

新能源车企参与下的充电基础设施建设发展： 四方演化博弈视角

吴千千, 柏琳

(北京邮电大学经济管理学院, 北京 100876)

摘要: 探讨充电基础设施与新能源汽车协同演化对充电基础设施产业高质量发展具有重要意义。将新能源车企纳入充电基础设施建设运营系统中, 构建四方演化博弈模型分析均衡点, 通过数值仿真探讨影响演化的关键因素并借助实证分析验证充电设施建设发展对新能源汽车消费的推动作用。研究发现, 运营商需扩大盈利面, 提升设施利用率; 消费者对新能源车价和充电损失力度较为敏感, 新能源车企应谨慎定价并通过评估考虑自建或与他方共建充电设施。

关键词: 充电基础设施; 演化博弈; 新能源汽车; 稳定策略组合; 新能源车企

中图分类号: F294.9; F224.32 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2025)02-0275-14

近年来, 我国新能源汽车产业发展迅速, 已逐渐迈向从政策驱动转向市场拉动的新发展时期。随着新能源汽车在我国的加速普及, 推进充电基础设施建设, 能进一步激发市场活力。国务院办公厅印发《关于进一步构建高质量充电基础设施体系的指导意见》, 对新能源汽车配套设施建设的覆盖范围、规模结构等要求做了具体部署^[1]。作为新型基础设施建设的重要内容, 充电基础设施建设发展对于促进新能源汽车市场推广具有重要意义。据中国充电联盟数据, 截至 2023 年 12 月, 我国充电基础设施累计数量为 859.6 万台, 同比增加 65%。桩车增量比为 1:2.8^[2]。

新能源汽车的里程受限和充电难的问题是阻碍消费者选择新能源汽车的主要原因。完善健全的充电基础设施体系提高新能源汽车车主充换电的便利性, 缓解长距离行驶的里程焦虑, 从而促进新能源汽车的市场推广。然而, 我国充电基础设施产业发展还存在着诸多问题, 充电基础设施布局不合理、故障率高、高速公路充电难、供需不匹配等问题依旧严峻, 亟待加速布局, 促进新能源汽车的市场推广与产业升级。

构建完善健全的充电基础设施体系是促进我国新能源汽车产业高质量发展的重要基础, 考虑到新能源车企自建或与他方共建充电基础设施的

情景, 借助演化博弈建立了政府、充电基础设施运营商、消费者和新能源车企四方主体演化博弈模型, 并通过稳定性分析和数值模拟仿真厘清主体策略选择及主要参数对演化稳定状态的影响, 围绕充电基础设施建设运营的主要利益相关者探讨充电基础设施与新能源汽车协调发展、相互促进的关键要素, 有助于更全面地理解充电基础设施与新能源汽车发展之间的互动关系, 为建成高质量充电基础设施网络体系、在补贴退坡背景下推动新能源汽车市场发展提供政策建议。

1 研究综述

充电基础设施为新能源汽车提供充换电服务。充电基础设施运营商是指安装充电基础设施并运营维护的企业^[3]。充电基础设施运营商可分为独立运营商、电力公司和新能源车企三类, 独立运营商如特来电、星星充电, 电力公司如国家电网、南方电网, 而蔚来、特斯拉等车企选择自建充电基础设施。除了以上三类, 还有部分企业采取车站合作模式、分时租赁及众筹等模式^[4]。

新能源汽车发展依赖于充电基础设施这类互补品^[5]。年行驶里程和充换电时间是影响消费者对新能源汽车偏好的关键因素^[6], 便捷充电的可获得性对缓解长距离出行的距离焦虑和促进电动汽车的广泛采用起到了关键作用^[7]。

收稿日期: 2024-08-18

作者简介: 吴千千(2000—), 女, 安徽安庆人, 硕士研究生, 研究方向为演化博弈; 通信作者柏琳(1965—), 女, 重庆人, 教授, 硕士研究生导师, 研究方向为信息管理、企业管理。

近年来,随着新能源汽车的普及,充电基础设施行业得到快速发展,但也面临着诸多问题,如发展不均衡、利用率低和布局不合理等问题^[8-9,4]。充电基础设施运营商主要盈利空间集中在服务费上,利用率较低^[10],盈利较困难^[11],导致运营商在管理维护方面的费用支出减少,亟待开发增值服务以扩大盈利面,这些问题严重影响消费者的购买意愿和新能源汽车的市场推广^[12]。

充电基础设施的建设发展需要依靠多方共建共治^[13]。博弈模型可以将多方主体纳入研究范围,讨论各方密切相关的策略选择问题。已有学者借助博弈模型探讨充电基础设施的相关问题。孙丙香等^[14]通过三方静态非合作博弈模型研究政府、充电基础设施运营商和用户的行为研究,表明了充电定价的合理性能促进电动汽车的市场发展。Zhu等^[15]提出三层次 Stackelberg 博弈模型来分析政府、充电基础设施投资者和电动汽车消费者之间的互动,指出电动汽车市场的间接网络效应对电动汽车渗透率和政策有效性具有重要作用。Zhang等^[16]通过博弈模型探究政府如何针对用户和充电服务提供商设计补贴政策以高效促进电动汽车的采用及解决充电基础设施供需不匹配问题。

然而,由于充电基础设施运营商等主体在实际决策过程中缺乏确定和完备的信息,且决策选择过程为有限理性博弈^[17],上述研究也较少考虑多主体博弈的长期动态变化过程^[18],已有研究基于演化博弈论对充电基础设施利益相关者进行分析。演化博弈在充电基础设施研究领域的运用,一方面基于选址^[19]、投资建设^[20]等问题讨论相关主体之间的博弈。部分学者对充电基础设施的考察还关注产权方^[21]、中间服务商^[3]之间的策略演化过程;另一方面基于充电基础设施对新能源汽车推广的角度。Fang等^[22]通过小世界网络背景下的演化博弈研究电动汽车充电基础设施的推广,研究表明在均衡的政府补贴和税收政策下,充电基础设施的推广具有更高的经济效率。郑生钦和段旭^[21]构建多方参与充电基础设施建设的动态演化博弈模型,分析充电基础设施运营商和产权方在有政府参与下的策略演化。Chen等^[23]构建复杂网络中的演化博弈模型,发现在运营补贴模式和政府有力监管背景下,口碑效应与消费者选择购买电动汽车之间存在正相关关系。王伟等^[24]构建充电基础设施利益相关者行为的演化博弈模型,并借助系统动力学仿真表明充电基础设施运营商积极运营可以有效提高消

费者购买新能源汽车的欲望。

综上所述,尽管相关文献从博弈角度对充电基础设施及相关利益方或充电基础设施与新能源汽车推广之间展开了讨论,但在充电基础设施与新能源汽车协同发展过程中,各主体不能做到完全理性,且信息不对称,尚未探讨现实中部分新能源车企选择参与自建或与运营商共建充电基础设施的情况。研究首次将新能源车企纳入博弈框架内,并将四方演化博弈用于充电基础设施建设运营与新能源汽车协同演化发展研究中,探讨动态演化过程中的均衡策略选择和均衡点的稳定性,借助数值仿真发现影响充电基础设施与新能源汽车协同发展的关键因素,并利用实证研究验证充电基础设施对新能源汽车消费的支撑作用,促进充电基础设施有效监管、多元化运营和高质量发展。

2 模型构建

2.1 问题描述

根据相关研究现状和现实实践可知,演化博弈模型构建主要涉及四方之间的互动关系。

政府通过调整监管手段和力度促进充电基础设施体系建立健全,适度为新能源汽车消费者和新能源车企提供补贴,并根据市场发展阶段逐步退坡^[25],通过免征新能源汽车购置税刺激消费者购买意愿,并对出现骗补、不合规运营等情况的运营商予以处罚,核算环境效益,推动汽车行业绿色转型和新能源汽车产业健康发展,追求社会效益最大化。

充电基础设施运营商通过提供充换电服务获得服务费,提供其他附加服务获得额外收益,根据所在地区政府出台的各项政策获得相应补贴或税收优惠,同时需负责充电基础设施的运营维护,收益受新能源汽车产业发展状况和消费者使用情况影响,追求经济收益最大化。

消费者作为市场需求方,根据个人购买意愿、偏好、相关补贴及税收优惠、充电或加油便利性、产品质量等信息做出购买新能源汽车或购买燃油汽车的选择,作为充电基础设施运营监督的利益相关者,充电基础设施若存在不规范运营、消极运营等情况,可能会直接影响消费者的合法权益,追求使用效益最大化。

新能源车企作为市场供给方,除新能源汽车的研发销售等环节,也会根据经营和市场的不同,选择是否参与自建(如蔚来、特斯拉、小鹏等企业)或与充电基础设施运营商共同建设充电基础设施(如一汽、江淮、大众和星星充电共同成立充电桩运营

公司开迈斯),以此提高品牌吸引力和竞争力,同时需付出一定成本并承担风险,追求经济收益最大化。

因此,基于上述互动过程,构建新能源车企参与下的充电基础设施与新能源汽车协同发展机制,参与主体为政府、充电基础设施运营商、消费者和新能源车企,主体之间的利益关系如图1所示,并基于此进行下一步模型构建。

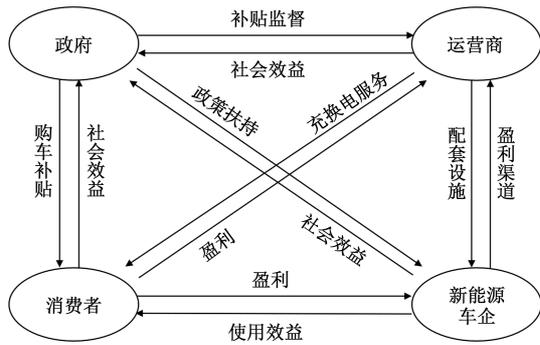


图1 四方博弈主体利益关系

2.2 博弈建立

2.2.1 假设

为有效开展四方演化博弈研究,对模型进行了必要假设。

H1:参与主体在不完全信息条件下均为有限理性,基于自身利益最大化原则,且策略选择受其他主体影响,随时间逐渐演化稳定于最优。不考虑其他可能影响博弈系统的因素。

H2:政府的策略集合为{积极监管,不积极监管},设定政府采取积极监管策略的概率为 $w(0 \leq w \leq 1)$,采取不积极监管策略的概率为 $(1-w)$;积极监管是指政府主动承担监管责任,奖罚分明对充电基础设施运营商给予补贴和惩罚;不积极监管是指考虑到监管和补贴成本等问题,放松了对充电基础设施运营商的监管。

充电基础设施运营商的策略集合为{积极运营,消极运营},设定运营商采取积极运营策略的概率为 $x(0 \leq x \leq 1)$,采取消极策略的概率为 $(1-x)$;积极运营是指运营商严格按照相关管理办法运营,依法进行项目审批验收,积极排除故障和风险,提供安全快捷的充电服务;消极运营是指运营商出现建设不合规充电基础设施、维护检修不到位、多计费等不良问题。

消费者的策略集合为{购买新能源汽车,购买燃油汽车},设定消费者采取购买新能源汽车策略的概率为 $y(0 \leq y \leq 1)$,采取购买燃油汽车策略的概率为 $(1-y)$ 。

新能源车企的策略集合为{参与自建或共建充电基础设施,不参与自建或共建充电基础设施},设定新能源车企采取参与自建或共建充电基础设施策略的概率为 $z(0 \leq z \leq 1)$,采取策略的概率为 $(1-z)$ 。 w, x, y, z 均为时间 t 的函数。

H3:政府采取积极监管策略时对充电基础设施运营商给予建设补贴和运营补贴,补贴力度分别为 μ_1 和 μ_2 ,对充电基础设施运营商骗补等行为进行处罚 P ,处罚力度为 k_1 ,同时,政府付出监管成本 C_1 。政府将通过新能源汽车的推广获得社会效益 U_1 。

H4:充电基础设施运营商建设成本为 C_2 ,运营维护电力等成本为 C_3 ,充电收益为 U_2 ,若充电基础设施运营商采取积极运营策略或车企参与自建或共建充电基础设施,则可通过提高消费者的充电效用促进新能源汽车推广或提供增值服务从而获得额外收益 U_3 。

H5:进入汽车市场的消费者均有购车意愿,且在购买新能源汽车或燃油汽车中决策,消费者购买新能源汽车的成本为 C_4 ,使用效益为 U_4 ,政府对新能源汽车消费者给予购车补贴,补贴力度为 λ ,若政府、充电基础设施运营商采取不积极策略或车企不参与自建或共建充电基础设施,消费者面临充换电难、找桩难等问题引发的潜在充电损失力度为 k_2 。购买燃油汽车的成本为 C_5 ,车辆购置税率为 k_3 ,使用效益为 U_5 。

H6:新能源车企研发生产销售等成本为 C_6 ,获得政府的相关补助为 $\mu_3 C_6$,卖车所获收益为 U_6 ,若车企采取自建或共建充电基础设施策略,所需成本为 C_7 ,通过以上策略提高消费者充电效用从而促进汽车销售得到的其他收益为 U_7 。

四方演化博弈模型的参数设置及其含义如表1所示。

2.2.2 支付矩阵

根据上述假设和参数设置,四方博弈的策略组合和支付矩阵如表2和表3所示。

3 稳定性分析

3.1 四方策略选择的稳定性分析

3.1.1 政府策略选择的稳定性分析

根据上述模型假设和变量设定,政府选择积极监管的期望收益:

$$E_{w_1} = xyza_{11} + (1-x)yz a_{12} + xy(1-z)a_{21} + (1-x)y(1-z)a_{22} + x(1-y)za_{31} + (1-x)(1-y)za_{32} + x(1-y)(1-z)a_{41} + (1-x)(1-y)(1-z)a_{42} \quad (1)$$

表 1 四方演化博弈模型参数符号及其含义

参数	参数名称	参数解释
μ_1	建设补贴力度	政府采取积极监管策略时对充电基础设施运营商给予有关建设补贴的力度
μ_2	运营补贴力度	政府采取积极监管策略时对充电基础设施运营商给予有关日常运营补贴的力度
k_1	处罚力度	政府对充电基础设施运营商骗补、乱收费等行为进行处罚的力度
P	处罚	政府对充电基础设施运营商骗补、乱收费等行为进行处罚
C_1	监管成本	政府付出的监管成本
U_1	社会效益	政府将通过新能源汽车的推广获得的社会效益
C_2	建设成本	充电基础设施运营商建设充电桩、充电站及换电站等基础设施的建设成本
C_3	运营等成本	充电基础设施运营商日常运营维护等成本
U_2	充电收益	充电基础设施运营商可获得的充电收益
U_3	额外收益	若充电基础设施运营商采取积极运营策略或车企参与自建或共建充电基础设施,则可通过提高消费者的充电效用促进新能源汽车推广或提供增值服务从而获得额外收益
C_4	购新能源汽车成本	消费者购买新能源汽车的成本
U_4	购新能源汽车收益	消费者购买新能源汽车获得的使用效益
λ	购车补贴力度	政府对新能源汽车消费者给予购车补贴的力度
k_2	充电损失力度	消费者面临充换电难、找桩难等问题引发的潜在充电损失力度
C_1	购燃油车成本	消费者购买燃油汽车的成本
k_3	车辆购置税率	车辆购置税率
U_5	购燃油车收益	消费者购买燃油汽车获得的使用效益
C_6	车企研发等成本	新能源车企研发生产销售等成本
μ_3	政府补助车企力度	政府对新能源车企的相关补助力度
U_6	卖车收益	新能源车企卖车所获收益
C_7	自建或共建成本	车企采取自建或共建充电基础设施策略所需成本
U_7	促进销售收益	车企通过车企采取自建或共建充电基础设施策略提高消费者充电效用从而促进新能源汽车销售得到的其他收益

表 2 政府积极监管下四方博弈支付矩阵

消费者	车企	政府积极监管(w)	
		运营商积极(x)	运营商不积极($1-x$)
购买新能源汽车(y)	参与自建或共建充电基础设施(z)	$a_{11} = U_1 - C_1 - \mu_1 C_2 - \mu_2 C_3 - \lambda C_4 - \mu_3 C_6$	$a_{12} = U_1 - C_1 - \lambda C_4 - \mu_3 C_6 + k_1 P$
		$b_{11} = U_2 + U_3 - C_2 - C_3 + \mu_1 C_2 + \mu_2 C_3$	$b_{12} = U_2 - C_2 - C_3 - k_1 P$
		$c_{11} = U_4 - C_4 + \lambda C_4$	$c_{12} = U_4 - C_4 + \lambda C_4 - k_2 U_4$
		$d_{11} = U_6 + U_7 - C_6 - C_7 + \mu_3 C_6$	$d_{12} = U_6 + U_7 - C_6 - C_7 + \mu_3 C_6$
购买新能源汽车(y)	不参与自建或共建充电基础设施($1-z$)	$a_{21} = U_1 - C_1 - \mu_1 C_2 - \mu_2 C_3 - \lambda C_4 - \mu_3 C_6$	$a_{22} = U_1 - C_1 - \lambda C_4 - \mu_3 C_6 + k_1 P$
		$b_{21} = U_2 + U_3 - C_2 - C_3 + \mu_1 C_2 + \mu_2 C_3$	$b_{22} = U_2 - C_2 - C_3 - k_1 P$
		$c_{21} = U_4 - C_4 + \lambda C_4 - k_2 U_4$	$c_{22} = U_4 - C_4 + \lambda C_4 - k_2 U_4$
		$d_{21} = U_6 - C_6 + \mu_3 C_6$	$d_{22} = U_6 - C_6 + \mu_3 C_6$
购买燃油汽车($1-y$)	参与自建或共建充电基础设施(z)	$a_{31} = k_3 C_5 - C_1 - \mu_1 C_2 - \mu_2 C_3 - \mu_3 C_6$	$a_{32} = k_3 C_5 + k_1 P - C_1 - \mu_3 C_6$
		$b_{31} = -C_2 - C_3 + \mu_1 C_2 + \mu_2 C_3$	$b_{32} = -C_2 - C_3 - k_1 P$
		$c_{31} = U_5 - C_5 - k_3 C_5$	$c_{32} = U_5 - C_5 - k_3 C_5$
		$d_{31} = \mu_3 C_6 - C_6 - C_7$	$d_{32} = \mu_3 C_6 - C_6 - C_7$
购买燃油汽车($1-y$)	不参与自建或共建充电基础设施($1-z$)	$a_{41} = k_3 C_5 - C_1 - \mu_1 C_2 - \mu_2 C_3 - \mu_3 C_6$	$a_{42} = k_3 C_5 + k_1 P - C_1 - \mu_3 C_6$
		$b_{41} = -C_2 - C_3 + \mu_1 C_2 + \mu_2 C_3$	$b_{42} = -C_2 - C_3 - k_1 P$
		$c_{41} = U_5 - C_5 - k_3 C_5$	$c_{42} = U_5 - C_5 - k_3 C_5$
		$d_{41} = \mu_3 C_6 - C_6$	$d_{42} = \mu_3 C_6 - C_6$

注:从上至下依次为政府、运营商、消费者及新能源车企的支付函数。

政府选择不积极监管的期望收益:

$$\begin{aligned}
 E_{w_2} = & xyza_{13} + (1-x)yza_{14} + xy(1-z)a_{23} + \\
 & (1-x)y(1-z)a_{24} + x(1-y)za_{33} + \\
 & (1-x)(1-y)za_{34} + x(1-y)(1-z)a_{43} + \\
 & (1-x)(1-y)(1-z)a_{44} \quad (2)
 \end{aligned}$$

政府的平均期望收益为

$$\bar{E}_w = wE_{w_1} + (1-w)E_{w_2} \quad (3)$$

政府的复制动态方程为

$$\begin{aligned}
 G(w) = \frac{dw}{dt} = & w(E_{w_1} - \bar{E}_w) = \\
 & w(1-w)[-C_1 + k_1 P - x(k_1 P + C_2 + C_3)] \quad (4)
 \end{aligned}$$

接下来,讨论运营商积极运营的概率 x 的变化

对政府策略选择的影响,令 $x_0 = \frac{k_1 p - C_1}{k_1 p + C_2 + C_3}$,可

知当 $x = x_0$ 时, $G(w) \equiv 0$,此时 $\forall x \in [0,1]$ 均为稳定点。

表 3 政府不积极监管下四方博弈支付矩阵

消费者	车企	政府不积极(1-w)	
		运营商积极(x)	运营商不积极(1-x)
购买新能源汽车 y	参与自建或共建充电基础设施(z)	$a_{13} = U_1 - \lambda C_4 - \mu_3 C_6$	$a_{14} = U_1 - \lambda C_4 - \mu_3 C_6$
		$b_{13} = U_2 + U_3 - C_2 - C_3$	$b_{14} = U_2 - C_2 - C_3$
		$c_{13} = U_4 - C_4 + \lambda C_4 - k_2 U_4$	$c_{14} = U_4 - C_4 + \lambda C_4 - k_2 U_4$
		$d_{13} = U_6 + U_7 - C_6 - C_7 + \mu_3 C_6$	$d_{14} = U_6 + U_7 - C_6 - C_7 + \mu_3 C_6$
	不参与自建或共建充电基础设施(1-z)	$a_{23} = U_1 - \lambda C_4 - \mu_3 C_6$	$a_{24} = U_1 - \lambda C_4 - \mu_3 C_6$
		$b_{23} = U_2 + U_3 - C_2 - C_3$	$b_{24} = U_2 - C_2 - C_3$
		$c_{23} = U_4 - C_4 + \lambda C_4 - k_2 U_4$	$c_{24} = U_4 - C_4 + \lambda C_4 - k_2 U_4$
		$d_{23} = U_6 - C_6 + \mu_3 C_6$	$d_{24} = U_6 - C_6 + \mu_3 C_6$
购买燃油汽车(1-y)	参与自建或共建充电基础设施(z)	$a_{33} = k_3 C_5 - \mu_3 C_6$	$a_{34} = k_3 C_5 - \mu_3 C_6$
		$b_{33} = -C_2 - C_3$	$b_{34} = -C_2 - C_3$
		$c_{33} = U_5 - C_5 - k_3 C_5$	$c_{34} = U_5 - C_5 - k_3 C_5$
		$d_{33} = \mu_3 C_6 - C_6 - C_7$	$d_{34} = \mu_3 C_6 - C_6 - C_7$
	不参与自建或共建充电基础设施(1-z)	$a_{43} = k_3 C_5 - \mu_3 C_6$	$a_{44} = k_3 C_5 - \mu_3 C_6$
		$b_{43} = -C_2 - C_3$	$b_{44} = -C_2 - C_3$
		$c_{43} = U_5 - C_5 - k_3 C_5$	$c_{44} = U_5 - C_5 - k_3 C_5$
		$d_{43} = \mu_3 C_6 - C_6$	$d_{44} = \mu_3 C_6 - C_6$

注:从上至下依次为政府、运营商、消费者及新能源车企的支付函数。

当 $x \neq x_0$ 时,由 $G(w) = 0$ 可得 $w = 0$ 和 $w = 1$ 均为零点,即政府“积极监管或不积极监管”都是稳定策略。

引理 1 当 $0 < x < x_0$ 时,政府演化稳定策略为 $w = 1$;当 $x_0 < x < 1$ 时,政府演化稳定策略为 $w = 0$ 。

证明:对 $G(w)$ 关于变量 w 求一阶偏导,可得

$$\frac{dG(w)}{dw} = (1 - 2w)[-C_1 + k_1 P - x(k_1 P + C_2 + C_3)] \quad (5)$$

由微分方程稳定性定理^[26]可知,当政府选择积极监管策略的概率满足: $G(w) = 0$ 且 $\frac{dG(w)}{dw} < 0$ 时, w 为政府策略选择的演化稳定点。

故当 $0 < x < x_0$ 时, $G(w)|_{w=1} = 0$ 且 $\frac{dG(w)}{dw}|_{w=1} < 0$,此时 $w = 1$ 为演化稳定点,即当运营商采取积极运营的概率小于 x_0 时,政府最终选择积极监管。

当 $x_0 < x < 1$ 时, $G(w)|_{w=0} = 0$ 且 $\frac{dG(w)}{dw}|_{w=0} < 0$,此时 $w = 0$ 为演化稳定点,即当运营商采取积极运营的概率大于 x_0 时,政府最终选择不积极监管。

命题 1 当积极监管的成本 C_1 越大,政府越倾向于选择“不积极监管”策略。

证明:政府策略选择的相位图如图 2 所示,图中的空间被曲面 $x = x_0$ 划分为I和II部分,其体积分别记为 V_{x1} 和 V_{x2} ,表示政府选择积极监管策略的概率和不积极监管策略的概率,空间I是满足条件 $0 < x < x_0$ 的初始策略集,由引理 1 可知,当政府初始状态位于

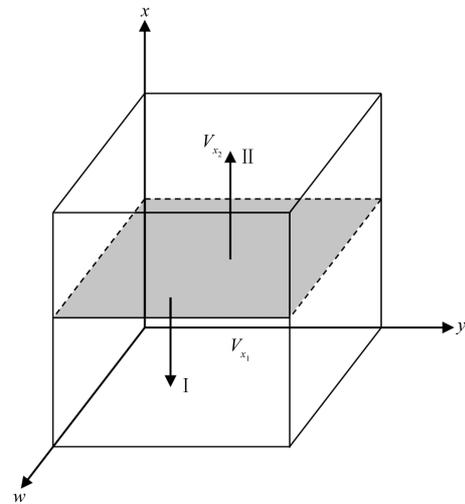


图 2 政府策略选择相位图

空间I时,政府最终会选择积极监管策略。空间II是满足条件 $x_0 < x < 1$ 的初始策略集,由引理 1 可知,当政府初始状态位于空间II时,政府会向不积极监管策略方向演化。当其他参数不变时,如果增加监管成本 C_1 , x_0 会随之减小,导致空间I的体积缩小,即政府采取积极监管的概率减小,表明当政府积极监管成本较高时,政府监管的积极性会降低。

3.1.2 运营商策略选择的稳定性分析

运营商选择积极运营的期望收益:

$$E_{x1} = wyzb_{11} + (1-w)yzb_{13} + wy(1-z)b_{21} + (1-w)y(1-z)b_{23} + w(1-y)zb_{31} + (1-w)(1-y)zb_{33} + w(1-y)(1-z)b_{41} + (1-w)(1-y)(1-z)b_{43} \quad (6)$$

运营商选择消极运营的期望收益:

$$E_{x_2} = \omega y z b_{12} + (1 - \omega) y z b_{14} + \omega y (1 - z) b_{22} + (1 - \omega) y (1 - z) b_{24} + \omega (1 - y) z b_{32} + (1 - \omega) (1 - y) z b_{34} + \omega (1 - y) (1 - z) b_{42} + (1 - \omega) (1 - y) (1 - z) b_{44} \quad (7)$$

运营商的平均期望收益为

$$\bar{E}_x = x E_{x_1} + (1 - x) E_{x_2} \quad (8)$$

运营商的复制动态方程为

$$O(x) = \frac{dx}{dt} = x(E_{x_1} - \bar{E}_x) =$$

$$x(1 - x)(y U_3 + \omega_1 C_2 + \omega_2 C_3 + \omega k_1 P) \quad (9)$$

讨论消费者购买新能源汽车的概率 y 的变化对运营

商策略选择的影响,令 $y_0 = \frac{-\omega_1 C_2 - \omega_2 C_3 - \omega k_1 P}{U_3}$,

$y_0 < 0$, 当 $y = y_0$ 时, $O(x) \equiv 0$, 此时 $\forall x \in [0, 1]$ 均为稳定点; 当 $y \neq y_0$ 时, 由 $O(x) = 0$ 可得 $x = 0$ 和 $x = 1$ 均为零点, 即运营商“积极运营或消极运营”都是稳定策略。

3.1.3 消费者策略选择的稳定性分析

消费者的策略选择为购买新能源汽车时的期望收益:

$$E_{y_1} = \omega x z c_{11} + \omega (1 - x) z c_{12} + (1 - \omega) x z c_{13} + (1 - \omega) (1 - x) z c_{14} + \omega x (1 - z) c_{21} + \omega (1 - x) (1 - z) c_{22} + (1 - \omega) x (1 - z) c_{23} + (1 - \omega) (1 - x) (1 - z) c_{24} \quad (10)$$

消费者选择购买燃油汽车的期望收益:

$$E_{y_2} = \omega x z c_{31} + \omega (1 - x) z c_{32} + (1 - \omega) x z c_{33} + (1 - \omega) (1 - x) z c_{34} + \omega x (1 - z) c_{41} + \omega (1 - x) (1 - z) c_{42} + (1 - \omega) x (1 - z) c_{43} + (1 - \omega) (1 - x) (1 - z) c_{44} \quad (11)$$

消费者的平均期望收益为

$$\bar{E}_y = y E_{y_1} + (1 - y) E_{y_2} \quad (12)$$

消费者的复制动态方程为

$$C(y) = \frac{dy}{dt} = y(E_{y_1} - \bar{E}_y) = y(1 - y)(U_4 - C_4 + C_4 - k_2 U_4 - U_5 + C_5 + k_3 C_5 + \omega x z k_2 U_4) \quad (13)$$

令 $z_0 = \frac{-U_4 + C_4 - C_4 + k_2 U_4 + U_5 - C_5 - k_3 C_5}{\omega x k_2 U_4}$, 当

$z = z_0$ 时, $C(y) \equiv 0$, 此时 $\forall y \in [0, 1]$ 均为稳定点; 当 $z \neq z_0$ 时, 由 $C(y) = 0$ 可得 $y = 0$ 和 $y = 1$ 均为零点, 即消费者购买新能源汽车或购买燃油汽车都是稳定策略。

引理 2 当 $0 < z < z_0$ 时, 消费者演化稳定策略为

$y = 0$; 当 $z_0 < z < 1$ 时, 消费者演化稳定策略为 $y = 1$ 。

证明: 对 $C(y)$ 关于变量 y 求一阶偏导, 可得

$$\frac{dC(y)}{dy} = (1 - 2y)(U_4 - C_4 + C_4 - k_2 U_4 - U_5 + C_5 + k_3 C_5 + \omega x z k_2 U_4) \quad (14)$$

当 $0 < z < z_0$ 时, $C(y)|_{y=0} = 0$ 且 $\frac{dC(y)}{dy}|_{y=0} <$

0 , 此时 $y = 0$ 为演化稳定点, 即当新能源车企选择参与自建或共建充电基础设施的概率小于 z_0 时, 消费者最终选择购买燃油汽车。

当 $z_0 < z < 1$ 时, $C(y)|_{y=1} = 0$ 且 $\frac{dC(y)}{dy}|_{y=1} <$

0 , 此时 $y = 1$ 为演化稳定点, 即当新能源车企选择参与自建或共建充电基础设施的概率大于 z_0 时, 消费者最终选择购买新能源汽车。

命题 2 当新能源汽车购置成本越大, 消费者越倾向于选择“购买燃油汽车”策略。

证明: 消费者策略选择的相位图如图 3 所示, 图中的空间被曲面 $z = z_0$ 划分为 I 和 II 部分, 其体积分别记为 V_{y_1} 和 V_{y_2} , 分别表示消费者采取购买燃油汽车策略的概率和购买新能源汽车策略的概率, 空间 I 是满足条件 $0 < z < z_0$ 的初始策略集, 由引理 2 可知, 当消费者初始状态位于空间 I 时, 消费者会向购买燃油汽车策略演化。空间 II 表示初始策略 $x_0 < x < 1$, 根据引理 2, 当消费者初始状态位于空间 II 时, 消费者会倾向于购买新能源汽车。在其他参数不变时, 随着 C_4 增大, z_0 会增大, 使得空间 I 的体积增大, 即消费者选择购买燃油汽车的概率增大, 说明当新能源汽车购置成本较高时, 消费者倾向于购买燃油汽车。

3.1.4 新能源车企策略选择的稳定性分析

新能源车企选择参与自建或共建充电基础设

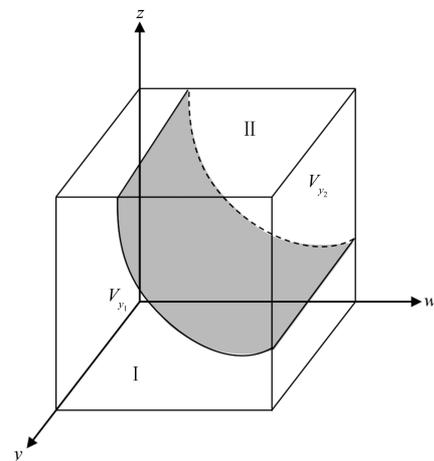


图 3 消费者策略选择相位图

施的期望收益:

$$E_{z_1} = \omega xy d_{11} + \omega(1-x)y d_{12} + (1-\omega)xy d_{13} + (1-\omega)(1-x)y d_{14} + \omega x(1-y)d_{31} + \omega(1-x)(1-y)d_{32} + (1-\omega)x(1-y)d_{33} + (1-\omega)(1-x)(1-y)d_{34} \quad (15)$$

新能源车企选择不参与自建或共建充电基础设施的期望收益:

$$E_{z_2} = \omega xy d_{21} + \omega(1-x)y d_{22} + (1-\omega)xy d_{23} + (1-\omega)(1-x)y d_{24} + \omega x(1-y)d_{41} + \omega(1-x)(1-y)d_{42} + (1-\omega)x(1-y)d_{43} + (1-\omega)(1-x)(1-y)d_{44} \quad (16)$$

新能源车企的平均期望收益为

$$\bar{E}_z = zE_{z_1} + (1-z)E_{z_2} \quad (7)$$

新能源车企的复制动态方程为

$$F(z) = \frac{dz}{dt} = z(E_{z_1} - \bar{E}_z) = z(1-z)(yU_7 - C_7) \quad (18)$$

令 $y_0 = \frac{C_7}{U_7}$, 当 $y = y_0$ 时, $F(z) \equiv 0$, 此时 $\forall z \in [0, 1]$ 均为稳定点; 当 $y \neq y_0$ 时, 由 $F(z) = 0$ 可得 $z = 0$ 和 $z = 1$ 均为零点, 即新能源车企参与自建或共建充电基础设施与否都是稳定策略。

引理 3 当 $0 < y < y_0$ 时, 新能源车企演化稳定策略为 $z = 0$; 当 $y_0 < y < 1$ 时, 新能源车企演化稳定策略为 $z = 1$ 。

证明: 对 $F(z)$ 关于变量 z 求一阶偏导, 可得

$$\frac{dF(z)}{dz} = (1 - 2z)(yU_7 - C_7) \quad (19)$$

当 $0 < y < y_0$ 时, $F(z)|_{z=0} = 0$ 且 $\frac{dF(z)}{dz}|_{z=0} < 0$, 此时 $z = 0$ 为演化稳定点, 即当消费者选择购买新能源汽车的概率小于 y_0 时, 新能源车企最终选择不参与自建或共建充电基础设施。

当 $y_0 < y < 1$ 时, $F(z)|_{z=1} = 0$ 且 $\frac{dF(z)}{dz}|_{z=1} < 0$, 此时 $z = 1$ 为演化稳定点, 即当消费者选择购买新能源汽车的概率大于 y_0 时, 新能源车企最终选择参与自建或共建充电基础设施。

命题 3 当 U_7 越大, 新能源车企越倾向于选择“参与自建或共建充电基础设施”策略。

证明: 新能源车企策略选择的相位图如图 4 所示, 图中的空间被曲面 $y = y_0$ 划分为 I 和 II 部分, 其体积分别记为 V_{z_1} 和 V_{z_2} , 表示新能源车企选择参与自建或共建充电基础设施策略的概率和不参与自建或共建充电基础设施策略的概率, 空间 I 表示此

时 $0 < y < y_0$, 由引理 3 可知, 当新能源车企初始状态位于空间 I 时, 新能源车企倾向于不参与自建或共建充电基础设施。空间 II 表示初始策略 $y_0 < y < 1$, 由引理 3 可知, 当新能源车企初始策略选择概率落入空间 II 时, 新能源车企最终会采取参与自建或共建充电基础设施策略。同时, 在其他参数不变时, 当增加 U_7 , y_0 会随之减小, 使得 V_{z_1} 减小, 新能源车企选择不参与自建或共建充电基础设施的概率减小, 说明当新能源车企通过参与自建或共建充电基础设施促进销售的收益较高时, 新能源车企倾向于参与自建或共建充电基础设施。

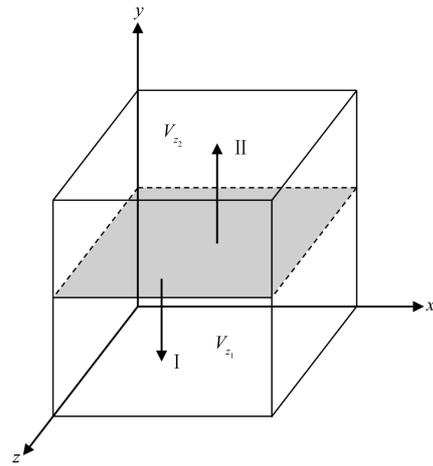


图 4 新能源车企策略选择相位图

3.2 演化稳定策略组合

根据四方支付矩阵和上述复制动态方程, 可得政府、充电基础设施运营商、消费者和新能源车企四方博弈的复制动态方程组为

$$\begin{cases} \frac{dw}{dt} = G(w) = w(E_{w_1} - \bar{E}_w) = w(1-w)(E_{w_1} - E_{w_2}) \\ \frac{dx}{dt} = O(x) = x(E_{x_1} - \bar{E}_x) = x(1-x)(E_{x_1} - E_{x_2}) \\ \frac{dy}{dt} = C(y) = y(E_{y_1} - \bar{E}_y) = y(1-y)(E_{y_1} - E_{y_2}) \\ \frac{dz}{dt} = F(z) = z(E_{z_1} - \bar{E}_z) = z(1-z)(E_{z_1} - E_{z_2}) \end{cases} \quad (20)$$

令复制动态方程组等于 0, 即

$$\begin{cases} \frac{dw}{dt} = 0 \\ \frac{dx}{dt} = 0 \\ \frac{dy}{dt} = 0 \\ \frac{dz}{dt} = 0 \end{cases} .$$

求解可得到四方演化博弈的均衡点,其中包括 16 个纯策略均衡点(0,0,0,0)、(1,0,0,0)、(0,1,0,0)、(0,0,1,0)、(0,0,0,1)、(1,1,0,0)、(1,0,1,0)、(1,0,0,1)、(0,1,1,0)、(0,1,0,1)、(0,0,1,1)、(1,1,1,0)、(1,1,0,1)、(1,0,1,1)、(0,1,1,1)、(1,1,1,1)及 1 个混合策略均衡点 (w^*, x^*, y^*, z^*) 。

在多群体演化博弈中,复制动态方程组的稳定解一定是严格纳什均衡^[27-28],而严格纳什均衡一定是纯策略。故接下来考虑 16 个纯策略均衡点的稳定性。主体策略选择的初始状态和参数的微小变化都会引起均衡点的改变,因此,需讨论均衡点的稳定性才能得出演化稳定策略^[29]。

为此,根据各方的复制动态方程构建雅各比矩阵:

$$J = \begin{pmatrix} \frac{\partial G}{\partial w} & \frac{\partial G}{\partial x} & \frac{\partial G}{\partial y} & \frac{\partial G}{\partial z} \\ \frac{\partial O}{\partial w} & \frac{\partial O}{\partial x} & \frac{\partial O}{\partial y} & \frac{\partial O}{\partial z} \\ \frac{\partial C}{\partial w} & \frac{\partial C}{\partial x} & \frac{\partial C}{\partial y} & \frac{\partial C}{\partial z} \\ \frac{\partial F}{\partial w} & \frac{\partial F}{\partial x} & \frac{\partial F}{\partial y} & \frac{\partial F}{\partial z} \end{pmatrix} \quad (21)$$

将上述 16 个纯策略均衡点分别代入雅可比矩阵,得出各均衡点对应雅可比矩阵的特征值如表 4 所示。

系统均衡点的特征值正负情况、稳定性结论及系统演化稳定时需满足条件如表 5 所示。根据李雅普诺夫第一法^[30],当上述均衡点使得雅可比矩阵所有特征值均为非正时即为该系统的演化稳定策略(evolutionary stable strategy, ESS)。

表 4 各均衡点对应特征值

均衡点	特征值			
	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4
$E_1(0,0,0,0)$	$a_{42} - a_{44}$	$b_{43} - b_{44}$	$c_{24} - c_{44}$	$d_{34} - d_{44}$
$E_2(1,0,0,0)$	$a_{44} - a_{42}$	$b_{41} - b_{42}$	$c_{22} - c_{42}$	$d_{32} - d_{42}$
$E_3(0,1,0,0)$	$a_{41} - a_{43}$	$b_{44} - b_{43}$	$c_{23} - c_{43}$	$d_{33} - d_{43}$
$E_4(0,0,1,0)$	$a_{22} - a_{24}$	$b_{23} - b_{24}$	$c_{44} - c_{24}$	$d_{14} - d_{24}$
$E_5(0,0,0,1)$	$a_{32} - a_{34}$	$b_{33} - b_{34}$	$c_{14} - c_{34}$	$d_{44} - d_{34}$
$E_6(1,1,0,0)$	$a_{43} - a_{41}$	$b_{42} - b_{41}$	$c_{21} - c_{41}$	$d_{31} - d_{41}$
$E_7(1,0,1,0)$	$a_{24} - a_{22}$	$b_{21} - b_{22}$	$c_{42} - c_{22}$	$d_{12} - d_{22}$
$E_8(1,0,0,1)$	$a_{34} - a_{32}$	$b_{31} - b_{32}$	$c_{12} - c_{32}$	$d_{42} - d_{32}$
$E_9(0,1,1,0)$	$a_{21} - a_{23}$	$b_{24} - b_{23}$	$c_{43} - c_{23}$	$d_{13} - d_{23}$
$E_{10}(0,1,0,1)$	$a_{31} - a_{33}$	$b_{34} - b_{33}$	$c_{13} - c_{33}$	$d_{43} - d_{33}$
$E_{11}(0,0,1,1)$	$a_{12} - a_{14}$	$b_{13} - b_{14}$	$c_{34} - c_{14}$	$d_{24} - d_{14}$
$E_{12}(1,1,1,0)$	$a_{23} - a_{21}$	$b_{22} - b_{21}$	$c_{41} - c_{21}$	$d_{11} - d_{21}$
$E_{13}(1,1,0,1)$	$a_{33} - a_{31}$	$b_{32} - b_{31}$	$c_{11} - c_{31}$	$d_{41} - d_{31}$
$E_{14}(1,0,1,1)$	$a_{14} - a_{12}$	$b_{11} - b_{12}$	$c_{32} - c_{12}$	$d_{22} - d_{12}$
$E_{15}(0,1,1,1)$	$a_{11} - a_{13}$	$b_{14} - b_{13}$	$c_{33} - c_{13}$	$d_{23} - d_{13}$
$E_{16}(1,1,1,1)$	$a_{13} - a_{11}$	$b_{12} - b_{11}$	$c_{31} - c_{11}$	$d_{21} - d_{11}$

表 5 各均衡点稳定性分析

均衡点	特征值				稳定性结论	条件
	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4		
$E_1(0,0,0,0)$	U	0	U	-	不稳定	
$E_2(1,0,0,0)$	U	+	U	-	不稳定	
$E_3(0,1,0,0)$	-	0	U	-	不稳定	
$E_4(0,0,1,0)$	U	+	U	U	不稳定	
$E_5(0,0,0,1)$	U	0	U	+	不稳定	
$E_6(1,1,0,0)$	+	-	U	-	不稳定	
$E_7(1,0,1,0)$	U	+	U	U	不稳定	
$E_8(1,0,0,1)$	U	+	U	+	不稳定	
$E_9(0,1,1,0)$	-	-	U	U	ESS	1 和 2
$E_{10}(0,1,0,1)$	-	0	U	+	不稳定	
$E_{11}(0,0,1,1)$	U	+	U	U	不稳定	
$E_{12}(1,1,1,0)$	+	-	U	U	不稳定	
$E_{13}(1,1,0,1)$	+	-	U	+	不稳定	
$E_{14}(1,0,1,1)$	U	+	U	U	不稳定	
$E_{15}(0,1,1,1)$	-	-	U	U	ESS	1 和 3
$E_{16}(1,1,1,1)$	+	-	U	U	不稳定	

注:U 表示该特征值的正负无法判断,各条件分别为条件(1): $U_5 - C_5 - k_3 C_5 - (U_4 - C_4 + C_4 - k_2 U_4) < 0$,条件(2): $U_7 - C_7 < 0$,条件(3): $C_7 - U_7 < 0$ 。

当满足条件(1): $U_5 - C_5 - k_3 C_5 - (U_4 - C_4 + C_4 - k_2 U_4) < 0$ 和条件(2): $U_7 - C_7 < 0$ 时,即政府、新能源车企采取消极措施及运营商积极运营时消费者购买燃油汽车的收益小于政府、新能源车企采取消极措施及运营商积极运营时消费者购买新能源汽车的收益,同时若车企采取自建或共建充电基础设施策略所获的其他收益小于所需成本时,均衡点 $E_9(0,1,1,0)$ 对应雅各比矩阵的特征值为非正值。故 $E_9(0,1,1,0)$ 为该四方演化博弈的演化稳定策略(ESS),(政府不积极、运营商积极、消费者购买新能源汽车、新能源车企不参与自建或共建充电基础设施)为该四方演化博弈的演化稳定策略组合。

当满足条件(1): $U_5 - C_5 - k_3 C_5 - (U_4 - C_4 + C_4 - k_2 U_4) < 0$ 和条件(3): $C_7 - U_7 < 0$ 时,即政府不积极、运营商积极、新能源车企参与自建或共建充电基础设施时消费者购买燃油汽车的收益小于政府不积极、运营商积极、新能源车企参与自建或共建充电基础设施时消费者购买新能源汽车的收益,同时车企采取自建或共建充电基础设施所需成本小于车企因采取自建或共建充电基础设施策略所得到的其他收益时,均衡点 $E_{15}(0,1,1,1)$ 对应雅各比矩阵的特征值为非正值。故 $E_{15}(0,1,1,1)$ 为该四方演化博弈的演化稳定策略(ESS),(政府不积极、运营商积极、消费者购买新能源汽车、新能源车企参与自建或共建充电基础设施)为该四方演化博弈的演化稳定策略组合。

4 数值模拟仿真及实证分析

为验证前文的稳定性分析,进一步分析博弈中的主要参数对主体演化策略和稳定状态的影响,更直观地说明问题,研究采用 MATLAB R2022a 进行数值仿真,采用 SPSS 和 Stata 进行实证研究。由于各方主体初始状态随机,本文仿真研究中初始策略概率均设为 0.5。依据相关研究调查及文献资料^[24,31-33],设置的参数值符合现实情景,保证变量赋值的合理性(如车辆购置税率为国家税务总局政策规定),各参数赋值如下: $\mu_1 = 20\%$, $\mu_2 = 15\%$, $k_1 = 15\%$, $P = 5$, $C_1 = 3$, $C_2 = 10$, $C_3 = 4$, $U_3 = 1$, $\lambda = 15\%$ 。

4.1 稳定策略组合仿真

对前文中的两个特定条件下稳定策略组合的数值仿真检验结果如下。

4.1.1 均衡点 E_9

当部分参数赋值为 $C_4 = 15$, $U_4 = 25$, $k_2 = 10\%$, $C_5 = 10$, $k_3 = 10\%$, $U_5 = 20$, $C_7 = 5$, $U_7 = 1$,即满足条件(1): $U_5 - C_5 - k_3 C_5 - (U_4 - C_4 + C_4 - k_2 U_4) < 0$ 和条件(2): $U_7 - C_7 < 0$ 时,四方博弈系统的演化路径图 5 所示,横轴为时间 t ,取值范围为 $[0, 10]$,纵轴为政府(w)、充电基础设施运营商(x)、消费者(y)、新能源车企(z)四方分别选择各自策略的概率 P ,取值范围为 $[0, 1]$ 。此时系统会稳定于 $(0, 1, 1, 0)$ 状态,即稳定点 E_9 。此时,消费者遵循利益最大化的原则选择购买新能源汽车,且新能源车企由于参与自建或共建充电基础设施所需成本过大而选择不参与自建或共建充电基础设施。尽管政府选择“不积极监管”,但充电基础设施运营商在前期建设投入大只有选择积极运营以期望盈利。四方行为策略的调整过程及结果与上文中演化稳定策略组合的分析吻合。

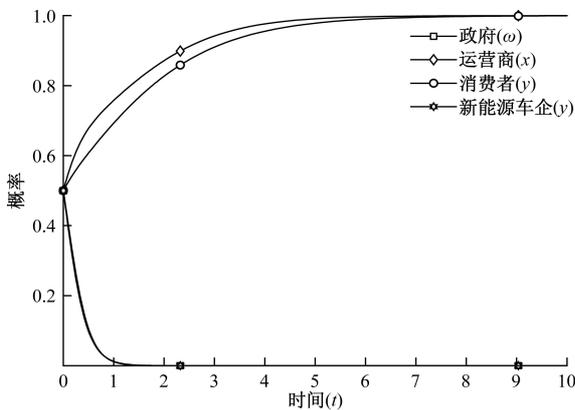


图 5 满足条件(1)和条件(2)时四方策略演化过程

4.1.2 均衡点 E_{15}

当部分参数赋值为 $C_4 = 15$, $U_4 = 25$, $k_2 = 10\%$, $C_5 = 10$, $k_3 = 10\%$, $U_5 = 20$, $C_7 = 5$, $U_7 = 6$,即满足条件(1): $U_5 - C_5 - k_3 C_5 - (U_4 - C_4 + C_4 - k_2 U_4) < 0$ 和条件(3): $C_7 - U_7 < 0$ 时,其演化路径如图 6 所示,系统会稳定于 $(0, 1, 1, 1)$ 状态,即稳定点 E_{15} 。此时新能源车企尽管前期由于参与自建或共建充电基础设施的成本较大,所以在资金压力下倾向于不参与,但在所获收益大于成本的条件下,随着时间的推移和消费者及运营商积极选择的背景下,转向参与自建或共建充电基础设施;消费者遵循利益最大化的原则选择购买新能源汽车,且充电基础设施运营商在前期付出较大成本,且消费者和新能源车企的积极表现促进新能源汽车的推广从而提高充电基础设施的利用率,提高运营商的利润使得运营商趋向积极运营。四方行为策略的调整过程及结果与上文中演化稳定策略组合的分析一致。

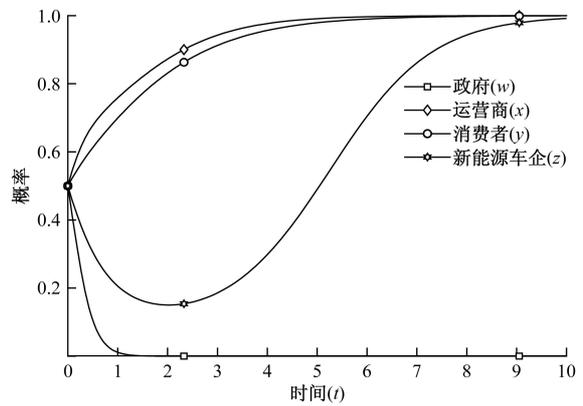


图 6 满足条件 1 和 3 时四方策略演化过程

4.2 参数敏感性分析

通过改变 U_3 研究对运营商策略的影响可得到图 7,可以发现, U_3 的改变影响了充电基础设施运营商的决策速度,但并不改变最终收敛策略,当 U_3 越大,运营商向“积极运营”策略的决策转变速度越快,说明若充电基础设施运营商采取积极运营策略通过提高消费者的充电效用促进新能源汽车推广从而获得其他收益 U_3 越大,利益驱使运营商选择“积极运营”策略,从而进一步促进充电基础设施的建设。

在其他参数不变的情况下,新能源汽车购置成本的变化对消费者博弈主体策略演化的影响如图 8 所示。新能源汽车购置成本的变化引起消费者策略发生较大改变,当新能源汽车购置成本小于燃油汽车购置成本时,经过一定时间消费者策略逐渐趋

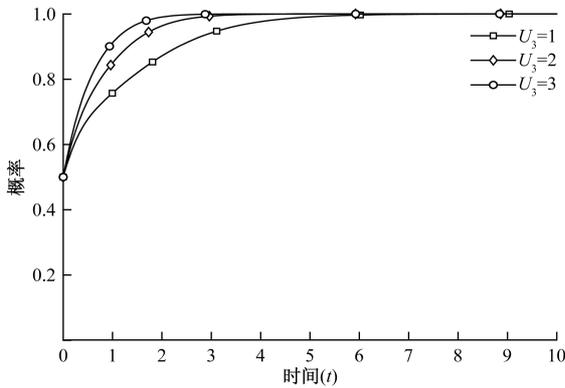


图 7 额外收益对充电基础设施运营商策略选择的影响

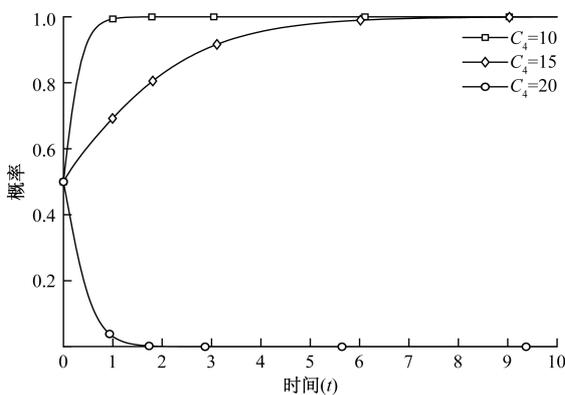


图 8 新能源汽车购置成本对消费者策略选择的影响

近于购买新能源汽车,当新能源汽车购置成本不断上升且高于燃油汽车购置成本时,消费者倾向的策略选择逐渐向购买燃油汽车方向演化,且演化速度加快。消费者对购置成本变化较为敏感,新能源车企在定价或调价时需谨慎考虑。

图 9 显示充电损失力度 k_2 的大小对消费者的策略选择有着明显影响。消费者由于充电难、找桩难等问题引发的潜在充电损失力度影响消费者的策略选择。当充电损失力度较小,消费者对充电和找桩难等问题仍在接受范围内,消费者的策略选择会逐渐收敛于概率为 1 的“购买新能源汽车”策略。当充电损失力度过大,消费者的策略选择逐渐趋向于购买燃油汽车。表明新能源汽车使用效益受充换电便利便携程度影响较大,政府、充电基础设施运营商和新能源车企应共同发力助力建成健全充电基础设施网络。

在满足条件(1)和条件(3)的情况下,新能源车企自建或共建充电基础设施的成本对新能源车企的策略选择的影响如图 10 所示,当成本过高时,车企选择不参与自建或共建充电基础设施,当成本较低,在策略演化前期,新能源车企还在市场观望期,

碍于成本压力和收益不确定性选择不参与建设,一段时间后,参与自建或共建能为车企带来更多利益时,车企逐渐向参与策略方向演化。

改变车企选择参与自建或共建充电基础设施提高消费者充电效用从而促进新能源汽车销售得到的其他收益对新能源车企策略选择的影响如图 11 所示,当收益较低时,新能源车企基于利益最大

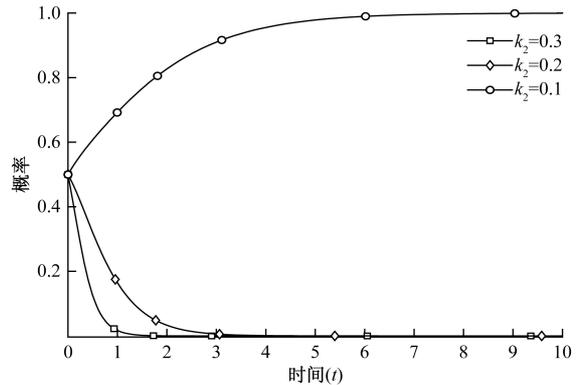


图 9 充电损失力度对消费者策略选择的影响

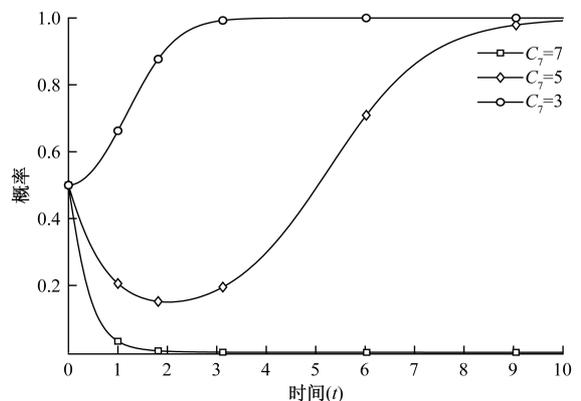


图 10 自建或共建充电基础设施的成本对新能源车企策略选择的影响

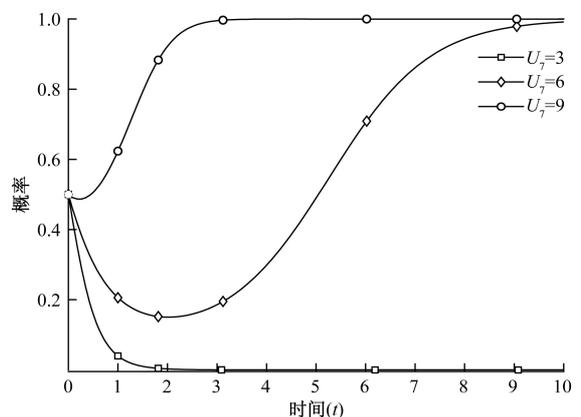


图 11 自建或共建促进销售的收益对新能源车企策略选择的影响

化不参与。随着收益逐渐升高,经过一段时间的市场反应,车企意识到参与自建或共建充电基础设施能够提高品牌效应、打造完整产业链带来的收益,迅速向参与方向演化。当收益处于较高水平,新能源车企策略选择逐渐趋于“参与”。

4.3 实证分析

上文运用演化博弈和仿真分析说明了充电基础设施运营商在博弈系统达到均衡时均会选择积极运营策略,且充电损失力度影响了消费者的购买决策,为详细说明充电基础设施建设发展对新能源汽车市场及消费者的影响,选取2018—2023年31个省份(因数据缺失,未包含港、澳、台地区)的面板数据进行实证分析,考察充电基础设施建设发展对新能源汽车市场推广的作用。

4.3.1 变量选取和数据来源

选取新能源汽车销量为被解释变量,以公共充电桩保有量为核心解释变量,参照已有研究^[33,34]控制变量主要包括人均可支配收入、最高额外补贴、油价以及是否限购。新能源汽车销量数据参照交强险上险量数据,公共充电桩保有量数据来源于中国充电联盟,控制变量数据来源于国家统计局、各省政策发布数据等。

4.3.2 模型设定及描述性统计

参考Egner和Trosvik^[35]、李晓敏和刘毅然^[34]关于新能源汽车推广的研究模型,构建如下模型:

$$\ln NEV_{it} = \alpha + \beta \ln CHARGER_{it} + \lambda X_{it} + \mu_i + \mu_t + \epsilon_{it} \quad (22)$$

式中: i 为省份; t 为年份; $NEV_{i,t}$ 为省份 i 在 t 年度的新能源汽车销量; $CHARGER_{i,t}$ 为省份 i 在 t 年度的公共充电桩保有量; X_{it} 为控制变量; α 为常数项; μ_i 为省份固定效应; μ_t 为时间固定效应; ϵ_{it} 为随机误差项。变量名称、定义及描述性统计结果如表6所示。

4.3.3 基准回归结果

首先对每个变量进行单位根检验,所有变量均为一阶差分平稳,进一步采用方差因子分析检验多

重共线性(表7),模型解释变量最大的VIF为2.99,小于10的临界值,即 $1/VIF$ 均大于0.1,因此模型不存在严重的多重共线性。

表8中模型(1)~模型(4)分别表示基准模型的OLS估计结果、控制省份效应的估计结果、控制时间效应的估计结果以及双向固定效应的估计结果。由模型(2)的结果可知,公共充电桩保有量的系数显著为正(0.29),说明公共充电桩保有量对新能源汽车销量会产生显著的正向影响关系,充电基础设施运营商积极运营和超前布局可以促进新能源汽车的推广应用,部分新能源车企选择自建与其他运营商共建充电基础设施体系对扩大销售具有显著作用。

表7 多重共线性检验

变量名称	VIF	1/VIF
lnCHARGER	2.11	0.47
lnIncome	2.99	0.33
Subsidy	1.22	0.82
Oil	1.11	0.90
Purchase	1.65	0.61
平均值 VIF	1.81	

表8 基准回归结果

变量名称	模型(1)	模型(2)	模型(3)	模型(4)
lnCHARGER	0.85** (16.46)	0.29** (3.07)	0.98** (19.83)	0.26* (2.20)
lnIncome	0.64 (1.86)	5.21** (6.69)	-0.24 (-0.73)	1.73 (0.74)
Subsidy	0.01 (1.17)	0.03 (1.29)	0.00 (0.57)	0.01* (2.06)
Oil	0.29** (10.25)	0.26** (9.85)	0.28** (7.47)	0.24* (8.28)
Purchase	-0.31 (-1.29)	0.10 (0.22)	0.04 (0.22)	0.05 (0.22)
常数项	-6.78* (-2.04)	-48.52** (-6.67)	3.51 (1.10)	-10.01 (-0.41)
省份固定效应	否	控制	否	控制
时间固定效应	否	否	控制	控制
R ²	0.89	0.39	0.87	0.57
观测值	186	186	186	186

注:*、**分别表示10%、5%的显著性水平;括号内为 t 值。

表6 变量解释及描述性统计

变量名称	变量含义	观测值	最小值	最大值	平均值	标准差
NEV	各省新能源汽车销量	186	55.00	912 453.00	99 197.37	147 161.27
CHARGER	各省公共充电桩保有量	186	17.00	563 175.00	39 371.20	62 305.95
Income	人均可支配收入	186	17 286.00	84 834.00	33 538.59	13 488.34
Subsidy	各省出台的对新能源汽车车主的最高额外补贴金额	186	0.00	10 000.00	618.28	2 061.09
Oil	95号汽油油价	186	6.88	10.50	8.56	1.09
Purchase	各省是否出台机动车限购政策,为虚拟变量	186	0.00	1.00	0.13	0.34

4.3.4 稳健性检验

第一种方法是更换解释变量的代理变量,用各省充电站保有量代替公共充电桩保有量,结果如表 9 模型(5)所示,充电站保有量的系数依然显著为正;第二种方法是在基准模型中加入被解释变量的一阶滞后项,并采用系统 GMM 估计,结果如表 9 模型(6),lnCHARGER 的系数在 5%的水平上显著为正,且通过 Hansen 过度识别检验,模型接受 AR(2)检验($P=0.83>0.05$),意味着模型不存在自相关性,说明当前模型构建良好。综上所述,充电基础设施的建设运营有效促进了新能源汽车的推广,研究结果具有稳健性。

表 9 稳健性检验

变量名称	模型(5) 替换解释变量	模型(6) 系统 GMM 估计
lnCHARGER	0.25*(2.42)	0.37**(3.40)
lnIncome	5.49**(7.26)	0.34(0.44)
Subsidy	-0.00(-1.35)	-0.01(-0.69)
Oil	0.27**(9.55)	0.20**(7.24)
Purchase	-0.24*(-2.28)	-0.23(-0.45)
常数项	-50.56**(-7.14)	-4.10**(-0.56)
R^2	0.33	0.83
Hansen 过度识别检验	—	0.12
观测值	186	124

注:*、**分别表示 10%、5%的显著性水平;括号内为 t 值。

5 结论与建议

新能源汽车产业为我国汽车行业的绿色发展和转型升级提供了重要驱动力,充电基础设施作为其互补品,二者在发展上相互促进,同时充电设施的有准公共品性和准经营性^[5]使得其利益相关者众多。就充电基础设施市场多主体协同发展问题作出分析,基于有限理性假设构建了新能源车参与下的充电基础设施四方演化博弈模型,考虑了新能源车与充电基础设施运营商自建或共建充电设施的问题,系统分析了政府、运营商、消费者和新能源车企的决策演化过程,通过相位图分析、雅可比矩阵特征值与李雅普诺夫第一法则等方法探究各方策略选择的稳定性及均衡策略组合的稳定性,并通过数值仿真验证了前文结论的有效性,重点关注影响主体策略选择和演化过程的主要因素。此外,借助实证数据验证充电基础设施建设发展对新能源汽车消费的推动作用,并根据各参数的影响关系和稳定条件为充电基础设施市场发展和监管、形成新能源汽车市场和充电基础设施的良性交互关系提出了相关对策与建议。

5.1 结论

(1)四方博弈主体最终演化稳定结果。 $E_9(0, 1, 1, 0)$ 和 $E_{11}(0, 1, 1, 1)$ 分别在满足一定条件时为博弈系统的演化稳定策略,即在存在一定充电损失条件下消费者购买新能源汽车的使用效益比购买燃油汽车的效益大,且新能源车企选择自建或共建基础设施能够盈利时,(政府不积极监管、运营商积极运营、消费者购买新能源汽车、新能源车企不参与自建或共建充电基础设施)为博弈系统的演化稳定策略;若新能源车企自建或共建充电基础设施耗费过大,(政府不积极监管、运营商积极运营、消费者购买新能源汽车、新能源车企不参与自建或共建充电基础设施)为博弈系统的演化稳定策略。

(2)参数敏感性分析。额外收益作为运营商除充电差价和服务费外重要的收入来源,是引起运营商决策方向和决策演化速率的重要因素。购车补贴有效拉动新能源汽车市场推广^[36],但由于补贴逐渐退坡,新能源汽车消费转向市场主导,消费者对新能源汽车购置成本较为敏感,因此车企的定价对汽车销售有重要影响。除此之外,充电损失力度也是影响新能源汽车使用效益的重要一环。消费者注重充电体验的前提下,在充电基础设施建设上发力成为新能源车企构建完整服务链、提升产品竞争力的有效途径。

5.2 建议

在充电基础设施市场发展初期,政府出台对配套充电基础设施产业发展的资金支持和税收减免政策有利于市场推广。随着市场的逐步发展,地方政府建立健全充电基础设施运营管理办法,并通过处罚机制适当约束运营商行为,对高于电价标准收取电费、不区分电费与服务费等行为的运营商责令限期退还或依法没收多收费用并处以罚款,利用大数据等手段监测充电电量,防止出现冒领补贴、功率不足等问题,通过调整处罚力度合理引导企业,减少盲目建设、建而不用、建而不管等现象的出现,保障消费者的合法权益。

我国充电基础设施运营商主体多元,不同主体采用的运营模式不同,在额外收益能有效提高运营商积极性的情况下,运营商除电费差价和服务费之外,还需通过各种手段扩大额外收益和盈利面,增强盈利能力和抗风险能力形成有效正反馈。一方面在技术上自主创新,研发超充、快充充电基础设施,提高充电效率,利用大数据和人工智能等技术为车主提供附近空闲充电设施位置信息,统筹管理

闲置充电桩场站,使用共享模式盘活现有资源,既能减少消费者的寻桩和充电时间,又能提高充电基础设施利用率;另一方面加快完善充电基础设施服务,提供包括洗车、超市、餐饮、休憩等在内的一体化服务,并通过大数据深挖营运车队、渠道方的充电需求,运用平台算法向车队、地图运营商等精准推送,运营商还可以通过海量的充电数据挖掘车主的有关特征和出行习惯、获得车辆的分布信息、掌握新能源汽车的电池相关数据,为消费者提供检修、保养服务,在更好地服务消费者的同时开拓更多盈利模式。

此外,研究表明消费者对购车成本较为敏感,新能源车企在新车发布前应着重考虑初始定价,在市场变化时也应及时调整折扣、采取优惠降价等措施,减少客户因价格原因的流失。充电基础设施建设成本及其为品牌带来的推广效果是新能源车企是否自建或共建充电基础设施的关键,新能源车企选择自建或共建基础设施不仅可以提高车主充电体验,从而提升品牌黏性,而且可以通过建立完整产业链吸引更多消费者,与此同时,车企应谨慎评估其必要性,可选择和社会资本、成熟运营商企业等合作共建,降低成本和投资风险同时提升品牌吸引力。

参考文献

- [1] 国务院办公厅关于进一步构建高质量充电基础设施体系的指导意见[EB/OL]. [2023-06-19]. https://www.gov.cn/zhengce/content/202306/content_6887167.htm.
- [2] 郑雪芹. 截至2023年充电设施累计859.6万台[J]. 汽车纵横, 2024(2): 116-117.
- [3] 刘娟娟, 张甜甜. 基于分享经济的充电运营商与中间服务商合作机制和利益分配[J]. 产经评论, 2017, 8(4): 86-92.
- [4] MA L, ZHAI Y F, WU T. Operating charging infrastructure in China to achieve sustainable transportation: the choice between company-owned and franchised structures[J]. Sustainability, 2019, 11(6): 1549.
- [5] 张勇, 蒲勇健, 史乐峰. 电动汽车充电基础设施建设与政府策略分析[J]. 中国软科学, 2014(6): 167-181.
- [6] HOEN A, KOETSE J M. A choice experiment on alternative fuel vehicle preferences of private car owners in the Netherlands[J]. Transportation Research Part A, 2014, 61: 199-215.
- [7] CHEN T J, ZHANG X P, WANG J J, et al. A review on electric vehicle charging infrastructure development in the UK[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2020(2): 193-205.
- [8] ZHUL J, LU H H, ZHANG Q, et al. Application of crowdfunding on the financing of EV's charging piles[J]. Energy Procedia, 2016, 104: 336-341.
- [9] FLORES J R, SHAFFER P B, BROUWER J. Electricity costs for an electric vehicle fueling station with Level 3 charging[J]. Applied Energy, 2016, 169: 813-830.
- [10] SCHROEDER A, TRABER T. The economics of fast charging infrastructure for electric vehicles[J]. Energy Policy, 2012, 43: 136-144.
- [11] LI Z, OUYANG M G. The pricing of charging for electric vehicles in China: dilemma and solution[J]. Energy, 2011, 36(9): 5765-5778.
- [12] 赵世佳, 赵福全, 郝瀚, 等. 中国新能源汽车充电基础设施发展现状与应对策略[J]. 中国科技论坛, 2017(10): 97-104.
- [13] 杨璧浩, 景玮婕, 李慧琳, 等. 电动汽车充电桩建设发展困境及治理机制研究[J]. 物流工程与管理, 2022, 44(4): 33-35.
- [14] 孙丙香, 阮海军, 许文中, 等. 基于静态非合作博弈的电动汽车充电电价影响因素量化分析[J]. 电工技术学报, 2016, 31(21): 75-85.
- [15] ZHU L J, WANG P Z, ZHANG Q. Indirect network effects in China's electric vehicle diffusion under phasing out subsidies[J]. Applied Energy, 2019, 251: 113350.
- [16] ZHANG L H, YANG M, ZHAO Z L. Game analysis of charging service fee based on benefit of multi-party participants: a case study analysis in China[J]. Sustainable Cities and Society, 2019, 48: 101528.
- [17] WANG G, CHAO Y C, CAO Y, et al. A comprehensive review of research works based on evolutionary game theory for sustainable energy development[J]. Energy Reports, 2022, 8: 114-136.
- [18] 谢识予. 有限理性条件下的进化博弈理论[J]. 上海财经大学学报, 2001(5): 3-9.
- [19] MOUNA K. Charging station location problem: a comprehensive review on models and solution approaches [J]. Transportation Research Part C, 2021, 132: 103376.
- [20] 付爱莉. 电动汽车充电基础设施投资价值驱动因素研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2016.
- [21] 郑生钦, 段旭. 城市充电设施网络布局多主体合作演化博弈[J]. 科学与管理, 2021, 41(4): 12-21.
- [22] FANG Y J, WEI W, MEI S W, et al. Promoting electric vehicle charging infrastructure considering policy incentives and user preferences: an evolutionary game model in a small-world network[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 258: 120753.
- [23] CHEN R K, FAN R G, WANG D X, et al. Effects of multiple incentives on electric vehicle charging infrastructure deployment in China: an evolutionary analysis in complex network [J]. Energy, 2023, 264: 125747.
- [24] 王伟, 张靖轩, 邵志国, 等. 基于系统动力学的充电基础设施利益相关者行为的演化博弈分析[J]. 系统科学

- 学报, 2024(3): 64-71.
- [25] 韩世锋, 程旖婕. 后补贴时代新能源汽车产业展望: 政策梳理与技术分析[J]. 科技和产业, 2023, 23(22): 199-208.
- [26] 徐道义. 关于稳定性的几个基本定理[J]. 数学季刊, 1992(2): 61-67.
- [27] RITZBERGER K, WEIBULL J W. Evolutionary selection in normal form games[J]. *Econometrica*, 1995, 63: 1371-1399.
- [28] SELTEN R. A note on evolutionarily stable strategies in asymmetric animal conflicts[J]. *Journal of theoretical biology*, 1980, 84(1): 93-101.
- [29] 文鸿莹. 基于四方演化博弈的高校网络舆情演化规律研究[J]. 管理评论, 2022, 34(9): 158-169.
- [30] 朱立龙, 荣俊美, 张思意. 政府奖惩机制下药品安全质量监管三方演化博弈及仿真分析[J]. 中国管理科学, 2021, 29(11): 55-67.
- [31] 万林孙. 电动汽车用户-充电桩运营商-政府三方博弈研究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2021.
- [32] 吴君民, 钱佳丽. 双积分政策下新能源车企、传统车企、政府协同创新的演化博弈研究[J]. 技术经济, 2024, 43(2): 22-32.
- [33] 王慧芳. 充电基础设施对电动汽车推广的影响机制研究[D]. 广州: 暨南大学, 2019.
- [34] 李晓敏, 刘毅然. 充电基础设施对新能源汽车推广的影响研究[J]. 中国软科学, 2023(1): 63-72.
- [35] EGNER F, TROSVIK L. Electric vehicle adoption in Sweden and the impact of local policy instruments[J]. *Energy Policy*, 2018, 121: 584-596.
- [36] YAN S Y. The economic and environmental impacts of tax incentives for battery electric vehicles in Europe[J]. *Energy Policy*, 2018, 123: 53-63.

Construction and Development of Charging Infrastructure with the Participation of New Energy Vehicle Enterprises: A Perspective of the Four-party Evolutionary Game

WU Qianqian, BAI Lin

(School of Economics and Management, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract: It is of great significance to discuss the co-evolution of charging infrastructure and new energy vehicles for the high-quality development of the charging infrastructure industry. The new energy vehicle enterprises were included in the charging infrastructure construction and operation system, and the four-party evolutionary game model was constructed to analyze the equilibrium point. The key factors affecting the evolution were discussed through numerical simulation. With the help of empirical analysis, the role of the construction and development of charging facilities in promoting the consumption of new energy vehicles was verified. It is found that operators need to expand their profitability and improve facility utilization. Consumers are more sensitive to NEV prices and charging losses, and NEV companies should be cautious in setting prices and consider building charging facilities by themselves or co-building with others.

Keywords: charging infrastructure; evolutionary game; new energy vehicles; stable strategy combination; new energy vehicle enterprises