

# 电动汽车动力电池区块链技术的投资演化博弈

尤建新, 任 佳

(同济大学 经济与管理学院, 上海 200092)

**摘要:** 为促进汽车生产商积极主动投资区块链技术, 基于演化博弈理论, 构建电池生产商、整车生产商和政府的三方演化博弈模型, 探讨政府参与下汽车生产商区块链技术投资行为, 分析三类参与主体之间的行为选择及演化均衡状态, 并通过仿真模拟区块链技术特征参数和政府参与行为对于系统稳态的影响。研究表明汽车生产商在区块链技术投资系统中的策略选择与区块链技术所带来的额外收益有关; 区块链技术带来的优势、政府所提供的间接收益率都能促进区块链技术投资系统较快地趋向理想均衡状态, 而技术引进奖励的波动则对这一速度影响较小。研究结果可以为促进区块链技术引入到动力电池回收行业提供一定的理论指导。

**关键词:** 动力电池; 区块链技术投资; 演化博弈

中图分类号: F274

文献标志码: A

## Evolutionary Game of Investment in Electric Vehicle Power Battery Blockchain Technology

YOU Jianxin, REN Jia

(School of Economics and Management, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** In order to promote automobile manufacturers to actively invest in blockchain technology, based on evolutionary game theory, a three-party evolutionary game model of battery manufacturers, vehicle manufacturers, and the government is created to explore the investment behavior of automobile manufacturers in blockchain technology with participation from the government, analyze the behavioral choice, and determine the evolutionary equilibrium state among the three types of participants. And simulate the influence of the characteristic parameters of blockchain technology and government participation behaviour on the system steady state. The study shows that the additional benefits brought by blockchain technology, and the indirect rate of return

provided by the government all contribute to the quicker convergence of the blockchain technology investment system to the ideal equilibrium, while the fluctuations in the incentives for technology introduction have less impact on this rate. The study's findings might offer some theoretical direction for facilitating the adoption of blockchain technology in the power battery recycling sector.

**Key words:** power battery; blockchain technology investment; evolutionary game

新能源汽车具有低碳绿色、可再生等特点, 通过发展新能源汽车这一战略性新兴产业, 有助于缓解环境压力, 同时也是应对气候变化、促进绿色发展的重要战略举措<sup>[1]</sup>。随着中国新能源汽车市场的扩大, 新能源汽车动力电池的数目呈指数级增长, 根据中国汽车研究中心数据统计, 中国退役动力电池累计数量在 2025 年将达到 78 万 t, 且市场规模将超过 400 亿元, 一旦动力电池中有毒电解质和重金属(如铬、钴和镍等)得不到有效处理, 将对生态环境和人类健康造成严重危害<sup>[2-4]</sup>。面对动力电池数目的增长以及对环境的影响, 动力电池的回收问题引起了市场的关注<sup>[5-6]</sup>。2020 年 1 月, 工信部发布了《新能源汽车退役动力电池综合利用行业标准条件》, 明确指出汽车企业应该承担起动力电池回收的主要责任, 自此许多电池生产商和整车生产商, 如宁德时代、大众汽车都开始建立起自己的动力电池回收系统。

目前针对新能源汽车动力电池回收方面的研究, 主要集中在政府补贴和回收过程中技术问题方面。在回收过程中的技术方面, Yun 等总结了机械程序和化学回收方面的现有回收技术<sup>[7]</sup>; 在补贴方面, Tang 等指出传统补贴机制的无效性, 并给出了奖惩机制下退役电动汽车电池回收的经济和环境影响<sup>[8]</sup>; Gu 等探讨了具有损失厌恶特征的电动车制造

收稿日期: 2023-03-15

基金项目: 上海市软科学项目(23692105100)

第一作者: 尤建新(1961—), 男, 教授, 博士生导师, 管理学博士, 主要研究方向管理理论与方法、创新与质量管理。

E-mail: yjx2256@vip.sina.com

通信作者: 任佳(1995—), 男, 博士生, 主要研究方向为管理理论与工业工程。E-mail: ren\_jia\_alston@126.com



论文  
拓展  
介绍

商在补贴和电池回收下的最佳电动车生产策略<sup>[9]</sup>。在实际的动力电池回收过程中,受到信息不对称的影响,经常存在回收主体间协调、回收溯源信息传递和回收过程监管等问题,主要由于主体之间缺乏信任而不愿意信息共享、企业利用自己的产品优势或信息资源优势向其他参与方实施压力<sup>[10]</sup>,比如在庞大的电池回收市场中,信息不透明导致无数的电池流入到非正规企业,造成了巨大的环境污染和安全隐患<sup>[5]</sup>,同时也造成电池的使用情况难以追踪。对于监管方来说,由于回收溯源体系的不完善,经常出现监管“盲点”现象,监管方不能掌控回收全流程,回收监管效率难以保证<sup>[11]</sup>。

针对动力电池回收过程中存在的信息不对称问题,现有学者提出可借助区块链技术的共识机制提升动力电池回收过程中的信息溯源效率,降低信息不对称的风险<sup>[12]</sup>。区块链技术作为一种新兴技术,具备信息可追溯性和共享性,为不同层级企业之间的有效联系提供保障和降低其风险<sup>[13]</sup>,另外区块链技术为智能合约提供了可信的执行环境,减少了双方交易过程中的人工操作风险,提高业务效率<sup>[14-15]</sup>。鉴于区块链技术的优势,将区块链技术引入到动力电池回收中具有重要意义,然而区块链技术应用于动力电池回收行业的研究仍处于初级阶段,企业作为引入区块链技术的微观主体,对区块链技术在动力电池行业中的发展起到重要推动作用,因此,有必要研究动力电池行业相关主体间区块链技术的投资行为演变规律。

考虑到电池生产商和整车生产商在动力电池回收过程中承担主要责任,本文以电池生产商和整车生产商为研究对象,基于演化博弈理论,构建出电池生产商、整车生产商和政府的三方演化博弈模型,分析三个博弈方之间的策略选择及演化均衡状态,得到各博弈方策略选择的影响因素,然后通过数值仿真,模拟区块链技术的特征优势和政府的参与对区块链技术投资系统的影响,期望从微观主体行为的角度促进区块链技术更好地应用于动力电池回收行业。

## 1 模型构建

### 1.1 模型假设

以电池生产商A和整车生产商B作为研究对象,A和B均为有限理性。当在回收动力电池过程中引入区块链技术时,为生产商企业降低信息不对称带来的风险,获得可观的收益,而政府可以通过对企业征税的形式获取收益。基于以上背景,本文提出以下模型假设:

假设1:电池生产商A和整车生产商B的策略集合为[投资,不投资], $x$ 和 $y$ 分别是A和B选择“投资”的概率, $1-x$ 和 $1-y$ 是他们不投资的概率,其中 $x,y \in [0,1]$ 。政府的策略集合为[参与、不参与],其中政府选择“参与”策略的概率为 $z$ ,选择“不参与”的概率为 $1-z,z \in [0,1]$ 。

假设2:电池生产商A和整车生产商B在不投资区块链技术时,各自的收益为 $\pi_a$ 和 $\pi_b$ ,由于区块链技术不仅能够消除动力电池回收过程中信息不对称的影响,而且其“智能合约技术”能够加快旧电池的回收速度,带来新的需求。同时由于旧电池具有分散性特征,区块链技术的可追溯性能够降低交易时间和成本,因此本文设区块链技术给电池生产商和整车生产商带来额外需求的收益分别为 $P_1$ 和 $P_2$ ;在回收的过程中因信息不对称等原因而产生的交易和收集成本为 $\pi_r$ ,引入区块链技术后,节省的交易和收集成本的最优系数为 $\alpha$ ,则额外技术收益为 $\alpha\pi_r$ ,其中 $0 \leq \alpha \leq 1$ 。

假设3:政府主体以税收的形式从电池生产商和整车生产商的区块链技术投资行为中获利,设税率为 $s$ 。当政府选择“参与”策略时,实施区块链技术投资策略的生产商将获得技术引入奖励 $I$ ,该奖励由生产商双方共同分配,电池生产商A分配系数为 $\delta$ ,生产商B的分配系数为 $\lambda$ ,同时受到政府监管的影响,区块链技术相关标准得以被规范,生产商企业的运营环境得到改善,因此会提高企业的收益,设提高的收益比例为 $\beta$ , $0 \leq \beta \leq 1$ ,其中政府因监管所支付的成本为 $C$ 。

假设4:不考虑的电池生产商和整车生产商的区块链技术投资成本,仅考虑区块链技术平台的维护成本,设为 $M$ ,若两个企业均投资区块链技术,则区块链技术平台维护成本由两个企业共同承担,各自承担的分配系数与技术引入奖励的分配系数一致。

假设5:当一个生产商选择“投资”时,而另一个生产商选择“不投资”时,后者由于“搭便车”可以获得部分区块链技术所带来的收益,设为 $N_a$ 和 $N_b$ 。

表1对模型中的相关参数进行了说明。

### 1.2 模型构建与均衡策略求解

基于以上问题描述和假设,构建电池生产商、整车生产商和政府主体的演化博弈支付矩阵,如表2所示。根据表2,电池生产商选择“投资”策略时的期望收益函数为

$$E_x = yz \left[ (1-s)(1+\beta)(\pi_a + \alpha\pi_r + P_1) + \delta I - \delta M \right] + y(1-z) \left[ (1-s)(\pi_a + \alpha\pi_r + P_1) - \delta M \right] + (1-y)z \left[ (1-s)(1+\beta) \times \right.$$

$$(\pi_a + \alpha\pi_r + P_1) + I - M] + (1 - y)(1 - z)[(1 - s)(\pi_a + \alpha\pi_r + P_1) - M] \quad (1)$$

表1 模型中涉及的相关参数

Tab.1 Relevant parameters involved in the model

| 参数        | 表示含义                  |
|-----------|-----------------------|
| $\pi_a$   | 生产商A在不投资区块链技术时的收益     |
| $\pi_b$   | 生产商B在不投资区块链技术时的收益     |
| $P_1$     | 区块链技术为生产商A带来的额外需求收益   |
| $P_2$     | 区块链技术为生产商B带来的额外需求收益   |
| $\alpha$  | 因区块链技术节省的交易和收集成本的最优系数 |
| $s$       | 政府对生产商征收的税率           |
| $I$       | 政府提供的技术引入奖励           |
| $\pi_r$   | 回收过程中因信息不对称产生的交易和收集成本 |
| $\delta$  | 生产商A的分配系数             |
| $\lambda$ | 生产商B的分配系数             |
| $\beta$   | 政府监管为生产商带来的间接收益率      |
| $C$       | 政府因监管所支付的成本为C         |
| $M$       | 区块链技术平台的维护成本          |
| $N_a$     | 电池生产商因“搭便车”行为的额外收益    |
| $N_b$     | 整车生产商因“搭便车”行为的额外收益    |

电池生产商选择“不投资”策略时的期望收益函数为

$$E_{1-x} = yz(1 - s)(1 + \beta)(\pi_a + N_a) + y(1 - z)(1 - s)(\pi_a + N_a) + (1 - y)z(1 - s) \times (1 + \beta)\pi_a + (1 - y)(1 - z)(1 - s)\pi_a \quad (2)$$

整车生产商选择“投资”策略时的期望收益函数为

$$E_y = xz[(1 - s)(1 + \beta)(\pi_b + \alpha\pi_r + P_2) + \lambda I - \lambda M] + x(1 - z)[(1 - s)(\pi_b + \alpha\pi_r + P_2) - \lambda M] + (1 - x)z[(1 - s)(1 + \beta) \times (\pi_b + \alpha\pi_r + P_2) + I - M] + (1 - x)(1 - z)[(1 - s) \times (\pi_b + \alpha\pi_r + P_2) - M] \quad (3)$$

整车生产商选择“不投资”策略时的期望收益函数为

数为

$$E_{1-y} = xz(1 - s)(1 + \beta)(\pi_b + N_b) + x(1 - z) \times (1 - s)(\pi_b + N_b) + (1 - x)z(1 - s) \times (1 + \beta)\pi_b + (1 - x)(1 - z)(1 - s)\pi_b \quad (4)$$

政府选择“参与”策略时的期望收益函数为

$$E_z = xy[s(1 + \beta)(\pi_a + \pi_b + 2\alpha\pi_r + P_1 + P_2) - I - C] + x(1 - y)[s(1 + \beta)(\pi_a + \pi_b + \alpha\pi_r + P_1 + N_b) - I - C] + (1 - x) \times y[s(1 + \beta)(\pi_a + \pi_b + \alpha\pi_r + P_2 + N_a) - I - C] + (1 - x)(1 - y)[s(1 + \beta) \times (\pi_a + \pi_b) - C] \quad (5)$$

政府选择“不参与”策略时的期望收益函数为

$$E_{1-z} = xys(\pi_a + \pi_b + 2\alpha\pi_r + P_1 + P_2) + x(1 - y) \times s(\pi_a + \pi_b + \alpha\pi_r + P_1 + N_b) + (1 - x)y \times s(\pi_a + \pi_b + \alpha\pi_r + P_2 + N_a) + (1 - x) \times (1 - y)s(\pi_a + \pi_b) \quad (6)$$

基于式(1)~式(6),得到区块链技术投资系统中各利益主体的复制动态方程组,如式(7)所示,其中 $f(x, y, y), g(x, y, z)$ 以及 $h(x, y, z)$ 分别表示电池生产商、整车生产商和政府的复制动态方程。

$$f(x, y, y) = x(x - 1)(M - P_1 - \alpha\pi_r + P_1s - Iz - My + N_a y + \alpha\pi_r s - P_1\beta z + M\delta y - N_a s y + Iyz + N_a\beta yz - I\delta yz - \alpha\pi_r\beta z + P_1\beta s z + \alpha\pi_r\beta s z - N_a\beta s y z) \quad (7)$$

$$g(x, y, z) = y(y - 1)(M - P_2 - \alpha\pi_r + P_2s - Iz - Mx + N_b x + \alpha\pi_r s - P_2\beta z + M\lambda x - N_b s x + Izx + N_b\beta x z - I\lambda x z - \beta\alpha\pi_r z + P_2\beta s z + \beta\alpha\pi_r s z - N_b\beta s x z)$$

表2 参与主体的博弈支付矩阵

Tab.2 Game payment matrix for participating subjects

| 企业主体策略(A, B) | 支付函数  | 政府                                                                      |                                                  |
|--------------|-------|-------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|
|              |       | 参与                                                                      | 不参与                                              |
| (投资, 投资)     | 电池生产商 | $(1 - s)(1 + \beta)(\pi_a + \alpha\pi_r + P_1) + \delta I - \delta M$   | $(1 - s)(\pi_a + \alpha\pi_r + P_1) - \delta M$  |
|              | 整车生产商 | $(1 - s)(1 + \beta)(\pi_b + \alpha\pi_r + P_2) + \lambda I - \lambda M$ | $(1 - s)(\pi_b + \alpha\pi_r + P_2) - \lambda M$ |
|              | 政府    | $s(1 + \beta)(\pi_a + \pi_b + 2\alpha\pi_r + P_1 + P_2) - I - C$        | $s(\pi_a + \pi_b + 2\alpha\pi_r + P_1 + P_2)$    |
| (投资, 不投资)    | 电池生产商 | $(1 - s)(1 + \beta)(\pi_a + \alpha\pi_r + P_1) + I - M$                 | $(1 - s)(\pi_a + \alpha\pi_r + P_1) - M$         |
|              | 整车生产商 | $(1 - s)(1 + \beta)(\pi_b + N_b)$                                       | $(1 - s)(\pi_b + N_b)$                           |
|              | 政府    | $s(1 + \beta)(\pi_a + \pi_b + \alpha\pi_r + P_1 + N_b) - I - C$         | $s(\pi_a + \pi_b + \alpha\pi_r + P_1 + N_b)$     |
| (不投资, 投资)    | 电池生产商 | $(1 - s)(1 + \beta)(\pi_a + N_a)$                                       | $(1 - s)(\pi_a + N_a)$                           |
|              | 整车生产商 | $(1 - s)(1 + \beta)(\pi_b + \alpha\pi_r + P_2) + I - M$                 | $(1 - s)(\pi_b + \alpha\pi_r + P_2) - M$         |
|              | 政府    | $s(1 + \beta)(\pi_a + \pi_b + \alpha\pi_r + P_2 + N_a) - I - C$         | $s(\pi_a + \pi_b + \alpha\pi_r + P_2 + N_a)$     |
| (不投资, 不投资)   | 电池生产商 | $(1 - s)(1 + \beta)\pi_a$                                               | $(1 - s)\pi_a$                                   |
|              | 整车生产商 | $(1 - s)(1 + \beta)\pi_b$                                               | $(1 - s)\pi_b$                                   |
|              | 政府    | $s(1 + \beta)(\pi_a + \pi_b) - C$                                       | $s(\pi_a + \pi_b)$                               |

$$h(x, y, z) = z(1-z)(\pi_a\beta s - Ix - Iy - C + \pi_b\beta s + Ixy + N_b\beta sx + N_a\beta sy + P_1\beta sx + P_2\beta sy + \alpha\pi_r\beta sx + \alpha\pi_r\beta sy - N_a\beta sxy - N_b\beta sxy)$$

令3个主体的复制动态方程等于0,求得纳什均衡点,得到三方博弈系统中具有实际意义的8个均衡点,并分别求出对应的特征值,表3为局部均衡点及其特征值。

表3 均衡点及其特征值

Tab.3 Equilibrium points and their eigenvalues

| 均衡点            | 特征值                                                       | 特征值                                                         | 特征值                                                         |
|----------------|-----------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| $E_1(0, 0, 0)$ | $(1-s)(\alpha\pi_r + P_1) - M$                            | $(1-s)(\alpha\pi_r + P_2) - M$                              | $\beta s(\pi_a + \pi_b) - C$                                |
| $E_2(1, 0, 0)$ | $M - (1-s)(\alpha\pi_r + P_1)$                            | $(1-s)(\alpha\pi_r + P_2 - N_b) - \lambda M$                | $\beta s(\pi_a + \pi_b + N_b + \alpha\pi_r + P_1) - I - C$  |
| $E_3(0, 1, 0)$ | $(1-s)(\alpha\pi_r + P_1 - N_a) - \delta M$               | $M - (1-s)(\alpha\pi_r + P_2)$                              | $\beta s(\pi_a + \pi_b + N_a + \alpha\pi_r + P_2) - I - C$  |
| $E_4(0, 0, 1)$ | $I - M + (1+\beta)(1-s)(\alpha\pi_r + P_1)$               | $I - M + (1+\beta)(1-s)(\alpha\pi_r + P_2)$                 | $C - \beta s(\pi_a + \pi_b)$                                |
| $E_5(1, 0, 1)$ | $M - I - (1+\beta)(1-s)(\alpha\pi_r + P_1)$               | $\lambda(I - M) - (1+\beta)(1-s)(-\alpha\pi_r - P_2 + N_b)$ | $I + C - \beta s(\pi_a + \pi_b + N_b + \alpha\pi_r + P_1)$  |
| $E_6(1, 1, 0)$ | $\delta M - (1-s)(\alpha\pi_r - N_a + P_1)$               | $\lambda M - (1-s)(\alpha\pi_r - N_b + P_2)$                | $\beta s(\pi_a + \pi_b + P_1 + P_2 + 2\alpha\pi_r) - I - C$ |
| $E_7(0, 1, 1)$ | $\delta(I - M) - (1+\beta)(1-s)(N_a - P_1 - \alpha\pi_r)$ | $(M - I) - (1+\beta)(1-s)(\alpha\pi_r + P_2)$               | $I + C - \beta s(\pi_a + \pi_b + N_a + \alpha\pi_r + P_2)$  |
| $E_8(1, 1, 1)$ | $\delta(M - I) - (1+\beta)(1-s)(\alpha\pi_r - N_a + P_1)$ | $\lambda(M - I) - (1+\beta)(1-s)(\alpha\pi_r - N_b + P_2)$  | $I + C - \beta s(\pi_a + \pi_b + P_1 + 2\alpha\pi_r + P_2)$ |

## 2 均衡点稳定性分析

通过对8个可能的演化均衡点的特征值分析,发现汽车生产商区块链技术投资系统的稳定性受到相关参数影响,为了更好地分析电池生产商和整车生产商的区块链技术投资行为以及政府的参与行为演化特征,选取可能的均衡点  $E_2(1, 0, 0)$ 、 $E_5(1, 0, 1)$ 、 $E_6(1, 1, 0)$ 和  $E_8(1, 1, 1)$ 进行分析,采用 Matlab 软件分别仿真模拟这4种情形下的多主体策略的复制动态过程。在验证系统均衡点的稳定过程中,假设初始状态下电池生产商和整车生产商均以0.5的概率选择“投资”策略,政府主体以0.5的概率选择“参与”策略,即系统的初始状态为(0.5, 0.5, 0.5)。根据以下4种情形设置仿真参数,部分参数取值参考刘亚婕等人的研究<sup>[16]</sup>,如表4所示。

表4 仿真参数

Tab.4 Simulation parameters

| 参数        | 参数值            |                |                |                |
|-----------|----------------|----------------|----------------|----------------|
|           | $E_2(1, 0, 0)$ | $E_5(1, 0, 1)$ | $E_6(1, 1, 0)$ | $E_8(1, 1, 1)$ |
| $\pi_a$   | 400            | 400            | 400            | 400            |
| $\pi_b$   | 450            | 450            | 450            | 450            |
| $P_1$     | 300            | 300            | 300            | 300            |
| $P_2$     | 250            | 250            | 270            | 270            |
| $\alpha$  | 0.3            | 0.3            | 0.3            | 0.3            |
| $s$       | 0.2            | 0.2            | 0.2            | 0.2            |
| $I$       | 80             | 40             | 80             | 80             |
| $\pi_r$   | 100            | 100            | 100            | 100            |
| $\delta$  | 0.6            | 0.6            | 0.6            | 0.6            |
| $\lambda$ | 0.4            | 0.4            | 0.4            | 0.4            |
| $\beta$   | 0.7            | 0.7            | 0.7            | 0.7            |
| $C$       | 150            | 120            | 150            | 120            |
| $M$       | 100            | 200            | 100            | 100            |
| $N_a$     | 200            | 200            | 200            | 200            |
| $N_b$     | 232            | 240            | 232            | 232            |

### 2.1 均衡点1: $E_2(1, 0, 0)$

当  $M < (1-s)(\alpha\pi_r + P_1)$ ,  $(1-s)(\alpha\pi_r + P_2) - (1-s)N_b < \lambda M$ ,  $\beta s(\pi_a + \pi_b + N_b + \alpha\pi_r + P_1) < I + C$ 时,即电池生产商在区块链技术投资行为中获得收益大于平台维护成本,整车生产商所获得的超额收益小于平台维护成本,以及政府收益小于参与成本时,均衡点  $E_2(1, 0, 0)$ 为系统的稳定点,对应的策略为(投资,不投资,不参与)。如图1所示,在该情形中,电池生产商投资区块链技术获得的收益高于独自承担的区块链技术平台维护成本,电池生产商的投资意愿加强,整车生产商初期选择“投资”策略的意愿呈现上升的趋势,但经过主体多次重复博弈之后,整车生产商发现通过“搭便车”行为所获得收益逐渐与投资区块链技术获得的收益相近,此时整车生产商选择“不投资”策略的意愿更加强烈,对于政府而言,参与所付出的成本高于所获得的收益,因此参与意愿迅速降低。

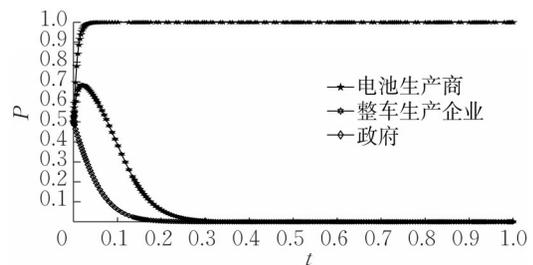


图1  $E_2(1, 0, 0)$ 的稳定性检验

Fig.1 Stability test for  $E_2(1, 0, 0)$

### 2.2 均衡点2: $E_5(1, 0, 1)$

当  $M < I + (1+\beta)(1-s)(\alpha\pi_r + P_1)$ ,  $(1+$

$\beta)(1-s)(\alpha\pi_r + P_2 - N_b) + \lambda I < \lambda M$ ,  $I + C < \beta s(\pi_a + \pi_b + N_b + \alpha\pi_r + P_1)$ , 即电池生产商在政府资助的情况下, 区块链技术投资行为中获得收益大于平台维护成本, 整车生产商所获得的超额技术收益与平台维护成本之和大于所获得的政府资助, 以及政府收益大于参与成本时, 均衡点  $E_5(1, 0, 1)$  为系统的稳定点, 对应的策略为(投资, 不投资, 参与)。如图2所示, 当资助监管所付出的成本远低于所获得的收益, 政府选择“参与”策略, 电池生产商发现区块链技术所带来的收益大于平台维护成本, 同时还可以受到政府资助, 因此更加快速地趋向于稳定状态的速度。经过多次博弈后, 整车生产商发现通过“搭便车”行为所获得收益逐渐接近投资区块链技术获得的收益, 并且即使受到政府的正向激励, 所获得的总收益依旧低于平台维护的成本, 因此整车生产商选择“不投资”策略的意愿更加强烈, 因此加快了趋向于该稳定状态的速度。

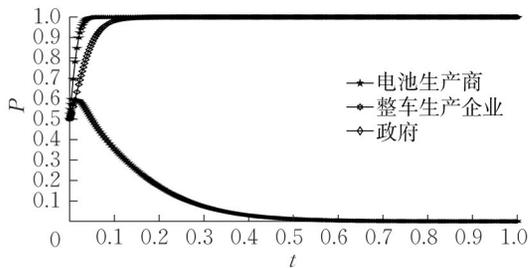


图2  $E_5(1, 0, 1)$ 的稳定性检验  
Fig.2 Stability test for  $E_5(1, 0, 1)$

2.3 均衡点3:  $E_6(1, 1, 0)$

当  $\delta M < (1-s)(\alpha\pi_r - N_a + P_1)$ ,  $\lambda M < (1-s)(\alpha\pi_r - N_b + P_2)$ ,  $\beta s(\pi_a + \pi_b + P_1 + P_2 + 2\alpha\pi_r) < I + C$ , 即电池生产商和整车生产商所获得技术收益均大于平台维护成本, 以及政府收益小于参与成本时, 均衡点  $E_6(1, 1, 0)$  为系统的稳定点, 对应的策略为(投资, 投资, 不参与)。如图3所示, 不管是电池生产商还是整车生产商, 均发现投资区块链技术时, 区块链技术为其所带来的收益远大于“搭便车”所带来的收益时, 即使在没有政府参与的情况下, 收益也足够承担各自所分配的平台维护成本, 因此两类企业均选择“投资”策略, 并在较短的时间内达到稳定状态, 而对于政府而言, 参与所付出的成本高于所获得的收益, 因此政府依旧选择“不参与”策略。

2.4 均衡点4:  $E_8(1, 1, 1)$

当  $\delta M < \delta I + (1+\beta)(1-s)(\alpha\pi_r - N_a + P_1)$ ,  $\lambda M < \lambda I + (1+\beta)(1-s)(\alpha\pi_r - N_b + P_2)$ ,  $I + C <$

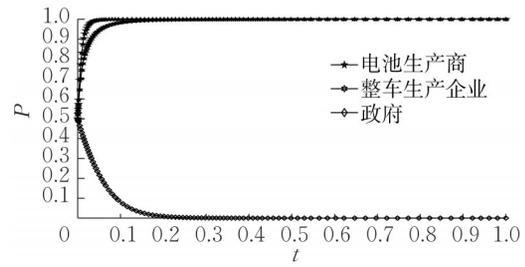


图3  $E_6(1, 1, 0)$ 的稳定性检验  
Fig.3 Stability test for  $E_6(1, 1, 0)$

$\beta s(\pi_a + \pi_b + P_1 + 2\alpha\pi_r + P_2)$ , 即电池生产商和整车生产商在政府资助的情况下, 区块链技术投资行为中获得收益大于平台维护成本, 以及政府收益大于参与成本时, 均衡点  $E_8(1, 1, 1)$  为系统的稳定点, 对应的策略为(投资, 投资, 参与)。如图4所示, 电池生产商和整车生产商发现, 自己主动投资区块链技术时, 所获得的收益远大于“搭便车”所带来的收益, 同时主动行为还可以受到政府激励, 因此两类生产商企业均选择“投资”策略, 并且趋向于稳定状态的速度较快。对于政府而言, 企业缴纳的超额技术收益税收高于参与成本, 政府选择“参与”策略的概率也逐步提高, 最终趋于稳定。

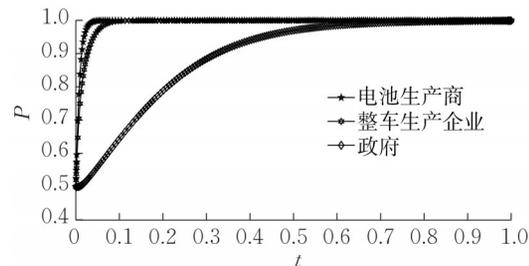


图4  $E_8(1, 1, 1)$ 的稳定性检验  
Fig.4 Stability test for  $E_8(1, 1, 1)$

3 数值实验与仿真

通过对电池生产商和整车生产商区块链技术投资过程的分析, 发现电池生产商和整车生产商在区块链技术投资系统中的策略选择主要与区块链技术所带来的额外收益以及区块链技术平台维护成本有关。为促进区块链技术更好地被引入到动力电池回收行业中, 有必要分析区块链技术的优势对汽车生产商区块链技术投资系统演化的影响, 同时考虑到区块链技术的应用仍处于初期阶段, 政府的作用不可以被忽视, 因此本文也将政府参与相关的因素纳入到分析当中。

3.1 区块链技术参数对区块链技术投资系统演化的影响

区块链技术的可追溯性和透明性, 以及智能合约

技术降低了新能源动力电池回收过程中信息不对称性的影响,降低了交易时间和运营成本,因此本文通过设置不同的区块链技术最优系数 $\alpha$ ,来分析其对博弈各方演化趋势的影响。在保持其他变量不变的基础上,分别设定 $\alpha$ 为0.1,0.5和0.9。如图5所示,最优系数的变化不会改变整体系统的稳定均衡状态,但对不同的博弈主体趋向稳态的速度产生影响,较高的

最优系数加快了系统整体趋向理想均衡状态,说明博弈各主体对于较高的最优系数更加敏感。另外通过比较图5a和b,发现电池生产商比整车生产商更快地趋向稳定均衡状态,这是由于在仿真的过程中,为电池生产商设置了较高的成本分担和技术奖励的分配系数,这间接说明成本分担和技术奖励会对企业的区块链技术投资行为有正向促进影响。

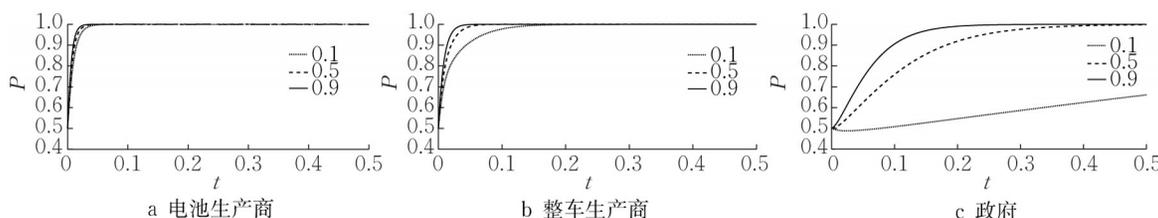


图5 最优系数 $\alpha$ 对区块链技术投资系统演化的影响

Fig.5 The impact of optimality factor  $\alpha$  on the evolution of blockchain technology investment systems

3.2 政府参与对区块链技术投资系统演化的影响

本文将政府参与行为分为技术引进奖励和因监管产生的间接收益,通过设置差异化的 $I$ 值和 $\beta$ 值,分别设定 $I$ 为20,50和80; $\beta$ 为0.68,0.75和0.95。如图6所示,电池生产商和整车生产商对政府技术引进奖励变化的敏感度较低,技术引进奖励的波动对于相关企业进行区块链技术投资行为的影响较

弱,但是相比于整车生产商,电池生产商趋于理想均衡状态的速度更快,说明电池生产商进行区块链技术投资的意愿更强。与企业不同,政府主体的策略选择对技术引进奖励的波动更加敏感,更低的奖励支出( $I=20$ )会使得政府在较短时间内提高参与意愿,趋向均衡状态的速度远大于高的奖励支出下的对应速度。

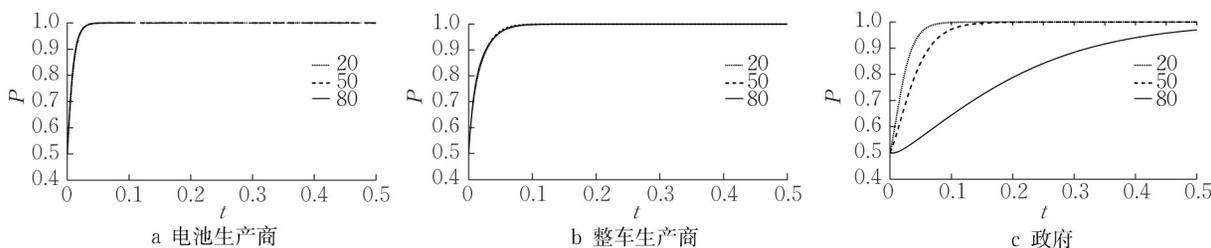


图6 技术引进奖励对区块链技术投资系统演化的影响

Fig.6 The impact of technology introduction incentives on the evolution of blockchain technology investment systems

如图7所示,因政府监管而形成的间接收益率不会改变整体系统的稳定均衡状态,但对不同的博

弈主体趋向稳态的速度产生影响,较高的间接收益率加快了系统整体趋向理想均衡状态,说明博弈各

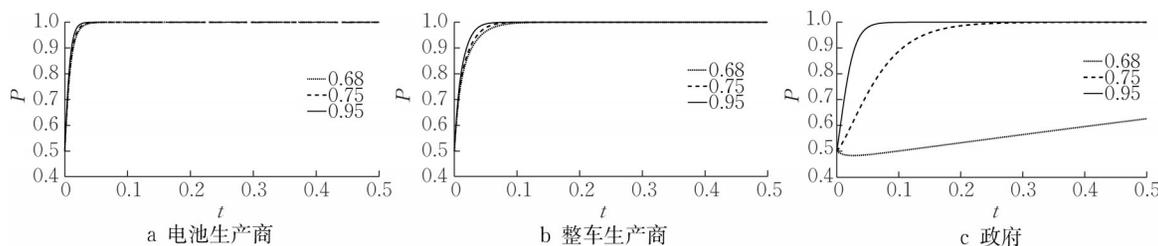


图7 政府监管而形成的间接收益率对区块链技术投资系统演化的影响

Fig.7 The impact of indirect benefits resulting from government regulation on the evolution of blockchain technology investment systems

主体对间接收益率的波动较为敏感。对于电池生产商和整车生产商,较高的间接收益率会促进他们积极主动采取区块链技术投资行为。对于政府而言,较高的间接收益率会使得政府在短时期内促进系统达到理想均衡状态,说明政府即使支付了较高的间接收益成本,但能够很快地从电池生产商和整车生产商所支付的税收收益中得到较高的补偿,因此政府在这种情形下,实施监管的意愿更加强烈,这也有利于动力电池回收过程中汽车生产商和政府实现双赢的局面,同时避免社会资源浪费,促进区块链技术在企业运营中的发展。

## 4 结束语

不同于以往专注于区块链技术在回收过程中的技术问题和回收补贴问题的研究,本文考虑到企业微观主体在区块链技术发展中的作用,从汽车生产商行为的角度出发,探讨电池生产商和整车生产商两类参与主体在政府参与下的区块链技术投资行为演变过程,并重点分析了区块链技术和政府行为的相关参数对区块链技术投资系统演化的影响。研究表明汽车生产商在区块链技术投资系统中的策略选择与区块链技术所带来的额外收益有关;区块链技术带来的优势、政府所提供的间接收益率都能促进区块链技术投资系统较快地趋向理想均衡状态,而技术引进奖励的波动则对这一速度影响较小。研究结果为推动汽车生产商积极主动投资区块链技术,促进区块链技术更好地应用于动力电池行业提供理论指导。

### 作者贡献声明:

尤建新:提出选题并设计技术路线;

任佳:整理文献基础上构建模型和论文撰写。

### 参考文献:

- [1] 李进兵. 战略性新兴产业创新系统演化进程与驱动力[J]. 科学学研究, 2016, 34(9): 1426.  
LI Jinbing. Study on the innovation system evolutionary proceedings and driving forces of the strategic emerging industry [J]. Studies in Science of Science, 2016, 34(9): 1426.
- [2] LIU S, GONG D. Modeling and simulation on recycling of electric vehicle batteries—using agent approach [J]. International Journal of Simulation Modelling, 2014, 13: 79.
- [3] THIEL C, PERUJO A, MERCIER A. Cost and CO<sub>2</sub> aspects of future vehicle options in Europe under new energy policy scenarios[J]. Energy Policy, 2010, 38: 7142.
- [4] KANG D H P, CHEN M, OGUNSEITAN O A. Potential environmental and human health impacts of rechargeable lithium batteries in electronic waste [J]. Environmental Science and Technology, 2013, 47: 5495.
- [5] GU X, IEROMONACHOU P, ZHOU L, *et al.* Optimising quantity of manufacturing and remanufacturing in an electric vehicle battery closed-loop supply chain [J]. Industrial Management & Data Systems, 2017, 118: 283.
- [6] KHOSHAND A, KHANLARI K, ABBASIANJAHROMI H *et al.* Construction and demolition waste management: Fuzzy Analytic Hierarchy Process approach [J]. Waste Management and Research, 2020, 38: 773.
- [7] YUN L, LINH D, SHUI L, *et al.* Metallurgical and mechanical methods for recycling of lithiumion battery pack for electric vehicles [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2018, 136: 198.
- [8] TANG Y, ZHANG Q, LI Y, *et al.* The social-economic-environmental impacts of recycling retired EV batteries under reward-penalty mechanism [J]. Applied Energy, 2019, 251: 113313.
- [9] GU H, LIU Z, QING Q. Optimal electric vehicle production strategy under subsidy and battery recycling [J]. Energy Policy, 2017, 109: 579.
- [10] KETCHEN JR D J, GTM HULT. Toward greater integration of insights from organization theory and supply chain management [J]. Journal of Operations Management, 2007, 25 (2): 455.
- [11] 周兴建, 黎继子, 李菲, 等. 基于Blockchain的新能源汽车动力电池回收供应链模式 [J]. 计算机集成制造系统, 2023(4): 1  
ZHOU Xingjian, LI Jizi, LI Fei, *et al.* Recycling supply chain mode of new energy vehicle power battery based on Blockchain technology [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2023(4): 1
- [12] XING P, YAO J. Power battery echelon utilization and recycling strategy for new energy vehicles based on blockchain technology [J]. Sustainability, 2022, 14: 11835.
- [13] FAN Z P, WU X Y, CAO B B. Considering the traceability awareness of consumers: should the supply chain adopt the blockchain technology [J]. Annals of Operations Research, 2022, 309: 837.
- [14] CHANG Y, IAKOVOU E, SHI W. Blockchain in global supply chains and cross border trade: A critical synthesis of the state-of-the-art, challenges and opportunities [J]. International Journal of Production Research, 2019, 58: 2082.
- [15] SHEN B, XU X, YUAN Q. Selling secondhand products through an online platform with blockchain [J]. Transportation Research Part E—Logistics and Transportation Review, 2020, 142: 102066.
- [16] 刘亚婕, 董锋. 政府参与下新能源汽车企业间协同创新的竞争策略研究 [J]. 研究与发展管理, 2022, 34(5): 136.  
LIU Yajie, DONG Feng. Co-opetition Strategy of collaborative innovation for new energy automobile enterprises under government participation [J]. R&D Management, 2022, 34(5): 136.