

文章编号: 1001-0920(2010)12-1775-07

基于不同交货期策略的供应链库存优化与协调模型

李 果¹, 王兆华¹, 马士华²

(1. 北京理工大学 管理与经济学院, 北京 100081; 2. 华中科技大学 管理学院, 武汉 430074)

摘要: 根据供应链的实际运作情况建立了交货策略1, 即基于时间窗的协议交货期模型, 分析了以制造商为主的Stackelberg对策博弈中各方的最优决策; 接着建立了交货策略2, 即基于费用分担的可控交货期模型, 分析了以分销商为主的Stackelberg对策博弈中各方的最优决策; 然后对交货策略1和策略2进行了比较, 给出了成本分担系数范围, 提出了一种基于改进理想点的Nash协商交货期费用分担模型. 数值分析比较了两种策略, 表明费用分担模型是有效的.

关键词: 交货期策略; 供应链; Stackelberg对策; 改进理想点; Nash协商

中图分类号: F273.7

文献标识码: A

Optimization and collaboration model of supply chain inventory based on different delivery policies

LI Guo¹, WANG Zhao-hua¹, MA Shi-hua²

(1. School of Management and Economics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China; 2. School of Management, Huazhong University of Technology, Wuhan 430074, China. Correspondent: LI Guo, E-mail: lg4229682@163.com)

Abstract: According to actual operation of supply chain, the delivery model of agreement on lead time based on delivery windows is established, which is a Stackelberg game controlled by manufacturer. The optimal decision of each side is analyzed. Then controllable lead time model is established based on cost sharing. In the Stackelberg game controlled by distributor, the optimal decision is given. Delivery policy 1 and 2 are compared, and the range of cost sharing coefficient is given. Then cost sharing model with Nash consultation is proposed, based on adapted ideal point method. Finally, the policy 1 and 2 are compared in numerical analysis, which shows that the cost sharing model is effective.

Key words: Delivery policy; Supply chain; Stackelberg game; Adapted ideal point; Nash consultation

1 引言

20世纪90年代以来, 基于时间竞争逐渐成为一种新的竞争模式^[1], 速度已成为战略性的竞争武器^[2]. 基于时间竞争模式, 要求企业不断加强交货期管理以获得持续竞争优势. 正因如此, 越来越多的企业重视与时间相关的订货提前期. 订货提前期即供应商交货期, 是指从下游发出订单到下游收到上游供应的货物时间间隔. 它通常由订单准备、订单递送、供货商提前期、交货期、准备期等部分构成. 缩短提前期可减少安全库存和缺货损失、加速顾客响应、改善顾客服务水平、提高企业竞争力, 因而近年来基于可控提前期的供应链决策问题引起了许多学者的关注.

Liao^[3]最早将提前期分为多个操作时段, 在假定

每个时段内提前期缩短时间和成本为线性关系下, 求解使得总成本最小的提前期. Ouyang^[4]在Liao的基础上, 将订货批量也作为决策变量, 并考虑了缺货回补和缺货损失的情况. Moon^[5]研究了一个连续性的库存系统. Ben-daya^[6]研究了随机库存系统中提前期压缩问题, 并指出了提前期管理与控制的策略. Ryu^[7]建立了一个随机提前期和稳定需求的二重模型. 基于文献[3-7], 学者们从不同角度对可控提前期和订货批量展开了研究, 如Ouyang^[8]和Ben-Day^[9]考虑了供需双方一体化库存决策; Chuang^[10]和Ouyang^[11]考虑了订货成本可变的情况; Pan^[12,13]和Ouyang^[14]考虑了缺货时顾客流失比例问题; Peter^[15], Liang^[16]和Jha^[2]等考虑了服务水平约束下, 使得库存成本最小的最优批量

收稿日期: 2009-09-03; 修回日期: 2010-05-06.

基金项目: 国家自然科学基金项目(70773008, 70971036); 国家863计划项目(2006AA04Z153).

作者简介: 李果(1980—), 男, 湖南怀化人, 讲师, 博士, 从事供应链与物流管理、生产运作与管理的研究; 王兆华(1974—), 男, 山东泰安人, 教授, 博士生导师, 从事绿色供应链与逆向物流管理等研究.

和提前期; Lee 等^[17]考虑了再订购折扣和可控订货成本等因素的可控提前期库存问题; Lin^[18,19]考虑了订货成本可控和再订购折扣的库存优化问题。

上述文献的研究具有下列特点: 首先, 多数文献的研究对象为单一节点或集中库存系统, 然而根据文献 [20] 的统计, 我国下游厂商因上游厂商不能及时足量供货而不满意者占 18.35%, 很不满意者占 2.33%。可见以单一节点研究库存系统并不能真实反映供货状况, 因此研究两级供应链节点供货以及库存优化是比较重要的。其次, 在交货期策略上, 上述研究都假设交货期决策权由下游控制, 缩短提前期费用完全由下游支付。然而在现实的供应链采购中, 为了获得更好的供应链收益, 上下游按照一定比例承担交货期压缩费用的情形是比较常见的^[21]。

在供应链的实际运作中, 常见有下列两种不同交货期策略, 策略 1 为基于交货窗的协议交货期交货策略, 即制造商根据自己交货能力与分销商要求, 让分销商指定一个最早和最晚交货期, 最早最晚交货期构成了交货窗^[22]。在交货窗内, 制造商先决定最优的交货期; 然后分销商决定订货批量的交货策略, 交货窗内交货期的缩短不需要交货期压缩费用。策略 2 为基于费用分担的可控交货期策略, 即分销商决定订货批量和提前期, 制造商决定生产批量, 缩短提前期的费用按一定比例由上下游分担的交货策略。基于上述研究的局限和实际运作的情况, 本文将研究两级供应链库存优化与协调问题。

2 基于交货窗的协议交货期交货策略

2.1 模型描述与参数定义

考虑一个单制造商-单分销商的两级周期性补货系统。分销商采用连续检查的 (Q, r) 策略, 当库存水平小于订货点 r 时, 其向制造商发出 Q 单位的订货量, 制造商以生产率 P 生产 mQ 件产品, 分 m 次以批量 Q 交付。分销商单位时间内的顾客需求服从 (μ, σ^2) 的正态分布, 其概率密度函数为 $f(\cdot)$ 。分销商允许缺货, 其一个订购周期内期望缺货量为 $B(r)$, 则有 $B(r) = E(x - r)^+, (x - r)^+ = \max(x - r, 0)$ 。对于缺货量 $B(r)$, 有 $\beta(0 \leq \beta \leq 1)$ 比例的顾客愿意等到下次到货, $1 - \beta$ 比例的顾客流失。分销商对愿意等待的顾客实行再订购折扣策略, 单位产品的毛边际率为 π_0 , 单位再订购产品的价格折扣量为 $\pi_x(0 < \pi_x \leq \pi_0)$ 。决策变量 β 的大小与 π_x 线性相关, 即 $\beta = \beta_0 \pi_x / \pi_0$, 其中 $\beta_0(0 \leq \beta \leq \beta_0 \leq 1)$ 为愿意等待补货的顾客最大比例。

交货期的最终确定由制造商和分销商协议解决。在交货策略 1 下, 分销商的最晚交货期为 L_w , 制造商的最早交货期为 L_m , 存在 $L_m \leq L_w$ 。制造商在交货

窗 $[L_m, L_w]$ 内决定最优的交货时间以使得自己的库存成本最小化, 交货窗内交货期的减小不需要成本投入。在交货策略 2 下, 制造商公布最早交货期 L_m , 分销商决定订货批量, 交货期缩短费用由两者共同协议分担。制造商最早交货期 L_m 由 n 个相互独立的操作时段构成, 每个操作时段的最短持续时间为 t_j , 正常持续时间为 T_j , 缩短单位时间的交货期成本为 a_j , 在这里排序使 $a_1 \leq a_2 \leq \dots \leq a_n$ 。定义 $L_m \equiv \sum_{j=1}^n T_j(j =$

$1, 2, \dots, n)$ 。令 $L_i = L_c - \sum_{j=1}^i (T_j - t_j)$ 表示前 i 个时段被压缩到最短时间的交货期, 则当交货期在区间 $[L_i, L_{i-1}]$ 时, 缩短交货期的成本为

$$C(L) = a_i(L_{i-1} - L) + \sum_{j=1}^{i-1} a_j(T_j - t_j). \quad (1)$$

其他参数定义如下: s 为分销商每次订货固定成本, A 为制造商每次生产的准备成本, h_m 为零部件在制造商单位库存费用, h_v 为零部件在供应商单位库存费用, β 为 Backorder 比例系数, λ 为分销商承担交货期压缩费用的比例, 简称交货期成本分担系数。

2.2 制造商和分销商的库存模型

2.2.1 分销商库存成本模型

分销商在单位时间内的总成本包括订货成本、库存成本和缺货成本。

1) 订货成本。分销商每次订货成本为 s , 单位时间需求量为 μ , 每次订货量为 Q , 则单位时间的订货成本为 $s \frac{\mu}{Q}$ 。

2) 缺货成本。分销商一个订货周期内的缺货量为

$$B(r) = \int_r^\infty (x - r) f(x) dx = \sigma \sqrt{L} \omega(k), \quad (2)$$

其中 $\omega(k) = \phi(k) - k[1 - \Phi(k)]$, ϕ 和 Φ 分别为标准正态分布的概率密度函数和分布函数。

当发生缺货时, 给愿意等待下次补货的顾客实行再订购折扣策略, 其单位折扣量为 π_x , 每个周期的折扣成本为 $\pi_x \beta B(r)$; 每个周期的缺货损失成本为 $\pi_0(1 - \beta)B(r)$, 则分销商单位时间的期望缺货成本为 $\mu[\pi_x \beta + \pi_0(1 - \beta)]B(r)/Q$ 。

3) 库存成本。 β 为顾客愿意等待下次到货的比率, 则 $\beta B(r)$ 表示的是每周期期望延期交货的数量, $(1 - \beta)B(r)$ 为每周期期望销售损失的数量。在每个周期期末, 期望净库存量为 $E[x - r]^+ + (1 - \beta)B(r)$; 每个周期期初, 当订货量 Q 到达时, 期望净库存水平达到最高, 即 $Q + E[x - r]^+ + (1 - \beta)B(r)$ 。因此, 每个周期内的期望库存量可近似为

$$I_w \approx \frac{1}{2}[Q + E[x - r]^+ + (1 - \beta)B(r) + E[x - r]^+ + (1 - \beta)B(r)] =$$

$$\frac{Q}{2} + k\sigma\sqrt{L} + (1 - \beta)B(r). \quad (3)$$

因此分销商单位时间的期望总成本为

$$ECW = s\frac{\mu}{Q} + h_r \left[\frac{Q}{2} + k\sigma\sqrt{L} \right] + \left[h_r \left(1 - \frac{\beta_0}{\pi_0} \pi_x \right) + \frac{\mu}{Q} \left(\frac{\beta_0}{\pi_0} \pi_x^2 + \pi_0 - \beta_0 \pi_0 \right) \right] \sigma\sqrt{L}\omega(k). \quad (4)$$

2.2.2 制造商库存成本模型

制造商的成本包括生产准备成本和库存成本。

1) 生产准备成本. 制造商每批次生产准备成本为 A , 生产批量为 mQ , 单位时间的平均需求量为 μ , 则制造商的一个生产周期为 $T_m = mQ/\mu$, 因此制造商单位时间期望生产准备成本为 $\mu A/mQ$.

2) 库存成本. 制造商以生产率 P 生产 mQ 件零部件, 分 m 次以批量 Q 交付, 则制造商的平均库存水平为^[14]

$$I_m = \frac{Q}{2} \left[m \left(1 - \frac{\mu}{P} \right) - 1 + \frac{2\mu}{P} \right]. \quad (5)$$

由此可得制造商在单位时间的期望总成本为

$$ECM = A\frac{\mu}{mQ} + h_m \frac{Q}{2} \left[m \left(1 - \frac{\mu}{P} \right) - 1 + \frac{2\mu}{P} \right]. \quad (6)$$

2.3 基于交货策略 1 的库存优化分析

当实施交货策略 1 后, 制造商首先给定交货窗 $[L_m, L_w]$ 内协议交货期 L_c , 分销商决定订货批量 Q 和再订购折扣 π_x , 制造商再决定生产批量 m . 此问题可归结为一类 Stackelberg 主从对策问题, 即制造商寻求成本最小化的协议交货期 L_c 和生产批量 m , 分销商寻求成本最小化的订货批量 Q 和再订购折扣 π_x . 当给定一个协议交货期 $L_c \in [L_m, L_w]$ 时, 有:

定理 1 对于给定的协定交货期 L_c , 分销商单位时间总成本 $ECW(Q, \pi_x)$ 为 Q 和 π_x 的联合凸函数, 存在最优的 Q^* 和 π_x^* 使得 $ECW(Q, \pi_x)$ 最小.

证明 对 $ECW(Q, \pi_x)$ 中的决策变量 Q 和 π_x 求导, 则

$$\frac{\partial ECW}{\partial Q} = -s\frac{\mu}{Q^2} + \frac{h_r}{2} - \frac{\mu}{Q^2} \left(\frac{\beta_0}{\pi_0} \pi_x^2 + \pi_0 - \beta_0 \pi_0 \right) \sigma\sqrt{L_c}\omega(k), \quad (7)$$

$$\frac{\partial ECW}{\partial \pi_x} = -\frac{\beta_0}{\pi_0} h_r \sigma\sqrt{L_c}\omega(k) + \frac{\mu}{Q} \left[\frac{2\beta_0}{\pi_0} \pi_x - \beta_0 \right] \sigma\sqrt{L_c}\omega(k). \quad (8)$$

由 $\frac{\partial^2 ECW}{\partial Q^2} > 0$, $\frac{\partial^2 ECW}{\partial \pi_x^2} > 0$, 且 Hessian 矩阵

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial^2 ECW}{\partial Q^2} & \frac{\partial^2 ECW}{\partial Q \partial \pi_x} \\ \frac{\partial^2 ECW}{\partial \pi_x \partial Q} & \frac{\partial^2 ECW}{\partial \pi_x^2} \end{bmatrix} > 0, \quad (9)$$

即可得证. \square

定理 2 当分销商单位时间总成本 $ECW(Q, \pi_x)$ 存在最优的 Q^* 和 π_x^* 时, 分销商允许交货期最大

值为 $L_{\max} = \left[\frac{2\mu\pi_0}{h_r\beta_0\sigma\omega(k)} \right]^2$, 且 $L_w \leq L_{\max}$.

证明 令式 (8) 等于 0, 则

$$\pi_x^* = \frac{h_r Q_c^*}{2\mu} + \frac{\pi_0}{2}. \quad (10)$$

然后令式 (7) 为 0 并将式 (10) 带入其中, 则

$$Q_c^* = \sqrt{\frac{2\mu \left[s + \pi_0 \left(1 - \frac{\beta_0}{4} \right) \sigma\sqrt{L_c}\omega(k) \right]}{h_r \left[1 - \frac{h_r\beta_0}{2\mu\pi_0} \sigma\sqrt{L_c}\omega(k) \right]}}, \quad (11)$$

为保证协议交货期下 $Q_c^* > 0$, 由 $1 - \frac{h_r\beta_0}{2\mu\pi_0} \sigma\sqrt{L_c}\omega(k) > 0$, 解得 $L_c < \left[\frac{2\mu\pi_0}{h_r\beta_0\sigma\omega(k)} \right]^2$, 则

$$L_{\max} = \left[\frac{2\mu\pi_0}{h_r\beta_0\sigma\omega(k)} \right]^2. \quad (12)$$

由此, 定理 2 得证. \square

定理 3 当协议交货期 L_c 在区间 $[0, L_w]$ 上减小时, 分销商的最优订货批量 Q_c^* 是减小的.

证明 由式 (11) 可知

$$Q_c^* = \left[\left[2\mu \left[\frac{s}{\sqrt{L}} - \frac{sh_r\beta_0\sigma\omega(k)}{2\mu\pi_0} + \frac{sh_r\beta_0\sigma\omega(k)}{2\mu\pi_0} + \pi_0 \left(1 - \frac{\beta_0}{4} \right) \sigma\omega(k) \right] \right] / h_r \left[\frac{1}{\sqrt{L}} - \frac{h_r\beta_0\sigma\omega(k)}{2\mu\pi_0} \right] \right]^{1/2} = \left[\frac{2\mu s}{h_r} + \left[\frac{sh_r\beta_0\sigma\omega(k)}{2\mu\pi_0} + \pi_0 \left(1 - \frac{\beta_0}{4} \right) \sigma\omega(k) \right] / h_r \left[\frac{1}{\sqrt{L}} - \frac{h_r\beta_0\sigma\omega(k)}{2\mu\pi_0} \right] \right]^{1/2}. \quad (13)$$

当 $L_c \in (0, L_w]$, L_c 减小时, $\frac{1}{\sqrt{L_c}} - \frac{h_r\beta_0\sigma\omega(k)}{2\mu\pi_0}$ 将增大, $\left[\frac{sh_r\beta_0\sigma\omega(k)}{2\mu\pi_0} + \pi_0 \left(1 - \frac{\beta_0}{4} \right) \sigma\omega(k) \right] / h_r \left[\frac{1}{\sqrt{L_c}} - \frac{h_r\beta_0\sigma\omega(k)}{2\mu\pi_0} \right]$ 将减小, 即得证. \square

接下来对制造商进行分析. 由于 $\frac{\partial ECM^2(m)}{\partial m^2} > 0$, 可知 $ECM(m)$ 是关于 m 的凸函数, 令 $\frac{\partial ECM(m)}{\partial m} = 0$, 则最佳生产批量的决策为

$$m^* = \frac{1}{Q_c^*} \sqrt{\frac{2AP\mu}{h_m(P - \mu)}}. \quad (14)$$

将式 (14) 带入 (6) 中, 则制造商最优成本为

$$ECM(m^*) = \sqrt{2h_m A\mu \left(1 - \frac{\mu}{P} \right)} + h_m \frac{Q_c^*}{2} \left[\frac{2\mu}{P} - 1 \right]. \quad (15)$$

由式 (15) 可知, 在交货期策略 1 下, 制造商的最优总成本和分销商的订货批量有关, 而分销商的订货批量又与制造商给出的协议交货期 $L_c \in [L_m, L_w]$ 有关. 制造商可通过调整 L_c 来改变分销商的最优订货批量 Q_c^* , 因此存在下列情况:

1) 当 $1 > \mu/P \geq 1/2$ 时, 式 (15) 中第 2 项系数 $2\mu/P - 1 > 0$. 在交货期策略 1 下, 制造商和分销商的

最终 Stackelberg 对策博弈的结果为: 制造商将在交货窗 $[L_m, L_w]$ 选择交货期的下限 L_m , 使得 $L_c = L_m$.

2) 当 $0 < \mu/P < 1/2$ 时, 制造商和分销商 Stackelberg 对策博弈的结果将使得制造商选择交货窗 $[L_m, L_w]$ 的上限 L_w , 使得 $L_c = L_w$.

可见, 制造商可通过改变交货窗内的协议交货期 L_c 的大小, 间接地调整分销商的最优订货批量.

3 基于费用分担的可控交货期交货策略

在实施交货策略 2 后, 分销商先决定交货期和订货批量, 制造商决定生产批量. 在交货期 $[0, L_m]$ 内, 交货期压缩成本由双方共同承担, 交货策略 2 是分销商主导的一个 Stackelberg 主从对策.

3.1 分销商的库存决策分析

在引入交货期压缩成本 $C(L)$ 后, 分销商承担压缩成本 $\lambda C(L)$, 制造商承担 $(1 - \lambda)C(L)$, 则分销商单位时间期望总成本为

$$ECW_l(Q, \pi_x, L) = s \frac{\mu}{Q} + h_r \left[\frac{Q}{2} + k\sigma\sqrt{L} \right] + \frac{\mu\lambda}{Q} C(L) + \left[h_r \left(1 - \frac{\beta_0}{\pi_0} \pi_x \right) + \frac{\mu}{Q} \left(\frac{\beta_0}{\pi_0} \pi_x^2 + \pi_0 - \beta_0 \pi_0 \right) \right] \sigma\sqrt{L}\omega(k), \quad (16)$$

其中 $\lambda \in [0, 1]$. 对 $ECW_l(Q, \pi_x, L)$ 分别求关于 Q, π_x, L 的二次偏导, 有

$$\frac{\partial^2 ECW_l^2(Q, \pi_x, L)}{\partial Q^2} > 0, \quad (17)$$

$$\frac{\partial^2 ECW_l^2(Q, \pi_x, L)}{\partial \pi_x^2} > 0, \quad (18)$$

$$\frac{\partial^2 ECW_l^2(Q, \pi_x, L)}{\partial L^2} < 0, \quad (19)$$

且

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial^2 ECW_l^2(Q, \pi_x, L)}{\partial Q^2}, & \frac{\partial^2 ECW_l^2(Q, \pi_x, L)}{\partial Q \partial \pi_x} \\ \frac{\partial^2 ECW_l^2(Q, \pi_x, L)}{\partial \pi_x \partial Q}, & \frac{\partial^2 ECW_l^2(Q, \pi_x, L)}{\partial \pi_x^2} \end{bmatrix} > 0.$$

由上可知, $ECW_l(Q, \pi_x, L)$ 是关于 Q, π_x 的联合凸函数. 而对于固定的 Q 和 π_x , $ECW_l(Q, \pi_x, L)$ 在 $L \in (L_i, L_{i-1})$ 上具有凹性. 令 $\partial ECW_l / \partial \pi_x = 0$, 有

$$\pi_x^* = \frac{h_r Q_c^*}{2\mu} + \frac{\pi_0}{2}. \quad (20)$$

令 $\partial ECW_l / \partial Q = 0$, 并将式 (20) 带入其中, 有

$$Q_l = \left[\frac{2\mu \left[s + \pi_0 \left(1 - \frac{\beta_0}{4} \right) \sigma\sqrt{L}\omega(k) + \lambda C(L) \right]}{h_r \left[1 - \frac{h_r \beta_0}{2\mu\pi_0} \sigma\sqrt{L}\omega(k) \right]} \right]^{1/2}. \quad (21)$$

由式 (21) 可以看出, Q_l 与交货期的长短有关. 当 $C(L) = 0$ 时, 有 $L = L_m = \sum_{j=1}^n T_j$. 当交货期压缩为最

小时, 有 $L = \sum_{j=1}^n t_j$, 这时压缩成本为 $\lambda \sum_{j=1}^n a_j (T_j - t_j)$,

存在 $Q_{\min} \leq Q_l \leq Q_{\max}$, 其中

$$Q_{\min} = \left[\frac{2\mu \left[s + \pi_0 \left(1 - \frac{\beta_0}{4} \right) \sigma \sqrt{\sum_{j=1}^n t_j \omega(k)} \right]}{h_r \left[1 - \frac{h_r \beta_0}{2\mu\pi_0} \sigma \sqrt{\sum_{j=1}^n t_j \omega(k)} \right]} \right]^{1/2}, \quad (22)$$

$$Q_{\max} = \left[\frac{2\mu \left[s + \pi_0 \left(1 - \frac{\beta_0}{4} \right) \sigma \sqrt{\sum_{j=1}^n T_j \omega(k)} \right]}{h_r \left[1 - \frac{h_r \beta_0}{2\mu\pi_0} \sigma \sqrt{\sum_{j=1}^n T_j \omega(k)} \right]} + \frac{2\mu \left[\lambda \sum_{j=1}^n a_j (T_j - t_j) \right]}{h_r \left[1 - \frac{h_r \beta_0}{2\mu\pi_0} \sigma \sqrt{\sum_{j=1}^n T_j \omega(k)} \right]} \right]^{1/2}. \quad (23)$$

因 $\partial^2 ECW_l / \partial L^2 < 0$, 当 Q 和 π_x 确定时, ECW_l 在时段 (L_i, L_{i-1}) 上具有凹性, 所以 ECW_l 的最小值必然在时段的边界上取得. 为了求得最优的 $ECW_l(Q, \pi_x, L)$, 本文给出以下算法:

- 1) 对单位时间的交货期成本 a_j 进行排序, 使得 $a_1 \leq a_2 \leq \dots \leq a_n$, 初始化 $j = 0$, 则 $a_0 = 0$;
- 2) 令 $j = j + 1$;
- 3) 对于 $j = 1, 2, \dots, n$, 根据公式计算对应的交货期区段 (L_i, L_{i-1}) 的 Q_j , 令 $Q_j = Q$;
- 4) 若 $Q_j \leq Q_{i-1}$, 则令 $Q_j = Q_{i-1}$; 若 $Q_i \leq Q_j$, 则令 $Q_j = Q_i$;
- 5) 根据得到的 Q_j 计算对应的再订购折扣 π_{xj} , 将得到的 Q_j 和 π_{xj} 带入到公式, 计算 $ECW_l(Q_j, \pi_{xj}, L_j)$;
- 6) 若 $j \geq n$, 则进入 8); 若 $j < n$, 则返回到 2);
- 7) 令

$$ECW_l^*(Q_l^*, \pi_{x,l}^*, L^*) = \text{Min}\{ECW_l(Q_j, \pi_{xj}, L_j)\},$$

$$j = \{0, 1, \dots, n\};$$

- 8) 输出 $Q_l^*, \pi_{x,l}^*, L^*$ 为对应的最优解.

3.2 制造商的库存决策分析

在交货期策略 2 下, 制造商的成本函数为

$$ECW_l(m) = A \frac{\mu}{m Q_l^*} + h_m \frac{Q_l^*}{2} \left[m \left(1 - \frac{\mu}{P} \right) - 1 + \frac{2\mu}{P} \right] + h_m \frac{L^*}{\mu} + (1 - \lambda) \frac{\mu}{Q_l^*} C(L^*). \quad (24)$$

定理 4 制造商在成本压缩后的最优正整数解的范围为

$$m^*(m^* - 1) \leq \frac{2A\mu}{h_m Q_l^{*2} \left(1 - \frac{\mu}{P}\right)} \leq m^*(m^* + 1).$$

证明 忽略式(24)中不含参数 m 的式子, 令 $Y(m) = A \frac{\mu}{mQ} + h_m m \frac{Q}{2} \left(1 - \frac{\mu}{P}\right)$. 当 m^* 为最优正整数的解时, 其必须满足 $Y(m^*) \leq Y(m^* - 1)$ 且 $Y(m^*) \leq Y(m^* + 1)$, 即

$$m^*(m^* - 1) \leq \frac{2A\mu}{h_m Q_l^{*2} \left(1 - \frac{\mu}{P}\right)} \leq m^*(m^* + 1). \quad (25)$$

由此, 定理 4 得证. \square

4 费用分担机制与协调策略

4.1 基于交货期策略比较的费用分担机制

在两种不同的交货策略下, 制造商和分销商之间都存在着 Stackelberg 对策博弈. 在交货策略 1 中, 上游制造商主导决定交货期; 而在策略 2 中, 下游分销商主导决定交货期. 为使双方协调且接受策略 2, 费用分担系数 λ 必须满足

$$\begin{cases} \min \text{ECM}_l(Q, \pi_x, L) \leq \min \text{ECM}(Q, \pi_x), \\ \min \text{ECW}_l(Q, \pi_x, L) \leq \min \text{ECW}(Q, \pi_x). \end{cases} \quad (26)$$

定义 $\min \text{ECM}_l(Q, \pi_x, L)$ 的最优解为 $Q_l^*, \pi_{x,l}^*, L^*$; $\min \text{ECW}(Q, \pi_x)$ 的最优解为 Q^*, π_x^*, L_c . 令

$$\begin{aligned} F_1(\lambda) &= \Delta \text{ECW}(\lambda), \quad F_2(\lambda) = \Delta \text{ECW}(\lambda), \\ \lambda_1 &= \min\{\{\lambda | F_1(\lambda) \geq 0\}\}, \quad \lambda_1^* = \max(0, \lambda_1) \\ \lambda_2 &= \min\{\{\lambda | F_2(\lambda) \geq 0\}\}, \quad \lambda_2^* = \min(1, \lambda_2), \end{aligned}$$

则分销商接受的成本分担系数范围为 $\lambda_1^* \leq \lambda \leq \lambda_2^*$.

4.2 基于改进理想点法的协调策略

成本分担系数 λ 对交货策略 2 的制造商和分销商的成本有着显著影响. 因此, 如何确定合理的成本分担系数, 使制造商和分销商在实施交货策略 2 后均得到改善, 是需要解决的关键问题. 在实际运作中, $\lambda \in (\lambda_1^*, \lambda_2^*)$ 的取值由双方协商确定, 因此本文提出一种基于改进理想点法的 Nash 协调策略.

令 d_m, d_w 分别表示制造商和分销商距离理想点的距离, $\Delta \text{ECM}(\lambda)$ 和 $\Delta \text{ECW}(\lambda)$ 分别表示制造商和分销商在实施策略 2 后成本节约的实际值, $\max \Delta \text{ECM}(\lambda)$ 和 $\max \Delta \text{ECW}(\lambda)$ 分别表示制造商和分销商在实施交货策略 2 后的理想值. 令

$$\begin{cases} d_m = [\max \Delta \text{ECM}(\lambda)] - \Delta \text{ECM}(\lambda), \\ d_w = [\max \Delta \text{ECW}(\lambda)] - \Delta \text{ECW}(\lambda); \end{cases} \quad (27)$$

s.t. $\lambda \in (\lambda_1^*, \lambda_2^*)$.

当成本节约越大时, d_m 和 d_w 越小. 而现实中 $\lambda \in (\lambda_1^*, \lambda_2^*)$ 的具体取值受买卖双方的谈判实力、技巧、

所拥有的信息和风险因素的影响. 令影响分销商和制造商谈判的综合因素值分别为 θ 和 $1 - \theta$, 则基于改进理想点法的 Nash 协调费用分担模型为

$$V_{\text{Nash}} = \max \left\{ \left(\frac{1}{d_w}\right)^\theta \cdot \left(\frac{1}{d_m}\right)^{1-\theta} \right\}. \quad (28)$$

当 d_m 和 d_w 越小时, 其倒数将会增大, 基于改进的理想点法的 Nash 协调策略将会确定最优的费用分担比例 $\lambda^*(\lambda^* \in (\lambda_1^*, \lambda_2^*))$.

5 仿真分析

本文采用 Pan^[12] 的数据: $\mu = 1\,000$ 单位/年, $s = 25$ 元/次, $h_m = 4$ 元/(单位·年), $h_w = 5$ 元/(单位·年), $\pi_0 = 150$ 元/单位, $\delta = 7$ 单位/周, $P = 3\,200$ 单位/年, $A = 400$ 元/次, 同时参照 Ouyang^[11] 固定安全系数模型, 服务水平为 0.9, 相应的 $k = 1.28$. 交货期的构成如表 1 所示.

表 1 制造商最短交货期 L_m 的组成部分

操作时段 j	交货期构成			L_i	$C(L_i)$
	正常作业 时间 T_j/d	最短作业 时间 t_j/d	单位赶工 成本/元		
1	20	4	2	32	32
2	16	6	5.1	22	83
3	12	8	32.1	18	211.4

5.1 不同交货策略下供应链库存优化与比较

在交货期策略 2 下, 当 $\lambda = 1, \beta_0$ 和 L 变化时, 分销商和制造商的参数和总成本值如表 2 所示.

表 2 基于交货期策略 2 的最优解及参数设置

β_0	L	$Q_l, \pi_{x,l}$	ECW_l	m_l	ECW_l
1	32	122.11, 81.27	2 627.8	4	1 883.1
	22	119.32, 78.58	2 582.6*	4	1 845.2*
	18	123.87, 82.01	2 678.2	4	1 890.5
0.75	32	124.68, 82.83	2 683.8	4	1 932.5
	22	123.45, 81.68	2 629.1*	4	1 895.9*
	18	125.12, 82.95	2 705.7	4	1 905.7
0.5	32	127.15, 83.66	2 725.5	4	2 045.3
	22	124.91, 82.85	2 689.3*	4	1 920.6*
	18	128.34, 84.23	2 789.9	4	1 983.7
0.25	32	130.29, 85.21	2 793.1	4	2 103.2
	22	127.32, 83.71	2 747.4*	4	1 995.7*
	18	131.87, 86.05	2 845.6	4	2 039.2
0	32	133.58, 87.96	2 864.3	4	2 161.4
	22	130.71, 85.34	2 807.8*	4	2 034.2*
	18	135.21, 88.13	2 922.5	4	2 102.8

当 $\lambda = 1, \beta_0$ 变化时, 本文比较了交货期策略 1 和策略 2 下分销商和制造商的最优解, 如表 3 所示.

由表 3 的比较可以看出, 当 $\lambda = 1, \beta_0$ 变化时, 交货期策略 2 下的分销商和制造商的最优成本均比交货期策略 1 下的最优成本小.

当 $\beta_0 = 1, \lambda$ 变化时, 本文得到交货期压缩下分销商和制造商的最优决策和参数设置, 如表 4 所示.

表 3 不同交货策略下分销商和制造商的最优解

β_0	交货期策略 1			
	Q^*, π_x^*	ECW*	m^*	ECW*
1	132.29, 87.82	2573.5	3	1862.7
0.75	137.65, 89.74	2668.7	3	1947.8
0.5	143.73, 92.12	2763.8	3	2056.2
0.25	149.01, 94.46	2827.3	3	2114.8
0	153.89, 96.92	2901.6	3	2175.2

β_0	交货期策略 2			
	$Q_l^*, \pi_{x,l}^*, L^*$	ECW $_l^*$	m_l^*	ECW $_l^*$
1	119.32, 78.58, 22	2582.6	4	1845.2
0.75	123.45, 81.68, 22	2629.1	4	1895.9
0.5	124.91, 82.85, 22	2689.3	4	1920.6
0.25	127.32, 83.71, 22	2747.4	4	1995.7
0	130.71, 85.34, 22	2807.8	4	2034.2

表 4 λ 变化下的基于交货期策略 2 的分销商和制造商的最优解

λ	$Q_l^*, \pi_{x,l}^*, L^*$	ECW $_l^*$	m_l^*	ECW $_l^*$
1	119.32, 78.58, 22	2582.6	4	1845.2
0.8	116.59, 77.92, 22	2562.5	4	1832.6
0.6	112.86, 77.03, 22	2543.2	4	1842.9
0.4	110.07, 76.95, 22	2529.1	4	1857.8
0.2	107.53, 76.52, 18	2496.8	4	1874.6
0	105.18, 76.31, 18	2481.4	4	1900.1

由表 4 可以看出, 当 $\lambda = 1$ 时, 策略 2 下分销商的最优成本值 ECW $_l^*$ (2582.6) 大于策略 1 下的最优成本值 ECW*(2573.5), 这时分销商将不会接受策略 2. 同理, 当 $\lambda = 0$ 和 $\lambda = 0.2$ 时, 制造商将不会接受策略 2. 本文得到策略 2 优于策略 1 下的 λ 的范围为 [0.34, 0.92].

5.2 基于改进理想点法的双边协调

为了确定合理的 λ 值, 使双方采用策略 2 后有较好的协调, 则有

$$\Delta ECW(\lambda) = -102.6\lambda^2 + 164.3\lambda - 33,$$

$$\Delta ECW(\lambda) = -0.5\lambda^2 - 101.3\lambda + 90.7.$$

当 $\lambda = 0.34$ 时, $\max \Delta ECW(\lambda) = 56.2$; 当 $\lambda = 0.75$ 时, $\max \Delta ECW(\lambda) = 32.5$. 因此, 根据式 (27), 制造商和分销商距离理想点的距离 d_m 和 d_w 分别为

$$\begin{cases} d_m = 102.6\lambda^2 - 164.3\lambda + 65.8, \\ d_w = 0.5\lambda^2 + 101.3\lambda - 34.5. \end{cases}$$

根据式 (28) 可以得到该数例基于改进理想点的 Nash 协调费用分担模型 (V_{Nash}) 为

$$\max \left\{ \left(\frac{1}{0.5\lambda^2 + 101.3\lambda - 34.5} \right)^\theta, \left(\frac{1}{102.6\lambda^2 - 164.3\lambda + 65.8} \right)^{1-\theta} \right\}.$$

当 $\lambda \in [0.34, 0.92]$ 时, 与其相应的谈判能力范围 $\theta \in [0.34, 0.92]$, 由此本文得到基于改进理想点的 Nash 协调费用分担模型 V_{Nash} 与谈判能力 θ 和费用分担系数 λ 的变化关系图, 如图 1 所示. 在不同的特定谈判能力下, λ 变化时, 模型值总存在最大值. 当 $\lambda = 0.82, \theta = 0.34$ 时, 基于改进理想点的 Nash 协调费用分担模型有最大值.

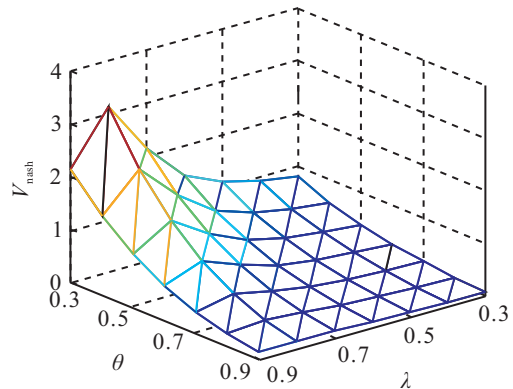


图 1 协调模型值与谈判能力、费用分担系数变化趋势

6 结 论

本文研究和分析了现实中两种不同交货期策略下两级供应链库存优化与协调问题. 通过分析和证明, 得出以下结论:

1) 在基于交货窗的协议交货期交货策略 1 下, 供应链库存优化决策是个以制造商为主的 Stackelberg 主从对策, 分销商将根据自己的最优决策决定交货窗的最晚交货期 L_{max} , 而制造商决定交货窗内具体的交货期. 当 $1 > \mu/P \geq 1/2$ 时, 制造商将在交货窗 $[L_m, L_w]$ 选择交货期的下限 L_m 交货; 而当 $0 < \mu/P < 1/2$ 时, 制造商将选择交货窗 $[L_m, L_w]$ 的上限交货.

2) 在基于费用分担的可控交货期策略 2 下, 库存优化是一个以分销商为主的 Stackelberg 主从对策, 分销商存在最优订货批量和再订购折扣, 而制造商存在最优生产批量范围.

3) 存在一个费用分担系数 λ 范围, 在此范围内, 交货策略 2 优于交货策略 1. 在此基础上, 本文提出了基于改进理想点的 Nash 协商的交货期费用分担模型. 数值分析对交货期策略 1 和策略 2 的优化进行了比较分析, 在某个特定的费用分担系数范围内, 策略 2 优于策略 1.

参考文献(References)

[1] Pine B. Mass customization: The new frontier in business competition[M]. Boston: Harvard Business School Press, 1993.

[2] Jha J K, Shanker K. Two-echelon supply chain inventory model with controllable lead time and service level

- constraint[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2009, 57(3): 1096-1104
- [3] Liao C J, Shyu C H. An analytical determination of lead time with normal demand[J]. *Int J of Operations Production Management*, 1991, 11(9): 72-78.
- [4] Ouyang L Y, Yeh N C, Wu K S. Mixture inventory model with backorders and lost sales for variable lead time[J]. *J of the Operational Research Society*, 1996, 47(6): 829-832.
- [5] Moon I, Choi S. A note on lead time and distributional assumptions in continuous review inventory models[J]. *Computers & Operations Research*, 1998, 25(11): 1007-1012.
- [6] Ben-daya M, Hariga M. Lead-time reduction in a stochastic inventory system with learning consideration[J]. *Int J of Production Research*, 2003, 41(3): 571-579.
- [7] Ryu S W, Lee K K. A stochastic inventory model of dual sourced supply chain with lead-time reduction[J]. *Int J of Production Economics*, 2003, 81(11): 513-524.
- [8] Ouyang L Y, Wu K S, Ho C H. Integrated vendor buyer cooperative models with stochastic demand in controllable lead time[J]. *Int J of Production Economics*, 2004, 92(3): 255-266.
- [9] Ben Day M, Hariga M. Integrated single vendor single buyer model with stochastic demand and variable lead time[J]. *Int J of Production Economics*, 2004, 92(1): 75-80.
- [10] Chuang B R, Ouyang L Y, Chuang K W. A note on periodic review inventory model with controllable setup cost and lead time[J]. *Computers & Operations Research*, 2004, 31(4): 549-561.
- [11] Ouyang L Y, Chuang B R, Lin Y J. The inter-dependent reductions of lead time and ordering cost in periodic review inventory model with backorder price discount[J]. *Int J of Information and Management Sciences*, 2007, 18(3): 195-208.
- [12] Pan J C, Lo M C, Hsiao Y C. Optimal reorder point inventory model with variable lead time and backorder discount considerations[J]. *European J of Operational Research*, 2004, 158(2): 488-505.
- [13] Pan J C, Hsiao Y C. Integrated inventory models with controllable lead time and backorder discount considerations[J]. *Int J of Production Economics*, 2005, 93(1): 387-397.
- [14] Ouyang L Y, Wu K S, Ho C H. An integrated vendor-buyer inventory model with quality improvement and lead time reduction[J]. *Int J of Production Economics*, 2007, 108(1/2): 349-358.
- [15] Peter C, Yang K L, Chen P S. Improved inventory models with service level and lead time[J]. *Computers & Operations Research*, 2005, 32(2): 285-296.
- [16] Liang S K, Peter C, Yang K L. Improved periodic review inventory model involving lead-time with crashing components and service level[J]. *Int J of Systems Science*, 2008, 39(4): 421-426.
- [17] Lee W C, Wu J W, Lei C L. Computational algorithmic procedure for optimal inventory policy involving ordering cost reduction and back-order discounts when lead time demand is controllable[J]. *Applied Mathematics and Computation*, 2007, 189(1): 186-200.
- [18] Lin Y J. An integrated vendor-buyer inventory model with backorder price discount and effective investment to reduce ordering cost[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2009, 56(4): 1597-1606.
- [19] Lin Y J. Minimax distribution free procedure with backorder price discount[J]. *Int J of Production Economics*, 2008, 111(1): 118-128.
- [20] Frank S, Ma S H, Michael B. Internationalization of logistics systems: How Chinese and German companies enter foreign markets[M]. Berlin: Springer, 2008.
- [21] 李怡娜, 叶飞, 徐学军. 可控提前期供应链库存优化的费用分担模型[J]. *系统工程学报*, 2009, 24(1): 9-17. (Li Y N, Ye F, Xu X J. Cost allocation model for optimizing supply chain in inventory with controllable lead time[J]. *J of Systems Engineering*, 2009, 24(1): 9-17.)
- [22] Corbett, Lawrence M. Delivery windows-a new view on improving manufacturing flexibility and on-time delivery performance[J]. *J of Production and Inventory Management*, 1992, 33(3): 74-80.

(上接第1774页)

- [14] Pourboghra F, Karlsson M. Adaptive control of dynamic mobile robots with nonholonomic constraints[J]. *Computers & Electrical Engineering*, 2002, 28(4): 241-253.
- [15] Dong Wenjie, Huo Wei, Tso S K, et al. Tracking control of uncertain dynamic nonholonomic system and its application to wheeled mobile robots[J]. *IEEE Trans on Robotics and Automation*, 2000, 16(6): 870-874.
- [16] Wang L-X. A course in fuzzy systems and control[M]. London: Prentice Hall, 1997.