文章编号: 1001-0920 (2015) 11-2019-06 DOI: 10.13195/j.kzyjc.2014.1411

再制造率随机的闭环供应链产品差别定价策略

韩秀平[a], 陈东彦[b], 陈德慧[a], 侯 玲[b]
(哈尔滨理工大学 a. 管理学院，b. 应用科学学院，哈尔滨 150080)

摘 要: 考虑闭环供应链的差别定价问题, 制造商回收废旧产品, 并生产新产品和再制造产品, 再制造率随机. 采用 Stackelberg 博弈方法, 研究集中决策和分散决策下相应产品的最优定价, 给出供应链各成员的最优利润. 结果表明: 若制造商对产品延迟定价, 则集中决策下回收价格高于分散决策, 而销售价格均低于分散决策; 当零售商的保守利润不低于一定值时, 集中决策下总利润不低于分散决策, 制造商可以采用改进的两部定价契约协调供应链.

关键词: 闭环供应链；再制造率；差别定价策略；回收价格；两部定价契约
中图分类号: F253 **文献标志码:** A

Products difference pricing strategy of closed-loop supply chain with remanufacturing rate random

HAN Xiu-ping[a], *CHEN Dong-yan*[b], *CHEN De-hui*[a], *HOU Ling*[b]
(a. School of Management，b. School of Applied Science，Harbin University of Science and Technology，Harbin 150080，China. Correspondent：CHEN Dong-yan，E-mail：dychen_2004@aliyun.com)

Abstract: Considering the differential pricing problem of the closed-loop supply chain, the manufacturer collects used products and produces new products and remanufacturing products, and the remanufacturing rate is random. The Stackelbery game of the manufacturer leader is adopted to research the product differential pricing strategy under centralized decision-making and decentralized decision-making, and gives the profit of each member in the supply chain under two decision making. The research shows that when manufacturers have the opportunity to delay on product pricing, the centralized decision making recovery price of used products is higher than the decentralized decision making, and product prices are less than the decentralized decision making. When the retailer's fundamental profit can achieve a certain value, the total profit under centralized decision making is not less than under decentralized decision making, thus the manufacturer can improve the two-tariff pricing contract to coordinate the supply chain.

Keywords: closed-loop supply chain；remanufacturing rate；differential pricing strategies；recovery price；two-tariff contract

0 引 言

闭环供应链可以减少对环境的污染, 提高资源和能源的综合利用, 促进循环经济和低碳经济的发展, 已成为实现社会经济可持续发展的重要方式. 目前, 在我国闭环供应链已成功地应用于电子、汽车、机械工程、机床等行业, 如上海大众、山东潍柴、重庆机床等. 而国内外的相关理论研究也有了大量成果, 主要集中在回收渠道选择[1-4]、产品定价[5-7]、契约协调[8-9]以及奖惩机制[10-11]等问题.

我国的闭环再制造产业起步较晚, 回收产品质量参差不齐, 再制造过程中废品的拆卸、清洗、检测、翻新等技术的落后, 使得再制造生产效率较低, 并不是所有回收的废旧产品都能够被加工成再制造产品, 因此, 再制造率已成为闭环供应链系统中重要的随机因素. Bakal 等[12]在逆向供应链中研究了再制造率随机对延迟定价策略的影响, 给出了再制造产品的最优售价及废旧产品的最优回收价格, 但没考虑正向供应链的相关决策问题. 梁喜等[13]研究了二级闭环供应链系统, 采用制造商主导的 Stackelberg 博弈方法研究了正向供应链和闭环供应链的利润问题, 并分析了回收再利用率对闭环供应链各成员利润的影响. Li 等[14]考虑了再制造系统中再制造率和需求均随机的问题, 运

收稿日期: 2014-09-12；**修回日期:** 2015-01-26.
基金项目: 国家自然科学基金项目(11271103).
作者简介: 韩秀平(1979−), 女, 博士生, 从事系统优化与供应链管理的研究；陈东彦(1964−), 女, 教授, 博士生导师, 从事系统优化与供应链管理等研究.

用两阶段动态规划方法分别给出了两种决策顺序下产品的定价策略. Shi 等[15-16]研究了闭环供应链中废品回收量是随机的, 且有最低回收要求时的定价策略. Galbreth[17]建立了再制造率关于再制造成本的函数, 研究了确定需求和随机需求下回收和再制造率的决策问题.

由于再制造节约了成本, 制造商往往将其差别定价. 如 Ferrer 等[18]研究了消费者对新产品和再制造产品具有不同的偏好, 两种产品差别定价时的相关决策问题. 颜荣芳等[19]假设回收价格是内生变量, 研究再制造闭环供应链新产品和再制造产品的差别定价问题, 在集中决策和分散决策下分别给出了产品的最优批发价格和最优零售价格, 并探讨了回收价格对各决策变量的影响. 许茂增等[20]根据消费者对新产品、二手产品和再制造产品的不同偏好, 构建了不同产品差别定价的闭环供应链模型, 研究了制造商从事再制造的生产决策和零售商经销二手产品的销售决策问题.

本文在文献 [12] 的基础上研究回收产品的再制造率随机时, 新产品和再制造产品差别定价的最优定价策略. 得出的主要结果是: 1) 集中决策和分散决策下产品的最优定价策略; 2) 在零售商保守利润不低于某个定值时, 集中决策供应链利润高于分散决策, 并给出了协调契约; 3) 通过算例研究再制造率的随机性对最优回收价格和两种决策下各成员最优利润的影响.

1 模型描述和基本假设

考虑包括单个制造商和单个零售商的再制造闭环供应链. 制造商生产新产品和再制造产品, 并分别以价格 ω_m 和 ω_r ($\omega_m > \omega_r$) 批发给零售商, 零售商再将产品分别以价格 p_m 和 p_r ($p_m > p_r$) 销售给消费者, 当产品寿命终结时, 制造商以回收价格 f 从消费者手中回收废旧产品, 并对回收的废旧产品进行处理, 处理后符合再制造质量标准的进行再制造, 再制造产品将与新产品一同投放到市场.

为了简化模型, 给出如下假设.

假设 1[13] 制造商是领导者, 零售商是跟随者, 供应链成员的决策均以追求利润最大化为目标.

假设 2[18] 制造商新产品和再制造产品的单位生产成本分别是 c_m 和 c_r, 且 $c_m > c_r$.

假设 3[21] 废旧产品的回收数量是单位回收价格 f 的线性函数, 即 $s(f) = a + bf$. 其中: $a > 0$ 表示零售商不提供给消费者任何补偿时自愿返还废旧产品的消费者数量; $b > 0$ 表示消费者对回收价格的敏感程度; f 可以取负值, 表示企业处理废旧产品要向用户收费, 这种情形在欧洲和日本较常见. 另外, 废旧产品的单位处理成本为 A.

假设 4[12] 废旧产品的再制造率 R 是随机变量, R 的实现值是 r, 且 $g(r)$ 和 $G(r)$ 分别为 R 的概率密度函数和累积分布函数.

假设 5[12] 处理后不符合再制造质量标准的废旧产品残值是 s, 未售出的再制造产品残值也是 s.

假设 6[5] 市场上存在新产品和再制造产品, Q 是市场容量, α 是相对于新产品消费者对再制造产品的接受度, $0 \leqslant \alpha \leqslant 1$. 则消费者购买新产品的数量 q_m 和再制造产品的数量 q_r 分别如下所示:

当 $\alpha < p_r/p_m$ 时

$$q_m = Q - p_m,\ q_r = 0;$$

当 $p_r/p_m \leqslant \alpha \leqslant 1 - (p_m - p_r)/Q$ 时

$$q_m = Q - \frac{p_m - p_r}{1-\alpha},\ q_r = \frac{\alpha p_m - p_r}{\alpha(1-\alpha)};$$

当 $\alpha > 1 - (p_m - p_r)/Q$ 时

$$q_r = (Q - p_m)/\alpha,\ q_m = 0.$$

本文用 π^c 表示集中决策下供应链的整体利润, π_M^D 和 π_R^D 分别为分散决策下制造商和零售商的利润.

2 模型的建立

本节讨论集中决策和分散决策下制造商和零售商的最优定价和最优利润. 假设供应链参与者之间是完全信息下的 Stackelberg 动态博弈, 制造商是领导者, 零售商是跟随者, 制造商有机会在随机的再制造率实现后确定产品的价格. 制造商的决策过程由两个阶段组成: 第 1 阶段, 为废旧产品设置相应的回收价格进行回购, 将回购来的产品进行处理并制成再制造产品, 即再制造率实现; 第 2 阶段, 为新产品和再制造产品设置价格, 使需求得到满足.

2.1 集中决策下闭环供应链定价策略

在集中决策下, 供应链是一个整体, 决策的目标是使供应链整体利润最大, 问题可以表示为

$$\begin{aligned} &\max_{(p_m,p_r,f)}\ \pi^c(p_m,p_r,f) = \\ &\quad (p_m - c_m)q_m + (p_r - s)q_r - \\ &\quad (f + A + c_r - s)(a + bf), \\ &\text{s.t.}\ q_r \leqslant r(a+bf). \end{aligned} \tag{1}$$

采用逆向归纳法求解优化问题 (1). 首先, 分析第 2 阶段, 给出回收价格 f, 且随机的再制造率 r 已经实现, 得到产品的最优销售价格.

命题 1 当回收价格 f 给出且随机的再制造率已经实现时, 新产品的最优销售价格是

$$p_m^* = (Q + c_m)/2.$$

再制造产品的最优销售价格如下:

当 $r \geqslant \dfrac{\alpha c_m - s}{2\alpha(1-\alpha)(a+bf)}$ 时

$$p_r^* = (\alpha Q + s)/2;$$

当 $r < \dfrac{\alpha c_m - s}{2\alpha(1-\alpha)(a+bf)}$ 时

$$p_r^* = \frac{\alpha Q + \alpha c_m - 2\alpha(1-\alpha)r(a+bf)}{2}. \tag{2}$$

证明　将产品的需求数量 q_m 和 q_r 代入优化问题(1)中, 有

$$\pi^c(p_m, p_r|f) = (p_m - c_m)\Big(Q - \frac{p_m - p_r}{1-\alpha}\Big) + (p_r - s)\frac{\alpha p_m - p_r}{\alpha(1-\alpha)} - (f + A + c_r - s)(a+bf).$$

求 π^c 关于 p_m、p_r 的二阶偏导, 得 Hessian 矩阵

$$H = \begin{bmatrix} -\dfrac{2}{1-\alpha} & \dfrac{2}{1-\alpha} \\ \dfrac{2}{1-\alpha} & -\dfrac{2}{\alpha(1-\alpha)} \end{bmatrix}.$$

由于矩阵 H 是负定的, 目标函数 π^c 是 p_m、p_r 的联合凹函数, 而约束条件是关于 p_m、p_r 的线性函数, 该问题是凸优化问题, 最优解 (p_m^*, p_r^*) 可通过KKT条件求得. □

其次, 分析第1阶段废旧产品的最优回收价格. 由于再制造率 r 随机, 考虑供应链整体利润的期望值

$$\begin{aligned}
&\mathrm{E}[\pi^c(f|p_m^*, p_r^*)] = \\
&-(f + A + c_r - s)(a+bf) + \\
&\int_{-\infty}^{\frac{\alpha c_m - s}{2\alpha(1-\alpha)(a+bf)}} [(p_m^* - c_m)q_m + (p_r^* - s)q_r]g(r)\mathrm{d}r + \\
&\int_{\frac{\alpha c_m - s}{2\alpha(1-\alpha)(a+bf)}}^{+\infty} (p_m^* - c_m)q_m + (p_r^* - s)r(a+bf)]g(r)\mathrm{d}r = \\
&\frac{Q - c_m}{2}\Big[\frac{Q}{2} + \frac{s - c_m}{2(1-\alpha)}\Big] + \frac{\alpha Q - s}{2}\frac{\alpha c_m - s}{2\alpha(1-\alpha)} - \\
&(f + A + c_r - s)(a+bf) - \\
&\int_{-\infty}^{\frac{\alpha c_m - s}{2\alpha(1-\alpha)(a+bf)}} \frac{[\alpha c_m - s - 2\alpha(1-\alpha)r(a+bf)]^2}{4\alpha(1-\alpha)} g(r)\mathrm{d}r.
\end{aligned} \tag{3}$$

因为

$$\frac{\partial^2 \mathrm{E}(\pi^c)}{\partial f^2} = -4\alpha(1-\alpha)b\int_{-\infty}^{\frac{\alpha c_m - s}{2\alpha(1-\alpha)(a+bf)}} rg(r)\mathrm{d}r - 2bf < 0,$$

即期望利润函数是关于 f 的凹函数, 所以最大化期望利润函数得到的最优回收价格 f^* 满足

$$\begin{aligned}
&\int_{-\infty}^{\frac{\alpha c_m - s}{2\alpha(1-\alpha)(a+bf^*)}} r[\alpha c_m - s - 2(1-\alpha)\times \\
&\alpha r(a+bf^*)]g(r)\mathrm{d}r = \\
&2f^* + (A + c_r - s) + a/b.
\end{aligned} \tag{4}$$

结论 1　设

$$h(f) = -2f + \int_{-\infty}^{\frac{\alpha c_m - s}{2\alpha(1-\alpha)(a+bf)}} [\alpha c_m - s - 2(1-\alpha)\alpha r(a+bf)]rg(r)\mathrm{d}r,$$

由

$$\partial h/\partial f = -2\alpha(1-\alpha)b\int_{-\infty}^{\frac{\alpha c_m - s}{2\alpha(1-\alpha)(a+bf)}} r^2 g(r)\mathrm{d}r - 2 < 0$$

知, $h(f)$ 是关于 f 的减函数, 因此, 废旧产品的处理成本 A 和再制造成本 c_r 越大, f^* 越小; 残值 s 越大, f^* 越大.

2.2　分散决策下闭环供应链定价策略

在分散决策下, 制造商占主导地位, 博弈为两阶段动态博弈. 首先, 制造商决策回购价格 f, 随机的再制造率 r 实现后设置新产品和再制造产品的批发价格 ω_m 和 ω_r; 然后零售商决策产品的售价 p_m 和 p_r, 消费者需求实现. 采用逆向归纳法求解问题. 零售商的决策问题是

$$\max_{(p_m, p_r)} \pi_R^D(p_m, p_r) = (p_m - \omega_m)q_m + (p_r - \omega_r)q_r. \tag{5}$$

由一阶最优性条件得到

$$p_m(\omega_m) = \frac{Q + \omega_m}{2},\ p_r(\omega_r) = \frac{\alpha Q + \omega_r}{2}. \tag{6}$$

制造商的决策问题为

$$\begin{aligned}
\max_{(f, \omega_m, \omega_r)}\ & \pi_M^D(f, \omega_m, \omega_r|p_m(\omega_m), p_r(\omega_r)) = \\
& (\omega_m - c_m)\Big[\frac{Q}{2} + \frac{\omega_r - \omega_m}{2\alpha(1-\alpha)}\Big] + \\
& (\omega_r - s)\frac{\alpha\omega_m - \omega_r}{2\alpha(1-\alpha)} - \\
& (f + A + c_r - s)(a+bf), \\
\text{s.t.}\ & \frac{\alpha\omega_m - \omega_r}{2\alpha(1-\alpha)} \leqslant r(a+bf).
\end{aligned} \tag{7}$$

此时, 制造商又分两阶段决策. 首先考虑第2阶段决策新产品和再制造产品的最优批发价格.

命题 2　在分散决策下, 制造商设置出回收价格 f, 且随机的再制造率 r 已经实现, 新产品的最优批发价格是

$$\omega_m^{**} = (Q + c_m)/2.$$

再制造产品的最优批发价格如下:

当 $r \geqslant \dfrac{\alpha c_m - s}{4\alpha(1-\alpha)(a+bf)}$ 时

$$\omega_r^{**} = (\alpha Q + s)/2;$$

当 $r < \dfrac{\alpha c_m - s}{4\alpha(1-\alpha)(a+bf)}$ 时

$$\omega_r^{**} = \frac{\alpha Q + \alpha c_m - 4\alpha(1-\alpha)r(a+bf)}{2}. \tag{8}$$

证明与命题1相同, 此略.

其次, 考虑第1阶段决策最优回收价格. 给定产品的批发价格, 由于再制造率 r 随机, 考虑制造商利润的期望值

$$\begin{aligned}
&\mathrm{E}[\pi_M^D(f|\omega_m^{**}, \omega_r^{**})] = \\
&-(f + A + c_r - s)(a+bf) +
\end{aligned}$$

$$\int_{-\infty}^{\frac{\alpha c_m-s}{4\alpha(1-\alpha)(a+bf)}}[(\omega_m^{**}-c_m)q_m+(\omega_r^{**}-s)q_r]g(r)\mathrm{d}r+\int_{\frac{\alpha c_m-s}{4\alpha(1-\alpha)(a+bf)}}^{+\infty}[(\omega_m^{**}-c_m)q_m+(\omega_r^{**}-s)\times r(a+bf)]g(r)\mathrm{d}r=$$
$$\frac{Q-c_m}{2}\Big[\frac{Q}{4}+\frac{s-c_m}{4(1-\alpha)}\Big]+\frac{\alpha Q-s}{2}\frac{\alpha c_m-s}{4\alpha(1-\alpha)}-(f+A+c_r-s)(a+bf)-\int_{-\infty}^{\frac{\alpha c_m-s}{2\alpha(1-\alpha)(a+bf)}}\frac{[\alpha c_m-s-4\alpha(1-\alpha)r(a+bf)]^2}{8\alpha(1-\alpha)}g(r)\mathrm{d}r. \tag{9}$$

通过最大化制造商期望利润, 得到 f^{**} 满足

$$\int_{-\infty}^{\frac{\alpha c_m-s}{4\alpha(1-\alpha)(a+bf^{**})}}r[\alpha c_m-s-4(1-\alpha)\times\alpha r(a+bf^{**})]g(r)\mathrm{d}r=2f^{**}+(A+c_r-s)+a/b. \tag{10}$$

结论 2 $p_m^*<p_m^{**},p_r^*<p_r^{**},f^*>f^{**}$, 即集中决策下新产品和再制造产品的销售价格均小于分散决策, 而回收价格高于分散决策. 说明集中决策增加了废旧品回收量, 给消费者和环保都带来了效益.

结论 3 新产品批发价格及零售价格与消费者对再制造产品的接受度 α 无关, 再制造产品的批发价格及零售价格随 α 增大而增加. 说明随着消费者对再制造产品支付意愿的增加, 再制造产品能以更高的价格在市场上销售.

2.3 两种决策下利润的比较和契约协调

2.3.1 利润比较

在分散决策下, 将式 (6) 和 (8) 代入 (5) 中, 得到零售商的期望利润函数

$$\mathrm{E}[\pi_R^D(f)]=\frac{Q-c_m}{4}\Big[\frac{Q}{4}+\frac{s-c_m}{4(1-\alpha)}\Big]+\frac{\alpha Q-s}{4}\frac{\alpha c_m-s}{4\alpha(1-\alpha)}-\frac{(\alpha c_m-s)^2}{16\alpha(1-\alpha)}\int_{-\infty}^{\frac{\alpha c_m-s}{4\alpha(1-\alpha)(a+bf)}}g(r)\mathrm{d}r. \tag{11}$$

不难发现, $\mathrm{E}[\pi_R^D(f)]$ 随 f 的增加而增大, 即如果制造商提高回收价格, 则零售商的利润增加, 而其自身利润减少, 理性的制造商不会主动提高回收价格. 但供应链中零售商也有自身的最低获利要求, 即零售商有保守利润, 设其为 $\varDelta$, 则有如下命题.

命题 3 对于制造商给出的回收价格 f, 当零售商的保守利润 $\varDelta$ 满足条件

$$\varDelta\geqslant\int_{\frac{\alpha c_m-s}{4\alpha(1-\alpha)(a+bf^{**})}}^{\frac{\alpha c_m-s}{2\alpha(1-\alpha)(a+bf^{**})}}\frac{[\alpha c_m-s-2(1-\alpha)\alpha r(a+bf^{**})]^2}{4(1-\alpha)\alpha}g(r)\mathrm{d}r$$

时, 集中决策下供应链的总期望利润大于分散决策, 即

$$\mathrm{E}[\pi^C(f^*)]\geqslant\mathrm{E}[\pi_M^D(f^{**})]+\mathrm{E}[\pi_R^D(f^{**})].$$

证明 $\pi^C(f)$ 是关于 f 的凹函数, 因为 f^* 为集中决策下使 $\pi^C(f)$ 达到最大的回收价格, 所以

$$\mathrm{E}[\pi^c(f^*)]\geqslant\mathrm{E}[\pi^c(f^{**})],$$
$$\mathrm{E}[\pi^c(f^{**})]=-(f^{**}+A+c_r-s)(a+bf^{**})+\frac{Q-c_m}{2}\left[\frac{Q}{2}+\frac{s-c_m}{2(1-\alpha)}\right]+\frac{\alpha Q-s}{2}\frac{\alpha c_m-s}{2\alpha(1-\alpha)}-\int_{-\infty}^{\frac{\alpha c_m-s}{2\alpha(1-\alpha)(a+bf^{**})}}\frac{[\alpha c_m-s-2\alpha(1-\alpha)r(a+bf^{**})]^2}{4\alpha(1-\alpha)}g(r)\mathrm{d}r. \tag{12}$$

由式 (9) 和 (11) 知

$$\mathrm{E}[\pi_R^D(f^{**})]+\mathrm{E}[\pi_M^D(f^{**})]=\frac{3Q-3c_m}{4}\Big[\frac{Q}{4}+\frac{s-c_m}{4(1-\alpha)}\Big]+\frac{3\alpha Q-3s}{4}\frac{\alpha c_m-s}{4\alpha(1-\alpha)}-(f^{**}+A+c_r-s)(a+bf^{**})+\int_{-\infty}^{\frac{\alpha c_m-s}{4\alpha(1-\alpha)(a+bf^{**})}}\frac{[\alpha c_m-s-4\alpha(1-\alpha)r(a+bf^{**})]}{4\alpha(1-\alpha)}\times\frac{[3s-3\alpha c_m+4\alpha(1-\alpha)r(a+bf^{**})]}{4}g(r)\mathrm{d}r. \tag{13}$$

式 (12) 减去 (13), 并结合 (11) 得

$$\mathrm{E}[\pi^c(f^{**})]-\mathrm{E}[\pi_R^D(f^{**})]-\mathrm{E}[\pi_M^D(f^{**})]=\mathrm{E}[\pi_R^D(f^{**})]-\varDelta\geqslant 0. \qquad \square$$

结论 4 制造商通过降低新产品的生产成本来提高零售商的利润, 从而使零售商参与到供应链中; 而制造商降低再制造产品的生产成本只能为自己带来收益, 不能提高零售商的利润.

2.3.2 契约协调

由命题 3 条件知, 集中决策时供应链的利润大于分散决策, 此时具有领导地位的制造商可以采用改进的两部定价契约协调供应链. 首先, 制造商决策回收价格 f', 零售商支付固定金额 F 给制造商, 制造商向零售商提供低于批发价格 (ω_m^*,ω_r^*) 的优惠价格 (ω_m',ω_r'); 然后, 为使闭环供应链达到协调, 还必须满足零售商的激励相容约束和个人理性约束条件. 因此, 协调问题转化为求解如下双层规划问题:

$$\begin{aligned}\max\ \ &\mathrm{E}[\pi_M^D(f,\omega_m,\omega_r)]=\\&(\omega_m-c_m)q_m+(\omega_r-s)q_r-\\&(f+A+c_r-s)(a+bf)+F,\\&q_r\leqslant r(a+bf);\\\text{s.t.}\ \ &(p_m',p_r')\in\arg\max[\pi_R^D(p_m,p_r),\\\text{IR}\ \ &\mathrm{E}[\pi_R^D(p_m',p_r')]\geqslant\mathrm{E}[\pi_R^D(p_m^{**},p_r^{**}),\\&\mathrm{E}[\pi_M^D(\omega_m',\omega_r')]\geqslant\pi_M^D(\omega_m^{**},\omega_r^{**})].\end{aligned} \tag{14}$$

若制造商决策回收价格 $f'=f^*$, 提供给零售商的优惠价格是 $(\omega_m',\omega_r')=(c_m,s)$, 则零售商的最优销

售价格 $(p'_m, p'_r) = (p^*_m, p^*_r)$, 此时总利润等于集中决策下的利润, 供应链达到协调. 而零售商支付给制造商的固定金额 F 由双方议价能力决定.

3　数值算例

假设模型中各参数取值为: $c_m = 40$, $c_r = 6$, $A = 4$, $\alpha = 0.6$, $s = 22$, $a = 2$, $b = 1$, $Q = 46$. 随机的再制造率 R 服从 $[r_1, r_2]$ 上的均匀分布, 由 $0 \leqslant R \leqslant 1$ 及最优解的存在性知, 再制造率的均值 $\mu \in [0.3, 0.65]$.

3.1　再制造率的随机性对回收价格的影响

设均值 μ 分别取 0.35, 0.40, 0.50, 0.65, 其他参数值如上. 图 1 和图 2 描述了均值 μ 对回收价格的影响.

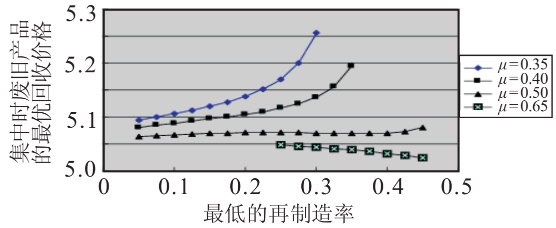

图 1　μ 变化时再制造率的随机性对集中时回收价格的影响

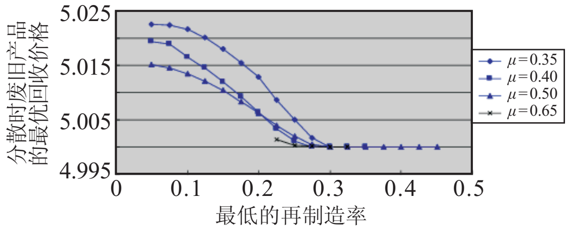

图 2　μ 变化时再制造率的随机性对分散时回收价格的影响

从图 1 和图 2 可以看出:

1) 当均值 μ 是定值, 且不取最大值时, 随着最低再制造率 r_1 的增大, f^* 增大, f^{**} 先减小后保持不变; 当均值 μ 取最大值时, 随着 r_1 的增大, f^* 减小, f^{**} 先减小后保持不变. 这是因为: 当再制造率的均值较小时, 再制造不能形成一定的生产规模, 集中决策下为了从再制造处获得更多收益, 制造商只能通过提高回收价格增加废旧产品的回收量; 而分散决策下再制造产品产出较小, 制造商的收益大多是从新产品处获得, 回收价格会减小. 相反, 当再制造率的均值较大时, 随机性对再制造产品的产出影响较小, 随着 r_1 的增大最优回购价格会逐渐减小, 直至最小值后保持不变.

2) 当最低的再制造率 r_1 固定时, 随着均值 μ 的增大, f^* 和 f^{**} 减小. 这说明, 废旧产品的平均再制造率越高, 制造商对废旧产品的需求越少, 支付给消费者的回收价格就越小.

3.2　再制造率的随机性对闭环供应链中各成员的最优利润的影响

图 3～图 5 分别描述了均值 μ 对两种决策下各成员的最优利润的影响.

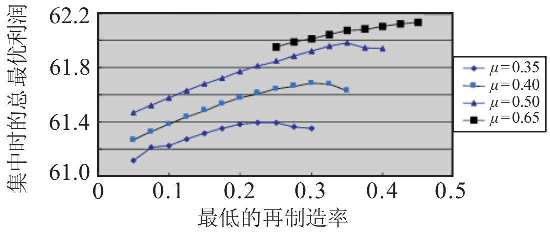

图 3　再制造率的随机性对集中时总最优利润的影响

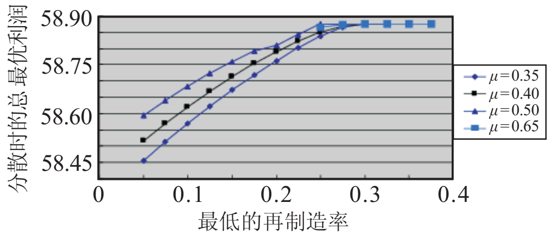

图 4　再制造率的随机性对分散时总最优利润的影响

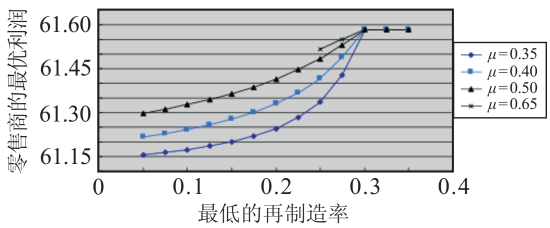

图 5　再制造率的随机性对零售商最优利润的影响

从图 3～图 5 可以看出:

1) 当均值 μ 是定值, 且不取最大值时, 随着 r_1 的增大, 集中决策下的利润先增大后减小. 这是因为: r_1 由小变大到一定值时, 制造商回收价格变大, 废旧产品的回收数量增多, 提高了再制造获得的利润; 当 r_1 增大到定值时, 增加回收价格已不能提高再制造获得的利润, 反而使总利润减小; 当均值 μ 取最大值时, r_1 增大对再制造产品的产量影响较小, 回收价格变小使总利润增大; 当均值 μ 是定值时, 随着 r_1 的增大, 分散决策下各成员的利润先增大后保持不变. 这是因为: r_1 由小变大到一定值时, 制造商进行再制造投资并不能带来丰厚利润, 为了使再制造产品保有一定的市场份额, 回收价格减小, 总利润增大; 当 r_1 增大到定值时, 回收价格不变, 总利润不变.

2) 当最低的再制造率 r_1 是定值时, 随着 μ 的增大, 集中决策和分散决策下各成员的利润均增大. 这说明, 废旧产品的平均再制造率越高, 供应链中不仅制造商支付给消费者的回收价格减少, 而且各成员都从再制造产品获取更多的利润.

4　结　论

本文分别建立了集中决策与分散决策下再制造率随机的闭环供应链产品差别定价模型, 采用 Stackelberg 博弈方法对两类模型的定价和各成员的利润进行了研究. 研究结果表明: 当制造商对产品进行延迟定价时, 集中决策下废旧产品的回收价格高于

分散决策, 产品的售价均小于分散决策; 而当零售商的保守利润不低于一定值时, 集中决策的总利润不低于分散决策, 此时制造商可采用改进的两部定价契约协调供应链, 并获取更多的超额利润. 数值算例说明再制造率的均值越大, 制造商实施闭环供应链管理就越有利, 这也是目前我国许多企业能够进行闭环再制造的根本原因. 但本文仅针对单周期和单零售商的情况进行了研究, 进一步可以考虑多周期及两竞争零售商情形下的闭环供应链问题.

参考文献(References)

[1] Savaskan R C, Bhattacharya S, Wassenhove L V. Closed-loop supply chain models with product remanufacturing[J]. Management Science, 2004, 50(2): 239-253.

[2] Savaskan R C, Wassenhove L V. Reverse channel design: The case of competing retailers[J]. Management Science, 2006, 52(5): 1-14.

[3] Hong I-Hsuan, Yeh Jun-Sheng. Modeling closed-loop supply chains in the electronics industry[J]. Transportation Research Part E, 2012, 48(4): 817-829.

[4] Xianpei Hong, Zongjun Wang, Dezhi Wang, et al. Decision models of closed-loop supply chain with remanufacturing under hybrid dual-channel collection[J]. Int J of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 68(5-8): 1851-1865.

[5] Ferrer G, Jayashankar M S. Managing new and remanufactured products[J]. Management Science, 2006, 52(1): 15-26.

[6] Liang Yijiong, Pokharel S, Lim G H. Pricing used products for remanufacturing[J]. European J of Operational Research, 2009, 193(2): 390-395.

[7] Lee C, Realff M, Ammons J. Integration of channel decisions in a decentralized reverse production system with retailer collection under deterministic non-stationary demands[J]. Advanced Engineering Informatics, 2011, 25(1): 88-102.

[8] 郭亚军, 赵礼强, 李绍江. 随机需求下闭环供应链协调的收入费用共享契约研究[J]. 运筹与管理, 2007, 16(6): 15-20.
(Guo Y J, Zhao L Q, Li S J. Revenue-and-expense sharing contract on the coordination of closed-loop supply chain under stochastic demand[J]. Operations Research and Management Science, 2007, 16(6): 15-20.)

[9] 晏妮娜, 黄小原. 基于第3方逆向物流的闭环供应链模型及应用[J]. 管理科学学报, 2008, 11(4): 83-93.
(Yan N N, Huang X Y. Models of closed-loop supply chain with thirds-party reverse logistics and their applications[J]. J of Management Sciences in China, 2008, 11(4): 83-93.)

[10] Mitra S, Webster S. Competition in remanufacturing and the effects of government subsidies[J]. Int J of Production Economics, 2008, 111(2): 287-298.

[11] 易余胤, 梁家密. 奖惩机制下的再制造闭环供应链协调[J]. 计算机集成制造系统, 2013, 19(4): 811-849.
(Yi Y Y, Liang J M. Coordination of remanufacturing closed-loop supply chain under premium and penalty mechanism[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2013, 19(4): 811-849.)

[12] Bakal I S, Elifi A. Effects of random yield in remanufacturing with price-sensitive supply and demand[J]. Production and Operations Management, 2006, 15(3): 407-420.

[13] 梁喜, 熊中楷. 产品回收再利用率对闭环供应链利润的影响[J]. 工业工程与管理, 2009, 15(4): 36-40.
(Liang X, Xiong Z K. Study on the impact of recoverability rate on the profits of closed-loop supply chain[J]. Industrial Engineering and Management, 2009, 15(4): 36-40.)

[14] Li Xiang, Li Yongjian, Cai Xiaoqiang. Remanufacturing and pricing decisions with random yield and random demand[J]. Computers & Operations Research, 2015, 54: 195-203.

[15] Shi Jianmai, Zhang Guoqing, Sha Jichang. Optimal production and pricing policy for a closed loop system[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2011, 55(6): 639-647.

[16] Shi Jianmai, Zhang Guoqing, Sha Jichang. Optimal production planning for a multi-product closed loop system with uncertain demand and return[J]. Computers Operations Research, 2011, 38(3): 641-650.

[17] Galbreth M R. Managing condition variability in remanufacturing[D]. Tennessee: Graduate School, Vanderbilt University, 2006.

[18] Ferrer G, Jayashankar M S. Managing new and differentiated remanufactured products[J]. European J of Operational Research, 2010, 203(2): 370-379.

[19] 颜荣芳, 程永宏, 王彩霞. 再制造闭环供应链最优差别定价模型[J]. 中国管理科学, 2013, 21(1): 90-97.
(Yan R F, Cheng Y H, Wang C X. Strategy analysis on differential pricing in closed-loop supply chain with remanufacturing[J]. Chinese J of Management Science, 2013, 21(1): 90-97.)

[20] 许茂增, 唐飞. 考虑消费者偏好的闭环供应链差别定价模型[J]. 计算机集成制造系统, 2014, 20(4): 945-953.
(Xu M Z, Tang F. Differential pricing model of closed-loop supply chain considering consumer preferences[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2014, 20(4): 945-953.)

[21] Shih W. Optimal inventories policies when stock outs result from defective products[J]. Int J of Production Research, 2002, 18(6): 677-685.

(责任编辑：李君玲)