

外包再制造下再制造设计对制造/再制造影响^①

夏西强¹, 朱庆华^{2*}

(1. 郑州大学商学院, 郑州 450001; 2. 上海交通大学安泰经济与管理学院, 上海 200030)

摘要: 为分析外包再制造模式下, 再制造设计对制造/再制造供应链竞争的影响, 构建制造/再制造博弈模型. 基于博弈模型, 分析再制造设计费用不同承担方式对再制造设计努力程度、废旧产品回收率、收益和环境等影响. 研究表明: 原始制造商通过外包再制造不仅可以降低再制造商的市场竞争优势, 还可以获得再制造带来的收益; 再制造设计可以促进再制造商回收废旧产品, 提高废旧产品回收率; 无论是原始制造商还是再制造商承担再制造设计费用, 两者收益分别在再制造设计努力程度的不同点达到最大, 而不是再制造设计努力程度越大其收益越大; 再制造对环境的影响并不总是有利的, 当单位再制造产品与新产品对环境造成的影响之比小于某一阈值, 同时再制造设计给单位再制造产品带来收益与带给单位新产品收益之比大于某一阈值时, 再制造才有利于降低对环境的影响.

关键词: 原始制造商; 再制造商; 外包再制造; 再制造设计

中图分类号: F272 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-9807(2019)09-0096-15

0 引言

为应对环境危机和资源枯竭, 各国政府和企业都在寻求经济可持续发展, 生产者延伸责任制, 即要求制造企业负责废旧产品处理费用, 已在发达国家实施; 国务院于2016年12月25日颁发《生产者责任延伸制度推行方案》, 随后中国政府在汽车、电子行业等出台相关政策进行有效探索与推进. 为了减少废旧产品处理费用并尽量提升利用价值, 再制造是有效途径之一^[1, 2]. 由于原始制造商缺乏再制造技术以及相关设备与人才, 同时担心再制造出现会影响新产品销售, 许多原始制造商不愿意进行再制造, 甚至会设法制约再制造发展^[3, 4]. 但是, 由于政府对生产者延伸责任制的要求, 原始制造商一般会通过知识产权把废旧产品的再制造外包给第三方进行再制造, 也即外包再制造.

废旧产品可再制造性约三分之二取决于原始制造商产品设计初期的再制造设计^[5], 因此, 原始制造商开展面向再制造的设计成为关键^[6]. 原始制造商进行再制造设计需要一定的再制造设计费用, 该费用应该由原始制造商还是再制造商承担呢? 不同的再制造设计费用承担方式, 可以直接影响原始制造商进行再制造设计的积极性, 也即再制造设计努力程度. 因此, 基于外包再制造研究再制造设计费用不同承担方式对再制造设计影响, 具有重要的现实意义.

基于此, 本研究从外包再制造视角出发, 构建再制造设计费用不同承担方式下原始制造商与再制造商博弈模型. 基于此模型, 首先分析外包再制造对制造/再制造供应链竞争的影响; 其次, 分析再制造设计费用不同承担方式对制造/再制造决策变量、环境影响、消费者剩余和社会剩余的影响. 本研究面向三个研究问题: 一是分析外包再制

① 收稿日期: 2019-01-06; 修订日期: 2019-05-01.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(71702174; 71632007; 71690241).

通讯作者: 朱庆华(1970—), 女, 江苏太仓人, 教授, 博士生导师. Email: qhzu@sjtu.edu.cn

造对原始制造商收益的影响,二是确立原始制造商与再制造商愿意承担再制造设计费用的边界和再制造设计费用不同承担模式对制造/再制造供应链竞争的影响,三是剖析再制造有利于环境保护的条件。

1 文献综述

国内外学者针对外包再制造研究,主要分为两个方面:一方面是外包再制造策略选择的研究,另一方面是外包再制造模式下制造/再制造供应链协调机制的研究。对于外包再制造策略选择的研究主要有: Esenduran 等研究政府法规约束下再制造对原始制造商影响以及原始制造商选择何种再制造模式对其造成影响^[7]; Tsai 基于收益管理法、作业成本法和非竞争理论讨论了外包再制造决策的必要条件,研究得到在市场运营具有不确定性时应选择外包再制造^[8]; Alumur 等构建几种再制造废旧产品回收模型,确定外包回收再制造的边界条件^[9]; 王能民等对单个产品的生产企业,建立再制造与外包再制造博弈模型,研究外包再制造与再制造的最优生产比例^[10]。对于外包再制造模式下制造/再制造供应链协调机制的研究,主要包括: Zou 等针对汽车零部件再制造领域中废旧产品和再制造业务外包构建了两个分散模型,研究如何通过契约达到协调^[11]; Cai 等基于一个制造商和一个外包再制造商构建两级供应链博弈模型,引入外包再制造的比例系数,并基于该系数分析协调契约^[11]。

目前,国内外针对再制造设计的研究主要有: Wu 基于原始制造商再制造设计策略(易于再制造设计与不易于再制造设计)构建制造/再制造博弈模型,研究得到原始制造商通过再制造设计可以有效控制再制造商市场竞争优势,进一步考虑再制造商价格策略(高价策略与低价策略),分析不同策略对再制造产品市场竞争的影响^[12]; 夏西强等基于完全市场竞争情况下,研究再制造设计对制造/再制造市场竞争的影响,发现再制造设计为两种产品带来的单位收益之比在某一区间时,原始制造商与再制造商都愿意承担再制造设计费用,进一步又分析政府补贴策略对再制造设

计影响,得到政府补贴给原始制造商更有利于再制造设计^[13,14]; 肖露等基于再制造设计研究政府政策对再制造供应链的影响,研究主要得到,原始制造商可以通过改变产品设计的可再制造性水平,控制可再制造旧产品的供应数量^[15]。

综上所述,国内外针对外包再制造与再制造设计已经有较多研究,并取得良好成果,比如文献[6-10]研究外包再制造运营管理与原始制造商选择外包再制造的边界条件,文献[1,11]研究外包再制造下制造/再制造供应链协调机制,文献[12,13]研究再制造设计对制造/再制造市场竞争影响,文献[15,16]研究政府政策对再制造设计的影响。但是,外包再制造如何影响再制造设计? 在外包再制造模式下,不同再制造设计费用承担模式如何影响再制造设计的努力? 这些问题是实现再制造设计的关键,但尚待进一步深入研究。因此,本研究在外包再制造背景下,分别基于再制造设计费用不同承担方式,构建原始制造商与再制造商博弈模型,以期解决上述两个问题,为制造/再制造决策提供依据。

本研究创新点主要有三个方面:一是模型构建,在已有文献[12-15]基础上,引入外包再制造,同时设计了制造商、再制造商承担再制造设计费用时对双方决策以及经济环境绩效的影响;二是确立原始制造商与再制造商愿意承担再制造费用的边界,为原始制造商与再制造决策提供依据;三是确立再制造设计对环境、消费者剩余和社会剩余有利的边界,为政府采取策略促进再制造发展提供科学依据。

2 模型建立

2.1 问题描述

根据外包制造定义可知,企业将其非核心的、辅助性的业务或功能外包给专业化服务的外部机构。比如苹果的核心设计在美国,而富士康按照设计为苹果公司生产手机。在博弈时,一般发包商处于主导地位,外包产品的制造价格主要由发包商决定。与一般制造的外包不同,外包再制造的产生有两个主要原因:一是越来越多的政府为保护环境开展延伸生产者责任制,因此企业在产品设计

时就要考虑废旧产品的再回收和再利用;二是原始制造商缺乏再制造设备和专业技能.原始制造商基于应对政府政策和自身不足,选择再制造商进行废旧产品再制造.因此,针对再制造设计的博弈,原始制造商不处于主导地位,且单位产品外包再制造费用是原始制造商与再制造商博弈的焦点^[1].

如图 1 所示,原始制造商为专注其核心业务(新产品生产),同时又能获得再制造带来的收益,原始制造商通过知识产权转让将再制造业务外包出去,进行外包再制造并支付一定的费用

(本研究称为外包再制造费用).同时,为响应政府政策,原始制造商在新产品设计初期考虑产品的可再制造性,也即再制造设计.而原始制造商进行再制造设计时,会产生一定再制造设计成本,该成本原始制造商与再制造商如何承担呢?以及不同承担方式对再制造设计努力程度影响如何?基于此背景,本研究构建外包再制造下原始制造商承担再制造设计费用与再制造商承担再制造设计费用两个博弈模型,并分析再制造设计费用不同承担方式对制造/再制造供应链竞争影响.

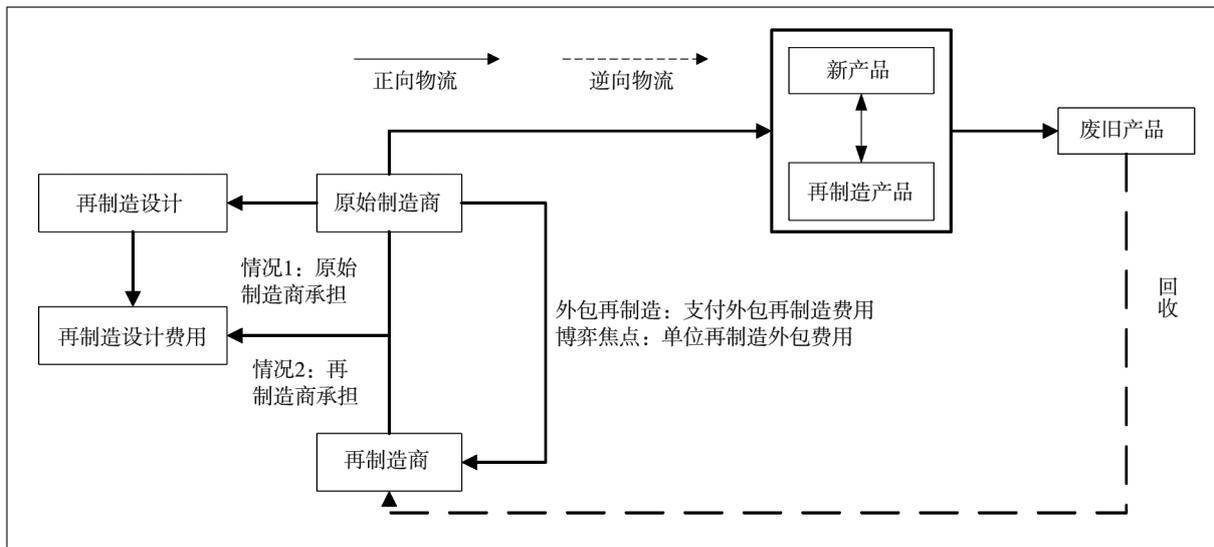


图 1 再制造设计费用不同承担模式下制造/再制造博弈示意图

Fig.1 The game diagram of manufacturing/remanufacturing based on different commitment mode of remanufacturing design cost

通过上述分析和图 1 可知,外包再制造下,博弈的焦点是原始制造商支付给再制造商的单位再制造产品外包再制造费用,而影响单位再制造产品外包费用的是单位再制造产品零售价格(再制造产品单位零售价格是与单位新产品单位零售价格市场竞争决定的).进一步地,单位再制造产品外包再制造费用受单位新产品与再制造产品零售价格市场竞争和再制造设计的影响,而再制造设计努力程度受到再制造设计费用承担方式(也即本研究研究两种再制造设计费用承担模式)的影响.

在原始制造商承担再制造设计费用时,原始制造商首先决策再制造设计努力程度;然后,原始制造商决策单位新产品零售价格和单位再制造产品外包再制造费用;最后,再制造商根据单位再制造产品外包再制造费用与再制造设计努力程度带

给其收益,决策废旧产品回收数量(通过确定废旧产品回收率确定废旧产品回收数量).

在再制造商承担再制造设计费用时,再制造商首先通过向原始制造商提供再制造设计费用来影响再制造设计努力程度;然后,原始制造商基于再制造设计努力程度决策单位新产品零售价格和单位再制造产品外包再制造费用;最后,再制造商根据单位再制造产品外包再制造费用决策废旧产品回收数量.

根据博弈论逆序求解过程,可得如下求解顺序:原始制造商承担再制造设计费用时,再制造商首先决策废旧产品回收数量,也即废旧产品回收率;原始制造商再根据废旧产品回收率决策单位新产品零售价格和单位再制造产品外包再制造费用;最后,原始制造商再根据上述最优值决策最优再制造设计努力程度.

再制造商承担再制造设计费时,再制造商首先决策废旧产品回收数量;原始制造商再根据废旧产品回收率决策单位新产品零售价格和单位再制造产品外包再制造费用;最后,再制造商再根据上述最优值决策提供再制造设计的费用,从而决策最优再制造设计努力程度。

2.2 模型符号

- c_n : 单位新产品生产成本;
- c_r : 单位再制造产品生产成本 根据实际情况可知 $c_r < c_n$, 记 $\Delta c = c_n - c_r$;
- p_n : 市场上无再制造产品时,单位新产品零售价格;
- q_n : 市场上无再制造产品时,新产品需求量;
- e_n : 单位新产品对环境造成的影响;
- e_r : 单位再制造产品对环境造成的影响;
- π_n : 市场上无再制造产品时,原始制造商收益;
- π_N : 外包再制造下,再制造设计时,原始制造商收益;
- π_R : 外包再制造下,再制造设计时,再制造商收益;
- p_N, p_R : 分别表示外包再制造下,无再制造设计时,单位新产品和再制造产品零售价格;
- q_N, q_R : 分别表示外包再制造下,无再制造设计时,新产品和再制造产品销售量;
- OEM*: 下标 *OEM* 表示进行再制造设计时,原始制造商承担再制造设计费用;
- R*: 下标 *R* 表示进行再制造设计时,再制造商承担再制造设计费用;
- p_{Ni}, p_{Ri} : 分别表示进行再制造设计时,单位新产品和再制造产品零售价格,其中 $i \in \{OEM, R\}$;
- q_{Ni}, q_{Ri} : 分别表示进行再制造设计时,新产品和再制造产品销售量,其中 $i \in \{OEM, R\}$;
- λ_i : 废旧产品的回收率,其中 $i \in \{OEM, R\}$;
- π_{Ni}, π_{Ri} : 分别表示进行再制造设计时,原始制造商和再制造商收益,其中 $i \in \{OEM, R\}$;
- δ_n : 进行再制造设计时,再制造设计努力程度给单位新产品带来的收益系数,比如有利于产品拆解、清洗和升级^[2,3];
- δ_r : 进行再制造设计时,再制造设计努力程度

给单位再制造产品带来的收益系数,比如有利于废旧产品回收时拆解和运输^[2,3];

E : 无再制造设计时,两种产品对环境造成的影响;

E_i : 再制造设计时,两种产品对环境造成的影响,其中 $i \in \{OEM, R\}$;

w_i : 再制造设计时,两种制造商承担的单位再制造产品外包再制造费用,其中 $i \in \{OEM, R\}$;

τ_i : 再制造设计时,再制造设计努力程度,根据文献[15],再制造设计费用是再制造设计努力程度二次函数,也即再制造设计费用为 $k_i \tau_i^2 / 2$,其中 k_i 表示再制造设计努力程度系数, $i \in \{OEM, R\}$ 。

2.3 模型假设

借鉴文献[13],并根据实际情况,原始制造商进行再制造设计时,再制造费用与再制造设计努力程度正相关,也即再制造设计努力程度越大,再制造设计费用就越高。因此,原始制造商在进行再制造设计时,会考虑再制造设计的费用,也即本研究给出的假设1。如果不满足假设1,原始制造商在进行再制造设计时不会考虑再制造设计费用。

假设1 原始制造商承担再制造设计费用

$$\text{时, } k_{OEM} > \frac{(\delta + k) \delta_n^2 + (\delta_r - 2\delta\delta_n) \delta_r}{2(\delta + k - \delta^2)};$$

$$\text{再制造商承担再制造设计费用时, } k_R > \frac{k(\delta_r - \delta\delta_n)^2}{4(\delta + k - \delta^2)^2}.$$

假设2 再制造产品与新产品市场需求总容量为1,也即对两种产品的市场需求总容量进行归一化处理,该处理为了便于求解,不影响结果分析。

假设3 消费者购买产品的支付意愿的概率分布服从[0,1]的均匀分布,该假设目前已经被国内外很多学者使用,比如文献[3,5,12]。

2.4 需求函数

本研究采用的需求函数是一个比较成熟的函数,在国内外文献已经成熟使用,比如文献[1,5,13,16]。根据上述文献,可以得到两种产品需求量与单位产品零售价格之间关系为

$$p_{Ni} = 1 - q_{Ni} - \delta q_{Ri}, p_{Ri} = \delta(1 - q_{Ni} - q_{Ri}),$$

其中 $i \in \{OEM, R\}$.

3 模型求解与分析

3.1 模型求解

原始制造商承担再制造设计费用

$$\pi_{NOEM} = (p_{NOEM} - c_n + \delta_n \tau_{OEM}) q_{NOEM} + (p_{ROEM} - w_{OEM}) q_{ROEM} - \frac{k_{OEM}}{2} \tau_{OEM}^2 \quad (1)$$

$$\pi_{ROEM} = (w_{OEM} - c_r + \delta_r \tau_{OEM}) q_{ROEM} - \frac{k}{2} q_{ROEM}^2 \quad (2)$$

式(1)中 $p_{NOEM} - c_n + \delta_n \tau_{OEM}$ 表示销售单位新产品获得的收益, $(p_{NOEM} - c_n + \delta_n \tau_{OEM}) q_{NOEM}$ 表示销售新产品总收益, $p_{ROEM} - w_{OEM}$ 表示外包再制造下, 销售单位再制造产品收益, $(p_{ROEM} - w_{OEM}) q_{ROEM}$ 表示销售再制造产品获得收益, $k_{OEM} \tau_{OEM}^2 / 2$ 再制造设计所需要的费用, 该费用与再制造设计努力程度正相关.

式(2)中 $w_{OEM} - c_r + \delta_r \tau_{OEM}$ 表示通过外包再制造, 再制造商获得单位再制造产品收益, $(w_{OEM} - c_r + \delta_r \tau_{OEM}) q_{ROEM}$ 表示再制造商通过外包再制造获得收益, $k q_{ROEM}^2 / 2$ 表示回收废旧产品所需要的费用, 该费用与回收废旧产品数量正相关.

再制造商承担再制造设计费用

$$\pi_{NR} = (p_{NR} - c_n + \delta_n \tau_R) q_{NR} + (p_{RR} - w_R) q_{RR} \quad (3)$$

$$\pi_{RR} = (w_R - c_r + \delta_r \tau_R) q_{RR} - \frac{k}{2} q_{RR}^2 - \frac{k_R}{2} \tau_R^2 \quad (4)$$

类似于原始制造商承担再制造设计可知, 式(3)中 $(p_{NR} - c_n + \delta_n \tau_R) q_{NR}$ 表示销售新产品获得收益, $(p_{RR} - w_R) q_{RR}$ 通过外包再制造原始制造商获得再制造收益, $(w_R - c_r + \delta_r \tau_R) q_{RR}$ 再制造商通过外包再制造获得收益, $k q_{RR}^2 / 2$ 废旧产品回收费用, $k_R \tau_R^2 / 2$ 再制造设计费用.

$$\begin{aligned} \pi_{NOEM} = & (1 - q_{NOEM} - \delta \frac{w_{OEM} - c_r + \delta_r \tau_{OEM}}{k} - c_n + \delta_n \tau_{OEM}) q_{NOEM} + \\ & (\delta - \delta q_{NOEM} - \delta \frac{w_{OEM} - c_r + \delta_r \tau_{OEM}}{k} q_{ROEM} - w_{OEM}) \frac{w_{OEM} - c_r + \delta_r \tau_{OEM}}{k} - \frac{k_{OEM}}{2} \tau_{OEM}^2 \\ & c_n + \delta_n \tau_{OEM} , \end{aligned} \quad (8)$$

对式(8)分别关于 q_{NOEM} w_{OEM} 求一阶偏导数和二阶偏导数, 可得

$$\frac{\partial \pi_{NOEM}}{\partial q_{NOEM}} = 1 - 2q_{NOEM} - 2\delta \frac{w_{OEM} - c_r + \delta_r \tau_{OEM}}{k} -$$

根据问题描述中决策顺序, 为获得两种情况下的最优值, 首先给出引理 1.

引理 1(a) 式(2)关于 λ_{OEM} 是凹函数, 通过求解式(2)获得的最优解 λ_{OEM}^* 代入式(1)后, 式(1)关于 q_{NOEM} w_{OEM} 是凹函数, 然后通过式(1)获得最优解 q_{NOEM}^* w_{OEM}^* 代入式(1), 式(1)关于 τ_{NOEM} 是凹函数;

(b) 式(4)关于 λ_R 是凹函数, 通过求解式(4)获得的最优解 λ_R^* 代入式(3)后, 式(3)关于 q_{NR} w_R 是凹函数, 然后通过式(3)获得最优解 q_{NR}^* w_R^* 代入式(4), 式(4)关于 τ_R 是凹函数.

证明 (a) 把 $q_{ROEM} = \lambda_{OEM} q_{NOEM}$ 代入式(2)可得式(5)

$$\begin{aligned} \pi_{ROEM} = & \lambda_{OEM} (w_{OEM} - c_r + \delta_r \tau_{OEM}) \times \\ & q_{NOEM} - \frac{k}{2} (\lambda_{OEM} q_{NOEM})^2 \end{aligned} \quad (5)$$

对式(5)关于 λ_{OEM} 求一阶偏导数和二阶偏导数可得

$$\begin{aligned} \frac{\partial \pi_{ROEM}}{\partial \lambda_{OEM}} = & (w_{OEM} - c_r + \delta_r \tau_{OEM}) \times \\ & q_{NOEM} - k q_{NOEM}^2 \lambda_{OEM} \end{aligned} \quad (6)$$

$$\frac{\partial^2 \pi_{ROEM}}{\partial \lambda_{OEM}^2} = -k q_{NOEM}^2 \quad (7)$$

根据式(7)可知 $\frac{\partial^2 \pi_{ROEM}}{\partial \lambda_{OEM}^2} = -k q_{NOEM}^2 < 0$, 也

即式(2)关于 λ_{OEM} 是凹函数. 因此式(5)最优值在其一阶导数等于零的地方达到, 故根据式(6)可得 λ_{OEM} 最优解, 具体如下

$$\lambda_{OEM}^* = \frac{w_{OEM} - c_r + \delta_r \tau_{OEM}}{k q_{NOEM}} .$$

把 λ_{OEM}^* 代入式(1)可得

$$\frac{\partial \pi_{NOEM}}{\partial w_{OEM}} = -2 \frac{\delta}{k} q_{NOEM} + \frac{\delta + c_r - \delta_r \tau_{OEM}}{k} -$$

$$2\delta \frac{w_{OEM} + c_r - \delta_r \tau_{OEM}}{k^2} - 2 \frac{w_{OEM}}{k},$$

$$\frac{\partial^2 \pi_{NOEM}}{\partial w_{OEM} \partial q_{NOEM}} = \frac{\partial^2 \pi_{NOEM}}{\partial q_{NOEM} \partial w_{OEM}} = -2 \frac{\delta}{k},$$

$$\frac{\partial^2 \pi_{NOEM}}{\partial q_{NOEM}^2} = -2,$$

$$\frac{\partial^2 \pi_{NOEM}}{\partial w_{OEM}^2} = -2 \frac{\delta + k}{k^2}.$$

由此可得式(8)关于 q_{NOEM} w_{OEM} 海森矩阵为

$$H = \begin{bmatrix} -2 & -2 \frac{\delta}{k} \\ -2 \frac{\delta}{k} & -2 \frac{\delta + k}{k^2} \end{bmatrix}$$

而 $|H| = \frac{4}{k^2} [\delta(1-\delta) + k] > 0$ 且 $-2 < 0$ 也即式

(8) 关于 q_{NOEM} w_{OEM} 是凹函数.

$$w_i^* = \frac{\delta k c_n + [2\delta(1-\delta) + k]c_r - [(2\delta - 2\delta^2 + k)\delta_r + k\delta\delta_n]\tau_i^*}{2(\delta + k - \delta^2)},$$

$$\lambda_i^* = \frac{\delta c_n - c_r + (\delta_r - \delta\delta_n)\tau_i^*}{\delta + k - \delta^2 + \delta c_r - (\delta + k)c_n + [(\delta + k)\delta_n - \delta\delta_r]\tau_i^*},$$

$$p_{Ri}^* = \delta \frac{\delta + k - \delta^2 + (1-\delta)c_r + kc_n - [(1-\delta)\delta_r + k\delta_n]\tau_i^*}{2(\delta + k - \delta^2)},$$

$$q_{Ni}^* = \frac{\delta + k - \delta^2 + \delta c_r - (\delta + k)c_n + [(\delta + k)\delta_n - \delta\delta_r]\tau_i^*}{2(\delta + k - \delta^2)} \quad \text{其中 } i \in \{OEM, R\}.$$

$$\pi_{NOEM}^* = \frac{(1 - c_n + \delta_n \tau_{OEM}^*)^2}{4} + \frac{[\delta c_n - c_r + (\delta_r - \delta\delta_n)\tau_{OEM}^*]^2}{4(\delta + k - \delta^2)} - \frac{k_{OEM} \tau_{OEM}^{*2}}{2}$$

$$\pi_{ROEM}^* = \frac{k [\delta c_n - c_r + (\delta_r - \delta\delta_n)\tau_{OEM}^*]^2}{8(\delta + k - \delta^2)^2}$$

$$\pi_{NR}^* = \frac{(1 - c_n + \delta_n \tau_R^*)^2}{4} + \frac{[\delta c_n - c_r + (\delta_r - \delta\delta_n)\tau_R^*]^2}{4(\delta + k - \delta^2)}$$

$$\pi_{RR}^* = \frac{k [\delta c_n - c_r + (\delta_r - \delta\delta_n)\tau_R^*]^2}{8(\delta + k - \delta^2)^2} - \frac{k_R \tau_R^{*2}}{2}$$

3.2 模型分析

由结论 1 可得推论 1 具体如下.

推论 1 外包再制造对再制造影响为

(a) 原始制造商通过外包再制造可以获得再制造带来的收益,增加原始制造商的收益,也即 $\pi_n^* > \pi_n^*$;

(b) 原始制造商不进行再制造设计时,原始制造商和再制造商收益与再制造节约成本正相

最优解 q_{NOEM}^* w_{OEM}^* 代入式(1),式(1)关于 τ_{OEM} 是凹函数与式(2)关于 λ_{OEM} 是凹函数证明过程类似,在此就不给予证明.

(b) 的证明过程与(a)完全类似,在此就省略其证明. 证毕.

根据引理 1 可得如下最优解 具体见结论 1.

结论 1 两种情况下 最优纳什均衡解为

$$\tau_{OEM}^* = \frac{[(\delta + k)(1 - c_n) - \delta(\delta - c_r)]\delta_n + (\delta c_n - c_r)\delta_r}{(\delta + k - \delta^2)(2k_{OEM} - \delta_n^2) - (\delta_r - \delta\delta_n)^2},$$

$$\tau_R^* = \frac{k(\delta_r - \delta\delta_n)(\delta c_n - c_r)}{4k_R(\delta + k - \delta^2)^2 - k(\delta_r - \delta\delta_n)^2},$$

$$p_{Ni}^* = \frac{1 + c_n - \delta_n \tau_i^*}{2},$$

$$q_{Ri}^* = \frac{\delta c_n - c_r + (\delta_r - \delta\delta_n)\tau_i^*}{2(\delta + k - \delta^2)},$$

关,也即 $\frac{\partial \pi_N^*}{\partial \Delta c} > 0, \frac{\partial \pi_R^*}{\partial \Delta c} > 0.$

证明(a) 市场上无再制造产品时,原始制造商收益函数为

$$\pi_n = (p_n - c_n)q_n = (1 - q_n - c_n)q_n$$

易知上式关于 q_n 是凹函数,求解可得其最优解为

$$p_n^* = \frac{1 + c_n}{2}, q_n^* = \frac{1 - c_n}{2}, \pi_n^* = \frac{(1 - c_n)^2}{4}$$

再由结论 1 可得, 无再制造设计时, 也即 $\tau_i = 0$ 时, 原始制造商与再制造商收益为

$$\pi_N^* = \frac{(1 - c_n)^2}{4} + \frac{[\Delta c - (1 - \delta)c_n]^2}{4(\delta + k - \delta^2)} \quad (9)$$

$$\pi_R^* = \frac{k[\Delta c - (1 - \delta)c_n]^2}{8(\delta + k - \delta^2)^2} \quad (10)$$

由此可得 $\pi_N^* - \pi_n^* = \frac{[\Delta c - (1 - \delta)c_n]^2}{4(\delta + k - \delta^2)} > 0$, 也即 $\pi_N^* > \pi_n^*$.

(b) 由式(9)和式(10)可得

$$\frac{\partial \pi_N^*}{\partial \Delta c} > 0, \quad \frac{\partial \pi_R^*}{\partial \Delta c} > 0. \quad \text{证毕.}$$

推论 1 表明, 在无外包再制造时, 再制造出现会减少新产品销售利润. 但是, 原始制造商通过知识产权保护采取外包再制造时, 原始制造商收益是增加的, 也即再制造由威胁转变为增加原始制造商收益.

进一步, 在外包再制造下, 再制造节约成本越多, 原始制造商与再制造商收益越大, 也即, 原始制造商可以通过外包再制造获得再制造带来的收益, 且该收益与再制造节约成本正相关. 原始制造商可以通过再制造设计降低再制造生产成本, 增加再制造节约成本; 而进行再制造设计时, 会产生一定的费用. 因此, 有必要确立原始制造商与再制造商愿意承担再制造设计费用的边界条件, 具体见结论 2.

管理启示 在外包再制造下, 原始制造商与再制造商都应致力于降低再制造生产成本. 比如, 通过本研究所提的再制造设计, 可以降低废旧产品的拆解成本、运输成本和清洗成本等.

结论 2 再制造商愿意承担再制造设计费用的边界为: $\delta_r/\delta_n > \delta$;

原始制造商愿意承担再制造设计费用的边界为 $\delta_r/\delta_n > \frac{(\delta c_n - c_r)}{\delta(\delta - c_r) - (\delta + k)(1 - c_n)}$.

证明 由结论 1 可知, 原始制造商承担再制造设计费用时, 再制造设计努力程度为

$$\tau_{OEM}^* = \frac{[(\delta + k)(1 - c_n) - \delta(\delta - c_n)]\delta_n + (\delta c_n - c_r)\delta_r}{(\delta + k - \delta^2)(2k_{OEM} - \delta_n^2) - (\delta_r - \delta\delta_n)^2}$$

因此, 原始制造商愿意承担再制造设计费用需要满足 $\tau_{OEM}^* > 0$.

再根据原始制造商承担再制造设计费用的假设条件可知

$$\tau_{OEM}^* > 0 \Leftrightarrow [(\delta + k)(1 - c_n) - \delta(\delta - c_n)]\delta_n + (\delta c_n - c_r)\delta_r > 0,$$

而 $[(\delta + k)(1 - c_n) - \delta(\delta - c_n)]\delta_n + (\delta c_n - c_r)\delta_r > 0$

$$\Leftrightarrow \frac{\delta_r}{\delta_n} > \frac{(\delta c_n - c_r)}{\delta(\delta - c_r) - (\delta + k)(1 - c_n)}.$$

类似可证再制造商愿意承担再制造设计费用边界条件为: $\delta_r/\delta_n > \delta$. 证毕.

结合推论 1 结论 2 表明, 原始制造商承担再制造设计费用时, 原始制造商不仅希望自己获得再制造设计带来的收益越大越好, 还希望再制造商获得的再制造设计收益满足一定的阈值. 主要原因有两个: 一是再制造设计努力程度越高, 通常单位新产品制造成本降低就越多, 制造成本的降低间接减少新产品零售价格, 提升其市场竞争优势; 二是由推论 1 可知, 原始制造商收益还与再制造节约成本正相关, 因此, 通过再制造设计还可以降低单位再制造生产成本, 进而增加再制造带来的收益, 间接增加其收益; 也就是说, 原始制造商愿意承担再制造设计费用的边界条件与单位再制造设计努力程度带给原始制造商与再制造商收益相关.

再制造商承担再制造设计费用时, 单位再制造设计努力程度带给其收益越大, 其节约成本也越大, 也即对其越有利, 而进行再制造设计还对原始制造商有利. 因此, 再制造商愿意承担再制造设计费用时, 不仅要考虑再制造设计带给其收益, 还要考虑再制造设计带给原始制造商收益.

管理启示 再制造设计带给单位再制造产品与单位新产品收益比大于某一阈值时, 再制造商应选择承担再制造设计费用; 当再制造设计带给单位再制造产品收益与单位新产品收益之比小于某一阈值时, 再制造商与原始制造商会根据各自的边界条件, 选择是否承担再制造设计费用.

结论 3 再制造设计努力程度对最优纳什均衡解的影响为

$$(a) \quad \frac{\partial w_i^*}{\partial \tau_i} < 0, \quad \frac{\partial p_{Ni}^*}{\partial \tau_i} < 0, \quad \frac{\partial p_{Ri}^*}{\partial \tau_i} < 0;$$

$$(b) \quad \text{当 } \delta < \delta_r/\delta_n < 1 + \frac{k}{\delta} \text{ 时,}$$

$$\frac{\partial q_{Ni}^*}{\partial \tau_i} > 0, \frac{\partial q_{Ri}^*}{\partial \tau_i} > 0;$$

$$\text{当 } \delta_r/\delta_n < \delta \text{ 时, } \frac{\partial q_{Ni}^*}{\partial \tau_i} > 0, \frac{\partial q_{Ri}^*}{\partial \tau_i} < 0;$$

$$\text{当 } 1 + \frac{k}{\delta} < \delta_r/\delta_n \text{ 时, } \frac{\partial q_{Ni}^*}{\partial \tau_i} < 0, \frac{\partial q_{Ri}^*}{\partial \tau_i} > 0.$$

(c) 原始制造商承担再制造设计费用时

$$(i) \text{ 当 } \tau_{OEM} < \tau_{OEM}^* \text{ 时, } \frac{\partial \pi_{NOEM}^*}{\partial \tau_{OEM}} > 0, \text{ 否则,}$$

$$\frac{\partial \pi_{NOEM}^*}{\partial \tau_{OEM}} < 0;$$

$$(ii) \text{ 当 } \delta < \frac{\delta_r}{\delta_n} \text{ 时, } \frac{\partial \pi_{ROEM}^*}{\partial \tau_{OEM}} > 0, \text{ 否则 } \frac{\partial \pi_{ROEM}^*}{\partial \tau_{OEM}} < 0.$$

$$\text{再制造商承担再制造设计费用时: } \frac{\partial \pi_{NR}^*}{\partial \tau_R} > 0;$$

$$\text{当 } \tau_R < \tau_R^* \text{ 时, } \frac{\partial \pi_{RR}^*}{\partial \tau_R} > 0, \text{ 否则 } \frac{\partial \pi_{RR}^*}{\partial \tau_R} < 0.$$

证明 (a) 由结论 1 可知

$$\frac{\partial w_i^*}{\partial \tau_i} = - [(2\delta - 2\delta^2 + k)\delta_r + k\delta\delta_n] < 0,$$

$$\frac{\partial p_{Ni}^*}{\partial \tau_i} = - \frac{\delta_n}{2} < 0,$$

$$\frac{\partial p_{Ri}^*}{\partial \tau_i} = - \frac{(1 - \delta)\delta_r + k\delta_n}{2(\delta + k - \delta^2)} < 0.$$

也即(a)成立,类似可证其它结论成立.证毕.

结论 3 说明,单位再制造产品外包再制造费用、单位新产品零售价格和单位再制造产品零售价格与单位再制造设计努力程度负相关,也即通过再制造设计不仅可以降低两种产品的单位零售价格,还可以降低单位再制造产品外包再制造费用,这进一步验证再制造设计可以有效降低两种产品的生产成本,进而增加两者的收益(根据推论 1 可知).

当单位再制造设计努力程度带给单位再制造产品收益与带给单位新产品收益之比大于某一阈值时,说明再制造设计带给再制造产品的收益比较大,使其在市场上具有更强的竞争优势,增加再制造产品销售量.反之,当单位再制造设计努力程度带给单位再制造产品收益与带给单位新产品收益之比小于某一阈值时,说明再制造设计带给新产品的收益比较大,使其在市场上具有一定的竞

争优势,增加新产品销售量,也即当单位再制造设计努力程度带给再制造商收益与带给原始制造商收益之比大于(或小于)某一阈值,再制造设计仅仅有利于一种产品销售.当单位再制造设计努力程度带给再制造商收益与带给原始制造商收益之比在某一区间时,再制造设计有利于增加两种产品的销售量.

当原始制造商承担再制造设计费时,原始制造商收益在再制造设计努力程度某一点达到最大,也即,单位再制造设计努力程度小于某一阈值时,原始制造商收益与单位再制造设计努力程度正相关,反之负相关.说明原始制造商进行再制造设计时,不是再制造设计努力程度越大越好.再制造商收益与单位再制造设计努力程度带给单位再制造产品收益与带给单位新产品收益比值有关,也即当单位再制造设计努力程度带给再制造商收益与带给原始制造商收益比值大于某一阈值时,再制造设计才会增加其收益.

当再制造商承担再制造设计费用时,原始制造商收益与单位再制造设计努力程度正相关,也即单位再制造设计努力程度越大,其收益越大.再制造商收益在某一点达到最大,在未达到这一点时,其收益与单位再制造设计努力程度正相关;超过这一点时,其收益与单位再制造设计努力程度负相关.虽然原始制造商收益与单位再制造设计努力程度正相关,但是再制造商承担再制造设计费用是有边界条件的,原始制造商也不能一直提高再制造设计努力程度.

管理启示 再制造设计费用由原始制造商承担时,再制造设计费用应小于某一值,这样才能使其收益达到最大;再制造设计费用由再制造商承担时,为使原始制造商持续进行再制造设计,需要综合考虑再制造设计带给原始制造商的收益以及边界条件.

3.3 再制造设计对环境的影响

借鉴文献 [5],可知两种产品对环境的影响为

$$\begin{aligned} E_i - E &= e_n q_{Ni}^* + e_r q_{Ri}^* - (e_n q_N^* + e_r q_R^*) \\ &= \tau_i^* \frac{[(\delta + k)e_n - \delta e_r]\delta_n + (e_r - \delta e_n)\delta}{2(\delta + k - \delta^2)} \end{aligned}$$

其中 $E_i = e_n q_{Ni}^* + e_r q_{Ri}^*$ (其中 $i \in \{OEM, R\}$) 表示不同承担方式下,新产品与再制造商对环境造成

的影响; $E = e_n q_n^* + e_r q_R^*$ 表示不进行再制造设计对环境造成的影响.

结论 4 再制造设计对环境造成的影响为

- (a) 当 $\frac{e_r}{e_n} \geq \delta$ 时, $E_i > E$;
- (b) 当 $\frac{e_r}{e_n} < \delta$ 且 $\frac{(\delta+k)e_n - \delta e_r}{\delta e_n - e_r} > \frac{\delta_r}{\delta_n}$ 时, $E_i > E$;
- (c) 当 $\frac{e_r}{e_n} < \delta$ 且 $\frac{(\delta+k)e_n - \delta e_r}{\delta e_n - e_r} < \frac{\delta_r}{\delta_n}$ 时, $E_i < E$.

证明 (a) 当 $\frac{e_r}{e_n} \geq \delta$ 时, 可知 $e_r - \delta e_n > 0$;

再由 $(\delta + k)e_n - \delta e_r = \delta(e_n - e_r) + ke_n > 0$ 可知 $[(\delta + k)e_n - \delta e_r]\delta_n + (e_r - \delta e_n)\delta_r > 0$, 也即 $E_i > E$.

类似可证 (b) 和 (c) 成立. 证毕.

结论 4 表明 相对于单位新产品对环境造成影响, 当单位再制造产品对环境造成的影响大于某一阈值时, 再制造不利于降低对环境造成的影响. 造成这一现象主要原因是: 再制造虽然通过减少新产品销售量降低新产品对环境造成的影响, 但是再制造产品对环境也造成一定的影响, 且当单位再制造产品相对于单位新产品对环境造成的影响大于某一阈值时, 再制造产品对环境造成的影响大于新产品对环境影响的降低量, 最终使两种产品对环境造成的影响是增加的.

相对于单位新产品对环境造成影响, 当单位再制造产品对环境造成的影响小于某一阈值, 两种产品对环境造成的影响还与再制造设计带给两种产品收益有关, 也即当单位再制造设计努力程度给单位再制造产品与给单位新产品带来的收益之比小于某一阈值时, 再制造出现不利于降低对环境造成的影响; 反之, 再制造有利于降低对环境造成的影响. 以上结论说明, 再制造对环境的影响并不总是降低的, 相对于单位新产品对环境造成的影响, 单位再制造产品对环境造成影响小于某一阈值时且再制造设计给单位再制造产品带来的收益(相对于再制造设计带给单位新产品的收益)大于某一阈值时, 再制造才有利于降低对环境的影响.

管理启示 为使再制造有利于降低环境影响, 单位再制造产品的环境影响必须控制在某一阈值; 或者再制造设计带给单位再制造产品收益

与带给单位新产品收益之比达到一定的阈值.

3.4 再制造设计对消费者剩余和社会剩余的影响

根据经济学知识, 可以计算消费者剩余和社会剩余, 为便于讨论, 消费者剩余记为 S_{Ci} , 具体计算过程如下

$$S_{Ci} = \int_{1-q_{Ni}}^1 (\theta - p_{Ni}) d\theta + \int_{1-q_{Ni}q_{Ri}}^{1-q_{Ni}} (\delta\theta - p_{Ri}) d\theta$$

$$= \frac{(q_{Ni} + \delta q_{Ri})^2 + \delta(1 - \delta)q_{Ri}^2}{2}$$

社会剩余记为 S_{Si} , 具体计算过程如下

$$S_{Si} = S_{Ci} + \pi_{Ni}^* + \pi_{Ri}^* \text{ 其中 } i \in \{OEM, R\}.$$

同时, 记 S_C 和 S_S 分别表示无再制造设计时消费者剩余和社会剩余.

根据上述消费者剩余和社会剩余表达式, 可得如下结论 5.

结论 5 再制造设计对消费者剩余和社会剩余影响为

(a) 再制造设计对消费者剩余的影响: 当 $\delta < \delta_r/\delta_n$ 时, $S_{Ci} > S_C$;

(b) 再制造设计对社会剩余的影响: 当 $\tau_i < \tau_i^*$ 且 $\delta < \frac{\delta_r}{\delta_n}$ 时, $S_{Si} > S_S$.

证明 (a) 由 $q_{Ni}^* - q_N^* = (\delta_r - \delta\delta_n)\tau_i^*$ 及 $q_{Ni}^* + \delta q_{Ni}^* - (q_n^* + \delta q_n^*) = (\delta + k - \delta^2)\delta_n\tau_i^*$ 可知, 当 $\delta < \frac{\delta_r}{\delta_n}$ 时, $q_{Ni}^* + \delta q_{Ni}^* > q_n^* + \delta q_n^*$, $q_{Ni}^* > q_n^*$, 也即 $S_{Ci} > S_C$.

类似可证 (b) 成立. 证毕.

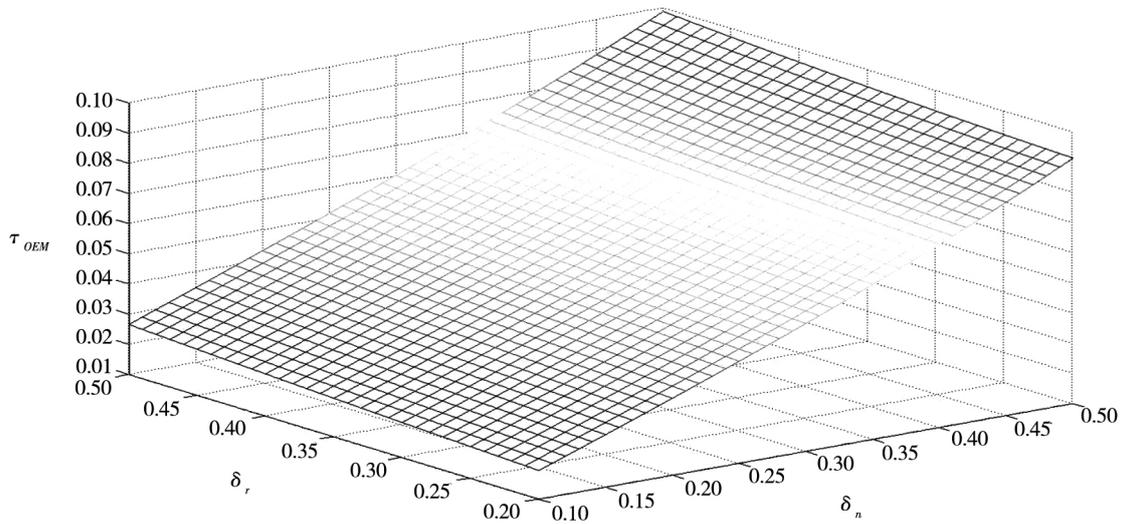
结论 5 表明, 原始制造商进行再制造设计时, 再制造不一定增加消费者剩余, 也即不一定使消费者受益. 只有当再制造设计努力程度给单位再制造产品带来收益与给单位新产品带来收益之比大于某一阈值时, 再制造设计才会增加消费者剩余. 社会剩余不仅受到再制造设计带给两种单位产品带来收益有关, 还与再制造设计努力程度的峰值有关, 因为社会剩余还与两个制造商收益有关. 因此, 在再制造设计努力程度没有达到最优值时, 社会剩余与再制造设计努力程度正相关.

4 算例分析

通过第3节分析可知,再制造设计可以同时给原始制造商与再制造商带来收益,且该收益不仅影响再制造设计努力程度,还影响其他变量.为进一步详细分析再制造设计带给两种产品单位收益对再制造设计努力程度、回收率、需求量和收益影响,以废旧发动机再制造为例用 MATLAB R2014a 进行仿真分析.根据文献 [16]可知,与单位新产品相比,单位再制造不仅可以降低环境影响 80%,还能节约成本 50%、节约能源 60%、节约原材料 70%.同时借鉴文献 [13]取 $c_n = 0.6$, $c_r = 0.3$, $\delta = 0.6$, $k = 1.1$, $k_{OEM} = 1.2$, $k_R = 1.3$.

4.1 δ_n 与 δ_r 对再制造设计努力程度影响

由图2可知,原始制造商承担再制造设计费用时,再制造设计努力程度与 δ_n 、 δ_r 正相关;再制造商承担再制造设计费用时,再制造设计努力程度与 δ_r 正相关、与 δ_n 负相关.主要原因有两个:一是在外包再制造下,再制造对原始制造商造成的威胁变成机会,且原始制造商收益与单位再制造节约成本正相关,也即当原始制造商进行再制造设计时,对再制造商节约成本越多越好,最终使再制造设计努力程度与 δ_r 正相关;二是再制造设计对原始制造商带来收益越多,原始制造商进行再制造设计努力程度越大,也即与 δ_n 正相关.



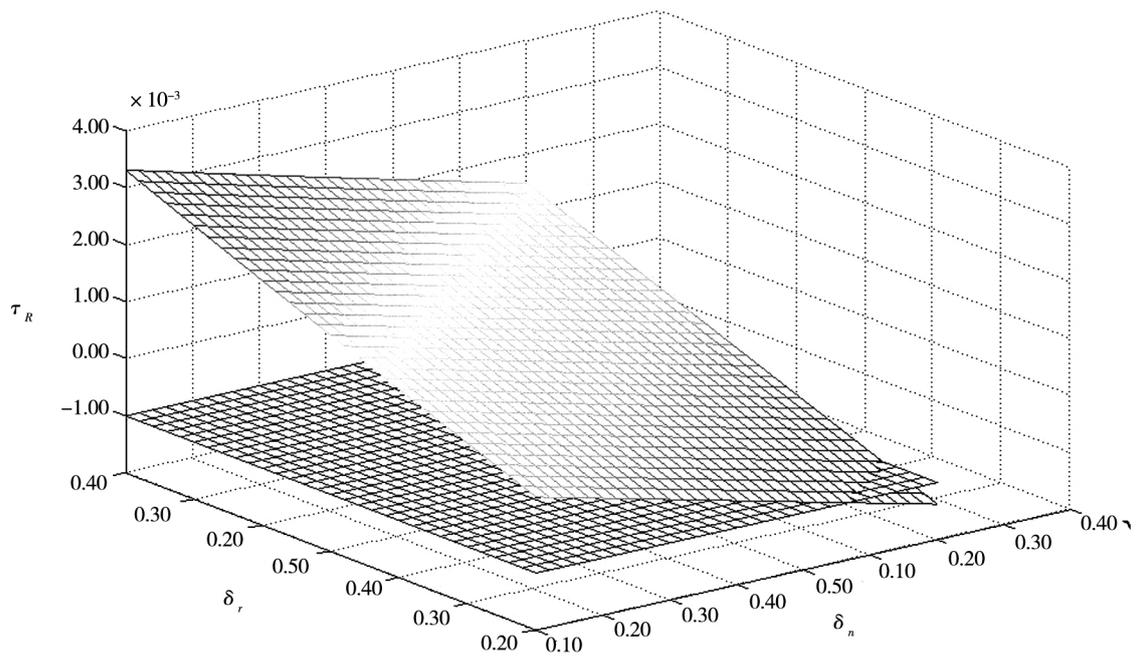


图 2 再制造设计费用不同承担模式下 δ_n 与 δ_r 对 τ_i 的影响

Fig.2 The influence of δ_n and δ_r on the τ_i based on different commitment mode of remanufacturing design cost

当再制造商承担再制造设计费用时, δ_r/δ_n 小于某一阈值时, 再制造商不愿意承担再制造设计费用, 也即在图中出现 $\tau_R < 0$ 部分; 同时, 再制造商仅仅能从单位再制造节约成本获益, 而不能从新产品节约成本获利, 所以再制造承担再制造设计费用积极性与 δ_r 正相关, 与 δ_n 负相关. 综合以上分析, 可得推论 2.

推论 2 δ_n 与 δ_r 对 τ_i 影响为

$$\frac{\partial \tau_{OEM}}{\partial \delta_n} > 0, \frac{\partial \tau_{OEM}}{\partial \delta_r} > 0, \frac{\partial \tau_R}{\partial \delta_n} < 0, \frac{\partial \tau_R}{\partial \delta_r} > 0.$$

4.2 δ_n 与 δ_r 对回收率影响

由图 3 可知, 当原始制造商承担再制造设计

费用时, 废旧产品回收率与 δ_r 正相关, 且在 δ_r/δ_n 等于某一值时达到最大, 也即废旧产品回收率关于 δ_r/δ_n 是凹函数. 主要原因有两个: 一是再制造商负责回收废旧产品, 因此, 再制造设计带给再制造产品收益越大, 再制造商回收积极性就越高; 二是由于再制造设计费用由原始制造商承担, 且其承担费用具有一定边界, 废旧产品回收率最优值还与 δ_n 有关, 也即与 δ_r/δ_n 有关. 当再制造商承担再制造设计费用时, 废旧产品回收率与 δ_r 正相关, 与 δ_n 负相关, 与再制造商承担再制造设计费用时对再制造设计努力程度具有相同的原因. 综合上述分析, 可得推论 3.

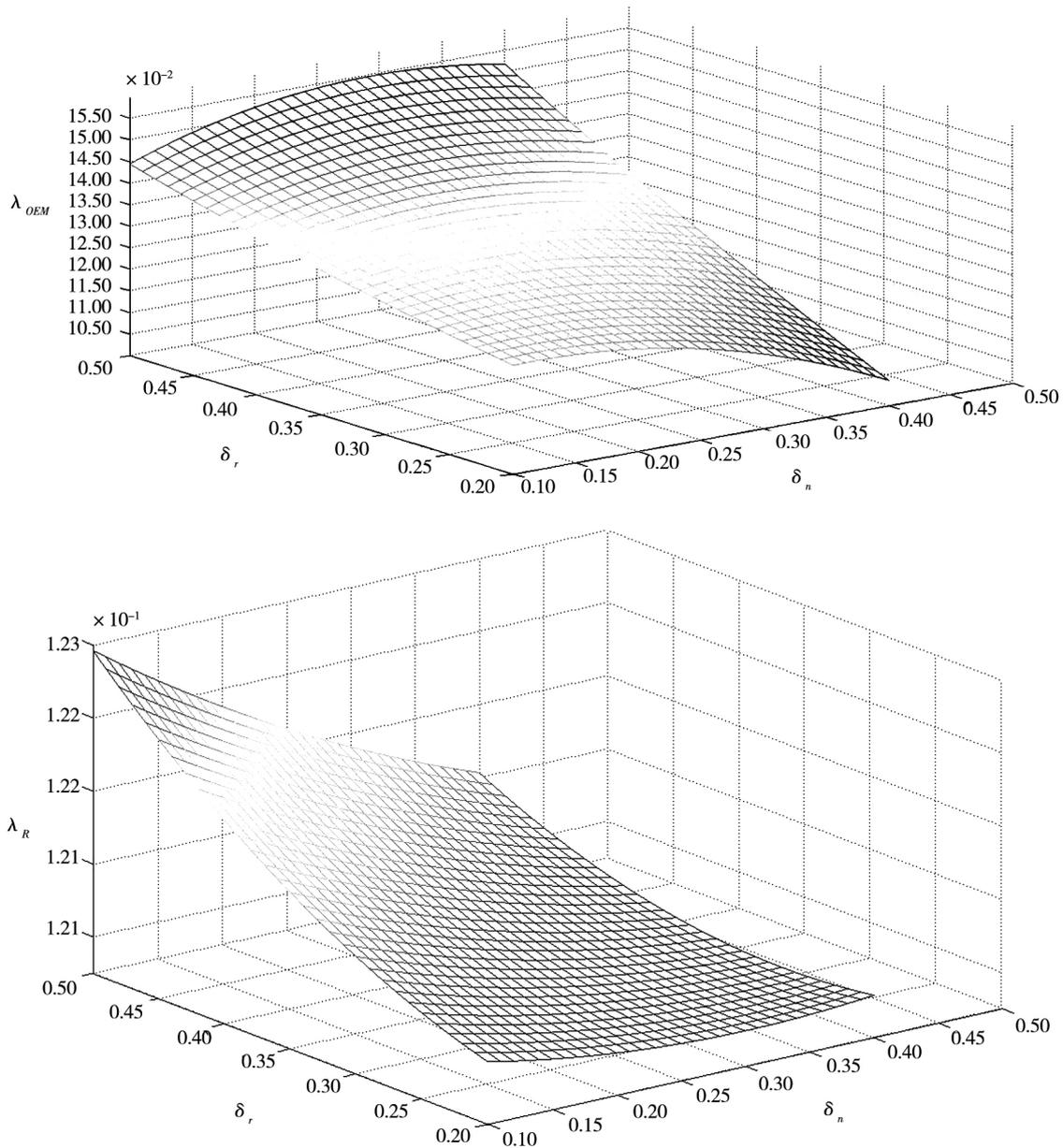


图3 再制造设计费用不同承担模式下 δ_n 与 δ_r 对 λ_i 影响

Fig.3 The influence of δ_n and δ_r on the λ_i based on different commitment mode of remanufacturing design cost

推论3 δ_n 与 δ_r 对 λ_i 影响为

$$\frac{\partial \lambda_{OEM}}{\partial \delta_r} > 0, \frac{\partial \lambda_R}{\partial \delta_r} > 0, \frac{\partial \lambda_R}{\partial \delta_n} < 0;$$

λ_R 关于 δ_r/δ_n 是凹函数.

4.3 δ_n 与 δ_r 对新产品需求量影响

在仿真分析过程中发现 δ_n 与 δ_r 对再制造产品需求量影响和 δ_n 与 δ_r 对回收率影响趋势一样.故在此只给出 δ_n 与 δ_r 对新产品需求量仿真分析.

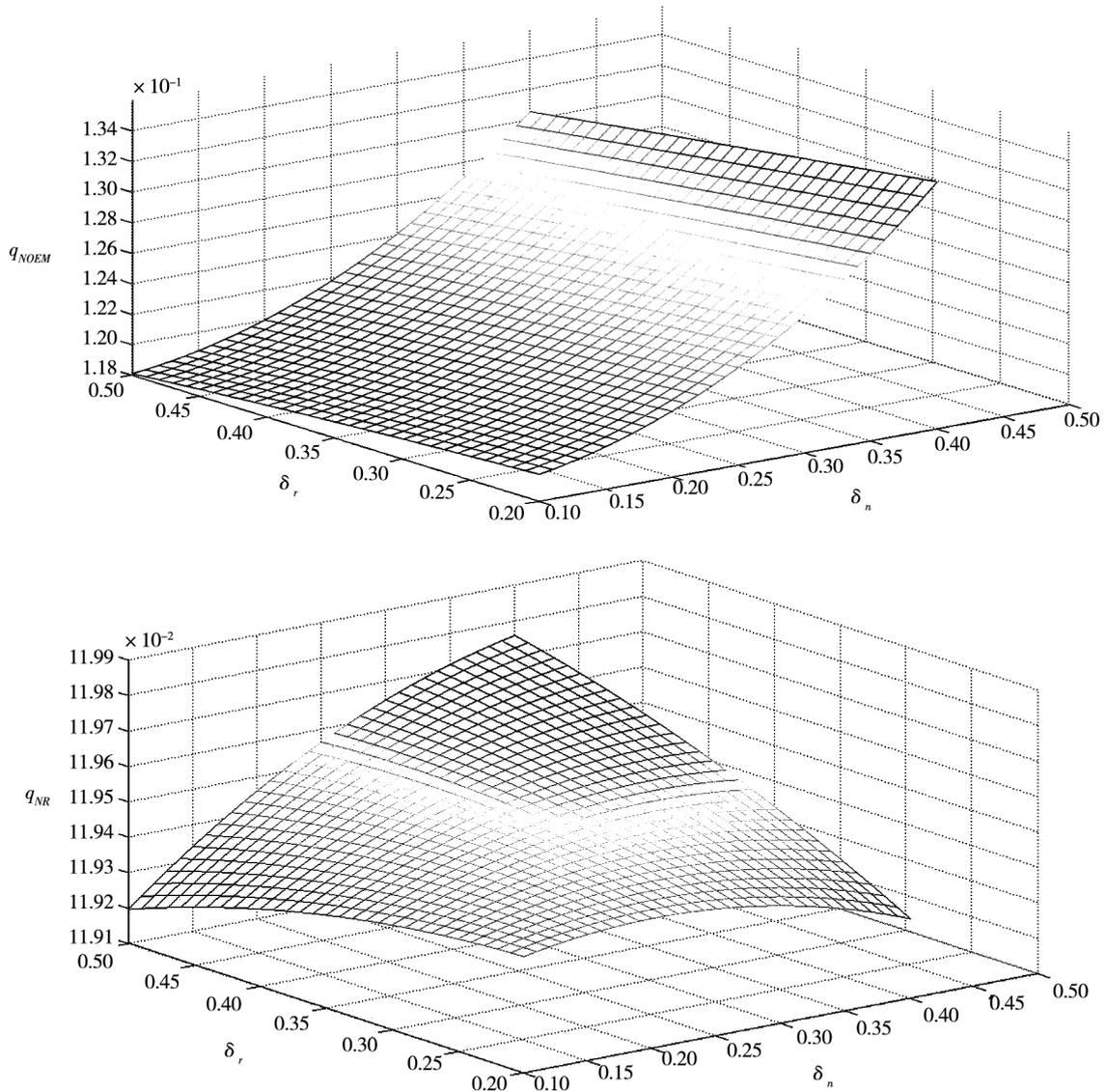


图 4 δ_n 与 δ_r 对新产品需求量影响

Fig. 4 The influence of δ_n and δ_r on the demand of new products

由图 4 可知,原始制造商承担再制造设计费用时,新产品需求与 δ_n 正相关、与 δ_r 负相关.上述现象主要因为:再制造设计带给新产品收益越大,新产品单位产品零售价格越低,在与再制造产品竞争中越有利;反过来,当再制造设计带给再制造产品收益越大,新产品在市场竞争中越不利.再制造商承担再制造设计费用时,新产品需求量 δ_r 小于某一阈值时,其需求量与 δ_n 负相关,反之,与 δ_n 正相关.

推论 4 δ_n 与 δ_r 对需求量影响为

$$(a) \frac{\partial q_{NOEM}}{\partial \delta_r} < 0, \frac{\partial q_{NOEM}}{\partial \delta_n} > 0;$$

$$(b) \frac{\partial q_{ROEM}}{\partial \delta_r} > 0, \frac{\partial q_{ROEM}}{\partial \delta_n} < 0, \frac{\partial q_{RR}}{\partial \delta_n} < 0;$$

(c) q_{RR} 关于 δ_r/δ_n 是凹函数,也即 q_{RR} 在 δ_r/δ_n 比值某一点达到最大值.

4.4 δ_n 与 δ_r 对收益影响

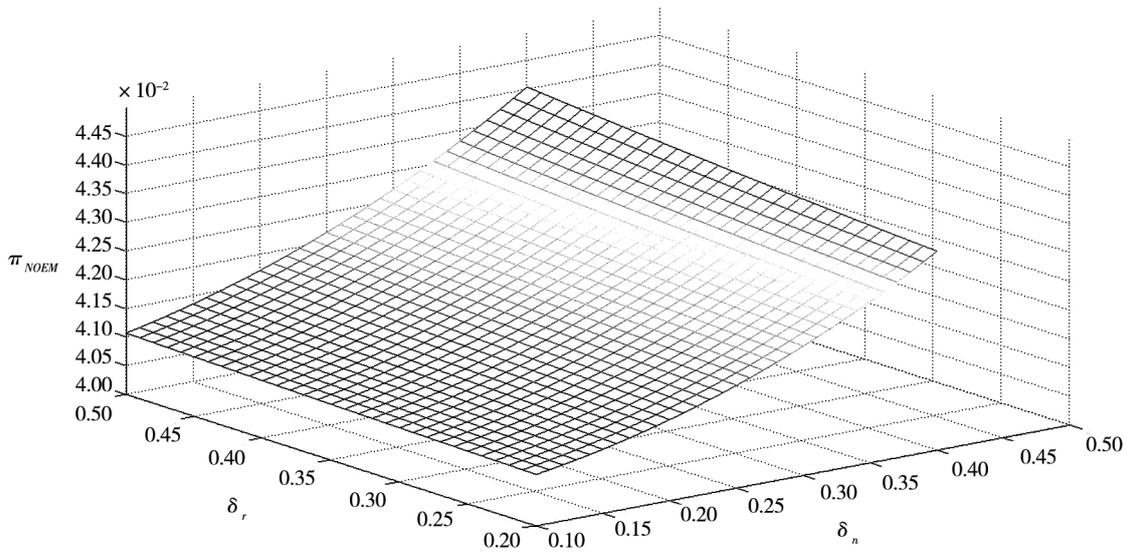


图5 原始制造商承担费用时 δ_n 与 δ_r 对原始制造商收益影响

Fig. 5 The influence of δ_n and δ_r on the profit of OEM when OEM bearing the DfR cost

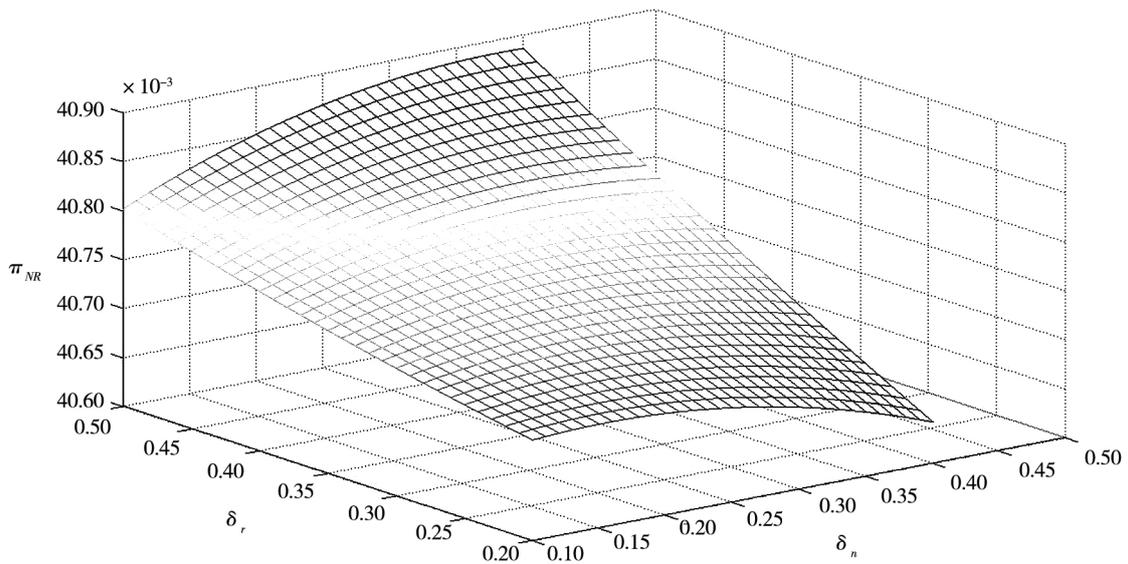


图6 再制造商承担费用时 δ_n 与 δ_r 对原始制造商收益影响

Fig. 6 The influence of δ_n and δ_r on the profit of OEM when remanufacturer bearing the DfR cost

由图5和图6可知,当原始制造商承担再制造设计费用时,原始制造商收益与 δ_n 、 δ_r 正相关.这一现象很容易理解,因为原始制造商可以通过外包再制造转移再制造收益,所以进行再制造设计时,再制造设计带给原始制造商收益越多,原始制造商通过外包再制造转移再制造收益也增加;另一方面,再制造设计带给新产品收益越多,原始制造商收益也越大.

当再制造商承担再制造设计费用时,原始制造商收益与 δ_r 正相关、与 δ_n 负相关.原始制造商

收益与 δ_r 正相关原因与原始制造商承担再制造设计费用时相同.与 δ_n 负相关主要是因为,当再制造商承担再制造设计费用时,新产品获得再制造设计收益越大,再制造商一般会减少再制造设计费用,限制再制造设计努力程度,最终不仅使新产品收益减少,还减少再制造设计带给再制造产品收益,促使原始制造商收益减少.综合两种情况分析,可得推论5.

推论5 δ_n 与 δ_r 对原始制造商收益影响为

$$(a) \frac{\partial \pi_{NOEM}}{\partial \delta_n} > 0, \frac{\partial \pi_{NOEM}}{\partial \delta_r} > 0;$$

$$(b) \frac{\partial \pi_{NR}}{\partial \delta_n} < 0, \frac{\partial \pi_{NR}}{\partial \delta_r} > 0.$$

类似可得推论 6.

推论 6 δ_n 与 δ_r 对再制造商收益影响为

$$(a) \frac{\partial \pi_{ROEM}}{\partial \delta_n} < 0, \frac{\partial \pi_{ROEM}}{\partial \delta_r} > 0;$$

$$(b) \frac{\partial \pi_{RR}}{\partial \delta_n} < 0, \frac{\partial \pi_{RR}}{\partial \delta_r} > 0.$$

5 结束语

为分析外包再制造模式下,再制造设计费用不同承担方式对制造/再制造供应链经济、环境的影响,分别基于原始制造商、再制造商承担再制造设计费用构建制造/再制造博弈模型,进一步分析再制造设计费用不同承担方式对两种产品单位零售价格、销售量、单位外包再制造费用、收益、环境、消费者剩余和社会剩余影响,本研究主要得到如下结论:

1) 原始制造商通过外包再制造不仅可以改变再制造出现对其造成的不利影响,还可以通过

外包再制造获得再制造带来的收益.原始制造商与再制造商愿意承担再制造设计费用是有边界.

2) 原始制造商承担再制造设计费时,原始值制造商收益在再制造设计努力程度某一点达到最大,反之负相关;再制造商承担再制造设计费用时,原始制造商收益与单位再制造设计努力程度正相关,再制造商收益在再制造设计努力程度某一点达到最大,在未达到这一点时,其收益与单位再制造设计努力程度正相关,超过这一点时,其收益与单位再制造设计努力程度负相关.

3) 相对于单位新产品对环境造成的影响,单位再制造产品对环境造成的影响大于某一阈值时,再制造不利于降低对环境造成的影响;相对于单位新产品对环境造成的影响,单位再制造产品对环境造成影响小于某一阈值时且再制造设计给单位再制造产品带来收益大于某一阈值时,再制造才有利于降低对环境的影响.单位再制造设计努力程度给单位再制造产品带来收益与给单位新产品带来收益之比大于某一阈值时,再制造设计才会增加消费者剩余.社会剩余不仅受到再制造设计给两种单位产品带来收益有关,还与再制造设计努力程度峰值有关.

参考文献:

- [1]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.
- [2]夏西强. 政府参与下汽车零部件再制造博弈模型研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2015.
Xia Xiqiang. Study on Game Models for Auto Parts Remanufacturing Based on Government Involvement [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2015. (in Chinese)
- [3]邹宗保. 非独立第三方再制造博弈模型研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2016.
Zou Zongbao. Game Models of Interdependent Third-part Remanufacturing [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2016. (in Chinese)
- [4]郑本荣, 杨超, 杨珺, 等. 产品再制造、渠道竞争和制造商渠道入侵[J]. 管理科学学报, 2018, 21(8): 103-116.
Zheng Benrong, Yang Chao, Yang Jun, et al. Product remanufacturing, channel competition and manufacturer encroachment [J]. Journal of Management Sciences in China, 2018, 21(8): 103-116. (in Chinese)
- [5]Örsdemir A, Ziya E K, Parlaktürk A K. Competitive quality choice and remanufacturing [J]. Production and Operations Management, 2014, 23(1): 48-64.
- [6]Steenek D W, Sarin S C. Product design for leased products under remanufacturing [J]. International Journal of Production Economics, 2018, 202(8): 132-144.
- [7]Esenduran G, Kemahllıglu-Ziya E, Swaminathan J M. Impact of take-back regulation on the remanufacturing industry [J]. Production and Operations Management, 2017, 26(5): 924-944.

- [8] Tsai W H. Integrating activity-based costing and revenue management approaches to analyse the remanufacturing outsourcing decision with qualitative factors [J]. *International Journal of Revenue Management*, 2010, 1(4): 367-387.
- [9] Alumur S A, Nickel S, Saldanha-Da-Gama F, et al. Multi-period reverse logistics network design [J]. *European Journal of Operational Research*, 2012, 220(1): 67-78.
- [10] 王能民, 孙青林, 孙林岩. 考虑外包的单产品再制造批量决策 [J]. *运筹与管理*, 2011, 20(5): 162-168.
Wang Nengmin, Sun Qinglin, Sun Linyan. Single-item dynamic lot sizing problem with remanufacturing and outsourcing [J]. *Operations Research and Management Science*, 2011, 20(5): 162-168. (in Chinese)
- [11] Cai M, Fan T J, Zhou H, et al. Research on Supply Chain Coordination Model of Green Remanufacturing with Outsourcing [C]. *International Symposium on Information Science*. Shanghai, 2010.
- [12] Wu C. OEM product design in a price competition with remanufactured product [J]. *Omega*, 2013, 41(2): 287-298.
- [13] 夏西强, 朱庆华. 主动再制造设计下制造/再制造博弈模型研究 [J]. *系统工程学报*, 2018, 33(3): 328-340.
Xia Xiqiang, Zhu Qinghua. Study on game model of manufacture/remanufacture based on designing for remanufacturing [J]. *Journal of Systems Engineering*, 2018, 33(3): 328-340. (in Chinese)
- [14] 夏西强. 政府补贴与再制造设计下原始制造商与再制造商博弈模型 [J]. *系统工程*, 2017, 35(4): 85-90.
Xia Xiqiang. Game model between OEM and remanufacturer based on government subsidy and designing for remanufacturing [J]. *Systems Engineering*, 2017, 35(4): 85-90. (in Chinese)
- [15] 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 Lu, Wang Xianjia, Qian Guisheng, 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. (in Chinese)
- [16] 夏西强, 朱庆华, 赵森林. 政府补贴下制造/再制造竞争机理研究 [J]. *管理科学学报*, 2017, 20(4): 71-83.
Xia Xiqiang, Zhu Qinghua, Zhao Senlin. Competition mechanism of manufacture/remanufacture considering government subsidies [J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2017, 20(4): 71-83. (in Chinese)

Study on the effect of design for remanufacturing on manufacturing /remanufacturing competition based on the outsourcing remanufacturing pattern

XIA Xi-qiang¹, ZHU Qing-hua^{2*}

1. School of Business, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China;

2. Antai College of Economics & Management, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China

Abstract: A game model between an original equipment manufacturer (OEM) and a remanufacturer is established in order to analyze the effect of design for remanufacturing (DfR) on manufacturing/remanufacturing supply chain competition under the outsourcing remanufacturing pattern. Moreover, based on the game model, the effect of different DfR cost sharing modes on the DfR effort level, the collection rate of used products, benefit and environmental impact is analyzed. The main research results are as follows: through outsourcing remanufacturing, the OEM could not only reduce the market competitive advantage of the remanufacturer, but also increase its benefit; DfR could promote the remanufacturer to collect used products and thus improve the collection rate of used products; whether the OEM or the remanufacturer covering the DfR cost, both benefits are maximized at certain different DfR effort levels, in other words, the greater effort of DfR does not always bring the greater benefit; remanufacturing does not always reduce environmental impact, and it is more environmental friendly only when the ratio of environmental impact for unit remanufactured to new products is less than a certain threshold, and the ratio of the DfR brought benefit for unit remanufactured to new products is greater than a certain threshold.

Key words: original equipment manufacturer; remanufacturer; outsourcing remanufacturing; DfR