

## 考虑骑行者异质性的进站公交与自行车冲突博弈分析

季千喜, 贾顺平, 陈越, 代斯薇, 杨琪

引用本文:

季千喜, 贾顺平, 陈越, 等. 考虑骑行者异质性的进站公交与自行车冲突博弈分析[J]. *控制与决策*, 2025, 40(6): 1922-1930.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2024.0839>

---

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### [基于参数自适应蚁群算法的高速列车行车调度优化](#)

Optimization of high-speed train operation scheduling based on parameter adaptive improved ant colony algorithm  
*控制与决策*. 2021, 36(7): 1581-1591 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0992>

#### [车辆跟随控制策略的状态可达集建模及验证方法](#)

A modeling and verification method of state reachable set for vehicle following control strategy  
*控制与决策*. 2021, 36(7): 1679-1685 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1562>

#### [基于混合整数规划的智能网联车冲突区时序优化模型](#)

Mixed integer programming model of scheduling for connected automated vehicles in a conflict zone  
*控制与决策*. 2021, 36(3): 705-710 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0886>

#### [基于卷积长短时记忆神经网络的城市轨道交通短时客流预测](#)

Metro short-term traffic flow prediction with ConvLSTM  
*控制与决策*. 2021, 36(11): 2760-2770 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0501>

#### [考虑供应商技术截断的“主-供”合作机制演化博弈分析](#)

Evolutionary game analysis of “main manufacturer-supplier” collaboration mechanism considering supplier’s technology truncation  
*控制与决策*. 2021, 36(10): 2547-2552 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1678>

# 考虑骑行者异质性的进站公交与自行车冲突博弈分析

季千喜<sup>1</sup>, 贾顺平<sup>1†</sup>, 陈越<sup>1,2</sup>, 代斯薇<sup>1</sup>, 杨琪<sup>1</sup>

(1. 北京交通大学 交通运输学院, 北京 100044; 2. 利兹大学 交通研究所, 利兹 LS29JT)

**摘要:** 为了研究骑行者异质性影响下进站公交与自行车通行概率的演化机制, 将自行车骑行者分为冒险型和保守型, 以公交车驾驶员和自行车骑行者各自通过冲突区域的损失最小为目标, 构建进站公交与自行车的冲突演化博弈模型, 引入前景理论和从众效应对模型进行优化, 求解并分析系统的演化结果, 利用数值仿真对模型的关键参数进行灵敏度分析. 研究表明: 交通管理部门应该制定优先规则引导系统收敛于不对称整数解; 基于前景理论考虑骑行者异质性和从众效应的演化博弈模型更加符合实际的交通场景; 从众效应和冒险型骑行者占比对自行车骑行者通过概率的影响是显著的, 公交优先通行权的设置能有效规避其对公交车驾驶员决策的影响; 各类型骑行者对自行车骑行者通过概率的主导地位并非体现在人数占比上. 此研究成果可以为制定公交站冲突区域的交通礼让规则提供理论基础与实践支持.

**关键词:** 交通工程; 交通冲突; 演化博弈; 进站公交; 骑行者异质性; 从众效应

中图分类号: U491.3 文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2024.0839

引用格式: 季千喜, 贾顺平, 陈越, 等. 考虑骑行者异质性的进站公交与自行车冲突博弈分析 [J]. 控制与决策, 2025, 40(6): 1922-1930.

## Game analysis of conflicts between inbound buses and bicycles at stops considering cyclist heterogeneity

Ji Qian-xi<sup>1</sup>, Jia Shun-ping<sup>1†</sup>, Chen Yue<sup>1,2</sup>, Dai Si-wei<sup>1</sup>, Yang Qi<sup>1</sup>

(1. School of Traffic and Transportation, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. Institute for Transport Studies, University of Leeds, Leeds LS29JT, England)

**Abstract:** In order to study the evolution mechanism of the probability of inbound bus and bicycle passage under the influence of rider heterogeneity, this paper classifies bicycle riders into adventurous and conservative types, constructs a conflict evolution game model of inbound bus and bicycle with the objective of minimizing the loss of each of the bus driver and the bicycle rider through the conflict area, introduces prospect theory and conformity effect to optimize the model, and solves and analyzes the system's evolutionary results, and finally the key parameters of the model are analyzed for sensitivity using numerical simulation. The results of the study show that the traffic management department should formulate priority rules to guide the system to converge to an asymmetric integer solution; the evolutionary game model based on prospect theory considering the heterogeneity of cyclists and conformity effect is more in line with the actual traffic scenarios; the effects of conformity effect and the percentage of adventurous cyclists on the probability of bicyclists' passing are significant, and the setting of the bus priority right of way can effectively circumvent its influence on the decision-making of the bus driver effects; the dominance of each type of rider on the probability of bicyclist passing is not reflected in the percentage of people. This research result can provide theoretical basis and practical support for the development of traffic courtesy rules in the conflict area of bus stops.

**Keywords:** traffic engineering; traffic conflict; evolutionary game theory; inbound buses; cyclist heterogeneity; conformity effect

## 0 引言

在提倡绿色出行的大背景下, 自行车成为城市居民在短距离出行中不可或缺的选择. 部分城市虽

然将城市道路中非机动车道标志为自行车道以鼓励自行车出行, 但是对于横断面形式为单幅路或双幅路的的城市道路来说, 自行车道与机动车道仅用标线

收稿日期: 2024-07-15; 录用日期: 2025-01-18.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (71621001); 中央高校基本科研业务费专项资金项目 (2023YJS134).

责任编委: 龙建成.

†通信作者. E-mail: shpjia@bjtu.edu.cn.

进行分离,容易产生机非混行的情况,尤其在公交车站台附近较为突出.公交车在变道驶入公交站时需要占用自行车道,造成该路段的机非混行,既影响了该路段的通行能力,又增加了该路段的安全隐患.由于存在城市道路空间受限的情况,部分公交站只能设置为直线式.且有研究表明,在建成区域,直线式公交站可能比港湾式公交站有更高的事故率<sup>[1]</sup>.即使是港湾式公交站,如果没有对自行车道进行后绕式物理分离,公交车进站时仍会存在具有安全隐患的交织区.因此,研究直线式公交站附近的进站公交与自行车的冲突演化机制对于交通安全管理具有十分重要的意义.

部分学者对城市交通中的主体间的冲突开展研究. Wang 等<sup>[2]</sup>认为公交车可能成为限制公交站附近交通流量的瓶颈,并提出一种定量的方法来评估公交车在公交站附近对非机动车交通运行状态的影响. Zhang 等<sup>[3]</sup>研究了浮动式与路边式两种类型公交站点对乘客与自行车的交互行为的安全影响,研究发现道路宽度、乘客和骑行者的交通规范遵守度、乘客与自行车的密度和交叉方向的相互作用会增加公交站内的安全风险. Yu 等<sup>[4]</sup>认为缓解公交站点的冲突行为对当前和未来城市公共交通系统的效率管理和可持续运行至关重要,并提出了一种轨迹协同优化策略,对公交车与小汽车的交织冲突进行有效管理.既有研究虽然证明公交站台区域内存在较大的安全隐患,并且提出了一些解决方法,但是对于冲突区域内交互行为的研究主要围绕行人与自行车、公交车与小汽车开展,较少有研究直接分析公交车与自行车之间的冲突交互.

学者通常使用博弈论来研究主体之间的交互行为.部分学者将博弈论应用到共享单车的运营管理中:谭春桥等<sup>[5]</sup>使用 Bertrand 博弈模型研究了差异定价和协同定价下共享单车企业关于租赁定价和单车投放数量的最佳策略.张书婧等<sup>[6]</sup>构建了量子反应均衡模型来分析政府和共享单车企业的停车管理博弈机理.部分学者将博弈论应用到车辆换道模型中:Yu 等<sup>[7]</sup>提出了一个基于博弈论的变道模型,该模型通过与周围驾驶员的互动来估计其他车辆的攻击性,预测其反应,从而达到模拟人类驾驶员行为的效果;Jing 等<sup>[8]</sup>将不完全信息框架下的主从博弈应用于人工驾驶车辆和智能网联自动驾驶汽车的交互中,以解决人工驾驶风格的不确定性,帮助自动驾驶车辆准确预测人类行为.部分学者将博弈论应用到交通主体交互行为机理的分析中:魏丽英等<sup>[9]</sup>在分析行人与机动车冲突情景的基础上,提出了基础收益、

冲突损失、等待损失以及互让损失 4 种概念,建立行人与机动车冲突演化的动力学模型,用来分析不同条件下系统的演化方向及演化速率;在此基础上,王维莉等<sup>[10]</sup>引入前景理论构建无信控交叉口中电动自行车与机动车的冲突演化博弈模型.许伦辉等<sup>[11]</sup>关于无信控路段人车通行冲突的研究证明:相较于系统动力学模型,演化博弈模型具有显著优越性.在基于博弈论的交互行为机理研究中,既有研究虽然证实博弈论模型具有一定的优越性,并且进一步考虑了心理感知和从众效应等主观因素对交互行为的影响,但是在研究中没有区分博弈主体的异质性.

综上,本文在前景理论的基础上,考虑骑行者异质性并引入从众效应来构建进站公交与自行车的冲突演化博弈模型,对公交车驾驶员和自行车骑行者选择“通过”概率的演化路径进行模拟仿真,探讨不同参数对系统演化结果的影响.

## 1 问题描述与建模

### 1.1 公交车与自行车的冲突行为分析

本文选取的研究区域为直线式公交站的进站交织区,在车辆行驶过程中,公交车驾驶员与自行车骑行者没有信息的交互,在交织区中没有明确的策略组合规定谁优先通行,并且公交车与自行车都存在选择“通过”的概率,因此公交车在变道进站的过程中可能会与自行车发生碰撞.碰撞是否发生,取决于交通主体的相对位置、心理感知情况以及行驶速度.本文研究情景主要从交通主体的相对位置出发,考虑心理感知情况对决策行为的影响.

根据相对位置将公交车和自行车的交互场景分为交错行驶和并排行驶.若自行车与公交车的相对位置为一方在前一方在后,此时双方为确保自身的行驶安全,其通过概率是确定的,因此该场景下的交互可以分为两种情形:第 1 种情形是自行车位于公交车车身后端,若公交车变道,由于距离较近,显然自行车骑行者会为了自身安全选择“不通过”,即自行车通过概率为 0,自行车让公交车;第 2 种情形是自行车位于公交车的车身前端,公交车驾驶员易注意到右前方自行车的行驶情况,此时公交车驾驶员会选择“不通过”,即公交车通过概率为 0,公交车让自行车.当自行车与公交车并排行驶时,其通过概率由具体的通行策略决定,且通行策略的确定受交通主体心理感知的影响,这也是本文重点讨论的场景.在该场景下由于公交车驾驶员和自行车骑行者共有 {通过, 不通过}、{不通过, 通过}、{不通过, 不通过} 和 {通过, 通过} 4 种不同的策略组合,故有 4 种不同

的交互情形.这4种交互情形可做如下解释:

1)若公交车驾驶员基于自身体积和优先权的优势,认为自行车会避让,感知通行风险较低故选择通过;自行车骑行者因公交车不减速而感知到较高风险,故选择让行,即公交车通过概率为1,自行车通过概率为0,自行车让公交车.

2)若自行车速度较快,公交车驾驶员认为通行风险较高会选择主动让行,此时骑行者感知公交车的让行则选择通过,即公交车通过概率为0,自行车通过概率为1,公交车让自行车.

3)若驾驶双方均认为通行风险较高,则双方都会采取让行策略,即公交车和自行车的通过概率均为0,公交车与自行车互让.

4)若驾驶双方均认为通行风险较低,则双方都会采取通行策略,即公交车和自行车的通过概率均为1,发生碰撞.

### 1.2 考虑骑行者异质性的演化博弈模型

#### 1.2.1 基本假设

在构建演化博弈模型前,对研究问题做出以下基本假设.

**假设1** 博弈参与主体为有限理性的“公交车驾驶员”“自行车骑行者”.

**假设2** 博弈主体策略为“通过”“不通过”.

公交车驾驶员选择“通过”的概率为 $x$ ,选择“不通过”的概率为 $1-x$ .将自行车骑行者分为冒险型和保守型两类,用 $p$ 表示冒险型骑行者的占比,其中冒险型骑行者选择“通过”的概率为 $y_A$ ,选择“不通过”的概率为 $1-y_A$ ;保守型骑行者选择“通过”的概率为 $y_C$ ,选择“不通过”的概率为 $1-y_C$ ;冒险型骑行者选择“通过”的概率大于保守型骑行者,即 $y_A > y_C$ .自行车骑行者选择“通过”的概率为 $y$ , $y$ 为 $py_A$ 与 $(1-p)y_C$ 之和.

**假设3** 公交车驾驶员都是具有职业素养的人,将公交车驾驶员驾驶风格默认为保守型.

**假设4** 若公交车与自行车发生碰撞,自行车骑行者受到的伤害大于公交车驾驶员.

#### 1.2.2 演化博弈策略组合及收益矩阵

将公交车驾驶员与自行车骑行者通过冲突区域的基础收益分别定义为 $E_1$ 和 $E_2$ <sup>[9]</sup>.如果策略组合为{通过,通过},则发生碰撞,公交车驾驶员、冒险型骑行者和保守型骑行者的冲突损失分别为 $C_1$ 、 $C_{2A}$ 、 $C_{2C}$ ;如果策略组合为{通过,不通过}或者{不通过,通过}时,选择不通过的一方会产生相应的等待损失,将公交车驾驶员、冒险型骑行者和保守型骑行者的

等待损失分别定义为 $T_1$ 、 $T_{2A}$ 、 $T_{2C}$ ;如果策略组合为{不通过,不通过},即双方互让,双方都将产生互让损失,将公交车驾驶员、冒险型骑行者和保守型骑行者的互让损失分别定义为 $M_1$ 、 $M_{2A}$ 、 $M_{2C}$ .将最终的收益定义为两大主体各自的基础收益与各类损失数值之差.

公交车驾驶员与自行车骑行者两位博弈主体各有“通过”“不通过”两种纯策略,因此可以得到4种通行策略组合,冒险型骑行者和保守型骑行者分别与公交车驾驶员相应的策略组合与博弈收益矩阵如表1所示.

表1 公交车驾驶员与自行车骑行者的博弈策略组合及相应的收益矩阵

		公交车驾驶员	
		通过	不通过
冒险型骑行者	通过	$E_1 - C_1, E_{2A} - C_{2A}$	$E_1 - T_1, E_{2A}$
	不通过	$E_1, E_{2A} - T_2$	$E_1 - M_1, E_{2A} - M_2$
保守型骑行者	通过	$E_1 - C_1, E_{2C} - C_{2C}$	$E_1 - T_1, E_{2C}$
	不通过	$E_1, E_{2C} - T_2$	$E_1 - M_1, E_{2C} - M_2$

#### 1.2.3 演化博弈模型

由于人在自身性格、偏好等因素上具有异质性,这可能会导致人的实际决策与基于理性预测的决策产生偏差.所以,在博弈主体有限理性的基础上,引入前景理论考虑博弈主体的心理感知与选择偏好.本文将博弈主体对收益和损失的敏感度定义为 $\alpha$ 、 $\beta$ <sup>[12]</sup>,值越大说明其对收益或损失越敏感;将博弈主体对损失的规避程度表示为 $\lambda$ <sup>[12]</sup>;用 $\gamma$ 表示博弈主体的决策影响系数,即决策权重函数曲线的弯曲程度, $\gamma$ 取值越小,表示权重函数越弯曲.本文认为冒险型骑行者相较于损失,对收益更加敏感;相反,保守型骑行者对于损失更加敏感.因此,冒险型骑行者对损失的规避程度小于保守型骑行者对损失的规避程度.结合以上描述,主要考虑用骑行者通过概率、基础收益、冲突损失、收益和损失敏感度以及风险规避度的不同来表示自行车骑行者的异质性.

本文引入的前景理论认为,总体价值可以由权重函数和价值函数共同度量,即

$$U = \sum_i u(z_i)\omega(p_i). \quad (1)$$

其中: $U$ 表示博弈主体对所有策略的感知价值之和, $z_i$ 为博弈主体选择第 $i$ 种策略的收益, $p_i$ 为 $z_i$ 发生的概率.以 $u_0$ 为参考点,当 $z_i \geq u_0$ 时, $z_i - u_0$ 表示博弈主体的相对收益;当 $z_i < u_0$ 时, $u_0 - z_i$ 表示博弈主体的相对损失.以相对收益、相对损失为主体构成价

值函数

$$u(z_i) = \begin{cases} (z_i - u_0)^\alpha, & z_i \geq u_0; \\ -\lambda(u_0 - z_i)^\beta, & z_i < u_0. \end{cases} \quad (2)$$

权重函数

$$\omega(p_i) = \frac{p_i^\gamma}{[p_i^\gamma + (1 - p_i)^\gamma]^{1/\gamma}}. \quad (3)$$

将  $E_1$ 、 $E_{2A}$  和  $E_{2C}$  分别作为公交车驾驶员、冒险型骑行者和保守型骑行者的参考点. 结合前景理论分别得出公交车驾驶员选择“通过”以及选择“不通过”的纯策略期望收益  $U_{11}$  和  $U_{12}$  分别为

$$U_{11} = u(E_1 - C_1)\omega(y) + u(E_1)\omega(1 - y), \quad (4)$$

$$U_{12} = u(E_1 - T_1)\omega(y) + u(E_1 - M_1)\omega(1 - y). \quad (5)$$

同理可得, 冒险型骑行者和保守型骑行者选择“通过”以及选择“不通过”的纯策略期望收益  $U_{21A}$ 、 $U_{22A}$ 、 $U_{21C}$ 、 $U_{22C}$  分别为

$$U_{21A} = u(E_{2A} - C_{2A})\omega(x) + u(E_{2A})\omega(1 - x), \quad (6)$$

$$U_{22A} = u(E_{2A} - T_{2A})\omega(x) + u(E_{2A} - M_{2A})\omega(1 - x), \quad (7)$$

$$U_{21C} = u(E_{2C} - C_{2C})\omega(x) + u(E_{2C})\omega(1 - x), \quad (8)$$

$$U_{22C} = u(E_{2C} - T_{2C})\omega(x) + u(E_{2C} - M_{2C})\omega(1 - x). \quad (9)$$

进一步得到自行车骑行者选择“通过”以及选择“不通过”的纯策略期望收益  $U_{21}$ 、 $U_{22}$  分别为

$$U_{21} = pU_{21A} + (1 - p)U_{21C}, \quad (10)$$

$$U_{22} = pU_{22A} + (1 - p)U_{22C}. \quad (11)$$

公交车驾驶员以  $x$  的概率选择“通过”, 以  $1 - x$  的概率选择不通过的混合策略期望收益为

$$\begin{cases} F_1(x, y) = \frac{\partial x}{\partial t} = x(U_{11} - \bar{U}_1) = x(1 - x)(-\lambda_C) \left\{ \frac{(C_1^{\beta_C} - T_1^{\beta_C})y^\gamma - M_1^{\beta_C}(1 - y)^\gamma}{[y^\gamma + (1 - y)^\gamma]^{1/\gamma}} \right\} = 0, \\ F_2(x, y) = \frac{\partial y}{\partial t} = y(U'_{21} - \bar{U}'_2) = \\ y(y - 1)(1 + 2\mu P_{B1} - 2\mu) \left\{ \frac{[(\lambda_A C_{2A}^{\beta_A} - \lambda_C T_2^{\beta_C})p]x^\gamma}{[x^\gamma + (1 - x)^\gamma]^{1/\gamma}} + \right. \\ \left. \frac{[(\lambda_C C_{2C}^{\beta_C} - \lambda_A T_2^{\beta_A})(1 - p)]x^\gamma - [\lambda_C M_2^{\beta_C}p + \lambda_A M_2^{\beta_A}(1 - p)](1 - x)^\gamma}{[x^\gamma + (1 - x)^\gamma]^{1/\gamma}} \right\} = 0. \end{cases} \quad (18)$$

求解式 (18) 可得到公交车驾驶员与自行车骑行者选择“通过”策略的均衡点. 由式 (18) 可知, 方程组有 (0, 0)、(0, 1)、(1, 0)、(1, 1) 4 组固定的纯策略解, 还有 1 组混合策略解  $(x^*, y^*)$ . Friedman 等<sup>[15]</sup> 研究表明, 雅克比矩阵在均衡点处满足行列式  $\text{Det}(J) > 0$  且它的迹  $\text{Tr}(J) < 0$  时, 该均衡点为系统的稳定点.

对  $F_1(x, y)$ 、 $F_2(x, y)$  分别求关于  $x, y$  的偏导, 得

$$\bar{U}_1 = xU_{11} + (1 - x)U_{12}. \quad (12)$$

同理, 自行车骑行者的混合策略期望收益为

$$\bar{U}_2 = yU_{21} + (1 - y)U_{22}. \quad (13)$$

此外, 自行车骑行者同过街行人一样具有一定的从众心理, 考虑使用从众效应量化方程<sup>[13]</sup>对自行车骑行者的收益进行修正, 引入变量  $\xi$  表示从众效应,  $\mu$  作为权重来反映从众效应的影响强度. 对自行车骑行者的期望收益进行修正后的期望收益变为

$$U'_{2i} = (1 - \mu)U_{2i} + \mu\xi, \quad i = 1, 2. \quad (14)$$

用  $P_{Bi}(U_{21} - U_{22})$ <sup>[11]</sup> 表示从众效应  $\xi$ , 其中  $P_{Bi}$  表示自行车骑行者中选择是否通过人数的占比, 则自行车骑行者修正后的最终期望收益变为

$$U'_{21} = (1 - \mu)U_{21} + \mu P_{B1}(U_{21} - U_{22}), \quad (15)$$

$$U'_{22} = (1 - \mu)U_{22} + \mu P_{B2}(U_{21} - U_{22}). \quad (16)$$

综上, 公交车驾驶员与自行车骑行者的最终收益为

$$\begin{cases} \bar{U}_1 = xU_{11} + (1 - x)U_{12}, \\ \bar{U}'_2 = yU'_{21} + (1 - y)U'_{22}. \end{cases} \quad (17)$$

## 2 模型求解与分析

### 2.1 均衡点的相关计算

基于公交车驾驶员与自行车骑行者的博弈收益矩阵, 根据 Malthusian 复制动态方程<sup>[14]</sup>可以得到公交车驾驶员与自行车骑行者选择“通过”策略的复制动态方程, 再根据演化博弈中演化稳定策略的概念和微分方程的相关知识, 复制动态方程等于 0, 即关于  $x, y$  的二阶微分方程中  $x, y$  的变化率为 0 时, 系统达到均衡状态. 基于此, 可得

到其雅克比矩阵如下:

$$\text{Jacobi} = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_1(x, y)}{\partial x}, & \frac{\partial F_1(x, y)}{\partial y} \\ \frac{\partial F_2(x, y)}{\partial x}, & \frac{\partial F_2(x, y)}{\partial y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (1 - 2x)J_{11}, & x(1 - x)J_{12} \\ y(y - 1)J_{21}, & (2y - 1)J_{22} \end{bmatrix}. \quad (19)$$

其中

$$J_{11} = (-\lambda_C) \left\{ \frac{(C_1^{\beta_C} - T_1^{\beta_C})y^\gamma - M_1^{\beta_C}(1-y)^\gamma}{[y^\gamma + (1-y)^\gamma]^{1/\gamma}} \right\},$$

$$J_{12} = \frac{\partial J_{11}}{\partial y},$$

$$J_{22} =$$

$$(1 + 2\mu P_{B1} - 2\mu) \left\{ \frac{[(\lambda_A C_{2A}^{\beta_A} - \lambda_C T_{2C}^{\beta_C})p]x^\gamma}{[x^\gamma + (1-x)^\gamma]^{1/\gamma}} + \right.$$

$$\left. \frac{[(\lambda_C C_{2C}^{\beta_C} - \lambda_A T_{2A}^{\beta_A})(1-p)]x^\gamma}{[x^\gamma + (1-x)^\gamma]^{1/\gamma}} - \right.$$

$$\left. \frac{[\lambda_C M_{2C}^{\beta_C} p + \lambda_A M_{2A}^{\beta_A} (1-p)](1-x)^\gamma}{[x^\gamma + (1-x)^\gamma]^{1/\gamma}} \right\},$$

$$J_{21} = \frac{\partial J_{22}}{\partial x}.$$

通过计算得到雅克比矩阵的行列式和迹分别为

$$\text{Det}(J) = (1 - 2x)(2y - 1)J_{11}J_{22} - xy(1 - x)(y - 1)J_{12}J_{21}, \quad (20)$$

$$\text{Tr}(J) = (1 - 2x)J_{11} + (2y - 1)J_{22}. \quad (21)$$

将 5 个局部均衡点分别代入式 (20) 和 (21) 求解矩阵对应的行列式与迹, 得到关乎行列式正负性的关键式  $C_1^{\beta_C} - T_1^{\beta_C}$ 、 $1 + 2\mu P_{B1} - 2\mu$  以及  $(\lambda_A C_{2A}^{\beta_A} - \lambda_C T_{2C}^{\beta_C})p + (\lambda_C C_{2C}^{\beta_C} - \lambda_A T_{2A}^{\beta_A})(1 - p)$ , 确定了这 3

个表达式的正负性也就可以确定行列式的正负性.

### 2.2 稳定性分析

根据现有文献 [12] 设定参数  $\beta_C = 0.88$ ,  $\lambda_C = 2.25$ ,  $\gamma = 0.69$ , 为凸显骑行者的异质性, 本文在此基础上设定参数  $\beta_A = 0.8$ ,  $\lambda_A = 1$ , 表示冒险型骑行者对损失的敏感度和规避程度均小于保守型.

由 2.1 节可知, 各均衡解行列式与迹的正负性随博弈收益矩阵变量取值的变化而变化, 因此, 各均衡点  $\text{Det}(J)$  与  $\text{Tr}(J)$  的正负性主要由  $C_1$  与  $T_1$  的相对大小、 $\mu P_{B2}$  与 0.5 的相对大小及  $p$  的大小共同决定, 具体值的选取并不会影响系统的最终收敛结果, 故在求解不同场景下的稳定点时, 将  $C_1$  与  $T_1$  的差值定为  $\pm 2$ ,  $\mu P_{B2}$  的可能取值定为 0.64 或 0.16,  $p$  的可能取值定为 0.2, 0.5, 0.8. 由于本文提前假设公交车驾驶员驾驶风格为保守型, 根据现实交通情况可以用公交优先通行权来解释  $C_1$  与  $T_1$  的相对大小,  $C_1 > T_1$  表示公交车在当前路段没有优先通行权,  $C_1 < T_1$  表示公交车在当前路段具有优先通行权.

接下来对由 3 组判别条件组合成的 12 种不同场景的均衡点稳定性进行探讨, 将符合 12 种不同场景的取值代入式 (18) 进行求解, 得到不同场景下的  $(x, y)$  收敛结果如表 2 所示.

表2 不同场景的稳定点

场景	满足条件	稳定点	系统平衡状态
1	$C_1 > T_1, \mu P_{B2} > 0.5, p > 0.5$	(0, 1)	公交车让自行车先行
2	$C_1 > T_1, \mu P_{B2} > 0.5, p < 0.5$	(0, 1)、(1, 0)	自行车让公交车先行、公交车让自行车先行
3	$C_1 > T_1, \mu P_{B2} > 0.5, p = 0.5$	(0, 1)、(1, 0)	自行车让公交车先行、公交车让自行车先行
4	$C_1 > T_1, \mu P_{B2} < 0.5, p > 0.5$	(1, 0)	自行车让公交车先行
5	$C_1 > T_1, \mu P_{B2} < 0.5, p < 0.5$	无	系统没有平衡状态
6	$C_1 > T_1, \mu P_{B2} < 0.5, p = 0.5$	无	系统没有平衡状态
7	$C_1 < T_1, \mu P_{B2} > 0.5, p > 0.5$	(1, 1)	自行车与公交车发生碰撞
8	$C_1 < T_1, \mu P_{B2} > 0.5, p < 0.5$	(1, 0)	自行车让公交车先行
9	$C_1 < T_1, \mu P_{B2} > 0.5, p = 0.5$	(1, 0.128)	趋近于自行车让公交车先行
10	$C_1 < T_1, \mu P_{B2} < 0.5, p > 0.5$	(1, 0)	自行车让公交车先行
11	$C_1 < T_1, \mu P_{B2} < 0.5, p < 0.5$	(1, 0.999)	趋近于自行车与公交车发生碰撞
12	$C_1 < T_1, \mu P_{B2} < 0.5, p = 0.5$	(1, 0.767)	趋近于自行车与公交车发生碰撞

由表 2 可知, 共出现收敛于一个稳定点、收敛于两个稳定点以及不收敛 3 种情况. 其中收敛于一个稳定点的平衡状态体现为“自行车让公交车先行”“公交车让自行车先行”“发生碰撞”, 没有出现收敛

于 (0, 0) 的结果说明在实际交通场景中公交车驾驶员与自行车骑行者之间的博弈往往更倾向于产生含有“通过”决策的结果, 而不是一直互相礼让. 此外, 系统关于自行车骑行者的收敛结果并非完全收敛于

整数解,例如稳定点(1, 0.128)表示公交车驾驶员选择通过的概率是1,自行车骑行者选择通过的概率是0.128.尽管从整体看趋向于自行车让公交车先行,但是存在个别骑行者仍然选择通过.该结果与实际也是相符的,现实中的确存在特别冒险的骑行者,由于安全意识较差,在交互中更容易以自身利益优先做出“通过”的选择,也更容易产生安全事故,这种结果凸显了骑行者的内部差异.由此可知,本文考虑骑行者的异质性能够使模型更加贴近实际交通场景.

对比场景1和场景4、场景8和场景11的稳定点可以发现:在同样的条件下,从众效应相关参数 $\mu P_{B2}$ 与0.5的大小对比对冒险型和保守型骑行者占比分别较大情况下的自行车骑行者的最终决策会产生影响.场景1和场景4对应公交车驾驶员冲突损失大于等待损失、冒险型骑行者占比较大的情况,此时这种条件应该理解为公交车驾驶员为了规避产生比等待损失更大的冲突损失,倾向于选择“不通过”,其通过概率可能收敛于0,自行车骑行者由于冒险型占比较大,可能更倾向于选择“通过”,其通过概率可能收敛于1.在 $\mu P_{B2} < 0.5$ 时,自行车骑行者最终选择“不通过”,其通过概率最终收敛于0,与理论上的决策结果相反;在 $\mu P_{B2} > 0.5$ 时,自行车骑行者最

终选择“通过”,其通过概率最终收敛于1,与理论上的决策结果一致.场景8和场景11对应公交车驾驶员冲突损失小于等待损失,保守型骑行者占比较大的情况,此时公交车驾驶员为了减少损失,倾向于选择“通过”,其通过概率可能会收敛于1,自行车骑行者由于保守型占比较大,可能更倾向于选择“不通过”,其通过概率可能会收敛于0.在 $\mu P_{B2} < 0.5$ 时,自行车骑行者最终选择“通过”,其通过概率最终收敛于1;在 $\mu P_{B2} > 0.5$ 时,自行车骑行者最终选择“不通过”,其通过概率最终收敛于0.由此可知, $\mu P_{B2} < 0.5$ 对不同骑行者通过概率的影响是使结果与该类型骑行者占比较大时理论上的通过决策相反, $\mu P_{B2} > 0.5$ 时结果保持不变.

### 3 数值仿真与结果分析

为了深入探究参数对决策的作用,下文固定初始策略 $(x, y) = (0.5, 0.5)$ ,对参数 $\mu$ 、 $P_{B2}$ 和 $p$ 进行系统收敛的灵敏度分析.

#### 3.1 从众效应对系统演化结果的影响

为了研究从众效应对决策的影响,在固定 $C_1$ 、 $T_1$ 和 $p$ 的条件下,将 $\mu$ 分别取0.3和0.8来表示从众效应影响权重小和从众效应影响权重大的情况,将 $P_{B2}$ 分别取0.2和0.8代表过街占比大和过街占比小的情况,得到的结果如图1所示.

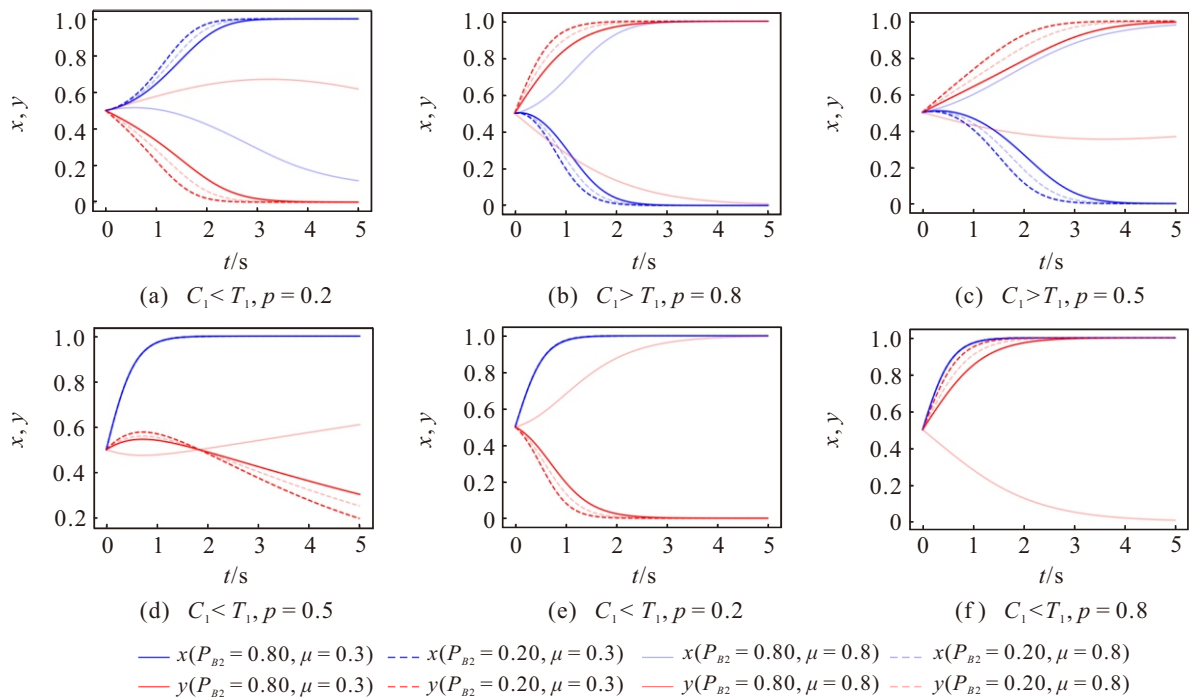


图1 从众效应对系统演化结果的影响

从图1可知,从众效应相关参数 $\mu P_{B2}$ 与0.5的相对大小在 $C_1 < T_1$ 时,对公交车的通过概率没有影响,且相较于 $C_1 > T_1$ 时,自行车的通过概率收敛更

快,所以公交优先通行权的设定可以有效缓解从众效应带来的影响.

在 $\mu$ 和 $P_{B2}$ 的取值组合中,只有 $\mu = 0.8$ 且 $P_{B2} =$

0.8的情况下  $\mu P_{B2} > 0.5$ , 其余组合情况均表示  $\mu P_{B2} < 0.5$ . 观察图1中6个不同条件组合下  $x$ 、 $y$  的取值趋势, 可以发现  $\mu = 0.8$  且  $P_{B2} = 0.8$  时, 会出现公交车和自行车的通过概率与其他情况通过概率相反的情况, 这与2.2节中提到的“ $\mu P_{B2} < 0.5$  对不同类型骑行者通过概率的影响是使结果与该类型骑行者占比较大时理论上的通过决策相反,  $\mu P_{B2} > 0.5$  时结果保持不变”是一致的。

### 3.2 冒险型骑行者占比对系统演化结果的影响

根据  $C_1$  与  $T_1$ 、 $\mu P_{B2}$  与 0.5 的相对大小, 可以得到4种组合情况, 由于2.2节中得出场景5和场景6没有稳定点, 故不分析  $C_1 > T_1$  且  $\mu P_{B2} < 0.5$  的情况, 基于此对冒险型骑行者的占比进行灵敏度分析. 将  $p$  取值为 0.2、0.4、0.6、0.8 分别代入3种组合中, 得到不同冒险型骑行者占比下公交车驾驶员和自行车骑行者的通过概率, 结果如图2所示。

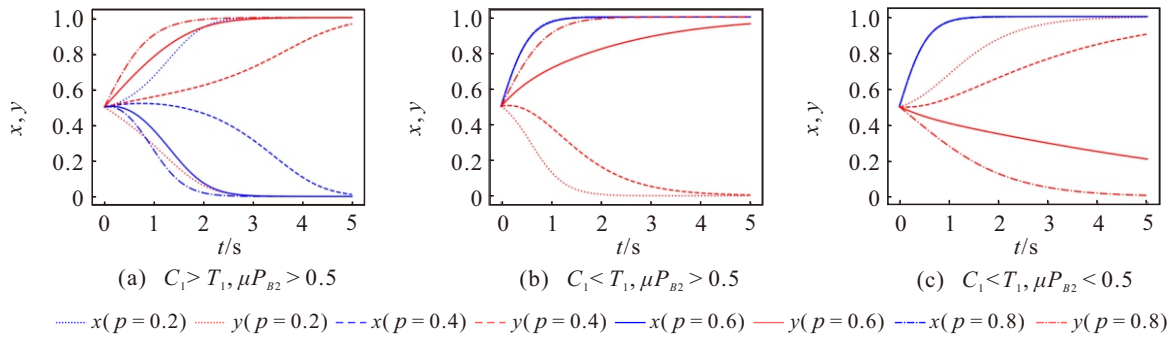


图2 冒险型骑行者占比对系统演化结果的影响

对比图2中3种情况下的公交车驾驶员通过概率, 可以发现  $C_1 < T_1$  时, 公交车驾驶员通过概率不受冒险型骑行者占比的影响. 对此可做如下解释: 在  $C_1 < T_1$  时, 即在公交车具有优先通行权的条件下, 公交车驾驶员能果断地做出通过决策. 相反, 在  $C_1 > T_1$  时, 由于此时公交车不具备优先通行权且驾驶员驾驶风格较为保守, 公交车驾驶员的决策会受到冒险型骑行者占比的影响. 由图2可知, 自行车骑行者的通过概率受冒险型骑行者占比的影响是显著的,

这进一步证实了骑行者异质性在公交车驾驶员与自行车骑行者之间的交互行为研究中的必要性. 对比“冒险型骑行者占比高”和“保守型骑行者占比高”的两类情况, 不难发现单一类型骑行者的占比越高, 自行车骑行者的骑行风格越一致, 系统收敛越快。

为了进一步探究不同类型骑行者对系统收敛结果的影响程度, 在求解过程中求解使自行车骑行者通过概率发生本质变化的  $p$  值区间, 即  $y$  的取值变化跨越 0.5 的情况, 求解结果如图3所示。

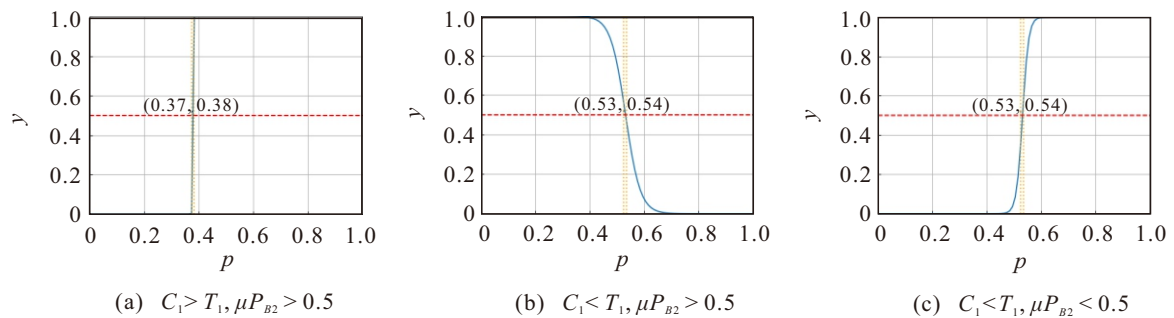


图3 影响系统稳定性的冒险型骑行者占比临界范围

从图3中3种情况下  $p$  值区间的求解结果可知,  $p = 0.5$  均不在求解的  $p$  值区间中, 这说明从对自行车骑行者通过概率的影响来看, 并不是单纯的“谁人多就听谁的”, 人数较多的骑行者类型在决策中不一定占主导地位. 由图3(a)可知, 在公交车没有优先通行权的情况下, 得到的  $p$  值区间小于 0.5, 说明冒险型骑行者对自行车骑行者通过概率的影响占主导地位. 同理, 由图3(b)和图3(c)可知, 在公交车具有优先行

驶权的情况下, 得到的  $p$  值区间大于 0.5, 说明保守型骑行者对自行车骑行者通过概率的影响占一定的主导地位. 但是, 从决定自行车骑行者通过概率发生本质变化的  $p$  值区间与  $p = 0.5$  的相对远近来看, 图3(a)中的  $p$  值区间离  $p = 0.5$  更远, 说明冒险型骑行者的主导作用较强, 图3(b)和图3(c)的  $p$  值区间离  $p = 0.5$  更近, 说明保守型骑行者的主导作用较弱。

## 4 结论

本文引入前景理论,构建了考虑骑行者异质性和从众心理影响下的进站公交与自行车冲突演化博弈模型,通过数值仿真得到以下结论:

1) 在系统稳定点求解中,自行车骑行者的通过概率出现非整数解,这表明在决策过程中,自行车骑行者群体有独特的个体存在,这一结果证实了考虑骑行者异质性的模型更贴近实际,从而能够更准确地描述复杂的交通状况。

2) 系统最终收敛的情况体现为:收敛于一个稳定点和收敛于两个稳定点。其中,收敛于一个稳定点的情况体现为“自行车让公交车先行”“公交车让自行车先行”“发生碰撞”;收敛于两个稳定点的情况体现为“自行车让公交车先行”或“公交车让自行车先行”。结合实际交通场景,交通管理部门应该制定相关规则,以引导系统收敛于不对称解,例如设置优先通行权。后续研究证实设置公交优先通行权对公交而言具有显著优势,即公交优先通行权的设定可以有效规避从众效应和冒险型骑行者占比对公交车驾驶员决策的影响。

3) 从众效应对自行车骑行者通过概率的影响是显著的,决定因素是 $\mu P_{B2}$ 与0.5的相对大小。 $\mu P_{B2} < 0.5$ 对不同骑行者通过概率的影响是使结果与该类型骑行者占比较大时理论上的通过决策相反, $\mu P_{B2} > 0.5$ 时结果与该类型骑行者占比较大时理论上的通过决策保持一致。

4) 冒险型骑行者占比对自行车骑行者通过概率的影响是显著的。单一类型骑行者的占比越大,系统收敛越快。骑行者类型的主导性并不体现在人数占比上,在不设公交优先通行权的情况下,冒险型骑行者在决策中占主导地位且作用较强;在设公交优先通行权的情况下,保守型骑行者在决策中占主导地位但作用较弱。

5) 本文研究可以为公交站台附近礼让规则的制定提供理论指导。结合求解结果,非整数解均出现在公交车具有优先权的情况,也就是说公交车具有优先权时,部分骑行者会放大自身的等待损失,宁愿冒险发生冲突也要抢占优先通行的权利。这说明,在骑行者安全意识较差、冒险意图较强的城市,为防止发生碰撞应优先考虑安全问题,对自行车骑行者设置优先权,以引导系统收敛于不对称的整数解。在骑行者安全意识较优、冒险意图较弱的城市,应以公交站台的公交通行效率优先,对公交车设置优先权,以引导系统快速收敛。

## 参考文献 (References)

- [1] Phillips R O, Hagen O H, Berge S H. Bus stop design and traffic safety: An explorative analysis[J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2021, 153: 105917.
- [2] Wang C, Ye Z R, Xu Y R, et al. Effect of dwelling buses on the traffic operations of nonmotor vehicles at bus stops[J]. *Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems*, 2018, 144(5): 04018013.
- [3] Zhang C, Du B, Wang Q, et al. Observational study on multi-type conflicts between passengers and cyclists at the bus stop — A case study in Nanjing[J]. *Travel Behaviour and Society*, 2022, 29: 176-185.
- [4] Yu J, Liu Y, Chen W Q. Conflict management at urban bus stops through cooperative trajectory planning[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2024, 165: 104696.
- [5] 谭春桥, 李尽展, 周丽. 基于 Bertrand 博弈的共享单车定价与投放联合策略研究[J]. *控制与决策*, 2021, 36(7): 1786-1792.  
(Tan C Q, Li J Z, Zhou L. Joint pricing and launching strategy for bike-sharing enterprises based on Bertrand game[J]. *Control and Decision*, 2021, 36(7): 1786-1792.)
- [6] 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.  
(Zhang S J, Jia S P, Peng P, et al. Game analysis of parking management between government and bike-sharing enterprises based on quantal response equilibrium[J]. *Control and Decision*, 2024, 39(2): 641-648.)
- [7] Yu H T, Tseng H, Langari R. A human-like game theory-based controller for automatic lane changing[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2018, 88: 140-158.
- [8] Jing D, Yao E J, Chen R S. Decentralized human-like control strategy of mixed-flow multi-vehicle interactions at uncontrolled intersections: A game-theoretic approach[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2024, 167: 104835.
- [9] 魏丽英, 崔裕枫, 李东莹. 基于演化博弈论的行人与机动车冲突演化机理研究[J]. *物理学报*, 2018, 67(19): 37-49.  
(Wei L Y, Cui Y F, Li D Y. Evolution mechanism of conflict between pedestrian and vehicle based on evolutionary game theory[J]. *Acta Physica Sinica*, 2018, 67(19): 37-49.)
- [10] 王维莉, 肖雨晴, 周辉, 等. 无信控交叉口电动自行车

- 与机动车的冲突博弈研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2024, 24(1): 149-158.
- (Wang W L, Xiao Y Q, Zhou H, et al. Research on conflict game between electric bicycle and motor vehicle at intersection without signal control[J]. *China Industrial Economics*, 2024, 24(1): 149-158.)
- [11] 许伦辉, 骈宇庄, 林永杰, 等. 基于累积前景理论的无信控路段人车通行冲突博弈分析[J]. *中国公路学报*, 2022, 35(1): 119-136.
- (Xu L H, Pian Y Z, Lin Y J, et al. Game analysis of conflicts between pedestrians and vehicular traffic on unsignalized road sections based on cumulative prospect theory[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2022, 35(1): 119-136.)
- [12] Tversky A, Kahneman D. Advances in prospect theory: Cumulative representation of uncertainty[J]. *Journal of Risk and Uncertainty*, 1992, 5(4): 297-323.
- [13] 吴文静, 王占中, 马芳武. 从众心理影响下的行人群体行为演化博弈的仿真分析——以行人过街为例[J]. *吉林大学学报: 工学版*, 2017, 47(1): 92-96.
- (Wu W J, Wang Z Z, Ma F W. Simulation analysis of evolutionary game of pedestrians' group behaviors under influence of herd behavior: In case of crossing behavior[J]. *Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition*, 2017, 47(1): 92-96.)
- [14] Friedman D. On economic applications of evolutionary game theory[J]. *Journal of Evolutionary Economics*, 1998, 8(1): 15-43.
- [15] Friedman D. Evolutionary games in economics[J]. *Econometrica*, 1991, 59(3): 637.

### 作者简介

季千喜 (2000-), 女, 博士生, 主要研究方向为公共交通规划管理, E-mail: [23111272@bjtu.edu.cn](mailto:23111272@bjtu.edu.cn);

贾顺平 (1963-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为交通运输经济、公共交通规划管理, E-mail: [shpjia@bjtu.edu.cn](mailto:shpjia@bjtu.edu.cn);

陈越 (1997-), 男, 博士生, 主要研究方向为公共交通规划管理、交通大数据, E-mail: [22110284@bjtu.edu.cn](mailto:22110284@bjtu.edu.cn);

代斯薇 (2000-), 女, 博士生, 主要研究方向为公共交通规划管理, E-mail: [23111282@bjtu.edu.cn](mailto:23111282@bjtu.edu.cn);

杨琪 (2000-), 女, 硕士生, 主要研究方向为公共交通规划管理, E-mail: [22120959@bjtu.edu.cn](mailto:22120959@bjtu.edu.cn).