

车网互动中电动汽车群体策略的随机演化博弈分析

程宏波, 何 洪, 李云泉, 朱伟铭, 程耀昆

(华东交通大学电气与自动化工程学院, 江西 南昌 330013)

摘要: 【目的】电动汽车负荷具有移动性、随机性等特点, 数量庞大的电动汽车无序接入将给电网运行带来巨大的压力, 合理的电动汽车充放电控制策略对电网尤为重要。为分析车网互动过程中电动汽车群体充放电决策的影响因素及规律, 【方法】建立了电动汽车群体内部不同个体之间的决策演化博弈模型, 引入用户偏好影响因子对复制动态方程进行改进, 分析了电动汽车群体策略演化形成的过程, 分析了各因素变化对电动汽车群体互动策略的影响规律。【结果】仿真表明, 考虑用户偏好影响时, 选择充电策略的电动汽车用户比例由 65% 提高到 75%, 当用户经济效益敏感程度由 0 增加到 2 时, 充电和不充不放用户的比例分别减少 50% 和 10%, 放电用户的比例则增加了 60%。【结论】用户偏好及经济效益敏感程度会提高电动汽车用户参与车网互动的比例, 而外部环境的扰动不会对电动汽车用户最终的选择结果产生影响。建立的随机演化博弈模型可以分析电动汽车群体内部的策略演化过程, 为车网互动时电动汽车群体行为特性的分析提供了一种新的方法。

关键词: 车网互动; 充放电策略; 演化博弈; 改进复制动态方程

中图分类号: U4

文献标志码: A

Stochastic Evolutionary Game Analysis of Group Strategies for Electric Vehicles Population in Vehicle Network Interaction

CHENG Hongbo , HE Hong , LI Yunxiao , ZHU Weiming , CHENG Yaokun

(School of Electrical and Automation Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: 【Objective】 The load of electric vehicles has characteristics such as mobility and randomness. The disorderly connection of a large number of electric vehicles will bring huge pressure to the operation of the power grid. Reasonable charging and discharging control strategies for electric vehicles are particularly important for the power grid. To analyze the influencing factors and laws of electric vehicle group charging and discharging decisions in the process of vehicle network interaction, 【Method】 established a decision evolution game model among different individuals within the electric vehicle group, introduced user preference influence factors to improve the replication dynamic equation, analyzed the process of the evolution of electric vehicle group strategies, and analyzed the impact of various factors on the interaction strategies of electric vehicle groups. 【Result】 The simulation results indicate that when considering the influence of user preferences, the proportion of electric vehicle users who choose charging strategies increases from 65% to 75%. When the sensitivity of user economic benefits increases from 0 to 2, the proportion of charging and discharging users decreases by 50% and 10% respectively, while the proportion of discharging users increases by 60%. 【Conclusion】 The sensitivity of user preferences and economic benefits will increase the proportion of electric vehicle users participating in vehicle network interaction, while external environmental disturbances will not affect the final selection results of electric vehicle users. The established stochastic evolutionary game model can analyze the strategy evolution process within the electric vehicle group, providing a new method for analyzing the behavioral characteristics of the electric vehicle group during vehicle network interaction.

Keywords: Car network interaction; Charging and discharging strategy; Evolutionary game; Improved replication of dynamic equations

0 引言

【研究意义】电动汽车(Electric Vehicle, EV)是汽车工业未来的发展方向^[1-2]。与传统的电力负荷相比,电动汽车负荷具有移动性、随机性等特点,数量庞大的电动汽车无序接入将给电网运行带来巨大的压力,合理的电动汽车充放电控制策略对电网尤为重要。

与一般的储能系统不同,电动汽车在满足自身出行需求的前提下参与电网的充放电互动,参与电网的需求响应与满足自身的出行需求之间存在一定的冲突。分析影响电动汽车充放电策略选择的影响因素及电动汽车策略选择的演化过程,是制定合理充放电策略的前提。

【研究现状】目前,很多算法已经被运用于制定电动汽车的充放电策略^[3-5]。如李志伟等^[6]基于用户的满意度,建立了电动汽车的双层智能充放电策略;鲍谚等^[7]综合考虑用户充电成本以及出行需求,提出了一种多目标双层优化模型,通过对模型的求解得到合理的电动汽车充放电策略;李正烁等^[8]以电动汽车用户充电成本最低为目标,建立了电动汽车群体协同优化调度模型,以实现汽车清洁充电并提高风电利用率。程宏波等^[9]以“削峰填谷”为主要目标建立住宅区内电动汽车充电电费定价的双层规划模型,求得了电动汽车的充电分时电价。这些研究从总体上研究了电动汽车群体和电网之间的互动策略,为电动汽车与电网之间互动的实施提供了基础。

上述研究多将电动汽车视为一个整体与电网互动,但实际电动汽车个体多、数量大,不同用户的需求差异大,不同用户的互动策略会对电网状态产生影响进而会对其他用户的收益产生影响,因此,分析清楚电动汽车群体内部之间如何协调、演进对于制定合理的车网互动激励措施至关重要。

博弈论作为一种先进的优化工具,主要用于研究多个利益相关主体如何进行优化决策的问题。电动汽车充放电优化调度的研究领域,博弈论已经有了较多进展^[10-11]。蔡国伟等^[12]针对多决策主体间的复杂博弈问题,提出了一种基于非合作博弈理论的电动汽车实时充放电优化调度的多主体双层博弈模型,最终在削峰填谷的同时,可以均衡多方博弈主体的经济利益,对电动汽车的调度合理优化;陈吕鹏等^[13]考虑多个充电聚合商的多方收益,提出了基

于动态非合作博弈理论的电动汽车实时调度模型,最终得到了各方面均适用于大规模电动汽车的实时充电优化调度;程杉等^[14]基于合作博弈的思想,以电动汽车聚合商与电动汽车群体用户的合作联盟利益最优为目标,建立了电动汽车的动态分时优化充放电模型,对电动汽车充放电时段进行引导规划。刘东奇等^[15]证明了相较于其他算法,采用演化博弈方法的电动汽车充放电调度模型得到的最优策略,EV用车成本更低。程宏波等^[16]基于演化博弈理论,研究了车网双方策略选择的动态演化过程,从而得到促进双方合作的电价范围。林国营等^[17]建立了车网演化博弈模型,利用复制动态方程描述了车网双方合作的演化过程。上述研究中,车网双方的策略仅有合作与不合作两种选择,同时没有考虑不同策略间的相互影响,而实际中电动汽车个体不同的充放电策略选择会对电网的功率需求产生影响,促使电网改变电价,进而会对其他电动汽车个体的策略产生影响。

电动汽车主体之间相互牵制,受彼此决策结果的影响,构成了复杂的利益博弈关系。演化博弈(Evolutionary Game)^[18-20]将经济学的“均衡观”与生物学的“适应性”理念进行了很好的结合。它刻画了在理性不完全、信息不对称、对环境及预期存在偏差条件下,群体通过学习、模仿、试错而不断适应外部环境的过程,为研究合作演化提供了重要数学框架。因此,**【创新特色】**利用演化博弈理论建立合理的电动汽车充放电策略选择的演化模型,考虑演化过程中各种内外界影响因素对电动汽车策略选择结果的影响,分析不同情况下策略选择的演化结果,有利于制定针对性的政策措施,促进电动汽车和电网行业更好的发展。

复制动态方程描述了不同策略在电动汽车群体中的传播和演化过程^[21],**【关键问题】**本文引入影响因子对传统的复制动态方程进行改进,以刻画电动汽车用户偏好在决策过程中的影响,同时引入随机扰动强度来刻画外部不确定因素对电动汽车策略演化带来的干扰,建立了电动汽车群体内部不同个体之间的决策演化博弈模型,分析了电动汽车充放电策略的发展演化规律,可为车网互动激励措施的制定提供依据。

1 考虑决策相互影响的电动汽车互动策略演化

电动汽车用户的个体多，不同用户参与互动的敏感因素和互动策略不同，用户互动策略的选择相互独立，但用户的互动策略会对电网的需求状态产生影响，促使电网改变自身的充放电电价，进而影响其他电动汽车用户的互动策略^[22]。

假设电动汽车群体由 n 辆电动汽车组成，电动汽车群集合记为 $N = \{1, 2, \dots, n\}$ ，电动汽车可采取的策略集为 $\{\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3\} = \{\text{充电策略, 放电策略, 既不充电也不放电策略}\}$ ，选择三种策略的初始用户数量集合为 $\{n_1, n_2, n_3\}$ ，选择充电、放电、既不充电又不放电的电动汽车比例分别为 x, y, z ，则

$$0 \leq x, y, z \leq 1 \text{ 且 } x + y + z = 1。$$

对于电动汽车，充电时主要考虑充电成本，放电时主要考虑放电收益，当有电动汽车充电或放电时，会改变电网的功率缺额或盈余，电网会根据自身的缺额或盈余状态调整电价。因此，电动汽车用户参与互动的成本和收益会受其他用户决策影响，分别用 ΔR 、 ΔE 表示因用户决策变化，电网调整电价，最终导致电动汽车用户的充电成本与放电收益的变化。若大量用户的决策相同则会导致过度充放电现象，进而加剧电动汽车成本与收益的变化，设过度充放电带来的收益共享系数为 α 和 β 。据此建立电动汽车群体的三策略博弈模型，其收益矩阵如表 1 所示：

表 1 电动汽车三策略博弈收益矩阵

Tab.1 Income Matrix of Three Strategy Game for Electric Vehicles

		EV1		
		Charging strategy (α_1)	Discharge strategy (α_2)	Non charging and discharging strategies (α_3)
EV2	Charging strategy (α_1)	$a_1 = -R_{ev} - \alpha\Delta R$ $a_2 = -R_{ev} - \alpha\Delta R$	$b_1 = -R_{ev}$ $b_2 = E_{ev}$	$c_1 = -R_{ev} - \Delta R$ $c_2 = 0$
	Discharge strategy (α_2)	$d_1 = E_{ev}$ $d_2 = -R_{ev}$	$e_1 = E_{ev} + \beta\Delta E$ $e_2 = E_{ev} + \beta\Delta E$	$f_1 = E_{ev} + \Delta E$ $f_2 = 0$
	Non charging and discharging strategies (α_3)	$g_1 = 0$ $g_2 = -R_{ev} - \Delta R$	$h_1 = 0$ $h_2 = E_{ev} + \Delta E$	$i_1 = 0$ $i_2 = 0$

表 1 表示电动汽车用户可能的选择策略及其对应的收益情况。当 EV1 选择充电策略 EV2 选择放电策略时，EV1 的充电成本为 R_{ev} ，EV2 的放电收益为 E_{ev} ；当 EV1 选择充电策略而 EV2 选择不充不放电策略时，此时为促进互动，电网会调整电价，导致 EV1 的充电成本增加 ΔR 。EV2 由于未参与互动，其收益为 0。当电动汽车同时充电或同时放电时，会导致电网功率的缺额或盈余进一步加剧，为维持稳定，电网会大幅调整电价，因此，当 EV1 与 EV2 同时选择充电策略时，其充电成本将会增加 $\alpha\Delta R$ 。当 EV1 与 EV2 同时选择放电策略时，其放电收益将增加 $\beta\Delta E$ 。

电动汽车的充电成本 R_{ev} 与放电收益 E_{ev} 可以表示为：

$$\begin{cases} E_{ev} = (Q_d * r_d - Q_d * K_b) * \rho^d \\ R_{ev} = \frac{Q_c * r_c + Q_c * K_b}{\rho^c} \end{cases} \quad (1)$$

ρ^d, ρ^c 为放电效率和充电效率， K_b 为电动汽车电池的单位电量损耗^[23]：

$$K_b = \frac{R_x}{L_c * C^{i.ev} * D_{od}} \quad (2)$$

式中： R_x 为电池成本； L_c 为常规使用时电池的平均寿命，一般以可循环次数表示； $C^{i.ev}$ 为电动汽车电池容量； D_{od} 表示在正常使用中使用的电池可放电深度。

Q^c, Q^d 表示由电动汽车参与充放电过程中的充放电电量；

$$\begin{cases} Q^c = \sum_{i=1}^n C^{EV} \cdot SOC_i \cdot f_i^c \cdot \eta_i^c \\ Q^d = \sum_{i=1}^n C^{EV} \cdot (1 - SOC_i) \cdot f_i^d \cdot \eta_i^d \end{cases} \quad (3)$$

其中 C^{EV} 为电动汽车的电池容量, SOC_i 为电动汽车 i 的荷电状态, 为了满足出行需求, 其范围为: 20%~90%; $f_i^c, f_i^d, \eta_i^c, \eta_i^d$ 表示电动汽车充放电电价响应概率和充放电剩余时间响应概率, 根据程宏波等^[24]的分析, 可以得到电价、停留时间对电动汽车充放电响应概率的影响规律。

根据表 1 中电动汽车选择不同策略时的收益情况, 可得电动汽车选择充电策略 (α_1) 时的期望收益:

$$\begin{aligned} U_1 &= a_1x + b_1y + c_1z \\ &= -x(R_{ev} + \alpha\Delta R) + yR_{ev} + z(R_{ev} + \Delta R) \end{aligned} \quad (4)$$

选择放电策略 (α_2) 时的期望收益:

$$\begin{aligned} U_2 &= d_1x + e_1y + f_1z \\ &= xE_{ev} + y(E_{ev} + \beta\Delta E) + z(E_{ev} + \Delta E) \end{aligned} \quad (5)$$

选择不充不放策略 (α_3) 时的期望收益:

$$U_3 = g_1x + h_1y + i_1z = 0 \quad (6)$$

由此可以得到电动汽车三策略选择下的平均收益:

$$\begin{aligned} \bar{U} &= (xU_1 + yU_2 + zU_3) \\ &= [xU_1 + yU_2 + (1-x-y)U_3] \end{aligned} \quad (7)$$

通常情况下, 电动汽车个体按自身期望根据收益最大原则选择各自策略, 个体策略的选择共同决定了电动汽车群体策略的演化方向。电动汽车个体在策略选择过程中主要受自身的出行需求和经济利益的影响, 但也会受其他个体策略选择的影响, 如电网在互动初期制定电价时, 电价较低, 此时电动汽车用户选择充电的居多, 随着充电需求的增加, 造成电网功率不平衡, 电网会通过调整电价对电动汽车的充放电行为进行引导, 此时电动汽车会调整后的电价, 在考虑自身出行需求的情况下调整选择的策略。因此, 电动个体之间的策略选择相互依存, 相互影响。

Yu 等^[25]在电动汽车策略选择演化的基础上, 考

虑各策略选择相互之间的影响。假设电动汽车选择充电决策的群体数量为 n_1 , 选择放电决策的群体数量为 n_2 , 选择既不充电也不放电决策的群体数量为 n_3 , 则有:

$$\begin{cases} x = \frac{n_1}{n_1 + n_2 + n_3} \\ y = \frac{n_2}{n_1 + n_2 + n_3} \\ z = \frac{n_3}{n_1 + n_2 + n_3} \end{cases} \quad (8)$$

随着电动汽车策略选择过程的推进, 不同策略的选择个体数量会随着演化过程推进发生变化, 最终某一占优策略会演化成为稳定的演化策略^[26]。而在电动汽车策略选择的过程中, 收益是驱动电动汽车做出策略更新的重要手段, 因此, 选择充放电策略的电动汽车群体数量的变化率 n_i' 与该策略能够获取的收益 U_i 正相关^[27], 即:

$$\begin{cases} n_1' = \eta_1 n_1 U_1 \\ n_2' = \eta_2 n_2 U_2 \\ n_3' = \eta_3 n_3 U_3 \end{cases} \quad (9)$$

为了描述不同用户在选择过程中偏好作用的影响, 引入了用户偏好影响因子 η_i , 表示不同用户对不同策略的偏好程度, 它由电动汽车用户自身需求决定。不同类型的用户对不同策略的偏好程度不同, η_i 越大反映出用户更偏好于该策略。在相同的激励措施下, 用户更偏向于选择策略 α_i ^[28]。

对式 (8) 求导可得:

$$\begin{cases} F(x) = \frac{dx}{dt} = \eta_1 x \left[U_1 - xU_1 - \frac{\eta_2}{\eta_1} yU_2 - \frac{\eta_3}{\eta_1} zU_3 \right] \\ F(y) = \frac{dy}{dt} = \eta_2 y \left[U_2 - yU_2 - \frac{\eta_1}{\eta_2} xU_1 - \frac{\eta_3}{\eta_2} zU_3 \right] \\ F(z) = \frac{dz}{dt} = \eta_3 z \left[U_3 - zU_3 - \frac{\eta_1}{\eta_3} xU_1 - \frac{\eta_2}{\eta_3} yU_3 \right] \end{cases} \quad (10)$$

式 (10) 即是电动汽车选择充电策略的复制动态方程, 它描述了电动汽车群体内各策略选择的演变转化规律, 各策略在初始的选择比例下, 随着演化的推进, 选择不同策略电动汽车比例发生变化, 至最终演化稳定。令 $F(x)=0$, $F(y)=0$, $F(z)=0$

求解改进的复制动态方程式，即可得到改进条件下的电动汽车策略选择演化博弈平衡状态点^[29]。

令 $\lambda_{ij} = \frac{\eta_i}{\eta_j}$ ，则 λ_{ij} 反映的为策略影响因子 η_i 和

策略影响因子 η_j 之间的关系， $\lambda_{ij} > 1$ 表明此时策略 α_i 相对于策略 α_j 占优 ($i, j = 1, 2, 3 \quad i \neq j$)， α_j 为演化的最终稳定策略。

2 电动汽车群体策略的演化

假设电动汽车群体中选择充电策略个体的个数为 i ，选择放电策略的个体个数为 j ，则选择不充不放策略的个体个数为 $N - i - j$ 。在每一次选择中，对于选择除了 α_1 的用户数量可能出现两种情况：一种是原来选择 α_2 的用户转为选择 α_1 ；一种为原来选择 α_3 的用户转为选择 α_1 。因此，三种策略在演化过程中转移概率主要有以下几种趋势：

$$\begin{aligned}
P_{i,i+1}^{j,j} &= \frac{if_{\alpha_1}}{if_{\alpha_1} + jf_{\alpha_2} + (N-i-j)f_{\alpha_3}} \cdot \frac{N-i-j}{N} \\
P_{i,i+1}^{j,j-1} &= \frac{if_{\alpha_1}}{if_{\alpha_1} + jf_{\alpha_2} + (N-i-j)f_{\alpha_3}} \cdot \frac{j}{N} \\
P_{i,i-1}^{j,j} &= \frac{(N-i-j)f_{\alpha_3}}{if_{\alpha_1} + jf_{\alpha_2} + (N-i-j)f_{\alpha_3}} \cdot \frac{i}{N} \\
P_{i,i-1}^{j,j+1} &= \frac{jf_{\alpha_2}}{if_{\alpha_1} + jf_{\alpha_2} + (N-i-j)f_{\alpha_3}} \cdot \frac{i}{N} \\
P_{i,i}^{j,j+1} &= \frac{jf_{\alpha_2}}{if_{\alpha_1} + jf_{\alpha_2} + (N-i-j)f_{\alpha_3}} \cdot \frac{N-i-j}{N} \\
P_{i,i}^{j,j-1} &= \frac{(N-i-j)f_{\alpha_3}}{if_{\alpha_1} + jf_{\alpha_2} + (N-i-j)f_{\alpha_3}} \cdot \frac{j}{N} \\
P_{i,i}^{j,j} &= 1 - P_{i,i+1}^{j,j} - P_{i,i+1}^{j,j-1} - P_{i,i-1}^{j,j} - P_{i,i-1}^{j,j+1} - P_{i,i-1}^{j,j+1} - P_{i,i}^{j,j-1} \\
\end{aligned} \tag{11}$$

其中 $P_{i,i+1}^{j,j}$ 表示的是由不充不放策略 α_3 转而选择充电策略 α_1 的概率，此时选择充电策略的个体个数加 1，选择放电策略的用户个数不变，而选择不充不放策略的个体个数减 1；同理， $P_{i,i+1}^{j,j-1}$ 表示的是由放电策略 α_2 转而选择充电策略 α_1 的概率， $P_{i,i-1}^{j,j}$ 表示的是由充电策略 α_1 转而选择不充不放策略 α_3 的概率， $P_{i,i-1}^{j,j+1}$ 表示的是由充电策略 α_1 转而选择放电策略 α_2 的概率， $P_{i,i}^{j,j+1}$ 表示的是由不充不放策略 α_3 转而

选择放电策略 α_2 的概率， $P_{i,i}^{j,j-1}$ 表示的是由放电策略 α_2 转而选择不充不放策略 α_3 的概率。

利用 $\Phi(i, j)$ 表示 i 个充电策略用户可能转化为放电策略的固定概率，根据全概率公式可以得到：

$$\begin{aligned}
\Phi(i, j) &= \Phi(i+1, j)P_{i,i+1}^{j,j} + \Phi(i+1, j-1)P_{i,i+1}^{j,j-1} \\
&\quad + \Phi(i-1, j)P_{i,i-1}^{j,j} + \Phi(i-1, j+1)P_{i,i-1}^{j,j+1} \\
&\quad + \Phi(i, j-1)P_{i,i}^{j,j-1} + \Phi(i, j+1)P_{i,i}^{j,j+1} \\
&\quad + \Phi(i, j)P_{i,i}^{j,j}
\end{aligned} \tag{12}$$

这个转化过程是一个有吸收状态的马尔科夫过程，具有两个吸收状态，即 $i=0$ 和 $i=N$ ，以此作为该模型的边界条件，则可以得到 i 个充电策略用户转化为 $N-i$ 个放电策略用户且没有不充不放策略用户的概率：

$$\Phi_i = \frac{1 + \sum_{j=1}^{i-1} \prod_{k=1}^j \frac{f_{\alpha_2}(k)}{f_{\alpha_1}(k)}}{1 + \sum_{j=1}^{N-1} \prod_{k=1}^j \frac{f_{\alpha_2}(k)}{f_{\alpha_1}(k)}} \tag{13}$$

通过对电动汽车策略选择的随机演化过程分析，可以得到电动汽车群体在策略选择过程中的转移概率和固定概率。从转移概率和固定概率可以看出，二者与电动汽车选择该策略的成本和收益有关系，因此，在电动汽车策略随机演化过程中，通过分析电动汽车在策略选择过程中的成本收益，可以分析电动汽车群体最终的演化结果。

3 电动汽车群体策略的演化仿真分析

针对前述改进复制动态方程的电动汽车演化博弈模型，通过设置不同的激励系数，分析电动汽车不同策略之间的依存关系及其对博弈演化过程的影响，对改进复制动态演化博弈模型的准确性进行验证。

假设电动汽车选择策略的初始状态为 $x(t_0) = y(t_0) = z(t_0) = 1/3$ 对不同情况下的状态演化趋势进行仿真分析，可以得到不同激励系数以及外部干扰在演化过程中的作用。其中，激励系数越大，表示策略间的相互作用关系越大，用高斯白噪声模拟外界随机因素给电动汽车决策行为带来的干扰。

3.1 考虑用户偏好的演化对比分析

如前所述,在电动汽车群体策略的演化过程中,复制动态方程中个体策略选择的变化率与该策略所能获得的收益正相关,因此,最终会有一种策略成为占优策略。在给定相同初始条件下,考虑各策略选择的无偏性,即 $\eta_1 = \eta_2 = \eta_3 = 1$ 时,此时为传统的复制动态方程,电动汽车策略演化趋势如图1所示。考虑用户偏好时的策略演化趋势如图2所示。

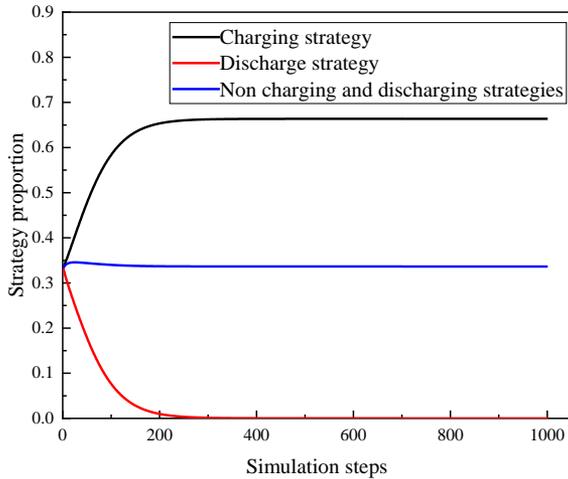


图1 不考虑用户偏好的策略演化

Fig.1 Policy evolution without considering user preferences

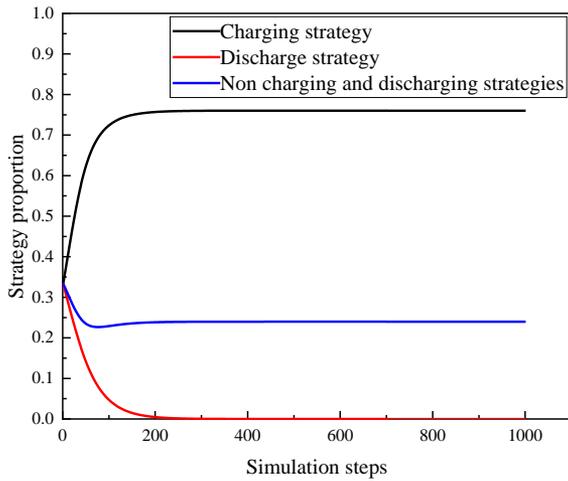


图2 考虑用户偏好的策略演化

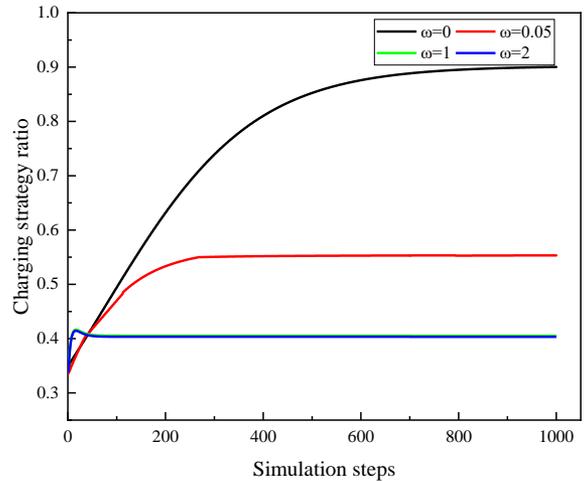
Fig.2 Policy evolution considering user preferences

图中横轴表示电动汽车策略选择演化发展的过程,纵轴表示选择各互动策略的电动汽车比例。可以看到,在某一个给定的电价下,不同的电动汽车用户会根据自身情况做出不同选择,选择不同互动

策略的电动汽车用户比例最终会趋于一个稳定值。图1中当用户对各策略无偏好时,只根据不同策略可能带来的收益进行决策,依据当前电价,电动汽车用户无法通过放电获取到收益,选择放电策略的电动汽车比例最终趋于0;但当前电价较低,选择充电策略的用户可以较低的充电成本获得电能,因此,选择充电策略的用户比例最终趋于65%;选择不参与互动即不充不放策略的用户比率没有变化,即为促进电网互动所实施的差异化电价对这部分用户没有影响。而图2中考虑用户偏好后,最终选择充电策略的用户比率提高至75%,同样是充电策略占优,但选择充电策略的用户比率相对于不考虑用户偏好时要高,且选择不充不放策略的用户比率会变低,这更符合通过差异化电价调整用户参与度的实际情况。

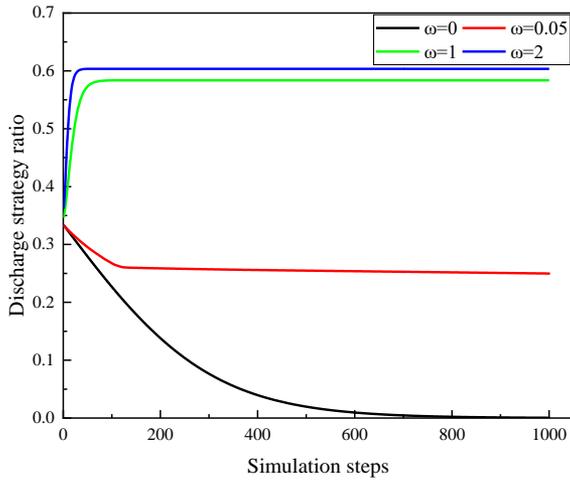
3.2 考虑用户经济效益敏感度的演化分析

在互动中,不同的策略选择会带来不同的经济收益,如果用户对经济效益敏感程度不同,那么最终的演化结果也会产生差异。分析用户经济效益敏感程度对于群体策略演化结果的影响,能够更准确的制定相应的激励措施。不同收益敏感程度下,充放电策略的演化结果如图3所示。



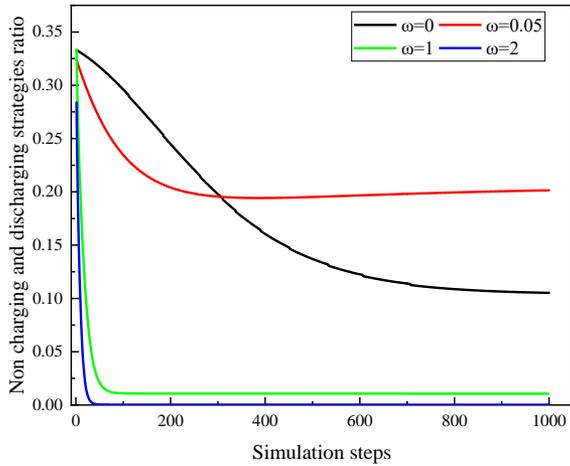
a) 不同敏感程度下充电策略的演化

a) Evolution of charging strategies under different sensitivity levels



b) 不同敏感程度下放电策略的演化

b) Evolution of discharge strategies under different sensitivity levels



c) 不同敏感程度下不充不放策略的演化

c) Evolution of the strategy of not charging and not releasing under different sensitivity levels

图3 不同敏感程度下策略演化趋势

Fig.3 Evolution trends of strategies under different sensitivity levels

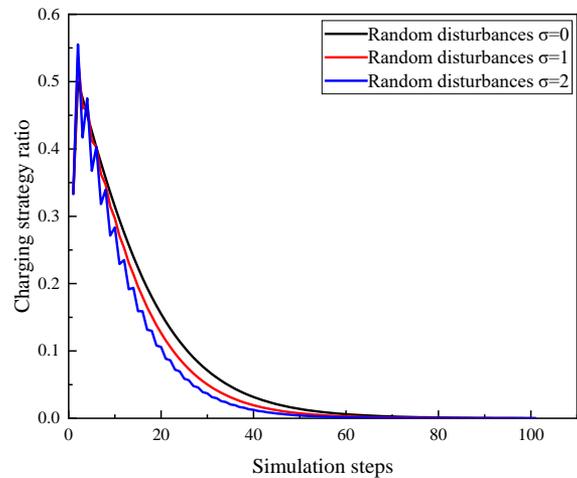
从图3中可以看到,在经济效益敏感度 $\omega=0$ 时,选择充电策略的用户比例达到最大90%,选择放电的用户比例最终稳定于0,选择不充不放策略的用户比例达到10%;当经济效益敏感度增加到 $\omega=0.05$ 时,选择充电策略的用户比例最终稳定在55%,选择放电策略的用户比例最终稳定在25%,而选择不充不放策略的用户比例最终稳定在20%;经济效益敏感度增加到 $\omega=1$ 时,选择充电策略的用户比例最终稳定在40%,选择放电策略的用户比例最终稳定在

58%,而选择不充不放策略的用户比例最终稳定在2%;当 ω 进一步增加到2后,充电策略的用户比例稳定在40%,放电策略的用户比例稳定在60%,而不充不放的比率为0。

上述分析表明,不同的经济效益敏感度将导致不同的策略选择:经济效益敏感度越低时,用户对于互动收益越不敏感,用户更关注自身的出行需求,选择充电策略的比例越高;经济效益敏感度越高时,互动收益对用户的吸引力越大,选择放电策略的用户比例越高,而选择不充不放策略的用户比例越低。而且从图中可以看到,经济效益敏感度越高,各种策略的比例越快达到稳定,反映出在高经济敏感度的情况下,策略调整完成的更快。但当经济效益敏感度达到一定程度($\omega=1$)后,能吸引的电动汽车用户都已吸引到,选择各策略的用户比例趋于最大值,此时经济效益敏感度即使再增加($\omega=2$),对用户比例几乎不会有影响。因此,用户经济效益敏感度越高,对用户互动的吸引越大,选择放电策略的比例就越大,且收敛的速度越快,反映出在经济利益的驱使下,可更加有效的促进车网互动的开展。

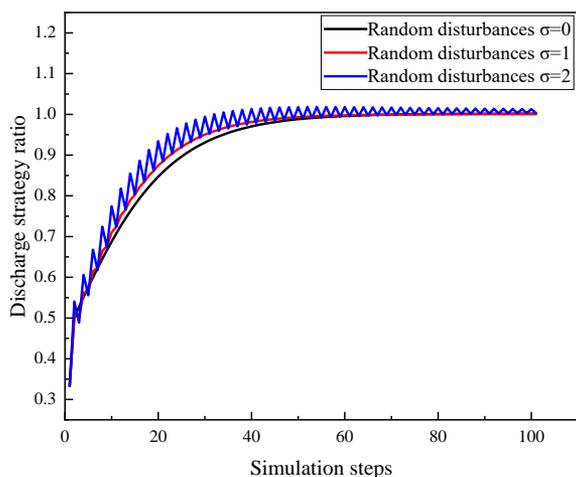
3.3 考虑外界影响的演化结果分析

由于电动汽车要考虑出行,而电动汽车出行会受到外界环境因素如天气变化、交通拥堵等随机时间变化的影响,为分析此类外界随机因素对最终演化结果的影响,引入随机扰动因子,不同扰动干扰下互动策略的演化如图4所示。



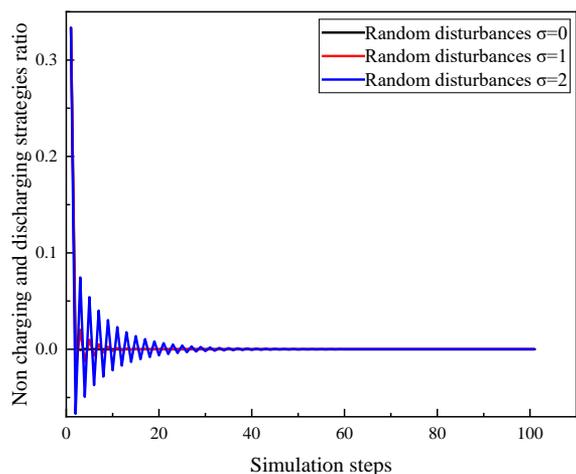
a) 不同扰动下充电策略的演化趋势

a) Evolutionary trends of charging strategies under different disturbances



b) 不同扰动下放电策略的演化趋势

b) Evolution trends of discharge strategies under different disturbances



c) 不同扰动下不充不放策略的演化趋势

c) Evolutionary trends of non-charging and non-releasing strategies under different disturbances

图4 考虑随机扰动下的演化趋势

Fig.4 Consider evolutionary trends under random perturbations

从图 4 可以看到,在当前情况下,没有扰动 ($\sigma=0$)时,选择充电和不充不放策略的用户比例稳定的趋于 0,选择放电策略的用户比例稳定的趋于最大值 1;而当有扰动($\sigma=1, \sigma=2$)时,选择充电和不充不放策略的用户比例在达到稳定的过程中存在较大的波动,但最终稳定于 0,选择放电策略的用户比例在稳定过程中也有较大波动,但最终也稳定

于 1。表明外界的随机变化会对电动汽车群体策略的演化产生一定影响,扰动越大的情况下,达到稳定过程中的波动越大;但无论是无扰动($\sigma=0$),轻微扰动($\sigma=1$),还是强烈扰动($\sigma=2$),选择各种策略的用户比例最终还是会稳定到相同的结果上,表明外界干扰对电动汽车用户最终的策略选择不会产生影响。

4 结论

车网互动过程中,电动汽车个体策略的选择既相互依存,又相互独立。本文建立了电动汽车群体随机演化博弈模型,描述用户在策略选择过程中受到的各种影响因素,分析了各因素变化对演化结果的影响规律,为不同情况下互动激励措施的制定提供依据。通过分析,得到如下结论:

1) 车网互动过程中,各个电动汽车用户根据自身情况选择不同的互动策略,各用户策略之间相互依存、相互影响,演化形成最终的电动汽车群体互动策略,随机演化博弈模型可以较好的描述电动汽车群体内部各个体之间演化博弈的过程,可作为车网互动背景下电动汽车群体行为规律的分析工具。

2) 电动汽车群体内部不同用户对经济收益的敏感程度不同、不同用户的偏好存在差异。考虑用户偏好影响后选择充电策略的用户比率相对于不考虑时要高,且选择不充不放策略的用户比率变低,更加符合通过差异化电价调整用户参与度的实际情况。

3) 收益是影响互动策略选择的关键因素,用户对互动收益的敏感度越大,选择放电的用户比例越高,参与车网互动的积极性提高,利用经济杠杆对车网互动的参与度进行调整是一种非常有效的调节手段。

4) 外部环境因素扰动会对互动策略的形成产生一定的干扰,扰动越大,策略演化稳定过程中的波动越大,但对最终互动策略的选择不会产生影响。

参考文献:

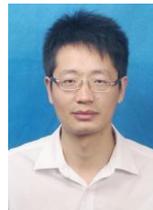
[1] LI G, ZHANG X P. Modeling of plug-in hybrid electric vehicle charging demand in probabilistic power flow calculations[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, (31): 492-499.

[2] Tundys B, Wiśniewski T. Smart Mobility for Smart Cities—Electromobility Solution Analysis and Development Directions[J]. Energies, 2023, 16(4): 1958.

[3] 陈中,刘艺,陈轩,等.考虑移动储能特性的电动汽车充放电调度策略[J].电力系统自动化,2020,44(02):77-85.

- CHEN Zhong, LIU Yi, CHEN Xuan, et al. Charging and discharging dispatching strategy for electric vehicles considering characteristics of mobile energy storage[J]. Automation of Electric Power Systems,2020,44(02):77-85.
- [4] 董龙昌,陈民铀,李哲,等.基于 V2G 的电动汽车有序充放电控制策略[J].重庆大学学报,2019,(01):1-15.
- DONG L C, CHEN M Y, LI Z, et al. Ordered charging and discharging control strategy of EVs based on V2G[J]. Journal of Chongqing University,2019,(01):1-15.
- [5] 崔金栋,罗文达,周念成.基于多视角的电动汽车有序充放电定价模型与策略研究[J].中国电机工程学报,2018,38(15):4438-4450+4644.
- CUI J D, LUO W D, ZHOU N C. Research on Pricing Model and Strategy of Electric Vehicle Charging and Discharging Based on Multi View[J]. Proceedings of the CSEE,2018, 38(15):4438-4450+4644.
- [6] 李志伟,赵书强,刘应梅.电动汽车分布式储能控制策略及应用[J].电网技术,2016,40(02):442-450.
- LI Z W, ZHAO S Q, LIU Y M. Control strategy and application of distributed electric vehicle energy storage[J]. Power System Technology,2016,40(02):442-450.
- [7] 鲍彦,姜久春,张维戈,等.电动汽车移动储能系统模型及控制策略[J].电力系统自动化,2012,36(22):36-43.
- BAO Y, JIANG J C, ZHANG W G, et al. Model and control strategy of electric vehicle mobile energy storage system[J]. Automation of Electric Power Systems,2012,36(22):36-43.
- [8] 李正烁,孙宏斌,郭庆来,等.计及碳排放的输电网侧“风-车协调”研究[J].中国电机工程学报,2012,32(10):41-48.
- LI Z S, SUN H B, GUO Q L, et al. Study on Wind-EV complementation on the transmission grid side considering carbon emission[J]. Proceedings of the CSEE,2012,32(10):41-48.
- [9] 程宏波,李明慧.基于 Stackelberg 博弈的车-网双向互动策略研究[J].华东交通大学学报,2017,34(05):49-55+80.
- Cheng H B, Li M H. Study on bilateral interaction between vehicle and grid based on stackelberg model[J]. Journal of East China Jiaotong University,2017,34(05):49-55+80.
- [10] 张美霞,徐立成,杨秀,等.基于电动汽车充电需求时空分布特性的充电站规划研究[J].电网技术,2023,47(01):256-268.
- ZHANG Meixia, XU Licheng, YANG Xiu, et al. Planning of charging stations based on spatial and temporal distribution characteristics of electric vehicle charging demand[J]. Power System Technology, 2023, 47(01):256-268.
- [11] 周星月,黄向敏,张勇军,等.基于需求响应潜力模糊评估的电动汽车实时调控优化模型[J].电力自动化设备,2022,42(10):30-37.
- ZHOU Xingyue, HUANG Xiangmin, ZHANG Yongjun, et al. Real-time scheduling and optimization model of electric vehicles based on fuzzy evaluation of demand response potential[J]. Electric Power Automation Equipment,2022,42(10):30-37.
- [12] 蔡国伟,姜雨晴,黄南天,等.电力需求响应机制下基于多主体双层博弈的规模化电动汽车充放电优化调度[J].中国电机工程学报,2023,43(01):85-99.
- CAI G W, JIANG Y Q, HUANG N T, et al. Large-scale electric vehicles charging and discharging optimization scheduling based on multi-agent two-level game under electricity demand response mechanism[J]. Proceedings of the CSEE,2023,43(01):85-99.
- [13] 陈吕鹏,潘振宁,余涛,等.基于动态非合作博弈的大规模电动汽车实时优化调度[J].电力系统自动化,2019,43(24):32-40+66.
- CHEN L P, PAN Z N, YU T, et al. Real-time optimal dispatch for large-scale electric vehicles based on dynamic non-cooperative game theory[J]. Automation of Electric Power Systems,2019,43(24):32-40+66.
- [14] 程杉,陈梓铭,徐康仪,等.基于合作博弈与动态分时电价电动汽车有序充放电方法[J].电力系统保护与控制,2020,48(21):15-21.
- CHENG S, CHEN Z M, XU K Y, et al. An orderly charging and discharging method for electric vehicles based on a cooperative game and dynamic time-of-use price[J]. Power System Protection and Control,2020,48(21):15-21.
- [15] 刘东奇,张曦,钱奕衡.电动汽车集群充放电演化博弈协同策略[J].电力系统保护与控制,2023,51(16):84-93.
- LIU Dongqi, ZHANG Xi, QIAN Yiheng. Evolutionary game coordination strategy of electric vehicle cluster charging and discharging[J]. Power System Protection and Control,2023,51(16):84-93.
- [16] 程宏波,李志成,王勋,等.基于演化博弈的车网双向互动策略研究[J].中国电力,2019,52(07):40-46.
- CHENG H B, LI Z C, WANG X, et al. Research on Two-Way interactive strategy of electric vehicle and power grid based on evolutionary game[J]. Electric Power,2019,52(07):40-46.
- [17] 林国营,冯小峰,卢世祥.基于演化博弈的 V2G 收益优化策略(英文)[J].Journal of Southeast University(English Edition),2020,36(01):50-55.
- Lin Guoying, Feng Xiaofeng, Lu Shixiang. Revenue optimization strategy of V2G based on evolutionary game[J]. Journal of Southeast University (English Edition),2020,36(01):50-55.
- [18] NOWAK M A. Evolving cooperation[J]. Journal of theoretical biology, 2012, 299: 1-8.
- [19] Sun H, Wan Y, Lv H. System dynamics model for the evolutionary behaviour of government enterprises and consumers in China's new energy vehicle market[J]. Sustainability, 2020, 12(4): 1578.
- [20] 吕思,卫志农,马骏超,等.基于多目标优化的电力-交通系统协同运行分析[J].电力系统自动化,2022,46(12):98-106.
- LYU Si, WEI Zhinong, MA Junchao, et al. Analysis on coordinated power-transportation system operation based on multi-objective optimization[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(12):98-106.
- [21] 甘卫华,刘郑,刘亚楠等.基于奖惩机制的网络货运平台监

- 管策略演化博弈分析[J]. 华东交通大学学报,2023,40(01):34-43.
- Gan Weihua, Liu Zheng , Liu Yanan, et al. Evolutionary game analysis of regulating strategy based on reward and punishment mechanisms[J]. Journal of East China Jiaotong University,2023,40(01):34-43.
- [22] 梁士栋,朱冰清.考虑负荷分布均衡的电动汽车充电定价策略[J].华东交通大学学报,2022,39(06):56-65.
- Liang S D, Zhu B Q. Charging Pricing Strategy for Electric Vehicles Considering Balanced Time Distribution of Power Load[J]. Journal of East China Jiaotong University,2022,39(06):56-65.
- [23] 程宏波,郭源曦,商子轩等.计及场景系数的车网互动收益研究[J].中国电力,2022,55(03):28-36.
- CHENG H B, GUO Y X, SHANG Z X, et al. Study of Vehicle-to-Grid Interaction Income Considering Scenario Coefficient[J]. Electric Power,2022,55(03):28-36.
- [24] 程宏波,商子轩,郭源曦等.车网互动过程的系统动力学分析[J].电网技术,2021,45(10): 4125-4133.
- CHENG H B, SHANG Z X, GUO Y X, et al. Research on vehicle-to-grid process based on system dynamics[J]. Power System Technology,2021,45(10): 4125-4133.
- [25] Yu Y, Li G, Li Z. A game theoretical pricing mechanism for multi-microgrid energy trading considering electric vehicles uncertainty[J]. IEEE Access, 2020, 8: 156519-156529.
- [26] Li J, Ren H, Wang M. How to escape the dilemma of charging infrastructure construction? A multi-sectorial stochastic evolutionary game model[J]. Energy, 2021, 231: 120807.
- [27] Sun P J. The optimal privacy strategy of cloud service based on evolutionary game[J]. Cluster Computing, 2022, 25(1): 13-31.
- [28] 徐松鹤,胡少龙,韩传峰.基于改进复制动态方程的邻避事件随机演化博弈模型[J].数学的实践与认识,2021,51(15):1-12.
- XU S H, HU S L, HAN C F. Stochastic evolutionary game model of NIMBY events based on improved repetitive dynamic equations[J]. Mathematics in Practice and Theory,2021,51(15):1-12.
- [29] Yang Z, Shi Y, Li Y. Analysis of intellectual property cooperation behavior and its simulation under two types of scenarios using evolutionary game theory[J]. Computers & Industrial Engineering, 2018, 125: 739-750.



通信作者：程宏波（1979—），男，博士，教授，博士生导师，研究方向为输变电设备（包括牵引供电设备）健康管理、故障诊断及预测、电网智能控制等。

E-mail: hbcheng@ecjtu.edu.cn。