

文章编号: 1001-0920(2013)11-1623-07

## 基于安全多方计算的产能约束供应商协同供货

李毅鹏<sup>1,2</sup>, 马士华<sup>1</sup>

(1. 华中科技大学管理学院, 武汉 430074; 2. 中南财经政法大学信息与安全工程学院, 武汉 430073)

**摘要:** 针对供应链中核心制造商对产能约束的多个零部件供应商的“末位惩罚”问题, 构建基于安全多方计算的多个供应商协同模型, 并分析了分散决策和供应商协同决策下各个成员的最优决策. 通过 Monte Carlo 模拟仿真方法和数例分析表明, 采用基于安全多方计算的供应链信息共享机制, 可在保护供应商的私有产能信息不公开的同时还能进行集中决策, 从而明显降低供应商的损失成本和整个供应链的全局损失成本, 最终让供应链达到帕累托改善.

**关键词:** 安全多方计算; 供应商协同; 产能约束; 信息共享

中图分类号: TP273

文献标志码: A

## Suppliers synchronization replenishment under performance constraint based on secure multi-party computation

LI Yi-peng<sup>1,2</sup>, MA Shi-hua<sup>1</sup>

(1. School of Management, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. School of Information and Safety Engineering, Zhongnan University of Economics and Law, Wuhan 430073, China. Correspondent: LI Yi-peng, E-mail: lyp2357@163.com)

**Abstract:** Focusing on the problem about “Last Penalty” taken by core manufacturer on components’ suppliers constrained by performance in supply chain, a multi-suppliers’ synchronization model based on secure multi-party computation is built. Considering two situations under independent decision and suppliers’ joint decision, their optimal decision is analyzed respectively. Through the Monte Carlo simulation methodology and numerical example analysis, the results show that the information sharing mechanism in supply chain based on secure multi-party computation can take joint decision while protecting suppliers’ private performance information undisclosed, and decrease the loss cost of suppliers and global loss cost of whole supply chain significantly, finally let the supply chain achieve Pareto improvement.

**Key words:** secure multi-party computation; suppliers’ synchronization; performance constraint; information sharing

### 0 引言

在日趋激烈与复杂的供应链竞争中, 按订单装配 ATO 已成为最有效的生产运作管理方式之一, 普遍应用于汽车、船舶制造以及电脑、手机等消费电子产业<sup>[1]</sup>. 而在 ATO 生产方式下, 供应链中的核心制造商提前向上游的多个供应商采购零部件, 当收到来自下游客户的订单之后, 便可立即使用这些提前准备的零部件以装配成最终产品. 然而, 由于供应商受到原材料补给、机器故障或维修、人力资源及质量保证等多方面因素的影响, 往往会出现产能不足的情况<sup>[2]</sup>, 导致只能按制造商所下订单量的比例  $k$  ( $0 < k < 1$ ) 进行供货, 而且到货时间可能发生延误<sup>[3]</sup>. 通常一个最

终产品由多种零部件组成, 即使是其中一种零部件发生缺货或到货延误, 都会给制造商的产品装配造成重大损失, 要么降低订单满足率, 要么延迟交货, 甚至这两种情况会同时发生<sup>[4]</sup>.

从近期本研究在中国重汽、上汽仪征、神龙汽车、武船重工等企业的调研情况来看, 大型制造-装配型企业通常都会与其上游的多个零部件供应商签订契约, 通过对缺货和晚交货的供应商进行惩罚的方式来确保最终产品装配的正常进行或减少/转嫁自己由于无法按时按量履行客户订单所带来的损失. 从对调研企业的高层管理人员的访谈得知, 在中国的供应链管理实践中, 当出现多个供应商由于产能约束而缺货

收稿日期: 2012-07-23; 修回日期: 2012-11-01.

基金项目: 国家自然科学基金项目(71072035); 国家 863 计划项目(2006AA04Z153).

作者简介: 李毅鹏(1980—), 男, 讲师, 博士生, 从事信息管理、供应链管理的研究; 马士华(1956—), 男, 教授, 博士生导师, 从事生产与运作管理、供应链与物流管理等研究.

或交货延迟时, 制造商往往只会对缺货最多或交货最晚的单个供应商进行“末位惩罚”, 从而起到“杀一儆百”、“树立反面典型”的作用. 而当 Stackelberg 博弈中的“follower”(众多供应商)知道“leader”(制造商)的实际惩罚机制(不按契约, 而按“末位惩罚”)后, 都会采取相应的行动来打听其他供应商的产能信息, 从而决定自己是否需要赶工或外包来避免受到“末位惩罚”. 当然, 各个供应商也不愿意共享自己的产能信息或提供虚假的信息, 从而“迷惑”对方, 也可以防止私有信息被泄漏. 其严重后果就是供应商花费了更多的赶工或外包成本, 却可能受到更多的“末位惩罚”; 而制造商在不断提高订单量(以免缺货)的同时, 花费了更多的剩余零部件持有成本, 却仍然无法提高对下游客户的订单满足率.

鉴于此, 本文将安全多方计算模型应用到多个零部件供应商的协同供应中来. 由于在安全多方计算协议下, 所有共享的私有产能信息都是加密的, 每个供应商只能得到“赶工或外包”决策的计算结果, 而无法获得其他参与成员所输入的私有信息. 这是一种全新的供应链信息共享方式, 可以让多个供应商积极、主动地共享自己的产能信息, 同时保证供应商私有的产能信息不会泄露, 却又可得到各个供应商所需要的协同集中决策的计算结果.

## 1 相关文献综述

目前, 在与本文研究相关的国内外研究文献中, 主要包括3方面的内容: 产能约束、供应链协同以及安全多方计算. 文献[5]认为涉及“高科技”零部件的制造和装配的许多过程都有高度变化的产出, 生产的计划和控制较为复杂, 使得供应商的产能受到局限. 文献[6]也提出产品复杂性、制造环境复杂性的增加, 以及产品质量关注度的增加, 这些因素导致了生产过程的不确定性. 这些不确定性的表现为: 没有计划的机器维护, 变化的生产产出以及返工等, 这些都会约束供应商的产能. 文献[7]探讨了当零部件制造或获取产出以及可能的装配产出是随机的时候, 在装配系统中选择最优批量的问题. 文献[8]认为供应商不确定的生产工艺导致生产损耗, 导致配送过程不确定, 只能配送订单量的随机的一部分, 并分析强调了在供应和需求不确定的情况下, 协调零部件订货和生产决策的重要性.

为了解决上述供应与需求的不确定、不一致问题, 文献[9]认为协调或协同是提升受系统动态性约束的供应链绩效的一个重要因素; 文献[10]提出了服务水平协议 SLA 这样一个重要的协调机制, 对于供应商来说是一个承诺以在规定的时间内获得最低的满足率; 文献[11]还认为缺货会对供应商的商誉

产生未来的、无形的影响, 仅靠基于直接惩罚的协调机制无法弥补; 文献[12]还认为在供应链管理的概念下, 激励模式协同策略胜过其他的策略, 并且能提升整个系统和所有成员的绩效. 而文献[13]提出除了管理其供应商的关系以外, 买家(制造商)需要率先管理这些供应商们之间的关系, 并首次提出了在买家-供应商-供应商三元关系中研究供应商-供应商关系的重要性, 将供应商-供应商关系表达成合作关系, 即上游的多个供应商一起协同工作来满足下游买家(制造商)的需求, 这也是本文论述的基点.

信息共享是实现供应链协调或协同的重要前提, 也是主要障碍. 文献[14]首次提出了供应链中的“牛鞭效应”, 并认为信息共享能降低或消除信息扭曲的现象; 文献[15]也研究了许多公司主动让更多的需求信息在零售商和其上游供应商之间共享, 并认为特别是当需求显著地与时间相关的时候, 信息共享的价值是非常高的. 然而, 由于害怕私有商业信息被供应链中的其他成员利用或泄漏给其竞争对手, 在供应链实践中, 信息共享实现起来还不尽如人意; 因此, 国内外学者提出把安全多方计算应用到供应链成员的信息共享中. 文献[16]首次在理论计算机科学中提出了“安全多方计算”的概念; 文献[17]研究了安全供应链协同协议, 能够让供应链成员合作性地获得所期望的全局目标而不需要透露任何成员的私有信息; 文献[18]认为安全多方计算是解决信息共享障碍的重要途径, 并成功应用于“联合经济批量(JELS)模型”的集中决策制定; 文献[19]利用了安全多方计算中同态加密的性质来解决一个供应商和一个零售商的私有成本信息的联合订货决策问题, 结果表明能够达到完全信息共享的决策效果; 文献[20]提出了基于安全多方计算的按比例和线性安全产能分配机制, 以确保制造商产能分配活动顺利进行、零售商获得合理的分配量的同时, 也不泄露参与者的私有信息; 文献[21]也采用了安全多方计算, 既保护了参与方私有信息的安全, 又使多产品联合订货的供应链总成本最小化. 本研究的主要贡献是, 在基于多个供应商的产能约束、零部件供应不确定的前提下, 采用安全多方计算这样一个全新的供应链信息共享机制, 使多个供应商消除泄露私有产能信息的顾虑, 积极、主动地参与集中决策机制, 形成零部件物流的协同供应, 最终使多个零部件供应商与下游核心制造商的整个供应链达到协调.

## 2 问题假设与符号描述

### 2.1 问题假设

考虑由两个零部件供应商和一个核心制造商所组成的二级供应链, 制造商采取按订单装配(ATO)的

方式, 以两种零部件 1: 1 的数量比例加工生产一种最终产品. 首先, 制造商根据预测向上游的两个供应商分别订购数量为  $Q_1$  和  $Q_2$  的零部件; 然后, 制造商接收来自下游客户的随机需求量  $D$  (分布已知); 最后, 等这两种零部件到货后进行齐套上线装配. 这里不考虑采购零部件的提前期以及最终产品的装配时间. 由于制造商已知供应商的产能约束情况, 其订货量  $Q_1$  和  $Q_2$  可能会进行适当放大以减少短缺的可能性. 按合同要求供应商不允许超订单量供应, 这样, 受到产能约束的两个供应商的实际供应数量为  $K_1Q_1 + G_1$  和  $K_2Q_2 + G_2$ . 其中:  $K_1$  和  $K_2$  属于随机变量且  $0 < K_1, K_2 \leq 1$ ;  $G_1, G_2$  是为了避免“末位惩罚”而不得不赶工或外包的数量. 制造商会对交货数量较少的供应商进行  $W(Q_i - K_iQ_i - G_i)$  ( $i = 1, 2$ ) 的所谓“末位惩罚”, 但当两个供应商的交货数量相同时, 由于“法不责众”, 即使均缺货制造商也不会进行惩罚.

本文所定义的产能约束具体是指供应商的零部件供应边际总成本已经等于单位价格 (即边际利润为零). 当供应商还要提供超出其产能的产品数量时, 可通过赶工或外包的方式, 但边际利润会小于零且递减 (即单位赶工或外包会亏损, 且数量越多, 亏损越多). 这样假设的合理性在于: 受到产能约束的供应商原本尽最大努力 (包含有利可图的加急赶工或外包) 也只能供应  $K_iQ_i$ ; 然而, 为了避免“末位惩罚”, 还要不得不进行“亏本”赶工或外包, 但只要其“亏本”小于“惩罚”, 还是有价值的, 在文献 [6, 22-23] 中都有类似假设; 因此, 在产能均受到约束的情况下, 两个供应商都想尽力隐瞒自己的成本、价格以及交货数量等产能信息, 同时尽力获取对方的产能信息, 这样便可最优化自己的赶工或外包决策, 从而逃避惩罚.

## 2.2 符号描述

本文的参数符号如下:  $p_1, p_2$  为两个供应商的零部件单位价格;  $G_1, G_2$  为两个供应商的赶工或外包数量;  $f_1(G_1), f_2(G_2)$  为两个供应商的赶工或外包的单位成本函数, 函数值大于价格且是递增的;  $D$  为市场对最终产品的需求量, 服从正态分布;  $Q_1, Q_2$  为制造商对两个供应商的零部件订单数量;  $K_1, K_2$  为两个供应商的产能约束因子, 服从均匀分布;  $h_1, h_2$  为制造商中的两种零部件的单位持有成本;  $\omega$  为下游客户对制造商的单位缺货惩罚成本;  $W$  为制造商对供应商的单位缺货惩罚成本.

## 3 分散决策下的最优决策模型

### 3.1 制造商的最优决策

在分散决策下, 制造商的决策变量为零部件订单

量  $Q_1, Q_2$ , 从而使其期望损失成本最小, 即

$$\min(E(C_Z)), \quad (1)$$

$$C_Z = h_1[K_1Q_1 + G_1 - \min(D, K_1Q_1 + G_1, K_2Q_2 + G_2)]^+ + h_2[K_2Q_2 + G_2 - \min(D, K_1Q_1 + G_1, K_2Q_2 + G_2)]^+ + \omega[D - \min(K_1Q_1 + G_1, K_2Q_2 + G_2)]^+ - W[(1 - K_i)Q_i - G_i]. \quad (2)$$

其中

$$i = \begin{cases} 1, & K_1Q_1 + G_1 < K_2Q_2 + G_2; \\ 2, & K_1Q_1 + G_1 > K_2Q_2 + G_2; \end{cases}$$

$$Q_1 > 0, Q_2 > 0.$$

式 (2) 中的第 1 项和第 2 项为制造商由于订单量过大而产生的多余零部件的持有成本; 第 3 项为下游客户对制造商缺货的惩罚; 第 4 项为制造商对供应商缺货的“末位惩罚”, 如果  $K_1Q_1 + G_1 = K_2Q_2 + G_2$ , 该项则为零.

这里有可能出现  $D < \min(K_1Q_1 + G_1, K_2Q_2 + G_2)$  的情况, 按常理制造商并没有因为缺货而受到下游客户的惩罚; 但由于是分散决策, 此时受惩罚的供应商并不知道自己的供应量已超过实际需求量, 而制造商仍然会进行“末位惩罚”以弥补自己多订货而造成多余零部件的持有成本.

### 3.2 供应商的损失成本

在分散决策下, 供应商无法得知对方供应商的实时产能信息, 为了避免惩罚, 双方均不得不以类似“军备竞赛”的方式来尽最大努力进行赶工或外包; 但在第 2.1 节的前提假设中, “亏本”赶工或外包的单位成本始终大于价格且是递增的, 所以其最大数量  $G_i^M$  应该使其单位亏损等于单位缺货惩罚, 即  $f(G_i^M) - p_i = W, i = 1, 2$ ; 因此, 这两个供应商的损失成本可表示为

$$C_{S1} = G_1[f_1(G_1) - p_1] + mW[(1 - K_1)Q_1 - G_1], \quad (3)$$

$$C_{S2} = G_2[f_2(G_2) - p_2] + mW[(1 - K_2)Q_2 - G_2]. \quad (4)$$

其中

$$G_i = \begin{cases} G_i^M, & K_iQ_i + G_i^M \leq Q_i; \\ (1 - K_i)Q_i, & K_iQ_i + G_i^M > Q_i; \end{cases}$$

$$m = \begin{cases} 1, & K_1Q_1 + G_1 < K_2Q_2 + G_2; \\ 0, & K_1Q_1 + G_1 > K_2Q_2 + G_2. \end{cases}$$

式 (3) 和 (4) 中的第 1 项为赶工或外包的总亏损, 第 2 项为供应商受到的“末位惩罚”. 对此, 在分散决策下, 产能约束的供应商只需要根据订单量、产能约束和赶工或外包成本来尽最大可能供应零部件, 以避免惩罚; 但是, 由于缺乏信息共享, 供应商可能会出现努力赶工或外包后仍然受到惩罚, 或者在根本就不需

要(或需要少量)赶工或外包的情况下花费了大量成本来赶工或外包等类似的情况。

**命题 1** 分散决策下,当满足一定参数条件时,制造商的期望成本损失函数  $E(C_Z)$  是订单量  $(Q_1, Q_2)$  的凸函数,存在唯一的  $(Q_1^*, Q_2^*)$  使得制造商的成本损失最小。

**证明** 考虑到“末位惩罚”的公平性,令  $Q = Q_1 = Q_2$ . 代入式(2)求其期望,按不同分段区间积分展开. 由于  $D, K_1Q + G_1, K_2Q + G_2, Q$  之间的大小关系有 8 种不确定的情况,同时  $G_i (i = 1, 2)$  分别有两种不确定的取值情况,  $E(C_Z)$  展开后共有 32 个分段区间积分,表述起来较繁冗,在此省略. 令  $\partial E(C_Z)/\partial Q = 0$ , 当  $p_1, p_2, h_1, h_2, \omega$  等参数不变时,容易求得:当参数  $W \rightarrow 0$  时,一阶导数大于 0;而当  $W \rightarrow \infty$  时,一阶导数小于 0;因此可以推出总存在一定的  $p_1, p_2, h_1, h_2, \omega, W, Q$  关系,使得一阶导数等于 0. 同样对于期望的二阶导数,也容易求得:当参数  $W \rightarrow 0$  时,  $\partial^2 E(C_Z)/\partial Q^2 < 0$ ; 而当  $W \rightarrow \infty$  时,  $\partial^2 E(C_Z)/\partial Q^2 > 0$ ; 因此,总存在满足一定的  $p_1, p_2, h_1, h_2, \omega, W$  关系,使得期望函数是凸函数,并存在最优的订单量使得目标函数的期望取得最小值.  $\square$

### 4 基于安全多方计算的供应协同模型

#### 4.1 安全多方计算协议与步骤

该模型是在保证参与方信息私有性的基础上,鼓励供应商积极主动地参与到零部件供应协同的机制中,从而获得比分散决策更少的损失成本,见图 1.

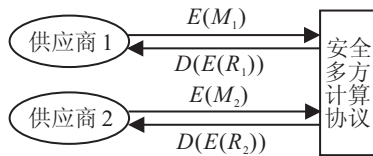


图 1 安全多方计算协议模型

1) 两个供应商分别输入自己的私有产能信息  $M_1, M_2$ , 即: 实际可供应数量  $K_1Q_1, K_2Q_2$ ; 零部件的单位价格  $p_1, p_2$ ; 赶工或外包的单位成本函数  $f_1(\cdot), f_2(\cdot)$ . 多方安全计算协议必须能够保证这些信息的私有性。

2) 对私有信息加密  $E(M_1), E(M_2)$ , 再加密传输至安全多方计算协议中心。

3) 根据如表 1 所示的几种情况来计算决策结果  $R_1, R_2$ , 其中  $G'_i = \min(G_i^M, (1 - K_i)Q_i), i = 1, 2$  (1 和 2 可以互换)。

表 1 中, 只有第 2 种情况下供应商 1 会受到惩罚, 其余情况下两个供应商已经形成了协同供应, 即使都缺货, 也不会受到惩罚. 这种协同模型算法保证了供应量较少的供应商通过赶工或外包后就一定能减少甚至避免惩罚; 同时在保证供应量较多的供应商不受到惩罚的前提下, 尽可能减少其赶工或外包的损失。

4) 输出计算结果  $R_1, R_2$ , 并加密传输给两个供应商, 再通过解密  $D(\cdot)$  得到各自最优的赶工或外包的数量分别为  $G_1$  和  $G_2$ .

#### 4.2 供应商协同后的损失成本

在实现了安全多方计算的供应协同后, 两个供应商的损失成本可表示为

$$C'_{S1} = G_1[f_1(G_1) - p_1] + mW[(1 - K_1)Q_1 - G_1], \quad (5)$$

$$C'_{S2} = G_2[f_2(G_2) - p_2] + mW[(1 - K_2)Q_2 - G_2]. \quad (6)$$

其中

$$m = \begin{cases} 1, & K_1Q_1 + G_1^M < K_2Q_2 \text{ or} \\ & K_2Q_2 + G_2^M < K_1Q_1; \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases}$$

在式(5)和(6)中, 第 1 项仍为赶工或外包的总亏损; 第 2 项仅仅当一个供应商尽赶工或外包的最大努力仍然赶不上另一个供应商的供应量时才存在, 其他情况下两个供应商的供应量是相同的, 该项为零。

**命题 2** 在安全多方计算协议下, 供应商的期望损失成本小于分散决策下的期望损失成本。

**证明** 通过比较式(3)与(5), 式(4)与(6)可以看出在安全多方计算协议下, 供应商的赶工或外包的数量  $G_1$  要么减少了, 要么与原先持平; 同时供应商受到惩罚的概率也减少了, 只有当  $m = 1$  发生时才受到惩罚, 此时  $C'_{S1} - C_{S1} < 0, C'_{S2} - C_{S2} < 0$ ; 因此, 在安全多方计算协议下, 供应商的期望损失成本总是会小于分散决策下的期望损失成本.  $\square$

#### 4.3 制造商的最优决策

在安全多方计算的集中决策下, 制造商的决策变量仍为零部件订单量, 从而使其期望损失成本最小,

表 1 供应商的赶工或外包决策

两个供应商的供应量比较	赶工或外包决策 $G_1$	赶工或外包决策 $G_2$
$K_1Q_1 = K_2Q_2$	0	0
$K_1Q_1 + G'_1 \leq K_2Q_2$	$G'_1$	0
$K_1Q_1 < K_2Q_2$ 且 $K_2Q_2 \leq K_1Q_1 + G'_1 \leq K_2Q_2 + G'_2$	$G'_1$	$K_1Q_1 + G'_1 - K_2Q_2$
$K_1Q_1 < K_2Q_2$ 且 $K_2Q_2 + G'_2 \leq K_1Q_1 + G'_1$	$K_2Q_2 + G'_2 - K_1Q_1$	$G'_2$

即

$$\min(E(C'_Z)), \tag{7}$$

$$C'_Z = h_1[K_1Q_1 + G_1 - \min(D, K_1Q_1 + G_1, K_2Q_2 + G_2)]^+ + h_2[K_2Q_2 + G_2 - \min(D, K_1Q_1 + G_2, K_2Q_2 + G_2)]^+ + \omega[D - \min(K_1Q_1 + G_1, K_2Q_2 + G_2)]^+ - mW[(1 - K_i)Q_i - G_i]. \tag{8}$$

其中

$$m = \begin{cases} 1, & i = 1, K_1Q_1 + G_1^M < K_2Q_2; \\ 1, & i = 2, K_2Q_2 + G_2^M < K_1Q_1; \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases}$$

$$Q_1 > 0, Q_2 > 0.$$

**命题 3** 在多方安全计算协议下, 当满足一定参数条件时, 制造商的期望损失成本函数  $E(C'_Z)$  是订单量  $(Q_1, Q_2)$  的凸函数, 并存在惟一的  $(Q_1^*, Q_2^*)$ , 使得制造商的成本损失最小.

证明过程与命题 1 相同.

**命题 4** 在安全多方计算协议下, 整个供应链的全局期望损失成本小于分散决策下的全局期望损失成本, 其差值为供应协同的价值.

**证明** 记安全多方计算协议下的全局期望损失成本为  $C'_T = C'_Z + C'_{S1} + C'_{S2}$ ; 分散决策下的全局期望损失成本为  $C_T = C_Z + C_{S1} + C_{S2}$ ; 供应协同的价值为  $V = C_T - C'_T$ . 因为在考虑全局损失成本时, 惩罚成本属于供应链内部成本, 不予计算在内, 所以全局损失成本仅仅包含供应商的赶工或外包的成本和制造商的缺货惩罚成本以及多余零部件的持有成本. 由命题 2 可知, 供应商的赶工或外包的成本减少了或至少持平. 由表 1 可知, 制造商的实际装配最终产品的数量保持不变, 但多余零部件的数量变少了; 因此在安全多方计算协议下, 整个供应链的全局期望损失成本降低了, 供应协同的价值  $V > 0$ . □

### 5 算例与协同价值分析

由于模型的动态性和复杂性, 本文采用 Monte Carlo 仿真方法来模拟供应商与制造商的整个运作流程, 从而验证分散决策和安全多方计算下供应链各个成员的损失成本变化. 这里令  $D \sim N(100, 10^2)$ ,  $K_1, K_2 \sim U(0.55, 0.98)$ ,  $p_1 = 25, p_2 = 30, f_1(x) = (x - 1)^2/10 + 20, f_2(x) = (x - 1)^2/8 + 30, h_1 = 30, h_2 = 35, \omega = 120$ . 由于假设两种零部件的装配比例是 1:1, 并且产能约束独立同分布, 为了惩罚的公平性, 令  $Q = Q_1 = Q_2$ . 由于产能约束的供应商的零部件供应的不确定性以及客户需求的不确定性, 使用 Excel 的 VBA 程序生成 10000 组服从各自分布的  $(D, K_1,$

$K_2)$  随机变量, 并让  $Q$  从 80 到 200 以 5 为步长增长, 同时  $W$  从 5 到 55 以 5 为步长增长, 以观察供应商和制造商的期望损失成本的变化情况.

#### 5.1 分散决策

图 2 为分散决策下的制造商期望损失成本变化曲线. 图 2 中的曲线由上至下依次代表  $W = 5, W = 10, W = 15, W = 20, W = 25, W = 30, W = 35, W = 40, W = 45, W = 50, W = 55$ . 在分散决策下, 制造商的期望损失成本是关于订单量的凸函数, 其最优订单量  $Q^*$  随惩罚成本  $W$  的增加而减小, 期望损失成本也随之减少, 具体数值如表 2 所示.

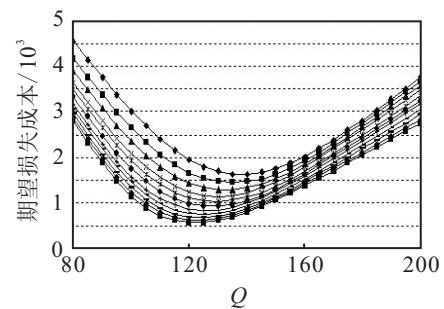


图 2 分散决策下的制造商期望损失成本变化曲线

表 2 分散决策下的制造商最优决策

惩罚成本 $W$	最优订单量 $Q^*$	期望损失成本
5	140	1631
10	135	1438
15	135	1285
20	130	1142
25	130	1024
30	130	917
35	125	827
40	125	744
45	125	672
50	125	611
55	120	556

由表 2 可知, 在分散决策下, 若制造商加大对供应商的惩罚力度, 则可使供应商的赶工或外包的积极性增加, 从而提高订单的满足率; 同时降低了制造商的最优订单量, 减少了多余零部件的持有成本. 即使制造商发生缺货, 也可从其对供应商的“末位惩罚”中得到更多的补偿, 最终降低其期望损失成本.

#### 5.2 安全多方计算协议

图 3 为安全多方计算下的制造商期望损失成本变化曲线. 图 3 中的曲线由上至下依次代表  $W = 5, W = 10, W = 15, W = 20, W = 25, W = 30, W = 35, W = 40, W = 45, W = 50, W = 55$ . 在安全多方计算下, 制造商的期望损失成本是关于订单量的凸函数, 其最优订单量  $Q^*$  随惩罚成本  $W$  的增加而减小, 期望损失成本也随之减少, 具体数值如表 3 所示.

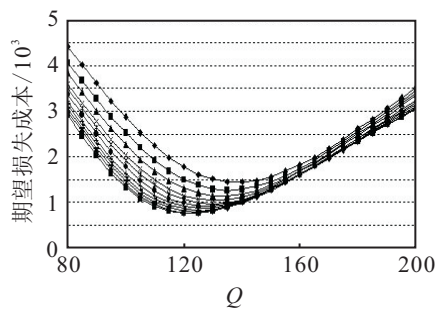


图 3 安全多方计算下的制造商期望损失成本变化曲线

表 3 安全多方计算下的制造商最优决策

惩罚成本 $W$	最优订单量 $Q^*$	期望损失成本
5	140	1 447
10	135	1 266
15	135	1 144
20	130	1 042
25	130	965
30	130	918
35	125	864
40	125	823
45	125	797
50	125	775
55	125	765

### 5.3 安全多方计算的价值分析

#### 5.3.1 对于制造商的价值

对比表 2 和表 3, 发现当惩罚成本小于 30 时, 采用安全多方计算会使制造商的期望损失成本减少, 但随着惩罚成本的增加, 分散决策更有利于制造商. 这说明, 当制造商将惩罚成本控制一定范围时, 供应商之间实现协同供应既有利于制造商 (协同价值大于零, 对比表 2 和表 3 中的第 3 列), 又有利于供应商自己, 如表 4 所示; 而当制造商的惩罚力度较大时 ( $W \geq 30$ ), 会促使或“逼迫”供应商不得不“团结起来”进行协同供应, 但只有利于供应商自己, 反而对制造商不利 (协同价值小于零, 对比表 2 和表 3 中的第 3 列).

#### 5.3.2 对于供应商的价值

由表 4 可见, 随着惩罚成本的增加, 供应商的期望损失成本随之增加. 而从表 4 中的第 2, 3 列可以看出, 在实现了安全多方计算的供应协同以后, 供应商的期望损失成本有了明显的降低, 即协同对供应商的价值总是大于零. 这说明了基于安全多方计算的供应协同可部分消除不必要的赶工或外包, 从而有效地避免“末位惩罚”, 降低供应商的损失成本. 同时也说明, 制造商对产能约束的供应商的惩罚力度越大, 两个供应商就越具有协同供应的主动性和积极性, 从而自觉地采用安全多方计算协议来共享自己的产能信息, 所获得损失成本的减少就会越多, 协同的价值就会越明显.

表 4 两种情况下的供应商的损失成本对比

惩罚成本 $W$	分散决策	安全多方计算	协同对供应商的价值
5	120	83	37
10	235	153	82
15	365	231	134
20	492	302	190
25	593	363	230
30	750	450	300
35	831	503	328
40	937	571	366
45	1 045	639	406
50	1 155	711	444
55	1 212	790	422

#### 5.3.3 对于整个供应链的价值

由表 5 可见, 虽然协同供应总是能够减少供应商的损失成本, 在满足一定条件下还可以减少制造商的损失成本, 但对于由两个供应商和一个制造商所组成的整个供应链来说, 协同供应总是可以降低整个供应链的总损失成本, 协同的总价值总是大于零. 这说明上游的两个供应商迫于产能约束和惩罚的压力, 自发形成的协同供应机制可显著地消除制造商的多余零部件的持有成本浪费以及供应商为了逃避惩罚而进行的不必要的赶工或外包损失, 并最大限度地减少了制造商对供应商的惩罚, 最终减少了全局的损失, 使整个供应链得到优化.

表 5 两种情况下整个供应链的总损失成本对比

惩罚成本 $W$	分散决策	安全多方计算	协同的总价值
5	1 871	1 613	258
10	1 908	1 572	336
15	2 015	1 606	409
20	2 126	1 646	480
25	2 210	1 691	519
30	2 417	1 818	599
35	2 489	1 870	619
40	2 618	1 965	653
45	2 762	2 075	687
50	2 921	2 197	724
55	2 980	2 345	635

## 6 结 论

本文建立了基于安全多方计算的供应链信息共享模型, 多个产能约束的零部件供应商采用该模型能够在不泄露私有产能信息的同时进行集中决策, 从而形成多个零部件供应商对下游制造商的协同供应. 通过数学模型证明和算例分析可得到以下结论:

1) 制造商对产能约束的多个供应商进行的“末位惩罚”会促使供应商积极、主动地参与基于安全多方计算的信息共享决策, 而又免除了私有信息泄露的顾虑.

2) 多个供应商所形成的对制造商的协同供应, 不

仅能降低供应商自己的损失成本,而且有利于全局供应链损失成本的降低。

3) 当制造商的惩罚力度不大时,多个供应商之间所形成的协同甚至还有利于制造商减少其损失成本;而当惩罚力度逐渐变大时,多个供应商参与安全多方计算的积极性和主动性会增加,但多个供应商所形成的协同会加大(恶化)制造商的损失成本。

由于研究条件的限制,模型没有考虑让核心制造商共享自己的客户需求信息从而也参与到安全多方计算中来,也没有把安全多方计算的价值与完全信息共享的价值的差异进行比较分析,这些将是进一步研究的方向。

### 参考文献(References)

- [1] Lu Ying-dong, Song Jing-sheng, Zhao Yao. No-holdback allocation rules for continuous-time assemble-to-order systems[J]. *Operations Research*, 2010, 58(3): 691-705.
- [2] Frank W Ciarallo, Ramakrishna Akella, Thomas E Morton. A periodic review, production planning model with uncertain capacity and uncertain demand-optimality of extended myopic policies[J]. *Management Science*, 1994, 40(3): 320-332.
- [3] Kirstin Zimmer. Supply chain coordination with uncertain just-in-time delivery[J]. *Int J of Production Economics*, 2002, 77(1): 1-15.
- [4] Gregory A DeCroix, Song Jing-sheng, Paul H Zipkin. Managing an assemble-to-order system with returns[J]. *Manufacturing & Service Operations Management*, 2009, 11(1): 144-159.
- [5] Hau L Lee, Candace Arai Yano. Production control in multistage systems with variable yield losses[J]. *Operations Research*, 1988, 36(2): 269-278.
- [6] Mordechai Henig, Yigal Gerchak. The structure of periodic review policies in the presence of random yield[J]. *Operations Research*, 1990, 38(4): 634-643.
- [7] Gerchak Y, Wang Y Yano. Lot sizing in assembly systems with random component yields[J]. *IIE Trans*, 1994, 26(2): 19-24.
- [8] Haresh Gurnani, Ram Akella, John Lehoczky. Supply management in assembly systems with random yield and random demand[J]. *IIE Trans*, 2000, 32(8): 701-714.
- [9] Hing K Chan, Felix T S Chan. A review of coordination studies in the context of supply chain dynamics[J]. *Int J of Production Research*, 2010, 48(10): 2793-2819.
- [10] Elena Katok, Douglas Thomas, Andrew Davis. Inventory service-level agreements as coordination mechanisms: The effect of review periods[J]. *Manufacturing & Service Operations Management*, 2008, 10(4): 609-624.
- [11] George Liberopoulos, Isidoros Tsikis, Stefanos Delikouras. Backorder penalty cost coefficient: What could it be?[J]. *Int J Production Economics*, 2010, 123(1): 166-178.
- [12] Kanit Prasetwattana, Yoshiaki Shimizu, Navee Chiadamrong. Evolutional optimization on material ordering and inventory control of supply chain through incentive scheme[J]. *J of Advanced Mechanical Design, Systems and Manufacturing*, 2007, 1(4): 562-573.
- [13] Wu Zhao-hui, Choi Thomas Y, Johnny Rungtusanatham M. Supplier-supplier relationships in buyer-supplier-supplier triads implications for supplier performance[J]. *J of Operations Management*, 2010, 28(2): 115-123.
- [14] Hau L Lee, Padmanabhan V, Seungjin Whang. The bullwhip effect in supply chains[J]. *Sloan Management Review*, 1997, 38(3): 93-102.
- [15] Hau L Lee, Kut C So, Christopher S Tang. The value of information sharing in a two-level supply chain[J]. *Management Science*, 2000, 46(5): 626-643.
- [16] Yao A C. Protocols for secure computation[Z]. California: University of California Berkel, 1982.
- [17] Mikhail J Atallah, Hicham G Elmongui, Vinayak Deshpande, et al. Secure supply-chain protocols[C]. *Proc of the IEEE Int Conf on E-Commerce*. California, 2003: 293-302.
- [18] Richard Pibernik, Yingying Zhang, Florian Kerschbaum, et al. Secure collaborative supply chain planning and inverse optimization-The JELS model[J]. *European J of Operational Research*, 2011, 208(1): 75-85.
- [19] 鲁芳, 仲伟俊, 张玉林. 成本信息保护下的安全供应链联合订货决策[J]. *管理工程学报*, 2009, 23(4): 163-165. (Lu F, Zhong W J, Zhang Y L. Secure supply chain cooperative ordering decision under cost information protection[J]. *J of Industrial Engineering and Engineering Management*, 2009, 23(4): 163-165.)
- [20] 董绍辉, 西宝, 田丽娜. 基于安全多方计算的供应链产能分配机制[J]. *华东经济管理*, 2009, 23(5): 82-84. (Dong S H, Xi B, Tian L N. On capacity allocation mechanism of the supply chain based on secure Multi-party computation[J]. *East China Economic Management*, 2009, 23(5): 82-84.)
- [21] 谢翠华, 仲伟俊, 张玉林. 私有信息保护的多产品联合订货研究[J]. *统计与决策*, 2009, 24(18): 50-53. (Xie C H, Zhong W J, Zhang Y L. Research on multi products join ordering under private information protection[J]. *Statistics and Decision*, 2009, 24(18): 50-53.)
- [22] Ke Fu, Vernon N Hsu, Lee Chung-ye. Optimal component acquisition for a single-product, single-demand assemble-to-order problem with expediting[J]. *Manufacturing & Service Operations Management*, 2009, 11(2): 229-236.
- [23] Erica L Plambeck, Amy R Ward. A separation principle for a class of assemble-to-order systems with expediting[J]. *Operations Research*, 2007, 55(3): 603-609.