

基于长期客流数据的北京城市轨道交通客流演变分析*

杨志刚¹ 贾慧慧² 陈 峰^{3,4} 王子甲^{3,5}

(1. 北京市城市规划设计研究院, 100045, 北京; 2. 北京市首都规划设计工程咨询开发有限公司, 100031, 北京;

3. 北京交通大学北京市轨道交通线路安全与防灾工程技术研究中心, 100044, 北京;

4. 中国石油大学(北京)机械与储运工程学院, 102249, 北京;

5. 北京交通大学土木建筑工程学院, 100044, 北京//第一作者, 正高级工程师)

摘 要 构建了考虑乘客异质性的客流分配方法和基于信息熵的均衡度模型。选取北京城市轨道交通 2009 年、2012 年、2015 年、2018 年等跨度 10 年的 AFC(自动售检票)系统数据,经过客流分配得到全网早高峰时刻断面客流量;利用 GIS(地理信息系统)平台将其可视化,并结合城市发展和城市轨道交通新线开通情况,分析北京城市轨道交通近 10 年的线网客流演变。分析显示:高峰小时进出站客流量、断面客流量均在 2009—2012 年迅速增长,在 2015 年略有下降,而在 2015—2018 年又恢复增长;最大客流量出现的位置基本稳定,仅个别位置发生改变。

关键词 北京;城市轨道交通;客流演变

中图分类号 U293.1⁺3:U231

DOI:10.16037/j.1007-869x.2022.09.025

Passenger Flow Evolution Analysis of Beijing Urban Rail Transit Network Based on Long-term Passenger Flow Data

YANG Zhigang, JIA Huihui, CHEN Feng, WANG Zijia

Abstract A passenger flow distribution method considering passenger heterogeneity and an equilibrium degree model based on information entropy are constructed. By selecting AFC (automatic fare collection) data of Beijing urban rail transit in 2009, 2012, 2015 and 2018. The sectional passenger flow of the whole network during the morning rush hour is obtained through the assignment model. The results are visualized by GIS (geographical information system) platform, and the passenger flow evolution of Beijing rail transit network in recent ten years is analyzed in combination with urban development and new line opening. Analysis results show that passenger flow during peak hour increased rapidly in 2009—2012, and decreased slightly in 2015, and resumed to increase in 2015—2018. The locations where the maximum passenger

flow occurs are basically consistent, with only a few locations changing.

Key words Beijing; urban rail transit; passenger flow evolution

First-author's address Beijing Municipal Institute of City Planning & Design, 100045, Beijing, China

2009—2018 年是北京城市轨道交通迅速发展并实现网络化运营的重要阶段。2018 年北京城市轨道交通运营线路共 21 条(新增了 12 条),线路总长为 636.8 km,较 2009 年新增线路长度为 408.8 km;2018 年运营车站 391 座,较 2009 年新增车站 244 座;2018 年工作日客运量达到 1 200 万人次/d,较 2009 年增长了 670 万人次/d^[1-2]。研究这一时期客流的时空演变规律对提高城市轨道交通线网及车站规划建设水平、促进城市轨道交通智能化运营有着重要作用^[3]。

目前,国内外对城市轨道交通客流的研究主要集中在客流分配、预测及车站客流特征等方面,对客流演变的研究较少^[4],尤其缺乏长跨度时间的分析。由于 AFC(自动售检票)系统无法直接统计断面客流量,需采用客流分配方法得到。在参考前人关于客流分配方法的研究^[5-7]基础上,利用 AFC 系统数据的特点,构建了考虑乘客异质性的分配方法。传统的客流分析方法是借助饼图、折线图等二维图形,但这些方式缺失空间信息,可读性差^[8],而基于 GIS(地理信息系统)平台的可视化方法弥补了这些不足,成为大数据分析的重要方法。信息熵^[9]是刻画城市空间规律的重要特征量。本文基于信息熵理论,分析了北京市近 10 年的城市轨道交通客流分布的空间变化。

* 中央高校基本科研业务费专项资金课题(2019JBZ107)

综上,本文首先利用 AFC 系统数据的特点构建了考虑乘客异质性的客流分配方法及基于信息熵的均衡度模型,然后利用北京城市轨道交通 2009 年、2012 年、2015 年、2018 年的 AFC 数据,经过客流分配得到早高峰断面客流量,在 GIS 平台上将其可视化,结合城市轨道交通新线开通情况、城市规划等分析北京城市轨道交通近十年的成长规律。

1 北京城市轨道交通客流分配方法与均衡性度量

1.1 考虑乘客异质性的客流分配方法

基于乘客异质性的城市轨道交通客流分配方法充分考虑了在路径选择方面的乘客异质性和时间异质性,主要步骤如下:

1) 清洗地铁 AFC 系统数据。提取早高峰时段的 OD(起讫点)客流矩阵,计算 OD 对 r 至 s (r 为起点, s 为终点)间客流量 q_{rs} 。

2) 对乘客进行分类。首先,从时间和空间两个维度进行规律性出行筛选:时间上,计算统计时段内所有乘客的平均出行天数,小于平均水平的乘客为“偶然性出行类乘客”,其余乘客在空间维度进行进一步筛选;空间上,对剩余乘客的起点进行统计,利用式(1)计算某乘客最频繁进站点的进站次数占总出行次数的比例 F ,若 F 大于某一界限值,则认为该乘客属于“规律性出行类乘客”,否则归入“偶然出行类乘客”中。根据研究,可选取乘客占比约为 80%所对应的 F 值为界限值^[10]。

$$F = \frac{M_{b,\max}}{\sum_{b=1}^Z M_b} \tag{1}$$

式中:

- b —— 站点编号;
- Z —— 站点总数;
- M_b —— 某站点某乘客出行的次数。

然后基于主题模型^[11]和 K-means 算法对“规律性出行类乘客”进一步分类。利用主题模型计算得到每位乘客对应多种出行规律的概率分布,将其作为每位乘客的特征值。采用 K-means 聚类算法对不同的乘客进行聚类。本研究中,用不同时间对应出行次数的不同来表示相应的主题,具体算法如下:

$$z \sim M(1, P) \tag{2}$$

$$u \mid z \sim M(S, W_z) \tag{3}$$

$$p(u) = \sum_z p(z) \prod_{s=1}^S p(u_s \mid z) \tag{4}$$

式中:

- z —— 相应主题;
 - u —— 乘客编号;
 - P —— 主题分布对应的比例;
 - M —— 多项式分布,从中选取一个主题;
 - S —— 出行总次数;
 - W_z —— 相应主题出行的周规律分布;
 - $p(u)$ —— 乘客 u 的出行概率分布。
- 其中, P 和 W_z 均由 EM 算法估算得来。

3) 利用 K 短路径算法^[6]确定有效路径集,定义第 n 类乘客可能选择的有效路径集为 $K_{rs,n}$ 。

4) 利用式(5)一式(7)分别计算第 n 类乘客在各条路径的广义出行费用 $C_{rs,k,n}$ (k 为 r 至 s 间第 k 条路径)和最小出行费用函数 C_{\min} ,其中 $k \in K_{rs,n}$, $n \in N$, $f_c(w)$ 为拥挤度的量化表示,具体取值见式(8)。各参数定义见表 1,本研究使用贝叶斯推断法^[12]对相关参数(λ_n 、 α_n 、 β_n)进行标定。

表 1 模型参数定义
Tab. 1 Definition of model parameters

参数	定义
$c_{rs,k,n}$	第 n 类乘客的固定费用
$t_{rs,IV}$	OD 对 r 至 s 间乘客乘车时间总和
$t_{\text{run},i}$	第 i 个区间的列车运行时间
$t_{rs,TR}$	乘客换乘时间
$t_{\text{trf},j}$	换乘走行时间
α_n	第 n 类乘客对应的换乘惩罚参数
λ_n	第 n 类乘客对应的在车、候车时间的惩罚参数
p_n	列车拥有的座位数量
A, η	乘客数量大于座位数量且小于最大载客量时的校正参数
$\varepsilon_{rs,k,n}$	第 n 类乘客误差项
$t_{rs,WT}$	OD 对 r 至 s 间乘客候车时间总和
$t_{\text{dw},j}$	第 j 个车站列车停站时间
h_l	线路 l 的发车间隔
$n_{rs,j,k}$	OD 对 r 至 s 间在换乘站 j 处发生的累计换乘次数
β_n	第 n 类乘客对应的换乘惩罚调整参数
x_w	列车的实际载客量
p_c	列车额定载客量
B, ψ	乘客数量大于最大载客量时的校正参数

注:下标 IV 表示乘车总时间;下标 WT 表示候车总时间; j 表示车站编号;下标 dw 表示停站时间。

$$C_{rs,k,n} = c_{rs,k,n} + \varepsilon_{rs,k,n} \tag{5}$$

$$c_{rs,k,n} = \lambda_n (t_{rs,IV} + t_{rs,WT}) [1 + f_c(x_w)] + t_{rs,TR} \tag{6}$$

由式(5)、式(6)可得:

$$C_{rs,k,n} = \lambda_n \left(\sum_i t_{\text{run},i} + \sum_j t_{\text{dw},j} + \sum \frac{h_l}{2} \right) \cdot$$

$$[1 + f_c(x_w)] + [\sum_j t_{\text{trf},j} \alpha_n(n_{rs,j,k})^{\beta_n}] + \varepsilon_{rs,k,n} \quad (7)$$

$$f_c(x_w) = \begin{cases} 0, & x_w \leq p_n \\ A\left(\frac{x_w - p_n}{p_n}\right)^\eta, & p_n < x_w < p_c \\ A\left(\frac{p_c - p_n}{p_n}\right)^\eta + B\left(\frac{x_w - p_c}{p_n}\right)^\psi, & x_w \geq p_c \end{cases} \quad (8)$$

5) 利用式(9)计算第 n 类乘客的路径选择概率 $p_{rs,k,n}$ 。式(9)中 θ_n 表示第 n 类乘客对某条路径的忠实程度,使用贝叶斯推断法^[12]进行标定。

$$p_{rs,k,n} = \frac{\exp(-\theta_n C_{rs,k,n}/C_{\min})}{\sum_{p \in K_{rs,n}} (-\theta_n C_{rs,p,n}/C_{\min})} \quad (9)$$

6) 利用式(10)计算每条路径上不同类型的客流量 $f_{rs,k,n}$ 。

$$f_{rs,k,n} = q_{rs,n} \cdot p_{rs,k,n} \quad (10)$$

式中:

$q_{rs,n}$ —— rs 间第 n 类乘客的客流量。

7) 利用式(11)得到区间断面客流量 x_a 。

$$x_a = \sum_r \sum_s \sum_k f_{rs,k} \cdot \delta_{rs,k,a} \quad (11)$$

若路段 a 属于路径 k , 则 $\delta_{rs,k,a} = 1$, 否则 $\delta_{rs,k,a} = 0$ 。

1.2 基于信息熵的均衡度模型

为进一步研究客流空间分布的演变规律及路网结构的完善程度,基于信息熵建立了如下均衡度模型^[9]:

$$E = - \sum_{i=1}^m (P_i) \ln(P_i) / \ln(m) \quad (12)$$

式中:

E ——均衡度;

P_i ——第 i ($i=1, 2, \dots, m$) 个区间或断面客流量占总客流量的比值;

m ——站点或断面个数。

均衡度反映了客流量空间分布的均衡程度,取值为 0~1。其值越趋近于 1,说明客流分布越均衡,路网结构越完善。

2 北京城市轨道交通客流数据来源及处理

本文所使用的客流数据主要包括:2009 年、2012 年、2015 年、2018 年等某月(不含节假日)AFC 系统数

据,以及北京地铁线路及站点 GIS 平台矢量数据。

本文旨在研究 2009—2018 年北京城市轨道交通网络客流演变,其时间跨度较大,因此以每隔 2 年的方式来选取研究对象,最终选择了 2009 年、2012 年、2015 年、2018 年。用这 4 年某月的 AFC 系统数据来构建客流分配模型,并从中选取某工作日的数据为代表进行分析。早晚高峰客流较大,对城市轨道交通客流的研究也主要集中在早晚高峰。由于上班时间的集中性,早高峰客流较晚高峰更为集中,因此选取工作日早高峰为代表进行分析。

由于不同区域客流发生时间不同,本研究将早高峰小时定义为 6:30—9:30 客流最大的一个小时。

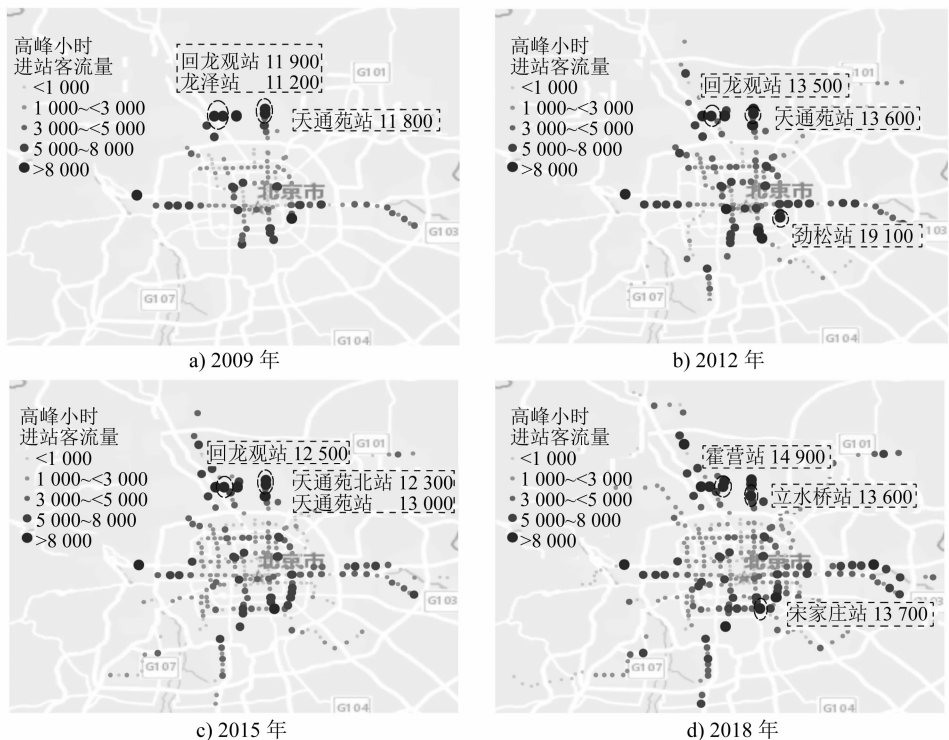
3 北京城市轨道交通进出站客流量可视化结果及分析

3.1 进站客流量

北京城市轨道交通工作日早高峰小时进站客流量(见图 1)在 2009—2012 年迅速增长,在 2012—2015 年略有下降,2015—2018 年又恢复增长。2009—2012 年城市轨道交通建设处于高速增长期,北京城市轨道交通新投入运营的线路增加了既有线的可达范围,且采用 2 元单一票制,吸引了大量客流,使进站客流量增长迅速。2014 年 12 月 28 日,北京公共交通推出按里程计价策略,公共交通票价提升。地铁票价的上升在短期内缓解了城市轨道交通的拥堵,使 2015 年的进站客流略有下降。2015 年后,除了自然增长与新线开通影响外,涨价的影响逐渐淡化,且共享单车的出现提高了一部分站点的可达性,进站客流量又逐渐增加。

近 10 年,进站客流量排名较高的站点基本位于回龙观站、天通苑站、劲松站、宋家庄站等大型居住区边缘。劲松站是北京地铁 10 号线一期最南端的地铁站,其在 2013 年二期开通前,吸引了较多客流;10 号线二期开通后,南端的潘家园站、十里河站等分散了劲松站的一部分客流。这点可从同一乘车卡号进站站点的变化看出。

1 号线东段的国贸站、大望路站、四惠站、四惠东站 4 站在 2012—2015 年间进站客流量明显减少。根据乘车卡号对客流转移情况进行识别发现,北京地铁 6 号线开通后进站站点由 1 号线段的国贸站、大望路站、四惠站、四惠东站这 4 站转移到 6 号线东段的乘车客流占其客流减少量的 16%。由这 4 站转移到北



注：图中数据的单位为人次/h。

图 1 北京城市轨道交通工作日早高峰小时进站客流量演变

Fig. 1 Evolution of inbound passenger flow of Beijing urban rail transit in the morning rush hour on weekdays

运河西站的人数最多,占转移总数的 37%。这说明随着网络完善,新线对既有有线客流的分担越来越明显。

此外,2009 年已开通的几条市区线客流成长较快,在 2012 年后基本稳定。与市区线相比,联系新城与主城区的郊区线如昌平线、房山线等客流培育期较长,但客流量持续增长。

站点进站均衡度见图 2。2009—2012 年,北京城市轨道交通大量新线开通增加了轨道网络的可达性,使进站客流量大幅增加,而部分新开站点处于客流培育期,客流较少,故导致站点间差异较大,均衡度较低;2015—2018 年,随着路网结构的完善,近、远郊车站不断培育客流,使均衡度逐渐提升。

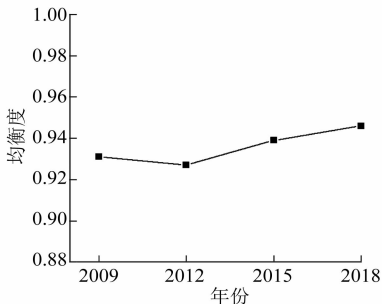


图 2 进站客流量均衡度

Fig. 2 Equilibrium of inbound passenger flow

3.2 出站客流量

与进站相比,出站客流量更多且更集中。早高峰出站客流量整体与进站客流变化趋势相似,但最大出站客流量持续增长,这体现出城市轨道交通虽然拓展了居民的居住范围,但工作区域仍呈现高度集中的格局,且网络可达性越大,越能吸引更远的居民进入中心城工作。最大出站客流量出现的位置主要聚集在大型工作区附近,如西二旗、国贸、西直门、朝阳门等,且有向外围扩散的趋势。

除了自然增长及新线开通影响外,一些站点变化较大。结合城市规划及人口疏解政策分析认为,2015—2018 年,望京区工作岗位不断集中,使望京东、将台等站出站客流明显增长;随着中关村国家自主创新示范区空间规模和布局调整、丰台科技园的扩建,丰台科技园站出站客流量逐年增加;受北京非首都功能疏解政策影响,动物园站早高峰出站客流量在 2012—2018 年间由 6 120 人次/h 减少到 2 850 人次/h。

由于大型工作区比较集中,居住区比较分散,而出站客流主要集中在大型工作区附近,因此出站与进站客流量的统计特征有明显差异。2009—2015

年时,出站客流量不断增长,但早高峰郊区出站量很小,这增大了全市范围内出站客流量的差异,因此均衡度减小明显;2018 年后,出站客流量整体增长明显,且部分区域如望京、丰台等地的工作区不断集中,减小了站点间客流量的差异,增大了均衡度。出站客流量均衡度见图 3。

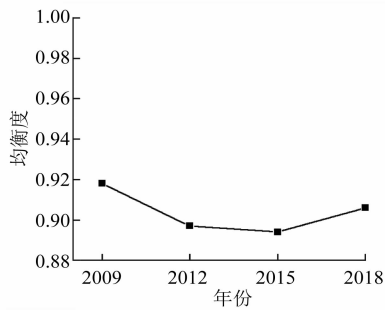


图 3 出站客流量均衡度

Fig. 3 Equilibrium of outbound passenger flow

4 断面客流量可视化结果及分析

利用客流分配模型及刷卡数据,得到的北京城市轨道交通早高峰断面客流(见图 4)。由图 4 可看出,北京城市轨道交通早高峰断面客流量具有向

心性、方向不均衡性的特点。断面客流量均衡度变化趋势与进站客流量基本相似,10 年间先上升再下降后又上升。

最大断面客流量位置变化较大。在 2009—2012 年,北京城市轨道交通断面客流量集中在北京地铁 1 号线四惠站站—建国门站之间。2012 年后,随着北京地铁 6 号线(以下简为“6 号线”,其余类同)的开通,最大断面位置逐渐转移到 6 号线的青年路站—呼家楼站站间。这是因为近距离平行的 6 号线、7 号线的开通分散了 1 号线和八通线的进站客流量。对此做基于乘车卡号的进站及配流对比分析,结果表明,6 号线开通后,由 1 号线东段及八通线站点进站的客流转移到 6 号线东段站点,进站的人数占减少总量的 18%;7 号线开通后转移人数占减少总量的 5%。这体现出新线开通对网络拓扑及乘客进站和路径选择的巨大影响。与之相对,14 号线半环与 10 号线也是近距离平行,但影响幅度较小。说明在既有网络中加密、分流线路的规划设计,需要从网络拓扑、既有网上乘客的时空分布、路径选择等多方面进行综合评估,优化新建线路由和站位,才能达到规划目标。



a) 2009 年



环线在线网中有着特殊地位,特予以分析。虽2号线与10号线均为环线,但2号线的客流压力较10号线小,且2号线客流在近年有下降趋势,主要是因为10号线是从外围进入中心城区的第一条环线,承担了较多分流压力。在2015—2018年,10号线途经客流比例由11%上升到12.5%。2号线在网络拓扑上的重要度逐步下降,且受二环内人口疏解等影响,拥堵水平逐步降低。2015年后,2号线途经客流占比从17.2%下降到15%,总客流下降约3%。14号线东段虽在开通后客流增长迅速,但并未有效缓解10号线的压力。高峰小时单向最大客流断面多出现在环线相邻区间或相近区间、多出现于能换乘进入城市中心的第一座换乘站附近。10号线分布了较多这类换乘站,承担了较多分流压力。

断面客流量均衡度(见图5)变化趋势与进站客流量相似,在2009—2012年间有所降低,而在2012—2018年间持续增大。从断面客流的角度,北京城市轨道交通网络逐渐趋于完善,断面客流量在全市范围内逐步均衡。

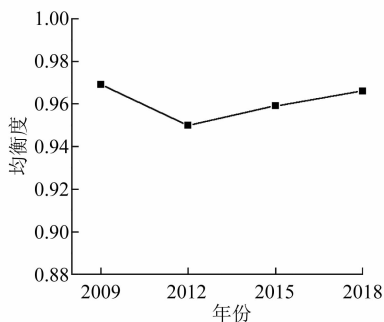


图5 断面客流量均衡度

Fig. 5 Equilibrium of sectional passenger flow

5 结语

本文以2009年、2012年、2015年、2018年典型时段北京城市轨道交通的AFC系统数据为基础,利用考虑乘客异质性的客流分配方法得到早高峰小时断面客流量,在GIS平台可视化基础上,分析2009—2018年北京城市轨道交通的客流演变规律。结果显示:早高峰小时进出站、断面客流量均在2009—2012年迅速增长,在2012—2015年略有下降,在2015—2018年又恢复增长;最大客流量出现的位置基本稳定,仅个别位置发生改变;客流量较多的位置有向外围扩散趋势,进出站尤为明显;从发展水平上看,东西部较均衡,并逐渐向东拓展,南北向一直有差距,北部更密集;新线开通增加了工

作区的可达性,使居住区向外围扩散。

人口增长及新线开通是客流变化的基本因素。2009—2012年客流变化较大,主要是由新线开通引起的。但2012年后受各种政策的影响,原因比较复杂:一些主要服务外围郊区的线路客流培育期较长,客流逐年增长;客流量受接驳效率影响较大,共享单车的出现提高了接驳效率,同时也使短距离出行的乘客有更多选择,影响了客流量;环线的位置和数量对线网客流分布有显著影响。

根据以上分析结果,建议如下:今后城市轨道交通的规划应与国家政策相结合,选线时多考虑站点周围的土地使用、产业结构等因素;在既有网络中加密线路的规划,需要从网络拓扑、既有网上乘客的时空分布等多方面进行综合评估,优化新建线路和站位,才能达到规划目标;合理的票价、人口疏解等政策对平衡客流有显著作用;建设应与城市发展相适配,应提高接驳能力,来方便居民出行,可在站点周围设置适量共享单车以增加可达性。

参考文献

- [1] 赵昕,顾保南. 2018年中国城市轨道交通运营线路统计和分析[J]. 城市轨道交通研究,2019(1):1.
ZHAO Xin, GU Baonan. Statistical analysis of urban rail transit lines in 2018 China[J]. Urban Mass Transit, 2019(1):1.
- [2] 北京交通发展研究中心. 2010年北京市交通发展年度报告[R]. 北京:北京交通发展研究中心,2010.
Beijing Transportation Research Center. Beijing transport annual report 2010 [R]. Beijing: Beijing Transportation Research Center, 2010.
- [3] 李艳艳,李志成,张孝法. 城市轨道交通网络化运营条件下客流特征分析[J]. 物流科技,2017(6):92.
LI Yanyan, LI Zhicheng, ZHANG Xiaofa. Analysis on passenger flow characteristics of urban rail transit network operation[J]. Logistics Sci-Tech, 2017(6):92.
- [4] 邵星杰,张宁,邱华瑞. 城市轨道交通客流时空演变建模研究[J]. 都市快轨交通,2015(2):65.
SHAO Xingjie, ZHANG Ning, QIU Huarui. Modeling research on spatial and temporal evolution of passenger flows of urban rail transit[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2015(2):65.
- [5] 四兵锋,毛保华,刘智丽. 无缝换乘条件下城市轨道交通网络客流分配模型及算法[J]. 铁道学报,2007(6):12.
SI Bingfeng, MAO Baohua, LIU Zhili. Passenger flow assignment model and algorithm for urban railway traffic network under the condition of seamless transfer[J]. Journal of the China Railway Society, 2007(6):12.

(下转第135页)