考虑采购资金约束的供应链期权柔性契约①

胡本勇[1], 彭其渊[2], 王性玉[3]
(1. 电子科技大学经济与管理学院, 成都 610054; 2. 西南交通大学交通运输学院, 成都 610031; 3. 河南大学工商管理学院, 开封 475001)

摘要: 在销售商存在采购预算资金约束下, 对供应链期权柔性契约进行了研究. 首先, 利用非线性规划中的 Kuhn-Tucker条件分析了采购资金对销售商的订货决策的影响, 并得出了不同资金稀缺程度下的订货策略; 其次, 讨论了供应商的产量决策问题, 并得出了供应商的最优产量安排; 再次, 研究了供应链的合作问题, 并给出了实现供应链合作的具体条件; 最后, 通过数值分析对研究结论进行了验证和说明.

关键词: 柔性契约; 实物期权; 采购资金短缺; Kuhn-Tucker条件; 供应链合作
中图分类号: F252　　文献标识码: A　　文章编号: 1007-9807(2009)06-0062-10

0 引 言

科技发展及消费者偏好的变化, 使得具有易逝性特征(生命周期较短、贬值较快、市场需求不确定性大)的产品增多, 在传统的供应链契约(比如: 批发价契约)下, 销售商在合作中承担较大的市场风险, 不利于供应链合作. 为了提升供应链的竞争能力, 需要对传统供应链契约进行创新, 增加合作契约的柔性, 从而实现供应链的收益共享、风险共担. 另外, 从经济学的角度来看, 资源总是稀缺的, 而且随着全球能源价格不断上扬, 进一步拉升了许多企业的经营成本, 也使得他们在经营决策中往往面临一定的资源约束. 作为企业重要的经营资源之一, 企业资金更是如此, 这也使得企业在很多决策总是或多或少的受到资金短缺的制约. 当前, 企业在资源约束条件下开展生产经营, 已成为新时期较普遍的经济问题. 因此有必要对这类供应链问题展开研究.

对供应链柔性契约研究的文献较多, 但在研究中很少考虑资源短缺因素对契约的影响. Tsay[1,2]利用数量弹性条款, 考察了柔性契约下供应链参与企业的行为与绩效的关系. Pasternack[3]利用报童问题从可退货的角度研究了供应链合作契约的柔性问题. Bassok[4]对单一产品、最小担保订货量的供应链柔性契约进行了研究, 并得出了买方最优采购政策. Donohue[5]研究了两种供货模式下的柔性供应契约对供应链收益的影响. Cachon等[6]研究了包含固定条款和选择条款的供应链柔性契约, 对实现供应链信息共享与协调的影响. Eppen和 Iyer[7]、Iyer和 Bergen[8]、Wu[9]、陈旭[10]进一步讨论了信息更新下的供应链柔性契约问题. 不难发现上述文献多利用了一些类似期权合同条款, 以实现供应链契约柔性, 正如 Ritchken[11]所说: 如果把金融衍生工具——期权与传统订货方式结合起来, 能够提高供应链契约柔性, 加强供应链合作. 因此近年来已有学者开始探讨基于期权的供应链柔性契约问题. Barnes-Schasler等[12]将单向看涨期权引入契约, 提高契约柔性, 论证了期权的引入能够提高供应链的绩效. Wang等[13]研究了两级供应链中单期、双向期权契约的买方优化问题. 宁钟等[14]把期权应用于

① 收稿日期: 2008-01-29; 修订日期: 2008-09-02.
基金项目: 国家社会科学基金资助项目(06BJY006).
作者简介: 胡本勇(1974—), 男, 河南息县人, 博士, 讲师. Email: huby2008@163.com

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

供应链风险管理, 论述了如何通过期权提高供应链的供给柔性、市场响应能力, 以及增强信息沟通和风险分担问题. 郭琼等[15]通过期权契约研究了供应链的定价策略、最优生产订货批量、以及供应链协调问题. 与上述文献不同, 本文在研究中不仅将期权引入供应链契约, 而且还考察了资源短缺因素对供应链契约的影响, 其重要意义体现在: 1)现有的供应链期权柔性契约模型的优化分析过程及其结论, 并不能简单推广到存在采购资金约束的供应链柔性契约模型中去. 对于后者, 无论是所研究问题的复杂性, 还是所采用的优化分析方法, 以及对其解的特征的描述, 与前者相比都明显不同, 而且更为复杂; 2)考虑采购资金约束的供应链期权柔性契约问题, 更符合新时期的经济现实, 对当前此类供应链合作也更具有借鉴意义. 对于限制性因素供应链契约相关的研究, 当前主要集中在交货时间约束、产能约束上. YANG[16]研究了存在批量交付时间约束的产品分销调度问题. 但斌等[17]对存在交货期时间约束的多级供应链批量调度问题进行了研究. 李延晖等[18]研究了存在时间约束的供应链配送系统的随机模型. 姚建明和蒲云[19]研究了存在动态生产能力约束的供应链 M C 模式下调度优化问题. 杜少甫和梁樑[20]对基于 GBOM 的供应链网络和产能约束的集成生产计划问题进行了研究. 当前这类文献主要对供应链上游企业 (比如生产企业), 在存在一定约束 (产能约束、交货时间约束)情况下的相关问题进行研究, 而对供应链下游企业 (比如销售商)在存在一定约束 (采购资金约束)情况下的相关问题研究不足. 本文与现有文献不同, 考察了销售商存在采购资金短缺的供应链合作问题.

本文在前人研究的基础上, 对易逝品供应链合作问题, 在供应链期权数量柔性契约, 分析了供应链买方采购资金短缺对销售商、供应商的决策以及供应链的协调的影响, 而且在模型的优化分析中, 利用 Kuhn-Tucker条件, 讨论了模型解的特征.

1 模型概述

考虑由一个供应商和一个销售商组成的单周期、两级供应链. 销售商在产品生产提前期开始时刻 t_0 向供应商提供初始订货量和期权购买量, 在销售季节开始时刻 t_1 供应商把初始订货量和执行期权购买量之和的产品送交销售商. 产品的销售季节为 t_1 到 t_2, 产品生产提前期为 t_0 到 t_1. 市场结构及决策时序如图 1所示. 在合作中, 销售商在 t_0 时刻选择初始订货量和期权购买量, 并在 t_1 时刻获取不超过期权的机会调整初始采购量. 销售商存在采购预算资金限制, 只能在资金范围内优化采购行为.

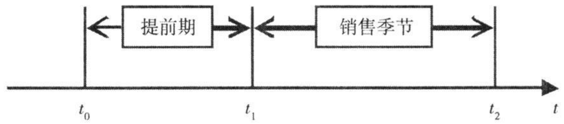

图 1　决策时序

Fig. 1 The sequence of decisions

为便于讨论, 这里给出本文所涉及到的各个变量的定义: q 为销售商的初始订货量; m 为销售商的期权购买量; w 为单位产品的批发价; w_o 为单位期权的价格; w_e 为单位期权的执行价格; p 为单位产品的市场零售价; s 为单位缺货成本; v 为单位产品的残值; Y 为销售商的采购预算资金总额; $f(x)$ 为开始时刻 t_0 预测的顾客需求概率密度函数; $F(x)$ 为开始时刻 t_0 预测的顾客需求累积分布函数; $F^{-1}(x)$ 为 $F(x)$ 的反函数;

经过简单分析, 上述参数之间应满足下列关系:

$$0 < w_o + v \leqslant w;\ 0 < w \leqslant w_e + w_o;$$

$$0 < w_o + w_e \leqslant p + s;\ 0 < v \leqslant w \leqslant p \qquad (1)$$

在式 (1) 中第 1项表示期权价格不能过高, 否则将不会购买期权; 第 2项表示初始采购相对期权采购便宜; 第 3项表示期权采购是有利可图的.

2 销售商的决策优化分析

销售商的决策分为两个阶段: 首先, 由于产品的生产存在提前期, 因此销售商必须在市场需求发生之前, 即在 t_0 时刻做出采购基本决策 (所谓的基本决策, 是指决定最优的初始订货量 q 和期权购买量 m), 而且这种决策是基于对市场的预测信息, 而非真实的市场需求信息. 这是第 1阶段的决策. 其次, 在销售季节开始时刻 t_1, 销售商根据在逝去的 t_0 到 t_1 时段内所掌握的需求新信息, 对原来的需求信息加以更新, 决定是否执行期权, 追

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

加订货, 以实现对 t_0时刻的采购决策加以修订, 从而提高采购量的精确度. 这是第 2阶段的决策.

2.1 销售商第 1阶段的决策模型

销售商第 1阶段的决策, 即 t_0 时刻的决策就是确定最优的初始订货量 q和期权购买量 m 的决策, 那么根据上述假设, 当实际需求 $x \in [0, q]$ 时, 初始订货量足以满足需求, 甚至还会有剩余, 销售商不会执行期权; 当 $x \in [q, q+m]$时, 初始订货量不足, 销售商会选择部分执行期权以弥补差额; 当 $x \geqslant q+m$ 时, 期权将被全部执行, 可能出现缺货. 据此可得出销售商在 t_0 时刻决策的期望收益函数

$$\begin{aligned}\pi_r(q, m) = &\int_0^q [px + v(q-x)]f(x)\,dx + \\ &\int_q^{q+m}[px - w_e(x-q)]f(x)\,dx + \\ &\int_{q+m}^{\infty}[p(q+m) - s(x-q-m) - \\ &w_e m]f(x)\,dx - wq - w_o m \end{aligned} \tag{2}$$

因此, 在 t_0时刻, 销售商考虑资金约束的优化问题可表示为

$$\begin{aligned} &\max \quad \pi_r(q, m) \\ \text{s.t.}\quad & wq + (w_o + w_e)m \leqslant Y \\ & -q \leqslant 0 \\ & -m \leqslant 0 \end{aligned} \tag{3}$$

将 $\pi_r(q, m)$ 分别对 q, m 求一阶偏导数, 分别为

$$\begin{aligned}\frac{\partial \pi_r(q, m)}{\partial q} = &(v - w_e)F(q) + (w_e - p - s) \times \\ &F(q+m) + p + s - w \end{aligned} \tag{4}$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial \pi_r(q, m)}{\partial m} = &-(p + s - w_e)F(q+m) + \\ &p + s - w_o - w_e \end{aligned} \tag{5}$$

根据式 (4)、式 (5), 利用非线性规划中有关约束极值问题的理论[21], 问题 (3) 的 Kuhn-Tucker条件为

1) $\lambda_1[Y - wq - (w_o + w_e)m] = 0$;

2) $\lambda_2 q = 0$;

3) $\lambda_3 m = 0$;

4) $(v-w_e)F(q)+(w_e-p-s)F(q+m)+p+s-w = \lambda_1 w - \lambda_2$;

5) $-(p+s-w_e)F(q+m)+p+s-w_o-w_e = \lambda_1(w_o+w_e) - \lambda_3$;

6) $q \geqslant 0, m \geqslant 0, \lambda_1 \geqslant 0, \lambda_2 \geqslant 0, \lambda_3 \geqslant 0$

其中: λ_1、λ_2、λ_3 为广义拉格朗日 (Lagrange) 乘子. 对于 $\pi_r(q, m)$, 其二阶偏导数分别为

$$\begin{aligned}\frac{\partial^2 \pi_r(q, m)}{\partial q^2} = &-(w_e - v)f(q) - \\ &(p + s - w_e)f(q+m) \end{aligned} \tag{6}$$

$$\frac{\partial^2 \pi_r(q, m)}{\partial m^2} = -(p + s - w_e)f(q+m) \tag{7}$$

$$\frac{\partial^2 \pi_r(q, m)}{\partial q \partial m} = -(p + s - w_e)f(q+m) \tag{8}$$

显然$w_e - v > 0$, 否则销售商无论有无需求均会执行期权, 同样 $p + s - w_e > 0$, 否则期权采购对销售商无利可图. 因此, 根据式 (6)、式 (7)、式 (8) 可知

$$\frac{\partial^2 \pi_r(q, m)}{\partial q^2} < 0$$

$$\frac{\partial^2 \pi_r(q, m)}{\partial m^2} < 0$$

$$\frac{\partial^2 \pi_r(q, m)}{\partial q \partial m} < 0$$

那么 $\pi(q, m)$ 相对 q、m 是凹函数, 存在惟一解. 也就是说, 在没有采购资金限制时, 销售商的期望收益存在最大值解, 此时问题 (3) 就是标准的报童问题[12], 其最优解分别为

$$q^* = F^{-1}\left(\frac{w_o + w_e - w}{w_e - v}\right) \tag{9}$$

$$m^* = F^{-1}\left(\frac{p + s - w_o - w_e}{p + s - w_e}\right) - q^* \tag{10}$$

2.2 销售商第 1阶段的决策优化分析

当销售商采购预算资金 Y不足, 即

$$Y < wq^* + (w_o + w_e)m^*$$

时, 销售商无法实现式 (9)、式 (10) 所示的最优决策解, 销售商的决策必须受资金约束. 下面将着重研究当存在采购资金约束时销售商的决策优化问题.

由于在采购资金约束时, 销售商的决策问题 (3) 是非线性规划问题, 求解起来比较困难, 本文将利用 Kuhn-Tucker条件[21] 对其解的特征进行讨论分析, 并以 3个命题的形式给出, 具体如下:

命题 1 如果 $wq + (w_o + w_e)m = Y$成立, 那么 $q = 0$, $m > 0$不可能是问题 (3) 的最优解.

命题 1给出了销售商的决策问题 (3) 解的一个边界. 同时命题 1也说明了在销售商的决策受

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

采购资金短缺约束 ($wq+(w_o+w_e)m=Y$, 其中 $Y<wq^*+(w_o+w_e)m^*$) 时, 销售商的初始订货量 q必然大于零. 这主要因为, 由于采购资金的约束, 销售商总的采购量相对于无资金约束时必然有所降低, 又由于初始采购方式相对期权采购更为廉价, 为了避免缺货损失和实现最大销售量, 销售商必须利用初始采购才能优化决策.

命题 1的证明过程如下.

为了证明命题 1成立, 首先给出命题 1的对立命题: 假定 $q=0, m>0$成立, 由 Kuhn-Tucker条件 4) 可得

$$F(m)=\frac{p+s-(1+\lambda_1)w+\lambda_2}{p+s-w_e} \tag{11}$$

由 Kuhn-Tucker条件 5) 可得

$$F(m)=\frac{p+s-(1+\lambda_1)(w_o+w_e)}{p+s-w_e} \tag{12}$$

联立等式 (11)、(12) 可得

$$1+\lambda_1=\frac{-\lambda_2}{w_o+w_e-w} \tag{13}$$

将式 (13) 代入式 (11), 则式 (11) 可重写为

$$F(m)=\frac{p+s+\dfrac{w_o+w_e}{w_o+w_e-w}\lambda_2}{(p+s-w_e)} \tag{14}$$

式中, $F(m)\leqslant 1$, 因此下面不等式必然成立

$$\lambda_2\leqslant-\frac{w_e(w_o+w_e-w)}{w_o+w_e}<0 \tag{15}$$

式 (15) 表明 $\lambda_2<0$, 这与 Kuhn-Tucker条件 6) $\lambda_2\geqslant 0$矛盾, 显然假设不成立, 因此, 命题 1成立.

命题 2 如果

$$wq+(w_o+w_e)m=Y,$$

$$F(q)\leqslant 1-\frac{w(p+s)(w_e-v)-v[(w_o+w_e)(p+s-v)-w(p+s-w_e)]}{(p+s-v)[(w_o+w_e)(p+s-v)-w(p+s-w_e)]}$$

关系成立, 那么问题 (3) 的最优解为 $q=Y/w$、$m=0$

命题 2给出了销售商的决策问题 (3)的解的另一个边界, 即销售商在采购预算资金短缺到什么程度时, 才开始放弃期权采购, 而将有限的资金全部用于初始采购. 销售商之所以放弃期权采购, 由于采购资金较少, 销售商所能满足的市场需求很有限, 出现过量采购的可能性很小, 又由于初始采购方式相对期权采购更为廉价, 因此销售商将把有限的资金完全用于初始采购, 以实现最大收益.

命题 2的证明过程如下.

首先假定命题 2成立, 即有 $q=Y/w$、$m=0$, 那么, 当 $q>0$时 $\lambda_2=0$, 此时又有 $m=0$, 由 Kuhn-Tucker条件 4) 可得

$$F(q)=\frac{p+s-(1+\lambda_1)w}{p+s-v} \tag{16}$$

由 Kuhn-Tucker条件 5) 可得

$$F(q)=\frac{p+s-(1+\lambda_1)(w_o+w_e)+\lambda_3}{p+s-w_e} \tag{17}$$

联立等式 (16)、(17) 可得

$$1+\lambda_1=\frac{(p+s)(w_e-v)+\lambda_3(p+s-v)}{(w_o+w_e)(p+s-v)-w(p+s-w_e)} \tag{18}$$

将式 (18) 代入式 (16), 化简后有

$$F(q)=1-\frac{w(p+s)(w_e-v)+\lambda_3(p+s-v)w}{(p+s-v)[(w_o+w_e)(p+s-v)-w(p+s-w_e)]}+\frac{v}{p+s-v}\leqslant$$
$$1-\frac{w(p+s)(w_e-v)-v[(w_o+w_e)(p+s-v)-w(p+s-w_e)]}{(p+s-v)[(w_o+w_e)(p+s-v)-w(p+s-w_e)]} \tag{19}$$

所以, 如果不等式 (19) 成立, 命题 2必然成立.

从上述两个命题可以看出: 第 1, 无论采购预算资金如何短缺, 销售商都不会放弃初始采购; 第 2 当采购预算资金短缺到一定程度时, 销售商将放弃期权采购, 而将有限的资金全部用于初始采购. 显然, 针对问题 (3), 需要分析销售商将在什么时候开始以两种采购方式 (初始采购和期权采购) 采购商品?这个问题将在命题 3中得以解决.

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

命题 **3** 如果

$$wq + (w_o + w_e)m = Y,$$

$$F(q) > 1 - \frac{w(p+s)(w_e - v) - v[(w_o + w_e)(p+s-v) - w(p+s-w_e)]}{(p+s-v)[(w_o+w_e)(p+s-v) - w(p+s-w_e)]}$$

关系成立, 那么问题(3)的最优解 q、m 都大于零, 并且 q、m 满足下列关系

$$F(q) = \frac{(1+\lambda_1)(w_o + w_e - w)}{w_e - v} \quad (20)$$

$$F(q+m) = \frac{p+s-(1+\lambda_1)(w_o+w_e)}{p+s-w_e} \quad (21)$$

式(20)、(21)中 $\lambda_1 \geqslant 0$ 联立式(20)、式(21)和 $wq + (w_o+w_e)m = Y$, 求解三元一次方成组, 可得出具体的 q、m、λ_1 值.

命题 3的证明过程如下.

根据命题 1, $q > 0$必然成立, 又根据命题 2, 当

$$F(q) \leqslant 1 - \frac{w(p+s)(w_e - v) - v[(w_o + w_e)(p+s-v) - w(p+s-w_e)]}{(p+s-v)[(w_o+w_e)(p+s-v) - w(p+s-w_e)]}$$

时, $m = 0$, $q = Y/w$, 因此, 当

$$F(q) > 1 - \frac{w(p+s)(w_e - v) - v[(w_o + w_e)(p+s-v) - w(p+s-w_e)]}{(p+s-v)[(w_o+w_e)(p+s-v) - w(p+s-w_e)]}$$

时, 问题(3)的最优解 q、m 都必然大于零.

而当 $q > 0$, $m > 0$时, 由 Kuhn-Tucker条件 2)、3) 可得: $\lambda_2 = 0$, $\lambda_3 = 0$, 将其代入由 Kuhn-Tucker条件 4)、5), 化简后则可得式(20)和式(21).

综上分析, 命题 3成立.

命题 3表明当销售商的采购资金超过某一数额时, 将同时采用初始采购和期权采购两种采购方式, 实现订货决策的最优化.

命题 1、2、3讨论了销售商的决策问题(3)的最优解的特征, 以及最优解随采购预算资金短缺程度的变化, 为实践中销售商的决策提供了有价值的参考.

2.3 资金短缺对销售商第 1阶段决策的影响

为了可考察资金短缺对销售商第 1阶段决策的影响, 将销售商在无资金约束时的最优采购策略式(9)、(10)和命题 3所表示存在资金约束时的最优采购策略式(20)、(21)相比较, 可得如下两个重要推论.

推论 **1** 存在采购资金约束时, 销售商总的最优产品采购量比没有采购资金约束时的要小.

因为, 根据式(9)、(10), 销售商在无采购资金约束时总的最优采购量 $q^* + m^*$ 满足

$$F(q^* + m^*) = \frac{p+s-(w_o+w_e)}{p+s-w_e}$$

而存在采购资金约束时, 根据命题 3, 销售商总的采购量 $q+m$ 满足式(21), 由于 $\lambda_1 \geqslant 0$, 所以

$$F(q^* + m^*) \geqslant F(q+m)$$

又因为 $F(x)$ 为 x 的增函数, 所以 $q^* + m^* \geqslant q + m$, 即推论 1成立.

推论 **2** 当存在采购资金约束时, 销售商将增大初始采购量, 减少期权采购量.

因为销售商在无采购资金约束时, 根据式(9), 初始采购量 q 满足

$$F(q^*) = \frac{w_o + w_e - w}{w_e - v}$$

而存在采购资金约束时, 根据命题 3, 销售商初始采购量 q满足式(20), 由于 $\lambda_1 \geqslant 0$, 所以 $F(q^*) \leqslant F(q)$, 又因为 $F(x)$ 为 x 的增函数, 所以 $q^* \leqslant q$. 另外, 根据推论 1知 $q^* + m^* \geqslant q + m$, 上面已证明 $q^* \leqslant q$, 所以 $m^* \geqslant m$.

综上分析, 推论 2成立.

推论 1和推论 2反映了采购资金的短缺对销售商第 1阶段决策的影响.

2.4 销售商第 2阶段的决策及分析

销售商在第 2阶段的决策主要体现在期权执行量(用 $\bar{m}$表示)的选择上, 即在销售季节开始时刻 t_1的决策就是根据在逝去的 t_0到 t_1时段所掌握的需求新信息(以 i表示), 对原来所预测的需求特征(这里主要指产品的市场需求概率密度函数)加以更新, 并以信息更新后的产品市场需求特征作为决策的依据, 决定是否执行期权, 追加订货, 以实现对 t_0时刻决策的修订. 假设在 t_1时刻基于新信息 i修正后的顾客需求概率密度函数为

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

$f(x \mid i)$, 并假设其他市场参数不变. 在确定最优期权执行量 $\bar{m}$ 之前, 需要确定信息更新后的市场需求预测值 $\bar{q}$, 其中 $\bar{q}$ 由下列问题求出

$$\max_{\bar{q}>0} \pi_r(\bar{q}) = \int_0^{\bar{q}} [px + v(\bar{q} - x)] f(x \mid i) \mathrm{d}x + \int_{\bar{q}}^{\infty} [p\bar{q} - s(x - \bar{q})] f(x \mid i) \mathrm{d}x - w\bar{q}$$

$$\text{s.t.}\quad w_e[\bar{q} - q]^+ \leqslant Y - wq - w_o m \tag{22}$$

其中: q, m 由式 (20) 和式 (21) 所确定; $[\bar{q} - q]^+$ 是非负数, 当 $\bar{q} < q$ 时, $[\bar{q} - q]^+ = 0$.

问题 (22) 是一个带约束条件的报童问题, 本文将采用讨论的方法求解这一问题. 显然, 如果不考虑约束条件, 问题 (22) 是一个标准报童问题, 其最优决策变量 $\hat{q}$ 为

$$\hat{q} = F^{-1}\left(\frac{p + s - w}{p + s - v} \,\middle|\, i\right) \tag{23}$$

如果考虑约束条件, 则有:

①当 $\hat{q} \leqslant q$ 时, 条件

$$w_e[\hat{q} - q]^+ \leqslant Y - wq - w_o m$$

成立, 问题 (22) 的最优解 $\bar{q} = \hat{q}$, 这时销售商在决策的第 2阶段不追加订货, 销售商期权执行量 $\bar{m} = 0$;

②当 $q < \hat{q} \leqslant q + m$ 时, 条件

$$w_e[\hat{q} - q]^+ \leqslant Y - wq - w_o m$$

也成立, 问题 (22) 的最优解 $\bar{q} = \hat{q}$, 这时销售商在决策的第 2阶段开始追加订货, 期权执行量 $\bar{m} = \hat{q} - q$;

③当 $\hat{q} \geqslant q + m$ 时, 条件

$$w_e[\hat{q} - q]^+ \leqslant Y - wq - w_o m$$

不再成立, 问题 (22) 的决策变量最优值 $\bar{q} = q + m$, 那么销售商在决策的第 2阶段因追加订货而执行期权量 $\bar{m} = m$.

对上述分析加以概括, 则销售商在第 2阶段的期权执行量的决策可表示为

$$\bar{m} = \begin{cases} 0, & \text{当 } \hat{q} \leqslant q \\ \hat{q} - q, & \text{当 } q < \hat{q} \leqslant q + m \\ m, & \text{当 } \hat{q} \geqslant q + m \end{cases} \tag{24}$$

其中: q, m 由式 (20) 和式 (21) 确定, $\hat{q}$ 如式 (23) 所示.

3　供应商的决策优化分析

对于供应商, 首先, 在 t_0 时刻与销售商达成期权契约 (w, w_o, w_e), 销售商根据命题 3向供应商提交最优初始订货量 q 和期权购买量 m. 其次, 在销售季节开始的 t_1 时刻, 供应商向销售商提供调整后 (根据需求信息更新, 销售商选择执行期权, 以实现对初始订货量的修订) 的订货量产品, 记为 Z, 则 Z 可表示为 $Z = q + \min(m, (x - q)^+)$, 令 $\theta = \min(m, (x - q)^+)$, 则 θ 为销售商在销售季节开始时刻 t_1 可能的追加订货量. 契约规定供应商必须向销售商供应的产品总数为 Z, 显然 $Z \leqslant q + m$. 最后, 供应商确定最优常规产量 Q, 以实现本企业期望收益最大化. 因此, 从上述分析可以看出, 虽然销售商决策具有两个阶段, 但对于供应商, 在供应链合作过程中只有 1个决策时点, 即在 t_0 时刻完成生产计划安排.

显然, 由式 (20) 和式 (21) 所确定的 q, m, 只对供应商产量安排提供了可能区间, 即 $Q \in [q, q + m]$, 销售商期权执行量 θ 受 t_1 时刻市场需求影响. 为了更好了解供应商生产安排特性, 假设 θ 服从均值为 μ, 标准差为 δ 的正态分布, 那么, $Z = q + \theta$ 则服从均值为 $q + \mu$, 标准差为 δ 的正态分布 (对供应商而言, q 是由式 (20) 确定的常数).

另外, 本文假设供应商具备快速响应能力[22] (正常生产模式下的单位生产成本为 c, 快速响应生产模式下的单位生产成本为 $(1 + \gamma)c$, $\gamma > 0$), 供应商须考虑常规产量及快速应急产量的协调优化. 因此, 供应商的最优产量 Q 安排必为下列问题的最优解

$$\max_{Q} \pi_s \tag{25}$$

其中

$$\pi_s = wq + w_o m + \int_q^{q+m} w_e[q + m - Z]\varphi(Z)\mathrm{d}Z + \int_q^{Q} [v(Q - Z) - Qc]\varphi(Z)\mathrm{d}Z + \int_Q^{q+m} -[(Z - Q)(1 + \gamma)c + Qc]\varphi(Z)\mathrm{d}Z \tag{26}$$

式 (26) 为供应商的期望收益函数, 它的右边: 第 1

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

项表示产品批发收入;第 2项为期权销售收入;第 3项为当销售商执行期权时,供应商的收入额;第 4、5项为供应商的生产成本.

根据式(26),可得对产量 Q 的一阶条件为

$$\frac{\partial \pi_s}{\partial Q} = -(c-v)\Phi(Q) + \gamma c[1-\Phi(Q)] \tag{27}$$

其中:$\Phi(\cdot)$ 是均值为 $q+\mu$、方差为 δ 的正态分布累积函数,$\Phi^{-1}(\cdot)$ 为 $\Phi(\cdot)$ 反函数. 令式(27)等于零,整理可得供应商的最优产量

$$Q = q + \mu + \delta\frac{\gamma c}{(1+\gamma)c - v} \tag{28}$$

式(28)为供应商的产量安排提供决策参考,如果能够通过努力,获得更准确的销售商追加订货量 θ 的特征,则可降低这种追加订货不确定性对供应商产量安排的影响,从而降低生产风险.

4 供应链合作

从整合决策的视角考虑,供应链只有一个决策时点,即在 t_0 时刻确定最优的生产批量(这个批量必须考虑销售商的采购资金约束). 假设在 t_0 时刻供应链所预测的市场需求概率密度函数与销售商的所预测的相一致,均为 $f(x)$. 其他市场参数不变,供应商依然具备快速响应能力,必须满足市场需求,那么供应链的决策就是确定最优的产量 T. 当需求 $x\in[0, T]$ 时,正常生产模式下的产出就可以满足需求,甚至还会有剩余;当需求 $x > T$ 时,正常生产模式下的产出不能满足需求,需要启动快速响应生产模式追加生产. 因此供应链的决策问题可表示为

$$\max_T \pi_t = \int_0^T [px + v(T-x) - cT]f(x)\,dx + \int_T^{+\infty}[px - (1+\gamma)c(x-T) - cT]f(x)\,dx$$

$$\text{s.t.}\quad wT \leqslant T \tag{29}$$

对问题(29)求解,则供应链最优产量 T 为

$$T = \begin{cases} F^{-1}\left[\dfrac{\gamma c}{(1+\gamma)c - v}\right], & 若\ F^{-1}\left[\dfrac{\gamma c}{(1+\gamma)c - v}\right] < \dfrac{Y}{w} \\ \dfrac{Y}{w}, & 若\ F^{-1}\left[\dfrac{\gamma c}{(1+\gamma)c - v}\right] \geqslant \dfrac{Y}{w} \end{cases} \tag{30}$$

因此,实现供应链的协调,则需满足下列条件:

$$\begin{cases} q + m = T \\ Q = T \end{cases} \tag{31}$$

其中:q、m 由式(20)、式(21)确定,Q、T 由式(28)、式(30)确定.

由于 Q、$q+m$ 都是 w、w_o、w_e 的函数,因此可以通过调节 w、w_o、w_e,保证式(31)成立,从而实现供应链的协调.

5 算例分析

5.1 销售商的决策

某销售商主要从事半导体 IC 卡芯片的销售,此类产品具有典型的易逝性特征,产品市场需求在[1 000, 1 400]上服从均匀分布,相应的市场参数分别为:$p = 13$, $s = 2$, $w = 7$, $v = 3$, $w_o = 1$, $w_e = 1$. 通过数值分析,考察采购资金对销售商的决策的影响.

在无资金约束时,根据式(9)、(10),可得出销售商最优初始采购量 $q^* = 1\ 160$,期权采购量 $m^* = 183$. 此时销售商所需的最低采购预算资金为 $Y^* = 9\ 769$. 如果销售商无法足额筹集到所需的采购资金,即当 $Y < 9\ 769$ 时,销售商的订货策略将受到影响,根据非线性规划问题(3),分别考查了采购预算资金 Y 分别为:2 886、5 772、8 659、8 770、8 881、8 992、9 103、9 214、9 325、9 436、9 547、9 658时的订货策略. 具体如表 1所示.

表 1 资金对采购策略的影响

Tabel 1 The impact of fund on order policy

采购量	Y													
	0	2 886	5 772	8 659	8 770	8 881	8 992	9 103	9 214	9 325	9 436	9 547	9 658	9 769
q	0	412	825	1 237	1 193	1 189	1 185	1 181	1 178	1 174	1 171	1 167	1 164	1 160
m	0	0	0	0	47	62	77	93	108	123	138	153	168	183
$q+m$	0	412	825	1 237	1 240	1 251	1 262	1 274	1 286	1 297	1 309	1 320	1 332	1 343

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

从表 1中数据可以看出:

①销售商的初始订货量 q 均大于零, 表明初始订货方式是销售商不可缺少的订货方式之一, 同时验证了命题 1结论;

②当 $Y \leqslant 8\,659$时, 销售商仅采用单一的初始订货方式, 而当 $Y > 8\,659$时, 销售商开始购买期权, 采购预算资金 $Y = 8\,659$ 为销售商采购方式跳跃的资金点, 这也验证了命题 3结论;

③从表 1最后 1行可以看出, 销售商总的最优产品采购量 $q + m$ 从左到右依次是递增的, 最右一项 1 343为最大值, 而 1 343正是无资金约束时的最优的总采购量, 从而验证了命题 4的结论;

④从表 1最后一列向左看起, 随着资金越来越短缺, 即 Y越来越小, q越来越大, m 越来越小, 直到 m 为零时止, 这一规律正体现了命题 5的结论.

5.2　供应商的决策

假设由于资金短缺 ($Y = 9\,214$), 销售商在 t_0 时刻的订货策略为: $q = 1\,178$, $m = 108$. 供应商预测销售商在销售季节开始时刻 t_1 时的执行期权的购买量 $\theta = \min[m, (x - q)^+]$ 服从均值为 $\mu = 60$, 标准差为 $\delta = 9$ 的正态分布, 供应商的生产成本 $c = 5$, 另外 $\gamma = 0.5$, 则根据式 (28) 可求出最优产量 $Q = 1\,243$.

5.3　供应链的决策

假设产品市场需求在 $[1\,000, 1\,400]$ 上服从均匀分布, 其他市场参数具体数值同上, 当销售商的采购资金为 $Y = 9\,214$(小于最优采购资金 9 767), 其最大可能采购量 $Y/w = 1\,316$, 而 $F^{-1}\left[\dfrac{\gamma c}{(1+\gamma)c - v}\right] = 1\,222$, 所以根据式 (30) 可得供应链最优产量 $T = 1\,222$.

5.4　供应链协调

当销售商的供应链采购资金为 $Y = 9\,214$时, 由于 $T = 1\,222$, $Q = 1\,243$, $q + m = 1\,286$, 现有的参数 w、w_o、w_e 并不能实现供应链协调, 需要加以调节. 通过调试发现, 当 $w = 7.5$, $w_o = 0.7$, $w_e = 8.5$时, $T = Q = q + m = 1\,222$, 可以实现供应链协调.

6　结束语

本文的研究是在销售商存在采购预算资金约束情况下展开的. 首先, 利用非线性规划中 Kuhn-Tucker条件, 分析采购资金对销售商的订货决策的影响, 并得出了不同资金稀缺程度下的销售商的具体订货策略, 以及销售商的订货策略随采购预算资金短缺程度的变化特征; 其次, 讨论了供应商的产量决策问题, 并得出了具体的最优产量安排, 当然这种最优产量安排是根据销售商的初始采购量、期权采购量以及对销售商执行期权的预测的基础上得出的; 再次, 研究了供应链的合作问题, 并给出了实现供应链合作的具体条件, 指出可以通过调节产品批发价 w 和期权参数 w_o、w_e 实现供应链协调.

本文仅研究了单周期、存在采购预算资金约束的供应链期权柔性契约问题, 如果适当放宽本文研究假设, 比如: 如果上期未销售完的产品直接 (或经简单的重新包装) 可以在下期继续销售, 则本文问题可以向多周期甚至无限期推广. 由于在多周期情况下, 销售商可以提高初始订货量, 适当增加库存, 这样不仅可以减少缺货损失, 而且还可以降低期权被执行的可能, 从而节约了成本. 当然, 产品库存的增加必然增加产品的库存成本. 总之, 对于上述多周期问题, 需要考虑库存所带来的正反两方面的影响, 销售商和供应商决策优化问题也更为复杂, 这也是作者后续研究的方向.

参 考 文 献:

[1] Tsay A A. The quantity flexibility contract and supplier-customer incentives[J]. Management Science, 1999, 45(10): 1339—1358.

[2] Tsay A A. Quantity flexibility contract and supply chain performance[J]. Manufacturing and Operations Management, 1999, 1(2): 89—111.

[3] Pasternack B A. Optimal pricing and return policies for perishable commodities[J]. Marketing Science, 1985, 4(2): 166—176.

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

[4] Bassok Y, Anupindi R. Analysis of supply contracts with total minimum commitment[J]. IIE Transactions, 1997, 9(5): 373—381.

[5] Donohue K L. Efficient supply contracts for fashion goods with forecast updating and two production modes[J]. Management Science, 2000, 46(11): 1397—1411.

[6] Cachon G., Lariviere M A. Contracting to assure supply: How to share demand forecasts in a supply chain[J]. Management Science, 2001, 47(5): 629—646.

[7] Eppen G D, Iyer A V. Backup agreements in fashion buying— the value of upstream flexibility[J]. Management Science, 1997, 43(11): 1469—1484.

[8] Iyer A, Bergen M. Quick response in manufacturer retailer channels[J]. Management Science, 1997, 43(4): 559—570.

[9] Wu J H. Quantity flexibility contracts under bayesian updating[J]. Computer & Operations Research, 2005, 32(5): 1267—1288.

[10] 陈 旭. 需求信息更新条件下易逝品的批量订货策略[J]. 管理科学学报, 2005, 8(5): 38—42.
Chen Xun. Optimal batch-ordering policy for perishable products with demand and information updating[J]. Journal of Management Sciences in China, 2005, 8(5): 38—42. (in Chinese)

[11] Ritchken P H, Tapiero C S. Contingent claims contracting for purchasing decisions in inventory management[J]. Operations Research, 1986, 34(6): 864—870.

[12] 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.

[13] Wang Q Z, Tsao D. Supply contract with bidirectional options: The buyer's perspective[J]. International Journal of Production Economics, 2006, 101(1): 30—52.

[14] 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 Zhong, Dai Jun-jun. The application of options in supply chain risk management[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2005, 25(7): 49—54. (in Chinese)

[15] 郭 琼, 杨德礼, 迟国泰. 基于期权的供应链契约协调模型[J]. 系统工程, 2005, 23(10): 1—6.
Guo Qiong, Yang De-li, Chi Guo-tai. Supply chain coordination with option contract[J]. System Engineering, 2005, 23(10): 1—6. (in Chinese)

[16] YANG X. Scheduling with generalized batch delivery dates and earliness penalties[J]. IIE Transactions, 2000, 32(8): 735—741.

[17] 但 斌, 肖 剑, 刘晓红, 等. 基于交货期窗口约束的多级供应链批量调度问题研究[J]. 计算机集成制造系统, 2007, 13(2): 310—316.
Dan Bin, Xiao Jian, Liu Xiao-hong, *et al.* Batch scheduling of a multi-stage supply chain with due windows[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2007, 13(2): 310—316. (in Chinese)

[18] 李延晖, 马士华, 刘黎明. 基于时间约束的供应链配送系统随机模型[J]. 预测, 2004, 23(4): 45—47.
Li Yan-hui, Ma Shi-hua, Liu Li-ming. A time-constrained stochastic model for distribution system of supply chain[J]. Forecasting, 2004, 23(4): 45—47. (in Chinese)

[19] 姚建明, 蒲 云. 基于动态生产能力约束的MC模式下供应链调度优化[J]. 系统工程, 2005, 23(2): 25—30.
Yao Jian-ming, Pu Yun. Scheduling optimization of supply chain in mass customization based on dynamic production ability restriction[J]. Systems Engineering, 2005, 23(2): 25—30. (in Chinese)

[20] 杜少甫, 梁 樑. 基于GBOM的供应链网络及其有生产能力约束的集成生产计划模型[J]. 管理学报, 2006, 3(2): 143—147.
Du Shao-fu, Liang Liang. GBOM-based supply chain network and its integrated production planning model with capacity constraints[J]. Chinese Journal of Management, 2006, 3(2): 143—147. (in Chinese)

[21] 郭耀煌. 运筹学原理与方法[M]. 峨眉: 西南交通大学出版社, 1994.
Guo Yao-huang. The Principle and Technique of Operational Research[M]. Emei: Southwest Jiaotong University Press, 1994. (in Chinese)

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

[22] Donohue K L. Efficient supply contracts for fashion goods with forecast updating and two production modes[J]. Management Science, 2000, 46(11): 1397—1411.

Supply chain option flexibility contract with consideration of influence of shortage of capital

HU Ben-yong[1], *PENG Qi-yuan*[2], *WANG Xing-yu*[3]

1. School of Economics and Management, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610031, China;
2. School of Traffic and Transportation, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;
3. College of Management, Henan University, Kaifeng 475001, China

Abstract This paper studied a supply chain option flexibility contract faced by the constraint of order budget, in which the retailer was short of order fund. Firstly, using the non-linear programming Kuhn-Tucker condition, the paper discussed the influence of retailer's order fund on the seller's purchasing decision, and gained concrete order policies according to different fund conditions. Secondly, the problem of supplier's output decision was discussed and supplier's optimal output plan was obtained. Thirdly, the paper studied the problem of supply chain cooperation, and put forward the condition under which the supply chain cooperation can come true. In the end, the conclusion of the research was validated and illuminated by numerical analyzing.

Key words flexibility contract; real option; shortage of order fund; Kuhn-Tucker condition; supply chain cooperation

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net