

## 基于期权的供应链数量柔性契约决策模型

朱海波, 胡文

(哈尔滨商业大学 计算机与信息工程学院, 哈尔滨 150028)

**摘要:** 针对单个制造商和单个销售商组成的多周期单产品两级供应链协调问题, 建立了期权与数量柔性契约相结合的决策模型; 需求的不确定性通过有限的情境描述, 采用逐步对冲算法对基于情境的随机规划模型进行求解, 给出了销售商最优的期权购买量和初始订货量以及制造商最优的原材料采购量和产品生产量; 最后通过数值仿真实验验证了所提出模型的有效性。

**关键词:** 供应链协调; 数量柔性契约; 随机规划模型; 期权

**中图分类号:** TP273

**文献标志码:** A

### Decision model of supply chain quantity flexibility contract with option

ZHU Hai-bo, HU Wen

(School of Computer and Information Engineering, Harbin University of Commerce, Harbin 150028, China.

Correspondent: ZHU Hai-bo, E-mail: zhuhb@hrbcu.edu.cn)

**Abstract:** The coordination problem of a multi-period supply chain for single type of products composed of one manufacturer and one retailer is discussed. In such a supply chain, a decision-making model is proposed by combining quantity flexibility contract with options. The demand uncertainty is described by a finite number of the possible scenarios. The stochastic programming model based on scenarios is solved through progressive hedging algorithm. In this algorithm, optimal option purchase quantities and order quantities for the retailer and optimal raw materials purchase quantities and production quantities for the manufacturer can be calculated. Finally, a numerical simulation experiment is given to validate the effectiveness of the proposed model.

**Key words:** supply chain coordination; quantity flexibility contract; stochastic programming model; option

### 0 引言

供应链是由相互独立的决策主体构成的分布式系统, 各主体决策时会从自身利益最大化的角度出发, 从而造成双重边际效应, 使得供应链并未实现整体优化. 因此, 如何有效地协调供应链中各主体, 使各主体向系统最优的方向努力, 已成为供应链管理过程中的难点问题. 对于供应链, 可以通过设计恰当的契约形式来协调各方的利益, 以实现供应链整体利润的提升. 数量柔性契约是经常采用的供应链契约形式之一, 它是一种供应商允许销售商在感知市场需求之后改变最初订购量的协议. 通过这种柔性采购和柔性制造可以提高供应链应对市场需求不确定性的能力. 但是, 数量柔性契约中的“柔性采购权”是销售商无偿获得的, 故订货量的灵活性越大, 对销售商越有利; 而对供应商而言, 只有在订货灵活性较差时才有利, 这就使

该契约具有一定的局限性<sup>[1]</sup>. 因此, 为了使数量柔性契约更合理, 将期权引入到供应链契约之中.

期权是规避风险的有效工具之一, 将期权引入供应链契约可以降低客户需求不确定性对供应链造成的冲击. 因此, 如何利用期权来协调供应链各成员的利益已成为广大学者关注的热点. Barnes-Schuster 等<sup>[2]</sup>将期权引入到两阶段订货供应链系统, 发现期权提升了销售商应对复杂多变的市场需求的能力; Wang 等<sup>[3]</sup>通过建立由零售商领导的带有期权的供应链风险分担契约, 实现了供应链成员间的协调; 宁钟等<sup>[4]</sup>研究了面对市场需求的不确定性, 利用期权来协调供应链各成员利益的方法和机制, 并提出了建立供应链期权交易市场的构想; Gomez-Padilla 等<sup>[5]</sup>研究了单供应商和单销售商、多供应商和单销售商两种案例下期权契约的影响分析; Cheaitou 等<sup>[6]</sup>提出将期权

收稿日期: 2013-01-05; 修回日期: 2013-04-01.

基金项目: 国家自然科学基金项目(70771031); 黑龙江省教育厅面上项目(12532070).

作者简介: 朱海波(1976—), 男, 副教授, 博士, 从事电子商务与供应链的研究; 胡文(1957—), 男, 教授, 博士生导师, 从事电子商务与信息服务等研究.

与回购契约相结合的供应链协调机制; Zhao等<sup>[7]</sup>提出了将期权和收益分享契约相结合的供应链协调机制; Liang等<sup>[8]</sup>针对由一个销售商和一个制造商组成的两级救灾物资供应链, 设计了一个两阶段期权契约, 构建了期权价格模型, 并分析了库存率和灾害发生概率等参数的影响, 最后通过数值算例验证了模型的有效性; 胡本勇等<sup>[9]</sup>针对供应商与销售商组成的两级供应链系统, 研究了期权销量担保契约下供应商最优期权购买量和销售商最优广告投入水平, 并给出了实现供应链协调的条件; Wallace等<sup>[10]</sup>综述了供应链柔性采购、期权、鲁棒性、信息分享结构和成员议价能力的彼此关系, 讨论了这些理念在供应链管理中的作用, 并指出期权在不确定环境下的优化求解需要进一步研究.

国内学者的研究大多是针对单周期产品供应链协调进行的, 国外学者虽然研究了面向多周期产品供应链契约, 但对需求不确定性的影响的研究不够深入. 本文将情境分析引入到供应链契约协调之中, 考虑了单制造商与单销售商组成的多周期单产品两级供应链, 并通过多情境描述需求不确定性, 建立了基于期权的数量柔性契约决策模型(该模型为两阶段随机规划模型), 最后给出求解模型最优解(或可行解)的算法, 以实现分布式供应链系统的优化, 为供应链管理者提供决策依据.

## 1 模型构建

### 1.1 问题与假设

研究由一个制造商和一个销售商组成的单产品产销供应链, 销售商和制造商采用数量柔性契约来减少需求的不确定性, 销售商面对的是多个销售周期(本文考虑两个销售期). 由于采用数量柔性契约, 销售商可以根据以往的经验决定两个销售期的订货数量. 在销售期前, 向制造商统一订货, 这使得订货量更大, 故可以获得更大的购买折扣. 制造商分别在两次销售期初按照销售商的订货量送货. 由于需求的不确定性, 销售商在第1个销售期中了解到新的市场需求信息后, 可能改变第2期的订货数量. 为了减少制造商的风险, 销售商在最初向制造商订货时可以同时购买一定数量的产品期权, 通过执行期权来增加或减少第2期的订货量. 制造商在交易之前发布单位产品的期权价格, 销售商购买一定数量的产品期权并支付相应的期权费用(权利金), 使其可以在契约交易日根据市场的需求状况, 按预定的期权执行价格购买不超过其期权总量产品的权利. 制造商也可根据销售商的订货数量调整生产数量, 从而提高整个分布式供应链应对需求不确定性的能力. 因此, 这是一个带有期权的数量柔性契约. 本文探讨了不确定需求条件下销售商如何

决定订购数量、期权数量, 制造商如何决定原材料采购数量、生产数量, 能够获得各自最大的利润.

为建模需要, 作如下假设: 1) 销售商的初始库存为0; 2) 客户需求的概率分布已知; 3) 制造商有足够的原材料生产产品, 不考虑原材料供货提前期; 4) 制造商能够满足销售商的所有订货量, 即无拖欠订单.

### 1.2 销售商决策模型

销售商在销售期前, 从制造商处购买产品和期权; 在销售期末, 根据市场需求变化, 决定第2期是否通过执行期权来调整订货量. 关键决策变量为订货数量和期权数量. 销售商决策模型的符号说明如下, 其中  $i = 1, 2$ .

1) 变量.

$O_1$ : 第1销售期开始前购买的期权数量;

$E_1$ : 第2销售期开始前执行的期权数量;

$Q_i$ : 第  $i$  个销售期开始前的订货量;

$I_i^+$ : 第  $i$  个销售期末的库存量;

$I_i^-$ : 第  $i$  个销售期末拖欠的订货量;

$I_i$ : 第  $i$  个销售期末实际的库存量 ( $I_i = I_i^+ - I_i^-$ ).

2) 参数.

$h_i$ : 第  $i$  个销售期的单位产品持有成本;

$p_i$ : 第  $i$  个销售期的产品销售单价;

$s_i$ : 第  $i$  个销售期的单位产品缺货成本;

$c_i$ : 第  $i$  个销售期的单位产品采购成本;

$p^o$ : 单位期权购买价格;

$p^e$ : 单位期权执行价格;

$v$ : 销售期末未售出产品的单位产品残值;

$M^o$ : 每个销售期最大可购买的期权数量;

3) 客户需求.

$d_i$ : 第  $i$  个销售期的客户需求 ( $d_i \in D \sim f(d)$ ,  $f(d)$  为概率密度函数). 客户需求的不确定性通过有限的情境表述, 需求的概率分散到情境  $h$  之中,  $h \in H$ .

4) 其他符号.

$\hat{Q}_1$ : 所有情境下订货数量  $Q_1$  的期望值, 即  $\hat{Q}_1 = \sum_{h \in H} f_h Q_1(h)$ ;

$\hat{O}_1$ : 所有情境下购买期权数量  $O_1$  的期望值, 即  $\hat{O}_1 = \sum_{h \in H} f_h O_1(h)$ ;

$\pi_s$ : 销售商利润期望;

$\pi_m$ : 制造商利润期望.

按照以上的符号设定, 销售商的最大利润期望决策模型为

$$\max \pi_s = \sum_{h \in H} f_h g_h^s(Q(h), E(h), O(h), I(h)) =$$

$$\sum_{h \in H} f_h [p_1(d_1(h) - I_1^-(h)) + p_2(d_2(h) + I_1^-(h) - I_2^-(h)) + vI_2^+(h) - p^o O_1(h) - p^e E_1(h) - h_1 I_1^+(h) - h_2 I_2^+(h) - s_1 I_1^-(h) - s_2 I_2^-(h) - c_1 Q_1(h) - c_2 Q_2(h)]. \quad (1)$$

$$\text{s.t. } I_1(h) = I_1^+(h) - I_1^-(h), h \in H; \quad (2)$$

$$I_2(h) = I_2^+(h) - I_2^-(h), h \in H; \quad (3)$$

$$I_1(h) = Q_1(h) - d_1(h), h \in H; \quad (4)$$

$$I_2(h) = I_1(h) + Q_2(h) + E_1(h) - d_2(h), h \in H; \quad (5)$$

$$0 \leq E_1(h) \leq O_1(h), h \in H; \quad (6)$$

$$O_1(h) \leq M^o, h \in H; \quad (7)$$

$$Q_1(h) = \hat{Q}_1, h \in H; \quad (8)$$

$$O_1(h) = \hat{O}_1, h \in H; \quad (9)$$

$$I_1^+(h), I_1^-(h) \geq 0, h \in H; \quad (10)$$

$$I_2^+(h), I_2^-(h) \geq 0, h \in H; \quad (11)$$

$$Q_1(h), Q_2(h), O_1(h) \geq 0, h \in H. \quad (12)$$

销售商决策模型是基于情境的,因此模型中变量后面的 $h$ 表示各情境下的特定值.式(1)为所有情境下的期望利润,其中 $g_h^s(Q(h), E(h), O(h), I(h))$ 为销售商利润函数,由总收益减去总成本计算得到.总收益包括销售期的产品销售收益和第2个销售期末未售出的产品被制造商回购所获收益.总成本包括库存持有成本、期权购买成本和产品进货成本.式(2)~(12)为模型的约束条件,其中:式(2)和(3)为销售期末的实际库存,等于期末库存量减去拖欠订货量;式(4)和(5)保证了相应销售期末的实际库存量的计算;式(6)和(7)分别为可执行期权数量的边界和期权最大购买数量限制;式(10)~(11)保证了决策变量的非负性;式(8)和(9)的作用将在第3部分模型求解算法中解释.

### 1.3 制造商决策模型

制造商有2个关键决策变量,一个是原材料的采购数量,另一个是最终产品的生产数量.在销售期开始前,制造商可以根据销售商的订货数量组织生产,并卖给销售商一定数量的期权;在第1个销售期末,由于销售商可以通过执行期权来增加或减少第2个销售期订货量,制造商可以调整第2期产品的生产数量;在第2个销售期末,制造商需要回购销售商未售出的产品并获得产品残值.制造商决策模型的符号说明如下,其中 $i = 1, 2$ .

1) 变量.

$R_i$ : 第 $i$ 个销售期前原材料的采购数量;

$F_i$ : 第 $i$ 个销售期前生产的产品数量;

$I_i^r$ : 第 $i$ 个销售期末原材料的库存量;

$I_i^p$ : 第 $i$ 个销售期末产品的库存量.

2) 参数.

$h_i^r$ : 第 $i$ 个销售期中单位原材料库存持有成本;

$h_i^p$ : 第 $i$ 个销售期中单位产品库存持有成本;

$w_i$ : 第 $i$ 个销售期生产产品的单位产品劳动力成本;

$p_i^m$ : 第 $i$ 个销售期前产品的批发价格;

$c$ : 原材料采购成本;

$I_2^s$ : 第2销售期末销售商所剩库存量;

$v$ : 产品的单位残值;

$v^r$ : 原材料的单位残值;

$v^u$ : 回购销售商未售出产品的单位回购成本;

$T$ : 从销售商处回购产品的单位运输成本;

$p^o$ : 单位期权销售价格;

$p^e$ : 单位期权执行价格;

$E_1^s$ : 销售商第1个销售期末执行的期权数量;

$O_1^s$ : 销售商在销售期开始前购买的期权数量;

$Q_i^s$ : 第 $i$ 个销售期前销售商的订货量.

3) 其他符号.

$\hat{R}_1$ : 所有情境下订货数量 $R_1$ 的期望值,即 $\hat{R}_1 =$

$$\sum_{h \in H} f_h R_1(h);$$

$\hat{F}_1$ : 所有情境下购买期权数量 $F_1$ 的期望值,即

$$\hat{F}_1 = \sum_{h \in H} f_h F_1(h).$$

按照以上的符号设定,制造商的最大期望利润决策模型为

$$\begin{aligned} \max \pi_m = & \sum_{h \in H} f_h g_h^m(R(h), F(h), I(h)) = \\ & \sum_{h \in H} f_h [p_1^m Q_1^s + p_2^m Q_2^s + p^e E_1^s + \\ & p^o O_1^s + v^r I_2^r(h) + v(I_2^p(h) + I_2^s) - \\ & h_1^r I_1^r - h_2^r I_2^r - h_1^p I_1^p - h_2^p I_2^p - w_1 F_1 - \\ & w_2 F_2 - c_1(R_1 + R_2) - (v^u + T)I_2^s]; \quad (13) \end{aligned}$$

$$\text{s.t. } I_1^r(h) = R_1(h) - F_1(h), h \in H, \quad (14)$$

$$\begin{aligned} I_2^r(h) = \\ I_1^r(h) + R_2(h) - F_2(h), h \in H, \quad (15) \end{aligned}$$

$$I_1^p(h) = F_1(h) - Q_1^s(h), h \in H, \quad (16)$$

$$I_2^p(h) = I_1^p(h) + F_2(h) - E_1^s(h) - Q_2^s(h), h \in H, \quad (17)$$

$$I_1^r(h), I_2^r(h) \geq 0, h \in H, \quad (18)$$

$$R_1(h), R_2(h) \geq 0, h \in H, \quad (19)$$

$$F_1(h), F_2(h) \geq 0, h \in H, \quad (20)$$

$$R_1(h) = \hat{R}_1, h \in H, \quad (21)$$

$$F_1(h) = \hat{F}_1, h \in H. \quad (22)$$

制造商决策模型也是基于情境的. 式(13)为制造商在所有情境下的期望利润, 其中  $g_h^m(R(h), F(h), I(h))$  为制造商利润函数, 由总收益减去总成本计算得到. 总收益包括3个部分, 分别为: 产品销售收益, 期权售出及执行收益, 剩余原材料、剩余产品和回购产品的残值. 总成本包括原材料采购成本、原材料和产品的库存持有成本, 生产产品的劳动力成本, 销售商销售期末未售出产品的回购成本以及由此产生的额外运输成本. 式(14)~(22)为模型的约束条件, 其中: 式(14)和(15)为原材料的数量约束, 式(16)和(17)为产品的数量约束, 式(18)~(20)保证了变量的非负性, 式(21)和(22)的作用将在第3部分模型求解算法中解释.

## 2 模型求解算法

相对于确定性模型, 随机规划模型中目标函数的变量或约束条件是不确定的. 随机规划旨在解决不确定条件下的决策制定, 而随机决策的特点之一就是每个阶段的决策都是非预期的, 所以解决随机规划模型的主要任务是如何处理与“不确定性”有关的变量. Van等<sup>[11]</sup>提出将随机变量通过概率描述, 将不确定事件发生概率分散到各个情境之中, 从而将不确定问题转化为确定性等价问题. 本文基于此思想, 针对需求的不确定, 构建了基于情境的两阶段(对应两个销售期)随机规划模型. 模型中的式(8), (9), (21)和(22)为非预期约束条件, 它们是用来描述各个情境之间联系的约束条件. 模型的目标就是找到能够获得最大利润且满足对各个情境不变的最佳解. 对于确定性等价问题的优化求解算法, Rockafellar等<sup>[12]</sup>提出了逐步对冲算法, 该方法与增广拉格朗日法相似. Haugen等<sup>[13]</sup>和Liu等<sup>[14]</sup>证明了逐步对冲算法是解决随机规划问题的有效工具. 逐步对冲算法能够实现各情境子问题的完整分离, 将非预期约束条件移到目标函数中作为带有拉格朗日乘数的二次惩罚项, 这个惩罚项能够被分散到各个情境之中. 每次迭代, 所有情境的子问题独立求解. 求解过程一直持续到非预期条件满足一个特定容忍度, 最终解对所有的情境不变. 本文采用逐步对冲算法对模型进行求解, 销售商和制

造商的目标函数需要加上惩罚项. 因此, 销售商决策模型和制造商决策模型分别变为

$$\begin{aligned} \max \pi_s = & \sum_{h \in H} f_h \left( g_h^s - [\lambda_1 \ \lambda_2] \begin{bmatrix} Q_1(h) - \hat{Q}_1 \\ O_1(h) - \hat{O}_1 \end{bmatrix} - \right. \\ & \left. \frac{1}{2} [\rho_1 \ \rho_2] \begin{bmatrix} (Q_1(h) - \hat{Q}_1)^2 \\ (O_1(h) - \hat{O}_1)^2 \end{bmatrix} \right), \end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} \max \pi_m = & \sum_{h \in H} f_h \left( g_h^m - [\lambda_1 \ \lambda_2] \begin{bmatrix} R_1(h) - \hat{R}_1 \\ F_1(h) - \hat{F}_1 \end{bmatrix} - \right. \\ & \left. \frac{1}{2} [\rho_1 \ \rho_2] \begin{bmatrix} (R_1(h) - \hat{R}_1)^2 \\ (F_1(h) - \hat{F}_1)^2 \end{bmatrix} \right). \end{aligned} \quad (24)$$

其中:  $\rho$ 为惩罚参数,  $\lambda$ 为二元价格向量. 由式(23)和(24)可以将方程分离成各个情境子问题, 则销售商和制造商每个情境子问题的目标函数为

$$\begin{aligned} \max \pi_s = & g_h^s - [\lambda_1 \ \lambda_2] \begin{bmatrix} Q_1(h) - \hat{Q}_1 \\ O_1(h) - \hat{O}_1 \end{bmatrix} - \\ & \frac{1}{2} [\rho_1 \ \rho_2] \begin{bmatrix} (Q_1(h) - \hat{Q}_1)^2 \\ (O_1(h) - \hat{O}_1)^2 \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (25)$$

$$\begin{aligned} \max \pi_m = & g_h^m - [\lambda_1 \ \lambda_2] \begin{bmatrix} R_1(h) - \hat{R}_1 \\ F_1(h) - \hat{F}_1 \end{bmatrix} - \\ & \frac{1}{2} [\rho_1 \ \rho_2] \begin{bmatrix} (R_1(h) - \hat{R}_1)^2 \\ (F_1(h) - \hat{F}_1)^2 \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (26)$$

逐步对冲算法的求解步骤如下.

**Step 1:** 参数初始化. 设定  $\lambda_1, \lambda_2, \rho_1, \rho_2, \gamma, \varepsilon$  的值, 设定迭代值  $k = 1$ .

**Step 2:** 寻找初始估计值. 求解没有非预期约束条件的所有情境子问题的线性规划解.

**Step 3:** 求解带有二次惩罚项的各个情境子问题.

**Step 4:** 更新解和参数值, 求解变量新的估值, 例如  $R_1 = \sum_{h \in H} f_h R_1^*(h)$ , 其中  $R_1^*(h)$  为情境子问题的一个解. 更新参数  $\rho_k = \gamma \rho_{k-1}$  ( $\gamma$ 为每次迭代中加重惩罚参数值的标量,  $\gamma > 1$ ),  $\lambda_k = \lambda_{k-1} + \rho_{k-1}(R_1^*(h) - \hat{R}_1)$ .

**Step 5:** 检查是否是最优解. 例如: 若

$$\frac{\sqrt{\sum_{h \in H} (R_1^*(h) - \hat{R}_1)^2}}{\hat{R}_1} < \varepsilon,$$

且

$$\frac{\sqrt{\sum_{h \in H} (F_1^*(h) - \hat{F}_1)^2}}{\hat{F}_1} < \varepsilon$$

成立 ( $\varepsilon$  为容忍度), 则得到最终解. 若不成立, 则转到 Step 3 继续求解.

### 3 仿真实验

通过仿真实验来验证模型的有效性. 用 Visual C++ 2008 编写决策模型的对应程序, 采用 CPLEX 软件求解情境子问题的解. 假定客户需求服从正态分布, 需求量随机产生并被分散到各情境之中, 具体的分散方法参见文献 [11]. 下面概述需求量随机产生及分散到情境的过程.

Step 1: 输入需求的均值和标准差 ( $\mu, \sigma$ ).

Step 2: 设定依赖于情境数量的方差区间, 如果有  $n$  个区间, 则有  $2n + 1$  个情境, 区间各参数差值为  $\frac{6}{2n+1}$ . 例如: 如果  $n = 4$ , 则有 9 种情境, 在区间为  $(-3\sigma, 3\sigma)$  中, 其差值为  $\frac{6}{9}$ , 即  $(-3\sigma, -\frac{21}{9}\sigma, -\frac{15}{9}\sigma, -\sigma, -\frac{3}{9}\sigma, \frac{3}{9}\sigma, \frac{15}{9}\sigma, \frac{21}{9}\sigma, 3\sigma)$ .

Step 3: 列出所有可能的需求  $D_h$  ( $h$  为情境). 例如: 如果  $n = 4$ , 则各端点为

$$K_1 = \mu - 3\sigma, K_2 = \mu - \frac{21}{9}\sigma,$$

$$K_3 = \mu - \frac{15}{9}\sigma, K_4 = \mu - \sigma,$$

$$K_5 = \mu - \frac{3}{9}\sigma, K_6 = \mu + \frac{3}{9}\sigma,$$

$$K_7 = \mu + \sigma, K_8 = \mu + \frac{15}{9}\sigma,$$

$$K_9 = \mu + \frac{21}{9}\sigma, K_{10} = \mu + 3\sigma.$$

由此需求分别为

$$D_1 = \frac{K_1 + K_2}{2}, D_2 = \frac{K_2 + K_3}{2},$$

$$D_3 = \frac{K_3 + K_4}{2}, D_4 = \frac{K_4 + K_5}{2},$$

$$D_5 = \frac{K_5 + K_6}{2}, D_6 = \frac{K_6 + K_7}{2},$$

$$D_7 = \frac{K_7 + K_8}{2}, D_8 = \frac{K_8 + K_9}{2},$$

$$D_9 = \frac{K_9 + K_{10}}{2}.$$

Step 4: 产生随机数  $N \in [0, 1]$ , 生成带有随机数  $N$  的标准正态分布随机变量

$$Z_1 = \cos(2\pi N)\sqrt{-2 \ln N},$$

$$Z_2 = \sin(2\pi N)\sqrt{-2 \ln N}.$$

Step 5: 生成分散到情境的需求, 如果  $Z$  的值为分散区间, 则需求  $D \in D_h$ .

按照以上步骤生成仿真实验的两阶段客户随机

需求.

### 3.1 销售商参数设定及结果分析

假定销售商的相关参数设定为:  $p_1 = p_2 = 20$ ,  $c_1 = c_2 = 12$ ,  $h_1 = h_2 = 0.5$ ,  $s_1 = s_2 = 8$ ,  $p^e = 10$ ,  $p^o = 2$ ,  $v = 6$ ,  $M^o = 10000$ . 客户需求遵循均值  $\mu$  为 1000, 标准差  $\sigma \in \{50, 100, 150, 200, 300, 400\}$  的正态分布. 模型求解的参数初始化设定为:  $\lambda_1 = \lambda_2 = 0.5$ ,  $\rho_1 = \rho_2 = 0.1$ ,  $\gamma = 3$ ,  $\varepsilon = 0.01$ . 求解的结果如图 1 和图 2 所示.

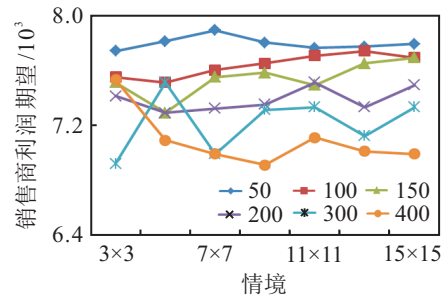


图 1 不同情境水平下的销售商利润期望

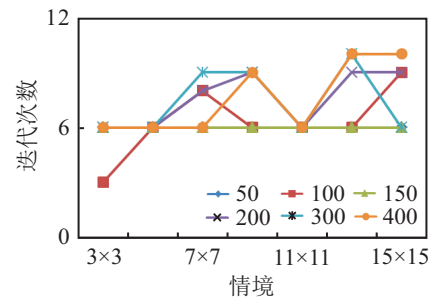


图 2 不同情境水平下销售商模型的收敛迭代次数

图 1 为在 6 种不同客户需求标准差和 7 种不同情境水平下销售商的利润期望. 图 1 中情境坐标的  $3 \times 3$  是指需求的概率分布被分散到两个销售期中, 共有 9 种情境. 从图 1 可以看出: 销售商的利润期望随着标准差的增加而减少, 这表明客户需求越稳定, 销售商获取的利润越高; 另一方面, 销售商利润期望随着情境数量的增加而趋向稳定. 与标准差相比, 情境数量的增加对利润的影响效果并不显著. 当  $\sigma = 50$  时, 销售商的利润期望在各情境水平下基本稳定, 而随着标准差的增加, 销售商利润期望在各情境水平下的波动增大. 这表明: 如果客户需求是稳定的, 则销售商利润期望基本独立于情境数量; 如果客户需求不稳定, 则需要分离出更多的情境以获得更稳定的解.

图 2 为相同条件下不同情境水平的迭代次数. 从图 2 可以看出, 模型求解随着标准差的增加而趋向收敛. 这表明稳定的客户需求不仅会使利润增加, 而且使得模型的求解更容易收敛. 最终解  $Q_1^*(h)$  和  $O_1^*(h)$  在所有情境下基本是一致的, 即最终解对所有情境是不变的, 这就是销售商在仅知道客户需求

概率分布信息的情况下,在第1个销售期前做出决策,以决定从制造商处购买多少产品和期权,能够获得最大利润期望.

### 3.2 制造商参数设定及结果分析

销售商决策模型中的变量  $Q_1(h), O_1(h), I_2^+(h)$  成为制造商决策模型中的参数. 制造商决策模型的其他参数设定为:  $h_1^r = h_2^r = 0.5, h_1^p = h_2^p = 0.25, w_1 = 6, w_2 = 5, p_1^m = p_2^m = 12, c = 4, I_2^s = 0, v = 6, v^r = 2, v^p = 4, T = 4, p^o = 2, p^e = 10$ . 模型求解的参数初始化设定为:  $\lambda_1 = \lambda_2 = 0.5, \rho_1 = \rho_2 = 0.1, \gamma = 3, \varepsilon = 0.05$ . 模型求解的结束条件为  $R_1^*(h)$  和  $F_1^*(h)$  的均值小于  $\varepsilon$ . 求解的结果如图3和图4所示.

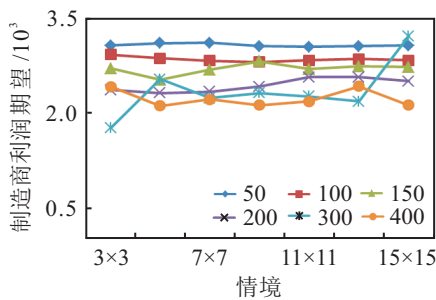


图3 不同情境水平下的制造商利润期望

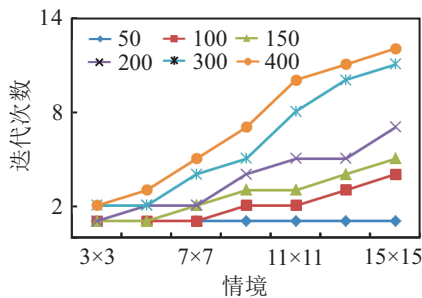


图4 不同情境水平下制造商模型的收敛迭代次数

图3为在6种不同客户需求标准差和7种不同情境水平下制造商的利润期望. 从图3可以看出,需求越稳定,制造商获得利润越大;需求越不稳定,制造商随着情境水平的增加而获得的利润波动越大.

图4为不同情境水平下制造商模型求解的迭代次数. 从图4可以看出,迭代次数随着需求标准差的增加而增多,当  $\sigma = 50$  时,情境的增加并不影响迭代次数.

### 3.3 销售商与制造商的结果比较

本节比较销售商和制造商在不同期权价格和期权执行价格下的利润,结果如图5和图6所示. 图5为不同期权执行价格下销售商与制造商的利润期望以及总利润的比较,图6为在不同期权价格下的双方利润期望与总利润的比较.

从图5可以看出:当执行价格高于8.5以后,制造商的期望利润显著降低,而销售商的利润期望增加;

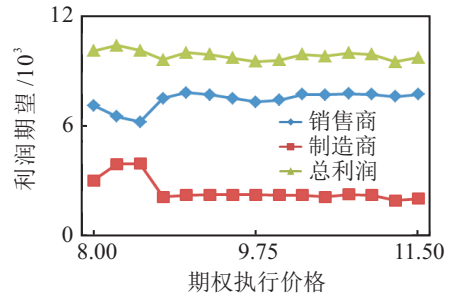


图5 不同期权执行价格下利润期望比较

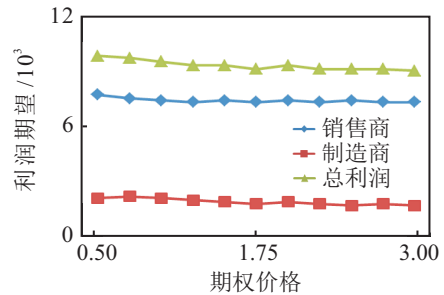


图6 不同期权价格下利润期望比较

销售商在执行价格位于8.5 ~ 9和10 ~ 10.5区间内时获得较高利润期望,而制造商在8 ~ 8.5区间内获得较高利润;从总利润角度看,执行价格在8.5 ~ 9.5区间内呈现较高态势.

从图6可以看出:随着期权价格的增加,销售商和制造商的利润期望呈下降趋势,但并不显著.这是因为期权价格的增加使得销售商减少购买期权,从而导致产品采购柔性的降低,使得销售商应对需求不确定性的能力降低,导致利润呈下降趋势;另一方面,制造商柔性调整产品生产数量的能力也降低,这也导致利润下降.

图5和图6表明,制造商的利润期望对期权执行价格的提高比较敏感.也就是说,各自决策的销售商和制造商应该协调好期权价格和期权执行价格,这样才能使得整个供应链获得较高的总利润.

## 4 结 论

供应链数量柔性契约提高了销售商应对需求不确定性的能力,同时增加了制造商的风险,引入期权既可以降低制造商的风险,又可以使制造商根据销售商的柔性采购调整产品的生产数量. 本文将期权与数量柔性契约相结合,建立了两阶段随机规划决策模型,将客户不确定性需求分散到有限的情境来表述,运用逐步对冲算法对基于情境的决策模型进行求解. 仿真结果表明:客户需求的稳定性越高,销售商和制造商所获利润越高;情境数量对销售商和制造商利润期望的影响并不显著;制造商对期权执行价格的高低较为敏感,需要协调销售商与制造商之间期权价格和期权执行价格的制定,使得供应链总利润获得提升. 该研

究成果既丰富了供应链的管理理论, 又为供应链各决策主体制定相应产销策略提供了参考依据。

### 参考文献(References)

- [1] 刘蕾, 鄢章华, 滕春贤. 基于期权契约的供应链协调研究[J]. 运筹与管理, 2011, 20(8): 48-57.  
(Liu L, Yan Z H, Teng C X. Supply chain coordination based on option contract[J]. Operation Research and Management Science, 2011, 20(8): 48-57.)
- [2] Barnes-Schuster D, Bassok Y, Anupindi R. Coordination and flexibility in supply contracts with options[J]. Manufacturing and Service Operations Management, 2002, 4(3): 171-207.
- [3] Wang X, Liu L. Coordination in a retailer-led supply chain through option contract[J]. Int J of Production Economics, 2007, 110(1/2): 115-127.
- [4] 宁钟, 戴俊俊. 期权在供应链风险管理中的应用[J]. 系统工程理论与实践, 2005, 25(7): 49-54.  
(Ning Z, Dai J J. The Application of Options in Supply Chain Risk Management[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2005, 25(4): 49-54.)
- [5] Gomez-Padilla A, Mishina T. Supply contract with options[J]. Int J of Production Economics, 2009, 122(1): 312-318.
- [6] Cheaitou A, Jemai Z, Dallery Y, et al. Two-stage flexible supply contract with payback and information update[J]. European J of Industrial Engineering, 2010, 4(4): 471-492.
- [7] Zhao Y, Wang S, Cheng T C, et al. Coordination of supply chains by option contracts: A cooperative game theory approach[J]. European J of Operational Research, 2010, 207(2): 668-675.
- [8] Liang L, Wang X X, Gao J G. An option contract pricing model of relief material supply chain[J]. Omega Int J of Management Science, 2012, 40(5): 594-600.
- [9] 胡本勇, 陈旭. 考虑努力水平和决策风险偏好的供应链期权销量担保模型[J]. 管理工程学报, 2012, 26(3): 184-190.  
(Hu B Y, Chen X. Supply chain sale-surety option contract with effort demand and risk preference[J]. J of Industrial Engineering and Engineering Management, 2012, 26(3): 184-190.)
- [10] Wallace S W, Choi T M. Flexibility, information structure, options and market power in robust supply chains[J]. Int J of Production Economics, 2011, 134(2): 284-288.
- [11] Van D C, Vial J P. A practical implementation of stochastic programming: An application to the evaluation of option contracts in supply chains[J]. Automatica, 2004, 40(5): 743-756.
- [12] Rockafellar R, Wets R J. Scenarios and policy aggregation in optimization under uncertainty[J]. Mathematics of Operations Research, 1991, 16(1): 119-147.
- [13] Haugen K K, Lokketangen A, Woodruff D L. Progressive hedging as a meta-heuristic applied to stochastic lot-sizing[J]. European J of Operational Research, 2001, 132(1): 116-122.
- [14] Liu X W, Toh K C, Zhao G Y. On the implementation of a log-barrier progressive hedging method for multistage stochastic programs[J]. J of Computational and Applied Mathematics, 2010, 234(2): 579-592.

(责任编辑: 齐 霖)