

闭环供应链双渠道回收系统定价机制与协调策略

于春海, 李 想

(东北大学 工商管理学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 针对由再制造商、零售商和第三方回收商构成的闭环供应链回收再制造系统, 基于再制造商委托第三方回收商同时回收的双渠道回收模式, 在分散决策和集中决策两种情形下, 运用博弈论方法研究闭环供应链的定价机制与协调策略; 进而采用 Rubinstein 讨价还价模型及贴现因子理论进行闭环供应链策略协调分析及收益的 Pareto 改进; 最后通过算例验证了定价机制与协调策略的有效性. 研究发现, 闭环供应链在采用双渠道回收模式下, 系统集中决策不仅提高了各方收益, 而且提高了闭环供应链回收再制造系统的整体效率.

关 键 词: 闭环供应链; 双渠道回收; Rubinstein 讨价还价; Stackelberg 博弈; Pareto 改进

中图分类号: F 224.32

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2014)09-1360-05

Pricing Mechanisms and Coordination Strategies of Closed-Loop Supply Chain with Dual-Channel Recycling systems

YU Chun-hai, LI Xiang

(School of Business Administration, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: YU Chun-hai, E-mail: yuchunhai2010@gmail.com)

Abstract: A recycling and remanufacturing system consisting of the remanufacturer, retailer and third-party recycler was investigated. In this dual-channel recycling model, product recycling of the closed-loop supply chain was determined by the remanufacturer and third-party recycler. In addition, pricing mechanisms and coordination strategies were analyzed under decentralized and centralized decision with the method of game theory. Based on the Rubinstein bargaining model and discount factor theory, coordination strategy and Pareto improvement were established. Finally, a numerical example was given to illustrate the effectiveness of the pricing mechanisms and coordination strategies. This study proves that the dual-channel recycling model can not only improve all parties' benefits but also promote the overall efficiency of this recycling and remanufacturing system.

Key words: closed-loop supply chain; dual-channel recycling; Rubinstein bargaining; Stackelberg game; Pareto improvement

近年来,随着全球经济的发展,环境和资源问题日益凸显,加快发展节能环保产业和绿色循环经济受到越来越多国家和地区的重视.

国内外学者对闭环供应链再制造系统的定价机制和协调策略等相关问题的研究日渐深入^[1-3]. Shi 等^[4]通过集成的思想,分析了闭环再制造系统的定价和生产策略. Hong 等^[5]研究了一个由零售商负责回收的电子产品闭环供应链模型,并分析第三方非盈利回收机构对闭环供应链

系统的影响. Savaskan 等和 Bakal 等^[6-7]运用 Stackelberg 博弈分别研究不同的产品回收渠道对各成员定价及其利润的影响. 邱若臻等^[8]运用博弈论方法研究制造商和销售商同时负责产品回收的模型下闭环供应链协调问题. 王玉燕^[9]探讨了在政府的干涉措施下双渠道回收废旧品的闭环供应链管理问题. 张成堂等^[10]研究一个由制造商和零售商组成的单周期闭环供应链系统的双渠道回收与销售定价策略.

综合以上文献可以看出,目前对闭环供应链回收与再制造相关问题的研究多数集中在单一回收渠道构成的闭环供应链系统方面;此外,在双渠道回收定价机制与协调策略的有限文献中,很少涉及委托第三方回收商同时回收的双渠道回收模式.针对现有研究的不足,本文针对由再制造商、零售商和第三方回收商构成的闭环供应链再制造系统,构建再制造商和第三方回收商同时负责回收的双渠道回收模型,运用博弈论方法分类研究分散决策和集中决策两种情形下闭环供应链的定价机制与协调策略.

1 模型描述

1.1 问题说明与假设

在该闭环供应链回收再制造系统中,废旧品有两种回收渠道:一种是直接回收方式,即再制造商从市场中回收废旧品;另一种是间接回收方式,即再制造商委托第三方回收商从市场中回收具有可再造性的废旧品.再制造商负责将回收的废旧品加工成再制造品,然后批发给零售商,零售商再把再制造品销售给消费者.回收再制造系统结构如图 1 所示.

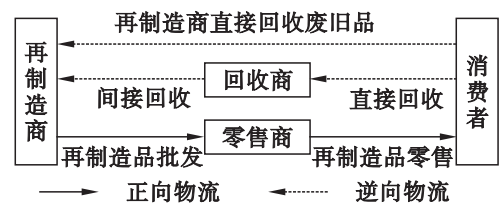


图 1 闭环供应链双渠道回收再制造系统结构模型
Fig. 1 The remanufacture model of closed-loop supply chain with dual channel recycling

文中使用的相关符号说明如下:
 c_m 和 c_s 分别为再制造商单位再制造成本、零售商单位商品销售成本; c_r 和 c_l 分别为再制造商、第三方回收商单位废旧品直接回收成本; p_m 和 p_s 分别为再制造商单位再制造品批发价格、零售商再制造品的市场销售价格; q_m 和 q_l 为再制造商、第三方回收商的单位废旧品市场回收价格; q_{ml} 为再制造商对第三方回收商的单位废旧品回收价格.其中, p_m, q_{ml}, q_m 为再制造商的决策变量, p_s 为零售商的决策变量, q_l 为第三方回收商的决策变量.

除上述符号外, Π 表示收益,下标 m, s, t, T 分别表示再制造商、零售商、第三方回收商和整个闭环供应链系统,上标 C, D 分别表示系统集中决

策和分散决策.
相关假设如下:
假设零售商和回收商不承担市场风险,所有回收的废旧品都转移给再制造商,再制造品也集中于再制造商;回收的废旧品全部进行再制造,再制造率为 1.假设再制造产品供大于求,对于剩余未出售的再制造产品,再制造商可获得一定的边际残值 θ .

1.2 函数构建

基于以上假设与说明,可得到如下函数.

1) 再制造品需求函数:
$$Q(p_s) = b - gp_s, \quad (1)$$

其中: b 为再制造品潜在的市场需求; g 为再制造品市场价格敏感系数.

2) 废旧品回收量函数:
$$Q(q_m) = a + q_m - eq_l, Q(q_l) = a + q_l - fq_m. \quad (2)$$

其中: a 为废旧品市场基本回收量; e 和 f 为交叉价格影响系数,且 $e, f > 0$.

3) 再制造商、零售商和第三方回收商的收益函数分别为

$$\begin{aligned} \Pi_m &= (\theta - q_m - c_m - c_r)(a + q_m - eq_l) + \\ &\quad (\theta - q_{ml} - c_m)/(a + q_l - fq_m) + \\ &\quad (p_m - \theta)(b - gp_s), \end{aligned} \quad (3)$$

$$\Pi_s = (p_s - p_m - c_s)(b - gp_s), \quad (4)$$

$$\Pi_l = (q_{ml} - q_l - c_l)(a + q_l - fq_m). \quad (5)$$

4) 闭环供应链再制造系统整体收益函数

$$\begin{aligned} \Pi_T &= (\theta - q_m - c_m - c_r)(a + q_m - eq_l) + \\ &\quad (\theta - q_l - c_m - c_l)(a + q_l - fq_m) + \\ &\quad (p_s - \theta - c_s)(b - gp_s). \end{aligned} \quad (6)$$

2 系统分散决策下的策略分析

分散决策时,再制造商处于主导地位,应用 Stackelberg 非合作博弈模型进行闭环供应链分散定价决策分析.根据逆向归纳法,首先求解博弈的第三阶段,对于式(4)和式(5),根据一阶优化条件确定第三方回收商和零售商的最优反应函数为

$$q_l = \frac{fq_m + q_{ml} - (a + c_l)}{2}, p_s = \frac{1}{2}(p_m + c_s) + \frac{b}{2g}. \quad (7)$$

将上述解代入式(3),解得再制造品最优批发价格、最优市场零售价格分别为

$$p_m^D = \frac{1}{2}(\theta - c_s) + \frac{b}{2g}, p_s^D = \frac{1}{4}(\theta + c_s) + \frac{3b}{4g}. \quad (8)$$

再制造商的最优市场回收价格、第三方回收商最优市场回收价格以及再制造商从第三方回收商手中回收废旧品时的最优回收价格分别为

$$q_m^D = \frac{1}{(8 - 6ef - e^2 - f^2)} [(4 + e - f - 3ef - e^2) (\theta - c_m) + (e^2 + 3ef - 4) c_r - (e + f) \times (a - c_i) - 2e(a + c_i) - 4a] , \tag{9}$$

$$q_t^D = \frac{1}{2(8 - 6ef - e^2 - f^2)} [(4 - 2e + 6f - 2ef - 4ef^2 - 2f^2) (\theta - c_m) + (2e - 6f + 4ef^2) c_r - (4 + f^2 - ef) (a - c_i) - (e + 3f) \times (2a + ae + ec_i)] , \tag{10}$$

$$q_{mt}^D = \frac{1}{(8 - 6ef - e^2 - f^2)} \{ [(2 + f - e) (2 - ef) - f(e + f)] (\theta - c_m) + (2 - ef) (e - f) c_r - (e + f) (2a + ae + ec_i) - (4 - 2ef) \times (a - c_i) \} . \tag{11}$$

3 系统集中决策下策略分析

3.1 集中决策下策略分析

集中决策以整体收益最大化为目标来决定产品定价机制.

命题 1 当满足条件 $e + f < 2$ 时, 目标函数 Π_T 是关于 q_m, q_t 和 p_s 的严格可微凹函数.

证明 由式(6)知, 函数 Π_T 关于 q_m, q_t 和 p_s

的 Hession 矩阵:
$$H = \begin{bmatrix} -2 & e+f & 0 \\ e+f & -2 & 0 \\ 0 & 0 & -2g \end{bmatrix} .$$
 当 $e +$

$f < 2$ 时, $-2 < 0, \begin{vmatrix} -2 & e+f \\ e+f & -2 \end{vmatrix} = 4 - (e + f)^2 > 0,$

$|H| = -2g[4 - (e + f)^2] < 0$, 所以 Hession 矩阵 H 为负定矩阵, 目标函数 Π_T 是关于 q_m, q_t 和 p_s 的严格凹函数, 因而系统存在最优解.

由命题 1 进一步得, 集中决策下闭环供应链相关最优价格分别为

$$p_s^C = \frac{1}{2} (\theta + c_s) + \frac{b}{2g} , \tag{12}$$

$$q_m^C = \frac{1}{[4 - (e + f)^2]} \{ [(1 - e) (e + f) + 2(1 - f)] (\theta - c_m) + (e^2 + ef - 2) c_r + (f - e) c_i - (2 + e + f) a \} , \tag{13}$$

$$q_t^C = \frac{1}{[4 - (e + f)^2]} \{ [(1 - f) (e + f) + 2(1 - e)] \times (\theta - c_m) + (f^2 + ef - 2) c_i + (e - f) c_r - (2 + e + f) a \} . \tag{14}$$

3.2 集中决策下系统协调

在实际运作中, 不是集中决策下的所有有效

方案对于各参与者而言都是稳定的. 当闭环供应链进行集中决策时, 如果存在一种可行的定价机制组合 (p_m^C, q_m^C) 使得各方收益都不少于分散决策情形下的收益, 即同时满足条件: $\Pi_m^C \geq \Pi_m^D, \Pi_s^C \geq \Pi_s^D, \Pi_t^C \geq \Pi_t^D$, 这时的策略才能被所有参与者全部接受.

实际上, 再制造商希望 p_m 的取值更大, 更接近 $p_{m(\max)}$; 而零售商希望 p_m 的取值更小, 更接近 $p_{m(\min)}$. 由上述条件得到

$$p_{m(\max)} = p_s^C - c_s - \frac{(p_s^D - p_m^D - c_s)(b - gp_s^D)}{(b - gp_s^C)} , p_{m(\min)} = \theta + \frac{(p_m^D - \theta)(b - gp_s^D)}{(b - gp_s^C)} .$$

同理, 再制造商对第三方回收商的废旧品回收价格 q_{mt} 满足条件 $q_{mt(\min)} \leq q_{mt}^C \leq q_{mt(\max)}$, 得到

$$q_{mt(\max)} = (\theta - c_m) + \frac{1}{Q(q_t)^C} [(\theta - q_m^C - c_m - c_r) \times Q(q_m)^C - (\theta - q_m^D - c_m - c_r) Q(q_m)^D - (\theta - q_{mt}^D - c_m) Q(q_t)^D] ,$$
$$q_{mt(\min)} = (q_t^C + c_i) + \frac{(q_{mt}^D - q_t^D - c_i) Q(q_t)^D}{Q(q_t)^C} .$$

根据 Rubinstein 讨价还价模型可知, 存在唯一的子博弈精炼纳什均衡结果, $\lambda_1^* = (1 - \alpha_1) / (1 - \alpha_1 \alpha_2)$, $\lambda_2^* = (1 - \beta_1) / (1 - \beta_1 \beta_2)$; 其中, α_1, α_2 分别为再制造品销售环节中再制造商和零售商的贴现因子, β_1, β_2 分别为废旧品回收环节中再制造商和第三方回收商的贴现因子, 且 $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2 \in [0, 1]$, 其实际取值由双方谈判决定^[11]. 贴现因子表示参与者的耐心程度, 取值越大说明参与者的耐心越强, 在谈判中的地位越高; 如果贴现因子等于 0, 则说明参与者完全没有耐心. 所以, 运用 Rubinstein 讨价还价模型可以确定唯一最优的再制造品批发价格及再制造商对第三方回收商的废旧品回收价格.

由
$$\frac{p_{m(\max)} - p_m^C}{p_m^C - p_{m(\min)}} = \frac{\lambda_1^*}{1 - \lambda_1^*} = \frac{1 - \alpha_1}{\alpha_1 (1 - \alpha_2)} \text{ 及 } \frac{q_{mt(\max)} - q_{mt}^C}{q_{mt}^C - q_{mt(\min)}} = \frac{\lambda_2^*}{1 - \lambda_2^*} = \frac{1 - \beta_1}{\beta_1 (1 - \beta_2)}$$
 可得如下命题:

命题 2 闭环供应链集中决策下, 再制造系统最优的 Pareto 定价机制组合 (p_m^C, q_{mt}^C) 为

$$\left[\frac{\alpha_1 (1 - \alpha_2) p_{m(\max)} + (1 - \alpha_1) p_{m(\min)}}{1 - \alpha_1 \alpha_2} , \frac{\beta_1 (1 - \beta_2) q_{mt(\max)} + (1 - \beta_1) q_{mt(\min)}}{1 - \beta_1 \beta_2} \right] .$$

4 数值分析

通过以下数值分析比较不同策略情形下闭环供应链的最优价格及收益情况,以及主要参数对系统运作的影响. 相关参数取值如下: $a = 4, b =$

$130, c_t = 5, c_s = 6, e = 0.6, f = 0.5, g = 0.9, c_m = 20, c_r = 7, \theta = 90, \alpha_1 = 0.6, \alpha_2 = 0.4, \beta_1 = 0.7, \beta_2 = 0.3.$

4.1 策略分析

由上述相关参数设置及优化模型得到两种策略下最优定价及各方收益情况,如表 1 所示.

表 1 供应链最优定价机制及收益情况
Table 1 The optimal pricing mechanisms and corresponding profits

决策	P_m	P_s	q_{mt}	q_m	q_t	Π_m	Π_s	Π_t	Π_T	$Q(q_t)$	$Q(q_m)$	$Q(P_s)$	ΔQ
分散决策 D	114	132	32	27	18	1 318	132	73	1 523	8.5	20.5	11	18
集中决策 C	105	120	38	28	27	1 431	202	94	1 727	17	16	22	11

从表 1 计算结果可以看出:

1) 关于价格与需求的比较. 集中决策下再制造品的批发价格和销售价格都低于分散决策下的价格,因此提高了再制造品的市场需求;集中决策下第三方回收商和再制造商对第三方回收商的废旧品回收价格都有一定的提高,因而增加了第三方回收商对废旧品的回收力度.

2) 关于收益的比较. 各方在最优 Pareto 集中定价机制下的收益均高于分散决策下的收益,说明了闭环供应链协调策略的有效性;系统集中决策不仅促进了供应链成员形成稳定的合作,同时也改进了各参与方和系统整体的收益.

3) 关于废旧品回收量的比较. 同分散决策相比,系统集中决策提高了第三方回收商的废旧品回收量,而降低了再制造商的直接回收量. 降低了再制造商的滞销品数量,提高了再制造系统的效率,促进了闭环供应链的合理运营.

4.2 贴现因子对收益的影响

运用 Matlab 仿真软件分别分析再制造商和零售商的贴现因子变动对各自收益的影响.

图 2 描述了闭环供应链集中决策时,不同贴现因子下再制造商收益的变化趋势. 从中可以看出,随着再制造品销售环节中再制造商的贴现因子 α_1 在区间 $[0,1]$ 内增长,再制造商收益表现出明显的递增趋势. 由贴现因子 β_1 在区间 $[0,1]$ 内

的变化发现,第三方回收商不会对再制造商收益构成显著的影响,这是因为再制造商能够通过直接回收渠道回收废旧品,所以再制造商在和第三方回收商谈判中的耐心程度相对较高.

图 3 描述了闭环供应链集中决策时,不同贴现因子下零售商收益的变化趋势,其中, α_2 为再制造品销售环节中零售商的贴现因子. 从图 3 中可以看出,随着贴现因子 α_2 在区间 $[0,1]$ 内增长,零售商收益表现为递增趋势. 这说明,在供应链实际运作中,零售商的耐心程度越高,其收益越大. 由此可见,贴现因子是影响系统收益再分配的重要因素.

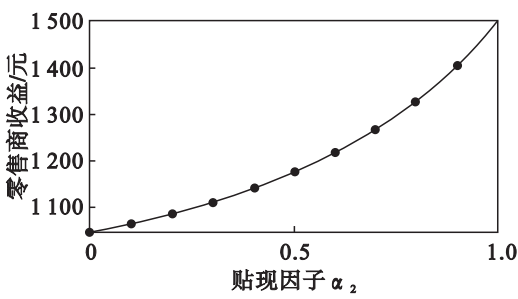


图 3 贴现因子对零售商收益的影响
Fig. 3 Influence of discount factor on the retailer's profits

5 结 语

本文针对由再制造商、零售商和第三方回收商构成的闭环供应链回收再制造系统,基于再制造商委托第三方回收商同时回收的双渠道回收模式,分别研究了分散决策和集中决策两种情形下的定价机制与协调策略. 结果表明,在价格与需求方面,闭环供应链集中决策下再制造品市场价格更低,同时提高了再制造品市场需求;在收益方面,集中决策下闭环供应链各方收益相对更高.

(下转第 1368 页)

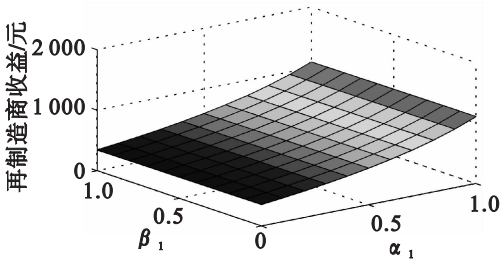


图 2 贴现因子对再制造商收益的影响
Fig. 2 Influence of discount factor on the remanufacturer's profits