

基于动态仿真的地铁站点人群流动与管控效果分析

李佳欣, 房志明, 尤亚云*, 郝艺琳

上海理工大学管理学院, 上海

收稿日期: 2024年9月19日; 录用日期: 2024年11月26日; 发布日期: 2024年12月5日

摘要

本研究基于人民广场地铁站图纸, 构建仿真模型模拟不同管控策略下的人群流动。其结果采用层次分析法确定指标权重, 并建立人群流动管控效果评价指标体系, 通过模糊综合评价法定量评价导流和限流两类不同管控策略的实施效果。结果表明, 实施导流和限流措施后, 管控效果评价等级最高可以达到V2, 即管控效果良好。其中增设导流栏杆的导流策略对于V2的隶属度为0.3454。限流策略有两种, 打开楼梯通道对V3的隶属度为0.4871, 更改闸机状态的隶属度为0.4706。说明在综合提升地铁站人群流动的流畅性、均衡性及稳定性方面, 限流策略管控效果优于导流策略, 而更改闸机状态相对于其他限流方法更为有效。

关键词

人群流动, 动态仿真, 管控策略, 评价指标体系

Analysis of Crowd Flow and Control Effectiveness in Subway Stations Based on Dynamic Simulation

Jiaxin Li, Zhiming Fang, Yayun You*, Yilin Hao

Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Sep. 19th, 2024; accepted: Nov. 26th, 2024; published: Dec. 5th, 2024

Abstract

Based on the drawings of People's Square subway station, this study constructs a simulation model

*通讯作者。

文章引用: 李佳欣, 房志明, 尤亚云, 郝艺琳. 基于动态仿真的地铁站点人群流动与管控效果分析[J]. 运筹与模糊学, 2024, 14(6): 151-163. DOI: 10.12677/orf.2024.146518

to simulate the crowd flow under different control strategies. The results use hierarchical analysis to determine the weights of the indicators and establish the evaluation index system of crowd flow control effect, and quantitatively evaluate the implementation effect of the two different types of control strategies, namely, diversion and flow restriction, through the fuzzy comprehensive evaluation method. The results show that after the implementation of the measures of infusion and flow restriction, the highest evaluation level of the control effect can reach V2, *i.e.*, the control effect is good. The flow-guiding strategy of adding guide railings has an affiliation of 0.3454 for V2. There are two types of flow-restricting strategies, opening the stairway has an affiliation of 0.4871 for V3, and changing the gate status has an affiliation of 0.4706, which indicates that in terms of comprehensively improving the smoothness, balance, and stability of the crowd flow in the subway station, the flow-restricting strategy has a better effect than the flow-guiding strategy, and changing the gate status is more effective than other methods of flow-restricting.

Keywords

Crowd Flow, Dynamic Simulation, Control Strategy, Evaluation Index System

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着城市路网的不断扩展和客流的持续增长,部分车站 in 运营管理上面临着愈加复杂和繁重的任务,特别在高峰期,部分地铁站的人流量超出了其设计容量,导致城市中心区域的地铁站出现人群拥堵。这种拥堵不仅延长了乘客的出行时间,还降低了出行的便捷性和乘客的满意度[1]。为了解决这些问题,国内外学者在研究人群流动管控措施方面进行了深入探讨,主要集中在人群流动路线设计、站内设施布局以及管控效果等方面[2]。例如,Wang 提出了地铁线路协调动态客流控制方法,建立了多种协调和动态的客流控制模式,以找到适应系统最佳需求驱动力的客流控制模式[3],但是研究主要集中在短期的乘客流量控制上,而对长期效果和可持续性的考量不足,如乘客行为的适应性变化以及对未来需求的影响。Zuo 从静态和动态两个维度分析了行人行走的空间需求和步行速度特征,提出了换乘站客流组织优化问题及优化步骤[4],尽管仿真可以捕捉到复杂的人群行为,但在模型构建和运行中,可能会面临计算复杂性和资源消耗的问题,这可能限制模型的实时应用。Hong 等利用 VISSIM 模拟软件,模拟分析了不同客流强度条件下地铁车站的行人移动情况,并基于此提出了优化限流设施配置的建议[5],但是仿真可能没有充分考虑乘客在拥挤情况下的决策过程,如选择行走路径、等待时间的容忍度等。此外,Zhao 建立了以关联度函数为基础的评价指标体系,并通过物元可扩展模型的改进进行实例验证,从而确认了模型与评价体系的实用性与可行性[6]。研究可能过于依赖定量分析,而对定性因素的考虑不足。

在服务水平评估方面,Ding 采用 K 均值聚类方法对地铁站的服务水平进行等级划分,并利用仿真软件 and 有色 Petri 网评价模型对地铁站进出站,以验证模型的可行性,并给出合理化建议[7]。其仿真模型可能基于一些理想化的假设,如乘客均匀流动等,而在实际情况中,乘客流动模式往往是非线性和不均匀的。而 Pan 等从居民出行需求出发,以雷达图法确定、以实际案例构建轨道交通站点服务等级评定[8]。Nie 等以层次分析法为基础,进一步地提出了对于乘客在地铁站内的换乘服务能力的评价方法,通过实际案例对模型进行了验证[9]。Niu 等人分析了当前交通客流组织现状,建立了客流线路组织的评价指

标体系，并采用模糊综合评判方法对北京南站的客流线路组织和运营等方面进行了评价[10]。

目前的地铁站人群流动的管控方案通常是在仿真模拟后制定的，难以全面考虑到实际突发情况，也难以同时进行仿真和管控。本文旨在利用客流仿真技术建立地铁站模型，并应用动态管控策略，对地铁运营状况、人群拥挤状况、人群密度等关键因素进行实时监控，通过模拟不同时段、不同场景下的人群流动情况，收集并处理相关数据以评价地铁站的人群流动管控效果，为地铁运营管理人员决策提供重要支持。

2. 地铁站人群流动评价指标体系

2.1. 管控效果评价体系

地铁站的人群流动管控效果评价体系是一个综合且多层次的系统，涉及不同维度的定性和定量指标。本研究主要从流畅性、均衡性、稳定性 3 个方面来对地铁人群流动的管控效果进行评价[11]，如表 1 所示。

Table 1. Evaluation system of crowd movement control effectiveness in subway stations

表 1. 地铁站的人群流动管控效果评价体系

目标层	符号	准则层	符号	指标层	符号		
地铁站人群流动管控效果评价体系	U	流畅性	U1	闸机客流强度	U11		
				楼梯客流强度	U12		
				换乘通道客流强度	U13		
		均衡性	U2	稳定性	U3	闸机使用均衡率	U21
						楼梯使用均衡率	U22
						闸机饱和度	U31
		楼梯饱和度	U32				
		换乘通道饱和度	U33				

2.1.1. 流畅性指标

客流强度(人/平方米)是评价地铁站内人群流动的关键指标，在本研究中，客流强度是指单位时间内车站不同区域人流量与区域面积之比，其计算公式为：

$$\rho = \frac{Q}{S} \tag{1}$$

式中， Q 表示单位时间内车站不同区域的人群流动数量， S 表示区域面积， ρ 表示客流强度。此公式反映了地铁站的客流密度，帮助评估不同区域的流畅性。

2.1.2. 均衡性指标

地铁站设施的使用均衡率的差异由设施的摆放位置和行人个体选择所引起，其数值可以科学地衡量设施利用程度的均衡性，使用均衡率的计算公式如下：

$$P'_{ei} = \left| \frac{Q_j}{\bar{Q}} - 1 \right| \tag{2}$$

$$P_{ei} = \min(1 - P'_{ei}) \tag{3}$$

其中， Q_j 表示第 i 类设施的通过人数， \bar{Q} 表示第 i 类设施的平均服务量， P_{ei} 表示第 i 类服务设施的总体

服务的均衡率。

2.1.3. 稳定性指标

客流稳定性是指在一定时间内，个体行为的相似性会直接影响群体特性，简单且相似的个体反应会使群体在外界影响下的动态特性变化减少[12]，直观反映为通过类设施的饱和度，其计算公式为：

$$r = \frac{V}{C} \tag{2}$$

其中，V表示设施的实际通过量，C是设施的最大通行能力，地铁站各类设施具体数据如表2所示[13]。

Table 2. Maximum capacity of MTR station facilities

表 2. 地铁站设施最大通行能力

设施	最大通行能力(人/分钟)
闸机	20
楼梯	70
换乘通道	83

3. 地铁站人群流动的管控效果评价模型

3.1. 层次分析法确定指标权重

本文利用层次分析法(AHP)，构建分为目标层、准则层、指标层三个层次的地铁站人群流动管控效果评价的层次结构模型。依据 1.1 中介绍的地铁站人群流动管控效果的指标体系，建立层次结构模型，如图 1 所示。

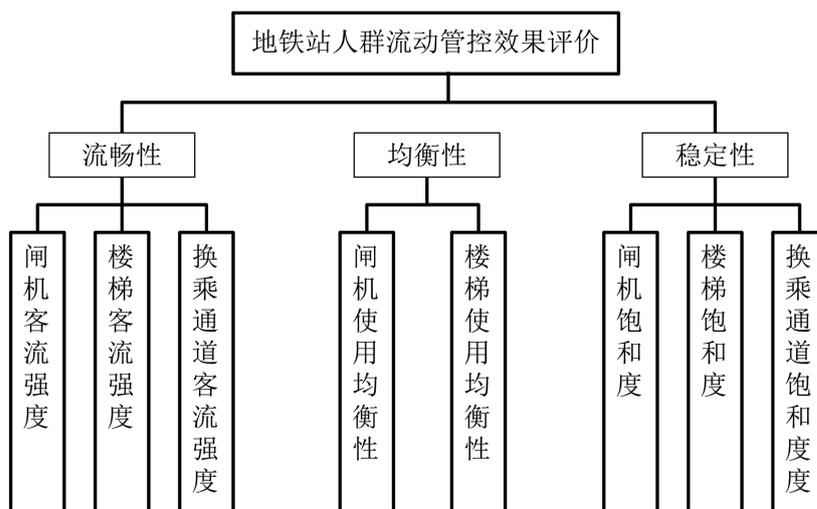


Figure 1. Hierarchical structure of the control effectiveness evaluation indicator system

图 1. 管控效果评价指标体系的层级结构

3.1.1. 构造对比矩阵

采用问卷调查的方法进行数据收集，利用九级标度法，根据因素间的重要性比较设计问卷。邀请专业人员或乘客组成评分小组，对影响地铁站人群流动的指标进行打分，通常用 1~9 的比较标度来量化指标间的影响程度数值，如表 3 所示。

Table 3. Nine levels of the scale 1~9
表 3. 1~9 的九级标度

标度	含义
1	第 i 个指标与第 j 个指标同样重要
3	第 i 个指标比第 j 个指标较重要
5	第 i 个指标比第 j 个指标重要
7	第 i 个指标比第 j 个指标更重要
9	第 i 个指标比第 j 个指标非常重要
2、4、6、8	第 i 个指标相对于第 j 个指标的重要程度介于相邻等级之间

3.1.2. 确定层次总权重

假定准则层的权重数值为 W_1, W_2, \dots, W_j ；各指标对准则层 U_j 的单排序结果为 $w_{1j}, w_{2j}, \dots, w_{nj}$ ，则层次总权重为：

$$w_n = \sum_{j=1}^j W_j w_{nj} \tag{5}$$

式中： C_j 为准则层对目标层的权重， u_{nj} 指标层对准则层的权重。

为了更准确地衡量地铁站人群流动控制的效果，邀请了 100 名乘客提供意见，以确定各指标的权重。其中关于准则层的调查问卷如图 2 所示。

* 2. 根据过往的出行体验，您认为在乘坐地铁的过程中，流畅性与均衡性相比

非常不重要 非常重要

① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨

* 3. 根据过往的出行体验，您认为在乘坐地铁的过程中，流畅性与稳定性相比

非常不重要 非常重要

① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨

* 4. 根据过往的出行体验，您认为在乘坐地铁的过程中，均衡性与稳定性相比

非常不重要 非常重要

① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨

Figure 2. Questionnaire on the guideline layer
图 2. 关于准则层的调查问卷

3.1.3. 人群流动管控效果评价指标的权重

根据调查问卷的结果，按照公式计算出各指标间两两比较的重要程度平均打分值，用以此构建对比矩阵，如表 4 所示。

Table 4. Comparison matrix for the criterion layer
表 4. 准则层的对比矩阵

U	U_1	U_2	U_3
U_1	1	2	4
U_2	1/2	1	3
U_3	1/4	1/3	1

将所有指标归一化，得到矩阵 A ：

$$A = \begin{bmatrix} 0.5747 & 0.6000 & 0.5000 \\ 0.1149 & 0.3000 & 0.3750 \\ 0.1436 & 0.1000 & 0.1250 \end{bmatrix}$$

将矩阵按行分别相加，得到向量 $a = [1.6747, 0.7899, 0.3686]^T$ ，进行归一化处理，得到权重向量 $W = [0.5911, 0.2788, 0.1301]^T$ 。

3.1.4. 指标层的权重值

根据调查问卷的结果，按照公式计算出各指标间两两比较的重要程度平均打分，用以此构建对比矩阵最后得到各个指标的权重如表 5 所示。

Table 5. Indicator weights
表 5. 各指标权重

目标层	准则层	权重	指标层	指标层对准则层权重	指标层对目标层权重
地铁站 人群流动 管控效果 评价	U1	0.5911	U11	0.6480	0.3830
			U12	0.1222	0.0722
			U13	0.2299	0.1359
	U2	0.2788	U21	0.7500	0.2091
			U22	0.2500	0.0697
			U31	0.1279	0.0166
	U3	0.1301	U32	0.3601	0.0468
			U33	0.5120	0.0666

故指标层相对于目标层的权重集合 W_1 为：

$$\{0.3830, 0.0722, 0.1359, 0.2091, 0.0697, 0.0166, 0.0468, 0.0666\}$$

3.2. 综合评价模型

3.2.1. 确定管控效果评价集

评价等级的作用体现在对不同因素之间模糊的概念进行评价，可以划分为等级向量，实现对不同层级的影响元素进行评价，具体的表现为：

$$V = \{V_1, V_2, \dots, V_m\} \tag{6}$$

3.2.2. 设定指标权重

每个指标的权重反映了相关因素在综合评价中的重要性：

$$W = \{w_1, w_2, \dots, w_n\} \tag{7}$$

3.2.3. 模糊综合评价

类似地，可以计算出目标层的综合得分向量如下：

$$P = \{W_1, W_2, \dots, W_n\} \begin{bmatrix} c_{11} & \dots & c_{1l} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{n1} & \dots & c_{nl} \end{bmatrix} = \{C_1, C_2, \dots, C_l\} \quad (8)$$

得到综合得分向量 P 后，依据最大隶属度原则， P 中最大数值所对应的评价等级即为该管控措施所属的等级。

3.3. 基于模糊综合的人群流动管控效果评价

依据人群通行服务水平的分类标准，选取管控效果评价等级为 5，设评价等级集合为 $V = \{V_1, V_2, V_3, V_4, V_5\}$ ，评价分级如表 6 所示。

Table 6. Evaluation grading criteria

表 6. 评价分级标准

管控效果水平等级	含义
V_1	优秀
V_2	良好
V_3	一般
V_4	较差
V_5	差

通过查阅相关文献、地铁公司的运营经验，并参考 John J. Fruin 博士在《行人规划与设计》中提出的 Los (Level of service, 服务水平) 分级标准[14]，确定了各指标的“优秀”和“差”的值，即指标层的 8 项指标依据管控效果分级的阈值，如表 7 所示。

Table 7. Thresholds for grading control effectiveness

表 7. 管控效果分级的阈值

管控效果阈值	V1	V2	V3	V4	V5
闸机客流强度	0.41	0.53	0.72	1.07	2.15
楼梯客流强度	0.58	0.66	0.88	1.54	2.74
换乘通道客流强度	0.72	0.95	1.33	3.28	4.87
闸机使用均衡率	0.89	0.78	0.62	0.43	0.37
楼梯使用均衡率	0.79	0.66	0.57	0.41	0.33
闸机饱和度	0.52	0.64	0.74	0.88	1.22
楼梯饱和度	0.68	0.77	0.85	0.93	1.31
换乘通道饱和度	0.74	0.88	0.96	1.05	1.42

4. 上海市人民广场站人群流动仿真与管控效果评价

4.1. 人民广场站仿真模型建立

通过与地铁相关管理部门联系，获得人民广场站的 CAD 图纸，对 CAD 底图进行清理，在客流仿真平台建立人民广场站的物理模型，包括大厅以及 1、2、8 号线的站台层，如图 3 所示。

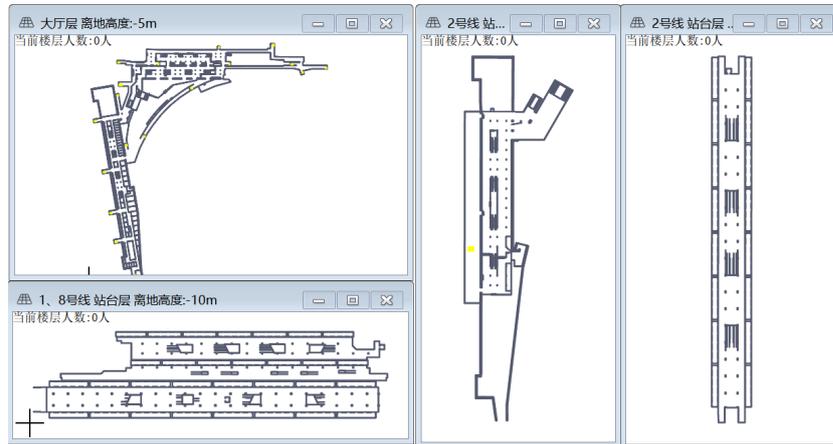


Figure 3. Physical model of People's Square Station
图 3. 人民广场站的物理模型

在早高峰时段，由于大量通勤人群汇集，地铁站内大厅层的进站人数迅速激增，尤其是进站闸机区域，拥挤的情况变得尤为显著，其在早高峰热力图如图 4 所示。

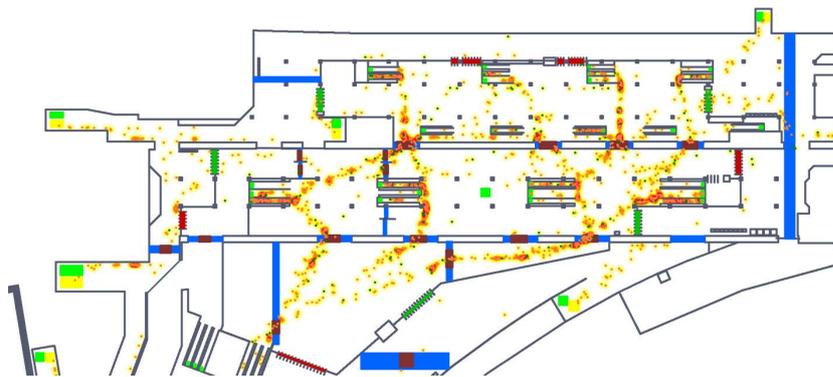


Figure 4. Heat map of morning peak passenger flow in the lobby of Shanghai People's Square Metro Station
图 4. 上海市人民广场地铁站大厅早高峰客流热力图

4.2. 动态管控策略

4.2.1. 增加导流栏杆

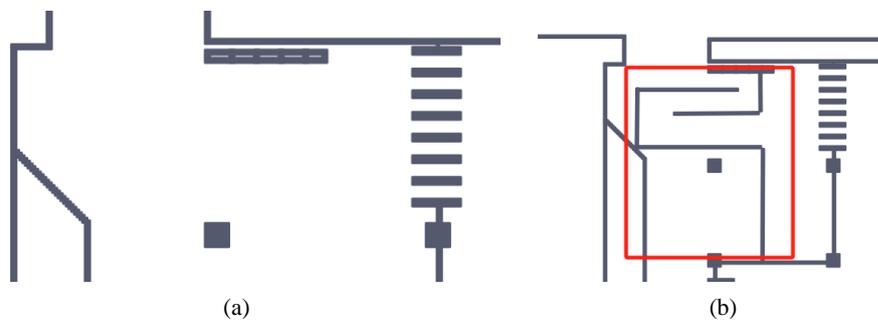


Figure 5. Adding guide rails
图 5. 添加导流栏杆

在大厅层进站闸机处增设导流围栏，即在非付费区域进行优化人群进站速度，地铁站左侧的第二组进站闸机为例，图 5 中的(a)是进站闸机处原始状态，(b)为增加导流围栏后的进站闸机处。



Figure 6. Changes in passenger flow intensity at inbound gates
图 6. 进站闸机处客流强度变化图

模型初始化后开始仿真，如图 6 所示，在第 208 秒进站闸机组整体出现较为严重的人群拥堵情况，平均客流强度已经将近 2.5 p/m^2 ，在各组进站闸机处增设导流围栏，235 秒时平均客流强度明显下降，其平均客流强度基本稳定在 0.6 人/m^2 的范围内，这是一个较为安全和舒适的客流强度水平。

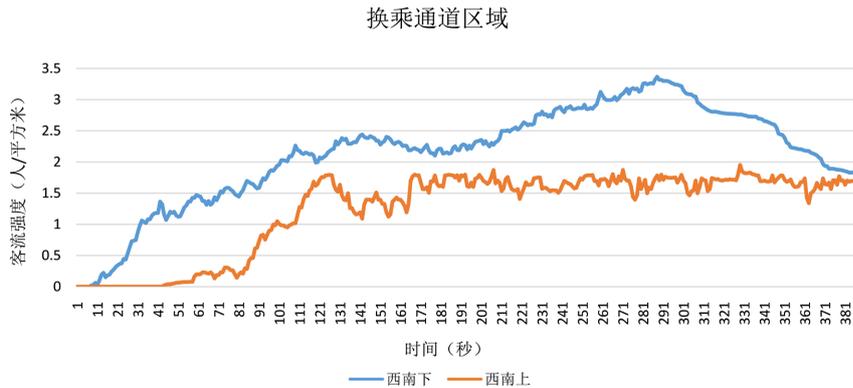


Figure 7. Intensity of passenger flow in the interchange area under diversion measures
图 7. 导流措施下换乘通道区域客流强度

如图 7 所示，在换乘通道区域，西南下部分区域拥堵较为严重，而西南上区域由于换乘人数较少，导流措施的效果不明显，客流强度相对稳定，维持在 $1.5\sim 2 \text{ p/m}^2$ 。经过指标计算，导流策略下管控前后的指标如表 8 所示。

Table 8. Indicator data before and after control under infusion strategy
表 8. 导流策略下管控前后指标数据

准则层	指标层	管控前	管控后
累计人数 (人/10min)	闸机客流强度	2.3552	0.6750
	楼梯客流强度	1.8021	0.7934
	换乘通道客流强度	2.5488	1.8053

续表

均衡性	闸机使用均衡率	0.5069	0.6552
	楼梯使用均衡率	0.5376	0.5735
稳定性	闸机饱和度	0.7600	0.6000
	楼梯饱和度	0.8300	0.7500
	换乘通道饱和度	0.9138	0.8931

根据隶属度函数，可得管控前各项指标的隶属度如下：闸机客流强度的隶属度 $b_{11} = \{0, 0, 0, 0.2210, 0.7790\}$ ；楼梯客流强度的隶属度 $b_{12} = \{0, 0, 0, 0.8630, 0.1370\}$ ；换乘通道客流强度的隶属度 $b_{13} = \{0, 0, 0.4187, 0.5813, 0\}$ ；闸机使用均衡率的隶属度 $b_{21} = \{0, 0, 0.4210, 0.5790, 0\}$ ；楼梯使用均衡率的隶属度 $b_{22} = \{0, 0, 0.5310, 0.4690, 0\}$ ；闸机饱和度的隶属度 $b_{31} = \{0, 0.6180, 0.3820, 0, 0\}$ ；楼梯饱和度的隶属度 $b_{32} = \{0, 0.2500, 0.7500, 0, 0\}$ ；换乘通道饱和度的隶属度 $b_{33} = \{0, 0.2710, 0.7290, 0, 0\}$ 。

采用模糊综合评价法进行等级评定，先对 P_1, P_2, P_3, P 向量中各评价等级 $V = \{V_1, V_2, V_3, V_4, V_5\}$ ，根据最大隶属度原则，评价等级为 V_4 ，表明未实施管控措施时地铁站人群流动处于较差水平。

类似地，可以计算实施导流管控策略后， $P = [0.2572, 0.3454, 0.3312, 0.0679, 0.0000]$ ，根据最大隶属度原则，管控效果评价等级为 V_2 。

4.2.2. 控制设施状态

1) 打开楼梯通道

初始化后进行模拟，楼梯区域第 81 秒发生了轻微拥堵，持续增长至第 111 秒，拥堵情况突出。打开了 1 号楼梯组的 3 号通道而关闭自动扶梯，观察到客流强度有所下降，并且稳定在 0.7 p/m^2 左右，如图 8 所示。

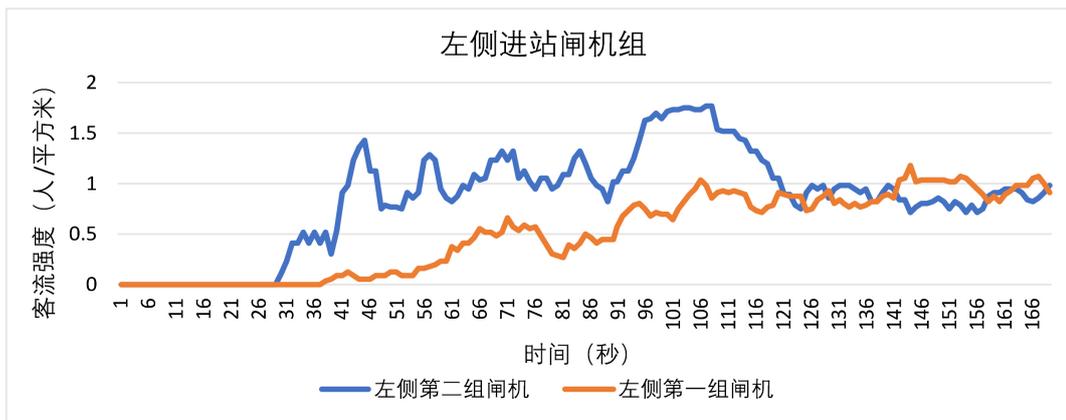


Figure 8. Passenger flow at the left inbound gate when the stairway is open
图 8. 打开楼梯通道时左侧进站闸机客流

2) 更改闸机状态

在进行地铁站客流模拟的过程中，观察到换乘通道区域在第 201 秒时出现了较为明显的拥堵情况。为了应对这一情况，对模型中的闸机通行效率进行调整，以实施限流措施。

如图 9 所示，随着时间的推移，可以看到在第 346 秒时，客流强度出现了显著的变化。

据客流仿真平台收集的数据结合公式，得到管控前后的各指标数据如表 9 所示。



Figure 9. Changing the passenger flow in the interchange area under the gate condition
图 9. 更改闸机状态下换乘通道区域客流

Table 9. Data before and after control under flow restriction strategy
表 9. 限流策略下管控前后数据

指标层	未管控	第一次管控	第二次管控
闸机客流强度 U11	1.1313	0.8213	0.9061
楼梯客流强度 U12	1.9235	0.7021	0.6796
换乘通道客流强度 U13	0.8961	0.9759	0.8536
闸机使用均衡率 U21	0.72	0.80	0.64
楼梯使用均衡率 U22	0.36	0.52	0.55
闸机饱和度 U31	0.61	0.63	0.74
楼梯饱和度 U32	0.89	0.83	0.85
换乘通道饱和度 U33	1.02	0.97	0.76
管控效果等级	V4	V3	V2

通过计算管控前后数据的隶属度矩阵与各准则层得分向量，综合权重后，得到未管控时目标层的综合得分向量 $P = [0.0380, 0.0810, 0.3890, 0.4530, 0.0400]$ ，根据最大隶属度原则，评价等级为 V4，此时地铁站整体人群流动状况相对较差。

第一次管控后 $P = [0.1302, 0.1183, 0.4871, 0.2652, 0.0000]$ ，根据最大隶属度原则，管控效果评价等级为 V3，表明打开楼梯通道的管控措施对地铁站人群流动管控水平一般，意味着该管控措施仅在一定程度上解决了问题，还需进一步优化或增加额外的管控策略以达到最佳的疏导效果。

第二次管控后的 $P = [0.2758, 0.4706, 0.1107, 0.1449, 0.0000]$ ，根据最大隶属度原则，管控效果评价等级为 V2。

4.3. 管控效果分析及建议

4.3.1. 结果分析

综合上述管控策略的效果，各类管控措施效果总结如下表 10 所示。

Table 10. Summary of control effectiveness
表 10. 管控效果总结

管控策略		评价等级
导流策略	增设导流围栏	V2

续表

控制设施状态	打开楼梯通道	V3
	更改闸机状态	V2

经计算显示管控评价等级为 V2，管控效果良好，使得地铁站的服务水平等级得到提升，打开楼梯通道的管控措施评价等级为 V3，即管控效果一般，可能由于楼梯通道的容量有限或其他并行措施未能同步优化。

相比之下，更改闸机状态的限流策略在模拟中显示出较为显著的效果，这种策略的管控评价等级达到了 V2，且隶属度为 0.4706，说明管控效果良好且有效。

4.3.2. 应用建议

1) 优化导流栏杆布局

在应对高峰初期时，为避免降低乘客出行体验，优先选择导流策略，优化导流栏杆的布局和设计，确保在不增加额外空间的前提下，使人群流动更加顺畅。可以考虑使用可移动的导流栏杆，在客流高峰时段快速调整以应对不同的客流情况。

2) 多通道开放与限流均衡

在楼梯区域拥堵时，需要根据实际情况灵活开放或限制某些楼梯通道的使用。同时可以优化通道使用的时间分配，如在高峰期间增加向上或向下的专用楼梯通道。如果想要达到更好的整体管控效果，需要配合其他管控措施。

3) 实施动态闸机调整

增加智能闸机系统的应用，根据实时客流数据动态调整闸机的开放数量和通行速率。例如，在换乘通道区域拥堵时，及时更改闸机状态，控制进站人群数量。

5. 结论与展望

研究表明，增设导流围栏的导流措施，管控效果评价等级为 V2，即管控效果良好。限流措施如打开楼梯通道，管控效果评价等级为 V3，缓解人群流动拥堵状态效果有限，需要改变策略或配合其他管控措施。调整闸机状态能在一定程度上缓解客流压力，管控效果评价等级达到 V2，可以保障乘客安全和运营秩序。通过实时监控和评估地铁站的运行状态，可以及时调整运营策略，有效防止人群流动堵塞和运营延误，提高地铁站的整体运行效率和服务质量。

在本文的分析研究过程中，仍存在一些不足之处，需要在未来的研究中进一步探讨和完善。首先建立的地铁站仿真模型基于一些理想化的假设，只保留地铁站内关键设施因素，未能完全考虑地铁站内所有实际运行的复杂情况。其次未深入探讨关于改变列车运行的管控策略，如增加列车载客量、增加开行列车等。未来研究可以进一步完善仿真模型，提高模型的现实适应性，探索改变列车运行策略在实际运营中的应用，与地铁站的人群流动导流、限流管控策略相结合，以实现更高效的客流管理。

参考文献

- [1] 李可. 城市轨道交通换乘站大客流仿真优化研究[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州交通大学, 2024.
- [2] 宋晓敏, 冯旭杰, 王子甲, 等. 基于动态路径规划的地铁进站大客流管控仿真分析[J]. 交通运输研究, 2022, 8(3): 154-165.
- [3] Wang, X., Wu, J., Yang, X., Guo, X., Yin, H. and Sun, H. (2020) Multistation Coordinated and Dynamic Passenger Inflow Control for a Metro Line. *IET Intelligent Transport Systems*, 14, 1068-1078. <https://doi.org/10.1049/iet-its.2019.0337>

-
- [4] 左楚阳. 城市轨道交通换乘站大客流组织仿真与优化[D]: [硕士学位论文]. 深圳: 深圳大学, 2021.
- [5] 洪晨, 庄异凡, 景文丽, 等. 城市轨道交通车站瓶颈处限流设施布设仿真研究[J]. 智能计算机与应用, 2021, 11(10): 123-130.
- [6] 赵晓磊, 肖为周. 基于可拓物元法的轨道交通换乘站服务水平综合评价[J]. 河北工业科技, 2022(4): 282-289.
- [7] 丁佳麒. 城市轨道交通换乘站设施服务水平分析与评价研究[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连交通大学.
- [8] 潘福全, 亓荣杰, 唐海梁, 等. 基于乘客需求的轨道交通车站服务水平评价[J]. 深圳大学学报: 理工版, 2018, 35(6): 636-642.
- [9] 聂婷婷, 郑维清, 孙杨, 等. 综合客运枢纽旅客换乘服务水平评价方法[J]. 交通运输研究, 2019, 5(6): 434-439.
- [10] Niu, T.H. and Zhang, X. (2014) Passenger Organization Fuzzy Comprehensive Evaluation Analysis of Beijing South Railway Station. *Applied Mechanics and Materials*, **587**, Article 3308.
- [11] 韩子韬. 轨道多线换乘站设施服务水平评价研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆交通大学, 2023.
- [12] 林芳, 段彪. 环境监测技术存在的问题及对策[J]. 中国资源综合利用, 2020(3): 167-169.
- [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB50157-2013 地铁设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
- [14] Fruin, J.J. (1971) *Pedestrian Planning and Design*. Metropolitan Association of Urban Designers and Environmental Planners.