

基于博弈论的再制造企业产品回收模型研究

蔡然, 黄鹏鹏

引用本文

蔡然, 黄鹏鹏. 基于博弈论的再制造企业产品回收模型研究[J]. 计算机科学, 2023, 50(6A): 220300113-6.

CAI Ran, HUANG Pengpeng. [Study on Product Recovery Model of Remanufacturing Enterprises Based on Game Theory](#) [J]. Computer Science, 2023, 50(6A): 220300113-6.

相似文章推荐 (请使用火狐或 IE 浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

[一种基于博弈论的移动边缘计算资源分配策略](#)

Resource Allocation Strategy Based on Game Theory in Mobile Edge Computing

计算机科学, 2023, 50(2): 32-41. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.220300198>

[干扰环境下无人机群动态频谱决策方法](#)

Dynamic Spectrum Decision-making Method for UAV Swarms in Jamming Environment

计算机科学, 2022, 49(12): 326-331. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.220400228>

[急件订单插入下生产系统的重调度](#)

Rescheduling of Production System Under Interference of Emergency Order

计算机科学, 2022, 49(11A): 211100193-6. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.211100193>

[蜜罐博弈中信念驱动的攻防策略优化机制](#)

Belief Driven Attack and Defense Policy Optimization Mechanism in Honeypot Game

计算机科学, 2022, 49(9): 333-339. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.220400011>

[考虑中断风险与模糊定价的闭环供应链网络设计模型](#)

Closed-loop Supply Chain Network Design Model Considering Interruption Risk and Fuzzy Pricing

计算机科学, 2022, 49(7): 220-225. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.201100084>

基于博弈论的再制造企业产品回收模型研究

蔡 然 黄鹏鹏

江西理工大学机电工程学院 江西 赣州 341000

(2334773244@qq.com)

摘 要 基于不同回收渠道闭环供应链中的研究假设,针对回收商(制造商、零售商或第三方回收商)分别建立产品回收模型,应用 Stackelberg 博弈理论对模型进行分析,得出 3 种不同回收模型的均衡解,利用 Matlab 对最优回收模型解进行数值仿真。研究结果表明:在制造商领导的市场中,再制造产品的销售渠道定价和回收渠道定价不会因回收模型的不同而发生改变,但渠道成员的利润分配会随回收模型的不同而改变;由制造商进行回收的模型中整个闭环供应链利润最大,其余两种回收模型中闭环供应链利润相同;无论何种回收模型中制造商的利润总是最高的。

关键词: 再制造;闭环供应链;博弈论;回收模型;Matlab 仿真

中图法分类号 F224.9

Study on Product Recovery Model of Remanufacturing Enterprises Based on Game Theory

CAI Ran and HUANG Pengpeng

School of Mechanical and Electrical Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou, Jiangxi 341000, China

Abstract Based on the research assumptions in the closed-loop supply chain of different recycling channels, a product recycling model is established for recyclers (manufacturers, retailers or third-party recyclers), and the Stackelberg game theory is applied to analyze the models, and three types of recycling are obtained. For the equilibrium solution of the model, Matlab is used to numerically simulate the solution of the optimal recovery model. Research results show that in the market led by manufacturers, the pricing of remanufactured products' sales channels and recycling channels do not change due to the different recycling models, but the profit distribution of channel members varies with the different recycling models. In the models where recycling is carried out by the manufacturer, the entire closed-loop supply chain has the largest profit, and the other two recycling models have the same closed-loop supply chain profit. The manufacturer always has the highest profit in all recycling models.

Keywords Remanufacturing, Closed-loop supply chain, Game theory, Recycling model, Matlab simulation

居民消费水平的上升与产品更新换代的速度不断加快,随之产生的是大量废弃物与淘汰品。但在这些物品中,有极大一部分产品(如机械电子产品、家用电器等)零部件仍具有回收利用的可能性。如果将它们直接丢弃,不但是资源的一种浪费,更为致命的是会对生态环境造成不可挽救的伤害。据中国家用电器研究院的一份数据显示,自 2015 年以来,我国淘汰电子产品理论数量以年均 20% 的比例逐年增加,2020 年的理论报废数量更是达到了 6.2 亿台。据此估算,2021 年我国淘汰电子产品报废量将达到 7.4 亿台^[1]。因此,废旧品的回收再制造研究具有重要的实际意义,一方面能带来经济方面的增益,另一方面还可以促进资源的再利用,实现经济可持续发展。

闭环供应链指传统的正向供应链和废旧品回收再利用的逆向供应链完整循环。逆向供应链是闭环供应链中极其重要的一部分,指企业为从客户手中回收废旧产品而进行的一系列活动。由于逆向供应链在环境保护、资源利用方面的积极影响,越来越多的学者致力于对闭环供应链的研究。

Wang 等^[2]分析了由零售商进行产品回收的闭环供应链(Closed Loop Supply Chains, CLSC)系统,通过建立模型,研究了在不完全信息情况下,制造商如何通过提升零售商的

努力回收水平来提高自身的收益。Shen 等^[3]研究了不完全信息情况下,制造商通过与零售商建立契约合同来提高收益的问题。Gao 等^[4]就社会责任承担对 CLSC 的决策影响,研究了制造商为主导者时的定价策略和社会责任承担水平,并从收益共享和定价契约协调角度进行分析比较,发现收入共享契约的灵活性更强。Wang 等^[5]基于博弈论研究了由政府、制造商、零售商和第三方回收商组成的 CLSC 系统,分析了政府政策对供应链利益主体的最优决策,发现了渠道竞争会影响产品设计和回收责任,并提出了解决方法。Gu 等^[6]考虑了新产品与再造品的成本差异化, Huang 等^[7]比较了多种直线型产品的再制造模型,并从定价策略方面给出了相关建议。Zhao 等^[8]将再制造模型和成本差异化相互结合,分析了制造商分别处于优势和劣势下的定价与绩效。Li 等^[9]研究了由分销商和再制造商组成的 CLSC 系统,发现废旧品回收数量与回收价格关系紧密,利用博弈论和优化理论,证明了分散式系统中的再造品数量和回收价格偏高会进一步引起销售价格的偏高。

综上可知,再造品的定价协调策略的相关研究已有很多,但主要针对的是产品定价,以及不同权力领导机构下的收益选择。本研究将再造品的定价策略应用到产品回收模型的选择。

择问题上,综合考虑产品的销售定价、回收定价、渠道商成员利润和闭环供应链总收益;对比分析不同回收模型中的利益变化,选择最佳回收模型,为相关企业提供决策依据。

1 模型描述

如图 1 所示,制造商自行回收废旧产品。在此模型中,制造商以回收价 p_r 收购消费者手中的废旧产品,经过再制造处理后与新产品一起以批发价格 w 出售给零售商,零售商再以价格 p 出售给消费者。

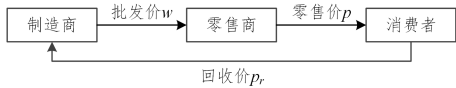


图 1 制造商回收模型

Fig. 1 Manufacturer recycling model

如图 2 所示,由制造商委派零售商进行废旧产品的回收。

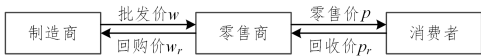


图 2 零售商回收模型

Fig. 2 Retailer recycling model

如图 3 所示,由第三方回收商进行废旧产品的回收。

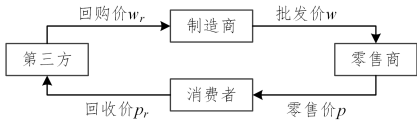


图 3 第三方回收商回收模型

Fig. 3 The third party recycler recycling model

1.1 模型假设

假设 1 所有回收的产品都可进行再制造,再造品和新产品在性能和效用上一致,以相同的方式投放市场,即拥有一样的包装、售价等。

假设 2 制造商是本文 Stackelberg 博弈模型中的领导者,成员按自身利益最大化决策。

假设 3 新产品与再造品的需求模式是一致的,市场需求量与零售价格呈负相关。废旧品的市场需求量与回收价格呈正相关,即随着回收价的上涨,废旧品的回收数量也会增加。

假设 4 根据文献[10],假设制造商、零售商和第三方回收商的运营成本与回收量成正比,运营成本随着回收量的增加而呈比例增加。

假设 5 市场上利益相关者只有制造商、零售商和第三方回收商,制造商、零售商、第三方回收商之间不存在内部和外部的相互竞争,它们的风险均为中风险且完全信息(所有成员对其他人的博弈信息有完全的掌握,博弈时战略和行动一致),回收和再造能力无限制^[11]。

1.2 模型参数

模型相关参数如表 1 所列,下标 M,R,A 分别代表制造商、零售商、第三方回收商。

市场需求函数 $D=b-\beta * p$, b, β 为常量且大于 0。

废旧品回收函数 $Q=a+\alpha * p_r$ ^[12],表示废旧产品的回收数量与 p_r 呈正比例关系(a, α 为常量且大于 0),即随着废旧产品回收价格的提高,其回收量也将增大。

$C_{(M,R,A)}=\delta Q=\delta(a+\alpha * p_r)$,其中, $\delta>0$ 代表回收运营成

本系数,表示产品回收的难易程度, δ 越大,表明回收越困难^[13](这是产品的特性造成的),回收成本与回收量呈线性正相关。

表 1 模型参数

Table 1 Model parameters

parameter	Paraphrase
p	Product retail price
p_r	Recycling price of waste products
w	Wholesale price given by the manufacturer
w_r	Buyback price given by the manufacturer
p_0	new product unit
p_1	manufacturing cost
D	remanned unit
Q	manufacturing cost
R_R	market demand
R_M	Total waste product recycling
R_A	retailer profit
T	manufacturer's profit
C_M	Third Party Recycler Profits
C_A	Closed-loop supply chain total profit
a	Manufacturer operating cost recovery
b	Third-party operating recovery costs
α	Green recycling
β	total market capacity
δ	Recovery Price Sensitivity

2 模型构建与求解

2.1 制造商回收模型

制造商利润等于出售新产品利润加上出售再造品利润减去运营成本。

$$R_M=(w-p_0) * (b-\beta * p-a-\alpha * p_r)+(w-p_1-p_r) * (a+\alpha * p_r)-\delta * (a+\alpha * p_r) \tag{1}$$

零售商利润等于产品(新产品和再造品)销售利润加上废旧品利润减去运营成本。

$$R_R=(p-w) * (b-\beta * p) \tag{2}$$

闭环供应链总利润等于制造商利润加上零售商利润。

$$T=R_M+R_R \tag{3}$$

采用逆向归纳法求解模型,由 $\frac{d^2 R_R}{d^2 p}<0$, R_R 是关于 p 的凹

函数,通过 $\frac{d R_R}{d p}=0$ 可得最优零售价。

$$p=(b+\beta * w)/(2 * \beta) \tag{4}$$

将式(4)代入式(1),由 $\frac{d^2 R_M}{d^2 w}, \frac{d^2 R_M}{d^2 p_r}<0$ 知, R_M 是关于 w ,

p_r 的凹函数,通过 $\frac{d R_M}{d w}=0, \frac{d R_M}{d p_r}=0$ 求解得到最优回收价和最优批发价。

$$p_r=\frac{-(a+\alpha * \delta-\alpha * p_0+\alpha * p_1)}{(2 * \alpha)} \tag{5}$$

$$w=(b+\beta * p_0)/(2 * \beta) \tag{6}$$

将式(5)与式(6)代入式(4)求得最优解。

$$p=(3 * b+\beta * p_0)/(4 * \beta)$$

再制造回收模型中的最优解。

$$w=(b+\beta * p_0)/(2 * \beta)$$

$$p=(3 * b+\beta * p_0)/(4 * \beta)$$

$$p_r=\frac{-(a+\alpha * \delta-\alpha * p_0+\alpha * p_1)}{(2 * \alpha)}$$

分别将 w, p, p_r 代入模型,由此可得各方的最佳收益。

制造商利润:

$$R_M = \frac{(a * p_0 - a * \delta - a * p_1)}{2} + \frac{(\alpha * \delta^2 + \alpha * p_0^2 - b * p_0)}{4} + (\alpha * p_1^2) + (\beta * p_0^2) / 8 + a^2 / (4 * \alpha) + b^2 / (8 * \beta) + \frac{(\alpha * \delta * p_1 - \alpha * \delta * p_0 - \alpha * p_0 * p_1)}{2}$$

零售商利润: $R_R = (b - \beta * p_0)^2 / (16 * \beta)$

闭环供应链总利润:

$$T = \frac{(a * p_0 - a * \delta - a * p_1)}{2} - \frac{(3 * b * p_0)}{8} + \frac{(\alpha * \delta^2 + \alpha * p_0^2 + \alpha * p_1^2)}{4} + a^2 / (4 * \alpha) + (3 * \beta * p_0^2) / 16 + (3 * b^2) / (16 * \beta) + \frac{(\alpha * \delta * p_1 - \alpha * \delta * p_0 - \alpha * p_0 * p_1)}{2}$$

2.2 零售商回收模型

制造商利润等于出售新产品的利润加上出售再造品的利润。

$$R_M = (w - p_0) * (b - \beta * p - a - \alpha * p_r) + (w - p_1 - w_r) * (a + \alpha * p_r) \quad (7)$$

零售商利润等于产品(新产品和再造品)销售利润加上废旧品利润减去运营成本。

$$R_R = (p - w) * (b - \beta * p) + (w_r - p_r) * (a + \alpha * p_r) - \delta * (a + \alpha * p_r) \quad (8)$$

闭环供应链总利润等于制造商利润加上零售商利润。

$$T = R_M + R_R \quad (9)$$

采用逆向归纳法求解模型,由 $\frac{d^2 R_R}{d^2 p} < 0$ 和 $\frac{d^2 R_R}{d^2 p_r} < 0$ 知,

R_R 是关于 p, p_r 的凹函数,通过 $\frac{dR_R}{dp} = 0, \frac{dR_R}{dp_r} = 0$ 可得最优零售价和最优回收价。

$$p = (b + \beta * w) / (2 * \beta) \quad (10)$$

$$p_r = \frac{-(a + \alpha * \delta - \alpha * w_r)}{(2 * \alpha)} \quad (11)$$

将式(10)与式(11)代入式(7),由 $\frac{d^2 R_M}{d^2 w} < 0$ 和 $\frac{d^2 R_M}{d^2 w_r} < 0$

知, R_M 是关于 w, w_r 的凹函数,通过 $\frac{dR_M}{dw} = 0, \frac{dR_M}{dw_r} = 0$ 求解得到最优批发价和最优回购价。

$$w = \frac{(b + \beta * p_0)}{(2 * \beta)} \quad (12)$$

$$w_r = \frac{-(a - \alpha * \delta - \alpha * p_0 + \alpha * p_1)}{(2 * \alpha)} \quad (13)$$

将式(12)与式(13)代入式(10)与(11)求解得到:

$$p = (3 * b + \beta * p_0) / (4 * \beta)$$

$$p_r = \frac{-(3 * a + \alpha * \delta - \alpha * p_0 + \alpha * p_1)}{(4 * \alpha)}$$

零售商回收模型中的最优解:

$$w = (b + \beta * p_0) / (2 * \beta)$$

$$w_r = \frac{-(a - \alpha * \delta - \alpha * p_0 + \alpha * p_1)}{(2 * \alpha)}$$

$$p = (3 * b + \beta * p_0) / (4 * \beta)$$

$$p_r = \frac{-(3 * a + \alpha * \delta - \alpha * p_0 + \alpha * p_1)}{(4 * \alpha)}$$

分别将 p, p_r, w, w_r 代入,由此可得各方的最佳收益。

制造商利润:

$$R_M = \left(\frac{(a - \alpha * \delta + \alpha * p_0 - \alpha * p_1)}{4} \right) * \left(\frac{(b + \beta * p_0)}{(2 * \beta)} - p_1 + \frac{(a - \alpha * \delta - \alpha * p_0 + \alpha * p_1)}{(2 * \alpha)} \right) + \left(p_0 - \frac{(b + \beta * p_0)}{(2 * \beta)} \right) * \left(\frac{(a - b - \alpha * \delta + \alpha * p_0 - \alpha * p_1 + \beta * p_0)}{4} \right)$$

零售商利润:

$$R_R = \frac{(a * p_0 - a * \delta - a * p_1 - b * p_0)}{8} + \frac{(\alpha * \delta^2 + \alpha * p_0^2 + \alpha * p_1^2)}{16} + (\beta * p_0^2) / 16 + a^2 / (16 * \alpha) + b^2 / (16 * \beta) + \frac{(\alpha * \delta * p_1 - \alpha * \delta * p_0 - \alpha * p_0 * p_1)}{8}$$

闭环供应链总利润:

$$T = \frac{(3 * a * p_0 - 3 * a * \delta - 3 * a * p_1 - 3 * b * p_0)}{8} + \frac{(3 * a * \delta^2 + 3 * a * p_0^2 + 3 * a * p_1^2)}{16} + \frac{(3 * \beta * p_0^2)}{16} + \frac{(3 * a^2)}{(16 * \alpha)} + \frac{(3 * b^2)}{(16 * \beta)} + \frac{(3 * a * \delta * p_1 - 3 * a * \delta * p_0 - 3 * a * p_0 * p_1)}{8}$$

2.3 第三方回收模型

制造商利润等于出售新产品的利润加上出售再造品的利润。

$$R_M = (w - p_0) * (b - \beta * p - a - \alpha * p_r) + (w - p_1 - w_r) * (a + \alpha * p_r) \quad (14)$$

零售商利润等于产品(新产品和再造品)销售利润减去运营成本。

$$R_R = (p - w) * (b - \beta * p) \quad (15)$$

第三方利润由废旧品利润减去运营成本组成。

$$R_A = (w_r - p_r) * (a + \alpha * p_r) - \delta * (a + \alpha * p_r) \quad (16)$$

闭环供应链总利润等于制造商利润加上零售商利润。

$$T = R_M + R_R + R_A \quad (17)$$

采用逆向归纳法求解模型,由 $\frac{d^2 R_R}{d^2 p} < 0$ 和 $\frac{d^2 R_A}{d^2 p_r} < 0$ 知,

R_R, R_A 分别是关于 p, p_r 的凹函数,通过 $\frac{dR_R}{dp} = 0, \frac{dR_A}{dp_r} = 0$ 可得最优零售价和最优回收价。

$$p = (b + \beta * w) / (2 * \beta) \quad (18)$$

$$p_r = \frac{-(a + \alpha * \delta - \alpha * w_r)}{(2 * \alpha)} \quad (19)$$

将式(18)与式(19)代入式(14),由 $\frac{d^2 R_M}{d^2 w} < 0$ 和 $\frac{d^2 R_M}{d^2 w_r} < 0$

知, R_M 是关于 w, w_r 的凹函数,通过 $\frac{dR_M}{dw} = 0$ 和 $\frac{dR_M}{dw_r} = 0$ 求解得到最优批发价和最优回购价。

$$w = (b + \beta * p_0) / (2 * \beta) \quad (20)$$

$$w_r = \frac{-(a - \alpha * \delta - \alpha * p_0 + \alpha * p_1)}{(2 * \alpha)} \quad (21)$$

将式(20)与式(21)代入式(18)与(19)求得第三方回收模型中的最优解。

$$w = (b + \beta * p_0) / (2 * \beta)$$

$$p = (b + \beta * w) / (2 * \beta)$$

$$p_r = -(3 * a + \alpha * \delta - \alpha * w_r) / (4 * \alpha)$$

$$w_r = \frac{-(a - \alpha * \delta - \alpha * p_0 + \alpha * p_1)}{(2 * \alpha)}$$

分别将 p, p_r, w, w_r 代入, 由此可得各方的最佳收益。

制造商利润:

$$R_M = \left(\frac{(a - \alpha * \delta + \alpha * p_0 - \alpha * p_1)}{4} \right) * \left(\frac{(b + \beta * p_0)}{(2 * \beta)} - p_1 + \frac{(a - \alpha * \delta - \alpha * p_0 + \alpha * p_1)}{(2 * \alpha)} \right) + \left(p_0 - \frac{(b + \beta * p_0)}{(2 * \beta)} \right) * \left(\frac{(a - b - \alpha * \delta + \alpha * p_0 - \alpha * p_1 + \beta * p_0)}{4} \right)$$

零售商利润:

$$R_R = (b - \beta * p_0)^2 / (16 * \beta)$$

第三方利润:

$$R_A = (w_r - p_r) * (a + \alpha * p_r) - \delta * (a + \alpha * p_r)$$

闭环供应链总利润:

$$T = \frac{(3 * a * p_0 - 3 * a * \delta - 3 * a * p_1 - 3 * b * p_0)}{8} + \frac{(3 * \alpha * \delta^2 + 3 * \alpha * p_0^2 + 3 * \alpha * p_1^2)}{16} + \frac{(3 * \beta * p_0^2)}{16} + \frac{(3 * a^2)}{(16 * \alpha)} + \frac{(3 * b^2)}{(16 * \beta)} + \frac{(3 * \alpha * \delta * p_1 - 3 * \alpha * \delta * p_0 - 3 * \alpha * p_0 * p_1)}{8}$$

2.4 结论

对模型推导求解, 可得以下结论(Z, L, D 分别代表制造商回收模型、零售商回收模型、第三方回收商模型)。

结论 1 制造商回收模型中, 闭环供应链总利润最高; 零售商回收模型与第三方回收模型中, 两者闭环供应链总利润相等。证明如下:

因为

$$ZT - LT = ZT - DT = \frac{(a - \alpha * \delta + \alpha * p_0 - \alpha * p_1)^2}{(16 * \alpha)} LT - DT = 0$$

其中 $(a - \alpha * \delta + \alpha * p_0 - \alpha * p_1)^2 > 0$, 且 $\alpha > 0$ 恒为一个正数, 所以 $LT = DT, ZT > LT, ZT > DT$, 结论 1 得证。

结论 2 制造商利润值在制造商回收模型中达到最大, 在零售商回收模型和第三方回收模型中利润相同。证明如下:

因为

$$ZR_M - LR_M = ZR_M - DR_M = \frac{(a - \alpha * \delta + \alpha * p_0 - \alpha * p_1)^2}{(8 * \alpha)} LR_M - DR_M = 0$$

其中 $(a - \alpha * \delta + \alpha * p_0 - \alpha * p_1)^2 > 0$, 且 $\alpha > 0$, 所以 $LR_M = DR_M, ZR_M > LR_M, ZR_M > DR_M$, 结论 2 得证。

结论 3 零售商利润值在零售商回收模型中达到最大, 在制造商回收模型和第三方回收模型中利润相同。证明如下:

因为

$$LR_R - ZR_R = LR_R - DR_R = \frac{(a - \alpha * \delta + \alpha * p_0 - \alpha * p_1)^2}{(16 * \alpha)} ZR_R - DR_R = 0$$

其中, $(a - \alpha * \delta + \alpha * p_0 - \alpha * p_1)^2 > 0$, 且 $\alpha > 0$, 所以 $ZR_R = DR_R, LR_R > ZR_R, LR_R > DR_R$, 结论 3 得证。

3 数值算例

为验证上述结论, 通过一个算例进行说明。某企业以制造家电产品为主, 其产品销量处于领先地位, 产品遍及全国大部分城市。对于该企业来说, 废旧品的回收模式问题便显得极其重要。以“月”为时间周期, 考察某个地区的废旧家电回收数量情况, 相关参数如下: 制造新产品的单位成本为 $p_0 = 20$ 元, 再造品的单位成本为 $p_1 = 5$ 元, 市场容量 b 为 1 000 个, 回收价敏感系数 $\alpha = 30$ 个/元, 零售价敏感系数 $\beta = 5$ 个/元。随着科技化的回收设备逐渐普及, 回收成本已大大降低, 此处取回收成本系数 $\delta = 2$, 取绿色回收量 $a = 20$ 个, 则市场需求 $D = 1\,000 - 5 * p$, 废旧产品回收量 $Q = 20 + 30 * p_r$ 。将以上数据分别代入求解^[14], 得到的结果如表 2 所列。

表 2 参数值
Table 2 Parameter values
(单位: 元)

Parameter	Model		
	Manufacturer recycling model	Retailer recycling model	Third Party Recycling Models
w	110.00	110.00	110.00
w_r	—	8.17	8.17
p	155.00	155.00	155.00
p_r	5.10	2.75	2.75
R_M	21 650.83	2095.041	20950.41
R_R	10 125.21	10 475.21	10 125.21
R_A	—	—	350.00
T	31 775.83	31 425.43	31 425.43

由表 2 得:

$$LT = DT, ZT - LT = ZT - DT = 350.4 > 0$$

$$LR_M = DR_M = 20950.41$$

$$ZR_M - LR_M = ZR_M - DR_M = 700.42 > 0$$

$$LR_R - ZR_R = LR_R - DR_R = 350.21 > 0$$

$$ZR_R = DR_R = 10\,125.21$$

证实了结论的正确性。

4 仿真分析

通过 matlab 进行数值仿真, 分析回收模型中的主要参数对输出利润的影响以及敏感程度。与各方利润、售价有关的参数主要有两类: 一类是成本参数(p_0, p_1), 另一类是敏感系数(α, β, δ)。产品成本由于材料成本等市场的稳定性、技术的成熟性已经渐渐持平, 不会有太大的变化。而敏感系数却经常因市场行情变化、厂商定价不同而波动较大。因此本节主要研究各项敏感参数(α, β, δ)对输出利润的影响。

从制造商利益最大化角度出发, 选择制造商回收模型进行仿真分析。此回收模型中闭环供应链总利润达到最大值, 各方利润也比较均衡, 其他回收模型与此回收模型具有一定的相似性, 因此制造商回收模型有较大的代表性。基于制造商回收模型, 分别对零售价 p 、回收价 p_r 、批发价 w 、制造商利润 R_M (单位: 元) 进行敏感系数分析。取上节参数 $p_0 = 20$ 元、 $p_1 = 5$ 元、 $a = 20$ 、 $b = 1\,000$, 利用 matlab 作图。

分析批发价 w 、零售价 p 、回收价 p_r 随参数 α, β, δ (其中

$0<\alpha,\beta,\delta<10$)的变化情况可以得到如下结论:

(1)图 4 表明批发价 w 随着零售价敏感系数 β 的变化而变化,两者呈反比例关系。敏感系数越小,批发价就越高,而且市场需求 D 也将增加。

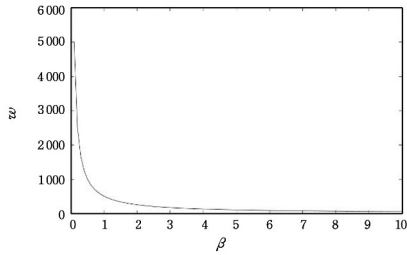


图 4 批发价变化趋势图

Fig. 4 Chart of wholesale price trend

(2)图 5 表明零售价 p 随敏感系数 β 的增大而降低,两者呈反比例关系。零售价较低时,消费者对产品的需求量会变大;但当产品售价定价过高时,同样会引起销量的骤减。只有将零售价控制在合理的范围才能确保零售价敏感系数 β 处于一个较为合理的值,进而提高批发价,提高利润。人们消费水平的不同,对产品的敏感程度也会变化,这也就意味着管理者可以分析市场行情,进行区域定价,通过对敏感系数的适当调控来增加企业的收益。

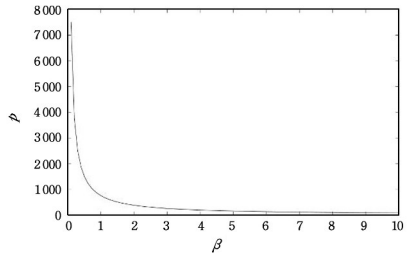


图 5 零售价变化趋势图

Fig. 5 Chart of retail price trend

(3)图 6 表明废旧产品回收价 p_r 受回收价格敏感系数 α 和回收运营成本系数 δ 的共同影响。回收价随敏感系数的增大而提高,回收运营成本系数对回收价影响较为平缓。与零售价相似,消费者对回收价的波动比较敏感,回收价的变化会影响回收数量 Q ,进而影响企业收益。因此,制定回收价时一定要分析市场行情,充分考虑消费者的利益,适当变化。

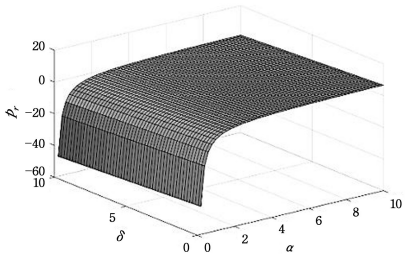


图 6 回收价变化趋势图

Fig. 6 Trend chart of recovery price

制造商既是主导者,也是闭环供应链的一环,担任着至关重要的角色,其收益受到众多因素的影响。这里主要探究参数分别为 $\delta=2,\alpha=30,\beta=5$ 时与制造商利润 R_M 的关系。为了更好地观察分析参数的变化,固定其中一个,看另外两个因素与制造商利润 R_M 之间的变化关系。

(4)当 $\delta=2,0<\alpha,\beta<100$ 时,如图 7 所示,制造商利润 R_M 主要与回收价格敏感系数和零售价敏感系数有关,制造商利润 R_M 随 β 增大而减小,回收价格敏感系数 α 对 R_M 影响较平缓。

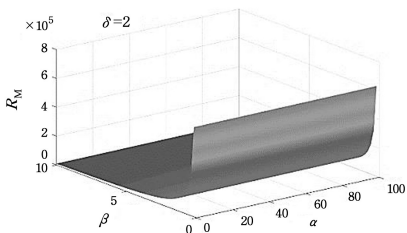


图 7 $\delta=2$ 时制造商利润趋势图

Fig. 7 Trend chart of manufacturer profit when $\delta=2$

(5)当 $\alpha=30,0<\beta,\delta<100$ 时,如图 8 所示,制造商利润主要由零售价敏感系数和回收运营成本系数决定,其中受回收运营成本系数影响较小,与零售价格敏感系数呈反比例关系,制造商利润 R_M 随 β 增大而减小。

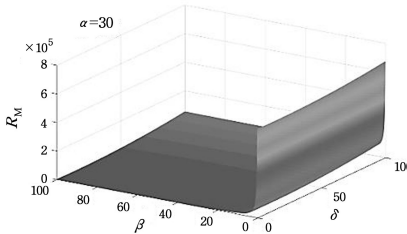


图 8 $\alpha=30$ 时制造商利润趋势图

Fig. 8 Trend chart of manufacturer profit when $\alpha=30$

(6)当 $\beta=5,0<\delta,\alpha<100$ 时,如图 9 所示,此时制造商利润随回收运营成本系数和回收价格敏感系数的变化而变化。当回收价格敏感系数较小时,回收价较低,制造商不得不把部分利润投入废旧品的回收,刺激回收数量增长;当回收价格敏感系数较大时,因为提高了产品的回收价,强化了消费者返回废旧品的愿望,使得回收量得到提升。废旧品回收量的激增,规模效应带来的经济效益便体现为制造商利润的增加。

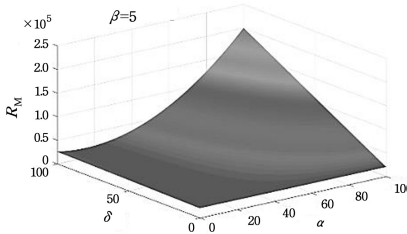


图 9 $\beta=5$ 时制造商利润趋势图

Fig. 9 Trend chart of manufacturer profit when $\beta=5$

结束语 基于制造商领导的市场分别构建了由制造商回收、零售商回收、第三方回收的逆向物流产品回收模型,研究了不同回收模型中闭环供应链的销售渠道利润分配、定价决策问题。同时分析了制造商回收模型中敏感系数 (α,β,δ) 与渠道成员利润的变化规律,并借助 matlab 进行了数值仿真。主要得到以下结论:

(1)不同回收模型中,制造商自行回收时闭环供应链总利润最高。

(2)制造商收益在制造商回收模型中达到最高;零售商收益在零售商回收模型中达到最高,且等于第三方回收模型中

的零售商利润与第三方回收商利润之和。

本文只考虑了单一制造商、单一零售商和单一第三方回收商,在未来的工作中可以扩展多制造商和多零售商竞争的情形,还可以考虑再造品和新产品差别定价的情况。这些研究将有助于企业更好地做出相关决策。

参 考 文 献

[1] ZHAO L, DAI Q H. Research on the Development Status and Trend of Supply Chain in Home Appliance Industry[J]. Supply Chain Management, 2020, 1(10): 72-87.

[2] WANG W B, ZHOU S H, ZHANG M, et al. A Closed-Loop Supply Chain with Competitive Dual Collection Channel under Asymmetric Information and Reward-Penalty Mechanism[J]. Sustainability, 2018, 10(7): 21-41.

[3] SHEN Y, WILLEMS S P. Coordinating a channel with asymmetric cost information and the manufacturers optimality[J]. International Journal of Production Economics, 2012, 135(1): 125-135.

[4] GAO J H, HAN H S, HOU L T, et al. Decision-making and coordination of closed-loop supply chain considering social responsibility[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2014, 20(6): 1453-1464.

[5] WANG Z, LI B Y, LIU Z, et al. Research on the Influence of Government Regulation on Double-Responsibility and Dual-Channel Closed-Loop Supply Chain [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2017(1): 1-16.

[6] GU Q L, JI J H, GAO T G. Pricing management for a closed-loop supply chain[J]. Journal of Revenue & Pricing Management, 2008, 7(1): 45-60.

[7] HUANG Z Q, DA Q L. Efficiency Analysis of Decision Structure of Linear Remanufacturing Supply Chain[J]. Journal of Management Science, 2006, 9(4): 51-57.

[8] ZHAO X M, LIN Y H, SU C M. Performance Analysis of S-M Two-Level Closed-Loop Supply Chain under Different Channel

Power Structures[J]. China Management Science, 2012, 20(2): 78-86.

[9] LI X, LI Y J. Research on Reverse Supply Chain Optimization and Coordination Considering Recycling Pricing and Sales Pricing in Stochastic Environment[J]. System Science and Mathematics, 2011(11): 1511-1523.

[10] BHATTACHARYA S, GUIDE J R D R, VAN WASSENHOVE L N. Optimal order quantities with remanufacturing across new product generations[J]. Production and Operations Management, 2006, 15(3): 421-431.

[11] XIA X Q, LI B. Research on the impact of government carbon tax and subsidy policies on outsourcing remanufacturing [J]. China Management Science, 2021, 40(12): 23-33.

[12] MEI Z Y. Dual-channel closed-loop supply chain coordination mechanism based on third-party logistics services[J]. Logistics Science and Technology, 2016, 39(6): 115-120.

[13] ZHANG L. Construction and Optimization of Reverse Logistics System in Uncertain Environment[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.

[14] WU C H. Product-design and pricing strategies with remanufacturing[J]. European Journal of Operational Research, 2020, 218(2): 1-19.



CAI Ran, born in 1996, master. His main research interests include lean production and enterprise economics.



HUANG Pengpeng, born in 1961, master, professor. His main research interests include simulation optimization of production and service system, operation mechanism of bulk-mechanical system.