(0,35,0,0,0)
供应商 3	(0,0,16,0,0)	(0,0,1200,0,0)	(0,0,100,0,0)	(0,0,25,0,0)	(0,0,50,0,0)
供应商 4	(0,0,0,9,0)	(0,0,0,1600,0)	(0,0,0,150,0)	(0,0,0,40,0)	(0,0,0,80,0)
供应商 5	(0,0,0,0,4)	(0,0,0,0,2600)	(0,0,0,0,260)	(0,0,0,0,75)	(0,0,0,0,150)

表 2 制造商 M_i 的初始化需求

订单	O_{i1}^M	O_{i2}^M	O_{i3}^M	O_{i4}^M	O_{i5}^M
初始需求	(1, 10, 500, 26000)	(11, 20, 400, 26000)	(21, 30, 200, 24000)	(31, 40, 100, 17000)	(41, 50, 50, 16500)
(开始时间,	(7, 16, 500, 26500)	(17, 26, 400, 26000)	(27, 36, 200, 26000)	(37, 46, 100, 18500)	(47, 56, 50, 18000)
结束时间,	(14, 23, 500, 26000)	(24, 36, 400, 26000)	(37, 46, 200, 24000)	(47, 56, 100, 17500)	(57, 66, 50, 17000)
数量, 成本)	(21, 30, 500, 26000)	(31, 40, 400, 26000)	(41, 50, 200, 24000)	(51, 60, 100, 17500)	(61, 70, 50, 17500)
	(28, 37, 500, 26000)	(38, 47, 400, 26000)	(48, 57, 200, 24000)	(58, 67, 100, 17500)	(68, 77, 50, 16500)

表 3 订单数量对订单分配结果的影响

需求数量	5	10	15	20	25
协商成功率	98%	93%	91%	89%	85%
平均协商次数	13	15	16	18	20

表 4 制造商 M_i 复杂度高时的初始化需求

订单	O_{i1}^M	O_{i2}^M	O_{i3}^M	O_{i4}^M	O_{i5}^M
初始需求	(1, 10, 500, 26000)	(11, 20, 400, 26000)	(21, 30, 200, 24000)	(31, 40, 100, 17000)	(41, 50, 50, 16500)
(开始时间,	(4, 13, 500, 26500)	(14, 23, 400, 26000)	(24, 33, 200, 26000)	(34, 43, 100, 18500)	(44, 53, 50, 18000)
结束时间,	(7, 16, 500, 26000)	(17, 26, 400, 26000)	(27, 36, 200, 24000)	(37, 46, 100, 17500)	(47, 56, 50, 17000)
数量, 成本)	(10, 19, 500, 26000)	(20, 29, 400, 26000)	(30, 39, 200, 24000)	(40, 49, 100, 17500)	(50, 59, 50, 17500)
	(13, 22, 500, 26000)	(23, 32, 400, 26000)	(33, 42, 200, 24000)	(43, 52, 100, 17500)	(53, 62, 50, 16500)

表 5 订单复杂程度对订单分配结果的影响

复杂度 \ 供应商数量		20	25	30	35	40
低	协商次数	22	17	14	11	9
	成功率	91%	95%	97%	94%	94%
	制造商总成本	3 315 200	3 231 900	3 164 154	3 137 600	3 098 800
中等	协商次数	25	19	15	12	10
	成功率	67%	72%	85%	60%	60%
	制造商总成本	3 383 500	3 302 800	3 297 100	3 285 200	3 269 700
高	协商次数	28	25	18	15	12
	成功率	47%	65%	70%	50%	50%
	制造商总成本	3 678 600	3 535 820	3 458 600	3 375 000	3 461 600

表 6 不同订单选择策略对订单分配结果的影响

策略	最优选择策略	联赛选择策略					
		1	2	3	4	5	∞
协商次数	16	23	21	19	18	17	16
制造商总成本	4 225 800	4 409 900	4 363 400	4 341 900	4 340 200	4 338 700	4 335 800

的数量对订单分配结果的影响, 在这里我们给定需求的数量 $D_{size} = 5, 10, 15, 20, 25$ 。制造商订单需求初始参数设置值如表 2 所示。供应商选择策略为最优选择策略。实验结果如表 3 所示。

根据表 3 可以看出, 协商成功率随需求数量的增大而减小, 平均协商次数随需求数量的增大而增大。这是因为供应链中需求数量越大, 表示供应链

中有更多的相互依赖订单, 制造商需要花更多的时间来协调相互依赖订单, 因此平均协商次数越大。由于供应链中相互依赖订单增加, 订单在分配过程中会产生更多的冲突, 采用协商的方法消解的冲突效率是有限的, 所以协商的成功率也相应减少。为了在接下来的实验中获得一个较好的实验结果, 我们选择 $D_{size} = 10$ 来完成下面的实验。

由于制造商的需求是连续产生的,产生需求的速度决定了订单的复杂程度。产生需求越快时,相同订单执行时间重叠程度更大,订单复杂程度越高。反之,订单复杂程度越低。为了研究订单复杂程度对订单分配结果的影响,根据相同订单执行时间重叠程度的不同,我们将订单分为低、中等和高三种复杂程度。需求方的订单复杂程度较高时,需求初始参数如表 4 所示。供应商选择策略为最优选择策略。实验结果如表 5 所示。

从表 5 可以看出,订单复杂程度越高,平均协商次数越多。这是因为订单复杂程度高,履行时间重叠的订单越多,由于局部优势,这些订单很容易同时分配给同一个最优的供应商。但是供应商的能力有限无法同时完成所有的订单,因此供应商必然需要提前开始订单或者延迟完成订单。由于这些订单不能按计划进行,将很可能与相邻的相互依赖订单的履行时间产生冲突。虽然通过辩论协商,这些冲突的订单能够重新分配给其他供应商,通过协调达成一致,但是仍需要更多的时间来消解这些冲突。因此,订单复杂程度越高,需要更多的时间进行协调,协商次数越多。另一方面,订单复杂程度越高,制造商完成所有订单需要的总成本也相应增加。这是因为订单复杂程度越高,导致在订单分配过程中有更多的冲突产生,供应商提前和延迟订单都会产生额外的惩罚成本。

3.2 供应商规模对订单分配结果的影响

供应链中供应商数量不同,则供应链整体的供应能力也不相同。为了研究供应商数量不同对订单分配结果的影响,实验给定不同的供应商的数量 $S_{size} = \{20, 25, 30, 35, 40\}$, 供应商选择策略为最优选择策略。协商结果如表 5 所示。

从表 5 可以看出,当供应商数量较小时,协商次数较多。这是因为此时制造商在分配订单时只有少数几个供应商可选择,订单分配过程必然会产生较多的冲突订单,这些冲突很难协调,因此需要更多的协商次数。另一方面,当供应商数量较小时,协商成功率也较低。因为此时供应商的能力有限难以完成所有的订单,被拒绝的订单很难再次成功分配,因此协商成功率很低。随着供应商数量的增加,供应链整体供应能力提高,协商成功率也随着增加。但是当供应商数量超过 30 时,成功率开始下降。这是因为当供应链中供应商较多时,供应商之间的竞争更加激烈,供应商需要提供更有竞争的投标才能竞争到订单,协商成功率也因此降低。

对于制造商总成本而言,随着供应商数量的增加,制造商总成本在降低。这是因为供应链数量较小时,由于供应能力有限,供应商往往不能按时完成订单,需要交付更多因延误而产生的额外费用。并且在此环境下供应商竞争压力小,供应商会提出更高的报价来竞争订单。另一方面,当供应商的数量较大时,供应商竞争大,供应商给出更有竞争力的投标来竞争订单,制造商的成本也因此降低。

3.3 供应商选择策略对订单分配结果的影响

制造商可以采取最优选择和联赛选择两种策略来选择供应商的投标。本节对比了采用这两种策略时的订单分配效果。实验设置每个订单有相应的 6 个供应商来竞争。联赛选择策略的联赛规模设置为 $size = 3$, 图 3 统计了每轮协商中制造商采用不同的供应商选择策略产生存在冲突的同时订单的数量。

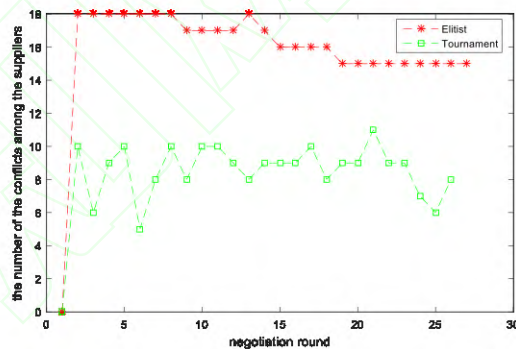


图 3 冲突的同时订单数量

从图 3 可以看出,当制造商采用最优选择策略时,有更多的冲突的同时订单产生,在整个协商过程中,冲突订单的数量一直处于较高的水平。这是因为制造商采用最优策略选择投标的时候只考虑了自身需求,而没有考虑整个供应链需求,协商过程很容易陷入局部最优,即多个相似订单同时分配给了同一个供应商。由于考虑了供应商能力限制,必然会有冲突订单产生。当制造商采用联赛选择策略时,冲突订单数量少了很多。这是因为联赛选择策略先随机选择了三个供应商,随机选择的过程可以有效地避免陷入局部最优。

对于联赛选择策略,不同的联赛规模下的订单分配结果也不相同。因此选择联赛规模为 1, 2, 3, 4, 5 和 ∞ 进行仿真实验。采取不同的策略和不同的联赛规模的实验结果如表 6 所示。

由表 6 可以看出,制造商采用最优选择策略的总成本比采用联赛选择策略低,这是因为采取最优选择策略时,制造商主要考虑了供应商的投标成本。由于有更多的冲突的同时订单存在,需要更多

次的辩论协商来解决同时订单冲突问题, 会产生更多的额外协商成本。虽然额外的协商成本与投标成本相比小很多, 但是对总成本还是有一定的影响。因此制造商在选取策略的时候还是需要权衡总成本和冲突订单的数量。

因此, 当供应链中供应能力不高, 重新分配的压力较大时, 推荐采用联赛选择策略。相反则选择最优选择策略, 因为最优选择策略所需的平均协商次数和成本均比联赛选择策略的低。由于本文采用了辩论协商重新分配有冲突的同时订单, 且重新分配的额外成本不高, 所以采用联赛选择策略避免局部最优的优势并不明显。

4 结束语

本文研究了多对多供应链中的相互依赖订单分配问题, 订单分配的过程中对供应商的能力约束以及订单的多属性约束加以考虑。并采用了自动协商的方法来消解因依赖订单和同时订单而导致的冲突, 在保证订单成功分配给供应商的同时, 实现各自利益最大化。研究表明, 协商能有效地解决订单分配过程中产生的冲突, 不同的供应链环境下订单分配的结果也不相同。

最后, 本文研究的供应链中, 供应商同级之间主要是竞争关系。然而, 在实际供应链中, 供应商可以通过合作共同完成订单, 这种合作的方式能让更多有能力的供应商有更多的机会获得订单。同样对于制造商而言, 也可以进行合作, 从而实现整个供应链利润的最大化。因此, 对于供应链中同时考虑竞争与合作的关系将是进一步研究的方向。

参考文献 (References)

- [1] 徐辉, 侯建明. 需求不确定条件下的制造商订单分配模型 [J]. 中国管理科学, 2016, 24(3):80–88.
(Xu H, Hou J. Manufacturer's order allocation model under demand uncertainty [J]. Chinese Journal of Management Science, 2016, 24(3):80–88.)
- [2] Wang M, Wang H, Vogel D, et al. Agent-based negotiation and decision making for dynamic supply chain formation [J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2009, 22(7):1046–1055.
- [3] Kim H, Cho J. Supply chain formation using agent negotiation [J]. Decision Support Systems, 2010, 49(1):77–90.
- [4] 肖剑, 但斌, 张旭梅. 双渠道供应链电子渠道与零售商合作策略研究 [J]. 系统工程学报, 2009, 24(6):673–679.
(Xiao J, Dan B, Zhang X. Study on cooperation strategy between electronic channels and retailers in dual-channel supply chain [J]. Journal of System Engineering, 2009, 24(6):673–679.)
- [5] Lou P, Zhou Z D, Chen Y P, et al. Negotiation-based task allocation in an open supply chain environment [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B Journal of Engineering Manufacture, 2006, 220(6):975–985.
- [6] Yu F, Kaihara T, Fujii N, et al. A multi-attribute multi-item negotiation mechanism of supply chain networks between buyers and sellers [J]. International Journal of Production Research, 2015, 53(20):6143–6160.
- [7] Wong T N, Fang Fang. A multi-agent protocol for multilateral negotiations in supply chain management [J]. International Journal of Production Research, 2010, 48(1): 271–299.
- [8] Rao C, Xiao X, Goh M, Zheng J, Wen J. Compound mechanism design of supplier selection based on multi-attribute auction and risk management of supply chain [J]. Computers & Industrial Engineering, 2017, 105: 63–75.
- [9] Lin F, Kuo H, Lin S. The enhancement of solving the distributed constraint satisfaction problem for cooperative supply chains using multi-agent systems [J]. Decision Support Systems, 2008, 45(4): 795–810.
- [10] Yu F, Kaihara T, Fujii N. Coalition formation based multi-item multi-attribute negotiation of supply chain networks [J]. Procedia Cirp, 2013, 7(12): 85–90.
- [11] Tanimizu Y, Orita B, Shimizu Y, et al. Computational evaluation of order selection methods in dynamic supply chains [J]. Procedia Cirp, 2012, 3(1):281–286.
- [12] 蒋大奎, 李波, 曹立思. 平行机供应链排序及转包多目标模型 [J]. 系统工程学报, 2014, 29(4):507–514.
(Jiang D, Li B, Cao L. A multi-objective model of parallel machine supply chain scheduling with subcontracting option [J]. Journal of System Engineering, 2014, 29(4):507–514.)
- [13] Zhang X, Lesser V. Solving negotiation chains in semi cooperative multi-agent systems [J]. Proc. of Int. conf. on Aamas, 2011, 22(4):50–57.
- [14] An B, Lesser V, Sim K. Strategic agents for multi-resource negotiation [J]. Autonomous Agents and Multi-Agent Systems, 2011, 23(1):114–153.
- [15] Jain V, Wadhwa S, Deshmukh S G, et al. A negotiation-to-coordinate (n2c) mechanism for modeling buyer-supplier relationship in dynamic environment. International Journal of Enterprise Information Systems, 2007, 3(3), 1–22.
- [16] Fink A. Supply chain coordination by means of automated negotiations between autonomous agents. Multiagent based Supply Chain Management, 2006, 28, 351–372.
- [17] Marey O, Bentahar J, Dssouli R, et al. Measuring and analyzing agents' uncertainty in argumentation-based negotiation dialogue games [J]. Expert Systems with Applications An International Journal, 2014, 41(2):306–320.