

基于客流态势快速推演方法的城市轨道交通车站 客流组织调整措施^{*}

郑翔^{1,2} 刘龙² 邹晓磊²

(1. 广州地铁设计研究院股份有限公司, 510010, 广州;

2. 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 201804, 上海//第一作者, 高级工程师)

摘要 目的: 为更准确地把握城市轨道交通车站客流态势变化过程, 及时应对可能出现的大客流风险, 需基于客流态势快速仿真推演方法来调整车站的客流组织。方法: 构建了基于车站实时客流数据和历史客流数据的客流态势快速推演方法的系统架构, 提出了基于客流态势快速推演方法的技术流程, 以及基于时间逻辑分析的态势推演效率的评测方法。基于快速寻路的跳点算法、大规模人群快速仿真的多线程并行计算方法及用于展示和分析态势演化过程的图形化复现方法, 快速获取并处理客流数据, 生成推演场景及推演算法, 以提升客流态势推演及客流组织调整的时效性和实时性。以上海轨道交通8号线杨思站工作日早高峰时段为例, 验证了客流态势快速仿真推演方法的可行性和有效性。结果及结论: 该方法总体达到了Level-3级的车站客流态势推演技术水平, 可较高效地完成车站10~15 min粒度的短时客流态势推演, 为车站客流组织方案的调整提供辅助决策。

关键词 城市轨道交通; 车站客流组织; 大客流; 行人仿真; 态势推演

中图分类号 U231.4

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2023.11.008

Passenger Flow Organization Adjustment in Urban Rail Transit Station Based on Rapid Deduction for Passenger Flow Situation

ZHENG Xiang, LIU Long, ZOU Xiaolei

Abstract Objective: In order to grasp the changes of passenger flow in urban rail transit stations and respond in a timely manner to potential high passenger flow risks, it is necessary to adjust the passenger flow organization based on rapid simulation and deduction of passenger flow situation. Method: A system framework of rapid passenger flow deduction and decision assistance are constructed based on real-time passenger flow data and historical passenger flow data. The technique diagram of deduction and adjustment of passenger flow and an e-

valuation method of deduction efficiency are also proposed. Based on the jump-point algorithm for fast pathfinding, a multi-threaded parallel computing method for rapid simulation of large-scale crowds, and a graphical reproduction technology for displaying and analyzing the evolution process of the situation, by quickly obtaining and processing the passenger flow data, the deduction scenarios and deduction algorithms are generated, aiming to improve the efficiency and effective of passenger flow situation deduction and organization adjustment. The feasibility and effectiveness of the rapid simulation and deduction method of passenger flow situation are verified during the workday morning peak period of Yangsi Station on Shanghai Metro Line 8. Result & Conclusion: The proposed method has reached Level-3 of station passenger flow deducing technology mentioned in this paper, which can efficiently complete the short-term passenger flow situation deduction with a time granularity of 10-15 minutes at the station, providing decision-making for the adjustment of the station passenger flow organization scheme.

Key words urban rail transit; passenger organization at stations; mass passenger flow; pedestrian simulation; situation deduction

First-author's address Guangzhou Metro Design & Research Institute Co., Ltd., 510010, Guangzhou, China

城市轨道交通车站的运营效率 and 安全性已成为运营方和专家学者广泛关注的问题。目前我国多个城市的轨道交通线网客流进入了快速增长期, 部分车站的客流压力激增。针对车站的常态大客流, 学者们在分析客流历史数据的基础上, 提出了客流组织的优化方案^[1]、减少进站量的限流方法^[2]、提升高峰时段车站客流疏散效率的列车运行调整方法^[3]; 针对车站的突发大客流, 学者们分别提出了运用视频^[4]、Wi-Fi

^{*} 中央高校基本科研业务费专项资金资助课题(2022-5-YB-04); 广州地铁设计研究院股份有限公司课题(YK-2018-10)

(无线保真)^[5]、手机信令^[6]等技术手段及时获取客流数据,实时感知车站客流拥挤状态,并提出了基于三级大客流响应标准采取客流管控措施^[7]。然而,既有的大客流管控大多基于“见堵治疏”原则,常态大客流的管控措施常导致限流时段的延长,突发大客流应急管控措施的实施时间也常滞后于需求,进而造成一定的资源浪费,乘客的乘坐体验、车站的运营效率及安全性也受到了一定的影响。

为此,运营方希望能够实现大客流管控的“预堵治疏”,及时获取站内客流的聚集状态及其 10~15 min 内的客流发展趋势,以便及早采取管控措施。有学者基于短期客流预测方法建立了城市轨道交通车站客流限流动态预警的数学模型,实现了高峰时段车站进出站客流量及站台客流密度的预测^[8]。行人仿真作为重要的研究手段被广泛应用于城市轨道交通车站客流组织研究,用以还原不同场景下客流在站内接受服务和集疏的过程^[9-10]。但是,既有研究和应用场景大多为基于车站设计和客流组织方案优化的离线客流分析,可用于车站客流

动态组织和管控的在线实时客流态势仿真和预警的研究成果还相对缺乏。

本文提出基于客流态势的快速仿真推演方法,用以对车站的客流组织进行调整,辅助决策者发现客流组织瓶颈和风险并及时进行调整,提高车站的运营效率,确保车站管理安全。

1 基于客流态势快速推演方法的系统架构及技术流程

1.1 系统架构

客流态势快速推演方法基于车站实时客流数据和历史同期客流数据,对车站未来 10~15 min 短时客流(以下简称“短时客流”)的变化趋势及变化过程进行仿真推演,以用于车站客流聚集异常情况的研究判断和及时干预。其系统架构如图 1 所示,主要包含 3 个模块:实时数据和历史数据接入模块、面向快速推演的行人微观仿真模块、态势推演结果复现及调整迭代模块。这 3 个模块分别发挥了数据处理、快速推演及决策支持的作用。

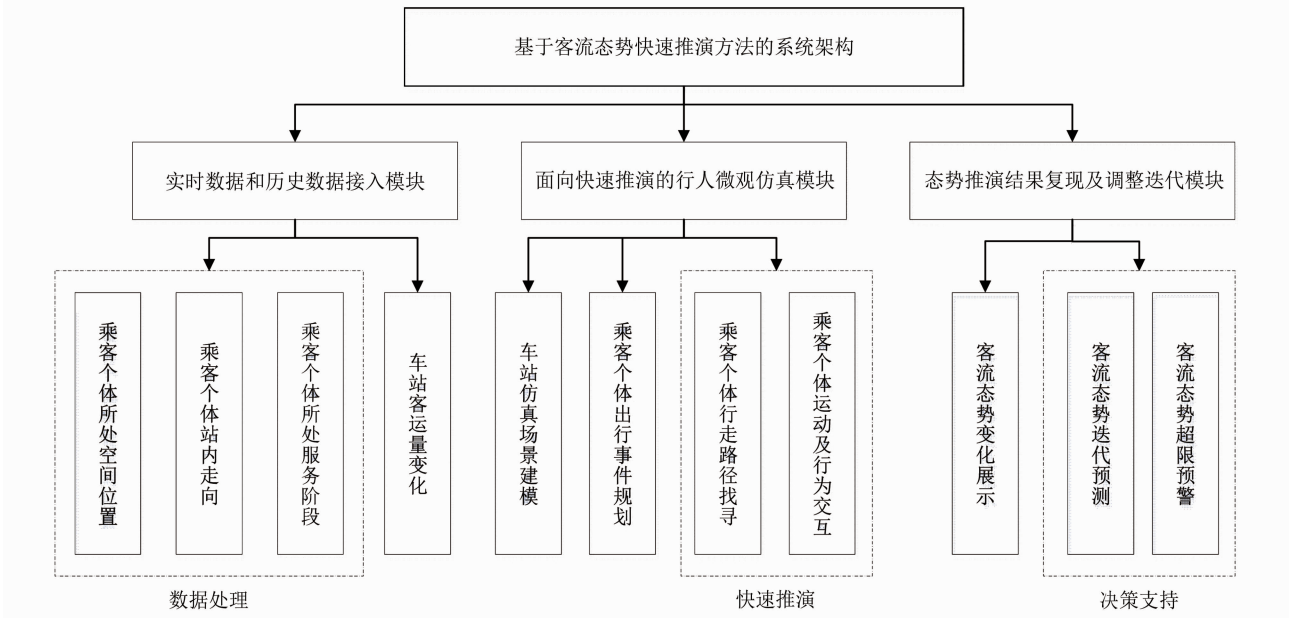


图 1 基于客流态势快速推演方法的系统架构

Fig. 1 System architecture based on rapid deduction technology of passenger flow situation

1.2 技术流程

车站客流态势快速推演的目的是获取目标时间段车站各区域的客流态势变化过程,及时发现短时客流组织及客流分布的瓶颈及风险,以便车站提出客流组织调整及管控措施,并在验证措施的合理性后迅速予以实施。基于客流态势快速推演方法

的技术流程如图 2 所示。

1.3 客流态势快速推演方法的时效性要求

车站客流态势推演的时机与耗时应满足城市轨道交通车站客流组织风险即时研判和应急调整的要求,因此,将推演的目标时间段 T_a 设为 10~15 min,以保证短期客流态势推演的精确度及客流

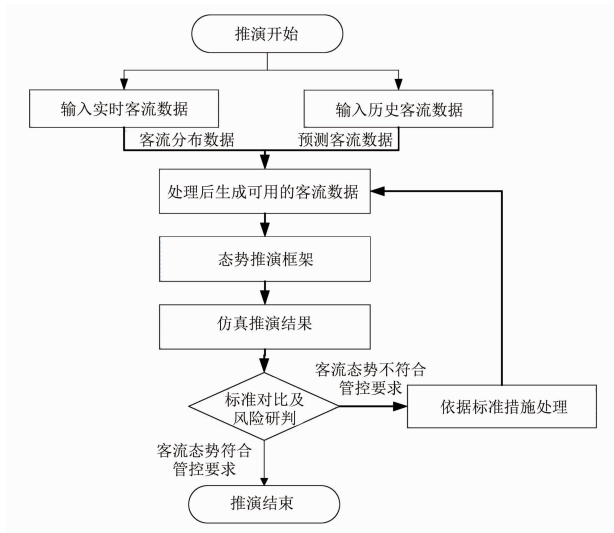


图 2 基于客流态势快速推演方法的技术流程

Fig. 2 Technical diagram of rapid deduction of passenger flow situation

管控措施调整在时间上的可行性。对某城市轨道交通车站在 t_0 (推演目标时间段开始时刻) 至 t_1 (推演目标时间段结束时刻) 时段内的客流变化态势进行快速推演, 其时间逻辑如图 3 所示。

图 3 中: T_p 、 T_r 和 T_a 在推演中可视为常量; T_d 为变量, 受仿真场景复杂度和软硬件运算效率影响; T_{d1} 与 T_d 数值接近; T_{p1} 与 T_p 数值接近。要获取 T_a 内完整的客流态势变化情况, 需要在 t_r 时刻提前导入对应的实时客流数据和历史客流数据, 并推演 t_r 至 t_1 时刻的客流变化过程。为确保客流态势推演对客流管控措施调整的有效性, 在推演总用时中预留了 T_{d1} , 供车站决策者进行二次仿真推演, 以验证采取客流管控措施后站内客流态势变化情况。一般情况下 $T_{d1} = T_d$, $T_{p1} = T_p$ 。

1. 3. 1 客流态势快速推演方法的全流程效率

定义 η 为客流态势快速推演方法的全流程效率

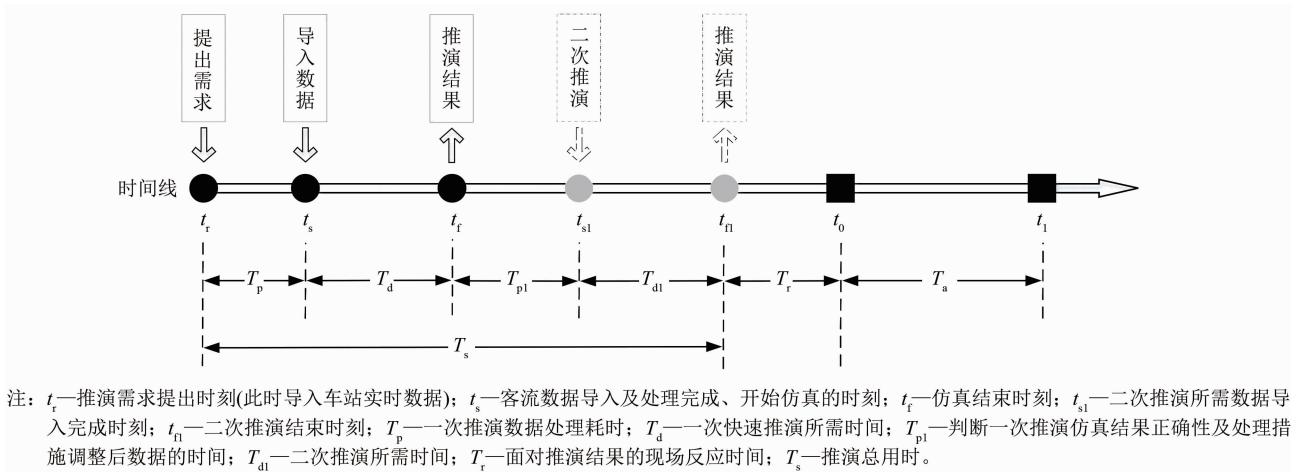


图 3 车站客流态势快速推演方法的时间逻辑示意图

Fig. 3 Temporal logic diagram of rapid deduction of passenger flow situation at the station

率, 其计算式为:

$$\eta = \frac{T_s + T_r + T_a}{T_s} = \frac{t_1 - t_r}{t_{f1} - t_r} \quad (1)$$

由式(1)可知: 要实现客流态势快速推演, 需使 $\eta \in (1, +\infty)$ 。当 η 趋向于正无穷大时, 意味着客流态势快速推演方法的效率趋于最大, 车站初始状态时刻 t_r 趋向于 t_{f1} ; 当 η 趋向于 1 时, 意味着 t_{f1} 趋向于 t_1 , 即无法通过提前开始推演方式获取 T_a 的客流变化态势。 $\eta \leq 1$ 时, 无法实现在线推演。

1. 3. 2 快速推演的仿真效率

定义 λ 为快速推演 (包括一次推演和二次推演) 的仿真效率, 其计算式为:

$$\lambda = \frac{2T_p + 2T_d + T_r + T_a}{T_d} \quad (2)$$

由式(2)可知: λ 受仿真场景复杂度及软硬件运算效率影响, 主要由 T_d 决定。 η 也可采用以下的计算式进行计算:

$$\eta = \frac{\lambda(2T_p + T_r + T_a)}{2\lambda T_p + 2T_r + 2T_a} \quad (3)$$

由式(3)可知: 因 T_p 、 T_r 和 T_a 可视为常量, 则 η 由 λ 确定。在 T_a 、 η 和 T_r 均已确定的情况下, 可得 t_r 的计算式如下:

$$t_r = t_1 - \frac{\eta}{\eta - 1}(T_r + T_a) \quad (4)$$

由上述分析可知, 优化快速推演的软硬件条

件,可缩短 T_d 和 T_s ,提高 λ 和 η ,有利于提高仿真推演结果的精确度和快速推演的时效性。

2 客流态势快速推演方法的关键技术

综合考虑快速推演过程的数据来源、预警方式、客流调整途径及推演效率,本文认为客流态势快速推演方法的智能化水平可划分 5 个等级,如表

表 1 车站客流态势快速推演方法的智能化水平等级

Tab. 1 Intelligence levels of rapid deduction of passenger flow situation at the station

等级	推演方式	数据来源	判别与预警	调整途径	η
Level-1	离线	历史客流数据	人工判别及预警	人工调整	(0,1]
Level-2	在线	历史客流数据	人工判别及预警	人工调整	(1,3]
Level-3	在线	历史客流数据+实时客流数据	人工判别及预警	人工调整	(3,5]
Level-4	在线	历史客流数据+实时客流数据	自动判别及预警	人工调整	(5,7]
Level-5	在线	历史客流数据+实时客流数据	自动判别及预警	自动调整	(7, +∞)

2.1 数据获取、处理和推演场景生成技术

车站客流推演场景主要包括仿真推演目标时段内的乘客运动特征、车站设施设备布局、列车运行方案、客流组织方案、客流初始状态及客流到达分布等方面的特征。其中:乘客运动特征、车站设施设备布局、列车运行方案、客流组织方案等场景特征应在推演需求提出前预先处理; t_r 的初始客流状态及 t_r-t_1 时段内的客流到达分布则需在 t_s 前快速生成。这些场景的生成主要运用以下技术:

1) 基于实时监测客流数据和历史客流数据生成 t_r 的客流初始状态。运用自动检票闸机、视频监控、Wi-Fi 探针等实时监测手段获取车站的实时客流数据。使用基于实时和历史数据的站内乘客个体出行选择还原方法,处理得到乘客的位置、速度及流程环节等状态参数,进而生成站内客流群体在 t_r 的空间、流程分布状态和运动状态,并将这些数据快速导入至推演场景车站空间。

2) 基于历史客流数据生成 T_a 内的客流到达分布。结合历史同期数据与仿真时段客流初始状态,运用时间序列法和贝叶斯模型,分析客流发展规律并进行预测,生成 T_a 内的车站客运量及到达分布情况。

2.2 面向快速推演的算法和模型

本文采用同济大学自主研发的基于 A^* 寻路算法和社会力模型的客流微观仿真原型系统,引入 JPS(跳点寻路)算法和线程池技术(见图 4),在保证仿真精度的基础上,提高寻路效率,改进仿真架构,使 η 和 λ 满足要求。JPS 算法在 A^* 寻路算

1 所示。

表 1 中:在线、离线两种推演方式的主要区别在于能否在 t_r 提前开始推演,并获取 T_a 的客流变化态势,即是否有足够高的 λ 和 η ,可完成短时客流推演并立即用于车站客流组织调整。基于目前的技术水平,本文主要聚焦 Level-3 对应的实时客流数据应用和快速推演技术等方面的研究。

法的基础上,通过找寻障碍物附近可能改变乘客个体移动方向的特定跳点,使得寻点数量减少,进而使寻路效率在不同场景下提高 35%~100%。此外,基于线程池技术的仿真系统可实现多线程并行计算乘客个体位置变化,使仿真效率进一步提高 30%~80%。

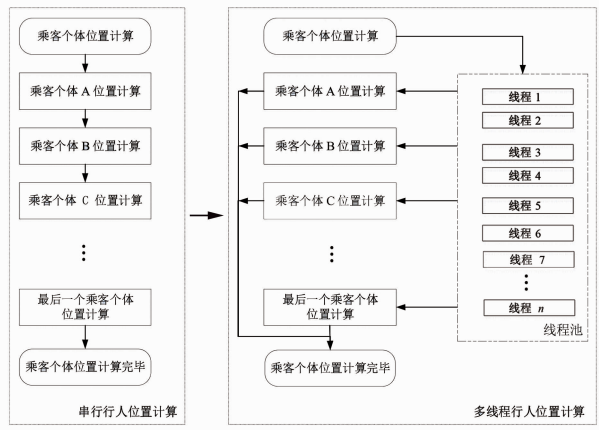


图 4 线程池技术示意图

Fig. 4 Technical diagram of thread pool

基于上述技术,客流态势快速推演方法的 η 在常见场景下可达到 4.5 左右,足以满足在线实时客流态势仿真的时效性需求。

2.3 推演结果再现及态势推演迭代技术

仿真推演完成后,需对 T_a 内客流整体运动过程及主要特征进行直观的快速复现,以便及时发现客流组织的瓶颈区域和拥挤风险,研判车站短时客流的发展趋势。客流密度的时空分布变化情况最能直观反映站内的拥挤风险和发展趋势,本文优化了

客流状态数据存储及展示模块,实现了仿真推演过程中客流空间密度数据的快速记录、存储、读取,以及客流密度时空分布的动态回放复现。

如果在推演结果中发现 T_a 内存在较严重的客流疏散瓶颈,站内拥挤风险有增加趋势时,车站决策者可以提出客流组织调整措施,并建立客流组织调整的推演场景。基于推演场景对客流组织调整方案下的客流态势变化进行快速仿真推演及数据再处理,以验证客流调整措施的实施效果。

3 实例分析

本文以上海轨道交通 8 号线杨思站为例,选取工作日早高峰时段的 8:30—8:40 作为车站客流态势推演的 T_a ,测试客流态势快速推演方法的执行效率和实施效果。

3.1 数据准备及客流态势推演

本案例取 $T_a = 600$ s, $T_{pl} = T_p = 10$ s, $T_r = 60$ s。经测试可得 $T_d \approx 68$ s。根据式(2)求得 $\lambda = 12$,根据式(3)求得 $\eta \approx 5.23$ 。根据式(4),取 t_r 为 08:25,即将 T_a 提前 5 min 作为初始时刻。根据实时客流数据生成车站的客流分布状态,并参考历史同期客流数据预测 08:25—08:40 该站的客流到达分布。

获取 t_r 的有效 AFC(自动售检票)客流数据,并根据事先已仿真获取的乘客出行轨迹经验数据集,生成该站的乘客空间分布及运动状态。将这些数据导入仿真系统,可得到 t_r 的实时客流分布,如图 5 所示。

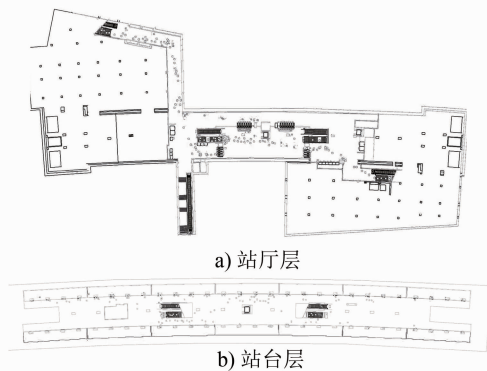


图 5 杨思站客流实时分布截图

Fig. 5 Real-time pedestrian distribution at Yangsi Station

3.2 态势推演结果再现及客流组织调整

考虑乘客动态行走与静态等候的空间服务水平评价差异,本文对原来仅适用于动态行走场景的 Fruin 行人空间服务水平评价指标加以改进,以粒度为 50 cm(长)×50 cm(宽)的底层地图栅格进行车

站客流密度统计,并评估站内空间的服务水平等级。在车站平面图中,用热力图动态显示站内客流密度的变化情况。

通过系统内置的瞬时密度动态复现技术,可查看车站各时刻行人位置及密度分布,以辅助车站管理人员快速了解客流态势变化情况,识别可能出现的客流组织瓶颈及拥挤风险,研判客流的变化趋势。针对可能发生客流拥挤的位置和时段,车站人员应根据车站应急处置预案提前进行客流管控和客流组织调整。

杨思站站厅层一次推演后客流态势变化展示界面如图 6 所示。由图 6 可知:站厅层左侧楼扶梯区域、1 号口走行通道及左侧安检通道区域易出现高密度行人聚集,可采取通道分流、安检前绕行及楼扶梯前绕行等措施,以降低拥挤风险。

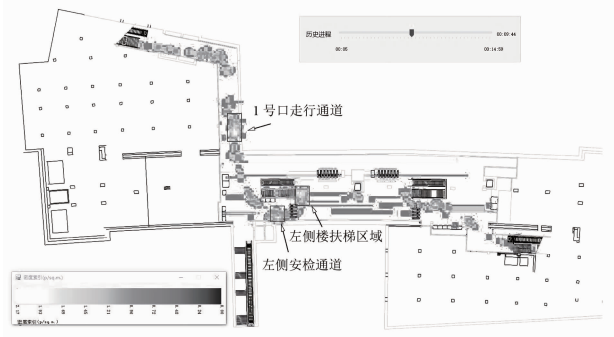


图 6 杨思站站厅层一次推演后客流态势变化展示界面截图
Fig. 6 The passenger flow situation on the station floor of Yangsi Station after the first deduction

对采取客流组织调整措施后的杨思站开展全站客流态势的二次快速推演,得到站厅层客流态势二次推演后展示界面截图,如图 7 所示。由图 7 可知:实施客流组织调整措施后,上述 3 个易拥挤区域的客流聚集情况得到了有效改善。

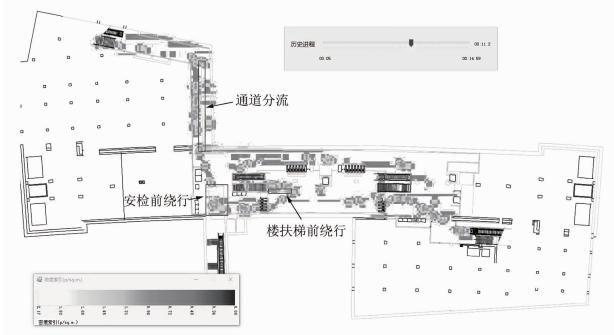


图 7 杨思站站厅层客流态势二次推演后展示界面截图
Fig. 7 The passenger flow situation on the station floor of Yangsi Station after the second deduction

推演各阶段的用时如表 2 所示。由表 2 可知,二次推演用时为 67 s。完整的客流态势推演从 t_r 提出需求至 t_n 二次推演完毕,共计用时 155 s,可满足车站客流态势在线推演和运营优化的时效性要求。

表 2 推演各阶段用时表

项目	用时/s
数据处理及导入阶段	10
一次推演阶段	68
风险研判、数据再处理阶段	10
二次推演阶段	67
总计	155

4 结语

本文针对城市轨道交通车站大客流管控问题,提出了基于多源客流数据和微观仿真技术的车站客流态势快速推演方法。该方法构建了客流快速推演的系统架构,梳理了客流态势推演和客流组织调整的完整流程,解决了客流快速路径搜索和多线程仿真推演等关键问题。以上海轨道交通 8 号线杨思站工作日早高峰客流为案例,测试了客流态势快速推演和客流组织措施调整的可行性和有效性。本文的研究成果在广州地铁 22 号线广州南站站的互联互通换乘服务客流态势推演及优化项目中得到了成功应用。该方法可较高效地完成车站 10~15 min 短时客流态势推演,并为车站客流组织方案的调整提供辅助决策。

经验证,该方法总体达到了本文所提 Level-3 级的车站客流态势推演技术水平。下一阶段可基于本文所提的客流态势快速推演系统架构,进一步对智能化客流拥挤风险识别、发展趋势研判和动态预警方法等进行深入研究,使该方法达到智能化和自动化程度更高的车站客流动态推演层级水平,实现车站客运组织方案的自适应调整和车站大客流的智能化管控。

参考文献

[1] 朱正玲. 城市轨道交通网络高峰时段常态限流问题研究[J]. 铁路通信信号工程技术, 2017, 14(2): 71.
ZHU Zhengling. Passenger inflow control for urban rail transit in peak hours[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2017, 14(2): 71.
[2] 杨贞桢. 上海轨道交通莘庄站常态客流分析及策略研究[J].

城市轨道交通研究, 2014, 17(5): 50.
YANG Zhenzhen. Normal passenger flow analysis and strategic study for Shanghai metro Xinzhuang Station[J]. Urban Mass Transit, 2014, 17(5): 50.
[3] 周菁楠, 李伟, 罗钦. 城轨车站大客流条件下列车运行调整[J]. 深圳大学学报(理工版), 2020, 37(6): 617.
ZHOU Jingnan, LI Wei, LUO Qin. Adjustment for train operation under the condition of mass passenger flow in urban rail transit[J]. Journal of Shenzhen University (Science and Engineering), 2020, 37(6): 617.
[4] 屈晓宜. 基于视频分析技术的轨道交通车站安全预警模型构建及仿真[J]. 自动化与仪器仪表, 2021(3): 4.
QU Xiaoyi. Construction and simulation of rail transit station safety early warning model based on video analysis technology[J]. Automation & Instrumentation, 2021(3): 4.
[5] 陈菁菁, 江志彬. 基于 Wi-Fi 嗅探数据的地铁网络客流分析技术[J]. 城市轨道交通研究, 2018, 21(5): 153.
CHEN Jingjing, JIANG Zhibin. Passenger flow analysis technology in metro network based on Wi-Fi probing data[J]. Urban Mass Transit, 2018, 21(5): 153.
[6] 胡忠顺, 王进, 朱亮. 基于手机信令数据的大客流监控应用研究[J]. 电信技术, 2017(4): 21.
HU Zhongshun, WANG Jin, ZHU Liang. Research on application of large passenger flow monitoring based on mobile phone signaling data[J]. Telecommunications Technology, 2017(4): 21.
[7] 陈春娇. 基于智慧地铁的车站客流压力分级管控策略[J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(1): 52.
CHEN Chunjiao. Research on station passenger flow pressure classification management and control strategy based on smart metro[J]. Urban Mass Transit, 2021, 24(1): 52.
[8] 杨安安, 陈艳艳, 黄建玲, 等. 基于短时客流预测的地铁动态限流预警模型研究[J]. 城市轨道交通研究, 2018, 21(10): 29.
YANG An'an, CHEN Yanyan, HUANG Jianling, et al. Early warning model of metro dynamic flow limitation based on short-term passenger flow forecasting[J]. Urban Mass Transit, 2018, 21(10): 29.
[9] LIU J, CHEN X. Simulation of passenger motion in metro stations during rush hours based on video analysis[J]. Automation in Construction, 2019, 107: 102938.
[10] 赵保锋, 邹晓磊, 屈晓宜. 基于仿真的城市轨道交通站台客流滞留分级预警方法[J]. 城市轨道交通研究, 2017, 20(9): 107.
ZHAO Baofeng, ZOU Xiaolei, QU Xiaoyi. Classification of early warning for passenger flow retention at urban rail transit station based on simulation[J]. Urban Mass Transit, 2017, 20(9): 107.

(收稿日期:2021-04-26)