

文章编号: 1005-0523(2025)04-0100-10



基于区块链的动力电池溯源系统博弈分析

李卓群^{1,2}, 韦锦松^{1,2}, 邵岩祠^{1,2}

(1. 华东交通大学综合立体交通信息感知与融合江西省重点实验室, 江西南昌 330013;

2. 华东交通大学交通运输工程学院, 江西南昌 330013)

摘要:针对新能源汽车动力电池回收中的信息不对称和管理低效问题,探索基于区块链的溯源系统,以提高回收效率与透明度,减少环境威胁。利用区块链技术实现动力电池全生命周期的溯源管理,并通过演化博弈理论构建仿真模型,分析电池生产商、整车制造商及政府的策略互动及其对系统稳定性的影响。仿真结果表明,区块链溯源系统通过合理的激励机制和政策设计,显著提升了动力电池回收体系的透明度与管理效率,减轻了信息不对称的负面影响。区块链溯源系统在提高动力电池回收管理效率方面具有显著优势,并为政策制定者提供科学依据,促进了新能源汽车回收体系的有效性与创新应用潜力。

关键词:区块链技术;动力电池回收;溯源;演化博弈;仿真分析

中图分类号:F542;TM912.9

文献标志码:A

本文引用格式:李卓群,韦锦松,邵岩祠.基于区块链的动力电池溯源系统博弈分析[J].华东交通大学学报,2025,42(4):100-109.

Game Analysis of Blockchain-Based Traceability System for New Energy Battery

Li Zhuoqun^{1,2}, Wei Jinsong^{1,2}, Shao Yanci^{1,2}

(1. Jiangxi Provincial Key Laboratory of Comprehensive Stereoscopic Traffic Information Perception and Fusion,

East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 2. School of Transportation Engineering,

East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: This study addresses the challenges of information asymmetry and inefficiency in the recycling of new energy vehicle batteries by exploring a blockchain-based traceability system aimed at improving recycling efficiency, transparency, and reducing environmental risks. Blockchain technology was employed in the management of the full lifecycle of power batteries. An evolutionary game model was constructed to analyze the strategic interactions among battery manufacturers, vehicle manufacturers and the government, assessing their impact on system stability. Simulation results reveal that the blockchain traceability system, supported by appropriate incentive mechanisms and policy designs, significantly improves transparency and the efficiency of battery recycling management, while mitigating the negative effects of information asymmetry. The blockchain-based traceability system provides notable advantages in enhancing the management efficiency of power battery recycling. It offers a scientific foundation for policymakers, encouraging innovation and promoting the effectiveness of new energy battery recycling systems.

收稿日期: 2024-02-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(71761011);江西省重点研发计划“揭榜挂帅”项目(20224BBE51051)

Key words: blockchain technology; power battery recycling; new energy; traceability; evolutionary game; simulation analysis

Citation format: LI Z Q, WEI J S, SHAO Y C. Game analysis of blockchain-based traceability system for new energy battery[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2025, 42(4): 100–109.

随着全球对可持续发展理念的日益重视,新能源汽车作为减少碳排放的重要手段,其市场份额持续增长,大量动力电池的退役和回收问题正成为行业亟待解决的关键挑战。电池回收作为循环经济的核⼼部分^[1],其重要性愈发凸显。

目前,动力电池回收过程中存在信息不对称和管理低效的问题^[2]。回收链条涉及多个主体,包括电池生产商、整车制造商及监管机构等,各主体之间缺乏有效的信息共享,导致难以掌握电池的状态和剩余价值。此外,传统的回收模式依赖中心化管理,信息处理、资源调配和监管执行方面存在诸多局限性,导致信息流通不畅、资源分配不均以及监管不力。这些问题不仅降低了回收效率,还可能导致部分回收商采取不规范操作,废旧电池的不当处理对环境构成了严重威胁,每一块电池的来⼾去向是否规范,直接关乎社会安全^[3]。

区块链技术凭借其去中心化、不可篡改和高度透明的特性^[4-5],为动力电池回收提供了一种创新性解决方案。通过区块链系统,电池从生产到使用再到回收的全生命周期都能够得到透明、可追溯的管理。同时,合理分析并优化影响回收体系的各类策略,是构建高效回收体系的关键。因此,借助区块链平台,电池生产商、整车制造商、回收商及监管机构能够共享并实时追踪电池在回收过程中的状态,从而显著提升信息流通的效率,减少信息不对称带来的误差和资源浪费,最终提高资源利用率并降低环境影响。

在动力电池回收过程中,区块链技术的引入不仅为解决信息不对称和提高回收效率提供了技术支持,也为各主体的协同合作奠定了基础。为此,国内外学者开展了大量研究,探索区块链技术在电池追踪与回收领域中的应用路径和具体实施方案。

在动力电池追踪和回收技术的具体应用中,Regueiro等^[6]提出的基于区块链的翻新认证系统,通过跟踪电池的生命周期,提高了消费者对翻新电

池的信任度。Antônio等^[7]探讨了基于区块链的电池追踪平台的重要性,认为此类平台可以有效地监控电池的性能以提高回收效率。Subramanian等^[8]提出了一种利用混合区块链技术全面追踪电动汽车供应链生命周期的方法,确保供应链记录的可靠性和透明度。周兴建等^[9]则构建了基于区块链技术的新能源汽车动力电池回收供应链体系,并利用数据包络分析方法对回收效率进行了评价,发现基于区块链的供应链模式比传统模式更具效率。

根据上述的文献分析,动力电池回收效率的提升和成本的优化在很大程度上取决于供应链的高效协作,而区块链技术在这一过程中展现出了巨大的潜力。然而,区块链技术的广泛应用不仅依赖技术成熟度,更需协调电池生产商、整车制造商与政府等多方主体的策略互动。尽管区块链技术能够显著提升数据透明度,但企业往往因短期经济利益而在信息上链过程中有所顾虑^[10],尤其是在权衡长期收益方面考虑不足。因此,动力电池回收体系中各参与方的策略选择,直接决定了区块链技术能否真正发挥效用。正如尤建新等^[11]所构建的动力电池区块链技术投资的演化博弈模型,分析了政府参与下汽车生产商的区块链技术投资行为。刘琦铀等^[12]通过构建复杂网络演化博弈模型,探讨了农户融资上链行为的影响因素。而Yi等^[13]研究了区块链在新能源汽车供应链退役电池回收中的应用,构建了Stackelberg博弈模型,揭示该技术在降低信息泄露、增强信任与优化供应链协调方面的作用。冯章伟等^[14]利用Stackelberg博弈模型研究了新能源汽车制造商和电池供应商的策略选择,发现区块链溯源技术通过提升溯源水平,从而促进了新能源汽车销量和电池回收效率。此外,政府政策对市场行为的影响也是研究的重要领域。吴君民等^[15]探讨了双积分政策对车企协同创新和政府激励机制的影响。Li等^[16]揭示了政府补贴对回收商提升回收效率的显著作用。

综上所述,区块链技术在动力电池回收领域展现出显著潜力,但其有效应用仍需多方协作与政策支持。本文通过构建基于区块链溯源的演化博弈模型,重点探讨政府、生产商和其他参与者之间的博弈关系,旨在推动动力电池回收体系的改进,促进区块链技术在新能源领域的有效应用,最终实现资源高效利用和环境保护的目标。

1 三方演化博弈模型的构建

1.1 问题描述

传统电池溯源模式存在信息不对称、管理成本高、效率低等问题,引入区块链技术可以有效解决这些挑战。通过区块链技术,各方参与者在去中心化的平台上共享和验证信息,从而实现全程信息的可追溯性。生产阶段,电池生产商将批次、型号及重要参数上传至区块链系统;在安装和使用阶段,整车制造商更新电池信息;政府作为监管方介入,负责对上链过程的规范性进行监管,确保各环节的合规和透明。基于此溯源模式,本文以电池生产商、整车制造商和政府为研究对象,构建三方演化博弈模型。

1.2 模型假设

在区块链溯源系统中以电池生产商、整车制造商和政府为研究对象,均为有限理性。对电池生产商而言,上链的信息在未来的回收流程中为其降低信息不对称所带来的风险,选择上链获得相应的利益。对于整车制造商,积极履行其回收责任可以提升整车制造商的品牌形象和市场信誉。政府通过向参与电池回收的企业征税,从而获得财政收入,并对整个系统中的上链行为实施监管。此外,对违规行为所征收的罚款也构成政府收入的一部分。鉴于前文所述情境,本研究制定了接下来的理论假设框架:

假设 1: 电池生产商和整车制造商的策略集合为[上链,不上链]。 x, y 分别为电池生产商和整车制造商选择“上链”的概率; $1-x$ 和 $1-y$ 分别为选择信息不上链的概率,其中 $x, y \in [0, 1]$ 。政府的策略集合为[强监管,弱监管],其中政府选择“强监管”策略的概率为 z , 选择“弱监管”的概率为 $1-z$, $z \in [0, 1]$ 。

假设 2: 电池生产商 A 和整车制造商 B 的基本收益分别为 R_A, R_B 。假设区块链溯源系统在初次

上线时需要支付建设成本,不同企业的溯源信息复杂程度各不相同,所需的上线建设成本也存在差异^[17-18]。电池生产商、整车制造商的上线建设成本分别记为 C_A, C_B 。在区块链系统建设完成后,各企业仍需支付固定的上链成本 c 。鉴于区块链溯源系统具备不可篡改和高度可追溯的特性,显著降低了电池回收流程中信息不对称所带来的风险。可以设定,当电池信息成功上链后,电池生产商、整车制造商能够获得的额外经济收益分别表示为 b_A 和 b_B 。

假设 3: 在其上链过程中,不同的企业会根据其在区块链溯源系统中的策略,选择提交信息的完整度,这直接影响其在整个供应链中的角色定位和收益预期。所提供的电池信息的完整度设为 $\theta_i \in (0, 1], i \in \{A, B\}$, 其中信息的完整度 θ_i 与企业需承担的成本正相关,即完整度越高,其相关成本包括收集、验证和处理信息的费用也越高。这一关系可以用完整度成本函数 $C(\theta_i) = m\theta_i + c + C_i$, $i \in \{A, B\}$ 来表示,其中 m 为每单位完整度增加所带来的成本增量。信息完整度的提升增加了可溯源性,并增加了消费者的信任,并可能带来额外的市场份额和收益。收益函数可以表示为 $S(\theta) = n\theta_i + b_i, i \in \{A, B\}$, 其中 n 为单位完整度的收益系数, $n > m$ 以保证企业有上链的动力。企业的目标是最大化其净收益,即收益与成本之差 $\pi(\theta) = S(\theta) - C(\theta)$ 。企业将通过调整信息的完整度 θ_i 来平衡其额外的收益和成本。

假设 4: 在本模型中,我们考虑了市场互联性,即各方的收益不仅取决于自身的策略选择,还受到市场整体状况的影响。市场整体状况由所有对象的行为共同决定^[19]。引入负面交互效应系数 δ , 表示不上链的对象对其他对象收益的负面影响程度。本模型还考虑了政府如何通过税收、监管等政策影响电动汽车动力电池回收溯源系统。政府通过设定税率 s 从企业的区块链上链行为中获得税收。同时,政府面临着监管成本,包括固定成本 M 和与监管强度相关的变动成本 M_V 。在强监管的策略下, F_A 和 F_B 分别为电池生产商、整车制造商不上链时面临的罚款^[20]。作为动力电池源头厂家,电池生产商的罚款会比整车制造商的多 ($F_A > F_B$)。此外,假设 $F_B > M_V$, 即对整车制造商的

罚款金额大于政府的强监管变动成本,从而促使政府采取更严格的监管政策。

1.3 模型构建与均衡策略求解

本研究在此前问题阐述和假设提出的基础上,构建了一个涵盖电池生产商、整车制造商及政府的多方演化博弈框架,并设计了相应的支付矩阵(见表1)。该矩阵展示了不同策略组合下各方的收益情况。

根据表1,电池生产商选择“上链”策略时的期望收益函数 E_x 为

$$E_x = yz\{(1-s)[R_A + \pi(\theta_A)]\} + y(1-z)\{(1-s)[R_A + \pi(\theta_A)]\} + (1-y)z\{(1-s)[R_A + \pi(\theta_A)] - \delta\} + (1-y)(1-z)\{(1-s)[R_A + \pi(\theta_A)] - \delta\} \quad (1)$$

电池生产商选择“不上链”策略时的期望收益函数 E_{1-x} 为

$$E_{1-x} = yz[(1-s)(R_A - C_A - c) - F_A] + y(1-z)\{(1-s)(R_A - C_A - c) + (1-y)z[(1-s)(R_A - C_A - c) - F_A] + (1-y)(1-z)[(1-s)(R_A - C_A - c)]\} \quad (2)$$

整车制造商选择“上链”策略时的期望收益函数 E_y 为

$$E_y = xz\{(1-s)[R_B + \pi(\theta_B)]\} + x(1-z)\{(1-s)[R_B + \pi(\theta_B)]\} + (1-x)z\{(1-s)[R_B + \pi(\theta_B)] - \delta\} + (1-y)(1-z)\{(1-s)[R_B + \pi(\theta_B)] - \delta\} \quad (3)$$

整车制造商选择“不上链”策略时的期望收益函数 E_{1-y} 为

$$E_{1-y} = xz[(1-s)(R_B - C_B - c) - F_B] + x(1-z)\{(1-s)(R_B - C_B - c) + (1-x)z[(1-s)(R_B - C_B - c) - F_B] + (1-x)(1-z)[(1-s)(R_B - C_B - c)]\} \quad (4)$$

政府选择“强监管”策略时的期望收益函数 E_z 为

$$E_z = xy\{s[R_A + R_B + \pi(\theta_A) + \pi(\theta_B) - M - M_V]\} + (1-x)y\{s[R_A + R_B + \pi(\theta_B) - C_A - c - M - M_V + F_A]\} + x(1-y)\{s[R_A + R_B + \pi(\theta_A) - C_B - c] - M - M_V + F_B\} + (1-y)(1-x)\{s(R_A + R_B - C_A - C_B - 2c) - M - M_V + F_A + F_B\} \quad (5)$$

政府选择“弱监管”策略时的期望收益函数 E_{1-z} 为

$$E_{1-z} = xy\{s[R_A + R_B + \pi(\theta_A) + \pi(\theta_B) - M]\} + (1-x)y\{s[R_A + R_B + \pi(\theta_B) - C_A - c - M]\} + x(1-y)\{[R_A + R_B + \pi(\theta_A) - C_B - c] - M\} + (1-y)(1-x)\{s(R_A + R_B - C_A - C_B - 2c) - M\} \quad (6)$$

由式(1)~式(6),得到区块链溯源系统中各参与主体的复制动态方程组,如式(7)~式(9)所示。电池生产商的复制动态方程为

$$F(x) = x(1-x)\{(1-s)(b_A + (n-m)\theta_A - \delta(1-y) + F_A z)\} \quad (7)$$

整车制造商的复制动态方程为

$$F(y) = y(1-y)\{(1-s)(b_B + (n-m)\theta_B - \delta(1-x) + F_B z)\} \quad (8)$$

表1 区块链溯源系统博弈支付矩阵

Tab.1 Game payment matrix of blockchain traceability system

策略组合	强监管	弱监管
电池生产商-上链	$(1-s)(R_A + b_A - C_A - c + (n-m)\theta_A)$	$(1-s)(R_A + b_A - C_A - c + (n-m)\theta_A)$
整车制造商-上链	$(1-s)(R_B + b_B - C_B - c + (n-m)\theta_B)$	$(1-s)(R_B + b_B - C_B - c + (n-m)\theta_B)$
政府	$s[R_A + R_B + \pi(\theta_A) + \pi(\theta_B)] - M - M_V$	$s[R_A + R_B + \pi(\theta_A) + \pi(\theta_B)] - M$
电池生产商-不上链	$(1-s)(R_A + b_A - C_A - c + (n-m)\theta_A) - \delta$	$(1-s)(R_A + b_A - C_A - c + (n-m)\theta_A) - \delta$
整车制造商-不上链	$(1-s)(R_B - C_B - c) - F_B$	$(1-s)(R_B - C_B - c)$
政府	$s[(R_A + \pi(\theta_A) + R_B - C_B - c)] - M - M_V + F_B$	$s(R_A + \pi(\theta_A) + R_B - C_B - c) - M$
电池生产商-不上链	$(1-s)(R_A - C_A - c) - F_A$	$(1-s)(R_A - C_A - c)$
整车制造商-上链	$(1-s)(R_B + b_B - C_B - c + (n-m)\theta_B) - \delta$	$(1-s)(R_B + b_B - C_B - c + (n-m)\theta_B) - \delta$
政府	$s[R_A + \pi(\theta_A) + R_B - C_B - c] - M - M_V + F_A$	$s[R_A + R_B + \pi(\theta_B) - C_A - c] - M$
电池生产商-不上链	$(1-s)(R_A - C_A - c) - F_A$	$(1-s)(R_A - C_A - c)$
整车制造商-不上链	$(1-s)(R_B - C_B - c) - F_B$	$(1-s)(R_B - C_B - c)$
政府	$s(R_A + R_B - C_A - C_B - 2c) - M - M_V + F_A + F_B$	$s(R_A + R_B - C_A - C_B - 2c) - M$

政府的复制动态方程为

$$F(z) = z(1-z)[F_A(1-x) + F_B(1-y) - M_V] \quad (9)$$

2 博弈系统均衡点的稳定性分析

由 $F(x)=0, F(y)=0, F(z)=0$ 得到系统均衡点: $E_1(0,0,0), E_2(1,0,0), E_3(0,1,0), E_4(0,0,1), E_5(1,0,1), E_6(1,1,0), E_7(0,1,1), E_8(1,1,1), E_9(1-(1-s)(b_B+(n-m)\theta_B)/\delta, 1-(1-s)(b_A+(n-m)\theta_A)/\delta, 0), E_{10}(1-(F_B+(1-s)(b_B+(n-m)\theta_B))/\delta, 1-(F_A+(1-s)(b_A+(n-m)\theta_A))/\delta, 1)$ 。

根据表2的特征值实部符号,我们可以确定系统的均衡点及其稳定性。当符合条件①: $F_A+(1-s)(b_A+(n-m)\theta_A) - \delta < F_B+(1-s)(b_B+(n-m)\theta_B) - \delta < 0$ 时,复制动态系统存在两个稳定点 $E_4(0,0,1), E_6(1,1,0)$ 。此时, $E_4(0,0,1), E_6(1,1,0)$ 为系统渐近稳定点(ESS)。

表明:在上述条件下,电池生产商、整车制造商和政府积极参与区块链溯源系统的预期净收益大于零。如果一方选择不上链,另一方选择上链将受到较大影响,而政府的惩罚力度较小时,根据三方策略选择初始点的不同,策略组合演化稳定于(不上链,不上链,强监管)和(上链,上链,弱监管)两个稳定点。在这种情况下,电池生产商与整车制造商之间存在共进退关系,即他们会选择同时上链或者同时不上链。然而,在这种情境下,政府的监管显得无效,无法有效约束企业的行为。因此,企业的决策将主要基于自身的收益和成本考量,而不是政府的监管力度。

为了避免出现(不上链,不上链,强监管)的情况,政府和企业可以采取一系列措施。首先,通过政策引导,提升电池生产商和整车制造商上链所获得的经济收益,例如提供税收减免或补贴,提升上

链的经济吸引力。同时,通过技术创新和规模效应,降低区块链上链的固定成本和信息完整度成本,使企业更愿意选择上链。此外,建立企业间的合作机制,促进信息共享和互信,减少信息不对称,提高整体上链的收益。

其次,提高对不上链行为的罚款金额,增加企业选择不上链的机会成本,使不上链行为不再具有经济优势。同时,建立透明和有效的监管机制,确保政府的监管行为公平、公正、公开,增强企业对监管体系的信任和依赖。最后,鼓励公众和第三方机构参与监督,形成外部压力,促使企业积极上链。

综上所述,当电池生产商、整车制造商和政府参与区块链溯源系统中的净收益预期为正且受到的惩罚较小时,系统的策略组合会趋于两个稳定点。这一结论为政策制定者提供了重要参考,即在设计监管政策时,需考虑企业之间的策略互动以及政府监管的有效性,从而促进整个区块链溯源系统的稳定运行。通过上述措施,可以有效提高企业上链的意愿,降低不上链行为的发生概率,从而实现区块链溯源系统的稳定运行。

3 仿真分析

为验证演化稳定性分析的有效性与广泛性,我们使用MATLAB R2024a和Python3.11进行数值仿真,在咨询行业专家和相关企业技术人员后,结合行业实际情况和本文假设,对数据进行了处理,并对参数进行了初始设置。数组1设定如下: $b_A=20, b_B=30, n=10, m=5, \theta_A=0.6, \theta_B=0.4, \delta=60, F_A=30, F_B=25, s=0.1, M_V=20$ 。这些参数在满足条件①的情况下,提供了一个现实且合理的基础。基于该数组,我们进一步分析了企业初始策

表2 区块链溯源系统的均衡点稳定性分析

Tab.2 Stability analysis of equilibrium point in blockchain traceability system

均衡点	Jacobian 矩阵特征值	实部符号	稳定性	条件
$E_1(0,0,0)$	$(1-s)(b_A+(n-m)\theta_A) - \delta, (1-s)(b_B+(n-m)\theta_B) - \delta, F_A+F_B-M_V$	(-, -, +)	不稳定点	—
$E_2(1,0,0)$	$-(1-s)(b_A+(n-m)\theta_A) + \delta, (1-s)(b_B+(n-m)\theta_B), F_B-M_V$	(+, +, ×)	不稳定点	—
$E_3(0,1,0)$	$(1-s)(b_A+(n-m)\theta_A), -(1-s)(b_B+(n-m)\theta_B) + \delta, F_A-M_V$	(+, +, -)	不稳定点	—
$E_4(0,0,1)$	$F_A+(1-s)(b_A+(n-m)\theta_A) - \delta, F_B+(1-s)(b_B+(n-m)\theta_B) - \delta, -F_A-F_B+M_V$	(-, -, -)	ESS	①
$E_5(1,0,1)$	$-F_A-(1-s)(b_A+(n-m)\theta_A) + \delta, F_B+(1-s)(b_B+(n-m)\theta_B), -F_B+M_V$	(+, +, ×)	不稳定点	—
$E_6(1,1,0)$	$-(1-s)(b_A+(n-m)\theta_A), -(1-s)(b_B+(n-m)\theta_B), -M_V$	(-, -, -)	ESS	—
$E_7(0,1,1)$	$F_A+(1-s)(b_A+(n-m)\theta_A), -F_B-(1-s)(b_B+(n-m)\theta_B) + \delta, -F_A+M_V$	(+, +, ×)	不稳定点	—
$E_8(1,1,1)$	$-F_A+(1-s)(b_A+(n-m)\theta_A), -F_B+(1-s)(b_B+(n-m)\theta_B), M_V$	(+, +, +)	不稳定点	—

略、信息完整度等主要参数对演化博弈过程和结果的影响,以更好地理解区块链溯源系统在新能源动力电池回收中的实际应用效果。

3.1 初始策略对系统稳定的仿真分析

图1展示了在相关参数保持不变的情况下,电池生产商、整车制造商和政府三方初始策略概率的变化对最终演化结果稳定性的影响。可以看出,无论各主体的初始上链意愿如何,系统最终均趋于稳定状态。当初始上链概率较高时(如 $x_0, y_0, z_0 = 0.7$), 电池生产商和整车制造商的策略比例迅速收敛至1, 呈现更强的系统驱动力, 表明高初始意愿可以加快系统达成稳定状态的速度, 有助于建立更加完善的信息共享体系, 提升供应链中的透明度和信任度。而当初始上链意愿较低时(如 $x_0, y_0, z_0 = 0.1$), 电池生产商和整车制造商的上链概率均趋于零, 表明在低初始意愿下, 企业更倾向于不上链; 与此同时, 政府采取严格监管的概率逐渐收敛至1, 以强化对未上链企业的监管。整体来看, 提高电池生产商和整车制造商的初始上链意愿, 不仅能促使企业更迅速地选择上链策略, 也反映了政府在前期推广和激励政策中的有效工作, 这不仅推动了企业的主动参与, 还使得政府能够适时调整监管力度, 从而实现系统的有效协作与稳定。

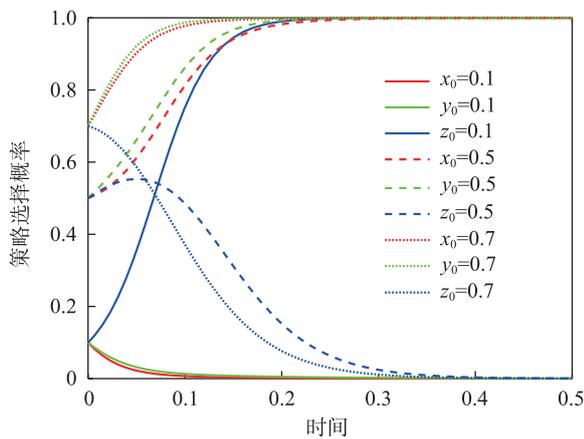


图1 初始策略的影响
Fig.1 Impact of initial strategies

3.2 信息完整度对稳定策略的仿真分析

在图2和图3中,展示了电池生产商和整车制造商在不同初始策略下(0.1, 0.3, 0.5, 0.7), 选择不同信息完整度 (θ_A 和 θ_B) 的演化过程。电池生产商的信息完整度 θ_A 分别设为 0.3, 0.5, 0.7 和 0.9; 而整车制造商的信息完整度 θ_B 略低, 分别为 0.2, 0.4, 0.6

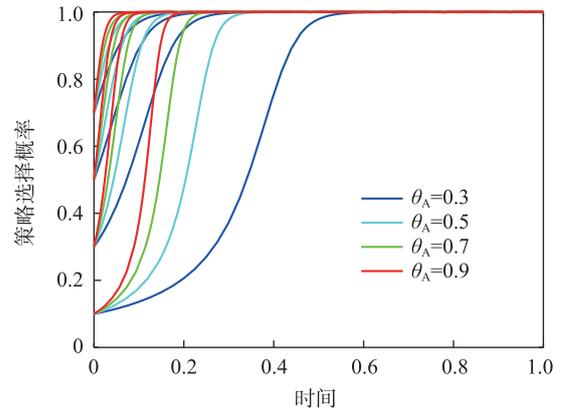


图2 电池生产商信息完整度的影响
Fig.2 Impact of battery manufacturer information integrity

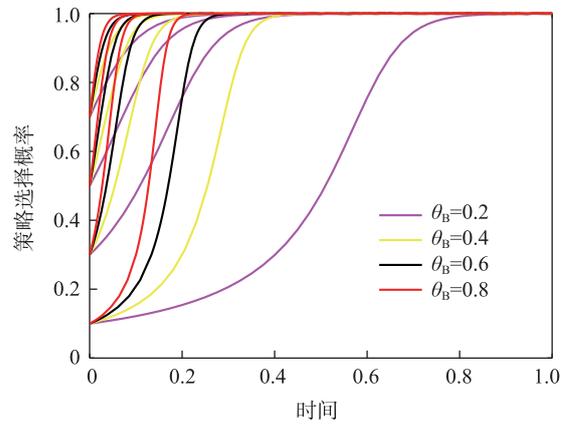


图3 整车制造商信息完整度的影响
Fig.3 Impact of vehicle manufacturer information integrity

和0.8。企业的初始策略选择及其信息完整度的设定,对整体上链行为的演化进程和最终稳定状态产生了明显影响。

仿真结果表明,较高的信息完整度有效提升了电池生产商和整车制造商选择上链的概率,加快了系统策略的收敛速度,使得系统能够更快地进入稳定状态,从而形成溯源系统上链的良性循环。相反,较低的信息完整度则导致上链概率的增长缓慢,系统演化过程出现延迟,达到稳定状态所需的时间更长,时间经归一化处理,无量纲。这些结果进一步表明,在区块链溯源系统中,不同企业的策略选择与信息完整度之间存在密切关联。提高初始信息完整度不仅有助于增强企业的上链意愿,加速系统的收敛过程,还能提升系统整体的效率和稳定性,为新能源动力电池提供更可靠的溯源能力。

3.3 各参数对稳定策略的仿真分析

为了分析 (n, m) 变化对演化博弈过程及结果的影响,将 (n, m) 分别赋予 $(10, 5)$, $(20, 10)$, $(30, 15)$ 。复制动态方程组随着时间演化的仿真结果如图4所示。可以看出,在系统演化至稳定点的过程中,随着 n 和 m 的差值的增加,电池生产商和整车制造商选择上链的概率有所提升。这表明,单位信息完整度的收益增加或成本减少,都能有效加快企业上链的速度。在这种情况下,企业在区块链上补全电池信息的意愿增强,以此获得更高的经济回报。与此同时,随着企业上链概率的增加,政府选择强监管的概率逐渐下降,表明在信息完整度收益显著高于成本的情况下,企业的自律性得以增强,政府可以适度放松监管力度。

为了分析负面交互效应系数 δ 对演化博弈过

程及结果的影响,将 δ 分别赋予60, 80, 100进行仿真。仿真结果如图5所示。可以看出,随着 δ 值的增加,电池生产商和整车制造商选择上链的概率显著下降,特别是在当 $\delta=100$ 时,企业几乎完全放弃上链。这表明,较大的负面交互效应将显著抑制企业的上链行为;因为 δ 的数值高,意味着不上链企业对上链企业的负面影响更为严重,导致企业对上链的经济激励减少。与此同时,政府的强监管概率随着 δ 的增加而逐渐提高。当 δ 较大时,政府不得不加大监管力度,以弥补企业自律性下降所带来的系统风险。总体而言,较高的负面交互效应迫使政府通过更强的监管来维持系统的稳定性,但也显著降低了企业的上链积极性,可能导致系统运行效率的降低。因此,在政策设计中,应考虑降低负面交互效应,以激励更多企业参与上链,并减少对政府强监管的依赖。

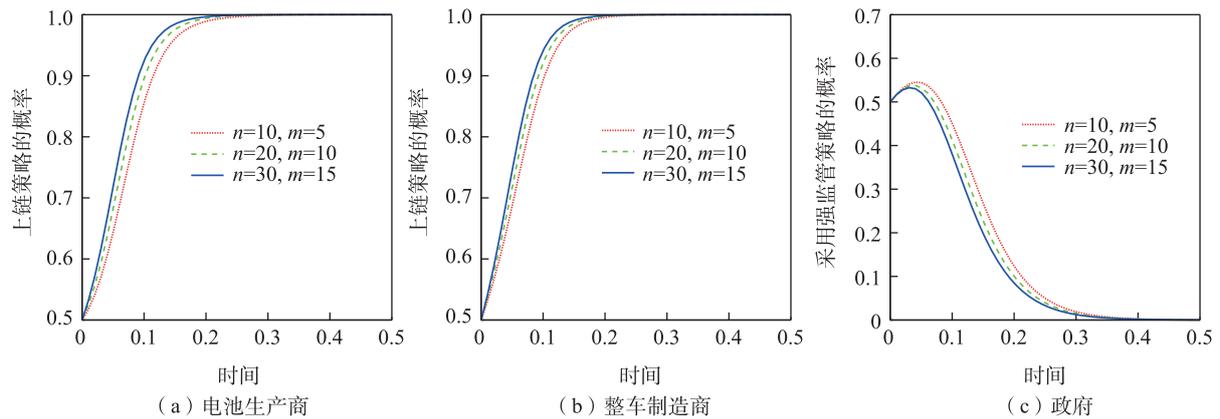


图4 单位信息完整度成本与收益的影响

Fig. 4 Impact of unit information integrity cost and benefit

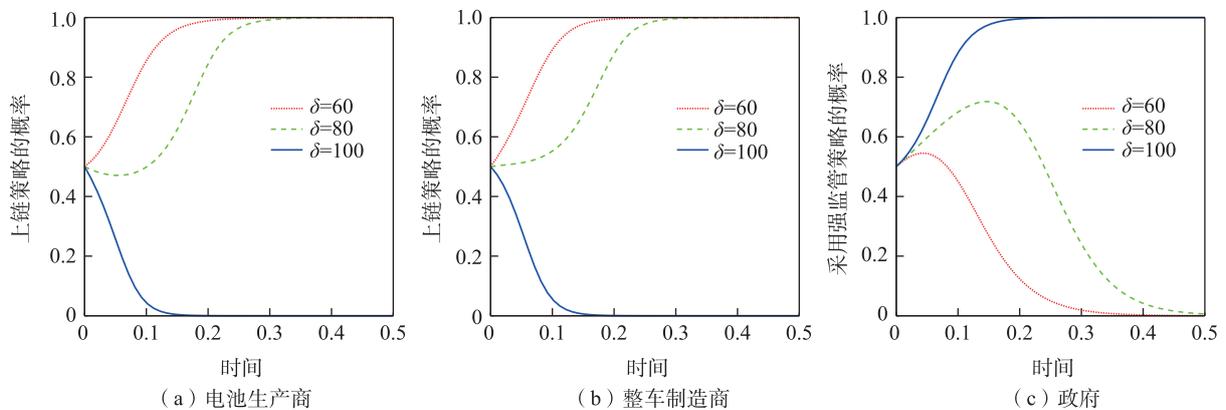


图5 负面交互效应系数的影响

Fig. 5 Impact of negative interaction coefficient

为了探究不同罚款力度 F_A 和 F_B 对演化博弈的影响,将 (F_A, F_B) 分别设定为 $(20, 15)$, $(30, 25)$, $(40, 35)$ 进行仿真。仿真结果如图6所示。图中可以看出,随着罚款力度的增加,电池生产商和整车制造商选择上链的概率明显提升。这表明,较高的罚款金额能够有效促进企业遵守上链义务,以避免受到更大的经济惩罚。此外,随着罚款力度

的增加,政府选择强监管的概率呈现下降趋势。高罚款力度提升了企业的自律性,使得政府不再需要通过强监管来确保企业上链,从而可以适当减少监管强度。这一结果表明,合理设计罚款政策,可以在提高企业合规性的同时,减轻政府的监管负担,进而促进整个区块链溯源系统的有效运行。

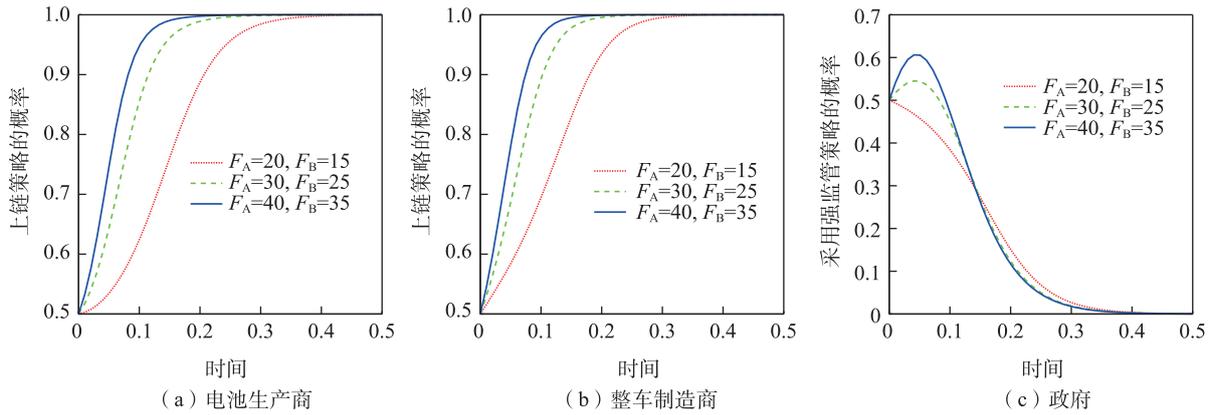


图6 政府对企业罚款额的影响
 Fig. 6 Impact of government fines on enterprises

为了验证增加上链收益对演化结果的影响,本文引入数组2,赋以参数: $b_A = 35$, $b_B = 40$, $n = 10$, $m = 5$, $\theta_A = 0.6$, $\theta_B = 0.4$, $\delta = 60$, $F_A = 30$, $F_B = 25$, $s = 0.1$, $M_v = 20$,并将两组数值分别从不同初始策略组合出发随时间演化,结果如图7,图8所示。

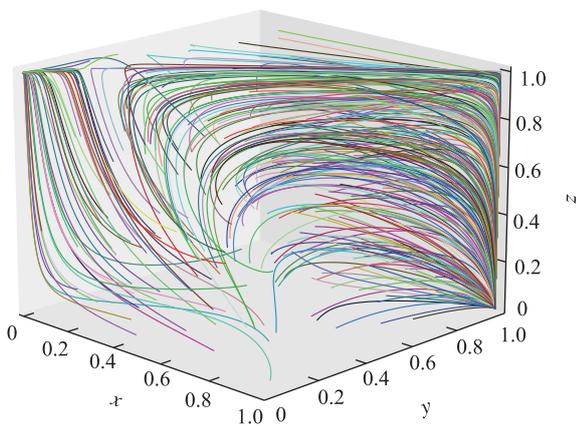


图7 数组1演化结果
 Fig. 7 Evolution result of Array 1

图7表明,在满足条件1的情况下,系统在演化后呈现出两个演化稳定点 $(0, 0, 1)$ 和 $(1, 1, 0)$ 。即在新能源动力电池的区块链溯源系统中,电池生产

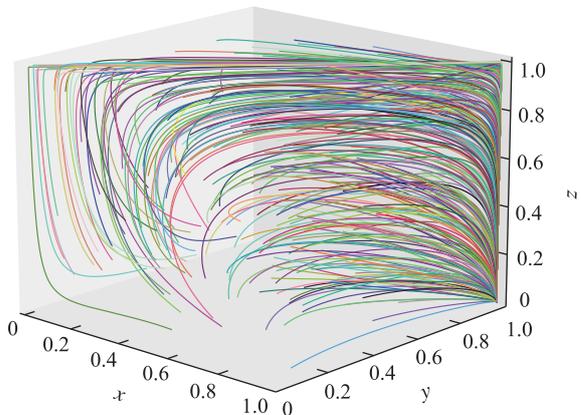


图8 数组2演化结果
 Fig. 8 Evolution result of Array 2

商、整车制造商、政府之间的策略组合分别为(不上链,不上链,强监管)和(上链,上链,弱监管)时,系统将趋向于稳定。这两个演化稳定点表明,在不同外部性影响和内在激励作用下,企业与政府在动力电池回收链条中的博弈可能收敛至不同的策略组合。因此,政府在制定监管政策时,需着重考虑区块链技术在信息化建设中的关键作用,通过有效的激励和惩罚措施,促使企业选择上链,从而减少信息不对称所引发的风险。

如图8所示,增加企业的上链收益后,策略组合更趋向于(上链,上链,弱监管)。仿真结果表明,通过有效的激励措施,直接或间接增加企业的上链收益,可以实现最优的溯源方案,即企业自发选择上链,而无需政府投入过多精力进行强监管,使系统更加稳定。仿真结果与理论分析一致,验证了模型的有效性,并为区块链技术在新能源领域的应用提供了实质性支持。

4 结论

本文基于区块链技术的新能源动力电池溯源系统,采用演化博弈模型对电池生产商、整车制造商和政府监管部门之间的策略互动进行了深入研究,探讨了如何通过信息透明度提升、激励机制优化和监管手段调整来提高回收体系的效率,得出以下结论。

1) 提高企业自律性和信息完整度对于实现市场稳定和提升回收体系的运行效率具有重要意义。政策制定者应在设计激励机制时,充分考虑信息完整度对企业决策的影响,以确保整个系统的长期稳定性和可持续性。

2) 企业的上链行为受到信息完整度收益和上链成本的双重影响。仿真分析表明,通过增加企业上链收益或减少上链成本,可以显著提高企业参与上链的意愿,从而有效提升回收管理效率。

3) 负面交互效应对企业的上链意愿存在显著影响。较高的负面交互效应往往会对企业选择上链行为产生阻碍,从而增加政府的监管压力。因此,通过有效减少负面交互效应并采用相应的激励措施以提高企业的上链收益,可以有效推动企业积极参与回收管理。

4) 政府的监管策略对系统的稳定性有重要影响。强监管和高罚款力度可以有效遏制企业的不规范行为,但也会增加监管成本。合理设计激励与罚款政策,可以在提高企业合规性的同时降低政府的监管负担,促进系统的高效运作。

参考文献:

- [1] WESSELKÄMPER J, VON DELFT S. Current status and future research on circular business models for electric vehicle battery recycling[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2024, 206: 107596.
- [2] 牟思宇, 谢宇斌. 我国废旧动力电池回收利用的发展现状、存在问题及对策建议[J]. 有色金属工程, 2022, 12(12): 153-158.
MOU S Y, XIE Y B. Current status, existing problems and development suggestions for recycling and utilization of waste power batteries[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2022, 12(12): 153-158.
- [3] XIAO Q, ZHENG Y J, ZHANG J H. Recycling mode selection for the reverse supply chain of waste power batteries: an environmental responsibility perspective[J]. Journal of Industrial and Production Engineering, 2025, 42(2): 127-146.
- [4] 曾诗钦, 霍如, 黄韬, 等. 区块链技术研究综述: 原理、进展与应用[J]. 通信学报, 2020, 41(1): 134-151.
ZENG S Q, HUO R, HUANG T, et al. Survey of blockchain: principle, progress and application[J]. Journal on Communications, 2020, 41(1): 134-151.
- [5] 焦通, 申德荣, 聂铁铮, 等. 区块链数据库: 一种可查询且防篡改的数据库[J]. 软件学报, 2019, 30(9): 2671-2685.
JIAO T, SHEN D R, NIE T Z, et al. BlockchainDB: querable and immutable database[J]. Journal of Software, 2019, 30(9): 2671-2685.
- [6] REGUEIRO C, GÓMEZ G A, PEDROSA N, et al. Blockchain-based refurbishment certification system for enhancing the circular economy[J]. Blockchain: Research and Applications, 2024, 5(1): 100172.
- [7] ANTÔNIO R C J, SANSEVERINO E R, GALLO P, et al. Blockchain review for battery supply chain monitoring and battery trading[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2022, 157: 112078.
- [8] SUBRAMANIAN G, THAMPY A S. Implementation of hybrid blockchain in a preowned electric vehicle supply chain[J]. IEEE Access, 2021, 9: 82435-82454.
- [9] 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, 29(4): 1386-1398.
ZHOU X J, LI J Z, LI F, et al. Recycling supply chain mode of new energy vehicle power battery based on Blockchain technology[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2023, 29(4): 1386-1398.
- [10] GAO J W, JIANG S M, ZHANG Y. To adopt blockchain or not? a game theoretic analysis of profit and environmental impact in decommissioned EV lithiumion battery recycling[J]. Applied Energy, 2024, 367: 123312.

- [11] 尤建新, 任佳. 电动汽车动力电池区块链技术的投资演化博弈[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2023, 51(5): 660-666.
YOU J X, REN J. Evolutionary game of investment in electric vehicle power battery blockchain technology[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2023, 51(5): 660-666.
- [12] 刘琦铀, 林丽婷, 张成科. 区块链环境下基于复杂网络演化博弈的农户融资上链行为研究[J]. 金融理论与实践, 2024(2): 15-24.
LIU Q Y, LIN L T, ZHANG C K. Farmers' financing up-chain behavior based on evolutionary game theory on complex networks in the context of blockchain[J]. Financial Theory & Practice, 2024(2): 15-24.
- [13] YI Y X, FU A, LI Y Q, et al. Battery recycling and coordination in information leakage prevention under blockchain technology in a new energy vehicles supply chain[J]. Energy Economics, 2024, 139: 107862.
- [14] 冯章伟, 杜碧升, 于志勇, 等. 区块链驱动的新能源汽车动力电池回收与溯源技术投入策略研究[J]. 中国管理科学, 2025, 33(4): 313-324.
FENG Z W, DU B S, YU Z Y, et al. Recycling and traceability technology introducing strategy of new energy vehicles' Power battery driven by blockchain[J]. Chinese Journal of Management Science, 2025, 33(4): 313-324.
- [15] 吴君民, 唐僖, 盛永祥, 等. 基于三方演化博弈的后补贴时代新能源汽车政产学研协同创新机制研究[J]. 运筹与管理, 2021, 30(4): 96-102.
WU J M, TANG X, SHENG Y X, et al. Research on the collaborative innovation mechanism among the government, enterprises and universities in the post-subsidy era of new energy automobiles based on tripartite evolutionary game theory[J]. Operations Research and Management Science, 2021, 30(4): 96-102.
- [16] LI X, MU D, DU J B, et al. Game-based system dynamics simulation of deposit-refund scheme for electric vehicle battery recycling in China[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2020, 157: 104788.
- [17] GAO Y L, GONG B G, LIU Z, et al. The behavioural evolution of the smart electric vehicle battery reverse supply chain under government supervision[J]. Industrial Management & Data Systems, 2023, 123(10): 2577-2606.
- [18] 孙国强, 谢雨菲. 区块链技术、供应链网络与数据共享: 基于演化博弈视角[J]. 中国管理科学, 2023, 31(12): 149-162.
SUN G Q, XIE Y F. Blockchain technology, supply chain networks and data sharing: based on the perspective of evolutionary game[J]. Chinese Journal of Management Science, 2023, 31(12): 149-162.
- [19] 程宏波, 何洪, 李云泉, 等. 电动汽车群体互动策略的随机演化博弈分析[J]. 华东交通大学学报, 2024, 41(3): 74-81.
CHENG H B, HE H, LI Y X, et al. Stochastic evolutionary game analysis of group strategies for electric vehicles in vehicle network interaction[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2024, 41(3): 74-81.
- [20] 王文宾, 刘业, 钟罗升, 等. 补贴-惩罚政策下废旧动力电池的回收决策研究[J]. 中国管理科学, 2023, 31(11): 90-102.
WANG W B, LIU Y, ZHONG L S, et al. Research on recovery decision of waste power battery under subsidy-penalty policy[J]. Chinese Journal of Management Science, 2023, 31(11): 90-102.



通信作者:李卓群(1976—),女,教授,博士,研究方向为供应链系统建模与仿真。E-mail:1901@ecjtu.edu.cn。

(责任编辑:姜红贵)