

# 相对公平关切下考虑产品设计的再制造 合作模式与供应链协调

唐娟<sup>1,2†</sup>, 李帮义<sup>1</sup>, 刘志<sup>1,3</sup>, 龚本刚<sup>2</sup>, 陈玉玉<sup>1</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; 3. 加拿大温莎大学 Odette 商学院, 温莎 N9B3P4)

**摘要:** 将相对公平关切和产品可再制造性设计同时纳入由一个制造商和一个再制造商构成的供应链中, 构建外包和授权两种再制造合作模式下供应链的决策模型, 研究制造商的再制造合作模式选择问题, 分析最优再制造合作模式下再制造商相对公平关切和产品可再制造性设计对供应链生产定价决策及利润的影响, 并设计相应的协调策略. 研究表明: 外包再制造是制造商的最优再制造合作模式; 在外包再制造供应链中, 再制造商的相对公平关切虽会降低制造商利润, 但能提高供应链系统利润; 产品可再制造性设计对再制造商总是有利的; 外包价格契约能够实现外包再制造供应链的协调.

**关键词:** 再制造; 合作模式; 相对公平关切; 可再制造性设计; 外包价格契约

中图分类号: F253

文献标志码: A

## Decisions of remanufacturing cooperation mode and coordination in supply chain considering relative fairness concern and product design

TANG Juan<sup>1,2†</sup>, LI Bang-yi<sup>1</sup>, LIU Zhi<sup>1,3</sup>, GONG Ben-gang<sup>2</sup>, CHEN Yu-yu<sup>1</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; 3. Odette Business School, University of Windsor, Windsor N9B3P4, Canada)

**Abstract:** Both relative fairness concern and remanufacturability design are simultaneously integrated into a manufacturer-remanufacturer supply chain. Decision models in the outsourcing and authorization remanufacturing scenarios are formulated to study the choice of cooperation mode for remanufacturing from the viewpoint of the manufacturer. Then, the impacts of the remanufacturer's relative fairness concern and the remanufacturability design of product on quantity-pricing decision and member's profits are investigated in the optimal remanufacturing cooperation mode. Finally, the corresponding coordination strategy is designed. The results show that the authorization remanufacturing is always dominated by the outsourcing remanufacturing from the perspective of the manufacturer. In the outsourcing remanufacturing supply chain, relative fairness concern of the remanufacturer will reduce the manufacturer's profits, but it can improve the system profit of the supply chain. Meanwhile, remanufacturability design is always conducive to the remanufacturer. Outsourcing price contract can realize the coordination of the outsourcing remanufacturing supply chain.

**Keywords:** remanufacturing; cooperation mode; relative fairness concern; remanufacturability design; outsourcing price contract

## 0 引言

再制造作为发展循环经济的重要内容, 是缓解资源短缺与资源浪费矛盾, 推动资源综合利用和环境

保护的有效途径. 在企业视角下, 再制造不仅能扩展产品线, 提高产品市场占有率, 还能提升企业的品牌形象<sup>[1]</sup>, 因此, 越来越多的制造商涉足再制造领域, 如:

收稿日期: 2017-08-15; 修回日期: 2017-10-09.

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(71671001); 安徽省高校人文社会科学  
研究重点项目(SK2016A0109, SK2017A0122); 安徽省高等教育提升计划科学研究项目(TSSK2016B25).

责任编辑: 李登峰.

作者简介: 唐娟(1985—), 女, 讲师, 博士生, 从事物流与供应链管理、生产者责任延伸理论的研究; 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.

†通讯作者. E-mail: juan1985juan@163.com

苹果、格力、惠普、联想等. 制造商可通过自行再制造(如史泰博、长虹)、外包(如卡特波特公司)或授权(如IBM、思科)给第三方再制造商(以下简称再制造商)等方式从事再制造;出于对再制造成本和专注核心竞争力的考虑,大部分制造商并不自行再制造,而选择与占据再制造市场主体的第三方再制造商合作,共享再制造风险和收益<sup>[2]</sup>. 当制造商与再制造商合作再制造时,外包或授权合作模式的选择是制造商需考虑的关键问题.

目前,国内外学者已从法律法规、回收渠道、物流服务和权力结构等多个角度,对再制造供应链的运作决策问题进行了研究<sup>[3-4]</sup>. 其中:1) 在外包再制造方面, Tsai<sup>[5]</sup>运用作业成本法、收益管理方法和无竞争行为理论,研究了制造商选择再制造外包模式的充分必要条件;范体军等<sup>[6]</sup>构建了考虑激励因素和不考虑激励因素情形下的废旧产品回收外包决策模型,确定了决定废旧产品回收是否外包的临界外包成本; Abdulrahman 等<sup>[7]</sup>运用层次分析法研究了影响制造商不再制造、自行再制造和外包再制造决策的关键因素; Zuo 等<sup>[8]</sup>从制造商、再制造商、消费者剩余、社会福利和环境影响等角度对外包和授权两种再制造合作模式进行了比较; Wang 等<sup>[9]</sup>对自行再制造和外包再制造绩效的关键影响因素进行分析,从零售商利润和环境角度,比较了两种再制造模式的优劣. 2) 在授权再制造方面, Oraiopoulos 等<sup>[10]</sup>研究了二手产品交易市场下,制造商如何向购买翻新再制造品的消费者收取软件注册费用问题;熊中楷等<sup>[11]</sup>研究了专利保护下的再制造策略,明确了制造商选择授权再制造的边界条件;易余胤等<sup>[12]</sup>从制造商、消费者和环保的角度,对再制造授权模式下两种专利许可费用收取方式进行了比较和分析; Hong 等<sup>[13]</sup>针对制造商的技术许可问题,在考虑废旧产品回收竞争的基础上,比较和分析了提成许可和固定费用许可两种方式的实施效果. 3) 在供应链协调方面,现有研究偏重于协调契约和合作利润分配两个问题. 其中:在协调契约上,收益共享-费用分担契约、收入共享契约、价格折扣契约、两部定价契约<sup>[14-18]</sup>等已被证实能够有效协调再制造供应链;在合作利润分配上,部分学者利用合作博弈理论中的解概念及不同分配方法,如 Shapley 值、纳什议价模型等,解决了供应链合作利润的分配问题<sup>[9,19-22]</sup>.

上述研究已对两种合作模式下的产品生产定价决策、供应链运行效率和协调机制进行了分析,但是,忽略了产品可再制造性设计对合作模式运行效

率的影响. 虽已有部分学者从运作层面对产品可再制造性设计展开了研究<sup>[2,23-25]</sup>,但大多是以研究产品可再制造性最优设计,以及与再制造商或其他制造商展开竞争为主. 如 Subramanian 等<sup>[2]</sup>研究了再制造商竞争环境下制造商的最优产品通用性设计决策问题; Gu 等<sup>[25]</sup>研究了竞争环境下制造商的最优产品互换性设计决策问题,指出互换性设计策略是制造商与再制造商开展竞争的有效手段. 另外,上述研究均假设合作双方完全理性,忽略了决策主体有限理性、会对收益分配的公平性表现出极大关注(即公平关切)的事实<sup>[26]</sup>. 公平关切会影响个体的决策行为,已有学者将其引入再制造供应链中. 如:张克勇等<sup>[27]</sup>研究了零售商公平关切对再制造供应链差异化定价策略的影响;丁雪峰等<sup>[28]</sup>研究了零售商公平关切对不同权力结构的再制造供应链定价决策及运行效率的影响; Ma 等<sup>[29]</sup>研究了零售商公平关切对废旧产品回收率、零售商销售努力、供应链经济效益的影响. 上述研究中的公平关切属于只考虑收益大小的绝对公平关切. 在现实中,公平具有相对性,各方的实力与贡献会影响利益分配的公平性. 因此,为更加符合实际,需考虑决策主体的相对公平关切<sup>[30]</sup>.

本文依据文献[30]的相对公平关切框架和文献[23]的产品可再制造性设计理论,构建外包和授权两种再制造合作模式的决策模型,探讨制造商的最优再制造合作模式,分析相对公平关切和产品可再制造性设计对最优再制造合作模式下生产定价决策及利润的影响,并研究最优再制造模式下供应链的协调策略.

## 1 问题描述与相关假设

再制造供应链由一个制造商和一个再制造商构成. 制造商不对废旧产品进行自行再制造,而通过外包或授权的方式与再制造商进行合作. 在外包再制造模式下,制造商将废旧产品的回收再制造全部外包给再制造商,再制品生产后由制造商负责销售. 在授权再制造模式下,再制造商负责废旧产品的回收、再制造和销售,制造商向再制造商收取一定的再售特许费或软件注册费. 在两种模式下,制造商为领导者,再制造商为跟从者,两者之间为 Stackelberg 博弈. 制造商与再制造商的决策顺序如下:

- 1) 制造商决定产品的可再制造性水平;
- 2) 制造商决定新产品产量、再制品外包价格或授权费用;
- 3) 再制造商依据制造商制定的外包价格或授权

费用,决定再制造品的产量.

本文中的假设与符号说明如下:

制造商在产品设计阶段,决定新产品的可再制造性水平  $k$ ,  $k \in (0, 1)$ ,  $k$  越高,产品中可再制造部分的比例越高. 在可再制造性水平  $k$  下,新产品单位生产成本为  $f_n(k)$ ,再制造品单位生产成本为  $f_r(k)$ ,研发费用为  $F(k)$ . 其中:  $F(k)$  和  $f_n(k)$  均为  $k$  的递增凸函数,  $f_r(k)$  为  $k$  的递减函数<sup>[23]</sup>. 在本文中,假设  $f_n(k) = c_n + \alpha_n k$ ,  $f_r(k) = c_r - \alpha_r k$ ,  $F(k) = \alpha_F k^2$ ,  $c_n$  和  $c_r$  分别为不考虑可再制造性设计策略下制造商和再制造商的基准生产成本,且有  $c_n > c_r$ ,  $\alpha_F > \alpha_n$  和  $\alpha_F > \alpha_r$ . 假设一个废旧产品只能生产一个再制造品,且仅能再制造一次.

再制造品具有再制造标识,消费者对新产品和再制造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  $v$  在整个市场  $[0, Q]$  上均匀分布,其分布密度函数为  $f(v)$ .  $\delta v$  为消费者对再制造品的支付意愿,  $\delta \in [0, 1)$  反映了再制造品对新产品的替代程度. 消费者依据效用最大化原则进行购买决策,其购买新产品和再制造品的效用分别为  $u_n(v) = v - p_n$  和  $u_r(v) = \delta v - p_r$ ,  $p_n$  和  $p_r$  为新产品和再制造品的销售价格. 当  $0 < \delta \leq p_r/p_n$  时,市场上只存在新产品,新产品的市场需求  $q_n = Q - p_n$ ,再制造品的市场需求  $q_r = 0$ ; 当  $1 - (p_n - p_r)/Q \leq \delta < 1$  时,市场上只存在再制造品,  $q_n = 0$ ,  $q_r = Q - p_r/\delta$ ; 当  $p_r/p_n < \delta < 1 - (p_n - p_r)/Q$  时,新产品与再制造品共存,此时,若  $u_n(v) > u_r(v)$  且  $u_n(v) > 0$ ,则消费者选择购买新品,  $q_n = Q - (P_N - P_R)/(1 - \delta)$ ; 若  $u_r(v) > u_n(v)$  且  $u_r(v) > 0$ ,则消费者选择购买再制造品,  $q_r = (p_n - p_r)/(1 - \delta) - p_r/\delta$ . 本文只对新产品和再制造品共存情形进行分析,此时,制造商与再制造商都按照市场需求组织生产,则两种产品的逆需求函数为  $p_n(q_n, q_r) = Q - q_n - \delta q_r$  和  $p_r(q_n, q_r) = \delta(Q - q_n - q_r)$ .

再制造商回收废旧产品的努力成本是关于回收数量的凸函数,设为  $cq_r^2$ ,其中  $c$  为回收成本规模参数,其大小反映了废旧产品的回收难易程度. 为简化模型,已将再制造商从消费者处回收废旧产品所需支付的转移成本纳入  $c_r$  中,该简化不影响分析结果. 在外包再制造模式下,制造商向再制造商支付单位再制造品外包价格  $p_o$ ; 在授权再制造模式下,制造商向再制造商收取单位再制造品授权费用  $p_s$ ; 为保证两种再制造模式下再制造活动的获利性,有

$$p_r > \max\{p_o, p_s\} > f_r(k).$$

制造商与再制造商均为风险中性,但再制造商作为跟随者,对供应链利润分配的公平与否较为关注,即再制造商具有公平关切偏好,制造商无公平关切偏好. 在该情形下,制造商以利润最大化为决策目标,再制造商以效用最大为决策目标;同时,制造商可获知再制造商公平关切信息,并在制定决策时加以考虑. 考虑到制造商和再制造商在供应链中地位和贡献的差异性,采用Nash讨价还价模型的公平解作为公平关切的参考点,以描述再制造商的相对公平关切.

由文献[30]可知,在相对公平关切下,再制造商的效用函数为

$$u_R^i = \frac{2(1+\lambda)\pi_R^i}{2+\lambda} - \frac{(1+\lambda)\pi_M^i}{2+\lambda}.$$

其中:  $\lambda \geq 0$  为再制造商的相对公平关切系数,  $\lambda = 0$  表示再制造商对公平不关注,即公平中性;  $\lambda \rightarrow \infty$  表示对公平极度关注. 符号  $\pi_M^i$  和  $\pi_R^i$  为模型  $i$  下制造商和再制造商的利润,  $i = \{\text{RF}, \text{AF}, \text{TC}\}$  分别表示外包再制造模型、授权再制造模型和外包价格契约模型. 此外,  $\pi^C$  表示集中决策下再制造供应链系统总利润.

## 2 再制造合作模式分析

### 2.1 外包再制造决策RF模型

在RF模型下,制造商进行外包价格  $p_o$  和新产品产量  $q_n$  决策,其利润函数为

$$\pi_M^{\text{RF}} = (p_n - f_n(k))q_n + (p_r - p_o)q_r - F(k); \quad (1)$$

{ $p_o, q_n$ }

再制造商利润函数为

$$\pi_R^{\text{RF}} = (p_o - f_r(k))q_r - cq_r^2. \quad (2)$$

{ $q_r$ }

首先,将逆需求函数代入再制造商效用函数  $u_R^{\text{RF}}$  中. 根据逆向归纳法可得,当  $c > c_1$  时,RF模型有唯一最优解,其中  $c_1 = \frac{1}{2}\delta\lambda$ . 令  $\Delta_{\text{RF}} = 4c(2+\lambda) + \delta(4 - 4\delta - \lambda^2)$  和  $\rho = \delta f_n(k) - f_r(k)$ ,则模型的均衡解为

$$q_n^{\text{RF}*} = \frac{1}{2} \left( Q - f_n(k) - \frac{4\delta\rho}{\Delta_{\text{RF}}} \right),$$

$$p_o^{\text{RF}*} =$$

$$\frac{4(\delta(1-\delta) + c)f_r(k) + (4c\delta(1+\lambda) - \delta^2\lambda^2)f_n(k)}{\Delta_{\text{RF}}},$$

$$q_r^{\text{RF}*} = \frac{(2+\lambda)\rho}{\Delta_{\text{RF}}}.$$

进一步,可得制造商和再制造商利润,有

$$\pi_M^{\text{RF}*} = \frac{(Q - f_n(k))^2}{4} + \frac{\rho^2}{\Delta_{\text{RF}}} - F(k),$$

$$\pi_R^{RF*} = \frac{\rho^2(2+\lambda)((2+3\lambda)c - \delta\lambda^2)}{\Delta_{RF}^2}$$

$$q_r^{RF*} - q_r^{AF*} = \frac{\delta(2+\lambda)^3\rho}{\Delta_{RF}\Delta_{AF}} > 0,$$

**2.2 授权再制造决策 AF 模型**

在 AF 模型下, 制造商进行授权价格  $p_s$  和新产品产量  $q_n$  决策, 其利润函数为

$$\pi_M^{AF} = (p_n - f_n(k))q_n + p_s q_r - F(k); \quad (3)$$

$\{p_s, q_n\}$

再制造商利润函数为

$$\pi_R^{AF} = (p_r - f_r(k) - p_s)q_r - cq_r^2. \quad (4)$$

$\{q_r\}$

同理, 由逆向归纳法可知 AF 模型总存在唯一最优解. 令  $\Delta_{AF} = c(2+\lambda) + \delta(2-\delta+\lambda)$ , 则模型均衡解为

$$q_n^{AF*} = \frac{1}{2} \left( Q - f_n(k) - \frac{\delta\rho}{\Delta_{AF}} \right),$$

$$p_s^{AF*} = \frac{(\delta Q - f_r(k))(\delta(2-\delta) + 2c) + \delta\lambda(c + \delta)(Q - f_n(k))}{2\Delta_{AF}},$$

$$q_r^{AF*} = \frac{(2+\lambda)\rho}{\Delta_{AF}}.$$

进一步, 可得制造商和再制造商利润, 有

$$\pi_M^{AF*} = \frac{1}{4} \left( (Q - f_n(k))^2 + \frac{\rho^2}{\Delta_{AF}} \right) - F(k),$$

$$\pi_R^{AF*} = \frac{\rho^2(2+\lambda)(2+3\lambda)(c+\delta)}{16\Delta_{AF}}.$$

**2.3 两种再制造合作模式比较与选择**

**引理 1** 当且仅当  $\rho = \delta f_n(k) - f_r(k) > 0$  时, 制造商和再制造商才会合作从事再制造活动.

**证明** 由  $q_r^{RF*} = \frac{(2+\lambda)\rho}{\Delta_{RF}}$ 、 $q_r^{AF*} = \frac{(2+\lambda)\rho}{\Delta_{AF}}$ 、 $\Delta_{RF} > 0$ 、 $\Delta_{AF} > 0$  和  $\lambda > 0$  可知, 当且仅当  $\rho > 0$  时, 才有  $q_r^{RF*} > 0$  和  $q_r^{AF*} > 0$ .  $\square$

引理 1 中表达式  $\delta f_n(k) - f_r(k)$  反映了消费者对再制品具有损失厌恶情形下再制品相对于新产品的成本节约, 反映了再制品的市场竞争能力; 仅当再制品具有成本节约优势时, 再制造才有利可图, 再制造商才会从事废旧品的回收再制造. 产品可再制造性水平越高, 新产品单位生产成本越高; 再制品单位生产成本越低, 再制品的成本节约优势越显著, 制造商与再制造商合作再制造的可能性越高. 同时, 再制造商的相对公平关切对其是否从事再制造活动没有影响.

**结论 1** 与授权再制造模式相比, 外包再制造模式下新产品销量更低, 再制品销量更高.

**证明** 由于

$$q_n^{RF*} - q_n^{AF*} = -\frac{\delta^2(2+\lambda)^2\rho}{\Delta_{RF}\Delta_{AF}} < 0,$$

从而结论 1 得证.  $\square$

相对于授权再制造模式, 外包再制造模式下, 制造商为获得最大收益, 会制定更低的新产品和再制品销售价格 ( $p_n^{RF*} < p_n^{AF*}$  和  $p_r^{RF*} < p_r^{AF*}$ ), 以刺激市场需求, 提高新产品和再制品销量. 但是, 再制品市场的激发, 加剧了对新产品市场的蚕食, 新产品销量会低于授权再制造模式.

**结论 2** 与授权再制造模式相比, 外包再制造模式下制造商的利润更高; 当  $c > \hat{c}$  时, 再制造商利润在外包模式下也更高.

**证明** 由于

$$\pi_M^{RF*} - \pi_M^{AF*} = \frac{\delta(2+\lambda)^2\rho}{4\Delta_{RF}\Delta_{AF}} > 0,$$

$$\pi_R^{RF*} - \pi_R^{AF*} = \frac{1}{16}\delta\rho^2(2+\lambda)^2g(c),$$

$$g(c) = -16\delta^4(1+\lambda) + (2+\lambda)^2(4(c+\delta)(2c\lambda + 2\delta^2 - \delta) - 3\lambda^2(c-\delta)),$$

解等式  $g(c) = 0$ , 可得

$$c_2 = \frac{(2+\lambda)(3\lambda^2 + 4\delta - 8\delta\lambda - 8\delta^2) + \xi}{16\lambda(2+\lambda)},$$

其中

$$\xi = [(2+\lambda)^2((3\lambda^2 + 4\delta - 8\delta\lambda - 8\delta^2)^2 - 32\delta\lambda(3\lambda^2 - 4\delta\lambda + 8\delta^2)) + 512\delta^4\lambda(1+\lambda)]^{1/2}.$$

由  $\frac{d^2g}{dc^2} = 16\lambda(2+\lambda)^2 > 0$  可得: 当  $c_2 > c_1$  时, 若  $c > c_2$ , 则  $\pi_R^{RF*} - \pi_R^{AF*} > 0$ ; 若  $c_1 < c < c_2$ , 则  $\pi_R^{RF*} - \pi_R^{AF*} < 0$ . 当  $c_2 < c_1$  时,  $\pi_R^{RF*} - \pi_R^{AF*} > 0$  恒成立. 令  $\bar{c} = \max\{c_1, c_2\}$ , 于是结论 2 得证.  $\square$

外包再制造模式下, 新产品销量、边际效益及再制品边际收益均低于授权再制造模式, 但是再制品销量却远高于授权再制造模式, 即

$$\frac{q_r^{RF*} - q_r^{AF*}}{|q_n^{RF*} - q_n^{AF*}|} = \frac{2+\lambda}{\delta} > 2.$$

再制品利润较高, 且能弥补新产品市场的利润损失, 使得制造商在外包再制造模式下盈利总是高于授权再制造模式. 原因在于, 在外包再制造模式下, 制造商可通过直接调控新产品和再制品销售价格及外包价格, 最大化自身利润, 同时不需要负担高昂的废旧产品回收成本. 再制造商偏好于何种再制造模式取决于废旧产品的回收难易程度: 当废旧产品回收较容易时, 再制造商偏好于授权再制造, 即通过制定再制品销售价格, 主动调控其销量, 以最大化自

身利润;当废旧产品回收较困难时,再制造所承担的风险较高,为转移风险,再制造商偏好于外包再制造模式.

结论2表明,无论再制造商是否公平关切,只要再制造具有盈利性,制造商均偏好于外包再制造模式.因制造商为供应链领导者,后续仅对外包再制造供应链相关决策及协调问题进行研究.

### 3 外包再制造供应链均衡解及利润分析

**结论3** 再制造商的相对公平关切越强,则有:

1) 新产品销量、再制品销量和外包价格越高;2) 制造商利润越低,再制造商利润和供应链总利润越高.

**证明** RF模型各最优决策和利润分别对公平关切系数 $\lambda$ 求偏导,有

$$\frac{\partial q_n^{\text{RF}*}}{\partial \lambda} = \frac{4\delta\rho(2c - \delta\lambda)}{\Delta_{\text{RF}}^2} > 0,$$

$$\frac{\partial q_r^{\text{RF}*}}{\partial \lambda} = \frac{\delta\rho((2 + \lambda)^2 - 4\delta)}{\Delta_{\text{RF}}^2} > 0,$$

$$\frac{\partial p_o^{\text{RF}*}}{\partial \lambda} = \frac{8\rho(c + \delta - \delta^2)(2c - \delta\lambda)}{\Delta_{\text{RF}}^2} > 0;$$

$$\frac{\partial \pi_M^{\text{RF}*}}{\partial \lambda} = -\frac{2\rho^2(2c - \delta\lambda)}{\Delta_{\text{RF}}^2} < 0,$$

$$\frac{\partial \pi_n^{\text{RF}*}}{\partial \lambda} = \rho^2(2c - \delta\lambda)((2 + \lambda)(8c + \delta(8 + \lambda(2 + \lambda))) - 4\delta(4 + 3\lambda))/\Delta_{\text{RF}}^3 > 0,$$

$$\frac{(\pi_M^{\text{RF}*} + \pi_R^{\text{RF}*})}{\partial \lambda} = \frac{\rho^2\delta(2c - \delta\lambda)((2 + \lambda)^3 - 4\delta(2 + 3\lambda))}{\Delta_{\text{RF}}^3} > 0.$$

从而结论3得证.  $\square$

结论3表明:新产品的可再制造性水平确定后,再制造商公平关切越强,制造商给予再制造商的单位外包价格越高;较高的外包价格驱动再制造商生产更多的再制品,再制造商利润提高;此时,为刺激再制品需求,制造商会降低再制品销售价格,使再制品销量提高.

为减少再制品对新产品市场的蚕食,制造商也会降低新产品的销售价格,提高其销量.随着新产品和再制品销售价格的降低以及单位再制品外包价格的提高,新产品和再制品的边际效益减少,其对制造商总利润的影响高于销量的变化,制造商利润降低;但是,制造商利润的降低幅度小于再制造商利润的增加幅度,供应链总利润提高.由此可知,再制造商相对公平关切越强,越能促进利润在供应链中的公

平分分配,对提高供应链的经济效率具有积极的作用.

**结论4** 1) 新产品产量与可再制造性水平负相关,再制品产量与其正相关. $\alpha_n/\alpha_r$ 存在阈值 $\bar{\epsilon} = \frac{4(c + \delta - \delta^2)}{\delta(4c(1 + \lambda) - \delta\lambda^2)}$ ,当 $\alpha_n/\alpha_r > \bar{\epsilon}$ 时,再制品外包价格与产品可再制造性水平正相关,反之负相关.

2) 存在阈值

$$\bar{k}_{\text{RF}} = \frac{\alpha_n(4\delta(\delta Q - c_r) - (Q - c_n)(\Delta_{\text{RF}} + 4\delta^2)) + \dots}{(4\alpha_F - \alpha_n^2)\Delta_{\text{RF}} - \dots} \rightarrow \leftarrow \frac{4\alpha_r(\delta c_n - c_r)}{4(\delta\alpha_n + \alpha_r)^2}.$$

当 $0 < k < \bar{k}_{\text{RF}}$ 时,制造商利润与产品可再制造性水平负相关;当 $\bar{k}_{\text{RF}} < k < 1$ 时,制造商利润与产品可再制造性水平正相关;再制造商利润总与产品可再制造性水平正相关.

**证明** 外包再制造模型RF的各最优决策和利润分别对可再制造性水平 $k$ 求偏导,有

$$\frac{\partial q_n^{\text{RF}*}}{\partial k} = -\frac{1}{2}\left(\alpha_n + \frac{4\delta(\delta\alpha_n + \alpha_r)}{\Delta_{\text{RF}}}\right) < 0,$$

$$\frac{\partial q_r^{\text{RF}*}}{\partial k} = \frac{(\delta\alpha_n + \alpha_r)(2 + \lambda)}{\Delta_{\text{RF}}} > 0,$$

$$\frac{\partial p_o^{\text{RF}*}}{\partial k} = \frac{\alpha_n\delta(4c(1 + \lambda) - \delta^2\lambda) - 4\alpha_r(c + \delta - \delta^2)}{\Delta_{\text{RF}}};$$

$$\frac{\partial \pi_M^{\text{RF}*}}{\partial k} =$$

$$\frac{1}{2}\left(\alpha_n c_n + \alpha_n^2 k - 4\alpha_F k - \alpha_n Q + \frac{4\rho(\delta\alpha_n + \alpha_r)}{\Delta_{\text{RF}}}\right),$$

$$\frac{\partial \pi_R^{\text{RF}*}}{\partial k} = \frac{2\rho(\delta\alpha_n + \alpha_r)(2 + \lambda)(c(2 + 3\lambda) - \delta\lambda^2)}{\Delta_{\text{RF}}^2} > 0.$$

于是结论4得证.  $\square$

提高产品的可再制造性水平对再制造商总是有利的,但是,对制造商并不总是有利.制造商无法以利润最大化为目标确定产品的最优可再制造性水平.当 $k = \bar{k}_{\text{RF}}$ 时,制造商利润最低,此时,其会降低或提高产品的可再制造性水平.从再制造产业发展角度考虑,政府需建立适当的激励机制,以刺激制造商采取较高的产品可再制造性水平.

### 4 外包再制造供应链的协调

协调以消除供应链双重边际、最大化供应链系统利润为目标.本部分主要分析外包再制造模式下,面对再制造商的相对公平关切,制造商提供的外包价格契约能否实现协调?若能实现协调,则契约参数如何设置?为简化问题,假设新产品的可再制造性水平

$k$ 为常数.

集中决策下外包再制造供应链系统利润为

$$\max_{\{q_n, q_r\}} \pi^c = (p_n - f_n(k))q_n + (p_r - f_r(k))q_r - F(k) - cq_r^2. \quad (5)$$

将逆需求函数代入式(5),根据一阶条件对其求解,可得

$$\begin{aligned} q_n^{C*} &= -\frac{1}{2} \left( Q - f_n(k) - \frac{\delta\rho}{\Delta_C} \right), \\ q_r^{C*} &= \frac{\rho}{2\Delta_C}, \\ P_n^{C*} &= \frac{Q + f_n(k)}{2}, \\ p_r^{C*} &= \frac{\delta}{2} \left( Q + f_n(k) - \frac{(1-\delta)\rho}{\Delta_C} \right). \end{aligned}$$

进一步可得

$$\pi^{C*} = \frac{(Q - f_n(k))^2}{4} + \frac{\rho^2}{4\Delta_C} - F(k),$$

其中  $\Delta_C = c + \delta - \delta^2$ .

外包价格契约可描述如下: 制造商向再制造商提供较高的单位外包价格  $p_o^{TC}$ , 以激励再制造商回收和再制造废旧产品. 在该契约下, 制造商利润

$$\pi_M^{TC} = (p_n - f_n(k))q_n + (p_r - p_o)q_r - F(k),$$

再制造商利润

$$\pi_R^{TC} = (p_o - f_r(k))q_r - cq_r^2.$$

若外包价格契约能够实现协调, 则新产品产量  $q_n$  和再制品产量  $q_r$  都可以达到集中决策水平, 即有  $q_n^{TC*} = q_n^{C*}$  和  $q_r^{TC*} = q_r^{C*}$ ; 依据逆需求函数可知  $p_n^{TC*} = p_n^{C*}$  和  $p_r^{TC*} = p_r^{C*}$ . 此时, 最优利润分别为

$$\begin{aligned} \pi_M^{TC*} &= \frac{2\rho\Delta_C(\delta f_n(k) - p_o) - \delta\rho^2(1-\delta)}{4\Delta_C^2} + \\ &\quad \frac{(Q - f_n(k))^2}{4} - F(k), \\ \pi_R^{TC*} &= \frac{2\rho\Delta_C(p_o - f_r(k)) - \rho^2c}{4\Delta_C^2}. \end{aligned}$$

外包价格契约若要实现协调, 则其参数设置必须满足制造商和再制造商的个体理性约束, 有:

- 1) 协调模型TC下制造商利润不小于模型RF的最优利润, 即  $\pi_M^{TC*} \geq \pi_M^{RF*}$ ;
- 2) 协调模型TC下再制造商效用值不小于模型RF的最优效用值, 即  $u_R^{TC*} \geq u_R^{RF*}$ .

令

$$\begin{aligned} \bar{p}_{o1} &= \frac{2\Delta_C\xi_R}{\rho(2+\lambda)}, \quad \bar{p}_{o2} = \frac{\Delta_C\xi_M}{2\rho}, \\ \xi_M &= \frac{2\rho\delta f_n(k)}{\Delta_C} - \frac{4\rho^2}{\Delta_{RF}} - \frac{\rho^2\delta(1-\delta)}{\Delta_C^2}, \end{aligned}$$

$\xi_R =$

$$\begin{aligned} &\frac{\rho(2\Delta_C(2f_r(k) + \lambda\delta f_n(k)) - (2c - (1-\delta)\delta\lambda)\rho)}{4\Delta_C^2} + \\ &\frac{(2\lambda(2+\lambda)(3c-\delta\lambda) - \delta(4-4\delta-\lambda^2))\rho^2}{\Delta_{RF}^2}. \end{aligned}$$

从而可得如下结论.

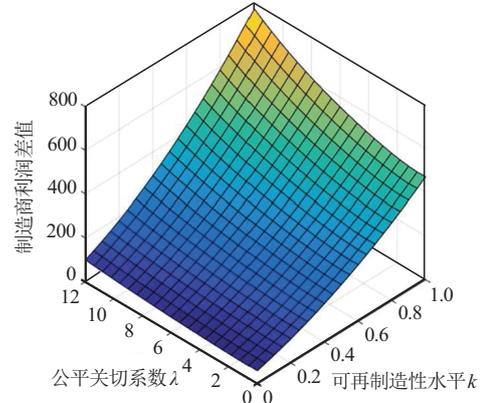
**结论5** 当  $\max\{\bar{p}_{o1}, p_o^{RF*}\} < p_o^{TC} < \bar{p}_{o2}$  时, 外包价格契约能够实现再制造商相对公平关切下外包再制造供应链的协调;  $p_o^{TC}$  与再制造商相对公平关切正相关.

外包价格契约协调有效性的条件较为复杂, 后面将通过数值仿真进行更深入的分析.

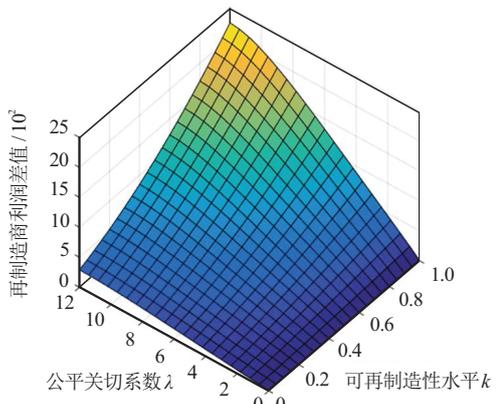
### 5 数值仿真分析

本节将通过数值仿真, 对上述结论进行验证和进一步分析. 模型参数设置如下:  $Q = 960, c_n = 580, c_r = 280, \delta = 0.8, c = 5, \alpha_F = 720, \alpha_n = 260$  和  $\alpha_r = 120$ . 此时, 仅当  $0 < \lambda < 12.5$  时, 外包再制造模型RF存在唯一最优解.

公平关切系数和可再制造性水平同时变化时, 两种再制造合作模式下制造商利润、再制造商利润的比较结果如图1所示.



(a) 制造商利润差值 ( $\pi_M^{RF*} - \pi_M^{AF*}$ )

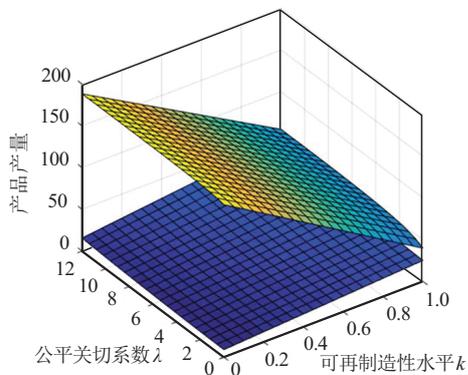


(b) 再制造商利润差值 ( $\pi_R^{RF*} - \pi_R^{AF*}$ )

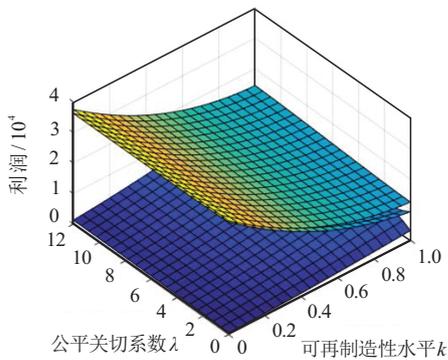
图1 两种模式下制造商利润差值与再制造商利润差值

由图1可知:外包再制造模式下制造商利润总是高于授权再制造模式;因 $c_2 < c_1$ ,故再制造商利润也在外包再制造模式下也最高;外包再制造模式成为制造商和再制造商的共同选择. 制造商的相对公平关切越高,外包再制造模式的优越越显著;较高的产品可再制造性水平会提高制造商对外包再制造模式的偏好,而对再制造商的模式偏好影响较小.

在外包再制造供应链中,各个决策变量的均衡解、各方利润与可再制造性水平和公平关切的关系如图2所示. 由图2(a)可知,产品的可再制造性水平越高,新产品(再制品)的生产成本越高(越低),销售价格越高(越低),销量越低(高). 再制造商的相对公平关切越强,新产品产量和再制品产量越高. 该结果与结论3和结论4相符.



(a) 新产品和再制造品产量



(b) 制造商、再制造商和供应链利润

图2 再制造外包模式下各决策变量、各方利润与 $k$ 和 $\lambda$ 关系

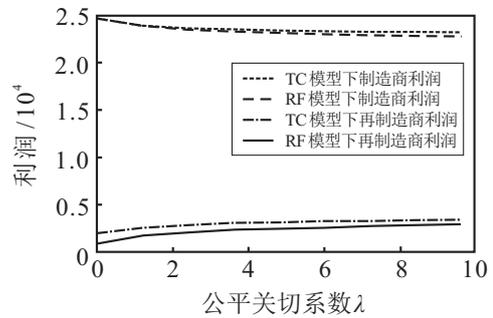
因 $\bar{k}_{RF} > 1$ ,故产品的可再制造性水平和再制造商的相对公平关切越高,制造商利润越低,再制造商利润越高;此时,制造商利润对产品可再制造性水平的变化较为敏感,再制造商利润对其相对公平关切的变化较为敏感,使得供应链总利润随着产品可再制造性水平的递增而降低,随着再制造商相对公平关切的递增而增加. 由此表明,在无外部环境的驱动下(如政府法律法规,供应链合作契约等),制造商不会设计较

高的产品可再制造性水平,会依据再制造收益确定合适的产品可再制造性水平.

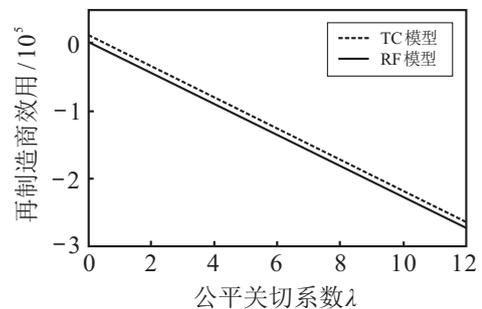
设 $k = 0.3$ ,依据结论5,取协调契约下的外包价格

$$p_o^{TC} = 521.02 - \frac{2914.37}{40.64 + (20 - 0.8\lambda)}$$

有无协调下制造商利润、再制造商利润和效用的对比如图3所示. 图3表明:在外包价格契约下,制造商利润、再制造商利润和效用均高于无协调的分散决策情景,且再制造商的相对公平关切越强,外包价格契约的协调性越强;同时,协调契约下的再制品外包价格高于分散决策下的外包价格,并与再制造商的相对公平关切正相关,与实际相符. 因此,外包价格契约能够实现外包再制造供应链的协调.



(a) 制造商和再制造商利润



(b) 再制造商效用

图3 有无协调下各方利润的比较

## 6 结论

针对由一个制造商和一个再制造商构成的再制造供应链,在考虑再制造商相对公平关切和产品可再制造性设计的基础上,运用博弈理论,本文构建了再制造外包和再制造授权两种合作模式下的决策模型,分析了两种合作模式的合作效率,探讨了效率较高合作模式下再制造商相对公平关切和产品可再制造性设计对供应链决策及利润的影响,并探讨了该供应链的协调机制. 研究表明:1) 外包再制造模式下,新产品销量更低,再制品销量更高,制造商能够获得更高的利润,再制造商利润是否更高取决于废旧产品的回收成本参数;当废旧产品的回收成本参数较高

时,再制造商在外包再制造模式下的利润更高,反之,则更低。2) 外包再制造模式下,再制造商的相对公平关切越高,制造商利润越低,再制造商利润和供应链总利润越高;较高的产品可再制造性水平对再制造商总是有利的,但对制造商不一定总是有利的,意味着在无政府法律法规、供应链契约外部驱动下,制造商不会提高产品的可再制造性水平;为提高产品的可再制造性水平,促进再制造产业的发展,政府需建立相应的产品设计奖惩机制。3) 外包价格契约能够实现再制造外包供应链的协调,且契约参数与再制造商的相对公平关切正相关。

本文仅考虑了合作模式下由一个制造商和一个再制造商构成的再制造供应链。其中,在外包再制造模式下,再制造商将生产的再制品全部转移给制造商进行销售,自己不对外销售。现实中,再制造商可能会依据再制品的外包价格,选择为多家制造商进行废旧产品的回收再制造,或自行进行部分再制品的销售,此时,再制造商和制造商是竞争与合作的关系。因此,下一步将研究制造商和再制造商竞争与合作情境下的生产定价决策问题。

#### 参考文献(References)

- [1] McConocha D M, Speh T W. Remarketing: Commercialization of remanufacturing technology[J]. *J of Business & Industrial Marketing*, 1991, 6(1/2): 23-37.
- [2] Subramanian R, Ferguson M E, Toktay L B. Remanufacturing and the component commonality decision[J]. *Production & Operations Management*, 2013, 22(1): 36-53.
- [3] 公彦德, 达庆利. 不同物流模式下的再制造补贴机制和供应链稳定性研究[J]. *管理工程学报*, 2016, 30(1): 140-146.  
(Gong Y D, Da Q L. Remanufacturing subsidy mechanism and supply chain stability under different logistics modes[J]. *J of Industrial Engineering and Engineering Management*, 2016, 30(1): 140-146.)
- [4] 王玉燕, 申亮. 基于消费者需求差异和渠道权力结构差异的MT-CLSC定价、效率与协调研究[J]. *中国管理科学*, 2014, 22(6): 34-42.  
(Wang Y Y, Shen L. Pricing, efficiency, and coordination in MT-CLCS considering differences in customer demand and differences channel power structures[J]. *Chinese J of Management Science*, 2014, 22(6): 34-42.)
- [5] Tsai W H. Integrating activity-based costing and revenue management approaches to analyze the remanufacturing outsourcing decision with qualitative factors[J]. *Int J of Revenue Management*, 2007, 1(4): 367-387.
- [6] 范体军, 楼高翔, 王晨岚, 等. 基于绿色再制造的废旧产品回收外包决策分析[J]. *管理科学学报*, 2011, 14(8): 8-16.  
(Fan T J, Lou G X, Wang C L, et al. Analysis of outsourcing decision-making on used products collection for green remanufacturing[J]. *J of Management Sciences in China*, 2011, 14(8): 8-16.)
- [7] Abdulrahman D A, Subramanian N, Liu C, et al. Viability of remanufacturing practice: A strategic decision making framework for Chinese auto-parts companies[J]. *J of Cleaner Production*, 2015, 105(1): 311-323.
- [8] Zou Z B, Wang J J, Deng G S, et al. Third-party remanufacturing mode selection: Outsourcing or authorization?[J]. *Transportation Research Part E: Logistics & Transportation Review*, 2016, 87: 1-19.
- [9] Wang L, Cai G, Tsay A A, et al. Design of the reverse channel for remanufacturing: Must profit-maximization harm the environment?[J]. *Production & Operations Management*, 2017, 26(8): 1585-1603.
- [10] Oraopoulos N, Toktay L B. Relicensing as a secondary market strategy[J]. *Management Science*, 2012, 58(5): 1022-1037.
- [11] 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.)
- [12] 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.)
- [13] Hong X P, Govindan K, Xu L, et al. Quantity and collection decisions in a closed-loop supply chain with technology licensing[J]. *European J of Operational Research*, 2017, 256(3): 820-829.
- [14] 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]. *Chinese J of Management Science*, 2014, 22(10): 106-112.)
- [15] Zhao S, Zhu Q. Remanufacturing supply chain coordination under the stochastic remanufacturability rate and the random demand[J]. *Annals of Operations Research*, 2017, 257(1/2): 661-695.
- [16] Saha S, Sarmah S P, Moon I. Dual channel closed-loop supply chain coordination with a reward-driven remanufacturing policy[J]. *Int J of Production Research*, 2016, 54(5): 1-15.
- [17] Zheng B R, Yang C, Yang J, et al. Pricing, collecting and contract design in a reverse supply chain with incomplete

- information[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2017, 111(9): 109-122.
- [18] Heydari J, Govindan K, Jafari A. Reverse and closed loop supply chain coordination by considering government role[J]. *Transportation Research Part D: Transport & Environment*, 2017, 52: 379-398.
- [19] Jena S K, Sarmah S P. Price competition and co-operation in a duopoly closed-loop supply chain[J]. *Int J of Production Economics*, 2014, 156(5): 346-360.
- [20] Hong F X, Li D F. Nonlinear programming method for interval-valued  $n$ -person cooperative games[J]. *Int J of Operational Research*, 2017, 17(2): 479-497.
- [21] Li D F. Models and methods of interval-valued cooperative games in economic management[M]. Cham: Springer, 2016.
- [22] 刘家财, 李登峰, 胡勋锋. 区间值最小二乘核仁解及在供应链合作利益分配中的应用[J]. *中国管理科学*, 2017, 25(10): 89-98.  
(Liu J C, Li D F, Hu X F. Interval-valued least square nucleolus and its application in profit allocation of supply chain[J]. *Chinese J of Management Science*, 2017, 25(10): 89-98.)
- [23] Debo L G, Toktay L B, Wassenhove L N V. Market segmentation and product technology selection for remanufacturable products[J]. *Manage Science*, 2005, 51(8): 1193-1205.
- [24] Wu C H. OEM product design in a price competition with remanufactured product[J]. *Omega*, 2013, 41(2): 287-298.
- [25] Gu W, Chhajed D, Petruzzi N C, et al. Quality design and environmental implications of green consumerism in remanufacturing[J]. *Int J of Production Economics*, 2015, 162: 55-69.
- [26] Kahneman D, Knetsch J L, Thaler R. Fairness as a constraint on profit seeking: Entitlements in the market[J]. *American Economic Review*, 1986, 76(4): 728-741.
- [27] 张克勇, 吴燕, 侯世旺. 具公平关切零售商的闭环供应链差别定价策略研究[J]. *中国管理科学*, 2014, 22(3): 51-58.  
(Zhang K Y, Wu Y, Hou S W. Differential pricing strategy of considering retailer's fairness concerns in the closed-loop supply chain[J]. *Chinese J of Management Science*, 2014, 22(3): 51-58.)
- [28] 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.)
- [29] Ma P, Li K W, Wang Z J. Pricing decisions in closed-loop supply chains with marketing effort and fairness concerns[J]. *Int J of Production Research*, 2017, 55(22): 6710-6731.
- [30] 杜少甫, 朱贾昂, 高冬, 等. Nash 讨价还价公平参考下的供应链优化决策[J]. *管理科学学报*, 2013, 16(3): 68-72.  
(Du S F, Zhu J A, Gao D, et al. Supply chain coordination considering fairness concerns[J]. *J of Management Sciences in China*, 2013, 16(3): 68-72.)

(责任编辑: 李君玲)

## 下 期 要 目

- 复杂网络理论在银行系统中的应用研究进展 ..... 黄飞鸣
- 基于实例的离散制造系统能耗知识建模与预测 ..... 徐彬梓, 等
- 基于DBSCAN算法的城轨车站乘客聚集特征分析 ..... 李晓璐, 等
- 基于改进向量相似度的区间数动态多指标决策模型及应用 ..... 钱吴永, 等
- 基于二阶一致性算法的多仿生机器鱼分布式编队控制 ..... 李宗刚, 等
- 基于差分隐私和SVD++的协同过滤算法 ..... 鲜征征, 等
- 利用种群扩张与稀疏化策略改进NSGA-II-DE算法 ..... 蒋永华, 等
- 一类不确定非线性系统的自适应支持向量回归建模与动态面控制 ..... 陈 强, 等
- 一种无线传感器网络能耗均衡的自适应拓扑博弈算法 ..... 王慧娇, 等
- 考虑参数不确定性的移动机器人轨迹跟踪控制 ..... 顾万里, 等
- UCUBG: 基于等级划分的水下传感器网络非均匀分簇算法 ..... 李志华, 等