

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2023.04.020

考虑再制造成本差异和信息不对称性的生产决策

李思源¹, 李凯^{1,2}, 刘静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:文章以传感器嵌入产品为再制造对象, 针对原始设备制造商和再制造商组成的供应链, 考虑双方再制造成本差异性, 构建了两阶段产量竞争模型。通过 KKT 条件(Karush-Kuhn-Tucker conditions)的方法得到不同条件下供应链中各成员的最优产量决策, 并且探究再制造成本信息不对称性对决策结果的影响。研究表明: 当原始设备制造商的再制造成本低于再制造商时, 若原始设备制造商共享信息, 则较大的市场规模对再制造商是有利的; 当原始设备制造商的再制造成本高于再制造商时, 原始设备制造商通过生产传感器嵌入产品带来的信息优势能够占据更多的再制造市场份额, 再制造商通过提高对成本信息的预测精度能够提高自身的再制造产量。

关键词:闭环供应链; 再制造成本差异; 信息不对称; 产量竞争

中图分类号: F274

文献标志码: A

文章编号: 1003-5060(2023)04-0560-08

Production decision considering remanufacturing cost difference and information asymmetry

LI Siyuan¹, LI Kai^{1,2}, LIU Jing¹

(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: Taking sensor-embedded products (SEPs) as the objects of remanufacturing, a two-period production competition model is constructed considering the differences in remanufacturing costs between the two parties in a closed-loop supply chain composed of an original equipment manufacturer (OEM) and an independent remanufacturer (IR). The optimal decisions of supply chain members under different conditions are obtained by the Karush-Kuhn-Tucker (KKT) conditions, and the influence of the asymmetry of remanufacturing cost information on optimal decisions is explored. The results reveal that when the remanufacturing cost of the OEM is lower than that of the IR, larger market size is more beneficial to the IR if the OEM shares cost information; when the remanufacturing cost of the OEM is higher than that of the IR, the information advantage brought by the production of SEPs can help the OEM occupy more remanufacturing market share, and the IR should improve the prediction accuracy of cost information in order to increase remanufacturing production.

Key words: closed-loop supply chain; remanufacturing cost difference; information asymmetry; production competition

绿色经济在全球范围内的不断发展对生产制造的可持续性和产品的环境性能提出了更高的要求。

再制造是一种新型的绿色制造模式, 是制造业产业链的延伸, 符合我国坚持绿色发展的战略

收稿日期: 2021-03-11; 修回日期: 2021-04-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(71871076; 72271070); 安徽省自然科学基金杰青资助项目(2208085J07)

作者简介: 李思源(1997—), 女, 安徽阜阳人, 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。

要求^[1],具有重要的研究意义。

旧产品的回收和再制造形成了一条闭环供应链。在原始设备制造商和再制造商组成的竞争性闭环供应链中,原始设备制造商生产的新产品及再制造产品与再制造商生产的再制造产品形成了双重竞争,这一直是再制造领域的研究热点。文献[2]在不同的竞争模式下探讨了原始设备制造商和再制造商的最优博弈策略,得到了再制造商从事回收再制造活动的临界条件;文献[3]同时考虑了原始设备制造商和再制造商之间产品的销售竞争及旧产品的回收竞争,认为原始设备制造商不具备成本优势时,需要减少新产品的产量来保护自己的市场份额;文献[4]考虑了2个再制造商在旧产品回收和再制造产品销售之间的竞争,认为对于同时博弈的2个再制造商而言,市场优势比回收优势更加有利;文献[5-6]构建了原始设备制造商和再制造商组成的两阶段模型,分析了原始设备制造商的再制造策略对再制造商的影响以及再制造节约成本对双方生产规模的影响。

上述文献研究了再制造供应链中各成员间的竞争,但是没有考虑到再制造过程中的不对称性问题。由于供应链各成员的地位或技术水平不同,在旧产品的回收再制造过程中往往会产生信息的不对称性。文献[7]认为在原始设备制造商进行回收再制造的供应链中,回收活动是其私有信息,研究了回收成本不对称时制造商和零售商激励合同的设计;文献[8]假定零售商可能偏好自利型也可能偏好利他型,原始设备制造商只能对零售商的偏好类型进行预测;文献[9]假定零售商是供应链中的领导者,在再制造成本是原始设备制造商的私有信息的情形下,研究了制造商选择共享或不共享信息时,供应链成员的最优决策和利润变化;文献[10]在原始设备制造商只进行回收再制造,零售商销售产品且拥有产品需求信息的背景下,探究旧产品的回收效率对信息共享的影响;文献[11]假定新产品成本和再制造产品成本是上游原始设备制造商的私有信息,然后得到了信息对称和不对称时供应链中各成员的最优决策;文献[12]在回收成本是下游零售商私有信息的情况下,研究了信息对称和不对称时的最优合同机制,并分析了信息对于供应链中各成员的影响;文献[13]研究了供应商进行再制造和原始设备制造商进行再制造的2种模式,其中需求信息是零售商的私人信息,得到了信息共享对供应商和原始设备制造商有利,但对零售商不利的结论;

文献[14]研究了原始设备制造商和再制造商组成的供应链,再制造成本是再制造商的私人信息,通过利润最大化模型得到了再制造商进行信息共享的条件。其中,文献[7-13]考虑的是供应链中纵向的信息不对称性,仅有文献[14]研究了原始设备制造商与再制造商之间横向的信息不对称性,从文献[7-14]可以看出,闭环供应链中的信息不对称性多分为横向和纵向2种,但是现有文献对横向的信息不对称性研究较少。

随着新一代信息技术在制造业中的广泛渗透,许多原始设备制造商的产品在制造过程中嵌入了传感器、电子标签等,为获取产品的生命周期信息提供了物质基础。这些新兴的智能技术也逐渐应用于回收再制造过程中^[15],从而在原始设备制造商和再制造商之间产生了更多横向的信息不对称性。此外,文献[2-6]研究闭环供应链中的再制造竞争问题,文献[7-14]研究再制造过程中的信息不对称性问题,这些研究均未考虑不同再制造主体间的再制造成本的差异性。实际上,由于再制造水平和回收旧产品质量的差异,不同再制造主体的再制造成本也不尽相同^[16-17]。

本文以传感器嵌入产品(sensor-embedded products,SEPs)^[18]为再制造对象,构建了原始设备制造商和再制造商组成的供应链,基于双方不同的再制造成本探究了信息不对称性对供应链中各成员生产决策和市场结构的影响。信息不对称性体现在原始设备制造商和再制造商之间横向的再制造成本信息的不对称,即原始设备制造商能够通过传感器获得产品的全生命周期信息,包括产品的实时质量状态,从而能够准确判断每个产品在生命周期末进行回收再制造时的再制造成本,而再制造商只能在回收后通过对旧产品的质量评估确定其再制造成本。因此,原始设备制造商在供应链中具备信息优势,能同时掌握双方的再制造成本,而再制造商对原始设备制造商的再制造成本只能进行一定的预测。

1 问题描述

在再制造成本差异化的基础上,以传感器嵌入产品为再制造对象,针对原始设备制造商和再制造商组成的供应链,建立了两阶段竞争模型;第1阶段原始设备制造商生产传感器嵌入产品新品(简称新产品);第2阶段原始设备制造商和再制造商回收旧的传感器嵌入产品(简称旧产品)进行再制造。原始设备制造商决策新产品及其再制

造产品的产量,同时再制造商决定其再制造产品的产量。当原始设备制造商与再制造商共享成本信息时,建立信息对称时的利润最大化模型;当原始设备制造商的再制造成本是其私有信息时,建立信息不对称时的利润最大化模型,此时原始设备制造商同时掌握双方的再制造成本,而再制造商只能确定自己的再制造成本。

1.1 符号及含义

设 p_n, q_n 分别为新产品的价格和需求; p_{ro}, q_{ro} 分别为原始设备制造商生产的再制造产品的价格和需求; p_{ri}, q_{ri} 分别为制造商生产的再制造产品的价格和需求; Q 为市场潜在规模; θ 为消费者对新产品的支付意愿; δ 为消费者对再制造产品的偏好; C_n 为新产品的生产成本; j, k 为成本或产量的水平高低, $j, k \in \{H, L\}$ 且 $j \neq k$; C_{ro}, C_{ri} 分别为原始设备制造商和再制造商的再制造成本; α 为信息不对称时,再制造商对原始设备制造商再制造成本的预测精度; λ 为回收率; Π_{OEM}, Π_{IR} 分别为原始设备制造商和再制造商的利润。

1.2 基本假设

(1) 原始设备制造商与再制造商拥有不同的再制造技术,因此双方的再制造成本不同,原始设备制造商的再制造成本有如下 2 种可能: $C_{ro} = C_{ri}^H > C_{ri}, C_{ro} = C_{ri}^L < C_{ri}$ 。

(2) 每个产品只可以使用一个周期,最多只参与一次再制造。

(3) $\lambda q_n \geq q_{ro} + q_{ri}$, 为了简化模型,参考文献[14],令 $\lambda = 1$,即旧产品完全被回收。 $q_n = q_{ro} + q_{ri}$,表示回收的旧产品全部进行再制造。

(4) 原始设备制造商和再制造商都能确定自身的再制造成本,原始设备制造商通过传感器收集的信息能够掌握再制造商的再制造成本。在信息不对称条件下,再制造商只能预测原始设备制造商的再制造成本。当 $C_{ro} = C_{ri}^j$ 时,再制造商对原始设备制造商的再制造成本和产量预测情况为: $P(C_{ro} = C_{ri}^j) = \alpha, P(C_{ro} = C_{ri}^k) = 1 - \alpha, P(q_n = q_{n,j}) = \alpha, P(q_n = q_{n,k}) = 1 - \alpha$ 。

(5) 参考文献[5-6],消费者对原始设备制造商和再制造商生产的再制造产品无偏好差异,即两者为完全替代产品且价格相同;消费者对新产品和再制造产品的支付意愿分别为 θ 与 $\delta\theta$, θ 服从 $[0, Q]$ 的均匀分布。根据消费者效用得到逆需求函数为:

$$p_n = Q - q_n - \delta(q_{ro} + q_{ri}),$$

$$p_r = \delta(Q - q_n - q_{ro} - q_{ri}).$$

2 信息对称时的竞争模型

若原始设备制造商选择和再制造商共享再制造成本信息,则双方的利润最大化模型为:

$$\begin{aligned} \Pi_{OEM} &= [Q - q_n - \delta(q_{ro} + q_{ri}) - C_n]q_n + \\ &\quad [\delta(Q - q_n - q_{ro} - q_{ri}) - C_{ro}]q_{ro}, \\ \Pi_{IR} &= [\delta(Q - q_n - q_{ro} - q_{ri}) - C_{ri}]q_{ri}; \\ \text{s. t. } & q_n \geq q_{ro} + q_{ri}, \quad q_{ro} \geq 0, \quad q_{ri} \geq 0. \end{aligned}$$

原始设备制造商和再制造商同时进行决策,原始设备制造商决策新产品及其再制造产品的产量,再制造商决策其再制造产品的产量。通过 KKT 条件(Karush-Kuhn-Tucker conditions)求解双方最优产量,得到定理 1~定理 3。

定理 1 当 $C_{ro} = C_{ri}^H > C_{ri}$ 且 $\delta Q > C_{ri}$, 有如下 2 种情况:

$$(1) \frac{2C_{ri} - \delta Q}{\delta} < C_n < \frac{\delta Q(1 - \delta) + (2 + \delta)C_{ri}}{3\delta}$$

时,原始设备制造商和再制造商的最优决策为 $q_n^{1-1*}, q_{ro}^{1-1*}, q_{ri}^{1-1*}$ 。回收的旧产品不能完全进行再制造,再制造商垄断再制造市场。

$$(2) C_n > \frac{\delta Q(1 - \delta) + (2 + \delta)C_{ri}}{3\delta}$$

时,原始设备制造商和再制造商的最优决策为 $q_n^{1-2*}, q_{ro}^{1-2*}, q_{ri}^{1-2*}$ 。回收的旧产品全部进行再制造,再制造商垄断再制造市场。

$C_{ro} > C_{ri}$ 时的市场结构如图 1 所示,令 $Q = 1000, C_{ro} = C_{ri}^H = 350, \delta = 0.7$, 得到定理 1 中的 2 种情况分别对应图 1 中的 2 个区域。每种情况下原始设备制造商和再制造商的最优决策见表 1 所列。

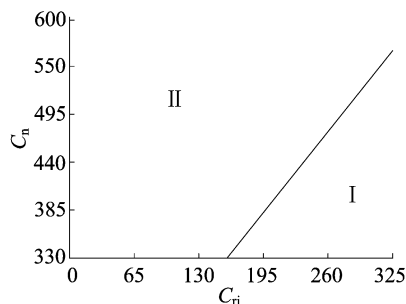


图 1 $C_{ro} > C_{ri}$ 时的市场结构

推论 1 当 $C_{ro} > C_{ri}$, 原始设备制造商的再制造产量为 0。这说明在信息对称的条件下,当原始设备制造商的再制造成本高于再制造商时,再制造商凭借成本优势垄断再制造市场。

表 1 定理 1 中的供应链成员最优产量决策

决策结果	$m=1$	$m=2$
q_n^{1-m*}	$\frac{(2-\delta)Q-2C_n+C_{ri}}{4-\delta}$	$\frac{\delta Q-C_{ri}}{3\delta}$
q_{ro}^{1-m*}	0	0
q_{ri}^{1-m*}	$\frac{\delta Q+\delta C_n-2C_{ri}}{\delta(4-\delta)}$	$\frac{\delta Q-C_{ri}}{3\delta}$

定理 2 当 $C_{ro}=C_{ri}^L < C_{ri}$ 且 $C_{ri} < \delta Q < 2C_{ri} - C_{ri}^L$, 有如下 4 种情况:

(1) $\frac{C_{ri}^L}{\delta} < C_n < \frac{(1-\delta)\delta Q+(1+\delta)C_{ri}^L}{2\delta}$ 时, 原始设备制造商和再制造商的最优决策为 q_n^{2-1*} 、 q_{ro}^{2-1*} 、 q_{ri}^{2-1*} 。回收的旧产品不能完全进行再制造, 原始设备制造商垄断市场。

(2) $[(1-\delta)\delta Q+(1+\delta)C_{ri}^L]/(2\delta) < C_n < [(1+3\delta)C_{ri}-\delta C_{ri}^L-2\delta^2Q]/\delta$ 时, 原始设备制造商和再制造商的最优决策为 q_n^{2-2*} 、 q_{ro}^{2-2*} 、 q_{ri}^{2-2*} 。回收的旧产品不能完全进行再制造, 原始设备制造商垄断市场。

(3) $[(1+3\delta)C_{ri}-\delta C_{ri}^L-2\delta^2Q]/\delta < C_n < [(1-\delta)\delta Q+2(1+2\delta)C_{ri}-(3\delta)C_{ri}^L]/(3\delta)$ 时, 原始设备制造商和再制造商的最优决策为 q_n^{2-3*} 、 q_{ro}^{2-3*} 、 q_{ri}^{2-3*} 。回收的旧产品全部进行再制造, 原

始设备制造商的新产品、再制造产品和再制造商的再制造产品形成双重竞争。

$$(4) C_n > \frac{(1-\delta)\delta Q+2(1+2\delta)C_{ri}-3\delta C_{ri}^L}{3\delta} \text{ 时,}$$

原始设备制造商和再制造商的最优决策为 q_n^{2-4*} 、 q_{ro}^{2-4*} 、 q_{ri}^{2-4*} 。回收的旧产品全部进行再制造, 再制造商垄断再制造市场。

定理 2 说明了当 $C_{ro}=C_{ri}^L < C_{ri}$ 且市场规模较小时, 原始设备制造商和再制造商的最优产量决策。 $C_{ro} < C_{ri}$ 且市场规模较小时的市场结构如图 2 所示, 令 $Q=1\ 000$, $C_{ro}=C_{ri}^L=300$, $\delta=0.7$ (图 3 同), 得到定理 2 中的 4 种情况分别对应图 2 的 4 个区域。

每种情况下原始设备制造商和再制造商的最优决策见表 2 所列。

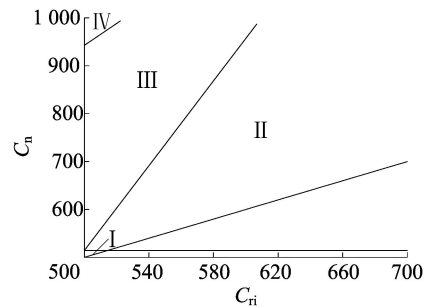


图 2 $C_{ro} < C_{ri}$ 且市场规模较小时的市场结构

表 2 定理 2 中的供应链成员最优产量决策

决策结果	$m=1$	$m=2$	$m=3$	$m=4$
q_n^{2-m*}	$\frac{(1-\delta)Q-C_n+C_{ri}^L}{2(1-\delta)}$	$\frac{(1+\delta)Q-C_n-C_{ri}^L}{2(1+3\delta)}$	$\frac{(1+3\delta)Q-C_{ri}^L-C_n-2C_{ri}}{2(1+5\delta)}$	$\frac{\delta Q-C_{ri}}{3\delta}$
q_{ro}^{2-m*}	$\frac{\delta C_n-C_{ri}^L}{2\delta(1-\delta)}$	$\frac{(1+\delta)Q-C_n-C_{ri}^L}{2(1+3\delta)}$	$\frac{(1-\delta)\delta Q-3\delta C_{ri}^L+2(1+2\delta)C_{ri}-3\delta C_n}{2\delta(1+5\delta)}$	0
q_{ri}^{2-m*}	0	0	$\frac{2\delta^2Q+\delta C_{ri}^L-(1+3\delta)C_{ri}+\delta C_n}{\delta(1+5\delta)}$	$\frac{\delta Q-C_{ri}}{3\delta}$

推论 2 当 $C_{ro} < C_{ri}$ 且市场规模较小时, 新产品成本较高会使得原始设备制造商的再制造产量为 0。只有回收的旧产品全部进行再制造, 再制造商的再制造产量才不为 0, 这说明当信息对称时, 再制造商若想在高再制造成本和低市场规模的条件下占有再制造市场份额, 必须提高再制造率, 使得回收的旧产品全部进行再制造。

定理 3 当 $C_{ro}=C_{ri}^L < C_{ri}$ 且 $\delta Q > 2C_{ri} - C_{ri}^L$, 有如下 4 种情况:

(1) $(2C_{ri}-\delta Q)/\delta < C_n < [(1-\delta)\delta Q+(4-$

$\delta)C_{ri}^L-2(1-\delta)C_{ri}]/(3\delta)$ 时, 原始设备制造商和再制造商的最优决策为 q_n^{3-1*} 、 q_{ro}^{3-1*} 、 q_{ri}^{3-1*} 。回收的旧产品不能完全进行再制造, 再制造商垄断再制造市场。

(2) $\frac{(1-\delta)\delta Q+(4-\delta)C_{ri}^L-2(1-\delta)C_{ri}}{3\delta} < C_n < \frac{(1-\delta)\delta Q+(1+2\delta)C_{ri}^L+(1-\delta)C_{ri}}{3\delta}$ 时, 原始

设备制造商和再制造商的最优决策为 q_n^{3-2*} 、 q_{ro}^{3-2*} 、 q_{ri}^{3-2*} 。回收的旧产品不能完全进行再制

造,原始设备制造商的新产品、再制造产品和再制造商的再制造产品形成双重竞争。

$$(3) \frac{(1-\delta)\delta Q+(1+2\delta)C_{ri}^L+(1-\delta)C_{ri}}{3\delta} < C_n < \frac{(1-\delta)\delta Q+2(1+2\delta)C_{ri}-3\delta C_{ri}^L}{3\delta}$$

时,原始设备制造商和再制造商的最优决策为 $q_n^{3-3^*}$ 、 $q_{ro}^{3-3^*}$ 、 $q_{ri}^{3-3^*}$ 。回收的旧产品全部进行再制造,原始设备制造商的新产品、再制造产品和再制造商的再制造产品形成双重竞争。

$$(4) C_n > \frac{(1-\delta)\delta Q+2(1+2\delta)C_{ri}-3\delta C_{ri}^L}{3\delta}$$

时,原始设备制造商和再制造商的最优决策为 $q_n^{3-4^*}$ 、 $q_{ro}^{3-4^*}$ 、 $q_{ri}^{3-4^*}$ 。回收的旧产品全部进行再制造,再制造商垄断再制造市场。

定理 3 说明了当 $C_{ro}=C_{ri}^L < C_{ri}$ 且市场规模较大时,原始设备制造商和再制造商的最优产量决策。 $C_{ro} < C_{ri}$ 且市场规模较大时的市场结构如图 3 所示,定理 3 中的 4 种情况分别对应图 3 的 4 个区域。每种情况下原始设备制造商和再制造商的最优决策见表 3 所列。

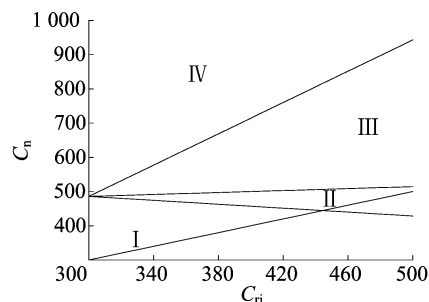


图 3 $C_{ro} < C_{ri}$ 且市场规模较大时的市场结构

表 3 定理 3 中的供应链成员最优产量决策

决策结果	$m=1$	$m=2$	$m=3$	$m=4$
$q_n^{3-m^*}$	$\frac{(2-\delta)Q-2C_n+C_{ri}}{4-\delta}$	$\frac{(1-\delta)Q-C_n+C_{ri}^L}{2(1-\delta)}$	$\frac{(1+3\delta)Q-C_{ri}^L-C_n-2C_{ri}}{2(1+5\delta)}$	$\frac{\delta Q-C_{ri}}{3\delta}$
$q_{ro}^{3-m^*}$	0	$\frac{-(1-\delta)\delta Q-(4-\delta)C_{ri}^L+3\delta C_n+2(1-\delta)C_{ri}}{6\delta(1-\delta)}$	$\frac{(1-\delta)\delta Q-3\delta C_{ri}^L+2(1+2\delta)C_{ri}-3\delta C_n}{2\delta(1+5\delta)}$	0
$q_{ri}^{3-m^*}$	$\frac{\delta Q+\delta C_n-2C_{ri}}{\delta(4-\delta)}$	$C_{ro} < C_{ri}$	$\frac{2\delta^2 Q+\delta C_{ri}^L-(1+3\delta)C_n+\delta C_n}{\delta(1+5\delta)}$	$\frac{\delta Q-C_{ri}}{3\delta}$

推论 3 在信息对称的条件下,当 $C_{ro} < C_{ri}$ 且市场规模较大时,再制造商始终占有再制造市场份额,与市场规模较小时相比,其再制造产量有所提高,这说明较大的市场规模对于再制造商是有利的。通过对比区域 I 和区域 II 所对应的市场结构可以发现,当旧产品不能完全进行再制造时,新产品成本降低,原始设备制造商的再制造产量反而下降。通过区域 III 和区域 IV 所对应的市场结构可以发现,当旧产品完全进行再制造时,新产品成本的升高会降低原始设备制造商的再制造产量,甚至导致再制造商垄断再制造市场。

定理 1~定理 3 表明了信息对称时,原始设备制造商和再制造商在不同的再制造成本关系下的市场结构。说明了在竞争环境下,当原始设备制造商的再制造成本高于再制造商时,再制造商能通过较低的再制造成本将原始设备制造商排斥出再制造市场,从而在再制造市场中占有绝对优势。当原始设备制造商的再制造成本低于再制造商时,原始设备制造商的再制造产品产量不总为 0,并有垄断再制造市场的可能。较高的市场规模

对再制造商是有利的,若市场规模较低,制造商需要提高再制造率,使得回收的旧产品全部进行再制造以便占有一定的再制造市场份额。

3 信息不对称时的竞争模型

再制造商的再制造成本为双方的共有信息,原始设备制造商的再制造成本为其私有信息,则双方的利润最大化模型为:

$$\begin{aligned} \Pi_{OEM} &= [Q - q_n - \delta(q_{ro} + q_{ri}) - C_n]q_n + \\ &\quad [\delta(Q - q_n - q_{ro} - q_{ri}) - C_{ri}^L]q_{ro}, \\ \Pi_{IR} &= \alpha[\delta(Q - q_{n,j} - q_{ro,j} - q_{ri}) - C_{ri}]q_{ri} + \\ &\quad (1-\alpha)[\delta(Q - q_{n,k} - q_{ro,k} - q_{ri}) - C_{ri}]q_{ri}; \\ \text{s. t. } &\quad q_n \geq q_{ro} + q_{ri}, \quad q_{ro} \geq 0, \quad q_{ri} \geq 0. \end{aligned}$$

原始设备制造商具有信息优势,能够准确判断再制造商的再制造成本,而再制造商只能预测原始设备制造商的再制造成本和产量,原始设备制造商决策新产品及其再制造产品的产量,再制造商决策其再制造产品的产量。通过 KKT 条件求解双方最优产量,得到定理 4~定理 6。

定理 4 当 $\delta Q > C_{ri}^j$ 且 $C_{ri} < \frac{\delta Q + 3f(\alpha) + 2C_{ri}^j}{6}$,

其中 $f(\alpha) = \alpha C_{ri}^j + (1-\alpha)C_{ri}^k$, 下同, 有如下 2 种情况:

(1) $C_n < \frac{2(2+\delta)C_{ri} - \delta^2 Q - (2+\delta)f(\alpha)}{2\delta}$ 时,

原始设备制造商和再制造商的最优决策为 q_n^{4-1*} 、 q_{ro}^{4-1*} 、 q_{ri}^{4-1*} 。回收的旧产品不能完全进行再制造, 再制造商垄断再制造市场。

(2) $C_n > \frac{2(2+\delta)C_{ri} - \delta^2 Q - (2+\delta)f(\alpha)}{2\delta}$ 时,

原始设备制造商和再制造商的最优决策为 q_n^{4-2*} 、 q_{ro}^{4-2*} 、 q_{ri}^{4-2*} 。回收的旧产品全部进行再制造, 再制造商垄断再制造市场。

定理 4 说明了再制造商的再制造成本处于低水平时, 原始设备制造商和再制造商的最优产量决策。当 $C_{ro} = C_{ri}^H > C_{ri}$ (即 j 为 H) 时, $C_{ro} > C_{ri}$ 且 C_{ri} 处于低水平时的市场结构如图 4 所示。令 $Q = 1\ 000$, $C_{ri}^H = 500$, $\delta = 0.6$, $\alpha = 0.6$, 得到定理 4 中的 2 种情况分别对应图 4 的 2 个区域, 当 $C_{ro} = C_{ri}^L < C_{ri}$ (即 j 为 L) 时, 令 $Q = 1\ 000$, $C_{ri}^L = 150$, $\delta = 0.6$, $\alpha = 0.6$, 定理 4 中的 2 种情况对应的区域与图 4 类似, 这里不再重复列出, 定理 5~定理 6 也是如此。

定理 4 中每种情况下原始设备制造商和再制造商的最优决策见表 4 所列。

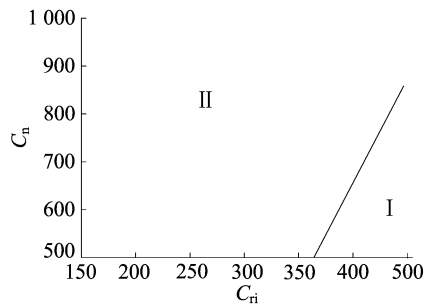


图 4 $C_{ro} > C_{ri}$ 且 C_{ri} 处于低水平时的市场结构

表 4 定理 4 中的供应链成员最优产量决策

决策结果	$m=1$	$m=2$
q_n^{4-m*}	$\frac{(2-\delta)Q + 2C_{ri} - 2C_{ri} - f(\alpha)}{4}$	$\frac{\delta Q + f(\alpha) - 2C_{ri}}{2\delta}$
q_{ro}^{4-m*}	0	0
q_{ri}^{4-m*}	$\frac{\delta Q + f(\alpha) - 2C_{ri}}{2\delta}$	$\frac{\delta Q + f(\alpha) - 2C_{ri}}{2\delta}$

推论 4 在信息不对称的条件下, 当再制造商

的再制造成本低于阈值 $[\delta Q + 3f(\alpha) + 2C_{ri}^j]/6$ 时, 不论新产品的成本大小如何, 再制造商都能凭借低水平的再制造成本垄断再制造市场, 此时, 原始设备制造商只生产新产品。当 $C_{ro} = C_{ri}^H > C_{ri}$, 即原始设备制造商的再制造成本高于再制造商时, 再制造商的再制造产量与预测精度 α 呈正相关。

定理 5 当 $\delta Q > C_{ri}^j$ 且 $\frac{\delta Q + 3f(\alpha) + 2C_{ri}^j}{6} <$

$C_{ri} < \frac{\delta Q + f(\alpha)}{2}$, 有如下 4 种情况:

(1) $C_n < [(1-\delta)\delta Q + 2C_{ri}^j + (1-\delta)f(\alpha) - 2(1-\delta)C_{ri}]/(2\delta)$ 时, 原始设备制造商和再制造商的最优决策为 q_n^{5-1*} 、 q_{ro}^{5-1*} 、 q_{ri}^{5-1*} 。回收的旧产品不能完全进行再制造, 再制造商垄断再制造市场。

(2) $[(1-\delta)\delta Q + 2C_{ri}^j + (1-\delta)f(\alpha) - 2(1-\delta)C_{ri}]/(2\delta) < C_n < [(1-\delta)\delta Q + 2(1-\delta)C_{ri} + 2(1+\delta)C_{ri}^j - (1-\delta)f(\alpha)]/(4\delta)$ 时, 原始设备制造商和再制造商的最优决策为 q_n^{5-2*} 、 q_{ro}^{5-2*} 、 q_{ri}^{5-2*} 。回收的旧产品不能完全进行再制造, 原始设备制造商的新产品、再制造产品和再制造商的再制造产品形成双重竞争。

(3) $[(1-\delta)\delta Q + 2(1-\delta)C_{ri} + 2(1+\delta)C_{ri}^j - (1-\delta)f(\alpha)]/(4\delta) < C_n < [2(1+2\delta)C_{ri} - \delta^2 Q - \delta C_{ri}^j - (1+2\delta)f(\alpha)]/\delta$ 时, 原始设备制造商和再制造商的最优决策为 q_n^{5-3*} 、 q_{ro}^{5-3*} 、 q_{ri}^{5-3*} 。回收的旧产品全部进行再制造, 原始设备制造商的新产品、再制造产品和再制造商的再制造产品形成双重竞争。

(4) $C_n > [2(1+2\delta)C_{ri} - \delta^2 Q - \delta C_{ri}^j - (1+2\delta)f(\alpha)]/\delta$ 时, 原始设备制造商和再制造商的最优决策为 q_n^{5-4*} 、 q_{ro}^{5-4*} 、 q_{ri}^{5-4*} 。回收的旧产品全部进行再制造, 再制造商垄断再制造市场。

定理 5 说明了再制造商的再制造成本处于中等水平时, 原始设备制造商和再制造商的最优产量决策。当 $C_{ro} = C_{ri}^H > C_{ri}$ (即 j 为 H) 时, $C_{ro} > C_{ri}$ 且 C_{ri} 处于中等水平时的市场结构如图 5 所示。

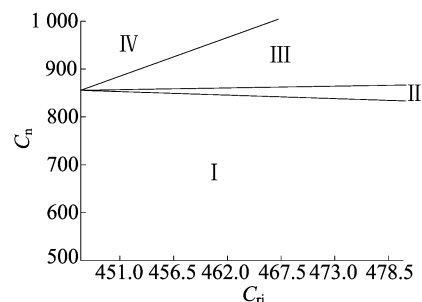


图 5 $C_{ro} > C_{ri}$ 且 C_{ri} 处于中等水平时的市场结构

定理 5 中的 4 种情况分别对应图 5 的 4 个区域。每种情况下进行原始设备制造商和再制造商

的最优决策,定理 5 中的供应链成员最优产量决策见表 5 所列。

表 5 定理 5 中的供应链成员最优产量决策

决策结果	$m=1$	$m=2$	$m=3$	$m=4$
q_n^{5-m*}	$\frac{(2-\delta)Q+2C_{ri}-2C_n-f(\alpha)}{4}$	$\frac{(1-\delta)Q-C_n+C_{ri}^j}{2(1-\delta)}$	$\frac{(1+2\delta)Q-C_n-C_{ri}^j-2C_{ri}+f(\alpha)}{2(1+3\delta)}$	$\frac{\delta Q-2C_{ri}+f(\alpha)}{2\delta}$
q_{ro}^{5-m*}	0	$[2(1-\delta)C_{ri}-(1-\delta)\delta Q+2\delta C_n-2C_{ri}^j-(1-\delta)f(\alpha)]/[4\delta(1-\delta)]$	$[2(1+2\delta)C_{ri}-\delta C_n-\delta C_{ri}^j-\delta^2 Q-(1+2\delta)f(\alpha)]/[2(1+3\delta)]$	0
q_{ri}^{5-m*}	$\frac{\delta Q-2C_{ri}+f(\alpha)}{2\delta}$	$\frac{\delta Q-2C_{ri}+f(\alpha)}{2\delta}$	$\frac{\delta Q-2C_{ri}+f(\alpha)}{2\delta}$	$\frac{\delta Q-2C_{ri}+f(\alpha)}{2\delta}$

推论 5 新产品生产成本较高或较低时,原始设备制造商的再制造产量都为 0,再制造商垄断再制造市场。对比区域 II 和区域 I 可以发现,当再制造商的再制造成本处于中等水平范围内,即 $C_{ri} \in (\frac{\delta Q+3f(\alpha)+2C_{ri}^j}{6}, \frac{\delta Q+f(\alpha)}{2})$ 时,原始设备制造商降低新产品生产成本反而会降低其再制造产量。当原始设备制造商的再制造成本高于再制造商的再制造成本时,与信息对称的条件下相比,信息不对称的条件下,再制造商不能凭借成本优势始终垄断再制造市场,信息不对称性能够帮助原始设备制造商弥补成本劣势从而占据一定的再制造市场份额。当 $C_{ro} = C_{ri}^H > C_{ri}$,即原始设备制造商的再制造成本高于再制造商时,再制造商的再制造产量与预测精度 α 呈正相关。

定理 6 当 $\delta Q > C_{ri}^j$ 且 $C_{ri} > \frac{\delta Q+f(\alpha)}{2}$, 有如下 2 种情况:

(1) $\frac{C_{ri}^j}{\delta} < C_n < \frac{(1-\delta)\delta Q+(1+\delta)C_{ri}^j}{2\delta}$ 时,原始

设备制造商和再制造商的最优决策为 q_n^{6-1*} 、 q_{ro}^{6-1*} 、 q_{ri}^{6-1*} 。回收的旧产品不能完全进行再制造,原始设备制造商垄断再制造市场。

(2) $\frac{(1-\delta)\delta Q+(1+\delta)C_{ri}^j}{2\delta} < C_n < (1+\delta)Q -$

C_{ri}^j 时,原始设备制造商和再制造商的最优决策为 q_n^{6-2*} 、 q_{ro}^{6-2*} 、 q_{ri}^{6-2*} 。回收的旧产品全部进行再制造,原始设备制造商垄断再制造市场。

定理 6 说明再制造商的再制造成本处于高水平时,原始设备制造商和再制造商的最优产量决策。当 $C_{ro} = C_{ri}^H > C_{ri}$ 即 j 为 H 时, $C_{ro} > C_{ri}$ 且 C_{ri} 处于高水平时的市场结构如图 6 所示,定理 6 中的 2 种情况分别对应图 6 的 2 个区域。每种情形下原始设备制造商和再制造商的最优决策见表 6 所列。

推论 6 当再制造商的再制造成本超过阈值 $[\delta Q+f(\alpha)]/2$ 时,不论新产品的生产成本大小如何,再制造商的产量为 0,此时,原始设备商垄断市场。当原始设备制造商的再制造成本高于再制造商的再制造成本时,信息不对称的条件下,原始设备制造商有机会垄断再制造市场,而在信息对称的条件下,原始设备制造商的产量始终为 0,这进一步说明了信息不对称性对于原始设备制造商的再制造生产是有利的。

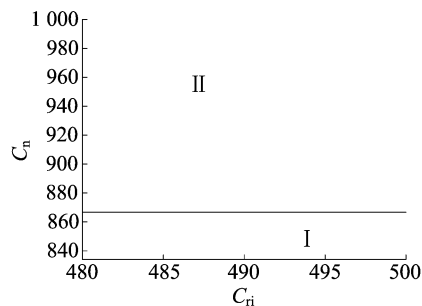


图 6 $C_{ro} > C_{ri}$ 且 C_{ri} 处于高水平时的市场结构

表 6 定理 6 中的供应链成员最优产量决策

决策结果	$m=1$	$m=2$
q_n^{6-m*}	$\frac{(1-\delta)Q-C_n+C_{ri}^j}{2(1-\delta)}$	$\frac{(1+\delta)Q-C_n-C_{ri}^j}{2(1+3\delta)}$
q_{ro}^{6-m*}	$\frac{\delta C_n-C_{ri}^j}{2\delta(1-\delta)}$	$\frac{(1+\delta)Q-C_n-C_{ri}^j}{2(1+3\delta)}$
q_{ri}^{6-m*}	0	0

定理 4~定理 6 分别在再制造商的再制造成本处于低、中、高 3 种水平下,讨论原始设备制造商和再制造商在不同的新产品成本范围内所对应的市场结构。信息不对称条件下,原始设备制造商降低再制造成本有利于形成双重竞争的市场结构。当原始设备制造商的再制造成本高于再制造商的成本时,有以下 3 种情况:① 原始设备制造商的再制造产量不总为 0,并且当再制造商的再

制造成本超过阈值时,原始设备制造商有垄断再制造市场的可能。这说明与信息对称时相比,原始设备制造商的信息优势能够使其占据更多的再制造市场份额。②再制造商通过提高预测精度可以提高再制造产量。③再制造商还需要努力提高再制造水平,降低再制造成本,以免被排斥出市场。

4 结 论

随着新一代信息技术的发展,很多原始设备制造商在生产新产品时嵌入传感器,从而获得产品全生命周期的信息,以便为再制造生产决策提供建议,进一步推动绿色经济的发展。本文以传感器嵌入产品为再制造对象,认为原始设备制造商通过第1阶段生产传感器嵌入产品新品,因而在第2阶段的再制造市场中具备一定的信息优势。在此背景下,建立原始设备制造商和独立再制造商的竞争模型,基于双方不同的再制造成本分析了成本信息的不对称性对双方产量决策和市场结构的影响。主要结论如下:

(1)在信息对称的条件下,当原始设备制造商的再制造成本高于再制造商时,再制造商具备成本优势从而垄断再制造市场;当原始设备制造商的再制造成本低于再制造商且市场规模较低时,原始设备制造商可以通过降低新产品成本垄断再制造市场,而过高的新产品成本有利于再制造商垄断再制造市场;当原始设备制造商的再制造成本低于再制造商且市场规模较大时,再制造商始终在再制造市场占据一席之地,过高或过低的新产品成本都会使再制造商垄断再制造市场。原始设备制造商保持适中的新产品成本有利于形成双重竞争的市场结构。

(2)在信息不对称的条件下,当原始设备制造商的再制造成本高于再制造商时,原始设备制造商能够凭借生产传感器嵌入产品新品带来的信息优势占据一定的再制造市场份额,甚至有机会垄断再制造市场。因此,在没有额外的奖励时,原始设备制造商不会主动共享信息,此时再制造商应提高预测精度来提高自身的再制造产量。

本文重点研究了竞争条件下再制造成本差异性和信息不对称性对供应链成员产量决策的影响,并未考虑信息共享的成本,今后可以结合信息共享成本及供应链成员间的合作机制进行研究。

[参 考 文 献]

[1] 徐滨士,李恩重,郑汉东,等.我国再制造产业及其发展战略

[J].中国工程科学,2017,19(3):61-65.

- [2] 孙浩,叶俊,胡劲松,等.不同决策模式下制造商与再制造商的博弈策略研究[J].中国管理科学,2017,25(1):160-169.
- [3] BULMUS S C, ZHU S X, TEUNTER R. Competition for cores in remanufacturing[J]. European Journal of Operational Research, 2014, 233(1): 105-113.
- [4] KLEBER R, REIMANN M, SOUZA G C, et al. Two-sided competition with vertical differentiation in both acquisition and sales in remanufacturing[J]. European Journal of Operational Research, 2020, 284(2): 572-587.
- [5] 伍颖,熊中楷.制造商与在位再制造商的再制造生产决策研究[J].系统工程学报,2015,30(4):554-565.
- [6] 伍颖,熊中楷.竞争条件下制造商和再制造商的生产决策[J].系统工程理论与实践,2014,34(2):291-303.
- [7] 张盼,熊中楷.制造商回收成本信息不对称下零售商激励合同设计[J].管理工程学报,2019,33(4):144-150.
- [8] 魏光兴,付巧玲,陈曦.考虑偏好异质性及其信息不对称的绿色供应链决策[J].软科学,2020,34(11):123-129,144.
- [9] 刘启明.零售商主导闭环供应链信息共享价值研究[D].合肥:中国科学技术大学,2017.
- [10] ZHANG P, XIONG Z. Information sharing in a closed-loop supply chain with asymmetric demand forecasts[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2017, 2017: 1-12.
- [11] WEI J, GOVINDAN K, LI Y, et al. Pricing and collecting decisions in a closed-loop supply chain with symmetric and asymmetric information[J]. Computers & Operations Research, 2015, 54: 257-265.
- [12] ZHANG P, XIONG Y, XIONG Z, et al. Designing contracts for a closed-loop supply chain under information asymmetry[J]. Operations Research Letters, 2014, 42(2): 150-155.
- [13] HUANG Y, WANG Z. Values of information sharing: a comparison of supplier-remanufacturing and manufacturer-remanufacturing scenarios [J]. Transportation Research Part E, 2017, 106: 20-44.
- [14] HUANG H, MENG Q, XU H, et al. Cost information sharing under competition in remanufacturing[J]. International Journal of Production Research, 2019, 57(21): 6579-6592.
- [15] 蒋琼,王勇,刘名武.新兴智能回收下制造商转移定价决策[J].中国管理科学,2021,29(9):156-167.
- [16] GALBRETH M R, BLACKBURN J D. Optimal acquisition quantities in remanufacturing with condition uncertainty [J]. Production and Operations Management, 2010, 19(1): 61-69.
- [17] 陈伟达,刘碧玉.考虑质量成本的再制造系统批量计划综合优化[J].管理科学学报,2015,18(12):36-46.
- [18] ONDEMIR O, GUPTA S M. A multi-criteria decision making model for advanced repair-to-order and disassembly-to-order system[J]. European Journal of Operational Research, 2014, 233(2): 408-419.

(责任编辑 张 镛)