

文章编号:1003-207(2015)07-0068-09

DOI:10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2015.07.009

不同政府决策目标下逆向供应链的奖惩机制研究

王文宾¹, 张雨¹, 范玲玲¹, 何凌云¹, 达庆利²

(1. 中国矿业大学管理学院, 江苏 徐州 221116; 2. 东南大学经济管理学院, 江苏 南京 211189)

摘要:考虑政府的三种决策目标,研究了逆向供应链的政府奖惩机制设计问题。分别建立了有无奖惩机制下的逆向供应链博弈模型,得到了政府奖惩力度的均衡解,并对求解结果进行比较,讨论了管理意义,最后通过算例验证了模型的结论并进一步仿真分析了外生变量对决策变量影响。研究表明:政府奖惩机制不仅能够提高废旧电器电子产品的回收率,还能降低新产品零售价,提高回购价,有利于全社会福利的提高;奖惩力度随着市场容量的增加而提高,政府应根据制造商产品的市场容量大小制定奖惩力度而不是对所有制造商制定统一的奖惩力度;政府应综合考虑全社会福利和废旧产品回收带来的环境效益,这样能较好地提高逆向供应链的回收率。

关键词:政府决策目标;奖惩机制;逆向供应链;回收率

中图分类号:F252 **文献标识码:**A

1 引言

近年来,废旧电器电子产品的回收再利用逐渐得到政府、企业界和学术界的重视。中国《废弃电器电子产品(Waste Electrical and Electronic Equipment, WEEE)回收处理管理条例》从 2011 年 1 月 1 日开始实施,按照发达国家的经验和我国的实际情况,由于电视机、洗衣机、电冰箱、空调和电脑在所有废旧家电中所占的比例最大,处理技术相对成熟,因此将“四机一脑”列入首批回收目录。条例明确规定国家建立废弃电器电子产品处理基金,用于废弃电器电子产品回收处理费用的补贴,电器电子产品制造商应当按照规定履行缴纳义务;国家鼓励电器电子产品制造商自行或者委托零售商、回收商等回收电器电子产品。目前我国与条例配套的《废弃电器电子产品处理基金的征收使用管理办法》正在制定中。另外,来自国外废旧电器电子产品立法的压力也不容忽视。早在 2003 年 2 月,欧盟通过了《报废电器电子设备指令》,要求电器电子设备生产商、进口商和经销商在 2005 年 8 月 13 日后负责回收处理

进入欧盟市场的废弃电器电子产品。这对我国近几年电器电子产品的出口生产商产生了巨大影响。以 2005 年为例,我国近 25% 的家电产品出口到欧盟国家,直接影响金额达 560 亿美元。

国内外有一些文献致力于逆向物流和逆向供应链的研究。达庆利等^[1]论述了逆向物流系统结构研究的现状并展望了未来的研究方向。Kaya^[2]研究了再制造产品与新制造产品部分可替代的决策模型。达庆利^[3]提出,政府法律法规和环保政策对回收再制造的影响是供应链管理领域值得关注的问题。熊中楷等^[4]考虑了受专利保护的原制造商许可第三方再制造的闭环供应链,构建了集中和分散决策的模型。Mitra 和 Webster^[5]探讨了政府的再制造补贴对于制造商和再制造商利润的影响。Chen 和 Sheu^[6]利用微分对策建立了环境规制下制造商的定价模型。Aksen^[7]运用二层规划建立政府补贴制造商的两个模型。Atasu 和 Wassenhove 等^[8]考虑了经济和环境的双重影响,建立了政府、制造商及消费者的博弈模型,政府给予制造商补贴以引导其回收再制造 WEEE,讨论立法有效的条件。Hammond 和 Beullens^[9]考虑了奖励和惩罚参数,用变分不等式建立闭环供应链网络均衡模型。计国君和黄位旺^[10]以条例为背景,比较了企业单独回收和集体回收两种回收责任,得到单独回收责任下制造商更倾向于再制造的结论。汪翼等^[11]研究制造商和分销商责任制,得到两者对供应链的绩效无影响,但通

收稿日期:2013-01-10; 修订日期:2014-02-07

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2013W02);四川循环经济研究中心重点项目(XHJJ-1058)

作者简介:王文宾(1979-),男(汉族),山东诸城人,中国矿业大学管理学院副教授,硕士生导师,研究方向:逆向物流、闭环供应链管理。

过回收可变费用影响收益在供应链成员间分配的结论。王文宾^[12]初步探讨了政府奖惩机制对逆向供应链决策的影响。聂佳佳等^[13]讨论了零售商负责回收情况下政府针对零售商的奖惩机制对逆向供应链的影响。王文宾^[14]将政府对再制造逆向供应链的奖励、惩罚及奖惩机制建模进行比较,论证了奖惩机制在引导废旧产品回收再制造方面的优点与有效性。王文宾^[15]比较了基于回收率和基于回收量的奖惩机制的异同。朱庆华^[16]建立了绿色供应链管理中考虑产品绿色度和政府补贴分析的三阶段博弈模型。Hong^[17]建立了政府与制造商、进口商、销售商群体及回收商的博弈模型,研究了预付费机制下政府对废旧电子产品回收再利用的补贴问题。

以上文献为本文的研究提供了重要借鉴,但除了朱庆华^[16]和 Hong^[17]外,很少有文献考虑政府的决策目标,将政府作为一个博弈方进行建模研究,而朱庆华^[16]和 Hong^[17]的研究主要是针对政府补贴的研究。王文宾等^[12,14-15]和聂佳佳^[13]初步探讨了政府奖惩机制的设计及其对废旧产品回收再利用的影响,然而却没有考虑政府的决策目标,着重探讨奖惩机制能够提高回收率的条件。作为社会主义国家,政府代表全社会的利益,考虑社会福利最大化正是政府的决策目标。

考虑政府决策目标的情况下应设计怎样的奖惩机制才能有效引导逆向供应链?为探讨该问题,在上述文献的基础上,本文以逆向供应链为研究对象,以奖惩力度、回收率及价格变量为主要参数,探讨了无奖惩机制下逆向供应链决策(基准情形)和三种政府决策目标不同的逆向供应链奖惩机制情形。比较并讨论了四种情形下的博弈决策问题,探讨了模型的管理意义,并进一步作了仿真分析,最后总结全文并指出了进一步的研究方向。

2 模型描述与基本假设

2.1 模型描述

考虑政府奖惩机制下逆向供应链的一般结构如图 1 所示。制造商、回收商和消费者构成逆向供应链,政府对制造商回收再制造 WEEE 提供奖惩机制,机制参数主要包括奖惩力度和目标回收率等。制造商生产一种电器电子产品,优先使用 WEEE 生产,当 WEEE 的数量不足时用新材料生产。第三方回收商不仅回收 WEEE,还承担拆解、分拣等处理工作。政府的责任是引导逆向供应链成员积极回收再制造 WEEE,目标是全社会福利最大。奖惩机制

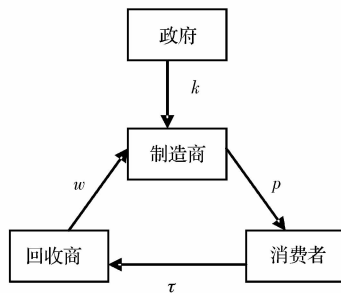


图 1 考虑政府决策目标的逆向供应链的一般结构示意图

针对逆向供应链,如果逆向供应链的实际回收率低于目标回收率,制造商受到政府的经济惩罚,反之,制造商得到政府的经济奖励。

2.2 符号说明

c_n : 制造商采用新材料生产新产品的单位成本;

c_r : 制造商使用回收的 WEEE 生产新产品的单位成本;

c_z : 新产品的成本,由于新产品包含新制造产品和再制造产品,故 $c_z = \tau c_r + (1 - \tau)c_n = c_n - \tau(c_n - c_r)$;

c : 回收商的单位回收成本;

p : 新产品的零售价,是制造商的决策变量之一;

w : 制造商支付给回收商 WEEE 的单位产品回购价;

$D(p)$: $D(p) = \varphi - p$, 新产品的需求函数,其中 φ 为市场潜在需求;

τ : 回收到的 WEEE 占新产品市场需求的比例,是回收商的决策变量, $\tau \in [0, 1]$;

τ_0 : 政府规定的最低回收率(目标回收率),当 $\tau > \tau_0$ 时,政府将给予制造商奖励,当 $\tau < \tau_0$ 时,政府将处罚制造商;

k : 政府对制造商单位回收率的奖惩力度,为使模型有意义,需 $k > 0$ 。

2.3 基本假设

(1) 设制造商生产一件新产品的单位成本大于使用回收产品进行再制造的单位成本,即 $c_n > c_r$, 这表示制造商进行再制造可以节约成本,有利可图,不妨设 $\Delta = c_n - c_r$, 则 $c_z = c_n - \tau\Delta$ 。

(2) τ 与制造商的再制造投资相关,设投资成本 $I = b\tau^2$, b 为回收 WEEE 的难度系数。回收投资成本为回收率的凸函数,这表明随着回收率的增加,回收投资成本急剧增加,也就是说过分的追求高回收

率对制造商来说是不经济的。

(3) 制造商优先利用回收 WEEE 的零部件生产, 不足的部分用新材料生产新产品。这个假设是合理的, 因为政府的奖惩机制引入后, 奖励惩罚两种策略并用, 会对制造商的生产决策产生影响。

(4) 再制造的产品和新制造产品质量相同。除了特别研究两种产品市场细分的文献, 一般文献均做该假设^[12]。

(5) 制造商是逆向供应链的 Stackelberg 领导者, 这一假设与条例的指导思想一致。

2.4 无奖惩机制下逆向供应链决策(基准情形)

根据第 2.2 节的变量定义和基本假设, 基准情形下制造商的决策目标函数为:

$$\max_{p,w} \pi_m = (1-\tau)(\varphi-p)(p-c_n) + \tau(\varphi-p)(p-w-c_r) = (\varphi-p)(p-c_n + \tau\Delta - \tau w) \quad (1)$$

式(1)中制造商的利润包含使用新材料生产和使用回收产品生产两种情况的利润。回收商的决策为:

$$\max_{\tau} \pi_r = \tau(\varphi-p)(w-c) - b\tau^2 \quad (2)$$

因为该情形下制造商是逆向供应链的 Stackelberg 领导者, 故决策顺序为制造商先决策, 回收商根据制造商的决策结果决策。具体决策顺序为: 制造商首先决定零售价, 然后根据零售价决定回购价, 最后回收商根据回购价决定回收率。由逆向归纳法可得:

$$w^s = \frac{\Delta+c}{2} \quad (3)$$

$$p^s = \frac{4b(\varphi+c_n) - \varphi(\Delta-c)^2}{8b - (\Delta-c)^2} \quad (4)$$

$$\tau^s = \frac{(\varphi-c_n)(\Delta-c)}{8b - (\Delta-c)^2} \quad (5)$$

3 奖惩机制下不同政府决策目标的逆向供应链决策

3.1 政府决策目标为逆向供应链成员企业的利润与实施奖惩机制成本之差的情形(情形 2)

奖惩机制的设计如王文宾等^[12-15]相同。模型

$$\pi_g^p = \frac{[4b + (\Delta-c)^2](\varphi-c_n) + 3(\Delta-c)k - b[(\varphi-c_n)(\Delta-c) + 2k]^2}{[8b - (\Delta-c)^2]^2} - \alpha k^2 \quad (12)$$

将式(12)乘以常数不影响函数的凹凸性, 因此考虑将上式乘以 $[8b - (\Delta-c)^2]^2$ 并对 k 求二阶导数得 $d^2\pi_g^p/dk^2 = -8b - 2\alpha[8b - (\Delta-c)^2]^2 < 0$, 因此 π_g^p 有最大值, 对 k 取一阶导数可得政府的奖惩力

的主要不同之处是政府作为博弈方, 本节考虑政府的决策目标函数, 该情况下制造商的决策目标函数为:

$$\max_{p,w} \pi_m = (\varphi-p)(p-c_n + \tau\Delta - \tau w) + k(\tau - \tau_0) \quad (6)$$

回收商的决策目标函数为:

$$\max_{\tau} \pi_r = \tau(\varphi-p)(w-c) - b\tau^2 \quad (7)$$

政府的目标函数为逆向供应链上企业成员的利润与奖惩机制的成本之和的最大化, 逆向供应链上企业成员的利润包括制造商的利润、回收商的利润, 而奖惩机制的成本是指政府实施奖惩机制的固定投入及机制的奖惩额度, 故政府的决策目标为:

$$\max_k \pi_g = \pi_m + \pi_r - k(\tau - \tau_0) - \alpha k^2 = (\varphi-p)[p - c_n + \tau(\Delta-c)] - b\tau^2 - \alpha k^2 \quad (8)$$

其中, $k(\tau - \tau_0) + \alpha k^2$ 为奖惩机制的成本, α 为政府为实施奖惩机制的固定投入成本系数(这种假设在企业成本投入中很常见, 类似的, 政府为了实施奖惩机制, 需要付出监管成本等)。

该情形下共有 k, p, w, τ 四个决策变量, 决策顺序为政府先对 k 进行决策, 接着制造商决定零售价 p , 然后制造商决定回购价 w , 最后回收商根据 w 对回收率 τ 进行决策。这个问题可以看做一个两阶段动态博弈问题, 包括政府与制造商、制造商与回收商的博弈。根据逆向归纳法的思想, 先求制造商与回收商的博弈, 再求政府与制造商的博弈。由制造商与回收商的博弈可得:

$$w^p = \frac{2b(\Delta+c)(\varphi-c_n) + 4bk + c(\Delta-c)k}{4b(\varphi-c_n) + (\Delta-c)k} \quad (9)$$

$$p^p = \frac{4b(\varphi+c_n) - \varphi(\Delta-c)^2 - (\Delta-c)k}{8b - (\Delta-c)^2} \quad (10)$$

$$\tau^p = \frac{(\varphi-c_n)(\Delta-c) + 2k}{8b - (\Delta-c)^2} \quad (11)$$

将式(9)一式(11)代入政府的目标函数式(8)得:

度为:

$$k^p = \frac{2b(\Delta-c)(\varphi-c_n)}{4b - (\Delta-c)^2 + \alpha[8b - (\Delta-c)^2]^2} \quad (13)$$

将 k^p 代入式(9)一式(11)得:

$$w^p = \frac{2b(\Delta + c)(\varphi - c_n)\{4b - (\Delta - c)^2 + \alpha[8b - (\Delta - c)^2]^2\} + 2b[4b + c(\Delta - c)](\Delta - c)(\varphi - c_n)}{4b(\varphi - c_n)\{4b - (\Delta - c)^2 + \alpha[8b - (\Delta - c)^2]^2\} + 2b(\Delta - c)^2(\varphi - c_n)} \quad (14)$$

$$p^p = \frac{4b(\varphi + c_n) - \varphi(\Delta - c)^2}{8b - (\Delta - c)^2} - \frac{2b(\Delta - c)^2(\varphi - c_n)}{[8b - (\Delta - c)^2]\{4b - (\Delta - c)^2 + \alpha[8b - (\Delta - c)^2]^2\}} \quad (15)$$

$$\tau^p = \frac{(\varphi - c_n)(\Delta - c)}{8b - (\Delta - c)^2} + \frac{4b(\Delta - c)(\varphi - c_n)}{[8b - (\Delta - c)^2]\{4b - (\Delta - c)^2 + \alpha[8b - (\Delta - c)^2]^2\}} \quad (16)$$

3.2 政府目标函数为全社会福利的情形(情形 3)

该情形下,制造商和回收商的决策目标和与情形 2 相同,而政府的目标函数为全社会福利最大化。这是因为光考虑企业的利益设计的奖惩机制不一定能代表全社会的经济利益。全社会的福利是收益与成本之差,收益包括制造商的利润、回收商的利润、消费者剩余,成本是指政府实施奖惩机制的固定投入及机制的奖惩额度,故政府的决策目标为:

$$\begin{aligned} \max_k \pi_g &= \pi_m + \pi_r - k(\tau - \tau_0) - ak^2 + (\varphi - p)^2 / 2 \\ &= (\varphi - p) \left[\frac{(\varphi + p)}{2} - c_n + \tau(\Delta - c) \right] - b\tau^2 - ak^2 \end{aligned} \quad (17)$$

其中 $(\varphi - p)^2 / 2$ 为消费者剩余。

$$\pi_g^w = \frac{3 * [4b(\varphi - c_n) + (\Delta - c)k][4b(\varphi - c_n) + (\Delta - c)k] - 2b[(\varphi - c_n)(\Delta - c) + 2k]^2}{2[8b - (\Delta - c)^2]^2} - ak^2 \quad (21)$$

将式(21)乘以常数不影响函数的凹凸性,因此考虑将上式乘以 $2[8b - (\Delta - c)^2]^2$ 并对 k 求二阶导数得 $d^2\pi_g^w/dk^2 = -8\alpha[8b - (\Delta - c)^2]^2 < 0$, 因此 π_g^w 有最大值,对 k 取一阶导数可得政府的奖惩力度为:

$$w^w = \frac{8b(\Delta + c)\{4b - (\Delta - c)^2 + \alpha[8b - (\Delta - c)^2]^2\} + 8b(\Delta - c)[4b + c(\Delta - c)]}{8b\{4b - (\Delta - c)^2 + \alpha[8b - (\Delta - c)^2]^2\} + 8b(\Delta - c)^2} \quad (23)$$

$$p^w = \frac{4b(\varphi + c_n) - \varphi(\Delta - c)^2}{8b - (\Delta - c)^2} - \frac{(\varphi - c_n)(\Delta - c)}{2[8b - (\Delta - c)^2]} * \frac{8b(\Delta - c)}{4b - (\Delta - c)^2 + \alpha[8b - (\Delta - c)^2]^2} \quad (24)$$

$$\tau^w = \frac{(\varphi - c_n)(\Delta - c)}{8b - (\Delta - c)^2} + \frac{8b(\varphi - c_n)(\Delta - c)}{[8b - (\Delta - c)^2]\{4b - (\Delta - c)^2 + \alpha[8b - (\Delta - c)^2]^2\}} \quad (25)$$

3.3 政府目标函数为全社会福利与环境效益之和的情形(情形 4)

该情形下,制造商和回收商的决策目标和与情形 2 相同,而政府的目标函数为全社会的福利与环境效益之和的最大化,这是因为光考虑全社会的福利设计的奖惩机制仅代表全社会的经济利益,而没有考虑环境影响,本节我们进一步考虑环境效益设计奖惩机制。全社会的福利与情形 3 的假设相同,环境效益为回收的 WEEE 带来的环境收益,故政府

该情形下的决策顺序与情形 2 相同,由逆向归纳法可得:

$$w^w = \frac{2b(\Delta + c)(\varphi - c_n) + 4bk + c(\Delta - c)k}{4b(\varphi - c_n) + (\Delta - c)k} \quad (18)$$

$$p^w = \frac{4b(\varphi + c_n) - \varphi(\Delta - c)^2 - (\Delta - c)k}{8b - (\Delta - c)^2} \quad (19)$$

$$\tau^w = \frac{(\varphi - c_n)(\Delta - c) + 2k}{8b - (\Delta - c)^2} \quad (20)$$

将式(18)一式(20)代入政府的目标函数式(17)得:

$$k^w = \frac{\varphi - c_n}{2} * \frac{8b(\Delta - c)}{4b - (\Delta - c)^2 + \alpha[8b - (\Delta - c)^2]^2} \quad (22)$$

将 k^w 代入式(18)一式(20)得:

的决策目标为

$$\begin{aligned} \max_k \pi_g &= \pi_m + \pi_r - k(\tau - \tau_0) - ak^2 + \beta x(\varphi - p) \\ &+ (\varphi - p)^2 / 2 \\ &= (\varphi - p) \left[(\varphi + p) / 2 - c_n + \tau(\beta + \Delta - c) \right] - b\tau^2 - ak^2 \end{aligned} \quad (26)$$

其中 $\beta x(\varphi - p)$:回收 WEEE 带来的环境效益, β 为回收的 WEEE 带来的环境效益系数。

该情形下的决策思想和顺序与情形 2 相同,根据情形 2 的决策顺序可得:

$$\omega^c = \frac{2b(\Delta + c)(\varphi - c_n) + 4bk + c(\Delta - c)k}{4b(\varphi - c_n) + (\Delta - c)k} \quad \tau^c = \frac{(\varphi - c_n)(\Delta - c) + 2k}{8b - (\Delta - c)^2} \quad (29)$$

(27) 将式(27)一式(29)代入政府的目标函数式(26)

$$p^c = \frac{4b(\varphi + c_n) - \varphi(\Delta - c)^2 - (\Delta - c)k}{8b - (\Delta - c)^2} \quad (28) \quad \text{得:}$$

$$\pi_g^c = \frac{[4b(\varphi - c_n) + (\Delta - c)k]\{3 * [4b(\varphi - c_n) + (\Delta - c)k] + 2\beta[(\varphi - c_n)(\Delta - c) + 2k]\} - 2b[(\varphi - c_n)(\Delta - c) + 2k]^2}{2[8b - (\Delta - c)^2]^2} - \alpha k^2 \quad (30)$$

将式(30)乘以常数不影响函数的凹凸性,因此考虑将上式乘以 $2[8b - (\Delta - c)^2]^2$ 并对 k 求二阶导数得 $d^2\pi_g^c/dk^2 = -8\alpha[8b - (\Delta - c)^2]^2 < 0$, 因此 π_g^c 有最大值,对 k 取一阶导数可得政府的奖惩力度为:

$$k^c = \frac{\varphi - c_n}{2} * \frac{8b(\Delta - c) + \beta[8b + (\Delta - c)^2]}{4b - (\Delta - c)^2 - 2\beta(\Delta - c) + \alpha[8b - (\Delta - c)^2]^2} \quad (31)$$

将 k^c 代入式(27)一式(29)得:

$$\omega^f = \frac{8b(\Delta + c)\{4b - (\Delta - c)^2 - 2\beta(\Delta - c) + \alpha[8b - (\Delta - c)^2]\} + [4b + c(\Delta - c)]\{8b(\Delta - c) + \beta[8b + (\Delta - c)^2]\}}{8b\{4b - (\Delta - c)^2 - 2\beta(\Delta - c) + \alpha[8b - (\Delta - c)^2]\}^2 + (\Delta - c)\{8b(\Delta - c) + \beta[8b - (\Delta - c)^2]\}} \quad (32)$$

$$p^c = \frac{4b(\varphi + c_n) - \varphi(\Delta - c)^2}{8b - (\Delta - c)^2} - \frac{(\varphi - c_n)(\Delta - c)}{2[8b - (\Delta - c)^2]} * \frac{8b(\Delta - c) + \beta[8b + (\Delta - c)^2]}{4b - (\Delta - c)^2 - 2\beta(\Delta - c) + \alpha[8b - (\Delta - c)^2]^2} \quad (33)$$

$$\tau^c = \frac{(\varphi - c_n)(\Delta - c)}{8b - (\Delta - c)^2} + \frac{(\varphi - c_n)\{8b(\Delta - c) + \beta[8b + (\Delta - c)^2]\}}{[8b - (\Delta - c)^2]\{4b - (\Delta - c)^2 - 2\beta(\Delta - c) + \alpha[8b - (\Delta - c)^2]^2\}} \quad (34)$$

4 模型比较与管理意义分析

首先,在分析比较之前,需要界定一下参数的关系。由式(16)、(25)和(34)知,要使模型的解有意

义,需满足 $0 < \tau^p \leq 1, 0 < \tau^w \leq 1, 0 < \tau^c \leq 1$ 于是得到式(35)、(36)、(37),以及根据假设 $k^p > 0, k^w > 0, k^c > 0$ 可得式(38)、(39):

$$8b - (\Delta - c)^2 > 0 \quad (35)$$

$$0 \leq \frac{(\Delta - c)(\varphi - c_n)\{1 + \alpha[8b - (\Delta - c)^2]\}}{4b - (\Delta - c)^2 + \alpha[8b - (\Delta - c)^2]^2} \leq \frac{\{12b - (\Delta - c)^2 + \alpha[8b - (\Delta - c)^2]^2\}(\varphi - c_n)(\Delta - c)}{[8b - (\Delta - c)^2]\{4b - (\Delta - c)^2 + \alpha[8b - (\Delta - c)^2]^2\}} \leq 1 \quad (36)$$

$$0 < \beta \leq \frac{4b - (\Delta - c)^2 + \alpha[8b - (\Delta - c)^2 - (\varphi - c_n)(\Delta - c)] - (\varphi - c_n)(\Delta - c)}{\varphi - c_n + 2(\Delta - c)} \quad (37)$$

$$- \frac{4b - (\Delta - c)^2 + \alpha[8b - (\Delta - c)^2]^2}{[8b - (\Delta - c)^2][\varphi - c_n + 2(\Delta - c)]}$$

为表示方便,不妨设

$$\beta^{\max} = \frac{4b - (\Delta - c)^2 + \alpha[8b - (\Delta - c)^2 - (\varphi - c_n)(\Delta - c)] - (\varphi - c_n)(\Delta - c)}{\varphi - c_n + 2(\Delta - c)}$$

$$- \frac{4b - (\Delta - c)^2 + \alpha[8b - (\Delta - c)^2]^2}{[8b - (\Delta - c)^2][\varphi - c_n + 2(\Delta - c)]}$$

$$4b - (\Delta - c)^2 + \alpha[8b - (\Delta - c)^2] > 0 \quad (38)$$

$$4b - (\Delta - c)^2 - 2\beta(\Delta - c) + \alpha[8b - (\Delta - c)^2]^2 > 0 \quad (39)$$

在满足式(38)、(39)的前提下,可以得到以下命题 1—命题 4:

命题 1 $k^p < k^w < k^c$ 。

证明: $k^w - k^p = \frac{\varphi - c_n}{2} *$

$$\frac{4b(\Delta - c)}{4b - (\Delta - c)^2 + \alpha[8b - (\Delta - c)^2]^2}$$

$$k^c - k^w = \frac{\varphi - c_n}{2} * \left\{ \frac{\beta[8b + (\Delta - c)^2] \{4b - (\Delta - c)^2 + \alpha [8b - (\Delta - c)^2]^2\} + 16b\beta (\Delta - c)^2}{\{4b - (\Delta - c)^2 - 2\beta(\Delta - c) + \alpha [8b - (\Delta - c)^2]^2\} \{4b - (\Delta - c)^2 + \alpha [8b - (\Delta - c)^2]^2\}} \right\}$$

由于 $\Delta - c > 0$, 结合式(38)、(39)可知, $k^w - k^p > 0$, $k^c - k^w > 0$, 故命题 1 得证。

命题 1 说明, 随着政府考虑消费者及环境效益等因素, 奖惩力度需要依次加大。

命题 2 $p^c < p^w < p^p < p^s$ 。

证明: $p^w - p^c = \frac{-(\Delta - c)}{8b - (\Delta - c)^2} (k^w - k^c)$, $p^p - p^w = \frac{-(\Delta - c)}{8b - (\Delta - c)^2} (k^p - k^w)$, $p^s - p^p = \frac{(\Delta - c)k^p}{8b - (\Delta - c)^2}$, 由命题 1 可知: $k^p < k^w < k^c$, 结合式(35)以及 $\Delta - c > 0$ 可以得到: $p^w - p^c > 0$, $p^p - p^w > 0$; $k > 0$, 故 $p^s - p^p > 0$, 所以命题 2 得证。

命题 2 表明, 考虑政府决策目标的奖惩机制下新产品的零售价比无奖惩机制情况会降低, 对消费者有利, 这进一步显示出政府奖惩机制的有效性; 在三种政府目标函数中, 政府综合考虑全社会福利和 WEEE 环境效益时新产品的零售价最低, 这说明政府综合考虑全社会福利和 WEEE 环境效益是三种模型中最优的, 最能降低制造商的零售价格, 增加新产品的市场需求, 从而增强制造商的新产品市场竞争力。

命题 3 $\tau^s < \tau^p < \tau^w < \tau^c$ 。

证明: $\tau^p - \tau^s = \frac{2k^p}{[8b - (\Delta - c)^2]}$, $\tau^w - \tau^p = \frac{2(k^s - k^p)}{[8b - (\Delta - c)^2]}$, $\tau^c - \tau^w = \frac{2(k^c - k^s)}{[8b - (\Delta - c)^2]}$, 由 $k > 0$ 可得知 $\tau^p - \tau^s > 0$, 根据命题 1 可知 $k^p < k^w < k^c$, 结合式(35)可以得到: $\tau^w - \tau^p > 0$, $\tau^c - \tau^w > 0$, 故命题 3 得证。

命题 3 表明, 考虑政府决策目标的奖惩机制下 WEEE 的回收率比无奖惩机制的(基准情形)的回收率高, 可见, 政府奖惩机制的实施对提高 WEEE 的回收率是有效的; 在三种政府目标函数中, 政府综合考虑全社会福利和 WEEE 环境效益时的回收率最高, 这说明政府综合考虑全社会福利和 WEEE 环境效益是三种决策情形中最优的, 最能提高逆向供应链的 WEEE 回收率。

命题 4 从奖惩力度 k^c 的表达式可以得到以下管理洞见:

(1) 奖惩力度 k^c 随着 φ 的增加而提高, 二者正相关;

(2) 奖惩力度 k^c 随着 β 的增加而提高, 二者正相

关;

(3) 奖惩力度 k^c 随着 b 的增加而降低, 二者负相关;

(4) 奖惩力度 k^c 随着 α 的增加而降低, 二者负相关。

除(2)外, 其它证明较易, 主要是对其求偏导并对求解结果判断正负获得, 考虑到篇幅, 证明略。(2)的证明如下:

证明: k^c 表达式前半部分乘数 $\frac{\varphi - c_n}{2}$ 是正常数, k^c 随 β 的变化趋势与正常数无关, 因此只需证明 $\frac{8b(\Delta - c) + \beta[8b + (\Delta - c)^2]}{4b - (\Delta - c)^2 - 2\beta(\Delta - c) + \alpha [8b - (\Delta - c)^2]^2}$ 随 β 的变化趋势即可。由 $d\left\{ \frac{8b(\Delta - c) + \beta[8b + (\Delta - c)^2]}{4b - (\Delta - c)^2 - 2\beta(\Delta - c) + \alpha [8b - (\Delta - c)^2]^2} \right\} / d\beta = \frac{32b^2 + (\Delta - c)^2 [12b - (\Delta - c)^2] + \alpha [8b + (\Delta - c)^2] [8b - (\Delta - c)^2]^2}{\{4b - (\Delta - c)^2 - 2\beta(\Delta - c) + \alpha [8b - (\Delta - c)^2]^2\}^2}$ 知, $dk^c / d\beta$ 的符号取决于 $32b^2 + (\Delta - c)^2 [12b - (\Delta - c)^2] + \alpha [8b + (\Delta - c)^2] [8b - (\Delta - c)^2]^2$ 的符号。而由 $4b - (\Delta - c)^2 > 0$ 可知 $32b^2 + (\Delta - c)^2 [12b - (\Delta - c)^2] + \alpha [8b + (\Delta - c)^2] [8b - (\Delta - c)^2]^2 > 0$, 故(2)得证。

命题 4 的管理意义分析如下:

(1) 表明市场容量越大, 奖惩力度亦大, 因此, 具体实施奖惩机制时政府应考虑制造商产品的市场容量大小制定奖惩力度, 而不是无论大小制造商皆采用“一刀切”的做法。

(2) 表明单位废旧产品的回收带来的环境效益大者, 奖惩力度应该越大, 以促进其回收。这与政府关注环境效益的目标是相吻合的。

(3) 回收 WEEE 的难度系数越大, 也就是说固定投资越大, 奖惩力度越低, 这是因为企业在回收方面投入的越大, 政府补贴(奖励)企业回收的力度就不需要太大就可以获得较高的回收率。因此机制的力度相应降低, 故二者负相关。

(4) 这一点与(3)相似, 但不完全相同, 政府的奖惩机制固定投入成本大的话会影响逆向供应链成员企业和消费者, 从全社会福利最大化的角度考虑, 希望固定成本小一些, 因此对于固定投资成本大的情况, 奖惩力度较低。

5 算例分析

本节首先通过算例分析比较同一组参数下四种情形的均衡解；然后针对情形 4，讨论单位回收成本、奖惩机制成本系数、环境效益系数的变化对回购价、零售价及回收率的影响。假设某家电产品的有关参数为： $c_n = 92, \Delta = 60, c = 10, b = 400, \varphi = 100, \beta = 200, \alpha = 0.2, \tau_0 = 0.2$ 。所得结果如表 1 和图 2—图 4 所示。

从表 1 可以看出，与无政府奖惩机制的基准情形相比，考虑政府决策目标的奖惩机制情形下废旧产品的回购价提高，零售价降低，废旧产品的回收率提高，制造商、回收商及逆向供应链的利润均增加。这说明了政府奖惩机制的有效性；而且在三种政府目标函数的模型中，综合考虑了全社会福利和环境效益的政府目标函数情形，在回收价格、零售价格、回收率以及制造商和零售商的利润方面都明显优于情形 2 和情形 3，这说明综合考虑全社会福利和环境效益的政府目标函数的模型是最为合理的，也是政府在制定奖惩机制时最应参考的情形。

表 1 四种情形的求解结果

	情形 1	考虑政府决策目标		
		情形 2	情形 3	情形 4
$\tau\omega$	35	35.01	35.18	36.46
p	81.71	81.48	81.24	76.90
τ	57.1%	58.1%	59%	76.4%
k	—	3.30	6.59	67.44
π_m	72.89	74.38	75.65	104.69
π_r	130.67	134.95	139.37	233.56
π	203.56	209.33	215.02	338.17
π_g	—	205.91	379.66	3188

如图 2 所示，随着单位回收成本的增加，回购价提高，当回收成本超过一定值时，回收率变为零，然后零售价降低；只要回收率不为零，随着回收成本的增加，零售价提高，回收率降低。这一现象说明回收成本会增加新产品零售价，进而影响产品的市场需求。

从图 3 可以看到，随着政府奖惩机制成本系数的增加，回购价和零售价均提高，而回收率降低。可见，政府实施奖惩机制的成本会转移到逆向供应链，进而影响回收率等关键参数，奖惩机制成本高虽然能够提高回购价，但会降低回收率的提高，增加新产品零售价，从而影响新产品的市场需求量。

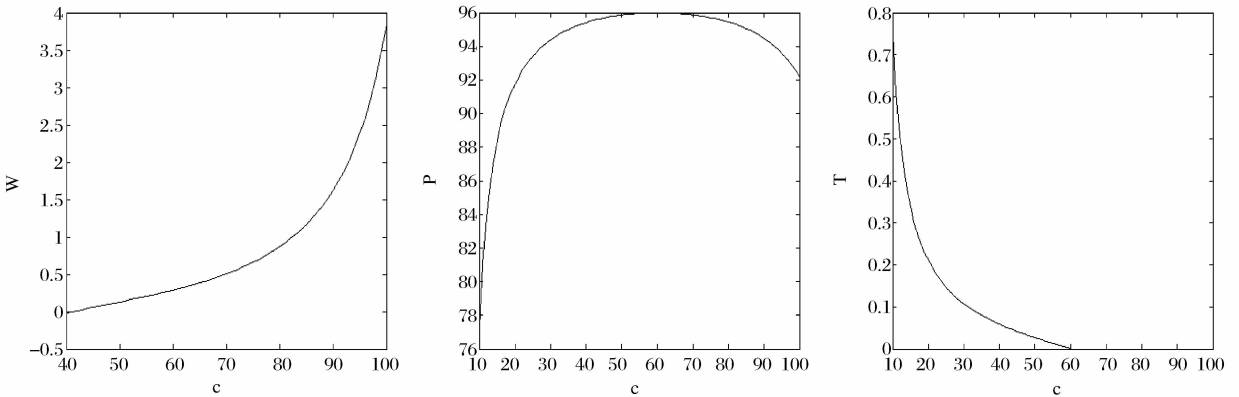


图 2 回购价、零售价及回收率随单位回收成本的变化趋势

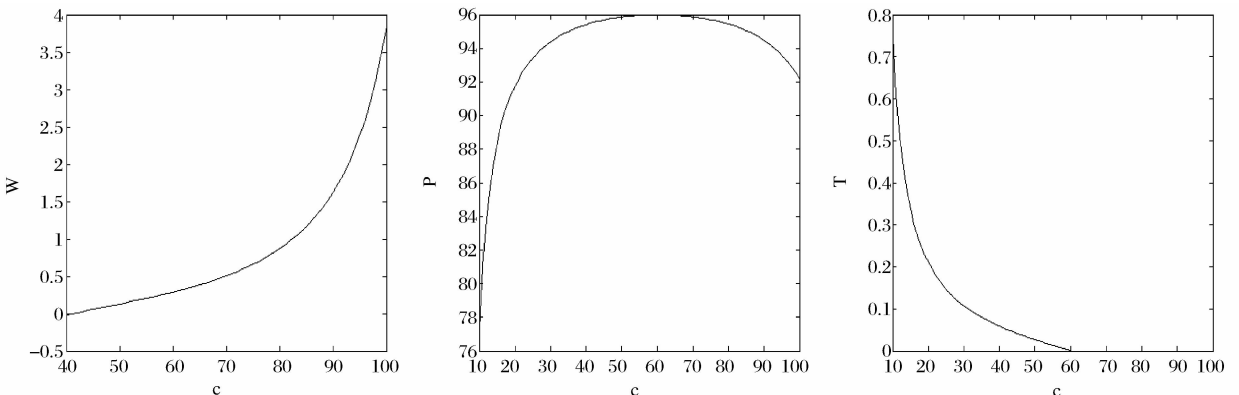


图 3 回购价、零售价及回收率随奖惩机制成本系数的变化趋势

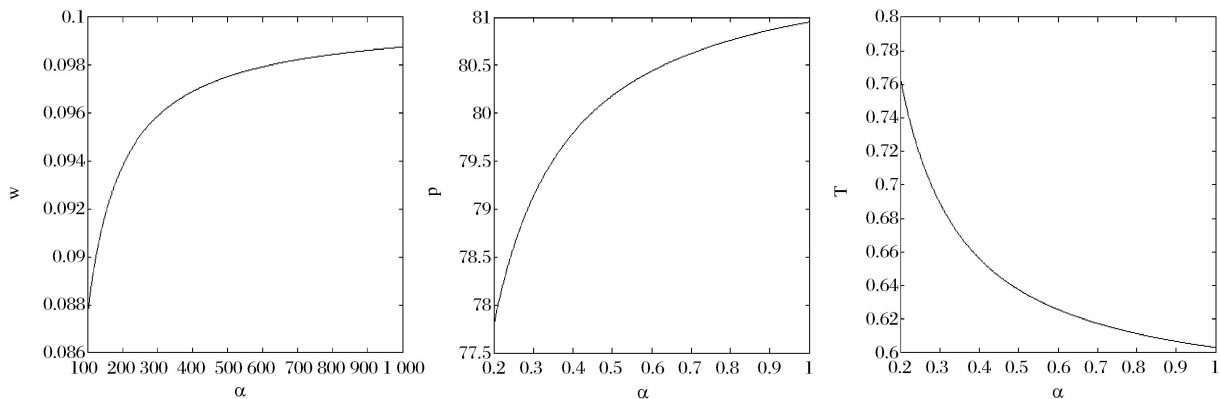


图 4 回购价、零售价及回收率随环境效益系数的变化趋势

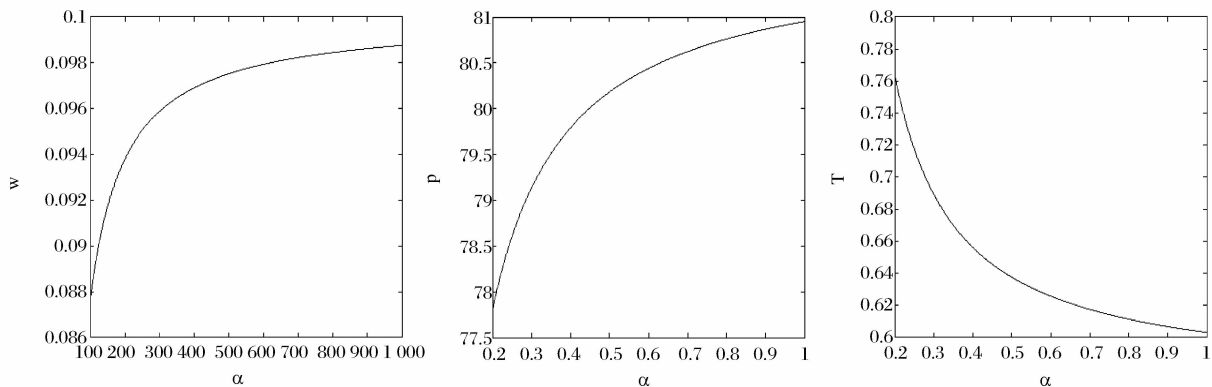


图 5 制造商利润、回收商利润及政府目标函数随目标回收率的变化趋势

从图 4 可知,随着环境效益系数的增加,回购价提高,零售价降低,回收率提高。可见,环境效益越大,对回收越有利,且新产品价格降低,对消费者也有利。因此,环境效益大的产品要比环境效益小的产品回收难度小(回收率相对大)。

从图 5 可知,制造商的利润和政府目标函数的值都随着目标回收率的增加而降低,而目标回收率的变动不会引起回收商利润的变化,由此可知,通过制定较高的目标回收率来激励制造商和回收商从事废旧电器电子产品的回收再制造是不适宜的。

6 结语

本文在模型描述、符号说明与基本假设的基础上,首先建立了一个无奖惩机制下逆向供应链决策的基准模型,然后建立了三个考虑政府决策目标的逆向供应链奖惩机制模型,接下来对模型的求解结果进行比较并做了管理意义的分析,最后用算例验证了模型的结论并仿真讨论了单位回收成本、奖惩机制成本系数、环境效益系数的变化对回购价、零售价及回收率的影响。通过建模求解,得到了奖惩力度、回购价、零售价及回收率的均衡解,并证明了政

府奖惩机制不仅能够提高废旧产品回收率,还能降低新产品零售价、提高回购价,对全社会福利的提高具有有效性。通过对三种政府不同的决策目标的博弈模型进行比较发现,政府综合考虑全社会福利和 WEEE 环境效益是三种决策情形中最优,该情形最能提高逆向供应链的 WEEE 回收率。

本文还可以从以下几个方面进行扩展:(1)多个制造商竞争的环境下该奖惩机制得到的结论是否仍然成立。(2)随机需求环境下政府奖惩机制的设计问题。

参考文献:

[1] 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.
 [2] Kaya O. Incentive and production decisions for remanufacturing operations[J]. European Journal of Operational Research, 2010, 201(2):442-453.
 [3] 达庆利. 供应链管理研究的新动向(专辑的序言)[J]. 系统工程学报,2008,23(6):641-643.
 [4] 熊中楷,申成然,彭志强. 专利保护下再制造闭环供应链协调机制研究[J]. 管理科学学报,2011,14(6):76-85.

- [5] Mitra S, Webster S. Competition in remanufacturing and the effects of government subsidies[J]. *International Journal of Production Economics*, 2008, 111(2):287-298.
- [6] Chen Y J, Sheu J B. Environmental-regulation pricing strategies for green supply chain management[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2009, 45(5):667-677.
- [7] Aksen D, Aras N, Karaarslan A G. Design and analysis of government subsidized collection systems for incentive-dependent returns[J]. *International Journal of Production Economics*, 2009, 119(2):308-327.
- [8] Atasu A, Van Wassenhove L N, Sarvary M. Efficient take-back legislation [J]. *Production and Operations Management*, 2009, 18(3):243-258.
- [9] Hammond D, Beullens P. Closed-loop supply chain network equilibrium under legislation[J]. *European Journal of Operational Research*, 2007, 183(2): 895-908.
- [10] 计国君, 黄位旺. 回收条例约束下的再制造供应链决策[J]. *系统工程理论与实践*, 2010, 30(8): 1355-1362.
- [11] 汪翼, 孙林岩, 杨洪焦, 等. 不同回收法律下的再制造供应链决策与合作研究[J]. *管理科学*, 2009, 22(1): 2-8.
- [12] 王文宾, 达庆利. 考虑政府引导的电子类产品逆向供应链奖惩机制设计[J]. *中国管理科学*, 2010, 18(2): 62-67.
- [13] 聂佳佳, 王文宾, 吴庆. 奖惩机制对零售商负责回收闭环供应链的影响[J]. *工业工程与管理*, 2011, 16(2): 52-59.
- [14] 王文宾, 达庆利. 再制造逆向供应链协调的奖励、惩罚及奖惩机制比较[J]. *管理工程学报*, 2010, 24(4): 48-52.
- [15] 王文宾, 达庆利. 奖惩机制下闭环供应链的决策与协调[J]. *中国管理科学*, 2011, 19(1): 36-41.
- [16] 朱庆华, 窦一杰. 基于政府补贴分析的绿色供应链管理博弈模型[J]. *管理科学学报*, 2011, 14(6): 86-95.
- [17] Hong I H, Ke J S. Determining advanced recycling fees and subsidies in "E-scrap" reverse supply chains [J]. *Journal of Environment Management*, 2011, 92(6): 1495-1502.

Research on the Premium and Penalty Mechanism of the Reverse Supply Chain Considering Various Goals of Government

WANG Wen-bin¹, ZHANG Yu¹, FAN Ling-ling¹, HE Ling-yun¹, DA Qing-li²

(1. School of Management, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;

2. School of Economics and Management, Southeast University, Nanjing 211189, China)

Abstract: Considering the government's three decision-making goals, the premium and penalty mechanism of government design problem of the reverse supply chain is discussed in this paper. With and without the premium and penalty mechanism is established under the game model of the reverse supply chain, the equilibrium solution of the government premium and penalty mechanism is gained, and the results are compared to discuss management insights. Finally, the conclusions of the model are verified by examples, and further simulation analysis of the influence of exogenous variables on the decision variables is also listed. The study has shown that: the government premium and penalty mechanism can not only improve the recovery rate of waste electrical and electronic products, but also reduce the retail price of new products, improve the repurchase price, which is conducive to the improvement of the welfare of the whole society; premium and penalty efforts are increased with the increase of market capacity, the government should consider the market size of the products of the manufacturer while implementing the premium and penalty mechanism to develop premium and penalty intensity rather than to formulate a unified incentive intensity of all manufacturers. It would be better to improve the recovery rate of the reverse supply chain that the government considering the welfare of the whole society and the environmental effects brought by the collection of waste electrical and electronic products.

Key words: government's decision-making goal; premium and penalty mechanism; reverse supply chain; collection rate