

法律约束情形下电子产品回收再制造研究

徐杰^{1,2}, 刘南^{1†}, 柳键²

(1. 浙江大学管理学院, 杭州 310058; 2. 江西财经大学信息管理学院, 南昌 330058)

摘要: 面对政府制定的法律约束, 企业需对旧产品进行回收处理. 传统文献虽然考虑了法律约束的情形, 但很少将其量化到模型中. 基于此, 将政府制定的最小回收率作为约束条件处理, 并将回收率作为决策变量, 分析回收率约束对企业实施回收再制造的影响. 研究表明, 当旧产品逆向运营成本取极端值时, 在法律约束情形下, 制造商要么选择回收所有旧产品, 要么选择政府制定的最小回收率. 然而, 当逆向运营成本取值不那么极端时, 制造商的最优决策由逆向运营成本与新产品生产成本的组合决定. 此外, 以苹果公司为案例背景, 依据现实数据对模型进行验证, 实例分析表明模型具有较强的稳健性与实用性.

关键词: 电子产品; 法律约束; 再制造; 生产者责任延伸制

中图分类号: F272.3

文献标志码: A

E-product remanufacturing under product take-back regulation

XU Jie^{1,2}, LIU Nan^{1†}, LIU Jian²

(1. School of Management, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 2. School of Information Technology, Jiangxi University of Finance and Economics, Nanchang 330058, China)

Abstract: The manufacturer should be involved in the collection of used products under product take-back regulation issued by the government. Research on environmental regulation is not uncommon, but with collection rate constraint consideration has received limited attention. Therefore, we use the collection rate as a decision variable and analyze the effect of constraint on the remanufacturing strategies. Research results show that the manufacturer adopts the maximum (minimum) collection rate when the inverse operating cost falls on the two opposite ends of the spectrum. Otherwise, combinations of inverse operating cost and new product manufacturing cost lead to the optimal solutions. In addition, we use Apple company as the case to verify the proposed model through real data. Numerical results show the robustness and applicability of the proposed model.

Keywords: E-product; take-back regulation; remanufacturing; extended producer responsibility

0 引言

根据2016年系列电视节目《联合国在行动》^[1]的报道, 电子垃圾正成为世界上最大的垃圾来源之一, 而世界上三分之一的电子垃圾来源于中国和美国. 如果不对电子垃圾进行妥善处理, 其释放出的致癌物和有毒烟雾将会对人类健康产生严重的威胁. 面对如此严峻的环境问题, 不同国家和地区基于生产者责任延伸制分别出台了相应的法律、法规. 如欧盟推出《废弃电气电子设备条例》, 要求制造商对废旧电子产品进行回收, 并且设定最小回收率^[2]. 在美国, 虽然没有联邦法律要求回收电子垃圾, 但是到2011年底已

经有25个州建立了电子垃圾回收法^[3].

总体而言, 在政府制定的废旧电子产品回收法律约束下, 电子产品的回收处理活动已初见成效. 不同企业依据自身生产能力对回收的旧电子产品采取不同的处理方式, 再制造作为产品循环方式之一, 不仅可以挖掘产品潜在价值, 还可以起到环境保护的作用. 基于此, 本文从废旧电子产品回收法的角度探讨企业最优决策问题.

1 文献综述

近年来, 资源的枯竭以及日益严重的环境问题, 导致不同国家和地区纷纷出台相关法律、法规, 要求

收稿日期: 2017-03-22; 修回日期: 2017-08-15.

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(71471162, 71761015).

责任编委: 唐加福.

作者简介: 徐杰(1984—), 男, 讲师, 博士, 从事物流与供应链管理的研究; 刘南(1961—), 男, 教授, 博士生导师, 从事物流与供应链管理、交通运输经济管理研究.

†通讯作者. E-mail: nliu@zju.edu.cn

制造商承担生产者责任延伸制的义务. 基于此, 学者们开始从法律约束的角度研究产品再制造问题. 早期涉及法律约束的研究来自于文献[4]. 此后, 在回收再制造领域关于法律约束的论文开始大量涌现, 学者们主要从两个角度分析了法律约束情境下产品回收再制造问题: 1) 回收机制设计, 比较不同法律对企业的影响; 2) 新产品质量设计, 从设计的角度研究有利于环境且易于再制造的产品.

从回收机制设计角度研究的文献主要有文献[3, 5-6]. Atasu等^[5]研究了在法律约束条下CPR(企业共同建设回收点, 按照各自的市场份额回收旧产品)和IPR(企业单独建设回收点, 只负责回收自己生产的产品)两种回收机制对产品设计和社会经济福利的影响. 作者发现, 相对于IPR, CPR回收机制下产生的消费者剩余往往更高. Esenduran等^[3]从回收成本的角度研究了机制IPR和CPR带来的管理意义. 研究结果表明, 当共同回收机制中参与企业所占的市场份额较大时, 由多家企业参与的共同回收机制比单独回收机制有更高的回收率. 类似地, Atasu等^[6]从政府、制造商、零售商以及环境的角度研究了两种回收法产生的法律意义. 另外, 一些学者从新产品质量设计角度研究了电子产品回收再制造问题. Atasu等^[7]研究了废旧产品的回收处理方式对新产品质量选择的影响. 谢家平等^[8]以质量为内生变量确定旧产品的再制造比例. 曹晓刚等^[9]基于博弈理论研究了新产品与再造品质量相互竞争的情形. 与以往文献不同, Esenduran等^[10]假设对旧产品的再处理可使企业获利, 研究了处理旧产品带来的经济与环境意义.

上述研究所涉及到的法律约束只规定了最小回收率. 然而, 有些环保组织提倡对旧产品回收率和再制造率同时约束. Karakayali等^[11]考虑了两种法律约束对经济与环境效益的影响: 1) 仅考虑最小回收率; 2) 同时考虑最小回收率和最小再制造率. Jacobs等^[12]研究了由一个原材料供应商与一个制造商组成的二级闭环供应链问题, 同时考虑了由供应商负责的最小回收率和制造商负责的最小再制造率. Esenduran等^[13]考虑一个制造商同时生产新产品和再造品的情形, 分析了3种法律约束所带来的环境意义. 国内学者计国君等^[14]基于现行《回收条例》以社会福利最大化为目标分析了3种不同模式下相关主体的经济行为. 高艳红等^[15]研究了保证金退还制度对电子垃圾回收定价的影响. 马祖军等^[16]研究了电子产品回收法律约束对企业回收价格与回收量的影响. 公彦德等^[17]从处理基金与拆解补贴的角度研

究了不同回收模式下制造商的最优决策.

2 问题描述与假设

本文基于生产者责任延伸制研究法律约束对企业实施电子产品回收再制造所产生的影响. 首先, 制造商生产新产品并在主要市场销售. 当新产品的生命周期到达时, 由制造商负责回收旧产品用于再制造, 再造品放在二级市场销售. 具体而言, 制造商的决策顺序如下: 1) 制造商首先决策新产品价格 p_n ; 2) 制造商决定旧产品回收率 α ; 3) 制造商决策再造品产量 X ; 4) 制造商决策再造品价格 p_r .

模型建立需要作一些必要的假设, 具体如下:

1) 新产品和再造品分别在两个不同的市场销售, 也就是说两种产品不存在市场竞争^[18].

2) 新产品和再造品的市场需求分别为确定情形^[18-20].

3) 基于生产者责任延伸制, 制造商需要完成政府制定的最小回收率 α_0 , 且制造商有能力完成这个最小回收率.

4) 旧产品的最大回收率为 α_1 , 且 $\alpha_1 \leq 1$.

5) 在不失一般性前提下, 假设市场容量为1^[19]. 类似于Raz等^[18]和Ferguson等^[19]在主要市场中假设消费者对新产品的支付意愿服从0到1上的均匀分布. 相应地, 在二级市场中, 假设消费者对再造品的支付意愿服从0到 u 上的均匀分布, 且 $u \leq 1$. 基于上述分析, 可以推导出新产品和再造品的市场需求函数, 分别为 $D_n = 1 - p_n$ 和 $D_r = 1 - p_r$.

6) 参考Savaskan等^[20], 假设所有回收的旧产品都能用于再制造.

本文所用到的符号及其意义如表1所示.

表1 本文所涉及到的符号

	符号	定义
决策变量	p_n	新产品价格
	p_r	再造品价格
	α	回收率
	X	再造品产量
参数	c_n	新产品生产成本
	c_r	再造品生产成本
	k	再造品残值
	c_c	旧产品回收成本
	u	二级市场容量
其他符号	D_n	新产品市场需求
	D_r	再造品市场需求
	ccr	$c_c + c_r$, 旧产品逆向运营成本

3 模型构建与分析

3.1 模型构建

基于上述背景与假设, 制造商面临如下问题:

$$\begin{aligned} \max \pi(p_n, p_r, \alpha, X) = & \\ & (p_n - c_n)D_n + (p_r - c_r) \min(X, D_r) + \\ & (k - c_r)(X - D_r)^+ - c_c \alpha D_n; \quad (1) \\ \text{s.t. } \alpha_0 \leq \alpha \leq \alpha_1, & \quad (2) \\ 0 \leq X \leq \alpha D_n. & \quad (3) \end{aligned}$$

式(1)为制造商的利润函数. 其中: 第1项表示主要市场中新产品的利润, 第2项表示二级市场中再造品的利润, 第3项表示当再造品的产量超过市场需求

时产生的利润, 第4项表示旧产品的回收成本. 约束(2)表示制造商的回收率必须满足政府规定的要求, 但不超过上限值 α_1 . 约束(3)保证再造品的产量不超过旧产品的回收量.

3.2 模型分析

本节分析制造商的最优决策问题. 采用逆向推导法求解制造商的最优决策.

定理1 新产品价格, 回收率, 再造品的产量及价格如表2所示.

表2 制造商的最优决策

区间	p_r	X	α^{R*}	p_n^{R*}
R_1	$u - \frac{\alpha_0^2 s_0 + \alpha_0(1 - c_n)}{2(\alpha_0^2 + 1)}$	$\frac{\alpha_0^2 s_0 + \alpha_0(1 - c_n)}{2(\alpha_0^2 + 1)}$	α_0	$\frac{2\alpha_0^2 - \alpha_0 s_0 + 1 + c_n}{2(\alpha_0^2 + 1)}$
R_2	$\frac{u + k}{2}$	$\frac{\alpha_0^2 s_1 + \alpha_0(1 - c_n)}{2}$	α_0	$\frac{1 + c_n - \alpha_0 s_1}{2}$
R_3	$\frac{u + ccr}{2}$	$\frac{u - ccr}{2}$	$\frac{u - ccr}{1 - c_n}$	$\frac{1 + c_n}{2}$
R_4	$u - \frac{\alpha_1^2 s_0 + \alpha_1(1 - c_n)}{2(\alpha_1^2 + 1)}$	$\frac{\alpha_1^2 s_0 + \alpha_1(1 - c_n)}{2(\alpha_1^2 + 1)}$	α_1	$\frac{2\alpha_1^2 - \alpha_1 s_0 + 1 + c_n}{2(\alpha_1^2 + 1)}$
R_5	$\frac{u + k}{2}$	$\frac{\alpha_1^2 s_1 + \alpha_1(1 - c_n)}{2}$	α_1	$\frac{1 + c_n - s_1 \alpha_1}{2}$
其中	$s_0 = u - ccr, s_1 = k - ccr$			

证明 为方便表示, 记

$$\begin{aligned} s_{00} = \frac{(\alpha_0^2 + 1)H - H_0}{\alpha_0^2}, \quad s_{11} = \frac{(\alpha_1^2 + 1)H - H_1}{\alpha_1^2}, \\ s_{01} = \frac{(\alpha_0^2 + 1)H - H_1}{\alpha_0 \alpha_1}, \quad s_0 = u - ccr, \quad s_1 = k - ccr. \end{aligned}$$

本模型有4个阶段, 标准解法为逆向推导法, 即从第4阶段开始分析, 以此类推直到第1阶段.

1) 第4阶段分析. 给定新产品价格 p_n , 旧产品回收率 α 以及再制品产量 X 时, 求解再制品价格 p_r . 注意到式(1)中存在 $\min(X, D_r)$ 和 $(X - D_r)^+$, 因此需要考虑 X 与 D_r 的大小关系. 计算发现, 当 $X \leq D_r$ 时, 再造品的最优价格为 $p_r = u - X$, 即 $X =$

D_r . $X = D_r$ 是 $X \geq D_r$ 的特殊情况, 故 $X \leq D_r$ 的情形被 $X \geq D_r$ 的情形占优. 因此, 接下来仅考虑 $X \geq D_r$ 的情形. 相应地, 制造商的问题为

$$\begin{aligned} \max \pi(p_r | p_n, \alpha, X) = & \\ & - p_r^2 + (u + k)p_r + (p_n - c_n - \\ & c_c \alpha)(1 - p_n) + (k - c_r)X - uk, \quad (4) \end{aligned}$$

$$\text{s.t. } D_r \leq X \leq \alpha D_n. \quad (5)$$

表3给出了再造品的最优价格.

2) 第3阶段分析. 在求解出第4阶段的最优决策后, 接下来求解制造商第3阶段最优决策, 即最优产量, 计算结果如表4所示.

表3 制造商第4阶段最优决策

$A_2 \leq A_1$	p_r	D_r	$\pi(X, p_r(X) p_n, \alpha)$
$X \leq A_2 \leq A_1$	$u - X$	X	$-X^2 + (u - c_r)X + (p_n - c_n - c_c \alpha)D_n$
$A_1 \leq A_2$	p_r	D_r	$\pi(X, p_r(X) p_n, \alpha)$
$X \leq A_1$	$u - X$	X	$-X^2 + (u - c_r)X + (p_n - c_n - c_c \alpha)D_n$
$A_1 \leq X \leq A_2$	$\frac{u + k}{2}$	$\frac{u - k}{2}$	$(k - c_r)X + \frac{(u - k)^2}{4} + (p_n - c_n - c_c \alpha)D_n$
其中	$A_1 = H/2, A_2 = \alpha D_n, H = u - k$		

表4 制造商第3阶段最优决策

$k \geq c_r$	p_r	D_r	X	$\pi(\alpha, p_r(\alpha), X(\alpha) p_n)$
$X \leq A_2 \leq A_1$	$u - \alpha D_n$	αD_n	αD_n	$-D_n^2 \alpha^2 + (u - c_r)\alpha D_n + (p_n - c_n - c_c \alpha)D_n$
$A_1 \leq X \leq A_2$	$\frac{u + k}{2}$	$\frac{u - k}{2}$	αD_n	$(k - c_r)\alpha D_n + \frac{(u - k)^2}{4} + (p_n - c_n - c_c \alpha)D_n$

3) 第1阶段和第2阶段分析. 在求解出制造商的第3阶段、第4阶段的最优决策后, 现在分析制造商第1阶段和第2阶段的最优决策.

在表4中, 当 $A_2 \leq A_1$, 即 $m = \frac{H}{2D_n\alpha} \geq 1$ 时, 称之为模型RA, 此时制造商的利润函数为

$$\pi(\alpha) = -D_n^2\alpha^2 + (u - c_r)\alpha D_n + (p_n - c_n - c_c\alpha)D_n; \quad (6)$$

当 $A_2 \geq A_1$, 即 $m = \frac{H}{2D_n\alpha} \leq 1$ 时, 称之为模型RB, 此时制造商的利润函数为

$$\pi(\alpha) = (k - c_r)\alpha D_n + \frac{(u - k)^2}{4} + (p_n - c_n - c_c\alpha)D_n. \quad (7)$$

相应地, 制造商面临如下两个问题:

$$\text{RA-1: } \pi(\alpha) = -D_n^2\alpha^2 + s_0 D_n \alpha + (p_n - c_n)D_n, \\ \text{s.t. } \alpha_0 \leq \alpha \leq \alpha_1 \leq t; \quad (8)$$

$$\text{RA-2: } \pi(\alpha) = -D_n^2\alpha^2 + s_0 D_n \alpha + (p_n - c_n)D_n, \\ \text{s.t. } \alpha_0 \leq \alpha \leq t \leq \alpha_1. \quad (9)$$

对于模型RB, 制造商面临的问题如下:

$$\text{RB-1: } \pi(\alpha) = s_1 \alpha D_n + \frac{(u - k)^2}{4} + (p_n - c_n)D_n, \\ \text{s.t. } t \leq \alpha_0 \leq \alpha \leq \alpha_1; \quad (10)$$

$$\text{RB-2: } \pi(\alpha) = s_1 \alpha D_n + \frac{(u - k)^2}{4} + (p_n - c_n)D_n, \\ \text{s.t. } \alpha_0 \leq t \leq \alpha \leq \alpha_1. \quad (11)$$

下面分别求解模型RA和RB. 先分析RA-1.

注意到制造商的利润函数是关于 α 的二次函数且为凹, 求解利润函数对 α 的导数, 可以得到

$$\frac{\partial \pi(\alpha)}{\partial \alpha} = -2D_n^2\alpha + s_0 D_n.$$

当 $s_0 \leq 0$ 时, $\frac{\partial \pi(\alpha)}{\partial \alpha} \leq 0$. 此时制造商的利润函数是关于回收率 α 的减函数. 注意到 $s_0 \leq 0$ 等价于 $\text{ccr} \geq u$, 也就是说当逆向运营成本非常高时, 在法律约束的情形下, 制造商的最优回收率为 $\alpha^{\text{RA}^*} = \alpha_0$. 相应地, 制造商的问题如下:

$$\pi(p_n) = -D_n^2\alpha_0^2 + s_0 D_n \alpha_0 + (p_n - c_n)D_n; \quad (12)$$

$$\text{s.t. } \begin{cases} m \geq 1, \\ s_0 \leq 0. \end{cases} \quad (13)$$

对上述问题化简, 制造商的问题如下:

$$\pi(p_n) = -(\alpha_0^2 + 1)p_n^2 + (2\alpha_0^2 - s_0\alpha_0 + 1 + c_n)p_n - \alpha_0^2 + s_0\alpha_0 - c_n; \quad (14)$$

$$\text{s.t. } \begin{cases} p_n \geq p_{H0}, \\ s_0 \leq 0. \end{cases} \quad (15)$$

其中 $p_{H0} = 1 - \frac{H}{2\alpha_0}$. 求解式(14)对 p_n 的一阶导数并令其等于0, 可以得到

$$p_{n0}^{\text{RA}^*} = \frac{2\alpha_0^2 - \alpha_0 s_0 + 1 + c_n}{2(\alpha_0^2 + 1)}.$$

容易发现最优价格包含两种情况: 当 $p_{n0}^{\text{RA}^*} \geq p_{H0}$ 时, $p_n^{\text{RA}^*} = p_{n0}^{\text{RA}^*}$; 当 $p_{n0}^{\text{RA}^*} \leq p_{H0}$ 时, $p_n^{\text{RA}^*} = p_{H0}$. 现在分析取得最优价格时所需满足的条件.

i) $p_n^{\text{RA}^*} = p_{n0}^{\text{RA}^*}$, 此时需要同时满足条件 $p_n^{\text{RA}^*} \geq p_{H0}$ 和 $s_0 \leq 0$. 注意到 $p_n^{\text{RA}^*} \geq p_{H0}$ 等价于 $s_0 \leq s_{00}$, $s_0 \leq 0$ 等价于 $\text{ccr} \geq u$. 综上, 取得该最优解需满足的条件为

$$\left(\frac{H}{H_0} \leq \frac{1}{\alpha_0^2 + 1} \ \& \ \text{ccr} \geq u - s_{00} \right) \cup \left(\frac{H}{H_0} \geq \frac{1}{\alpha_0^2 + 1} \ \& \ \text{ccr} \geq u \right).$$

ii) $p_n^{\text{RA}^*} = p_{H0}$, 此时需要同时满足条件 $p_n^{\text{RA}^*} \leq p_{H0}$ 和 $s_0 \leq 0$. 取得该最优解所需满足的条件为

$$\left(\frac{H}{H_0} \leq \frac{1}{\alpha_0^2 + 1} \ \& \ u \leq \text{ccr} \leq u - s_{00} \right).$$

当 $s_0 \geq 0$ 时, 求解制造商利润函数对 α 的导数并令其等于0, 可以得到 $\alpha_{\text{RA}} = \frac{s_0}{2D_n}$. 容易发现 α 的最优值包含3种情况:

当 $\alpha_{\text{RA}} \leq \alpha_0$ 时, $\alpha^{\text{RA}^*} = \alpha_0$;

当 $\alpha_0 \leq \alpha_{\text{RA}} \leq \alpha_1$ 时, $\alpha^{\text{RA}^*} = \alpha_{\text{RA}}$;

当 $\alpha_{\text{RA}} \geq \alpha_1$ 时, $\alpha^{\text{RA}^*} = \alpha_1$.

针对上述3种情况, 现在分析新产品的价格决策.

对于 $\alpha_{\text{RA}} \leq \alpha_0$ 时, $\alpha^{\text{RA}^*} = \alpha_0$. 此时制造商的利润函数与 $s_0 \leq 0$ 时的情形一致, 制造商的问题如下:

$$\pi(p_n) = -(\alpha_0^2 + 1)p_n^2 + (2\alpha_0^2 - s_0\alpha_0 + 1 + c_n)p_n - \alpha_0^2 + s_0\alpha_0 - c_n; \\ \text{s.t. } \begin{cases} p_{H1} \leq p_n \leq p_{n0}^{\text{RA}}, \\ 0 \leq s_0 \leq \frac{\alpha_0}{\alpha_1} H. \end{cases} \quad (16)$$

其中: $p_{H1} = 1 - \frac{H}{2\alpha_1}$, $p_{n0}^{\text{RA}} = 1 - \frac{s_0}{2\alpha_0}$. 制造商的利润函数是关于新产品价格的二次函数且为凹. 求解制造商的利润函数对价格的一阶导数并令其等于0, 可以得到

$$p_{n0}^{\text{RA}^*} = \frac{2\alpha_0^2 - \alpha_0 s_0 + 1 + c_n}{2(\alpha_0^2 + 1)}.$$

此时新产品的最优价格存在3种情况:

当 $p_{n0}^{\text{RA}^*} \leq p_{H1}$ 时, $p_n^{\text{RA}^*} = p_{H1}$;

当 $p_{H1} \leq p_{n0}^{\text{RA}^*} \leq p_{n0}^{\text{RA}}$ 时, $p_n^{\text{RA}^*} = p_{n0}^{\text{RA}^*}$;

当 $p_{n0}^{\text{RA}^*} \geq p_{n0}^{\text{RA}}$ 时, $p_n^{\text{RA}^*} = p_{n0}^{\text{RA}}$.

接下来分析新产品价格取不同值时所需满足的条件.

i) $p_n^{RA*} = p_{H1}$. 此时需要同时满足条件 $p_{n0}^{RA*} \leq p_{H1}$ 和 $0 \leq s_0 \leq \frac{\alpha_0}{\alpha_1} H$. 注意到 $p_{n0}^{RA*} \leq p_{H1}$ 等价于 $ccr \leq u - s_{01}$, $0 \leq s_0 \leq \frac{\alpha_0}{\alpha_1} H$ 等价于 $u - \frac{\alpha_0}{\alpha_1} H \leq ccr \leq u$, 因此, 取得该最优解所需满足的条件为

$$\left(\frac{H}{H_1} \leq \frac{1}{\alpha_0^2 + 1} \& u - \frac{\alpha_0}{\alpha_1} H \leq ccr \leq u \right) \cup \left(\frac{1}{\alpha_0^2 + 1} \leq \frac{H}{H_1} \leq 1 \& u - \frac{\alpha_0}{\alpha_1} H \leq ccr \leq u - s_{01} \right).$$

ii) $p_n^{RA*} = p_{n0}^{RA*}$. 此时需要同时满足条件 $p_{H1} \leq p_{n0}^{RA*} \leq p_{n0}^{RA}$ 和 $0 \leq s_0 \leq \frac{\alpha_0}{\alpha_1} H$. 取得最优解满足的条件为

$$(H \geq H_1 \& u - H_0 \leq ccr \leq u) \cup \left(\frac{H_1}{\alpha_0^2 + 1} \leq H \leq H_1 \& u - s_{01} \leq ccr \leq u \right).$$

iii) $p_n^{RA*} = p_{n0}^{RA}$. 此时需要同时满足条件 $p_{n0}^{RA*} \geq p_{n0}^{RA}$ 和 $0 \leq s_0 \leq \frac{\alpha_0}{\alpha_1} H$. 取得该最优解所需满足的条件为

$$(H \geq H_1 \& U - \frac{\alpha_0}{\alpha_1} H \leq ccr \leq u - H_0).$$

对于其他情形, 分析方法类似. \square

定理1表明:

1) 在区间 R_1 中

$$\left(u - s_{00} \leq ccr \leq u - \frac{c_n - 1}{\alpha_1} \& 0 \leq c_n \leq 1 - \frac{H}{\alpha_0} \right) \cup \left(u - H_0 \leq ccr \leq u - \frac{c_n - 1}{\alpha_1} \& 1 - \frac{H}{\alpha_0} \leq c_n \leq 1 \right).$$

此时逆向运营成本较高, 制造商的最优回收率为政府制定的最小回收率 α_0 . 其中

$$S_{00} = \frac{(\alpha_0^2 + 1)H - H_0}{\alpha_0^2},$$

$$H_0 = \alpha_0(1 - c_n), H = u - k.$$

2) 在区间 R_2 中

$$\left(k \leq ccr \leq u - s_{00} \& 0 \leq c_n \leq 1 - \frac{H}{\alpha_0} \right).$$

制造商的最优回收率仍为 α_0 , 但是新产品的价格、再造品的产量及价格与区间 R_1 不同, 原因在于两个区间的逆向运营成本不同.

3) 在区间 R_3 中

$$\left(k \leq ccr \leq u - H_0 \& 1 - \frac{H}{\alpha_0} \leq c_n \leq 1 - \frac{H}{\alpha_1} \right) \cup \left(u - H_1 \leq ccr \leq u - H_0 \& 1 - \frac{H}{\alpha_1} \leq c_n \leq 1 \right).$$

制造商的最优回收率为 $\frac{u - ccr}{(1 - c_n)}$, 与二级市场容量和新产品的生产成本成正比例关系, 与逆向运营成本成反比例关系. 其中 $H_1 = \alpha_1(1 - c_n)$.

4) 在区间 R_4 中

$$\left(u - s_{11} \leq ccr \leq u - H_1 \& 1 - \frac{H}{\alpha_1} \leq c_n \leq c_{n_{max}} \right) \cup$$

$$(0 \leq ccr \leq u - H_1 \& c_{n_{max}} \leq c_n \leq 1).$$

制造商的最优回收率为 α_1 , 在该区间中, 虽然逆向运营成本不是非常低, 但是新产品的生产成本较高. 此情形下, 制造商仍有动力回收旧产品. 其中

$$s_{11} = [(\alpha_1^2 + 1)H - H_1]/\alpha_1^2,$$

$$c_{n_{max}} = (k\alpha_1^2 + \alpha_1 + k - u)/\alpha_1.$$

5) 在区间 R_5 中

$$\left(0 \leq ccr \leq k \& 0 \leq c_n \leq 1 - \frac{H}{\alpha_1} \right) \cup$$

$$\left(0 \leq ccr \leq u - s_{11} \& 1 - \frac{H}{\alpha_1} \leq c_n \leq c_{n_{max}} \right).$$

注意到此时逆向运营成本非常低, 无论新产品的生产成本高或低, 制造商都会选择回收所有旧产品.

图1描述了制造商的最优决策区间如何随逆向运营成本与新产品生产成本组合的变化而变化. 从图1可以看出, 制造商拥有5个决策区间, 各自对应着相应的条件. 在区间 R_1 、 R_3 以及 R_4 中, 再造品价格随着逆向运营成本的增加而增加. 然而, 在区间 R_2 和 R_5 中, 再造品价格完全独立于逆向运营成本, 仅与二级市场容量及对应的残值有关.

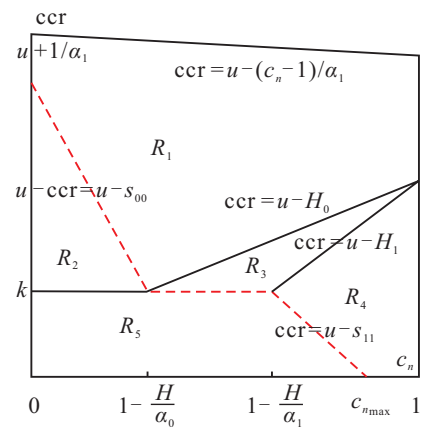


图1 制造商的最优决策区间

4 实例分析

本节以苹果公司为案例背景, 依据现实数据验证模型的科学性及应用性. 苹果公司回收项目中第2条明确指出 (<http://www.apple.com/recycling/gift-card/faq.html>), 将那些具有货币价值, 能够翻新并在二级市场销售的产品视为再造品. 基于此, 本文分析将新产品和再造品放在两个不同市场销售的情形. 根据美国苹果官网上的产品显示, 本文以 iPad mini 2 Wi-Fi + Cellular 32 GB for AT&T 为例验证模型的应用价值(随着时间的推移, 官网上销售的产品也会发生相应变化).

4.1 数据获得

1) α_0 : 政府制定的最小回收率. 美国缅因州制定的回收比例要求到2018年旧产品的回收率需达到50% (<http://www.ilga.gov/legislation/ilcs/ilcs3.asp?ActID=2998&ChapterID=36>), 故取 $\alpha_0 = 0.5$.

2) α_1 : 旧产品回收率的上限值. 通常情况下, 回收率的上限约为0.85到0.95之间, 本文取其平均值0.9.

3) c_c : 旧产品回收成本. 苹果美国官网显示该款产品目前的回收价格为85美元. 此外, 通过委托在美国工作的朋友走访苹果官方零售店了解到, 从2014年起旧产品回收价格每一次调整幅度约为5%, 也就是说上一次的回收价格约为 $85(1 + 5\%) = 89.25$ 美元. 在不失一般性的前提下, 以当前价格85美元为中心, 按照5%的波动幅度共选取10个数据, 分别为69.23、72.87、76.71、80.75、85、89.25、93.71、98.40、103.32、108.49. 本文采取线性比重法对上述数据进行无量纲化处理, 得到新的数据为0.079、0.083、0.087、0.092、0.097、0.102、0.107、0.112、0.118、0.124. 通过上述数据可以发现, 前3个数据增长幅度为0.004, 后3个数据增长幅度为0.006, 中间数据增长幅度为0.005, 取其平均值0.005代表回收成本 $c_c \in [0.079 + 0.124]$ 的增长幅度.

4) c_r : 旧产品再制造成本. Neira等^[21]认为, 回收成本约为总成本的80%, 取回收成本的中间值 $(0.097 + 0.102)/2 \approx 0.1$, 相应地, 再制造成本 $c_r = 0.025$.

5) w : 旧产品残值. 参考Raz等^[18], 旧产品残值约为回收成本的5%. 类似于再制造成本的计算, 取回收成本的中间值, 则旧产品残值约为0.005.

6) k : 再造品残值. 再造品残值是指, 当再造品的数量超过市场需求时产生的残值. 从理论上讲, 再造品的残值应大于旧产品的回收成本, 小于再造品的零售价格. 在不失一般性的情况下, 假设再造品的残值

约为0.12.

7) u : 二级市场容量. 在主要市场中, 消费者对新产品的支付意愿服从0到1上的均匀分布. 相应地, 消费者对再造品的支付意愿服从0到 u 上的均匀分布, 且 $u \leq 1$, 这是因为通常情况下消费者认为再造品的质量低于新产品. Raz等^[18]认为 u 的可能取值为0.4、0.5、0.6, 本文取其平均值0.5.

4.2 模型应用分析

将上述数据代入模型中, 可以得到新产品生产成本的4个区间段, 分别为

$$A_1 : c_n \in \left[0, 1 - \frac{H}{\alpha_0}\right] = [0, 0.240\ 000],$$

$$A_2 : c_n \in \left[1 - \frac{H}{\alpha_0}, 1 - \frac{H}{\alpha_1}\right] = [0.240\ 000, 0.577\ 778],$$

$$A_3 : c_n \in \left[1 - \frac{H}{\alpha_1}, c_{n_{\max}}\right] = [0.577\ 778, 0.685\ 778],$$

$$A_4 : c_n \in [c_{n_{\max}}, 1] = [0.685\ 778, 1].$$

接下来分析当 c_n 以及 ccr 发生变化时, 制造商的最优决策将发生怎样的变化. 根据 A_1 、 A_2 、 A_3 以及 A_4 四个区间段 c_n 的分布情况, 在不失一般性的情况下, 以0.1作为 c_n 的增长幅度分析制造商最优决策区间的变化情况.

在区间 A_1 中, $c_n \in [0, 0.240\ 000]$. 如表5所示, c_n 的取值分别为0.1和0.2. 先分析 $c_n = 0.1$ 时制造商的决策情况. 当 $ccr \leq 0.119$, 即 $ccr \leq k$ 时, 制造商愿意回收所有旧产品, 因为此时逆向运作成本较低, 回收再制造可使企业获利. 由图1可知, 制造商的最优决策区间为 R_5 . 当 $k \leq ccr \leq u - s_{00}$ 时, 制造商的最优区间为 R_2 . 注意到此时逆向运作成本总是小于 $u - s_{00}$, 故 R_1 不可能成为制造商的最优决策区间. 当 $c_n = 0.2$ 时, 制造商的最优决策情况与 $c_n = 0.1$ 的情形一致.

表5 新产品生产成本位于区间 A_1 时制造商的最优决策 (缅因州: $\alpha_0 = 50\%$)

ccr	$c_n = 0.100\ 000, u - s_{00} = 0.400\ 000$				$c_n = 0.200\ 00, u - s_{00} = 0.200\ 000$			
	p_r	X	α^{R^*}	$p_n^{R^*}$	p_r	X	α^{R^*}	$p_n^{R^*}$
0.104 000	0.310 000	0.411 480	0.900 000	0.542 800	0.310 000	0.366 480	0.900 000	0.592 800
0.109 000	0.310 000	0.409 455	0.900 000	0.545 050	0.310 000	0.364 455	0.900 000	0.595 050
0.114 000	0.310 000	0.407 430	0.900 000	0.547 300	0.310 000	0.362 430	0.900 000	0.597 300
0.119 000	0.310 000	0.405 405	0.900 000	0.549 550	0.310 000	0.360 405	0.900 000	0.599 550
0.124 000	0.310 000	0.224 500	0.650 000	0.551 000	0.310 000	0.199 500	0.650 000	0.601 000
0.129 000	0.310 000	0.223 875	0.650 000	0.552 250	0.310 000	0.198 875	0.650 000	0.602 250
0.134 000	0.310 000	0.223 250	0.650 000	0.553 500	0.310 000	0.198 250	0.650 000	0.603 500
0.139 000	0.310 000	0.222 625	0.650 000	0.554 750	0.310 000	0.197 625	0.650 000	0.604 750
0.144 000	0.310 000	0.222 000	0.650 000	0.556 000	0.310 000	0.197 000	0.650 000	0.606 000
0.149 000	0.310 000	0.221 375	0.650 000	0.557 250	0.310 000	0.196 375	0.650 000	0.607 250

对于区间 A_2 , A_3 以及 A_4 , 可用同样的方法进行分析讨论。

5 结论

针对当前日益严重的环境问题, 本文从法律约束的角度分析了制造商最优决策问题。研究发现: 1) 制造商拥有 5 个决策区间, 且各决策区间有唯一最优解; 2) 最优决策区间由新产品生产成本和旧产品逆向运营成本的组合决定。最后, 本文以苹果公司为案例背景, 用现实数据对模型进行了验证。实例分析表明, 模型具有较强的稳健性与实用性。

参考文献(References)

- [1] Pengpai News. The UN is acting[R]. http://www.the-paper.cn/newsDetail_forward_1418687, 2016.
- [2] Toyasaki F, Boyaci T, Verter V. An analysis of monopolistic and competitive take-back schemes for WEEE recycling[J]. *Production and Operations Management*, 2011, 20(6): 805-823.
- [3] Esenduran G, Kemahlioglu-Ziya E. A comparison of product take back compliance schemes[J]. *Production and Operations Management*, 2015, 24(1): 71-88.
- [4] Atasu A, Van Wassenhove L N, Sarvary M. Efficient take-back legislation[J]. *Production and Operations Management*, 2009, 18(3): 243-258.
- [5] Atasu A, Subramanian R. Extended producer responsibility for e-waste: Individual or collective producer responsibility?[J]. *Production and Operations Management*, 2012, 21(6): 1042-1059.
- [6] Atasu A, Ozdemir O, Van Wassenhove L N. Stakeholder perspective on e-waste take back legislation[J]. *Production and Operations Management*, 2013, 22(2): 382-396.
- [7] Atasu A, Souza G. How does product recovery affect quality choice?[J]. *Production and Operations Management*, 2013, 22(4): 991-1010.
- [8] 谢家平, 迟琳娜, 梁玲. 基于产品质量内生的制造/再制造最优生产决策[J]. *管理科学学报*, 2012, 15(8): 12-23.
(Xie J P, Chi L N, Liang L. Optimal manufacturing/remanufacturing production decision based on endogenous product quality[J]. *J of Management Science in China*, 2012, 15(8): 12-23.)
- [9] 曹晓刚, 郑本荣, 闻卉. 基于质量与价格竞争的再制造系统均衡决策研究[J]. *控制与决策*, 2014, 29(8): 1394-1400.
(Cao X G, Zheng B R, Wen H. Research on equilibrium decision of remanufacturing system based on quality and price competition[J]. *Control and Decision*, 2014, 29(8): 1394-1400.)
- [10] Esenduran G, Atasu A, Van Wassenhove L N. Valuable e-waste: Implications for extended producer responsibility[Z]. Fisher College of Business, The Ohio State University, 2015.
- [11] Karakayali I, Boyaci T, Verter V, et al. On the incorporation of remanufacturing in recovery targets[Z]. Desautels Faculty of Management, McGill University, 2011.
- [12] Jacobs B W, Subramanian R. Sharing responsibility for product recovery across the supply chain[J]. *Production and Operations Management*, 2012, 21(1): 85-100.
- [13] Esenduran G, Kemahlioglu-Ziya E, Swaminathan J M. Take-back legislation: Consequence for remanufacturing and environment[J]. *Decision Sciences*, 2016, 47(2): 219-256.
- [14] 计国君, 黄位旺. WEEE回收条例有效实施问题研究[J]. *管理科学学报*, 2012, 15(5): 1-10.
(Ji G J, Huang W W. Effective implementation of WEEE take-back irective[J]. *J of Management Science in China*, 2012, 15(5): 1-10.)
- [15] 高艳红, 陈德敏, 张瑞. 保证金退还制度下废旧电器电子产品回收定价模型[J]. *科研管理*, 2015, 36(8): 152-160.
(Gao Y H, Chen D M, Zhang R. The recycling-pricing model of waste electric and electronic products in the deposit refund system[J]. *Science Research Management*, 2015, 36(8): 152-160.)
- [16] 马祖军, 胡书, 代颖. 政府规制下混合渠道销售/回收的电器电子产品闭环供应链决策[J]. *中国管理科学*, 2016, 24(1): 82-90.
(Ma Z J, Hu S, Dai Y. Decision models for a closed-loop supply chain hybrid sale/collection channels for electrical and electronic equipment under government regulations[J]. *Chinese J of Management Science*, 2016, 24(1): 82-90.)
- [17] 公彦德, 达庆利, 占济舟. 基于处理基金和拆解补贴的电器电子产品CLSC研究[J]. *中国管理科学*, 2016, 24(6): 97-105.
(Gong Y D, Da Q L, Zhan J Z. Research on closed-loop supply based on processing funds and dismantling subsidies[J]. *Chinese J of Management Science*, 2016, 24(6): 97-105.)
- [18] Raz G, Blass V, Druehl C. The effect of environmental regulation on DfE innovation: Assessing social cost in primary and secondary markets[Z]. Darden School of Business, University of Virginia, 2014.
- [19] Ferguson M E, Toktay L B. The effect on competition on recovery strategies[J]. *Production and Operations Management*, 2006, 15(3): 351-368.
- [20] Savaskan R C, Bhattacharya S, Van Wassenhove L N. Closed-loop supply chain with product remanufacturing[J]. *Management Science*, 2004, 50(2): 239-252.
- [21] Neira J, Favret L, Fuji M, et al. End-of-life management of cell phones in the United States[D]. Santa Barbara: Donald Bren School of Environment Science and Management, University of California, 2006.

(责任编辑: 曹洪武)