

基于质量与价格竞争的再制造系统均衡决策研究

曹晓刚¹, 郑本荣¹, 闻 卉²

(1. 武汉纺织大学 管理学院, 武汉 430073; 2. 湖北工业大学 理学院, 武汉 430068)

摘 要: 针对竞争型制造商与单一零售商构成的再制造系统, 考虑新产品与再制造产品的质量和价格竞争, 基于博弈理论构建利润最大化的质量-定价决策模型. 通过对分散化决策和制造商联合决策2种模式下再制造系统的决策均衡解的分析, 得到相关的结论. 利用算例验证并分析散化决策模型中关键参数变化对均衡解及决策成员利润的影响, 研究了制造商联合决策模式对再制造系统决策效率的影响.

关键词: 再制造系统; 质量竞争; 价格竞争; 横向联盟; 均衡决策

中图分类号: TP273

文献标志码: A

Research on equilibrium decision of remanufacturing system based on quality and price competition

CAO Xiao-gang¹, ZHENG Ben-rong¹, WEN Hui²

(1. School of Management, Wuhan Textile University, Wuhan 430073, China; 2. School of Science, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China. Correspondent: CAO Xiao-gang, E-mail: caoxiaogang1982@hotmail.com)

Abstract: The remanufacturing system decision model with two competing manufacturers and a communal retailer is established based on the game theory, which considers the impact of quality and price competition on the remanufacturing system. Furthermore, some conclusions are derived based on the equilibrium solutions in the decentralized decision and manufacturers joint decision cases. Finally, some numerical examples are given to analyze the influence of key parameters in the decentralized model on equilibrium solutions and channel member profit of the remanufacturing system, and the impacts to the remanufacturing system when two manufacturers are jointly making decisions are studied.

Key words: remanufacturing system; quality competition; price competition; horizontal alliance; equilibrium decision

0 引 言

近年来, 商业经济的迅速发展和市场需求的多样化趋势使得产品的生命周期不断缩短, 也因此产生了更多废旧产品. 如何有效处置和利用废旧产品已成为政府、企业和人们普遍关注的一个热点问题. 再制造是废旧产品价值实现的重要途径之一, 它的实施不仅能够通过产品回收将企业的生产经营纳入到环境保护的政策下, 而且能够为企业降低成本、创造经济效益和环境效益、提升品牌形象^[1]. 鉴于此, 对再制造实践相关问题的研究具有重要的理论和现实意义.

在传统供应链管理思想和研究方法的基础上, 人们对再制造问题的研究主要包括生产计划与控制、库存管理、逆向物流网络设计和再制造系统的定价以及

协调机制等方面. 关于再制造产品定价问题的研究, 文献[2]假设新产品与再制造产品完全同质, 研究了在面临第三方再制造商的进入威胁时, 混合再制造/制造系统的最优定价和产量决策. 文献[3]利用博弈论的方法研究了再制造闭环供应链的回收渠道选择问题, 提出了制造商回收、零售商回收和第三方回收3种回收模式, 并针对零售商回收模式提出了“两部收费制”的协调方法. 在文献[3]的基础上, 文献[4]针对包含单一制造商和竞争型零售商的市场结构, 在不同的回收模式下分析了再制造闭环供应链的最优定价策略和协调机制. 但上述研究均假设新产品与再制造产品没有区别, 而在现实生活中, 消费者对新产品和再制造产品往往具有不同的支付意愿. 随着研究的不断深

收稿日期: 2013-01-14; 修回日期: 2013-07-24.

基金项目: 国家自然科学基金项目(71301126); 教育部人文社会科学基金项目(11YJC630011); 中国博士后科学基金项目(2012M511215, 2013T60723).

作者简介: 曹晓刚(1982—), 男, 副教授, 博士, 从事再制造与闭环供应链等研究; 郑本荣(1988—), 男, 硕士生, 从事闭环供应链管理的研究.

入,一些学者开始关注新产品与再制造产品存在差异下的决策问题.文献[5]引入了回收函数,在异质性消费群体下,对比研究了寡头垄断和竞争条件下的新产品与再制造品的最优产量和定价策略,并指出垄断者可以采取恐吓或者打击的手段阻止再制造商进入再制造市场.文献[6-7]在新产品与再制造产品差异定价下,分别研究了单周期、两周期和多周期的再制造系统最优定价与数量决策.

上述研究均关注的是再制造产品的定价决策,然而消费者的购买行为不仅取决于产品的价格,还与质量、服务等一系列价格以外的因素相关.文献[8]通过研究指出,提高产品的质量水平在短期内可能会导致企业的成本增加,但从长远看,高质量的产品会增加顾客的认知价值和顾客的重复购买行为,从而提高企业的市场份额和利润水平.文献[9]针对有容量限制的服务行业,建立了单阶段和多阶段服务竞争的动态模型,分析指出产品的质量水平会随着市场竞争程度的提高而提高.文献[10-11]以日本电力供应商为实际案例,通过建立相关模型,分析得出提高产品质量可以增加顾客效用和企业利润水平,并进一步研究了顾客对产品价格和质量的敏感性对企业产生的影响,指出了顾客对产品质量的高敏感性会使大企业收益,从而挤兑小企业,以致其退出市场.文献[12]则研究了2个竞争的供应链模型,在无协调情景、协调情景和混合情景3种情境中,分析了供应链的价格和质量竞争的均衡策略.文献[13]基于市场需求的不确定,研究了具有风险规避行为的供应链的价格和质量均衡决策.然而,在再制造的研究中,回收产品的数量和质量具有高度的不确定性,而且消费者对新产品和再制造产品的认知价值存在巨大差异.因此,闭环供应链下企业的再制造决策同样需要考虑产品的质量水平因素.文献[14]建立了再制造产品和新产品分别定价并通过技术选择影响再制造水平的单周期和多周期利润最大化模型,指出了制造商不同的技术选择会直接影响回收品的价值恢复,再制造商的决策必须与再制造能力相适应.文献[15]考虑新产品与再制造产品的质量水平之间的内在关系,在不同消费者的价格敏感性差异的基础上,建立了两阶段价格-质量动态博弈模型.文献[16]将产品的质量水平作为内生变量,分别研究单寡头、双寡头非合作和双寡头合作市场结构中制造商的最优制造/再制造决策,但并未考虑供应链成员横向合作对均衡决策的影响.

综合分析上述文献,现有的关于再制造定价决策的研究更多关注了回收模式、市场结构和供应链内部竞争机制,而较少考虑产品质量决策对再制造系统

最优决策的影响,即未把质量因素纳入到影响消费者购买行为的决策体系.其次,供应链的内部结构对企业的决策和系统的效率会产生非常大的影响,同一层级成员横向联合决策的研究是值得关注的实际问题.文献[17]研究了供应链企业横向联盟结构的契约协调问题,并分别给出了契约所适用的范围.文献[18]考察了物流服务供应商(LSPs)的横向合作对物流系统的影响,通过设计相关的契约使系统的绩效水平实现提高.由此可以看出,研究企业横向联合决策对供应链决策系统的影响非常必要,但目前关于此方面的研究还比较缺乏.

鉴于此,本文在考虑制造商竞争的基础上,区分已有研究,分别在分散化决策和制造商联合决策2种模式下得到基于质量与价格竞争的再制造系统的均衡决策解,并进一步分析制造商横向联合对再制造系统决策效率的影响,为企业的再制造实践和政府的经济决策提供有意义的理论指导.

1 基本模型

1.1 问题描述

本文研究的是一个双寡头竞争型市场,其中一个制造商负责新产品的生产和批发,另一个制造商直接从消费市场回收废旧产品并进行产品的再制造,且双方共同通过单一垄断零售商向消费市场销售产品.假设消费者对新产品和再制造产品具有不同的价值评价,他们将综合考虑新产品与再制造产品的价格和质量水平,从而选择购买何种产品.这里所指的产品质量包括一切与消费者感知产品的相关因素,例如:产品的品质和品牌、售后服务水平或服务速率等.因此本文将从产品的价格和质量两方面因素综合影响需求函数条件下,分析再制造闭环供应链价格与质量竞争的均衡策略,进一步对比并分析制造商横向联合决策对供应链均衡决策解的影响.

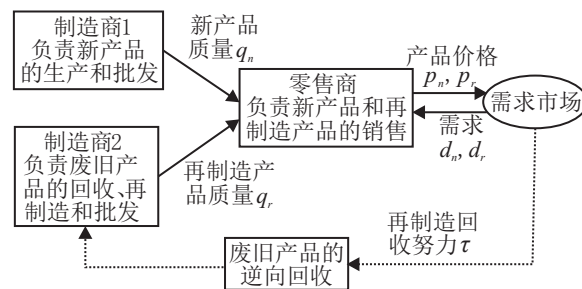


图1 再制造闭环供应链价格与质量竞争模型

1.2 需求函数

根据前文描述,令 $d_i(p, q)$ 表示产品 i 在价格向量 p 和质量向量 q 下的市场需求. 类比文献[10-11]和文献[16], 这里仅考虑需求 d_i 为价格和质量的线性函数

的情形,即

$$d_i(p, q) = \alpha_i - \beta_p p_i + \gamma_p (p_j - p_i) + \beta_q q_i - \gamma_q (q_j - q_i),$$

$$i, j = n, r, i \neq j. \quad (1)$$

其中: $\alpha_i (i = n, r)$ 为产品 i 潜在的市场规模; $\beta_p, \beta_q > 0$ 为顾客需求对产品 i 的价格和质量的反应; $\gamma_p \geq 0$ 为产品 i 的价格需求交叉影响系数, $\gamma_q \geq 0$ 为产品 i 的质量需求交叉影响系数. 这里进一步假设 $\gamma_p < \beta_p$, $\gamma_q < \beta_q$, 即表示顾客需求关于自身价格和质量的反应比竞争对手产品价格和质量的反应大. γ_p 和 γ_q 为衡量新产品与再制造产品的价格和质量竞争的强度, 其值越大表示竞争越激烈.

1.3 模型假设

为了便于分析, 这里对模型作如下假设:

1) 假设再制造商的回收努力水平为 $\tau (0 \leq \tau \leq 1)$, 回收成本 $C(\tau)$ 可以等价于货币成本. 根据文献[3-4]中的思想, 设回收成本是回收努力水平的二次函数形式: $C(\tau) = b\tau^2$ 表明随着努力程度的提高, 回收成本增加且增加的速度变快, 其中 b 为回收的固定成本系数(为了便于讨论, 假设 b 为一个足够大的参数, 从而确保文中的最优解存在).

2) 新产品生产成本为 c , 再制造产品生产成本为 c_r , $\delta = c - c_r > 0$ 表示再制造单位成本节约. 由文献[3-4]可知, 再制造产品的平均生产成本可以表示为 $\tilde{c} = c(1 - \tau) + c_r \tau = c - \delta\tau$. 制造商与再制造商的产品批发价格分别为 w_n 和 w_r , 满足 $0 < c < w_n$, $0 < c - \delta\tau < w_r < w_n$. 为简化模型的复杂性, 保证所研究问题的科学性, 根据文献[19], 假设新产品和再制造产品的批发价格均为外生变量.

3) q_n, q_r 分别表示新产品与再制造产品的质量水平, 文献[10-12, 14, 16]均采用了二次函数的形式表示质量成本. 因此, 假设产品的质量成本函数为 eq_i^2 , 参数 e 表示质量的固定成本系数.

4) 假设信息是完全对称的, 制造商和再制造商均为风险中性决策者, 而且基于利润最大化的目标进行决策. 同时, 制造商担任供应链的领导者, 闭环供应链表现为价格与质量水平的综合竞争均衡.

5) 不考虑缺货情形, 而且再制造商回收的废旧品总能满足企业再制造的需求.

2 分散化结构下供应链竞争均衡及分析

2.1 模型建立及均衡解

首先分析当制造商和再制造商分别进行决策时

(即成员的决策是相互独立的), 闭环供应链的价格和质量竞争均衡解. 给定市场需求为 d_i , 制造商和再制造商基于利润最大化的决策模型如下:

$$\max_{q_n} \pi_{M_n}^D = (w_n - c)d_n - eq_n^2, \quad (2)$$

$$\max_{\tau, q_r} \pi_{M_r}^D = (w_r - c + \delta\tau)d_r - eq_r^2 - b\tau^2. \quad (3)$$

零售商基于利润最大化的决策模型为

$$\max_{p_n, p_r} \pi_R^D = (p_n - w_n)d_n + (p_r - w_r)d_r. \quad (4)$$

系统成员之间的博弈按照下列顺序进行: 首先, 再制造商的回收努力水平可以看成是属于企业生产计划的内容^[19], 因此, 再制造商在销售季节开始前确定回收努力水平; 其次, 制造商与再制造商根据回收努力水平决策确定产品的质量; 最后, 零售商在制造商质量决策的基础上确定新产品和再制造产品的销售价格, 市场需求得以实现.

定理 1 制造商的利润函数 $\pi_{M_n}^D$ 为关于新产品质量水平 q_n 的凹函数; 再制造商的利润函数 $\pi_{M_r}^D$ 为关于再制造产品质量水平 q_r 和回收努力水平 τ 的联合凹函数; 零售商的利润函数 π_R^D 为关于产品价格 p_n 和 p_r 的联合凹函数.

证明 将 $\pi_{M_n}^D$ 对 q_n 求二阶偏导可得 $\partial^2 \pi_{M_n}^D / \partial q_n^2 = -2e < 0$, 所以 $\pi_{M_n}^D$ 关于 q_n 是严格凹函数; $\pi_{M_r}^D$ 关于 τ 和 q_r 的海塞矩阵为

$$H_{M_r} = \begin{bmatrix} -2e & \Omega_q \delta \\ \Omega_q \delta & -2b \end{bmatrix}.$$

其中: $\Omega_p = \beta_p + \gamma_p$, $\Omega_q = \beta_q + \gamma_q$, 对应的 $|H_{M_r}| = 4be - (\beta_q + \gamma_q)^2 \delta^2 > 0$ 是负定阵, 因此, $\pi_{M_r}^D$ 是关于 q_r 和 τ 的联合凹函数.

同理, π_R^D 关于 p_n 和 p_r 的海塞矩阵为

$$H_R = \begin{bmatrix} -2\Omega_p & 2\gamma_p \\ 2\gamma_p & -2\Omega_p \end{bmatrix},$$

对应的 $|H_R| = 4\beta_p(\beta_p + 2\gamma_p) > 0$ 是负定阵, 所以 π_R^D 是关于 p_n 和 p_r 的联合凹函数. \square

定理 1 保证了上述模型最优解的唯一性, 决策者均在供应链其他决策成员最优策略的基础上选择自己的最优策略. 运用逆向归纳法对上述博弈问题进行求解, 首先可以得到产品的价格关于质量和回收努力决策的最优反应函数 p_n^b, p_r^b . 那么, 将式(4)分别对 p_n 和 p_r 求一阶条件, 则可以得到

$$p_n^b = \frac{\alpha_n \Omega_p + \alpha_r \gamma_p + w_n \beta_p (\Omega_p + \gamma_p)}{2\beta_p (\Omega_p + \gamma_p)} + \frac{(q_n - q_r) \beta_p \gamma_q + \beta_q (q_n \Omega_p + q_r \gamma_p)}{2\beta_p (\Omega_p + \gamma_p)}, \quad (5)$$

$$p_r^b = \frac{\alpha_n \gamma_p + \alpha_r \Omega_p + w_r \beta_p (\Omega_p + \gamma_p)}{2\beta_p (\Omega_p + \gamma_p)} + \frac{(q_r - q_n) \beta_p \gamma_q + \beta_q (q_r \Omega_p + q_n \gamma_p)}{2\beta_p (\Omega_p + \gamma_p)}. \quad (6)$$

由上式可得到 $(\beta_p \Omega_q + \beta_q \gamma_p) / (2\beta_p (\Omega_p + \gamma_p)) > 0$, 表明产品的价格与质量水平成正比关系, 竞争者产品质量水平对产品的价格的影响通过双方的竞争强度 γ_p 来体现. 进一步可知

$$\frac{\partial p_i^b}{\partial q_j} = \frac{(\beta_q \gamma_p - \beta_p \gamma_q)}{(2\beta_p (\Omega_p + \gamma_p))},$$

则当 $\beta_q \gamma_p > \beta_p \gamma_q$ 时, $\partial p_i^b / \partial q_j > 0$, 表明双方的价格竞争越激烈时 (γ_p 越大), 其中一种产品质量水平的提高会相应地导致另一种产品价格的提高. 在第二阶段中, 制造商的质量决策 q_n 和 q_r 的最优反应函数为 q_n^b, q_r^b , 通过求解一阶条件 $\partial \pi_{M_n}^D(p_n^b, p_r^b) / \partial q_n = 0$ 和 $\partial \pi_{M_r}^D(p_n^b, p_r^b) / \partial q_r = 0$, 可以得到制造商的最优反应函数为

$$q_n^b = \frac{(w_n - c) \Omega_q}{4e}, \quad (7)$$

$$q_r^b = \frac{(w_r - c + \delta \tau) \Omega_q}{4e}. \quad (8)$$

由式 (7) 可以看出, 新产品的质量水平 q_n^b 与最优回收努力无关, 因此 $q_n^b = q_n^{D*}$, 再制造产品的质量关于回收努力 τ 是递增的. 当 $\delta \tau > w_n - w_r$ 时, $q_r^b > q_n^b$, 表明当再制造带来的成本节约足够大时, 再制造产品的质量将超过新产品的质量水平. 这在经济上是合理的, 因为当再制造商的再制造成本节约越大时, 为了获取更高的利润, 再制造商会选择通过提高产品的质量水平与制造商展开竞争. 根据回收努力和制造商质量决策的最优反应函数, 可以通过求解 $\tau^* \in \arg \max_{\tau} \pi_{M_r}^D(\tau | p_n^b, p_r^b, q_n^b, q_r^b)$ 得到再制造商的最优努力程度, 即

$$\tau^{D*} = \frac{\delta(4e\alpha_r + 4ew_n\gamma_p - \Omega_q(c\beta_q + w_n\gamma_q))}{16be - \delta^2\Omega_q^2} - \frac{w_r(4e\Omega_p - \Omega_q^2)}{16be - \delta^2\Omega_q^2}. \quad (9)$$

在此基础上, 将 τ^{D*} 代入再制造商质量决策的最优反应函数中可以求出再制造产品的均衡质量 q_r^{D*} , 可以进而求得新产品与再制造产品的均衡价格 p_n^{D*}, p_r^{D*} .

2.2 供应链竞争均衡分析

为了进一步对分散化结构下再制造系统价格和价格竞争均衡进行分析, 获得更多富有价值的结论, 本节将分析一些关键参数 (单位成本和再制造成本节约等) 对于供应链均衡和成员利润的影响.

定理 2 在分散化结构下: 1) 再制造最优回收努

力 τ^{D*} 关于再制造成本节约 δ 递增, 关于回收固定成本系数 b 递减. 2) 新产品均衡质量 q_n^{D*} 关于 b 和 δ 相互独立, 再制造产品的均衡质量 q_r^{D*} 关于 δ 递增, 关于 b 递减. 3) 再制造产品的均衡价格 p_r^{D*} 关于 δ 递增, 关于 b 递减. 当 $\beta_q \gamma_p \geq \beta_p \gamma_q$ 时, 新产品的最优零售价格 p_n^{D*} 关于 δ 递增, 关于 b 递减; 否则, 新产品的最优零售价格关于 δ 递减, 关于 b 递增.

定理 2 分析了供应链竞争均衡解关于再制造成本节约与回收成本的变动关系. 结论表明: 1) 当再制造商回收投入成本越高时, 其最优回收努力水平下降, 相应地降低了产品的质量水平, 产品的价格也随之降低; 相反, 当再制造成本节约越高时, 再制造商能够并且愿意为提高产品的质量水平而努力, 产品质量提高, 致使价格也相应地提高. 进一步分析可以看出, 当 $\delta = 0$ 时, 再制造商会放弃再制造, 从而转化为传统型的制造商. 2) 由结论可看出, 新产品的质量均衡决策与再制造商的成本节约和回收投入无关. 当双方的价格竞争强度足够大时 ($\gamma_p \geq \beta_p \gamma_q / \beta_q$), 零售商为了追求更多的利润, 会降低新产品的销售价格. 同理, 当双方的质量竞争越激烈时 ($\gamma_q \geq \beta_q \gamma_p / \beta_p$), 零售商将会对新产品制定高价策略.

定理 3 在分散化结构下: 1) $\tau^{D*}, q_n^{D*}, q_r^{D*}$ 关于质量的固定成本系数 e 递减. 2) 设 $\Theta_n = \partial q_n^{D*} / \partial e$, $\Theta_r = \partial q_r^{D*} / \partial e$. 当 $\beta_q \gamma_p \geq (\beta_p (\Omega_q \Theta_n - \gamma_q \Theta_r)) / (\Theta_r + \Theta_n)$ 时, p_n^{D*} 关于 e 递减; 否则, p_n^{D*} 关于 e 递增. 当 $\beta_q \gamma_p \geq (\beta_p (\gamma_q \Theta_r - \Omega_q \Theta_n)) / (\Theta_r + \Theta_n)$ 时, p_r^{D*} 关于 e 递减; 否则, p_r^{D*} 关于 e 递增.

定理 3 分析了均衡质量和价格关于质量投入参数的变动关系. 通过分析可知: 1) 新产品与再制造产品的质量水平均随质量投入成本的增加而降低, 再制造商的最优回收努力水平下降. 2) 质量投入成本对均衡价格的影响并不直观, 不仅取决于双方的价格竞争水平, 还与双方的质量竞争程度相关. 分析可知, 双方的价格竞争越激烈, 零售商会选择低价策略. 同时, 产品均衡价格关于 Θ_n 和 Θ_r 的变化也是不同的: Θ_r 越大, 质量投入成本增加会导致零售商对再制造产品制定较低的价格; Θ_n 越大, 质量成本投入增加会导致零售商对新产品制定较高的价格.

定理 4 在分散化结构下: τ^{D*} 关于价格竞争强度 γ_p 递增. 当 $\delta \geq \delta''$ 时, τ^{D*} 关于 γ_q 递增, 其中

$$\delta'' = \frac{4(be[(w_n + c - 2w_r)\beta_q + (\Omega_q[8e(\alpha_r - w_r\Omega_p) - 2(w_n - w_r)\gamma_q])^{1/2}]}{(\Omega_q[8e(\alpha_r - w_r\Omega_p) - \beta_q(c\Omega_q - w_n\beta_q) - w_n(8e\gamma_p + \beta_q\gamma_q)])^{1/2}}.$$

定理4表明, 价格竞争强度越高, 再制造商相应地会提高回收努力水平, 这是因为再制造能给再制造商带来成本节约, 从而获得价格上的竞争优势. 然而, 双方的质量竞争并不总是会导致再制造商的回收努力水平上升. 只有当再制造成本节约高于阈值 δ'' 时, 再制造商才会增加回收努力; 否则, 再制造商会降低回收努力水平. 这也间接地说明了再制造商可以通过提高回收努力水平来应对制造商的价格和质量竞争.

定理5 在分散化结构下: 1) q_n^{D*} 与价格竞争强度 γ_p 无关, q_r^{D*} 关于 γ_p 递增. 2) q_n^{D*} , q_r^{D*} 关于质量竞争强度 γ_q 递增.

定理5分析了均衡质量和价格关于价格竞争强度 γ_p 与质量竞争强度 γ_q 的变动关系. 可以得到如下结论: 双方之间激烈的质量竞争可提高双方产品的质量水平; 其次, 价格竞争会导致再制造商提高再制造产品的质量, 而对制造商的产品质量决策没有直接的影响, 这是因为再制造商对双方的价格竞争反应更敏感, 通过提高产品的质量水平可以提高产品的竞争能力.

3 制造商联合决策下系统均衡及分析

上文分析了分散化结构下再制造系统的均衡决策, 在供应链相关问题的研究中, 如何实现供应链系统效益的改进是人们普遍关注的一个问题. 一般来说, 供应链合作决策的效率会高于分散化决策的效率, 在本文所建立的再制造决策模型中, 下面将探究制造商与再制造商组成横向联盟情形下, 再制造系统的最优决策行为. 联合决策下再制造系统的博弈按照以下顺序进行: 1) 联盟确定再制造回收努力和质量水平; 2) 零售商根据联盟决策的最优反应确定新产品和再制造产品的零售价格. 则联盟基于利润最大化的决策模型为

$$\begin{aligned} \max_{\tau, q_n, q_r} \pi_M^C = \\ (w_n - c)d_n + (w_r - c + \delta\tau)d_r - eq_r^2 - eq_n^2 - b\tau^2. \end{aligned} \quad (10)$$

零售商基于利润最大化的决策模型为

$$\max_{p_n, p_r} \pi_R = (p_n - w_n)d_n + (p_r - w_r)d_r. \quad (11)$$

由前文可知, 零售商的目标函数关于价格 p_n 和 p_r 是凹函数, 制造商联盟的目标函数关于 τ , q_n , q_r 的海塞矩阵为

$$H^C = \begin{bmatrix} -2b & -\delta\gamma_q & \delta\Omega_q \\ -\delta\gamma_q & -2e & 0 \\ \delta\Omega_q & 0 & -2e \end{bmatrix}.$$

容易验证海塞矩阵 H^C 是负定的, 所以目标函数是凹函数. 运用逆向归纳法求解, 与分散化决策情形相同, 可以得到零售商的最优反应函数如下:

$$\begin{aligned} p_n^\ell = p_n^b = \\ \frac{\alpha_n \Omega_p + \alpha_r \gamma_p + w_n \beta_p (\Omega_p + \gamma_p)}{2\beta_p (\Omega_p + \gamma_p)} + \\ \frac{(q_n - q_r) \beta_p \gamma_q + \beta_q (q_n \Omega_p + q_r \gamma_p)}{2\beta_p (\Omega_p + \gamma_p)}, \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} p_r^\ell = p_r^b = \\ \frac{\alpha_n \gamma_p + \alpha_r \Omega_p + w_r \beta_p (\Omega_p + \gamma_p)}{2\beta_p (\Omega_p + \gamma_p)} + \\ \frac{(q_r - q_n) \beta_p \gamma_q + \beta_q (q_r \Omega_p + q_n \gamma_p)}{2\beta_p (\Omega_p + \gamma_p)}. \end{aligned} \quad (13)$$

制造商和再制造商质量决策的最优反应函数为

$$q_n^\ell = \frac{(w_n - c)\beta_q - (\delta\tau - w_n + w_r)\gamma_q}{4e}, \quad (14)$$

$$q_r^\ell = \frac{(w_r - c + \delta\tau)\beta_q - (\delta\tau - w_n + w_r)\gamma_q}{4e}. \quad (15)$$

根据零售商和联盟的最优反应函数, 可求得再制造商的最优回收努力为

$$\begin{aligned} \tau^{C*} = \frac{\delta(4e\alpha_r - c\beta_q^2 + w_r(\Omega_q^2 + \gamma_q^2 - 4e\Omega_p))}{16be - \delta^2(\Omega_q^2 + \gamma_q^2)} + \\ \frac{\delta(2w_n(2e\gamma_p - \gamma_q\Omega_q))}{16be - \delta^2(\Omega_q^2 + \gamma_q^2)}. \end{aligned} \quad (16)$$

根据式(16), 将 τ^{C*} 代入再制造商质量决策的最优反应函数中, 可以求出制造商和再制造商的质量均衡解 q_n^{C*} , q_r^{C*} , 进一步可以求得新产品与再制造产品的均衡价格 p_n^{C*} , p_r^{C*} .

定理6 将2种不同决策模式下的均衡解和利润作对比可以得到: 1) $\tau^{C*} \leq \tau^{D*}$; 2) $q_n^{C*} < q_n^{D*}$, $q_r^{C*} < q_r^{D*}$; 3) $p_n^{C*} > p_n^{D*}$, $p_r^{C*} > p_r^{D*}$; 4) $\pi_M^{C*} > \pi_M^{D*} + \pi_{M^*}^{D*}$, $\pi_R^{C*} > \pi_R^{D*}$.

定理6表明: 再制造系统中, 若制造商和再制造商组成战略联盟联合进行决策, 最优回收努力、均衡质量较分散化决策均下降, 但产品的价格上升, 各成员和系统利润均实现了增加. 这个结论具有较强的经济意义和现实意义, 论证了古诺产量博弈和伯特兰德价格博弈在再制造系统中的具体实践. 分散化决策下制造商和再制造商为了获得更多的利润, 在价格和质量上展开竞争, 从而产生了“双重边际化效应”现象, 造成了效益的损失. 制造商联合决策下各成员和整个再制造系统的利润水平均实现了增加, 但同时伴随着产品价格的提高和市场交易量的降低, 这对消费者来说是不利的. 因此, 从市场的角度看, 针对再制造系统中企业之间的联合所造成的市场低效率问题, 政府应发挥相应的调控作用.

4 数值分析

前文已经分析了价格和质量竞争环境中再制造系统的决策均衡, 但由于均衡解的表达式非常复杂或者没有给出明确的解析式, 接下来将给出一些具体的数值算例进行分析. 从以下2个视角进行: 1) 在分

散式决策下通过算例分析对比制造商和再制造商质量与价格竞争; 2) 对比分散式决策和制造商横向联盟 2 种决策模式下再制造系统的决策效率. 有关参数如下:

$$\alpha_n = \alpha_r = 8^2, w_n = 6, w_r = 5, c = 3, \delta = 1,$$

$$b = 10, e = 12, \beta_p = 10, \gamma_p = 4, \beta_q = 8, \gamma_q = 6.$$

4.1 分散化决策下再制造系统数值算例结果分析

针对分散化决策情形, 本文将通过数值算例分析以下几方面的内容: 1) 分析和比较模型中一些关键变量(如再制造成本节约、回收成本、质量投入成本等)对再制造系统均衡决策的影响; 2) 分析新产品和再制造产品质量与价格竞争均衡的阈值条件, 从而进一步明确再制造商的再制造和市场进入决策.

分散化决策下再制造系统均衡质量、价格和系统利润与再制造成本节约的关系如图 2 所示.

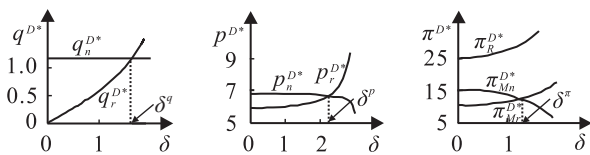


图 2 再制造成本节约影响下的均衡质量、价格和利润

由图 2 可知, 再制造产品的均衡质量和价格与再制造成本节约呈正相关关系, 而且再制造商和零售商的利润水平也与再制造成本节约呈相同方向变动. 但随着再制造成本节约增加, 制造商的利润水平降低. 这表明再制造成本节约越大, 再制造产品的竞争力也越强, 从而使得再制造商受益, 但会间接伤害制造商的利益. 对于零售商而言, 会从再制造成本节约的提高中获益, 这是因为零售商销售新产品的利润损失会从销售再制造产品环节得到补偿. 另外, 可以看出, 存在阈值 δ^q 使得再制造产品的均衡质量超过新产品的均衡质量, 这个结论似乎有悖常理. 事实上, 这是因为再制造成本节约越高, 再制造商会选择加大投入, 提高再制造产品的质量, 当到达一定值后, 会超过新产品的质量水平. 关于价格和利润的再制造成本节约阈值 δ^p, δ^π 的经济意义与质量阈值分析类似.

分散化决策下再制造系统的均衡质量、价格和系统利润与再制造商回收成本的关系如图 3 所示.

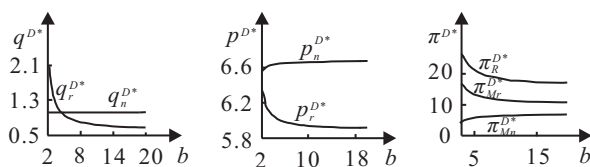


图 3 回收成本影响下的均衡质量、价格和利润

由图 3 可知, 回收成本增加直接导致再制造产品的均衡质量和价格降低, 利润也因此减少, 但制造商

的利润实现了一定的增加. 这是因为再制造产品的成本上升, 在与新产品质量和价格竞争中处于劣势, 间接地使制造商的利润水平增加. 零售商利润变化趋势与再制造一致, 这个结论是直观的, 因为此时销售再制造产品对企业总利润的贡献减少.

分散化决策下再制造系统的均衡质量、价格和系统利润与质量投入成本的关系如图 4 所示.

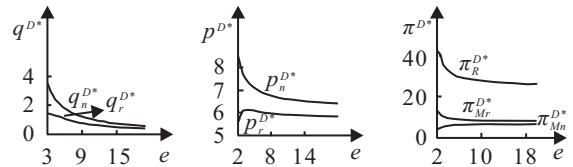


图 4 质量投入成本影响下的均衡质量、价格和利润

由图 4 可知, 2 种产品的质量水平均随质量投入成本的增加而下降, 且价格整体也呈下降趋势. 从成员利润变化趋势看, 提高质量成本投入均会导致利润水平下降, 这是因为制造商质量投入增加导致产品质量下降, 从而降低了产品销售量.

4.2 2 种决策模式结果对比

接下来将讨论制造商与再制造商的联合决策行为对再制造系统的最优回收努力、产品零售价格和水平决策的影响, 并进一步与分散化情形下的再制造系统决策效率进行对比, 从而说明供应链横向一体化在再制造实践中的优势和局限性. 再制造成本节约影响下的 2 种决策均衡结果对比如图 5 所示.

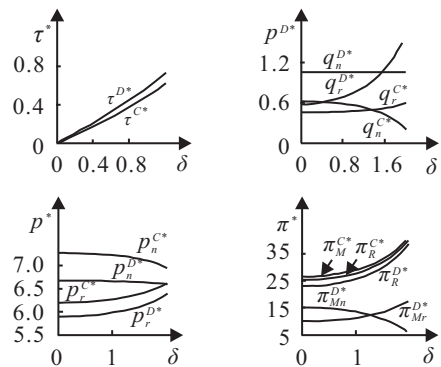


图 5 再制造成本节约影响下的 2 种决策均衡结果对比

本节选取再制造成本节约 δ 作为影响变量, 对比分析了再制造成本节约影响下分散化决策和制造商联合决策 2 种决策模式的均衡结果和利润, 验证了定理 6 的正确性. 由图 5 可以看出, 制造商联合决策情形下再制造系统的均衡质量、价格和利润与分散化决策情形下的基本变化趋势大致是相符合的. 随着再制造成本节约不断提高, 制造商横向联合决策下再制造回收努力、产品的均衡质量与分散化决策情形相比, 差值逐渐增大. 另一方面, 制造商联盟、零售商利润增加的幅度也逐渐变大, 表明了制造商联合会充分利用再制造的成本优势提高企业的利润. 但另一方面消费者

所购买产品的质量下降,支付的价格增加,收益受到了损害.因此,政府有必要发挥相应的经济调节实现市场的稳定运行.

5 结 论

本文针对竞争型的制造商和单一零售商构成的再制造系统,对新产品与再制造产品在价格和质量上展开竞争,利用博弈论的研究方法建立了基于利润最大化的质量-价格决策模型.分别求得了分散化决策和制造商联合决策2种模式下再制造系统的均衡解,并对均衡解随模型中关键参数的变化情况进行了分析,给出了相关结论.进一步,通过将2种情形下的均衡解和利润对比发现:在制造商联合决策模式下,再制造回收努力和产品的质量水平下降,而产品的价格和系统的利润水平均提高,这对再制造系统来说是有利的,但同时也损害了消费者的利益.最后,通过设计相关的算例对结论进行了验证和分析.

在此基础上可对该领域做进一步研究,最直接的方式是把确定性需求扩展到随机需求情形进行研究;其次,可以建立含有多个制造商、多个再制造商和多个分销商的闭环供应链网络均衡模型,可以得到更为一般情况下的供应链竞争均衡解,从而使结论更具有现实指导意义.

参考文献(References)

- [1] Johnson M R, Wang M H. Economical evaluation of disassembly operations for recycling, remanufacturing and reuse[J]. *Int J of Production Research*, 1998, 36 (12): 3227-3252.
- [2] Majumder P, Groenevelt H. Competition in remanufacturing[J]. *Production and Operations Management*, 2001, 10(2): 125-141.
- [3] Savaskan R C, Bhat T S, Wassenhove L N V. Closed-loop supply chain models with product manufacturing[J]. *Management Science*, 2004, 50 (2): 239-252.
- [4] Savaskan R C, Wassenhove L N V. Reverse channel design: The case of competing retailers[J]. *Management Science*, 2006, 52(1): 1-14.
- [5] Ferguson M E, Toktay L B. The effect of competition on recovery strategies[J]. *Production and Operations Management*, 2006, 15(3): 351-368.
- [6] Ferrer G, Swaminathan J M. Managing new and differentiated remanufactured products[J]. *European J of Operational Research*, 2010, 203(2): 370-379.
- [7] 谢家平, 王爽. 偏好市场下制造/再制造系统最优生产决策[J]. *管理科学学报*, 2011, 14(3): 24-33.
(Xie J P, Wang S. Optimal production decision model of the remanufacturing/manufacturing system in the heterogeneous market[J]. *J of Management Science in China*, 2011, 14(3), 24-33.)
- [8] Kranton R E. Competition and the incentive to produce high quality[J]. *Economica, New Series*, 2003, 70(279): 385-404.
- [9] Hall J, Porteus E. Customer service competition in capacitated systems[J]. *Manufacturing and Service Operations Management*, 2000, 2(2): 144-165.
- [10] Matsubayashi N. Price and quality competition: The effect of differentiation and vertical integration[J]. *European J of Operational Research*, 2007, 180(2): 132-151.
- [11] Matsubayashi N, Yamada Y. A note on price and quality competition between asymmetric firms[J]. *European J of Operational Research*, 2008, 187(2): 142-154.
- [12] 鲁其辉, 朱道立. 质量与价格竞争供应链的均衡与协调策略研究[J]. *管理科学学报*, 2009, 12(3): 56-64.
(Lu Q H, Zhu D L. Research on equilibriums and coordination strategies of supply chains with quality and price competition[J]. *J of Management Science in China*, 2009, 12(3): 56-64.)
- [13] Xie G, Yue W Y, Wang S Y, et al. Quality investment and price decision in a risk-averse supply chain[J]. *European J of Operational Research*, 2012, 214(2): 403-410.
- [14] Debo L, Toktay B, Van Wassenhove L. Market segmentation and product technology selection for remanufacturable products[J]. *Management Science*, 2005, 51(8): 1193-1205.
- [15] 曹俊, 熊中楷, 刘莉莎. 闭环供应链中新件制造商和再制造商的价格及质量水平竞争[J]. *中国管理科学*, 2010, 18(5): 82-90.
(Cao J, Xiong Z K, Liu L S. Price and quality competition between the new and remanufactured producer in the closed-loop supply chain[J]. *Chinese J of Management Science*, 2010, 18(5): 82-90.)
- [16] 谢家平, 迟琳娜, 梁玲. 基于产品质量内生的制造/再制造最优生产决策[J]. *管理科学学报*, 2012, 15(8): 12-23.
(Xie J P, Chi L N, Liang L. Optimal manufacturing /remanufacturing production decision based on endogenous product quality[J]. *J of Management Science in China*, 2012, 15(8): 12-23.)
- [17] Nault B R, Tuagi R K. Implementable mechanisms to coordinate horizontal alliances[J]. *Management Science*, 2001, 47(6): 787-799.
- [18] Wallenburg C M, Raue J S. Conflict and its governance in horizontal cooperations of logistics service providers[J]. *Int J of Physical Distribution & Logistics Management*, 2011, 41(4): 385-400.
- [19] Wu C H. Price and service competition between new and remanufactured products in a two-echelon supply chain[J]. *Int J of Production Economics*, 2012, 140(4): 496-517.