

# 控制与决策

Control and Decision

考虑政府补贴及环境设计的再制造闭环供应链生产决策

姚锋敏, 闫颖洛, 刘珊, 滕春贤

引用本文:

姚锋敏, 闫颖洛, 刘珊, 滕春贤. 考虑政府补贴及环境设计的再制造闭环供应链生产决策[J]. *控制与决策*, 2022, 37(10): 2637–2646.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2021.1034>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

考虑政府补贴的新产品与再制造产品定价模型

Pricing models of new products and remanufactured products under government subsidies

*控制与决策*. 2022, 37(1): 196–204 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.1090>

考虑公平关切和制造商竞争的平台型供应链定价、低碳水平和服务水平决策

Decisions of pricing, low-carbon level and service level in a platform supply chain considering fairness concern and manufacturers' competition

*控制与决策*. 2022, 37(4): 1045–1055 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0720>

不同担保模式下考虑零售商公平关切的闭环供应链博弈模型

Game models of closed-loop supply chain under different warranty modes considering retailer's fairness concerns

*控制与决策*. 2021, 36(6): 1489–1498 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1328>

政府补贴和增值税退税政策的闭环供应链决策

Closed-loop supply chain decisions under government subsidies and VAT rebates

*控制与决策*. 2021, 36(11): 2771–2782 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0356>

考虑企业社会责任和公平偏好的绿色供应链决策

Green supply chain considering fairness preference and corporate social responsibility

*控制与决策*. 2021, 36(7): 1743–1753 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1102>

# 考虑政府补贴及环境设计的再制造闭环供应链生产决策

姚锋敏<sup>†</sup>, 闫颖洛, 刘 珊, 滕春贤

(哈尔滨理工大学 经济与管理学院, 哈尔滨 150080)

**摘要:** 在外包及授权再制造模式下, 研究考虑政府补贴及制造商环境设计的再制造闭环供应链生产决策问题. 构建 4 种闭环供应链决策模型, 分析政府补贴及环境设计水平对制造商与再制造商竞合关系、闭环供应链绩效以及环境的影响. 研究发现, 制造商可以通过调节单位再制造外包费或专利许可费实现与再制造商共享政府补贴, 因此政府不同补贴策略不会对闭环供应链最优生产决策及绩效产生影响. 政府补贴与消费者对再制造产品的认知程度, 并不总是有利于提高制造商环境设计水平, 但均有助于促进再制造产品销售. 制造商总是有动机进行环境设计, 而再制造商只有在环境设计能为再制造产品带来更多成本节约时, 才有动力接受制造商的环境设计方案. 相比于授权再制造, 制造商及再制造商均在外包再制造下获得更多的利润. 另外, 政府补贴与环境设计并不一定总能起到减少产品环境总影响程度的作用.

**关键词:** 闭环供应链; 政府补贴; 环境设计; 外包再制造; 授权再制造; 生产决策

中图分类号: F224; C931.1 文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2021.1034

引用格式: 姚锋敏, 闫颖洛, 刘珊, 等. 考虑政府补贴及环境设计的再制造闭环供应链生产决策[J]. 控制与决策, 2022, 37(10): 2637-2646.

## Production decision for remanufacturing closed-loop supply chain considering government subsidies and environment design

YAO Feng-min<sup>†</sup>, YAN Ying-luo, LIU Shan, TENG Chun-xian

(School of Economics and Management, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China)

**Abstract:** Under the outsourcing and authorizing remanufacturing, the production decision for remanufacturing closed-loop supply chain (CLSC) considering government subsidies and manufacturer's design for environment is researched. Four CLSC decision models are constructed to analyze the effects of government subsidies and environment design investment on the competition and cooperation between manufacturers and remanufacturers as well as the performance of the CLSC. It shows that the manufacturer can share the government subsidies with the remanufacturer by adjusting unit remanufacturing outsourcing fee or patent licensing fee, so the different subsidy strategies of the government will not affect the optimal production decision and performance of the CLSC. The government subsidies and consumer acceptance degree of remanufactured products are not always conducive to increasing the manufacturer's design level for environment, but both contribute to promoting the sale of remanufactured products. The manufacturer always has an incentive to invest in design for the environment, and the remanufacturer will only be motivated to accept the environmental design solutions if it can bring more cost savings to the remanufactured product. Compared with the licensed remanufacturing, both the manufacturer and remanufacturer will gain more profits under the outsourced remanufacturing. In addition, government subsidies and environmental design may not always play a role in reducing the total environmental impact of products.

**Keywords:** closed-loop supply chain; government subsidies; design for the environment; outsourcing remanufacturing; authorizing remanufacturing; production decision

## 0 引言

随着经济的高速发展, 产品更新迭代速度不断加快, 不仅消耗大量资源, 还产生大量废旧产品, 造成

了严重的环境污染问题. 《智能再制造产业白皮书 2018》指出, 实施废产品回收再制造能够节省 70% 的材料, 减少 60% 的能源消耗, 降低 80% 的污染物排放

收稿日期: 2021-06-15; 录用日期: 2021-09-28.

基金项目: 中央支持地方高校改革发展资金人才培养项目(2021); 国家自然科学基金项目(71701056); 黑龙江省自然科学基金项目(G2018007).

责任编辑: 李勇建.

<sup>†</sup>通讯作者. E-mail: fengmin\_yao@hrbust.edu.cn.

量. 目前, 各国政府及企业都在大力推进废旧产品回收再制造产业, 以实现经济可持续发展.

环境设计 (design for the environment, DfE), 也叫绿色设计, 是指在产品的设计阶段就考虑产品的环境特性, 减少资源、有害物质等的使用, 提高资源循环利用, 减少产品在整个生命周期的废物排放. 不少研究指出, 制造企业如果采取环境设计策略, 则不仅能有效减少产品生产的资源消耗及环境影响, 而且能降低废旧产品回收再制造的成本及难度<sup>[1-2]</sup>. 现实中, 惠普通过实施环境设计策略不仅降低了产品的生产成本及资源消耗, 还提高了产品的可再制造性<sup>[1]</sup>. 尽管环境设计提高了再制造经济效益, 但许多制造商仍然不愿意从事再制造活动<sup>[1,3]</sup>. 主要原因有两点: 一是废旧产品回收再制造初始投资大, 且利润率有限; 二是制造商一般缺乏相关的专业人员与技术经验, 使其在从事再制造方面心有余而力不足<sup>[3]</sup>. 如福特由于缺乏相关经验而不得不放弃废旧汽车回收再制造业务<sup>[4]</sup>. 因此, 制造商通常将回收再制造业务外包或授权给第三方再制造商. 如路虎将再制造业务外包给专业的再制造商卡特彼勒, 而苹果公司选择授权富士康对其废旧手机等进行再制造和再销售<sup>[5]</sup>. 我国再制造产业处于发展初期, 政府采取财政补贴等激励政策促进再制造产业的发展尤为重要. 目前, 关于政府补贴存在的争议主要是补贴给哪一方 (制造商或再制造商) 才能获得最佳的补贴效果<sup>[3]</sup>. 基于此, 本文将重点研究3个问题: 一是在环境设计外生情形下, 政府的不同补贴策略及环境设计水平对不同再制造模式下制造商与再制造商竞合关系有何影响; 二是政府不同补贴策略及环境设计水平如何影响环境; 三是在环境设计水平内生情形下, 政府补贴及不同再制造模式对制造商的最佳环境设计水平、闭环供应链生产决策及利润有何影响?

在绿色可持续发展的背景下, 供应链的产品及环境设计策略受到国内外学者的广泛关注. Raz等<sup>[6]</sup>较早提出环境设计的概念, 指出企业通过环境设计可以降低单位产品的环境影响及生产成本. Zheng等<sup>[1]</sup>分别在垄断及竞争条件下研究了制造商环境设计水平对企业生产决策及环境的影响. 李婧婧等<sup>[7]</sup>研究了企业生态设计的激励机制, 表明增加信息共享程度可以提高供应链企业利益分配比和生态设计努力水平. 在产品的设计方面, Wu<sup>[8]</sup>与肖露等<sup>[9]</sup>研究了两周期闭环供应链的产品设计及政府激励问题. Liu等<sup>[10]</sup>在供应商进行零部件设计及制造商进行产品设计的条件下, 研究了产品设计策略对供应链运作的影响. Li等<sup>[11]</sup>分析了直销型闭环供应链的产品设计与广告

策略对成员企业决策的影响. 在再制造设计方面, 夏西强等<sup>[12]</sup>对比了制造商或再制造商承担再制造设计费用对再制造设计程度、回收率及企业绩效的影响. Reimann等<sup>[4]</sup>研究了制造商与零售商分别负责再制造对再制造过程创新的影响.

在再制造模式选择以及政府补贴方面, Zou等<sup>[15]</sup>从企业利润、社会福利及环境角度研究了再制造的外包或授权条件. 郑小雪等<sup>[13]</sup>研究了制造商直接外包与委托零售商外包两种模式下的企业定价决策问题. 孙浩等<sup>[14]</sup>对比了有或无专利授权下的竞争与合作模式对制造商与再制造商博弈的影响. Hong等<sup>[15]</sup>探讨了闭环供应链中制造商的单位或固定授权策略选择问题. 许民利等<sup>[16]</sup>在再制造产出具有不确定性的情形下, 研究了不同专利许可模式下的闭环供应链定价及协调问题. 申成然等<sup>[17]</sup>与曹柬等<sup>[18]</sup>分别研究了政府补贴与政府规制下再制造供应链的专利授权问题. Bian等<sup>[19]</sup>研究了政府不同补贴策略对供应链绿色技术投入、减排及环境的影响. 针对双渠道闭环供应链, 马祖军等<sup>[20]</sup>研究了政府规制对供应链最优决策、利润及社会福利的影响. 王文宾等<sup>[21]</sup>研究了政府补贴下正规与非正规回收商价格竞争及回收决策等问题. He等<sup>[22]</sup>分析了政府补贴对制造商销售渠道选择的影响.

现有研究分别在再制造供应链产品设计、政府补贴及专利授权等方面取得了丰硕成果, 但就现实中广泛存在的外包及授权再制造模式下, 政府如何选择补贴策略、制造商如何确定最佳环境设计水平, 以及两者对新产品与再制造产品生产、环境的影响等问题尚未在理论上得到有效探讨. 基于此, 本文在考虑政府补贴及环境设计的背景下, 分别构建基于外包或授权再制造、政府补贴制造商或再制造商情形下的4种闭环供应链决策模型. 首先, 探讨外包及授权再制造模式下再制造商进行再制造的条件、政府补贴策略的选择及实施效果; 其次, 分析政府补贴及环境设计对制造商与再制造商竞合关系、闭环供应链绩效以及环境的影响; 最后, 通过数值仿真对主要结论进行分析验证. 研究结果为考虑环境设计的再制造闭环供应链优化运作及政府政策制定提供了科学的决策参考.

## 1 问题描述与假设

考虑一个制造商及一个再制造商构成的闭环供应链, 两者属于完全信息下的 Stackelberg 博弈, 且制造商为渠道领导者. 考虑制造商有两种回收再制造模式可以选择: 一是通过支付一定单位外包再制造费用, 将废旧产品的回收再制造外包给再制造商, 此

时制造商负责新产品及再制造产品的销售;二是通过收取一定的单位再制造专利许可费用,将废旧产品的回收再制造及销售统一授权给再制造商,此时制造商仅负责新产品的生产与销售.同时,政府为了促进再制造产业的发展,给予参与废旧产品回收再制造及销售的制造商或再制造商一定的补贴<sup>[3,17]</sup>.

在绿色可持续发展的背景下,由于受到政府环境法规的约束,为赢得持续竞争优势,制造商实施环境设计,向市场提供资源节约型和环境友好型的环保产品成为必然趋势.结合现实中苹果等企业通过环境设计减少单位产品生产成本以及环境影响的实际案例,并借鉴文献[1],在建模时假定制造商通过环境设计,能够有效降低单位新产品以及再制造产品的生产成本与环境影响.基于上述背景,研究外包以及授权再制造下,制造商的环境设计对闭环供应链最优决策以及政府补贴策略的影响问题,并分析政府补贴以及环境设计水平对闭环供应链绩效及环境的影响.

相关符号定义和假设如下: $c_n$ 、 $c_r$ 分别表示无环境设计时,新产品及再制造产品的单位生产成本,且 $c_n - c_r > 0$ ;  $c_{ne}$ 、 $c_{re}$ 分别表示环境设计下新产品及再制造产品的单位生产成本; $\rho_1$ 、 $\rho_2$ 分别表示单位环境设计水平引起新产品及再制造产品单位生产成本的降低程度<sup>[1]</sup>,  $\rho_1$ 、 $\rho_2 > 0$ ;  $e_n$ 、 $e_r$ 分别表示无环境设计时,单位新产品及再制造产品对环境造成的影响程度; $e_{ne}$ 、 $e_{re}$ 分别表示环境设计下单位新产品及再制造产品对环境造成的影响程度; $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ 分别表示单位环境设计水平引起单位新产品及再制造产品环境影响降低程度<sup>[1]</sup>,  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2 > 0$ ;  $\beta$ 表示相对于新产品,消费者对再制造产品的认可程度,  $0 < \beta < 1$ ;  $p_n$ 、 $p_r$ 分别表示新产品及再制造产品的零售价格; $q_n$ 、 $q_r$ 分别表示新产品及再制造产品的市场需求量; $p_t$ 表示制造商支付给再制造商的单位再制造产品外包费用; $f$ 表示制造商向再制造商收取的单位再制造产品专利费用; $s$ 表示政府给予单位再制造产品的补贴额度,  $s > 0$ ;  $\tau$ 表示废旧产品的回收率,  $0 \leq \tau \leq 1$ ;  $e$ 表示环境设计水平,参照文献[1]假设  $0 \leq e \leq 1$ ;  $h(e)$ 表示制造商进行环境设计投入的成本函数,参照文献[1]假设  $h(e) = ke^2$ ,  $k$ 代表制造商进行环境设计的难易程度,  $k > 0$ ;  $\pi_X^i$ 表示  $i$ 模型下主体  $X$  的利润,  $i = \{OM, OT, AM, AT\}$  分别表示外包再制造下政府补贴制造商、外包再制造下政府补贴再制造商、授权再制造下政府补贴制造商、授权再制造下政府补贴再制造商,  $X = \{M, T, S\}$  分别表示制造商、再制造商和闭环供应链系统整体.

**假设 1** 参照文献[1,5]采用单周期决策模型,即

所有企业决策都在一个单独稳定的时期内考虑.该时期内产品价格、市场需求和回收率等均相对稳定.基于此,在市场需求稳定的情形下<sup>[1,5]</sup>,新产品的逆需求函数设定为  $p_n = 1 - q_n - \beta q_r$ ,再制造产品的逆需求函数设定为  $p_r = \beta(1 - q_n - q_r)$ .

**假设 2** 环境设计有助于同时降低新产品和再制造产品的生产成本及环境影响程度<sup>[1,6]</sup>.因此,借鉴文献[1,12]在给定的环境设计水平下,单位新产品的生产成本为  $c_{ne} = c_n - \rho_1 e$ ,环境影响程度为  $e_{ne} = e_n - \lambda_1 e$ ;单位再制造产品的生产成本为  $c_{re} = c_r - \rho_2 e$ ,环境影响程度为  $e_{re} = e_r - \lambda_2 e$ .

**假设 3** 参照文献[5,12],再制造商回收的废旧产品等于再制造产品的市场需求,表示为  $q_r = \tau q_n$ .同时假设废旧产品回收成本与废旧产品回收数量正相关<sup>[5,12]</sup>,即废旧产品回收总成本为  $gq_r^2$ ,其中  $g$  为规模参数,  $g > 0$  代表废旧产品回收的难易程度.

**假设 4** 与文献[4,12]假设一致,为保证相关表达式具有经济可行性,规模参数满足

$$k > \frac{\rho_1^2(2g + \beta - \beta^2) + (\rho_2 - \beta\rho_1)^2}{4(2g + \beta - \beta^2)},$$

$$g > \frac{\rho_1\beta(\beta - c_r) - s(\rho_2 - \beta\rho_1)}{2\rho_1(1 - c_n)}.$$

## 2 模型建立与求解

### 2.1 外包再制造模式下模型构建及求解

制造商与再制造商的 Stackelberg 博弈决策顺序如下:主导制造商确定环境设计水平、新产品零售价格及支付给再制造商的单位外包再制造费用;再制造商确定废旧产品回收再制造数量.

当政府给予制造商补贴时,制造商与再制造商的利润函数如下(OM模型):

$$\pi_M^{OM} = (p_n - c_n + \rho_1 e)q_n + (p_r - p_t + s)q_r - ke^2, \quad (1)$$

$$\pi_T^{OM} = (p_t - c_r + \rho_2 e)q_r - gq_r^2. \quad (2)$$

当政府给予再制造商补贴时,制造商与再制造商的利润函数如下(OT模型):

$$\pi_M^{OT} = (p_n - c_n + \rho_1 e)q_n + (p_r - p_t)q_r - ke^2, \quad (3)$$

$$\pi_T^{OT} = (p_t - c_r + \rho_2 e + s)q_r - gq_r^2. \quad (4)$$

**定理 1** 在外包再制造模式下,政府给予制造商或再制造商补贴时,新产品的最优零售价格及市场需求分别为

$$p_n^{OM*} = p_n^{OT*} = \frac{1 + c_n - \rho_1 e}{2},$$

$$q_n^{OM*} = q_n^{OT*} = \frac{2g + \beta - \beta^2 - (2g + \beta)(c_n - \rho_1 e) + \beta(c_r - \rho_2 e - s)}{2(2g + \beta - \beta^2)};$$

再制造产品的最优零售价格及市场需求分别为

$$p_r^{OM*} = p_r^{OT*} = \frac{\beta(2g + \beta - \beta^2) + 2g(c_n - \rho_1 e) + (1 - \beta)(c_r - \rho_2 e - s)}{2(2g + \beta - \beta^2)},$$

$$q_r^{OM*} = q_r^{OT*} = \frac{\beta(c_n - \rho_1 e) - (c_r - \rho_2 e - s)}{2(2g + \beta - \beta^2)};$$

最优单位再制造外包费用及回收率分别为

$$p_t^{OM*} = \frac{g\beta(c_n - \rho_1 e) + (g + \beta - \beta^2)(c_r - \rho_2 e) + gs}{2g + \beta - \beta^2},$$

$$p_t^{OT*} = \frac{g\beta(c_n - \rho_1 e) + (g + \beta - \beta^2)(c_r - \rho_2 e - s)}{2g + \beta - \beta^2},$$

$$\tau^{OM*} = \tau^{OT*} =$$

$$\frac{\beta(c_n - \rho_1 e) - (c_r - \rho_2 e - s)}{2g + \beta - \beta^2 - (2g + \beta)(c_n - \rho_1 e) + \beta(c_r - \rho_2 e - s)};$$

制造商、再制造商及系统总利润分别为

$$\pi_M^{OM*} = \pi_M^{OT*} = \frac{(1 - c_n + \rho_1 e)^2}{4} + \frac{(\beta(c_n - \rho_1 e) - (c_r - \rho_2 e - s))^2}{4(2g + \beta - \beta^2)} - ke^2,$$

$$\pi_T^{OM*} = \pi_T^{OT*} = \frac{g(\beta(c_n - \rho_1 e) - (c_r - \rho_2 e - s))^2}{4(2g + \beta - \beta^2)},$$

$$\pi_S^{OM*} = \pi_S^{OT*} = (1 - c_n + \rho_1 e)^2/4 + \frac{(3g + \beta - \beta^2)(\beta(c_n - \rho_1 e) - (c_r - \rho_2 e - s))^2}{4(2g + \beta - \beta^2)} - ke^2;$$

制造商的最佳环境设计水平为

$$e^{OM*} = e^{OT*} = \frac{\rho_1((2g + \beta)(1 - c_n) - \beta(\beta - c_r)) + (4k - \rho_1^2)(2g + \beta - \beta^2) - \rho_2(\beta c_n - c_r) + s(\rho_2 - \beta\rho_1)}{(\rho_2 - \beta\rho_1)^2}.$$

**证明** 由于OM模型、OT模型求解方法及过程类似,此处仅以OM模型求解为例,采用逆向递推法求解,具体求解过程如下.

首先将 $q_r = \tau q_n$ 代入再制造商的利润函数,即式(2)中,可得

$$\pi_T^{OM}(\tau) = (p_t - c_r + \rho_2 e)\tau q_n - g(\tau q_n)^2.$$

由 $\partial^2 \pi_T^{OM}(\tau)/\partial \tau^2 = -2gq_n^2 < 0$ 可知, $\pi_T^{OM}(\tau)$ 关于 $\tau$ 为严格凹函数,由一阶条件可求得再制造商关于回收率的最佳反馈函数为 $\tau^{OM} = (p_t - c_r + \rho_2 e)/(2gq_n)$ .

再将 $\tau^{OM}$ 代入式(1)制造商的利润函数中,可得

$$\pi_M^{OM}(q_n, p_t) = \left(1 - q_n - \frac{\beta p_t - \beta c_r + \beta \rho_2 e}{2g} - c_n + \rho_1 e\right)q_n + \left(\beta - \beta q_n - \frac{\beta p_t - \beta c_r + \beta \rho_2 e}{2g} - p_t + s\right) \cdot (p_t - c_r + \rho_2 e)/(2g) - ke^2. \quad (5)$$

由式(5)易知

$$\frac{\partial^2 \pi_M^{OM}(q_n, p_t)}{\partial q_n^2} = -2,$$

$$\frac{\partial^2 \pi_M^{OM}(q_n, p_t)}{\partial q_n \partial p_t} = \frac{\partial^2 \pi_M^{OM}(q_n, p_t)}{\partial p_t \partial q_n} = -\frac{\beta}{g},$$

$$\frac{\partial^2 \pi_M^{OM}(q_n, p_t)}{\partial p_t^2} = -\frac{2g + \beta}{2g^2}.$$

可得制造商利润函数 $\pi_M^{OM}(q_n, p_t)$ 关于 $q_n$ 、 $p_t$ 的海森

矩阵为 $H = \begin{bmatrix} -2 & -\frac{\beta}{g} \\ -\frac{\beta}{g} & -\frac{2g + \beta}{2g^2} \end{bmatrix}$ ,且 $|H| = (2g + \beta - \beta^2)/g^2 > 0$ ,故可知制造商利润函数 $\pi_M^{OM}(q_n, p_t)$ 关于 $q_n$ 、 $p_t$ 为联合凹函数,再由一阶条件即可解得最优的新产品市场需求量 $q_n^{OM*}$ 与最优单位再制造外包价格 $p_t^{OM*}$ .将 $q_n^{OM*}$ 、 $p_t^{OM*}$ 代入 $\tau^{OM}$ 中,可解得最优废旧产品回收率 $\tau^{OM*}$ .将上述最优解分别代入逆需求函数以及式(1)和(2)中,依次解得最优新产品及再制造产品零售价格、制造商及再制造商利润.最后,由制造商利润关于环境设计水平 $e$ 的一阶条件,可解得制造商的最佳环境设计水平 $e^{OM*}$ .□

**2.2 授权再制造模式下模型构建及求解**

制造商与再制造商的Stackelberg博弈决策顺序如下:主导制造商首先确定环境设计水平、新产品零售价格及收取的单位再制造专利许可费;再制造商确定废旧产品回收再制造数量.

当政府给予制造商补贴时,制造商与再制造商的利润函数如下(AM模型):

$$\pi_M^{AM} = (p_n - c_n + \rho_1 e)q_n + (f + s)q_r - ke^2, \quad (6)$$

$$\pi_T^{AM} = (p_r - c_r + \rho_2 e - f)q_r - gq_r^2. \quad (7)$$

当政府给予再制造商补贴时,制造商与再制造商的利润函数如下(AT模型):

$$\pi_M^{AT} = (p_n - c_n + \rho_1 e)q_n + f q_r - ke^2, \quad (8)$$

$$\pi_T^{AT} = (p_r - c_r + \rho_2 e - f + s)q_r - gq_r^2. \quad (9)$$

**定理2** 在授权再制造模式下,政府给予制造商或再制造商补贴时,新产品的最优零售价格及市场需求分别为

$$p_n^{AM*} = p_n^{AT*} = \frac{1 + c_n - \rho_1 e}{2},$$

$$q_n^{AM*} = q_n^{AT*} = \frac{2g + 2\beta - \beta^2 - 2(g + \beta)(c_n - \rho_1 e) + \beta(c_r - \rho_2 e - s)}{2(2g + 2\beta - \beta^2)};$$

再制造产品的最优零售价格及市场需求分别为

$$p_r^{AM*} = p_r^{AT*} = \beta \frac{2g + 2\beta - \beta^2 + (2g + \beta)(c_n - \rho_1 e)}{2(2g + 2\beta - \beta^2)} + \beta \frac{(1 - \beta)(c_r - \rho_2 e - s)}{2(2g + 2\beta - \beta^2)},$$

$$q_r^{AM*} = q_r^{AT*} = \frac{\beta(c_n - \rho_1 e) - (c_r - \rho_2 e - s)}{2(2g + 2\beta - \beta^2)}$$

最优单位再制造专利许可费及回收率分别为

$$f^{AM*} = (\beta - c_r + \rho_2 e - s)/2,$$

$$f^{AT*} = (\beta - c_r + \rho_2 e + s)/2,$$

$$\tau^{AM*} = \tau^{AT*} =$$

$$\frac{\beta(c_n - \rho_1 e) - (c_r - \rho_2 e - s)}{2g + 2\beta - \beta^2 - 2(g + \beta)(c_n - \rho_1 e) + \beta(c_r - \rho_2 e - s)}$$

制造商、再制造商及系统总利润分别为

$$\pi_M^{AM*} = \pi_M^{AT*} =$$

$$(1 - c_n + \rho_1 e)^2/4 +$$

$$\frac{(\beta(c_n - \rho_1 e) - (c_r - \rho_2 e - s))^2}{4(2g + 2\beta - \beta^2)} - ke^2,$$

$$\pi_T^{AM*} = \pi_T^{AT*} =$$

$$\frac{(g + \beta)(\beta(c_n - \rho_1 e) - (c_r - \rho_2 e - s))^2}{4(2g + 2\beta - \beta^2)^2},$$

$$\pi_S^{AM*} = \pi_S^{AT*} =$$

$$(1 - c_n + \rho_1 e)^2/4 +$$

$$\frac{(3g + 3\beta - \beta^2)(\beta(c_n - \rho_1 e) - (c_r - \rho_2 e - s))^2}{4(2g + 2\beta - \beta^2)^2} - ke^2;$$

制造商的最佳环境设计水平为

$$e^{AM*} = e^{AT*} =$$

$$\frac{\rho_1(2(g + \beta)(1 - c_n) - \beta(\beta - c_r)) + \rho_2(\beta c_n - c_r) + s(\rho_2 - \beta\rho_1)}{(4k - \rho_1^2)(2g + 2\beta - \beta^2) - (\rho_2 - \beta\rho_1)^2} \rightarrow$$

定理 2 证明过程同定理 1, 此略。

**命题 1** 无论是在外包或授权再制造模式下, 再制造商选择再制造(即市场中存在再制造产品)的启动条件均为  $\beta > \frac{c_r - \rho_2 e - s}{c_n - \rho_1 e}$ , 且该启动条件右侧表达式关于政府补贴  $s$  为减函数。进一步, 当  $\frac{\rho_2}{\rho_1} < \frac{c_r - \rho_2 e - s}{c_n - \rho_1 e}$  时, 该启动条件右侧表达式关于环境设计水平  $e$  为增函数; 当  $\frac{\rho_2}{\rho_1} > \frac{c_r - \rho_2 e - s}{c_n - \rho_1 e}$  时, 该启动条件右侧表达式关于环境设计水平  $e$  为减函数。

**证明** 令  $A = \frac{c_r - \rho_2 e - s}{c_n - \rho_1 e}$ , 可得

$$\frac{\partial A}{\partial s} = \frac{-1}{c_n - \rho_1 e} < 0,$$

$$\frac{\partial A}{\partial e} = \frac{\rho_1(c_r - \rho_2 e - s) - \rho_2(c_n - \rho_1 e)}{(c_n - \rho_1 e)^2}.$$

易知, 当  $\frac{\rho_2}{\rho_1} < \frac{c_r - \rho_2 e - s}{c_n - \rho_1 e}$  时,  $\frac{\partial A}{\partial e} > 0$ ; 当  $\frac{\rho_2}{\rho_1} > \frac{c_r - \rho_2 e - s}{c_n - \rho_1 e}$  时,  $\frac{\partial A}{\partial e} < 0$ .  $\square$

命题 1 表明, 无论是在外包或授权再制造模式下,

只有当消费者对再制造产品的认可达到一定程度时, 再制造商才会选择从事再制造, 且政府补贴有助于降低再制造的启动条件。仅当环境设计水平引起再制造产品单位生产成本降幅较大时, 环境设计水平的提高才有利于降低再制造的启动条件, 否则会提高再制造的启动条件。

### 3 均衡结果分析

#### 3.1 政府补贴策略的影响

**命题 2** 无论在外包还是授权再制造模式下, 政府采取不同补贴策略时均有  $p_n^{H*} = p_n^{L*}, p_r^{H*} = p_r^{L*}, q_n^{H*} = q_n^{L*}, q_r^{H*} = q_r^{L*}, e^{H*} = e^{L*}, \pi_M^{H*} = \pi_M^{L*}, \pi_T^{H*} = \pi_T^{L*}, \pi_S^{H*} = \pi_S^{L*}, p_t^{OM*} - p_t^{OT*} = s, f^{AT*} - f^{AM*} = s, H = \{OM, AM\}, L = \{OT, AT\}$ .

命题 2 证明过程同命题 1, 此略。

命题 2 表明, 无论在外包还是授权再制造模式下, 政府的不同补贴策略对新产品及再制造产品的零售价格、市场需求, 以及成员企业利润、环境设计水平均没有影响, 仅对两种再制造模式下的单位再制造外包费用或专利许可费用产生影响。

该命题揭示出, 在外包或授权再制造模式下, 无论政府补贴制造商还是再制造商, 制造商都可以通过调节单位再制造外包费用或专利许可费用实现与再制造商共享政府补贴, 从而使政府的不同补贴策略不会对闭环供应链的最优生产决策及绩效产生影响。

**命题 3** 当政府采取不同补贴策略时:

- 1) 在外包再制造模式下,  $\frac{\partial p_t^{OM*}}{\partial s} > 0, \frac{\partial p_t^{OT*}}{\partial s} < 0$ ;
- 2) 在授权再制造模式下,  $\frac{\partial f^{AM*}}{\partial s} < 0, \frac{\partial f^{AT*}}{\partial s} > 0$ .

命题 3 证明过程同命题 1, 此略。

命题 3 表明, 随着政府补贴的增加, 当政府补贴制造商时, 制造商会通过增加单位再制造外包费用或减少单位再制造授权费用使得再制造商间接获益; 而当政府补贴再制造商时, 制造商会通过减少单位再制造外包费用或增加单位再制造授权费用的形式增加自身收益。

该命题揭示出, 外包或授权费用是协调制造商与再制造商竞合关系的一个杠杆, 双方可通过调节再制造外包或授权费用共享政府补贴, 政府也可通过改变补贴策略来调节双方之间的外包或授权费用。

**命题 4** 无论在外包或授权再制造模式下, 政府采取不同补贴策略时, 有: 1)  $\partial p_n^{O*}/\partial s = \partial p_n^{A*}/\partial s = 0, \partial p_r^{O*}/\partial s < \partial p_r^{A*}/\partial s < 0, \partial q_n^{O*}/\partial s < \partial q_n^{A*}/\partial s < 0, \partial q_r^{O*}/\partial s > \partial q_r^{A*}/\partial s > 0$ ; 2)  $\partial \pi_M^{O*}/\partial s > 0, \partial \pi_M^{A*}/\partial s > 0, \partial \pi_T^{O*}/\partial s > 0, \partial \pi_T^{A*}/\partial s > 0, \partial \pi_S^{O*}/\partial s > 0, \partial \pi_S^{A*}/\partial s > 0$ . 其中:  $O = \{OM, OT\}, A = \{AM, AT\}$ .

命题4证明过程同命题1,此略.

命题4表明,无论在外包或授权再制造模式下,政府补贴均对新产品的零售价格没有影响,但会导致新产品销售量的减少,同时能起到降低再制造产品价格、增加再制造产品销量及制造商与再制造商利润的作用.这是因为政府补贴总能起到增加再制造产品边际收益的效果,所以再制造产品的零售价格会随政府补贴的增加而降低,进而刺激再制造产品的消费.由于市场总需求量是一定的,再制造产品销量增加会导致新产品销量减少.但是,无论在外包或授权再制造模式下,制造商都能通过调节外包或授权费用来转移再制造产品生产及销售的利润,且该利润高于新产品销售减少带来的利润损失,因此制造商及再制造商都能从政府补贴中受益.

### 3.2 环境设计水平的影响

**命题5**  $\partial p_t^{O*}/\partial e < 0, \partial f^{A*}/\partial e > 0$ .

命题5证明过程同命题6,以命题6为例,此略.

命题5表明,随着制造商环境设计水平的提高,外包再制造模式下再制造外包费用在减少;而在授权再制造模式下,再制造授权费用在增加.这是由于随着环境设计水平的提高,制造商的环境设计投入成本也会增加,制造商会通过降低外包费用或增加授权费用的方式将部分成本转移给再制造商.同时结合命题3可以发现,再制造外包费用与授权费用不仅能起到分享政府补贴的效果,还能起到帮助制造商转移研发投入成本的作用.

该命题揭示出,在外包或授权再制造模式下,制造企业依然有足够的动机通过产品环境设计降低再制造成本,促进再制造产业的发展.

**命题6** 1) 在外包再制造模式下:①  $\partial p_n^{O*}/\partial e < 0, \partial p_r^{O*}/\partial e < 0$ ;② 当  $\rho_2/\rho_1 < \beta$  时,  $\partial q_r^{O*}/\partial e < 0$ , 当  $\beta < \rho_2/\rho_1 < 1+2g/\beta$  时,  $\partial q_r^{O*}/\partial e > 0, \partial q_n^{O*}/\partial e > 0$ , 当  $1+2g/\beta < \rho_2/\rho_1$  时,  $\partial q_r^{O*}/\partial e > 0, \partial q_n^{O*}/\partial e < 0$ ;③ 当  $e < e^{O*}$  时,  $\partial \pi_M^{O*}/\partial e > 0$ , 否则  $\partial \pi_M^{O*}/\partial e < 0$ , 当  $\beta < \rho_2/\rho_1$  时,  $\partial \pi_T^{O*}/\partial e > 0$ , 否则  $\partial \pi_T^{O*}/\partial e < 0$ .

2) 在授权再制造模式下:①  $\partial p_n^{A*}/\partial e < 0, \partial p_r^{A*}/\partial e < 0$ ;② 当  $\rho_2/\rho_1 < \beta$  时,  $\partial q_r^{A*}/\partial e < 0$ , 当  $\beta < \rho_2/\rho_1 < 2+2g/\beta$  时,  $\partial q_r^{A*}/\partial e > 0, \partial q_n^{A*}/\partial e > 0$ , 当  $2+2g/\beta < \rho_2/\rho_1$  时,  $\partial q_r^{A*}/\partial e > 0, \partial q_n^{A*}/\partial e < 0$ ;③ 当  $e < e^{A*}$  时,  $\partial \pi_M^{A*}/\partial e > 0$ , 否则  $\partial \pi_M^{A*}/\partial e < 0$ , 当  $\beta < \rho_2/\rho_1$  时,  $\partial \pi_T^{A*}/\partial e > 0$ , 否则  $\partial \pi_T^{A*}/\partial e < 0$ .

**证明** 以计算较为复杂的1)中②为例进行证明.由定理1及定理2,可得

$$\frac{\partial q_r^{O*}}{\partial e} = \frac{\rho_2 - \beta\rho_1}{2(2g + \beta - \beta^2)}, \quad \frac{\partial q_n^{O*}}{\partial e} = \frac{(2g + \beta)\rho_1 - \beta\rho_2}{2(2g + \beta - \beta^2)}.$$

令  $\rho_2 - \beta\rho_1 = 0, (2g + \beta)\rho_1 - \beta\rho_2 = 0$ , 可得  $\rho_2/\rho_1 = \beta, \rho_2/\rho_1 = 1+2g/\beta$ . 由此易知,当  $\rho_2/\rho_1 < \beta$  时,  $\partial q_r^{O*}/\partial e < 0$ ; 当  $\beta < \rho_2/\rho_1 < 1+2g/\beta$  时,  $\partial q_r^{O*}/\partial e > 0, \partial q_n^{O*}/\partial e > 0$ ; 当  $1+2g/\beta < \rho_2/\rho_1$  时,  $\partial q_r^{O*}/\partial e > 0, \partial q_n^{O*}/\partial e < 0$ . 其他部分证明方法及过程与此类似,此略.  $\square$

命题6表明,无论在外包或授权再制造模式下,环境设计水平的提高总有利于降低新产品及再制造产品价格,但并不一定有利于提高产品销量、增加成员企业利润.当提高单位环境设计水平带来的单位再制造成本下降量,与单位新产品生产成本下降量的比值小于某一阈值,即环境设计为新产品带来较大收益时,新产品更具竞争优势,其销量随环境设计水平的提高而增大.反之,当环境设计为再制造产品带来较大收益时,再制造产品更具竞争优势,其销量会随环境设计水平的提高而增大.只有当单位环境设计水平提高带来的单位再制造成本下降量,与单位新产品生产成本下降量的比值在某一固定区间时,环境设计水平的提高才能同时有利于增加两种产品的销量,否则仅有利于增加一种产品的销量.

另外,制造商利润在环境设计水平取特定值时达到最大,即在环境设计水平小于某一阈值时,制造商利润与环境设计水平正相关,反之负相关.因此,尽管环境设计能够提高新产品及再制造产品的收益,但环境设计水平并不一定越高越好.而再制造商收益与环境设计水平间的关系,则与单位再制造成本下降量与单位新产品生产成本下降量之间的比值有关,只有当环境设计带给再制造产品的收益较大时,环境设计水平的提高才有利于增加再制造商的利润.

结合命题5和命题6来看,由于外包或专利费用存在的成本与收益转移作用(部分环境设计投入成本被制造商转移给再制造商),再制造商并不一定乐于接受制造商的环境设计方案.只有当环境设计能带给再制造产品更大的成本节约时,再制造商才有充足的动力接受制造商的环境设计方案.

### 3.3 政府补贴及环境设计对环境的影响

借鉴文献[1,5],外包或授权再制造模式下两种产品对环境造成的总影响分别为

$$E^O = (e_n - \lambda_1 e)q_n^{O*} + (e_r - \lambda_2 e)q_r^{O*} = \frac{(e_n - \lambda_1 e)(2g + \beta - \beta^2)}{2(2g + \beta - \beta^2)} + \frac{\beta^2 - (2g + \beta)(c_n - \rho_1 e) + \beta(c_r - \rho_2 e - s)}{\beta - \beta^2} + \frac{(e_r - \lambda_2 e)(\beta(c_n - \rho_1 e) - (c_r - \rho_2 e - s))}{2(2g + \beta - \beta^2)}, \quad (10)$$

$$E^A = (e_n - \lambda_1 e)q_n^{A*} + (e_r - \lambda_2 e)q_r^{A*} = \frac{(e_n - \lambda_1 e)(2g + 2\beta - \beta^2 - 2(2g + 2(g + \beta)(c_n - \rho_1 e) + \beta(c_r - \rho_2 e - s)))}{2(2g + 2(g + \beta)(c_n - \rho_1 e) + \beta(c_r - \rho_2 e - s))} + \frac{(e_r - \lambda_2 e)(\beta(c_n - \rho_1 e) - (c_r - \rho_2 e - s))}{2(2g + 2\beta - \beta^2)}. \quad (11)$$

**命题 7** 在外包或授权再制造模式下, 政府补贴对环境的影响满足: 当  $\frac{e_r - \lambda_2 e}{e_n - \lambda_1 e} > \beta$  时,  $\frac{\partial E^{O*}}{\partial s} > 0$ ,  $\frac{\partial E^{A*}}{\partial s} > 0$ ; 当  $\frac{e_r - \lambda_2 e}{e_n - \lambda_1 e} < \beta$  时,  $\frac{\partial E^{O*}}{\partial s} < 0$ ,  $\frac{\partial E^{A*}}{\partial s} < 0$ .

命题 7 证明过程同命题 6, 此略.

命题 7 表明, 无论在外包或授权再制造模式下, 政府补贴不一定能起到降低产品环境总影响的效果. 具体而言, 只有当再制造产品造成的单位环境影响较小时, 政府补贴才能起到降低产品环境总影响的效果. 这是由于产品环境总影响取决于新产品及再制造产品的销量与其单位环境影响, 而政府补贴能起到减少新产品销售量及增加再制造产品销售量的作用. 只有当再制造产品造成的环境影响较小时, 再制造产品销量增加产生的环境不利影响增加量, 才能小于新产品销量减少带来的环境不利影响减少量, 此时两种产品造成的总环境影响也随之减少. 反之, 政府补贴的增加会使再制造产品销量增加, 带来的环境不利影响增加量多于新产品销量减少带来的环境不利影响减少量, 政府补贴会增加产品的总环境影响. 如通过对发动机再制造可以降低 80% 的环境不利影响<sup>[3]</sup>, 政府则会通过“以旧换再”等补贴手段促进再制造发动机的销售, 并减少新发动机的销量, 有效减少产品对环境的总影响.

该命题揭示出, 政府如果想降低新产品及再制造产品整体对环境造成的不利影响, 与新产品相比, 则应在单位再制造产品对环境产生的不利影响较小时, 采取增加补贴的策略, 反之应减少补贴.

**命题 8** 1) 在外包再制造模式下, 环境设计水平对环境的影响满足: 当  $e < e_1$  时,  $\partial E^O / \partial e > 0$ ; 当  $e > e_1$  时,  $\partial E^O / \partial e < 0$ . 2) 在授权再制造模式下, 环境设计水平对环境的影响满足: 当  $e < e_2$  时,  $\partial E^A / \partial e > 0$ ; 当  $e > e_2$  时,  $\partial E^A / \partial e < 0$ .

**证明** 以外包再制造模式为例, 由式 (10) 易得

$$\frac{\partial E^O}{\partial e} = \frac{e_n((2g + \beta)\rho_1 - \beta\rho_2) + e_r(\rho_2 - \beta\rho_1)}{2(2g + \beta - \beta^2)} - \frac{\lambda_1(2g + \beta - \beta^2 + \beta c_r - (2g + \beta)c_n - \beta s)}{2(2g + \beta - \beta^2)} - \frac{\lambda_2(\beta c_n - c_r + s) + 2\lambda_1 e((2g + \beta)\rho_1 - \beta\rho_2)}{2(2g + \beta - \beta^2)} +$$

$$\frac{2\lambda_2 e(\rho_2 - \beta\rho_1)}{2(2g + \beta - \beta^2)},$$

令  $\partial E^O / \partial e = 0$ , 可得

$$e_1 = \frac{e_n((2g + \beta)\rho_1 - \beta\rho_2)}{2\lambda_1((2g + \beta)\rho_1 - \beta\rho_2) + 2\lambda_2(\rho_2 - \beta\rho_1)} + \frac{e_r(\rho_2 - \beta\rho_1) - \lambda_2(\beta c_n - c_r + s)}{2\lambda_1((2g + \beta)\rho_1 - \beta\rho_2) + 2\lambda_2(\rho_2 - \beta\rho_1)} - \frac{\lambda_1(2g + \beta - \beta^2 + \beta c_r - (2g + \beta)c_n - \beta s)}{2\lambda_1((2g + \beta)\rho_1 - \beta\rho_2) + 2\lambda_2(\rho_2 - \beta\rho_1)}.$$

根据

$$\frac{\partial^2 E^O}{\partial^2 e} = \frac{2\lambda_1((2g + \beta)\rho_1 - \beta\rho_2) + 2\lambda_2(\rho_2 - \beta\rho_1)}{2(2g + \beta - \beta^2)} < 0,$$

当  $e < e_1$  时,  $\partial E^O / \partial e > 0$ ; 当  $e > e_1$  时,  $\partial E^O / \partial e < 0$ . 同理即可求得

$$e_2 =$$

$$\frac{e_n(2(g + \beta)\rho_1 - \beta\rho_2) + e_r(\rho_2 - \beta\rho_1) - \lambda_2(\beta c_n - c_r + s)}{2\lambda_1(2(g + \beta)\rho_1 - \beta\rho_2) + 2\lambda_2(\rho_2 - \beta\rho_1)} - \frac{\lambda_1(2g + 2\beta - \beta^2 + \beta c_r - 2(g + \beta)c_n - \beta s)}{2\lambda_1(2(g + \beta)\rho_1 - \beta\rho_2) + 2\lambda_2(\rho_2 - \beta\rho_1)}. \quad \square$$

命题 8 表明, 无论在外包或授权再制造模式下, 尽管环境设计能降低单位产品的环境不利影响, 但环境设计并不一定总能起到降低产品总环境影响的效果. 这是由于环境设计能起到降低新产品及再制造产品成本及价格的效果, 间接促进了新产品及再制造产品的销售. 因此当环境设计水平较低时, 其为单位产品带来的环境不利影响减少量, 会低于增加产品销量带来的环境不利影响增加量, 此时环境设计无法起到降低产品环境总影响的效果. 只有当环境设计能较大程度降低新产品及再制造产品带来的环境影响时 ( $e_1, e_2$  均与  $\lambda_1, \lambda_2$  负相关), 才能使较低的环境设计水平起到降低产品环境总影响的作用.

## 4 数值仿真及管理启发

本节在环境设计水平内生情形下, 一方面分析  $s, \beta$  变化对  $e, \tau$  的影响; 另一方面从产品销量及企业利润角度, 分析  $\rho_1, \rho_2$  变化对外包及授权再制造模式选择的影响. 在满足参数假设前提下, 借鉴文献 [1, 3] 的参数设置, 令  $c_n = 0.6, c_r = 0.2, k = 1.2, g = 1.1$ ; 在分析  $s, \beta$  对  $e, \tau$  的影响时, 令  $\rho_1 = 0.3, \rho_2 = 0.22$ ; 在分析  $\rho_1, \rho_2$  的影响时, 令  $s = 0.1, \beta = 0.6$ .

### 4.1 $s, \beta$ 对 $e, \tau$ 的影响

$s, \beta$  对  $e$  的影响如图 1 所示. 由图 1 可知, 无论在外包还是授权再制造模式下, 当消费者对再制造产品认知程度相对较低时, 政府补贴增加才能明显起到增加环境设计水平的作用. 同时, 随着消费者对再制造产品认知程度的增加, 环境设计水平呈现出先增加后

减少的趋势. 进一步, 当消费者对再制造产品认知程度较高时, 较之外包再制造模式, 授权再制造模式下的环境设计水平更高. 因此, 政府若想提高制造商的环境设计水平, 则应当在消费者对再制造产品认知程度较低时增加补贴力度, 并努力促进外包再制造模式的发展, 反之, 应降低补贴力度并考虑促进授权再制造模式的发展.

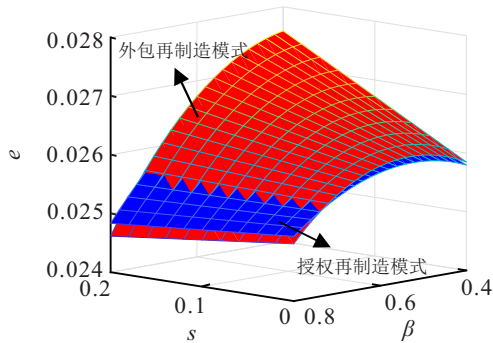


图1  $s$ 、 $\beta$ 对 $e$ 的影响

$s$ 、 $\beta$ 对 $\tau$ 的影响如图2所示. 由图2可知, 无论在外包还是授权再制造模式下, 政府补贴额度与消费者对再制造产品认知程度的增加, 均能起到提高废旧产品回收率的效果. 进一步, 与授权再制造模式相比, 外包再制造下废旧产品回收率始终更高, 因此可知, 在考虑环境设计的第三方再制造闭环供应链中, 外包再制造模式更有利于提高废旧产品回收率. 该现象也揭示出, 政府在实施补贴政策促进废旧产品回收再制造产业发展时, 应当在增加补贴额度的同时, 增加对再制造产品的宣传(例如, 宣传再制造产品与新产品有相同的性能及保修期等), 以提高消费者对再制造产品的认知程度, 从而使政府补贴能够有更好的实施效率及效果.

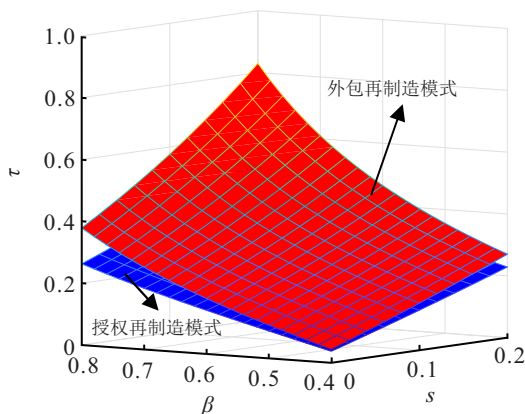


图2  $s$ 、 $\beta$ 对 $\tau$ 的影响

4.2  $\rho_1$ 、 $\rho_2$ 对产品销量及利润的影响

图3为 $\rho_1$ 、 $\rho_2$ 对新产品销量的影响, 图4为 $\rho_1$ 、 $\rho_2$ 对再制造产品销量的影响. 由图3和图4可知, 无论在外包还是授权再制造模式下, 新产品及再制造产品的

销量均随着环境设计带来的单位成本节约程度的增加而增大. 同时, 无论 $\rho_1$ 、 $\rho_2$ 如何变化, 新产品销量始终在授权再制造模式下更高, 而再制造产品销量始终在外包再制造模式下更高. 这也表明, 与外包再制造模式相比, 授权再制造模式显然更有利于促进新产品的销售, 很好地解释了为什么即使苹果公司在手机设计阶段就进行了大量环境设计投入(如使用更加绿色可循环的原材料等), 但其依然将废旧手机的再制造及再销售业务全部授权给富士康等公司负责.

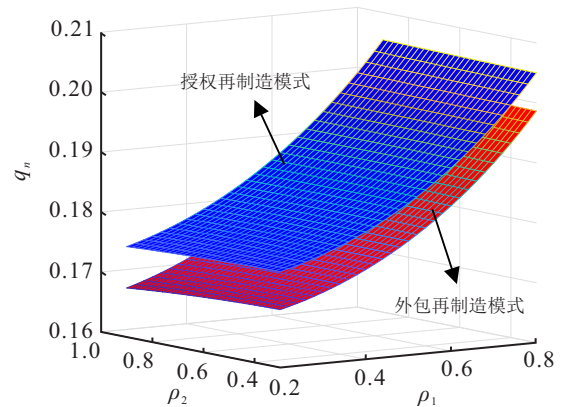


图3  $\rho_1$ 、 $\rho_2$ 对新产品销量的影响

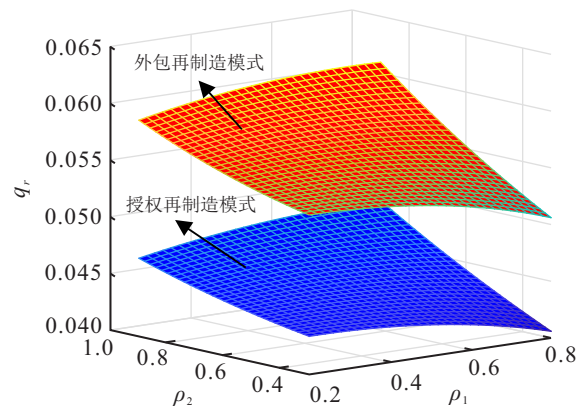


图4  $\rho_1$ 、 $\rho_2$ 对再制造产品销量的影响

图5为 $\rho_1$ 、 $\rho_2$ 对制造商利润的影响, 图6为 $\rho_1$ 、 $\rho_2$ 对再制造商利润的影响. 由图5及图6可知, 无论在外包还是授权再制造模式下, 制造商及再制造商的利润

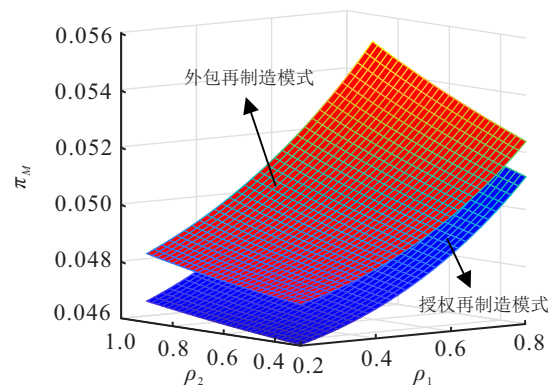


图5  $\rho_1$ 、 $\rho_2$ 对制造商利润的影响

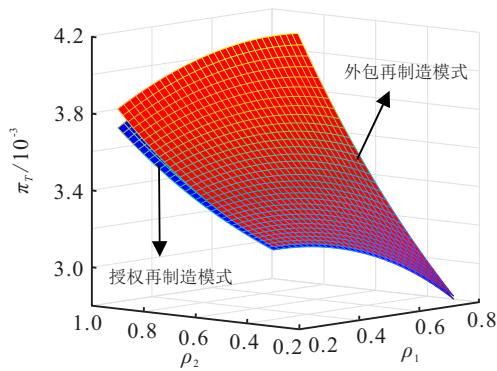


图6  $\rho_1, \rho_2$  对再制造商利润的影响

均随着环境设计带来的单位成本节约程度的增加而增大,且无论制造商或再制造商,均在外包再制造模式下获得了更多的利润。尽管外包再制造模式下新产品销量相对较低,但得益于再制造产品的销售与政府补贴,加之外包与授权费用的调节转移作用,使得制造商与再制造商都能在外包再制造模式下获得相对较多的收益。

## 5 结论

针对一个由制造商和再制造商组成的闭环供应链,在考虑政府补贴及环境设计的背景下,本文分别构建了基于外包或授权再制造、政府补贴制造商或再制造商情形下的4种闭环供应链决策模型,分析了政府补贴及环境设计水平对制造商与再制造商竞合关系、闭环供应链绩效以及环境的影响。得到以下主要结论:1)无论在外包还是授权再制造模式下,再制造商进行再制造均要满足一定条件,政府补贴始终有利于降低再制造启动条件。当环境设计水平引起再制造产品单位生产成本降低量较大时,环境设计才有助于降低该启动条件。2)政府补贴总是有利于提高废旧产品回收率、制造商及再制造商收益,并且双方都能通过调整外包或授权费用共享政府补贴,使得政府不同补贴策略对企业生产决策造成的影响并无差异。3)政府补贴与消费者对再制造产品的认知程度,并不一定总是起到提高环境设计水平的效果,但均有助于促进再制造产品的销售。4)制造商总是有动机采取环境设计策略,而再制造商只有在环境设计能为再制造产品带来更多的成本节约时,才有动力接受制造商的环境设计方案。5)只有当单位再制造产品对环境造成的不利影响较新产品更小时,政府补贴才能起到降低产品环境总影响的效果,此时适合通过增加政府补贴以减少产品环境总影响,否则应当减少补贴。6)当环境设计对降低单位产品环境不利影响的作用较大时,环境设计才有助于降低产品的环境总影响。7)相比于授权再制造,制造商及再制造商均在外

包再制造下获得更多的利润。

基于上述研究结论,本文得到如下管理启示:1)政府通过补贴推动再制造产业发展的同时,也应当注重多与企业联合进行再制造产品的宣传推广,提高消费者对再制造产品的认知程度,使制度要素与市场要素相耦合,形成政策市场合力,产生正向共振效应,从而提高政府补贴的效果。2)制造企业应当意识到环境设计所带来的经济与环境效益,主动加大环境设计投入,减少产品的环境不利影响,塑造良好的企业社会形象,在增强竞争力的同时,实现供应链绩效改善与环境保护的双赢。3)再制造商应当以强化再制造产品质量体系为根本,确保再制造产品的合规性,增强消费者的购买信心;同时,努力与制造商达成外包再制造的合作模式,更好地促进再制造产品的销售以及供应链绩效的改善。

本文着重分析的是环境设计背景下,稳定单周期内新产品与再制造产品产量及市场需求相对稳定时,单个制造商与再制造商的博弈问题,以后的研究可以考虑在多周期以及新产品与再制造产品产量不确定的情形下,探讨消费者环保偏好及环境设计的竞争闭环供应链生产决策等问题。

## 参考文献(References)

- [1] Zheng X, Govindan K, Deng Q Z, et al. Effects of design for the environment on firms' production and remanufacturing strategies[J]. *International Journal of Production Economics*, 2019, 213: 217-228.
- [2] 赵晓敏, 孟潇潇, 朱贺. 专利授权模式下OEM与再制造商的博弈决策: 基于OEM的绿色创新视角[J]. *管理评论*, 2020, 32(4): 132-145.  
(Zhao X M, Meng X X, Zhu H. Game decision and coordination between OEM and remanufacturer in the authorization mode: Green innovation perspective[J]. *Management Review*, 2020, 32(4): 132-145.)
- [3] 夏西强, 曹裕. 外包再制造下政府补贴对制造/再制造影响研究[J]. *系统工程理论与实践*, 2020, 40(7): 1780-1791.  
(Xia X Q, Cao Y. Studying on the impact of government subsidies on manufacture/remanufacture based on outsourcing remanufacturing[J]. *Systems Engineering—Theory & Practice*, 2020, 40(7): 1780-1791.)
- [4] Reimann M, Xiong Y, Zhou Y. Managing a closed-loop supply chain with process innovation for remanufacturing[J]. *European Journal of Operational Research*, 2019, 276(2): 510-518.
- [5] Zou Z B, Wang J J, Deng G S, et al. Third-party remanufacturing mode selection: Outsourcing or authorization?[J]. *Transportation Research—Part E: Logistics and Transportation Review*, 2016, 87: 1-19.

- [6] Raz G, Druehl C T, Blass V. Design for the environment: Life-cycle approach using a newsvendor model[J]. *Production and Operations Management*, 2013, 22(4): 940-957.
- [7] 李婧婧, 李勇建, 刘露, 等. 激励绿色供应链企业开展生态设计的机制决策[J]. *系统工程理论与实践*, 2019, 39(9): 2287-2299.  
(Li J J, Li Y J, Liu L, et al. Mechanism decisions to encourage product eco-design implemented by green supply chain enterprises[J]. *Systems Engineering—Theory & Practice*, 2019, 39(9): 2287-2299.)
- [8] Wu C H. OEM product design in a price competition with remanufactured product[J]. *Omega*, 2013, 41(2): 287-298.
- [9] 肖露, 王先甲, 钱桂生, 等. 基于产品设计的再制造激励以及政府干预的影响[J]. *系统工程理论与实践*, 2017, 37(5): 1229-1242.  
(Xiao L, Wang X J, Qian G S, et al. The incentives for remanufacturing based on product design and the effects of government intervention[J]. *Systems Engineering—Theory & Practice*, 2017, 37(5): 1229-1242.)
- [10] Liu Z, Li K W, Li B Y, et al. Impact of product-design strategies on the operations of a closed-loop supply chain[J]. *Transportation Research—Part E: Logistics and Transportation Review*, 2019, 124: 75-91.
- [11] Li Q B, Sun H, Zhang H, et al. Design investment and advertising decisions in direct-sales closed-loop supply chains[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 250: 119552.
- [12] 夏西强, 朱庆华. 外包再制造下再制造设计对制造/再制造影响[J]. *管理科学学报*, 2019, 22(9): 97-112.  
(Xia X Q, Zhu Q H. Study on the effect of design for remanufacturing on manufacturing/remanufacturing competition based on the outsourcing remanufacturing pattern[J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2019, 22(9): 97-112.)
- [13] 郑小雪, 刘志. 第三方再制造外包模式选择与协调研究[J]. *控制与决策*, 2020, 35(9): 2261-2268.  
(Zheng X X, Liu Z. Selection and coordination of third-party remanufacturing outsourcing modes[J]. *Control and Decision*, 2020, 35(9): 2261-2268.)
- [14] 孙浩, 叶俊, 胡劲松, 等. 不同决策模式下制造商与再制造商的博弈策略研究[J]. *中国管理科学*, 2017, 25(1): 160-169.  
(Sun H, Ye J, Hu J S, et al. Research on the game strategies for the OEM and the remanufacturer under different decision structures[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2017, 25(1): 160-169.)
- [15] Hong X P, Govindan K, Xu L, et al. Quantity and collection decisions in a closed-loop supply chain with technology licensing[J]. *European Journal of Operational Research*, 2017, 256(3): 820-829.
- [16] 许民利, 王竟竟, 简惠云. 专利保护与产出不确定下闭环供应链定价与协调[J]. *管理工程学报*, 2021, 35(3): 119-129.  
(Xu M L, Wang J J, Jian H Y. Pricing and coordination of closed-loop supply chain under patent protection and random yield[J]. *Journal of Industrial Engineering and Engineering Management*, 2021, 35(3): 119-129.)
- [17] 申成然, 熊中楷, 彭志强. 专利保护与政府补贴下再制造闭环供应链的决策和协调[J]. *管理工程学报*, 2013, 27(3): 132-138.  
(Shen C R, Xiong Z K, Peng Z Q. Decision and coordination research for remanufacturing closed-loop supply chain under patent protection and government subsidies[J]. *Journal of Industrial Engineering and Engineering Management*, 2013, 27(3): 132-138.)
- [18] 曹东, 赵韵雯, 吴思思, 等. 考虑专利许可及政府规制的再制造博弈[J]. *管理科学学报*, 2020, 23(3): 1-23.  
(Cao J, Zhao Y W, Wu S S, et al. Remanufacturing game with patent protection and government regulation[J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2020, 23(3): 1-23.)
- [19] Bian J S, Zhang G Q, Zhou G H. Manufacturer vs. consumer subsidy with green technology investment and environmental concern[J]. *European Journal of Operational Research*, 2020, 287(3): 832-843.
- [20] 马祖军, 胡书, 代颖. 政府规制下混合渠道销售/回收的电器电子产品闭环供应链决策[J]. *中国管理科学*, 2016, 24(1): 82-90.  
(Ma Z J, Hu S, Dai Y. Decision models for a closed-loop supply chain with hybrid sale/collection channels for electrical and electronic equipment under government regulations[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2016, 24(1): 82-90.)
- [21] 王文宾, 丁军飞, 林欣怡. 政府补贴对双回收渠道价格竞争的引导作用研究[J]. *科研管理*, 2020, 41(3): 227-237.  
(Wang W B, Ding J F, Lin X Y. A study of the guiding role of government subsidy to price competition with dual-channel of collection[J]. *Science Research Management*, 2020, 41(3): 227-237.)
- [22] He P, He Y, Xu H. Channel structure and pricing in a dual-channel closed-loop supply chain with government subsidy[J]. *International Journal of Production Economics*, 2019, 213: 108-123.

## 作者简介

姚锋敏(1981—), 男, 教授, 博士生导师, 从事闭环供应链优化等研究, E-mail: fengmin\_yao@hrbust.edu.cn;  
闫颖洛(1995—), 男, 博士生, 从事闭环供应链管理的研究, E-mail: yanyingluo08@163.com;  
刘珊(1991—), 女, 博士生, 从事闭环供应链管理的研究, E-mail: 18846121312@163.com;  
滕春贤(1947—), 男, 教授, 博士生导师, 从事系统分析与优化等研究, E-mail: tengcx@hrbust.edu.cn.

(责任编辑: 郑晓蕾)