

演化博弈视角下PPP模式在新能源汽车换电模式中的应用分析

马云清, 马国顺

西北师范大学数学与统计学院, 甘肃 兰州
Email: yunqma@163.com, guoshunma@163.com

收稿日期: 2021年5月8日; 录用日期: 2021年5月28日; 发布日期: 2021年6月10日

摘要

2019年下半年以来, 由于政府补贴大幅降低, 充电设施不足等问题, 导致国内新能源汽车销量增速放缓。为解决这一问题, 换电模式开始受到关注, 但换电站前期建设成本太高使得换电模式发展困难。因此考虑引入PPP模式, 即政府引导新能源汽车企业与电池企业合作进行换电站的建设和运营。为了分析在这个模式下各群体的合作意愿, 本文建立了一个三方演化博弈模型, 计算和分析了在不同情形下的演化稳定策略, 得出各群体都倾向于合作的情形是存在的, 并讨论了几个影响合作行为的关键因素。结果表明: 政府补贴、换电成本、当前模式的利润、电价、充电时长和换电风险会影响演化稳定策略向三方合作演化。

关键词

PPP模式, 演化博弈论, 复制动态方程, 换电模式, 演化稳定策略

Application Analysis of PPP Mode in New Energy Vehicle Battery Exchange Mode from the Perspective of Evolutionary Game

Yunqing Ma, Guoshun Ma

School of Mathematics and Statistics, Northwest Normal University, Lanzhou Gansu
Email: yunqma@163.com, guoshunma@163.com

Received: May 8th, 2021; accepted: May 28th, 2021; published: Jun. 10th, 2021

Abstract

Since the second half of 2019, the growth of domestic new energy vehicles sales has slowed down

文章引用: 马云清, 马国顺. 演化博弈视角下 PPP 模式在新能源汽车换电模式中的应用分析[J]. 应用数学进展, 2021, 10(6): 1887-1903. DOI: 10.12677/aam.2021.106198

due to the decrease of government subsidies and insufficient charging facilities. In order to solve this problem, the power exchange mode began to be concerned, but the high construction cost of the power exchange station makes the development of the power exchange mode difficult. Therefore, it is necessary to introduce the PPP model, that is, the government guides the new energy vehicle enterprises to cooperate with battery enterprises to build and operate the power station. In order to analyze the willingness of each group to cooperate in this model, this paper establishes a tripartite evolutionary game model, calculates and analyzes the evolutionary stability strategies in different situations, and concludes that the situation that each group tends to cooperate exists, and discusses several key factors affecting the cooperative behavior. The results show that government subsidies, cost of electricity exchange, profit of current mode, electricity price, charging time and risk of electricity exchange will affect the evolution of evolutionary stability strategy to tripartite cooperation.

Keywords

PPP Model, Evolutionary Game Theory, Replication Dynamic Equation, Power Exchange Model, Evolutionary Stability Strategy

Copyright © 2021 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

为缓解环境和能源问题带来的压力,我国不但鼓励利用新能源技术,而且对电动汽车技术开展了大量的研究与应用[1]。新能源汽车最关键的三个因素为动力性、续航里程和经济性。其中续航能力是新能源汽车的最大问题,尤其在冬天,动力电池受温度影响较大,新能源汽车的续航能力会大幅度降低[2]。基于现阶段技术研发程度,动力电池的性能提升空间较小[3]。另一种策略是换电模式。2019年6月,国家发改委发布《推动重点消费品更新升级畅通资源循环利用实施方案(2019~2020年)》,明确提到“换电”、“车电分离”等概念。2020年4月,四部委发布《关于完善新能源汽车推广应用财政补贴政策的通知》,特别强调,“换电车辆”不受补贴前售价30万元的限制。期间,工信部多次召开座谈会,进一步推动换电标准的统一、换电商业模式的创新,换电模式正式迎来转机[4]。换电模式具有降低购车成本、提高补能效率两大优势[5],但也存在换电站建设前期投入高、电池标准化程度低、融资需求较大,回报周期较长等问题[6]。为了能在有限的财政预算下,实现公共利益的最大化,引入PPP(Public-Private-Partnership)模式。应用PPP模式不仅可以降低社会资本投资公共服务事业的风险,更能促进公共产品质量的提高[7]。由于利益纠葛和整车企业的不配合,各参与方合作发展换电模式有较大的难度[8]。本文运用演化博弈理论来分析新能源汽车企业、电池企业和电动汽车用户三方的行为策略。通过建立演化博弈模型,分析各利益相关者的合作意愿以及稳定性条件,并对关键影响因素进行仿真分析,研究结果可为新能源汽车换电模式的发展提供参考。

2. 文献综述

2.1. 换电模式

自2019年下半年以来,国内新能源汽车销量增速放缓,补贴大幅度退出导致制造成本难以消化,新能源汽车销售价格仍然偏高,同时由于充电基础设施效率不足、自有停车位欠缺、电网配合扩容难度较

大等导致充电桩建设不及预期, 使用便利性大打折扣。电池是新能源汽车最核心的技术, 是决定新能源汽车能否在未来取代传统燃油车的关键[9], 而电池技术的安全性、可靠性、稳定性不足以及产品循环寿命不长等问题制约了产业的发展[2] [3]。在此背景下, 车电分离开始受到关注。国外 Better Place 公司试图构建全球统一的换电电池标准, 并联合全球的汽车厂商、电力供应商制定统一标准, 但由于电池行业标准短期内统一难度大, Better Place 的电池标准化目标没有实现[10]。我国自 2008 年起就已经开始在纯电动客车领域开展换电模式的推广, 但受限当时政策环境、技术水平、成本因素和市场规模, 换电模式并没有大规模推广[8]。刘春辉等通过对换电模式的 SWOT 分析, 认为在未来会有越来越多的企业加入到换电模式建设中[4]。本文中的换电模式是指集中充电统一配送模式, 该模式的优点在于电网的集中控制, 削峰填谷作用明显[11], 另外配送站因无电网接入选址自由, 方便用户, 而且集中型充电站采用恒温恒湿慢充, 提高了动力电池循环寿命和安全性[12]。但王佳也提出此模式存在建设成本偏高等不足[8]。所以, 本文考虑通过促进新能源整车企业和电池企业合作, 来进行前期换电站的建设。

2.2. PPP 模式

PPP 模式可分为合同承包、特许经营和私有化三大类, 按照 BDO、BOT、BOO、BBO 等模式运营。我国已经在很多领域尤其是能源、交通领域推广应用 PPP 模式。帅翔宇通过对 PPP 模式在新能源汽车充电基础设施产业的应用分析, 得出在新能源汽车基础设施建设中, PPP 模式有很强的优越性[7]。王琨等通过对三个处于执行阶段的充电基础设施 PPP 项目的研究, 发现降低成本、提高回报率需求对建设运营方案有很大的影响[13]。蔡竞仪通过 PPP+EPC 模式在光伏发电项目的研究, 得出此模式在光伏发电项目中是利大于弊的[14]。综上所述, 在新能源基础设施建设中, 使用 PPP 模式是可行的。

2.3. 演化博弈

演化博弈的思想起源于达尔文的生物进化理论和拉玛克的遗传基因理论, 将有限理性的博弈群体作为研究对象, 得到复制动态方程和演化稳定策略。复制动态方程描述的是某种策略在种群中的增长率, 表示为适应值与平均适应值之差的一个微分方程。根据复制者动态方程, 可以得到种群之间的相互转化及其行为的动态调整[15] [16]。本文将通过演化博弈模型和数值仿真的方法[17], 分析新能源汽车企业、电池企业和新能源汽车车主三方的行为策略, 并对影响合作行为的关键因素进行详细讨论。

3. 模型构建

3.1. 参数设置及基本假定

在 PPP 模式下, 当新能源整车企业、电池企业、新能源汽车车主都选择合作时, 整车企业和电池企业共同承担建设成本进行前期换电站的建设。新能源汽车企业研发换电模式车辆会为车企带来更强的市场竞争力; 电池企业承担后期换电站运营并对电池进行回收, 收取电池租用服务费和补能费; 新能源汽车车主节约了购车成本和使用成本, 也解决了里程焦虑和充电焦虑等问题。为了促进三方的合作, 政府对三方进行补贴。各参与方的关系如图 1 所示。

通过构建演化博弈模型来分析各参与方的合作意愿, 先提出以下基本假定:

假定一: 博弈参与方包括新能源整车企业、电池企业和车主, 三方均为有限理性群体, 在多次博弈的过程中, 不断寻找最优的策略。

假定二: 换电站集中充电的电价 i_1 小于新能源车主自行在充电桩充电的电价 i_2 (电网峰谷差)。

假定三: 每个参与方都有两种策略: 对 PPP 模式下的换电模式采取合作或不合作策略。

假定四: 换电设备使用寿命为 L_1 , 假设土地成本是每年租用, 而换电站设备建设成本 C_1 是一次性

投入, 考虑贴现率 r , 则每年的设备成本为: $C_{11} = C_1 * \frac{r(1+r)^{L_1}}{(1+r)^{L_1} - 1}$ 。

假定五: 电池的回收: 对于完全丧失再利用价值的电池进行拆解和化学处理, 回收镍、钴等金属用于生产新电池, 实现循环利用。电池使用寿命记为 L_2 , 最终回收价值记为 B , 考虑贴现率 r , 则每年的回收价值为: $B_1 = B * \frac{r(1+r)^{L_2}}{(1+r)^{L_2} - 1}$ 。

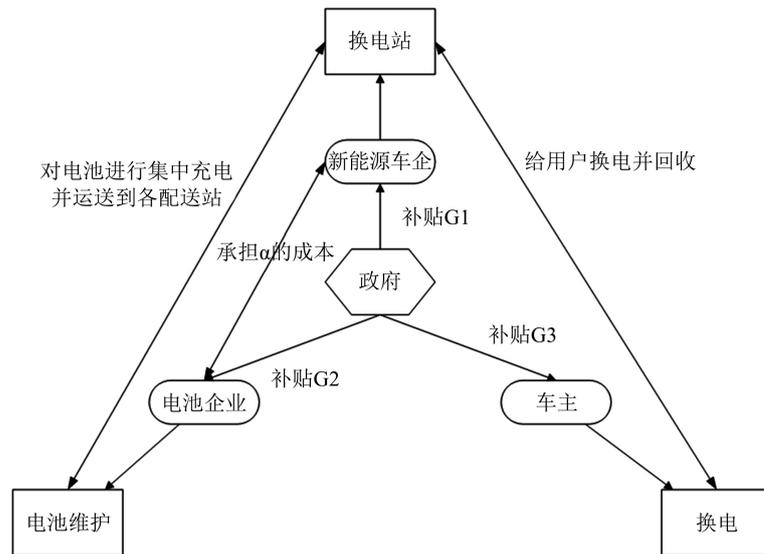


Figure 1. The relationship between the three parties in PPP mode
图 1. PPP 模式下三方的相互关系

各参数设置如下表 1。

Table 1. Parameter settings
表 1. 参数设置

x	新能源整车企业选择合作的比例	M_1	每年运营换电站的花费
y	电池企业选择合作的比例	M_2	每年维护电池的花费
z	车主选择合作的比例	L_1	换电站设备使用寿命
C_1	建设换电站的设备成本	L_2	电池使用寿命
C_2	每年电池研发成本	V_1	车主换电的风险成本
C_3	建设换电站的土地成本	V_2	车主充电的风险成本
C_4	每年充电模式的新能源汽车生产成本	R	车主换电时较充电的额外收益
C_5	每年换电模式下新能源汽车的生产成本	F_1	每年车主租用电池费
K_1	生产换电模式新能源汽车的的市场竞争力	F_2	每年车主换电时补能费
K_2	生产充电模式新能源汽车的利润	F_3	两家企业不合作时, 车主换电付出的额外成本
K_3	电池企业不合作时将电池卖给整车企业的利润	G_1	政府对新能源整车企业合作时的补贴
i_1	换电站集中充电的电价¥/kw h	G_2	政府对电池企业合作时的补贴
i_2	车主自行在充电桩充电的电价¥/kw h	G_3	政府对购买换电模式新能源汽车车主的补贴
E	电池的额定功率	B	电池最终剩余价值
T	充满电所需的时间	r	贴现率

3.2. 模型构建

基于以上假设和参数设置, 所有参与方的成本和收益按每年来计算, 假设新能源整车企业选择合作的比例为 $x(0 < x < 1)$, 电池企业选择合作的比例为 $y(0 < y < 1)$, 车主选择换电的比例为 $z(0 < z < 1)$, 得到三方的收益矩阵如下表 2 所示。

Table 2. Income matrix

表 2. 收益矩阵

新能源车企	电池企业	车主	
		换电(z)	充电($1-z$)
合作(x)	合作(y)	(a_1, a_2, a_3)	(b_1, b_2, b_3)
	不合作($1-y$)	(c_1, c_2, c_3)	(d_1, d_2, d_3)
不合作($1-x$)	合作(y)	(e_1, e_2, e_3)	(f_1, f_2, f_3)
	不合作($1-y$)	(g_1, g_2, g_3)	(h_1, h_2, h_3)

根据各参与方的策略选择, 总共考虑 8 种情形, 如下图 2 所示。

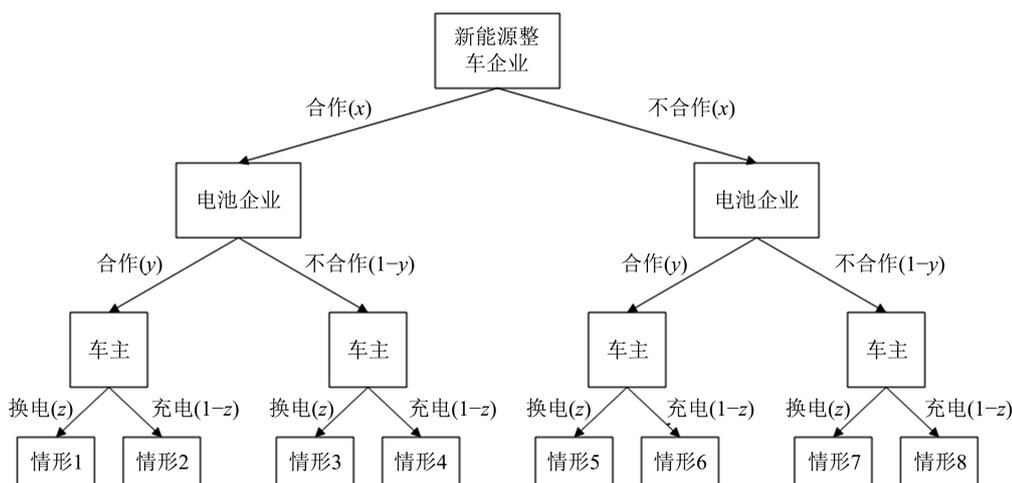


Figure 2. Game tree

图 2. 博弈树

情形 1: 当新能源车企、电池企业和车主都选择合作, 演化策略为(合作, 合作, 换电), 各方相应的收益为 (a_1, a_2, a_3) 。在这种情形下, 新能源车企和电池企业合作进行前期换电站的建设, 每年的设备成本为 C_{11} , 土地成本为 C_3 , 车企和电企按比例 α 承担成本。换电站和电池的维护由电企承担, 成本为 M_1 和 M_2 , 电池进行集中充电, 费用为 $E_i T$, 车主需付出电池租用费和补能费, 换电模式下的风险记为 V_1 , 政府对新能源整车企业的补贴为 G_1 , 对电池企业的补贴为 G_2 , 对车主的补贴为 G_3 。三方的收益为:

$$\begin{cases} a_1 = K_1 + G_1 - \alpha(C_1 + C_3) - C_3 \\ a_2 = F_1 + F_2 + G_2 - (1-\alpha)(C_1 + C_3) - C_2 - M_1 - M_2 + B - E_i T \\ a_3 = G_3 + R - F_1 - F_2 - V_1 \end{cases}$$

情形 2: 当新能源车企和电池企业选择合作, 而车主不合作。演化策略为(合作, 合作, 充电)。各方收益为 (b_1, b_2, b_3) 。在这种情形下, 车主自行在充电桩充电, 花费为 Ei_2T , 充电风险记为 V_2 , 新能源车企和电企以比例 α 进行换电站的建设投资。政府对新能源车企的补贴记为 G_1 , 对电企的补贴记为 G_2 , 对车主不补贴。三方的收益为:

$$\begin{cases} b_1 = G_1 + K_1 - \alpha(C_1 + C_3) - C_4 \\ b_2 = G_2 - C_2 - M_1 - (1 - \alpha)(C_1 + C_3) \\ b_3 = -Ei_2T - V_2 \end{cases}$$

情形 3: 当新能源车企和车主都有合作意愿, 而电池企业不合作时, 演化策略为(合作, 不合作, 换电)。各方收益为 (c_1, c_2, c_3) 。在这种情形下, 车企将独自进行换电站的建设和后期运营, 而电池企业直接将动力电池卖给车企。此时, 政府对电池企业不补贴, 对车企的补贴记为 G_1 , 对车主的补贴记为 G_3 , 则三方的收益为:

$$\begin{cases} c_1 = K_1 + G_1 - (C_1 + C_3) - M_1 - M_2 + B - Ei_1T + F_1 + F_2 \\ c_2 = K_3 - C_2 \\ c_3 = G_3 + R - F_1 - F_2 - V_1 \end{cases}$$

情形 4: 当新能源车企有意推广换电模式, 而其他两方都不合作时, 演化策略为(合作, 不合作, 充电), 各方收益为 (d_1, d_2, d_3) , 此时, 车企独自建设及运营换电站, 而电池企业直接将电池卖给车企, 车主自行在充电桩充电。政府只对车企进行补贴 G_1 。三方的收益为:

$$\begin{cases} d_1 = K_1 + G_1 - (C_1 + C_3) - M_1 \\ d_2 = K_3 - C_2 \\ d_3 = -Ei_2T - V_2 \end{cases}$$

情形 5: 当车企没有合作意愿, 而电池企业和车主都有合作意愿时, 演化策略为(不合作, 合作, 换电), 各方收益记为 (e_1, e_2, e_3) 。此时, 不研发换电模式的车企市场竞争力较弱, 记为 K_2 , 电池企业在政府补贴下建设并运营换电站。政府对电池企业的补贴为 G_2 , 对车主的补贴记为 G_3 。三方的收益为:

$$\begin{cases} e_1 = K_2 - C_4 \\ e_2 = G_2 - (C_1 + C_3) - C_2 - M_1 - M_2 + B - Ei_1T + F_1 + F_2 \\ e_3 = G_3 + R - F_1 - F_2 - V_1 \end{cases}$$

情形 6: 当车企和车主都没有合作意愿, 只有电池企业采取换电模式时, 演化策略为(不合作, 合作, 充电), 各方收益为 (f_1, f_2, f_3) 。此时, 电池企业独自承担换电站的建设成本, 政府也只对电池企业进行补贴 G_2 。三方的收益为:

$$\begin{cases} f_1 = K_2 - C_4 \\ f_2 = G_2 - (C_1 + C_3) - C_2 - M_1 \\ f_3 = -Ei_2T - V_2 \end{cases}$$

情形 7: 当车企和电池企业都没有合作意愿, 而车主采用换电模式时, 演化策略为(不合作, 不合作, 换电), 各方收益为 (g_1, g_2, g_3) 。此时, 车主需付出更高代价换电, 记为 F_3 , 政府也只对采取换电模式的车主进行补贴 G_3 。三方的收益为:

$$\begin{cases} g_1 = K_2 - C_4 \\ g_2 = K_3 - C_2 \\ g_3 = G_3 + R - V_1 - F_1 - F_3 \end{cases}$$

情形 8: 当各参与方没有合作意愿, 即采取策略(不合作, 不合作, 充电), 各方收益为 (h_1, h_2, h_3) 。此时换电模式不能推广, 车主通过充电桩充电。政府不对各参与方进行补贴。三方的收益为:

$$\begin{cases} h_1 = K_2 - C_4 \\ h_2 = K_3 - C_2 \\ h_3 = -Ei_2T - V_2 \end{cases}$$

4. 模型分析

我们通过建立复制者动态方程, 求解平衡点来分析演化过程。复制者动态方程描述了种群中选择合作的比例的演化过程, 该过程受不同策略的收益影响。比例的增加可以由方程直接计算出来, 且与收益呈正相关。例如, 当新能源整车企业通过合作能获得比不合作时更高的收益时, 新能源整车企业选择合作的比例会增加, 增加的比例与两种策略的收益差呈线性关系。当比例增加为零时, 比例将达到一个稳定的水平。当种群不能从改变策略中获得更高的收益时, 原来的策略被称为演化稳定策略, 即 ESS [15] [16]。

4.1. 复制者动态方程

U_x 为新能源整车企业选择合作时的期望收益, U_{1-x} 为新能源整车企业选择不合作时的期望收益, \bar{U} 为新能源整车企业的平均收益, 则:

$$\begin{cases} U_x = y[za_1 + (1-z)b_1] + (1-y)[zc_1 + (1-z)d_1] \\ U_{1-x} = y[ze_1 + (1-z)f_1] + (1-y)[zg_1 + (1-z)h_1] \\ \bar{U} = xU_x + (1-x)U_{1-x} \end{cases}$$

V_y 为电池企业选择合作时的期望收益, V_{1-y} 为电池企业选择不合作时的期望收益, \bar{V} 为电池企业的平均收益, 则:

$$\begin{cases} V_y = z[xa_2 + (1-x)e_2] + (1-z)[xb_2 + (1-x)f_2] \\ V_{1-y} = z[xc_2 + (1-x)g_2] + (1-z)[xd_2 + (1-x)h_2] \\ \bar{V} = yV_y + (1-y)V_{1-y} \end{cases}$$

W_z 为新能源汽车车主选择换电时的期望收益, W_{1-z} 为车主选择自行充电时的期望收益, \bar{W} 为车主的平均收益, 则:

$$\begin{cases} W_z = x[ya_3 + (1-y)c_3] + (1-x)[ye_3 + (1-y)g_3] \\ W_{1-z} = x[yb_3 + (1-y)d_3] + (1-x)[yf_3 + (1-y)h_3] \\ \bar{W} = zW_z + (1-z)W_{1-z} \end{cases}$$

将新能源车企的复制者动态方程记为 $F(x)$, 电池企业的复制者动态方程记为 $G(y)$, 新能源车主的复制者动态方程记为 $H(z)$, 则有:

$$\begin{aligned}
 F(x) &= \frac{dx}{dt} = x(U_x - \bar{U}) \\
 &= x(1-x) \{ y [z(C_4 - C_5 - B_1 - F_1 - F_2 + M_2 + Ei_1T) - \alpha C_1 - \alpha C_3 - C_4 + C_{11} + M_1] \\
 &\quad + z(B_1 - M_2 - Ei_1T + F_1 + F_2) + K_1 + G_1 - C_{11} - C_3 - M_1 - K_2 + C_4 \} \\
 G(y) &= \frac{dy}{dt} = y(V_y - \bar{V}) \\
 &= y(1-y) [z(B_1 + F_1 + F_2 - M_2 - Ei_1T) + x(\alpha C_{11} + \alpha C_3) + G_2 - C_{11} - C_3 - M_1 - K_3] \\
 H(z) &= \frac{dz}{dt} = z(W_z - \bar{W}) \\
 &= z(1-z) \{ x [y(F_2 - F_3) + F_3 - F_2] + y(F_3 - F_2) + G_3 + R - V_1 - F_1 - F_3 + Ei_2T + V_2 \}
 \end{aligned}$$

从复制者动态方程中可以得出, 三方的合作意愿受他们在不同情形下的收益的影响。在 $F(x)$ 中, 当新能源整车企业选择合作时的期望收益高于平均期望收益时, 车企的合作意愿将会增加, x 的比例将会增大, 而 dx/dt 也与两种期望收益的差成正相关。同样解释也适用于 $G(y)$ 和 $H(z)$ 中。

4.2. 平衡点的稳定性分析

令 $F(x)=0$, $G(y)=0$, $H(z)=0$, 并立复制者动态方程组, 只考虑纯策略, 不考虑混合策略求得 8 个平衡点, 分别为 $(0, 0, 0)$, $(1, 0, 0)$, $(0, 1, 0)$, $(0, 0, 1)$, $(1, 1, 0)$, $(1, 0, 1)$, $(0, 1, 1)$, $(1, 1, 1)$ 。本文研究在 PPP 模式下三方的合作条件, 即平衡点 $(1, 1, 1)$ 的稳定性条件。根据复制者动态方程求出的平衡点不一定是系统的演化稳定策略, 因此, 根据李雅普诺夫稳定性理论, 系统在平衡点的稳定性可以通过分析系统的雅可比矩阵的特征值来判断, 即系统的稳定性的充分必要条件是雅可比矩阵的所有特征值均具有负实部[16] [17]。

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial F(x)}{\partial x} & \frac{\partial F(x)}{\partial y} & \frac{\partial F(x)}{\partial z} \\ \frac{\partial G(y)}{\partial x} & \frac{\partial G(y)}{\partial y} & \frac{\partial G(y)}{\partial z} \\ \frac{\partial H(z)}{\partial x} & \frac{\partial H(z)}{\partial y} & \frac{\partial H(z)}{\partial z} \end{bmatrix}$$

下面我们讨论各平衡点的稳定性:

在平衡点 $(0, 0, 0)$, J 的特征值为:

$$\begin{cases} \lambda_1^1 = K_1 + G_1 - C_{11} - C_3 - M_1 - K_2 + C_4 \\ \lambda_2^1 = G_2 - C_{11} - C_3 - M_1 - K_3 \\ \lambda_3^1 = G_3 + R - V_1 - F_1 - F_3 + Ei_2T + V_2 \end{cases}$$

当 $\lambda_1^1 < 0$, 即 $K_1 + G_1 + C_4 < C_{11} + C_3 + M_1 + K_2$; $\lambda_2^1 < 0$, 即 $G_2 < C_{11} + C_3 + M_1 + K_3$; $\lambda_3^1 < 0$, 即 $G_3 + R + Ei_2T + V_2 < V_1 + F_1 + F_3$ 时, 平衡点 $(0, 0, 0)$ 为 ESS。此时整车企业在政府补贴后换电模式中的净利润小于当前的利润 K_2 ; 电池企业在政府补贴后换电模式中的净利润小于不合作时将电池直接售卖给整车企业的利润 K_3 ; 车主选择则换电模式的风险 V_1 大于充电模式的风险 V_2 , 且所付出的电池租用费和补能费 $F_1 + F_3$ 相比自行充电的费用 Ei_2T 过高。在这种情形下, 三方都会选择不合作。

在平衡点(1, 0, 0), J 的特征值为:

$$\begin{cases} \lambda_1^2 = -\lambda_1^1 \\ \lambda_2^2 = \alpha C_{11} + \alpha C_3 + G_2 - C_{11} - C_3 - M_1 - K_3 \\ \lambda_3^2 = G_3 + R - V_1 - F_1 - F_2 + E_i T + V_2 \end{cases}$$

因 $\lambda_1^2 = -\lambda_1^1$, 则平衡点(0, 0, 0)和(1, 0, 0)不可能同时为 ESS。当 $K_1 + G_1 + C_4 > C_{11} + C_3 + M_1 + K_2$; $G_2 < (1 - \alpha)(C_{11} + C_3) + M_1 + K_3$; $G_3 + R + E_i T + V_2 < V_1 + F_1 + F_2$ 时, 平衡点(1, 0, 0)为 ESS。此时整车企业在政府补贴后换电模式中的净利润大于当前的利润 K_2 ; 电池企业在政府补贴后换电模式中的净利润小于不合作时将电池直接售卖给整车企业的利润 K_3 ; 车主选择换电模式的风险 V_1 大于充电模式的风险 V_2 , 且所付出的电池租用费和补能费 $F_1 + F_2$ 相比自行充电的费用 $E_i T$ 过高。在这种情形下, 车企和车主都会选择不合作。

在平衡点(0, 1, 0), J 的特征值为:

$$\begin{cases} \lambda_1^3 = K_1 + G_1 - \alpha C_{11} - (1 + \alpha)C_3 - K_2 \\ \lambda_2^3 = -\lambda_2^1 \\ \lambda_3^3 = \lambda_3^2 \end{cases}$$

因 $\lambda_2^3 = -\lambda_2^1$, 则平衡点(0, 1, 0)和(1, 0, 0)不能同时为 ESS。当 $K_1 + G_1 < \alpha C_{11} + (1 + \alpha)C_3 + K_2$, $G_2 > C_{11} + C_3 + M_1 + K_3$, $G_3 + R + E_i T + V_2 < V_1 + F_1 + F_2$ 时, 平衡点(0, 1, 0)为 ESS。此时, 政府补贴车企后的净利润 $K_1 + G_1 - \alpha C_{11} - (1 + \alpha)C_3$ 小于当前的利润 K_2 时, 车企会选择保持现状; 政府补贴 $G_2 > (1 - \alpha)(C_{11} + C_3) + M_1 + K_3$, 电池企业会选择合作; 车主选择换电模式的风险 V_1 大于充电模式的风险 V_2 , 且所付出的电池租用费和补能费 $F_1 + F_2$ 相比自行充电的费用 $E_i T$ 较高, 也会选择不合作。

在平衡点(0, 0, 1), J 的特征值为:

$$\begin{cases} \lambda_1^4 = B_1 - M_2 - E_i T + F_1 + F_2 + K_1 + G_1 - C_{11} - C_3 - M_1 - K_2 + C_4 \\ \lambda_2^4 = B_1 + F_1 + F_2 - M_2 - E_i T + G_2 - C_{11} - C_3 - M_1 - K_3 \\ \lambda_3^4 = -\lambda_3^1 \end{cases}$$

因 $\lambda_3^4 = -\lambda_3^1$, 则平衡点(0, 0, 1)和(0, 0, 0)不能同时为 ESS。当 $B_1 + F_1 + F_2 + K_1 + G_1 + C_4 < M_2 + E_i T + C_{11} + C_3 + M_1 + K_2$, $B_1 + F_1 + F_2 + G_2 < M_2 + E_i T + C_{11} + C_3 + M_1 + K_3$, $G_3 + R + E_i T + V_2 > V_1 + F_1 + F_3$ 时, 平衡点(0, 0, 1)为 ESS。此时, 车企在政府补贴后换电模式带来净收益的小于目前的利润 K_2 ; 电池企业在政府补贴后进行换电模式的净收益 $B_1 + F_1 + F_2 + G_2 - M_2 - E_i T - C_{11} - C_3 - M_1$ 小于将电池直接售卖给整车企业的利润 K_3 ; 车主选择换电模式的风险 V_1 小于充电模式的风险 V_2 , 且所付出的电池租用费和补能费 $F_1 + F_3$ 相比自行充电的费用 $E_i T$ 较低。在这种情形下, 只有车主会采取换电策略, 其他两方将不会合作。

在平衡点(1, 1, 0), J 的特征值为:

$$\begin{cases} \lambda_1^5 = -\lambda_1^3 \\ \lambda_2^5 = -\lambda_2^2 \\ \lambda_3^5 = \lambda_3^2 \end{cases}$$

因 $\lambda_1^5 = -\lambda_1^3$, $\lambda_2^5 = -\lambda_2^2$, 则当平衡点(0, 1, 0)或(1, 0, 0)为 ESS 时, 平衡点(1, 1, 0)不是 ESS。当 $K_1 + G_1 > \alpha C_{11} + (1 + \alpha)C_3 + K_2$, $G_2 > (1 - \alpha)(C_{11} + C_3) + M_1 + K_3$, $G_3 + R + E_i T + V_2 < V_1 + F_1 + F_2$ 时, 平衡点(1, 1, 0)为 ESS。此时政府补贴后车企的市场竞争力 $K_1 + G_1$ 大于成本和当前的利润

$\alpha C_{11} + (1 + \alpha)C_3 + K_2$; 政府对电池企业的补贴 G_2 较高, 成本 $(1 - \alpha)(C_{11} + C_3) + M_1$ 较低; 车主选择换电模式的风险 V_1 大于充电模式的风险 V_2 , 且所付出的电池租用费和补能费 $F_1 + F_2$ 相比自行充电的费用 Ei_2T 较高。在这种情形下, 车主不会合作。

在平衡点(1, 0, 1), J 的特征值为:

$$\begin{cases} \lambda_1^6 = -\lambda_1^4 \\ \lambda_2^6 = B_1 + F_1 + F_2 - M_2 - Ei_1T + \alpha C_{11} + \alpha C_3 + G_2 - C_{11} - C_3 - M_1 - K_3 \\ \lambda_3^6 = -\lambda_3^2 \end{cases}$$

因 $\lambda_1^6 = -\lambda_1^4$, $\lambda_3^6 = -\lambda_3^2$, 当平衡点(0, 0, 1)或(1, 0, 0)是 ESS 时, 平衡点(1, 0, 1)不会是 ESS。当 $B_1 + F_1 + F_2 + K_1 + G_1 + C_4 > M_2 + Ei_1T + C_{11} + C_3 + M_1 + K_2$, $B_1 + F_1 + F_2 + G_2 < M_2 + Ei_1T + (1 - \alpha)(C_{11} + C_3) + M_1 + K_3$, $G_3 + R + Ei_2T + V_2 > V_1 + F_1 + F_2$ 时, (1, 0, 1)是 ESS。此时, 车企在政府补贴后换电模式的净收益大于当前的利润 K_2 ; 电池企业在政府补贴后换电模式的净收益小于电池企业在不合作时将电池售卖给整车企业的利润 K_3 ; 车主选择换电模式的风险 V_1 小于充电模式的风险 V_2 , 且所付出的电池租用费和补能费 $F_1 + F_2$ 低于自行充电的费用 Ei_2T 。在这种情形下, 只有电池企业不会合作。

在平衡点(0, 1, 1), J 的特征值为:

$$\begin{cases} \lambda_1^7 = K_1 + G_1 + C_4 - \alpha C_{11} - \alpha C_3 - C_3 - C_5 - K_2 \\ \lambda_2^7 = -\lambda_2^4 \\ \lambda_3^7 = -\lambda_3^2 \end{cases}$$

因 $\lambda_2^7 = -\lambda_2^4$, $\lambda_3^7 = -\lambda_3^2$, 当平衡点(0, 0, 1)或(0, 1, 0)是 ESS 时, 平衡点(0, 1, 1)不会是 ESS。当 $K_1 + G_1 + C_4 < \alpha C_{11} + (1 + \alpha)C_3 + C_5 + K_2$, $B_1 + F_1 + F_2 + G_2 > M_2 + Ei_1T + C_{11} + C_3 + M_1 + K_3$, $G_3 + R + Ei_2T + V_2 > V_1 + F_1 + F_2$ 时, 平衡点(0, 1, 1)是 ESS。此时, 整车企业在政府补贴后换电模式的净收益小于当前的利润 K_2 ; 电池企业在政府补贴后进行换电模式的净收益 $B_1 + F_1 + F_2 + G_2 - M_2 - Ei_1T - C_{11} - C_3 - M_1$ 大于将电池直接售卖给整车企业的利润 K_3 ; 车主选择换电模式的风险 V_1 小于选择充电模式的风险 V_2 , 且所付出的电池租用费和补能费 $F_1 + F_2$ 低于自行充电的费用 Ei_2T 。在这种情形下, 只有新能源汽车企业不会合作。

在平衡点(1, 1, 1), J 的特征值为:

$$\begin{cases} \lambda_1^8 = -\lambda_1^7 = -K_1 - G_1 - C_4 + \alpha C_{11} + \alpha C_3 + C_3 + C_5 + K_2 \\ \lambda_2^8 = -\lambda_2^6 = -B_1 - F_1 - F_2 + M_2 + Ei_1T - \alpha C_{11} - \alpha C_3 - G_2 + C_{11} + C_3 + M_1 + K_3 \\ \lambda_3^8 = -\lambda_3^5 = -G_3 - R + V_1 + F_1 + F_2 - Ei_2T - V_2 \end{cases}$$

因 $\lambda_1^8 = -\lambda_1^7$, $\lambda_2^8 = -\lambda_2^6$, $\lambda_3^8 = -\lambda_3^5$, 当(1, 1, 1)是 ESS 时, (1, 1, 0)、(1, 0, 1)和(0, 1, 1)的稳定性条件不能被满足。我们的目的是保证平衡点(1, 1, 1)成为 ESS, 其稳定性条件如下:

1) $\lambda_1^8 < 0$ 、 $\lambda_2^8 < 0$ 、 $\lambda_3^8 < 0$ 。即 $K_1 + G_1 + C_4 > \alpha C_{11} + (1 + \alpha)C_3 + C_5 + K_2$, 此时整车企业在政府补贴后的净收益大于当前模式下的利润 K_2 ; $B_1 + F_1 + F_2 + G_2 > M_2 + Ei_1T + (1 - \alpha)(C_{11} + C_3) + M_1 + K_3$, 此时电池企业在政府补贴后的净收益大于电池企业在不合作时将电池售卖给整车企业的利润 K_3 ; $G_3 + R + Ei_2T + V_2 > V_1 + F_1 + F_2$ 此时, 车主选择换电模式的风险 V_1 小于选择充电模式的风险 V_2 , 且所付出的电池租用费和补能费 $F_1 + F_2$ 相比自行充电的费用 Ei_2T 要低。以上三个条件须同时满足。

2) $\lambda_1^1 > 0$ 或 $\lambda_2^1 > 0$ 或 $\lambda_3^1 > 0$, 即 $K_1 + G_1 + C_4 > C_{11} + C_3 + M_1 + K_2$ 此时整车企业在政府补贴后换电模

式中的净利润大于目前的利润 K_2 ; $G_2 > C_{11} + C_3 + M_1 + K_3$ 电池企业在换电模式中政府补贴后的净利润大于不合作时将电池直接售卖给整车企业的利润 K_3 , $G_3 + R + E_i T + V_2 > V_1 + F_1 + F_3$ 车主由于换电模式的风险 V_1 小于充电模式的风险 V_2 , 且所付出的电池租用费和补能费 $F_1 + F_3$ 相比自行充电的费用 $E_i T$ 较低。

3) $\lambda_1^2 > 0$ 或 $\lambda_2^2 > 0$ 或 $\lambda_3^2 > 0$ 。因 $\lambda_3^2 = -\lambda_3^8$, $\lambda_3^8 < 0$, 则条件 3) 满足。

4) $\lambda_1^3 > 0$ 或 $\lambda_2^3 > 0$ 或 $\lambda_3^3 > 0$ 。因 $\lambda_3^3 = \lambda_3^2$, 由条件 3) 则条件 4) 满足。

5) $\lambda_1^4 > 0$ 或 $\lambda_2^4 > 0$ 或 $\lambda_3^4 > 0$ 。 $B_1 + F_1 + F_2 + K_1 + G_1 + C_4 > M_2 + E_i T + C_{11} + C_3 + M_1 + K_2$, 此时车企在政府补贴后单独做换电模式带来净收益大于目前的利润 K_2 ;

$B_1 + F_1 + F_2 + G_2 > M_2 + E_i T + C_{11} + C_3 + M_1 + K_3$ 电池企业在政府补贴后单独做换电模式的净收入

$B_1 + F_1 + F_2 + G_2 - M_1 - E_i T - C_{11} - C_3 - M_1$ 大于将电池直接售卖给整车企业的利润 K_3 。以上五个条件必须同时满足。下面我们讨论有一方不合作时, 如何控制参数, 使得演化稳定策略向平衡点(1, 1, 1)演化。

5. 仿真分析

5.1. 数据和参数

以蔚来汽车建设换电站的成本为例, 换电站电池储备为 13 块, 设备成本大约为 400 万元, 按贴现率 5% 计算得每年的成本约为 33 万元。土地租赁费用大约每年 30 万元。换电站每年的维护成本包括人力成本在内大约 30 万元。市场上动力电池的功率不一, 这里按 60 kw/h 计算。按高峰用电和低谷用电分别计算电费。换电站在用电低谷时统一充电, 电价为 0.45 元/度, 高峰电价为 0.9 元/度。采用慢充的充电方式, 充电时长大约为 6 小时。一个换电站每天的换电次数按 60 次计算。目前在售的新能源汽车配备的两种锂电池分别为: 三元锂电池和磷酸铁锂电池, 三元锂电池的寿命大约是 1200 次充放循环, 而磷酸铁锂的循环次数, 则是 2000 次。假设充一次电新能源汽车能行驶 300 km, 则寿命可以到几十万公里左右, 但决定电池寿命的因素还有很多, 按照正常一年行驶一到两万公里来计算, 一辆电动汽车可以行驶十年以上。换电站的使用时间按设备折旧和技术更新换代为使用年限, 大约为 20 年。电池的生产成本大约为 6 万元, 直接购买电池的价格为 8 万元。电动汽车的成本中“三电”即电池、电机、电控的成本占比要达到 50%~60%, 而电池成本占到了“三电”成本的 70%。整车企业与电池企业合作时, 造车成本较低, 记为 13 万元/辆, 而不合作时的成本较高, 大约为 15 万元/辆。固定资产的回收价值统一为 5%, 因此一块电池最终回收价值通常为成本的 5%, 即 3000 元, 按贴现率 5% 算得一块电池每年的回收价值为 388.2 元, 假设每年能回收 125 块电池, 则回收价值约为 5 万元。在 PPP 模式下, 为了促进三方达成合作, 政府对三方的补贴记为 $G_1 = 200$ 万元, $G_2 = 150$ 万元, $G_3 = 50$ 万元。 x, y, z 的初值都设置为 0.1。基于以上假设, 得到各参数的数值如表 3 所示。

Table 3. Value of each parameter

表 3. 各参数的取值

C_{11}	C_2	C_3	C_4	C_5	M_1	M_2	K_1	K_2	K_3	$E_i T$	$E_i T$		
35	80	30	190	170	30	2	300	180	105	50	100		
B_1	L_1	L_2	r	V_1	V_2	R	F_1	F_2	F_3	G_1	G_2	G_3	α
5	20	10	5%	20	30	50	15	25	20	200	200	100	0.6

5.2. 演化结果

基于以上的参数设置, 得到演化过程如下图所示。

当在政府补贴力度较大时, 各方均有较大收益, 合作意愿较强, 且车企和车主更早达到 1, 演化轨迹收敛到 ESS (1, 1, 1); 当 $G_3 = 0, i_2 = 0.45, T = 50, R = 20, V_1 = 30, V_2 = 20$ 时, 演化轨迹收敛到 ESS (1, 1, 0); 快充技术的发展, 充电时长缩短使得换电模式没有显著的优势, 且价格较高, 车主将会选择充电。但车企和电企因为节约成本, 提高市场竞争力, 会选择继续合作; 当 $K_3 = 150, G_2 = 0$ 时, 演化轨迹收敛到 ESS (1, 0, 1); 当政府不对电池企业进行补贴时, 电企的合作意愿降低, 且电池企业将电池直接售卖给整车企业的利润较大时, 合作意愿进一步降低; 当 $G_2 = G_3 = 0, K_3 = 150, i_2 = 0.45, T = 50, R = 20, V_1 = 30, V_2 = 20$ 时, 演化轨迹收敛到 ESS (1, 0, 0); 政府不对电企和车主进行补贴时, 双方合作意愿降低。演化轨迹如下图 3 所示。

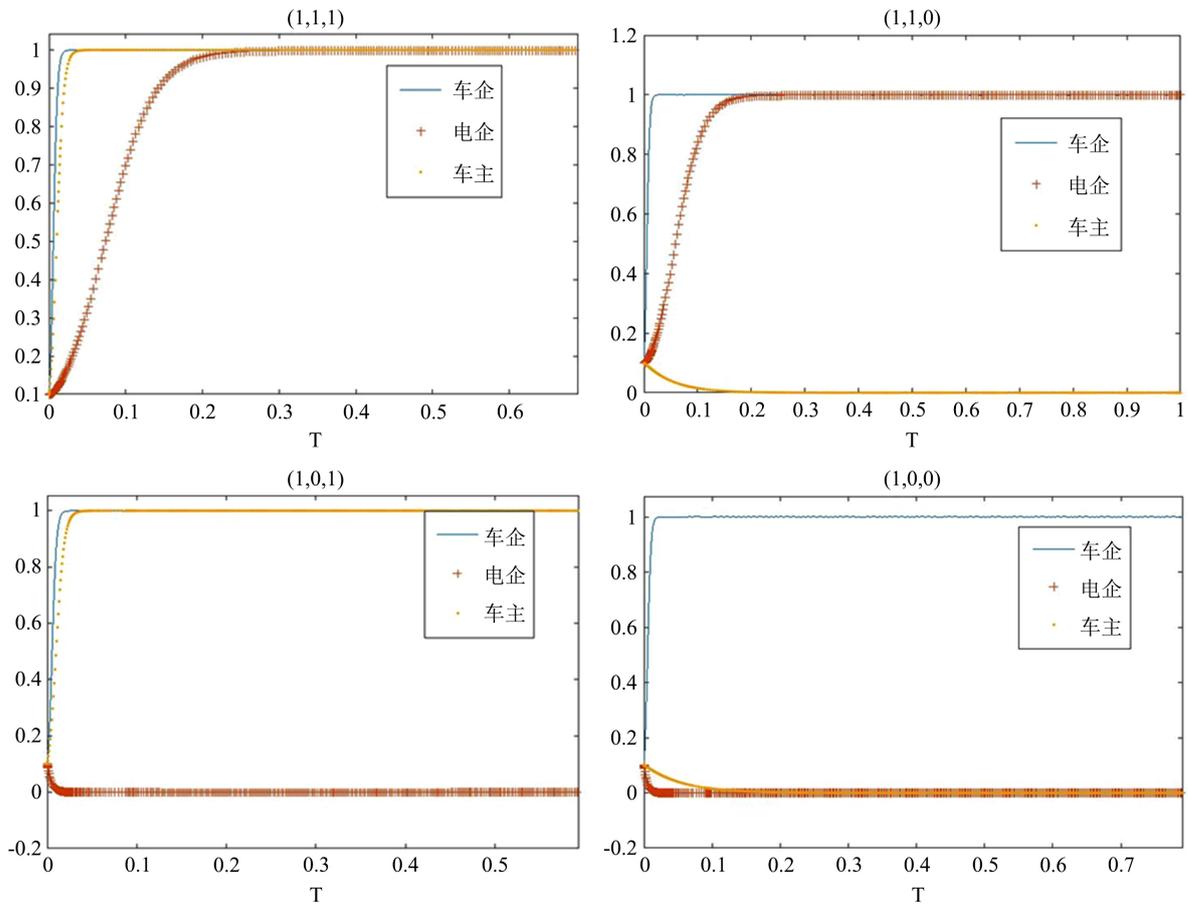


Figure 3. Evolution trajectory of ESS (1, 1, 1), (1, 1, 0), (1, 0, 1), (1, 0, 0)
 图 3. ESS (1, 1, 1)、(1, 1, 0)、(1, 0, 1)、(1, 0, 0)的演化轨迹

当 $G_1 = 0, K_1 = 200, K_3 = 80$ 时, 演化轨迹收敛到 ESS (0, 1, 1): 车企在政府不补贴时换电模式的净收益较小, 此时, 车企的合作意愿先上升然后下降; 当 $G_1 = G_3 = 0, K_1 = 200, K_3 = 80, V_1 = 30, V_2 = 20, i_2 = 0.45, T = 50, R = 20$ 时, 演化轨迹收敛到 ESS (0, 1, 0): 车企和车主都因为收益较低会退出合作; 当 $G_1 = G_2 = G_3 = 0, K_1 = 200, K_2 = 300, R = 20, i_2 = 0.45, T = 50, V_1 = 30, V_2 = 20$ 时, 演化轨迹收敛到 ESS (0, 0, 0): 取消补贴后, 三方合作意愿降低; 当 $G_1 = G_2 = 0, K_1 = 200, K_2 = 300$ 时, 演化轨迹收敛到 ESS (0, 0, 1): 只有车主因为换电的收益大于充电会趋向于合作, 车企和电企趋向于不合作。演化轨迹如下图 4 所示。

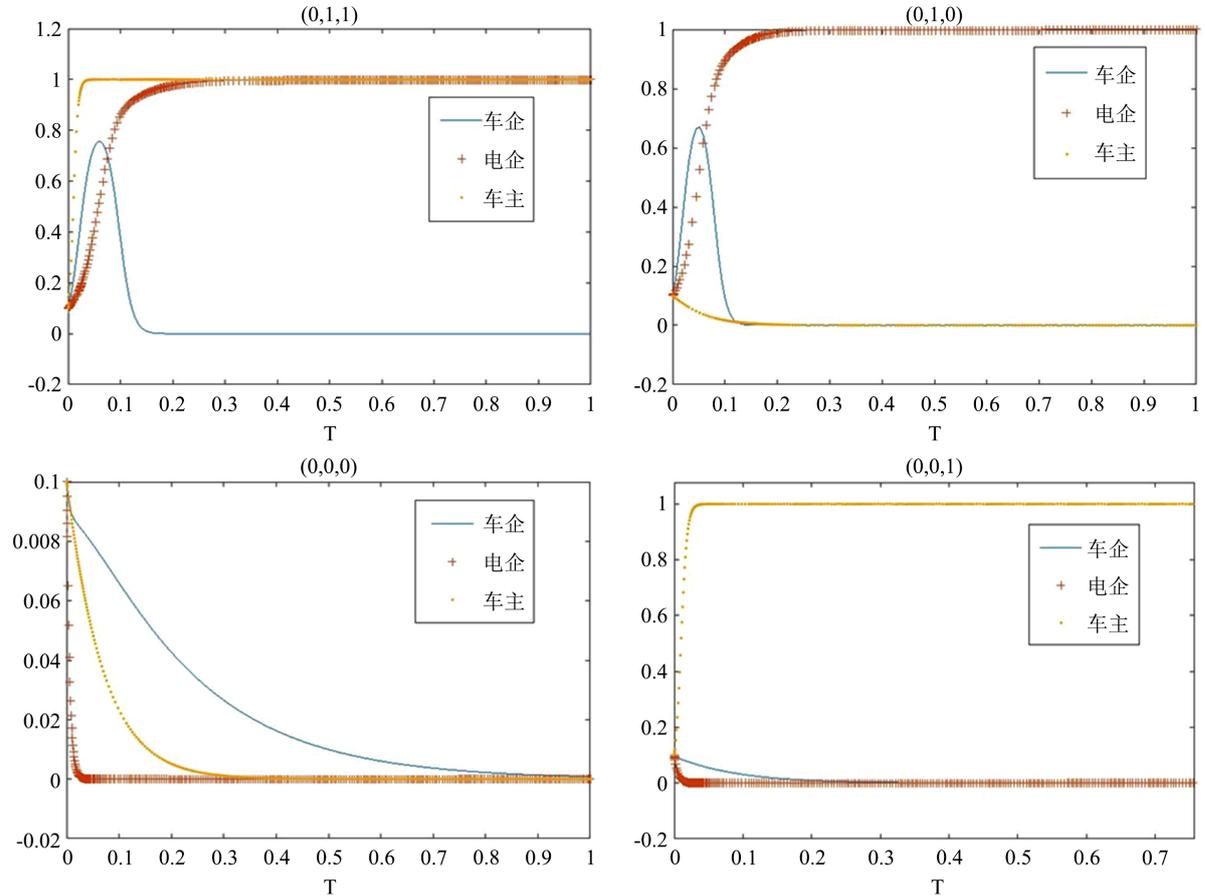


Figure 4. Evolution trajectory of ESS (0, 1, 1), (0, 1, 0), (0, 0, 0), (0, 0, 1)
 图 4. ESS (0, 1, 1)、(0, 1, 0)、(0, 0, 0)、(0, 0, 1)的演化轨迹

5.3. 初值和参数的影响

对 x, y, z 取不同的初始值, 其他参数跟表 1 保持相同, 得到初始值不一样时 ESS 相同, 但到达 1 的时间不同。具体演化轨迹如下图 5 所示。

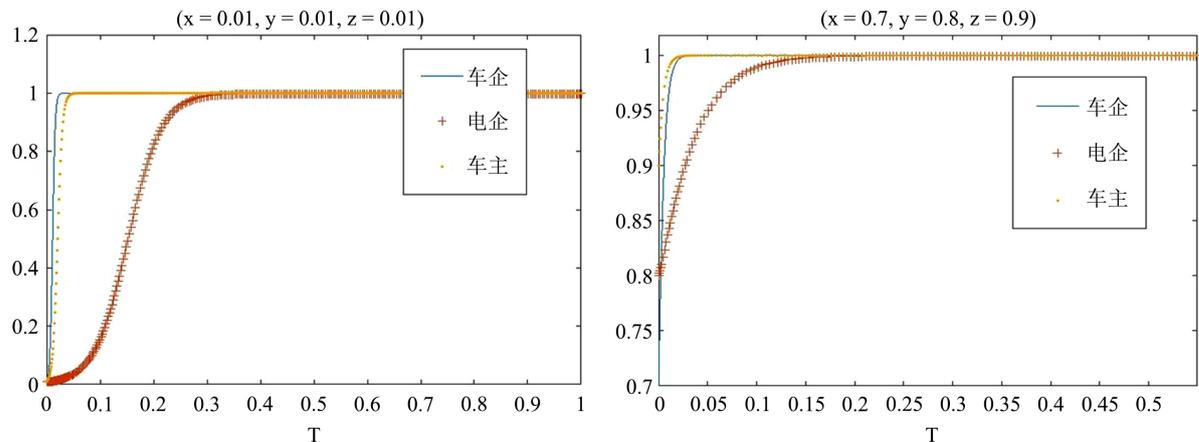


Figure 5. The evolution trajectory of $(x, y, z) = (0.01, 0.01, 0.01)$, $(x, y, z) = (0.7, 0.8, 0.9)$
 图 5. $(x, y, z) = (0.01, 0.01, 0.01)$ 、 $(x, y, z) = (0.7, 0.8, 0.9)$ 的演化轨迹

ESS (0, 1, 1)的敏感性分析如图 6 所示: 分析参数 G_1, K_1 对车企行为策略的影响, 并控制参数使得车企的行为策略由不合作向合作演化。ESS (0, 1, 1)可以通过调整参数 G_1 和 K_1 来向 ESS (1, 1, 1)转变, 政府补贴 G_1 对车企激励作用明显, 不补贴时, 由于前期成本较高, 车企最终会选择不合作。换电模式的市场竞争力 K_1 较大时, 即使政府不补贴, 车企也会选择合作。

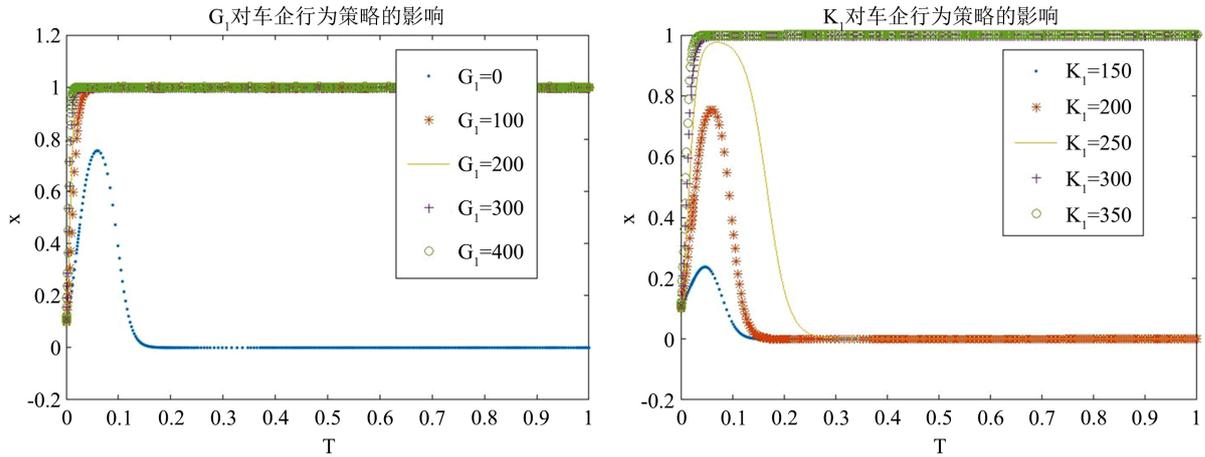


Figure 6. Sensitivity analysis of (0, 1, 1)
图 6. (0, 1, 1)的敏感性分析

ESS (1, 0, 1)的敏感性分析如图 7 所示: 分析参数 G_2 和 K_3 对电企行为策略的影响, 并控制参数使得电企的行为策略由不合作向合作演化。政府补贴较小或不补贴时, 电企合作积极性不高。在补贴较少时, 电企将电池卖给整车企业的利润 K_3 较小时, 电企的合作积极性较高, 随着 K_3 的更大, 合作意愿逐步降低。

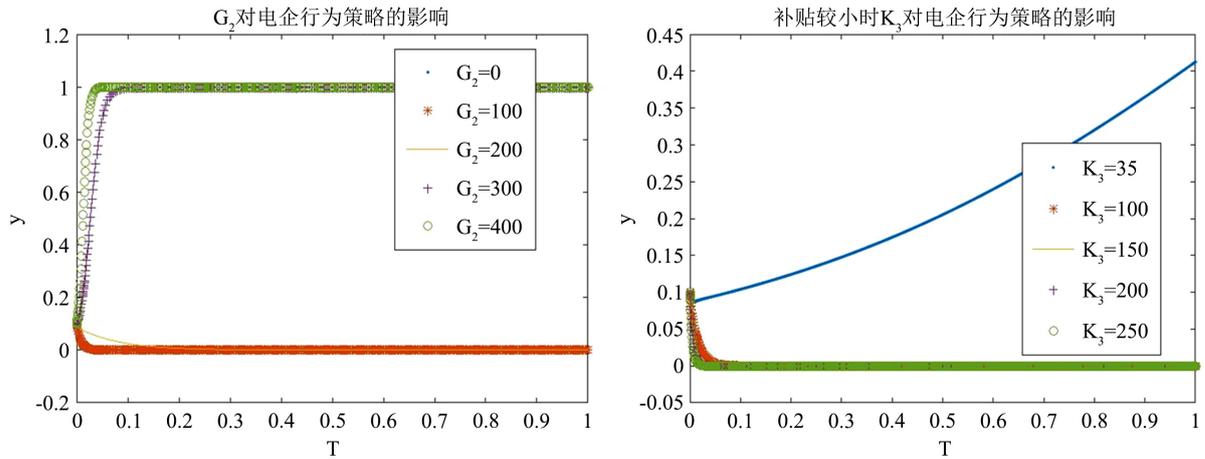


Figure 7. Sensitivity analysis of (1, 0, 1)
图 7. (1, 0, 1)的敏感性分析

ESS (1, 1, 0)的敏感性分析如图 8 所示: 分析参数 G_3, i_2, T, R 对车主行为策略的影响, 并控制参数使得车主的行为策略由不合作向合作演化。政府的补贴影响车主的合作积极性, 补贴越高, 积极性越强。在补贴较低时, 随着自主充电的电费升高, 车主的合作意愿增强。充电时长越长, 意味着车主的等待时间越长, 为缓解充电焦虑, 车主的合作意愿也会增加。换电模式带来的直接收益与车主合作意愿呈正比。

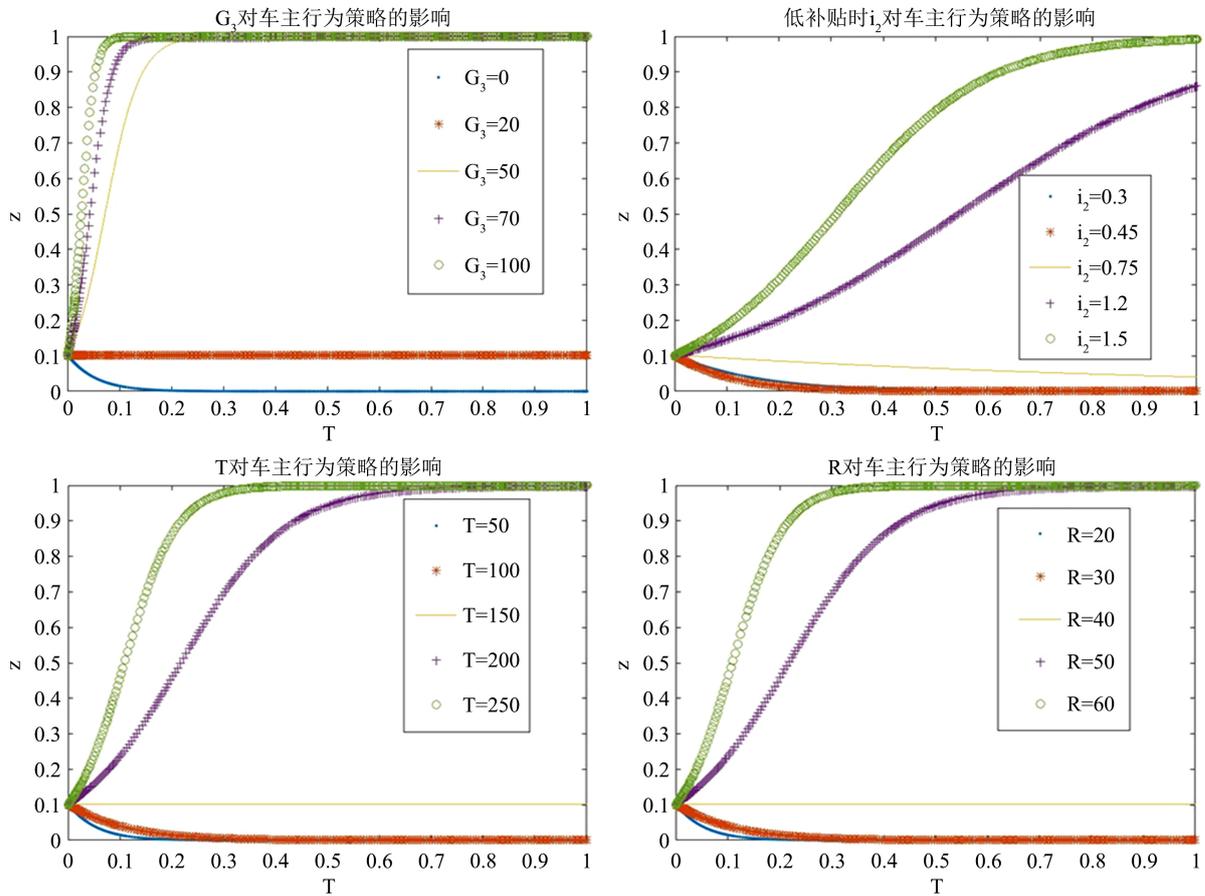


Figure 8. Sensitivity analysis of $(1, 1, 0)$
 图 8. $(1, 1, 0)$ 的敏感性分析

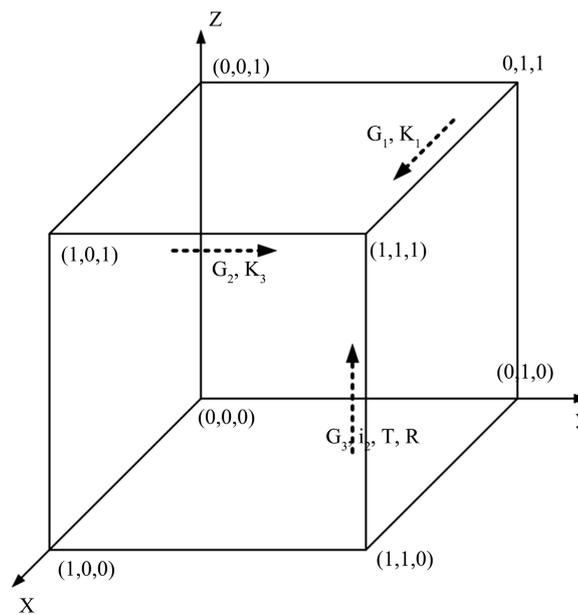


Figure 9. The evolution of ESS
 图 9. ESS 的演变

综上, 受参数影响的 ESS 的演变过程如图 9 所示: 可调整 G_1, K_1 , 使 ESS (0, 1, 1) 演变为 ESS (1, 1, 1); 调整 G_2, K_3 使 ESS (1, 0, 1) 演变为 ESS (1, 1, 1); 调整 G_3, i_2, T, R 使 ESS (1, 1, 0) 演变为 ESS (1, 1, 1)。

6. 结论

根据演化博弈理论的分析, 要利用 PPP 模式促进新能源汽车换电模式的发展, 若满足以下条件, PPP 模式很可能会成功:

- 1) 新能源整车企业在政府补贴后的净收益大于当前模式下的利润。
- 2) 电池企业在政府补贴后进行换电模式的净收入大于将电池直接售卖给整车企业的利润。
- 3) 车主在政府补贴后换电模式的风险小于充电模式的风险, 且所付出的电池租用费和补能费低于自行充电的费用。

如果在实践中提出 PPP 模式, 所有参与者将被潜在里利润吸引而进行合作, 并且合作行为在市场上是稳定的。ESS 仅受满足稳定性条件的参数值的影响。初始值越大, 演化轨迹到达 ESS (1, 1, 1) 的速度越快。

1) 当电企和车主愿意合作, 而车企不愿意合作。政府的适当补贴和降低成本以此来增大市场竞争力可以吸引车企合作。

2) 当车企和车主愿意合作, 而电企不愿意合作。政府的适当补贴和降低工业用电的电价可以吸引电企合作。

3) 当车企和电企愿意合作, 而车主不愿意合作。政府的适当补贴和提高自主充电的收费以及控制换电模式的风险可以吸引车主合作。

致 谢

感谢国家自然科学基金项目: 高维复杂数据分析中的贝叶斯随机桥惩罚回归: 理论、方法及应用(12061065); 随机动态死亡率模型的统计性质及应用研究(12061066)的资助。

参考文献

- [1] 徐国祥, 余碧涛, 李福燊. 全球新能源汽车领域专利申请情况的统计分析与预测[J]. 机械制造与自动化, 2013, 42(3): 162-165+187.
- [2] 杨晔. 新能源汽车动力电池关键技术的研究现状[J]. 南方农机, 2020, 51(16): 132-133.
- [3] 柯尚伟. 新能源汽车电池技术创新分析[J]. 农机使用与维修, 2020(12): 46-47.
- [4] 刘春辉, 王宇婷, 沈润杰. 浅析新能源汽车换电模式未来发展前景[J]. 时代汽车, 2020(24): 95-97.
- [5] 刘坚. 电动汽车充电方式和商业运营模式初探[J]. 汽车工程师, 2011(1): 19-23.
- [6] 苏浩. 换电商业模式是纯电动汽车在石油短缺和低碳经济下快速发展的解决方案[J]. 经济视角, 2011(10): 49-50.
- [7] 帅翔宇, 谈成, 张圣威. PPP 模式在新能源汽车充电基础设施产业中的应用分析[J]. 经贸实践, 2017(16): 46-47.
- [8] 王佳, 方海峰, 吴松泉. 关于我国新能源汽车产业发展换电模式的思考[J]. 汽车纵横, 2019(1): 43-45.
- [9] 朱捷尔. 新能源汽车电池技术创新探讨[J]. 南方农机, 2020, 51(9): 137.
- [10] 朱笛, 叶倩, 袁建森. 由 Better Place 破产引发的电动车行业发展思考[C]//河南省汽车工程学会. 自主创新、学术交流——第十届河南省汽车工程科学技术研讨会论文集. 河南省汽车工程学会, 2013: 4.
- [11] 张舒, 胡泽春, 宋永华, 刘辉, Masoud Bazargan. 考虑电动汽车换电站与电网互动的机组组合问题研究[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(10): 49-55+8.
- [12] 高赐威, 张亮, 薛飞, 刘红超. 考虑集中型充电站定址分容的电网规划研究[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(7): 40-46.
- [13] 胡总, 王琨. 新能源汽车充电基础设施 PPP 模式选择研究[J]. 合作经济与科技, 2019(18): 54-56.

- [14] 蔡竞仪. PPP+EPC 模式在光伏发电项目管理中的应用探索[J]. 冶金管理, 2020(23): 131-132.
- [15] Weibull, J.W. (1998) Evolutionary game theory. MIT Press, Cambridge, 32-38.
- [16] Friedman, D. (1998) On Economic Applications of Evolutionary Game Theory. *Journal of Evolutionary Economics*, **8**, 15-43. <https://doi.org/10.1007/s001910050054>
- [17] Fang, Y., Wei, W., Liu, F., Mei, S., Chen, L. and Li, J. (2019) Improving Solar Power Usage with Electric Vehicles: Analyzing a Public-Private Partnership Cooperation Scheme Based on Evolutionary Game Theory. *Journal of Cleaner Production*, **233**, 1284-1297. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.001>