

基于 REVD 考虑碳排放的零部件再制造决策^①

刘碧玉^{1,2}, 陈伟达^{2*}, 杨海东¹

(1. 福州大学经济与管理学院, 福州 350116; 2. 东南大学经济管理学院, 南京 211189)

摘要: 在只知道需求分布部分信息条件下, 研究三种碳排放政策(碳限额、碳税和碳权交易)下零部件再制造决策问题. 首先根据销售收入、再制造成本、废弃处理成本、库存持有成本和缺货成本等构建总利润最大化的基本模型, 并在此基础上分别扩展建立三种碳排放政策情形下包括碳排放成本的生产决策优化模型; 然后将它转化为 REVD(relative expected value distribution) 模型进行求解, 在具有相同一阶矩、二阶矩的分布集合中, 以最小化相对后悔值为鲁棒标准, 寻找使得最坏分布下期期望利润最大的最优再制造数; 最后通过算例分析再制造率、有无碳排放政策以及三种不同碳排放政策的严惩程度对再制造数和总利润的影响, 以期对再制造商和碳排放政策制定方在制定决策时提供帮助.

关键词: 再制造; 生产决策; REVD; 碳排放; 有限分布信息

中图分类号: F205; F224.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-9807(2016)10-0048-13

0 引言

在环境日益恶化现状的驱动和政府法规的强制下, 基于环保意识进行制造和产品回收(ECM-PRO, environmentally conscious manufacturing and product recovery) 已经成为一个重要的和强制性的概念^[1]. 而在产品回收后, 最必不可少的环节就是拆卸和再制造^[2]. 对于大多数耐用产品来说, 产品的寿命周期往往比设计周期长, 例如汽车、打印机和移动电话常常在以前设计制造的产品仍在使用时, 就开始了新的设计, 即使回收产品能恢复到“新产品”状态, 但产品市场很可能已没有这个需求. 此时, 再制造的目标不再是整个产品, 而是零部件. 在这种再制造需求环境下, 一些独立的零部件再制造商应运而生, 他们将零部件从不同种回收产品中拆卸下来后, 通过再制造以满足不同的零部件需求^[3]. 本文即研究这种情形下独立再制造商的生产决策问题.

目前一些学者分别从不同视角, 如回收价格^[4]、质量状况^[5]、顾客偏好^[6]、新品/再制品成本和价格差异^[7,8]以及需求信息预测^[9]等方面对制造/再制造混合系统的产成品层面的生产决策问题进行了研究, 在这些研究中, 他们考虑“再制品”与新品的成本节约, 重点优化新品与再制品的生产数量, 这里的“再制品”是与新品具有同等功用的产成品, 而不是零部件, 且优化目标主要为经济指标. 然而, 近年来, 全球气候变暖已成为人类面临的重大挑战, 为了减缓这一进程, 2005 年正式生效的国际公约《京都议定书》设定了一种通过管制和市场双重手段以有效达到减排效果的“减排机制”: 针对每个国家或地区设定排放限额, 允许“排放权交易”. 最终各国或各地区必须将国家宏观层面的减排目标分解落实到企业微观生产运作层面, 并针对企业制定相应的配额和交易政策. 研究表明, 生产环节是能源、资源消耗和污染物排放的主要环节, 也是节约潜力最大和废

① 收稿日期: 2013-11-08; 修订日期: 2014-12-02.

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(71501046); 国家自然科学基金面上基金资助项目(71571042; 71271054; 70971022).

通信作者: 陈伟达(1965—), 男, 浙江海宁人, 博士, 教授, 博士生导师. Email: cwd@seu.edu.cn

弃物循环利用的关键节点^[10]。因此,从生产计划层面考虑碳排放将成为新的研究趋势。对于零部件独立再制造商来说,其主要生产过程为拆卸和再制造,这些是主要的碳排放环节。由于回收产品质量的差异性,零部件具有不同的再制造率,这将导致不同程度的碳排放量。对于再制造率高的零部件,碳排放量相对较少,但对于再制造率较低的零部件,则会产生大量碳排放。因此,考虑碳排放研究独立再制造商的生产决策问题具有重要的理论和现实意义。

综观国内外研究现状,已有一些文献针对一般制造业在生产决策问题研究中考虑了碳排放,但才刚刚起步,相关文献较少。如 Liao 和 Önal 等^[11]探讨了碳权交易导致的产品成本差异,提出碳排放成本已成为生产成本的一部分,与企业的产品决策高度相关,对产品组合和配置有一定的影响; Letmathe 和 Balakrishnan^[12]研究了环境约束下企业最优产品组合问题; Nabil 和 Stéphane 等^[13]研究了碳排放约束下单产品不同生产和运输模式下的产品组合生产批量问题。也有学者从碳排放获取渠道的角度研究了企业生产策略问题,如杜少甫等^[14]分别针对确定净化水平与可控净化水平的情形建立了考虑政府配额、市场交易和净化处理三种排放权获取渠道的企业生产优化模型,得到了确定性需求和有排放限额下的最优生产策略。上述文献说明,碳排放权作为一种新的生产要素已经引起企业和学术界的重视。

除了碳排放权交易市场的迅速发展,碳税也受到各国的关注。但采取哪种政策在我国仍存在争议,除此之外,即使确定了碳排放政策,奖惩的程度和约束的严厉程度也存在着不确定性,不同地方的碳排放许可价格也会有不同程度的波动。未来,碳排放政策将扮演日益重要的角色,企业的各方面决策尤其是生产决策将受到重大影响,越来越多的企业将碳排放权纳入经营决策中。有一些学者从碳排放政策的角度研究了企业的生产计划优化问题,如 Zhang 和 Xu^[15]研究了碳排放限额与交易政策下多产品生产计划问题,建立了一个利润最大化模型,分析了生产和碳交易决策,并与碳税政策进行了比较; Song 和 Leng^[16]研究了单周期单产品在碳排放限额、碳税和碳权交易三

种政策下一般制造业的生产决策问题;常香云等^[17]分析了碳税、碳排放限额等政策对企业制造/再制造生产决策的影响;申成然和熊中楷^[18]研究了强制减排和碳排放权交易两种政策下制造商新品和再制品生产决策问题。虽然以上文献考虑了碳排放政策对生产决策的影响,但文献[15,16]均是针对一般制造业,其模型未能体现再制造率并非 100% 这一区别于传统制造业的再制造业的特征,因而并不能将其移植应用到再制造业;文献[17,18]假设新品和再制品同质,共同满足市场需求,其区别体现在碳排放量的差异上,而未体现不同级别回收产品再制造过程的碳排放量,因而其模型和方法同样不适用于独立再制造商。

对于独立再制造商来说,虽然是顺应碳减排政策而产生的,但和其他一般制造业一样,其经营目标仍然是为了盈利。因而,作为出于环境考虑的碳排放政策制定方和从利润角度考虑的再制造商,需要寻求经济利益和环境影响的平衡点,即要考虑以下问题:在不同碳排放政策下再制造商该如何决策?碳排放政策对再制造决策的影响是什么?哪种碳排放政策更有利于促进再制造商的发展?应如何制定碳排放政策以及严惩程度等?基于这些问题,本文首先分析再制造过程,建立不考虑碳排放政策的基础模型,然后分别扩展到碳排放限额、碳税和碳权交易三种政策下的生产决策优化模型。此外,较之其他产品的市场需求,再制造零部件的需求波动更大,其具体分布一般很难确定,但其部分信息,如一阶矩、二阶矩等可以通过统计数据比较容易得到。因此,不同于以往大多数文献对于需求变量为正态分布的假设,本文在只知需求一阶矩、二阶矩有限分布信息下,针对研究的问题构建 REVD(relative expected value of distribution) 模型进行求解(将在 3.1 对该方法进行讨论),即基于最小化决策相对后悔值的原则,寻求最优再制造数以最大化最小期望利润;最后通过算例分析有无碳排放政策情形下再制造率对再制造商生产数量和总利润的影响,以及各种碳排放政策的严惩程度对再制造商利润的影响。以期再制造商在不同碳排放政策下制定生产决策时提供理论指导,并为政策制定方制定合理的碳排放政策促进再制造业的发展提供帮助。

1 问题描述及参数定义

对于独立的零部件再制造商来说,其再制造过程如图 1 所示.废旧产品回收回来后,进入拆卸车间进行拆卸,然后进行再制造,再制

造成成功后的零部件销往需求市场,未成功的零部件则进行废弃处理.在本文研究的问题中,由于考虑碳排放政策对再制造决策的影响,为平衡经济利益和环境影响,那些质量等级低,再制造成本高且碳排放量大的零部件也将被废弃处理.

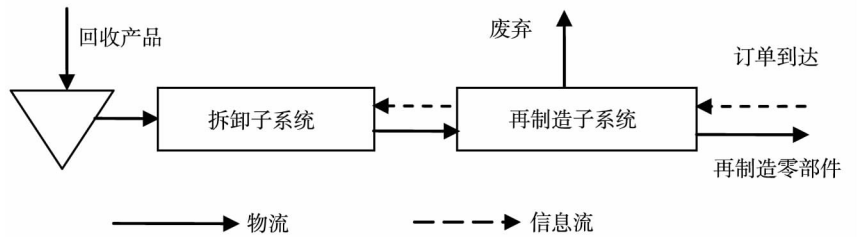


图 1 零部件再制造过程

Fig.1 The process of remanufacturing parts

根据实际的再制造过程,产生的成本包括再制造成本、废弃处理成本、库存持有成本、缺货成本以及碳排放成本.因而,本文所建立的模型涉及到的参数如下所示:

- q_r —再制造数,为决策变量;
- α —再制造率,即表示拆卸后零部件再制造成功的概率;
- D —零部件的市场需求,为随机变量;
- $F(D)$ —随机变量 D 的概率分布函数;
- $f(D)$ —随机变量 D 的概率密度函数;
- μ —随机变量 D 的一阶矩;
- $\mu^2 + \sigma^2$ —随机变量 D 的二阶矩,其中 σ^2 为方差;
- c_w —未再制造成功或未被选择进行再制造的零部件的单位废弃处理成本;
- c_r —零部件单位再制造成本;
- p —再制造零部件单位销售价格;
- h —再制造零部件单位库存持有成本;
- c —未满足市场需求的零部件单位缺货成本,为不失一般性,假设 $c > h$;
- M —碳排放限额;
- e —再制造单位零部件的碳排放量;

- ξ —政府对超出碳排放限额部分征收的单位惩罚性税款;
- δ —每单位碳排放量所需缴纳的税款;
- ε_1 —每单位碳排放权的买入价格;
- ε_2 —每单位碳排放权的卖出价格,假设 $\varepsilon_1 > \varepsilon_2$;
- Π^{iw} —总利润,为优化目标,其中 $i = w, x, s, j$,分别表示不考虑碳排放、碳限额、碳税和碳权交易四种情形.

2 模型构建

本文首先根据实际的再制造过程,在不考虑碳排放政策下,建立再制造商生产优化决策基础模型,然后再扩展建立碳限额、碳税和碳权交易三种政策下的优化模型.

2.1 不考虑碳排放政策

如图 1 所示,在不考虑碳排放政策下,零部件再制造过程包括再制造成本、废弃处理成本、库存持有成本和缺货成本,根据以上分析建立的优化模型如下

$$\begin{aligned} \max_{q_r \geq 0} \Pi_f^{nw}(q_r) &= \max_{q_r \geq 0} \left\{ pE_F(\min(\alpha q_r, D)) - [c_r q_r + (1 - \alpha) q_r c_w + \right. \\ &\quad \left. hE_F(\alpha q_r - D)^+ + cE_F(D - \alpha q_r)^+] \right\} \\ \text{s. t.} \quad &\begin{cases} E(D) = \mu \\ E(D^2) = \mu^2 + \sigma^2 \end{cases} \end{aligned} \tag{1}$$

式中 c_r, q_r 为再制造成本, $(1 - \alpha) q_r, c_w$ 为未再制造成功的零部件的废弃处理成本, x^+ 表示当 $x > 0$ 时, 取 x ; 否则, 取 0. $hE_F(\alpha q_r - D)^+$ 表示当再制造零部件数大于零部件需求数时, 产生的期望库存持有成本; $cE_F(D - \alpha q_r)^+$ 表示当再制造零部件数不足以满足零部件市场需求时, 产生的期望缺货成本; 约束条件 $E(D) = \mu, E(D^2) = \mu^2 + \sigma^2$ 分别表示随机变量 D 的一阶矩和二阶矩, 即随机变量 D 为具有相同一阶矩 (μ) 和二阶矩 ($\mu^2 + \sigma^2$) 的分布集合. 式 (3)、(5) 和 (7) 中的约束条件亦同.

为方便模型求解, 令 $\alpha q_r = q$. 根据 $\min(D, \alpha q_r) = \alpha q_r - (\alpha q_r - D)^+$ 式 (1) 中的目标函数可以写为

$$\begin{aligned} \max_{q_r \geq 0} \Pi_f^{sw}(q_r) &= \max_{q_r \geq 0} \left\{ pE_F \min(\alpha q_r, D) - [c_r q_r + (1 - \alpha) q_r c_w + hE_F(\alpha q_r - D)^+ + cE_F(D - \alpha q_r)^+ + \xi(e q_r - M)^+] \right\} \\ \text{s. t. } &\begin{cases} E(D) = \mu \\ E(D^2) = \mu^2 + \sigma^2 \end{cases} \end{aligned} \quad (3)$$

同理 2.1 式 (3) 中的目标函数可以写为

$$\begin{aligned} \max_{q_r \geq 0} \Pi_f^{sw}(q_r) &= \max_{q_r \geq 0} G_f^{sw}(q) = \\ \max_{q_r \geq 0} E_F &\left\{ \left[p - \frac{c_r + (1 - \alpha) c_w}{\alpha} \right] q - (p + h)(q - D)^+ - c(D - q)^+ - \frac{e\xi}{\alpha} \left(q - \frac{\alpha}{e} M \right)^+ \right\} \end{aligned} \quad (4)$$

2) 碳税

在碳税政策下, 政府不为企业设定固定的限额, 将针对碳排放企业产生的所有碳排放量按单位排放量 δ 的价格征收税款, 因而再制造 q_r 个零部件所产生的碳排放成本为 $\delta e q_r$. 则在这种情形下的优化模型为

$$\begin{aligned} \max_{q_r \geq 0} \Pi_f^{sw}(q_r) &= \\ \max_{q_r \geq 0} &\left\{ pE_F \min(\alpha q_r, D) - [c_r q_r + (1 - \alpha) q_r c_w + hE_F(\alpha q_r - D)^+ + cE_F(D - \alpha q_r)^+ + \delta e q_r] \right\} \\ \text{s. t. } &\begin{cases} E(D) = \mu \\ E(D^2) = \mu^2 + \sigma^2 \end{cases} \end{aligned} \quad (5)$$

同理 2.1 式 (5) 中的目标函数可以写为

$$\begin{aligned} \max_{q_r \geq 0} [\Pi_f^{sw}(q_r)] &= \max_{q_r \geq 0} G_f^{sw}(q) = \\ \max_{q_r \geq 0} E_F &\left\{ \left[p - \frac{c_r}{\alpha} - \left(\frac{1 - \alpha}{\alpha} \right) c_w \right] q - (p + h)(q - D)^+ - c(D - q)^+ \right\} \end{aligned} \quad (2)$$

2.2 考虑碳排放政策

再制造的初衷主要是出于环境考虑, 本文考虑碳排放政策对再制造商决策的影响. 因而以下根据三种不同碳排放政策分别建立优化模型.

1) 碳限额

碳限额政策是指政府根据企业性质等碳排放情况分配一定的碳排放权, 即表示企业的碳排放量不能超过这一限额, 否则, 政府对超过部分将征收较高的惩罚性税款. 本文设定碳排放限额为 M , 单位惩罚性税款为 ξ , 则优化模型为

$$\begin{aligned} \max_{q_r \geq 0} \Pi_f^{sw}(q_r) &= \max_{q_r \geq 0} G_f^{sw}(q) = \\ \max_{q_r \geq 0} E_F &\left\{ \left[p - \frac{c_r + (1 - \alpha) c_w + \delta e}{\alpha} \right] q - (p + h)(q - D)^+ - c(D - q)^+ - \xi(e q_r - M)^+ \right\} \end{aligned} \quad (6)$$

3) 碳权交易

在这种政策下, 政府会根据企业的实际情况分配一定的碳排放限额, 如果排放量超出限额, 为避免政府的罚款和制裁, 企业则必须购买额外的排放权; 反之, 也可以出售多余的碳权, 此种政策相对于碳排放政策来说, 灵活性更大, 可以根据企业实际的碳排放消耗量进行买入或卖出. 本文设定碳排放限额为 M , 买入价格为 ε_1 , 卖出价格为 ε_2 , 因而优化模型为

$$\begin{aligned} \max_{q_r \geq 0} \Pi_f^{sw}(q_r) &= \\ \max_{q_r \geq 0} &\left\{ pE_F \min(\alpha q_r, D) - [c_r q_r + (1 - \alpha) q_r c_w + hE_F(\alpha q_r - D)^+ + cE_F(D - \alpha q_r)^+ + \varepsilon_1(e q_r - M)^+ + \varepsilon_2(M - e q_r)^+] \right\} \\ \text{s. t. } &\begin{cases} E(D) = \mu \\ E(D^2) = \mu^2 + \sigma^2 \end{cases} \end{aligned} \quad (7)$$

式中 $\varepsilon_1(eq_r - M)^+$ 表示当碳排放量超过限额(即 $eq_r > M$) 时,因买入碳权而产生的成本, $\varepsilon_2(M - eq_r)^+$ 表示当碳排放量未超过限额(即 $eq_r < M$) 时,售出多余碳权而获得的收益.

同理 2.1 式(7) 中的目标函数可以写为

$$\max_{q_r \geq 0} E_f \left\{ \begin{aligned} & [p - \frac{c_r + (1 - \alpha)c_w}{\alpha}]q - (p + h) \times \\ & (q - D)^+ - c(D - q)^+ - \frac{e\varepsilon_1}{\alpha} (q - \frac{\alpha M}{e})^+ + \\ & \frac{e\varepsilon_2}{\alpha} (\frac{\alpha M}{e} - q)^+ \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

3 模型求解

由上述模型可以看出,其结构类似于经典的“报童模型”. 在确定报童模型的最优控制参数时,通常的做法是:通过历史数据得到均值和方差,然后假设其服从某一具体分布再进行求解. 然而,这些假设往往只是基于较有限的统计数据得到,假设本身有可能与实际分布不吻合,若不吻合,将会导致求解结果与最优结果偏离较大. 鉴于这一实际情况以及再制造零部件市场需求的高变动性而难以得到其具体分布的现实,本文基于“Scarf’s rule”的思想^[19, 20],在只知再制造零部件需求分布部分信息(即一阶矩、二阶矩)条件下,为保证解的鲁棒性,针对所研究的问题构建 REVD 模型进行求解.

3.1 REVD 模型

REVD 模型是基于“Scarf’s rule”和 AEVD (absolute expected value distribution)^[21] 提出的一种随机鲁棒模型^[22]. 这三者都用于解决有限分布信息条件下的报童问题,分别代表了三种标准:绝对鲁棒标准、鲁棒偏差和相对鲁棒标准. 其中,“Scarf’s rule”的目标旨在使得最坏分布情况下的优化目标最优,由此得到的决策结果有可能过于保守;AEVD 和 REVD 模型则为最小化决策后悔值,若定义 $G_f(q)$ 为决策值, $G_f(q_f^*)$

为真实需求分布下的最优值,则 AEVD 表示两者的差值(即 $AEVD_f(q) = G_f(q) - G_f(q_f^*)$),其目标即为 $\min_q \max_{f \in H(\cdot)} AEVD_f(q)$; 而 REVD 则表示

两者的比值(即 $REVD_f(q) = \frac{G_f(q)}{G_f(q_f^*)}$),其目标

即为 $\min_q \max_{f \in H(\cdot)} REVD_f(q)$. 由此可以看出,AEVD

模型为最小化绝对后悔值,而 REVD 模型则为最小化相对后悔值,当 AEVD 的值变动较大或需求分布在较宽范围内浮动时,REVD 更能体现实际的后悔值大小. 因而本文鉴于再制造零部件需求分布的较大不确定性,针对所研究的问题构建 REVD 模型进行求解.

3.2 不考虑碳排放政策

首先对基本模型即(1) 进行求解,其对应的 REVD 模型为

$$\max_{q \geq 0} \min_{f \sim H(\mu, (\mu^2 + \sigma^2), [0, +\infty))} REVD_f(q) = \max_{q \geq 0} \min_{f \sim H(\mu, (\mu^2 + \sigma^2), [0, +\infty))} \frac{G_f^{nw}(q)}{G_f^{nw}(q_f^*)} \quad (9)$$

其中 $H(\mu, (\mu^2 + \sigma^2), [0, +\infty))$ 表示一阶矩为 μ , 二阶矩为 $(\mu^2 + \sigma^2)$ 的分布集合.

对上述模型的求解思路为:①首先说明对于任意的再制造数 $q_r \geq 0$,最小的 $REVD_f(q)$ 在两点分布中取得,并找到对应的两点分布;②然后在两点分布里寻找最优的再制造数 q_r ,最大化最小的 $REVD_f(q)$. 为说明①,同理文献[21, 22] 得到引理 1 如下.

引理 1 对于给定的 μ, σ , 任意 $q \in [0, +\infty)$ 以及 $f \in H(\mu, (\mu^2 + \sigma^2), [0, +\infty))$, 存在两点分布 $\{T(\gamma) \mid -(p + h) < \gamma \leq \gamma_0\} \in H(\mu, (\mu^2 + \sigma^2), [0, +\infty))$ 使得 $REVD_f(q) \geq REVD_{T(\gamma)}(q)$. 其中, $-(p + h) < \gamma \leq \gamma_0$, $T(\gamma)$ 分别以概率 $\omega_1(\gamma) = (c - \gamma) / (p + h + c)$ 、 $\omega_2(\gamma) = (p + h + \gamma) / (p + h + c)$ 使得

$$\begin{aligned} q_1(\gamma) &= \mu - \sigma \sqrt{\frac{p + h + \gamma}{c - \gamma}}, \\ q_2(\gamma) &= \mu + \sigma \sqrt{\frac{c - \gamma}{p + h + \gamma}} \end{aligned} \quad (10)$$

令 $q_1^{-1}(q), q_2^{-1}(q)$ 为 $q_1(\gamma), q_2(\gamma)$ 的反函

数 则 $\gamma_0 = q_1^{-1}(0) = \frac{c\mu^2 - (p+h)\sigma^2}{\mu^2 + \sigma^2}$.

由引理 1 可以得到 最小的 $REVD_f(q)$ 存在于上述两点分布集合中, 记 $\min REVD_f(q) = REVD_{\min}(q)$, 则 $\min REVD_f(q)$ 的优化问题等价于在 $-(p+h) <$

$$G_{T(\gamma)}^{wv}(q) = \begin{cases} C_R q + c(q - \mu) & \text{if } 0 \leq q < q_1(\gamma) \\ C_R q + \sigma \sqrt{(c - \gamma)(p + h + \gamma)} + \gamma(q - \mu) & \text{if } q_1(\gamma) \leq q < q_2(\gamma) \\ C_R q - (p + h)(q - \mu) & \text{if } q_2(\gamma) \leq q \end{cases} \quad (11)$$

其中 $C_R = p - \frac{c_r + (1 - \alpha)c_w}{\alpha}$.

从式(11) 可以看出 $G_{T(\gamma)}^{wv}(q)$ 由三段函数组

$\gamma \leq \gamma_0$ 中寻求一个 γ 使得 $REVD_{T(\gamma)}(q)$ 最小, 即 $REVD_{\min}(q) = \min_{\gamma_0 \leq \gamma < p} \{REVD_{T(\gamma)}(q)\}$.

在两点分布 $T(\gamma)$ 下, 目标函数 $G_f^{wv}(q)$ 可以写为

$$G_{T(\gamma)}^{wv}(q) = \begin{cases} C_R q + c(q - \mu) & \text{if } 0 \leq q < q_1(\gamma) \\ C_R q + \sigma \sqrt{(c - \gamma)(p + h + \gamma)} + \gamma(q - \mu) & \text{if } q_1(\gamma) \leq q < q_2(\gamma) \\ C_R q - (p + h)(q - \mu) & \text{if } q_2(\gamma) \leq q \end{cases} \quad (11)$$

成, 如图 2 所示. 令 $q_{T(\gamma)}^*$ 为最大化 $G_{T(\gamma)}^{wv}(q)$ 的最优值, 由图 2 可以看出, 当 $\gamma > -c_R$ 时, $q_{T(\gamma)}^* = q_2(\gamma)$; 当 $\gamma < -c_R$ 时 $q_{T(\gamma)}^* = q_1(\gamma)$.

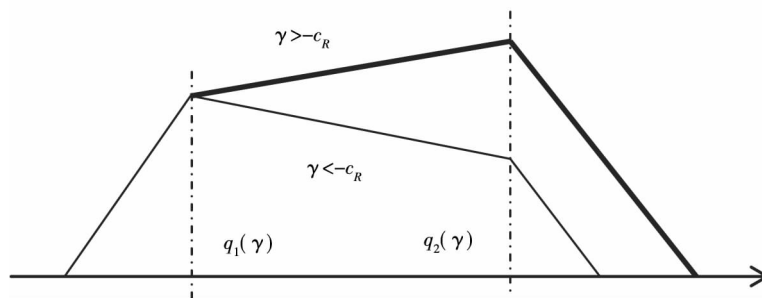


图 2 $G_{T(\gamma)}^{wv}(q)$ 关于 q 的变化趋势
Fig. 2 The change trend of $G_{T(\gamma)}^{wv}(q)$ over q

为方便下面的计算, 令

$$V_-(q, \gamma) := REVD_{T(\gamma)}(q) \Big|_{-(p+h) < \gamma \leq -c_R, q_1(\gamma) \leq q \leq q_2(\gamma)} = \frac{G_{T(\gamma)}(q)}{G_{T(\gamma)}(q_1(\gamma))} \Big|_{q_1(\gamma) \leq q \leq q_2(\gamma)}$$

$$= \frac{C_R q + \sigma \sqrt{(c - \gamma)(p + h + \gamma)} + \gamma(q - \mu)}{C_R q_1(\gamma) + \sigma \sqrt{(c - \gamma)(p + h + \gamma)} - \gamma(\sigma \sqrt{(p + h + \gamma)} / (c - \gamma))}$$

$$V_+(q, \gamma) := REVD_{T(\gamma)}(q) \Big|_{-c_R \leq \gamma \leq \gamma_0, q_1(\gamma) \leq q \leq q_2(\gamma)} = \frac{G_{T(\gamma)}(q)}{G_{T(\gamma)}(q_2(\gamma))} \Big|_{q_1(\gamma) \leq q \leq q_2(\gamma)}$$

$$= \frac{C_R q + \sigma \sqrt{(c - \gamma)(p + h + \gamma)} + \gamma(q - \mu)}{C_R q_2(\gamma) + \sigma \sqrt{(c - \gamma)(p + h + \gamma)} + \gamma(\sigma \sqrt{(c - \gamma)} / (p + h + \gamma))}$$

令 q^e 为最大化最小 REVD 的再制造数, 即 $\max_q (REVD_{\min}(q)) = REVD_{\min}(q^e)$. 则相应得到

① 当 $\gamma_0 < -c_R$ 时

$$REVD_{\min}(q) = \min_{-(p+h) < \gamma \leq \gamma_0} (REVD_{T(\gamma)}(q))$$

$$= \min_{-(p+h) < \gamma \leq \gamma_0} V_-(q, \gamma)$$

因为 $V_-(q, \gamma_1)$ 和 $\min_{-(p+h) \leq \gamma_1 < \gamma_0} V_-(q, \gamma_1)$ 均为 q 的减函数, 因而

$$q^e = 0, REVD_{\min}(q^e) = REVD_{\min}(0) \quad (12)$$

$$= \min_{-(p+h) \leq \gamma \leq \gamma_0} V_-(0, \gamma)$$

② 当 $\gamma_0 \geq -c_R$ 时
同理文献 [22], 可以得到以下引理 2.

引理 2

$$\min_{-(p+h) < \gamma \leq \gamma_0} \{REVD_{T(\gamma)}(q)\} = \min\left\{ \min_{-(p+h) < \gamma_1 \leq -c_R} V_-(q, \gamma_1), \min_{-c_R \leq \gamma_2 \leq \gamma_0} V_+(q, \gamma_2) \right\}$$

因而, 由引理 2, 可以得到下式

$$REVD_{\min}(q) = \min_{-(p+h) < \gamma \leq \gamma_0} (REVD_{T(\gamma)}(q))$$

$$= \min\left\{ \min_{-(p+h) < \gamma_1 \leq -c_R} V_-(q, \gamma_1), \min_{-c_R \leq \gamma_2 \leq \gamma_0} V_+(q, \gamma_2) \right\} \quad (13)$$

又因为

$$\left\{ \begin{array}{l} V_-(q, \gamma_1) \geq 1 \quad \text{for } q \leq q_1(\gamma_1), \\ \quad -(p+h) < \gamma_1 \leq -c_R \\ V_+(q, \gamma_2) \geq 1 \quad \text{for } q \geq q_2(\gamma_2), \\ \quad -c_R \leq \gamma_2 \leq \gamma_0 \end{array} \right. \quad \text{且}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \min_{-(p+h) < \gamma_1 \leq -c_R} q_1(\gamma_1) = q_1(-c_R) \\ \max_{-c_R \leq \gamma_2 \leq \gamma_0} q_2(\gamma_2) = q_2(-c_R) \end{array} \right. \quad \text{因而}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \min_{-(p+h) < \gamma_1 \leq -c_R} V_-(q, \gamma_1) \geq 1 \quad \text{for } q \leq q_1(-c_R) \\ \min_{-c_R \leq \gamma_2 \leq \gamma_0} V_+(q, \gamma_2) \geq 1 \quad \text{for } q \geq q_2(-c_R) \end{array} \right.$$

此外 $V_-(q, \gamma_1)$ 和 $\min_{-(p+h) < \gamma_1 \leq -c_R} V_-(q, \gamma_1)$ 是 q 的减函数, 而 $V_+(q, \gamma_2)$ 和 $\min_{-c_R \leq \gamma_2 \leq \gamma_0} V_+(q, \gamma_2)$ 是 q 的增函数.

因而得到

$$\begin{aligned} q_1(-c_R) \leq q^e \leq q_2(-c_R), \\ \min_{-c_R \leq \gamma_2 \leq \gamma_0} V_+(q^e, \gamma_2) = \min_{-(p+h) < \gamma_1 \leq -c_R} V_-(q^e, \gamma_1) \end{aligned} \quad (14)$$

综上所述得到

$$\begin{aligned} REVD_{\min}(q) = \\ \left\{ \begin{array}{l} \min_{-(p+h) < \gamma_1 \leq -c_R} V_-(q^e, \gamma_1) \quad \text{if } q < q^e \\ \min_{-c_R \leq \gamma_2 \leq \gamma_0} V_+(q^e, \gamma_2) \quad \text{if } q \geq q^e \end{array} \right. \end{aligned} \quad (15)$$

为方便下一步计算最优再制造数 q^e 以最大化的 $REVD_f(q)$, 首先通过以下参数变换对式 (15) 进行进一步简化.

$$\begin{aligned} REVD_{\min}(q^e) &= \min_{0 \leq x < \beta, 0 \leq y < a} g_{\alpha_0 \beta \lambda}(x, y) \\ &= \min_{0 \leq x < \beta, 0 \leq y < a} \left(1 + \frac{(\sqrt{(\alpha_0 + x)/(\beta - x)} + \sqrt{(\beta + y)/(\alpha_0 - y)})xy}{\sqrt{\frac{\alpha_0 + x}{\beta - x}} [\beta + (\beta - 1)\lambda \sqrt{\frac{\beta + y}{\alpha_0 - y}}]x + \sqrt{\frac{\beta + y}{\alpha_0 - y}} [\alpha_0 + (\beta - 1)\lambda \sqrt{\frac{\alpha_0 + x}{\beta - x}}]y} \right) \end{aligned} \quad (19)$$

通过计算雅可比矩阵, 很容易证明 $g(x, y)$ 是关于 (x, y) 的凸函数, 这在算例中也将得到验证. 因而 $g(x, y)$ 存在唯一最小值, 令 x^*, y^* 为对应的最优解, 则其可通过一阶最优条件求得. 进而得到以下结果

$$\theta = \frac{q - \mu}{\sigma}, \quad \alpha_0 = \frac{c + c_R}{p + h}, \quad \beta = \frac{p + h - c_R}{p + h},$$

$$\lambda = \frac{\mu}{\sigma}, \quad x = -\frac{\gamma_1 + c_R}{p + h}, \quad y = \frac{\gamma_2 + c_R}{p + h}, \quad a = \frac{\gamma_0 + c_R}{p + h}$$

(备注: 由于 3.3 节中三种政策下最优再制造数的求解过程与 3.2 节类似, 在此定义相似的参数, 即 $\alpha_i, \beta_i, x_i, y_i, a_i, c_{R_i}$. 其中 $i = 1, 2, 3$, 分别代表碳限额、碳税和碳权交易政策.)

令

$$\left\{ \begin{array}{l} g_-(\theta, x) := V_-(q, \gamma_1) := 1 + \\ \quad \frac{1 + \theta \sqrt{(\alpha_0 + x)/(\beta - x)}}{\alpha_0 + (\beta - 1)\lambda \sqrt{(\alpha_0 + x)/(\beta - x)}} x \\ g_+(\theta, y) := V_+(q, \gamma_2) := 1 + \\ \quad \frac{1 - \theta \sqrt{(\beta + y)/(\alpha_0 - y)}}{\beta + (\beta - 1)\lambda \sqrt{(\beta + y)/(\alpha_0 - y)}} y \end{array} \right. \quad (16)$$

那么, 式(15) 变为

$$REVD_{\min}(q) = \begin{cases} \min_{0 \leq x_1 \leq \beta_1} g_-(\theta, x) & \text{if } q < q^e \\ \min_{0 \leq y_1 \leq a_1} g_+(\theta, y) & \text{if } q \geq q^e \end{cases} \quad (17)$$

式(17) 为对于任意给定的 q 而得到的最小 REVD, 下一步即为寻找最优的再制造数 q^e . 根据式(14) 和式(17), 原问题即转化为求以下优化问题

$$\min_{0 \leq x_1 \leq \beta_1, 0 \leq y_1 \leq a_1} g_-(\theta, x) \quad \text{s.t.} \quad g_-(\theta, x) = g_+(\theta, y) \quad (18)$$

消除 θ , 式(18) 则变为

$$\begin{aligned} \max_{q_r} \min_{f \in H(\mu, \sigma, [0, +\infty])} REVD_f(q_r) = \\ \left\{ \begin{array}{l} \min g_-(-\mu/\sigma, x) & \text{if } \gamma_0 < -c_R \\ g(x^*, y^*) & \text{if } \gamma_0 \geq -c_R \end{array} \right. \end{aligned} \quad (20)$$

$$q_r^* = \begin{cases} 0 & \text{if } \gamma_0 < -c_R \\ \frac{\mu}{\alpha} + \frac{\theta^* \sigma}{\alpha} & \text{if } \gamma_0 \geq -c_R \end{cases} \quad (21)$$

$$\max_{q_r} \Pi_f^{uw}(q_r) = G_{\pi(\gamma)}^{uw}(q_r^*) = \begin{cases} C_R \alpha q_r^* + c(\alpha q_r^* - \mu) & \text{if } 0 \leq \alpha q_r^* < q_1(\gamma) \\ C_R \alpha q_r^* + \sigma \sqrt{(c - \gamma)(p + h + \gamma)} + \gamma(\alpha q_r^* - \mu) & \text{if } q_1(\gamma) \leq \alpha q_r^* < q_2(\gamma) \\ C_R \alpha q_r^* - (p + h)(\alpha q_r^* - \mu) & \text{if } q_2(\gamma) \leq \alpha q_r^* \end{cases} \quad (22)$$

$$\theta^* = \frac{-[\beta + (\beta - 1)\lambda \sqrt{\frac{\beta + y^*}{\alpha_0 - y^*}}]x^* + [\alpha_0 + (\beta - 1)\lambda \sqrt{\frac{\alpha_0 + x^*}{\beta - x^*}}]y^*}{\sqrt{\frac{\alpha_0 + x^*}{\beta - x^*}}[\beta + (\beta - 1)\lambda \sqrt{\frac{\beta + y^*}{\alpha_0 - y^*}}]x^* + \sqrt{\frac{\beta + y^*}{\alpha_0 - y^*}}[\alpha_0 + (\beta - 1)\lambda \sqrt{\frac{\alpha_0 + x^*}{\beta - x^*}}]y^*} \quad (23)$$

3.3 考虑碳排放政策

根据对基本模型的求解思路, 以下分别对三种碳排放政策下的优化模型进行求解.

1) 碳限额

①当 $q_r \geq M/e$ 时, 总的期望利润函数为

$$\max_{q_r \geq 0} \Pi_f^{xw}(q_r) = \max_{q \geq 0} G_f^{xw}(q) =$$

$$\max_{q_r} \Pi_f^{xw}(q_r) = G_{\pi(\gamma)}^{xw}(q_r^{**}) = \begin{cases} C_{R_1} \alpha q_r^{**} + c(\alpha q_r^{**} - \mu) + \xi M & \text{if } 0 \leq \alpha q_r^{**} < q_1(\gamma) \\ C_{R_1} \alpha q_r^{**} + \sigma \sqrt{(c - \gamma)(p + h + \gamma)} + \gamma(\alpha q_r^{**} - \mu) + \xi M & \text{if } q_1(\gamma) \leq \alpha q_r^{**} < q_2(\gamma) \\ C_{R_1} \alpha q_r^{**} - (p + h)(\alpha q_r^{**} - \mu) + \xi M & \text{if } q_2(\gamma) \leq \alpha q_r^{**} \end{cases} \quad (26)$$

其中 $c_{R_1} = c_R - e\xi/\alpha$

$$\theta^{x*} = \frac{-[\beta_1 + (\beta_1 - 1)\lambda \sqrt{\frac{\beta_1 + y_1^*}{\alpha_1 - y_1^*}}]x_1^* + [\alpha_1 + (\beta_1 - 1)\lambda \sqrt{\frac{\alpha_1 + x_1^*}{\beta_1 - x_1^*}}]y_1^*}{\sqrt{\frac{\alpha_1 + x_1^*}{\beta_1 - x_1^*}}[\beta_1 + (\beta_1 - 1)\lambda \sqrt{\frac{\beta_1 + y_1^*}{\alpha_1 - y_1^*}}]x_1^* + \sqrt{\frac{\beta_1 + y_1^*}{\alpha_1 - y_1^*}}[\alpha_1 + (\beta_1 - 1)\lambda \sqrt{\frac{\alpha_1 + x_1^*}{\beta_1 - x_1^*}}]y_1^*} \quad (27)$$

②当 $q_r < M/e$ 时, 式(4)与不考虑碳排放政策情形下的模型相同, 表示当再制造商产生的碳排放量不超过碳排放限额时, 该政策不会影响其生产决策.

2) 碳税

$$\max_{q_r \geq 0} \Pi_f^{sw}(q_r) = G_{\pi(\gamma)}^{sw}(q_r^{s*}) =$$

$$\begin{cases} C_{R_2} \alpha q_r^{s*} + c(\alpha q_r^{s*} - \mu) & \text{if } 0 \leq \alpha q_r^{s*} < q_1(\gamma) \\ C_{R_2} \alpha q_r^{s*} + \sigma \sqrt{(c - \gamma)(p + h + \gamma)} + \gamma(\alpha q_r^{s*} - \mu) & \text{if } q_1(\gamma) \leq \alpha q_r^{s*} < q_2(\gamma) \\ C_{R_2} \alpha q_r^{s*} - (p + h)(\alpha q_r^{s*} - \mu) & \text{if } q_2(\gamma) \leq \alpha q_r^{s*} \end{cases} \quad (29)$$

$$\max_{q \geq 0} E_R \{ [p - \frac{c_r + (1 - \alpha)c_w}{\alpha} - \frac{e\xi}{\alpha}]q - (p + h)(q - D)^+ - c(D - q)^+ + \xi M \} \quad (24)$$

同理 3.2, 可以得到

$$q_r^{x*} = \begin{cases} 0 & \text{if } \gamma_0 < -c_{R_1} \\ \frac{\mu}{\alpha} + \frac{\theta^{x*} \sigma}{\alpha} & \text{if } \gamma_0 \geq -c_{R_1} \end{cases} \quad (25)$$

同理 3.2, 可以得到

$$q_r^{s*} = \begin{cases} 0 & \text{if } \gamma_0 < -c_{R_2} \\ \frac{\mu}{\alpha} + \frac{\theta^{s*} \sigma}{\alpha} & \text{if } \gamma_0 \geq -c_{R_2} \end{cases} \quad (28)$$

其中 $c_{R_2} = c_R - \delta e/\alpha$

$$\theta^* = \frac{-[\beta_2 + (\beta_2 - 1)\lambda] \sqrt{\frac{\beta_2 + y_2^*}{\alpha_2 - y_2^*}} x_1^* + [\alpha_2 + (\beta_2 - 1)\lambda] \sqrt{\frac{\alpha_2 + x_2^*}{\beta_2 - x_2^*}} y_2^*}{\sqrt{\frac{\alpha_2 + x_2^*}{\beta_2 - x_2^*}} [\beta_2 + (\beta_2 - 1)\lambda] \sqrt{\frac{\beta_2 + y_2^*}{\alpha_2 - y_2^*}} x_2^* + \sqrt{\frac{\beta_2 + y_2^*}{\alpha_2 - y_2^*}} [\alpha_2 + (\beta_2 - 1)\lambda] \sqrt{\frac{\alpha_2 + x_2^*}{\beta_2 - x_2^*}} y_2^*} \quad (30)$$

3) 碳权交易

$$(p + h)(q - D)^+ - c(D - q)^+ + \varepsilon_1 M \quad (31)$$

①当 $q_r \geq M/e$ 时,总的期望利润函数为

同理 3.2,可以得到

$$\max_{q_r \geq 0} \Pi_f^{iw}(q_r) = \max_{q \geq 0} G_f^{iw}(q) = \max_{q \geq 0} E\{ [p - \frac{c_r + (1 - \alpha)c_w}{\alpha} - \frac{e\varepsilon_1}{\alpha}]q -$$

$$q_r^* = \begin{cases} 0 & \text{if } \gamma_0 < -c_{R_3} \\ \frac{\mu}{\alpha} + \frac{\theta^* \sigma}{\alpha} & \text{if } \gamma_0 \geq -c_{R_3} \end{cases} \quad (32)$$

$$\max_{q_r \geq 0} \Pi_f^{iw}(q_r) = G_{T(\gamma)}^{iw}(q_r^*) =$$

$$\begin{cases} C_{R_3} \alpha q_r^* + c(\alpha q_r^* - \mu) + \varepsilon_1 M & \text{if } 0 \leq \alpha q_r^* < q_1(\gamma) \\ C_{R_3} \alpha q_r^* + \sigma \sqrt{(c - \gamma)(p + h + \gamma)} + \gamma(\alpha q_r^* - \mu) + \varepsilon_1 M & \text{if } q_1(\gamma) \leq \alpha q_r^* < q_2(\gamma) \\ C_{R_3} \alpha q_r^* - (p + h)(\alpha q_r^* - \mu) + \varepsilon_1 M & \text{if } q_2(\gamma) \leq \alpha q_r^* \end{cases} \quad (33)$$

其中 $c_{R_3} = c_R - e\varepsilon_1/\alpha$

$$\theta^{j*} = \frac{-[\beta_3 + (\beta_3 - 1)\lambda] \sqrt{\frac{\beta_3 + y_3^*}{\alpha_3 - y_3^*}} x_3^* + [\alpha_3 + (\beta_3 - 1)\lambda] \sqrt{\frac{\alpha_3 + x_3^*}{\beta_3 - x_3^*}} y_3^*}{\sqrt{\frac{\alpha_3 + x_3^*}{\beta_3 - x_3^*}} [\beta_3 + (\beta_3 - 1)\lambda] \sqrt{\frac{\beta_3 + y_3^*}{\alpha_3 - y_3^*}} x_3^* + \sqrt{\frac{\beta_3 + y_3^*}{\alpha_3 - y_3^*}} [\alpha_3 + (\beta_3 - 1)\lambda] \sqrt{\frac{\alpha_3 + x_3^*}{\beta_3 - x_3^*}} y_3^*} \quad (34)$$

②当 $q_r < M/e$ 时,与①具有相似结构的结果,即将①中的 ε_1 用 ε_2 替代即可.

值,如 $\theta, \alpha_0, \beta, \gamma$ 等;

2) 基于上述参数求出对应的 $g(x, y)$ 的最优值 x^*, y^* , 当 $\alpha=0.5$ 时 $g(x, y)$ 随 x, y 的变化趋势如图 3 所示,可以看出 $g(x, y)$ 为凸函数,存在唯一最优值,与第 3 部分的结论相吻合;

4 算例分析

为说明模型的合理性和求解结果的准确性,下面通过算例进行验证并分别分析再制造率、不同碳排放政策对再制造商生产决策的影响. 以某汽车零部件再制造企业为背景,结合笔者及其课题组前期调研过程中获取的数据,整理得 $p = 20, c_r = 3, c_w = 2, h = 1.5, c = 5, \mu = 500, \sigma = 10$; 为验证不同碳排放政策对再制造决策的影响,设定初始数据: $M = 1400, e = 2, \xi = 3, \varepsilon_1 = 1.5, \varepsilon_2 = 1.2, \delta = 0.8$.

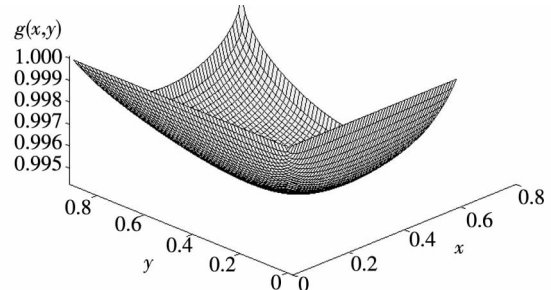


图 3 当 $\alpha=0.5$ 时 $g(x, y)$ 的取值情况

Fig. 3 Function $g(x, y)$ with $\alpha=0.5$

4.1 计算结果

根据第 3 部分的求解过程,本文通过 Matlab 进行算例求解,其思路为:

3) 最后求出最优再制造数 q_r 和总利润 Π .

根据第 3 节的求解过程,四种情形下的零部件再制造的临界值(即各种情形下适宜进行再制造的零部件再制造率的下限)如表 1 所示.

1) 求出对应不同再制造率 α 的各转换参数

表 1 四种情形下零部件再制造临界值

Table 1 Critical value for remanufacturing with four different cases

	1	2	3	4
$q_r = 0$	$\alpha \leq 0.1853$	$\alpha \leq 0.4076$	$\alpha \leq 0.2445$	$\alpha \leq 0.2964$

注: case 1—未考虑碳排放政策; case 2—碳限额; case 3—碳税; case 4—碳权交易,下同。

从表 1 可以看出,在 case 2 情形下,对于选择进行再制造的零部件的质量等级要求较高,其次为 case 4, case 3, 最后是 case 1,说明若政策制定方旨在加大再制造力度,碳限额政策并不是最佳之选,可以考虑碳税或碳权交易政策。对于超过临界值的情形,再制造数和相应的总利润以及各政策参数对生产决策的影响程度将通过 4.2 中的一系列图进行讨论。

4.2 影响分析

4.2.1 有无碳排放约束对零部件再制造商生产决策的影响

比较不考虑碳排放和三种碳排放政策约束下,随着再制造率 α 的变化,再制造数 q_r 、总利润 Π 的变化趋势,以及总利润 Π 和再制造数 q_r 的关系,如图 4 所示。

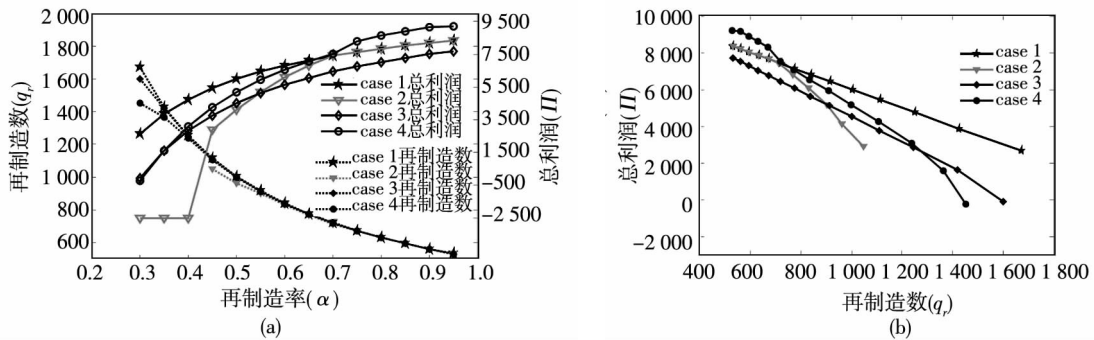


图 4 (a) 总利润和再制造数随再制造率变化的趋势 (b) 总利润随再制造数的变化趋势

Fig. 4 (a) Total profit and remanufacturing quantity vs. yield rate and (b) Total profit vs. remanufacturing quantity

从图 4 可以看出,四种情形下:①再制造的临界值有较大差异,与 4.1 的结果相吻合;但当再制造率超过临界值后最优再制造数与再制造率成负相关关系,且均保持在同一水平,说明碳排放政策会影响再制造临界点,但在临界值之后几乎不影响再制造数;②当再制造率 $\alpha < 0.6$ 时,总利润的大小顺序依次为: case 1 > case 4 > case 3 > case 2,因而,为鼓励再制造商制造更多的废旧产品,政策制定方应制定较为灵活的碳排放政策,如碳权交易政策,而不宜选用碳限额政策;当再制造率 $0.6 \leq \alpha < 0.7$ 时,产生的碳排放量与配额的差异不大,因而碳限额政策优于碳税政策;当再制造率 $\alpha \geq 0.7$ 时,再制造数较少,企业剩余碳排放权,若采用碳权交易政策则可以因节约碳权而获得收益,因而总利润的大小顺序变为: case 4 > case 1 = case 2 > case 3,这与实际是相吻合的;③从图 4 (b) 可以看出,总利润和再制造数始终呈负相关关系。

4.2.2 三种碳排放政策下约束的严厉或惩罚程度对生产决策的影响

不同碳排放政策的严惩程度或约束的严厉程度对再制造商生产决策同样会产生影响,以下分别分析碳限额政策下惩罚性税款、碳税政策下税款的额度以及碳权交易政策下买入价格、卖出价格对再制造商总利润的影响,通过观察总利润的变化趋势来说明其对再制造决策的影响以及政策制定方如何根据这些结果制定有利于再制造业发展的措施。

1) 惩罚性税款 ξ 对再制造决策的影响

碳限额政策的主要参数是惩罚性税款,图 5 显示了总利润随其变化而变化的趋势。

图 5 表明当再制造率 $\alpha < 0.70$ 时,企业再制造的临界点随着惩罚性税款的增加而提高,原因是再制造率越低,需要再制造更多数量的零部件才能均衡再制造成本和碳排放成本,但因增加的

再制造数产生的销售收入不足以抵消由此产生的碳排放量导致的成本,而惩罚力度越大,碳排放成本越高,可以获得的最终利润越少,因而,企业会选择制造再制造率更高的零部件;当再制造率 α 0.70时,惩罚性税款对再制造商最大总利润的影响几乎可以消除,原因是当再制造率越高时,再制造数减少,总的碳排放量减少,超过碳排放限额的数量亦随之减少,因而较高的惩罚性税款对再制造商的影响并不大.由此可以看出,对于再制造商来说,应尽可能提高废旧产品的再制造率;对于碳排放政策制定方来说,为鼓励再制造商尽可能多地再制造废旧产品,不宜设定更高的惩罚性税款或提高再制造企业的碳排放限额.

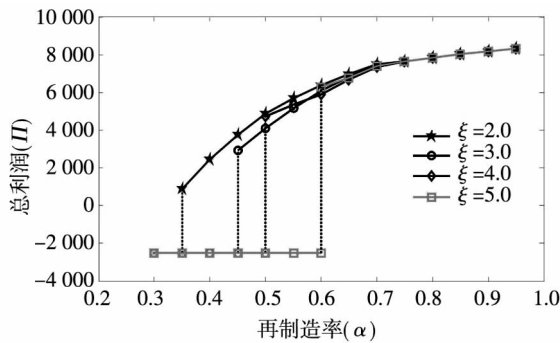


图5 当 ξ 在[2.0 5.0]变化时对总利润的影响
Fig.5 Effect on the total profit caused by ξ varying from 2.0 to 5.0

2) 碳税 δ 变化时对再制造决策的影响
碳税政策的关键参数是单位碳税 δ ,图6显

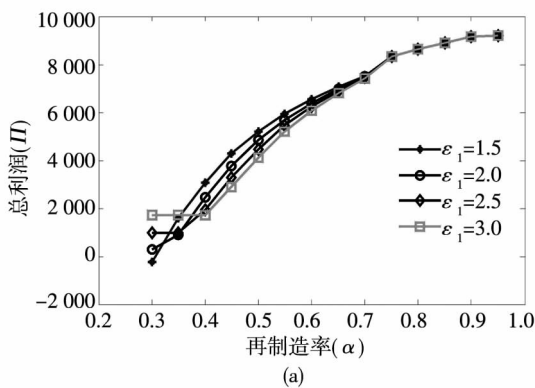


图7 (a) 当碳排放权卖出价格 $\epsilon_2 = 1.2$, 买入价格 ϵ_1 在[1.5 3]变化时对总利润的影响

示了总利润随着碳税变化而变化的趋势.

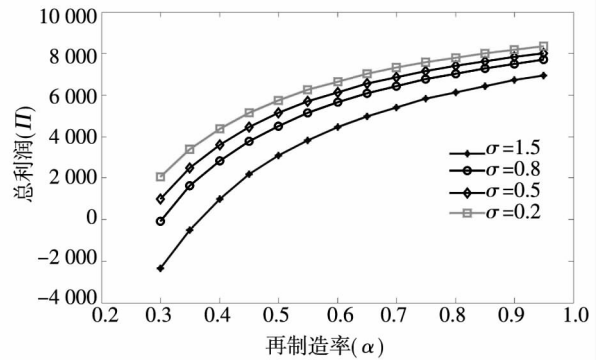


图6 当 δ 在[0.2 1.5]变化时对总利润的影响
Fig.6 Effect on the total profit when δ varying from 0.2 to 1.5

从图6可以看出,随着碳税的增加,再制造商的总利润会随之减少,碳税的变化对总利润的影响随着再制造率的提高而减少,但减少的幅度较之碳限额政策下惩罚性税款对总利润影响的幅度小,原因是在碳限额政策下,由于碳排放产生的成本仅仅是超出碳权限额部分的碳排放量,而碳税政策下则需要支付因生产所有再制品而产生的碳排放成本.

3) ϵ_1 (买入价格) 和 ϵ_2 (卖出价格) 变化时对再制造决策的影响

碳权交易政策区别于其他碳排放政策的主要参数是碳排放权买入价格(ϵ_1)和卖出价格(ϵ_2).图7显示了总利润随着这两个参数变化而变化的趋势.

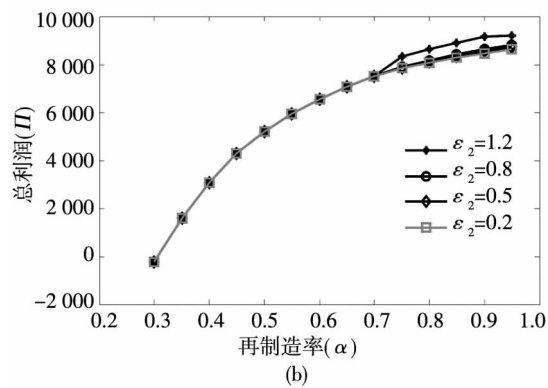


图7 (b) 当碳排放权买入价格 $\epsilon_1 = 1.5$, 卖出价格 ϵ_2 在[0.2 1.2]变化时对总利润的影响

Fig. 7 (a) The effect on the total profit caused by ϵ_1 varying from 1.5 to 3 when $\epsilon_2 = 1.2$ and (b) by ϵ_2 varying from 0.2 to 1.2 when $\epsilon_1 = 1.5$

从图7(a)可以看出,随着碳排放权买入价格的提高,再制造的临界值越大,即再制造商选择进

行再制造的零部件质量等级越高;当再制造率 $\alpha < 0.70$ 时,随着买入价格的提高,再制造商的总

利润会减少,但减少的幅度随着再制造率的提高而逐渐减弱,说明回收产品的质量状况越好,碳排放量越少,碳权买入价格对其影响越小。当再制造率 $\alpha \geq 0.70$ 时,买入价格对总利润的影响基本可以消除,原因是此时再制造数量较少,总的碳排放量未超过政府配额;图 7(b) 恰恰反映了这一事实,此时再制造商可以出售多余的碳权,因而再制造的最大总利润随着碳排放权卖出价格的提高而增加。

5 结束语

碳排放权已成为生产企业的一种重要资源和新的生产要素,是生产决策的关键因素之一。随着产品更新换代越来越快,涌现出了一些独立的零部件再制造商,这些再制造商将回收回来的废旧产品进行拆卸,再制造,然后满足市场的零部件需求。本文以这类独立的零部件再制造商为研究对象,研究碳排放限额、碳税政策、碳权交易三种政策下再制造商的生产决策问题。以实际再制造过程为基础,在需求不确定条件下,首先构建了考虑再制造成本、废弃处理成本、库存持有成本以及缺货成本,以利润最大化为目标的基础模型,然后在该模型基础上,构建了包括碳排放成本的三种碳排放政策情形下的优化模型,针对再制造零部件需求波动较大,很

难确定其具体分布的实际情况,不同于以往文献假设需求为某一具体分布,而是在只知道其一阶矩、二阶矩有限分布信息条件下,将模型转化为 REVD 模型进行求解。为验证模型的准确性和有效性,通过算例分别讨论了有无碳排放政策以及不同碳排放政策对再制造决策的影响,以及碳排放政策制定方如何制定法规政策以利于再制造业的发展。

通过研究发现: 1) 四种情形下,碳限额政策的临界点最大,若从鼓励企业再制造更多废旧产品的角度出发,不宜选用碳限额政策,而在临界点之后,最优再制造数保持在同一水平,碳排放政策几乎不影响再制造数,但对总利润的影响较大; 2) 无论是对于较高还是较低再制造率的废旧产品,三种碳排放政策中,碳权交易政策下的总利润总是大于其他两种政策,因而从某种程度来说,政策制定方可优先考虑碳权交易政策; 3) 对于再制造商来说,无论采取哪一种碳排放政策,为获得更高的利润,应尽可能提高废旧产品的再制造率; 对于碳排放政策制定方来说,从环保角度出发,为促进再制造业的发展,不宜设定较高的惩罚性税款或者提高再制造企业的碳排放限额。本文主要针对单个零部件再制造商进行研究,下一步可拓展研究多个零部件,包含采购件和再制造件的重新装配再制造系统在不同碳排放政策下的各环节批量计划。

参考文献:

- [1] Mehmet A I, Surendra M G. Environmentally conscious manufacturing and product recovery (ECMPRO): A review of the state of the art [J]. *Journal of Environmental Management*, 2010, 91: 563 – 591.
- [2] Askiner Gungor, Surendra M G. Issues in environmentally conscious manufacturing and product recovery: A survey [J]. *Computers & Industrial Engineering*, 1999, 36(4): 811 – 853.
- [3] Kongar E, Gupta S. A multi-criteria decision making approach for disassembly-to-order systems [J]. *Journal of Electronics Manufacturing*, 2002, 11(2), 171 – 183.
- [4] Shi J M, Zhang G Q, Sha J C. Optimal production planning for a multi-product closed loop system with uncertain demand and return [J]. *Computers & Operations Research*, 2011, 38(3): 641 – 650.
- [5] 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 Jiaping, Chi Linna, Liang Ling. Optimal manufacturing/remanufacturing production decision based on endogenous product quality [J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2012, 15(8): 12 – 23. (in Chinese)

- [6]谢家平,王 爽. 偏好市场下制造/再制造系统最优生产决策[J]. 管理科学学报,2011,14(3):24-33.
Xie Jiaping, Wang Shuang. Optimal production decision model of the manufacturing/remanufacturing system in the heterogeneous market[J]. Journal of Management Sciences in China,2011,14(3):24-33. (in Chinese)
- [7]聂佳佳. 需求信息预测对制造商回收再制造策略的价值[J]. 管理科学学报,2014,17(1):35-47.
Nie Jiajia. Value of demand information forecast on remanufacturing strategy of manufacturer[J]. Journal of Management Sciences in China,2014,17(1):35-47. (in Chinese)
- [8]Kenné J P, Dejax P, Gharbi A. Production planning of a hybrid manufacturing-remanufacturing system under uncertainty within a closed-loop supply chain[J]. International Journal of Production Economics,2012,135(1):81-93.
- [9]Kim E, Saghafian S, Van Oyen M P. Joint control of production, remanufacturing, and disposal activities in a hybrid manufacturing-remanufacturing system[J]. European Journal of Operational Research,2013,231(2):337-348.
- [10]Zeng J J, Qu J S, Zhang Z Q. Review of the international greenhouse gas emission reduction scenario programs[J]. Advances in Earth Science,2009,24(4):436-443.
- [11]Liao C N, Önal H, Chen M H. Average shadow price and equilibrium price: A case study of tradable pollution permit markets[J]. European Journal of Operational Research,2009,196(3):1207-1213.
- [12]Letmathe P, Balakrishnan N. Environmental considerations on the optimal product mix[J]. European Journal of Operational Research,2005,167(2):398-412.
- [13]Nabil A, Stéphane D P, Safia K S, et al. Lot sizing with carbon emission constraints[J]. European Journal of Operational Research,2013,227(1):55-61.
- [14]杜少甫,董骏峰,梁 樑,等. 考虑排放许可与交易的生产优化[J]. 中国管理科学,2009,17(3):81-86.
Du Shaofu, Dong Junfeng, Liang Liang, et al. Optimal production policy with emission permits and trading[J]. Chinese Journal of Management Science,2009,17(3):81-86. (in Chinese)
- [15]Zhang B, Xu L. Multi-item production planning with carbon cap and trade mechanism[J]. International Journal of Production Economics,2013,144(1):118-127.
- [16]Song J P, Leng M M. Analysis of the Single-Period Problem under Carbon Emissions Policies[M]. New York: Springer, Handbook of Newsvendor Problems, International Series in Operations Research & Management Science,2012,176:297-313.
- [17]常香云,王艺璇,朱慧赞,等. 集成碳排放约束的企业制造/再制造生产决策[J]. 系统工程,2014,32(2):49-56.
Chang Xiangyun, Wang Yixuan, Zhu Huiyun, et al. Optimal production decision for manufacturing/remanufacturing with constraints of carbon emission[J]. Systems Engineering,2014,32(2):49-56. (in Chinese)
- [18]申成然,熊中楷. 碳排放约束下制造商再制造决策研究[J]. 系统工程学报,2014,29(4):537-549.
Shen Chengran, Xiong Zhongkai. Production decisions of the manufacturer remanufacturing under carbon emission constraint[J]. Journal of Systems Engineering,2014,29(4):537-549. (in Chinese)
- [19]Scarf H. A Min-max Solution of an Inventory Problem, in: Studies in the Mathematical Theory of Inventory and Production [M]. California, CA: Stanford University Press,1958:201-209.
- [20]Guillermo G, Ilkyeong M. The distribution free newsboy problem: Review and extensions[J]. Journal of the Operational Research Society,1993,44(8):825-834.
- [21]Yue J F, Chen B T, Wang M C. Expected value of distribution information for the newsvendor problem[J]. Operations Research,2006,54(6):1128-1136.
- [22]Zhu Z S, Zhang J W, Ye Y Y. Newsvendor optimization with limited distribution information[J]. Optimization Methods and Software,2013,28(3):640-667.

(下转第86页)

analytic techniques. The contextual dimensions model of the complex organizations include 5 dimensions (i. e. , technique , environment , strategy , enterprise system and organization culture) and 20 items. The research confirms that the characteristics of Chinese complex organizations include: above average industry scale , sophisticated and advanced technology systems , highly uncertain environment , flexible multi-level strategy , learning oriented culture , and standardized teamwork system. Further , this paper contributes to the theoretical foundation for further study of complex organizations' governance.

Key words: complex organizations; strategy management; contextual dimensions; scale analysis

~~~~~  
( 上接第 60 页)

## Decision-makings on remanufacturing considering carbon emissions based on REVD

*LIU Bi-yu*<sup>1 2</sup> , *CHEN Wei-da*<sup>2\*</sup> , *YANG Hai-dong*<sup>1</sup>

1. School of Economics and Management , Fuzhou University , Fuzhou 350116 , China;
2. School of Economics and Management , Southeast University , Nanjing 211189 , China

**Abstract:** Remanufacturing decisions for dedicated part remanufacturers with limited demand distribution information ( i. e. , the first moment and second moment) under three carbon emission policies ( carbon limitation , carbon tax and carbon trade policies) are studied in this paper. First , a basic model , which includes sales revenue , remanufacturing cost , disposal cost , inventory holding cost and shortage cost , but not carbon emission cost , is presented; Second , three different models considering carbon emission costs under three different carbon emission policies are derived; Third , these models are solved by converting them into REVD ( relative expected value distribution) models , in which the optimal remanufacturing quantity which maximizes the minimum total profit is obtained by minimizing the relative regret value under the distribution set with the same first and second moment; Finally , the effects on the decisions of remanufacturing and the total profit of the carbon emission policy or the penalty degree are analyzed by an numerical example. These results can help dedicated part remanufacturers and policy makers to make reasonable decisions.

**Key words:** remanufacturing; production decision; relative expected value distribution; carbon emission; limited distribution information