

基于行人仿真的中运量公交站台的规模分析与设计

刘宇星

(上海城市交通设计院有限公司, 上海市 200025)

摘要: 公交站台是客运系统中的重要一环,合理设计公交站台能够有效显著提升乘客出行体验和出行效率。以上海市71路公交西延伸工程为例,基于行人运动规律,为中运量公交站台的设计和服务水平评价提供支撑。首先,通过计算中运量公交泊位数得出站台的最小长度。然后,基于行人运动基本图和速度优化公式建模仿真,分析乘客在不同场景和状态下的运动速度、密度和流率情况,得出通道宽度等场景的较优解;最后,对站台服务水平进行评价,得出不同服务水平下的行人运动速度与流率,并结合71路公交西延伸工程设计进行了验证;行人仿真为中运量公交站台的规模分析提供了一个新的方法,可供类似工程参考。

关键词: 公交站台;服务水平评价;行人运动仿真;行人运动规律;站台规模设计

中图分类号: U412.37; TU997

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)03-0126-06

Scale Analysis and Design of Medium-Capacity Bus Stops Based on Pedestrian Simulation

LIU Yuxing

(Shanghai Urban Traffic Design Institute Co., Ltd., Shanghai 200025, China)

Abstract: Bus stops are an important part of the passenger transport system. Rational design of bus stops can effectively and significantly enhance the travel experiences and travel efficiency of the passengers. Taking the Shanghai Bus Route 71 West Extension Project as an example, and based on the movement laws of pedestrians, a support for designing the medium-capacity bus stops and evaluating the level of service (LOS) is provided. Firstly, the minimum length of the bus stops is obtained by calculating the number of parking spaces for medium-capacity buses. Subsequently, based on the basic graph of pedestrian movement and the speed optimization formula, the modeling and simulation are conducted to analyze the movement speed, density and flow rates of the passengers under the diverse scenarios and states for obtaining the better solutions of scenarios such as channel width. Finally, the LOS of the bus stops is evaluated to give the movement speeds and flow rates of the pedestrians under the different levels of service, which are verified with the design of the Shanghai Bus Route 71 West Extension Project. The pedestrian simulation provides a new method for the scale analysis of medium-capacity bus stops and can provide a reference for the similar projects.

Keywords: bus stop; level of service (LOS) evaluation; pedestrian movement simulation; pedestrian movement law; scale design of bus stop

0 引言

《上海市交通发展白皮书》^[1]提出了优化上海市公共交通网络结构的发展构想:结合轨道交通网络规划,依托公共汽(电)车客流走廊,因地制宜地采取现代有轨电车、中运量等多种方式,形成基于路权优先的公共汽(电)车骨干线网。

由于中运量客流量较大,站台结构较常规公交站台复杂,站台内往往聚集大量人员。人群聚集导致乘客舒适度下降,行人运动效率低,紧急情况下甚至会导致踩踏事件的发生。因此,为进一步提升公交乘客出行舒适度,提升中运量客流吸引力,践行公交优先的国家战略,了解行人在站台内部运动规律具有重要的研究意义。

对于交通枢纽内的人群运动,研究人员开展了很多模型与实验研究。于洋等^[2]提出了基于乘客换乘量和基于泊位的站台规模计算模型,以计算BRT站台最小面积和最小长度。郭沛亮和何萌^[3]通过实

收稿日期: 2025-07-25

基金项目: 上海市政总院科研项目“中运量数字轨道智慧行车安全技术研究”(K2022K107A)

作者简介: 刘宇星(1996—),男,硕士,工程师,从事道路设计工作。

际案例分析,给出了公交站台尺寸建议。Zhang等^[4]研究了在信号交叉口中,行人步行通过人行横道的运动规律,发现了方向分流比为0.5时,行人通过流量最大。Luo等^[5]通过实验研究了地铁站中,行人通过不同形态的瓶颈的运动效率,发现左侧圆柱型措施能有效保障安全性和效率。胡继华等^[6]提出了个BRT行人交通模型,以模拟个体决策和运动。Fang等^[7]通过分析火车站台中旅客的运动规律,建立起一个携带行李的行人运动模型。李东岳等^[8]根据公交到达率,优化设计公交站台长度和泊位数。通过研究行人运动规律,能够为设施设计提供支撑,进一步地保障居民出行效率和安全。Feliciani等^[9]通过实验验证包含乘坐轮椅的多类型行人,感知效率和决策的差异性,并充分体现人群中运动规律。王海峰等^[10]结合行人运动速度控制,得出了行人轨迹预测模型,并进一步得出更精确的基本图。故本文将考虑行人运动规律,进行中运量站台优化设计和服务水平评价。

1 中运量公交站台平面布置

中运量公交站台设置形式有路中式和路侧式的形式,典型中运量设站形式为路中式,设站原则如下。

(1) 中途停靠站与客流集散点紧密结合

中途停靠站必须与客流集散点紧密结合,从而实现向更多人群提供最为直接和便利的中运量服务。

(2) 中途停靠站尽量设置在交叉口的进口道

公交中途停靠站设置在交叉口进口道,则可以利用红灯时间停车完成上下客,避免出口道设站时公交车二次制动,有效提高公交专用道通行效率。

(3) 根据地带客流需求的差异选择合理的站距

相比于路侧式公交站台,路中式站台更加容易聚集较多的乘客。主要原因是乘客离开站台为间断流,取决于站台连接处人行横道的通行绿灯时长。因此,为了避免客流过大,导致站台内部人员密度过大,甚至乘客被拥挤至车行道上,产生安全隐患,合理设计中运量站台尤为重要。

1.1 中运量站台泊位数

中运量公交站台泊位数应与站远期超高峰客流量 Q 相匹配,在保障功能的前提下,更好的加强乘客安全性和舒适度,同时满足未来客流需求。泊位数根据下式计算:

公交站台通行能力:

$$C_{\text{站}} = \frac{3600}{t} \quad (1)$$

式中: t 为车辆停靠站台的时间,一般与车辆性能、乘客上下车时间等相关。

站点停靠能力:

$$nC_{\text{站}} \geq 10S_i \quad (2)$$

式中: n 为泊位数; S_i 为高峰小时站点的停靠车辆数。

站台最小长度:

$$L = nl + (n - 1)l_h \quad (3)$$

式中: L 为站台长度; n 为泊位数; l_h 为安全停车间距。

1.2 站台宽度设计

中运量公交站台区域主要分为设备区、动态区(行人移动)和静态区(行人保持静止)。对于乘客保持静止状态时,站台可容纳乘客数远大于动态区,故制约站台容量的区域为行人移动状态下的情况。故本文以行人运动状态下,尤其是相向行人流状态下作为研究重点。

中运量站台服务乘客的过程,可分为两个过程,当公交车未到时,乘客陆陆续续进站,站台内乘客数不断增加;当公交车到站时,下车乘客出站,上车乘客进站,此时将会形成双向行人流。

(1)设计过程中首先应确保乘客能够舒适站立和排队等候,可以应对高峰期的人流量。通行通道宽度要保障两个相向方向的行人流相互干扰在可控范围^[11]

(2)站台的宽度还应考虑到辅助设施的设置,如信息屏设施、座椅、栏杆、屏蔽门等。这些设施需要占用一定的空间,站台的宽度要保障足够的空间容纳它们。

有研究表明^[12],行人流在相向运动过程中,在密度较大时会发生拥塞现象,即行人运动速度接近于0,出现停停走走现象的不稳定状态。在由自由流转化为拥塞流的过程中,拥塞密度会随着通道宽度的增加而增加。若站台宽度不足,两个方向行人流相互拥塞,会造成乘客舒适度下降,延误增加,甚至产生危险。因此,站台宽度应综合考虑经济性和功能性,设置一个最优宽度值。

在行人运动学理论中,根据人群密度与运动速度的关系可划分为三种典型流态:

(1) 自由流(Free Flow)

当人群密度较低时($\rho < \rho_1$),行人运动速度保持较高水平($v_i \approx v_f$),个体间几乎不存在相互干扰。此

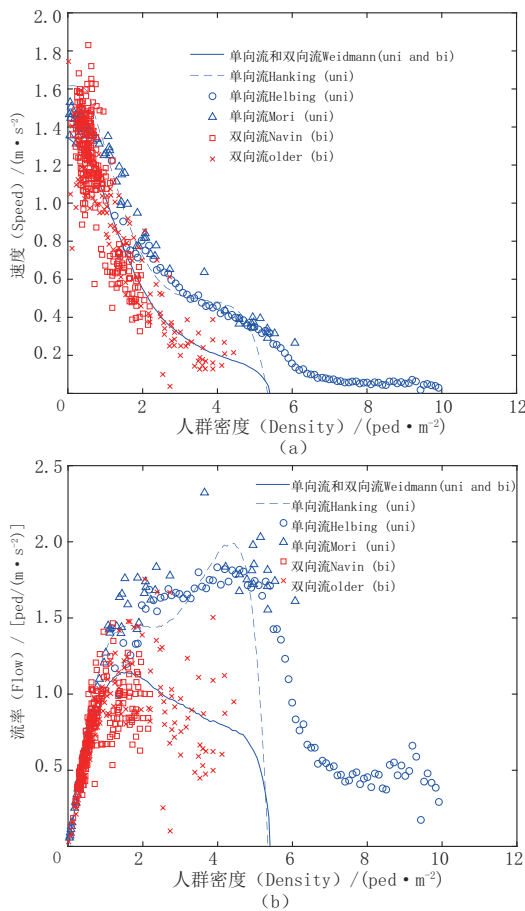


图1 前人研究中的行人流基本图

(数据来源于 www.asim.uni-wuppertal.de/en/database.html)^[13]

时流率($q = v_i \rho$)随密度增加呈线性正增长,运动状态符合自由粒子特征。

(2)稳定流(Stable Flow)

当密度达到临界值($\rho_1 \leq \rho < \rho_2$)时,行人开始出现速度衰减($dv/d\rho < 0$),但个体通过调节仍能维持稳定移动。此阶段流率呈现抛物线特征,在密度 $\rho = \rho_{\max}$ 时达到最大流率 $q_{\max}$,此时通道通行效率最高。

(3)拥塞流(Congested Flow)^[12]

当密度超过阈值($\rho \geq \rho_2$)后,速度急剧下降($\lim_{\rho \rightarrow \rho_{\max}} v = 0$),流率随密度增加反而减小。此时空间占有率接近理论最大值,行人几乎无法运动,密度 $\rho_{\max}$ 称为拥塞密度。

根据速度优化公式:

$$v_t = v_f \times \left\{ 1 - \text{EXP} \left[-\gamma \left(\frac{1}{\rho_t} - \frac{1}{\rho_{\max}} \right) \right] \right\} \quad (4)^{[14]}$$

式中: v_t 为人群在 t 时刻的平均速度; v_f 为行人自由流速度,取1.34 m/s; ρ_t 是行人在 t 时刻的人群密度; $\gamma = 1.913$ 是拟合参数; $\rho_{\max} = 5.4 \text{ ped/m}^2$ 是最大人群密度。如图1所示,Weidmann和Hanking, $\rho = 5.4$,行人运动速度和运动流率均趋向于0,同时行人运动速度符合速度优化公式,因此取用以上参数。

如采用C级服务水平时的人群平均密度为1.4~2.3 ped/m²,则人群平均速度为1.21~1.32 m/s,详见表1。表1理想的速度和流率数值参照《美国通行能力手册》(2010)和《快速公共汽车交通系统设计规范》(CJJ 136—2010)条文说明6.3.5,经验数据计算可参照图1数据。其中,行人占用面积为1/ ρ ,C级服务水平,为稳定流向不稳定流过渡阶段。

表1 乘客步行空间服务水平分级

服务水平	行人占用面积/m ²	密度/(ped·m ⁻²)	理想的速度和流率		经验数据计算所得	
			平均速度/(m·s ⁻¹)	流率/[ped·(m·s) ⁻¹]	平均速度/(m·s ⁻¹)	流率/[ped·(m·s) ⁻¹]
A	≥3.3	<0.3	1.32	0~0.38	1.34	0~0.4
B	2.3~3.3	0.30~0.43	1.27~1.32	0.38~0.55	1.32~1.34	0.40~0.57
C	1.4~2.3	0.43~0.71	1.22~1.27	0.55~0.82	1.21~1.32	0.57~0.86
D	0.9~1.4	0.73~1.11	1.15~1.22	0.82~1.10	1.00~1.21	0.86~1.11
E	0.50~0.90	1.11~2.00	0.77~1.15	1.10~1.37	0.61~1.00	1.11~1.21
F	<0.5	>2	<0.77	不定	<0.61	不定

1.3 行人仿真和实验研究验证

基于元胞自动机的场域模型,利用C++语言,本文构建了一个包含乘坐轮椅人员^[15]、打伞状态以及运动缓慢的老人等不同类型的乘客群体,在站台通道双向通行的场景。

模型中,行人被当作离散粒子,时间和空间均为离散状态,即空间上划分个相同大小的方格,时间离散为一个个时间步^[16]。每个行人占用一定空间,并受到空间中静态场、动态场、避障、群组等场的作用

而运动。其中,静态场为目标区域(出口、兴趣点)形成的引力,动态场为行人跟随形成的引力、避障为行人避让障碍物的排斥力、群组场^[17]为结伴行人通过凝聚力维持群里运动的力。如行人在 (i, j) 格点附近时,往该格点运动的概率为 $P_{i,j}$,如式(5)所示:

$$p_{i,j} = \text{NEXP}(k_s S_{i,j}) \exp(k_d D_{i,j}) (1 - n_{i,j}) \xi_{i,j} \quad (5)$$

式中: k_s 为静态场敏感系数; k_d 为动态场的敏感系数; $S_{i,j}$ 为元胞 (i, j) 处的静态场值; $D_{i,j}$ 为动态场值; $n_{i,j}$ 为元胞占据参数; $\xi_{i,j}$ 为障碍物参数,二者取值都为0

或 1。当 $n_{i,j}=1$ 和 $\xi_{i,j}=1$ 时,则表示元胞 (i,j) 被占据,且表示障碍物占据了元胞 (i,j) ; N 为归一化系数,保障行人往各个方向的行动概率之和为 1。

同时,本文在相同场景下开展了一组实验,通过 mean-shift 法提取乘客运动轨迹。模拟了行人群体在通道内相向运动的情况,如图 2 所示,空心符号为东向西行人、实心符号为西向东行人。考虑普通人、乘坐轮椅人员、打伞状态以及运动缓慢的老人等不同运动特征,构建不同占用面积分别代表上述行人,并用不同大小符号代替。如图 3 所示,给出了行人不同时刻在通道的位置,分别为东向西和西向东行人轨迹图,再现了双向行人流中的行人分层现象。通过轨迹计算,得出行人运动基本图。

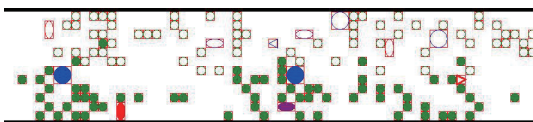


图 2 模拟场景图

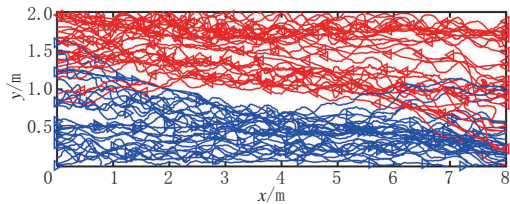


图 3 行人运动轨迹图

模拟中再现了自由流、分层现象、拥塞状态等典型现象,根据实验数据,校验了模型参数,经过校验过后的双向流模型具备良好的准确性。模型与前人研究中的经验数据具备较好的吻合性。

通过模拟不同宽度场景下的行人相向运动状态。结果表明,当宽度大于 3 m 时,流率和临界密度随宽度变化不明显,故推荐封闭式双向站台最小宽度应大于等于 3 m。

2 服务水平评价

目前站台内乘客候车、排队区域、乘客步行空间服务水平分级均以人流密度或行人占用面积进行分级。本文以 71 路中运量公交西延伸工程为例,对比基本图中行人运动规律,便于评价公交站台服务水平。

以 71 路中运量车辆 18 m 双源无轨电车为例,根据交通客流预测数据,详见图 7 和表 2,申长路兴虹路站(上行)远期超高峰时刻上下客量分别为 30 人、71 人,高峰小时站点停靠车辆 20 辆,远期发车间隔 2.5 s,车辆停靠时间为 30 s, $C_{站}=120$ 辆/h,若要满足

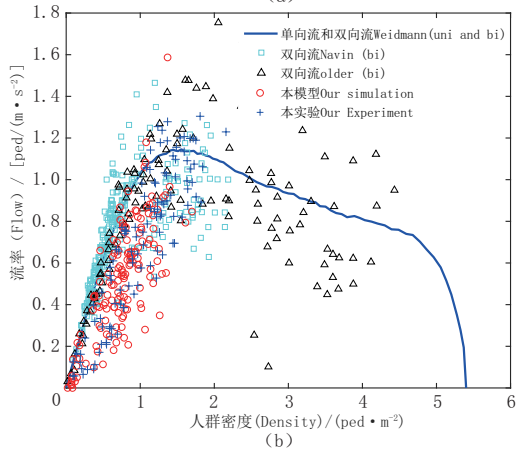
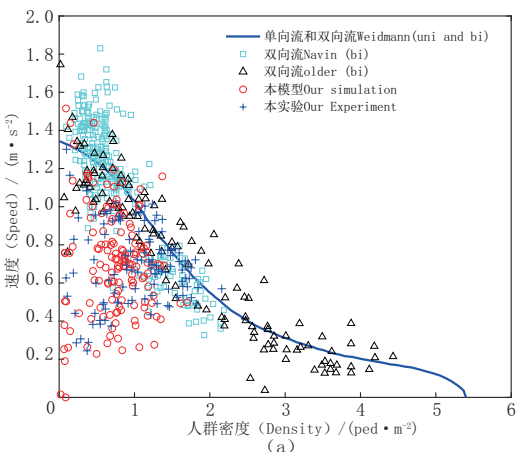


图 4 本次研究的行人流基本图

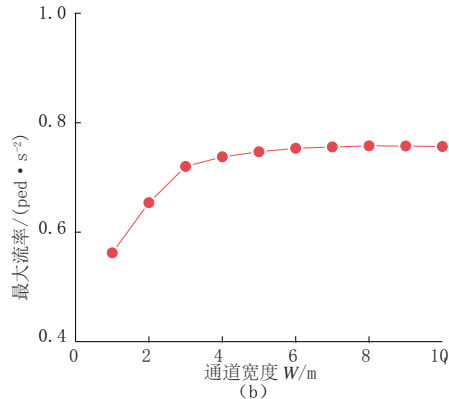
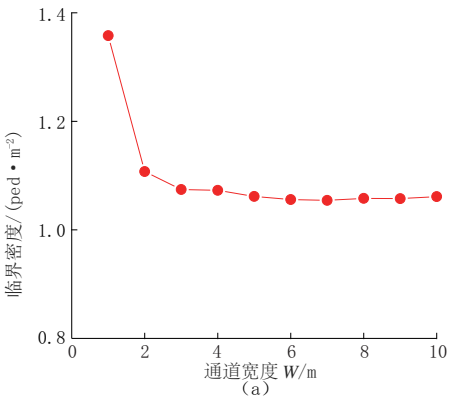


图 5 不同通道宽度下的行人运动状态图

$nC_{站} \geq 10 S_t$, 则 $n=2$, 最小站台长度为 37.5 m。此外考虑站台中分离岛式站台设备区长度 4 m, 分离岛式站



图6 2035年早高峰站点客流预测(单位:乘次/h)

台设备区长度2.5 m,其中设备区部分长度可以保证车辆车尾部位停放。故分离岛式站台长度取40 m,常规整体岛式站台长度取38.5 m。其中,申长路绍虹路站南侧利用交叉口处人行过街横道线进出站,北侧设置人行天桥连接虹桥火车站人行天桥;申昆路丰虹路站(品汇站)位于虹桥国际展汇区,考虑将其打造成特色站。经综合考虑,站台长度分别设置为39.5 m和41.8 m。

根据《建筑与市政工程无障碍通用规范》(GB 55019—2021)中规定,无障碍通道在人员密集的公共场所的通行净宽应大于1.8 m,结合项目实际情况,本工程中分离岛式站台通道宽度取2.6 m,整体岛式站台为两个1.9 m宽的通道,申长路绍虹路站通

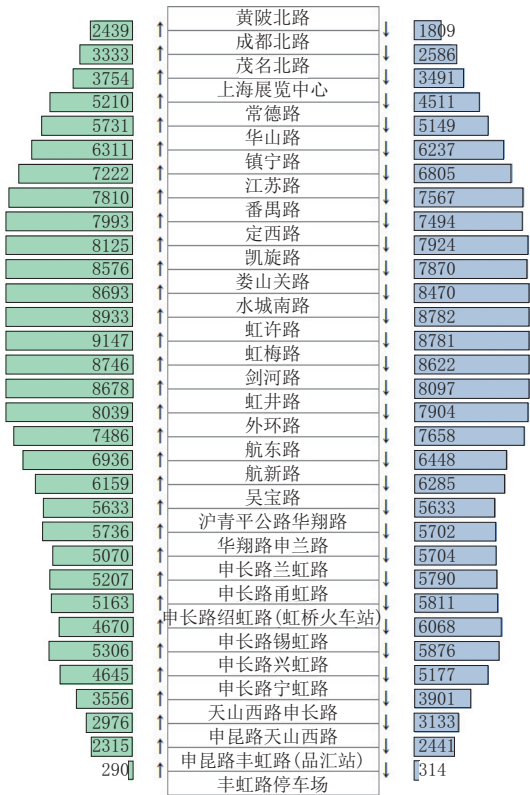


图7 2035年断面日客流(单位:乘次/d)

道宽度3.5 m,申昆路丰虹路(品汇站)通道宽度4 m,详见表2。

表2 站台流量数据 and 设计参数表

站名	下行		上行		站台尺寸	站台通行空间	人流密度/(ped·m ⁻²)	
	进/(人·h ⁻¹)	出/(人·h ⁻¹)	进/(人·h ⁻¹)	出/(人·h ⁻¹)			上行	下行
沪青平公路华翔路	24	20	20	25	3.5×40.0	93.6	0.24	0.24
申长路兰虹路	42	37	36	40	5.0×38.5	136.8	0.57	0.56
申长路甬虹路	36	35	35	36	3.5×40.0	93.6	0.38	0.38
申长路绍虹路 (虹桥火车站)	80	65	65	80	5.0×39.5	138.3	1.05	1.05
申长路锡虹路	32	43	43	32	3.5×40.0	93.6	0.40	0.40
申长路兴虹路	30	71	71	28	3.5×40.0	93.6	0.54	0.53
申长路宁虹路	18	92	92	16	3.5×40.0	93.6	0.59	0.57
天山西路申长路	6	51	50	6	5.0×38.5	136.8	0.42	0.41
申昆路天山西路	5	45	45	4	5.0×38.5	136.8	0.37	0.36
申昆路丰虹路(品汇站)	1	143	122	1	5.0×41.8	157.2	0.92	0.78

在最不利情况下,本次设计采用远期超高峰时段小时交通流量,同时考虑人行过街信号周期长、公交车延误到达等实际情况,以公交最大滞留人数为30 min的超高峰时段交通流量。如表2和3所示,经计算,除特殊站之外,所有的站台在远期超高峰时段的服务水平均高于或等于C级。对于申长路绍虹路(虹桥火车站)和申昆路丰虹路(品汇站),通道内通行宽度大于其余站台,基本图中相变区间右移,故堵塞发生时的人群密度要高于其余站台,故运行更为

顺畅,实际运行效果也能满足C级服务水平。此外,申长路绍虹路(虹桥火车站)站台南北两端均可以进出站台,乘客疏散时间也减半。因此,本工程的站台规模设计均满足服务水平C级即以上的站台通过能力。

3 结论与展望

中运量公交站台在中运量公交运行中起重要作用,适当的规模设计对提高乘客出行满意度,提升中

表 3 服务水平评价表

站名	站台人流密度/(ped·m ⁻²)		平均速度/(m·s ⁻¹)		平均流率/[ped/(m·s ⁻¹)]		服务水平
	上行	下行	上行	下行	上行	下行	
沪青平公路华翔路	0.24	0.24	1.34	1.34	0.32	0.33	A
申长路兰虹路	0.57	0.56	1.27	1.28	0.73	0.71	C
申长路甬虹路	0.38	0.38	1.33	1.33	0.50	0.50	B
申长路绍虹路(虹桥火车站)	1.05	1.05	1.03	1.03	1.08	1.08	D
申长路锡虹路	0.40	0.40	1.32	1.32	0.53	0.53	B
申长路兴虹路	0.54	0.53	1.29	1.29	0.69	0.68	C
申长路宁虹路	0.59	0.57	1.27	1.27	0.75	0.73	C
天山西路申长路	0.42	0.41	1.32	1.32	0.55	0.54	B
申昆路天山西路	0.37	0.36	1.33	1.33	0.49	0.47	B
申昆路丰虹路(品汇站)	0.92	0.78	1.10	1.17	1.01	0.92	D

运量公交服务水平,践行公交优先发展战略起重要作用。本文考虑行人运动规律,充分结合客流需求,对中运量站台尺寸进行精细化设计,同时以速度、密度、流率以及站台疏散时间等定量指标进行站台服务水平评价。本文以 71 路西延伸工程为例,深入分析各站台尺寸设计,并进行评价。下阶段可考虑构建行人运动模型,模拟站台内行人运动过程,为站台内设施设计提供支撑。此外,站台也要考虑到多模式交通的接驳,如自行车停车区域、共享电动车充电桩等,以提供更便捷的出行方式。随着技术的发展,公交站台也应智能化,比如可利用数据分析和管理系统,来优化调度、提高安全性和服务质量等。

参考文献:

[1] 上海市交通委员会.上海市交通发展白皮书[N/OL].(2022-10-13)[2025-7-28].<https://jtw.sh.gov.cn/zxxfxx/20221014/1ac0342daa9e48a390420a6d211c8686.html>.
[2] 于洋,何世伟,宋瑞,等.基于乘客换乘量和停车泊位的BRT站台规模研究[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2008,27(4):634-637.
[3] 郭沛亮,何萌.城市公交专用道设计标准探讨[J].城市道桥与防洪,2014(5):5-7;270.
[4] Zhang J, Wang Q, Hu Y, et al. The effect of a directional split flow ratio on bidirectional pedestrian streams at signalized crosswalks[J]. Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment, 2018, 2018(7): 073408.
[5] Luo W, Sun L, Yao L, et al. Experimental Study for Optimizing Pedestrian Flows at Bottlenecks of Subway Stations[J]. Promet-Traffic&Transportation, 2018, 30(5): 525-538.
[6] 胡继华,高立晓,詹承志.BRT站台行人交通模拟[J].计算机工程与

设计,2016,37(8):2181-2189.
[7] Fang Z M, Lv W, Jiang L X, et al. Observation, simulation and optimization of the movement of passengers with baggage in railway station[J]. International Journal of Modern Physics C, 2015, 26(11).
[8] 李东岳,焦朋朋,王红霖.基于排队论的公交站台优化设计[J].综合运输,2017,39(4):73-77.
[9] Feliciani C, Murakami H, Shimura K, et al. Efficiently informing crowds - Experiments and simulations on route choice and decision making in pedestrian crowds with wheelchair users [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2020, 114: 484-503.
[10] 王海峰,桑海峰,王金玉,等.结合速度控制的时空图网络行人轨迹预测模型[J].电子测量与仪器学报,2022(5):146-154.
[11] Zhang J, Klingsch W, Schadschneider A, et al. Ordering in bidirectional pedestrian flows and its influence on the fundamental diagram [J]. Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment, 2012, 2012(2): 02002.
[12] Muramatsu M, Irie T, Nagatani T. Jamming transition in pedestrian counter flow [J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 1999, 267(3-4): 487-98.
[13] University of wuppertal. Database [N/OL]. (2025-06-02)[2025-07-28].www.asim.uni-wuppertal.de/en/database.html.
[14] Wirz M, Franke T, Roggen D, et al. Probing crowd density through smartphones in city-scale mass gatherings [J]. EPJ Data Science, 2013, 2(1): 5.
[15] Geörg P, Schumann J, Holl S, et al. The Influence of Wheelchair Users on Movement in a Bottleneck and a Corridor [J]. J Adv Transport, 2019(3): 1-17.
[16] Nishinari K, Kirchner A, Namazi A, et al. Extended floor field CA model for evacuation dynamics [J]. Physics, 2003, 87: 726-32.
[17] Fu L, Liu Y, Yang P, et al. Dynamic analysis of stepping behavior of pedestrian social groups on stairs [J]. Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment, 2020, 2020(6): 063403.