

产品生态化设计与再造决策

刘华 计国君

(厦门大学 管理学院 福建 厦门 361005)

摘要: 基于再制造的产品生态化设计是生产商应对内外部刺激的关键策略,在市场需求和回收量不确定情况下,产品的制造/再制造系统变得复杂化。从生产商以生产总成本最小化为决策目标,建立了数学模型并求解得到了产品生态设计率、普通产品的回收再造率和生态产品的再造率等三个决策变量的最优值。通过数例进行计算并且分别基于12种成本参数进行敏感性分析。结果表明,生产商对于决策变量具有较强的策略性选择。

关键词: 产品系统;制造/再制造;生态设计率;回收再造率;随机

文献引用: 刘华,计国君.产品生态化设计与再造决策[J].生态经济,2012(8):127~131.

中图分类号: F273.2 **文献标识码:** A

Decision on the Eco-Design of Product and Remanufacture

LIU Hua, Ji Guojun

(School of Management, Xiamen University, Xiamen Fujian 361005, China)

Abstract: The producer carries out a key strategy based on ecological design of product system and remanufacture in order to face the internal and external incentives. Yet the manufacture/remanufacture system about product will become more complicated under stochastic demand and returns. This paper takes the total production cost as target of decision, and establishes a mathematical model about cost. We get the optimal values of three decision variables, that is the ecological design rate of product, the remanufacture rate of general product, and the remanufacture rate of ecological product. The results from the numerical calculation and sensitivity analysis depended on twelve cost parameters show that the producer has strong strategy to choose decision variables.

Key words: product system; manufacture/remanufacture system; eco-design rate; remanufacture rate; stochastic

1 引言

进入21世纪,人类赖以生存的自然环境面临资源枯竭、污染等问题,并且日趋严重。这引起国际社会的普遍关注,2009年欧盟在2005年的能耗产品(energy-using products, EuP)指令基础上颁布了能源相关产品(Energy-related products, ErP)的生态设计指令,要求在产品生命周期的以下阶段:原材料选购和使用;制造;包装、运输、配送;安装、维修;使用;末期处置等注重环境效益。面对越来越大的环保压力以及越来越挑剔的消费者,生产商之间的竞争越来越激烈。李昆和魏小平^[1]通过将产品系统分割为普通因子部分和生态因子部分,研究了企业实施生态化经营的内在驱动机制。此外,延伸生产者责任(Extended Producer Responsibility, EPR)是要求生产商承担更多的环境责任,在产品的设计、采购、制造和再造等领域考虑环境因素,并借以实现企业的经济目标。生产商进行产品创新,实施考虑产品生命周期的生态设计战略兼顾社会效益、经济效益和环境效益。另一方面,

回收再造过程中蕴含巨大的经济利益,为生产商带来新的机会。越来越多的生产商尝试实施回收再造策略,如富士施乐(Xerox)公司通过回收再造节约大量的原材料并获得显著的环境效益^[2],柯达、佳能和IBM公司也采用了大量回收部件的方式。同样地,回收再造活动为生产商带来经济效益的同时,也需要对再造决策进行优化,以此减少因再造带来的成本结构变化和新的不确定性。

生产商的回收再造活动是实现节约原材料成本、缩短供应时间、市场营销策略以及遵守行业规则和法律法规的重要途径。对于短周期的产品,如纸张、电子电器、玻璃、塑料等产品而言,再造活动带来的好处明显。因此,生产商基于再制造进行产品系统生态化设计是一种很全面的应对内外部刺激的策略。但是生产商面对的生产决策就变得复杂化,需要运用科学的方法解决产品系统设计和再造的决策问题,在国内外学术领域对混杂制造/再造系统的研究主要聚焦在单一产品的制造/再造系统决策,杰拉尔多(Geraldo)^[3]等人研究了企业建设再造系

基金项目:国家自然科学基金项目“基于复杂产品供应链的不连续创新能级研究”(70971111);教育部人文社会科学项目“存在战略顾客的退货策略研究”(12YJC630264)

作者简介:刘华(1980~),男,江西永新人,博士生,研究方向为生产运作管理、供应链管理。

系统的驱动因素有法律法规、延长产品寿命和战略选择等，并系统论证了再造过程的逆向物流、处置和包装、分类和拆解、产品设计者反馈、库存和计划、重新组装任务和再造品营销等环节。卡尔(Karl)^[4]着重研究了具有替代效益的混杂制造/再造系统的政策优化。欧(Ou)^[5]等人通过设定具有确定需求和回流产品的制造/再造系统，研究随机订货提前期下的经济效益。李(Li)^[6]等人运用系统动力学理论研究实施看板政策的制造/再造中混杂库存系统的绩效。李(LI)^[7]等人在给定随机产出和随机需求的情况下，研究再造系统的定价决策。袁开福和高阳^[8]研究再造能力有限下需求确定的多产品制造/再造系统的库存决策，但面对市场需求和产品回收数量不确定的环境，具有一定的局限性。

本文考虑随机市场需求和回收下，从生产商以生产总成本最小化为经营目标的角度，对包含普通产品和生态产品的产品系统的生态设计率以及两类产品的废旧产品再造率进行决策。

2 模型建立

如图1所示，生产商根据市场需求进行产品设计，提供普通产品和生态产品两类产品，并且将产品周期末的废旧产品进行回收再造。模型将考虑最简单的情形：采购、研发设计、生产、销售和回收等决策环节都由一家生产商独立完成。

2.1 符号、变量和假设

2.1.1 符号、变量

下标 $i=0,1$ 的参数分别表示普通产品、生态设计产品对应参数。两类产品市场需求以及它们的废旧产品回收数量都服从均匀分布^[9]。

初始总生产量 Q ，普通产品产量 Q_0 ，生态产品产量 $Q_1, Q=Q_0+Q_1$ ；普通产品的市场需求 $D_0, D_0 \sim U[a, b], b > a > 0$ ；生态产品的市场需求 $D_1, D_1 \sim U[a, b]$ ；普通产品的回收数量 $R_0, R_0 \sim U[c, d], d > c > 0$ ；生态产品的回收数量 $R_1, R_1 \sim U[e, f], f > e > 0$ ；产品系统生产总成本 TC ；普通产品生产总成本 TC_0 ；生态产品生产

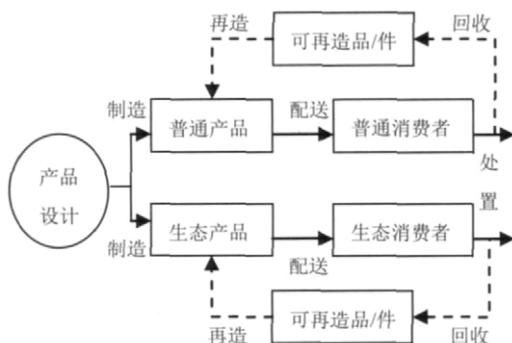


图1 产品系统设计与制造/再造系统简构图

总成本 TC_1 ；产品生产总成本 c_{pi} ；产品生产固定成本 k_0, k_1 ；单位产品的变动成本 v_0, v_1 ；产品再造成本 c_{ri} ；再造产品的固定成本 z_0, z_1 ；单位再造产品的变动成本 n_0, n_1 ；流通中产品的库存成本 c_{hi} ；流通中单位产品的库存成本 h_0, h_1 ；回收中的废旧产品库存成本 c_{li} ；回收中的单位废旧产品库存成本 l_0, l_1 ；废旧产品处置成本 c_{di} ；废旧产品处置固定成本 u_0, u_1 ；单位废旧产品处置变动成本 d_0, d_1 ；产品的缺货成本 c_{si} ；单位产品的缺货成本 s_0, s_1 ；产品库存积压损失 c_{mi} ；单位产品库存积压损失 m_0, m_1 。

决策变量：生态产品设计系数 $\tau=Q_1/(Q_0+Q_1)$ （以下简称生态设计率）；普通产品回收再造率 r_0 ；生态产品回收再造率 r_1 。

2.1.2 前提假设

假设一：生产商的产品系统中分为两类产品。即普通产品和生态产品，将市场中的消费者分为普通消费者和生态消费者^[1]，两类产品市场独立。

假设二：两类产品的再制造活动独立。即回收的普通产品和生态产品分别用于制造普通产品和生态产品。两类产品各自的再造品和新品没有质量差异。

假设三：两类产品的生产提前期为零。

2.2 模型建立

生产总成本 = 普通产品总成本 + 生态产品总成本，即 $TC=TC_0+TC_1$ 。而每一类产品的生产总成本由生产成本、再造成本、处置成本、回收中的库存成本、流通中的库存成本、缺货成本和积压损失成本构成。

$$\begin{aligned}
 TC_0 &= c_{p0} + c_{r0} + c_{h0} + c_{l0} + c_{d0} + c_{s0} + c_{m0} \\
 &= k_0 + v_0(1-\tau)Q + z_0 + n_0r_0 \int_c^d \frac{y}{d-c} dy + u_0 + \\
 &\quad d_0(1-r_0) \int_c^d \frac{y}{d-c} dy + \frac{h_0}{2} \cdot \\
 &\quad \left[\int_c^d \int_a^{(1-\tau)Q+r_0y} \frac{x}{(b-a)(d-c)} dx dy + \int_c^d \int_{(1-\tau)Q+r_0y}^b \frac{(1-\tau)Q+r_0y}{(b-a)(d-c)} dx dy \right] + \\
 &\quad \frac{l_0}{2} \int_c^d \frac{y}{d-c} dy + s_0 \cdot \int_c^d \int_{(1-\tau)Q+r_0y}^b \frac{x-(1-\tau)Q-r_0y}{(b-a)(d-c)} dx dy + \\
 &\quad m_0 \cdot \int_c^d \int_a^{(1-\tau)Q+r_0y} \frac{(1-\tau)Q+r_0y-x}{(b-a)(d-c)} dx dy
 \end{aligned} \tag{1}$$

$$\begin{aligned}
 TC_1 &= c_{p1} + c_{r1} + c_{h1} + c_{l1} + c_{d1} + c_{s1} + c_{m1} \\
 &= k_1 + v_1\tau Q + z_1 + n_1r_1 \int_e^f \frac{y}{d-c} dy + u_1 + \\
 &\quad d_1(1-r_1) \int_e^f \frac{y}{d-c} dy + \frac{h_1}{2} \cdot \left[\int_e^f \int_a^{\tau Q+r_1y} \frac{x}{(b-a)(f-e)} dx dy + \right. \\
 &\quad \left. \int_e^f \int_{\tau Q+r_1y}^b \frac{\tau Q+r_1y}{(b-a)(f-e)} dx dy \right] + \frac{l_1}{2} \int_e^f \frac{y}{f-e} dy + \\
 &\quad s_1 \cdot \int_e^f \int_{\tau Q+r_1y}^b \frac{x-\tau Q-r_1y}{(b-a)(f-e)} dx dy + m_1 \cdot \int_e^f \int_a^{\tau Q+r_1y} \frac{\tau Q+r_1y-x}{(b-a)(f-e)} dx dy
 \end{aligned} \tag{2}$$

建立生产总成本目标函数：

$$\begin{aligned}
 \text{Min}TC &= TC_0 + TC_1 \\
 &= k_0 + v_0(1-\tau)Q + z_0 + n_0r_0 \int_c^d \frac{y}{d-c} dy + \\
 &u_0 + d_0(1-r_1) \int_c^d \frac{y}{d-c} dy + \frac{h_0}{2} \cdot \\
 &\left[\int_c^d \int_a^{(1-\tau)Q+r_0y} \frac{x}{(b-a)(d-c)} dx dy + \int_c^d \int_a^b \frac{(1-\tau)Q+r_0y}{(b-a)(d-c)} dx dy \right] + \\
 &\frac{l_0}{2} \int_c^d \frac{y}{d-c} dy + s_0 \cdot \int_c^d \int_a^{(1-\tau)Q+r_0y} \frac{x-(1-\tau)Q-r_0y}{(b-a)(d-c)} dx dy + \\
 &m_0 \cdot \int_c^d \int_a^{(1-\tau)Q+r_0y} \frac{(1-\tau)Q+r_0y-x}{(b-a)(d-c)} dx dy + k_1 + v_1\tau Q + z_1 + n_1r_1 \int_c^f \frac{y}{d-c} dy + \\
 &u_1 + d_1(1-r_1) \int_c^f \frac{y}{d-c} dy + \frac{h_1}{2} \cdot \left[\int_c^f \int_a^{\tau Q+r_1y} \frac{x}{(b-a)(f-e)} dx dy + \right. \\
 &\left. \int_c^f \int_{\tau Q+r_1y}^b \frac{\tau Q+r_1y}{(b-a)(f-e)} dx dy \right] + \frac{l_1}{2} \cdot \int_c^f \frac{y}{f-e} dy + \\
 &s_1 \cdot \int_c^f \int_{\tau Q+r_1y}^b \frac{x-\tau Q-r_1y}{(b-a)(f-e)} dx dy + m_1 \cdot \int_c^f \int_a^{\tau Q+r_1y} \frac{\tau Q+r_1y-x}{(b-a)(f-e)} dx dy
 \end{aligned} \tag{3}$$

3 模型求解

式(3)分别对 τ 、 r_0 、 r_1 求一阶导数：

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial TC}{\partial \tau} &= \frac{Q^2(4s_0+4m_0-2h_0+4s_1+4m_1-2h_1)}{4(b-a)} \tau + \\
 &\frac{Q(h_0-2s_0-2m_0)(c+d)}{4(b-a)} r_0 + (v_1-v_0)Q + \\
 &\frac{Q(2s_1+2m_1-h_1)(e+f)}{4(b-a)} r_1 + \frac{Q^2(2h_0-4s_0-4m_0)}{4(b-a)} + \\
 &\frac{Q(2bh_1-4bs_1-4am_1+4bs_0+4am_0-2bh_0)}{4(b-a)}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial TC}{\partial r_0} &= \frac{Q(h_0-2s_0-2m_0)(c+d)}{4(b-a)} \tau + \\
 &\frac{(2s_0+2m_0-h_0)(c^2+cd+d^2)}{6(b-a)} r_0 + \frac{(n_0-d_0)(c+d)}{2} + \\
 &\frac{(2s_0Q+2m_0Q-h_0Q+2bs_0-2am_0)(c+d)}{4(b-a)}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial TC}{\partial r_1} &= \frac{Q(2s_1+2m_1-h_1)(e+f)}{4(b-a)} \tau + \\
 &\frac{(2s_1+2m_1-h_1)(e^2+ef+f^2)}{6(b-a)} r_1 + \frac{(n_1-d_1)(e+f)}{2} + \\
 &\frac{(bh_1-2bs_1-2am_1)(e+f)}{4(b-a)}
 \end{aligned}$$

令 $\frac{\partial TC}{\partial \tau} = 0$, $\frac{\partial TC}{\partial r_0} = 0$, $\frac{\partial TC}{\partial r_1} = 0$, 有方程组：

$$\begin{cases} \tau + Ar_0 + Br_1 = C \\ \tau + Dr_0 = E \\ \tau + Fr_1 = G \end{cases}$$

方程组中：

$$\begin{aligned}
 A &= \frac{(h_0-2s_0-2m_0)(c+d)}{Q(4s_0+4m_0-2h_0+4s_1+4m_1-2h_1)} ; \\
 B &= \frac{(2s_1+2m_1-h_1)(e+f)}{Q(4s_0+4m_0-2h_0+4s_1+4m_1-2h_1)} ; \\
 C &= \frac{4bs_1+4am_1-2bh_1+2bh_0-4bs_0-4am_0}{Q(4s_0+4m_0-2h_0+4s_1+4m_1-2h_1)} + \\
 &\frac{Q(4s_0+4m_0-2h_0)+4(v_0-v_1)(b-a)}{Q(4s_0+4m_0-2h_0+4s_1+4m_1-2h_1)} ; \\
 D &= -\frac{2(c^2+cd+d^2)}{3Q(c+d)} ; \\
 E &= \frac{h_0Q-2s_0Q-2m_0Q+2bs_0+2am_0-bh_0}{Q(h_0-2s_0-2m_0)} + \frac{2(d_0-n_0)(b-a)}{Q(h_0-2s_0-2m_0)} ; \\
 F &= \frac{2(e^2+ef+f^2)}{3Q(e+f)} ; \\
 G &= \frac{(2bs_1+2am_1-bh_1)+2(d_1-n_1)(b-a)}{Q(2s_1+2m_1-h_1)} .
 \end{aligned}$$

解方程组得到：

$$\begin{aligned}
 \tau &= \frac{CDF - AEF - BDG}{DF - AF - BD} ; \\
 r_0 &= \frac{EF + BG - BE - CF}{DF - AF - BD} ; \\
 r_1 &= \frac{AE + DG - AG - CD}{DF - AF - BD} .
 \end{aligned}$$

4 数值计算与敏感性分析

4.1 数值计算

分别做以下赋值： $[a, b]=[500, 800]$, $[c, d]=[100, 500]$, $[e, f]=[200, 600]$ 。初始产品总生产量 $Q=1000$ ，从生产总成本的目标函数当中可知固定成本不影响最优的决策。因此，只考虑与产品生产成本相关的变动成本参数的影响（后一节做敏感性分析也是一样），取所有的固定成本参数等于0，具体为： $k_0=0, k_1=0, v_0=0.5, v_1=1, z_0=0, z_1=0, n_0=0.8, n_1=1.5, h_0=0.2, h_1=0.3, l_0=0.1, l_1=0.2, u_0=0, u_1=0, d_0=0.3, d_1=0.4, s_0=1.5, s_1=2.5, m_0=0.4, m_1=0.5$ 。根据第3部分的结论计算数例的最优结果： $\tau_1=0.553, r_0=0.590, r_1=0.181, TC=1688.412$ 。

4.2 敏感性分析

取12个成本参数： $v_0, v_1, n_0, n_1, h_0, h_1, d_0, d_1, s_0, s_1, m_0, m_1$ 作为自变量，为分析 τ_1, τ_2, r_1, r_2 和 TC 的敏感性变化，分别绘制相对应的敏感分析图2~图13，由于篇幅所限，作者保留与图相对应的数据。

从图2可看出，随着单位普通产品的变动成本增加，生产商会提高产品的生态设计率以弥补变动成本增加带来的损失，同时降低两类产品的回收再造率，但生产总成本在总体上会小幅度增加。

从图3可看出，随着单位生态产品的变动成本增加，生产商会降低产品的生态设计率以弥补变动成本增加带来的损失，同时提高了生态产品的回收再造率，降低普通产

品的回收再造率，但生产总成本在总体上会小幅度增加。

从图4可看出，随着单位普通产品再造的变动成本增加，生产商小幅度提高生态设计率和生态产品的回收再造率，大幅降低普通产品的回收再造率就可以保证生产成本不受影响。

从图5可看出，随着单位生态产品再造的变动成本增加，生产商降低生态产品的回收再造率，大幅度提高普通产品的回收再造率，生态设计率有微小的提高，但生产总成本在总体上只有微小的增加。

从图6可看出，随着单位普通产品的处置成本增加，生产商一开始会大幅度提高普通产品的废旧品回收再造率，但达到一定增幅后会保持不变，同时保持生态设计率和生态产品的回收再造率水平，生产总成本在总体上受影响很微小。

从图7可看出，随着单位生态产品的处置成本增加，生产商会大幅度提高生态产品的回收再造率，并小幅度降低生态设计率，普通产品的回收再造率有所降低，以保证生产总成本不受影响。

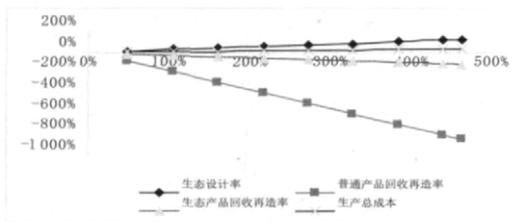


图2 基于 v_0 的 τ_1, τ_2, r_1, r_2 和 TC 敏感性分析图

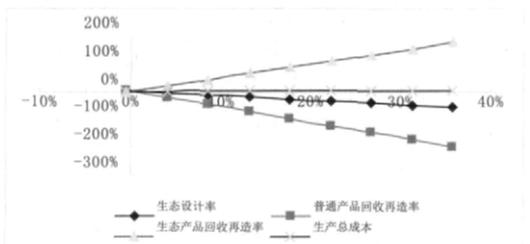


图3 基于 v_1 的 τ_1, τ_2, r_1, r_2 和 TC 敏感性分析图

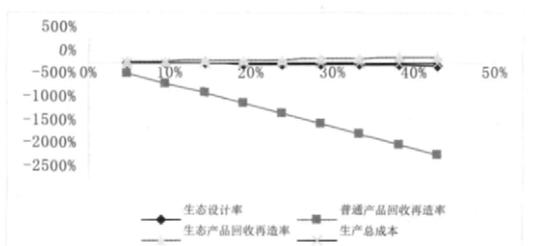


图4 基于 n_0 的 τ_1, τ_2, r_1, r_2 和 TC 敏感性分析图

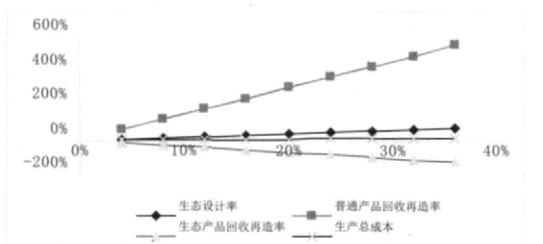


图5 基于 n_1 的 τ_1, τ_2, r_1, r_2 和 TC 敏感性分析图

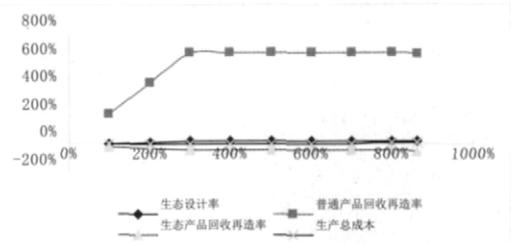


图6 基于 d_0 的 τ_1, τ_2, r_1, r_2 和 TC 敏感性分析图

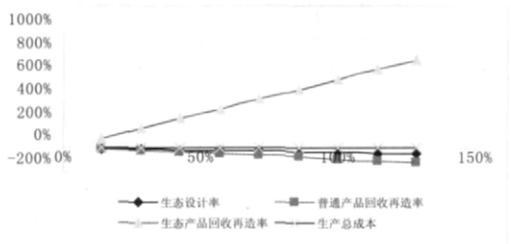


图7 基于 d_1 的 τ_1, τ_2, r_1, r_2 和 TC 敏感性分析图

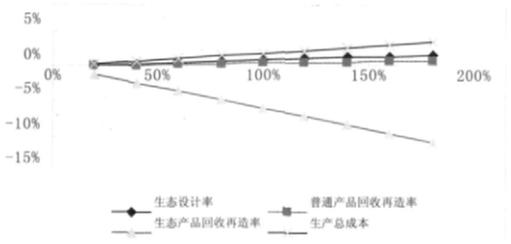


图8 基于 h_0 的 τ_1, τ_2, r_1, r_2 和 TC 敏感性分析图

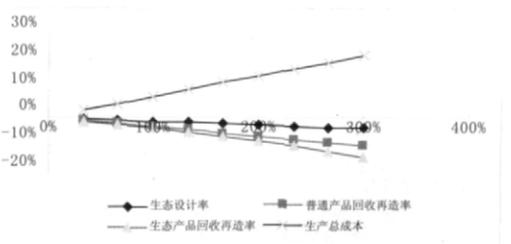


图9 基于 h_1 的 τ_1, τ_2, r_1, r_2 和 TC 敏感性分析图

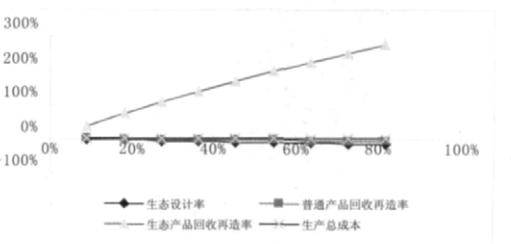
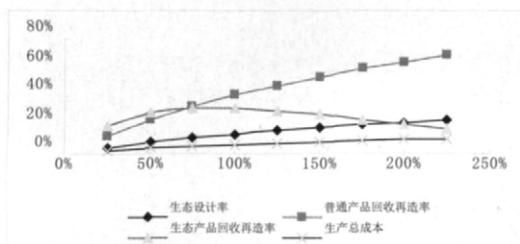
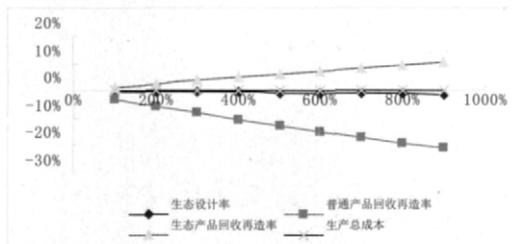
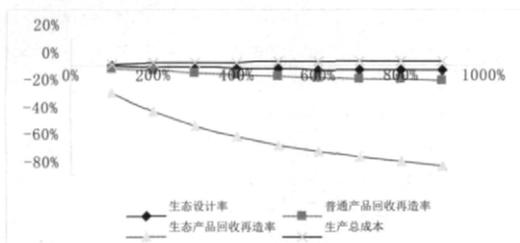


图10 基于 s_0 的 τ_1, τ_2, r_1, r_2 和 TC 敏感性分析图

图 11 基于 s_1 的 τ_1, τ_2, r_1, r_2 和 TC 敏感性分析图图 12 基于 m_0 的 τ_1, τ_2, r_1, r_2 和 TC 敏感性分析图图 13 基于 m_1 的 τ_1, τ_2, r_1, r_2 和 TC 敏感性分析图

从图 8 可看出,随着流通中单位普通产品的库存成本增加,生产商小幅度提高了生态设计率和普通产品的回收再造率,大幅度降低了生态产品的回收再造率,但生产总成本有所增加。

从图 9 可看出,随着流通中单位生态产品的库存成本增加,生产商小幅度降低生态设计率,并且明显降低了两类产品的回收再造率,但生产总成本大幅度增加。

从图 10 可看出,随着普通产品的缺货成本增加,生产商小幅度降低了生态设计率,大幅度提高了生态产品的回收再造率,而普通产品的回收再造率维持不变,但生产总成本不受影响。

从图 11 可看出,随着生态产品的缺货成本增加,生产商会逐渐提高生态设计率,大幅度提高普通产品的回收再造率,生态产品的回收再造率先提高后逐渐降低,但生产总成本会小幅度增加。

从图 12 可看出,随着普通产品的库存积压成本增加,生产商会大幅度降低普通产品的回收再造率和大幅度提高生态产品的回收再造率,而生态设计率维持不变,但生产总成本不受影响。

从图 13 可看出,随着生态产品的库存积压成本增加,生产商会小幅度降低生态设计率和普通产品回收再造率,

大幅度降低生态产品的回收再造率,但生产总成本小幅度增加。

综上所述,依据本例给出的数据做敏感性分析结果中,生产总成本变化明显的情形是在流通中的两类产品的单位产品库存成本增加时(图 8、图 9 所示),究其原因是因为两类产品的单位缺货成本均分别高于流通中的单位产品库存成本,调整生态设计率和回收再造率参数均不能对冲流通中增加的库存成本。而在其他情形下,生产总成本受影响很小。

5 结语

本文研究了随机市场需求和回收数量情况下,以生产总成本最小化为目标,生产商产品系统设计和再制造的最优决策。同时进行了敏感性分析,深刻探讨了普通产品和生态产品相关参数对生态设计率、普通产品回收再造率、生态产品再造率和生产总成本的影响,研究结果为生产商应对各成本参数的变化提供了可取的策略性选择,具有实用的实践价值。此外,本文假定两类产品的再造产品和新产品没有差异,以及不考虑生产提前期的影响,如果扩展到所有生产商的实际经营过程中,那么在这两方面的研究还有待深入。

参考文献:

- [1]李昆,魏晓平.产品系统生态因子选择动力研究[J].管理科学学报,2008,11(2):35~42.
- [2]Wendy K, Chris R. Ecoefficiency Gains from Remanufacturing: A Case Study of Photocopier Remanufacturing at Fuji Xerox Australia [J]. Journal of Cleaner Production, 2001, 9(1): 75-81.
- [3]Jeraldo F, Jayashankar M. Managing New/Remanufactured Products [J]. Management Science. 2006, 52 (1): 15-26.
- [4]Karl I. Optimal Policies in Hybrid Manufacturing/Remanufacturing Systems with Product Substitution [J]. Production Economics, 2004, 90(3): 325-343.
- [5]Ou T, Robert W. Grubbstrom. Considering Stochastic Lead Times in a Manufacturing/Remanufacturing System With Deterministic Demands And Returns [J]. Production Economics, 2005, 93-94(1): 285-300.
- [6]Li Z, Mohamed M N, Ou T, et al. Dynamic Performance of a Hybrid Inventory System with a Kanban Policy in Remanufacturing Process [J]. Omega, 2006, 34(6): 585-598.
- [7]LI X, LI Y J, CAI X Q. Collection Pricing Decision in a Remanufacturing System Considering Random Yield and Random Demand [J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2009, 29(8): 19-27.
- [8]袁开福,高阳.再制造能力有限的多产品混合系统库存决策[J].运筹与管理,2011,20(4):82~89.
- [9]Wang J, Zhao J, Wang X. Optimum Policy in Hybrid Manufacturing/Remanufacturing System [J]. Computers & Industrial Engineering, 2011, 60(3): 411-419.