doi：10.3969/j.issn.1002－0268.2021.05.019

基于博弈决策的道路通行费最优定价模型研究

陈文强[1]，顾玉磊[2]，汪勇杰[1]，陈 波[1]
（1. 长安大学 运输工程学院，陕西 西安 710064；
2. 长安大学 汽车学院，陕西 西安 710064）

摘要：道路通行费定价是一个典型双层博弈问题，上层是主管部门与交通参与者决策互动，收费主体通过改变通行费率，影响出行者出行选择，达到预设目标；下层是出行者之间决策互动，出行者基于出行费率的变化，考虑出行成本和其他出行者决策，选择出行效用最大化方案。基于管理者不同决策目标，将道路管理者和交通出行者看成是非合作静态博弈的双方，考虑不同出行者群体时间价值和出行效用差异性，建立双层规划模型，上层研究道路决策主体的决策问题，下层研究不同时间价值的出行者出行博弈过程和出行行为选择，利用博弈论方法来诠释不同决策目标下的道路最优定价，为城市道路通行费合理制定提供决策参考。基于模型约束条件，先对下层N个局中人的纳什－Wardrop均衡模型求解，再利用图解法进行上层$N+1$局中人非合作静态Stackelberg博弈模型求解，并构建出行情景验证模型的精确性。结果显示，基于博弈决策的道路通行费最优定价模型，可以有效测算不同通行费率下、不同时间价值参与者博弈过程、决策收益和不同决策目标下的最优通行费率。在构建的出行情景下，道路通行费为4时，出行者出行收益和通行费收入最大；当通行费介于4－5之间，社会剩余最大。出行情景模拟结果验证了模型的精确性和可操作性。

关键词：运输经济；最优定价；博弈论；公路通行费；效用理论
中图分类号：F570.71 **文献标识码**：A **文章编号**：1002－0268（2021）05－0152－07

Study on Optimal Pricing Model of Road Toll Based on Game Decision-making

CHEN Wen-qiang[1], GU Yu-lei[2], WANG Yong-jie[1], CHEN Bo[1]
(1. School of Transportation Engineering, Chang'an University, Xi'an Shaanxi 710064, China;
2. School of Automobile, Chang'an University, Xi'an Shaanxi 710064, China)

Abstract: Road toll pricing is a typical two-level game problem. The upper level is the decision-making interaction between the competent authority and the traffic participants. The toll subject changes the toll rate to influence the travel choice and achieve the preset goal; the lower level is the decision-making interaction between travelers. Based on changes in travel rate, travelers consider travel costs and other traveler decisions, and choose travel utility maximization programs. Based on the different decision-making goals of managers, road manager and traffic traveler regarded as 2 parties in a non-cooperative static game, considering the differences in time value and travel utility of different traveler groups, a two-level planning model is established. The upper level studies the decision-making issues of subject of road decision-making, the lower level studies the travel game process and travel behavior choices of travelers with different time values, and interprets the optimal road pricing under different decision-making goals by using game theory method to provide decision-making reference for the reasonable formulation of urban road tolls. Based on the

收稿日期：2020－09－26
基金项目：教育部人文社科项目（18YJC630168，20YJC790007）；中央高校基本科研业务费专项资金项目（300102239105，300102230628）；陕西省教育厅哲学社会科学重点研究基地项目（19JZ014）；西安市社科基金（GL44）
作者简介：陈文强（1981－），男，安徽界首人，博士，副教授.（cwq@chd.edu.cn）

model constraints, first, the Nash-Wardrop equilibrium model of the lower N players is solved. Then, the non-cooperative static Stackelberg game model of the upper $N+1$ players is solved by using the graphical method, and a travel scenario is built to verify the accuracy of the model. The result shows that (1) the optimal pricing model of road tolls based on game decision-making can effectively measure the game process and decision-making benefits of participants with different toll rates and different time values as well as the optimal toll rates under different decision-making goals; (2) in the constructed travel scenario, the traveler's travel profit and toll income are the largest when the road toll is 4, while the social surplus is the largest when the toll is between 4 – 5. The travel scenario simulation result verified the accuracy and operability of the model.

Key words: urban traffic; optimal pricing; highway toll; game theory; unity theory

0　引言

随着中国经济的快速发展，交通拥堵问题已经扩散到各级城市，城市尺度的道路收费目标逐步由收费还贷转变为收费还贷与交通需求管理并重目标。交通需求管理目标之一，是通过拥堵定价增加沿线的出行成本来缓解路网拥堵，从而将交通流量从高峰时段转为非高峰时段，从拥挤路线改为拥挤程度较小的路线，或从私家车改为公共交通工具[1]。

拥挤定价理论的起源可以追溯到 Pigou[2] 和 Knight[3]，其以高速公路为例来解决外部性和最佳拥堵成本问题。此后，边际成本定价的概念，即净社会利益最大化而征收等于私人成本与道路社会成本之差的费用，已广泛应用于道路网络优化中[4-8]。拥堵定价涉及到管理者与交通出行者之间、交通出行者之间的相互反应，博弈论可以较好地处理主体间相互影响关系，利用博弈论研究拥堵收费的成果十分丰富。P. Ferrari [9]对道路网络收费和社会福利之间关系做了系统研究；N. Xiao[10] 基于道路参与者互动原理提出了拥堵收费设计框架；Zhu 和 Ukkusuri[11] 使用排队理论工具，将交通行为的动态和随机方面纳入边际拥堵成本的计算中，提出了一种基于距离的动态收费模型，并考虑了不确定的交通需求和供应状况，结果表明，收费通行的总行程时间比模拟运行减少了 25%；AE Ohazulike[12] 提出了拥堵收费的多主体博弈模型；Dusica Joksimovic[13] 基于博弈理论，提出了不同政策目标下的拥堵收费定价模型；Theodore Tsekeris[14] 提出了不同路网管理措施下的定价策略的综合评估框架，分析了道路交通拥堵的边际社会成本定价和收益最大化的道路通行费定价等情况；Wu 和 Huang[15] 提出了在竞争性公路/交通系统中，考虑道路拥堵和瓶颈队列中的车辆拥堵，通过分析三种道路使用定价策略下的均衡来研究通勤者的出行方式；Z. Liu[16] 提出了基于 logit 的随机用户均衡（SUE）约束的最优惠价格的通行费定价框架；Daganzo 和 Lehe[17] 引入出行时间异质性，提出了一种基于使用情况的时变通行费，既减轻了拥堵，又优先考虑了短途出行。李浩、虞明远等[18-19] 基于公共性差异化、车辆排放水平差异化视角研究了公路收费问题。

从目前检索到的成果看，除文献[17] 引入了出行时间异质性外，其他涉及利用博弈理论研究拥堵收费的成果基本上将不同出行者的时间价值和出行效用做了无差别处理。而实际上，不同层次出行者的出行时间价值和出行效用是不同的，对于拥堵收费费率的敏感程度也会有差异，进而影响模型精度。本研究基于文献［13］提出的拥堵收费定价模型，基于管理者不同决策目标，将道路管理者和交通出行者看成是非合作静态博弈的双方，考虑不同出行者群体时间价值和出行效用差异性，建立双层规划模型，利用博弈论方法来诠释不同决策目标下的道路最优定价，以期提高模型精度，为城市道路通行费合理制定提供决策参考。

1　问题描述与建模

交通网络中，管理者通过改变出行费率实现对出行者的引导，出行者基于出行效用选择出行路线，这是个典型的 $1+N$ 双层博弈问题。上层是管理者 1 与 N 个交通出行者参与的最优决策问题，下层是 N 个交通出行者的交通均衡问题。

为研究方便，设公路网中任意两点间有多条线路可以通行，其中至少有一条为收费线路。出行者决策原则是出行收益大于出行成本，其中出行成本包括时间成本和财务成本。令 c_{xi} 表示出行者 i 选择路线 x 的出行成本，则 c_{xi} 可以表示为：

$$c_{xi} = a_i\tau_x + \theta_x, \tag{1}$$

式中，τ_x 是选择 x 路线出行，完成全程所用的时间；θ_x 是选择 x 路线出行支付通行费；α_i 是出行者 i 单位出行时间价值。

令 u_{xi} 表示出行者 i 选择线路 x 的出行收益，其由出行效用 $\bar{u}$ 和选择线路 x 完成出行的出行成本 c_{xi} 负数）构成，表达式为：

$$u_{xi} = \bar{u} + c_{xi}。 \tag{2}$$

根据出行线路决策原则，$u_{xi} > 0$，出行者出行；$u_{xi} < 0$，出行者放弃出行。

1.1 交通均衡模型

令 S_i 表示出行者 i 可以选择的策略集，$s_i(\theta)$ 表示出行者 i 根据管理者决策（设通行费率为 θ 采取的策略集，其中 $s_i(\theta) \in S_i$，s_{-i} 表示在此决策的基础上其他出行者 i 决策集，其中 $s_{-i} = (s_i, \cdots, s_{i-1})$。假设出行者是考虑到其他出行者合理选择的基础上单独进行决策来寻求收益最大，此时令 $J_i(s_{-i}(\theta), s_i(\theta), \theta)$ 表示在给定的决策策略 θ 下，出行者 i 的收益。出行者收益包括出行效用和出行成本。出行者 i 收益表达式为：

$$J_i(s_{-i}(\theta), s_i(\theta), \theta) = u_{xi} - c_{xi}。 \tag{3}$$

此时，如果其他出行者采取对策 s_{-i}^*，出行者 i 将采取对策 $s_i^*(\theta)$ 来最大化其出行收益，表达式为：

$$s_i^*(\theta) = \arg\max_{s_i \in S_i} J_i(s_{-i}(\theta), s_i(\theta), \theta)。 \tag{4}$$

如果式（4）涵盖所有的出行者，则 $s_i^*(\theta) \equiv (s_{-i}^*(\theta), s^*(\theta))$ 可以看成一个通行费率为 θ 的 Nash-Wardrop 均衡模型。

1.2 管理者决策模型

管理者决策模型是由 1 个管理者和 N 个交通出行者作为局中人的非合作博弈模型。令 ϕ 代表管理者可能采取的定价策略集，设管理者采用通行费率为 θ 的策略（$\theta \in \phi$），出行者策略为 $s_i^*(\theta)$，管理者的收益为 $R(s_i^*(\theta), \theta)$。如果管理者希望通过 θ^* 策略达到目标最优，表达式为：

$$\theta^* = \arg\max_{\theta \in \phi} R(s_i^*(\theta), \theta)。 \tag{5}$$

假定式（4）、（5）适合所有局中人，则式（4）中 $\theta = \theta^*$。另外假定定价博弈模型是一个完全信息博弈模型，即每一位局中人对其他局中人信息、策略空间和收益函数有准确把握。则最优定价公式可以表示为：

$$\theta^* = \arg\max_{\theta \in \varphi} R(s_i^*(\theta), \theta)$$
$$\text{s.t. } s_i^*(\theta) = \arg\max_{s_i \in S_i} J_i(s_{-i}(\theta), s_i(\theta), \theta)。 \tag{6}$$

此模型是一个典型的非合作静态 Stackelberg 博弈模型。

1.3 不同目标下的定价模型

目标不同，最优定价策略也会有所不同：

（1）总出行收益最大。交通管理者通过改变通行费率来平衡不同线路上的交通流量，以减少总的交通出行成本和因拥挤而产生的延迟，提高每条线路的利用率，使路网上交通总出行收益最大，其目标函数为：

$$\max R(s_i^*(\theta), \theta) = \sum_{i=1}^{N} J_i(s^*(\theta))。 \tag{7}$$

（2）通行费最大。交通管理者通过通行费率变化改变收费路网上交通量，使两者乘积最大。目标函数为：

$$\max R(s_i^*(\theta), \theta) = \sum_p q_p(s^*(\theta))\theta_p, \tag{8}$$

式中，$q_p(s^*)$，θ_p 分别表示利用线路 p 的出行者数量和通行费率。

（3）社会剩余最大。社会剩余最大即社会的总福利最大，是指生产者剩余和消费者剩余之和最大，本研究等同于通行费收与所有出行收益之和最大，目标函数表达式为：

$$\max R(s_i^*(\theta), \theta) = \sum_{i=1}^{N} J_i(s^*(\theta)) + \sum_p q_p(s^*(\theta))\theta_p。 \tag{9}$$

1.4 模型求解

双层规划模型，它是一种具有二层递阶结构的系统优化问题，上层决策者和下层决策者都有各自的目标函数和约束条件，上层先给定一个决策变量，下层各子系统以这个决策变量为参量，根据目标函数和约束条件，在可能的范围内求得一个最优值，并反馈给上层，上层再在下层的最佳反应的基础上，在可能的范围内求得整体上的最优解。基于本研究目标函数、约束条件特性和最优解特点（整数规划），论文采用分枝定界法进行模型求解[20]。求解步骤，先进行下层 N 个局中人的纳什 - Wardrop 均衡模型求解。纳什 - Wardrop 均衡可由 Beckmann 平衡分配模型及其 F - W 求解算法获得[21]；在此基础上利用图解法进行上层 $N+1$ 人的非合作静态 Stackelberg 博弈模型求解，最后对不同目标下的最优定价策略进行研究。

2 实证计算与结果分析

假设交通出行者驾驶车辆从城市 B 点至 C 点上班，有 p 条线路可选，其中一条为收费线路，其余

是免费线路。交通出行者 i 有三个出行方案可选择：收费线路、非收费线路和不出行。出行者 i 出行决策收益函数 $J_i(s_{-i}(\theta),\ s_i(\theta),\ \theta)$ 与选择策略 $s_i(\theta)$、完成出行所获得的效用 $\overline{u}$、所耗费的时间 τ_p、单位时间价值 a 及通行费 θ_p 有关。本例中出行者决策收益函数表达式为：

$$J_i(s_{-i}(\theta),\ s_i(\theta),\ \theta) = \overline{u} - a\tau_p(s_{-i}(\theta),\ s_i(\theta)) - \theta_p。\tag{10}$$

通常情况下，不同出行者单位时间价值与出行效用是有差异的，出行目的、单位时间价值、出行效用各异。为方便研究，本节将出行者分为两组，“高单位时间价值组”和“低单位时间价值组”，假定两组出行者数量相同。经测算，高时间价值组出行者平均单位时间价值 a = 35 元/h（按照月收入 8 400元，每天工作 8 h 计算），低时间价值组出行者平均单位时间价值 a = 20 元/h（按照月收入 4 800 元，每天工作 8 h 计算），高、低时间价值出行者在规定时间前到达 C 点，出行效用分别为 $\overline{u}$ = 35 元/h × 8 h = 280 元、20 元/h × 8 h = 160 元，迟到效用都为 0，$\overline{u}$ = 0。

根据交通工程理论，建成环境条件一定的情况下，车辆行驶速度（时间）与道路通行能力、交通流量有关。经调查，B 点出行者在早高峰驾车到达 C 点一般预留 36 min 在途时间。经实地测定，任意一组在早高峰从 B 点至 C 点选择收费线路，收费线路和免费线路处于自由流阶段，经收费线路全程行驶时间为 24 min（2/5 h），经免费线路全程行驶时间为 36 min（3/5 h）；两组都选择收费线路，全程行驶时间为 36 min（3/5 h）；两组都选择免费线路时，全程行驶时间为 48 min（4/5 h）。数学描述为：

$$\tau_t(s_{-i}(\theta),\ s_i(\theta)) = \begin{cases} 2/5\ \text{h}, \text{任意一组选择收费线路} \\ 3/5\ \text{h}, \text{两组都选择收费线路} \end{cases}。\tag{11}$$

$$\tau_{\text{f}}(s_{-i}(\theta),\ s_i(\theta)) = \begin{cases} 3/5\ \text{h}, \text{任意一组选择非收费线路} \\ 4/5\ \text{h}, \text{两组都选择非收费线路} \end{cases}。\tag{12}$$

利用函数式（10）、（11）、（12），结合上述测算值，通行费率为 θ 出行者收益如表 1 所示。

基于决策收益，研究“最大出行收益”、“最大通行费”和“最大社会剩余”目标下的路网最优定价问题。

2.1　最大出行收益目标下的最优定价

出行者总出行收益最大数学表达式为式（7），设管理者选择 $\theta \in \varphi$ 决策，决策收益如表 2 所示。

表 1　通行费率为 θ 时的出行者收益

Tab. 1　Traveler's profit at toll rate θ

出行组别		选择线路		
		低单位时间价值组		
		收费道路	免费道路	不出行
高单位时间价值组	收费道路	$(259-\theta,\ 148-\theta)$	$(264-\theta,\ 148)$	$(264-\theta,\ 0)$
	免费道路	$(259,\ 152-\theta)$	$(259,\ 148)$	$(259,\ 0)$
	不出行	$(0,\ 152-\theta)$	$(0,\ 148)$	$(0,\ 0)$

表 2　总出行收益最大的决策收益

Tab. 2　Decision-making profit with largest total travel profit

出行组别		选择线路		
		低单位时间价值组		
		收费道路	免费道路	不出行
高单位时间价值组	收费道路	$407-2\theta$	$412-\theta$	$264-\theta$
	免费道路	$411-\theta$	407	259
	不出行	$152-\theta$	148	0

由表 1 可知，当 $0 \leqslant \theta < 5$，根据收益最大原则，高单位时间价值组首选收费道路，因为选择收费道路收益（$264-\theta$）大于选择免费线路收益 259 或不出行收益 0；当 $0 \leqslant \theta < 4$ 时，低单位时间价值出行者会选择收费道路出行，因为选择收费道路出行收益（$152-\theta$）大于免费道路的收益 148 和不出行收益 0。因此，当 $0 \leqslant \theta < 4$ 时，双方都会选择收费道路出行，即 $s^* = \{s_{\text{低单位价值组}}\ (\theta \neq 0),\ s_{\text{高单位价值组}}\ (\theta \neq 0)\}$ 此时实际收益为（$407-2\theta$）。博弈结果见表 3。

表 3　通行费率 $0 \leqslant \theta < 4$ 时的出行者博弈

Tab. 3　Travelers' game process when toll rate is between $0 \leqslant \theta < 4$

出行组别		选择线路		
		低单位时间价值组		
		收费道路	免费道路	不出行
高单位时间价值组	收费道路	$(259-\theta,\ 148-\theta)$	$(264-\theta,\ 148)$	$(264-\theta,\ 0)$
	免费道路	$(259,\ 152-\theta)$	$(259,\ 148)$	$(259,\ 0)$
	不出行	$(0,\ 152-\theta)$	$(0,\ 148)$	$(0,\ 0)$

当 $4 \leqslant \theta \leqslant 5$，高单位时间价值组首选收费道路，因为选择收费道路的收益（$264-\theta$）大于等于选择免费道路收益 259 或不出行收益 0；此时低单位时间价值组会选择免费道路出行，原因是选择免费道路收益 148 大于收费道路的收益（$152-\theta$）或不出行 0。因此，当 $4 \leqslant \theta \leqslant 5$ 时，两者博弈决策策略为 $s^* = \{s_{\text{低单位价值组}}\ (\theta = 0),\ s_{\text{高单位价值组}}\ (\theta \neq 0)\}$，实际收益为 $412-\theta$。博弈结果见表 4。

当 $\theta > 5$，高单位时间价值组会选择免费道路出行，因为选择免费道路收益 259 大于收费道路收益

$264-\theta$ 和不出行收益 0；低单位时间价值组会也会选择非收费道路出行，选择非收费道路收益 148 大于收费道路的收益 $152-\theta$ 或不出行收益 0，两者博弈决策 $s^*=\{s_{低单位价值组}(\theta=0), s_{高单位价值组}(\theta=0)\}$，实际收益为 407。博弈结果见表 5。

表 4 通行费率 $4\leqslant\theta\leqslant5$ 时的出行者博弈

Tab. 4 Travelers' game process when toll rate is between $4\leqslant\theta\leqslant5$

出行组别		选择线路		
		低单位时间价值组		
		收费道路	免费道路	不出行
高单位时间价值组	收费道路	$(259-\theta, 148-\theta)$	$(264-\theta, 148)$	$(264-\theta, 0)$
	免费道路	$(259, 152-\theta)$	$(259, 148)$	$(259, 0)$
	不出行	$(0, 152-\theta)$	$(0, 148)$	$(0, 0)$

表 5 通行费率 $\theta>5$ 时的出行者博弈

Tab. 5 Travelers' game process when toll rate $\theta>5$

出行组别		选择线路		
		低单位时间价值组		
		收费道路	免费道路	不出行
高单位时间价值组	收费道路	$(259-\theta, 148-\theta)$	$(264-\theta, 148)$	$(264-\theta, 0)$
	免费道路	$(259, 152-\theta)$	$(259, 148)$	$(259, 0)$
	不出行	$(0, 152-\theta)$	$(0, 148)$	$(0, 0)$

综上，不同通行费率 θ 下的出行者博弈决策结果和决策收益如式（13）、（14）所示：

$$s^*(\theta)=\begin{Bmatrix}s_{低单位价值组}(\theta\neq0), s_{高单位价值组}(\theta\neq0), 0\leqslant\theta<4\\ s_{低单位价值组}(\theta=0), s_{高单位价值组}(\theta\neq0), 4\leqslant\theta\leqslant5\\ s_{低单位价值组}(\theta=0), s_{高单位价值组}(\theta=0), \theta>5\end{Bmatrix}, \tag{13}$$

$$\max R(s^*(\theta), \theta)=\sum_{i=1}^{N}J_i(s^*(\theta))=\begin{cases}407-2\theta, 0\leqslant\theta<4\\ 412-\theta, 4\leqslant\theta\leqslant5\\ 407, \theta>5\end{cases}。 \tag{14}$$

利用图解法将总出行收益最大为目标的管理者决策收益绘制成图（如图 1 所示）。通过图 1 可以看出，公路通行费率 $\theta=4$ 时，出行者总出行收益最大 $R=408$。

2.2 最大通行费目标下的最优定价

通行费最大数学描述如函数式（8），管理者选择 $\theta\in\phi$ 决策，决策收益如式（15）所示：

$$\max R(s^*(\theta), \theta)=\sum_p q_p(s^*(\theta))\theta_p=\begin{cases}2\theta, 0\leqslant\theta<4\\ \theta, 4\leqslant\theta\leqslant5\\ 0, \theta>5\end{cases}。 \tag{15}$$

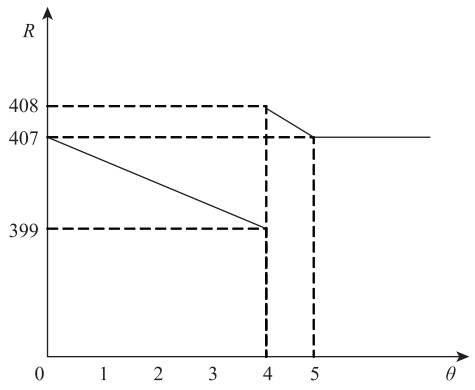

图 1 基于最大总出行收益的决策收益示意图

Fig. 1 Schematic diagram of decision-making profit based on largest total travel profit

利用图解法将最大通行费下的管理者决策收益绘制成图（图 2）。

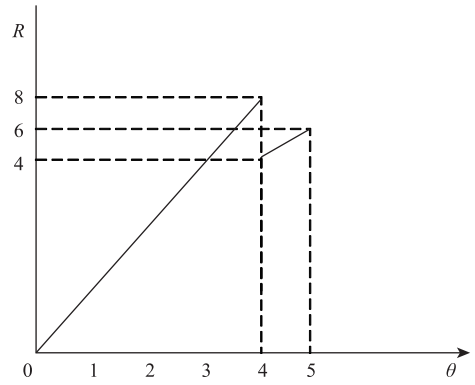

图 2 基于最大通行费收益的决策收益示意图

Fig. 2 Schematic diagram of decision-making profit based on largest toll

从图 2 可以看出，当 $0\leqslant\theta<4$，两组出行者同时选择收费公路，此区间通行费最大值趋于 8；$4\leqslant\theta\leqslant5$ 时，高单位时间组会选择收费公路，低单位时间价值组会选择免费道路，此区间通行费最大值为 5。当 $\theta>5$，此区间通行费为 0，由上述分析可知，通行费最大化目标下的公路最优定价 θ 趋于 4，此时的管理者决策收益接近 8。

2.3 最大社会剩余目标下的最优定价

管理者剩余最大数学描述如函数式（9），管理者选择 $\theta\in\phi$ 决策，决策收益如式（16）所示：

$$\max R(s_i^*(\theta), \theta)=\sum_{i=1}^{N}J_i(s^*(\theta))+\sum_p q_p(s^*(\theta))\theta_p=\begin{cases}407, 0\leqslant\theta<4\\ 412, 4\leqslant\theta\leqslant5\\ 407, \theta>5\end{cases}。 \tag{16}$$

利用图解法将最大社会剩余最大的管理者决策收益绘制成图（图 3）。

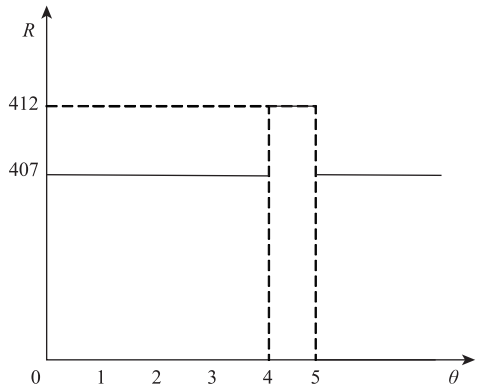

图 3　基于最大社会剩余的决策收益示意图

Fig. 3　Schematic diagram of decision-making profit based on largest social surplus

从图 3 可以看出，当 $0 \leqslant \theta < 4$，最大社会剩余为 407；$4 \leqslant \theta \leqslant 5$ 时，最大社会剩余为 412；当 $\theta > 5$，最大社会剩余为 407。可以看出，社会剩余最大化目标下最优定价为 $4 \leqslant \theta \leqslant 5$，此时决策收益为 412。

3　结论与讨论

本研究基于博弈论方法对不同决策目标下的道路通行费定价问题进行了研究，结果显示，基于博弈决策的道路通行费定价模型，可以表达和测算不同通行费率下道路参与者博弈过程和决策收益、不同决策目标下的最优通行费率。文中构建的出行情景中，通行费为 $\theta = 4$ 时，出行者出行收益最大；通行费趋于 4 时，通行费最大；当通行费 $4 \leqslant \theta \leqslant 5$ 时，社会剩余最大。可以看出，本研究中构建的出行情景中通行费率为 4 时，出行者收益、通行费和社会剩余同时达到最大化，较好的满足决策目标。

为了验证模型的精度，本研究构建了出行情景，在出行情景下重点研究了上层交通参与者决策过程，对下层交通均衡问题研究做了简单处理，将交通参与者分为高价值组和低价值组，对每组的数量、道路通行能力等进行了假设，在此基础上给出交通均衡结果，这样处理的结果可能与现实中交通均衡问题有差异，但不影响论文研究目标的达成，这部分内容将在后续研究中补充完善。

参考文献：

References：

[1] ZHANG X. Editorial: Optimization Methods of Road Pricing [J]. European Journal of Transport and Infrastructure Research, 2014, 14 (1): 1 - 6.

[2] PIGOU A C. The Economics of Welfare [M]. London: Macmillan Co., Ltd., 1920.

[3] KNIGHT F H. Some Fallacies in the Interpretation of Social Cost [J]. The Quarterly Journal of Economics, 1924, 38 (4): 582 - 606.

[4] YANG H, HUANG H J. Principle of Marginal-cost Pricing: How Does it Work in a General Road Network? [J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 1998, 32 (1): 45 - 54.

[5] NASH C. Marginal Cost and Other Pricing Principles for User Charging in Transport: A Comment [J]. Transport Policy, 2003, 10 (4): 345 - 348.

[6] SWÄRDH J E, GENELL A. Marginal Costs of Road Noise: Estimation, Differentiation and Policy Implications [J]. Transport Policy, 2020, 88 (C): 24 - 32.

[7] GAVANAS N, TSAKALIDIS A, PITSIAVA-LATINOPOULOU M. Assessment of the Marginal Social Cost due to Congestion Using the Speed Flow Function [J]. Transportation Research Procedia, 2017, 24: 250 - 258.

[8] VIERTH I, MERKEL A. Internalization of External and Infrastructure Costs Related to Maritime Transport in Sweden [M] //Research in Transportation Business & Management. [S. l.]: Elsevier, 2020.

[9] FERRARI P. Road Network Toll Pricing and Social Welfare [J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2002, 36 (5): 471 - 483.

[10] XIAO N, WANG X, XIE L, et al. Road Pricing Design Based on Game Theory and Multi-agent Consensus [J]. Journal of Automatica Sinica, 2014, 1 (1): 31 - 39.

[11] ZHU F, UKKUSURI S V. A Reinforcement Learning Approach for Distance-based Dynamic Tolling in the Stochastic Network Environment [J]. Journal of Advanced Transportation, 2015, 49 (2): 247 - 266.

[12] OHAZULIKE A E, STILL G, KERN W, et al. Multiple Stakeholders in Road Pricing: A Game Theoretic Approach [M]. Springer International Publishing: Berlin, 159 - 189, 2015.

[13] JOKSIMOVIC D, BLIEMER M CJ, BOVY P H L et al. Different Policy Objectives in Road Pricing: A Game Theory Approach [C] // Bijdrage aan het Colloquium Vervoersplanologisch Speurwerk. Antwerpen: [s. n.], 2005.

[14] TSEKERIS T, VOβ S. Design and Evaluation of Road Pricing: State-of-the-art and Methodological Advances [J]. NETNOMICS: Economic Research and Electronic Networking, 2009, 10 (1): 5 - 52.

[15] WU W X, HUANG H J. Equilibrium and Modal Split in a Competitive Highway/Transit System under Different Road-

use Pricing Strategies [J]. Journal of Transport Economics and Policy, 2014, 48 (1): 153 – 169.

[16] LIU Z, WANG S, MENG Q. Toll Pricing Framework under Logit-based Stochastic User Equilibrium Constraints [J]. Journal of Advanced Transportation, 2013, 48 (8): 1121 – 1137.

[17] DAGANZO C F, LEHE L J. Distance-dependent Congestion Pricing for Downtown Zones [J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2015, 75: 89 – 99.

[18] 李昊, 虞明远, 余艳春, 等. 基于车辆排放水平的差异化公路通行费率的分析 [J]. 公路交通科技, 2018, 35 (6): 137 – 144.
LI Hao, YU Ming-yuan, YU Yan-chun, et al. Analysis on Differentiated Highway Toll Rate Based on Vehicle Emission Level [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2018, 35 (6): 137 – 144.

[19] 徐瑛, 虞明远. 基于差异化公共性的公路收费问题解析 [J]. 公路交通科技, 2012, 29 (4): 149 – 152, 158.
XU Ying, YU Ming-yuan. Analysis of Road Tolling Based on Differential Publicity [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2012, 29 (4): 149 – 152, 158.

[20] 赵志刚, 顾新一, 李陶深. 求解双层规划模型的粒子群优化算法 [J]. 系统工程理论与实践, 2007 (8): 92 – 98.
ZHAO Zhi-gang, GU Xin-yi, LI Tao-shen. Particle Swarm Optimization for Bi-level Programming Problem [J]. Systems Engineering Theory & Practice, 2007 (8): 92 – 98.

[21] 魏贤鹏, 战秋艳, 朝鲁. 基于 Groebner 基的 Beckmann 交通平衡分配模型新解法 [J]. 动力系统与控制, 2016, 5 (3): 96 – 104.
WEI Xian-peng, ZHAN Qiu-yan, CHAO Lu. A New Method Based on Groebner Bases for Solving the Beckmann Traffic Equilibrium Assignment Model [J]. Dynamical Systems and Control, 2016, 5 (3): 96 – 104.

(上接第 143 页)

[13] 白银. 流通业技术创新与积累对产业发展的影响: 机理与实证 [J]. 商业经济研究, 2020 (4): 17 – 20.
BAI Yin. Technology Accumulation and Industry Development in Circulation Industry: Mechanism and Demonstration [J]. Journal of Commercial Economics, 2020 (4): 17 – 20.

[14] 李攀科. 技术创新赋能我国物流业高质量发展探讨 [J]. 商业经济研究, 2020 (12): 97 – 100.
LI Pan-ke. Discussion on Technological Innovation Empowering High-quality Development of Chinese Logistics Industry [J]. Journal of Commercial Economics, 2020 (12): 97 – 100.

[15] 吴开亚, 何彩虹, 王桂新, 等. 上海市交通能源消费碳排放的测算与分解分析 [J]. 经济地理, 2012, 32 (11): 45 – 51.
WU Kai-ya, HE Cai-hong, WANG Gui-xin, et al. Measurement and Decomposition Analysis on Carbon Emissions of Transportation Industry in Shanghai [J]. Economic Geography, 2012, 32 (11): 45 – 51.

[16] 吴俊红. 新常态下区域物流发展差异与协调对策研究 [J]. 商业经济, 2017 (5): 56 – 59.
WU Jun-hong. Differences and Coordinated Countermeasure of Regional Logistics Development under the New Normal [J]. Business & Economy, 2017 (5): 56 – 59.

[17] 吴开亚, 金菊良. 区域生态安全评价的熵组合权重属性识别模型 [J]. 地理科学, 2008, 28 (6): 754 – 758.
WU Kai-ya, JIN Ju-liang. Attribute Recognition Method of Regional Ecological Security Evaluation Based on Combined Weight on Principle of Relative Entropy [J]. Scientia Geographica Sinica, 2008, 28 (6): 754 – 758.

[18] 任颖颖. 我国上市交通物流企业研发绩效研究 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2018.
REN Ying-ying. R&D Performance of Listed Transportation and Logistics Enterprises in China [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2018.

[19] 马天山. 我国物流业发展战略研究 [D]. 西安: 长安大学, 2005.
MA Tian-shan. Research on Development Strategy of Logistics Industry of China [D]. Xi'an: Chang'an University, 2005.

[20] 简新华, 聂长飞. 中国高质量发展的测度: 1978—2018 [J]. 经济学家, 2020 (6): 49 – 58.
JIAN Xin-hua, NIE Chang-fei. Measurement of China's High-quality Development: 1978—2018 [J]. Economist, 2020 (6): 49 – 58.