

手机召车软件影响下城市出租车运营平衡模型探讨

曹 祎¹, 朱 海²

(1. 四川成渝高速公路股份有限公司, 四川 成都 610041; 2. 西南交通大学交通运输与物流学院, 四川 成都 610031)

摘 要:手机召车软件深刻变革了城市出租车系统,为供需双方搭建了信息平台,出租车空驶时,需完成双层选择。上层为选择使用手机召车软件的网约模式或者不使用手机召车软件的巡游模式;下层为选择下一乘客的起点小区,下层区域选择受上层模式选择特征影响。文章分析了模式选择与区域选择的关系,构建基于出租车选择行为的出租车运营平衡模型,并探讨两种模式对应的乘客在等待过程上的差异,以便于计算基于小区特征的等待时间。算例结果表明:网约模式的出租车搜索时间比巡游模式受出租车规模影响小;出租车规模较小时,巡游模式的利用率较网约模式低;随着规模增大,巡游模式利用率下降 6.2%,网约模式利用率下降 13.1%,且此时网约模式的利用率较低,乘客等待时间的差距缩短。可见,手机召车软件可有效改善信息不对称,但在出租车规模较大时边际效应明显。

关键词:城市出租车系统;均衡模型;手机召车软件;出租车搜索行为;乘客等待时间

中图分类号:U469.12 **文献标识码:**A **DOI:** 10.13282/j.cnki.wccst.2019.06.042

文章编号:1673-4874(2019)06-0162-05

Discussion on Equilibrium Model of Urban Taxi Operation under the Influence of E-hailing Software

CAO Yi¹, ZHU Hai²

(1. Sichuan Chengyu Expressway Co., Ltd., Chengdu, Sichuan, 610041; 2. School of Transportation and Logistics, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan, 610031)

Abstract: The e-hailing software has profoundly changed the urban taxi system, and builds an information platform for both the supply and demand sides, and, when the taxi is empty, it needs to complete the double-layer selection, the upper layer is to select the online reservation mode of e-hailing software or not using the cruise mode of e-hailing software, the lower layer is to select the starting community of next passenger, and the lower-layer area selection is affected by the upper-layer mode selection feature. This article analyzes the relationship between mode selection and region selection, constructs a taxi operation equilibrium model based on taxi selection behavior, and discusses the difference of corresponding passenger waiting process under the two modes, in order to calculate the waiting time based on community characteristics. The calculation results show that the taxi search time of online reservation mode is less affected by the taxi scale than the cruise mode. When the taxi scale is small, the utilization rate of cruise mode is lower than online reservation mode. As the scale increases, the cruise mode utilization rate is decreased by 6.2%, and the utilization rate of online reservation mode is decreased by 13.1%. At this time, the utilization rate of online reservation mode is lower, and the gap between passenger waiting times is shortened. It can be seen that the e-hailing software can effectively improve the information asymmetry, but the marginal effect is obvious when the taxi scale is large.

Keywords: Urban taxi system; Equilibrium model; E-hailing software; Taxi search behavior; Passenger waiting time

作者简介

曹 祎(1989—), 博士, 研究方向: 交通网络均衡;

朱 海(1988—), 博士研究生, 研究方向: 路网均衡。

0 引言

“互联网+”城市交通为城市公共出行服务的供给侧改革和优化带来了机遇,需要重新审视基于信息平台的出租车系统。面对技术革新与行业演化,急需理清出租车系统中传统与新型两种模式的差异,把握信息背景下的市场运转机制特征。

Yang 和 Wong 在 Douglas^[1] 提出在经典出租车固定需求的框架上开创出租车市场均衡问题^[2-3]。Wong 认为空驶出租车的选择由两个子模型构成^[4-5]。以上研究均设定在传统出租车市场的背景下以讨论空驶行为的随机性。然而在信息环境下,空驶车可通过手机召车软件提前获知需求分布信息,基于自身利益最大化动态调整搜索策略,传统研究难以完整涵括这种转变过程。

目前,已有学者注意到出租车市场变化态势:Zhao 采用纽约的出租车信息平台数据,得出手机召车软件这一技术创新为制度革新提供了可行性^[6];Xia 构建了出租车行业评价指标体系^[7];Hai 认为互联网专车是出租车的有效补充^[8];He 讨论了出租车司机及乘客的双边选择均衡问题^[9]。以上研究多集中于对手机召车软件这一技术手段本身的探讨,较少涉及系统运转机制及内生变量的变化。

通过以上分析可知,空驶出租车的搜索行为,是区分新型与传统出租车系统的关键。将使用手机召车软件完成出租车服务的召车模式称为网约模式,反之为巡游模式。假设所有出租车均已配备手机召车软件,在上一乘客下车后,可自由选择下一乘客。本文拟量化出租车选择行为,构建信息环境下出租车系统重构的运营平衡模型,旨在为决策部门掌握手机召车软件特性及制定管控方案提供理论参考。

1 出租车网络平衡模型

有道路网络 G ; I 为起点小区集合, $i \in I$; J 为终点小区集合, $j \in J$ 。 q_{ij}^1 、 q_{ij}^2 分别表示 i 从小区至 j 小区实载的巡游车及网约车数量;令 O_i^1 、 O_i^2 分别为 i 小区的巡游车及网约车需求量, O_i 为 i 小区的出租车的总需求量。则有:

$$O_i^k = \sum_{j \in J} q_{ij}^k, k=1,2 \quad (1)$$

$$O_i = O_i^1 + O_i^2 \quad (2)$$

单位时间内所有从 i 小区出发的实载巡游车及网约车到达 j 小区后,转变为空驶状态, j 小区产生的空驶车数量 D_j 为:

$$D_j = \sum_{i \in I} q_{ij}^1 + \sum_{i \in I} q_{ij}^2 \quad (3)$$

令 D_j^1 、 D_j^2 分别为 j 小区产生的空驶巡游车及空驶网约车数量,则:

$$D_j = D_j^1 + D_j^2 \quad (4)$$

1.1 空驶出租车的区域选择行为

对于空驶巡游车,出租车依靠驾驶员主观经验搜索乘客,空驶阶段需考虑空驶成本。出租车在上一乘客下车到下一乘客上车之间的行驶距离称为空驶里程,巡游车倾向于选择空驶里程短且乘客需求量的小区。对于在 j 小区的空驶巡游车选择 i 小区作为下一乘客起点的概率 P_{ji}^1 ,可用 Logit 模型近似表示^[10],则有:

$$P_{ji}^1 = \frac{\exp[-\beta_1(h_{ji}\theta O_i + w_i^1)]}{\sum_{r \in I} \exp[-\beta_1(h_{jr} - \theta O_r + w_r^1)]} \quad (5)$$

式中: β_1 为巡游车修正值,越大代表对路网特征及需求等预估的不确定性越小; h_{ji} 为车辆从 j 小区至 i 小区的最短行程时间,网约车及巡游车在相同 OD 下的行程时间一致; θ 为将出行需求转化为对时间影响的系数; w_i^1 为巡游车在 i 小区内搜索乘客的时间。由于乘客并非集中于 i 小区同一位置,巡游车在到达 i 小区后,还需在小区内部巡游搜索乘客。

对于空驶网约车,可通过手机召车软件提前获知需求信息并预约乘客。由于已约定某一乘客, i 小区的需求量大小不再影响搜索行为。在 j 小区的空驶网约车选择小区作为下一乘客起点的概率 P_{ji}^2 为^[11]:

$$P_{ji}^2 = \frac{\exp[-\beta_2(h_{ji} + w_i^2)]}{\sum_{r \in I} \exp[-\beta_2(h_{jr} + w_r^2)]} \quad (6)$$

式中: β_2 为网约车修正值; w_i^2 为网约车从 i 小区的中心到达乘客位置所需时间。

1.2 空驶出租车的模式选择行为

在 j 小区的空驶出租车,基于自身效益最大化选择巡游模式或者网约模式两种不同模式对应不同的负效用,因此将出租车的选择行为表示为 NL 模型,如图 1 所示。

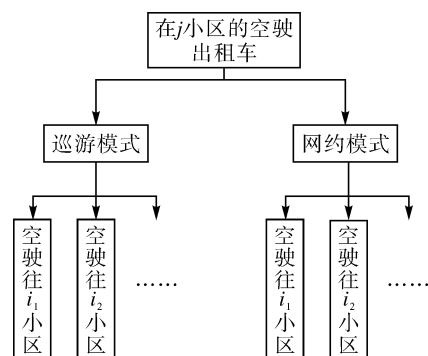


图1 空驶出租车选择行为模型结构示意图

可见,空驶出租车的选择行为可划分为上层的模

式选择及下层的区域选择。1.1 中已论述了两种模式下出租车的区域选择行为,在模式选择时,采用 logsum 参数表示区域选择肢的负效用:

$$L_j^1 = -\frac{1}{\beta_1} \ln \sum_{i \in I} \exp(-\beta_1 U_{ji}^1) \quad (7)$$

$$L_j^2 = -\frac{1}{\beta_2} \ln \sum_{i \in I} \exp(-\beta_2 U_{ji}^2) \quad (8)$$

式中: L_j^1 、 L_j^2 分别表示从 j 小区离开的巡游车及网约车的感知负效用; U_{ji}^1 、 U_{ji}^2 分别表示在巡游模式或网约车模式下,在 j 小区的空驶车选择 i 小区的负效用,由式(5)、式(6)可知,空驶过程中的负效用可由下式确定:

$$U_{ji}^1 = h_{ji} - \theta O_i + w_i^2 \quad (9)$$

$$U_{ji}^2 = h_{ji} + w_i^2 \quad (10)$$

得出在 j 小区的空驶车在模式选择后,两种模式的选择比例为:

$$D_j^k = D_j \frac{\exp(-\beta_3 L_j^k)}{\exp(-\beta_3 L_j^1) + \exp(-\beta_3 L_j^2)}, k=1,2 \quad (11)$$

式中: β_3 是模式选择层的扩散系数,为保证双层模型的一致性,需 $\beta_1 \gg \beta_3, \beta_2 \gg \beta_3$ 。

1.3 运营时间守恒约束

出租车在实载与空载状态中转换,运营时间包括实载时间与空载时间。巡游车及网约车的总实载时间分别用 T_o^1 、 T_o^2 表示,有:

$$T_o^k = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} q_{ij}^k h_{ij}, k=1,2 \quad (12)$$

对于从 j 小区出发以 $P_{ji}^k (k=1,2)$ 的概率选择 i 小区的空驶车,到达 i 小区的流量满足:

$$\sum_{j \in J} D_j^k P_{ji}^k = O_i^k, k=1,2 \quad (13)$$

空驶时间包括从 j 小区至 i 小区的行程时间与在 i 小区内的时间,对于巡游车及网约车的总实载时间分别以 T_v^1 、 T_v^2 表示:

$$T_v^k = \sum_{j \in J} \sum_{i \in I} D_j^k P_{ji}^k (h_{ji} + w_i^k), k=1,2 \quad (14)$$

巡游车、网约车的总实载时间与总出租车空驶时间之和应与出租车的总数量满足守恒关系:

$$\sum_{k=1}^2 (T_o^k + T_v^k) = N \quad (15)$$

式中: N 为出租车总规模。

联立式(8)、式(10)即可构建单位时间内出租车运营的网络平衡模型为:

$$\begin{cases} \sum_{j \in J} D_j^1 P_{ji}^1 = O_i^1 \\ \sum_{j \in J} D_j^2 P_{ji}^2 = O_i^2 \\ \sum_{k=1}^2 [\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} q_{ij}^k h_{ij} + \sum_{j \in J} \sum_{i \in I} D_j^k P_{ji}^k (h_{ji} + w_i^k)] = N \end{cases} \quad (16)$$

2 乘客等待时间

乘客等待时间是衡量出租车系统服务水平的核

心指标,下面将量化两种模式对应的乘客等待时间差异。对于空驶巡游车,空驶时间决定乘客等待时间。沿用文献^[1]理论,巡游车的空驶里程覆盖完小区道路总长度的时间为巡游乘客的平均等待时间 $W_i^{[2]}$,有:

$$W_i^1 = \eta \frac{Z_i}{O_i^1 w_i^1 v^1} \quad (17)$$

式中: η 为固定修正系数; Z_i 为 i 小区的道路总里程; v^1 为巡游车空驶时的行驶速度。

网约车到达 i 小区后,不在 i 小区内巡游搜索乘客而是直达乘客所在处。网约车乘客的等待过程由两部分构成:第一部分是乘客在手机召车软件上发布需求直至有网约车响应,以 R 表示;第二部分是该网约车在 i 小区内到达乘客所在处的时间,可用每乘客分配到时间 $\frac{w_i^2}{O_i^2}$ 表示。因此,网约车乘客的平均等待时间 w_i^2 为:

$$W_i^2 = R + \frac{w_i^2}{O_i^2} \quad (18)$$

$$W_i^2 = \frac{\bar{l}_i}{v^2} \quad (19)$$

式中: R 与供需双方对手机召车软件的操作熟练程度有关,为常数; \bar{l}_i 表示在 i 小区内网约车到达乘客处的平均距离; v^2 表示网约车空驶时的行驶速度。

3 模型求解

在网络平衡模型(16)中,在给定的路网及需求分布条件下,通过本文 1.3 节可得出网约车在 i 小区内到达乘客处的时间 w_i^2 。平衡模型内生变量仅为巡游车在 i 小区搜索时间 w_i^1 ,其数量为小区数,与模型(16)具有的独立方程数相同。模型(16)可使用 Brouwer 不动点定理证明具有唯一解。构建与模型(16)等价的熵型最小化问题,该问题是具有线性约束的凸规划,表示对应 KKT 条件,设计出空驶出租车的选择过程的迭代算法,最终求出满足收敛准则的最优解^[12]。

4 算例分析

以某实际道路为例进行分析,该网络有 5 个小区节点,小区间的固定 OD 需求及最短行程时间分别如表 1、表 2 所示。

取 β_1 、 β_2 、 β_3 分别为 0.2、0.5、0.7^[12]; θ 为 0.01; η 为 10; R 为 0.01; σ_1 、 σ_2 、 σ_3 、 σ_4 、 σ_5 分别设定为 5、15、25、35、45。与乘客预约的网约车与搜索状态的巡游车虽为空驶,巡游车通过降低行驶速度以增加途中发

现乘客的概率,因此 $v^1 < v^2$, 取 v^1 为 20, v^2 为 35, 可计算得 $w_i^2, w_i^1, i \in I$ 。

表 1 OD 需求表(乘次 $\cdot h^{-1}$)

| 小区 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|----|----|----|----|----|----|
| 1 | 0 | 40 | 30 | 30 | 20 |
| 2 | 25 | 0 | 20 | 30 | 25 |
| 3 | 10 | 35 | 0 | 10 | 30 |
| 4 | 15 | 25 | 10 | 0 | 35 |
| 5 | 40 | 20 | 30 | 15 | 0 |

表 2 小区间最短行程时间表(h)

| 小区 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|----|------|------|------|------|------|
| 1 | 0 | 0.18 | 0.2 | 0.12 | 0.17 |
| 2 | 0.18 | 0 | 0.16 | 0.22 | 0.15 |
| 3 | 0.2 | 0.16 | 0 | 0.24 | 0.18 |
| 4 | 0.12 | 0.22 | 0.24 | 0 | 0.2 |
| 5 | 0.17 | 0.15 | 0.17 | 0.2 | 0 |

令出租车规模分别为 400、450、500、550。采用 MATLAB R2012 编程设定初始值为 $D_j^i = 0.7D_j$ 、 $D_j^2 = 0.3D_j$, 分别计算出(16)对应的独立方程的解, 经过 8 次迭代达到稳定收敛值。出租车搜索时间、乘客等待时间及出租车时间利用率计算结果如图 2 所示。出

租车利用率指实载时间占总时间的比例。

随着出租车规模增加, 结合图 2(a)、图 2(c)可知: 巡游车搜索时间总增幅为 51%, 出租车规模增加意味着市场中出租车运力增加, 即总运营时间增加, 在需求固定的情况下, 巡游车搜索对象为路网中的任一乘客, 因此搜索时间增加, 整体利用率降低了 6.2%; 网约车搜索时间不受出租车规模影响, 这是由于网约车的服务对象为路网中的特定的已预约乘客, 搜索时间只由供需双方的距离等路网特征决定, 搜索时间稳定, 整体利用率降低了 13.1%, 比巡游车更为敏感。由图 2(b)可知: 随着出租车规模的增加, 巡游车乘客更容易扬招到出租车, 等待时间下降明显; 参考式(7)、式(8)可知, 随着巡游车的负效用增加, 而网约车搜索时间未变, 网约车的负效用也不变, 出租车更倾向于选择网约模式; 由式(18)可知, 网约车乘客等待时间则间接降低。此外, 在出租车规模较小时, 网约模式的乘客等待时间短, 同时利用率也高; 规模较大时, 网约车与巡游车乘客等待时间接近, 此时巡游模式的利用率较高, 说明此时手机召车软件边际效应有限。

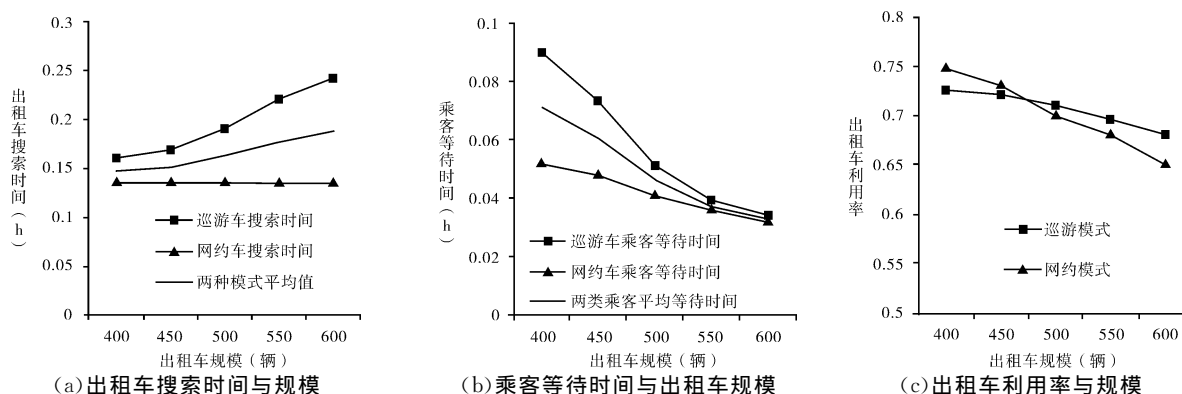


图 2 出租车规模灵敏度分析图

5 结语

在手机召车软件广泛使用的背景下, 本文确定了空驶出租车选择行为的多层次结构。上层为模式选择(巡游模式或网约模式); 下层为区域选择(下一乘客的起点小区)。并依次量化了选择效用, 建立了考虑空间路网特征的出租车市场平衡模型。在平衡状态时, 空驶出租车不可通过改变选择行为以增加效用。通过算例分析可知, 在一定的规模下, 巡游模式

在出租车搜索时间及乘客等待时间上, 受出租车规模影响的波动性更大, 证实了手机召车软件在规模较小时对信息不对称的改善作用; 但在规模较大时, 该作用十分有限。本文的研究是在出租车总需求固定的前提下进行的, 对于弹性需求的变化, 将是下一步的研究方向。

参考文献

- [1] Douglas G W, Douglas G W. Price Regulation and Optimal Service Standards: The taxicab Industry [J]. Journal of

- Trans-Port Economics and Policy, 1972(20): 116—127.
- [2] Yang H, Wong S C. A network model of urban taxi services [J]. Transportation Research Part B Methodological, 1998, 32(4): 235—246.
- [3] Yang H, Wong K I, Wong S C. Modeling urban taxi services in road networks: Progress, problem and prospect [J]. Journal of Advanced Transportation, 2001, 35(3): 237—258.
- [4] Wong R C P, Szeto W Y, Wong S C. A two-stage approach to modeling vacant taxi movements [J]. Transportation Research Part C Emerging Technologies, 2015 (59): 147—163.
- [5] Wong R C P, Szeto W Y, Wong S C. Behavior of taxi customers in hailing vacant taxis: a nested logit model for policy analysis: [J]. Journal of Advanced Transportation, 2015, 49 (8): 867—883.
- [6] Zhao J. Humanizing Travel: How E-hail Apps Transform Stakeholder Relationships in the U.S. Taxi Industry [C]. Transportation Research Board 94th Annual Meeting, 2015.
- [7] Xia T. Evaluation of Efficiency of Taxi Industry: Effects of Taxi-Calling Mobile Apps [C]. Transportation Research Board Annual Meeting 94th Annual Meeting, 2015.
- [8] Hai D J, Yang Y J, Li W F, et al. How the Chauffeured Cars Affect the Taxi Market? A Case Study in Xiamen, China [C]. Presented at the 95th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D.C., 2016.
- [9] He F, Shen Z J M. Modeling taxi services with smartphone-based e-hailing applications [J]. Transportation Research Part C Emerging Technologies, 2015(58): 93—106.
- [10] Wang X L, He F, Gao O. Pricing Strategies for an E-hailing Platform in Taxi Service [C]. Presented at the 95th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D.C., 2016.
- [11] 曹 伟, 陶龑宇, 罗 霞. 打车软件使用率对出租车社会福利的影响 [J]. 交通运输系统工程与信息, 2015, 15 (3): 1—6.
- [12] Shi Y, Lian Z. Optimization and Strategic Behavior in a Passenger-taxi Service System [J]. European Journal of Operational Research, 2016(249): 1024—1032.

收稿日期: 2019-03-05

(上接第 128 页)

的扰动, 施工过程尽可能采用人工开挖辅以机械开挖, 同时保证左右洞开挖应错开一定的距离。

(5) 强化工人质量安全意识与优化施工工序, 缩短工序间衔接时间, 确保开挖完成后能及时进行支护封闭, 防止围岩暴露时间过长而出现松弛坍塌现象。

(6) 二次衬砌及仰拱施工紧跟开挖面, 确保二次衬砌及早加入结构受力。

(7) 对隧道渗水量进行实时监控, 采用对地下水以堵为主的处理方法。根据物探与钻探结果, 及时调整平田隧道涌水突泥处理方案, 对隧道洞内涌水量大的段落采用全断面径向注浆堵水的方法。

(8) 编制相应的平田隧道应急救援预案, 配备相关的救援设施、设备, 以防在隧道内掌子面后方发生塌方等事故时, 保证对被困人员实施安全、快速、有效的救援, 最大限度地减少事故损失。

4 结语

综上所述, 随着我国高速公路的发展, 公路工程

隧道的建设也越来越多, 而隧道工程浅埋段施工的各种问题也日渐突出。本文从隧道工程浅埋段的施工方案方面入手, 着重分析了浅埋段施工技术, 并依托实体工程——平田隧道, 研究了适合平田隧道浅埋段的施工方案, 通过对浅埋段施工方案的选择及其他处理措施的综合应用, 确保了隧道工程浅埋段的施工质量和安全。

参考文献

- [1] JTGF60—2009, 公路隧道工程施工技术规范[S].
- [2] 颜 研. 超浅埋暗挖隧道下穿高速公路施工技术探讨 [J]. 科技经济市场, 2015(3): 5, 6.
- [3] 郑更臣. 公路隧道工程中浅埋地段的施工技术 [J]. 设备管理与维修, 2017(5): 130—131.

收稿日期: 2019-03-10