

安检互认条件下的市郊铁路与地铁换乘站 客流模拟仿真研究*

杨瑞霞¹ 兰亚京² 韩宝明¹ 周玮腾¹

(1. 北京交通大学交通运输学院, 100044, 北京; 2. 北京市城市规划设计研究院, 100044, 北京//第一作者, 博士研究生)

摘要 在分析研究既有的行人仿真方法的基础上, 利用基于元胞自动机的客流仿真技术对安检互认条件下的市郊铁路与地铁换乘站进行仿真, 将车站内容流需求、设施设备、运行计划、乘客行为和客流组织集成到 SRAIL 系统中, 通过动态监测手段对设施设备布局进行合理评估。并以在建的新航城站为例, 通过 SRAIL 系统对站内客流进行仿真, 从服务水平、交通组织等角度为调整、选择车站设计方案提供依据。

关键词 城市轨道交通; 市郊铁路; 换乘站; 客流仿真; 动态模拟

中图分类号 U293.13

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2021.01.043

Simulation Research on Passenger Flow of Suburban Railway and Metro Transfer Station Under Mutual Recognition of Security

YANG Ruixia, LAN Yajing, HAN Baoming, ZHOU Weiteng

Abstract On the basis of studying existing simulation method about pedestrian, a passenger flow simulation technology based on cellular automata is used to conduct simulation study of the suburban railway and metro transfer station under mutual recognition of security. The passenger demand, equipment, operation plan, passenger behaviors and passenger flow organization are integrated into the SRAIL system, and the layout of equipment is assessed reasonably through dynamic monitoring. Taking the Xinhangcheng Station under construction as an example, simulation of passenger flow is conducted through SRAIL system, providing reference for adjusting and selecting the station design from the perspective of service level and traffic organization.

Key words urban rail transit; suburban railway; transfer station; passenger flow simulation; dynamic simulation

First-author's address College of Traffic and Transportation, Beijing Jiaotong University, 100044, Beijing, China

目前, 城市轨道交通在许多城市已形成网络化运营, 随着规模的扩大, 线路间的换乘效率对乘客显得尤为重要, 部分换乘站在运营期出现了设施设备无法满足客流需求的现象。因此, 前期合理的车站规划设计, 可避免或降低运营期间关键区域出现不可控的客流拥堵, 以提高服务水平。

随着都市圈的扩大和城市轨道交通线路的延伸, 服务于市区的地铁与服务于市区和近郊的市郊铁路建立了联系, 乘客通过换乘站进行转移。市郊铁路为地铁网络带来了大量异质性客流, 导致换乘车站运营的不确定因素繁多: 在早晚高峰, 市郊铁路一次到达的客流规模一般高于地铁; 市郊铁路列车发车间隔和停站时间较长; 部分市郊铁路的车票须在指定车站购买, 在客流组织层次与地铁存在差异; 此外, 市郊铁路与地铁的安检标准可能不统一, 换乘乘客二次安检使得换乘流线较为复杂。随着都市圈轨道交通的发展与融合, 安检互认工作得到了逐步推广。从运输服务角度看, 市郊铁路与地铁换乘站同传统地铁换乘站相比, 更强调换乘时间的衔接性, 同铁路与地铁换乘站相比, 更注重换乘的便捷性。传统的“先出站再进站”模式, 对车站而言, 只存在进站和出站流线, 安检互认改变了换乘流线, 为无缝换乘提供了可能, 但集中到达的铁路客流对地铁站厅产生了较大冲击, 对车站的换乘和容纳能力提出了更高的要求, 不仅需重新考虑安检设备、售票设备的数量, 还需对换乘区域面积、通道面积进行合理评估。影响因素除客流量外, 还包括乘客属性及行为习惯等。因而在整个车站大背景下, 安检互认实质上是更换了车站的运输组织过程, 同时增大了车站换乘客流的组织难度。设立安检互认区往往需要通过扩大换乘通道和站台面积等方式做好配合。

* 科技部重点研发计划项目(2018YFB1201402); 中央高校基本科研业务费项目(2019JBM039); 交控科技设计创新和学科发展基金项目(9907006511)

市郊铁路与地铁换乘站在客流组织上会面临更多在设计阶段难以预估的问题。传统的规划设计依据客流需求,配置与运输能力相符的设施设备数量,这种静态计算抽调了行人走动的过程,在运营期间往往会出现设施设备静态能力低于实际的动态能力、乘客感受到的服务水平低于车站提供的服务水平等现象。因此,做好车站设计工作对保证服务水平有关键性作用。

采用行人动态仿真技术进行车站布局辅助设计已成为车站前期设计方案评价的重要手段^[1]。车站客流仿真是在车站空间布局和列车运营组织模式下,对乘客行为和集散规律进行再现的手段。国内外学者根据研究目标和建模层次的不同,构建了众多的乘客走行规律仿真模型^[2]。文献[3]建立了客流分配模型,根据节点的影响程度指标识别车站能力瓶颈;文献[4]采用迭代函数系统模型描述客流变化,并基于分形插值方法生成动态客流;文献[5]利用 SRAIL 系统对西二旗站进行了模拟仿真研究;文献[6]利用 Anylogic 软件对地铁车站进行建模仿真,并通过客流仿真获得换乘服务水平评价的指标数据;文献[7]利用 Vissim 软件对崇文门站进行客流模拟仿真,确定了瓶颈区域;文献[8]利用自主开发的仿真软件对换乘站进行了客流组织仿真。

综上所述,既有的仿真研究对象主要集中在地铁中间站、换乘站和铁路客运站,对市郊铁路与地铁换乘站的仿真研究较少。根据市郊铁路与地铁换乘站客流的异质性、列车到发规律的差异性以及换乘组织的复杂性,本文构建市郊铁路与地铁换乘站客流仿真模型,利用走行流线对乘客行为进行宏观把控,通过元胞自动机模型模拟乘客的微观走行路径规划;并利用北京交通大学自主研发的 SRAIL 系统模拟车站运营的客流场景,识别客流瓶颈,结合不同

设备的利用率情况确定车站设施能否满足乘客需求。该仿真模型可为车站设计和运营优化提供支撑,辅助设计人员决策。

1 市郊铁路与地铁换乘站客流分析

市郊铁路客流具有早晚高峰明显的时间特征,在特殊时段的随机性、波动性较大^[9],而地铁的客流特征相对多样化。市郊铁路与地铁换乘站客流特征主要体现为以下四点:

1) 是否安检互认对流线组织影响较大:市郊铁路与地铁的安检标准一般存在差异,换乘乘客需二次安检;若安检互认,乘客走行流线会比较复杂,提高了运输组织难度。

2) 短时冲击性强:客流随列车的到达呈现脉冲分布,且市郊铁路和地铁列车频率差别较大,前者带来的换乘客流易对地铁站厅造成短暂压力;当两条线路难以满足客流需求时,乘客会滞留站台,造成换乘设施首尾端客流堵塞,降低了服务水平。

3) 客流规模庞大:换乘站周边地区一般呈现出显著的客流集散与换乘特性,客流异质性明显且规模庞大,站内客流组织除进出站外,还需对换乘客流做好组织工作。

4) 方向不均衡:同一时段、不同换乘方向的客流量有所差异,客流的潮汐性质导致换乘站的早晚高峰尤为显著。图1显示了北京城际铁路联络线(即市郊铁路 S6 线)和地铁 20 号线(即 R4 线)的换乘站新航城站、地铁昌平线和 13 号线换乘站西二旗站的晚高峰客流情况。相对于西二旗站,新航城站的客流规模更大。地铁昌平线和 13 号线的行车间隔分别为 4 min 和 2.5 min, S6 线和 R4 线行车间隔分别为 20 min 和 4 min, S6 线运行列车载客能力为 1 998 人,其他 3 条线路列车能力为 1 500 人。在行车间隔

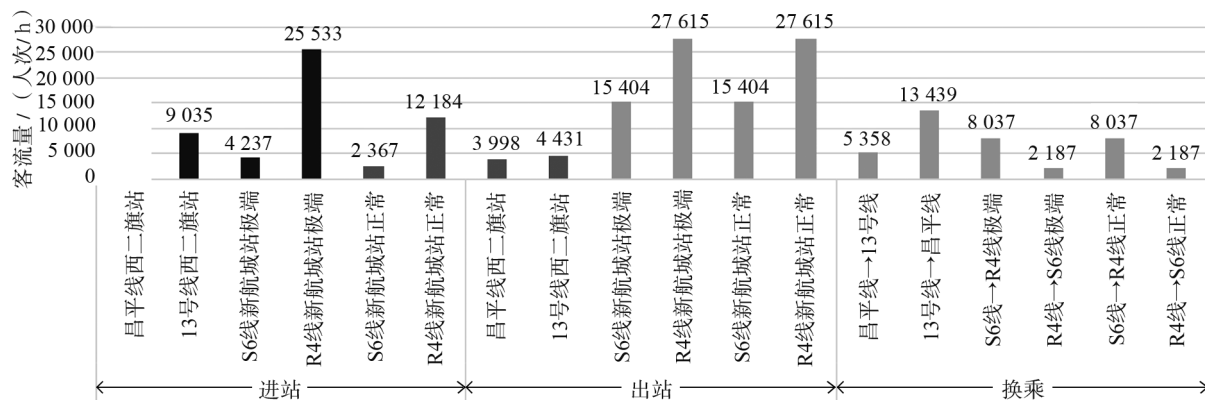


图1 新航城站和西二旗站晚高峰客流情况

和列车能力方面,市郊铁路与地铁存在显著的差异性,有必要对S6线的换乘客流进行预先安排与组织,防止造成较大的冲击。

2 市郊铁路与地铁换乘站客流仿真建模

常用的动态仿真建模方法包括连续仿真和离散仿真。乘客进出车站、购票、安检、进出闸机等可通过离散仿真实现;速度和走行方向通过连续仿真来呈现。因此,车站客流仿真需两者结合,充分集成。

车站客流仿真涉及乘客和列车2种主体。列车的运行路径和到发时间是确定的,无需进行微观层次仿真,只需考虑乘客上下车。乘客在车站的活动包括走行路径规划、控制点选择和决策反馈,基于这3个阶段构建基于元胞自动机的客流集散仿真模型,通过输入列车和客流数据,完成车站客流仿真。

2.1 寻路模型

乘客的走行路径指乘客自进入车站至离开车站期间的实际路径,通过设置父节点、子节点完成路径设定,构成有向图。乘客在*i*站内的走行流线 L_i 包含的控制点为 $\{C_i, M_i, S_i, N_i, J_i, H_i, O_i, T_i\}$,其依次表示客流产生点、防止走进无效区域设定的点、售票点、安检点、检票点、站台集合点、出站点和上车点,部分节点之间有严格的父子关系,在由父节点走向子节点的过程中,有多种走行方式,理论上选择最短路径。当乘客受到干扰时,会适当调整方向,呈现出局部随机分布特征,本文采用Moore型元胞自动机模型刻画该过程。将乘客个体看作一个元胞,乘客可活动的空间为元胞空间(见图2)。

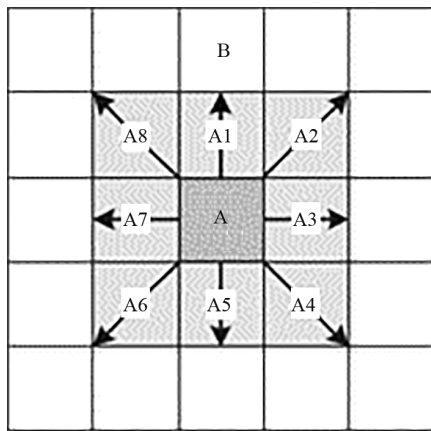


图2 Moore型元胞及邻域

在图2中,中心深色的元胞表示乘客,周边被8个元胞包围,乘客每一时刻有9个位置作为选择,若周围8个方向都被占用,将停留在原元胞中。由父节

点A向子节点B移动的规则如下:行进方向有 $A_0 \sim A_8$ (A_0 表示A本身),乘客倾向于选择未被占用的元胞作为下一位置;未占用的 A_4, A_5, A_6 方向对乘客的吸引力较低;当某方向的元胞被设备设施占用,舍弃该元胞。乘客*i*方向A的元胞未被占用时, $O_{i,A} = 1$;元胞被占用时, $O_{i,A} = -1$;乘客*i*当前所在的元胞 $O_{i,A} = 9$ 。9个元胞的移动参数如下($\delta_{i,1}$ 表示乘客*i*沿 A_1 方向前进的移动参数,余类推):

$$\begin{aligned} \delta_{i,1} &= 1 \\ \delta_{i,2} &= \delta_{i,8} = 1/\sqrt{2} \\ \delta_{i,0} &= \delta_{i,3} = \delta_{i,7} = 0 \\ \delta_{i,6} &= \delta_{i,4} = -1/\sqrt{2} \\ \delta_{i,5} &= -1 \end{aligned} \quad (1)$$

2.2 选择模型

控制点的选择受个体属性的直接影响,乘客属性有性别、年龄、是否有行李、是否购票等;乘客到达某活动服务范围内且存在多种位置选择时,会选择效用值最高的控制点,这一选择行为由Logit模型实现。如站台有多个上车点。在闸机处接受服务时,可能由于节点服务能力不足,需要等待、排队,这是设备设施瓶颈识别的关键之一。刻画乘客选择行为的Logit模型如下:

$$U_{i,k} = -\alpha t_{i,k} - \beta p_{i,k} + \gamma s_{i,k} + \varepsilon_{i,k} \quad (2)$$

$$P_{i,k} = \frac{e^{U_{i,k}}}{\sum e^{U_{i,k}}} \quad (3)$$

式中:

- $U_{i,k}$ ——控制点*k*对乘客*i*的效用值;
- $t_{i,k}$ ——乘客*i*到达控制点*k*的时间;
- $p_{i,k}$ ——控制点*k*的人数;
- $s_{i,k}$ ——控制点*k*对于乘客*i*的服务水平;
- $P_{i,k}$ ——乘客*i*选择控制点*k*的概率;
- α, β, γ ——归一化系数;
- $\varepsilon_{i,k}$ ——随机变量,服从正态分布。

当控制点出现拥堵并超过乘客可接受范围时,乘客规避并舍弃该控制点。

2.3 规避模型

乘客的感知直接影响乘客的决策。乘客选择能够最快到达目的地的方向前进,但前方乘客的行走速度会影响该乘客的速度与选择:若需要超越,优先右侧超越,若右侧有阻碍,会呈现规避行为,可能会选择放慢速度,等待其他人通过后,再超越;也可能选择左侧超越,当左侧超越失败时,放慢速度。现通过式(4)刻画这一行为,在每一步长时间对乘客的环

境感知进行计算:

$$P_i = \lambda_i \delta_{i,A} + \eta_i E(O_{i,A}) + \varphi_i W(O_{i,A}) + s_i \Delta v \quad (4)$$

式中:

$E(O_{i,A})$ ——乘客的超越函数;

$W(O_{i,A})$ ——乘客规避、放慢速度函数;

$\lambda_i, \eta_i, \varphi_i, s_i$ ——乘客对待移动距离、超越、规避、速度差的态度参数;

Δv ——速度差。 $\Delta v = \max\{0, v_i - v\}$, v_i 为乘客当前速度, v 为前方乘客速度, 当 A_i 方向的元胞未被占用时, $v = 0$ 。

根据乘客活动目的的不同, 将客流分为进站客流、出站客流和换乘客流。由于地铁和市郊铁路客流的差异性, 乘客需刷卡离开某一系统, 再刷卡进入另一系统, 结合不同车站安检的差异性, 客流的走行路径如图 3。

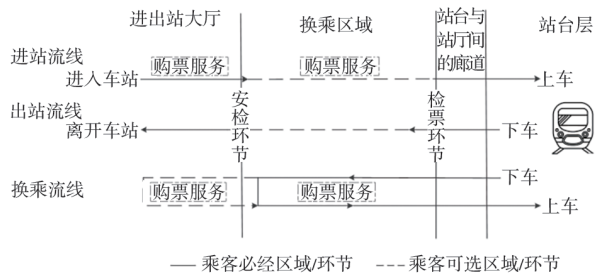


图3 不同客流的走行路径

2.4 基于元胞自动机模型的 SRAIL 系统

通过四元模型校验法验证模型与实际客流移动的相似程度。包括使用基本图校验、自组织校验、比较分析校验和实际校验法, 文献[9]测试调查乘客速度和流量的关系并与经验数据进行比较, 两者非常接近, 说明模型可较好地反映乘客移动情况; 直接观察仿真过程发现, 乘客具有良好的自动渠化、流动斑纹等主要的自组织现象; 对运营车站进行模拟仿真, 将仿真结果同实际现象进行对比分析, 验证了模型的合理性与可用性。基于上述验证结果, 本文利用基于该元胞自动机客流仿真模型的 SRAIL 系统对换乘站进行仿真。

3 实例应用

市郊铁路与地铁的换乘站新航城站目前处于设计方案确定阶段, 根据预测, 选择客流规模最大的晚高峰小时 17:30—18:30 作为仿真时段, 新航城站和西二旗站以通勤客流为主, 乘客行为特征相似, 且该仿真模型已成功应用于西二旗站^[10]。因此客流仿真参数依据西二旗站确定, 此外, 根据《地铁设计规

范》^[11]确定设备设施能力。依赖可视化仿真过程, 对两种方案进行评估。

3.1 案例建模

方案一为两侧交通轴方案, 地铁进、出站闸机分别为 12 台和 8 台, 市郊铁路进、出站闸机分别为 24 台和 12 台, 对称布置市郊铁路和地铁售票窗口各 4 处; 方案二为中央交通轴方案, 地铁进、出站闸机分别为 12、16 台, 市郊铁路进、出站闸机分别为 20、18 台, 对称布置城际铁路和地铁售票窗口各 4 处。地铁站台为岛式, 市郊铁路站台为侧式。在乘客均匀进站下对两种方案在正常客流和极端客流 (大型会展期间) 下的晚高峰小时分别进行仿真。

3.2 仿真结果与分析

本文对为极端客流下新航城站站厅层客流密度仿真过程, 选择性地对相关区域进行量化分析。

3.2.1 特殊聚集区域客流状况

由仿真结果可知, 方案一中, 地铁进站闸机处正常客流下的区域密度最高值约 0.81 人/ m², 极端客流下为 1 人/ m²; 方案二中, 东西两侧地铁进站闸机区域密度相仿, 客流密度较方案一显著偏低。

方案一的换乘大厅承受了来自所有进站口的客流压力, 极端客流下密度为 1.32 人/ m², 较拥堵; 两处安检设施分别承担了 5 个方向的客流压力, 表现出较高的拥挤度; 正常客流下, 西侧安检通道最大密度为 1.51 人/ m², 东侧为 1.3 人/ m²。极端客流下安检通道区域密度变化见图 4。

建议方案一增加安检设施并调整安检入口方向, 减少安检乘客与南北走向通道乘客的冲突。

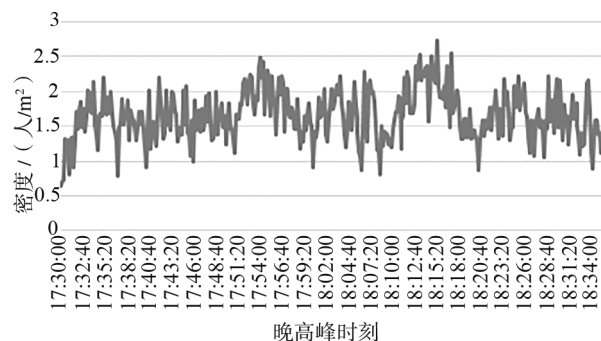


图4 方案一极端客流下西侧安检通道区域密度

3.2.2 设施设备利用水平

两种方案下进出站闸机的流率见表 1。市郊铁路进站闸机流率随列车发车间隔呈现有规律的波动。新航城站的楼扶梯整体使用率较低, 大多低于 3 人/10 s。

表1 进出站闸机流率

单位:人/10s

闸机所在地	方案一		方案二	
	正常客流	极端客流	正常客流	极端客流
地铁进站	10.0 ~ 16.0	20.0 ~ 29.0	8.0 ~ 14.0	18.0 ~ 25.0
地铁出站	0 ~ 3.3	0 ~ 3.3	0 ~ 2.7	0 ~ 2.7
市郊铁路进站	0 ~ 3.7	0 ~ 7.0	0 ~ 5.5	0 ~ 8.0
市郊铁路出站	0 ~ 2.3	0 ~ 2.3	0 ~ 1.6	0 ~ 1.6

3.2.3 区域服务水平

区域服务水平是对不同设施的行人疏散效率和步行舒适度的综合评价,用单人可使用的空间面积来表示。方案一极端客流的服务水平较差,属D级;方案二正常客流的服务水平属B级,极端客流的服务水平为C级。从仿真结果的地铁进站闸机处乘客的等待行为可以看出,方案一地铁进站闸机处排队等待现象较为显著,换乘大厅和东西两侧南北通道的客流交叉明显。建议方案一增加地铁进站闸机数量;扩大车站南北通道面积,以减小进出站客流的拥堵。

3.2.4 主要换乘流线换乘耗时

两种方案下换乘乘客的平均换乘耗时见图5。两种方案的市郊铁路换乘地铁耗时明显低于地铁换乘市郊铁路的时间,换乘客流量和列车到达频率对换乘购票时间有较为明显的影响。同一方案下,是否购票对同一换乘客流的时间影响不大,可推测车站换乘设施的布局和能力对乘客换乘有一定的影响。

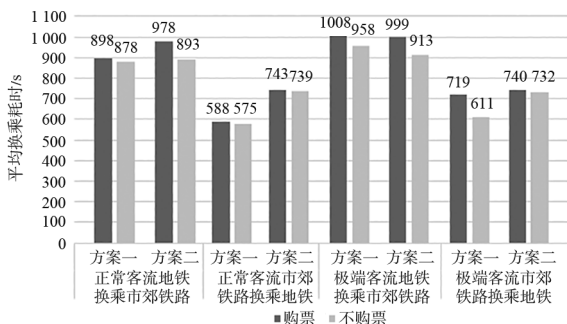


图5 乘客平均换乘耗时

4 结语

本文通过对市郊铁路与地铁换乘站的分析研

究,利用基于元胞自动机的SRAIL系统完成了安检互认条件下新航城站的站内客流仿真。通过分析两种方案的仿真结果,对车站设备设施配置、流线组织等提出了相应的建设。由于客流数据来源的局限性,未能精确得到进出站口的客流量,乘客属性的刻画还不够细致,这些还需作进一步完善。

参考文献

- [1] 张琦,韩宝明,李得伟,等.基于仿真技术的城市轨道交通枢纽运营效果评价方法[J].中国铁道科学,2011(5):120.
- [2] 傅志妍,陈坚,李武,等.城市轨道交通车站乘客集散行为仿真及优化[J].铁道运输与经济,2018(2):100.
- [3] 黄家骏,徐瑞华,邓颖,等.考虑乘客选择行为的地铁车站承载能力瓶颈识别方法[J].同济大学学报(自然科学版),2018(8):1080.
- [4] 乐逸祥,周磊山,齐向春.基于分形插值方法的城市轨道交通车站客流拟合与仿真[J].铁道学报,2012(8):7.
- [5] 李得伟,周玮腾.城市轨道交通枢纽客流仿真辅助决策技术与实践研究[J].铁道标准设计,2012(12):1.
- [6] 赖艺欢.基于仿真技术的城市轨道交通突发大客流应急组织方案研究[D].北京:北京交通大学,2017.
- [7] 商金涛,陈峰.Vissim在城市轨道交通车站客流仿真中的应用[J].城市轨道交通研究,2013(1):54.
- [8] 杨梅,徐瑞华.城市轨道交通换乘站大客流组织的仿真[J].城市轨道交通研究,2011(9):48.
- [9] 李得伟.城市轨道交通枢纽乘客集散模型及微观仿真理论[D].北京:北京交通大学,2007.
- [10] YU D D, HAN B M, LI D W, et al. Study on capacity bottlenecks identification and elimination of Xierqi station in Beijing MTR based on simulation method[J]. Applied Mechanics and Materials, 2011, 90-93:284-289.
- [11] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.地铁设计规范:GB 50157—2003[S].北京:中国建筑工业出版社,2013.

(收稿日期:2019-05-27)

欢迎订阅《城市轨道交通研究》

服务热线 021-51030704