

# 控制与决策

Control and Decision

## 第三方再制造外包模式选择与协调研究

郑小雪, 刘志

引用本文:

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.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.1746>

---

## 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

### 不同权力结构下闭环供应链CSR分摊机制及定价策略

Corporation social responsibility apportionment mechanism and pricing strategy for closed-loop supply chain under different power structures

*控制与决策*. 2020, 35(6): 1525–1536 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.1413>

### 三级低碳供应链联合减排及宣传促销微分博弈研究

Differential game models for joint carbon emission reduction and promotion in three-echelon low carbon supply chain

*控制与决策*. 2019, 34(8): 1776–1788 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2017.1752>

### 相对公平关切下考虑产品设计的再制造合作模式与供应链协调

Decisions of remanufacturing cooperation mode and coordination in supply chain considering relative fairness concern and product design

*控制与决策*. 2018, 33(12): 2234–2242 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2017.1084>

### 基于回收产品质量水平的闭环供应链渠道选择模型

Reverse channel selection in closed-loop supply chain based on quality of recycled products

*控制与决策*. 2017, 32(2): 193–202 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2016.0070>

### 再制造率随机的闭环供应链产品差别定价策略

Products difference pricing strategy of closed-loop supply chain with remanufacturing rate random

*控制与决策*. 2015, 30(11): 2019–2024 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2014.1411>

# 第三方再制造外包模式选择与协调研究

郑小雪<sup>1</sup>, 刘志<sup>2†</sup>

(1. 福建农林大学 交通与土木工程学院, 福州 350002; 2. 安徽工程大学 管理工程学院, 安徽 芜湖 241000)

**摘要:** 研究第三方再制造外包选择与协调问题, 将制造商外包和零售商外包两种模式进行对比分析. 研究结果表明: 制造商外包模式下新产品的数量、原始设备制造商的利润以及系统总利润更高, 新产品的价格更低; 零售商外包模式下再制品的数量、外包价格以及再制造商的利润更高. 制造商外包模式具有较高的消费者剩余和较差的环境绩效. 当再制造优势明显时, 零售商外包模式的社会福利水平高于制造商外包模式. 采用合作博弈方法对零售商外包模式下多主体闭环供应链进行协调, 可为供应链管理决策提供理论依据与决策方法.

**关键词:** 再制造外包; 斯坦克伯格博弈; 合作博弈; 社会福利; 环境影响

中图分类号: F253 文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2018.1746

引用格式: 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.

## Selection and coordination of third-party remanufacturing outsourcing modes

ZHENG Xiao-xue<sup>1</sup>, LIU Zhi<sup>2†</sup>

(1. College of Transportation and Civil Engineering, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China; 2. College of Management Engineering, Anhui Polytechnic University, Wuhu 241000, China)

**Abstract:** This study focuses on the issues of the selection and coordination of the third-party remanufacturing outsourcing modes, comparing the manufacturer outsourcing mode and retailer outsourcing mode. The results show that the quantities of new products, the profits of the original equipment manufacturers and channel systems are higher in the manufacturer outsourcing mode than that in the retailer outsourcing mode, but the retailer outsourcing mode enjoys higher remanufacturing products, outsourcing price and three-party remanufacturer profit. Therefore, the manufacturer outsourcing mode has higher consumer surplus but inferior environmental performance. When the advantage of remanufacturing production is obvious, the level of social welfare is higher in the retailer outsourcing mode than that in the manufacturing outsourcing mode. The cooperative game theory is used to coordinate the multi-party closed loop supply chain under the retailer outsourcing mode, which can provide theories and methods for supply chain management.

**Keywords:** remanufacturing outsourcing; Stackelberg game; cooperative game; social welfare; environmental impact

## 0 引言

随着经济的快速发展和人口激增, 环境污染、资源短缺以及废旧产品过剩等问题日益凸显. 在此背景下, 符合可持续发展战略的再制造业应运而生. 大量的研究和生产实践证明<sup>[1-10]</sup>, 企业实施再制造可以最大限度地提高资源利用率、降低生产成本, 同时增加企业经济效益. 然而, 目前仅有 6% 的原始设备制造商 (original equipment manufacturer, OEM), 自行负责废旧产品的回收和再制造<sup>[2]</sup>. 出于方便回收、降低成本等因素的考虑, 大部分 OEM 选择将再制造业务外包. 目前, 大型 OEM 的再制造外包主要有两种

模式: 1) 制造商外包的模式 (M 模式), 指的是 OEM 直接将再制造业务外包给第三方再制造商 (3PR, third-party remanufacture), 例如富士康与苹果公司签署协议获得对中国地区的废旧 iPhone 手机再制造的所有权; 2) 零售商外包的模式 (R 模式), 指的是由 OEM 授权给零售商, 由零售商负责将再制造业务外包给 3PR, 例如世界上最大的工程机械生产公司卡特彼勒公司, 授权给南京利盛鸿机械有限公司负责江苏省卡特彼勒机械产品再制造的转包和转售业务. 两种模式均非理想化的生产模式<sup>[3]</sup>: 对于不成熟的市场, M 模式下 OEM 需要寻找可靠的合作伙伴, 不利于 OEM

收稿日期: 2018-12-21; 修回日期: 2019-03-13.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (71801003); 福建省科技计划项目 (2019J05049); 教育部人文社科青年基金项目 (18YJC630110); 福建省社会科学规划项目 (FJ2016C025); 安徽省高校自然科学研究重点项目 (KJ2018A0115).

†通讯作者. E-mail: liuzhi0551@126.com.

专注于核心产品的研发设计与生产,而R模式则存在再制品质量可控性差<sup>[3]</sup>等问题.除了上述因素外,经济效益是OEM选择外包模式时最主要考虑的因素,即哪种模式能够实现更有利的价格、更大的回收量或者更高的经济利益?另外,出于经济效益、保护环境以及履行企业社会责任等因素考虑,企业应采用何种协调策略以选择更有利于社会福利最大化的外包模式,也是一个值得考虑的问题.

通过文献分析可知,国内外学者对于再制造外包问题进行了初步的探索,取得了一定的研究成果.如Chen等<sup>[4]</sup>指出缺乏基础设施和专业知识是OEM选择3PR进行再制造的主要原因;Ordoobadi<sup>[5]</sup>提出一个针对外包再制造业务战略分析的多阶段决策模型;Karakayali等<sup>[6]</sup>研究了两个再制造业务驱动模型——再制造商驱动模型和回收者驱动模型,研究表明当产品同质时,回收者驱动是OEM的最佳选择,否则再制造商驱动则更加有利;Ferrer等<sup>[7]</sup>针对OEM在自己的工厂或设施内进行再制造或将再制造外包给3PR的决策问题进行了研究;Tsai<sup>[8]</sup>通过对基于再制造外包决策的成本节约问题的探讨,得出原料、货物单元、批次生产活动的成本和投入的不确定性越高,OEM实施再制造外包的受益可能性越大;Zhang等<sup>[9]</sup>构建了一个动态的博弈模型并证明政府补贴给OEM而非3PR,会提高废旧产品的回收效率;Zou等<sup>[10]</sup>通过针对再制造外包和授权两种模式,从利润、消费者剩余、社会福利和环境影响4个角度对两种模型进行了比较,研究指出在发达国家,外包模型是更好的选择,而在发展中国家,授权再制造则更优.通过分析,目前研究成果中尚未见到从经济、社会、环境等综合视角对制造商外包与零售商外包这两种模式的比较研究.因此,本文通过建立博弈模型和实例验证对于不同再制造外包模式下的最优定价决策和生产利润进行具体的分析研究,同时提出基于合作博弈的协调机制,以期为闭环供应链的成员选择合适的再制造外包模式提供理论依据和决策支持.

## 1 问题描述与相关假设

根据外包方的不同,对闭环供应链的两种外包模式分析如下:1)M模式,闭环供应链由一个OEM和一个3PR构成,OEM为领导者,3PR为跟随者.OEM直接将再制造业务外包给3PR并支付外包的费用,3PR只负责进行废旧产品的回收与再制造,再制品的销售仍由OEM负责,如图1(a)所示.2)R模式,闭环供应链由一个OEM、一个零售商和一个3PR构成,OEM为供应链一级领导者、零售商为二级领导者,3PR为跟

随者.这时,OEM只负责生产新产品,并将外包主导权交予零售商,由零售商将再制造业务外包给3PR并支付外包的费用,零售商同时负责新产品与再制品的销售,如图1(b)所示.模型中OEM、零售商和3PR分别用符号M、R和T表示,其余符号及含义见表1.

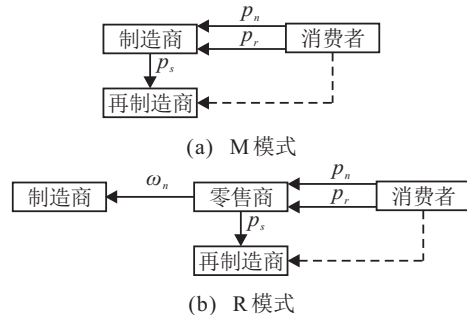


图1 两种外包模式的供应链

本文的相关假设如下.

**假设1** 市场总规模归一化为1,消费者对新产品支付意愿 $\phi$ 服从 $[0, 1]$ 均匀分布,而用 $\delta\phi$ 表示消费者对再制品的支付意愿.其中, $\delta \in [0, 1]$ 作为消费者对再制品的认可度参数,反映出再制品对新产品的替代程度.设新产品和再制品定价分别为 $p_n$ 和 $p_r$ ,市场需求分别为 $Q_n$ 和 $Q_r$ .消费者购买新产品和再制品的效用为 $\mu_n = \phi - p_n$ , $\mu_r = \delta\phi - p_r$ .设OEM与3PR严格按照市场需求组织生产,即两种产品的产量等于其市场需求.受文献[9, 11-12]的启发,新产品与再制品的需求函数表示为 $Q_n = 1 - \frac{p_n - p_r}{1 - \delta}$ 和 $Q_r = \frac{\delta p_n - p_r}{\delta(1 - \delta)}$ .根据需求函数,可以推导出逆需求函数 $p_n = 1 - Q_n - \delta Q_r$ 和 $p_r = \delta(1 - Q_n - Q_r)$ .

**假设2** 再制品的生产成本低于新产品的生产成本<sup>[11]</sup>,即 $c_r < c_n$ .

废旧产品回收之后,存在可重复利用的部分,而新产品则需要用新原料进行生产,因此再制品的生产成本要低于新产品的生产成本.这也从一定程度上反映了市场规律.

**假设3** 由3PR收集的废旧产品等于再制品的需求,即回收的废旧产品均能通过再制造成为再制品,表示为 $Q_r = \lambda Q_n$ ,其中 $\lambda$ 为废旧产品回收率.随着3PR从消费者手中回收废旧产品数量的增加,收集成本和难度也在不断增加.设回收努力成本为 $\frac{1}{2}\eta(\lambda Q_n)^2$ ,其中规模参数 $\eta$ 的大小反映了回收的难易程度<sup>[9]</sup>.为了保证 $0 < \lambda < 1$ ,假设 $K + \delta c_r - (\delta + \eta)c_n > 0$ ,其中 $K = \delta_\eta - \delta^2$ .

**假设4** 参照Yan等<sup>[11]</sup>、Örsdemir等<sup>[13]</sup>的论文,本文模型采用单周期模型,即局中人所有决策都在一个单独的时期内考虑.单独的时期可以被看作是产品生命周期的成熟阶段,产品价格、需求和回收率相对稳定.

表1 各参数及其含义

符号	定义
$\phi$	消费者对新产品的支付意愿
$\delta$	消费者基于新产品对再制品的价值折扣
$\mu_n/\mu_r$	消费者购买新产品/再制品的效用
$\eta$	回收成本的规模参数
$\lambda$	废旧产品回收率
$c_n/c_r$	新产品/再制品的单位生产成本
$Q_n/Q_r/Q_T$	新产品/再制品的数量/总产量
$p_n/p_r$	新产品/再制品的价格
$\pi_j^i$	模式 <i>i</i> 中的 <i>j</i> 的利润,其中 <i>i</i> ∈ {M, R} 和 <i>j</i> ∈ {M, R, T, SC}, SC表示供应链总利润
CS	消费者剩余
SW	社会福利
$e_n^m/e_r^m$	新产品/再制品在生产阶段的单位环境影响值
$e_n^u/e_r^u$	新产品/再制品在使用阶段的单位环境影响值
$E^M/E^R$	M/R模式的环境影响总值

## 2 决策模型及求解

### 2.1 制造商外包模式(M模式)

M模式中, OEM首先决定新产品的产量 $Q_n$ 和再制造外包费用 $p_s$ ; 3PR根据OEM支付的 $p_s$ 再决定从消费者手中回收的废旧产品回收率 $\lambda$ . 两者均以利润最大化为决策目标. OEM和3PR的利润函数分别为

$$\max_{Q_n, p_s} \{ \pi_M^M = p_n Q_n - c_n Q_n + p_r Q_r - p_s Q_r \}; \quad (1)$$

$$\text{s.t. } \max_{\lambda} \left\{ \pi_T^M = p_s Q_r - c_r Q_r - \frac{1}{2} \eta Q_r^2 \right\}. \quad (2)$$

根据逆向归纳法, OEM决策变量 $Q_n$ 和 $p_s$ 给定时, 由 $\partial^2 \pi_T^M / \partial \lambda^2 < 0$ 和 $\partial \pi_T^M / \partial \lambda = 0$ 可得3PR的最优反应函数 $\lambda^M(Q_n, p_s) = (p_s - c_r) / \eta Q_n$ . 将 $Q_r = \lambda Q_n$ 代入式(1)中, 由海塞矩阵 $|H| = 4K / \eta^2 > 0$  ( $K = \delta + \eta - \delta^2$ ) 负定可知,  $\pi_M^M$ 为 $Q_n$ 和 $p_s$ 的严格凹函数, 模型存在唯一最优解. 通过联立 $\partial \pi_M^M / \partial Q_n = 0$ 和 $\partial \pi_M^M / \partial p_s = 0$ , 可解得

$$Q_n^{M*} = \frac{K - (\delta + \eta)c_n + \delta c_r}{2K},$$

$$p_s^{M*} = \frac{\eta \delta c_n + (2\delta + \eta - 2\delta^2)c_r}{2K}.$$

根据最优反应函数 $\lambda^M(Q_n, p_s) = \frac{p_s - c_r}{\eta Q_n}$ , 可解得

$$\lambda^* = \frac{\delta c_n - c_r}{K + \delta c_r - (\delta + \eta)c_n},$$

其中 $K = \delta + \eta - \delta^2$ . 根据以上均衡解, 由逆需求函数可得

$$p_n^{M*} = \frac{1 + c_n}{2}, \quad p_r^{M*} = \frac{\delta K + \delta(1 - \delta)c_r + \delta \eta c_n}{2K}.$$

OEM和3PR的最优利润分别为

$$\pi_M^{M*} = \frac{(1 - c_n)^2}{4} + \frac{(\delta c_n - c_r)^2}{4K}, \quad \pi_T^{M*} = \frac{\eta(\delta c_n - c_r)^2}{8K^2}.$$

### 2.2 零售商外包模式(R模式)

R模式中, OEM首先决定新产品的批发价格 $\omega_n$ , 进而零售商决定以 $Q_n$ 的数量进行新产品的销售; 同

时, 零售商将再制造业务外包给3PR进行, 以 $p_s$ 的外包价格进行回收品的再制造; 随后, 3PR决定回收率 $\lambda$ . 三者均以各自利润最大化为决策目标, OEM、零售商和3PR的利润函数分别为

$$\max_{\omega_n} \{ \pi_M^R = (w_n - c_n)Q_n \}; \quad (3)$$

$$\text{s.t. } \max_{Q_n, p_s} \{ \pi_R^R = (p_n - \omega_n)Q_n + (p_r - p_s)Q_r \}, \quad (4)$$

$$\max_{\lambda} \left\{ \pi_T^R = (p_s - c_r)Q_r - \frac{1}{2} \eta Q_r^2 \right\}. \quad (5)$$

根据逆向归纳法, 给定零售商决策变量 $Q_n$ 和 $p_s$ 时, 由 $\partial^2 \pi_T^R / \partial \lambda^2 < 0$ 和 $\partial \pi_T^R / \partial \lambda = 0$ 可得3PR的最优反应函数 $\lambda^R(Q_n, p_s) = (p_s - c_r) / \eta Q_n$ . 将 $Q_r = \lambda Q_n$ 代入式(4)中, 由海塞矩阵 $|H| = 4(\delta + \eta - \delta^2) / \eta^2 > 0$  负定可知,  $\pi_R^R$ 为 $Q_n$ 和 $p_s$ 的严格凹函数, 模型存在唯一最优解. 通过联立 $\partial \pi_R^R / \partial Q_n = 0$ 和 $\partial \pi_R^R / \partial p_s = 0$ , 可解得最优反应函数

$$Q_n^R(w_n) = \frac{\delta(1 + c_r - w_n - \delta) + \eta(1 - w_n)}{2K},$$

$$p_s^R(w_n) = \frac{\delta \eta w_n + c_r [2\delta(1 - \delta) + \eta]}{2K}.$$

将 $Q_n^{R*}$ 代入OEM的利润函数(3)中, 由 $\partial^2 \pi_M^R / \partial w_n^2 < 0$ 可知, OEM的利润函数存在最优解. 通过 $\partial \pi_M^R / \partial w_n = 0$ 可以得到

$$w_n^{R*} = \frac{\eta(1 + c_n) + (1 + c_n + c_r - \delta)\delta}{2(\delta + \eta)}.$$

将 $w_n^{R*}$ 代入 $Q_n$ 和 $p_s$ , 可得

$$Q_n^{R*} = \frac{\eta(1 - c_n) + (1 + c_r - c_n - \delta)\delta}{4K},$$

$$p_s^{R*} = c_r + \frac{1}{4} \left[ \eta + \frac{\eta(\delta c_n - c_r)}{K} - \frac{\eta(\eta + c_r)}{\delta + \eta} \right],$$

进而得到 $\lambda^{R*} = \frac{\delta}{\delta + \eta} + \frac{\delta c_n - c_r}{K + \delta c_r - (\delta + \eta)c_n}$ . OEM、零售商和3PR的最优利润分别为

$$\pi_M^{R*} = \frac{[\eta(c_n - 1) + \delta(c_n + \delta - 1 - c_r)]^2}{8K(\delta + \eta)},$$

$$\pi_R^{R*} =$$

$$\frac{[\eta(c_n - 1) + \delta(c_n + \delta - 1 - c_r)]^2}{16K(\delta + \eta)} + \frac{(c_r - \delta)^2}{4(\delta + \eta)},$$

$$\pi_T^{R*} =$$

$$\frac{\eta \{ \eta \delta (1 + c_n) + \delta [(1 + c_n + c_r) \delta - \delta^2 - 2c_r] - 2\eta c_r \}^2}{32K^2(\delta + \eta)^2}.$$

### 2.3 两种模式的环境影响值

对环境影响值的分析可以分为两个部分: 一是产品生产过程中的环境影响值; 二是使用阶段的环境影响值. 参照Örşdemir等<sup>[13]</sup>的论文, 可以将新产品、再制品在生产阶段和使用阶段的环境影响值定义为 $e_n^m$ 、 $e_n^u$ 、 $e_r^m$ 和 $e_r^u$ (下标 $n$ 和 $r$ 分别表示新产品

和再制品,上标  $m$  和  $u$  分别表示生产阶段和使用阶段).再制品在生产阶段能够重复利用一些原部件,减少能源消耗和碳排放,从而达到降低环境影响的效果,因此有  $e_n^m > e_r^m$ . 由于没有证据显示二者在使用阶段的环境影响值大小关系,此处不妨设  $e_n^u = e_r^u$ . 据此,可以得到环境影响值的表达式

$$E = Q_n(e_n^m + e_n^u) + Q_r(e_r^m + e_r^u). \quad (6)$$

将式  $Q_n^{M*}$ 、 $Q_r^{M*}$ 、 $Q_n^{R*}$  和  $Q_r^{R*}$  分别代入式(6),可得如下命题.

**命题1** M模式和R模式的环境影响值分别为

$$E^{M*} = \frac{[K + \delta c_r - (\delta + \eta)c_n](e_n^m + e_n^u)}{2K} + \frac{(\delta c_n - c_r)(e_r^m + e_r^u)}{2K}, \quad (7)$$

$$E^{R*} = \frac{1}{4} \left\{ \frac{[K + \delta c_r - (\delta + \eta)c_n](e_n^m + e_n^u)}{K} + \left(1 + \frac{\delta c_n - c_r}{K} - \frac{\eta + c_r}{\delta + \eta}\right)(e_r^m + e_r^u) \right\}. \quad (8)$$

### 2.4 两种模式的消费者剩余和社会福利

根据消费者剩余(CS)和社会福利(SW)的定义<sup>[13]</sup>,可将他们分别表示为

$$CS = \int_{1-Q_n-Q_r}^{1-Q_n} (\delta\phi - p_r)d\phi + \int_{1-Q_n}^1 (\phi - p_n)d\phi, \quad (9)$$

$$SW = \pi_{SC} + CS - E. \quad (10)$$

将两种模式的均衡解分别代入式(9)和(10),可得如下命题.

**命题2** 两种模式下,最优的消费者剩余和社会福利分别为

$$CS^{M*} = \frac{(1 - c_n)^2}{8} + \frac{\delta(1 - \delta)(\delta c_n - c_r)^2}{8K^2},$$

$$SW^{M*} = \frac{3(1 - c_n)^2}{8} + \frac{3k(\delta c_n - c_r)^2}{8K^2} - \frac{(\delta c_n - c_r)(e_n^m + e_n^u)}{2K} - \frac{[K + \delta c_r - (\delta + \eta)c_n](e_n^m + e_n^u)}{2K},$$

$$CS^{R*} = \frac{[K - (\delta + \eta)c_n + \delta c_r]^2}{32K^2} + \frac{\delta[\delta K + \delta c_n(\delta + \eta) + (\delta^2 - 2\delta - 2\eta)^2 c_r^2]}{16K^2(\delta + \eta)} + \frac{\{\delta[(\delta + \eta)c_n - K] + (2\delta - \delta^2 + \eta)c_r\}}{16K^2(\delta + \eta)} \times$$

$$\delta[(\delta + \eta)c_n - K - \delta c_r],$$

$$SW^{R*} =$$

$$\frac{7(\delta + \eta)c_n[(\delta + \eta)c_n - 2K] + (12\delta + 12\eta - 5\delta^2)c_r^2}{32K(\delta + \eta)}$$

$$\frac{K(7\delta + 5\delta^2 + 7\eta) - 2\delta c_r[5K + 7(\delta + \eta)c_n]}{32K(\delta + \eta)}$$

$$\frac{[K + \delta c_r - (\delta + \eta)c_n](e_n^m + e_n^u)}{4K} +$$

$$\left(1 + \frac{\delta c_n - c_r}{\delta + \eta} - \frac{\eta + c_r}{\delta + \eta}\right) \frac{(e_r^m + e_r^u)}{4}.$$

### 3 两种模式的均衡决策分析

**命题3** 对于再制造外包价格  $p_s$ , 有  $p_s^{R*} > p_s^{M*}$ .

**证明** 由  $p_s^{R*} - p_s^{M*} = \frac{\delta\eta[K + \delta c_r - (\delta + \eta)c_n]}{4K(\delta + \eta)}$

$> 0$  可得命题3成立.  $\square$

M模式中,OEM和3PR组成的权力结构使得主导者OEM对于追随者3PR的约束能力更强,因此OEM能够将单位再制品外包价格  $p_s$  压得比较低;而在R模式中,零售商相对于3PR而言为主导者,但受到了供应链主导者OEM的影响,使其对3PR的约束减弱,3PR的讨价还价能力增强,能够争取更高的外包价格  $p_s$ ,从而获得比M模式更高的收益.同时,零售商通过再制造品的销售能够直接增加其利润.因此,零售商会制定更高的  $p_s$ ,鼓励3PR生产更多的再制品.

**命题4** 对于新产品产量,有  $Q_n^{M*} > Q_n^{R*}$ ;对于再制品产量,有  $\lambda^{M*} < \lambda^{R*}$  和  $Q_r^{M*} < Q_r^{R*}$ ;而对于总产量,有  $Q_T^{M*} > Q_T^{R*}$ .

**证明** 由

$$Q_n^{M*} - Q_n^{R*} = \frac{K + \delta c_r - (\delta + \eta)c_n}{4K} > 0,$$

$$\lambda^{R*} - \lambda^{M*} = \frac{\delta}{\delta + \eta} + \frac{c_n\delta - c_r}{K + \delta c_r - (\delta + \eta)c_r} > 0,$$

$$Q_r^{R*} - Q_r^{M*} = \frac{K + \delta c_r - (\delta + \eta)c_n}{4K} > 0,$$

$$Q_T^{M*} - Q_T^{R*} = \frac{\eta[K + \delta c_r - (\delta + \eta)c_n]}{4K(\delta + \eta)} > 0,$$

容易证明命题4成立.  $\square$

在R模式中,作为再制造外包的主导者零售商可以直接从销售再制造品中获取利润.因此,他通过制定更高的外包价格来鼓励3PR提高再制品产量  $Q_r$ .同时,在竞争环境下,由于市场中再制品数量的增大,直接蚕食了部分新产品市场,导致R模式中新产品产量的降低.此外,对于OEM而言,新产品的制造与销售才是其主流业务,在M模式中,新产品的数量由OEM调控,因此OEM能够通过提高新产品产量来增加自己的收益,这也进一步导致了  $Q_n^M > Q_n^R$ .

**命题5** 对于新产品价格和再制品价格,有  $p_n^{M*}$

$< p_n^{R*}$  和  $p_r^{M*} < p_r^{R*}$ .

**证明** 由

$$p_n^{R*} - p_n^{M*} = \frac{K + \delta c_r - (\delta + \eta)c_n}{4(\delta + \eta)} > 0,$$

$$p_r^{R*} - p_r^{M*} = \frac{\delta\eta[K + \delta c_r - (\delta + \eta)c_n]}{4K(\delta + \eta)} > 0.$$

可得命题5成立. □

由命题3可知: R模式的外包价格高于M模式,这导致了R模式中再制品的市场价格要比M模式高,即  $p_r^{R*} > p_r^{M*}$ ;而对于新产品价格而言,M模式中的新产品价格只受生产成本  $c_n$  的影响,而在R模式中新产品价格增加了零售商加价的过程,从而导致新产品零售价格升高,即  $p_n^{R*} > p_n^{M*}$ .

**命题6** 对于OEM利润而言,  $\pi_M^{M*} > \pi_M^{R*}$ .

**证明** 由

$$\pi_M^M - \pi_M^R = \frac{1}{8} \left[ (1 - c_n)^2 + \frac{(c_r - \delta)^2}{\delta + \eta} + \frac{(c_r - c_n\delta)^2}{\delta - \delta^2 + \eta} \right] > 0$$

可得命题6成立. □

在M模式中,OEM的利润不仅仅来源于新产品,还有一部分来源于再制品,OEM控制着市场中新产品的数量,而3PR控制着再制品的数量,OEM通过制定外包价格来压低再制品的边际利润、提高新产品的边际利润,从而提高了新产品的产量.OEM通过这种新产品销售的规模经济效益来使自己获得最

大利益,最终使得  $\pi_M^{M*} > \pi_M^{R*}$ .

#### 4 基于合作博弈的多主体闭环供应链协调机制

由以上均衡分析可知,R模式能够回收更多的再制品,对经济可持续发展更为有利,但是R模式的OEM利润和新产品产量较低.因此,本文研究考虑OEM、零售商和3PR多主体的闭环供应链协调问题.针对R模式的多主体供应链结构特征,运用合作博弈方法实现闭环供应链协调.合作博弈需要建立基于多主体不同联盟结构的特征函数集,本文参考现有关于供应链局部联盟形式的研究<sup>[14-19]</sup>,将R模式视为3个主体独立竞争的形式、M模式视为OEM与零售商联盟的形式,即MR模型(这时有  $\pi_M^{M*} = \pi_{MR}^{MR*}$ ).引入集中决策模型即模型C作为协调目标,这是三方组成超组织集中决策者的大联盟MRT的形式,此时三方之间的交易行为转变为组织的内部行为.参考Savaskan等<sup>[1]</sup>的研究,将制造商回收再制造的模式视为OEM与3PR联盟的形式(即MT模型),将零售商回收再制造的模式视为零售商与3PR联盟的形式(即RT联盟).R模型和MR模型已在前文中详细分析,模型C、MT和RT的闭环供应链利润函数如表2所示(其中公式上标表示模型,即模型C、模型MT或模型RT,下标表示单个局中人或联盟,即联盟MT、联盟RT、局中人T或M).

表2 模型C、MT和RT的闭环供应链利润函数

	模型C	模型MT	模型RT
函数	$\max_{p_n, p_r} \left\{ \pi^C = (p^n - c_n)Q_n + (p_r - c_r)Q_r - \frac{1}{2}\eta Q_r^2 \right\}$	$\begin{cases} \max_{w_n, w_r} \left\{ \pi_{MT}^{MT} = (w_n - c_n)Q_n + (w_r - c_r)Q_r - \frac{1}{2}\eta Q_r^2 \right\}; \\ \text{s.t. } \max_{p_n, p_r} \left\{ \pi_T^{MT} = (p_n - w_n)Q_n + (p_r - w_r)Q_r \right\} \end{cases}$	$\begin{cases} \max_{w_n} \left\{ \pi_{RT}^{RT} = (w_n - c_n)Q_n \right\}; \\ \text{s.t. } \max_{p_n, p_r} \left\{ \pi_{RT}^{RT} = (p_n - w_n)Q_n + (p_r - c_r)Q_r - \frac{1}{2}\eta Q_r^2 \right\} \end{cases}$

通过逆向归纳法,3种模型均有最优解,其联盟最优利润分别为

$$\pi^{C*} = \frac{(1 - c_n)^2}{4} + \frac{(\delta c_n - c_r)^2}{4\delta(1 - \delta) + 2\eta},$$

$$\pi_{MT}^{MT*} = \frac{(1 - c_n)^2}{8} + \frac{(\delta c_n - c_r)^2}{8\delta(1 - \delta) + 2\eta},$$

$$\pi_{RT}^{RT*} = \frac{1}{16} \left[ (1 - c_n)^2 + \frac{6(c_r - \delta)^2}{2\delta + \eta} + \frac{2(\delta c_n - c_r)^2}{2\delta(1 - \delta) + \eta} \right].$$

限于篇幅,此处均衡解的证明过程略.

基于5种模型的最优利润,根据特征函数的性质<sup>[20-21]</sup>和Zhang等<sup>[14]</sup>的特征函数构建原则,建立闭环供应链特征函数(如表3所示):M、R和T单个局

中人的特征函数由完全分散的R模式中3人的最优利润表示,MR联盟的特征函数由M模式中制造商的最优利润表示,联盟MT和RT的特征函数分别由模型MT和RT中的局部联盟最优利润解表示,大联盟MRT的特征函数则由集中决策模型C的最优利润表示.基于表3的特征函数,采用经典合作博弈解Shapley值<sup>[22-24]</sup>对其进行协调,所得的分配解记为  $x_M$ 、 $x_R$  和  $x_T$ .

表3 闭环供应链特征函数

联盟	(M)	(R)	(T)	(MR)	(MT)	(RT)	(MRT)
特征函数	$\pi_M^{R*}$	$\pi_R^{R*}$	$\pi_T^{R*}$	$\pi_{MR}^{MR*}$	$\pi_{MT}^{MT*}$	$\pi_{RT}^{RT*}$	$\pi^{C*}$

### 5 数值仿真

#### 5.1 M模式与R模式的仿真分析

为了保证再制品数量为正,且收集率 $\lambda$ 大于0小于1,参考Zou等<sup>[10]</sup>的论文,对各参数取值如下: $\delta \in [0.5, 0.9]$ ,  $c_r \in [0, 0.2]$ ,  $e_r^m \in [0.05, 0.25]$ . 除了可变参数外,还有其余固定参数的取值如下: $c_n = 0.48$ ,  $\eta = 3$ ,  $e_n^m = 0.28$ ,  $e_r^u = e_n^u = 0.03$ . 由于没有相关资料表明新产品与再制品在使用过程中对环境的影响,本文设定 $e_r^u = e_n^u = 0.03$ . 考虑两种情形的敏感性分析: 1)当 $\delta$ 在 $[0.5, 0.9]$ 的范围内变化时,取 $c_r = 0.15$ ; 2)当 $c_r$ 在 $(0, 0.2]$ 的范围内变化时,取 $\delta = 0.5$ . 情形1)的均衡决策、最优利润、消费者剩余、环境影响及社会福利变化情况如图2~图5所示,情形2)与情形1)的变化趋势相似,故图省略. 由图2~图5可知:

1) 随着消费者对再制品接受度的增加,两种模式的新产品数量和价格均随之减少,再制品数量和

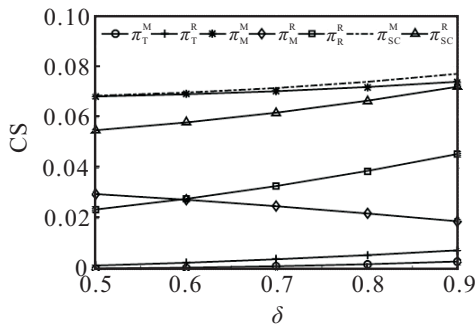


图2 利润与 $\delta$ 的关系

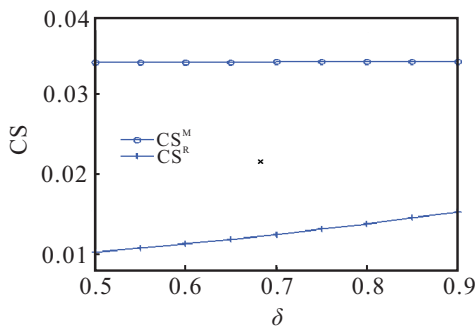


图3 消费者剩余与 $\delta$ 的关系

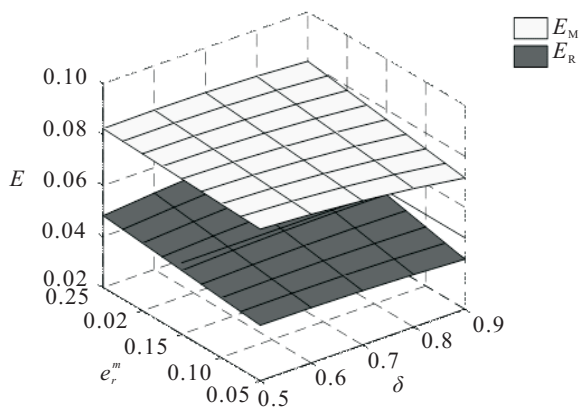


图4  $\delta$ 和 $e_r^m$ 对环境的影响

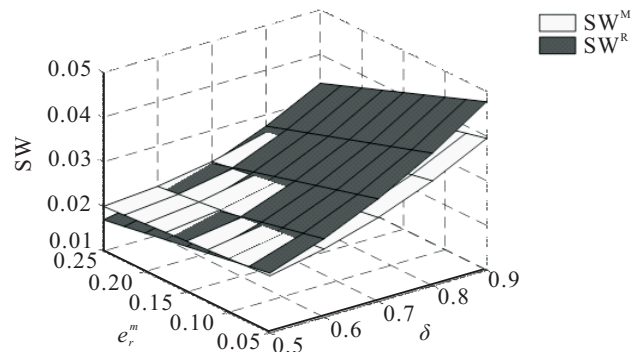


图5  $\delta$ 和 $e_r^m$ 对社会福利的影响

价格均随之增加,外包价格也随之增加. 在这种情形下,由于R模式中的OEM利润均来自新产品, $\pi_M^R$ 随 $\delta$ 增加而递减,其他利润均呈增长趋势. 另外,当 $\delta$ 变化时, $CS^M$ 的变化幅度明显小于 $CS^R$ ,说明再制品产量更高的R模式在再制品接受度提高时更能满足消费者的需求. 两种模式的福利变化情况较为复杂,即当 $\delta$ 较高且 $e_r^m$ 较小时,R模式的社会福利才高于M模式.

2) 随着再制品生产成本的增加,两种模式的新产品数量增加,再制品数量减少,外包价格均随之增加,对比外包价格,两种模式再制品的价格增幅较小. 这是由于再制品成本上涨,零售商直接提高外包价格,间接导致再制品价格提高,再制品的价格增幅较小. 与 $\delta$ 变化相反,由于R模式中的OEM利润均来自新产品, $\pi_M^R$ 随 $c_r$ 增加而增长,其他利润均呈下降趋势. 另外,当 $c_r$ 变化时, $CS^M$ 的变化幅度明显小于 $CS^R$ ,说明再制品产量更高的R模式,当再制品成本下降时更能满足消费者的需求. 两种模式的社会福利变化情况与 $\delta$ 变化情形类似,即当 $c_r$ 和 $e_r^m$ 都较小时,有R模式的社会福利才高于M模式. 于是,结合 $\delta$ 变化情形可知,当再制造生产更为有利时,R模式的社会总福利更高.

3) 无论两种参数如何变化,由于R模式的外包价格和再制品数量均高于M模式,R模式的3PR利润始终高于M模式. 但是,由于R模式存在两次双重边际效应,其总利润总是低于M模式. M模式的环境影响值和消费者剩余始终高于R模式,这是因为M模式下新产品产量远高于R模式,虽然更能满足消费者的需求,但也造成了更大的环境影响.

#### 5.2 基于合作博弈的多主体闭环供应链协调的仿真分析

为了验证本文第4节所提出协调机制的可行性,通过4个结构参数( $c_r$ ,  $c_n$ ,  $\delta$ 和 $\eta$ )变化对协调结果进行分析,如表4~表7所示.

表4 Shapley值随 $c_r$ 的变化情况

$c_r$	$c_n$	$\delta$	$\eta$	Shapley值			求和	$\pi^{C*}$
				M	R	T		
0.1	0.5	0.5	3	0.0321	0.0299	0.0037	0.0657	0.065714
0.15	0.5	0.5	3	0.0332	0.0282	0.0025	0.0639	0.063929
0.2	0.5	0.5	3	0.0344	0.0269	0.0016	0.0629	0.062857

表5 Shapley值随 $\delta$ 的变化情况

$c_r$	$c_n$	$\delta$	$\eta$	Shapley值			求和	$\pi^{C*}$
				M	R	T		
0.15	0.5	0.6	3	0.0303	0.0312	0.0042	0.0657	0.065733
0.15	0.5	0.7	3	0.0271	0.0348	0.0065	0.0684	0.068348
0.15	0.5	0.8	3	0.0237	0.0390	0.0092	0.0719	0.071913

表6 Shapley值随 $\eta$ 的变化情况

$c_r$	$c_n$	$\delta$	$\eta$	Shapley值			求和	$\pi^{C*}$
				M	R	T		
0.15	0.5	0.5	4	0.0344	0.0272	0.0020	0.0636	0.0344
0.15	0.5	0.5	5	0.0352	0.0265	0.0017	0.0634	0.0352
0.15	0.5	0.5	6	0.0358	0.0261	0.0014	0.0633	0.0358

表7 Shapley值随 $c_n$ 的变化情况

$c_r$	$c_n$	$\delta$	$\eta$	Shapley值			求和	$\pi^{C*}$
				M	R	T		
0.15	0.6	0.5	3	0.0201	0.0201	0.0031	0.0433	0.043214
0.15	0.7	0.5	3	0.0104	0.0138	0.0039	0.0281	0.028214
0.15	0.8	0.5	3	0.0043	0.0096	0.0050	0.0189	0.018929

由数值仿真的分析可知,集中决策模型C的利润均高于其他模型系统最优利润,因此可作为协调的总目标值.此外,在Shapley值的协调下,OEM分配的利润随着 $c_r$ 和 $\eta$ 的增加而增加,随着 $\delta$ 和 $c_n$ 的增加而减少;零售商分配的利润随着 $c_r$ , $\eta$ 和 $c_n$ 的增加而减少,随着 $\delta$ 的增加而增加;3PR分配的利润随着 $c_r$ 和 $\eta$ 的增加而减少,随着 $\delta$ 和 $c_n$ 的增加而增加.这与R模式中3个主体随着4个参数变化规律相同,同时所有的Shapley分配解均大于R模式时的均衡利润且总利润能够达到集中决策时的利润水平,即 $x_M > \pi_M^{R*}$ , $x_R > \pi_R^{R*}$ 和 $x_T > \pi_T^{R*}$ ,且 $x_M + x_R + x_T = \pi^{C*}$ .因此,本文提出的基于合作博弈的协调机制符合R模式下的成员利润变化规律,且能达到集中决策时的最优利润,是切实可行的协调策略.

## 6 结论

本文研究了第三方再制造外包选择与协调问题,将制造商外包和零售商外包两种模式进行了对比分析.研究表明:

1)相较于零售商外包的模式,制造商外包模式下新产品的数量、OEM的利润以及系统总利润更高,而新产品的价格更低.因此,制造商外包模式更能满足消费者市场的需求,但却导致更低的环境效益.追求利润最大化的OEM倾向于选择制造商外包的模式.

2)相较于制造商外包的模式,零售商外包模式下

再制品的数量、外包价格以及3PR的利润更高,因此,零售商外包模式具有更高的环境绩效.依赖于再制造业务的3PR更倾向于选择零售商外包模式.此外,当再制造优势明显时,零售商外包模式的社会福利水平高于制造商外包模式.

3)合作博弈方法能够对零售商外包模式下多主体闭环供应链进行协调,且协调结果具有较好的鲁棒性和可行性.

通过本文的研究,可得到以下2点管理启示:

1)对于OEM而言,再制造外包的模式固然能使企业达到较高盈利,但是在企业社会责任(corporate social responsibility, CSR)压力下,OEM为自身利益考虑的同时,必须兼顾环境绩效.

2)对于政府而言,零售商外包模式能够提高废旧产品的回收效率,同时也能带动再制品零售业的发展.但是,零售商外包模式在OEM利润、消费者剩余方面较差,这就需要政府完善再制造补贴政策,以降低再制造成本,鼓励OEM与其他供应链成员合作,提高再制造的积极性;同时,还应该通过宣传、教育等措施提高消费者对环境可持续发展的关注度,促进再制品市场的发展.

在前面的研究基础上,值得进一步研究的问题有:1)进一步考虑具有有限理性行为的闭环供应链协调模型;2)当政府制定回收率强制性法规时,再制



造外包选择决策问题; 3) 市场需求不确定时的闭环供应链定价策略与协调模型.

### 参考文献(References)

- [1] Savaskan R C, Van Wassenhove B L N. Closed-loop supply chain models with product remanufacturing[J]. *Management Science*, 2004, 50(2): 239-252.
- [2] Hauser W, Lund R. *Remanufacturing: Operating practices and strategies*[D]. Boston: Boston University, 2008.
- [3] 刘志, 李帮义, 龚本刚, 等. 再制造商公平关切下闭环供应链生产设计决策与协调[J]. *控制与决策*, 2016, 31(9): 1615-1622.  
(Liu Z, Li B Y, Gong B G, et al. Production design decision and coordination of the closed-loop supply considering remanufacturer's fairness concern[J]. *Control and Decision*, 2016, 31(9): 1615-1622.)
- [4] Chen J M, Chang C I. The co-opetitive strategy of a closed-loop supply chain with remanufacturing[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2012, 48(2): 387-400.
- [5] Ordoobadi S M. Outsourcing reverse logistics and remanufacturing functions: A conceptual strategic model[J]. *Management Research News*, 2009, 32(9): 831-845.
- [6] Karakayali I, Emir-Farinas H, Akcali E. An analysis of decentralized collection and processing of end-of-life products[J]. *Journal of Operations Management*, 2007, 25(6): 1161-1183.
- [7] Ferrer G, Whybark D C. Material planning for a remanufacturing facility[J]. *Production & Operations Management*, 2010, 10(2): 112-124.
- [8] Tsai W H. Integrating activity-based costing and revenue management approaches to analyze the remanufacturing outsourcing decision with qualitative factors[J]. *International Journal of Revenue Management*, 2010, 1(4): 367-387.
- [9] Zhang H, Ozturk U A, Zhou D, et al. How to increase the recovery rate for waste cooking oil-to-biofuel conversion: A comparison of recycling modes in China and Japan[J]. *Ecological Indicators*, 2015, 51: 146-150.
- [10] 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.
- [11] Yan W, Xiong Y, Xiong Z, et al. Bricks vs clicks: Which is better for marketing remanufactured products?[J]. *European Journal of Operational Research*, 2015, 242(2): 434-444.
- [12] Liu Z, Tang J, Li B Y, et al. Trade-off between remanufacturing and recycling of WEEE and the environmental implication under the Chinese Fund Policy[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 167: 97-109.
- [13] Örsdemir A, Kemahlolu-Ziya E, Parlaktürk A K. Competitive quality choice and remanufacturing[J]. *Production & Operations Management*, 2014, 23(1): 48-64.
- [14] Zhang C T, Ren M L. Closed-loop supply chain coordination strategy for the remanufacture of patented products under competitive demand[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2016, 40(13/14): 6243-6255.
- [15] Ma Z J, Zhang N, Dai Y, et al. Managing channel profits of different cooperative models in closed-loop supply chains[J]. *Omega*, 2016, 59: 251-262.
- [16] Leng Mingming, Mahmut Parlar. Allocation of cost savings in a three-level supply chain with demand information sharing: A cooperative-game approach[J]. *Operations Research*, 2009, 57: 200-213.
- [17] Jena S K, Sarmah S P. Price competition and co-operation in a duopoly closed-loop supply chain[J]. *International Journal of Production Economics*, 2014, 156(5): 346-360.
- [18] Zheng X X, Liu Z, Li K W, et al. Cooperative game approaches to coordinating a three-echelon closed-loop supply chain with fairness concerns[J]. *International Journal of Production Economics*, 2019, 212: 92-110.
- [19] Taleizadeh, Ata Allah, Vahid Reza Soleymanfar, et al. Optimal pricing and alliance strategy in a retailer-led supply chain with the return policy: A game-theoretic analysis[J]. *Information Sciences*, 2017, 420: 466-489.
- [20] 李翠, 薛惠锋. 基于广义解的网络合作博弈收益分配模型[J]. *控制与决策*, 2017, 32(6): 1041-1046.  
(Li C, Xue H F. Model of profit allocation based on generalized solution in network cooperative game[J]. *Control and Decision*, 2017, 32(6): 1041-1046.)
- [21] 李登峰, 刘家财. 基于最小平方距离的区间值合作对策求解模型与方法[J]. *中国管理科学*, 2016, 24(7): 135-142.  
(Li D F, Liu J C. Models and method of interval-valued cooperative games based on the least square distance[J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2016, 24(7): 135-142.)
- [22] Shapley L S. A value for n-person games[J]. *Annals of Mathematical Studies*, 1953, 28: 307-317.
- [23] Frisk M, Göthe-Lundgren M, Jörnsten K, et al. Cost allocation in collaborative forest transportation[J]. *European Journal of Operational Research*, 2010, 205(2): 448-458.
- [24] Lozano S, Moreno P, Adenso-Díaz B, et al. Cooperative game theory approach to allocating benefits of horizontal cooperation[J]. *European Journal of Operational Research*, 2013, 229(2): 444-452.

### 作者简介

郑小雪(1981—), 女, 讲师, 博士, 从事物流与供应链管理研究, E-mail: snowwie@126.com;

刘志(1985—), 男, 副教授, 从事可持续供应链管理和博弈论应用的研究, E-mail: liuzhi0551@126.com.

(责任编辑: 孙艺红)