

基于随机需求与产能限制的供应链协同优化研究

童泽平¹ 李涛² 李立杰³ 任亮¹

(武汉科技大学管理学院工商与物流管理系 武汉 430081)¹

(武汉科技大学计算机科学与技术学院信息安全系 武汉 430081)²

(北京理工大学软件学院 北京 100081)³

摘要 供应链所面临的需求随机性以及供应方的产能限制对供应链协同路径优化有着显著影响。已有研究并未考虑二者综合作用下供应链各参与主体的行为选择机理及协同优化的实现路径。对此,建立了一个包含多制造商与单一销售商的二级供应链模型,运用非合作博弈的方法求得稳定均衡解,并探讨了实现供应链协同优化的有效路径,从而有助于为供应链参与主体提供决策支持。

关键词 供应链优化,随机需求,产能限制,协同优化

中图分类号 F224 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2018.04.044

Study on Collaborative Optimization of Supply Chain with Uncertain Demand and Capacity Constraint

TONG Ze-ping¹ LI Tao² LI Li-jie³ REN Liang¹

(Department of Business Administration and Logistics Management, School of Management, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China)¹

(Department of Information Security, School of Computer Science and Technology, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China)²

(School of Software, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)³

Abstract The uncertainty demand of supply chain market and the capacity constraint of suppliers have a great impact on the path of optimization in supply chain. Most of the existing literatures do not analyze the behavior choosing mechanism and collaborative optimization in supply chain with both uncertain demand and capacity-constrained suppliers. Thus, this paper established a multi-suppliers-one-retailer supply chain to analyze the efficient way to achieve the collaborative optimization by using the non-cooperative game theory. The results are helpful for the stakeholders of supply chain in making decisions.

Keywords Supply chain optimization, Uncertain demand, Capacity constrained, Collaborative optimization

1 引言

随着世界经济发展的多元化和经济形势的复杂化,作为竞争基本单元的供应链内的各参与主体也在不断寻求一套行之有效的协作机制以实现供应链各方的多赢,创造更多的价值。供应链中的主要参与者都是市场环境中的微观经济学个体或组织,因而追求利润最大化是供应链各参与主体的最主要目的^[1]。然而,个体理性行为的存在导致供应链内各参与主体更多地关注自身利润的最大化,从而采取可能损害供应链整体利润与其他参与者利润的策略行为,进而影响供应链整体的运作效率与稳定,造成供应链内各参与主体的“多输”局面^[2]。而供应链内集中决策的模式有利于弱化各参与主体

的个体理性行为,使得供应链整体利润最大化成为了各参与主体的主要目标^[3]。在各参与主体间订立契约,有利于供应链协同优化构建各主体间集中决策的长效机制,实现各主体在供应链环境下的纵向协作,将各主体追求个体利润最大化的目标转化为追求供应链整体利润最大化的目标,最终实现供应链内各方的共赢^[4-5]。因此,为了提高供应链的整体运作效率,改善其内部各主体的利润水平,探讨如何实现供应链内的协同优化具有重要意义。

目前,国内外对供应链协同优化问题已经进行了大量研究,Leng等^[6]研究了两级供应链结构下,面对价格依赖型随机需求时的供应链内各主体协同优化路径,他们提出采用回购契约和损耗成本分摊契约以实现各主体的纵向协作。

收稿日期:2017-12-25 返修日期:2018-01-27 本文受国家自然科学基金项目:基于在线双向拍卖的运输服务市场交易策略研究(71501147),湖北省教育厅科学技术研究项目:考虑决策者行为的第四方物流路径优化问题研究(Q20171104)资助。

童泽平(1976—),男,博士,副教授,主要研究方向为物流优化、管理决策;李涛(1979—),男,博士,副教授,主要研究方向为智能计算;李立杰(1977—),男,博士,讲师,主要研究方向为虚拟现实、优化算法;任亮(1985—),男,博士,讲师,主要研究方向为物流优化、智能优化算法、不确定优化等,E-mail:renliang@wust.edu.cn(通信作者)。

Zhang 等^[7]考虑一对一的二级供应链结构中具有价格依赖特点的随机需求商品的协同优化契约设计,设计了一套收益共享和协作投资契约以实现供应链各主体的纵向协作,结果表明,在考虑技术投资保护的情况下,收益共享系数必须位于特定区间范围内才能实现供应链的协同优化。Huang 等^[8]考虑了一个包含供应商、制造商和零售商的三级供应链,利用动态非合作博弈模型分析了供应链各主体的价格与库存决策问题,结果表明,在供应链运作过程中,各主体均有背离供应链整体最优的目标而追求自身利润最大化的动力。而 Tulika 等^[9]则分析了多对一结构供应链中各主体的协作与竞争问题,探讨了零售价格机制和收益共享机制在其中的作用。综上所述,目前已有研究更多关注供应链不同环节间的行为策略选择与渠道选择,较少关注同一环节内不同参与主体间的竞争或协同策略选择;同时,当前的文献更多地将现实环境中的随机需求与生产商的产能限制两个重要因素孤立地进行分析,缺少将二者结合起来考虑其相互影响机理及对供应链整体影响的研究成果。因此,本文根据供应链运作过程中的实际情况,同时考虑了市场随机需求与供给端产能限制,分析了在二者的共同影响下,供应链中同一环节内各参与主体的竞争与协同策略以及不同环节间协同优化的实现路径。

2 模型设定

在现实市场环境中,供应链末端所面临的消费需求受到各类因素的影响,具有一定的不确定性;同时在某些产业中,销售商往往同时从多家制造商处购进产品进行销售,而每一位制造商往往仅根据一位销售商的订单进行生产安排,同时由于自身的生产场地、人力、资金或设备等因素的限制,其生产能力有限。另一方面,在当前供应链的运作过程中,各参与主体依然以分散决策模式为主,在此背景下,供应链内的协同优化问题也必须考虑到各主体间的竞争与协作关系。基于此,本文从现实经济环境中面临的以上情况出发,考虑一个具有多制造商和单一销售商分散决策的二级供应链,如图 1 所示,每个制造商都面临产能约束,同时销售商面临的市场需求是随机的。此外,本文假设不同制造商生产的商品是同质的,制造商的成本包括生产成本、固定成本,销售商的成本包括订货成本、采购成本,二者的利润均来自于销售收入。

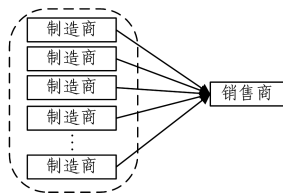


图 1 供应链结构

Fig. 1 Structure of supply chain

2.1 模型的基本假设

1) 为便于分析产能限制对供应链运作的影响,借鉴 Davood 等^[3]的研究思路,假设仅有制造商被占用的产能会产生成本,即根据制造商被占用的产能同比例计算其生产成本。
 2) 供应链中存在 I 位制造商,且所有制造商的产能都具有机会成本 Δc (表征制造商空闲产能时所创造的最大价值),同时供应链中唯一的销售商也具有机会成本 ΔR (表征销售

商选择第 i 位制造商进行交易所投入的成本及其所能接受的最低利润水平)。

3) 市场需求是随机的,且受到销售价格的影响。为便于分析市场价格对供应链的影响,根据 Jia 等^[10]的研究思路,本文假设市场需求的表达式为:

$$D(p_R) = M_0 p_R^{-\delta} \epsilon \quad (1)$$

其中, M_0 表示整体市场规模; p_R 表示销售商的销售价格; $\delta > 1$ 表示需求的价格弹性系数; ϵ 是一个随机变量,同时本文不失一般性地假设 $\epsilon \in (0, +\infty)$ 且其期望值 $E(\epsilon) = 1$, 其分布函数设为 $F(x)$, 密度函数为 $f(x)$ 。

4) 为更好地分析产能限制以及机会成本对供应链成员利润的影响,本文进一步假设所有制造商的产量等于其接收到的来自于销售商的订单量,如图 2 所示,即将最大产能与产量之差视为制造商的空闲产能,并计入机会成本。

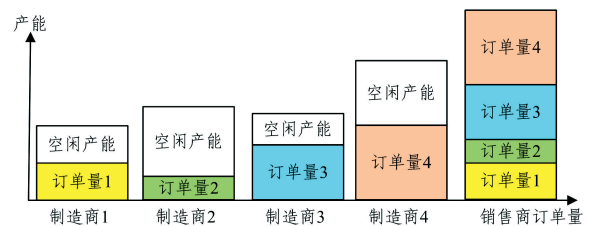


图 2 4 位被选中的制造商的生产情况

Fig. 2 Production situation of four selected manufacturers

2.2 模型的变量说明

一般供应链环境中,各参与主体的行为选择主要集中在价格决策与订单决策,因而本文主要根据制造商与销售商在供应链中的定价行为与订货行为决策分析二者协同优化的有效路径。

各参与主体的决策变量如表 1 所列。

表 1 参与主体的决策变量及说明

Table 1 Decision variables and explanation of participants

变量符号	变量说明	决策主体
d	销售商的总订货量	销售商
ϵ_i	状态变量, $\epsilon_i = 1$ 表示销售商从第 i 位制造商处进货, 反之无交易发生	销售商
ϑ_i	销售商从第 i 位制造商处的订货量占总订货量的比例	销售商
p_R	销售商的零售价格	销售商
p_i	第 i 位制造商的批发价格	制造商

模型的参数设置如表 2 所列。

表 2 模型的参数设置及说明

Table 2 Model parameters' setting and description

参数符号	参数说明
I	制造商的数量
D	市场总需求
O	销售商的固定订单成本
o	销售商的订单成本
m	制造商的固定生产成本
c	制造商的单位生产成本
S_i	第 i 位制造商的最大产能
π_i	第 i 位制造商的利润
π_R	销售商的利润
π_S	供应链整体的利润
Δc	制造商使用全部产能的机会成本
ΔR	销售商的机会成本

由此可以得出在分散决策状态下,供应链内各参与主体的利润水平表达式。

第 i 位制造商的利润为:

$$\pi_i = p_i d \vartheta_i - \frac{d \vartheta_i}{S_i} (S_i c + m) - \Delta c (1 - \frac{d \vartheta_i}{S_i}) \quad (2)$$

销售商的利润为:

$$\pi_R = p_R E \min [d, D(p_R)] - \sum_{i=1}^I p_i d \vartheta_i - O - \sum_{i=1}^I \epsilon_i o \quad (3)$$

对于制造商产能约束下的利润水平,相关研究大多基于EOQ模型来计算其利润水平(如Kheljani等^[11]),但这些研究提出的制造商利润表达式并未考虑到制造商提高订单量的动力,因而与现实经济情况并不相符。因此本文提出,根据被占用的产能比例来计算生产成本,以更好地考虑产能限制对制造商利润水平的影响。

3 制造商与销售商选择行为分析

由前文分析可知,供应链内各参与主体的集中决策模式有利于实现供应链的协同优化,因此本文首先在集中决策模式下,从供应链整体利润水平出发,确定供应链协同优化的目标函数;其次在分散决策下,分别分析销售商和制造商的行为选择机理,探寻供应链协同优化的实现路径。

3.1 供应链集中决策情形

根据前文制造商与销售商的利润表达式,供应链整体利润可以表示为:

$$\pi_S = \sum_{i=1}^I \pi_i + \pi_R = p_R E \min [d, D(p_R)] - \sum_{i=1}^I p_i d \vartheta_i - O - \sum_{i=1}^I \epsilon_i o + \sum_{i=1}^I [p_i d \vartheta_i - \frac{d \vartheta_i}{S_i} (S_i c + m) - \Delta c (1 - \frac{d \vartheta_i}{S_i})] \quad (4)$$

式(4)可以简写为:

$$\pi_S = p_R E \min [d, D(p_R)] - \sum_{i=1}^I (\epsilon_i o + O + m \frac{d \vartheta_i}{S_i}) - \sum_{i=1}^I d \vartheta_i c - \sum_{i=1}^I \Delta c (1 - \frac{d \vartheta_i}{S_i}) \quad (5)$$

为了在求解过程中便于书写,本文参考Petruzzii等^[12]的研究思路,假设 $\alpha = d/M_0 p_R^{-\delta}$,此时将 $p_R = (\alpha M_0/d)^{1/\delta}$ 代入式(5)可得:

$$\pi_S = (\frac{\alpha M_0}{d})^{1/\delta} d [1 - \int_0^\alpha (1 - \frac{x}{\alpha}) f(x) dx] - \sum_{i=1}^I (\epsilon_i o + O + m \frac{d \vartheta_i}{S_i}) - \sum_{i=1}^I d \vartheta_i c - \sum_{i=1}^I \Delta c (1 - \frac{d \vartheta_i}{S_i}) \quad (6)$$

其中, $f(x)$ 是随机市场需求变量 ϵ 的概率密度函数。本文进一步假设 $\mu(\alpha) = \alpha \bar{F}(\alpha) / \int_0^\alpha x f(x) dx$, 其中 $\bar{F}(x) = 1 - F(x)$ 。同时对式(6)求关于 α 的一阶导数,并将 $\mu(\alpha)$ 代入一阶导数表达式中,可得一阶条件为:

$$\frac{d\pi_S(\alpha)}{d\alpha} = \frac{(\frac{M_0}{d})^{1/\delta} d \int_0^\alpha x f(x) dx}{\delta \alpha^{2-1/\delta}} \times [\mu(\alpha) - (\delta - 1)] = 0 \quad (7)$$

根据Cai等^[13]的研究结论,有 $d\mu(\alpha)/d\alpha < 0$,即在区间 $(0, +\infty)$ 上, $\pi_S(\alpha)$ 是关于 α 的拟凹函数。因此容易证明,

$\lim_{\alpha \rightarrow 0} \mu(\alpha) = +\infty$ 且 $\lim_{\alpha \rightarrow \infty} \mu(\alpha) = -1$,由此可得 $\lim_{\alpha \rightarrow 0} d\pi_S(\alpha)/d\alpha > 0$ 且 $\lim_{\alpha \rightarrow \infty} d\pi_S(\alpha)/d\alpha < 0$ 。因此,可以判断存在唯一最优解 α^*

满足 $\mu(\alpha) - (\delta - 1) = 0$,即 $(\delta - 1) \int_0^\alpha x f(x) dx = \alpha \bar{F}(\alpha)$,由此可得销售商的最优定价决策为:

$$p_R^* = (\alpha^* M_0 / d)^{1/\delta} \quad (8)$$

将式(8)及 $(\delta - 1) \int_0^\alpha x f(x) dx = \alpha \bar{F}(\alpha)$ 代入式(6)可得:

$$\pi_S = \frac{\delta \bar{F}(\alpha^*) (\alpha^* M_0)^{1/\delta} d}{d^{1/\delta} (\delta - 1)} - \sum_{i=1}^I (\epsilon_i o + O + m \frac{d \vartheta_i}{S_i}) - \sum_{i=1}^I d \vartheta_i c - \sum_{i=1}^I \Delta c (1 - \frac{d \vartheta_i}{S_i}) \quad (9)$$

对式(9)两边分别求 d 的一阶导数与二阶导数可得:

$$\frac{d\pi_S(d)}{dd} = \bar{F}(\alpha^*) (\alpha^* M_0)^{1/\delta} d^{-1/\delta} - \sum_{i=1}^I (m \frac{\vartheta_i}{S_i} + \vartheta_i c - \Delta c \frac{\vartheta_i}{S_i}) \quad (10)$$

$$\frac{d^2 \pi_S(d)}{dd^2} = -\frac{\bar{F}(\alpha^*) (\alpha^* M_0)^{1/\delta} d^{-(1+1/\delta)}}{\delta} \leq 0 \quad (11)$$

由式(11)可知, $\pi_S(d)$ 是关于 d 的凹函数,由此可令式(10)的值为0,求得销售商的最优订货量为:

$$d^* = \frac{\alpha^* M_0 \bar{F}^\delta(\alpha^*)}{\sum_{i=1}^I (m \frac{\vartheta_i}{S_i} + \vartheta_i c - \Delta c \frac{\vartheta_i}{S_i})^\delta} \quad (12)$$

为了书写与后续计算便利,本文令:

$$\beta = \frac{m}{S_i} + c - \frac{\Delta c}{S_i} \quad (13)$$

基于此,将式(12)代入式(9)可得:

$$\pi_S = \frac{\alpha^* M_0 \bar{F}^\delta(\alpha^*)}{(\delta - 1) \sum_{i=1}^I (\vartheta_i \beta)^{\delta-1}} - \sum_{i=1}^I (\epsilon_i o + O + \Delta c) \quad (14)$$

因此,供应链集中决策情形下的最优决策问题转变为给定 $\Theta = \{\vartheta_1, \vartheta_2, \vartheta_3, \dots, \vartheta_I\}$ 以及 $\epsilon = \{\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3, \dots, \epsilon_I\}$ 情况下的如下最优化问题:

$$\max \pi_S(\Theta, \epsilon) = \frac{\alpha^* M_0 \bar{F}^\delta(\alpha^*)}{(\delta - 1) \sum_{i=1}^I (\vartheta_i \beta)^{\delta-1}} - \sum_{i=1}^I (\epsilon_i o + O + \Delta c) \quad (15)$$

$$\sum_{i=1}^I \vartheta_i = 1 \quad (16)$$

$$\vartheta_i \leq \epsilon_i S_i / d, \forall i \in \{1, 2, 3, \dots, I\} \quad (17)$$

$$\epsilon_i = 0 \text{ 或 } \epsilon_i = 1, \forall i \in \{1, 2, 3, \dots, I\} \quad (18)$$

$$\vartheta_i \geq 0 \quad (19)$$

其中,式(16)保证销售商的订单需求得到满足;式(17)保证未被选中的制造商不会接到销售商的订单,同时被选中的制造商接到的订单不会超过自身的最大产能。

根据Kheljani等^[11]的研究结论,对于任意给定的数组 $\epsilon = \{\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3, \dots, \epsilon_I\}$,目标函数(15)都是关于 Θ 的凹函数,因而该最优化问题存在最优解,可以使用MATLAB软件进行有效求解。由于本文更加关注实现供应链协同优化的路径,因而求解出供应链协同优化后的最优状态并不是本文的重心,因此本文不给出具体的求解步骤与结果。

3.2 供应链分散决策情形

在分散决策模式下,本文将探讨如何进行行为决策以实现供应链的协同优化。此时制造商和销售商的博弈过程如下:1)销售商决定自身的总订货量;2)制造商决定自己的批发价格;3)如果制造商发现有比自己出价更低的价格,则会重新调整自身报价;4)销售商选择报价最低的制造商进行交易,如图 3 所示。

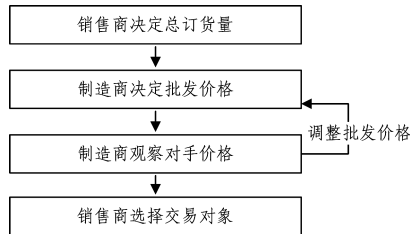


图 3 分散决策的博弈流程

Fig. 3 Game process of decentralized decision making

为了便于后续分析供应链内的博弈过程,本文做出如下补充假设:如果制造商的报价相同,那么销售商更倾向于具有选择偏好的制造商(如过去的合作历史或者声誉等)。

本文首先考虑销售商的最优决策。根据前文销售商的利润函数,可知其目标函数为:

$$\max \pi_R(p_R, d, \Theta, \epsilon) = p_R E \min[d, D(p_R)] - \sum_{i=1}^I p_i d \vartheta_i - O - \sum_{i=1}^I \epsilon_i o \quad (20)$$

此时销售商的最优定价与集中决策下的基本类似,因此可直接得到: $p_R^* = (\alpha^* M_0 / d)^{1/\delta}$, 因此销售商的目标函数为:

$$\max \pi_R(d, \Theta, \epsilon) = \frac{\delta \bar{F}(\alpha^*) (\alpha^* M_0)^{1/\delta} d}{d^{1/\delta} (\delta - 1)} - \sum_{i=1}^I (\epsilon_i o + O) - \sum_{i=1}^I p_i d \vartheta_i \quad (21)$$

与前文求解过程的式(9)一式(12)类似,此时根据 π_R 关于 d 的二阶导数可以判断 π_R 是 d 的凹函数,由其一阶条件可得到销售商的最优订货量为:

$$d_R^* = \frac{\alpha^* M_0 \bar{F}^\delta(\alpha^*)}{\sum_{i=1}^I (p_i \vartheta_i)^\delta} \quad (22)$$

对于销售商的订单选择与分配问题,根据 Chauhan 等^[14]的研究结论容易证明,对于具有凹的利润函数的制造商而言,存在一个订单分配的最优解,因此对于销售商的最优反应而

$$\pi_x(p_1, p_2, \dots, p_x, \dots, p_N) = \begin{cases} p_i S_i - S_i c - m, & p_x \neq \max\{p_1, p_2, \dots, p_x, \dots, p_N\} \\ \frac{d - \sum_{i \neq x} d \vartheta_i}{S_i} (p_i S_i - S_i c - m) - \Delta c (1 - \frac{d - \sum_{i \neq x} d \vartheta_i}{S_i}), & p_x = \max\{p_1, p_2, \dots, p_x, \dots, p_N\} \end{cases} \quad (29)$$

对于除 x 以外的制造商而言,若 $\max_{m \neq i \in N} p_m > p_{si}$, 则对于制造商 i 而言,其最优决策是比其他制造商所报的最高价低一个足够小的值,即 $p_i^* = \max_{m \neq i} p_m - \tau$, 由此可以得到不等式 $\max_{m \neq i} p_m \geq p_x \geq p_x > p_{si}$ 成立。因此,对于所有(除 x 以外)制造商而言,有 $p_i^* < \max\{p_1, p_2, \dots, p_x, \dots, p_N\}$, 可以得到 $p_x = \max\{p_1, p_2, \dots, p_x, \dots, p_N\}$ 。由此可知,对于制造商 x 而言,一旦其报价在所有被选中的制造商中是最高的,则其最优定价决

言,具有最高报价的制造商获得的订单量一定小于其产能限制^[3]。此时对于制造商而言,其会不断调整自己的价格以获取销售商更多的订单量,同时最大化自身的利润水平。根据前文假设可得,制造商的报价须满足如下条件:

$$p_i S_i - S_i c - m \geq \Delta c \quad (23)$$

此时令式(23)等号成立的 p_i 必然是制造商所能提出的最低报价,即最低报价满足:

$$\underline{p}_i = c + \frac{m}{S_i} + \frac{\Delta c}{S_i} \quad (24)$$

由于销售商根据制造商报价来选择交易的制造商,因而必然有部分制造商因为自身成本过高,导致其即使给出自身的最低报价,也不会被销售商选中。因此对于这部分制造商而言,最低报价即是其最优报价,因此有:

$$\underline{p}_i^* = \underline{p}_i = c + \frac{m}{S_i} + \frac{\Delta c}{S_i} \quad (25)$$

其中, n 表示未被选中的制造商。与之对应,在博弈第 2) 步报价结束后,所有被选中的制造商在此轮的报价必然等于其在博弈第 3) 步的最高报价,该最高报价也必然等于所有未被选中的制造商中的最低报价,即满足:

$$\bar{p}_{si} = \min p_{nj}^* \quad (26)$$

其中, s 表示被选中的制造商,其集合用 N 表示; j 表示未被选中的制造商的集合,在后续分析过程中,也使用 j 表示未被选中的制造商;使用 i 表示选中的制造商;上横线表示最高报价,下横线表示最低报价。

在博弈第 3) 步中,对于所有被选中的制造商而言,其订单量等于最大产能时的报价所获得的利润必然与其最高报价所产生的利润相等,即满足:

$$\underline{p}_s S_i - S_i c - m = \bar{p}_s d \vartheta_i - \frac{d \vartheta_i}{S_i} (S_i c + m) - \Delta c (1 - \frac{d \vartheta_i}{S_i}) \quad (27)$$

联立式(25)、式(26)可得:

$$\underline{p}_s = S_i c + m - \Delta c (1 - \frac{2d \vartheta_i}{S_i}) \quad (28)$$

由此可得被选中的制造商的价格决策区间为 $[\underline{p}_s, \bar{p}_{si}]$ 。

基于此,本文考虑一个制造商 x , 其在所有被选中的制造商中报价最高。根据前文分析,制造商 x 获得的订单量必然小于其最大产能,而其余被选中的制造商则获得其最大产能的订单量,此时制造商的利润函数为:

策是选择最高报价,即 $p_x^* = \bar{p}_{si}$, 而其他制造商的最优决策为 $p_i^* = p_x^* - \tau_i$, 其中, τ_i 是一个足够小的值。

4 实验结果与分析

为了更准确地反映实际市场经济环境中的供应链协同优化问题,本文选择 10 位制造商与单一销售商组成的二级供应链,并运用 MATLAB 软件对模型结果进行模拟和仿真实验。模型中各参数的设置如表 3 和表 4 所列。

表3 模型参数的赋值

Table 3 Values of model parameters

参数符号	参数说明	参数赋值
I	制造商的数量	10
O	销售商的固定订单成本	0.001
o	销售商的订单成本	0.05
m	制造商的固定生产成本	2
c	制造商的单位生产成本	0.2
Δc	制造商使用全部产能的机会成本	0.3
ΔR	销售商的机会成本	0.01
M_0	整体市场规模	50
δ	需求的价格弹性系数	1.5

表4 各制造商的最大产能

Table 4 Maximum production capacity of each manufacturer

制造商	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
最大产能	4.07	4.53	0.63	4.57	3.16	0.49	1.39	2.73	4.79	4.82

表5 在不同决策模式下模型的结果

Table 5 Results of model under different decision-making modes

		销售商	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	供应链
集中决策	d	2.9532	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	$d\vartheta_i$	—	0.1034	0	0	0.0003	0	0	0	0	0	2.8495	—
	π_S	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	3.3507
分散决策	d	2.9532	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	$d\vartheta_i$	—	0.1034	0	0	0.0003	0	0	0	0	0	2.8495	—
	p_R	12.602	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	p_i	—	0.6802	0.7077	3.8508	0.6802	0.9278	4.8939	1.8547	1.0425	0.6802	0.6802	—
	π_R	6.1257	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	π_i	—	-0.2935	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	-0.122	—
	π_S	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	3.3103

4.1 模型的灵敏度分析

产能限制是实际经济情况中对供应链整体绩效以及协同优化效果影响较大的因素,因此探讨产能限制的变化对供应链优化路径的影响具有较为重要的意义。本文在最初设置的10位制造商各自的产能约束条件下,通过以统一的比例调整10位制造商的产能约束,来分析产能限制对供应链整体利润水平的影响。参数设置及模型结果如表6和图4所示。从表6和图4中的数据可以明显看出,随着各制造商产能约束条件的放松,供应链整体利润呈现一种先下降后上升的趋势,这表明,对于供应链整体利润而言,产能约束的影响是非线性的。从供应链内各主体的决策行为来看,产能提高有可能使部分制造商被选为供货商,而供货必须支付机会成本,而且从产能上升10%后的求解结果可以看出(见表7),最初产能约束条件下很多制造商因为其产能较低而没有被销售商选择供货,但当这些制造商的产能上升后,产能约束条件放松,使得被选中的制造商的数量增加,整个供应链的机会成本以及交易成本都有所上升,导致供应链的整体利润反而有所下降。

模型结果如表5所列。从表中数据可以看出,在分散决策下通过采用本文模型所设计的定价策略和供货商选择策略,实现了供应链整体绩效与集中决策模式下供应链整体绩效的基本一致。在分散决策模式下,制造商的利润水平为负值,这主要是由于本文设定了机会成本这一表征制度性交易成本的参数,在实际市场经济环境中,这一成本并不会被计入企业经营成本中,因此排除该参数的影响后,所有被选中的制造商的利润水平均为正值,而未被选中的制造商的利润为0。基于此,根据分散决策下的博弈均衡解 $\{p_R^*, d^*, p_i^*\}$,制造商与销售商均能最大化自身及供应链整体利润,此时在最优决策情形下,销售商与制造商均实现了自身利润最优化,同时也满足供应链整体利润最大化,实现了供应链的协同优化。因此,在随机需求与产能限制共同影响供应链运作的条件下,多制造商与单一销售商选择本文分析得出的最优决策是实现供应链协同优化的有效路径。

类似的情况也出现在产能上升幅度从20%增加到30%的过程中。

表6 各制造商最大产能的变化及其对供应链利润的影响

Table 6 Changes of the maximum capacity of each manufacturer and its impact on supply chain profit

产能增加幅度/%	0	10	20	30	40	50	60
π_S	3.3507	1.1475	1.4854	1.1576	1.7544	2.7121	3.8042

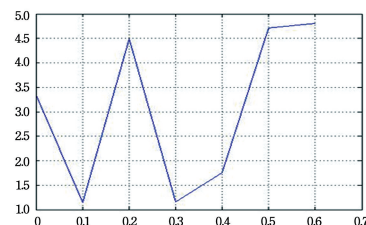


图4 产能变化对供应链总利润的影响

Fig. 4 Effect of capacity change on total supply chain profit

表7 各制造商最大产能上升10%时的求解结果

Table 7 Solution of ϑ_i when the maximum capacity of each manufacturer increases by 10%

制造商	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ϑ_i	0.2577	0.0002	0.0001	0.0002	0.1991	0.0001	0.0007	0.0002	0.5414	0.0003

另一方面,在供应链中各成员间达成交易所产生的制度性成本(本文以机会成本来衡量)也是影响供应链优化的重要因素。从实际市场环境来看,供应链成员间交易的制度性成

本对供应链利润会产生负面影响,从而降低各成员交易的积极性与市场活力。为了验证这一观点,本文同样考查机会成本的变化对供应链总利润的影响,结果如表8和图5所示。

表 8 机会成本变化对供应链利润的影响

Table 8 Influence of opportunity cost change on supply chain profit

Δc	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
π_S	3.3507	1.980	0.9309	-0.001	-0.9240	-1.9643	-2.4671

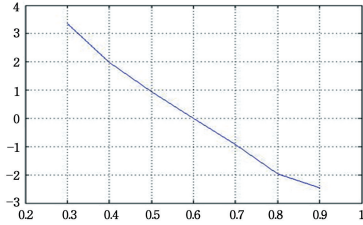


图 5 机会成本变化对供应链总利润的影响

Fig. 5 Influence of opportunity cost change on total supply chain profit

从表 8 和图 9 中的数据可以看出,制造商的机会成本越

高,供应链整体利润水平越低。当机会成本从 0.4 上升到 0.5,即增加 25%时,利润从 1.98 下降到 0.9309,利润下降了接近 53%。

分散决策下总利润为 3.3103,但当机会成本从 0.3 增加到 0.4(大约 33%)时,分散决策利润减少了 1.0278,下降了 31.05%。这主要是因为当制造商的机会成本上升后,其最优定价就必须上升以弥补成本的增加。以制造商 1 的定价为例,其最优定价从 0.6802 上升到 0.7142,提高了 5%,其最优定价对机会成本的弹性约为 0.15。而在集中决策时,当机会成本从 0.3 增加到 0.4(大约 33%)时,供应链整体的销售价格从 12.602 降为 12.0769,这主要是因为当机会成本上升后,一些原来有订单分配的制造商失去了订单,这一销售商决策降低了订单成本,当订单成本下降幅度超过机会成本的上升幅度时,最优定价反而有可能更低以满足更多的总需求(见表 9)。这一结论表明,调整企业间交易的制度性成本有利于促进供应链协同优化的实现。

表 9 制造商机会成本为 0.4 时 ϑ_i 的求解结果

Table 9 Solution of ϑ_i when opportunity cost of manufacturer is 0.4

制造商	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ϑ_i	0.0000	0.0001	0.0000	0.9133	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0001	0.0865

结束语 供应链内的协同优化问题是改善供应链整体绩效、提高运作效率的有效途径,本文通过构建一个多制造商与单一销售商的二级供应链的博弈模型,首先分析在集中决策情形下供应链的整体收益情况,然后分析分散决策下各参与主体如何确定最优行为策略,最大化自身利润水平,实现供应链内的协同优化。为了简化模型的计算,本文并未完全考虑符合现实经济情况的供应链结构,如多制造商与多销售商之间的供应链网络结构,或者三级供应链结构等,这也是下一步研究需要完善的地方。

参 考 文 献

[1] YAN J, DING X P, LIU Y R. Research on collaborative optimization of supply chain inventory based on immune genetic algorithm [J]. Computer Science, 2016, 43 (11A): 59-62. (in Chinese)
 闫军, 丁鑫培, 刘永瑞. 基于免疫遗传算法的供应链库存协同优化研究[J]. 计算机科学, 2016, 43(11A): 59-62.

[2] WHANG S. Coordination in operations: A taxonomy [J]. Journal of Operations Management, 1995, 12(3/4): 413-422.

[3] DAVOOD M, SEYED H G, ASHKAN H. A game theoretic analysis in capacity-constrained supplier-selection and cooperation by considering the total supply chain inventory costs [J]. International Journal of Production Economics, 2016, 181(S1): 87-97.

[4] GOVINDAN K, POPIUC M N. Reverse supply chain coordination by revenue sharing contract: A case for the personal computers industry [J]. European Journal of Operational Research, 2014, 233(2): 326-336.

[5] PALSULE-DESAI O D. Supply chain coordination using revenue-dependent revenue sharing contracts [J]. Omega, 2013, 41(4): 780-796.

[6] LENG M M, PARLARB M. Game-theoretic analyses of decentralized assembly supply chains: Non-cooperative equilibria vs. coordination with cost-sharing contracts [J]. European Journal

of Operational Research, 2010, 204(1): 96-104.

[7] ZHANG J X, LIU G W, ZHANG Q, et al. Coordinating a supply chain for deteriorating items with a revenue sharing and cooperative investment contract [J]. Omega, 2015, 56: 37-49.

[8] HUANG Y, HUANG G Q, NEWMAN S T. Coordinating pricing and inventory decisions in a multi-level supply chain: A game-theoretic approach [J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2011, 47(2): 115-129.

[9] TULIKA C, SATYAVEER S C, NAVNEET V. Coordination and competition in a common retailer channel: Wholesale price versus revenue-sharing mechanisms [J]. International Journal of Production Economics, 2015, 166(8): 103-118.

[10] JIA J X, HU Q Y. Dynamic ordering and pricing for a perishable goods supply chain [J]. Computers & Industrial Engineering, 2011, 60(2): 302-309.

[11] KHELJANI J G, GHODSYPOUR S H, O'BRIEN C. Optimizing whole supply chain benefit versus buyer's benefit through supplier selection [J]. International Journal of Production Economics, 2009, 181(2): 482-493.

[12] PETRUZZINC, DADA M. Pricing and the newsvendor problem: a review with extensions [J]. Operational Research, 1999, 47(2): 183-194.

[13] CAI X, CHEN J, XIAO Y, et al. Optimization and coordination of fresh product supply chains with freshness-keeping effort [J]. Production & Operations Management, 2010, 19(3): 261-278.

[14] CHAUHAN S S. The concave cost supply problem [J]. European Journal of Operational Research, 2003, 148(2): 374-383.

[15] ZHOU K Q, YU D Q, LI C M, et al. Design and Implementation of RFID-based Logistics Information Platform for Automobile Supply China [J]. Journal of Chongqing University of Technology (Nature Science), 2014, 28(1): 80-86. (in Chinese)
 周康渠, 喻代权, 李传明, 等. 应用射频识别的汽车制造供应链物流信息协同平台设计及实现 [J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2014, 28(1): 80-86.