

“以旧换再”和“以旧换新”策略下制造商和再制造商的博弈分析

景 熠, 杜鹏琦

(重庆理工大学管理学院, 重庆 400054)

摘要: 针对原始制造商实施“以旧换新”策略、隶属于同一集团的关联再制造商同时实施“以旧换再”策略的运营决策问题, 运用博弈理论构建了多元需求下的两阶段模型, 并分析了最优均衡解的变化趋势. 研究表明, 随着置换回收价格的提高, “以旧换再”消费市场会挤兑“以旧换新”消费市场, 或者“直购新品”消费市场会挤兑“直购再制品”消费市场, 但两者不会同时发生; 而政府“以旧换再”补贴的提高会引起这两类挤兑效应同时发生; “以旧换再”补贴能够促进废旧产品回收, 扩大再制造产品市场份额, 但不一定有利于原始制造商和关联再制造商的盈利; 只有当补贴超过某一阈值时, 其对企业盈利的负面影响才会消除, 并且通过提升再制造技术的节能降本水平, 可以降低阈值条件.

关键词: 以旧换再; 以旧换新; 关联再制造商; 博弈分析

中图分类号: C934

文献标识码: A

文章编号: 1000-5781(2021)03-0339-14

doi: 10.13383/j.cnki.jse.2021.03.005

Game analysis of manufacturer and remanufacturer under the strategies of old-for-remanufacturing and old-for-new

Jing Yi, Du Pengqi

(College of Management, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China)

Abstract: In order to solve the operational decision problem in which the original manufacturer implements the strategy of old-for-new and the associated remanufacturer affiliated to the same group implements the strategy of old-for-remanufacturing simultaneously, this paper establishes a two-stage model under multiple demands by using game theory, and analyses the changing trend of the optimal equilibrium solution. The results show that the consumer market of old-for-remanufacturing cannibalizes the consumer market of old-for-new, or alternatively the consumer market of directly purchasing new products cannibalizes the consumer market of directly purchasing remanufactured products when the replacement recycling price increases. However, the two types of cannibalization effects occur simultaneously only when government subsidy of old-for-remanufacturing increases. The subsidy can promote the recycling level of used products and expand the market share of remanufactured products, but not necessarily enhance the profits of the original manufacturer and the associated remanufacturer. Only when the subsidy exceeds a certain threshold, can its negative impact on corporate profits be eliminated. Further, the threshold condition can be reduced by raising the level of energy-saving and cost-reduction of remanufacturing technology.

Key words: old-for-remanufacturing; old-for-new; associated remanufacturer; game analysis

收稿日期: 2019-03-13; 修订日期: 2020-09-10.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(71802034); 教育部人文社会科学资助项目(15YJC630049); 重庆市教委科学技术资助项目(KJQN201801138).

1 引言

再制造作为循环经济的重要形式,是通过表面工程等先进技术,对废旧产品进行修复、强化和改造等一系列技术措施和工程活动的总称^[1]. 在环境日趋恶化、资源日趋紧张的形势下,再制造不仅可以延长产品的生命周期,实现资源的高效循环利用,并且,其生产成本仅为新产品的50%左右,节能60%,节材70%以上,减少对大气和水资源的污染近80%,可以同时达到降低成本和保护环境的效果^[2]. 因此,再制造产业已经成为可持续发展的重点领域.

值得注意的是,我国的再制造产业仍处于市场培育阶段,废旧产品“回收难”和再制造产品“销售难”成为制约产业发展的关键问题^[3]. 一方面,大多数企业尚未建立正规、高效的回收渠道,消费者也缺乏主动参与回收活动的意愿,导致废旧产品供应不稳定,难以形成产业规模效应^[4,5]. 另一方面,虽然再制造产品在质量、性能和外观等方面都达到甚至超过了新产品的水平,但是消费者对其认可度和购买意愿仍普遍较低.

针对废旧产品的回收渠道问题, Savaskan 等^[6]构建了制造商自行回收、零售商回收和第三方回收三种制造/再制造经典决策模型,并从销售价格、销售数量、回收率、利润等方面对比分析了不同回收渠道的优劣. Savaskan 等^[7]将上述制造商自行回收和零售商回收模型拓展到两个零售商竞争的情形. Atasu 等^[8]也进一步探讨了废旧产品回收的成本结构对三种回收渠道选择的影响. Han 等^[9]综合考虑了闭环供应链的盈利性和鲁棒性,研究了再制造成本不确定条件下的回收渠道选择问题. Wang 等^[1]针对无回收竞争、制造商与再制造商回收竞争、零售商与再制造商回收竞争三种市场情景,分别构建了 Stackelberg 博弈模型,研究了三个主体的最优定价策略以及对不同情景的态度. He 等^[11]基于渠道投资与回收不便性以及回收不便性与回收率之间的函数关系,构建了集中回收、零售商回收和竞争回收三种决策模型,研究了回收不便性影响下的回收效率问题,并探讨了契约机制和授权机制的有效性. 这些研究从独立结构到竞争结构,从经济性视角、鲁棒性视角,再到便利性视角,对回收渠道问题进行了丰富且深入的探索.

同时,为了提升消费者主动参与回收活动的意愿,我国制定了《家电以旧换新实施办法》和《汽车以旧换新实施办法》等政策;海尔和一汽和吉利等企业,也纷纷采用“以旧换新”策略回收废旧产品,并促进新产品的销售. 目前,国内外学者针对“以旧换新”策略的研究,取得了较为丰富的成果. 马卫民等^[12,13]分别以常规和考虑产品等级的闭环供应链为研究对象,探讨了政府“以旧换新”补贴对供应链规模、消费者利益和企业利润的影响. Ma 等^[14]研究了“以旧换新”补贴对闭环供应链渠道选择的影响,认为制造商和传统零售商都是补贴的受益者,而电子零售商的利益不确定. Huang 等^[15]探讨了消费补贴和产品售价限制对“以旧换新”策略的影响. 汪欣等^[16]重点分析了地域区别、产品类型和人员素质等因素对“以旧换新”策略的影响. 颜波等^[17]探讨了制造商在双销售渠道结构中自主推行“以旧换新”业务的决策问题. 缪朝炜等^[18]立足于第三方回收商参与的闭环供应链系统,探讨了三类市场结构的“以旧换新”决策问题. Genc 等^[19]基于回收返利、新产品价格和回收量之间的函数关系,分别构建了可变返利和固定返利的回收模型,并运用马尔科夫策略和开环策略进行动态均衡分析. 进一步,一些学者将“以旧换新”策略研究拓展到了竞争环境. 刘慧慧等^[20]研究了制造商参与回收并与非正规回收企业存在竞争的情形,认为“以旧换新”策略能够提高制造商的回收竞争力. Zhu 等^[21]研究了仅一个制造商实施“以旧换新”策略、两个制造商同时实施“以旧换新”策略两种竞争情景下的均衡决策问题. Agrawal 等^[22]认为,当第三方参与再制造产品竞争时,原始制造商应实施“以旧换新”策略设置市场壁垒. 刘靓晨等^[23]研究了先后进入市场的企业之间是否存在竞争对于“以旧换新”策略的影响. 然而,“以旧换新”策略虽然可以有效促进废旧产品的回收,但仍没有解决再制造产品“销售难”的问题.

因此,2013年我国又制定了《再制造产品“以旧换再”试点实施方案》,以汽车发动机、变速箱为试点领域,对交回废旧产品并购买再制造产品的消费者给予置换折扣和政府补贴. “以旧换再”政策的出台不仅进一步扩大了废旧产品的回收,而且能够促进再制造产品的销售,提升消费者对再制造产品的接受程度和认可程度. 目前,关于“以旧换再”策略的研究还处于起步阶段,相关理论成果并不多见. 李新然等^[24,25]分别以

单渠道和双渠道闭环供应链为研究对象,探讨了政府“以旧换再”补贴对消费者、制造商、零售商和环保效益的影响。杨倩霞^[26]针对单阶段“以旧换再”闭环供应链系统,研究了不同市场结构下的“以旧换再”决策。朱庆华等^[27]在政府“以旧换再”补贴政策下,建立了制造商和再制造商的博弈模型,对是否收取专利费用进行了对比分析。王玉燕等^[28]以汽车供应链为研究对象,建立了单阶段“以旧换再”供应链模型,对有无政府“以旧换再”补贴下的最优决策进行了对比分析。韩小花等^[29]针对两阶段闭环供应链系统,研究了“以旧换再”策略的实施条件,对比分析了集中、分散决策下的产品定价和企业利润。在此基础上,韩小花等^[30]进一步研究了古诺竞争型闭环供应链中的“以旧换再”问题。

通过国内外研究现状的梳理可以看出,现有研究中并没有同时考虑“以旧换再”和“以旧换新”策略对制造/再制造决策的影响。在“以旧换再”试点实践中,潍柴动力再制造有限公司等试点企业,作为专业再制造商,虽然只能够开展“以旧换再”业务,但在其隶属的集团内部,从事新产品生产的原始制造商可以同时实施“以旧换新”策略。由于新产品和再制造产品具有一定的可替代性,并且通过“以旧换新”和“以旧换再”得到的废旧产品最终都要进入再制造修复流程,实现价值增值,因此隶属于同一集团的两类主体在运作过程中,会在销售端形成竞争关系,在回收端形成合作关系。

而从消费行为/需求的角度来看,作为理性经济人,单个消费者不会同时购买新产品和再制造产品^[31]。因此,在市场规模有限的情况下,回收价格、再制造节省成本、环保意识等因素的变化会引起直接购买新产品(以下简称“直购新品”)消费市场和直接购买再制造产品(以下简称“直购再制品”)消费市场之间的挤兑效应^[32-34]。类似地,“以旧换再”消费市场和“以旧换新”消费市场之间也可能存在挤兑效应,但不一定与直购市场完全相同。对挤兑效应的分析,有助于指导企业平衡各类产品的市场份额。

另一方面,政府推动置换回收计划,其目的在于“促进再制造旧件回收,扩大再制造产品份额”^[35],即通过政府补贴的激励,对再制造产业发挥市场培育作用。但是,政府补贴作为一种经济杠杆,具有宏观性和导向性,不一定与微观个体的经营目标保持一致^[36,37]。了解政府补贴的影响,有助于企业在既定宏观政策下,最大限度的保障和提升自己的利润空间。

基于上述分析,本文以原始制造商实施“以旧换新”策略、隶属于同一集团的关联再制造商同时实施“以旧换再”策略为研究背景,针对第一阶段只有新产品需求,第二阶段同时存在“以旧换新”需求、“以旧换再”需求、“直购新品”需求和“直购再制品”需求的多元市场情形,运用博弈理论构建原始制造商和关联再制造商的两阶段决策模型,重点探讨以下问题:1) 置换回收价格、政府补贴等因素是否会引起“以旧换再”和“以旧换新”之间、“直购新品”和“直购再制品”之间的市场挤兑效应? 2) 政府补贴是否能够真正发挥市场培育作用,是否有利于企业的经济效益? 3) 两者在什么条件下能够得以兼顾?

研究结果表明,随着置换回收价格的提高,完全再制造条件下“以旧换再”消费市场会挤兑“以旧换新”消费市场,不完全再制造条件下“直购新品”消费市场会挤兑“直购再制品”消费市场。然而,政府“以旧换再”补贴的提高会引起这两类挤兑效应同时发生。此外,政府“以旧换再”补贴还能够促进废旧产品回收,扩大再制造产品市场份额,但不一定有利于原始制造商和关联再制造商的盈利。只有当补贴超过某一阈值时,其对企业盈利的负面影响才会消除,并且通过提升再制造技术的节能降本水平,可以降低阈值条件。

2 问题描述与基本假设

以同一集团下属的原始制造商(标记为 **M**)和关联再制造商(标记为 **R**)为研究对象。在第一阶段,仅有原始制造商生产新产品,并直接进行销售。在第二阶段,原始制造商不仅可以直接销售新产品,还可以通过“以旧换新”的方式进行置换销售;与此同时,关联再制造商以废旧产品为毛坯进行生产,并通过直接销售和“以旧换再”两种方式拓展再制造产品市场份额。由于原始制造商和关联再制造商分别实施“以旧换新”和“以旧换再”策略,两个主体在回收端存在合作关系;又因为新产品和再制造产品之间存在一定的可替代性,两个主体在销售端存在竞争关系。

对于消费者而言,第一阶段只需要根据效用评价决定是否购买新产品.而在第二阶段,已购买过第一阶段新产品的消费者将面临三种选择:1)通过“以旧换新”向原始制造商重新购买新产品;2)通过“以旧换再”向关联再制造商购买再制造产品;3)继续使用原有产品.除此之外,第二阶段还会有一批新的消费者进入市场,可以选择“直购新品”或者“直购再制品”.

对于产品而言,第一阶段销售出的新产品,经过消费者使用后,价值会逐渐降低,到第二阶段变为旧产品^[38].企业可以通过回收再制造,延长产品的生命周期,实现价值增值,使其在第二阶段以再制造产品的形式进行销售.但第一阶段销售和流通的新产品数量,会限制第二阶段的回收产品数量^[39],回收产品数量又会进一步限制再制造产品数量.

本文中的主要符号说明如表1所示,制造/再制造系统结构如图1所示.

表1 主要符号及其含义

Table 1 Main symbols and their implications

符号	含义
c	新产品的单位生产成本
Δ	再制造修复的单位节约成本,即再制造产品的单位成本可以表示为 $c - \Delta$
p_{1n}	第一阶段新产品的销售价格
p_{2n}	第二阶段新产品的直接销售价格
p_{2r}	第二阶段再制造产品的直接销售价格
A	废旧产品的置换回收价格,即“以旧换新”和“以旧换再”的置换销售价格分别为 $p_{2n} - A$ 和 $p_{2r} - A$
q_{1n}	第一阶段新产品的销售数量
q_{2n}	第二阶段“以旧换新”的销售数量
q_{2r}	第二阶段“以旧换再”的销售数量
q_{2fn}	第二阶段新产品的直接销售数量
q_{2fr}	第二阶段再制造产品的直接销售数量
s	政府给予“以旧换再”消费者的额外补贴
θ	消费者对新产品的支付意愿,且服从 $[0, Q]$ 均匀分布 ^[39]
α	再制造价值折扣系数
β	废旧产品残值系数

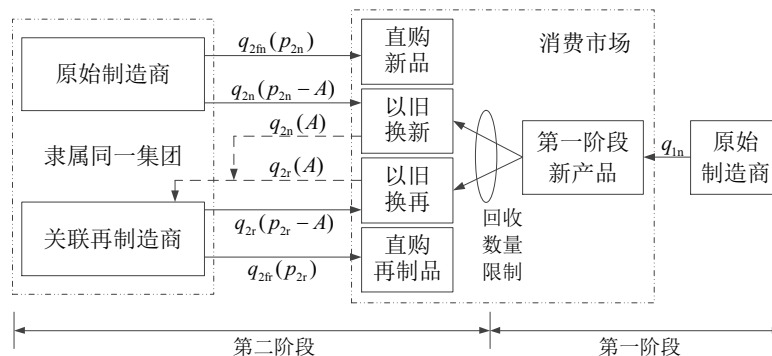


图1 “以旧换再”和“以旧换新”策略下制造/再制造系统结构

Fig. 1 Manufacturing/remanufacturing system structure under the strategies of old-for-remanufacturing and old-for-new

同时,为了聚焦研究重点,在不影响模型推导的前提下,作出如下假设:

假设1 原始制造商不涉及废旧产品的再处理业务,并且和关联再制造商隶属于同一集团,两者在回收端存在合作关系,因此会将“以旧换新”回收而来的废旧产品零成本调拨给关联再制造商.

现阶段,再制造产业仍需要政府、企业和社会的共同支持^[2].由于原始制造商和关联再制造商隶属于同一集团,两者存在一定的合作基础,可以规定原始制造商将顾客“以旧换新”交付的废旧产品直接运往关联再制造商,回收成本由原始制造商承担.制定该政策的原因主要有三个方面:一是体现对再制造业务的支持,除了政府扶持,集团内部也需要给予一定的政策倾斜;二是新产品的边际利润往往高于再制造产品^[40],原始

制造商在承担回收成本的情况下, 仍能通过“以旧换新”业务获得可观利润; 三是原始制造商基于生产者延伸责任制, 本就需要对废旧产品进行回收、及其后的拆卸和环保废弃, 并承担相应成本, 翻新、回炉难以进行批量处理或经济价值极低^[2], 而再制造业务可以消除原始制造商的“后顾之忧”。

假设 2 再制造产品的单位生产成本通常低于新产品^[6], 并以较低的销售价格进入市场^[39], 即 $\Delta > 0$, $p_{2n} > p_{2r}$; 同时, 为保证回收再制造活动的经济性, 存在 $A < \Delta$ ^[6,41]。

对于假设 2 的合理性, 相关文献中已经进行了充分论证, 在此不再赘述。

假设 3 原始制造商实施“以旧换新”策略, 关联再制造商同时实施“以旧换再”策略, 但政府仅对“以旧换再”的消费者给予额外的补贴。

目前, 我国政府对“以旧换新”和“以旧换再”均出台了一些补贴政策, 但两者的补贴范围并不一致。通过政策梳理可以发现, 对于消费类电子和家电产业, 仅存在“以旧换新”补贴; 对于汽车产业, “以旧换新”补贴面向废旧整车, 而“以旧换再”补贴面向发动机、变速箱等关键零部件。另一方面, 在国家《关于推进再制造产业发展的意见》中明确提出, 将汽车零部件、工程机械和机床作为我国再制造产业发展的重点领域。基于以上两点, 本文重点关注汽车零部件领域, 考虑政府会给予“以旧换再”的消费者一定的额外补贴 s 。

假设 4 新产品和再制造产品的生产原料和加工过程存在较大差异, 因此消费者对两者具有不同的支付意愿。

消费者目前对再制造技术和再制造产品的认知程度偏低^[4], 在质量和可靠性方面存有质疑, 使其对再制造产品的支付意愿要低于新产品^[42]。参照文献^[39], 消费者对新产品支付意愿为 θ , 对再制造产品的支付意愿则为 $\alpha\theta$ ($0 < \alpha < 1$)。在此基础上, 依据消费者效用理论^[32], 第一阶段消费者购买新产品的效用为 $U_{1n} = \theta - p_{1n}$; 在第二阶段, 消费者“以旧换新”的效用为 $U_{2n} = \theta - p_{2n} + A$, “以旧换再”的效用为 $U_{2r} = \alpha\theta - p_{2r} + A + s$, 继续使用原有产品的效用为 $U_{2u} = \beta\theta$ ($\beta < \alpha$), “直购新品”的效用为 $U_{2fn} = \theta - p_{2n}$, “直购再制品”的效用为 $U_{2fr} = \alpha\theta - p_{2r}$ 。

3 基于博弈理论的两阶段模型

第一阶段, 原始制造商销售新产品, 仅当 $U_{1n} > 0$, 即 $p_{1n} < \theta < Q$ 时, 消费者才会进行购买, 否则, 放弃购买。因此, 第一阶段新产品需求函数可表示为

$$q_{1n} = \int_{p_{1n}}^Q d\theta = Q - p_{1n}. \quad (1)$$

第二阶段, 已购买过前一阶段新产品的消费者, 将面临三种选择, 并通过比较价值效用做出决策。

1) 当 $U_{2n} > 0$, $U_{2n} > U_{2r}$, $U_{2n} > U_{2u}$, 即 $\max \left\{ \frac{p_{2n} - p_{2r} + s}{1 - \alpha}, \frac{p_{2n} - A}{1 - \beta} \right\} < \theta < Q$ 时, 消费者选择“以旧换新”。

2) 当 $U_{2r} > 0$, $U_{2r} > U_{2n}$, $U_{2r} > U_{2u}$, 即 $\frac{p_{2r} - A - s}{\alpha - \beta} < \theta < \frac{p_{2n} - p_{2r} + s}{1 - \alpha}$ 时, 消费者选择“以旧换再”。

3) 当 $U_{2u} > 0$, $U_{2u} > U_{2n}$, $U_{2u} > U_{2r}$, 即 $p_{1n} < \theta < \min \left\{ \frac{p_{2n} - A}{1 - \beta}, \frac{p_{2r} - A - s}{\alpha - \beta} \right\}$ 时, 消费者选择保留原来的产品, 不产生任何置换购买行为。

通过消费者选择行为的组合分析, 可以得出, 只有当 $\frac{p_{2n} - p_{2r} + s}{1 - \alpha} > \frac{p_{2n} - A}{1 - \beta} > \frac{p_{2r} - A - s}{\alpha - \beta}$ 时, 第二阶段的市场上才会同时出现“以旧换新”和“以旧换再”两种消费行为。因此, “以旧换新”和“以旧换再”的需求函数可分别表示为

$$q_{2n} = \int_{\frac{p_{2n} - p_{2r} + s}{1 - \alpha}}^Q d\theta = Q - \frac{p_{2n} - p_{2r} + s}{1 - \alpha}, \quad (2)$$

$$q_{2r} = \int_{\frac{p_{2r}-A-s}{\alpha-\beta}}^{\frac{p_{2n}-p_{2r}+s}{1-\alpha}} d\theta = \frac{p_{2n}-p_{2r}+s}{1-\alpha} - \frac{p_{2r}-A-s}{\alpha-\beta}. \quad (3)$$

与此同时, 第二阶段还会有一批新的消费者进入市场, 将面临“直购新品”和“直购再制品”两种选择. 参照上述分析思路, 只有当 $\frac{p_{2n}-p_{2r}}{1-\alpha} > p_{2n}$ 时, 两种消费行为才会同时存在, 其需求函数可分别表示为

$$q_{2fn} = \int_{\frac{p_{2n}-p_{2r}}{1-\alpha}}^Q d\theta = Q - \frac{p_{2n}-p_{2r}}{1-\alpha}, \quad (4)$$

$$q_{2fr} = \int_{\frac{p_{2r}}{\alpha}}^{\frac{p_{2n}-p_{2r}}{1-\alpha}} d\theta = \frac{p_{2n}-p_{2r}}{1-\alpha} - \frac{p_{2r}}{\alpha}. \quad (5)$$

因此, 原始制造商和关联再制造商的利润函数分别为

$$\Pi_M = (p_{1n} - c)q_{1n} + ((p_{2n} - A) - c)q_{2n} + (p_{2n} - c)q_{2fn}, \quad (6)$$

$$\Pi_R = ((p_{2r} - A) - (c - \Delta))q_{2r} + (p_{2r} - (c - \Delta))q_{2fr}. \quad (7)$$

约束条件为

$$\begin{cases} q_{2n} \geq q_{2fr} \\ q_{1n} > q_{2n} + q_{2r} \\ q_{2n} > 0, q_{2fn} > 0, q_{2r} > 0, q_{2fr} > 0. \end{cases} \quad (8)$$

其中原始制造商利润函数第一项表示第一阶段新产品利润, 第二项表示“以旧换新”利润, 第三项表示“直购新品”利润; 关联再制造商利润函数第一项表示“以旧换再”利润, 第二项表示“直购再制品”利润; 约束条件第一项的完整形式为 $q_{2n} + q_{2r} \geq q_{2fr} + q_{2r}$, 即再制造产品总量不能大于废旧产品置换回收数量, 第二项表示废旧产品置换回收数量应小于第一阶段新产品销售数量, 第三项表示各种市场需求应大于零.

原始制造商利润函数 Π_M 是关于 p_{1n} 和 p_{2n} 的凹函数, 关联再制造商利润函数 Π_R 是关于 p_{2r} 的凹函数(证明过程见附录 1), 理论上均存在唯一最优解. 因此, 对式(6)分别求关于 p_{1n} 和 p_{2n} 的一阶偏导并令其为零, 可得

$$\frac{\partial \Pi_M}{\partial p_{1n}} = Q + c - 2p_{1n} = 0, \quad (9)$$

$$\frac{\partial \Pi_M}{\partial p_{2n}} = \frac{2Q(1-\alpha) + 2c + A - s - 4p_{2n} + 2p_{2r}}{1-\alpha} = 0. \quad (10)$$

同时, 联合式(7)和式(8)构建拉格朗日函数为

$$L = (p_{2r} - A - (c - \Delta)) \left(\frac{p_{2n}-p_{2r}+s}{1-\alpha} - \frac{p_{2r}-A-s}{\alpha-\beta} \right) + (p_{2r} - (c - \Delta)) \left(\frac{p_{2n}-p_{2r}}{1-\alpha} - \frac{p_{2r}}{\alpha} \right) + \lambda \left(\left(Q - \frac{p_{2n}-p_{2r}+s}{1-\alpha} \right) - \left(\frac{p_{2n}-p_{2r}}{1-\alpha} - \frac{p_{2r}}{\alpha} \right) \right). \quad (11)$$

该函数的 Kuhn-Tucker 条件可等价表示为

$$\begin{cases} \frac{\partial L}{\partial p_{2r}} = ((\alpha\beta - 2\alpha + \beta)(2p_{2r} - c + \Delta) + \alpha(1-\alpha)(2A + s) + \lambda(1+\alpha)(\alpha-\beta) + \alpha(\alpha-\beta)(2p_{2n} + s + A))/(\alpha(1-\alpha)(\alpha-\beta)) = 0, \\ \frac{\partial L}{\partial \lambda} = (Q\alpha(1-\alpha) - \alpha(2p_{2n} - p_{2r} + s) + p_{2r})/(\alpha(1-\alpha)) = 0. \end{cases} \quad (12)$$

由最优性一阶条件可得

1) 当最大支付意愿 $Q < \tilde{Q}$, 即回收的废旧产品能够全部用于再制造时, 产品最优价格分别为

$$p_{1n}^E = (Q + c)/2, \quad p_{2n}^E = ((2Q - s)(1-\alpha) + (2c + A)(1+\alpha))/4, \quad p_{2r}^E = (\alpha(2c + A + s))/2,$$

其中 $\tilde{Q} = ((2\alpha - \alpha\beta - \beta)(2\Delta + s\alpha - 2c(1 - \alpha)) + \alpha(1 - \alpha)(2c\alpha - s(2 - \alpha) - A(4 - \alpha - \beta))) / (2\alpha(1 - \alpha)(\alpha - \beta))$.

最优销售量分别为

$$\begin{aligned} q_{1n}^E &= (Q - c)/2, q_{2n}^E = ((1 - \alpha)(2Q - 2c - A) - s(3 - \alpha)) / (4(1 - \alpha)), \\ q_{2r}^E &= ((1 - \alpha)(2Q(\alpha - \beta) - (\alpha + \beta)(2c + A + s) + 2(2A + s)) + 2s(1 - \beta)) / (4(1 - \alpha)(\alpha - \beta)), \\ q_{2fn}^E &= ((1 - \alpha)(2Q - 2c - A) + s(1 + \alpha)) / (4(1 - \alpha)), \\ q_{2fr}^E &= ((1 - \alpha)(2Q - 2c - A) - s(3 - \alpha)) / (4(1 - \alpha)). \end{aligned}$$

原始制造商的最优利润值为

$$\Pi_M^E = ((A + s)(1 - \alpha)^2(A + s - 4(Q - c)) + 2(1 - \alpha)(Q - c)^2(3 - 2\alpha) + 4As) / (8(1 - \alpha)),$$

关联再制造商的最优利润值为

$$\Pi_R^E = (K_1 + K_2 - K_3) / (4(1 - \alpha)(\alpha - \beta)),$$

其中 $K_1 = 4\alpha c(1 - \alpha)((c + s)(1 - \alpha) - \Delta) - 2As(\alpha - \beta)$,

$$K_2 = (1 - \alpha)(2 - \alpha)(\alpha(s^2 + 4Ac) - (A + s) \times (A\alpha + 2(A + c - \Delta))),$$

$$K_3 = (1 - \alpha)(\alpha - \beta)(2Q(1 - \alpha)(2c + A) + 2Q(\Delta - \alpha s) + A(2c + A + s)).$$

2) 当最大支付意愿 $Q \geq \tilde{Q}$, 即回收的废旧产品无法全部用于再制造时, 产品最优价格分别为

$$\begin{aligned} p_{1n}^G &= (Q + C)/2, \\ p_{2n}^G &= ((2Q(1 - \alpha) + 3c - \Delta)(2\alpha - \alpha\beta - \beta) + (\alpha - \beta)(A(2\alpha + 1) - s) + 3A\alpha(1 - \alpha)) \\ &\quad (2(\alpha(2 - \alpha - \beta) + 2(\alpha - \beta))), \\ p_{2r}^G &= (2(\alpha - \beta)(Q\alpha(1 - \alpha) + c(1 + \alpha) - \Delta) + \alpha(A + s)(2 - \alpha - \beta) + 2\alpha(1 - \beta)(A + c - \Delta)) \\ &\quad (2(\alpha(2 - \alpha - \beta) + 2(\alpha - \beta))). \end{aligned}$$

最优销售量分别为

$$\begin{aligned} q_{1n}^G &= (Q - c)/2, \\ q_{2n}^G &= ((2\alpha - \alpha\beta - \beta)(2Q(1 - \alpha) - \Delta) + (1 - \alpha)(A\beta - c(2\alpha - \beta)) - s(\alpha(2 - \alpha - \beta) + 3(\alpha - \beta))) / \\ &\quad (2(1 - \alpha)(\alpha(2 - \alpha - \beta) + 2(\alpha - \beta))), \\ q_{2r}^G &= (2Q(1 - \alpha)(\alpha - \beta)^2 + s(2\alpha(1 - \alpha)(1 - \beta) + (\alpha - \beta)(4 - 3\alpha - \alpha\beta)) + \\ &\quad A(1 - \alpha)(\alpha - \beta)(4 - \alpha - \beta) + \Delta(2 - \alpha - \beta)(2\alpha - \alpha\beta - \beta) - c(1 - \alpha)(4\alpha - \beta(2 + \alpha + \beta))) / \\ &\quad (2(1 - \alpha)(\alpha - \beta)(\alpha(2 - \alpha - \beta) + 2(\alpha - \beta))), \\ q_{2fn}^G &= ((2\alpha - \alpha\beta - \beta)(2Q(1 - \alpha) + s - \Delta) + (1 - \alpha)(\beta(A + c) - \alpha(2c - s))) / \\ &\quad (2(1 - \alpha)(\alpha(2 - \alpha - \beta) + 2(\alpha - \beta))), \\ q_{2fr}^G &= (2\alpha(1 - \beta)(Q\alpha(1 - \alpha) - s) - c(1 - \alpha)(4\alpha - \beta(3\alpha + 2)) - \alpha(1 - \alpha)(4 - \alpha - 2\beta) + \\ &\quad \Delta(2 - \alpha)(2\alpha - \alpha\beta - \beta)) / (2\alpha(1 - \alpha)(\alpha(2 - \alpha - \beta) + 2(\alpha - \beta))). \end{aligned}$$

原始制造商和关联再制造商的最优利润值为 Π_M^G 和 Π_R^G , 由于表达形式过于复杂, 在此不再列出.

引理 1 为了保证制造/再制造系统的正常运作, 当回收产品能够全部用于再制造时, 置换回收价格应该满足 $F_1 < A < \min(F_2, F_3)$; 当回收产品无法全部用于再制造时, 置换回收价格应该满足 $\max(D_1, D_2) < A < \min(D_3, D_4)$. (证明见附录 2)

4 均衡结果分析

首先, 在最优均衡解的基础上, 分析置换回收价格 A 和政府“以旧换再”补贴 s 对多元市场结构的影响.

命题 1 1) 当回收产品能够全部用于再制造时, 随着置换回收价格 A 的提高, “以旧换再”消费市场会对“以旧换新”消费市场产生挤兑效应, 而“直购新品”和“直购再制品”的市场规模会逐步萎缩. 2) 当回收产品无法全部用于再制造时, 随着置换回收价格 A 的提高, “直购新品”消费市场会对“直购再制品”消费市场产生挤兑效应, 而“以旧换新”和“以旧换再”的市场规模会逐步扩大.

$$\text{当 } Q < \tilde{Q} \text{ 时, } \frac{\partial p_{2n}^E}{\partial A} > 0, \frac{\partial p_{2r}^E}{\partial A} > 0, \frac{\partial q_{2n}^E}{\partial A} < 0, \frac{\partial q_{2r}^E}{\partial A} > 0, \frac{\partial q_{2fn}^E}{\partial A} < 0, \frac{\partial q_{2fr}^E}{\partial A} < 0;$$

$$\text{当 } Q \geq \tilde{Q} \text{ 时, } \frac{\partial p_{2n}^G}{\partial A} > 0, \frac{\partial p_{2r}^G}{\partial A} > 0, \frac{\partial q_{2n}^G}{\partial A} > 0, \frac{\partial q_{2r}^G}{\partial A} > 0, \frac{\partial q_{2fn}^G}{\partial A} > 0, \frac{\partial q_{2fr}^G}{\partial A} < 0 \text{ (证明见附录 3).}$$

可以看出, 置换回收价格的变化, 会引起“以旧换再”和“以旧换新”之间, 或者, “直购新品”和“直购再制品”之间的市场挤兑, 但两类挤兑效应不会同时发生, 存在异步性.

当回收产品能够全部用于再制造时, 新产品和再制造产品的直接销售价格会随着置换回收价格的增加而增加, 且前者的增长速率大于后者, 速率比值小于 $1/\alpha$, 从而造成部分“直购新品”消费者转而购买再制造产品, 以及更多“直购再制品”消费者转而放弃购买任何产品, 两个消费市场均出现萎缩现象. 同时, 部分“以旧换新”消费者转而置换再制造产品, 而由于高额优惠的直接刺激, 部分不打算参与置换的原始消费者, 也选择进行“以旧换再”. “以旧换再”消费市场对“以旧换新”消费市场和保有原产品消费群体均产生挤兑效应.

当回收产品无法全部用于再制造时, 新产品和再制造产品的直接销售价格虽然同样随着置换回收价格的增加而增加, 但前者的增长速率小于后者, 从而造成“直购再制品”消费者大量流失, 可能转而购买新产品, 也可能会放弃购买任何产品, 被挤兑现象非常明显. 同时, 部分“以旧换再”消费者会转而置换新产品, 但更多原本不打算参与置换的消费者会选择“以旧换再”, 因此“以旧换新”和“以旧换再”两个消费市场均逐步扩大.

命题 2 随着政府“以旧换再”补贴 s 的提高, “以旧换再”消费市场会对“以旧换新”消费市场产生挤兑效应, “直购新品”消费市场会对“直购再制品”消费市场产生挤兑效应.

$$\text{当 } Q < \tilde{Q} \text{ 或 } Q \geq \tilde{Q} \text{ 时, 均有 } \frac{\partial p_{2n}^{E,G}}{\partial s} < 0, \frac{\partial p_{2r}^{E,G}}{\partial s} > 0, \frac{\partial q_{2n}^{E,G}}{\partial s} < 0, \frac{\partial q_{2r}^{E,G}}{\partial s} > 0, \frac{\partial q_{2fn}^{E,G}}{\partial s} > 0, \frac{\partial q_{2fr}^{E,G}}{\partial s} < 0. \text{ (证明与附录 3 类似)}$$

可以看出, 政府“以旧换再”补贴的变化, 会引起“以旧换再”和“以旧换新”之间、以及“直购新品”和“直购再制品”之间的市场挤兑, 两类挤兑效应同时发生, 存在同步性.

无论回收产品是否能够全部用于再制造, 新产品的直接销售价格均会随着政府“以旧换再”补贴的增加而降低, 而再制造产品的直接销售价格会不断提高, 从而造成“直购再制品”消费者大量流失, 可能转而购买新产品, 也可能会放弃购买任何产品. 同时, 由于政府补贴的支持, 减少了“以旧换再”消费者的实际购买支出, 部分“以旧换新”消费者会转而置换再制造产品, 部分不打算参与置换的原始消费者, 也会选择进行“以旧换再”, 使其市场规模不断扩大.

然后, 分析政府“以旧换再”补贴 s 对废旧产品置换回收总量 $q_c^E = q_{2n}^E + q_{2r}^E$ (或 $q_c^G = q_{2n}^G + q_{2r}^G$), 再制造产品整体市场份额 $q_r^E = q_{2r}^E + q_{2fr}^E$ (或 $q_r^G = q_{2r}^G + q_{2fr}^G$), 原始制造商和关联再制造商利润的影响.

命题 3 政府“以旧换再”补贴 s 能够促进废旧产品回收, 扩大再制造产品市场份额.

经推导, 可得 $\frac{\partial q_c^{E,G}}{\partial s} > 0, \frac{\partial q_r^{E,G}}{\partial s} > 0$ (证明与附录 3 类似). 结合命题 2 可以看出, 政府补贴有力刺激了原始消费者“以旧换再”的消费行为, 尽管“以旧换新”和“直购再制品”消费行为受到了一定程度的抑制, 但总体上废旧产品的置换回收数量和再制造产品的市场份额仍然不断提高, 补贴政策的市场培育作用得到充分体现.

命题4 政府“以旧换再”补贴 s 不一定有利于原始制造商和关联再制造商的盈利。

当 $Q < \tilde{Q}$ 或 $Q \geq \tilde{Q}$ 时, 随着政府“以旧换再”补贴的提高, 原始制造商和关联再制造商的利润均呈现“先减少后增长”的趋势. (证明见附录4)

换言之, 补贴不一定对企业产生正向影响. 对于原始制造商而言, 只有当政府“以旧换再”补贴超过某一临界值时, “直购新品”的利润增量才会大于“以旧换新”的利润减量, 使其总利润回升; 而对于关联再制造商, 只有当政府补贴超过某一临界值时, “以旧换再”的利润增量才会大于“直购再制品”的利润减量, 使其总利润回升。

综合命题3和命题4, 可以看出, 虽然政府补贴对废旧产品回收和再制造产品销售始终保持着促进作用, 但较低的补贴额度, 可能会对原始制造商和关联再制造商产生负面影响, 有碍企业盈利. 因此需要进一步确定能够兼顾市场培育效果和企业经济效益的一致性条件。

命题5 1) 当回收产品能够全部用于再制造时, 如果政府“以旧换再”补贴 s 大于阈值 $\max(s_M^E, s_R^E)$, 其对原始制造商和关联再制造商盈利的负面影响便会消除, 并产生促进作用. 2) 当回收产品无法全部用于再制造时, 如果政府“以旧换再”补贴 s 大于阈值 $\max(s_M^G, s_R^G)$, 其对原始制造商和关联再制造商盈利的负面影响便会消除, 并产生促进作用。

假设 $\Pi_i^j(0)$ ($i = M, R, j = E, G$) 表示无补贴情况下的最优利润值, 只有当 $\Pi_i^j(s) - \Pi_i^j(0) > 0$ 时, 政府“以旧换再”补贴 s 才不会对企业盈利产生负面影响. 对于正“U”型抛物线, 此时的右端点即为阈值条件(推导过程见附录5). 政府“以旧换再”的补贴额度, 只有超过阈值条件, 才能够在发挥市场培育作用的同时, 兼顾微观企业的经济效益。

但是, 政府补贴作为经济杠杆, 不可能无限制的提高, 也无法照顾到所有企业的个体利益. 对于企业而言, 在既定补贴政策下, 阈值条件越低, 越能够规避政府补贴可能带来的不利影响。

命题6 改进再制造工艺技术, 提升再制造修复的单位节约成本 Δ , 即降低再制造单位生产成本, 是降低阈值条件的最优途径。

当 $Q < \tilde{Q}$ 或 $Q \geq \tilde{Q}$ 时, $\frac{\partial s_M^E}{\partial \Delta} = 0$ (或 $\frac{\partial s_M^G}{\partial \Delta} < 0$), $\frac{\partial s_M^{E,G}}{\partial \Delta} < 0$, $\frac{\partial s_M^{E,G}}{\partial c} < 0$, $\frac{\partial s_M^{E,G}}{\partial Q} > 0$, $\frac{\partial s_R^{E,G}}{\partial \Delta} < 0$, $\frac{\partial s_R^{E,G}}{\partial A} > 0$, $\frac{\partial s_R^{E,G}}{\partial c} > 0$, $\frac{\partial s_R^{E,G}}{\partial Q} < 0$ (证明与附录3类似). 可以看出, 提高置换回收价格 A , 原始制造商的阈值条件会相应降低, 但关联再制造商的阈值条件反而会升高, 使其利益受到损害. 双方很难就这一问题达成一致意见. 新产品单位生产成本 c 和消费者最大支付意愿 Q 的变化, 也会产生类似影响. 只有提升再制造修复的单位节约成本 Δ , 即降低再制造单位生产成本, 关联再制造商阈值条件降低的同时, 原始制造商的阈值条件也会同样降低(或维持不变). 并且, 改进再制造工艺水平, 进一步降低再制造生产成本, 也符合企业的内涵式发展要求。

5 算例

本节将通过多组数值算例对上述主要研究结果进行仿真试验, 从而验证其结论的正确性和可靠性. 首先, 对回收产品能够全部用于再制造时的情形进行验证. 假设消费者的最大购买意愿 $Q = 200$; 新产品单位生产成本 $c = 135$, 并高于再制造产品, 则再制造修复的单位节约成本 $\Delta = 77$, 即 $c - \Delta = 58$; 由于消费者对再制造产品的效用评价低于新产品, 但高于废旧产品, 取再制造价值折扣系数 $\alpha = 0.53$, 废旧产品残值系数 $\beta = 0.18$.

1) 为了验证命题1, 取政府“以旧换再”补贴 $s = 5$; 由引理中制造/再制造系统正常运作时, 置换回收价格 A 满足的必要条件 $F_1 < A < \min(F_2, F_3)$, 可得 $A \in [8.5, 12.8]$, 此时最大购买意愿的最小临界值 $\tilde{Q} = 269$, 满足 $Q < \tilde{Q}$ 的约束条件. 对 q_{2n}^E , q_{2r}^E , q_{2fn}^E 和 q_{2fr}^E 进行数值模拟, 结果如图2~图3所示. 可以看

出,数值模拟结果与命题1的结论保持一致.

2) 为了验证命题2~命题5,取置换回收价格 $A = 12.8$, $s \in [0, 4.8]$. 对 q_{2n}^E , q_{2r}^E , q_{2fn}^E , q_{2fr}^E , q_c^E , q_r^E , Π_M^E 和 Π_R^E 进行数值模拟,结果如图4~图7所示. 其中图4和图5对应命题2,图6对应命题3,图7对应命题4和命题5. 可以看出,数值模拟结果与相应命题的结论保持一致.

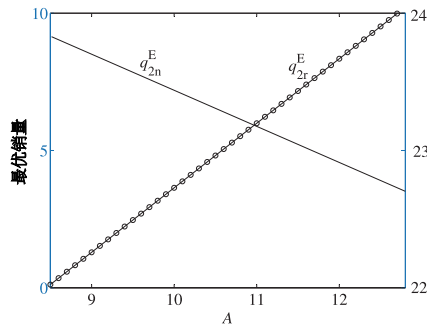


图2 置换回收价格对置换销售市场挤兑效应的影响

Fig. 2 The effect of replacement recycling prices on run-off effects of the replacement sale market

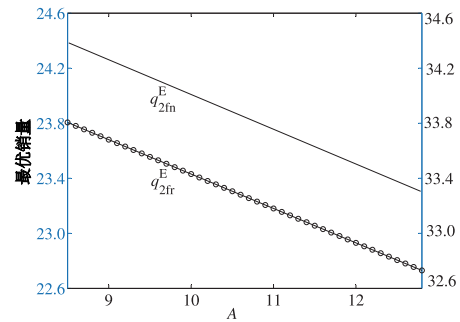


图3 置换回收价格对直购市场萎缩的影响

Fig. 3 The effect of replacement recycling prices on the shrinking of direct purchase market

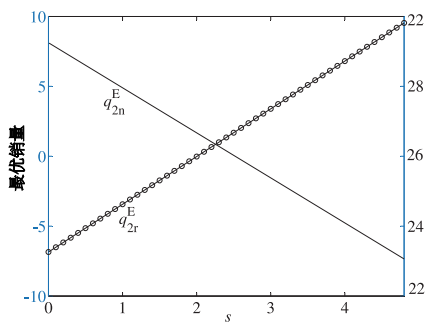


图4 政府补贴对置换销售市场挤兑效应的影响

Fig. 4 The effect of government subsidies on run-off effects of the replacement sales market

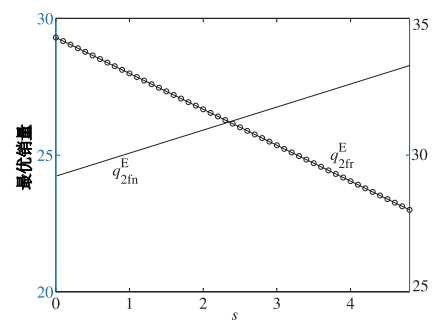


图5 政府补贴对直购市场挤兑效应的影响

Fig. 5 The effect of government subsidies on run-off effects of direct purchase market

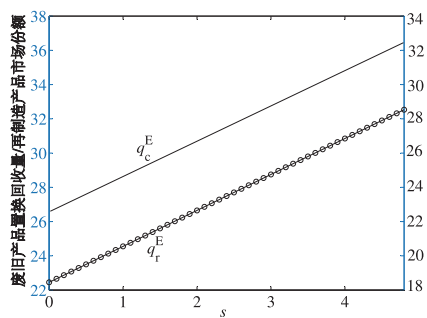


图6 政府补贴对市场培育效果的影响

Fig. 6 The effect of government subsidies on market cultivation

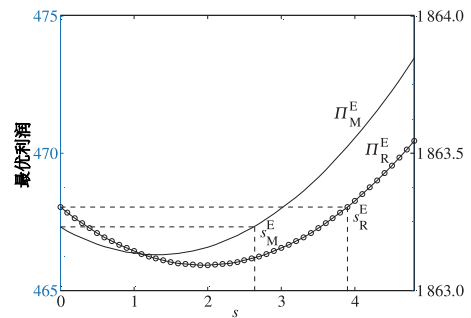


图7 政府补贴对企业经济效益的影响

Fig. 7 The effect of government subsidies on the economic benefits of enterprises

3) 为了验证命题6,取置换回收价格 $A = 12.8$,再制造修复的单位节约成本 $\Delta = 77.0$, $\Delta^* = 76.8$,

$\Delta^{**} = 77.2, \Delta^{***} = 77.4, s \in [0, 4.8]$. 对 Π_R^E 进行数值模拟(Π_M^E 保持稳定), 结果如图 8 所示. 可以看出, 数值模拟结果与命题 6 的结论保持一致.

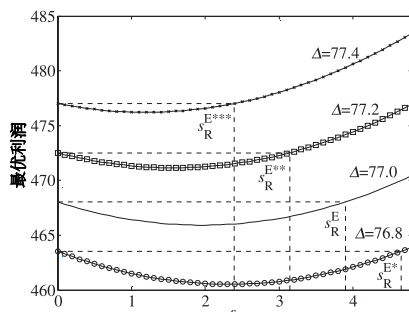


图 8 再制造修复的节约成本对阈值条件的影响

Fig. 8 The effect of cost savings of remanufacturing repair on threshold conditions

对回收产品无法全部用于再制造情形的验证与上述过程基本相同, 其模拟结果与相应命题的结论均保持一致, 由于篇幅原因, 不再过多赘述. 除此之外, 对 $Q = 300, c = 128, \Delta = 60, \beta = 0.2$ 等其他仿真数值也进行了模拟, 其结果均与理论推导保持一致, 此处也不再逐一列出.

6 结束语

本文运用博弈理论, 构建了原始制造商和关联再制造商的两阶段模型, 研究了“以旧换再”和“以旧换新”之间、“直购新品”和“直购再制品”之间的市场挤兑效应, 以及政府补贴对市场培育效果和企业经济效益的影响. 研究结果为企业和政府提供了有益的启发和参考. 首先, 对于企业而言, 可以通过调整不同时期的置换回收价格, 平衡“直购新品”, “直购再制品”, “以旧换新”和“以旧换再”的市场份额. 在补贴政策存续时期, 企业可以实行较低的置换回收价格; 当补贴政策取消后, 提升置换回收价格, 可以最大限度的保持市场稳定. 当然, 如果企业期望在补贴期间尽快扩大“以旧换再”市场, 也可以在此时制定较高的置换回收价格. 其次, 在既定补贴政策下, 企业提升经济效益的最佳途径是改进再制造工艺, 降低再制造生产成本. 这不仅有利于关联再制造商, 在一般情况下, 对原始制造商也是有利的. 最后, 对于政府而言, “以旧换再”的补贴额度应当设置在略微高于大多数试点企业阈值条件的水平. 一方面, 可以在发挥市场培育作用的同时, 兼顾大多数试点企业的经济效益. 另一方面, 当补贴政策取消后, 企业经营回归到无补贴状态, 盈利水平也不会受到影响, 可以避免利润断崖式下滑.

在后续研究中, 将尝试设计契约机制或授权机制, 加强原始制造商和关联再制造商之间的深度合作. 另外, 可以将“以旧换再”和“以旧换新”的补贴范围在理论上纳入同一产业领域, 比较两者的补贴效率和影响.

参考文献:

- [1] 徐滨士, 刘世参, 史佩京. 推进再制造工程管理, 促进循环经济发展. 管理学报, 2004, 1(1): 28–31.
Xu B S, Liu S C, Shi P J. Improve the management of remanufacture engineering and promote the development of cyclical economy. Chinese Journal of Management, 2004, 1(1): 28–31. (in Chinese)
- [2] 徐滨士. 再制造技术与应用. 北京: 化学工业出版社, 2015.
Xu B S. Remanufacturing Technology and Application. Beijing: Chemical Industry Press, 2015. (in Chinese)
- [3] 林火灿. 让再制造产业链转起来. 经济日报, 2013–09–04(3).
Lin H C. Let the remanufacturing industry chain around. Economic Daily, 2013–09–04(3). (in Chinese)
- [4] 周文泳, 胡 雯, 尤建新, 等. 产品服务系统下的机电产品再制造模式: 基于 BT 公司的案例研究. 管理案例研究与评论, 2012, 5(2): 105–113.

- Zhou W Y, Hu W, You J X, et al. A general model of remanufacturing for electromechanical products considering product-service system: A case study of BT industries. *Journal of Management Case Studies*, 2012, 5(2): 105–113. (in Chinese)
- [5] 陈红喜, 曹刚, 李文青, 等. 消费者参与家电回收意愿影响因素的实证研究. *环境科学与技术*, 2016, 39(9): 209–213.
Chen H X, Cao G, Li W Q, et al. Empirical study on factor influencing consumers' willingness to participate in outdated household appliances recycling. *Environmental Science & Technology*, 2016, 39(9): 209–213. (in Chinese)
- [6] Savaskan R C, Bhattacharya S, Van Wassenhove L N. Closed-loop supply chain models with product remanufacturing. *Management Science*, 2004, 50(2): 239–252.
- [7] Savaskan R C, Van Wassenhove L N. Reverse channel design: the case of competing retailers. *Management Science*, 2006, 52(1), 1–14.
- [8] Atas A, Toktay L B, Van Wassenhove L N. How collection cost structure drives a manufacturer's reverse channel choice. *Production and Operations Management*, 2013, 22(5): 1089–1102.
- [9] Han X, Wu H, Yang Q, et al. Reverse channel selection under remanufacturing risks: Balancing profitability and robustness. *International Journal of Production Economics*, 2016, 182: 63–72.
- [10] Wang N, He Q, Jiang B. Hybrid closed-loop supply chains with competition in recycling and product markets. *International Journal of Production Economics*, 2019, 217: 246–258.
- [11] He Q, Wang N, Yang Z, et al. Competitive collection under channel inconvenience in closed-loop supply chain. *European Journal of Operational Research*, 2019, 275(1): 155–166.
- [12] 马卫民, 赵璋. 以旧换新补贴对不同模式闭环供应链的影响. *系统工程理论与实践*, 2012, 32(9): 1938–1944.
Ma W M, Zhao Z. Different models of closed-loop supply chain with government replacement-subsidy. *Systems Engineering: Theory & Practice*, 2012, 32(9): 1938–1944. (in Chinese)
- [13] 马卫民, 赵璋. 以旧换新补贴对具有不同等级产品闭环供应链的影响研究. *中国管理科学*, 2013, 21(3): 113–117.
Ma W M, Zhao Z. How does government replacement-subsidy influence the closed-loop supply chain with different grades of products. *Chinese Journal of Management Science*, 2013, 21(3): 113–117. (in Chinese)
- [14] Ma W M, Zhao Z, Ke H. Dual-channel closed-loop supply chain with government consumption-subsidy. *European Journal of Operational Research*, 2013, 226(2): 221–227.
- [15] Huang J, Leng M, Liang L, et al. Qualifying for a government's scrappage program to stimulate consumer's trade-in transactions? Analysis of an automobile supply chain involving a manufacturer and a retailer. *European Journal of Operational Research*, 2014, 239(2): 363–376.
- [16] 汪欣, 赵林. 政府补贴下的以旧换新策略研究. *华东经济管理*, 2015, 29(6): 141–147.
Wang X, Zhao L. A study on trade-in strategy with government subsidies. *East China Economic Management*, 2015, 29(6): 141–147. (in Chinese)
- [17] 颜波, 李鸿媛. 线上线下共同销售的制造商自主以旧换新策略行为. *计算机集成制造系统*, 2015, 21(12): 3336–3348.
Yan B, Li H Y. Strategic behavior of manufacturer adopting autonomous trade-in policy on dual channels. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2015, 21(12): 3336–3348. (in Chinese)
- [18] 缪朝炜, 夏志强. 基于以旧换新的闭环供应链决策模型. *管理科学学报*, 2016, 19(9): 49–66.
Miao Z W, Xia Z Q. Decision models for closed-loop supply chain with trade-ins. *Journal of Management Science in China*, 2016, 19(9): 49–66. (in Chinese)
- [19] Genc T S, De Giovanni P. Optimal return and rebate mechanism in a closed-loop supply chain game. *European Journal of Operational Research*, 2018, 269(2): 661–681.
- [20] 刘慧慧, 禹春霞, 向宁. 废弃电器电子产品回收管理的以旧换新机制研究. *经济管理*, 2015(1): 150–157.
Liu H H, Yu C X, Xiang N. Research on enterprise old-for-new mechanism in recycling management of waste electrical and electronic products. *Economic Management*, 2015(1): 150–157. (in Chinese)
- [21] Zhu X, Wang M, Chen G, et al. The effect of implementing trade-in strategy on duopoly competition. *European Journal of Operational Research*, 2016, 248(3): 856–868.
- [22] Agrawal V, Ferguson M, Souza G C. Trade-in rebates for price discrimination and product recovery. *Kelley School of Business Research Paper*, 2015, 11–15.
- [23] 刘靓晨, 瞿昕. 竞争环境下的以旧换新策略. *中国管理科学*, 2018, 26(9): 75–84.
Liu J C, Zhai X. Trade-in strategy in competitive markets. *Chinese Journal of Management Science*, 2018, 26(9): 75–84. (in Chinese)

- [24] 李新然, 吴义彪. 政府“以旧换再”补贴下的差别定价闭环供应链. 系统工程理论与实践, 2015, 35(8): 1983–1995.
Li X R, Wu Y B. Differential price closed-loop supply chain under the government-subsidy. Systems Engineering: Theory & Practice, 2015, 35(8): 1983–1995. (in Chinese)
- [25] 李新然, 吴义彪. 以旧换再补贴对双渠道销售闭环供应链的影响. 科研管理, 2015, 36(9): 106–118.
Li X R, Wu Y B. Impacts of replacement subsidy on the dual-channel sale closed-loop supply chain. Science Research Management, 2015, 36(9): 106–118. (in Chinese)
- [26] 杨倩霞. 不同市场结构下企业的“以旧换再”策略研究. 广州: 广东工业大学, 2016.
Yang Q X. “Trade in Old for Remanufacturing” Strategy under Different Market Structure. Guang Zhou: Guangdong University of Technology, 2016. (in Chinese)
- [27] 朱庆华, 夏西强, 李幻云. 政府补贴与专利费用下制造与再制造博弈模型. 系统工程学报, 2017, 32(1): 8–18.
Zhu Q H, Xia X Q, Li H Y. A game model between a manufacturer and a remanufacturer based on government subsidies and patent fees. Journal of Systems Engineering, 2017, 32(1): 8–18. (in Chinese)
- [28] 王玉燕, 于兆青. “以旧换再”策略下汽车供应链的运作模式调整研究. 经济与管理评论, 2017(6): 56–66.
Wang Y Y, Yu Z Q. Research on the adjustment of operation mode of automobile supply chain under the strategy of replacement-subsidy. Review of Economy and Management, 2017(6): 56–66. (in Chinese)
- [29] 韩小花, 周维浪, 沈 莹, 等. “以旧换再”闭环供应链策略选择及其定价协调研究. 管理评论, 2018, 30(1): 177–192.
Han X H, Zhou W L, Shen Y, et al. Trade-old-for-remanufactured program: Strategy selection, pricing and coordination. Management Review, 2018, 30(1): 177–192. (in Chinese)
- [30] 韩小花, 周维浪, 沈 莹. 竞争型“以旧换再”闭环供应链策略选择及生产决策研究. 运筹与管理, 2019, 28(2): 37–44.
Han X H, Zhou W L, Shen Y. “Trade-old-for-remanufactured” closed-loop supply chain under competition: Strategy selections and production decisions. Operations Research and Management Science, 2019, 28(2): 37–44. (in Chinese)
- [31] 高举红, 李梦梦, 霍 帆. 市场细分下考虑消费者支付意愿差异的闭环供应链定价决策. 系统工程理论与实践, 2018, 38(12): 3071–3084.
Gao J H, Li M M, Huo Z. pricing decision of closed-loop supply chain considering consumers’ willingness to pay differentiation under market segmentation. Systems Engineering: Theory & Practice, 2018, 38(12): 3071–3084. (in Chinese)
- [32] Ferguson M E, Toktay L B. The effect of competition on recovery strategies. Production and Operations Management, 2006, 15(3): 351–368.
- [33] 但 斌, 丁雪峰. 再制品最优定价及市场挤兑与市场增长效应分析. 系统工程理论与实践, 2010, 30(8): 1371–1379.
Dan B, Ding X F. Optimal pricing for remanufactured products and analyzing the effect of cannibalization and market growth. Systems Engineering: Theory & Practice, 2010, 30(8): 1371–1379. (in Chinese)
- [34] Atasu A, Sarvary M, Van Wassenhove L N. Remanufacturing as a marketing strategy. Management Science, 2008, 54(10): 1731–1746.
- [35] 国家发展与改革委员会. 再制造产品“以旧换再”试点实施方案. 2013–07–04.
National Development and Reform Commission. Pilot implementation plan of “old-for-remanufacturing” for remanufactured products. 2013–07–04. (in Chinese)
- [36] 陈彦斌, 刘哲希. 中国宏观经济政策体系面临的困境与改革方向. 中国人民大学学报, 2016(5): 12–20.
Chen Y B, Liu Z X. The dilemma and reform direction of china’s macroeconomic policy. Journal of Renmin University of China, 2016(5): 12–20. (in Chinese)
- [37] 徐雪高, 吴 比, 张 振. 大豆目标价格补贴的政策演进与效果评价. 经济纵横, 2016(10): 81–87.
Xu X G, Wu B, Zhang Z. Policy evolution and effect evaluation of soybean target price subsidy. Economic Review, 2016(10): 81–87. (in Chinese)
- [38] Ray S, Boyaci T, Aras N. Optimal prices and trade-in rebates for durable, remanufacturable products. Manufacturing & Service Operations Management, 2005, 7(3): 208–228.
- [39] Ferrer G, Swaminathan J M. Managing new and differentiated remanufactured products. European Journal of Operational Research, 2010, 203(2), 370–379.
- [40] Guide Jr V D R, Li J. The potential for cannibalization of new products sales by remanufactured products. Decision Science, 2010, 41(3): 547–572.
- [41] 王文宾, 张 梦, 赵 蕾, 等. 第三方回收商公平关切下闭环供应链决策模型. 系统工程学报, 2019, 34(3): 409–421.
Wan W B, Zhang M, Zhao L, et al. Decision-making model of closed-loop supply chain based on third-party collector’s fairness concern. Journal of Systems Engineering, 2019, 34(3): 409–421. (in Chinese)

[42] Abbey J D, Blackburn J D. Optimal pricing for new and remanufactured products. *Journal of Operations Management*, 2015, 36: 130–146.

作者简介:

景 熠(1987—), 男, 贵州都匀人, 博士, 副教授, 研究方向: 生产运作, 供应链管理, Email: clearsky0429@126.com;

杜鹏琦(1993—), 男, 甘肃陇南人, 硕士生, 研究方向: 闭环供应链管理, Email: henrydu7777777@163.com.

附录1 关于原始制造商和关联再制造商利润函数 Π_M 和 Π_R 凹凸性的检验

证明 将式(1)、式(2)和式(4)代入式(6), 构建原始制造商利润函数的 Hesse 矩阵, 可得

$$H = \begin{bmatrix} -2 & 0 \\ 0 & -\frac{4}{1-\alpha} \end{bmatrix}. \quad (13)$$

易知 H 为负定矩阵, 原始制造商利润函数是关于 p_{1n} 和 p_{2n} 的凹函数. 同时, 将式(3)和式(5)代入式(7), 对其求 p_{2r} 的二阶偏导数, 可得 $\frac{\partial^2 \Pi_R}{\partial p_{2r}^2} = -\frac{2(\alpha(1-\beta) + (\alpha-\beta))}{\alpha(1-\alpha)(\alpha-\beta)} < 0$, 说明关联再制造商利润函数是关于 p_{2r} 的凹函数. 证毕.

附录2 引理的证明

证明 当 $Q < \tilde{Q}$ 时, 最优价格 $p_{1n}^E, p_{2n}^E, p_{2r}^E$ 和最优销售量 $q_{1n}^E, q_{2n}^E, q_{2fn}^E, q_{2r}^E, q_{2fr}^E$ 均应大于零, 且“以旧换新”销售价格 $p_{2n}^E - A$ 和“以旧换再”销售价格 $p_{2r}^E - A$ 在正常市场环境下也应大于零, 并满足 $q_{1n}^E > q_{2n}^E + q_{2r}^E$ 的约束条件. 其中 p_{1n}^E, q_{1n}^E 的表达式与置换回收价格 A 无关. 而由 $q_{2r}^E > 0$ 可得 $A > F_1$, 由 $q_{2n}^E = q_{2fr}^E > 0$ 可得 $A < F_2$, 由 $q_{1n}^E > q_{2n}^E + q_{2r}^E$ 可得 $A < F_3$. 进一步, 由市场形成条件 $\frac{p_{2n}^E - p_{2r}^E + s}{1-\alpha} > \frac{p_{2n}^E - A}{1-\beta} > \frac{p_{2r}^E - A + s}{\alpha-\beta}$, 可知 $A > F_1$ 恒成立, 由 $\frac{p_{2n}^E - p_{2r}^E}{1-\alpha} > p_{2n}^E$, 可知 $A < F_2$ 恒成立. 而 $q_{2fn}^E - F_2 = \frac{4s}{1-\alpha} > 0, p_{2r}^E - F_3 = \frac{(Q+c)(\alpha-\beta) + 2s}{(2-\alpha)(\alpha-\beta)} > 0, p_{2n}^E - F_3 = \frac{(3-\alpha)(Q(1-\beta) + c(\alpha-\beta)) + (1-\alpha)(Q(1-\alpha) + 4c) + 2s(2-\alpha)}{(3-\alpha)(2-\alpha)} > 0$. 因此, 当回收产品能够全部用于再制造时, 置换回收价格应满足 $F_1 < A < \min(F_2, F_3)$. 当 $Q \geq \tilde{Q}$ 时, 置换回收价格应满足 $\max(D_1, D_2) < A < \min(D_3, D_4)$, 证明思路与上述过程类似, 在此不再赘述. 其中 $F_1 = (2(1-\alpha)(c(\alpha+\beta) - Q(\alpha-\beta)) - s((1-\alpha)^2 + (1-\beta)(3-\alpha)))/((1-\alpha)(4-\alpha-\beta))$, $F_2 = (2(1-\alpha)(Q-c) - s(3-\alpha))/(1-\alpha)$, $F_3 = (c(\alpha-\beta) - Q(\alpha+\beta) - s(2-\alpha))/(2-\alpha)$, $D_1 = ((2\alpha-\beta)(c(1-\alpha) + 2s) + s(\alpha(1-\alpha) - \beta(1+\alpha)) + (2\alpha - \alpha\beta - \beta)(\Delta - 2Q(1-\alpha)))/(\beta(1-\alpha))$, $D_2 = ((1-\alpha)(c(\alpha-\beta^2) + \alpha(1-\alpha)(c-2\Delta-2s)) - (\alpha-\beta)(s(1-\alpha\beta) + (\alpha-\beta)(3s+\Delta+\Delta\alpha)) - (1-\alpha)(\alpha-\beta)(2(s+\Delta)(1+\alpha) + 2Q(\alpha-\beta) + \alpha(c-\Delta) - 2c-s))/((1-\alpha)(\alpha-\beta)(4-\alpha-\beta))$, $D_3 = (2\alpha(1-\beta)(Q\alpha(1-\alpha) - s) - (2\alpha - \alpha\beta - \beta)((2c-\Delta)(1-\alpha) - \Delta) + c\alpha\beta(1-\alpha))/(\alpha(1-\alpha)(4-\alpha-2\beta))$, $D_4 = ((\alpha-\beta)((2+\alpha)(Q(\alpha-\beta) - c(1+\beta)) + 4s) + 2\Delta(2\alpha - \alpha\beta - \beta) - \alpha(2-\alpha+\beta)(c-s))/(\alpha(1-\alpha)(4-\alpha-2\beta))$. 证毕.

附录3 命题1的证明

证明 当 $Q < \tilde{Q}$ 时, p_{1n}^E, q_{1n}^E 的表达式与 A 无关, 分别对 $p_{2n}^E, p_{2r}^E, q_{2n}^E, q_{2r}^E, q_{2fn}^E, q_{2fr}^E$ 求关于 A 的一阶偏导数, 可得 $\frac{\partial p_{2n}^E}{\partial A} = \frac{1+\alpha}{4} > 0, \frac{\partial p_{2r}^E}{\partial A} = \frac{\alpha}{2} > 0, \frac{\partial q_{2n}^E}{\partial A} = -\frac{1}{4} < 0, \frac{\partial q_{2r}^E}{\partial A} = \frac{4-\alpha-\beta}{4(\alpha-\beta)} > 0, \frac{\partial q_{2fn}^E}{\partial A} = -\frac{1}{4} < 0, \frac{\partial q_{2fr}^E}{\partial A} = -\frac{1}{4} < 0$.

当 $Q \geq \tilde{Q}$ 时, p_{1n}^G, q_{1n}^G 的表达式与 A 无关, 分别对 $p_{2n}^G, p_{2r}^G, q_{2n}^G, q_{2r}^G, q_{2fn}^G, q_{2fr}^G$ 求关于 A 的一阶偏导, 可得 $\frac{\partial p_{2n}^G}{\partial A} = \frac{\alpha(3-\alpha-2\beta) + (\alpha-\beta)}{2X_1} > 0, \frac{\partial p_{2r}^G}{\partial A} = \frac{\alpha(4-\alpha-3\beta)}{2X_1} > 0, \frac{\partial q_{2n}^G}{\partial A} = \frac{\beta}{2X_1} > 0, \frac{\partial q_{2r}^G}{\partial A} = \frac{4-\alpha-\beta}{2X_1} > 0, \frac{\partial q_{2fn}^G}{\partial A} = \frac{\beta}{2X_1} > 0, \frac{\partial q_{2fr}^G}{\partial A} = \frac{-(4-\alpha-2\beta)}{2X_1} < 0$. 其中 $X_1 = \alpha(2-\alpha-\beta) + 2(\alpha-\beta)$. 证毕.

附录4 命题4的证明

证明 当 $Q < \tilde{Q}$ 时, $\frac{\partial \Pi_M^E}{\partial s} = \frac{2A - (1-\alpha)^2(2Q-2c-A) + s(1-\alpha)^2}{4(1-\alpha)}, \frac{\partial \Pi_R^E}{\partial s} = \frac{T_1 - T_2 - T_3 + T_4}{4(1-\alpha)(\alpha-\beta)}$. 此时, 如果 $s < \frac{(1-\alpha)^2(2Q-2c-A) - 2A}{(1-\alpha)^2}$, Π_M^E 是 s 的减函数, 反之, Π_M^E 是 s 的增函数. 如果 $s < \frac{T_2 + T_3 - T_1}{2\alpha(1-\alpha)(2-\alpha)}$, Π_R^E 是 s 的减函数, 反之, Π_R^E 是 s 的增函数, 其中 $T_1 = 2\alpha(1-\alpha)(Q(\alpha-\beta) + 2c(1-\alpha)), T_2 = 2(1-\alpha)(2-\alpha)(A(1-\alpha) + c - \Delta), T_3 = A(\alpha-\beta)(3-\alpha), T_4 = 2s\alpha(1-\alpha)(2-\alpha)$. 当 $Q \geq \tilde{Q}$ 时, 推导思路与上述过程类似, 在此不再赘述. 证毕.

(下转第399页)