

产品质量和 WTP 差异下的制造/再制造生产决策

许民利, 梁红燕, 简惠云

(中南大学 商学院, 长沙 410083)

摘要: 在需求与价格、质量相关的假设下, 提出再制造产品的3种生产模式, 给出最优生产决策. 研究表明, 随着再制造产品支付意愿(WTP)的提高, 第2阶段新产品产量都将下降, 再制造产品和第1阶段新产品产量在 Model O 和 Model OI 模式下上升, 在 Model I 模式下不变; 产品质量的上升会使所有产品的产量都下降, 导致原设备生产商(OEM)的收益下降, 而独立的再制造商(IR)的收益在一定范围内上升, 但其获利所需最低 WTP 值也将上升. 数值仿真验证了各参数对生产决策及利润的影响.

关键词: 产品质量; 支付意愿; 再制造; 生产决策

中图分类号: F224; F274

文献标志码: A

Manufacturing/remanufacturing decision based on product quality and WTP differentiation

XU Min-li, LIANG Hong-yan, JIAN Hui-yun

(Business School, Central South University, Changsha 410083, China. Correspondent: XU Min-li, E-mail: xu_minli@163.com)

Abstract: Three kinds of production models of remanufactured products are established based on the price-dependent and quality-dependent demand. The optimal production decisions of the three models are given. The results show that, with the improvement of willing to pay(WTP) for the remanufactured products, the production yield of the new product in second stage of all systems will decrease, and the production yield of the new product in the first stage and remanufactured product in the second stage will increase under Model O and Model OI, and will not change under Model I. With the improvement of quality grade, the production yield of new products and remanufactured products of all systems will decrease. It is also found that with the improvement of product's quality grade, the original equipment manufacturer(OEM) will lose some profit, the independent remanufacturer(IR)'s profit can be improved in some certain, but the required minimum WTP for its profit will rise. The numerical simulation verifies the effects of the parameters on the production decision and profits.

Keywords: product's quality; WTP; remanufacturing; production decision

0 引言

再制造^[1]是指, 通过一定的工艺过程使废旧产品重新达到新产品的状态以便再次销售. 再制造不仅可以节约大量资源, 还可以降低产品成本, 因此, 能很好地支持国家可持续发展战略. 从事再制造生产活动的制造商可以是第3方独立的再制造商(IR), 也可以是原设备生产商(OEM).

已有研究成果表明, 产品质量等级对企业的生产和收益会产生直接影响. Fine^[2]讨论了产品成本节约与产品质量之间的关系; Gal-Or^[3]探讨了产品质量

对产量的影响, 其结果表明降低产品平均质量能够提高产品的总产量; 谢家平等^[4]将产品质量水平作为内生变量, 探讨了新产品与再制造产品的生产决策; 袁开福等^[5]同时考虑产品质量与服务水平, 确定制造与翻新的最优策略; 曹晓刚等^[6]针对新产品和再制造产品之间存在质量与价格竞争时, 采用博弈论的方法构建了决策模型, 分析了再制造系统的均衡决策. 这些研究说明产品质量对新产品和再制造产品的生产都具有重要影响. 与此同时, 消费者对新产品和再制造产品的接受程度存在明显差异, 其支付意愿(WTP)

收稿日期: 2014-12-29; **修回日期:** 2015-04-14.

基金项目: 国家社会科学基金项目(14BGL196); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(2014zzts130); 湖南省自然科学基金项目(2015JJ2177).

作者简介: 许民利(1969—), 男, 教授, 博士生导师, 从事供应链管理研究; 梁红燕(1990—), 女, 硕士生, 从事供应链管理研究.

很大程度上决定了新产品和再制造产品的市场需求. 郭军华等^[7]针对消费者具有 WTP 差异的情况, 研究了制造商是否进入再制造领域, 指出了进行再制造的进入条件. 高阳等^[8]在消费者对新产品和再制造产品存在 WTP 差异的基础上, 建立了闭环供应链决策模型, 发现 shapley 值可以协调供应链利益的分配. 因此, 考虑消费者 WTP 差异对再制造的生产决策具有重要意义. Adem^[9]综合考虑产品质量等级和 WTP 的影响, 运用博弈论探讨了再制造对社会福利以及环境的影响. Atasu 等^[10]描述了 Xerox 和 Kodak 在产品的设计时考虑了再制造, 并且以质量设计作为主要决策. Desai 等^[11]在相互独立产品竞争之间考虑质量设计, 但并未在再制造产品之间考虑质量的影响. Moorthy 等^[12]在双寡头的市场环境下研究了产品产量与价格的竞争. Ferrer 等^[13]研究了不同市场环境下的制造/再制造产品的均衡产量、价格, 但并未考虑 WTP 和产品质量等因素. Johnson 等^[14]研究了 OEM 和 IR 生产新产品及再制造产品的产量与价格之间的规律. 这些研究从多个方面探讨了质量对新产品或再制造产品生产的影响, 给本研究带来了重要启示.

目前, 再制造生产决策已有大量研究成果. Van 等^[15]研究了考虑随机库存的再制造生产系统, 分析了再制造产品的生产计划和库存控制策略. Daniel^[16]对再制造系统的生产和控制进行了实证研究. 娄山佐等^[17]利用更新过程和鞅理论, 在需求及废旧产品回收数量与时间不确定时, 构建了相应决策模型. Wu^[18]对再制造生产系统的产品设计以及价格策略进行了分析. 谢家平等^[19]在新产品与再制造产品之间具有一定替代性的背景下, 分析了再制造产品的生产决策. 伍颖等^[20]针对新产品与再制造产品之间存在竞争的环境, 根据再制造成本的节约对新产品与再制造产品生产规模的影响, 给出了 12 种不同的生产策略. 这些研究没有考虑产品质量与消费者 WTP 差异对再制造生产决策的影响.

经检索, 目前尚未看到基于产品质量差异和消费者 WTP 差异的再制造生产决策方面文献. 为了探讨产品质量和 WTP 对制造/再制造系统生产决策的影响, 以及两因素共同作用时所产生的复杂效果, 本文在前人研究的基础上, 将两因素相结合, 以期研究更多的生产策略, 深化制造/再制造系统生产决策的研究内容. 本文将基于需求依赖于产品价格, 综合考虑消费者 WTP 值和产品质量差异对市场的影响, 探讨制造/再制造系统的生产决策.

1 问题描述与基本假设

1.1 问题描述

本文将讨论 3 种模式下的两阶段生产决策, 以

及各参数对不同模式下生产决策的影响. 对于制造/再制造生产系统, 可以首先考虑是否再制造, 然后考虑由谁再制造, 这样就可以把生产模式分为 3 种. Model O 模式表示两阶段都由 OEM 进行生产的模式, 此时新产品和再制造产品都由 OEM 生产. Model I 和 Model OI 模式则表示 IR 参与再制造时的两种生产方式, 前者表示 IR 单独进行再制造时的生产模式, 后者表示 OEM 和 IR 都进行再制造时的生产模式. 这 3 种生产模式见图 1.

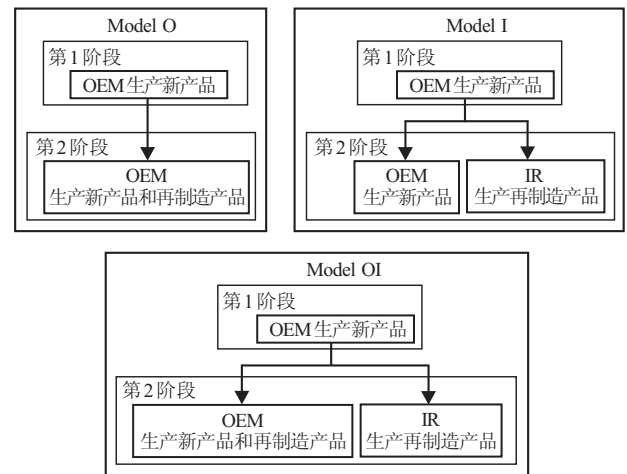


图 1 生产模式示意

1.2 符号说明

P_{1n}^o : 第 1 阶段 OEM 新产品价格;

P_{2n}^o : 第 2 阶段 OEM 新产品价格;

P_{2r}^o : 第 2 阶段 OEM 再制造产品价格;

P_{2r}^I : 第 2 阶段 IR 再制造产品价格;

q_{1n}^o : 第 1 阶段 OEM 新产品产量;

q_{2n}^o : 第 2 阶段 OEM 新产品产量;

q_{2r}^o : 第 2 阶段 OEM 再制造产品产量;

q_{2r}^I : 第 2 阶段 IR 再制造产品产量;

c_n : 新产品单位制造成本;

c_r : 再制造产品单位制造成本;

s : 产品质量等级系数, $s \in [0, 1]$;

δ : 表示消费者对再制造产品的支付意愿, 即 WTP 值;

β : 产品生产成本规模参数;

α : 再制造产品成本优势系数, 随再制造节省成本的增加而减小, $\alpha \in (0, 1]$;

ρ : 产品回收率;

ε : 在 OI 模式下, OEM 在回收产品中所占比例, $\varepsilon \in [0, 1]$, $\varepsilon = 0$ 时, OI 模式相当于 Model I 模式, $\varepsilon = 1$ 时, OI 模式相当于 Model O 模式.

1.3 基本假设

设产品的生产成本与产品的质量等级系数相

关,假定产品质量等级由OEM决定,并且第1阶段和第2阶段新产品的产品质量等级系数是一样的.借鉴文献[10-12]的研究结果,令 $c_n = \beta s^2$, $c_r = \alpha \beta s^2$.

假设产品的回收率为 ρ ,且 $0 \leq \rho \leq 1$,再制造产品产量受上一阶段新产品产量的影响.假设消费者对新产品和再制造产品的认可度存在着差异.产品的市场需求受产品价格的影响,参考 Ferrer 等^[13]的结果,假设第1阶段新产品的需求函数为 $q_{1n} = 1 - p_{1n}$;第2阶段,根据 Johnson 等^[14]的研究结果,并参照 Adem^[9]的研究,新产品和再制造产品的价格满足以下规律: $p_n = s(1 - q_n - \delta q_r)$, $p_r = \delta s(1 - q_n - q_r)$,且 $\delta \in (0, 1]$,表示消费者对于再制造产品的支付意愿不高于新产品.

2 不同生产模式下再制造供应链生产决策

2.1 Model O 模式下的生产决策

在 Model O 模式下,第1阶段 OEM 生产新产品,第2阶段 OEM 同时生产新产品和再制造产品,通过最大化 OEM 的利润函数以确定其两阶段新产品和再制造产品的最优产量,其生产决策满足如下定理.

定理 1 在 Model O 模式下, OEM 在两个阶段对于新产品和再制造产品的最优生产决策满足

$$q_{1n}^o = \frac{1 - \beta s^2(1 + \alpha \rho - \delta \rho)}{2(1 + \delta s \rho^2(1 - \delta))},$$

$$q_{2n}^o = \frac{1 - \beta s}{2} - \delta \rho \frac{1 - \beta s^2(1 + \alpha \rho - \delta \rho)}{2(1 + \delta \rho^2 s(1 - \delta))},$$

$$q_{2r}^o = \frac{\rho - \beta s^2 \rho(1 + \alpha \rho - \delta \rho)}{2(1 + \delta \rho^2 s(1 - \delta))}.$$

证明 OEM 的决策问题可以表示为

$$\begin{aligned} \max \pi_o &= (p_{1n}^o - \beta s^2)q_{1n}^o + \\ &\quad (p_{2n}^o - \beta s^2)q_{2n}^o + \\ &\quad (p_{2r}^o - \alpha \beta s^2)q_{2r}^o; \\ \text{s.t. } q_{2r}^o &\leq \rho q_{1n}^o, \\ p_{1n}^o &= 1 - q_{1n}^o, \\ p_{2n}^o &= s(1 - q_{2n}^o - \delta q_{2r}^o), \\ p_{2r}^o &= \delta s(1 - q_{2n}^o - q_{2r}^o). \end{aligned} \quad (1)$$

式(1)的目标函数表示 OEM 的利润函数,由3部分构成:第1阶段新产品利润,第2阶段新产品以及再制造产品利润.第1个约束条件表示第2阶段再制造产品产量不高于第1阶段新产品产量,其余约束条件分别表示 OEM 第1阶段新产品、第2阶段新产品和再制造产品价格与产量之间的关系.

式(1)的海赛矩阵为

$$|H| = \begin{vmatrix} -2 & 0 & 0 \\ 0 & -2s & -2\delta s \\ 0 & -2\delta s & -2\delta s \end{vmatrix} > 0. \quad (2)$$

一阶顺序主子式 $|H_1| = -2 < 0$,二阶顺序主子式 $|H_2| = 4s > 0$,三阶顺序主子式 $|H_3| = -2\delta(4s^2 - 4\delta s^2) < 0$,因此其海赛矩阵负定,利润函数是凹的,约束条件是关于 q_{1n}^o 、 q_{2n}^o 、 q_{2r}^o 的线性函数,此问题有最优解.构造拉格朗日函数

$$\begin{aligned} L_{\pi_o} &= \\ &\quad (1 - q_{1n}^o - \beta s^2)q_{1n}^o + \\ &\quad (s(1 - q_{2n}^o - \delta q_{2r}^o) - \beta s^2)q_{2n}^o + \\ &\quad (\delta s(1 - q_{2n}^o - q_{2r}^o) - \alpha \beta s^2)q_{2r}^o + \lambda(\rho q_{1n}^o - q_{2r}^o). \end{aligned} \quad (3)$$

分别求 L_{π_o} 关于 q_{1n}^o 、 q_{2n}^o 、 q_{2r}^o 、 λ 的一阶偏导,有

$$\begin{aligned} \frac{\partial L_{\pi_o}}{\partial q_{1n}^o} &= 1 - \beta s^2 - 2q_{1n}^o + \lambda \rho, \\ \frac{\partial L_{\pi_o}}{\partial q_{2n}^o} &= s - \beta s^2 - 2s q_{2n}^o - 2\delta s q_{2r}^o, \\ \frac{\partial L_{\pi_o}}{\partial q_{2r}^o} &= \delta s - \alpha \beta s^2 - 2\delta s q_{2n}^o - 2\delta s q_{2r}^o - \lambda, \\ \frac{\partial L_{\pi_o}}{\partial \lambda} &= \rho q_{1n}^o - q_{2r}^o. \end{aligned}$$

根据库恩-塔克优化条件求解该方程组即可得到定理 1. □

2.2 Model I 模式下的生产决策

在 Model I 模式下, OEM 在两个阶段都生产新产品; IR 在第2阶段生产再制造产品,其产量受到 OEM 第1阶段新产品产量的限制,同时, OEM 在第2阶段新产品的产量将受到 IR 再制造产品的影响.假设 OEM 处于主导地位,先确定其新产品产量,随后再确定 IR 的再制造产品产量.

定理 2 在 Model I 模式下, OEM 在两个阶段对新产品的最优生产决策满足

$$\begin{aligned} q_{1n}^o &= \frac{1}{2}(1 - \beta s^2), \\ q_{2n}^o &= \frac{1}{4}(2 - 2\beta s - \delta \rho(1 - \beta s^2)). \end{aligned}$$

IR 在第2阶段对再制造产品的最优产量满足

$$q_{2r}^I = \frac{1}{2}\rho(1 - \beta s^2).$$

证明 OEM 的决策问题可表示为

$$\begin{aligned} \max \pi_o &= (p_{1n}^o - \beta s^2)q_{1n}^o + (p_{2n}^o - \beta s^2)q_{2n}^o; \\ &\quad q_{1n}^o, q_{2n}^o \\ \text{s.t. } p_{1n}^o &= 1 - q_{1n}^o, \\ p_{2n}^o &= s(1 - q_{2n}^o - \delta q_{2r}^I). \end{aligned} \quad (4)$$

式(4)中目标函数表示 Model I 模式下 OEM 的利润函数,由第1阶段新产品利润和第2阶段新产品的利润组成.两个约束条件分别表示 OEM 第1阶段和第2阶段新产品价格与产量之间的关系.

IR 的决策问题可表示为

$$\begin{aligned} \max_{q_{2r}^I} \pi_I &= (p_{2r}^I - \alpha\beta s^2)q_{2r}^I; \\ \text{s.t. } q_{2r}^O &\leq \rho q_{1n}^O, \\ p_{2r}^I &= \delta s(1 - q_{2n}^O - q_{2r}^I). \end{aligned} \quad (5)$$

式(5)中目标函数表示 Model I 模式下 IR 的利润函数, 第 1 个约束条件表示 IR 再制造产品产量不高于第 1 阶段 OEM 生产的新产品产量, 第 2 个约束条件表示 IR 再制造产品价格与产量之间的关系。

参照文献[7]和[15], 首先求出 OEM 的最优决策; 然后构造 IR 决策目标函数的拉格朗日函数并求其库恩塔克条件; 最后, 联立方程组求解便可得到定理 2. 具体过程略. \square

2.3 Model OI 模式下的生产决策

在 Model OI 模式下, OEM 在第 1 阶段生产新产品, 第 2 阶段同时生产新产品和再制造产品; IR 在第 2 阶段进入市场, 生产再制造产品. OEM 与 IR 在第 2 阶段存在着竞争.

定理 3 在 Model OI 模式下, OEM 在两个阶段对新产品和再制造产品的最优生产决策满足

$$\begin{aligned} q_{1n}^O &= \frac{1 - \beta s^2(1 + \alpha\rho\varepsilon - \delta\rho\varepsilon)}{2 + \rho^2\varepsilon\delta s(1 + \varepsilon - \delta)}, \\ q_{2n}^O &= \frac{1}{2} \left[1 - \beta s - \delta\rho(1 + \varepsilon) \frac{1 - \beta s^2(1 + \alpha\rho\varepsilon - \delta\rho\varepsilon)}{2 + \rho^2\varepsilon\delta s(1 + \varepsilon - \delta)} \right], \\ q_{2r}^O &= \rho\varepsilon \frac{1 - \beta s^2(1 + \alpha\rho\varepsilon - \delta\rho\varepsilon)}{2 + \rho^2\varepsilon\delta s(1 + \varepsilon - \delta)}. \end{aligned}$$

IR 在第 2 阶段对再制造产品的最优产量满足

$$q_{2r}^I = \rho(1 - \varepsilon) \frac{1 - \beta s^2(1 + \alpha\rho\varepsilon - \delta\rho\varepsilon)}{2 + \rho^2\varepsilon\delta s(1 + \varepsilon - \delta)}.$$

证明 OEM 的决策问题可表示为

$$\begin{aligned} \max_{q_{1n}^O, q_{2n}^O, q_{2r}^O} \pi_o &= (p_{1n}^O - \beta s^2)q_{1n}^O + \\ &\quad (p_{2n}^O - \beta s^2)q_{2n}^O + \\ &\quad (p_{2r}^O - \alpha\beta s^2)q_{2r}^O; \\ \text{s.t. } q_{2r}^O &\leq \rho\varepsilon q_{1n}^O, \\ p_{1n}^O &= 1 - q_{1n}^O, \\ p_{2n}^O &= s(1 - q_{2n}^O - \delta(q_{2r}^O + q_{2r}^I)), \\ p_{2r}^O &= \delta s(1 - q_{2n}^O - q_{2r}^O - q_{2r}^I). \end{aligned} \quad (6)$$

式(6)中目标函数表示 Model OI 模式下 OEM 的利润函数, 由第 1 阶段新产品利润、第 2 阶段新产品以及再制造产品利润组成. 第 1 个约束条件表示 OEM 第 2 阶段再制造产品的产量受到产品回收系数、回收产品占总回收产品的比例以及第 1 阶段新产品产量的影响, 其余约束条件分别表示第 1 阶段新产品、第 2 阶段新产品和再制造产品的价格与产量之间的关系。

IR 的决策问题可以表示为

$$\begin{aligned} \max_{q_{2r}^I} \pi_I &= (p_{2r}^I - \alpha\beta s^2)q_{2r}^I; \\ \text{s.t. } q_{2r}^I &\leq \rho(1 - \varepsilon)q_{1n}^O, \\ p_{2r}^I &= \delta s(1 - q_{2n}^O - q_{2r}^O - q_{2r}^I). \end{aligned} \quad (7)$$

其中: 目标函数表示 Model OI 模式下 IR 的利润函数; 第 1 个约束条件表示 IR 再制造产品产量受产品回收系数、第 1 阶段新产品产量以及 OEM 回收产品所占总回收产品比例的制约; 第 2 个约束条件表示 IR 再制造产品的价格与产量之间的关系。

同样, 参照文献[7]和[15], 首先分别构造 OEM、IR 决策目标函数的拉格朗日函数; 然后分别求其库恩塔克条件; 最后, 联立 OEM、IR 的库恩塔克条件方程求解便可得到定理 3. 具体过程略. \square

3 参数对生产决策的影响

下面分别讨论产品质量等级 s 、WTP 值对各阶段新产品和再制造产品生产决策的影响. 由于利润函数比较复杂, 只在第 4 节通过数值分析探讨各参数对利润的影响。

3.1 产品质量对各生产模式下生产决策的影响

在 Model O 和 Model OI 生产模式下, 各产量对 s 和 δ 求偏导的结果都是分数形式, 而且分子是形如 $ax^2 + bx + c$ ($a \neq 0$) 的二次型函数, a 是二次项系数, b 是一次项系数, c 是常数项, 令 $\Delta = b^2 - 4ac$. 通过分析产品质量与产量之间的关系, 可得如下推论。

推论 1 1) Model O 和 Model OI 下, 保持其他条件不变时, 第 1 阶段新产品产量 q_{1n}^O 和第 2 阶段再制造产量 q_{2r}^O 、 q_{2r}^I 的最优值随产品质量等级系数 s 的增加而减少。

2) 在 Model O 模式下, 保持其他条件不变时, 产品质量等级系数 s 对第 2 阶段 OEM 新产品的最优产量 q_{2n}^O 影响分为以下 3 种情况:

① 当 $2\beta\delta^2\rho^3(1 - \delta)(1 + \alpha\rho - \delta\rho) > \rho(1 - \delta)$ 时, 若 $\Delta \leq 0$, 则 q_{2n}^O 随着 s 的上升而提高; 若 $\Delta > 0$, 则 q_{2n}^O 随着 s 在取值范围内呈现二次函数型变化特征。

② 当 $2\beta\delta^2\rho^3(1 - \delta)(1 + \alpha\rho - \delta\rho) = \rho(1 - \delta)$ 时, 若

$$s \leq \frac{\beta - \delta^2\rho^3(1 - \delta)}{2\delta\beta\rho[(1 + \alpha\rho - \delta\rho) - \rho(1 - \delta)]},$$

则 q_{2n}^O 随着 s 的上升而降低; 若

$$s > \frac{\beta - \delta^2\rho^3(1 - \delta)}{2\delta\beta\rho[(1 + \alpha\rho - \delta\rho) - \rho(1 - \delta)]},$$

则 q_{2n}^O 随着 s 的上升而提高。

③ 当 $2\beta\delta^2\rho^3(1 - \delta)(1 + \alpha\rho - \delta\rho) < \rho(1 - \delta)$ 时, 若 $\Delta \leq 0$, 则 q_{2n}^O 随着产品质量等级系数 s 的上升而降低; 若 $\Delta > 0$, 则 q_{2n}^O 随着 s 在取值范围内呈现二次

函数型变化特征.

3) 在 Model OI 模式下, 其他条件不变时, s 对第2阶段 OEM 新产品最优产量 q_{2n}^o 影响分为以下3种情况:

① 当 $2\varepsilon\beta\delta^2\rho^3(1+\varepsilon)(1+\varepsilon-\delta)(1+\alpha\rho\varepsilon-\delta\rho\varepsilon) > \rho\varepsilon(1+\varepsilon-\delta)$ 时, 若 $\Delta \leq 0$, 则 q_{2n}^o 随着 s 的上升而提高; 若 $\Delta > 0$, 则 q_{2n}^o 随着 s 在取值范围内的变化呈现出二次函数型变化特征.

② 当 $2\varepsilon\beta\delta^2\rho^3(1+\varepsilon)(1+\varepsilon-\delta)(1+\alpha\rho\varepsilon-\delta\rho\varepsilon) = \rho\varepsilon(1+\varepsilon-\delta)$ 时, 若

$$s \leq \frac{8\beta\delta\rho(1+\varepsilon)(1+\alpha\rho\varepsilon-\delta\rho\varepsilon)-\rho\varepsilon(1+\varepsilon-\delta)}{8\delta\beta\rho(1+\varepsilon)(1+\alpha\rho\varepsilon-\delta\rho\varepsilon)-\rho\varepsilon(1+\varepsilon-\delta)},$$

则 q_{2n}^o 随着 s 的上升而降低; 若

$$s > \frac{8\beta\delta\rho(1+\varepsilon)(1+\alpha\rho\varepsilon-\delta\rho\varepsilon)-\rho\varepsilon(1+\varepsilon-\delta)}{8\delta\beta\rho(1+\varepsilon)(1+\alpha\rho\varepsilon-\delta\rho\varepsilon)-\rho\varepsilon(1+\varepsilon-\delta)},$$

则 q_{2n}^o 随着 s 的上升而提高;

③ 当 $2\varepsilon\beta\delta^2\rho^3(1+\varepsilon)(1+\varepsilon-\delta)(1+\alpha\rho\varepsilon-\delta\rho\varepsilon) < \rho\varepsilon(1+\varepsilon-\delta)$ 时, 若 $\Delta \leq 0$, 则 q_{2n}^o 随着 s 上升而降低; 若 $\Delta > 0$, 则 q_{2n}^o 随着 s 在取值范围内的变化呈现出二次函数型变化特征.

4) 在 Model I 下, 其他条件不变时, 产量 q_{1n}^o 、 q_{2n}^o 、 q_{2r}^I 的最优值随着 s 的增加而减少.

证明 各产量对 s 求偏导, 判断偏导的正负情况. 各阶段产量对 s 求偏导结果如表 1 所示.

表 1 各阶段产量对 s 求偏导情况

模式	偏导表达式	
Model O	$\frac{\partial q_{1n}^o}{\partial s}$	$\frac{-2\beta\delta\rho^2(1-\delta)(1+\alpha\rho-\delta\rho)s^2-4\beta(1+\alpha\rho-\delta\rho)s-2\delta\rho^2(1-\delta)}{4(1+\delta\rho^2s(1-\delta))^2}$
	$\frac{\partial q_{2n}^o}{\partial s}$	$\frac{(2\beta\delta^2\rho^3(1-\delta)(1+\alpha\rho-\delta\rho)-\rho(1-\delta))s^2+4\delta\beta\rho((1+\alpha\rho-\delta\rho)-\rho(1-\delta))s+2\delta^2\rho^3(1-\delta)-2\beta}{4(1+\delta\rho^2s(1-\delta))^2}$
	$\frac{\partial q_{2r}^o}{\partial s}$	$\frac{-2\beta\delta\rho^3(1-\delta)(1+\alpha\rho-\delta\rho)s^2-4\beta\rho(1+\alpha\rho-\delta\rho)s-2\delta\rho^3(1-\delta)}{4(1+\delta\rho^2s(1-\delta))^2}$
	$\frac{\partial q_{2r}^I}{\partial s}$	-
Model I	$\frac{\partial q_{1n}^o}{\partial s}$	$-\beta s < 0$
	$\frac{\partial q_{2n}^o}{\partial s}$	$-\frac{1}{2}\beta(1-\delta\rho s) \leq 0$
	$\frac{\partial q_{2r}^o}{\partial s}$	-
	$\frac{\partial q_{2r}^I}{\partial s}$	$-\rho\beta s < 0$
Model OI	$\frac{\partial q_{1n}^o}{\partial s}$	$\frac{-\varepsilon\beta\delta\rho^2(1+\varepsilon-\delta)(1+\alpha\rho\varepsilon-\delta\rho\varepsilon)s^2-4\beta(1+\alpha\rho\varepsilon-\delta\rho\varepsilon)s-\varepsilon\delta\rho^2(1+\varepsilon-\delta)}{(2+\rho^2\varepsilon\delta s(1+\varepsilon-\delta))^2}$
	$\frac{\partial q_{2n}^o}{\partial s}$	$\frac{[2\varepsilon\beta\delta^2\rho^3(1+\varepsilon)(1+\varepsilon-\delta)(1+\alpha\rho\varepsilon-\delta\rho\varepsilon)-\rho\varepsilon(1+\varepsilon-\delta)]s^2+}{(4+2\rho^2\varepsilon\delta s(1+\varepsilon-\delta))^2} \rightarrow$ $\leftarrow \frac{[8\delta\beta\rho(1+\varepsilon)(1+\alpha\rho\varepsilon-\delta\rho\varepsilon)-\rho\varepsilon(1+\varepsilon-\delta)]s+2\delta^2\rho^3\varepsilon(1+\varepsilon)(1+\varepsilon-\delta)-8\beta}{(4+2\rho^2\varepsilon\delta s(1+\varepsilon-\delta))^2}$
	$\frac{\partial q_{2r}^o}{\partial s}$	$\frac{-\beta\delta\varepsilon^2\rho^3(1+\varepsilon-\delta)(1+\alpha\rho\varepsilon-\delta\rho\varepsilon)s^2-4\varepsilon\beta\rho(1+\alpha\rho\varepsilon-\delta\rho\varepsilon)s+\delta\varepsilon^2\rho^3(1+\varepsilon-\delta)}{(2+\rho^2\varepsilon\delta s(1+\varepsilon-\delta))^2}$
	$\frac{\partial q_{2r}^I}{\partial s}$	$\frac{-\beta\delta\rho^3\varepsilon(1-\varepsilon)(1+\varepsilon-\delta)(1+\alpha\rho\varepsilon-\delta\rho\varepsilon)s^2-4\beta\rho(1-\varepsilon)(1+\alpha\rho\varepsilon-\delta\rho\varepsilon)s-\delta\varepsilon\rho^3(1-\varepsilon)(1+\varepsilon-\delta)}{(2+\rho^2\varepsilon\delta s(1+\varepsilon-\delta))^2}$

由表 1 的结果可以发现, Model O 和 Model OI 模式下各阶段产量对 s 求偏导结果的分子都恒大于 0, 分子都是形如 $ax^2 + bx + c (a \neq 0)$ 的二次型函数, 判断表 1 中各表达式的正负情况只需分析分子即可. 根据二次型函数的分析方法分析各式的正负可以得到推论 1, 限于篇幅, 过程略. □

推论 1 表明: 在 Model O 和 Model OI 模式下, 随着产品质量等级的升高, 第 1 阶段的新产品和第 2 阶段的再制造产品的产量可以适当降低; 第 2 阶段新产品的产量受到产品质量的影响相对比较复杂, 此时

需要考虑废旧产品回收系数、回收产品所占比例和 WTP 值的综合影响. 在 Model I 模式下, 产品质量的升高将引起所有产品产量的下降.

3.2 WTP 值对各生产模式下生产决策的影响

推论 2 1) 在 Model O 和 Model OI 下, 其他条件不变时, WTP 值对第 1 阶段新产品和第 2 阶段再制造产品最优产量的影响分为两种情况: ① 当 $\Delta \leq 0$ 时, 最优产量随着 WTP 值的增加而增加; ② 当 $\Delta > 0$ 时, 最优产量随着 WTP 值的增加呈现二次函数型变化特征.

2) 在 Model O 模式下, 其他条件不变时, WTP 值 δ 对第 2 阶段新产品产量 q_{2n}^o 的影响分为以下 3 种情况:

① 当 $\beta s^2(1 + \alpha\rho) > 1$ 时, 若 $\Delta \leq 0$, 则 q_{2n}^o 随着 WTP 值的增加而增加; 若 $\Delta > 0$, 则 q_{2n}^o 随着 WTP 值在取值范围内的变化呈现出二次函数型变化特征。

② 当 $\beta s^2(1 + \alpha\rho) = 1$ 时, 若

$$\delta > -\frac{\beta s^2(1 + \alpha\rho) - 1}{\rho^2 \beta s^2 [2 + \alpha s(1 - \rho)]},$$

则 q_{2n}^o 随着 WTP 值的增加而增加; 若

$$\delta < -\frac{\beta s^2(1 + \alpha\rho) - 1}{\rho^2 \beta s^2 [2 + \alpha s(1 - \rho)]},$$

则 q_{2n}^o 随着 WTP 值的增加而减少; 当

$$\delta = -\frac{\beta s^2(1 + \alpha\rho) - 1}{\rho^2 \beta s^2 [2 + \alpha s(1 - \rho)]}$$

时, q_{2n}^o 取得最大值。

③ 当 $\beta s^2(1 + \alpha\rho) < 1$ 时, 若 $\Delta \leq 0$ 时, 则 q_{2n}^o 随着 WTP 值的增加而减少; 若 $\Delta > 0$ 时, 则 q_{2n}^o 随着 WTP 值的增加呈现二次函数型变化特征。

3) 在 Model OI 模式下, 保持其他条件不变时, WTP 值对第 2 阶段新产品产量 q_{2n}^o 的影响分为以下 3 种情况。

① 当 $\beta s^2(1 + \rho\varepsilon(\alpha - \rho - \varepsilon)) > 1$ 时, 若 $\Delta \leq 0$,

则 q_{2n}^o 随着 WTP 值的增加而增加; 若 $\Delta > 0$, 则 q_{2n}^o 随着 WTP 值在取值范围内的变化呈现出二次函数型变化特征。

② 当 $\beta s^2(1 + \rho\varepsilon(\alpha - \rho - \varepsilon)) = 1$ 时, 若

$$\delta < \frac{2\rho(1 + \varepsilon) [\beta s^2(1 + \alpha\rho\varepsilon) - 1]}{\rho^3 \varepsilon s(1 + \varepsilon)^2 (1 + \beta s^2 \alpha \rho \varepsilon) + 4\rho^2 \varepsilon \beta s^2 (1 + \varepsilon)},$$

则 q_{2n}^o 随着 WTP 值的增加而增加; 若

$$\delta > \frac{2\rho(1 + \varepsilon) [\beta s^2(1 + \alpha\rho\varepsilon) - 1]}{\rho^3 \varepsilon s(1 + \varepsilon)^2 (1 + \beta s^2 \alpha \rho \varepsilon) + 4\rho^2 \varepsilon \beta s^2 (1 + \varepsilon)},$$

则 q_{2n}^o 随着 WTP 值的增加而减少; 当

$$\delta = -\frac{\beta s^2(1 + \alpha\rho) - 1}{\rho^2 \beta s^2 [2 + \alpha s(1 - \rho)]}$$

时, q_{2n}^o 取得最大值。

③ 当 $\beta s^2(1 + \rho\varepsilon(\alpha - \rho - \varepsilon)) < 1$ 时, 若 $\Delta \leq 0$, 则 q_{2n}^o 随着 WTP 值的增加而增加; 若 $\Delta > 0$ 时, 则 q_{2n}^o 随着 WTP 值在取值范围内的变化呈现出二次函数型变化特征。

4) 在 Model I 下, 其他条件不变时, 第 1 阶段新产品、第 2 阶段再制造产品的最优产量不受 WTP 值的影响, 第 2 阶段新产品的最优产量随着 WTP 值的增加而减少。

将各阶段产量对 WTP 值 δ 求偏导, 结果如表 2 所示。限于篇幅, 证明过程略。

表 2 各阶段产量对 δ 求偏导情况

模式	偏导表达式	
Model O	$\frac{\partial q_{1n}^o}{\partial \delta}$	$\frac{2s^3 \rho^3 \beta \delta^2 + 4s\rho^2(1 - \beta s^2(1 + \alpha\rho))\delta + 2\rho\beta s^2(1 + s\rho + \alpha\rho^2 s) - 2s\rho^2}{4(1 + \delta\rho^2 s(1 - \delta))^2}$
	$\frac{\partial q_{2n}^o}{\partial \delta}$	$\frac{2s\rho^3(\beta s^2(1 + \alpha\rho - \rho) - 1)\delta^2 - 4\beta s^2 \rho^2 \delta + 2\beta s^2 \rho + 2\beta \alpha s^2 \rho^2 - 2\rho}{4(1 + \delta\rho^2 s(1 - \delta))^2}$
	$\frac{\partial q_{2r}^o}{\partial \delta}$	$\frac{2s^3 \rho^4 \beta \delta^2 + 4s\rho^3(1 - \beta s^2(1 + \alpha\rho))\delta + 2\rho^2 \beta s^2(1 + \rho s + \alpha\rho^2 s) - 2s\rho^3}{4(1 + \delta\rho^2 s(1 - \delta))^2}$
	$\frac{\partial q_{2r}^I}{\partial \delta}$	-
Model I	$\frac{\partial q_{1n}^o}{\partial \delta}$	0
	$\frac{\partial q_{2n}^o}{\partial \delta}$	$-\frac{1}{4}\rho(1 - \beta s^2) < 0$
	$\frac{\partial q_{2r}^o}{\partial \delta}$	-
	$\frac{\partial q_{2r}^I}{\partial \delta}$	0
Model OI	$\frac{\partial q_{1n}^o}{\partial \delta}$	$\frac{\beta \varepsilon^2 \rho^3 s^3 \delta^2 + 2\varepsilon s \rho^2(1 - \beta s^2(1 + \alpha\varepsilon\rho))\delta + 2\beta \varepsilon \rho s^2 - \varepsilon(1 + \varepsilon)s\rho^2 + \beta \varepsilon(1 + \varepsilon)\rho^2 s^3 + \alpha \beta \varepsilon^2 \rho^2 s^3(1 + \rho)}{(2 + \rho^2 \varepsilon \delta s(1 + \varepsilon - \delta))^2}$
	$\frac{\partial q_{2n}^o}{\partial \delta}$	$\frac{2s\rho^3 \varepsilon(1 + \varepsilon)(\beta s^2(1 + \alpha\rho\varepsilon - \rho\varepsilon - \rho\varepsilon^2) - 1)\delta^2 - 8\beta s^2 \rho^2 \varepsilon(1 + \varepsilon)\delta + 4\beta \rho s^2(1 + \varepsilon)(1 + \alpha\rho\varepsilon) - 4\rho(1 + \varepsilon)}{(4 + 2\rho^2 \varepsilon \delta s(1 + \varepsilon - \delta))^2}$
	$\frac{\partial q_{2r}^o}{\partial \delta}$	$\frac{\beta \varepsilon^3 \rho^4 s^3 \delta^2 + 2\rho^3 \varepsilon^2 s(1 - \beta s^2(1 + \alpha\rho\varepsilon))\delta + 2\rho^2 \varepsilon^2 \beta s^2 - s(1 + \varepsilon)\rho^3 \varepsilon^2 + \beta \varepsilon^2 s^3 \rho^3(1 + \varepsilon)(1 + \alpha\rho\varepsilon)}{(2 + \rho^2 \varepsilon \delta s(1 + \varepsilon - \delta))^2}$
	$\frac{\partial q_{2r}^I}{\partial \delta}$	$\frac{\beta \varepsilon^2 s^3 \rho^4(1 - \varepsilon)\delta^2 + 2\varepsilon s \rho^3(1 - \varepsilon)(1 - \beta s^2(1 + \alpha\rho\varepsilon))\delta + 2\beta \varepsilon s^2 \rho^2(1 - \varepsilon) - \varepsilon s \rho^3(1 - \varepsilon^2) + \beta \varepsilon s^3 \rho^3(1 - \varepsilon^2)(1 + \alpha\rho\varepsilon)}{(2 + \rho^2 \varepsilon \delta s(1 + \varepsilon - \delta))^2}$

推论2表明, 消费者支付意愿(WTP)对于制造/再制造系统生产决策的影响并不是单一的, 而是与产品质量等级、废旧产品回收系数等相互综合、共同影响. 因此在实际生产过程中, 不能单纯一味地通过其他途径提高消费者的WTP, 更不能因为WTP的提高直接降低第2阶段新产品的产量以提高再制造产品的产量, 而是要综合考虑产品的质量等级等因素, 根据实际情况合理安排生产.

4 数值分析

本节将通过数值仿真分析各参数对产量和利润

的影响, 从而验证前面的定理和推论.

4.1 参数对产量的影响

表3给出了各参数对产量的影响($\beta = 0.6, \rho = 0.7, \alpha = 0.6, \varepsilon = 0.4$). 从表3中数据可以看出: 在Model O模式下, q_{1n}^o, q_{2r}^o 随着 s 的增加而变小; 当 $s = 0.25$ 时, q_{1n}^o, q_{2r}^o 随着 δ 的增加呈现出先减后增的变化趋势; 当 $s > 0.25$ 时, q_{1n}^o, q_{2r}^o 随着 δ 增加而增大. 在Model OI生产模式下, $q_{1n}^o, q_{2r}^o, q_{2r}^I$ 随着 s 的增加而变小; 当 $s = 0.25$ 时, $q_{1n}^o, q_{2r}^o, q_{2r}^I$ 随着 δ 的增加呈现出先减后增的变化趋势; 当 $s > 0.25$ 时, $q_{1n}^o, q_{2r}^o, q_{2r}^I$

表3 各参数对产量的影响($\beta = 0.6, \rho = 0.7, \alpha = 0.6, \varepsilon = 0.4$)

δ/s	Model O				Model I				Model OI			
	0.25	0.45	0.65	0.85	0.25	0.45	0.65	0.85	0.25	0.45	0.65	0.85
q_{1n}^o	0.4660	0.4075	0.3229	0.2135	0.4813	0.4393	0.3733	0.2833	0.4761	0.4279	0.3543	0.2559
	0.4650	0.4081	0.3273	0.2241	0.4813	0.4393	0.3733	0.2833	0.4757	0.4281	0.3560	0.2601
	0.4652	0.4105	0.3336	0.2361	0.4813	0.4393	0.3733	0.2833	0.4755	0.4286	0.3582	0.2647
	0.4665	0.4145	0.3419	0.2499	0.4813	0.4393	0.3733	0.2833	0.4755	0.4295	0.3607	0.2697
	0.4688	0.4203	0.3522	0.2657	0.4813	0.4393	0.3733	0.2833	0.4758	0.4308	0.3637	0.2751
	0.4724	0.4279	0.3648	0.2838	0.4813	0.4393	0.3733	0.2833	0.4763	0.4325	0.3672	0.2809
	0.4771	0.4376	0.3800	0.3050	0.4813	0.4393	0.3733	0.2833	0.4771	0.4345	0.3711	0.2872
	0.4830	0.4494	0.3983	0.3298	0.4813	0.4393	0.3733	0.2833	0.4781	0.4370	0.3754	0.2940
q_{2n}^o	0.3435	0.2937	0.2485	0.2076	0.3829	0.3266	0.2723	0.2202	0.3667	0.3126	0.2616	0.2137
	0.3111	0.2650	0.2248	0.1901	0.3660	0.3112	0.2593	0.2103	0.3434	0.2916	0.2439	0.2004
	0.2785	0.2357	0.1999	0.1706	0.3492	0.2958	0.2462	0.2004	0.3202	0.2705	0.2260	0.1866
	0.2454	0.2054	0.1734	0.1488	0.3324	0.2804	0.2331	0.1905	0.2968	0.2492	0.2078	0.1723
	0.2117	0.1738	0.1448	0.1241	0.3155	0.2651	0.2201	0.1806	0.2734	0.2278	0.1892	0.1574
	0.1770	0.1403	0.1135	0.0960	0.2987	0.2497	0.2070	0.1706	0.2499	0.2061	0.1701	0.1418
	0.1411	0.1046	0.0789	0.0635	0.2818	0.2343	0.1940	0.1607	0.2263	0.1840	0.1504	0.1254
	0.1038	0.0661	0.0401	0.0257	0.2650	0.2189	0.1809	0.1508	0.2025	0.1616	0.1302	0.1081
q_{2r}^o	0.3262	0.2853	0.2260	0.1494	-	-	-	-	0.1333	0.1198	0.0992	0.0716
	0.3255	0.2857	0.2291	0.1569	-	-	-	-	0.1332	0.1199	0.0997	0.0728
	0.3256	0.2873	0.2335	0.1653	-	-	-	-	0.1331	0.1200	0.1003	0.0741
	0.3265	0.2902	0.2393	0.1749	-	-	-	-	0.1332	0.1203	0.1010	0.0755
	0.3282	0.2942	0.2465	0.1860	-	-	-	-	0.1332	0.1206	0.1018	0.0770
	0.3307	0.2996	0.2553	0.1987	-	-	-	-	0.1334	0.1211	0.1028	0.0787
	0.3340	0.3063	0.2660	0.2135	-	-	-	-	0.1336	0.1217	0.1039	0.0804
	0.3381	0.3146	0.2788	0.2309	-	-	-	-	0.1339	0.1224	0.1051	0.0823
q_{2r}^I	-	-	-	-	0.3369	0.3075	0.2613	0.1983	0.1999	0.1797	0.1488	0.1075
	-	-	-	-	0.3369	0.3075	0.2613	0.1983	0.1998	0.1798	0.1495	0.1092
	-	-	-	-	0.3369	0.3075	0.2613	0.1983	0.1997	0.1800	0.1504	0.1112
	-	-	-	-	0.3369	0.3075	0.2613	0.1983	0.1997	0.1804	0.1515	0.1133
	-	-	-	-	0.3369	0.3075	0.2613	0.1983	0.1998	0.1810	0.1528	0.1155
	-	-	-	-	0.3369	0.3075	0.2613	0.1983	0.2001	0.1817	0.1542	0.1180
	-	-	-	-	0.3369	0.3075	0.2613	0.1983	0.2004	0.1825	0.1559	0.1206
	-	-	-	-	0.3369	0.3075	0.2613	0.1983	0.2008	0.1835	0.1577	0.1235

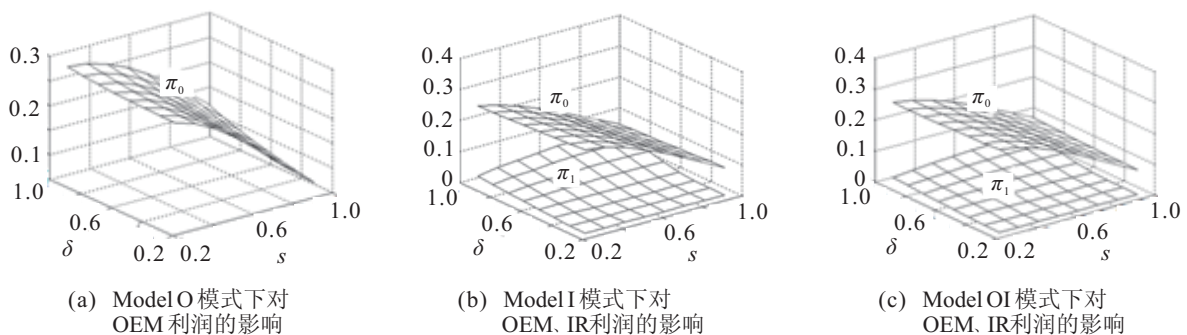


图2 δ 和 s 对利润的影响($\beta = 0.6, \rho = 0.7, \alpha = 0.6, \varepsilon = 0.4$)

随着 δ 的增加而增大. 在 Model I 模式下, q_{1n}^o 、 q_{2r}^I 不受 δ 的影响, 但随着 s 的增加而变小. 在 3 种模式下, q_{2n}^o 都分别随着 δ 、 s 的增加而变小, 从而验证了推论 1 和推论 2 的结论.

4.2 参数对利润的影响

图 2 模拟了当前数值环境下 δ 和 s 对利润的影响. 图 2(b) 和图 2(c) 中, 上图表示 OEM 的利润, 下图表示 IR 的利润. 从图 2(a) 可以看出: 在 Model O 模式下, OEM 的利润随 WTP 值增加而增加; 随着质量等级 s 增加而下降. 从图 2(b) 可以看出: Model I 模式下, 随着 WTP 值增加, OEM 利润减小, IR 利润增加; 随着质量等级 s 的增加, OEM 利润减小, IR 利润增加. 从图 2(c) 可以看出: Model OI 模式下, OEM 利润随质量等级 s 增加而减小; 当质量等级较低时, WTP 的提高不会提高 OEM 的收益; 当质量较高时, 提高 WTP 可以增加 OEM 的收益. IR 利润随着 WTP 值的增加而增加; 当 WTP 较低时, 产品质量对 IR 收益的影响非常小; 当 WTP 较高时, 提高产品质量能够明显提高 IR 的

收益. 因此, 在实际生产中, OEM 应该设置一个最低质量等级阈值, 当产品质量达到阈值时, 就不必单纯追求产品的高质量.

表 4 给出了不同生产模式下 ρ 对 OEM 利润的影响 ($\beta = 0.6, \alpha = 0.6, \varepsilon = 0.4$). 分析表 4 数据可以发现: 在 Model O 生产模式下, 当 $s = 0.25$ 且 $\delta \in [0.25, 0.85]$ 、 $s = 0.45$ 且 $\delta \in [0.25, 0.75]$ 、 $s \in [0.65, 0.85]$ 且 $\delta \in [0.25, 0.65]$ 时, OEM 的利润随着废旧产品回收率 ρ 的增加而降低; 当 $s = 0.25$ 且 $\delta = 0.95$ 、 $s = 0.45$ 且 $\delta \in [0.85, 0.95]$ 、 $s \in [0.65, 0.85]$ 且 $\delta \in [0.75, 0.95]$ 时, OEM 的利润随着废旧产品回收系数 ρ 的增加而提高. 而且, 随着产品质量等级系数 s 的增加, OEM 的利润随着产品回收系数增加而出现提高趋势所要求的最低 δ 逐渐减小. 这说明当 WTP 值较大时, OEM 提高废旧产品回收率 ρ 对生产是有利的. 在 Model I 和 Model OI 生产模式下, 随着废旧产品回收率 ρ 的增加, OEM 利润减少. 这说明 IR 生产越多的再制造产品, 将侵占 OEM 更大的市场份额, 从而导致 OEM 收益下降.

表 4 不同生产模式下 ρ 对 OEM 利润的影响 ($\beta = 0.6, \alpha = 0.6, \varepsilon = 0.4$)

δ/s	Model O				Model I				Model OI				
	0.25	0.45	0.65	0.85	0.25	0.45	0.65	0.85	0.25	0.45	0.65	0.85	
$\rho = 0.3$	0.25	0.2739	0.2459	0.1886	0.1179	0.2730	0.2476	0.1944	0.1269	0.2733	0.2469	0.1920	0.1232
	0.35	0.2742	0.2472	0.1910	0.1211	0.2715	0.2456	0.1923	0.1252	0.2726	0.2462	0.1917	0.1235
	0.45	0.2747	0.2486	0.1936	0.1244	0.2701	0.2435	0.1902	0.1236	0.2719	0.2455	0.1915	0.1239
	0.55	0.2752	0.2502	0.1964	0.1280	0.2687	0.2416	0.1882	0.1220	0.2712	0.2449	0.1914	0.1243
	0.65	0.2758	0.2519	0.1994	0.1317	0.2673	0.2396	0.1862	0.1204	0.2706	0.2444	0.1913	0.1248
	0.75	0.2766	0.2538	0.2025	0.1357	0.2660	0.2378	0.1843	0.1188	0.2701	0.2439	0.1913	0.1253
	0.85	0.2774	0.2559	0.2059	0.1399	0.2647	0.2359	0.1824	0.1173	0.2696	0.2436	0.1914	0.1259
	0.95	0.2784	0.2582	0.2095	0.1443	0.2634	0.2341	0.1805	0.1158	0.2691	0.2433	0.1915	0.1265
$\rho = 0.5$	0.25	0.2710	0.2399	0.1801	0.1089	0.2706	0.2442	0.1909	0.1241	0.2707	0.2424	0.1864	0.1177
	0.35	0.2713	0.2416	0.1837	0.1136	0.2683	0.2409	0.1875	0.1215	0.2694	0.2411	0.1858	0.1181
	0.45	0.2719	0.2438	0.1877	0.1187	0.2660	0.2378	0.1843	0.1188	0.2682	0.2400	0.1854	0.1187
	0.55	0.2728	0.2464	0.1921	0.1244	0.2638	0.2347	0.1811	0.1163	0.2672	0.2391	0.1853	0.1194
	0.65	0.2740	0.2494	0.1971	0.1305	0.2617	0.2317	0.1781	0.1139	0.2663	0.2383	0.1853	0.1202
	0.75	0.2754	0.2528	0.2026	0.1373	0.2596	0.2289	0.1752	0.1115	0.2655	0.2378	0.1855	0.1212
	0.85	0.2772	0.2568	0.2088	0.1448	0.2576	0.2262	0.1724	0.1093	0.2649	0.2375	0.1859	0.1224
	0.95	0.2792	0.2613	0.2156	0.1531	0.2557	0.2235	0.1697	0.1071	0.2644	0.2374	0.1866	0.1238
$\rho = 0.7$	0.25	0.2673	0.2329	0.1710	0.1002	0.2683	0.2409	0.1875	0.1215	0.2677	0.2375	0.1805	0.1121
	0.35	0.2674	0.2349	0.1754	0.1060	0.2651	0.2365	0.1830	0.1178	0.2658	0.2356	0.1796	0.1126
	0.45	0.2681	0.2376	0.1806	0.1125	0.2621	0.2323	0.1787	0.1144	0.2642	0.2340	0.1790	0.1133
	0.55	0.2693	0.2411	0.1866	0.1199	0.2592	0.2283	0.1746	0.1111	0.2628	0.2328	0.1789	0.1143
	0.65	0.2711	0.2455	0.1935	0.1283	0.2565	0.2246	0.1708	0.1079	0.2617	0.2321	0.1791	0.1155
	0.75	0.2734	0.2507	0.2015	0.1379	0.2539	0.2210	0.1672	0.1050	0.2609	0.2317	0.1797	0.1171
	0.85	0.2763	0.2568	0.2107	0.1490	0.2515	0.2176	0.1638	0.1022	0.2603	0.2317	0.1807	0.1191
	0.95	0.2798	0.2641	0.2215	0.1620	0.2492	0.2145	0.1606	0.0996	0.2600	0.2321	0.1822	0.1214

表5给出了不同生产模式下 ρ 对IR利润的影响($\beta = 0.6, \alpha = 0.6, \varepsilon = 0.4$)。分析表5中的数据可以发现,当 $\delta \in [0.25, 0.55]$ 时,IR的利润随着废旧产品回收率 ρ 的增加不会持续提高,某些情况下呈现下降趋势,直至没有任何利润(当没有利润时,IR不再进行再制造生产)。当 $\delta > 0.55$ 时,IR的利润随着废旧产品回收率 ρ 的增加而提高。这也说明当再制造产品的消费者

支付意愿很低时,IR提高废旧产品回收力度,只会浪费更多的回收成本而导致收益下降。当消费者对再制造产品的支付意愿较高时,提高废旧产品回收率 ρ 可以提高IR的利润。同时还可以发现,随着产品质量等级系数的提高,IR利润大于0所需的最小WTP值出现逐渐提高的趋势,说明提高产品质量会提高IR的获利难度。

表5 不同生产模式下 ρ 对IR利润的影响($\beta = 0.6, \alpha = 0.6, \varepsilon = 0.4$)

	δ/s	$\rho = 0.3$				$\rho = 0.5$				$\rho = 0.7$			
		0.25	0.45	0.65	0.85	0.25	0.45	0.65	0.85	0.25	0.45	0.65	0.85
Model I	0.25	0.0008	0	0	0	0.0001	0	0	0	0	0	0	0
	0.35	0.0025	0.0013	0	0	0.0025	0	0	0	0.0012	0	0	0
	0.45	0.0043	0.0046	0.0029	0.0003	0.0051	0.0047	0.0017	0	0.0043	0.0023	0	0
	0.55	0.0061	0.0080	0.0075	0.0054	0.0078	0.0099	0.0090	0.0064	0.0077	0.0089	0.0075	0.0051
	0.65	0.0080	0.0114	0.0123	0.0107	0.0107	0.0153	0.0165	0.0148	0.0114	0.0160	0.0175	0.0165
	0.75	0.0099	0.0150	0.0171	0.0159	0.0137	0.0209	0.0242	0.0233	0.0154	0.0235	0.0280	0.0282
	0.85	0.0118	0.0186	0.0220	0.0213	0.0169	0.0267	0.0322	0.0321	0.0197	0.0315	0.0389	0.0403
	0.95	0.0139	0.0223	0.0270	0.0266	0.0202	0.0328	0.0404	0.0410	0.0243	0.0398	0.0503	0.0526
Model OI	0.25	0.0005	0	0	0	0.0002	0	0	0	0	0	0	0
	0.35	0.0016	0.0009	0	0	0.0017	0.0002	0	0	0.0012	0	0	0
	0.45	0.0027	0.0029	0.0019	0.0003	0.0034	0.0033	0.0016	0	0.0033	0.0025	0.0001	0
	0.55	0.0038	0.0051	0.0048	0.0035	0.0052	0.0067	0.0062	0.0044	0.0057	0.0069	0.0062	0.0044
	0.65	0.0050	0.0072	0.0078	0.0067	0.0071	0.0102	0.0110	0.0096	0.0083	0.0117	0.0127	0.0114
	0.75	0.0063	0.0095	0.0108	0.0100	0.0092	0.0139	0.0160	0.0152	0.0111	0.0169	0.0196	0.0191
	0.85	0.0076	0.0118	0.0140	0.0135	0.0114	0.0179	0.0213	0.0210	0.0142	0.0224	0.0271	0.0273
	0.95	0.0089	0.0142	0.0172	0.0170	0.0137	0.0220	0.0269	0.0273	0.0176	0.0284	0.03512	0.0363

5 结 论

在产品质量和消费者WTP都存在差异下,本文构建了3种生产模式下OEM和IR的利润模型,给出了3种生产模式下的最优生产决策,分析了参数对新产品、再制造产品生产决策的影响,得到以下结论:

1) 3种生产模式下,提高产品的质量等级系数,各阶段产品产量都呈现出下降的趋势,说明单纯提高产品质量不能使各厂商生产更多的产品。提高消费者对再制造产品的WTP值,第1阶段新产品以及第2阶段再制造产品的产量在Model O和Model OI模式下呈现出上升的趋势;在Model I模式下,由于第1阶段新产品产量不变,在产品回收率不变的情况下,IR产量不变;而3种模式下第2阶段新产品的产量降低,说明提高再制造产品的WTP将侵占新产品的市场份额。

2) 随着产品质量等级的增加,3种模式下,IR收益在一定范围内有所提高但获利难度相对增加,OEM的整体利润下降,下降的速度逐渐加快。因此,OEM处于主导地位时,不能以单纯追求高质量为目标,应该在控制产品质量等级达到最低阈值之后进行产品

创新,以获取更大的市场需求来增加收益。对OEM而言,相较于WTP值,产品质量等级的变化对生产决策的影响更加突出。对IR而言,当WTP较低时,产品质量等级的提升会降低收益;当WTP较大时,提升产品质量在一定范围内对生产是有利的。

3) 在Model O模式下,产品回收率对OEM利润的影响取决于其与产品质量等级系数以及再制造产品WTP值的综合影响。OEM的收益能够随着产品回收率的提高而呈现增长趋势,而且随着产品质量等级的提高,呈现出该趋势所需要的最小WTP值逐渐降低,因此,OEM在产品质量较高时提高回收力度是有利的。在Model I和Model OI模式下,OEM利润随着产品回收率的提高而降低,因为IR的再制造产品侵占了其部分利润。对IR而言,再制造产品WTP较低时,提高废旧产品回收率会导致收益下降。当再制造产品WTP较高时,提高废旧产品回收率可以提高IR的利润。

产品质量等级系数的大小对OEM和IR收益的影响是冲突的,如何设置一种契约机制协调OEM与

IR 之间的利益冲突可作为下一步研究计划. 本文没有考虑废旧产品质量等级的影响, 未来的研究可以考虑这一因素的影响. 同时, 产品的回收系数受多重因素影响, 未来的研究可以考虑多回收系数影响因素下的生产决策.

参考文献(References)

- [1] Savaskan R C, Bhattacharya S, Van Wassenhove L N. Closed-loop supply chain models with product remanufacturing[J]. *Management Science*, 2004, 50(2): 239-252.
- [2] Fine C H. Quality improvement and learning in productive systems[J]. *Management Science*, 1986, 32(10): 1301-1315.
- [3] Gal-Or E. Quality and quantity competition[J]. *The Bell J of Economics*, 1983, 14(2): 590-600.
- [4] 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.)
- [5] 袁开福, 高阳. 考虑质量和服务水平的制造与翻新批量决策[J]. *计算机集成制造系统*, 2010, 16(10): 2116-2123. (Yuan K F, Gao Y. Lot size decision-making for manufacturing & recovery considering quality & service level[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2010, 16(10): 2116-2123.)
- [6] 曹晓刚, 郑本荣, 闻卉. 基于质量和价格竞争的再制造系统均衡决策研究[J]. *控制与决策*, 2014, 29(8): 1394-1400. (Cao X G, Zhen B R, Wen H. Research on equilibrium decision of remanufacturing system based on quality and price competition[J]. *Control and Decision*, 2014, 29(8): 1394-1400.)
- [7] 郭军华, 李帮义, 倪明. WTP 差异下的再制造进入决策研究[J]. *中国管理科学*, 2013, 21(1): 149-156. (Guo J H, Li B Y, Ni M. Research on remanufacturing entry decision based on WTP differentiation[J]. *Chinese J of Management Science*, 2013, 21(1): 149-156.)
- [8] 高阳, 杨新. 基于 WTP 差异化的再制造闭环供应链利益协调机制[J]. *计算机应用研究*, 2014, 31(2): 388-391. (Gao Y, Yang X. Study of profit coordination of manufacturing closed-loop supply chain based on WTP differentiation[J]. *Application Research of Computers*, 2014, 31(2): 388-391.)
- [9] Adem Örsdemir, Eda Kemahlioğlu-Ziya, Ali K Parlaktürk. Competitive quality choice and remanufacturing[J]. *Production and Operations Management*, 2014, 23(1): 48-64.
- [10] Atasu A, Souza G C. How does product recovery affect quality choice?[J]. *Production and Operations Management*, 2013, 22(4): 991-1010.
- [11] Desai P S. Quality segmentation in spatial markets: When does cannibalization affect product line design[J]. *Market Science*, 2001, 20(3): 265-283.
- [12] Moorthy K S. Product and price competition in a duopoly[J]. *Market Science*, 1988, 7(2): 141-168.
- [13] Ferrer G, Swaminathan J M. Managing new and remanufactured products[J]. *Management Science*, 2006, 52(1): 15-26.
- [14] Johnson J P, Myatt D P. Multiproduct cournot oligopoly[J]. *Rand J of Economics*, 2006, 37(3): 583-601.
- [15] Van der Laan E, Salomon M. Production planning and inventory control with remanufacturing and disposal[J]. *European J of Operational Research*, 1997, 102(2): 264-278.
- [16] Daniel V R, Guide Jr. Production planning and control for remanufacturing: Industry practice and research needs[J]. *J of Operations Management*, 2000, 18(4): 467-483.
- [17] 娄山佐, 田新诚. 需求和回收品均随机的制造-再制造系统生产控制[J]. *控制与决策*, 2014, 29(2): 292-298. (Lou S Z, Tian X C. Production control of manufacturing-remanufacturing system with stochastic demand and returns[J]. *Control and Decision*, 2014, 29(2): 292-298.)
- [18] Wu C H. Product-design and pricing strategies with remanufacturing[J]. *European J of Operational Research*, 2012, 222(2): 204-215.
- [19] 谢家平, 王爽, 迟琳娜. 无偏好市场下制造/再制造系统最优生产决策[J]. *管理评论*, 2011, 23(12): 148-155. (Xie J P, Wang S, Chi L N. A production decision-making optimization model of the manufacture/remanufacture system in the homogenous market[J]. *Management Review*, 2011, 23(12): 148-155.)
- [20] 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. (Wu Y, Xiong Z K. Production strategies of the original equipment manufacturer and independent operator under the condition of competition[J]. *Systems Engineering—Theory & Practice*, 2014, 34(2): 291-303.)

(责任编辑: 李君玲)