

# 西安地铁 T 型换乘站“空间-流量”效能匹配性优化分析

高 建

(轨道交通工程信息化国家重点实验室(铁一院), 710043, 西安//工程师)

**摘 要** 目的:目前对地铁换乘站的研究大多集中在站内设施布置、管理措施及标识系统等方面,忽视了换乘站自身各组构空间面积配置不均衡引起的空间瓶颈问题及地下空间浪费问题,需对此进行深入研究。方法:以西安地铁线网内 8 个 T 型换乘站为研究对象,提出换乘站“空间-流量”效能匹配性基本概念,将 T 型换乘站内部空间划分为 5 个组构单元;对 T 型换乘站进行换乘流线拆解和空间简化,通过数据统计建立了西安地铁的典型 T 型换乘站空间模型;基于各组构面积占比和人行通道平均宽度两项评价指标,采用 AnyLogic 软件,对设计需求工况及弹性需求工况两种试验工况下典型 T 型换乘站“空间-流量”的效能匹配性进行仿真分析。仿真分析表明:换乘通道面积富余,竖向交通区的面积和宽度不足,既有典型 T 型换乘站各组构单元“空间-流量”效能不匹配。针对典型 T 型换乘站空间布局原方案提出了 8 个备选方案,并进行方案比选。结果及结论:备选方案 6 最优;与原方案相比,备选方案 6 在设计需求工况下的换入客流平均通行速度增加了 3.3%,换出客流平均通行速度增加了 4.2%;在弹性需求工况下备选方案 6 较原方案的换入客流平均通行速度增加了 3.0%,换出客流平均通行速度增加了 2.1%。在保持换乘站总建筑面积不变情况下,适当缩小站厅层非付费区面积占比、增加竖向交通区人行通道宽度可有效提高乘客通行效率。

**关键词** 地铁; T 型换乘站; 乘客通行效率; “空间-流量”效能匹配性

**中图分类号** U293.13; U231.4

**DOI**:10.16037/j.1007-869x.2023.07.022

## Optimization Analysis of 'Space-Flow' Efficiency Matching Ability of Xi'an Metro T-type Interchange Station

GAO Jian

**Abstract** Objective: Currently, most research on metro interchange stations focus on station internal facility arrangement, management measures and signage systems, ignoring the spatial bottleneck issues and underground space wastage caused by the uneven area allocation of the spatial units that are compos-

ing the interchange station itself, thus an in-depth research on this topic needs to be carried out. Method: Taking eight T-type interchange stations in Xi'an Metro line network as research objects, the basic concept of interchange station 'space-flow' efficiency matching ability is proposed, and the T-type interchange station internal space is divided into five compositional units; by decomposing the interchange passenger flow lines and simplifying the space for the T-type interchange station, a spatial model of typical T-type interchange station in Xi'an Metro is established through data statistics; based on two evaluation indexes of the area proportion of each compositional unit and the average width of pedestrian passages, the 'space-flow' efficiency matching ability of typical T-type interchange station under the two test working conditions of design-demand and flexible-demand are simulated and analyzed using AnyLogic software. The simulation analysis shows that there is excess area in the interchange passage while insufficient area and width in the vertical traffic area, resulting in a mismatch in the 'space-flow' efficiency of the compositional units in the existing typical T-type interchange station. Eight optimization solutions for the typical T-type interchange station spatial layout original scheme are proposed and compared for selection. Result & Conclusion: Optimization solution 6 is the optimal; compared to the original scheme, solution 6 increases the average speed of incoming interchange passenger flow by 3.3% and that of outgoing interchange passenger flow by 4.2% under design-demand working condition; under flexible-demand working condition, the average speed of incoming interchange passenger flow is increased by 3.0% and that of outgoing interchange passenger flow by 2.1%. Under the premises of keeping the same total floor area of interchange station building, reducing the proportion of platform floor non-paying area reasonably and increasing the width of vertical traffic area pedestrian passages can elevate passenger throughput efficiency significantly.

**Key words** metro; T-type interchange station; passenger

throughput efficiency; 'space-flow' efficiency matching ability

**Author's address** State Key Laboratory of Rail Transit Engineering Informatization (FSDI), 710043, Xi'an, China

截至 2022 年年底,西安地铁线网现有车站 176 座,其中换乘站为 17 座(T 型换乘站 9 座),占线网车站总数的 9.7%。未来西安地铁线网中换乘站的数量还将持续增加。地铁换乘站(以下简称“换乘站”)不仅是地下客运交通的重要节点,还发挥着辐射周边商业及带动城市发展的作用。因此,如何最大程度地发挥交通和城市两个层面的效能,是换乘站设计的难点。

既有关于换乘站空间效能的量化研究主要关注交通效率,包含了运用仿真软件优化设备配置,优化管理措施<sup>[1]</sup>,疏解瓶颈区的客流拥堵等方面以提升换乘站的整体服务水平。文献[2]从换乘衔接布局、换乘衔接空间位置与换乘衔接数量等方面提出了换乘站的优化措施。文献[3]从乘客分流方案和站内设施布置方面提出了若干设计策略和建议,以提升换乘效率。因此,目前大部分研究大多考虑换乘站在设施布置、管理措施及标识系统等方面的优化,忽视了换乘站自身各组构空间面积配置不均衡引发的空间“瓶颈”问题及地下空间浪费问题。为此,本文从 T 型换乘站空间组构角度,对换乘站进行“空间-流量”效能匹配性精细化研究,以找寻换乘站设计的优化措施。

## 1 “空间-流量”效能匹配性概述

换乘站空间效能的主要影响因子是站内各部分的空间尺寸。行人通行效率主要受站内各区域客流通行宽度和通行流量的影响。“空间-流量”匹配性是指车站内一定面积和宽度的空间与空间内的换乘量相互匹配。本文采用空间面积和通行宽度两个评价指标,旨在向上衔接以空间面积为指标的城市设计评价,向下衔接以通道宽度为指标的交通设计评价。这里的“空间”不仅包含车站整体空间,还包含车站局部组构单元,如换乘通道、站厅区域,以及站厅层和站台层间竖向交通区域(以下简称“竖向交通区”)等。

“空间-流量”效能匹配性基于空间各个单元的服务水平和客流平均通行速度进行评价,以此表征换乘站内部空间与流量的关联程度。在区域和单元之间对效能进行横向对比,可以反映换乘站在城

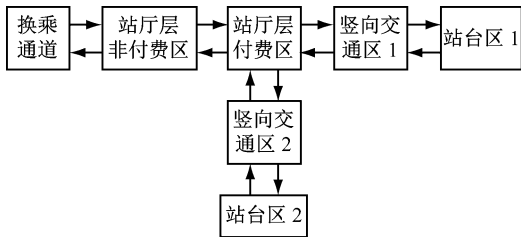
市层面自身各组构面积配置的均匀性与建设合理性。这对于提高换乘站内乘客通行效率及整体空间利用率具有重要意义。

## 2 西安地铁 T 型换乘站“空间-流量”效能匹配性分析

本文对西安地铁线网内图纸和数据资料详细的 8 个 T 型换乘站进行了空间调研,对其空间组构进行拆解和简化,构建了换乘站公共区典型空间模型,并基于该模型进行“空间-流量”效能匹配性分析。

## 2.1 组构拆解

T型换乘站公共区包含换乘通道、站厅层非付费区、站厅层付费区、站厅层和站台层间竖向交通区及站台区等5个组构单元,可单独观察各单元区域与行人流量的匹配情况。依据行人行走逻辑,图1建立了5个组构单元间的简要联系。



注:箭头表示各单元之间的通行逻辑。

图 1 T 型换乘站 5 个空间单元间的联系

Fig. 1 Relation among the 5 compositional units in T-type interchange station

本文以西安地铁4号线和5号线的换乘站李家村站为例予以说明,其站位图如图2 a)所示。在此基础上,绘制了该T型换乘站内换乘客流行走路线逻辑示意图,如图2 b)—图2 d)所示。由于换乘站内部空间各组构间通过串联的方式连接,每个组构单元都可视为1个独立区域,自行完成区域内换乘客流的运送任务,不受其他组构单元的影响或约束。这种特性使得换乘站内部整体空间可被拆分。

## 2.2 构建换乘站公共区典型空间模型

T 型换乘站公共区的空间组织模式较为固定。本研究对西安地铁线网内 8 个 T 型换乘站进行了空间调研,收集、整理得到各 T 型换乘站各组构单元的面积数据,计算这 8 个 T 型换乘站各组构单元面积占比、建筑总面积、各空间尺寸、站内楼扶梯数等关键数据的平均值和中位值,进而得到典型 T 型换乘站各组构单元相应的关键数据值,如表 1 所示。

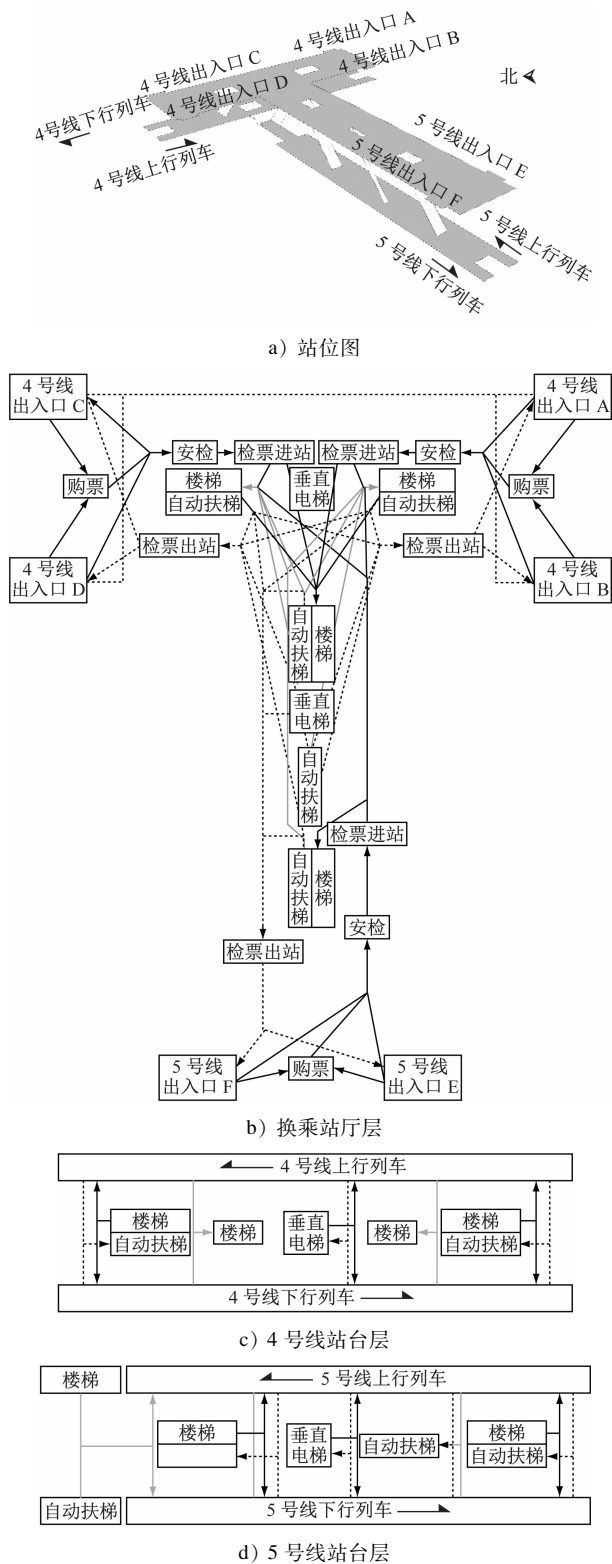


图2 案例换乘站站位图及各组构单元内换乘乘客流行走路线示意图

Fig. 2 Case interchange station layout map and diagram of interchange passenger flow in each compositional unit

依据表1中典型T型换乘站各组构面积的占比情况,建立了T型换乘站公共区的典型空间模型,并将该典型模型作为本研究下一步的试验对象。

## 2.3 模拟试验

### 2.3.1 工具选择及参数设定

目前应用较广泛的交通行人仿真软件有 AnyLogic、Legion、Steps 及 Sim-Walks 等。AnyLogic 软件为社会力模型,能够较好地拟合换乘站内多类型混合的乘客流动行为。此外,AnyLogic 软件能够对空间进行拆分模拟,允许从组构层面进行试验,保证本研究在不同组构方案下能进行对比研究。

模拟参数分空间模型设置、行人特征设置及行人进出站逻辑设置3个部分。其中:①空间模型中,采用上文所述的典型T型换乘站模型,由换乘通道、站厅层非付费区、站厅层付费区、竖向交通区、4号线站台(南北向)和5号线站台(东西向)等7个区域构成;②行人特征中,行人个体尺寸在 $0.4 \sim 0.5 \text{ m}^2$ 内随机分布,行人初速度在 $0.3 \sim 0.7 \text{ m/s}$ 内随机分布,平均通行速度在 $0.5 \sim 1.0 \text{ m/s}$ 内随机分布;③行人进出站逻辑依据图1进行设置。

### 2.3.2 试验工况设定

本研究旨在通过模拟试验,横向对比不同流量下各组构单元间行人密度的匹配情况,纵向对比不同流量下空间与流量的匹配情况。在实际运营过程中,换乘站客流具有潮汐特征,因此本试验模拟了2组不同级别的客流方案:设计需求工况和弹性需求工况。

#### 2.3.2.1 设计需求工况

第1组客流数据采用设计需求工况。换乘站总客运量数据采用《西安市地铁客流预测》中李家村站的初步预测结果:4号线远期(2045年)高峰时段客运量为23.957万人次/h,换乘量为12.875万人次/h;5号线远期(2045年)高峰时段客运量为17.855万人次/h,换乘量为0.864万人次/h。

#### 2.3.2.2 弹性需求工况

第2组客流数据采用弹性需求工况。考虑到该典型T型换乘站近、远期客流需求波动的影响,设置弹性需求工况,用以测试换乘站能否适应更大的客运量。取弹性系数为0.2,即当小时换乘量为设计小时换乘量的1.2倍时,测试交通设施能否满足运营需求。

表 1 典型 T 型换乘站各组构单元关键数据推算

参数	各组构单元面积占比/%					建筑总面积/ m <sup>2</sup>	空间尺寸/m				楼扶梯数/部	
	换乘通道区域	站厅层非付费区	站厅层付费区	竖向交通区	站台层公共区		通道宽度	车站宽度	站台长度	站台宽度	楼梯数	电扶梯数
8 个 T 型换乘站数据的平均值	29.4	21.8	21.5	8.0	19.3	11 035	6.7	23.7	140.0	14.9	3	7
8 个 T 型换乘站数据的中位数	32.3	24.2	17.0	8.0	18.5	10 630	7.1	23.2	140.0	14.5	3	7
典型 T 型换乘站数据	29.6	19.2	20.8	7.9	22.5	10 720	14.9	14.5	140.0	14.0	3	7

3 模拟数据分析

3.1 典型 T 型换乘站的城市效能分析

本文对典型 T 型换乘站的各组构单元面积进行了占比分析,并从上述调研的 8 个换乘站中挑选了 1 个与典型 T 型换乘站建筑总面积相近且周边高容积率换乘站,与典型 T 型换乘站进行对比分析,其结果如图 3 所示。

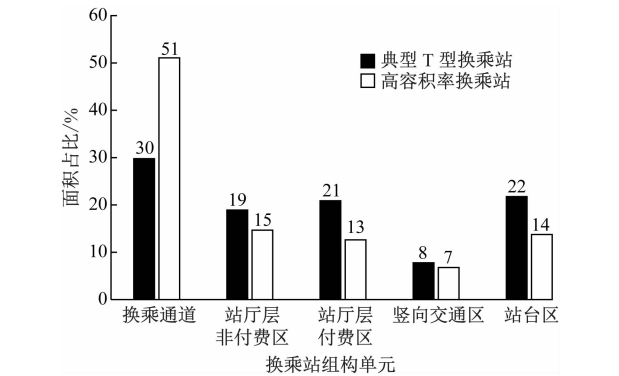


图 3 典型 T 型换乘站和周边高容积率地铁车站各组构单元面积占比对比

Fig. 3 Comparison of each compositional unit in area proportion between typical T-type interchange station and surrounding high plot ratio metro stations

- 由图 3 可知：
- 1) 典型 T 型换乘站的组构单元中:换乘通道面积占比约为 30%,在所有组构中占比最高;站厅层付费区、站厅层非付费区及站台区的面积占比均在 20% 左右;竖向交通区的占比仅为 8%。
  - 2) 高容积率换乘站的组构单元中:换乘通道面积占比为 51%。与典型 T 型换乘站相比,此类车站的站厅层付费区、站厅层非付费区及站台区的面积占比均在一定程度上被压缩。

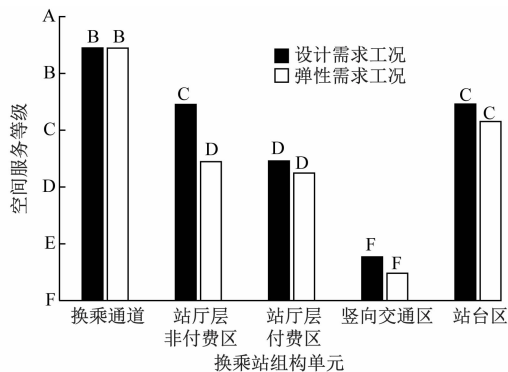
由此可见,在城市周边建设环境的影响下,换乘通道是“空间-流量”效能匹配性优化的核心区域。

3.2 典型 T 型换乘站“空间-流量”效能匹配分析

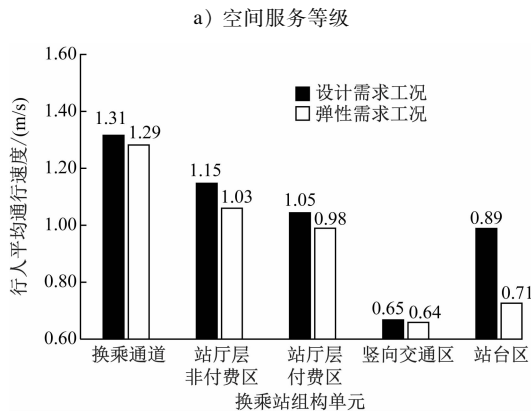
为进一步横向对比各个组构单元间的“空间-流量”效能匹配性,本文使用 Fruin 服务水平评价指标体系<sup>[5]</sup>(见表 2),对采用 AnyLogic 软件模拟得到的行人密度进行服务水平评价。在此基础上,结合行人平均通行速度进行综合效能评价,得到典型 T 型换乘站“空间-流量”效能匹配分析结果如图 4 所示。

表 2 Fruin 服务水平评价指标体系	
Tab. 2 Fruin service level evaluation index system	
服务等级	区域内行人密度的取值区间/(人/m <sup>2</sup> )
A	0 ~ 0. 31
B	>0. 31 ~ 0. 43
C	>0. 43 ~ 0. 72
D	>0. 72 ~ 1. 08
E	>1. 08 ~ 2. 17
F	>2. 17

- 1) 在设计需求工况下,典型 T 型换乘站各组构单元的服务水平不均衡。其中:换乘通道的平均通行速度和服务等级最高;站厅层非付费区及站台区的平均通行速度较高,处于中等服务水平;换乘流线交叉最多的站厅层付费区平均通行速度较低,服务水平总体也较低;竖向交通区的平均通行速度最低,服务水平最低,且与其他组构单元的差距较大。
- 2) 在弹性需求工况下,换乘总量增大将导致换乘站内的平均通行速度总体降低,局部区域的服务水平降低。但换乘通道在两个测试工况下的结果差别不大,行人平均通行速度基本不变,这表明换乘通道具有很高的承载量,即该工况下换乘通道面积和宽度富余。但是,竖向交通区和站台区的平均



注：实际服务等级取所在区间的下限值。



注：竖向交通区电扶梯的速度取 0.65 m/s。

b) 行人平均通行速度

图4 典型T型换乘站“空间-流量”效能匹配分析结果

Fig. 4 Analysis results of 'space-flow' efficiency matchability in typical T-type interchange station

通行速度下降幅度明显，“空间-流量”效能不匹配。

分别对设计需求工况和弹性需求工况下站厅层付费区及竖向交通区内行人密度进行仿真，其结果如图5及图6所示。由图5及图6可看出：①两种方案下站厅层付费区均存在部分区域行人密度

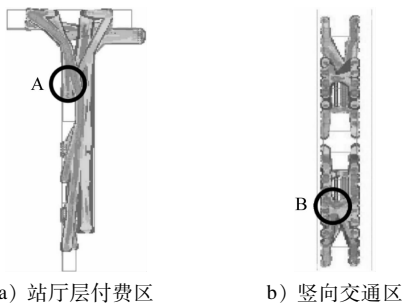
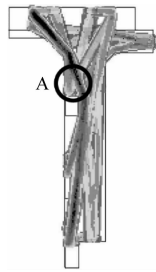


图5 设计需求工况下典型T型换乘站2个组构单元内行人密度模拟结果

Fig. 5 Simulation results of pedestrian density in two compositional units of typical T-type interchange station under design-demand working condition



a) 站厅层付费区



b) 竖向交通区

图6 弹性需求工况下典型T型换乘站2个组构单元内行人密度模拟结果

Fig. 6 Simulation results of pedestrian density in two compositional units of typical T-type interchange station under elastic-demand working condition

过高的问题，其主要原因为安检等设施的通行能力限制了行人的通行速度；②弹性需求工况下，站厅层付费区4号线南北两部下行楼梯处（图5 a）和图6 a）中的A点）最为拥挤，其主要原因为5号线换乘4号线的换乘量非常大；③竖向交通区向上客流密度高于向下客流密度，且极易受列车到站后瞬时大客流的影响，进而造成间歇性的拥挤排队（图5 b）和图6 b）中的B点），还会由此造成站厅层付费区和站台层局部区域的拥堵；④站台层虽有局部拥堵，但对换乘量的变化不敏感。

综上所述，典型T型换乘站各组构单元的“空间-流量”效能匹配并不均衡：换乘通道面积富余；竖向交通区的面积和宽度不足，“空间-流量”效能不匹配；弹性需求工况下站厅层付费区和站台层局部区域出现客流拥堵。

## 4 典型T型换乘站“空间-流量”匹配优化

### 4.1 组构单元配置的备选方案

基于上文仿真得到的结果，本文通过对典型T型换乘站各组构单元的面积配置进行优化，以进一步提升典型换乘站内乘客通行效率。优化目标是在保持换乘站总面积不变的前提下，优化5个组构单元的面积占比，进而调整各单位内人行通道的宽度。

对竖向交通区面积和人行通道宽度进行调整，影响到站台层和站厅层内部分区域的人行通道宽度也同步调整。依据上文的分析结果，在保持总面积不变的前提下，提出8个优化备选方案（见表3）。其优化方法主要为降低换乘通道面积占比，提升竖向交通区和站台区面积占比，其他区域在保持总面

积不变的情况下随之调整。

4.2 备选方案比选

对 8 组备选方案进行模拟,并与原方案对比,以筛选最优方案。对比表 3 中不同方案下行人的平均通行速度可知,备选方案 6 最优。与原方案相比,备选方案 6 在设计需求工况下的换入客流平均通行速

度增加了 3.3%,换出客流平均通行速度增加了 4.2%。在弹性需求工况下,备选方案 6 的换入客流平均通行速度较原方案增加了 3.0%,换出客流平均通行速度较原方案增加了 2.1%。这说明对各组构单元的面积占比进行优化,可在不增加换乘站建筑总面积情况下有效提升乘客通行效率。

表 3 典型 T 型换乘站各组构单元原方案及 8 个备选方案的对比

Tab.3 Comparison between original scheme and eight optimized solutions for the various compositional units of typical T-type transfer station													
方案	面积占比/%					空间尺寸/m				设计需求工况下 行人的平均通行 速度/(m/s)		弹性需求工况下 行人的平均通行 速度/(m/s)	
	换乘 通道	站厅层非 付费区	站厅层 付费区	竖向交 通区	站台层	换乘通 道宽度	站厅 宽度	站台 长度	站台 宽度	换入 客流	换出 客流	换入 客流	换出 客流
原方案	29.6	19.2	20.8	7.9	22.5	6.5	22	140	13	0.61	1.18	0.48	0.96
备选方案 1	29.6	16.1	20.8	8.9	24.6	6.0	22	140	14	0.61	1.20	0.49	0.97
备选方案 2	27.5	16.8	22.1	8.9	24.7	6.5	22	140	14	0.61	1.20	0.49	0.98
备选方案 3	29.9	17.1	22.0	8.2	22.8	6.0	22	140	14	0.60	1.17	0.48	0.93
备选方案 4	29.9	17.6	21.5	8.2	22.8	6.0	22	140	13	0.61	1.18	0.49	0.96
备选方案 5	27.6	17.9	20.6	9.0	24.9	6.0	21	140	14	0.63	1.22	0.50	0.98
备选方案 6	27.6	18.4	20.2	9.0	24.8	6.0	21	140	14	0.63	1.23	0.51	0.98
备选方案 7	29.8	19.4	20.3	8.1	22.6	6.5	21	140	13	0.61	1.18	0.49	0.96
备选方案 8	27.4	20.0	22.0	8.0	22.6	6.0	23	140	13	0.60	1.16	0.48	0.93

对最优方案(备选方案 6)进行再次仿真,对各组构单元内的行人密度进行分析。仿真结果表明:连接站厅层与站台层的楼梯端部仍会间歇性产生不同程度的拥挤现象,但拥挤程度相比原方案已有下降;排队拥挤现象能够在换入线路列车的一次发车间隔内得到疏解;站厅层至站台层的自动扶梯口处客流拥堵情况得到了缓解。

5 结语

研究在面向地铁换乘站城市空间利用和乘客通行效率的双向需求上,通过空间组构拆解、Any-Logic 软件模拟等措施,建立了换乘站空间与流量的效能匹配关联。基于“空间-流量”效能匹配性分析,可找出当前换乘站内影响乘客通行效率的空间瓶颈,建立基于数据统计分析的地下换乘站精细化空间设计方法。结果表明,西安地铁既有 T 型换乘站内各组构单元的服务水平不均衡,竖向交通区内“空间-流量”效能不匹配,该区域是乘客通行的瓶颈空间。在保持换乘站总建筑面积不变情况下,适当缩小站厅层非付费区的面积占比,增加竖向交通区的人行通道宽度,可有效提高乘客的通行效率。

参考文献

[1] 刘汉英. 基于 Anylogic 的地铁车站客流仿真分析[J]. 铁路计算机应用, 2020, 29(9): 6.  
LIU Hanying. Simulation analysis of passenger flow in metro station using Anylogic[J]. Railway Computer Application, 2020, 29(9): 6.

[2] 于宝霏, 任军. 基于 Anylogic 仿真模拟的高铁站换乘效率优化研究: 以天津西站为例[J]. 南方建筑, 2021(6): 94.  
YU Baofei, REN Jun. Research on optimisation of high-speed railway station transfer efficiency based on any logic simulation while considering Tianjin west railway station as an example[J]. South Architecture, 2021(6): 94.

[3] 竺刻瑶, 高语杉, 许隼. 以换乘效率为导向的流线组织研究: 以西安火车站北广场换乘厅为例[J]. 建筑与文化, 2018(12): 187.  
ZHU Yanyao, GAO Yushan, XU Jian. Research on streamline organization based on transfer efficiency—taking the transfer hall of Xi'an Railway Station north square as an example[J]. Architecture & Culture, 2018(12): 187.

[4] 朱效洁. 上海轨道交通人民广场枢纽站大客流组织对策研究[J]. 城市轨道交通研究, 2010, 13(1): 1.  
ZHU Xiaojie. Countermeasures on high passenger flow at Shanghai People Square subway hub[J]. Urban Mass Transit, 2010, 13(1): 1.

(收稿日期:2022-11-22)