

# 不确定需求下有价差时再造回收模式研究

计国君

(厦门大学管理学院, 福建 厦门 361005)

**摘要:**当前,再制造作为一种环保节约型的生产理念和制造方式受到了许多国家的重视,成为实现可持续发展最为有效的途径之一。本文应用博弈理论,针对市场需求不确定情况下制造商废旧产品回收模式选择问题,构建了新品和再造品有价差情况下制造商和零售商的决策模型。研究表明,尽管新品与再造品有价差时,顾客对两种产品的需求存在差异,但企业再造品供给不影响其新品定价。同时,在再造闭环供应链中,制造商的收益受回收成本影响,若各种回收模式回收成本相同,制造商应选择自己回收或零售商回收,这两种模式对产品销售和制造商收益没有影响,且有利于再造品销售,而第三方回收模式较利于新品销售;若各种回收模式的回收成本有差异,制造商应尽量选择回收成本较低的回收模式。

**关键词:**再制造;不确定需求;回收模式

**中图分类号:** F253.9

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1007-8266(2009)05-0041-05

## 一、引言

再造是通过必要的拆卸、检修与零部件更换等工序,将废旧品恢复成具有像新品一样质量和性能的过程。<sup>[1]</sup>美国开展再造工程的公司有 7.3 万家,年销售额达 529 亿美元,雇员多达 48.2 万人,其中汽车产业的再造年销售额约 365 亿美元,再造零部件包括发动机、离合器、转向器、起动机、化油器等。<sup>[2]</sup>再造活动的实施每年为美国施乐公司节省了上百万美元的原材料费和废物处理费,并为其塑造了环境友好型企业品牌形象。<sup>[3]</sup>再造通过对废旧品进行增值回收再利用,可有效实现资源优化利用、环境保护及经济可持续发展等综合目标,企业是否执行再造甚至成为贸易全球化背景下的瓶颈问题,受到了各国政府的高度重视,如再造工程研究被列入我国自然科学基金委员会“十五”期间的优先支持领域。<sup>[4]</sup>

再造的研究始于 20 世纪末,主要反映在以下四方面:(1)闭环供应链(Closed-loop Supply Chain,以下简称 CLSC)相关理论,如驱动力<sup>[5]</sup>、再处理的不确定特征<sup>[6]</sup>、第三方物流作用<sup>[7]</sup>、生产计划和控制的应急预案<sup>[8]</sup>、CLSC 经济学内涵<sup>[9]</sup>、实证研究<sup>[10]</sup>、技术方法支持<sup>[11]</sup>等;(2)再造方面的理论,如再造回收网络设计<sup>[12]</sup>、再造生产计划<sup>[13]</sup>、再造库存管理<sup>[14]</sup>等;(3)不确定需求下的供应链决策,如产品订购数量<sup>[15]</sup>、定价<sup>[16]</sup>及协调策略<sup>[17]</sup>等;(4)再造 CLSC 回收模式,如回收模式类型和特点<sup>[18]</sup>、回收模式选择<sup>[19]</sup>等。但有关再造的研究大多集中在工程技术方面,有关其运作管理的研究近年来才开始受到重视。<sup>[20]</sup>再造工程的实施过程包括废旧品收集、拆卸、检测/分类、再制造、再销售等环节,与正向产品物流活动相结合,共同构成一个 CLSC 系统。与单向供应链相比,再造 CLSC 在拓扑结构上呈现出源多、目的地少的多对一

结构,且每一个源处的回收在数量、时间、损坏情况等方面具有不确定性,使系统充满不确定因素,管理和协调非常困难。<sup>[21]</sup>要使废旧品从消费者手中低成本、高效率地到达再造企业,离不开合理的回收模式,而回收模式设计要综合考虑回收过程中各种不确定因素的影响,如果回收模式选择不当,会使回收品在数量、时间和质量上更加难以控制,使回收成本增加,回收率降低,相关信息不能在链条中顺利传递,从而影响再造活动实施。综上所述,已有研究存在以下问题:对 CLSC 的研究大都集中在网络设计、生产计划安排及库存方面,对逆向物流回收模式选择问题关注不够,将不确定因素简化,如假设需求量确定,回收量为需求量的固定比率,回收价格不影响回收率等,特别是对再造品需求的简化,假定再造品回收量与回收价具有直接关联,许多学者考虑了再造品与新品在统一市场进行无价差销售时制造商的回收模式选择,而对现实中再造品低价销售且与新品销售存在竞争的情况考虑较少。因此,本文将从制造商的角度出发,研究市场需求不确定情况下制造商废旧产品回收模式选择问题。利用博弈论对不确定需求情况下新品与再造品有价差时参与主体的收益建模,分析比较各种模式下节点企业的期望收益和最优决策,以帮助制造商选择合适的回收模式,也为再造工程实施提供一些有益的指导。

## 二、再造闭环供应链及其回收模式

### 1. 再造的内涵

再造系统的功能活动主要包括对废旧品或功能过时产品的收集、检测/分类、再造、再销售及其他处理活动。<sup>[22]</sup>再造物流由从消费者到再造商的逆向回收物流与再造后重新回到销售市场的再造品流组成,两者形成了一个 CLSC 系统。结合再造的本质,再造 CLSC 指在产品报废后对其重新

加工形成可用产品的过程中所进行的供应链管理活动,其中可用产品包括处理后的原材料以及在不破坏基本外型的情况下,经再造后性能得到改良的零部件。再造 CLSC 管理包括从产品设计到制造与投入使用,再到回收再造的整个过程中,为保持、恢复产品可用状态所采取的一系列活动,最后生成各种再造品及有关产品的反馈信息,有助于实现良好的经济效益与社会生态环保效益。<sup>[23]</sup>再造活动一是使废旧品零部件性能得以恢复或升级,重新获得再使用价值和经济效益;二是满足环保立法相关规定,节约资源,保护环境,实现可持续发展的战略目标。可用于再造的对象极为广泛,既有设备、系统、设施,也有产品、零部件,既有硬件部分,也有软件部分。参与再造的基本实体有顾客、供应商、制造商、零售商、循环商、政府等。其中,循环商包括回收商与集中回收处理中心。回收商一般由原制造商、零售商、第三方公司或联盟组织来承担;集中回收处理中心可以是原制造商的一个部门,也可以是独立的再造企业。

## 2. 再造闭环供应链回收模式及类型

在生产商责任延伸制度下,制造商应根据需要选择恰当的回收模式来履行社会义务。从已有实践看,常见回收模式主要有四大类。<sup>[24][25]</sup>

(1) 制造商负责回收模式。指制造商自建逆向物流体系,并承担废旧品回收、修复、拆卸和再循环等活动中产生的所有成本。该模式优点为:直接从消费者手中回收产品,可快速获得有关产品的第一手反馈信息,有利于及时掌握顾客偏好,进行产品创新,可实施正逆向物流的协调集成运作,对回收活动控制能力强,有利于提高回收处理效率,包括较低的运输成本、合理的产品调配及品牌形象维护等。<sup>[26]</sup>该模式缺点为:投资量大,运作过程中可能出现正逆向业务资源冲突等。因此,该模式一般仅适合实力雄厚的大中型企业。

(2) 零售商负责回收模式。指制造商负责整个回收再造过程,而回收环节由零售商协助制造商实施,制造商在获取废旧品时对零售商给予一定的经济补偿。该模式的优点是零售商零距离接近消费者,有利于获得更大的回收量,避免制造商在回收网络方面的大量投资和分散管理等。但在该模式下,双方的代理关系导致零售商回收的努力程度对回收量影响很大,信息不对称使制造商无法准确观察零售商的努力程度并采取有效激励。因此,当制造商正向销售网络与逆向回收网络重合较多时,宜选择零售商负责回收模式。

(3) 第三方负责回收模式。指制造商与第三方服务企业达成协议,由第三方负责从消费端进行回收并转交给制造商处理。第三方企业可同时为多个制造商提供回收服务,集约化程度高,规模效益突出,具有完备的物流网络、先进的物流信息系统和管理经验,可提供更为专业和更为优质的服务,有利于企业将薄弱的物流职能剥离出去,集中核心能力。如 TNT 国际快递公司、美国联合包裹运送服务公司(UPS)等进入中国后,已纷纷推出逆向物流服务。采取该模式也存在一定的风险,如容易造成信息外泄,不利于技术保护;大多数第三方物流企业在设备、技术、管理等方面达不到运作要求;逆向物流行业缺乏强有力的第三方物流企

业业绩考核参考标准等。制造商如果不能慎重考察第三方企业的物流服务能力,容易产生缺乏信任、沟通不畅、应对不确定性能力低等风险,影响合作收益。

(4) 制造商联合回收模式。指生产同类产品或同行业的制造商以合作或合资等方式建立一个联合责任组织,来对这些制造商的产品进行回收再造。该模式能够克服单一制造商建立回收网络时资金不足、管理能力低、运作风险大等缺点,通过与行业中合作伙伴甚至竞争对手的合作,可实现回收技术共享及协调发展,有利于发挥专业优势,实现规模经济效益,提高回收处理效率,联盟间组织协调可有效抑制成员机会主义行为,节约交易成本。如日本电视机生产商大多采用该模式。<sup>[27]</sup>该模式也存在一定的弊端,如联盟前需确定公认的成本核算与利益分配原则,否则会影响参与企业的协作积极性及联合责任组织的物流运作绩效;制造商不能及时、准确地获得产品回收信息,不利于企业产品设计向易分解、易再造的方向发展;产品拆卸过程中极易造成企业核心技术和保密信息外泄,同行业成员间的竞争、信任及规模实力差异对合作效果也具有不同程度的影响。

综上所述可见,制造商在具体回收运作过程中应结合自身资源与产品特点及所处环境等因素进行综合决策,确定恰当的回收模式,归类比较如表 1 所示。

表 1 回收模式比较表

模式	制造商负责回收	零售商负责回收	第三方负责回收
适合企业规模	一般适合大企业	大中型企业	中小企业或专注于核心优势的大企业
物流成本	高	较高	低
规模经济性	低	较低	高
信息反馈速度	及时、准确	较难反馈	通过契约获得
风险承担主体	制造商	零售商	第三方企业
产品类型	种类少、回收价值高、专业性强的产品	正逆向销售网络重合较多的产品	种类多、生命周期短、回收率高的产品

## 三、不确定需求下有价差时再造回收模型

### 1. 基本假设

假定在制造商责任延伸制度下由制造商负责回收本企业的废旧品,并对回收到的废旧品进行再造。再造品和新品以不同的批发价格  $w_1$ 、 $w_2$  出售给零售商,其中新品单位生产成本为  $c$  ( $0 < c \leq w_1$ ),再造品单位生产成本为  $c_0$  ( $0 < c_0 \leq w_2$ )。新品需求量为  $D_1$ ,零售商订购量为  $Q_1$ ,零售价为  $p_1$  ( $p_1 > w_1$ );再造品需求量为  $D_2$ ,零售商订购量为  $Q_2$ ,零售价为  $p_2$  ( $p_2 > w_2$ )。下面主要分析制造商  $M$  负责回收、零售商  $R$  负责回收与第三方  $T$  负责回收三种模式,各参与主体的期望收益分别为  $\pi_M^i$ 、 $\pi_R^i$ 、 $\pi_T^i$  ( $i=M, R, T$ )。

假设 1:再造品在功能和性能上满足新品要求,但价格上有差异。消费者在零售商处拥有产品信息知情权,能自由选择购买新品或再造品。

假设 2:新品市场需求确定,再造品市场需求具有随机

性,供应链成员不能完全根据再造品需求量进行决策。这一方面是因为,在企业准入政策方面缺乏有效的监管机制,市场上再造品质量参差不齐;另一方面是因为,消费者对再造品仍然存在一定的疑虑,除受价格影响外,还受环保意识、品牌形象、售后服务等因素的影响。因此,假设新品需求确定,再造品需求具有随机性。

假设3:新品和再造品市场需求均受其零售价格的影响,且再造品价格降低会吸引部分新品需求者,另外新品市场需求也会随再造品价格上升而增加。

由此可将新品和再造品市场需求量  $D_1$ 、 $D_2$  分别表示成  $p_1$ 、 $p_2$  的函数,且满足:  $\frac{\partial D_1}{\partial p_1} < 0$ ,  $\frac{\partial D_1}{\partial p_2} > 0$ ,  $\frac{\partial D_2}{\partial p_2} < 0$ ,  $\frac{\partial D_2}{\partial p_1} > 0$ 。为不失一般性,将需求函数表述成价格的线性函数<sup>[28]</sup>,利用线性加性不确定性来描述再造品的不确定性,则  $D_1$ 、 $D_2$  满足:

$$D_1 = d_1(p_1, p_2) = \alpha_1 - \beta_1 p_1 - \lambda(p_1 - p_2 - v)$$

$$D_2 = d_2(p_1, p_2) + \varepsilon = \alpha_2 - \beta_2 p_2 + \lambda(p_1 - p_2 - v) + \varepsilon$$

其中  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$  为两种产品不受其零售价影响时最大的市场需求量,  $\beta_1$ 、 $\beta_2$  为消费者对价格的敏感系数,  $\varepsilon$  为独立于零售价  $p_2$  的再造品需求随机变量,其密度函数为  $f(\cdot)$ ,累积概率分布函数为  $F(\cdot)$ 。由于两种产品在市场上存在竞争,消费者购买再造品可获得价格优势  $(p_1 - p_2)$ ,从效用理论考虑,再造品可能会使消费者少获得效用  $v$  ( $v > 0$ ),因此再造品价格优势为  $(p_1 - p_2 - v) \cdot \lambda$  表示顾客对该价格优势的敏感系数。

假设4:回收量由零售商对再造品的需求预测决定,制造商负责对这些回收品进行再造。这是一种拉式回收策略,不考虑回收价格及回收量函数。

假设5:再造对制造商而言有利可图,生产一种新品的单位成本  $c$  大于再造品的单位成本  $c_0$  (表示所有回收品的平均再造成本),制造商通过再造可节约单位成本  $c - c_0$ 。废旧品单位回收、检测/拆卸及运输成本为  $A$  ( $c < c_0$ ),是外生变量(常数)。当制造商从零售商或第三方处购买回收品时,制造商转移支付价格  $b$  与  $A$  的大小有关,满足  $A < b < c - c_0$ 。

假设6:制造商完全根据零售商的订购策略进行新品生产与废旧品再造。零售商面临一个具有随机性的再造品市场需求,销售中发生产品缺货时,由零售商承担缺货成本,单位缺货成本用  $h$  ( $h > 0$ ) 表示,销售季节过后未销售完的产品由零售商以价格  $u$  自行处理 ( $u$  为残值,是外生变量,满足  $0 < u < p$ )。

假设7:供应链由单一的制造商、零售商或第三方企业组成。市场是开放的,各参与主体完全理性,根据自己最大化的期望利润进行决策。在制造商与零售商或第三方企业的博弈中,制造商是博弈领导者,零售商和第三方企业是追随者。

假设8:仅考虑单个周期内需求不确定的情况。

## 2. 不确定需求下有价差时再造回收模型

(1) 制造商负责回收模型。制造商根据零售商的订购量分别进行回收、废旧品再造及新品生产。决策过程如下:首

先,由零售商根据产品市场需求预测来确定订购量  $Q_1$ 、 $Q_2$ ,制造商根据  $Q_1$ 、 $Q_2$  制定两种产品的批发价  $w_1$ 、 $w_2$ ,然后零售商确定零售价  $p_1$ 、 $p_2$ 。对零售商来说,新品订购量  $Q_1$  可完全根据需求预测  $D_1$  确定,但在决定再造品订购量  $Q_2$  时,再造品需求的随机性使零售商无法准确预测  $D_2$  的大小,因此会出现  $Q_2$  与  $D_2$  不符的情况,相应地零售商就要承担缺货成本或多余产品处理成本。因此,新品销售收益  $R_1 = (p_1 - w_1)D_1$ ;再造品销售收益  $R_2 = p_2 \min(D_2, Q_2) - w_2 Q_2$ ;多余产品处理收益  $R_3 = u(Q_2 - D_2)$ ;缺货成本  $C_1 = h(D_2 - Q_2)$ 。这样零售商的期望收益为:

$$\pi_R^M = \begin{cases} (p_1 - w_1)D_1 + p_2 D_2 - w_2 Q_2 + u(Q_2 - D_2) & D_2 \leq Q_2 \\ (p_1 - w_1)D_1 + (p_2 - w_2)D_2 - h(D_2 - Q_2) & D_2 > Q_2 \end{cases} \quad (1)$$

设  $z = Q_2 - d_2(p_1, p_2)$ , 则上式化为:

$$\pi_R^M = (p_1 - w_1)D_1 - w_2(d_2(p_1, p_2) + z) + \int_0^z [p_2(d_2(p_1, p_2) + x) + u(z - x)]f(x)dx + \int_z^\infty [p_2(d_2(p_1, p_2) + z - h(x - z))]f(x)dx \quad (2)$$

作为追随者的零售商,会首先制定出满足自身利益最大化的反应函数,以确定最优的产品零售价  $p_1^*$ 、 $p_2^*$  与再造品订购量  $Q_2^*$ 。  $p_1^*$ 、 $p_2^*$ 、 $z$  满足如下条件:

$$\frac{\partial \pi_R^M}{\partial p_1} = \alpha_1 - \beta_1 p_1 - \lambda(p_1 - p_2 - v) - (p_1 - w_1)(\beta_1 + \lambda) + (p_2 - w_2)\lambda = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial \pi_R^M}{\partial p_2} = \lambda(p_1 - w_1) + \alpha_2 - 2\beta_2 p_2 + (p_1 - 2p_2 - v)\lambda + \int_0^z x f(x)dx - z(1 - F(z)) + w_2(\beta_2 + \lambda) = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial \pi_R^M}{\partial z} = (p_2 + h)(1 - F(z)) - w_2 + uF(z) = 0 \quad (5)$$

制造商完全根据零售商的订购量进行回收、废旧品再造及新品生产,无需承担缺货成本或多余商品残值处理成本。其再造品收益为  $R_4 = (w_2 - c_0 - A)Q_2$ ,新品收益为  $R_5 = (w_1 - c)D_1$ ,则制造商期望收益满足:

$$\pi_M^M = (w_1 - c)d_1(p_1, p_2) + (w_2 - c_0 - A)(d_2(p_1, p_2) + z) \quad (6)$$

因此,在制造商负责回收模式下,制造商的期望收益及最优决策变量  $w_1^*$ 、 $w_2^*$  满足下式:

$$\max(\pi_M^M(w_1, w_2, p_1, p_2, z))$$

$$S.t. \begin{cases} \alpha_1 - \beta_1 p_1 - \lambda(p_1 - p_2 - v) - (p_1 - w_1)(\beta_1 + \lambda) + (p_2 - w_2)\lambda = 0 \\ \lambda(p_1 - w_1) + \alpha_2 - 2\beta_2 p_2 + (p_1 - 2p_2 - v)\lambda + \int_0^z x f(x)dx - z(1 - F(z)) + w_2(\beta_2 + \lambda) = 0 \\ (p_2 + h)(1 - F(z)) - w_2 + uF(z) = 0; p_1 > w_1 > c, p_2 > w_2 > c_0 + A \end{cases} \quad (7)$$

(2) 零售商负责回收模型。制造商负责新品生产与废旧品再造;零售商除负责确定订购量与零售价并将新品和再造品卖给消费者外,还负责从消费者手中回收废旧品并以转移支付价格  $b$  将回收品卖给制造商。在该模型中,零售商的期望收益包括产品销售收益与废旧品回收收益,其中销售收益与制造商负责回收模型中零售商的收益类似,回收收益为  $R_6 = (b - A)Q_2$ 。因此,零售商的期望收益满足:

$$\pi_R^R = \begin{cases} (p_1 - w_1)D_1 + p_2 D_2 + (b - A - w_2)Q_2 + u(Q_2 - D_2) & D_2 \leq Q_2 \\ (p_1 - w_1)D_1 + (p_2 - w_2 + b - A)D_2 - h(D_2 - Q_2) & D_2 > Q_2 \end{cases} \quad (8)$$

设  $z = Q_2 - d_2(p_1, p_2)$  则公式(8)可转化为:

$$\pi_R^R = (p_1 - w_1)D_1 + (b - A - w_2)(d_2(p_1, p_2) + z) + \int_0^z [p_2(d_2(p_1, p_2) + x) + u(z - x)]f(x)dx + \int_z^\infty [p_2(d_2(p_1, p_2) + z - h(x - z))]f(x)dx \quad (9)$$

使零售商收益最大的  $p_1, p_2, Q_2$  满足如下条件:

$$\frac{\partial \pi_R^R}{\partial p_1} = \alpha_1 - \beta_1 p_1 - \lambda(p_1 - p_2 - v) - (p_1 - w_1)(\beta_1 + \lambda) + (p_2 - w_2 - A + b)\lambda = 0 \quad (10)$$

$$\frac{\partial \pi_R^R}{\partial p_2} = \lambda(p_1 - w_1) + \alpha_2 - 2\beta_2 p_2 + (p_1 - 2p_2 - v)\lambda + \int_0^z x f(x)dx + z(1 - F(z)) - (b - A - w_2)(\beta_2 + \lambda) = 0 \quad (11)$$

$$\frac{\partial \pi_R^R}{\partial z} = b - w_2 - A + uF(z) + (p_2 + h)(1 - F(z)) = 0 \quad (12)$$

作为博弈领导者的制造商,其再制品收益为  $R_4 = (w_2 - c_0 - b)Q_2$ , 新品收益为  $R_5 = (w_1 - c)D_1$ , 则制造商收益为:

$$\pi_M^R = (w_1 - c)d_1(p_1, p_2) + (w_2 - c_0 - b)(d_2(p_1, p_2) + z) \quad (13)$$

制造商的期望收益与供应链中决策变量  $w_1^*, w_2^*, p_1^*, p_2^*, z^*$  的值满足如下关系:

$$\begin{cases} \max(\pi_M^R(w_1, w_2, p_1, p_2, z)) \\ \text{s.t.} \begin{cases} \alpha_1 - \beta_1 p_1 - \lambda(p_1 - p_2 - v) - (p_1 - w_1)(\beta_1 + \lambda) + (p_2 - w_2 - A + b)\lambda = 0 \\ \lambda(p_1 - w_1) + \alpha_2 - 2\beta_2 p_2 + (p_1 - 2p_2 - v)\lambda + \int_0^z x f(x)dx + z(1 - F(z)) + (b - A - w_2)(\beta_2 + \lambda) = 0 \\ (p_2 + h)(1 - F(z)) + b - w_2 - A + uF(z) = 0; p_1 > w_1 > c, p_2 > w_2 > c_0 + b \end{cases} \end{cases} \quad (14)$$

(3) 第三方负责回收模型。制造商负责新品生产与废旧品再造;零售商负责确定订购量和销售价格并将产品卖给消费者,第三方负责回收,以单位回收成本  $A$  从顾客处获得废旧品并以转移支付价格  $b$  卖给制造商。零售商的期望收益为:

$$\pi_R^T = (p_1 - w_1)D_1 - w_2(d_2(p_1, p_2) + z) + \int_0^z [p_2(d_2(p_1, p_2) + x) + u(z - x)]f(x)dx + \int_z^\infty [p_2(d_2(p_1, p_2) + z - h(x - z))]f(x)dx \quad (15)$$

第三方期望收益为:

$$\pi_T^T = (b - A)(d_2(p_1, p_2) + z) \quad (16)$$

制造商期望收益为:

$$\pi_M^T = (w_1 - c)d_1(p_1, p_2) + (w_2 - c_0 - b)(d_2(p_1, p_2) + z) \quad (17)$$

在该主从博弈过程中,制造商是领导者,制造商的期望收益和决策变量  $w_1, w_2$  满足:

$$\begin{cases} \max(\pi_M^T(w_1, w_2, p_1, p_2, z)) \\ \text{s.t.} \begin{cases} \alpha_1 - \beta_1 p_1 - \lambda(p_1 - p_2 - v) - (p_1 - w_1)(\beta_1 + \lambda) + (p_2 - w_2)\lambda = 0 \\ \lambda(p_1 - w_1) + \alpha_2 - 2\beta_2 p_2 + (p_1 - 2p_2 - v)\lambda + \int_0^z x f(x)dx + z(1 - F(z)) + w_2(\beta_2 + \lambda) = 0 \\ (p_2 + h)(1 - F(z)) - w_2 + uF(z) = 0; p_1 > w_1 > c, p_2 > w_2 > c_0 + b \end{cases} \end{cases} \quad (18)$$

### 3. 仿真与结论

利用仿真分析方法求解各回收模式中参与主体的最优决策与期望收益。对于模型中随机需求变量  $\varepsilon$  所属分布,考虑到模型求解中对其密度函数积分的计算量,假设  $\varepsilon$  服从  $U(0, d)$  的均匀分布( $d > 0$ ),即密度函数  $f(x)$  可表示为:

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{d-0} = \frac{1}{d} & x \in (0, d) \\ 0 & x \notin (0, d) \end{cases}$$

设定  $d=2$ ,各参数赋值分别为  $\alpha_1=200, \alpha_2=130, \beta_1=7, \beta_2=5, \rho_0=6, \rho=10, \nu=5, h=u=4, \lambda=2, b=1.2A, A=0.8$ 。把这些值分别代入公式(7)、(14)、(18),利用 Lingo 优化软件分别对模型中的每个参数,如新品和再造品的价格敏感系数  $\beta_1, \beta_2$  及回收成本  $A$  和价格差异敏感系数  $\lambda$  进行敏感性分析。当新品价格敏感系数  $\beta_1$  分别在 7 上下、再造品价格敏感系数  $\beta_2$  分别在 5.5 上下、再造品单位回收成本  $A$  分别在 0.8 上下、新品与再造品价格差异敏感系数  $\lambda$  分别在 2 上下 10% 与 20% 的范围内波动时,可由仿真结果得出以下结论:

(1) 当新品与再造品有价差时,再造 CLSC 三种回收模式中各参与主体的期望收益及最优决策为:制造商最优期望收益  $\pi_M^M = \pi_M^R > \pi_M^T$ ,零售商最优期望收益  $\pi_R^R = \pi_R^M > \pi_R^T$ ,新品最优批发价  $w_1^M = w_1^R = w_1^T$ ,新品最优零售价  $p_1^M = p_1^R = p_1^T$ ;新品最优订购量  $Q_1^T > Q_1^M = Q_1^R$ ;再造品最优批发价  $w_2^R > w_2^T > w_2^M$ ;再造品最优零售价  $p_2^T > p_2^M = p_2^R$ ;再造品最优订购量  $Q_2^M = Q_2^R > Q_2^T$ 。

(2) 在随机需求给定的情况下,三种回收模式中新品的最优批发价与零售价均相同,说明制造商采用何种回收模式不会影响其新品定价。

(3) 从新品和再造品价格敏感系数的仿真结果可以发现,降低顾客对新品和再造品的价格敏感性有利于产品销售量的提高与供应链整体收益的增加。降低顾客对再造品价格敏感性的措施有很多种,如对再造品实施分级定价策略,利用良好的营销手段使顾客了解再造品并提供完善的售后服务保障等。

(4) 单位回收成本  $A$  的增加会导致再造品销售价格上升,订购量减少,制造商与零售商期望收益降低。同时,再造品定价的相应改变能促使新品销售量增加,但并不影响其定价。

(5) 顾客对再造品与新品价差敏感性增加时,降低再造品零售价有利于再造品销售与供应链参与主体收益的提高。

因此,需求不确定情况下新品与再造品有价差时的回收策略包括:若不考虑各种模式回收成本的差异,制造商应选择自己回收或由零售商回收,这两种模式对产品销售和制造商收益没有影响,且有利于再造品销售,而第三方回收模式比较有利于新品销售;若各种模式回收成本有差异,制造商应尽量选择回收成本较低的模式。

### 四、有待进一步研究的问题

结合前面的分析,还有下列问题有待进一步研究:利用我国企业历史数据对所建模型进行实证分析;对废旧品可再造率不确定性及回收运输成本差异的考虑;在信息不对称和动态博弈条件下,制造商再造品与第三方企业再造品

存在竞争时,再制品的定价问题等。

\* 本文系国家青年科学基金项目《基于企业社会责任的绿色供应链实证分析与运作研究》(项目编号:70802052)和福建省新世纪优秀人才支持计划项目《基于循环经济理论的闭环供应链研究》(项目编号:闽[2006]35)的部分研究成果。

参考文献:

[1]V. Jayaraman, V. D. R. Guide, R. Srivastava. A Closed-loop Logistics Model for Remanufacturing [J]. Journal of the Operational Research Society, 1999, 50(5): 497-508.

[2]R. T. Lund. The Remanufacturing Industry - hidden Giant [R]. Boston University, Manufacturing Engineering Department, 1996: 47-51.

[3]W. Kerr, C. Ryan. Eco-efficiency Gains from Remanufacturing: A Case Study of Photocopier Remanufacturing at Fuji Xerox Australia [J]. Journal of Cleaner Production, 2001, 9(1):75-81.

[4]徐滨士.再制造与循环经济[M].北京:科学出版社,2007:66-73.

[5],[22]Guojun Ji. Complaint Management and Virtual Enterprise in Closed-loop Supply Chains and Its Performance Evaluation by Using Exergoeconomics and Extenics [J]. International Journal of Service and Operation Management, 2008, 2(2): 23-44.

[6]V. D. R. Guide. Supply-chain Management for Recoverable Manufacturing Systems[J]. Interfaces, 2000, 30(3): 125-142.

[7]D. W. Krumwiede, C. Sheu. A Model for Reverse Logistics Entry by Third Party Providers[J]. Omega, 2002, 30(5):325-333.

[8]V.D.R.Guide, V.Jayaraman, J.D.Linton. Building Contingency Planning for Closed-loop Supply Chains with Product Recovery [J]. Journal of Operations Management, 2003, 21(3): 259-279.

[9],[20]尤建新, 隋明刚. 闭环供应链的经济学解释[J]. 同济大学学报, 2005, 16(5): 102-106.

[10]M. L. French, R. L. La Forge. Closed-loop Supply Chains in Process Industries: An Empirical Study of Producer Re-use Issues[J]. Journal of Operations Management, 2006, 24(3): 271-286.

[11]D. Vaochaos, P. Georgiadis, E. Iakovou. A System Dynamics Model for Dynamic Capacity Planning of Remanufacturing in Closed-loop Supply Chains[J]. Computers & Operations Research, 2007(34): 367-394.

[12]B. M. Beamon, C. Fernandes. Supply-chain Network Configuration for Product Recovery [J]. Production Planning & Control, 2004, 15(3): 270-281.

[13]刘宝全, 季建华, 张弦. 废旧产品再制造环境下的产品定价和再制造方式分配[J]. 管理工程学报, 2008, 22(3): 74-79.

[14]刘晓峰, 等. 基于网络分析法的逆向物流回收模式选择评价[J]. 电子科技大学学报(社科版), 2007, 9(3): 32-36.

[15]M. K. Mantrala, K. Raman. Demand Uncertainty and Suppliers Returns Policies for a Multi-store Style-good Retailer [J]. European Journal of Operational Research, 1999, 115(2): 270-284.

[16]华中生, 孙毅彪, 季四杰. 单周期产品需求不确定性对供应链合作的影响[J]. 管理科学学报, 2004, 7(5): 40-48.

[17]K. Ibdurfurth. Optimal Policies in Hybrid Manufacturing/Remanufacturing Systems with Product Substitution [J]. Production Economics, 2004, 90(3): 325-343.

[18]S. K. Mukhopadhyay, R. Setaputra. The Role of 4PL as the Reverse Logistics Integrator: Optimal Pricing and Return Policies [J]. International Journal of Physical Distribution & Logistics Management, 2006, 36(9): 716-729.

[19]R. C. Savaskan, S. Bhattacharya, L. V. Wassenhove. Closed-loop Supply Chain Models with Product Remanufacturing [J]. Management Science, 2004, 50(2): 239-252.

[21]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.

[23]计国君. 闭环供应链下的配送和库存理论及应用[M]. 北京: 中国物资出版社, 2007: 20-35.

[24]员巧云, 刘斌. 不同策略下的再制造利润模型研究[J]. 集团经济研究, 2007(1): 263-264.

[25]R. C. Savaskan, S. Bhattacharya, L. V. Wassenhove. Closed-loop Supply Chain Models with Product Remanufacturing [J]. Management Science, 2004, 50(2): 239-252.

[26]A. J. Spicer, M. R. Johnson. Third-party Remanufacturing as A Solution for Extended Producer Responsibility [J]. Journal of Cleaner Production, 2004, 12(1): 37-45.

[27]常香云. 企业逆向物流回收处理若干关键问题研究[D]. 同济大学, 2007: 35-49.

[28]A. Tsay, N. Agrawal. Channel Dynamics Under Price and Service Competition [J]. Manufacturing and Service Operations Management, 2000, 2(4): 372-391.

[作者简介]计国君(1964-),男,安徽省合肥市人,厦门大学管理学院教授,博士生导师,主要研究方向为供应链管理、系统工程、信息技术及管理。 责任编辑 陈静

## The Study on Products' Recycling Modes Based on Remanufacturing with Uncertain Demand

Ji Guo-jun

(Xiamen University, Xiamen, Fujian 361005, China)

**Abstract:** In this paper, the product's recycling modes based on remanufacturing with uncertain demand are discussed. The selection of enterprise recycling different modes is analyzed under random market demand for products, respectively. Based on the game theory, the decision-making model between manufacturers and retailers with prices different are studied respectively. At the same time, by using numerical analysis method, the optimal solution of the main players in remanufacturing closed-loop supply chain and the influence of changing remanufacturing related factors on them can be gained, which can offer support for policymaker selecting recycling modes.

**Key words:** remanufacturing; demand uncertainty; recycling modes