

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2024.08.018

考虑平台零售商的再制造产品销售 渠道决策模型

吴文雅¹, 李凯^{1,2}, 赵能桂¹

(1. 合肥工业大学 管理学院, 安徽 合肥 230009; 2. 过程优化与智能决策教育部重点实验室, 安徽 合肥 230009)

摘要:文章假设平台零售商销售新产品,而对于再制造产品,考虑平台零售商销售和制造商通过平台直销 2 种模式,构建对应的再制造销售渠道模型;通过 Karush-Kuhn-Tucker 条件构造 Lagrangian 函数得到制造商和平台零售商的最优决策区域,分析不同供应链成员对再制造产品销售渠道的决策偏好。数值仿真实验结果表明:在考虑平台零售商的再制造销售渠道决策中,制造商一直倾向于新产品和再制造产品均由平台零售商销售;而平台零售商的决策依赖于再制造节约成本,当再制造节约成本较小时,平台零售商倾向于同时销售新产品和再制造产品,否则倾向于仅销售新产品,同时为制造商提供平台由其直接销售再制造产品。

关键词:再制造成本;平台零售商;渠道决策;消费者剩余;供应链管理

中图分类号:F273

文献标志码:A

文章编号:1003-5060(2024)08-1125-09

Decision model of remanufactured products sales channels considering platform retailers

WU Wenyang¹, LI Kai^{1,2}, ZHAO Nenggui¹

(1. School of Management, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Key Laboratory of Process Optimization and Intelligent Decision Making of Ministry of Education, Hefei 230009, China)

Abstract: It is assumed that the platform retailer sells new products, and for remanufactured products, considering two modes of platform retailer sales and manufacturer direct sales through the platform, the corresponding remanufacturing sales channel model is constructed. The Lagrangian function is constructed by Karush-Kuhn-Tucker conditions to obtain the optimal decision-making region of manufacturers and platform retailers, and the decision-making preferences of different supply chain members to the sales channels of remanufactured products are analyzed. Numerical simulation results show that manufacturers always tend to sell both new products and remanufactured products by platform retailers in the decision-making of remanufacturing sales channels considering platform retailers. The decision-making of platform retailers depends on remanufacturing costs. When the cost of remanufacturing is small, platform retailers tend to sell new products and remanufactured products at the same time; otherwise, they tend to sell only new products and provide manufacturers with a platform to sell remanufactured products directly.

Key words: remanufacturing cost; platform retailer; channel decision; consumer surplus; supply chain management

收稿日期:2021-06-17;修回日期:2021-08-21

基金项目:国家自然科学基金资助项目(71871076;72271070);国家自然科学基金青年科学基金资助项目(72001064)和安徽省自然科学基金资助项目(2208085J07)

作者简介:吴文雅(1996—),女,安徽合肥人,合肥工业大学硕士生;

李凯(1977—),男,安徽蒙城人,博士,合肥工业大学教授,博士生导师,通信作者,E-mail:hfutlk@163.com.

0 引言

经济的快速增长一方面改善了人们的生活水平,另一方面也带来了巨大的资源与能源消耗。再制造在产品级实现了资源循环再生利用,因而具有显著的经济效益、社会效益和环境效益,是一种典型的绿色生产模式^[1]。如华为、苹果公司在生产中使用部分再制造零部件,可以实现 30%~50%的成本节约^[2]。

再制造产品的销售渠道决策对再制造企业至关重要,特别是近些年电子商务的发展为再制造产品销售提供了便利条件和新的销售渠道。文献[3]比较 2 种再制造产品销售渠道模型,结果表明制造商线上直销总是比通过第三方销售更加环保;文献[4]比较分析新产品和再制造产品可能存在的 5 种销售渠道,发现通过 2 个零售商混合销售 2 种产品是较为理想的渠道结构;文献[5]考虑消费者对再制造产品和在线渠道的偏好,研究双渠道模式下的定价决策,同时分析双渠道对比单一传统渠道的优势;文献[6]研究考虑碳减排和再制造的制造商渠道决策模型,从利润和排放的角度比较纯线上渠道、纯线下渠道和双渠道 3 种渠道结构;文献[7]考虑含有线上和线下的 3 种分销渠道,分析政府补贴水平对新产品和再制造产品的最优渠道与定价决策的影响。

在线上销售中,平台零售商作为一种新的线上销售模式越来越受到关注,如我国家电零售的主导品牌国美和苏宁均采用考虑平台零售商的销售模式,将店内空间租给多个制造商。每个制造商都通过自己的销售团队来管理产品的销售过程,需要将部分销售收入与这些零售商进行分享作为条件。许多学者也开始关注考虑平台零售商的销售渠道决策问题。文献[8]对比研究新兴电子商务模式下市场、经销商或者混合营销 3 种线上模型,发现最优渠道选择受到订单履行成本和上游竞争强度之间相互作用的影响;文献[9]构建并研究一个基于电子书销售的垂直差异化商品模型,比较和分析销售代理模式、批发模式以及代理模型的激励对齐条件;文献[10]研究在 4 种可能的供应商策略组合模式下基于混合式电商平台的渠道选择和价格与服务竞争策略;文献[11]分析制造商如何与平台零售商和传统经销商进行互动,发现渠道成员对 2 种销售模式的选择受到中介费和零售渠道之间需求替代效应的影响;文献[12]针对由一个多渠道零售商和一个平台商组

成的供应链,对比研究电商平台代理和转售 2 种销售模式下的最优定价顺序;文献[13]研究在一个包含电子零售商平台服务和自营店的闭环供应链系统中,平台费用和订单履行成本对 4 种销售渠道模式下的再制造最优决策和绩效的影响。

本文分别从制造商、平台零售商及整个供应链系统、消费者剩余视角,研究考虑平台零售商的再制造销售渠道决策模型,为企业再制造销售渠道决策提供一定的参考。

1 问题描述与基本假设

1.1 问题描述

本文研究一个由制造商、平台零售商和消费者组成的三级供应链结构,假定制造商是 Stackelberg 博弈的主导者,平台零售商是跟随者。制造商生产新产品并实施废旧产品的回收和再制造。平台零售商既可以作为经销商从制造商处批发产品,然后以零售价格销售给消费者,也可以为制造商直接销售提供在线销售平台。

1) 平台零售商作为经销商,既销售新产品,也销售再制造产品(简称 RR 模式)。首先制造商以批发价格 w_n 、 w_r 向平台零售商出售新产品和再制造产品;然后平台零售商再确定 2 种产品的最优需求量 q_n 、 q_r ,以使其利润最大化,并确定相应的零售价格 p_n 、 p_r 。

2) 平台零售商仅销售新产品,制造商通过平台直接销售再制造产品(简称 RP 模式)。针对新产品,制造商首先确定批发价格 w_n ,平台零售商再以零售价格 p_n 销售给消费者,确定新产品最优需求量 q_n ,使其利润最大;针对再制造产品,制造商通过平台进行直接销售,确定最优需求量 q_r 和零售价格 p_r ,在此情形下,平台零售商收取比例 k 的平台服务费用。

考虑平台零售商的再制造渠道结构如图 1 所示。

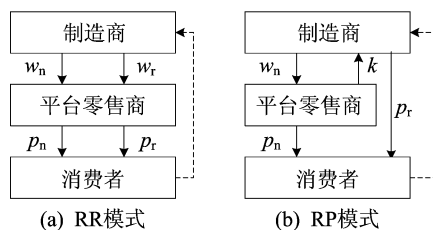


图 1 考虑平台零售商的再制造渠道结构

1.2 基本假设

本文研究基于如下假设：

1) 潜在的市场总规模为 1, 依据文献[14-15]中的共同假设, 新产品和再制造产品同质无差异, 但消费者是异质的。当消费者购买新产品的支付意愿为 ρ 时, 购买再制造产品的支付意愿较低为 $\delta\rho$, 其中 δ 为消费者对再制造产品的消费者价值折扣, $0 < \delta < 1$; 消费者购买新产品和再制造产品的效用分别为 $u_n = \rho - p_n$, $u_r = \delta\rho - p_r$, 仅当效用非负时, 消费者才会购买, 且最多只能购买 1 件产品。

2) C_n 表示生产新产品的平均单位成本; v 表示再制造的平均单位节约成本, 其中 $0 < v < C_n < 1$, 该模型建立了制造商在生产再制造产品过程中的成本优势, 这一假设在以往的研究中已被广泛接受, 参考文献[16-17]。

3) 将渠道运营成本、回收成本等其他成本标准化为 0, 这些假设旨在简化模型的数学推导, 同时保留问题中的基本定性结果。

4) $0 < k < 1$ 表示平台零售商提供在线市场时收取一定比例的平台服务费率。

5) 再制造产品的供应受新产品的约束, 因此在稳定状态下再制品的市场需求量不高于新产品, 即 $q_n \geq q_r \geq 0$ 。

6) 决策问题建模为单个时期, 且供应链所有成员都是独立的、风险中性的、利润最大化的, 同时对信息有平等的获取权。

依据假设 1), 由消费者效用函数推导出新产品和再制造产品的逆需求函数分别为 $p_n = 1 - q_n - \delta q_r$, $p_r = \delta(1 - q_n - q_r)$ 。 Π_{ni}^j 和 Π_{ri}^j 分别为 j 模式决策 i 下制造商和平台零售商的利润, 其中 i 分别对应渠道成员的不同最优决策, $j \in \{RR, RP\}$ 分别对应图 1 的 2 种销售渠道模型。

2 模型构建和分析

2.1 RR 模式

制造商选择将新产品和再制造产品都通过平台零售商进行销售, 此时平台零售商作为经销商, 考虑销售 2 种产品。制造商和平台零售商的利润函数分别为:

$$\begin{aligned} \max_{w_n, w_r} \Pi_m^{RR} &= (w_n - C_n)q_n + (w_r - C_n + v)q_r; \\ \max_{q_n, q_r} \Pi_r^{RR} &= (p_n - w_n)q_n + (p_r - w_r)q_r; \\ \text{s. t.} \quad q_n &\geq q_r \geq 0. \end{aligned}$$

根据 Stackelberg 博弈模型的逆序求解思想, 为得到制造商的最优决策, 应首先确定平台零售商新产品和再制造产品的最优市场需求量相对于

制造商批发价格的最优反应函数。易证明上述问题属于凹规划问题, 因此模型存在唯一最优解, 通过 Karush-Kuhn-Tucker (KKT) 优化条件构造 Lagrangian 函数进行分析, 可得制造商和平台零售商的最优决策区域, 见命题 1、命题 2。

命题 1 在 RR 模式下, 当给定批发价格 w_n 和 w_r 时, 平台零售商的最优决策有 3 个区域, 下面分别给出新产品和再制造产品的最优需求量。

1) 情形 RR-1. 若 $0 < w_n < w_{n1}^{RR}$, 有

$$q_{n1}^{RR} = \frac{1 - w_n}{2}, \quad q_{r1}^{RR} = 0.$$

2) 情形 RR-2. 若 $w_{n1}^{RR} \leq w_n \leq w_{n2}^{RR}$, 有

$$q_{n2}^{RR} = \frac{1 - \delta - w_n + w_r}{2(1 - \delta)},$$

$$q_{r2}^{RR} = \frac{\delta w_n - w_r}{2\delta(1 - \delta)}.$$

3) 情形 RR-3. 若 $w_{n2}^{RR} < w_n < 1$, 有

$$q_{n3}^{RR} = q_{r3}^{RR} = \frac{1 + \delta - w_n - w_r}{2(1 + 3\delta)}.$$

其中

$$\begin{aligned} w_{n1}^{RR} &= w_r / \delta; \\ w_{n2}^{RR} &= \frac{\delta(1 - \delta) + (1 + \delta)w_r}{2\delta}. \end{aligned}$$

命题 2 在 RR 模式下, 制造商的最优决策有 3 个区域, 下面分别给出最优新产品、再制造产品批发价格。

1) 情形 RR-1. 若 $0 < v < v_1^{RR}$, 有

$$w_{n1}^{RR} = \frac{1 + C_n}{2}, \quad w_{r1}^{RR} = \frac{\delta(1 + C_n)}{2}.$$

2) 情形 RR-2. 若 $v_1^{RR} \leq v \leq v_2^{RR}$, 有

$$w_{n2}^{RR} = \frac{1 + C_n}{2},$$

$$w_{r2}^{RR} = \frac{\delta + C_n - v}{2}.$$

3) 情形 RR-3. 若 $v_2^{RR} < v < C_n$, 有

$$w_{n3}^{RR} = \frac{1 + 4\delta - \delta^2 + (1 + \delta)(2C_n - v)}{2 + 6\delta},$$

$$w_{r3}^{RR} = \frac{\delta(2\delta + 2C_n - v)}{1 + 3\delta}.$$

其中

$$\begin{aligned} v_1^{RR} &= (1 - \delta)C_n; \\ v_2^{RR} &= \frac{(1 - \delta)(\delta + C_n)}{1 + \delta}. \end{aligned}$$

依据命题 1 和命题 2 将供应链成员的最优决策代入其最优问题, 见表 1 所列, 分别得到制造商和平台零售商的最优反应。

表 1 RR 模式中供应链成员的均衡决策

决策结果	情形		
	RR-1	RR-2	RR-3
q_n^{RR*}	$\frac{1-C_n}{4}$	$\frac{1-v-\delta}{4(1-\delta)}$	$\frac{1+v+\delta-2C_n}{4(1+3\delta)}$
q_r^{RR*}	0	$\frac{v-C_n+\delta C_n}{4\delta(1-\delta)}$	$\frac{1+v+\delta-2C_n}{4(1+3\delta)}$
w_n^{RR*}	$\frac{1+C_n}{2}$	$\frac{1+C_n}{2}$	$\frac{1+4\delta-\delta^2-v(1+\delta)+2(1+\delta)C_n}{2+6\delta}$
w_r^{RR*}	$\frac{\delta(1+C_n)}{2}$	$\frac{\delta+C_n-v}{2}$	$\frac{\delta(-v+2\delta+2C_n)}{2+6\delta}$
p_{ni}^{RR*}	$\frac{3+C_n}{4}$	$\frac{3+C_n}{4}$	$\frac{3-v+10\delta-v\delta-\delta^2+2C_n+2\delta C_n}{4(1+3\delta)}$
p_r^{RR*}	$\frac{\delta(3+C_n)}{4}$	$\frac{3\delta+C_n-v}{4}$	$\frac{\delta(1-v+5\delta+2C_n)}{2(1+3\delta)}$

2.2 RP 模式

平台零售商仅销售新产品, 制造商将再制造产品通过平台零售商提供的在线平台进行直接销售。制造商和平台零售商的利润函数分别为:

$$\begin{aligned} \max_{q_n, w_n} \Pi_m^{RP} &= (w_n - C_n)q_n + \\ & [(1-k)p_r - C_n + v]q_r; \\ \max_{q_n} \Pi_r^{RP} &= (p_n - w_n)q_n + kp_r q_r; \\ \text{s. t. } & q_n \geq q_r \geq 0. \end{aligned}$$

同理, 运用逆序归纳法, 采用 Karush-Kuhn-Tucker 优化条件构造 Lagrangian 函数分析上述问题, 可得制造商和平台零售商的最优决策区域, 见命题 3、命题 4。

命题 3 在 RP 模式下, 当给定批发价格 w_n 平台零售商的最优决策有 3 个区域, 下面分别给出新产品和再制造产品的最优需求量。

1) 情形 RP-1。若 $0 \leq w_n \leq w_{n1}^{RP}$, 有

$$q_{n1}^{RP} = \frac{1-w_n}{2}, q_{r1}^{RP} = 0.$$

2) 情形 RP-2。若 $w_{n1}^{RP} < w_n \leq w_{n2}^{RP}$, 有

$$q_{n2}^{RP} = \frac{(1-k)(2w_n-2) + (1+k)(v-C_n) + \delta(1-k^2)}{(1-k)(\delta+k\delta-4)},$$

$$q_{r2}^{RP} = \frac{2(C_n-v) - \delta(1-k)(1+w_n)}{(1-k)\delta(\delta+k\delta-4)}.$$

$$w_{n3}^{RP} = \frac{2+3\delta-k\delta - (1-k^2)\delta^2 + (2C_n-v)(2+\delta+k\delta)}{4+2(-3+k)\delta}.$$

其中

$$v_1^{RP} = \frac{3(-1+k)\delta + [4 + (-1+k)\delta]C_n}{4};$$

$$v_2^{RP} = \frac{(-1+k)\delta(-6+\delta+k\delta) - [8 + (-3+k)\delta]C_n}{-8+\delta+k\delta};$$

3) 情形 RP-3。若 $w_{n2}^{RP} < w_n < 1$, 有

$$q_{n3}^{RP} = q_{r3}^{RP} = \frac{1-w_n}{2+\delta+k\delta}.$$

其中

$$w_{n1}^{RP} = \frac{2(C_n-v) - (1-k)\delta}{(1-k)\delta};$$

$$w_{n2}^{RP} = \frac{\delta(1-\delta) + (1+\delta)w_r}{2\delta}.$$

当满足 $\frac{2-\delta}{\delta} - 2\sqrt{\frac{1-\delta}{\delta^2}} < k < 1$ 时, Hessian

矩阵 $H(q_n, q_r)$ 负定, Π_r^{RP} 是关于 q_n 的凹函数。

命题 4 在 RP 模式下时, 制造商的最优决策有 4 个区域, 下面分别给出最优新产品批发价格。

1) 情形 RP-1。若 $0 < v < v_1^{RP}$, 有

$$w_{n1}^{RP} = \frac{1+C_n}{2}.$$

2) 情形 RP-2-1。若 $v_1^{RP} \leq v < v_2^{RP}$, 有

$$w_{n2-1}^{RP} = \frac{2(C_n-v) - (1-k)\delta}{(1-k)\delta}.$$

3) 情形 RP-2-2。若 $v_2^{RP} \leq v < v_3^{RP}$, 有

$$w_{n2-2}^{RP} = \{[k(\delta^2 - 8 - 2v(4-\delta)) - 4\delta] + k^2(8+v-\delta)\delta + [8 + (k+1)(k-3)\delta]C_n - k^3\delta^2 + 8 - 4\delta + v\delta + \delta^2\} / \{2(k+1)[\delta(3+k) - 8]\}.$$

4) 情形 RP-3。若 $v_3^{RP} \leq v < C_n$, 有

$$v_3^{RP} = \frac{(-1+k)\delta[-2+(-3+k)\delta]+[-8+(3-5k)\delta]C_n}{-8+(-3+k)\delta}。$$

为确保再制造节约成本 v 非负,要求 $C_n > (3\delta-3k\delta)/(4-\delta+k\delta)$ 。依据命题 3、命题 4 将供应链成员的最优决策代入其最优问题,分别得到制造商和平台零售商的最优反应,见表 2 所列。

表 2 RP 模式中供应链成员的均衡决策

决策结果	情形			
	RP-1	RP-2-1	RP-2-2	RP-3
q_n^{RP*}	$\frac{1-C_n}{4}$	$\frac{k\delta+C_n-v-\delta}{(k-1)\delta}$	$\frac{2(1-k-v-\delta+k\delta+kC_n)}{(k-1)[(3+k)\delta-8]}$	$\frac{k\delta+2C_n-1-v-\delta}{2(k\delta-2-3\delta)}$
q_r^{RP*}	0	0	$\frac{[v+(1-k)\delta][(1+k)\delta-6]+(8+(k-3)\delta)C_n}{2(1-k)\delta[(3+k)\delta-8]}$	$\frac{k\delta+2C_n-1-v-\delta}{2(k\delta-2-3\delta)}$
w_n^{RP*}	$\frac{1+C_n}{2}$	$\frac{2v+\delta-k\delta-2C_n}{(k-1)\delta}$	$\frac{\{[v-4+k^2(8+v-\delta)]\delta+8+k[(2v+\delta)(\delta-4)-8]+(1-k^3)\delta^2+[8+(k+1)(k-3)\delta]C_n\}}{\{2(k-1)[(3+k)\delta-8]\}}$	$\frac{[-2-3\delta+k\delta+\delta^2-k^2\delta^2+(v-2C_n)(2+\delta+k\delta)]/[2(k-3)\delta-4]}{2(k-3)\delta-4}$
p_n^{RP*}	$\frac{3+C_n}{4}$	$\frac{v-C_n}{(k-1)\delta}$	$\frac{\{[12-k^2(\delta-2)\delta+k[(6+v)\delta-12]-4v+\delta^2+[8+k(\delta-4)-3\delta]C_n+(v-8)\delta]/[2(k-1)((3+k)\delta-8)]\}}{2(1+\delta)C_n/[2(k-3)\delta-4]}$	$\frac{(v+(k+v-\delta)\delta-3+(1-k)\delta^2-2(1+\delta)C_n)/[2(k-3)\delta-4]}{2(k-3)\delta-4}$
p_r^{RP*}	$\frac{\delta(3+C_n)}{4}$	$\frac{v-C_n}{k-1}$	$\frac{\{(k-1)\delta(-6+\delta+k\delta)+v(5+k)\delta+[8-3(1+k)\delta]C_n-8v\}}{\{2(k-1)[(3+k)\delta-8]\}}$	$\frac{\delta(1-v+2\delta+2C_n)}{2-(k-3)\delta}$

证明 在 RP 模式中,制造商优化问题的 Lagrangean 和 KKT 条件为:

$$L = (w_n - C_n)q_n + [(1-k)\delta(1-q_n - q_r) - C_n + v]q_r + \lambda_1 q_r - \lambda_2 (q_r - q_n) \quad (1)$$

$$\frac{\partial L}{\partial q_r} = v - C_n + (1-k)\delta(1-q_n - q_r) - (1-k)\delta q_r + \lambda_1 - \lambda_2 = 0 \quad (2)$$

$$\lambda_1 q_r = \lambda_2 (q_r - q_n) = 0 \quad (3)$$

$$q_n \geq q_r \geq 0 \quad (4)$$

在 RP 模式中,平台零售商优化问题的条件为:

$$M = (1 - q_n - \delta q_r - w_n)q_n + k\delta(1 - q_n - q_r)q_r + \lambda_3 q_n \quad (5)$$

$$\frac{\partial M}{\partial q_n} = 1 - 2q_n - \delta q_r - k\delta q_r - w_n + \lambda_3 = 0 \quad (6)$$

$$\lambda_3 q_n = 0 \quad (7)$$

$$q_n > 0 \quad (8)$$

由于 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 可以为 0 或正数,由式(7)、式(8)互补松弛条件知 $\lambda_3 = 0$ 。

当 $\lambda_1 > 0, \lambda_2 = 0$ 时,由式(3)得 $q_n = 0$;将已知条件代入式(6)得 $q_n = \frac{1-w_n}{2}$;将 q_n, q_r 代入式(2)中,可得:

$$\lambda_1 = \frac{-2v - \delta + k\delta + 2C_n - \delta w_n + k\delta w_n}{2}。$$

由约束条件 $\lambda_1 > 0$ 求得 w_n 范围为:

$$0 < w_n < \frac{2v + \delta - k\delta - 2C_n}{-\delta + k\delta}。$$

当 $\lambda_1 = 0, \lambda_2 = 0$ 时,将 $\lambda_1 = \lambda_2 = 0$ 代入式(2)、式(6)中得:

$$q_{r2} = \frac{2v + \delta - k\delta - 2C_n + \delta w_n - k\delta w_n}{(-1+k)\delta(-4+\delta+k\delta)},$$

$$q_{n2} = \frac{[-2+2k+v+kv+\delta-k^2\delta-(1+k)C_n-2(-1+k)w_n]/[(1-k)(-4+\delta+k\delta)]}{[1-k)(-4+\delta+k\delta)]}。$$

由式(4)求得 w_n 范围为:

$$\frac{2v + \delta - k\delta - 2C_n}{-\delta + k\delta} \leq w_n \leq (2v - \delta + k\delta + v\delta + kv\delta + \delta^2 - k^2\delta^2 - 2C_n - \delta C_n - k\delta C_n)/(-3\delta + 3k\delta)。$$

当 $\lambda_1 = 0, \lambda_2 > 0$ 时,将 $\lambda_1 = 0, q_n = q_r$ 代入式(2)、式(6)得:

$$q_{n3} = q_{r3} = \frac{1-w_n}{2+\delta+k\delta}。$$

$$\lambda_2 = \frac{[kv\delta + \delta^2 - k^2\delta^2 - (2+\delta+k\delta)C_n - 3(-1+k)\delta w_n + 2v - \delta + k\delta + v\delta]/(2+\delta+k\delta)}{2+\delta+k\delta}。$$

由约束条件 $\lambda_2 > 0$ 求得 w_n 范围为:

$$w_n > \frac{[v(2+\delta+k\delta) + \delta(-1+k+\delta-k^2\delta) - (2+\delta+k\delta)C_n]/[3(-1+k)\delta]}{3(-1+k)\delta}。$$

综上所述得到命题 3。

1) 在情形 RP-1 中假设制造商倾向于让平台零售商选择 $\{q_{n1}, q_{r1}\}$, 因此其优化问题为:

$$\max_{q_r, \omega_n} \Pi_m^{\text{RP}} = (\omega_n - C_n)q_{n1} + [(1-k)p_r - C_n + v]q_{r1}.$$

$$\text{当 } 0 < \omega_n < \frac{2v + \delta - k\delta - 2C_n}{-\delta + k\delta} \text{ 时, } \omega_{n1} = \frac{1 + C_n}{2},$$

此时 $0 < v < \frac{3(-1+k)\delta + [4 + (-1+k)\delta]C_n}{4}$; 若

考虑 $v \geq \frac{3(-1+k)\delta + [4 + (-1+k)\delta]C_n}{4}$ 最优,

批发价格无限接近于 $\omega_{n1} = \frac{2v + \delta - k\delta - 2C_n}{-\delta + k\delta}$, 此

时被 $\omega_{n2-1} = \frac{2v + \delta - k\delta - 2C_n}{-\delta + k\delta}$ 所主导。

2) 在情形 RP-2 中假设制造商倾向于让平台零售商选择 $\{q_{n2}, q_{r2}\}$, 因此其优化问题为:

$$\max_{q_r, \omega_n} \Pi_m^{\text{RP}} = (\omega_n - C_n)q_{n2} + [(1-k)p_r - C_n + v]q_{r2}.$$

$$\text{当 } \frac{2v + \delta - k\delta - 2C_n}{-\delta + k\delta} \leq \omega_n \leq [\delta(-1+k+\delta -$$

$k^2\delta) + v(2+\delta+k\delta) - (2+\delta+k\delta)C_n]/[3(-1+k)\delta]$ 时, 在情形 RP-2-1 中有 $\omega_{n2-1} = (2v + \delta - k\delta - 2C_n)/(-\delta + k\delta)$, 此时:

$$0 < v < \frac{\{(-1+k)\delta(-6+\delta+k\delta) - [8 + (-3+k)\delta]C_n\}}{(-8+\delta+k\delta)};$$

在情形 RP-2-2 中有

$$\omega_{n2-2} = \frac{\{k[-8+2v(-4+\delta) - 4\delta + \delta^2] + k^2(8+v-\delta)\delta + [8 + (-3-2k+k^2)\delta]C_n + 8 - 4\delta + v\delta + \delta^2 - k^3\delta^2\}}{\{2(-1+k) - [8 + (3+k)\delta]\}},$$

此时:

$$\frac{\{(-1+k)\delta(-6+\delta+k\delta) - [8 + (-3+k)\delta]C_n\}}{[-8+\delta+k\delta]} \leq v \leq \frac{\{[(-1+k)\delta \times [-2 + (-3+k)\delta] + [-8 + (3-5k)\delta]C_n\}}{[-8 + (-3+k)\delta]};$$

在情形 RP-2-3 中有

$$\omega_{n2-3} = \frac{[v(2+\delta+k\delta) + \delta(-1+k+\delta - k^2\delta) - (2+\delta+k\delta)C_n]}{[3(-1+k)\delta]},$$

此时:

$$\frac{\{(-1+k)\delta[-2 + (-3+k)\delta] + [-8 + (3-5k)\delta]C_n\}}{[-8 + (-3+k)\delta]} < v < C_n.$$

3) 在情形 RP-3 中假设制造商倾向于让平台零售商选择 $\{q_{n3}, q_{r3}\}$, 因此其优化问题为:

$$\max_{q_r, \omega_n} \Pi_m^{\text{RP}} = (\omega_n - C_n)q_{n3} + [(1-k)p_r - C_n + v]q_{r3}.$$

当 $[v(2+\delta+k\delta) + \delta(-1+k+\delta - k^2\delta) - (2+\delta+k\delta)C_n]/[3(-1+k)\delta] < \omega_n < 1, \omega_{n3} = [-2 - 3\delta + k\delta + \delta^2 - k^2\delta^2 + v(2+\delta+k\delta) - 2(2+\delta+k\delta)C_n]/[-4 + 2(-3+k)\delta]$, 此时:

$$\frac{\{(-1+k)\delta[1 + (3+k)\delta] + 4(1+k\delta)C_n\}}{[4 + (3+k)\delta]} < v < C_n.$$

为确保 v 非负, 要求 $C_n > (3\delta - 3k\delta)/(4 - \delta + k\delta)$ 。易证

$$\frac{3(-1+k)\delta + [4 + (-1+k)\delta]C_n}{4} <$$

$$\frac{(-1+k)\delta(-6+\delta+k\delta) - [8 + (-3+k)\delta]C_n}{-8+\delta+k\delta} <$$

$$\frac{(-1+k)\delta[1 + (3+k)\delta] + 4(1+k\delta)C_n}{4 + (3+k)\delta} <$$

$$\frac{\{(-1+k)\delta[-2 + (-3+k)\delta] + [-8 + (3-5k)\delta]C_n\}}{[-8 + (-3+k)\delta]} < C_n.$$

若 $\frac{\{(-1+k)\delta[1 + (3+k)\delta] + 4(1+k\delta)C_n\}}{[4 + (3+k)\delta]} < v < \frac{\{(-1+k)\delta[-2 + (-3+k)\delta] + [-8 + (3-5k)\delta]C_n\}}{[-8 + (-3+k)\delta]}$, 则 $\Pi_{m3}^{\text{RP}} - \Pi_{m2-2}^{\text{RP}} < 0$, 对制造商而言 ω_{2-2}^{RP} 比 ω_{3}^{RP} 优化; 若 $\frac{\{(-1+k)\delta[-2 + (-3+k)\delta] + [-8 + (3-5k)\delta]C_n\}}{[-8 + (-3+k)\delta]} < v < C_n$, 则 $\Pi_{m3}^{\text{RP}} - \Pi_{m2-3}^{\text{RP}} > 0$, 对制造商而言 ω_{3}^{RP} 比 ω_{2-3}^{RP} 优化。

综上所述, 整理得到命题 4。

2.3 均衡决策分析

推论 1 在 2 种销售渠道模式中均存在一个阈值 $\bar{v}(v_1^{\text{RR}}, v_2^{\text{RP}})$, 当 $v > \bar{v}$ 时, 新产品和再制造产品被同时销售, 否则仅销售新产品。制造商选择 RP 模式提高了其从事再制造产品销售的门槛, 即 $v_2^{\text{RP}} > v_1^{\text{RR}}$ 。

比较发现, 当制造商与平台零售商决定是否销售再制造产品时, 都受到单位再制造节约成本的影响, 当 $0 < v < \bar{v}$ 时, 2 种销售模式下再制造利润均为 0, 各渠道成员主要依赖新产品收益。此外, 若制造商选择将再制造产品通过平台零售商提供的在线平台进行销售, 相比于传统销售模式, 提高了其决定是否从事回收再制造废旧产品的阈值。RP 模式中再制造产品的销售不仅由再制造节约成本和消费者对再制造产品的价值折扣共同决定, 还受到平台零售商提供在线市场时所收推荐费率 k 的影响。因此, 制造商需要与平台零售商分享再制造利润, 缩小了再制造产品销售的决策空间。

推论 2 制造商实施再制造策略时, 在 RR 模式下, 再制造产品的零售价格 p_r 随着单位再制

造节约成本 v 的增加而减少,但当制造商部分再制造(RR-2)时, p_n 与 v 无关,当制造商完全再制造(RR-3)时,新产品的零售价格 p_n 随着 v 的增加而减少;在 RP 模式下,新产品和再制造产品的零售价格 p_n, p_r 均随着单位再制造节约成本 v 的增加而减少。

推论 2 表明,在 2 种再制造销售模式下,促进再制造成本节约有利于降低新产品和再制造产品的零售价格。再制造成本降低导致的再制造产品零售价格下降,使得制造商和平台零售商在价格博弈中会同时压低新产品的价格,以追求整体收益最大。当制造商部分再制造时,新产品零售价格在 RP 模式中受相关成本、再制品价值折扣以及推荐费率的影响;而在 RR 模式中仅与新产品的生产成本有关,不受再制造产品销售的影响。

推论 3 在 RR 模式下,当制造商从事再制造时,再制造产品的市场需求量 q_r 均随着单位再制造节约成本 v 的增加而增加,但当制造商部分再制造(RR-2)时,新产品的市场需求量 q_n 随着 v 的增加而减少,当制造商完全再制造(RR-3)时, q_n 随着 v 的增加而增加;在 RP 模式下,当制造商分别部分再制造(RP-2-2)和完全再制造(RP-3)时,再制造产品和新产品的市场需求量有关单位再制造节约成本的变化趋势与 RR 模式下相同。

推论 3 表明,与再制造销售渠道选择无关,就再制造产品而言,单位再制造节约成本的增加使得需求市场逐渐扩大,这与生产再制造产品成本节约导致的相应零售价格降低有关(参考推论 2)。反之,如果单位再制造节约成本足够低($v < v_1^{RR}$ 或 $v < v_2^{RP}$),再制造变得越来越无利可图,制造商将退出再制造;就新产品而言,新产品和再制造产品同时具有补充和替代的特征。当只有部分可用的新产品被回收和再制造时,同类相食的影响显著,2 种产品是纯粹的替代品,再制造产品市场需求量的提高蚕食了制造商新产品的销售。而当制造商完全再制造时,所有可用的新产品都被回收和再制造,再制造所节约的成本克服了同类相食的负面影响。

推论 4 制造商实施再制造策略时,在 RP 模式下,新产品和再制造产品的批发价格 w_n 和 w_r 均随着单位再制造节约成本 v 的增加而减少;在 RR 模式下,当制造商部分再制造(RR-2)时, w_n 与 v 无关,当制造商完全再制造(RR-3)时,新产品的批发价格 w_n 随着 v 的增加而减少。

推论 4 的结果与推论 2 类似,此处不再赘述。可见,无论制造商选择 RR 或者 RP 模式都能促进再制造产品的销售,降低再制造产品的零售和批发价格,有利于废旧产品的循环利用,实现资源节约和环境保护。

3 数值算例

本文分别从供应链成员及整个系统、消费者剩余、社会福利视角探讨不同再制造销售渠道的优劣,同时采用数值算例方式对 2 种销售模式下制造商和平台零售商的最优决策进行进一步分析。易证得 $v_1^{RR} < v_2^{RR} < v_1^{RP} < v_2^{RP} < v_3^{RP}$,有 6 种不同的均衡解方案可供比较,见表 3 所列。

为了使研究有意义(避免 $q_r = 0$ 的情形),只需对方案 5、方案 6 分析。在满足相关约束的条件下设置 $\delta = 1/2, C_n = 17/20, k = 3/10$,在方案 5 (记为再制造较低成本节约的情形,上标 j/L)中 $18/35 < v < 499/935$,在方案 6 (记为再制造较高成本节约的情形,上标为 j/H)中 $499/935 < v < 17/20$ 。

表 3 不同方案下渠道成员的最优决策

方案	决策区域	RR 模式	RP 模式
1	$0 < v < v_1^{RR}$	RR-1	RP-1
2	$v_1^{RR} < v < v_2^{RR}$	RR-2	RP-1
3	$v_2^{RR} < v < v_1^{RP}$	RR-3	RP-1
4	$v_1^{RP} < v < v_2^{RP}$	RR-3	RP-2-1
5	$v_2^{RP} < v < v_3^{RP}$	RR-3	RP-2-2
6	$v_3^{RP} < v < C_n$	RR-3	RP-3

基于制造商、平台零售商和整个供应链系统的角度,研究再制造节约成本 v 对其经济效益的影响,如图 2、图 3 所示。

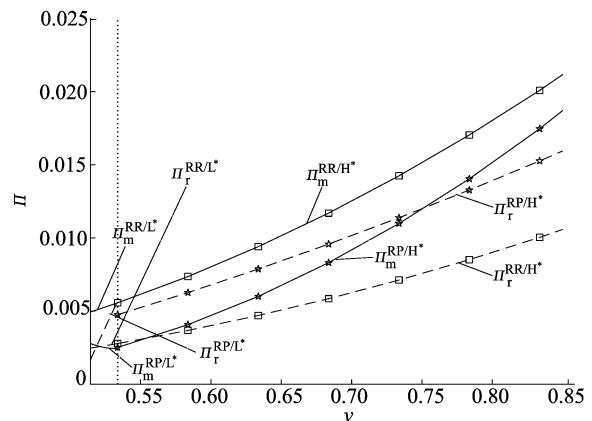


图 2 在 2 种销售渠道下的制造商和平台零售商利润

由图 2 可知:渠道成员同时销售 2 种产品的

情形下,就制造商而言,选择 RR 模式优于 RP 模式;就平台零售商而言,当再制造节约成本足够低时,倾向于选择 RR 模式,当再制造节约成本较高时,更倾向于 RP 模式。具体地说,在 $v \in (18/35, 499/935)$ 区间内,即再制造较低成本节约的情形下, Π_r^{RP/L^*} 与 Π_r^{RR/L^*} 有一个交点。存在某一阈值 v^Δ , 当 $v \in (18/35, v^\Delta)$ 时 $\Pi_r^{RR} > \Pi_r^{RP}$; 当 $v \in (v^\Delta, 17/20)$ 时, $\Pi_r^{RR} < \Pi_r^{RP}$ 。

在 2 种销售模式中平台零售商的利润、 Π_m^{RR/L^*} 、 Π_m^{RP/H^*} 、 Π_m^{RR/H^*} 均随着再制造节约成本 v 的增加而增加,但是 Π_m^{RP/L^*} 随着 v 的增加而减少。

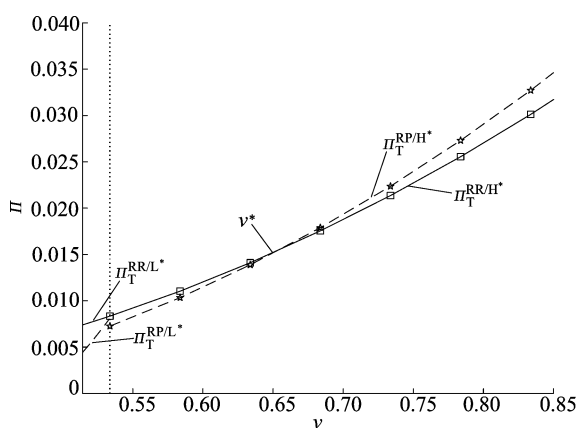


图 3 在 2 种销售渠道下的供应链系统总利润

由图 3 可知:渠道成员同时销售 2 种产品的情形下,当再制造节约成本相对较低时,相比 RP 模式,选择 RR 模式更有利于提升供应链的总体绩效;当再制造节约成本相对较高时,倾向于 RP 模式。具体地说,在 $v \in (18/35, v^*)$ 区间内, $\Pi_r^{RR} > \Pi_r^{RP}$; 在 $v \in (v^*, 17/20)$ 区间内, $\Pi_r^{RR} < \Pi_r^{RP}$ 。随着再制造节约成本 v 的增加,制造商再制造具有足够优势时,选择将再制造产品通过平台零售商提供的在线平台进行销售,可以增加整个供应链的利润,从而限制双重边缘化问题的损失。

从企业和社会层面,研究再制造节约成本差异的情况下,通过数值算例分析对消费者剩余和社会福利的影响,比较其在 2 种销售模式下的大小,从而进行最优渠道决策,如图 4 所示。

消费者剩余(consumer surplus, CS)表示为:

$$C_s = \int_{\frac{p_n - p_r}{1 - \delta}}^1 (v - p_n) dv + \int_{\frac{p_r}{\delta}}^{\frac{p_n - p_r}{1 - \delta}} (\delta v - p_r) dv = \frac{(p_n - p_r)^2}{2(1 - \delta)} + \frac{p_r^2}{2\delta} - p_n + \frac{1}{2}。$$

社会福利(social welfare, SW)表示为 $S_w =$

$$\Pi_m + \Pi_r + C_s。$$

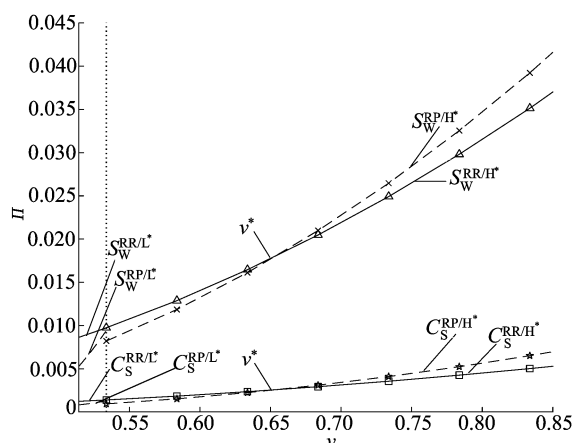


图 4 在 2 种销售渠道下的消费者剩余和社会福利

由图 4 可知,渠道成员同时销售 2 种产品的情形下,从消费者剩余的角度考虑:当再制造节约成本相对较低时,倾向于 RR 模式;当再制造节约成本相对较高时,更倾向于 RP 模式。从社会福利的角度考虑,与上述情况相同。具体地说,在 $v \in (18/35, v^*)$ 区间内, $C_s^{RR} > C_s^{RP}$ 且 $S_w^{RR} > S_w^{RP}$; 在 $v \in (v^*, 17/20)$ 区间内, $C_s^{RR} < C_s^{RP}$ 且 $S_w^{RR} < S_w^{RP}$ 。

同时观察到,再制造节约成本的阈值 v^* 在图 3 和图 4 的情形下相等。在 2 种最优决策区域内,消费者剩余和社会福利都随着再制造节约成本的增加而增加。变化趋势与图 3 中供应链系统总利润相似。

4 结 论

再制造产品和新产品销售渠道的决策关系到产品价值的实现和供应链系统效率的优化。随着平台零售商提供在线平台模式的出现,对比传统线上零售,本文构建了 RR 模式和 RP 模式 2 种销售渠道模型。将再制造产品销售与新兴平台零售商模式相结合,研究再制造节约成本如何影响渠道成员对销售新产品和再制品的渠道选择,以及均衡决策对再制品最优需求量、产品最优价格、渠道成员经济效益、消费者剩余和社会福利的影响问题。

通过求解和比较分析不同模型的均衡解,采用数值仿真得到以下管理启示。在考虑平台零售商的再制造销售渠道决策中,从经济效益的视角:制造商一直倾向于新产品和再制造产品均由平台零售商销售;而平台零售商的决策依赖于再制造

节约成本,当再制造节约成本较小时,平台零售商倾向于同时销售新产品和再制造产品,否则倾向于仅销售新产品,并同时为制造商提供平台由其直接销售再制造产品;供应链系统的渠道决策偏好与平台零售商相似。此外,从消费者剩余和社会福利的视角:发现渠道选择偏好始终与供应链系统一致,其中区分 2 种渠道偏好的再制造节约成本的阈值相等。

本文考虑了由单一制造商和单一平台零售商组成的供应链系统,后期可以将这 2 个模型拓展到制造商与多个零售商互动的情况,同时可以引入基于环境效益视角的对比分析。

[参 考 文 献]

- [1] LI K, LIU J, FU H, et al. An integrated system with multiple product lifecycles for remanufacturing (IS-MPLR): new opportunities and challenges [J]. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 2021, 34(1): 20-40.
- [2] TOFFEL M W. Strategic management of product recovery [J]. *California Management Review*, 2004, 46(2): 120-141.
- [3] YAN W, XIONG Y, XIONG Z, et al. Bricks vs. clicks: which is better for marketing remanufactured products? [J]. *European Journal of Operational Research*, 2015, 242(2): 434-444.
- [4] 邹宗保, 王建军, 邓贵仕. 再制造产品销售渠道决策分析 [J]. *运筹与管理*, 2017, 26(6): 1-9.
- [5] GAN S S, PUJAWAN I N, WIDODO B. Pricing decision for new and remanufactured product in a closed-loop supply chain with separate sales-channel [J]. *International Journal of Production Economics*, 2017, 190: 120-132.
- [6] YANG L, WANG G, CHAI Y. Manufacturer's channel selection considering carbon emission reduction and remanufacturing [J]. *Journal of Systems Science and Systems Engineering*, 2018, 27(4): 497-518.
- [7] HE P, HE Y, XU H. Channel structure and pricing in a dual-channel closed-loop supply chain with government subsidy [J]. *International Journal of Production Economics*, 2019, 213: 108-123.
- [8] TIAN L, VAKHARIA A J, TAN Y, et al. Marketplace, reseller, or hybrid: strategic analysis of an emerging e-commerce model [J]. *Production and Operations Management*, 2018, 27(8): 1595-1610.
- [9] TAN Y, CARRILLO J E. Strategic analysis of the agency model for digital goods [J]. *Production and Operations Management*, 2017, 26(4): 724-741.
- [10] 赵菊, 刘龙, 王艳, 等. 基于电商平台的供应商竞争和模式选择研究 [J]. *系统工程理论与实践*, 2019, 39(8): 2058-2069.
- [11] SHEN Y, WILLEMS S P, DAI Y. Channel selection and contracting in the presence of a retail platform [J]. *Production and Operations Management*, 2019, 28(5): 1173-1185.
- [12] 魏杰, 常美静. 基于电商平台的定价顺序和销售模式选择 [J]. *系统工程*, 2021, 39(1): 94-100.
- [13] JIA D, LI S. Optimal decisions and distribution channel choice of closed-loop supply chain when e-retailer offers online marketplace [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 265: 121767.
- [14] XIONG Y, ZHAO Q, ZHOU Y. Manufacturer-remanufacturing vs supplier-remanufacturing in a closed-loop supply chain [J]. *International Journal of Production Economics*, 2016, 176(1): 21-28.
- [15] LI K, ZHOU T, LIU B. The comparison between selling and leasing for new and remanufactured products with quality level in the electric vehicle industry [J]. *Journal of Industrial and Management Optimization*, 2021, 17(3): 1505-1529.
- [16] WU X, ZOU Z. Buyer-specific versus uniform pricing in a closed-loop supply chain with third-party remanufacturing [J]. *European Journal of Operational Research*, 2018, 273(2): 548-560.
- [17] QIAN Z, CHAI J, LI H, et al. Implications of product upgrading confronting supplier remanufacturing [J]. *International Journal of Production Research*, 2020, 58(19): 5870-5892.

(责任编辑 张 镗)