

城市轨道交通车站接驳客流组合预测模型

戴骏晨¹ 李萍² 崔莹² 凌小静¹ 彭艳梅¹

(1. 中咨城建设计有限公司江苏分公司, 210012, 南京;

2. 南京市规划和自然资源局, 210005, 南京)

摘要 [目的] 接驳设施的合理配套是充分发挥城市轨道交通功能的重要保障, 为量化描述城市轨道交通车站的客流来源分布及接驳交通方式分担率, 提出一种车站接驳客流组合预测模型。[方法] 介绍了国内外客源区划定、车站选择模型、接驳方式选择方面的研究现状。建立接驳客流组合预测模型, 即接驳方式选择模型和车站选择模型, 二者均采用嵌套式 Logit 模型, 可通过接驳方式选择模型 ROOT 层(根层)的 Logsum 实现两种模型的衔接。[结果及结论] 接驳方式选择模型输出 ROOT 层的 Logsum 可用于表征空间点对的各接驳方式综合竞争力, 能够更全面地反映综合成本。车站选择模型利用离散化的手机信令集计数据进行标定, 在南京主城区地铁车站的研究实例中, 车站选择模型标定的校正伪 R^2 达到了 0.872, 说明模型解释效果较好。对比实例研究结果与调查数据可知, 所提车站接驳客流组合预测模型对接驳客流的来源分布及所采用的交通方式的定量描述能力较好。

关键词 城市轨道交通; 车站; 接驳客流预测

中图分类号 U293.13

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.02.017

Integrated Prediction Model for Urban Rail Transit Station Feeder Passenger Flow

DAI Junchen¹, LI Ping², CUI Ying², LING Xiaojing¹, PENG Yanmei¹

(1. CIECC Urban Construction Design Co., Ltd., Jiangsu Branch, 210012, Nanjing, China; 2. Nanjing Municipal Bureau of Planning and Natural Resources, 210005, Nanjing, China)

Abstract [Objective] The rational coordination of feeder facilities is crucial for maximizing the functionality of urban rail transit. To quantitatively describe the distribution of passenger flows originating from urban rail transit stations and the mode share of feeder transportation, an integrated prediction model for feeder passenger flow is proposed. [Method] The current research status on domestic and international studies related to source region delineation, station selection models, and feeder mode selection is reviewed. The above integrated prediction model is established, consisting of feeder mode se-

lection and station selection models, and both employ a nested Logit model. The Logsum from the ROOT layer of the feeder mode selection model serves as a connector between the two models. [Result & Conclusion] The Logsum output from the ROOT layer of the feeder mode selection model is utilized to characterize the comprehensive competitiveness of various feeder modes for spatial points, offering a more comprehensive reflection of overall costs. The station selection model is calibrated using discretized mobile signaling data, and in the case study of metro stations in the central area of Nanjing, the corrected pseudo- R^2 for the calibrated station selection model reached 0.872, indicating a satisfactory explanatory performance. Comparison between the research case results and survey data reveals that the proposed integrated prediction model effectively describes the distribution of feeder passenger flows and quantifies the usage of different feeder modes.

Key words urban rail transit; station; feeder passenger flow

接驳设施的合理配套是充分发挥城市轨道交通功能的重要保障, 然而在实际规划设计过程中, 对于直接影响城市轨道交通(以下简称“城轨”)车站接驳设施规模的指标——接驳分担率的确定通常采用类比、经验等主观判断方式, 对于城轨车站接驳设施的布局设计也不以空间分布数据作为依据。对于不具备建立精细化四阶段模型条件的城市, 实际中一般先建立模型获得车站级客流, 然后估计接驳客流在车站各方向(如四个象限)的分布比例和接驳方式分担率, 所获得的结果通常较为主观且精度不足。

为更合理地估计接驳客流分布和接驳方式分担率, 本文提出一种城轨车站接驳客流组合预测模型。将所提模型用于接驳设施规模测算时, 需要输入四阶段模型或车站级客流回归模型的车站客运量结果, 即用所提模型获得的是各接驳方式的分担率及其对应接驳方式的客流相对分布, 故本文所提模型是对城轨客流预测模型的一种补充。本文研

究可为城轨车站接驳设施的合理配套提供更为合理的基础数据。

1 国内外研究现状

对于接驳客流分布方面的研究,现有文献多聚焦于划定轨道交通车站客源区及建立车站选择模型。

1) 客源区划定方面的研究。文献[1]通过调查数据描述了加拿大多伦多地铁车站客源区,指出在中心城区的乘客往往并不选择最近的车站,且不同车站客源区会重叠。文献[2]通过调查数据得出了分方式接驳路径距离,并建立了车站各接驳方式的服务区域。文献[3]基于韩国首尔公共交通 IC (集成电路) 卡数据分析了轨道交通站分时段的公交客源区特征。文献[4]通过引入距离衰减函数得到了比全有全无函数(超过客源区即无影响)具有更好解释能力的车站客流模型。由此可知,客源区的划定多根据调查数据而确定,客源区内部的分布特征通常被忽略,而接驳客流分布规模是随着出行距离而衰减的,因此更为量化的模型描述能更好地反映接驳客流的分布情况。

2) 车站选择模型方面的研究。车站选择模型通过离散的选择概率间接量化描述车站的接驳分布情况。文献[5]指出仅 53% 的荷兰铁路乘客通过最近的火车站出行,并建立了考虑接驳距离、发车频率、车站区位、P+R (停车换乘) 设施等车站选择 Logit 模型。文献[6]使用 Huff 模型计算车站选择概率,并获得了客源区边界。文献[7]的研究发现,在英国威尔士和苏格兰市域铁路(站间距约为 2 km)的乘客中,约有 60% ~ 70% 的乘客选择最近车站出行,并将多个接驳方式的接驳成本作为变量引入车站选择 Logit 模型,获得了较好的解释效果。但既有车站选择模型仅能获得各地点在选择轨道交通出行时选择各站的概率,是否选择轨道交通出行本身未被模型解释,故依然不能获得较完整的接驳客流的分布情况。

3) 接驳方式选择方面的研究。Logit 模型在交通出行方式选择上的应用已较为成熟。文献[8]在假设四阶段模型已经确定接驳乘客分布的条件下,构建 Logit 模型来确定各接驳方式分担率。文献[9]结合四阶段模型,建立了上海轨道交通出行方式链模型。文献[10]采用对应分析方法优化群体分类,以便提高 Logit 模型的解释能力。文献[11]

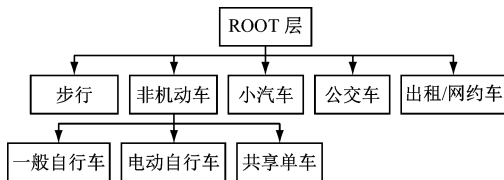
构建潜在分类 NL (嵌套式 Logit) 模型,直接在模型内部分段以适应不同群体。由于实践中对四阶段法进行简化建模,导致接驳客流分布的预测精度不高,而将四阶段模型细化以达到可预测接驳设施布局的精度所需成本较高,故宜对此模块单独进行建模。

既有研究中将接驳方式选择及车站选择两方面研究结合起来的较少,但在实际中,这两者是紧密相连的:各接驳方式分担率直接决定了接驳成本,而接驳成本又影响着车站的选择。因此,有必要对同时考虑接驳方式选择及车站选择两方面的接驳客流组合预测模型进行研究。

2 建立接驳客流组合预测模型

2.1 接驳方式选择

采用 NL 模型,将非机动车细分为一般自行车、电动自行车和共享单车,其他接驳方式包括步行、小汽车、公交车、出租/网约车。接驳方式选择模型分层结构示意图如图 1 所示。



注:ROOT 层表示根层。

图1 接驳方式选择模型分层结构示意图

Fig. 1 Hierarchical structure diagram of feeder mode selection model

Logit 模型中的 Logsum (各子选择枝效用函数的指数函数求和再取对数) 在数学上等于其子选择枝最大效用的期望值,可表征综合出行竞争力。非机动车的效用函数 $V_{\text{non-motor}}$ 及 ROOT 层的 Logsum 值 L_{root} 可以表示为:

$$V_{\text{non-motor}} = \theta \ln \left[e^{\frac{V_{\text{bike}}}{\theta}} + e^{\frac{V_{\text{ebike}}}{\theta}} + e^{\frac{V_{\text{shared-bike}}}{\theta}} \right] \quad (1)$$

$$L_{\text{root}} = \ln \left[e^{V_{\text{walk}}} + e^{V_{\text{non-motor}}} e^{V_{\text{car}}} + e^{V_{\text{bus}}} + e^{V_{\text{taxi}}} \right] \quad (2)$$

式中:

V_{bike} 、 V_{ebike} 、 $V_{\text{shared-bike}}$ ——非机动车的子选择枝,即一般自行车、电动自行车、共享单车的效用函数;

V_{walk} 、 V_{car} 、 V_{bus} 、 V_{taxi} ——步行、小汽车、公交车、出租/网约车的效用函数;

θ ——非机动车的 Logsum 系数,各子选择枝的效用函数通过 θ 进行缩放,取值范围为(0,1]。

各接驳方式的效用函数是其组成变量的线性函数(具体公式参考文献[12]),其中,组成变量包括:车内时间、车外时间、费用、停放难易程度,以及出行者家庭拥有的小汽车数。接驳方式选择模型效用函数的组成变量如表 1 所示。

表 1 接驳方式选择模型效用函数的组成变量
Tab.1 Utility function variables used in feeder mode selection model

效用函数	组成变量					
	车内时间	车外时间	票价	停放难易程度	家庭私家车数	常数项
步行	✓				✓	
一般自行车	✓			✓	✓	✓
电动自行车	✓			✓	✓	✓
共享单车	✓	✓	✓	✓	✓	✓
小汽车	✓	✓				✓
公交车	✓	✓	✓		✓	✓
出租/网约车	✓	✓	✓		✓	✓

注:停放难易程度从“难停”至“易停”分别赋值-2至2来进行评分,其现状根据调查确定,未来情况基于现状并根据规划预期确定;✓表示该接驳方式选择枝的效用函数包含该变量,余类同。

当接驳方式选择模型构建完成后,即可获得各空间点至各城轨车站的 L_{root} ,其值越大表示出行阻抗(出行成本)越小,而出行阻抗又直接影响接驳空间分布,因此 L_{root} 成为了接驳方式选择与车站选择模型的桥梁。与传统的仅通过接驳方式分担率加权的出行时耗相比, L_{root} 包括出行时间、出行费用、个人社会经济因素、接驳设施空间因素的综合影响,能更全面地反映出行综合成本。

2.2 城轨车站选择

要获得接驳空间分布,除获得每个点选择各车站的概率外,还应对不同地点是否选择城轨出行建模。车站选择模型分层结构示意图如图 2 所示。通过车站选择模型获得的概率与当地人口数相乘即可获得接驳空间分布。其中,选择城市轨道交通出行方式(以下简称“城轨出行”)的子选择枝为可选车站集合,应包含大多数选择情况。通常,想要乘坐轨道交通出行的乘客会在最近及周边的车站中选择进站乘车,而对于距离更远的车站,则选择的可能性较小。

不选择城市轨道交通出行方式(以下简称“未城轨出行”)的效用函数,其组成变量应反映乘客出行的意愿及乘坐城轨出行的意愿、出行的便捷程

度。组成变量包括家庭拥有小汽车数、用地混合度及最近城轨车站的 L_{root} 。各可选车站的效用函数为 L_{root} 及“是否为最近车站”(0-1 变量),后者用于增加对最近车站偏好现象的解释能力(如:厌恶步行,即使去最近的车站需反向行走一段却依然选择该种出行方式)。车站选择模型效用函数的组成变量如表 2 所示。

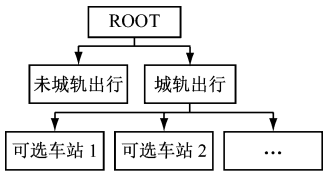


图 2 车站选择模型分层结构示意图
Fig. 2 Hierarchical structure diagram of station selection model

表 2 车站选择模型效用函数的组成变量
Tab.2 Utility function variables used in station selection model

效用函数	组成变量					
	最近车站 L_{root}	家庭私家车数	用地混合度	L_{root}	是否为最近车站	常数项
未城轨出行	✓	✓	✓			✓
城轨出行 可选车站				✓	✓	

3 实例应用

3.1 实例数据

以南京地铁为例构建模型,实际数据来源包括问询调查与手机信令数据。问询调查以线上、线下相结合的方式在 2019 年末开展,调查范围覆盖南京市域,调查对象为工作日早高峰城轨出行的乘客。手机信令数据为 2019 年下旬的电信数据,包括城轨接驳空间分布、人口与岗位分布等。

本文取主城区范围内城轨车站工作日早高峰进站数据进行分析。该范围是以长江、秦淮河及绕城路包围的区域,主要进站量数据来源于主城区内部。该范围共包括 1 795 份有效问询调查数据,用于接驳方式选择模型的标定。由于标定需要每位被调查者所有可选方式的出行信息,而调查仅能获取其所选方式,故根据出行起终点位置通过电子地图导航补充数据,以此进行接驳方式选择模型标定。

车站选择模型标定首先要确定每个位置的可选车站集合。通常,乘客会在最近及其附近车站中

选择车站进站,本次调查中该比例为 65.1%。一般而言,城轨车站越密集,步行接驳比例越高,乘客避免体力出行的倾向使得选择最近车站的比例更高。

进一步统计本次调查选择周边车站的比例。首先,使用最短路径泰森多边形(每个车站划分一个多边形,且该车站是其多边形内部任一点考虑路径距离的最近车站,即将传统的泰森多边形考虑的直线距离改为路径距离)划定每个车站的影响范围。然后,统计选择邻接车站的比例,邻接车站指与最近车站的影响范围存在共享边的车站。调查结果显示,选择邻接车站的比例为 23.5%,即在最近车站和邻接车站中选择的比例为 88.6%。此外,选择比邻接车站更远的车站的主要原因是由于公交部分区段与地铁存在竞争关系,而公交出行的价格优势使部分乘客倾向于先乘坐公交后再乘坐地铁,或因地铁线网不完善使得最近车站需要绕行、换乘等。但未来随着地铁线网的进一步完善,以及公交与地铁间的充分配合,该出行现象的选择比例将有所降低。综上所述,将可选车站集合定量描述为最近车站及其邻接车站。

实例研究对象为主城区车站的进站接驳客流。为便于分析和描述,将主城区车站的影响范围作为实例研究范围,同时用 500 m 网格表示影响范围内各空间位置。南京市主城区车站影响范围示意图如图 3 所示。

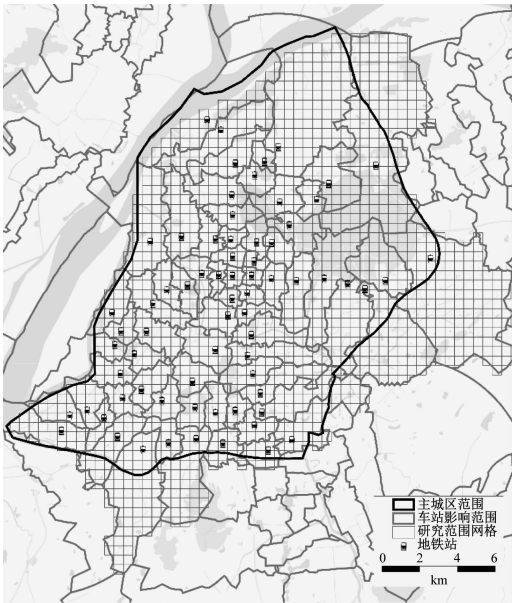


图3 南京市主城区车站影响范围示意图
Fig.3 Diagram of station impact scope in Nanjing central area

3.2 接驳方式选择模型标定

利用问询调查数据标定方式选择模型,接驳方式选择模型效用函数变量系数标定结果如表 3 所示。大多数变量系数的 T 检验值的绝对值均大于 2,可见各变量基本能在 5% 的显著性水平下通过 T 检验。校正伪 R^2 可用于表征模型的拟合优度,取值范围为 $[0,1]$, R^2 越大表示模型拟合越好。所提接驳方式选择模型的 R^2 为 0.32(对于 Logit 模型而言, R^2 为 0.20~0.40 已较好^[12])。

表3 接驳方式选择模型效用函数变量系数标定结果
Tab.3 Calibration results of utility function variables coefficients in feeder mode selection model

系数所属变量	包含该变量的接驳方式效用函数	系数估计值	T 检验值
车内时间	所有接驳方式	-0.117	-17.849
车外时间	共享单车、小汽车、公交车、出租/网约车	-0.165	-12.101
票价	共享单车、公交车、出租/网约车	-0.411	-5.842
停放难易程度	一般自行车	0.303	3.784
	电动自行车	0.231	3.224
	共享单车	0.340	4.513
家庭私家车数	步行	-1.575	-5.296
	一般自行车、电动自行车、共享单车	-1.596	-5.411
	公交车	-1.395	-4.672
	出租/网约车	-0.937	-2.672
常数项	一般自行车	-3.062	-11.133
	电动自行车	-3.443	-13.538
	共享单车	-2.173	-9.715
	小汽车	-5.716	-13.604
	公交车	-0.022	-0.148
	出租/网约车	0.796	0.918
θ		0.758	-1.510

注:系数估计值为正表示该变量对该接驳方式的效用(即竞争力)有正向作用,为负则表示该变量对该接驳方式的效用有负作用;各系数 T 检验假设为 0, T 检验值的正负与系数估计值的正负相对应,但参数 θ 的 T 检验假设为 1, θ 的 T 检验值为负;余类同。

3.3 车站选择模型标定

用大样本、广覆盖的手机信令数据作为标定输入。但由于 Logit 模型的标定不能使用集计数据,只能使用离散数据,故需要将集计的手机信令数据(通常为 OD(起讫点)表)转换为离散数据,即每个个体一条记录(包括出行起点、出行终点、出行量等):将各网格人口数作为该位置样本总体数,重复

多条以该网格作为出行起点、各地铁站作为出行终点的个体出行记录,其重复数为出行量;出行起点的网格不出行人数则为样本总体数减去出行量。

由于本文主要关注接驳客流的相对分布量而非绝对分布量,为减少标定计算量,对未城轨出行样本以更低的抽样率进行抽样:实例研究范围常住人口为 412.2 万人,工作日高峰小时平均进站量为 14.6 万人次/h,则认为未城轨出行人口为 397.6 万人(早高峰多为单次出行,此处不完全严谨但基本能够反映实际情况,但对于交通枢纽站等流动人口较多的车站应以单独考虑);标定数据样本为 51 489 人,其中城轨出行人口为 7 074 人,未城轨出行人口为 44 415 人,即城轨出行的样本抽样率为 4.8%,未城轨出行的样本抽样率为 1.1%。

车站选择模型效用函数变量系数标定结果如表 4 所示。以网格为单元进行计算,其中用地混合度以用地熵表征,其取值范围为 0~1,其值越大表示用地越混合,反之则表示用地越单一。为便于统一标定,将可选车站设置为主城区内所有地铁站,但非最近且非邻接车站的 L_{root} 值设置为 -99(极小值),以排除选择非最近且非邻接车站的可能。

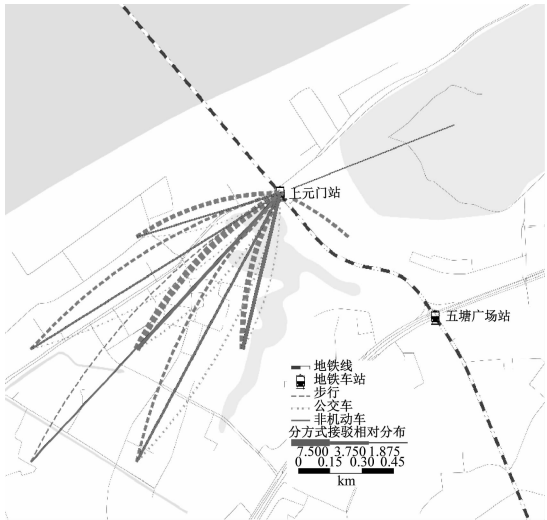
表 4 车站选择模型效用函数变量标定结果
Tab. 4 Calibration results of utility function variables coefficients in station selection model

系数所属变量	包含该变量的选择枝	系数估计值	T 检验值
最近车站 L_{root}	未城轨出行	-0.565	-37.770
家庭私家车数	未城轨出行	-0.773	-18.792
用地混合度	未城轨出行	0.931	10.965
L_{root}	城轨出行可选车站	0.001	29.620
是否为最近车站(0-1 变量)	城轨出行可选车站	0.023	60.277
常数项	未城轨出行	0.685	16.546
θ		0.010	-44 517.294

标定结果的校正伪 R^2 为 0.872,本次标定的实质是将离散数据匀质化,忽略了网格的内部差异,进而使得该离散数据更易拟合。同时,校正伪 R^2 为 0.872 也反映出所提车站选择模型的解释效果较好。各变量系数的 T 检验值的绝对值均大于 2,可见各变量都在 5% 的显著性水平下通过 T 检验。其中,最近车站 L_{root} 系数为负,表示最近的城轨车站接驳越方便,乘客越倾向于城轨出行;家庭私家车数

基本对应家庭的收入水平,其系数为负表示出行频率与收入水平正相关,同时由于实例研究范围为南京市主城区,其车站设置较密集、小汽车停车费高,使得选择小汽车出行不如选择地铁出行方便,故拥有小汽车的乘客选择未城轨出行的倾向未能体现;用地混合度系数为正表示该位置用地功能较为复合,外出需求较少; L_{root} 和“是否为最近车站的系数为正”,分别表示 L_{root} 越大越容易选择该车站,以及倾向于选择最近的车站。

由于此时每个网格已包含人口规模数的记录,集计结果即为接驳空间的相对分布(按四阶段或回归模型得到的各车站预测客运量调整后才可得到绝对分布)。结合接驳方式选择模型可得到的网格-车站接驳方式比例,南京地铁 3 号线上元门站分方式接驳相对分布示意图如图 4 所示。



注:为便于分辨,图中仅显示主要接驳方式并忽略较小值。
图 4 南京地铁 3 号线上元门站分方式接驳相对分布示意图
Fig. 4 Relative distribution diagram of feeder modes at Shangyuanmen Station of Nanjing Metro Line 3

3.4 模型应用说明与效果检验

在模型标定好后即可输入变量数据,以测算分接驳方式的空间相对分布结果。接驳方式选择模型的输入为各效用函数的变量值;接驳方式选择模型的输出包括:各点对(网格-车站)的接驳方式分担率矩阵 A ;各点对(网格-车站)的 L_{root} 矩阵 B 。车站选择模型的输入为各效用函数的变量值、各网格人口及 B ;车站选择模型的输出为各网格选择各车站的概率矩阵 C 。将 C 乘以各网格人口即可得到各车站的接驳客流空间相对分布矩阵,再将其乘以 A 即可得到分接驳方式的空间相对分布矩阵。

将模型计算结果(利用手机信令数据标定/训练)与实例研究范围内的问询调查数据进行对比,模型计算结果与问询调查数据的接驳客流空间分

布热度图对比,如图 5 所示。问询调查数据因样本相对少,分布较为离散,但整体轮廓与模型结果一致,验证了所提模型的合理性与准确性。

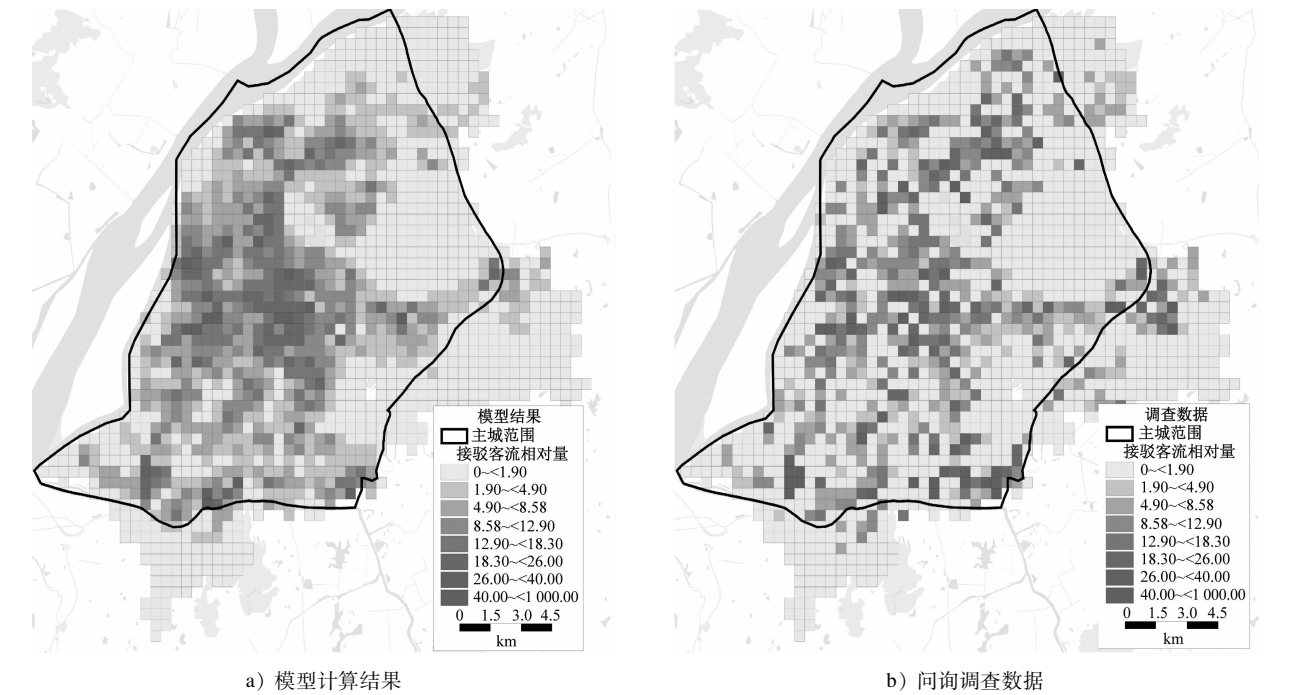


图 5 模型计算结果与问询调查数据的接驳客流空间分布热度图对比

Fig. 5 Comparison of feeder passenger flow spatial distribution heat maps based on model calculation results and questionnaire investigation data

模型计算结果与问卷调查数据指标对比如表 5 所示。平均接驳距离的模型计算结果与问询调查数据较为接近,公交车分担率的模型计算结果与问询调查数据相差最大,这与被调查人员中乘公交群体占比偏高有关。从整体来看,模型结果与问询调查结果较为接近,基本符合实际情况,说明所提模型能较好地模拟城轨车站的接驳客流情况,可在规划设计实践中更合理地预测接驳客流分布和接驳方式分担率,进而为相关规划设计提供数据支撑。

表 5 模型计算结果与问卷调查数据指标对比

Tab.5 Comparison of model calculation results and questionnaire investigation data indicators

项目	平均接驳 距离/km	步行分 担率/%	公交车分 担率/%	非机动车 分担率/%	非公交机 动车分担 率/%
模型结果	1.5	51.7	11.8	30.5	6.0
问询调查 结果	1.7	52.7	17.9	25.1	4.3
差值	-0.2	-1.0	-6.1	5.4	1.7

4 结语

1) 接驳方式选择模型 ROOT 层的 Logsum 结果可与车站选择模型实现衔接,表征对应空间联系点对的各交通方式的综合竞争力,较之传统的按距离或按方式分担率加权的时耗,Logsum 考虑的因素更加全面,模型解释结果更好。

2) 城轨车站的客源区划分可使用 NL 模型较好处进行量化描述。模型结构应分为是否乘坐轨道交通出行及选择哪个车站出行两方面。可将手机信令集计数据离散化后用于模型标定,实例中得到的校正伪 R^2 值达到了 0.872,说明模型解释效果较好。

需要说明的是,理论上四阶段模型本身就能解决本文研究问题,但由于实践中的各种原因,四阶段模型的预测精度不足。从研究角度来看,这并非四阶段模型本身的问题,而是如何应用模型的问题。本文研究意在探讨实践中的建模方法选择与客观条件限制之间的平衡。

参考文献

- [1] XI Y L, SAXE S, MILLER E. Accessing the subway in Toronto, Canada; access mode and catchment areas[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2016, 2543(1): 52.
- [2] LI X, LIU Z, MA X. Measuring access and egress distance and catchment area of multiple feeding modes for metro transferring using survey data[J]. Sustainability, 2022, 14(5): 2841.
- [3] EOM J K, CHOI J, PARK M S, et al. Exploring the catchment area of an urban railway station by using transit card data: case study in Seoul[J]. Cities, 2019, 95: 102364.
- [4] GUTIÉRREZ J, CARDOZO O D, GARCÍA-PALOMARES J C. Transit ridership forecasting at station level: an approach based on distance-decay weighted regression[J]. Journal of Transport Geography, 2011, 19(6): 1081.
- [5] DEBREZION G, PELS E, RIETVELD P. Choice of departure station by railway users [J]. European Transport, 2007 (37): 78.
- [6] ZHU Z, HE Y, GUO X, et al. Improved huff model for estimating urban rail transit station catchment areas considering station choices [J]. Journal of Advanced Transportation, 2021, 2021: 1.
- [7] YOUNG M A, BLAINEY S P. Development of railway station choice models to improve the representation of station catchments

in rail demand models[J]. Transportation Planning and Technology, 2018, 41(1): 80.

- [8] TSAMBOULAS D, GOLIAS J, VLAHOYANNIS M. Model development for metro station access mode choice[J]. Transportation, 1992, 19(3): 231.
- [9] 董志国. 上海轨道交通出行方式链模型研究[J]. 城市轨道交通研究, 2012, 15(7): 15.
- DONG Zhiguo. On the trip chain model of Shanghai urban rail transit[J]. Urban Mass Transit, 2012, 15(7): 15.
- [10] DIANA M, PRONELLO C. Traveler segmentation strategy with nominal variables through correspondence analysis[J]. Transport Policy, 2010, 17(3): 183.
- [11] WEN C H, WANG W C, FU C. Latent class nested logit model for analyzing high-speed rail access mode choice[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2012, 48(2): 545.
- [12] MCFADDEN D. Quantitative methods for analyzing travel behaviour of individuals: some recent developments[J]. Cowles Foundation Discussion Paper, 1977(474): 1.

· 收稿日期:2022-09-26 修回日期:2022-11-07 出版日期:2024-02-10
Received:2022-09-26 Revised:2022-11-07 Published:2024-02-10
· 通信作者:戴骏晨,工程师,djesse@foxmail.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

(上接第 87 页)

距离为 1 520.7 m;故障车为重车、其余为空车时,故障车切除 2 个转向架的安全距离为 2 196.7 m。

3) 当列车出现转向架故障时,通常采用降速运行,只要将其最高运行速度限制在速度阈值之下即可。该速度阈值对应的紧急制动距离应不大于最差黏着情况下列车的紧急制动距离,可据此确定故障车的最大限速。

本文得出的安全距离仅为理论值,在实际应用中应考虑测速误差及位置不确定性误差等因素,为安全距离留出一定的安全裕量,避免列车与前车相撞。

参考文献

- [1] 宋云. 移动闭塞中安全距离的分析[J]. 铁路通信信号工程技术, 2009, 6(3): 45.
- SONG Yun. Analysis of safety distance in CBTC[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2009, 6(3): 45.
- [2] 张滔. 移动闭塞信号系统的安全距离计算浅析[J]. 铁道通信信号, 2010, 46(6): 24.
- ZHANG Tao. Calculation of safety distance for moving block signalling system[J]. Railway Signalling & Communication, 2010, 46

(6): 24.

- [3] 罗志刚, 侯涛. 列车安全距离优化算法研究与仿真[J]. 铁道学报, 2014, 36(8): 49.
- LUO Zhigang, HOU Tao. Optimization algorithm of safe distance between running trains and simulation[J]. Journal of the China Railway Society, 2014, 36(8): 49.
- [4] 龙安宝. 轨道交通移动闭塞安全距离的仿真研究[J]. 城市轨道交通研究, 2012, 15(6): 49.
- LONG Anbao. On the simulation of safe distance in moving block [J]. Urban Mass Transit, 2012, 15(6): 49.
- [5] POLACH O. A fast wheel-rail forces calculation computer code [J]. Vehicle System Dynamics, 1999, 33(S1): 728.
- [6] 谭江. 高速轮轨黏着特性及增黏措施试验研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2019.
- TAN Jiang. Experimental investigations on the wheel/rail adhesion at high speeds and adhesion enhancement[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2019.

· 收稿日期:2023-04-10 修回日期:2023-04-10 出版日期:2024-02-10
Received:2023-04-10 Revised:2023-04-10 Published:2024-02-10
· 通信作者:黄文杰,正高级工程师,hwj_2003@126.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license