

分类号: F272

密 级: 公开

学校代码: 10363

学 号: 2220720118



安徽工程大学

Anhui Polytechnic University

# 硕士学位论文

题 目 政府补贴政策下新能源汽车供应链  
以旧换新策略与定价决策研究

论 文 作 者 申子辰

指 导 教 师 唐娟 副教授

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: 2025 年 5 月 14 日

分类号: F272

单位代码: 10363

密 级: 公开

学 号: 2220720118

题 目 政府补贴政策下新能源汽车供应链以旧换新策略与定价  
决策研究

英文并列

题 目 Research on Trade-in and Pricing Decision in the New  
Energy Vehicle Supply Chain under Government Subsidy  
Policies

学生姓名: 申子辰

指导教师: 唐娟 副教授

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: 2025 年 5 月 14 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：申子辰

日期：2025 年 5 月 14 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或部分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：

申子辰

日期：2025 年 5 月 14 日

指导教师签名：

唐娟

日期：2025 年 5 月 14 日

# 政府补贴政策下新能源汽车供应链以旧换新策略与定价决策研究

## 摘 要

在当今全球范围内，绿色可持续发展已成为重塑产业格局的核心战略。汽车产业作为国民经济的重要支柱产业，在消费端面临着绿色转型的双重挑战：既要满足市场需求，又要遵循低碳发展路径。在此背景下，企业“以旧换新”策略成为推动汽车产业绿色转型的重要举措之一；各国政府也通过补贴支持以旧换新在该行业的广泛运用。为了进一步支持新能源汽车(New energy vehicle, NEV)消费和推动汽车产业绿色转型，政府的补贴已从单补贴政策（仅对老顾客置换 NEV 提供补贴）逐步扩展至双补贴政策（对老顾客置换 NEV 或燃油车均提供补贴），以鼓励更广泛的消费者参与和产业升级。

作为 NEV 的核心部件，寿命有限的动力蓄电池已进入了大规模退役阶段，为推动动力蓄电池的回收再利用，NEV 生产企业可通过提供动力蓄电池以旧换新服务或者整车以旧换新服务加以实现。此外，为了加速汽车市场的绿色化转型进程，NEV 企业还推出了多样化的整车以旧换新服务，如以旧 NEV 换新 NEV 服务、以旧燃油车换新燃油车服务和以旧燃油车换 NEV 服务，以鼓励消费者更换 NEV 或排放量更低的新燃油车。

本文综合考虑了 NEV 企业以旧换新策略的多样性以及政府补贴政策演变的现实背景。首先，在政府单补贴政策的背景下，分别考虑 NEV 部件（动力蓄电池）和整车以旧换新策略下 NEV 企业定价决策，并探讨补贴政策对企业以旧换新策略的影响。其次，针对实践中 NEV 企业更灵活的整车以旧换新服务策略和政府以旧换新补贴的变化，分析政府不同补贴政策下 NEV 制造商的最优以旧换新策略及定价决策。最后，探究政府补贴政策演变与企业以旧换新策略间的关系。本文的主要研究结论概括如下：

首先，当 NEV 企业提供部件和整车以旧换新服务时，企业的以旧换新策略需要考虑旧车耐用性。仅当旧车耐用性较低时，整车以旧换新策略能最大化制造商和零售商利润。另外，NEV 及电池的定价决策与制造商的以旧换新策略、旧电池容量消耗和 NEV 生产成本有关。最后，政府补贴的增加虽然能提升供应链成员的利润，但过高的补贴不利于社会总福利的提升，且补贴力度的增加并不总对所有消费者有利。

其次，在政府不同的补贴政策下，NEV 企业的以旧换新策略需考虑政府对老顾客置换 NEV 补贴力度的影响。在政府单补贴（双补贴）政策下，当政府对老顾客置换 NEV 的补贴力度较低时（政府对老顾客置换 NEV 和燃油车的补贴差额较小即补贴政策差异不明显时），制造商应提供全面置换服务；当政府对老顾客置换 NEV 的补贴力度较高时（补贴政策差异较大时），则应提供双向置换服务。其次，制造商以旧换新策略和政府补贴政策交互影响着 NEV 企业的最

优产品定价决策。最后，政府提高对老顾客置换 NEV 的补贴力度（补贴政策差异的增大且偏向于 NEV）能显著提高新车销量、供应链总利润和消费者剩余，而并不总是有利于社会总福利水平的提升。

最后，当政府单补贴政策演变为双补贴政策时，若制造商提供单一置换服务或双向置换服务，政府补贴政策的变化对制造商以旧换新策略下的定价决策和销量没有影响；但是，当制造商提供定向置换服务和全面置换服务时，其对刺激汽车市场需求和提升社会总福利方面有明显作用，但是否能提升消费者剩余和供应链成员利润与制造商的以旧换新策略和政府补贴政策的差异有关。

**关键词：**新能源汽车供应链，政府补贴，以旧换新，定价决策，博弈论

# RESEARCH ON TRADE-IN AND PRICING DECISION IN THE NEW ENERGY VEHICLE SUPPLY CHAIN UNDER GOVERNMENT SUBSIDY POLICIES

## ABSTRACT

In today's global context, green and sustainable development has become a core strategy for reshaping the industrial landscape. As an important pillar industry of the national economy, the automobile industry is facing the dual challenge of green transformation on the consumer side: meeting market demand and following a low-carbon development path. In this context, the “trade-in” strategy has become one of the most important measures to promote the green transformation of the automotive industry; governments have also supported the widespread use of trade-in through subsidies. In order to further support the consumption of new energy vehicles (NEVs) and promote the green transformation of the automotive industry, government subsidies have

been gradually expanded from a single-subsidy policy (only subsidizing the replacement of NEVs by old customers) to a dual-subsidy policy (subsidizing the replacement of NEVs or fuel vehicles by old customers), so as to encourage wider consumer participation and industrial upgrading.

As the core component of NEVs, the limited-life power battery has entered the stage of large-scale decommissioning. In order to promote the recycling and reuse of power batteries, NEV manufacturers can realize it by providing power battery trade-in services or vehicle trade-in services. In addition, in order to accelerate the green transformation process of the automobile market, NEV enterprises have also launched diversified vehicle trade-in services, such as the trade-in of old NEVs for new NEVs service, the trade-in of old fuel vehicles for new fuel vehicles service, and the trade-in of old fuel vehicles for NEVs service, in order to encourage consumers to replace their NEVs or new fuel vehicles with lower emissions.

This paper comprehensively considers the diversity of NEV enterprises' trade-in strategies and the realistic background of the evolution of government subsidy policy. First, in the context of the government's single-subsidy policy, it considers the pricing decisions of NEV enterprises under the NEV component (power battery) and whole-vehicle trade-in strategies respectively, and explores the impact of the subsidy policy on the enterprises' trade-in strategies. Second, the optimal

trade-in strategies and pricing decisions of NEV manufacturers under different government subsidy policies are analyzed with respect to the more flexible whole-vehicle trade-in service strategies of NEV enterprises and the changes in government trade-in subsidies in practice. Finally, the relationship between the evolution of government subsidy policies and the trade-in strategies of enterprises is explored. The main findings of this paper are summarized as follows:

First, when NEV firms offer parts and whole-vehicle trade-ins, the firm's trade-in strategy needs to consider the durability of the old vehicle. The whole vehicle trade-in strategy maximizes manufacturer and retailer profits only when the old vehicle durability is low. In addition, the pricing decision of NEVs and batteries is related to the manufacturer's trade-in strategy, the consumption of old battery capacity, and the production cost of NEVs. Finally, while an increase in government subsidies can enhance the profits of supply chain members, excessive subsidies are detrimental to total social welfare, and an increase in subsidies is not always beneficial to all consumers.

Second, under different government subsidy policies, the trade-in strategy of NEV enterprises needs to take into account the impact of government subsidy on the replacement of NEVs by old customers. Under the government's single-subsidy (double-subsidy) policy, when the government's subsidy for the replacement of NEVs by old customers is

low (when the difference between the government's subsidy for the replacement of NEVs by old customers and the subsidy for fuel vehicles is small, i.e., the difference between the subsidy policies is not obvious), the manufacturer should provide full replacement services; when the government's subsidy for the replacement of NEVs by old customers is high (when the difference between the subsidy policies is large), the manufacturer should provide two-way replacement services. Second, the manufacturer's trade-in strategy and the government's subsidy policy interact to influence the optimal product pricing decision of NEV firms. Finally, a higher government subsidy for NEV replacement by existing customers (with a larger difference in subsidy policies and in favor of NEVs) significantly increases new car sales, total supply chain profits, and consumer surplus, while not always contributing to the increase in the level of total social welfare.

Finally, when the government's single-subsidy policy evolves into a dual-subsidy policy, the change in the government's subsidy policy has no effect on the pricing decision and sales volume under the manufacturer's trade-in strategy if the manufacturer provides a single replacement service or a two-way replacement service; however, when the manufacturer provides a directional replacement service and a full replacement service, it has a significant effect in terms of stimulating the demand for automobiles in the automobile market and enhancing the total

welfare of the society, but whether or not it can improve the consumer surplus and supply chain members' profits is associated with differences in manufacturers' trade-in strategies and government subsidy policies.

Author: Zichen Shen (Management science and engineering)

Supervised by: Professor Juan Tang

KEY WORDS: new energy vehicle supply chain, government subsidies, trade-in, pricing decision, game theory

## 目 录

|                                             |    |
|---------------------------------------------|----|
| 摘 要.....                                    | I  |
| ABSTRACT.....                               | IV |
| 目 录.....                                    | IX |
| 第 1 章 绪 论.....                              | 1  |
| 1.1 研究背景及意义.....                            | 1  |
| 1.1.1 研究背景.....                             | 1  |
| 1.1.2 研究意义.....                             | 3  |
| 1.2 研究内容和创新点.....                           | 4  |
| 1.2.1 研究内容.....                             | 4  |
| 1.2.2 创新点.....                              | 6  |
| 1.3 研究方法和技术路线.....                          | 6  |
| 1.3.1 研究方法.....                             | 6  |
| 1.3.2 技术路线.....                             | 7  |
| 第 2 章 文献综述.....                             | 9  |
| 2.1 以旧换新背景下企业定价决策研究.....                    | 9  |
| 2.2 企业以旧换新策略研究.....                         | 10 |
| 2.3 以旧换新补贴设计及影响研究.....                      | 11 |
| 2.4 文献评述.....                               | 13 |
| 第 3 章 政府单补贴政策下 NEV 供应链整部件以旧换新策略及定价决策研究...14 |    |
| 3.1 问题描述与相关假设.....                          | 14 |
| 3.1.1 问题描述.....                             | 14 |
| 3.1.2 相关假设与需求函数.....                        | 16 |
| 3.2 模型建立与求解.....                            | 19 |
| 3.2.1 无以旧换新服务模型— $N$ .....                  | 19 |
| 3.2.2 电池以旧换新服务模型— $B$ .....                 | 20 |
| 3.2.3 整车以旧换新服务模型— $I$ .....                 | 21 |

|                                            |    |
|--------------------------------------------|----|
| 3.3 均衡结果分析.....                            | 22 |
| 3.3.1 以旧换新策略的影响分析.....                     | 22 |
| 3.3.2 关键参数影响分析.....                        | 23 |
| 3.4 数值仿真.....                              | 26 |
| 3.4.1 耐用性与以旧换新策略对利润与顾客需求的影响.....           | 27 |
| 3.4.2 耐用性与以旧换新策略对消费者剩余与社会福利的影响.....        | 30 |
| 3.4.3 政府补贴政策的影响.....                       | 32 |
| 3.5 本章小结.....                              | 33 |
| 第 4 章 政府单补贴政策下 NEV 供应链整车以旧换新策略及定价决策研究..... | 35 |
| 4.1 问题描述与相关假设.....                         | 35 |
| 4.1.1 问题描述.....                            | 35 |
| 4.1.2 相关假设与需求函数.....                       | 37 |
| 4.2 模型建立与求解.....                           | 41 |
| 4.2.1 单一置换服务模型— $NE$ .....                 | 41 |
| 4.2.2 定向置换服务模型— $FE$ .....                 | 42 |
| 4.2.3 双向置换服务模型— $EE$ .....                 | 43 |
| 4.2.4 全面置换服务模型— $DE$ .....                 | 44 |
| 4.3 均衡结果分析.....                            | 46 |
| 4.3.1 以旧换新策略的影响分析.....                     | 46 |
| 4.3.2 关键参数影响分析.....                        | 47 |
| 4.4 数值仿真.....                              | 51 |
| 4.4.1 政府补贴与以旧换新策略对总需求和总利润的影响.....          | 51 |
| 4.4.2 政府补贴与以旧换新策略对社会总福利和消费者剩余的影响.....      | 53 |
| 4.5 本章小结.....                              | 55 |
| 第 5 章 政府双补贴政策下 NEV 供应链整车以旧换新策略及定价决策研究..... | 56 |
| 5.1 问题描述与相关假设.....                         | 56 |
| 5.1.1 问题描述.....                            | 56 |
| 5.1.2 相关假设与需求函数.....                       | 58 |
| 5.2 模型建立与求解.....                           | 62 |

|                                       |     |
|---------------------------------------|-----|
| 5.2.1 单一置换服务模型— $NT$ .....            | 62  |
| 5.2.2 定向置换服务模型— $FT$ .....            | 62  |
| 5.2.3 双向置换服务模型— $ET$ .....            | 64  |
| 5.2.4 全面置换服务模型— $DT$ .....            | 65  |
| 5.3 均衡结果分析.....                       | 66  |
| 5.3.1 以旧换新策略的影响分析.....                | 66  |
| 5.3.2 关键参数影响分析.....                   | 68  |
| 5.4 政府不同补贴政策对以旧换新策略的影响分析.....         | 70  |
| 5.4.1 模型 $NE$ 与 $NT$ 的比较分析 .....      | 70  |
| 5.4.2 模型 $FE$ 与 $FT$ 的比较分析 .....      | 71  |
| 5.4.3 模型 $EE$ 与 $ET$ 的比较分析 .....      | 72  |
| 5.4.4 模型 $DE$ 与 $DT$ 的比较分析 .....      | 73  |
| 5.5 数值仿真.....                         | 73  |
| 5.5.1 政府补贴与以旧换新策略对总需求和总利润的影响.....     | 74  |
| 5.5.2 政府补贴与以旧换新策略对社会总福利和消费者剩余的影响..... | 75  |
| 5.5.3 政府差异性补贴政策对制造商以旧换新策略的影响.....     | 78  |
| 5.6 本章小结.....                         | 83  |
| 第 6 章 结论与展望.....                      | 85  |
| 6.1 结论.....                           | 85  |
| 6.2 管理启示.....                         | 86  |
| 6.3 展望.....                           | 87  |
| 参考文献.....                             | 88  |
| 附 录.....                              | 96  |
| 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.....     | 109 |
| 发表或录用论文.....                          | 109 |
| 参与科研项目.....                           | 109 |
| 致 谢.....                              | 110 |

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 研究背景及意义

### 1.1.1 研究背景

在当今全球范围内，“绿色和可持续发展”已成为推动经济社会转型的重要理念，它不仅深刻影响着人们的日常生活方式，也对各行业，尤其是汽车产业，提出了前所未有的变革要求。具体而言，汽车产业的绿色转型不仅要满足市场需求，还需要遵循低碳发展的路径。在工业实践中，与传统燃油汽车相比，新能源汽车(New energy vehicle, NEV)在使用过程中几乎没有尾气排放，有效减少了空气污染和温室气体的释放<sup>[1]</sup>。随着技术的发展和成本的下降，NEV 的价格逐渐变得更具竞争力，并吸引了越来越多的消费者购买，NEV 市场呈指数级增长。根据乘联会数据统计，2024 年，NEV 销量突破 1603 万辆，占总汽车总销量的 19.7%<sup>[2]</sup>。

动力蓄电池作为 NEV 的核心部件，其寿命一般为 5 到 8 年，且当动力蓄电池的容量低于 80%时，其将无法在汽车上继续使用，此时，顾客需要更换电池<sup>[3]</sup>。因此，NEV 产业的快速发展必将会面临动力蓄电池的大规模退役，预计到 2030 年，国内动力蓄电池退役总量将达 70.8 万吨<sup>[4]</sup>。动力蓄电池中含有大量有害物质和贵金属，如若不能合理科学的回收再利用，将会对环境造成极大的危害，同时产生较大的资源浪费<sup>[5]</sup>。为推动动力蓄电池的回收再利用进程，汽车制造商通过提供电池以旧换新服务或整车以旧换新服务来鼓励消费者参与以旧换新，进而实现动力蓄电池的有效回收。例如，特斯拉公司为用户提供了电池的以旧换新服务<sup>[6]</sup>，蔚来和理想汽车也提供了与特斯拉类似的电池以旧换新服务，比亚迪汽车则提供了 NEV 的整车以旧换新服务<sup>[7]</sup>，而汽车制造商的两种以旧换新策略各有其优势和劣势。

在工业实践中，为了进一步推动汽车产业的绿色转型，汽车制造商推出了

多样化的整车以旧换新服务，以鼓励消费者更换 NEV 或排放量更低的新燃油车。其中，以旧燃油车换新燃油车服务是汽车制造商为了吸引消费者升级旧车的一种常规策略，而为了抢占 NEV 市场，进一步激励消费者转向 NEV 领域，诸如上汽大通、广汽丰田等汽车制造商又创新性地推出以旧燃油车置换 NEV 的服务方案<sup>[8]</sup>。值得注意的是，部分汽车制造商在实践中采取了更为灵活的以旧换新策略，即同时提供上述两种乃至更多种的整车以旧换新服务。例如，广汽丰田在深圳直营店同时提供以旧燃油车换 NEV 或换新燃油车的两种服务。这种多元化的服务模式不仅满足了不同消费者的需求，也进一步提升了汽车制造商的市场竞争力。

近年来，为了进一步促进 NEV 消费和推动汽车产业绿色转型，国内各省市也推出了支持汽车以旧换新相关政策，例如，广东省 2021 年发布的《2021 年汽车以旧换新专项行动公告》中指出，对报废旧车后购买 NEV 的车主补贴 10000 元/辆，对转出旧车，购买 NEV 的车主补贴 8000 元/辆<sup>[9]</sup>，即政府仅对老顾客以旧车置换 NEV 进行补贴（单补贴政策）。2024 年 4 月商务部、财政部等 7 部门联合又印发了《汽车以旧换新补贴实施细则》，明确了最新的汽车以旧换新资金补贴政策：个人消费者报废国三及以下排放标准燃油乘用车或 2018 年前注册登记的新能源乘用车，并购买符合最新标准的 NEV 或更低排量燃油车的消费者，给予一次性定额补贴<sup>[10]</sup>。为了贯彻商务部、财政部等 7 部门发布的《汽车以旧换新补贴实施细则》和国务院发布的《推动大规模设备更新和消费品以旧换新行动方案》等政策，国内各省市进一步也推出了新一轮的以旧换新补贴政策。例如，2024 年上海市发布《上海市加快汽车更新消费行动方案（2024-2027 年）》，明确了上海新一轮汽车以旧换新的实施细则：为鼓励老旧汽车使用者更换购买更高标准的环保新车和 NEV，对老旧汽车置换环保高标燃油车按 7000 元/辆补贴、置换 NEV 按 10000 元/辆补贴<sup>[11]</sup>。即政府对老顾客以旧车置换 NEV 或燃油车都提供补贴（双补贴政策）。由此可知，政府为了推动汽车以旧换新的补贴政策已经从单补贴政策逐渐演变为双补贴政策。

本文综合考虑了 NEV 企业以旧换新策略的多样性以及政府补贴政策演变的现实背景。首先，在政府单补贴政策的背景下，分别考虑 NEV 部件（动力蓄电池）和整车以旧换新策略下 NEV 企业定价决策，并探讨补贴政策对 NEV 企业

以旧换新策略的影响。其次，针对实践中 NEV 企业更灵活的整车以旧换新服务策略和政府以旧换新补贴的变化，分析政府不同补贴政策下 NEV 企业的最优以旧换新策略及定价决策。最后，探究了政府补贴政策演变与企业以旧换新策略间的关系。本研究对以上问题的解决可为 NEV 企业以旧换新策略和政府补贴政策的优化和提供一定的参考。

### 1.1.2 研究意义

#### (1) 理论意义

在以旧换新领域，当前研究主要聚焦于一般废旧产品的以旧换新策略选择问题以及相关的定价决策问题，鲜有文献关注汽车行业尤其是 NEV 领域的以旧换新问题。因此，本研究首先考虑了 NEV 行业特有的动力蓄电池以旧换新服务，探讨 NEV 企业在动力蓄电池更换周期内的以旧换新策略选择问题。并以此为出发点，进一步聚焦于现实中更广泛的整车以旧换新情景，探究在政府实施不同补贴政策的背景下，NEV 企业在不同整车以旧换新策略下的定价决策，并明确其最优的整车以旧换新策略。最后，分析政府补贴政策的变化与企业以旧换新策略间的关系。本研究不仅拓展了以旧换新领域的研究情境，也在一定程度上丰富了供应链运作管理理论。

#### (2) 现实意义

根据工业实践，NEV 企业提供的以旧换新服务主要有动力蓄电池以旧换新服务和整车以旧换新服务，本文首先研究了 NEV 电池处于更换阶段时，NEV 企业应该为老顾客提供哪种以旧换新服务。以此为基础，进一步聚焦于现实中更为复杂的整车以旧换新情景，探究了政府不同补贴政策下，NEV 企业最优的整车以旧换新策略以及不同策略下的定价决策问题；同时，分析了政府补贴的演变与 NEV 企业以旧换新策略间的关系。研究结果可为拥有不同类型旧车（旧燃油车/NEV）消费者的以旧换新决策、NEV 企业的以旧换新策略和政府补贴政策的优化提供建议。

## 1.2 研究内容和创新点

### 1.2.1 研究内容

(1) 政府单补贴政策下 NEV 供应链整部件以旧换新策略及定价决策研究。在政府仅对老顾客置换 NEV 提供补贴（单补贴政策）的背景下，当 NEV 的电池需要更换时，在考虑消费者市场细分的基础上，针对一个由制造商和零售商构成的 NEV 供应链，构建无以旧换新、制造商提供部件（动力蓄电池）以旧换新和制造商提供整车以旧换新三种以旧换新策略下供应链成员的博弈决策模型，分析不同以旧换新策略下最优产品定价决策及影响因素。其次，从供应链利润、消费者剩余和社会总福利等维度，探讨制造商不同以旧换新策略下 NEV 供应链的运行绩效，分析供应链成员的以旧换新模式偏好及影响因素。最后，探究了政府单补贴政策的影响。

(2) 政府单补贴政策下 NEV 供应链整车以旧换新策略及定价决策研究。基于上一部分的研究得出，在多数情况下，整车以旧换新策略为最优策略，且制造商提供整车以旧换新服务总能最大化社会福利，从而实现经济效益和社会福利的双重提升。另外，为了加速汽车产业绿色转型的进程，汽车制造商推出了多样化的整车以旧换新服务，以鼓励消费者更换 NEV 或排放量更低的新燃油车。基于此，进一步聚焦于 NEV 供应链整车以旧换新策略，在考虑消费者市场细分的基础上，针对一个由制造商和零售商构成的 NEV 供应链，构建制造商四种整车以旧换新策略下（仅提供以旧 NEV 换新 NEV（简称 TOEE）服务、同时提供 TOEE 和以旧燃油车换新燃油车（简称 TOFF）服务、同时提供 TOEE 和以旧燃油车换 NEV（简称 TOFE）服务以及同时提供 TOEE、TOFE 和 TOFF 服务）的供应链成员的博弈决策模型，探讨政府单补贴政策下制造商的最优整车以旧换新策略及定价决策。其次，从供应链利润、消费者剩余和社会总福利等维度，探讨制造商不同以旧换新策略下 NEV 供应链的运行绩效，并分析供应链各成员的以旧换新模式偏好及影响因素。最后，同样探讨了政府单补贴政策的影响。

(3) 政府双补贴政策下 NEV 供应链整车以旧换新策略及定价决策研究。基于上一部分的研究并结合当前政府补贴政策的演变趋势，在政府同时对老顾客置换 NEV 或新燃油车都提供补贴（双补贴政策）的背景下，同样构建四种整车

以旧换新策略下供应链成员的博弈决策模型，探究政府双补贴政策下制造商的最优以旧换新策略及定价决策。其次，从供应链利润、消费者剩余和社会总福利等维度，探讨不同以旧换新策略下 NEV 供应链的运行绩效，并分析供应链各成员的以旧换新模式偏好及影响因素和政府双补贴政策的影响。最后，本文进行了两种政府补贴政策下的对比分析，明确政府补贴政策变化与 NEV 企业整车以旧换新策略间的关系。

全文各章节的结构安排及内容阐述如下：

第一章：绪论。主要阐述本文的研究背景及意义、研究思路、研究内容和研究框架，并指出本文的主要创新点、所用到的研究方法和技术路线。

第二章：文献综述。首先对与本文研究内容相关的国内外文献进行回顾，主要包括：以旧换新背景下企业定价决策研究、企业以旧换新策略研究、以旧换新补贴设计及影响研究。然后进行文献评述。

第三章：政府单补贴政策下 NEV 供应链整部件以旧换新策略及定价决策研究。研究政府仅对老顾客置换 NEV 提供补贴时（单补贴政策），制造商仅提供部件（动力蓄电池）以旧换新服务或仅提供整车以旧换新服务需要满足哪些条件。其次，分析制造商不同以旧换新策略下最优产品定价决策及其影响因素，并从供应链利润、消费者剩余和社会总福利等维度，探讨不同以旧换新策略下 NEV 供应链的运行绩效，同时分析供应链成员的以旧换新模式偏好及影响因素。最后，分析了政府单补贴政策的影响。

第四章：政府单补贴政策下 NEV 供应链整车以旧换新策略及定价决策研究。在政府单补贴政策的背景下，探讨制造商的最优整车以旧换新策略及定价决策。其次，从供应链利润、消费者剩余和社会总福利等维度，探讨制造商不同以旧换新策略下 NEV 供应链的运行绩效，并分析供应链各成员的以旧换新模式偏好及影响因素。最后，探讨了政府单补贴政策的影响。

第五章：政府双补贴政策下 NEV 供应链整车以旧换新策略及定价决策研究。基于上一章的研究，继续讨论当政府同时对老顾客置换 NEV 或新燃油车都提供补贴时（双补贴政策），探究制造商的最优以旧换新策略及定价决策。其次，从供应链利润、消费者剩余和社会总福利等维度，探讨不同以旧换新策略下 NEV 供应链的运行绩效，并分析供应链各成员的以旧换新模式偏好及影响因素和政

府双补贴政策的影响。最后，本文进行了两种政府补贴政策下的对比分析，明确政府补贴政策变化与 NEV 企业整车以旧换新策略间的关系。

第六章：结论与展望。对本文上述的研究工作和结论进行总结，得出相关的管理学启示。并对本文研究的不足之处进行说明，同时对未来可能的研究方向进行展望。

### 1.2.2 创新点

(1) 在以旧换新领域，现有研究普遍倾向于广义层面的一般废旧产品，并探究其以旧换新策略、回收渠道选择及定价决策等问题，然而，针对汽车行业，尤其是 NEV 领域的研究十分匮乏。本研究以 NEV 供应链为研究对象，在政府单补贴的背景下，考虑了 NEV 行业特有的动力蓄电池以旧换新服务，构建了不同以旧换新服务情景下的供应链决策模型，探讨在 NEV 的动力蓄电池需要更换的阶段，NEV 企业的以旧换新策略的选择及定价决策问题。

(2) 本研究进一步拓展研究视野，考虑了 NEV 企业在实践中更为灵活的整车以旧换新策略，即同时提供两种或两种以上的整车以旧换新服务策略。同时，本研究还考虑了政府补贴政策的动态变化，据此构建四种整车以旧换新策略下的供应链决策模型，探讨了在政府不同补贴政策下，NEV 企业的整车旧换新策略选择及定价决策问题。

(3) 当前关于政府补贴政策的研究大多聚焦于政府不同补贴政策的影响，而考虑政府补贴政策演变与以旧换新策略间关系的较少。本研究深入分析了政府补贴政策的变化与制造商整车以旧换新策略间的关系，为政府补贴政策及制造商以旧换新策略的优化提供了一定的参考和借鉴。

## 1.3 研究方法和技术路线

### 1.3.1 研究方法

(1) 文献研究法：搜集并梳理大量国内外的相关文献和著作，其中包括以旧换新背景下企业定价决策研究、企业以旧换新策略研究和以旧换新补贴设计及影响研究，并对这些成果进行归纳、总结和评述，找到该领域可能的延伸课题，

对本文的研究提供有效的理论指导。

(2) 数学建模法：综合运用供应链管理理论、Stackelberg 博弈理论、消费者效用理论、最优化理论等相关理论，研究 NEV 供应链中成员决策，构建 NEV 企业不同以旧换新策略下供应链成员的博弈模型，并采用逆向归纳法和最优化方法得到供应链成员的最优决策。

(3) 比较分析法：通过比较 NEV 企业不同以旧换新策略下供应链成员最优均衡解、利润水平、销量、消费者剩余以及社会总福利等关键指标，为企业以旧换新策略的制定提供理论依据；进一步通过对比在政府不同的补贴政策下供应链成员的最优均衡解、利润水平、销量、消费者剩余和社会总福利等关键指标，为政府补贴政策的优化提供建议。

(4) 数值仿真法：在参考相关文献和满足相关假设的前提下设定各参数取值，运用 Matlab 和 Mathematic 等相关数学分析软件对模型中的变量进行数值仿真，揭示并分析不同以旧换新模型下销量、利润、消费者剩余和社会总福利的变化趋势，模拟验证相关结论的正确性和科学性。

### 1.3.2 技术路线

本文的技术路线如图 1-1 所示。

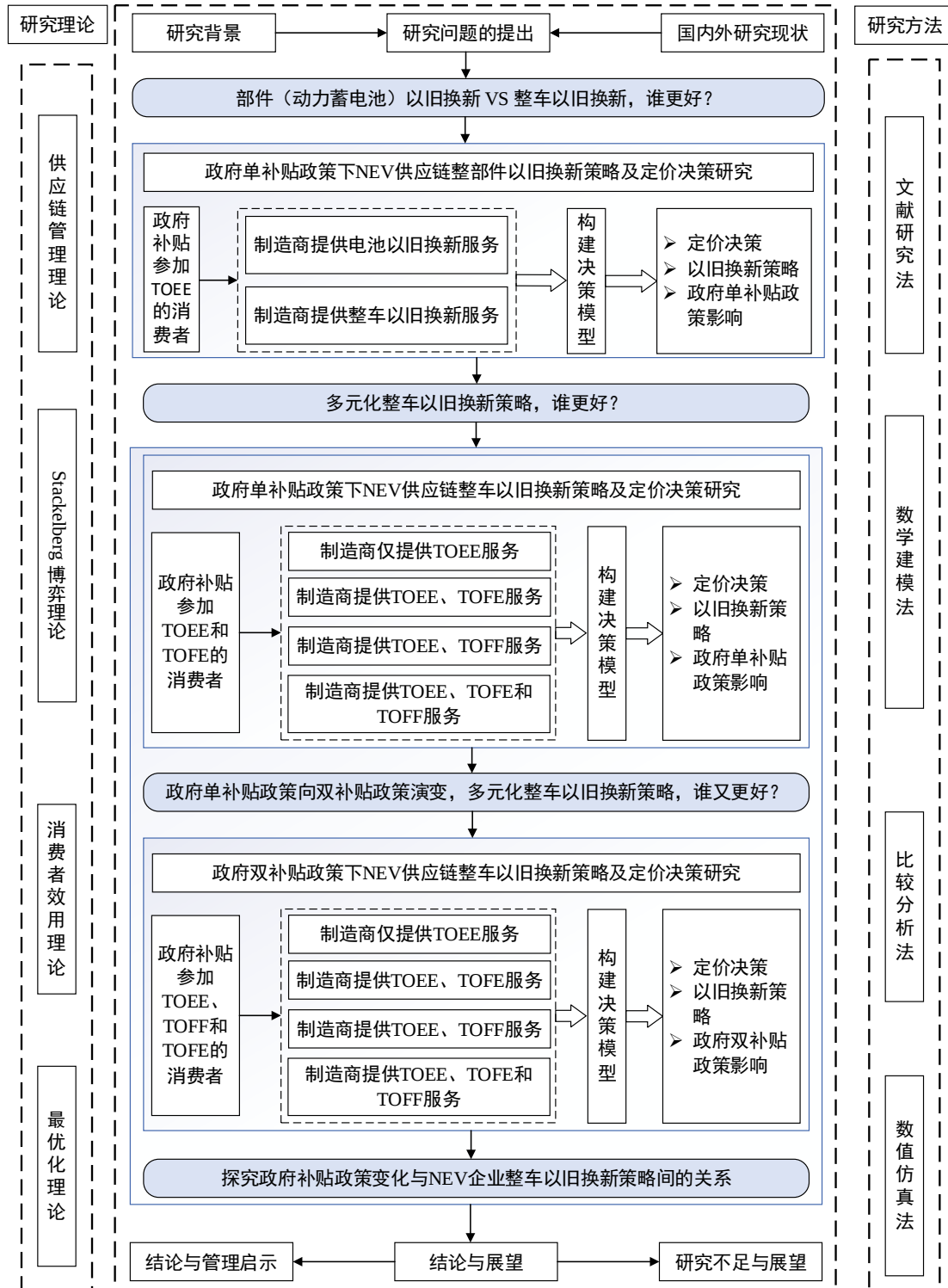


图 1-1 技术路线图

## 第2章 文献综述

以旧换新的研究起源于市场营销领域，并从经济学和运营管理的角度得到了深入的探讨和发展，理论体系逐步趋于完善，其理论成果亦为企业的实践运营提供了诸多参考与启示。具体而言，与本文研究相关的文献主要包括：以旧换新背景下企业定价决策研究、企业以旧换新策略研究和以旧换新补贴设计及影响研究。本章将从以上三个方面对国内外研究现状进行综述。

### 2.1 以旧换新背景下企业定价决策研究

从经济学和运营管理的角度来看，企业在提供以旧换新服务时，产品的定价决策问题是企业重点关注的问题，鉴于此，越来越多的文献对以旧换新背景下企业定价决策研究进行了深入的探讨。然而，现有的文献大多是考虑市场垄断型企业的产品定价决策研究。例如，Chen 等<sup>[12]</sup>研究了垄断情形下制造商在不同以旧换新策略下的最优定价决策，同时明确不同的以旧换新策略选择（不提供以旧换新服务、仅为拥有高质量旧产品的老顾客提供以旧换新服务和为所有老顾客提供以旧换新服务）实施的条件。张喜征等<sup>[13]</sup>考虑了消费者预期后悔行为，研究企业提供以旧换新服务时的最优定价策略。易余胤等<sup>[14]</sup>则研究了制造商不同以旧换新模式下的回收定价策略。Xiao 等<sup>[15]</sup>探究了不同渠道下企业实施以旧换新的条件，同时研究了老顾客市场份额和顾客的在线渠道接受度对产品定价的影响。Cao 等<sup>[16]</sup>考虑了顾客退货的情况，研究制造商的以旧换新策略选择和旧产品耐用性对产品最优定价的影响。罗子灿等<sup>[17]</sup>研究在企业以旧换新服务下产品动态定价策略和静态定价策略选择问题，研究结果表明：企业的最优以旧换新定价策略受两代产品质量差异的影响。Yi 等<sup>[18]</sup>则考虑顾客对新能源汽车存在里程焦虑，探究汽车经销商的不同以旧换新策略下的最优产品定价，同时探究不同以旧换新策略存在的阈值条件。丁珮琪等<sup>[19]</sup>则探讨在制造商实施差异化以旧换新及再制造策略的背景下，关于产品定价策略（静态定价或动态定价）的决策机制。Feng 等<sup>[20]</sup>考虑二级市场和企业以旧换新计划并存时对产品定价决策和质量决策的影响。Bai 等<sup>[21]</sup>则考虑转售平台的存在对企业以旧换新策

略选择和定价决策的影响。此外，部分研究还进一步考虑到了市场中的消费者类型，如 Hu 等<sup>[22]</sup>将消费者细分为短视消费者和战略消费者，考虑不同类型消费者的购买行为，探究当企业提供以旧换新服务时下一代产品的最优定价和以旧换新返利，研究发现企业下一代产品的最优价格受增量价值的影响。Liu 等<sup>[23]</sup>则考虑市场由战略消费者组成，建立了一个动态博弈模型，研究企业连续向战略消费者推出新一代产品并提供以旧换新服务时的最优定价策略（动态定价或预先公布定价）。苑希港等<sup>[24]</sup>将市场中消费者细分为短视消费者和策略消费者，探究在企业提供以旧换新服务时，不同补贴方式下企业的最优定价，结果表明企业的最优产品价格与短视消费者比例有关。

少数学者研究了在竞争情形下，企业实施以旧换新时的产品定价问题，如刘靓晨等<sup>[25]</sup>考虑了先后进入市场的两家竞争性企业，探究两家企业提供不同以旧换新服务时的产品定价策略。Tang 等<sup>[26]</sup>针对两家竞争性企业均可提供品牌内或多品牌的以旧换新服务，并探究品牌忠诚度对两企业定价决策的影响。Zhu 等<sup>[27]</sup>则考虑在双头垄断的背景下，探讨当其中一家公司提供以旧换新服务，而另一家公司不提供时的定价决策问题，研究发现实施以旧换新可以给企业带来更高的市场份额和利润方面的竞争优势。Agrawal 等<sup>[28]</sup>考虑了原始设备制造商与第三方再制造商竞争时，其是否需要提供以旧换新服务或销售再制造产品，同时探究在提供不同服务时的最优产品定价决策。Huang 等<sup>[29]</sup>考虑两竞争性企业在第一阶段销售新产品，第二阶段通过实施以旧换新回收旧产品，在回收阶段，考虑了两种不同的以旧换新回收方式，即连续时间回收和固定时间回收，并确定了竞争环境下的最优定价策略。Desai 等<sup>[30]</sup>在两家企业的竞争环境中，其中两家企业均可提供传统类别内或跨类别的以旧换新服务，探究消费者损失厌恶心理对产品最优定价的影响。简惠云等<sup>[31]</sup>则在网络零售平台和回收平台合作以旧换新的情景下，探究渠道竞争对定价决策的影响。

## 2.2 企业以旧换新策略研究

企业通过实施以旧换新可以实现在回收旧产品的同时销售新产品，有效地将产品的回收环节和销售环节紧密相连，进而促进消费升级和产品的迭代更新。在此过程中，企业如何选择合理的以旧换新策略，是其实施该模式时的首要考

量因素，亦是本文研究的核心，当前已有大量的文献从不同视角出发，针对企业的以旧换新策略展开了深入的研究。如洪江涛等<sup>[32]</sup>研究了供应链权力结构的不同时的以旧换新服务提供者问题，发现不存在转移支付的情况下，制造商和零售商都倾向于自身提供以旧换新服务。Miao 等<sup>[33]</sup>借助产品全生命周期评估方法分析不同以旧换新模式的绩效，探究供应链成员对不同以旧换新模式的偏好。Cao 等<sup>[34]</sup>研究了企业在碳税政策下的以旧换新策略。李四杰等<sup>[35]</sup>在考虑消费者细分的基础上，研究个人二手产品市场的存在对企业以旧换新策略的影响，研究发现其对企业以旧换新策略的影响与老顾客复购率和市场客户比例有关。卢茂盛等<sup>[36]</sup>则探讨了决策主体的风险规避程度如何影响其以旧换新策略的选择偏好。Yin 等<sup>[37]</sup>构建了两期动态博弈模型，研究两代产品的最优以旧换新策略。Han 等<sup>[38]</sup>探究再制造品对企业以旧换新策略的影响。Feng 等<sup>[39]</sup>则考虑在存在渠道冲突的背景下企业以旧换新策略的选择。Cao 等<sup>[40]</sup>考虑了在不同销售渠道下零售商的以旧换新策略。唐飞等<sup>[41]</sup>探究了以旧换新固定成本对企业以旧换新策略的影响。Li 等<sup>[42]</sup>探究二级市场存在与否对原始设备制造商以旧换新策略的影响。石平等<sup>[43]</sup>研究了非正规回收企业存在时，厂商是否需要实施以旧换新，结果显示自主实施以旧换新可以显著提升旧产品回收市场份额。Li 等<sup>[44]</sup>则研究了垄断性回收平台的以旧换新策略选择问题，研究发现其取决于旧产品的质量折旧度。部分学者研究了顾客行为对企业以旧换新策略的影响，如 Xu 等<sup>[45]</sup>探究了顾客浪费厌恶心理对企业以旧换新策略的影响。Miller 等<sup>[46]</sup>和唐飞等<sup>[47]</sup>则研究了顾客品牌忠诚度对以企业旧换新策略的影响，而 Zhang 等<sup>[48]</sup>则探究顾客购买行为对企业以旧换新策略及其再制造效率的影响。另外，也有部分学者在以旧换新模式的基础上，进一步引入以旧换再的理念并继续探究，例如 Ma 等<sup>[49]</sup>和张福安等<sup>[50]</sup>研究当以旧换新和以旧换再共存时企业的最优决策，研究发现两种策略共存时并不总有利于企业。

## 2.3 以旧换新补贴设计及影响研究

为了更有效地促进以旧换新，政府或企业往往会向参与以旧换新的消费者提供补贴激励。这一举措直接降低老顾客购置新产品的成本，显著激发其参与意愿，进而促使以旧换新需求的提升。此过程不仅促进了商品流通与产品的更

新换代，并且对社会总福利水平的提升具有积极影响。因此，在以旧换新的研究范畴内，关于以旧换新补贴的设计及其产生的影响，已成为学术界关注的焦点。具体而言，当前的文献主要围绕两大方向展开深入探讨：一是政府提供的以旧换新补贴设计及其影响研究；二是企业自身提供以旧换新补贴设计及其影响。

在政府提供的以旧换新补贴设计及影响方面，丰奇倩等<sup>[51]</sup>考虑了政府补贴及补贴比例对不同以旧换新策略定价决策的影响。Bai 等<sup>[52]</sup>考虑了政府以旧换新固定补贴和以旧换新共享补贴两种补贴，研究发现政府提供以旧换新共享补贴对激励消费者进行以旧换新更为有效。唐飞等<sup>[53]</sup>探究为了使社会福利最大化，政府应该提供消费补贴还是以旧换新补贴，研究发现政府补贴策略的选择与产品耐用性相关。Cao 等<sup>[54]</sup>在政府补贴的背景下探究制造商是否要授权第三方开展以旧换新，研究发现其受政府以旧换新补贴及产品耐用性影响。Ma 等<sup>[55]</sup>在政府补贴的背景下，考虑线上和线下双渠道回收，研究发现政府提供的以旧换新补贴有利于线下零售商。Huang 等<sup>[56]</sup>重点探究政府以旧换新补贴对企业以旧换新策略、产品定价及顾客购买决策的影响。Li 等<sup>[57]</sup>研究双渠道供应链中政府以旧换新补贴和消费补贴对供应链成员、环境以及社会福利的影响，并指出政府提供以旧换新补贴更有利于环境。马卫民等<sup>[58]</sup>研究了政府提供的以旧换新补贴对不同模式闭环供应链的影响，在此基础上，马卫民等<sup>[59]</sup>进一步探究了政府提供的以旧换新补贴对具有不同等级产品闭环供应链的影响。Miao 等<sup>[60]</sup>则在以旧换新的背景下探究了政府补贴对碳排放量和制造商利润影响。

在企业自身提供的以旧换新补贴设计及其影响方面，Arya 等<sup>[61]</sup>探究了供应链销量与库存间的关系，结果表明当供应链因零售商库存积累而导致效率低时，此时企业提供以旧换新补贴最为有效。Huang 等<sup>[29]</sup>考虑了产品生命周期，考虑了产品不同回收时期对企业以旧换新补贴的影响。Vana 等<sup>[62]</sup>考虑将现金设置为企业以旧换新补贴方式，并研究其对消费者购买行为和购买规模的影响。而Zhang 等<sup>[63]</sup>则考虑将礼品卡设置为企业以旧换新补贴方式，并探究礼品卡的最优设计数量与最佳折扣。在此基础上，Cao 等<sup>[64]</sup>研究对比了使用现金与礼品卡作为企业以旧换新补贴方式的优劣，其研究结果表明，企业以旧换新补贴方式的制定应该考虑二手产品的剩余价值因素。此外，苑希港等<sup>[24]</sup>在以旧换新的背

景下，探究企业补贴和政府补贴对消费者行为和企业最优动态定价产生的不同影响。

## 2.4 文献评述

通过对上述文献的梳理与分析可知，在以旧换新这一特定市场情景下，当前国内外学者在以旧换新背景下企业定价决策、企业以旧换新策略、以旧换新补贴设计及影响等方面已经取得了丰富的研究成果。然而，目前的研究仍存在一些值得深入研究的空间，具体而言：

(1) 针对以旧换新背景下企业定价决策研究。当前文献在垄断或竞争的市场结构框架下，对以旧换新背景下企业的定价决策已经进行了深入探讨，但研究焦点多集中于广义范畴上一般废旧产品的以旧换新，鲜有文献关注汽车行业尤其是 NEV 领域的以旧换新问题，鉴于此，本文将视角聚焦于 NEV 领域，探讨 NEV 企业在不同以旧换新策略下的定价决策。

(2) 针对企业以旧换新策略研究。现有文献主要围绕着企业是否需要提供以旧换新服务、提供何种以旧换新服务以及外部因素如何影响企业以旧换新策略等问题进行研究，但研究对象同样偏向于广义范畴上一般废旧产品的以旧换新，且较少有文献考虑到现实中以旧换新策略组合的情况，因此，本文首先考虑 NEV 领域特有的电池以旧换新服务，并探讨 NEV 企业在动力蓄电池更换周期内的以旧换新策略，其次，针对考虑到现实中多种整车以旧换新服务可能并存的实际情境，进一步探讨 NEV 企业的整车以旧换新策略。

(3) 针对以旧换新补贴设计及影响研究。目前文献大部分关注的是企业或政府提供以旧换新补贴设计及其影响，而鲜有文献从现实中政府补贴政策的变化出发并研究其对企业以旧换新策略的影响。因此，本文结合政府以旧换新补贴由单补贴政策演变为双补贴政策的现实背景，研究了政府不同补贴政策下 NEV 企业的以旧换新策略及定价决策，并分析政府补贴政策变化与 NEV 企业以旧换新策略间的关系。

## 第 3 章 政府单补贴政策下 NEV 供应链整部件以旧换新策略 及定价决策研究

近年来, NEV 市场呈指数级增长, 而 NEV 产业的快速发展必将会面临动力蓄电池的大规模退役。为实现动力蓄电池合理科学的回收再利用, NEV 生产企业通过提供电池以旧换新服务或者整车以旧换新服务来鼓励顾客进行以旧换新, 进而实现动力蓄电池的有效回收。政府为了支持 NEV 消费和推动汽车产业绿色转型, 也推出了支持汽车以旧换新的相关政策, 各省市亦相继作出积极回应, 例如, 深圳市 2023 年发布的《深圳市关于促进消费的若干措施》中指出, 对报废旧车后购买 NEV 的消费者给予补贴<sup>[65]</sup>, 即政府对旧车置换 NEV 的顾客进行补贴(单补贴政策)。然而, 企业提供的两种以旧换新服务各有优势和劣势, NEV 生产企业如何依据自身特点制定合理的以旧换新策略, 是其在后市场中制定相关决策需考虑的关键问题。

基于此, 本章针对由一个制造商和一个零售商构成的 NEV 供应链, 在政府对老顾客置换 NEV 提供补贴的背景下, 通过建立无以旧换新服务、部件(动力蓄电池)以旧换新服务和整车以旧换新服务三种情景下的供应链决策模型, 并尝试解决以下问题:

- (1) 研究在不同以旧换新服务模式下, 制造商和零售商的最优产品定价决策;
- (2) 探究制造商是否应为 NEV 提供以旧换新服务, 如若提供, 应提供哪种以旧换新服务模式更有利于提升企业的市场占有率与盈利能力;
- (3) 明确影响 NEV 生产企业以旧换新策略选择及产品定价决策的因素;
- (4) 探讨政府单补贴政策对市场需求、供应链利润以及社会总福利水平的影响。

### 3.1 问题描述与相关假设

#### 3.1.1 问题描述

考虑由一个制造商和一个零售商构成的 NEV 供应链, 其中制造商为领导者,

零售商为跟随者，两者为 Stackelberg 博弈关系。市场中存在两类消费者，即已经拥有 NEV 的老顾客和尚未购买 NEV 的新顾客。为了激励新顾客首次购买和老顾客二次购买 NEV，制造商将为 NEV 提供不同的以旧换新服务。依据制造商的以旧换新服务模式，本章研究分为三种情况：无以旧换新服务（模型  $N$ ）、制造商提供电池以旧换新服务（模型  $B$ ）、制造商提供整车以旧换新服务（模型  $I$ ）。在模型  $N$  中，制造商作为领导者，首先制定 NEV 批发价  $w_e$ ，然后零售商制定 NEV 零售价  $p_e$ 。在模型  $B$  中，制造商为老顾客提供电池的以旧换新服务，此时，制造商首先决定 NEV 和电池的批发价格  $w_e$  和  $w_b$ ，零售商决定两者的销售价格  $p_e$  和  $p_b$ ，在电池以旧换新服务中，制造商向老顾客提供电池以旧换新补贴  $s_b$ ，并从零售商处以单位价格  $b_b$  收购其回收的旧电池。在模型  $I$  中，制造商和零售商分别决定 NEV 的批发价格和零售价格  $w_e$  和  $p_e$ ，同时，制造商给予老顾客 NEV 以旧换新补贴  $s_e$ ，并从零售商处以单位价格  $b_e$  收购其回收的汽车。为进一步推动旧车的绿色升级，政府为老顾客置换 NEV 提供补贴  $m_e$ 。各个模型中的决策过程如图 3-1 所示。

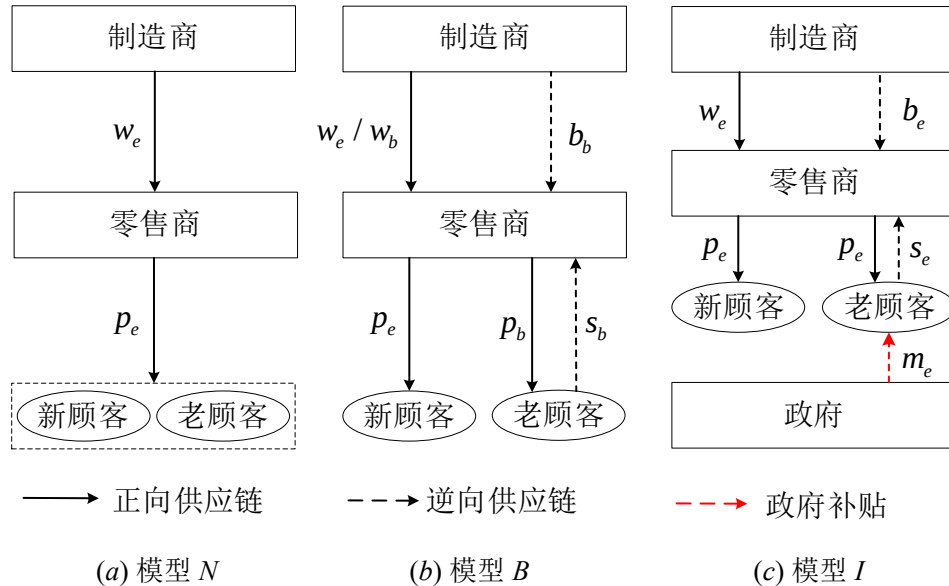


图 3-1 三种以旧换新模式下的决策过程

### 3.1.2 相关假设与需求函数

#### (1) 相关假设

**假设 3.1.** 制造商和零售商在各方面信息完全公开透明，双方均以利润最大化为目标；其自身也都是风险中性的<sup>[66]</sup>。

**假设 3.2.** 消费者拥有一辆 NEV 即可满足需求，所以消费者至多拥有一辆 NEV<sup>[28]</sup>。老顾客可以选择继续使用或以旧换新，本章仅考虑同一品牌内的 NEV 的以旧换新。

**假设 3.3.** 假设市场稳定，只考虑单个周期的决策。市场中存在两类消费者，即已经拥有 NEV 的老顾客和尚未购买 NEV 的新顾客，假设市场规模标准化为 1，老顾客的市场占比为  $\gamma$ ，新顾客的市场占比为  $1-\gamma$ ，其中  $\gamma \in (0,1)$ <sup>[67]</sup>。假设消费者对 NEV 的支付意愿为  $\psi$  且服从  $[0,1]$  上的均匀分布。假设老顾客对旧 NEV 的评价即旧车的耐用性为  $\delta$ ，其中  $\delta \in (0,1)$ ，此时老顾客对旧 NEV 的估值为  $\delta\psi$ <sup>[49]</sup>。假设老顾客对更换电池后的 NEV 接受程度为  $\mu$  (简称消费者接受度)。相对于旧产品，消费者更愿意接受更换电池后的 NEV，所以  $\mu > \delta$ 。

**假设 3.4.** 动力蓄电池成本占 NEV 总成本的比例记为  $\beta$  (简称动力蓄电池成本系数)，且有  $\beta \in (0,1)$ 。假设各类 NEV 车型中的动力蓄电池成本相似，均为  $\beta c_e$ ；其中， $c_e$  表示 NEV 的单位生产成本。

**假设 3.5.** 旧动力蓄电池的容量消耗为  $\theta$ ，其在  $[0,1]$  上均匀分布<sup>[68]</sup>。假设旧电池剩余价值  $g(\theta)$  随其容量消耗  $\theta$  的升高而不断降低<sup>[69]</sup>，表示为  $g(\theta) = \delta(\theta_m - \theta)$ ， $\theta_m$  表示电池未使用时的容量，其中  $\theta_m \in [0,1]$  且  $\theta \leq \theta_m$ 。假设除电池外的整车其余部分残值  $k$ ，则整车的剩余价值为  $g(\theta) + k$ 。

**假设 3.6.** 为刺激 NEV 的销售，我国于 2024 年年初出台了 NEV 的以旧换新政策，在央一地一企的以旧换新政策协同下，消费者能够从以旧换新政策中获得较高的收益，因此，相较于在售价较低的二手市场出售，消费者更愿意选择在制造商处以旧换新。因此，假设当制造商提供以旧换新时，消费者将选择以

旧换新而非在售价较低的二手市场出售。当老顾客选择电池以旧换新服务时，其需支付新电池的更换费用  $p_b$ ，并获得制造商提供的电池以旧换新补贴  $s_b$ ；此时，老顾客在电池以旧换新服务中的实际支出为  $p_b - s_b$ 。当老顾客选择整车以旧换新服务时，其需支付新车更换费用  $p_e$ ，并获得制造商提供的以旧换新补贴  $s_e$ ，同时政府给予置换 NEV 补贴  $m_e$ ，此时，老顾客在整车以旧换新服务中的实际支出为  $p_e - s_e - m_e$ 。另外，当制造商不提供以旧换新服务时，顾客可在二手市场中出售旧车以获得收益  $s_s$ 。

**假设 3.7.** 假设社会总福利的表达式为： $SW = \pi_M + \pi_R + CS_n + CS_o - EX$ ， $\pi_M + \pi_R$  为供应链总利润， $CS_n$  为新顾客消费者剩余， $CS_o$  为老顾客消费者剩余， $EX$  为政府财政总支出<sup>[70]</sup>。

## (2) 需求函数

基于上述假设，新老顾客的需求函数分析如下：

### 1) 新顾客的需求函数

新顾客购买 NEV 的效用函数为  $u_e(\psi) = \psi - p_e$ ；当  $u_e(\psi) > 0$  时，新顾客购买 NEV；反之，则不购买。由此可得新顾客群体中的 NEV 需求为  $q_e = (1 - \gamma) \int_{p_e}^1 1 d\psi = (1 - \gamma)(1 - p_e)$ 。

### 2) 老顾客的需求函数

①当制造商不提供以旧换新服务时（模型 N），老顾客有两种选择：将已拥有的旧车在二手市场出售后购买新车或者继续使用旧车，两种选择的效用函数分别为  $u_s(\psi) = \psi - (p_e - s_s)$  和  $u_u(\psi) = \delta\psi$ 。仅当  $u_s(\psi) > u_u(\psi)$  且  $u_s(\psi) > 0$  时，消费者才会购买 NEV，即 NEV 的需求函数为  $q_s = \gamma \int_{\frac{p_e - s_s}{1 - \delta}}^1 d\psi = \gamma(1 - \frac{p_e - s_s}{1 - \delta})$ 。

②当制造商提供电池以旧换新服务时（模型 B），基于上述假设以及现实情况可知，NEV 在电池需要更换阶段时的残值较低，相较于直接在二手市场出售获得较低收益来说，老顾客会更愿意参加电池以旧换新来满足自身使用需求，

故老顾客有两种选择：动力蓄电池以旧换新或者继续使用旧车，两种选择的效用函数分别为  $u_t(\psi) = \mu\psi - (p_b - s_b)$  和  $u_u(\psi) = \delta\psi$ 。仅当  $u_t(\psi) > u_u(\psi)$  且  $u_t(\psi) > 0$  时，消费者才会选择动力蓄电池以旧换新，即动力蓄电池以旧换新服务的需求函数为  $q_t = \gamma \int_{\frac{p_b - s_b}{\mu - \delta}}^1 d\psi = \gamma(1 - \frac{p_b - s_b}{\mu - \delta})$ 。

③当制造商提供整车以旧换新服务时（模型 I），老顾客更愿意选择在以旧换新返利较高的制造商处参加整车以旧换新，而不是选择去售价较低的二手市场出售，此时老顾客有两种选择：整车以旧换新或者继续使用旧车，两种选择的效用函数分别为  $u_p(\psi) = \psi - (p_e - s_e - m_e)$  和  $u_u(\psi) = \delta\psi$ 。仅当  $u_p(\psi) > u_u(\psi)$  且  $u_p(\psi) > 0$  时，消费者才会选择整车以旧换新，即整车以旧换新服务的需求函数为： $q_p = \gamma \int_{\frac{p_e - s_e - m_e}{1 - \delta}}^1 dv = \gamma(1 - \frac{p_e - s_e - m_e}{1 - \delta})$ 。

本章研究使用的相关符号及说明如表 3-1 所示：

表 3-1 第三章符号和定义

| 符号          | 定义                  |
|-------------|---------------------|
| 决策变量        |                     |
| $w_e / w_b$ | NEV/动力蓄电池的单位批发价格    |
| $p_e / p_b$ | NEV/动力蓄电池的单位零售价格    |
| $b_b / b_e$ | 旧动力蓄电池/旧 NEV 回购价格   |
| 参数          |                     |
| $c_e$       | NEV 的单位生产成本         |
| $\psi$      | 顾客对 NEV 的支付意愿       |
| $\theta$    | 旧电池的容量消耗            |
| $\theta_m$  | 电池未使用时的容量           |
| $\gamma$    | 老顾客的市场占比            |
| $\delta$    | 旧 NEV 的耐用性          |
| $\mu$       | 老顾客对换电池后的 NEV 的接受程度 |
| $\beta$     | 动力蓄电池成本系数           |
| $k$         | 非动力蓄电池组件回收残值        |

|                     |                                           |
|---------------------|-------------------------------------------|
| $s_s / s_b / s_e$   | 二手市场对旧车的估值/企业对电池/整车以旧换新的单位补贴              |
| $m_e$               | 政府对老顾客置换 NEV 的单位补贴                        |
| 其他符号                |                                           |
| $q_e$               | 新顾客中 NEV 的需求                              |
| $q_t / q_p / q_s$   | 老顾客换电池/整车/在二手市场出售旧车后购买新车的需求               |
| $g(\theta)$         | 旧动力蓄电池的剩余价值                               |
| $\pi_M^h / \pi_R^h$ | $h$ 模型中制造商/零售商利润                          |
| $CS_n^h / CS_o^h$   | $h$ 模型中新顾客/老顾客消费者剩余                       |
| $EX$                | 政府补贴总支出                                   |
| $SW^h$              | $h$ 模型中社会总福利                              |
| $h$                 | $h = \{N, B, I\}$ ，分别表示模型 $N$ 、 $B$ 和 $I$ |

## 3.2 模型建立与求解

### 3.2.1 无以旧换新服务模型— $N$

在无以旧换新服务（模型  $N$ ）情景中，制造商首先决定 NEV 批发价格  $w_e$ ，然后零售商决定 NEV 零售价格  $p_e$ 。制造商和零售商的利润函数分别为：

$$\max_{\{w_e\}} \pi_M^N = (w_e - c_e)(q_e + q_s) \quad (3-1)$$

$$\max_{\{p_e\}} \pi_R^N = (p_e - w_e)(q_e + q_s) \quad (3-2)$$

依据逆向归纳法对模型  $N$  进行求解，可得：

(1) NEV 的最优批发价格和零售价格为：

$$w_e^{N*} = \frac{\gamma(s_s - \delta)}{2 - 2\delta(1 - \gamma)} + \frac{1 + c_e}{2} \quad (3-3)$$

$$p_e^{N*} = \frac{3\gamma(s_s - \delta)}{4 - 4\delta(1 - \gamma)} + \frac{3 + c_e}{4} \quad (3-4)$$

(2) NEV 的销售量为：

$$q_e^{N*} = (1 - \gamma) \left( \frac{1 - c_e}{4} - \frac{3\gamma(s_s - \delta)}{4 - 4\delta(1 - \gamma)} \right) \quad (3-5)$$

$$q_s^{N*} = \gamma - \frac{\gamma}{1-\delta} \left( \frac{3\gamma(s_s - \delta)}{4-4\delta(1-\gamma)} + \frac{3+c_e}{4} - s_s \right) \quad (3-6)$$

(3) 制造商和零售商的利润分别为：

$$\pi_M^{N*} = \frac{(1-c_e - \delta + \delta c_e(1-\gamma) + \gamma s_s)^2}{8(1-\delta)(1-\delta(1-\gamma))} \quad (3-7)$$

$$\pi_R^{N*} = \frac{(1-c_e - \delta + \delta c_e(1-\gamma) + \gamma s_s)^2}{16(1-\delta)(1-\delta(1-\gamma))} \quad (3-8)$$

### 3.2.2 电池以旧换新服务模型—B

在电池以旧换新服务（模型 B）模式中，制造商首先决定 NEV 批发价格  $w_e$  和电池批发价格  $w_b$ ，然后零售商决定 NEV 和电池的零售价格  $p_e$  和  $p_b$ 。制造商和零售商的利润函数分别为：

$$\max_{\{w_e, w_b\}} \pi_M^B = (w_e - c_e)q_e + (w_b - \beta c_e + g(\theta) - s_b - b_b)q_t \quad (3-9)$$

$$\max_{\{p_e, p_b\}} \pi_R^B = (p_e - w_e)q_e + (p_b - w_b + b_b)q_t \quad (3-10)$$

其中，在式(3-9)和(3-10)中， $(w_b - \beta c_e + g(\theta) - s_b - b_b)q_t$  和  $(p_b - w_b + b_b)q_t$  分别表示制造商和零售商从电池以旧换新服务中获得的收益。

同理，依据逆向归纳法对模型 B 进行求解，可得：

(1)NEV 和电池的最优批发价格和零售价格为：

$$w_e^{B*} = \frac{1+c_e}{2} \quad (3-11)$$

$$w_b^{B*} = \frac{2b_b + 2s_b + \mu + \beta c_e + \delta(-1 + \theta - \theta_m)}{2} \quad (3-12)$$

$$p_e^{B*} = \frac{3+c_e}{4} \quad (3-13)$$

$$p_b^{B*} = \frac{4s_b + 3\mu + \beta c_e + \delta(-3 + \theta - \theta_m)}{4} \quad (3-14)$$

(2)NEV 的销售量及电池以旧换新数量分别为：

$$q_e^{B*} = \frac{(1-\gamma)(1-c_e)}{4} \quad (3-15)$$

$$q_t^{B*} = \frac{\gamma(\mu - \delta - \beta c_e + \delta(\theta_m - \theta))}{4(\mu - \delta)} \quad (3-16)$$

(3)进而可得制造商和零售商的利润分别为：

$$\pi_M^{B*} = \frac{1}{8}((1-\gamma)(1-c_e)^2 + \frac{\gamma(\mu - \delta - \beta c_e + \delta(\theta_m - \theta))^2}{\mu - \delta}) \quad (3-17)$$

$$\pi_R^{B*} = \frac{1}{16}((1-\gamma)(1-c_e)^2 + \frac{\gamma(\mu - \delta - \beta c_e + \delta(\theta_m - \theta))^2}{\mu - \delta}) \quad (3-18)$$

### 3.2.3 整车以旧换新服务模型—I

在整车以旧换新服务（模型 I）模式中，制造商首先决定 NEV 批发价格  $w_e$ ，然后零售商决定 NEV 销售价格  $p_e$ 。制造商和零售商的利润函数分别为：

$$\max_{\{w_e\}} \pi_M^I = (w_e - c_e)q_e + (w_e - c_e + g(\theta) + k - s_e - b_e)q_p \quad (3-19)$$

$$\max_{\{p_e\}} \pi_R^I = (p_e - w_e)q_e + (p_e - w_e + b_e)q_p \quad (3-20)$$

其中，在式(3-19)和式(3-20)中， $(w_e - c_e + g(\theta) + k - s_e - b_e)q_p$  和  $(p_e - w_e + b_e)q_p$  分别表示制造商和零售商在整车以旧换新服务中的收益。

同理，依据逆向归纳法对模型 I 进行求解，可得：

(1)NEV 的最优批发价格和零售价格：

$$w_e^{I*} = \frac{\gamma(2b_e - k + m_e + 2s_e + \delta(-1 + \theta - \theta_m))}{2 - 2\delta(1 - \gamma)} + \frac{1 + c_e}{2} \quad (3-21)$$

$$p_e^{I*} = \frac{\gamma(4s_e + 3m_e - k + \delta(-3 + \theta - \theta_m))}{4 - 4\delta(1 - \gamma)} + \frac{3 + c_e}{4} \quad (3-22)$$

(2)NEV 的销售数量及整车以旧换新数量分别为：

$$q_e^{I*} = \frac{(1-\gamma)(1-c_e)}{4} - \frac{\gamma(1-\gamma)(4s_e + 3m_e - k + \delta(-3 + \theta - \theta_m))}{4 - 4\delta(1 - \gamma)} \quad (3-23)$$

$$q_p^{I*} = \gamma - \frac{\gamma}{1-\delta} \left( \frac{\gamma(4s_e + 3m_e - k + \delta(-3 + \theta - \theta_m))}{4 - 4\delta(1-\gamma)} + \frac{3 + c_e}{4} - s_e - m_e \right) \quad (3-24)$$

(3) 制造商和零售商的利润分别为：

$$\pi_M^{I*} = \frac{\gamma(m_e + s_e - \delta)(1-\gamma)(\delta(\theta_m - \theta) + k - s_e - b_e)}{1-\delta(1-\gamma)} + \frac{((1-\delta + \gamma\delta)(1-c_e) + \gamma(k + m_e + \delta(\theta_m - \theta - 1)))^2}{8(1-\delta)(1-\delta(1-\gamma))} \quad (3-25)$$

$$\pi_R^{I*} = \frac{\gamma b_e(1-\gamma)(m_e + s_e - \delta)}{1-\delta(1-\gamma)} + \frac{((1-\delta + \gamma\delta)(1-c_e) + \gamma(k + m_e + \delta(\theta_m - \theta - 1)))^2}{16(1-\delta)(1-\delta(1-\gamma))} \quad (3-26)$$

### 3.3 均衡结果分析

本节将对三种模型中的均衡结果进行对比分析，探讨以旧换新模式对产品定价及销量的影响；同时，分析不同以旧换新模式下政府补贴、顾客对更换电池后的 NEV 接受程度、动力蓄电池的成本参数、旧电池容量消耗等参数对产品价格、产品销量以及供应链成员利润的影响。

#### 3.3.1 以旧换新策略的影响分析

对三种不同以旧换新策略下的最优定价决策进行对比，可得命题 3.1。

**命题 3.1** 旧车耐用性存在阈值  $\delta_1$  和  $\delta_2$ ；当  $\delta > \delta_1$  时， $w_e^{B*} > \max\{w_e^{N*}, w_e^{I*}\}$ ， $p_e^{B*} > \max\{p_e^{N*}, p_e^{I*}\}$  和  $q_e^{B*} < \min\{q_e^{N*}, q_e^{I*}\}$ 。当  $0 < \delta < \delta_2$  时， $w_e^{B*} < \min\{w_e^{N*}, w_e^{I*}\}$ ， $p_e^{B*} < \min\{p_e^{N*}, p_e^{I*}\}$  和  $q_e^{B*} > \max\{q_e^{N*}, q_e^{I*}\}$ 。

证明过程见附录 1。

命题 3.1 表明，旧车的耐用性会改变以旧换新模式对产品定价和销量的影响。相比于无以旧换新服务或整车以旧换新服务，当旧车的耐用性较高时，电池以旧换新服务会较大程度提高新车的批发价格和销售价格，进而降低消费者对新车的需求，不利于 NEV 的市场推广。当旧车的耐用性较低时，电池以旧换新服务则会降低新车的批发价格和销售价格，进而提高新车的销量。由此可知，从推广 NEV 使用、抢占更大的市场份额角度出发，制造商应根据旧车的耐用性选择合适的以旧换新策略。

对三种以旧换新策略下的利润进行对比，可得命题 3.2。

**命题 3.2** 在三种以旧换新服务模式下， $\frac{\pi_R^{N*}}{\pi_M^{N*}} = \frac{1}{2}$ ， $\frac{\pi_R^{B*}}{\pi_M^{B*}} = \frac{1}{2}$ ；当  $\delta \geq \delta_3$  时，

$$\frac{\pi_R^{I*}}{\pi_M^{I*}} \leq \frac{1}{2}, \text{ 当 } \delta < \delta_3 \text{ 时, } \frac{\pi_R^{I*}}{\pi_M^{I*}} > \frac{1}{2}.$$

证明过程见附录 2。

命题 3.2 表明，当制造商不提供以旧换新服务或仅为电池提供以旧换新服务时，其因领导地位，将获得供应链中较大的利润；制造商为动力蓄电池提供以旧换新服务（模型 B）不改变供应链利润在成员之间的分配结构。但是，当制造商提供整车以旧换新服务（模型 I）时，其对供应链利润的分配影响与旧 NEV 的耐用性相关。当旧车的耐用性较低时（ $\delta < \delta_3$ ），制造商获得的供应链利润比例会降低，而当旧车的耐用性较高时（ $\delta \geq \delta_3$ ），制造商获得的供应链利润比例会增加，这是因为当耐用性较高时，旧 NEV 的残值较高，所以会使制造商在以旧换新活动中会获得较高的收益。这说明，当旧车耐用性较高时，制造商提供整车以旧换新服务会提高其在供应链中的相对利润。

### 3.3.2 关键参数影响分析

在不同的以旧换新模型下，动力蓄电池的容量消耗  $\theta$  对均衡解、销量和利润的影响如命题 3.3 所示。

**命题 3.3** 在电池或整车以旧换新模式下，(1)  $\frac{\partial w_e^{B*}}{\partial \theta} = \frac{\partial p_e^{B*}}{\partial \theta} = \frac{\partial q_e^{B*}}{\partial \theta} = 0$ ，

$$\frac{\partial w_b^{B*}}{\partial \theta} > 0, \frac{\partial p_b^{B*}}{\partial \theta} > 0, \frac{\partial q_t^{B*}}{\partial \theta} < 0; \frac{\partial \pi_M^{B*}}{\partial \theta} = 2 \frac{\partial \pi_R^{B*}}{\partial \theta} < 0; (2) \frac{\partial w_e^{I*}}{\partial \theta} > 0, \frac{\partial p_e^{I*}}{\partial \theta} > 0,$$

$$\frac{\partial q_e^{I*}}{\partial \theta} < 0, \frac{\partial q_p^{I*}}{\partial \theta} < 0; \text{ 当 } s_{e1} < s_e < s_{e2} \text{ 时, 若 } 0 < c_e < c_{e1}, \text{ 有 } \frac{\partial \pi_M^{I*}}{\partial \theta} < 0, \text{ 若}$$

$$c_{e1} < c_e < 1, \text{ 有 } \frac{\partial \pi_M^{I*}}{\partial \theta} > 0; \text{ 当 } 0 < s_e < s_{e1} (s_e > s_{e2}) \text{ 时, 有 } \frac{\partial \pi_M^{I*}}{\partial \theta} > 0 (\frac{\partial \pi_M^{I*}}{\partial \theta} < 0).$$

当  $0 < k < k_1$  时, 若  $0 < c_e < c_{e2}$ , 有  $\frac{\partial \pi_R^{I*}}{\partial \theta} < 0$ , 当  $c_{e2} < c_e < 1$  时, 有  $\frac{\partial \pi_R^{I*}}{\partial \theta} > 0$ ; 当

$k > k_1$  时, 有  $\frac{\partial \pi_R^{I*}}{\partial \theta} < 0$ 。

证明过程见附录 3。

命题 3.3 表明, 当制造商提供电池的以旧换新服务 (模型 B) 时, 动力蓄电池的容量消耗并不影响 NEV 的批发价格、销售价格和销量; 但容量消耗过高会降低电池的剩余价值, 减少以旧换新服务的盈利性, 使制造商和零售商利润下降; 此时, 制造商和零售商会提高电池以旧换新的价格。当制造商提供整车以旧换新服务 (模型 I) 时, 动力蓄电池的容量消耗越高, 旧车的剩余价值越低, 制造商从以旧换新服务中获得的边际收益会降低。为了提高以旧换新服务的盈利性, 制造商会提高 NEV 的批发价格, 零售商则随之提高其零售价格, 这将导致 NEV 销量和以旧换新车辆数量的降低。此时, 其对制造商利润的影响与企业对整车以旧换新单位补贴和 NEV 生产成本相关。当补贴较低时, 电池容量消耗越高, 制造商利润越高; 当补贴适中时, 若汽车生产成本较低, 制造商利润随着电池容量消耗的增加而降低, 但若汽车生产成本较高, 制造商利润会提高; 当补贴较高时, 制造商利润会随着电池容量消耗的增加而降低。其对零售商利润的影响与 NEV 其他组件 (除动力蓄电池) 残值和汽车生产成本相关。当汽车其他组件的残值较高时, 零售商利润降低; 当汽车其他组件残值较低时, 若汽车生产成本较低, 零售商利润也降低, 但若汽车生产成本较高, 则零售商利润会提高。

由此可知, 在促进 NEV 推广应用的角度上, 当动力蓄电池性能不高且在使用过程中容量较易消耗时, 应鼓励制造商提供电池的以旧换新服务; 当动力蓄电池性能较高且在使用过程中容量消耗较慢时, 应鼓励制造商提供整车以旧换新服务。制造商需要根据电池技术的发展来灵活地选择电池以旧换新和整车以旧换新服务模式; 此外, 当其提供整车以旧换新服务时, 其也需要考虑生产成本和以旧换新补贴大小的影响, 以确保其在市场竞争中保持较高的市场份额和盈利水平。

在不同的以旧换新模型下, NEV 生产成本  $c_e$  对均衡解、销量和利润的影响

如命题 3.4 所示。

$$\text{命题 3.4 (1) } \frac{\partial w_e^{h*}}{\partial c_e} > 0, \quad \frac{\partial p_e^{h*}}{\partial c_e} > 0, \quad \frac{\partial q_e^{h*}}{\partial c_e} < 0; \quad (2) \frac{\partial w_b^{B*}}{\partial c_e} > 0, \quad \frac{\partial p_b^{B*}}{\partial c_e} > 0, \\ \frac{\partial q_t^{B*}}{\partial c_e} < 0, \quad \frac{\partial q_p^{I*}}{\partial c_e} < 0; \quad (3) \frac{\partial \pi_M^{h*}}{\partial c_e} < 0, \quad \frac{\partial \pi_R^{h*}}{\partial c_e} < 0, \quad h \in \{N, B, I\}。$$

证明过程见附录 4。

命题 3.4 表明，制造商的以旧换新服务策略不影响 NEV 生产成本对汽车批发价格、零售价格以及制造商和零售商利润的影响，即随着 NEV 生产成本的增加，NEV 的批发价格和零售价格均提高，这将降低产品需求，损害制造商和零售商的盈利能力。当制造商提供电池以旧换新服务（模型 B）时，随着汽车生产成本的增加，NEV 的零售价格提高；此时，消费者更愿意选择更换动力蓄电池而非置换新车，动力蓄电池的批发价格和零售价格随之提高，电池更换数量降低。同理，当制造商提供整车以旧换新服务时，整车以旧换新数量也随着汽车生产成本的升高而降低。

在制造商提供电池以旧换新服务时（模型 B），老顾客对换电池后的 NEV 接受程度  $\mu$  以及动力蓄电池成本系数  $\beta$  对均衡解和销量的影响如命题 3.5 所示。

$$\text{命题 3.5 (1) } \frac{\partial w_e^{B*}}{\partial \mu} = \frac{\partial p_e^{B*}}{\partial \mu} = \frac{\partial q_e^{B*}}{\partial \mu} = 0, \quad \frac{\partial w_b^{B*}}{\partial \mu} > 0, \quad \frac{\partial p_b^{B*}}{\partial \mu} > 0; \quad \frac{\partial q_t^{B*}}{\partial \mu} > 0; \quad (2) \\ \frac{\partial w_e^{B*}}{\partial \beta} = \frac{\partial p_e^{B*}}{\partial \beta} = \frac{\partial q_e^{B*}}{\partial \beta} = 0, \quad \frac{\partial w_b^{B*}}{\partial \beta} > 0, \quad \frac{\partial p_b^{B*}}{\partial \beta} > 0, \quad \frac{\partial q_t^{B*}}{\partial \beta} < 0。$$

证明过程见附录 5。

命题 3.5 表明，在电池以旧换新服务中，老顾客对换电池后的 NEV 接受程度  $\mu$  以及动力蓄电池成本系数  $\beta$  不影响制造商和零售商的新车定价决策和销量，但会影响电池定价决策和以旧换新数量。随着老顾客对换电池后的 NEV 接受程度  $\mu$  的增加，制造商和零售商均会为动力蓄电池制定较高的批发价格和零售价格，但其更换电池后获得的汽车使用效用仍较高，此时，老顾客更愿意进行电池以旧换新，电池以旧换新数量增加。另外，动力蓄电池成本系数  $\beta$  越高，电池的批发价格和销售价格越高，提高了消费者更换电池的成本，电池以旧换新

数量降低。由此可知，当制造商提供电池以旧换新服务时，需要了解顾客的需求和关注点，例如提供高质量的电池、降低电池的生产成本、提供长期的保修和保养计划等，以提高顾客对更换电池后 NEV 的接受程度，进而提高动力蓄电池以旧换新数量和边际利润。

在制造商提供整车以旧换新服务时（模型  $I$ ），政府对老顾客置换 NEV 的补贴  $m_e$  对均衡解、销量的影响如命题 3.6 所示。

**命题 3.6** 在整车以旧换新模式下， $\frac{\partial w_e^{I*}}{\partial m_e} > 0$ ， $\frac{\partial p_e^{I*}}{\partial m_e} > 0$ ， $\frac{\partial q_e^{I*}}{\partial m_e} < 0$ ， $\frac{\partial q_p^{I*}}{\partial m_e} > 0$ 。

证明过程见附录 6。

命题 3.6 表明，当制造商提供整车以旧换新服务时，随着政府对老顾客置换 NEV 补贴  $m_e$  的增加，制造商和零售商均会为 NEV 制定较高的批发价格和零售价格，此举直接导致新顾客购买 NEV 的成本增加，进而使其对 NEV 的需求降低；然而，随着政府以旧换新补贴力度的增大，老顾客升级旧车的成本降低，这有效刺激了整车以旧换新的市场需求，即整车以旧换新的需求会增加。

### 3.4 数值仿真

旧车耐用性反映了 NEV 企业的技术水平，也直接影响到旧车的残值<sup>[71]</sup>，故本节通过数据仿真来研究旧车耐用性  $\delta$  对供应链成员最优利润及需求的影响。参考 Han 等<sup>[38]</sup>和 Liu 等<sup>[23]</sup>研究所使用的数据，本文相关参数设置如下： $\gamma = 0.4$ ， $c_e = 0.2$ ， $\beta = 0.4$ ， $\theta_m = 1$ ， $\theta = 0.8$ ， $\mu = 0.7$ ， $b_e = 0.05$ ， $k = 0.02$ ， $s_s = 0.01$ ， $s_e = 0.01$  和  $m_e = 0.01$ 。根据《2024 年中国新能源汽车新车质量研究(NEV-IQS)》显示，NEV 质量问题不断增多，且与 2023 年相比，质量问题的增速加快，尤其是设计缺陷类问题，可知目前 NEV 的耐用性较低<sup>[72]</sup>。另外，在《2023-2024 年全球及中国汽车动力电池行业研究报告》中的调查结果也指出，目前动力电池仍存在耐用性不高的挑战，作为 NEV 的重要组成部分，这也大大降低了 NEV 的耐用性<sup>[73]</sup>；因此，为使以旧换新需求为正， $\delta$  需在(0,0.3)之间取值，该取值范围也与当前电动汽车的市场价值变化相吻合。

### 3.4.1 旧车耐用性与以旧换新策略对利润与顾客需求的影响

在上述参数设置下，旧车耐用性  $\delta$  与以旧换新策略对供应链成员最优利润和需求的影响如图 3-2、3-3 和 3-4 所示。

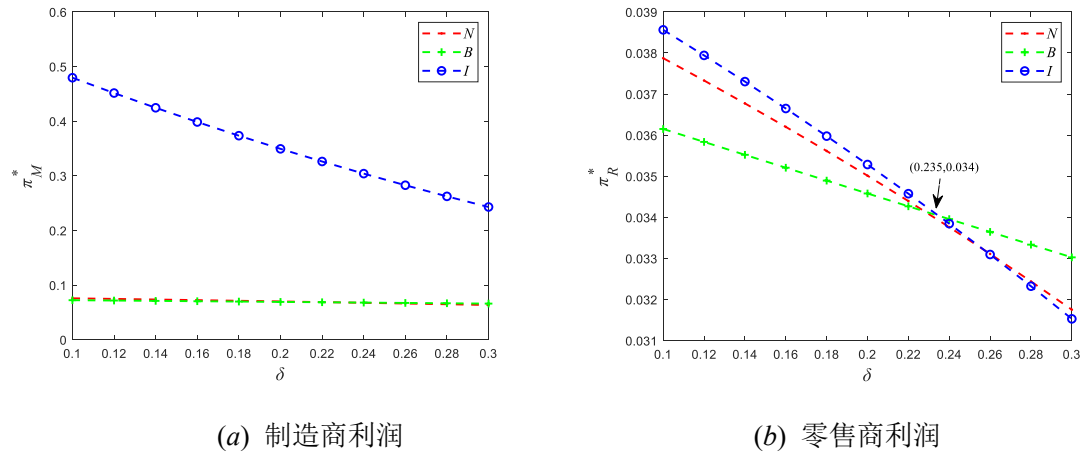


图 3-2 供应链成员利润

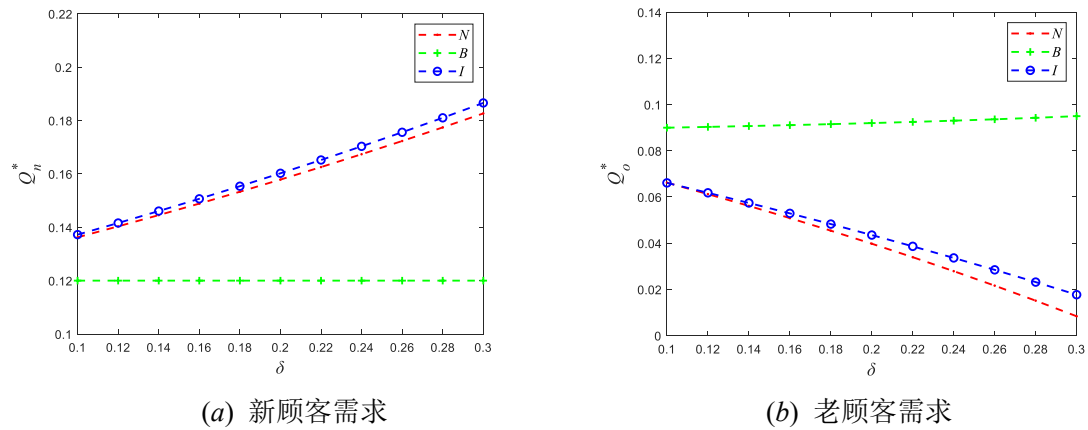


图 3-3 新老顾客需求

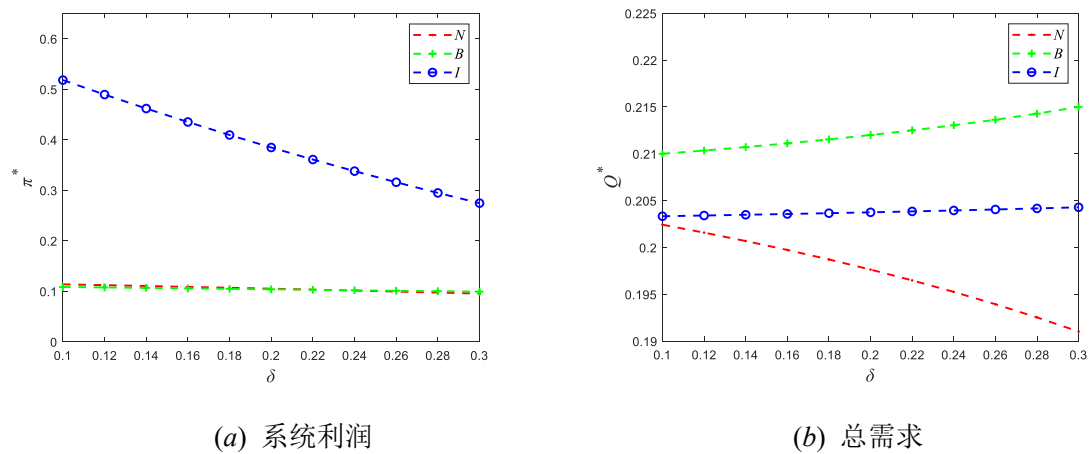


图 3-4 系统总利润与总需求

由图 3-2 和图 3-4(a)可知,随着旧车耐用性的增强,制造商、零售商和系统利润均逐渐降低,且为整车提供以旧换新服务总能使制造商和供应链获利最高。因为提供整车以旧换新服务是制造商向客户传达关心和关怀信息的直接途径,这种积极的客户体验能够增强客户对品牌的认同感,并提高客户忠诚度,从而促进重复购买和口碑传播,进一步增加利润;但是,该服务模式是否有利于零售商则受到耐用性的影响。当旧车的耐用性较低时,零售商也能从整车以旧换新服务中获取较高利润,此时,其对以旧换新服务模式的选择偏好与制造商一致;但是,随着旧车耐用性的提高,且当旧车耐用性高于一定阈值时( $\delta > 0.235$ ),零售商偏向于电池以旧换新服务。此时,为使整车以旧换新服务模式成为制造商、零售商甚至是整个供应链的最佳选择,制造商应构建合理的协调机制,实现以旧换新服务所得额外收益在其与零售商之间合理分配,以促进零售商积极参与整车的以旧换新服务。

由图 3-3 和图 3-4(b)可知,在吸引新顾客的层面上,整车以旧换新服务模式的绩效最高,电池以旧换新服务模式的绩效最低。在维持老顾客的层面上,电池以旧换新的成本相对较低,能够稳定老顾客的品牌忠诚度,维持较高的老顾客需求;而整车以旧换新成本较高,使得老顾客整车更换的需求最低,这使得电池以旧换新模式能够带来最高的市场占有率。另外,随着旧车耐用性的提高,整车以旧换新和电池以旧换新在吸引新顾客和维持老顾客方面的绩效差异显著增加,电池以旧换新模式在市场总占有率方面的优势也逐渐增加。由此可知,若制造商以扩大市场总占有率为短期目标,应积极提供电池以旧换新服务模式。

此外,本节进一步探讨在制造商提供整车以旧换新服务模式下(模型 I),制造商和零售商最优利润随着 NEV 生产成本  $c_e$ 、企业对整车以旧换新的单位补贴  $s_e$ 、汽车除动力蓄电池其它组件回收残值  $k$  变化的仿真数据如表 3-2 所示,所有利润数值都被扩大了 10,000 倍。

表 3-2 制造商提供整车以旧换新服务模式下的利润

| 组别 | $c_e$ | $k$  | $\gamma$ | $\delta$ | $m_e$ | $\theta_m$ | $\theta$ | $s_e$ | $b_e$ | $\pi_M^{I*}$ | $\pi_R^{I*}$ |
|----|-------|------|----------|----------|-------|------------|----------|-------|-------|--------------|--------------|
| 1  | 0.002 | 0.02 | 0.1      | 0.29     | 0.001 | 1          | 0.80     | 0.100 | 0.05  | 1239.34      | 599.877      |
|    | 0.002 | 0.02 | 0.1      | 0.29     | 0.001 | 1          | 0.81     | 0.100 | 0.05  | 1239.02      | 599.382      |
|    | 0.002 | 0.02 | 0.1      | 0.29     | 0.001 | 1          | 0.82     | 0.100 | 0.05  | 1238.70      | 598.887      |
| 2  | 0.200 | 0.02 | 0.1      | 0.29     | 0.001 | 1          | 0.80     | 0.010 | 0.05  | 768.184      | 370.161      |
|    | 0.200 | 0.02 | 0.1      | 0.29     | 0.001 | 1          | 0.81     | 0.010 | 0.05  | 768.382      | 369.767      |
|    | 0.200 | 0.02 | 0.1      | 0.29     | 0.001 | 1          | 0.82     | 0.010 | 0.05  | 768.580      | 369.374      |
| 3  | 0.200 | 0.02 | 0.1      | 0.29     | 0.001 | 1          | 0.80     | 0.001 | 0.05  | 764.830      | 369.613      |
|    | 0.200 | 0.02 | 0.1      | 0.29     | 0.001 | 1          | 0.81     | 0.001 | 0.05  | 765.060      | 369.219      |
|    | 0.200 | 0.02 | 0.1      | 0.29     | 0.001 | 1          | 0.82     | 0.001 | 0.05  | 765.290      | 368.825      |
| 4  | 0.200 | 0.02 | 0.1      | 0.29     | 0.001 | 1          | 0.80     | 0.300 | 0.05  | 770.656      | 387.820      |
|    | 0.200 | 0.02 | 0.1      | 0.29     | 0.001 | 1          | 0.81     | 0.300 | 0.05  | 769.830      | 387.426      |
|    | 0.200 | 0.02 | 0.1      | 0.29     | 0.001 | 1          | 0.82     | 0.300 | 0.05  | 769.004      | 387.033      |
| 5  | 0.200 | 0.02 | 0.4      | 0.20     | 0.001 | 1          | 0.80     | 0.010 | 0.05  | 746.489      | 347.472      |
|    | 0.200 | 0.02 | 0.4      | 0.20     | 0.001 | 1          | 0.81     | 0.010 | 0.05  | 745.679      | 346.551      |
|    | 0.200 | 0.02 | 0.4      | 0.20     | 0.001 | 1          | 0.82     | 0.010 | 0.05  | 744.871      | 345.632      |
| 6  | 0.980 | 0.02 | 0.4      | 0.20     | 0.001 | 1          | 0.80     | 0.010 | 0.05  | 2.04574      | 1.41832      |
|    | 0.980 | 0.02 | 0.4      | 0.20     | 0.001 | 1          | 0.81     | 0.010 | 0.05  | 2.14938      | 1.47287      |
|    | 0.980 | 0.02 | 0.4      | 0.20     | 0.001 | 1          | 0.82     | 0.010 | 0.05  | 2.25528      | 1.52855      |
| 7  | 0.200 | 0.17 | 0.4      | 0.20     | 0.001 | 1          | 0.80     | 0.010 | 0.05  | 813.716      | 419.744      |
|    | 0.200 | 0.17 | 0.4      | 0.20     | 0.001 | 1          | 0.81     | 0.010 | 0.05  | 812.736      | 418.739      |
|    | 0.200 | 0.17 | 0.4      | 0.20     | 0.001 | 1          | 0.82     | 0.010 | 0.05  | 811.758      | 417.734      |

由表 3-2 可知，当  $0.0085 < s_e < 0.2976$  时，若  $0 < c_e < 0.0053$ ，有  $\frac{\partial \pi_M^{I*}}{\partial \theta} < 0$

（如组 1 所示），当  $0.0053 < c_e < 1$ ，有  $\frac{\partial \pi_M^{I*}}{\partial \theta} > 0$ （如组 2 所示）；当

$0 < s_e < 0.0085$  时，有  $\frac{\partial \pi_M^{I*}}{\partial \theta} > 0$ （如组 3 所示），当  $s_e > 0.2976$  时，有  $\frac{\partial \pi_M^{I*}}{\partial \theta} < 0$

（如组 4 所示）。当  $0 < k < 0.159$  时，若  $0 < c_e < 0.937$ ，有  $\frac{\partial \pi_R^{I*}}{\partial \theta} < 0$ （如组 5 所

示），当  $0.937 < c_e < 1$  时，有  $\frac{\partial \pi_R^{I*}}{\partial \theta} > 0$ （如组 6 所示）；当  $k > 0.159$  时，有

$\frac{\partial \pi_R^{I*}}{\partial \theta} < 0$  (如组 7 所示)。与命题 3.3(2)的结果相一致。

### 3.4.2 旧车耐用性与以旧换新策略对消费者剩余与社会福利的影响

在三种以旧换新模型中，新顾客和老顾客的消费者剩余分别为：

(1) 在模型  $N$  下：

$$CS_n^N = (1-\gamma) \int_{p_e}^1 (\psi - p_e) d\psi = \frac{(1-\gamma)(1-p_e)^2}{2} \quad (3-27)$$

$$CS_o^N = \gamma \int_{\frac{p_e - s_s}{1-\delta}}^1 (\psi - p_e + s_s) d\psi = \gamma \left( \frac{1}{2} - p_e + s_s + \frac{(1-2\delta)(p_e - s_s)^2}{2(1-\delta)^2} \right) \quad (3-28)$$

(2) 在模型  $B$  下：

$$CS_n^B = (1-\gamma) \int_{p_e}^1 (\psi - p_e) d\psi = \frac{(1-\gamma)(1-p_e)^2}{2} \quad (3-29)$$

$$CS_o^B = \gamma \int_{\frac{p_b - s_b}{\mu - \delta}}^1 (\mu\psi - p_b + s_b) d\psi = \gamma \left( \frac{\mu}{2} - p_b + s_b + \frac{(\mu-2\delta)(p_b - s_b)^2}{2(\mu-\delta)^2} \right) \quad (3-30)$$

(3) 在模型  $I$  下：

$$CS_n^I = (1-\gamma) \int_{p_e}^1 (\psi - p_e) d\psi = \frac{(1-\gamma)(1-p_e)^2}{2} \quad (3-31)$$

$$CS_o^I = \gamma \int_{\frac{p_e - s_e - m_e}{1-\delta}}^1 (\psi - p_e + s_e + m_e) d\psi = \gamma \left( \frac{1}{2} - p_e + s_e + m_e + \frac{(1-2\delta)(p_e - s_e - m_e)^2}{2(1-\delta)^2} \right) \quad (3-32)$$

在满足相关参数的设置下，旧车耐用性  $\delta$  与以旧换新策略对消费者剩余及社会总福利的影响如图 3-5 和图 3-6 所示。

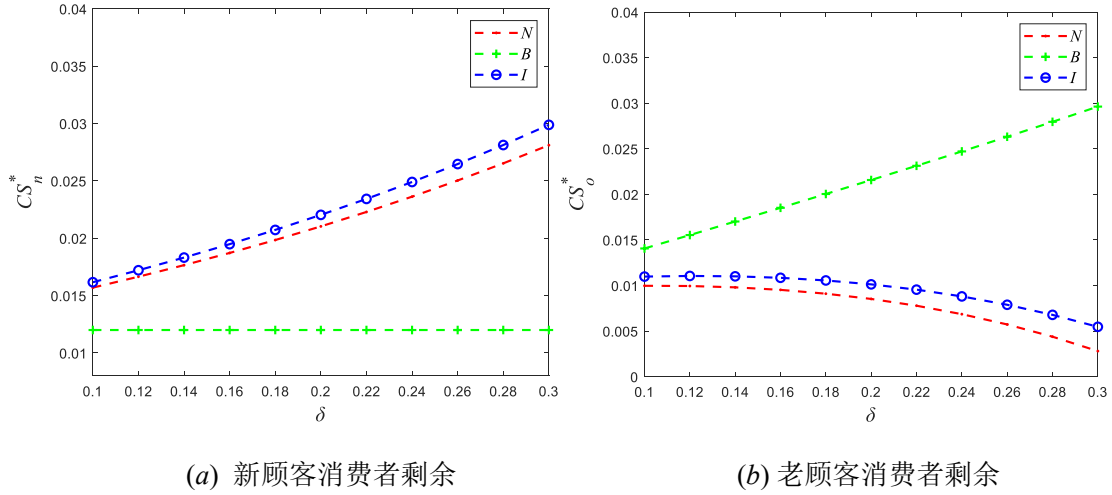


图 3-5 新老顾客消费者剩余

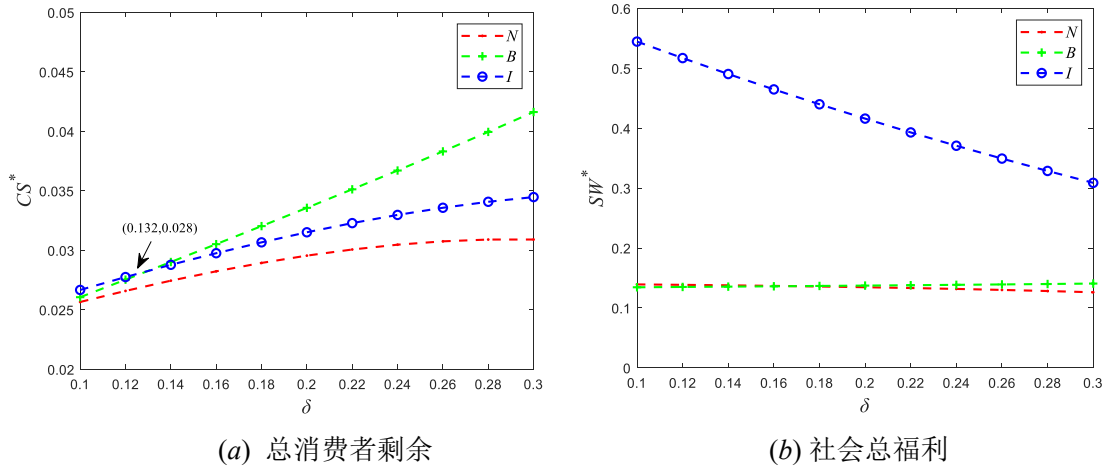


图 3-6 总消费者剩余及社会总福利

由图 3-5 和图 3-6 可知，旧车耐用性对消费者剩余及社会总福利的影响与以旧换新模式相关。在电池以旧换新模式下，旧车耐用性越高，新（老）顾客消费者剩余不变（升高），总消费者剩余和社会总福利均提高；在无以旧换新或整车以旧换新服务模式下，随着旧车耐用性的增加，新（老）顾客消费者剩余增加（降低），总消费者剩余提高，而社会总福利降低。同时，整车以旧换新对新顾客最为有利，而电池以旧换新对老顾客最为有利。在所有消费者层面，当旧车耐用性非极低时，电池以旧换新总是优于整车以旧换新。在社会总福利层面，整车以旧换新总能够产生最高的社会总福利。因此，为了最大化社会总福利，政府应鼓励制造商提供整车以旧换新服务模式，这也与当前政府提供的单补贴政策相吻合。

### 3.4.3 政府补贴政策的影响

当制造商提供整车以旧换新服务时（模型  $I$ ），政府对老顾客置换 NEV 补贴  $m_e$  对供应链成员利润、消费者剩余和社会总福利的影响如图 3-7、图 3-8 和图 3-9 所示。在满足相关参数假设条件的基础上，设定  $\delta = 0.25$ ， $m_e \in (0, 0.6)$ 。

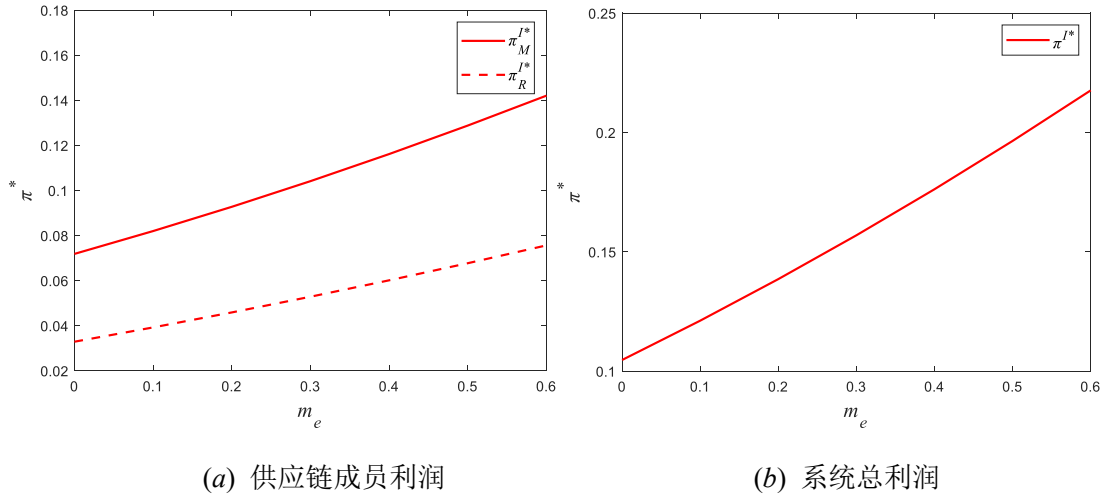


图 3-7 政府补贴对利润的影响

由图 3-7 可知，随着政府对老顾客置换 NEV 补贴  $m_e$  的升高，制造商、零售商和系统总利润均会增加，这是因为政府补贴直接降低了老顾客参加整车以旧换新的成本，有效刺激了以旧换新的市场需求，进而提升了供应链中各成员的利润水平。

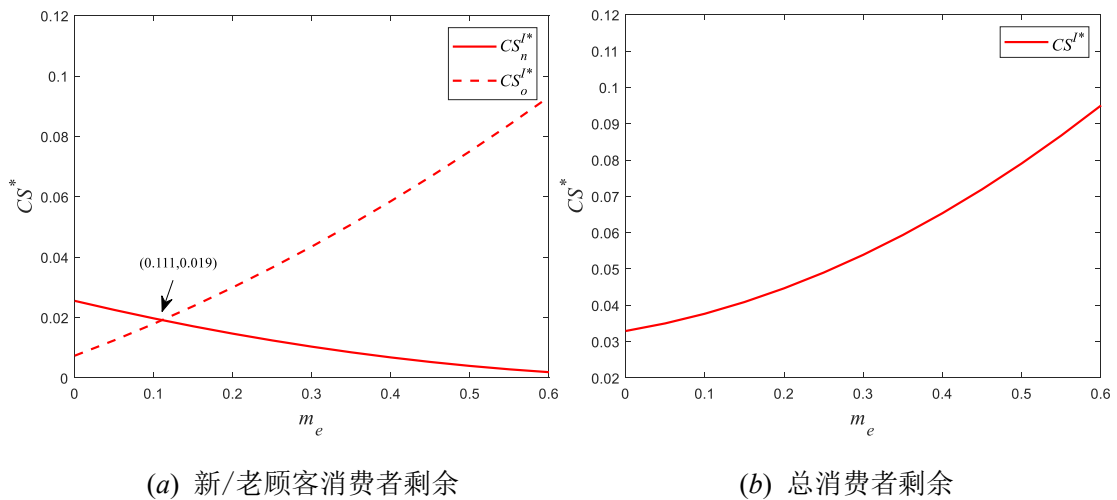


图 3-8 政府补贴对消费者剩余的影响

由图 3-8 可知，当制造商提供整车以旧换新服务时（模型  $I$ ），随着政府对

老顾客置换 NEV 补贴  $m_e$  的升高, 新顾客的消费者剩余降低, 而老顾客的消费者剩余升高; 其次, 当政府补贴高于一点阈值时 ( $m_e > 0.111$ ), 老顾客消费者剩余会超过新消费者剩余, 因此, 政府以旧换新补贴的升高并不总是有利于所有消费者, 即有利于参加以旧换新的老顾客, 而会蚕食新顾客的利益。

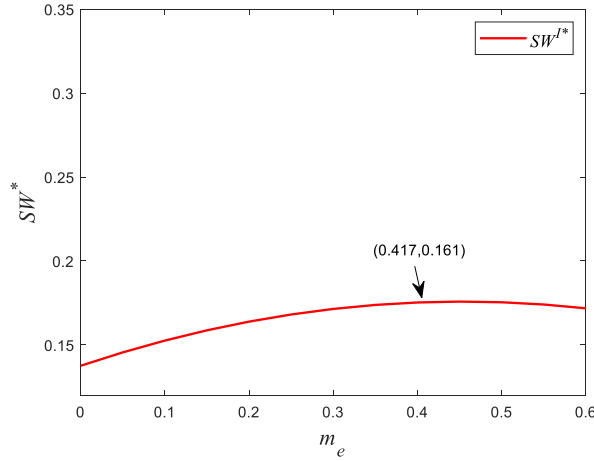


图 3-9 政府补贴对社会总福利的影响

由图 3-9 可知, 随着政府对老顾客置换 NEV 补贴  $m_e$  的升高, 社会总福利水平呈现先升后降趋势。这是因为政府补贴力度增大直接降低了老顾客以旧换新的成本, 从而带来了更高的市场需求, 结合图 3-7(b)和图 3-8(b)可知, 总消费者剩余的增加和供应链成员利润的增加使得社会总福利呈上升趋势。然而, 当补贴超过一定阈值时 ( $m_e > 0.417$ ), 更高的以旧换新补贴额度会给政府带来更高的财政支出, 进而会给社会总福利带来不利影响。因此, 政府在确定补贴额度时, 应该进行详细的成本效益分析, 旨在衡量财政支出与社会福利增长之间的平衡关系, 以确保财政资源的高效且合理的利用。

### 3.5 本章小结

本章以由一个制造商和一个零售商构成的 NEV 供应链为研究对象, 在依据消费者类型对市场进行细分的基础上, 同时考虑政府为老顾客提供以旧车换 NEV 补贴 (单补贴政策), 分别构建了无以旧换新、电池以旧换新和整车以旧换新三种服务模式下的供应链博弈模型, 研究不同以旧换新服务模式下定价的决策, 明确以旧换新模式、政府补贴、动力蓄电池容量消耗、旧车耐用性等关键参数对定价决策的影响, 探讨不同以旧换新模式的运行绩效。主要结论

如下：

(1) 当制造商提供电池以旧换新服务时，旧电池容量消耗仅会影响电池的定价决策，而不影响 NEV 的定价决策，即旧电池容量消耗越大，电池批发价格和销售价格越高，以旧换新数量降低。当制造商提供整车以旧换新服务时，旧电池容量消耗越高，NEV 的批发价格和零售价格越高，NEV 的销量和整车以旧换新数量会降低。在两种以旧换新模式下，NEV 生产成本越高，NEV 和动力蓄电池的批发价格和销售价格越高，新车销量和以旧换新数量则越低。

(2) 当旧车耐用性较低时，制造商提供电池以旧换新服务会降低 NEV 的批发价格和销售价格，进而提高 NEV 销量；当旧车耐用性较高时，提供电池以旧换新服务会提高 NEV 的批发价格和零售价格，进而降低 NEV 销量；由此可知，若制造商以推广 NEV 使用以抢占更大的市场份额为目标，则应依据旧车的耐用性选择合适的以旧换新策略。

(3) 两种以旧换新服务模式对供应链成员利润的影响与旧车耐用性相关。当旧车耐用性较低时，相较于电池以旧换新，整车以旧换新总能为制造商和零售商带来更高的利润，整车以旧换新服务模式是相关利益主体的共同选择。

(4) 当制造商提供整车以旧换新服务时，政府补贴力度的增大并不总有利于所有消费者，即有利于参加以旧换新的老顾客，而会蚕食新顾客的利益，其次，政府补贴的增加会提升供应链成员的利润，而过高的政府补贴额度不利于社会总福利的提升。

## 第4章 政府单补贴政策下 NEV 供应链整车以旧换新策略及定价决策研究

在政府单补贴政策的背景下，上一章依据工业实践，考虑了制造商提供两种不同的以旧换新服务，即部件（电池）以旧换新服务和整车以旧换新服务，分析了不同以旧换新模式下最优产品定价决策及其影响因素，并探讨了 NEV 生产企业的最优以旧换新策略。研究结果显示，在多数情况下，整车以旧换新策略为最优策略，且制造商提供整车以旧换新服务总能最大化社会福利，从而实现经济效益和社会福利的双重提升。另外，为了加速汽车产业绿色转型的进程，汽车制造商推出了多样化的整车以旧换新服务，以鼓励消费者更换 NEV 或排放量更低的新燃油车。

因此，本章聚焦于 NEV 供应链整车以旧换新策略的研究，考虑了现实中存在的更多不同的整车以旧换新服务模式，例如，以旧 NEV 置换新 NEV 和以旧燃油车置换 NEV 等服务。具体而言，针对一个由制造商和零售商构成的 NEV 供应链，在制造商仅提供以旧 NEV 换新 NEV 服务的基础上，考虑制造商同时提供以旧燃油车换 NEV 服务、或同时提供以旧燃油车换新燃油车服务或三种服务都提供的四种不同的整车以旧换新策略，建立制造商不同整车以旧换新策略下供应链成员的博弈决策模型，并尝试解决以下问题：

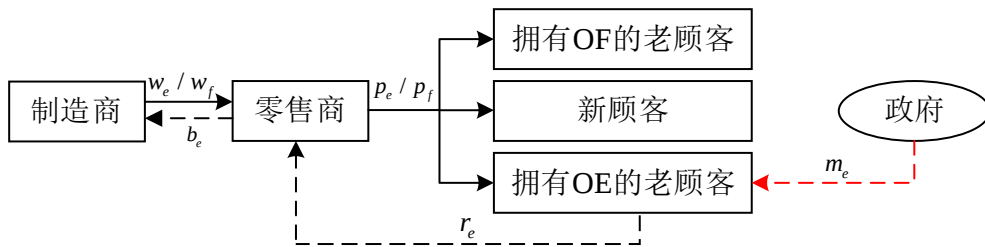
- (1) 研究当政府仅提供 NEV 置换补贴（单补贴）时，在不同的整车以旧换新服务模式，制造商和零售商的最优产品定价决策；
- (2) 政府单补贴政策对制造商不同整车以旧换新策略下 NEV 供应链运作绩效的影响；
- (3) 明确影响 NEV 企业整车以旧换新策略选择及产品定价决策的因素。

### 4.1 问题描述与相关假设

#### 4.1.1 问题描述

本章考虑由一家同时生产燃油车和 NEV 的汽车制造商（简称制造商）和零

售商构成的 NEV 供应链，其中制造商为领导者，零售商为跟随者，两者为 Stackelberg 博弈关系。制造商以批发价格  $w_e(w_f)$  将制造成本为  $c_e(c_f)$  的 NEV（燃油车）批发给零售商，零售商以零售价格  $p_e(p_f)$  销售给顾客。为了更好的连接汽车的销售端和回收端，制造商提供整车以旧换新服务，即零售商给予参加以旧换新的老顾客旧车折价  $r_e(r_f)$ ，制造商以转移价格  $b_e(b_f)$  向零售商回购旧车，制造商可从旧车中获得的单位残值为  $\tau_e(\tau_f)$ 。市场中存在三种消费者，即尚未购买任何汽车的新顾客和拥有旧燃油车（简称 OF）或者拥有旧 NEV（简称 OE）的老顾客。为了激励新顾客首次购买和老顾客进行整车的置换，制造商将提供不同的整车以旧换新服务，基于上一章的研究，本章首先考虑制造商提供以旧 NEV 换新的 NEV（简称 TOEE）服务，在此基础上制造商考虑是否为拥有旧燃油车的老顾客提供整车以旧换新服务以及该提供哪种服务，因此，本文研究分为四种情况：制造商仅提供 TOEE 服务（模型 NE，简称单一置换服务）；在提供 TOEE 服务基础上，制造商同时提供以旧燃油车换新燃油车（简称 TOFF）服务（模型 FE，简称定向置换服务）；在提供 TOEE 服务基础上，制造商同时提供以旧燃油车换 NEV（简称 TOFE）服务（模型 EE，简称双向置换服务）；制造商同时提供 TOEE、TOFF 和 TOFE 服务（模型 DE，简称全面置换服务）。为进一步扩大购买需求，政府为老顾客提供以旧换新单位补贴  $m_e$ ，本章考虑政府仅对置换 NEV 的老顾客提供以旧换新补贴（单补贴政策），即参加 TOEE、TOFE 服务的老顾客可以得到政府补贴。制造商的四种整车以旧换新策略下制造商和零售商的决策过程如图 4-1 所示。



(a) 模型 NE

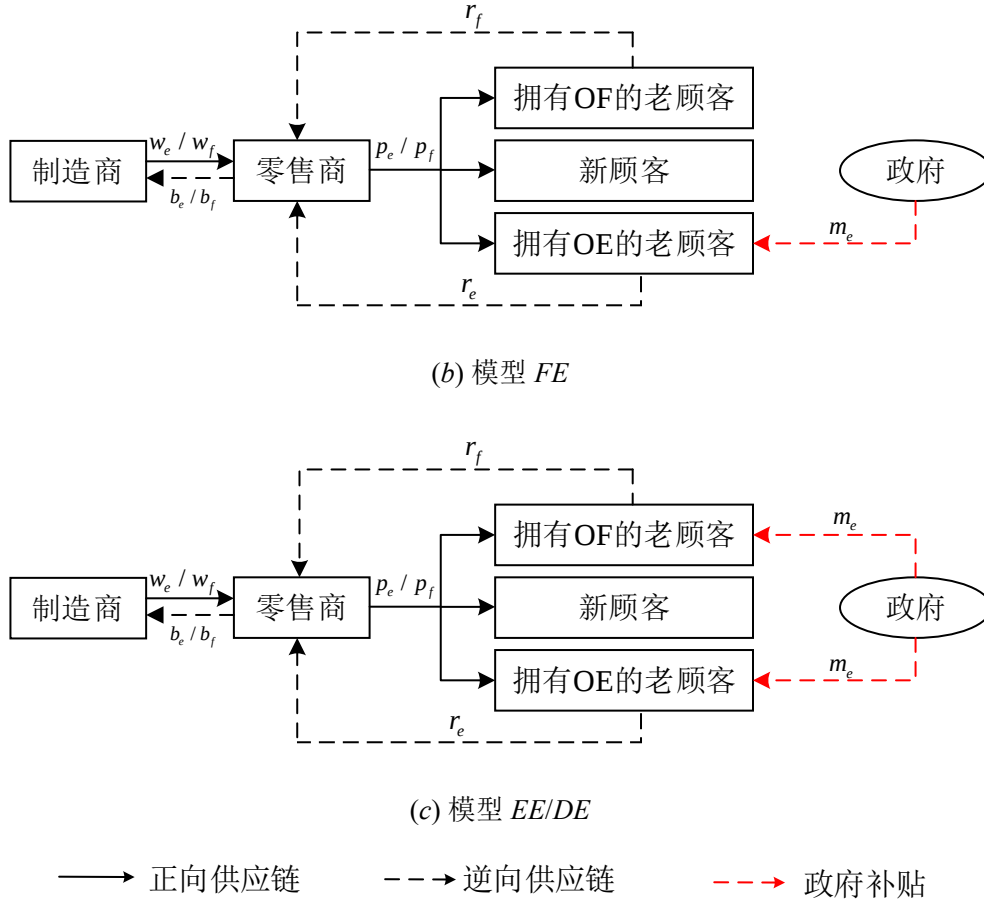


图 4-1 不同整车以旧换新策略下的决策过程

#### 4.1.2 相关假设与需求函数

##### (1) 相关假设

**假设 4.1.** 制造商和零售商在各方面信息完全公开透明，双方均以利润最大化为目标，其自身也都是风险中性的。

**假设 4.2.** 假设市场稳定，只考虑单个周期的决策。市场中存在三类消费者，即尚未购买汽车的新顾客、已经拥有旧燃油车的老顾客和已经拥有旧 NEV 的老顾客，假设市场规模标准化为 1，其中拥有旧燃油车的老顾客比例为  $\eta$ ，拥有旧 NEV 的老顾客比例为  $\gamma$ ，新顾客比例为  $(1-\gamma-\eta)$ ，其中， $0 < \eta + \gamma < 1$ 。假设消费者对燃油汽车的支付意愿  $v$  在  $[0,1]$  上均匀分布，对 NEV 的支付意愿为  $\alpha v$  ( $\alpha > 1$ )， $\alpha$  为顾客环保意识<sup>[74]</sup>。根据全球性市场咨询公司(J.D. Power)的研究<sup>[75]</sup>，NEV 和燃油车的耐用性水平趋于一致，为了简化后续计算，假设老顾客对

旧燃油车和旧 NEV 的评价相同，即旧燃油车和旧 NEV（统称旧车）的耐用性均为  $\delta$ ， $\delta \in (0,1)$ ，此时老顾客对旧燃油车的估值为  $\delta v$ ，对旧 NEV 的估值为  $\delta \alpha v$ 。

**假设 4.3.** 消费者拥有一辆汽车即可满足需求，所以消费者至多拥有一辆汽车。老顾客可以选择继续使用旧车或以旧换新。

**假设 4.4.** 假设对于拥有旧车的老顾客来说，其更愿意选择在以旧换新返利较高的制造商处通过参加整车以旧换新来获得所需要的车型，而不是选择去售价较低的二手市场出售后再去直接购买所需的车型。

**假设 4.5.** 全球电动汽车驾驶员联盟(GEVA)的研究报告显示<sup>[76]</sup>，96%的 NEV 车主不想换回燃油车，只有 3%的 NEV 车主表示不确定，这与其他类似的研究结果基本相似，因此，本章假设拥有旧 NEV 的老顾客不会选择去置换新燃油车。

**假设 4.6.** 旧车二手市场回收旧的燃油车和 NEV 仍然有较高的经济价值和再利用价值<sup>[77]</sup>，为保证本章模型结果非负，本章假设  $r_s > \delta$ ，即旧车的回收价格大于耐用性系数，意味着虽然旧车在使用过程中会逐渐磨损，但其废旧状态下的回收价值仍然较高，这样回收旧车和顾客出售旧车才具有现实意义。

## (2) 需求函数

基于上述假设，新老顾客的需求函数分析如下：

### 1) 新顾客的需求函数

根据本章假设可知，新顾客有三种选择：购买燃油车、购买 NEV 和不购买，新顾客购买燃油车和 NEV 的效用分别为  $u_{nf}^i = v - p_f$  和  $u_{ne}^i = \alpha v - p_e$ ，当  $u_{nf}^i > u_{ne}^i$  且  $u_{nf}^i > 0$  时，新顾客选择购买燃油车；当  $u_{ne}^i > u_{nf}^i$  且  $u_{ne}^i > 0$  时，新顾客选择购买 NEV。由此可知，新顾客购买燃油车和 NEV 的需求分别为

$$q_{nf}^i = (1 - \eta - \gamma) \left( \frac{p_e - p_f}{\alpha - 1} - p_f \right) \quad \text{和} \quad q_{ne}^i = (1 - \eta - \gamma) \left( 1 - \frac{p_e - p_f}{\alpha - 1} \right), \quad \text{其中}$$

$$i \in \{NE, EE, FE, DE\}。$$

### 2) 老顾客的需求函数

#### ① 拥有旧 NEV 的老顾客

根据本章假设可知，拥有旧 NEV 的老顾客有两种选择：参加制造商提供的 TOEE 服务或者继续使用旧车，参加 TOEE 的老顾客可以得到政府的 NEV 置换补贴  $m_e$  以及旧车折价  $r_e$ ，两种选择的效用分别为： $u_{ee}^i = \alpha v - p_e + r_e + m_e$ 、 $u_e^i = \delta \alpha v$ ，仅当  $u_{ee}^i > u_e^i$  且  $u_{ee}^i > 0$  时，拥有旧 NEV 的老顾客会参加 TOEE 服务，由此可知，拥有旧 NEV 的老顾客参加 TOEE 服务的需求为  $q_{ee}^i = \gamma(1 - \frac{p_e - r_e - m_e}{\alpha(1 - \delta)})$ ，其中  $i \in \{NE, EE, FE, DE\}$ 。

## ②拥有旧燃油车的老顾客

1、当制造商仅提供 TOEE 服务时（模型 NE），拥有旧燃油车的老顾客此时有三种选择：在二手市场出售旧车后再购买新燃油车或者 NEV 和继续使用旧燃油车，在二手市场出售旧车的收益为  $r_s$ ，三种选择的效用分别为：

$u_{ff}^{NE} = v - p_f + r_s$ 、 $u_{fe}^{NE} = \alpha v - p_e + r_s$  和  $u_f^{NE} = \delta v$ 。仅当  $u_{ff}^{NE} > \max\{u_{fe}^{NE}, u_f^{NE}\}$  且  $u_{ff}^{NE} > 0$  时，拥有旧燃油车的老顾客才会出售旧车后购买新燃油车，仅当  $u_{fe}^{NE} > \max\{u_{ff}^{NE}, u_f^{NE}\}$  且  $u_{fe}^{NE} > 0$  时，老顾客才会出售旧车后购买 NEV，进而可得拥有旧燃油车的老顾客在二手市场出售旧车后购买燃油车和 NEV 的需求为：

$$q_{ff}^{NE} = \eta(\frac{p_e - p_f}{\alpha - 1} - \frac{p_f - r_s}{1 - \delta}), \quad q_{fe}^{NE} = \eta(1 - \frac{p_e - p_f}{\alpha - 1})。$$

2、当制造商同时提供 TOEE 和 TOFF 服务时（模型 FE）。拥有旧燃油车的老顾客此时有三种选择：在二手市场出售旧车后再购买 NEV、参加 TOFF 服务和继续使用旧燃油车，在二手市场出售旧车的收益为  $r_s$ ，参加 TOFF 的老顾客可以得到旧车折价  $r_f$ ，三种选择的效用分别为： $u_{fe}^{FE} = \alpha v - p_e + r_s$ ， $u_{ff}^{FE} = v - p_f + r_f$  和  $u_f^{FE} = \delta v$ ，仅当  $u_{fe}^{FE} > \max\{u_{ff}^{FE}, u_f^{FE}\}$  且  $u_{fe}^{FE} > 0$  时，拥有旧燃油车的老顾客才会在二手市场出售旧车后购买 NEV，仅当  $u_{ff}^{FE} > \max\{u_{fe}^{FE}, u_f^{FE}\}$  且  $u_{ff}^{FE} > 0$  时，老顾客才会参加 TOFF 服务，可得拥有旧燃油车的老顾客在二手市场出售旧车后购买能源车和参加 TOFF 服务的需求为：

$$q_{fe}^{FE} = \eta(1 - \frac{p_e - p_f + r_f - r_s}{\alpha - 1}), \quad q_{ff}^{FE} = \eta(\frac{p_e - p_f + r_f - r_s}{\alpha - 1} - \frac{p_f - r_f}{1 - \delta}).$$

3、当制造商同时提供 TOEE 和 TOFE 服务时（模型 EE）。拥有旧燃油车的老顾客此时有三种选择：在二手市场出售旧车后再购买新燃油车、参加 TOFE 服务和继续使用旧燃油车，在二手市场出售旧车的收益为  $r_s$ ，参加 TOFE 的老顾客可以得到政府的 NEV 置换补贴  $m_e$  以及旧车折价  $r_f$ ，三种选择的效用分别为  $u_{ff}^{EE} = v - p_f + r_s$ 、 $u_{fe}^{EE} = \alpha v - p_e + r_f + m_e$  和  $u_f^{EE} = \delta v$ ，仅当  $u_{ff}^{EE} > \max\{u_{fe}^{EE}, u_f^{EE}\}$  且  $u_{ff}^{EE} > 0$  时，拥有旧燃油车的老顾客才会在二手市场出售旧车后购买新燃油车，仅当  $u_{fe}^{EE} > \max\{u_{ff}^{EE}, u_f^{EE}\}$  且  $u_{fe}^{EE} > 0$  时，拥有旧燃油车的老顾客才会参加 TOFE 服务，可得拥有旧燃油车的老顾客在二手市场出售旧车后购买燃油车和参加 TOFE 服务的需求为：

$$q_{ff}^{EE} = \eta(\frac{p_e - p_f + r_s - r_f - m_e}{\alpha - 1} - \frac{p_f - r_s}{1 - \delta}), \quad q_{fe}^{EE} = \eta(1 - \frac{p_e - p_f + r_s - r_f - m_e}{\alpha - 1}).$$

4、当制造商同时提供 TOEE、TOFF 和 TOFE 服务时（模型 DE）。拥有旧燃油车的老顾客此时有三种选择：参加 TOFE 服务、参加 TOFF 服务和继续使用旧燃油车，参加 TOFE 的老顾客可以得到政府的 NEV 置换补贴  $m_e$  以及旧车折价  $r_f$ ，参加 TOFF 的老顾客只可以得到旧车折价  $r_f$ ，三种选择的效用分别为  $u_{fe}^{DE} = \alpha v - p_e + r_f + m_e$ ， $u_{ff}^{DE} = v - p_f + r_f$  和  $u_f^{DE} = \delta v$ ，仅当  $u_{fe}^{DE} > \max\{u_{ff}^{DE}, u_f^{DE}\}$  且  $u_{fe}^{DE} > 0$  时，拥有旧燃油车的老顾客才会参加 TOFE 服务，仅当  $u_{ff}^{DE} > \max\{u_{fe}^{DE}, u_f^{DE}\}$  且  $u_{ff}^{DE} > 0$  时，拥有旧燃油车的老顾客会参加 TOFF 服务，进而可得拥有旧燃油车的老顾客参加 TOFE 和 TOFF 的需求为：

$$q_{fe}^{DE} = \eta(1 - \frac{p_e - p_f - m_e}{\alpha - 1}), \quad q_{ff}^{DE} = \eta(\frac{p_e - p_f - m_e}{\alpha - 1} - \frac{p_f - r_f}{1 - \delta}).$$

本章研究使用的相关符号及说明如表 4-1 所示。

表 4-1 第四章符号和定义

| 符号                    | 定义                                               |
|-----------------------|--------------------------------------------------|
| 决策变量                  |                                                  |
| $w_e / w_f$           | NEV/新燃油车的单位批发价格                                  |
| $p_e / p_f$           | NEV/新燃油车的单位零售价格                                  |
| $b_e / b_f$           | 旧 NEV/燃油车的转移价格                                   |
| $r_e / r_f$           | 旧 NEV/燃油车的折价                                     |
| 参数                    |                                                  |
| $c_e / c_f$           | NEV/新燃油车的单位生产成本                                  |
| $\alpha$              | 消费者的环保意识                                         |
| $\gamma$              | 拥有旧 NEV 的老顾客比例                                   |
| $\eta$                | 拥有旧燃油车的老顾客比例                                     |
| $m_e$                 | 政府对老顾客置换 NEV 的单位补贴                               |
| $r_s$                 | 老顾客在二手市场出售旧燃油车的收益                                |
| $v$                   | 消费者对燃油车的支付意愿                                     |
| $\tau_e / \tau_f$     | 旧 NEV/燃油车的单位残值                                   |
| $\delta$              | 旧车的耐用性                                           |
| 其他符号                  |                                                  |
| $Q^i$                 | $i$ 模型中顾客购买新车的总需求                                |
| $Q_{EV}^i / Q_{FV}^i$ | $i$ 模型中顾客购买 NEV/燃油车的总需求                          |
| $q_{ne}^i / q_{nf}^i$ | $i$ 模型中新顾客购买 NEV/燃油车的需求                          |
| $q_{fe}^i / q_{ff}^i$ | $i$ 模型中拥有旧燃油车的老顾客置换 NEV/新燃油车需求                   |
| $q_{ee}^i$            | $i$ 模型中拥有旧 NEV 的老顾客置换新 NEV 的需求                   |
| $\pi_M^i / \pi_R^i$   | $i$ 模型中制造商/零售商利润                                 |
| $i$                   | $i \in \{NE, FE, EE, DE\}$ ，分别表示模型 NE、FE、EE 和 DE |

## 4.2 模型建立与求解

### 4.2.1 单一置换服务模型—NE

在制造商仅提供 TOEE 服务（模型 NE）的情景中，制造商首先决定燃油车 (NEV) 的批发价格  $w_f(w_e)$  和旧 NEV 的回购价格  $b_e$ ，然后零售商决定燃油车

(NEV)的零售价格  $p_f(p_e)$  和旧 NEV 的折价  $r_e$ 。此时制造商和零售商的利润函数可表达如下：

$$\max_{\{w_f, w_e, b_e\}} \pi_M^{NE} = (w_f - c_f)(q_{nf} + q_{ff}) + (w_e - c_e)(q_{ne} + q_{fe}) + (w_e - c_e - b_e + \tau_e)q_{ee} \quad (4-1)$$

$$\max_{\{p_f, p_e, r_e\}} \pi_R^{NE} = (p_f - w_f)(q_{nf} + q_{ff}) + (p_e - w_e)(q_{ne} + q_{fe}) + (p_e - w_e + b_e - r_e)q_{ee} \quad (4-2)$$

运用逆向归纳法对模型 NE 求解可得：

(1) 最优批发价格和零售价格为：

$$w_e^{NE*} = \frac{\eta(r_s - \delta)}{2((1-\gamma)(1-\delta) + \delta\eta)} + \frac{c_e + \alpha}{2} \quad (4-3)$$

$$w_f^{NE*} = \frac{\eta(r_s - \delta)}{2((1-\gamma)(1-\delta) + \delta\eta)} + \frac{1 + c_f}{2} \quad (4-4)$$

$$p_e^{NE*} = \frac{3\eta(r_s - \delta)}{4((1-\gamma)(1-\delta) + \delta\eta)} + \frac{c_e + 3\alpha}{4} \quad (4-5)$$

$$p_f^{NE*} = \frac{3\eta(r_s - \delta)}{4((1-\gamma)(1-\delta) + \delta\eta)} + \frac{3 + c_f}{4} \quad (4-6)$$

(2) 最优回购价格和旧车折价为：

$$b_e^{NE*} = \frac{\alpha\delta + \tau_e - m_e}{2} + \frac{\eta(r_s - \delta)}{2((1-\gamma)(1-\delta) + \delta\eta)} \quad (4-7)$$

$$r_e^{NE*} = \frac{3(\alpha\delta - m_e) + \tau_e}{4} + \frac{3\eta(r_s - \delta)}{4((1-\gamma)(1-\delta) + \delta\eta)} \quad (4-8)$$

#### 4.2.2 定向置换服务模型—FE

在制造商同时提供 TOEE 和 TOFF 服务（模型 FE）的情景中，制造商首先决定燃油车(NEV)的批发价格  $w_f(w_e)$  和旧燃油车(NEV)的回购价格  $b_f(b_e)$ ，然后零售商决定燃油车(NEV)的零售价格  $p_f(p_e)$  和旧燃油车(NEV)的折价  $r_f(r_e)$ 。此时制造商和零售商的利润函数可表达如下：

$$\begin{aligned} \max_{\{w_f, w_e, b_e, b_f\}} \pi_M^{FE} = & (w_f - c_f)q_{nf} + (w_f - c_f - b_f + \tau_f)q_{ff} + (w_e - c_e)(q_{ne} + q_{fe}) \\ & + (w_e - c_e - b_e + \tau_e)q_{ee} \end{aligned} \quad (4-9)$$

$$\begin{aligned} \max_{\{p_f, p_e, r_e, r_f\}} \pi_R^{FE} = & (p_f - w_f)q_{nf} + (p_f - w_f + b_f - r_f)q_{ff} + (p_e - w_e)(q_{ne} + q_{fe}) \\ & + (p_e - w_e + b_e - r_e)q_{ee} \end{aligned} \quad (4-10)$$

运用逆向归纳法对模型  $FE$  求解可得：

(1) 最优批发价格和零售价格为：

$$w_e^{FE*} = \frac{\alpha\eta(r_s - \delta)}{2((1-\gamma)(\alpha - \delta) + \delta\eta)} + \frac{c_e + \alpha}{2} \quad (4-11)$$

$$w_f^{FE*} = \frac{\alpha\eta(r_s - \delta)}{2((1-\gamma)(\alpha - \delta) + \delta\eta)} + \frac{1 + c_f}{2} \quad (4-12)$$

$$p_e^{FE*} = \frac{3\alpha\eta(r_s - \delta)}{4((1-\gamma)(\alpha - \delta) + \delta\eta)} + \frac{c_e + 3\alpha}{4} \quad (4-13)$$

$$p_f^{FE*} = \frac{3\alpha\eta(r_s - \delta)}{4((1-\gamma)(\alpha - \delta) + \delta\eta)} + \frac{3 + c_f}{4} \quad (4-14)$$

(2) 最优回购价格和旧车折价为：

$$b_e^{FE*} = \frac{\alpha\eta(r_s - \delta)}{2((1-\gamma)(\alpha - \delta) + \delta\eta)} + \frac{\alpha\delta + \tau_e - m_e}{2} \quad (4-15)$$

$$b_f^{FE*} = \frac{(1-\alpha)(1-\gamma)(r_s - \delta)}{2((1-\gamma)(\alpha - \delta) + \delta\eta)} + \frac{\tau_f + r_s}{2} \quad (4-16)$$

$$r_e^{FE*} = \frac{3\alpha\eta(r_s - \delta)}{4((1-\gamma)(\alpha - \delta) + \delta\eta)} + \frac{3(\alpha\delta - m_e) + \tau_e}{4} \quad (4-17)$$

$$r_f^{FE*} = \frac{3(1-\alpha)(1-\gamma)(r_s - \delta)}{4((1-\gamma)(\alpha - \delta) + \delta\eta)} + \frac{\tau_f + 3r_s}{4} \quad (4-18)$$

#### 4.2.3 双向置换服务模型— $EE$

在制造商同时提供  $TOEE$  和  $TOFE$  服务（模型  $EE$ ）的情景中，制造商首先决定燃油车(NEV)的批发价格  $w_f(w_e)$  和旧燃油车(NEV)的回购价格  $b_f(b_e)$ ，然后零售商决定燃油车(NEV)的零售价格  $p_f(p_e)$  和旧燃油车(NEV)的折价  $r_f(r_e)$ 。此时制造商和零售商的利润函数可表达如下：

$$\begin{aligned} \max_{\{w_f, w_e, b_e, b_f\}} \pi_M^{EE} &= (w_f - c_f)(q_{nf} + q_{ff}) + (w_e - c_e)q_{ne} + (w_e - c_e - b_f + \tau_f)q_{fe} \\ &\quad + (w_e - c_e - b_e + \tau_e)q_{ee} \end{aligned} \quad (4-19)$$

$$\begin{aligned} \max_{\{p_f, p_e, r_e, r_f\}} \pi_R^{EE} &= (p_f - w_f)(q_{nf} + q_{ff}) + (p_e - w_e)q_{ne} + (p_e - w_e + b_f - r_f)q_{fe} \\ &\quad + (p_e - w_e + b_e - r_e)q_{ee} \end{aligned} \quad (4-20)$$

运用逆向归纳法对模型  $EE$  求解可得：

(1) 最优批发价格和零售价格为：

$$w_e^{EE*} = \frac{\eta(r_s - \delta)}{2((1-\gamma)(1-\delta) + \delta\eta)} + \frac{c_e + \alpha}{2} \quad (4-21)$$

$$w_f^{EE*} = \frac{\eta(r_s - \delta)}{2((1-\gamma)(1-\delta) + \delta\eta)} + \frac{1 + c_f}{2} \quad (4-22)$$

$$p_e^{EE*} = \frac{3\eta(r_s - \delta)}{4((1-\gamma)(1-\delta) + \delta\eta)} + \frac{c_e + 3\alpha}{4} \quad (4-23)$$

$$p_f^{EE*} = \frac{3\eta(r_s - \delta)}{4((1-\gamma)(1-\delta) + \delta\eta)} + \frac{3 + c_f}{4} \quad (4-24)$$

(2) 最优回购价格和旧车折价为：

$$b_e^{EE*} = \frac{\alpha\delta + \tau_e - m_e}{2} + \frac{\eta(r_s - \delta)}{2((1-\gamma)(1-\delta) + \delta\eta)} \quad (4-25)$$

$$b_f^{EE*} = \frac{r_s - m_e + \tau_f}{2} \quad (4-26)$$

$$r_e^{EE*} = \frac{3(\alpha\delta - m_e) + \tau_e}{4} + \frac{3\eta(r_s - \delta)}{(1-\gamma)(1-\delta) + \delta\eta} \quad (4-27)$$

$$r_f^{EE*} = \frac{3(r_s - m_e) + \tau_f}{4} \quad (4-28)$$

#### 4.2.4 全面置换服务模型— $DE$

在制造商同时提供  $TOEE$ 、 $TOFF$  和  $TOFE$  服务（模型  $DE$ ）的情景中，制造商首先决定燃油车(NEV)的批发价格  $w_f(w_e)$  和旧燃油车(NEV)的回购价格

$b_f(b_e)$ ，然后零售商决定燃油车(NEV)的零售价格  $p_f(p_e)$  和旧燃油车(NEV)的折价  $r_f(r_e)$ 。此时制造商和零售商的利润函数可表达如下：

$$\begin{aligned} \max_{\{w_f, w_e, b_e, b_f\}} \pi_M^{DE} = & (w_f - c_f)q_{nf} + (w_f - c_f - b_f + \tau_f)q_{ff} + (w_e - c_e)q_{ne} \\ & + (w_e - c_e - b_f + \tau_f)q_{fe} + (w_e - c_e - b_e + \tau_e)q_{ee} \end{aligned} \quad (4-29)$$

$$\begin{aligned} \max_{\{p_f, p_e, r_e, r_f\}} \pi_R^{DE} = & (p_f - w_f)q_{nf} + (p_f - w_f + b_f - r_f)q_{ff} + (p_e - w_e)q_{ne} \\ & + (p_e - w_e + b_f - r_f)q_{fe} + (p_e - w_e + b_e - r_e)q_{ee} \end{aligned} \quad (4-30)$$

运用逆向归纳法对模型  $DE$  求解可得：

(1) 最优批发价格和零售价格为：

$$w_e^{DE*} = \frac{\eta m_e}{2(1-\gamma)} + \frac{c_e + \alpha}{2} \quad (4-31)$$

$$w_f^{DE*} = \frac{1 + c_f}{2} \quad (4-32)$$

$$p_e^{DE*} = \frac{3\eta m_e}{4(1-\gamma)} + \frac{c_e + 3\alpha}{4} \quad (4-33)$$

$$p_f^{DE*} = \frac{3 + c_f}{4} \quad (4-34)$$

(2) 最优回购价格和旧车折价为：

$$b_e^{DE*} = \frac{m_e(\eta + \gamma - 1)}{2(1-\gamma)} + \frac{\alpha\delta + \tau_e}{2} \quad (4-35)$$

$$b_f^{DE*} = \frac{\tau_f + \delta}{2} \quad (4-36)$$

$$r_e^{DE*} = \frac{3m_e(\eta + \gamma - 1)}{4(1-\gamma)} + \frac{3\alpha\delta + \tau_e}{4} \quad (4-37)$$

$$r_f^{DE*} = \frac{\tau_f + 3\delta}{4} \quad (4-38)$$

### 4.3 均衡结果分析

#### 4.3.1 以旧换新策略的影响分析

政府单补贴政策下制造商的以旧换新策略对供应链产品定价决策的影响如命题 4.1 所示。

**命题 4.1** (1) 当  $0 < m_e \leq m_{e1}$  时, 有  $w_e^{NE*} = w_e^{EE*} > w_e^{FE*} \geq w_e^{DE*}$ ,  $p_e^{NE*} = p_e^{EE*} > p_e^{FE*} \geq p_e^{DE*}$ ,  $b_e^{NE*} = b_e^{EE*} > b_e^{FE*} \geq b_e^{DE*}$  和  $r_e^{NE*} = r_e^{EE*} > r_e^{FE*} \geq r_e^{DE*}$ ; 当  $m_{e1} < m_e \leq m_{e2}$  时, 有  $w_e^{NE*} = w_e^{EE*} \geq w_e^{DE*} > w_e^{FE*}$ ,  $p_e^{NE*} = p_e^{EE*} \geq p_e^{DE*} > p_e^{FE*}$ ,  $b_e^{NE*} = b_e^{EE*} \geq b_e^{DE*} > b_e^{FE*}$  和  $r_e^{NE*} = r_e^{EE*} \geq r_e^{DE*} > r_e^{FE*}$ ; 当  $m_{e2} < m_e < 1$  时, 有  $w_e^{DE*} > w_e^{NE*} = w_e^{EE*} > w_e^{FE*}$ ,  $p_e^{DE*} > p_e^{NE*} = p_e^{EE*} > p_e^{FE*}$ ,  $b_e^{DE*} > b_e^{NE*} = b_e^{EE*} > b_e^{FE*}$  和  $r_e^{DE*} > r_e^{NE*} = r_e^{EE*} > r_e^{FE*}$ ;

(2)  $w_f^{NE*} = w_f^{EE*} > w_f^{FE*} > w_f^{DE*}$ ,  $p_f^{NE*} = p_f^{EE*} > p_f^{FE*} > p_f^{DE*}$ ; 当  $0 < m_e \leq m_{e3}$  时, 有  $b_f^{EE*} \geq b_f^{FE*} > b_f^{DE*}$ ,  $r_f^{EE*} \geq r_f^{FE*} > r_f^{DE*}$ ; 当  $m_{e3} < m_e \leq m_{e4}$  时, 有  $b_f^{FE*} > b_f^{EE*} \geq b_f^{DE*}$ ,  $r_f^{FE*} > r_f^{EE*} \geq r_f^{DE*}$ ; 当  $m_{e4} < m_e < 1$  时, 有  $b_f^{FE*} > b_f^{DE*} > b_f^{EE*}$ ,  $r_f^{FE*} > r_f^{DE*} > r_f^{EE*}$ 。

证明过程见附录 7。

命题 4.1 表明, 制造商以旧换新策略对 NEV 的定价决策和旧燃油车回收的转移价格 (即零售商给予消费者旧车折价和制造商给予零售商的旧车回购价格) 的影响与政府补贴力度相关, 但其对燃油车的批发价格和零售价格的影响与其无关。首先, 当制造商提供全面置换服务时 (模型 DE), 燃油车的批发价格和零售价格最低, 而 NEV 的定价决策和旧燃油车回收的转移价格与制造商以旧换新策略和政府补贴力度有关。具体来说: 当政府补贴较低时, 对于消费者置换 NEV 的经济激励相对较小; 此时, 若制造商提供全面置换服务, 为了促进消费者进行以旧换新, 制造商和零售商会降低 NEV 的批发价格和零售价格, 同时为了最大化自身利润, 制造商会降低旧车的回购价格, 零售商也会降低旧车的折价。当政府补贴适中和较高时, 消费者置换 NEV 的意愿显著增强; 此时, 若制造商提供定向置换服务 (模型 FE), NEV 的批发价格和零售价格最低, 极大提

高了消费者对 NEV 的需求，同时也满足了部分老顾客置换传统燃油车的需求；为了平衡 NEV 和燃油车的销量，优化整体利润结构，制造商会提高（降低）旧燃油车(NEV)的回购价格，同时零售商也会提高（降低）旧燃油车(NEV)的折价。

政府单补贴政策下制造商以旧换新策略对燃油车和 NEV 销量的影响如命题 4.2 所示。

**命题 4.2** (1)  $Q^{FE*} = Q^{DE*} > Q^{NE*} = Q^{EE*}$  ; (2)  $Q_{EV}^{EE*} > Q_{EV}^{DE*} > Q_{EV}^{NE*} > Q_{EV}^{FE*}$  , 当  $0 < m_e \leq m_{e5}$  时 , 有  $Q_{FV}^{FE*} > Q_{FV}^{DE*} \geq Q_{FV}^{NE*} > Q_{FV}^{EE*}$  , 而当  $m_{e5} < m_e < 1$  时 , 有  $Q_{FV}^{FE*} > Q_{FV}^{NE*} > Q_{FV}^{DE*} > Q_{FV}^{EE*}$  。

证明过程见附录 8。

命题 4.2 表明，在政府单补贴政策下，与制造商提供单一置换服务（模型 NE）相比，制造商提供双向置换服务（模型 EE）不影响新车总销量，而提供定向置换服务（模型 FE）或全面置换服务（模型 DE）则会提高新车总销量。其次，制造商以旧换新策略对燃油车总销量的影响与政府补贴力度有关，而对 NEV 总销量的影响与其无关。具体来说：制造商提供双向置换服务能使 NEV 的总销量最高，这是因为制造商额外提供的 TOFE 服务满足了部分拥有旧燃油车的消费者对置换 NEV 的需求；制造商提供定向置换服务能最大化燃油车的总销量，因为此时拥有旧燃油车的消费者只能参加制造商提供的 TOFF 服务，进而提高了燃油车的总销量。另外，相较于制造商提供单一置换服务，当制造商提供全面置换服务时，燃油车总销量的变化与政府补贴力度有关，当政府的 NEV 置换补贴较低时，更多消费者会选择去置换燃油车；此时，若制造商提供全面置换服务，则燃油车总销量增加。当政府补贴较高时，更多的消费者会选择去置换 NEV，此时，制造商提供全面置换服务并不会提高燃油车总销量。由此可知，制造商以旧换新策略和政府补贴力度对燃油车和 NEV 的总销量具有重要影响，即制造商需要根据燃油车和 NEV 不同的销售目标以及政府的补贴力度来制定以旧换新策略。

#### 4.3.2 关键参数影响分析

在四种不同的整车以旧换新模型下，燃油车和 NEV 生产成本  $c_f$  和  $c_e$  对均

均衡解、销量的影响如命题 4.3 所示。

**命题 4.3** (1)  $\frac{\partial w_e^{i*}}{\partial c_f} = \frac{\partial p_e^{i*}}{\partial c_f} = \frac{\partial b_e^{i*}}{\partial c_f} = \frac{\partial r_e^{i*}}{\partial c_f} = 0$ ,  $\frac{\partial w_f^{i*}}{\partial c_f} > 0$ ,  $\frac{\partial p_f^{i*}}{\partial c_f} > 0$ ,  $\frac{\partial Q^{i*}}{\partial c_f} < 0$ ,  
 $\frac{\partial Q_{FV}^{i*}}{\partial c_f} < 0$ ,  $\frac{\partial Q_{EV}^{i*}}{\partial c_f} > 0$ ,  $\frac{\partial b_f^{t*}}{\partial c_f} = \frac{\partial r_f^{t*}}{\partial c_f} = 0$ ; (2)  $\frac{\partial w_f^{i*}}{\partial c_e} = \frac{\partial p_f^{i*}}{\partial c_e} = \frac{\partial b_e^{i*}}{\partial c_e} = \frac{\partial r_e^{i*}}{\partial c_e} = 0$ ,  
 $\frac{\partial w_e^{i*}}{\partial c_e} > 0$ ,  $\frac{\partial p_e^{i*}}{\partial c_e} > 0$ ,  $\frac{\partial Q^{i*}}{\partial c_e} < 0$ ,  $\frac{\partial Q_{FV}^{i*}}{\partial c_e} > 0$ ,  $\frac{\partial Q_{EV}^{i*}}{\partial c_e} < 0$ ,  $\frac{\partial b_f^{t*}}{\partial c_e} = \frac{\partial r_f^{t*}}{\partial c_e} = 0$ , 其中  
 $i \in \{NE, FE, EE, DE\}$ ,  $t \in \{FE, EE, DE\}$ 。

证明过程见附录 9。

命题 4.3 表明, 当政府仅提供 NEV 置换补贴时, 燃油车(NEV)生产成本对供应链产品定价决策和销量的影响与制造商的以旧换新服务策略无关。具体来说: 首先, 随着燃油车(NEV)生产成本的增加, NEV (燃油车) 的批发价格、零售价格和旧车回收的转移价格 (即零售商给予消费者旧燃油车/NEV 的折价和制造商给予零售商旧燃油车/NEV 的回购价格) 不变, 而燃油车(NEV)的批发价格和零售价格会升高, 进而使燃油车(NEV)总销量降低, NEV (燃油车) 总销量升高, 但其增加幅度较低, 使得新车总销量降低。

政府补贴  $m_e$  对均衡解、销量的影响如命题 4.4 所示。

**命题 4.4** (1)  $\frac{\partial w_f^{i*}}{\partial m_e} = \frac{\partial p_f^{i*}}{\partial m_e} = 0$ ,  $\frac{\partial b_e^{i*}}{\partial m_e} < 0$ ,  $\frac{\partial r_e^{i*}}{\partial m_e} < 0$ ,  $\frac{\partial Q_{EV}^{i*}}{\partial m_e} = \frac{\partial Q^{i*}}{\partial m_e} > 0$ ,  
 $i \in \{NE, FE, EE, DE\}$ ; (2) 在模型 NE 中, 有  $\frac{\partial w_e^{NE*}}{\partial m_e} = \frac{\partial p_e^{NE*}}{\partial m_e} = \frac{\partial Q_{FV}^{NE*}}{\partial m_e} = 0$ ; (3) 在  
 模型 FE 中, 有  $\frac{\partial w_e^{FE*}}{\partial m_e} = \frac{\partial p_e^{FE*}}{\partial m_e} = \frac{\partial b_f^{FE*}}{\partial m_e} = \frac{\partial r_f^{FE*}}{\partial m_e} = \frac{\partial Q_{FV}^{FE*}}{\partial m_e} = 0$ ; (4) 在模型 EE 中, 有  
 $\frac{\partial w_e^{EE*}}{\partial m_e} = \frac{\partial p_e^{EE*}}{\partial m_e} = 0$ ,  $\frac{\partial b_f^{EE*}}{\partial m_e} < 0$ ,  $\frac{\partial r_f^{EE*}}{\partial m_e} < 0$ ,  $\frac{\partial Q_{FV}^{EE*}}{\partial m_e} < 0$ ; (5) 在模型 DE 中, 有  
 $\frac{\partial w_e^{DE*}}{\partial m_e} > 0$ ,  $\frac{\partial p_e^{DE*}}{\partial m_e} > 0$ ,  $\frac{\partial b_f^{DE*}}{\partial m_e} = \frac{\partial r_f^{DE*}}{\partial m_e} = 0$ ,  $\frac{\partial Q_{FV}^{DE*}}{\partial m_e} < 0$ 。

证明过程见附录 10。

命题 4.4(1)表明, 制造商整车以旧换新策略不会改变政府补贴对燃油车的批发价格和零售价格、旧 NEV 的转移价格和折价以及 NEV 的总销量和新车总销量的影响。具体来说: 当政府补贴升高时, 燃油车的批发价格和零售价格不变, 旧 NEV 的转移价格和折价会降低, NEV 的总销量和新车总销量会升高。这是因为随着政府补贴的升高, 拥有旧车的消费者置换 NEV 的意愿增强, 则 NEV 总销量升高, 进而会使新车总销量也升高。此时, 为了最大化自身利润, 制造商会降低旧 NEV 的回购价格, 同时零售商也会降低旧 NEV 的折价。

命题 4.4(2)~(5)表明, 政府补贴对 NEV 的批发价格和零售价格、旧燃油车转移价格、旧燃油车折价和燃油车总销量的影响与制造商的以旧换新策略有关。具体来说: 当制造商提供单一置换服务时 (模型 NE), 政府补贴对 NEV 的批发价格和零售价格以及燃油车总销量没有影响; 当制造商提供定向置换服务时 (模型 FE), 随着政府补贴的升高, NEV 的批发价格和零售价格、旧燃油车的折价和转移价格以及燃油车总销量都不变; 当制造商提供双向置换服务时 (模型 EE), 随着政府补贴的升高, NEV 的批发价格和零售价格不变, 而旧燃油车的折价和转移价格降低, 则燃油车总销量也随之降低; 当制造商提供全面置换服务时 (模型 DE), 随着政府补贴的升高, 旧燃油车的折价和转移价格不变, 而 NEV 的批发价格和零售价格升高, 燃油车总销量降低。

由上述命题可知, 为了促进 NEV 的销售和减少燃油车的使用, 政府应继续提高对 NEV 的补贴力度。这不仅有助于提升 NEV 的市场竞争力, 同时也能推动旧车的淘汰和更新。虽然政府补贴对 NEV 的批发价格和零售价格影响不大, 但制造商仍应根据市场情况, 合理调整价格策略。其次, 制造商应根据消费者需求和燃油车的销售目标, 合理制定整车以旧换新策略, 平衡 NEV 和燃油车销量, 从而优化整体利润结构。

旧车耐用性  $\delta$  对均衡解、销量的影响如命题 4.5 所示。

$$\text{命题 4.5 (1) } \frac{\partial b_e^{i*}}{\partial \delta} > 0, \quad \frac{\partial r_e^{i*}}{\partial \delta} > 0, \quad \frac{\partial Q_{FV}^{i*}}{\partial \delta} < 0; \text{ 当 } 0 < m_e < m_{e6} \text{ 时, } \frac{\partial Q_{EV}^{i*}}{\partial \delta} < 0,$$

$$\frac{\partial Q^{i*}}{\partial \delta} < 0; \text{ 当 } m_{e6} < m_e < m_{e7} \text{ 时, } \frac{\partial Q_{EV}^{i*}}{\partial \delta} > 0, \quad \frac{\partial Q^{i*}}{\partial \delta} < 0; \text{ 当 } m_{e7} < m_e < 1 \text{ 时;}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q_{EV}^{i*}}{\partial \delta} > 0, \quad \frac{\partial Q^{i*}}{\partial \delta} > 0, \quad \text{其中 } i \in \{NE, FE, EE, DE\}; \quad (2) \text{ 在模型 } s \text{ 中, 有 } \frac{\partial w_e^{s*}}{\partial \delta} < 0, \\ \frac{\partial w_f^{s*}}{\partial \delta} < 0, \quad \frac{\partial p_e^{s*}}{\partial \delta} < 0, \quad \frac{\partial p_f^{s*}}{\partial \delta} < 0, \quad s \in \{NE, FE, EE\}; \quad \text{在模型 } DE \text{ 中, 有} \\ \frac{\partial w_e^{DE*}}{\partial \delta} = \frac{\partial w_f^{DE*}}{\partial \delta} = \frac{\partial p_e^{DE*}}{\partial \delta} = \frac{\partial p_f^{DE*}}{\partial \delta} = 0; \quad (3) \text{ 在模型 } k \text{ 中, 有 } \frac{\partial b_f^{k*}}{\partial \delta} > 0, \quad \frac{\partial r_f^{k*}}{\partial \delta} > 0, \\ k \in \{FE, DE\}; \quad \text{在模型 } EE \text{ 中, 有 } \frac{\partial b_f^{EE*}}{\partial \delta} = \frac{\partial r_f^{EE*}}{\partial \delta} = 0. \end{aligned}$$

证明过程见附录 11。

命题 4.5(1)表明, 制造商整车以旧换新策略的变化不会改变旧车耐用性对旧 NEV 的转移价格和折价以及销量的影响。具体来说: 当旧车耐用性升高时, 旧 NEV 的转移价格和折价会升高, 燃油车总销量会降低。旧车耐用性对 NEV 总销量和新车总销量的影响与政府补贴力度有关; 当政府补贴较低时, 随着旧车耐用性的升高, NEV 和新车总销量都降低; 当政府补贴适中时, 旧车耐用性的升高会提高 NEV 总销量, 而新车总销量仍会降低; 仅当政府补贴较高时, 随着旧车耐用性的升高, NEV 和新车总销量均会升高。

命题 4.5(2)~(3)表明, 旧车耐用性对燃油车(NEV)批发价格和零售价格、旧燃油车转移价格以及旧燃油车折价的影响与制造商的整车以旧换新策略有关。其中, 命题 4.5(2)表明, 当制造商提供全面置换服务时(模型 DE), 随着旧车耐用性的升高, NEV(燃油车)的批发价格和零售价格不变, 而当制造商提供非全面置换服务时(模型 NE、FE 和 EE), 旧车耐用性的升高会使 NEV(燃油车)的批发价格和零售价格降低。命题 4.5(3)表明, 当制造商提供双向置换服务时(模型 EE), 随着旧车耐用性的升高, 旧燃油车的折价和转移价格不变; 当制造商提供定向置换服务和全面置换服务时(模型 FE 和 DE), 随着旧车耐用性的升高, 旧燃油车的折价和转移价格均会升高, 这是因为旧车的耐用性会直接影响到旧车的残值。因此, 当旧车耐用性较高时即旧车残值较高时, 制造商愿意用更高的旧车回购价格向零售商回收旧车, 同时零售商给予消费者更高的旧车折价。

由上述命题可知, 政府应继续加大对 NEV 的补贴力度, 以促进 NEV 市场

的进一步发展。制造商首先应根据市场需求和不同的消费者偏好，提供多样化的整车以旧换新服务；其次，应加大在汽车技术研发和创新方面的投入，提高汽车的性能和耐用性，以及通过技术创新和升级，降低生产成本，进一步提高市场竞争力。

#### 4.4 数值仿真

本节通过数值仿真，探求政府单补贴政策对不同以旧换新策略下新车总需求、供应链总利润、消费者剩余和社会总福利的影响。参考 Xiong 等<sup>[78]</sup>和 Genc 等<sup>[79]</sup>研究所使用的数据，在满足本文相关参数假设条件下，相关参数设置如下：

$$c_e = 0.5, \quad c_f = 0.4, \quad \delta = 0.2, \quad \alpha = 1.25, \quad r_s = 0.25, \quad \tau_e = 0.22, \quad \tau_f = 0.28,$$

$$\gamma = 0.25 \text{ 和 } \eta = 0.35。$$

##### 4.4.1 政府补贴与以旧换新策略对总需求和总利润的影响

根据制造商和零售商的最优利润可以得出  $\pi_M^{i*} = 2\pi_R^{i*}$ ,  $i \in \{NE, FE, EE, DE\}$ ，即制造商和零售商的利润呈现出一定的比例关系，并占总利润的固定比例，且该关系不受以旧换新策略的影响。因此，仅分析政府补贴  $m_e$  对新车总需求和供应链总利润的影响，具体仿真结果如图 4-2 所示。

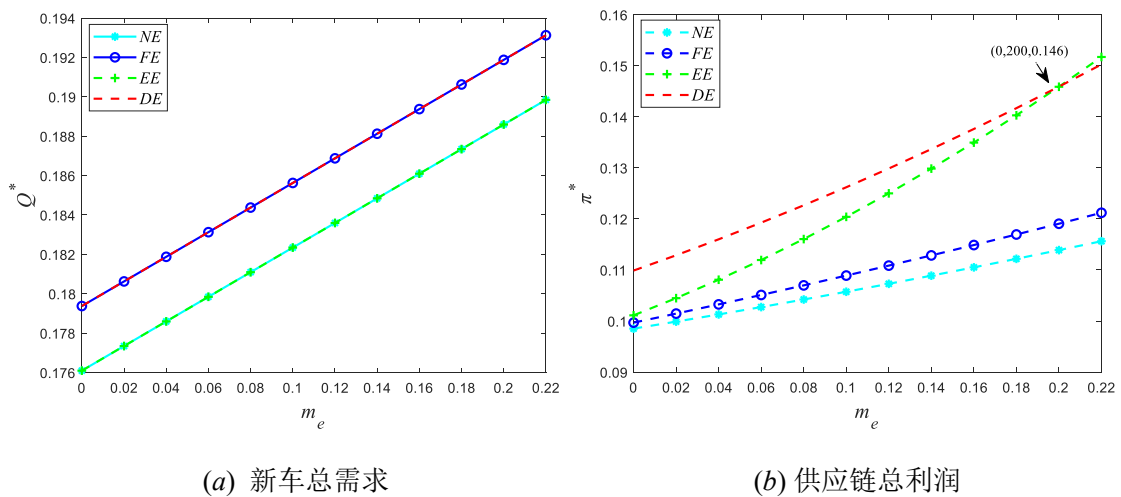


图 4-2 新车总需求与供应链总利润

由图 4-2(a)可知，当政府仅对顾客以旧车置换 NEV 提供补贴时（单补贴政

策), 随着政府单位补贴额度的提高, 消费者置换 NEV 的成本降低, 其参与整车以旧换新的动力增强, 推动了新车总销售量的增长。另外, 相较于单一置换服务(模型  $NE$ ), 制造商提供双向置换服务(模型  $EE$ ) 不影响新产品总需求; 相较于定向置换服务(模型  $FE$ ), 制造商提供全面置换服务(模型  $DE$ ) 也不影响新产品总销量。因此, 在仅提供以旧 NEV 换新的 NEV(TOEE)服务基础上, 额外提供以旧燃油车换新燃油车(TOFF)服务可有效增加市场总需求。该结果与命题 4.2 结论一致。

由图 4-2(b)可知, 首先, 随着政府单位补贴额度的提高, 消费者的以旧换新意愿会升高, 直接推动了销量的提升, 进而供应链总利润会随之升高, 其次, 当政府补贴不高时, 制造商提供全面置换服务时供应链总利润最高; 但是随着政府补贴升高并高于一定阈值时( $m_e > 0.200$ ), 制造商提供双向置换服务时供应链总利润最高。这是因为当政府补贴不高时, 若制造商此时提供全面置换服务, 对于拥有旧燃油车的老顾客来说有了更多的置换选择, 即可以在政府补贴不高的情况下选择将旧燃油车置换为新燃油车, 以避免置换 NEV 带来的高额成本。因此, 制造商此时提供全面置换服务提升了企业的以旧换新效率, 促进了供应链总利润的提升。但是, 随着政府补贴的升高, 置换 NEV 的成本降低, 这使得拥有旧燃油车的老顾客更倾向于选择置换为 NEV (即选择 TOFE 服务)。在这种情况下, 制造商如果仍然提供全面置换服务, 可能会因为提供了不必要的 TOFF 服务而增加成本, 从而降低供应链总利润。此时, 制造商应及时调整以旧换新策略, 转而去提供 TOEE 和 TOFE 服务(即双向置换服务), 以在更好满足消费者需求的同时降低不必要的成本, 提高供应链总利润。

综上所述, 政府补贴对新车总销量和供应链总利润起到至关重要的作用, 因此, 政府应密切关注市场动态和供应链成员的行为变化, 适时调整补贴政策以推动技术创新与汽车行业的转型升级, 而制造商在面对政府补贴政策的变化时, 需要灵活调整以旧换新策略以最大化供应链总利润, 例如在政府补贴力度较高时提供双向置换服务使供应链利润最大化。

#### 4.4.2 政府补贴与以旧换新策略对社会总福利和消费者剩余的影响

政府补贴  $m_e$  对新顾客消费者剩余、老顾客消费者剩余、总消费者剩余和社会总福利的影响如图 4-3 所示。

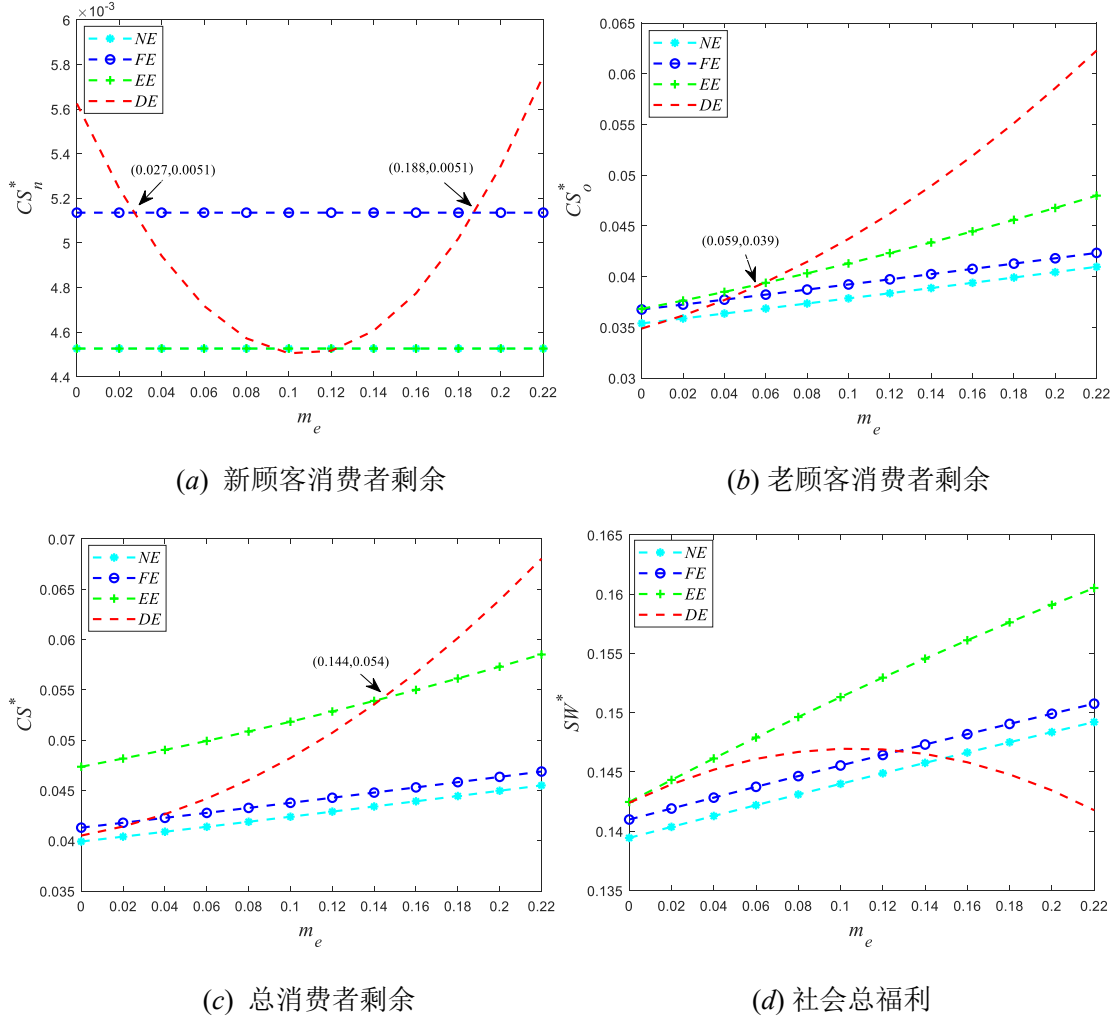


图 4-3 消费者剩余与社会总福利

由图 4-3(a)可知,随着政府单位补贴额度的升高,当制造商提供单一置换服务(模型 NE)、定向置换服务(模型 FE)和双向置换服务(模型 EE)时,新顾客消费者剩余不变,这是因为当制造商提供单一置换服务、定向置换服务和双向置换服务时,政府的补贴政策主要影响的是老顾客的置换决策和旧车的折价,而对新顾客的购买决策和新车价格没有直接影响。当制造商提供全面置换服务时(模型 DE),由式(4-31)和式(4-33)可得,政府补贴会影响到新车价格决策,即零售商会根据政府补贴来调整新车价格,进而影响新顾客消费者剩余;

此时，新顾客消费者剩余随着补贴的增加先下降后上升。当政府补贴较低 ( $m_e < 0.027$ ) 或较高 ( $m_e > 0.188$ ) 时，制造商提供全面置换服务时新顾客消费者剩余最高，而当政府补贴适中 ( $0.027 < m_e < 0.188$ ) 时，制造商提供定向置换服务时新顾客消费者剩余最高。这说明当政府补贴较低和较高时，新顾客偏向于制造商提供全面置换服务，而当政府补贴适中时，制造商提供定向置换服务有利于新顾客。

由图 4-3(b)可知，随着政府单位补贴额度的升高，无论制造商提供何种以旧换新服务，老顾客消费者剩余都会升高，因为政府补贴政策直接增加了老顾客从以旧换新服务中获得的净收益，因此，随着政府单位补贴额度的升高，老顾客在参与整车以旧换新的过程中获得的额外经济利益也会增加，从而提升了他们的消费者剩余。当政府补贴不高时，制造商提供双向置换服务时老顾客消费者剩余最高，而当政府补贴高于一定阈值时 ( $m_e > 0.059$ )，制造商提供全面置换服务有利于老顾客。即当政府补贴不高时，老顾客偏向于制造商提供双向置换服务，而当政府补贴较高时，老顾客转而偏向于制造商提供全面置换服务。

由图 4-3(c)可知，在消费者层面，随着政府单位补贴额度的升高，无论制造商提供何种以旧换新服务，总消费者剩余都会升高，另外，当政府补贴不高时，制造商提供双向置换服务时总消费者剩余最高，而当政府补贴高于一定阈值时 ( $m_e > 0.144$ )，制造商提供全面置换服务时总消费者剩余最高。由图 4-3(d)可知，随着政府单位补贴额度的升高，当制造商提供单一置换服务、定向置换服务和双向置换服务时，社会总福利上升，而当制造商提供全面置换服务时，社会总福利会先上升后下降。在四种以旧换新策略中，双向置换服务（模型 EE）提供了旧燃油车和 NEV 之间的置换选择，从而覆盖了更广泛的消费者群体，同时也紧密的联系了政府的置换补贴政策，进而实现了社会福利的最大化。

综上所述，政府应根据市场情况和制造商的以旧换新策略来调整补贴策略，以达到最佳的社会福利效果。对消费者而言，应同时关注政府补贴政策以及制造商以旧换新策略的变化，以便在最佳时机购买新车或者参加以旧换新活动。

## 4.5 本章小结

在考虑政府仅对老顾客以旧车置换 NEV 提供补贴（单补贴政策）的背景下，本章针对一个由同时生产燃油车和 NEV 的制造商和零售商构成的 NEV 供应链，依据制造商提供的不同以旧换新服务，分别构建了单一置换服务模型、定向置换服务模型、双向置换服务模型和全面置换服务模型，以研究不同策略下供应链的产品定价决策，探究不同服务策略的运行绩效。研究结果如下：

(1) 制造商以旧换新策略和政府补贴政策交互影响着制造商和零售商的最优产品定价决策；首先，仅当政府补贴较低时，制造商提供全面置换服务（模型 *DE*）能够产生最低的 NEV（燃油车）的批发价格和零售价格以及旧车的转移价格；其次，政府提高补贴能显著提高新车销量、供应链总利润和消费者剩余，但同时也会带来较大的财政支出，另外，政府补贴的升高并不总是有利于社会总福利；因此，政府在制定补贴政策时应综合考虑成本效益，权衡财政支出与社会福利的平衡，以确保财政资源高效利用。

(2) 企业整车以旧换新策略的制定应该主要考虑政府补贴的影响。当政府补贴较低时，制造商应提供全面置换服务以最大化供应链利润；当政府补贴较高时，制造商应提供双向置换服务，此时，该服务策略可同时使供应链利润和社会总福利最大化。

(3) 新顾客和拥有旧车的老顾客对于以旧换新服务模式的偏好呈现出了显著的差异性，并且这种偏好差异与政府补贴相关；仅当政府单位补贴额度较高时，新顾客和老顾客均偏向于制造商提供全面置换服务。

## 第 5 章 政府双补贴政策下 NEV 供应链整车以旧换新策略及定价决策研究

上一章探讨了政府仅对老顾客置换 NEV 提供补贴情景下（单补贴政策），制造商的整车以旧换新服务策略及定价决策，结果表明，政府提高补贴能显著提升供应链成员利润和社会总福利，但也会带来较大的财政支出。本章进一步结合政府补贴政策的实际变化，如《商务部等 7 部门关于进一步做好汽车以旧换新有关工作的通知》所示，为进一步推动汽车以旧换新，开始对老顾客以旧车置换 NEV 或燃油车均提供补贴<sup>[80]</sup>（双补贴政策）。即政府的汽车以旧换新的政策已经从单补贴政策逐渐演变为双补贴政策。基于上一章的研究，本章仍针对一个由制造商和零售商构成的 NEV 供应链，在考虑双补贴政策的基础上，建立四种整车以旧换新策略下的供应链成员的博弈决策模型，并尝试解决以下问题：

(1) 当政府同时对老顾客以旧车置换 NEV 或燃油车均提供补贴时（双补贴政策），在不同的整车以旧换新服务模式下，制造商和零售商的最优产品定价决策；

(2) 政府双补贴政策对制造商不同整车以旧换新策略下 NEV 供应链运行绩效的影响；

(3) 明确影响 NEV 企业整车以旧换新策略选择及产品定价决策的因素；

(4) 探究政府补贴政策的演变与 NEV 企业不同的整车以旧换新策略间的关系。

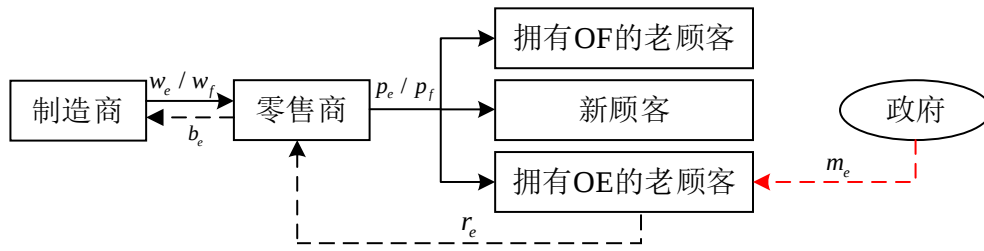
### 5.1 问题描述与相关假设

#### 5.1.1 问题描述

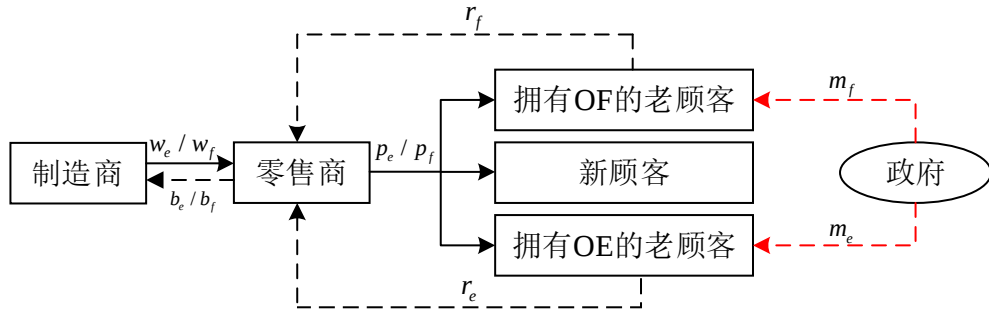
与上一章类似，本章同样考虑由一家同时生产燃油车和 NEV 的汽车制造商（简称制造商）和零售商构成的 NEV 供应链，其中制造商为领导者，零售商为跟随者，两者为 Stackelberg 博弈关系。制造商以批发价格  $w_e(w_f)$  将制造成本为

$c_e(c_f)$  的 NEV (燃油车) 批发给零售商, 零售商以零售价格  $p_e(p_f)$  销售给顾客。为了更好的连接汽车的销售端和回收端, 制造商提供整车以旧换新服务, 即零售商给予参加以旧换新的老顾客旧车折价  $r_e(r_f)$ , 制造商以转移价格  $b_e(b_f)$  向零售商回购旧车, 并从旧车中获得单位残值  $\tau_e(\tau_f)$ 。

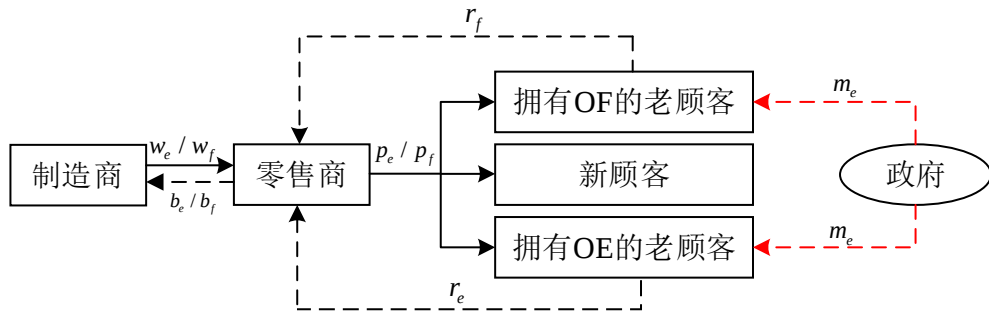
市场中存在三种消费者, 即尚未购买任何汽车的新顾客和拥有旧燃油车 (简称 OF) 或者拥有旧 NEV (简称 OE) 的老顾客。为了激励新顾客首次购买和老顾客进行整车的置换, 制造商将提供不同的整车以旧换新服务, 基于上一章的研究, 本章同样考虑四种制造商的整车以旧换新策略: (1) 制造商仅提供以旧 NEV 换新 NEV (简称 TOEE) 服务 (模型  $NT$ , 简称单一置换服务); (2) 在提供 TOEE 服务基础上, 制造商同时提供以旧燃油车换新燃油车 (简称 TOFF) 服务 (模型  $FT$ , 简称定向置换服务); (3) 在提供 TOEE 服务基础上, 制造商同时提供以旧燃油车换 NEV (简称 TOFE) 服务 (模型  $ET$ , 简称双向置换服务); (4) 制造商同时提供 TOEE、TOFF 和 TOFE 服务 (模型  $DT$ , 简称全面置换服务)。为进一步扩大购买需求, 政府为顾客提供以旧换新补贴, 本章考虑政府对置换 NEV 和燃油车的老顾客都提供补贴 (双补贴政策), 即参加 TOEE、TOFE 服务的老顾客可以得到政府对旧车置换 NEV 的补贴  $m_e$ , 而参加 TOFF 服务的老顾客可以得到政府对旧车置换燃油车的补贴  $m_f$ 。制造商四种整车以旧换新策略下制造商和零售商的决策过程如图 5-1 所示。



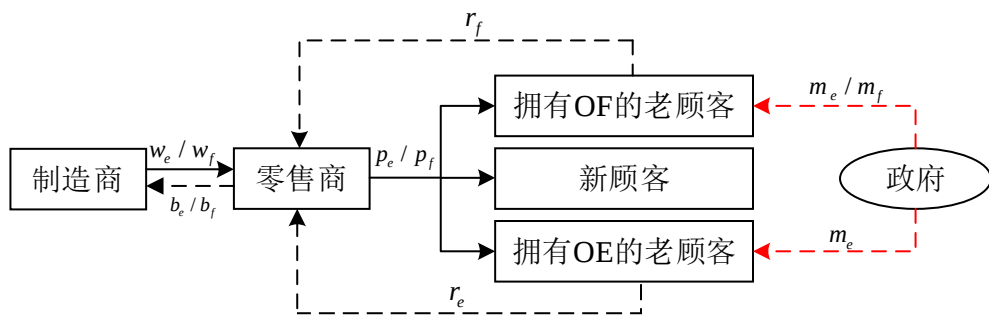
(a) 模型  $NT$



(b) 模型  $FT$



(c) 模型  $ET$



(d) 模型  $DT$

——→ 正向供应链      - - -> 逆向供应链      - - -> 政府补贴

图 5-1 不同整车以旧换新策略下的决策过程

### 5.1.2 相关假设与需求函数

#### (1) 相关假设

由于相关假设与 4.1 节保持一致，在此不再赘述。本节仅补充了本章中的新增假设。

**假设 5.1.** 根据当前政府的补贴政策可知，旧车置换 NEV 的补贴大于置换燃

油车的补贴<sup>[80]</sup>，即假设  $0 < m_f < m_e < 1$ ，令  $\Delta m = m_e - m_f$ ，其中  $\Delta m$  可视为政府对 NEV 和燃油车置换政策差异的一个量化指标，其数值越大，说明政府对 NEV 置换的补贴力度越大，即相对于燃油车，政府更鼓励消费者选择 NEV。

## (2) 需求函数

基于上述假设，新老顾客的需求函数分析如下：

### 1) 新顾客的需求函数

根据本章假设可知，新顾客有三种选择：购买燃油车、购买 NEV 和不购买，新顾客购买燃油车和 NEV 的效用分别为  $u_{nf}^j = v - p_f$  和  $u_{ne}^j = \alpha v - p_e$ ，当  $u_{nf}^j > u_{ne}^j$  且  $u_{nf}^j > 0$  时，新顾客选择购买燃油车；当  $u_{ne}^j > u_{nf}^j$  且  $u_{ne}^j > 0$  时，新顾客选择购买 NEV。由此可知，新顾客购买燃油车和 NEV 的需求分别为

$$q_{nf}^j = (1 - \eta - \gamma) \left( \frac{p_e - p_f}{\alpha - 1} - p_f \right) \quad \text{和} \quad q_{ne}^j = (1 - \eta - \gamma) \left( 1 - \frac{p_e - p_f}{\alpha - 1} \right), \quad \text{其中}$$

$$j \in \{NT, ET, FT, DT\}.$$

### 2) 老顾客的需求函数

#### ① 拥有旧 NEV 的老顾客

根据本章假设可知，拥有旧 NEV 的老顾客此时有两种选择：参加制造商提供的 TOEE 服务或者继续使用旧车，参加 TOEE 的老顾客可以得到政府的 NEV 置换补贴  $m_e$  以及旧车折价  $r_e$ ，两种选择的效用分别为： $u_{ee}^j = \alpha v - p_e + r_e + m_e$ 、 $u_e^j = \delta \alpha v$ ，仅当  $u_{ee}^j > u_e^j$  且  $u_{ee}^j > 0$  时拥有旧 NEV 的老顾客会参加 TOEE 服务，由此可知，拥有旧 NEV 的老顾客参加 TOEE 服务的需求为  $q_{ee}^j = \gamma \left( 1 - \frac{p_e - r_e - m_e}{\alpha(1 - \delta)} \right)$ 。

#### ② 拥有旧燃油车的老顾客

1、当制造商仅提供 TOEE 服务时（模型 NT），拥有旧燃油车的老顾客此时有三种选择：在二级市场出售旧车后再购买新燃油车或者 NEV 和继续使用旧燃油车，在二级市场出售旧车的收益为  $r_s$ ，三种选择的效用分别为：

$$u_{ff}^{NT} = v - p_f + r_s, \quad u_{fe}^{NT} = \alpha v - p_e + r_s \quad \text{和} \quad u_f^{NT} = \delta v. \quad \text{仅当} \quad u_{ff}^{NT} > \max\{u_{fe}^{NT}, u_f^{NT}\} \quad \text{且}$$

$u_{ff}^{NT} > 0$  时, 拥有旧燃油车的老顾客才会选择在二手市场出售旧车后购买新燃油车, 仅当  $u_{fe}^{NT} > \max\{u_{ff}^{NT}, u_f^{NT}\}$  且  $u_{fe}^{NT} > 0$  时, 老顾客会出售旧车后购买 NEV, 进而可得拥有旧燃油车的老顾客在二手市场出售旧车后购买燃油车和 NEV 的需求为:  $q_{ff}^{NT} = \eta(\frac{p_e - p_f}{\alpha - 1} - \frac{p_f - r_s}{1 - \delta})$  和  $q_{fe}^{NT} = \eta(1 - \frac{p_e - p_f}{\alpha - 1})$ 。

2、当制造商同时提供 TOEE 和 TOFF 服务时 (模型 FT)。拥有旧燃油车的老顾客此时有三种选择: 在二手市场出售旧车后再购买 NEV、参加 TOFF 服务和继续使用旧燃油车, 在二手市场出售旧车的收益为  $r_s$ , 参加 TOFF 的老顾客可以得到政府的燃油车置换补贴  $m_f$  和旧车折价  $r_f$ , 三种选择的效用分别为:

$u_{fe}^{FT} = \alpha v - p_e + r_s$ ,  $u_{ff}^{FT} = v - p_f + r_f + m_f$  和  $u_f^{FT} = \delta v$ , 仅当  $u_{fe}^{FT} > \max\{u_{ff}^{FT}, u_f^{FT}\}$  且  $u_{fe}^{FT} > 0$  时, 拥有旧燃油车的老顾客才会出售旧车后购买 NEV, 仅当  $u_{ff}^{FT} > \max\{u_{fe}^{FT}, u_f^{FT}\}$  且  $u_{ff}^{FT} > 0$  时, 拥有旧燃油车的老顾客会参加 TOFF 服务, 可得拥有旧燃油车的老顾客在二手市场出售旧车后购买能源车和参加 TOFF 服务的需求为:

$$q_{fe}^{FT} = \eta(1 - \frac{p_e - p_f + r_f + m_f - r_s}{\alpha - 1}) \quad \text{和}$$

$$q_{ff}^{FT} = \eta(\frac{p_e - p_f + r_f + m_f - r_s}{\alpha - 1} - \frac{p_f - r_f - m_f}{1 - \delta})。$$

3、当制造商同时提供 TOEE 和 TOFE 服务时 (模型 ET)。拥有旧燃油车的老顾客此时有三种选择: 在二手市场出售旧车后再购买新燃油车、参加 TOFE 服务和继续使用旧燃油车, 在二手市场出售旧车的收益为  $r_s$ , 参加 TOFE 的老顾客可以得到政府的 NEV 置换补贴  $m_e$  以及旧车折价  $r_f$ , 三种选择的效用分别为  $u_{ff}^{ET} = v - p_f + r_s$ 、 $u_{fe}^{ET} = \alpha v - p_e + r_f + m_e$  和  $u_f^{ET} = \delta v$ , 仅当  $u_{ff}^{ET} > \max\{u_{fe}^{ET}, u_f^{ET}\}$  且  $u_{ff}^{ET} > 0$  时, 拥有旧燃油车的老顾客才会出售旧车后购买新燃油车, 仅当  $u_{fe}^{ET} > \max\{u_{ff}^{ET}, u_f^{ET}\}$  且  $u_{fe}^{ET} > 0$  时, 拥有旧燃油车的老顾客会参加 TOFE 服务, 可得拥有旧燃油车的老顾客在二手市场出售旧车后购买燃油车

和参加 TOFE 服务的需求为： $q_{ff}^{ET} = \eta(\frac{p_e - p_f + r_s - r_f - m_e}{\alpha - 1} - \frac{p_f - r_s}{1 - \delta})$  和

$$q_{fe}^{ET} = \eta(1 - \frac{p_e - p_f + r_s - r_f - m_e}{\alpha - 1})。$$

4、当制造商同时提供 TOEE、TOFF 和 TOFE 服务时（模型  $DT$ ）。拥有旧燃油车的老顾客此时有三种选择：参加 TOFE 服务、参加 TOFF 服务和继续使用旧燃油车，参加 TOFE 的老顾客可以得到政府的 NEV 置换补贴  $m_e$  以及旧车折价  $r_f$ ，参加 TOFF 的老顾客可以得到政府的燃油车置换补贴  $m_f$  和旧车折价  $r_f$ ，三种选择的效用分别为  $u_{fe}^{DT} = \alpha v - p_e + r_f + m_e$ ， $u_{ff}^{DT} = v - p_f + r_f + m_f$  和  $u_f^{DT} = \delta v$ ，仅当  $u_{fe}^{DT} > \max\{u_{ff}^{DT}, u_f^{DT}\}$  且  $u_{fe}^{DT} > 0$  时，拥有旧燃油车的老顾客才会参加 TOFE 服务，仅当  $u_{ff}^{DT} > \max\{u_{fe}^{DT}, u_f^{DT}\}$  且  $u_{ff}^{DT} > 0$  时，拥有旧燃油车的老顾客才会参加 TOFF 服务，进而可得拥有旧燃油车的老顾客参加 TOFE 和参加 TOFF 的需求分别为： $q_{fe}^{DT} = \eta(1 - \frac{p_e - p_f + m_f - m_e}{\alpha - 1})$  和  $q_{ff}^{DT} = \eta(\frac{p_e - p_f + m_f - m_e}{\alpha - 1} - \frac{p_f - r_f - m_f}{1 - \delta})$ 。

部分符号与第四章一致，在此省略，表 5-1 仅补充本章新增的相关符号。

表 5-1 第五章符号和定义

| 符号                    | 定义                                                           |
|-----------------------|--------------------------------------------------------------|
| 参数                    |                                                              |
| $m_f$                 | 政府对老顾客置换新燃油车的单位补贴                                            |
| 其他符号                  |                                                              |
| $Q^j$                 | $j$ 模型中顾客购买新车的总需求                                            |
| $Q_{EV}^j / Q_{FV}^j$ | $j$ 模型中顾客购买 NEV/燃油车的总需求                                      |
| $q_{ne}^j / q_{nf}^j$ | $j$ 模型中新顾客购买 NEV/燃油车的需求                                      |
| $q_{fe}^j / q_{ff}^j$ | $j$ 模型中拥有旧燃油车的老顾客置换 NEV/新燃油车需求                               |
| $q_{ee}^j$            | $j$ 模型中拥有旧 NEV 的老顾客置换新的 NEV 的需求                              |
| $\pi_M^j / \pi_R^j$   | $j$ 模型中制造商/零售商利润                                             |
| $j$                   | $j \in \{NT, FT, ET, DT\}$ ，分别表示模型 $NT$ 、 $FT$ 、 $ET$ 和 $DT$ |

## 5.2 模型建立与求解

### 5.2.1 单一置换服务模型—NT

在制造商仅提供 TOEE 服务（模型 NT）的情景中，制造商首先决定燃油车 (NEV) 的批发价格  $w_f(w_e)$  和旧 NEV 的回购价格  $b_e$ ，然后零售商决定燃油车 (NEV) 的零售价格  $p_f(p_e)$  和旧 NEV 的折价  $r_e$ 。此时制造商和零售商的利润函数可表达如下：

$$\max_{\{w_f, w_e, b_e\}} \pi_M^{NT} = (w_f - c_f)(q_{nf} + q_{ff}) + (w_e - c_e)(q_{ne} + q_{fe}) + (w_e - c_e - b_e + \tau_e)q_{ee} \quad (5-1)$$

$$\max_{\{p_f, p_e, r_e\}} \pi_R^{NT} = (p_f - w_f)(q_{nf} + q_{ff}) + (p_e - w_e)(q_{ne} + q_{fe}) + (p_e - w_e + b_e - r_e)q_{ee} \quad (5-2)$$

运用逆向归纳法对模型 NT 求解可得：

(1) 最优批发价格和零售价格为：

$$w_e^{NT*} = \frac{\eta(r_s - \delta)}{2((1-\gamma)(1-\delta) + \delta\eta)} + \frac{c_e + \alpha}{2} \quad (5-3)$$

$$w_f^{NT*} = \frac{\eta(r_s - \delta)}{2((1-\gamma)(1-\delta) + \delta\eta)} + \frac{1 + c_f}{2} \quad (5-4)$$

$$p_e^{NT*} = \frac{3\eta(r_s - \delta)}{4((1-\gamma)(1-\delta) + \delta\eta)} + \frac{c_e + 3\alpha}{4} \quad (5-5)$$

$$p_f^{NT*} = \frac{3\eta(r_s - \delta)}{4((1-\gamma)(1-\delta) + \delta\eta)} + \frac{3 + c_f}{4} \quad (5-6)$$

(2) 最优回购价格和旧车折价为：

$$b_e^{NT*} = \frac{\alpha\delta + \tau_e - m_e}{2} + \frac{\eta(r_s - \delta)}{2((1-\gamma)(1-\delta) + \delta\eta)} \quad (5-7)$$

$$r_e^{NT*} = \frac{3(\alpha\delta - m_e) + \tau_e}{4} + \frac{3\eta(r_s - \delta)}{4((1-\gamma)(1-\delta) + \delta\eta)} \quad (5-8)$$

### 5.2.2 定向置换服务模型—FT

在制造商同时提供 TOEE 和 TOFF 服务（模型 FT）的情景中，制造商首先

决定燃油车(NEV)的批发价格  $w_f(w_e)$  和旧燃油车(NEV)的回购价格  $b_f(b_e)$ ，然后零售商决定燃油车(NEV)的零售价格  $p_f(p_e)$  和旧燃油车(NEV)的折价  $r_f(r_e)$ 。此时制造商和零售商的利润函数可表达如下：

$$\begin{aligned} \max_{\{w_f, w_e, b_e, b_f\}} \pi_M^{FT} = & (w_f - c_f)q_{nf} + (w_f - c_f - b_f + \tau_f)q_{ff} + (w_e - c_e)(q_{ne} + q_{fe}) \\ & + (w_e - c_e - b_e + \tau_e)q_{ee} \end{aligned} \quad (5-9)$$

$$\begin{aligned} \max_{\{p_f, p_e, r_e, r_f\}} \pi_R^{FT} = & (p_f - w_f)q_{nf} + (p_f - w_f + b_f - r_f)q_{ff} + (p_e - w_e)(q_{ne} + q_{fe}) \\ & + (p_e - w_e + b_e - r_e)q_{ee} \end{aligned} \quad (5-10)$$

运用逆向归纳法对模型  $FT$  求解可得：

(1) 最优批发价格和零售价格为：

$$w_e^{FT*} = \frac{\alpha\eta(r_s - \delta)}{2((1-\gamma)(\alpha - \delta) + \delta\eta)} + \frac{c_e + \alpha}{2} \quad (5-11)$$

$$w_f^{FT*} = \frac{\alpha\eta(r_s - \delta)}{2((1-\gamma)(\alpha - \delta) + \delta\eta)} + \frac{1 + c_f}{2} \quad (5-12)$$

$$p_e^{FT*} = \frac{3\alpha\eta(r_s - \delta)}{4((1-\gamma)(\alpha - \delta) + \delta\eta)} + \frac{c_e + 3\alpha}{4} \quad (5-13)$$

$$p_f^{FT*} = \frac{3\alpha\eta(r_s - \delta)}{4((1-\gamma)(\alpha - \delta) + \delta\eta)} + \frac{3 + c_f}{4} \quad (5-14)$$

(2) 最优回购价格和旧车折价为：

$$b_e^{FT*} = \frac{\alpha\eta(r_s - \delta)}{2((1-\gamma)(\alpha - \delta) + \delta\eta)} + \frac{\alpha\delta + \tau_e - m_e}{2} \quad (5-15)$$

$$b_f^{FT*} = \frac{(1-\alpha)(1-\gamma)(r_s - \delta)}{2((1-\gamma)(\alpha - \delta) + \delta\eta)} + \frac{\tau_f + r_s - m_f}{2} \quad (5-16)$$

$$r_e^{FT*} = \frac{3\alpha\eta(r_s - \delta)}{4((1-\gamma)(\alpha - \delta) + \delta\eta)} + \frac{3(\alpha\delta - m_e) + \tau_e}{4} \quad (5-17)$$

$$r_f^{FT*} = \frac{3(1-\alpha)(1-\gamma)(r_s - \delta)}{4((1-\gamma)(\alpha - \delta) + \delta\eta)} + \frac{\tau_f + 3(r_s - m_f)}{4} \quad (5-18)$$

### 5.2.3 双向置换服务模型—ET

在制造商同时提供 TOEE 和 TOFE 服务（模型 ET）的情景中，制造商首先决定燃油车(NEV)的批发价格  $w_f(w_e)$  和旧燃油车(NEV)的回购价格  $b_f(b_e)$ ，然后零售商决定燃油车(NEV)的零售价格  $p_f(p_e)$  和旧燃油车(NEV)的折价  $r_f(r_e)$ 。此时制造商和零售商的利润函数可表达如下：

$$\begin{aligned} \max_{\{w_f, w_e, b_e, b_f\}} \pi_M^{ET} = & (w_f - c_f)(q_{nf} + q_{ff}) + (w_e - c_e)q_{ne} + (w_e - c_e - b_f + \tau_f)q_{fe} \\ & + (w_e - c_e - b_e + \tau_e)q_{ee} \end{aligned} \quad (5-19)$$

$$\begin{aligned} \max_{\{p_f, p_e, r_e, r_f\}} \pi_R^{ET} = & (p_f - w_f)(q_{nf} + q_{ff}) + (p_e - w_e)q_{ne} + (p_e - w_e + b_f - r_f)q_{fe} \\ & + (p_e - w_e + b_e - r_e)q_{ee} \end{aligned} \quad (5-20)$$

运用逆向归纳法对模型 ET 求解可得：

(1) 最优批发价格和零售价格为：

$$w_e^{ET*} = \frac{\eta(r_s - \delta)}{2((1-\gamma)(1-\delta) + \delta\eta)} + \frac{c_e + \alpha}{2} \quad (5-21)$$

$$w_f^{ET*} = \frac{\eta(r_s - \delta)}{2((1-\gamma)(1-\delta) + \delta\eta)} + \frac{1 + c_f}{2} \quad (5-22)$$

$$p_e^{ET*} = \frac{3\eta(r_s - \delta)}{4((1-\gamma)(1-\delta) + \delta\eta)} + \frac{c_e + 3\alpha}{4} \quad (5-23)$$

$$p_f^{ET*} = \frac{3\eta(r_s - \delta)}{4((1-\gamma)(1-\delta) + \delta\eta)} + \frac{3 + c_f}{4} \quad (5-24)$$

(2) 最优回购价格和旧车折价为：

$$b_e^{ET*} = \frac{\alpha\delta + \tau_e - m_e}{2} + \frac{\eta(r_s - \delta)}{2((1-\gamma)(1-\delta) + \delta\eta)} \quad (5-25)$$

$$b_f^{ET*} = \frac{r_s - m_e + \tau_f}{2} \quad (5-26)$$

$$r_e^{ET*} = \frac{3(\alpha\delta - m_e) + \tau_e}{4} + \frac{3\eta(r_s - \delta)}{(1-\gamma)(1-\delta) + \delta\eta} \quad (5-27)$$

$$r_f^{ET*} = \frac{3(r_s - m_e) + \tau_f}{4} \quad (5-28)$$

#### 5.2.4 全面置换服务模型—DT

在制造商同时提供 TOEE、TOFF 和 TOFE 服务（模型 DT）的情景中，制造商首先决定燃油车(NEV)的批发价格  $w_f(w_e)$  和旧燃油车(NEV)的回购价格  $b_f(b_e)$ ，然后零售商决定燃油车(NEV)的零售价格  $p_f(p_e)$  和旧燃油车(NEV)的折价  $r_f(r_e)$ 。此时制造商和零售商的利润函数可表达如下：

$$\begin{aligned} \max_{\{w_f, w_e, b_e, b_f\}} \pi_M^{DT} = & (w_f - c_f)q_{nf} + (w_f - c_f - b_f + \tau_f)q_{ff} + (w_e - c_e)q_{ne} \\ & + (w_e - c_e - b_f + \tau_f)q_{fe} + (w_e - c_e - b_e + \tau_e)q_{ee} \end{aligned} \quad (5-29)$$

$$\begin{aligned} \max_{\{p_f, p_e, r_e, r_f\}} \pi_R^{DT} = & (p_f - w_f)q_{nf} + (p_f - w_f + b_f - r_f)q_{ff} + (p_e - w_e)q_{ne} \\ & + (p_e - w_e + b_f - r_f)q_{fe} + (p_e - w_e + b_e - r_e)q_{ee} \end{aligned} \quad (5-30)$$

运用逆向归纳法对模型 DT 求解可得：

(1) 最优批发价格和零售价格为：

$$w_e^{DT*} = \frac{\eta(m_e - m_f)}{2(1-\gamma)} + \frac{c_e + \alpha}{2} \quad (5-31)$$

$$w_f^{DT*} = \frac{1 + c_f}{2} \quad (5-32)$$

$$p_e^{DT*} = \frac{3\eta(m_e - m_f)}{4(1-\gamma)} + \frac{c_e + 3\alpha}{4} \quad (5-33)$$

$$p_f^{DT*} = \frac{3 + c_f}{4} \quad (5-34)$$

(2) 最优回购价格和旧车折价为：

$$b_e^{DT*} = \frac{m_e(\eta + \gamma - 1) - \eta m_f}{2(1-\gamma)} + \frac{\alpha\delta + \tau_e}{2} \quad (5-35)$$

$$b_f^{DT*} = \frac{\tau_f + \delta - m_f}{2} \quad (5-36)$$

$$r_e^{DT*} = \frac{3(m_e(\eta + \gamma - 1) - \eta m_f)}{4(1 - \gamma)} + \frac{3\alpha\delta + \tau_e}{4} \quad (5-37)$$

$$r_f^{DT*} = \frac{\tau_f + 3(\delta - m_f)}{4} \quad (5-38)$$

### 5.3 均衡结果分析

#### 5.3.1 以旧换新策略的影响分析

政府双补贴政策下制造商的以旧换新策略对供应链产品定价决策的影响如命题 5.1 所示。

**命题 5.1** (1) 当  $0 < \Delta m \leq \Delta m_1$  时, 有  $w_e^{NT*} = w_e^{ET*} > w_e^{FT*} \geq w_e^{DT*}$ ,  $p_e^{NT*} = p_e^{ET*} > p_e^{FT*} \geq p_e^{DT*}$ ,  $b_e^{NT*} = b_e^{ET*} > b_e^{FT*} \geq b_e^{DT*}$ ,  $r_e^{NT*} = r_e^{ET*} > r_e^{FT*} \geq r_e^{DT*}$ ; 当  $\Delta m_1 < \Delta m \leq \Delta m_2$  时, 有  $w_e^{NT*} = w_e^{ET*} \geq w_e^{DT*} > w_e^{FT*}$ ,  $p_e^{NT*} = p_e^{ET*} \geq p_e^{DT*} > p_e^{FT*}$ ,  $b_e^{NT*} = b_e^{ET*} \geq b_e^{DT*} > b_e^{FT*}$ ,  $r_e^{NT*} = r_e^{ET*} \geq r_e^{DT*} > r_e^{FT*}$ ; 当  $\Delta m_2 < \Delta m \leq 1$  时, 有  $w_e^{DT*} > w_e^{NT*} = w_e^{ET*} > w_e^{FT*}$ ,  $p_e^{DT*} > p_e^{NT*} = p_e^{ET*} > p_e^{FT*}$ ,  $b_e^{DT*} > b_e^{NT*} = b_e^{ET*} > b_e^{FT*}$ ,  $r_e^{DT*} > r_e^{NT*} = r_e^{ET*} > r_e^{FT*}$ 。

(2)  $w_f^{NT*} = w_f^{ET*} > w_f^{FT*} > w_f^{DT*}$ ,  $p_f^{NT*} = p_f^{ET*} > p_f^{FT*} > p_f^{DT*}$ ; 当  $0 < \Delta m \leq \Delta m_3$  时, 有  $b_f^{ET*} \geq b_f^{FT*} > b_f^{DT*}$ ,  $r_f^{ET*} \geq r_f^{FT*} > r_f^{DT*}$ ; 当  $\Delta m_3 < \Delta m \leq \Delta m_4$  时, 有  $b_f^{FT*} > b_f^{ET*} \geq b_f^{DT*}$ ,  $r_f^{FT*} > r_f^{ET*} \geq r_f^{DT*}$ ; 当  $\Delta m_4 < \Delta m \leq 1$  时, 有  $b_f^{FT*} > b_f^{DT*} > b_f^{ET*}$ ,  $r_f^{FT*} > r_f^{DT*} > r_f^{ET*}$ 。

证明过程见附录 12。

命题 5.1 表明, 制造商以旧换新策略对 NEV 的定价决策和旧燃油车回收的转移价格 (即零售商给予消费者旧车折价和制造商给予零售商的旧车回购价格) 的影响与政府对 NEV 和燃油车置换政策差异相关 (即政府对置换 NEV 与置换燃油车的单位补贴差额, 简称政府补贴差异), 但其对燃油车的批发价格和零售价格的影响与其无关。首先, 当制造商提供全面置换服务时 (模型 DT), 燃油

车的批发价格和零售价格最低，而 NEV 的定价决策和旧燃油车的转移价格和折价与政府补贴差异相关。具体来说：当政府对 NEV 和燃油车的置换补贴力度相近时(即补贴差异较小)，补贴对消费者置换 NEV 的经济激励相对较小；此时，若制造商提供全面置换服务，为了促进消费者参与以旧换新，制造商和零售商会降低 NEV 的批发和零售价格，同时，为了最大化自身利润，制造商会降低旧车的转移价格，零售商随之会降低旧车的折价。当政府补贴差异处于中等至较高水平时，政府对 NEV 的置换补贴力度显著加大，显著提升了消费者置换 NEV 的意愿；此时，若制造商提供定向置换服务（即模型  $FT$ ），NEV 的批发价格和零售价格最低，刺激了消费者对 NEV 的需求，同时也满足了部分老客户对传统燃油车置换的需求。为了平衡 NEV 和燃油车的销量，优化整体利润结构，制造商会提高（降低）旧燃油车(NEV)的转移价格，同时零售商也会随之提高（降低）旧燃油车(NEV)的折价。

政府双补贴政策下制造商以旧换新策略对燃油车和 NEV 销量的影响如命题 5.2 所示。

**命题 5.2** (1)  $Q^{FT*} = Q^{DT*} > Q^{NT*} = Q^{ET*}$  ; (2)  $Q_{EV}^{ET*} > Q_{EV}^{DT*} > Q_{EV}^{NT*} > Q_{EV}^{FT*}$  ,  
 $Q_{FV}^{FT*} > \max\{Q_{FV}^{DT*}, Q_{FV}^{NT*}\} > Q_{FV}^{ET*}$  。

证明过程见附录 13。

命题 5.2(1)表明，在政府双补贴政策下，相较于制造商仅提供单一置换服务（模型  $NT$ ），在此基础上，制造商额外提供以旧燃油车换 NEV 服务（双向置换服务，即模型  $ET$ ）并不影响新车的总销售量；然而，当制造商提供定向置换服务（模型  $FT$ ）或全面置换服务（模型  $DT$ ），则会提高新车的总销售量。由命题 5.2(2)进一步可得，当制造商提供双向置换服务时，制造商额外提供的 TOFE 服务有效的满足了部分拥有旧燃油车的消费者对于 NEV 置换的需求，从而促进了 NEV 销量的提升。其次，当制造商提供定向置换服务时，燃油车的总销售量则达到最高，这是因为在该服务模式下，拥有旧燃油车的老顾客仅能通过参与制造商提供的以旧燃油车换新燃油车(TOFF)服务来完成置换，这一限制条件直接推动了燃油车总销售量的增长。

综上所述，制造商在制定以旧换新策略时，需充分考虑其燃油车和 NEV 各

自的销售目标，通过灵活调整置换服务的种类与范围，可以更有效地满足市场需求，进而实现销售目标的最大化。

### 5.3.2 关键参数影响分析

在制造商不同的整车以旧换新策略下，燃油车和 NEV 生产成本  $c_f$  和  $c_e$  对均衡解、销量的影响如命题 5.3 所示。

**命题 5.3** (1)  $\frac{\partial w_e^{j*}}{\partial c_f} = \frac{\partial p_e^{j*}}{\partial c_f} = \frac{\partial b_e^{j*}}{\partial c_f} = \frac{\partial r_e^{j*}}{\partial c_f} = 0$ ,  $\frac{\partial w_f^{j*}}{\partial c_f} > 0$ ,  $\frac{\partial p_f^{j*}}{\partial c_f} > 0$ ,  $\frac{\partial Q^{j*}}{\partial c_f} < 0$ ,  $\frac{\partial Q_{FV}^{j*}}{\partial c_f} < 0$ ,  $\frac{\partial Q_{EV}^{j*}}{\partial c_f} > 0$ ,  $\frac{\partial b_f^{m*}}{\partial c_f} = \frac{\partial r_f^{m*}}{\partial c_f} = 0$ ; (2)  $\frac{\partial w_f^{j*}}{\partial c_e} = \frac{\partial p_f^{j*}}{\partial c_e} = \frac{\partial b_e^{j*}}{\partial c_e} = \frac{\partial r_e^{j*}}{\partial c_e} = 0$ ,  $\frac{\partial w_e^{j*}}{\partial c_e} > 0$ ,  $\frac{\partial p_e^{j*}}{\partial c_e} > 0$ ,  $\frac{\partial Q^{j*}}{\partial c_e} < 0$ ,  $\frac{\partial Q_{FV}^{j*}}{\partial c_e} > 0$ ,  $\frac{\partial Q_{EV}^{j*}}{\partial c_e} < 0$ ,  $\frac{\partial b_f^{m*}}{\partial c_e} = \frac{\partial r_f^{m*}}{\partial c_e} = 0$ , 其中  $j \in \{NT, FT, ET, DT\}$ ,  $m \in \{FT, ET, DT\}$ 。

证明过程见附录 9。

命题 5.3 表明，当政府同时对老顾客以旧车置换 NEV 和新燃油车都提供补贴时，燃油车(NEV)生产成本对供应链产品定价决策和销量的影响与制造商的以旧换新服务策略无关。具体而言：随着燃油车(NEV)生产成本的增加，NEV（燃油车）的批发价格、零售价格和旧车回收的转移价格（即零售商给予消费者旧燃油车/NEV 的折价和制造商给予零售商旧燃油车/NEV 的回购价格）不变，而燃油车(NEV)的批发价格和零售价格会升高，进而使燃油车(NEV)总销量降低，NEV（燃油车）总销量升高，但其增加幅度较低，使得新车总销量降低。

政府对 NEV 的置换补贴  $m_e$  对均衡解、销量的影响如命题 5.4 所示。

**命题 5.4** (1)  $\frac{\partial w_f^{j*}}{\partial m_e} = \frac{\partial p_f^{j*}}{\partial m_e} = 0$ ,  $\frac{\partial b_e^{j*}}{\partial m_e} < 0$ ,  $\frac{\partial r_e^{j*}}{\partial m_e} < 0$ ,  $\frac{\partial Q_{EV}^{j*}}{\partial m_e} = \frac{\partial Q^{j*}}{\partial m_e} > 0$ ,  $j \in \{NT, FT, ET, DT\}$ ; (2) 在模型 NT 中，有  $\frac{\partial w_e^{NT*}}{\partial m_e} = \frac{\partial p_e^{NT*}}{\partial m_e} = \frac{\partial Q_{FV}^{NT*}}{\partial m_e} = 0$ ; (3) 在模型 FT 中，有  $\frac{\partial w_e^{FT*}}{\partial m_e} = \frac{\partial p_e^{FT*}}{\partial m_e} = \frac{\partial b_f^{FT*}}{\partial m_e} = \frac{\partial r_f^{FT*}}{\partial m_e} = \frac{\partial Q_{FV}^{FT*}}{\partial m_e} = 0$ ; (4) 在模型 ET 中，有

$$\frac{\partial w_e^{ET*}}{\partial m_e} = \frac{\partial p_e^{ET*}}{\partial m_e} = 0, \quad \frac{\partial b_f^{ET*}}{\partial m_e} < 0, \quad \frac{\partial r_f^{ET*}}{\partial m_e} < 0, \quad \frac{\partial Q_{FV}^{ET*}}{\partial m_e} < 0; \quad (5) \text{在模型 } DT \text{ 中, 有}$$

$$\frac{\partial w_e^{DT*}}{\partial m_e} > 0, \quad \frac{\partial p_e^{DT*}}{\partial m_e} > 0, \quad \frac{\partial b_f^{DT*}}{\partial m_e} = \frac{\partial r_f^{DT*}}{\partial m_e} = 0, \quad \frac{\partial Q_{FV}^{DT*}}{\partial m_e} < 0。$$

证明过程见附录 10。

命题 5.4(1)表明, 与政府实行单补贴政策时类似, 制造商整车以旧换新策略不会改变政府的 NEV 置换补贴对燃油车批发价格和零售价格、旧 NEV 的转移价格和折价以及 NEV 的总销量和新车总销量的影响。命题 5.4(2)~(5)表明, 政府的 NEV 置换补贴对 NEV 的批发价格和零售价格、旧燃油车转移价格、旧燃油车折价和燃油车总销量的影响与制造商的以旧换新策略有关。具体可见第四章, 在此不再详述。

政府对老顾客以旧车换燃油车的补贴  $m_f$  对均衡解、销量的影响如命题 5.5 所示。

**命题 5.5** (1)在模型 NT 和模型 ET 中,  $\frac{\partial b_f^{ET*}}{\partial m_f} = \frac{\partial r_f^{ET*}}{\partial m_f} = 0$ ,

$$\frac{\partial w_e^{n*}}{\partial m_f} = \frac{\partial p_e^{n*}}{\partial m_f} = \frac{\partial w_f^{n*}}{\partial m_f} = \frac{\partial p_f^{n*}}{\partial m_f} = \frac{\partial b_e^{n*}}{\partial m_f} = \frac{\partial r_e^{n*}}{\partial m_f} = 0, \quad n \in \{NT, ET\} \quad (2) \text{在模型 } FT \text{ 中,}$$

$$\frac{\partial w_e^{FT*}}{\partial m_f} = \frac{\partial p_e^{FT*}}{\partial m_f} = \frac{\partial w_f^{FT*}}{\partial m_f} = \frac{\partial p_f^{FT*}}{\partial m_f} = \frac{\partial b_e^{FT*}}{\partial m_f} = \frac{\partial r_e^{FT*}}{\partial m_f} = 0, \quad \frac{\partial b_f^{FT*}}{\partial m_f} < 0, \quad \frac{\partial r_f^{FT*}}{\partial m_f} < 0,$$

$$\frac{\partial Q^{FT*}}{\partial m_f} > 0, \quad \frac{\partial Q_{FV}^{FT*}}{\partial m_f} > 0, \quad \frac{\partial Q_{EV}^{FT*}}{\partial m_f} < 0; \quad (3) \text{在模型 } DT \text{ 中, } \frac{\partial w_f^{DT*}}{\partial m_f} = \frac{\partial p_f^{DT*}}{\partial m_f} = 0,$$

$$\frac{\partial w_e^{DT*}}{\partial m_f} < 0, \quad \frac{\partial p_e^{DT*}}{\partial m_f} < 0, \quad \frac{\partial b_e^{DT*}}{\partial m_f} < 0, \quad \frac{\partial b_f^{DT*}}{\partial m_f} < 0, \quad \frac{\partial r_e^{DT*}}{\partial m_f} < 0, \quad \frac{\partial r_f^{DT*}}{\partial m_f} < 0,$$

$$\frac{\partial Q^{DT*}}{\partial m_f} > 0, \quad \frac{\partial Q_{FV}^{DT*}}{\partial m_f} > 0, \quad \frac{\partial Q_{EV}^{DT*}}{\partial m_f} < 0。$$

证明过程见附录 14。

命题 5.5 表明, 政府对老顾客置换燃油车的补贴 (简称燃油车置换补贴) 对均衡解和销量的影响与制造商的以旧换新策略有关, 具体来说: 当制造商提供不含 TOFF 服务的单一置换服务 (模型 NT) 和双向置换服务 (模型 ET) 时,

政府对置换燃油车的补贴未对这两种策略下的均衡解和销量产生直接影响，这是因为制造商未提供以旧燃油车换新燃油车服务。当制造商提供包含 TOFF 服务的双向置换服务（模型  $FT$ ）时，政府对置换燃油车补贴力度的增大并不会影响 NEV 的批发价格和零售价格以及旧 NEV 的折价和转移价格，而随着燃油车置换补贴的提升，降低了消费者置换新燃油车的成本，即消费者置换新燃油车意愿增强，使燃油车总销量升高，而 NEV 总销量下降，但新车总销量会升高，此时为了最大化自身利润，制造商会降低旧燃油车的转移价格，零售商也会降低旧燃油车折价。当制造商提供全面置换服务（模型  $DT$ ）时，随着燃油车置换补贴升高，燃油车的批发价格和零售价格不变，而 NEV 的批发价格和零售价格下降，同时旧燃油车(NEV)的折价和转移价格也下降。然而，尽管 NEV 价格的降低有利于消费者购买 NEV，但其价格的下降可能未能充分抵消燃油车补贴升高带来的吸引力，导致消费者更倾向于购买或置换燃油车。因此，随着燃油置换补贴升高，燃油车总销量和新车总销量上升，而 NEV 总销量会下降。

综上所述，政府对老顾客以旧车置换燃油车的补贴力度与制造商的以旧换新策略之间存在复杂的交互关系，这种关系对市场价格、不同类型汽车的销量分布以及 NEV 产业的长期发展具有重要影响。政府和汽车制造商需密切关注市场动态和消费者行为变化，以确保补贴政策的有效性和市场的健康发展。

## 5.4 政府不同补贴政策对以旧换新策略的影响分析

结合第四章的研究内容，本小节探讨政府补贴政策变化（即由单补贴政策演变为双补贴政策）与制造商以旧换新策略间的关系。

### 5.4.1 模型 $NE$ 与 $NT$ 的比较分析

**命题 5.6** 当制造商仅提供 TOEE 服务（简称单一置换服务）时，政府提供单补贴政策和双补贴政策时的均衡解和需求的关系如下：(1)  $w_e^{NE*} = w_e^{NT*}$ ，

$$w_f^{NE*} = w_f^{NT*}, \quad p_e^{NE*} = p_e^{NT*}, \quad p_f^{NE*} = p_f^{NT*}, \quad b_e^{NE*} = b_e^{NT*}, \quad r_e^{NE*} = r_e^{NT*}; \quad (2)$$

$$Q^{NE*} = Q^{NT*}, \quad Q_{EV}^{NE*} = Q_{EV}^{NT*}, \quad Q_{FV}^{NE*} = Q_{FV}^{NT*}。$$

证明过程见附录 15。

命题 5.6 表明，当制造商提供单一置换服务时，政府补贴政策的变化（即由单补贴政策变为双补贴政策）对 NEV 和燃油车的定价决策、新车总销量、燃油车总销量以及 NEV 总销量均未产生显著影响。这是因为，相比于政府仅对置换 NEV 提供补贴的单补贴政策，若政府对置换燃油车也提供补贴（即双补贴政策），其主要影响的是制造商提供以旧燃油车换新燃油车(TOFF)服务的决策。然而，在制造商仅提供单一置换服务的情境下，由于不存在 TOFF 服务，因此政府补贴政策的变化并不会对这一服务策略下的定价决策和销量产生直接影响。即在制造商提供单一置换服务时，政府的补贴政策变化对 NEV 和燃油车的市场表现不具有显著的调节作用。

综上所述，命题 5.6 揭示了当制造商提供单一置换服务时政府补贴政策变化的影响机制。即政府在制定补贴政策时，应充分考虑制造商的以旧换新服务策略，以确保政策实施的有效性和市场的健康发展。

#### 5.4.2 模型 FE 与 FT 的比较分析

**命题 5.7** 当制造商同时提供 TOEE 和 TOFF 服务（简称定向置换服务）时，政府提供单补贴政策和双补贴政策时的均衡解和需求的关系如下：(1)

$$w_e^{FE*} = w_e^{FT*}, \quad w_f^{FE*} = w_f^{FT*}, \quad p_e^{FE*} = p_e^{FT*}, \quad p_f^{FE*} = p_f^{FT*}, \quad b_e^{FE*} = b_e^{FT*}, \quad r_e^{FE*} = r_e^{FT*}, \\ b_f^{FE*} > b_f^{FT*}, \quad r_f^{FE*} > r_f^{FT*}; (2) Q^{FE*} < Q^{FT*}, \quad Q_{EV}^{FE*} > Q_{EV}^{FT*}, \quad Q_{FV}^{FE*} < Q_{FV}^{FT*}.$$

证明过程见附录 16。

首先，在制造商提供定向置换服务的情境下，政府补贴政策的变化对 NEV 和燃油车的批发价格、零售价格，以及旧 NEV 的折价和转移价格均不产生影响。这是因为在定向置换服务模式下，政府的补贴政策虽然能够刺激市场需求，但并未直接作用于定价环节，因此无法对批发价格和零售价格产生直接影响。其次，由本文的假设可知，拥有旧 NEV 的老顾客不会换回到燃油车，因此，政府对老顾客置换燃油车也进行补贴（简称燃油车置换补贴）时并不会影响到旧 NEV 的折价和转移价格。然而，相比于政府仅提供 NEV 置换补贴的单补贴政策，若政府同时对置换燃油车提供补贴（即双补贴政策），则旧燃油车的折价和转移价格会降低，这是因为在政府双补贴政策下，政府为置换燃油车的老顾客

提供补贴，从而增加了旧燃油车的市场需求。为了最大化自身利润，制造商会降低旧燃油车的转移价格，而零售商会随之降低旧燃油车的折价；在双补贴政策下，由于政府提供了燃油车置换补贴，因此，老顾客置换燃油车的意愿增强，进而推动了燃油车销量的提升。同时，政府的双补贴政策使部分偏向于继续使用旧车的老顾客转而去置换燃油车，因此新车总销量也随之升高。但是，在有限的市场需求下，燃油车销量增加意味着部分原本可能购买 NEV 的消费者会转而选择购买燃油车。此时，NEV 销量会降低。

综上所述，命题 5.7 揭示了当制造商提供定向置换服务时政府补贴政策的变化对供应链各环节的影响机制，对政府而言，在制定补贴政策时，需全面考虑制造商的以旧换新策略及消费者的需求，确保政策既能精准激励，又能有效引导市场走向，从而维护政策的有效实施与汽车市场生态的良性循环。

#### 5.4.3 模型 EE 与 ET 的比较分析

**命题 5.8** 当制造商同时提供 TOEE 和 TOFE 服务（简称双向置换服务）时，政府提供单补贴政策 and 双补贴政策时的均衡解和需求的关系如下：(1)

$$w_e^{EE*} = w_e^{ET*}, \quad w_f^{EE*} = w_f^{ET*}, \quad p_e^{EE*} = p_e^{ET*}, \quad p_f^{EE*} = p_f^{ET*}, \quad b_e^{EE*} = b_e^{ET*}, \quad r_e^{EE*} = r_e^{ET*}, \\ p_f^{EE*} = p_f^{ET*}, \quad r_f^{EE*} = r_f^{ET*}; \quad (2) Q^{EE*} = Q^{ET*}, \quad Q_{EV}^{EE*} = Q_{EV}^{ET*}, \quad Q_{FV}^{EE*} = Q_{FV}^{ET*}.$$

证明过程见附录 17。

当制造商实施包含以旧燃油车换 NEV(TOFE)和以旧 NEV 换新的 NEV(TOEE)在内的双向置换服务策略时，政府补贴政策的调整，并不影响 NEV 与燃油车的定价策略和销量。这一现象与制造商提供单一置换服务（即仅提供 TOEE 服务）时的市场反应相似。因为在制造商提供双向置换服务的情境下，依然不存在制造商提供 TOFF 服务的情景，因此，政府补贴政策的变化并不会对这一服务策略下的定价决策和销量产生直接影响。

综上所述，政府需审慎评估补贴政策调整的实际效果与潜在影响，特别是在制造商仅提供单一置换服务和双向置换服务的背景下，确保政策设计的科学性与有效性。

#### 5.4.4 模型 DE 与 DT 的比较分析

**命题 5.9** 当制造商同时提供 TOEE、TOFE 和 TOFF 服务（简称全面置换服务）时，政府提供单补贴政策 and 提供双补贴政策时的均衡解和需求的关系如下：

$$(1) \quad w_f^{DE*} = w_f^{DT*}, \quad p_f^{DE*} = p_f^{DT*}, \quad w_e^{DE*} > w_e^{DT*}, \quad p_e^{DE*} > p_e^{DT*}, \quad b_e^{DE*} > b_e^{DT*}, \\ b_f^{DE*} > b_f^{DT*}, \quad r_e^{DE*} > r_e^{DT*}, \quad r_f^{DE*} > r_f^{DT*}; \quad (2) \quad Q^{DE*} < Q^{DT*}, \quad Q_{EV}^{DE*} > Q_{EV}^{DT*}, \\ Q_{FV}^{DE*} < Q_{FV}^{DT*}.$$

证明过程见附录 18。

命题 5.9 表明，当制造商提供全面置换服务时，政府的补贴政策调整对燃油车的批发价格与零售价格没有影响，然而，相较于单补贴政策情形，若政府同时对置换燃油车进行补贴（即双补贴政策），NEV 的批发价格与零售价格均会下降。此外，政策的调整会使旧燃油车与旧 NEV 的折价以及制造商向零售商回购旧车的转移价格降低。在销量方面，政府补贴政策的变化使新车总销量与燃油车总销量均上升，这反映出政策调整有效激发了市场对燃油车的购买需求。然而，NEV 的总销量会下降，这是因为此时消费者在选择置换车辆时更倾向于选择燃油车，从而在一定程度上挤占了 NEV 的市场份额。

综上所述，政府应考虑细化补贴政策，以更精准地引导市场需求。例如，可以根据 NEV 的不同类型（如纯电动车、插电式混合动力车等）以及燃油车的排放等级设定不同的补贴标准，以促进汽车市场的多元化发展。而制造商应密切关注政府补贴政策的变化，灵活调整自身的以旧换新服务策略，以适应市场需求的变化。

### 5.5 数值仿真

本节通过数值仿真，探求政府双补贴政策对不同以旧换新策略下新车总需求、供应链总利润、消费者剩余和社会总福利的影响。在参考第四章参数设置（ $c_e = 0.5$ ， $c_f = 0.4$ ， $\delta = 0.2$ ， $\alpha = 1.25$ ， $r_s = 0.25$ ， $\tau_e = 0.22$ ， $\tau_f = 0.28$ ， $\gamma = 0.25$  和  $\eta = 0.35$ ），且同时满足本章相关参数假设条件下，本章参数设置如下： $m_f = 0.02$ ；其中，设定政府对置换 NEV 的补贴  $m_e$  为自变量且  $m_e \in (0.02, 0.22)$ 。

政府对置换燃油车的补贴  $m_f$  固定不变，则  $m_e$  越高表示政府对置换 NEV 补贴力度越大，也表示政府对 NEV 和燃油车置换补贴政策差异越大，即  $\Delta m$  越大。

### 5.5.1 政府补贴与以旧换新策略对总需求和总利润的影响

根据制造商和零售商的最优利润可以得出  $\pi_M^{j*} = 2\pi_R^{j*}$ ， $j \in \{NT, FT, ET, DT\}$ ，即制造商和零售商的利润呈现出一定的比例关系，并占总利润的固定比例，且该关系不受以旧换新策略的影响。因此，仅分析政府对置换 NEV 的补贴  $m_e$  和以旧换新策略对新车总需求和供应链总利润的影响，具体仿真结果如图 5-2 所示。

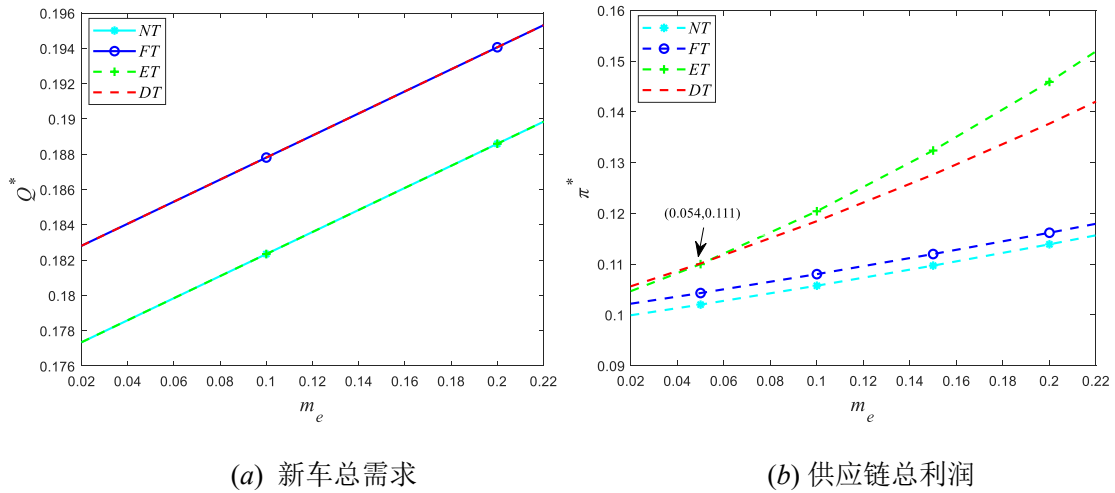


图 5-2 新车总需求与供应链总利润

由图 5-2(a)可知，当政府提供双补贴政策时，政府补贴政策差异的增大即对置换新能源补贴力度增加时，新车总需求会升高。其次，相较于单一置换服务（模型 NT），制造商提供双向置换服务（模型 ET）不影响新产品总需求；相较于定向置换服务（模型 FT），制造商提供全面置换服务（模型 DT）也不影响新产品总销量。这与本章命题 5.2(1)相吻合，表明在特定情境下，提供更广泛的置换服务选项并不总是能带来更高的总需求。

图 5-2(b)则揭示了政府补贴政策与供应链总利润之间的关系。一方面，随着政府对 NEV 置换补贴的增加，消费者的以旧换新意愿显著增强，直接推动了销量的提升，进而使供应链总利润升高。另一方面，当政府对 NEV 置换补贴处于较低水平时，制造商提供全面置换服务时供应链总利润最高；但是，随着政

府对 NEV 置换补贴升高并高于一定阈值时 ( $m_e > 0.054$ )，制造商提供双向置换服务时供应链总利润最高。这是因为当政府对 NEV 的置换补贴维持在较低水平时，表明政府对 NEV 与燃油车置换政策的差异并不显著。在此情境下，若制造商提供全面置换服务，将为拥有旧燃油车的老顾客提供更多样化的置换选项，即可选择将旧燃油车置换为新燃油车，从而避免了因置换 NEV 而产生的较高成本。因此，制造商提供的全面置换服务增强了自身的以旧换新效率，促进了供应链总利润的增长。但是，政府对 NEV 置换补贴力度的加大，会显著加剧置换 NEV 与燃油车在补贴政策上的差异，即降低了消费者置换 NEV 的成本，进而使拥有旧燃油车的老顾客更倾向于选择将旧车置换为 NEV（即选择 TOFE 服务）。在此情境下，若制造商继续提供全面置换服务（即同时提供 TOEE、TOFF 和 TOFE 服务），可能会因提供了不必要的 TOFF 服务（以旧燃油车换新燃油车服务）而增加了自身成本，从而对供应链总利润构成负面影响。因此，制造商需根据政府政策的变化及时调整其以旧换新策略。

综上所述，政府补贴政策对新车总销量和供应链总利润起到至关重要的作用，因此，政府应继续优化和完善双补贴政策，确保补贴力度既能有效刺激消费者参与以旧换新活动，又能避免过度补贴导致的资源浪费。而制造商在面对政府补贴政策的变化时应密切关注政府补贴政策的变化，灵活调整自身的以旧换新策略，以适应市场需求的变化。例如在补贴政策差异不大的初期，制造商可优先考虑提供全面置换服务，以吸引更多消费者参与以旧换新活动；但随着补贴政策差异的扩大，应及时转向提供双向置换服务，以降低不必要的成本并提升供应链总利润。

### 5.5.2 政府补贴与以旧换新策略对社会总福利和消费者剩余的影响

政府对消费者置换 NEV 的补贴  $m_e$  和以旧换新策略对新顾客消费者剩余、老顾客消费者剩余、总消费者剩余和社会总福利的影响如图 5-3 所示。

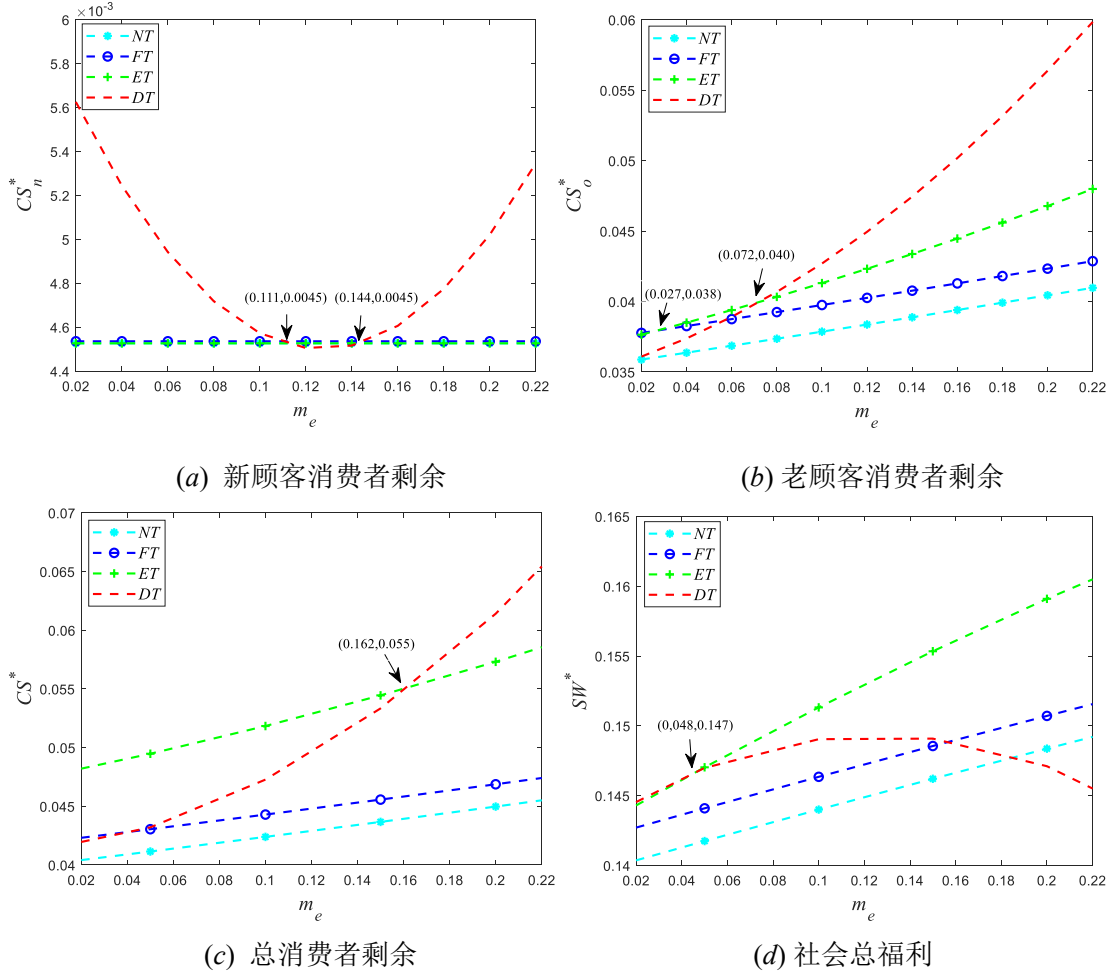


图 5-3 消费者剩余与社会总福利

由图 5-3(a)可得, 随着政府对 NEV 置换补贴额度的提升 (即政府补贴政策差异增大), 若制造商提供单一置换服务 (模型  $NT$ )、定向置换服务 (模型  $FT$ ) 及双向置换服务 (模型  $ET$ ), 新顾客消费者剩余保持不变, 原因在于补贴政策只作用于老顾客的置换决策及旧车折价, 对新顾客的购买决策无影响。当制造商提供全面置换服务 (模型  $DT$ ) 时, 由式(5-31)和式(5-33)可得, 政府补贴政策差异会影响到新车价格决策, 即零售商会根据政府补贴额度调整新车价格, 进而影响新顾客消费者剩余; 此时, 新顾客消费者剩余会随政府补贴政策差异的升高先下降后上升。进一步观察可以发现, 政府对 NEV 置换补贴额度处于较低 ( $m_e < 0.111$ ) 或较高水平 ( $m_e > 0.144$ ) 时 (即此时政府补贴政策差异较小或较大), 全面置换服务能最大化新顾客消费者剩余; 而当政府对 NEV 置换补贴额度适中 ( $0.111 < m_e < 0.144$ ) 时 (即此时政府补贴政策差异适中), 定向置换服务则成为

新顾客的最优选择。这表明新顾客的偏好会随政府补贴政策的差异而随之动态变化。

图 5-3(b)表明无论制造商提供何种以旧换新服务，随着政府对 NEV 置换补贴的增加，老顾客从以旧换新服务中获得的净收益提高，进而使其消费者剩余提高。具体而言，政府对 NEV 置换补贴额度较低时 ( $0 < m_e < 0.027$ )（即此时政府补贴政策差异较小），老顾客偏向于选择定向置换服务；补贴适中时 ( $0.027 < m_e < 0.072$ )（即此时政府补贴政策差异适中），则偏向于双向置换服务；而补贴超过一定阈值后 ( $m_e > 0.072$ )（即此时政府补贴政策差异较大），全面置换服务成为老顾客的最优选择。这一趋势反映了老顾客在政府补贴政策差异下对以旧换新服务的不同需求。

由图 5-3(c)可知，在消费者层面上，无论制造商提供何种以旧换新服务，政府对 NEV 置换补贴的增加会使总消费者剩余升高，另外，当政府对 NEV 置换补贴较低时，即此时政府对 NEV 与燃油车置换时补贴政策的差异并不显著，双向置换服务在提升总消费者剩余方面表现最优；当政府对 NEV 置换补贴超过一定水平后 ( $m_e > 0.162$ )，即政府补贴政策的差异较明显，制造商提供全面置换服务时总消费者剩余最高。

图 5-3(d)表明，在制造商提供非全面置换服务的情形下，社会总福利随政府对 NEV 置换补贴额度的增加而上升；而当制造商提供全面置换服务时，社会总福利会先升后降。此外，当政府对 NEV 补贴较低时，政府补贴政策差异不明显，制造商提供全面置换服务时社会总福利最高；而当政府对 NEV 补贴较高且超过一定阈值时 ( $m_e > 0.048$ )，即此时政府补贴政策的差异较大且偏向于置换 NEV，制造商提供包含 TOEE 和 TOFE 的双向置换服务时能最大化社会总福利。

综上所述，政府应当深化与制造商之间的沟通协作机制，合理制定和优化补贴政策。在此过程中，政府需关注双补贴政策对社会总福利及供应链利润的影响，确保政策既能有效提升供应链利润和社会总福利水平，又能避免过度补贴导致的资源浪费。同时，结合图 5-2(b)和图 5-3(d)可知，当政府对顾客置换新燃油车或 NEV 的补贴力度相近时（即补贴政策差异较小），制造商提供全面置

换服务能最大化供应链成员利润和社会总福利水平；当政府补贴政策差异较大且偏向于置换 NEV 时，政府应积极倡导并支持制造商提供包含 TOEE 和 TOFE 服务的双向置换服务，以适应政策导向，促进市场的健康发展。

### 5.5.3 政府差异性补贴政策对制造商以旧换新策略的影响

结合第四章的研究内容，同时根据本章 5.4 节的内容可得，相比于政府提供单补贴政策，政府提供双补贴政策只会影响到消费者参加 TOFF 服务时的购买决策，因此，本节仅分析政府补贴变化对制造商提供定向置换服务（模型  $FE$  与模型  $FT$ ）和全面置换服务（模型  $DE$  与模型  $DT$ ）时的影响。

#### (1) 政府差异性补贴政策对新车总需求和供应链总利润的影响

当制造商提供定向置换服务和全面置换服务时，政府补贴范围的扩大对新车总需求和供应链总利润的影响如图 5-4 和图 5-5 所示。

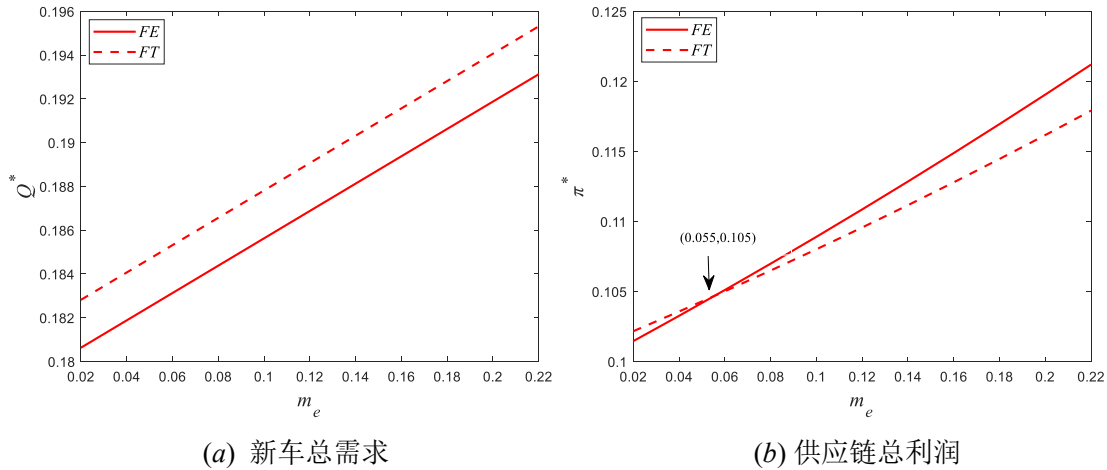


图 5-4 模型  $FE$  和模型  $FT$  的新车总需求和供应链总利润

图 5-4(a)所示的结果表明，在制造商提供定向置换服务（即同时提供以旧燃油车换新燃油车和以旧 NEV 换新的 NEV 的服务）的情况下，无论政府提供何种补贴（单补贴或双补贴）政策，随着政府对 NEV 置换补贴的增加，新车总需求上升，这表明政府对 NEV 的补贴对刺激市场需求具有积极作用。另外，若政府由单补贴政策转而提供双补贴政策，新车总需求升高，这与之前的研究结论（命题 5.7）相符合，进一步证明了双补贴政策在促进新车销售方面的优势。

图 5-4(b)表明了制造商提供定向置换服务时，结合图 5-4(a)可得，随着政府对 NEV 置换补贴的增加，新车总需求升高，进而使供应链总利润升高。但是，

当政府对 NEV 置换补贴处于较低水平时，即此时政府对置换燃油车和置换 NEV 补贴差异（简称补贴政策差异）不大，政府双补贴政策下的供应链总利润最高；但当补贴超过某一阈值时 ( $m_e > 0.055$ )，即此时政府补贴政策差异较大明显且对置换 NEV 补贴力度较大，政府单补贴政策下的供应链总利润反而更高。这表明当制造商提供定向置换服务时，若政府此时提供双补贴政策且补贴政策差异较大时，会对供应链成员利润产生负面影响，即政府提供更全面的补贴政策不一定总有利于供应链成员利润。

综上所述，政府应关注制造商以旧换新策略及消费者需求的变化，并在制定双补贴政策时，考虑对置换燃油车与置换 NEV 所提供的补贴力度差异，以确保双补贴政策实施的有效性。

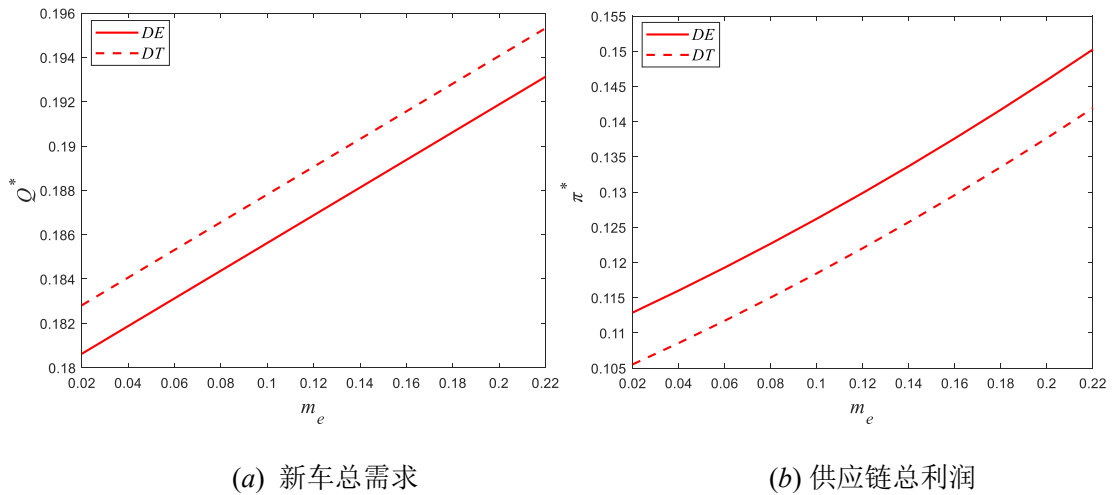


图 5-5 模型 DE 和模型 DT 的新车总需求和供应链总利润

由图 5-5(a)可知，当制造商提供全面置换服务时（即同时提供三种不同的以旧换新服务），无论政府提供何种补贴（单补贴或双补贴）政策，政府对 NEV 置换补贴的增加会直接导致新车总需求的提升。这表明政府对 NEV 的补贴对刺激市场需求具有积极作用。另外，若政府由单补贴政策转而提供双补贴政策，新车总需求升高，这也与命题 5-9 所示一致。图 5-5(b)表明了制造商提供全面置换服务时，结合图 5-5(a)可得，随着政府对 NEV 置换补贴的增加，新车总需求升高，进而使供应链总利润升高。然而，当制造商提供全面置换服务时，若政府由单补贴政策转而提供双补贴政策，供应链总利润会降低。

综上所述，制造商应继续提供全面置换服务，以满足不同消费者的需求，

特别是那些希望通过以旧换新方式升级旧车的消费者。这不仅能提升品牌形象，还能有效扩大市场份额。而当制造商提供全面置换服务时，政府应该进一步优化补贴结构并加强与企业间沟通，避免给供应链成员利润带来不利影响。

## (2) 政府差异性补贴政策对消费者剩余和社会总福利的影响

当制造商提供定向置换服务和全面置换服务时，政府补贴范围的扩大对消费者剩余和社会总福利的影响图 5-6 和图 5-7 所示。

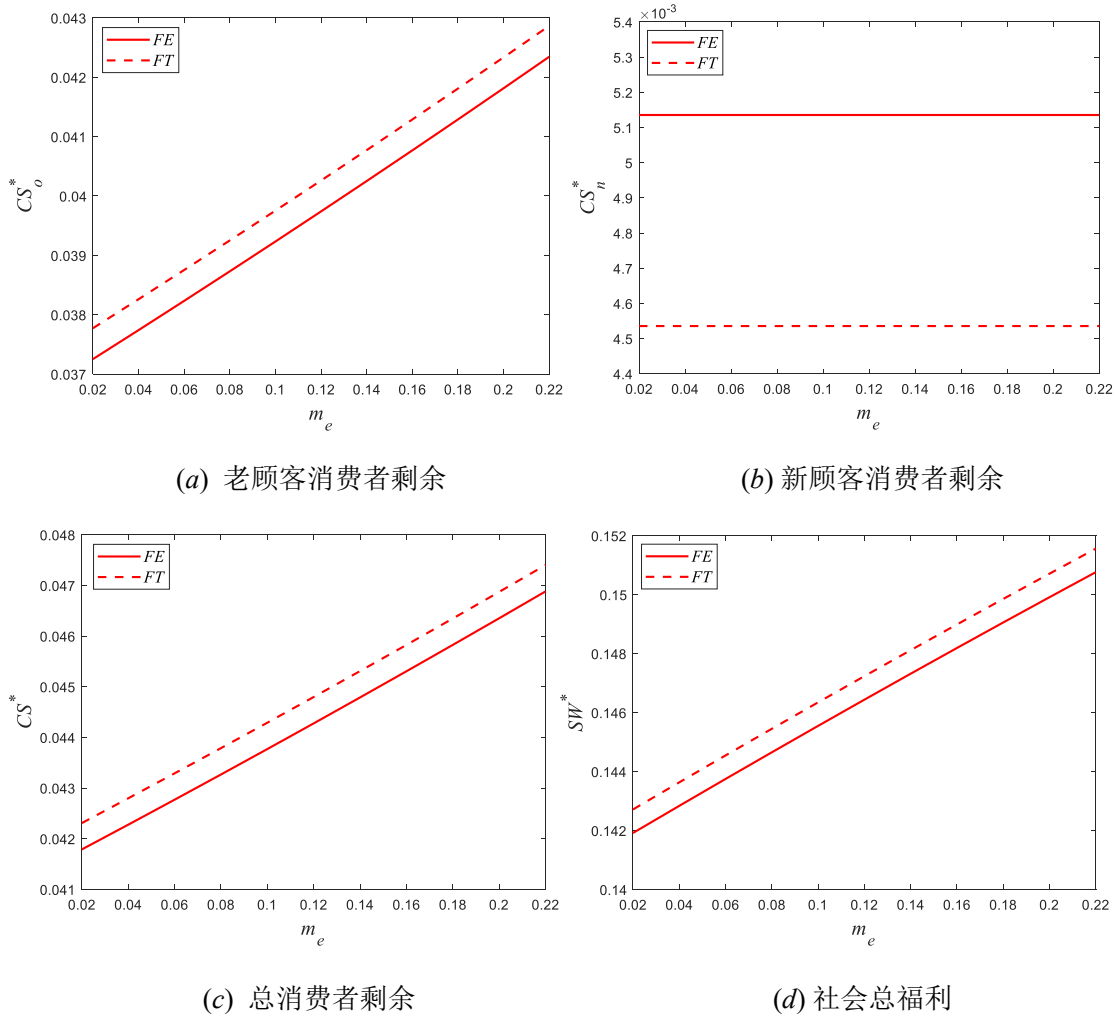
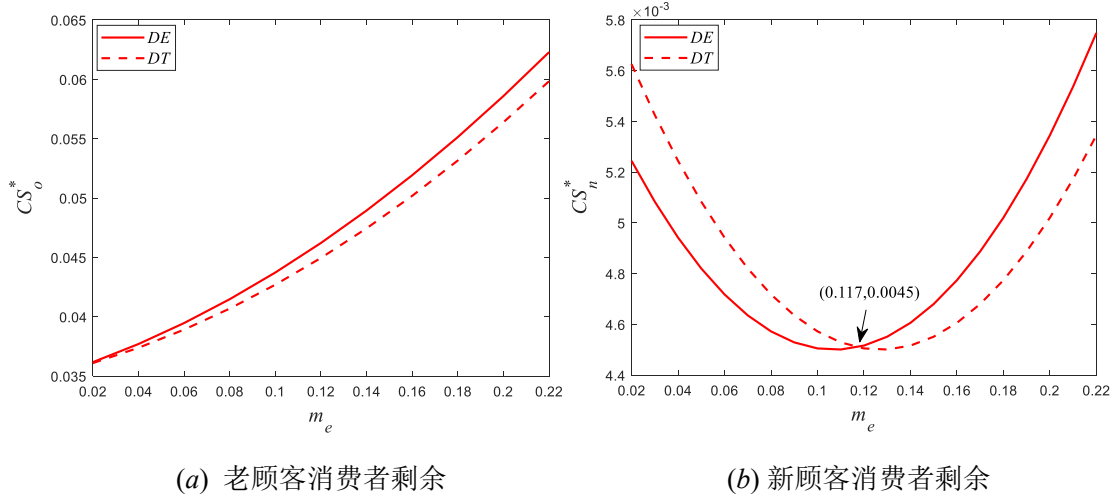


图 5-6 模型 FE 和模型 FT 的消费者剩余和社会总福利

由图 5-6(a)可知，当制造商提供定向置换服务时，随着政府对 NEV 置换补贴的升高，直接降低了老顾客置换 NEV 的成本，进而使其消费者剩余增加。与政府仅对老顾客置换 NEV 提供补贴（单补贴政策）相比，当政府同时补贴置换燃油车的老顾客时（双补贴政策），老顾客的消费剩余会进一步升高。这是因为双补贴政策增加了老顾客在置换决策上的灵活性，使他们无论选择置换 NEV

还是燃油车都能获得一定的经济利益。由图 5-6(b)可知，政府对 NEV 置换补贴的增加对新顾客的消费剩余没有影响。这是因为新顾客没有旧车可以置换，因此无法直接受益于政府的置换补贴；而与单补贴政策相比，政府提供双补贴会降低新顾客的消费剩余。由图 5-6(c)可知，随着政府对 NEV 置换补贴的增加，无论政府提供何种补贴政策，总消费者剩余均会增加。其次，与政府提供单补贴政策相比，政府提供双补贴政策时总消费者更高，这是因为老顾客消费剩余的增加部分抵消了新顾客消费剩余的轻微下降。由图 5-6(d)可知，当制造商提供定向置换服务时，无论政府提供何种补贴政策，随着政府对 NEV 置换补贴的增加，社会总福利均会增加。其次，与政府提供单补贴政策相比，双补贴政策下社会总福利更高。这是因为双补贴政策在促进 NEV 销售的同时，也考虑到了燃油车市场的稳定和发展，从而实现了更广泛的社会和经济利益。

综上所述，政府在实施双补贴政策时，应合理分配资源，确保既能促进 NEV 的普及和发展，又能保持燃油车市场的稳定和可持续发展。而制造商应积极响应政府的政策导向，提供更多样化的置换服务选项，以满足市场上不同类型消费者的需求。



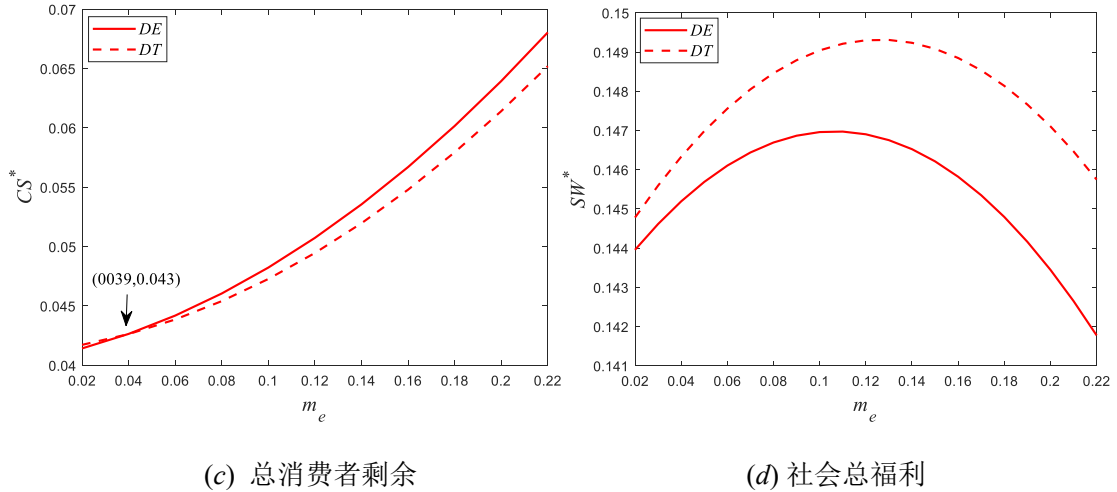


图 5-7 模型 DE 和模型 DT 的消费者剩余和社会总福利

由图 5-7(a)可知，当制造商提供全面置换服务时，无论政府提供何种补贴政策，随着政府对 NEV 置换补贴的增加，老顾客的消费剩余均会增加。其次，相比于政府仅对老顾客置换 NEV 提供补贴（单补贴政策），当政府同时补贴置换燃油车的老顾客时（双补贴政策），老顾客的消费剩余会降低。由图 5-7 (b) 可知，无论政府提供何种补贴政策，当制造商提供全面置换服务时，结合式(4-33) 和式(5-33)可知，政府补贴会直接影响 NEV 定价决策，进而影响到新顾客消费者剩余，此时，新顾客消费者剩余随着政府对 NEV 置换补贴的增加先下降后上升。其次，当政府对 NEV 置换补贴不高时，即此时政府补贴政策差异不明显，政府提供双补贴政策时新顾客消费者剩余最高。而当政府对 NEV 置换补贴较高且超过一定阈值时 ( $m_e > 0.117$ )，即此时政府补贴政策差异较大，结合由式(5-33)可得，当政府补贴政策差异增大时，会使 NEV 的零售价格增高，直接损害了购买 NEV 的新顾客的利益，进而会使新顾客的消费剩余降低。

由图 5-7 (c)可知，无论政府提供何种补贴政策，随着政府对 NEV 置换补贴的增加，总消费者剩余也会增加。另外，与政府提供单补贴政策相比，在政府对 NEV 置换补贴水平不高时即补贴政策差异不明显时，双补贴政策能够带来更高的总消费者剩余，但随着对 NEV 置换补贴水平的提高且超过一定阈值时 ( $m_e > 0.039$ ) 即此时补贴政策差异较大，单补贴政策下总消费者剩余更高。由图 5-7 (d)可知，当制造商提供全面置换服务时，无论政府提供何种补贴政策，随着政府对 NEV 置换补贴的增加，社会总福利会先升后降，其次，相比于政府的

单补贴政策，当政府提供双补贴政策时会提高社会总福利。这是因为双补贴政策能够更好地满足不同老顾客以旧换新的需求，进而使社会福利升高。

综上所述，政府在制定补贴政策时，应充分考虑制造商以旧换新策略和消费者需求的变化，灵活调整补贴力度和方式，避免因补贴政策差异过大带来的负面影响。

## 5.6 本章小结

在政府同时对 NEV 置换和燃油车置换都提供补贴（双补贴政策）的背景下，本章针对一个由同时生产燃油车和 NEV 的制造商和零售商构成的 NEV 供应链，依据制造商提供的不同以旧换新服务，分别构建了单一置换服务模型、定向置换服务模型、双向置换服务模型和全面置换服务模型，以研究不同策略下供应链的产品定价决策，探究不同服务策略的运行绩效，同时探究政府补贴政策变化与制造商以旧换新策略间的关系，研究结果如下：

(1) 制造商以旧换新策略和政府补贴政策差异交互影响制造商和零售商的最优产品定价决策，只有当政府补贴差异较小时，即对 NEV 和燃油车的置换补贴力度相近时，制造商提供全面置换服务能产生最低的 NEV（新燃油车）的批发和零售价格以及旧车的转移价格；政府补贴政策差异的增大即对置换新能源补贴力度增加能提高新车销量、供应链总利润和消费者剩余，但政府补贴力度的增大并不总是有利于社会总福利的提升。

(2) 当政府提供双补贴政策时，企业以旧换新策略的制定应主要考虑政府补贴政策差异的影响，在政府对燃油车和 NEV 置换补贴差异不明显时，制造商应提供全面置换服务以最大化供应链利润；而在政府置换补贴差异较大时，制造商应提供双向置换服务，此时，该以旧换新策略可同时使供应链利润和社会总福利最大化。

(3) 当政府提供双补贴政策时，新顾客和拥有旧车的老顾客对于以旧换新服务模式的偏好呈现出了显著的差异性，并且这种偏好差异与政府补贴政策差异相关，仅当政府补贴政策差异较大即对置换 NEV 补贴力度较大时，新顾客和老顾客均偏向于制造商提供全面置换服务。

(4) 当政府的单补贴政策演变为双补贴政策时，若制造商提供不含 TOFF 服

务的单一置换服务或双向置换服务，政府补贴政策的变化并不会对制造商以旧换新策略下的定价决策和销量产生直接影响；当制造商提供包含 TOFF 服务的定向置换服务和全面置换服务时，其对刺激汽车市场需求和提升社会总福利方面有明显作用，但是否能提升消费者剩余和供应链成员利润与制造商的以旧换新策略和政府补贴政策的差异有关，例如，当制造商提供定向置换服务时，仅当政府补贴政策差异较小时（即对老顾客以旧车置换 NEV 或新燃油车的补贴力度相近），政府补贴政策的变化才有利于消费者和供应链成员利润。

## 第 6 章 结论与展望

### 6.1 结论

本文基于 NEV 企业以旧换新策略的多样性以及政府补贴政策演变的现实背景开展研究。首先，在政府单补贴政策的背景下，分别考虑 NEV 部件和整车以旧换新策略下 NEV 企业定价决策，探讨补贴政策对 NEV 企业以旧换新策略的影响。其次，针对实践中 NEV 企业更灵活的整车以旧换新服务策略和政府以旧换新补贴的变化，分析政府不同补贴政策下 NEV 制造商的最优以旧换新策略及定价决策。最后，探究了政府补贴政策演变与企业以旧换新策略间的关系。本文的主要研究结论概括如下：

(1) 当企业提供部件和整车以旧换新服务时，NEV 企业的以旧换新策略需要考虑旧车耐用性。仅当旧车耐用性较低时，整车以旧换新策略能最大化制造商和零售商利润。另外，NEV 及电池的定价决策与制造商的以旧换新策略、旧电池容量消耗和 NEV 生产成本有关。当制造商提供电池以旧换新服务时，旧电池容量消耗仅会影响电池的定价决策，而不影响 NEV 的定价决策，即旧电池容量消耗越大，电池批发价格和销售价格越高，以旧换新数量降低。当制造商提供整车以旧换新服务时，旧电池容量消耗越高，NEV 的批发价格和零售价格越高，NEV 的销量和整车以旧换新数量会降低。在两种以旧换新模式下，NEV 生产成本越高，NEV 和动力蓄电池的批发价格和销售价格越高，新车销量和以旧换新数量则越低。最后，政府补贴的增加虽然能提升供应链成员的利润，但过高的补贴不利于社会总福利的提升，且补贴力度的增加并不总对所有消费者有利，即有利于参加以旧换新的老顾客，而会蚕食新顾客的利益。

(2) 在政府不同的补贴政策下，NEV 企业的以旧换新策略需考虑政府对老顾客置换 NEV 补贴力度的影响。在政府单补贴（双补贴）政策下，当政府对老顾客置换 NEV 的补贴力度较低时（补贴政策差异不明显时），制造商应提供全面置换服务；当政府对老顾客置换 NEV 的补贴力度较高时（补贴政策差异较大时），则应提供双向置换服务。其次，制造商以旧换新策略和政府补贴政策交互

影响着 NEV 企业的最优产品定价决策，仅当政府对老顾客置换 NEV 的补贴力度较低时（补贴政策差异不明显时），制造商提供全面置换服务能够产生最低的新车的批发价格和零售价格以及旧车的转移价格。最后，政府提高对老顾客置换 NEV 的补贴力度（补贴政策差异的增大且偏向于 NEV）能显著提高新车销量、供应链总利润和消费者剩余，而并不总是有利于社会总福利水平的提升，同时也会带来较大的财政支出。因此，政府在制定补贴政策时应综合考虑成本效益，权衡财政支出与社会总福利之间的平衡，以确保财政资源的高效利用。

(3) 当政府单补贴政策演变为双补贴政策时，若制造商提供单一置换服务或双向置换服务，政府补贴政策的变化对制造商以旧换新策略下的定价决策和销量没有影响；但是，当制造商提供定向置换服务和全面置换服务时，其对刺激汽车市场需求和提升社会总福利方面有明显作用，但是否能提升消费者剩余和供应链成员利润与制造商的以旧换新策略和政府补贴政策的差异有关。具体而言，当制造商提供定向置换服务时，仅当政府补贴政策差异较小时（即对老顾客以旧车置换 NEV 或新燃油车的补贴力度相近），政府补贴政策的变化才有利于消费者和供应链成员利润。

## 6.2 管理启示

基于上述研究结果，本文研究可为新顾客的购买决策和拥有不同类型旧车（旧燃油车/NEV）老顾客的以旧换新决策、NEV 企业以旧换新策略和政府补贴政策的优化提供一定的建议：

(1) 在政府层面，政府应综合考虑成本效益，确定合适的补贴力度。过高的补贴不仅增加财政支出，还可能不利于社会总福利的提升，其应平衡财政支出与社会福利，确保财政资源的高效利用。另外，政府应关注在 NEV 企业不同以旧换新策略下，补贴政策的变化（即由单补贴变为双补贴）对社会总福利及消费者剩余的影响。不仅要保证补贴政策实施的有效性，还要同时避免补贴政策的变动对市场产生的不利影响。

(2) 在 NEV 企业层面，在电池以旧换新服务和整车以旧换新服务方面，NEV 企业以旧换新策略的制定应主要考虑旧车耐用性及旧电池容量消耗的因素，因此，企业应建立科学的检测和评估体系，精准识别旧车耐用性以及旧电池的

容量消耗，为企业以旧换新策略的制定提供数据支持。另外，NEV 企业应加强与政府部门的合作交流，及时了解政策变化，并灵活调整以旧换新策略，例如，若政府补贴政策由单补贴变为双补贴且补贴政策差异较小，此时制造商提供定向置换服务可以最大化自身利润。

(3) 在消费者层面，新顾客和拥有旧车的老顾客均需要关注政府补贴政策的变化和 NEV 企业的以旧换新策略，例如，在政府提供单补贴政策且补贴力度较大的背景下，若制造商提供全面置换服务，新顾客能以最低的价格购买新燃油车，而拥有旧燃油车的老顾客若选择去置换新燃油车，不仅能以最低的价格购买新燃油车，还能获得相对较高的旧车折价。

### 6.3 展望

本文的研究不仅扩宽了以旧换新领域的研究范畴，也在一定程度上丰富了供应链运作管理理论，但也存在一些局限性，主要包括以下 3 个方面：

(1) 本文研究情景都是基于市场垄断的背景下进行，但在工业实践中，NEV 企业往往处于非垄断关系，彼此间存在着复杂的竞争或合作关系。因此，未来可考虑在 NEV 企业竞争或合作的情境下，探究 NEV 企业的以旧换新策略及定价决策。

(2) 在本文研究中，假设供应链成员只考虑单周期决策，在工业实践中，当企业提供以旧换新服务时，往往基于长期视角来制定策略，因此，未来研究可进一步拓展至多周期决策。

(3) 本文将政府补贴作为外生变量，未来可将政府作为决策主体参与到 NEV 供应链中，以社会福利最大化或既定市场目标下财政支出最小化为决策目标开展研究。

## 参考文献

- [1] Zhang J, Huang J. Vehicle product-line strategy under government subsidy programs for electric/hybrid vehicles[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2021, 146: 102221.
- [2] 腾讯网. “崔东树: 2024 年全球新能源汽车销量 1603 万台, 70.4%销量在中国”[EB/OL]. <https://news.qq.com/rain/a/20250213A026RZ00>, 2025-02-13.
- [3] Huang Z Y, Xie Z L, Zhang C Z, et al. Modeling and multi-objective optimization of a stand-alone PV-hydrogen-retired EV battery hybrid energy system[J]. Energy Conversion and Management, 2019, 181: 80-92.
- [4] Wu Y F, Yang L Y, Tian X, et al. Temporal and spatial analysis for end-of-life power batteries from electric vehicles in China[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2020, 155: 104651.
- [5] Ai N, Zheng J J, Chen W Q. US end-of-life electric vehicle batteries: Dynamic inventory modeling and spatial analysis for regional solutions[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2019, 145: 208-219.
- [6] Hu S, Zhu S X, Fu K. Optimal trade-in and refurbishment strategies for durable goods[J]. European Journal of Operational Research, 2023, 309(1): 133-151.
- [7] Yu J L, Williams E, Ju M T, et al. Managing e-waste in China: Policies, pilot projects and alternative approaches[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2010, 54(11): 991-999.
- [8] 陈健. 汽车供应链以旧换新最优定价研究[D]. 广州: 暨南大学, 2021.
- [9] 广东省发展和改革委员会. 广东省 2021 年汽车以旧换新专项行动公告 [EB/OL]. [http://drc.gd.gov.cn/ywgg/content/post\\_3332653.html](http://drc.gd.gov.cn/ywgg/content/post_3332653.html), 2021-06-29.
- [10] 中华人民共和国中央人民政府. 商务部, 财政部等 7 部门关于印发《汽车以旧换新补贴实施细则》的通知[EB/OL]. [https://www.gov.cn/zhengce/zhengcek u/202404/content\\_6947864.htm](https://www.gov.cn/zhengce/zhengcek u/202404/content_6947864.htm), 2024-04-24.

- [11] 上海市人民政府. 市商务委关于印发《上海市加快汽车更新消费行动方案(2024-2027 年)》的通知[EB/OL]. <https://www.shanghai.gov.cn/hqcyfz2/20240805/6bcb9303299046489bf1e73a88ef09c9.html>, 2024-07-19.
- [12] Chen J M, Hsu Y T. Trade-in strategy for a durable goods firm with recovery cost[J]. *Journal of Industrial and Production Engineering*, 2015, 32(6): 396-407.
- [13] 张喜征, 肖嘉琳, 余思勤. 预期后悔行为下考虑以旧换新产品的换代与定价策略[J]. *系统工程*, 2022, 40(06): 55-66.
- [14] 易余胤, 李华艺. 考虑制造商回收定价的 B2C 平台以旧换新优惠策略[J]. *计算机集成制造系统*, 2022, 28(03): 927-942.
- [15] Xiao L, Wang X J, Chin K S. Trade-in strategies in retail channel and dual-channel closed-loop supply chain with remanufacturing[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2020, 136: 101898.
- [16] Cao K Y, Choi T M. Optimal trade-in return policies: Is it wise to be generous?[J]. *Production and Operations Management*, 2022, 31(3): 1309-1331.
- [17] 罗子灿, 沈厚才, 欧阳建军. 消费者短视和以旧换新情形下设计架构与定价策略研究[J]. *管理工程学报*, 2020, 34(02): 213-223.
- [18] Yi Y Y, Chen J, Feng J J. Optimizing prices in trade-in strategies for vehicle manufacturers[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2021, 157: 107338.
- [19] 丁珮琪, 夏维力, 杨柏. 以旧换新下产品再利用及耐用性投资策略[J]. *系统工程学报*, 2022, 37(05): 701-720.
- [20] Feng L P, Li Y J, Fan C X. Optimization of pricing and quality choice with the coexistence of secondary market and trade-in program[J]. *Annals of Operations Research*, 2020: 1-18.
- [21] Bai X M, Choi T M, Li Y J, et al. Implementing trade-in programs in the presence of resale platforms: Mode selection and pricing[J]. *Production and Operations Management*, 2023, 32(10): 3193-3208.
- [22] Hu S, Ma Z J, Sheu J B. Optimal prices and trade-in rebates for successive-generation products with strategic consumers and limited trade-in duration[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2019, 124:

- 92-107.
- [23] Liu J C, Zhai X, Chen L H. Optimal pricing strategy under trade-in program in the presence of strategic consumers[J]. *Omega*, 2019, 84: 1-17.
- [24] 苑希港, 张晓青. 考虑不同消费者选择行为和以旧换新补贴的产品动态定价策略研究[J]. *工业工程与管理*, 2022, 27(03): 95-105.
- [25] 刘靛晨, 翟昕. 竞争环境下的以旧换新策略[J]. *中国管理科学*, 2018, 26(09): 75-84.
- [26] Tang F, Dai Y, Ma Z J, et al. Trade-in operations under retail competition: Effects of brand loyalty[J]. *European Journal of Operational Research*, 2023, 310(1): 397-414.
- [27] Zhu X X, Wang M M, Chen G F, et al. The effect of implementing trade-in strategy on duopoly competition[J]. *European Journal of Operational Research*, 2016, 248(3): 856-868.
- [28] Agrawal V V, Ferguson M, Souza G C. Trade-in rebates for price discrimination and product recovery[J]. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 2016, 63(3): 326-339.
- [29] Huang Y S, Lin C J, Fang C C. A study on recycle schedules for trade-in rebates with consideration of product life cycle[J]. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 2018, 66(3): 475-490.
- [30] Desai P S, Purohit D, Zhou B. The strategic role of exchange promotions[J]. *Marketing Science*, 2016, 35(1): 93-112.
- [31] 简惠云, 潘利. 考虑渠道竞争的“互联网+”以旧换新定价决策研究[J]. *工业技术经济*, 2021, 40(09): 39-48.
- [32] 洪江涛, 全禹亭. 基于以旧换新和供应链结构差异的闭环供应链决策模型[J]. *中国管理科学*, 2024, 32(05): 147-157.
- [33] Miao Z W, Fu K, Xia Z Q, et al. Models for closed-loop supply chain with trade-ins[J]. *Omega*, 2017, 66: 308-326.
- [34] Cao K Y, Xu B, Wang J. Optimal trade-in and warranty period strategies for new and remanufactured products under carbon tax policy[J]. *International Journal of*

- Production Research, 2020, 58(1): 180-199.
- [35] 李四杰, 郑斌. 存在 P2P 二手产品市场时企业以旧换新策略研究[J]. 管理科学学报, 2022, 25(07): 29-40.
- [36] 卢茂盛, 柳键, 黄红梅. 基于风险规避的闭环供应链以旧换新策略[J]. 计算机集成制造系统, 2024, 30(11): 4114-4126.
- [37] Yin R, Li H, Tang C S. Optimal pricing of two successive-generation products with trade-in options under uncertainty[J]. Decision Sciences, 2015, 46(3): 565-595.
- [38] Han X H, Yang Q X, Shang J, et al. Optimal strategies for trade-old-for-remanufactured programs: Receptivity, durability, and subsidy[J]. International Journal of Production Economics, 2017, 193: 602-616.
- [39] Feng L P, Li Y J, Xu F C, et al. Optimal pricing and trade-in policies in a dual-channel supply chain when considering market segmentation[J]. International Journal of Production Research, 2019, 57(9): 2828-2846.
- [40] Cao K Y, Wang J, Dou G W, et al. Optimal trade-in strategy of retailers with online and offline sales channels[J]. Computers & Industrial Engineering, 2018, 123: 148-156.
- [41] 唐飞, 代颖, 马祖军. 闭环供应链中制造商以旧换新渠道决策[J]. 系统管理学报, 2024, 33(01): 16-28.
- [42] Li Y J, Feng L P, Govindan K, et al. Effects of a secondary market on original equipment manufactures' pricing, trade-in remanufacturing, and entry decisions[J]. European Journal of Operational Research, 2019, 279(3): 751-766.
- [43] 石平, 石松. 存在非正规回收企业竞争的厂商自主以旧换新策略分析[J]. 系统工程学报, 2022, 37(01): 12-22.
- [44] Li Y J, Wang K, Xu F C, et al. Management of trade-in modes by recycling platforms based on consumer heterogeneity[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2022, 162: 102721.
- [45] Xu X B, Chen R, Zhang J. Effectiveness of trade-ins and price discounts: A moderating role of substitutability[J]. Journal of Economic Psychology, 2019, 70:

80-89.

- [46] Miller C J, Wiles M A, Park S. Trading on up: An examination of factors influencing the degree of upgrade: Evidence from cash for clunkers[J]. *Journal of Marketing*, 2019, 83(1): 151-172.
- [47] 唐飞, 代颖, 马祖军. 考虑顾客忠诚度的竞争性企业以旧换新策略[J]. *中国管理科学*, 2024, 32(05): 13-23.
- [48] Zhang F Q, Zhang R Y. Trade-in remanufacturing, customer purchasing behavior, and government policy[J]. *Manufacturing & Service Operations Management*, 2018, 20(4): 601-616.
- [49] Ma Z J, Zhou Q, Dai Y, et al. Optimal pricing decisions under the coexistence of “trade old for new” and “trade old for remanufactured” programs[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2017, 106: 337-352.
- [50] 张福安, 李娜, 达庆利, 等. 基于两种补贴政策的多元需求闭环供应链低碳减排研究[J]. *中国管理科学*, 2023, 31(10): 116-127.
- [51] 丰奇倩, 刘渤海, 郑汉东, 等. 基于政府补贴的制造商“以旧换再”定价策略[J]. *中国表面工程*, 2020, 33(05): 123-132.
- [52] Bai J R, Hu S, Gui L Y, et al. Optimal subsidy schemes and budget allocations for government-subsidized trade-in programs[J]. *Production and Operations Management*, 2021, 30(8): 2689-2706.
- [53] 唐飞, 代颖, 王永龙, 等. 基于社会福利最大化的政府促销补贴政策选择[J]. *系统工程理论与实践*, 2024, 44(10): 3280-3293.
- [54] Cao K Y, Bo Q S, He Y. Optimal trade-in and third-party collection authorization strategies under trade-in subsidy policy[J]. *Kybernetes*, 2018, 47(5): 854-872.
- [55] Ma W M, Zhao Z, Ke H. Dual-channel closed-loop supply chain with government consumption-subsidy[J]. *European Journal of Operational Research*, 2013, 226(2): 221-227.
- [56] Huang J, Leng M M, Liang L P, et al. Qualifying for a government’s scrappage program to stimulate consumers’ trade-in transactions? Analysis of an automobile

- supply chain involving a manufacturer and a retailer[J]. *European Journal of Operational Research*, 2014, 239(2): 363-376.
- [57] Li B, Chen W C, Xu C C, et al. Impacts of government subsidies for environmental-friendly products in a dual-channel supply chain[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 171: 1558-1576.
- [58] 马卫民, 赵璋. 以旧换新补贴对不同模式闭环供应链的影响[J]. *系统工程理论与实践*, 2012, 32(09): 1938-1944.
- [59] 马卫民, 赵璋. 以旧换新补贴对具有不同等级产品闭环供应链的影响研究[J]. *中国管理科学*, 2013, 21(03): 113-117.
- [60] Miao Z W, Mao H Q, Fu K, et al. Remanufacturing with trade-ins under carbon regulations[J]. *Computers & Operations Research*, 2018, 89: 253-268.
- [61] Arya A, Mittendorf B. Managing strategic inventories via manufacturer-to-consumer rebates[J]. *Management Science*, 2013, 59(4): 813-818.
- [62] Vana P, Lambrecht A, Bertini M. Cashback is cash forward: delaying a discount to entice future spending[J]. *Journal of Marketing Research*, 2018, 55(6): 852-868.
- [63] Zhang Q H, Zhang D L, Segerstedt A, et al. Optimal ordering and pricing decisions for a company issuing product-specific gift cards[J]. *Omega*, 2018, 74: 92-102.
- [64] Cao K Y, Han G X, Xu B, et al. Gift card payment or cash payment: Which payment is suitable for trade-in rebate?[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2020, 134: 101857.
- [65] 深圳市发展和改革委员会. 深圳市发展和改革委员会关于印发《深圳市关于促进消费的若干措施》[EB/OL]. [https://www.szgm.gov.cn/xxgk/ztl/gmqhqzqc/szszczy/content/post\\_10846024.html](https://www.szgm.gov.cn/xxgk/ztl/gmqhqzqc/szszczy/content/post_10846024.html), 2023-09-21.
- [66] Tang J, Li B Y, Li K W, et al. Pricing and warranty decisions in a two-period closed-loop supply chain[J]. *International Journal of Production Research*, 2020, 58(6): 1688-1704.
- [67] 颜波, 李鸿媛, 王滔, 等. 考虑市场细分的零售商自主以旧换新策略研究[J]. *管*

- 理科学学报, 2017, 20(03): 120-136.
- [68] Liu C Y, Wang H, Tang J, et al. Optimal recovery model in a used batteries closed-loop supply chain considering uncertain residual capacity[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2021, 156: 102516.
- [69] Ray S, Boyaci T, Aras N. Optimal prices and trade-in rebates for durable, remanufacturable products[J]. Manufacturing & Service Operations Management, 2005, 7(3): 208-228.
- [70] 周艳菊, 胡凤英, 周正龙, 等. 最优碳税税率对供应链结构和社会福利的影响[J]. 系统工程理论与实践, 2017, 37(04): 886-900.
- [71] 易余胤, 陈健. 汽车供应链的以旧换新最优定价研究[J]. 系统工程理论与实践, 2022, 42(04): 1072-1085.
- [72] J. D. Power. 2024 年中国新能源汽车新车质量研究(NEV-IQS)[R]. <https://china.jdpower.com/zh-hans/press-release/2024-NEV-IQS>. Shanghai, J. D. Power, 2024.
- [73] iiMedia Research. 2023-2024 年全球及中国汽车动力电池行业研究报告[R]. <https://report.iimedia.cn/repo139-0/43413.html>. Guangzhou, iiMedia Research, 2024.
- [74] 易余胤, 陈健. 不同供应链模式下“以旧换新燃油”和“以旧换新能源”定价策略[J]. 管理工程学报, 2023, 37(03): 80-91.
- [75] J. D. Power. 2024 中国车辆可靠性研究(VDS)[R]. <https://china.jdpower.com/zh-hans/press-release/2024-VDS>. Shanghai, J. D. Power, 2024.
- [76] GEVA. 2024 全球电车驾驶者调研报告[R]. <https://globalevalliance.com/world-wide-ev-drivers-survey-92-of-ev-drivers-will-never-go-back/>. Aachen, GEVA, 2024.
- [77] Kuşakcı A O, Ayvaz B, Cin E, et al. Optimization of reverse logistics network of End of Life Vehicles under fuzzy supply: A case study for Istanbul Metropolitan Area[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 215: 1036-1051.
- [78] Xiong Y, Zhao P, Xiong Z K, et al. The impact of product upgrading on the decisi

on of entrance to a secondary market[J]. *European Journal of Operational Research*, 2016, 252(2): 443-454.

[79] Genc T S, De Giovanni P. Optimal return and rebate mechanism in a closed-loop supply chain game[J]. *European Journal of Operational Research*, 2018, 269(2): 661-681.

[80] 中华人民共和国中央人民政府. 商务部等 7 部门关于进一步做好汽车以旧换新有关工作的通知[EB/OL]. [https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202408/content\\_6968810.htm](https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202408/content_6968810.htm), 2024-08-15.

## 附录

### 附录 1：命题 3.1 的证明

由  $w_e^{I*} - w_e^{B*} = \frac{\gamma(2b_e - k + 2s_e + \delta(-1 + \theta - \theta_m))}{2 - 2\delta(1 - \gamma)}$  , 令  $\frac{\gamma(2b_e - k + 2s_e + \delta(-1 + \theta - \theta_m))}{2 - 2\delta(1 - \gamma)}$  可得  $\delta = \frac{2b_e - k + 2s_e}{\theta_m - \theta + 1}$  ; 由  $w_e^{N*} - w_e^{B*} = \frac{\gamma(s_s - \delta)}{4 - 4\delta(1 - \gamma)}$  , 令  $\frac{\gamma(s_s - \delta)}{4 - 4\delta(1 - \gamma)} = 0$  可得  $\delta = s_s$  , 即当  $\delta > \delta_1 = \max\{\frac{2b_e - k + 2s_e}{\theta_m - \theta + 1}, s_s\}$  时 ,  $w_e^{B*} > \max\{w_e^{N*}, w_e^{I*}\}$  。同理 , 进而可以得出命题 3.1。其中 ,  $\delta_1 = \max\{\frac{2b_e - k + 2s_e}{\theta_m - \theta + 1}, s_s\}$  ,  $\delta_2 = \min\{\frac{4s_e - k}{\theta_m - \theta + 3}, s_s\}$  。

命题 3.1 得证。

### 附录 2：命题 3.2 的证明

由式(3-7)和式(3-8)可得,  $\frac{\pi_R^{N*}}{\pi_M^{N*}} = \frac{1}{2}$  , 由式(3-17)和式(3-18)可得,  $\frac{\pi_R^{B*}}{\pi_M^{B*}} = \frac{1}{2}$  , 由(3-25)和式(3-26)可得,  $\pi_M^{I*} - 2\pi_R^{I*} = \frac{\gamma(s_e - \delta)(1 - \gamma)(\delta(\theta_m - \theta) + k - s_e - 3b_e)}{1 - \delta(1 - \gamma)}$  , 令  $\frac{\gamma(s_e - \delta)(1 - \gamma)(\delta(\theta_m - \theta) + k - s_e - 3b_e)}{1 - \delta(1 - \gamma)} = 0$  , 得  $\delta = \delta_3 = \frac{s_e - k + 3b_e}{\theta_m - \theta}$  。

命题 3.2 得证。

### 附录 3：命题 3.3 的证明

在不同的以旧换新模型下, 求解均衡解、销量和利润对动力蓄电池的容量

消耗  $\theta$  的一阶偏导数, 有:  $\frac{\partial w_e^{B*}}{\partial \theta} = \frac{\partial p_e^{B*}}{\partial \theta} = \frac{\partial q_e^{B*}}{\partial \theta} = 0$  ,  $\frac{\partial w_b^{B*}}{\partial \theta} = \frac{\delta}{2} > 0$  ,

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial p_b^{B*}}{\partial \theta} &= \frac{\delta}{4} > 0, & \frac{\partial q_t^{B*}}{\partial \theta} &= \frac{\delta\gamma}{4(\delta-\mu)} < 0, \\
 \frac{\partial \pi_M^{B*}}{\partial \theta} &= 2 \frac{\partial \pi_R^{B*}}{\partial \theta} = \frac{\delta\gamma(-\mu+c_e\beta+\delta(1+\theta-\theta_m))}{4(\mu-\delta)} < 0, & \frac{\partial w_e^{I*}}{\partial \theta} &= \frac{\delta\gamma}{2+2\delta(-1+\gamma)} > 0, \\
 \frac{\partial p_e^{I*}}{\partial \theta} &= \frac{\delta\gamma}{4+4\delta(-1+\gamma)} > 0, & \frac{\partial q_e^{I*}}{\partial \theta} &= \frac{\delta\gamma(-1+\gamma)}{4+4\delta(-1+\gamma)} < 0, \\
 \frac{\partial q_p^{I*}}{\partial \theta} &= \frac{\delta\gamma^2}{4(-1+\delta)(1+\delta(-1+\gamma))} < 0, & \text{令 } \frac{\partial \pi_M^{I*}}{\partial \theta} > 0 \text{ 和 } \frac{\partial \pi_M^{I*}}{\partial \theta} < 0, & \text{可得当} \\
 s_{e1} < s_e < s_{e2} \text{ 时, 若 } 0 < c_e < c_{e1}, & \text{有 } \frac{\partial \pi_M^{I*}}{\partial \theta} < 0, & \text{若 } c_{e1} < c_e < 1, & \text{有 } \frac{\partial \pi_M^{I*}}{\partial \theta} > 0; \text{ 当} \\
 0 < s_e < s_{e1} (s_e > s_{e2}) \text{ 时, 有 } \frac{\partial \pi_M^{I*}}{\partial \theta} > 0 ( \frac{\partial \pi_M^{I*}}{\partial \theta} < 0 ). & \text{令 } \frac{\partial \pi_R^{I*}}{\partial \theta} > 0 \text{ 和 } \frac{\partial \pi_R^{I*}}{\partial \theta} < 0, & \text{当} \\
 0 < k < k_1 \text{ 时, 若 } 0 < c_e < c_{e2}, & \text{有 } \frac{\partial \pi_R^{I*}}{\partial \theta} < 0, & \text{当 } c_{e2} < c_e < 1 \text{ 时, 有 } \frac{\partial \pi_R^{I*}}{\partial \theta} > 0; \text{ 当} \\
 k > k_1 \text{ 时, 有 } \frac{\partial \pi_R^{I*}}{\partial \theta} < 0. & \text{其中,} \\
 s_{e1} &= \frac{(1+4(m_e-\delta))(-1+\delta)-\gamma(k+m_e(4\delta-3)+\delta(4(1-\delta)-\theta+\theta_m))}{4(1-\delta)(1-\gamma)}, \\
 s_{e2} &= \frac{4(m_e-\delta)(-1+\delta)-\gamma(k+m_e(4\delta-3)+\delta(3-4\delta-\theta+\theta_m))}{4(1-\delta)(1-\gamma)}, \\
 c_{e1} &= \frac{1+m_e(4+4\delta(\gamma-1)-3\gamma)+4s_e(1-\gamma)(1-\delta)+k\gamma+\delta(4\delta-5+\gamma(\theta_m-\theta+4(1-\delta)))}{1-\delta(1-\gamma)}, \\
 k_1 &= \delta(1+\theta-\theta_m)-m_e, \quad c_{e2} = \frac{1-\delta+\gamma(\delta(\theta_m-\theta)+k+m_e)}{1-\delta(1-\gamma)}.
 \end{aligned}$$

命题 3.3 得证。

#### 附录 4：命题 3.4 的证明

在不同的以旧换新模型下，求解均衡解、销量和利润对 NEV 生产成本  $c_e$  的

$$\begin{aligned}
 &\text{一阶偏导数，有：} \quad \frac{\partial w_e^{N*}}{\partial c_e} = \frac{\partial w_e^{B*}}{\partial c_e} = \frac{\partial w_e^{I*}}{\partial c_e} = \frac{1}{2} > 0, \quad \frac{\partial p_e^{N*}}{\partial c_e} = \frac{\partial p_e^{B*}}{\partial c_e} = \frac{\partial p_e^{I*}}{\partial c_e} = \frac{1}{4} > 0, \\
 &\frac{\partial q_e^{N*}}{\partial c_e} = \frac{\partial q_e^{B*}}{\partial c_e} = \frac{\partial q_e^{I*}}{\partial c_e} = -\frac{1-\gamma}{4} < 0, \quad \frac{\partial w_b^{B*}}{\partial c_e} = \frac{\beta}{2} > 0, \quad \frac{\partial p_b^{B*}}{\partial c_e} = \frac{\beta}{4} > 0, \\
 &\frac{\partial q_t^{B*}}{\partial c_e} = \frac{-\beta\gamma}{4(\mu-\delta)} < 0, \quad \frac{\partial q_p^{I*}}{\partial c_e} = \frac{-\gamma}{4(1-\delta)} < 0, \\
 &\frac{\partial \pi_R^{N*}}{\partial c_e} = \frac{\partial \pi_M^{N*}}{\partial c_e} = \frac{c_e - 1 + \delta + c_e \delta(\gamma - 1) - s_s \gamma}{4(1-\delta)} < 0, \\
 &\frac{\partial \pi_R^{B*}}{\partial c_e} = \frac{\partial \pi_M^{B*}}{\partial c_e} = \frac{-(1-c_e)(1-\gamma)}{4} + \frac{2\beta\gamma(c_e\beta - \mu + \delta(1+\theta - \theta_m))}{8(\mu-\delta)} < 0, \\
 &\frac{\partial \pi_R^{I*}}{\partial c_e} = \frac{\partial \pi_M^{I*}}{\partial c_e} = \frac{c_e - 1}{4} - \frac{\gamma(k + m_e - \delta(c_e + \theta - \theta_m))}{1-\delta} < 0.
 \end{aligned}$$

命题 3.4 得证。

## 附录 5：命题 3.5 的证明

在制造商提供电池以旧换新服务时，求解均衡解和销量老顾客对更换电池后的 NEV 接受程度  $\mu$  和动力蓄电池成本系数  $\beta$  的一阶偏导数，有：

$$\begin{aligned}
 &\frac{\partial w_e^{B*}}{\partial \mu} = \frac{\partial p_e^{B*}}{\partial \mu} = \frac{\partial q_e^{B*}}{\partial \mu} = 0, \quad \frac{\partial w_b^{B*}}{\partial \mu} = \frac{1}{2} > 0, \quad \frac{\partial p_b^{B*}}{\partial \mu} = \frac{3}{4} > 0, \\
 &\frac{\partial q_t^{B*}}{\partial \mu} = \frac{\gamma(c_e\beta + \delta(\theta - \theta_m))}{4(\mu-\delta)^2} > 0; \quad \frac{\partial w_e^{B*}}{\partial \beta} = \frac{\partial p_e^{B*}}{\partial \beta} = \frac{\partial q_e^{B*}}{\partial \beta} = 0, \quad \frac{\partial w_b^{B*}}{\partial \beta} = \frac{c_e}{2} > 0, \\
 &\frac{\partial p_b^{B*}}{\partial \mu} = \frac{c_e}{4} > 0, \quad \frac{\partial q_t^{B*}}{\partial \beta} = \frac{-c_e\gamma}{4(\mu-\delta)} < 0.
 \end{aligned}$$

命题 3.5 得证。

## 附录 6：命题 3.6 的证明

在制造商提供整车以旧换新服务时，求解均衡解和销量老顾客对政府对老顾客置换 NEV 补贴  $m_e$  的一阶偏导数，有：

$$\frac{\partial w_e^{I*}}{\partial m_e} = \frac{\gamma}{2(1-\delta(1-\gamma))} > 0,$$

$$\frac{\partial p_e^{I*}}{\partial m_e} = \frac{3\gamma}{4(1-\delta(1-\gamma))} > 0, \quad \frac{\partial q_e^{I*}}{\partial m_e} = \frac{-3\gamma(1-\gamma)}{4(1-\delta(1-\gamma))} < 0,$$

$$\frac{\partial q_p^{I*}}{\partial m_e} = \frac{\gamma}{1-\delta} - \frac{3\gamma}{4(1-\delta(1-\gamma))(1-\delta)} > 0。$$

命题 3.6 得证。

## 附录 7：命题 4.1 的证明

对四种不同整车以旧换新模型下 NEV 的批发价格、零售价格以及旧 NEV 的转移价格和折价进行两两相减，例如：由

$$w_e^{NE*} - w_e^{FE*} = \frac{\delta\eta(\alpha-1)(r_s-\delta)(\gamma+\eta-1)}{2((1-\gamma)(1-\delta)+\delta\eta)((1-\gamma)(\delta-\alpha)-\delta\eta)} > 0, \quad \text{可得 } w_e^{NE*} > w_e^{FE*}。 \text{ 由}$$

$$w_e^{NE*} - w_e^{EE*} = 0, \quad \text{可得 } w_e^{NE*} = w_e^{EE*}。 \text{ 同理可得： } w_e^{NE*} = w_e^{EE*} > w_e^{FE*},$$

$$p_e^{NE*} = p_e^{EE*} > p_e^{FE*}, \quad b_e^{NE*} = b_e^{EE*} > b_e^{FE*}, \quad r_e^{NE*} = r_e^{EE*} > r_e^{FE*}; \quad \text{当}$$

$$0 < m_e \leq \frac{(1-\gamma)(r_s-\delta)}{(1-\gamma)(1-\delta)+\delta\eta} \text{ 时，有 } w_e^{NE*} = w_e^{EE*} \geq w_e^{DE*}, \quad p_e^{NE*} = p_e^{EE*} \geq p_e^{DE*},$$

$$b_e^{NE*} = b_e^{EE*} \geq b_e^{DE*}, \quad r_e^{NE*} = r_e^{EE*} \geq r_e^{DE*}, \text{ 反之，当 } \frac{(1-\gamma)(r_s-\delta)}{(1-\gamma)(1-\delta)+\delta\eta} < m_e < 1 \text{ 时，有}$$

$$w_e^{NE*} = w_e^{EE*} < w_e^{DE*}, \quad p_e^{NE*} = p_e^{EE*} < p_e^{DE*}, \quad b_e^{NE*} = b_e^{EE*} < b_e^{DE*}, \quad r_e^{NE*} = r_e^{EE*} < r_e^{DE*};$$

$$\text{当 } 0 < m_e \leq \frac{\alpha(1-\gamma)(r_s-\delta)}{(1-\gamma)(\alpha-\delta)+\delta\eta} \text{ 时，有 } w_e^{FE*} \geq w_e^{DE*}, \quad p_e^{FE*} \geq p_e^{DE*}, \quad b_e^{FE*} \geq b_e^{DE*},$$

$$r_e^{FE*} \geq r_e^{DE*}, \text{ 反之，当 } \frac{\alpha(1-\gamma)(r_s-\delta)}{(1-\gamma)(\alpha-\delta)+\delta\eta} < m_e < 1 \text{ 时，有 } w_e^{FE*} < w_e^{DE*}, \quad p_e^{FE*} < p_e^{DE*},$$

$$b_e^{FE*} < b_e^{DE*}, \quad r_e^{FE*} < r_e^{DE*}。 \text{ 又因为 } \frac{\alpha(1-\gamma)(r_s-\delta)}{(1-\gamma)(\alpha-\delta)+\delta\eta} < \frac{(1-\gamma)(r_s-\delta)}{(1-\gamma)(1-\delta)+\delta\eta}, \text{ 对上述区}$$

$$\text{间进行合并可以得到命题 4.1(1)。其中， } m_{e1} = \frac{\alpha(1-\gamma)(r_s-\delta)}{(1-\gamma)(\alpha-\delta)+\delta\eta},$$

$$m_{e2} = \frac{(1-\gamma)(r_s-\delta)}{(1-\gamma)(1-\delta)+\delta\eta}。$$

对四种不同模型下燃油车的批发价格和零售价格进行两两相减，例如：由

$$w_f^{NE*} - w_f^{FE*} = \frac{\eta(\alpha-1)(\gamma-1)(r_s-\delta)}{2((1-\gamma)(1-\delta)+\delta\eta)((1-\gamma)(\delta-\alpha)-\delta\eta)} > 0, \text{ 可得 } w_f^{NE*} > w_f^{FE*}. \text{ 由}$$

$w_f^{NE*} - w_f^{EE*} = 0$ ，可得  $w_f^{NE*} = w_f^{EE*}$ 。同理可得其余模型两两比较结果，对上述结果整理可得命题 4.1(2)。

对四种不同模型下旧燃油车的转移价格和折价进行两两相减，例如：由

$$b_f^{FE*} - b_f^{EE*} = \frac{(-1+\gamma)((1-\alpha)(\delta-r_s)+m_e(-\alpha+\delta))+m_e\delta\eta}{2\alpha(1-\gamma)+2\delta(-1+\gamma+\eta)}, \text{ 令其等于零可得}$$

$$m_e = \frac{(\alpha-1)(1-\gamma)(r_s-\delta)}{(1-\gamma)(\alpha-\delta)+\delta\eta}, \text{ 即当 } 0 < m_e \leq \frac{(\alpha-1)(1-\gamma)(r_s-\delta)}{(1-\gamma)(\alpha-\delta)+\delta\eta} \text{ 时, 有 } b_f^{FE*} \leq b_f^{EE*}, \text{ 同}$$

理可得,  $b_f^{FE*} > b_f^{DE*}$ ,  $r_f^{FE*} > r_f^{DE*}$ ; 当  $0 < m_e \leq \frac{(\alpha-1)(1-\gamma)(r_s-\delta)}{(1-\gamma)(\alpha-\delta)+\delta\eta}$  时, 有

$$b_f^{FE*} \leq b_f^{EE*}, r_f^{FE*} \leq r_f^{EE*}, \text{ 反之, 当 } \frac{(\alpha-1)(1-\gamma)(r_s-\delta)}{(1-\gamma)(\alpha-\delta)+\delta\eta} < m_e < 1 \text{ 时, 有 } b_f^{FE*} > b_f^{EE*},$$

$r_f^{FE*} > r_f^{EE*}$ ; 当  $0 < m_e \leq r_s - \delta$  时, 有  $b_f^{EE*} \geq b_f^{DE*}$ ,  $r_f^{EE*} \geq r_f^{DE*}$ , 反之, 当

$r_s - \delta < m_e \leq 1$  时, 有  $b_f^{EE*} < b_f^{DE*}$ ,  $r_f^{EE*} < r_f^{DE*}$ 。又因为  $\frac{(\alpha-1)(1-\gamma)(r_s-\delta)}{(1-\gamma)(\alpha-\delta)+\delta\eta} < r_s - \delta$ ,

对上述区间进行合并可得命题 4.1(2)。同理可得命题 4.1 中命题。其中,

$$m_{e3} = \frac{(\alpha-1)(1-\gamma)(r_s-\delta)}{(1-\gamma)(\alpha-\delta)+\delta\eta}, m_{e4} = r_s - \delta.$$

命题 4.1 得证。

## 附录 8：命题 4.2 的证明

对四种不同模型下新车总销量、NEV 总销量和燃油车总销量进行两两相减，

$$\text{例如：由 } Q^{NE*} - Q^{FE*} = \frac{\eta(r_s - \tau_f)}{4(1-\delta)} < 0, \text{ 可得 } Q^{NE*} < Q^{FE*}; \text{ 由 } Q^{NE*} - Q^{EE*} = 0, \text{ 可}$$

得  $Q^{NE*} = Q^{EE*}$ ，同理可得其余模型两两比较结果，对上述结果进行整理可得命

题 4.2。其中， $m_{e5} = \frac{(\alpha-1)(\tau_f - r_s)}{1-\delta}$ 。

命题 4.2 得证。

## 附录 9：命题 4.3 和命题 5.3 的证明

求解四种不同模型下均衡解、新车总销量、NEV 总销量和燃油车总销量对新燃油车生产成本  $c_f$  和 NEV 生产成本  $c_e$  的一阶偏导数，可得：

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial w_e^{NE*}}{\partial c_f} &= \frac{\partial w_e^{FE*}}{\partial c_f} = \frac{\partial w_e^{EE*}}{\partial c_f} = \frac{\partial w_e^{DE*}}{\partial c_f} = 0, & \frac{\partial p_e^{NE*}}{\partial c_f} &= \frac{\partial p_e^{FE*}}{\partial c_f} = \frac{\partial p_e^{EE*}}{\partial c_f} = \frac{\partial p_e^{DE*}}{\partial c_f} = 0, \\
 \frac{\partial b_e^{NE*}}{\partial c_f} &= \frac{\partial b_e^{FE*}}{\partial c_f} = \frac{\partial b_e^{EE*}}{\partial c_f} = \frac{\partial b_e^{DE*}}{\partial c_f} = 0, & \frac{\partial r_e^{NE*}}{\partial c_f} &= \frac{\partial r_e^{FE*}}{\partial c_f} = \frac{\partial r_e^{EE*}}{\partial c_f} = \frac{\partial r_e^{DE*}}{\partial c_f} = 0, \\
 \frac{\partial w_f^{NE*}}{\partial c_f} &= \frac{\partial w_f^{FE*}}{\partial c_f} = \frac{\partial w_f^{EE*}}{\partial c_f} = \frac{\partial w_f^{DE*}}{\partial c_f} = \frac{1}{2} > 0, & \frac{\partial p_f^{NE*}}{\partial c_f} &= \frac{\partial p_f^{FE*}}{\partial c_f} = \frac{\partial p_f^{EE*}}{\partial c_f} = \frac{\partial p_f^{DE*}}{\partial c_f} = \frac{1}{4} > 0, \\
 \frac{\partial Q^{NE*}}{\partial c_f} &= \frac{\partial Q^{FE*}}{\partial c_f} = \frac{\partial Q^{EE*}}{\partial c_f} = \frac{\partial Q^{DE*}}{\partial c_f} = \frac{1}{4}(\gamma - 1 - \frac{\delta\eta}{1-\delta}) < 0, \\
 \frac{\partial Q_{FV}^{NE*}}{\partial c_f} &= \frac{\partial Q_{FV}^{FE*}}{\partial c_f} = \frac{\partial Q_{FV}^{EE*}}{\partial c_f} = \frac{\partial Q_{FV}^{DE*}}{\partial c_f} = \frac{1}{4}(\frac{\alpha(1-\gamma)}{1-\alpha} - \frac{\delta\eta}{1-\delta}) < 0, \\
 \frac{\partial Q_{EV}^{NE*}}{\partial c_f} &= \frac{\partial Q_{EV}^{FE*}}{\partial c_f} = \frac{\partial Q_{EV}^{EE*}}{\partial c_f} = \frac{\partial Q_{EV}^{DE*}}{\partial c_f} = \frac{1-\gamma}{4(\alpha-1)} > 0, & \frac{\partial b_f^{FE*}}{\partial c_f} &= \frac{\partial b_f^{EE*}}{\partial c_f} = \frac{\partial b_f^{DE*}}{\partial c_f} = 0, \\
 \frac{\partial r_f^{FE*}}{\partial c_f} &= \frac{\partial r_f^{EE*}}{\partial c_f} = \frac{\partial r_f^{DE*}}{\partial c_f} = 0; & \frac{\partial w_f^{NE*}}{\partial c_e} &= \frac{\partial w_f^{FE*}}{\partial c_e} = \frac{\partial w_f^{EE*}}{\partial c_e} = \frac{\partial w_f^{DE*}}{\partial c_e} = 0, \\
 \frac{\partial p_f^{NE*}}{\partial c_e} &= \frac{\partial p_f^{FE*}}{\partial c_e} = \frac{\partial p_f^{EE*}}{\partial c_e} = \frac{\partial p_f^{DE*}}{\partial c_e} = 0, & \frac{\partial b_e^{NE*}}{\partial c_e} &= \frac{\partial b_e^{FE*}}{\partial c_e} = \frac{\partial b_e^{EE*}}{\partial c_e} = \frac{\partial b_e^{DE*}}{\partial c_e} = 0, \\
 \frac{\partial r_e^{NE*}}{\partial c_e} &= \frac{\partial r_e^{FE*}}{\partial c_e} = \frac{\partial r_e^{EE*}}{\partial c_e} = \frac{\partial r_e^{DE*}}{\partial c_e} = 0, & \frac{\partial w_e^{NE*}}{\partial c_e} &= \frac{\partial w_e^{FE*}}{\partial c_e} = \frac{\partial w_e^{EE*}}{\partial c_e} = \frac{\partial w_e^{DE*}}{\partial c_e} = \frac{1}{2} > 0, \\
 \frac{\partial p_e^{NE*}}{\partial c_e} &= \frac{\partial p_e^{FE*}}{\partial c_e} = \frac{\partial p_e^{EE*}}{\partial c_e} = \frac{\partial p_e^{DE*}}{\partial c_e} = \frac{1}{4} > 0, \\
 \frac{\partial Q^{NE*}}{\partial c_e} &= \frac{\partial Q^{FE*}}{\partial c_e} = \frac{\partial Q^{EE*}}{\partial c_e} = \frac{\partial Q^{DE*}}{\partial c_e} = \frac{-\gamma}{4\alpha(1-\delta)} < 0,
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial Q_{FV}^{NE*}}{\partial c_e} &= \frac{\partial Q_{FV}^{FE*}}{\partial c_e} = \frac{\partial Q_{FV}^{EE*}}{\partial c_e} = \frac{\partial Q_{FV}^{DE*}}{\partial c_e} = \frac{1-\gamma}{4(\alpha-1)} > 0, \\ \frac{\partial Q_{EV}^{NE*}}{\partial c_e} &= \frac{\partial Q_{EV}^{FE*}}{\partial c_e} = \frac{\partial Q_{EV}^{EE*}}{\partial c_e} = \frac{\partial Q_{EV}^{DE*}}{\partial c_e} = \frac{1}{4} \left( \frac{\gamma-1}{\alpha-1} + \frac{\gamma}{\alpha(\delta-1)} \right) < 0, \\ \frac{\partial b_f^{FE*}}{\partial c_e} &= \frac{\partial b_f^{EE*}}{\partial c_e} = \frac{\partial b_f^{DE*}}{\partial c_e} = 0, \quad \frac{\partial r_f^{FE*}}{\partial c_e} = \frac{\partial r_f^{EE*}}{\partial c_e} = \frac{\partial r_f^{DE*}}{\partial c_e} = 0. \text{ 同理可得命题 5.3 中结论。}\end{aligned}$$

命题 4.3 和命题 5.3 得证。

## 附录 10：命题 4.4 和命题 5.4 的证明

求解四种不同模型下均衡解和燃油车总销量对政府补贴  $m_e$  的一阶偏导数，

$$\begin{aligned}\text{可得：} \quad \frac{\partial w_f^{NE*}}{\partial m_e} &= \frac{\partial w_f^{FE*}}{\partial m_e} = \frac{\partial w_f^{EE*}}{\partial m_e} = \frac{\partial w_f^{DE*}}{\partial m_e} = 0, \quad \frac{\partial p_f^{NE*}}{\partial m_e} = \frac{\partial p_f^{FE*}}{\partial m_e} = \frac{\partial p_f^{EE*}}{\partial m_e} = \frac{\partial p_f^{DE*}}{\partial m_e} = 0, \\ \frac{\partial b_e^{NE*}}{\partial m_e} &= \frac{\partial b_e^{FE*}}{\partial m_e} = \frac{\partial b_e^{EE*}}{\partial m_e} = -\frac{1}{2} < 0, \quad \frac{\partial b_e^{DE*}}{\partial m_e} = \frac{\eta+\gamma-1}{2(1-\gamma)} < 0, \\ \frac{\partial r_e^{NE*}}{\partial m_e} &= \frac{\partial r_e^{FE*}}{\partial m_e} = \frac{\partial r_e^{EE*}}{\partial m_e} = -\frac{3}{4} < 0, \quad \frac{\partial r_e^{DE*}}{\partial m_e} = \frac{3(\eta+\gamma-1)}{4(1-\gamma)} < 0, \\ \frac{\partial Q_{EV}^{NE*}}{\partial m_e} &= \frac{\partial Q_{EV}^{FE*}}{\partial m_e} = \frac{\partial Q_{EV}^{EE*}}{\partial m_e} = \frac{\partial Q_{EV}^{DE*}}{\partial m_e} = \frac{\gamma}{4\alpha(1-\delta)} > 0, \\ \frac{\partial Q_{NE*}}{\partial m_e} &= \frac{\partial Q_{FE*}}{\partial m_e} = \frac{\partial Q_{EE*}}{\partial m_e} = \frac{\partial Q_{DE*}}{\partial m_e} = \frac{\gamma}{4\alpha(1-\delta)} > 0; \quad \frac{\partial w_e^{NE*}}{\partial m_e} = \frac{\partial p_e^{NE*}}{\partial m_e} = \frac{\partial Q_{FV}^{NE*}}{\partial m_e} = 0, \\ \frac{\partial w_e^{FE*}}{\partial m_e} &= \frac{\partial p_e^{FE*}}{\partial m_e} = \frac{\partial b_f^{FE*}}{\partial m_e} = \frac{\partial r_f^{FE*}}{\partial m_e} = \frac{\partial Q_{FV}^{FE*}}{\partial m_e} = 0; \quad \frac{\partial w_e^{EE*}}{\partial m_e} = \frac{\partial p_e^{EE*}}{\partial m_e} = 0, \quad \frac{\partial b_f^{EE*}}{\partial m_e} = -\frac{1}{2} < 0, \\ \frac{\partial r_f^{EE*}}{\partial m_e} &= -\frac{3}{4} < 0, \quad \frac{\partial Q_{FV}^{EE*}}{\partial m_e} = \frac{\eta}{4(1-\alpha)} < 0; \quad \frac{\partial w_e^{DE*}}{\partial m_e} = \frac{\eta}{2(1-\gamma)} > 0, \\ \frac{\partial p_e^{DE*}}{\partial m_e} &= \frac{3\eta}{4(1-\gamma)} > 0, \quad \frac{\partial b_f^{DE*}}{\partial m_e} = \frac{\partial r_f^{DE*}}{\partial m_e} = 0, \quad \frac{\partial Q_{FV}^{DE*}}{\partial m_e} = \frac{\eta}{4(1-\alpha)} < 0. \text{ 同理可得命题}\end{aligned}$$

5.4 中结论。

命题 4.4 和命题 5.4 得证。

## 附录 11：命题 4.5 的证明

求解四种不同模型下均衡解、新车总销量、NEV 总销量和燃油车总销量对旧车耐用性  $\delta$  的一阶偏导数，可得：

$$\frac{\partial b_e^{NE*}}{\partial \delta} = \frac{\partial b_e^{EE*}}{\partial \delta} = \frac{\alpha}{2} + \frac{\eta(\gamma-1-r_s(\eta+\gamma-1))}{2((1-\gamma)(1-\delta)+\delta\eta)^2} > 0, \quad ,$$

$$\frac{\partial b_e^{FE*}}{\partial \delta} = \frac{\alpha((1-\gamma)^2(\alpha-\delta)^2 + \eta(1-\gamma)(r_s-2\delta^2 + \alpha(2\delta-1)) + \eta^2(\delta^2-r_s))}{2(\alpha(1-\gamma)\delta(\eta+\gamma-1))^2} > 0, \quad ,$$

$$\frac{\partial b_e^{DE*}}{\partial \delta} = \frac{\alpha}{2} > 0, \quad \text{令} \quad \frac{\partial Q_{EV}^{NE*}}{\partial \delta} = \frac{\partial Q_{EV}^{FE*}}{\partial \delta} = \frac{\partial Q_{EV}^{EE*}}{\partial \delta} = \frac{\partial Q_{EV}^{DE*}}{\partial \delta} = \frac{\gamma(m_e+r_e-c_e)}{4\alpha(1-\delta)^2}, \quad \text{令}$$

$$\frac{\gamma(m_e+r_e-c_e)}{4\alpha(1-\delta)^2} = 0, \quad \text{可得} \quad m_{e6} = c_e - \tau_e, \quad \text{令}$$

$$\frac{\partial Q^{NE*}}{\partial \delta} = \frac{\partial Q^{FE*}}{\partial \delta} = \frac{\partial Q^{EE*}}{\partial \delta} = \frac{\partial Q^{DE*}}{\partial \delta} = \frac{\alpha\eta(r_s-c_f) + \gamma(m_e+\tau_e-c_e)}{4\alpha(1-\delta)^2}, \quad \text{令}$$

$$\frac{\alpha\eta(r_s-c_f) + \gamma(m_e+\tau_e-c_e)}{4\alpha(1-\delta)^2} = 0 \text{ 可得 } m_{e7} = c_e - \tau_e + \frac{\alpha\eta(c_f-r_s)}{\gamma}, \quad \text{且 } m_{e7} > m_{e6};$$

$$\frac{\partial w_e^{NE*}}{\partial \delta} = \frac{\partial w_e^{EE*}}{\partial \delta} = \frac{\eta(\gamma-1-r_s(\eta+\gamma-1))}{2((1-\gamma)(1-\delta)+\delta\eta)^2} < 0, \quad \frac{\partial w_e^{FE*}}{\partial \delta} = \frac{\alpha\eta(\alpha(\gamma-1)-r_s(\eta+\gamma-1))}{2(\alpha(1-\gamma)+\delta(\eta+\gamma-1))^2} < 0, \quad ,$$

$$\frac{\partial w_f^{NE*}}{\partial \delta} = \frac{\partial w_f^{EE*}}{\partial \delta} = \frac{\eta(\gamma-1-r_s(\eta+\gamma-1))}{2((1-\gamma)(1-\delta)+\delta\eta)^2} < 0, \quad \frac{\partial w_f^{FE*}}{\partial \delta} = \frac{\eta(\alpha(\gamma-1)-r_s(\eta+\gamma-1))}{2(\alpha(1-\gamma)+\delta(\eta+\gamma-1))^2} < 0, \quad ,$$

$$\frac{\partial p_e^{NE*}}{\partial \delta} = \frac{\partial p_e^{EE*}}{\partial \delta} = \frac{3\eta(\gamma-1-r_s(\eta+\gamma-1))}{4((1-\gamma)(1-\delta)+\delta\eta)^2} < 0, \quad \frac{\partial p_e^{FE*}}{\partial \delta} = \frac{3\alpha\eta(\alpha(\gamma-1)-r_s(\eta+\gamma-1))}{4(\alpha(1-\gamma)+\delta(\eta+\gamma-1))^2} < 0, \quad ,$$

$$\frac{\partial p_f^{NE*}}{\partial \delta} = \frac{\partial p_f^{EE*}}{\partial \delta} = \frac{3\eta(\gamma-1-r_s(\eta+\gamma-1))}{4((1-\gamma)(1-\delta)+\delta\eta)^2} < 0, \quad \frac{\partial p_f^{FE*}}{\partial \delta} = \frac{3\eta(\alpha(\gamma-1)-r_s(\eta+\gamma-1))}{4(\alpha(1-\gamma)+\delta(\eta+\gamma-1))^2} < 0; \quad ,$$

$$\frac{\partial w_e^{DE*}}{\partial \delta} = \frac{\partial w_f^{DE*}}{\partial \delta} = \frac{\partial p_e^{DE*}}{\partial \delta} = \frac{\partial p_f^{DE*}}{\partial \delta} = 0 \quad ;$$

$$\frac{\partial b_f^{FE*}}{\partial \delta} = \frac{(\alpha-1)(\gamma-1)(\alpha(\gamma-1)-r_s(\eta+\gamma-1))}{2(\alpha(1-\gamma)+\delta(\eta+\gamma-1))^2} > 0, \quad \frac{\partial b_f^{DE*}}{\partial \delta} = \frac{1}{2} > 0, \quad ,$$

$$\frac{\partial r_f^{FE*}}{\partial \delta} = \frac{3(\alpha-1)(\gamma-1)(\alpha(\gamma-1)-r_s(\eta+\gamma-1))}{4(\alpha(1-\gamma)+\delta(\eta+\gamma-1))^2} > 0, \quad \frac{\partial r_f^{DE*}}{\partial \delta} = \frac{3}{4} > 0, \quad ,$$

$$\frac{\partial b_f^{EE*}}{\partial \delta} = \frac{\partial r_f^{EE*}}{\partial \delta} = 0。$$

命题 4.5 得证。

## 附录 12：命题 5.1 的证明

对四种不同模型下 NEV 的批发价格、零售价格以及旧 NEV 的转移价格和折价进行两两相减，例如：由

$$w_e^{NT*} - w_e^{FT*} = \frac{\delta\eta(\alpha-1)(r_s-\delta)(\gamma+\eta-1)}{2((1-\gamma)(1-\delta)+\delta\eta)((1-\gamma)(\delta-\alpha)-\delta\eta)} > 0，\text{ 可得 } w_e^{NT*} > w_e^{FT*}。由$$

$$w_e^{NT*} - w_e^{ET*} = 0，\text{ 可得 } w_e^{NT*} = w_e^{ET*}。同理可得：} w_e^{NT*} = w_e^{ET*} > w_e^{FT*}，$$

$$p_e^{NT*} = p_e^{ET*} > p_e^{FT*}，\quad b_e^{NT*} = b_e^{ET*} > b_e^{FT*}，\quad r_e^{NT*} = r_e^{ET*} > r_e^{FT*}；\text{ 当}$$

$$0 < m_e - m_f \leq \frac{(1-\gamma)(r_s-\delta)}{(1-\gamma)(1-\delta)+\delta\eta} \text{ 时，有 } w_e^{NT*} = w_e^{ET*} \geq w_e^{DT*}，\quad p_e^{NT*} = p_e^{ET*} \geq p_e^{DT*}，$$

$$b_e^{NT*} = b_e^{ET*} \geq b_e^{DT*}，\quad r_e^{NT*} = r_e^{ET*} \geq r_e^{DT*}，\text{ 反之，当 } \frac{(1-\gamma)(r_s-\delta)}{(1-\gamma)(1-\delta)+\delta\eta} < m_e - m_f < 1 \text{ 时，}$$

$$\text{有 } w_e^{NT*} = w_e^{ET*} < w_e^{DT*}，\quad p_e^{NT*} = p_e^{ET*} < p_e^{DT*}，\quad b_e^{NT*} = b_e^{ET*} < b_e^{DT*}，\quad r_e^{NT*} = r_e^{ET*} < r_e^{DT*}；$$

$$\text{当 } 0 < m_e - m_f \leq \frac{\alpha(1-\gamma)(r_s-\delta)}{(1-\gamma)(\alpha-\delta)+\delta\eta} \text{ 时，有 } w_e^{FT*} \geq w_e^{DT*}，\quad p_e^{FT*} \geq p_e^{DT*}，\quad b_e^{FT*} \geq b_e^{DT*}，$$

$$r_e^{FT*} \geq r_e^{DT*}，\text{ 反之，当 } \frac{\alpha(1-\gamma)(r_s-\delta)}{(1-\gamma)(\alpha-\delta)+\delta\eta} < m_e - m_f < 1 \text{ 时，有 } w_e^{FT*} < w_e^{DT*}，$$

$$p_e^{FT*} < p_e^{DT*}，\quad b_e^{FT*} < b_e^{DT*}，\quad r_e^{FT*} < r_e^{DT*}。又\text{ 因为}$$

$$\frac{\alpha(1-\gamma)(r_s-\delta)}{(1-\gamma)(\alpha-\delta)+\delta\eta} < \frac{(1-\gamma)(r_s-\delta)}{(1-\gamma)(1-\delta)+\delta\eta}，\text{ 对上述区间进行合并可以得到命题 5.1(1)。}$$

$$\text{其中，}\Delta m_1 = \frac{\alpha(1-\gamma)(r_s-\delta)}{(1-\gamma)(\alpha-\delta)+\delta\eta}，\quad \Delta m_2 = \frac{(1-\gamma)(r_s-\delta)}{(1-\gamma)(1-\delta)+\delta\eta}。$$

对四种不同模型下燃油车的批发价格和零售价格进行两两相减，例如：由

$$w_f^{NT*} - w_f^{FT*} = \frac{\eta(\alpha-1)(\gamma-1)(r_s-\delta)}{2((1-\gamma)(1-\delta)+\delta\eta)((1-\gamma)(\delta-\alpha)-\delta\eta)} > 0，\text{ 可得 } w_f^{NT*} > w_f^{FT*}。由$$

$w_f^{NT*} - w_f^{ET*} = 0$ ，可得  $w_f^{NT*} = w_f^{ET*}$ 。同理可得其余模型两两比较结果，对上述结果整理可得命题 5.1(2)。

对四种不同模型下旧燃油车的转移价格和折价进行两两相减，例如：由

$$b_f^{FT*} - b_f^{ET*} = \frac{(-1+\gamma)((1-\alpha)(\delta-r_s) + (m_e - m_f)(-\alpha+\delta)) + (m_e - m_f)\delta\eta}{2\alpha(1-\gamma) + 2\delta(-1+\gamma+\eta)}, \text{ 令其等于}$$

$$0 \text{ 可得 } \Delta m = m_e - m_f = \frac{(\alpha-1)(1-\gamma)(r_s-\delta)}{(1-\gamma)(\alpha-\delta) + \delta\eta}, \text{ 即当 } 0 < \Delta m \leq \frac{(\alpha-1)(1-\gamma)(r_s-\delta)}{(1-\gamma)(\alpha-\delta) + \delta\eta} \text{ 时,}$$

有  $b_f^{FT*} \leq b_f^{ET*}$ ，同理可得， $b_f^{FT*} > b_f^{DT*}$ ， $r_f^{FT*} > r_f^{DT*}$ ；当

$0 < \Delta m \leq \frac{(\alpha-1)(1-\gamma)(r_s-\delta)}{(1-\gamma)(\alpha-\delta) + \delta\eta}$  时，有  $b_f^{FT*} \leq b_f^{ET*}$ ， $r_f^{FT*} \leq r_f^{ET*}$ ，反之，当

$\frac{(\alpha-1)(1-\gamma)(r_s-\delta)}{(1-\gamma)(\alpha-\delta) + \delta\eta} < \Delta m < 1$  时，有  $b_f^{FT*} > b_f^{ET*}$ ， $r_f^{FT*} > r_f^{ET*}$ ；同理，当

$0 < \Delta m \leq r_s - \delta$  时，有  $b_f^{ET*} \geq b_f^{DT*}$ ， $r_f^{ET*} \geq r_f^{DT*}$ ，反之，当  $r_s - \delta < \Delta m \leq 1$  时，有

$b_f^{ET*} < b_f^{DT*}$ ， $r_f^{ET*} < r_f^{DT*}$ 。又因为  $\frac{(\alpha-1)(1-\gamma)(r_s-\delta)}{(1-\gamma)(\alpha-\delta) + \delta\eta} < r_s - \delta$ ，对上述区间进行合

并可得命题 5.1(2)。其中， $\Delta m_3 = \frac{(\alpha-1)(1-\gamma)(r_s-\delta)}{(1-\gamma)(\alpha-\delta) + \delta\eta}$ ， $\Delta m_4 = r_s - \delta$ 。

命题 5.1 得证。

### 附录 13：命题 5.2 的证明

对四种不同模型下新车总销量、NEV 总销量和燃油车总销量进行两两相减，

例如：由  $Q^{NT*} - Q^{FT*} = \frac{\eta(r_s - \tau_f - m_f)}{4(1-\delta)} < 0$ ，可得  $Q^{NT*} < Q^{FT*}$ ；由  $Q^{NT*} - Q^{ET*} = 0$ ，

可得  $Q^{NT*} = Q^{ET*}$ ，同理可得其余模型两两比较结果，对上述结果进行整理可得命题 5.2。

命题 5.2 得证。

## 附录 14：命题 5.5 的证明

求解四种不同模型下均衡解、新车总销量、NEV 总销量和燃油车总销量对

政府对旧车置换燃油车的补贴  $m_f$  的一阶偏导数，可得： $\frac{\partial b_f^{ET*}}{\partial m_f} = \frac{\partial r_f^{ET*}}{\partial m_f} = 0$ ，

$$\frac{\partial w_e^{NT*}}{\partial m_f} = \frac{\partial w_e^{ET*}}{\partial m_f} = 0, \quad \frac{\partial p_e^{NT*}}{\partial m_f} = \frac{\partial p_e^{ET*}}{\partial m_f} = 0, \quad \frac{\partial w_f^{NT*}}{\partial m_f} = \frac{\partial w_f^{ET*}}{\partial m_f} = 0, \quad \frac{\partial p_f^{NT*}}{\partial m_f} = \frac{\partial p_f^{ET*}}{\partial m_f} = 0,$$

$$\frac{\partial b_e^{NT*}}{\partial m_f} = \frac{\partial b_e^{ET*}}{\partial m_f} = 0, \quad \frac{\partial r_e^{NT*}}{\partial m_f} = \frac{\partial r_e^{ET*}}{\partial m_f} = 0;$$

$$\frac{\partial w_e^{FT*}}{\partial m_f} = \frac{\partial p_e^{FT*}}{\partial m_f} = \frac{\partial w_f^{FT*}}{\partial m_f} = \frac{\partial p_f^{FT*}}{\partial m_f} = \frac{\partial b_e^{FT*}}{\partial m_f} = \frac{\partial r_e^{FT*}}{\partial m_f} = 0, \quad \frac{\partial b_f^{FT*}}{\partial m_f} = \frac{\partial b_f^{DT*}}{\partial m_f} = -\frac{1}{2} < 0,$$

$$\frac{\partial r_f^{FT*}}{\partial m_f} = \frac{\partial r_f^{DT*}}{\partial m_f} = -\frac{3}{4} < 0, \quad \frac{\partial Q^{FT*}}{\partial m_f} = \frac{\eta}{4(1-\delta)} > 0, \quad \frac{\partial Q_{FV}^{FT*}}{\partial m_f} = \frac{\eta(\delta-\alpha)}{4(1-\alpha)(1-\delta)} > 0,$$

$$\frac{\partial Q_{EV}^{FT*}}{\partial m_f} = \frac{\eta}{4(1-\alpha)} < 0; \quad \frac{\partial w_f^{DT*}}{\partial m_f} = \frac{\partial p_f^{DT*}}{\partial m_f} = 0, \quad \frac{\partial w_e^{DT*}}{\partial m_f} = \frac{-\eta}{2(1-\gamma)} < 0,$$

$$\frac{\partial p_e^{DT*}}{\partial m_f} = \frac{-3\eta}{4(1-\gamma)} < 0, \quad \frac{\partial b_e^{DT*}}{\partial m_f} = \frac{-\eta}{2(1-\gamma)} < 0, \quad \frac{\partial r_e^{DT*}}{\partial m_f} = \frac{-3\eta}{4(1-\gamma)} < 0,$$

$$\frac{\partial Q^{DT*}}{\partial m_f} = \frac{\eta}{4(1-\delta)} > 0, \quad \frac{\partial Q_{FV}^{DT*}}{\partial m_f} = \frac{\eta(\delta-\alpha)}{4(1-\alpha)(1-\delta)} > 0, \quad \frac{\partial Q_{EV}^{DT*}}{\partial m_f} = \frac{\eta}{4(1-\alpha)} < 0。$$

命题 5.5 得证。

## 附录 15：命题 5.6 的证明

将政府不同补贴政策下，当制造商提供单一置换服务时的均衡解、新车总

销量、NEV 总销量和燃油车总销量，进行两两对比可得： $w_e^{NE*} = w_e^{NT*}$ ，

$$w_f^{NE*} = w_f^{NT*}, \quad p_e^{NE*} = p_e^{NT*}, \quad p_f^{NE*} = p_f^{NT*}, \quad b_e^{NE*} = b_e^{NT*}, \quad r_e^{NE*} = r_e^{NT*}, \quad Q^{NE*} = Q^{NT*},$$

$$Q_{EV}^{NE*} = Q_{EV}^{NT*}, \quad Q_{FV}^{NE*} = Q_{FV}^{NT*}。$$

命题 5.6 得证。

## 附录 16：命题 5.7 的证明

将政府不同补贴政策下，当制造商提供定向置换服务时的均衡解、新车总销量、NEV 总销量和燃油车总销量，进行两两对比可得： $w_e^{FE*} = w_e^{FT*}$ ， $w_f^{FE*} = w_f^{FT*}$ ， $p_e^{FE*} = p_e^{FT*}$ ， $p_f^{FE*} = p_f^{FT*}$ ， $b_e^{FE*} = b_e^{FT*}$ ， $r_e^{FE*} = r_e^{FT*}$ ， $b_f^{FE*} > b_f^{FT*}$ ， $r_f^{FE*} > r_f^{FT*}$ ， $Q^{FT*} - Q^{FE*} = \frac{\eta m_f}{4(1-\delta)} > 0$ ， $Q_{FV}^{FT*} - Q_{FV}^{FE*} = \frac{\eta m_f(\delta - \alpha)}{4(1-\alpha)(1-\delta)} > 0$ ， $Q_{EV}^{FT*} - Q_{EV}^{FE*} = \frac{\eta m_f}{4(1-\alpha)} < 0$ 。

命题 5.7 得证。

## 附录 17：命题 5.8 的证明

将政府不同补贴政策下，当制造商提供双向置换服务时的均衡解、新车总销量、NEV 总销量和燃油车总销量，进行两两对比可得： $w_e^{EE*} = w_e^{ET*}$ ， $w_f^{EE*} = w_f^{ET*}$ ， $p_e^{EE*} = p_e^{ET*}$ ， $p_f^{EE*} = p_f^{ET*}$ ， $b_e^{EE*} = b_e^{ET*}$ ， $r_e^{EE*} = r_e^{ET*}$ ， $p_f^{EE*} = p_f^{ET*}$ ， $r_f^{EE*} = r_f^{ET*}$ ， $Q^{EE*} = Q^{ET*}$ ， $Q_{EV}^{EE*} = Q_{EV}^{ET*}$ ， $Q_{FV}^{EE*} = Q_{FV}^{ET*}$ 。

命题 5.8 得证。

## 附录 18：命题 5.9 的证明

将政府不同补贴政策下，当制造商提供全面置换服务时的均衡解、新车总销量、NEV 总销量和燃油车总销量，进行两两对比可得： $w_f^{DE*} = w_f^{DT*}$ ， $p_f^{DE*} = p_f^{DT*}$ ， $w_e^{DE*} - w_e^{DT*} = \frac{\eta m_f}{2(1-\gamma)} > 0$ ， $p_e^{DE*} - p_e^{DT*} = \frac{3\eta m_f}{4(1-\gamma)} > 0$ ， $b_e^{DE*} - b_e^{DT*} = \frac{\eta m_f}{2(1-\gamma)} > 0$ ， $b_f^{DE*} - b_f^{DT*} = \frac{m_f}{2} > 0$ ， $r_e^{DE*} - r_e^{DT*} = \frac{3\eta m_f}{4(1-\gamma)} > 0$ ， $r_f^{DE*} - r_f^{DT*} = \frac{3m_f}{4} > 0$ ， $Q^{DE*} - Q^{DT*} = \frac{\eta m_f}{4(\delta-1)} < 0$ ， $Q_{EV}^{DE*} - Q_{EV}^{DT*} = \frac{\eta m_f}{4(\alpha-1)}$ ，

$$Q_{FV}^{DE*} - Q_{FV}^{DT*} = \frac{\eta m_f(\alpha - \delta)}{4(1 - \alpha)(1 - \delta)} < 0。$$

命题 5.9 得证。

## 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 目经历

### 发表或录用论文

[1] 申子辰, 唐娟, 龚本刚, 刘志. 不同以旧换新模式下新能源汽车供应链定价决策和运作绩效. 安徽工程大学学报. (已录用)

[2] 唐娟, 申子辰, 龚本刚, 张智超, 刘志. 不同政府补贴策略下新能源汽车供应链定价决策. 青岛大学学报(自然科学版). (已录用)

### 参与科研项目

[1] 国家社会科学基金青年项目《新能源汽车供应链生态系统的产品研发合作激励机制研究》(项目编号: 24GLC05469, 参与)

[2] 安徽省哲学社会科学规划一般项目《央地政策协同下动力蓄电池回收利用多主体合作机制研究》(项目编号: AHSKY2023D019, 参与)

[3] 安徽省高校优秀青年科研项目《新能源汽车供应链竞合关系演化与引导机制研究》(项目编号: 2024AH030065, 参与)

[4] 安徽省高校杰出青年科研项目《数字技术驱动下供应链减排合作机制研究》(项目编号: 2023AH020016, 参与)

## 致 谢

时光荏苒，行文至此，三年研途之旅即将画上句点。回首求学路上的点滴，心中感慨万千。在此，谨向所有给予我帮助、支持与鼓励的师长、亲友和同窗致以最诚挚的谢意！

首先，衷心感谢我的导师唐娟老师，感谢您在学术道路上的悉心指导，从论文选题、框架设计到研究推进，您始终以严谨的治学态度、渊博的学识和耐心的点拨为我指明方向。您不仅在学术上为我传道授业，更以豁达的胸襟和谦和的品格教会我为人处世的道理，这些都将成为我未来人生中的宝贵财富。同时，衷心感谢刘志老师在科研和生活中给予的帮助和指导。刘老师严谨的治学精神和细致认真的工作态度让我受益匪浅。感谢经管学院所有给我授课的老师、辅导员以及研究生秘书。祝各位老师在未来的生活和工作中万事顺意！

感谢师兄万名冬、计冠群、明晨宇，师姐张怀苗、唐文慧给予我的指导和帮助。感谢同门陈奎、任佳宝、杨倩的帮助。感谢师弟管硕、刘国，师妹叶莉、丁吴燕、李新星与我交流学习。感谢室友盛志远、张翊、徐超的帮助和陪伴。祝各位工作顺利，学业有成！

感谢我的父母。你们的理解、包容与无条件的支持，让我在迷茫时重拾勇气，在挫折中坚定前行。祝你们岁月静好，安康常伴！

最后，感谢各位评审专家！能够在百忙之中抽出时间审阅本文，并提出宝贵的意见。