

文章编号:1007-6735(2011)05-0489-06

基于产品差异的闭环供应链绩效分析

赵晓芳¹, 赵晓敏²

(1. 上海理工大学 外语学院, 上海 200093; 2. 上海大学 管理学院, 上海 200444)

摘要: 针对新品与再制造品有差异的情况, 利用博弈论对制造商、零售商构成的两级闭环供应链系统进行建模, 着重分析在分散决策方式下, 消费者对再制造品的认可度以及回收再制造成本对产品销量和供应链绩效的影响. 研究表明, 当消费者对再制造品的认可度很高时, 回收再制造是制造商和零售商获利的一种重要战略选择; 当消费者对再制造品的认可度很低时, 制造商的理性选择是不考虑进行产品回收再制造; 当消费者对再制造品的认可度中等时, 是否进行产品再制造则要视回收再制造成本而定, 当回收再制造成本较低时考虑进行产品的回收再制造, 当回收再制造成本较高时则不考虑回收再制造, 只生产新品.

关键词: 闭环供应链; 产品再制造; 产品差异; 博弈论

中图分类号: F 253

文献标志码: A

Performance analysis of closed-loop supply chain based on product difference

ZHAO Xiao-fang¹, ZHAO Xiao-min²(1. College of Foreign Languages, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;
2. School of Management, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

Abstract: Game theory was used to develop the model of a closed-loop supply chain system including one manufacturer and one retailer. The impacts of consumer approval and recycling remanufacturing cost on product sale and supply chain performance were analysed under different degrees of product difference existing in decentralized structure. The result shows that in the case of very high consumer approval, recycling remanufacturing is an important strategic option; in the case of very low consumer approval, rational choice is leave recycling remanufacturing out of account; and in the case of middle consumer approval, product remanufacturing depends on recycling and remanufacturing cost.

Key words: closed-loop supply chain; products remanufacturing; products difference; game theory

收稿日期: 2011-03-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(70801041)

作者简介: 赵晓芳(1977-), 女, 讲师. 研究方向: 系统建模与优化. E-mail: zhao_xf2005@126.com

近年来随着环境问题的日益凸显,闭环供应链系统的实践应用和理论研究受到越来越多的关注.与传统供应链系统相比,闭环供应链系统通过产品的正向交付与逆向回收再利用,使“资源-生产-消费-废弃”的开环过程变成了“资源-生产-消费-再生资源”的闭环反馈式循环过程.该系统减少了对初始资源的获取,同时还减少了最终垃圾的数量,对企业以及整个社会的可持续发展具有积极意义.

对研究者和管理者而言,闭环供应链系统是否优于传统供应链系统,以及产品再制造活动究竟会给企业带来怎样的影响是一个非常值得研究的问题.近几年,越来越多的学者开始运用博弈论的方法研究闭环供应链的问题. Savaskan 等^[1]基于确定的线性需求,研究了1个制造商和1个零售商在再制造闭环供应链中的决策问题以及回收渠道的选择问题,主要考虑了3种回收渠道:制造商直接回收、制造商委托零售商回收和制造商委托第三方回收,着重研究了渠道成员在不同回收渠道下的最优决策,通过批发价格、销售价格以及成员企业利润和系统总利润的对比研究,探讨了不同回收渠道对闭环供应链成员定价及利润的影响. Savaskan 等^[2]在2006年扩展了前一研究,探讨了零售商存在竞争情形下不同回收渠道对闭环供应链成员定价及利润的影响. Karakayli^[3]假定需求为回收价格和零售价格的线性函数,研究了集中式和分散式情形下耐用产品的回收定价及再制造品的销售定价问题. 黄祖庆和达庆利^[4]研究了直线型再制造供应链在不同决策结构下的收益以及与集成式“超组织”结构相比的效率损失. 易余胤^[5]建立了制造商领导、零售商领导以及市场无领导这3种不同市场力量下的闭环供应链博弈模型,研究了不同市场力量结构对渠道成员决策的影响.

本文主要对新品与再制造品存在差异的情况,建立1个制造商和1个零售商构成的两级闭环供应链博弈模型. 本文的研究目标为: a. 分析不同差异度下,制造商和零售商在分散决策方式下的最优销量与收益问题; b. 通过数值分析,探讨不同差异度下,消费者对再制造品的认可度以及逆向回收再制造成本对产品销量和供应链绩效的影响效应,进而剖析产品回收再制造对制造商以及零售商的战略意义.

1 系统描述与研究假设

1.1 系统描述

本文的研究对象如图1所示,在该系统中制造

商以回收成本 A 从市场回收废旧产品用于再制造,并分别以批发价格 w_n 和 w_r 将产品销售给下游零售商,零售商再分别以价格 p_n 和 p_r 销售给终端市场.

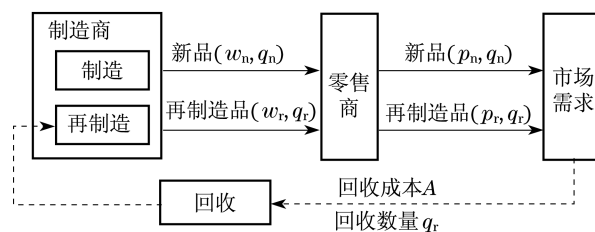


图1 有差异情况下闭环供应链分散决策模型

Fig.1 Decentralized model in a closed-loop supply chain with products difference

文中 w_n, w_r 分别为新品和再制造品的批发价格; q_n, q_r 分别为新品和再制造品的销量; p_n, p_r 分别为新品和再制造品的零售价格; c_n 为单位新产品生产成本, c_r 为单位废旧产品再制造成本; u_n, u_r 分别为消费者对新品和再制造品品质的认可度; σ 为新品和再制造品的差异度; A 为单位回收成本; Π_i 为渠道成员企业 i 的利润, i 为 M 代表制造商, i 为 R 代表零售商, i 为 T 代表供应链整体.

1.2 研究假设

假设1 制造商、零售商分别制定最优决策,决策方式为完全信息下的非合作二阶段 Stackelberg 博弈,制造商为博弈的领导者.

假设2 再制造品和新品存在差异,消费者对再制造品的认可度,不高于对新品的认可度,即 $u_r \leq u_n$.

假设3 单位再制造成本与回收成本之和小于单位新产品成本,即 $c_r + A < c_n$,这是制造商愿意进行产品再制造的直接经济动因.

假设4 闭环供应链的决策是单期决策.

2 消费者效用函数

本文在 Shubik 和 Levitan 于 1980 提出的经典消费者效用函数基础上,借鉴 Symeonidis^[6]的研究来刻画新品和再制造品的效用函数,具体函数为

$$U = u_n q_n + u_r q_r - q_n^2 - q_r^2 - \sigma q_n q_r - p_n q_n - p_r q_r \quad (1)$$

式中,参数 $\sigma \in (0, 2)$ 是描述产品差异度的指标,可以反映新品和再制造品的替代效应. 当 $\sigma \rightarrow 0$ 时,两种产品完全独立,即新品与再制造品的差异度极大,面向完全不同层次的消费者,两者之间不存

在任何替代性,因此,新品和再制造品不存在竞争;而当 $\sigma \rightarrow 2$ 时,再制造品与新品完全无差异,面向同一类型的消费群体,因为替代性强,因而存在激烈的竞争.

将式(1)最优化后可得到新品和再制造品需求函数的逆函数

$$\begin{cases} p_n = u_n - 2q_n - \sigma q_r \\ p_r = u_r - 2q_r - \sigma q_n \end{cases} \quad (2)$$

3 分散决策模型

3.1 成员企业的利润函数

零售商、制造商的目标函数分别为

$$\max_{q_n, q_r} \Pi_R = (p_n - w_n)q_n + (p_r - w_r)q_r \quad (3)$$

$$\max_{w_n, w_r} \Pi_M = (w_n - c_n)q_n + (w_r - c_r)q_r - Aq_r \quad (4)$$

3.2 最优定价策略和产品销量

分散决策模型中,制造商确定新品与再制造品的批发价格 w_n 和 w_r ,零售商确定新品和再制造品的销售价格 p_n 和 p_r ,制造商回收废旧产品的单位成本为 A .制造商为博弈的领导者,因此,先对零售商的目标函数进行一阶求导,先将式(2)代入式(3)中,求导后得到零售商的最佳反应方程

$$\begin{cases} q_n = \frac{2u_n - \sigma u_r + \sigma w_r - 2w_n}{8 - 2\sigma^2} \\ q_r = \frac{2u_r - \sigma u_n + \sigma w_n - 2w_r}{8 - 2\sigma^2} \end{cases} \quad (5)$$

将式(5)代入制造商的目标函数,由

$$\begin{cases} \frac{\partial \Pi_M}{\partial w_n} = 0 \\ \frac{\partial \Pi_M}{\partial w_r} = 0 \end{cases}$$

可得制造商的最优定价决策

$$\begin{cases} \Pi_M^* = \frac{(u_n - c_n)q_n^* + [u_r - (c_r + A)]q_r^*}{2} = \frac{(u_n - c_n)^2 + [u_r - (c_r + A)]^2 - \sigma(u_n - c_n)[u_r - (c_r + A)]}{16 - 4\sigma^2} \\ \Pi_R^* = \frac{(u_n - c_n)q_n^* + [u_r - (c_r + A)]q_r^*}{4} = \frac{(u_n - c_n)^2 + [u_r - (c_r + A)]^2 - \sigma(u_n - c_n)[u_r - (c_r + A)]}{32 - 8\sigma^2} \end{cases} \quad (10)$$

闭环供应链系统总利润为

$$\Pi_T^* = \Pi_M^* + \Pi_R^* = \frac{3\{(u_n - c_n)^2 + [u_r - (c_r + A)]^2 - \sigma(u_n - c_n)[u_r - (c_r + A)]\}}{32 - 8\sigma^2} \quad (11)$$

4 闭环供应链系统绩效分析

现主要选取如表1(见下页)所示的参数进行数

$$\begin{cases} w_n^* = \frac{u_n + c_n}{2} \\ w_r^* = \frac{u_r + c_r + A}{2} \end{cases} \quad (6)$$

将式(6)代入式(5),可得新品和再制造品的最优销量为

$$\begin{cases} q_n^* = \frac{2u_n - \sigma u_r + \sigma(c_r + A) - 2c_n}{16 - 4\sigma^2} \\ q_r^* = \frac{2u_r - \sigma u_n + \sigma c_n - 2(c_r + A)}{16 - 4\sigma^2} \end{cases} \quad (7)$$

$q_r^* > 0, q_n^* > 0$ 是制造商和零售商进行再制造品和新品的销售的前提,即

$$\begin{cases} 2(u_n - c_n) > \sigma[u_r - (c_r + A)] \\ 2[u_r - (c_r + A)] > \sigma(u_n - c_n) \end{cases} \quad (8)$$

将式(7)代入式(2),可得零售商最优定价决策

$$\begin{cases} p_n^* = u_n - 2q_n^* - \sigma q_r^* = \\ u_n - \frac{2[2u_n - \sigma u_r + \sigma(c_r + A) - 2c_n]}{16 - 4\sigma^2} - \\ \frac{\sigma[2u_r - \sigma u_n + \sigma c_n - 2(c_r + A)]}{16 - 4\sigma^2} = \\ \frac{(12 - 3\sigma^2)u_n + 4c_n - \sigma^2 c_n}{16 - 4\sigma^2} = \frac{3u_n + c_n}{4} \\ p_r^* = u_r - 2q_r^* - \sigma q_n^* = \\ u_r - \frac{2[2u_r - \sigma u_n + \sigma c_n - 2(c_r + A)]}{16 - 4\sigma^2} - \\ \frac{\sigma[2u_n - \sigma u_r + \sigma(c_r + A) - 2c_n]}{16 - 4\sigma^2} = \\ \frac{(12 - 3\sigma^2)u_r + 4(c_r + A) - \sigma^2(c_r + A)}{16 - 4\sigma^2} = \\ \frac{3u_r + c_r + A}{4} \end{cases} \quad (9)$$

3.3 最优利润

将式(6)、(7)、(9)分别代入式(3)与式(4)中,得到制造商、零售商最大利润为

$$\begin{cases} \Pi_M^* = \frac{(u_n - c_n)q_n^* + [u_r - (c_r + A)]q_r^*}{2} = \frac{(u_n - c_n)^2 + [u_r - (c_r + A)]^2 - \sigma(u_n - c_n)[u_r - (c_r + A)]}{16 - 4\sigma^2} \\ \Pi_R^* = \frac{(u_n - c_n)q_n^* + [u_r - (c_r + A)]q_r^*}{4} = \frac{(u_n - c_n)^2 + [u_r - (c_r + A)]^2 - \sigma(u_n - c_n)[u_r - (c_r + A)]}{32 - 8\sigma^2} \end{cases} \quad (10)$$

闭环供应链系统总利润为

$$\Pi_T^* = \Pi_M^* + \Pi_R^* = \frac{3\{(u_n - c_n)^2 + [u_r - (c_r + A)]^2 - \sigma(u_n - c_n)[u_r - (c_r + A)]\}}{32 - 8\sigma^2} \quad (11)$$

值仿真分析.

图2(见下页)反映了 $\sigma = 0.5$ 时新品和再制造品的最佳销量,以及制造商、零售商和供应链整体的利润情况. $\sigma = 0.5$ 意味着新品和再制造品之间的差

异度较大,主要面向不同的消费群体,两者之间不存在明显的竞争关系.针对新品和再制造品低竞争的

情景,消费者对再制造品的认可度 u_r 和回收再制造成本 $c_r + A$ 的影响如下:

表 1 参数设置
Tab.1 Parameters

差异度 σ	认可度 u_r	回收再制造成本 $c_r + A$	其余参数
$\sigma = 0.5$ 无明显竞争	$u_r = 0.2, 0.6, 1.0$	$c_r + A = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7$	$u_n = 1.0$
$\sigma = 1.0$ 中度竞争	$u_r = 0.2, 0.6, 1.0$	$c_r + A = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7$	$c_n = 0.8$
$\sigma = 1.5$ 竞争较激烈	$u_r = 0.2, 0.6, 1.0$	$c_r + A = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7$	

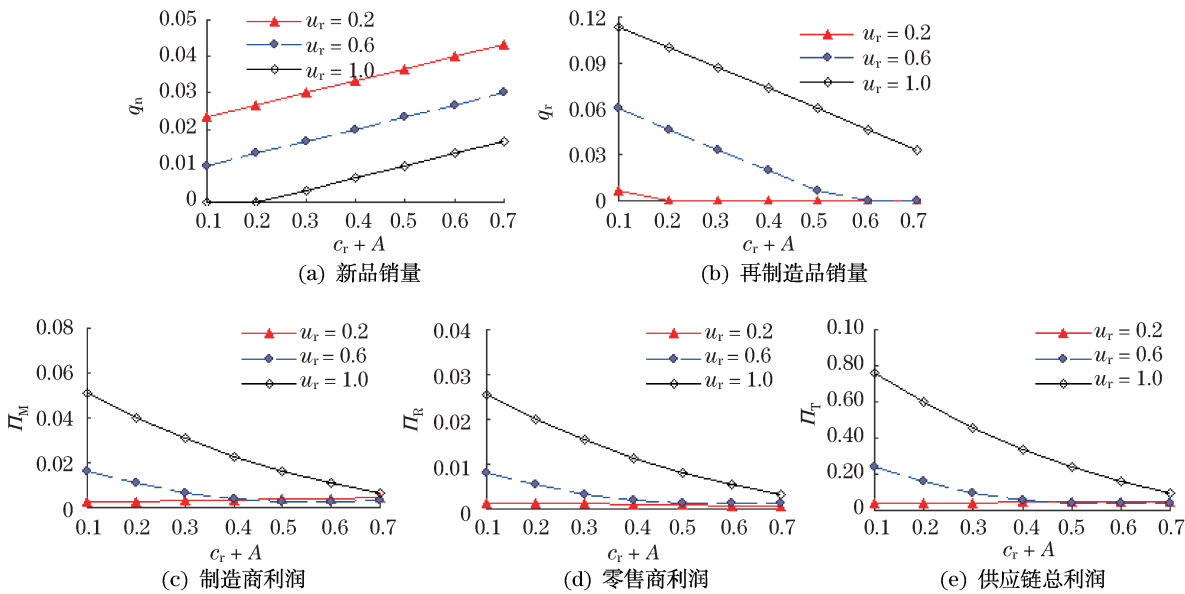


图 2 $\sigma = 0.5$ 时的销量与利润 (新品与再制造品不存在明显竞争)
Fig.2 Sales volume and profits when $\sigma = 0.5$ (no obvious competition)

a. 从消费者对再制造品的认可度 u_r 的影响来看,当 u_r 增大时,新品销量 q_n 减少,再制造品销量 q_r 增加;同时,随着 u_r 增大,制造商利润 Π_M 、零售商利润 Π_R 及供应链整体利润 Π_T 基本呈现上升趋势.此时,进行产品再制造会带来正面的经济影响,制造商应将产品回收再制造作为其战略选择.

b. 从回收再制造成本 $c_r + A$ 的影响来看,当 $c_r + A$ 增大时,新品销量 q_n 增加,再制造品销量 q_r 减少;同时,随着 $c_r + A$ 增大,制造商利润 Π_M 、零售商利润 Π_R 及供应链整体利润 Π_T 基本呈现下降趋势,再制造带来的负面经济影响增加.因此,当逆向回收再制造成本较高,接近于新品生产成本时,制造商的理性选择是不考虑产品回收再制造.

总体来看,在 $\sigma = 0.5$ (即新品和再制造品不存在明显竞争) 的情况下,如果消费者认可度很高,如 $u_r = 1$,制造商应该积极参与产品回收再制造;而消费者认可度很低时,如 $u_r = 0.2$,即使回收再制造成本较低,制造商的理性选择仍应是不进行产品回收

再制造.

图 3 反映了 $\sigma = 1$ 时新品和再制造品的最佳销量,以及制造商、零售商和供应链整体的利润情况. $\sigma = 1$ 意味着新品和再制造品之间存在中度竞争,所面向的消费群体具有一定的重叠.在此情况下,消费者对再制造品的认可度 u_r 和回收再制造成本 $c_r + A$ 的影响如下:

a. 从消费者对再制造品的认可度 u_r 影响来看,当 u_r 增大时,新品销量 q_n 减少,再制造品销量 q_r 增加;同时,随着 u_r 增大,制造商利润 Π_M 、零售商利润 Π_R 及供应链整体利润 Π_T 基本呈现上升趋势.但是,当 u_r 很低时,再制造品的销量 $q_r \rightarrow 0$,此时,制造商与零售商主要通过生产和销售新品获利.

b. 从回收再制造成本 $c_r + A$ 的影响来看,当 $c_r + A$ 增大时,新品销量 q_n 增加,再制造品销量 q_r 减少;同时,随着 $c_r + A$ 增大,制造商利润 Π_M 、零售商利润 Π_R 及供应链整体利润基本呈现下降趋势.但是,在 u_r 很低 ($u_r = 0.2$) 时,随着 $c_r + A$ 的增大,

制造商利润 Π_M 、零售商利润 Π_R 及供应链整体利润 Π_T 上升,原因在于新品和再制造品存在竞争关系,

$c_r + A$ 的增大会刺激新品销量的增加,制造商、零售商将通过售出更多新品而获得更多利润。

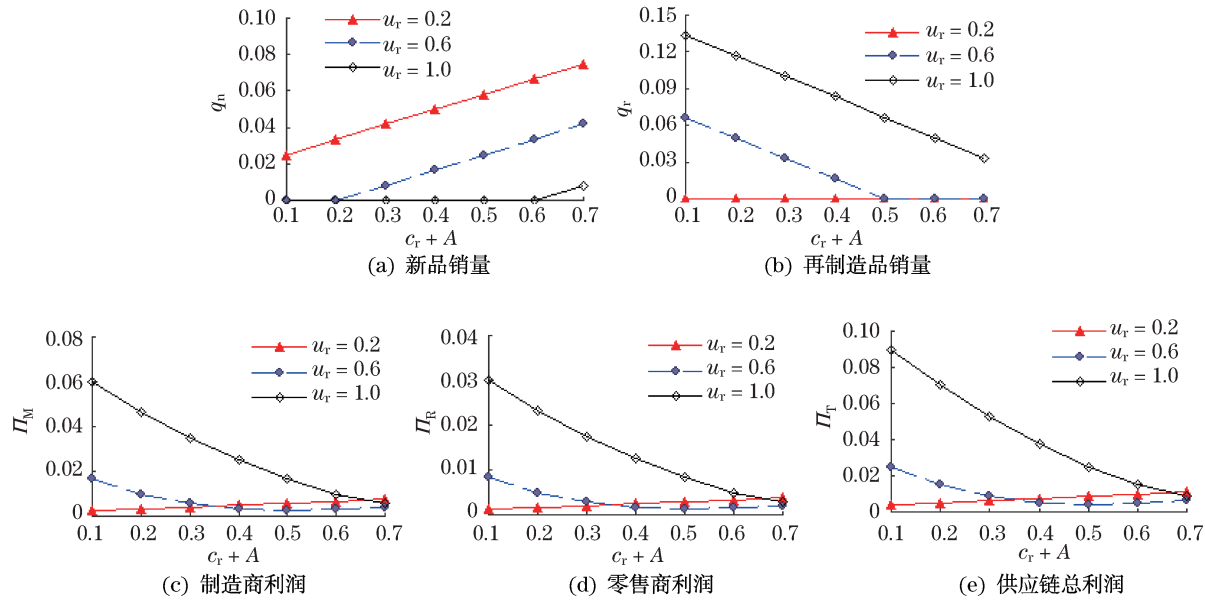


图3 $\sigma=1$ 时的销量与利润(新品与再制造品存在中度竞争)

Fig.3 Sales volume and profits when $\sigma=1$ (with moderate competition)

总体来看,在 $\sigma=1$ (即新品再制造品存在中度竞争)的情况下,当消费者认可度 u_r 较高时,产品再制造会带来正面的经济影响,制造商应该积极参与产品回收再制造;而消费者认可度 u_r 很低时,则不应考虑再制造;回收再制造成本 $c_r + A$ 较高时,也不宜考虑再制造。

图4反映了 $\sigma=1.5$ 时新品和再制造品的最佳销量,以及制造商、零售商和供应链整体的利润情况。 $\sigma=1.5$ 意味着新品和再制造品本身差异较小,两者替代性很强,所面向的是同一类型的消费群体,新品和再制品存在明显的市场竞争关系。

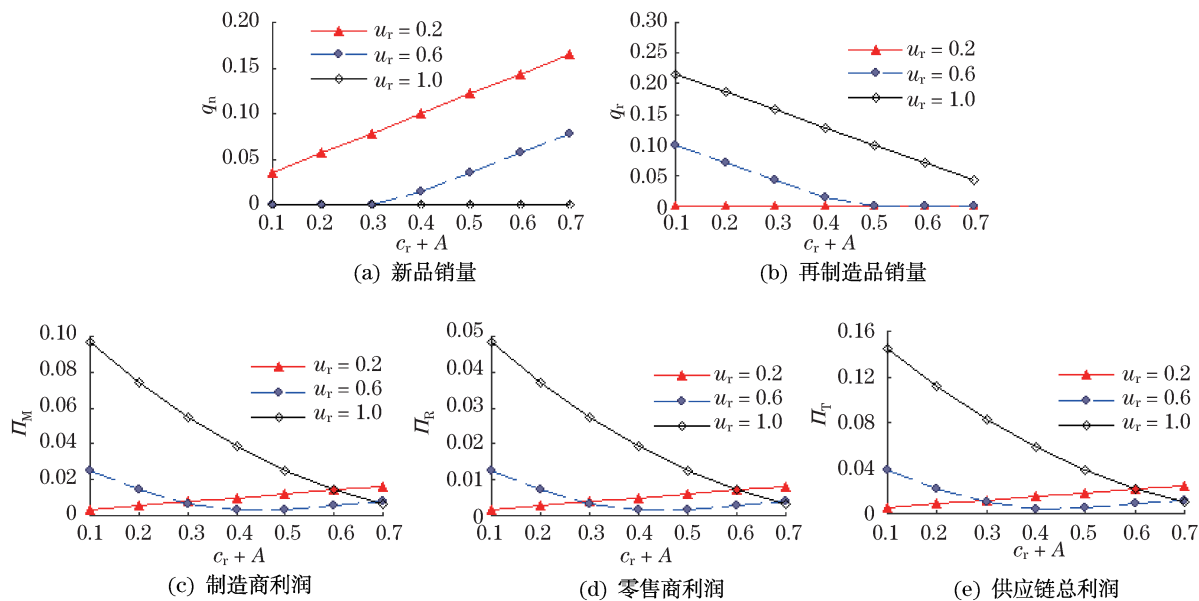


图4 $\sigma=1.5$ 时的销量与利润(新品与再制造品存在较激烈竞争)

Fig.4 Sales volume and profits when $\sigma=1.5$ (with intense competition)

在 $\sigma = 1.5$ 的情况下,消费者对再制造品的认可度 u_r 和回收再制造成本 $c_r + A$ 对制造商、零售商及供应链整体绩效的影响较为复杂:

a. 当 u_r 很低时 ($u_r = 0.2$),再制造品的销量 $q_r \rightarrow 0$,制造商与零售商主要通过生产和销售新品获利;并且制造商利润 Π_M 、零售商利润 Π_R 及供应链整体利润 Π_T 呈现随 $c_r + A$ 的增大而上升的趋势,其原因在于新品和再制造品存在明显的竞争关系,因此,回收再制造成本 $c_r + A$ 的增大会刺激新品销量 q_n 的增加,制造商和零售商因卖出更多的新品而获得更多利润.

b. 当 $u_r = 0.6$,即消费者对再制造品为中度认可时,将需要考虑回收再制造成本 $c_r + A$ 的大小;当 $c_r + A$ 较小时,以销售再制造品来获利;当 $c_r + A$ 较大时,以销售新品来获利.

c. 当 u_r 很高 ($u_r = 1$),即消费者对再制造品完全认可时, $q_n \rightarrow 0$,制造商将主要通过销售再制造品获利,原因在于回收再制造成本小于新品生产成本,即 $c_r + A < c_n$,制造商不进行新品的生产.

5 结 论

本文主要对 1 个制造商和 1 个零售商构成的两级闭环供应链系统进行研究,着重分析在不同差异度下,消费者对再制造品的认可度 u_r 以及回收再制造成本 $c_r + A$ 对产品销量和供应链绩效的影响.本文研究表明:当消费者对再制造品的认可度 u_r

很高时,回收再制造是制造商、零售商获利的一种重要战略选择;当消费者对再制造品的认可度 u_r 很低时,制造商、零售商的理性选择是不考虑进行产品回收再制造;当消费者对再制造品的认可度 u_r 中等时,是否进行产品再制造则要视回收再制造成本 $c_r + A$ 而定,当 $c_r + A$ 较低时考虑进行产品的回收再制造,当 $c_r + A$ 较高时,不考虑回收再制造,只生产新品.

参考文献:

- [1] 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.
- [2] SAVASKAN R C, VAN WASSENHOVE L N. Reverse channel design: The case of competing retailers[J]. *Management Science*, 2006, 52(1):1-14.
- [3] KARAKAYLI I. An analysis of decentralized collection and processing of end-of-life products[J]. *Journal of Operations Management*, 2007, 25(6), 1161-1183.
- [4] 黄祖庆,达庆利. 直线型再制造供应链决策结构的效率分析[J]. *管理科学学报*, 2006, 9(4):51-57.
- [5] 易余胤. 具竞争零售商的再制造闭环供应链模型研究[J]. *管理科学学报*, 2009, 12(6):45-54.
- [6] SYMEONIDIS G. Comparing Cournot and Bertrand equilibrium in a differentiated duopoly with product R & D[J]. *International Journal of Industrial Organization*, 2003, 21(1):39-55.

(上接第 488 页)

参考文献:

- [1] BRUALDI R A, SOLHEID E S. On the spectral radius of complementary acyclic matrices of zeros and ones[J]. *SIAM J Algebra Discrete Method*, 1986, 7(2):265-272.
- [2] WU B F, XIAO E L, HONG Y. The spectral radius of trees on k pendent vertices[J]. *Linear Algebra Appl*, 2005, 395:343-349.
- [3] BERMAN A, ZHANG X D. On the spectral radius of graphs with cut vertices[J]. *J Combin Theory Ser B*, 2001, 83(2):233-240.
- [4] LIU H, LU M, TIAN F. On the spectral radius of graphs with cut edges[J]. *Linear Algebra Appl*, 2004, 389:139-145.
- [5] GUO J M. On the spectral radius of trees[J]. *Linear Algebra Appl*, 2001, 329(1):1-8.
- [6] GUO J M. On the spectral radius of trees with fixed diameter [J]. *Linear Algebra Appl*, 2006, 413(1):131-147.
- [7] FENG L H, YU G H, ZHANG X D. Spectral radius of graphs with given matching number[J]. *Linear Algebra Appl*, 2007, 422(1):133-138.
- [8] LI Q, FENG K Q. On the largest eigenvalue of a graph [J]. *Acta Math Appl Sinica*, 1979, 2:167-175.
- [9] CVETKOVIC D, ROWLINSON P, SIMIC S. *Eigenvalues of Graphs*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1997.
- [10] CVETKOVIC D, DOOB M, SACHS H. *Spectral of Graphs*[M]. New York: Academic Press, 1980.