

城市轨道交通车站局部空间拥堵 风险等级评价方法研究*

田思琪¹ 黄肇红² 罗冬梅² 颜希² 邹晓磊^{1**} 徐瑞华¹

(1. 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 201804, 上海; 2. 广州地铁集团有限公司线网管控中心客运管理部, 510335, 广州//第一作者, 硕士研究生)

摘要 合理地评估城市轨道交通车站内客流拥堵风险,对车站运营安全管理具有重要意义。基于现有的服务水平等级标准,结合密度分布、速度分布和客流流线提出拥挤区域的判别方法,引入指定密度、持续时间等时间维度的指标,提出基于时空维度的客流拥堵风险等级评价方法,通过风险概率值对车站内可能的拥挤区域进行动态识别。以广州地铁杨箕换乘枢纽站为例进行仿真建模,结果表明,优化后拥堵风险降低,服务水平提高,验证了上述方法的可靠性和实用性。

关键词 城市轨道交通; 车站; 客流仿真; 拥堵风险等级; 服务水平

中图分类号 U298.2; U231.4

DOI:10.16037/j.1007-869x.2019.03.008

Evaluation Method of the Congestion Risk Level in the Local Space of Urban Rail Transit Station

TIAN Siqi, HUANG Zhaozhong, LUO Dongmei, YAN Xi, ZOU Xiaolei, XU Ruihua

Abstract Reasonable assessment of the risks of passenger flow congestion at urban rail transit station is of great importance for station safety operation and management. Based on the existing service level standards and combined with the density distribution, velocity distribution and traffic flow, a method to discriminate the crowded area is put forward. By introducing time dimension indicators such as the specified density and the duration of time, a traffic congestion risk grade evaluation method based on spatial-temporal dimension is put forward, and risk probability value is used for the dynamic identification of the crowded area within the station. Finally, Yangji transfer hub station in Guangzhou metro is taken as an example for the modelling simulation, and the result shows that the congestion

risk is reduced, service level is raised after the improvement of station space, the reliability and practicability of the proposed method is verified.

Key words urban rail transit; station; passenger flow simulation; congestion risk level; service level

First-author's address The Key Laboratory of Road and Traffic Engineering, Ministry of Education, Tongji University, 201804, Shanghai, China

目前,城市轨道交通车站客流拥堵程度的评价大多基于服务水平这一指标。该指标由文献[1]提出,并按行人运动的流量、密度和速度关系将客流拥堵程度划分为A—F级。其中,A级表示所评价的区域最宽松,F级表示所评价的区域最为拥挤。由于上述指标与行人流的运动特性参数息息相关,因此不同设施、不同行人流构成的服务水平也不尽相同。文献[2-6]分别对人行道、楼扶梯、通道等设施的服务水平进行研究。文献[7]率先将服务水平引入城市轨道交通车站客运组织管理中,并设置了站台、楼扶梯、闸机、通道等设施的服务水平等级标准。我国主要城市轨道交通的运营企业也分别结合当地的客流特征制定了相应的服务水平等级标准,但是上述服务水平的评价缺乏时间维度的约束。在实际运营中,突发大客流虽然会导致部分设施设备在极短时间内呈现服务水平较低的情况,但是延长所评价的时段后服务水平会发生变化,甚至可能忽略了拥挤现象的存在。如何平衡评价时间和服务水平等级间的关系,使其准确描述客流拥堵程度,对于辅助客运组织管理至关重要。

本文基于现有的服务水平等级标准,引入指定

* 2018年度国家重点研发计划(2018YFB1201402);城市轨道交通系统安全与运维保障国家工程实验室项目(16A0058)

** 本文通信作者

密度持续时间等时间维度指标,提出基于时空维度的客流拥堵风险等级评价方法,通过风险概率值对车站内可能的拥挤区域进行动态识别,为车站管理人员提供参考。

1 城市轨道交通车站客流分布的时空指标

能够反映城市轨道交通车站客流疏散安全的评价指标主要包括时间和空间两类指标。这两类指标可以记录不同区域客流分布的差异,分析不同功能区域服务水平的分布情况,且有助于确定车站内不同区域的协调性和疏散的瓶颈位置。本文研究的评价指标主要包括以下几类。

1.1 平均密度空间分布

平均密度空间分布指乘客疏散过程中,车站内不同“计算区域”(“计算区域”的大小控制该类指标的评价精度,即区域面积越小,指标评价越精细)内的平均客流密度状况。

$$\rho_1 = \frac{n}{S} \quad (1)$$

式中:

- ρ_1 ——平均客流密度值;
- S ——计算区域面积;
- n ——计算区域面积内的人数。

该评价指标可以有效评价车站各个区域的客流聚集状态,是对当前客流疏散空间分布最直接检验的标准。

1.2 平均速度空间分布

平均速度空间分布指乘客疏散过程中,车站内不同区域乘客的平均疏散速度。

$$v = \frac{\sum_{i=1}^n v_i}{n} \quad (2)$$

式中:

- v ——某一区域乘客的平均疏散速度;
- v_i —— n 个乘客中第 i 个乘客的疏散速度。

该评价指标可以直接反映乘客在各个区域的疏散效率。

1.3 瞬时密度空间分布

瞬时密度空间分布指乘客疏散过程中,车站内不同“计算区域”、不同“计算时刻”(“计算时刻”控制该类指标的评价精度,即时间跨度越小,指标评价越精细)的平均客流密度情况。

$$\rho_j = \frac{n}{S} \Big|_{t_j} \quad (3)$$

式中:

- ρ_j ——某一区域、某一时刻客流的瞬时密度;
- t_j ——总时间 t 内的 j 时刻。

1.4 高于指定密度的持续时间

高于指定密度的持续时间是指乘客疏散过程中,不同“计算区域”乘客的瞬时密度高于某指定乘客密度的持续时间累加值。

$$t_E = k \sum_{j=1}^m (\rho_{t_j} > \rho_E) \quad (4)$$

式中:

- t_E ——某区域内高于指定乘客密度的持续时间;
- ρ_E ——某指定乘客密度参数;
- k ——时刻精度。

2 客流拥堵风险等级评价方法研究

2.1 客流流线交叉严重性(拥挤区域)分析方法

基于仿真分析,结合密度分布、速度分布和客流流线,提出拥挤区域的判别方法。客流流线及交叉严重性的分析主要针对车站大厅、通道等客流通行的局部空间。因此,可运用客流平均密度分布图和动态运动路线来分析客流走向,并结合速度分布图来确定客流是否产生交叉以及交叉的严重性。某车站站厅设施布局如图 1 所示。

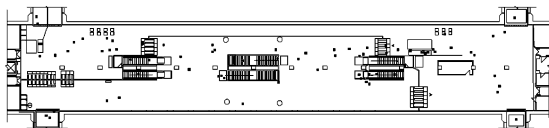


图 1 某车站站厅设施布局图

根据图 2 中某车站站厅一段时间内的平均客流密度分布和动态运动路线来分析客流走向。

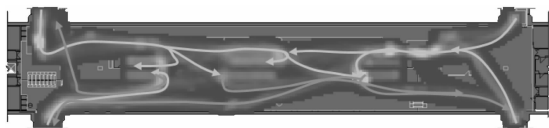


图 2 某车站站厅一定时段内的平均客流密度分布图

进一步可根据该车站站厅段时间内的平均客流速度分布(见图 3)中速度较低的空间区域分布来确定各客流流线交叉的严重程度。其中,安检、闸机、售票机等区域为等候区,因等候服务使得客流速度降低;其他客流低速区域皆为通行区域,在客流流线交叉处为交叉严重区域(见图 3 中的 3 个圆圈标记区域)。针对上述区域应设置局部分流措施。

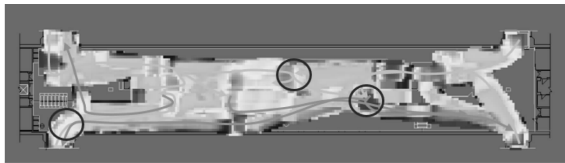


图3 某车站站厅一定时段内的平均客流速度分布图

2.2 客流拥堵风险概率分析方法

平均客流密度展示的是客流密度在一定时段内的平均值分布。该指标一方面不能直接反映车站空间各区域是否拥堵,另一方面亦无法确定乘客拥堵的严重程度和时长。因此不宜通过其直接解读站内拥堵区域的堵塞程度和时间分布,需结合高峰期一定时段内的客流密度速度变化才可判别。同时,车站的客流密度和速度分布是不断变化的,单纯分析某一时刻或较短的时间段远远不够。在实际运营中,突发大客流虽然会导致部分设施设备在极短时间内呈现服务水平较低的情况,但是延长所评价的时段后服务水平会发生变化,甚至可以忽略拥堵现象的存在。因此,需要对整个客流高峰期间空间各区域发生拥堵的时长比例及级别进行综合分析,才能全面反映空间各区域及车站整体的拥堵程度和安全风险。因此,本文提出采用空间各区域不同级别的拥堵时长比例来综合判断拥堵发生的概率,并根据概率表征各区域的拥挤程度和拥堵风险。

2.2.1 拥堵分级概率

拥堵分级概率是指空间某区域达到一定行人服务水平(可参考文献[1]中的分级标准或其他通用标准)的时间比例。以文献[1]中的分级标准为例,当服务水平达到E级和F级时拥堵现象较为严重。由式(3)、式(4)可得到空间任一区域、任一时刻的人群密度即服务水平,以及该区域达到某一服务水平的持续时间,并通过拥堵分级概率表明达到拥堵级别的时间比例。针对概率较高的区域,考虑采取相应级别的限流或客流疏导措施。

$$P_E = \frac{t_E}{t} \quad (5)$$

$$P_F = \frac{t_F}{t} \quad (6)$$

式中:

P_E, P_F ——该区域达到E级和F级服务水平的概率;

t_E, t_F ——持续时间。

2.2.2 拥堵概率

客流密度较高的情况下,如客流拥堵分级概率达到E级或F级时,人群仍可走动,此时存在安全隐患但并不一定发生堵塞。只有在通行区域客流密度较高且行走速度较低时才发生堵塞。所以,可以根据仿真数据计算空间任一区域、任一时刻的客流密度和速度,如满足高密度(E级及以上)、低速度(如0.2 m/s以下)则为堵塞。记录该区域仿真时段内的堵塞时长,可计算该区域的拥堵时间比例,即拥堵概率。针对拥堵概率高的区域,需采取改进设施设备布局,或进行人为限流或疏导的措施。

$$t_E = k \sum_{j=1}^m (\rho_i > \rho_E, v_i < 0.2) \quad (7)$$

$$P_{E,O} = \frac{t_{E,O}}{t} \quad (8)$$

式中:

$P_{E,O}$ ——拥堵概率;

$t_{E,O}$ ——拥堵持续时间;

v_i ——某一区域、某一时刻的瞬时平均速度。

3 案例分析

3.1 PedAge 仿真建模

通过 PedAge 仿真软件建立事件管理层、路径规划层、行人动力学层相结合的三层结构行人Agent(具有感知、决策和运动能力的智能体)模型。

“事件管理层”的主要功能是配合“事件驱动的行人流模型”,对行为流程进行管理,以及对事件的驱动和任务进行指派等。用户自定义一股行人流所要经历的事件流程,并指派每个事件所涉及的设施设备集合。

“路径规划层”利用改进的A*算法进行规划,主要分为两个层面:①宏观路径规划:主要负责为某事件中的某个移动任务找到从起点到目的地的大致路线;②微观路径规划:主要负责在较短距离内根据宏观路径方向和当前拥堵情况等要素找到较为具体的路线。

“行人动力学层”采用了改进的社会力模型,用以负责Agent心理上 and 物理上的受力分析、避让行为以及基于矢量的连续型运动计算等。该结构可以体现行人对空间的需求以及模拟加减速等运动规律,同时可以解决Agent之间的路径冲突问题以及模拟行人在局部区域的动态避让行为。

仿真的总体过程分为基础资料收集、车站建模

仿真和仿真结果评价 3 大步骤,如图 4 所示。

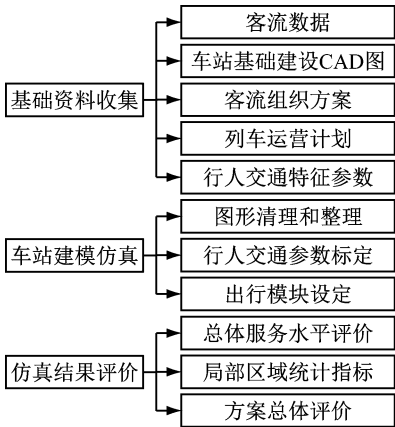


图 4 PedAge 仿真软件建模步骤

与其他同类型仿真软件相比,PedAge 仿真软件实现了瞬时密度的计算,且能够为本文提出的方法提供数据支持,同时对局部空间密度分布的时间变化有了更为精确的分析。

3.2 广州地铁杨箕站仿真分析

借助仿真工具 PedAge,对广州地铁杨箕换乘枢纽站(1、5 号线换乘站)5 号线站厅进行仿真建模,分析站厅局部拥挤区域和拥挤概率。

在参数标定方面,对广州地铁杨箕站、广州火车站站、客村站、石牌桥站、体育西路站和天河客运站站进行了专项调研,得到乘客特征、设施设备服务时间和社会力参数标定等所需的相关参数。经广州地铁相关人员实地考察,仿真结果和现场情况较为契合,有较高的仿真度。与仿真有关的乘客共性特征如下:

3.2.1 步行速度

自由流中单个乘客的平均走行速度为 1.42 m/s,主要分布范围为 1.40 ~ 1.44 m/s;乘客携带行李的平均走行速度为 1.30 m/s,主要分布范围为 1.28 ~ 1.32 m/s;乘客在楼梯中(不分上下行)的平均走行速度为 0.8 m/s,分布范围为 0.78 ~ 0.82 m/s。

3.2.2 部分设施服务时间

云购票时间:只取单程票时约 4 ~ 5 s,购票时约 15 ~ 26 s。售票机购票时间:组群(2 ~ 3 人)购票时约 30 ~ 45 s,单人购票时约 15 ~ 30 s。通过闸机时间:不携带行李时约 1.8 ~ 2.1 s,携带行李时约 1.9 ~ 2.3 s。通过安检时间:携带背包、挎包时约 10 ~ 13 s,携带大件行李时约 15 ~ 19 s。

3.2.3 社会力参数标定

现场观测通道中客流距离墙壁和障碍物的距

离,尤其是行走中客流与立柱和拐角处凸起墙壁或障碍物的距离,再通过调整社会力参数来使仿真过程客流与立柱和拐角处凸起墙壁、障碍物的距离更为接近实际。仿真中,障碍物的排斥力参数 R 取 10, U_{ab} (行人在障碍物标准排斥力作用半径范围内以单位速度行走时的标准排斥力参数)取 2。结果表明客流与障碍物的距离与实际较为相符。

服务水平采用 Fruin 评价指标^[1],如表 1 所示。

表 1 Fruin 评价指标

空间服务水平	占用空间/(m ² /人)	人群密度/(人/m ²)
A 级	≥3.24	≤0.31
B 级	2.32 < · < 3.24	0.31 < · ≤0.43
C 级	1.39 < · ≤2.32	0.43 < · ≤0.72
D 级	0.93 < · ≤1.39	0.72 < · ≤1.08
E 级	0.46 < · ≤0.93	1.08 < · ≤2.17
F 级	≤0.46	>2.17

仿真时间按照 1 h 考虑,具体步骤如下:第一步,通过平均速度及客流流向可以找出拥挤区域(见图 5 虚线方框);第二步,通过瞬时密度监控,得出局部拥堵区域不同时刻的瞬时密度(见图 6),并通过式(6)可得拥堵区域的拥堵概率(见表 2)。

表 2 拥堵区域的拥堵概率

F 级服务水平持续时间/min	拥堵概率/%
18	30

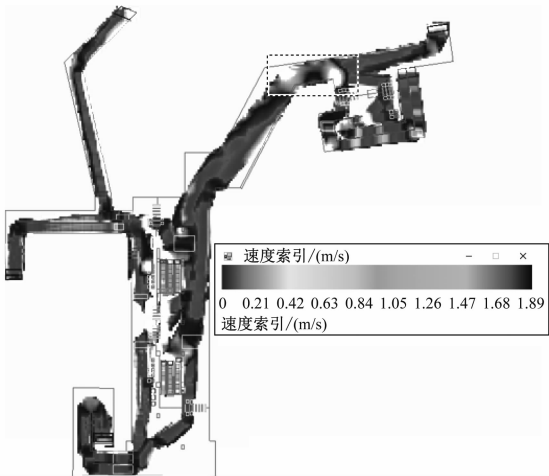


图 5 车站空间的平均速度

根据拥挤区域的判定及拥堵概率,对区域内客流流线进行分析。图 6 中的拥堵区域通道为混合通道,该通道既有 5 号线进出站客流,又是 1、5 号线换乘的必经通道。因此,在假定客流不变的情况下,

在该通道设置铁马进行乘客分流,能有效地减少各类乘客的冲突。优化后结果如图7,结果表明,优化后的拥堵概率降为0。由此可知,在该通道设置铁马能很好地将客流进行分流,使得其平均速度有一定提高,同时可以看到并没有因为这一分流措施而产生新的局部拥堵区域,因此实现了较好的优化效果。

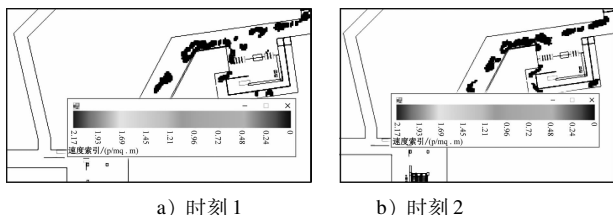


图6 车站局部拥堵区域不同时刻的瞬时密度

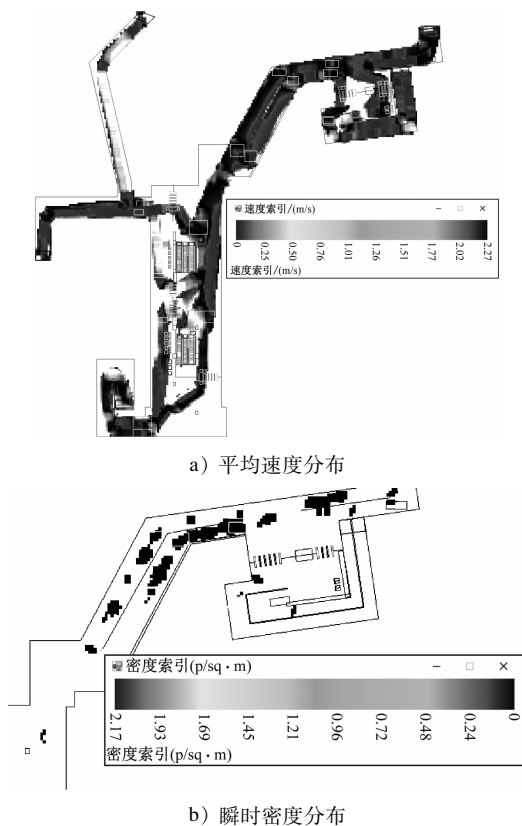


图7 优化后车站空间的平均速度和瞬时密度分布图

4 结论

本文基于现有的服务水平等级标准,结合时间和服务水平等级间的关系,引入指定密度持续时间

等时间维度的指标,使其准确描述客流拥挤和拥堵程度;提出基于时空维度的客流拥堵风险等级评价方法,对整个客流高峰期间空间各区域发生拥堵的时长比例及级别进行综合分析,定量反映空间局部区域的拥堵程度和安全风险,通过拥堵概率值对车站内可能的拥挤区域进行识别。基于仿真分析,结合密度分布、速度分布和客流流线,提出拥挤区域的判别方法。并以广州地铁杨箕换乘枢纽站为例进行仿真建模,结果表明,该方法能有效直观地获得地铁车站站内的拥挤区域及拥堵概率,并可对其加以改善。

本文后续将做以下研究:

(1) 目前只针对局部空间进行了定量研究,今后仍需对不同空间进行分析。即通过建立车站整体的分时段拥堵风险分布图来研究不同空间拥堵风险变化的规律。

(2) 基于不同空间拥堵风险的变化,分析服务流程中各空间拥堵风险的关联性和相互影响。

(3) 可对拥堵风险计算的时长进行调整,在此基础上,对车站历史客流数据进行仿真计算,以用于对未来车站客流拥堵风险的短时预测和预警。

参考文献

- [1] FRUIN J J. Pedestrian planning and design [M]. New York: Metropolitan Association of Urban Designers and Environmental Planners Inc, 1971.
- [2] National Research Council (NRC). Highway Capacity Manual [M]. Washington, D. C.: TRB, 2010.
- [3] 黎韦利. 人行道服务水准评估之研究 [D]. 台北: 国立交通大学交通运输研究所, 1999.
- [4] 谭丹丹, 王炜, 陆建, 等. 人行道行人服务水平评价方法研究 [J]. 交通运输系统与工程, 2007, 7(5): 74.
- [5] 史建港. 大型活动行人交通特性研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2009.
- [6] 吴娇蓉, 叶建红, 陈小鸿. 大型活动场馆参观人流服务水平分级研究 [J]. 同济大学学报(自然科学版), 2007, 35(6): 850.
- [7] LI D Q, FU B W, WANG Y P, et al. Percolation transition in dynamical traffic network with evolving critical bottlenecks [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2015, 112(3): 69.
- [8] 贺杰. 城市轨道交通车站客流拥堵等级评价模型研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2014.

(收稿日期: 2018-06-05)

欢迎投稿《城市轨道交通研究》

投稿网址: tougao. umt1998. com