

文章编号: 1001-0920(2009)11-1693-04

Downside-risk 测度下闭环供应链 风险控制 and 利润分配机制研究

史成东^{1,2}, 陈菊红¹, 钟麦英³

(1. 西安理工大学 工商管理学院, 西安 710048; 2. 山东理工大学 电气与电子工程学院,
山东 淄博 255091; 3. 北京航空航天大学 自动化科学与电气工程学院, 北京 100083)

摘要: 以由风险中性的制造商与具有下行风险特性的销售商组成的两阶段闭环供应链为背景, 证明了 Downside-risk 测度下的收益共享契约和批量折扣契约不能协调该闭环供应链. 将补偿策略附加到收益共享契约和批量折扣契约, 设计了风险共享契约, 它既能满足下行风险约束, 又能保证供应链参与方利润均有增量, 实现了 Downside-risk 测度下闭环供应链的协调和风险控制. 最后通过实例分析验证了风险共享契约的可行性和有效性.

关键词: 下行风险; 闭环供应链; 风险控制; 利润分配; 补偿策略

中图分类号: F062; F224

文献标识码: A

Risk controlling and profit distributing mechanism in closed-loop supply chain on theory of Downside-risk

SHI Cheng-dong^{1,2}, CHEN Ju-hong¹, ZHONG Mai-ying³

(1. School of Business Administration, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. School of Electric and Electronic Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255091, China; 3. School of Automation Science and Electrical Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China. Correspondent: SHI Cheng-dong, E-mail: scd0211@163.com)

Abstract: The impact of revenue sharing contract and quantity discount contract is studied in the two-echelon closed loop supply chain with a risk-neutral supplier and a Downside-risk-averse retailer, which shows that the two kinds of contracts may not coordinate such a channel on the theory of Downside-risk control. A risk-sharing contract composed of initial contract and return policy is designed, which offers the desired Downside protection to the retailer, provides more profits to the agents, and accomplishes channel coordination. Finally, an application example shows the effectiveness and feasibility of the risk-sharing contract.

Key words: Downside-risk; Closed loop supply chain; Risk controlling; Profit distributing; Return policy

1 引言

随着经济和社会的可持续发展,许多企业已经意识到产品再生产闭环供应链的有效管理不仅能达到生态友好的目标,而且会产生降低资源投入,减少储存和流通成本,提高顾客满意度等一系列直接效益^[1,2]. Gan 等研究了供应商是风险中性、销售商具有 Downside-risk 特性的供应链的协调性问题^[3]. 赵道致等研究了分销商具有 Downside-risk 约束的供应链合作契约的设计问题^[4]. Savaskan 等研究了

制造商负责回收,销售商负责回收和第 3 方物流公司负责回收 3 种情况下的闭环供应链的协调问题^[5]. 邱若臻等在综合考虑制造商和销售商同时负责产品回收两种渠道下,建立了闭环供应链 Stackelberg 主从对策模型,研究了闭环供应链渠道协调策略存在的可能性^[6]. 郭亚军等研究了随机市场需求下,制造商生产产品,零售商在销售产品的同时负责从消费者手中回收旧品的二阶闭环供应链的协调问题^[7]. 葛静燕等提出了基于销售收入和回收

收稿日期: 2008-12-16; 修回日期: 2009-03-19.

基金项目: 国家自然科学基金项目(70602017); 陕西省教育厅科学研究项目(07JK081); 山东省软科学项目(2009RKA173).

作者简介: 史成东(1965—),男,山东沂水人,副教授,博士生,从事系统工程、物流与供应链管理的研究; 陈菊红(1964—),女,陕西富平人,教授,博士生导师,从事工业工程、物流与供应链管理等研究.

费用分享的闭环供应链协调机制^[8].

文献[3,4]研究了 Downside-risk 测度下开环供应链的协调问题,文献[5-8]研究了供应链参与主体风险中性情况下闭环供应链契约协调问题.在此基础上,本文拟探讨制造商负责新产品制造和回收产品再制造,销售商负责产品销售和废品回收,制造商是风险中性,销售商具有下行风险约束的闭环供应链的协调问题.设计了风险共享契约,满足 Downside-risk 测度下的下行风险约束,实现供应链利润的最优化以及制造商和销售商利润的合理分配与优化.

2 Downside-risk 测度模型和集中决策模型

2.1 风险控制模型的建立

Downside-risk 测度下销售商的决策模型为

$$\max E(\Pi_r(q, X)), \tag{1}$$

$$\text{s. t. } P\{\Pi_r(q, X) \leq \alpha\} \leq \beta. \tag{2}$$

式(1)代表销售商的期望利润最大化,式(2)表示下行风险(被定义为完不成目标利润 α 的概率应不大于置信水平 β ^[9]).

2.2 变量与参数

市场需求 X 为随机变量,其概率密度函数为 $f(x)$;分布函数为 $F(x)$, $F(x)$ 连续、可导且可逆; q 为销售商的订购量;产品市场价格为 p ;制造商单位制造成本为 c_m ;回收产品再制造成本为 c_r ;产品批发价为 w ;转移价格(制造商支付销售商回收产品的价格)为 b ;回收产品的价格为 a ;产品回收率(销售商回收产品的数量占生产量 q 的比例)为 θ , $0 \leq \theta \leq 1$,当 $\theta = 1$ 时为逆向供应链.为保证闭环供应链的运作,假设 $a < b$, $c_r < c_m$,且 $c_r + b < c_m$.

2.3 闭环供应链集中决策模型

索寒生等指出,在研究供应链企业间的博弈时,考虑固定的库存成本和缺货费用只能使模型结构复杂,并不能改变问题的本质^[10].因此,为便于分析,本文不考虑残值、超量订购成本(管理成本等)和缺货损失费(机会损失)等.所以集中决策下闭环供应链利润函数为

$$\Pi_x(q, X) = \begin{cases} pX - (c_m(1-\theta)q + c_r\theta q) - a\theta q, & X \leq q; \\ pq - (c_m(1-\theta)q + c_r\theta q) - a\theta q, & X > q. \end{cases} \tag{3}$$

令 $c = c_m(1-\theta) + c_r\theta$ (制造商的平均单位制造成本),则集中决策下闭环供应链的期望利润为

$$\begin{aligned} \pi_x(q) &= E(\Pi_x(q, X)) = \\ &= p \int_0^q xf(x)dx + pq \int_q^\infty f(x)dx - (c + a\theta)q = \\ &= p(q - \int_0^q F(y)dy) - (c + a\theta)q. \end{aligned} \tag{4}$$

最大化式(4),得集中决策下闭环系统的最优订购量(生产量)

$$\hat{q} = F^{-1}\left(\frac{p-c-a\theta}{p}\right). \tag{5}$$

3 Downside-risk 测度下闭环供应链的协调性分析

命题 1 对于任意目标利润 α ,存在一个临界订购数量

$$q^0 = \frac{\alpha}{p-w+(b-a)\theta}. \tag{6}$$

当订购量 $q \leq q^0$ 时,销售商的下行风险为 1;当 $q \geq q^0$ 时,下行风险为 $F((\alpha + wq - (b-a)\theta q)/p)$,是 q 的增函数.

证明 当订购量 $q \leq q^0$ 时, $\min\{q, X\} = q$,销售商利润

$$\begin{aligned} \Pi_r(q, X) &= \\ &= p\min\{q, X\} - wq + (b-a)\theta q = \\ &= (p-w+(b-a)\theta)q \leq \\ &= (p-w+(b-a)\theta)q^0 = \alpha, \end{aligned}$$

因此 $P\{\Pi_r(q, X) \leq \alpha\} = 1$.当 $q \geq q^0$ 时,有

$$P[\{\Pi_r(q, X) \leq \alpha\} \cap \{X > q\}] = 0,$$

因此

$$\begin{aligned} P\{\Pi_r(q, X) \leq \alpha\} &= \\ P\{pX - wq + (b-a)\theta q \leq \alpha\} &= \\ P\left\{X \leq \frac{\alpha + wq - (b-a)\theta q}{p}\right\} &= \\ F\left(\frac{\alpha + wq - (b-a)\theta q}{p}\right). \end{aligned}$$

显然,下行风险与 q 是递增关系. \square

命题 2 对于风险厌恶组合 (α, β) , $\beta > F(q^0)$,销售商的最优订购量

$$q^* = \begin{cases} \hat{q}_r, & F\left(\frac{\alpha + w\hat{q}_r - (b-a)\theta\hat{q}_r}{p}\right) \leq \beta; \\ \frac{pF^{-1}(\beta) - \alpha}{w - (b-a)\theta}, & F(q^0) < \beta < \\ & F\left(\frac{\alpha + w\hat{q}_r - (b-a)\theta\hat{q}_r}{p}\right). \end{cases} \tag{7}$$

\hat{q}_r 满足式(1), $\hat{q}_r = F^{-1}\left(\frac{p-w+(b-a)\theta}{p}\right)$.限于篇幅,证明略.

根据命题 2,收益共享契约下销售商的最优订购量为

$$q^* = \begin{cases} \hat{q}, & F\left(\frac{\alpha + w\hat{q} - (b-a)\theta\hat{q}}{\phi p}\right) \leq \beta; \\ \frac{\phi p F^{-1}(\beta) - \alpha}{w - (b-a)\theta}, & F(q^0) < \beta < \\ & F\left(\frac{\alpha + w\hat{q} - (b-a)\theta\hat{q}}{\phi p}\right). \end{cases} \tag{8}$$

显然,当 $F(\frac{\alpha + \omega\hat{q} - (b-a)\hat{\theta}\hat{q}}{\phi p}) > \beta$ 时,销售商的订购量低于 \hat{q} ,因此闭环供应链不协调.

批量折扣契约下销售商的最优订购量为

$$q^* = \begin{cases} \hat{q}, & F(\frac{\alpha + \omega\hat{q} - (b-a)\hat{\theta}\hat{q}}{p}) \leq \beta; \\ \frac{pF^{-1}(\beta) - \alpha}{\omega - (b-a)\theta}, & F(q^0) < \beta < F(\frac{\alpha + \omega\hat{q} - (b-a)\hat{\theta}\hat{q}}{p}). \end{cases} \quad (9)$$

显然,当 $F(\frac{\alpha + \omega\hat{q} - (b-a)\hat{\theta}\hat{q}}{p}) > \beta$ 时,销售商的订购量低于 \hat{q} ,因此闭环供应链也不协调.

4 风险共享契约

4.1 风险共享契约的设计

风险共享契约包括两部分:一是基本合同,二是附加条款.其中基本合同在本文中是指收益共享契约和批量折扣契约.令 q^* 为基本合同中销售商具有风险厌恶特性 (α_r, β_r) 时的最优订购量,则如式(7)所示,随着风险厌恶程度的增加,销售商的最优订购量不断降低.若 $q^* = \hat{q}$,则闭环供应链是协调的.不失一般性,假设 $q^* < \hat{q}$,则根据式(7),有

$$P\{\Pi_r^0(q^*, X) \leq \alpha_r\} = \beta_r.$$

附加条款主要包括以下 3 部分内容:1) $q^0 < q \leq q^*$, 执行基本合同;2) $q^* \leq q \leq \hat{q}$, 销售商订购量在 q^* 以内的部分执行基本合同,超过 q^* 的部分要支付批发价 w' ,超过 q^* 的部分扣除市场已销售 q^* 后仍未销售完的部分获得补偿 w' ,详见式(10), w' 的取值范围见式(13), w' 的大小取决于二者的博弈能力;3) $q > \hat{q}$,除销售商获得补偿的数量不能超过 $\hat{q} - q^*$ 外,其余条款同 2).

根据以上合同设计,销售商利润函数构造如下:

1) $q^0 < q \leq q^*$, 利润函数为 $\Pi_r^0(q, X)$. 根据命题 2,其期望利润 $E(\Pi_r^0(q, X))$ 小于销售商的最优利润 $E(\Pi_r^0(q^*, X))$,供应链不协调.

2) $q^* \leq q \leq \hat{q}$, 利润函数为

$$\begin{cases} \Pi_r^0(q^*, X), & X \leq q^*; \\ \Pi_r^0(q^*, X) + (p - w')(X - q^*) + (b - a)\theta(q - q^*), & q^* \leq X \leq q; \\ \Pi_r^0(q^*, X) + (p - w')(q - q^*) + (b - a)\theta(q - q^*), & X \geq q. \end{cases} \quad (10)$$

期望利润为

$$E(\Pi_r^0(q^*, X)) + (p - w') \left[\int_{q^*}^q (x - q^*) f(x) dx + (1 - F(q))(q - q^*) \right] + (b - a)\theta(1 - F(q^*))(q - q^*). \quad (11)$$

3) $q > \hat{q}$, 利润函数为

$$\begin{cases} \Pi_r^0(q^*, X) - W'(q - \hat{q}), & X \leq q^*; \\ \Pi_r^0(q^*, X) + (p - w')(X - q^*) - w'[(q - X) - (\hat{q} - q^*)]^+ + (b - a)\theta(q - q^*), & q^* \leq X \leq q; \\ \Pi_r^0(q^*, X) + (p - w')(q - q^*) + (b - a)\theta(q - q^*), & X \geq q. \end{cases} \quad (12)$$

推导过程同 2),“+”代表方括号内取 $\max\{(q - x) - (\hat{q} - q^*), 0\}$ 的值.此时,下行风险

$$\begin{aligned} & P\{\Pi_r(q, X) \leq \alpha_r\} \geq \\ & P[\{\Pi_r(q, X) \leq \alpha_r\} \cap \{X \leq q^*\}] = \\ & P\{\Pi_r^0(q^*, X) - w'(q - \hat{q}) \leq \alpha_r\} > \\ & P\{\Pi_r^0(q^*, X) \leq \alpha_R\} = \beta_r. \end{aligned}$$

因此,销售商下行风险约束条件得不到满足,闭环供应链不协调.

命题 3 为保证有效地实施风险共享契约, w' 的下界和上界分别为

$$\begin{aligned} & \frac{(c + b\theta)(1 - F(q^*))(q - q^*)}{(q - q^*) - \int_{q^*}^q F(x) dx}, \\ & p + \frac{(b - a)\theta(1 - F(q^*))(q - q^*)}{(q - q^*) - \int_{q^*}^q F(x) dx}. \end{aligned} \quad (13)$$

证明 销售商的新增利润为

$$\begin{aligned} \Delta_r(w', q) = & (p - w') \left[\int_{q^*}^q (x - q^*) f(x) dx + (1 - F(q))(q - q^*) \right] + \\ & (b - a)\theta(1 - F(q^*))(q - q^*) \geq 0. \end{aligned}$$

制造商的新增利润为

$$\begin{aligned} \Delta_s(w', q) = & w' \left[\int_{q^*}^q (x - q^*) f(x) dx + (1 - F(q))(q - q^*) \right] - (c + b\theta)(1 - F(q^*))(q - q^*) \geq 0. \end{aligned}$$

而

$$\int_{q^*}^q (x - q^*) f(x) dx + (1 - F(q))(q - q^*) = (q - q^*) - \int_{q^*}^q F(x) dx,$$

从而可得式(13). □

4.2 闭环供应链的协调性分析

定理 1 对于任意风险厌恶组合 (α_r, β_r) , 如果 w' 在式(13) 的范围内,那么风险共享契约能够使闭环供应链协调.

证明 1) 根据式(11) 和命题 3,销售商和制造商的期望利润均高于其基本权益.

2) 如果销售商订购产品的数量为 q^* , 则

$$P\{\Pi_r^0(q^*, X) \leq \alpha_r\} = \beta_r. \quad (14)$$

当销售商订购量 q 为 $q^0 < q \leq q^*$ 和 $q > \hat{q}$ 时, 根据 4.1 节的分析, 闭环供应链不协调. 而当 $q^* \leq q \leq \hat{q}$ 时, 根据式(10), 如果市场需求大于 q^* , 则销售商的利润 $\Pi_r(q, X) > \alpha_r$. 因此

$$P[\{\Pi_r(q, X) \leq \alpha_r\} \cap \{X > q^*\}] = 0.$$

从而 $P\{\Pi_r(q, X) \leq \alpha_r\} = P\{\Pi_r^0(q^*, X) \leq \alpha_r\} = \beta_r$, 满足销售商下行风险约束.

3) 当 $q^* \leq q \leq \hat{q}$ 时, 根据式(11), 销售商的期望利润随着 q 的增大而不断增大. 但需要注意的是: 当 $q > \hat{q}$ 时, 由于合同规定销售商的最大补偿数量为 $\hat{q} - q^*$, 此时销售商不能满足下行风险的约束. 因此, 在风险共享契约的引导下, 销售商订购数量调整为 \hat{q} , 正好满足闭环供应链集中决策下的最优订购量, 从而使闭环供应链期望利润最大, 闭环供应链能够协调. □

4.3 激励和风险分析

风险共享契约下, 由于销售商订购量能够达到最优订购量 \hat{q} , 闭环供应链的利润实现了增加. 销售商由于对订购超过 q^* 部分的未售产品获得了补偿, 在下行风险没有增加的情况下, 其期望利润增加了 $\Delta_r(\omega', \hat{q})$; 制造商由于采取补偿策略, 要承担更多的风险, 但其期望利润也增加了 $\Delta_s(\omega', \hat{q})$.

5 实例分析

根据对某电子产品生产和销售情况的观察得: $c_m = 5, c_r = 1, a = 1, b = 2, p = 12, \theta = 0.5, \omega = 8$, 市场需求 X 服从均匀分布 $X \sim U(A, B), A = 200, B = 1000$. 假设基本合同为批量折扣契约, 取 $\alpha = 2490, \beta = 0.4$, 则 $5.5 \leq \omega' \leq 12.7$, 供应链新增利润 880. 当对 ω', β 和 θ 进行灵敏度分析时, 供应链的变化情况如表 1 ~ 表 3 所示.

表 1 供应链利润与风险变化情况 ($\theta = 0.5$)

ω'	$\Delta_s(\omega', \hat{q})$	$\Delta_r(\omega', \hat{q})$	β	q^*	\hat{q}
5.5	0	880	0.4	500	767
10	553	327	0.4	500	767
12.7	880	0	0.4	500	767

表 2 供应链利润与风险变化情况 ($\omega' = 10$)

β	$\Delta_s(\omega', \hat{q})$	$\Delta_r(\omega', \hat{q})$	θ	q^*	\hat{q}
0.6	19.6	8.3	0.5	756	767
0.4	553	327	0.5	500	767
0.2	1253	893	0.5	244	767

从表 1 可以看出, 随着 ω' 的增加, 制造商的新增利润不断增加, 销售商的新增利润不断减少, 这说

表 3 供应链利润与风险变化情况 ($\beta = 0.4$)

θ	$\Delta_s(\omega', \hat{q})$	$\Delta_r(\omega', \hat{q})$	ω'	q^*	\hat{q}
0.3	464	250	10	500	713
0.5	553	327	10	500	767
0.7	639	400	10	500	807

明制造商实行补偿策略后, 表面上看产生了一定的损失, 但实际上随着 ω' 的增加, 收益多的还是制造商; 从表 2 可以看出, 随着下行风险 β 的减小, q^* 不断减少, 销售商和制造商的新增利润均不断增加; 从表 3 可以看出, 随着回收率 θ 的增加, \hat{q} 以及销售商和制造商的新增利润均不断增加.

6 结 论

本文以由一个风险中性的制造商与一个具有风险下行特性的销售商组成的两阶闭环供应链为研究对象, 在分析了 Downside-risk 测度下收益共享契约和批量折扣契约不能协调闭环供应链的基础上, 依据风险中性方为风险规避方主动提供相应的风险保护, 满足其风险约束的思路, 将补偿策略附加到基本合同中, 设计了风险共享契约, 引导销售商按闭环供应链集中决策下的最优订购量订货, 使风险共担, 实现了风险控制和闭环供应链协调. 但当闭环供应链存在多个环节且参与方具有下行风险特性时, 闭环供应链的协调、风险控制和利润分配可作为下一步研究的方向.

参考文献 (References)

- [1] Juan P S, Cristina G, Helena R L. Reverse logistics in the editorial sector: An exploratory study [R]. Barcelona: Universitat Pompeu Fabra, 2005.
- [2] Van Nunen J A E E, Zuidwijk R A. E-enabled closed-loop supply chains[J]. California Management Review, 2004, 46(2): 40-45.
- [3] Gan X H, Sethi S P, Yan H M. Channel coordination with a risk-neutral supplier and a Downside-risk-averse retailer[J]. Production and Operations Management, 2005, 14(1): 80-89.
- [4] 赵道致, 何龙飞. Downside-risk 控制下的供应链合作契约研究[J]. 系统工程理论与实践, 2007, (4): 34-40. (Zhao D Z, He L F. Research on supply chain cooperative contract on the theory of Downside-risk control[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2007, (4): 34-40.)
- [5] Savaskan R C, Bhattacharya S, Wassenhove L N V. Closed-loop supply chain models with product remanufacturing [J]. Management Science, 2004, 50 (2): 239-252.

(下转第 1701 页)