

## 再制造商公平关切下闭环供应链生产设计决策与协调

刘志<sup>1,2</sup>, 李帮义<sup>1</sup>, 龚本刚<sup>2</sup>, 程晋石<sup>2</sup>

(1. 南京航空航天大学 经济与管理学院, 南京 210016; 2. 安徽工程大学 管理工程学院, 安徽 芜湖 241000)

**摘要:** 研究制造商关注和关注再制造商公平关切的闭环供应链生产设计决策与协调. 研究表明: 制造商和闭环供应链利润均与公平关切程度负相关; 制造商关注再制造商公平关切时, 公平关切程度越高, 许可费和模块化水平越低, 再制造商利润越高, 且与不关注相比, 新产品与再制造品销量更高, 环境效益更好; 当不关注再制造商公平关切时, 再制造商利润与公平关切程度负相关. 采用再制造收益共享契约对考虑再制造商公平关切的供应链进行协调.

**关键词:** 闭环供应链; 公平关切; 模块化水平设计; 许可费; 收益共享契约

中图分类号: F253

文献标志码: A

## Production design decision and coordination of closed-loop supply chain considering remanufacturer's fairness concern

LIU Zhi<sup>1,2</sup>, LI Bang-yi<sup>1</sup>, GONG Ben-gang<sup>2</sup>, CHENG Jin-shi<sup>2</sup>

(1. College of Economics and Management, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China; 2. College of Management Engineering, Anhui Polytechnic University, Wuhu 241000, China. Correspondent: LIU Zhi, E-mail: liuzhi0551@126.com)

**Abstract:** The production design decision and coordination of the closed-loop supply chain are researched by considering and not considering the remanufacturer's fairness concern on profit distribution. The result shows that: The manufacturer's and supply chain profits are negatively correlated with the fairness concern degree; when the manufacturer considers remanufacturer's fairness concern, the higher remanufacturer's fairness concern degree is, the lower licensing fee and product modularity level are, and the more profits the remanufacturer gains. Comparing with not considering the remanufacturer's fairness concern, the new product and remanufacturing product sales are higher, and the environmental benefits are better. When the manufacturer doesn't consider the remanufacturer's fairness concern, the remanufacturer's profits are negatively correlated with the fairness concern degree. The closed-loop supply chain considering remanufacturer's fairness concern is coordinated by remanufacturing the revenue sharing contract.

**Keywords:** closed-loop supply chain; fairness concern; modularity level design; licensing fee; revenue sharing contract

### 0 引言

近年来, 资源浪费和环境污染问题日益凸显. 为实现经济的循环发展, 许多国家都制定了环境保护政策和法律, 要求制造企业承担产品废弃后的回收和再利用责任. 废旧产品(EOL)的回收再利用不仅能减少废弃物的排放和资源的消耗, 还能降低制造企业的生产成本, 提升社会形象, 因此, 很多大型制造商都选择对废旧产品进行回收和再制造(如柯达、IBM和卡特彼勒), 或出于品牌和回收成本的考虑授权第三方再

制造商进行再制造(如苹果公司), 以在承担社会和环境责任的同时, 获取更多的利润.

当制造商委托再制造商进行再制造时, 为减少再制造品的竞争威胁, 分享再制造的经济效益, 制造商会向再制造商收取一定的许可费用, 如专利许可费<sup>[1]</sup>、软件注册许可费<sup>[2]</sup>等. 同时, 为了满足顾客的多样化和个性化需求, 制造商会提高产品的模块化水平; 然而, 模块化水平并非越高越好, 模块化水平越高, 需要制造商投入的研发费用越高, 且提

收稿日期: 2015-10-07; 修回日期: 2016-01-11.

**基金项目:** 国家社会科学基金重点项目(13AZD062); 国家自然科学基金项目(71171002); 江苏省普通高校研究生科研创新计划项目(KYZZ15\_0099); 安徽省高校自然科学研究项目(KJ2015A112); 安徽省高等教育提升计划科学研究项目(TSSK2015B26); 安徽省高校人文社会科学重点项目(SK2016A0109).

**作者简介:** 刘志(1985—), 男, 讲师, 博士生, 从事物流与供应链管理的研究; 李帮义(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 从事供应链建模与优化、委托代理理论等研究.

高产品的模块化水平会降低再制造的难度和成本<sup>[3]</sup>,提高再制品的市场竞争优势,加剧对新产品的蚕食.因此,在制造商授权再制造商再制造情形下,制定合适的模块化水平、许可费用及生产决策是制造商亟需解决的问题之一.

目前,国内外理论界对再制造闭环供应链管理的研究主要集中在回收主体差异和市场主导模式不同、多双渠道竞争、政府干预和补贴、随机环境和差异化价格<sup>[4]</sup>、许可费用收取、产品设计等方面的定价策略及协调契约的设计.

1) 在许可费用收取方面,熊中楷等<sup>[5]</sup>研究了第三方再制造商再制造模式下制造商的专利授权决策,并利用收益分享契约实现了专利保护下闭环供应链的协调;熊中楷等<sup>[6]</sup>也建立了零售商负责废旧品回收的闭环供应链决策模型,以分析受专利保护下原制造商采取不同再制造策略的定价决策及边界条件;申成然等<sup>[1]</sup>构建了政府补贴给拥有专利的原制造商和直接补贴给第三方再制造商两种补贴机制下由第三方回收再制造的闭环供应链分散决策模型,并采用收益-费用共享契约对专利保护与政府补贴下的闭环供应链进行协调;Oraiopoulos等<sup>[2]</sup>研究了二手交易市场上原始设备制造商对购买翻新产品顾客收取的许可费设置问题,并明确了原始设备制造商选择激励或阻碍二手交易市场存在的边界条件;易余胤等<sup>[7]</sup>对两种不同的再制造专利许可模式进行了比较,得出相对于单位产品专利许可费模式,固定专利许可费模式具有更好的社会效益和环境效益,并确定消费者异质市场下原制造商选择两种专利许可模式的临界值;曹晓刚等<sup>[8]</sup>研究了混合需求条件下再制造闭环供应链批发价格、订购量、单位产品专利许可费和回收价格的决策问题,分析了消费者社会环保意识和消费者对回收价格的敏感度与各个决策变量的关系,并构建了收益共享-费用分担契约,以实现闭环供应链的协调.

2) 在产品设计方面,Örsemir等<sup>[9]</sup>指出OEM可通过为高端消费者提供高质量产品,以降低第三方再制造商的废旧品回收量,阻止其进行再制造;Galbreth等<sup>[10]</sup>研究了一个OEM垄断的新产品、再制造升级产品和再制品的三产品竞争系统,并指出新产品技术创新程度的增加会降低再制造升级产品和再制品的最优数量;谢家平等<sup>[11]</sup>将质量水平作为内生变量,在考虑质量水平对返回废旧产品降级率影响的基础上,分别讨论了不同市场结构下制造商的最优制造/再制造决策策略,并指出制造商的再制造比例随着产品质量的降低而递减;Subramanian等<sup>[12]</sup>分别研究了OEM再制造模式和第三方再制造模式下产品部件通用性对OEM盈利水平的影响,指出在第三方再制造模式下,若部件通用性能够大幅度降低再制造生产

成本,则OEM不会将通用性引入产品生产线;Wu<sup>[13]</sup>将消费者分为绿色消费者和普通消费者,并构建了制造商和再制造商在完全竞争环境下的两阶段决策模型,以研究不同市场结构下制造商的产品设计策略和再制造商价格策略的相互关系;同时,Wu<sup>[14]</sup>也分析了竞争环境下,制造商产品互换性设计策略对制造商和再制造商产品价格竞争的影响,研究发现,产品互换性设计策略能作为制造商的有效竞争手段,但对再制造商也并非总是不利的,并分析了制造商产品互换性设计策略与再制造商废旧品回收策略之间的关系.

由上述可知,现有的研究没有将许可费用和产品设计因素同时纳入闭环供应链的系统模型中,且均假设决策主体完全理性,忽略了决策主体有限理性的事实.行为研究发现,在现实生活中人们往往对公平表现出极大关注,即公平关切<sup>[15]</sup>.公平关切影响着个体成员的决策行为,因此,有必要将公平关切引入闭环供应链的运作决策中.目前,这方面的研究逐渐增多,但以关注制造商和零售商的公平关切为主<sup>[16-19]</sup>,缺乏对再制造商公平关切的考虑.当制造商授权再制造商进行再制造时,制造商收取许可费用以共享再制造利润,作为再制造利润实现主体的再制造商,对再制造利润的分配也会公平关切,因此,应对考虑再制造商公平关切的闭环供应链决策问题进行研究.

本文将公平关切、许可费用和产品模块化设计同时纳入闭环供应链决策模型中,研究再制造商的公平关切行为对新产品/再制品产量、产品模块化水平、许可费用及利润的影响,探讨各决策变量的均衡解,为制造商的产品设计决策、生产决策和许可费用决策、再制造商的生产决策提供参考;研究再制造收益共享契约,确定制造商和再制造商实现共赢的契约参数阈值,以实现闭环供应链的协调.

## 1 问题描述与基本假设

在由一个制造商和一个再制造商构成的闭环供应链中,制造商是领导者,再制造商为跟从者,两者之间为Stackelberg博弈.制造商负责新产品设计、生产和销售,再制造商接受制造商的注册或专利许可,负责回收废旧产品、生产和销售再制品.

本文中的假设与符号说明如下.

新产品和再制品质量相同,但再制品具有再制造标识,消费者对新产品和再制品具有不同的支付意愿.假设市场总规模为 $Q$ ,消费者对新产品的支付意愿 $\nu$ 在整个市场 $[0, Q]$ 上均匀分布; $\delta\nu$ 为消费者对再制品的支付意愿, $\delta \in [0, 1)$ ,反映了再制品对新产品的替代程度.

设新产品与再制品定价分别为 $p_n$ 和 $p_r$ ,市场需求分别为 $q_n$ 和 $q_r$ .消费者购买新产品与再制品

的效用函数分别为  $u_n(\nu) = \nu - p_n$  和  $u_r(\nu) = \delta\nu - p_r$ . 根据效用最大化原则,其购买行为取决于新产品和再制造品的定价及替代关系<sup>[19]</sup>. 当  $0 < \delta \leq p_r/p_n$  时,市场上只存在新产品,有  $q_n = Q - p_n$  和  $q_r = 0$ ; 当  $1 > \delta \geq 1 - (p_n - p_r)/Q$  时,市场上只存在再制造品,有  $q_n = 0$  和  $q_r = Q - p_r/\delta$ ; 当  $p_r/p_n < \delta < 1 - (p_n - p_r)/Q$  时,市场上新产品与再制造品共存,有  $q_n = ((1 - \delta)Q - p_n + p_r)/(1 - \delta)$  和  $q_r = (\delta p_n - p_r)/(\delta(1 - \delta))$ . 本文只对新产品和再制造品共存情形进行分析,此时,新产品需求  $q_n$  是新产品价格  $p_n$  的增函数,是再制造品价格  $p_r$  和替代系数  $\delta$  的减函数,再制造品需求  $q_r$  与之相反. 制造商与再制造商都按照市场需求组织生产,即产品产量等于市场需求. 新产品与再制造品的逆需求函数为

$$p_n = Q - q_n - \delta q_r, \quad (1)$$

$$p_r = \delta(Q - q_n - q_r). \quad (2)$$

设  $c_n$  为制造商生产新产品的单位成本,  $c_r$  为再制造商生产再制造品的单位成本,  $h$  为制造商向再制造商收取的单位产品许可费,  $s$  为再制造商从消费者手中回收单位废旧产品的价格,则再制造品的单位总成本为  $c_r + s + h$ , 且  $c_r + s + h < c_n$ .

产品模块化水平  $k$  在  $[0, 1]$  取值,  $k = 0$  表示产品在设计阶段未采用模块化设计策略;  $0 < k \leq 1$  表示采取模块化设计策略,且  $k$  越大,模块化水平越高. 在模块化水平  $k$  下,产品设计的研发投入费用为  $\theta k^2/2$ <sup>[20]</sup>,  $\theta > 0$  反映了模块化设计的研发难易程度.

若不考虑回收过程和模块化水平对新产品生产成本的影响,则新产品单位生产成本  $c_n$  与  $k$  无关. 在模块化水平  $k$  下,再制造品单位生产成本为  $c_r + s + h - \omega k$ . 其中:  $\omega k$  为模块化设计节约的单位再制造成本,  $\omega$  为模块化设计引起的再制造成本下降率,即增加一单位模块化水平所节省的再制造成本大小,且有  $\omega > 0$  和  $0 < c_r + s + h - \omega k < c_r + s + h < c_n$ .

假设废旧产品可再制造率为 1.

设符号  $\pi_j^i$  表示在模型  $i$  中,闭环供应链成员  $j$  的利润. 其中:  $i$  可以取  $I$ 、 $D$ 、 $F$ 、 $N$  和  $FC$ , 分别表示公平中性下的集中决策模型、分散决策模型、关注再制造商公平关切的分散决策模型、不关注再制造商公平关切的分散决策模型和关注再制造商公平关切的供应链协调模型;  $j$  可以取  $M$ 、 $R$  和  $T$ , 分别表示制造商、再制造商和供应链系统.

再制造商公平关切下,制造商以利润最大为决策目标,再制造商以公平效用最大化为决策目标. 参考杜少甫等<sup>[21]</sup>构建的公平效用函数模型可知,再制造商的公平效用函数为

$$u_R = \pi_R - \lambda(\pi_M - \pi_R) = (1 + \lambda)\pi_R - \lambda\pi_M. \quad (3)$$

其中:  $\lambda$  为再制造商的公平关切系数,  $\lambda \geq 0$ ;  $\lambda = 0$  表

示再制造商对公平不关注,  $\lambda \rightarrow \infty$  表示再制造商对公平极度关注.

## 2 公平中性下的决策模型

### 2.1 集中决策模型

集中决策模型  $I$  下,制造商与再制造商组成超组织决策者,对新产品产量  $q_n$ 、再制造品产量  $q_r$  和模块化水平  $k$  进行决策,系统总利润函数为

$$\pi_{\{q_n, q_r, k\}}^I = (p_n - c_n)q_n + (p_r - c_r + \omega k - s)q_r - \frac{1}{2}\theta k^2. \quad (4)$$

将新产品和再制造品的逆需求函数(1)和(2)代入利润函数(4)中,由式(4)的海赛矩阵

$$H^I = \begin{bmatrix} -2 & -2\delta & 0 \\ -2\delta & -2\delta & \omega \\ 0 & \omega & -\theta \end{bmatrix}$$

负定可知,当  $2\delta(1 - \delta)\theta - \omega^2 > 0$  时,模型  $I$  存在唯一最优解,且由联立的一阶偏导方程组  $\frac{\partial \pi^I}{\partial q_n} = 0, \frac{\partial \pi^I}{\partial q_r} = 0$  和  $\frac{\partial \pi^I}{\partial k} = 0$  可得最优决策为

$$k^{I*} = \frac{\omega(\delta c_n - c_r - s)}{2\delta(1 - \delta)\theta - \omega^2}, \quad q_r^* = \frac{\theta(\delta c_n - c_r - s)}{2\delta(1 - \delta)\theta - \omega^2},$$

$$q_n^* = \frac{Q - c_n}{2} - \frac{\delta\theta(\delta c_n - c_r - s)}{2\delta(1 - \delta)\theta - \omega^2},$$

系统最优总利润为

$$\pi_T^{I*} = \frac{(Q - c_n)^2}{4} + \frac{\theta(\delta c_n - c_r - s)^2}{2(2\delta(1 - \delta)\theta - \omega^2)}.$$

### 2.2 分散决策模型

分散决策模型  $D$  下,决策者均以各自利润最大化为目标. 制造商与再制造商的利润函数分别为

$$\pi_{\{q_n, h, k\}}^D = (p_n - c_n)q_n + hq_r - \frac{1}{2}\theta k^2, \quad (5)$$

$$\pi_{\{q_r\}}^D = (p_r - c_r + \omega k - h - s)q_r. \quad (6)$$

首先,将新产品和再制造品的逆需求函数(1)和(2)分别代入制造商和再制造商的利润函数(5)和(6)中,根据逆向归纳法,在制造商决策变量  $q_n$ 、 $k$  和  $h$  给定下,由  $\frac{d\pi_R^D}{dq_r} = 0$  和  $\frac{d^2\pi_R^D}{dq_r^2} = -2\delta < 0$ , 可得再制造商的最优反应函数

$$q_r^D(q_n, h, k) = \frac{Q - q_n}{2} - \frac{h + s + c_r - \omega k}{2\delta},$$

再将其代入制造商利润函数(5)中,由海赛矩阵

$$H^D = \begin{bmatrix} \delta - 2 & 0 & -\frac{\omega}{2} \\ 0 & -\frac{1}{\delta} & \frac{\omega}{2\delta} \\ -\frac{\omega}{2} & \frac{\omega}{2\delta} & -\theta \end{bmatrix}$$

负定可知,当  $2\delta(2 - \delta)\theta - \omega^2 > 0$  时,模型  $D$  存在唯一最优解,且由联立的一阶偏导方程组  $\frac{\partial \pi_M^D}{\partial q_n} = 0, \frac{\partial \pi_M^D}{\partial k} = 0$  和  $\frac{\partial \pi_M^D}{\partial h} = 0$ , 可解得最优决策

$$q_n^{D*} = \frac{Q - c_n}{2} - \frac{\delta\theta(\delta c_n - c_r - s)}{2\delta(2 - \delta)\theta - \omega^2},$$

$$k^{D*} = \frac{\omega(\delta c_n - c_r - s)}{2\delta(2 - \delta)\theta - \omega^2},$$

$$h^{D*} = \frac{\delta Q - s - c_r}{2} + \frac{\omega^2(\delta c_n - c_r - s)}{2(2\delta(2 - \delta)\theta - \omega^2)}.$$

将  $q_n^{D*}$ 、 $k^{D*}$  和  $h^{D*}$  代入  $q_r^D(q_n, h, k)$  中, 可得  $q_r^D$  最优解  $q_r^{D*} = \frac{\theta(\delta c_n - c_r - s)}{2\delta(2 - \delta)\theta - \omega^2}$ . 此时, 制造商、再制造商和闭环供应链的最优利润分别为

$$\pi_M^{D*} = \frac{(Q - c_n)^2}{4} + \frac{\theta(\delta c_n - c_r - s)^2}{2(2\delta(2 - \delta)\theta - \omega^2)},$$

$$\pi_R^{D*} = \frac{\delta\theta^2(\delta c_n - c_r - s)^2}{(2\delta(2 - \delta)\theta - \omega^2)^2},$$

$$\pi_T^{D*} = \frac{(Q - c_n)^2}{4} + \frac{(2\delta(3 - \delta)\theta - \omega^2)\theta(\delta c_n - c_r - s)^2}{2(2\delta(2 - \delta)\theta - \omega^2)^2}.$$

### 3 关注再制造商公平关切的决策模型

再制造商公平关切制造收益的分配, 制造商可获得其公平关切信息, 并在制定决策时加以考虑.

将新产品与再制品逆需求函数 (1) 和 (2)、制造商与再制造商利润函数 (4) 和 (5) 代入再制造商的公平效用函数 (3) 中, 根据逆向归纳法, 由  $\frac{d^2 u_R}{dq_r^2} = -2(1 + \lambda)\delta < 0$  和  $\frac{du_R}{dq_r} = 0$ , 可得再制造商的最优反应函数

$$q_r^F(q_n, h, k) = \frac{Q - q_n}{2} - \frac{h + c_r + s - \omega k}{2\delta} + \frac{\lambda(\delta q_n - h)}{2\delta(1 + \lambda)}.$$

将其代入制造商利润函数 (5) 中, 由其海塞矩阵

$$H^F = \begin{bmatrix} \frac{\delta}{1 + \lambda} - 2 & \frac{\lambda}{1 + \lambda} & -\frac{\omega}{2} \\ \frac{\lambda}{1 + \lambda} & -\frac{1 + 2\lambda}{\delta(1 + \lambda)} & \frac{\omega}{2\delta} \\ -\frac{\omega}{2} & \frac{\omega}{2\delta} & -\theta \end{bmatrix}$$

负定可知, 当  $4\delta\theta(1 + 2\lambda) - (2\theta\delta^2 + \omega^2)(1 + \lambda) > 0$  时, 模型  $F$  存在唯一最优解, 由联立的一阶偏导方程组  $\frac{\partial \pi_M^F}{\partial q_n} = 0$ ,  $\frac{\partial \pi_M^F}{\partial h} = 0$  和  $\frac{\partial \pi_M^F}{\partial k} = 0$ , 可得制造商最优决策

$$q_n^{F*} = \frac{Q - c_n}{2} - \frac{\delta\theta(\delta c_n - c_r - s)(1 + \lambda)}{4\delta\theta(1 + 2\lambda) - (2\theta\delta^2 + \omega^2)(1 + \lambda)},$$

$$h^{F*} = \frac{\delta Q - s - c_r}{2} - \frac{(\delta c_n - c_r - s)(4\delta\theta\lambda - (1 + \lambda)\omega^2)}{2(4\delta\theta(1 + 2\lambda) - (2\theta\delta^2 + \omega^2)(1 + \lambda))},$$

$$k^{F*} = \frac{\omega(\delta c_n - c_r - s)(1 + \lambda)}{4\delta\theta(1 + 2\lambda) - (2\theta\delta^2 + \omega^2)(1 + \lambda)}.$$

将  $q_n^{F*}$ 、 $k^{F*}$  和  $h^{F*}$  代入  $q_r^F(q_n, h, k)$ , 有

$$q_r^{F*} = \frac{(\delta c_n - c_r - s)\theta(1 + 2\lambda)}{4\delta\theta(1 + 2\lambda) - (2\theta\delta^2 + \omega^2)(1 + \lambda)}.$$

制造商、再制造商和闭环供应链最优利润分别为

$$\pi_M^{F*} = \frac{(Q - c_n)^2}{4} + \frac{(\delta c_n - c_r - s)^2\theta(1 + \lambda)}{2(4\delta\theta(1 + 2\lambda) - (2\theta\delta^2 + \omega^2)(1 + \lambda))},$$

$$\pi_R^{F*} = \frac{(\delta c_n - c_r - s)^2\delta\theta^2(1 + 2\lambda)(1 + 4\lambda)}{(4\delta\theta(1 + 2\lambda) - (2\theta\delta^2 + \omega^2)(1 + \lambda))^2},$$

$$\pi_T^{F*} = -\frac{\theta(\delta c_n - c_r - s)((2\delta^2\theta + \omega^2)(1 + \lambda)^2 - (4\delta\theta(1 + 2\lambda))}{(4\delta\theta(1 + 2\lambda))} \rightarrow$$

$$\leftarrow \frac{6\delta\theta(1 + 2\lambda)^2}{(2\theta\delta^2 + \omega^2)(1 + \lambda)^2} + \frac{(Q - c_n)^2}{4}.$$

**结论 1** 关注再制造商公平关切时, 新产品产量与公平关切系数正相关; 再制品产量、模块化设计水平和许可费都与公平关切系数负相关.

**证明** 由于

$$\frac{\partial q_n^{F*}}{\partial \lambda} = \frac{4\delta^2\theta^2(\delta c_n - c_r - s)}{(4\delta\theta(1 + 2\lambda) - (2\theta\delta^2 + \omega^2)(1 + \lambda))^2} > 0,$$

$$\frac{\partial k^{F*}}{\partial \lambda} = -\frac{\omega}{\delta\theta} \frac{\partial q_n^{F*}}{\partial \lambda} < 0,$$

$$\frac{\partial q_r^{F*}}{\partial \lambda} = -\frac{\omega^2 + 2\delta^2\theta}{4\delta^2\theta} \frac{\partial q_n^{F*}}{\partial \lambda} < 0,$$

$$\frac{\partial h^{F*}}{\partial \lambda} = (-2 + \delta) \frac{\partial q_n^{F*}}{\partial \lambda} < 0,$$

结论 1 得证.  $\square$

结论 1 表明, 当制造商关注再制造商的公平关切时, 随着再制造商公平关切程度的增强, 制造商收取的单位许可费降低, 使得其不愿意投入更多的成本进行新产品的模块化设计, 进而导致模块化设计水平降低. 通过分析亦可知, 公平关切程度越强, 再制品单位生产成本越低, 当消费者对再制品支付意愿稍大时 ( $\delta > \sqrt{\omega^2/(2\theta)}$ ), 再制品价格也稍低, 此时, 制造商为了增强新产品的竞争优势, 必然降低新产品价格, 进而导致再制品的市场竞争能力下降 ( $((\delta p_n^{F*} - p_r^{F*}))/\partial \lambda < 0$ ), 因此, 新产品价格与公平关切程度负相关, 销量与其正相关, 再制品销量则随着公平关切程度的增强而降低.

**结论 2** 关注再制造商公平关切下, 制造商利润和闭环供应链利润是公平关切系数的减函数, 再制造商利润是公平关切系数的增函数. 当  $\lambda \rightarrow \infty$  时, 有

$$\pi_M^{F*}(\infty) = \frac{(Q - c_n)^2}{4} + \frac{(\delta c_n - c_r - s)^2\theta}{2(2(4 - \delta)\delta\theta - \omega^2)},$$

$$\pi_R^{F*}(\infty) = \frac{8\delta\theta^2(\delta c_n - c_r - s)^2}{(2(4 - \delta)\delta\theta - \omega^2)^2}.$$

**证明** 由于

$$\frac{\partial \pi_M^{F*}}{\partial \lambda} = -\frac{A}{C} < 0, \quad \frac{\partial \pi_R^{F*}}{\partial \lambda} = \frac{AB(1 + 4\lambda)}{C^3} < 0,$$

$$\frac{\partial \pi_T^{F*}}{\partial \lambda} = \frac{A(B(2 + 5\lambda) - 4\delta\theta(1 + 2\lambda))}{C^2} > 0,$$

结论 2 得证. 其中  $A = 2\delta\theta^2(c_r + s - \delta c_n)$ ,  $B = 2\theta\delta^2 + \omega^2$ ,  $C = (2\delta\theta(-2 + \delta) + \omega^2 + (2\theta\delta(-4 + \delta) + \omega^2)\lambda)$ .  $\square$

结论2表明,再制造商的公平关切会影响闭环供应链收益在各个成员之间的分配.当制造商关注再制造商的公平关切时,公平关切程度越强,再制造商的讨价还价能力越强,再制造品单位获利能力越高,所分配的利润越多,制造商的利润则越少.但是,制造商是该闭环供应链的领导者,且新产品收益的实现与再制造商的努力程度关系较小,因此,大部分新产品利润并不会在制造商和再制造商之间分配,进而使得制造商/再制造商利润不会随公平关切程度的增强而无限递减/递增,而是以  $\frac{(Q - c_n)^2}{4} + \frac{(\delta c_n - c_r - s)^2 \theta}{2(2(4 - \delta)\theta - \omega^2)}$  和  $\frac{8\delta\theta^2(\delta c_n - c_r - s)^2}{(2(4 - \delta)\theta - \omega^2)^2}$  为极限.

#### 4 不关注再制造商公平关切的决策模型

再制造商的公平关切信息通常为私人信息,制造商可能不了解,或者了解但不给予关注.此时,制造商基于再制造商公平中性的假设制定新产品产量  $q_n$ 、模块化设计水平  $k$  和许可费  $h$ ,再制造商基于公平效用最大化进行再制造品产量  $q_r$  决策.

在求解过程中,首先将新产品和再制造品的逆需求函数(1)和(2)分别代入制造商和再制造商的利润函数(5)和(6)中,根据逆向归纳法,制造商认为再制造商最优反应函数为  $q_r^D(q_n, h, k)$ .将其代入制造商利润函数(5)中,由联立一阶偏导方程组  $\frac{\partial \pi_M^N}{\partial q_n} = 0, \frac{\partial \pi_M^N}{\partial h} = 0$  和  $\frac{\partial \pi_M^N}{\partial k} = 0$ ,可得制造商最优决策

$$q_n^{N*} = \frac{Q - c_n}{2} - \frac{\delta\theta(\delta c_n - c_r - s)}{2\delta(2 - \delta)\theta - \omega^2},$$

$$k^{N*} = \frac{\omega(\delta c_n - c_r - s)}{2\delta(2 - \delta)\theta - \omega^2},$$

$$h^{N*} = \frac{\delta Q - s - c_r}{2} + \frac{\omega^2(\delta c_n - c_r - s)}{2(2\delta(2 - \delta)\theta - \omega^2)}.$$

再制造商公平关切,将制造商最优决策  $q_n^{N*}, h^{N*}$  和  $k^{N*}$  代入再制造商公平效用函数(3)中,由  $du_R/dq_r = 0$  和  $d^2u_R/dq_r^2 < 0$ ,得

$$q_r^{N*} = \frac{\theta(\delta c_n - c_r - s)}{(2\delta(2 - \delta)\theta - \omega^2)(1 + \lambda)}.$$

制造商、再制造商和闭环供应链最优利润为

$$\pi_M^{N*} = \frac{(Q - c_n)^2}{4} + \frac{\theta(4\delta\theta - (2\delta^2\theta + \omega^2)(1 + \lambda))(\delta c_n - c_r - s)^2}{2(1 + \lambda)(2\delta(2 - \delta)\theta - \omega^2)^2},$$

$$\pi_R^{N*} = \frac{\delta\theta^2(1 + 2\lambda)(\delta c_n - c_r - s)^2}{(1 + \lambda)^2(2\delta(2 - \delta)\theta - \omega^2)^2},$$

$$\pi_T^{N*} = \frac{\theta(2\delta\theta(3 + 4\lambda) - (2\delta^2\theta + \omega^2)(1 + \lambda)^2)(\delta c_n - c_r - s)^2}{2(1 + \lambda)^2(2\delta(2 - \delta)\theta - \omega^2)^2} + \frac{(Q - c_n)^2}{4}.$$

**结论3** 在不关注再制造商公平关切下,新产品产量、许可费和模块化设计水平与公平关切系数不

相关;新产品价格和再制造品价格与公平关切系数正相关,再制造品产量与其负相关.

**证明** 各最优决策分别对公平关切系数  $\lambda$  求偏导,有

$$\frac{\partial q_n^{N*}}{\partial \lambda} = \frac{\partial h^{N*}}{\partial \lambda} = \frac{\partial k^{N*}}{\partial \lambda} = 0, \quad \frac{\partial q_r^{N*}}{\partial \lambda} = -\frac{1}{\delta} \frac{\partial p_r^{N*}}{\partial \lambda} < 0,$$

$$\frac{\partial p_n^{N*}}{\partial \lambda} = \frac{\partial p_r^{N*}}{\partial \lambda} = \frac{\delta\theta(\delta c_n - c_r - s)}{(1 + \lambda)^2(2\delta(2 - \delta)\theta - \omega^2)} > 0.$$

由此,结论3得证. □

结论3表明,当制造商不关注再制造商的公平关切时,其仍按照公平中性进行决策,故新产品产量、许可费和模块化设计水平的最优决策与公平关切系数无关.新产品与再制造品的销售价格以相同的速度随着公平关切系数的增加而递增,由于消费者对再制造品的支付意愿小于新产品,再制造品的市场竞争力下降,在新产品产量不变的情况下,再制造品产量随着公平关切系数的增加而降低.

**结论4** 在不关注再制造商公平关切下,制造商利润、再制造商利润和闭环供应链总利润都是公平关切系数的减函数,且制造商利润和闭环供应链总利润的递减速率高于关注再制造商公平关切情形.

**证明** 由于

$$\frac{\partial \Pi_M^{N*}}{\partial \lambda} = \frac{-2\delta\theta^2(c_r + s - \delta c_n)^2}{(1 + \lambda)^2(2\delta\theta(-2 + \delta) + \omega^2)^2} < \frac{\partial \Pi_M^{F*}}{\partial \lambda} < 0,$$

$$\frac{\partial \Pi_R^{N*}}{\partial \lambda} = \frac{\lambda}{1 + \lambda} \frac{\partial \Pi_M^{N*}}{\partial \lambda} < 0,$$

$$\frac{\partial \Pi_T^{N*}}{\partial \lambda} = \frac{1 + 2\lambda}{1 + \lambda} \frac{\partial \Pi_M^{N*}}{\partial \lambda} < \frac{\partial \Pi_T^{F*}}{\partial \lambda} < 0.$$

结论4得证. □

结论4表明,当制造商无视再制造商的公平关切时,按照公平中性制定的许可费用降低了再制造商的利润.再制造商为了获得更多的利润,只能提高再制造品的销售价格,而这样会降低再制造品销量,减少制造商收取的总许可费用和一部分消费者剩余,进而导致供应链利润受损.由此可知,制造商无视再制造商的公平关切不仅会加快自身利润和闭环供应链整体利润的降低,还会使再制造商利益受损,且随着公平关切程度的增加,受损程度越来越强.

对关注再制造商公平关切与不关注再制造商公平关切情形下各决策变量均衡解和利润进行比较,可得到如下推论.

**推论1** 与关注再制造商公平关切相比,不关注再制造商公平关切情形存在着更低的新产品销量和再制造品销量,更高的许可费和模块化水平,更低的制造商利润、再制造商利润和供应链利润.

**证明** 将关注再制造商公平关切与不关注下均衡解相减,并与零比较,有  $q_n^{F*} - q_n^{N*} = -\frac{2A\delta\lambda}{(B - 4\delta\theta)C}$

$> 0, q_r^{F^*} - q_r^{N^*} > 0, k^{F^*} - k^{N^*} < 0, h^{F^*} - h^{N^*} < 0, \pi_M^{F^*} - \pi_M^{N^*} < 0, \pi_R^{F^*} - \pi_R^{N^*} < 0, \pi_T^{F^*} - \pi_T^{N^*} < 0. \square$

### 5 基于再制造收益共享的闭环供应链协调

针对制造商关注再制造商公平关切情形, 采用再制造收益共享契约对制造商和再制造商构成的闭环供应链进行协调, 以促使闭环供应链的效益达到集中决策水平. 再制造收益共享契约如下: 制造商向再制造商提供再制造收益共享契约  $(\Phi, 0)$ , 其中  $\Phi$  表示制造商分享的再制造收入比例,  $0$  表示制造商不再收取许可费用; 再制造商根据自身的利润情况选择接受或拒绝该契约, 如若接受, 则再制造商可持有再制造收益的  $1 - \Phi$  比例. 在该契约下, 制造商和再制造商的利润如下:

$$\pi_M^{FC} = (p_n - c_n)q_n - \frac{1}{2}\theta k^2 + \Phi p_r q_r, \quad (7)$$

$$\pi_R^{FC} = ((1 - \Phi)p_r - c_r + \omega k - s)q_r. \quad (8)$$

再制造收益共享契约如果能够实现协调, 则制造商和再制造商的利润之和总是等于集中决策的总利润, 有  $\pi_M^{FC*} + \pi_R^{FC*} = \pi_T^*$ . 由式 (7) 和 (8) 可知,  $\pi_M^{FC*} =$

$\pi_M^{I*} + \Phi\pi_R^{V*}, \pi_R^{FC*} = \pi_R^{I*} - \Phi\pi_R^{V*}$ , 其中  $\pi_R^{V*} = p_r^I q_r^I$  为契约协调下再制造商的销售收入. 此时, 再制造商的公平效用函数为  $u_R^{FC} = (1 + \lambda)\pi_R^{FC} - \lambda\pi_M^{FC}$ . 契约必须满足个体理性约束条件方能被双方接受, 即:

1) FC 模型再制造商公平效用值不小于 F 模型的最大效用, 有  $u_R^{FC*} \geq u_R^{F*} = (1 + \lambda)\pi_R^{F*} - \lambda\pi_M^{F*}$ ;

2) FC 模型制造商利润不小于 F 模型最优利润, 有  $\pi_M^{FC*} \geq \pi_M^{F*}$ .

综上可知, 当满足下式时:

$$\frac{\pi_M^{F*} - \pi_M^{I*}}{\pi_R^{V*}} \leq \Phi \leq \frac{(1 + \lambda)(\pi_R^{I*} - \pi_R^{F*}) - \lambda(\pi_M^{I*} - \pi_M^{F*})}{(1 + 2\lambda)\pi_R^{V*}},$$

再制造收益共享契约能够实现闭环供应链的协调, 且  $\Phi$  取值区间的宽度随着公平关切程度的增强而递减, 即意味着再制造商的公平关切会增加协调的难度.

### 6 数值仿真分析

下面通过数值仿真进一步分析各个决策变量、制造商/再制造商利润、供应链利润与参数的关系. 闭环供应链的基础参数分别为  $Q = 1000, c_n = 600, c_r = 250, \delta = 0.75, \omega = 5, \theta = 100, s = 150, \lambda = 0.8$ .

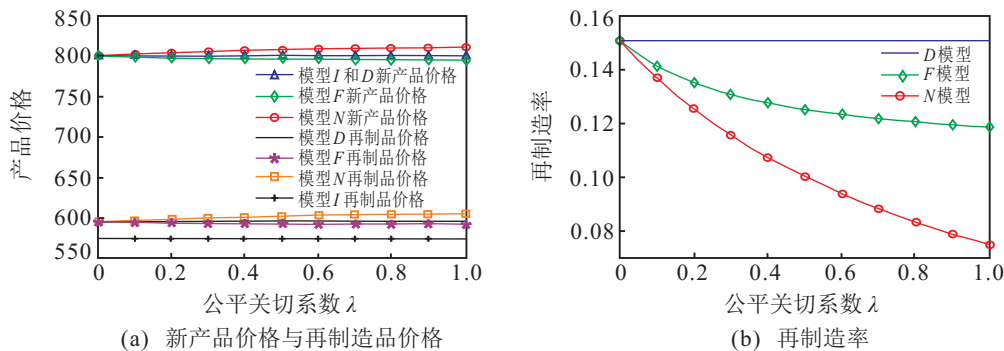


图 1 公平关切系数变化下产品定价及再制造率的变化趋势

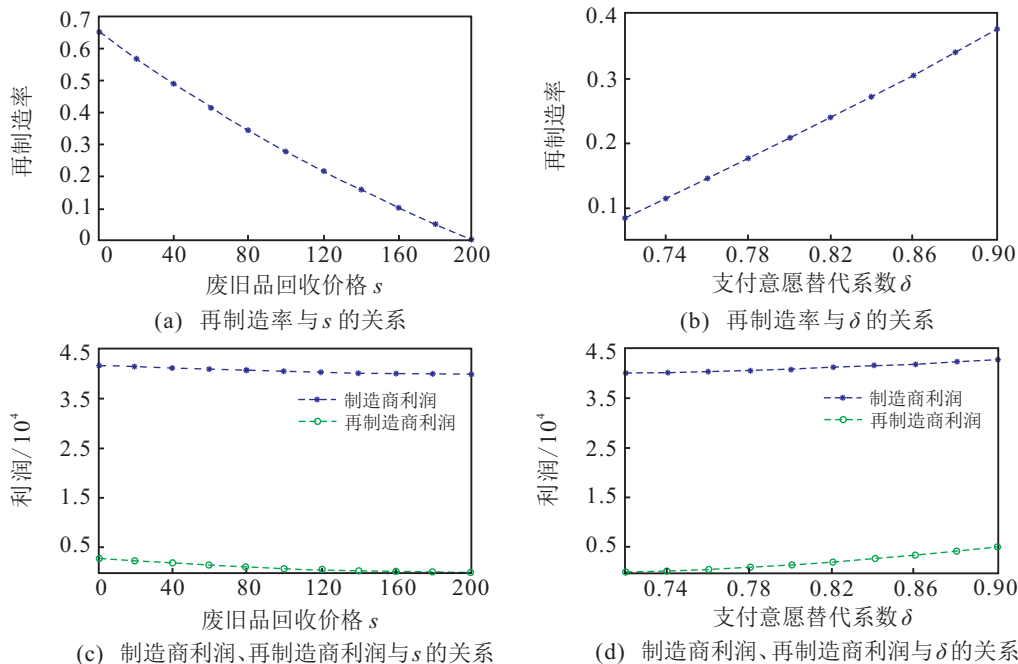


图 2 公平关切下制造商利润、再制造商利润与 s 和 delta 的关系

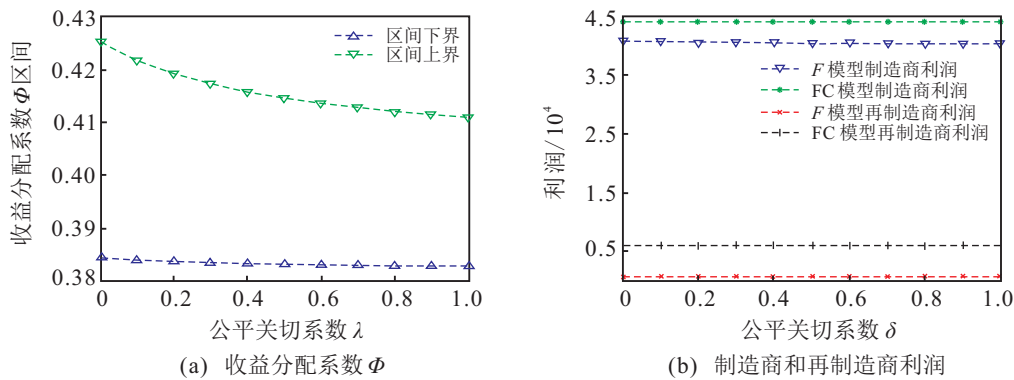


图3 协调契约参数及契约下制造商和再制造商利润与公平关切系数的关系

各模型下新产品和再制造品价格、废旧品再制造率随公平关切系数递增的变化趋势如图1所示. 由图1可知:

1) 公平关切下, 公平关切系数的变化对新产品和再制造品定价的影响具有一致性, 在制造商关注方式下都随着其增加而提高, 在不关注方式下则随着其增加而降低, 而且考虑再制造商公平关切相比于不考虑再制造商公平关切, 存在着更低的新产品价格和再制造品价格, 即社会福利更好.

2) 以再制造率衡量闭环供应链的环境效益, 当再制造商公平关切时, 无论制造商是否给予关注, 环境效益均随着公平关切程度的增加而降低, 而且不关注情形下的下降速度高于关注情形. 因此, 不关注再制造商的公平关切不仅损害制造商和再制造商的利润, 还会降低闭环供应链的环境效益, 属于三方受损情形, 制造商应尽可能避免.

综上可知, 当再制造商公平关切时, 制造商应给予关注. 在关注情形下, 再制造率、制造商利润、再制造商利润与  $\delta$  和  $s$  的关系如图2所示. 由图2可知: 废旧品回收价格越高, 再制造率、制造商和再制造商利润越低; 再制造品支付意愿越高, 再制造率、制造商和再制造商利润越高.

当  $\phi$  在图3(a)所示的区间内取值时, 再制造收益共享契约可协调闭环供应链; 当  $\phi = 0.4$  时, 由图3(b)可知, 再制造收益共享契约实现了闭环供应链的协调, 双方决策目标实现了 Pareto 改进.

## 7 结 论

本文研究了再制造商公平关切下闭环供应链系统的生产设计与生产决策问题, 将制造商关注和不关注再制造商公平关切情形进行了对比分析. 研究结果表明:

1) 制造商关注再制造商的公平关切比不关注再制造商的公平关切存在着更低的新产品价格和再制造品价格, 更高的新产品销量和再制造品销量, 更低的许可费和模块化水平, 更高的环境效益;

2) 当制造商关注再制造商的公平关切时, 公平关切程度不仅影响着渠道利润在闭环供应链节点企业间的分配, 还会影响消费者购买新产品/再制造品的数量和价格, 降低再制造闭环供应链的总利润;

3) 当制造商不关注再制造商的公平关切时, 再制造商的公平关切不仅会导致双方利益受损, 加剧闭环供应链总利润的降低, 还会降低再制造的环境效益;

4) 再制造收益共享契约能够对考虑再制造商公平关切的闭环供应链进行协调, 且协调难度随着公平关切程度的增加而递增.

通过对制造商和再制造商生产设计策略的分析, 可得到以下3点管理借鉴:

1) 当再制造商公平关切时, 制造商应给予关注, 否则会损害闭环供应链的经济效益、环境效益和社会福利;

2) 政府应建立适当的调控机制, 企业应建立适当的诱导机制, 以提高消费者对再制造品的认识和支付意愿, 实现闭环供应链经济效益和环境效益的同步增长;

3) 政府应完善再制造补贴政策, 以降低废旧品回收成本, 提高企业再制造的积极性.

下一步应考虑的问题:

1) 进一步考虑讨价还价公平性对于闭环供应链产品设计与定价策略的影响;

2) 当政府制定回收率强制性法规时, 在考虑再制造商公平关切情形下, 如何达到政府的法规要求;

3) 目前研究是基于信息确定的, 公平关切程度不确定下的委托代理模型也需要进行一步研究.

## 参考文献(References)

[1] 申成然, 熊中楷, 彭志强. 专利保护与政府补贴下再制造闭环供应链的决策和协调[J]. 管理工程学报, 2013, 27(3):132-138.  
(Shen C R, Xiong Z K, Peng Z Q. Decision and coordination research for remanufacturing closed-loop supply chain under patent protection and government

- subsidies[J]. *J of Industrial Engineering and Engineering Management*, 2013, 27(3): 132-138.)
- [2] Oraopoulos N, Ferguson M E, Toktay L B. Relicensing as a secondary market strategy[J]. *Management Science*, 2012, 58(5): 1022-1037.
- [3] Kim K, Chhajed D. Commonality in product design: Cost saving, valuation change and cannibalization[J]. *European J of Operational Research*, 2000, 125(3): 602-621.
- [4] 张克勇. 互惠偏好下的闭环供应链系统定价决策分析[J]. *控制与决策*, 2015, 30(9): 1717-1722.  
(Zhang K Y. Analysis on closed-loop supply chain pricing decision under reciprocity preference[J]. *Control and Decision*, 2015, 30(9): 1717-1722.)
- [5] 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.  
(Xiong Z K, Shen C R, Peng Z Q. Closed-loop supply chain coordination research with remanufacturing under patent protection[J]. *J of Management Sciences in China*, 2011, 14(6): 76-85.)
- [6] 熊中楷, 申成然, 彭志强. 专利保护下闭环供应链的再制造策略研究[J]. *管理工程学报*, 2012, 26(3): 159-165.  
(Xiong Z K, Shen C R, Peng Z Q. A remanufacturing strategy for the closed-loop supply chain under patent protection[J]. *J of Industrial Engineering and Engineering Management*, 2012, 26(3): 159-165.)
- [7] 易余胤, 阳小栋. 不同专利许可模式下的再制造闭环供应链模型[J]. *计算机集成制造系统*, 2014, 20(9): 2305-2312.  
(Yi Y Y, Yang X D. Remanufacturing closed-loop supply chain model under different patent licensing model[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2014, 20(9): 2305-2312.)
- [8] 曹晓刚, 闻卉, 郑本荣, 等. 混合需求下考虑专利保护因素的闭环供应链定价与协调[J]. *中国管理科学*, 2014, 22(10): 106-112.  
(Cao X G, Wen H, Zheng B R, et al. Pricing and coordination decision of closed-loop supply chain with patent protection factor under mixed demand[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2014, 22(10): 106-112.)
- [9] Örsdemir A, Kemahlgülu-Ziya E, Parlaktürk A K. Competitive quality choice and remanufacturing[J]. *Production and Operations Management*, 2014, 23(1): 48-64.
- [10] Galbreth M R, Boyaci T, Verter V. Product reuse in innovative industries[J]. *Production and Operations Management*, 2013, 22(4): 1011-1033.
- [11] 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 Sciences in China*, 2012, 15(8): 12-23.)
- [12] Subramanian R, Ferguson M E, Beril Toktay L. Remanufacturing and the component commonality decision[J]. *Production and Operations Management*, 2013, 22(1): 36-53.
- [13] Wu C H. Product-design and pricing strategies with remanufacturing[J]. *European J of Operational Research*, 2012, 222(2): 204-215.
- [14] Wu C H. OEM product design in a price competition with remanufactured product[J]. *Omega*, 2013, 41(2): 287-298.
- [15] Fehr E, Schmidt K M. A theory of fairness, competition and cooperation[J]. *Quarterly J of Economics*, 1999, 114(3): 817-868.
- [16] 张克勇, 侯世旺, 周国华. 公平关切下闭环供应链定价策略[J]. *系统管理学报*, 2013, 22(6): 841-849.  
(Zhang K Y, Hou S W, Zhou G H. Pricing strategy in the closed-loop supply chain with fairness concerns[J]. *J of Systems & Management*, 2013, 22(6): 841-849.)
- [17] 张克勇, 吴燕, 侯世旺. 讨价还价公平关切下闭环供应链差别定价策略[J]. *工业工程*, 2013, 16(6): 95-100.  
(Zhang K Y, Wu Y, Hou S W. Differential pricing strategy of retailer's bargaining on concern of fairness in closed-loop supply chain[J]. *Industrial Engineering J*, 2013, 16(6): 95-100.)
- [18] 丁雪峰, 魏芳芳, 但斌. 零售商公平关切下闭环供应链定价与协调机制[J]. *计算机集成制造系统*, 2014, 20(6): 1471-1480.  
(Ding X F, Wei F F, Dan B. Pricing and coordination mechanism of closed loop supply chain considering retailer's fairness concerns[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2014, 20(6): 1471-1480.)
- [19] Ferrer G, Swaminathan J M. Managing new and differentiated remanufactured products[J]. *European J of Operational Research*, 2010, 203(2): 370-379.
- [20] Atasu A, Souza G. How does product recovery affect quality choice?[J]. *Production and Operations Management*, 2013, 22(4): 991-1010.
- [21] 杜少甫, 杜婵, 梁樑. 考虑公平关切的供应链契约与协调[J]. *管理科学学报*, 2010, 13(11): 41-48.  
(Du S F, Du C, Liang L. Supply chain coordination considering fairness concerns[J]. *J of Management Sciences in China*, 2010, 13(11): 41-48.)