

分类号: F253

密 级: 公开

学校代码: 10363

学 号: 2210720113



安徽工程大学

Anhui Polytechnic University

硕士学位论文

题 目 政府规制下再制造供应链运营决策
与收益分配研究

论 文 作 者 明晨宇

指 导 教 师 刘志 教授

学 科 (专 业) 管理科学与工程

研 究 方 向 物流与供应链管理

论文提交日期: 2024 年 6 月 3 日

分类号: F253

密 级: 公开

单位代码: 10363

学 号: 2210720113

题 目 政府规制下再制造供应链运营决策与收益分配研究

英文并列

题 目 Operation Decision-making and Benefit Distribution
of Remanufacturing Supply Chain under Government
Regulation

学生姓名: 明晨宇

指导教师: 刘志 教授

专 业: 管理科学与工程

研究方向: 物流与供应链管理

论文答辩日期: 2024 年 5 月 29 日

安徽工程大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：我恪守学术道德，崇尚严谨学风。所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已明确注明和引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品及成果的内容。论文为本人亲自撰写，我对所写的内容负责，并完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

学位论文作者签名：明晨宇

日期：2024 年 6 月 3 日

安徽工程大学学位论文版权使用授权书

学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅或借阅。本人授权安徽工程大学可以将本学位论文的全部内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

保密 ☐，在 _____ 年解密后适用本版权书。

本学位论文属于

不保密 ☒。

学位论文作者签名：明晨宇

日期：2024 年 6 月 3 日

指导教师签名：刘杰

日期：2024 年 6 月 3 日

政府规制下再制造供应链运营决策与收益分配研究

摘 要

随着现代工业的快速发展，资源短缺和环境污染问题日益严峻。为解决社会经济发展和资源环境问题的矛盾，各国大力发展循环经济；再制造作为发展循环经济的重要一环，是解决当前资源和环境问题的重要手段。然而，回收数量低、回收再制造成本高等现实问题普遍存在，使得许多行业的废旧产品再制造并未取得理想效果。为此，世界各国政府基于生产者责任延伸原则出台了多种规制以激励企业回收再制造，其中，基金政策和奖惩政策两种政府规制对各行业回收和再制造活动的开展具有显著的激励作用。同时，在工业实践中，为降低回收再制造风险，许多企业通过再制造转移、联合再制造等模式与供应链其他企业合作进行回收和再制造活动。因此，研究基金政策和奖惩政策两种政府规制对再制造供应链企业回收和再制造责任转移模式与合作模式选择、运营决策影响以及供应链收益分配问题，对于丰富再制造供应链领域的研究成果和指导相关企业的运营决策具有重要意义。

本文首先研究了基金政策下再制造供应链回收和再制造责任转移问题，讨论供应链成员对不同回收和再制造责任转移模式（简称回收再制造模式）的偏好以及基金政策的影响，并从供应链、消费者和社会福利三个角度，

探讨最优的回收再制造模式及适用条件。然后，针对社会福利最大化的回收再制造模式，在引入奖惩政策和拓展再制造供应链结构基础上，研究供应链成员的合作模式选择和奖惩政策影响问题，探讨促进供应链社会福利和经济效益均衡发展的政策优化策略；最后借助合作博弈方法协调供应链收益分配问题，得到稳定的再制造供应链运营模式。相关研究结论如下：

再制造供应链成员对不同回收再制造模式的偏好存在差异。制造商偏好仅再制造外包模式，再制造商在不同的产品研发效率下偏好不同的回收再制造模式。在全部授权模式下，供应链成员组成大联盟可以实现供应链利润最大化，但目标回收率和奖惩力度的变动会导致供应链成员在局部联盟中获得更高的收益，因此，大联盟合作模式并不稳定。

基金政策下，全部外包和全部授权模式下社会福利最大，仅再制造外包模式下供应链利润最大，仅再制造授权模式下消费者效用最高。基金政策可以引导企业选择更有利于社会的回收再制造模式，但社会福利与供应链收益的冲突难以协调。奖惩政策能够促进供应链成员合作，大联盟合作模式可以实现供应链收益最大化，协调供应链成员收益和社会福利最优的问题。此外，无论基金政策还是奖惩政策，只有适当的激励力度方能实现社会福利和供应链收益的双重最优，过度的激励力度终将适得其反。

基金政策和奖惩激励政策变动直接影响新产品和再制造品的单位利润，因此，不同供应链成员对政策激励的强弱有着不同的偏好。在基金政策下，制造商偏好较低的环境税而再制造商偏好较高的环境税；在奖惩政策下，零售商偏好低回收率目标和低奖惩力度的宽松政策，而再制造商偏好高回收率目标和高奖惩力度的严格政策，制造商偏好回收率目标和奖惩力度适

中的政策。

受规制政策变动的影响，再制造供应链成员难以在合作模式的选择上达成一致。供应链成员在不同政策水平下的利润差异使得供应链成员的利润分配要求难以满足。因此，综合考虑供应链成员在不同政策水平下的利润差异，设计的供应链利润分配方案能够满足各成员在不同政策水平下的收益分配要求，实现供应链合作模式的稳定。

关键词：再制造供应链，基金政策，奖惩政策，Stackelberg 博弈，合作博弈

OPERATION DECISION-MAKING AND BENEFIT DISTRIBUTION OF REMANUFACTURING SUPPLY CHAIN UNDER GOVERNMENT REGULATION

ABSTRACT

With the rapid development of modern industry, the issues of resource scarcity and environmental pollution have become increasingly severe. To address the contradictions between socio-economic development and resource environmental issues, countries around the world are actively promoting the circular economy. Remanufacturing, as an essential component of the circular economy, is a crucial means to tackle current resource and environmental challenges. However, practical issues such as low recycling quantities and high costs associated with recycling and remanufacturing are prevalent, which has led to less than ideal outcomes in the remanufacturing of waste products in many industries. In response, governments across the globe, based on the principle of Extended Producer Responsibility, have introduced various regulations to incentivize enterprises to engage in recycling and remanufacturing. Among these, fund policies and reward-punishment policies are two types of

governmental regulations that significantly motivate the recycling and remanufacturing activities across various industries. At the same time, in industrial practice, to reduce the risks associated with recycling and remanufacturing, many enterprises collaborate with other businesses in the supply chain through models such as remanufacturing transfer and joint remanufacturing to conduct these activities. Therefore, studying the impact of fund policies and reward-punishment policies, two types of government regulations, on the choice of recycling and remanufacturing responsibility transfer models and cooperation models, operational decisions, and supply chain profit distribution issues for remanufacturing supply chain enterprises, is of significant importance for enriching the research outcomes in the field of remanufacturing supply chain and guiding the operational decisions of related enterprises.

This article begins by examining the issue of recycling and remanufacturing responsibility transfer in the remanufacturing supply chain under the fund policy. It discusses the preferences of supply chain members for different recycling and remanufacturing responsibility transfer models (referred to as recycling and remanufacturing models) and the impact of the fund policy. Furthermore, it explores the optimal recycling and remanufacturing models and their applicable conditions from three perspectives: the supply chain, consumer, and societal welfare. Then, focusing on the recycling and remanufacturing model that maximizes societal welfare, this study examines the choice of

cooperation models and the impact of reward-punishment policies by introducing such policies and expanding the structure of the remanufacturing supply chain. It explores policy optimization strategies that promote a balanced development of societal welfare and economic benefits within the supply chain. Finally, using cooperative game theory to coordinate the profit distribution issue in the supply chain, a stable operating model for the remanufacturing supply chain is obtained. The relevant research conclusions are as follows:

There are differences in the preferences of remanufacturing supply chain members for different recycling and remanufacturing models. Manufacturers prefer the model where remanufacturing is solely outsourced, while remanufacturers prefer different recycling and remanufacturing models depending on the product development efficiency. Under the full authorization model, supply chain members forming a grand coalition can maximize the supply chain profit. However, changes in the target recycling rate and the intensity of rewards and punishments can lead to higher profits for supply chain members in partial coalitions. Therefore, the grand coalition cooperation model is not stable.

Under the fund policy, the maximum societal welfare is achieved under the full outsourcing and full authorization models, the maximum supply chain profit is achieved under the sole remanufacturing outsourcing model, and the maximum consumer utility is achieved under the sole remanufacturing authorization model. The fund policy can guide enterprises to choose recycling

and remanufacturing models that are more beneficial to society, but the conflict between societal welfare and supply chain profits is difficult to reconcile. The reward-punishment policy can promote cooperation among supply chain members, and the grand coalition cooperation model can achieve the maximization of supply chain profits, addressing the issue of optimal distribution of supply chain member profits and societal welfare. Moreover, whether it is the fund policy or the reward-punishment policy, only an appropriate level of incentive intensity can achieve dual optimization of societal welfare and supply chain profits; excessive incentive intensity will ultimately backfire.

Changes in the fund policy and reward-punishment incentive policy directly affect the unit profit of new products and remanufactured goods. Therefore, different supply chain members have different preferences for the strength of policy incentives. Under the fund policy, manufacturers prefer a lower environmental tax while remanufacturers prefer a higher environmental tax. Under the reward-punishment policy, retailers prefer a lenient policy with a low recycling target and low intensity of rewards and punishments, while remanufacturers prefer a strict policy with a high recycling target and high intensity of rewards and punishments, and manufacturers prefer a policy with a moderate recycling target and intensity of rewards and punishments.

Influenced by changes in regulatory policies, it is challenging for members of the remanufacturing supply chain to reach a consensus on the choice of

cooperation models. The differences in profits among supply chain members under various policy levels make it difficult to meet the profit distribution requirements of all members. Therefore, by taking into account the profit differences among supply chain members under different policy levels, a designed supply chain profit distribution plan can meet the revenue distribution requirements of each member under different policy levels, thereby achieving stability in the supply chain cooperation model.

Author: Chen-yu Ming (Management Science and Engineering)

Supervised by- Professor Zhi Liu

KEY WORDS: remanufacturing supply chain, fund policy, incentive and penalty policy, Stackelberg game, cooperative game

目 录

摘 要	I
ABSTRACT	IV
第 1 章 绪 论	1
1.1 研究背景与研究意义	1
1.1.1 研究背景	1
1.1.2 研究意义	3
1.2 文献综述	4
1.2.1 再制造供应链运营模式	4
1.2.2 政府规制影响	5
1.2.3 供应链收益分配研究	6
1.2.4 文献评述	7
1.3 研究内容与组织结构	9
1.4 主要创新点	12
第 2 章 相关概念与理论概述	13
2.1 生产者责任延伸制度	13
2.2 再制造概述	14
2.3 再制造供应链和回收再制造模式	15
2.4 Stackelberg 博弈模型	16
2.5 合作博弈理论方法	17
第 3 章 基金政策下再制造供应链运营决策研究	19
3.1 问题描述和符号说明	19
3.2 决策模型与求解	23
3.3 均衡结果分析	25
3.3.1 均衡结果对比	25
3.3.2 政府基金政策影响分析	28

3.4 仿真算例	30
3.4.1 供应链利润和消费者剩余	31
3.4.2 社会福利	33
3.5 本章小结	35
第4章 奖惩政策下再制造供应链运营决策与收益分配研究	36
4.1 问题描述和符号说明	36
4.1.1 问题描述	36
4.1.2 假设与符号说明	38
4.2 决策模型与均衡结果	40
4.3 结果分析	43
4.3.1 均衡结果对比	44
4.3.2 政府奖惩政策对最优决策的影响分析	46
4.4 基于合作博弈理论的收益分配机制	48
4.4.1 合作博弈特征函数	49
4.4.2 核心分配机制	49
4.4.3 τ 值法	50
4.4.4 经典合作博弈核心及联盟权重设计	50
4.5 数值仿真分析	53
4.5.1 原特征值解与加权特征值解比较	53
4.5.2 政策影响分析	58
(1)供应链成员利润影响	58
(2)环境影响	61
4.6 本章小结	65
第5章 结论与展望	66
5.1 本文的主要结论	66
5.2 研究不足和展望	67
参考文献	69
附 录	76
攻读硕士学位期间发表或录用的学术论文与参与的科研项目经历	89
致 谢	90

第 1 章 绪 论

1.1 研究背景与研究意义

1.1.1 研究背景

近年来,人类工业水平的快速发展引发的区域资源匮乏和环境污染问题引起了社会各界的广泛关注。为解决资源和环境问题,多国政府提出可持续发展理念,大力发展循环经济。再制造作为实现循环经济的重要途径,被认为是应对当前资源和环境问题的有效手段。再制造采用专业的设备和技术对废旧产品进行修复和改造,使其在质量、安全和使用性能方面满足新产品标准要求,既节约了资源,又减少了环境污染。相关统计数据显示,与生产新产品相比,再制造可以节约 50%的成本和 60%的能源,减少 70%的材料和 80%污染排放^[1]。在工业实践中,越来越多企业积极开展废旧产品再制造活动并取得了不错的效果。如 Xerox 公司所生产的墨盒中有 6 成产品为再制造品,减少了 30 万吨的工业垃圾,节约了 45%~65%的生产成本^[2]。然而,站在全球视角下,一些行业的废旧产品回收和再制造并未取得理想效果。根据 ITU 发布的 Global E-waste Monitor 2020 显示:2019 年,全球正式记录的收集和回收量为 930 万吨,仅占当年电子垃圾产量的 17.4%^[3]。由此可见全球电子垃圾的回收活动并没有赶上其增长速度。这是因为许多企业考虑再制造前期资金投入大、成本回收时间长和再制造品对于品牌的影响,拒绝开展再制造活动甚至阻止再制造。例如高德纳公司的调查报告指出,随着墨盒再制造商进军打印市场,打印机制造商损失严重,部分打印机制造商选择降低产品可再制造性来阻止再制造^[4]。因此,为促进企业积极承担相应的回收和再制造责任,各国政府纷纷出台一系列规制政策来激励企业开展废旧产品回收和再制造活动。

目前,废旧产品的回收和再制造的相关规制主要有两类:一类是处罚激励政策,政府设置废旧产品回收和再制造目标,对未完成目标的企业进行处罚。例如,欧盟的《废弃电器电子设备指令》提出产品生产者具有回收和再制造废旧产品的责任并明确了各类产品的回收和再制造目标,对未履行废旧产品回收目标责任的企业进行处罚激励^[5]。另

一类为补贴激励政策，政府对履行回收和再制造责任的企业发放补贴。例如，我国《废弃电器电子产品处理基金征收使用管理办法》对产品生产者或进口商收取基金用于补贴从事淘汰电子和电器产品回收的企业^[6]。处罚规制明确了生产者的回收和再制造责任，但并没有解决企业开展再制造活动前期成本投入高和成本回收时间长的问题。补贴政策在一定程度上缓解了企业开展再制造活动的资金问题，但是，愈发激烈的市场竞争和快速迭代的产品技术要求企业在产品和技术创新上投入更多资源，技术落后的再制造品投入市场会拉低品牌定位等问题依然困扰着各大品牌生产商，使得其在两种规制下仍然难以承担废旧产品回收和再制造责任。

为了更好的履行回收和再制造责任，许多企业选择将回收和再制造业务转移给第三方企业。例如路虎与卡特彼勒签订协议，将再制造业务外包给卡特彼勒^[7]。苹果公司授权富士康进行废旧产品的再制造和销售，以保证其品牌效益不受影响^[7]。通过将回收和再制造业务转移，企业所面临的前期成本投入和再制造技术问题有所缓解，但第三方再制造又带来了如再制造品低价侵蚀市场和核心技术泄露等风险。随着产品技术升级、市场竞争的加剧和环保组织等利益相关机构的不断施压，转移回收和再制造业务的制造商和承接业务的再制造商所面临的压力也越来越大，如产品技术的升级和环保要求的提高均需要企业投入更多的资金进行回收和处理设备和技术升级，而市场竞争的加剧则要求企业进一步降低成本，仅仅通过转移回收和再制造业务来履行回收和再制造责任难以实现。为此，许多企业选择与其供应链企业合作，共同开展回收和再制造活动。例如，特斯拉与优美科在欧洲合作回收汽车电池取得了不错的效果^[8]。施乐、伊士曼柯达与其下游零售商建立合作关系来回收和处理二手产品^[9]。这种合作形式需要制造商承担一定的成本投入风险，但汇集了不同企业的优势资源和关键技术，供应链成员能够实现优势互补，提升供应链整体的盈利能力。

由于再制造活动前期投资成本高、收益回报周期长的特性，无论供应链企业选择何种合作形式，如何进行科学合理的收益分配都是决定供应链稳定运营的重要条件。例如国美和格力因为销售收益分配问题于2004年3月终止合作^[8]。为维持供应链运营的稳定，较多学者基于契约协调理论和合作博弈理论提出了多种供应链收益分配方案。在契约协调理论方面，数量折扣契约^[10]、回购契约^[11]、两部定价契约^[12]、利润共享契约^[13]等理论方法被广泛运用。在合作博弈理论方面，研究者们通常首先考虑所有可能的合作形式及其结果，然后确定所有参与者和可能的联盟的特征值，并以此确定所有供应链企业的

最终收益分配。然而，无论是基于契约协调理论还是合作博弈理论所确定的供应链收益分配方案都有可能因政府规制的变动而无法满足供应链企业的收益分配要求。这是因为政府规制规定了不同企业所需承担的回收和再制造责任，政府规制的变动将直接影响供应链企业的责任承担大小，进而影响各企业的盈利能力和收益分配诉求，最优合作形式和收益分配方案都会随之改变。因此明确政府规制对供应链运营决策和收益分配的影响对于促进企业回收再制造具有十分重要的意义。

为探究政府规制政策对企业履行回收和再制造责任的影响，本文立足于当前工业实践中现存的回收和再制造合作形式，研究了两种激励政策对再制造供应链运营决策的影响。考虑到惩罚激励政策对企业的激励作用不高，本文参考我国废旧电器电子回收基金政策^[6]和欧盟 2006/66/EC 指令中的奖惩机制^[14]，首先讨论了基金政策下供应链回收和再制造责任转移模式的选择问题和基金政策对各模式下供应链运营决策的影响，得到供应链成员对不同回收和再制造模式的偏好。然后，从供应链、消费者和社会福利三个方面讨论各类回收和再制造责任转移模式的运行绩效。再次，以社会福利最大的回收和再制造转移模式为研究对象，引入奖惩政策并拓展再制造供应链结构，以研究供应链合作问题和奖惩政策对供应链成员决策的影响，探讨各类合作模式的运行绩效，分析奖惩政策对供应链经济效益的影响；最后诉诸合作博弈方法，合理分配供应链各成员的合作利润，推动供应链经济效益和社会效益的均衡发展，实现供应链的长效运营；在此基础上，本研究为再制造供应链成员废旧产品的回收和再制造策略选择、合作模式选择及收益分配问题提供了建议，对促进资源回收和再制造产业发展具有一定的积极意义。

1.1.2 研究意义

(1) 理论意义

在再制造供应链领域，学者们对于政府规制政策的影响主要聚焦于供应链运营决策、回收渠道选择和再制造转移模式选择上，较少涉及对回收渠道和再制造责任转移模式决策的综合考虑，对于供应链合作模式的选择和收益分配影响等问题也关注不多。因此，本文考虑了基金政策和奖惩政策两种政府规制，首先研究了基金政策对不同回收再制造责任转移模式下供应链回收再制造模式选择和运营决策的影响，然后在社会福利最优的回收再制造责任转移模式和奖惩政策影响下，讨论供应链利润最大化合作模式以及该模式下的供应链收益分配方案。本研究融合考虑规制影响和收益分配两种问题，补充

了当前对再制造供应链的规制影响研究和收益分配研究上的不足。

(2) 现实意义

我国当前废旧产品的回收和再制造行业的发展还需要政府规制的进一步引导，企业回收和再制造废旧产品的效率有待进一步提高。本文研究结论对于政府规制完善和企业运营改善具有积极的引导意义。

对于政府而言，本文对规制政策影响供应链企业利润与决策、消费者剩余以及环境的研究可以为政府制定和调整废旧产品回收和再制造的相关规制提供参考。此外，本文揭示了政府规制变动对供应链运营决策的影响，这对于政府宏观调控市场，维护市场稳定具有十分重要的参照作用。

对于供应链企业而言，本文对政府规制影响、回收和再制造责任转移模式和合作模式选择以及供应链收益分配等问题的研究为供应链企业选择合适的再制造运营模式和应对政府规制变化具有重要的参考价值。另外，本文设计的供应链收益分配方案，充分考虑了政府规制影响，这为供应链企业再制造合作谈判提供了新的思路，对于供应链达成长期稳定的运营模式具有重要的参考意义。

1.2 文献综述

为了进一步说明本文选题背景、阐述相关领域当前的学术研究进展、突显本文创新，本节主要从再制造供应链运营模式、政府规制政策影响和供应链收益分配三个方面综述相关领域的国内外研究现状。

1.2.1 再制造供应链运营模式

对于如何选择再制造供应链运营模式的研究文献很多，本文所涉及到的再制造供应链运营模式主要包括回收渠道选择和再制造模式选择两个方面。

对于回收渠道选择问题，Savaskan 等^[15] (2004)最早研究了不同回收主体回收的差异，对比制造商、零售商和第三方回收商三种主体回收方式，发现距离消费者最近的零售商回收方式最优。陈建华等^[16] (2021)构建了零售商主导的闭环供应链，讨论了四种混合回收渠道下的供应链决策、利润和回收水平。郭军华等^[17] (2015)考虑了不同消费者对再制造品存在支付意愿差异，讨论了对制造商回收、零售商回收和第三方再制造商回收三种回收渠道选择的影响。黄宗盛和张媛^[18] (2023)研究了第三方回收商回收渠道下，非

合作、资金支持和劳动合作三种回收模式选择及闭环供应链决策的影响。姚锋敏等^[19](2019)在3种不同回收渠道结构下,探讨主导制造商的企业社会责任行为对新产品定价及废旧产品回收的影响。夏西强和李梦雅等^[20](2023)考虑了知识产权法规对外包和授权两种再制造模式下最优回收渠道选择的影响。王方和尹雪薇等^[21](2023)考虑了电子废物的信息敏感程度政府监管力度对正规和非正规回收渠道竞争的影响。曹晓刚等^[22](2024)研究供应链四种混合回收模式下的决策受供应链成员公平关切的影响,结果表明最优回收模式会因为公平关切程度而不同。

对于再制造模式选择问题,熊中凯等^[23](2011)首次研究了制造商作为再制造商的经销商的合作模式,并与二者竞争两种模式进行对比。刘艳等^[24](2024)研究了区块链技术引入对具有品牌优势的制造商的竞争与合作再制造模式偏好的影响。夏佳玉和马祖军^[25](2021)讨论了制造商代工模式下三种再制造策略的选择问题,结果表明外包再制造为最优策略。王娜和张玉林^[26](2021)在考虑碳税和消费者需求异质性情况下,对比分析了授权和外包两种再制造转移模式下的供应链决策和利润。郑小雪等^[27](2020)通过对比制造商外包和零售商外包两种模式下的供应链决策和利润,研究了第三方再制造外包选择与协调问题。唐娟等^[28](2018)通过比较再制造供应链外包和授权两种模式的决策和利润研究最优模式选择问题,并考虑了公平关切和产品设计的影响。王麒翔等^[29](2023)考虑了回收的责任目标大小对零售商和制造商两种主体回收模式下双方的再制造决策的影响。冯章伟等^[30](2023)对比分析了政府补贴和碳税两种政策对授权转移再制造和外包转移再制造两种模式下供应链运营决策和成员利润的影响。Wang 等^[31](2017)讨论了零售商自己再制造和外包给第三方再制造的条件以及两种再制造模式对环境的影响。

1.2.2 政府规制影响

本文所关注的政府规制政策主要有两类,分别是补贴激励政策和奖惩激励政策。

关于补贴激励政策,王文斌等^[32](2010)考虑了政府对制造商施行处罚政策和对回收商实施补贴政策对再制造闭环供应链废旧产品回收率和利润的影响。缪朝炜等^[33](2024)研究了碳税对再制造供应链碳减排和再制造策略的影响,结果表明碳税的实施可以有效促进供应链开展再制造和降低碳减排。吴思思和曹束等^[34](2023)研究了政府规制对无政府参与、有政府参与和专利许可三种模式下再制造供应链决策和收益分配的影响。龚本刚等^[35](2021)考虑是否有政府基金政策和不同回收主体,构建了六种动力电池闭环供应

链回收渠道模型，分析政府基金政策对最优决策、利润和环境效益的影响。王珊珊等^[36](2022)研究了政府补贴对制造商主导的双渠道供应链渠道选择影响，通过比较两个单渠道制造商回收、零售商回收和一个混合渠道制造商零售商混合竞争回收下的供应链利润，得出制造商最优渠道选择。姚锋敏等^[37](2022)考虑了政府补贴以及环境设计，通过对比外包及授权再制造模式下的供应链决策和利润，刻画了考虑政府补贴对再制造供应链生产决策的影响。夏西强等^[38](2023)考虑了历史排放法和基准法两种碳配额分配方法对制造商和再制造商决策和利润的影响。朱庆华等^[39](2017)站在以旧换新的政策背景下，讨论了专利费用和政府补贴对废旧产品回收率以及再制造品销售的影响。夏西强等^[40](2022)通过对比碳税和补贴政策下的供应链决策和利润，探究了两种政策对采用外包再制造模式的供应链运营决策和利润的影响。Pazoki 等^[41](2020)研究了监管机构是否应该鼓励制造商再制造或生态设计的问题，为监管机构和制造商决策提供了指导方针。Xiong 等^[42](2013)讨论了政府补贴对于集中和分散两种结构的供应链再制造决策影响，结果表明在集中结构中政府补贴有益于环境。

关于奖惩激励政策，Wang 等^[43](2015)研究了奖惩机制对不同权力结构下闭环供应链回收效率和制造商责任承担比例的影响。Liu 等^[44](2017)提出政府应针对产品环境设计对新产品和再制造品生产进行奖惩，即通过影响新产品和再制造品成本的方式来调控供应链决策机制，并分析了此机制下最优环境设计和生产决策以及供应链利润所受到的影响。易余胤和梁家密^[45](2014)在奖惩机制下，从回收率、利润的角度讨论闭环供应链对于三种混合回收模式的选择问题，并分析了奖惩力度对供应链决策和利润的影响。马建华等^[46](2023)研究了生产者责任延伸制度下竞争供应链渠道选择和政府奖惩政策设计的问题，通过对比合作生产责任制和个体生产责任制下的均衡结果，得到不同制度下的奖惩机制的变化趋势。王文宾等^[47](2023)通过构建制造商、回收商和政府三方博弈模型讨论了政府奖惩对回收商回收策略、回收率和制造商价格策略的影响。汪和平等^[48](2023)在考虑消费者低碳偏好条件下，分析了政府奖惩机制对汽车制造商新能源汽车生产和定价决策的影响。姜力文等^[49](2023)在碳中和视角下，研究了由制造商与第三方回收商以及电商平台构成的逆向回收供应链的减排和价格决策如何受政府奖惩机制影响的问题。

1.2.3 供应链收益分配研究

目前关于供应链收益和利润协调问题的研究主要是借助协调契约理论和合作博弈

理论进行,考虑到再制造供应链存在复杂的结构关系,能够考虑和对比所有可能的合作模式的合作博弈理论更适合用来解决供应链合作模式的选择和收益分配表的问题。因此本文主要对采用合作博弈理论研究供应链收益分配问题的研究文献进行分析。

运用合作博弈解决供应链收益分配问题,主要采取非合作-合作博弈模型方法。先通过非合作博弈模型描述所有可能的合作形式和结果,然后采用合作博弈的利润分配方法来协调供应链收益。Leng 和 Parlar^[50](2009)分析了在制造商、分销商和零售商组成的三级供应链中共享需求信息来分配成本节约的问题,运用合作博弈理论找到了一个独特的分配方案。Zheng 和 Liu 等^[51](2019)在考虑了零售商公平关切下,采用非合作博弈理论与合作博弈论和非合作博弈论描述一个由供应商、制造商和零售商组成的三级闭环供应链的合作模式选择与利润分配问题。Zheng 和 Li 等^[52](2021)采用合作博弈的方法研究了当制造商有自愿利润让步行为时,一个三方双头垄断供应链的协调问题。Liu 和 Zheng 等^[53](2021)考虑了零售商的公平关注如何影响三方可持续供应链中的合作关系,运用合作博弈理论给出了该可持续供应链的协调方案以及在以公平关注程度为区间时如何协调这种供应链。李昌文等^[54](2018)研究了一个由 3 个相互竞争的零售商组成的两层分销供应链系统的订货策略与联盟合作模式的选择问题,将合作博弈方法与两阶段博弈相结合,讨论了联盟稳定的条件和方法。Tooba Asghari 等^[55](2022)运用核仁法、Shapley 值法和不同的契约结构,包括成本分担、收入分享和两部分关税契约研究一个绿色供应链的收益分配问题。Zheng 等^[56](2022)基于多目标规划方法得到最优混合回收模型,然后结合 Shapley 值法提出一项成本分担的法。Zheng 等^[57](2023)针对由两个环保创新的制造商和投资商组成的供应链,采用两型博弈方法研究了其环保创新投入机制。杨洁等^[58](2023)采用两型博弈模型研究双碳背景下的绿色供应链企业碳排放策略以及联盟选择和收益分配问题。黄湘萌等^[59](2020)考虑了 6 个影响绿色供应链成员利润的因素,以此来修正 Shapley 值,得到更具公平的绿色供应链收益分配方案。Zheng 等^[60](2019)设计了一种加权的 Shapley 值法来协调由制造商、零售商和第三方再制造商组成的闭环供应链的收益问题。

1.2.4 文献评述

通过对现有的相关文献的综述可知,学者们对供应链回收和再制造模式选择、政府激励政策影响以及供应链收益分配问题已经开展了大量的研究,取得了丰硕的成果,但

是，仍存在以下几个方面值得深入研究。

(1)在研究供应链运营模式选择问题方面，现有研究通常是将回收渠道选择和再制造模式选择分开进行，以便于讨论制造商和供应链其他成员对于不同回收渠道和再制造模式的偏好和选择。但在工业实践中，回收渠道和再制造模式的选择均为制造商开展再制造活动所必须考虑的重要问题，两种问题的决策相互影响，共同作用于再制造供应链成员的运营决策。此外，当前研究主要关注单因素对再制造供应链决策的影响，少有研究者分析不同影响因素对再制造供应链决策的综合影响。然而在实践中，企业决策恰好是综合考虑各种因素(包括政府基金政策、产品可再制造性设计、废旧产品质量不确定、回收再制造模式)共同作用的结果。因此本文构建了四种回收渠道和再制造责任转移模型，综合考虑回收渠道和再制造责任转移模式对于供应链运营决策的影响。因此，本文站在多因素角度上研究再制造供应链的运营决策问题，更具有实践参考价值。

(2)在政府规制政策影响问题上，当前关于政府规制研究的重点在于规制如何影响供应链的运营策略。其中，对于补贴激励规制，重点关注补贴对象和补贴力度的差异性会如何影响供应链运营模式选择和生产决策；对于奖惩激励规制，则重点研究奖励和处罚力度对供应链生产决策的影响。然而，政府规制调整必将影响供应链不同成员的盈利能力进而影响其对收益分配的要求，目前，在政府规制如何影响供应链内部的收益分配问题上却是少有涉及，且较少考虑政策未来的变动趋势可能会导致供应链当前运营模式的不稳定。因此，本文在研究激励政策对供应链运营决策影响问题的同时，考虑了激励政策未来可能的变化趋势和这一变动趋势对供应链收益分配的影响。

(3)在供应链收益分配研究方面：现有文献大多采用经典合作博弈理论方法研究供应链收益分配问题，如 Shapley 值、核心、核仁、 τ 值等分配方法。但是这类方法是以当前条件下供应链成员组成的所有联盟的盈利状态为基础确定所有成员联盟的特征值，然后采用经典的合作博弈方法确定最终的收益分配。然而，供应链成员共同回收和再制造废旧产品是一项投资回报长远的合作计划，考虑供应链和各成员长期的合作贡献和盈利能力并由此确定的最终收益分配方案更为公平合理。因此，本文基于政策变动趋势预测的长期视角下，采用改进的合作博弈理论分析供应链利益协调问题。

针对上述研究不足，本文在基金和奖惩两种激励机制的政策下，依次讨论了最优回收和再制造责任转移模式选择、最优供应链合作模式选择以及最优合作模式下供应链收益分配的问题。首先通过不同回收和再制造责任转移模式下供应链利润和决策来判断政

府规制的影响,然后从社会福利、供应链利润等角度分析最优回收再制造责任转移模式;在此基础上扩充供应链结构,讨论实现社会福利最大化的回收再制造责任转移模式下供应链最优合作模式以及更具激励性的奖惩政策对供应链利润和决策的影响,并以此讨论供应链成员在最优合作模式下的收益分配问题,结合奖惩政策对供应链利润的影响确定能够维持供应链合作模式稳定的收益分配方式。本文综合考虑了未来政府规制可能的调整趋势以及在该趋势下供应链成员收益分配要求的变化,以此来改进经典合作博弈理论方法,进而得到满足供应链合作形式长期稳定的收益分配方案。本文研究不仅丰富了再制造供应链运营决策方面的理论,而且为供应链协调问题研究补充了新的切入视角,得出了新的收益分配方法。

1.3 研究内容与组织结构

本文以政府规制政策下供应链运营决策和收益分配为主体,在第三章研究基金政策下的供应链回收再制造责任转移模式选择、利润和决策的影响;然后在第四章讨论社会福利最大化和供应链利润最大化的协调问题,在第三章的社会福利最大化回收再制造责任转移模式的基础上考虑供应链合作模式的选择以及奖惩政策对供应链成员和不同联盟模式的收益的影响,然后根据奖惩政策对供应链联盟的影响研究供应链收益分配问题,进而得到能够维持供应链最优合作模式稳定的供应链收益分配方案,实现社会福利和供应链收益双重最优的协调。

第一章,绪论。主要阐述本文选题的背景,本文研究的意义,相关文献的综述和对当前研究的评论,文章研究内容概述和组织架构,最后指出本文研究的创新之处。

第二章,相关概念与理论概述。本文涉及到的循环经济理论、再制造理论、回收渠道和再制造模式、Stackelberg 博弈模型、合作博弈理论方法等基础理论将在本章进行介绍。

第三章,基金政策下再制造供应链运营决策研究。本章在考虑基金政策影响下,构建不同回收再制造责任转移模式下的供应链决策模型,其中,制造商为领导者,第三方再制造商为追随者,根据回收和再制造主体的差异性可以得到四种回收再制造责任转移模式(简称回收再制造模式)。通过求解和对比不同模式下的最优决策和均衡利润,分析各供应链成员对不同回收再制造模式的偏好。然后,分析供应链成员决策和利润随政策相关参数的变化,探讨政策对供应链成员决策和利润的影响,在此基础上从社会福利、

供应链利润和消费者剩余最大化模式。

第四章，奖惩政策下再制造供应链运营决策与收益分配研究。本章以奖惩激励政策的实施为背景，在第三章研究基础上，选择社会福利最大的回收再制造合作模式，在延伸供应链结构的前提下，构建不同联盟合作模式下再制造供应链决策模型。供应链由制造商、零售商和再制造商构成，其中，制造商为领导者，零售商和再制造商为跟随者，依据各个成员的联盟方式，可形成五种联盟模式。通过求解和对比不同联盟模式下供应链成员的决策和利润，探究最优联盟模式和各成员所有可能的收益水平，然后以此为基础讨论政策相关参数变动对供应链成员决策和收益的影响。在得到各成员在各联盟的收益水平和政策对各成员利润影响的基础上，采用合作博弈方法构建符合供应链各方利润要求和长期合作稳定的收益分配方案。

第五章，结论与展望。对本文研究内容和所得到的结果进行概括总结，指出本文研究的不足和值得进一步深入研究的内容，展望未来可能的研究内容。

本文的组织结构如图 1-1 所示。

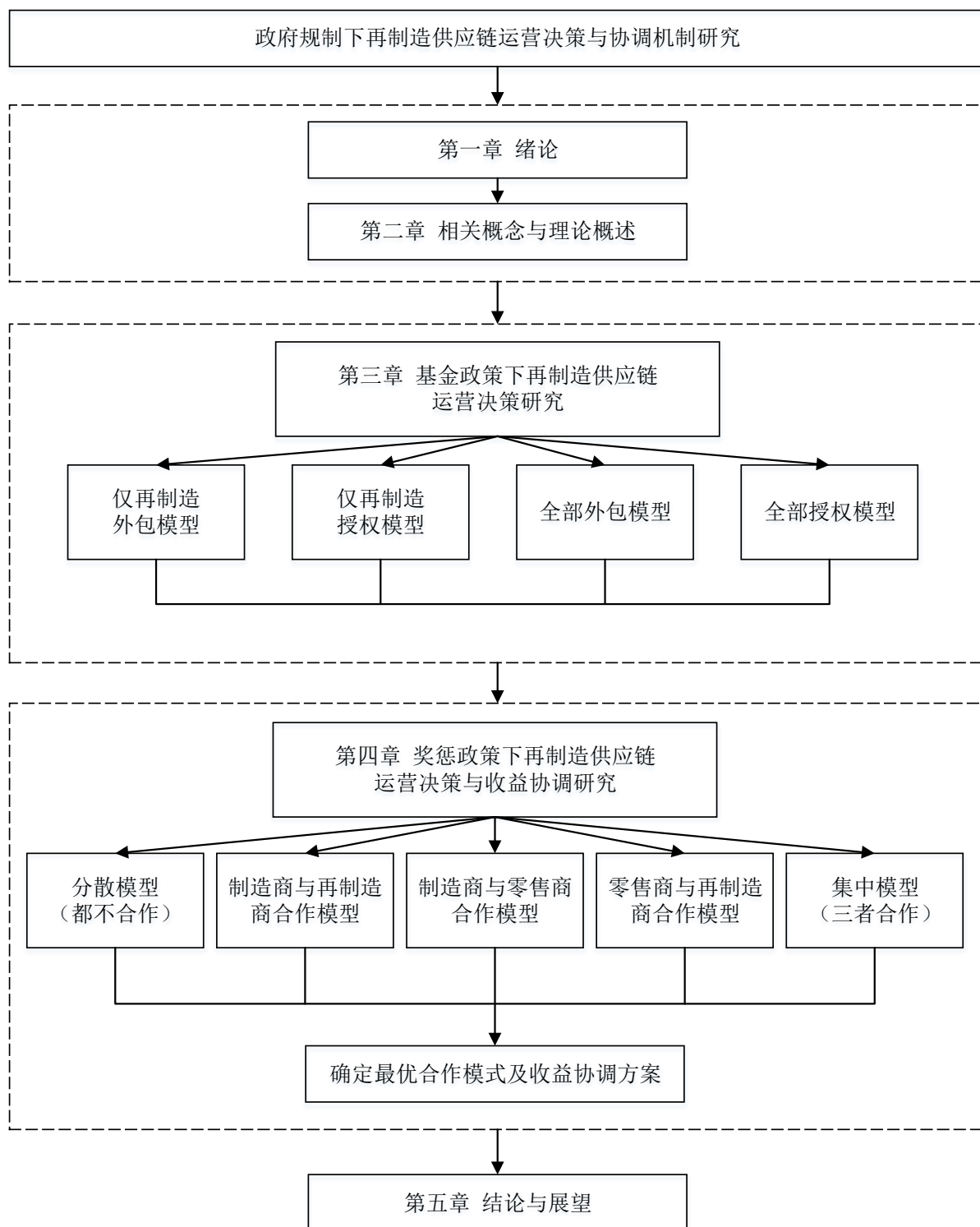


图 1-1 组织结构图

1.4 主要创新点

本文研究了两种激励政策对采取两种再制造合作形式的再制造供应链运营决策及协调机制的影响，通过构建不同的回收再制造决策模型和联盟决策模型来讨论供应链最优合作模式和该模式下的收益分配问题。本文的主要创新点如下：

(1) 研究视角创新。在研究政策影响问题时，不同于以往供应链运营决策研究，本文综合考虑多种因素对供应链成员决策的共同影响，从而更贴近现实企业决策。此外，在讨论供应链收益分配问题时，本文站在长期收益的角度，考虑政策、市场等外部因素的变动趋势以及由此带来的供应链成员对供应链整体收益贡献的变化，以供应链成员未来长时期的贡献和盈利能力作为供应链收益分配分配的基准更为公平合理，更能满足供应链合作模式的长期稳定。

(2) 研究方法创新。本文研究供应链收益分配问题时，充分考虑了外部政策变动对供应链收益分配的影响，在经典合作博弈理论的基础上提出了加权的方法来确定合作博弈的特征值，称之为加权特征值。基于加权特征值构建的特征值得到收益分配方案能够很好的满足合作模式的长期稳定。

第 2 章 相关概念与理论概述

2.1 生产者责任延伸制度

生产者责任延伸制度规定产品的生产者不仅需要在产品的生产过程中承担责任，而是延伸到产品的整个生命周期。包括产品的设计、生产、消费、回收和再利用五个阶段。目前多国基于生产者责任延伸制度出台了一些列规制来明确生产者回收处理废旧产品的责任。

生产者责任延伸制度在瑞典被提出，随后经过环境经济学家托马斯研究和总结，提出了生产者责任延伸的具体概念。托马斯教授认为生产者必须承担环境破坏、经济、物质、所有权和信息披露 5 种责任。在生产者责任延伸的概念提出后，在德国《包装物条例》中得到首次运用，然后被世界多国所采纳，在托马斯教授的概念基础上出台了一系列的法规政策，如欧盟的《废弃电子电器设备指令》和我国的《废弃电器电子产品处理基金征收使用管理办法》均是在生产者责任延伸制度的基础上结合地区和本国国情出台的法规政策。

生产者责任延伸制度强调了生产者的责任，但也同样明确了产品生命周期中所有相关者的责任，包括销售商、消费者、回收者和政府。生产者起主导作用，在产品的设计阶段就需要考虑产品的整个生命周期可能会对环境所产生的影响；当产品使用报废后，制造商需要承担产品回收利用、披露产品信息和分担非生产者回收的废旧产品回收和处理费用。销售商的责任主要包括面向消费市场收集并存放废旧产品、分担和收取回收费用和告知消费者废旧产品危害信息责任。消费者的责任主要为将废旧产品交给正规的回收渠道和承担一定废旧产品处理费用。政府的责任包括制定相关激励法规制度，规范废旧产品回收和处理市场、建立产品分类和拆解处理等技术标准等。相关主体的责任承担如图 2-1 所示。

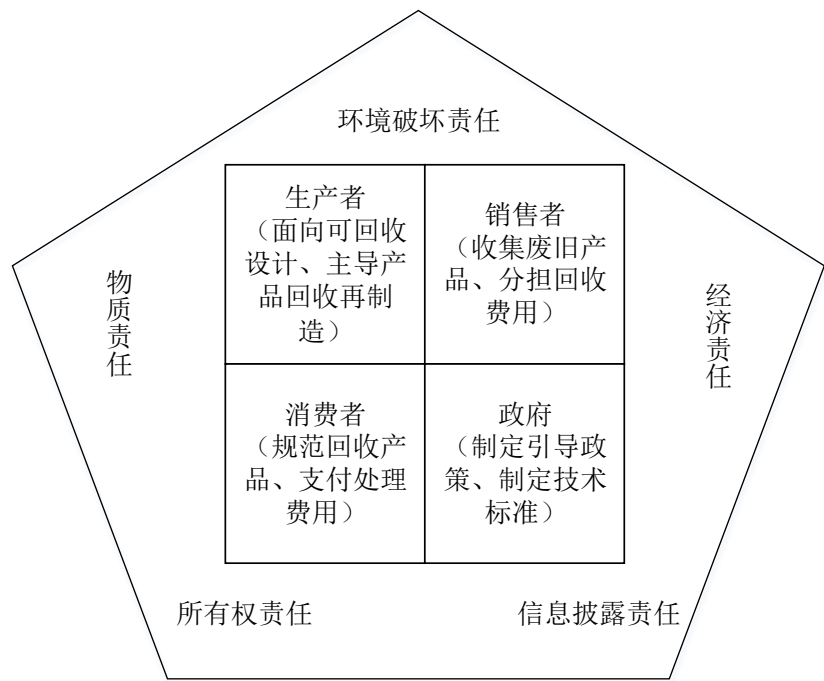


图 2-1 相关主体责任承担

2.2 再制造概述

再制造是一项通过高端技术手段和技术来彻底修复或改造废旧产品的产业。这项产业主要从损坏或者将要报废的产品上获得材料，根据产品原本的外形和材料基础, 采用先进的工艺和技术手段对废旧产品进行清洗、拆卸、检测、分类、修复等一系列再制造作业，使其安全性能、质量品质和使用功能恢复到新产品的标准要求，甚至超过标准要求。相比于采用原料生产新产品，生产同样单位数量的再制造品可以实现节省成本 50%、节能 60%、节材 70%，减排 80%。再制造的本质是修复而不是传统意义上的维修，是一种高科技含量的修复过程，是产品维修的高级阶段。

再制造过程包括 8 个步骤：废旧产品清洗、拆卸废旧产品、清洗可用对象、检测可用对象、将可用对象按照检测结果分类、根据要求选择再制造技术、目标产品再制造和检验再制造品是否达标。整个过程如图 2-2 所示。

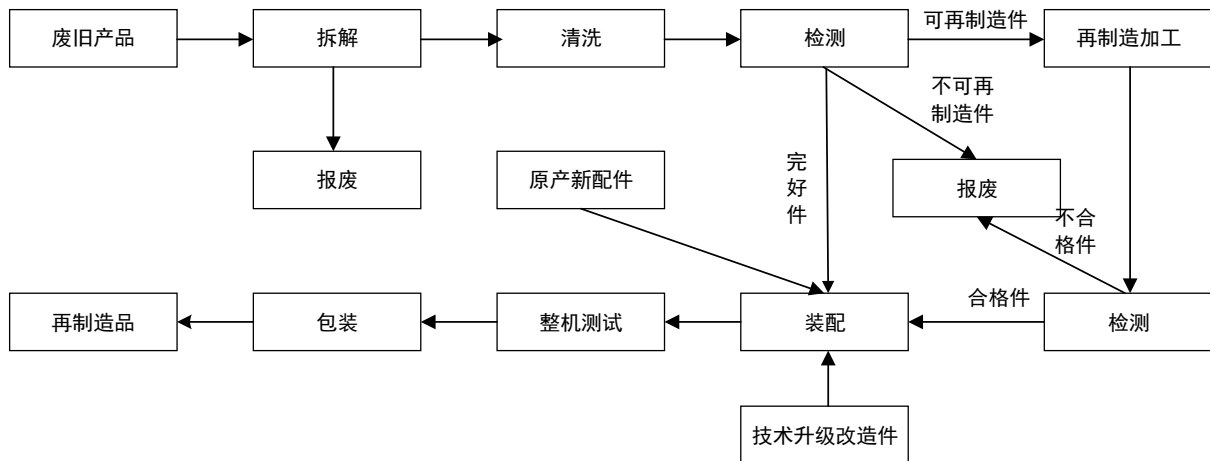


图 2-2 再制造过程

2.3 再制造供应链和回收再制造模式

再制造供应链是指开展废旧产品回收和再制造活动的供应链，其结构主要有两种，一种是只包含废旧产品回收和再制造的逆行供应链结构，一般至少由一个制造商和一个再制造商构成，制造商与再制造商达成协议，将回收和再制造业务部分或全部转移给再制造商进行回收和再制造活动；另一种为包含逆向供应链由包含正向供应链的闭环供应链结构，一般至少由一个制造商、一个销售商和一个再制造商构成，制造商通过协议将回收和再制造业务分别转移给销售商和再制造商来开展回收和再制造活动。两种再制造供应链结构如图 2-3 所示。

本文所研究的回收模式是指回收主体，即由谁来进行回收的问题。根据现有的研究文献，回收模式按照回收主体划分可以分为单个主体独自回收的单渠道回收模式和多个主体共同回收的混合渠道模式。单渠道回收是指由一个主体进行回收业务，与本文设定相关的主要有制造商回收、零售商回收和第三方再制造商回收三种渠道。混合渠道回收是指由两个及以上主体共同开展回收业务，与本文设定相关的主要有制造商+零售商回收、制造商+第三方再制造商回收、零售商+第三方再制造商回收和制造商+零售商+第三方再制造商回收四种混合回收渠道。本文所研究的为单回收渠道选择问题，混合回收渠道问题有待进一步探讨。

本文所涉及的回收模式主要包括三类模式：制造商自己再制造、制造商将再制造业务通过外包的方式转移给第三方再制造商和制造商将再制造业务通过授权的方式转移给第三方再制造商。

制造商再制造模式：在这种模式下，制造商自行或委托第三方回收消费者更换的废旧产品，根据产品的生产工艺对可再制造的废旧产品进行修复，使其质量、性能等标准不弱于新产品，然后经由制造商的销售渠道售给消费者。这种再制造模式的优点在于制造商了解产品工艺，对目标的拆卸、清洗、检测等再制造操作更为清晰。此外，制造商再制造有利于保护制造商的核心技术和知识产权和减少低价再制造品对产品市场的侵蚀。其缺点在于缺乏专业的再制造设备、场地和再制造修复技术，前期需要大量的资本投入。此外，制造商生产再制造品会拉低产品的品牌形象，不利于产品定位市场高端。

外包再制造模式：在这种模式下，制造商通过支付一定的外包费用将再制造业务转移给第三方再制造商，制造商复杂再制造品的销售工作。这种模式本质上也是制造商再制造，相较于制造商直接再制造，这种模式可以避免前期巨大的资金投入，再制造品成本更低，但产品技术泄露风险有所增加。

授权再制造模式：在这种模式下，制造商将再制造业务授权给第三方再制造商并收取一定的授权费用，由第三方再制造商负责生产和销售再制造品。相对与前两种模式，这种模式下产品核心技术泄露的风险最大，再制造品侵占新产品市场的风险最高。但由于再制造品不通过制造商销售渠道销售，对产品的品牌形象没有影响。

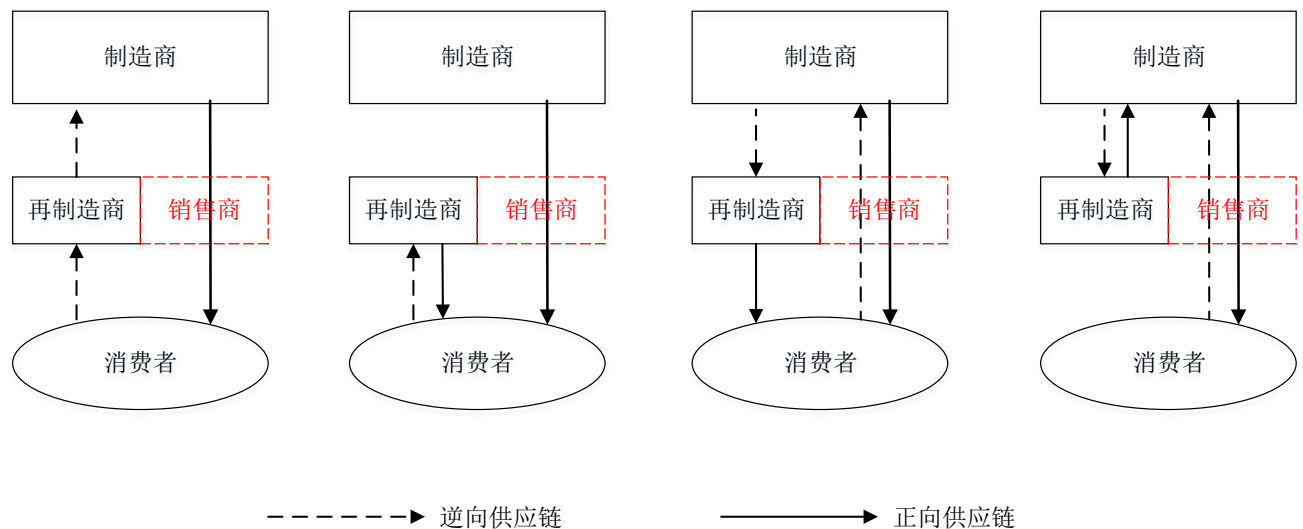


图 2-3 再制造供应链结构类型

2.4 Stackelberg 博弈理论

Stackelberg 博弈由德国经济学家 H. Von Stackelberg 提出，通常用来研究企业不对称竞争问题。在该模型中，竞争的厂商地位不平等，一个是处于支配地位的领导者，其他

厂商为追随者。领导者会考虑追随者的反应函数并根据利润最大化(或成本最小化)原则优先做出决策,然后追随者依据领导者的决策再进行决策。领导者和决策者之间是完全信息动态决策过程。

在本文所构建的 Stackelberg 博弈模型中,制造商均为领导者,第三方再制造商和零售商为同等地位的跟随者。以本文背景为例,其求解过程如下:

制造商利润函数为: $\pi_M = f_M(q_n, q_r, p_s, k)$; 再制造商利润函数为: $\pi_R = f_R(q_n, q_r, p_s, k)$; 采用逆向归纳法优先求解第三方再制造商对制造商决策的反应函数, $q_r = f(q_n, p_s, k)$; 将追随者反应函数代入制造商利润函数得到目标函数 $\pi_M = f_M(q_n, p_s, k)$, 构建海塞矩阵判断目标函数是否存在极大值或极小值; 若极大值或极小存在,则制造商能够实现利润最大化(或成本最小化),极值点为制造商最优决策; 海塞矩阵由目标函数的二次偏导函数构成,以本文背景为例, 制造商利润函数为 π_M ,

其决策变量为 q_n 、 p_s 和 k , 则海塞矩阵为
$$\begin{pmatrix} \frac{\partial^2 \pi_M}{\partial q_n^2} & \frac{\partial^2 \pi_M}{\partial q_n \partial p_s} & \frac{\partial^2 \pi_M}{\partial q_n \partial k} \\ \frac{\partial^2 \pi_M}{\partial p_s \partial q_n} & \frac{\partial^2 \pi_M}{\partial p_s^2} & \frac{\partial^2 \pi_M}{\partial p_s \partial k} \\ \frac{\partial^2 \pi_M}{\partial k \partial q_n} & \frac{\partial^2 \pi_M}{\partial k \partial p_s} & \frac{\partial^2 \pi_M}{\partial k^2} \end{pmatrix}$$
。若海塞矩阵正定,

目标函数存在极小值; 若海塞矩阵负定, 目标函数存在极大值; 若海塞矩阵既不正定也不负定, 目标函数不存在极值点。目标函数极值点通过联立方程组

$\{\frac{\partial \pi_M}{\partial q_n} = 0, \frac{\partial \pi_M}{\partial p_s} = 0, \frac{\partial \pi_M}{\partial k} = 0\}$ 求解。将制造商决策结果代入第三方再制造商和零售商反应

函数, 得到他们的最优决策。

2.5 合作博弈理论

合作博弈是一种与非合作博弈相对称的博弈类型, 与非合作博弈强调个体收益最大化不同, 合作博弈强调集体理性、效率、公平, 博弈的参与者们追求的目标为集体利润最大化, 他们之间形成一种具有约束性质且可强制执行的协议, 以保证集体目标的实现。合作博弈中最重要的两个概念为联盟和分配。

联盟是合作博弈的基本形式，合作博弈所有参与人的任意组合均可以看作一个联盟，包括只有一个参与人单人联盟和没有参与人空联盟。若参与者通过联盟实现了集体收益的提升，即参与者联盟时的总收益大于参与者非联盟时的收益之和，则需要对联盟后的效用进行公平、合理的分配，收益分配结果必须是一个帕累托最优改进，即该联盟的参与者的收益分配不小于其单人联盟时的收益。本文研究供应链收益分配主要涉及联盟特征值、核心、Shapley 值法和 τ 值法等理论方法将在第三章和第四章根据假设背景详细说明，此处概述如下：

特征值：若存在 n 个参与者组成联盟集为 N ，联盟 S 的特征函数为联盟 S 与剩下所有 $N-S$ 的联盟博弈中所能够取到的最小收益，反映了联盟 S 收益分配的底线。

核心：若一个收益分配方案，既能够保证任意每个联盟的参与者的收益分配不小于他们任意联盟所产生的利润总和，则该分配方案就是一个可以维持该联盟形式稳定的分配方案，称之为可行解。所有可行解的集合称为核心。

Shapley 值法是一种不考虑参与者加入联盟先后顺序的收益分配方式。首先确定收益最高的联盟形式，然后需要计算出所有参与者对其参与的所有属于该联盟子集联盟的贡献，贡献值为包含参与者 i 的联盟收益减去仅不包含参与者 i 的联盟收益。然后计算所有参与者对所有联盟贡献值的平均值，并以此为依据对所有参与人分配收益。

τ 值法是一种对参与者最低收益分配要求和最高收益分配要求进行折中的收益分配方法，最低收益分配要求为参与者单人联盟的特征值，最高分配要求为参与人单人联盟对收益最高联盟的贡献值。依据所有参与者收益分配之和等于收益最高联盟的总收益，得到折中比例，最终的收益分配值称为 τ 值。

第3章 基金政策下再制造供应链运营决策研究

目前,针对电子、汽车、重工等多个行业的废旧产品回收,多国政府颁布基金政策激励相关企业参与废旧产品的回收和再制造业务。在工业实践中,许多企业出于对再制造成本、技术和品牌形象的考虑,将再制造业务通过外包或授权方式转移给第三方再制造企业。例如,路虎将再制造业务外包给卡特彼勒,苹果公司授权富士康进行再制造品生产和销售^[7]。在此背景下,本章构建基金政策下由原始设备制造商(下文简称制造商,OEM)和第三方再制造商(下文简称再制造商,TPR)组成的再制造供应链 Stackelberg 博弈模型,其中,制造商是领导者,在供应链中占据主导地位,再制造商为追随者。本章旨在研究基金政策背景下,当制造商采取不同合作方式转移回收再制造责任时、再制造供应链的运营决策问题,探讨基金政策变动对再制造供应链运营决策及不同成员合作方式偏好的影响。

3.1 问题描述和符号说明

再制造供应链由一个制造商(领导者)和一个再制造商构成,制造商进行新产品可再制造性设计、生产和销售,然后由制造商或再制造商回收消费者淘汰的废旧产品,并通过授权或外包的方式将其转移给再制造商进行再制造。此外,政府根据新产品销售数量向制造商征收废弃处理基金(环境税)并以此补贴废旧产品回收者。

根据回收和再制造责任转移形式的不同,制造商和再制造商之间可形成四种合作形式,进而可构建四种回收再制造责任转移模型:(1)全部外包模式RO:制造商将回收和再制造业务全部外包给再制造商,再制造商回收废旧产品并生产再制造品,然后交给制造商销售,如图3-1(a)所示。例如卡特彼勒公司为路虎提供回收和再制造服务;(2)全部授权模式RP:制造商授权再制造商进行废旧产品的回收、再制造生产和销售,如图3-1(b)所示。代表企业有SUN公司对于从事其服务器再制造的第三方再制造商收取专利许可费;(3)仅再制造外包模式MO:制造商回收废旧产品,然后将再制造业务外包给再制造商,再制造产品仍然由制造商销售,如图3-1(c)所示。例如苹果公司在欧美将废旧手机和平板的再制造业务外包给第三方再制造商,然后通过苹果官网销售再制造品;(4)仅再制

造授权模式**MP**：制造商将回收的废旧品以授权的形式交付再制造商进行再制造品的生产与销售，如图3-1(d)所示，例如苹果公司将回收的废旧品交付给富士康进行再制造和销售。四种回收再制造模式的运作流程如图3-1所示。

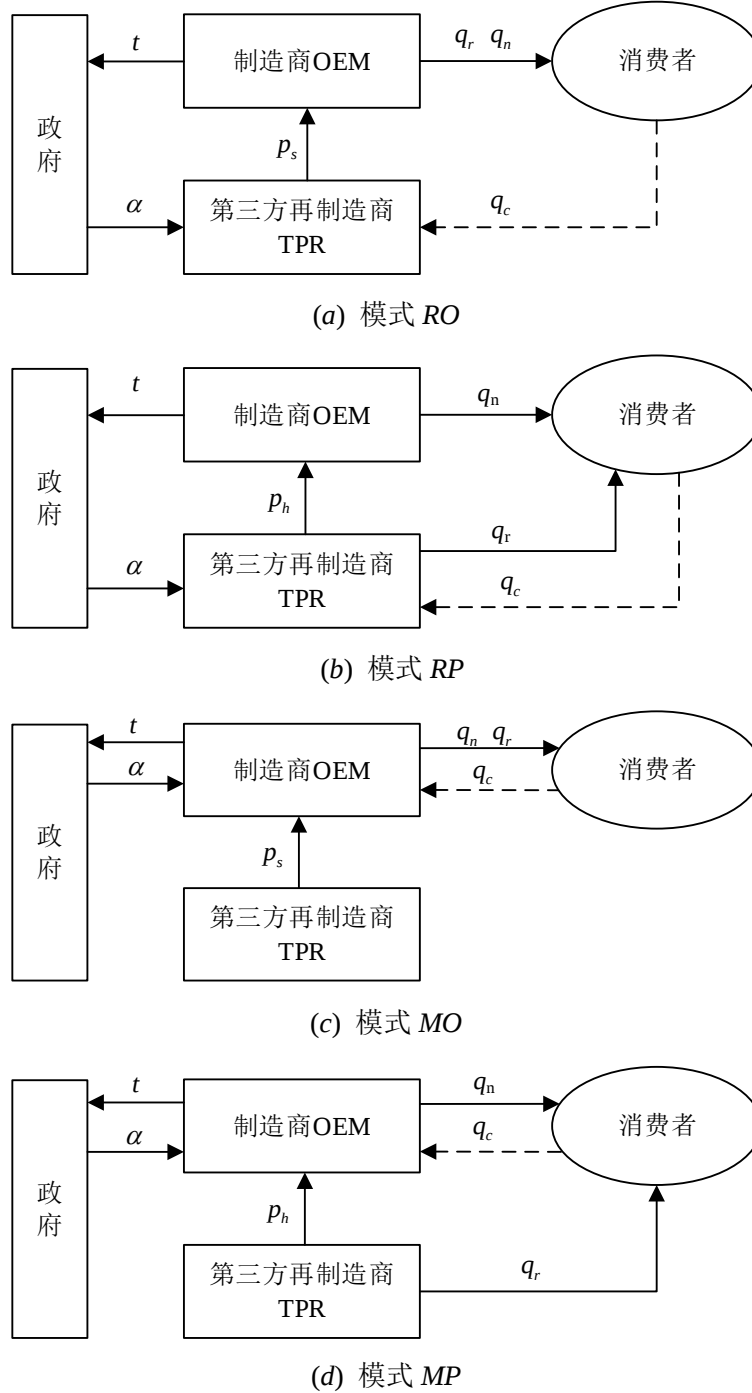


图 3-1 四种回收再制造模式

本文的相关假设及符号说明如下：

设新产品、再制造品的生产成本和废旧品的回收价格在四种模式中一致，废旧产品数量足够大且只能被再制造一次，不同主体回收效率一致^[28]。新产品生产成本为 c_n ， c_r

和 s 分别是再制造品的单位生产成本和废旧产品的单位回收价格。相较于生产新产品，生产再制造品可节省能源和材料，所以再制造品相较于新产品具有成本优势^[43]，即 $c_r + s < c_n$ 。

设市场潜在规模为 1，消费者对新产品的支付意愿 v 在 $[0,1]$ 上服从均匀分布。消费者对再制造品的支付意愿低于新产品，消费者对于再制造品的支付意愿为 δv ，其中 $\delta \in [0,1]$ ，反映了再制造品对新产品的替代程度^[61]。此时消费者购买新产品与再制造品的效用函数分别为 $u_n(v) = v - p_n$ 和 $u_r(v) = \delta v - p_r$ ，根据效用最大化原则，其购买行为取决于新产品和再制造品的定价及替代关系，参考文献[62]可得新产品和再制造品的需求函数分别为 $q_n = 1 - \frac{p_n - p_r}{1 - \delta}$ 和 $q_r = \frac{\delta p_n - p_r}{\delta(1 - \delta)}$ ，从而推导出两种产品的逆需求函数分别为 $p_n = 1 - q_n - \delta q_r$ 和 $p_r = \delta(1 - q_n - q_r)$ 。

在 RO 和 MO 模式中制造商向再制造商支付再制造品批发价格为 p_s (外包价格)，在 RP 和 MP 模式中制造商向再制造商收取单位再制造品授权费用为 p_h (授权费)。在四种模式中，由再制造商获利性得到， $p_r^{RO} > p_s^{RO} > c_r + s - \alpha$ ， $p_r^{RP} > p_h^{RP} + c_r + s - \alpha$ ， $p_r^{MO} > p_s^{MO} > c_r$ 和 $p_r^{MP} > p_h^{MP} + c_r$ 。

废旧产品回收规模越大，回收难度越高。因此回收努力成本与回收数量关系为 cq_c^2 ，其中参数 c 反映了回收难易程度，且有 $c > \delta$ ^[63]。

制造商进行新产品可再制造性设计，可再制造性水平 k 在 $[0,1]$ 中取值^[64]，其中 $k = 0$ 表示未采用可再制造性设计策略， $0 < k < 1$ 表示采取提高产品可再制造性设计策略。可再制造性设计研发成本与可再制造性水平的关系为 $C(k) = \theta k^2 / 2$ ^[64,65]；其中参数 $\theta > 0$ 反映了可再制造性设计研发的难易程度。可再制造性水平为 k 时，再制造品单位生产成本为 $c_r - \mu k$ ，参数 μ 表示可再制造性设计引起的再制造品单位生产成本下降率。为了表示产品可再制造性投入对产品再制造成本节约的影响，设参数 H 来表示产品可再制造性设计研发效率^[66] (简称研发效率)，由可再制造性设计引起的单位再制造成本下降率

的平方和可再制造性设计研发难度系数的比构成，即 $H = \mu^2 / \theta$ 。

政府对制造商售出的每单位新产品征收处理基金(也称环境税，下文简称税收) t ，征收的基金以每单位废旧产品 α 补贴回收企业(下文简称补贴)^[66]。

新产品和再制造品对于环境的影响值可以分为生产和使用阶段。设新产品和再制造品在使用阶段对于环境的影响一致，因为再制造品在生产阶段能够重复利用一些可用原部件，再制造品在生产阶段造成的环境影响小于新产品，故设再制造品单位环境影响值 e_r 小于新产品单位环境影响值 e_n ，即 $e_r < e_n$ 。环境影响值表达式为： $E = e_n q_n + e_r q_r$ ^[63]，消费者剩余(CS)表达式为： $CS = \int_{1-q_n-q_r}^{1-q_n} (\delta v - p_r) dv + \int_{1-q_n}^1 (v - p_n) dv$ ^[61]，政府财政收支表达式为： $TI = tq_n - \alpha q_c$ ，政府财政收支为：环境税收入 tq_n 减去补贴支出 αq_c ^[67]。

本文采用单周期决策模型，即所有决策都在一个单独稳定的周期内，该周期内产品的价格、市场需求和回收率等都相对稳定^[64,68]。在决策框架方面，制造商与再制造商均为风险中性，且以利润最大化为目标。

文中符号说明如表 3-1 所示，其中符号 M 、 R 和 T 分别表示制造商、再制造商和再制造供应链。

表 3-1 符号及相关说明

符号	说明	符号	说明
q_n / q_r	新产品/再制造品数量	t / α	单位新产品环境税收/单位废旧产品回收补贴
p_s / p_h	单位再制造品外包价格/授权费用	c_n	新产品单位生产成本
q_c / q_t	废旧产品回收数量/总产量	m	废旧产品材料回收单价
e_n / e_r	新产品/再制造品单位环境影响值	s / c_r	废旧产品单位回收价格/再制造成本
k	产品可再制造性水平	c	回收成本规模效应参数
p_n / p_r	新产品/再制造品零售价格	θ	可再制造性设计成本规模系数
μ	可再制造设计导致的再制造成本下降率	TI	政府财政收支
v	消费者对新产品的支付意愿	δ	再制造品对新产品的替代程度
CS^i	模式 i 下的消费者剩余，	E^i	模式 i 下的环境影响值，

$i = \{RO, RP, MO, MP\}$	$i = \{RO, RP, MO, MP\}$
续表 3-1	
SW^i	模式 i 下的社会福利， $i = \{RO, RP, MO, MP\}$
H	可再制造性设计研发效率
π_j^i	供应链成员 j 在模式 i 下的利润， $i = \{RO, RP, MO, MP\}$ ， $j = \{M, R, T\}$

3.2 决策模型与求解

(1) 全部外包模式 RO

在 RO 模式中，制造商和再制造商博弈决策顺序为：首先制造商决定可再制造性水平 k 、新产品数量 q_n 以及再制造品外包价格 p_s ，然后再制造商根据制造商的决策决定再制造品数量 q_r 。制造商和再制造商利润函数分别为：

$$\max_{\{q_n, p_s, k\}} \pi_M^{RO} = (p_n - c_n)q_n + (p_r - p_s)q_r - \frac{1}{2}\theta k^2 - tq_n \quad (3-1)$$

$$\max_{\{q_r\}} \pi_R^{RO} = (p_s - c_r + \mu k - s)q_r - cq_r^2 + \alpha q_r \quad (3-2)$$

根据逆向归纳法求得最优结果如表 2 所示。求解过程见附录 1。

(2) 全部授权模式 RP

RP 模式中，制造商和再制造商决策顺序为：首先制造商决定产品可再制造性水平 k 、新产品数量 q_n 和再制造品授权费用 p_h ，然后再制造商根据制造商的决策决定再制造品数量 q_r 。制造商和再制造商利润函数分别为：

$$\max_{\{q_n, p_h, k\}} \pi_M^{RP} = (p_n - c_n)q_n + p_h q_r - \frac{1}{2}\theta k^2 - tq_n \quad (3-3)$$

$$\max_{\{q_r\}} \pi_R^{RP} = (p_r - p_h - c_r + \mu k - s)q_r - cq_r^2 + \alpha q_r \quad (3-4)$$

同理求得最优结果如表 2 所示，求解过程参照附录 1。

(3) 仅再制造外包模式 MO

在 MO 模式中，制造商和再制造商决策博弈顺序为：首先制造商决定产品可再制造性水平 k ，新产品数量 q_n 和再制造品数量 q_r ，然后再制造商根据制造商的决策决定再制造品外包价格 p_s 。制造商和再制造商利润函数分别为：

$$\max_{\{q_n, q_r, k\}} \pi_M^{MO} = (p_n - c_n)q_n + (p_r - p_s - s)q_r - \frac{1}{2}\theta k^2 - cq_r^2 - tq_n + \alpha q_r \quad (3-5)$$

$$\max_{\{p_s\}} \pi_R^{MO} = (p_s - c_r + \mu k)q_r \quad (3-6)$$

同理求得最优结果如表 2 所示，求解过程参照附录 1。

(4) 仅再制造授权模式 MP

在模式 MP 中，制造商与再制造商博弈决策顺序与 RP 模式中一致，制造商和再制造商利润函数分别为：

$$\max_{\{q_n, p_h, k\}} \pi_M^{MP} = (p_n - c_n)q_n + (p_h - s)q_r - \frac{1}{2}\theta k^2 - cq_r^2 - tq_n + \alpha q_r \quad (3-7)$$

$$\max_{\{q_r\}} \pi_R^{MP} = (p_r - p_h - c_r + \mu k)q_r \quad (3-8)$$

同理求得最优结果如表 3-2 所示，求解过程参照附录 1。

表 3-2 四种模式下的均衡结果

	模式 RO	模式 RP	模式 MO	模式 MP
q_n	$\frac{1-c_n-t}{2} - \frac{\theta\delta\Delta}{\xi^{RO}}$	$\frac{1-c_n-t}{2} - \frac{\theta\delta\Delta}{\xi^{RP}}$	$\frac{1-c_n-t}{2} - \frac{\theta\delta\Delta}{\xi^{MO}}$	$\frac{1-c_n-t}{2} - \frac{\theta\delta\Delta}{\xi^{MP}}$
q_r	$\frac{\theta\Delta}{\xi^{RO}}$	$\frac{\theta\Delta}{\xi^{RP}}$	$\frac{\theta\Delta}{\xi^{MO}}$	$\frac{\theta\Delta}{\xi^{MP}}$
k	$\frac{\mu\Delta}{\xi^{RO}}$	$\frac{\mu\Delta}{\xi^{RP}}$	$\frac{\mu\Delta}{\xi^{MO}}$	$\frac{\mu\Delta}{\xi^{MP}}$
p_n	$\frac{1+c_n+t}{2}$	$\frac{1+c_n+t}{2}$	$\frac{1+c_n+t}{2}$	$\frac{1+c_n+t}{2}$

续表 3-2

p_r	$\frac{\delta(1+c_n+t)}{2} - \frac{\delta\theta\Delta(1-\delta)}{\xi^{RO}}$	$\frac{\delta(1+c_n+t)}{2} - \frac{\delta\theta\Delta(1-\delta)}{\xi^{RP}}$	$\frac{\delta(1+c_n+t)}{2} - \frac{\delta\theta\Delta(1-\delta)}{\xi^{MO}}$	$\frac{\delta(1+c_n+t)}{2} - \frac{\delta\theta\Delta(1-\delta)}{\xi^{MP}}$
p_s / p_h	$c_r + s + \frac{\Delta(2c\theta - \mu^2)}{\xi^{RO}}$	$\frac{\delta + \alpha - c_r - s}{2} + \frac{\Delta\mu^2}{2\xi^{RP}}$	$c_r + \frac{\Delta(\delta\theta(1-\delta) - \mu^2)}{\xi^{MO}}$	$\frac{\delta + s - c_r - \alpha}{2} + \frac{\Delta(\mu^2 + 2c\theta)}{2\xi^{MP}}$
π_M	$\frac{(1-c_n-t)^2}{4} + \frac{\theta\Delta^2}{2\xi^{RO}}$	$\frac{(1-c_n-t)^2}{4} + \frac{\theta\Delta^2}{2\xi^{RP}}$	$\frac{(1-c_n-t)^2}{4} + \frac{\theta\Delta^2}{2\xi^{MO}}$	$\frac{(1-c_n-t)^2}{4} + \frac{\theta\Delta^2}{2\xi^{MP}}$
π_R	$\frac{c\theta^2\Delta^2}{(\xi^{RO})^2}$	$\frac{(c+\delta)\theta^2\Delta^2}{(\xi^{RP})^2}$	$\frac{(1-\delta)\delta\theta^2\Delta^2}{(\xi^{MO})^2}$	$\frac{\delta\theta^2\Delta^2}{(\xi^{MP})^2}$
π_T	$\frac{(1-c_n-t)^2}{4} + \frac{\theta\Delta^2(2\theta(3c+\delta-\delta^2)-\mu^2)}{2(\xi^{RO})^2}$	$\frac{(1-c_n-t)^2}{4} + \frac{\theta\Delta^2(2\theta(3c+3\delta-\delta^2)-\mu^2)}{2(\xi^{RP})^2}$	$\frac{(1-c_n-t)^2}{4} + \frac{\theta\Delta^2(2\theta(c+3\delta-3\delta^2)-\mu^2)}{2(\xi^{MO})^2}$	$\frac{(1-c_n-t)^2}{4} + \frac{\theta\Delta^2(2\theta(c+3\delta-\delta^2)-\mu^2)}{2(\xi^{MR})^2}$

其中 $\xi^{RO} = 2\theta(2c + \delta - \delta^2) - \mu^2$, $\xi^{RP} = 2\theta(2c + 2\delta - \delta^2) - \mu^2$, $\xi^{MO} = 2\theta(c + 2\delta - 2\delta^2) - \mu^2$,

$\xi^{MP} = 2\theta(c + 2\delta - \delta^2) - \mu^2$ 和 $\Delta = \delta(c_n + t) - (c_r + s - \alpha)$; 四个模型存在唯一最优解的条件

分别为: $\xi^{RO} > 0$, $\xi^{RP} > 0$, $\xi^{MO} > 0$ 和 $\xi^{MP} > 0$ 。

3.3 结果分析

本节将对上述四种回收再制造模式中的均衡结果进行对比分析, 讨论再制造商和制造商模式偏好以及政府基金政策对于最优生产决策、供应链利润、环境影响及消费者剩余的影响。

3.3.1 均衡结果对比

结论 3.1 在四种模式中, 再制造商进入再制造品市场的条件一致, 都为

$c_r + s - \alpha < \delta(c_n + t)$ (即 $\Delta > 0$)。

结论 1 表明只有再制造品具有相对成本优势时, 再制造商才会进入再制造市场。当再制造品单位成本($c_r + s - \alpha$)越低、新产品单位成本($c_n + t$)越高或再制造品对新产品的

替代程度(δ)越高时,再制造品相对成本优势越大,再制造商的获利空间越大,再制造商选择进入再制造品市场的可能性越高。

结论 3.2 在四种模式下,有 $q_n^{MO} < q_n^{MP} < q_n^{RO} < q_n^{RP}$, $q_r^{MO} > q_r^{MP} > q_r^{RO} > q_r^{RP}$, $k^{MO} > k^{MP} > k^{RO} > k^{RP}$, $p_n^{MO} = p_n^{MP} = p_n^{RO} = p_n^{RP}$, $p_r^{MO} < p_r^{MP} < p_r^{RO} < p_r^{RP}$ 和 $q_t^{MO} > q_t^{MP} > q_t^{RO} > q_t^{RP}$ 。

证明过程见附录 2。

相比于再制造商回收模式(RO, RP),在制造商回收模式下,制造商需要承担回收成本,因此制造商设置较高的产品可再制造性水平激励再制造商增加再制造品产量以获取更高的再制造品销售或授权费收益。因此制造商回收模式(MO, MP)中再制造品数量和产品可再制造性水平相对更高

在外包模式(MO, RO)中,制造商销售新产品和再制造品,制造商与再制造商之间没有竞争关系。而在授权模式(MP, RP)中,制造商销售新产品,再制造商销售再制造品,制造商和再制造商之间存在竞争关系。因此相比于外包模式,制造商为了占据更多的市场份额会设置较低的产品可再制造性水平以减少再制造品产量。所以授权模式中再制造品数量和产品可再制造性水平比外包形式中的低($i^{MO} > i^{MP}, i^{RO} > i^{RP}, i = \{q_r, k\}$)。

在四种回收再制造模式中,制造商都是领导者且处于优势地位,因此可以保持在四种模式中新产品定价一致。再制造品成本优势随着产品可再制造性水平提高而上升,当可再制造性水平较高时,再制造品成本优势较大,制造商或再制造商能够以较低的零售价格出售更多再制造品,所以四种模式中再制造品零售价格大小关系与产品可再制造性水平相反。由于新产品价格在四种模式中保持一致,当再制造品的价格相对较低时,消费者购买新产品的效用不变而再制造品的效用更高,消费者对再制造品需求相对更高而对新产品需求相对较低。制造商和再制造商按需生产,因此四种模式中新产品的数量关系与再制造品数量相反。

由各模式中新产品与再制造品数量关系易得各模式回收率大小。按照各模式再制造品数量(可再制造性水平)依次升高的顺序(RP, RO, MP, MO),再制造品价格依次下降。由新产品和再制造品需求函数可知,再制造品零售价格下降导致的再制造品需求增加大于新产品需求减少($|\partial q_n / \partial p_r| < |\partial q_r / \partial p_r|$),总产量逐渐提高。

结论 3.2 表明,由于在不同的回收再制造模式中制造商的成本支出和获利方式不同,

制造商通过设置不同的产品可再制造性水平来调节再制造品数量。其中仅再制造外包模式可再制造性水平最高，最有利于再制造品生产。

结论 3.3 在四种模式下， $\pi_M^{MO} > \pi_M^{MP} > \pi_M^{RO} > \pi_M^{RP}$ ；存在研发效率阈值 $H^1 < H^2 < H^3$ ，当 $0 < H < H^1$ 时， π_R^{RP} 最大；当 $H^1 < H < H^2$ 时， π_R^{RO} 最大；当 $H^2 < H < H^3$ 时， π_R^{MP} 最大；当 $H^3 < H < H^{MO}$ 时， π_R^{MO} 最大；当 $H = H^1$ 时， $\pi_M^{RP} = \pi_M^{RO}$ ；当 $H = H^2$ 时， $\pi_M^{MP} = \pi_M^{RO}$ ；当 $H = H^3$ 时， $\pi_M^{MP} = \pi_M^{MO}$ ； $\pi_T^{MO} > \pi_T^{MP} > \pi_T^{RO} > \pi_T^{RP}$ 。

证明过程见附录 3

由结论 3.2 可知，随着各模式再制造品数量(可再制造性水平)依次增加，新产品数量依次减少。结论 3.3 说明再制造品数量相对增加使得制造商利润相对增长大于新产品数量相对减少带来的利润损失。因此，制造商偏好再制造品最多(可再制造性水平最高)的 MO 模式。

研发效率直接影响再制造品单位成本节约和产品设计研发成本。在一定研发难度下，随着研发效率提高，再制造品单位成本节约上升，此时再制造品数量(产品可再制造性水平)越高则再制造商利润越大。在一定再制造成本下降率下，随着研发效率提高，研发成本降低，制造商从再制造品中抽取的利润也随之下降，因此再制造品数量越高则再制造商利润越大。由于研发成本随着可再制造性水平提高呈指数增长，当产品可再制造性水平提高到一定程度时，提高产品可再制造性水平导致研发成本增长会超过再制造成本节约，制造商需要从再制造品中获取更多的利润来弥补高额的研发成本，从而导致再制造商利润下降。因此只有当研发效率足够高时，再制造商偏好可再制造性水平最高的 MO 模式，随着研发效率的降低，再制造商的偏好依次变为可再制造性水平依次降低的 MP 模式、RO 模式以及 RP 模式。

当研发效率处于临界值上时，再制造商利润最大模式存在两个，此时产品可再制造性或高或低并不影响再制造商对这两个模式的偏好。由于制造商利润远大于再制造商利润，因此四个模式中供应链总利润大小关系与 OEM 利润大小关系一致。

结论 3.4 在四种模式下，有 $C^M > C^P > C^R > C^O$ ，当 $e_r - \delta e_n < 0$ 时， $E^M > E^P > E^R > E^O$ ；当 $e_r - \delta e_n \geq 0$ 时， $E^{MO} \geq E^{MP} \geq E^{RO} \geq E^{RP}$ 。

证明过程见附录 4。

随着各模式再制造品价格递减(RP 、 RO 、 MP 、 MO)，消费者购买单位再制造品效用依次递增而购买单位新产品效用不变，再制造品购买量依次递增而新产品购买量依次递减。结论 3.4 表明随着各模式再制造价格递减，消费者购买再制造品效用相对增加大于购买新产品效用相对减少，消费者剩余递增，消费者偏好最有利于再制造的 MO 模式。

结论 3.4 表明，有利于再制造的模式不一定有利于环境。随着各模式再制造品数量递增，新产品数量依次减少。当再制造品相对环境影响较小时($e_r - \delta e_n < 0$)，再制造品数量相对增加导致的环境影响值增加小于新产品数量相对减少导致的环境影响值减少。环境影响递减，越有利于再制造的模式则越有利于环境。当再制造品的相对环境影响较大时($e_r - \delta e_n \geq 0$)，再制造品数量增加导致的环境影响增加大于或等于新产品数量减少导致的环境影响减少。环境影响递增或一致，此时越有利于再制造的模式则越不利于环境或环境影响一致。

3.3.2 政府基金政策影响分析

政府环境税和补贴对四种模式下制造商和再制造商生产决策、产品定价、最大利润、消费者剩余及环境的影响如结论 5~7 所示。

结论 3.5 (1) $\frac{\partial q_n^i}{\partial t} < \frac{\partial q_n^i}{\partial \alpha} < 0$, $\frac{\partial q_n^{RP}}{\partial j} > \frac{\partial q_n^{RO}}{\partial j} > \frac{\partial q_n^{MP}}{\partial j} > \frac{\partial q_n^{MO}}{\partial j}$; (2) $0 < \frac{\partial q_r^i}{\partial t} < \frac{\partial q_r^i}{\partial \alpha}$, $\frac{\partial q_r^{RP}}{\partial j} < \frac{\partial q_r^{RO}}{\partial j} < \frac{\partial q_r^{MP}}{\partial j} < \frac{\partial q_r^{MO}}{\partial j}$; (3) $0 < \frac{\partial k^i}{\partial t} < \frac{\partial k^i}{\partial \alpha}$, $\frac{\partial k^{RP}}{\partial j} < \frac{\partial k^{RO}}{\partial j} < \frac{\partial k^{MP}}{\partial j} < \frac{\partial k^{MO}}{\partial j}$ 。其中， $i = \{RO, RP, MP, MO\}$, $j = \{t, \alpha\}$ 。

证明过程见附录 5。

由结论 3.1 可知，在四种模式中，当政府提高环境税或补贴时，再制造品相对新产品成本优势扩大，制造商选择减少新产品产量，转而提升产品可再制造性水平激励再制造商生产更多再制造品，以此减少由环境税或补贴提高带来的损失并谋求从再制造品销售或授权上获取更多利润。环境税和补贴直接影响新产品和再制造品单位利润，生产规模越大，环境税和补贴对制造商和再制造商利润影响越大，制造商或再制造商采取的应对策略则越强烈。因此在生产规模最大的 MO 模式中，新产品和再制造品数量以及产品可再制造性水平受环境税和补贴影响最大，随着总产量降低，环境税和补贴的影响也随

之降低。环境税直接影响新产品的单位成本($c_n + t$), 补贴直接影响再制造品的单位成本($c_r + s - \alpha - \mu k$), 所以相比较而言, 环境税对新产品数量影响更大, 而补贴对再制造品数量影响更大。产品可再制造性水平与再制造品成本直接相关, 所以补贴对可再制造性水平影响更大。

结论 3.5 说明提高环境税和补贴均能够激励再制造商生产再制造品和制造商提高产品可再制造性设计水平, 在产品可再制造性水平越高的模式, 基金政策的激励效果就越显著。相对于环境税而言, 提高补贴是激励再制造更为有效的手段。

结论 3.6 在 RO 模式中, 当 $H < 2c$ 时, $\frac{\partial p_s^{RO}}{\partial t} > 0$, $\frac{\partial p_s^{RO}}{\partial \alpha} > 0$, 当 $2c \leq H < H^{RO}$ 时, $\frac{\partial p_s^{RO}}{\partial t} \leq 0$, $\frac{\partial p_s^{RO}}{\partial \alpha} \leq 0$; 在 RP 模式中, $\frac{\partial p_h^{RP}}{\partial t} > 0$, $\frac{\partial p_h^{RP}}{\partial \alpha} > 0$; 在 MO 模式中, 当 $H < \delta(1-\delta)$ 时, $\frac{\partial p_s^{MO}}{\partial t} > 0$, $\frac{\partial p_s^{MO}}{\partial \alpha} > 0$, 当 $\delta(1-\delta) \leq H < H^{MO}$ 时, $\frac{\partial p_s^{MO}}{\partial t} \leq 0$, $\frac{\partial p_s^{MO}}{\partial \alpha} \leq 0$; 在 MP 模式中, $\frac{\partial p_h^{MP}}{\partial t} > 0$, 当 $H < \delta(2-\delta)$ 时, $\frac{\partial p_h^{MP}}{\partial \alpha} < 0$, 当 $\delta(2-\delta) \leq H < H^{MP}$ 时, $\frac{\partial p_h^{MP}}{\partial \alpha} \geq 0$ 。

证明过程见附录 6。

结论 3.6 表明, 制造商或再制造商通过调整再制造转移价格(p_s / p_h)共摊税收上涨导致的损失和共享补贴提升带来的盈利。当环境税或补贴提高时: 在 RO 模式中, 制造商销售再制造品且再制造品数量相对较少, 所以制造商为了获取更高的再制造品销售收益, 除了提高产品可再制造性水平外, 还提高再制造品外包价格以激励再制造商生产更多再制造品; 而当研发效率较高时($2c \leq H < H^{RO}$), 提高产品可再制造性水平已经为再制造商生产再制造品带来了高额的成本节约, 因此制造商会保持外包价格不变甚至降低外包价格以获取更多利润。同样是制造商销售再制造品, 因为 MO 模式中再制造品数量相对较多, 所以只有在可再制造性设计研发效率较低($H < \delta(1-\delta)$)时, 再制造商才会选择提高外包价格以获取更多利润, 反之再制造商会保持外包价格不变或降低外包价格来让利制造商以保证较高的可再制造性水平。在 RP 模式中, 再制造商销售再制造品并享受政府补贴。因此制造商无论研发效率高低都会提高授权费用来弥补环境税的提高带来的损失或共享回收补贴。在 MP 模式中, 再制造商销售再制造品, 制造商享受补贴。因

此, 当环境税提高时, 制造商会提高授权费用来弥补损失; 而当补贴提高时, 若研发效率低于一定值($H < \delta(2-\delta)$)时, 制造商会适当降低授权费用来激励再制造商生产; 反之则不会减少授权费用甚至提高授权费用以获取更高利润。

结论 3.7 在各模式中, (1) $\frac{\partial \pi_M^i}{\partial \alpha} > 0$, $\frac{\partial \pi_M^{MO}}{\partial \alpha} > \frac{\partial \pi_M^{MP}}{\partial \alpha} > \frac{\partial \pi_M^{RO}}{\partial \alpha} > \frac{\partial \pi_M^{RP}}{\partial \alpha}$; (2) $\frac{\partial \pi_R^i}{\partial \alpha} > 0$, $\frac{\partial \pi_R^i}{\partial t} > 0$; (3) $\frac{\partial CS^i}{\partial \alpha} > 0$; (4) $\frac{\partial E^i}{\partial t} > 0$, 当 $\delta e_n > e_r$ 时, $\frac{\partial E^i}{\partial \alpha} < 0$, 当 $\delta e_n \leq e_r$ 时, $\frac{\partial E^i}{\partial \alpha} \geq 0$,

其中 $i = \{RO, RP, MO, MP\}$ 。

证明过程见附录 7。

当补贴提高时, 再制造品成本和零售价格下降($\frac{\partial p_r^i}{\partial \alpha} < 0$)且生产规模扩大, 再制造商利润和消费者剩余增长。当环境税提高时, 再制造品成本优势上升且生产规模扩大, 再制造商利润上升。

由结论 3.6 得知, 制造商通过调整再制造品外包价格和授权费用获取更多利润, 因此制造商利润也随之增长。再制造品数量越多, 制造商从再制造品上获取利润越多、利润随补贴增长的越快。结合结论 3.2 中四种模式再制造品数量关系可知, MO 模式中再制造产品数量最多, 因此补贴对制造商利润影响最大, 随着再制造品数量降低, 补贴对制造商利润影响依次减小。

环境影响方面, 当政府提高补贴时, 再制造品数量增加, 新产品数量减少(结论 3.5)。当再制造品相对环境影响较小($\delta e_n > e_r$)时, 再制造品数量增加导致的环境影响增加小于新产品数量减少导致的环境影响减少, 总体环境影响减小; 当再制造品相对环境影响较大($\delta e_n \leq e_r$)时, 再制造品数量增加导致的环境影响增加大于或等于新产品数量减少导致的环境影响减少, 总环境影响增大或不变。环境税提高导致新产品数量减少大于再制造品数量增加, 当单位新产品环境影响大于单位再制造品环境影响时, 总环境影响下降。

3.4 仿真算例

根据某品牌手机 2020 年度财报、回收市场价格、第三方调查公司(Fomalhaut Technology Solutions)公布的成本数据和对第三方再制造企业和消费者调查结果, 得到其

某款手机的相关数据,参考文献[63,68]进行标准化处理,得到相关参数如下: $\delta = 0.57$, $c = 1$, $\theta = 2$, $\mu = 0.6$, $s = 0.03$, $c_n = 0.49$, $c_r = 0.23$ 。为了讨论政府环境税对供应链决策的影响以及如何设置的问题,设定回收补贴为 $\alpha = 0.13$,分别讨论不同再制造品相对环境优势的($e_n = 0.3$, 当 $e_r = 0.15$ 时, $\delta e_n > e_r$; 当 $e_r = 0.18$ 时, $\delta e_n \leq e_r$)社会福利。

3.4.1 供应链利润和消费者剩余

当研发效率 $H = 0.18$ 时, 四种模式下制造商、再制造商及再制造供应链总体利润和消费者剩余随环境税增减的变化情况如图 3-2~3-5 所示。由图 3-2、3-3 可知,在四种模式中,制造商利润随着环境税的提高而降低且下降速率逐渐放缓而再制造商利润随环境税提高而快速攀升。这是因为环境税提高导致单位新产品生产成本增加而产量减少,再制造成本优势扩大而产量提高(结论 3.5)。由于再制造商利润远小于制造商利润,因此图 3-4 中供应链总利润随环境税变化趋势与图 3-2 一致。图 5 表明,在四种模式中,随着环境税提高,新产品和再制造品价格上涨($\partial p_n / \partial t > 0$, $\partial p_r / \partial t > 0$)而总产量减少,因此消费者剩余都随之下降。

结合结论 3.3 和 3.7 可知,制造商和再制造商对模式偏好不会随政府基金政策的调整而改变。提高环境税收有利于提高再制造商利润和降低环境影响,但是站在供应链总体和消费者的角度看,过高的环境税不利于行业发展。提高补贴对制造商、再制造商和消费者都有利,但过高的补贴会使得政府财政负担较重且不一定有益于减少环境影响。因此政府在制定税收和补贴标准时,需综合考虑供应链、消费者和环境三者利益均衡。

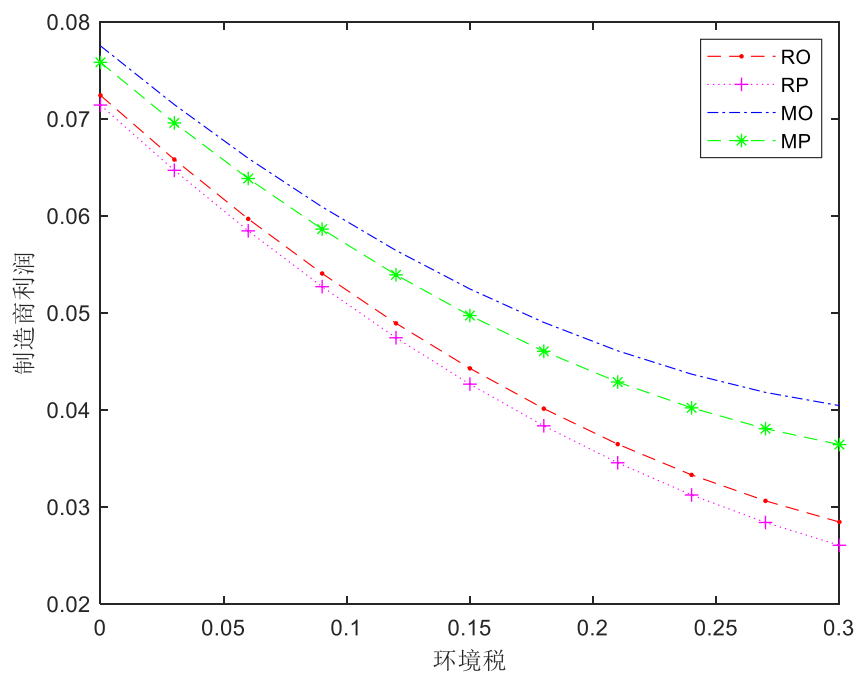


图 3-2 制造商利润

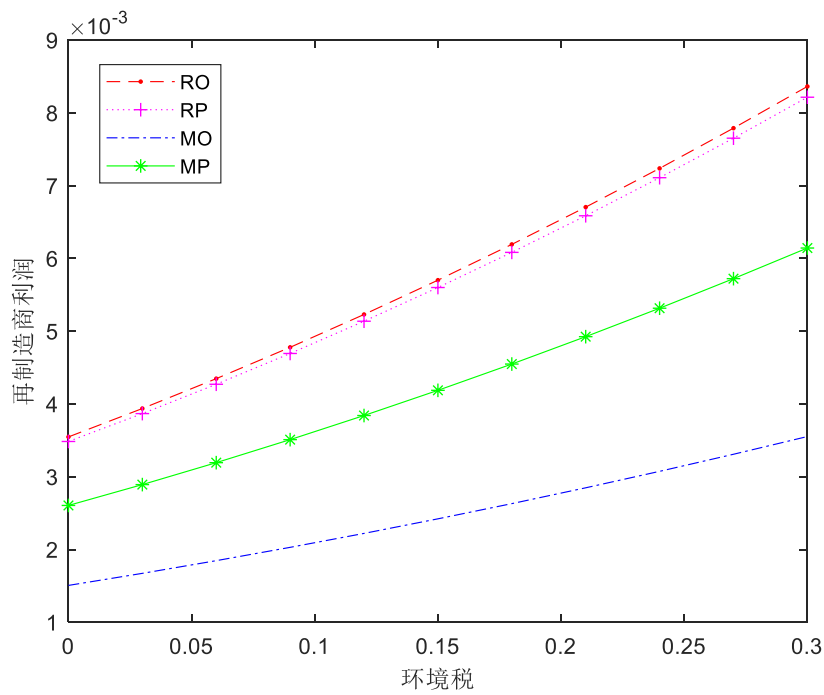


图 3-3 再制造商利润

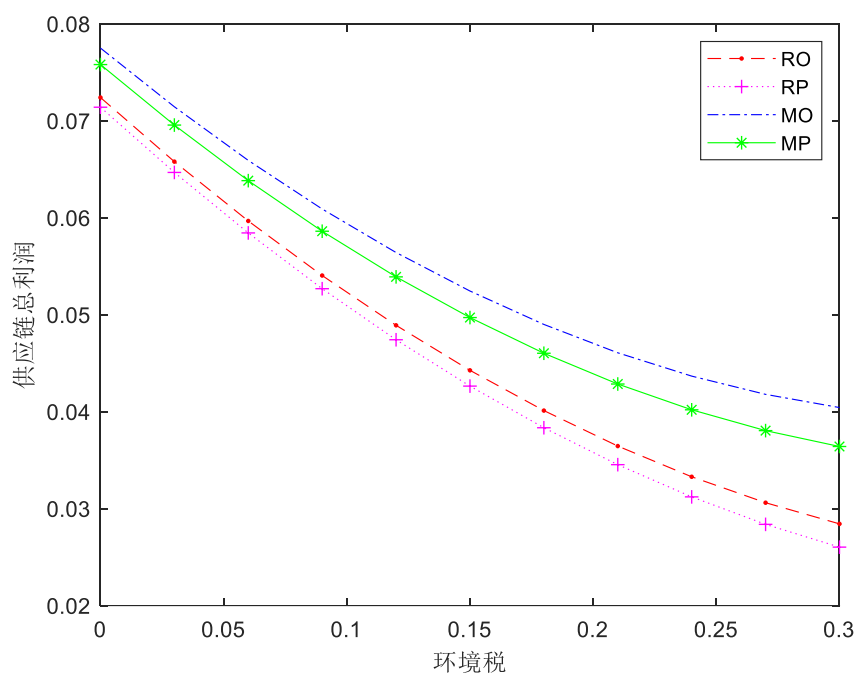


图 3-4 供应链总利润

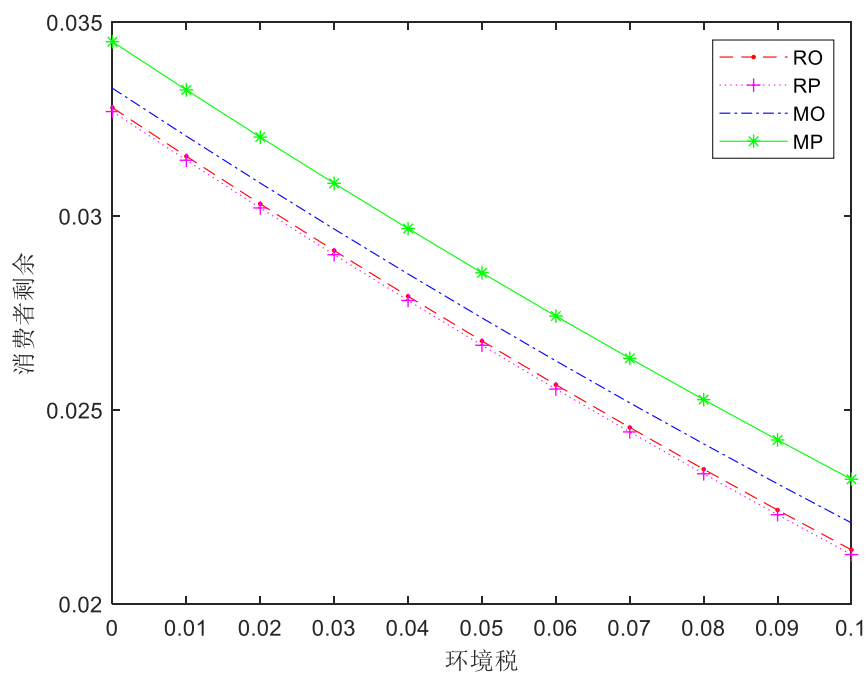


图 3-5 消费者剩余

3.4.2 社会福利

参考 Cai 等^[68]社会总福利的定义，社会总福利的表达式为 $SW = \pi_T + CS - E + TI$ 。

将数值代入上述表达式, 得到社会福利仿真结果, 如图 3-6 和 3-7 所示。由图 3-6 和 3-7 可知, 相比于制造商回收, 再制造商回收(RO , RP)能够实现更高的社会总福利, 但需要设立较高的税收水平才能够实现社会总福利最大化。在社会总福利最大化的角度, RO 和 RP 模式分别是再制造品相对环境优势较大和相对环境优势较小时的最优模式。

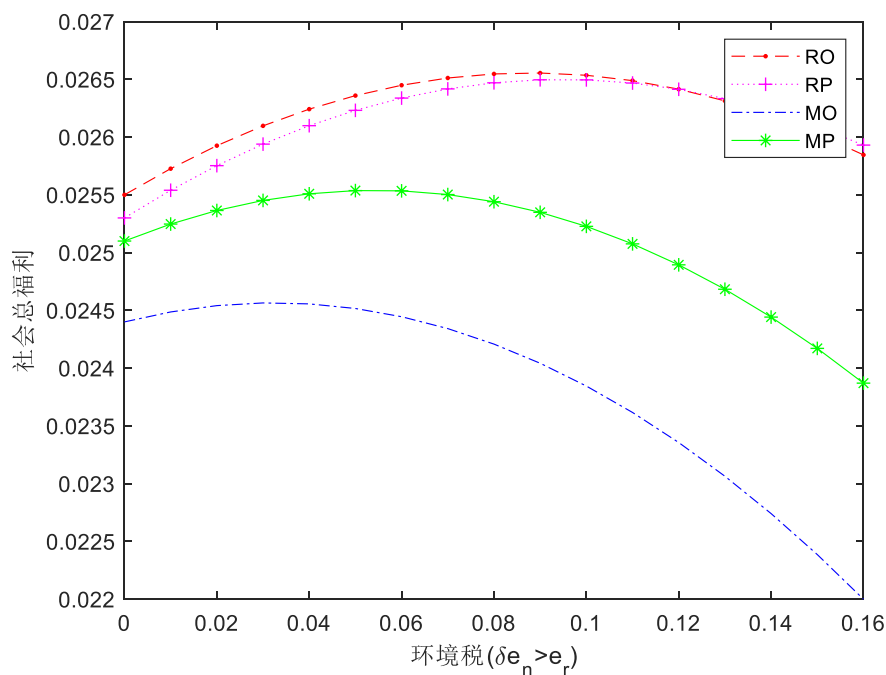


图 3-6 社会总福利($\delta e_n > e_r$)

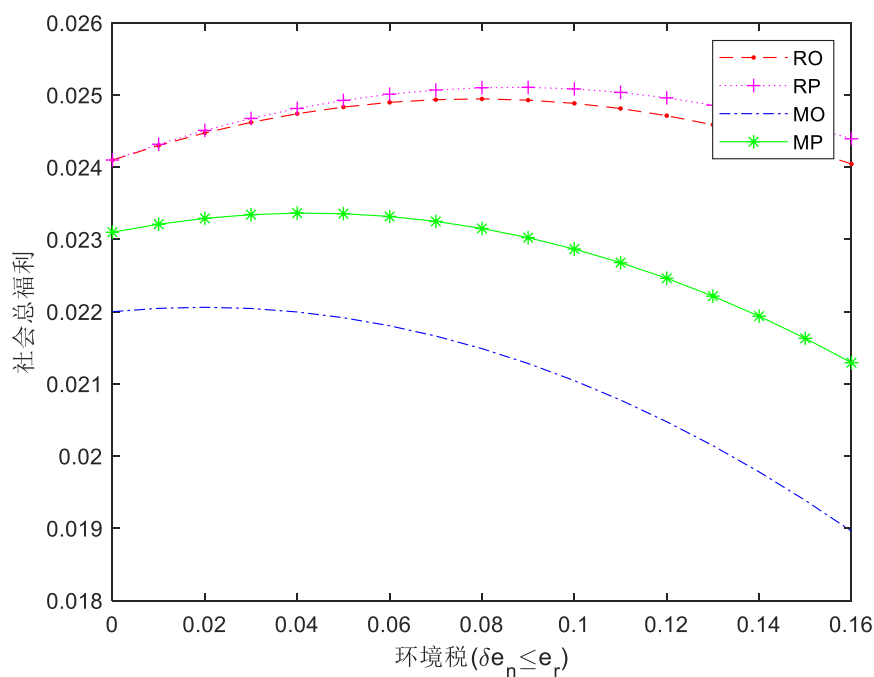


图 3-7 社会总福利($\delta e_n \leq e_r$)

3.5 本章小结

本章针对由制造商和再制造商组成的再制造供应链，在考虑政府基金政策影响下，依据回收再制造责任转移方式，分别构建了全部外包、全部授权、仅外包、仅授权四种决策模型，分析了制造商和再制造商对四种合作模式的偏好以及政府基金政策对再制造供应链决策、利润、环境影响、消费者剩余和社会总福利的影响。得到以下结论：

(1) 在四种模式中，再制造商进入再制造市场的条件相同，即只有当再制造品具有相对成本优势时，才会进入再制造市场。

(2) 制造商和消费者偏好仅外包模式，而再制造商在不同的研发效率下偏好不同的回收再制造模式。

(3) 当环境税或补贴提高时，制造商在各模式中均会减少新产品数量并提升可再制造性水平，再制造商或制造商都会增加再制造品数量，因此提升环境税和补贴均有益于激励再制造。

(4) 提高环境税有益于环境，但是不利于供应链和消费者；提高废旧品回收补贴不一定有利于环境，且会加重政府财政负担。因此政府在设定环境税和补贴水平时需要综合考虑供应链、消费者和环境三方利益均衡。

(5) 在供应链利润最大化角度，仅外包模式为供应链最优模式，但在社会总福利最大化角度，全部外包和全部授权模式最优。最大化供应链利润和最大化社会总福利的目标不能兼得。

第 4 章 奖惩政策下再制造供应链运营决策与收益分配研究

上一章分析了政府补贴激励政策下再制造供应链最优运营模式与运营决策,相关结果显示:全部外包或全部授权模式下的供应链社会总福利最高,但供应链利润偏低。这表明社会福利最大化与供应链收益最大化两种目标的实现存在着一种难以调和的“矛盾”。如何解决这一“矛盾”是本章研究的主要问题。在工业实践中,面对来自政府规制、技术迭代、竞争对手和利益相关方越来越大的压力,许多制造商选择与第三方再制造商或销售商联盟,共同开展再制造业务。例如特斯拉与优美科在欧洲合作回收汽车电池取得了不错的效果^[8];卡特彼勒和利星行机械有限公司合作^[70],在上海和江苏出售再制造设备;施乐、伊士曼柯达与其下游零售商建立合作关系来回收和处理二手产品^[9]。这是因为供应链企业合作可以实现资金、技术、信息等资源互补,提高供应链运作效率和抗风险能力,从而能够有效提升供应链收益。此外,政府为推动制造商企业积极承担回收再制造责任,推出了更具激励性的奖惩政策。例如英国政府为制造企业设定回收率目标,对未达回收率目标的企业进行罚款并以此设立基金激励制造企业达成回收率目标^[69]。奖惩政策不仅减少了履行责任企业的运营成本,还可有效提高供应链的盈利能力。

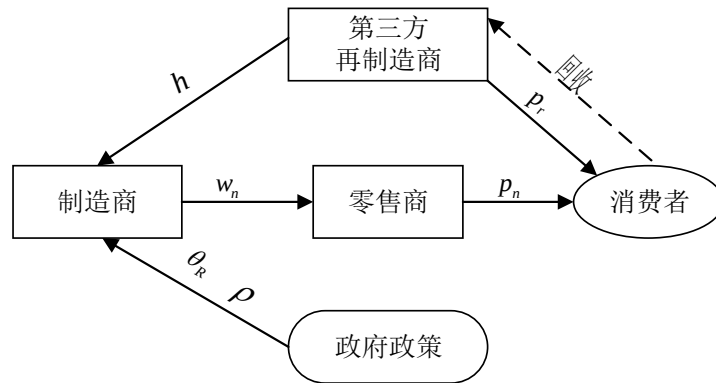
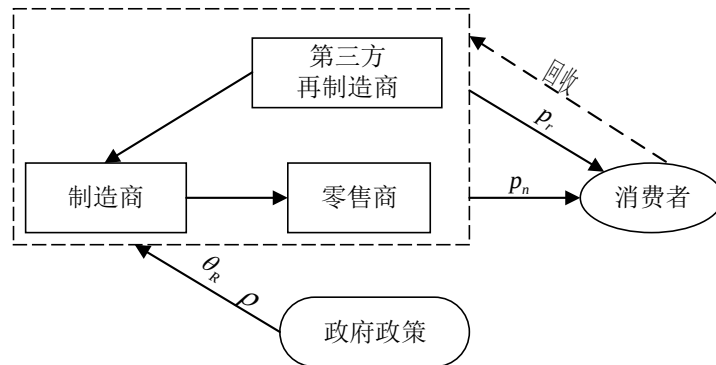
因此,本章在上一章研究基础上,以政府的奖惩政策为背景,延伸再制造供应链结构,即构建了由制造商、零售商和再制造商组成的再制造供应链 Stackelberg 博弈模型。参考 Wang 等^[69]提出的奖惩激励机制,本章将讨论奖惩政策下再制造供应链的最优合作模式选择和运营决策问题;以此为基础,依托合作博弈方法进行供应链成员收益分配,使得最优合作模式稳定;同时,在最大化社会福利的基础上实现供应链收益最大化目标,为缓解社会福利和供应链收益“矛盾”提供一种有效的解决方法。

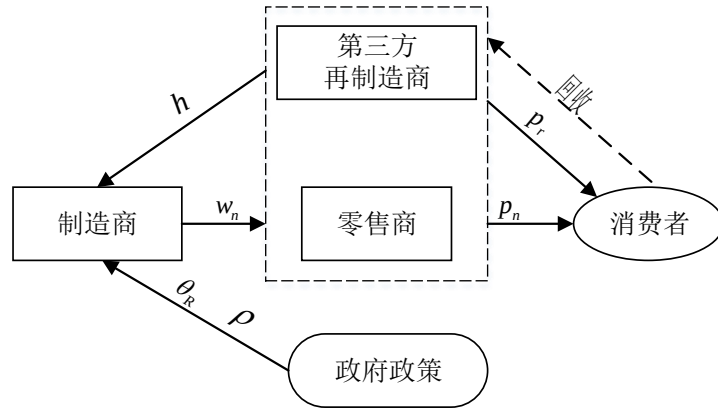
4.1 问题描述和符号说明

4.1.1 问题描述

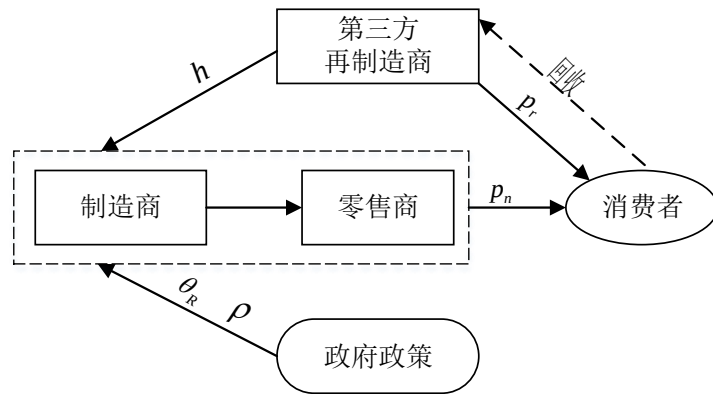
本文研究的再制造供应链由一个主导者和两个同等地位的跟随着组成,制造商(M)为主导者、零售商(R)和再制造商(T)为跟随者。在该再制造供应链中,制造商生产新产

品(数量记为 q_n) 以每单位 w_n 的价格批发给零售商, 将再制造业务通过授权的方式转移给再制造商并收取每单位 h 的授权费用; 零售商将新产品以单价 p_n 销售给消费者; 再制造商从消费者手中回收废旧产品并全部用以生产再制造品(数量记为 q_r) 并以单价 p_r 销售给消费者。本文还考虑了政府奖惩政策对于闭环供应链的影响, 政府为制造商设定回收目标 ρq_n , 若回收数量超过既定目标则制造商将获得超过部分的奖励, 否则受到处罚, 奖励或处罚为 $\theta_r(q_r - \rho q_n)$ [42]。根据供应链成员所有可能的联盟形式, 本文构建了 5 种供应链决策模型, 如图 4-1 所示。在非联盟模型 D 中, 制造商为领导者, 零售商和再制造为追随者, 三者独立决策。在三者联盟模式 C 中, 制造商、零售商和再制造商作为一个整体共同决策。部分联盟模式有三种, 分别是制造商与零售商联盟(MR 模式)、制造商与再制造商联盟(MT 模式)、零售商与再制造商联盟(RT 模式), 其中制造商参与的联盟为供应链的领导者 [47], 即 MR 模式中制造商与零售商联盟(MR 联盟)为领导者, MT 模式中制造商与再制造商(MT 联盟)为追随者, RT 模式中制造商为领导者。

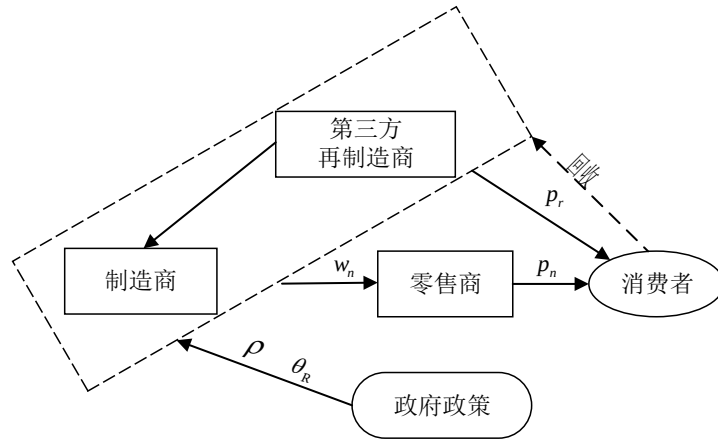

 (a) 模式 D

 (b) 模式 C



(c) 模式 RT



(d) 模式 MR



(e) 模式 MT

图 4-1 非合作-合作模型

4.1.2 假设与符号说明

本文相关假设及符号说明如下：

供应链成员间的相互作用发生在一个稳定的单周期内^[43,61]。稳定的单周期可以看作处于产品生命周期的成熟阶段，产品需求稳定且存在数量足够多的二手产品，因此无需

考虑二手产品回收数量对于再制造品数量的限制。

新产品和再制造品在同一市场出售，消费者可以通过再制造标识来辨别新产品和再制造品。尽管再制造品与新产品同质，但消费者对二者还是存在不同的购买意愿^[61]。消费者对新产品的购买意愿为 v ，均匀分布在 0 到 1 之间。消费者对再制造品的购买意愿低于新产品为 δv ，其中 $\delta \in [0,1)$ 。

消费者购买新产品和再制造品所获得的效用分别为： $u_n(v) = v - p_n$ ， $u_r(v) = \delta v - p_r$ 。根据最大效用原则推导出新产品和再制造的需求函数分别为 $q_n = 1 - \frac{p_n - p_r}{1 - \delta}$ 和 $q_r = \frac{\delta p_n - p_r}{\delta(1 - \delta)}$ ^[71]。

再制造品的单位生产成本小于新产品，且有 $0 < c_r < c_n < 1$ 。使用二手产品的零件进行再制造使得再制造品的单位成本低于新产品^[72]。由于消费者最大支付意愿标准化为 1，新产品单位成本不能超过消费者最大支付意愿^[63]，因此 $c_n < 1$ 。

参考文献[63]新产品和再制造品的净利润分别为 $m_n = 1 - c_n - \rho\theta_r$ 和 $m_r = \delta - c_r + \theta_r$ 。为确保制造和再制造的盈利性，有 $m_n > 0$ 和 $m_r > 0$ 。令 $\frac{m_r}{m_n} = k$ ， k 为相对净利润，表示再制造品与新产品净利润的比。

单位再制造品的环境影响小于单位新产品的环境影响，即有 $e_r < e_n$ 。环境总影响为 $E = e_n q_n + e_r q_r$ 。再制造品与新产品同质量，在使用过程中环境影响无差异，但生产过程中所需的能源和原材料更少，因此在再制造品在生命周期中所造成的环境影响小于新产品^[63]。

相关符号说明如表 1 所示。

表 4-1 决策变量及相关参量

符号	说明
决策变量	
w_n	单位新产品批发价格
p_n / p_r	新产品/再制造品零售价格

h

再制造品单位授权费用

续表 4-1

参量	
c_n / c_r	新产品/再制造品单位生产成本
δ	消费者对再制造品支付意愿折扣系数, $\delta \in [0,1]$
v	消费者对新产品支付意愿, $v \in (0,1)$
θ_r	政府规定的奖惩系数, $\theta_r \in [0,1]$
ρ	目标回收率, $\rho \in [0,1]$
ξ_j^i	π_j^i / π_{MTR}^C , $i = \{C, D, MT, MR, MT\}$, $j = \{MTR, MT, MR, MT, M, R, T\}$
φ_{i+j}^{ij}	$\xi_{ij}^{ij} - \xi_i^D - \xi_j^D$, 联合增加利润
q_n / q_r	新产品/再制造品产量
e_n / e_r	新产品/再制造品单位环境影响值
E	环境影响总值
$u_i(v)$	消费者效用 $i = \{n, r\}$
π_j^i	i 模式下, j 联盟利润, 其中 $i = \{C, D, MT, MR, MT\}$, $j = \{MTR, MT, MR, MT, M, R, T\}$

4.2 决策模型与均衡结果

在本节,我们将讨论 5 种不同非联盟与联盟模式下,供应链成员的均衡决策以及最优利润并以此作为讨论再制造供应链成员收益分配的基础。

(1) 集中决策模式(C 模式)

在 C 模式中,制造商、零售商和再制造商组成联盟并作为一个集中决策者决策新产品价格 p_n 和再制造品价格 p_r ; 制造商与零售商之间、制造商与再制造商之间的金融交

易被消除，供应链利润函数表述为：

$$\max \pi_{MTR}^C(p_n, p_r) = (p_n - c_n)q_n + (p_r - c_r)q_r + \theta_r(q_r - \rho q_n). \quad (4-1)$$

求解公式(4-1)得到结论 4.1。

结论 4.1 新产品和再制造品的最优价格、产品以及供应链利润分别为

$$p_n^{C*} = \frac{1}{2}(1 + c_n + \rho\theta_r), \quad p_r^{C*} = \frac{1}{2}(\delta + c_r - \theta_r), \quad q_n^{C*} = \frac{m_n - m_r}{2(1-\delta)}, \quad q_r^{C*} = \frac{m_r - \delta m_n}{2\delta(1-\delta)} \text{ 和}$$

$$\pi_{MTR}^{C*} = \frac{m_n^2}{4} + \frac{(m_r - \delta m_n)^2}{4\delta(1-\delta)}.$$

为了简化符号运算，我们将以 ξ_j^i 替代各联盟的利润进行合作博弈的运算。其中

$$\xi_j^i = \frac{\pi_j^i}{\pi_{MRT}^C}, \quad \xi_{MTR}^C = 1, \text{ 其中 } i = \{C, D, MR, MT, RT\}, \quad j = \{M, R, T, MR, MT, RT, MRT\}.$$

证明过程见附录 8。

(2) 分散决策模式(D 模式)

D 模式下供应链成员各自独立决策，决策顺序为：首先制造商决定新产品批发价格 w_n 和再制造授权费用 h ，然后零售商和再制造商分别决定新产品零售价格 p_n 和再制造品零售价格 p_r 。再制造商和零售商同为追随者，在供应链中地位相同，决策顺序无先后之分。D 模式下供应链成员利润函数为：

$$\max \pi_M^D(w_n, h) = (w_n - c_n)q_n + hq_r + \theta_r(q_r - \rho q_n) \quad (4-2)$$

$$\max \pi_R^D(p_n) = (p_n - w_n)q_n \quad (4-3)$$

$$\max \pi_T^D(p_r) = (p_r - c_r - h)q_r \quad (4-4)$$

根据逆向归纳法求解上述式，得到结论 4.2。

结论 4.2 D 模式下新产品的最优批发价格、零售价格、产量，再制造品的授权费用、零售价格、产量，供应链成员的利润分别为：

$$w_n^{D*} = \frac{1}{2}(1 + c_n + \rho\theta_r), \quad p_n^{D*} = 1 - \frac{2m_n + m_r}{2(4-\delta)},$$

$$q_n^{D*} = \frac{(2-\delta)m_n - m_r}{2(4-\delta)(1-\delta)}, \quad h^{D*} = \frac{1}{2}(\delta - c_r - \theta_r), \quad p_r^{D*} = \delta - \frac{\delta m_n + 2m_r}{2(4-\delta)}, \quad q_r^{D*} = \frac{(2-\delta)m_r - \delta m_n}{2\delta(4-\delta)(1-\delta)},$$

$$\pi_M^{D*} = \frac{(1-\delta)(2\delta m_n^2 + m_r^2) + (m_r - \delta m_n)^2}{4\delta(4-\delta)^2(1-\delta)}, \quad \pi_R^{D*} = \frac{((2-\delta)m_n - m_r)^2}{4(4-\delta)^2(1-\delta)} \text{ 和 } \pi_T^{D*} = \frac{((2-\delta)m_r - \delta m_n)^2}{4\delta(4-\delta)^2(1-\delta)}。$$

证明过程见附录 8。进一步可得， $\xi_M^D = \frac{2-\delta}{4-\delta} + \frac{2k\delta(1-\delta)}{(4-\delta)(k^2 + \delta - 2k\delta)}$ ，
 $\xi_R^D = \frac{\delta(k + \delta - 2)^2}{(4-\delta)^2(k^2 + \delta - 2k\delta)}$ 和 $\xi_T^D = \frac{(\delta - k(2-\delta))^2}{(4-\delta)^2(k^2 + \delta - 2k\delta)}$ 。

(3) 制造商与零售商联盟(MR 模式)

在 MR 模式中，制造商与零售商联盟作为供应链领导者先决定新产品价格 p_n 和再制造授权费用 h ，然后再制造商决策再制造品价格 p_r 。制造商与零售商联盟消除了制造商与零售商之间的金融交易。MR 模式下供应链成员的利润函数分别为：

$$\max \pi_{MR}^{MR}(p_n, h) = (p_n - c_n)q_n + hq_r + \theta_r(q_r - \rho q_n) \quad (4-5)$$

$$\max \pi_T^{MR}(p_r) = (p_r - c_r - h)q_r \quad (4-6)$$

根据逆向归纳法，求解上述式得到结论 4.3。

结论 4.3 MR 模式下最优新产品价格、产量，再制造品授权费用、价格、产量，供应链

成员利润分别为： $p_n^{MR*} = \frac{1}{2}(1 + c_n + \rho\theta_r)$ ， $q_n^{MR*} = \frac{(2-\delta)m_n - m_r}{4(1-\delta)}$ ， $h^{MR*} = \frac{1}{2}(\delta - c_r - \theta_r)$ ，

$$p_r^{MR*} = \delta - \frac{\delta m_n + m_r}{4}，q_r^{MR*} = \frac{m_r - \delta m_n}{4\delta(1-\delta)}，\pi_{MR}^{MR*} = \frac{m_n^2}{4} + \frac{(m_r - \delta m_n)^2}{8\delta(1-\delta)}，\pi_T^{MR*} = \frac{(m_r - \delta m_n)^2}{16\delta(1-\delta)}。$$

证明过程见附录 8。进一步可得 $\xi_{MR}^{MR} = \frac{1}{2} + \frac{\delta(1-\delta)}{2(k^2 + \delta - 2k\delta)}$ 和 $\xi_T^{MR} = \frac{(k - \delta)^2}{4(k^2 + \delta - 2k\delta)}$ 。

(4) 制造商与再制造商联盟(MT 模式)

MT 模式中，制造商与再制造商联盟取消他们之间的金融交易。MT 联盟作为供应链领导者先决策新产品批发价格 w_n 和再制造品零售价格 p_r ，然后零售商制定新产品零售价格 p_n 。MT 模式下供应链成员利润函数分别为：

$$\max \pi_{MT}^{MT}(w_n, p_r) = (w_n - c_n)q_n + (p_r - c_r)q_r + \theta_r(q_r - \rho q_n) \quad (4-7)$$

$$\max \pi_R^{MT}(p_n) = (p_n - w_n)q_n \quad (4-8)$$

根据逆行归纳法求解上述式，得到结论 4.4。

结论 4.4 MT 模式下最优新产品批发价格、零售价格、数量，再制造品零售价格、数量，

供应链成员利润分别为： $w_n^{MT*} = \frac{1}{2}(1+c_n+\rho\theta_r)$ ， $p_n^{MT*} = 1 - \frac{m_n+m_r}{4}$ ， $q_n^{MT*} = \frac{m_n-m_r}{4(1-\delta)}$ ，

$$p_r^{MT*} = \frac{1}{2}(\delta+c_r-\theta_r)，q_r^{MT*} = \frac{(2-\delta)m_r-\delta m_n}{4\delta(1-\delta)}，\pi_R^{MT*} = \frac{(m_n-m_r)^2}{16(1-\delta)}，\pi_{MT}^{MT*} = \frac{(m_n-m_r)^2}{8(1-\delta)} + \frac{m_r^2}{4\delta}。$$

证明过程见附录 8，进一步可得 $\xi_{MT}^{MT} = \frac{1}{2} + \frac{(1-\delta)k^2}{2(k^2+\delta-2k\delta)}$ ， $\xi_R^{MT} = \frac{\delta(1-k)^2}{4(k^2+\delta-2k\delta)}$ 。

(5)零售商与再制造商联盟模式(RT 模式)

RT 模式中，制造商作为领导者优先决定新产品批发价格 w_n 和再制造品授权价格 h ，然后 RT 联盟共同决策新产品和再制造品零售价格 p_n 和 p_r 。供应链成员利润函数分别为：

$$\max \pi_M^{RT}(w_n, h) = (w_n - c_n)q_n + hq_r + \theta_r(q_r - \rho q_n) \quad (4-9)$$

$$\max \pi_{RT}^{RT}(p_n, p_r) = (p_n - w_n)q_n + (p_r - c_r - h)q_r \quad (4-10)$$

根据逆向归纳法求解上述式，得到结论 4.5。

结论 4.5 RT 模式下新产品最优批发价格、零售价格、产量，再制造品最优授权费用、零售价格、产量，供应链成员利润分别为：

$w_n^{RT*} = \frac{1}{2}(1+c_n+\rho\theta_r)$ ， $p_n^{RT*} = 1 - \frac{m_n}{4}$ ， $q_n^{RT*} = \frac{m_n-m_r}{4(1-\delta)}$ ，

$$h^{RT*} = \frac{1}{2}(\delta - c_r - \theta_r)，p_r^{RT*} = \delta - \frac{m_r}{4}，q_r^{RT*} = \frac{m_r - \delta m_n}{4\delta(1-\delta)}，\pi_M^{RT*} = \frac{(m_n-m_r)^2}{8(1-\delta)} + \frac{m_r^2}{8\delta}，$$

$$\pi_{RT}^{RT*} = \frac{(m_n-m_r)^2}{16(1-\delta)} + \frac{m_r^2}{16\delta}。$$

证明过程见附录 8。进一步可得， $\xi_M^{RT} = \frac{1}{2}$ ， $\xi_{RT}^{RT} = \frac{1}{4}$ 。

4.3 结果分析

本节我们将分析不同模式下供应链最优决策和供应链成员利润的差异以及政府奖惩政策对各模式下供应链决策的影响。

4.3.1 均衡结果对比

结论 4.6 不同模式下新产品批发价格和再制造品授权费用关系为：

$$w_n^{D*} = w_n^{MT*} = w_n^{RT*} = \frac{1}{2}(1 + c_n + \rho\theta_r), \quad h^{D*} = h^{MR*} = h^{RT*} = \frac{1}{2}(\delta - c_r - \theta_r)。$$

结论 4.6 表明若制造商与零售商或再制造商之间的双重边界没有被消除，则制造商对于新产品批发价格和再制造授权费用的议价格局不会受到其他联盟的影响。

结论 4.7 各模式下新产品与再制造品共存于同一市场的条件分别为：模式 D ，

$$\frac{\delta}{2-\delta} < k < 2-\delta；模式 C，\delta < k < 1；模式 MR，\delta < k < 2-\delta；模式 MT，\frac{\delta}{2-\delta} < k < 1；$$

模式 RT ， $\delta < k < 1$ 。

结论 4.7 由各模式新产品和再制造品数量均大于 0 得出。新产品和再制造品在同一市场相互竞争，若一种产品的净利润优势足够大，则可以采取降价策略侵蚀对方市场份额直至占据整个市场，使得零售商或再制造商完全退出市场，不符合本文讨论范畴。因此本文研究将在所有模式新产品和再制造品共存的条件开展，即满足 $\delta < k < 1$ 。

证明过程见附录 9。

结论 4.8 各模式下新产品和再制造品零售价格关系为：

$$p_n^{RT*} > p_n^{D*} > p_n^{MT*} > p_n^{C*} = p_n^{MR*}, \quad p_r^{RT*} > p_r^{D*} > p_r^{MR*} > p_r^{C*} = p_r^{MT*}。$$

与 D 模式相比，由于 $MR(MT)$ 联盟消除了双重边际效应，提高了新产品(再制造品)边际利润，因此在 $MR(或 MT)$ 模式下， $MR(MT)$ 联盟均采用低价战略抢占市场以谋求更高利润。相反，对应的再制造商(或零售商)不得不降低再制造品(新产品)的零售价格以抵御替代品的侵蚀。但由于他们与制造商之间存在双重边际效应，净利润空间小，降价幅度要小于 $MR(MT)$ 联盟。因此 $p_n^{D*} > p_n^{MT*} > p_n^{MR*}$ ， $p_r^{D*} > p_r^{MR*} > p_r^{MT*}$ 。与局部联盟模式相比， C 模式下新产品或再制造品流通过程中的双重边际效应均被消除，因此 MRT 联盟能够采用与 MR 和 MT 联盟一致的价格策略($p_n^{C*} = p_n^{MR*}$ ， $p_r^{C*} = p_r^{MT*}$)以获取高额规模利润。同样是形成垄断， RT 联盟没有消除与制造商之间双重边际效应，没有足够的利润空间来支持其采用低价策略， RT 联盟只能以高额垄断价格获取垄断利润。所以

$$p_n^{RT*} > p_n^{D*}, \quad p_r^{RT*} > p_r^{D*}。$$

证明过程见附录 10。

结论 4.9 各模式新产品和再制造品数量关系为:

- (1) 当 $\delta < k \leq \frac{2}{3-\delta}$ 时, $q_n^{M^*R} > q_n^{*C} \geq q_n^{*D} > q_n^{M^*T}$; 当 $\frac{2}{3-\delta} < k < 1$ 时, $q_n^{M^*R} > q_n^{*D} > q_n^{*C} > q_n^{M^*T}$;
- (2) 当 $\delta < k \leq \frac{\delta(3-\delta)}{2}$ 时, $q_r^{MT*} > q_r^{D*} \geq q_r^{C*} > q_r^{MR*} = q_r^{RT*}$; 当 $\frac{\delta(3-\delta)}{2} < k < 1$ 时, $q_r^{MT*} > q_r^{C*} > q_r^{D*} > q_r^{MR*} = q_r^{RT*}$ 。

$MR(MT)$ 联盟的低价策略使得新产品(再制造品)抢占了大量的市场份额, 因此 $MR(MT)$ 模式下新产品(再制造品)数量最多, 而再制造品(新产品)数量最低。 RT 联盟消除了零售商和再制造商之间的横向竞争, 形成市场垄断, 因此 RT 联盟以高额的垄断价格维持最低的市场需求($q_n^{MT*} = q_n^{RT*}, q_r^{MR*} = q_r^{RT*}$)。在 D 模式下, 供应链成员的双重边际效应和横向竞争都违背消除, 低价策略和垄断策略均无法实现, 因此 D 模式下新产品和再制造品数量介于最大值与最小值之间。在 C 模式下, MRT 联盟将制造商与零售商和与再制造商之间的双重边际效应消除, 新产品或再制造品不存在如同 MR 或 MT 模式那般显著的净利润优势, 因此它们都无法大量侵占对方的市场, 其数量也都介于 5 种模式之间。与 D 模式相比, C 模式下的 MRT 联盟消除了双重边界和横向竞争两层负面影响, 市场总量更大。适当增加净利润较高产品的市场份额可以实现更高利润。因此当新产品净利润优势较大($\delta < k < \frac{2}{3-\delta}$)时, 新产品数量相对增加, 再制造品数量相对减少; 当新产品净利润优势较小($\frac{\delta(3-\delta)}{2} < k < 1$)时, 再制造品数量增加而新产品数量减少; 相对净利润处于二者之间($\frac{\delta(3-\delta)}{2} \leq k \leq \frac{2}{3-\delta}$)时, 新产品和再制造品数量都相对增加。

证明过程见附录 11。

结论 4.10 各模式供应链成员最优利润存在以下关系:

- (1) C 模式供应链总利润最高; (2) $\xi_{MT}^{MT} > \xi_M^D + \xi_T^D, \xi_R^{MT} < \xi_R^D$;
- (3) $\xi_{MR}^{MR} > \xi_M^D + \xi_R^D, \xi_T^{MR} < \xi_T^D$; (4) $\xi_{RT}^{RT} > \xi_R^D + \xi_T^D, \xi_M^{MR} < \xi_M^D$;

供应链成员之间联盟能够减少制造商与零售商或再制造商之间的双重边际效应从而实现更高的利润。 C 模式下制造商与零售商和再制造商间的双重边际效应都被消除, 因此 C 模式下供应链总利润最高。供应链成员两两结盟使得他们相对于分散模式更具有竞争优势, 因此局部联盟模式下的供应链总利润要高于分散模式下二者的利润之和; 而

联盟外的一方由于在供应链中的竞争优势下降，其利润低于分散模式。

证明过程见附录 12。

结论 4.11 各模式环境影响在条件 $\delta < k < 1$ 下，有以下结论成立：

- (1) 当 $e_r \leq \delta e_n$ ， $E^{RT} < E^{MT} < E^C \leq E^{MR}$ ； $E^{RT} < E^D < E^{MR}$ ；
- (2) 当 $\delta e_n < e_r < \frac{\delta}{k} e_n$ ， $E^{RT} < E^D < E^{MT} < E^{MR} < E^C$ ；当 $e_r > \frac{\delta}{k} e_n$ ， $E^{RT} < E^D < E^{MR} < E^{MT} < E^C$

只有再制造品单位环境影响足够小，再制造品数相对增加带来的环境影响增量小于新产品数量相对减少导致的环境影响减量($e_r \Delta q_r + e_n \Delta q_n < 0$)，再制造才有利于环境。在各模式共存基础上，我们讨论了两个关键临界值 δe_n 和 $\frac{\delta}{k} e_n$ 。若 $e_r \leq \delta e_n$ ，则再制造品单位环境影响足够小，总数量相差在一定范围内，再制造品数量占比越高则总环境影响越小，故 $E^{MT} < E^C \leq E^{MR}$ 。由于 RT 模式下新产品和再制造品数量在各模式中均最少，因此环境影响最低而无关 e_r 与 e_n 。 D 模式下新产品数量介于 RT 与 MR 之间，其环境影响值亦是如此。若 $\delta e_n < e_r$ ， C 模式下 MRT 联盟同时消除了制造商与零售商和再制造商之间的双重边际效应和零售商与再制造商之间的横向竞争，这使得 C 模式下新产品和再制造品数量在各模式中均处于较高水平。因此相较于 $MR(MT)$ 模式， C 模式再制造品(新产品)数量相对增加导致的环境影响增量大于新产品(再制造品)数量相对减少的相对环境减量。环境影响值最大。 D 模式下再制造品数量少于 MT ，因此在 $\delta e_n < e_r$ 条件下其环境影响值也同样小于 MT 。若 $e_r < \frac{\delta}{k} e_n$ ，则新产品数量占比更高的 MR 模式环境影响值大于 MT 模式。若 $e_r > \frac{\delta}{k} e_n$ ，则再制造品数量更多的 MT 模式环境影响高于 MR 模式。

证明过程见附录 13。

4.3.2 政府奖惩政策对最优决策的影响分析

结论 4.12 奖惩政策对批发价格与授权费用影响分析：

$$\frac{\partial w_n^{i*}}{\partial \rho} = \frac{1}{2} \theta_r, \quad \frac{\partial w_n^{i*}}{\partial \theta_r} = \frac{1}{2} \rho, \quad i = \{D, MT, RT\}; \quad \frac{\partial h^{i*}}{\partial \rho} = 0, \quad \frac{\partial h^{i*}}{\partial \theta_r} = -\frac{1}{2}, \quad i = \{D, MR, RT\}.$$

制造商通过提高批发价格减少新产品需求和降低授权费用促进再制造品生产，以此

应对更加严格的政策。目标回收率的提高意味着处罚增加或奖励减少，这对于制造商而言仅有惩处作用，因此制造商仅仅提高批发价格来避免处罚。而奖惩系数的提高对于制造商而言存在惩处和奖励的双重作用，因此制造商通过提高批发价格和降低授权费用来追求政策奖励。结合结论 4.15 利润影响分析可知，在 MR 联盟和 MT 联盟中制造商的利润占比很大，零售商与再制造商因决策调整造成的利益损失远小于制造商利益止损或增加。因此从联盟整体利润最大化角度，局部联盟 MR 和 MT 的应对策略相同。

结论 4.13 奖惩政策对零售价格影响分析：

$$(1) \quad \frac{\partial p_n^{i*}}{\partial \rho} > 0, \quad i = \{D, C, MR, MT, RT\}; \quad \frac{\partial p_n^{i*}}{\partial \theta_r} > 0, \quad i = \{C, MR, RT\}; \quad \frac{\partial p_n^{MT*}}{\partial \theta_r} < 0;$$

$$\frac{\partial p_n^{D*}}{\partial \theta_r} = \frac{2\rho - 1}{2(4 - \delta)};$$

$$(2) \quad \frac{\partial p_r^{i*}}{\partial \rho} > 0, \quad i = \{D, MR\}; \quad \frac{\partial p_r^{i*}}{\partial \rho} = 0, \quad i = \{C, MT, RT\}; \quad \frac{\partial p_r^{i*}}{\partial \theta_r} < 0, \quad i = \{D, C, MR, MT, RT\}。$$

随着目标回收率和奖惩系数提高，新产品净利润降低，因此决策者提高新产品售价来应对净利润减小。再制造品净利润与目标回收率无关而与奖惩系数成正比，降价扩大市场可以实现更高的规模利润。但决策者在决策价格时还需要考虑当前的竞争形势和市场规模问题。 D 模式中，面对再制造品的降价侵蚀，零售商必须综合考虑单位净利润与市场份额以实现最大化利润，而不是执行固定的价格策略。在 MT 模式中，零售商需要降低价格以阻止再制造品的侵蚀。在 D 和 MR 模式中，新产品价格上涨，再制造商可以适当提高再制造品价格追求更高利润。

证明过程见附录 14。

结论 4.14 奖惩政策对产品数量影响分析：

$$(1) \quad \frac{\partial q_n^i}{\partial \rho} < 0, \quad \frac{\partial q_n^i}{\partial \theta_r} < 0, \quad i = \{D, C, MR, MT, RT\};$$

$$(2) \quad \frac{\partial q_r^i}{\partial \rho} > 0, \quad \frac{\partial q_r^i}{\partial \theta_r} > 0, \quad i = \{D, C, MR, MT, RT\}。$$

结论 4.14 表明，随着目标回收率和奖惩系数提高新产品净利润下降，因此各模式下新产品数量减少。虽然目标回收率提高不会直接影响再制造品净利润，但再制造品相对净利润扩大，再制造品数量得以提升。再制造品净利润随着奖惩系数提高而增大，再制

造品数量随之提升。

证明过程见附录 15。

结论 4.15 奖惩政策对利润影响分析：

$$(1) \quad \frac{\partial \pi_j^i}{\partial \rho} < 0, \quad (i = D, C, MR, MT, RT), \quad (j = M, MR, MT, MRT, RT, R); \quad \frac{\partial \pi_j^i}{\partial \rho} > 0,$$

$$(i = D, MR), \quad (j = T);$$

$$(2) \quad \frac{\partial \pi_j^i}{\partial \theta_r} < 0, \quad (i = D, MT), \quad (j = R); \quad \frac{\partial \pi_j^i}{\partial \theta_r} > 0, \quad (i = D, MR), \quad (j = T);$$

$$(3) \quad \frac{\partial \pi_j^{i*}}{\partial \theta_r}, \quad (i = D, C, MR, MT, RT), \quad (j = M, MR, MT, MRT, RT) \text{ 取决于目标回收率, 当目}$$

$$\text{标回收率低于一定值 } \rho^* \text{ 时, } \frac{\partial \pi_j^{i*}}{\partial \theta_r} \geq 0; \text{ 否则 } \frac{\partial \pi_j^{i*}}{\partial \theta_r} < 0。$$

由上述结论可知，再制造商利润随着目标回收率提高而增高，其他个体或联盟利润则随之减少。这是因为目标回收率的提高使得制造商不得不提高新产品批发价格以转移政策影响造成的利润损失，致使新产品数量下降，零售商利润减少，再制造品数量上升，再制造商利润增加。由于制造商占据了供应链绝大部分的利润，制造商的利润损失大于再制造商的利润增长，因此 *MT* 和 *MRT* 联盟的利润变化趋势与制造商一致。*RT* 联盟由于承受制造商转移的政策影响，其新产品收益下降大于再制造品收益增长，总利润下降。

奖惩系数的提升使得新产品边际利润降低而再制造品边际利润提高，因此零售商利润下降而再制造商利润上涨。奖惩系数的提升对于制造商来说是一把双刃剑，当目标回收率较低时，制造商可以牺牲少量新产品利润换取高额的政策奖励回报，当目标回收率较高时，制造商必须大规模减产新产品并降低授权费用鼓励再制造品生产才可能实现目标。若政策奖励低于制造商努力减产新产品和激励再制造所造成的利润损失，则制造商利润下降。因此制造商和其参与的联盟以及 *RT* 联盟的利润变化取决与不同模式下具体的目标回收率。

证明过程见附录 16。

4.4 基于合作博弈理论的收益分配机制

本节将分析政策变动对供应链利润分配的影响，并设计合理的供应链收益分配方案。

考虑到政府政策变动将直接影响供应链成员和联盟的盈利能力，从长期盈利能力的角度，以当前供应链成员的盈利能力和对联盟收益贡献为基础制定的供应链收益分配方案并不能满足往后长期供应链成员的收益分配要求。供应链成员的收益分配要求无法满足，则供应链成员的联盟形式不能维持稳定。为此，本文采用合作博弈理论解决供应链成员间的盈余利润分配问题。运用核心分配原则和 τ 值法，讨论联盟稳定的条件并给出具体的利润协调和分配方案。

4.4.1 合作博弈特征函数

特征函数用数对 $[N, v]$ 来表示，其中 N 表示由全部参与者组成的所有联盟， v 表示属于 N 的每个联盟对特征值 $v(s)$ 的映射。根据本文的供应链结构， $n = \{M, R, T\}$ 表示供应链成员，其中 $v(\emptyset)$ ， $v(M)$ ， $v(R)$ ， $v(T)$ ， $v(MR)$ ， $v(MT)$ ， $v(RT)$ ， $v(MRT)$ 是所有供应链成员组成的所有联盟的特征值。根据合作博弈理论，联盟的特征值是其在与供应链其他成员博弈所能够获得的最低利润。换言之，特征值代表了该联盟底线，反映了其在供应链合作中的议价能力。在此处，我们用各模式下的利润比例系数 ξ_j^i 替代利润作为特征值进行计算。此外，空联盟的特征值为 0。

表 4-3 合作博弈的特征函数

联盟	M	R	T	MR	MT	RT	MRT
$v(s)$	ξ_M^{RT}	ξ_R^{MT}	ξ_T^{MR}	ξ_{MR}^{MR}	ξ_{MT}^{MT}	ξ_{RT}^{RT}	ξ_{MRT}^C
数值	$\frac{1}{2}$	$\frac{\delta(1-k)^2}{4A}$	$\frac{(k-\delta)^2}{4A}$	$\frac{A+\delta(1-\delta)}{2A}$	$\frac{(1-\delta)k^2+A}{2A}$	$\frac{1}{4}$	1

其中 $A = k^2 - 2k\delta + \delta$ 。

4.4.2 核心分配机制

结论 4.10 表明， C 模式下供应链总利润最高，因此大联盟 MRT 是供应链成员最优合作模式。因此我们希望找到一个合理的利润分配方案来协调制造商、零售商和再制造商三者的利润以维持供应链联盟的稳定。我们分别用 x_M ， x_R 和 x_T 来表示供应链成员制造商、零售商和再制造商在大联盟中的利润分配。只有当分配方案 $x = (x_M, x_R, x_T)$ 同时

满足个体理性和集体理性时，才能称为合适的分配方案。结合本文的设定，个体理性和集体理性表述如下：

(1) 个体理性： $x_M \geq v(M)$ ， $x_R \geq v(R)$ ， $x_T \geq v(T)$ ；

(2) 集体理性： $x_M + x_R + x_T = 1$ 。

核心的特征函数式为： $C(v) = \{x(v) \in I(v) | \sum_{i \in S} x_i(v) \geq v(s), s \subset N\}^{[72]}$ 。在本文设定下，满足核心的分配方案可以用特征函数表述为：分配方案 $x = (x_M, x_R, x_T)$ 使得 $x_M \geq v(M)$ ， $x_R \geq v(R)$ ， $x_T \geq v(T)$ ， $x_M + x_R \geq v(MR)$ ， $x_M + x_T \geq v(MT)$ ， $x_T + x_R \geq v(RT)$ ， $x_M + x_R + x_T = 1$ 同时成立。核心是所有满足上述条件的所有分配方案的集合。若核心非空，则表明存在分配方案使得每个参与者所分配的利润均大于其独立决策时的最低利润，任意两者所分配的利润之和大于它们结盟能够获取的利润，而且大联盟利润被完全分配，大联盟形式稳定。若核心为空集，则表明没有分配方案能够使每个参与者都满意，对利润分配不满意的参与者为追求个体利益最大化将会退出联盟，联盟形式不稳定。

4.4.3 τ 值法

τ 值法作为经典合作博弈利润分配方法能够满足个体理性、整体理性和整体有效性，是对个体议价能力（下向量）和个体理想收益（上向量）的妥协单值解。对于合作博弈 $[N, v]$ ，供应链各成员 $(i \in n)$ 的 τ 值为：

$$\tau_i(v) = \alpha m_i(v) + (1 - \alpha) M_i(N, v) \quad (4-11)$$

$$\sum_{i \in N} \tau_i(v) = v(N) \quad (4-12)$$

其中 $m_i(v) = v(i)$ 和 $M_i(N, v) = 1 - v(n - i)$ 分别是参与者 i 的收益分配下限和上限，最终收益分配 $\tau_i(v)$ 的生效比例分别为 α 和 $1 - \alpha$ ，由式(4-12)决定。本文将运用 τ 值法给出供应链成员制造商、零售商和再制造商的最终利润分配方案。

4.4.4 经典合作博弈核心及联盟权重设计

本小节将运用经典合作博弈理论求解 MRT 联盟的核心，分析经典合作博弈理论下的分配方案存在的一些问题并做出改进。

(1)核心分配方案及缺陷分析

将表 4-3 中的特征值代入核心的特征函数形式，联立并求解不等式组，得到经典合作博弈理论下联盟参与者收益分配上限和下限为：

$$\frac{\delta(1-k)^2}{4(k^2+\delta-2k\delta)} \leq x_R \leq \frac{\delta(1-k)^2}{2(k^2+\delta-2k\delta)}, \quad \frac{(k-\delta)^2}{4(k^2+\delta-2k\delta)} \leq x_T \leq \frac{(k-\delta)^2}{2(k^2+\delta-2k\delta)}, \quad \frac{1}{2} \leq x_M \leq \frac{3}{4},$$

其中 $x_M + x_R + x_T = 1$ 。

若分配方案 $x = \{x_M, x_R, x_T\}$ 满足核心，则必同时满足 $x_M + x_R \geq v_{MR}$ ， $x_M + x_T \geq v_{MT}$ ，

$x_T + x_R \geq v_{RT}$ ，即 $\xi_{MR} + \xi_{MT} + \xi_{RT} \leq 2(x_M + x_R + x_T) = 2$ 。由此得到

分配方案满足核心的条件区间为 $A = \{(\delta, k) | (0 < \delta < \frac{1}{4}, \delta < k < 1) \cup (\frac{1}{4} < \delta < \frac{1}{2}, \delta < k \leq k_1 \cup k_2 \leq k < 1)\}$ ，其中 $k_1 = \frac{3\delta - \sqrt{\delta(\delta - (\delta^2 - 5))}}{1 + 2\delta}$ ， $k_2 = \frac{3\delta + \sqrt{\delta(5\delta - 4\delta^2 - 1)}}{1 + 2\delta}$ 。这表明在大联盟为最优合作模式的

的区间 $G = \{(\delta, k) | 0 < \delta < 1, \delta < k < 1\}$ 内，经典合作博弈方法并不总能满足参与者的个体理性。在区间 $G - A$ 中，局部联盟利润大于参与者利润分配上限之和，即 $M_i(N, v) + M_j(N, v) \leq v_{ij}$ ， $i \neq j$ ， $\{i, j\} \in \{M, R, T\}$ 。然而，消费者对再制造品接受程度和政府政策并不是一成不变的。政府关于废旧产品再制造的相关法案需根据现实需求及时调整，例如欧盟的《Waste Electrical and Electronic Equipment》^[74]和我国的《废弃电器电子产品处理基金征收管理规定》自颁布以来进行过多次修订。随着消费者环保意识的增强，消费者对于再制造品的接受程度随之提升。这种外部因素的改变会导致部分联盟的利润优势改变，进而影响联盟参与者的合作选择。例如，若供应链成员之间只是短期合作，当 $\delta < k^2$ 时 MT 联盟的利润高于 MR 联盟，制造商应与再制造商联盟以追求个体利润最大化；若是长期合作，随着外部环境的变化， MR 联盟和 MT 联盟未来的利润大小难以预测，制造商难以根据当前的利润优势去判断选择与零售商或再制造商合作才能够实现未来一段时间利润的最大化。因此，在长期合作中，局部联盟模式并不能成为供应链成员的最终选择。

由此可知，经典合作博弈理论方法将静态的局部联盟利润作为联盟的特征函数并以此来分配参与者利润，没有考虑外部因素的变动会导致局部联盟利润优势发生改变从而

影响参与者最终的合作选择，因此在解决供应链企业长期合作利润分配问题上存在一定的缺陷。针对这一缺陷，我们提出局部联盟权重设计方案(加权特征值法)来改进经典合作博弈理论特征值的确定，从而得到满足所有供应链成员个体理性的解决方案。

(2)联盟的权重设计

参考 Wang[74] 提出的联合增加利润概念，其在本文背景下可以表示为 $\varphi_{i+j}^{ij} = \pi_{i+j}^{ij} - \pi_i^D - \pi_j^D$ ， $\varphi_{M+R+T}^{MRT} = \pi_{MRT}^C - \pi_M^D - \pi_R^D - \pi_T^D$ ， $\{i, j = M, R, T\}$ 。将分配方案同时满足所有参与者个体理性的条件式 $\xi_{MR} + \xi_{MT} + \xi_{RT} \leq 2(x_M + x_R + x_T) = 2$ 两边同时减去 $2(\xi_M^D + \xi_R^D + \xi_T^D)$ 得到以联合增加利润形式表述分配方案满足所有参与者个体理性的条件 $\bar{\varphi}_{i+j}^{ij} \leq \frac{2}{3} \varphi_{M+R+T}^{RT}$ ，其中 $\bar{\varphi}_{i+j}^{ij} = \frac{\varphi_{M+R}^{MR} + \varphi_{M+T}^{MT} + \varphi_{R+T}^{RT}}{3}$ 。这表明当局部联盟的平均联合增加利润超过大联盟 MRT 联合增加利润的 2/3 时，参与者的个体理性将难以同时满足，使得大联盟不稳定。为解决这一问题，维持大联盟稳定，本文提出了一种以加权的局部联盟利润表示特征值的方法，如式(4-6)和(4-7)所示。

$$\omega^{ij} = \begin{cases} e^{\beta(\varphi_{M+R+T}^{MRT} - \varphi_{i+j}^{ij})} \varphi_{M+R+T}^{MRT} < \varphi_{i+j}^{ij} \\ 1 & \varphi_{M+R+T}^{MRT} > \varphi_{i+j}^{ij} \end{cases}, (i, j) \in (M, R, T) \quad (4-13)$$

$$\sum e^{\beta(\varphi_{M+R+T}^{MRT} - \varphi_{i+j}^{ij})} v_{ij} + \sum v_{ij} \leq 2 \quad (4-14)$$

随着供应链外部因素的变化，各局部联盟(MR, MT, RT) 在不同条件下均存在联合增加利很高的情况，而局部联盟联合增加利润过高会导致局部联盟的平均联合增加利润超过大联盟联合增加利润的 2/3，导致联盟参与者个体理性难以满足，大联盟不稳定。考虑到各局部联盟的利润优势并不恒定且没有参与该联盟的成员利润分配上限过低，导致其个体理性无法满足。因此，在分配利润时，需要联合增加利润过大(大于大联盟的联合增加利润)的局部联盟做出让步来提高没有参与该联盟的成员的利润分配上限，从而满足所有参与者的个体理性实现大联盟稳定。如式(4-13)所示：我们为所有局部联盟设定了一个权重 ω^{ij} ，局部联盟的特征值由经典合作博弈中的 $v(ij) = \pi_{ij}$ 变成 $v(ij) = \omega^{ij} \pi_{ij}$ 。这样一来，当部分联盟的联合增加利润大于大联盟的联合增加利润时，适当降低该部分联盟的权重以减小该部分联盟的特征值的大小。其中 $\beta > 0$ 为幅度参数，联合增加利润过高的局部联盟的特征值不必过分降低，只需使得所有部分联盟的特征值满足式(4-14)

即可，即满足所有参与者个体理性的条件。

接下来，我们将借助数值仿真工具比较经典合作博弈理论特征值(原特征值)下 MRT 联盟的核心和 τ 值(称为原核心和原 τ 值)与加权特征值下联盟的核心与 τ 值(称为加权核心与加权 τ 值)。

4.5 数值仿真分析

4.5.1 原特征值解与加权特征值解比较

为验证所提出的加权利润作为局部联盟特征值的方法(加权特征值法)能够满足参与者的个体理性实现大联盟稳定，本文将在不同消费者支付意愿与 k 值下对比原核心与加权核心、原 τ 值与加权 τ 值。本文对消费者对再制造品的支付意愿从 0.1~0.9 划分为 9 个等级，以表明加权特征值法普适于各种消费者群体。其次在不同的 δ 等级下我们分别取区间 $(\delta, 1)$ 的 1/4 点，中点和 3/4 点的 k 值来说明该方法在零售商或再制造商竞争占优时也同样适用。1/4 点表示两产品净利润相差较大，零售商竞争占优。3/4 点则表示两产品净利润相差不大，再制造品竞争占优。区间中点则表示二者竞争优势相当。因为大联盟核心在 $\delta = 0.3$ 和 $\delta = 0.4$ 时在区间 $\delta < k \leq k_1 \cup k_2 \leq k < 1$ 内非空，为了表现加权后核心与原核心的对比，我们在 $\delta = 0.3$ 和 $\delta = 0.4$ 时 k_1 分别取 0.4 和 0.45， k_2 分别取 0.7 和 0.88。

表 4-4 原核心与加权核心比较

	k_1		k_2		k_3	
δ	原核	加权核	原核	加权核	原核	加权核
	[0.5000,0.7500]	[0.5000,0.7500]	[0.5000,0.7500]	[0.5000,0.7500]	[0.5000,0.7500]	[0.5000,0.7500]
0.1	[0.0810,0.1620]	[0.0810,0.1620]	[0.0173,0.0346]	[0.0173,0.0407]	[0.0023,0.0046]	[0.0023,0.0151]
	[0.0900,0.1800]	[0.0900,0.1800]	[0.1731,0.3462]	[0.1731,0.3462]	[0.2088,0.4175]	[0.2088,0.4175]
	[0.5000,0.7500]	[0.5000,0.7500]	[0.5000,0.7500]	[0.5000,0.7500]	[0.5000,0.7500]	[0.5000,0.7500]
0.2	[0.0900,0.1800]	[0.0900,0.1800]	[0.0250,0.0500]	[0.0250,0.0616]	[0.0038,0.0077]	[0.0038,0.0263]
	[0.0500,0.1000]	[0.0500,0.1000]	[0.1250,0.2500]	[0.1250,0.2500]	[0.1731,0.3462]	[0.1731,0.3462]
	[0.5000,0.7500]	[0.5000,0.7500]			[0.5000,0.7500]	[0.5000,0.7500]
0.3	[0.1227,0.2455]	[0.1227,0.2455]	$\emptyset$	$\emptyset$	[0.0182,0.0365]	[0.0182,0.0581]

	[0.0114,0.0227]	[0.0114,0.0471]		[0.1081,0.2162]	[0.1081,0.2162]
	[0.5000,0.7500]	[0.5000,0.7500]	[0.5000,0.7500]	[0.5000,0.7500]	[0.5000,0.7500]
0.4	[0.1247,0.2495]	[0.1247,0.2495]	[0.0348,0.0696]	[0.0348,0.1399]	[0.0031,0.0061]
	[0.0026,0.0052]	[0.0026,0.0330]	[0.0582,0.1165]	[0.0582,0.1165]	[0.1224,0.2449]

续表 4-4

		[0.5000,0.7608]		[0.5000,0.7705]		[0.5000,0.7500]
0.5	∅	[0.0332,0.1324]	∅	[0.0250,0.1351]	∅	[0.005,0.0974]
		[0.0147,0.1114]		[0.0500,0.1073]		[0.0900,0.1800]
		[0.5000,0.7893]		[0.5000,0.7944]		[0.5000,0.7827]
0.6	∅	[0.0540,0.1080]	∅	[0.0214,0.1090]	∅	[0.0045,0.0950]
		[0.0100,0.1043]		[0.0351,0.1046]		[0.0682,0.1364]
		[0.5000,0.8333]		[0.5000,0.8385]		[0.5000,0.8295]
0.7	∅	[0.0411,0.0822]	∅	[0.0169,0.1157]	∅	[0.0038,0.1096]
		[0.0065,0.1149]		[0.0242,0.1088]		[0.0486,0.0971]
		[0.5000,0.8617]		[0.5000,0.8652]		[0.5000,0.8603]
0.8	∅	[0.0277,0.0686]	∅	[0.0118,0.0907]	∅	[0.0027,0.0866]
		[0.0038,0.0927]		[0.0147,0.0882]		[0.0308,0.0624]
		[0.5000,0.9069]		[0.5000,0.9086]		[0.5000,0.9066]
0.9	∅	[0.0140,0.0458]	∅	[0.0061,0.0632]	∅	[0.0015,0.0627]
		[0.0017,0.0634]		[0.0068,0.0623]		[0.0147,0.0437]

由表 4-4 可知，在原特征值下的利润分配方案满足核心原则的条件区间内，加权特征值下的利润分配方案同样满足核心原则；而在原特征值下的利润分配方案不满足核心原则的区间内(表中用空集表示核心)，加权特征值下的利润分配方案在部分区间内仍然满足核心原则。由此得到结论 4.16。

结论 4.16 加权核心范围不小于原核心，加权方案提高了 *MRT* 联盟的稳定性。

结论 4.16 证明如下：

若 $\varphi_{i+j}^{ij} \leq \varphi_{M+R+T}^{MRT}$ ， $\{i, j\} \in n$ 。则各联盟权重均为 1，各联盟权重与原值相同。因此原核心与加权核心范围相同。

若 $\phi_{i+j}^{ij} > \phi_{M+R+T}^{MRT}$, 则局部联盟 ij 的加权后特征值 v_{ij} 有所减小。相对应的 MRT 中非 i, j 成员利润分配上限提升而利润分配下限不变。以 MR 联盟为例, $\phi_{M+R}^{MR} > \phi_{M+R+T}^{MRT}$, T 的分配上限由 $M_T(v)$ 变为 $M_T(v) + \Delta M_T(v)$, 但其分配下限 $m_T(v)$ 不变。因为参与者个体理性无法满足, $M_T(v) + M_R(v) + m_M(v) < \xi_{RT}^{RT} + \xi_M^{RT} < 1$, $M_T(v) + M_M(v) + m_R(v) < \xi_{MT}^{MT} + \xi_R^{MT} < 1$ 。因此 $M_T(v) + m_R(v) < 1 - M_M(v)$, 存在 Δx_M 和 Δx_R 使得 $1 - M_T(v) - m_R(v) - \Delta x_M - \Delta x_R = m_M(v)$ 。 $\Delta x_T > 0$ 且足够小使得 $\Delta M_T(v) > \Delta x_T > 0$ 存在。因此相对于经典合作博弈核心, 加权核心至少存在一个分配满足: $(M_T(v) + \Delta x_T) + (m_R(v) + \Delta x_R) + (m_M(v) + \Delta x_M) = 1$ 。对于其他局部联盟 MT 和 RT 同样成立, 结论 4.16 得证。

为了进一步验证结论 4.16, 本文选取了一个较为核心范围扩大较为明显的点 ($\delta = 0.3, k = 0.7$) 来对比原核心和加权核心范围。并选取消费者对再制造品支付意愿为 $\delta = 0.2, 0.3$ 时原 τ 值与加权 τ 值进行比较。

图 4-3 加权核心范围明显大于图 4-2 原核心, 这表明采用加权特征值法确定局部联盟的特征值可以为参与者提供更多的利润分配方案, 从而使得联盟更加稳固。此外, 从图 4-4 中加权 τ 值与原 τ 值的对比可以看出, 当原 τ 值不存在的部分区间内加权 τ 值存在, 这进一步验证了结论 16 的正确性。而且, 在原 τ 值和加权 τ 值同时存在的区间内, 加权 τ 值和原 τ 值大小相近, 加权 τ 值的最小值总是大于原 τ 值的最小值, 而加权 τ 值的最大值总是小于原 τ 值的最大值。这表明采用加权特征值法确定的参与者利润分配方案相对于原特征值确定的分配方案, 参与者利润分配更加均衡和公平。当供应链外部环境因素使得再制造品与新产品的相对净利润较低时, 零售商竞争优势较强而再制造商竞争优势较弱, 加权 τ 值减少制造商和零售商的利润分配补充给再制造商, 使再制造商处于竞争劣势仍然可以获得可观的利润。随着再制造品与新产品的相对净利润提高, 零售商处于竞争劣势时也同样能够获得同样的利润分配保障。而且加权利润分配方案没有改变不同参与者的利润分配大小关系, 处于竞争优势者的利润分配依然占优。因此加权特征值法既为参与者处于竞争弱势时的利润分配, 有保证参与者处于竞争优势时的利润分配优势。

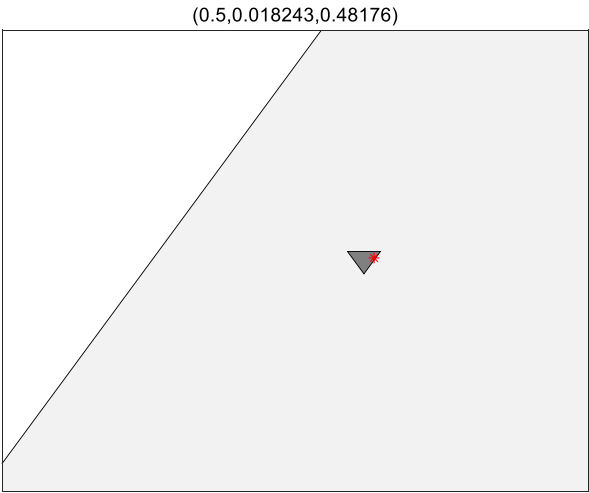


图 4-2 原核心区域

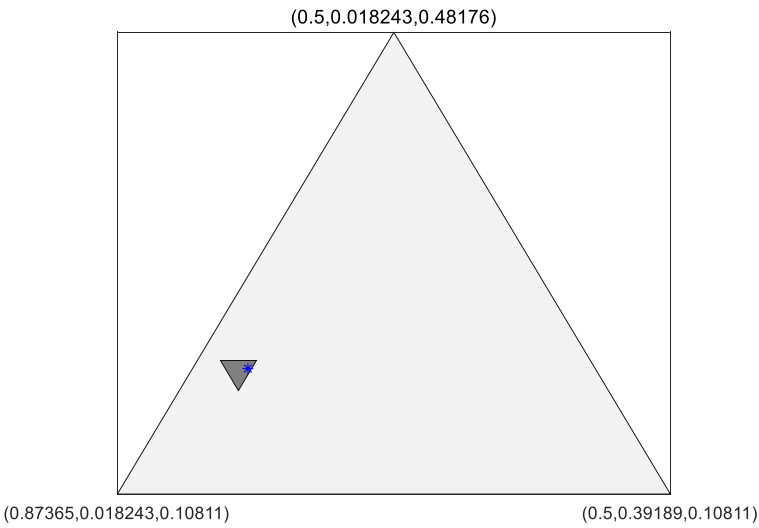
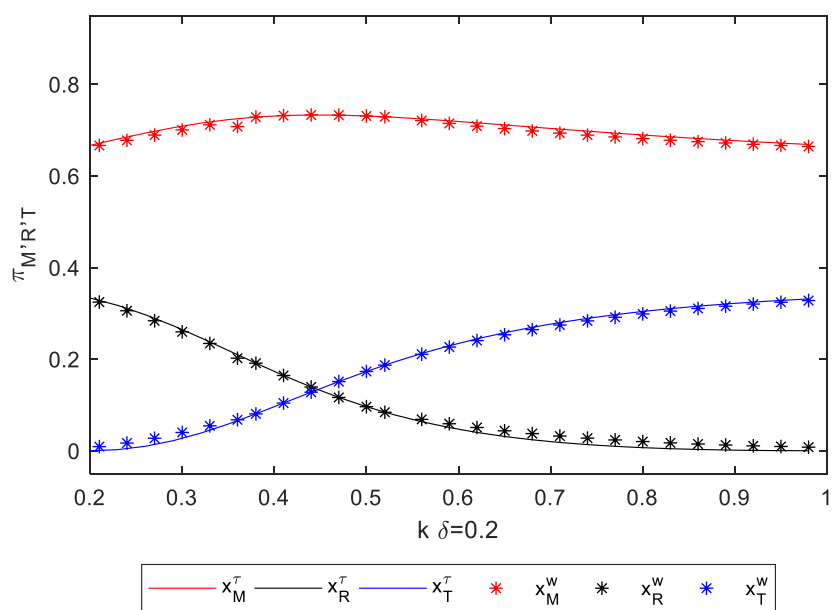
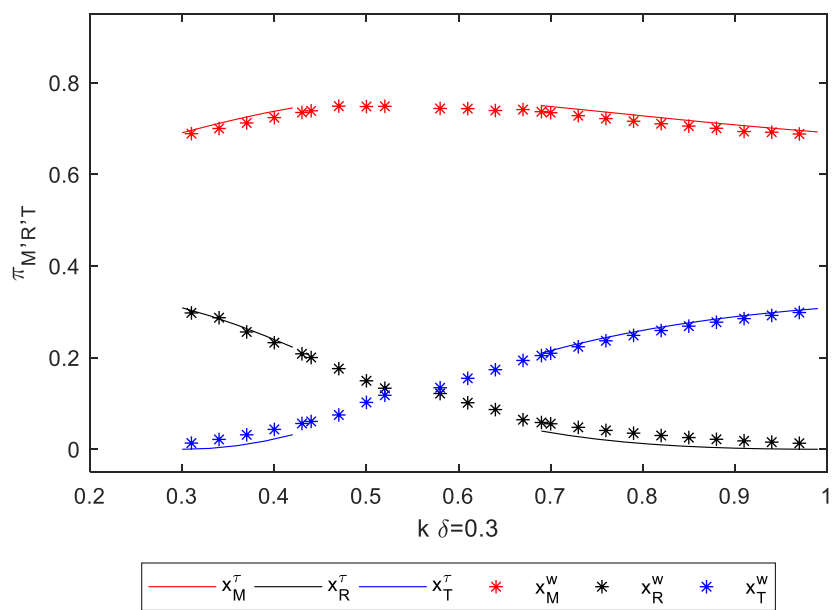


图 4-3 加权核心区域



(a) $\delta=0.2$



(b) $\delta=0.3$

图 4-4 加权前后利润分配比较

4.5.2 政策影响分析

为了探究目标回收率和奖惩系数变动对于最终利润分配的影响，以及为政府奖惩政策的制定提出建议。本文分别讨论了在较低目标回收率和较高目标回收率下政府奖惩力度变化和在较高奖惩力度和较低奖惩力度下目标回收率变化对供应链成员利润分配和环境的影响。参考 Wang^[74]和《The Global E-waste Monitor 2020》^[75]资料，本文相关参数取值为： $c_n = 0.26$ ， $c_r = 0.12$ ， $\delta = 0.45$ ，低目标回收率 $\rho = 0.3$ ，高目标回收率 $\rho = 0.7$ ，为确保新产品和再制造品的边际利润大于 0，因此奖惩系数不能够超过 0.41。据此，低奖惩系数 $\theta_r = 0.1$ ，高奖惩系数 $\theta_r = 0.3$ ， $e_n = 0.3$ ， $e_r = 0.15$ ，则 $e_r / e_n > \delta$ ，若 $e_r = 0.12$ 则 $e_r / e_n < \delta$ 。

(1) 供应链成员利润影响

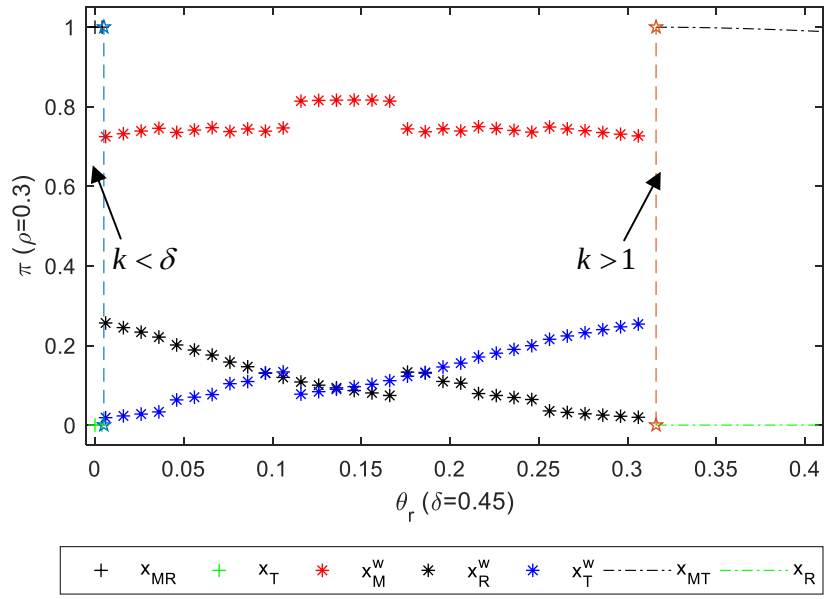
图 4-5(a)和(b)分别为低目标回收率下和高目标回收率下奖惩系数变化对供应链成员分配利润影响的情况。本文发现 ρ 的大小仅影响 MRT 条件区间 $\delta < k < 1$ 的长度而不影响参与者利润的变化趋势。随着奖惩系数增大，新产品边际利润减少而再制造品边际利润增加，这使得零售商对大联盟的贡献减少，而再制造商的贡献增加。因此零售商的分配利润减少，再制造商所分配的利润增加。相比较而言，在高目标回收水平下这一趋势变化的更快，这说明在高目标回收水平下奖惩力度对参与者利润分配影响更大。

当奖惩系数大小处于条件区间中间位置，制造商利润分配最大化。主要原因有二：一是因为在条件区间中间位置时， D 模式下零售商与再制造商竞争优势相当，横向竞争的负面影响最大。此时 RT 联盟消除横向竞争所创造的利润最大。这使得 RT 联盟的联合增加利润超过 MR 、 MT 和 MRT 联盟， RT 联盟的权重下调较多，零售商和再制造商的利润分配受此影响而分配减少较多。第二点原因在于零售商和再制造商相当的竞争优势使得 D 模式下新产品和再制造品数量均处于较高水平， D 模式下制造商的利润相对较高， MT 和 MR 联盟的联合增加利润也不大。制造商所参与的 MR 或 MT 联盟权重虽有调整，但调整幅度不大。这使得制造商的利润分配不降反增。因此制造商的利润分配在此时达到最大。相比较而言，在高目标回收率下，制造商在更低的奖惩系数下能够实现最大化利润分配。

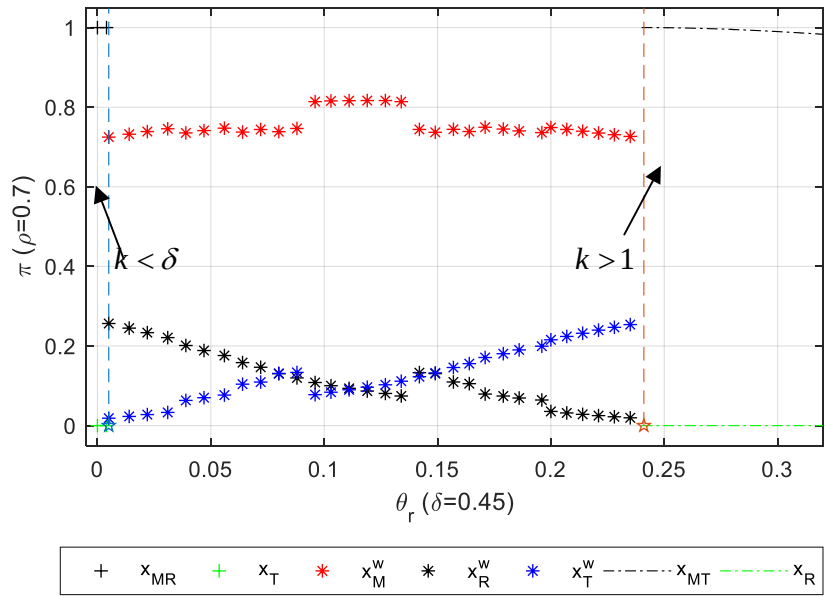
图 4-6(a)和(b)分别为低奖惩力度和高奖惩力度下目标回收率对供应链成员利润分配

影响的情况。本文发现不同奖惩力度下供应链成员利润变化趋势和条件区间均有不同。在低奖惩力度下，制造商利润在目标回收率 ρ 较高时能够实现较高的利润分配，原因同上述分析。随着目标回收率 ρ 增加，新产品边际利润减小，零售商的竞争优势减小而再制造商的竞争优势增加，此时制造商利润减小而再制造商利润增加。但当目标回收率 ρ 增加到较高水平时，*RT* 联盟权重下调使得零售商和再制造商的利润分配减少，故此时零售商和再制造商仍然保持原来的变化趋势但利润分配却相对更小。在高奖惩力度下，政府若采取较高的目标回收率则超出条件区间，*MRT* 联盟则不能成立。而若采取较低的目标回收率，零售商的利润分配始终低于再制造商。这表明奖惩力度对制造商与再制造商的竞争形式影响更大，高奖惩力度决定了再制造商是竞争中的优势方，且目标回收率 ρ 的变化不能够改变这种局面。随着目标回收率增加，*D* 模式下制造商和零售商的利润减少而再制造商的利润增加，这使得制造商和零售商所分配的利润呈下降趋势而再制造商的利润分配增加。

综合上述，我们发现奖惩系数比目标回收率对供应链成员的影响更大，零售商偏好较为宽松的回收政策，奖惩系数和目标回收率都处于相对较低的水平。再制造商偏好较为严格的政策，希望政府能够制定相对较高的目标回收率和奖惩力度，但在奖惩力度较低的条件再制造商更希望目标回收率适中。制造商则偏好于中庸的回收政策，奖惩力度适中，目标回收率适中，以便零售商和再制造商之间能够激烈竞争而坐收渔翁之利。

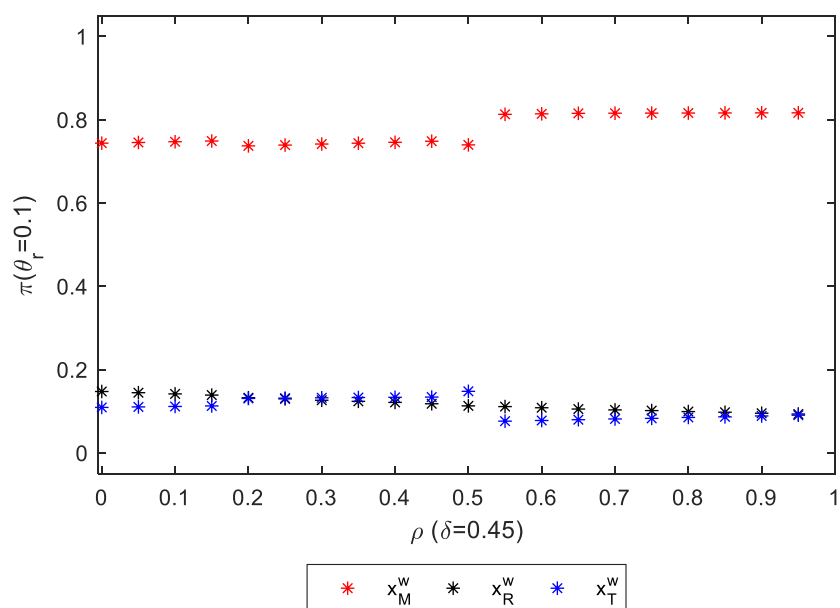


(a) 低回收目标

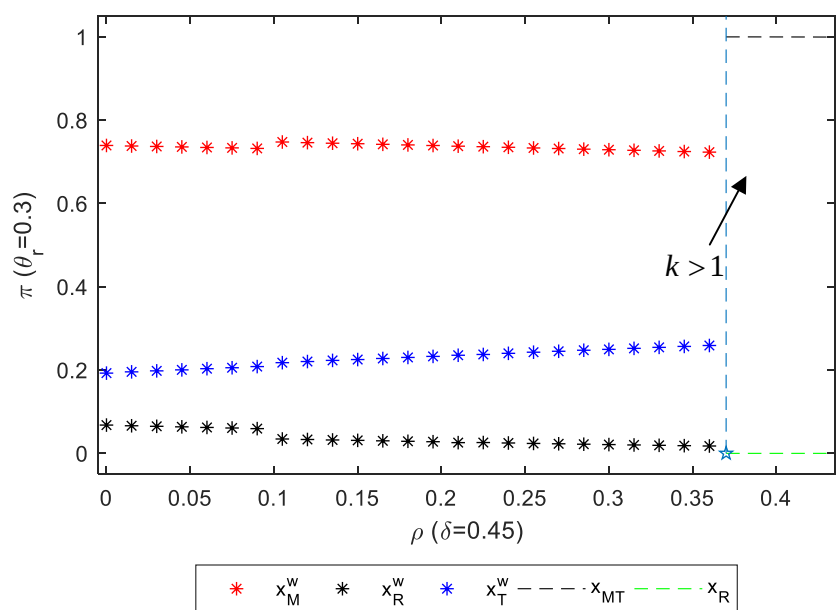


(b) 高回收目标

图 4-5 奖惩系数对利润分配影响



(a) 低奖惩力度



(b) 高奖惩力度

图 4-6 目标回收率对利润分配影响

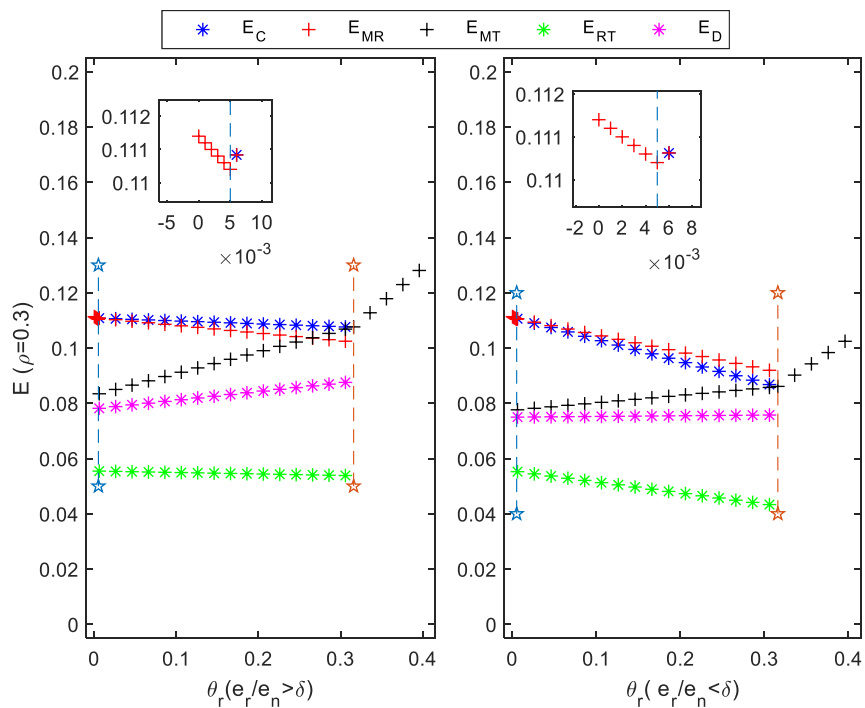
(2)环境影响

图 4-7(a)和(b)分别为低目标回收率和高目标回收率下奖惩系数变化对环境的影响情

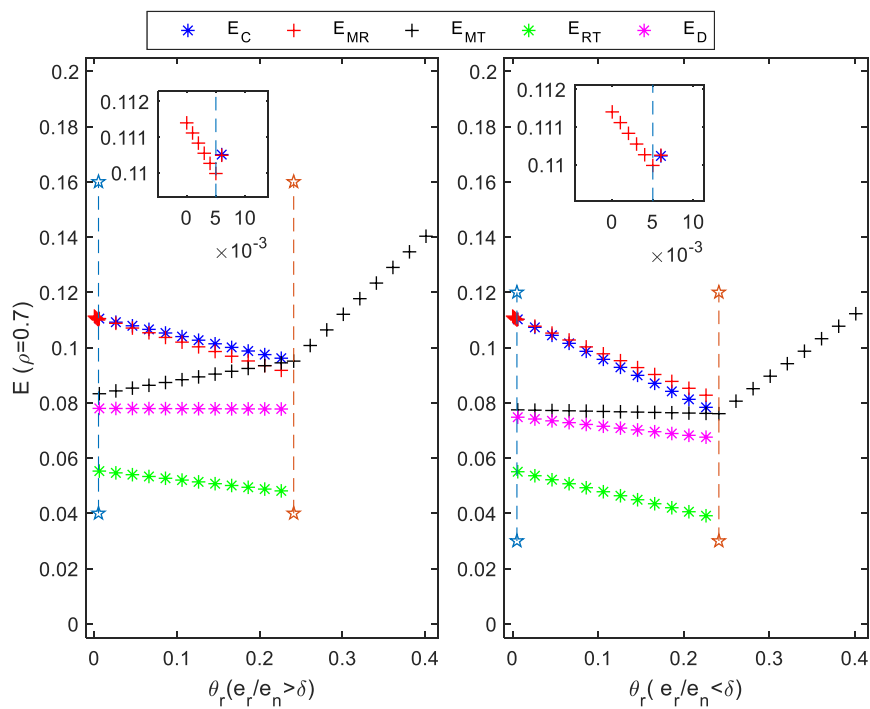
况。每张图左边的分图为 $e_r > \delta e_n$ 的情况，右边为 $e_r < \delta e_n$ 的情况。根据结论 4.10 可知，条件区间内 C 模式为最优合作模式，因此大联盟成立则其他合作模式将不会发生。为简化表述，本文不再详述条件区间内 C 模式以外的其他模式的环境影响变化情况，其他模式的环境影响仿真结果仅作为结论 4.11 的补充和佐证。对比两图可以发现在条件区间 $\delta < k < 1$ 内，随着奖惩系数 θ_r 增强， C 模式下环境影响值减小。在条件区间以外，向左在 $k < \delta$ 区间内，奖惩系数 θ_r 减小而 MR 模式下环境影响值增大，向右在 $k > 1$ 区间内奖惩系数 θ_r 增强而 MT 模式下环境影响值增大。这表明从环境的角度出发，无论目标回收水平如何，政府都应该采用较高的奖惩力度来激励再制造以减轻环境影响。再制造品单位环境影响越小则环境影响值减小的效果越明显。但是这种较高的奖惩力度应当适度，以支持三者结成大联盟。奖惩力度过大则会适得其反。此时新产品完全退出市场， MT 联盟模式下过量的再制造品反而会造成环境影响愈发严重。

图 4-8(a)和(b)分别为低奖惩力度和高奖惩力度下目标回收率变化对环境影响。每张图左边的分图为 $e_r > \delta e_n$ 的情况，右边为 $e_r < \delta e_n$ 的情况。本文发现 C 模式环境影响在条件区间内总是随着目标回收率 ρ 增大而减小，在低奖惩力度下，政府可以设置较高目标回收率来实现较低的环境影响；在高奖惩力度下，政府则需要考虑目标回收率是否过高而影响 MRT 联盟的形成。

综上所述，政府可以制定较为严格的政策（较高的目标回收率和较高的奖惩力度）以尽可能的减少环境影响，但需要注意政策对于供应链合作形式的影响，过高的目标回收率或奖惩力度不仅会影响行业的正常发展还会出现适得其反的环境效果。

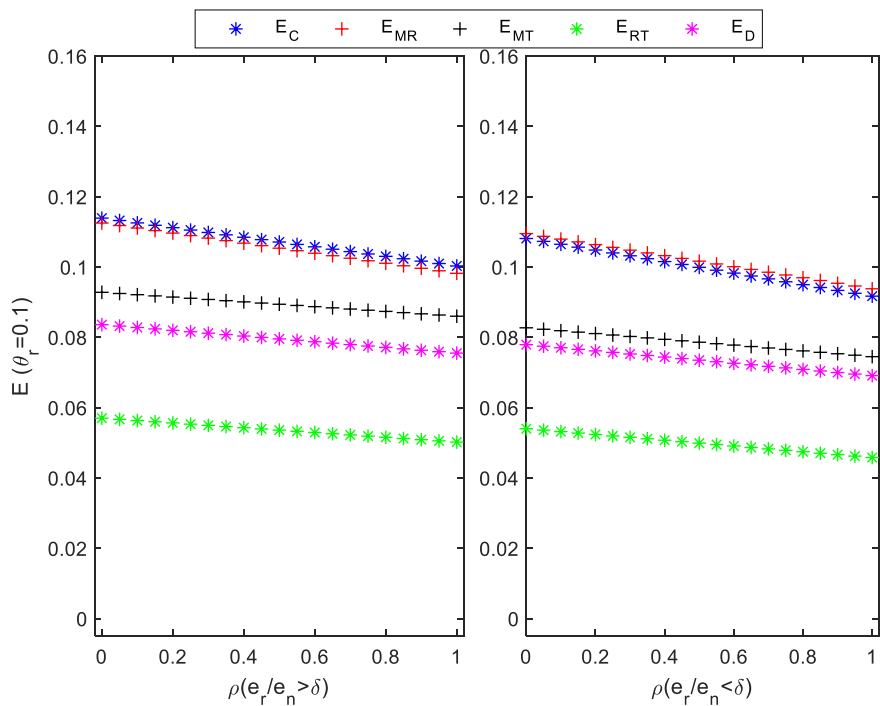


(a) 低回收目标

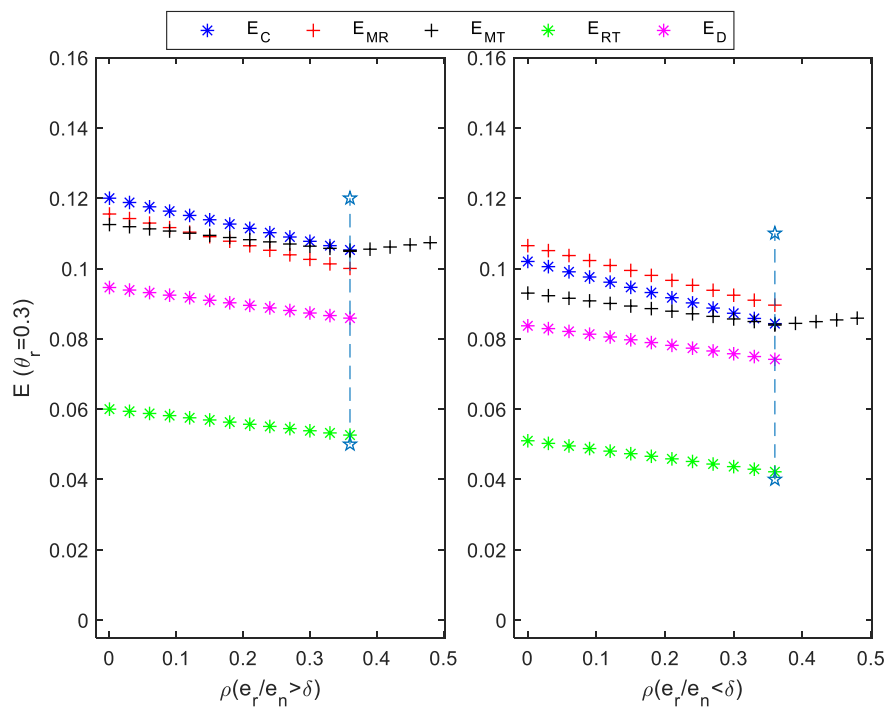


(b) 高回收目标

图 4-7 奖惩系数对环境影响



(a) 低奖惩力度



(b) 高奖惩力度

图 4-8 目标回收率对环境的影响

4.6 本章小结

在奖惩激励政策下，本章构建了一个由制造商、零售商和再制造商组成的再制造供应链，根据不同成员的联盟形式提出了 5 种决策模型，研究了政府奖惩激励政策下供应链成员的联盟模式选择和收益分配问题。对比不同模式下供应链成员的均衡决策、最优利润和分析政策变动对供应链成员决策和利润分配的影响，可得到以下结论：

(1) 供应链成员之间可以通过联盟消除双重边际效应和横向竞争的负面影响，从而扩大竞争优势和获得更高的利润。因此，制造商、零售商和再制造商三者联盟能够实现供应链利润最大化，是供应链最优合作模式。

(2) 目标回收率或奖惩力度的提升总是有利于再制造商且不利于零售商，因为这会导致新产品相对再制造品的单位净利润优势减小。因此，零售商偏好目标回收率和奖惩力度都低的宽松政策，而再制造商偏好目标回收率和奖惩力度双高的严苛政策。

(3) 由于制造商能够通过调整新产品批发价格和再制造品授权费用来与其他成员分摊政策变动带来的损失和收益，制造商更偏好目标回收率和奖惩力度均适中的政策。

(4) 随着目标回收率和奖惩力度的提升，各模式下的环境影响均有所降低。值得注意的是，过于严苛的奖惩力度会导致供应链对环境的影响不降反增，因此政府需要制定适中的目标回收率和奖惩力度，才能降低环境影响。

(5) 政策变动会影响新产品和再制造品的净利润比，进而导致供应链成员在不同政策条件下对利润分配的要求差异较大，影响联盟的稳定性。本文提出的加权特征值法能够有效解决这一问题，为供应链成员利润协调分配问题提供了新的解决方案。

第5章 结论与展望

在资源环境问题日益严峻的背景下，提高资源利用效率，发展循环经济是当前资源环境问题的有效解决方式。再制造作为发展循环经济的重要一环，对于减少环境污染和能源消耗、提高资源利用率尤为重要。因此，如何促进企业开展废旧产品回收和再制造活动、提高企业回收和再制造效率及其所创造的社会和环境效益等问题成为业界的重要议题。本文立足于现存的回收再制造激励政策和工业实践中企业的回收再制造模式，分别研究补贴激励政策下再制造供应链回收再制造模式选择和奖惩激励政策下再制造供应链联盟模式选择和收益分配问题，以实现再制造供应链经济效益和社会效益的同步发展。

5.1 本文的主要结论

在基金政策下，本文研究的主要结论如下：

(1) 提高环境税收和补贴会促进制造商提高产品的可再制造性水平和再制造品数量，因此有益于再制造。但是税收和补贴的提高是否有利于环境还要取决于再制造品单位环境影响值的大小，只有当再制造品相对新产品对环境的影响足够小时，提高再制造品数量，促进再制造才是有益于环境保护的。此外，税收和补贴的提高会导致供应链收益和消费者剩余的减少，而且会导致政府财政负担加重，制定过高的税收和补贴标准不利于行业的发展，因此政府需要综合考虑企业、消费者和环境三方利益均衡，引导企业合理的开展回收再制造工作。

(2) 制造商偏好自己回收和再制造外包的合作形式一仅再制造外包模式，而第三方再制造商的模式偏好取决于制造商关于产品可再制造性的研发效率。在供应链收益最大化的角度上，仅再制造外包模式为最优合作模式；但在社会总福利最大化角度，全部外包或全部授权模式最优。因此，最大化供应链利润和最大化社会总福利的目标不能兼得。

在奖惩政策下，本文研究的主要结论如下：

(1) 供应链成员联盟可以消除纵向的双重边际效应或横向的负面竞争影响,从而产生合作剩余。制造商、零售商和再制造商三者联盟的模式能够同时消除供应链纵向和横向的负面效用,产生最多的合作剩余,为最优合作模式。

(2) 奖惩政策的变化不影响三者联盟模式(大联盟)作为供应链最优合作模式,但会影响供应链大联盟和其他联盟的收益,从而影响供应链成员对联盟的贡献值的大小。因此,奖惩政策的变动将影响供应链成员内部的收益分配,这导致供应链成员在奖惩宽松或奖惩严格的政策条件下表现出明显的收益贡献差异,从而在不同政策条件下对收益分配提出差距较大的收益分配要求。考虑到可能的政策变化趋势和对供应链成员收益贡献的影响,本文在确定供应链成员的特征值时设计了一种加权的方法,旨在通过降低(并提高)高收益局部联盟的权重(提高低收益局部联盟的权重),使得供应链成员在不同政策时期对收益分配要求的差距减小,从而实现供应链大联盟形式的长期稳定。

(3) 在社会福利最大化的回收再制造责任转移模式下供应链成员形成大联盟可以实现供应链总收益最大化,加之政府奖惩政策的激励,大联盟模式下供应链总收益在满足社会福利最大化的回收再制造责任转移模式的基础上取得更高的利润,从而在一定程度上协调供应链收益与社会福利的双重最优。因此本文设计的供应链收益分配方案不仅可以协调供应链收益以维持供应链大联盟模式的稳定,还可以协调供应链收益与社会福利,实现双重最优。

5.2 研究不足和展望

本文分别在补贴激励政策下研究了再制造供应链不同回收再制造模式的选择和运营决策问题;在奖惩激励政策下研究了再制造供应链不同合作模式的选择、运营决策和收益分配问题,并得到了具有实践指导意义的结论,丰富了再制造供应链运营决策以及法规政策影响类的研究成果,但也存在一些局限性,未来可以针对这些方面开展进一步的研究。

(1) 本文所研究的都是单渠道回收模式,然而在工业实践上,许多企业开展回收再制造活动都会选择与其他企业一起共同回收废旧产品,以提高废旧产品的回收效率。以此,对激励政策下供应链回收再制造模式选择问题的研究可以扩展到对不同混合回收形式以及混合回收成本分摊的考虑。

(2) 本文缺少对废旧产品质量不确定性的考虑。在工业实践中，回收的废旧产品质量是不确定的，并不是所有的废旧产品都能被再制造，而且损害程度不同的产品其再制造成本也存在较大的差异。因此，将回收产品质量的不确定性纳入供应链成员运营决策的考虑范畴则更具现实意义。

(3) 本文只考虑了政府激励政策对于供应链收益分配方案的影响。外部环境因素不止政策，还有市场需求的不确定性、相关技术的发展和消费者观念的转变等都会影响到供应链不同合作模式的盈利能力，从而影响供应链成员的收益分配要求。因此，考虑其他外部因素对供应链收益分配的影响，得出具有一般现实意义的收益分配方法是未来值得进一步研究的潜在方向。

参考文献

- [1] Cao J, Zhang X, Hu L, et al. EPR regulation and reverse supply chain strategy on remanufacturing [J]. *Computer & Industrial Engineering*, 2018, 125:279-297.
- [2] 熊中楷, 申成然, 彭志强. 专利保护下闭环供应链的再制造策略研究[J]. *管理工程学报*, 2011, 26(3): 159-165.
- [3] Global E-waste Monitor 2020 [EB/OL]. https://www.itu.int/en/ITU-D/Environment/Documents/Toolbox/GEM_2020_def.pdf.
- [4] 肖露, 王先甲, 钱桂生, 等. 基于产品设计得再制造激励以及政府干预的影响[J]. *系统工程理论与实践*, 2017, 37(5): 1229-1242.
- [5] Forslind K H. Implementing extended producer responsibility: the case of Sweden's cars crapping scheme [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2005,13(6):619-629.
- [6] Liu Z, Tang J, Li B Y. Trade-of between remanufacturing and recycling of WEEE and the environmental implication under the Chinese Fund Policy[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 167(20): 97-109.
- [7] Zou Z B, Wang J J, Deng G S, et al. Third-party remanufacturing mode selection: Outsourcing or authorization?[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2016, 87: 1-19.
- [8] Gu X, Ieromonachou P, Zhou L, et al. Optimising quantity of manufacturing and remanufacturing in an electric vehicle battery closed-loop supply chain[J]. *Industrial Management & Data Systems*, 2018, 118: 283-302.
- [9] Ma Z J, Zhang N, Ying D, et al. Managing channel profits of different cooperative models in closed-loop supply chains[J]. *Omega*, 2016, 59: 251-262.
- [10] Govindan K, Popiuc M N. Reverse supply chain coordination by revenue sharing contract: a case for the personal computers industry[J]. *European Journal of Operational Research*, 2014, 233: 326-336.

- [11] Noori-daryan M, Taleizadeh A A, Govindan K. Joint replenishment and pricing decisions with different freight modes considerations for a supply chain under a composite incentive contract[J]. *Journal of the Operational Research Society*, 2018, 69: 876-894.
- [12] Saha S, Sarmah S P, Moon I. Dual channel closed-loop supply chain coordination with a reward-driven remanufacturing policy[J]. *International Journal of Production Research*, 2016, 54: 1-15.
- [13] Taleizadeh A A, Sane-Zerang E, Choi T-M. The effect of marketing effort on dual-channel closed-loop supply chain systems[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems* 2018, 48: 265-276.
- [14] Hao H, Xu W X, Wei F F, et al. Reward-Penalty vs Deposit-Refund: Government Incentive Mechanisms for EV Battery Recycling[J]. *Energies*, 2022, 15, 6885.
- [15] Savaskan R C, Bhattacharya S, Wasenhove L N V. Closed-loop supply chain models with product remanufacturing[J]. *Management Science*, 2004, 50(2): 239-252.
- [16] 陈建华, 梅俊晓, 曹菁菁. 零售商主导闭环供应链混合回收渠道选择决策[J]. *计算机集成制造系统*, 2021, 27(3): 954-964.
- [17] 郭军华, 李帮义, 倪明. WTP 差异下再制造闭环供应链的回收模式选择[J]. *管理学报*, 2015, 12(1): 142-147.
- [18] 黄宗盛, 张媛. 资金支持还是劳动联合? 第三方回收动态闭环供应链合作模式选择[J]. *中国管理科学*, 2023, <https://link.cnki.net/urlid/11.2835.g3.20230824.1937.004>.
- [19] 姚锋敏, 刘珊, 陈东彦, 等. 具有企业社会责任的闭环供应链回收及定价决策[J]. *控制与决策*, 2019, 34(9): 1981-1990.
- [20] 夏西强, 李梦雅, 路梦圆. 不同回收渠道下的再制造模式对比研究[J]. *系统管理学报*, 2023, <https://link.cnki.net/urlid/31.1977.n.20230830.1812.002>.
- [21] 王方, 尹雪薇, 余乐安. 政府监督下信息敏感型 WEEE 回收渠道的竞争策略研究[J]. *系统工程理论与实践*, 2023, <https://link.cnki.net/urlid/11.2267.N.20231211.1219.018>.
- [22] 曹晓刚, 曹博威, 闻卉. 考虑公平关切的混合回收渠道闭环供应链决策研究[J]. *中国管理科学*, 2024, <https://doi.org/10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2023.0619>.
- [23] 熊中楷, 王凯, 熊榆. 制造商作为再制造商的经销商的合作模式研究[J]. *管理工程学报*, 2011, 25(3): 189-193.

- [24] 刘艳, 王佩爽, 张彬燕, 等. 考虑品牌优势的供应链最优再制造模式与区块链引入策略[J]. 计算机集成制造系统, 2024, <https://doi.org/10.13196/j.cims.2023.0694>.
- [25] 夏佳玉, 马祖军. OEM 代工模式下品牌厂商的再制造策略[J]. 工业工程与管理, 2021, 26, 8: 168-176.
- [26] 王娜, 张玉林. 第三方再制造供应链生产及减排决策[J]. 计算机集成制造系统, 2024, 30(1): 144-154.
- [27] 郑小雪, 刘志. 第三方再制造外包模式选择与协调研究[J]. 控制与决策, 2020, 35(9): 2261-2268.
- [28] 唐娟, 李帮义, 刘志, 等. 相对公平关切下考虑产品设计的再制造合作模式与供应链协调[J]. 控制与决策, 2018, 33(12): 2234-2242.
- [29] 王麒翔, 李帮义, 陈白雪, 等. 回收目标责任制下制造商与零售商的再制造策略研究[J]. 系统工程理论与实践, 2023, 43(8): 2352-2365.
- [30] 冯章伟, 肖条军, 牟善栋. 考虑绿色偏好和政府补贴/碳税的第三方再制造模式[J]. 运筹与管理, 2023, 32(8): 57-64.
- [31] Wang L, Cai G, Tsay A A, et al. Design of the reverse channel for remanufacturing: must profit-maximization harm the environment?[J]. Production and Operations Management, 2017, 26(8): 1585-1603.
- [32] 王文宾, 达庆利, 胡天兵, 等. 基于惩罚与补贴的再制造闭环供应链网络均衡模型[J]. 运筹与管理, 2010, 19(1): 65-72.
- [33] 缪朝炜, 上官莉莉, 许舒婷, 等. 碳税政策下考虑双寡头竞争的再制造决策研究[J]. 管理工程学报, 2024, 38(6), <https://doi.org/10.13587/j.cnki.jieem.2024.06.014>.
- [34] 吴思思, 曹束, 张雪梅, 等. 考虑政府规制的再制造专利决策及协调策略[J]. 系统工程学报, 2023, 38(5): 643-660.
- [35] 龚本刚, 高一凌, 刘志, 等. 政府基金政策下动力电池闭环供应链回收渠道选择[J]. 计算机集成制造系统, 2023, 29(9): 3123-3137.
- [36] 王珊珊, 秦江涛. 政府补贴下双渠道闭环供应链回收渠道的选择研究[J]. 系统科学与数学, 2022, 42(10): 2756-2773.
- [37] 姚锋敏, 闫颖洛, 刘珊, 等. 考虑政府补贴及环境设计的再制造闭环供应链生产决策[J]. 控制与决策, 2022, 37(10): 2637-2646.

- [38] 夏西强, 李佩函, 贾家辉, 等. 基于碳配额不同分配方式政府补贴对制造/再制造影响研究[J]. 中国管理科学, 2023, <https://doi.org/10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2022.2451>.
- [39] 朱庆华, 夏西强, 李幻云. 政府补贴与专利费用下制造与再制造博弈模型[J]. 系统工程学报, 2017, 32(1): 8-18.
- [40] 夏西强, 李飏. 政府碳税与补贴政策对外包再制造影响研究[J]. 中国管理科学, 2022, 30(9): 105-115.
- [41] Pazoki M, Samarghandi H. Take-back regulation: Remanufacturing or Eco-design?[J]. International Journal of Production Economics, 2020, 227, 107674.
- [42] Xiong Y, Zhou Y, Li G D, et al. Don't forget your supplier when remanufacturing[J]. European Journal of Operational Research, 2013, 230: 15-25.
- [43] Wang W B, Zhang Y, Zhang K, et al. Reward-Penalty Mechanism for Closed-loop Supply Chains under Responsibility-Sharing and Different Power Structures[J]. International Journal of Production Economics, 2015, 170: 178-190.
- [44] Liu Z, Tang J, Li B Y, et al. Trade-off between remanufacturing and recycling of WEEE and the environmental implication under the Chinese Fund Policy[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 167: 97-109.
- [45] 易余胤, 梁家密. 奖惩机制下的闭环供应链混合回收模式[J]. 计算机集成制造系统, 2014, 20(1): 215-223.
- [46] 马建华, 舒美珍, 潘燕春, 等. EPR 制度下竞争供应链渠道结构和政府回收奖惩机制研究[J]. 中国管理科学, 2023, <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2835.G3.20230413.2108.006.html>.
- [47] 王文宾, 戚金钰, 张萌欣, 等. 三方演化博弈下政府奖惩机制对 WEEE 回收的影响[J]. 中国管理科学, 2023, <https://doi.org/10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2022.2196>.
- [48] 汪和平, 严啸宸, 赵丹, 等. 政府奖惩机制下考虑消费者低碳偏好的汽车制造商生产决策研究[J]. 系统工程理论与实践, 2023, 43(9): 2669-2684.
- [49] 姜力文, 唐金环, 饶卫振, 等. 碳中和视角下奖惩机制对逆向供应链碳减排与回收价格的影响[J]. 管理工程学报, 2024, 38(2): 121-138.
- [50] Leng M, Parlar M. Allocation of cost savings in a three-level supply chain with demand information sharing: a cooperative-game approach[J]. Operations Research, 2009, 57(1): 200-213.

- [51] Zheng X X, Liu Z, Li K W, et al. Cooperative game approaches to coordinating a three-echelon closed-loop supply chain with fairness concerns[J]. *International Journal of Production Economics*, 2019, 212: 92-110.
- [52] Zheng X X, Li D F, Liu Z, et al. Willingness-to-cede behaviour in sustainable supply chain coordination[J]. *International Journal of Production Economics*, 2021, 240, 108207.
- [53] Liu Z, Zheng X X, Li D F, et al. A novel cooperative game-based method to coordinate a sustainable supply chain under psychological uncertainty in fairness concerns[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2021, 147, 102237.
- [54] 李昌文, 周永务, 郭金森, 等. 两层供应链中数量竞争下零售商联盟合作及稳定性研究[J]. *系统管理学报*, 2018, 27(4): 791-800.
- [55] Asghari T, Taleizadeh A A, Jolai F, et al. Cooperative game for coordination of a green closed-loop supply chain[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 363, 132371.
- [56] Zheng X X, Chang C T, Li D F, et al. Designing an incentive scheme for producer responsibility organization of waste tires: A MCGP cooperative game approach[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2022, 167, 108009.
- [57] Zheng X X, Li D F. A new biform game-based investment incentive mechanism for eco-efficient innovation in supply chain[J]. *International Journal of Production Economics*, 2023, 258, 108795.
- [58] 杨洁, 曾子豪, 吴林炜, 等. 限制交流结构下供应链碳减排策略的非合作-合作两型博弈研究[J]. *系统工程理论与实践*, 2023, 43(10): 2928-2940.
- [59] 黄湘萌, 杨帅. 绿色供应链协同利益分配策略研究——基于区块链技术的 Shapley 值修正模型[J]. *技术经济与管理研究*, 2020(08): 14-19.
- [60] Zheng X X, Li D F, Liu Z, et al. Coordinating a closed-loop supply chain with fairness concerns through variable-weighted Shapley values[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2019, 126: 227-253.
- [61] Örsdemir A, Ziya E K, Parlaktürk A K. Competitive quality choice and remanufacturing[J]. *Product and Operations Management*, 2014, 23(1): 48-64.
- [62] 刘志, 李帮义, 程晋石, 等. 基于模块化设计的制造/再制造生产决策[J]. *计算机集成制造系统*, 2016, 22(4): 935-944.
- [63] Chen Y Y, Li B Y. Quantity and collection decisions of the remanufacturing enterprise

under both the take-back and carbon emission capacity regulations[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2020, 141, 102032.

[64] Liu Z, Li K W, Li B Y, et al. Impact of product-design strategies on the operations of a closed loop supply chain[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2019, 124: 75-91.

[65] Wu C H. OEM product design in a price competition with remanufactured product[J]. *Omega*, 2013, 41(2): 287-298.

[66] Zheng B, Wen K, Jin L, et al. Alliance or cost-sharing? Recycling cooperation mode selection in a closed-loop supply chain[J]. *Sustainable Production and Consumption*, 2022, 32: 942-955.

[67] 陈玉玉, 李帮义, 柏庆国, 等. 基于产品拆卸性设计的循环率规制的影响研究[J]. *计算机集成制造系统*, 2019, 25(7): 1817-1827.

[68] Cai Y J, Choi T M, Feng L, et al. Producer's choice of design-of-environment under environmental taxation[J]. *European Journal of Operational Research*, 2021, 297(2): 532-544.

[69] Wang W B, Yang S Q, Xu L, et al. Carrot/stick mechanisms for collection responsibility sharing in multi-tier closed-loop supply chain management[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2019, 125: 366-387.

[70] Xiong Z, Wang K. The closed-loop supply chain model where the distributor engages in remanufacturing[J]. *Service Systems and Service Management*, doi:10.1109/icsssm.2011.5959535.

[71] Yan W, Xiong Y, Xiong Z, et al. Bricks vs. clicks: which is better for marketing remanufactured products?[J]. *European Journal of Operational Research*, 2015, 242: 434-444.

[72] Ma Z J, Zhang N, Ying D, et al. Managing channel profits of different cooperative models in closed-loop supply chains[J]. *Omega*, 2016, 59: 251-262.

[73] Gillies D B. Solutions to general non-zero-sum games[J]. *Contributions to the Theory of Games*, 1959, 4(40): 47-85.

[74] Wang T Y, Chen Z S, He P, et al. Alliance strategy in an online retailing supply chain: Motivation, choice, and equilibrium[J]. *Omega*, 2023, 115, 102791.

[75] Waste from Electrical and Electronic Equipment (WEEE)[EB/OL]. <https://environment.ec.europa.eu/topics/waste-and-recycling/waste-electrical-and-electronic-equipment-weee-en>.

附录

附录 1. 四种回收在制造模式求解过程

RO 模式

根据逆向归纳法, 制造商决策变量 k 、 q_n 和 p_s 给定下, 由再制造商利润函数关于 q_r 的二阶偏导 $\frac{d^2 \pi_R^{RO}}{dq_r^2} = -2c < 0$ 可知, π_R^{RO} 是关于 q_r 的严格凹函数, 由一阶偏导方程

$$\frac{d\pi_R^{RO}}{dq_r} = 0 \text{ 可得再制造商的最优反应函数 } q_r^{RO}(q_n, p_s, k) = \frac{-s + \alpha + k\mu - c_r + p_s}{2c}, \text{ 再将其代入}$$

制造商利润函数式中, 由海赛矩阵负定得当 $\xi^{RO} = 2\theta(2c + \delta - \delta^2) - \mu^2 > 0$ 时, 模型 RO 存

在唯一最优解; 联立的一阶偏导方程组 $\frac{\partial \pi_M^{RO}}{\partial q_n} = 0$, $\frac{\partial \pi_M^{RO}}{\partial p_s} = 0$ 和 $\frac{\partial \pi_M^{RO}}{\partial k} = 0$ 可解得最优决策

$$\text{为 } q_n^{RO} = \frac{1 - c_n - t}{2} - \frac{\delta\theta\Delta}{\xi^{RO}}, \quad k^{RO} = \frac{\mu\Delta}{\xi^{RO}}, \quad p_s^{RO} = c_r + s + \frac{(2c\theta - \mu^2)\Delta}{\xi^{RO}} \text{ 和 } q_r^{RO} = \frac{\theta\Delta}{\xi^{RO}}. \text{ 代入逆需}$$

求函数得最优新产品和再制造品价格分别 $p_n^{RO} = \frac{(1 + c_n + t)}{2}$ 和

$$p_r^{RO} = \frac{\delta(1 + c_n + t)}{2} - \frac{\delta\theta(1 - \delta)\Delta}{\xi^{RO}}. \text{ 将 } q_n^{RO}、k^{RO}、p_s^{RO}、q_r^{RO}、p_n^{RO} \text{ 和 } p_r^{RO} \text{ 带入(3-1)式和(3-2)}$$

式, 得到制造商利润 $\pi_M = \frac{(1 - c_n - t)^2}{4} + \frac{\theta\Delta^2}{2\xi^{RO}}$ 、再制造商利润 $\pi_R = \frac{c\theta^2\Delta^2}{(\xi^{RO})^2}$ 和供应链总利

$$\text{润 } \pi_T = \frac{(1 - c_n - t)^2}{4} + \frac{\theta\Delta^2(2\theta(3c + \delta - \delta^2) - \mu^2)}{2(\xi^{RO})^2}.$$

RP 模式

由逆向归纳法, 制造商决策变量 k 、 q_n 和 p_h 给定下, 由再制造商利润函数关于 q_r 的二阶偏导 $\frac{d^2 \pi_R^{RP}}{dq_r^2} = -2(c + \delta) < 0$ 可知, π_R^{RP} 是关于 q_r 的严格凹函数, 由一阶偏导方程

$$\frac{d\pi_R^{RP}}{dq_r} = 0 \text{ 可得再制造商的最优反应函数 } q_r^{RP}(q_n, p_h, k) = -\frac{s - \alpha - \delta - k\mu + c_r + p_h + \delta q_n}{2(c + \delta)}, \text{ 再}$$

将其代入制造商利润函数式中，由海赛矩阵负定得当 $\xi^{RP} = 2\theta(2c + 2\delta - \delta^2) - \mu^2 > 0$ 时，

模型 RP 存在唯一最优解；联立的一阶偏导方程组 $\frac{\partial \pi_M^{RP}}{\partial q_n} = 0$ ， $\frac{\partial \pi_M^{RP}}{\partial p_h} = 0$ 和 $\frac{\partial \pi_M^{RP}}{\partial k} = 0$ 可解

得最优决策为 $q_n^{RP} = \frac{1-c_n-t}{2} - \frac{\delta\theta\Delta}{\xi^{RP}}$ ， $k^{RP} = \frac{\mu\Delta}{\xi^{RP}}$ ， $p_h^{RP} = \frac{\delta + \alpha - c_r - s}{2} + \frac{\mu^2\Delta}{2\xi^{RP}}$ 和 $q_r^{RP} = \frac{\theta\Delta}{\xi^{RP}}$ 。

代入逆需求函数得最优新产品和再制造品价格分别 $p_n^{RP} = \frac{(1+c_n+t)}{2}$ 和

$p_r^{RP} = \frac{\delta(1+c_n+t)}{2} - \frac{\delta\theta(1-\delta)\Delta}{\xi^{RP}}$ 。将 q_n^{RP} 、 k^{RP} 、 p_h^{RP} 、 q_r^{RP} 、 p_n^{RP} 和 p_r^{RP} 带入(3-3)式和(3-4)

式，得到制造商利润 $\pi_M = \frac{(1-c_n-t)^2}{4} + \frac{\theta\Delta^2}{2\xi^{RP}}$ 、再制造商利润 $\pi_R = \frac{(c+\delta)\theta^2\Delta^2}{(\xi^{RP})^2}$ 和供应链

总利润 $\pi_T = \frac{(1-c_n-t)^2}{4} + \frac{\theta\Delta^2(2\theta(3c+3\delta-\delta^2)-\mu^2)}{2(\xi^{RP})^2}$ 。

MO 模式

制造商将再制造品加价 h 出售， $p_r = p_s + h$ 。代入需求函数得到 q_n 和 q_r 关于 p_s 的函数关系。由逆向归纳法，制造商决策变量 k 、 q_n 和 q_r 给定下，由再制造商利润函数关

于 p_s 的二阶偏导 $\frac{d^2\pi_R^{MO}}{dp_s^2} = -\frac{2}{\delta(1-\delta)} < 0$ 可知， π_R^{MO} 是关于 p_s 的严格凹函数，由一阶偏导

方程 $\frac{d\pi_R^{MO}}{dp_s} = 0$ 可得再制造商的最优反应函数 $p_s^{MO}(q_n, q_r, k) = \frac{-h - k\mu + c_r + \delta q_n}{2}$ ，再将其

代入制造商利润函数式中，由海赛矩阵负定得当 $\xi^{MO} = 2\theta(c + 2\delta - 2\delta^2) - \mu^2 > 0$ 时，模型

MO 存在唯一最优解；联立的一阶偏导方程组 $\frac{\partial \pi_M^{MO}}{\partial q_n} = 0$ ， $\frac{\partial \pi_M^{MO}}{\partial q_r} = 0$ 和 $\frac{\partial \pi_M^{MO}}{\partial k} = 0$ 可解得最

优决策为 $q_n^{MO} = \frac{1-c_n-t}{2} - \frac{\delta\theta\Delta}{\xi^{MO}}$ ， $k^{MO} = \frac{\mu\Delta}{\xi^{MO}}$ ， $p_h^{MO} = c_r + \frac{\Delta(\delta\theta(1-\delta)-\mu^2)}{\xi^{MO}}$ 和 $q_r^{MO} = \frac{\theta\Delta}{\xi^{MO}}$ 。

代入逆需求函数得最优新产品和再制造品价格分别 $p_n^{MO} = \frac{(1+c_n+t)}{2}$ 和

$p_r^{MO} = \frac{\delta(1+c_n+t)}{2} - \frac{\delta\theta(1-\delta)\Delta}{\xi^{MO}}$ 。将 q_n^{MO} 、 k^{MO} 、 p_s^{MO} 、 q_r^{MO} 、 p_n^{MO} 和 p_r^{MO} 带入(3-5)式和(3-6)

式，得到制造商利润 $\pi_M = \frac{(1-c_n-t)^2}{4} + \frac{\theta\Delta^2}{2\xi^{MO}}$ 、再制造商利润 $\pi_R = \frac{(1-\delta)\delta\theta^2\Delta^2}{(\xi^{MO})^2}$ 和供应链

总利润 $\pi_T = \frac{(1-c_n-t)^2}{4} + \frac{\theta\Delta^2(2\theta(c+3\delta-3\delta^2)-\mu^2)}{2(\xi^{MO})^2}$ 。

MP 模式

由逆向归纳法，制造商决策变量 k 、 q_n 和 p_h 给定下，由再制造商利润函数关于 q_r 的

二阶偏导 $\frac{d^2\pi_R^{MP}}{dq_r^2} = -2\delta < 0$ 可知， π_R^{MP} 是关于 q_r 的严格凹函数，由一阶偏导方程 $\frac{d\pi_R^{MP}}{dq_r} = 0$

可得再制造商的最优反应函数 $q_r^{MP}(q_n, p_h, k) = -\frac{-\delta-k\mu+c_r+p_h+\delta q_n}{2\delta}$ ，再将其代入制造

商利润函数式中，由海赛矩阵负定得当 $\xi^{MP} = 2\theta(c+2\delta-\delta^2)-\mu^2 > 0$ 时，模型 MP 存在

唯一最优解；联立的一阶偏导方程组 $\frac{\partial\pi_M^{MP}}{\partial q_n} = 0$ ， $\frac{\partial\pi_M^{MP}}{\partial p_h} = 0$ 和 $\frac{\partial\pi_M^{MP}}{\partial k} = 0$ 可解得最优决策为

$q_n^{MP} = \frac{1-c_n-t}{2} - \frac{\delta\theta\Delta}{\xi^{MP}}$ ， $k^{MP} = \frac{\mu\Delta}{\xi^{MP}}$ ， $p_h^{MP} = \frac{\delta+s-\alpha-c_r}{2} + \frac{(2c\theta+\mu^2)\Delta}{2\xi^{MP}}$ 和 $q_r^{MP} = \frac{\theta\Delta}{\xi^{MP}}$ 。代入

逆需求函数得最优新产品和再制造品价格分别 $p_n^{MP} = \frac{(1+c_n+t)}{2}$ 和

$p_r^{MP} = \frac{\delta(1+c_n+t)}{2} - \frac{\delta\theta(1-\delta)\Delta}{\xi^{MP}}$ 。将 q_n^{MP} 、 k^{MP} 、 p_h^{MP} 、 q_r^{MP} 、 p_n^{MP} 和 p_r^{MP} 带入(3-7)式和(3-8)

式，得到制造商利润 $\pi_M = \frac{(1-c_n-t)^2}{4} + \frac{\theta\Delta^2}{2\xi^{MP}}$ 、再制造商利润 $\pi_R = \frac{\delta\theta^2\Delta^2}{(\xi^{MP})^2}$ 和供应链总利

润 $\pi_T = \frac{(1-c_n-t)^2}{4} + \frac{\theta\Delta^2(2\theta(c+3\delta-\delta^2)-\mu^2)}{2(\xi^{MP})^2}$ 。

附录 2. 结论 3.2 证明过程

由 $\xi^{RP} - \xi^{RO} = 2\xi\theta$ ， $\xi^{RO} - \xi^{MP} = 2c\theta$ ， $\xi^{MP} - \xi^{MO} = 2\xi^2\theta$ ，得证 $\xi^{MO} < \xi^{MP} < \xi^{RO} < \xi^{RP}$ 。

q_r 和 k 的分子部分相同，分母部分 $\xi^{RP} > \xi^{RO} > \xi^{MP} > \xi^{MO}$ 可证 $q_r^{MO} > q_r^{MP} > q_r^{RO} > q_r^{RP}$ 和

$$k^{MO} > k^{MP} > k^{RO} > k^{RP}。由 \quad q_n^{RP} - q_n^{RO} = \frac{2\delta^2\theta^2\Delta}{\xi^{RP}\xi^{RO}} > 0, \quad q_n^{RO} - q_n^{MP} = \frac{2c\delta\theta^2\Delta}{\xi^{RO}\xi^{MP}} > 0,$$

$$q_n^{MP} - q_n^{MO} = \frac{2\delta^3\theta^2\Delta}{\xi^{MP}\xi^{MO}} > 0 \text{ 得证 } q_n^{MO} < q_n^{MP} < q_n^{RO} < q_n^{RP}。由 \quad p_r^{RP} - p_r^{RO} = \frac{2\delta^2\theta^2\Delta(1-\delta)}{\xi^{RP}\xi^{RO}} > 0,$$

$$p_r^{RO} - p_r^{MP} = \frac{2c\delta\theta^2\Delta(1-\delta)}{\xi^{RO}\xi^{MP}} > 0, \quad p_r^{MP} - p_r^{MO} = \frac{2\delta^3\theta^2\Delta(1-\delta)}{\xi^{MP}\xi^{MO}} > 0 \text{ 得证 } p_r^{MO} < p_r^{MP} < p_r^{RO} < p_r^{RP}。$$

因 为 $q_r^M > q_r^P > q_r^R > q_r^O$ ， $q_n^{MO} < q_n^{MP} < q_n^{RO} < q_n^{RP}$ ，所 以。因 为

$$q_t^{MO} - q_t^{MP} = \frac{2\delta^2\theta^2(1-\delta)\Delta}{\xi^{MO}\xi^{MP}} > 0, \quad q_t^{MP} - q_t^{RO} = \frac{2c\theta^2(1-\delta)\Delta}{\xi^{RO}\xi^{MP}} > 0, \quad q_t^{RO} - q_t^{RP} = \frac{2\delta\theta^2(1-\delta)\Delta}{\xi^{MO}\xi^{MP}} > 0$$

得证 $q_t^{MO} > q_t^{MP} > q_t^{RO} > q_t^{RP}$ 。

附录 3. 结论 3.3 证明过程

$$由 \pi_M^{RO} - \pi_M^{RP} = \frac{\delta\theta^2\Delta^2}{\xi^{RO}\xi^{RP}} > 0, \quad \pi_M^{MP} - \pi_M^{RO} = \frac{c\theta^2\Delta^2}{\xi^{RO}\xi^{MP}} > 0, \quad \pi_M^{MO} - \pi_M^{MP} = \frac{\delta^2\theta^2\Delta^2}{\xi^{MO}\xi^{MP}} > 0 \text{ 得证}$$

$\pi_M^{MO} > \pi_M^{MP} > \pi_M^{RO} > \pi_M^R$ 。首先由四种模式存在最优解的条件得到各模式研发效率的取值

范 围： $H^{MO} < 2c + \delta - \delta^2$ ， $H^{MP} < 2c + 4\delta - 2\delta^2$ ， $H^{RO} < 4c + 2\delta - 2\delta^2$ 和

$$H^{RP} < 2c + 4\delta - 2\delta^2。由 \pi_R^{RO} - \pi_R^{RP} = \frac{\theta^2\Delta^2(c(\xi^{RP})^2 - (c+\delta)(\xi^{RP})^2)}{(\xi^{RO})^2(\xi^{RP})^2} > 0 \text{ 得到 } \pi_R^{RO} \text{ 大于 } \pi_R^{RP} \text{ 条}$$

件为： $2c + 2\delta(1-\delta) - 2\sqrt{c(c+\delta)} \leq H \leq 2c + 2\delta(1-\delta) + 2\sqrt{c(c+\delta)}$ ，因为区间上限超过存

在最优解的研发效率范围 $H^{RO} < 2c + 2\delta(1-\delta) + 2\sqrt{c(c+\delta)}$ ，因此实际范围为

$$2c + 2\delta(1-\delta) - 2\sqrt{c(c+\delta)} \leq H \leq H^{RO}，区间下限设为 H^1 ， $H^1 = 2c + 2\delta(1-\delta) - 2\sqrt{c(c+\delta)}$ 。$$

同理，由 $\pi_R^{MP} - \pi_R^{RO} > 0$ 得到 π_R^{MP} 大于 π_R^{RO} 的条件为 $2c + 2\delta(1-\delta) - 2\sqrt{c\delta} \leq H \leq H^{MP}$ ，其中

$$H^2 = 2c + 2\delta(1-\delta) - 2\sqrt{c\delta}；由 \pi_R^{MO} - \pi_R^{MP} > 0 \text{ 得到 } \pi_R^{MO} \text{ 大于 } \pi_R^{MP} \text{ 的条 件 为}$$

$$2c + \delta - (\delta - \delta)\sqrt{-2\delta} \leq H \leq H^{MO}，其中 H^3 = 2c + \delta - (\delta - \delta)\sqrt{-2\delta}。易 证$$

$$H^1 < H^2 < H^3。$$

$$\text{由 } \pi_T^{RO} - \pi_T^{RP} = \frac{\delta\theta^2\Delta^2((\xi^{RO})^2 + (4c + 2\delta\theta)\xi^{RO} + 4c\delta\theta)}{(\xi^{RO})^2(\xi^{RP})^2} > 0, \quad \pi_T^{MP} - \pi_T^{RO} > 0 \quad \text{和}$$

$$\pi_T^{MO} - \pi_T^{MP} > 0 \text{ 得证。}$$

附录 4. 结论 3.4 证明过程

将均衡解代入消费者剩余表达式，得到各模式消费者剩余分别为：

$$\begin{aligned} CS^{RO} &= \frac{(1-c_n-t)^2}{8} + \frac{\delta(1-\delta)\Delta^2\theta^2}{2(\xi^{RO})^2}, & CS^{RP} &= \frac{(1-c_n-t)^2}{8} + \frac{\delta(1-\delta)\Delta^2\theta^2}{2(\xi^{RP})^2}, \\ CS^{MO} &= \frac{(1-c_n-t)^2}{8} + \frac{\delta(1-\delta)\Delta^2\theta^2}{2(\xi^{MO})^2} \quad \text{和} \quad CS^{MP} = \frac{(1-c_n-t)^2}{8} + \frac{\delta(1-\delta)\Delta^2\theta^2}{2(\xi^{MP})^2} \quad \text{由} \\ CS^{RO} - CS^{RP} &= \frac{\delta(1-\delta)\Delta^2\theta^2((\xi^{RP})^2 - (\xi^{RO})^2)}{2(\xi^{RO})^2(\xi^{RP})^2} > 0, \quad CS^{MP} - CS^{RO} > 0, \quad CS^{MO} - CS^{MP} > 0 \text{ 得证} \end{aligned}$$

$$CS^{MO} > CS^{MP} > CS^{RO} > CS^{RP}。$$

将均衡解代入环境影响值的表达式，得到各模式环境影响值分别为：

$$\begin{aligned} E^{RO} &= \frac{(1-c_n-t)e_n}{2} + \frac{\theta\Delta(e_r - \delta e_n)}{\xi^{RO}}, & E^{RP} &= \frac{(1-c_n-t)e_n}{2} + \frac{\theta\Delta(e_r - \delta e_n)}{\xi^{RP}}, \\ E^{MO} &= \frac{(1-c_n-t)e_n}{2} + \frac{\theta\Delta(e_r - \delta e_n)}{\xi^{MO}} \quad \text{和} \quad E^{MP} = \frac{(1-c_n-t)e_n}{2} + \frac{\theta\Delta(e_r - \delta e_n)}{\xi^{MP}}。 \quad \text{由} \\ E^{RO} - E^{RP} &= \frac{2\xi^{RO}\xi^{RP}\theta\Delta(e_r - \delta e_n)}{\xi^{RO}\xi^{RP}}, \quad E^{MP} - E^{RO} = \frac{2c\theta^2\Delta(e_r - \delta e_n)}{\xi^{RO}\xi^{MP}}, \quad E^{MO} - E^{MP} = \frac{2\xi^{MO}\xi^{MP}\theta\Delta(e_r - \delta e_n)}{\xi^{MO}\xi^{MP}}, \end{aligned}$$

得证。

附录 5. 结论 3.5 证明过程

对各模式中的新产品数量、再制造产品数量和产品的可再制造性水平关于 t 和 α 进

$$\text{行求导即可证明。例如 } RO \text{ 模式求导结果如下：} \frac{\partial q_n^{RO}}{\partial t} = \frac{-\xi^{RO} - 2\delta^2\theta}{2\xi^{RO}}, \quad \frac{\partial q_n^{RO}}{\partial \alpha} = \frac{-\delta\theta}{\xi^{RO}},$$

$$\frac{\partial q_r^{RO}}{\partial t} = \frac{\delta \theta}{\xi^{RO}}, \quad \frac{\partial q_r^{RO}}{\partial \alpha} = \frac{\theta}{\xi^{RO}}, \quad \frac{\partial k^{RO}}{\partial t} = \frac{\delta \mu}{\xi^{RO}} \text{ 和 } \frac{\partial k^{RO}}{\partial \alpha} = \frac{\mu}{\xi^{RO}}。$$

附录 6. 结论 3.6 证明

对各模式中再制造产品价格和外包及授权价格关 t 和 α 进行求导即可证明。例如在 RO 模式中, $\frac{\partial p_s^{RO}}{\partial t} = \frac{\delta(2c\theta - \mu^2)}{\xi^{RO}}$ 和 $\frac{\partial p_s^{RO}}{\partial \alpha} = \frac{2c\theta - \mu^2}{\xi^{RO}}$; 在 RP 模式中, 有 $\frac{\partial p_h^{RP}}{\partial t} = \frac{\delta \mu^2}{2\xi^{RP}} > 0$ 和 $\frac{\partial p_h^{RP}}{\partial \alpha} = \frac{\theta(2c + 2\delta - \delta^2)}{\xi^{RP}} > 0$ 。

附录 7. 结论 3.7 证明

以 RO 模式为例, 对环境影响、制造商和再制造商利润和消费者剩余关于补贴(α) 进行求导: $\frac{\partial p_r^{RO}}{\partial t} = \frac{\delta(\xi^{RO} - 2\delta\theta(1-\delta))}{2\xi^{RO}} > 0$, $\frac{\partial p_r^{RO}}{\partial \alpha} = \frac{-\delta(1-\delta)}{\xi^{RO}} < 0$, $\frac{\partial \pi_M^{RO}}{\partial \alpha} = \frac{\theta\Delta}{\xi^{RO}} > 0$, $\frac{\partial \pi_R^{RO}}{\partial \alpha} = \frac{2c\theta^2\Delta}{(\xi^{RO})^2} > 0$, $\frac{\partial \pi_R^{RO}}{\partial t} = \frac{2c\delta\theta^2\Delta}{(\xi^{RO})^2}$, $\frac{\partial \pi_R^{RP}}{\partial t} = \frac{2(c+\delta)\delta\theta^2\Delta}{(\xi^{RP})^2}$, $\frac{\partial \pi_R^{RO}}{\partial t} - \frac{\partial \pi_R^{RP}}{\partial t} = \frac{2\delta\theta^2\Delta(c(\xi^{RP})^2 - (c+\delta)(\xi^{RO})^2)}{(\xi^{RO})^2(\xi^{RP})^2}$ 得 $\frac{\partial \pi_R^{RO}}{\partial t}$ 大于 $\frac{\partial \pi_R^{RP}}{\partial t}$ 的条件与 π_R^{RO} 大于 π_R^{RP} 的条件相同; $\frac{\partial CS^{RO}}{\partial \alpha} = \frac{\delta(1-\delta)\theta^2\Delta}{(\xi^{RO})^2} > 0$ 和 $\frac{\partial E^{RO}}{\partial \alpha} = \frac{\theta(e_r - \delta e_n)}{\xi^{RO}}$ 。得证。

附录 8. 五种非联盟-联盟模式求解过程

C 模式

将新产品和再制造品需求函数代入 C 模式供应链利润函数, 得到供应链关于 p_n 和 p_r 的目标函数。分别对目标函数求关于 p_n 和 p_r 的二次偏导, $\frac{\partial^2 \pi_{MRT}^C}{\partial p_n^2} = -\frac{2}{1-\delta} < 0$,

$$\frac{\partial^2 \pi_{MRT}^C}{\partial p_r \partial p_n} = \frac{2}{1-\delta} > 0, \quad \frac{\partial^2 \pi_{MRT}^C}{\partial p_r^2} = -\frac{2}{\delta(1-\delta)} < 0。海塞矩阵 \begin{vmatrix} \frac{\partial^2 \pi_{MRT}^C}{\partial q_n^2} & \frac{\partial^2 \pi_{MRT}^C}{\partial q_r \partial q_n} \\ \frac{\partial^2 \pi_{MRT}^C}{\partial q_r \partial q_n} & \frac{\partial^2 \pi_{MRT}^C}{\partial q_r^2} \end{vmatrix} = -\frac{4}{\delta(1-\delta)} 负定，$$

供应链存在利润最大值。联立 $\frac{\partial \pi_{MRT}^C}{\partial p_n} = 0$ 和 $\frac{\partial \pi_{MRT}^C}{\partial p_r} = 0$ 得到 $p_n^C = \frac{1}{2}(1+c_n+\rho\theta_R)$,

$$p_r^C = \frac{1}{2}(\delta+c_r-\theta_R)。代入需求函数得到 $q_n^C = \frac{m_n-m_r}{2(1-\delta)}$, $q_r^C = \frac{m_r-\delta m_n}{2\delta(1-\delta)}$ 。将 p_n^C , p_r^C , $q_n^C$$$

和 q_r^C 代入利润函数, 得到 C 模式下供应链利润为: $\pi_{MTR}^C = \frac{m_n^2}{4} + \frac{(m_r-\delta m_n)^2}{4(1-\delta)\delta}$ 。

D 模式

制造商作为供应链领导者优先决策新产品批发价格 w_n 和再制造授权费用 h , 然后再制造商和零售商根据制造商决策同时决策再制造品价格 p_r 和新产品价格 p_n 。由逆向归

纳法, 分别求解再制造商关于再制造品价格 p_r 二次倒数 $\frac{\partial^2 \pi_T^D}{\partial p_r^2} = -\frac{2}{(1-\delta)\delta} < 0$ 和零售商

关于新产品价格 p_n 二次倒数 $\frac{\partial^2 \pi_R^D}{\partial p_n^2} = -\frac{2}{1-\delta} < 0$ 。再制造商和制造商均存在最大利润。联

$$\text{立 } \frac{\partial \pi_T^D}{\partial p_r} = 0, \quad \frac{\partial \pi_R^D}{\partial p_n} = 0 \text{ 得到 } p_n^D = \frac{2+h-2\delta+c_r+2w_n}{4-\delta}, \quad p_r^D = \frac{2h+\delta-\delta^2+2c_r+\delta w_n}{4-\delta}, \text{ 代入}$$

$$\text{需求函数得到 } q_n^D = \frac{2+h-2\delta+c_r+(-2+\delta)w_n}{(-4+\delta)(-1+\delta)}, \quad q_r^D = \frac{h(-2+\delta)+\delta-\delta^2+(-2+\delta)c_r+\delta w_n}{(-4+\delta)(-1+\delta)\delta}。$$

将需求函数代入制造商利润函数, 得到制造商关于 w_n 和 h 的目标函数。分别求关于 w_n 和

$$h \text{ 的二次偏导数, 得到海塞矩阵 } \begin{vmatrix} \frac{\partial^2 \pi_M^D}{\partial w_n^2} & \frac{\partial^2 \pi_M^D}{\partial h \partial w_n} \\ \frac{\partial^2 \pi_M^D}{\partial h \partial w_n} & \frac{\partial^2 \pi_M^D}{\partial h^2} \end{vmatrix} = \frac{-4}{\delta(4-5\delta+\delta^2)} \text{ 负定。联立 } \frac{\partial \pi_M^D}{\partial w_n} = 0,$$

$$\frac{\partial \pi_M^D}{\partial h} = 0, \text{ 得到 } w_n^D = \frac{1}{2}(1+c_n+\rho\theta_R), \quad h^D = \frac{1}{2}(\delta-c_r-\theta_R)。回代得到: $p_n^D = 1 - \frac{2m_n+m_r}{8-2\delta},$$$

$$p_r^D = \delta - \frac{\delta m_n + 2m_r}{8-2\delta}, \quad q_n^D = \frac{(2-\delta)m_n - m_r}{2(4-\delta)(1-\delta)}, \quad q_r^D = \frac{(2-\delta)m_r - \delta m_n}{2(4-\delta)(1-\delta)\delta}。将上述变量代入制$$

造商、零售商和再制造商的利润函数，得到 $\pi_M^D = \frac{(1-\delta)(2\delta m_n^2 + m_r^2) + (m_r - \delta m_n)^2}{4(4-\delta)(1-\delta)\delta}$ ，

$$\pi_R^D = \frac{((2-\delta)m_n - m_r)^2}{4(4-\delta)^2(1-\delta)}, \quad \pi_T^D = \frac{((2-\delta)m_r - \delta m_n)^2}{4(4-\delta)^2(1-\delta)\delta}。$$

MR 模式

MR 联盟作为供应链领导者优先决策新产品零售价格 p_n 和授权费用 h ，然后再制造商决策再制造品零售价格 p_r 。将再制造品需求函数代入再制造商利润函数，得到关于 p_r

的目标函数。二次导数 $\frac{d^2\pi_T^{MR}}{dp_r^2} = \frac{-2}{\delta(1-\delta)}$ 为负，存在最大利润。求解 $\frac{d\pi_T^{MR}}{dp_r} = 0$ 得到

$$p_r^{MR} = \frac{1}{2}(h + c_r + \delta p_n)，将 p_r^{MR} 代入需求函数，然后再将需求函数代入 MR 联盟的利润函$$

数，得到目标函数。求目标函数关于 p_n 和 h 的二次偏导，得到海塞矩阵

$$\begin{vmatrix} \frac{\partial^2 \pi_{MR}^{MR}}{\partial p_n^2} & \frac{\partial^2 \pi_{MR}^{MR}}{\partial h \partial p_n} \\ \frac{\partial^2 \pi_{MR}^{MR}}{\partial h \partial p_n} & \frac{\partial^2 \pi_{MR}^{MR}}{\partial h^2} \end{vmatrix} = \frac{-1}{\delta(1-\delta)} 为负，存在最大化利润。联立 $\frac{\partial \pi_{MR}^{MR}}{\partial p_n} = 0$ ， $\frac{\partial \pi_{MR}^{MR}}{\partial h} = 0$ ，得到$$

$$p_n^{MR} = \frac{1}{2}(1 + c_n + \rho \theta_R)，h^{MR} = \frac{1}{2}(\delta - c_r - \theta_R)。回代得到 p_r^{MR} = \frac{1}{4}(2\delta + \delta c_n + c_r - (1-\delta\rho)\theta_R)，$$

$$q_n^{MR} = \frac{(2-\delta)m_n - m_r}{4(1-\delta)}，q_r^{MR} = \frac{m_r - \delta m_n}{4\delta(1-\delta)}。将上述变量代入 MR 联盟和再制造商利润函数，$$

$$得到 \pi_{MR}^{MR} = \frac{m_n^2}{4} + \frac{(m_r - \delta m_n)^2}{8(1-\delta)\delta}，\pi_T^{MR} = \frac{(m_r - \delta m_n)^2}{16(1-\delta)\delta}。$$

MT 模式

MT 联盟作为供应链领导者优先决策新产品批发价格 w_n 和再制造品零售价格 p_r ，然后零售商决策新产品零售价格 p_n 。将新产品需求函数代入零售商利润函数，得到关于 p_n

的目标函数。二次导数 $\frac{d^2\pi_R^{MT}}{dp_n^2} = \frac{-2}{1-\delta}$ 为负，存在最大利润。求解 $\frac{d\pi_R^{MT}}{dp_n} = 0$ 得到

$$p_n^{MT} = \frac{1}{2}(1 - \delta + p_r + w_n)，将 p_n^{MT} 代入需求函数，然后再将需求函数代入 MT 联盟的利润$$

函数，得到目标函数。求目标函数关于 w_n 和 p_r 的二次偏导，得到海塞矩阵

$$\left| \frac{\partial^2 \pi_{MT}^{MT}}{\partial w_n^2} \frac{\partial^2 \pi_{MT}^{MT}}{\partial p_r \partial w_n} \right| = \frac{-2}{\delta(1-\delta)} \text{ 为负, 存在最大化利润。联立 } \frac{\partial \pi_{MT}^{MT}}{\partial p_r} = 0, \quad \frac{\partial \pi_{MT}^{MT}}{\partial w_n} = 0, \text{ 得到}$$

$$w_n^{MT} = \frac{1}{2}(1 + c_n + \rho\theta_R), \quad p_r^{MT} = \frac{1}{2}(\delta + c_r - \theta_R)。回代得到 p_n^{MT} = \frac{1}{4}(3 - \delta + c_n + c_r - (1 - \rho)\theta_R),$$

$$q_n^{MT} = \frac{m_n - m_r}{4(1-\delta)}, \quad q_r^{MT} = \frac{(2-\delta)m_r - \delta m_n}{4(1-\delta)\delta}。将上述变量代入 MT 联盟和再制造商利润函数,$$

$$\text{得到 } \pi_{MT}^{MT} = \frac{(m_n - m_r)^2}{8(1-\delta)} + \frac{(m_r)^2}{4\delta}, \quad \pi_R^{MT} = \frac{(m_n - m_r)^2}{16(1-\delta)}。$$

RT 模式

制造商优先决策新产品批发价格 w_n 和再制造品授权费用 h , 然后 RT 联盟决策新产品和再制造品零售价格 p_n 和 p_r 。将需求函数代入 RT 联盟利润函数, 得到目标函数。分

$$\text{别求解关于 } p_n \text{ 和 } p_r \text{ 的二次偏导, 得到海塞矩阵 } \left| \frac{\partial^2 \pi_{RT}^{RT}}{\partial p_n^2} \frac{\partial^2 \pi_{RT}^{RT}}{\partial p_r \partial p_n} \right| = \frac{-4}{\delta(1-\delta)} \text{ 为负, 目标函数}$$

$$\text{存在最大化利润。联立 } \frac{\partial \pi_{RT}^{RT}}{\partial p_n} = 0, \quad \frac{\partial \pi_{RT}^{RT}}{\partial p_r} = 0 \text{ 得到 } p_n^{RT} = \frac{1}{2}(1 + w_n), \quad p_r^{RT} = \frac{1}{2}(h + \delta + c_r)。$$

代入需求函数, 然后再代入制造商利润函数, 得到目标函数。分别求解关于 w_n 和 h 的二

$$\text{次偏导, 得到海塞矩阵 } \left| \frac{\partial^2 \pi_M^{RT}}{\partial w_n^2} \frac{\partial^2 \pi_M^{RT}}{\partial h \partial w_n} \right| = \frac{-1}{\delta(1-\delta)} \text{ 为负, 目标函数存在最大化利润。联立}$$

$$\frac{\partial \pi_M^{RT}}{\partial w_n} = 0, \quad \frac{\partial \pi_M^{RT}}{\partial h} = 0 \text{ 得到 } w_n^{RT} = \frac{1}{2}(1 + c_n + \rho\theta_R), \quad h^{RT} = \frac{1}{2}(\delta - c_r - \theta_R)。回代得到$$

$$p_n^{RT} = \frac{1}{4}(3 + c_n + \rho\theta_R), \quad p_r^{RT} = \frac{1}{4}(3\delta + c_r - \theta_R), \quad q_n^{RT} = \frac{m_n - m_r}{4(1-\delta)}, \quad q_r^{RT} = \frac{m_r - \delta m_n}{4\delta(1-\delta)}。将上述$$

变量代入制造商和 RT 联盟的利润函数，得到 $\pi_M^{RT} = \frac{(m_n - m_r)^2}{8(1-\delta)} + \frac{m_r^2}{8\delta}$ ，

$$\pi_{RT}^{RT} = \frac{(m_n - m_r)^2}{16(1-\delta)} + \frac{m_r^2}{16\delta}。$$

附录 9. 结论 4.7 证明过程

由 $q_n^{D*} > 0$ 和 $q_r^{D*} > 0$ 得到 $\frac{\delta}{2-\delta} < k < 2-\delta$ ；由 $q_n^{C*} > 0$ 和 $q_r^{C*} > 0$ 得到 $\delta < k < 1$ ；由 $q_n^{MR*} > 0$ 和 $q_r^{MR*} > 0$ 得到 $\delta < k < 2-\delta$ ；由 $q_n^{MT*} > 0$ 和 $q_r^{MT*} > 0$ 得到 $\frac{\delta}{2-\delta} < k < 1$ ；由 $q_n^{RT*} > 0$ 和 $q_r^{RT*} > 0$ 得到 $\delta < k < 1$ ，得证。

附录 10. 结论 4.8 证明过程

由结论 4.7 知 $\delta < k < 1$ ， $p_n^{RT*} - p_n^{D*} = \frac{2m_r + \delta m_n}{4(4-\delta)} > 0$ 、 $p_n^{D*} - p_n^{MT*} = \frac{(2-\delta)m_r - \delta m_n}{4(4-\delta)} > 0$ 、
 $p_n^{MT*} - p_n^{C*} = \frac{m_n - m_r}{4} > 0$ 、 $p_n^{C*} = p_n^{MR*}$ ； $p_r^{RT*} - p_r^{D*} = \frac{2\delta m_n + m_r}{4(4-\delta)} > 0$ 、
 $p_r^{D*} - p_r^{MR*} = \frac{(2\delta - \delta^2)m_n - \delta m_r}{4(4-\delta)}$ 、 $p_r^{MR*} - p_r^{C*} = \frac{m_r - \delta m_n}{4} > 0$ 、 $p_r^{C*} = p_r^{MT*}$ ；得证。

附录 11. 结论 4.9 证明过程

由结论 4.7 知 $\delta < k < 1$ ， $q_n^{MR*} - q_n^{C*} = \frac{m_r - \delta m_n}{4(1-\delta)} > 0$ 、 $q_n^{C*} - q_n^{D*} = \frac{2m_n - (3-\delta)m_r}{2(4-\delta)(1-\delta)}$
 ($\delta < k \leq \frac{2}{3-\delta}$ 则 $\frac{2m_n - (3-\delta)m_r}{2(4-\delta)(1-\delta)} > 0$ ， $\frac{2}{3-\delta} < k < 1$ 则 $\frac{2m_n - (3-\delta)m_r}{2(4-\delta)(1-\delta)} < 0$)、
 $q_n^{D*} - q_n^{MT*} = \frac{(2-\delta)m_r - \delta m_n}{4(4-\delta)(1-\delta)} > 0$ 、 $q_n^{C*} - q_n^{MT*} = \frac{m_n - m_r}{4(1-\delta)} > 0$ ； $q_r^{MT*} - q_r^{C*} = \frac{\delta m_n - \delta m_r}{4\delta(1-\delta)} > 0$ 、
 $q_r^{C*} - q_r^{D*} = \frac{2m_r - \delta(3-\delta)m_n}{2\delta(4-\delta)(1-\delta)}$ ($\delta < k \leq \frac{\delta(3-\delta)}{2}$ 则 $\frac{2m_r - \delta(3-\delta)m_n}{2\delta(4-\delta)(1-\delta)} < 0$ ， $\frac{\delta(3-\delta)}{2} < k < 1$ 则

$$\frac{2m_r - \delta(3-\delta)m_n}{2\delta(4-\delta)(1-\delta)} > 0 \text{)、 } q_r^{C^*} - q_r^{MR^*} = \frac{m_r - \delta m_n}{4\delta(1-\delta)} > 0 \text{ 、 } q_r^{D^*} - q_r^{MR^*} = \frac{\delta(2-\delta)m_n - \delta m_r}{4\delta(4-\delta)(1-\delta)} > 0 \text{ , 得}$$

证。

附录 12. 结论 4.10 证明过程

$$\text{因为 } \delta < k < 1 \text{ , 所以 } \pi_{MRT}^C - \pi_{MRT}^D = \frac{m_n^2((k^2 + \delta - 2k\delta)(4 + \delta - \delta^2) - 4k\delta(2 - 3\delta + \delta^2))}{4\delta(1-\delta)(4-\delta)^2} > 0 \text{ ,}$$

$$\pi_{MRT}^C - \pi_{MRT}^{MR} = \frac{(k-\delta)^2 m_n^2}{16\delta(1-\delta)} > 0 \quad , \quad \pi_{MRT}^C - \pi_{MRT}^{MT} = \frac{(1-k)^2 m_n^2}{16(1-\delta)} > 0 \quad ,$$

$$\pi_{MRT}^C - \pi_{MRT}^{RT} = \frac{(k^2 + \delta - 2k\delta)m_n^2}{16\delta(1-\delta)} > 0 \text{ ;}$$

$$\xi_{MR}^{MR} - \xi_M^D - \xi_R^D = \frac{\delta(2-\delta)(k+\delta-2)^2}{2(4-\delta)^2(k^2 - 2k\delta + \delta)} > 0 \quad ,$$

$$\xi_T^{MR} - \xi_T^D = \frac{\delta(-2+k+\delta)(8k-3(2+k)\delta+\delta^2)}{4(4-\delta)^2(k^2 - 2k\delta + \delta)} < 0 \quad ;$$

$$\xi_{RT}^{RT} - \xi_R^D - \xi_T^D = \frac{\delta((k^2 - 2k\delta + \delta)\delta + (k^2 + \delta)(4 - 4\delta))}{4(4-\delta)^2(k^2 - 2k\delta + \delta)} > 0 \quad ,$$

$$\xi_M^{RT} - \xi_M^D = \frac{\delta(\delta + k(k + 2\delta - 4))}{2(4-\delta)(k^2 - 2k\delta + \delta)} < 0 \quad ; \quad \xi_{MT}^{MT} - \xi_M^D - \xi_T^D = \frac{(2-\delta)(k(\delta-2) + \delta)^2}{2(4-\delta)^2(k^2 - 2k\delta + \delta)} > 0 \quad ,$$

$$\xi_R^{MT} - \xi_R^D = \frac{\delta k^2(12 - 8\delta + \delta^2) - \delta k(16 - 8\delta + 2\delta^2) + 8\delta^2 - 3\delta^3}{4(4-\delta)^2(k^2 - 2k\delta + \delta)} < 0 \text{ ; 得证。}$$

附录 13. 结论 4.11 证明过程

$$E^D = \frac{\delta e_n((2-\delta)m_n - m_r) + e_r((2-\delta)m_r - \delta m_n)}{2\delta(4-\delta)(1-\delta)} \text{ , } E^C = \frac{\delta e_n(m_n - m_r) + e_r(m_r - \delta m_n)}{2\delta(1-\delta)} \text{ ,}$$

$$E^{MR} = \frac{\delta e_n((2-\delta)m_n - m_r) + e_r(m_r - \delta m_n)}{4\delta(1-\delta)} \text{ , } E^{MT} = \frac{\delta e_n(m_n - m_r) + e_r((2-\delta)m_r - \delta m_n)}{4\delta(1-\delta)} \text{ ,}$$

$$E^{RT} = \frac{\delta e_n(m_n - m_r) + e_r(m_r - \delta m_n)}{4\delta(1-\delta)} \text{ , } E^{MR} - E^C = \frac{(\delta e_n - e_r)(m_r - \delta m_n)}{4\delta(1-\delta)} \text{ , } \delta e_n - e_r > 0 \text{ ,}$$

$$E^{MR} > E^C, \delta e_n - e_r < 0, E^{MR} < E^C, E^{MR} - E^{MT} = \frac{m_n(\delta e_n - ke_r)}{4\delta}, ke_r < \delta e_n < e_r, E^{MR} > E^{MT},$$

$$\delta e_n < ke_r, \quad E^{MR} < E^{MT}, \quad E^{MR} - E^D = \frac{((2-\delta)e_n - e_r)(m_r - (2-\delta)m_n)}{4(4-\delta)(1-\delta)} < 0,$$

$$E^C - E^{MT} = \frac{(e_n - e_r)(m_n - m_r)}{4\delta(1-\delta)} > 0, \quad E^{MT} - E^{RT} = \frac{e_r m_r}{4\delta} > 0,$$

$$E^D - E^{RT} = \frac{e_r((2-\delta)m_n - m_r) + e_n((2-\delta)m_r - \delta m_n)}{4(4-\delta)(1-\delta)} > 0,$$

$$E^D - E^{MT} = \frac{(\delta e_n - (2-\delta)e_r)((2-\delta)m_r - \delta m_n)}{4\delta(4-\delta)(1-\delta)},$$

$$E^D - E^C = \frac{e_r((3-\delta)\delta m_n - 2m_r) + \delta e_n((3-\delta)m_r - 2m_n)}{2\delta(4-\delta)(1-\delta)}, \text{ 得证。}$$

附录 14. 结论 4.13 证明过程

$$\begin{aligned} \frac{\partial p_n^{D*}}{\partial \rho} &= \frac{\theta_R}{4-\delta}, \quad \frac{\partial p_n^{C*}}{\partial \rho} = \frac{\theta_R}{2}, \quad \frac{\partial p_n^{MR*}}{\partial \rho} = \frac{\theta_R}{2}, \quad \frac{\partial p_n^{MT*}}{\partial \rho} = \frac{\theta_R}{4}, \quad \frac{\partial p_n^{RT*}}{\partial \rho} = \frac{\theta_R}{4}, \quad \frac{\partial p_n^{D*}}{\partial \theta_R} = \frac{2\rho-1}{2(4-\delta)}, \\ \frac{\partial p_n^{C*}}{\partial \theta_R} &= \frac{\rho}{2}, \quad \frac{\partial p_n^{MR*}}{\partial \theta_R} = \frac{\rho}{2}, \quad \frac{\partial p_n^{MT*}}{\partial \theta_R} = \frac{\rho-1}{4}, \quad \frac{\partial p_n^{RT*}}{\partial \theta_R} = \frac{\rho}{4}, \quad \frac{\partial p_r^{D*}}{\partial \rho} = \frac{\delta\theta_R}{2(4-\delta)}, \quad \frac{\partial p_r^{C*}}{\partial \rho} = 0, \quad \frac{\partial p_r^{MR*}}{\partial \rho} = \frac{\delta\theta_R}{4}, \\ \frac{\partial p_r^{MT*}}{\partial \rho} &= 0, \quad \frac{\partial p_r^{RT*}}{\partial \rho} = 0; \quad \frac{\partial p_r^{D*}}{\partial \theta_R} = \frac{\delta\rho-2}{2(4-\delta)}, \quad \frac{\partial p_r^{C*}}{\partial \theta_R} = -\frac{1}{2}, \quad \frac{\partial p_r^{MR*}}{\partial \theta_R} = -\frac{1-\delta\rho}{4}, \quad \frac{\partial p_r^{MT*}}{\partial \theta_R} = -\frac{1}{2}, \\ \frac{\partial p_r^{RT*}}{\partial \theta_R} &= -\frac{1}{4}; \text{ 得证。} \end{aligned}$$

附录 15. 结论 4.14 证明过程

$$\begin{aligned} \frac{\partial q_n^{D*}}{\partial \rho} &= \frac{-(2-\delta)\theta_R}{2(4-\delta)(1-\delta)}, \quad \frac{\partial q_n^{C*}}{\partial \rho} = \frac{-\theta_R}{2(1-\delta)}, \quad \frac{\partial q_n^{MR*}}{\partial \rho} = \frac{-(2-\delta)\theta_R}{4(1-\delta)}, \quad \frac{\partial q_n^{MT*}}{\partial \rho} = \frac{-\theta_R}{4(1-\delta)}, \\ \frac{\partial q_n^{RT*}}{\partial \rho} &= \frac{-\theta_R}{4(1-\delta)}, \quad \frac{\partial q_n^{D*}}{\partial \theta_R} = \frac{-1-(2-\delta)\rho}{2(4-\delta)(1-\delta)}, \quad \frac{\partial q_n^{C*}}{\partial \theta_R} = \frac{-1-\rho}{2(1-\delta)}, \quad \frac{\partial q_n^{MR*}}{\partial \theta_R} = -\frac{1+(2-\delta)\rho}{4(1-\delta)}, \\ \frac{\partial q_n^{MT*}}{\partial \theta_R} &= \frac{-1-\rho}{4(1-\delta)}, \quad \frac{\partial q_n^{RT*}}{\partial \theta_R} = \frac{-1-\rho}{4(1-\delta)}; \quad \frac{\partial q_r^{D*}}{\partial \rho} = \frac{\theta_R}{2(4-\delta)(1-\delta)}, \quad \frac{\partial q_r^{C*}}{\partial \rho} = \frac{\theta_R}{2(1-\delta)}, \end{aligned}$$

$$\frac{\partial q_r^{MR*}}{\partial \rho} = \frac{\theta_R}{4(1-\delta)}, \quad \frac{\partial q_r^{MT*}}{\partial \rho} = \frac{\theta_R}{4(1-\delta)}, \quad \frac{\partial q_r^{RT*}}{\partial \rho} = \frac{\theta_R}{4(1-\delta)}, \quad \frac{\partial q_r^{D*}}{\partial \theta_R} = \frac{2-\delta(1-\rho)}{2\delta(4-\delta)(1-\delta)},$$

$$\frac{\partial q_r^{C*}}{\partial \theta_R} = \frac{1+\delta\rho}{2\delta(1-\delta)}, \quad \frac{\partial q_r^{MR*}}{\partial \theta_R} = \frac{1+\delta\rho}{4\delta(1-\delta)}, \quad \frac{\partial q_r^{MT*}}{\partial \theta_R} = \frac{2-\delta+\delta\rho}{4\delta(1-\delta)}, \quad \frac{\partial q_r^{RT*}}{\partial \theta_R} = \frac{1+\delta\rho}{4\delta(1-\delta)}, \text{ 得证。}$$

附录 16. 结论 4.15 证明过程

因 为 $\delta < k < 1$, 所 以 $\frac{\partial \pi_M^D}{\partial \rho} = \frac{-\theta_R((2-\delta)m_n - m_r)}{2(4-\delta)^2(1-\delta)} < 0$,

$$\frac{\partial \pi_T^D}{\partial \rho} = \frac{-(1-\delta)\theta_R((2-\delta)m_n - m_r)}{2(4-\delta)^2(1-\delta)} < 0, \quad \frac{\partial \pi_T^D}{\partial \rho} = \frac{\theta_R((2-\delta)m_r - \delta m_n)}{2(4-\delta)^2(1-\delta)} > 0,$$

$$\frac{\partial \pi_{MRT}^C}{\partial \rho} = \frac{\theta_R(m_r - m_n)}{2(1-\delta)} < 0, \quad \frac{\partial \pi_{MR}^{MR}}{\partial \rho} = \frac{-\theta_R((2-\delta)m_n - m_r)}{4(1-\delta)} < 0, \quad \frac{\partial \pi_T^{MR}}{\partial \rho} = \frac{\theta_R(m_r - \delta m_n)}{8(1-\delta)} > 0,$$

$$\frac{\partial \pi_{MT}^{MT}}{\partial \rho} = \frac{\theta_R(m_r - m_n)}{4(1-\delta)} < 0, \quad \frac{\partial \pi_R^{MT}}{\partial \rho} = \frac{\theta_R(m_r - m_n)}{8(1-\delta)} < 0, \quad \frac{\partial \pi_M^{RT}}{\partial \rho} = \frac{\theta_R(m_r - m_n)}{4(1-\delta)} < 0,$$

$$\frac{\partial \pi_{RT}^{RT}}{\partial \rho} = \frac{\theta_R(m_r - m_n)}{8(1-\delta)} < 0, \quad \text{得证 (1)}; \quad \frac{\partial \pi_R^D}{\partial \theta_R} = \frac{-(1+(2-\delta)\rho)((2-\delta)m_n - m_r)}{2(4-\delta)^2(1-\delta)} < 0,$$

$$\frac{\partial \pi_T^D}{\partial \theta_R} = \frac{(2-\delta)m_r - \delta m_n}{2\delta(4-\delta)^2(1-\delta)} > 0, \quad \frac{\partial \pi_T^{MR}}{\partial \theta_R} = \frac{(1+\delta\rho)(m_r - \delta m_n)}{8\delta(1-\delta)} > 0, \quad \frac{\partial \pi_R^{MT}}{\partial \theta_R} = \frac{(1+\rho)(m_r - m_n)}{8(1-\delta)} < 0,$$

$$\text{得证(2); } \rho \leq \frac{k(2-\delta)-\delta}{\delta(2-k-\delta)}, \frac{\partial \pi_M^{D*}}{\partial \theta_R} \geq 0; \rho > \frac{k(2-\delta)-\delta}{\delta(2-k-\delta)}, \frac{\partial \pi_M^{D*}}{\partial \theta_R} < 0; \rho \leq \frac{k-\delta}{\delta-k\delta}, \frac{\partial \pi_{MRT}^{C*}}{\partial \theta_R} \geq 0;$$

$$\rho > \frac{k-\delta}{\delta-k\delta}, \frac{\partial \pi_{MRT}^{C*}}{\partial \theta_R} < 0; \rho \leq \frac{k-\delta}{\delta(2-k-\delta)}, \frac{\partial \pi_{MR}^{MR*}}{\partial \theta_R} \geq 0; \rho > \frac{k-\delta}{\delta(2-k-\delta)}, \frac{\partial \pi_{MR}^{MR*}}{\partial \theta_R} < 0;$$

$$\rho \leq \frac{k(2-\delta)-\delta}{\delta(1-k)}, \frac{\partial \pi_{MT}^{MT*}}{\partial \theta_R} \geq 0; \rho > \frac{k(2-\delta)-\delta}{\delta(1-k)}, \frac{\partial \pi_{MT}^{MT*}}{\partial \theta_R} < 0; \rho \leq \frac{k-\delta}{\delta-k\delta}, \frac{\partial \pi_M^{RT*}}{\partial \theta_R} \geq 0,$$

$$\frac{\partial \pi_{RT}^{RT*}}{\partial \theta_R} \geq 0; \rho > \frac{k-\delta}{\delta-k\delta}, \frac{\partial \pi_M^{RT*}}{\partial \theta_R} < 0, \frac{\partial \pi_{RT}^{RT*}}{\partial \theta_R} < 0; \text{得证(3)}。$$

攻读硕士学位期间发表或录用的学术论文与参与的科研项目经历

论文成果

- [1] 刘志, 明晨宇, 龚本刚, 等. 不同回收和转移模式下再制造供应链生产决策研究[J]. 计算机集成制造系统, 2024, 30(1), 329-343.
- [2] 刘志, 明晨宇, 郑小雪, 等. “强制+自愿”机制下碳互补供应链合作模式选择与收益分配研究[J]. 系统工程理论与实践, 退修中.

科研项目经历

- [1] 国家社会科学基金一般项目《“双碳”目标下供应链数字化减排的合作行为与引导机制研究》(项目编号: 23BGL136, 参与)

致 谢

时光如白驹过隙，三年过往如同昨日一般历历在目，却已然到了毕业的时候。回顾以往，思绪万千。从面对科研问题的茫然无措到能够独立思考问题，从分析事物关系的不知就里到能够逻辑清晰的论证说明联系，从处理事务的手忙脚乱到能够井井有条的完成任务，三年期间，我学习了很多，成长了很多。在临近毕业之际，我首先衷心的感谢我的导师刘志老师，刘老师严谨周密的治学态度、格物致知的求知精神、逻辑严密的论证分析、低调谦逊的工作作风是引领我在校学习和未来工作中不懈努力、不断进步的灯塔。在读期间，刘老师不仅是严师，对我的论文写作提出高要求，提升了我的逻辑思维和写作表达能力；更是益友，关心我在校生活，教导我为人处世要低调谦卑，关心我的就业问题，与我规划未来职业方向。刘老师的关心和教导使我生活充实，受益良多。我还要感谢唐娟老师、郑小雪老师对我研究方法和论文写作上的指导，感谢张智超老师在组会分享论文，使我开拓视角，感谢经济与管理学院所有给予我指导的老师，祝愿老师们成果斐然，顺心如意！

此外，师姐王慧、高一凌、宋安林、张怀苗，师兄朱时范、万名冬给予了刚踏上科研道路上的我极大的帮助和支持，祝愿他（她）们学业有成、事业丰收！感谢同门计冠群、唐文慧、孟旭与我三年共勉，共同努力，祝愿他（她）们工作顺利、前程似锦！感谢正在漫漫求学路上师妹任佳宝、杨倩、苏丹丹、刘欣研、丁吴燕、李新星、叶莉、林梦晨，师弟申子辰、陈奎与我交流学习，共同进步，祝愿他（她）青出于蓝，展翅高飞！感谢所有 813 同学们，祝愿大家以梦为马，不负韶华。

最后，对辛勤、认真的评阅专家表示无限的谢意！

明 晨 宇

2024 年 4 月于芜湖