

车辆动力电池回收的演化博弈分析

陈奕麟

上海理工大学管理学院, 上海

收稿日期: 2024年4月12日; 录用日期: 2024年6月20日; 发布日期: 2024年6月28日

摘要

倡导可持续发展背景下, 电动汽车企业通过打造旧产品回收体系以履行产品延伸责任, 并通过生态化设计产品和提高再生料的应用水平降低生产成本。以电动汽车企业有义务对其销售的车辆上的动力电池回收为前提, 针对回收过程参与者间策略抉择问题构建综合车企、专业车企、非正规企业及用户四方演化博弈模型, 分析四方达成理想稳定演化策略的条件, 得出: 综合车企与专业车企的合作机制需要合理控制双方成本, 以保障双方产品延伸责任的同时履行; 综合车企作为产业骨干, 其有力的控制保证了回收体系的运转效果, 车企合作中, 综合车企保持适当控制强度有助于维持良好博弈状态; 两方车企集中力量选择干预用户或非正规企业, 可以实现对另一方的间接控制。

关键词

产品延伸责任, 回收渠道, 渠道竞争, 回收策略, 四方博弈

Evolutionary Game Analysis of Vehicle Power Battery Recycling

Yilin Chen

Business School, University of Shanghai for Science & Technology, Shanghai

Received: Apr. 12th, 2024; accepted: Jun. 20th, 2024; published: Jun. 28th, 2024

Abstract

In the context of advocating sustainable development, electric vehicle companies fulfill product extension responsibility by building a recycling system for used products, and reduce production costs by ecological product design and high level of recycled material usage. Based on the premise that electric vehicle companies have the obligation to recycle the power batteries on their vehicles, a four-party evolutionary game model of comprehensive car companies, specialized car companies, informal enterprises and users is constructed for the strategic choices of participants

in the recycling process, and the conditions for the four parties to achieve an ideal stable evolutionary strategy are analyzed. The cooperation mechanism between comprehensive car companies and specialized car companies needs should be cheap enough. And then the fulfillment of the extended responsibility of both parties' products will be ensured; as the backbone of the industry, the comprehensive car companies have strong control to ensure the operation effect of the recycling system. In the cooperation between the car companies, the comprehensive car companies maintain appropriate control intensity to help maintain a good game state; The two car companies concentrate their efforts on intervening with users or informal enterprises, which can achieve indirect control over the other party.

Keywords

Product Extension Responsibility, Recycling Channels, Channel Competition, Recycling Strategy, Four-Party Gaming

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

我国电动汽车产业快速发展下,动力电池回收问题伴随出现。非正规回收企业利用其监管逃逸能力、灵活性和成本优势,成为许多用户回收废旧动力电池的首选渠道。而主营业务压力下,正规企业无法建设起具有竞争力的回收渠道。但随着电动汽车产业出现主体分化,少数骨干车企有能力承担起产业全局的生态责任,其积极决策有助于改善产业末端的生态性。同时,骨干车企通过高效的供应链管理和成本控制降低了汽车新品的行业售价,扩大的市场份额不断强化其业务规模效应。而废旧动力电池回收价格主要与其金属基本价值和产业稀缺性有关,随着这类综合车企以低价增大产品供应量,废旧动力电池收购价格逐渐脱离虚高,会使得非正规企业不得不更加理性地开展回收业务,部分非正规企业选择与综合车企回收渠道合作,而部分则继续维持原先的收拆结合模式。目前购买新电动汽车的用户大多是二次购买,有以旧换新需求,旧电动车连带动力电池的合适回收价格和良好回收服务是其决策的重要前提。在新车定价机制影响下,旧品价值大幅缩水和电动汽车企业以旧换新补贴政策让非正规回收渠道的吸引力下降,消费者开始重新权衡正规渠道与非正规企业回收经济性。对于规模较小的专业车企而言,综合车企采取的低价策略削弱了其产品盈利空间,专业车企也要寻求控制成本和依法履行生产者延伸责任制的方式。在这样的条件下,存在四方动力电池回收策略的博弈。

不少文献中了解到回收体系中主体有序参与建设的方式和意义,李文龙等[1]考虑了用户对回收价格的敏感度和回收竞争水平对单渠道回收模式和多渠道混合回收模式的影响。罗堰等[2]认为企业提升回收效益的关键因素是市场份额、战略合作和用户信赖。张子健等[3]发现集中决策下动力电池回收率越高时回收成本越低。王佳和黄秀蓉[4]提出行业内骨干企业份额扩大能更快改变市场环境。郝硕硕等[5]认为各主体依序开展回收业务的模式能避免重复投资。

2. 模型假设

综合车企、专业车企、非正规企业和用户做决策时受信息不对称和有限理性等因素约束下,难以保证最先采取的策略能实现自身利益最大化。参与博弈的四方都在各自在设定的两种决策方案间徘徊,综合车企在控制(生态制造产品、设置产品信息壁垒、补贴用户等)与不控制策略间抉择;专业车企在委托(生

态采购产品、设置产品信息壁垒、委托综合车企代为履责)与不委托的策略间抉择;非正规企业在合作(放弃拆解电池获利,成为官方物流渠道的补充)与不合作的策略间抉择;而用户则是在参与(参与生态回收)和不参与的策略间抉择。如果综合车企控制,专业车企委托,非正规企业合作,用户环保回收,就能构建良好的回收体系。非正规企业构成廉价的下游回收渠道的补充,专业车企的支持进一步加强回收体系的规模经济效应,而综合车企控制则是提高了非生态拆解行为的门槛以约束非正规企业的违规操作,而用户环保回收也能获得相应的效用和以旧换新补贴。

假设如下:

假设 1: 博弈参与者为综合车企、专业车企、非正规企业和用户四方。

假设 2: 博弈参与者决策时,具有有限理性,博弈目标是利益最大化。

假设 3: 综合车企建立的回收体系,包含了电池制造商、车辆维修商、原料商等,模型中都被归结为综合车企。而专业车企需要委托使用综合车企建立的回收体系进行回收或是放任非正规企业回收。

假设 4: 动力电池回收体系内各环节的成本收益能被可靠计量。

假设 5: 博弈中的各方策略都是独立确定的。

假设 6: 当专业车企委托综合车企时,专业车企产品的回收价格会上涨。

假设 7: 综合车企和专业车企推卸生产者延伸责任会损失企业形象。

假设 8: 用户距离官方网点较远,存在额外路费支出。

假设其综合车企控制策略概率 w , 不控制策略概率 $1-w$, $w \in [0,1]$; 专业车企委托策略概率 x , 不委托策略概率 $1-x$, $x \in [0,1]$; 非正规企业合作策略概率 y , 不合作策略概率 $1-y$, $y \in [0,1]$; 用户参与策略概率 z , 不参与策略概率 $1-z$, $z \in [0,1]$ 。

16 种博弈策略组合为:

(控制, 委托, 合作, 参与)、(控制, 委托, 合作, 不参与)、(控制, 委托, 不合作, 参与)、(控制, 委托, 不合作, 不参与)、(控制, 不委托, 合作, 参与)、(控制, 不委托, 合作, 不参与)、(控制, 不委托, 不合作, 参与)、(控制, 不委托, 不合作, 不参与)、(不控制, 委托, 合作, 参与)、(不控制, 委托, 合作, 不参与)、(不控制, 委托, 不合作, 参与)、(不控制, 委托, 不合作, 不参与)、(不控制, 不委托, 合作, 参与)、(不控制, 不委托, 合作, 不参与)、(不控制, 不委托, 不合作, 参与)、(不控制, 不委托, 不合作, 不参与)。

3. 模型构建

3.1. 支付矩阵

构建支付矩阵如表 1 所示, 其中参数含义分别为 e_1 : 生态回收时, 综合车企产品的标准回收价格; e_2 : 非生态回收时, 非正规企业收购综合车企产品的价格($e_1 < e_2$); t : 综合车企补贴用户的金额; f_0 : 生态回收时, 专业车企推卸产品责任造成较低的产品回收价格; f_1 : 生态回收时, 专业车企委托履责后, 提高了的专业车企产品回收价格; f_2 : 非生态回收时, 专业车企产品的回收价格($f_0 < f_1 < f_2$); v_0 : 生态回收时, 非正规企业回收专业车企产品获利; v_1 : 非生态回收时, 非正规企业的回收专业车企产品的高获利($v_0 < v_1$); u_0 : 非正规企业生态回收时, 回收综合车企产品获利; u_1 : 非正规企业非生态回收时, 回收综合车企产品的高获利($u_0 < u_1$); r : 专业车企履责获得的企业形象改善等权益; h : 专业车企推卸产品责任损失的企业形象; k : 综合车企生态化设计产品、设置信息壁垒等费用; m : 专业车企采购生态化产品、设置信息壁垒和委托代理履责的费用; l_0 : 综合车企自有品牌产品被全部回收, 带来的企业形象提升的综合权益以及规模效应作用; l_1 : 代替专业车企履责后进一步增强的规模效应; g_1 : 综合车企的积极措施对非正

规企业的干预效果； g_2 ：专业车企的积极措施对非正规企业的干预效果； n ：用户去官方回收点的费用； o ：用户环保行为的效用。

Table 1. Game payment matrix
表 1. 博弈支付矩阵

综合/专业/作坊/用户		非正规企业合作		非正规企业不合作	
		用户参与	用户不参与	用户参与	用户不参与
综合车企控制	专业车企委托	$l_1 - k - t$	$l_1 - k - t$	$l_1 - k - t$	$-k - i$
		$r - m$	$r - m$	$r - m$	$-m$
		$u_0 + v_0$	$u_0 + v_0$	0	$u_1 + v_1 - g_1 - g_2$
		$t + e_1 + f_1 + o$	$t + e_1 + f_1$	$t + e_1 + f_1 - n + o$	$e_2 + f_2$
	专业车企不委托	$l_0 - k - t$	$l_0 - k - t$	$l_0 - k - t$	$l_0 - k$
		$-h$	$-h$	$-h$	$-h$
		$u_0 + v_0$	$u_0 + v_0$	0	$u_1 + v_1 - g_1$
		$t + e_1 + f_1 + o$	$t + e_1 + f_0$	$t + e_1 + f_0 - n + o$	$e_2 + f_2$
综合车企不控制	专业车企委托	l_1	l_1	l_1	$-i$
		$r - m$	$r - m$	$r - m$	$-m$
		$u_0 + v_0$	$u_0 + v_0$	0	$u_1 + v_1 - g_2$
		$e_1 + f_1 + o$	$e_1 + f_1$	$e_1 + f_1 - n + o$	$e_2 + f_2$
	专业车企不委托	l_0	l_0	l_0	$-i$
		$-h$	$-h$	$-h$	$-h$
		$u_0 + v_0$	$u_0 + v_0$	0	$u_1 + v_1$
		$e_1 + f_0 + o$	$e_1 + f_0$	$e_1 + f_0 - n + o$	$e_2 + f_2$

为了化简支付矩阵，设置新参数替代如下：
得到新表 2 的支付矩阵：

Table 2. The simplified payment matrix
表 2. 简化支付矩阵

综合/专业/作坊/用户		非正规企业合作		非正规企业不合作	
		用户参与	用户不参与	用户参与	用户不参与
综合车企控制	专业车企委托	a_1	b_1	c_1	d_1
		a_2	b_2	c_2	d_2
		a_3	b_3	c_3	d_3
		a_4	b_4	c_4	d_4
	专业车企不委托	a_5	b_5	c_5	d_5
		a_6	b_6	c_6	d_6
		a_7	b_7	c_7	d_7
		a_8	b_8	c_8	d_8

续表

		a_9	b_9	c_9	d_9
	专业车企委托	a_{10}	b_{10}	c_{10}	d_{10}
		a_{11}	b_{11}	c_{11}	d_{11}
综合车企不控制		a_{12}	b_{12}	c_{12}	d_{12}
		a_{13}	b_{13}	c_{13}	d_{13}
	专业车企不委托	a_{14}	b_{14}	c_{14}	d_{14}
		a_{15}	b_{15}	c_{15}	d_{15}
		a_{16}	b_{16}	c_{16}	d_{16}

3.2. 综合车企的演化博弈模型

设综合车企实施控制策略时的期望收益是 r_w ，实施不控制策略时的期望收益是 r_{1-w} ，平均期望收益为 r_1 。

综合车企实施控制策略时期望收益函数是：

$$r_w = a_1xyz + b_1xy(1-z) + c_1x(1-y)z + d_1x(1-y)(1-z) + a_5(1-x)yz + b_5(1-x)y(1-z) + c_5(1-x)(1-y)z + d_5(1-x)(1-y)(1-z) \quad (1)$$

综合车企实施策略 $1-w$ 时的期望收益函数是：

$$r_{1-w} = a_9xyz + b_9xy(1-z) + c_9x(1-y)z + d_9x(1-y)(1-z) + a_{13}(1-x)yz + b_{13}(1-x)y(1-z) + c_{13}(1-x)(1-y)z + d_{13}(1-x)(1-y)(1-z) \quad (2)$$

综合车企的平均期望收益函数是：

$$r_1 = wr_w + (1-w)r_{1-w} \quad (3)$$

综合车企的复制动态方程是：

$$L(w) = \frac{dw}{dt} = w(r_w - r_1) \quad (4)$$

3.3. 专业车企的演化博弈模型

设专业车企实施委托策略时的期望收益是 r_x ，选择不委托策略时的期望收益是 r_{1-x} ，平均期望收益为 r_2 。

专业车企实施委托期望收益函数为 r_2 ：

$$r_x = a_2wyz + b_2wy(1-z) + c_2w(1-y)z + d_2w(1-y)(1-z) + a_{10}(1-w)yz + b_{10}(1-w)y(1-z) + c_{10}(1-w)(1-y)z + d_{10}(1-w)(1-y)(1-z) \quad (5)$$

专业车企实施策略不委托策略时的期望收益函数：

$$r_{1-x} = a_6wyz + b_6wy(1-z) + c_6w(1-y)z + d_6w(1-y)(1-z) + a_{14}(1-w)yz + b_{14}(1-w)y(1-z) + c_{14}(1-w)(1-y)z + d_{14}(1-w)(1-y)(1-z) \quad (6)$$

专业车企平均期望收益函数：

$$r_2 = xr_x + (1-x)r_{1-x} \quad (7)$$

专业车企复制动态方程：

$$M(x) = \frac{dx}{dt} = x(r_x - r_2) \quad (8)$$

3.4. 非正规企业的演化博弈模型

设非正规企业 施合作策略时的期望收益是 r_y ，实施不合作策略时的期望收益是 r_{1-y} ，期望收益为 r_3 。非正规企业合作策略时的期望收益函数是：

$$r_y = a_3 z w x + a_7 z w (1-x) + a_{11} z (1-w) x + a_{15} z (1-w) (1-x) + b_3 (1-z) w x + b_7 (1-z) w (1-x) + b_{11} (1-z) (1-w) x + b_{15} (1-z) (1-w) (1-x) \quad (9)$$

非正规企业不合作策略时的期望收益函数：

$$r_y = c_3 z w x + c_7 z w (1-x) + c_{11} z (1-w) x + c_{15} z (1-w) (1-x) + d_3 (1-z) w x + d_7 (1-z) w (1-x) + d_{11} (1-z) (1-w) x + d_{15} (1-z) (1-w) (1-x) \quad (10)$$

非正规企业平均期望收益函数：

$$r_3 = y r_y + (1-y) r_{1-y} \quad (11)$$

非正规企业复制动态方程：

$$N(y) = \frac{dy}{dt} = y(r_y - r_3) \quad (12)$$

3.5. 用户的演化博弈模型

设用户实施参与策略时的期望收益是 r_z ，实施不参与策略时的期望收益是 r_{1-z} ，平均期望收益为。用户实施参与策略时的期望收益函数是 r_4 ：

$$r_z = a_4 y w x + a_8 y w (1-x) + a_{12} y (1-w) x + a_{16} y (1-w) (1-x) + c_4 (1-y) w x + c_8 (1-y) w (1-x) + c_{12} (1-y) (1-w) x + c_{16} (1-y) (1-w) (1-x) \quad (13)$$

用户实施不参与时的期望收益函数：

$$r_{1-z} = b_4 y w x + b_8 y w (1-x) + b_{12} y (1-w) x + b_{16} y (1-w) (1-x) + d_4 (1-y) w x + d_8 (1-y) w (1-x) + d_{12} (1-y) (1-w) x + d_{16} (1-y) (1-w) (1-x) \quad (14)$$

用户的平均期望收益函数：

$$r_4 = z r_z + (1-z) r_{1-z} \quad (15)$$

用户的复制动态方程：

$$O(z) = \frac{dz}{dt} = z(r_z - r_4) \quad (16)$$

4. 稳定性分析

联立式(4)、(8)、(12)、(16)得复制动态方程组：

$$\begin{cases} L(w) \\ M(x) \\ N(y) \\ O(z) \end{cases} \quad (17)$$

令各式为 0 并进行求解:

$$\begin{cases} L(w) = 0 \\ M(x) = 0 \\ N(y) = 0 \\ O(z) = 0 \end{cases} \quad (18)$$

解得 16 个纯策略均衡点(1, 1, 1, 1)、(1, 1, 1, 0)、(1, 1, 0, 1)、(1, 1, 0, 0)、(1, 0, 1, 1)、(1, 0, 1, 0)、(1, 0, 0, 1)、(1, 0, 0, 0)、(0, 1, 1, 1)、(0, 1, 1, 0)、(0, 1, 0, 1)、(0, 1, 0, 0)、(0, 0, 1, 1)、(0, 0, 1, 0)、(0, 0, 0, 1)、(0, 0, 0, 0)和其他混合均衡点(w, x, y, z)。本文假设下, 稳定均衡点为纯策略点, 仅检测 16 个纯策略点的稳定性。

根据方程组构造的雅可比矩阵:

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial L(w)}{\partial w}, \frac{\partial L(w)}{\partial x}, \frac{\partial L(w)}{\partial y}, \frac{\partial L(w)}{\partial z} \\ \frac{\partial M(x)}{\partial w}, \frac{\partial M(x)}{\partial x}, \frac{\partial M(x)}{\partial y}, \frac{\partial M(x)}{\partial z} \\ \frac{\partial N(y)}{\partial w}, \frac{\partial N(y)}{\partial x}, \frac{\partial N(y)}{\partial y}, \frac{\partial N(y)}{\partial z} \\ \frac{\partial O(z)}{\partial w}, \frac{\partial O(z)}{\partial x}, \frac{\partial O(z)}{\partial y}, \frac{\partial O(z)}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (19)$$

分别计算 16 个纯策略点的雅可比矩阵的对应特征值, 结果表 3 所示。

Table 3. Equilibrium points and eigenvalues
表 3. 均衡点和特征值

均衡点	特征值 λ_1	特征值 λ_2	特征值 λ_3	特征值 λ_4
$E_1(1, 1, 1, 1)$	$a_9 - a_1$	$a_6 - a_2$	$c_3 - a_3$	$b_4 - a_4$
$E_2(1, 1, 1, 0)$	$b_9 - b_1$	$b_6 - b_2$	$d_3 - b_3$	$a_4 - b_4$
$E_3(1, 1, 0, 1)$	$c_9 - c_1$	$c_6 - c_2$	$a_3 - c_3$	$d_4 - c_4$
$E_4(1, 1, 0, 0)$	$d_9 - d_1$	$d_6 - d_2$	$b_3 - d_3$	$c_4 - d_4$
$E_5(1, 0, 1, 1)$	$a_{13} - a_5$	$a_2 - a_6$	$c_7 - a_7$	$b_8 - a_8$
$E_6(1, 0, 1, 0)$	$b_{13} - b_5$	$b_2 - b_6$	$d_7 - b_7$	$a_8 - b_8$
$E_7(1, 0, 0, 1)$	$c_{13} - c_5$	$c_2 - c_6$	$a_7 - c_7$	$d_8 - c_8$
$E_8(1, 0, 0, 0)$	$d_{13} - d_5$	$d_2 - d_6$	$b_7 - d_7$	$c_8 - d_8$
$E_9(0, 1, 1, 1)$	$a_1 - a_9$	$a_{14} - a_{10}$	$c_{11} - a_{11}$	$b_{12} - a_{12}$
$E_{10}(0, 1, 1, 0)$	$b_1 - b_9$	$b_{14} - b_{10}$	$d_{11} - b_{11}$	$a_{12} - b_{12}$
$E_{11}(0, 1, 0, 1)$	$c_1 - c_9$	$c_{14} - c_{10}$	$a_{11} - c_{11}$	$d_{12} - c_{12}$
$E_{12}(0, 1, 0, 0)$	$d_1 - d_9$	$d_{14} - d_{10}$	$b_{11} - d_{11}$	$c_{12} - d_{12}$
$E_{13}(0, 0, 1, 1)$	$a_5 - a_{13}$	$a_{10} - a_{14}$	$c_{15} - a_{15}$	$b_{16} - a_{16}$
$E_{14}(0, 0, 1, 0)$	$b_5 - b_{13}$	$b_{10} - b_{14}$	$d_{15} - b_{15}$	$a_{16} - b_{16}$
$E_{15}(0, 0, 0, 1)$	$c_5 - c_{13}$	$c_{10} - c_{14}$	$a_{15} - c_{15}$	$d_{16} - c_{16}$
$E_{16}(0, 0, 0, 0)$	$d_5 - d_{13}$	$d_{10} - d_{14}$	$b_{15} - d_{15}$	$c_{16} - d_{16}$

使用李雅普诺夫判断法, 当 $\lambda_1 < 0$, $\lambda_2 < 0$, $\lambda_3 < 0$, $\lambda_4 < 0$ 时, 该均衡点是稳定均衡点即 ESS, 判断特征值的正负性如表 4 所示。

Table 4. Eigenvalue sign and equilibrium point stability
表 4. 特征值符号和均衡点稳定性

均衡点	特征值 λ_1	特征值 λ_2	特征值 λ_3	特征值 λ_4	稳定性
$E_1 (1, 1, 1, 1)$	+	-	-	-	非稳定点
$E_2 (1, 1, 1, 0)$	+	-	+/-	+	非稳定点
$E_3 (1, 1, 0, 1)$	+	-	+	+/-	非稳定点
$E_4 (1, 1, 0, 0)$	+	+/-	+/-	+/-	非稳定点
$E_5 (1, 0, 1, 1)$	+	+	-	-	非稳定点
$E_6 (1, 0, 1, 0)$	+	+	+/-	+	非稳定点
$E_7 (1, 0, 0, 1)$	+	+	+	+/-	非稳定点
$E_8 (1, 0, 0, 0)$	-	+/-	+/-	+/-	稳定点/非稳定点
$E_9 (0, 1, 1, 1)$	-	-	-	-	稳定点
$E_{10} (0, 1, 1, 0)$	-	-	+/-	+	非稳定点
$E_{11} (0, 1, 0, 1)$	-	-	+	+/-	非稳定点
$E_{12} (0, 1, 0, 0)$	-	+/-	+/-	+/-	稳定点/非稳定点
$E_{13} (0, 0, 1, 1)$	-	+	-	-	非稳定点
$E_{14} (0, 0, 1, 0)$	-	+	+	+	非稳定点
$E_{15} (0, 0, 0, 1)$	-	+	-	+/-	非稳定点
$E_{16} (0, 0, 0, 0)$	+	+/-	-	+/-	非稳定点

由表 4 知, $E_9 (0, 1, 1, 1)$ 为任意参数条件下的稳定均衡点。 $E_8 (1, 0, 0, 0)$ 、 $E_{12} (0, 1, 0, 0)$ 在参数满足一定条件时为稳定均衡点, 并且这两个均衡点属于不理想的稳定状态。为了使系统避免受到两个不良稳定状态的干扰, 需要进一步考察避免这两个不良稳定状态的条件。

情形一, 对于 $E_8 (1, 0, 0, 0)$ 为均衡点时, 综合车企设置壁垒, 专业车企不合作, 非正规企业不合作, 用户不参与正规回收。当满足 $h - m < 0$, $u_0 + v_0 - u_1 - v_1 + g_1 < 0$, $t + e_1 + f_0 - n - e_2 - f_2 < 0$ 时为稳定均衡点。若专业车企委托履责的费用高于不履责时企业形象的损失、综合车企对非正规企业的干预效果过小、用户受到的补贴过少, 四方演化博弈会进入 $E_8 (1, 0, 0, 0)$ 。为避免此不良稳定状态, 车企需协商下调委托代理履责费用, 并强化产品生态设计和巩固信息壁垒, 增加对非规范回收行为的干预, 同时增加用户参与生态化回收的补贴。

情形二, $E_{12} (0, 1, 0, 0)$ 为均衡点时, 综合车企不设置壁垒, 专业车企合作, 非正规企业不合作, 用户不参与正规回收。当满足 $m - h < 0$, $u_0 + v_0 - u_1 - v_1 + g_2 < 0$, $t + e_1 + f_1 - n - e_2 - f_2 < 0$ 时为稳定均衡点。若专业车企推卸产品责任时受到的惩罚高于委托代理履责的费用, 以及专业车企设置的信息壁垒对非规范回收行为的影响较弱, 用户的补贴额度也过小, 四方演化博弈就会进入 $E_{12} (0, 1, 0, 0)$ 。鉴于此, 专业车企需增加产品绿色设计水平和强化信息壁垒, 增加对用户的补贴。

5. 研究结论

本研究通过分析动力电池回收的四方主体的博弈, 针对实现“综合车企施加有效控制”“专业车企

委托履责并推动生态回收”“非生态回收商生态转型”和“用户积极参与生态回收”的目标，得出结论如下：

1) 两种车企的积极协作能够有力推动生态回收。为了吸引和保持专业车企的合作，综合车企需要加强与专业车企的协调沟通，设置双方都能接受的委托费用。同时，综合车企仍要持续对非生态回收行为保持控制强度，协同专业车企，优化产品生态化设计并提高产品信息壁垒的强度，并根据实际需要合理补贴用户，全面提升官方回收渠道优势。

2) 当非正规企业妥协参与生态回收系统时，综合车企可以局部降低控制强度，比如逐渐减少用户补贴，以起到节约成本的效果，但是需要结合非正规企业群体的动向随时调整。

以上结论为企业改善回收效果提供了理论支持。但要意识到，动力电池回收状况随电动汽车产业的发展而动态变化着。目前动力电池非生态回收比例较高，这是电动汽车产业发展过快造就的必然性。电动汽车企业作为产业核心参与者，需要努力提高产品生产阶段的易回收性和易拆解性、流通阶段的耐用性和可维护性以及处置阶段的回收体系建设。不过，实力再雄厚的企业也不能完全控制市场行为。企业需向政府部门提供行业相关信息和合理的建议，帮助政府制定有效改善动力电池回收现状的政策。合适的政策能够改善企业主体主动控制的积极性和有效性，更好实现电动汽车产品全生命周期的环保。

参考文献

- [1] 李文龙, 田立平, 王雪. 基于消费者对回收价格敏感程度的回收策略研究[J]. 系统科学与数学, 2021, 41(9): 2538-2548.
- [2] 罗堰, 陈兰芳, 吴刚, 等. WEEE 拆解多主体利益协调模型及其动态演化研究[J]. 软科学, 2021, 35(11): 138-144.
- [3] 张子健, 郭明波, 陈全朋. EPR 下动力电池梯度利用的闭环供应链定价策略与协调机制[J]. 工业工程, 2020, 23(3): 10-18.
- [4] 王佳, 黄秀蓉. 废旧动力电池的危害与回收[J]. 生态经济, 2021, 37(12): 5-8.
- [5] 郝硕硕, 董庆银, 李金惠. 基于成本核算的废旧动力电池回收模式分析与趋势研究[J]. 中国环境科学, 2021, 41(10): 4745-4755.