文章编号：1672-5328(2016)03-0029-06　中图分类号：U491.1+4　文献标识码：A　DOI:10.13813/j.cn11-5141/u.2016.0305

城市轨道交通网络新线接入后的客流预测

张永生[1]，姚恩建[1]，蔡昌俊[2]，杨志强[2]
(1.北京交通大学交通运输学院，北京 100044；2.广州地铁集团有限公司，广东 广州 510310)

摘要：城市轨道交通网络新线接入后，网络拓扑结构和客流时空规律都将发生较大变化。提出通过可达性指标将进出站量预测、OD分布量预测、基于路径选择模型的随机客流分配等阶段关联，构建客流预测模型。进出站量预测时，构建土地利用替代指标，避免对新车站周边土地利用、社会经济属性等进行调查；同时由目的地选择效用计算得到车站可达性指标，描述车站位置对进出站量的影响。OD分布量预测时，构建目的地选择模型，可适应拓扑变化后的场景，模型中OD可达性指标由路径选择效用计算得到。构建的路径选择模型，综合考虑了影响乘客路径选择的各因素。最后，对广州市地铁6号线接入后的客流进行建模预测，各模型参数均符合统计检验要求且客流预测精度较高。

关键词：交通规划；城市轨道交通；客流预测模型；新线接入

Forecasting Passenger Volume with the New Rail Transit Lines in Operation

Zhang Yongsheng[1], Yao Enjian[1], Cai Changjun[2], Yang Zhiqiang[2]
(1.School of Traffic and Transportation, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. Guangzhou Metro Group Co., Ltd., Guangzhou Guangdong 510310, China)

Abstract: The urban rail transit network topology and the spatial/temporal characteristics of passenger flow change significantly with the new rail transit lines in operation. This paper develops a passenger volume forecasting model using accessibility index in connecting entrance/egress passenger forecasting, OD distribution, and assignment based on route choice model. To forecast passenger entrance/egress volumes, the paper replaces land use with an alternative index to circumvent the investigation on land use and socio-demographics surrounding new stations. The station accessibility index is used based on destination choice utility to show the impacts of station location on entrance/egress passenger volumes. To forecast OD distribution, the study develops destination choice model that is tailored to different network topology. The OD accessibility index is calculated using route choice utility. The route choice model is developed with the consideration of various factors in passengers' route choice. Finally, the paper illustrates the passenger volume forecasting for the Guangzhou rail transit network with the new Metro Line 6. The results show that the estimated model parameters meet the statistical requirements and the forecasting results are highly accurate.

Keywords: transportation planning; urban rail transit; passenger volume forecasting model; new lines in operation

收稿日期：2016-05-09
基金项目：国家973计划资助项目“大城市综合交通系统的基础理论与实证研究——多方式交通运行的协同组织与控制(课题三)”(2012CB725403)、国家科技支撑计划资助项目“成网条件下城轨交通运输组织关键技术与系统研制”(2011BAG01B01)
作者简介：张永生(1988—)，男，山东日照人，在读博士研究生，主要研究方向：城市交通运输规划与管理。E-mail: 12114241@bjtu.edu.cn

为缓解道路交通压力，中国很多大中城市开始建设城市轨道交通系统，尤其是北京、上海、广州、深圳等超大城市的轨道交通系统已形成了网络化格局。客流预测可以指导车站的规划设计、进出站客流组织、换乘客流组织、列车运行计划制定等，对城市轨道交通的规划、建设、运营有着重要意义。但城市轨道交通网络新线接入后，网络拓扑结构、客流时空分布规律等都将发生较大变化，同时，城市轨道交通的规划、建

设、运营管理等部门要求客流预测的精度高、时间粒度小、操作简单易行等，给客流预测带来了很大的挑战。

1 新线接入后的客流预测方法

城市轨道交通客流指标一般包括进出站量、OD分布量、断面流量、换乘量和线路流量等，其中断面流量、换乘量、线路流量是基于路径选择模型的随机客流分配的结果。乘客路径选择模型、OD分布量预测模型、进出站量预测模型是城市轨道交通客流预测模型的三个核心环节，本文通过可达性指标将各个环节关联，以改善传统四阶段方法各环节参数一致性较差、难以测算诱增交通量等缺点。如图1所示，建模时，OD可达性可基于路径选择模型计算得到，车站可达性可基于目的地选择模型计算得到；预测时，进出站量是OD分布量预测模型的输入，OD分布量是基于路径选择模型的随机客流分配的输入。

1.1 新线接入后进出站量预测

进出站量一般与车站周边的土地利用、车站所处的位置、车站周边的交通环境等因素有关，但该部分因素的调查需要投入大量的人力、物力、财力，未来的发展趋势也不易预测。轨道交通运营部门有大量的进出站量数据、全网各车站位置信息和以往新线开通的记录，因此，本文基于轨道交通运营部门掌握的资料，研究新线接入后全网各车站进出站量的预测方法。在新线接入的条件下，根据有无历史数据，将车站分为既有车站和新车站。

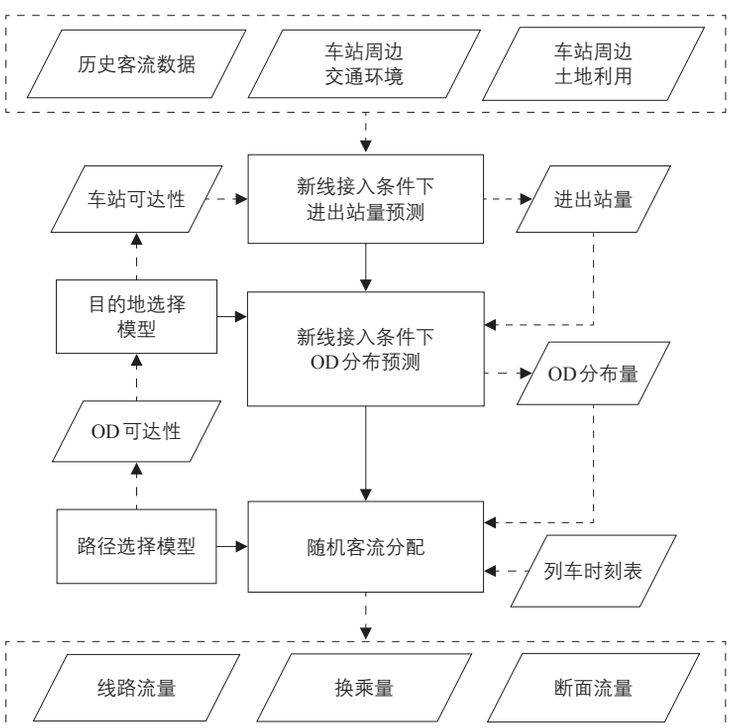

图1 城市轨道交通网络新线接入后客流预测流程

Fig.1 Flow diagram of passenger volume forecasting with the new rail transit lines in operation

1）既有车站。

既有车站进出站量预测有一定的历史数据和以往新线开通对既有车站进出站量影响的支持。根据客流生成机理[1]，新线对既有车站的影响可从车站的一次吸引范围[2]和二次吸引范围进行分析，在此基础上，结合新线接入前的进出站量，即得到新线接入后既有车站进出站量预测值

$$Q^{'}=\begin{cases}Q\cdot(1+a_i), & Q<\dfrac{q_i}{a_i}\\ Q+q_i, & Q\geq\dfrac{q_i}{a_i}\end{cases} \tag{1}$$

式中：$Q^{'}$ 为新线接入后既有车站的日均进出站量预测值/(人次·d^{-1})；Q 为新线接入前既有车站的日均进出站量/(人次·d^{-1})；a_i，q_i 为符合条件 i 的修正系数和修正量/(人次·d^{-1})。

2）新车站。

由于缺乏历史数据，时间序列预测方法等一般性的数理统计模型无法应用于新车站进出站量预测。同时，新车站周边土地利用、社会经济属性等数据的调查难度，也使得难以基于传统的发生吸引量预测模型进行进出站量预测[3]。本文从充分利用现有数据、简化输入数据等角度出发，建立一种新车站进出站量预测的方法。通过构造历史数据库，描述车站位置、土地利用性质、土地利用规模指标与进出站量的映射关系，实现新车站进出站量的预测。其中，车站位置、土地利用性质和土地利用规模指标是划分车站类型的依据，各指标值用正整数唯一标识。

$$DB:O=f(SJ,TX,TS), \tag{2}$$

式中：DB 为历史数据库；O 为日均进站量/(人次·d^{-1})，进站量与出站量相等；SJ 为车站位置指标；TX 为车站土地利用性质指标；TS 为车站土地利用规模指标。各指标值唯一标识一类车站，通过映射关系可以得到该类车站平均的进出站量。建模时，车站位置指标通过既有路网中车站可达性进行划分；土地利用性质指标利用土地利用位置指标相同车站的早(晚)高峰进站量比例、早(晚)高峰出站量比例等通过模糊聚类进行划分；土地利用规模指标通过每类土地利用性

质下各车站全日进出站量进行划分。预测时，新车站各对应指标值可从地图上获得，通过在历史数据库中进行模式匹配，即可获得对应的进出站量。

车站位置指标SJ取正整数，1为郊区站，2为市区站，即

$$SJ=\begin{cases}1, & AZ^r<AY\\ 2, & AZ^r\geqslant AY\end{cases} \tag{3}$$

式中：若车站可达性指标 AZ^r 小于阈值 AY，则该站为郊区站，否则为市区站。

车站可达性 AZ^r 表示该车站客流吸引能力和可达路网各站的方便程度，本文用目的地选择效用的合成值表示：

$$AZ^r=\ln\left(\sum_{s\in S}\exp(DE^{rs})\right), \tag{4}$$

式中：s 为目的地；S 为目的地集合；DE^{rs} 为在 r 站选择 s 站为目的地的效用。

1.2 新线接入后 OD 分布量预测

新线接入后，新 OD 对缺乏历史数据，而既有 OD 对在新车站的影响下也会发生不同程度的变化。本文基于非集计理论构建目的地选择模型，通过分析影响 OD 分布的因素，实现新线接入后 OD 分布量的预测。模型考虑的因素主要包括目的地吸引程度、起点到目的地出行方便程度(即 OD 可达性)、起点与目的地等周边的土地利用、起点与目的地的线位关系等。基于非集计理论，从起点 r 出发的城市轨道交通乘客 n 选择目的地 s 为终点的概率

$$F^{rs}=O^r\cdot Q_n^{rs}, \tag{5}$$

$$Q_n^{rs}=\frac{\exp(DE_n^{rs})}{\sum_{j\in S}\exp(DE_n^{rj})}, \tag{6}$$

$$DE^{rs}=a\cdot D^s/10\,000+\phi\cdot C^{rs}+\eta\cdot XZ^{rs}+\lambda\cdot GM^{rs}+\mu\cdot TX^{rs}+\omega\cdot AOD^{rs}, \tag{7}$$

式中：F^{rs} 为 OD 对 rs 间的日均 OD 分布量/(人次·d^{-1})；O^r 为起点 r 的日均进站量/(人次·d^{-1})；Q_n^{rs} 为在起点 r 的城市轨道交通乘客 n 选择目的地 s 的概率/%；DE_n^{rs} 为在起点 r 选择 s 为目的地的效用值；j 为目的地集合 S 中的某一目的地；D^s 为目的地 s 的日均出站量/(人次·d^{-1})，表示目的地的吸引程度；C^{rs} 为起点 r 与目的地 s 之间的票价/元；XZ^{rs} 为标记起点 r 与目的地 s 等周边土地利用性质指标的0-1哑元变量；GM^{rs} 为标记起点 r 与目的地 s 等周边土地利用强度指标的0-1哑元变量；TX^{rs} 为标记起点 r 与目的地 s 线位关系指标的0-1哑元变量；AOD^{rs} 为起点 r 与目的地 s 之间的 OD 可达性，表示 OD 对间的交通方便程度；a, ϕ, η, λ, μ, ω 为待定参数，可根据既有 OD 分布量利用加权的极大似然估计法得到[4-5]。

本文以路径选择效用的合成值表示 AOD^{rs}，即

$$AOD^{rs}=\ln\left(\sum_{k\in M_n^{rs}}\exp(V_{nk}^{rs})\right), \tag{8}$$

式中：V_{nk}^{rs} 为起点 r 与目的地 s 之间路径 k 的效用值；M_n^{rs} 为起点 r 与目的地 s 之间有效路径集合。

1.3 随机客流分配

基于路径选择模型利用MSA(Method of Successive Average)法进行随机客流分配，可以获得换乘量、断面流量和线路流量等客流指标值。路径选择模型描述了乘客 n 选择某条路径的概率，即

$$p_{nk}^{rs}=\frac{\exp(V_{nk}^{rs})}{\sum_{m\in M_n^{rs}}\exp(V_{nm}^{rs})}, \tag{9}$$

$$V_{nk}^{rs}=\beta_1\cdot CT_k^{rs}+\beta_2\cdot HC_k^{rs}+\beta_3\cdot HT_k^{rs}+\beta_4\cdot AC_k^{rs}+\beta_5\cdot SC_k^{rs}, \tag{10}$$

式中：p_{nk}^{rs} 为乘客 n 从起点 r 到目的地 s 选择路径 k 的概率；V_{nm}^{rs} 为起点 r 与目的地 s 之间路径 m 的效用值；CT_k^{rs} 为乘车时间/h；HC_k^{rs} 为换乘次数/次；HT_k^{rs} 为换乘时间/h；AC_k^{rs} 为角度费用/km，表征路径走向的非直线程度[6-7]；SC_k^{rs} 为舒适程度；$\beta_1\sim\beta_5$ 为待定参数，一般根据调查数据利用极大似然估计法得到。

2 模型应用与案例分析

广州市地铁6号线于2013年底开通，全长24.4 km，共设22座车站(含7座换乘站)，贯通市中心，连接老城区和一些大型居住区，与1号线、2号线、3号线和5号线等存在换乘关系(见图2)，使得广州市轨道交通网络结构和客流时空分布规律发生巨大改变。本文以地铁6号线接入轨道交通线网为背景，验证所构建的新线接入后客流预测模型的预测效果：以6号线开通前的网络结构和客流数据为基础，构建客流预测模型，对6号线接入后的客流进行预测，通过将预测值与真实值进行对比，验证模型的预测效果。

本文利用2012年9月乘客实际出行路径的抽样调查数据，对模型待定参数进行标

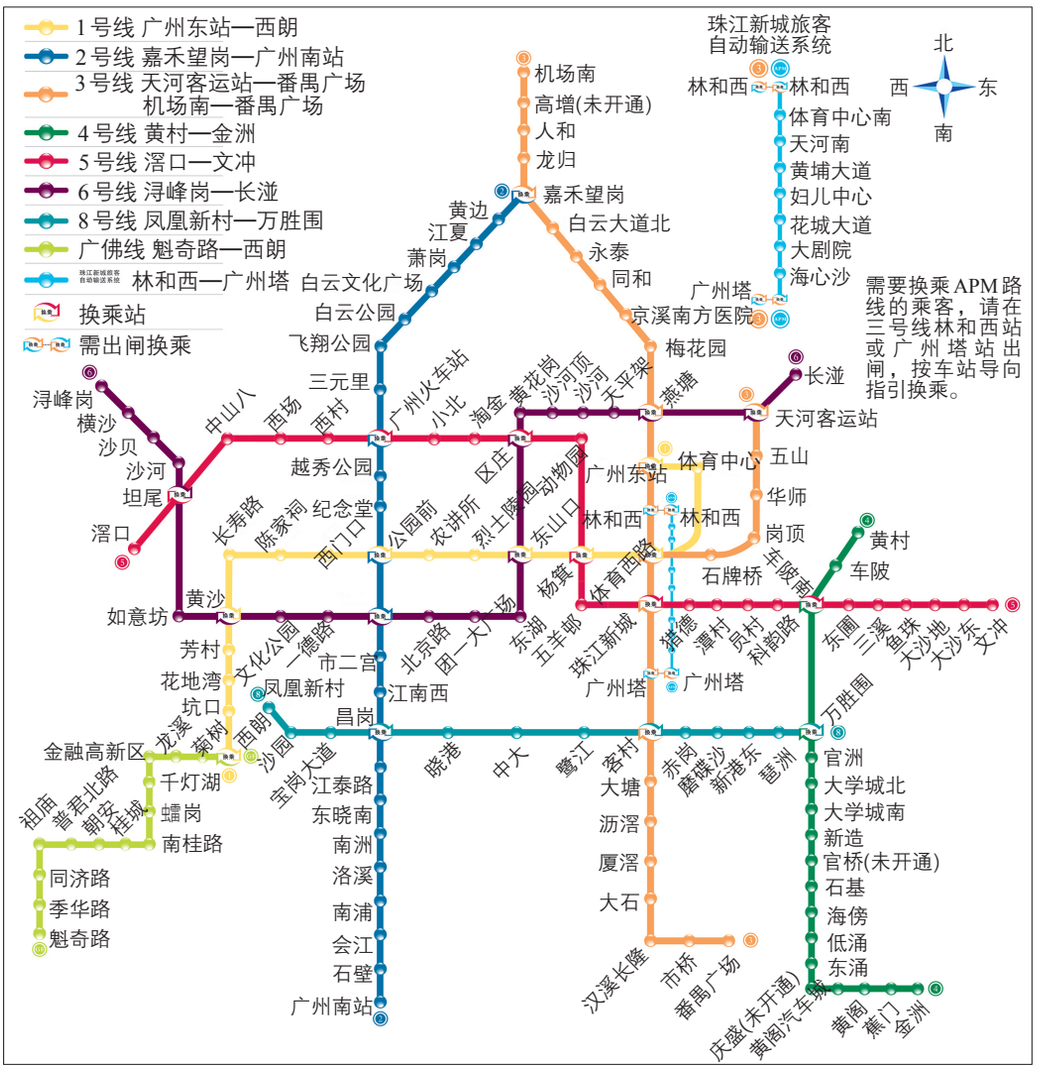

图2 广州市地铁6号线接入后轨道交通线网

Fig.2 Rail transit network with the new Metro Line 6 in Guangzhou

资料来源：广州地铁集团有限公司。

表1 路径选择模型参数标定结果

Tab.1 Calibration of route choice model

变量	高峰系数(t值)	平峰系数(t值)
乘车时间/h	−6.775 2(−6.423)	−5.302 9(−10.034)
换乘次数/次	−0.485 9(−7.752)	−0.623 4(−10.629)
换乘时间/h	−11.251 9(−10.034)	−9.673 1(−10.477)
角度费用/km	−2.535 2(−4.187)	−3.119 9(−7.049)
舒适程度		0.177 4(3.279)
调整 ρ^2	0.688 9	0.652 3
样本量	5 453	9 946

定。数据包括2012年9月平均OD分布量、列车运行计划、各站进出站量分时数据，以及2010年3号线北延线开通前后的进出站数据。得到的模型结果见表1~表4。

表1和表2中，各参数的 t 值绝对值均大于1.96，即在95%置信水平下认为各参数估计值可信； ρ^2 大于0.2，说明模型对数据的拟合效果好，满足检验要求。

表1的结果显示，平峰时舒适程度系数大于0，说明平峰时乘客更愿意选择出行舒适的路径。其他各因素的系数小于0，说明乘客更愿意选择乘车时间短、换乘次数少、换乘时间短、角度费用低的路径。上述结果符合实际情况。

在表2中，0-1哑元变量的取值规则为：当两个车站中，一个属于居住或居住占优，另一个属于办公或办公占优类时，土地利用性质哑元 XZ^{rs} 为1，否则为0；当起点全日进站量与目的地全日出站量之和大于5万人次·d^{-1}时，土地利用强度哑元 ZM^{rs} 为1，否则为0；当起点r和目的地s在同一条线路上时，线位关系哑元 TX^{rs} 为1，否则为0。目的地日均出站量系数为正值，说明车站客流吸引能力越强，选择该车站为目的地的乘客

越多；线位关系哑元为正，说明当终点站与起始站在同一条线路时，有更多的乘客选择该站为目的地车站。

在表3中，对应车站位置列，车站可达性小于5的车站为郊区车站，用1标识，否则为市区车站，用2标识；郊区车站类型1，2，3，4，5分别代表居住、居住占优、办公占优、枢纽、综合；市区车站类型1，2，3，4，5，6分别代表居住、办公、居住占优、办公占优、枢纽、综合。

根据以上模型结果，对地铁6号线接入后的客流进行预测，误差指标用平均绝对误差百分比(MAPE, Mean Absolute Percent Error)表示。各客流指标的对比值来自广州市地铁运营管理部门提供的2014年3月工作日均值，其中，进出站量为通过刷卡数据统计得到的真实值，换乘量和线路流量为该运营管理部门使用清分算法得出的估算值。表5展示了各客流指标平均的预测效果，误差都小于9%，满足运营部门的实际需求。从图3~图5可看出，各点均靠近45度线，说明每个站的进站量、出站量和每个换乘站的换乘量预测值都很理想。由图6可以看出，各条线路的客流量预测值与真实值相差不大，说明预测效果较好。上述各客流指标精确的预测结果，证明了本文提出的客流预测方法的优越性。

3 结语

本文提出的城市轨道交通网络新线接入后的客流预测模型利用车站可达性指标和OD可达性指标将各预测环节关联，避免传统四阶段法中各阶段相互孤立的弊端。同时，充分考虑数据获取的方便性，利用刷卡数据提取出行规律进行模型构建，避免大规模的土地利用、社会经济属性、目的地选择情况等数据的调查，在满足城市轨道交通规

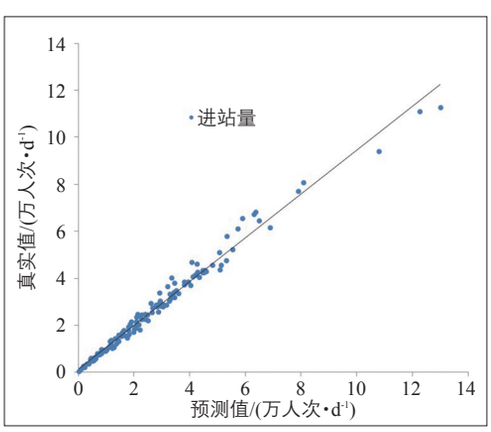

图3 进站量预测效果

Fig.3 Performance of passenger entrance volume forecasting

表2 目的地选择模型参数标定结果

Tab.2 Calibration of destination choice model

变量	系数值	t值
目的地日均出站量/(人次·d⁻¹)	0.237 0	37.386
票价/元	−0.066 5	−4.535
土地利用性质哑元	0.228 7	8.104
土地利用强度哑元	0.127 6	3.822
线位关系哑元	0.456 0	14.140
OD可达性	0.348 5	20.780
调整 p^2	0.205 68	

表3 新车站进出站量预测的历史数据库

Tab.3 Historical database for passenger entrance/egress volume forecasting on new stations

车站位置	车站类型	车站规模	最大日均进站量/(人次·d⁻¹)	最小日均进站量/(人次·d⁻¹)	最大日均出站量/(人次·d⁻¹)	最小日均出站量/(人次·d⁻¹)
1	1	1	44 245	40 128	42 831	40 748
1	1	2	37 180	27 559	36 820	28 035
1	1	3	18 070	7 171	17 221	7 023
1	2	1	70 236	51 347	61 497	50 626
…	…	…	…	…	…	…
2	6	3	43 070	27 619	42 380	28 710
2	6	4	21 438	12 466	20 673	11 878
2	6	5	5 160	5 160	4 962	4 962

表4 既有车站进出站量预测模型参数

Tab.4 Parameters of passenger entrance/egress volume forecasting model for existing stations

条件	1	2	3	4
性质描述	地铁车站周边公共汽车线路与地铁新线部分重合、并行、相交	与新线车站一次吸引范围重叠	为新增换乘站	其他情况
修正系数 α_i	−0.024	−0.035	0.091	0.039
修正量 q_i	−867	−1 782	2 882	737

表5 模型预测误差

Tab.5 Model estimation error %

误差指标	进站量	出站量	换乘量	线路流量
MAPE	7.76	8.06	8.20	5.84

划、建设、运营管理等部门对客流数据预测时间粒度、预测精度需求的同时，极大降低了对输入数据的获取难度、提高了模型的实用性和便捷性。以广州市地铁6号线接入既有线网为例进行建模和预测，验证了所构建模型在输入数据上的易获取性、在统计检验上的显著性和在客流预测上的高精度性。

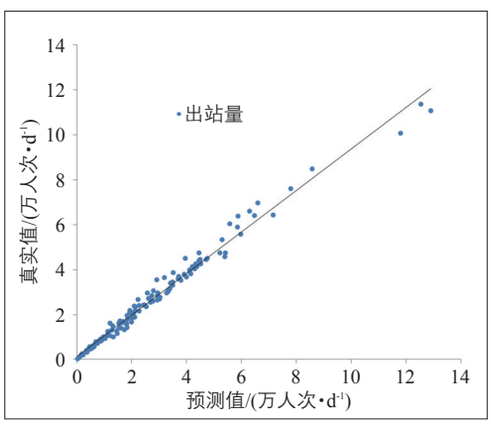

图4 出站量预测效果

Fig.4 Performance of passenger egress volume forecasting

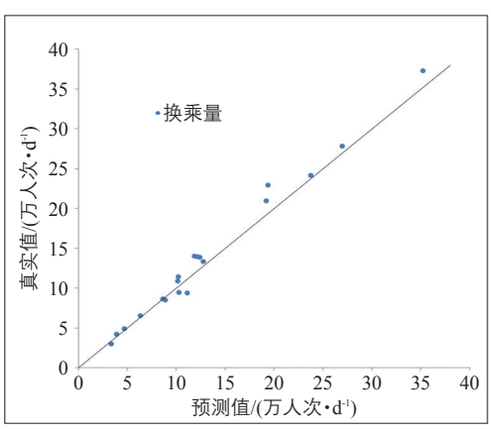

图5 换乘量预测效果

Fig.5 Performance of passenger transfer volume forecasting

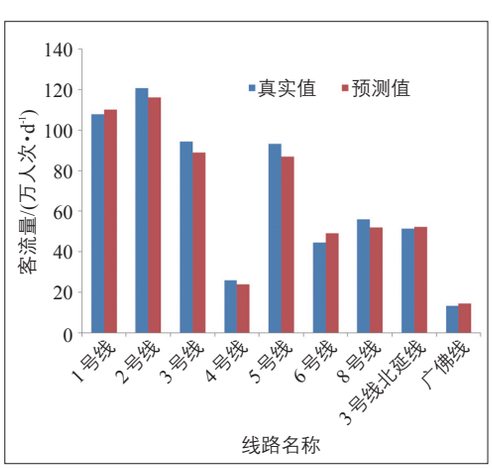

图6 客流量预测结果

Fig.6 Prediction performance of line passengers volume

参考文献：

References:

[1] 姚恩建，程欣，刘莎莎，张锐. 基于可达性的城轨既有站进出站客流预测[J]. 铁道学报，2016，38(1)：1-7.
Yao Enjian, Cheng Xin, Liu Shasha, Zhang Rui. Accessibility-Based Forecast on Passenger Flow Entering and Departing Existing Urban Railway Stations[J]. Journal of the China Railway Society, 2016, 38(1): 1-7.

[2] 李俊芳，杜慎旭，钱卫力. 城市轨道交通车站客流吸引范围重叠区域划分模型[J]. 城市交通，2015，13(6)：61-64.
Li Junfang, Du Shenxu, Qian Weili. Overlapping Region Partition Model for Urban Rail Transit Station Passenger Attraction[J]. Urban Transport of China, 2015, 13(6): 61-64.

[3] 光志瑞. 基于土地利用和可达性的城市轨道交通进出站客流量预测[D]. 北京：北京交通大学，2013.
Guang Zhirui. Passenger Flow Prediction for Urban Railway Station's Entrance and Exit Based on Land-Use and Accessibility[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2013.

[4] Wang Dalei, Yao Enjian, Yang Yang, Zhang Yongsheng. Modeling Passenger Flow Distribution Based on Disaggregate Model for Urban Rail Transit[C]//Sun Fuchun, Hu Dewen, Liu Huapin. Foundations and Practical Applications of Cognitive Systems and Information Processing. Beijing: Springer, 2014: 715-723.

[5] 蔡昌俊，姚恩建，张永生，刘莎莎. 基于AFC数据的城轨站间客流量分布预测[J]. 中国铁道科学，2015，36(1)：126-131.
Cai Changjun, Yao Enjian, Zhang Yongsheng, Liu Shasha. Forecasting of Passenger Flow's Distribution Among Urban Rail Transit Stations Based on AFC Data[J]. China Railway Science, 2015, 36(1): 126-131.

[6] Sebastian R, Munoz J C, Grange L D. A Topological Route Choice Model for Metro [J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2011, 45(2): 138-147.

[7] 张永生，姚恩建，代洪娜. 成网条件下地铁换乘量预测方法研究[J]. 铁道学报，2013，23(11)：1-6.
Zhang Yongsheng, Yao Enjian, Dai Hongna. Transfer Volume Forecasting Method for the Metro in Networking Conditions[J]. Journal of the China Railway Society, 2013, 23(11): 1-6.