

有限理性在交通领域应用研究综述

关宏志, 李 涛

(北京工业大学交通工程北京市重点实验室, 北京 100124)

摘要:为更好地对有限理性视野下的交通行为进行研究,总结梳理了现有关于有限理性视野下的出行行为研究及其成果,并将这些研究从2个方面进行了归纳和总结:一方面是与微观交通行为相关联的研究,其目的多为发现出行者在有限理性视野下的决策过程及行为规律;另一方面是与宏观交通分配模型相关联的研究,其作用在于松弛原有分配模型的完全理性假设,建立与实际更为相符的交通分配模型. 研究表明:以往的相关研究可以分成信息获取不完全或备选方案不完备假设下的有限理性,非最优路径选择机制假设下的有限理性,感知误差影响下的最优路径选择机制和重复选择过程中“非显著不更新”假设下的有限理性等4个问题. 在对目前的研究进行分析的基础上,指出了今后的研究方向.

关键词:有限理性; 交通行为; 交通分配

中图分类号: U 491

文献标志码: A

文章编号: 0254-0037(2018)08-1157-08

doi: 10.11936/bjtxb2017050005

Review on the Application of Bounded Rationality in Transportation

GUAN Hongzhi, LI Tao

(Beijing Key Laboratory of Transportation Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: The research and results on travel behavior under the bounded rational view were summarized and combed in order to better study the traffic behavior under the bounded rational view. The existing research productions were analyzed from two aspects. The first one was the study of microscopic traffic behavior, which aimed to find out the bounded rational decision-making process and behavior rules. The second one was the macroscopic traffic assignment model, which aimed to relax the completely rational assumption of the original allocation model, and to establish a bounded rational traffic assignment model which was more consistent with the reality. The results show that the previous research can be divided into four fields: partial attributes information or considering a subset of feasible alternatives, non-optimal route choice mechanism, optimal route choice mechanism with perception errors and updating only non-salient information. At the end of the paper the research direction was pointed out based on the analysis of the current research.

Key words: bounded rationality; traffic behavior; traffic assignment

理性(rationality)一词在不同的语境下有着不同的含义. 在经济学里,理性人(rational man)是两大基本假设之一,它的含义是每一个从事经济活动的人都是利己的. 也可以说,每一个从事经济活动

的人所采取的经济行为都是力图以自己的最小经济代价去获得自己的最大经济利益. 在哲学语境下,理性则是指能够识别、判断、评估实际理由以及使人的行为符合特定目的等方面的智能. 显然,经济学

收稿日期: 2017-05-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51378036, 51338008)

作者简介: 关宏志(1959—),男,教授,主要从事交通规划、交通行为方面的研究, E-mail: hguan@bjut.edu.cn

家强调的是目标,而哲学家则强调的是能力、过程,二者强调的重点有所不同,然而无论如何,目标和能力都影响着人们的决策行为,对不同侧重点的假设不同,引发出不同的研究发展领域和方向。

关于交通行为的研究更多地来自经济学中关于消费者行为的理论。因此,带有经济学中关于理性人假设的色彩,即出行者都是理性的,其选择行为是追求效用的最大化,如:在交通方式选择中,假设出行者选择期望负效用最小的方式^[1];在交通路径选择中,假设出行者选择广义出行成本最小的路径^[2]。在经济学领域,美国经济学家赫伯特·西蒙(Herbert A. Simon)提出人们在决策过程中并非完全理性,更多的是将追求满意方案作为选择结果^[3-4]。此外,他还强调造成人们有限理性的原因包括2点:一方面是由于客观信息的不完全性;另一方面是由于自身有限的计算能力。西蒙对有限理性的研究成果,无异于人类对于数字的认识从实数拓展到了复数,他也因此获得了1978年的诺贝尔经济学奖。由于有限理性的假设得到了普遍承认,故在经济学和心理学等领域中得到广泛应用。

较早的在交通领域考虑有限理性,是因为人们发现完全理性模型不能很好地解释实验中的出行行为^[5],然而根据Simon^[3]的观点,有限理性的提出可以松弛传统理性假设,降低模型与现实误差。此后,

有限理性理论被应用于交通分配、交通规划、交通政策制定、交通安全等领域的建模中。时至今日,有限理性视野下的出行行为研究,已经形成了一个庞大的家族,足以对交通行为研究形成一个新的、广大的领域。总结梳理现有的研究及其成果,对于更好地学习掌握交通行为相关理论,更加科学地分析预测交通行为,从而更好地为我们的社会实践服务具有重要的意义。

本文通过总结交通领域关于有限理性的现有研究,可将现有研究分为2类:第1类是微观交通行为研究,其目的在于发现出行者的有限理性决策过程及行为规律;第2类是宏观交通分配模型研究,其目的在于松弛原有分配模型的完全理性假设,建立与实际更为相符的有限理性交通分配模型。

1 有限理性交通行为研究

研究交通行为的学者假设出行决策之前,出行者掌握某些先验信息(如路网结构、备选路径、自由流时间等),并形成知识储备(经验),当出行者需要决策时,出行者会搜索决策相关信息,进而进行选择集生成和方案比选,最终确定选择结果^[4-6]。该决策假设框架如图1所示。然而,当有限理性的思想被提出之后,几乎引入了决策过程的各个环节,如图1中六边形方框所示。

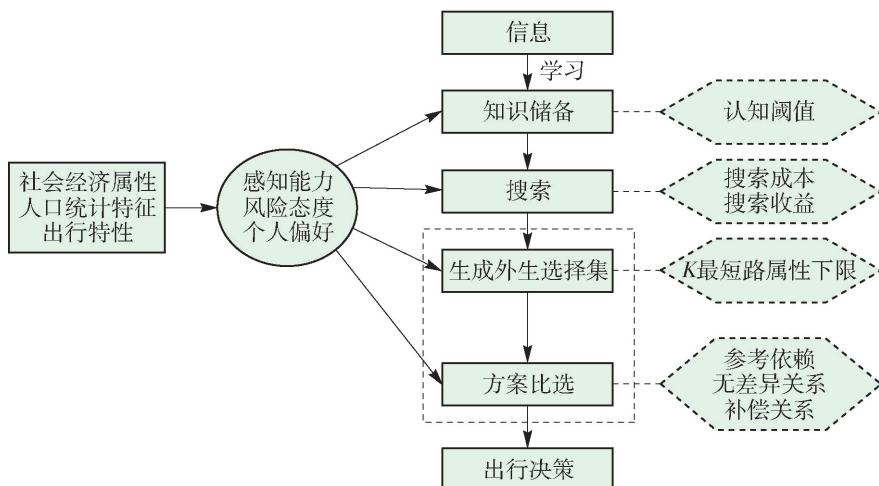


图1 出行者有限理性认知过程

Fig. 1 Bounded rational cognitive processes of travelers

1.1 信息搜索阶段

现实中,出行成本是一个随机变量。Gao等^[7]假设,出行者的最终选择结果并非最短路径的主要原因是由于他们的计算能力有限以及信息搜索成本过于昂贵。

基于以上假设,Gao等^[7]根据Gabaix等^[8]提出的经济学认知模型,建立了出行认知成本模型用来刻画复杂情况下昂贵的信息搜索成本对出行行为的影响。在这个模型中,各路径的走行时间随机分布,出行者只知道走行时间的期望与方差。如果决策者

选择搜索信息,那么他将得知该路径的确切走行时间,但搜索信息要支付一定的费用.因此,路径 r 被选择的概率可以表示为 2 个部分的加和

$$P(r|P_n) = P(r|P_n, C_{no,search})P(C_{no,search}) + P(r|P_n, C_{search}) \quad (1)$$

式中, $P(r|P_n, C_{search})$ 可表示为

$$P(r|P_n, C_{search}) = \sum_s \sum_t P(r|t, P_n, H_n^s)P(t|H_n^s)P(H_n^s) \quad (2)$$

式中: P_n 为出行者 n 的备选方案集; $P(H_n^s)$ 为出行者 n 搜索终止条件为 s 的概率; $P(t|H_n^s)$ 为 t 时刻搜索状态出现条件 s 的概率; $P(r|t, P_n, H_n^s)$ 为 t 时刻出现状态 s 时选择路径 r 的概率.

Gao 等^[7]给出了计算 $P(H_n^s)$ 和 $P(t|H_n^s)$ 的方法,并利用一项关于家与工作地之间 3 条路径选择的调查数据标定了 3 个模型:认知成本模型、完全无信息模型和完全信息模型.结果表明:对路网较为熟悉或者工作时间弹性较大的用户更倾向于不搜索新信息;路径的搜索成本越高,该路径越不容易被搜索,一条路径被决策者知晓的先验信息越多,该路径越容易被搜索;同时验证了搜索成本的异质性.

另外,Zhang^[6]的研究表明,如果信息搜索带来的收益低于其所需成本,则出行者不会进行信息搜索.

1.2 选择集生成阶段

一些学者认为,出行者进行路径选择时不能考虑所有可行路径,而是只能考虑其中的一部分,即所有路径集合中的一个子集,备选方案的搜索也是决策过程的一部分^[9].依据 Ben-Akiva 等^[10]的研究,出行者的路径选择行为分为 2 个阶段:备选路径集生成和交通分配^[11-13].

在两阶段决策理论中,备选方案产生于决策之前,常用 K 最短路方法和非补偿启发式方法生成备选方案. Zhu 等^[14]利用全球定位系统(global positioning system, GPS)数据比较了 4 种 K 最短路方法:标记法^[10]、消除法^[15]、罚函数法^[16]及仿真法.利用预测路径集与实际选择路径集重合度评价模型,结果显示,仿真法的预测效果最好,备选路径选择集重合度达到 63%. Han 等^[17]假设只有一部分路径被选择作为备选路径集,一条路径是否作为备选路径主要根据它的属性值.该方法包括 2 种策略:合取(所有属性均符合要求,该路径才会被纳入);析取(至少一个属性符合要求,则该路径被纳入).而早先的 Simon^[3]提出的满意准则即为合取策略的一种形式.

1.3 方案比选阶段

方案比选阶段常常采用 2 种策略:补偿策略和非补偿策略.补偿策略:各属性之间存在权衡,优势属性可以补偿劣势属性.传统的随机效用理论就是该策略的体现.非补偿策略:各属性之间相互独立,不存在权衡问题,选择肢的各个属性一个接一个地进行衡量. Simon^[3]的满意决策准则就是该策略的体现,只有当所有属性均满足相应要求,该选择肢才被选中.

1.3.1 补偿策略

补偿策略中最经典的理论为离散选择模型框架下的随机效用最大化理论(random utility maximization-model, RUM).其数学表达式为

$$P_{nr} = P(U_{nr} > U_{nr'}) = P(V_{nr} + \xi_{nr} > V_{nr'} + \xi_{nr'}) \quad (3)$$

式中: P_{nr} 为决策者 n 选择方案 r 的概率; U_{nr} 为方案 r 的效用; V_{nr} 为方案 r 的效用固定项; ξ_{nr} 为方案 r 的效用随机项.

当假设随机项 ξ_{nr} 服从 Gumbel 分布时,模型即为多项 logit 模型(multinomial logit model, MNL)^[18].后来,为了解决其独立不相关(independence from irrelevant alternation, IIA)特性的局限性^[19],学者们提出了一系列改进模型:C-logit^[20]、nestedlogit^[21]、cross-nested logit^[22]、multinomial probit^[23-25]、mixed logit^[26].然而,这些模型均以完全理性为前提^[27],因此,学者们提出了一系列基于有限理性理论的选择模型.

心理学实验表明,人类对效用值差异不大的 2 个选择肢偏好不明显^[28]. Krishnan^[29]根据心理学这一理论建立了最小可感知差异模型(minimum perceivable difference, MPD).模型假设出行者对 2 个选择肢存在 2 种偏好关系:完全偏好和无偏好,并假设 2 个选择肢的效用差异足够大(大于阈值 ε),则出行者可以做出理性判断,表现为完全偏好,否则在 2 个选择肢之间表现为无明显偏好.

1) 若 $U_1 > U_2 + \varepsilon$,则出行者偏好方案 1,方案 1 被选择的概率为: $P(\xi_1 - \xi_2 < V_2 - V_1 + \varepsilon)$.

2) 若 $U_2 > U_1 + \varepsilon$,则出行者偏好方案 2,方案 2 被选择的概率为: $P(\xi_1 - \xi_2 < V_2 - V_1 - \varepsilon)$.

3) 若 $|U_2 - U_1| \leq \varepsilon$,则出行者对方案 1 和方案 2 无明显偏好,这部分的概率为: $P(V_2 - V_1 - \varepsilon \leq \xi_1 - \xi_2 \leq V_2 - V_1 + \varepsilon)$.

若随机项 ξ_1 和 ξ_2 的分布已知,则上述选择概率可通过计算得到. Krishnan^[29]利用上述模型标定出行者的方式选择,并进行预测,结果表明该模型的

预测效果明显优于传统 logit 模型. 随后, Lioukas^[30] 将 MPD 模型拓展到多项选择中.

随着研究的深入, 学者们发现出行者的 ε 随着时间变化而逐渐调节, 且往往更愿意选择曾经选择过的选择肢^[31-32]. 因此, 他们将 ε 看作一个变量, 并随时间逐渐调节. Di 等^[33-34] 将 ε 看作关于时间、选择肢效用、选择结果的函数, 建立动态模型并用来描述新增一条路径之后出行者的换路行为.

1.3.2 非补偿策略

一些学者认为, 出行者对大量的影响因素无法进行综合考虑和理性判断, 因此, 假设各影响因素的属性相互独立, 不存在最优问题, 即出行者并非计算最优选择肢, 而是通过其他方法, 选择一项较为满意的选择肢^[35]. 该策略首先将影响决策方案的各个因素按重要度进行排序并设阈值, 从最重要的因素开始, 当选择肢的该因素未达到阈值时即被排除, 以此类推进行次要因素的计算. 不同的出行者对决策因素的排序不同, 因此, 其最终选择结果存在差异, 含有较为重要属性的选择肢被选择的可能性更大, Tversky^[36] 以条件概率的形式计算各选择肢被选择的概率. 选择肢 A_r 被选择的条件概率可表示为

$$P(A_r | A) = \frac{\sum_{k \in X' - X^0} X(k) P(k | A_k)}{\sum_{k' \in X' - X^0} X(k')} \quad (4)$$

式中: X' 为选择集中至少一个选择肢含有的属性集; X^0 为选择集中所有选择肢都包含的属性集; $X(k)$ 为包含属性 k 的属性集; A_k 为包含属性 k 的选择肢. Young^[37] 将该模型应用于包含 3 个选择肢的住宅位置选择, 对模型的有效性进行实际验证.

1.4 经验更新阶段

出行决策是一个重复学习的过程, 在决策之前出行者被假设具有一定的出行经验, 随着在相同起讫点之间的逐日出行, 出行者获取新的信息, 并逐渐更新出行经验. 出行者根据信息更新出行经验的过程称为学习过程, 传统的更新模型假设出行者完全理性, 只要出现新的信息, 出行者便会对信息做出反应, 更新经验和出行决策, 更新机制有加权平均^[38]、适应性预期^[38]、贝叶斯^[21, 25].

一些学者对该假设提出质疑, 他们认为由于出行者有限的计算能力、出行习惯以及更新成本的存在, 只有显著的信息才会影响出行者的经验更新, 这一论点得到了一系列实验的支持. 如: Lotan^[39] 分析了交通信息对熟悉路网与不熟悉路网驾驶员的影响, 结果显示对路网熟悉的驾驶员不愿意接受新的

信息, 继续坚持原有的驾驶路径, 不愿意花费精力降低出行时间; Cantillo 等^[31-32] 应用一个带有阈值的离散选择模型来模拟意向调查 (stated preference, SP) / 行为调查 (revealed preference, SP) 的出行方式选择调查数据, 形式为

$$y_n^{t, \text{time}} = \begin{cases} 0, & \hat{C}_n^t - C_n^t \leq \varepsilon_{n,o}^{t, \text{time}} \text{ 或 } C_n^t - \hat{C}_n^t \leq \varepsilon_{n,u}^{t, \text{time}} \\ 1, & \text{其他} \end{cases} \quad (5)$$

式中: $y_n^{t, \text{time}}$ 为经验更新判别因子; \hat{C}_n^t 为感知出行成本; C_n^t 为经验出行成本; $\varepsilon_{n,o}^{t, \text{time}}$ 和 $\varepsilon_{n,u}^{t, \text{time}}$ 分别为更新阈值, 是随机变量.

该模型表明, 当感知出行成本与经验出行成本的差值小于某一阈值时, 出行者不会更新其出行经验, 进而保持原出行方式; Carrion 等^[40] 利用 GPS 数据研究了 65 个被试 30 d 的路径选择行为, 结果显示出行者有着明确的决策阈值, 当某条路径的走行时间超出这一阈值时, 这条路径很可能被放弃; Hu 等^[41]、Jayakrishnan 等^[42-46]、Mahmassani 等^[45-47]、Srinivasan 等^[48] 在 20 世纪 90 年代做了一系列的实验, 结果显示尽管将所有信息提供给出行者, 出行者由于习惯的影响依然不能做到理性决策.

2 有限理性交通分配模型研究

交通分配模型可分为均衡模型与非均衡模型, 本文主要总结有限理性视野下的均衡分配模型研究. 传统均衡模型依据 Wardrop 原理^[47], 包括用户均衡 (user equilibrium, UE) 原理和系统最优原理. 随后, 由 Beckmann 等^[48] 提出了描述这一均衡问题的数学规划模型, 并最终由 Leblanc 等^[49] 提出了 Frank-Wolfe 算法, 由此形成了交通均衡分配理论基础.

研究认为, 达到 Wardrop 均衡需要满足 2 个条件: 出行者对信息完全知晓和出行者有能力计算出最优路径. 显然这种假设过于理想, 现实中的出行者并不可能做到完全信息和完美计算, 学者们通过松弛这 2 个条件, 建立有限理性均衡分配模型.

2.1 感知误差影响下的用户均衡

首先, 一些学者认为, 出行者对路网中各路径的出行成本并非完全知晓, 他们只能通过有限的信息感知出行成本, 感知成本服从一定的分布, 进而提出了随机用户均衡 (stochastic user equilibrium, SUE) 模型^[50]. 模型假设每条路径的感知出行成本 C_n^w 是一个随机变量, 由固定项 \bar{C}_n^w 和随机项 ξ_n^w 两部分组

成. 均衡条件是出行者不能通过改变路径降低其感知出行成本, 可表示为

$$\bar{C}_r^w(\mathbf{f}^*) - \bar{\pi}^w \begin{cases} = 0, & f_r^{w*} > 0, \\ > 0, & f_r^{w*} = 0, \end{cases} \forall r \in A^w, \forall w \in W \quad (6)$$

$$f_r^w = d^w p_r^w \quad (7)$$

$$p_r^w = \frac{\exp(-\alpha \bar{C}_r^w)}{\sum_{j \in A^w} \exp(-\alpha \bar{C}_j^w)} \quad (8)$$

式中: f_r^w 为起讫点 (origin destination, OD) 对 w 间路径 r 的交通流量; $\bar{\pi}^w$ 为均衡时 OD 对 w 间的走行; d^w 为 OD 对 w 间的出行需求; p_r^w 为 OD 对 w 间路径 r 被选择的概率; α 为出行者对出行成本的敏感度. 当 $\alpha=0$ 时, 出行者选择每一条路径的概率相同, 而当 $\alpha \rightarrow \infty$ 时, SUE 模型将等价于 UE 模型.

虽然 SUE 模型依然存在某些局限性^[51], 但其结构简单, 并可以从一定程度上体现出行者有限理性特征; 因此, 得到广泛应用^[52-53], 而且, 模型本身不断完善. 如: Caroline^[54] 给出了 SUE 模型的数学规划模型; Sheffi 等^[50] 提出了基于满意函数的随机均衡分配数学规划模型; 周晶^[55] 建立了弹性需求下的随机用户均衡的变分不等式模型等.

2.2 基于满意解的用户均衡

根据 Simon^[3] 的观点, 出行者由于自身计算能力以及环境等因素的影响不能计算出最优解, 实际决策中常常以寻求满意解为目的进行决策. 依据这一观点, 学者们提出了有限理性用户均衡 (boundedly rational user equilibrium, BRUE)^[56].

有限理性视野下, 路网均衡时, 每一出行将选择一条满意路径作为出行路径, BRUE 模型假设若一条路径的出行成本与该路径的最小出行成本 (UE 状态下的成本) 之差落在某一区域内时, 该路径即被选择. Lou 等^[56] 将这个区域命名为“无差异区域 (indifference band)”, 并指出这个区域的临界值受用户自身属性以及 OD 对之间的路网情况影响, 需要通过行为调查或行为实验进行获取.

Di 等^[53] 给出了 BRUE 模型求解的非线性互补条件

$$\tilde{C}_r^w(\mathbf{f}^*) - \tilde{\pi}^w \begin{cases} = 0, & f_r^{w*} > 0, \\ > 0, & f_r^{w*} = 0, \end{cases} \forall r \in A^w, \forall w \in W \quad (9)$$

$$\tilde{C}_r^w(\mathbf{f}^*) = C_r^w(\mathbf{f}^*) + \rho_r^w \quad (10)$$

$$\tilde{\pi}^w = \min C_j^w(\mathbf{f}) + \varepsilon^w \quad (11)$$

$$\rho_r^w = \begin{cases} \tilde{\pi}^w - C_r^w(\mathbf{f}), & C_r^w(\mathbf{f}) \leq \min C_j^w(\mathbf{f}) + \varepsilon^w \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (12)$$

式中: $\tilde{C}_r^w(\mathbf{f}^*)$ 为无差异出行成本; $\tilde{\pi}^w$ 为无差异区间内最高可接受成本; ρ_r^w 为路径 r 的实际出行成本与最小出行成本之差; ε^w 为无差异区间上限. 该条件的含义是: 有限理性视野下, 所有路径拥有相同的最短无差异成本区间, 所有被使用的路径的成本应大于或等于最短路径的无差异成本.

由于存在无差异区间, BRUE 模型的解不唯一, 这意味着在交通规划中, 当增加新路段或者实施道路收费政策之后, 路网交通流量不确定. 面对这种不确定性, 道路规划者可以表现出 3 种态度: 风险规避、风险追求、风险中立. 基于对风险的不同态度, Di 等^[57-58] 首次研究了当需求和无差异区间变化时的 Braess 悖论现象, 并建立了风险规避和风险追求态度下, 针对有限理性出行者的道路收费最优方案制定模型, 严格证明了解的存在性. 其数学表达式为

$$\begin{aligned} \min_y \min_x / \max_x \sum_{a \in A} x_a t_a(x_a) + \sum_{a \in T} x_a t_a(x_a, y_a) \\ \text{s. t. } 0 \leq y_a \leq \bar{y}, a \in \varepsilon \\ \mathbf{x} = \Delta \mathbf{f}, \forall \mathbf{f} \in \Gamma_{\text{BRUE}}^\varepsilon(\mathbf{y}) \end{aligned} \quad (13)$$

式中: y_a 为路段 a 的通行费用; \bar{y} 为道路收费上限; x_a 为路段 a 的流量; A 为不收费的路段集合; T 为收费的路段集合; $t_a(x_a, y_a)$ 为路段 a 的通行成本; $\Gamma_{\text{BRUE}}^\varepsilon(\mathbf{y})$ 为 BRUE 模型的解集.

Guo^[59] 提出了一种避免 BRUE 不确定问题的分配方法, 他将这种方法命名为迭代滚动顺序运算 (iterative roll sequence operation, IRSO). 该方法通过严格推导, 证明若出行群体同质, 则可通过迭代引导流量缩小 BRUE 解集的范围, 从而使 BRUE 的解收敛到 UE 解.

一些学者认为, 出行者进行路径选择时不能考虑所有可行路径, 而是只能考虑其中的一部分, 即所有路径集合中的一个子集. Zhang 等^[9] 将出行者的这种有限理性特性引入用户均衡模型, 提出了惯性用户均衡 (initial user equilibrium, IUE) 模型. 模型定义了一个惯性参数 H 用来表示用户决策所考虑的路径子集, $H \in A^w$, A^w 表示 OD 对 w 之间的所有可行路径. IUE 模型假设出行者在备选路径子集 H^w 中遵循 Wardrop 第一原理, 其数学表达式为

$$C_r^w(f^*) - \pi^w \begin{cases} = 0, & f_r^{w*} > 0, r \in H, \forall H \in H^w \\ > 0, & f_r^{w*} = 0, r \in H, \forall H \in A^w/H^w \end{cases} \quad \forall r \in A^w, \forall w \in W \quad (14)$$

通过上述模型计算可以得到 OD 对 w 之间所有备选路径子集 H^w 上的各个路段流量. 进一步的研究表明, 在 IUE 模型下, 由于惯性的存在, 管理者通过信息发布并不能影响均衡结果.

3 结论及展望

学者根据其对有限理性问题的认识, 提出不同的场景假设并构建了相应的模型, 从场景假设的角度将现有相关研究归纳为以下 4 个方面:

- 1) 信息获取不完全或备选方案不完备假设下的有限理性问题.
- 2) 非最优路径选择机制假设下的有限理性问题.
- 3) 感知误差影响下的最优路径选择机制问题.
- 4) 重复选择过程中“非显著不更新”假设下的有限理性问题.

在今后的研究中, 关于有限理性的研究还可以从如下方面加以探索.

1) 充实有限理性模型数据. 目前的一些涉及有限理性模型参数标定的研究大多是实验室数据, 缺乏实际行为数据的支持. 设计符合有限理性视野下的模型的行为调查方法, 并建立可以定量分析有限理性选择行为的模型, 应该是今后的一个需要关注的问题.

2) 在有限理性交通分配模型中考虑因素的多样化. 现有研究中, 利用有限理性思想建立的交通分配模型假设影响出行者决策的因素主要集中在出行时间, 这就需要发展出同时考虑出行费用及时间可靠性等多种因素的模型, 使之更加接近现实情况.

3) 给出模型的解析解. 基于有限理性建立的交通分配模型通常采用仿真的方法, 将有限理性规则引入仿真软件, 进而得到最终分配结果. 这种方法虽然可以模拟复杂的有限理性动态行为, 但缺乏模型解析解; 因此, 无法解释模拟现象的基本原理.

有限理性被应用于交通行为建模中, 并且产生了一系列研究成果. 然而, 这仅仅是刚刚起步, 并没有得到从业人员的足够重视, 而且也没有在实践中很好应用, 这主要源于其模型求解过程需要庞大的计算量. 但相信, 在未来的某一天, 交通规划从业人员一定可以在有限理性模型框架下提出更接近现实的需求预测方法, 从而制定合理的规划方案.

参考文献:

- [1] UNCLES M D. Discrete choice analysis: theory and application to travel demand [J]. Journal of the Operational Research Society, 1987, 38(4): 370-371.
- [2] MCCORD M R. Urban transportation networks: equilibrium analysis with mathematical programming methods[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 1987, 21(6): 481-484.
- [3] SIMON H. A behavioral model of rational choice[J]. The Quarterly Journal of Economics, 1955, 69(1): 99-118.
- [4] RICHARDSON A. Search models and choice set generation [J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 1982, 16(5): 403-419.
- [5] JENSEN A F. Bounded rational choice behaviour: applications in transport[J]. Transport Reviews, 2016, 36(5): 680-681.
- [6] ZHANG L. Behavioral foundation of route choice and traffic assignment: comparison of principles of user equilibrium traffic assignment under different behavioral assumptions[J]. Transportation Research Record, 2011, 2254(2254): 1-10.
- [7] GAO S, FREJINGER E, BEN-AKIVA M. Cognitive cost in route choice with real-time information: an exploratory analysis[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2011, 45(9): 916-926.
- [8] GABAIX X, LAIBSON D, MOLOCHE G, et al. Costly information acquisition: experimental analysis of a boundedly rational model [J]. American Economic Review, 2006, 96(4): 1043-1068.
- [9] ZHANG J, YANG H. Modeling route choice inertia in network equilibrium with heterogeneous prevailing choice sets [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2015, 57(57): 42-54.
- [10] BEN-AKIVA M, PALMA A D, ISAM K. Dynamic network models and driver information systems [J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 1991, 25(5): 251-266.
- [11] CHEN A, HONG K L, YANG H. A self-adaptive projection and contraction algorithm for the traffic assignment problem with path-specific costs [J]. European Journal of Operational Research, 2001, 135(1): 27-41.
- [12] RIDWAN M. Fuzzy preference based traffic assignment problem[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2004, 12(3): 209-233.
- [13] LI X Y, LI X M, LI X W, et al. Dynamic reference points based bounded rational multi-agent model of route choice [J]. Complex Systems & Complexity Science,

- 2016, 13(2):27-35.
- [14] ZHU S, LEVINSON D, LIU H X, et al. The traffic and behavioral effects of the I-35W mississippiriver bridge collapse[J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2010, 44(10):771-784.
- [15] AZEVEDO J, COSTA M E O S, MADEIRA J J E S, et al. An algorithm for the ranking of shortest paths[J]. *European Journal of Operational Research*, 1993, 69(1):97-106.
- [16] SNYMAN J A, STANDER N, ROUX W J. A dynamic penalty function method for the solution of structural optimization problems [J]. *Applied Mathematical Modelling*, 1994, 18(8):453-460.
- [17] HAN Q, TIMMERMANS H. Interactive learning in transportation networks with uncertainty, bounded rationality, and strategic choice behavior; quantalresponse model[J]. *Journal of the Transportation Research Board*, 2006, 1964(1):27-34.
- [18] LUCE R D. Individual choice behavior [J]. *American Economic Review*, 1959, 67(1):1-15.
- [19] HENSHER D A. Measurement of the valuation of travel time savings [J]. *Journal of Transport Economics & Policy*, 2001, 35(1):71-98.
- [20] ZHONG Z, ANTHONY C, SHLOMO B. C-logit stochastic user equilibrium model: formulations and solution algorithm[J]. *Transportmetrica*, 2012, 8(1):17-41.
- [21] JHA M, MADANAT S, PEETA S. Perception updating and day-to-day travel choice dynamics in traffic networks with information provision[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 1998, 6(3):189-212.
- [22] VOVSHA P. Link-nested logitmodel of route choice; overcoming route overlapping problem[J]. *Journal of the Transportation Research Board*, 1998, 1645(1645):133-142.
- [23] CASCETTA E. A stochastic process approach to the analysis of temporal dynamics in transportation networks [J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 1989, 23(1):1-17.
- [24] DAGANZO C F, BOUTHELIER F, SHEFFI Y. Multinomial probitand qualitative choice; acomputationally efficient algorithm [J]. *Transportation Science*, 1977, 11(4):338-358.
- [25] JOTISANKASA A, POLAK J. Framework for travel time learning and behavioral adaptation in route and departure time choice[J]. *Journal of the Transportation Research Board*, 2006, 1985(1):231-240.
- [26] GREENE W H, HENSHER D A, ROSE J. Accounting for heterogeneity in the variance of unobserved effects in mixed logitmodels [J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2006, 40(1):75-92.
- [27] SWAIT J. A non-compensatory choice model incorporating attribute cutoffs [J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2001, 35(10):903-928.
- [28] JONES L V, APPELBAUM M I. Psychometric methods [J]. *Annualreview of Psychology*, 1989, 40(40):23.
- [29] KRISHNAN K S. Incorporating thresholds of indifference in probabilistic choice models[J]. *Management Science*, 1977, 23(11):1224-1233.
- [30] LIOUKAS S K. Thresholds and transitivity in stochastic consumer choice; amultinomial logitanalysis [J]. *Management Science*, 1984, 30(1):110-122.
- [31] CANTILLO V, HEYDECKER B, ORTUZAR J D D. A discrete choice model incorporating thresholds for perception in attribute values [J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2006, 40(9):807-825.
- [32] CANTILLO V, ORTUZAR J D D, WILLIAMS H C. Modeling discrete choices in the presence of inertia and serial correlation[J]. *Transportation Science*, 2007, 41(2):195-205.
- [33] DI X, LIU H X, PANG J S, et al. Boundedly rational user equilibria (BRUE): mathematical formulation and solution sets [J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2013, 57(11):300-313.
- [34] DI X, LIU H X, PANG X J, et al. On the stability of a boundedly rational day-to-day dynamic[J]. *Networks and Spatial Economics*, 2015, 15(3):537-557.
- [35] RECKER W W, GOLOB T F. A non-compensatory model of transportation behavior based on sequential consideration of attributes [J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 1979, 13(4):269-280.
- [36] TVERSKY A. Elimination by aspects: a theory of choice [J]. *Psychological Review*, 1972, 79(4):281-299.
- [37] YOUNG W. A non-tradeoff decision making model of residential location choice [J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 1984, 18(1):1-11.
- [38] NAKAYAMA S, KITAMURA R, FUJII S. Drivers' route choice rules and network behavior: do drivers become rational and homogeneous through learning? [J]. *Journal of the Transportation Research Record*, 2001, 1752(1):62-68.
- [39] LOTAN T. Effects of familiarity on route choice behavior in the presence of information [J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 1997, 5(3/4):225-243.
- [40] CARRION C, LEVINSON D. Value of travel time reliability: areview of current evidence [J].

- Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2012, 46(4):720-741.
- [41] HU T, MAHMASSANI H. Day-to-day evolution of net work flows under real-time information and reactive signal control[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 1997, 5(1): 51-69.
- [42] JAYAKRISHNAN R, MAHMASSANI H, HU T. An evaluation tool for advanced traffic information and management systems in urban networks [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 1994, 2(3): 129-147.
- [43] MAHMASSANI H. Dynamic network traffic assignment and simulation methodology for advanced system management applications [J]. Networks and Spatial Economics, 2001, 1(3): 267-292.
- [44] MAHMASSANI H, JAYAKRISHNAN R. System performance and user response under real-time information in a congested traffic corridor [J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 1991, 25(5): 293-307.
- [45] MAHMASSANI H, LIU Y. Dynamics of commuting decision behavior under advanced traveler information systems[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 1999, 7(2): 91-107.
- [46] SRINIVASAN K, MAHMASSANI H. Role of congestion and information in trip-makers'dynamic decision processes: experimental investigation[J]. Journal of the Transportation Research Record, 1999, 1676(1): 44-52.
- [47] WARDROP J G. Some theoretical aspects of road traffic research [J]. ICE Proceedings Engineering Divisions, 1952, 1(3):325-362.
- [48] BECKMANN M J, MCGUIRE C B, WINSTEN C B, et al. Studies in the economics of transportation [J]. Economic Journal, 1956, 26(1):820-821.
- [49] LEBLANC L J, MORLOK E K, PIERSKALLA W P. An efficient approach to solving the road network equilibrium traffic assignment problem[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 1975, 9(3): 308-318.
- [50] SHEFFI Y, POWELL W B. An algorithm for the equilibrium assignment problem with random link times [J]. Networks, 1982, 12(2): 191-207.
- [51] DAGANZO C, SHEFFI Y. On stochastic models of traffic assignment[J]. Transportation Science, 1977, 11(3): 253-274.
- [52] YAI T, IWAKURA S, MORICHI S. Multinomial probit with structured covariance for route choice behavior[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 1997, 31(3): 195-207.
- [53] FOX J T, KIM K I, RYAN S P, et al. The random coefficients logit model is identified [J]. Journal of Econometrics, 2012, 166(2): 204-212.
- [54] CAROLINE F. Some developments in equilibrium traffic assignment [J]. Transportation Research Part B: Methodological, 1980, 14(3): 243-255.
- [55] 周晶. 随机交通均衡配流模型及其等价变分不等式问题[J]. 系统科学与数学, 2003, 23(1): 120-127.
- ZHOU J. Stochastic user equilibrium and its variational inequality problem [J]. Journal of Systems Science and Mathematical Sciences, 2003, 23(1): 120-127. (in Chinese)
- [56] LOU Y, YIN Y, LAWPHONGPANICH S. Robust congestion pricing under boundedly rational user equilibrium [J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2010, 44(1): 15-28.
- [57] DI X, LIU H X, BAN X J. Second best toll pricing within the framework of bounded rationality [J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2016, 83(1): 74-90.
- [58] DI X, LIU H X, ZHU S, et al. Indifference bands for boundedly rational route switching [J]. Transportation, 2016, 1(1): 1-26.
- [59] GUO X. Toll sequence operation to realize target flow pattern under bounded rationality [J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2013, 56(10): 203-216.

(责任编辑 梁洁)