文章编号：1673-0291(2026)03-0073-10 DOI：10.11860/j.issn.1673-0291.20250175

基于客流推算的城市轨道交通出行效用函数参数标定方法

许浩喆[1a,1b]，何 维[2]，陈绍宽[1a,1b]，苏 畅[2]，茧 敏[1a,1b]

（1.北京交通大学a.交通运输部综合交通运输大数据应用技术交通运输行业重点实验室，
b.中国综合交通研究中心，北京 100044；2.沈阳地铁集团有限公司 规划管理部，沈阳 110000）

摘 要：针对城市轨道交通客流分配模型中效用函数参数标定缺乏可靠支撑、未考虑乘客出行行为异质性的问题，提出基于客流推算的出行效用函数参数标定方法．首先，结合线网结构与列车时刻表搜索有效路径，依托自动售检票系统（Auto Fare Collection，AFC）数据开展客流路径推算；然后，分析轨道交通出行路径选择影响因素，构建包含出行时间、途经车站数、换乘次数的广义费用函数，建立最优化模型进行效用函数参数标定，并采用Logit模型实现客流分配；最后，分别利用实际调查结果与客流推算结果标定多组参数，对比不同数据来源、不同标定方式下的客流分配效果，同时验证方法在不同客流特征下的适用性．研究结果表明：采用基于AFC数据的客流推算结果标定参数后，客流分配结果的准确性显著优于基于实际调查结果标定的情况；将出行起讫点（Origin-Destination，OD）按出行时长分组标定参数，能有效降低线路双向断面客流和网络换乘量的差异率，案例线路双向断面客流平均差异率由3.79%和2.70%分别降低至3.65%和1.86%，网络换乘量差异率由5.59%降低至5.16%，客流分配模型精度得到提升；该参数标定方法在工作日、节假日不同客流特征和路径选择规律下，均表现出良好的精度与稳定性，能适配不同的轨道交通出行场景．

关键词：城市轨道交通；客流分配；Logit模型；参数标定

中图分类号：U239.19 **文献标志码**：A

Parameter calibration method for urban rail transit travel utility function based on passenger flow estimation

XU Haozhe[1a,1b], *HE Wei*[2], *CHEN Shaokuan*[1a,1b], *SU Chang*[2], *JIAN Min*[1a,1b]

（1a. Key Laboratory of Transport Industry of Big Data Application Technologies for Comprehensive Transport, 1b. Integrated Transport Research Center of China, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. Planning Management Department, Shenyang Metro Group Co., Ltd., Shenyang 110000, China）

Abstract: To address the lack of reliable support for parameter calibration of utility functions in urban rail transit passenger flow assignment models and the insufficient consideration of heterogeneity in pas-

收稿日期：2025-10-20；**修回日期**：2026-04-27

基金项目：沈阳地铁集团有限公司科研项目（D6/FB ZX-2024-006）；国家自然科学基金（U2569203）

Foundation items: Scientific Research project of Shenyang Metro Group Co., Ltd.（D6/FB ZX-2024-006）; National Natural Science Foundation of China（U2569203）

第一作者：许浩喆（2000—），男，甘肃兰州人，硕士生．研究方向为交通运输规划与管理．**email**：23120933@bjtu.edu.cn.

通信作者：陈绍宽（1977—），男，陕西商洛人，教授，博士，博士生导师．**email**：shkchen@bjtu.edu.cn.

引用格式：许浩喆，何维，陈绍宽，等．基于客流推算的城市轨道交通出行效用函数参数标定方法[J]．北京交通大学学报，2026，50(3)：73－82.

XU Haozhe, HE Wei, CHEN Shaokuan, et al. Parameter calibration method for urban rail transit travel utility function based on passenger flow estimation[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2026, 50(3): 73－82.（in Chinese）

senger travel behavior, this study proposes a parameter calibration method for the travel utility function based on passenger flow estimation. First, feasible routes are identified by integrating the network structure and train timetables, and passenger flow path inference is conducted using Auto Fare Collection (AFC) data. Then, the factors influencing route choice in urban rail transit are analyzed, and a generalized cost function incorporating travel time, number of intermediate stations, and number of transfers is constructed. An optimization model is developed to calibrate utility function parameters, and the Logit model is adopted for passenger flow assignment. Finally, multiple sets of parameters are calibrated using both observed survey data and estimated passenger flow data, and the assignment performance under different data sources and calibration strategies is compared. The applicability of the proposed method under different passenger flow characteristics is also evaluated. The research results show that parameter calibration based on AFC-derived passenger flow estimation yields significantly higher assignment accuracy than calibration based on survey data. Grouping Oorigin-Destination (OD) pairs by travel duration for parameter calibration effectively reduces discrepancies in bidirectional section flows and total network transfer volume. In the case study, the average discrepancy rates of bidirectional section passenger flows of the target lines decrease from 3.79% and 2.70% to 3.65% and 1.86%, respectively, while the discrepancy rate of total network transfer volume is reduced from 5.59% to 5.16%, indicating improved model accuracy. The proposed calibration method demonstrates strong accuracy and stability under different passenger flow patterns and path selection rules on both weekdays and holidays, making it adaptable to diverse urban rail transit travel scenarios.

Keywords: urban rail transit; passenger flow assignment; Logit model; parameter calibration

在城市轨道交通网络化运营中,乘客的一次出行往往有多条可选路径.深入研究乘客路径选择行为有助于掌握客流在网络中的时空分布规律,既能指导规划设计阶段的工作,也可在运营管理阶段为运营组织方案的优化提供依据,是提升城市轨道交通规划与运营质量的关键环节.

已有诸多学者对城市轨道交通乘客路径选择问题进行研究,这些研究可分为两类:集计分析下的多路径客流分配模型和非集计分析下的客流时空路径推算模型.

集计分析下的客流分配模型通常基于Logit多路径概率选择模型实现,构建出行效用函数后进行网络路径搜索,根据部分调查数据标定模型参数后即可将各站之间的OD量按比例分配至可行路径中.出行效用函数通常包括乘客的在车时间、换乘时间和换乘次数[1-4],部分学者则进一步研究不同运营时段[5]、多交路[6-7]、突发事件[8]下的客流分配问题,并探讨不同乘客群体的路径选择偏好[9-11].

非集计分析下的客流时空路径推算模型以大量自动售检票系统(Auto Fare Collection,AFC)数据为基础,不同学者从中挖掘乘客的个体出行信息,对相关时间参数进行数学估计,进而得到每位乘客的出行路径选择情况.文献[12]基于AFC数据对旅行时间要素进行参数估计,提出了基于AFC数据的乘客出行路径选择比例估计方法.文献[13]提出了一种融合模糊匹配和密度概率比例修正的路径匹配算法.文献[14-15]结合AFC数据和多元监测数据提高出行路径估计的准确程度.文献[16-18]进一步研究AFC数据与时刻表的关联,实现了乘客与列车之间的精确匹配,同时兼顾物理路径可达性和列车服务有效性.

综上所述,虽然客流分配模型的具体构成和效用函数考虑因素各有不同,但其中参数取值往往根据调查数据进行标定[1-3],或直接取值[5-6,9].调查法除了具有较高的成本外,较少的样本数量还导致其可靠度难以保证.客流分配模型存在的问题是模型参数能否科学合理地确定,而客流推算模型通过实际OD客流路径推算,能在网络层面获得更高精度的乘客出行路径选择方案,可为客流分配模型的参数标定提供更加可靠的支撑.此外,不同出行距离、出行目的及乘客类别都会影响乘客对换乘次数、换乘时间等影响因素的权重偏好,进而改变路径选择规律[9,19-20],但多数客流分配研究未考虑乘客出行行为的异质性,在网络层面上缺乏不同路径选择规律对模型精度影响的定量对比分析.

本文以出行时间、途经车站数量及换乘次数作为出行效用函数的组成部分,在分析轨道交通出行行为的基础上构建Logit多路径概率选择模型.首

先,为探究标定参数的数据来源和标定方式对结果的影响,构建最优化模型并提出了基于客流推算的城市轨道交通出行效用函数参数标定方法.然后,采用文献[16]的客流推算模型进行时空路径推算得到的路径选择情况与文献[1]中调查得到的路径选择情况标定多组参数进行客流分配.最后,对比该方法与传统方法得到的换乘站客流和断面客流,提升客流分配模型精度,并基于不同日期类型的客流分配精度,验证该方法的普遍适用性.

1　轨道交通乘客出行行为分析

1.1　路径选择影响因素

与道路交通相比,受限于路权特性、可靠性和换乘成本等方面差异,城市轨道交通系统中的路径选择以出行前决策为主导,乘客更倾向于根据不同路径之间的静态因素(如乘车时间、换乘次数、途经车站数等)进行有效路径筛选及最优路径判断.此外,城市轨道交通系统的换乘站具有通道换乘、同站台换乘、节点换乘、站厅换乘等多样化结构形式,由于不同结构对应的换乘步行距离、上下楼梯次数等存在显著区别,换乘时间也会影响到乘客的路径选择.

里程分段计价模式是我国城市轨道交通领域应用最广泛的计费模式,该模式下票务清分系统通过线网拓扑数据与最短路径算法,自动核定起点与终点间的最短轨道里程作为计费依据.乘客在轨道交通网络中的起点和终点一旦确定,在不乘坐特殊计费线路的前提下(如机场专线),无论选择何种换乘方案,最终收费保持一致,因此票价费用通常不会影响乘客在轨道交通网络中的出行路径选择.此外,由于乘坐轨道交通网络内独立收费的线路需要额外的刷卡付费流程,因此乘坐该类线路的路径可由刷卡数据精确记录,在票务清分与路径识别上被视作独立系统.

1.2　有效路径搜索

城市轨道交通网络可以用图论中“带权的有向图”来表示.设图 $G=(V,E,W)$ 表示一有向交通网络,其中 V 表示节点集,E 表示弧集,W 表示权集.网络中的每条路径均有一个广义费用值与之对应,该路径上的广义费用是指该路径上弧的权值之和.

将两条相交的城市轨道交通线路进行拓扑转化,如图1所示.图1中,$e(v_2,v_1)$ 为节点 v_2 与 v_1 之间的连接弧.将区间运行时间和换乘时间作为连接各车站节点弧的权值,为实现换乘弧,需将换乘站2拆分为两个节点 v_2 和 $v_{2'}$,以表示两线路之间的换入换出关系.在实际时刻表中,各区间在上下行的运行时分基本相同,但换乘时间受换乘站形式和换乘方式影响较大,同一换乘站内不同线路之间的换乘时间可能存在较大差异.为得到更加准确的结果,采用高峰期实际调研得到的换乘时间作为对应换乘弧的权值.

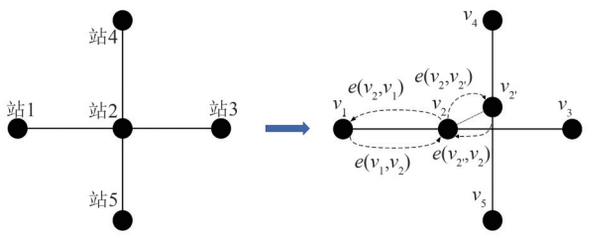


图 1　轨道交通线路拓扑转化示意图

Fig.1　Schematic diagram of topological transformation of urban rail transit lines

在实现网络化运营的城市轨道交通线网中,同一起终点间除最短路径外,仍存在多条可行的其他路径,出行者会根据各路径的特点及自身偏好选择实际出行路径.本文首先采用Floyd算法得到任意OD对之间的最短路径,之后采用K短路算法得到满足有效路径条件的次短路径.判断OD对 i 的第 j 条路径是否属于有效路径的方法为

$$\begin{cases} t_j^i \leqslant \min\left\{ t_{\min}^i + t_{\text{tor}},\ t_{\min}^i\left(1+f_{\max}\right)\right\} \\ n_j^i \leqslant N_{\max} \end{cases} \tag{1}$$

式中:t_j^i 为OD对 i 的第 j 条路径的出行时间;$t_{\min}^i$ 为OD对 i 最短路径的出行时间;t_{tor} 为绝对阈值;$f_{\max}$ 为相对阈值;n_j^i 为OD对 i 的第 j 条路径的换乘次数;$N_{\max}$ 为线网最大换乘次数.

2　客流推算与客流分配模型

2.1　客流推算流程

轨道交通网络中,同一OD对不同路径之间的差异可由在车时间、换乘时间等参数体现.AFC数据精确记录乘客在轨道交通系统中的进出站时间、位置等信息,将各路径的时间参数与AFC数据进行匹配评估,即可推算每次出行实际所选路径.

基于AFC数据的客流推算流程共有4个步骤,如图2所示:首先,利用单一路径无换乘OD对的AFC数据,估计各车站的进、出站时间参数;其次,基于进、出站时间参数,对单一路径有换乘OD对的AFC数据进行数学拟合,估计换乘时间参数;再次,采用路径搜索算法搜索网络各OD对的可行路径;最后,将全网AFC数据与对应路径出行时间参数进行匹配,即可得到每位乘客所选择的出行路径,完成客流推算.

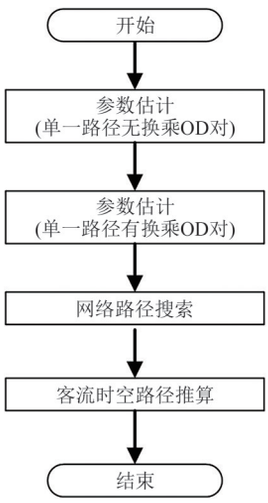


图 2 客流推算流程

Fig.2 Passenger flow estimation process

2.2 出行效用函数及客流分配模型构建

乘客在城市轨道交通网络中的路径选择受多种因素影响，主要包括出行时间、途径车站数、换乘次数等.综合考虑上述因素，OD对i第j条路径的出行效用V_j^i为

$$V_j^i=\alpha_1\left(\mathrm{to}_j^i+\alpha_2\mathrm{ts}_j^i\right)+\alpha_3 s_j^i+\alpha_4 n_j^i \tag{2}$$

式中：to_j^i为该路径的在车时间；ts_j^i为该路径的换乘时间；s_j^i为该路径的车站数量；n_j^i为该路径换乘次数；α_1为总出行时间影响参数；α_2为换乘时间影响参数；α_3为途径车站数量影响参数；α_4为换乘次数影响参数.

轨道交通客流分配属于典型的多路径选择问题，采用Logit模型计算各路径选择比例并进行客流分配，OD对i第j条路径的选择概率P_j^i为

$$P_j^i=\frac{\exp(-V_j^i)}{\sum\limits_{j\in J_i}\exp(-V_j^i)} \tag{3}$$

式中：J_i为OD对i的可行路径集合.

2.3 效用函数参数标定方法

式(2)中包含α_1、α_2、α_3、α_4共4个待标定的参数，参数取值是否合理会影响模型准确性，因此需要结合轨道交通网络实际出行情况进行参数标定.为探究不同模型参数标定方式对客流分配模型精度的影响，采用单OD对标定、多OD对标定和将OD对按出行时长分组标定共3种参数标定方式.参数标定模型目标函数为OD对各路径标定概率与实际选择概率差异的平方和最小，表达式为

$$\min Z=\sum_{i\in I}\sum_{j\in J_i}\left(P_j^i-\bar{P}_j^i\right)^2 \tag{4}$$

式中：Z为各OD对路径标定概率与实际概率差异的平方和；I为选取的OD对集合；$\bar{P}_j^i$为OD对i第j条路径实际选择概率.

模型约束条件为

$$\text{s.t.}\begin{cases}P_j^i=\dfrac{\exp(-V_j^i)}{\sum\limits_{j\in J_i}\exp(-V_j^i)}\\ V_j^i=\alpha_1\left(\mathrm{to}_j^i+\alpha_2\mathrm{ts}_j^i\right)+\alpha_3 s_j^i+\alpha_4 n_j^i\\ \alpha_1>0\\ \alpha_2>1\\ \alpha_3>0\\ \alpha_4>0\end{cases} \tag{5}$$

式(4)和式(5)构成的最优化模型形式较简单，采用带边界约束的有限内存拟牛顿法(Limited-memory Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno with Boundary，L-BFGS-B)可快速求解.

得到不同参数标定方式下的参数组后，基于AFC数据得到轨道交通网络各OD对之间的出行量，再结合路径信息即可进行网络客流分配.3种参数标定方式中，单OD对标定和多OD对标定均得到一组参数，将OD对按出行时长分组标定得到两组参数，进行客流分配时需判断各OD对最短路径的用时，若用时小于等于多路径OD对的出行时间平均数$\bar{t}$，则该OD对采用短途出行参数组进行客流分配；若大于，则采用长途出行参数组进行客流分配.

3 案例研究

3.1 相关基础数据

以沈阳市轨道交通网络为例进行案例研究.截至2024年10月，沈阳轨道交通运营线路共有5条，运营里程165 km，共设车站111座，其中包含11座换乘站.

选取2024年4月28日至5月4日的AFC数据和时刻表作为基础数据，包含3个工作日(4月28日至4月30日)和4个节假日(5月1日至5月4日).其中4月28日和5月1日数据用于客流推算并标定客流分配模型参数，其他日期数据用于输入参数标定后的客流分配模型，进行结果验证和对比.

沈阳轨道交通全网共有OD对12 210个，根据式(1)的有效路径搜索算法进行搜索，参考文献[3]方法和沈阳轨道交通网络实际情况，参数t_{tor}、$f_{\max}$和$N_{\max}$取值分别为15 min、0.1和3.基于可行路径搜索结果统计4月28日AFC数据中多路径OD对的出行信息，得到该日多路径OD对的平均出行时间$\bar{t}$为2 391 s，作为区分长、短途出行的依据，标定模型参数.

3.2　出行效用函数参数标定

将4月28日和5月1日AFC数据进行筛选、处理,结合该日时刻表数据对其进行客流路径推算,得到各OD对之间所有有效路径的乘客数.由于路径选择模型的本质是利用同一OD对不同路径的效用函数差异体现选择概率差异,因此应选择多路径且具有一定样本数量的OD对进行参数标定.若OD对路径数量过少,则无法估计关键参数;若样本数量过少,则模型收敛困难,参数估计偏差大.为对比不同路径选择结果的数据来源及参数标定方式对模型参数的影响,选取部分多路径OD对的客流推算结果和文献[1]中调查数据进行参数标定,具体信息见表1.其中4月28日数据共选取6组OD对,用于对比不同参数标定方式的影响;5月1日数据和调查数据仅选取1组OD对,用于对比不同数据来源及日期类型对参数标定的影响.

表1　标定参数所用OD对信息

Tab.1　OD pair information used for parameter calibration

数据来源	OD对序号	路径序号	在车时间/s	换乘时间/s	车站数量	换乘次数	选择人数	选择概率/%
客流推算(4月28日)	1	1	1 737	825	15	2	8	20.0
		2	2 525	309	17	1	20	50.0
		3	1 586	654	12	2	12	30.0
	2	1	2 299	390	15	1	49	62.8
		2	1 487	658	10	2	16	20.5
		3	1 323	744	10	2	13	16.7
	3	1	1 920	446	13	1	29	59.2
		2	1 467	724	9	2	3	6.1
		3	1 139	741	9	2	17	34.7
	4	1	2 722	357	18	1	11	45.8
		2	2 633	396	15	1	12	50.0
		3	1 837	667	13	2	1	4.0
	5	1	2 781	367	15	1	51	44.0
		2	2 767	419	19	1	24	20.7
		3	1 785	677	12	2	41	35.3
	6	1	3 293	371	22	1	31	75.6
		2	2 709	654	18	2	1	2.4
		3	2 716	615	18	2	9	22.0
客流推算(5月1日)	7	1	1 737	825	15	2	9	15.8
		2	2 525	309	17	1	26	45.6
		3	1 586	654	12	2	22	38.6
调查数据	8	1	1 719	180	11	1	14	42.4
		2	2 070	120	14	1	8	24.3
		3	2 118	276	16	1	9	27.3
		4	1 790	612	11	2	1	3.0
		5	2 140	330	14	2	1	3.0

统计表1中各OD对最短路径所用时间,将OD对1、2、3划分为短途出行;OD对4、5、6划分为长途出行.根据不同的数据来源和参数标定方式,选择对应的OD对信息,输入式(4)和式(5)构成的最优化模型中,进行求解即可得到不同的出行效用函数参数,结果见表2.

表2　参数标定结果

Tab.2　Parameter calibration results

数据来源	参数标定方式	采用的OD对	参数$\alpha_1\times10^{-4}$	参数α_2	参数$\alpha_3\times10^{-4}$	参数α_4
客流推算(4月28日)	单OD对标定	1	10.5	1.30	44.6	1.04
	多OD对标定	1、4	10.6	2.54	431	0.51
	分为长、短途标定两组参数	4、5、6(长)	44.9(长)	2.75(长)	440(长)	1.40(长)
		1、2、3(短)	0.36(短)	1.95(短)	10.1(短)	1.06(短)
客流推算(5月1日)	单OD对标定	7	22.5	1.25	5.57	1.36
文献[1]调查结果	单OD对标定	8	3.95	1.48	413	2.55

由表 2 可知，同一参数在不同数据来源和标定方式下会具有显著差异，进一步说明了科学确定客流分配模型参数取值的重要性.

在城市轨道交通系统中，长距离出行者的出行总时间较长，换乘过程会显著放大行程的不舒适感，而短距离出行者更加关注能否快速到达目的地，更易接受通过换乘缩短总出行时间.将出行分为长、短途标定两组参数后，体现换乘时间影响的参数 α_2 在短途出行中为 1.95，而在长途出行中为 2.75；体现换乘次数影响的参数 α_4 在短途出行中为 1.06，而在长途出行中为 1.40.参数的变化表明长途出行对换乘的敏感程度更高，与实际规律和既有相关研究结论一致.

3.3 不同参数标定方式下的客流分配精度对比

在城市轨道交通系统中，同一起终点间不同路径的核心区分特征集中体现于是否换乘、换乘站点和换乘次数的差异.将客流分配结果中的换乘站换乘量和线路断面客流量与实际客流数据进行对比，可较为直观地检验模型的精度.

采用不同出行效用函数参数进行客流分配时，各换乘站换乘量与实际换乘量的对比如图 3 所示.模型参数分别采用 4 月 28 日的客流推算结果和调查结果标定，标定方式均为单 OD 对标定.

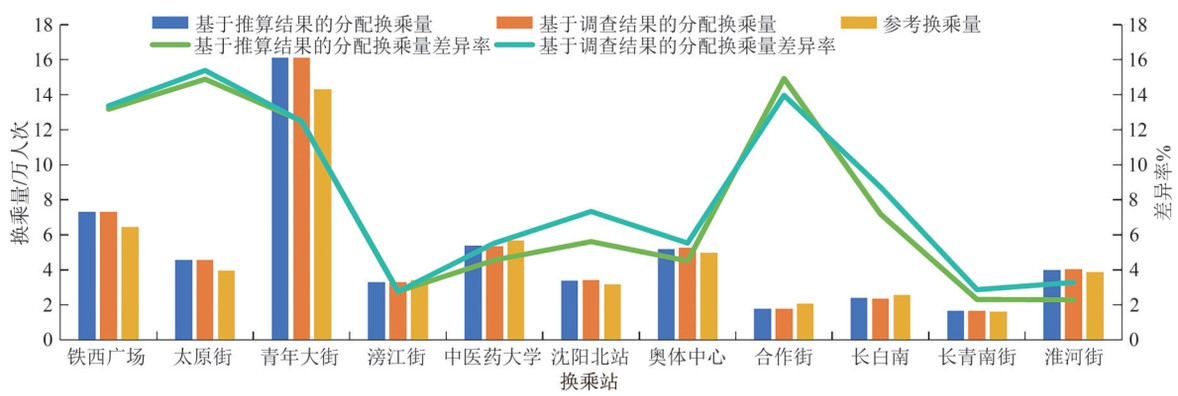


图 3 不同模型参数下的各换乘站换乘量对比

Fig.3 Comparison of transfer volumes at transfer stations under different model parameter settings

由图 3 可知，采用基于客流推算结果的模型参数进行客流分配时，各换乘站的换乘量整体更接近实际换乘量，其差异率曲线在多数站点低于基于调查结果的客流分配模型差异率曲线，仅在合作街站更高.

不同出行效用函数参数下的客流分配结果与网络总换乘量的差异率、各换乘站换乘量的平均差异率和最大差异率如表 3 所示.

表 3 不同模型参数下的换乘量差异率对比

Tab.3 Comparison of transfer volume discrepancy rates under different model parameter settings %

数据来源	参数标定方式	总换乘量差异率	换乘站平均差异率	换乘站最大差异率
文献[1]调查结果	单 OD 对标定	5.80	8.30	15.39
客流推算（4 月 28 日）	单 OD 对标定	5.59	7.71	14.93
	多 OD 对标定	5.41	7.60	14.23
	分为长途、短途标定两组参数	5.16	7.57	13.70

由表 3 可知：基于调查结果标定参数得到的客流分配结果中，总换乘量差异率、换乘站平均差异率和最大差异率均高于采用客流推算结果进行参数标定得到的客流分配结果；基于客流推算结果进行参数标定时，3 种参数标定方式下的总换乘量差异率均小于 6%，换乘站换乘量最大差异率均小于 15%；将 OD 对分为长途、短途，标定两组参数，能够进一步降低换乘量的差异率，得到的结果更加准确.

以沈阳地铁 4 号线长白南至合作街方向的 11 个区间为例，利用不同出行效用函数参数进行客流分配得到的断面客流与参考断面客流的对比如图 4 所示，模型参数标定方式均为单 OD 对标定.

由图 4 可知，基于客流推算结果进行客流分配的断面客流整体差异率更低，其在 8 个断面的差异率明显低于基于调查结果分配的断面客流，其他 3 个断面的差异率接近.

进一步统计不同出行效用函数参数下的客流分配结果与参考线路双向断面客流的最大、最小和平均差异率，如表 4 所示.

由表 4 可知：采用调查结果标定参数进行客流分配时，断面客流的平均差异率和最大差异率均更高；采用客流推算结果标定参数并客流分配的结果中，

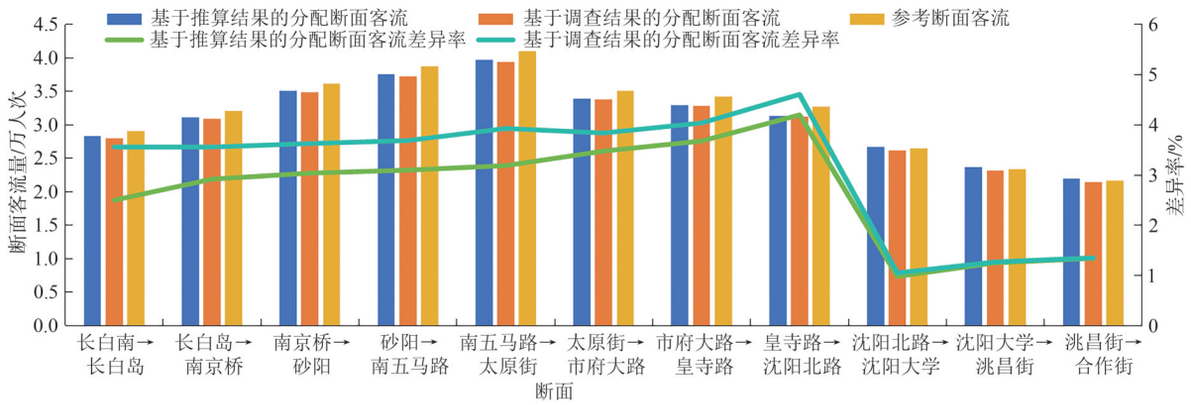


图 4　4号线上行方向断面客流对比

Fig.4　Comparison of section passenger flow in the northbound direction of Line 4

表 4　不同模型参数下的断面客流差异率对比

Tab.4　Comparison of section passenger flow discrepancy rates under different model parameter settings　%

数据来源	参数标定方式	断面客流最大差异率		断面客流最小差异率		断面客流平均差异率	
		下行	上行	下行	上行	下行	上行
文献[1]调查结果	单OD标定	6.09	4.61	1.47	1.05	4.06	3.14
客流推算（4月28日）	单OD标定	5.98	4.20	2.30	0.98	3.79	2.70
	多OD标定	5.83	4.10	2.20	0.93	3.78	2.59
	分为长、短途标定两组参数	5.46	3.66	1.83	0.73	3.65	1.86

3种参数标定方式下的断面客流平均差异率均小于3%,断面客流最大差异率均小于6%;将OD对分为长途、短途,标定两组参数,能够进一步降低断面客流与参考值的差异率,得到的结果最接近实际客流.

根据图4和表4综合换乘量与断面客流的对比结果可知:基于客流推算结果标定参数的客流分配模型精度整体优于基于调查数据标定参数的模型,这说明以AFC数据为基础的客流推算数据在效用函数参数标定中具有更高的可靠性;按出行时长对OD对进行分组标定参数的方式能够更好地匹配不同出行距离乘客的路径选择偏好,可进一步提升客流分配精度.

3.4　不同路径选择规律下的客流分配精度对比

为探究不同路径选择规律对客流分配精度的影响和本文提出的基于客流推算的出行效用函数参数标定方法的适用性,分别采用表2中利用4月28日和5月1日数据进行客流推算并标定的模型参数,对其他日期(4月29日至4月30日、5月2日至5月4日)的AFC数据进行客流分配.对比不同日期类型参数下的客流分配结果,可有效检验参数标定方法的泛化能力与分配精度.

通过不同出行效用函数参数进行客流分配得到的多日总换乘量和其与参考换乘量的差异率如图5所示,其中参数均采用单OD对标定.

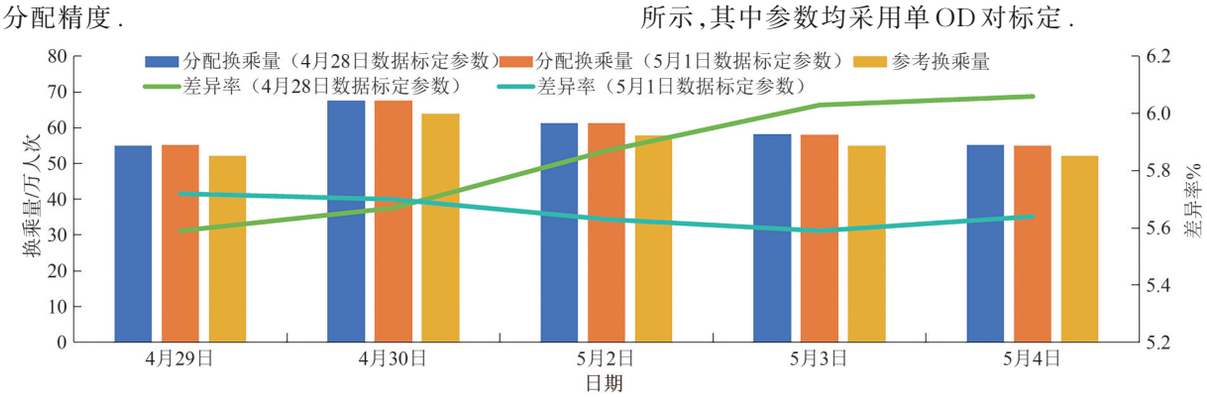


图 5　不同路径选择规律下的多日总换乘量对比

Fig.5　Comparison of total transfer volume over multiple days under different route choice rules

由图5可知:采用4月28日数据标定参数的客流分配总换乘量在工作日的精度更高,采用5月1日数据标定参数的客流分配总换乘量在节假日的精度更高;尽管不同模型参数适用于不同的日期类型,但

两条差异率曲线最高点与最低点的绝对差异均小于1%,模型整体稳定性较好.

不同出行效用函数参数标定方式下客流分配得到的多日网络总换乘量对比如表5所示.由表5可知,将OD对分为长途、短途,标定两组参数,在不同的出行规律下均可进一步降低网络换乘量的差异率.

表5 不同参数标定方式下的多日总换乘量对比

Tab.5 Comparison of total transfer volume over multiple days under different parameter calibration methods

日期	参考总换乘量/人次	客流分配换乘量/人次		换乘量差异率/%	
		单OD对标定	分组标定	单OD对标定	分组标定
4月29日	521 248	550 394	548 129	5.59	5.16
4月30日	639 420	675 681	673 042	5.67	5.26
5月2日	579 189	613 195	611 525	5.86	5.45
5月3日	549 813	582 188	580 238	5.87	5.58
5月4日	521 084	551 686	550 165	5.89	5.53

图5和表5的多日总换乘量对比仅从网络整体层面分析了基于客流推算的参数标定方法的精度和适用性,尚未深入至换乘站微观层面开展细化验证.为进一步探究该方法在关键节点的客流分配效果,针对典型换乘站两个换乘方向的换乘客流展开分析.

通过不同出行效用函数参数进行客流分配得到的奥体中心站分方向换乘量结果与参考换乘量的对比如表6所示.为简化表述换乘方向,将2号线换9号线表示为“2换9”,9号线换2号线表示为“9换2”.

表6 不同路径选择规律下奥体中心站分方向换乘量对比

Tab.6 Comparison of directional transfer volumes at Olympic Sports Center Station under different route choice rules

日期	参考换乘量/人次		分配换乘量(采用4月28日参数)/人次		分配换乘量(采用5月1日参数)/人次		换乘量差异率(采用4月28日参数)/%		换乘量差异率(采用5月1日参数)/%	
	2换9	9换2	2换9	9换2	2换9	9换2	2换9	9换2	2换9	9换2
4月29日	25 324	24 409	26 418	25 565	26 582	25 681	4.32	4.74	4.97	5.21
4月30日	26 559	28 632	27 781	30 045	27 858	30 122	4.60	4.94	4.89	5.20
5月2日	20 131	20 616	21 392	21 812	20 988	21 509	6.26	5.80	4.26	4.33
5月3日	20 072	19 114	21 222	20 144	20 922	19 898	5.73	5.39	4.23	4.10
5月4日	20 039	18 398	21 123	19 422	20 903	19 142	5.41	5.57	4.31	4.04

由表6可知:不同换乘方向的模型精度存在无明显规律的小幅差异,说明基于客流推算的参数标定方法对同一换乘站不同流向的适配性较均衡;采用4月28日数据标定参数进行客流分配的精度随工作日向节假日过渡呈下降趋势,而采用5月1日数据标定参数进行客流分配的精度呈上升趋势,与图5网络总换乘量的趋势相同;相同模型参数在不同日期类型的换乘站分方向换乘量差异率波动均处于2%以内,体现出较好的稳定性.

在不同参数标定方式下进行客流分配得到的奥体中心站分方向换乘量与参考换乘量的差异率如表7所示.由表7可知,按出行时长分组标定参数可进一步降低差异率,该优势在工作日和节假日均稳定存在.

综合本节中不同路径选择规律下的客流分配精度对比结果可知:利用工作日、节假日数据分别标定的模型参数虽更加适用于对应日期类型的客流分配,在不同日期类型的分配精度略有下降,但差异率波动处于可接受范围;按出行时长将OD对分组后标定参数的方式,在工作日和节假日均能进一步提升客流分配精度,充分验证了该方法在不同日期类型、不同路径选择规律下的适用性;基于客流推算的参数标定方法在不同的客流特征下均具备良好的泛化能力与稳定性.

表7 不同参数标定方式下奥体中心站换乘量差异率

Tab.7 Transfer volume discrepancy rates at Olympic Sports Center Station under different parameter calibration methods %

日期	单OD对标定差异率		分组标定差异率	
	2换9	9换2	2换9	9换2
4月29日	4.32	4.74	3.34	4.01
4月30日	4.60	4.94	3.59	4.22
5月2日	6.26	5.80	5.64	5.02
5月3日	5.73	5.39	5.06	4.89
5月4日	5.41	5.57	4.94	5.13

4 结论

1)对比城市轨道交通系统和道路交通出行的特点,影响轨道交通系统出行路径选择的因素主要

为在车时间、途径车站数、换乘次数等静态因素,且轨道交通出行途中倾向于维持计划路径.

2) 基于AFC数据的客流推算能够为客流分配模型提供更加广泛的数据基础和多样的参数标定方式,案例结果表明,采用客流推算结果进行参数标定和客流分配相比采用调查结果更加准确,换乘站换乘量平均精度提升0.59%.

3) 传统的客流分配模型仅使用一组参数,若将OD对按出行时长分组,标定不同的参数进行客流分配,能够体现出不同出行距离下的路径选择偏好差异,可进一步提升模型的精度.案例结果中网络总换乘量差异率降低0.43%,线路双向断面客流差异率分别降低0.84%和0.14%,换乘站换乘量最高降低1.23%.

4) 基于客流推算的出行效用函数参数标定方法具有良好的稳定性,在工作日与节假日不同的客流特征和路径选择规律下均适用,具有推广应用价值.案例结果中网络总换乘量波动小于1%,换乘站分方向换乘量波动小于2%.

未来可从3方面深化拓展:一是进一步融合列车拥挤度、乘客个人信息等多维度特征,完善效用函数的影响因子体系,更贴合真实出行决策逻辑;二是结合实时AFC数据、列车运行数据与客流监测数据,构建动态参数标定与客流分配模型,适配高峰拥堵、突发运营调整等动态场景;三是将该方法与轨道交通线网规划、运力调配、客流预警等业务系统深度集成,形成从数据处理、参数标定到客流分配、运营优化的全流程智能化应用体系,为城市轨道交通网络化、精细化运营管理提供更全面的技术支撑.

参考文献(References):

[1] 刘剑锋, 孙福亮, 柏赟, 等. 城市轨道交通乘客路径选择模型及算法[J]. 交通运输系统工程与信息, 2009, 9(2): 81−86.
LIU Jianfeng, SUN Fuliang, BAI Yun, et al. Passenger flow route assignment model and algorithm for urban rail transit network[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2009, 9(2): 81−86.(in Chinese)

[2] 林湛, 蒋明青, 刘剑锋, 等. 城市轨道交通客流分配的改进Logit模型及方法[J]. 交通运输系统工程与信息, 2012, 12(6): 145−151.
LIN Zhan, JIANG Mingqing, LIU Jianfeng, et al. Improved logit model and method for urban rail transit network assignment[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2012, 12(6): 145−151.(in Chinese)

[3] 陈培文, 高德辉. 考虑路径尺度的城市轨道交通客流分配[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(12): 4884−4889.
CHEN Peiwen, GAO Dehui. Passenger flow assignment method of urban rail transit based on path size[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(12): 4884−4889.(in Chinese)

[4] 杨陶源, 郑宣传, 孟海超. 城市轨道交通网络动态客流分配方法研究[J]. 交通工程, 2024, 24(12): 15−21.
YANG Taoyuan, ZHENG Xuanchuan, MENG Haichao. Research on dynamic passenger flow allocation methods for urban rail transit networks[J]. Journal of Transportation Engineering, 2024, 24(12): 15−21.(in Chinese)

[5] 胡煜堃, 文迪, 吕红霞. 路网能力限制的城市轨道交通动态客流分配问题研究[J]. 综合运输, 2020, 42(8): 61−67.
HU Yukun, WEN Di, LV Hongxia. Dynamic passenger flow assignment of urban rail transit based on network capacity limitation [J]. China Transportation Review, 2020, 42(8): 61−67.(in Chinese)

[6] 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)

[7] 许得杰, 潘星, 巩亮, 等. 基于列车开行方案的城市轨道交通多交路客流分配方法[J]. 交通运输系统工程与信息, 2023, 23(5): 238−246.
XU Dejie, PAN Xing, GONG Liang, et al. Passenger flow assignment method for multi-routing operation of urban rail transit based on train plan[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2023, 23(5): 238−246.(in Chinese)

[8] 闫科维, 朱志国, 马驷. 突发事件下城轨网络系统内客流分配方法[J]. 综合运输, 2022, 44(10): 78−83.
YAN Kewei, ZHU Zhiguo, MA Si. Method of passenger flow distribution in urban rail network system in emergency[J]. China Transportation Review, 2022, 44(10): 78−83.(in Chinese)

[9] 何世伟,张威,宋瑞,等. 面向现代物流的铁路运输生产组织关键技术架构研究[J].北京交通大学学报,2025, 49(5):102−108.
HE Shiwei,ZHANG Wei,SONG Rui,et al.Key technology architecture of railway transportation production organization oriented to modern logistics[J].Journal of Beijing Jiaotong University,2025,49(5):102−108.(in Chinese)

[10] 陈伯阳，蒋明清，四兵锋，等. 基于乘客个体属性的地铁客流分配算法及实证研究[J]. 北京交通大学学报，2015，39(6)：39－47.
CHEN Boyang，JIANG Mingqing，SI Bingfeng，et al. Individual attributes based assignment model and empirical research for urban subway network[J]. Journal of Beijing Jiaotong University，2015，39(6)：39－47.(in Chinese)

[11] SHIH H C，HSU Y T，LAI Y R. Modeling non-compensatory strategies on path choices in a complex urban rail transit network considering characteristics of transfer passengers and trips[J]. Travel Behaviour and Society，2024，35：100733.

[12] 石俊刚，周峰，朱炜，等. 基于AFC数据的城轨乘客出行路径选择比例估计方法[J]. 东南大学学报(自然科学版)，2015，45(1)：184－188.
SHI Jungang，ZHOU Feng，ZHU Wei，et al. Estimation method of passenger route choice proportion in urban rail transit based on AFC data[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition)，2015，45(1)：184－188.(in Chinese)

[13] 兰珊珊. 基于AFC数据的城轨路网客流分析算法研究[D]. 北京：北京交通大学，2019.
LAN Shanshan. Research on passenger flow analysis algorithms of urban rail network based on AFC data[D]. Beijing：Beijing Jiaotong University，2019.(in Chinese)

[14] 彭羽飞，蒋熙. 基于多源监测数据的城轨路网乘客出行路径估计方法[J]. 北京交通大学学报，2023，47(3)：96－102.
PENG Yufei，JIANG Xi. Estimation method of urban rail transit passenger route based on multi-source detection data[J]. Journal of Beijing Jiaotong University，2023，47(3)：96－102.(in Chinese)

[15] SHANG P，XIONG Y F，GUO J F，et al. A modeling framework to integrate frequency-and schedule-based passenger assignment approaches for coordinated path choice and space-time trajectory estimation based on multi-source observations[J]. Transportation Research Part B：Methodological，2024，183：102945.

[16] 茧敏，王卓，陈哲轩，等. 基于时空路径推算的城轨网络客流分配方法[J]. 西南交通大学学报，2023，58(5)：1117－1125.
JIAN Min，WANG Zhuo，CHEN Zhexuan，et al. Passenger flow assignment method for urban rail transit networks based on inference of spatiotemporal path[J]. Journal of Southwest Jiaotong University，2023，58(5)：1117－1125.(in Chinese)

[17] 马怀清，杨德明. 基于时空路径匹配的城市轨道交通新型清分算法[J]. 中国铁路，2024(3)：118－124.
MA Huaiqing，YANG Deming. New clearing algorithm for urban rail transit based on temporal-spatial path matching[J]. Chinese Railways，2024(3)：118－124.(in Chinese)

[18] 闫旭，彭其渊，张永祥，等. 拥堵条件下城市轨道交通“乘客-列车”分配方法[J]. 铁道科学与工程学报，2025，22(5)：2027－2039.
YAN Xu，PENG Qiyuan，ZHANG Yongxiang，et al. Passenger-to-train assignment method for urban rail transit under congestion[J]. Journal of Railway Science and Engineering，2025，22(5)：2027－2039.(in Chinese)

[19] RAVEAU S，GUO Z，MUÑOZ J C，et al. A behavioural comparison of route choice on metro networks：Time，transfers，crowding，topology and socio-demographics[J]. Transportation Research Part A：Policy and Practice，2014，66：185－195.

[20] 姚恩建，金方磊，胡倩雯，等. 考虑换乘次数阈值的城轨乘客路径选择行为分析[J]. 西南交通大学学报，2017，52(3)：639－645.
YAO Enjian，JIN Fanglei，HU Qianwen，et al. Analysis of route choice behavior of urban rail passengers considering transfer thresholds[J]. Journal of Southwest Jiaotong University，2017，52(3)：639－645.(in Chinese)