

“双积分”政策下的汽车竞合供应链策略选择

胡文婕^{1,2*}, 马成霖³, 赵 骅², 董 滔^{4*}

(1. 重庆工商大学企业管理研究中心, 重庆 400067; 2. 重庆工商大学工商管理学院, 重庆 400067;
3. 天津大学管理与经济学部, 天津 300072; 4. 西南大学电子信息工程学院, 重庆 400700)

摘要: 构建了不合作、价格折扣与成本分担策略模型, 研究了“双积分”政策对燃油汽车制造商(GV)和新能源汽车制造商(EV)生产策略的影响. 研究表明: 三种策略下, 当积分价格较低(高)时, 市场规模的扩大, 成本效率系数和电池价格的下降会诱导GV提高(降低)燃油汽车产量和燃油经济性水平; 成本分担策略下GV的利润始终最高, EV在积分价格较低时选择不合作策略利润更高, 积分价格较高时选择价格折扣策略利润更高; 成本分担策略应当制定更低的价格折扣合同才能激励EV参与协同研发. 以上结论说明当积分价格较低时, 市场规模的扩大, 成本效率系数和电池价格的下降会削弱“双积分”政策的实际效果, 这为汽车制造商提供了一定的管理启示.

关键词: “双积分”政策; 汽车竞合供应链; 燃油经济性; 新能源汽车

中图分类号: F273

文献标识码: A

文章编号: 1000-5781(2024)01-0109-19

doi: 10.13383/j.cnki.jse.2024.01.008

The strategic choice of co-opetition automobile supply chain under “dual-credit” policy

Hu Wenjie^{1,2*}, Ma Chenglin³, Zhao Hua², Dong Tao^{4*}

(1. Research Center for Enterprise Management, Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067, China; 2. School of Business Administration, Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067, China;
3. College of Management and Economics, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 4. College of Electronic and Information Engineering, Southwest University, Chongqing 400700, China)

Abstract: Three strategies: non-cooperation (N), price-discount (D) and cost-sharing (S) strategies, are established to analyze the impact of “dual credit” policy on the production strategies of the gasoline vehicle manufacturer (GV) and the new energy vehicle manufacturer (EV). The results show that when the credit price is lower (higher), the increase in market size, decrease in cost efficiency factor and battery price will induce GV to increase (decrease) the production of G-vehicles and fuel economy level. The profit of GV is always the highest under the S strategy. The profit of EV is higher under the N strategy when credit price is lower, while profit of EV is higher under the D strategy when credit price is higher. The S strategy should set a lower price discount than D strategy to attract EV to participate in collaborative R&D. The above findings suggest that larger market sizes, lower battery prices and lower cost efficiency factors will weaken the actual effect of the “dual credit” policy when the credit price is lower, which also provides some important management insights for automotive manufacturers.

Key words: “dual-credit” policy; automotive co-opetition supply chain; fuel economy; E-vehicle

收稿日期: 2022-10-16; 修订日期: 2023-08-10.

基金项目: 国家社会科学基金资助项目(21BGL255); 重庆工商大学科学研究资助项目(ctbuesd46).

*通信作者

1 引言

近年来,全球变暖已成为全世界关注的问题,而过量的碳排放被认为是主要原因,研究发现汽车尾气排放量约占二氧化碳总排放量的12%^[1].根据波士顿咨询公司《中国气候咨询报告》,要实现2060年前碳中和1.5摄氏度目标,中国汽车行业至少需要减少65%~70%的汽车尾气二氧化碳排放.为了促进传统汽车行业的低碳转型,加快新能源车辆的替换速度,中国于2017年9月提出了《乘用车企业平均燃料消耗量与新能源汽车积分并行管理办法》(以下简称“双积分”)针对乘用车企业平均燃料消耗量与新能源汽车积分实行并行管理.“双积分”政策规定乘用车企业平均燃料消耗量积分为该企业平均燃料消耗量的达标值和实际值之间的差额与其乘用车生产量或者进口量的乘积,实际值低于达标值产生正积分,高于达标值产生负积分.许多传统燃油汽车品牌因此将面临严峻的积分形势,例如,2020年负积分最多的一汽-大众汽车有限公司的平均燃料消耗量负积分达到1 183 342分,而长安、长城、广汽本田、东风本田、北京奔驰等多家传统燃油汽车制造商也存在“双积分”比例严重失衡的问题.

为了应对“双积分”政策所带来的积分压力,传统燃油汽车制造商不得不调整经营策略,生产新能源汽车或购买积分成为了燃油汽车制造商唯二的选择.目前,大众、丰田、宝马等传统燃油汽车制造商纷纷向全球市场推出自己的新能源汽车以降低燃油负积分.然而,随着上游电池原材料价格的大幅上涨(自2021年1月到2022年8月,锂矿石价格已上涨8倍)导致新能源汽车的原材料供应紧张.为了消除这一现象,已有燃油汽车制造商开始布局电池研发和生产,如丰田公司在2022年8月宣布,将在日本和美国投资约56亿美元进行电池研发与生产.此外,一汽、长安等传统燃油汽车制造商也在积极布局生产新能源汽车,并不断向供应链上游增加投资以确保电池供应的稳定,这一趋势势必对汽车供应链产生深远影响.因此,本文考虑了传统燃油汽车制造商同时生产燃油汽车、新能源汽车以及电池的场景.燃油汽车制造商在供应链上游向新能源汽车制造商供应电池,并在供应链下游与新能源汽车制造商形成竞争.当燃油汽车制造商积分不足时向新能源汽车制造商购买积分或向政府支付罚款.文章拟解决以下几个问题:1)不同积分价格水平下,成本效率系数、市场规模以及电池价格对燃油汽车产量、燃油经济性水平的影响;2)不同模式下燃油汽车制造商和新能源汽车制造商的绩效水平;3)价格折扣对新能源汽车制造商合作模式选择的影响.

基于上述分析,本文考虑了由一个燃油汽车制造商(GV)和一个新能源汽车制造商(EV)构成的汽车竞争供应链,分别构建了不合作、价格折扣和成本分担策略模型以研究“双积分”政策对汽车制造商合作模式与生产策略的影响.1)不合作策略,GV与EV以市场价格交易电池和积分.该策略事件顺序为,GV首先确定燃油经济性水平,然后确定燃油汽车产量.接下来,GV和EV同时确定新能源汽车产量,EV以市场价格从GV处采购电池.最后,GV计算年度积分,当积分为负时,GV将优先考虑向EV购买积分,当EV的积分无法满足交易需求时,GV将向政府支付罚金.当积分为正时,GV不参与积分交易.2)价格折扣策略,GV与EV以合同价格交易电池和积分.同样,GV首先确定燃油经济性水平,然后确定燃油汽车产量.之后,GV和EV同时确定新能源汽车产量,EV以合同价格从GV处采购电池.最后,GV计算年度积分,当积分为负时,GV以合同价格向EV购买积分,若交易完成后GV积分仍为负则向政府支付罚金.当积分为正时,GV不参与积分交易.3)成本分担策略,GV与EV共同参与研发并按比例分摊研发成本,双方以合同价格交易电池和积分.成本分担策略是价格折扣策略基础之上GV与EV合作的进一步深化,该事件决策顺序与价格折扣策略相同.结合了博弈理论和数值模拟方法,文章讨论了三种策略模型下,“双积分”政策对GV与EV策略选择的影响.研究表明:三种策略下,积分价格较低时,市场规模的扩大、研发成本的上涨和电池价格的下降会促使GV提高燃油经济性水平和燃油汽车产量.当积分价格较高时,情况则刚好相反.同时,积分价格显著影响着汽车制造商与供应链的整体收益,当积分价格较低时,成本分担策略下GV的利润更高,不合作策略下EV的利润更高,而供应链整体收益则会在价格折扣策略下实现最大化.当积分价格较高时,GV选择成本分担策略利润最高,而EV与供应链系统的利润则在价格折扣策略下更高.

本文不仅探讨了“双积分”政策下GV和EV的最优合作模式,还从理论上分析了成本效率系数、市场规模以及电池价格等参数对“双积分”政策实施效果的影响,并比较了“双积分”政策下EV的策略选择。而现有研究^[12-16]更多地关注“双积分”政策对GV生产策略选择的影响,对EV的研究则相对较少,目前也没有研究探讨电池价格对供应链各主体决策的影响。

2 文献综述

由于文章考虑的背景涉及“双积分”政策、汽车竞合供应链两个方面,因此,本节将从上述两个方面的研究成果进行梳理和总结。

汽车行业作为降碳减排的重要领域,已经受到了人们的广泛关注,关于环境政策对汽车制造企业竞合模式的影响也已经取得了一定的成果。Niu等^[1]探讨了在欧盟2019年汽车行业低碳排放标准的推动下,传统燃油汽车制造商的策略选择。研究发现,燃油汽车制造商的收益总是会受到“欧盟2019”标准的损害,但足够高的超额排放溢价可以诱导燃油汽车制造商与新能源汽车制造商形成合作,购买并转售新能源汽车。Yu等^[2]研究了在充电设施领域,汽车制造商和零售商投资与定价的合作模式选择,讨论了补贴政策和新能源汽车的异质客户价值对汽车供应链成员决策的影响。贾俊秀等^[3]建立了以电池生产商为领导者,新能源汽车制造商为跟随者的斯坦伯格博弈模型以讨论不同政府补贴策略对新能源汽车竞合供应链各主体决策行为的影响。Nakamichi等^[4]通过估算每辆汽车生产和运输过程的二氧化碳排放总量的变化,发现可持续的跨境供应链可以降低汽车供应链的二氧化碳排放量和生产成本。易余胤等^[5]构建了一个由汽车制造商和经销商联合开展以旧换新的供应链博弈模型,探讨了以旧换新策略下供应链成员的最优定价决策。Rasti-Barzoki等^[7]比较了碳税和政府补贴在实现电动汽车数量、二氧化碳减排、创收和客户盈余等四个目标的绩效差异。研究表明,如果政府寻求最大化电动汽车的数量和最小化污染,碳税政策优于政府补贴。倪晓等^[8]在考虑电动汽车租赁模式的基础上,建立了车辆替代决策优化模型,讨论了影响电动汽车替换速度的因素。结果表明,短周期、大金额政府补贴会加快电动车辆的替换速度。通过对相关文献的梳理发现,现有研究大多集中于讨论政府补贴^[9]、碳税^[10-11]等以政府为主导的环境政策对新能源汽车供应链成员运营决策的影响,关于环境政策如何通过市场机制调节汽车供应链主体行为决策的研究则相对不足,尤其是关于市场环境对决策主体影响下各内部驱动因素作用于汽车制造商决策的讨论与分析则更为缺乏。

为了实现传统汽车供应链的低碳转型,中国于2017年开始实行“双积分”政策,这给传统燃油汽车制造带来了巨大的转型压力,新能源汽车制造商也同样面临经营策略的调整。卢超等^[12]研究了在消费者低碳偏好和价格竞争影响下汽车制造商的定价策略和减排决策,探讨了“双积分”政策影响下新能源汽车积分值和积分比例要求对政府和企业决策的作用效果。于晓辉等^[13]建立“双积分”制度下燃油汽车和新能源汽车生产线共存的供应链合作模式,提出车企总收益最大化的生产布局策略。Ma等^[14]研究发现“双积分”政策并不总是有助于提高燃油经济性水平和新能源汽车产量。Cheng等^[15]通过研究发现稳定的积分市场中,集中生产策略始终是最有利可图的;而在积分市场不稳定时,合作策略则是最利于应对风险。Lou等^[16]认为“双积分”政策的实施无法提高燃油经济性水平和减少高油耗燃油汽车产量,建议应将新能源汽车积分标准与燃油汽车生产脱钩,为积分价格设定合理的范围。Yu等^[17]研究发现“双积分”规则和补贴政策的变化会对汽车制造商最优产量和定价策略产生不同的影响。王阳等^[18]讨论了“双积分”政策下传统汽车制造商以自产与外包方式进入新能源汽车市场的生产研发博弈模型,研究发现进入新能源汽车市场对传统汽车制造商总是有利的,较高的积分交易价格对传统汽车制造商进入新能源汽车市场具有激励作用,对车企开展外包研发合作具有推动作用。

通过对上述文献的梳理可以发现:1)较少的研究讨论燃油汽车制造商同时生产燃油汽车、新能源汽车和电池的情景,关于燃油汽车制造商与新能源汽车制造商同时交易积分与电池的研究则完全空白;2)现有研究大多局限于讨论“双积分”政策下外部驱动因素对汽车制造商经营决策的影响,关于内部因素的研究则

相对较少; 3) 很少有研究探讨燃油汽车制造商与新能源汽车制造商价格折扣和协同研发的合作模式。

3 “双积分”政策下的汽车供应链模型

3.1 参数与假设

考虑一个“双积分”政策下的汽车竞合供应链, 该链由一个GV和一个EV组成, GV同时生产燃油汽车和新能源汽车, 并自行研发和生产电池。考虑到潜在的合作关系, EV将从GV处采购电池, 而GV也将在积分不足的情况下优先考虑向EV采购积分。这使得GV与EV在供应链上游和积分市场形成合作关系, 并在终端产品市场展开竞争。基于Niu等^[1]的分析, 燃油汽车的市场占有率远高于新能源汽车, 故新能源汽车的销售价格会受到燃油汽车产量的影响, 而燃油汽车的价格则不会受到新能源汽车产量的影响。假设GV和EV生产的新能源汽车无差异, 并以相同的零售价销往市场, 分别以下标G、GE和E表示燃油汽车、GV生产的新能源汽车和EV生产的新能源汽车。燃油汽车和新能源汽车的价格分别为 $p_G = a - q_G + x$ 、 $p_E = a - (q_G + q_{GE}) - q_E$, 其中 a 为潜在市场; q_G 、 q_{GE} 和 q_E 分别表示燃油汽车产量、GV生产的新能源汽车产量和EV生产的新能源汽车产量; x 表示GV通过技术创新所引起的燃油经济性水平的提高, 燃油经济性是指在保证动力性的条件下燃油汽车以尽量小的燃油消耗量经济行驶的能力^[19], 以实现显著降低燃油汽车平均燃油消耗量的目的^[20-22]。假设其它可变生产成本为0, 只考虑提高燃油经济性水平的技术创新成本 $c = \frac{1}{2}kx^2$, 成本的二次型表明提高燃油经济性水平变得越来越困难和昂贵, 其中 k 为成本效率系数, 满足 $k > 0$ ^[20,30,31], k 越大表明提高燃油经济性水平需要的研发成本越高。

“双积分”政策旨在取代政府补贴以驱动新能源产业向市场化转型, 通过企业平均燃料消耗量(CAFC)积分和新能源汽车(NEV)积分同时对传统燃油汽车和新能源汽车产生影响^[12], 从而达到降低传统燃油汽车燃油消耗量和增加新能源汽车产量的目的。根据工信部颁布的《乘用车企业平均燃料消耗量与新能源汽车积分并行管理办法》, CAFC积分为企业平均燃料消耗量的达标值和实际值之间的差额与乘用车产量的乘积, 实际值低于达标值产生正积分, 高于达标值产生负积分^[23-25], 故GV的CAFC总积分为 $CAFC = (\gamma + x)q_G$, 其中 γ 表示每辆车的初始CAFC积分, 为CAFC的标准值与实际值之间的差值, 由于 γ 通常满足 $\gamma \in [-5, 1]$ ^[12], 为便于分析令 $\gamma = -1$ 。NEV积分是指该企业在核算年度内生产的新能源汽车单车积分与该车型产量的乘积。因此, GV的NEV总积分为 $NEV_1 = nq_{GE}$, EV的NEV总积分为 $NEV_2 = nq_E$, 其中 n 为每辆新能源汽车的单车积分, 根据工信部2022年7月公布的《关于修改〈乘用车企业平均燃料消耗量与新能源汽车积分并行管理办法〉的决定(征求意见稿)》规定2024年—2025年度纯电动汽车和插电式混合动力汽车的NEV积分上限分别为2.3分和1分, 为便于分析令 $n = 1$ 。CAFC负积分可以用NEV正积分抵偿, 但CAFC正积分只能单向抵偿积分而无法通过出售来获益, 因此CAFC正积分无法参与市场交易^[12]。基于上述分析, 当GV的CAFC负积分能够完全抵偿, 即 $CAFC + NEV_1 > 0$ 时, GV不参与积分交易。当GV的CAFC负积分不能完全抵偿, 即 $CAFC + NEV_1 < 0$ 时, 需要考虑以下两种情况: 1) EV的新能源积分可以满足GV的积分交易需求, 即 $CAFC + NEV_1 + NEV_2 \geq 0$; 2) EV的新能源积分无法完全满足GV积分交易的需求, 即 $CAFC + NEV_1 + NEV_2 < 0$, 此时GV还将向政府支付罚金 $P = F(CAFC + NEV_1 + NEV_2)$, 其中 F 表示单位积分罚款金额, 不失一般性, 令 $p_c = F$ 。同时, 假设GV和EV的积分按年度进行统计和抵偿。根据工信部2022年7月5日发布的《2021年度中国乘用车企业平均燃料消耗量与新能源汽车积分情况公告》显示, 2021年上汽通用的CAFC负积分高达95.25万分, 单一EV的NEV正积分无法完全满足其积分交易需求。因此, 本文仅研究GV的CAFC负积分不能完全抵偿且EV的NEV正积分无法完全满足积分交易需求的情况, 即 $CAFC + NEV_1 < 0$ 且 $CAFC + NEV_1 + NEV_2 < 0$ 的情况, 此时GV既需要向EV购买积分还需要向政府支付罚金。

本文建立了三种策略模型, 不合作策略、价格折扣策略以及成本分担策略以探讨“双积分”政策影响下GV和EV在竞合供应链中的潜在合作模式和绩效水平。

1) 不合作策略, GV与EV以市场价格 p_B 、 F 交易电池和积分. 该策略事件顺序为: 第一步, GV确定燃油经济性水平 x ; 第二步, GV确定燃油汽车产量 q_G ; 第三步, GV与EV同时确定新能源汽车产量 q_{GE} 和 q_E , EV以外生价格 p_B 从GV处采购 q_E 单位的电池; 最后, GV以单价 F 向EV购买NEV正积分, 并向政府支付罚金. 根据工信部发布的《乘用车企业平均燃料消耗量与新能源汽车积分并行管理实施情况年度报告(2021)》(以下简称《积分年度报告》)显示, 2018年至2021年CAFC积分转让共计124笔, 累计交易规模426万分, 交易总额超过11亿元, 其中转让CAFC积分规模达211万分; NEV积分交易订单共186笔, 累计交易规模达471万分, 交易总额达到31.7亿万^[26].

2) 价格折扣策略, GV与EV以合同价格 βp_B 、 βF 交易电池和积分. 该策略事件顺序为: 首先, GV确定燃油经济性水平 x ; 其次, GV确定燃油汽车产量 q_G ; 第三步, GV和EV同时确定产量 q_{GE} 和 q_E , EV以合同价格 βp_B 从GV处采购 q_E 单位的电池; 最后, GV以折扣价格 βF 向EV购买NEV正积分, 并向政府支付罚金. 目前, 销售积分已经成为EV的主要利润来源, 根据特斯拉2020年财报显示该品牌全年净利润7.21亿美元, 其中NEV正积分获得收入15.80亿美元. 随着环境政策的调整, NEV正积分单价波动明显, 根据工信部发布的《积分年度报告》显示, 2018年至2022年NEV正积分单价由500元上涨至2 088元, 而根据Li等^[27]的预测NEV正积分的未来单价将高达20 000元人民币. 积分价格的持续上涨给GV带来了巨大的成本压力, 为了控制因积分价格上涨所引发的成本增加, GV通常会与EV形成战略合作关系以降低积分交易成本(如增持股份和转售). 例如, 根据工信部、商务部、海关总署、市场监管总局联合发布的《2021年度中国乘用车企业平均燃料消耗量与新能源汽车积分情况公告》显示, 2021年广汽本田、广汽三菱、广汽丰田的CAFC负积分分别为74 383、8 513、71 097分, 而广汽乘用车有限公司的NEV正积分则达到448 763分. 虽然未披露详细的积分交易信息, 但内部低价交易可以帮助广汽集团实现积分达标.

3) 成本分担策略, GV与EV共同参与研发, 并分别以比例 η 和 $1 - \eta$ 分摊研发成本, 双方以合同价格 βp_B 、 βF 交易电池和积分. 该策略事件顺序为: 第一步, GV决定燃油经济性水平 x ; 第二步, GV确定燃油汽车产量 q_G ; 第三步, GV和EV同时新能源汽车确定产量 q_{GE} 和 q_E , EV以合同价格 βp_B 向GV采购 q_E 单位的电池; 最后, GV以折扣价格 βF 向EV购买NEV正积分, 并向政府支付罚金. 成本分担策略是在价格折扣策略基础之上GV与EV战略合作的进一步深化, 双方希望通过协同研发进一步稳固成本和技术优势以保证市场的主导地位^[28]. 例如, 在“双积分”政策实施后, 为了降低积分交易价格并推动新能源汽车技术创新, 2018年7月, 宝马和长城正式签署了在中国生产MINI品牌新能源汽车的协议, 双方各持股50%成立光束汽车. 此外, 戴姆勒集团与吉利控股也于2019年3月宣布成立合资公司推动Smart品牌的低碳转型.

3.2 模型分析

基于上节的问题描述和决策假设, 本节将对不合作、价格折扣和成本分担三种策略模型的最优决策进行分析. 为便于表达, 统一用上标表示供应链策略模式, 用下标表示GV与EV.

3.2.1 不合作策略

不合作策略下, GV与EV以自己的利润最大化来确定生产数量, 则GV与EV制定决策的过程可视为Stackelberg动态博弈过程, 其利润函数可写为

$$\pi_G^N = p_G q_G + p_E q_{GE} + p_B q_E - c + F(\text{CAFC} + \text{NEV}_1), \quad (1)$$

$$\pi_E^N = (p_E - p_B) q_E + F \text{NEV}_2, \quad (2)$$

其中 p_B 为电池的市场价格, 使用上标“N”表示不合作策略.

采用逆向归纳法, 首先分析第三阶段, 面对给定的 x 和 q_G , GV与EV同时通过决策 q_{GE} 和 q_E 来优化各自利润. 根据一阶条件, 可以计算出 $\partial \pi_G^N / \partial q_{GE} = \partial \pi_E^N / \partial q_E = 0$, 通过计算得到 $q_{GE} = (a - q_G + F + p_B) / 3$, $q_E = (a - q_G + F - 2p_B) / 3$. 在第二阶段, 面对给定的 x 和对第三阶段的最优新能源车订单的预期, GV决策 q_G 来优化自身的利润, 由一阶条件可得 $q_G = (7a + 9x - 11F - 5p_B + 9Fx) / 16$. 最后将 q_G 代

入GV的利润函数,并由一阶条件得到燃油经济性水平的最优解 $x^{N,*} = (1+F)(7a-11F-5p_B)/A$,其中 $A = 16k - 9F^2 - 18F - 9$,并重新代入可得 q_G 、 q_{GE} 及 q_E 的最优解.证明见附录.

定理1 不合作策略下,燃油经济性水平 x 、燃油汽车产量 q_G 、新能源汽车产量 q_{GE} 及 q_E 关于成本效率系数 k 的变化规律为

当积分价格 $0 < F < (7a - 5p_B)/11$, $\frac{\partial x}{\partial k} < 0$, $\frac{\partial q_G}{\partial k} < 0$, $\frac{\partial q_{GE}}{\partial k} > 0$, $\frac{\partial q_E}{\partial k} > 0$; 当积分价格 $F > (7a - 5p_B)/11$, $\frac{\partial x}{\partial k} > 0$, $\frac{\partial q_G}{\partial k} > 0$, $\frac{\partial q_{GE}}{\partial k} < 0$, $\frac{\partial q_E}{\partial k} < 0$.

定理1描述了不合作策略下,积分价格 F 和成本效率系数 k 对GV和EV生产策略的影响.具体来说,在特定的市场规模 a 和电池价格 p_B 下,积分价格存在一个阈值 $\epsilon = (7a - 5p_B)/11$,当积分价格 F 小于 ϵ 时,燃油经济性水平 x 以及燃油汽车产量 q_G 则关于成本效率系数 k 单减,而新能源汽车产量 q_{GE} 和 q_E 则关于成本效率系数 k 单增;随着积分价格 F 逐渐上涨并大于 ϵ 时,燃油经济性水平 x 与燃油汽车产量 q_G 关于成本效率系数 k 单增,而新能源汽车产量 q_{GE} 和 q_E 则关于成本效率系数 k 单减.直观上来看,随着积分价格的上涨,GV对成本效率系数的敏感性应当降低,但所得结果却与之相反.这主要是由两方面原因造成:一方面,积分价格的上涨会使得GV购买积分的成本增加,这会迫使GV投入更多的研发经费以提高燃油经济性水平从而降低对积分的依赖;另一方面,高的成本效率系数意味着提高燃油经济性水平所需要的研发成本投入更高,因此成本效率系数的增加会抑制GV的研发投入.综合上述分析,面对特定的市场规模和电池价格,会出现两种不同的结果:当积分价格低于 $(7a - 5p_B)/11$ 时,成本效率系数对GV研发投入的影响大于积分价格,因此GV会随着成本效率系数的增加而降低研发投入进而导致燃油经济性水平与燃油汽车产量的降低,而这也将会导致新能源汽车增产以填补燃油汽车减产所留下的市场空白;与之相反,当积分价格高于 $(7a - 5p_B)/11$ 时,二者的作用效果则完全逆转,积分价格变化对GV的影响大于成本效率系数,故随着成本效率系数的增加GV仍然会选择增加研发投入以提高燃油经济性水平和燃油汽车产量以降低对积分的依赖,而积分需求的下降与燃油汽车的增产则会进一步引发新能源汽车产量的下降.

需要特别注意的是,市场规模 a 和电池价格 p_B 调节了积分价格 F 的影响范围,积分价格 F 的阈值 ϵ 关于市场规模 a 单增,关于电池价格 p_B 单减.具体来说,市场规模的扩大提高了积分价格的阈值,降低了GV对积分价格的敏感性.这是因为市场规模的扩大使得GV可以通过生产并销售更多燃油汽车以弥补积分价格上涨所带来的成本的增加.而电池价格的上涨则会降低积分价格的阈值,这是由于电池价格的上涨会使得EV降低新能源汽车产量,从而导致积分供给的减少并引发积分价格的上涨,因此GV会选择增加研发投入提高燃油经济性水平与燃油汽车产量以降低积分需求.

综上所述,可以得到以下几点管理学见解,当积分价格低于阈值,成本效率系数的影响大于积分价格,此时GV应当根据成本效率系数的变化规律来制定生产策略,即成本效率系数越高(低)则应当降低(提高)燃油经济性水平和燃油汽车产量;当积分价格高于阈值,积分价格的影响大于成本效率系数,GV则应当根据积分价格的变化规律来制定生产策略,故虽然成本效率系数提高(降低)但仍应当提高(降低)燃油经济性水平和燃油汽车产量.此外,市场规模的扩大和电池价格的下降会削弱“双积分”政策对GV影响,因此,GV应当积极拓展市场并向供应链上游增加投资以将电池价格控制在合理范围之内才能有效缓解“双积分”政策所带来的转型压力.

定理2 不合作策略下,燃油经济性水平 x 、燃油汽车产量 q_G 、新能源汽车产量 q_{GE} 及 q_E 关于市场规模 a 的变化规律为:

当积分价格 $0 < F < \sqrt{k} - 1$ 时, $\frac{\partial x}{\partial a} > 0$, $\frac{\partial q_G}{\partial a} > 0$, $\frac{\partial q_{GE}}{\partial a} > 0$, $\frac{\partial q_E}{\partial a} > 0$; 当积分价格 $\sqrt{k} - 1 < F < 4\sqrt{k}/3 - 1$ 时, $\frac{\partial x}{\partial a} > 0$, $\frac{\partial q_G}{\partial a} > 0$, $\frac{\partial q_{GE}}{\partial a} < 0$, $\frac{\partial q_E}{\partial a} < 0$; 当积分价格 $F > 4\sqrt{k}/3 - 1$ 时, $\frac{\partial x}{\partial a} < 0$, $\frac{\partial q_G}{\partial a} < 0$, $\frac{\partial q_{GE}}{\partial a} > 0$, $\frac{\partial q_E}{\partial a} > 0$.

由定理2可知,不合作策略下,GV受到来自积分价格 F 与市场规模 a 两方面的影响:一方面积分价格的上涨会引起燃油汽车产量的下降,另一方面市场规模的扩大又利于燃油汽车的增产.具体来说,积分价格存在三个价格区间,当积分价格低于 $\sqrt{k} - 1$ 时,燃油经济性水平 x 、燃油汽车产量 q_G 、新能源汽车产量 q_{GE} 及 q_E 关

于市场规模 a 单增,这是由于当积分价格较低时,市场规模扩大所带来的燃油汽车销售收入的增加高于GV积分购买成本的增加,因此市场规模的扩大可以促使GV提高燃油经济性水平和燃油汽车产量,这将进一步引发积分需求的增加,从而诱使EV增产新能源汽车.当积分价格 $\sqrt{k}-1 < F < 4\sqrt{k}/3-1$,燃油经济性水平 x 和燃油汽车产量 q_G 关于市场规模 a 单增,新能源汽车产量 q_{GE} 及 q_E 关于市场规模 a 单减.这说明积分价格虽然上涨,但市场规模扩大所带来的燃油汽车销售收入的增加仍然高于GV购买积分成本的增加,因此GV仍将提高燃油经济性水平和燃油汽车产量.但积分价格和燃油经济性水平的提高势必降低GV对积分需求,再叠加燃油汽车增产对市场的挤压,从而迫使GV和EV减产新能源汽车.当积分价格高于 $4\sqrt{k}/3-1$ 时,燃油经济性水平 x 和燃油汽车产量 q_G 关于市场规模 a 单减,新能源汽车产量 q_{GE} 及 q_E 则关于市场规模 a 单增.原因是显而易见的,积分价格较高时,GV积分购买成本的增加幅度大于市场规模扩大所带来的燃油汽车销售收入的增加,此时GV销售燃油汽车已经变得无利可图甚至可能出现亏损.因此,市场规模的扩大将导致GV降低燃油经济性水平和燃油汽车产量并增产新能源汽车,而EV也将选择增产新能源汽车以填补燃油汽车减产所留下的市场空白.此外,成本效率系数 k 影响着积分价格的阈值,使得积分价格阈值随着成本效率系数的增加而增加,这说明提高燃油经济性水平所需要的单位研发成本越高GV对积分价格敏感性越低,这同时表明研发水平较低的GV不得不采购更高价格的积分.

通过上述分析可以得到以下几点重要的信息,当积分价格较低时,市场规模的扩大对GV和EV都是有利的,二者应当提高燃油汽车和新能源汽车的产量以占据增加的市场份额.随着积分价格的上涨但仍处于GV可接收范围内时,GV仍然应当提高燃油经济性水平和燃油汽车产量,但应当降低对新能源汽车的投入,而EV应当减少新能源汽车的产量.当积分价格进一步上涨,无论市场规模如何扩大销售燃油汽车都已经无利可图,故GV应当降低燃油经济性水平和燃油汽车产量,并增加新能源汽车产量.而EV也应当提高新能源汽车产量以填补市场规模扩大和燃油汽车减产所带来的市场空白.此外,GV应当努力提高自身研发水平以降低积分价格上涨所带来的负面冲击.

定理3 不合作策略下,燃油经济性水平 x 、燃油汽车产量 q_G 、新能源汽车产量 q_{GE} 及 q_E 关于电池价格 p_B 的变化规律为:

当积分价格 $0 < F < \sqrt{6k}/2-1$ 时, $\frac{\partial x}{\partial p_B} < 0$, $\frac{\partial q_G}{\partial p_B} < 0$, $\frac{\partial q_{GE}}{\partial p_B} > 0$, $\frac{\partial q_E}{\partial p_B} < 0$; 当积分价格 $\sqrt{6k}/2-1 < F < 4\sqrt{k}/3-1$ 时, $\frac{\partial x}{\partial p_B} < 0$, $\frac{\partial q_G}{\partial p_B} < 0$, $\frac{\partial q_{GE}}{\partial p_B} > 0$, $\frac{\partial q_E}{\partial p_B} > 0$; 当积分价格 $4\sqrt{k}/3-1 < F < \sqrt{21k}/3-1$ 时, $\frac{\partial x}{\partial p_B} > 0$, $\frac{\partial q_G}{\partial p_B} > 0$, $\frac{\partial q_{GE}}{\partial p_B} < 0$, $\frac{\partial q_E}{\partial p_B} < 0$; 当积分价格 $F > \sqrt{21k}/3-1$ 时, $\frac{\partial x}{\partial p_B} > 0$, $\frac{\partial q_G}{\partial p_B} > 0$, $\frac{\partial q_{GE}}{\partial p_B} > 0$, $\frac{\partial q_E}{\partial p_B} < 0$.

定理3刻画了不合作策略下电池价格 p_B 对燃油经济性水平 x 、燃油汽车产量 q_G 、新能源汽车产量 q_{GE} 及 q_E 的作用效果.究其原因,对GV和EV的影响主要来自两个方面:一方面,电池价格 p_B 的上涨会增加GV的电池销售收入但同时会导致EV因为成本的增加而减产;另一方面,积分价格 F 的增加虽然会增加EV销售积分的收入,但同时也会抑制GV的积分需求.具体来说,当积分价格 $0 < F < \sqrt{6k}/2-1$ 时,电池价格上涨所引起的电池销售收入的增加高于GV的积分购买成本,故GV将选择降低燃油经济性水平和燃油汽车产量以诱导EV增产新能源汽车从而达到增加电池销售的目的.但电池价格上涨同时会导致EV降低新能源汽车产量,故GV将选择提高新能源汽车产量以填补市场空白.当积分价格 $\sqrt{6k}/2-1 < F < 4\sqrt{k}/3-1$ 时,GV的电池销售收入仍然可以弥补积分价格上涨所带来的成本的增加,但二者之间的差距逐渐缩小,故GV仍然选择降低燃油经济性水平和燃油汽车产量以促使EV增产以实现电池销量的增加.对于EV而言,电池价格的上涨虽然意味着成本的增加,但销售扩大所带来的收益增加仍然能够帮助EV盈利,故EV将选择提高新能源汽车产量.而面对EV新能源汽车的增产,GV将选择降低新能源汽车产量.当积分价格 $4\sqrt{k}/3-1 < F < \sqrt{21k}/3-1$ 时,随着积分价格的进一步上涨,为了控制高昂的积分购买成本,GV将选择增加研发投入提高燃油经济性水平和燃油汽车产量.由于受到积分市场需求萎缩和电池成本增加的双重影响,EV将会选择降低新能源汽车产量.而燃油汽车增产对市场的挤占会使得GV降低新能源汽车产量.当积分价格 $F > \sqrt{21k}/3-1$ 时,GV将继续选择增加研发投入以提高燃油经济性水平以彻底摆脱对积分的依赖.积分需求的萎缩和高昂的电池成本则会加速EV降低新能源汽车产量,而GV也会在此时增加新能源汽车产

量以填补EV减产所留下的市场空白.

通过上述分析可以得到以下关键信息, 当积分价格较低时, 电池价格变化对GV的影响大于积分价格, GV应该减产以诱使EV提高新能源汽车产量从而达到增加电池销售收入的目的. 当积分价格较高时, 积分价格对GV的影响超过了电池价格, GV应当提高燃油经济性水平和燃油汽车产量以摆脱对积分的依赖, 而EV则应当减产以应对更加激烈的市场竞争和高昂的电池成本.

3.2.2 价格折扣策略

价格折扣模型下, GV与EV通过协商形成价格折扣合同, 并以折扣价格交易电池和积分, GV与EV的利润函数分别为

$$\pi_G^D = p_G q_G + p_E q_{GE} + \beta p_B q_E - c - \beta F NEV_2 + F(CAFC + NEV_1 + NEV_2), \quad (3)$$

$$\pi_E^D = (p_E - \beta p_B) q_E + \beta F NEV_2, \quad (4)$$

其中 $\beta(0 < \beta < 1)$ 为价格折扣系数, βp_B 为电池的折扣价格, βF 为新能源汽车制造商(EV)向燃油汽车制造商(GV)销售积分的折扣价格, 使用上标“D”表示价格折扣策略.

同样由逆向归纳法, 首先由一阶条件得到 $q_{GE} = [a - q_G + 2F + \beta(p_B - F)]/3$, $q_E = [a - q_G - F + 2\beta(F - p_B)]/3$. 其次, 由GV决策 q_G 优化自身的利润, 可得 $q_G = (7a + 9x + 5\beta F - 5\beta p_B + 9Fx)/16 - F$. 最后可以得到燃油经济性水平的最优解 $x^{D,*} = (1 + F)(7a + 5\beta F - 5\beta p_B - 16F)/A$, 并带入得到 q_G 、 q_{GE} 及 q_E 的最优解. 证明见附录.

定理4 价格折扣策略下, 燃油经济性水平 x 、燃油汽车产量 q_G 、新能源汽车产量 q_{GE} 及 q_E 关于成本效率系数 k 的变化规律为:

1) 当积分价格 $0 < F < (7a - 5\beta p_B)/(16 - 5\beta)$, $\frac{\partial x}{\partial k} < 0$, $\frac{\partial q_G}{\partial k} < 0$, $\frac{\partial q_{GE}}{\partial k} > 0$, $\frac{\partial q_E}{\partial k} > 0$; 2) 当积分价格 $F > (7a - 5\beta p_B)/(16 - 5\beta)$, $\frac{\partial x}{\partial k} > 0$, $\frac{\partial q_G}{\partial k} > 0$, $\frac{\partial q_{GE}}{\partial k} < 0$, $\frac{\partial q_E}{\partial k} < 0$.

由定理4可知, 积分价格同样存在一个阈值 $\lambda = (7a - 5\beta p_B)/(16 - 5\beta)$. 通过比较定理1和定理4发现, 不合作策略与价格折扣策略下, 积分价格 F 穿越阈值前后, 燃油经济性水平 x 、燃油汽车产量 q_G 、新能源汽车产量 q_{GE} 及 q_E 关于成本效率系数 k 的单调性相同. 不合作策略是价格折扣策略中价格折扣系数 $\beta = 1$ 的特殊情况, 在价格折扣、市场规模以及电池价格的叠加作用下, 不合作策略下的积分价格阈值在价格折扣策略下发生了位移. 为了更为准确地刻画积分价格阈值的变化规律, 接下来将讨论积分阈值 λ 关于价格折扣系数 $\beta \in (0, 1)$ 的变化规律.

推论1 价格折扣策略下, 积分阈值 λ 关于价格折扣系数 β 的变化规律为:

当 $p_B > 7a/16$ 时, 积分价格阈值 λ 关于价格折扣系数 β 单减, 即 $\frac{\partial \lambda}{\partial \beta} < 0$; 当 $p_B < 7a/16$ 时, 积分价格阈值 λ 关于价格折扣系数 β 单增, 即 $\frac{\partial \lambda}{\partial \beta} > 0$.

由推论1可知, 在市场规模特定的情况下, 当电池价格较低时, 积分价格阈值 λ 随着价格折扣系数 β 的增加而降低, 故价格折扣策略下的积分价格阈值高于不合作策略, 这说明供应链成员之间的合作会延迟其生产策略的调整时机, 这会促使GV持续减产燃油汽车以获取更高的电池销售收入, 这也将同时导致新能源汽车的增产. 当电池价格较高时, 积分价格阈值 λ 随着价格折扣系数 β 的增加而增加, 故不合作策略下的积分价格阈值高于价格折扣策略, 这表明不合作策略更利于燃油汽车的减产和新能源汽车的增产.

结合定理4与推论1可以看到, 价格折扣策略下积分价格阈值同时受到市场规模、积分价格以及价格折扣系数的影响. 在特定市场规模下, 当电池价格较低时, 价格折扣策略可以有效提高积分价格阈值, 更利于新能源汽车产量的增加; 与之相反, 当电池价格较高时, 不合作策略更利于新能源汽车产量的提高.

定理5 价格折扣策略下, 燃油经济性水平 x 、燃油汽车产量 q_G 、新能源汽车产量 q_{GE} 、 q_E 关于折扣系数 β 的变化规律为:

1) 当积分价格 $0 < F < p_B$ 时, (a) 若积分价格 $0 < F < \sqrt{6k}/2 - 1$, $\frac{\partial x}{\partial \beta} < 0$, $\frac{\partial q_G}{\partial \beta} < 0$, $\frac{\partial q_{GE}}{\partial \beta} > 0$; (b) 若积分价格 $\sqrt{6k}/2 - 1 < F < 4\sqrt{k}/3 - 1$, $\frac{\partial x}{\partial \beta} < 0$, $\frac{\partial q_G}{\partial \beta} < 0$, $\frac{\partial q_{GE}}{\partial \beta} > 0$; (c) 若积分价格 $4\sqrt{k}/3 - 1 < F < \sqrt{21k}/3 - 1$, $\frac{\partial x}{\partial \beta} > 0$, $\frac{\partial q_G}{\partial \beta} > 0$, $\frac{\partial q_{GE}}{\partial \beta} < 0$; (d) 若积分价格 $\sqrt{21k}/3 - 1 < F$, $\frac{\partial x}{\partial \beta} > 0$, $\frac{\partial q_G}{\partial \beta} > 0$, $\frac{\partial q_{GE}}{\partial \beta} > 0$.

2) 当积分价格 $F > p_B$ 时, (a) 若积分价格 $0 < F < \sqrt{6k}/2 - 1$, $\frac{\partial x}{\partial \beta} > 0$, $\frac{\partial q_G}{\partial \beta} > 0$, $\frac{\partial q_{GE}}{\partial \beta} < 0$; (b) 若积分价格 $\sqrt{6k}/2 - 1 < F < 4\sqrt{k}/3 - 1$, $\frac{\partial x}{\partial \beta} > 0$, $\frac{\partial q_G}{\partial \beta} > 0$, $\frac{\partial q_{GE}}{\partial \beta} < 0$; (c) 若积分价格 $4\sqrt{k}/3 - 1 < F < \sqrt{21k}/3 - 1$, $\frac{\partial x}{\partial \beta} < 0$, $\frac{\partial q_G}{\partial \beta} < 0$, $\frac{\partial q_{GE}}{\partial \beta} > 0$; (d) 若积分价格 $\sqrt{21k}/3 - 1 < F$, $\frac{\partial x}{\partial \beta} < 0$, $\frac{\partial q_G}{\partial \beta} < 0$, $\frac{\partial q_{GE}}{\partial \beta} < 0$.

通过计算可知, 价格折扣策略下, 燃油经济性水平 x 、燃油汽车产量 q_G 及新能源汽车产量 q_{GE} 关于市场规模 a 和电池价格 p_B 的单调性与定理2所描述完全相同, 故不再做单独阐述. 定理5着重讨论了价格折扣 β ($0 < \beta < 1$) 对GV生产决策的影响. 具体来说, 当积分价格小于电池价格, 即 $F < p_B$, 存在4个积分价格区间: 若 $0 < F < \sqrt{6k}/2 - 1$ 时, 燃油经济性水平 x 、燃油汽车产量 q_G 关于价格折扣 β 单减, 新能源汽车产量 q_{GE} 关于价格折扣 β 单增; 若 $\sqrt{6k}/2 - 1 < F < 4\sqrt{k}/3 - 1$ 时, 燃油经济性水平 x 和燃油汽车产量 q_G 关于价格折扣 β 单减, 新能源汽车产量 q_{GE} 关于价格折扣 β 单增; 若 $4\sqrt{k}/3 - 1 < F < \sqrt{21k}/3 - 1$, 燃油经济性水平 x 和燃油汽车产量 q_G 关于价格折扣 β 单增, 新能源汽车产量 q_{GE} 关于价格折扣 β 单减; 若 $\sqrt{21k}/3 - 1 \leq F$, 燃油经济性水平 x 、燃油汽车产量 q_G 和新能源汽车产量 q_{GE} 关于价格折扣 β 单增, 新能源汽车产量 q_E 关于价格折扣 β 单减. 当积分价格大于电池价格, 即 $F > p_B$, 燃油经济性水平 x 、燃油汽车产量 q_G 、新能源汽车产量 q_{GE} 在四个区间内关于价格折扣 β 的单调性发生了逆转. 这是由于价格折扣 β 会同时作用于积分价格 F 与电池价格 p_B , 当积分价格相对较低且小于电池价格时, 价格折扣 β 对电池价格 p_B 的影响高于积分价格 F , 故GV会在价格折扣 β 上升时降低燃油经济性水平 x 和燃油汽车产量 q_G 以实现收益最大化; 当积分价格较高且大于电池价格时, 情况则刚好相反, 价格折扣 β 提高所带来的积分购买成本的增加大于电池销售收益的增加, 故此时GV会在价格折扣 β 上升时增加燃油汽车产量 q_G 和燃油经济性水平 x . 而燃油汽车产量 q_G 的变化也会进一步引起新能源汽车产量 q_{GE} 和 q_E 的调整.

基于上述分析, 可以给出以下几点管理学启示, 当积分价格低于电池价格时, 价格折扣对电池价格的影响高于积分价格, 故随着价格折扣系数的提高, GV应当选择降低燃油经济性水平和燃油汽车产量以增加电池销售收入. 当积分价格高于电池价格时, 价格折扣对积分价格的影响高于电池价格, 故随着价格折扣系数的增加GV应当选择提高燃油经济性水平和燃油汽车产量以降低对积分的依赖.

3.2.3 成本分担策略

成本分担策略是在价格折扣策略基础之上扩展而来, 考虑了GV与EV战略合作的进一步深化, 即双方不仅以折扣价格交易积分与电池, 还协同研发并共同分担研发成本, GV与EV的利润函数分别为

$$\pi_G^S = p_G q_G + p_E q_{GE} + \beta p_B q_E - \eta c - \beta F NEV_2 + F(CAFC + NEV_1 + NEV_2), \quad (5)$$

$$\pi_E^S = (p_E - \beta p_B) q_E - (1 - \eta) c + \beta F NEV_2, \quad (6)$$

其中 η 为GV所承担的研发成本比例, $(1 - \eta)$ 为EV所承担的研发成本比例, 使用上标“S”表示成本分担策略.

采用与价格折扣策略同样的解决方案, 首先计算出 $q_{GE} = [a - q_G + 2F + \beta(p_B - F)]/3$, $q_E = [a - q_G - F + 2\beta(F - p_B)]/3$. 其次, 通过一阶条件可得 $q_G = 7a + 9x + 5\beta p_B - 5\beta F + 9Fx/16 - F$. 最后得到燃油经济性水平的最优解 $x^{S,*} = (1 + F)(7a + 5\beta F - 5\beta p_B - 16F)/B$, 其中 $B = 16\eta k - 9F^2 - 18F - 9$, 并代入得到 q_G 、 q_{GE} 及 q_E 的最优产量. 证明见附录.

定理6 成本分担策略下, 燃油经济性水平 x 和燃油汽车产量 q_G 、新能源汽车产量 q_{GE} 及 q_E 关于成本效率系数 k 和成本分担系数 η 的变化规律为

1) 当积分价格 $0 < F < (7a - 5\beta p_B)/(16 - 5\beta)$ 时, $\frac{\partial x}{\partial k} < 0$, $\frac{\partial q_G}{\partial k} < 0$, $\frac{\partial q_{GE}}{\partial k} > 0$, $\frac{\partial q_E}{\partial k} > 0$; $\frac{\partial x}{\partial \eta} < 0$, $\frac{\partial q_G}{\partial \eta} < 0$, $\frac{\partial q_{GE}}{\partial \eta} > 0$, $\frac{\partial q_E}{\partial \eta} > 0$.

2) 当积分价格 $F > (7a - 5\beta p_B)/(16 - 5\beta)$, $\frac{\partial x}{\partial k} > 0$, $\frac{\partial q_G}{\partial k} > 0$, $\frac{\partial q_{GE}}{\partial k} < 0$, $\frac{\partial q_E}{\partial k} < 0$; $\frac{\partial x}{\partial \eta} > 0$, $\frac{\partial q_G}{\partial \eta} > 0$, $\frac{\partial q_{GE}}{\partial \eta} < 0$, $\frac{\partial q_E}{\partial \eta} < 0$.

通过比较定理4与定理6可知, 价格折扣与成本分担策略下积分价格 F 拥有相同的阈值, 且在穿越阈值前后, 燃油经济性水平 x 、燃油汽车产量 q_G 、新能源汽车产量 q_{GE} 及 q_E 关于成本效率系数 k 和成本分担系数 η 的单调性相同, 这是由于成本分担系数 η 直接作用于成本效率系数 k 进而影响GV的生产策略.

定理7 成本分担策略下, 成本分担系数的引入会导致定理2与定理3中的积分价格阈值向左发生位移, 即在市场规模 a 和电池价格 p_B 的影响下GV和EV 将会在更低的积分价格区间调节燃油汽车与新能源汽车的产量.

成本分担策略下, 当积分价格阈值穿越不同价格区间时, 燃油经济性水平 x 、燃油汽车产量 q_G 、新能源汽车产量 q_{GE} 和 q_E 关于市场规模 a 和电池价格 p_B 的单调性与定理2和定理3所描述一致, 故不再做单独阐述. 由定理7可知, 成本分担系数强化了积分价格对供应链成员的影响, 在特定价格折扣下, 成本分担系数 $\eta \in (0, 1)$ 的引入会使得积分价格阈值向左发生位移, 这说明成本分担策略下的积分阈值低于价格折扣策略. 这意味着当价格折扣保持不变时, 成本分担策略下供应链成员会在更低的价格区间调整经营策略. 这表明在价格折扣一定时成本分担策略下, EV将会在更低的积分价格区间开始降低新能源汽车产量, 因此EV将更倾向于选择价格折扣策略以实现自身利益最大化.

综上所述, 可以得到以下关键信息, 由于积分价格与成本分担比例同时作用于GV和EV, 当积分价格较低时, 积分价格对GV的影响低于成本分担比例, 成本分担比例的上升会引起GV利润的增加. 当积分价格较高时, 积分价格对GV的影响高于成本分担比例, 成本分担比例的增加会使得GV的利润下降. 此外, 价格折扣比例显著影响着EV的策略选择, 制定更有吸引力的价格折扣有助于吸引EV参与协同研发.

4 对比分析

本节将通过数值算例进一步验证分析前文结论, 针对部分相对复杂且难以进行直接比较的结果也会在本节中进行分析, 并得到相应的管理学启示. 对模型变量初始值进行赋值如下: 潜在市场需求 $a = 30$; 电池价格 $p_B = 6$; 成本效率系数 $k = 5$; 成本分担系数 $\eta = 0.5$; 价格折扣系数 $\beta = 0.6$; 单位积分价格(罚款金额) $F \in [0.1, 10]$.

4.1 新能源汽车制造商(EV)对比分析

结论1 当积分价格较低时, EV选择不合作策略的利润高于价格折扣策略, 即 $\pi_E^N > \pi_E^D$; 当积分价格较高时, EV 选择价格折扣策略的利润高于不合作策略, 即 $\pi_E^N < \pi_E^D$.

附录中证明了存在一个 $\hat{F} = f(k)$, 满足 $k = (F + 1)^2 - F(2F + 1)/a$ 且 $F \neq \sqrt{3k/2} - 1$, 不合作策略下EV的利润高于价格折扣策略; 否则至少存在一个价格折扣 $\hat{\beta} \in (0, 1)$ 使得EV采取价格折扣策略的利润高于不合作策略. 如图1所示, EV的利润曲线在不合作策略与价格折扣策略下存在一个交点, 使得两种策略下利润相等: 当 $F \leq \hat{F}$ 时, EV采取不合作策略的利润高于价格折扣策略, 这是由于积分价格较低时, GV会提高燃油经济性水平和燃油汽车产量, EV则可以通过销售更多积分来增加收益; 当 $F > \hat{F}$ 时, 供应链成员之间的合作可以有效降低积分和电池价格, 这不仅可以提高积分需求还可以帮助EV降低电池成本以提高利润水平, 因此价格折扣策略下EV的利润高于不合作策略. 通过上述分析可以得到相应的管理学见解, 积分价格较低时, 积分需求较大, EV应当选择不合作策略以实现利润最大化; 当积分价格较高时, EV 应当加强与GV间的合作以实现利润的增长.

结论2 若执行相同的价格折扣合同($\beta = 0.6$), EV在价格折扣策略下的利润始终高于成本分担策略, 即 $\pi_E^D > \pi_E^S$. 当执行不同的价格折扣合同, EV的利润与积分价格 F 相关, 当积分价格较低($F = 0.1$)时, 价格折扣策略下EV的利润高于成本分担策略, 即 $\pi_E^D > \pi_E^S$; 当积分价格较高($F = 10$)时, 成本分担策略下EV的利润高于价格折扣策略, 即 $\pi_E^S > \pi_E^D$.

当价格折扣策略和成本分担策略下采取同样的价格折扣合同, 即 β 不变时, EV采取价格折扣策略的利

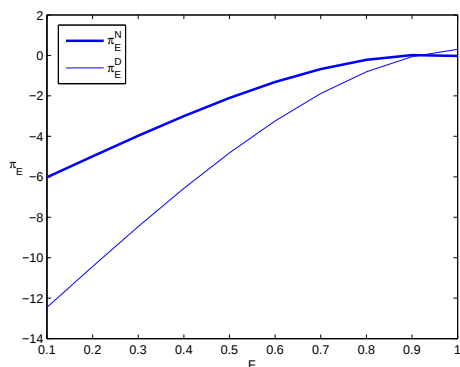


图1 不合作策略与价格折扣策略下EV的利润

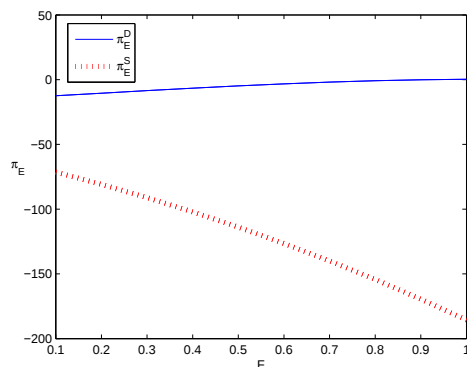
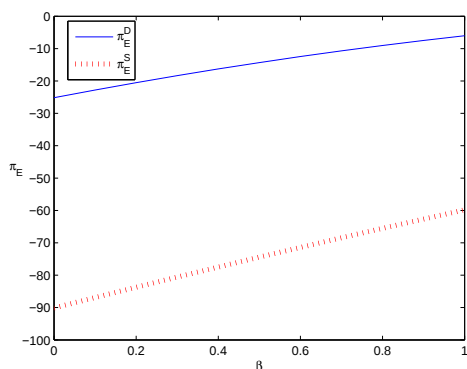
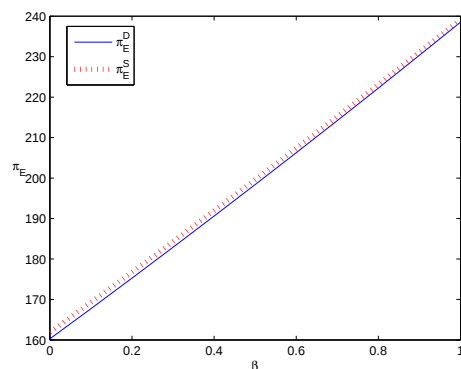
Fig. 1 The comparison of π_E in N and D strategies

图2 价格折扣策略与成本分担策略下EV的利润

Fig. 2 The comparison of π_E in D and S strategies

利润将始终高于成本分担策略,这符合直观准则,EV采取成本分担策略将承担比价格折扣策略更多的研发成本,如图2所示.图3和图4则分别展示了不同价格折扣下EV的利润变化,当积分价格较低($F = 0.1$)时,EV选择价格折扣策略的利润高于成本分担策略;当积分价格较高($F = 10$)时,EV的利润在成本分担策略下高于价格折扣策略.由图3可以看到,当积分价格达到一个较高水平($F = 10$)时,较低的价格折扣下EV选择成本分担策略的利润优势更明显,而随较高价格折扣则会削弱EV在成本分担策略的利润优势.综合以上分析可以看到,当积分价格较低时EV更倾向于选择价格折扣策略.当积分价格较高时,较低的价格折扣可以激励EV选择成本分担策略.

图3 价格折扣策略与成本分担策略下EV的利润($F = 0.1$)Fig. 3 The comparison of π_E in D and S strategies when $F = 0.1$ 图4 价格折扣策略与成本分担策略下EV的利润($F = 10$)Fig. 4 The comparison of π_E in D and S strategies when $F = 10$

4.2 燃油汽车制造商(GV)利润对比分析

结论3 在相同的价格折扣合同下($\beta = 0.6$),GV的利润与积分价格有关:当积分价格较低($F = 0.1$)时,GV利润大小关系为 $\pi_G^D < \pi_G^N < \pi_G^S$;当积分价格较高($F = 10$)时,GV利润大小关系为 $\pi_G^N < \pi_G^D < \pi_G^S$.

图5比较了在相同价格折扣合同($\beta = 0.6$)下,GV在三种策略下的利润高低.由于EV分担了部分研发成本,成本分担策略下GV的利润始终最高.当积分价格较低时($F = 0.2$),由于GV的电池销售收入高于积分购买成本,故不合作策略下GV的利润高于价格折扣策略.随着积分价格的上涨($F = 10$),积分购买成本逐渐高于电池销售收入,此时GV在价格折扣策略下的利润高于不合作策略.这说明积分价格的上涨使得GV有动机寻求与EV的合作以降低积分购买成本实现利润最大化.通过上述分析可以得到以下重要信息,如果执行相同的价格折扣合同,GV选择成本分担策略的收益始终优于不合作策略与价格折扣策略.这表明随着积分价格的上涨GV应当加强与EV的合作以实现利润最大化.

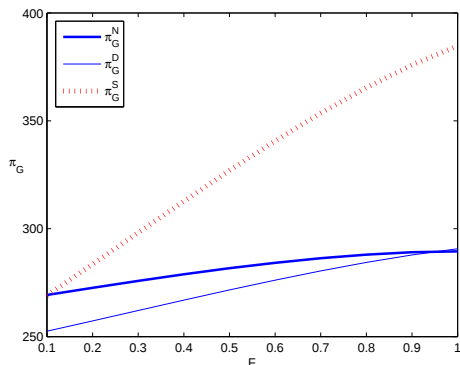


图5 三种策略下GV的利润

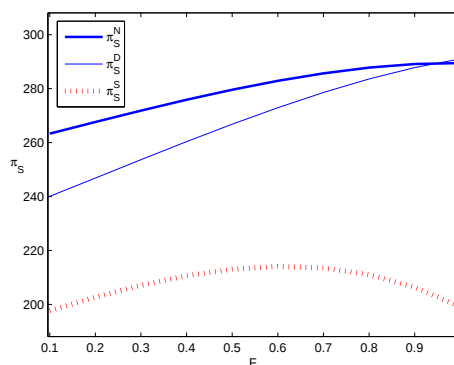
Fig. 5 The comparison of q_G in three strategies

图6 三种策略下供应链整体利润

Fig. 6 The comparison of π_S in three strategies

4.3 供应链系统利润比较

结论4 在相同的价格折扣合同($\beta = 0.6$)下, 供应链系统整体利润的大小关系为: 当积分价格较低时, $\pi_S^S < \pi_S^D < \pi_S^N$; 当积分价格较高时, $\pi_S^S < \pi_S^N < \pi_S^D$.

由图6可知, 在价格折扣($\beta = 0.6$)固定的情况下, 当积分价格较低, 不合作策略下供应链整体利润最高; 当积分价格较高, 价格折扣策略下供应链整体利润最高. 如前文所述, 不合作策略($\beta = 1$)为价格折扣策略的特殊情形, 这表明价格折扣与积分价格共同影响着供应链整体收益. 当积分价格较低时, 积分价格对供应链系统的影响大于价格折扣, 此时价格折扣所带来的供应链系统销售总收入的减少大于总成本的减少, 从而导致总利润的降低, 故不合作策略更利于提高供应链整体利润. 当积分价格较高时, 价格折扣对供应链系统的影响高于积分价格, 具体来说, 积分价格折扣所引起的供应链系统总成本的减少大于销售总收入的减少. 因此, 价格折扣策略更利于提高供应链整体利润.

综合上述分析可以得到以下管理启示, 不同合作模式下GV、EV与供应链整体的利润水平并不一致, 成本分担策略下虽然GV的利润总是最高, 但供应链整体利润则始终低于不合作策略与价格折扣策略. 这是由于供应链成员总是基于自身利益最大化为决策目标. 但随着积分价格的上涨, 供应链成员之间的合作对优化自身和供应链整体的绩效水平都是有益的, 若要实现供应链整体利润的最优, 应当选择价格折扣策略. 而为了实现供应链成员利润的最优则应当降低价格折扣以促进EV参与GV的协同研发.

5 结束语

文章提出了“双积分”政策下燃油经济性水平和燃油汽车产量的决策优化模型, 并分析了GV与EV的潜在合作模式. 通过博弈理论与数值仿真分析了不合作、价格折扣与成本分担策略模型下汽车制造商的策略选择与绩效水平. 研究发现, 积分价格显著影响着燃油经济性水平和燃油汽车产量, 当积分价格较低时, 随着成本效率系数、电池价格的下降和市场规模的扩大, GV更倾向于提高燃油经济性水平和燃油汽车产量以实现利润最大化目的; 当积分价格较高时, 情况则刚好相反. 而积分价格的阈值区间则会受到价格折扣的力度和成本分担比例的影响. 汽车制造商与供应链整体收益也与积分价格密切相关, 当积分价格较低时, GV选择成本分担策略收益更高, EV选择不合作策略收益更高, 而供应链整体收益则会在价格折扣策略下实现最大化. 当积分价格较高时, GV选择成本分担策略利润更高, 而EV与供应链系统的利润则在价格折扣策略下更高. 为了吸引EV选择成本分担策略, GV需要制定更低的价格折扣才能激励EV参与协同研发, 否则EV将始终倾向于选择价格折扣策略. 由以上结论可以看到, “双积分”政策的实施并不一定能够促使GV提高燃油经济性水平和降低燃油汽车产量, 更大的市场规模和更低的电池价格削弱了“双积分”政策的实施效果. 因此, 为了有效应对“双积分”政策, GV对外应当积极拓展市场, 对内应当提升技术创新水平以降低电池

研发成本.而为了有效应对积分价格上涨所带来的成本增加, GV应当以更低的价格折扣吸引EV参与协同研发.此外,将积分价格控制在一个合理范围内可以平滑供应链的产出,实现汽车供应链的安全降碳.本文的结论是在积分供给无法满足需求且积分价格相对较低的条件下得出,未来的研究可以延伸至积分供给可以满足需求以及积分价格进一步上涨的情况.此外,探讨EV自主研发电池可能会有更为有趣的发现,其与GV的竞争将会发生结构性变化,潜在的合作模式是未来研究的方向.

参考文献:

- [1] Niu B Z, Yu X H, Shen Z F. Structure adjustment of automobile supply chain facing low-carbon emission standard. *Resources, Conservation and Recycling*, 2021, 171: 105629.
- [2] Yu Y, Zhou D Q, Zha D L, et al. Joint optimization of charging facility investment and pricing in automobile retail supply chain and coordination. *Computers & Industrial Engineering*, 2021, 156: 107296.
- [3] 贾俊秀, 赵学科. 政府补贴下新能源汽车供应链电池续航能力及回收策略. *系统工程学报*, 2022, 37(3): 330–343.
Jia J X, Zhao X K. Battery endurance and recycling strategies of a new energy vehicle supply chain under government subsidies. *Journal of Systems Engineering*, 2022, 37(3): 330–343. (in Chinese)
- [4] Nakamichi K, Hanaoka S, Kawahara Y. Estimation of cost and CO₂ emissions with a sustainable cross-border supply chain in the automobile industry: A case study of Thailand and neighboring countries. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2016, 43: 158–168.
- [5] 易余胤, 陈健. 汽车供应链的以旧换新最优定价研究. *系统工程理论与实践*, 2022, 42(4): 1072–1085.
Yi Y Y, Chen J. Optimizing prices in trade-in strategies for vehicle supply chain. *Systems Engineering: Theory & Practice*, 2022, 42(4): 1072–1085.
- [6] Zhu X X, Liu K, Liu J, et al. Is government R&D subsidy good for BEV supply chain? The challenge from downstream competition. *Computers & Industrial Engineering*, 2022, 165: 107951.
- [7] Rasti-Barzoki M, Moon I. A game theoretic approach for analyzing electric and gasoline-based vehicles' competition in a supply chain under government sustainable strategies: A case study of South Korea. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, 146: 111139.
- [8] 倪晓, 李英. 租赁模式下的物流企业电动车辆替换决策. *系统工程学报*, 2020, 35(1): 13–23.
Ni X, Li Y. Replacement decisions of electric vehicles in logistics enterprises under rental model. *Journal of Systems Engineering*, 2020, 35(1): 13–23. (in Chinese)
- [9] 姚锋敏, 闫颖洛, 滕春贤. 考虑政府补贴及CSR投入的闭环供应链运作协调. *系统工程学报*, 2021, 36(6): 817–832.
Yao F M, Yan Y L, Teng C X. Operation coordination of closed-loop supply chain considering government subsidies and CSR input. *Journal of Systems Engineering*, 2021, 36(6): 817–832. (in Chinese)
- [10] 杨玉香, 李剑锋, 金芳芳, 等. 供应链网络均衡下碳税与碳交易政策比较. *系统工程学报*, 2022, 37(2): 178–193.
Yang Y X, Li J F, Jin F F, et al. Comparative study of carbon tax and carbon cap-and-trade policies under supply chain network equilibrium. *Journal of Systems Engineering*, 2022, 37(2): 178–193. (in Chinese)
- [11] 檀哲, 缪朝炜, 许舒婷, 等. 统一碳税和差异化碳税下的再制造绩效评价. *系统工程学报*, 2021, 36(1): 102–119.
Tan Z, Miao Z W, Xu S T, et al. Performance evaluation of remanufacturing strategies under uniform carbon tax and discriminated carbon tax. *Journal of Systems Engineering*, 2021, 36(1): 102–119. (in Chinese)
- [12] 卢超, 王倩倩, 赵梦园, 等. “双积分”政策下汽车制造商竞争定价与减排策略研究. *中国管理科学*, 2022, 30(1): 64–76.
Lu C, Wang Q Q, Zhao M Y, et al. A study on competitive pricing and emission reduction strategies of automobile manufacturers under the “double credit” policy. *Chinese Journal of Management Science*, 2022, 30(1): 64–76. (in Chinese)
- [13] 于晓辉, 刘玉博, 邹正兴, 等. “双积分”制度下新能源汽车双合作制造的博弈分析. *经济数学*, 2019, 36(4): 46–52.
Yu X H, Liu Y B, Zou Z X, et al. New energy vehicle co-production analysis under double integration system based on game theory. *Journal of Quantitative Economics*, 2019, 36(4): 46–52. (in Chinese)
- [14] Ma H C, Lou G X, Fan T J, et al. Conventional automotive supply chains under China's dual-credit policy: Fuel economy, production and coordination. *Energy Policy*, 2021, 151: 112166.
- [15] Cheng Y W, Fan T J. Production competition strategies for an FV automaker and a competitive NEV automaker under the dual-credit policy. *Omega*, 2021, 103: 102391.

- [16] Lou G X, Ma H C, Fan T J, et al. Impact of the dual-credit policy on improvements in fuel economy and the production of internal combustion engine vehicles. *Resources, Conservation and Recycling*, 2020, 156: 104712.
- [17] Yu Y, Zhou D Q, Zha D L, et al. Optimal production and pricing strategies in auto supply chain when dual credit policy is substituted for subsidy policy. *Energy*, 2021, 226: 120369.
- [18] 王 阳. 双积分政策下考虑市场进入方式的汽车供应链生产研发策略研究. *软科学*, 2021, 35(9): 28–36.
Wang Y. Research on production R&D strategy of automobile supply chain considering market entry mode under dual-credit policy. *Soft Science*, 2021, 35(9): 28–36. (in Chinese)
- [19] Sid M N, Becherif M, Aboubou A, et al. Power control techniques for fuel cell hybrid electric vehicles: A comparative study. *Computers & Electrical Engineering*, 2021, 97: 107602.
- [20] Trollo P D, Giorgio P D, Genovese M, et al. A hybrid power-unit based on a passive fuel cell/battery system for lightweight vehicles. *Applied Energy*, 2020, 279: 115734.
- [21] Nelson P A, Ahmed S, Gallagher K G, et al. Modeling the performance and cost of lithium-ion batteries for electric-drive vehicles, Third Edition. In: USDOE Office of Energy Efficiency and Renewable Energy(EERE), Vehicle Technologies Office(EE-3V). Argonne National Lab, 2019.
- [22] Zhe L, Song J Y, Kubal J, et al. Comparing total cost of ownership of battery electric vehicles and internal combustion engine vehicles. *Energy Policy*, 2021, 158: 112564.
- [23] 工业和信息化部. 关于修改《企业平均油耗与新能源汽车信用并行管理办法》的决定, 2020.
MIIT. Decision on amending the parallel management method for corporate average fuel consumption and new energy vehicles credits, 2020. (in Chinese)
- [24] 工业和信息化部. 关于2020年度乘用车企业平均燃料消耗量和新能源汽车积分管理有关事项的通知, 2021.
MIIT. Announcement on the corporate average fuel consumption and new energy vehicles credits of passenger vehicle companies in 2020, 2021. (in Chinese)
- [25] 工业和信息化部. 关于修改《乘用车企业平均燃料消耗量与新能源汽车积分并行管理办法》的决定, 2020.
MIIT. Decision on amending the parallel management method for corporate average fuel consumption and new energy vehicles credits, 2020. (in Chinese)
- [26] 工业和信息化部. 乘用车企业平均燃料消耗量与新能源汽车积分并行管理实施情况年度报告(2021), 2022.
MIIT. Annual report on the implementation of parallel management of average fuel consumption and new energy vehicle points of passenger vehicle enterprises (2021), 2022. (in Chinese)
- [27] Li Y M, Zhang Q, Liu B Y, et al. Substitution effect of newenergy vehicle credit program and corporate average fuel consumption regulation for green-car subsidy. *Energy*, 2018, 152: 223–236.
- [28] Yu X N, Lan Y F, Zhao R Q. Strategic green technology innovation in a two-stage alliance: Vertical collaboration or co-development? *Omega*, 2021, 98: 102116.
- [29] Chen P P, Zhao R Q, Lan Y F. E-commerce platform canvassing and service upgrade in an ocean shipping supply chain. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2022, 158: 102597.
- [30] Subramanian R, Gupta S, Talbot B. Compliance strategies under permits for emission. *Production and Operations Management*, 2007, 16(6): 763–779.
- [31] Ghosh D, Shah J. Supply chain analysis under green sensitive consumer demand and cost sharing contract. *International Journal of Production Economics*, 2015, 164: 319–329.
- [32] 工业和信息化部装备工业发展中心. 乘用车企业平均燃料消耗量与新能源汽车积分并行管理实施情况年度报告(2021), 2022.
MIIT. Annual report on the implementation of parallel management of average fuel consumption and new energy vehicle points of passenger vehicle enterprises (2021), 2022. (in Chinese)

作者简介:

胡文婕(1981—), 女, 重庆北碚人, 讲师, 硕士生导师, 研究方向: 供应链管理, Email: hatty_1981@126.com;

马成霖(1996—), 男, 重庆黔江人, 博士生, 研究方向: 供应链管理, 博弈论, Email: charlie_ma@tju.edu.cn;

赵 骅(1964—), 男, 重庆万州人, 教授, 博士生导师, 研究方向: 战略管理、供应链管理, Email: zhaohua@cqu.edu.cn;

董 滔(1981—), 男, 重庆北碚人, 教授, 博士生导师, 研究方向: 供应链复杂性研究, Email: david_312@126.com.

附录

定理1的证明 根据逆向归纳法, 首先解决GV和EV的关于 q_{GE} 和 q_E 的最优问题^[29-31], 将 $p_G = a - q_G + x$ 和 $p_E = a - (q_G + q_{GE}) - q_E$ 代入GV和EV的利润函数可得

$$\pi_G^N = (a - q_G + x)q_G + [a - q_G - q_{GE} - q_E]q_{GE} + p_B q_E - \frac{1}{2}kx^2 + F[(x - 1)q_G + q_{GE}], \quad (7)$$

$$\pi_E^N = [a - q_G - q_{GE} - q_E - p_B]q_E + Fq_E. \quad (8)$$

根据一阶条件分别对 q_{GE} 和 q_E 求偏导

$$\frac{\partial \pi_G^N}{\partial q_{GE}} = a - q_G - 2q_{GE} - q_E + F = 0, \quad (9)$$

$$\frac{\partial \pi_E^N}{\partial q_E} = a - q_G - q_{GE} - 2q_E - p_B = 0. \quad (10)$$

求解得到 $q_{GE} = \frac{a - q_G + F + p_B}{3}$, $q_E = \frac{a - q_G + F - 2p_B}{3}$.

然后, 同时将所得 q_{GE} 和 q_E 代入GV的利润函数, 并对 q_G 求导

$$\frac{\partial \pi_G^N}{\partial q_G} = \frac{7a + F - 16q_G - 5p_B}{9} + F(x - \frac{4}{3}) + x. \quad (11)$$

通过计算可得 $q_G = \frac{7a + 9x - 11F - 5p_B + 9Fx}{16}$.

最后, 将 q_G 重新代入GV的利润函数, 对 x 求导解得 $x^{N,*} = (1 + F)(7a - 11F - 5p_B)/A$, 其中 $A = 16k - 9F^2 - 18F - 9$.

再重新代入计算可得

$$q_G^{N,*} = k(7a - 11F - 5p_B)/A,$$

$$q_{GE}^{N,*} = [(7k - 3)p_B + 3a(k - 1) + 3(3k - 2a - 2p_B - 1)F - 3(2 + a + p_B)F^2 - 3F^3]/A,$$

$$q_E^{N,*} = [3(2 - 3k)p_B + 3a(k - 1) + 3(4p_B + 3k - 2a - 1)F + 3(2p_B - a - 2)F^2 - 3F^3]/A,$$

$$p_G^{N,*} = [(11k - 11a - 5p_B - 11)F - (9a + 11)F^2 + a(9k - 2) + 5p_B(k - 1)]/A,$$

$$p_E^{N,*} = [6F^3 + 3(4 - a - p_B)F^2 + (6 - 6a - 7k - 6p_B)F + (7k - 3)p_B + 3a(k - 1)]/A,$$

$$\pi_G^{N,*} = \{[10p_B^2 - 10(a + 2)p_B - 2a^2 - 8a + 17k - 2]F^2 - 2F^4 - 2(2a + 5p_B + 2)F^3 + [20p_B^2 + 10p_B(3k - 2a - 1) - 2a(2a + 5k + 2)]F + 5(2 - 3k)p_B^2 + 10ap_B(k - 1) + (9k - 2)a^2\}/(2A),$$

$$\pi_E^{N,*} = 9[(2p_B - a - 2)F^2 - F^3 + (4p_B - 2a + 3k - 1)F + 3(2 - 3k)p_B + a(k - 1)]^2/A^2.$$

接下来, 求关于 k 的一阶偏导: $\partial x/\partial k = -16(7a - 11F - 5p_B)(1 + F)/A^2$, $\partial q_G/\partial k = -9(7a - 11F - 5p_B)(1 + F)^2/A^2$, $\partial q_{GE}/\partial k = 3(7a - 11F - 5p_B)(1 + F)^2/A^2$, $\partial q_E/\partial k = 3(7a - 11F - 5p_B)(1 + F)^2/A^2$. 可知1) 当 $F < (7a - 5p_B)/11$, $\frac{\partial x}{\partial k} < 0$, $\frac{\partial q_G}{\partial k} < 0$, $\frac{\partial q_{GE}}{\partial k} > 0$, $\frac{\partial q_E}{\partial k} > 0$; 2) 当 $F > (7a - 5p_B)/11$, $\frac{\partial x}{\partial k} > 0$, $\frac{\partial q_G}{\partial k} > 0$, $\frac{\partial q_{GE}}{\partial k} < 0$, $\frac{\partial q_E}{\partial k} < 0$.

可得到以下结论: 1) 当积分价格 $F < (7a - 5p_B)/11$, 燃油经济性水平 x 和燃油汽车产量 q_G 关于成本系数 k 单减, 新能源汽车产量 q_{GE} 及 q_E 关于成本系数 k 单增; 2) 当积分价格 $F \geq (7a - 5p_B)/11$, 燃油经济性水平 x 和燃油汽车产量 q_G 关于成本系数 k 单增, 新能源汽车产量 q_{GE} 及 q_E 关于成本系数 k 单减. 证毕.

定理2的证明 对定理1中所得各均衡解分别关于 a 求一阶偏导: $\partial x/\partial a = 7(1 + F)/A$, $\partial q_G/\partial a = 7k/A$, $\partial q_{GE}/\partial a = 3(k - F^2 - 2F - 1)/A$, $\partial q_E/\partial a = 3(k - F^2 - 2F - 1)/A$. 可知: 1) 当 $0 < F < \sqrt{k} - 1$ 时, $\frac{\partial x}{\partial a} > 0$, $\frac{\partial q_G}{\partial a} > 0$, $\frac{\partial q_{GE}}{\partial a} > 0$, $\frac{\partial q_E}{\partial a} > 0$; 2) 当 $\sqrt{k} - 1 < F < 4\sqrt{k}/3 - 1$ 时, $\frac{\partial x}{\partial a} > 0$, $\frac{\partial q_G}{\partial a} > 0$, $\frac{\partial q_{GE}}{\partial a} < 0$, $\frac{\partial q_E}{\partial a} < 0$; 3) 当 $F > 4\sqrt{k}/3 - 1$ 时, $\frac{\partial x}{\partial a} < 0$, $\frac{\partial q_G}{\partial a} < 0$, $\frac{\partial q_{GE}}{\partial a} > 0$, $\frac{\partial q_E}{\partial a} > 0$.

由上述结果可知: 1) 当积分价格 $0 < F < \sqrt{k} - 1$ 时, 燃油经济性水平 x 、燃油汽车产量 q_G 、新能源汽车产量 q_{GE} 及 q_E 关于市场规模 a 单增; 当积分价格 $\sqrt{k} - 1 < F < 4\sqrt{k}/3 - 1$ 时, 燃油经济性水平 x 和燃油汽车产量 q_G 关于市场规模 a 单增, 新能源汽车产量 q_{GE} 及 q_E 关于市场规模 a 单减; 2) 当积分价格 $F > 4\sqrt{k}/3 - 1$ 时, 燃油经济性水平 x 、燃油汽车产量 q_G 关于市场规模 a 单减, 新能源汽车产量 q_{GE} 及 q_E 关于市场规模 a 单增.

定理3的证明 对定理1中所得各均衡解分别关于 p_B 求一阶偏导: $\partial x/\partial p_B = 5(1+F)/A$, $\partial q_G/\partial p_B = 5k/A$, $\partial q_{GE}/\partial p_B = (7k - 3F^2 - 6F - 3)/A$, $\partial q_E/\partial p_B = 3(2F^2 - 3k + 4F + 2)/A$. 可知: 1) 当 $0 < F < \sqrt{6k}/2 - 1$ 时, $\frac{\partial x}{\partial p_B} < 0$, $\frac{\partial q_G}{\partial p_B} < 0$, $\frac{\partial q_E}{\partial p_B} < 0$, $\frac{\partial q_{GE}}{\partial p_B} > 0$; 2) 当 $\sqrt{6k}/2 - 1 < F < 4\sqrt{k}/3 - 1$ 时, $\frac{\partial x}{\partial p_B} < 0$, $\frac{\partial q_G}{\partial p_B} < 0$, $\frac{\partial q_{GE}}{\partial p_B} > 0$, $\frac{\partial q_E}{\partial p_B} > 0$; 3) 当 $4\sqrt{k}/3 - 1 < F < \sqrt{21k}/3 - 1$ 时, $\frac{\partial x}{\partial p_B} > 0$, $\frac{\partial q_G}{\partial p_B} > 0$, $\frac{\partial q_{GE}}{\partial p_B} < 0$, $\frac{\partial q_E}{\partial p_B} < 0$; 4) 当 $F > \sqrt{21k}/3 - 1$ 时, $\frac{\partial x}{\partial p_B} > 0$, $\frac{\partial q_G}{\partial p_B} > 0$, $\frac{\partial q_{GE}}{\partial p_B} < 0$, $\frac{\partial q_E}{\partial p_B} > 0$.

由上述结果可得到以下结论: 1) 当积分价格 $0 < F < \sqrt{6k}/2 - 1$ 时, 燃油经济性水平 x 、燃油汽车产量 q_G 及新能源汽车产量 q_E 关于电池价格 p_B 单减, 新能源汽车产量 q_{GE} 关于电池价格 p_B 单增; 2) 当积分价格 $\sqrt{6k}/2 - 1 < F < 4\sqrt{k}/3 - 1$ 时, 燃油经济性水平 x 、燃油汽车产量 q_G 及新能源汽车产量 q_E 关于电池价格 p_B 单减, 新能源汽车产量 q_{GE} 和 q_E 关于电池价格 p_B 单增; 3) 当积分价格 $4\sqrt{k}/3 - 1 < F < \sqrt{21k}/3 - 1$ 时, 燃油经济性水平 x 、燃油汽车产量 q_G 及新能源汽车产量 q_E 关于电池价格 p_B 单增, 新能源汽车产量 q_{GE} 和 q_E 关于电池价格 p_B 单减; 4) 当积分价格 $F > \sqrt{21k}/3 - 1$ 时, 燃油经济性水平 x 、燃油汽车产量 q_G 及新能源汽车产量 q_{GE} 关于电池价格 p_B 单增, 新能源汽车产量 q_E 关于电池价格 p_B 单减. 证毕.

定理4的证明 根据逆向归纳法, 首先解决GV和EV的关于 q_{GE} 和 q_E 最优问题, 将 $p_G = a - q_G + x$ 、 $p_E = a - (q_G + q_{GE}) - q_E$ 和 $p_c = F$ 代入GV和EV的利润函数可得

$$\pi_G^D = (a - q_G + x)q_G + [a - q_G - q_{GE} - q_E]q_{GE} + \beta p_B q_E - \frac{1}{2}kx^2 + \beta F[(x - 1)q_G + q_{GE} + q_E] - \beta F q_E, \quad (12)$$

$$\pi_E^D = (a - q_G - q_{GE} - q_E - \beta p_B)q_E - \beta F q_E. \quad (13)$$

根据一阶条件, 分别对 q_{GE} 和 q_E 求导,

$$\frac{\partial \pi_G^D}{\partial q_{GE}} = F + a - q_G - 2q_{GE} - q_E = 0, \quad (14)$$

$$\frac{\partial \pi_E^D}{\partial q_E} = a + \beta F - q_G - q_{GE} - 2q_E - \beta p_B = 0. \quad (15)$$

$$\text{得到 } q_{GE} = \frac{a - q_G + 2F + \beta(p_B - F)}{3}, \quad q_E = \frac{a - q_G - F + 2\beta(F - p_B)}{3}.$$

然后, 同时将所得 q_{GE} 和 q_E 代入GV的利润函数, 并对 q_G 求导

$$\frac{\partial \pi_G^D}{\partial q_G} = \frac{7a + 4\beta F - 16q_G - 5\beta p_B}{9} + \beta F(x - \frac{5}{3}) + x. \quad (16)$$

$$\text{通过计算可得 } q_G = \frac{7a + 9x + 5\beta F - 5\beta p_B + 9Fx}{16} - F.$$

最后, 将 q_G 重新代入GV利润函数, 对 x 求导解得 $x^{D,*} = (1 + F)(7a + 5\beta F - 5\beta p_B - 16F)/A$, 其中 A 同定理1的证明.

再重新代入计算可得

$$q_G^{D,*} = k(7a - 5\beta p_B + 5\beta F - 16F)/A,$$

$$q_{GE}^{D,*} = \{(3\beta - 6)F^3 + [3(2 - p_B)\beta - 3a - 12]F^2 + [(3 - 7k - 6p_B)\beta - 6a + 16k - 6]F + \beta p_B(7k - 3) + 3a(k - 1)\}/A,$$

$$q_E^{D,*} = \{3(1 - 2\beta)F^3 + [6(p_B - 2)\beta - 3a + 6]F^2 + [3(3k + 4p_B - 2)\beta - 6a + 3]F + 6(2 - 3k)\beta p_B + 3a(k - 1)\}/A,$$

$$p_G^{D,*} = \{(5\beta - 16 - 9a)F^2 + [5(1 - k - p_B)\beta - 11a + 16k - 16]F + 5p_B(k - 1)\beta + 9ak - 2a\}/A,$$

$$p_E^{D,*} = \{(5\beta - 16 - 9a)F^2 + [5(1 - k - p_B)\beta - 11a + 16k - 16]F + 5p_B(k - 1)\beta + 9ak - 2a\}/A,$$

$$\pi_G^{D,*} = \{2(5\beta^2 - 5\beta - 1)F^4 + (20(1 - p_B)\beta^2 + 10(a + p_B - 2)\beta - 14a - 4)F^3 + [5(2p_B^2 - 3k - 8p_B + 2)\beta^2 + 10(2p_B - ap_B + 2a - 1)\beta - 2a^2 - 28a + 32k - 2]F^2 + [10(2p_B + 3k - 2)\beta^2 p_B + (10p_B - 20a - 10ak + 10a)\beta - 4a^2 - 14a]F - 15p_B^2(k - 2/3)\beta^2 + 10ap_B(k - 1)\beta + 9(k - 2/9)a^2\}/(2A),$$

$$\pi_E^{D,*} = 9\{(1 - 2\beta)F^3 + [(2p_B - 4)\beta - a + 2]F^2 + [(3k + 4p_B - 2)\beta - 2a + 1]F + (2 - 3k)\beta p_B + a(k - 1)\}^2/A^2.$$

各均衡解分别关于 k 求一阶偏导: $\partial x/\partial k = -16(1 + F)(5\beta F - 5\beta p_B + 7a - 16F)/A^2$, $\partial q_G/\partial k = -9[(5\beta F - 16F - 5\beta p_B + 7a)(1 + F)^2/A^2]$, $\partial q_{GE}/\partial k = 3(5\beta F - 16F - 5\beta p_B + 7a)(1 + F)^2/A^2$, $\partial q_E/\partial k = 3(5\beta F - 16F - 5\beta p_B + 7a)(1 + F)^2/A^2$. 可得: 1) 当 $0 < F < (7a - 5\beta p_B)/(16 - 5\beta)$, $\frac{\partial x}{\partial k} < 0$, $\frac{\partial q_G}{\partial k} < 0$, $\frac{\partial q_{GE}}{\partial k} > 0$, $\frac{\partial q_E}{\partial k} > 0$; 2) 当 $F > (7a - 5\beta p_B)/(16 - 5\beta)$, $\frac{\partial x}{\partial k} > 0$, $\frac{\partial q_G}{\partial k} > 0$, $\frac{\partial q_{GE}}{\partial k} < 0$, $\frac{\partial q_E}{\partial k} < 0$.

由上述结果可得以下结论: 1) 当积分价格 $0 < F < (7a - 5\beta p_B)/(16 - 5\beta)$, 燃油经济性水平 x 和燃油汽车产量 q_G 关于成本系数 k 单减, 新能源汽车产量 q_{GE} 和 q_E 关于成本系数 k 单增; 2) 当积分价格 $F > (7a - 5\beta p_B)/(16 - 5\beta)$, 燃油经济性水平 x 和燃油汽车产量 q_G 关于成本系数 k 单增, 新能源汽车产量 q_{GE} 和 q_E 关于成本系数 k 单减。证毕。

推论1的证明 对定理4中所得的积分价格阈值 $\lambda = (7a - 5\beta p_B)/(16 - 5\beta)$ 关于价格折扣系数 β 求一阶偏导, 可得 $\frac{\partial \lambda}{\partial \beta} = 5(7a - 16p_B)/(16 - 5\beta)^2$ 。通过分析得到积分价格阈值 λ 关于价格折扣系数 β 的变化规律为: 1) 当 $p_B > 7a/16$ 时, 积分价格阈值 λ 关于价格折扣系数 β 单减, 即 $\frac{\partial \lambda}{\partial \beta} < 0$; 2) 当 $p_B < 7a/16$ 时, 积分价格阈值 λ 关于价格折扣系数 β 单增, 即 $\frac{\partial \lambda}{\partial \beta} > 0$ 。证毕。

定理5的证明 对定理4中各均衡解分别关于 β 和 p_B 求一阶偏导: $\partial x / \partial \beta = 5(1 + F)(F - p_B)/A$, $\partial q_G / \partial \beta = 5(1 + F)(F - p_B)/(16k - 9F^2 - 18F - 9)/A$, $\partial q_{GE} / \partial \beta = -(F - p_B)(7k - 3F^2 - 6F - 3)/A$, $\partial q_E / \partial \beta = 3(F - p_B)(3k - 2F^2 - 4F - 2)/A$; $\partial x / \partial p_B = 5\beta(1 + F)/A$, $\partial q_G / \partial p_B = 5\beta(1 + F)/A$, $\partial q_{GE} / \partial p_B = \beta(7k - 3F^2 - 6F - 3)/A$, $\partial q_E / \partial p_B = -3\beta(3k - 2F^2 - 4F - 2)/A$ 。可得: 1) 当 $F < p_B$ 时, (a) 若 $0 < F < \sqrt{6k}/2 - 1$, $\frac{\partial x}{\partial \beta} < 0$, $\frac{\partial q_G}{\partial \beta} < 0$, $\frac{\partial q_{GE}}{\partial \beta} > 0$, $\frac{\partial q_E}{\partial p_B} < 0$; (b) 若 $\sqrt{6k}/2 - 1 < F < 4\sqrt{k}/3 - 1$, $\frac{\partial x}{\partial \beta} < 0$, $\frac{\partial q_G}{\partial \beta} < 0$, $\frac{\partial q_{GE}}{\partial \beta} > 0$, $\frac{\partial q_E}{\partial p_B} > 0$; (c) 若 $4\sqrt{k}/3 - 1 < F < \sqrt{21k}/3 - 1$, $\frac{\partial x}{\partial \beta} > 0$, $\frac{\partial q_G}{\partial \beta} > 0$, $\frac{\partial q_{GE}}{\partial \beta} < 0$, $\frac{\partial q_E}{\partial p_B} < 0$; (d) 若 $\sqrt{21k}/3 - 1 < F$, $\frac{\partial x}{\partial \beta} > 0$, $\frac{\partial q_G}{\partial \beta} > 0$, $\frac{\partial q_{GE}}{\partial \beta} < 0$, $\frac{\partial q_E}{\partial p_B} < 0$ 。

2) 当积分价格 $F > p_B$ 时, (a) 若 $0 < F < \sqrt{6k}/2 - 1$, $\frac{\partial x}{\partial \beta} > 0$, $\frac{\partial q_G}{\partial \beta} > 0$, $\frac{\partial q_{GE}}{\partial \beta} < 0$, $\frac{\partial q_E}{\partial p_B} > 0$; (b) 若 $\sqrt{6k}/2 - 1 < F < 4\sqrt{k}/3 - 1$, $\frac{\partial x}{\partial \beta} > 0$, $\frac{\partial q_G}{\partial \beta} > 0$, $\frac{\partial q_{GE}}{\partial \beta} < 0$, $\frac{\partial q_E}{\partial p_B} < 0$; (c) 若 $4\sqrt{k}/3 - 1 < F < \sqrt{21k}/3 - 1$, $\frac{\partial x}{\partial \beta} < 0$, $\frac{\partial q_G}{\partial \beta} < 0$, $\frac{\partial q_{GE}}{\partial \beta} > 0$, $\frac{\partial q_E}{\partial p_B} > 0$; (d) 若 $\sqrt{21k}/3 - 1 < F$, $\frac{\partial x}{\partial \beta} < 0$, $\frac{\partial q_G}{\partial \beta} < 0$, $\frac{\partial q_{GE}}{\partial \beta} < 0$, $\frac{\partial q_E}{\partial p_B} > 0$ 。

由上述结果可得以下结论: 1) 当积分价格 $F < p_B$ 时, (a) 若积分价格 $0 < F < \sqrt{6k}/2 - 1$, 燃油经济性水平 x 、燃油汽车产量 q_G 和新能源汽车产量 q_E 关于价格折扣系数 β 单减, 新能源汽车产量 q_{GE} 关于价格折扣 β 单增; (b) 若积分价格 $\sqrt{6k}/2 - 1 < F < 4\sqrt{k}/3 - 1$, 燃油经济性水平 x 和燃油汽车产量 q_G 关于价格折扣 β 单增, 新能源汽车产量 q_{GE} 和 q_E 关于价格折扣系数 β 单减; (c) 若积分价格 $4\sqrt{k}/3 - 1 < F < \sqrt{21k}/3 - 1$, 燃油经济性水平 x 和燃油汽车产量 q_G 关于价格折扣系数 β 单增, 新能源汽车产量 q_{GE} 和 q_E 关于价格折扣系数 β 单减; (d) 若积分价格 $\sqrt{21k}/3 - 1 < F$, 燃油经济性水平 x 、燃油汽车产量 q_G 和新能源汽车产量 q_{GE} 关于价格折扣系数 β 单增, 新能源汽车产量 q_E 关于价格折扣系数 β 单减。

2) 当积分价格 $F > p_B$ 时, (a) 若积分价格 $0 < F < \sqrt{6k}/2 - 1$, 燃油经济性水平 x 、燃油汽车产量 q_G 和新能源汽车产量 q_E 关于价格折扣系数 β 单增, 新能源汽车产量 q_{GE} 关于价格折扣系数 β 单减; (b) 若积分价格 $\sqrt{6k}/2 - 1 < F < 4\sqrt{k}/3 - 1$, 燃油经济性水平 x 和燃油汽车产量 q_G 关于价格折扣系数 β 单增, 新能源汽车产量 q_{GE} 和 q_E 关于价格折扣系数 β 单减; (c) 若积分价格 $4\sqrt{k}/3 - 1 < F < \sqrt{21k}/3 - 1$, 燃油经济性水平 x 和燃油汽车产量 q_G 关于价格折扣系数 β 单减, 新能源汽车产量 q_{GE} 和 q_E 关于价格折扣系数 β 单增; (d) 若积分价格 $\sqrt{21k}/3 - 1 < F$, 燃油经济性水平 x 、燃油汽车产量 q_G 和新能源汽车产量 q_{GE} 关于价格折扣系数 β 单减, 新能源汽车产量 q_E 关于价格折扣系数 β 单增。证毕。

定理6的证明 根据逆向归纳法, 首先解决GV和EV的关于 q_{GE} 和 q_E 的最优问题, 将 $p_G = a - q_G + x$ 、 $p_E = a - (q_G + q_{GE}) - q_E$ 和 $p_C = F$ 代入GV和EV的利润函数可得

$$\pi_G^S = (a - q_G + x)q_G + [a - q_G - q_{GE} - q_E]q_{GE} + \beta p_B q_E - \frac{1}{2}kx^2 + \beta F[(x - 1)q_G + q_{GE}], \quad (17)$$

$$\pi_E^S = [a - q_G - q_{GE} - q_E - \beta p_B]q_E - \beta F[(x - 1)q_G + q_{GE}] + F[(x - 1)q_G + q_{GE} + q_E]. \quad (18)$$

根据一阶条件, 分别对 q_{GE} 和 q_E 求导

$$\frac{\partial \pi_G^S}{\partial q_{GE}} = F + a - q_G - 2q_{GE} - q_E = 0, \quad (19)$$

$$\frac{\partial \pi_E^S}{\partial q_E} = a + \beta F - q_G - q_{GE} - 2q_E - \beta p_B = 0. \quad (20)$$

得到 $q_{GE} = \frac{a - q_G + 2F - \beta F + p_B}{3}$, $q_E = \frac{a - q_G - F + 2\beta(F - p_B)}{3}$ 。

然后, 同时将所得 q_{GE} 和 q_E 代入GV的利润函数, 并对 q_G 求导

$$\frac{\partial \pi_G^S}{\partial q_G} = \frac{7a + 5\beta F - 16q_G - 5\beta p_B}{9} + F(x - \frac{5}{3}) + x. \quad (21)$$

通过计算可得 $q_G = \frac{7a+9x+5\beta p_B-5\beta F+9Fx}{16} - F$.

最后, 将 q_G 重新代入GV利润函数, 对 x 求导解得 $x^{S,*} = (1+F)(7a+5\beta F-5\beta p_B-16F)/B$, 其中, $B = 16\eta k - 9F^2 - 18F - 9$.

再重新代入计算可得

$$q_G^{S,*} = \eta k(7a+5\beta F-5\beta p_B-16F)/B,$$

$$q_{GE}^{S,*} = \{3F^3(\beta-2) + 3F^2[\beta(2-p_B)-a-4] + F[\beta(3-7\eta k-6p_B) + 16\eta k - 6a - 6] + \beta(7\eta k p_B - 3p_B) + 3a\eta k - 3a\}/B,$$

$$q_E^{S,*} = \{3F^3(1-2\beta) + 3F^2[2\beta(1-2p_B)-a+2] + 3F[\beta(3\eta k+4p_B-2)-2a+1] + \beta p_B(6-9\eta k) + 3a\eta k - 3a\}/B,$$

$$p_G^{S,*} = \{F^2(5\beta-9a-16) + F[\beta(5-5p_B-5\eta k) + 16\eta k - 11a - 16] + 5\beta p_B(\eta k - 1) + a(9\eta k - 2)\}/B,$$

$$p_E^{S,*} = \{3F^3(\beta+1) + 3F^2[\beta(2-p_B)-a+2] + F[\beta(3-7\eta k-6p_B)-6a+3] + \beta p_B(7\eta k-3) + 3a(\eta k-1)\}/B,$$

$$\pi_G^{S,*} = \{\zeta_1 F^4 + \zeta_2 F^3 + \zeta_3 F^2 + \zeta_4 F + 5\beta^2 p_B^2(2-3\eta k) + 10\beta a p_B(\eta k-1) + a^2(9\eta k-2)\}/(2B),$$

$$\pi_E^{S,*} = \{18F^6(2\beta-1)^2 + \zeta_5 F^5 + \zeta_6 F^4 + \zeta_7 F^3 + \zeta_8 F^2 + \zeta_9 F + \beta^2 p_B^2[72 + 162\eta^2 k^2 - k(191\eta + 25)] - 2\beta a p_B[36 + 54\eta^2 k^2 - k(55\eta + 35)] + a^2[18 + 18\eta^2 k^2 + k(13\eta - 49)]\}/(2B^2).$$

其中 $\zeta_1 = 2(5\beta^2 - 5\beta - 1)$, $\zeta_2 = 20\beta^2(1-p_B) + 10\beta(a+p_B-2) - 14a - 4$, $\zeta_3 = 5\beta^2(2p_B^2 - 3\eta k - 8p_B + 2) + 10\beta[p_B(2-a) + 2a - 1] - 2a^2 + 32\eta k - 28a - 2$, $\zeta_4 = 10\beta^2(3\eta k p_B + 2p_B^2 - 2p_B) + 10\beta(a+p_B-a\eta k - 2a p_B) - 4a^2 - 14a$, $\zeta_5 = 36(2\beta-1)[2\beta(2-p_B)+a-2]$, $\zeta_6 = \beta^2(72p_B^2 - 576p_B + 432 - 191\eta k - 25k) + \beta(160k - 52\eta k + 288p_B - 72a p_B + 288a - 432) + 256\eta k - 256k + 18a^2 - 144a + 108$, $\zeta_7 = \beta^2[k(382\eta + 50)(p_B - 1) + 288p_B^2 - 864p_B + 288] + \beta[k(52\eta p_B - 160p_B - 110\eta a - 70a - 104\eta + 320) + p_B(432 - 288a) + 432a - 288] + k(512\eta - 512 + 224a - 188\eta a + 72a^2 - 216a + 72)$, $\zeta_8 = \beta^2[162\eta^2 k^2 - k(191\eta + 25)(p_B^2 - 4p_B + 1) + 432p_B^2 - 576p_B + 72] + \beta[k(110\eta a p_B + 70a p_B + 104\eta p_B - 320p_B - 220\eta a - 140a - 52\eta + 160) + p_B(288 - 432) + 288a - 72] + k[a^2(13\eta - 49) + a(488 - 376\eta) + 256\eta - 256] + 108a^2 - 144a + 18$, $\zeta_9 = 2\beta^2 p_B[144p_B - 162\eta^2 k^2 + k(191\eta + 25)(p_B - 1) - 72] + \beta[108a\eta^2 k^2 + k(220\eta a p_B + 140a p_B + 52\eta p_B - 160p_B - 110\eta a - 70a) + p_B(72 - 288a) + 72a] + 2a[k(13\eta a - 49a - 94\eta + 112) + 36a - 18]$.

各均衡解分别关于 k 和 η 求一阶偏导: $\partial x/\partial k = -16\eta(1+F)(5\beta F - 5\beta p_B + 7a - 16F)/B^2$, $\partial q_G/\partial k = -9\eta[(5\beta F - 16F - 5\beta p_B + 7a)(1+F)^2/B^2]$, $\partial q_{GE}/\partial k = 3\eta(5\beta F - 16F - 5\beta p_B + 7a)(1+F)^2/B^2$, $\partial q_E/\partial k = 3\eta(5\beta F - 16F - 5\beta p_B + 7a)(1+F)^2/B^2$; $\partial x/\partial \eta = -16k(1+F)(5\beta F - 5\beta p_B + 7a - 16F)/B^2$, $\partial q_G/\partial \eta = -9k[(5\beta F - 16F - 5\beta p_B + 7a)(1+F)^2/B^2]$, $\partial q_{GE}/\partial \eta = 3k(5\beta F - 16F - 5\beta p_B + 7a)(1+F)^2/B^2$, $\partial q_E/\partial \eta = 3k(5\beta F - 16F - 5\beta p_B + 7a)(1+F)^2/B^2$. 可知: 1) 当 $0 < F < (7a - 5\beta p_B)/(16 - 5\beta)$ 时, $\frac{\partial x}{\partial k} < 0$, $\frac{\partial q_G}{\partial k} < 0$, $\frac{\partial q_{GE}}{\partial k} > 0$, $\frac{\partial q_E}{\partial k} > 0$; $\frac{\partial x}{\partial \eta} < 0$, $\frac{\partial q_G}{\partial \eta} < 0$, $\frac{\partial q_{GE}}{\partial \eta} > 0$, $\frac{\partial q_E}{\partial \eta} > 0$. 2) 当 $F > (7a - 5\beta p_B)/(16 - 5\beta)$ 时, $\frac{\partial x}{\partial k} > 0$, $\frac{\partial q_G}{\partial k} > 0$, $\frac{\partial q_{GE}}{\partial k} < 0$, $\frac{\partial q_E}{\partial k} < 0$; $\frac{\partial x}{\partial \eta} > 0$, $\frac{\partial q_G}{\partial \eta} > 0$, $\frac{\partial q_{GE}}{\partial \eta} < 0$, $\frac{\partial q_E}{\partial \eta} < 0$.

由上述结果可得以下结论: 1) 当积分价格 $0 < F < (7a - 5\beta p_B)/(16 - 5\beta)$ 时, 燃油经济性水平 x 和燃油汽车产量 q_G 关于成本系数 k 和成本分担系数 η 单减, 新能源汽车产量 q_{GE} 及 q_E 关于成本系数 k 和成本分担系数 η 单增; 2) 当积分价格 $F > (7a - 5\beta p_B)/(16 - 5\beta)$ 时, 燃油经济性水平 x 、燃油汽车产量 q_G 关于成本系数 k 和成本分担系数 η 单增, 新能源汽车产量 q_{GE} 及 q_E 关于成本系数 k 和成本分担系数 η 单减. 证毕.

定理7的证明 对定理6中所得各均衡解分别关于 a 求一阶偏导: $\partial x/\partial a = 7(1+F)/B$, $\partial q_G/\partial a = 7k/B$, $\partial q_{GE}/\partial a = 3(k - F^2 - 2F - 1)/B$, $\partial q_E/\partial a = 3(k - F^2 - 2F - 1)/B$. 可知: 1) 当 $0 < F < \sqrt{\eta k} - 1$ 时, $\frac{\partial x}{\partial a} > 0$, $\frac{\partial q_G}{\partial a} > 0$, $\frac{\partial q_{GE}}{\partial a} > 0$, $\frac{\partial q_E}{\partial a} > 0$; 2) 当 $\sqrt{\eta k} - 1 < F < 4\sqrt{\eta k}/3 - 1$ 时, $\frac{\partial x}{\partial a} > 0$, $\frac{\partial q_G}{\partial a} > 0$, $\frac{\partial q_{GE}}{\partial a} < 0$, $\frac{\partial q_E}{\partial a} < 0$; 3) 当 $F > 4\sqrt{\eta k}/3 - 1$ 时, $\frac{\partial x}{\partial a} < 0$, $\frac{\partial q_G}{\partial a} < 0$, $\frac{\partial q_{GE}}{\partial a} > 0$, $\frac{\partial q_E}{\partial a} > 0$.

对定理6中所得各均衡解分别关于 p_B 求一阶偏导: $\partial x/\partial p_B = 5(1+F)/B$, $\partial q_G/\partial p_B = 5k/B$, $\partial q_{GE}/\partial p_B = (7k - 3F^2 - 6F - 3)/B$, $\partial q_E/\partial p_B = 3(2F^2 - 3k + 4F + 2)/B$. 可知: 1) 当 $0 < F < \sqrt{6\eta k}/2 - 1$ 时, $\frac{\partial x}{\partial p_B} < 0$, $\frac{\partial q_G}{\partial p_B} < 0$, $\frac{\partial q_{GE}}{\partial p_B} < 0$, $\frac{\partial q_E}{\partial p_B} > 0$; 2) 当 $\sqrt{6\eta k}/2 - 1 < F < 4\sqrt{\eta k}/3 - 1$ 时, $\frac{\partial x}{\partial p_B} < 0$, $\frac{\partial q_G}{\partial p_B} < 0$, $\frac{\partial q_{GE}}{\partial p_B} > 0$, $\frac{\partial q_E}{\partial p_B} > 0$; 3) 当 $4\sqrt{\eta k}/3 - 1 < F < \sqrt{21\eta k}/3 - 1$ 时, $\frac{\partial x}{\partial p_B} > 0$, $\frac{\partial q_G}{\partial p_B} > 0$, $\frac{\partial q_{GE}}{\partial p_B} < 0$, $\frac{\partial q_E}{\partial p_B} < 0$; 4) 当 $F > \sqrt{21\eta k}/3 - 1$ 时, $\frac{\partial x}{\partial p_B} > 0$, $\frac{\partial q_G}{\partial p_B} > 0$, $\frac{\partial q_{GE}}{\partial p_B} < 0$, $\frac{\partial q_E}{\partial p_B} > 0$.

对比定理2与定理3可知, 成本分担系数 $\eta \in (0, 1)$ 的引入引起了积分价格阈值向左地移动, 这这表明成本分担策略下市场规模 a 和电池价格 p_B 的影响会促使GV和EV更早的调整生产策略. 证毕.

结论1的证明 不合作策略与价格折扣策略下, EV的利润函数分别为 $\pi_E^N = \{9[(2p_B - a - 2)F^2 - F^3 + (4p_B - 2a + 3k - 1)F + 3(2 - 3k)p_B + a(k - 1)]^2\}/(16k - 9F^2 - 18F - 9)^2$, $\pi_E^D = \{9[\beta^3 F^2(2p_B - F) - \beta^2 F(aF +$

$$2F - 4p_B) + \beta(3kF - 2aF - F - 3kp_B + 2p_B) + a(k-1)]^2 / (16k - 9\beta^2 F^2 - 18\beta F - 9)^2.$$

为比较不合作策略与价格折扣策略下EV的利润大小, 令 $\psi = \pi_E^N - \pi_E^D$, 然后分别考虑当 $\beta = 0$ 和 $\beta = 1$ 时 ψ 的大小. 当 $\beta = 0$ 时, $\psi = 9[(2p_B - a - 2)F^2 - F^3 + (3k - 2a + 4p_B - 1)F + (2 - 3k)p_B + a(k - 1)]^2 / (16k - 9F^2 - 18F - 9)^2 - 9[(2 - a)F^2 + (1 - 2a)F + a(k - 1)]^2 / (16k - 9F^2 - 18F - 9)^2$, 由于分母 $(16k - 9)^2(16k - 9F^2 - 18F - 9)^2 \geq 0$ 恒成立, 故将分子改写为 $\nu = \theta_1 p_B^2 + \theta_2 p_B + \theta_3$, 其中 $\theta_1 = 9(3k - 2F^2 - 4F - 2)^2$, $\theta_2 = 18[p^3 + (a + 2)F^2 - (3k - 1 - 2a)F - a(k - 1)](3k - 2F^2 - 4F - 2)$, $\theta_3 = 9F(3k - F^2 - 4F - 2)(2ak - 2aF^2 - F^3 - 4aF + 3kF - 2a)$. 然后, 令 $\theta_1 > 0$, 即 $k \neq 2(F + 1)^2/3$, 由 $\Delta = 324(3k - 2F^2 - 4F - 2)^2(ak - aF^2 - 2aF + 2F^2 - a + F)^2$, 可以推断出当 $k = (F + 1)^2 - F(2F + 1)/a$ 时, p_B 有唯一解, 即 $\pi_E^N \geq \pi_E^D$, 故 $\psi \geq 0$ 恒成立; 否则 p_B 将存在两个零解, 即存在一个特定的价格折扣 $\hat{\beta}$ 使得 $\pi_E^N < \pi_E^D$. 当 $\beta = 1$ 时, $\psi = 0$, 即 $\pi_E^N = \pi_E^D$.

通过上述分析可以发现当 $k = (F + 1)^2 - F(2F + 1)/a$ 且 $k \neq 2(F + 1)^2/3$ 时, $\pi_E^N \geq \pi_E^D$ 恒成立, 即在满足该条件时EV采取不合作策略优于价格折扣策略, 否则至少存在一个 $\hat{\beta}$ 使得不合作策略下EV的利润低于价格折扣策略.

证毕.

2023年《系统工程学报》评审专家名单 (排名不分先后)

李 波	许格妮	杨善学	徐选华	牛英杰	许启发	刘 斌	汪忠志	艾兴政	计明军	张 明	郁培丽
刘伟华	李志国	李登峰	车阿大	宋振东	柴 建	刘兰剑	王海燕	曹 裕	贾晓菁	刘 超	王 成
马军海	牛 奔	李亚亚	周 驰	薛巍立	计国君	刘咏梅	王 勇	陈华友	蒋翠侠	刘德海	王国利
张水波	伏红勇	李勇建	钱 茜	蔡学媛	蒋永雷	刘志东	王志平	陈 炜	蒋 锋	刘晓星	王继霞
兰燕飞	李 平	但 斌	屈绍建	郑江波	宋 妍	聂佳佳	肖 进	陈志斌	赖晓凡	刘 颖	王 凌
张建雄	王先甲	柯 华	王建军	朱庆华	李 健	钱存华	郑冠群	丁黎黎	李 刚	刘志兵	王能民
陈萍萍	孙高济	夏西强	吴 鹏	邹镇涛	李 凯	秦 虎	张新生	杜少甫	李 果	马利军	王 鹏
朱 宁	周 勤	余乐安	杨立兴	左文明	张旭梅	舒 嘉	方匡南	付 红	李建斌	屈绍建	王 杉
孙晓晨	张祚超	刘 勇	张云丰	冯晨鹏	刘彦初	李春顶	何 波	胡林敏	李 杰	石 平	吴 坚
田 津	慕银平	冉 伦	王海宇	危小超	刘轶芳	李 丁	何建桂	胡 伟	李 想	孙少龙	曾庆成
吴文清	穆海林	饶从军	王欢芳	吴 杰	刘跃辉	李 凯	赵泉午	胡文婕	李宗平	张书华	吴武清
熊 熊	周 珍	张学伟	王坚强	吴 俊	刘振元	李 平	何正文	胡祥培	高金伍	孙有发	肖 辉
郭均鹏	倪中新	沈厚才	王天一	吴 妹	罗鹏飞	李寿德	贺庆仁	黄 敏	耿 娜	谭春桥	邢秉昆
何 楨	牛保庄	孙秀峰	王铁男	席运江	马千里	李心丹	胡 毅	黄 艳	龚 旭	汤旭东	曾 勇
南国芳	欧国立	唐振鹏	王熹徽	夏晓华	马晓飞	李 英	黄 瑞	惠晓峰	关 旭	唐加福	徐 和
荣喜民	彭 锐	田 林	王 宇	夏 鑫	马义中	梁 樑	黄守军	姜艳萍	郭本海	唐应辉	许 伟
张永杰	钱林义	万光羽	王志宏	向 阳	缪朝炜	刘家国	计小宇	鞠彦兵	韩先锋	杨 科	薛木森
赵秀杰	钱晓松	王道平	王治莹	肖邦明	许明辉	刘维奇	杨 超	杨建华	郭誉森	张继红	尤建新
周翠华	邱若臻	徐 勇	王宗水	张发明	颜迎晨	刘向丽	杨国庆	叶五一	韩 菁	张 琨	陈敬贤
林 强	丁珮琪	赵贞玉	张 政	朱冬梅	仲秋雁	翟庆庆	赵海峰	张跃军	韩卫彬	陈祥锋	卞文良
杨 敏	丁琳琳	崔庆安	张 蓓	迟国泰	张艳芳	周 建	陈宇宁	陈永成	陈孝伟	陈庭强	欧阳林寒
张成堂	周永务	周利平	赵宇哲	张玉林	张晓黎	张鹏东					