

城市轨道交通运营中断条件下乘客路径选择模型

韩宝明, 陈佳豪, 周玮腾, 孙亚洁

(北京交通大学 交通运输学院, 北京 100044)

摘要: 为研究城市轨道交通运营中断条件下乘客的路径选择行为, 首先依据运营中断事件对乘客的不同影响对乘客进行分类, 并给出对应的路径选择策略。其次基于出行时间和出行费用 2 个因素确定了广义时间费用的计算方法。然后分析中断时长对乘客的影响, 构建了中断下的乘客参考点的取值原则。最后利用累积前景理论和 Nested Logit 模型构造了乘客路径选择模型。算例结果表明: 模型计算的乘客路径选择概率结果与实际统计结果相对误差不超过 10%, 具有良好适用性; 乘客路径选择行为随中断时长的改变呈现动态变化, 短期间中断下乘客路径选择行为变化剧烈, 长时间中断下乘客路径选择行为相对稳定; 乘客对出行费用的接受度越高, 越倾向选择出行时间短的路径; 乘客对中断忍耐程度越低, 对路径综合价值越敏感。

关键词: 城市轨道交通; 路径选择; 累积前景理论; 运营中断; Nested Logit 模型

中图分类号: U268. 6

文献标志码: A

Passenger Route Choice Model Under the Condition of Urban Rail Transit Operation Disruption

HAN Baoming, CHEN Jiahao, ZHOU Weiteng, SUN Yajie

(School of Traffic and Transportation, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: To describe the route choice behavior of passengers under the condition of urban rail transit operation disruptions, a passenger route choice model was proposed. According to the different effects of operation disruptions, passengers were classified into different types and the corresponding route choice strategies were given. Then, the calculation method of generalized time cost was determined based on the travel time and travel cost. Considering the impact of the

disruption duration on passengers, the value principle of passenger reference point in disruptions was constructed. Finally, a passenger route choice model was proposed based on the cumulative prospect theory and the nested logit model. The experimental results show the validity and accuracy of the model is less than 10% of the relative error between the calculated results and the questionnaire data. The passenger's route choice changes dynamically with the change of disruption duration. It changes sharply in the short-time duration and is relatively stable in the long-time duration. The higher the passenger's acceptance of travel cost, the more inclined they are to choose the route with a short travel time. The lower the endurance of passengers to disruptions, the more sensitive they are to the comprehensive value of the route.

Key words: urban rail transit; route choice; cumulative prospect theory; operation disruptions; nested logit model

随着城市轨道交通的发展, 更多人选择城市轨道交通作为出行方式, 然而一些不可预知的设备故障、极端天气、社会事件等会导致城市轨道交通系统发生运营中断。在网络化运营条件下, 一旦发生中断事件, 往往会造成客流拥堵并在路网上快速传播, 更甚者会造成路网的局部瘫痪, 对乘客出行及运营者均会造成严重影响。中断事件发生后, 乘客会利用所获取的出行信息及其自身出行经验对出行路径进行调整, 并且此时乘客的行为决策因为受到中断事件影响而具更强的随机性和不确定性, 使路网客流分布情况与常态运营相比呈现较大变化, 增加了运营者制定应急策略的难度。由于乘客路径选择行为结果将直接影响路网客流分布情况, 传统的路径

收稿日期: 2021-12-31

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金(2022JBMC057); 国家自然科学基金(71971019); 北京市自然科学基金(L201013)

第一作者: 韩宝明(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为运输组织优化。E-mail: bmhan@bjtu.edu.cn

通信作者: 周玮腾(1988—), 男, 讲师, 工学博士, 主要研究方向为城市轨道交通系统运营管理。

E-mail: zhouwt@bjtu.edu.cn



论文
拓展
介绍

选择分析方法在中断事件下不具很好适用性,因此准确刻画运营中断事件下的乘客路径选择行为,分析乘客路径选择规律,进而得到运营中断下的路网客流分布状态,为运营者进行合理有效的应急指挥提供支持,具有重要的理论价值和现实意义。

在运营中断下出行路径选择方面,于鸿飞^[1]考虑旅行时间、拥挤度、换乘等因素作为路径阻抗,建立基于MNL模型的路径选择模型,尹浩东^[2]分别对封站和区间中断2种情况进行分析,构建了乘客个体出行行为最优化模型和分层离散选择模型,徐瑞华等^[3]考虑城市轨道交通列车运营延误事件下给定乘客备选路径集,以各路径旅行时间作为路径阻抗建立了基于正态分布概率模型的出行路径选择模型。这些研究基于效用理论^[4]的框架进行,即假定乘客在做出决策时是“绝对理性”的,总是选择效用最大的方案完成出行^[5]。实际上运营中断下的城市轨道交通路网的不确定性会大大增加,个体此时对出行方案的感知价值与实际价值之间存在较大差异,个体决策会受自身及环境等因素影响,表现为“有限理性”,同时考虑个体通常会在常态下路径选择结果的基础上进行路径调整,效用理论无法描述运营中断下各出行路径与原出行路径间的关联情况。

针对上述问题,Tversky等^[6]在有限理性的基础上提出前景理论(PT),将心理学研究应用于行为决策,发现个体决策行为取决于预期与实际结果间的差距,以收益和损失的角度来解释个体对于风险的追求,能更合理地解释不确定性环境下的选择行为。Tversky和Kahneman^[7]在这之后对前景理论进行修正,发展成为累积前景理论(CPT),解决了随机占优问题以及多结果处理问题,使该理论适用范围更广。在此基础上,柳伍生等^[8]利用累积前景理论对地铁运营中断后的乘客出行行为进行研究,验证了累积前景理论对于中断下行为选择问题研究的适用性,田丽君等^[9]对比分析期望效用理论和累积前景理论2种理论框架下的个体出行决策行为,结果表明累积前景理论更适用于不确定情形下的出行方式选择。

以上研究都是在保持中断事件不变的情况下分析乘客的路径选择行为,从理论层面验证了累积前景理论在分析该类问题上具有良好的适用性。但是既有模型没有考虑乘客面对中断时的路径选择过程,也未反映中断时长不确定下的乘客路径选择情况。基于此,本文通过分析乘客在中断事件下的路径选择行为特征,构建基于累积前景理论的路径选择模型,对随中断时长变化的乘客路径动态选择行

为进行分析,可为分析中断下的乘客路径选择行为提供一定的理论支持和研究思路。

1 乘客路径选择行为描述

大中型城市中有多种交通方式可供乘客选择,以地铁、出租车、公交车最为普遍。根据研究,在运营中断事件发生之前,乘客会根据过往经验及当前路网信息进行第1次路径决策,所选出的路径视为乘客在常态下的原出行路径,在运营中断事件发生后,乘客原出行路径若受到中断影响需绕行或等待时,乘客会进行第2次路径决策,将原出行路径作为参照对象,评估各备选路径相较于原出行路径的价值,最终选择一条会“带来收益”或“减少损失”的新路径。此外,由于乘客进入城市轨道交通系统的时间不同,其个人面临的中断时间有所差异,路径价值也会随着中断时间的变化而变化,因此在第2次路径决策时乘客会将进入城市轨道交通系统时的路网状态和中断时长作为路径决策依据。

同时,乘客面对运营中断事件时受到的影响会不同,按照受影响情况对乘客进行分类,可以分为以下2类:①出行路径受到中断影响的乘客;②进(出)站点受到中断影响的乘客。

根据乘客分类,给出各类别下的乘客备选出行路径。对于出行路径受到中断影响的乘客,备选出行路径包括:①换乘城市轨道交通线路到达目的地;②通过乘坐出租车到达目的地;③通过乘坐公交车到达目的地;④等待中断恢复,维持原路径出行。

对于进(出)站点受到中断影响的乘客,备选出行路径包括:①通过“出租车+轨道交通”组合出行;②通过“公交车+轨道交通”组合出行;③通过乘坐出租车到达目的地;④通过乘坐公交车到达目的地;⑤等待中断恢复,维持原路径出行。乘客决策行为如图1所示。

2 模型构建

2.1 乘客出行路径效用

在中断情况下,时间和费用是乘客进行出行路径选择的主要考虑因素,乘客除了维持轨道交通系统出行这一方式外,也可能考虑使用其他交通方式完成出行。本文主要考虑地铁、公交、出租车3种交通方式。为了进一步统一时间和费用关系,采用广义出行时间来描述乘客出行路径效用。

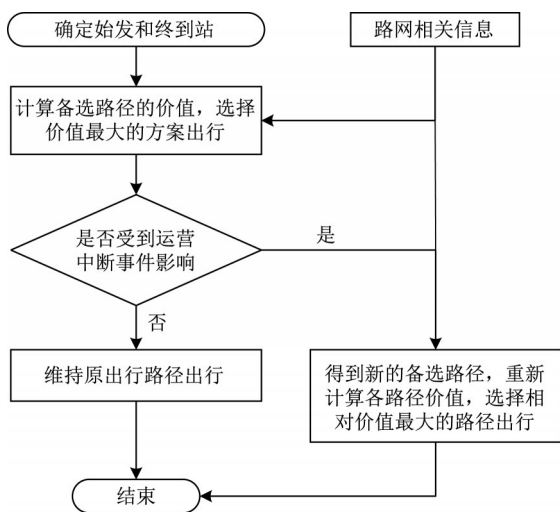


图1 乘客决策行为

Fig. 1 Passenger's decision behavior

结合 AFC 数据和地图软件 API 数据, 可获得 OD 对下各交通方式的理论出行时间和出行费用。同时, 根据调查问卷数据可知, 乘客对出行时间和出行费用两者的敏感度不同, 基于此利用费用-时间转换公式^[10], 引入费用转化权重, 将出行费用按权重转化为出行时间, 进而得到运营中断下各交通方式的广义出行时间。如式(1)、式(2):

$$t_{\text{cost}} = \frac{480 \times L \times M}{P} (\text{min} \cdot \text{元}^{-1}) \quad (1)$$

$$T_{\text{general}} = t_{\text{travel}} + \omega \cdot t_{\text{cost}} \quad (2)$$

式中: L 为法定工作天数; P 为人均年收入; t_{travel} 为各交通方式理论出行时间; M 为出行费用; t_{cost} 为费用转换时间; T_{general} 为广义出行时间; ω 为费用转换权重, 体现乘客对出行时间和出行费用的敏感度差异。

2.2 路径选择模型

乘客在实际出行中, 由于个体差异、心理状态、感性因素、出行偏好等原因在选择时会出现选择并非效用最大的路径, 这种由乘客的个体偏差所带来的不确定性被视作路径选择中的随机项。因此乘客的路径选择可以视作乘客对每条有效路径的选择概率。目前多数研究通过假设随机项相互独立且服从某种同一分布, 采用离散选择模型来估计乘客对于不同出行路径的选择概率。运用这种方法计算 OD 对 r - s 间路径 k 的效用函数, 表示如式(3):

$$U_{rs,k} = V_{rs,k} + \epsilon_{rs,k} \quad (3)$$

式中: $V_{rs,k}$ 为通过理论计算得到的效用值, 表示出行路径中的确定性部分; $\epsilon_{rs,k}$ 为随机项, 表示乘客个体偏差带来的不确定性因素。

假设随机项服从 Gumbel 分布, 常态下城市轨道

交通乘客可视为在轨道交通系统内部进行路径选择, 乘客路径选择模型为单层选择模型, 可利用改进 Logit 模型计算常态下城市轨道交通各路径选择概率^[1], 表示如式(4):

$$p_{rs}(k) = \frac{e^{\frac{-\theta V_k}{V_{\min}}}}{\sum_{k=1}^n e^{\frac{-\theta V_k}{V_{\min}}}} \quad (4)$$

式中: $p_{rs}(k)$ 为 OD 对 r - s 间路径 k 的选择概率; V_k 为路径 k 的常态下路径效用; V_{\min} 为所有有效路径中的最小路径效用; n 为 OD 对 r - s 间所有有效路径数量; θ 为路网熟悉程度。

在运营中断条件下, 乘客以往的出行经验、个体的出行偏好等影响因素造成的出行偏差将会随着中断时长变化而具有更大的不确定性, 其中较为明显的是在评估路径效用时, 乘客会更倾向于考虑选择路径的“收益”或“损失”情况。为了进一步刻画乘客在中断条件下的进行路径选择的风险规避情况, 利用累积前景理论进行中断下路径选择模型的构建。

设定 OD 对 r - s 间出行路径 k 的出行时间表示为 n 种可能结果, 将结果按照降序排列, 记作 $T = \{t_{rs,k1}, t_{rs,k2}, \dots, t_{rs,kn}\}$, 每个出行时间对应的实际发生概率为 $T = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ 。累积前景理论中的价值函数 $g(t)$ 表示如式(5):

$$\Delta t_{rs,ki} = t_{rs,\text{ref}} - t_{rs,ki} \quad i = 1, 2, \dots, n$$

$$g(t_{rs,ki}) = \begin{cases} (\Delta t_{rs,ki})^\alpha, & \Delta t_{rs,ki} > 0 \\ -\lambda(-\Delta t_{rs,ki})^\beta, & \Delta t_{rs,ki} < 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中: $t_{rs,\text{ref}}$ 为该乘客对于 OD 对 r - s 之间的时间参考点; $t_{rs,ki}$ 为出行路径 k 的第 i 种出行时间; $\Delta t_{rs,ki}$ 为路径 k 的第 i 种出行时间相对于时间参考点的收益或损失; $g(t_{rs,ki})$ 为乘客根据收益或损失评估后的出行价值; 参数 α 和参数 β 分别为收益时规避风险系数和损失时追求风险系数; λ 为损失规避系数。

累积前景理论中的累积决策权重函数 $\pi(p)$ 表示如式(6)、式(7):

$$\begin{cases} \pi_+(p_i) = w_+(p_i + \dots + p_n) - w_+(p_{i+1} + \dots + p_n), \\ m \leq i < n \\ \pi_+(p_n) = w_+(p_n) \\ \pi_-(p_i) = w_-(p_1 + \dots + p_i) - w_-(p_1 + \dots + p_{i-1}), \\ 1 < i \leq m \\ \pi_-(p_1) = w_-(p_1) \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} w_+(p_i) &= \frac{p_i^\gamma}{(p_i^\gamma + (1-p_i)^\gamma)^{\frac{1}{\gamma}}} \\ w_-(p_i) &= \frac{p_i^\delta}{(p_i^\delta + (1-p_i)^\delta)^{\frac{1}{\delta}}} \end{aligned} \quad (7)$$

式中: m 为相对于时间参考点各出行路径产生收益或损失的分界点, 大于 m 的路径产生收益, 小于 m 的路径产生损失; p_i 为出行路径 k 中出行时间为 $t_{rs, ki}^{rs}$ 的实际发生概率; $\pi_+(p_i)$ 和 $\pi_-(p_i)$ 分别为乘客面对收益和损失时的累积决策权重函数; $w_+(p_i)$ 和 $w_-(p_i)$ 分别为收益和损失的决策权重函数; 参数 γ 和参数 δ 分别为面对收益和损失时的风险态度系数。

结合累积前景理论中的价值函数和累积决策权重函数, OD 对 r - s 间的出行路径 k 的累积前景值为

$$C_k^{rs} = \sum_{i=1}^m \pi_-(p_i) g(t_{rs, ki}) + \sum_{i=m}^n \pi_+(p_i) g(t_{rs, ki}) \quad (8)$$

在运营中断事件下, 受影响乘客进行新路径的选择时会参考原出行路径的广义出行时间, 另外, 乘客面对运营中断时属于被动群体, 往往可以在原出行路径的基础上接受一定范围内的时间延误。结合以上 2 个影响因素, 确定累积前景理论中参考点时间 t_{ref} 的计算公式, 如式(9):

$$t_{ref} = t_{origin} + \omega \cdot t_{origin, cost} + t_{limit} \quad (9)$$

式中: t_{origin} 为原路径出行时间; $t_{origin, cost}$ 为原路径出行费用转化时间; t_{limit} 为乘客忍耐时间, 即乘客面对运营中断时可接受的出行时间延误。

乘客忍耐时间的取值与乘客原路径出行时间^[11]与运营中断时长^[12]有关。原路径出行时间决定了乘客忍耐极限值, 在此基础上乘客忍耐时间随运营中断时长而时刻改变。一般来说, 中断时长越长, 乘客忍耐时间越长, 但不会超过忍耐极限值。如式(10):

$$\begin{cases} t_{limit} = \min(t_1, t_2) \\ t_1 = f_1(t_{origin}) \\ t_2 = f_2(t_{delay}) \end{cases} \quad (10)$$

式中: t_1 为乘客忍耐极限值, t_2 为乘客时变忍耐时间, $f_1(t)$ 为乘客忍耐极限值与乘客原路径出行时间的函数关系, $f_2(t)$ 为乘客时变忍耐时间与运营中断时长 t_{delay} 的函数关系。结合调查数据, 得到 $f_1(t)$ 与 $f_2(t)$ 的函数表示如式(11):

$$\begin{cases} f_1(t) = \frac{-22.78620}{1 + (t/10.28911)^{4.74292}} + 25.91262 \\ f_2(t) = \frac{-23.07204}{1 + (t/13.56648)^{4.48367}} + 26.35116 \end{cases} \quad (11)$$

根据既有研究^[13], 城市轨道交通及道路交通方式的出行时间分布可以用正态分布进行描述, 根据正态分布性质得到各交通方式的广义出行时间的连续分布, 如式(12)表示:

$$\begin{cases} T_{general, transit} \sim N(\mu_{transit} + \omega \cdot t_{transit, cost}, \alpha_{transit}^2) \\ T_{general, taxi} \sim N(\mu_{taxi} + \omega \cdot t_{taxi, cost}, \alpha_{taxi}^2) \\ T_{general, bus} \sim N(\mu_{bus} + \omega \cdot t_{bus, cost}, \alpha_{bus}^2) \end{cases} \quad (12)$$

式中: $T_{general, transit}$ 为城市轨道交通广义出行时间; $T_{general, taxi}$ 为出租车广义出行时间; $T_{general, bus}$ 为公交车广义出行时间; $\mu_{transit}$ 、 μ_{taxi} 、 μ_{bus} 分别为城市轨道交通、出租车、公交车理论出行时间的平均值; $\alpha_{transit}^2$ 、 α_{taxi}^2 、 α_{bus}^2 分别为城市轨道交通、出租车和公交车理论出行时间的方差; $t_{transit, cost}$ 、 $t_{taxi, cost}$ 、 $t_{bus, cost}$ 分别为城市轨道交通、出租车和公交车出行的费用。正态分布的平均值和方差均使用对应样本数据的平均值和方差代替。

在考虑实际情况下, 乘客对出行时间的细微差异并不敏感, 因此将出行时间连续分布以每 1 min 为间隔离散化, 取每时间段的中值为具体出行时间, 对出行时间密度函数在该时间段上积分得到的概率值作为该出行时间的客观发生概率, 进而生成每条出行路径的出行时间分布集合和对应客观发生概率集合。利用式(5)至(8)可得每条路径的累积前景值。

将运营中断条件下乘客对不同交通方式进行选择视作双层决策模型, 即首先选择以哪一种交通方式进行出行, 再选择该交通方式下的具体路径。以交通方式作为模型上层、出行路径作为模型下层, 构建双层 Nested Logit (NL) 模型 (图 2)。通过将选择方案划分为不同的巢, 充分考虑不同选择方案间的相似性, 并将相似性较大的方案单独作为一层, 从而规避了 MNL 模型中 IIA 特性带来的一系列问题。

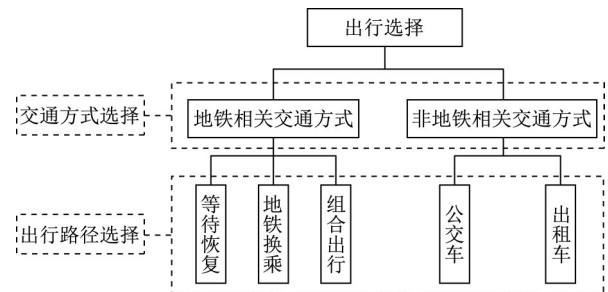


图2 NL选择模型

Fig. 2 NL choice model

假设备选路径集合 C 被划分为 N 个巢, 则在 NL 模型中, OD 对 r - s 间路径 k 的选择概率为选择巢 n 的

概率乘以在巢 n 中选择路径 k 的概率的乘积,即

$$P_{rs}(k) = P_{rs}(k|n) \cdot P_{rs}(n) \quad (13)$$

式中: $P_{rs}(k|n)$ 为在 OD 对 $r-s$ 间在巢 n 中选择路径 k 的概率,表达式为

$$p_{rs}(k|n) = \frac{e^{\frac{\theta_a V_{rs,kn}}{\theta_n}}}{\sum_{k=1}^{K_n} e^{\frac{\theta_a V_{rs,kn}}{\theta_n}}} \quad (14)$$

$P_{rs}(n)$ 为在 OD 对 $r-s$ 间在 N 个巢中选择巢 n 的概率。

$$p_{rs}(n) = \frac{e^{\theta_b V_{rs,n} + \theta_c \Gamma}}{\sum_{n=1}^N e^{\theta_b V_{rs,n} + \theta_c \Gamma}} \quad (15)$$

式中: $V_{rs,kn}$ 为 OD 对 $r-s$ 间选择巢 n 中路径 k 的确定性部分的效用; $V_{rs,n}$ 为选择巢 n 的确定性部分的效用; K_n 为巢 n 中出行路径的数量; 参数 θ_a 和 θ_b 分别为对出行路径和交通方式的熟悉程度指标, 值越大表示乘客对所选择对象越熟悉, 参数 θ_n 表示巢 n 中各个路径之间的相关性, 取值范围为 $[0, 1]$, 值越大表示各路径之间相关性越小。

由于 NL 模型的建模过程与模型标定过程是互逆的, 即 NL 模型首先会对每个巢内的路径进行标定参数, 将各个路径的效用进行对数相加得到 Γ 项, 作为各个巢的属性变量。 Γ 项的表达式为

$$\Gamma = \ln \left(\sum_{k=1}^{K_n} e^{\frac{\theta_a V_{rs,kn}}{\theta_n}} \right) \quad (16)$$

将各个巢内各选择路径的确定性部分效用替换为累积前景理论计算得到的前景值, 同时由于 NL 模型中每一层的概率计算依然沿袭 Logit 模型计算规则, 根据 Logit 模型得到的结果, 路径的选择概率由路径间的效用绝对大小所决定, 利用该方法得到的路径选择结果会集中分布在效用值较大的路径, 存在不合理性, 因此, 采用式 (17)、(18) 效用计算公式得到确定性部分效用:

$$V_{rs,kn} = C_{rs,kn} / \max \{ |C_{rs,kn}| \} \quad (17)$$

$$V_{rs,n} = \sum_k p_{rs}(k|n) V_{rs,kn} \quad (18)$$

式中: $C_{rs,kn}$ 为 OD 对 $r-s$ 间巢 n 中路径 k 的累积前景值。

3 案例分析

3.1 模型参数标定及有效性验证

为验证所建模型的可靠性和适用性, 选取某地城市轨道交通部分路网为例进行实证分析, 路网示意图如图 3 所示。

假设所有乘客都能准确感知到中断持续时间,

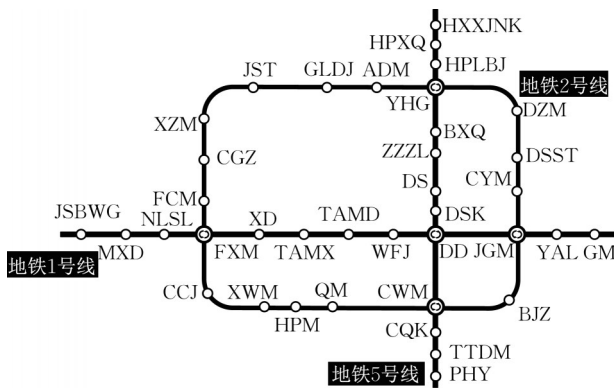


图 3 局部路网示意

Fig. 3 Schematic diagram of partial road network

且中断持续时间为确定值。设定在工作日早高峰时间 8:00—8:25, XD 至 DD 段发生双向运营中断事件, 此时覆盖区间和站点停止运营。受影响的乘客需要换乘轨道线路或改变出行方式到达目的地, 本文案例研究 2 个出行情景: ①起点为 JSBWG, 终点为 GM; ②起点为 XD, 终点为 GM。根据式 (11) 的计算, 2 个场景下乘客忍耐极限值取值为 25 min。实际上乘客忍耐极限值会随出行场景的变化而发生改变, 因此 25 min 仅适用于本文案例。

根据实际情况, 通勤乘客为城市轨道交通早高峰时期的主要客流, 且通勤乘客出行选择时对出行时间的敏感度最高, 因此本文案例将通勤乘客视为主体, 利用地图 API 进行早高峰时期地铁出行方案、公交车出行方案、出租车出行方案、组合出行方案的数据爬虫, 将获得的爬虫数据结合 AFC 数据进行筛选, 分别选出 2 个出行情景下的备选路径集合。

由于中断发生后实际数据难以获取, 采取网络长期投放问卷调查的方式进行参数标定及模型有效性验证。随机抽取 SP 调查问卷中 50% 的有效数据进行参数标定, 其中累积前景理论中的相关参数 γ 、 δ 、 α 、 β 、 λ 参考既有研究^[8], 利用 SPSS 运用多元线性回归法对路径选择模型中相关参数 θ_a 、 θ_b 、 θ_1 、 θ_2 、 θ 进行标定, 利用五分调查法^[14]结合调查数据确定费用转化权重取值, 参数标定结果如表 1 所示。

利用改进 Logit 模型对正常运营状态下乘客出行路径进行分析, 得到出行路径及选择概率情况如表 2 所示。

此时, 2 个 OD 对下的方案 1 在出行时间上都优于方案 2, 其方案的综合价值更高, 绝大部分乘客会选择该路径作为出行方案。因此可以认为此时各 OD 对下的方案 1 为乘客后续面对运营中断下进行路径选择时的参考方案。

表1 参数标定

Tab. 1 Parameter calibration results

OD对	γ	δ	α	β	λ	ω	θ_a	θ_b	θ_1	θ_2	θ
JSBWG—GM	0.61	0.69	0.88	0.88	2.25	0.30	2.24	4.22	0.12	0.64	7.96
XD—GM	0.61	0.69	0.88	0.88	2.25	0.30	2.24	2.73	0.45	0.64	7.96

表2 正常运营状态下乘客出行方案集

Tab. 2 Passenger route set under normal condition

OD对	方案	路径	平均时间/min	选择概率
JSBWG—GM	1	JSBWG—乘坐1号线—GM	26.4	0.985 0
	2	JSBWG—FXM—换乘2号线(CCJ方向)—JGM—换乘1号线—GM	37.9	0.015 0
XD—GM	1	XD—乘坐1号线—GM	18.2	0.991 0
	2	XD—乘坐1号线—DD—换乘5号线—CWM—换乘2号线—JGM—换乘1号线—GM	34.8	0.009 0

再利用基于累积前景理论的NL模型得到运营中断下的乘客路径选择概率,情况如表3所示。

表3 运营中断状态下乘客出行方案集

Tab. 3 Passenger route set in disruptions

OD对	方案	路径	费用/元	路径均值/min	路径方差/min	参考点/min	累积前景值	选择概率
JSBWG—GM	1	JSBWG—FXM—换乘2号线(CCJ方向)—JGM—换乘1号线—GM	4	38.43	1.38	53.5	14.93	0.716 4
	2	JSBWG—FXM—换乘2号线(CCJ方向)—CWM—换乘5号线—DD—换乘1号线—GM	4	47.61	1.96	53.5	2.60	0.024 2
	3	乘坐出租车	37	25.06	0.80	53.5	4.35	0.244 1
	4	乘坐公交车	3	72.59	0.92	53.5	-67.00	0.005 9
	5	等待中断恢复,维持原路径	4	51.93	0.80	53.5	-0.57	0.009 4
XD—GM	1	XD—乘坐出租车—FXM—乘坐2号线—JGM—换乘1号线—GM	19	34.29	1.47	45.3	9.72	0.722 1
	2	XD—乘坐公交车—FXM—乘坐2号线—JGM—换乘1号线—GM	6	47.09	1.37	45.3	1.6	0.0458
	3	乘坐出租车	42	40.51	1.5	45.3	-15.8	0.0012
	4	乘坐公交车	2	51.06	2.45	45.3	0.71	0.0458
	5	等待中断恢复,维持原路径	4	43.32	1.47	45.3	6.08	0.1851

利用SP调查问卷中另外50%的有效数据进行模型准确性验证,得到结果如图4所示。其中,传统MNL模型的相对误差最大,CPT-NL模型的相对误差最小,CPT-MNL模型介于两者之间。由图4可知,利用传统MNL(Multinomial Logit)模型计算得到的结果与问卷调查结果相比较差距较大,传统方法在分析乘客运营中断条件下的选择行为问题上存在缺陷,而结合累积前景理论进行考虑的CPT-MNL模型和CPT-NL模型相较于传统模型有更高的预测精度,对比CPT-MNL模型和CPT-NL模型,CPT-NL模型计算出的各方案选择概率与问卷调查中的方案选择概率最为接近,误差在10%以内,预测精度优于CPT-MNL模型,说明本文基于累积前景理论的NL模型能较为准确刻画城市轨道交通发生运营中断时乘客出行方案选择的真实情况,可认为模型预测结果较为可靠。

3.2 结果分析

由表3可见,在本文案例中断场景下,对于OD对JSBWG至GM,此时乘客的出行路径受到影响,74.06%的乘客会选择通过换乘城市轨道交通线路完成出行目的,25.00%的乘客会选择放弃城市轨道交通,0.94%的乘客会选择等待中断恢复,维持原路径出行。对于OD对XD至GM,此时乘客的进站点受到影响,76.79%的乘客选择通过组合交通方式出行,4.70%的乘客直接选择其他交通方式出行,18.51%的乘客选择等待中断恢复,维持原路径出行。综合来看,无论乘客是受到哪类影响,大部分乘客在面对运营中断后依然首先考虑使用轨道交通相关的交通方式完成出行。对比2个OD对,以乘坐出租车为例,该出行方式在2个OD对下的价格费用都很高,而累积前景值与选择概率却相差较大,是因为常态下2个OD的城市轨道交通出行效用不同,使2个OD对的中断下的参考点取值不同,第1个OD对

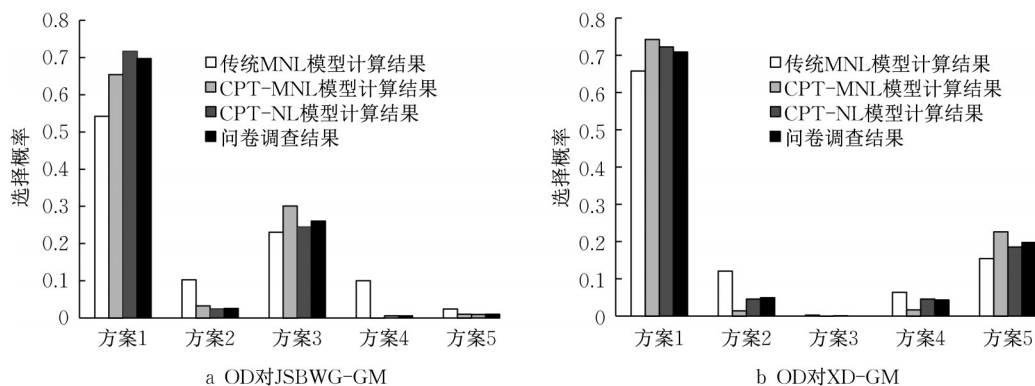


图4 模型计算结果与问卷调查结果对比

Fig. 4 Comparison of model calculation results and questionnaire survey results

下出租车的相对价值高于第2个OD对出租车的相对价值,这也说明乘客路径选择行为结果取决于各路径相对于参考点的大小而非各路径的绝对大小。

ω 为费用转换权重,即乘客对于出行费用的敏感程度,值越大,乘客对于出行费用的敏感度越高,保持其他条件不变,改变 ω 值,得到各路径选择概率变化情况如图5所示。可见,对JSBWG至GM,方案1和方案2的选择概率随 ω 值增加而增加,其他方

案均有所降低。对XD至GM,方案1的选择概率随 ω 值增加而减少,其他方案均有所增加。 ω 值越大,乘客出行时对于出行费用的考虑程度就越大,出行费用较小的方案总体优势相对更加明显,乘客会更加倾向出行费用小的方案。

在不同中断时长下的乘客路径选择行为存在差异。以1 min为步长,分析情景1和情景2下随中断时长变化的乘客路径动态选择行为,如图6所示。

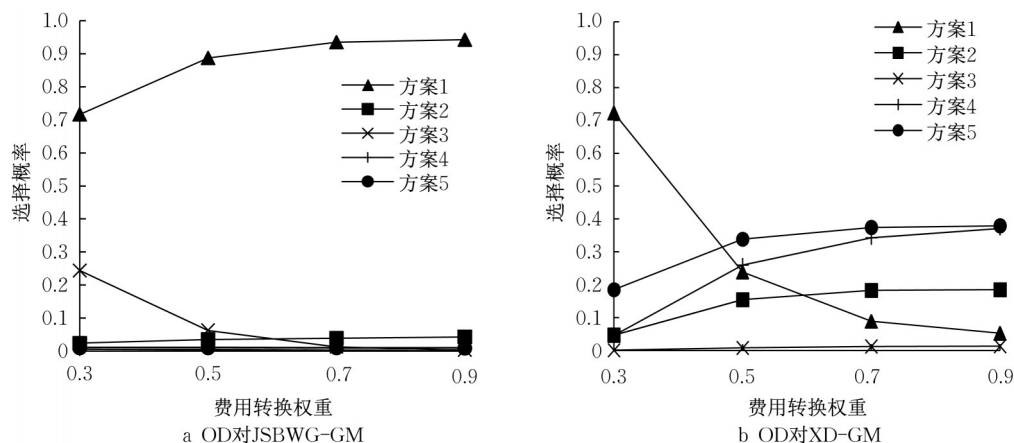


图5 不同费用转换权重下的路径选择概率

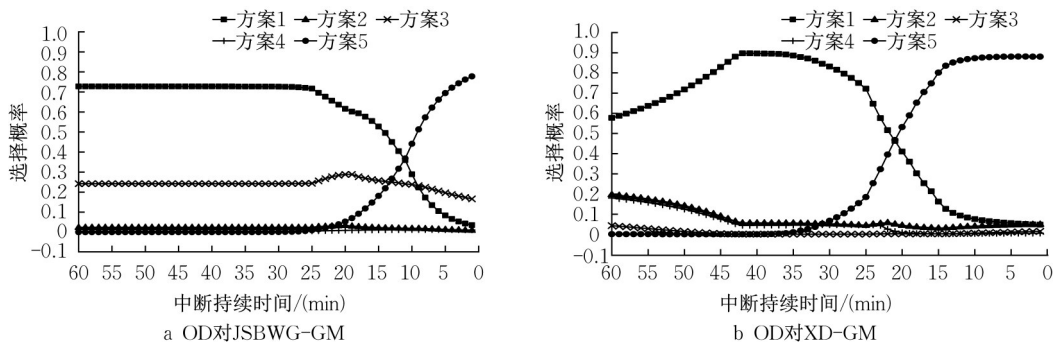
Fig. 5 Route choice probability at different ω values

图6 中断持续时间变化下的路径选择概率

Fig. 6 Route choice probability in the change of interrupt duration

由图6可见,在本文案例中断场景下,随着中断持续时间的变化,各出行方案的选择概率呈现动态变化。从整体上看,随着中断持续时间的减小,2个OD对下的维持原路径的选择概率均会逐渐变大,其余方案的选择概率会逐渐减小,最终概率会趋于正常情况下的选择概率。从25 min开始,方案5的选择概率随中断持续时间减小而迅速上升,其余方案的选择概率均会呈现不同程度的下降,说明25 min是乘客面对运营中断事件时是否改变自身原出行路径的临界点,这与调查得到的乘客面对中断时极限忍耐值为25 min保持一致,表明乘客的极限忍耐值是其出行路径选择行为上的一个关键参考因素。

在25 min以后,对于JSBWG至GM,随着中断持续时间的增加,各个方案的选择概率趋于稳定,说明对于出行路径发生变化的乘客而言,中断时长达到一定程度后,对于乘客各方案的选择影响不大。对于XD至GM,中断时长的增加会使得退出轨道交通的选择概率会有所上升,这是由于对于进站点受到影响的乘客而言,乘客此时尚未进入轨道交通系统,改换交通方式出行对于这类乘客而言更为容易,因此当他们接收到一个长时间的中断时间信息时,会对于其他交通方式出行产生一定程度的倾向。

综合以上2种情景,对于短时间的中断情况,乘客的出行方案变化更为剧烈,说明短时间中断下整个路网的不稳定性更高,对于长时间的中断情况,乘客的出行方案选择会因为自身所受中断影响的不同

而产生区别,其选择结果也呈现出不同,因此对乘客受影响类别进行分类是有必要的。

乘客极限忍耐值体现了乘客对于出行时间的看重程度,极限忍耐值越小,说明乘客在面对运营中断事件时希望自身因此造成的延误损失越小,保持中断时长25 min不变,改变乘客极限忍耐值,得到乘客路径选择概率随乘客最大容忍时间变化的动态曲线如图7所示。对JSBWG至GM,随着极限忍耐值的降低,方案1的选择概率整体呈现下降趋势,而方案3的选择概率整体呈现上升。其中,方案3的出行时间小于原出行方案,乘客在选择方案3时在出行时间上会产生“收益”,随着极限忍耐值越小,乘客对于出行时间的要求更高,因此对于出行时间上的“收益”感知会增强,使得方案3的选择概率增加。对XD至GM,随着极限忍耐值的降低,方案1的选择概率整体呈现下降趋势,方案2和方案5的选择概率呈现整体上升趋势。在3个方案中,方案1的出行费用大于方案2和方案5,方案1的出行时间最小,但仍大于原出行方案,乘客在此情景下无论做出何种选择,出行时间均是产生“损失”的,且随着极限忍耐值的减小,乘客在出行时间上的“损失”感知会增强,因此会转而选择出行费用更小的方案2和方案5以避免自身综合“损失”的扩大。

综上所述,乘客的极限忍耐值一定程度上影响乘客对出行“收益”和“损失”的感知程度,且感知程度越大,乘客越趋于扩大“收益”和减少“损失”。

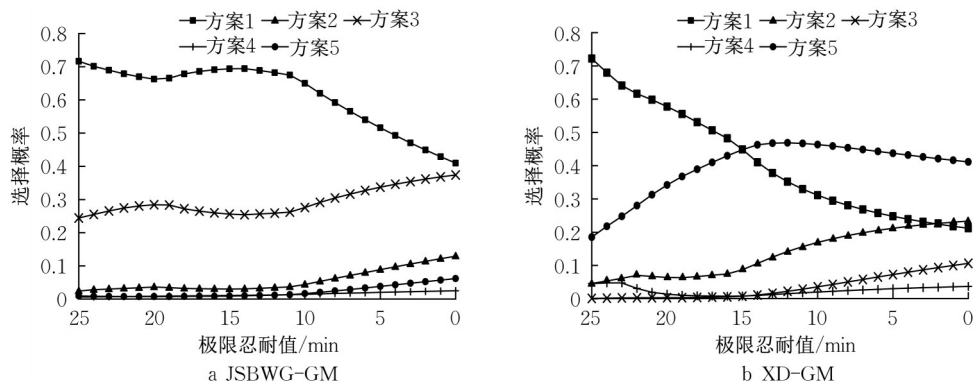


图7 极限忍耐值变化下的路径选择概率

Fig. 7 Route choice probability in the change of limit tolerance value

4 结论

(1)提出的基于累积前景理论的路径选择概率模型计算结果与问卷调查统计结果相差不超过10%,表明该模型在城市轨道交通运营中断条件下

乘客路径选择问题有较好的适用性。

(2)对于受到中断影响的不同类型乘客,其路径选择行为存在差异,出行路径受影响的乘客无论面对长时间中断还是短时间中断都更倾向于维持轨道交通出行这一交通方式来进行出行决策,而对于进

出站点受影响的乘客,面对长时间中断时会考虑改变交通方式出行,因此在分析运营中断下的乘客路径选择行为时有必要将乘客按照中断影响分类。

(3)乘客出行选择行为随中断时长改变呈现动态变化,短时中断下乘客的路径选择行为更加分散且变化更为剧烈,使得整个路网的不确定性更强,运营者在制定应急策略时需充分考虑中断时长变化的影响。乘客的极限忍耐值体现了乘客面对中断事件下对于自身“收益”和“损失”的感知程度,极限忍耐值越小,乘客对于自身“利益”和“损失”越敏感,越倾向于做出扩大“利益”和减少“损失”的决策。乘客极限忍耐值取值受到原路径出行时间的影响,不同出行场景下的极限忍耐值取值存在差异。

在研究过程中发现,乘客的参考点与各方案的前景值有紧密的联系,目前参考点的确定方法采用简单的统一定性分析,实际情况下因为乘客个人特征、喜爱偏好、出行目的等个体化差异会导致参考点确定的复杂性,后续研究中可以对参考点的确定方法进行深入研究。

作者贡献声明:

韩宝明:论文的构思者及负责人,指导实验设计、数据分析、论文写作与修改。

陈佳豪:论文的执行人,完成数据分析、论文初稿的写作。

周玮腾:参与实验设计和实验结果分析。

孙亚洁:进行论文修改。

参考文献:

- [1] 于鸿飞. 城轨路网客流非均衡随机动态分配及其在运营中断时的应用研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2015.
YU Hongfei. A dynamic stochastic disequilibrium passenger flow assignment method and its application on a local disruption of urban railway network [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015.
- [2] 尹浩东. 运营中断条件下城市轨道交通乘客出行行为建模与客流诱导优化研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2017.
YIN Haodong. Modeling passenger travel behavior and guidance optimization for disruption management in the urban rail transit network [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2017.
- [3] 徐瑞华, 叶剑鸣, 潘寒川. 列车运行延误条件下城市轨道交通网络换乘站大客流预警方法[J]. 中国铁道科学, 2014, 35(5):127.
XU Ruihua, YE Jianming, PAN Hanchuan. Method for early warning of heavy passenger flow at transfer station of urban rail transit network under train delay [J]. China Railway Science, 2014, 35(5):127.
- [4] AVINERI E, PRASHKER J N. Sensitivity to travel time variability: Travelers' learning perspective [J]. Transportation Research Part C, 2005, 13(2):157.
- [5] AVINERI E, CHORUS C G. Editorial: Recent developments in prospect theory-based travel behaviour research [J]. European Journal of Transport and Infrastructure Research, 2010, 10(4):293.
- [6] TVERSKY K A. Prospect theory: An analysis of decision under risk [J]. Econometrica, 1979, 47(2):263.
- [7] AMOS Tversky, DANIEL Kahneman. Advances in prospect theory: Cumulative representation of uncertainty [J]. Journal of Risk and Uncertainty, 1992, 5(4):297.
- [8] 柳伍生, 潘自翔, 龙思, 等. 基于累积前景理论的地铁运营中断后乘客出行行为[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2020, 17(4):70.
LIU Wusheng, PAN Zixiang, LONG Si, *et al.* Passenger travel behaviors after subway operation interruption based on cumulative prospect theory [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2020, 17(4):70.
- [9] 田丽君, 杨茜, 黄海军, 等. 基于累积前景理论的出行方式选择模型及实证[J]. 系统工程理论与实践, 2016, 36(7):1778.
TIAN Lijun, YANG Qian, HUANG Haijun, *et al.* Travel choice model and empirical analysis based on cumulative prospect theory [J]. System Engineering Theory and Practice, 2016, 36(7):1778.
- [10] 何胜学, 范炳全. 公交网络最优路径求解算法[J]. 交通运输工程与信息学报, 2007(1):22.
HE Shengxue, FAN Bingquan. Optimal path searching algorithm in transit network [J]. Journal of Transportation Engineering and Information, 2007(1):22.
- [11] 曲振. 列车延误条件下城市轨道交通时刻表优化模型研究[D]. 北京: 清华大学, 2016.
QU Zhen. Research on rescheduling optimization model with train delay in urban rail transit [D]. Beijing: Tsinghua University, 2016.
- [12] 曾璐, 刘军, 秦勇, 等. 基于AFC数据的突发事件下城市轨道交通乘客路径决策研究[J]. 铁道学报, 2019, 41(8):9.
ZENG Lu, LIU Jun, QIN Yong, *et al.* Route choice behavior of passengers in urban rail transit under emergency based on AFC data [J]. Journal of the China Railway Society, 2019, 41(8):9.
- [13] 李春晓. 城市轨道交通突发事件下乘客路径选择行为建模与仿真[D]. 北京: 北京交通大学, 2017.
LI Chunxiao. Modeling and simulation of passenger route choice behavior under emergencies of urban rail transit [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2017.
- [14] 钱蕾. 双向中断下城市轨道交通网络列车运行调整研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2021.
QIAN Lei. Research on train operation adjustment of urban rail transit network under bidirectional interruption [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2021.