

doi:10.19920/j.cnki.jmsc.2025.09.010

混行环境下自动驾驶出行服务供给模式分析^①

齐 航^{1,3}, 王光超^{2*}, 贾 宁^{3,4}, 凌 帅^{3,4}, 贺正冰⁵

(1. 湖北经济学院新财经交叉学科研究院(数字经济学院), 武汉 430205; 2. 华中师范大学信息管理学院, 武汉 430079; 3. 天津大学管理与经济学部, 天津 300072; 4. 天津大学复杂管理系统实验室, 天津 300072; 5. 麻省理工学院信息与决策系统实验室, 美国剑桥 2139-4307)

摘要: 在服务化运营的自动驾驶车辆(AV)与人工驾驶的普通车辆(HV)共存的新型混行交通环境阶段,城市交通将由选择 HV 方式出行者的“分散化”决策,与选择 AV 出行服务方式出行者所接受的运营方的“中心化”决策共同构成. 本研究构建了同时考虑“弹性需求—出行服务/方式选择—路径分配/选择”三层次组合决策的混合行为网络均衡模型,丰富了混行环境下城市交通网络均衡的相关理论. 两个数值算例检验了模型的有效性,揭示出 AV 出行服务市场的最优供给模式是政府和企业共同参与,并且这种市场结构能够在达到最优交通系统效率的同时,保持出行者感知不公平度最低. 本研究结果为解决“政府在 AV 出行服务市场中应扮演何种角色”等管理实践问题提供了有益启示.

关键词: 智慧交通; 混合行为网络均衡; 组合决策; 变分不等式; 市场结构; 社会公平

中图分类号: C93; U-9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-9807(2025)09-0143-14

0 引 言

随着国家政策的持续支持和商业界的积极投入,自动驾驶、车辆互联等技术飞速发展,城市交通也必将经历服务化自动驾驶车辆(automated vehicle, AV)与人工驾驶普通车辆(human-driven vehicle, HV)共存的新型混合交通环境阶段^[1, 2]. 自 2019 年以来,我国北京、上海、武汉、郑州、长沙等地已经率先探索以 L2/L3 级别的自动驾驶汽车为居民提供网约车服务,2024 年 7 月,百度旗下“萝卜快跑”自动驾驶出行服务平台更是因在武汉开展了世界上最大规模的全无人商业化运营实验而引发国际关注^[2]. 自动驾驶出行服务的落地推广,不仅为人们增加了可供选择的出行方式,还将引起混行环境下城市交通网络中出行需求与

供给规律的内在变化.

在需求方面,现行城市交通网络中,出行者均“分散化”地、独立地进行出行方式选择和路径选择决策;未来混行交通环境条件下,出行者需首先在私人化出行与不同种类的 AV 出行服务之间进行选择,然后相应地,私人化出行的出行者自主选择路径,而选择 AV 出行服务的用户则接受服务提供者依据其运营策略统一分配的路径. 自动驾驶出行服务的出现使得交通出行需求变为由出行者个体“分散化”决策与 AV 出行服务提供者“中心化”决策共同构成,这为城市交通出行需求刻画提出了新的理论挑战. 在供给方面,考虑到城市交通的公共服务属性和 AV 在减少拥堵和污染等方面的潜在优势,除了互联网企业、车企,政府也有动力成为自动驾驶出行服务的提供者. 企业

① 收稿日期: 2023-6-12; 修订日期: 2024-10-20.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(72101085; 72271176; 72271181); 中国博士后科学基金资助项目(2022M722355); 湖北省教育厅科学研究计划 2023 年度重点基金资助项目(D20232203); 湖北省自然科学基金资助项目(2025AFC046); 天津大学复杂管理系统实验室开放课题基金资助项目(FM-ZX-2023-HB01-001); 中央高校基本业务科研经费资助项目(CCN25ZZ173).

通讯作者: 王光超(1987—), 男, 湖北随州人, 博士, 副教授. Email: gc.wang@mail.ccnu.edu.cn

或政府可能遵循的调度与运营策略包括企业利润最大化/企业成本最小化准则(Cournot-Nash Principle, CN)^②、系统总成本最小化准则(Social-Optimal Principle, SO)等。综上,究竟应由政府、还是私企、抑或是两者共同供给 AV 出行服务才能够最大化提升城市交通系统效率? AV 出行服务市场最优供给模式下的效率提升是否会以损失社会公平为代价? 这是混行交通新常态下,城市交通管理者必须回答的重要问题,然而在全球范围内尚无可借鉴的先例。

习近平总书记 2025 年 4 月在上海考察时指出:“人工智能与实体经济深度融合的特征更加明显,已经开始赋能千行百业、走进千家万户,成为经济增长的新引擎,渗透到社会生活各方面。同时人工智能带来的风险挑战引发广泛关注,如何在发展和安全之间寻求平衡,亟需进一步凝聚共识。”为了应对上述理论挑战并回答管理问题,本研究从出行者选择行为视角出发,做出了三个边际贡献:1)构建了同时考虑出行者弹性需求-出行服务/方式选择-一路径分配-选择三维度组合决策的混合网络均衡模型,弥补混行环境下城市网络交通均衡的理论缺口;2)提出上述网络均衡模型的求解算法,为分析 AV 出行服务市场供给模式问题提供方法工具;3)结合两个算例,比较三种不同 AV 出行服务市场供给模式(私企完全垄断市场结构、政府完全垄断市场结构、政府与私企寡头垄断市场结构)下城市交通系统效率、感知不公平度等指标,从而深入分析 AV 出行服务市场最优供给模式问题,并给出管理建议。

1 文献综述

与本研究密切相关的研究分支是混合行为网络均衡理论(mixed behavior network equilibrium, MBE)。该理论最早由 Harker^[3]提出,适合刻画由遵循不同路径选择准则的个体或集团化出行者共同构成的、同一个集团内部的不同车辆之间互相

合作,而不同集团之间以及集团与个体出行者之间竞争性地使用网络资源的网络均衡。MBE 理论最初主要被应用于货运交通(即拥有大量运输工具的大型货运公司通常被视为追求企业内部总成本最小化的 CN 参与者与分散化的货车共同竞争使用码头、道路等资源的网络流量分配问题)^[4, 5],以及 ATIS 影响下的网络交通(即装备 ATIS 设施并接受 ATIS 路径诱导的用户与自主择路的用户共用城市交通网络的流量分配问题)^[5-7]。

近年来,混合行为网络均衡理论成为研究者刻画 AV-HV 混行环境下新型混合交通流量分配问题的强有力的理论框架。根据研究目的的不同,可将现有研究分为三类:第一,AV-HV 混合网络均衡建模问题。Wang 等^[8]将 AV 视为完全自私和理性的 UE(user equilibrium)用户,将 HV 出行者刻画为服从交叉巢式 Logit 路径决策准则的用户;第二,AV 专用道/区域的网络设计问题。Liu 和 Song^[9]关注 AV 专用道的优化设计,Chen 等^[10]重点关注 AV 专用区域的优化设计;第三,AV 最优控制策略设计:此类研究通常假设 AV 受到政府统一指挥并遵循 SO 准则,政府将 AV 比例作为系统效率优化的调控手段^[11, 12]。Chen 等^[12]构建了基于路径的双层线性规划模型从而设计控制最小比例的、遵循 SO 择路准则的 AV 与拥挤收费相结合的联合策略。

目前 AV-HV 混合交通的研究大多集中在探究 AV 市场渗透率对于道路流的影响^[13]。在为数不多的网络流层面研究中,大多将 AV 市场渗透率视为政府的决策变量^[11, 12],或与 AV 方式自身成本相关、而独立于其他方式成本结构的扩散函数^[14]。除了 Wang 等^[4]、Tian 等^[15]、永贵等^[16]等少量研究之外,极少从出行者选择行为视角出发,将其刻画为出行者的出行决策(是否出行)以及方式选择决策(采用何种方式出行)的内生结果。然而,如果忽略了对出行需求的准确刻画,忽视了出行者基于出行经验等所做出的自由选择,即使政府或企业能够调控投入市场的 AV 数量,也可

② 本研究理论假定企业运营自动驾驶车队的策略规则为以往文献中最常使用的“古诺成本最小化”而非经济学领域中常见的“利润最大化”,然而二者在本质上是一致的。如果企业只是追求自身利润最大化,而缺乏对用户出行体验考虑的话,那么在 AV 市场占有率内生的条件下,用户会离开那些服务质量较差的提供者,因此长期来看,企业只有追求所服务的所有出行者的广义旅行成本(包括时间成本和金钱成本两方面)总和最小化,才能够实现总利润最大化。

能出现出行服务市场的供需不均衡,造成供给过剩或供给不足等负面影响。

鉴于上述研究不足,本研究将从出行者选择行为视角出发,将AV市场份额刻画为出行者的出行决策(是否出行)、出行方式选择决策(采用何种方式出行)以及路径选择决策的内生结果,首次构建同时考虑“弹性需求-出行服务/方式选择-路径分配/选择”三层次组合决策的混合行为网络均衡模型(如图1所示)。具体地,将选择人工驾驶车辆的出行者刻画为遵循个体随机效用最大化(stochastic user equilibrium, SUE)择路准则的

SUE参与者,将接受公司统一指挥并追求企业总成本最小化或系统总成本最小化的AV车队分别刻画为遵循CN准则或SO准则的用户^③。借助这一模型框架,本研究可以将待考察的三种AV出行服务供给模式—私企完全垄断市场结构、政府完全垄断市场结构、政府与私企寡头垄断市场结构,分别刻画为SUE-CN混合系统、SUE-SO混合系统和SUE-CN-SO混合系统。最后,通过比较不同混合系统的系统效率、出行者感知不公平等各项指标,回答上文提出的AV出行服务最优供给模式的管理问题。

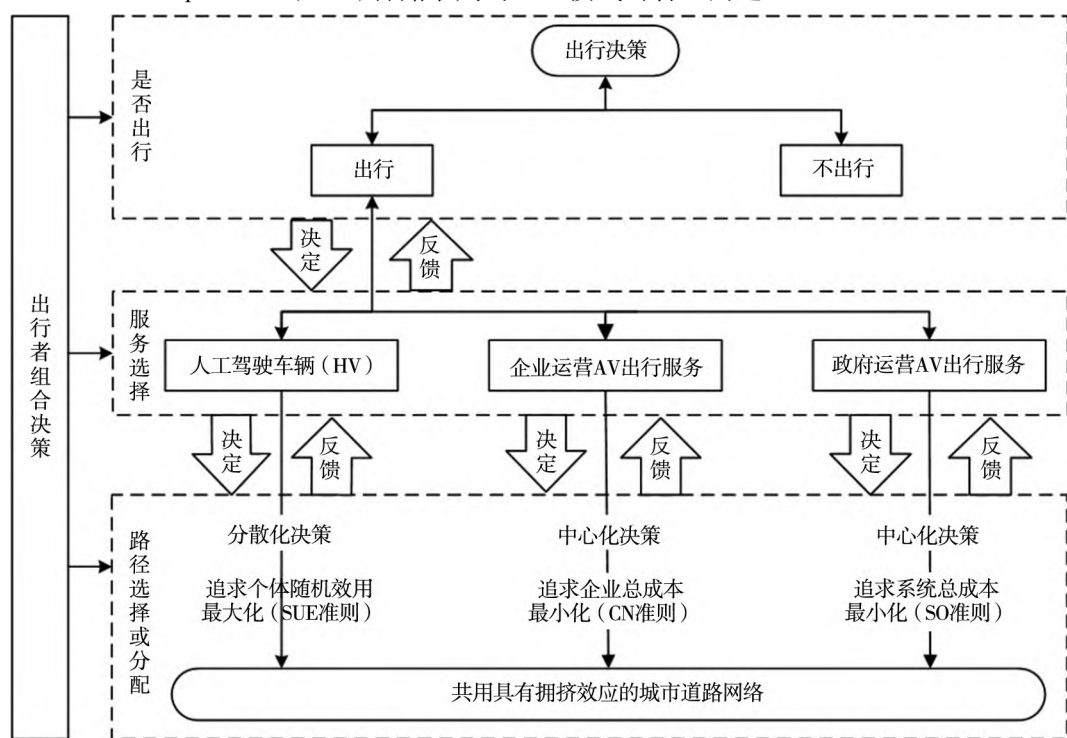


图1 弹性需求下考虑组合决策的混合行为网络均衡模型示意图

Fig.1 Schematic diagram of mixed behavior network equilibrium model considering combination decision under elastic demand

2 弹性需求下考虑组合决策的混合行为网络均衡模型

2.1 符号与假设

用 $G = (N, A, W)$ 表示一个强连通的有向网络,其中 N 、 A 和 W 分别为顶点、路段和起讫(origin-destination, OD)对集合; q_w 表示 OD 对 $w \in W$ 的出行需求, R_w 为连接 OD 对 $w \in W$ 的路径集合。

根据出行方式遵循的路径选择准则,考虑人工驾驶车辆、企业运营的自动驾驶车辆或政府运营的自动驾驶车辆三种出行方式,分别表示为 $m = 1, 2, 3$, 即 $M_w = \{1, 2, 3\}$ 。同时,本研究假设路段的广义旅行成本 $c_m^a(a \in A, m \in M)$ 包含两部分,即旅行时间成本 $t_m^a(a \in A, m \in M)$ 和货币成本 $\tau_m^a(a \in A, m \in M)$,二者均为路段流量 $v_m^a(a \in A, m \in M)$ 的函数。此时,路段的广义旅行成本 c_m^a 可以表示为

③ 为简化问题,暂不考虑地铁、公交等传统出行方式,未来研究可将本研究所构建的模型扩展至考虑更多公共出行方式的情形。

$$c_m^a = v_m t_m^a + \tau_m^a, \forall a \in A, m \in M \quad (1)$$

其中 v_m 表示出行方式 $m \in M$ 的 v_m^a ($a \in A, m \in M$) 用户时间价值参数 (value of time, VOT). 特别地, 假设所有路段均设置了 AV 专用道 (dedicated lanes) 以充分实现自动驾驶的技术潜力, 企业及政府运营的 AV 车辆均能够自由使用专用道. 相应地, 路段的 AV 旅行成本 (t_m^a, τ_m^a) ($m = 2, 3$) 是路段上 AV 流量之和 ($v_{AV}^a = v_2^a + v_3^a$) 的函数, 而 HV 出行者的旅行成本 (t_m^a, τ_m^a) ($m = 1$) 是 HV 流量总和 v_1^a 的函数.

在构建模型之前, 本研究做出以下假设:

假设 1 路段时间及货币成本 (t_m^a, τ_m^a) 是流量 $v^a = (v_1^a, v_2^a, v_3^a)^T$ 的连续可微凸函数.

假设 2 考虑政府补贴等因素, 企业运营 AV 与政府运营 AV 出行服务的货币成本满足 $\frac{\partial \tau_2^a}{\partial v_{AV}^a} \geq \frac{\partial \tau_3^a}{\partial v_{AV}^a}$.

假设 3 考虑 AV 出行的在途体验改善等因素, AV 乘客的 VOT 小于 HV 出行者, 即 $v_2 = v_3 < v_1$.

路网中的流量变量之间则满足以下关系

$$v_m^a = \sum_{w \in W} \sum_{r \in R_{w,m}} \delta_{w,m}^{r,a} f_{w,m}^r, a \in A, m \in M \quad (2)$$

$$v_{AV}^a = v_2^a + v_3^a, a \in A \quad (3)$$

$$\sum_{r \in R_{w,m}} f_{w,m}^r = q_{w,m}, m \in M_w, w \in W \quad (4)$$

$$\sum_{m \in M_w} q_{w,m} = q_w, w \in W \quad (5)$$

$$f_{w,m}^r \geq 0, r \in R_{w,m}, m \in M_w, w \in W \quad (6)$$

$$q_{w,m} \geq 0, m \in M, w \in W \quad (7)$$

其中式(2)描述了路段流量和路径流量之间的定义性约束, 式(3)描述了路段 AV 流量的构成, 式(4)和式(5)分别定义了交通方式和 OD 对之间的流量守恒约束, 式(6)和式(7)则定义了流量的非负约束.

2.2 混合决策准则下的路径选择行为

在 HV-AV 混合交通系统中^④, HV 用户依据个人经验或导航进行路径选择决策, 而 AV 出行

线路则大概率上由 AV 运营商根据运营目标进行统一分配调度, 即构成混合行为决策准则下的网络均衡问题.

对于 HV 用户, 考虑到旅行成本的波动性以及出行者的感知偏差等因素, 假设 HV 用户遵循随机效用最大化 (stochastic utility maximization) 框架自主选择路径, 并服从多元 Logit 路径选择概率模型

$$P_{w,1}^r = \frac{\exp(-\theta \pi_{w,1}^r)}{\sum_{s \in R_{w,1}} \exp(-\theta \pi_{w,1}^s)}, r \in R_{w,1}, w \in W \quad (8)$$

其中 $\pi_{w,1}^r$ 为 OD 对 $w \in W$ 之间路径 r 上使用 HV ($m = 1$) 时的广义成本,

$$\pi_{w,m}^r = \sum_{a \in A} c_m^a(v^a) \cdot \delta_{w,m}^{r,a} \quad (9)$$

为出行方式、路径和路段之间的关联关系指示变量, 当 OD 对 w 间的路径 r 包含路段 a 时等于 1, 否则等于 0; θ 为出行者感知误差离散系数, $\theta \rightarrow 0$ 时出行者倾向于以等概率选择每一条备选路径, $\theta \rightarrow \infty$ 时出行者只选择感知成本最小的路径. 相应地, 将 HV 用户的路径选择问题定义为 HV-SUE 子系统,

$$\min_{f_1 \in \Omega_1} Z_1(f_1, f_2, f_3) = \sum_{a \in A} \int_0^{v_1^a} c_1^a(v) dv + \text{HV-SUE} \sum_{w \in W} \sum_{r \in R_{w,1}} f_{w,1}^r \cdot (\ln f_{w,1}^r - 1) \quad (10)$$

$$a \in A, w \in W, r \in R_{w,1}$$

子系统的均衡条件则定义如下

$$q_{w,1}^r = P_{w,1}^r \cdot q_w, r \in R_{w,1}, w \in W \quad (11)$$

关于企业运营 AV 出行服务, 运营商在车辆互联技术和智能调配算法辅助下统筹调度所运营的 AV 车队, 以最大化企业利润或最小化 AV 车队运营成本. 此时, 企业运营 AV 的出行路线方案可简化视为基于 CN 规则的网络流量分配问题, 可以通过求解式(12)定义的 AV-CN 优化子问题获得

$$\text{AV-CN} \min_{f_2 \in \Omega_2} Z_2(f_1, f_2, f_3) = \sum_{w \in W} \sum_{r \in R_{w,2}} \pi_{w,2}^r(f_1, f_2, f_3) \cdot f_{w,2}^r \quad (12)$$

④ 本研究理论考察的三种混合市场结构 (SUE-CN-SO) 中暗含了市场中仅一家企业的假设. 考虑多个同质化企业时, 所构造的混合行为网络均衡模型相对于单一企业情形来说只有量的区别, 而非质的区别; 考虑多个异质化企业时, 仅需对本模型中不同企业运营 AV 出行服务的费率、等待时间、车上活动种类等特征进行差异化设定即可方便地推广至多企业的情形, 因此, 本研究暂未考虑多个企业与政府共同提供 AV 出行服务的市场结构.

政府运营的 AV 出行服务, 则以促进改善整个城市交通系统(包括企业和政府运营的 AV 以及常规 HV 所有车辆在内)的运行效率为目标, 受政府运营部门的统一调配, 该子系统可以刻画为基于 SO 规则的网络流量分配问题

$$\text{AV-SO } \min_{f_3 \in \Omega_3} Z_3(f_1, f_2, f_3) = \sum_{w \in W} \sum_{r \in R_{w,3}} \pi'_{w,3}(f_1, f_2, f_3) \cdot \sum_{i \in M_w} f_{w,i}^r \quad (13)$$

2.3 出行方式选择行为

出行者在 HV 和(不同) AV 出行服务之间的选择决策可以刻画为多元 Logit 模型, 相应的出行方式选择概率可以表示为

$$P_{w,m} = \frac{\exp(-\psi_w T_{w,m})}{\sum_{n \in M_w} \exp(-\psi_w T_{w,n})} \quad m \in M_w, \quad w \in W \quad (14)$$

其中 $p_{w,m}$ 是 OD 对 $w \in W$ 之间出行方式 m 的选择概率, ψ_w 是 OD 对 $w \in W$ 之间出行方式选择决策的尺度参数, $T_{w,m}$ 是 OD 对 $w \in W$ 之间出行方式 m 的广义感知旅行成本的函数, 即

$$\text{HV-SUE } T_{w,1} = -\frac{1}{\theta_{w,1}} \ln \sum_{s \in R_{w,1}} \exp(-\theta_{w,1} \pi_{w,1}^s), \quad w \in W \quad (15)$$

$$\text{AV-CN } T_{w,2} = \min_{r \in R_{w,2}} \{T_{w,2}^r\}, \quad \forall w \in W \quad (16)$$

$$\text{AV-SO } T_{w,3} = \min_{r \in R_{w,3}} \{T_{w,3}^r\}, \quad \forall w \in W \quad (17)$$

其中式(15)定义了 HV 出行方式的广义感知旅行成本函数, 即为 OD 对间的最小期望路径广义感知旅行成本(Log-sum); 式(16)和式(17)将 AV-CN 与 AV-SO 出行方式的广义感知旅行成本定义为 OD 对之间的最小广义感知旅行成本(见式(22)).

2.4 弹性出行需求

为刻画 AV 出行服务市场结构对城市交通系统出行需求的承载或响应水平的影响, 本研究进一步考虑弹性出行需求, 即 OD 对之间的出行需求会随着出行服务水平的变化而变化. 本研究将 OD 对间的出行需求 q_w 描述为出行服务水平(期望广义感知旅行成本)的函数

$$q_w = D_w(S_w), \quad \forall w \in W \quad (18)$$

其中 S_w 为 OD 对 w 之间的最大期望出行满意度, 由式(19)给出^⑤

$$S_w = -\frac{1}{\psi_w} \ln \sum_{m \in M_w} \exp(-\psi_w \cdot T_{w,m}), \quad \forall w \in W \quad (19)$$

2.5 弹性需求下多方式混合行为网络均衡的变分不等式模型

在上述弹性需求情形下的多方式混合行为网络均衡问题中, AV-CN 和 AV-SO 出行服务共享 AV 专用道并导致非对称的路径旅行成本函数(参考假设 2), 本研究将上述弹性需求情形下的多方式混合行为网络均衡问题刻画为以下变分不等式模型

$$\begin{aligned} & \sum_{w \in W} \sum_{m \in M_w} \sum_{r \in R_{w,m}} T_{w,m}^{r*} (f_{w,m}^r - f_{w,m}^{r*}) + \\ & \sum_{w \in W} \sum_{m \in M_w} \frac{1}{\psi_w} \ln q_{w,m}^* (q_{w,m} - q_{w,m}^*) + \\ & \sum_{w \in W} D_w^{-1}(q_w^*) (q_w - q_w^*) \geq 0 \end{aligned} \quad (20)$$

$$\text{s. t. 同式(2) ~ 式(7)} \quad (21)$$

其中 $T_{w,m}^{r*}$ 和 $D_w^{-1}(q_w^*)$ 分别为均衡状态下的路径广义感知旅行成本和 OD 对出行需求逆函数, $f_{w,m}^{r*}$ 、 $q_{w,m}^*$ 和 q_w^* 分别为均衡状态下的路径和出行方式的流量以及 OD 对之间的出行需求. 特别地, 路径广义感知旅行成本 $T_{w,m}^r$ 刻画了路径 r 上的流量 $f_{w,m}^r$ 对出行方式 m 子系统目标函数 Z_m 的边际贡献, 由路径的广义旅行成本和边际成本贡献两部分构成, 具体定义如下

$$\begin{aligned} T_{w,m}^r(f_1, f_2, f_3) = & \begin{cases} \frac{\partial Z_1}{\partial f_{w,1}^r} = \pi_{w,1}^r + \frac{1}{\theta_{w,1}} \ln f_{w,1}^r, \\ m = 1, \forall r \in R_{w,1}, w \in W, \\ \frac{\partial Z_2}{\partial f_{w,2}^r} = \pi_{w,2}^r + f_{w,2}^r \cdot \frac{\partial \pi_{w,2}^r}{\partial f_{w,2}^r}, \\ m = 2, \forall r \in R_{w,2}, w \in W, \\ \frac{\partial Z_3}{\partial f_{w,3}^r} = \pi_{w,3}^r + (f_{w,1}^r + f_{w,2}^r + f_{w,3}^r) \cdot \frac{\partial \pi_{w,3}^r}{\partial f_{w,3}^r}, \\ m = 3, \forall r \in R_{w,3}, w \in W. \end{cases} \end{aligned} \quad (22)$$

当 $m=1$ 时, $T_{w,m}^r$ 表示 HV-SUE 出行者在 OD 对

⑤ ψ_w 是 OD 对 $w \in W$ 之间出行方式选择决策的尺度参数.

w 之间路径 r 上的感知旅行成本; 当 $m=2$ 时, $T_{w,m}^r$ 表示 AV-CN 用户在 OD 对 w 之间选择路径 r 所产生的部分边际社会成本 (partial marginal social cost); 当 $m=3$ 时, $T_{w,m}^r$ 表示 AV-SO 用户在 OD 对 w 之间选择路径 r 所产生的完全边际社会成本 (full marginal social cost)。

基于假设 1 ~ 假设 3, 上述变分不等式模型式(20) ~ 式(22)具有以下性质:

命题 1 变分不等式模型等价于弹性需求下考虑出行方式—路径组合决策的混合行为网络均衡条件式^⑥。

命题 2 变分不等式模型式(20) ~ 式(22)存在均衡解^⑦。

3 求解算法设计

针对上述弹性需求条件下的变分不等式模型式(20) ~ 式(22), 借鉴 Ryu 等^[17]应用基于路径的梯度投影算法求解弹性需求下的路网流量分配问题, 本研究设计了基于路径的局部线性化求解算法^[4], 并引入自适应步长 (self-regulated averaging, SRA)^[4] 序列。其中, 在路径流量分配子问题中, AV-CN 和 AV-SO 子系统没有解析的路径选择概率模型, 本研究首先基于梯度投影算法求解 AV 子系统式(12)和式(13)获得子系统最优流量分配方案, 然后基于该流量分配结果计算 AV 子系统的路径选择概率以计算 AV 出行方式的辅助流量和调整方向。算法具体步骤如下:

步骤 0 初始化。设置 OD 对需求基数 \bar{q}_w , 初始化路段和路径的流量 $v, f > 0$; 设置出行方式选择和 HV-SUE 用户路径选择决策中的尺度参数 θ_w 和 η_w , SRA 步长序列参数 Γ 和 τ ; 令迭代轮数 $t=0$, 迭代终止误差 $\varepsilon=10e-6$;

步骤 1 更新路段、路径、出行方式的 (广义感知) 成本。基于路段流量 $v_m^a(t)$ 计算路段广义旅行成本 $c_m^a(t)$, 根据式(9) 计算路径旅行成本 $\pi_{w,m}^r(t)$, 根据式(22)和式(15) ~ 式(17) 分别计算路径及出行方

式的广义感知成本 $T_{w,m}^r(t)$ 及 $T_{w,m}(t)$;

步骤 2 更新 OD 对需求。根据式(19) 计算 OD 对间最大期望出行满意度 $S_w(t)$, 根据式(18) 更新 OD 对需求 $q_w(t) = \hat{q}_w(t)$;

步骤 3 计算辅助出行方式流量和路径流量。自顶向下, 结合式(14) 计算辅助的模式分担 $\hat{q}_{w,m}(t)$, 通过求解式(10) ~ 式(13) 获得辅助路径流量分布 $\hat{f}_{w,m}^r(t)$;

步骤 4 确定出行方式和路径流量的迭代方向。将出行方式和路径流量的迭代方向定义为其辅助流量与当前流量的差值

$$\vec{d}(t) = [\hat{q}_{w,m}(t), \hat{f}_{w,m}^r(t)] - [q_{w,m}(t), f_{w,m}^r(t)]$$

步骤 5 确定步长。根据 SRA 线性搜索策略确定步长 $\beta_{iter} = 1/\kappa_{iter}$, 其中

$$\kappa_t = \begin{cases} \kappa_{t-1} + \Gamma, & \text{当 } \|f(t) - \hat{f}(t)\| \geq \|f(t-1) - \hat{f}(t-1)\| \\ \kappa_{t-1} + \tau, & \text{当 } \|f(t) - \hat{f}(t)\| < \|f(t-1) - \hat{f}(t-1)\| \end{cases} \quad (23)$$

其中 Γ 和 τ 的经验取值范围为

$$\Gamma \in [1.5, 2.0], \tau \in (0, 0.5]$$

步骤 6 流量更新。更新出行方式及路径的流量分布 $[q_{w,m}(t+1), \hat{f}_{w,m}^r(t+1)] = [q_{w,m}(t), f_{w,m}^r(t)] + \beta_t \vec{d}(t)$

步骤 7 收敛性判断。算法误差因子定义为相邻两次迭代中出行方式流量以及路径流量分布的 RMSE 的最大值

$$E = \max \left\{ \sqrt{\|q_{w,m}(t+1) - q_{w,m}(t)\| / \sum_w |M_w|}, \sqrt{\|f_{w,m}^r(t+1) - f_{w,m}^r(t)\| / \sum_{w,m} |R_{w,m}|} \right\} \quad (24)$$

如果收敛因子 $E \leq \varepsilon$, 结束; 否则 $t = t+1$ 并返回步骤 1。

需要说明的是, 在步骤 3 中, 计算一种出行方式的辅助流量时假定其他出行方式的流量分布不

⑥ 此处详细证明过程省略, 有兴趣的读者可以联系作者邮箱获取

⑦ 此处详细证明过程省略, 有兴趣的读者可以联系作者邮箱获取

变,然后求解该方式对应的子优化问题.

4 数值算例^⑧

4.1 系统评价指标与模型参数设定

本研究将从三个维度来评价混合交通网络系统状态:出行结构、系统效率和出行者感知公平.首先,需求响应比例(elastic demand ratio, *EDR*)作为城市交通系统服务水平的衡量指标(即该混合交通系统能够吸引和承载的实际出行需求量占潜在总需求的比例),AV出行服务的需求总和(*AV share*)表征自动驾驶出行服务的市场份额或市场渗透率,两个指标共同反映网络出行结构特征.其次,为了使不同市场结构之间具有可比性,选用平均广义成本(average general travel cost, *AGC*)来衡量系统效率,计算方法是所有异质出行者广义感知成本的加权平均值

$$AGC = \frac{1}{\sum_{w \in W} q_w} \sum_{w \in W} \sum_{m \in M_w} \sum_{r \in R_{w,m}} \pi_{w,m}^r f_{w,m}^r \quad (25)$$

在“出行者感知公平”方面,本研究提出平均感知不公平度(index of unfairness, *IOU*)来衡量交通系统中个体感知不公平的平均程度.整个系统的平均感知不公平度由三类用户的平均感知不公平度与对应的模式分担比例加权平均而得.

交通研究对公平性的关注由来已久,目前常见三种分类方法:1)从公平发生的过程与结果不同,将公平化分为程序公平、结果公平和信息公平^[18];2)从资源在不同人群之间分配的视角出发,可以将公平分为横向公平与纵向公平^[19, 20];3)从交通弱势群体面临社会排斥的视角出发,将交通公平刻画为可达性,即关注社会成员具有均等的参与社会活动的机会^[18].常用的量化交通公平的指标包括:变异率、MIN-MAX 比值、Wilson 熵模型、空间可计算一般均衡模型、空间集聚度(莫兰指数)、DEA 模型、成本效益法等.横向公平强调在同一人群中相似的个体得到相似的利益,纵向公平更多关注利益在不同人群中的分配.HV 用户的路径是完全自由选择的结果,因此 HV

用户群体内部较难因为旅行成本的差异而引起横向不公平感,然而却可能因为 AV 出行服务用户有权使用专用道(占用道路公共资源),而产生纵向不公平感.因此,本研究设定 HV 用户的不公平感知来源于自身广义旅行成本与任意 AV 出行服务的广义旅行成本之差与 0 之间的最大值. AV 用户的路径是由运营机构统一调配,由于分配算法不公开、不透明(即不符合程序公正),那么选择同一种 AV 出行服务的个体在不同路径上所经历的旅行成本不同,便可能会引起横向不公平感.因此,AV-CN 与 AV-SO 用户的不公平感知主要来源于同 *OD* 下选择相同模式的不同出行者在旅行成本上的差异.为了方便不同市场结构下该指标具有可比性,两种 AV 出行服务的用户平均感知不公平度由同一种出行方式下的旅行成本的变异系数(标准差/均值)来表征.因此,两种 AV 出行服务用户的 *IOU* 是一个 0 到 1 之间的正数,数值越大代表感知不公平程度越严重.

不失一般性地,在两个算例中,对于两种 AV 出行服务的模型参数进行如下设定:1)同一路段上,AV 专用道与 HV 车道的通行能力之间满足关系 $C_m^a = \xi C_1^a$ ($m=2, 3$),其中,系数 ξ 是同一路段上,AV 专用道的路段通行能力与可供 HV 自由驾驶的常规路段通行能力的比值.由于 AV 技术能够比人工驾驶保持更短的安全时距从而提升道路通行能力, ξ 参数取值一般应大于 1.如非特别声明,在两个算例中 ξ 均为 1.5;2)两种 AV 出行服务费率与私家车费率之间满足关系 $\varpi_2^a = \vartheta_2 \varpi_1^a$ 和 $\varpi_3^a = \vartheta_3 \varpi_1^a$,其中,参数 ϑ_2 和 ϑ_3 是相关的尺度参数,一般来说 $\vartheta_3 \leq \vartheta_2$.具体地,设置 ϑ_2 和 ϑ_3 分别为 7/8 和 6/8, $(\varpi_1^a, \varpi_2^a, \varpi_3^a) = (0.8, 0.7, 0.6)$, $\forall a \in A$;3)两种 AV 出行服务用户的 *VOT* 参数与 HV 用户之间满足关系 $\phi_2 = \phi_3 \leq \phi_1$.由于在体验 AV 出行服务过程中,出行者从实际的驾驶行为中得到解放,可以自由安排路途时间用来休息、娱乐等活动,从而获得更低的时间价值感知.根据 Wang 等^[21],最高等级自动驾驶可节约用户 *VOT* 大约 42%,因此,给定 $\phi_1 = 1.8$,则 $\phi_2 =$

⑧ 因篇幅所限,两个算例中的部分参数设置省略,有兴趣的读者可以联系作者邮箱备案.

ϕ_3 一般应在 0.75 至 1.8 的范围内. 如非特别声明, 在两个算例中参数 $\phi_2 = \phi_3 = \phi$ 设为 1.1.

4.2 单一 OD 路网算例

首先, 考虑一个由三条平行路径构成的单一 OD 简单路网 (如图 2 所示). 网络潜在需求设定为 160, 三条路径的长度 L^a 分别为 3 km、5 km、7 km, HV 用户的道路通行能力 C_1^a 分别为 30 辆/min、40 辆/min、50 辆/min.

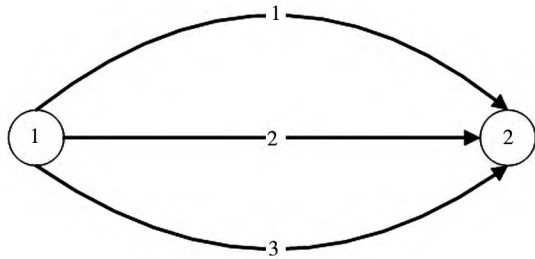


图 2 单一 OD 简单路网

Fig. 2 A simple road network with a single OD pair

4.2.1 均衡条件检验

表 1 展示了在混合行为网络均衡条件下三种出行方式在每条路径上的流量分布 $f_{w,m}^r$ 及其对应的广义感知成本 $T_{w,m}^r$ 、每种出行方式所分担的总流量 $q_{w,m}$ 以及该路网承载的总需求量 q_w . 下文从是否出行、出行方式/服务选择、路径选择/分配三个层次的决策过程出发, 检验该分配方案是否达到了稳定点或是否符合本研究提出的均衡条件 (式(19)), 进而验证算法的正确性.

表 1 单一 OD 路网的混合行为网络均衡解

Table 1 Network equilibrium solution in the single-OD route network

路径#	各出行方式在不同路径上的流量 $f_{w,m}^r$				期望旅行成本 $T_{w,m}^r$			
	HV	AV-CN	AV-SO	总计	HV	AV-CN	AV-SO	总计
1	27.34	13.67	0.00	41.01	10.93	11.05	21.31	—
2	24.76	14.73	0.00	39.49	11.01	11.05	16.39	—
3	2.27	7.38	10.19	19.84	13.00	11.05	13.14	—
总计	54.37	35.78	10.19	100.34	10.35	11.05	13.14	100.34
方式分担率	54.19%	35.66%	10.16%	100%	54.21%	35.63%	10.16%	100%

4.2.2 不同市场结构的系统评价对比

本节使用“所有出行者均选用人工驾驶车辆出行并以 SUE 准则自主择路假设下的网络均衡” (简称 SUE) 来代表现行城市道路交通系统, 并比较不同 AV 出行服务市场结构相比于现行交通系统状态的改善程度. 在上文中初始参数设定条件下, 本节分别考查了潜在总需求 $\sum_{w=1}^W q_w$ 由 40 变化至 240 (以 10 为

首先, 根据式(15)~式(17)可由不同出行方式在每条路径上广义感知旅行成本 $T_{w,m}^r$, 计算得到各个出行方式的广义感知旅行成本 $T_{w,m}^r$ (表 1 第 6 行第 6 列~表 1 第 6 行第 8 列), 再根据式(18)~式(19)可得出下一个迭代步的弹性需求为 100.34, 该值与当前分配条件下路网吸引或承载的弹性需求完全一致, 说明在“是否出行 (弹性需求)”的决策层次, 该分配方案已达到稳定点. 其次, 由三种出行方式的期望旅行成本所计算而得的方式划分结果 (表 1 第 7 行第 2 列~表 1 第 7 行第 4 列) 与由实际流量分配集计而得的方式划分结果 (表 1 第 7 行第 6 列~表 1 第 7 行第 8 列) 完全一致, 说明该分配方案的方式划分结果已达到稳定点. 最后, 针对 HV 用户, 通过每条路径的广义感知费用计算得到下一个迭代步的各路径被选择概率, 与当前分配方案中各路径被选择概率完全一致, 说明自主择路的 HV 用户所组成的子系统已达到均衡条件; 针对选用 AV-CN 或 AV-SO 出行服务的用户, 对比不同路径的期望旅行成本表 1 第 6 列~表 1 第 8 列与该方式下的均衡解路径流量分配结果表 1 第 2 列~表 1 第 4 列不难发现, 两类用户所使用的非零流量的路径分别具有相同且最小的部分边际广义旅行成本或完全边际广义旅行成本. 综上, 算例结果完全支持了推论 5 对于混合网络均衡解的预测. 上述结果既演示了均衡解的正确性, 也检验了算法的合理性.

步长), AV 专用道通行能力系数 ξ (即 AV 专用道通行能力是 HV 使用的常规车道通行能力的倍数) 由 1.0 变化至 2.0 (以 0.1 为步长), AV 用户 VOT 系数 $\phi_2 = \phi_3$ 由 0.1 变化至 1.8 (以 0.1 为步长), 三种 AV 出行服务市场结构与纯粹 SUE 参照系统的效率指标结果. 结果发现, 在上述所有参数组合中, 为政府与企业共同提供出行服务 (SUE-CN-SO 混合) 的交通系统是最优市场结构. 表 2 以潜在总需求 120 (其他

参数均采用基准设置)为例,演示不同市场结构下各系统评价指标的结果.

表 2 不同市场结构在各个系统评价指标下的结果(以潜在总需求为 120 为例)

Table 2 Results under each system evaluation indicator of different market structures (taking a potential total demand of 120 for example)

不同 市场结构	需求 响应水平 (EDR)	方式分担			系统 效率	平均感知不公平度 (IOU)			
		HV-SUE	AV-CN	AV-SO		系统均值	HV-SUE	AV-CN	AV-SO
SUE	74.54	1.00	0.00	0.00	10.11	—	—	—	—
SUE-SO	76.35	0.60	0.00	0.40	9.31	0.328	0.415	—	0.195
SUE-CN	77.43	0.55	0.45	0.00	9.05	0.314	0.407	0.198	—
SUE-CN-SO	79.05	0.48	0.37	0.15	8.83	0.232	0.344	0.179	0.002

注：各评价指标的定义参见 4.1 节

通过不同市场结构下系统均衡时的各项评价指标结果(例如,表 2 第 5 行与表 2 第 3 行或表 2 第 4 行对比)可得到两点结论:1)由于车联网技术使得路段通行能力增加、路途可从事多种活动而使得用户 *VOT* 降低等原因,相较于全部由人工驾驶车辆构成的现行交通系统而言,任何一种 HV-AV 混合交通系统都是帕累托改进的;2)从平均广义成本、总弹性需求、系统或子用户群体的感知不公平度等多个评价维度出发,政府与企业共存的市场结构(SUE-CN-SO 混合)均是最优的,稳定地优于由私人完全垄断(SUE-CN 混合)或由政府完全垄断(SUE-SO 混合)的出行服务供给模式.进一步地,本研究发现在 4.3 节所测试的任意参数组合中,SUE-CN-SO 混合系统始终是最优供给模式,这一定程度上检验了上述结论的一般性.换言之,在本研究模型假设条件下,政府与企业共同经营 AV 出行服务是最优供给模式,不仅吸引更多的出行需求,而且能够达到在效率最优的同时做到社会感知不公平度最低.

4.3 多 OD 路网算例

考虑一个包含 4 个 OD 对、10 条路径的多 OD 路网(图 3),路段参数设置见表 3.如非特别声明,四个 OD 对(1, 2)、(1, 6)、(5, 2)、(5, 6)的基准需求水平分别设定为(20, 25, 20, 25).本节将分析不同模型参数的变化(包括潜在需求水平、AV 专用道通行能力参数、AV 用户 *VOT* 参数)对于 SUE-CN-SO 混合交通系统各维度评价指标的影响.

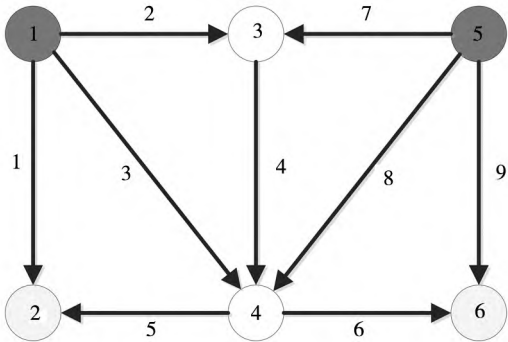


图 3 数值算例使用的多 OD 路网

Fig. 3 Multiple OD-pair network in the example

表 3 多 OD 路网中各路段的参数设置

Table 3 Parameter settings of each section of the multiple OD-pair network

路段#	通行能力 (veh/min)	长度 (km)	自由流速度 (km/min)	路段#	通行能力 (veh/min)	长度 (km)	自由流速度 (km/min)
1	200	3.5	0.5	6	300	4.5	0.9
2	300	2.0	0.8	7	250	8.4	1.2
3	300	4.0	1.0	8	300	6.6	0.6
4	350	1.8	1.2	9	300	11.4	0.6
5	300	2.5	1.0				

4.3.1 潜在需求水平的参数敏感性分析

针对 SUE-CN-SO 混合交通系统,将所有 OD 对的潜在需求水平从基准需求水平的 1 倍变化至 10 倍,其他参数保持在基准水平不变,图 4(a)

展示了 AV 市场份额和需求响应水平的变化趋势,图 4(b)展示了系统效率与感知公平两维度指标的变化趋势.由图 4 可见,随着城市潜在总出行需求的线性扩张,混合交通系统所吸引和承载

的需求水平占比、AV 市场份额均下降. 与此同时, 人均广义成本上升, 群体平均感知不公平度也上升. 这一结果暗示着: 在 AV 市场渗透率内生假设下, 对于人口规模越大的城市, AV 出行服务渗入居民日常生活的阻力越大, 混合交通系统效率更低而社会不公平感更大. 这一现象

背后的原因可能是: 随着需求量增大, 网络变得更加拥堵, 同 OD 对下的 AV-CN 与 AV-SO 两种出行服务需要竞争性地使用 AV 专用道, 它们为对方带来的负外部性逐渐增强, 从而抵消了 AV 出行服务原本的成本优势, 因而导致 AV 份额降低.

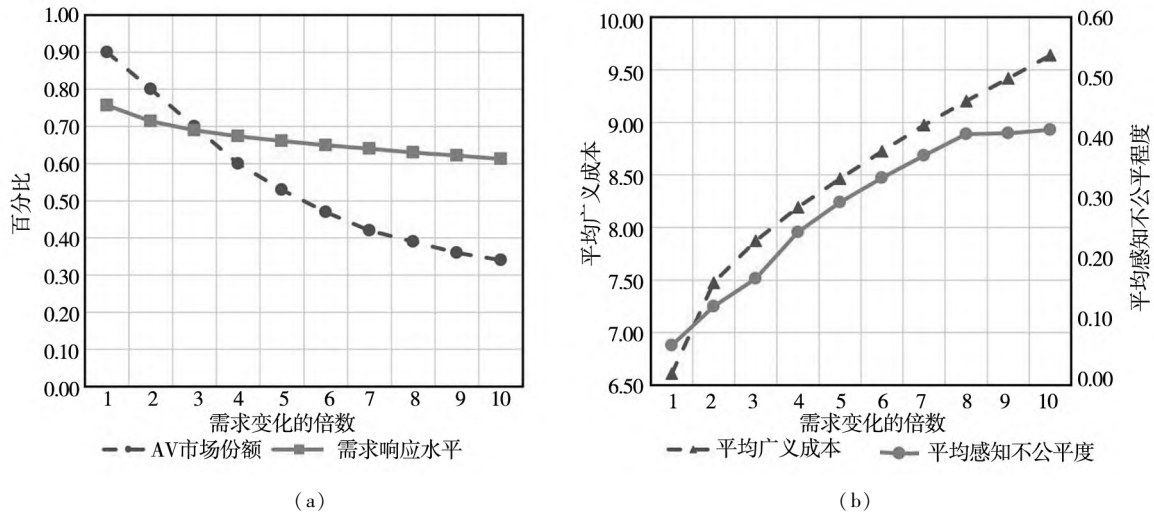


图4 AV 市场份额、需求响应水平、平均广义成本与平均感知不公平度随着需求规模的变化趋势

Fig.4 AV share, demand response level, average generalized cost, and average perceived inequality change with demand size

4.3.2 AV 专用道通行能力水平、AV 用户 VOT 水平的参数敏感性分析

针对 SUE-CN-SO 混合交通系统, 将 AV 专用道通行能力系数 ξ 由 1.0 变化至 3.0 (以 0.2 为步长), 或将 AV 用户 VOT 系数 $\phi_2 = \phi_3 = \phi$ 由 0.7 变化至 1.8 (以 0.1 为步长), 其他参数保持在基准水平不变, 图 5(a) 和图 6(a) 展示了 AV 市场份额和需求响应水平的变化趋势, 图 5(b) 和

图 6(b) 展示了系统效率与公平指标的变化趋势. 无论是 AV 专用道通行能力的增加, 还是 AV 出行服务用户时间价值的降低, 都会使得 AV 出行服务的成本优势更加显著, 导致 AV 市场份额增加. 同时, 系统平均广义成本降低, 又使得混合交通系统的需求响应水平上升. 然而, 图 5(b) 和图 6(b) 中系统平均感知不公平度随着两类参数变化的趋势却是相反的.

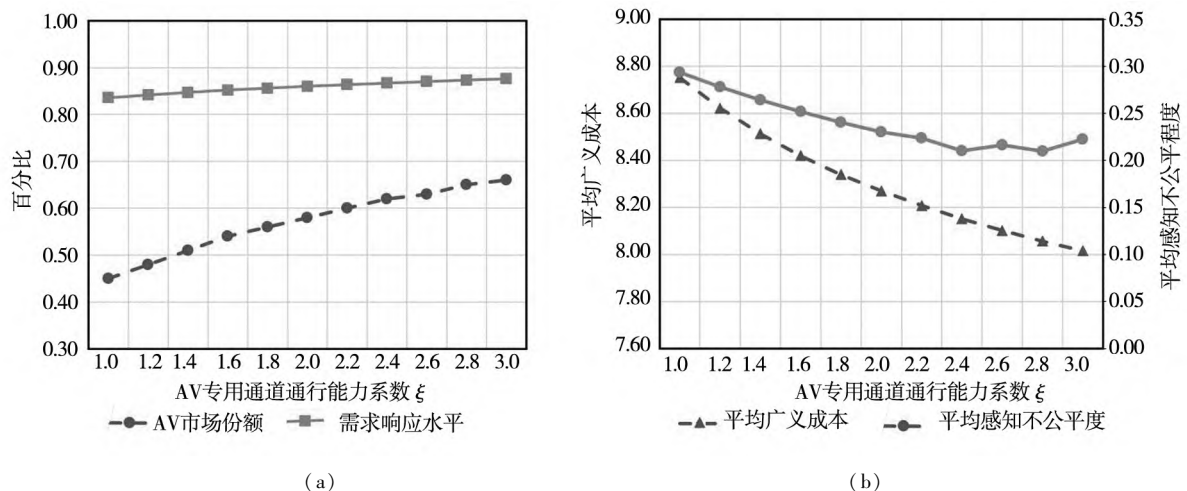


图5 AV 市场份额、需求响应水平、平均广义成本与平均感知不公平度随着 AV 专用道通行能力系数 ξ 变化趋势

Fig.5 The relationship between AV share, demand response level, average generalized cost and average perceived inequality and AV lane capacity coefficient ξ

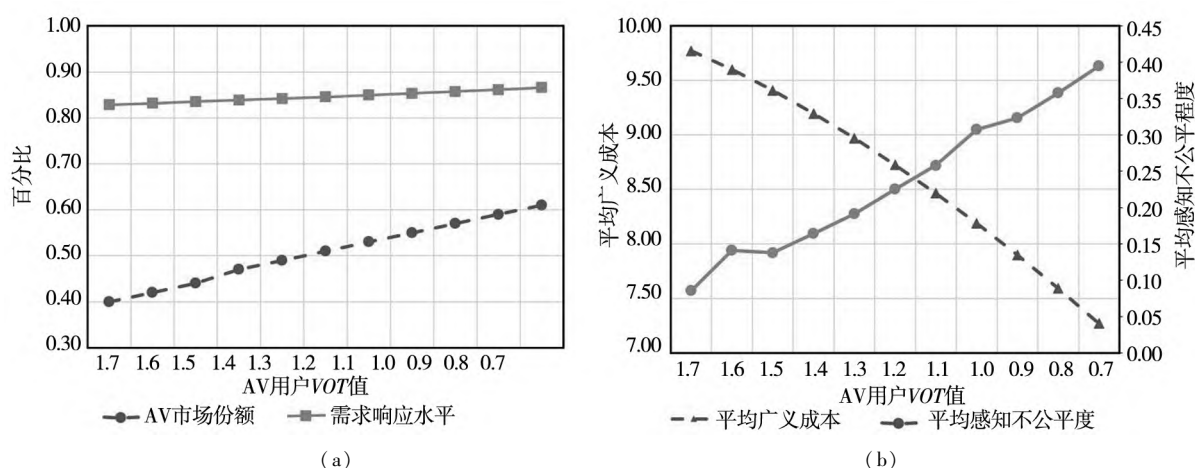


图6 AV市场渗透率、需求响应水平、平均广义成本与平均感知不公平度关于AV用户VOT参数 ϕ 的变化趋势

Fig.6 Trends in AV market penetration, demand response level, average generalized cost, and average perceived unfairness relative to the AV users' VOT parameter ϕ .

图7(a)和图7(b)绘制了三类用户各自感知不公平度随着上述两类参数变化的趋势规律,一定程度上揭示了上述相反变化趋势现象的原因.虽然AV专用道通行能力扩大略微增加了HV群体的感知不公平度,然而由于HV感知不公平度处在适中的水平,随着越来越多的人放弃HV而选择AV出行服务,整个混合交通系统的平均感知不公平度以AV-

CN群体感知不公平度下降为主导,进而下降.相比之下,AV用户VOT值的降低极大地增加了HV感知不公平度并使之处在高位水平,即使越来越多的人放弃HV,群体平均不公平度在HV子用户群体不公平度上升为主导的带动下不断上升.因此,随着AV出行服务的改善,社会公平感知水平的变化趋势存在参数依赖的不确定性.

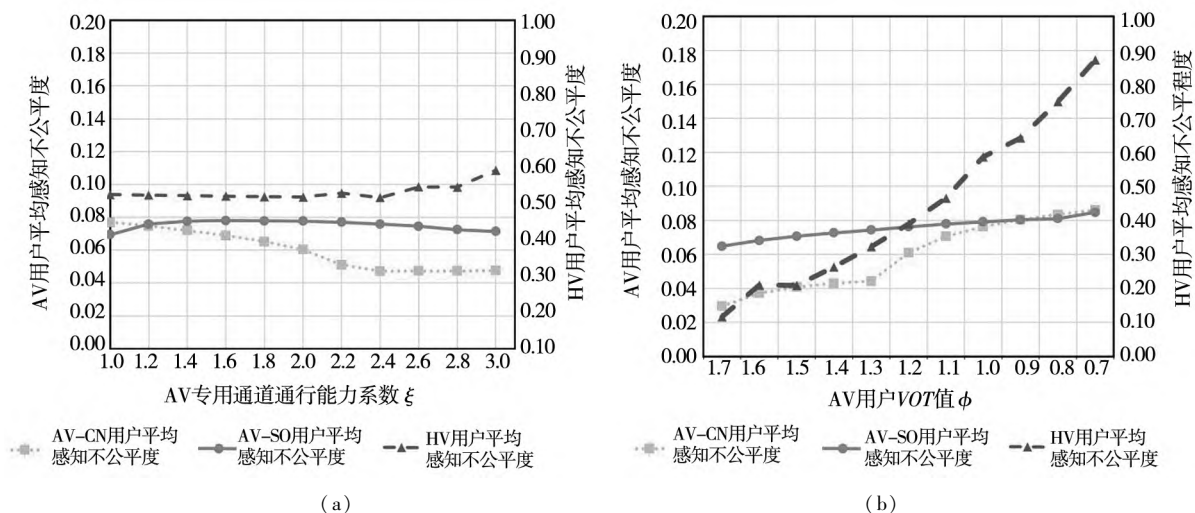


图7 三类用户平均感知不公平度随AV专用道通行能力系数 ξ 和AV用户VOT参数 ϕ 的变化趋势

Fig.7 Trends in average perceived unfairness of the three user categories relative to the dedicated AV lane capacity coefficient ξ and the AV users' VOT parameter ϕ

5 管理启示

本研究模型复杂度高,难以解析证明AV出行服务供给的最优市场结构,然而在数值算例中,

本研究发现:1)相较于完全由HV构成的现行交通系统,混行环境下新型混合交通系统的效率均是帕累托改进的;2)政府与企业共同提供AV出行服务是最优市场结构,不仅能够吸引和服务更多的出行需求,而且能够同时达到在公平和效率

两维度下的最优;3)对于人口规模越大的城市,推动 AV 出行服务渗入居民日常生活的阻力越大,混合交通系统对系统效率提升的程度更低而社会层面的出行不公平感更大.这些结果可以得到三点管理启示:

1)在 AV 落地应用的初期,为了充分释放 AV 新技术与服务模式的红利,应充分调动政府、产业界、金融、媒体、立法机构等多方面的积极性,联手培养出行者对 AV 出行服务的接受度和使用习惯,共同推动 AV 出行服务市场份额的增加.一方面,应升级城市道路基础设施(新增或扩建 AV 专用道/区域),或改善 AV 车内基础设施,从而改善在途体验、提升 AV 出行服务质量;另一方面,要避免改善 AV 出行服务质量以大幅牺牲出行者感知不公平感为代价,从而持续激励出行者自愿、主动地选择 AV 出行服务.

2)面对 AV 出行服务市场,政府应既要当好“后勤员”,又要做好“运动员”.为实现更便捷、更智能、更公平的智慧交通,政府不仅应当以开放的心态支持相关企业为居民提供 AV 出行服务,也应积极地下场或入场,成为出行服务的提供方之一,从而促使 AV 技术在提升城市交通效率、减少环境污染和交通事故率等方面的潜力得以发挥,实现城市交通需求响应水平、系统效率和感知公平的同步提升.

3)可以考虑在人口规模适中的城市率先推广 AV 出行服务,逐步扩展到人口规模更大、交通路况、经济社会活动更为复杂的超大特大城市.目前,我国自动驾驶先行先试区域均集中在特大、超大城市(如北京、上海、武汉、长沙等).然而,由于人口规模适中城市出行需求和网络路况相对简单,率先推广 AV 出行服务的难度小、见效快、社会反响好,既有利于进行数据和技术的快速迭代,也有利于培养用户对 AV 出行服务的信任度和使用习惯.

6 结束语

随着自动驾驶技术的发展和基于移动智能终

端技术的“出行即服务”系统的逐步实现,出行者将不仅可以选用人工驾驶的普通车辆,也可以选择不同运营策略的 AV 出行服务.城市交通管理也由“出行者—管理者”的二元结构转变为“出行者—服务提供者—管理者”的多元结构.那么,在新的多元结构中,新兴的 AV 出行服务市场应当完全由政府垄断、还是完全交给市场、还是由企业与企业共同供给?本研究的理论贡献在于,从出行者选择行为视角出发,首次构建了同时考虑“弹性需求—出行服务/方式选择—路径分配/选择”三层次组合决策的混合行为网络均衡模型,证明了均衡的等价性、存在性等性质并设计了求解算法.数值算例结果显示,在模型假设条件下,政府与企业共存的市场结构是 AV 出行服务的最优供给模式,不仅能够吸引更多的出行需求,而且能够达到在公平和效率双目标维度下的最优.

本研究的实践价值在于,提供了一种混行环境下能够同时预测城市交通需求水平、出行方式划分及网络流量分布的方法工具.其重要潜在应用之一是帮助交通管理者合理预测自动驾驶出行服务的市场需求规模,并评估引入不同运营模式的自动驾驶出行服务所带来的整个交通系统的效率改善程度,为有针对性地制定管理政策合理引导个体机动化出行、精细化地管理自动驾驶出行服务市场提供工具和依据.

未来的研究方向包括:将本研究模型扩展至考虑政府与多个异质企业共同提供出行服务的市场结构、扩展至包含公交、地铁等传统出行方式的混合城市交通网络;在更为复杂路网或真实路网上检验算法效率和最优供给模式结果的一般性;更加精细化地考虑自动驾驶车辆和人工驾驶车辆之间的区别,例如假设非对称的路段成本函数^[21]或假设非对称的用户时间价值函数,或在自动驾驶出行服务模式中考虑出行者的共乘/共享出行行为^[22];以及考虑利用真实的交通大数据来检验模型的现实解释力等^[23].

参 考 文 献:

- [1] 余玉刚, 霍 红, 郑圣明, 等. 管理科学与工程学科“十四五”发展规划以及若干思考[J]. 管理科学学报, 2023, 26(1): 142–158.

- Yu Yugang, Huo Hong, Zheng Shengming, et al. The 14th Five-Year Development Plan and some insights for the discipline of management science and engineering[J]. Journal of Management Sciences in China, 2023, 26(1): 142 – 158. (in Chinese)
- [2] 齐航, 王光超, 张运胜, 等. 自动驾驶出行服务的公众关切与研究展望——兼评“萝卜快跑”世界最大规模无人驾驶商业化运营[J]. 交通运输工程与信息学报, 2024, 22(4): 1 – 12.
- Qi Hang, Wang Guangchao, Zhang Yunsheng, et al. Chinese public attitudes to and research prospects of autonomous mobility services: Comment on the world's largest experiment of “Apollo Go”[J]. Journal of Transportation Engineering and Information, 2024, 22(4): 1 – 12. (in Chinese)
- [3] Harker P T. Multiple equilibrium behaviors on networks[J]. Transportation Science, 1988, 22(1): 39 – 46.
- [4] Wang G, Qi H, Xu H, et al. A mixed behaviour equilibrium model with mode choice and its application to the endogenous demand of automated vehicles[J]. Journal of Management Science and Engineering, 2020, 5(4): 227 – 248.
- [5] Zhang X, Yang H, Huang H J. Multiclass multicriteria mixed equilibrium on networks and uniform link tolls for system optimum[J]. European Journal of Operational Research, 2008, 189(1): 146 – 158.
- [6] Yang H, Zhang X, Meng Q. Stackelberg games and multiple equilibrium behaviors on networks[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2007, 41(8): 841 – 861.
- [7] 镇璐, 高佳静, 谭哲一. 多卡车与多无人机协同配送路径优化问题研究[J]. 管理科学学报, 2024, 27(7): 1 – 18.
- Zhen Lu, Gao Jiajing, Tan Zheyi. Routing problem for collaborative delivery system based on multiple trucks and drones[J]. Journal of Management Sciences in China, 2024, 27(7): 1 – 18. (in Chinese)
- [8] Wang J, Peeta S, He X. Multiclass traffic assignment model for mixed traffic flow of human-driven vehicles and connected and autonomous vehicles[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2019, 126: 139 – 168.
- [9] Liu Z, Song Z. Strategic planning of dedicated autonomous vehicle lanes and autonomous vehicle/toll lanes in transportation networks[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2019, 106: 381 – 403.
- [10] Chen Z B, He F, Yin Y F, et al. Optimal design of autonomous vehicle zones in transportation networks[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2017, 99: 44 – 61.
- [11] Li R, Liu X, Nie Y. Managing partially automated network traffic flow efficiency vs stability[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2018, 114(8): 300 – 324.
- [12] Chen Z B, Lin X, Yin Y F, et al. Path controlling of automated vehicles for system optimum on transportation networks with heterogeneous traffic stream[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2020, 110: 312 – 329.
- [13] Wang D, Li W, Zhu L, et al. Learning to control and coordinate mixed traffic through robot vehicles at complex and unsignalized intersections[J]. The International Journal of Robotics Research, 2025, 44(5): 805 – 825.
- [14] Chen Z B, He F, Zhang L H, et al. Optimal deployment of autonomous vehicle lanes with endogenous market penetration[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2016, 72: 143 – 156.
- [15] Tian L J, Sheu J B, Huang H J. The morning commute problem with endogenous shared autonomous vehicle penetration and parking space constraint[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2019, 123(5): 258 – 278.
- [16] 永贵, 田丽君, 李鹏博. 异质用户和内生市场渗透率下的自动驾驶收益——基于累积前景理论的方法[J]. 系统科学与数学, 2023, 43(9): 2328 – 2340.
- Yong Gui, Tian Lijun, Li Pengbo. The benefits for autonomous driving with heterogeneous users and endogenous market penetration: Based approach of a cumulative prospect theory[J]. Journal of Systems Science and Mathematical Sciences, 2023, 43(9): 2328 – 2340. (in Chinese)
- [17] Ryu S, Chen A, Choi K. A modified gradient projection algorithm for solving the elastic demand traffic assignment problem[J]. Computers & Operations Research, 2014, 47(7): 61 – 71.
- [18] 徐淑一, 陈平. 收入、社会地位与幸福感——公平感知视角[J]. 管理科学学报, 2017, 20(12): 99 – 116.
- Xu Shuyi, Chen Ping. Income, social status, and happiness: Fairness perception perspective[J]. Journal of Management Sciences in China, 2017, 20(12): 99 – 116. (in Chinese)
- [19] 林晓言, 张泽华, 王梓利. 中国交通公平性测度研究——基于交通基尼系数的分析[J]. 宏观经济研究, 2019, 246

- (5):154–167.
- Lin Xiaoyan, Zhang Zehua, Wang Zili. China's study on traffic equity measurement: An analysis based on traffic Gini coefficient[J]. *Macroeconomics*, 2019, 246(5): 154–167. (in Chinese)
- [20] Liu D, Liu J, Li Q, et al. Technology inflow following high-speed railway: Evidence from Chinese cities[J]. *Journal of Management Science and Engineering*, 2023, 8(4): 570–583.
- [21] Wang J, Peeta S, He X. Multiclass traffic assignment model for mixed traffic flow of human-driven vehicles and connected and autonomous vehicles[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2019, 126: 139–168.
- [22] 朱鸿伟, 田丽君, 许 岩. 鼓励合乘的可交易电子路票策略管理混合时代出行需求[J]. *系统工程理论与实践*, 2022, 42(5): 1314–1326.
- Zhu Hongwei, Tian Lijun, Xu Yan. The tradable credit scheme that encourages carpooling manage the travel demand in the era of mixed traffic[J]. *Systems Engineering: Theory & Practice*, 2022, 42(5): 1314–1326. (in Chinese)
- [23] Lin W, Wei Y. Economic forecasting with big data: A literature review[J]. *Journal of Management Science and Engineering*, 2024, 9(2): 254–270.

Analysis on the supply mode of autonomous mobility service in mixed traffic environment

QI Hang^{1,3}, WANG Guang-chao^{2*}, JIA Ning^{3,4}, LING Shuai^{3,4}, HE Zheng-bing⁵

1. Interdisciplinary Research Institute in New Finance and Economics (School of Digital Economics), Hubei University of Economics, Wuhan 430205, China;
2. School of Information Management, Central China Normal University, Wuhan 430079, China;
3. College of Management and Economics, Tianjin University, Tianjin 300072, China;
4. Laboratory of Computation and Analytics of Complex Management Systems, Tianjin University, Tianjin 300072, China;
5. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge MA 2139–9307, USA

Abstract: In the era of mixed transportation systems, where service-oriented autonomous vehicles (AV) coexist with human-driven regular vehicles (HV), urban transportation network flows will consist of “decentralized” decisions made by commuters who choose the HV mode, and “centralized” decisions made by AV mobility service operators who assign routes to travelers opting for their AV mobility services. This paper presents a hybrid behavior equilibrium model that integrates the combined decision-making processes of elastic demand, traveler service/mode selection, and route allocation/choice, which enriched the theories of mixed networks equilibrium in mixed traffic environment. Two numerical examples are used to verify the effectiveness of the model, revealing that the optimal supply mode for the AV service market is a joint effort between the government and private enterprises. More importantly, this market structure can simultaneously achieve optimal efficiency in the transportation system and minimal perceived unfairness for travelers. This study provides valuable insights into important management questions such as what role the government should play in the AV service market.

Key words: Intelligent Transportation Systems; mixed behavior equilibrium; combined choices; variational inequalities; market structure; social fairness