

文章编号: 1003-207(2012)02-0078-09

不同渠道权力结构下的 S-M 两级闭环 供应链绩效分析

赵晓敏, 林英晖, 苏承明

(上海大学管理学院, 上海 200444)

摘要:与传统正向供应链相比,闭环供应链关注对消费阶段后的废旧产品进行回收再制造,从而减少环境污染、降低资源消耗,对推动制造业的可持续发展具有非常重要与深远的意义。为了探讨产品再制造战略对闭环供应链中成员企业的影响,本文采用博弈论对一个供应商和一个制造商构成的 S-M 两级闭环供应链进行研究,着重分析供应商强势、制造商强势以及供应商和制造商双方势力均衡时的定价策略和供应链系统绩效。研究结果表明:当实施产品再制造战略时,产品的销售价格降低、产品的市场销量增加,零部件的批发价格则上涨。从成员企业个体来看,再制造战略总是有助于制造商获得更多额外收益,而对供应商的影响效应则与供应商在渠道中的权力地位有关,处于强势地位的供应商可以通过大幅提高零部件批发价格的方式来保证自己从再制造中获益,而处于弱势地位的供应商则有可能遭受利益损失。从系统整体绩效来看,再制造战略具有提升供应链系统整体赢利水平的积极作用,但是供应商和制造商之间的权力结构会影响再制造的经济价值。具体而言,供应商和制造商势力均衡时的供应链绩效最优,其次是制造商主导的供应链,最差的是供应商主导的供应链。

关键词: 闭环供应链; 产品再制造; 渠道权力; 博弈论

中图分类号: C931 **文献标识码:** A

1 引言

近年来,随着制造商责任延伸制的推行,废弃产品的回收再制造成为全球制造业、特别是高科技制造业面临的一个热点问题。以电子制造行业为例,Apple、Dell、富士施乐等国际知名企业纷纷将产品再制造纳入到公司的总体战略中,以期实现经济与环境的协调发展。对这些企业来讲,需要对新产品正向物流与废旧产品逆向物流进行集成优化,实施闭环供应链管理^[1-3]。与传统正向供应链相比,闭环供应链系统减少了最终垃圾的数量,并尽可能延长了产品和零部件的使用寿命,在根本上降低了对环境的不良影响,因此受到理论界和企业界的广泛关注。

目前闭环供应链的研究已经取得不少成果,并且随着工业领域的逐渐应用和实践,闭环供应链的理论体系也在不断丰富与演进,其中从商业赢利视角设计闭环供应链系统成为现阶段的一个核心问

题。围绕这一问题,学者们主要将企业经济学的观点和研究方法应用到闭环供应链的研究中,采用博弈论、契约理论等方法建立模型,从企业利润最大化视角探讨产品回收、成员企业的合作与协调、逆向渠道设计等问题。例如,Savaskan 等(2004)^[4]应用博弈论分析了再制造闭环供应链的最优渠道结构。研究中假定新品与再制品无差异,主要考虑了制造商直接回收、零售商回收和第三方回收三种回收渠道结构,重点探讨了不同的逆向渠道结构对成员企业的批发价格、零售价格以及供应链利润的影响。Savaskan 等(2006)^[5]拓展分析了零售商竞争程度对渠道结构的影响,其研究表明在制造商直接回收的渠道结构中,供应链的渠道利润取决于回收努力对回流规模的影响,而在零售商从事回收的渠道结构中则取决于零售商之间的竞争程度。Karakayli 等(2007)^[6]讨论了制造商和零售商在集中决策和分散决策下耐用品的回收定价及再制品的销售定价问题,并针对分散决策中的效率损失现象采用二部定价合同进行利益协调。针对原产品与再制品存在差异时的情形,Ferguson 和 Toktay(2006)^[7]探讨了原产品制造商面临独立再制造商的竞争威胁时的两阶段定价及再制造决策问题。Webster 和

收稿日期:2011-07-30;修订日期:2012-02-13

基金项目:国家自然科学基金资助项目(70801041)

作者简介:赵晓敏(1975-),女(汉族),山西太原人,上海大学管理学院副教授,硕士生导师,研究方向:闭环供应链管理、物流系统仿真。

Mitra(2001)^[8]从政府立法视角分析了回收法律对制造商和再制造商的影响,表明立法的作用在于引导行业结构调整,使再制造变得有利可图。Mitra 和 Webster(2008)^[9]进一步探讨了政府补贴对制造商和独立再制造商的激励作用,认为将政府补贴分摊给制造商和再制造商,将有助于改善制造商和独立再制造商双方收益,进而推进再制造活动的开展。

近几年,国内学者对闭环供应链中的定价决策、利益协调以及逆向渠道设计等问题探讨的也比较深入。例如,黄祖庆和达庆利(2006)^[10]研究了再制造供应链在不同决策结构下的收益以及与集成式“超组织”结构相比的效率损失,并采用收益分享机制对制造商和销售商进行利益协调。包晓英等人(2010)^[11]针对新产品和废旧产品存在差别定价的闭环供应链,分析了制造商和零售商在集中决策和分散决策下的最优定价策略,针对分散决策中的利润损失提出两部收费的契约协调机制。易余胤(2004)^[12]针对制造商和零售商的市场力量,分别建立了制造商领导、零售商领导以及市场无领导者三种不同市场力量下的闭环供应链博弈模型,研究了不同市场力量结构对渠道成员决策的影响。王文宾和达庆利(2011)^[13]探讨了制造商、零售商和回收商组成的闭环供应链中,政府奖惩机制对成员企业最优决策的影响。熊中楷等(2011)^[14]针对再制造知识产权保护问题,构建了拥有专利权的原产品制造商许可第三方再制造的闭环供应链模型,利用博弈论讨论了分散与集中情形下成员企业的最优决策,以及专利许可对回收再制造的影响。聂佳佳和熊中楷(2011)^[15]则主要分析了需求信息分享模式对成员企业最优决策以及供应链绩效的影响。

上述研究从不同层面探讨了闭环供应链中的最优决策以及利益协调问题。从供应链中的决策主体来看,文献[7—9]主要探讨的是制造商与再制造商之间的竞争策略以及政府补贴效用;文献[4—6, 10—12]研究的是“制造商与零售商”组成的闭环供应链,从不同视角分析了制造商与零售商之间的最优决策以及协调机制;文献[13—15]主要针对“制造商、零售商和回收商”组成的闭环供应链,分析了政府奖惩机制以及信息分享模式的影响。文献[14]针对“制造商、零售商和第三方再制造商”组成的闭环供应链,探讨了专利许可下节点企业的最优决策以及利益协调问题。

上述研究中均没有考虑上游供应商这一决策主体,然而在实际中,当制造商进行产品回收再制造

时,必然会减少原材料和零部件的采购量,处于闭环供应链中的零部件供应商势必面临销量下滑的不利局面,显然再制造战略对上游供应商的冲击更为显著。为此,本文主要采用博弈论对一个供应商和一个制造商构成的 S—M 两级闭环供应链进行建模分析,研究目的在于以下两个方面:(1)建立不同渠道权力结构下的 S—M 闭环供应链模型,重点分析供应商强势、制造商强势和双方势力均衡时成员企业的最优决策以及赢利情况;(2)比较不同权力结构对制造商、上游供应商以及供应链系统整体绩效的影响。

2 S—M 两级闭环供应链描述及研究假设

2.1 模型中的符号说明

c_p :单位新产品生产成本,即制造商使用新原材料/零部件生产单位新产品的成本;

c_r :单位再制造成本,即制造商使用回收来的产品生产单位再制造品的成本;

A :单位回收成本;

p :产品的销售价格;

τ :废旧产品回收率, ($0 \leq \tau < 1$);

c_s :供应商生产单位零部件的成本;

w :单位零部件的批发价格;

Π_i :供应链中成员企业 i 的利润, $i = M$ 代表制造商, $i = S$ 代表供应商。

2.2 系统描述与研究假设

本文主要研究一个供应商和一个制造商组成的 S—M 两级闭环供应链,如图 1 所示。制造商通过两种方式生产产品来满足市场需求:(1)从上游供应商处购买原材料/零部件→生产新品→销往市场;(2)从市场回收废旧产品→对废旧产品进行再制造,

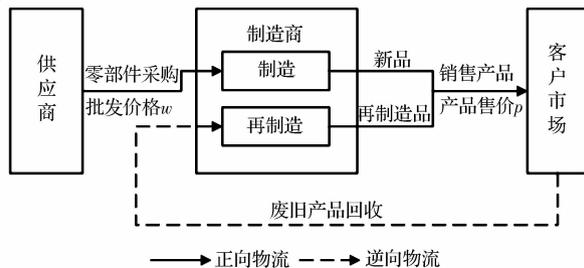


图 1 基于产品再制造的 S—M 两级闭环供应链系统

研究中主要有以下假设条件:

假设 1:制造商和供应商为双边垄断的纵向关系,双方按照各自的最大收益进行分散决策。

假设 2:制造商和供应商存在三种不同的权力结构,分别为供应商强势、制造商强势、以及双方势

力均衡。在第一种权力结构下,零部件供应商因拥有独特的技术或专利产品而获得强大的渠道影响力,成为 Stackelberg 博弈的领导者;在第二种权力结构下,制造商因对市场的垄断势力成为供应链中的强势企业,例如汽车行业中的通用、大众、丰田等汽车巨头均拥有较强的市场影响力,在各自的供应链中占据绝对的控制权和话语权,这些企业与上游零部件供应商之间进行的是制造商领导的 Stackelberg 博弈;在第三种权力结构下,双方势均力敌,制造商和供应商均不能主宰市场,双方进行的是 Nash 均衡博弈。

假设 3:市场需求为 $D(p) = \varphi - \beta p > 0$,其中 p 为产品的销售价格。

假设 4:制造商负责从市场回收废旧产品用以再制造,单位回收成本为 A ,再制造成本为 c_r ,回收率为 τ 。

假设 5:制造商通过再制造方式生产的产品与新品完全一致,并以相同价格在市场上销售,例如富士施乐公司再制造的复印机在质量和性能上与同型号的新复印机一致,售价也一致。

假设 6:本文在研究中遵循再制造的经济前提,假定通过回收废旧产品进行再制造要比从无到有生产新产品便宜,这一假定的数学表述为 $c_p + c_s > c_r + A$ 。

根据以上假设,可知制造商的利润函数为:

$$\Pi_M = D(p)p - (1 - \tau)D(p)(\omega + c_p) - \tau D(p)(c_r + A) \tag{1}$$

供应商的利润函数为:

$$\Pi_S = D(p)(1 - \tau)(\omega - c_s) \tag{2}$$

3 供应商领导的 Stackelberg 博弈

在供应商领导的市场中,假设供应商和制造商进行两阶段动态博弈,博弈顺序为:(1)供应商先确定零部件批发价格 ω ;(2)制造商再确定产品销售价格 p 。由于上述博弈为完全信息下的动态博弈,其均衡是子博弈精炼纳什均衡,因此可以采用逆向归纳法来求解博弈。

式(1)对销售价格 p 求导,可得一阶条件为:

$$p = \frac{\varphi + \beta(1 - \tau)(c_p + \omega) + \beta\tau(c_r + A)}{2\beta} \tag{3}$$

将式(3)代入供应商的利润函数,对批发价格 ω 求导,可得供应商的最优批发价格为:

$$\omega^{S*} = \frac{\varphi - \beta(1 - \tau)(c_p - c_s) - \beta\tau(c_r + A)}{2\beta(1 - \tau)} \tag{4}$$

命题 1:在供应商主导的市场中,零部件批发价格将随着产品回收率的增加而增加。

证明:容易验证 $\frac{\partial \omega^{S*}}{\partial \tau} = \frac{\varphi - \beta(c_r + A)}{2\beta(1 - \tau)^2} > 0$

(根据第 2 部分的假设, $D(p) = \varphi - \beta p > 0$,产品的销售价格大于生产或再制造环节的成本支出,即 $p > c_r + A$;因此 $\varphi - \beta(c_r + A) > \varphi - \beta p > 0$ 成立,由此得证 $\frac{\partial \omega^{S*}}{\partial \tau} > 0$)。

由命题 1 可知,在供应商领导的市场中,如果实施再制造战略,那么上游供应商将通过提高零部件批发价格的方式避免销量下滑带来的损失。

将 ω^{S*} 代入式(3)可得制造商的最优销售价格为:

$$p^{S*} = \frac{3\varphi + \beta(1 - \tau)(c_p + c_s) + \beta\tau(c_r + A)}{4\beta} \tag{5}$$

给定 p^{S*} ,可得产品销量为

$$D^{S*} = \frac{\varphi - \beta(1 - \tau)(c_p + c_s) - \beta\tau(c_r + A)}{4}$$

命题 2:在供应商主导的市场中,产品销售价格将随着产品回收率的增加而下降,产品销量则随着回收率的增加而上升。

证明:容易验证 $\frac{\partial p^{S*}}{\partial \tau} = \frac{(c_r + A) - (c_p + c_s)}{4}$

< 0 (根据再制造经济前提,回收废旧产品进行再制造要比从无到有生产新品便宜,即 $c_p + c_s > c_r + A$,可以得证 $\frac{\partial p^{S*}}{\partial \tau} < 0, \frac{\partial D^{S*}}{\partial \tau} > 0$)。

将 p^{S*} 和 ω^{S*} 代入公式(1)和公式(2),可得制造商和供应商的最优利润分别为:

$$\Pi_M^{S*} = \frac{[\varphi - \beta(1 - \tau)(c_p + c_s) - \beta\tau(c_r + A)]^2}{16\beta}$$

$$\Pi_S^{S*} = \frac{[\varphi - \beta(1 - \tau)(c_p + c_s) - \beta\tau(c_r + A)]^2}{8\beta}$$

系统总利润为:

$$\begin{aligned} \Pi_T^{S*} &= \Pi_M^{S*} + \Pi_S^{S*} \\ &= \frac{3[\varphi - \beta(1 - \tau)(c_p + c_s) - \beta\tau(c_r + A)]^2}{16\beta} \end{aligned}$$

命题 3:在供应商主导的市场中,制造商、供应商以及供应链总利润均随着产品回收率的增加而增加,即再制造战略有助于改善系统整体绩效并提升成员企业的收益。

证明: $\frac{\partial \Pi_M^{S*}}{\partial \tau} =$

$$\frac{(\varphi - \beta c_p + c_s) + \beta\tau[(c_p + c_s) - (c_r + A)] \cdot [(c_p + c_s) - (c_r + A)]}{8}$$

根据假设知 $c_p + c_s > c_r + A$; 产品需求 $D(p) = \varphi - \beta p > 0$, 产品销售价格大于生产成本支出, 即 $p > c_p + c_s$, 因此 $\varphi - \beta(c_p + c_s) > 0$ 成立, 由此得证 $\frac{\partial \Pi_M^*}{\partial \tau} > 0$ 。同理可证 $\frac{\partial \Pi_S^*}{\partial \tau} > 0, \frac{\partial \Pi_T^*}{\partial \tau} > 0$ 。

根据命题 1—命题 3, 可得到以下结论:

结论 1: 在供应商占据强势地位的 S-M 两级闭环供应链中, 当实施产品再制造战略时, 产品的销售价格将降低, 消费者能够以更低的价格购买产品从而刺激销量的增加, 制造商从扩大的市场销量中获益。具有主导权的供应商则通过制定更高的批发价格来弥补零部件销量下滑带来的损失, 并且随着回收率的增加, 供应商上调零部件批发价格的力度也越大, 从而保证其能够从再制造战略中获益。

4 制造商领导的 Stackelberg 博弈

在制造商领导的市场中, 假设供应商和制造商进行两阶段动态博弈, 博弈顺序为: (1) 制造商先确定产品销售价格 p ; (2) 供应商再确定零部件批发价格 w 。在采用逆向归纳法来求解博弈时, 参照文献 [12] 的研究方法, 假设供应商的零部件批发价格为 w , 则制造商生产单位新品的利润为 $m = p - w$, 将 $p = m + w$ 代入公式 (2) 并对批发价格 w 求导, 可得一阶条件为:

$$w = \frac{\varphi - \beta p + \beta c_s}{\beta} \quad (6)$$

将式 (6) 代入制造商的利润函数, 并对销售价格 p 求导, 可得制造商的最优销售价格为:

$$p^{M^*} = \frac{(3 - 2\tau)\varphi + \beta(1 - \tau)(c_p + c_s) + \beta c_r + A}{2\beta(2 - \tau)} \quad (7)$$

此时, 产品销量

$$D^{M^*} = \frac{\varphi - \beta(1 - \tau)(c_p + c_s) - \beta c_r + A}{2(2 - \tau)}$$

命题 4: 在制造商主导的市场中, 产品销售价格将随着产品回收率的增加而下降, 产品销量则随着回收率的增加而上升。

证明:

$$\frac{\partial p^{M^*}}{\partial \tau} = - \frac{[\varphi - \beta(c_r + A)] + \beta[(c_p + c_s) - (c_r + A)]}{2\beta(2 - \tau)^2} < 0$$

根据再制造的经济前提条件有 $c_p + c_s > c_r + A$, 此外产品销售价格大于再制造成本支出可得证 $\varphi - \beta(c_r + A) > \varphi - \beta p > 0$, 由此验证 $\frac{\partial p^{M^*}}{\partial \tau} < 0$ 成

立。同理可以验证 $\frac{\partial D^{M^*}}{\partial \tau} > 0$ 。

将 p^{M^*} 代入式 (6), 可得供应商的最优批发价格为:

$$w^{M^*} = \frac{\varphi - \beta(1 - \tau)c_p + \beta(3 - \tau)c_s - \beta c_r + A}{2\beta(2 - \tau)} \quad (8)$$

命题 5: 在制造商主导的市场中, 零部件批发价格随着回收率的增加而增加。

证明: 容易验证

$$\frac{\partial w^{M^*}}{\partial \tau} = \frac{[\varphi - \beta(c_r + A)] + \beta[(c_p + c_s) - (c_r + A)]}{2\beta(2 - \tau)^2} > 0 \text{ 成立。}$$

将 p^{M^*} 和 w^{M^*} 代入公式 (1) 和公式 (2), 可得制造商和供应商的最优利润分别为:

$$\Pi_M^{M^*} = \frac{[\varphi - \beta(1 - \tau)(c_p + c_s) - \beta c_r + A]^2}{4\beta(2 - \tau)}$$

$$\Pi_S^{M^*} = (1 - \tau) \cdot$$

$$\frac{[\varphi - \beta(1 - \tau)(c_p + c_s) - \beta c_r + A]^2}{4\beta(2 - \tau)^2}$$

系统总利润为:

$$\begin{aligned} \Pi_T^{M^*} &= \Pi_S^{M^*} + \Pi_M^{M^*} \\ &= (3 - 2\tau) \cdot \frac{[\varphi - \beta(1 - \tau)(c_p + c_s) - \beta c_r + A]^2}{4\beta(2 - \tau)^2} \end{aligned}$$

命题 6: 在制造商主导的市场中, 制造商的利润以及供应链系统总利润将随着产品回收率的增加而增加, 而供应商的利润与回收率之间表现为一定条件下的单调性, 呈现出先增后减的变化趋势。

证明: 令 $M = \varphi - \beta(1 - \tau)(c_p + c_s) - \beta c_r + A$, 则有 $\Pi_M^{M^*} = \frac{M^2}{4\beta(2 - \tau)}$, $\Pi_S^{M^*} = \frac{(1 - \tau)M^2}{4\beta(2 - \tau)^2}$, $\Pi_T^{M^*} = \frac{(3 - 2\tau)M^2}{4\beta(2 - \tau)^2}$ 。

制造商利润函数对 τ 求导可得: $\frac{\partial \Pi_M^{M^*}}{\partial \tau} = \frac{\beta M(4 - 2\tau)[(c_p + c_s) - (c_r + A)] + M^2}{4\beta(2 - \tau)^2}$ 。

根据假设知 $c_p + c_s > c_r + A$; 回收率满足 $0 \leq \tau < 1$; 产品需求 $D(p) = \varphi - \beta p > 0$ 且 $p > c_p + c_s$, 可知 $\varphi - \beta(c_p + c_s) > 0$ 成立, 因此 $M = \varphi - \beta(c_p + c_s) + \beta[(c_p + c_s) - (c_r + A)] > 0$ 成立, 由此可证 $\frac{\partial \Pi_M^{M^*}}{\partial \tau} > 0$ 。

同理可证:

$$\frac{\partial \Pi_T^{M^*}}{\partial \tau} =$$

$$\frac{2(1-\tau)M^2 + 2\beta M(2-\tau)(3-2\tau)[(c_p + c_s) - (c_r + A)]}{4\beta(2-\tau)^3} > 0.$$

供应商利润函数对 τ 求导可得： $\frac{\partial \Pi_S^M}{\partial \tau} = -\frac{\tau M^2 + 2\beta M(1-\tau)(2-\tau)[(c_p + c_s) - (c_r + A)]}{4\beta(2-\tau)^3}$ ，回收

率 τ 在 $[0, 1)$ 之间才有意义，可证明当

$$\tau \leq -\sqrt{\left[\frac{\varphi - \beta(c_r + A)}{2\beta[(c_p + c_s) - (c_r + A)]} + \frac{5}{2}\right]^2 - 4} + \frac{1}{2}\left[\frac{\varphi - \beta(c_r + A)}{2\beta[(c_p + c_s) - (c_r + A)]} + \frac{5}{2}\right]$$

时， $\frac{\partial \Pi_S^M}{\partial \tau} > 0$ ，否则 $\frac{\partial \Pi_S^M}{\partial \tau} < 0$ 。

根据命题 4-6，可以得到以下结论：

结论 2: 在制造商占据强势地位的 S-M 两级闭环供应链中，当实施产品再制造战略时，产品的销售价格将降低，消费者能够以更低的价格购买产品从而刺激销量的增加，制造商从扩大的市场销量中获益。供应商的利润则随着回收率的增加呈现先增后减的变化，在回收率较低时，供应商适当提高零部件批发价格即可弥补零部件销量下滑带来的损失，然而随着回收率的增加，产品再制造对供应商形成明显冲击，供应商的弱势地位导致其上调零部件批发价格的力度有限，再制造带来的竞争压力使供应商利益受损。但是从系统整体来看，供应链总利润将随着回收率的增加而增加，再制造战略具有改善供应链整体绩效的经济价值。

5 制造商和供应商 Nash 均衡博弈

在制造商和供应商均非领导者的市场中，假设制造商和供应商同时决策，制造商确定产品销售价格 p ，供应商确定零部件批发价格 w 。

制造商和供应商的一阶条件为：

$$\begin{cases} p = \frac{\varphi + \beta(1-\tau)(c_p + w) + \beta\alpha(c_r + A)}{2\beta} \\ w = \frac{\varphi - \beta p + \beta\alpha c_s}{\beta} \end{cases}$$

联立求解，可得最优销售价格和最优批发价格如下：

$$p^{Nash^*} = \frac{(2-\tau)\varphi + \beta(1-\tau)(c_p + c_s) + \beta\alpha(c_r + A)}{\beta(3-\tau)} \quad (9)$$

$$w^{Nash^*} = \frac{\varphi - \beta(1-\tau)c_p + 2\beta\alpha c_s - \beta\alpha(c_r + A)}{\beta(3-\tau)} \quad (10)$$

此时，产品销量为：

$$D^{Nash^*} = \frac{\varphi - \beta(1-\tau)(c_p + c_s) - \beta\alpha(c_r + A)}{3-\tau}$$

命题 7: 在制造商和供应商均非领导者的市场中，产品销售价格将随着产品回收率的增加而下降，产品销量则随着回收率的增加而上升；零部件的批发价格则随着回收率的增加而增加。

证明：容易验证

$$\frac{\partial p^{Nash^*}}{\partial \tau} = \frac{-[\varphi - \beta(c_r + A)] + 2\beta[(c_p + c_s) - (c_r + A)]}{\beta(3-\tau)^2} < 0$$

$$\frac{\partial D^{Nash^*}}{\partial \tau} = \frac{[\varphi - \beta(c_r + A)] + 2\beta[(c_p + c_s) - (c_r + A)]}{(3-\tau)^2} > 0;$$

$$\frac{\partial w^{Nash^*}}{\partial \tau} = \frac{[\varphi - \beta(c_r + A)] + 2\beta[(c_p + c_s) - (c_r + A)]}{\beta(3-\tau)^2} > 0$$

将 p^{Nash^*} 和 w^{Nash^*} 代入公式(1)和公式(2)，可得制造商和供应商的最优利润分别为：

$$\Pi_M^{Nash^*} = \frac{[\varphi - \beta(1-\tau)(c_p + c_s) - \beta\alpha(c_r + A)]^2}{\beta(3-\tau)^2}$$

$$\Pi_S^{Nash^*} = (1-\tau) \cdot \frac{[\varphi - \beta(1-\tau)(c_p + c_s) - \beta\alpha(c_r + A)]^2}{\beta(3-\tau)^2}$$

系统总利润为：

$$\Pi_T^{Nash^*} = \Pi_M^{Nash^*} + \Pi_S^{Nash^*} = (2-\tau) \cdot \frac{[\varphi - \beta(1-\tau)(c_p + c_s) - \beta\alpha(c_r + A)]^2}{\beta(3-\tau)^2}$$

命题 8: 在制造商和供应商势力均衡、双方均不能成为主导者的供应链中，制造商的利润以及系统总利润将随着产品回收率的增加而增加，供应商的利润与回收率之间表现为一定条件下的单调性，呈现出先增后减的变化。

证明：证明方法同命题 6，令 $M = \varphi - \beta(1-\tau)(c_p + c_s) - \beta\alpha(c_r + A)$ ，则 $\Pi_M^{Nash^*} = \frac{M^2}{\beta(3-\tau)^2}$ ，

$$\Pi_S^{Nash^*} = \frac{(1-\tau)M^2}{\beta(3-\tau)^2}, \Pi_T^{Nash^*} = \frac{(2-\tau)M^2}{\beta(3-\tau)^2}$$
，容易验证

$$\frac{\partial \Pi_M^{Nash^*}}{\partial \tau} = \frac{2\beta M(3-\tau)[(c_p + c_s) - (c_r + A)] + 2M^2}{\beta(3-\tau)^3} > 0;$$

$$\frac{\partial \Pi_T^{Nash^*}}{\partial \tau} = \frac{(1-\tau)M^2 + 2\beta M(2-\tau)(3-\tau)[(c_p + c_s) - (c_r + A)]}{\beta(3-\tau)^3} > 0$$

成立。

供应商利润函数对 τ 求导得: $\frac{\partial \Pi_S^{Nash^*}}{\partial \tau} =$

$$\tau \leq -\sqrt{\left[\frac{\varphi - \beta(c_p + c_s)}{2\beta[(c_p + c_s) - (c_r + A)]} + \frac{9}{2}\right]^2} + \frac{\varphi - \beta(c_p + c_s)}{\beta[(c_p + c_s) - (c_r + A)]} - 6 + \left[\frac{\varphi - \beta(c_p + c_s)}{2\beta[(c_p + c_s) - (c_r + A)]}\right] + \frac{9}{2}$$

时, $\frac{\partial \Pi_S^{Nash^*}}{\partial \tau} > 0$; 否则 $\frac{\partial \Pi_S^{Nash^*}}{\partial \tau} < 0$ 。

根据命题 7 和命题 8, 可以得到以下结论:

结论 3: 在制造商和供应商双方势力均衡的 S-M 两级闭环供应链中, 实施产品再制造战略使消费者能够以更低的价格购买产品从而刺激销量的增加, 制造商从扩大的市场销量中获得更多收益。供应商的利润则随着回收率的增加呈现先增后减的变化, 当回收率较低时, 产品再制造带来的竞争威胁较小, 适当提高零部件批发价格的方式可以让供应商获得一些额外收益, 然而随着回收率的增加, 再制造

$$\frac{M\{- (1 + \tau)M + 2\beta(1 - \tau)(3 - \tau)[(c_p + c_s) - (c_r + A)]\}}{\beta(3 - \tau)^3}$$

回收率 τ 在 $[0, 1)$ 之间才有意义, 可证明当:

战略使供应商面临零部件销量大幅下滑的不利局面, 零部件批发价格的上调幅度不足以弥补这一损失致使供应商利益受损。但是从系统整体来看, 供应链总利润将随着回收率的增加而增加, 再制造战略具有提升供应链整体绩效的经济价值。

6 三种渠道权力结构下的 S-M 闭环供应链绩效分析

根据表 1, 可以得到以下一些结论。

表 1 三种权力结构下的 S-M 闭环供应链最优决策与利润

最优决策与利润	供应商 Stackelberg 博弈	制造商 Stackelberg 博弈	Nash 均衡博弈
w^*	$\frac{\varphi - \beta(1 - \tau)(c_p + c_s) - \beta(c_r + A)}{2\beta(1 - \tau)}$	$\frac{\varphi - \beta(1 - \tau)c_p + \beta(3 - \tau)c_s - \beta(c_r + A)}{2\beta(2 - \tau)}$	$\frac{\varphi - \beta(1 - \tau)c_p + 2\beta c_s - \beta(c_r + A)}{\beta(3 - \tau)}$
p^*	$\frac{3\varphi + \beta(1 - \tau)(c_p + c_s) + \beta(c_r + A)}{4\beta}$	$\frac{(3 - 2\tau)\varphi + \beta(1 - \tau)(c_p + c_s) + \beta(c_r + A)}{2\beta(2 - \tau)}$	$\frac{(2 - \tau)\varphi + \beta(1 - \tau)(c_p + c_s) + \beta(c_r + A)}{\beta(3 - \tau)}$
D^*	$\frac{\varphi - \beta(1 - \tau)(c_p + c_s) - \beta(c_r + A)}{4}$	$\frac{\varphi - \beta(1 - \tau)(c_p + c_s) - \beta(c_r + A)}{2(2 - \tau)}$	$\frac{\varphi - \beta(1 - \tau)(c_p + c_s) - \beta(c_r + A)}{3 - \tau}$
Π_M^*	$\frac{[\varphi - \beta(1 - \tau)(c_p + c_s) - \beta(c_r + A)]^2}{16\beta}$	$\frac{[\varphi - \beta(1 - \tau)(c_p + c_s) - \beta(c_r + A)]^2}{4\beta(2 - \tau)}$	$\frac{[\varphi - \beta(1 - \tau)(c_p + c_s) - \beta(c_r + A)]^2}{\beta(3 - \tau)^2}$
Π_S^*	$\frac{[\varphi - \beta(1 - \tau)(c_p + c_s) - \beta(c_r + A)]^2}{8\beta}$	$(1 - \tau) \cdot \frac{[\varphi - \beta(1 - \tau)(c_p + c_s) - \beta(c_r + A)]^2}{4\beta(2 - \tau)^2}$	$(1 - \tau) \cdot \frac{[\varphi - \beta(1 - \tau)(c_p + c_s) - \beta(c_r + A)]^2}{\beta(3 - \tau)^2}$
Π_T^*	$\frac{3[\varphi - \beta(1 - \tau)(c_p + c_s) - \beta(c_r + A)]^2}{16\beta}$	$(3 - 2\tau) \cdot \frac{[\varphi - \beta(1 - \tau)(c_p + c_s) - \beta(c_r + A)]^2}{4\beta(2 - \tau)^2}$	$(2 - \tau) \cdot \frac{[\varphi - \beta(1 - \tau)(c_p + c_s) - \beta(c_r + A)]^2}{\beta(3 - \tau)^2}$

命题 9: 零部件最优批发价格满足 $w^{S^*} > w^{Nash^*} > w^{M^*}$ 。

证明: $w^{S^*} - w^{M^*} =$

$$\frac{[\varphi - \beta(c_p + c_s)] + \beta\tau[(c_p + c_s) - (c_r + A)]}{2\beta(1 - \tau)(2 - \tau)}$$

$$w^{M^*} - w^{Nash^*} = - (1 - \tau) \cdot$$

$$\frac{[\varphi - \beta(c_p + c_s)] + \beta\tau[(c_p + c_s) - (c_r + A)]}{2\beta(2 - \tau)(3 - \tau)}$$

根据再制造的经济前提有 $c_p + c_s > c_r + A$, 此外产品销售价格大于生产成本 (即 $p > c_s + c_p$), 因此有 $\varphi - \beta(c_p + c_s) > \varphi - \beta p > 0$ 成立, 由此可得证 $w^{S^*} - w^{M^*} > 0$; $w^{M^*} - w^{Nash^*} < 0$ 。

命题 9 表明: 零部件批发价格在供应商领导时最高, 其次是 Nash 均衡情形, 最低的是制造商领导的情形。显然, 在 S-M 两级闭环供应链中, 当供应商处于强势地位时具有更强的议价能力, 而当制造

商处于强势时, 供应商的议价能力被显著削弱。

命题 10: 产品最优销售价格满足 $p^{S^*} > p^{M^*} > p^{Nash^*}$, 相应的, 产品销量满足 $D^{S^*} < D^{M^*} < D^{Nash^*}$ 。

证明: 易得证

$$p^{S^*} - p^{M^*} =$$

$$\frac{\tau(\varphi - \beta(c_p + c_s) + \beta\tau[(c_p + c_s) - (c_r + A)])}{4\beta(2 - \tau)} > 0$$

$$p^{M^*} - p^{Nash^*} =$$

$$\frac{(1 - \tau)([\varphi - \beta(c_p + c_s)] + \beta\tau[(c_p + c_s) - (c_r + A)])}{2\beta(2 - \tau)(3 - \tau)} > 0$$

命题 10 表明: 产品销售价格在供应商领导时最高, 其次是制造商领导, 最低是 Nash 均衡情形; 相应的产品销量在 Nash 均衡时最高, 在供应商领导时最低。

命题 11: 制造商的利润满足 $\Pi_M^{M^*} > \Pi_M^{Nash^*} >$

$\Pi_M^{S^*}$, 供应商的利润满足 $\Pi_S^{S^*} > \Pi_S^{Nash^*} > \Pi_S^{M^*}$, 供应链系统总利润满足 $\Pi_T^{Nash^*} > \Pi_T^{M^*} > \Pi_T^{S^*}$ 。

证明: 易验证

$$\Pi_M^{M^*} - \Pi_M^{Nash^*} = \frac{(1+\tau)^2[\varphi - \beta(1-\tau)(c_p + c_s) - \beta\tau(c_r + A)]^2}{4\beta(2-\tau)(3-\tau)^2} > 0$$

$$\Pi_M^{S^*} - \Pi_M^{Nash^*} = \frac{-(1+\tau)(7-\tau)[\varphi - \beta(1-\tau)(c_p + c_s) - \beta\tau(c_r + A)]^2}{16\beta(3-\tau)^2} < 0$$

即得证 $\Pi_M^{M^*} > \Pi_M^{Nash^*} > \Pi_M^{S^*}$ 。

易验证 $\Pi_S^{S^*} - \Pi_S^{Nash^*} =$

$$\frac{(1+\tau)^2[\varphi - \beta(1-\tau)(c_p + c_s) - \beta\tau(c_r + A)]^2}{8\beta(3-\tau)^2} > 0$$

$$\Pi_S^{Nash^*} - \Pi_S^{M^*} = \frac{(1-\tau)^2 \cdot (7-3\tau)[\varphi - \beta(1-\tau)(c_p + c_s) - \beta\tau(c_r + A)]^2}{4\beta(3-\tau)^2 \cdot (2-\tau)^2} > 0$$

即得证 $\Pi_S^{S^*} > \Pi_S^{Nash^*} > \Pi_S^{M^*}$ 。

易验证 $\Pi_T^{S^*} - \Pi_T^{M^*} =$

$$\frac{-\tau(4-3\tau)[\varphi - \beta(1-\tau)(c_p + c_s) - \beta\tau(c_r + A)]^2}{16\beta(2-\tau)^2} < 0$$

$$\begin{aligned} & \Pi_T^{M^*} - \Pi_T^{Nash^*} = \\ & \frac{(1-\tau)^2(5-2\tau)[\varphi - \beta(1-\tau)(c_p + c_s) - \beta\tau(c_r + A)]^2}{4\beta(2-\tau)^2 \cdot (3-\tau)^2} \\ & < 0 \end{aligned}$$

即得证 $\Pi_T^{Nash^*} > \Pi_T^{M^*} > \Pi_T^{S^*}$ 。

命题 11 表明: 制造商的利润在制造商主导的供应链中最高, 在供应商主导的供应链中最低。供应商的利润则在供应商主导的供应链中最高, 在制造商主导的供应链中最低。但是供应链系统总利润却是在双方势力均衡时最高, 在供应商主导的供应链中最低, 其原因在于当供应商和制造商均不能主宰市场时, 产品的销售价格最低而销量最高, 增多的市场销量提升了供应链系统的总收益。

7 数值算例分析

本部分将通过数值算例验证前面的研究结果, 基本参数设置如下: $\varphi = 1; \beta = 0.5; c_s = 0.3; c_p = 0.6; c_r = 0.3; A = 0.2$, 三种权力结构下的最优定价决策和利润情况如图 2 所示。

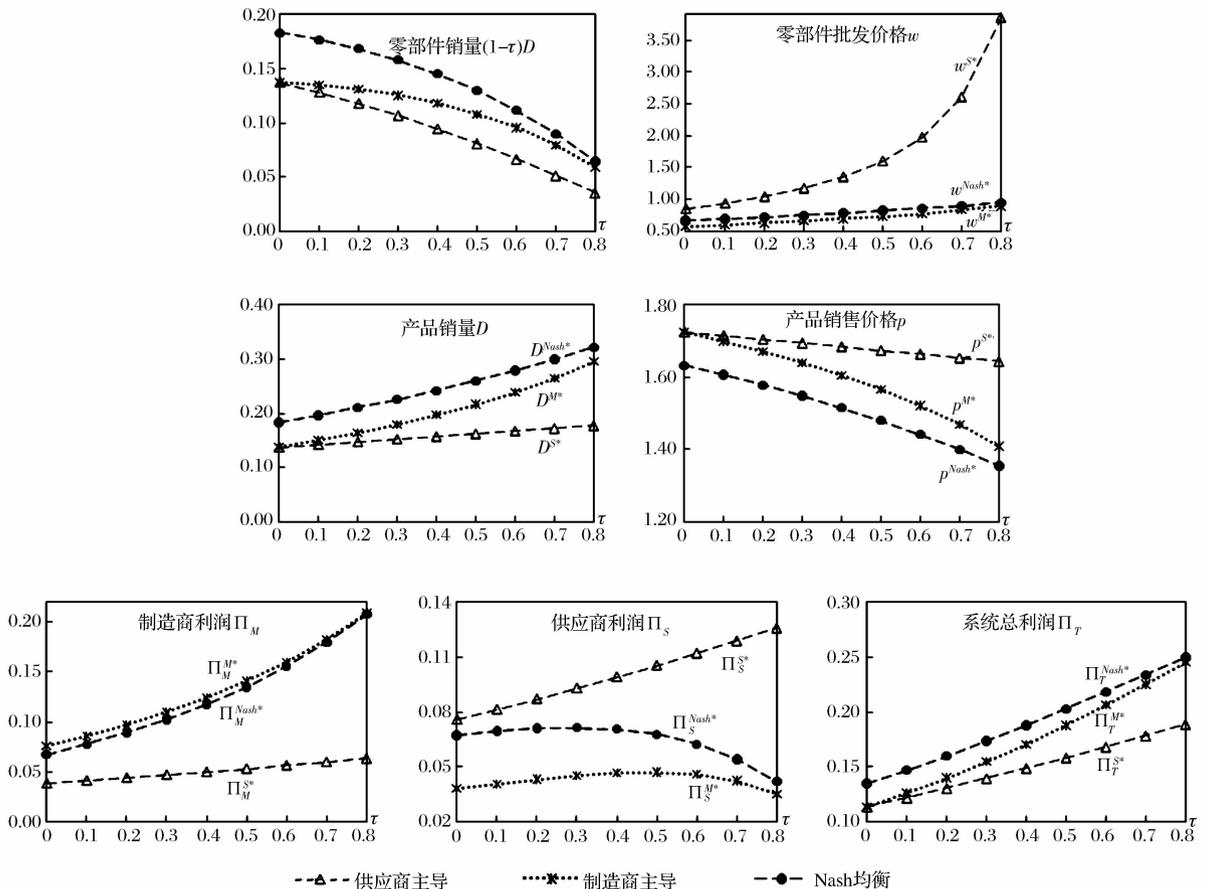


图 2 S-M 两级供应链系统中的定价决策与利润曲线

从产品的最优定价和市场销量来看:无论是供应商强势、制造商强势、还是双方势力均衡,产品销售价格均随着回收率的增加而降低,产品销量则随着回收率的增加而上升;显然,实施产品再制造战略有利于消费者以更低的价格购买产品,而较低的产品售价带来了产品市场销量的增加。

从零部件批发价格来看:零部件批发价格均随回收率的增加而增加,表明当实施产品再制造战略时,上游供应商将具有上调零部件批发价格的强烈动机,其中以供应商处于强势地位时的上调幅度最为显著。

从成员企业的盈利状况来看:制造商的利润将随回收率的增加而增加,即产品再制造能够提升制造商的盈利水平。但是对供应商而言,再制造的影响效应将视供应商在供应链中的权力地位而定。由于受到产品再制造的竞争压力,上游供应商均面临着零部件销量下滑的不利局面,处于强势地位的供应商可以通过大幅上调零部件批发价格的方式来弥补销量下滑的损失,并能保证自己从再制造中获得额外收益。当供应商与制造商势力均衡或制造商处于强势地位时,供应商的利润随回收率的增加呈现先增后减的变化,原因在于:当回收率较低时,产品再制造形成的竞争威胁较小,供应商可以通过适当提高零部件批发价格的方式从再制造中获益,但是当回收率超过某一临界值时,再制造带来的竞争压力显著增强,而由于缺乏足够的话语权,供应商上调零部件批发价格的力度有限使其赢利能力减弱,在回收率比较高的情况下,实施再制造战略将导致供应商利益受损。

从供应链系统整体绩效来看:供应商和制造商势力均衡时系统总利润最高,供应商处于强势地位时系统总利润最低。这一现象表明,当供应商处于强势地位时,虽然制造商和供应商都能从再制造中获益,但是这种“双赢”的结果却是以系统总利润的损失为代价,其原因在于供应商的强势地位会导致零部件批发价格的大幅上涨,供应商维护自身利益的结果却使产品的最终售价下降有限,无法刺激产品销量的显著增加,最终使供应链系统的整体赢利能力明显劣于供应商和制造商势力均衡的情况,也劣于制造商主导的情况。最后需要指出的是,无论制造商和供应商的权力结构如何,产品再制造均具有改善供应链系统整体赢利能力的作用,只是在具体实施过程中需要针对不同的权力结构建立更为合理的协调机制,以促进供应商和制造商之间的有

效合作,避免双方内耗带来的效率损失问题。

8 结语

本文主要对一个供应商和一个制造商构成的S-M两级闭环供应链进行研究,着重分析供应商和制造商处于不同权力结构下的定价策略、供应链成员利润以及系统总利润。研究表明:产品再制造战略有利于消费者以更低的价格购得产品从而刺激产品销量的增加,制造商可以从扩大的市场销量中获得更多利润。在供应商方面,为了应对产品再制造带来的竞争威胁,供应商会通过上调零部件批发价格的方式来弥补零部件销量下滑的损失。当供应商处于强势地位时,较强的提价能力可以保证供应商从再制造中获得额外收益;但是当供应商处于弱势地位或者和制造商势力均衡时,由于议价能力有限,在回收率超过某一临界值时,再制造竞争压力将削弱供应商的赢利能力。

从系统整体绩效来看,无论是在供应商强势、还是制造商强势、亦或是双方势力均衡的情况下,供应链总利润均随着回收率的增加而增加,因此再制造战略具有提升供应链系统整体赢利能力的积极作用。但是需要指出的是,供应商和制造商之间的权力结构将会影响再制造的经济价值,当供应商和制造商势力均衡时系统总利润最高,而当供应商处于强势地位时系统总利润最低,表明供应商的强势地位会局限再制造的经济价值,因此在实施过程中需要特别注意局部利益与整体利益之间的协调,以便充分发挥再制造的经济潜力。

最后要说明的是,本文是基于确定的线性需求来探讨一个供应商和一个制造商之间的单期最优决策问题,并且假定决策双方的信息是对称的。这些假定使得本文的研究具有一定的局限性,在未来的研究中,多个供应商和制造商,不对称信息决策和动态多期决策值得进一步探讨。

参考文献:

- [1] Krikke, H. R., Bloemhof-Ruwaard, J., Van Wassenhove, L. N.. Concurrent product and closed-loop supply chain design with an application to refrigerators[J]. International Journal of Production Research, 2003, 41(16): 3689-3719.
- [2] Guide, Jr. V. D. R., Van Wassenhove, L. N.. The evolution of closed-Loop supply chain research[J]. Operations Research, 2009, 57(1): 10-18.
- [3] Kumar, S., Craig, S.. Dell, Inc.'s closed loop supply

- chain for computer assembly plants [J]. *Information Knowledge Systems Management*, 2007, (6):197—214
- [4] Savaskan, R. C., Bhattacharya, S., Wassenhove, L. N. V.. Closed-loop supply chain models with product remanufacturing [J]. *Management Science*, 2004, 50 (2):239—252.
- [5] Savaskan, R. C., Van Wassenhove, L. N.. Reverse channel design: The case of competing retailers [J]. *Management Science*, 2006, 52(1): 1—14.
- [6] Karakayli, I., et al. An analysis of decentralized collection and processing of end-of-life products [J]. *Journal of Operations Management*, 2007, 25: 1161—1183.
- [7] Ferguson, M., Toktay, L.. The effect of competition on recovery strategies [J]. *Production and Operations Management*, 2006, 15(3):351—368.
- [8] Webster, S., Mitra, S.. Competitive strategy in remanufacturing and the impact of take-back laws [J]. *Journal of Operations Management*, 2007, 25:1123—1140.
- [9] Mitra, S., Webster, S.. Competition in remanufacturing and the effects of government subsidies [J]. *International Journal of Production Economics*, 2008, 111: 287—298.
- [10] 黄祖庆, 达庆利. 直线型再制造供应链决策结构的效率分析 [J]. *管理科学学报*, 2006, 9(4):51—57.
- [11] 包晓英, 唐志英, 唐小我. 基于回收再制造的闭环供应链差异定价策略及协调 [J]. *系统管理学报*, 2010, 19(5): 69—75.
- [12] 易余胤. 具竞争零售商的再制造闭环供应链模型研究 [J]. *管理科学学报*, 2009, 12(6):45—54.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 聂佳佳, 熊中楷. 信息分享模式对第三方负责回收闭环供应链的影响 [J]. *管理工程学报*, 2011, 25(2):74—81.

Performance Analysis of S-M Closed-loop Supply Chain under Different Channel Power Structures

ZHAO Xiao-min, LIN Ying-hui, SU Cheng-ming

(School of Management, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

Abstract: Different from traditional supply chain, closed-loop supply chain focuses on remanufacturing or reusing the used products after their consumption, which is of great importance in reducing environmental pollution, decreasing resource consumption and fundamentally promoting the sustainable development of manufacturing industries. In order to explore the influence of remanufacturing strategy on the member enterprises in a closed-loop supply chain, we use game theory to develop the models of a two-echelon closed-loop supply chain with one manufacturer and one supplier. We particularly analyze the pricing decisions and system's performance under different power structures, including supplier-dominated, manufacturer-dominated or balance of power between channel members. The results show that with remanufacturing strategy implementation, the sale price of products will decrease, the sales volume increase, and the wholesale price of components goes up. For the channel members, the remanufacturing strategy is more conducive to the manufacturer's profitability. However, the influence of remanufacturing on supplier depends on the power of supplier in a chain. The dominant supplier can get extra profit from remanufacturing by considerably raising the wholesale price of components; and the weak supplier may incur loss due to the competition of remanufacturing. As for the performance of the whole supply chain, the remanufacturing strategy plays an important role in improving the whole system's profitability, but the power structures have different effects on the economic value of remanufacturing. In general, the structure where power is equally split between members provides the best performance, then is the manufacturer-dominated, the worst is the supplier-dominated supply chain.

Key words: closed-loop supply chain; products remanufacturing; channel power; game theory