【交通物流 / Transportation Logistics】

考虑决策惯性的城市轨道交通多交路出行选择模型

巩亮[1,2]，朱欣雨[1,2]，许得杰[1,2]，胡晨皓[1,2]，杨阳阳[1,2]

1）兰州交通大学交通运输学院，甘肃兰州730070；2）兰州交通大学高原铁路运输智慧管控铁路行业重点实验室，甘肃兰州730070

摘　要：多交路运营是中国城市轨道交通网络化运营组织的重要组成部分，研究乘客在多交路运营条件下的出行选择行为，对把握乘客出行规律、满足多样化出行需求具有重要意义．基于随机后悔最小化模型，引入乘客对路径属性感知的异质性，构建融合效用与后悔机制的多尺度混合模型，克服了传统模型未考虑路径熟悉度导致的乘客出行行为与实际出行行为之间的决策偏差．通过整合容忍阈值与决策惯性，提出一种多交路出行选择建模方法，基于典型案例的陈述偏好(stated preference，SP)调查数据，完成模型参数估计与性能验证．研究结果表明，乘客对出行时间属性的容忍阈值为6.98 min；相较于基准模型，考虑决策惯性的模型在似然值、贝叶斯信息准则(Bayesian information criterion，BIC)及命中率指标上均表现更优，表明其具备更强的数据拟合能力；支付意愿分析进一步揭示乘客愿意为服务提升承担额外时间成本，从而验证了所提模型的有效性与实用性．

关键词：城市轨道交通；路径选择；决策惯性；容忍阈值；多交路；混合效用-后悔模型

中图分类号：U121；F57　　**文献标志码：**A　　**DOI：**10.3724/SP.J.1249.2026.01047

Multi-route choice model of urban rail transit considering decision inertia

GONG Liang[1,2], ZHU Xinyu[1,2], XU Dejie[1,2], HU Chenhao[1,2], and YANG Yangyang[1,2]

1) School of Traffic and Transportation, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, Gansu Province, P. R. China

2) Key Laboratory of Railway Industry on Plateau Railway Transportation Intelligent Management and Control, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, Gansu Province, P. R. China

Abstract: Multi-route operation is a key feature of the networked operation system in China′s urban rail transit. Investigating passengers′ travel choice behavior under such conditions is crucial for understanding passenger travel patterns of and meeting diverse travel demands. Based on minimum-regret theory, this study incorporates the passenger heterogeneity in the perception of route attributes to construct a multi-scale hybrid utility-regret model that integrates utility maximization and regret minimization mechanisms. This model addresses the decision-making deviation between predicted passengers′ travel behavior by traditional models and their actual travel behavior, a discrepancy arising from the passengers′ route familiarity. By integrating tolerance thresholds and decision inertia, we propose a modeling approach for multi-route travel choice and estimate model parameters and validate

Received: 2024-12-17; **Revised:** 2025-06-09; **Accepted:** 2025-07-30; **Online** (CNKI)**:** 2025-10-09

Foundation: National Natural Science Foundation of China (72261025); Innovation Foundation of Higher Education Institutions of Gansu Province (2021B-103); Joint Innovation Foundation of Lanzhou Jiaotong University and Tianjin University (2021056)

Corresponding author: Associate professor XU Dejie (xudejie126@126.com)

Citation: GONG Liang, ZHU Xinyu, XU Dejie, et al. Multi-route choice model of urban rail transit considering decision inertia [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2026, 43(1): 47-56. (in Chinese)

Open access: This article is licensed under the CC BY 4.0 License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

http://journal.szu.edu.cn

performance using stated preference (SP) survey data from a representative case. The results show that passengers exhibit a tolerance threshold of 6.98 minutes for travel time attribute. Compared with the benchmark model, the proposed model demonstrates superior performance in terms of log-likelihood, Bayesian information criterion (BIC), and hit rate, thereby confirming its stronger data-fitting capability. Furthermore, the analysis of willingness-to-pay reveals that passengers are willing to accept additional time costs for improved service quality, confirming the model's effectiveness and practical applicability.

Key words: urban rail traffic; route choice; decision inertia; tolerance threshold; multi-route; mixed utility-regret model

据中国城市轨道交通协会统计，2024年北京城市轨道交通年客运量达36.22亿人次，日均客运量989.61万人次，同比增长4.58%[1]．在多交路运营组织模式下，乘客的出行选择行为呈现出显著复杂性，其不仅受线路发车间隔和出行耗时等基础因素影响，还会因交路类型差异产生不同决策，如部分乘客为缩短候车时间优先选择发车频率高的小交路．此外，乘客对换乘站点的熟悉程度，以及通勤、休闲等不同出行目的，均会进一步影响其选择偏好．因此，深入研究乘客在多交路场景下的出行选择行为，能精准识别不同群体的需求差异，调整运力配置，提升服务质量与出行体验，对推动超大城市轨道交通高效运转具有重要现实意义．

传统城市轨道交通路径选择模型主要基于期望效用理论，采用随机效用最大模型(random utility maximization model，RUM)研究出行者的随机选择行为，该模型假设乘客具有完全理性，即会选择阻抗最小或效用最大的路径[2-4]．然而，SIMON[5]在有限理性理论中指出，乘客决策能力和信息获取能力存在客观约束，现实决策行为往往偏离完全理性假设．KAHNEMAN等[6-7]提出前景理论，为解释乘客在不确定性情境下的行为特征提供理论支撑．CHORUS等[8-9]将后悔理论引入交通领域，通过假设乘客存在后悔规避心理，提出随机后悔最小模型(random regret-minimization model，RRM)，其针对多方案路径选择问题，以预期后悔值差量化的方式进行表示，从而更好地刻画乘客决策时的半补偿效应．PRATO[10]研究表明，RRM模型可以有效克服独立性无关选择(independence of irrelevant alternatives，IIA)特性，较RUM模型能更准确描述乘客的出行行为，因此在交通出行行为研究中得到广泛应用．晋泽倩等[11]在洪涝灾害场景下，提出了疏散者在效用最大和后悔规避规则之间的疏散决策异质性，并分析了居民对不同疏散决策属性的支付意愿．徐媛等[12]构建了考虑心理距离的随机后悔最小化出行选择模型，该模型不仅能区分不同类型出行方案，还可解释心理因素对感知后悔情绪产生的影响．许心越等[13]研究了诱导信息对乘客路径选择的影响，提出决策框架与混合效用-后悔模型，并对乘客的信息偏好进行分析．

相较于单一交路运营，多交路模式下乘客的决策重点发生转移，即从对单一交路的依赖转向对多交路内不同列车的选择；但现有相关研究存在明显局限，大多仅围绕路径选择展开，未考虑乘客在长期单一交路出行中形成的决策惯性和乘客对路径熟悉度存在差异的实际情况．本研究引入决策惯性，构建城市轨道交通多交路出行选择模型．构建模型发现乘客路径熟悉度差异，有利于制定差异化引导方案，推动城市轨道交通在运能提升、服务优化及应急调度等场景下的精细化管理．

1 多交路运营组织形式

多交路是针对较长线路上客流分布空间差异性的解决方案，在多交路运营组织形式下，运营商可在同一线路上开行两种及以上交路形式的列车[14]．城市轨道交通典型多交路运营组织形式如图1，线路包含3条交路．其中，交路1贯通运营干线，从车站a运行至车站g后折返；交路2从车站a运行至车站c后折返；交路3在车站b发车，运行至支线的终点站e后折返，与交路2组成衔接交路，并与交路1组成Y型交路．

在多交路运营模式下，跨交路乘客的路径选择是一个复杂且受多因素影响的决策过程．特别是在共线区段bc，乘客的决策受到3条交路多重因素的共同作用．为研究乘客在多交路运营模式下的出行行为，本研究做如下假设：① 3条交路列车的车型、车厢容量和车辆编组的配置相同；② 高峰时段，3条交路列车的发车间隔相等，比例为1∶1∶1；③ 在多交路运营模式下，乘客换乘均为同站台换乘；④ 所有列车均采用站站停方案，即每条交路列车在其运行区间的所有车站均停靠．

http://journal.szu.edu.cn

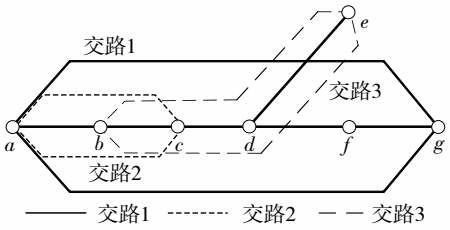

图 1　典型多交路形式

Fig. 1　Typical multi-interchange form. The solid line, short dashed line and long dashed line represent route 1, route 2 and route 3, respectively. The thick solid line from *a* to *g* represents the main line, and the thick solid line from *d* to *e* represents the branch line.

2　多交路出行选择模型

多交路运营模式为乘客提供更多的出行选择，使乘客能够根据个人需求与偏好灵活选择交路．然而，这种运营模式在一定程度上增加了乘客的选择决策复杂度．由于信息获取的局限性，乘客在多交路出行决策中一般具有有限理性．有限理性指人类因认知能力、信息获取及时间等限制，决策时无法追求“最优解”，转而寻求“满意解”，以此修正传统“完全理性”假设的局限性．因此，采用后悔理论可以更精确刻画乘客的路径选择行为．

2.1　尺度效用下的随机后悔最小化选择模型

后悔理论强调乘客对不同路径的比较，即乘客在决策时不仅会考虑所选出行路径的效用，还会权衡未被选择的有效路径以避免后悔．当乘客感知到所选路径的体验劣于其他路径时，会产生后悔情绪，并可能影响后续选择[8]．假设乘客在典型多交路的出行方案选择集 W 中，交路方案分别由出行时间(times)，换乘次数(transfer)及车厢内拥挤程度(load)这 3 个路径属性 m 来描述，且这些属性在所有备选方案之间都是可以比较的．根据 CHORUS 等[8]提出的后悔最小化模型，对属性 m，乘客选择交路 i 的后悔感知效用与选择交路 j 的后悔感知效用的差值 φ_{ij}^{m} 为

$$\varphi_{ij}^{m} = v_i^m - v_j^m \tag{1}$$

其中，v_i^m 和 v_j^m 分别为交路 i 和 j 关于属性 m 的属性值．

在多交路出行中，乘客会对交路方案的不同属性产生尺度效用，即乘客在不同路径属性尺度的评估下，对交路方案的选择会有所不同．长距离出行时，出行时间属性的尺度差异显著，而换乘次数和拥挤程度的尺度差异相对较小．因此，将 Weber 定律应用于路径出行时间属性的后悔值计算中，个体感知到的刺激变化 ΔI 与原始刺激 I 的比值恒定[15]，即

$$\frac{\Delta I}{I} = k \tag{2}$$

其中，k 为常数．在时间属性上，乘客选择交路 i 的后悔感知效用与选择交路 j 的后悔感知效用的相对差值 $\varphi_{ij}^{\text{times}}$ 为

$$\varphi_{ij}^{\text{times}} = \frac{v_i^{\text{times}} - v_j^{\text{times}}}{v_i^{\text{times}}} \tag{3}$$

其中，v_i^{times} 和 v_j^{times} 分别为交路 i 和交路 j 的出行时间属性值．

在换乘次数和拥挤程度属性上，乘客选择交路 i 的后悔感知效用与选择交路 j 的后悔感知效用的差值分别为

$$\varphi_{ij}^{\text{transfer}} = v_i^{\text{transfer}} - v_j^{\text{transfer}} \tag{4}$$

$$\varphi_{ij}^{\text{load}} = v_i^{\text{load}} - v_j^{\text{load}} \tag{5}$$

其中，v_i^{transfer}、v_i^{load} 和 v_j^{transfer}、v_j^{load} 分别为交路 i 和交路 j 的换乘次数、拥挤程度属性值；$\varphi_{ij}^{\text{transfer}}$ 和 $\varphi_{ij}^{\text{load}}$ 分别为交路 i 与交路 j 在换乘次数和拥挤程度维度上的后悔感知效用差值．

假设随机误差 ε_i 服从 Gumbel 分布，则考虑尺度效用的随机后悔最小化选择模型(scale random regret-minimization model，S-RRM)表示为

$$\varphi_{ij} = \beta_{\text{times}}\varphi_{ij}^{\text{times}} + \beta_{\text{transfer}}\varphi_{ij}^{\text{transfer}} + \beta_{\text{load}}\varphi_{ij}^{\text{load}} \tag{6}$$

$$\varphi_i = \sum_{j \neq i, j \in W} \varphi_{ij} + \varepsilon_i, i \in W \tag{7}$$

$$P_\varphi(i) = \text{prob}\left(\varphi_i < \varphi_j, \forall i, j \in W, j \neq i\right) = \frac{\exp(-\varphi_i)}{\sum_{j \in W}\exp(-\varphi_j)} \tag{8}$$

其中，φ_{ij} 为乘客选择交路 i 相较于选择交路 j 的属性相对值；β_{times}、β_{transfer} 和 β_{load} 分别为待标定参数；φ_i 和 φ_j 分别为乘客对交路方案 i 和 j 的总后悔值；$P_\varphi(i)$ 为乘客选择交路方案 i 的概率；prob 函数为计算乘客选择交路方案 i 的概率函数．考虑式(6)在零点附近不连续所产生的边际效应难以计算，将 φ_{ij} 进一步平滑处理为

$$R_{ij}^m = \max\left\{0 + \varepsilon_0^m, \beta_m\left(v_i^m - v_j^m\right) + \varepsilon_v^m\right\} \tag{9}$$

$$\int_\varepsilon \left[R_{ij}^m f(\varepsilon)\right]\mathrm{d}\varepsilon = \ln\left[1 + \exp\left(\beta_m\varphi_{ij}^m\right)\right] \tag{10}$$

因此，

http://journal.szu.edu.cn

$$\varphi_{ij} = \ln\left(1 + \exp\left(\beta_{\text{times}}\varphi_{ij}^{\text{times}} + \beta_{\text{transfer}}\varphi_{ij}^{\text{transfer}} + \beta_{\text{load}}\varphi_{ij}^{\text{load}}\right)\right) \tag{11}$$

其中，R_{ij}^{m}为后悔权重；ε为误差.

2.2 效用与后悔规则混合出行选择行为模型

基于S-RRM的分析可知不同路径属性对乘客出行选择的影响. 然而，乘客间存在异质性，每位乘客的决策过程中都有其独特的需求和偏好. KEYA等[16]提出基于效用规则与后悔规则的混合选择模型，为刻画个体在复杂决策情境下的非完全理性选择行为提供了通用建模框架，本研究结合城市轨道交通路径选择特征，对该混合决策框架进行具体建模，构建乘客效用与后悔混合模型(mixed utility-regret model，M-URM). 通过引入反映乘客个人属性差异的变量n，并基于S-RRM形式刻画路径间的后悔项，从而增强模型对城市轨道交通出行情境下乘客路径属性感知及备选路径相对差异特征的刻画能力. 假设ε_i服从Gumbel分布，则M-URM可表示为

$$U_i = \sum_n \beta_n v_i^n + \sum_m \beta_m v_i^m - \sum_{j \neq i, j \in W} \varphi_{ij} + \varepsilon_i, i \in W \tag{12}$$

$$P_U(i) = \text{prob}(U_i < U_j, \forall i, j \in W, j \neq i) = \frac{\exp(-U_i)}{\sum_{j \in W}\exp(-U_j)} \tag{13}$$

其中，U_i和U_j为乘客对交路方案i和j的总效用值；β_n为乘客个人属性的待标定参数；β_m为出行路径属性的待标定参数；v_i^n和v_i^m分别为交路i关于个人属性n和路径属性m的属性值；$P_U(i)$为乘客选择交路方案i的概率.

2.3 考虑决策惯性的效用与后悔规则混合选择模型

城市轨道交通多交路运营模式中，乘客的出行决策过程受习惯、经验或信息来源影响，形成稳定的决策模式，即决策惯性. 决策惯性主要体现在：① 减少换乘，乘客更偏好选择直达列车；② 固定出行路径的高满意度，如上班族和学生的日常通勤. 乘客选择路径时，会对比不同交路方案的属性价值，当这些属性价值差异细微时，对于具有决策惯性的乘客而言，这种对比可能不足以引起乘客的注意[17].

为量化乘客决策惯性，基于M-URM引入COOMBS等[18]提出感知阈值概念，当外部刺激的变化低于某一确定阈值时，个体无法感知其差异. 因此，在交路方案路径属性m的后悔感知效用中加入容忍阈值，以此来表示具有决策惯性的乘客对于不同交路方案属性的容忍程度. 交路i和j之间路径属性的后悔感知效用差值可表示为

$$\bar{\varphi}_{ij}^{\text{times}} = \left(\frac{v_i^{\text{times}} - v_j^{\text{times}}}{v_i^{\text{times}}}\right) - \alpha\Delta_{\text{times}} \tag{14}$$

$$\bar{\varphi}_{ij}^{\text{transfer}} = \left(v_i^{\text{transfer}} - v_j^{\text{transfer}}\right) - \alpha\Delta_{\text{transfer}} \tag{15}$$

$$\bar{\varphi}_{ij}^{\text{load}} = \left(v_i^{\text{load}} - v_j^{\text{load}}\right) - \alpha\Delta_{\text{load}} \tag{16}$$

其中，$\bar{\varphi}_{ij}^{\text{times}}$、$\bar{\varphi}_{ij}^{\text{transfer}}$和$\bar{\varphi}_{ij}^{\text{load}}$分别为乘客对出行时间、换乘次数和车厢拥挤程度维度的后悔感知效用差值；Δ_{times}、Δ_{transfer}和Δ_{load}分别为乘客对出行时间、换乘次数和车厢拥挤程度维度的容忍度；α为0-1变量，表示乘客对当前路径是否具有决策惯性，若乘客熟悉当前交路或经常出行当前交路，则$\alpha = 1$，反之$\alpha = 0$. 假设效用与后悔ε_i服从Gumbel分布，则考虑乘客决策惯性的效用与后悔混合模型(decision inertia mixed utility-regret model，DI-MURM)可表示为

$$\bar{\varphi}_{ij} = \ln\left(1 + \exp\left(\beta_{\text{times}}\bar{\varphi}_{ij}^{\text{times}} + \beta_{\text{transfer}}\bar{\varphi}_{ij}^{\text{transfer}} + \beta_{\text{load}}\bar{\varphi}_{ij}^{\text{load}}\right)\right) \tag{17}$$

$$X_i = \sum_n \beta_n v_i^n + \sum_m \beta_m v_i^m - \sum_{j \neq i, j \in W} \bar{\varphi}_{ij} + \varepsilon_i, i \in W \tag{18}$$

$$P_X(i) = \text{prob}(X_i < X_j, \forall i, j \in W, j \neq i) = \frac{\exp(-X_i)}{\sum_{j \in W}\exp(-X_j)} \tag{19}$$

其中，$\bar{\varphi}_{ij}$为交路i相对于交路j考虑决策惯性的属性相对值；X_i和X_j为乘客对交路方案i和j的总效用值[19]；$P_X(i)$为乘客选择交路方案i的概率.

3 多交路出行选择行为调查

3.1 调查方式及结果分析

本研究调查工作分为两部分：① 深入探究乘客个体属性，以全面掌握其需求及个人特征；② 调查乘客在城市轨道交通多交路运营模式下的出行选择意向，旨在揭示其出行偏好. 综合考量实际出行影响因素，并基于全面调查，设计旨在简化受访乘客答题负担的出行情境构建方法，以当前到站交路列车为例，设定特定出行场景，并引入换乘次数、平均出行时间及车厢拥挤程度等关键指标，通过提供不同到站车辆的相关属性信息，模拟乘客在

http://journal.szu.edu.cn

多交路环境下的出行选择情况．此设计同样适用于支线场景，从而能够更加全面反映乘客在典型多交路运营模式下的出行选择意向．出行情境构建示意图如图2．

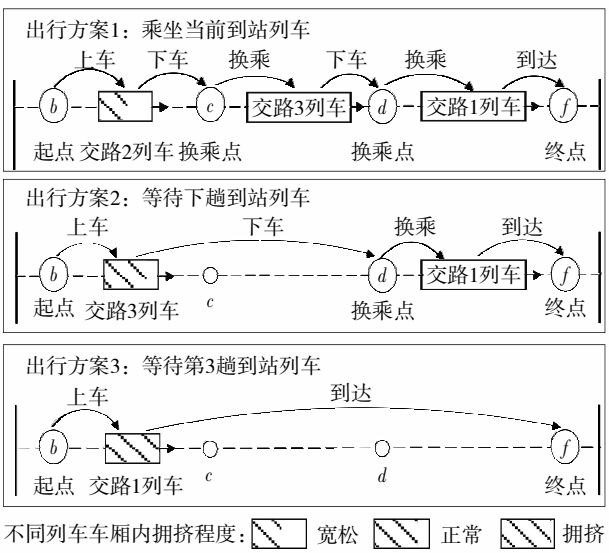

图2　出行情境构建示意

Fig. 2　Schematic diagram of travel scenario construction.

路径属性的参数水平值如表1．乘客平均出行时间参考《2023年度中国主要城市通勤监测报告》[20]，超大城市单程通勤平均时耗为40 min．根据有效路径阈值约束方法，乘客可能选择的交路出行平均时间 v^{times} 的范围为：$v^{\text{times}}\left(1-f_{\text{c}}\right)<v^{\text{times}}<v^{\text{times}}\left(1+f_{\text{c}}\right)$．其中，时间绝对阈值 $f_{\text{c}}=0.4$[13,21]，选取24、40和56 min贴近实际乘客出行时间水平．

表1　路径属性参数

Table 1　Path attribute parameters

属性	含义	水平设计	水平值
平均出行时间/min	出行全过程所花费的平均时间	24	1
		40	2
		56	3
换乘次数	出行全过程中路径方案所需要换乘的总次数	0	1
		1	2
		2	3
列车拥挤程度	不同交路列车车厢内的拥挤程度	宽松	1
		正常	2
		拥挤	3

问卷采取互联网调查方式，共收集到492份问卷，确定有效问卷457份，乘客基本信息的统计结果如图3．可见，调查结果的有效样本中男性和女性占比分别为59.91%和40.09%，年龄以20～60岁的成年人为主，其中，上班群体和学生群体分别占样本总量的44.10%和45.41%．

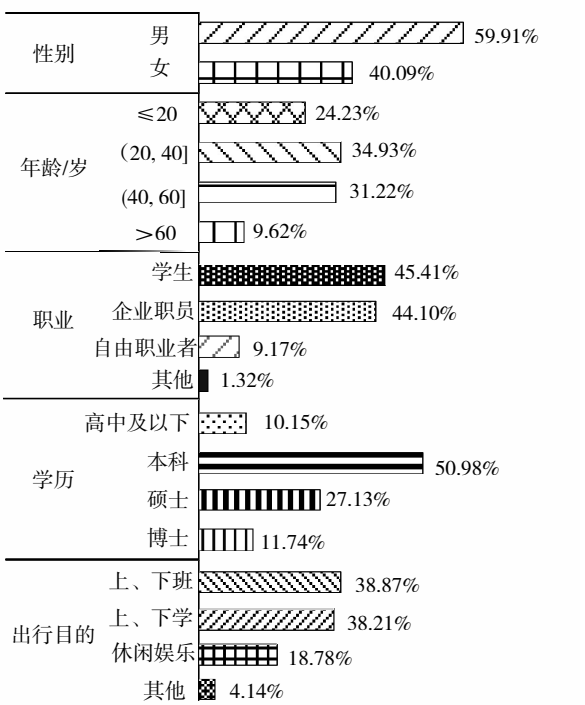

图3　乘客属性调查结果

Fig. 3　Passenger attribute survey results.

此外，样本中还包括一定比例的退休人员和自由职业者．从职业和教育程度来看，大部分受访者具有本科及以上教育程度，并从事专业性或技术性的工作．日常出行目的方面，大多数受访者的日常出行目的为上班和上学通勤，占比达到77.08%．这表明通勤客流是城市轨道交通客流中的主力，与大多数城市轨道交通系统的出行群体特征相符，可为调研结果的分析提供有效支撑．

将“交路乘客选择意愿”作为因变量（选择=1，不选择=0）；自变量包括：换乘次数（0/1/2，分类变量）、拥挤程度（宽松=1，正常=2，拥挤=3，有序变量）；控制变量：乘客年龄、性别、出行目的等．计算得出：① 0次换乘组，场景中无需换乘的交路方案，选择率为72.3%；② 1次换乘组，需换乘1次的方案，选择率降至51.6%；③ 2次换乘组，需换乘2次的方案，选择率进一步降至46.8%；④ 宽松车厢组，拥挤度等级为1，交路方案选择率为68.5%；⑤ 正常车厢组，拥挤度等级为2，选择率降至54.3%；⑥ 拥挤车厢组，拥挤度等级为3，选择率进一步降至49.3%．

http://journal.szu.edu.cn

1）时间容忍阈值验证．将平均出行时间设置为24、40及56 min，则容忍阈值为6.98 min，因此可以推断，当备选交路时间差≤7 min时，乘客更愿意选择熟悉的路径出行；当备选交路的时间差>7 min时，约60%乘客会重新选择路径．建议城轨运营方将同站台换乘的时间差控制在容忍阈值内，从而减少乘客决策犹豫，提高出行效率．

2）换乘与拥挤度敏感分析．当换乘次数从0次增至2次时，乘客选择意愿下降约35%，而拥挤程度从“宽松”到“拥挤”会导致28%的乘客转向其他交路．表明多交路设计应优先考虑减少换乘次数，尤其对学生群体；高峰时段需通过动态运力调配缓解车厢拥挤，建议在拥挤度超过“正常”阈值时触发预警，启动备用车加密班次．

3.2 个人属性对决策惯性的影响机制

个人属性对决策惯性的影响机制，本质是通过认知成本、风险感知、习惯强度及目标约束等中间变量所形成的链式影响．以下以个人属性为例分析其对决策惯性的影响．

1）出行频率与路径熟悉度通过习惯自动化强化决策惯性．高频出行使大脑对高频重复的决策逐渐形成自动化行为模式，即无需主动思考即可执行；路径熟悉度使路径的使用者对其时间分布、拥堵概率及换乘节点等有稳定预期，切换新路径会增加出行成本．因此，高频与高熟悉度群体的决策惯性更强；而低频与低熟悉度群体则无此惯性，更易因微小变化调整决策．

2）年龄通过信息处理能力与风险偏好调节决策惯性．青年群体的信息处理能力高，对风险偏好更开放，即决策惯性弱、容忍阈值低；中年群体的信息处理能力中等，但时间刚性约束更强，即对通勤场景的惯性强、容忍阈值高，对非通勤场景的惯性弱、容忍阈值低；老年群体的信息处理能力较弱，风险厌恶程度高，更倾向于维持已知的低风险选择，即决策惯性强、容忍阈值高．

3）职业与出行目的通过目标约束强度决定决策惯性．通勤群体的出行目标具有强时间刚性，且试错成本高．决策惯性为规避试错风险，即不冒险尝试未知，容忍阈值与迟到后果严重性绑定；而非通勤群体出行目标具有弱时间约束，试错成本低，决策惯性是当前决策的舒适度或效率，若原有路径出现非时间问题，也会因体验下降而切换，容忍阈值与主观体验敏感度绑定．

4）收入水平与信息获取能力通过决策资源影响惯性弹性．高收入群体拥有更强的改变决策的资源支撑，切换成本的感知更低，信息获取能力伴随着收入提升，从而降低未知风险，即决策惯性呈现高弹性；低收入群体改变决策的资源约束强，切换成本的感知更高，信息获取渠道有限，更依赖已知选择规避风险，即决策惯性呈现低弹性．

因此，当个人属性使“维持惯性的收益>改变成本”时，决策惯性强；当个人属性使“改变成本<维持惯性的损失”时，决策惯性弱．

4 乘客出行选择分析

4.1 模型参数估计

基于调查数据与初步分析构建出行选择行为模型，该模型纳入乘客决策惯性因素，可准确描述多交路运营模式下乘客的出行选择行为．采用Python中Biogeme库对多交路乘客出行选择模型进行参数估计，结果见表2．

1）模型参数估计结果显示，DI-MURM中平均出行时间、换乘次数及拥挤程度的参数均为负，表明乘客倾向于选择耗时短、换乘少及拥挤低的路径，这与乘客追求高效便捷、舒适出行的习惯相符．相比之下，S-RRM和M-URM中至少有1个参数的估计值为正，而DI-MURM更贴近实际，验证其考虑乘客决策惯性的合理性．

2）在本研究提出的DI-MURM中，只有换乘次数容忍度和拥挤程度容忍度在95%的置信度下不显著，表明乘客在多交路的出行选择中，对于换乘次数和拥挤程度不存在容忍度．而路径属性中的平均出行时间容忍度$\Delta_{\text{times}}=6.98$，且估计结果在95%的置信度下显著，表明多交路出行过程中，乘客仅对路径属性中的平均出行时间存在容忍阈值．

3）模型标定结果显示，DI-MURM在似然值和贝叶斯信息准则（Bayesian information criterion，BIC）等指标上优于其他模型，但R^2略高于M-URM原因是DI-MURM增加了容忍度变量，可能影响了R^2计算．高似然值意味着DI-MURM能够很好拟合实际数据．同时，较低的BIC值显示了DI-MURM在描述乘客选择行为上的高效性和准确性．尽管S-RRM在R^2值上表现良好，但因其路径属性变量较少，未充分考虑乘客主体异质性，故在全面捕捉乘客出行特征方面不及M-URM和DI-MURM．

http://journal.szu.edu.cn

表2　模型参数估计结果

Table 2　Model parameter estimation results

对应变量名称	待估参数	S-RRM		M-URM		DI-MURM	
		参数估计	t检验	参数估计	t检验	参数估计值	t检验
常数项	ASC_1	1.166*	16.606	0.549*	4.851	0.216*	1.712
	ASC_2	−0.705*	−9.480	−0.173*	−2.601	−0.183*	−2.750
	ASC_3	−0.454*	−5.310	−0.376*	−3.719	−0.033*	−0.343
年龄	β_1	—	—	−0.281*	−3.328	−0.280*	−3.220
性别	β_2	—	—	0.989*	5.991	0.982*	5.926
职业	β_3	—	—	0.303*	2.966	0.305*	2.975
学历	β_4	—	—	0.190*	2.925	0.190*	2.930
出行目的	β_5	—	—	−0.998*	−16.368	−0.992*	−16.274
平均出行时间	β_{times}	−0.641*	−19.896	−2.284*	−17.043	−2.224*	−15.912
换乘次数	β_{transfer}	0.701*	2.343	0.167*	2.782	−0.059*	−0.808
拥挤程度	β_{load}	0.263*	8.126	−0.281*	−7.843	−0.327*	−7.733
出行时间容忍度	Δ_{times}	—	—	—	—	6.982*	4.428
换乘次数容忍度	Δ_{transfer}	—	—	—	—	2.399	0.513
拥挤程度容忍度	Δ_{load}	—	—	—	—	2.933	0.651
样本量	3 199	3 199	3 199				
似然估计		−3 006.436		−2 902.479		−2 668.194	
R^2值		0.401		0.237		0.241	
BIC值		6 061.295		5 917.946		5 449.377	

注：*表示在95%的置信度下显著.

4.2　模型验证

本研究采用命中率评估3个模型的预测能力. 通过将调查问卷的原始数据进行划分，将调查数据分为估计数据集和验证数据集. 为保证数据的随机性和客观性，将457位乘客的调查数据随机选取66%作为模型估计集，其余34%作为验证数据集. 计算估计数据集选择概率最高的方案与验证数据集的选择方案是否相同，并将验证结果相同的观察值记1分，反之记0分. 通过重复两轮实验过程，计算每个验证集内模型命中率得分的平均值，以此量化模型的预测准确性.

表3为不同路径选择模型的命中率结果. 可见，S-RRM和M-URM的命中率分别为0.570 6和0.578 7，DI-MURM的命中率最高为0.616 5. 表明DI-MURM的预测性能略优于其他两个模型，在分析多交路乘客出行行为时具有更高的准确性.

表3　不同路径选择模型的命中率

Fig. 3　The hit rate of different path selection models

轮次	S-RRM	M-URM	DI-MURM
1	0.563 2	0.570 9	0.607 2
2	0.578 0	0.586 6	0.625 8
平均值	0.570 6	0.578 7	0.616 5

4.3　支付意愿分析

由模型参数估计结果表明，在多交路出行场景中，乘客仅对出行时间表现出显著的容忍阈值，为进一步揭示出行时间与拥挤程度之间的关系，采用支付意愿(willingness to pay，WTP)作为评价指标，反映乘客为换取服务水平提升所愿意承担的额外出行时间. 基于S-RRM、M-URM及DI-MURM的参数结果，分别计算其对应的拥挤程度支付意愿.

1）S-RRM支付意愿

乘客在交路i的后悔值函数中，车厢拥挤程度φ_i^{load}与出行时间φ_i^{times}的后悔值分别为

$$\varphi_i^{\text{load}} = \sum_{j\neq i,\, j\in w} \ln\left\{1+\exp\left[\beta_{\text{load}}\left(v_i^{\text{load}}-v_j^{\text{load}}\right)\right]\right\}+\varepsilon_i \quad (20)$$

$$\varphi_i^{\text{times}} = \sum_{j\neq i,\, j\in w} \ln\left\{1+\exp\left[\beta_{\text{times}}\left(\frac{v_i^{\text{times}}-v_j^{\text{times}}}{v_i^{\text{times}}}\right)\right]\right\}+\varepsilon_i \quad (21)$$

通过对二者比值进行推导，得到S-RRM的支付意愿$\varphi_{\text{WTP}}^{\text{load}}$为

http://journal.szu.edu.cn

$$\varphi_{\mathrm{WTP}}^{\mathrm{load}}=-\frac{\partial\varphi_i^{\mathrm{load}}/\partial v_i^{\mathrm{load}}}{\partial\varphi_i^{\mathrm{times}}/\partial v_i^{\mathrm{times}}}=$$

$$-\frac{\sum\limits_{j\neq i,\,j\in W}\left\{\dfrac{\beta_{\mathrm{load}}}{1+1\Big/\exp\left[\beta_{\mathrm{load}}\left(v_i^{\mathrm{load}}-v_j^{\mathrm{load}}\right)\right]}\right\}}{\sum\limits_{j\neq i,\,j\in W}\left\{\dfrac{\beta_{\mathrm{times}}v_j^{\mathrm{times}}\Big/\left(v_i^{\mathrm{times}}\right)^2}{1+1\Big/\exp\left[\beta_{\mathrm{times}}\left(v_i^{\mathrm{times}}-v_j^{\mathrm{times}}\right)\Big/v_i^{\mathrm{times}}\right]}\right\}} \tag{22}$$

2）M-URM支付意愿

乘客在交路i的总效用值函数中，车厢拥挤程度U_i^{load}与出行时间U_i^{times}两个属性维度的总效用值分别为

$$U_i^{\mathrm{load}}=\sum_n\beta_n v_i^n+\beta_{\mathrm{load}}v_i^{\mathrm{load}}-\sum_{j\neq i,\,j\in w}\ln\left\{1+\exp\left[\beta_{\mathrm{load}}\left(v_i^{\mathrm{load}}-v_j^{\mathrm{load}}\right)\right]\right\}+\varepsilon_i \tag{23}$$

$$U_i^{\mathrm{times}}=\sum_n\beta_n v_i^n+\beta_{\mathrm{times}}v_i^{\mathrm{times}}-\sum_{j\neq i,\,j\in w}\ln\left\{1+\exp\left[\beta_{\mathrm{times}}\left(\frac{v_i^{\mathrm{times}}-v_j^{\mathrm{times}}}{v_i^{\mathrm{times}}}\right)\right]\right\}+\varepsilon_i \tag{24}$$

通过对两个总效用值的比值进行运算，得到M-URM的支付意愿$U_{\mathrm{WTP}}^{\mathrm{load}}$为

$$U_{\mathrm{WTP}}^{\mathrm{load}}=-\frac{\partial U_i^{\mathrm{load}}/\partial v_i^{\mathrm{load}}}{\partial U_i^{\mathrm{times}}/\partial v_i^{\mathrm{times}}}=$$

$$-\frac{\beta_{\mathrm{load}}-\sum\limits_{j\neq i,\,j\in W}\left\{\dfrac{\beta_{\mathrm{load}}}{1+1\Big/\exp\left[\beta_{\mathrm{load}}\left(v_i^{\mathrm{load}}-v_j^{\mathrm{load}}\right)\right]}\right\}}{\beta_{\mathrm{times}}-\sum\limits_{j\neq i,\,j\in W}\left\{\dfrac{\beta_{\mathrm{times}}v_j^{\mathrm{times}}\Big/\left(v_i^{\mathrm{times}}\right)^2}{1+1\Big/\exp\left[\beta_{\mathrm{times}}\left(v_i^{\mathrm{times}}-v_j^{\mathrm{times}}\right)\Big/v_i^{times}\right]}\right\}} \tag{25}$$

3）DI-MURM支付意愿

乘客在交路i的总效用值函数中，车厢拥挤程度X_i^{load}与出行时间X_i^{times}两个属性维度的乘客总效用值为

$$X_i^{\mathrm{load}}=\sum_n\beta_n v_i^n+\beta_{\mathrm{load}}v_i^{\mathrm{load}}-\sum_{j\neq i,\,j\in w}\ln\left\{1+\exp\left[\beta_{\mathrm{load}}\left(\left(v_i^{\mathrm{load}}-v_j^{\mathrm{load}}\right)-\alpha\Delta_{\mathrm{load}}\right)\right]\right\}+\varepsilon_i \tag{26}$$

$$X_i^{\mathrm{times}}=\sum_n\beta_n v_i^n+\beta_{\mathrm{times}}v_i^{\mathrm{times}}-\sum_{j\neq i,\,j\in w}\ln\left\{1+\exp\left[\beta_{\mathrm{times}}\left(\frac{v_i^{\mathrm{times}}-v_j^{\mathrm{times}}}{v_i^{\mathrm{times}}}-\alpha\Delta_{\mathrm{times}}\right)\right]\right\}+\varepsilon_i \tag{27}$$

对两个总效用值的比值进行运算，得出DI-MURM的支付意愿$X_{\mathrm{WTP}}^{\mathrm{load}}$为

$$X_{\mathrm{WTP}}^{\mathrm{load}}=-\frac{\partial X_i^{\mathrm{load}}/\partial v_i^{\mathrm{load}}}{\partial X_i^{\mathrm{times}}/\partial v_i^{\mathrm{times}}}=-\frac{\beta_{\mathrm{load}}-\sum\limits_{j\neq i,\,j\in W}\left\{\dfrac{\beta_{\mathrm{load}}}{1+1\Big/\exp\left[\beta_{\mathrm{load}}\left(\left(v_i^{\mathrm{load}}-v_j^{\mathrm{load}}\right)-\alpha\Delta_{\mathrm{load}}\right)\right]}\right\}}{\beta_{\mathrm{times}}-\sum\limits_{j\neq i,\,j\in W}\left\{\dfrac{\beta_{\mathrm{times}}v_j^{\mathrm{times}}/\left(v_i^{\mathrm{times}}\right)^2}{1+1\Big/\exp\left[\beta_{\mathrm{times}}\left(\left(v_i^{\mathrm{times}}-v_j^{\mathrm{times}}\right)/v_i^{\mathrm{times}}-\alpha\Delta_{\mathrm{times}}\right)\right]}\right\}} \tag{28}$$

表4为不同路径选择模型的支付意愿．可见，不同路径选择模型的支付意愿存在显著差异．其中，S-RRM的支付意愿相对较小，乘客愿意付出0.115 8 min以换取1%出行体验的提升，这说明平均出行时间的变动是乘客产生后悔情绪的主要因素．而M-URM和DI-MURM的支付意愿分别为0.839 3 min和3.702 2 min，表明乘客更注重出行服务水平和时间效率的平衡，愿意为了提升出行服务水平而多付出一定的时间．此外，3个模型的支付意愿均小于DI-MURM平均出行时间容忍阈值的估计结果，这也进一步表明考虑平均出行时间容忍阈值的合理性．

表4 不同路径选择模型的支付意愿

Table 4 Payment willingness of different path selection models

min

模型	最大值	最小值	均值
S-RRM	0.119 5	0.112 1	0.115 8
M-URM	0.867 7	0.811 0	0.839 3
DI-MURM	3.846 4	3.557 7	3.702 2

4.4 运营优化策略

针对区间交路与干线交路的换乘站，结合模型分析得出，乘客对换乘时间压缩的敏感度高于路径惯性，因此，设计运营优化方案：① 设计分层引导策略．对决策惯性较低的青年群体，通过站台电

http://journal.szu.edu.cn

子屏实时推送换乘后行程总耗时对比；对决策惯性较高的老年群体，在换乘通道设置固定路线指引标识并搭配语音播报，强化路径记忆以降低换乘心理成本．② 引导方案与模型参数的关联．基于模型中换乘时间容忍阈值的群体差异，将换乘步行时间控制在对应阈值内，并通过进站时提前告知换乘选项来降低决策惯性对换乘意愿的抑制．

5　结　论

以城市轨道典型多交路运营模式为例，基于后悔理论分析乘客在多交路的出行特性，采用效用-后悔混合模型，考虑乘客对于单一交路的出行决策惯性，构建考虑乘客决策惯性的效用-后悔混合模型，通过SP调查数据验证了模型的有效性．研究结果表明：

1）考虑效用尺度的后悔最小化模型、效用-后悔混合模型及考虑决策惯性的效用-后悔混合模型的路径属性参数标定结果均具有显著性，表明这3个模型均能有效地描述乘客在多交路的出行选择行为．其中，在考虑决策惯性的混合模型中加入的出行时间容忍阈值，可以更好反映熟悉路径的乘客行为，弥补了效用-后悔混合模型的不足，为城市轨道交通运营管理提供更有针对性的决策支持．

2）考虑决策惯性的混合模型的R^2值和BIC等指标相对更好，能够较好拟合数据，其模型命中率相较于效用-后悔混合模型及经典后悔最小化模型分别提高4.6%和3.9%，说明改进后的模型可以更好描述乘客在多交路的出行决策过程．

3）支付意愿分析结果显示，乘客更注重出行服务水平和时间效率的平衡，愿意为了提升出行服务水平而多付出一定的额外出行时间成本，这表明乘客在决策过程中存在出行时间的容忍阈值．这一结果与考虑决策惯性的混合模型参数估计结果一致，进一步验证了该模型的有效性．支付意愿的付出时间均在出行时间估计阈值之内，进一步验证模型在模拟乘客选择行为方面的准确性．

基金项目：国家自然科学基金资助项目(72261025)；甘肃省高等学校创新基金资助项目(2021B-103)；兰州交通大学—天津大学联合创新基金资助项目(2021056)

作者简介：巩亮(gongliang@mail.lzjtu.cn)，兰州交通大学副教授．研究方向：城市轨道交通运营优化．

引　　文：巩亮，朱欣雨，许得杰，等．考虑决策惯性的城市轨道交通多交路出行选择模型[J]．深圳大学学报理工版，2026，43(1)：47-56.

参考文献 / References：

[1] 中国城市轨道交通协会．城市轨道交通2024年度统计和分析报告[J]．城市轨道交通，67(4)：14-18．
China Urban Rail Transit Association. Urban rail transit annual statistical and analysis report for 2024 [J]. Urban Rail Transit, 67(4): 14-18. (in Chinese)

[2] 钱堃，陈垚，毛保华．考虑换乘时间影响的城市轨道交通路径选择行为研究[J]．交通运输系统工程与信息，2015，15(2)：116-121．
QIAN Kun, CHEN Yao, MAO Baohua. Route choice behavior for urban rail transit considering transfer time [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2015, 15(2): 116-121. (in Chinese)

[3] 胡晨皓，许得杰，巩亮，等．城市轨道交通大小交路乘客出行选择行为模型[J]．交通科技与经济，2023，25(5)：18-24．
HU Chenhao, XU Dejie, GONG Liang, et al. Passenger travel choice behavior mode of full-length and short-turn routing in urban rail transit [J]. Technology & Economy in Areas of Communications, 2023, 25(5): 18-24. (in Chinese)

[4] CASCETTA E, PAPOLA A. Random utility models with implicit availability/perception of choice alternatives for the simulation of travel demand [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2001, 9(4): 249-263.

[5] SIMON H A. A behavioral model of rational choice [J]. The Quarterly Journal of Economics, 1955, 69(1): 99-118.

[6] KAHNEMAN D, TVERSKY A. Prospect theory: an analysis of decision under risk [J]. Estudios de Psicología, 2014, 8(29/30): 29-124.

[7] TVERSKY A, KAHNEMAN D. Advances in prospect theory: cumulative representation of uncertainty [J]. Journal of Risk and Uncertainty, 1992, 5(4): 297-323.

[8] CHORUS C G, ARENTZE T A, TIMMERMANS H J P. A random regret-minimization model of travel choice [J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2008, 42(1): 1-18.

[9] XIAO Qiang, HE Ruichun, WANG Ziyi. Random regret minimization model of carpool travel choice for urban residents considering perceived heterogeneity and psychological distance [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University (Science), 2024, 29(6): 995-1008.

[10] PRATO C G. Expanding the applicability of random regret minimization for route choice analysis [J]. Transportation, 2014, 41(2): 351-375.

http://journal.szu.edu.cn

[11] 晋泽倩，俞诚成，叶昕. 混合效用和后悔规则下的洪涝交通疏散决策行为研究[J]. 交通运输系统工程与信息，2025，25(2)：16-25.
JIN Zeqian, YU Chengcheng, YE Xin. Flood evacuation decision-making behavior under hybrid utility and regret rules [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2025, 25(2): 16-25. (in Chinese)

[12] 徐媛，徐薇，周晶，等. 考虑心理距离的随机后悔最小化出行选择模型[J]. 系统管理学报，2019，28(4)：679-686.
XU Yuan, XU Wei, ZHOU Jing, et al. A random regret minimization travel choice model considering psychological distance [J]. Journal of Systems & Management, 2019, 28(4): 679-686. (in Chinese)

[13] 许心越，谢兰诗雨. 诱导信息下城市轨道交通乘客路径选择行为研究[J]. 交通运输系统工程与信息，2022，22(3)：63-73.
XU Xinyue, XIE Lanshiyu. Route choice behavior of urban rail transit passengers based on guidance information [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2022, 22(3): 63-73. (in Chinese)

[14] 许得杰，巩亮，朱宁，等. 城市轨道交通多交路共线运营客流分配方法[J]. 交通运输系统工程与信息，2021，21(5)：206-213.
XU Dejie, GONG Liang, ZHU Ning, et al. Passenger flow assignment method for common-line operation with multi-routing of urban rail transit [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2021, 21(5): 206-213. (in Chinese)

[15] CHOWDHURY S, CEDER A, SCHWALGER B. The effects of travel time and cost savings on commuters′ decision to travel on public transport routes involving transfers [J]. Journal of Transport Geography, 2015, 43: 151-159.

[16] KEYA N, ANOWAR S, ELURU N. Freight mode choice: a regret minimization and utility maximization based hybrid model [J]. Transportation Research Record, 2018, 2672(9): 107-119.

[17] 胡晨皓. 基于列车开行方案的城轨多交路客流分配方法研究[D]. 兰州：兰州交通大学，2024.
HU Chenhao. Passenger flow assignment method for multi-routing operation of urban rail transit based on train plan [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2024. (in Chinese)

[18] COOMBS C H, DAWES R M, TVERSKY A. Mathematical psychology: an elementary introduction [M]. Sudbury, Canada: Prentice-Hall, 1970.

[19] 张丽娟，李江林，肖海承. 考虑决策惯性的多元路径选择模型[J]. 中国市场，2024(3)：193-198.
ZHANG Lijuan, LI Jianglin, XIAO Haicheng. Research on multivariate path selection model considering decision inertia [J]. China Market Marketing, 2024 (3): 193-198. (in Chinese)

[20] 中国城市规划设计研究院.《2023年度中国主要城市通勤监测报告》解读[J]. 城乡建设，2023(18)：70-77.
China Academy of Urban Planning & Design. Interpretation of the 2023 commuting monitoring report for major cities in China [J]. Urban and Rural Development, 2023(18): 70-77. (in Chinese)

[21] KUSAKABE T, IRYO T, ASAKURA Y. Estimation method for railway passengers′ train choice behavior with smart card transaction data [J]. Transportation, 2010, 37(5): 731-749.

【中文责编：方圆；英文责编：淡紫】

http://journal.szu.edu.cn