

地铁车站流线拥堵状态实时评价模型^{*}

施萍萍 胡 华 郝妍熙 方 勇 刘志钢

(上海工程技术大学城市轨道交通学院, 201620, 上海)

摘 要 [目的] 车站大客流管控措施的精准启动、效果评价和动态信息发布等需要更有效的依据。对此,有必要从流线层面考虑设施类型多样性及拥堵并发性等,建立地铁车站流线拥堵状态实时评价模型来评价实时客流状态。[方法] 将流线设施划分为节点设施和通道设施,基于流线拥堵的时空拥堵传播特性分析基于视频识别技术提取客流参数的可行性,提出了全流线节点平均延误时间、全流线节点排队空间溢出率、全流通道行走速度变异系数三个评价指标的定义及计算公式。面向动态信息发布,基于蚁群聚类算法确定了某车站流线的瞬时拥堵等级划分标准,并通过 CRITIC(客观赋权法)确定流线瞬时拥堵指标权重。以上海轨道交通漕河泾开发区站东厅主要进站流线为例,对该流线瞬时拥堵等级进行分析,并分析了不同拥堵信息发布间隔的流线综合拥堵等级变化。[结果及结论] 流线拥堵状态与多个单点设施的拥堵状态相关。对二者进行综合分析,能够为车站单点及流线等不同层面大客流管控措施的启动时机、顺序和效果评价等提供更全面的依据。

关键词 地铁车站; 流线拥堵状态; 实时评价模型; 拥堵特性; 动态信息发布

中图分类号 U293.13

DOI:10.16037/j.1007-869x.20230752

Real-time Evaluation Model for Metro Station Passenger Flow Streamline Congestion State

SHI Pingcui, HU Hua, HAO Yanxi, FANG Yong, LIU Zhigang

(School of Urban Rail Transportation, Shanghai University of Engineering Science, 201620, Shanghai, China)

Abstract [Objective] Implementing precise initiation, performance evaluation and dynamic information dissemination of metro station large passenger flow management and control measures requires more effective support. It is necessary to consider the diversity of facility types and the concurrency of congestion from the perspective of passenger flow streamlines. A congestion state real-time evaluation model of metro station passenger flow streamline for assessing real-time passenger flow conditions is established. [Method] Passenger flow stream-

line facilities are categorized into node facilities and passageway facilities. Based on the spatiotemporal propagation characteristics of streamline congestion and the feasibility of extracting passenger flow parameters via video recognition technology, three evaluation indicators — average delay time at all node facilities, queue space overflow rate at all node facilities, and variation coefficient in walking speed across all passageway facilities — are defined and formulated. Targeting dynamic information dissemination, the instantaneous congestion level classification criteria for a given station streamline is determined based on ant colony clustering algorithm, and the CRITIC method (an objective weighting approach) is used to determine the weights of streamline instantaneous congestion indicators. Taking the east station-hall main inbound passenger flow streamline of Shanghai Rail Transit Caohejing Hi-Tech Park Station as a case study, the streamline's instantaneous congestion levels are analyzed, as well as the changes in streamline overall congestion levels under different congestion information dissemination intervals. [Result & Conclusion] The congestion state of passenger flow streamline is related to that of multiple individual node facilities. By conducting a comprehensive analysis, this model provides a more holistic basis for determining the initiation timing, sequencing, and effectiveness of large passenger flow management and control measures across different levels of nodes and streamlines.

Key words metro station; streamline congestion state; real-time evaluation model; congestion characteristics; dynamic information dissemination

0 引言

随着地铁车站客流规模的不断增大,部分车站设施已无法适应实际客流需求,客流拥堵频发,增加了高密度人群冲突和拥挤踩踏的风险。考虑到各类设施供需态势的时空关联性,从流线层面开展客流拥堵状态实时评价是提高地铁车站大客流管

^{*} 国家自然科学基金项目(52072235, 71971136);上海市科委地方院校能力建设项目(19030501400)

理效率的有效手段,能够为地铁车站客流流线的动态优化、大客流实时监测预警及应急处置等客运管理工作提供科学依据,对于保障地铁车站安全及高效运营具有重要作用。

目前,国内外多采用服务水平法及密度法来评价地铁车站客流拥堵状态。文献[1]综合考虑乘客的行走速度、人群密度和客流速率,提出基于密度估计的数据驱动数学方法分析拥堵概率。文献[2]利用视频数据,以乘客占用空间、平均步行速度和单位宽度客流量为评价指标评价车站通道、楼梯、站台拥堵状态。文献[3]基于服务水平提出了站台、楼扶梯及闸机等设施的服务水平等级标准。文献[4]基于客流预测数据,以空间服务水平、平均换乘距离及时间为指标,借助仿真软件评价了车站换乘通道拥堵状态。文献[5]通过仿真软件识别车站拥堵点后,以客流密度为评价指标,评价拥堵点。文献[6]通过仿真建模,引入指定密度及持续时间等指标,利用调研数据对车站候车区域的拥堵等级进行评价。

然而,客流拥堵状态评价须解决以下问题:第一,仅以设施服务水平或客流密度为评价指标,难以准确描述设施客流过饱和(产生排队)后拥堵状态的变化;第二,客流拥堵状态评价多依赖历史数据或仿真数据,聚焦于车站单点设施或局部区域,未从流线层面上考虑设施多样性、拥堵并发性及传播性等特性。

对此,本文基于视频识别技术提取实时客流参数,考虑流线上各类设施的客流拥堵特性及其时空传播特性,构建流线拥堵状态评价指标体系和车站流线瞬时拥堵等级评价模型,进一步考虑不同拥堵等级的持续时间,建立面向动态信息发布的流线综合拥堵评价模型。

1 车站流线的拥堵特性

地铁车站流线是指在一定时间过程中,乘客在地铁车站从起点经过多个设施到达终点的活动过程,一般是指流线起终点间的最短有向路径。站台为流线的交织区和客流集散区,对其独立评价能更准确地反映车站流线及车站的整体拥堵状态。本文选出入口或连接站台站厅的楼扶梯作为流线起终点,考虑客流通行及拥堵特性,将流线上各设施划分为出入口、安检机、闸机及楼扶梯等节点设施,以及连接节点之间的通道设施。典型地铁车

站进站流线及拥堵传播方向如图1所示。

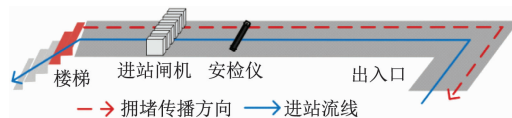


图1 典型地铁车站进站流线及拥堵传播方向

Fig. 1 Diagram of inbound passenger flow streamline and congestion propagation direction in a typical metro station

在拥堵状态下,节点设施的客流到达率大于饱和和流出率,发生排队现象,若不及时疏解,其排队长度会向相邻区域或下游设施传播,影响其他流线或设施的通行效率。对于通道设施,在静态瓶颈区、转弯区或合流区等关键瓶颈区段发生拥堵时,客流的行走速度和局部密度会发生变化。对此,本研究基于流线上不同类型设施的客流拥堵特性构建车站流线拥堵评价指标体系。

2 车站流线拥堵状态评价指标体系

地铁车站流线上设施拥堵的影响会在时间及空间上扩散,直至自然消退或经干预而消退。由于流线上的客流分布及拥堵状态动态变化,故仅根据瞬态情况评价流线拥堵状态不合理。在实际运营中,存在持续时间较长的常态大客流或突发短时大客流,故延长评价时段后,拥堵状态评价结果也会发生变化,甚至可能忽略极短时拥堵现象。因此,还应计算整个高峰期间流线拥堵的空间范围、拥堵等级和时长比例,从而全面体现车站各条流线及车站整体的拥堵程度和安全风险。

2.1 全流线节点设施的平均延误时间

全流线节点设施的平均延误时间 t_L 是指乘客在流线上各节点设施处产生的平均排队延误时间之和。该指标以行人在流线上额外耗费的时间来直接反映流线的客流拥堵强度,即:

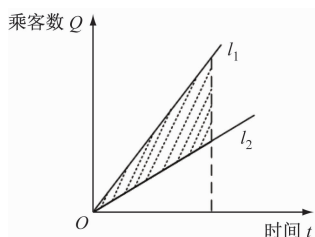
$$t_L = \sum_{i=1}^m t_i \quad (1)$$

式中:

t_i ——流线上节点设施 i 的平均排队延误时间, $i=1,2,\dots,m$ 。

为获得 t_i ,在节点设施乘客到达区域布设视频点,通过视频识别技术采集节点设施 i 的客流到达率 λ_i 及饱和和流出率 $\mu_{i,\max}$ 。根据文献[7],高峰时段 λ_i 近似服从线性分布。当 $\lambda_i > \mu_{i,\max}$ 时,节点设施 i 发生排队,此时的乘客累积到达曲线 I_i 和乘客流出

曲线 l_2 如图 2 所示。



注: l_1 拟合方程为 $Q = \lambda_i t$; l_2 拟合方程为 $Q = \mu_{i,\max} t$ 。

图 2 乘客累积到达曲线与流出曲线示意图

Fig. 2 Diagram of passenger cumulative arrival and departure amount curves

图 2 中阴影部分面积为乘客总延误时间 t_z , 故:

$$t_i = t_z / \lambda_i t = (\lambda_i - \mu_{i,\max}) t / 2 \lambda_i \quad (2)$$

2.2 全流线节点设施排队溢出率

当节点设施 i 处乘客排队长度超过该节点设施的允许排队空间并对其他流线或设施的通行效率产生影响时, 该节点设施产生排队溢出现象。例如某楼梯处乘客排队导致其相邻上游闸机组处乘客无法通行, 则判断该楼梯产生排队溢出现象, 如图 3 所示。全流线节点设施排队溢出率 η 是指流线上存在排队溢出现象的节点设施数占总节点设施数的比例。

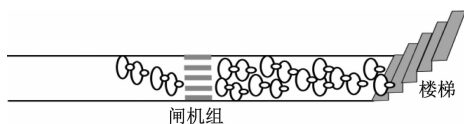


图 3 楼梯排队溢出现象示意图

Fig. 3 Diagram of staircase queue overflow phenomenon

由于流线上不同节点设施产生排队溢出后对流线或设施的通行影响程度存在差异^[8], 考虑受影响流线或设施的客流量及排队溢出长度等影响因素, 采用层次分析法对流线不同节点设施的排队溢出情况赋予不同的权重, 以获得更客观的 η , 即:

$$\eta = \sum_i \gamma_i R_i \quad (3)$$

式中:

R_i ——节点设施 i 的排队溢出值, $R_i = 0$ 表示未发生排队溢出, $R_i = 1$ 表示发生排队溢出;

γ_i ——节点设施 i 的排队溢出权重, $\sum_{i=1}^m \gamma_i = 1$ 。

2.3 全流线通道走行速度变异系数

进出站通道或换乘通道等通道设施一般为长且窄的线形结构, 行人通行时间较长。在非拥挤状

态下通道设施内的行人走行速度较为稳定, 拥挤状态下通道设施内行人走行速度波动较大。全流线通道走行速度变异系数 C_v 是指行人平均走行速度的标准差与行人平均走行速度平均值的比值, 即:

$$C_v = \sqrt{\frac{1}{p} \sum_{g=1}^p \left(v_g - \frac{1}{p} \sum_{g=1}^p v_g \right)^2} \bigg/ \left(\frac{1}{p} \sum_{g=1}^p v_g \right) \quad (4)$$

式中:

v_g ——通道关键瓶颈区段布设的第 g 个视频监控点的乘客走行速度, $g = 1, 2, \dots, p$ 。

C_v 越大, 说明乘客在通道上的走行速度波动越大, 则通道越拥挤。

3 车站流线拥堵状态评价模型

3.1 车站流线瞬时拥堵等级评价模型

t_L 、 η 、 C_v 均同流线拥堵状态呈正相关关系。三项指标越大, 表明流线拥堵越严重。为了综合比较各时间段车站流线瞬时拥堵状态, 并为车站安全管理提供决策支持, 提出综合评价指标即车站流线瞬时拥堵指数, 以描述流线拥堵状态。为了消除数据量纲和数量级影响, 并保持了原始数据和关联系数一致性, 可对评价指标值进行量纲一化处理, 即:

$$x_{q,k,1} = \frac{x_{q,k} - \min(X_q)}{\max(X_q) - \min(X_q)} \quad (5)$$

式中:

$x_{q,k}$ ——第 k 个评价样本中第 q 个评价指标的原始值, $q = 1, 2, 3$;

X_q ——所有评价样本中的第 q 个评价指标原始值序列;

$x_{q,k,1}$ —— $x_{q,k}$ 量纲一化处理后的值。

其中, $q = 1$ 时指标为 t_L , $q = 2$ 时指标为 η , $q = 3$ 时指标为 C_v 。

CRITIC(客观赋权法)采用对比强度和冲突性来表征各评价指标所蕴含信息量的大小。相比于主观法, CRITIC 能更全面地考虑各指标的差异性和关联性, 使权重更客观、准确。对评价指标而言, 单评价指标的波动性越大, 对比强度就越大, 所蕴含的信息量也就越大; 评价指标关联性越小, 冲突性就越大, 对流线拥堵等级的影响也就越大。第 q 个评价指标的权重 ω_q 及信息量 C_q 为:

$$\omega_q = C_q / \sum_q C_q \quad (6)$$

$$C_q = \sigma_q \left[\sum_{a,b} (1 - |r_{a,b}|) \right] \quad (7)$$

式中:

σ_q ——第 q 个评价指标的标准差;

$r_{a,b}$ ——样本 a 、 b 之间的相关性系数。

第 k 个样本的车站流线瞬时拥堵指数 W_k 为:

$$W_k = \sum_q \omega_q x_{q,k,1} \quad (8)$$

之后,根据算得的 W_k 取值范围,采用蚁群聚类算法确定车站流线拥堵等级阈值^[9],从而确定车站流线瞬时拥堵等级。

3.2 面向动态信息发布的车站流线综合拥堵等级

为满足车站动态信息发布和大客流预警管控的需求,本文以车站流线综合拥堵等级来反映该流线在一定时间段内的平均拥挤强度。车站流线综合拥堵等级是动态变化的,为全面反映流线拥堵程度和安全风险,应综合考虑车站高峰时段流线瞬时拥堵等级的波动程度及大客流分级预警响应时间^[10],来确定合理的车站流线综合拥堵等级信息发布时间间隔 t_N 。在 t_N 内包含了 n 个流线瞬时拥堵指数值,则流线综合拥堵指数 P 为:

$$P = \sum_k \left(\frac{W_k}{n} \right), \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (9)$$

结合 P 及车站流线综合拥堵等级阈值,即可确定某时段的车站流线综合拥堵等级。

4 实例分析

4.1 数据采集

上海轨道交通漕河泾开发区站(以下简称“漕河泾站”)有东西两个互不连通的站厅,选取该站东进站厅 2 号口至站台楼扶梯之间的进站流线(以下简称“流线 A”)为研究对象。流线 A 有 1 个出入口、1 个安检仪、1 组进站闸机、1 组楼扶梯,以及连接相邻节点设施的通道设施。晚高峰时段,流线 A 承担了该站 60% 以上的进站量。在每日 17:00—18:00 时段,漕河泾站采取 1 号口只出不进、2 号口只进不出的单向客流组织措施。根据流线通行能力计算分析和实地观测,常态情况下晚高峰时段流线 A 的楼扶梯处不存在拥堵情况。据此,设置流线 A 的数据采集点如图 4 所示。

4.2 数据分析

以视频数据为依据,标定高峰时段各节点设施的 $\mu_{i,\max}$ 实际值:安检机为 60 人次/min、6 台闸机为 92 人次/min,在 I 级限流(启用限流栏杆)及 II 级限流(启用限流栏杆并关闭一半限流栏杆出口)下出

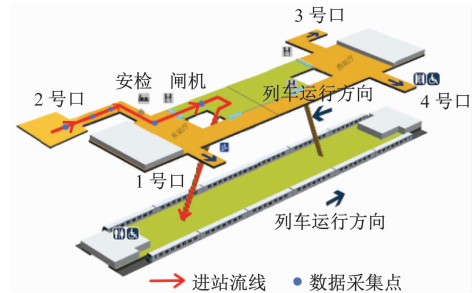


图 4 流线 A 的数据采集点示意图

Fig. 4 Diagram of data collection points for streamline A

入口的 $\mu_{i,\max}$ 分别为 60 人次/min 和 120 人次/min。以 1 min 为统计时间步长,统计流线 A 各设施的客流参数,并计算评价指标值。采集得到 60 组评价样本值,部分样本值见表 1。根据式(6)对其进行量纲一化处理,结果见表 2。

表 1 流线拥堵状态评价指标值(部分)

Tab. 1 Streamline congestion state evaluation indicator value (partial)

k	t_g/min	η	C_v
11	0.161	0.000	0.000
12	0.475	0.000	0.000
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
59	1.482	0.611	0.134
60	1.522	0.611	0.150

表 2 量纲一化后的指标值(部分)

Tab. 2 Indicator value after normalization treatment (partial)

k	量纲一化后 t_g	量纲一化后 η	量纲一化后 C_v
11	0.082	0.000	0.000
12	0.242	0.000	0.000
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
59	0.755	0.815	0.700
60	0.775	0.815	0.785

由式(6)及式(7)计算可得, t_g 、 η 、 C_v 的权重分别为 0.477、0.394、0.129。由式(9)计算可得流线瞬时拥堵指数,见表 3。

表 3 流线瞬时拥堵指数

Tab. 3 Instantaneous congestion indicator of streamlines

k	11	12	\dots	58	59	60
W_k	0.039	0.116	\dots	0.751	0.772	0.792

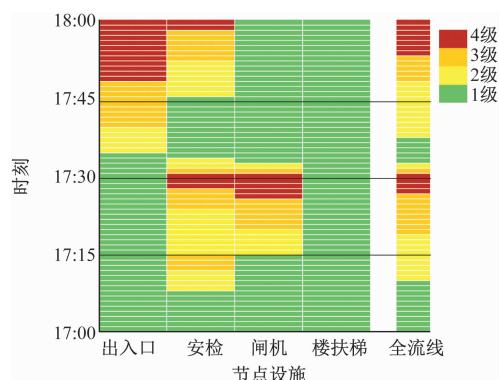
利用聚类算法确定流线 A 的瞬时拥堵等级划分标准,结果见表 4。

表4 流线A的瞬时拥堵等级划分标准

Tab.4 Streamline A instantaneous congestion level classification standards

拥堵等级	拥堵程度	W_k
1级	畅通	$0 \sim < 0.038$
2级	基本畅通	$0.038 \sim < 0.472$
3级	拥挤	$0.472 \sim < 0.693$
4级	严重拥挤	≥ 0.693

结合蚁群聚类并考虑节点平均延误时间指标分析法,取 $t_N = 1$ min,计算节点设施瞬时拥堵等级的时间分布,如图5所示。

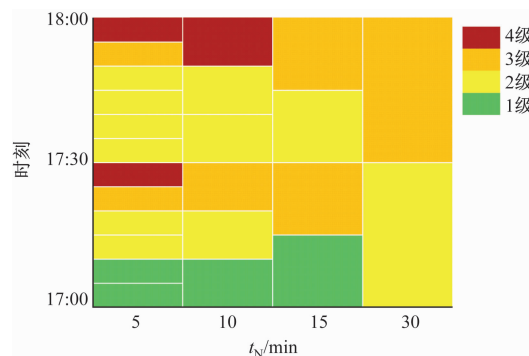
图5 $t_N = 1$ min时节点设施的瞬时拥堵等级分布Fig.5 Instantaneous congestion level distribution of node facilities at $t_N = 1$ min

结合计算结果可见:17:08开始,乘客到达率超过安检机的饱和和流出率,安检机处排队延误;车站于17:15启动小包免检的单元管控措施,安检机处畅通,而闸机处乘客到达率超过饱和和流出率,又因闸机距安检机较近,故闸机处发生了排队溢流,流线严重拥堵;17:30,改变3台出站闸机方向,并在2号口采用Ⅰ级限流,使流线转为基本畅通;随着限流时长的增加,2号口排队延误上升,启动Ⅱ级限流,但由于乘客到达率仍超过饱和和流出率,出入口和安检机处排队延误增大,出入口出现排队溢流。此时,应从流线层面启动出入口和站内的分流引导措施,并将安检机增至2台,提升流线的通行能力,缓解拥堵。

从流线A的分析结果来看,当至少2个节点设施发生严重拥堵,或单点产生排队溢流影响其他设施或流线时,该流线的拥堵状态达严重拥堵。

4.3 不同发布间隔下流线综合拥堵等级分析

t_N 分别取5 min、10 min、15 min、30 min,对流线A的综合拥堵等级进行评价,结果如图6所示。

图6 不同 t_N 的流线A综合拥堵等级分布Fig.6 Streamline A overall congestion level distribution under different t_N conditions

由图6可见:不同 t_N 的流线A拥堵状态变化趋势大体一致;当 t_N 为10 min或15 min时,流线A的拥堵等级为3级或4级的情况有所减少;当 t_N 为30 min时,流线A的拥堵等级仅为2级或3级,未出现4级的情况。综合考虑车站大客流管控的投入产出效率,建议流线 t_N 取10 min。

5 结语

1) 车站不同流线的拥堵程度对车站整体的集散能力影响不同。受不同流线上客流结构及设施局限性的影响,根据车站各条流线及车站整体的拥堵程度和安全风险调整客流管控方案,有必要对流线上发生拥堵的空间范围、拥堵等级和时长比例进行综合分析。

2) 流线上的客流分布及拥堵状态是不断变化的,仅依据瞬态情况来确定流线拥堵状态是不合理、不可行的,但若 t_N 过长则会忽略持续一定时长的突发性大客流。应综合考虑车站实际客流波动和大客流管控能力,来确定合理的 t_N 。

3) 实例分析表明:流线拥堵状态与多个单点设施的拥堵状态相关;对二者综合分析,能够为车站单点、流线等不同层面大客流管控措施的启动时机、顺序和效果评价等提供更全面的依据。

参考文献

- [1] WANG J, CHEN M, YAN W, et al. A data-driven approach to estimate the probability of pedestrian flow congestion at transportation bottlenecks[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2019, 23(1): 251.
- [2] ZHOU J, WU Y, MAO Y, et al. Congestion evaluation of pedestrians in metro stations based on normal-cloud theory[J]. Applied Sciences, 2019, 9(17): 3624.

- [3] LI D, FU B, WANG Y, 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): 669.
- [4] 刘善维, 张杨. 基于 AnyLogic 仿真的城市轨道交通三线换乘站功能评价[J]. 交通运输工程与信息学报, 2021, 19(1): 135.
- LIU Shanwei, ZHANG Yang. Functional evaluation of urban rail transit three-line transfer station based on AnyLogic simulation[J]. Journal of Transportation Engineering and Information, 2021, 19(1): 135.
- [5] 费爽, 刘智丽. 地铁换乘系统拥堵点的仿真分析及优化研究[J]. 城市轨道交通研究, 2018, 21(7): 100.
- FEI Shuang, LIU Zhili. Simulation analysis of metro congestion points and optimization method[J]. Urban Mass Transit, 2018, 21(7): 100.
- [6] 田思琪, 黄肇红, 罗冬梅, 等. 城市轨道交通车站局部空间拥堵风险等级评价方法研究[J]. 城市轨道交通研究, 2019, 22(3): 31.
- TIAN Siqi, HUANG Zhaohong, LUO Dongmei, et al. Evaluation method of the congestion risk level in the local space of urban rail transit station[J]. Urban Mass Transit, 2019, 22(3): 31.
- [7] 魏万旭, 方勇, 胡华, 等. 基于视频数据挖掘的城市轨道交通车站行人交通行为特征提取系统研究[J]. 铁道运输与经济, 2021, 43(8): 119.
- WEI Wanxu, FANG Yong, HU Hua, et al. Study on characteristics extraction system of pedestrian traffic behavior for subway stations based on video data mining[J]. Railway Transport and Economy, 2021, 43(8): 119.
- [8] 焦柳丹, 罗敏, 谌微微, 等. 基于复杂网络和 VIKOR 的城市轨道交通网络站点重要度研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2022, 41(10): 16.
- JIAO Liudan, LUO Min, CHEN Weiwei, et al. Station importance of urban rail transit network based on complex network and VIKOR[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2022, 41(10): 16.
- [9] WU H W, ZHEN J, ZHANG J. Urban rail transit operation safety evaluation based on an improved CRITIC method and cloud model[J]. Journal of Rail Transport Planning & Management, 2020, 16: 100206.
- [10] 李宗平, 陈宇帆, 鞠艳妮, 等. 多制式区域轨道交通网络关键节点识别[J]. 安全与环境学报, 2022, 22(6): 3217.
- LI Zongping, CHEN Yufan, JU Yanni, et al. Identification of key nodes in multi-mode regional rail transit networks[J]. Journal of Safety and Environment, 2022, 22(6): 3217.
- [11] 丁波, 彭瑾蓉, 徐光明, 等. 基于 AnyLogic 的轨道交通车站站厅设备布局优化及评价[J]. 铁道科学与工程学报, 2020, 17(6): 1578.
- DING Bo, PENG Jinrong, XU Guangming, et al. Optimizing and evaluating the equipment layout of rail transit station hall based on AnyLogic[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2020, 17(6): 1578.
- [12] 肖文锦, 张琦. 基于灾害蔓延理论的拥堵传播建模与仿真[J]. 铁道科学与工程学报, 2018, 15(6): 1593.
- XIAO Wenjin, ZHANG Qi. Modeling and simulation of congestion propagation based on disaster spreading dynamic model[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2018, 15(6): 1593.
- [13] SAEEDMANESH M, GEROLIMINIS N. Dynamic clustering and propagation of congestion in heterogeneously congested urban traffic networks[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2017, 105: 193.
- [14] 姚加林, 潘学成. 基于排队论的高铁车站安检设备运用优化研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2020, 17(8): 1919.
- YAO Jialin, PAN Xuecheng. Research on application by optimization of security inspection equipment in high-speed railway station based on queuing theory[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2020, 17(8): 1919.
- [15] 黄艳国, 宋二猛, 钟建新. 城市区域路网交通状态分析与评价方法[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2017, 36(12): 91.
- HUANG Yanguo, SONG Ermeng, ZHONG Jianxin. Analysis and evaluation method for traffic state of urban regional road network[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2017, 36(12): 91.
- [16] 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.
- [17] 徐慧智, 赵小红, 武腾飞. 考虑乘客流量和节点重要度的地铁站信息查询台优化布置[J]. 交通运输系统工程与信息, 2019, 19(6): 68.
- XU Huizhi, ZHAO Xiaohong, WU Tengfei. Optimal layout of subway station information query platform considering passenger flow and node importance[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2019, 19(6): 68.
- [18] 崔欣, 路庆昌, 徐鹏程, 等. 基于重要性贡献矩阵的城市轨道交通关键站点识别[J]. 铁道科学与工程学报, 2022, 19(9): 2524.
- CUI Xin, LU Qingchang, XU Pengcheng, et al. Critical station identification based on node importance contribution matrix in urban rail transit network[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2022, 19(9): 2524.
- [19] 文孝霞, 聂羿, 杜子学. 基于云模型和改进 CRITIC 方法的跨座式单轨车辆运营安全评估[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2022, 43(5): 512.
- WEN Xiaoxia, NIE Yi, DU Zixue. Operational safety assessment of straddle monorail vehicle system based on cloud model and

(下转第 169 页)

- learning[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2023.
- [22] 刘浩洋. 基于 Transformer 的地铁短时客流预测研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2023.
- LIU Haoyang. Research on short-term passenger flow forecast of subway based on Transformer[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2023.
- [23] 芦永玖. 基于组合模型的城市轨道交通车站客流预测方法[D]. 南京: 南京理工大学, 2023.
- LU Yongjiu. Passenger flow prediction method of urban rail transit station based on combined model[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2023.
- [24] 孙孟毅, 万孟飞. 基于列车满载率控制的地铁线网大客流车站协同控制研究[J]. 工程建设与设计, 2023(2): 71.
- SUN Mengyi, WAN Mengfei. Research on station collaborative control of metro network large passenger flow based on train load factor [J]. Construction & Design for Engineering, 2023(2): 71.
- [25] 黎佳妮. 基于 Anylogic 的某地铁车站“T”型换乘客流组织方式研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2022.
- LI Jiani. Research on the organization mode of 'T' transfer passenger flow in a subway station based on Anylogic [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2022.
- [26] 张顺勇. 基于 Legion 的地铁车站客流疏运仿真研究[J]. 未来城市设计与运营, 2022(9): 54.
- ZHANG Shunrong. Simulation study on passenger flow distribution in subway station based on Legion[J]. Future City Studies, 2022(9): 54.
- [27] 彭凯贝, 白伟, 伍柳伊, 等. 基于改进 LSTM 模型的铁路客运站客流预测研究[J]. 铁道运输与经济, 2023, 45(4): 53.
- PENG Kaibei, BAI Wei, WU Liuyi, et al. Research on method for prediction of passenger flow of railway station based on improved LSTM model [J]. Railway Transport and Economy, 2023, 45(4): 53.
- [28] 蔡昌俊. 城市轨道交通进出站短时客流预测模型研究[J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(9): 14.
- CAI Changjun. Study on urban rail transit entry and exit short-term passenger flow prediction model [J]. Urban Mass Transit, 2021, 24(9): 14.
- [29] 史永飞. 多尺度时序特征融合的地铁短时客流预测方法[J]. 福建电脑, 2023, 39(3): 15.
- SHI Yongfei. Short-term metro passenger flows prediction with multi-scale temporal feature fusion [J]. Journal of Fujian Computer, 2023, 39(3): 15.
- [30] 顾吉鹏, 邵亮, 陆垂基, 等. 基于 LSTNet 模型的配电台区短期电力负荷预测研究[J]. 电气传动, 2023, 53(5): 63.
- GU Jipeng, SHAO Liang, LU Chuiji, et al. Research on short-term power load forecasting in distribution area based on LSTNet model[J]. Electric Drive, 2023, 53(5): 63.
- [31] 刘杰, 蒋树旗. 基于 LSTNet 网络的风电机组发电机主轴承温度预测研究[J]. 传感技术学报, 2022, 35(7): 945.
- LIU Jie, JIANG Shuqi. Temperature prediction of main bearing of wind turbine generator based on LSTNet[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2022, 35(7): 945.
- [32] SUEBSOMBUT P, SEKHARI A, SUREEPHONG P, et al. Field data forecasting using LSTM and Bi-LSTM approaches [J]. Applied Sciences, 2021, 11(24): 11820.
- [33] 李争和. 基于深度学习的水文时间序列预测模型及可解释性量化分析研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2021.
- LI Zhenghe. Study on hydrological time series prediction model and interpretable quantitative analysis based on deep learning [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2021.
- 收稿日期:2024-09-18 修回日期:2024-11-07 出版日期:2025-07-10
Received:2024-09-18 Revised:2024-11-07 Published:2025-07-10
- 通信作者:许玲,正高级工程师,nb_metro@163.com
- ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

(上接第 162 页)

- improved CRITIC method [J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 2022, 43(5): 512.
- [20] 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.
- 收稿日期:2023-07-04 修回日期:2025-01-15 出版日期:2025-07-10
Received:2023-07-04 Revised:2025-01-15 Published:2025-07-10
- 第一作者:施萍萍,硕士研究生,492014509@qq.com
通信作者:胡华,教授,383755741@qq.com
- ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license