

控制与决策

Control and Decision

基于量子反应均衡的政府与共享单车企业停车管理博弈分析

张书婧, 贾顺平, 彭芑, 毛保华

引用本文:

张书婧, 贾顺平, 彭, 毛保华. 基于量子反应均衡的政府与共享单车企业停车管理博弈分析[J]. *控制与决策*, 2024, 39(2): 641–648.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2022.0970>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[基于Bertrand博弈的共享单车定价与投放联合策略研究](#)

Joint pricing and launching strategy for bike-sharing enterprises based on Bertrand game

控制与决策. 2021, 36(7): 1786–1792 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1638>

[服务差异化背景下基于行为的定价策略](#)

Pricing strategy based on strategic customer behavior with service differentiation

控制与决策. 2021, 36(7): 1754–1762 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1147>

[政府补贴和增值税退税政策的闭环供应链决策](#)

Closed-loop supply chain decisions under government subsidies and VAT rebates

控制与决策. 2021, 36(11): 2771–2782 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0356>

[一种要素双模糊的限制交流结构合作博弈方法及应用](#)

An allocation model of limited communication structure cooperative game with dual fuzzy elements

控制与决策. 2021, 36(2): 475–482 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1048>

[考虑定向能力的竞争性企业优惠券定向投放与定价策略](#)

Strategy of targeted delivery and pricing for competitive corporate coupon with orientation capability

控制与决策. 2020, 35(12): 3035–3044 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0356>

基于量子反应均衡的政府与共享单车企业停车管理博弈分析

张书婧^{1,2}, 贾顺平^{1,3†}, 彭 芑^{1,2}, 毛保华^{2,3}

(1. 北京交通大学 交通运输学院, 北京 100044; 2. 北京交通大学 综合交通运输大数据应用技术
交通运输行业重点实验室, 北京 100044; 3. 北京交通大学 中国综合交通研究中心, 北京 100044)

摘要: 共享单车停车问题是城市交通治理中最主要的问题之一, 其表面为共享单车用户停车行为不规范、共享单车企业管理调度不及时所致, 究其本质实为共享单车各利益主体缺乏有效协同治理机制、停车权责划分不清晰、成本分担失衡的结果. 考虑政府与共享单车企业的有限理性, 建立扩展式博弈的量子反应均衡(QRE)模型分析双方停车管理博弈机理, 并利用 Gambit 软件进行算例仿真分析. 研究表明: 双方博弈结果随理性程度增加逐渐趋向于基于完全理性的子博弈精炼纳什均衡, 政府掌握更多企业运营信息有利于达到社会效用最大化的博弈结果; 政府引入有效处罚措施或主导负责停车管理可以降低自身的财政支出和社会总成本, 建立量化的处罚标准能够促进企业主动承担停车管理责任; 有限理性程度、违停数量、激励机制和科技手段运行效率会影响企业的停车管理策略选择.

关键词: 共享单车停车; 治理研究; 有限理性; 量子反应均衡; 扩展式博弈; 仿真

中图分类号: U-121 文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2022.0970

引用格式: 张书婧, 贾顺平, 彭芑, 等. 基于量子反应均衡的政府与共享单车企业停车管理博弈分析[J]. 控制与决策, 2024, 39(2): 641-648.

Game analysis of parking management between government and bike-sharing enterprises based on quantal response equilibrium

ZHANG Shu-jing^{1,2}, JIA Shun-ping^{1,3†}, PENG Peng^{1,2}, MAO Bao-hua^{2,3}

(1. School of Traffic and Transportation, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. Key Laboratory of Transport Industry of Big Data Application Technologies for Comprehensive Transport of Ministry of Transport, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 3. Integrated Transport Research Center of China, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: Shared bicycles parking is one of the most important problems in urban transportation management. On the surface, it is caused by the irregular parking behavior of shared bicycles users and the untimely management and dispatching of operating enterprises. In essence, it is the result of the lack of effective collaborative governance mechanism, the unclear division of parking rights and responsibilities, the imbalance of cost sharing among the stakeholders of shared bicycles. Considering the bounded rationality of the government and bike-sharing enterprises, this study establishes an quantal response equilibrium (QRE) model for extensive form games to analyze the parking management game mechanism, and uses Gambit to simulate and analyze a numerical example. The research indicates that game results of two players gradually tend to the subgame-perfect equilibrium based on complete rationality with the increase of the degree of rationality. The government's grasp of more information about the operation of enterprises will help to achieve the game result of maximizing social utility. The government can reduce its own financial expenditure and total social cost by introducing effective punishment measures or taking charge of parking management. Quantifying the punishment standard can promote bike-sharing enterprises to take responsibility for parking management. In addition, the factors including the degree of bounded rationality, the number of illegal parking, operation efficiency of incentive mechanism and technological methods will affect the behaviour strategy of parking management.

Keywords: shared bicycles parking; governance research; bounded rationality; quantal response equilibrium; extensive form games; numerical simulation

收稿日期: 2022-06-05; 录用日期: 2022-09-30.

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金项目(2022YJS061); 国家自然科学基金项目(71971021).

责任编委: 龙建成.

†通讯作者. E-mail: shpjia@bjtu.edu.cn.

0 引言

共享单车作为城市绿色交通系统重要组成部分,在解决日常短途出行和公共交通“最后一公里”接驳方面发挥重要作用,但停车秩序存在诸多问题.乱停乱放是共享单车领域治理难度最大的问题,在城市中心区的重要轨道和公交站点、主要办公区域或商业综合体周边尤为突出,导致城市公共空间的“公地悲剧”.

较多学者关注共享单车停车问题,对停车区的规划选址和容量测算^[1]、车辆调度优化^[2]进行了充分讨论.实际的交通治理由于缺乏有效约束,即使规划有充足的停车配套设施,骑行用户仍然存在不规范停车行为,企业调度积极性差.鉴于此,部分学者从治理机制角度出发,通过建立奖惩或约束机制引导共享单车各利益相关者合理分担停车管理责任.徐国勋等^[3]引入激励机制吸引用户参与自适应调度,解决共享单车停车分布不均衡现象.Gao等^[4]构建混合Logit模型评估奖励或惩罚措施对用户规范停车行为的引导效果.王瑜琼等^[5]考虑位置识别率的影响,建立停车选择的混合策略博弈模型分析奖励和惩罚两种机制下用户停车行为的规范性.

上述研究大多针对用户行为,关于政府和共享单车企业停车管理责任分担的研究相对较少.张一进等^[6]和肖倩等^[7]运用演化博弈理论从行业治理角度分析政府与共享单车平台在不同稳定性条件下的管理策略.江南^[8]构建三方演化博弈模型寻求用户、平台以及政府监管部门的成本收益均衡点.既有研究多从经济原理层面分析政府与共享单车企业的利益协调规律,双方的策略选择局限于监督、管理与否,对“如何管理”及管理方法适用条件的讨论不够深入.演化博弈论(evolutionary game theory)被广泛应用于政府与企业的博弈分析,通过建立描述性模型对博弈主体有限理性(bounded rationality)进行阐述,而缺乏对有限理性的定量刻画和对序贯理性(sequential rationality)的考虑.McKelvey等^[9]利用个体离散选择行为的统计模型对博弈论进行推广,提出能够量化有限理性的量子反应均衡(quantal response equilibrium, QRE),并考虑博弈主体行动顺序,将QRE理论进一步延伸至基于完美回忆的扩展式博弈,提出代理量子反应均衡(agent quantal response equilibrium, AQRE)^[10],对于政府与共享单车企业信息不完全且政府作为先行者进行政策规制引导的博弈问题具有更好的解释能力.

本文考虑政府和共享单车企业的有限理性程度,

基于QRE理论对政府和共享单车企业停车管理的序贯博弈进行建模分析,讨论共享单车违停数量、激励机制和科技手段运行效率对均衡策略的影响,为政府设计协同治理机制以及共享单车企业寻求可操作的停车管理路径提供理论支持.

1 问题描述与博弈分析

共享单车停车占用道路资源具有显著的负外部性,政府、共享单车企业、骑行用户和用户单位等作为利益相关者,应共同承担停车管理责任.本文聚焦政府和共享单车企业的停车管理博弈过程,局中人(players)为 $i \in N$ ($N = 1, 2$),其中1为政府,2为共享单车企业.博弈双方的行动有先后顺序,政府作为共享单车停车管理的引导者,是博弈中的先行动者,有3种政策制定方案:1) g_1 为政府现状的停车管理策略,即城市管理部门以约谈或收缴部分违停车辆的方式要求共享单车企业自行整改停车管理措施;2) g_2 为将违停数量作为企业投放车辆的标准,在动态调整总量时限制违停严重企业的车辆投放,引导企业积极参与治理;3) g_3 为由政府主导维护停车秩序,政府可根据企业投放量向其收取一定费用以弥补停车管理成本.共享单车企业在了解政府行业管理政策的基础上决定自身停车管理方案:1) e_1 为在政府督促下被动进行停车管理;2) e_2 为主动对违停车辆进行及时清理调度;3) e_3 为通过引入激励机制,吸引部分用户和社会力量参与违停车辆调度,减轻企业清理调度工作量;4) e_4 为通过科技手段建设蓝牙道钉、电子围栏、禁停区等智能化设施,自动实现停车秩序维护.序贯博弈的扩展式表述如图1所示.

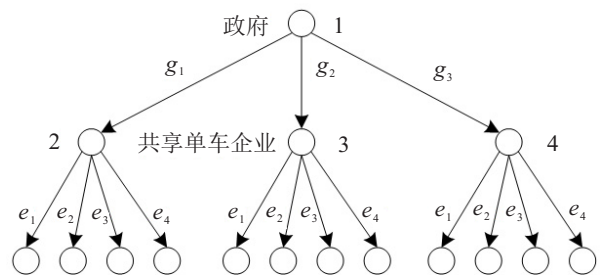


图1 政府和共享单车企业停车管理博弈

共享单车停车管理博弈中,政府有1个信息集(information set)和3个可选择的行动(actions);企业有3个信息集,每个信息集对应4个可选择的行动.在信息集 h_{ij} ,即局中人 i 在信息集 j 上,存在可选择的行动集合 $A(h_{ij})$,则 $A(h_{11}) = \{g_1, g_2, g_3\}$, $A(h_{22}) = A(h_{23}) = A(h_{24}) = \{e_1, e_2, e_3, e_4\}$.扩展式表述博弈中,行为战略(behaviour strategies) β 规定了每个信息集行动集合上的概率分布,且不同信息集中的概率分

布是独立的. $\bar{u}_{ija}(\beta)$ 表示局中人 i 在信息集 j 上选择行为 $a \in A(h_{ij})$ 且行为战略 β 发生在博弈树上时的期望效用 (payoffs), 其中 $\beta_{ija} \in [0, 1]$ 且 $\sum_{a \in A(h_{ij})} \beta_{ija} = 1$, 局中人的目标是选择战略以最大化其期望效用.

受获取信息和处理信息能力有限或错误偏离等因素干扰, 现实中政府与共享单车企业难以对实施各种管理措施后骑行用户的停车行为进行精准预测, 博弈双方的决策往往具有有限理性. 传统博弈论立足于严格理性假定, 纳什均衡完美最优化的推导建立在严密的逻辑运算基础上, 与现实的决策过程存在偏差. 演化博弈论虽考虑到了局中人的有限理性, 但仍将纳什均衡作为基准均衡, 且缺乏对政府与共享单车企业行动先后顺序的考虑. QRE 理论放松了纳什均衡的严格假设, 将均衡建立在更符合实际情形的行为基础上, 即政府与共享单车企业有选择期望效用最大化战略的信念, 但有限理性认知能力使其只能选择在误差干扰下认为最好的战略; 该框架下的 AQRE 理论考虑到了博弈双方的行动顺序, 能够更好地预测和解释政府和共享单车企业的现实决策.

2 因素分析

2.1 模型假设

根据共享单车停车治理的实际情况, 提出如下假设.

假设 1 共享单车市场需求大于供给, 停车复杂程度增加不会导致市场用户流失.

假设 2 政府在策略选择时不仅考虑自身的停车管理财政支出, 还考虑社会维护停车秩序的总效用.

假设 3 共享单车企业在城市管理部门约谈或收缴车辆的监管措施下被动进行停车管理时, 额外付出的处罚成本和清理调度成本可忽略不计; 此时违停车辆清理调度工作主要由政府承担, 且存在一定滞后性, 政府将在其他社会生产活动中承担违停问题造成的社会成本.

假设 4 共享单车企业主动清理违停车辆需付出额外的清理调度成本, 能够及时清理, 不受政府处罚.

假设 5 共享单车企业采取激励措施仅需简单的定位技术, 技术成本可忽略不计, 需付出额外的激励成本; 用户和社会力量参与调度后剩余的违停车辆由企业及时清理, 不受政府处罚.

假设 6 利用科技手段维护停车秩序时, 停车区容量可满足停放需求, 用户在规范停车区外无法锁车; 受位置识别精度或骑行用户素质影响, 仍将存在部分违停车辆. 政府主导解决停车问题将优先选择

科技手段.

假设 7 政府和共享单车企业在决策前能够根据历史数据对骑行用户违停比例和实施激励措施或科技手段后骑行用户停车行为的变化进行提前测算, 但受信息获取和处理能力影响, 测算精度存在误差, 将对博弈决策产生影响.

2.2 局中人效用函数分析

在政府与共享单车企业的停车管理博弈中, 企业的期望效用涉及车辆投放效用 R 、行政处罚成本 F 、清理调度成本 D_E 、激励成本 I 、技术设施建设成本 T_E 以及政府管理费用 P 等. 共享单车企业追求车辆投放数量最大化, 设平均每投放 1 辆单车获得的效用折算为货币为 r , 投放总量为 Q , 则车辆投放总效用 R 为

$$R = rQ. \quad (1)$$

令 θ 为采取某项管理措施前所面对的违停比例, 与局中人战略选择及行为进程有关, 局中人未采取任何管理措施约束用户行为时的初始违停比例为 θ_0 . 若政府以违停数量作为企业车辆投放标准, 在总量调控时对未及时、主动进行停车管理的企业的投放额度进行缩减, 设缩减比例为 $\tau(Q\theta_0)$, 与违停数量成正相关, 则企业的行政处罚成本 F 为

$$F = rQ\tau(Q\theta_0). \quad (2)$$

若共享单车企业主动采取清理调度措施, 则额外承担的清理调度成本 D_E 包括配备调度车辆、运维人员等的固定成本 m , 以及与违停车辆数相关的可变成本 $nQ\theta$, 有

$$D_E(\theta) = m + nQ\theta. \quad (3)$$

若共享单车企业采取激励措施, 设既有的违停车辆被用户或社会力量调度至指定位置的比例为 $\mu(\omega)$, 与平均每辆单车需额外付出的奖励金额 ω 成正相关, 则总激励成本 I 为

$$I(\theta, \omega) = \omega Q\mu(\omega)\theta, \quad (4)$$

$$\mu(\omega) = k\omega + l. \quad (5)$$

若企业采取科技手段维护停车秩序, 则技术设施建设成本为 T_E . 令 η 为技术设施建设后既有违停车辆仍然在停车区外违停的比例, 位置识别精度或骑行用户素质越高 η 越小, 违停车辆由企业及时负责清理. 若由政府主导解决停车问题, 则共享单车企业需根据投放总量向政府缴纳一定的管理费用 P , 设平均每辆车的管理费用为 p , 则有

$$P = pQ. \quad (6)$$

政府在停车管理博弈中以社会总效用最大化为

目标,期望效用包含政府自身财政投入与企业期望效用两部分,其中政府自身财政投入涉及共享单车乱停乱放造成的社会成本 B 、滞留违停车辆的清理调度成本 D_G 、技术设施建设成本 T_G 、企业缴纳的管理费用 P 等.在政府督促和引导企业进行停车管理时,违停车辆未能得到及时清理对社会带来的负效应随违停数量 $Q\theta_0$ 递增,最终可折算为政府在其他社会生产活动中付出的社会成本 B ,有

$$B = (Q\theta_0)^2. \tag{7}$$

政府清理调度成本为 D_G ,由固定成本与可变成本组成, δ_1 和 δ_2 分别表示政府相比企业成本增加的比例,有

$$D_G(\theta) = m' + n'Q\theta, \tag{8}$$

$$m' = m(1 + \delta_1), \tag{9}$$

$$n' = n(1 + \delta_2). \tag{10}$$

若政府主导解决停车问题时采取科技手段,则由于共享单车企业具有较成熟的技术基础,政府的技术设施建设成本 T_G 高于企业, δ_3 为政府相比企业技术设施建设成本增加的比例,有

$$T_G = T_E(1 + \delta_3). \tag{11}$$

局中人 i 的期望效用是局中人 i 及其他局中人所选择战略的函数,12种纯战略组合下的期望效用函数见表1. \bar{u}_2 代表共享单车企业期望效用, \bar{u}_1 代表政府期望效用.其中 $\{g_3, g_4\}$ 表示政府主导解决违停问题时企业与政府合作,自主建设技术设施并负责违停车辆的清理调度,政府减免其管理费用.由于不同管理措施涉及的成本与收益类型不同,不同战略组合对应不同期望效用函数,从而影响博弈双方行动选择.

表1 政府和共享单车企业停车管理博弈期望效用函数

博弈路径	纯战略组合	期望效用函数	
		\bar{u}_2	\bar{u}_1
1	$\{g_1, e_1\}$	R	$R - D_G(\theta_0) - B$
2	$\{g_1, e_2\}$	$R - D_E(\theta_0)$	$R - D_E(\theta_0)$
3	$\{g_1, e_3\}$	$R - I(\theta_0, \omega) - D_E(\theta_0 - \mu(\omega)\theta_0)$	$R - I(\theta_0, \omega) - D_E(\theta_0 - \mu(\omega)\theta_0)$
4	$\{g_1, e_4\}$	$R - T_E - D_E(\theta_0\eta)$	$R - T_E - D_E(\theta_0\eta)$
5	$\{g_2, e_1\}$	$R - F$	$R - D_G(\theta_0) - B$
6	$\{g_2, e_2\}$	$R - D_E(\theta_0)$	$R - D_E(\theta_0)$
7	$\{g_2, e_3\}$	$R - I(\theta_0, \omega) - D_E(\theta_0 - \mu(\omega)\theta_0)$	$R - I(\theta_0, \omega) - D_E(\theta_0 - \mu(\omega)\theta_0)$
8	$\{g_2, e_4\}$	$R - T_E - D_E(\theta_0\eta)$	$R - T_E - D_E(\theta_0\eta)$
9	$\{g_3, e_1\}$	$R - P$	$R - T_G - D_G(\theta_0\eta)$
10	$\{g_3, e_2\}$	$R - P - D_E(\theta_0\eta)$	$R - T_G - D_E(\theta_0\eta)$
11	$\{g_3, e_3\}$	$R - P - I(\theta_0\eta, \omega) - D_E(\theta_0\eta - \mu(\omega)\theta_0\eta)$	$R - T_G - I(\theta_0\eta, \omega) - D_E(\theta_0\eta - \mu(\omega)\theta_0\eta)$
12	$\{g_3, e_4\}$	$R - T_E - D_E(\theta_0\eta)$	$R - T_E - D_E(\theta_0\eta)$

3 考虑有限理性的均衡策略求解

传统博弈论假设参与者具有完全理性,通过推理演绎使互动行为达到均衡.其中对于局中人选择行为有先后次序且完美信息的序贯博弈,一般利用逆向归纳法(backwards induction)求解子博弈精炼纳什均衡(subgame perfect nash equilibrium),即从博弈最后一个阶段局中人在每个信息集上使其获得最大期望效用的最优选择开始分析,逐步倒推向前一个阶段相应局中人的最优选择,直至第1阶段.

由于社会经济环境和决策问题的复杂性,局中人的决策往往偏离基于完全理性假设的纳什均衡.行为博弈论(behavioral game)是行为经济学的重要组成部分,吸收了Simon的“有限理性”学说,认为局中人由于受到有限理性约束无法最大化期望效用,而会基于其他规则选择自认为最优的策略,但其追求理性

的努力不会停止.基于此,QRE理论放松了纳什均衡完全信息和完全认知、计算能力的严格假设,认为局中人不会以概率1选择最好的行动,而会以较高的概率选择有较高期望效用的行动,在许多博弈问题中被证明具有较好的预测力^[11-12],已被应用于生产决策^[13]、灾害疏散^[14]、经贸合作^[15]等领域.

在QRE分析框架下,AQRE理论用于扩展式博弈的均衡分析,其假定每个局中人在不同信息集分别由对应代理(agent)进行决策,同一局中人的不同代理决策相互独立且与该局中人具有相同的期望效用.在有限认知能力约束下,局中人受到某种噪声的干扰,无法正确评估各行动的期望效用,需根据信息集中各行动的相对期望效用来进行选择,有

$$\hat{u}_{ija}(\beta) = \bar{u}_{ija}(\beta) + \varepsilon_{ija}. \tag{12}$$

其中: $\hat{u}_{ija}(\beta)$ 为局中人 i 在信息集 j 选择行动 a 的相对期望效用; $\bar{u}_{ija}(\beta)$ 为不犯错误时计算得到的期望效用; ε_{ija} 为噪声干扰项, 代表局中人不总是采取收益最大化的行动, 或局中人无法完全确定对手的策略, 服从概率密度函数 $f(\varepsilon_{ija})$ 独立同分布于 $A(h_{ij})$. 在任意信息集 h_{ij} , 局中人选择行动 $a \in A(h_{ij})$ 的相对期望效用大于其他行动 $\hat{a} \in A(h_{ij})$ 时, 行动 a 会被选择, 即满足

$$R_{ija}(\bar{u}) = \{\varepsilon : \bar{u}_{ija} + \varepsilon_{ija} \geq \bar{u}_{ij\hat{a}} + \varepsilon_{ij\hat{a}}, \forall \hat{a} \in A(h_{ij})\}. \quad (13)$$

则在已知期望效用的情况下, 局中人选择行动 $a \in A(h_{ij})$ 的概率为

$$\varphi_{ija}(\bar{u}) = \int_{R_{ija}(\bar{u})} f(\varepsilon) d\varepsilon. \quad (14)$$

令 ε_{ija} 为独立同分布, 先验概率服从 Gumbel (或 log-Weibull) 型极值分布, 累计密度函数为 $F(\varepsilon_{ija}) = e^{-e^{\lambda\varepsilon_{ija}}}$, 极值分布的均值为 γ/λ (γ 为欧拉常数 0.577), 方差为 π^2/λ^2 . 此时局中人的行为战略遵循多元 logit 分布, 又称 logit-AQRE. 在信息集 h_{ij} , 局中人的行为战略 β_{ija} 为

$$\beta_{ija} = \frac{e^{\lambda\bar{u}_{ija}(\beta)}}{\sum_{a' \in A(h_{ij})} e^{\lambda\bar{u}_{ija'}(\beta)}}, \quad (15)$$

其中 $\lambda \in [0, \infty)$ 为有限理性参数, 用于衡量局中人关于其他人猜测的不确定性或有限理性程度, 参数值越高表示局中人受噪声干扰越小, 反应越准确. 当 $\lambda = 0$ 时, 表明局中人的计算误差很大, 几乎无法判断各策略的优劣, 此时所有策略的选择概率均相等; 当 $\lambda \rightarrow \infty$ 时, 表明局中人完全理性, 不存在计算误差, 此时行为战略 β_{ij}^* 将沿着某唯一的路径收敛于纳什均衡, 并同时满足序贯均衡.

4 算例分析

4.1 示例说明

根据政府与共享单车企业停车管理博弈模型, 构建如下案例: 某地区有 1 家共享单车企业独立运营, 单车投放量为 5 000 辆, 区域外部车辆无法流入, 内部车辆无法流出. 假设存在 5 个需进行停车治理的点, 设计 2 组情境: 1) 对所有点位的停车问题进行治理, 违停数量占投放总量比例 $\theta_0 = 35\%$; 2) 仅对其中 3 个点位的停车问题进行治理, 违停数量占投放总量比例 $\theta_0 = 10\%$.

对模型参数赋值如下: 为便于比较不同共享单车管理策略的期望效用, 成本和收益均按年成本计算, 平均每辆单车的投放效用 r 取 600 元/辆·年. 共享

单车企业未及时主动进行停车管理而受到行政处罚时, 当 $Q\theta_0 \in [0, 1000)$ 辆, 投放量缩减比例为 $\tau(Q\theta_0) = 5\%$; 当 $Q\theta_0 \in [1000, 2000)$ 辆, $\tau(Q\theta_0) = 10\%$. 共享单车企业及时主动清理调度违停车辆的固定成本 m 取 50 000 元/年, 可变成本 n 取 120 元/辆·年. 企业采取激励措施吸引用户和社会力量参与车辆调度时, 每辆单车需额外投入奖励金额取 $\omega \in [100, 300]$ 元/辆·年, k 取 1.2×10^{-4} , l 取 0.59. 情境 1) 中共享单车企业采取科技手段建设电子围栏的成本 T_E 取 300 000 元/年, 企业在政府主导治理停车问题时向政府缴纳的管理费用 p 取 75 元/辆·年; 情境 2) 中共享单车企业建设电子围栏成本 T_E 取 120 000 元/年, 政府主导停车治理时企业缴纳的管理费用 p 取 35 元/辆·年. 政府主导治理停车问题时同样选择采取科技手段建设电子围栏, 清理调度成本与电子围栏建设成本相比企业增加的比例为 $\delta = \delta_1 = \delta_2 = \delta_3 \in (0, 50]\%$.

4.2 模型仿真与分析

假设 $\theta_0 = 35\%$, $\omega = 300$ 元/辆·年, $\eta = 10\%$, 博弈双方的收益矩阵见表 2. 在完全理性假设下, 采用逆向归纳法分别从共享单车企业和政府收益方面分析效用最大化, 政府选择 g_1 时, 企业选择 e_1 的期望效用最大; 政府选择 g_2 时, 企业选择 e_2 的期望效用最大; 政府选择 g_3 时, 企业选择 e_4 的期望效用最大; 政府部分策略的期望效用与 δ 有关, 随 δ 的增大而减小. 根据企业在各个决策上的最优行动, 政府选择 g_2 的期望效用最大, 可推导出该博弈的子博弈精炼纳什均衡解为 $\{g_2, e_2\}$, 即政府对违停严重的企业采取总量限制, 企业主动对违停车辆进行及时清理调度. 而在现实中, 由于政府缺乏有效的处罚机制和主导管理机制, 更常见的情况是政府选择 g_1 , 企业选择 e_1 , 导致共享单车停车管理工作基本由政府承担, 社会总成本较高. 另外, 由于信息获取的局限, 博弈双方对不同管理措施的实施效果不能进行正确预期也可能导致无法以概率 1 选择最优行动.

在有限理性假设下, 政府和企业的决策为混合策略均衡. 使用 Gambit 实验工具对算例进行仿真分析, 得到停车管理博弈中政府与共享单车企业的行为战略随有限理性参数 λ 的变化趋势如图 2 所示. 有限理性参数 λ 表示政府或企业对于对方的行为、意图、成本的了解程度, λ 越大表明局中人对博弈信息掌握越充分. 初始 $\lambda = 0$ 的状态下, 博弈双方几乎无法辨别不同战略的优劣, 信息集 h_{22} 、 h_{23} 、 h_{24} 中各行动被选择概率均为 0.25, 信息集 h_{11} 中各行动被选择概率为 0.33.

表2 政府和共享单车企业收益矩阵

单位:万元

		政府		
		g_1	g_2	g_3
共享单车企业	e_1	300.000 0, -32.250 0 - 26.000 0 δ	270.000 0, -32.250 0 - 26.000 0 δ	261.750 0, 262.900 0 - 37.100 0 δ
	e_2	274.000 0, 274.000 0	274.000 0, 274.000 0	254.650 0, 262.900 0 - 30.000 0 δ
	e_3	274.000 0, 254.281 0	254.281 0, 254.281 0	252.678 1, 260.928 1 - 30.000 0 δ
	e_4	274.000 0, 262.900 0	262.900 0, 262.900 0	262.900 0, 262.900 0

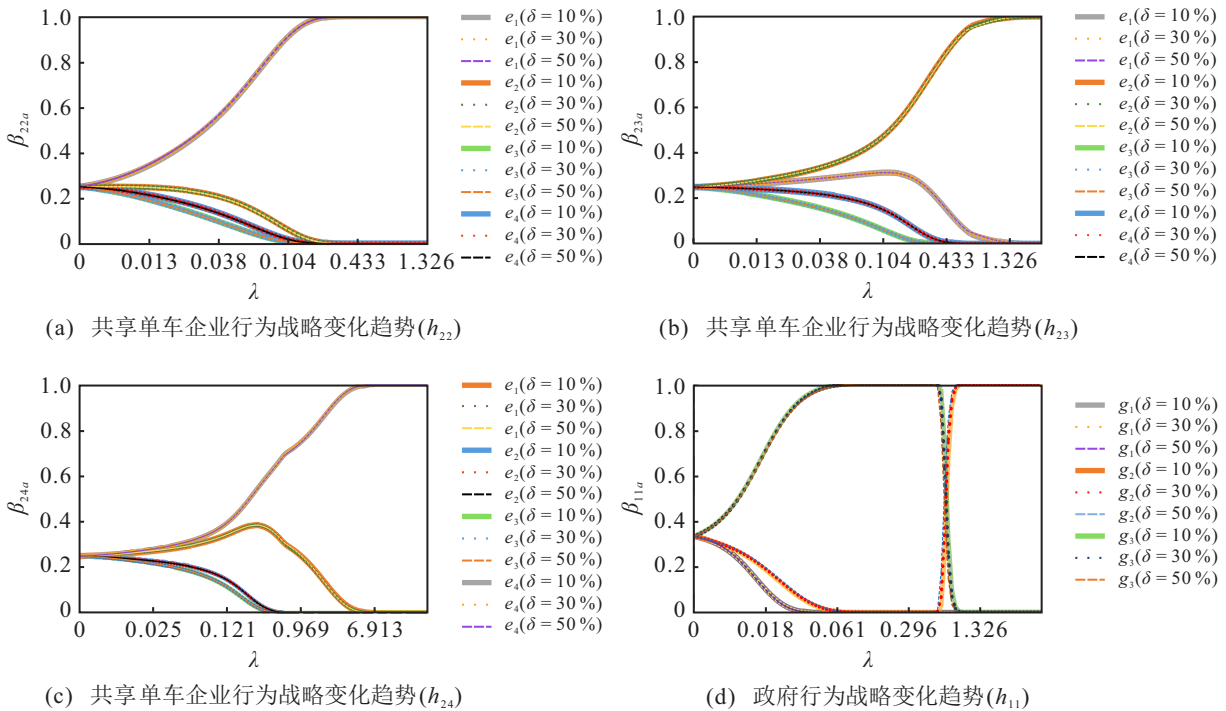


图2 政府和共享单车企业停车管理博弈量子反应均衡结果

共享单车企业行为战略受政府效用的影响较小, δ 为 10%、30%、50% 时各行动的选择概率曲线基本重叠. 随理性程度 λ 增加, 信息集 h_{22} 中共享单车企业选择 e_2 、 e_3 、 e_4 的概率逐渐降低, 选择 e_1 的概率上升, 最终在 $\lambda = 0.30$ 时达到 1; 信息集 h_{23} 中 e_3 、 e_4 的被选择概率逐渐降低, 选择 e_1 的概率先升后降 (拐点为 $\lambda = 0.11$); 选择 e_2 的概率逐渐上升, 最终在 $\lambda = 2.04$ ($\delta = 10\%$)、 1.92 ($\delta = 30\%$)、 1.91 ($\delta = 50\%$) 时达到 1, 表明政府引入处罚机制将促使企业主动采取有效的停车管理措施. 信息集 h_{24} 中 e_2 、 e_3 的被选择概率逐渐降低; 选择 e_1 的概率先缓慢上升再逐步下降 (拐点为 $\lambda = 0.30$); 选择 e_4 的概率逐渐上升, 在 $\lambda = 6.78$ ($\delta = 10\%$)、 6.91 ($\delta = 30\%$)、 7.01 ($\delta = 50\%$) 达到 1.

δ 对政府行为战略的影响相比企业更加明显, 政府在信息集 h_{11} 选择 g_1 的概率逐渐降低; 选择 g_3 的概率先上升后下降, 选择 g_2 的概率先下降后上

升, $\delta = 10\%$ 、30%、50% 时分别在 $\lambda = 0.82$ 、 0.79 、 0.73 选择 g_2 的概率超过 g_3 ; 在 $\lambda = 1.08$ ($\delta = 10\%$)、 1.03 ($\delta = 30\%$)、 0.95 ($\delta = 50\%$) 时, g_2 被选择的概率达到 1, 此时 QRE 与完全理性下的子博弈精炼纳什均衡一致. 结果表明 λ 越大, 即决策信息越全面, 共享单车企业的决策与最优行动的差距越小, 政府在达到一定理性程度后才趋向于选择最优行动; δ 越大, 政府选择最优行动 g_2 的概率超过 g_3 并达到 1 时所需的理性程度越低.

4.3 战略分析

令政府与共享单车企业的理性程度 λ 为 1.16, 政府相比企业成本增加比例 δ 为 30%. 在 2 组情境下, 无论 ω 和 η 如何变化, 信息集 h_{22} 中 e_1 始终为企业的最优行动. 政府引入处罚机制或由政府主导进行停车管理后, 信息集 h_{23} 、 h_{24} 、 h_{11} 中战略选择的变化趋势如图 3 所示.

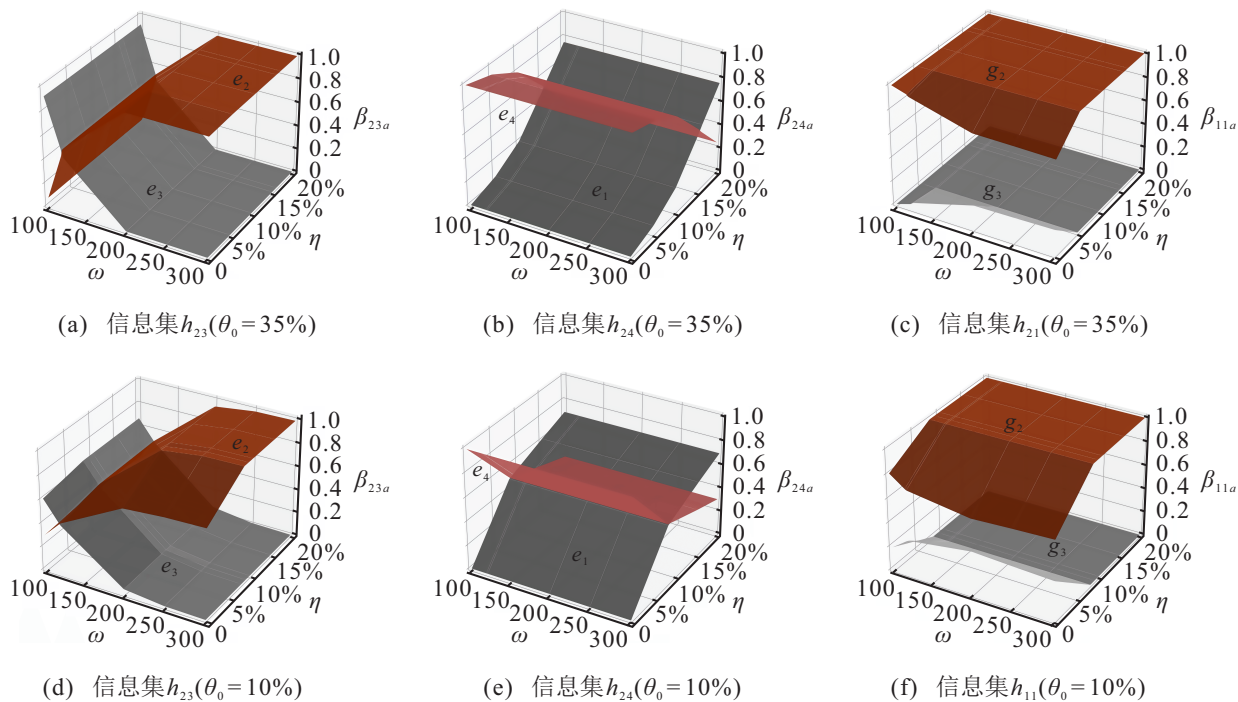


图3 奖励金额与电子围栏识别精度对均衡解的影响

从结果分析可得,信息集 h_{23} 的最优行动与采取激励措施时每辆单车需额外支出的奖励金额 ω 有关,行动 e_2 的被选择概率随 ω 增大而增大,行动 e_3 的被选择概率随 ω 增大而减小;当 $\omega = 120$ 元/辆·年,即违停车辆被用户或社会力量调度至规范停车区的概率为 60.4% 时, e_2 和 e_3 期望效用相同,均可作为最优行动;当 $\omega < 120$ 元/辆·年时, e_3 为最优行动;当 $\omega > 120$ 元/辆·年时, e_2 为最优行动. 信息集 h_{24} 的最优行动与电子围栏识别精度 η 有关,行动 e_1 的被选择概率随 η 增大而增大,行动 e_4 的被选择概率随 η 增大而减小. 在情境 1) 中,当 $\eta \leq 15\%$ 时, e_4 为最优行动,当 $\eta \geq 16\%$ 时, e_1 为最优行动;情境 2) 中,当 $\eta \leq 8\%$ 时, e_4 为最优行动,当 $\eta \geq 9\%$ 时, e_1 为最优行动. 2 组算例中,无论奖励金额和电子围栏识别率如何, g_2 始终为政府的最优战略,选择 g_2 的概率随 η 增大,直至达到 1.

5 结论

本文基于 QRE 理论,定量刻画政府与共享单车企业的有限理性程度,研究双方协同治理停车问题的博弈机理并进行算例仿真,主要结论如下:

1) 有限理性假设下局中人对期望效用的评估能力有限,战略选择与完全理性下的决策存在偏差,博弈结果随理性程度增加逐渐趋向于基于完全且完美信息的子博弈精炼纳什均衡. 政府与企业的停车管理成本差距越大,选择最优行动所需的理性程度越低.

2) 政府充分掌握企业运营成本和运营数据,有利于达到社会效用最大化的博弈结果,因此政府与共享单车企业需重视由信息不完全造成的认知局限,企业应加快完善信息平台建设,政府应将更详细的实时数据监测和报送纳入政府监管及服务管理平台管理,运用大数据为行业监管提供支撑.

3) 政府引入有效的处罚机制或主导进行停车管理,有助于实现政府财政支出和社会成本的最小化目标. 量化处罚标准,将促使共享单车企业积极承担停车管理责任.

4) 共享单车企业选择人工调度、激励措施或采取科技手段等停车管理方法与违停数量、激励成本和效果、智能化设施识别精度等因素有关.

下一步可在本文研究的基础上,进一步探讨共享单车市场供给大于需求的研究场景,某企业采取的停车管理措施造成停车复杂性增加可能会导致用户流向其他企业,因此企业效用函数中还需考虑用户流失成本或其他企业用户流入的收益,停车管理机制构建中也需考虑不同共享单车企业间的博弈关系. 另外,可将骑行用户、用户单位等其他共享单车利益相关者纳入博弈模型,通过多方博弈探讨停车管理成本分担机制,并细化考虑停车难易程度对骑行用户停车成本的影响、违停数量对社会成本的影响,更准确刻画局中人的期望效用. QRE 模型中默认政府与企业理性程度一致,与现实情况存在差异,可在策略选择问题中进一步考虑博弈双方的非对称理性.

参考文献(References)

- [1] Zhao D, Ong G P. Geo-fenced parking spaces identification for free-floating bicycle sharing system[J]. *Transportation Research—Part A: Policy and Practice*, 2021, 148: 49-63.
- [2] 任爽, 韩冰. 带有不确定性的公共租赁自行车的管理优化研究[J]. *控制与决策*, 2019, 34(11): 2469-2478.
(Ren S, Han B. Management and optimization of public rental bikes with uncertainty[J]. *Control and Decision*, 2019, 34(11): 2469-2478.)
- [3] 徐国勋, 李妍峰, 金大祥, 等. “红包车”机制下的共享单车调度问题[J]. *系统工程理论与实践*, 2020, 40(2): 426-436.
(Xu G X, Li Y F, Jin D X, et al. A user-based method for the static bike repositioning problem[J]. *Systems Engineering—Theory & Practice*, 2020, 40(2): 426-436.)
- [4] Gao L P, Ji Y J, Yan X C, et al. Incentive measures to avoid the illegal parking of dockless shared bikes: The relationships among incentive forms, intensity and policy compliance[J]. *Transportation*, 2021, 48(2): 1033-1060.
- [5] 王瑜琼, 贾顺平, 张思佳, 等. 位置识别率影响下基于博弈的共享单车停车奖惩策略研究[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2019, 19(1): 97-103.
(Wang Y Q, Jia S P, Zhang S J, et al. Reward and punishment strategy for bicycle-sharing parking based on the game theory under the influence of position recognition rate[J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2019, 19(1): 97-103.)
- [6] 张一进, 张金松. 政府监管与共享单车平台之间的演化博弈[J]. *统计与决策*, 2017(23): 64-66.
(Zhang Y J, Zhang J S. Evolutionary game between government supervision and bike-sharing platform[J]. *Statistics & Decision*, 2017(23): 64-66.)
- [7] 肖倩, 林孔团. 共享单车规范发展的演化博弈分析——基于利益相关者视角[J]. *西南交通大学学报: 社会科学版*, 2018, 19(3): 31-40.
(Xiao Q, Lin K T. Evolutionary game analysis on the main stakeholders in the development of public-sharing bikes specification—Based on stakeholder perspective[J]. *Journal of Southwest Jiaotong University: Social Sciences*, 2018, 19(3): 31-40.)
- [8] 江南. 共享单车行业的竞争、乱象与政府规制[D]. 南昌: 江西财经大学, 2019.
(Jiang N. Competition, disorder and government regulation in bicycle-sharing industry[D]. Nanchang: Jiangxi University of Finance and Economics, 2019.)
- [9] McKelvey R D, Palfrey T R. Quantal response equilibria for normal form games[J]. *Games and Economic Behavior*, 1995, 10(1): 6-38.
- [10] McKelvey R D, Palfrey T R. Quantal response equilibria for extensive form games[J]. *Experimental Economics*, 1998, 1(1): 9-41.
- [11] Goeree J K, Holt C A, Smith A M. An experimental examination of the volunteer's dilemma[J]. *Games and Economic Behavior*, 2017, 102: 303-315.
- [12] Kawagoe T, Matsubae T, Takizawa H. Quantal response equilibria in a generalized volunteer's dilemma and step-level public goods games with binary decision[J]. *SSRN Electronic Journal*, 2018, 15: 11-23.
- [13] 郑君君, 王璐, 王向民, 等. 考虑消费者环境意识及企业有限理性的生产决策研究[J]. *系统工程理论与实践*, 2018, 38(10): 2587-2599.
(Zheng J J, Wang L, Wang X M, et al. Research on production decision-making considering consumers' environmental awareness and enterprise's bounded rationality[J]. *Systems Engineering—Theory & Practice*, 2018, 38(10): 2587-2599.)
- [14] 宋艳, 孙典, 苏子逢. 台风疏散时间选择决策建模与仿真[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2018, 39(4): 793-798.
(Song Y, Sun D, Su Z F. Modeling and simulating evacuation timing decisions during typhoon disasters[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2018, 39(4): 793-798.)
- [15] Zhao C P, Li R, Gong Y, et al. Study on the asymmetric QRE network game simulation of the South China Sea route trade cooperation[J]. *Marine Policy*, 2020, 111: 103724.

作者简介

张书婧(1998—), 女, 博士生, 从事交通运输规划与管理的研究, E-mail: 20114053@bjtu.edu.cn;

贾顺平(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 从事系统工程、交通运输规划与管理等研究, E-mail: shpjia@bjtu.edu.cn;

彭芑(1998—), 女, 硕士生, 从事交通运输规划与管理的研究, E-mail: 20120879@bjtu.edu.cn;

毛保华(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 从事综合交通政策、运输组织与管理等研究, E-mail: bhmao@bjtu.edu.cn.