

基于绿色再制造的废旧产品回收外包决策分析^①

范体军¹, 楼高翔¹, 王晨岚¹, 陈荣秋²

(1. 华东理工大学商学院, 上海 200237; 2. 华中科技大学管理学院, 武汉 430074)

摘要: 基于博弈理论构建了考虑激励因素和不考虑激励因素两种情况下废旧产品回收外包的决策模型, 推导出临界外包成本, 提出废旧产品回收是否外包取决于临界外包成本. 通过算例, 分析了考虑激励因素前后的两个模型中, 再制造产品生产成本节约的变动对外包决策批发价、零售价、回收率、制造商利润以及临界外包成本的影响, 认为对于废旧产品回收外包, 引入激励因素有助于提高废旧产品的回收效率, 提高制造商的收益.

关键词: 再制造; 产品回收; 外包决策; 博弈论

中图分类号: F406.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-9807(2011)08-0008-09

0 引言

目前, 废旧产品对资源和环境的影响日益突出. 以我国为例, 报废产品处理已经到了刻不容缓的地步. 2005年起, 我国汽车的保有量达到3 500万辆, 2010年将达到4 700万辆, 每年报废的汽车将超过200万辆. 同时, 我国每年至少有500万台电视机、400万台冰箱、600万台洗衣机面临报废. 目前约有500万台电脑、上千万部手机已进入淘汰期. 我国政府在2009年3月5日正式颁布了《废弃电器电子产品回收处理管理条例》. 同时, 国家发展改革委员会牵头制定了《汽车零部件再制造试点管理办法》. 所有这些条例的核心是延伸生产者的责任以及必须承担自己报废产品回收的大部分责任.

毫无疑问, 面对社会环境问题以及即将出台的国家相应法律法规, 制造商不得不承担更多的责任和义务, 尽量利用废旧产品的可用资源, 使废旧产品中蕴含的价值得到最大限度的开发和利用, 进行绿色再制造生产.

从运作过程看, 废旧产品的绿色再制造可分为废旧产品回收、预处理(拆卸、润滑等)、再制造、包装销售和进入市场的过程, 废旧产品回收是其运作过程的核心.

然而, 由于制造商自身资源的有限性, 更重要的是还面临着再制造产品的市场需求不确定性, 以及废旧产品的供给不确定性. 在这种情况下, 这些制造商负责废旧产品回收的运作具有相当难度. 近年兴起的业务外包理论与实践为制造商的这种逆向物流运作提供了新思路. 通过业务外包策略, 企业不仅能够降低回收运作成本, 更重要的是大大增强绿色再制造的生产柔性, 缓解其产品市场需求不确定性和供给不确定性带来的运作难题^[1-3]. 基于此思路, 企业迫切需要解决综合利用社会化资源采用业务外包策略进行废旧产品回收.

但是, 在实现废旧产品回收外包的过程中, 其外包的成功与否相当程度取决于外包决策的正确性和科学性, 因而需要研究废旧产品回收的外包

^① 收稿日期: 2009-06-22; 修订日期: 2010-03-05.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(70871038; 71010107011); 国家科技支撑计划资助项目(2006BAB08B01); 教育部人文社会科学基金资助项目(093YJC630071); 上海市教育委员会科研创新重点资助项目(09ZS65); 上海市浦江人才计划; 上海市人才发展基金资助项目(2009018); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目.

作者简介: 范体军(1967—), 男, 湖北洪湖人, 博士, 教授. E-mail: fantijun@yahoo.com.cn

决策问题.

基于绿色再制造的废旧产品回收正引起学者们的极大关注. 由于废旧产品回收是逆向物流活动. 相关研究从逆向物流网络的角度进行. Jayaraman 等^[4]和 Fleischmann 等^[5]研究了再制造环境下的逆向物流网络结构问题, 其中, Fleischmann 等提出了两种废旧产品回收的逆向物流网络, 一种是利用传统的正向物流网络构建逆向物流网络, 另一种是整合正向物流和逆向物流的网络结构. 朱道立等^[6]讨论了简单逆向物流系统和带有回收中心的复杂逆向物流系统, 达庆利等^[7]综述了逆向物流系统结构, 李波等^[8]提出逆向物流网络的多期动态选址方法, 范体军等^[9]研究了废旧产品回收网络系统的优化设计, 提出了相应的优化设计数学模型和计算方法. 但他们的研究没有考虑在外包情况下逆向物流网络结构.

一些学者们也从业务外包视角研究逆向物流相关问题. Meade 和 Sarkis^[10]针对企业逆向物流管理面临的决策: 发展企业内部的逆向物流系统还是寻求与第 3 方逆向物流提供商的合作, 构建了选择和评价第 3 方逆向物流提供商的模型, 但该模型并没有详细地论述外包逆向物流的决策问题. Krumwiede 和 Sheu^[11]提出了第 3 方逆向物流市场进入的决策模型, 该模型有利于希望开展逆向物流业务的公司进行可行性分析. Vlachos 等^[12]基于遗传算法设计了第 3 方物流的集成正向和逆向的动态物流网络, 该研究并没有考虑第 3 方物流提供不同的服务策略问题. Serrato 等^[13]基于 Markov 提出了逆向物流外包决策模型, 该模型仅限于逆向物流外包策略的完全外包和完全内制, 并没有进一步讨论逆向物流的选择性外包策略以及逆向物流外包对于网络优化设计的影响. 尽管 Savaskan 等^[14]定量研究了集成式(生产商负责生产、销售及回收)和分散式(第 3 方负责回

收、销售商负责回收、生产商负责回收 3 种模式)逆向物流下的回收模式和策略, 晏妮娜等^[15]研究了基于第 3 方逆向物流服务提供商从事物料回收的多级闭环供应链模型, 但他们的研究没有从外包决策角度进行考虑.

本文在 Savaskan 提出的回收模式基础上, 基于博弈理论构建在未考虑激励和考虑激励两种情况下的废旧产品回收外包的决策模型, 推导出临界外包成本, 提出废旧产品回收是否外包取决于临界外包成本. 在此基础上, 通过算例, 比较两种情况的相关要素. 分析了考虑激励因素前后的两个模型中, 再制造产品生产成本节约的变动对外包决策批发价、零售价、回收率、制造商利润以及临界外包成本的影响. 研究有助于降低企业外包废旧产品回收业务的风险, 提高相应的收益, 增强企业的竞争能力.

1 废旧产品回收模式及符号说明

1.1 基于绿色再制造的废旧产品回收模式

根据中国目前的基于绿色再制造的废旧产品回收现状, 制造商主导下的废旧产品回收模式主要通过两种方式——基于整合的回收模式(简称 R 模式)和基于外包的回收模式(简称 3P 模式).

1) 基于整合的回收模式(R 模式) 该模式如图 1 所示, 制造商通过整合自己的正向物流和逆向物流渠道, 通过销售商完成废旧产品的回收和运输工作, 并付给销售商单位补偿费用, 然后进行废旧产品的再制造. 在该模式中, 为使废旧产品逆向物流顺畅地流回到制造商, 制造商只能在销售商利润最大化的条件下追求自身利益最大. 作为供应链成员的销售商负责产品销售和废旧产品的回收工作, 其决策是决定最优销售价格和废旧产品最优回收率.



图 1 基于整合的回收模式(R 模式)

Fig. 1 Model R with retail collecting used products (Model R)

2) 基于外包的回收模式(3P 模式) 该模式如图 2 所示, 制造商选择专业逆向物流第 3 方来完成

回收业务. 选择该模式时, 第 3 方回收商提供专业回收和运输服务, 并向制造商收取外包交易费和回收

费. 根据废旧产品在逆向供应链中的流动顺序, 制造商只能在回收商利润最大化条件下追求自身利益

最大. 销售商只负责产品的销售, 并根据制造商提供批发价决定最优零售价格使自身收益最大.

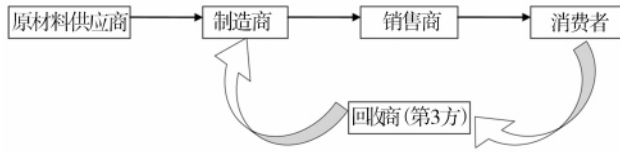


图2 基于外包的回收模式(3P模式)

Fig. 2 Model 3P with third party collecting used products (Model 3P)

1.2 符号说明

- c_m : 制造商生产单位新产品的成本;
- c_r : 制造商通过回收的废旧产品再制造生产出单位新产品的成本;
- c : 产品制造的平均成本 $c = c_m(1 - \tau) + c_r \tau = c_m - \Delta\tau$;
- τ : 废旧产品的回收比率. 通过回收的旧产品数量和消费者需求量之比表示 $0 \leq \tau \leq 1$;
- g : 由第3方回收商回收旧产品时, 制造商回购单位旧产品的价格;
- p : 单位新产品的售价;
- ω : 单位产品的批发价格;
- a : 回收单位废旧产品的可变成本 $a < g$;
- $D(p)$: 市场对该新产品的需求量, 假定其需求是产品价格 p 的函数.
- Π_j^i : 在供应链模型 i 中成员 j 的利润函数, 其中 i 可以为 R 或 3P, 分别表示由零售商和第3方回收商来回收废旧产品的模型, 而 j 也可以为 R 和 3P.
- e : 制造商外包回收业务时支付第3方回收商的固定费用.

1.3 假设条件

研究基于如下的假设.

- 1) 整个再制造供应链中, 其成员有制造商、销售商、消费者以及回收商. 该运作模式是基于制造商主导, 即制造商决定批发价, 及其旧产品回收业务是制造商自身还是由销售商, 或外包给第3方来完成.
- 2) 利用废旧产品再制造单位新产品的成本小于利用原材料制造单位新产品的成本, 即 $c_r < c_m$.
- 3) 根据 Savaskan 等采用的成本结构函数, 废旧产品的回收比率 τ (回收的旧产品和需求的比例) 是回收活动投入成本的函数, 表示为 $\tau =$

成本 K 表示废旧产品回收和宣传等活动所设计的规模, 是个足够大的常量. 同时, 其他学者 (如 Fruchter 和 Kalish^[16] Zhao^[17]) 也用该类似函数描述消费者保留与产品关注关系的广告效用. 这样, 使得 $C_f = K\tau^2$; 而回收单位旧产品的可变成本为 a , 同样 $a < \Delta$ ($\Delta = c_m - c_r$), 即假定产品回收有利可图.

- 4) 各成员完全竞争, 享有充分信息.
- 5) 消费者需求是价格的减函数, 设为线性函数, 即 $D(p) = \phi - \beta p$ ($\phi > 0, \beta > 0$), 且需求函数恒大于 0.
- 6) 制造商外包回收废旧产品业务的决策取决于其自身收益的最大化, 不考虑企业核心竞争力、商业信息安全以及第3方服务的质量保证等其他影响外包决策的因素.

2 不考虑激励的再制造废旧产品回收外包决策

2.1 废旧产品回收的博弈模型及优化

2.1.1 3P 模式下的博弈分析

在制造商选择外包废旧产品回收业务的情况下, 回收商决策回收率, 制造商决策批发价和外包交易费用.

回收商的利润可以表示为

$$\Pi_{3P}^{3P} = g\tau(\phi - \beta p) + e - K\tau^2 - a\tau(\phi - \beta p) \tag{1}$$

$$\Pi_R^{3P} = (p - \omega)(\phi - \beta p)$$

由 $\frac{\partial \Pi_{3P}^{3P}}{\partial \tau} = 0, \frac{\partial \Pi_R^{3P}}{\partial p} = 0$ 可以得到

$$\tau^{*3P} = \frac{(\phi - \beta p^{*3P})(g - a)}{2K}$$

$$p^{*3P} = \frac{\phi + \beta\omega}{2\beta} \tag{2}$$

由 $\frac{\partial^2 \Pi_{3P}^{3P}}{\partial \tau^2} = -2K < 0$, $\frac{\partial^2 \Pi_R^{3P}}{\partial p^2} = -2\beta < 0$ 可知,

第 3 方回收商和零售商的决策问题有唯一最大值, 且相应的最大值点即为式 (2)。

而制造商的利润可以表示为

$$\Pi_M^{3P} = (\omega - c)(\phi - \beta p) - g\tau(\phi - \beta p) - e \quad (3)$$

将式 (2) 带入式 (3) 并由 $\frac{\partial \Pi_M^{3P}}{\partial \omega} = 0$, $\frac{\partial \Pi_M^{3P}}{\partial g} =$

$$H = \begin{pmatrix} \frac{\partial^2 \Pi_M^{3P}}{\partial g^2} & \frac{\partial^2 \Pi_M^{3P}}{\partial g \partial \omega} \\ \frac{\partial^2 \Pi_M^{3P}}{\partial \omega \partial g} & \frac{\partial^2 \Pi_M^{3P}}{\partial \omega^2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{(\phi - \beta\omega)^2}{4K} & \frac{-\beta(\Delta + a - 2g)(\phi - \beta\omega)}{4K} \\ \frac{-\beta(\Delta + a - 2g)(\phi - \beta\omega)}{4K} & \frac{-4k\beta + (\Delta - g)(g - a)\beta^2}{4K} \end{pmatrix}$$

那么, 在驻点处的行列式值为

$$|H| = \frac{(\phi - \beta\omega)^2 \{4K\beta - [(\Delta - a)^2 - 3(\Delta - g)(g - a)]\beta^2\}}{16K^2} > \frac{(\phi - \beta\omega)^2 \{4K\beta - [(\Delta - a)^2 - 3(\Delta - a)(\Delta - a)]\beta^2\}}{16K^2}$$

$$= \frac{(\phi - \beta\omega)^2 [4K\beta + 2(\Delta - a)^2]}{16K^2} > 0,$$

且 $\frac{\partial^2 \Pi_M^{3P}}{\partial g^2} = -\frac{(\phi - \beta\omega)^2}{4K} < 0$, 从而制造商的决策

问题有唯一最大值, 且式 (4) 即为最优回收价和最优批发价格。

结合式 (1) - 式 (4), 得第 3 方回收商的最大利润和制造商的最大利润分别为

$$\Pi_{3P}^{3P*} = \frac{\left[\frac{(\phi - \beta c_m)^2}{16\beta} \right] \frac{\beta(\Delta - a)^2}{16K}}{\left[1 - \frac{\beta(\Delta - a)^2}{16K} \right]^2} + e \quad (5)$$

$$\Pi_M^{3P*} = \frac{(\phi - \beta c_m)^2}{1 - \frac{\beta(\Delta - a)^2}{16K}} - e \quad (6)$$

从式 (5) 可以看出, 第 3 方回收商的利润始终是大于零。这样, 所以制造商进行外包决策时, 主要考虑制造商自身的利润最大化, 就可以达到制造商和外包商双赢的局面。

2.1.2 R 模式下的博弈分析

根据 Savaskan 等的结论, 在 R 模式下, 制造商作为 Stackelberg 博弈的主导者, 在利益最大化前提下, 会选择通过零售商来回收废旧产品。在这种

0 得到

$$g^{*3P} = \frac{a + \Delta}{2},$$

$$\omega^{*3P} = \frac{\phi + \beta c_m}{2\beta} -$$

$$\frac{\phi - \beta c_m}{2\beta} \left[\frac{\beta(g - a)(\Delta - g)}{4K} \right] \quad (4)$$

根据 Hessian 矩阵

情况下的相关参数如下。

制造商的利润函数为

$$\Pi_M^R = (\phi - \beta p)(\omega - c) - g\tau(\phi - \beta p) \quad (7)$$

销售商的利润函数为

$$\Pi_R^R = (\phi - \beta p)(p - \omega) + g\tau(\phi - \beta p) - K\tau^2 - a\tau(\phi - \beta p) \quad (8)$$

由 $\partial \Pi_R^R / \partial p = 0$, $\partial \Pi_R^R / \partial \tau = 0$ 分别得

$$\tau^{*R} = \frac{(\phi + \beta p^*)(g - a)}{2K} \quad (9)$$

$$p^{*R} = \frac{\phi + \beta[\omega - (g - a)\tau^*]}{2\beta} \quad (10)$$

Hessian 矩阵

$$H = \begin{pmatrix} \frac{\partial^2 \Pi_R^R}{\partial p^2} & \frac{\partial^2 \Pi_R^R}{\partial p \partial \tau} \\ \frac{\partial^2 \Pi_R^R}{\partial \tau \partial p} & \frac{\partial^2 \Pi_R^R}{\partial \tau^2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -2\beta & -\beta(g - a) \\ -\beta(g - a) & -2K \end{pmatrix}$$

在驻点处的行列式值

$$|H| = 4K\beta - \beta^2(g - a)$$

由于 K 为足够大的常量, 知 $|H| > 0$, 且

$\frac{\partial^2 \Pi_R^R}{\partial p^2} = -2\beta < 0$ 从而零售商的决策问题有唯一

最大值,且式(9)和式(10)为最优回收率和最优销售价格.同理可证,制造商的利润函数为凹函数,有唯一最大解.

利用目标函数凹性,可以计算出

$$\omega^*_{R} = \frac{\phi + \beta c_m}{2\beta} - \frac{(\Delta - g)(g - a)(\phi - \beta c_m)}{2[4K - \beta(\Delta - a)(g - a)]} \quad (11)$$

制造商的最大利润为

$$e^c = \frac{2K(\phi - \beta c_m)^2(\Delta - a)(\Delta + 3a - 4g)}{(16K)^2 - \beta(\Delta - a)(\Delta + 4g - 5a) + 4\beta^2(\Delta - a)^3(g - a)} \quad (14)$$

可以得出如下的推论.

1) 当 $e > e^c$ 时,则 $\Pi_M^{3P^*} > \Pi_M^{R^*}$. 在这种情况下,制造商选择外包方式进行回收废旧产品将获得更多的利润.那么作为 Stackelberg 博弈主导者,制造商为了追求利润最大化,将会选择将回收废旧产品业务外包给第 3 方回收商的 3P 模式,放弃整合正向物流、由零售商来完成回收业务的 R 模式.

2) 当 $e < e^c$ 时,则 $\Pi_M^{3P^*} < \Pi_M^{R^*}$. 在这种情况下,制造商选择放弃外包方式进行回收废旧产品将获得更多的利润.那么制造商为了追求利润最大化,将会选择由零售商来完成回收业务的 R 模式,而放弃将回收废旧产品业务外包给第 3 方回收商的 3P 模式.

3) 当 $e = e^c$ 时,则 $\Pi_M^{3P^*} = \Pi_M^{R^*}$. 在这种情况下,制造商可以自由选择是由零售商来完成回收业务的 R 模式,或者是将回收废旧产品业务外包给第 3 方回收商的 3P 模式.

4) 当 $c_m > \phi/\beta$ 时, $\partial e^c/\partial c_m > 0$, 临界外包成本是制造成本的增函数,随着制造成本的增加,临界外包成本增大;而当 $c_m < \phi/\beta$ 时, $\partial e^c/\partial c_m < 0$, 临界外包成本是制造成本的减函数,临界外包成本将随着制造成本的增加而相应的减少.

(5) $\partial e^c/\partial \Delta < 0$, 临界外包成本是 Δ 的减函数.也就是说,当单位再制造产品成本相比于制造单位新产品的成本越低时,那么临界外包成本就越低,制造商更愿意选择将回收废旧产品业务外包给第 3 方回收商.这与实际运作中的观点一致.制造商在再制造产品成本越低,越愿意回收废旧产品进行绿色再制造,而再制造需要的大规模回

$$\Pi_M^{R^*} = \frac{\frac{(\phi - \beta c_m)^2}{8\beta}}{1 - \frac{\beta(\Delta - a)(g - a)}{4K}} \quad (12)$$

销售商的最大利润为

$$\Pi_R^{R^*} = \frac{(\phi - \beta c_m)^2}{16\beta \left[1 - \frac{\beta(\Delta - a)^2}{4K} \right]} \quad (13)$$

2.2 废旧产品回收的外包决策分析

根据前面阐述的 R 模式和 3P 模式优化结果,令外包临界成本为 e^c , 则有

收废旧产品则需要更专业化的回收商来完成;而从回收商角度,由于回收业务的批量增大,回收商也愿意以更低的外包成本来接受合同.

3 考虑激励的再制造废旧产品回收外包决策

为了提高废旧产品的回收效率,本文运用 Laffont 和 Tirole 的激励理论^[18],引入激励契约,假定激励费用是废旧产品回收率的函数,表示成 $F(\tau)$.仍考虑制造商作为 Stackelberg 博弈的主导者,进行外包决策.为了区分前述的 R 模式和 3P 模式,我们用 R^1 表示引入激励契约后基于整合的回收模式,用 $3P^1$ 表示引入激励契约后的基于外包的回收模式.

在 R^1 模式下,销售商的利润函数可以表示成

$$\Pi_R^{R^1} = (\phi - \beta p)(p - \omega) + g\tau(\phi - \beta p) - K\tau^2 - a\tau(\phi - \beta p) + F(\tau) \quad (15)$$

制造商的利润函数可以表示成

$$\Pi_M^{R^1} = (\phi - \beta p)(\omega - c) - g\tau(\phi - \beta p) - F(\tau) \quad (16)$$

其中 $F(\tau)$ 代表契约中规定的由于销售商回收效率提高而从制造商获得奖励.设激励契约 $F(\tau)$ 是关于回收率的线型函数,其二阶以上的导数为零.

Hessian 矩阵

$$H = \begin{pmatrix} \frac{\partial^2 \Pi_R^{R^1}}{\partial p^2} & \frac{\partial^2 \Pi_R^{R^1}}{\partial p \partial \tau} \\ \frac{\partial^2 \Pi_M^{R^1}}{\partial \tau \partial p} & \frac{\partial^2 \Pi_M^{R^1}}{\partial \tau^2} \end{pmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} -2\beta & -\beta(g-a) \\ -\beta(g-a) & -2K \end{bmatrix}$$

在驻点处的行列式值 $|H| = 4K\beta - \beta^2(g-a)$, 由于 K 为足够大的常量, 知 $|H| > 0$, 且

$$\frac{\partial^2 \Pi_R^{R1}}{\partial p^2} = -2\beta < 0$$

因此, 销售商的利润函数为凹函数, 有唯一最大解。同理可证制造商的利润函数也为凹函数, 有唯一最大解。

利用目标函数凹性, 可以计算出

$$\tau_1^{*R} = \frac{(g-a)(\phi - \beta p_M^{*R}) - F'(\tau)}{2K} \quad (17)$$

$$p_1^{*R} = \frac{\phi + \beta\omega - \tau_1^{*R}\beta(g-a)}{2\beta} \quad (18)$$

$$\omega_1^{*R} = \frac{\phi}{2\beta} - \frac{(\Delta-g)(g-a)\phi + 4K - \beta(g-a)^2}{2[4K - \beta(\Delta-a)(g-a)]} + \frac{4K\beta(\Delta+2a-3g) + \beta^2(g+\Delta-2a)}{4K[4K - \beta(\Delta-a)(g-a)]} F'(\tau) \quad (19)$$

将最优值 p_1^{*R} 、 τ_1^{*R} 和 ω_1^{*R} 代入利润目标函数, 可以得出

$$\Pi_M^{R1*} = [\omega_M^{R*} - c_m - \frac{(\Delta-g)F'(\tau)}{2K} + \frac{(\Delta-g)(g-a)(\phi - \beta p_M^{R*})}{2K}] \times (\phi - \beta p_M^{R*}) - F(\tau) \quad (20)$$

由于在 3P 模式中, 回收商利润已经考虑了与回收率相关的激励问题, 即其利润的来源于制造商支付的固定费用和根据回收量而定的变动费用。这样, 在 3P¹ 模式下, 假定作为考虑激励契约的问题, 制造商提高支付给回收商的固定费用, 即从原来的 e 提高到 e_1 。那么根据 3.1 中的 3P 模式分析结果, 有如下结果

在 3P¹ 模式下, 制造商的收益为

$$\Pi_M^{3P*} = \frac{(\phi - \beta c_m)^2}{8\beta} - e_1 \quad (21)$$

若在考虑激励因素的情况下的外包临界成本为 e_1^c , 其成本结构如下

$$e_1^c = \frac{(\phi - \beta c_m)^2}{8\beta} - [\omega_M^{R*} - c_m - \frac{(\Delta-g)F'(\tau)}{2K}] +$$

$$\frac{(\Delta-g)(g-a)(\phi - \beta p_M^{R*})}{2K} \times$$

$$(\phi - \beta p_M^{R*}) + F(\tau) \quad (22)$$

根据外包临界成本, 得出如下推论。

1) 当 $e_1 > e_1^c$ 时, $\Pi_M^{3P1*} < \Pi_M^{R1}$, 这时制造商将放弃外包方式进行回收废旧产品, 选择由零售商来完成回收业务的 R 模式。

(2) 当 $e_1 < e_1^c$ 时, $\Pi_M^{3P1*} > \Pi_M^{R1}$, 这时制造商将选择用外包方式进行回收废旧产品的 3P 模式, 放弃由零售商来完成回收业务的 R 模式。

(3) 当 $e_1 = e_1^c$ 时, $\Pi_M^{3P1*} = \Pi_M^{R1}$, 这时制造商可以选择外包方式进行回收废旧产品的 3P 模式或者是由零售商来完成回收业务的 R 模式。

4 考虑激励因素前后废旧产品回收的外包决策比较分析

为了进一步研究激励因素对外包决策策略的影响, 假设各模型中的参数值如下: $\varphi = 2000$, $\beta = 0.8$, $\mu = 20$, $g = 30$, $K = 3000$ 。根据上述参数和公式, 通过算例, 分析考虑激励因素前后两种情况再制造产品的生产成本节约 Δ 的变动, 对外包决策批发价、零售价、回收率、制造商利润以及临界外包成本的影响。

1) Δ 对制造商利润和临界外包成本的影响

Δ 表示单位新产品与再制造产品生产成本之间的差额, 即再制造单位产品可节约的生产成本。图 3 分析了 Δ 对制造商利润 (Π_M^{R*} 和 Π_M^{R1*}) 和临界外包成本 (e^c 和 e_1^c) 的影响。从图中可以看出, 当 Δ 增加时, 考虑激励因素前后的制造商利润 Π_M^{R*} 和 Π_M^{R1*} 都近似线性增长, 速度几乎一致, 所以再制造节省的单位成本越多, 制造商所得的利润也会相应增加。而在考虑激励因素前后, 外包临界曲线几乎完全重合。并且当 Δ 增长时, e^c 和 e_1^c 都相应增长。也就是说 Δ 对制造商利润 (Π_M^{R*} 和 Π_M^{R1*}) 和临界外包成本 (e^c 和 e_1^c) 的影响在考虑激励因素前后的变化不是很明显。

2) Δ 对最优批发价和零售价的影响

再制造产品的单位生产成本节约 Δ 对最优批发价和零售价的影响见图 4。通过图 4 可以看出, 当 Δ 增长时, 考虑激励因素前后的 ω_M^{R*} 、 p_M^{R*} 、 ω_M^{R1*}

和 $p_{M,j}^{R*}$ 的值都会相应减小,而考虑激励因素后 $\omega_{M,j}^{R*}$ 和 $p_{M,j}^{R*}$ 之间的差价比考虑激励因素前 ω^{*R} 和 p^{*R} 之间差价要大. 因此当引入激励因素之后,零售商从批发价和零售价之间差价所获得的利润也会大大增加.

3) Δ 对最优回收率的影响

再制造产品的单位生产成本节约 Δ 在考虑激励因素前后对最优回收率的影响见图 5. 从该图中可以看出,考虑激励因素后,回收率会大幅提高,甚至会高达 99%,接近逆向物流的理想状态. 同时可以看出再制造产品的单位生产成本节约 Δ 越多,最优回收率越高.

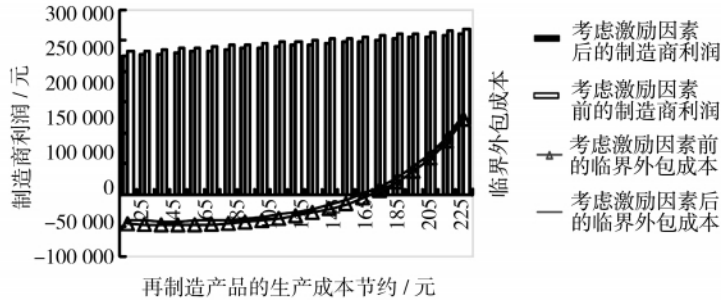


图 3 再制造产品的生产成本节约 Δ 对制造商利润以及外包临界成本的影响

Fig. 3 The effects of the unit cost savings of remanufacturing products on manufacturer's profit and critical outsourcing costs

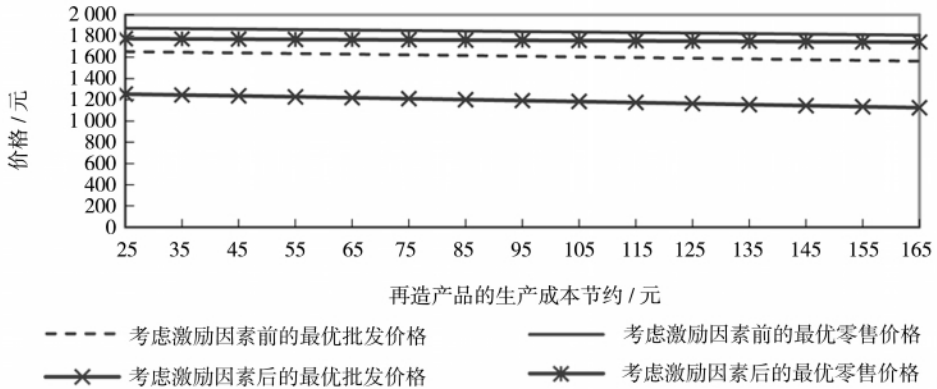


图 4 再制造产品的生产成本节约 Δ 对最优批发价和零售价的影响

Fig. 4 The effects of the unit cost savings of remanufacturing products on the wholesale price and retail price

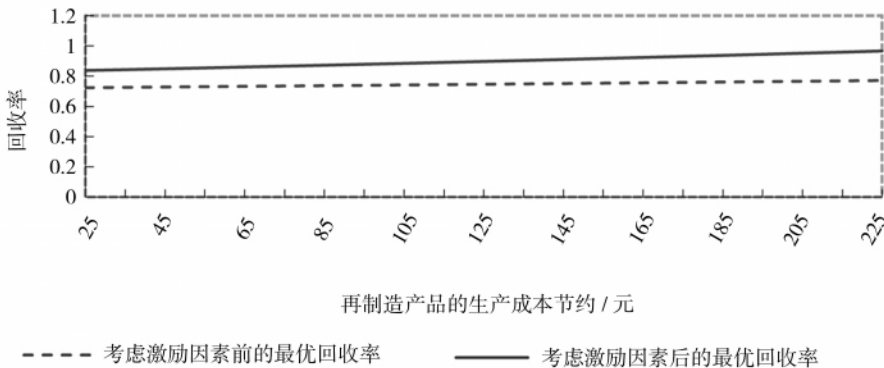


图 5 再制造产品的生产成本节约 Δ 对最优回收率的影响

Fig. 5 The effects of the unit savings of remanufacturing products on optimal returns rate

5 结束语

废旧产品回收是实现绿色再制造的关键运作环节,是推进循环经济的重要保障。通过外包策略,制造商能够降低废旧产品回收运作成本,并提高其废旧产品再制造的生产柔性。本文构建了考虑激励因素前后两种情况下废旧产品回收外包的

决策模型,推导出临界外包成本,提出废旧产品回收是否外包取决于临界外包成本。通过算例,分析了考虑激励因素前后的两个模型,认为:对于废旧产品回收外包,引入激励因素有助于提高废旧产品的回收效率,提高制造商的收益。该研究有助于企业通过整合社会资源能力,充分利用废旧产品资源,降低材料消耗,节约能源,保护环境,提高废旧产品绿色再制造的收益。

参考文献:

- [1] Wang L M, Liu L W, Wang Y J. Capacity decisions and supply price games under flexibility of backward integration[J]. *International Journal of Production Economics*, 2007, 110(1/2): 85-96.
- [2] Tsai W H, Lai C W. Outsourcing or capacity expansions: Application of activity-based costing model on joint products decisions[J]. *Computers & Operations Research* 2007, 34(12): 3666-3681.
- [3] Sinha S, Sarmah S P. Supply-chain coordination model with insufficient production capacity and option for outsourcing[J]. *Mathematical and Computer modeling*, 2007, 46(11/12): 1442-1452.
- [4] Jayaraman V, Guide Jr V D R, Srivastava R. A closed-loop logistics model for remanufacturing[J]. *Journal of the Operational Research Society*, 1999, 50(5): 497-508.
- [5] Fleischmann M, Beullens P, Bloemhof-Ruwaard J M and Van Wassenhove L N. The impact of product recovery on logistics network design[J]. *Production and Operations Management*, 2001, 10(2): 156-173.
- [6] 朱道立, 崔益明, 陈姝妮. 逆向物流系统和技术[J]. *复旦大学学报(自然科学版)*, 2003, 42(5): 673-679.
Zhu Dao-li, Cui Yi-ming, Chen Shu-ni. Reverse logistics systems and technique[J]. *Journal of Fudan University(Natural Science)*, 2003, 42(5): 673-679. (in Chinese)
- [7] 达庆利, 黄祖庆, 张钦. 逆向物流系统结构研究的现状及展望[J]. *中国管理科学*, 2004, 12(1): 131-138.
Da Qing-li, Huang Zu-qing, Zhang Qin. Current and future studies on structure of the reverse logistics system: A review[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2004, 12(1): 131-138. (in Chinese)
- [8] 李波, 曾成培. 一种逆向物流网络的多期动态选址方法[J]. *管理科学学报*, 2008, 11(5): 76-84.
Li Bo, Zeng Cheng-pei. Method of multi-period dynamic location in reverse logistic network[J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2008, 11(5): 76-84. (in Chinese)
- [9] 范体军, 常香云, 陈荣秋等. 大型废旧产品回收网络的数学模型与算法研究[J]. *管理科学学报*, 2009, 12(4): 94-102.
Fan Ti-jun, Chang Xiang-yun, Chen Rong-qiu, et al. Research on mathematical model and algorithm for large composite recovery network of used products[J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2009, 12(4): 94-102. (in Chinese)
- [10] Meade L, Sarkis J. A conceptual model for selecting and evaluating third-party reverse logistics providers[J]. *Supply Chain Management: An International Journal*, 2002, 7(5): 283-295.
- [11] Krumwiede D W, Sheu C. A model for reverse logistics entry by third-party providers[J]. *The International Journal of Management Sciences*, 2002, 30(5): 325-333.
- [12] Vlachos D, Georgiadis P, Iakovou E. A genetic algorithm-based heuristic for the dynamic integrated forward/reverse logistics network for 3PLs[J]. *Computers & Operations Research*, 2007, 34(2): 346-366.
- [13] Serrato M, Ryan S M, Gaytan J. A Markov decision model to evaluate outsourcing in reverse logistics[J]. *International Journal of Production Research*, 2007, 45(18): 4289-4315.
- [14] Savaskan R C, Bhattacharya S, Wassenhove L N Van. Closed-loop supply chain models with product remanufacturing[J]. *Management Science*, 2004, 50(2): 239-252.
- [15] 晏妮娜, 黄小原. 基于第3方逆向物流的闭环供应链模型及应用[J]. *管理科学学报*, 2008, 11(4): 83-93.
Yan Ni-na, Huang Xiao-yuan. A closed-loop supply chain model and its application[J]. *Journal of Management Sciences*, 2008, 11(4): 83-93.

- Yan Ni-na , Huang Xiao-yuan. Models of closed-loop supply chain with third-party reverse logistics and their applications [J]. Journal of Management Sciences in China , 2008 , 11(4) : 83 - 93. (in Chinese)
- [16] Fruchter G E , Kalish S. Closed-loop advertising strategies in a duopoly [J]. Management Science , 1997 , 43(1) : 54 - 63.
- [17] Zhao Z. Raising awareness and signaling quality to uninformed consumers: A price-advertising model [J]. Marketing Science , 2000 , 19(4) : 390 - 396.
- [18] Laffont J J , Tirole J. A Theory of Incentives in Procurement and Regulation [M]. Cambridge , MA: MIT Press , 1993.

Analysis of outsourcing decision-making on used products collection for green remanufacturing

FAN Ti-jun¹ , LOU Gao-xiang¹ , WANG Chen-lan¹ , CHEN Rong-qiu²

1. School of Business , East China University of Science and Technology , Shanghai 200237 , China;
2. College of Management , Huazhong University of Science and Technology , Wuhan 430074 , China

Abstract: Outsourcing will be helpful for manufacturers to reduce collecting cost of used products and to improve the flexibility of remanufacturing. This paper presents outsourcing decision-making models of used products collection with and without incentive contracts based on game theory. Critical outsourcing cost is derived to make outsourcing decisions of collecting waste products. The effects of the unit cost savings of remanufacturing products on the wholesale price , retail price , returns rate , manufacturer's profit and critical outsourcing costs are compared with examples applied to the two models , and we find that outsourcing collection of waste products with incentive contracts is useful to increase the returns rate and improve the manufacturers' benefit.

Key words: remanufacturing; products returns; outsourcing decision; game theory

(上接第 7 页)

Evolving network model of integrating three mechanisms: Node otherness , uniform node deletion and double preferential attachment

HU Ping , WANG Wen , LIU Zhi-hua

School of Management , Xi'an Jiaotong University , Xi'an 710049 , China

Abstract: The researches on the complex evolving network models have been researched separately based on the mechanisms of node otherness , uniform node deletion or double preferential attachment (DPA) . Nevertheless , these three mechanisms of evolving network exist simultaneously in the real network. This paper established an evolving network model by integrating the three mechanisms. The article performed analytic deductions , calculated the degree distribution , and generalized the scale-free model. Finally , the results show that the comprehensive model has the scale-free feature , and the three evolving mechanisms have different influences on the degree distribution of networks , which were also validated by simulations.

Key words: node otherness; uniform node deletion; DPA; evolving networks