

城市轨道交通既有线路延伸段开通初期 线网客流分布预测的改进重力模型^{*}

李嘉仪 张龙豪 宋绪扬 徐瑞华

(上海市轨道交通结构耐久与系统安全重点实验室, 201804, 上海)

摘要 [目的]城市轨道交通既有线路延伸段的开通,会影响全网客流分布。为满足延伸段开通初期的线网客流准确预测需求,有必要提出更好的模型。[方法]提出使用福莱特法收敛的改进重力模型,并选取某城市既有线路延伸段开通作为案例,结合历史客流特点对模型参数进行标定,验证了模型的可行性和准确性。采用实际案例进行预测,并与改进双约束重力模型的预测结果进行对比。[结果及结论]福莱特法收敛的改进重力模型计算得到的客流分布加权平均误差为5.98人次,绝大部分预测结果误差在10人次以内,其预测精度比双约束重力模型的预测精度更高。

关键词 城市轨道交通; 客流预测; 重力模型

中图分类号 U293.13

DOI:10.16037/j.1007-869x.2025.04.005

Improved Gravity Model for Network Passenger Flow Distribution Prediction in the Initial Stage of the Existing Urban Rail Transit Extension Lines

LI Jiayi, ZHANG Longhao, SONG Xuyang, XU Ruihua

(Shanghai Key Laboratory of Rail Infrastructure Durability and System Safety, 201804, Shanghai, China)

Abstract [Objective] The launch of extension sections for existing urban rail transit lines will affect passenger flow distribution throughout the network. It is necessary to propose a better model to meet the accurate prediction demand of network passenger flow during the initial stage of the extension section. [Method] An improved gravity model using the Follett method is proposed, and the opening of an existing line extension section in a city is selected as a case. The model parameters are calibrated in combination with the historical passenger flow characteristics to verify the feasibility and accuracy of the model. The actual case is used for prediction and compared with the prediction results of the improved double-constraint gravity model. [Result & Conclusion] The weighted average error of

passenger flow distribution calculated by the improved gravity model with convergence of Follett method is 5.98 person-times, while most prediction results have an error of less than 10 person-times, which is even higher than the prediction accuracy of the double constrained gravity model.

Key words urban rail transit; passenger flow prediction; gravity model

城市轨道交通线路常采用分期建设、分段运营的方式。随着既有线路延伸段接入线网,线网可达性、乘客出行径路选择及线网客流分布同步改变^[1],线网的断面客流及换乘量等在时间及空间维度均有变化。为保障既有线路延伸段顺利开通、科学制定运输组织计划、提高线路运营效率,有必要准确预测既有线路延伸段开通初期的线网客流分布情况。

针对城市轨道交通网络拓扑结构变化初期的OD(起讫点)客运量预测,目前国内外许多学者已经有很多相关的研究,提出了很多客流预测方法,如时间序列法^[2]、模糊C均值聚类法^[3-4]、相关性分析法^[5]、重力模型法^[6-7]、非集计模型法^[8]及神经网络法^[9]等。重力模型法中,无约束重力模型法基于进出站量,依据两个地铁站之间的阻抗值,对OD客运量进行预测,能够反映实际的乘客行为,是较理想的预测方法。

考虑到无约束重力模型法不满足进出站守恒约束条件,文献[10]将福莱特法与无约束重力模型法结合,并应用到公路的交通分布预测中。在四阶段法交通规划预测交通分布主要使用的收敛方法中,福莱特法的收敛速度和收敛效果均表现良好。该方法既可以满足乘客进出站守恒的约束条件,又可以充分结合现状出行分布的实际情况,较好地预测既有线路延伸段开通后的客流分布。基于此,本文

^{*} 国家自然科学基金项目(72171174)

针对既有有线延伸段开通初期的 OD 客运量预测需求,综合考虑收敛速度、收敛效果、迭代次数等多方面因素,提出使用福莱特法收敛的改进重力模型。

1 预测模型的建立及修正

延伸段大多位于城市郊区,对城市整体线网拓扑结构和既有 OD 客运量的影响不大。因此,假设既有站之间的 OD 客运量,即既有站 OD 客运量,在短期内不会有明显变化;新站 OD 客运量(包含新站和新站之间的 OD 客运量,新站和既有站之间的 OD 客运量)由模型计算得到;新线开通之后的所有 OD 客运量,即全网 OD,由两个部分叠加得到。此外,既有有线延伸段开通对其周边既有站进出站量有一定的影响,故需要对其进行修正。

1.1 模型的建立

采用福莱特法收敛的改进无约束重力模型预测 OD 客运量,步骤如下:

步骤 1 基于城市轨道交通线网中列车区间运行时间、停站时间和换乘站的乘客换乘走行时间,采用 Dijkstra 法计算既有有线网交通阻抗和既有有线延伸段开通后全网交通阻抗。

步骤 2 构建既有有线延伸段开通初期预测客运量的改进重力模型,并对模型进行修正。无约束重力模型的数学表达为:

$$q_{ij} = k O_i^\alpha D_j^\beta f(c_{ij}) \quad (1)$$

式中:

q_{ij} ——起点为 i 站、终点为 j 站的 OD 客运量;

O_i —— i 站进站量;

D_j —— j 站出站量;

c_{ij} —— i 站与 j 站之间的阻抗;

$f(\cdot)$ ——阻抗函数,本文取 $f(c_{ij}) = c_{ij}^\gamma$;

α, β, γ, k ——重力模型参数。

步骤 3 使用福莱特法对模型进行收敛,输出计算结果。即:

$$q_{ij,m+1} = q_{ij,m} F_{O_i,m} F_{D_j,m} \left(\frac{L_i + L_j}{2} \right) \quad (2)$$

$$L_i = \frac{O_{i,m}}{\sum_j (q_{ij,m} F_{D_j,m})} \quad (3)$$

$$L_j = \frac{D_{j,m}}{\sum_i (q_{ij,m} F_{O_i,m})} \quad (4)$$

式中:

$O_{i,m}, D_{j,m}$ ——第 m 次迭代的 i 站进站量、 j 站

出站量;

$q_{ij,m}$ ——第 m 次迭代时, i 站至 j 站的 OD 客运量;

$F_{O_i,m}$ —— O_i 第 m 次迭代的增长系数, $F_{O_i,m} = O_i / O_{i,m}$;

$F_{D_j,m}$ —— D_j 第 m 次迭代的增长系数, $F_{D_j,m} = D_j / D_{j,m}$;

m ——迭代次数;

L_i, L_j —— i 站、 j 站的位置系数。

步骤 4 将计算得到的新站 OD 客运量与既有站 OD 客运量叠加,即可输出既有有线延伸段开通初期的预测全网全日 OD 客运量。

根据式(1)推论,使用重力模型计算 OD 客运量时,阻抗越大则 OD 客运量越小,阻抗越小则 OD 客运量越大。而这一结论显然不符合实际城市轨道交通客流规律。实际生活中,乘客仅乘坐一站地铁的情况较少。有研究表明,乘客选择城市轨道交通出行的平均运距多为 $1/4 \sim 1/3$ (l 为线路长度)^[11]。可见,存在 1 个阈值,当阻抗大于该阈值时,重力模型依然适用;而当阻抗小于该阈值时,阻抗与预测 OD 客运量之间呈正相关,与重力模型预测结果相反。

以 2021 年 12 月北京地铁线网客流数据为例计算可得,阻抗-全网全日 OD 客运量拟合曲线如图 1 所示。可以看出,结果符合上述规律。

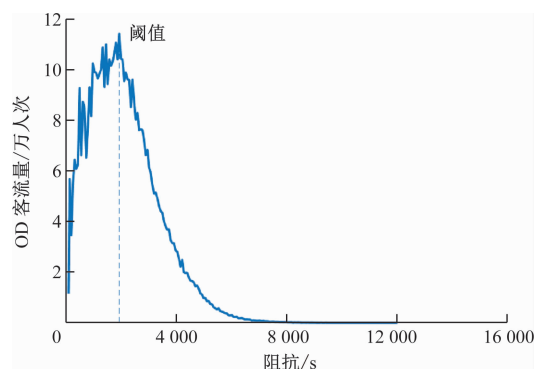


图 1 阻抗和 OD 客运量拟合图

Fig. 1 Impedance and OD passenger flow fitting diagram

对式(1)两边取对数得到式(5),并基于既有有线网数据,对阈值两边的系数分别标定,据此计算既有有线延伸段开通后的 OD 客运量。

$$\ln q_{ij} = \ln k + \alpha \ln O_i + \beta \ln D_j + \gamma \ln c_{ij} \quad (5)$$

1.2 模型修正

使用福莱特法收敛的改进重力模型对既有线延伸段开通后的 OD 客运量进行预测时,考虑到模型假设太过于理想化,实际的客流情况和模型预测有一定区别,故需要对模型进行修正。

线网拓扑结构变化后的客运量与城市轨道交通既有线网规模的大小有关。基于此,本文针对线网规模较大的城市(运营线路长度 ≥ 500 km)和线网规模较小的城市(运营线路长度 < 500 km),统计了不同线网规模城市在新线开通前后的阻抗比 δ ,结果如表1所示。

表1 线网规模不同城市新线开通前后的阻抗比统计

Tab.1 Impedance ratio statistics before and after new line openings in cities with different network scales

城市类型	δ	频数/次	比例/%
线网规模较小城市	1.0	5 473	55.3
	(1.0,1.1]	1 230	12.4
	(1.1,1.2]	1 436	14.5
	(1.2,1.5]	993	10.0
	> 1.5	768	7.8
线网规模较大城市	1.0	108 402	89.4
	(1.0,1.1]	9 119	7.5
	(1.1,1.2]	2 495	2.1
	(1.2,1.5]	645	0.6
	> 1.5	530	0.4

注: δ = 开通前阻抗/开通后阻抗;由于开通线路不会增大阻抗,故 $\delta \geq 1.0$ 。

由表1可以看出:当城市线网规模较大时, $\delta = 1.0$ 所占比例最高,达到了89.4%,即大部分乘客出行路径不会受到新线开通的影响;而当线网规模较小时, $\delta = 1.0$ 所占比例仅为55.3%,即有一半左右的乘客出行路径受到了新线开通的影响。由于线网规模较小时客流也较少,客流特征易受外界因素影响而不够稳定,故本文主要基于大型城市轨道交通既有网进行相关研究。

城市轨道交通既有线延伸段开通后,既有站,尤其是与延伸段较近车站的进出站量会受到较大的影响。主要变化客流为两类:诱增客流——延伸段的开通使得部分乘客出行意愿增加,从而产生相应的诱增客流,造成既有站进出站量的增加;转移客流——由于延伸线的开通,部分乘客会从既有站转移至新站出行,造成既有站进出站量的减少。既有站进出站量的最终取值要综合考虑诱增客流和

转移客流。

线网中延伸段可分为郊区延伸段和市区延伸段两种。市区线网密度高,转移客流较少,可近似看作仅受到诱增客流的影响;由市区前往郊区出行的客流也较少,可近似看作仅受到转移客流的影响。

对城市轨道交通既有线延伸段开通前后,本文提出衔接线路车站的进出站量修正如下:

$$O_{\text{new}} = O_{\text{old}} \prod_{z=1}^n \lambda_z \quad (6)$$

$$D_{\text{new}} = D_{\text{old}} \prod_{z=1}^n \lambda_z \quad (7)$$

式中:

O_{new} 和 O_{old} ——既有线延伸段开通后和开通前受新站影响的既有站进站量;

D_{new} 和 D_{old} ——既有线延伸段开通后和开通前受新站影响的既有站出站量;

n ——既有站距离延伸段的车站数量;

λ_z ——距离延伸段第 z 个既有站的修正系数。

此外,延伸段开通后,线路长度虽有所增加,但并非线路上的所有车站均受影响,还要根据历史客流信息、城市规模和城市轨道交通线网规模大小等情况,确定既有线延伸段开通后,需要修正的既有站的范围,即 n 的最大取值。

根据2013—2023年北京地铁相关数据,统计既有线延伸段开通对既有站进出站量的影响可知,既有线延伸段影响范围最大为5座车站,且需要根据线路的位置具体确定。

1.2.1 诱增客流修正

以北京地铁延伸段开通资料为例,对历史客流统计,得到诱增客流数据概况,如表2所示。由表2可见,对于诱增客流, λ_z 的取值为1.00~1.30,且 z 越大, λ_z 越小,二者呈负相关。具体取值还需参照车站原有客流及周边用地情况进行微调。

表2 诱增客流数据概况

Tab.2 Overview of induced passenger flow data

z	$O_{\text{old}}/$ (人次/d)	$D_{\text{old}}/$ (人次/d)	$O_{\text{new}}/$ (人次/d)	$D_{\text{new}}/$ (人次/d)	λ_z	
					进站	出站
1	1 989	1 819	2 443	2 301	1.23	1.26
2	5 304	5 670	7 257	7 782	1.11	1.09
3	5 361	4 890	7 833	7 094	1.06	1.06

1.2.2 转移客流修正

统计得到转移客流数据概况如表3所示。从统

计结果可知, λ_z 取值为 0.80 ~ 1.30, 且 z 越大, λ_z 越大。

表 3 转移客流数据概况

Tab.3 Overview of transfer passenger flow data

z	$O_{old}/$ (人次/d)	$D_{old}/$ (人次/d)	$O_{new}/$ (人次/d)	$D_{new}/$ (人次/d)	λ_z	
					进站	出站
4	37 677	35 996	30 242	28 932	0.80	0.80
5	4 989	3 955	4 022	3 077	1.00	0.97
6	19 970	19 983	18 168	19 307	1.13	1.24

2 模型预测效果验证

以某市既有线延伸段开通为例,使用本文所提福莱特法收敛的改进重力模型,对既有线延伸段开通初期的全网全日 OD 客运量进行预测,并和使用双约束法收敛的改进重力模型(以下简称“双约束重力模型”)预测的结果进行对比分析。两种模型在修正上均采用相同的参数。

对该市既有线延伸段开通前线网阻抗和 OD 之间的数据进行拟合,得到该市阻抗阈值为 1 950 s,即当阻抗 < 1 950 s 时,OD 客运量随着阻抗的增加而增加,当阻抗 > 1 950 s 时,OD 客运量随着阻抗的增加而减小。这一结论较符合实际生活规律。其中乘坐地铁出行的时间约为 0.5 h 的乘客占比最多。

根据该市既有线延伸段开通前各站的进站量、出站量、阻抗值及 OD 客运量,对式(5)进行标定。其中,工作日标定结果为:

$$\begin{cases} \ln q_{ij} = 0.38 \ln O_i + 0.48 \ln D_j + \\ 0.41 \ln c_{ij} + 6.82, & c_{ij} \leq 1\,950\text{ s} \\ \ln q_{ij} = 0.46 \ln O_i + 0.49 \ln D_j - \\ 2.09 \ln c_{ij} + 11.4, & c_{ij} > 1\,950\text{ s} \end{cases}$$

双休日标定结果为:

$$\begin{cases} \ln q_{ij} = \ln O_i + 0.77 \ln D_j + \\ 0.12 \ln c_{ij} + 6.17, & c_{ij} \leq 1\,950\text{ s} \\ \ln q_{ij} = 0.16 \ln O_i + 0.71 \ln D_j - \\ 1.39 \ln c_{ij} + 6.97, & c_{ij} > 1\,950\text{ s} \end{cases}$$

将标定结果代入福莱特法收敛的改进重力模型中,并对既有站进出站量进行修正,进一步计算可得到该市城市轨道交通既有线延伸段开通后的全日 OD 客运量预测结果。

以实际 OD 客运量为基础,使用不同预测方法来预测 OD 客运量,并统计预测 OD 客运量与实际

OD 客运量之间的绝对误差 τ ,结果如图 2 所示。

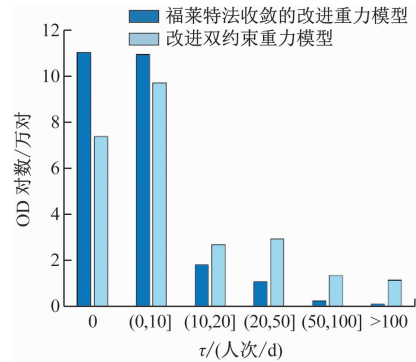


图2 两种模型预测结果的绝对误差统计

Fig.2 Absolute error statistics of prediction results for two models

结合图2可知:在福莱特法收敛的改进重力模型预测结果中, τ 为>10~20人次/d的占13%, τ 为>20~50人次/d的仅占6%, τ 为0的占44%,说明该方法预测误差较小;在改进双约束重力模型的预测结果中, τ 为>10~20人次/d以上的占32%, τ 为>20~50人次/d的占22%, τ 为0的占29%。从预测结果的比较来看,福莱特法收敛的改进重力模型预测精度更高。

分别计算不同模型预测结果的加权平均误差,福莱特法收敛的改进重力模型的加权平均误差为5.98人次/d,双约束重力模型的加权平均误差为16.2人次/d。

筛选阻抗值低于1 950 s的数据,统计不同模型预测结果的绝对误差,如图3所示。

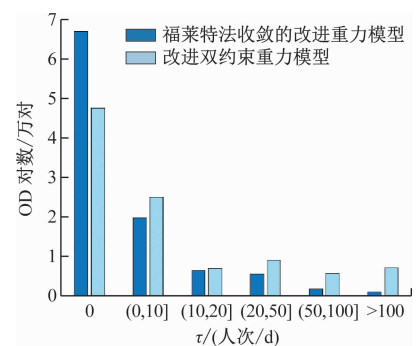


图3 阻抗小于1 950 s时不同模型预测结果的绝对误差

Fig.3 Absolute errors of different models' prediction results at impedance below 1 950 s

根据绝对误差统计结果进一步计算可得,福莱特法收敛的改进重力模型加权平均误差为6.17人次/d,双约束重力模型加权平均误差为16.62人次/d。可见,福莱特法收敛的改进重力模型更优。

3 结语

城市轨道交通既有线延伸段开通后,有必要对其初期客流分布情况进行预测。预测结果可以为相关运营管理部门提供辅助决策基础,进而支持城市轨道交通线网列车运行组织方案的优化,以不断改进车站运营服务水平。

从实际案例的预测结果来看,本文所提福莱特法收敛的改进重力模型对城市轨道交通既有线延伸段开通初期客流分布情况预测效果较好,误差较小,且该模型便于理解,适用于一线工作中。

参考文献

- [1] 杜世敏,徐瑞华,李志佳.城市轨道交通新线接入对既有网络客流分布的影响[J].都市快轨交通,2017,30(2):26.
DU Shimin, XU Ruihua, LI Zhijia. Impact on passenger flow distribution by new lines connected to the existing network of urban rail transit[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2017, 30(2): 26.
- [2] 徐明亮.新线接入条件下的轨道交通网络客流分布建模与影响评估研究[D].深圳:深圳大学,2020.
XU Mingliang. Research on modeling and impact assessment of passenger flow distribution in rail transit network under the condition of new line access[D]. Shenzhen: Shenzhen University, 2020.
- [3] 卢天伟,姚恩建,刘莎莎,等.城轨新线客流成长期进出站量短时预测研究[J].铁道学报,2020,42(5):19.
LU Tianwei, YAO Enjian, LIU Shasha, et al. Short-time forecast of entrance and exit passenger flow for new line of urban rail transit during growth period[J]. Journal of the China Railway Society, 2020, 42(5): 19.
- [4] 汪波,黄建玲,白云云.城市轨道交通网络新线开通客流预测与评估[C]//中国智能交通协会.第十届中国智能交通年会优秀论文集.北京:北京市交通委员会,2015:13.
WANG Bo, HUANG Jianling, BAI Yunyun. Passenger flow forecast and evaluation of new lines in urban rail transit network[C]//China Intelligent Transportation Systems Association. Excellent Paper Collection of the 10th China Intelligent Transportation Annual Conference. Beijing: Beijing Municipal Commission of Transport, 2015:13.
- [5] 郑清杰.城市轨道交通新线接入客流预测及网络客流分布研究[D].北京:北京交通大学,2016.
ZHENG Qingjie. Study on passenger flow forecast and distribution of urban rail transit network for new rail lines[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2016.
- [6] 杨天阳.城市轨道交通新线开通后短期客流交通分布预测[D].成都:西南交通大学,2018.
YANG Tianyang. Prediction of short-term passenger traffic distribution after the opening of the new urban rail transit line[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018.
- [7] WANG Y, YANG L, GENG Y, et al. OD matrix estimation for urban expressway[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2010, 10(2): 83.
- [8] 王大蕾.成网条件下城市轨道交通OD分布预测模型研究[D].北京:北京交通大学,2013.
WANG Dalei. Study on passenger flow distribution modeling for urban rail transit in networked conditions[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2013.
- [9] MUSSONE L, GRANT-MULLER S, CHEN H. A neural network approach to motorway OD matrix estimation from loop counts[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2010, 10(1): 88.
- [10] 王伟,黄蓉,华雪东,等.一种结合重力模型与Fratat模型的交通分布预测方法:201611087603.5[P].2018-10-12.
WANG Wei, HUANG Rong, HUA Xuedong, et al. A traffic distribution prediction method combining gravity model and Fratar model: 201611087603.5[P]. 2018-10-12.
- [11] 李文兵.城市轨道交通延伸线客流预测研究[D].西安:长安大学,2016.
LI Wenbing. Study on passenger flow forecast of urban rail transit extension line[D]. Xi'an: Chang'an University, 2016.

· 收稿日期:2022-12-22 修回日期:2023-02-20 出版日期:2025-04-10
Received:2022-12-22 Revised:2023-02-20 Published:2025-04-10
· 第一作者:李嘉仪,硕士研究生,1677115711@qq.com
通信作者:徐瑞华,教授,rxu@tongji.edu.cn
· ©《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

敬请关注《城市轨道交通研究》微信视频号

《城市轨道交通研究》微信视频号聚焦轨道交通行业内的热点问题、焦点问题,以及新技术、新成果,邀请相关专业领域内的专家学者及高级管理人员以视频方式解读和评述,是您及时获知行业资讯、深度了解轨道交通各专业领域的最佳平台。您还可以通过该平台查阅往期论文、查询稿件进度、开具论文录用通知书。敬请关注。

