

基于回收率的多阶段闭环供应链模型研究

方 惠^a, 韩曙光^b, 丁晓韵^a, 胡觉亮^b

(浙江理工大学, a. 经济管理学院; b. 理学院, 杭州 310018)

摘 要: 建立了由制造商、零售商、顾客、政府与第三方物流构成的闭环供应链回收再制造模型,在传统模式(制造商—零售商—顾客)的基础上,引入电子商务模式(制造商—顾客),政府为监管制造商回收废旧产品,设定标准回收率并对其进行奖惩。模型以供应链优化和增加成员利润为目的,通过博弈理论分析多阶段成员的决策行为和差异产品的定价。算例结合某家电下乡产品回收再制造情况进行数值计算,分析参数变化对回收率和闭环供应链效益的影响,为闭环供应链的管理提供理论指导和建议。

关键词: 闭环供应链; 多阶段; 回收率; 定价

中图分类号: F252.1 **文献标志码:** A

引 言

随着经济的迅速发展和环境保护意识的普及,制造型企业面临着生产发展和环境保护的双重压力,进而越来越多的企业选择参与闭环供应链,不仅迫于政府相关环保政策的压力,也因参与闭环供应链有利于降低成本提高效益。闭环供应链是指制造商生产的产品通过正向物流到达顾客手中后,以顾客为起点,通过逆向物流回收废旧产品进行再制造所形成的系统。近年来,闭环供应链是国内外关注的热点,研究企业、顾客、政府以及第三方物流(3PL)等的博弈行为和效益优化问题,具有理论意义和实用价值^[1]。

在闭环供应链研究的源头, Jayaraman 等^[2]研究电子设备企业的物流网络结构,利用混合整数规划确定电子器件再制造工厂的数量和分布。Spengler 等^[3]构建带限制的设施选址多层模型来研究钢铁企业的副产品回收再制造问题。Jayaraman 等^[4]针对逆向物流环节和设施的选址分布,通过设计启发式算法,提出了成本最小的解决方案。Yang 等^[5]考虑带多个零售商和具有价格敏感函数的易腐

蚀产品闭环供应链,研究集中优化和分散优化对效益的影响。Amin 等^[6]研究闭环供应链中带制造工厂与收集中心的总成本最小化问题,建立混合整数线性规划模型。王文宾等^[7]针对再制造成本优势,构建三种博弈最优决策模型。关启亮等^[8]根据政府补贴,考虑回收率,讨论不同模式下参数变化对回收率和供应链成员利润的影响。熊中楷等^[9]分析三类回收渠道的利润结果,讨论政府参与对利润和价格的影响。程晋石等^[10]在市场结构分析基础上提出闭环供应链利润分配的问题,通过启发式算法和贪婪算法求得最优分配结果。徐兵等^[11]考虑生产商委托零售商回收废旧产品以进行再制造问题,研究分别由单生产商主导和单零售商主导的闭环供应链。易余胤^[12]讨论分别由制造商领导和零售商领导的模型以及制造商和零售商的均衡博弈模型的最大效益。郑鑫等^[13]基于 Shapley 算法进行闭环供应链合作模式下的利润分配探讨,构建利润分配模型。

随着网络时代的来临,物流和电子商务得到迅猛发展,电子商务的发展使得产品销售渠道更加多元化,发展空间也更广阔,制造商借助 3PL 的专业化和规模化降低成本^[14]。本文将 3PL 引入到闭环

收稿日期: 2014-03-24

基金项目: 国家自然科学基金(11201428, 11271324); 浙江省自然科学基金(Y6110091); 浙江理工大学研究生创新研究项目(YCX12035)

作者简介: 方 惠(1991-),男,硕士研究生,浙江温州人,主要从事物流工程与供应链管理方面的研究。

通信作者: 韩曙光, E-mail: zist001@163.com

供应链中,结合电子商务考虑多渠道和多阶段情形,提出具有替代效应的再制造产品,基于回收率解决多类产品的定价问题。此外,本文根据近年家电下乡补贴的实际,构建数值算例并进行敏感性分析。

一、问题描述与模型建立

本文构建由制造商、零售商、政府、3PL 和顾客构成的闭环供应链模型。第一阶段,正向物流(实线箭头,见图1)中,制造商将产品批发给零售商,由零售商零售给顾客,在电子商务渠道中制造商通过3PL将产品直销给顾客;逆向物流(虚线箭头)中,3PL负责从顾客手中回收废旧产品,制造商进行再制造,政府根据标准回收率对制造商进行相应奖惩。第二阶段,制造商将废旧产品进行再制造与全新产品同步投入市场,但传统渠道只出售全新产品,在电子商务出售废旧产品回收再制造的产品,回收方式与第一阶段一致。如图1所示。

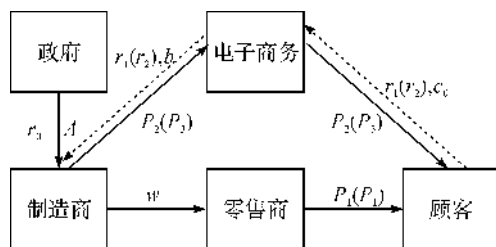


图1 多阶段闭环供应链模型示意

注:实线箭头:正向物流;虚线箭头:逆向物流;括号内:多阶段

(一)符号说明

c_m :制造商使用全新材料制造的单位成本;

c_r :制造商使用废旧产品材料制造的单位成本;

r_i :制造商在阶段 i 内的产品回收率;

r_0 :政府设定的标准回收率;

w :制造商对零售商的批发价格;

p_1 :零售商对顾客全产品的零售价格;

p_2 :电子商务下制造商对顾客全产品的销售价格;

p_3 :电子商务下制造商对顾客再制造产品的销售价格;

α :传统市场最大规模容量;

β :顾客需求对产品价格的敏感系数;

γ :顾客需求对替代产品价格的敏感系数;

k :顾客选择电子商务市场最大规模容量;

b :制造商从3PL回收产品的单位补贴;

c_0 :3PL从顾客回收产品的单位成本;

A :政府对制造商关于标准回收率设定的单位奖惩系数;

Π_m 表示制造商的期望利润;

Π_r 表示零售商的期望利润;

Π_{3PL} 表示3PL的期望利润。

(二)模型假设

a) 成员均为理性独立决策者,均按照自身利益最大化进行决策,分别结合单阶段和多阶段情形考虑。

b) 制造商制造产品时可选用全新材料生产,也可使用回收产品或其部分零部件制造生产,用废旧产品再制造的单位成本为 c_r ,用全新材料制造的单位成本为 c_m ,制造产品的单位平均成本为 $c = (1 - r_i)c_m + r_i * c_r$,两种方式生产的产品在成本和售价上是有区别,且顾客可以辨别。

c) 制造商以回收补贴 b 从3PL回收废旧产品, b 包含电子商务渠道中对3PL的正向物流配送的补贴;政府对回收产品的单位奖惩系数为 A ,制造商生产的产品以价格 w 批发给零售商,零售商以零售价 p_1 销售给顾客,在电子商务过程中制造商以价格 p_2 销售给顾客,第二阶段时在电子商务过程中制造商以价格 p_3 销售给顾客,产品使用后以废旧产品形式重新进入回收再制造领域,3PL回收废旧产品的单位成本为 c_0 。

d) 第一阶段,产品在传统市场上的需求函数为 $D_1 = \alpha - \beta p_1 + \gamma p_2$,产品在电子商务模式下的需求函数为 $D_2 = k - \beta p_2 + \gamma p_1$,第二阶段,产品在传统市场上的需求函数为 $D_1 = \alpha - \beta p_1 + \gamma p_3$,产品在电子商务过程中的需求函数为 $D_2 = k - \beta p_3 + \gamma p_1$,其中 $\alpha > k > 0$ 为市场规模,且回收再制造对于市场容量的影响忽略不计,另外根据实际假设 $p_1 > p_2 > p_3 > 0$ 。

(三)基于废旧产品回收再制造情况下的博弈行为决策分析

本文考虑单个制造商、单个零售商、单个3PL以及政府组成的闭环供应链。制造商决定对零售商的批发价格 w 和电子商务渠道的销售价格,实现自己的利润最大化;零售商和3PL则在制造商行为决策的基础上博弈各自的销售价格和回收补贴,使自身利润最大,同时政府根据制造商的回收率进行奖惩。根据每个参与者都是经济人,均是理性的决策者,皆以自身利润最大化为目标进行博弈决策。在常见的分散式闭环供应链中假设制造商为主方,零售商与3PL为从方,形成一个一主多从的 Stackelberg 博弈模型。

1. 第一阶段回收再制造模型

在博弈模型第一阶段中,根据上述假设和条件,可以得出制造商、零售商和3PL的利润函数分别为:

制造商的利润函数包括两类产品的销售利润减去支付于3PL的回收补贴再加上政府对其的奖惩金额:

$$\Pi_m = (\omega - c_m)(\alpha - \beta p_1 + \gamma p_2) + (p_2 - c_m)(k - \beta p_2 + \gamma p_1) - br_1[\alpha + k - (\beta - \gamma)(p_1 + p_2)] + A(r_1 - r_0)[\alpha + k - (\beta - \gamma)(p_1 + p_2)]$$

零售商的利润函数是传统渠道下零售商的销售利润:

$$\Pi_r = (p_1 - \omega)(\alpha - \beta p_1 + \gamma p_2)$$

3PL的利润函数为制造商支付给其的回收补贴减去回收以及配送的成本:

$$\Pi_{3PL} = br_1[\alpha + k - (\beta - \gamma)(p_1 + p_2)] - c_0[\alpha + k - (\beta - \gamma)(p_1 + p_2)]r_1^2$$

首先分析零售商的博弈问题,零售商可定最优的零售价以最大化自身利润,根据斯坦伯格博弈逆向归

纳法则,求零售商利润函数 Π_r 对 p_1 求一阶偏导得:

$$\frac{\partial \Pi_r}{\partial p_1} = \alpha - 2\beta p_1 + \omega\beta + \gamma p_2 = 0$$

$$\omega = 2p_1 - \frac{\alpha + \gamma p_2}{\beta}$$

将上式代入制造商利润函数 Π_m ,求 Π_m 对 p_1 、 p_2 求一阶偏导,且令一阶条件为零,得:

$$\frac{\partial \Pi_m}{\partial p_1} = \gamma(p_2 - c_m) - \beta(\omega - c_m) -$$

$$br(\gamma - \beta) + A(r_1 - r_0)(\gamma - \beta)$$

$$\frac{\partial \Pi_m}{\partial p_2} = k - \beta p_2 + \gamma p_1 - \beta(p_2 - c_m) + (\omega - c_m)\gamma -$$

$$br_1(\gamma - \beta) + A(r_1 - r_0)(\gamma - \beta)$$

可求得制造商实施的最优回收率以及零售商和电子商务时销售两类差异产品的利润最大时定价:

$$r_1 = \frac{4\left(\alpha + k - \frac{c_0(\alpha + k)}{b}\right)4(\beta + \gamma) - 2\beta k - \alpha\gamma - 2\beta\alpha - 2k\gamma + \frac{\alpha}{\beta}\gamma^2}{4\gamma^2 - 4\beta^2 - \beta\gamma + \frac{\gamma^3}{\beta}} + Ar_0 + c_m$$

$$p_1 = \frac{\left[\gamma^2 + \frac{\gamma^3}{\beta} - 2\beta^2\right][A(r_1 - r_0) - br_1 - c_m] - \frac{\alpha\gamma^2}{\beta} + 2k\gamma + 2\alpha\beta}{4\beta^2 - 4\gamma^2}$$

$$p_2 = \frac{[3\gamma^2 - \beta\gamma - 2\beta^2][A(r_1 - r_0) - br_1 - c_m] + \alpha\gamma + 2k\beta}{4\beta^2 - 4\gamma^2}$$

2. 第二阶段回收再制造模型

在该博弈模型第二阶段中,制造商将第一阶段回收的废旧产品全部进行再制造,在电子商务阶段采用销售回收再制造产品的策略,传统渠道政策不变。零售商和3PL则在制造商给定的条件下分别调节销售价格和回收补贴,根据以上假设,可以得出制造商、零售商和3PL的利润函数分别为:

$$\Pi_m = (\omega - c_m)(\alpha - \beta p_1 + \gamma p_3) + (p_3 - [(1 - r_1)c_m + r_1c_r])(k - \beta p_3 + \gamma p_1) - br_2[\alpha + k - (\beta - \gamma)(p_1 + p_2)] + A(r_2 - r_0)[\alpha + k - (\beta - \gamma)(p_1 + p_2)]$$

零售商的利润函数是传统渠道下零售商的销售利润:

$$\Pi_r = (p_1 - \omega)(\alpha - \beta p_1 + \gamma p_3)$$

3PL的利润函数为制造商支付给其的费用减去自身运行物流运输的成本:

$$\Pi_{3PL} = br_2[\alpha + k - (\beta - \gamma)(p_1 + p_3)] - c_0[\alpha + k - (\beta - \gamma)(p_1 + p_3)]r_2^2$$

$$r_2 = \frac{4\left(\alpha + k - \frac{c_0(\alpha + k)}{b}\right)4(\beta + \gamma) - (\beta\gamma - \gamma^2 + 2\beta^2)c_m + \left(3\gamma^2 - 2\beta^2 - \frac{\gamma^3}{\beta}\right)c - (\gamma + 2k + 2\beta)\alpha - 2\beta k - 2k\gamma}{4\gamma^2 - 4\beta^2 - \beta\gamma + \frac{\gamma^3}{\beta}} + Ar_0 + c_m$$

分析零售商的博弈问题,零售商可定最优的零售价以最大化自身利润,根据斯坦伯格博弈逆向归纳法则,求零售商利润函数 Π_r 对 p_1 求一阶偏导得:

$$\frac{\partial \Pi_r}{\partial p_1} = \alpha - 2\beta p_1 + \omega\beta + \gamma p_3 = 0$$

$$\omega = 2p_1 - \frac{\alpha + \gamma p_3}{\beta}$$

将上式代入制造商利润函数 Π_m ,求 Π_m 对 p_1 、 p_3 求一阶偏导,且令一阶条件为零,得:

$$\frac{\partial \Pi_m}{\partial p_1} = \gamma(p_3 - c) - \beta(\omega - c_m) - br_2(\gamma - \beta) + A$$

$$(r_2 - r_0)(\gamma - \beta) = 0$$

$$\frac{\partial \Pi_m}{\partial p_3} = k - \beta p_3 + \gamma p_1 - \beta(p_3 - c) + (\omega - c_m)\gamma -$$

$$br_2(\gamma - \beta) + A(r_2 - r_0)(\gamma - \beta) = 0$$

可求得制造商实施的最优回收率以及零售商和电子商务时销售两类差异产品的利润最大时定价:

$$p_3 = \frac{[3\gamma^2 - \beta\gamma - 2\beta^2][A(r_2 - r_0) - br_2] + \beta\gamma c_m + \alpha\gamma - 3\gamma^2 c + 2\beta k + 2\beta^2 c}{4\beta^2 - 4\gamma^2}$$

二、数值算例及敏感性分析

本算例结合某家电下乡产品回收再制造的运作情况进行数值算例,分析参数变化对回收率的影响。假设该博弈模型中制造商、零售商和 3PL 以及政府的参数分别为: $\alpha=310, k=150, \beta=1.6, \gamma=0.15, r_0$

$=0.4, A=16$ 元, $c_m=115$ 元, $c_r=90$ 元, $c_0=27.7$ 元, $b=36$ 元, 则根据上述模型结论求得 $r_1=71.87\%$, $p_1=169.89$ 元, $p_2=122.67$ 元, $p_3=109.37$ 元。本算例通过研究 c_m, A, b 参数变化对回收率的影响(如表 1),得出结论和建议。

表 1 决策变量变化对回收率的影响

(单位:元)

c_m	A	b	$r_1/\%$	c_m	A	b	$r_1/\%$	c_m	A	b	$r_1/\%$
115.0	16	36	71.87	115	16.00	36	71.87	115	16	36.00	71.87
115.5	16	36	69.37	115	16.10	36	72.03	115	16	36.01	73.16
116.0	16	36	66.87	115	16.20	36	72.20	115	16	36.02	74.45
116.5	16	36	64.37	115	16.30	36	72.36	115	16	36.03	75.73
117.0	16	36	61.87	115	16.40	36	72.53	115	16	36.04	77.01
117.5	16	36	59.37	115	16.50	36	72.69	115	16	36.05	78.29
118.0	16	36	56.87	115	16.60	36	72.86	115	16	36.06	79.57
118.5	16	36	54.37	115	16.70	36	73.03	115	16	36.07	80.85
119.0	16	36	51.87	115	25.40	36	100.0	115	16	36.23	100.0
121.5	16	36	39.37	115	15.90	36	71.72	115	16	36.99	70.58
114.5	16	36	74.37	115	15.80	36	71.56	115	16	36.98	69.29
114.0	16	36	76.87	115	15.70	36	71.40	115	16	36.97	68.00
113.5	16	36	79.37	115	15.60	36	71.25	115	16	36.96	66.70
113.0	16	36	81.87	115	15.50	36	71.10	115	16	36.95	65.40
109.3	16	36	100.0	115	0.00	36	57.71	115	16	36.76	40.34

从表 1 可以看出:

a) 制造商具有制造成本优势,表现为 c_m 降低,回收率是升高的,企业因制造成本的降低进而加大回收力度,以在再制造过程中获取更多利润。反之当 c_m 增加,企业制造成本增加,企业的回收率显著降低,所以企业自技术创新将大大增加回收率。

b) 当政府对制造商的奖励奖惩力度加大,表现为 A 值增大,回收率是增加的,但相比生产成本变化,企业受政府干预的回收率变化不明显。当政府对制造商的奖励奖惩力度减小,企业的回收率是降低的,但奖惩系数降低为 0 时依然保持一定的回收率,说明政府在闭环供应链中地位仍不明显,企业更多是趋利行为,较少考虑政府和环保等因素。

c) 当制造商对 3PL 的回收补贴增加,表现为 b 值增大,回收率是降低的,说明回收成本的增加使制造商对回收产生消极反应从而降低回收率。反之对 3PL 的回收补贴减少,能使回收率增加。在表中可分析出回收补贴变化相对于生产成本变化对回收率的影响更显著,证明企业内部因素和企业外部因素对回收率的影响是不一致的,以及对外支付对于企业的外部影响是直接而明显的。

三、结 语

本文基于多阶段闭环供应链,建立多个决策模型,设计数值算例并进行敏感性分析,得出以下结论:

a) 企业成本的降低、政府奖惩力度的增大以及回收补贴费用的降低都能使闭环供应链回收率增加。

b) 分析三个因素,企业生产成本的和回收补贴费用的变化影响回收率较为明显,政府奖惩力度影响较小,甚至政府奖惩力度为 0 时仍保有较高的回收率。因此可见政府强调监督和奖惩并不能明显改变闭环供应链现状,只有政府与企业一起进行技术转型和创新以降低回收成本才是有效手段。

c) 基于回收率的机制能有效引导制造商提高回收率,并有能降低产品价格的作用。政府对标准回收率和奖惩系数两参数需同时把握才能促进闭环供应链完善运行,同时 3PL 提高效率和技术以降低运输和回收费用,配合政府的工作。

本文尚有几点,需要日后进一步探讨。本文模型中政府是以提高回收率为目的,但未考虑政府自身利益,作为参与闭环供应链的博弈方,政府必然有

其他目标。只有闭环供应链成员加强协调合作,才能增加利益并减轻系统对环境可能的危害,以实现全社会福利。

参考文献:

- [1] 张曙红. 基于再制造的闭环供应链管理研究综述及展望[J]. 物流工程与管理, 2011, 33(11): 130-136.
- [2] Jayaraman V, Guide J, Srivastava R. A closed-loop logistics model for remanufacture[J]. Journal of the Operational Research Society, 1999, 50: 497-508.
- [3] Spengler T, Puechert H, Penkuhn T. Environmental integrated production and recycling management[J]. European Journal of Operational Research, 1997, 97(2): 308-326.
- [4] Jayaraman V, Raymond A, Erik Rolland. The design of reverse distribution networks: models and solution procedures[J]. European Journal of Operational Research, 2003, 150(1): 128-149.
- [5] Yang P C, Chung S L, Wee H M, et al. Collaboration for a closed-loop deteriorating inventory supply chain with multi-retailer and price-sensitive demand[J]. International Journal of Production Economics, 2013, 143: 557-566.
- [6] Amin S H, Zhang G. A multi-objective facility location model for closed-loop supply chain network under uncertain demand and return[J]. Applied Mathematical Modelling, 2013, 37(6): 4165-4176.
- [7] 王文宾, 达庆利. 奖惩机制下电子类产品制造商回收再制造决策模型[J]. 中国管理科学, 2008, 16(5): 57-63.
- [8] 关启亮, 周根贵, 曹 束. 具有政府回收约束的闭环供应链回收再制造决策模型[J]. 工业工程, 2009, 12(5): 40-44.
- [9] 熊中楷, 黄德斌, 熊 榆. 政府奖励条件下基于再制造的闭环供应链模式[J]. 工业工程, 2011, 14(2): 1-5.
- [10] 程晋石, 李帮义. 混合回收渠道下的闭环供应链市场结构分析[J]. 计算机应用研究, 2013, 30(3): 720-723, 727.
- [11] 徐 兵, 杨金梅. 闭环供应链竞争的博弈分析与链内协调合同设计[J]. 运筹与管理, 2013, 22(2): 64-71.
- [12] 易余胤. 基于再制造的闭环供应链博弈模型[J]. 系统工程理论与实践, 2009, 29(8): 28-36.
- [13] 郑 鑫, 朱晓曦, 马卫民. 基于 Shapley 值法的三级闭环供应链收益分配模型[J]. 运筹与管理, 2011, 20(4): 17-22.
- [14] 孙明波, 侯卓媛. 电子商务环境影响下的电子产品闭环供应链模型分析[J]. 物流技术, 2014(1): 274-276.

Study on Multistage Closed-Loop Supply Chain Model Based on Recovery Ratio

FANG Hui^a, HAN Shu-guang^b, DING Xiao-yun^a, HU Jue-liang^b

(a. School of Economics and Management; b. School of Science, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: The paper sets up a closed-loop supply chain recovery and reproduction model composed of manufacturers, retailers, customers, government and third-party logistics. Based on traditional model (manufacturer-retailer-customer), e-commerce model (manufacturer-customer) is introduced. The government sets up standard recovery ratio, rewards and punishments in order to supervise manufacturers to recycle waste products. The model aims to optimize the supply chain and add members' profit, analyzes decision behaviors of multi-stage members and differentiated product pricing through game theory. Combined with recycle and reproduction of Home Appliances to Countryside, this paper analyzes effects of parameter variations on closed-loop supply chain benefit to provide theoretical guidance and suggestions for management of closed-loop supply chain.

Key words: closed-loop supply chain; multistage; recovery ratio; pricing

(责任编辑: 陈和榜)