

Game Analysis of Cooperative Innovation in New Energy Vehicle Supply Chain Considering Delay Effect

Gang Fang Qi Ye

School of Management, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou, Zhejiang, 310018, China

Abstract

This research focuses on cooperative innovation between vehicle and battery enterprises in the new energy vehicle supply chain, especially in the context of rapid development of battery technology. The dynamics of cooperation among supply chain members in strategy selection, profit maximization and technology evolution are systematically analyzed by the second-order delay differential game model. The study pointed out that centralized decision-making can optimize battery R&D investment and supply chain profits. Cost-sharing contracts can promote supply chain coordination when the delay time is below the critical value. The delay effect can stimulate research and development and improve the technical level. At the critical threshold, cooperation tightness is positively correlated with profit. The R&D cycle has a non-linear effect on the delay effect, with moderate delays helping profits in short cycles, while excessive delays in long cycles may hurt profits. The research provides theoretical support for industrial cooperation strategies and promotes industrial innovation and development.

Keywords

new energy vehicle supply chain; cooperative innovation; differential game; delay effect; battery technology level

考虑延迟效应的新能源汽车供应链合作创新的博弈分析

方刚 叶琦

杭州电子科技大学管理学院, 中国·浙江 杭州 310018

摘要

本研究专注于新能源汽车供应链中整车与电池企业的合作创新,特别是在电池技术快速发展的背景下。通过二级延迟微分博弈模型,系统分析了供应链成员在策略选择、利润最大化和技术演进中的合作动态。研究指出,集中决策能优化电池研发投入和供应链利润。成本分担契约在延迟时间低于临界值时,可促进供应链协调。延迟效应能激励研发,提升技术水平。关键阈值下,合作紧密性与利润正相关。研发周期对延迟效应有非线性影响,适度延迟在短周期内有助于利润,而长周期内过度延迟可能损害利润。研究为产业合作策略提供理论支持,推动产业创新与发展。

关键词

新能源汽车供应链; 合作创新; 微分博弈; 延迟效应; 电池技术水平

1 引言

中国新能源汽车产业已连续八年领跑全球产销规模,通过在电池技术、电机系统、智能驾驶等关键技术领域的创新,重塑了传统汽车产业的竞争格局。2023年,中国汽车产业在全球市场上取得了显著成就,出口量超越日本,成为全球第一。但同时,中国新能源汽车产业的领先地位面临外部挑战,如美国推出的《两党基础设施法案》《芯片和科学法案》和《通胀削减法案》等政策措施,以及欧盟对自中国

进口电动汽车的登记要求,均对中国车企构成压力。

为维持竞争力并实现可持续发展,中国新能源汽车产业必须加速技术创新。新能源汽车技术的快速发展已显著缩短了车型的换代周期,部分车型的改款周期甚至少于12个月,这既是市场需求的拉动,也是企业加大研发投入、深化合作创新的结果。

新能源汽车企业合作创新受多种因素影响,其中地理和技术邻近性对绩效有正向影响,而组织邻近性则相反^[1]。政府补贴在产业初期通过降低技术和电池成本,促进了企业创新^[2,3],但信息不对称时可能产生“挤出效应”^[4]。产业政策,尤其是其连续性,显著提升了企业技术创新的积极性^[5,6],尽管政策不确定性可能抑制这种效应^[7]。财政和技术政策的协同作用对新能源汽车企业创新绩效有显著正面影响。“双积分”政策通过激励实质性和策略性创新行为,显著增加了企业的研发投入,进一步促进了实质性创新^[8]。研究还表明,

【基金项目】国家自然科学基金(项目编号: 71872059);

国家自然科学基金(项目编号: 7187205972272047)。

【作者简介】方刚(1970-),男,中国广东龙川人,博士,教授,从事创新管理研究。

政策激励与技术创新之间存在倒“U”型关系，说明适度的政策激励能最有效促进新能源汽车技术创新^[9]。

电池技术是新能源汽车发展的核心，其研发的复杂性直接影响产品迭代速度。例如，特斯拉从宣布开发 2170 型电池到实现量产，经历了两年时间，这一过程体现了电池技术研发的延迟效应。在市场需求快速变化和行业竞争激烈的背景下，如何有效应对这一延迟效应，对企业的竞争力至关重要。

在供应链管理领域，延迟效应是一个普遍现象。学术界对此有广泛讨论，EI-HODIRI 对延迟效应进行了定义和影响分析^[10]。20 世纪 60 年代，Nerlove 和 Arrow 提出了 Nerlove-Arrow 模型，为分析企业信誉动态变化提供了工具^[11]。Luhta 等研究者发展了该理论，构建了描述广告投入与品牌信誉动态关系的延迟微分方程^[12]。近年来，学者们开始从动态角度分析延迟效应对供应链决策的影响。陈东彦等研究了广告延时效应对供应链广告策略的影响^[13]。周熙登等进一步探讨了供应链的产品质量与服务质量决策问题^[14]。Sun 等研究了减排技术延迟效应和消费者低碳偏好对供应链减排决策及其收益的影响^[15]。

论文采用微分博弈理论，考虑电池研发过程中的延迟效应以及电池技术水平的动态变化，研究新能源汽车供应链中整车企业和电池企业在合作创新方面的策略选择。本研究致力于分析分散模式、成本分担模式和集中模式三种不同情形下的最优利润情况和最优决策，以及揭示参与者之间的相互作用和影响。同时，设计双边成本分担契约，以实现新能源汽车供应链上下游的协调。

2 问题描述与模型假设

2.1 模型描述

本研究聚焦于单一整车企业（V）与单一电池企业（B）之间的合作研发创新活动，其中电池企业承担电池技术的主要研发职责，而整车企业则根据自身产品需求，为电池企业提供研发支持，并对其研发活动进行激励。为了激发电池企业在研发过程中的积极性，整车企业向电池企业提供一定比例的研发资金补贴。

2.2 模型假设

假设 1：整车企业的技术创新投入程度为 $EV(t)$ ，电池企业的技术创新投入程度为 $EB(t)$ 。则整车企业的技术创新投入成本为：

$$C_V(t) = \frac{1}{2} \mu_V E_V^2(t) \quad (1)$$

电池企业的技术创新投入成本为：

$$C_B(t) = \frac{1}{2} \mu_B E_B^2(t) \quad (2)$$

其中， μ_V 和 μ_B 分别为整车企业和电池企业的创新投入系数； $CV(t)$ 和 $CB(t)$ 分别为整车企业和电池企业的创新投入成本。

假设 2：整车企业和电池企业在 t 时刻的电池技术水平 $T(t)$ 会受到整车企业和电池企业技术创新投入程度和技术更新的影响，且它是个动态变化过程，则电池技术水平在整个时间范围内按以下动态方程演化：

$$T(t) = [\lambda_1 E_V(t-d) + \lambda_2 E_B(t-d) - \delta T(t)] \quad (3)$$

其中，在初始状态下， $T(0)=T_0=0$ ； λ_1 、 λ_2 分别为整车企业和电池企业创新投入程度对电池技术水平的影响； d 为企业的创新投入对电池技术水平产生效果的延迟时间；因为在电池技术研发创新过程中会发生技术的更新淘汰，因此 $\delta > 0$ 表示电池技术水平的自然衰退率。

假设 3：为鼓励电池企业进行电池技术研发创新，整车企业给予电池企业 $u(t)$ 的创新补贴。

假设 4：在任意时刻，整车企业和电池企业均具有相同的贴现因子 ρ ($\rho > 0$)。

假设 5：借鉴张雄会等的研究假设：因产品质量改进而产生的收益函数是与产品质量水平成正比的。假设整车企业和电池企业在时刻协同研发总收益 $\pi(t)$ 可以表示为：

$$\pi(t) = \varepsilon_1 E_V(t) + \varepsilon_2 E_B(t) + \eta T(t) \quad (4)$$

其中， ε_1 、 ε_2 分别为整车企业和电池企业的电池技术研发创新努力对总收益的影响系数； $\eta > 0$ 为电池技术水平对总收益的影响系数。

假设 6：假设总收益仅在整车企业和电池企业之间分配，整车企业所占比例为 ω ($0 < \omega < 1$)，电池企业所占比例为 $1-\omega$ ，该分配比例由双方事先商议决定。

假设 7：式 (1) 至式 (4) 中包含 4 个控制变量 $EV(t)$ 、 $EB(t)$ 、 u 以及 1 个状态变量 $T(t)$ 。为便于书写，后文部分将省略时间 t 。

3 模型分析

3.1 分散决策模型

在分散决策模式中，新能源整车企业和电池企业独立追求利润最大化，根据各自的成本、需求和技术创新能力制定战略，以提升经济效益。整车企业和电池企业的目标函数分别为：

$$J_V^N = \int_0^\infty e^{-\rho t} [\omega(\varepsilon_1 E_V^N + \varepsilon_2 E_B^N + \eta T^N) - \frac{1}{2} \mu_V (E_V^N)^2] dt \quad (5)$$

$$J_B^N = \int_0^\infty e^{-\rho t} [(1-\omega)(\varepsilon_1 E_V^N + \varepsilon_2 E_B^N + \eta T^N) - \frac{1}{2} \mu_B (E_B^N)^2] dt \quad (6)$$

命题 1：分散决策模型下，整车企业和电池企业的均衡策略分别为：

$$E_V^{N*} = \frac{\omega \varepsilon_1 (\rho + \delta) + \lambda_1 \omega \eta e^{\delta d}}{\mu_V (\rho + \delta)} \quad (7)$$

$$E_B^{N*} = \frac{(1-\omega)(\rho + \delta) \varepsilon_2 + \lambda_2 (1-\omega) \eta e^{\delta d}}{\mu_B (\rho + \delta)}$$

该决策模型下，整车企业和电池企业和供应链整体最

优收益分别为:

$$V_V^{N^*}(T^{N^*}) = \frac{\omega\eta}{\rho+\delta} T^N + \frac{\omega[\varepsilon_1(\rho+\delta)+\eta\lambda_1 e^{\delta d}][\varepsilon_1(\rho+\delta)+\eta\lambda_1(2-e^{\delta d})]}{2\rho\mu_V(\rho+\delta)^2} + \frac{\omega(1-\omega)[\varepsilon_2(\rho+\delta)+\lambda_2\eta][\varepsilon_2(\rho+\delta)+\lambda_2\eta e^{\delta d}]}{\rho\mu_B(\rho+\delta)^2} \quad (8)$$

$$V_B^{N^*}(T^{N^*}) = \frac{(1-\omega)\eta}{\rho+\delta} T^N + \frac{\omega(1-\omega)[\varepsilon_1(\rho+\delta)+\eta\lambda_1 e^{\delta d}][\varepsilon_1(\rho+\delta)+\eta\lambda_1]}{\rho\mu_V(\rho+\delta)^2} + \frac{(1-\omega)[(\rho+\delta)\varepsilon_2+\eta\lambda_2 e^{\delta d}][(\rho+\delta)\varepsilon_2+\eta\lambda_2(2-e^{\delta d})]}{2\rho\mu_B(\rho+\delta)^2} \quad (9)$$

$$V_{\text{总}}^{N^*}(T^{N^*}) = V_V^{N^*}(T^{N^*}) + V_B^{N^*}(T^{N^*}) \quad (10)$$

电池技术水平的最优运动轨迹为:

$$T^{N^*}(t) = e^{-\delta t}(-A^N - B^N) + A^N + B^N$$

其中:

$$A^N = \frac{\lambda_1[\omega\varepsilon_1(\rho+\delta)+\lambda_1\omega\eta e^{\delta d}]}{\delta\mu_V(\rho+\delta)}$$

$$B^N = \frac{\lambda_2[(1-\omega)(\rho+\delta)\varepsilon_2+\lambda_2(1-\omega)\eta e^{\delta d}]}{\delta\mu_B(\rho+\delta)}$$

3.2 成本分担决策模型

在成本分担决策模型中, 新能源汽车整车企业作为领导者, 与作为追随者的电池企业形成 Stackelberg 微分博弈。整车企业首先决定其研发创新投入水平 $EV(t)$ 和对电池企业的补贴比 u 。随后, 电池企业根据整车企业的决策和自身条件, 确定其技术创新投入 $EB(t)$ 。这一过程旨在激励电池企业增加研发和创新活动。此时, 整车企业和电池企业的目标函数分别为:

$$J_V^N = \int_0^\infty e^{-\rho t} [\omega(\varepsilon_1 E_V^S + \varepsilon_2 E_B^S + \eta T^S) - \frac{u}{2} \mu_B (E_B^S)^2 - \frac{1}{2} \mu_V (E_V^S)^2] dt \quad (11)$$

$$J_B^N = \int_0^\infty e^{-\rho t} [(1-\omega)(\varepsilon_1 E_V^S + \varepsilon_2 E_B^S + \eta T^S) - \frac{1-u}{2} \mu_B (E_B^S)^2] dt \quad (12)$$

命题 2: 成本分担决策模型下, 整车企业和电池企业的均衡策略分别为:

$$E_V^{S^*} = \frac{\omega\varepsilon_1(\rho+\delta)+\lambda_1\omega\eta e^{\delta d}}{\mu_V(\rho+\delta)}, \quad E_B^{S^*} = \frac{(1+\omega)(\rho+\delta)\varepsilon_2+\lambda_2 e^{\delta d}(1-\omega)\eta}{2(\rho+\delta)\mu_B} \quad (13)$$

该决策模型下, 整车企业和电池企业和供应链整体最优收益分别为:

$$V_V^S = \frac{\omega\eta}{\rho+\delta} T^{S^*} + \frac{\omega^2(\varepsilon_1(\rho+\delta)+\lambda_1\eta e^{\delta d}) * [\varepsilon_1(\rho+\delta)+\lambda_1\eta(2-e^{\delta d})]}{2\rho\mu_V(\rho+\delta)^2} + \frac{[\varepsilon_2(\omega+1)(\rho+\delta)+\lambda_2\eta(2\omega+(1-\omega)e^{\delta d})]^2}{8\rho\mu_B(\rho+\delta)^2} \quad (14)$$

$$V_B^S = \frac{(1-\omega)\eta}{\rho+\delta} T^{S^*} + \frac{\omega(1-\omega)[\varepsilon_1(\rho+\delta)+\eta\lambda_1 e^{\delta d}][\varepsilon_1(\rho+\delta)+\eta\lambda_1]}{\mu_V(\rho+\delta)^2} + \frac{(1-\omega)[\varepsilon_2(\rho+\delta)+\lambda_2\eta(2-e^{\delta d})][\varepsilon_2(\omega+1)(\rho+\delta)+\lambda_2\eta(2\omega+(1-\omega)e^{\delta d})]}{4\rho\mu_B(\rho+\delta)^2} \quad (15)$$

$$V_{\text{总}}^S = V_V^S + V_B^S \quad (16)$$

电池技术水平的最优运动轨迹为:

$$T^{S^*}(t) = e^{-\delta t}(-A^S - B^S) + A^S + B^S$$

其中:

$$A^S = \frac{\lambda_1[\omega\varepsilon_1(\rho+\delta)+\lambda_1\omega\eta e^{\delta d}]}{\delta\mu_V(\rho+\delta)}$$

$$B^S = \frac{\lambda_2[(1+\omega)(\rho+\delta)\varepsilon_2+\lambda_2 e^{\delta d}(1-\omega)\eta]}{2\delta(\rho+\delta)\mu_B}$$

3.3 集中决策模型

在集中决策模式下, 整车企业和电池企业合作以最大化整个供应链的利润。整车企业负责确定研发创新的最优投入水平, 电池企业也需规划其技术创新的最优策略。此时, 新能源汽车供应链的目标函数为:

$$J_{\text{总}}^C = \int_0^\infty e^{-\rho t} (\varepsilon_1 E_V^C + \varepsilon_2 E_B^C + \eta T^C - \frac{1}{2} \mu_V (E_V^C)^2 - \frac{1}{2} \mu_B (E_B^C)^2) dt \quad (17)$$

命题 3: 集中决策模型下, 整车企业和电池企业的均衡策略分别为:

$$E_V^{C^*} = \frac{\varepsilon_1(\rho+\delta)+\lambda_1\eta e^{\delta d}}{\mu_V(\rho+\delta)}, \quad E_B^{C^*} = \frac{\varepsilon_2(\rho+\delta)+\lambda_2\eta e^{\delta d}}{\mu_B(\rho+\delta)} \quad (18)$$

该决策模型下, 整车企业和电池企业和供应链整体最优收益分别为:

$$V_V^{C^*} = \frac{\omega\eta}{\rho+\delta} T^{C^*} + \frac{\omega[\varepsilon_1(\rho+\delta)+\lambda_1\eta e^{\delta d}] * [\varepsilon_1(\rho+\delta)+\lambda_1\eta(2-e^{\delta d})]}{2\rho\mu_V(\rho+\delta)^2} + \frac{[\varepsilon_2(\rho+\delta)+\lambda_2\eta e^{\delta d}][\varepsilon_2(\rho+\delta)+\lambda_2\eta(2-e^{\delta d})]}{2\rho\mu_B(\rho+\delta)^2} \quad (19)$$

$$V_B^{C^*} = \frac{(1-\omega)\eta}{\rho+\delta} T^{C^*} + \frac{(1-\omega)[\varepsilon_1(\rho+\delta)+\lambda_1\eta e^{\delta d}][\varepsilon_1(\rho+\delta)+\lambda_1\eta(2-e^{\delta d})]}{2\rho\mu_V(\rho+\delta)^2} + \frac{(1-\omega)[\varepsilon_2(\rho+\delta)+\lambda_2\eta e^{\delta d}][\varepsilon_2(\rho+\delta)+\lambda_2\eta(2-e^{\delta d})]}{2\rho\mu_B(\rho+\delta)^2} \quad (20)$$

$$V_{\text{总}}^{C^*} = \frac{\eta}{\rho+\delta} T^{C^*} + \frac{[\varepsilon_1(\rho+\delta)+\lambda_1\eta e^{\delta d}] * [\varepsilon_1(\rho+\delta)+\lambda_1\eta(2-e^{\delta d})]}{2\rho\mu_V(\rho+\delta)^2} + \frac{[\varepsilon_2(\rho+\delta)+\lambda_2\eta e^{\delta d}][\varepsilon_2(\rho+\delta)+\lambda_2\eta(2-e^{\delta d})]}{2\rho\mu_B(\rho+\delta)^2} \quad (21)$$

电池技术水平的最优运动轨迹为:

$$T^{C^*}(t) = e^{-\delta t}(-A^C - B^C) + A^C + B^C$$

其中:

$$A^C = \frac{\lambda_1[\varepsilon_1(\rho+\delta)+\lambda_1\eta e^{\delta d}]}{\delta\mu_V(\rho+\delta)}$$

$$B^C = \frac{\lambda_2[\varepsilon_2(\rho+\delta)+\lambda_2\eta e^{\delta d}]}{\delta\mu_B(\rho+\delta)}$$

4 三种博弈结果比较分析

对比三种博弈机制, 可以得出以下命题:

命题 4: 成本分担机制增强了电池企业的技术投入, 且该投入随整车企业的补贴比例增加而增长。但电池研发延迟会减缓补贴比例增幅, 影响激励效果。在集中决策中, 整车企业与电池企业的技术投入最优化, 表现为当时, 集中决策的技术投入高于分散和成本分担决策。这强调了合作在新能源汽车技术创新中的重要性, 整车企业通过研发补贴激励电池企业, 促进技术进步和市场竞争力。合作双方需关注研发延迟效应, 整车企业应考虑该效应以优化补贴策略, 确保技术创新投入和协同效应最大化。证明见附录。

命题 5: 成本分担机制相较于 Nash 非合作机制, 显著提升了企业的电池技术水平, 并在集中决策模型下达到最优, 实现经济效益最大化。即当时, $TN < TS < TC, JN < JS < JC$ 。这一机制通过合作共担研发成本, 提高了技术创新效率。集中决策模型中, 统一的决策协调和资源配置促进了技术突破和生产效率优化, 为整车企业和电池企业带来更丰厚的经济回报, 加速了电池技术发展, 并最大化了供应链整体利益。这为新能源汽车产业中企业合作机制的设计提供了理论支持, 突出了集中决策在推动技术进步和经济效益提升中的关键作用。证明见附录。

命题 6: 分散式决策和成本分担决策模式中, 分别存在阈值 Y^1 和 Y^2 , 当研发延迟时间 dN 和 dS 超过这些阈值时, 这两种决策模式下的供应链利润现值不低于集中式决策模式。这表明, 超过特定延迟时间阈值后, 集中式决策的预期收益可能减少, 使得分散式或成本分担决策成为更优选择。集中式决策的优势在于有效管理合作过程中的时间敏感性, 但在研发延迟显著时, 其他决策模式可能更合理。因此, 供应链成员间的合作在研发延迟低于特定阈值时更有意义。决策者需考虑研发活动的延迟特性, 选择最合适的决策模式以最大化供应链整体利益。精细化决策模式选择有助于供应链成员在不同研发阶段和市场条件下实现协同发展和效益优化。

5 双边成本分担契约

根据前述分析, 集中决策模式在提升成员努力和电池技术方面达到最优, 但实际执行存在挑战。鉴于此, 本研究提出了双边成本分担契约, 旨在促进供应链协调。整车企业与电池企业共同分担技术研发创新成本, 分担比例分别为 m 和 n ($0 \leq m, n < 1$)。这种契约安排使双方在明确的责任和义务框架下, 共同推进技术研发和创新, 实现供应链整体优化和效益最大化。双边成本分担契约的设计与实施, 不仅缓解了企业在研发过程中的资金压力, 还促进了技术创新和市场拓展的协同效应。这种合作机制为新能源汽车产业中的企业合作提供了新的视角和策略选择, 有助于推动产业的健康发展和技术创新。

双边成本分担决策下整车企业和电池企业的目标函数分别为:

$$J_V^D = \int_0^{\infty} e^{-\rho t} [\omega(\varepsilon_1 E_V^D + \varepsilon_2 E_B^D + \eta T^D) - \frac{m}{2} \mu_B (E_B^D)^2 - \frac{1-n}{2} \mu_V (E_V^D)^2] dt \quad (22)$$

$$J_B^D = \int_0^{\infty} e^{-\rho t} [(1-\omega)(\varepsilon_1 E_V^D + \varepsilon_2 E_B^D + \eta T^D) - \frac{1-m}{2} \mu_B (E_B^D)^2 - \frac{n}{2} \mu_V (E_V^D)^2] dt \quad (23)$$

命题 7: 双边成本分担决策模型下, 整车企业和电池企业的均衡策略分别为:

$$E_V^{D*} = \frac{\varepsilon_1(\rho+\delta) + \lambda_1 \eta e^{\delta d}}{\mu_V(\rho+\delta)}, \quad E_B^{D*} = \frac{\varepsilon_2(\rho+\delta) + \lambda_2 \eta e^{\delta d}}{\mu_B(\rho+\delta)} \quad (24)$$

该决策模型下, 整车企业和电池企业和供应链整体最优收益分别为:

$$\begin{aligned} V_V^{D*} = & \frac{\omega \eta}{\rho+\delta} T^D + \frac{(\delta \varepsilon_1 + \varepsilon_1 \rho + \lambda_1 \eta e^{\delta d}) [2\omega \eta \lambda_1 + \varepsilon_1 \omega(\rho+\delta) - \omega \eta \lambda_1 e^{\delta d}]}{2\mu_V(\rho+\delta)^2} \\ & + \frac{(\delta \varepsilon_2 + \varepsilon_2 \rho + \lambda_2 \eta e^{\delta d})}{2\mu_B(\rho+\delta)^2} * (2\omega \eta \delta \lambda_2 + 2\omega \eta \lambda_2 \rho + \delta \varepsilon_2 \omega(\rho+\delta)) \\ & + \varepsilon_2 \omega \rho(\rho+\delta) - \lambda_2 \eta e^{\delta d}(\rho+\delta) + (1-\omega) \eta \delta \lambda_2 e^{\delta d} \\ & + (1-\omega) \eta \lambda_2 \rho e^{\delta d} \end{aligned} \quad (25)$$

$$\begin{aligned} V_B^{D*} = & \frac{(1-\omega) \eta}{\rho+\delta} T^D + \frac{(\delta \varepsilon_1 + \varepsilon_1 \rho + \lambda_1 \eta e^{\delta d}) [\varepsilon_1(\rho+\delta) + (1-\omega) \eta \lambda_1 - \omega \varepsilon_1(\rho+\delta)]}{\mu_V(\rho+\delta)^2} \\ & + \frac{(\delta \varepsilon_2 + \varepsilon_2 \rho + \lambda_2 \eta e^{\delta d})}{2\mu_B(\rho+\delta)^2} (\varepsilon_2(\rho+\delta) + 2(1-\omega) \eta \lambda_2 \\ & - \varepsilon_2 \omega(\rho+\delta) - (1-\omega) \eta \lambda_2 e^{\delta d}) \end{aligned} \quad (26)$$

$$V_{\text{总}}^D(T^D) = V_V^D(T^D) + V_B^D(T^D) \quad (27)$$

电池技术水平的最优运动轨迹为:

$$T^{D*}(t) = e^{-\delta t} (-A^D - B^D) + A^D + B^D$$

其中:

$$A^D = \frac{\lambda_1 [\omega \varepsilon_1(\rho+\delta) + \lambda_1 \omega \eta e^{\delta d}]}{\delta \mu_V(\rho+\delta)}$$

$$B^D = \frac{\lambda_2 [(1+\omega)(\rho+\delta) \varepsilon_2 + \lambda_2 e^{\delta d} (1-\omega) \eta]}{2\delta(\rho+\delta) \mu_B}$$

为确保整车企业与电池企业接受双边成本分担契约, 必须确保双方在该契约下的利润现值不低于分散决策模式下的水平。通过定量分析, 可确定关键阈值 Y^3 和 Y^4 。当研发延迟时间 dD 小于 Y^3 时, 整车企业的利润现值至少等于分散决策下的预期利润; 当 dD 小于 Y^4 时, 电池企业的利润现值也至少等于分散决策下的预期利润。由于 Y^3 小于 Y^4 , 当 dD 小于 Y^3 时, 双方均会接受该契约。

这一分析确定了实现供应链协调的条件, 为整车企业与电池企业之间的合作提供了明确的参考依据, 也为双方在面临研发延迟时的决策提供了理论支持。通过确保合作模式下的利润现值不低于分散决策模式, 双边成本分担契约能有效促进供应链成员之间的协同合作, 推动技术创新和经济效益的提升。

6 数值分析

为深入分析不同模型均衡结果、企业投入努力、电池技术水平及延迟时间对利润和双边成本分担契约的影响，本研究采用 Python 编程语言，构建了如下参数体系： $\rho=0.1$ ， $\mu V=0.3$ ， $\mu B=0.4$ ， $\lambda_1=0.6$ ， $\lambda_2=0.8$ ， $\delta=0.4$ ， $\eta=0.4$ ， $\varepsilon_1=0.3$ ， $\varepsilon_2=0.6$ ， $\omega=0.6$ ， $d=1$ 。

6.1 各决策模型均衡结果对比

表 1 为四种不同决策模型下的均衡策略以及供应链利润情况，分析结果表明：

①集中决策模型在技术创新努力方面优于分散决策和成本分担模型。成本分担策略提升了电池企业的技术创新努

力 18.38%，但对整车企业影响不显著。实施双边成本分担契约后，整车企业和电池企业的技术创新努力显著增长，分别达到集中决策模型的 66.67% 和 149.99%。

②在电池技术水平上，成本分担契约使技术水平提升了 8.43%，而双边成本分担契约则使技术水平达到集中决策模型的最优状态，实现有效协调。

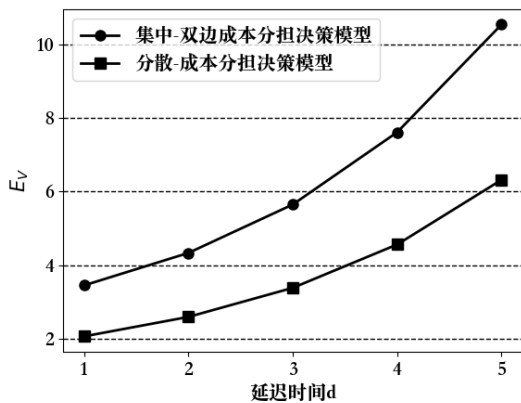
③就利润而言，成本分担契约使整车企业和电池企业的利润分别提升了 2% 和 16.95%。双边成本分担契约进一步促进了利润增长，整车企业和电池企业的利润分别增长了 35.08% 和 22.02%，整体利润达到集中决策模型的理想水平，有效促进了供应链的协调与合作。

表 1 不同决策模型均衡结果

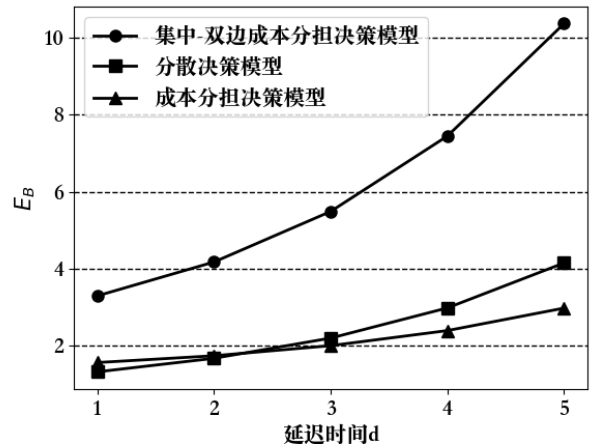
均衡状态	集中决策模型	分散决策模型	成本分担模型	双边成本分担模型
E_V	3.4569	2.0741	2.0741	3.4569
E_B	3.2902	1.3161	1.5580	3.2902
u	—	—	0.4223	—
m	—	—	—	0.6000
n	—	—	—	0.4000
T	11.7657	5.7433	6.2272	11.7657
J_V	1.9648	1.4545	1.4837	1.9648
J_B	1.3099	1.0735	1.2555	1.3099
J	3.2747	2.5580	2.7093	3.2747

6.2 延迟时间对供应链成员努力程度的影响

图 1 展示了研发延迟时间对整车企业和电池企业技术创新努力的影响。随着研发延迟时间的延长，两家企业的技术创新投入均有所增加。这一趋势与市场对新能源汽车性能和效率的高需求相一致。新能源汽车市场快速发展，竞争加剧，消费者对产品性能、续航里程和充电效率的期望不断提高。研发延迟可能导致整车企业无法及时推出新车型，影响市场份额。



(a) 延迟效应对整车企业技术创新努力的影响



(c) 延迟时间对电池企业技术创新努力的影响

图 1 延迟时间对成员努力程度的影响

为了应对市场竞争压力和推动技术革新，整车企业和电池企业需要增加研发投入，加速研发进程，缩短产品上市时间。这强调了在新能源汽车行业中，企业必须对市场动态和消费者需求保持敏感，并通过增加研发投入来加快技术创新，以维持市场竞争力。

6.3 延迟效应对电池技术水平的影响

图 2 展示了研发延迟时间对电池技术水平的影响。随着 d 的延长，电池技术水平呈现提升趋势，尤其在集中决策模型中，提升最为显著。这可能是因为企业为补偿时间损失而增加研发投入，加速技术进程，促进创新，提升技术水平。

结果表明，在研发延迟时，企业通过增加研发投入来维持技术创新，以实现技术进步。集中决策模型因其资源整合

和策略协调能力，在提升技术水平方面有更大潜力。这强调了整车企业和电池企业在新能源汽车产业中，应重视研发时效性，采取措施确保技术创新和电池技术水平的持续提升。

6.4 延迟时间对供应链利润的影响

图 3 分析了研发延迟时间对供应链整体利润的影响。结果显示，随着延迟时间增长，三种决策模型下的利润均先小幅上升后急剧下降，最终趋近于零。

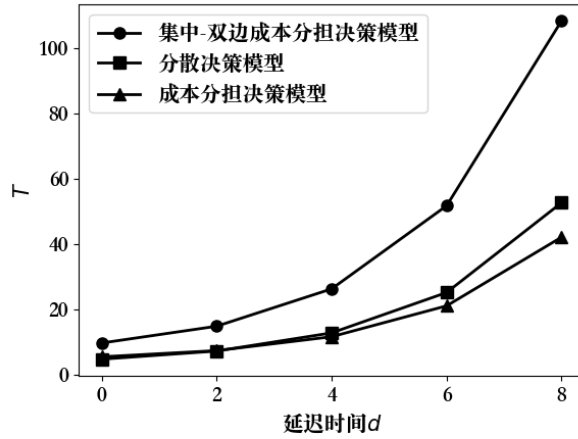


图 2 延迟时间对电池技术水平的影响

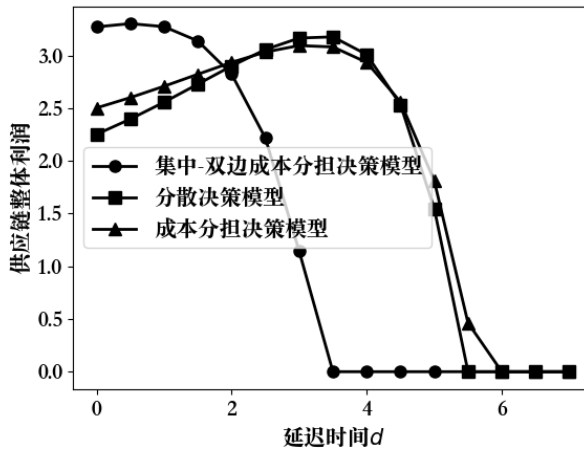


图 3 延迟时间对供应链整体利润的影响

在研发周期短时，由于成本低、产品快速上市，企业能提前获得收入，促进利润增长。但随着延迟时间延长，尽管技术水平提升可能增加利润，长期研发周期导致资源和资金投入增加，投资回报周期延长，利润下降。整车企业还可能因电池研发周期延长影响生产、装配和交付，损害品牌形象，进一步影响利润。

集中决策模型和双边成本分担决策模型中，延迟时间对利润的负面影响更显著。长期研发周期可能威胁合作关系，影响订单和利润。由此可知，紧密的合作关系在研发延迟时，对利润的负面影响更大。图 3 还指出了延迟时间的临界值。当延迟时间约 1.85 时，成本分担模型下的整体利润开始超过集中—双边成本分担模型；当延迟时间约 1.92 时，

分散决策模型下的整体利润也超越集中 - 双边成本分担模型。这验证了延迟效应对供应链成员利润及整体利润的显著影响，并与命题 7 的结论相吻合。

7 讨论与结论

本研究针对新能源汽车供应链中的纵向合作问题，特别是电池技术研发过程中的延迟效应，运用微分博弈理论，构建了分散决策、成本分担和集中决策三种模式下的供应链决策模型。通过模型分析，论文探讨了不同决策模式下的电池技术水平、供应链成员的最优策略选择以及利润最大化问题。进一步地，论文设计了双边成本分担契约，旨在实现供应链的协调，并分析了该契约成立的条件。最后，引入具体算例，分析了延迟时间对成员决策、电池技术水平及利润的

影响。主要研究结论如下：

首先，在集中决策模型中，企业对电池技术研发创新的投入最大，且电池技术水平最高；当电池技术研发的延迟时间低于某一临界值时，新能源汽车企业间的合作紧密度与其利润水平正相关；对于整车企业和电池企业而言，较短的延迟时间能够实现利润最大化，若研发延迟时间过长，则不合作可能是更优选择。

其次，第一，电池技术延迟时间的增加会促使成员投入更多努力以改进电池技术，提升技术水平；第二，在电池技术研发初期，随着延迟时间的增加，企业有一定时间缓冲研发带来的资金压力，但随着延迟时间的延长，利润会因成本上升而降低；第三，在集中决策或双边成本分担决策下，应尽可能缩短电池研发的延迟时间，而在分散决策和成本分担决策下，应合理控制延迟时间，以利于企业的长期发展。

论文研究存在一定的局限性，未来研究的展望如下：论文主要考虑了整车制造企业和电池企业组成的二级供应链，未涉及价格动态变化、外部干扰因素以及商誉延迟效应。未来的研究可以将供应链扩展至三级或多级，构建随机微分博弈模型，将价格作为内生变量，并考虑电池技术水平的延迟效应，以提供更全面的分析和策略建议。

参考文献

- [1] 刘微微,金英哲,毕克新.多维邻近性、创新开放度与合作创新绩效——基于网络演化视角[J].科研管理,2023,44(8):162-172.
- [2] Christian T, Adolfo P, Arnaud M. Cost And Co₂ Aspects Of Future Vehicle Options In Europe Under New Energy Policy Scenarios[J]. Energy Policy, 2010,38(11):7142-7151.
- [3] Alexandros D, Jos N. O, Paul K, Piet R. Not Fully Charged: Welfare Effects Of Tax Incentives For Employer - Provided Electric Cars[J]. Journal Of Environmental Economics And Management, 2016,78:1-19.
- [4] 熊勇清,范世伟,刘晓燕.新能源汽车财政补贴与制造商研发投入强度差异——制造商战略决策层面异质性视角[J].科学学与科学技术管理,2018,39(6):72-83.
- [5] 刘和旺,黄织娇,郑世林.新能源汽车产业政策何以激励企业技术创新?[J].科研管理,2023,44(2):21-31.
- [6] 李旭,熊勇清.“双积分”政策对新能源车企研发投入的影响分析[J].科学学研究,2021,39(10):1770-1780.
- [7] 谢理,何文韬.产业政策连续性、股权结构与企业创新——以新能源汽车为例[J].财经问题研究,2022(11):48-56.
- [8] 李旭,熊勇清.“双积分”政策对新能源车企研发投入的影响分析[J].科学学研究,2021,39(10):1770-1780.
- [9] 何正霞,曹长帅,王建明.政策激励对新能源汽车技术创新的影响研究[J].科学决策,2022(5):71-85.
- [10] EI-HODIRI M A, LOEHMANE, WHINSTONA. An optimal growth model with time lags[J]. Econometrica: Journal of the Econometric Society, 1972,40(6):1137-1146.
- [11] Nerlove M, Arrow K J. Optimal advertising policy under dynamic conditions[J]. Economica, 1962,29(114):129-142.
- [12] Luhta I, Virtanen I. Non-linear advertising capital model with time delayed feedback between advertising and stock of goodwill[J]. Chaos, Solitons & Fractals, 1996,7(12):2083-2104.
- [13] 陈东彦,于浚,侯玲.考虑延时效应的供应链动态合作广告策略研究[J].管理科学学报,2017,20(9):25-35.
- [14] 周熙登,徐兵,江玮璠,等.考虑延时效应的供应链质量决策[J].计算机集成制造系统,2020,26(8):2242-2252.
- [15] Sun L, Cao X, Alharthi M, et al. Carbon emission transfer strategies in supply chain with lag time of emission reduction technologies and low-carbon preference of consumers[J]. Journal of Cleaner Production, 2020,264(10):121664.