

惠 阳,余 强,王永岗,等. 地铁站应急疏散效率影响因素分析及优化策略[J]. 长安大学学报(自然科学版),2024,44(4):130-138.  
HUI Yang, YU Qiang, WANG Yong-gang, et al. Analysis of factors affecting emergency evacuation efficiency in subway stations and optimization strategies[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2024, 44(4): 130-138.

DOI:10.19721/j.cnki.1671-8879.2024.04.012

## 地铁站应急疏散效率影响因素 分析及优化策略

惠 阳<sup>1,2</sup>, 余 强<sup>3</sup>, 王永岗<sup>1</sup>, 彭 辉<sup>1</sup>

(1. 长安大学 运输工程学院, 陕西 西安 710064; 2. 长安大学 人文学院, 陕西 西安 710064;  
3. 长安大学 汽车学院, 陕西 西安 710064)

**摘 要:**为了提高地铁站突发事件发生时人员的应急疏散效率,通过深入分析搭建影响疏散效率的因素模型,并对各因素对应急疏散的影响进行综合评估。以西安市五路口地铁站为研究对象,运用 Pathfinder 仿真软件建立了应急疏散仿真模型,以此为基础构建了包括客流特征、设施布局、列车运行和人员特征等一级指标评价模型。在评价模型的构建过程中,采用了算术平均值法、几何平均值法和特征值法进行权重求解,对影响因素的权重进行了全面分析,以准确识别出不同指标下关键应急疏散因子的权重。基于对地铁应急疏散影响因素分析,提出了一系列针对性的优化建议。研究表明:高峰列车通行数量、闸机的通行能力、楼梯的通行能力、列车的承载能力、人员的行为特征和扶梯的通行能力等 6 个因素对地铁应急疏散能力具有重要影响,综合权重占比约为 85%,这些因素对地铁站的安全运营具有重要意义。研究结果对地铁站的安全性评价和紧急疏散能力提升具有重要意义,可为地铁运营管理部门提供科学依据和指导。

**关键词:**交通工程;地铁站;应急疏散效率;层次分析法;Pathfinder;因子权重比

**中图分类号:**U492.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-8879(2024)04-0130-09

## Analysis of factors affecting emergency evacuation efficiency in subway stations and optimization strategies

HUI Yang<sup>1,2</sup>, YU Qiang<sup>3</sup>, WANG Yong-gang<sup>1</sup>, PENG Hui<sup>1</sup>

(1. School of Transportation Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China;  
2. School of Humanities, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China;  
3. School of Automobile, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

**Abstract:** In order to enhance the efficiency of emergency evacuation for passengers in subway stations during emergencies, an in-depth analysis was conducted to construct a model of factors influencing evacuation efficiency and to comprehensively assess the impact of these factors on emergency evacuation. The Xi'an Wulukou Subway Station was chosen as the research subject, using Pathfinder simulation software, an emergency evacuation simulation model was

收稿日期:2023-11-07

基金项目:国家自然科学基金项目(52072044);陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2021JQ-295)

作者简介:惠 阳(1989-),女,陕西西安人,高级工程师,工学博士研究生,E-mail:huiyanghy@chd.edu.cn.

established. Based on this, a primary indicator evaluation model including passenger flow characteristics, facility layout, train operations, and personnel characteristics was constructed. In the process of constructing the evaluation model, arithmetic mean method, geometric mean method, and characteristic value method were utilized to solve the weights of influencing factors. The weights of influencing factors were analyzed comprehensively to accurately identify the key emergency evacuation factors under different indicators. Based on a thorough analysis of the influencing factors of emergency evacuation in subways, a series of targeted optimization suggestions were proposed. The results show that six factors, including the number of peak-hour train passages, the passage capacity of ticket gates, the passage capacity of stairs, the carrying capacity of trains, the behavioral characteristics of personnel, and the passage capacity of escalators, have significant impacts on the emergency evacuation capability of subway stations, with a combined weight proportion of approximately 85%. These factors are deemed crucial for the safe operation of subway stations. Research findings are of great significance for the safety evaluation and improvement of emergency evacuation capabilities in subway stations, and can providing scientific evidence and guidance for subway operation management departments. 10 tabs, 5 figs, 28 refs.

**Key words:** traffic engineering; subway station; emergency evacuation efficiency; analytic hierarchy process; Pathfinder; factor weight ratio

## 0 引言

随着城市化进程的发展,城市规模不断扩大、人口也在迅速增加,交通拥堵问题已经成为城市健康发展和居民日常出行的重要挑战<sup>[1-2]</sup>。城市轨道交通以其快捷、舒适、高效、节能环保等优势,逐渐成为缓解交通拥堵问题的首选解决方案<sup>[3-4]</sup>,然而,地铁车站位于城市地下空间,通常具有人员密集、空间封闭,并且遇到突发情况施救困难等特点,一旦发生火灾、洪水等灾害事件,将对乘客的生命和财产安全造成严重威胁<sup>[5-7]</sup>。因此,地铁站等公共场所的应急疏散问题引起政府和社会的高度重视。国务院办公厅在《关于保障城市轨道交通运营安全运行意见》中强调,提升城市轨道交通应急处置能力并构建综合的治理体系。为了确保城市轨道交通的安全运行,从疏散设计、疏散验收评价到疏散管理,都需要形成完善的安全体系,而构建这一体系是确保地铁站乘客疏散的必要途径,也是地下空间安全理论研究的紧迫需求<sup>[8-9]</sup>。因此,构建有效的城市轨道交通应急疏散安全体系,尤其需建立一个综合性、可靠性更强的应急疏散因子评价模型。

目前,城市轨道交通应急疏散效率模型的评价指标多种多样,包括疏散设施、应急响应、应急疏散和管理因素等多个方面<sup>[10-12]</sup>。近年来,城市

轨道交通应急疏散效率的研究主要集中在以下方面。风险评估方面,米红甫等从火灾风险的角度出发,构建了地铁车站火灾风险的模糊概率评估模型,评估模型将概率论与模糊理论相结合,避免了数理统计所需要的大样本需求,为有效预防地铁站火灾提供理论支持<sup>[13]</sup>。行为和环境因素方面,郑霞忠等综合考虑了紧急情况下人员移动速度和环境因素,对仿真模型进行了调整,研究发现,由于疏散速度和心理压力等因素的影响,紧急情况下的疏散时间更长<sup>[14]</sup>。人为因素和乘客客观认知方面,Lin等探讨了人群流动模式和乘客对地铁空间了解程度对紧急疏散的影响,发现两者之间存在显著的相互作用<sup>[15]</sup>。林晓飞等采用应变能力、帮助他人行为、听从他人引导行为以及安全通道熟悉程度等因素设计正交试验,通过仿真模型研究地铁站发生突发事件时乘客疏散的影响因素,研究发现听从他人引导行为是应急疏散的决定性因素,并提出充分利用站内资源,加强乘客安全素质教育,可有效提高地铁遇险时的疏散效率<sup>[16]</sup>。疏散设施的优化方面,Jiang等研究了地铁站疏散楼梯的关键参数,如最大速度和每人使用楼梯的平均最小宽度,通过仿真和优化减少了整体疏散时间的50%<sup>[17]</sup>。

综上,以往的研究主要集中在地铁应急疏散效率的2个方面:一方面是对火灾等紧急情况进

行建模和评估,另一方面是考虑疏散设施和环境因素进行仿真优化试验。然而,针对构建综合性较强的地铁应急疏散因子评价模型的研究还比较有限。地铁应急疏散是一个多因素、多层次相互关联的复杂问题,不能仅从某一方面进行探究和评估,需要选择具有代表性的地铁站,并综合考虑各种应急疏散因子。因此,本文选取了具有代表性的地铁站作为研究对象,通过建立应急疏散仿真模型,深入研究地铁站的应急疏散因子,同时,综合考虑了地铁站内人员特征、疏散设施、列车运行和客流特征等多个因素,并采用层次分析法(AHP)进行权重分析,以获得更准确的影响因子权重。此外,结合专家评分和概率分析的方法,找出了影响地铁应急疏散效率的瓶颈因素,并提出了相应的建议,旨在提高地铁站的应急疏散效率。

1 AHP 地铁应急疏散因子评价模型

1.1 地铁应急疏散影响因子的分析

本研究通过广泛调查、深入分析以及国内外文献的查阅,总结出影响地铁应急疏散能力的各种因素<sup>[17-19]</sup>。基于 AHP 方法,将地铁应急疏散能力的影响因子整理为标准的 AHP 结构,如图 1 所示。图 1 中,目标层明确为地铁应急疏散能力。准则层为一级指标,具体涵盖客流特征、设施布局、列车运行和人群特性。方案层为二级指标,其中包括但不限于乘客分布的均匀度、引导员的数量、客流的通畅程度、闸机的通行能力、扶梯的通行能力、楼梯的通行能力、出口的通行能力、高峰列车通行数量、列车的承载能力、人员的身体素质、人员的心理特征和人员的行为特征等 12 个疏散影响因子。

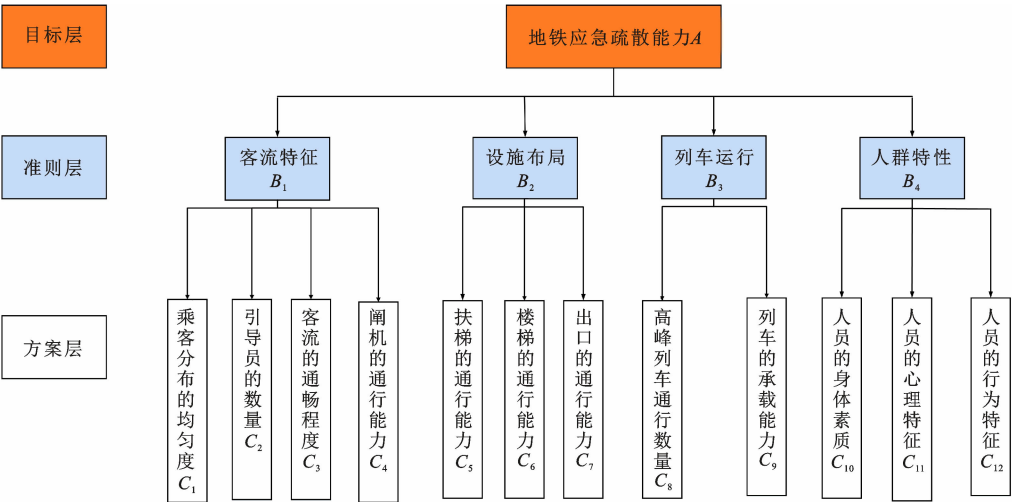


图 1 AHP 结构  
Fig. 1 Structure of AHP

1.2 AHP 方法简介

AHP 是一种综合评价方法,它结合了定性与定量分析,用于确定权重系数<sup>[19-21]</sup>。AHP 的核心思想是将复杂的指标体系进行层次化,然后通过比较各层次指标的相对重要程度,最终确定权重。AHP 方法具有准确性高、易于实施等特点,因此在基建领域、航天领域及医疗领域等广泛应用<sup>[22-24]</sup>。本研究以地铁应急疏散能力为决策目标,综合考虑影响该目标的 4 个一级指标,并将这些一级指标细分为多个应急疏散影响因子,形成了多层次的分析结构。通过 AHP 方法,科学计算应急疏散因子对疏散能力的影响权重。

AHP 的具体计算步骤计算如下:

步骤 1,建立层次分层结构模型。完整的决策架构包括决策对象、决策因素和决策目标。

步骤 2,构造判断矩阵。采用一致矩阵方法,对所有因素进行两两比较,并使用相对尺度进行赋值

$$a_{ij} = \frac{1}{a_{ji}}$$
(1)

式中: $a_{ij}$  为指标  $j$  相对指标  $i$  的重要程度。

判断矩阵元素  $a_{ij}$  的标度方法如表 1 所示<sup>[25]</sup>。

步骤 3,一致性检验。

① 计算一致性指标  $C_1$

$$C_1 = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$$
(2)

式中: $\lambda_{\max}$  为判断矩阵的最大特征值; $n$  为判断矩阵

表 1 标度的定义  
Tab. 1 Definition of scale

标度	含义
1	表示 2 个因素相比,具有同样重要性
3	表示 2 个因素相比,一个因素比另一个因素稍微重要
5	表示 2 个因素相比,一个因素比另一个因素明显重要
7	表示 2 个因素相比,一个因素比另一个因素强烈重要
9	表示 2 个因素相比,一个因素比另一个因素极端重要
2,4,6,8	上述两相邻判断的中值
倒数	A 和 B 相比如果标度为 3,那么 B 和 A 相比就是 1/3

表 2  $R_1$  与  $n$  的对应关系取值  
Tab. 2 Corresponding values of  $R_1$  and  $n$

$n$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$R_1$	0.00	0.00	0.52	0.89	1.12	1.26	1.36	1.41	1.46	1.49	1.52	1.54	1.56	1.58	1.59

对于一致性矩阵,由于其每列都是成比例分布的,在计算权重的时候只需要对其第 1 列求权重即可,其余列权重结果均相同,最终要对权重进行量纲一化处理。

对于非一致,第 1 步是将其量纲一化,即将每个元素的值除以其所在列的和;第 2 步是将量纲一化的各列进行求和,然后再将求和结果与原矩阵的值进行比较;第 3 步是将比较结果的值与  $n$  相乘,从而获得矩阵的权重向量。可以得出以下公式:

假设应急疏散因子判断矩阵  $A$  为

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix}$$

本文 4 个一级指标如表 6~表 9 所示,算数平均法求得的权重向量  $w_i$  为

$$w_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}}$$

几何平均法求得的权重向量  $w_i$  为

$$w_i = \left( \frac{\prod_{j=1}^n a_{ij}}{\sum_{i=1}^n \left( \prod_{j=1}^n a_{ij} \right)^{\frac{1}{n}}} \right)^{\frac{1}{n}}$$

特征向量法求得的权重向量,将权重矩阵  $W$  右乘判断矩阵  $A$ ,有  $AW = \lambda_{\max} W$ 。 $W$  的分量为正分量。

1.4 AHP 模型搭建与判断矩阵的一致性检验

本文通过专家打分、文献综述和数据分析等方法的综合使用,确保指标设置和权重确定是科学、准确和可信的。这种多角度的权重确定方法有助于提高模型的可靠性和适用性。表 3 为用于构建影响因

的阶数。

②查找对应的平均随机一致性指标  $R_1$ ,见表 2

③计算一致性比例  $C_R$

$$C_R = \frac{C_1}{R_1} \tag{3}$$

如果  $C_R < 0.1$ ,判断矩阵的一致性可接受;否则需要对判断矩阵进行修正<sup>[24]</sup>。

1.3 权重计算

求权重的基本方法:算数平均法、几何平均法和特征值法求权重<sup>[26]</sup>。

表 3 判断矩阵  $A-B$   
Tab. 3 Judgment matrix  $A-B$

$A$	$B_1$	$B_2$	$B_3$	$B_4$	$w_1$	$w_2$	$w_3$
$B_1$	1	0.2	0.2	1/3	0.067 2	0.064 0	0.064 9
$B_2$	5	1	1	5	0.416 5	0.420 9	0.421 9
$B_3$	5	1	1	4	0.392 3	0.398 0	0.392 7
$B_4$	3	0.2	0.25	1	0.124 1	0.117 1	0.120 6

$C_1 = 0.043\ 0; C_R = 0.048\ 3 < 0.10$

(判断矩阵  $A$  的一致性检验通过)

注: $w_1$  为算术平均值法求权重; $w_2$  为几何平均值法求权重; $w_3$  为特征值法平均值法求权重。

子的矩阵。

2 地铁站的应急疏散仿真模拟与分析

五路口地铁站位于西安城区,是西安地铁 1 号线和 4 号线的一个重要换乘车站。由于连接了西安地铁新老线路,五路口站的结构格局更加复杂,涵盖城市轨道交通应急疏散中的典型和非典型情况,因此具有广泛的研究价值。为了深入了解地铁站的应急疏散能力,本文采用 Pathfinder 疏散仿真软件进行仿真模拟。该软件提供了直观的图形用户界面,用于创建和运行疏散方针,并提供了二维和三维可视化工具,用于分析仿真结果。利用 Pathfinder 进行应急疏散时,采用 CAD 设计图进行空间转化,搭建 2D 和 3D 的界面共同构筑疏散仿真环境,包括整体建筑、楼层设置、楼梯设置、人员设置(性别、肩宽、行走速度、乘客数量)等。

2.1 地铁站的布局及有效建筑面积

五路口车站的站厅和站台平面布局如图 2 和图 3 所示。该车站内部包括 2 个站台和站厅,设有 A~G 共 7 个出口。2 个站台的布局呈十字交叉形

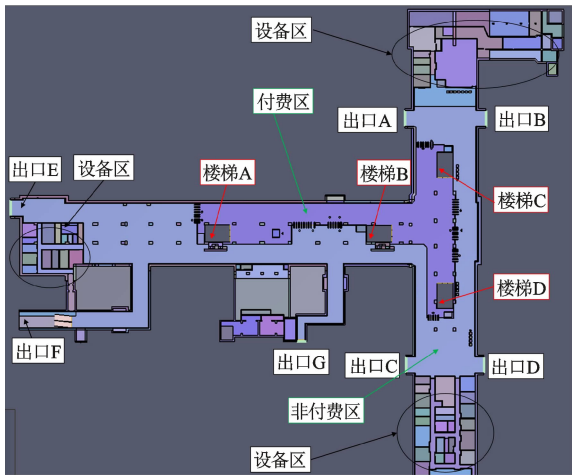


图 2 五路口站厅平面布局

Fig. 2 Hall layout of Wuloukou Subway Station

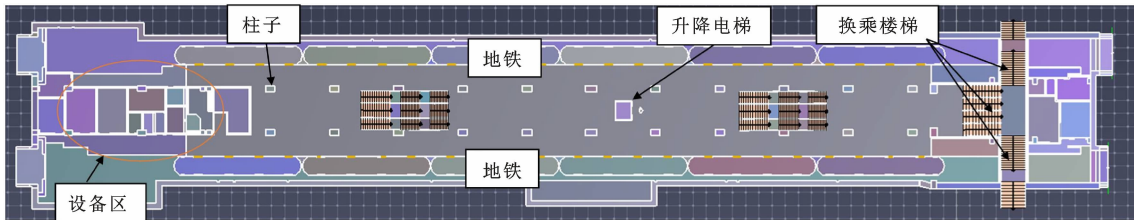


图 3 五路口站台平面布局

Fig. 3 Platform layout of Wuloukou Subway Station

2.2 人员参数与环境参数

仿真环境的人员参数考虑了多个因素,包括性别、年龄、对环境的熟悉程度、位置、性格特点和速度等。这些参数通过对上海市地铁行人特征的试验和数据统计获得<sup>[27]</sup>,从时间维度和城市发展差异,结合五路口高峰期客流量的实际情况获得,在大客流情况下,人员特征参数如表 4 所示。

表 4 大客流情况下人员特征参数

Tab. 4 Characteristic parameters of people under heavy traffic

类别	步速/(m·s <sup>-1</sup> )	比例/%
儿童	1.00	4
少年	1.32	15
青年男性	1.56	21
青年女性	1.49	17
中年男性	1.51	20
中年女性	1.42	19
老人	1.05	4

经过实地调研以及对地铁站早高峰人群的视频分析与统计,获得了地铁站早高峰的人群特征和密度情况。在早高峰时段,老年人群的比例较少,而少年和中年人群较多,青年上班族人数最多。列车内的人群密度可高达 3~5 人/m<sup>2</sup>,站台层的密度可达

状,最终在地下一层的位置汇集为 1 个公共站厅。在 7 个出口中,出口 E 的宽度为 5.3 m,而其余 6 个出口的宽度均为 5.6 m。

站厅内部有 4 组规格和尺寸相同的楼梯,每组包括左右两侧各 1 部上行和下行电梯,其尺寸规格为 11.55 m(长)×2.1 m(宽)。此外,还设有 1 部中间的步行扶梯,尺寸规格为 8.8 m(长)×1.9 m(宽)。在仿真过程中,不考虑站台层和站厅层之间的差异,将 4 号线站台层设定为 161.56 m(长)×14.0 m(宽)的长方形区域,而 1 号线站台层设定为 113.21 m(长)×13.552 m(宽)的长方形区域。

该车站的总建筑面积为 14 714.93 m<sup>2</sup>,去除非有效通行面积(如楼梯和自动扶梯),可供人员疏散的有效建筑面积为 2 261.84 m<sup>2</sup>。

到 1~2 人/m<sup>2</sup>,站厅层的密度可达到 0~2 人/m<sup>2</sup>。为了更好地反映实际情况,针对五路口站的站台层、1 号线站厅层和 4 号线站厅层的人流数量,采用了 0.1 的比例系数<sup>[28]</sup>,这更符合实际大客流情况下的人流分布。具体参数如下:

①五路口地铁站的列车类型为 B 型,每节车厢的实际面积为 40 m<sup>2</sup>(考虑到座椅和防摔栏杆所占用的面积)。该站共有 6 节车厢,早高峰时列车内人群的平均密度为 3 人/m<sup>2</sup>,因此 1 列列车内的人数为 40×6×3=720 人。

②根据调研得到的建筑参数,五路口地铁站 4 号线站台层面积为 1 423 m<sup>2</sup>,1 号线站台层面积为 1 410 m<sup>2</sup>,站厅层面积为 4 724 m<sup>2</sup>。其中,付费区域的面积为 1 344 m<sup>2</sup>,非付费区域的面积为 3 380 m<sup>2</sup>。在非付费区域,人员平均密度可设定为 1 人/m<sup>2</sup>,因此为保证地铁站在客流量最大时遇险疏散情况符合国家规定的 6 min 标准,假设情况为 4 号线站台层 2 列列车和 1 号线站台层 2 列列车同时到达五路口站,各区域分布最大乘客数量如表 5 所示。

2.3 客流分布与疏散时间

图 4 为地铁系统出口累计疏散人数分布,由图 4 可知,在当前客流情况下,总疏散时间为 323.5 s,



表 5 区域分布最大乘客数量

Tab. 5 Maximum number of passengers in regional distribution

名称	最大乘客数
1 列列车满载人数	720
站厅层非付费区域人数	338
站厅层付费区域人数	269
4 号线站台层人数	285
1 号线站台层人数	282
总计需疏散人数	1 894

在仿真的理想情况下进行应急疏散,五路口应急疏散时间符合国家规定的 6 min 标准,在实际应急疏散过程中,可能会面临各种突发因素,造成应急疏散时间的超标。因此后续需要通过 AHP 进一步探究应急疏散因子对疏散效率的影响。这种情况下的疏散人数达到了地铁站的最大容纳能力,是评估地铁应急疏散能力的极限情况。在整个疏散过程中,4 列列车从车厢到达站台的时间几乎相同,大约在 50~60 s 完成了全部疏散。这表明在地铁的应急疏散过程中,列车车厢的满载疏散不是核心问题。在 28 s 时,1 号线站台层的客流达到最大值 1 402 人;而在 27 s 时,四号线站台层的客流达到最大值1 249 人。这种现象的原因在于靠近换乘楼梯的乘客通过换乘楼梯从 4 号线站台到达 1 号线站台进行疏散,导致 1 号线站台层的客流人数高于 4 号线站台层。此外,随着整体客流量的增加,站厅层付费区的人数高于非付费区,这时闸机成为造成拥堵的核心因素,从而延长了疏散时间。

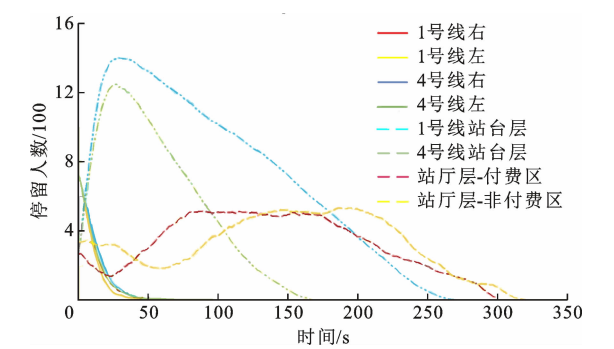


图 4 地铁系统出口累计疏散人数

Fig. 4 Cumulative number of evacuees at exits of metro system

### 3 基于 AHP 的权重求解和结果讨论

#### 3.1 应急疏散因子权重的分析求解

采用算术平均值法、几何平均值法和特征值法对应急疏散因子进行权重分析,深入了解这些因子对五路口地铁站应急疏散的影响情况,并得到它们的准确权重占比,为优化应急疏散所需的

时间提供了关键信息。通过 MATLAB 可以获得权重的求解结果如表 6~表 9 所示。通过 AHP 方法对应急疏散因子进行分析,可以量化评估不同应急疏散因子的重要性,从而为地铁站的应急疏散提供决策依据。

表 6 判断矩阵  $B_1-C$

Tab. 6 Judgment matrix  $B_1-C$

$B_1$	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$w_1$	$w_2$	$w_3$
$C_1$	1	5	3	0.633 3	0.637 0	0.637 0
$C_2$	0.2	1	1/3	0.106 2	0.104 7	0.104 7
$C_3$	1/3	3	1	0.260 5	0.258 3	0.258 3

$C_1=0.019\ 3;C_R=0.037\ 0<0.10$ (判断矩阵  $A$  的一致性检验通过)

表 7 判断矩阵  $B_2-C$

Tab. 7 Judgment matrix  $B_2-C$

$B_2$	$C_4$	$C_5$	$C_6$	$C_7$	$w_1$	$w_2$	$w_3$
$C_4$	1	4	1	5	0.427 1	0.430 4	0.428 5
$C_5$	0.25	1	1/3	2	0.131 6	0.130 1	0.130 5
$C_6$	1	3	1	3	0.352 2	0.352 5	0.353 3
$C_7$	0.2	0.5	1/3	1	0.089 1	0.087 0	0.087 7

$C_1=0.021\ 9;C_R=0.024\ 6<0.10$ (判断矩阵  $A$  的一致性检验通过)

表 8 判断矩阵  $B_3-C$

Tab. 8 Judgment matrix  $B_3-C$

$B_3$	$C_8$	$C_9$	$w_1$	$w_2$	$w_3$
$C_8$	1	3	0.750 0	0.750 0	0.750 0
$C_9$	1/3	1	0.250 0	0.250 0	0.250 0

$C_1=0.000;C_R=0.000<0.10$ (判断矩阵  $A$  的一致性检验通过)

表 9 判断矩阵  $B_4-C$

Tab. 9 Judgment matrix  $B_4-C$

$B_4$	$C_{10}$	$C_{11}$	$C_{12}$	$w_1$	$w_2$	$w_3$
$C_{10}$	1	1/3	0.25	0.119 9	0.117 2	0.117 2
$C_{11}$	3	1	1/3	0.272 1	0.268 6	0.268 4
$C_{12}$	4	3	1	0.608 0	0.614 4	0.614 4

$C_1=0.036\ 8;C_R=0.070\ 7<0.10$ (判断矩阵  $A$  的一致性检验通过)

利用 YAAHP 软件进一步计算各疏散因子对目标层的组合权重如表 10 所示,从表 10 可以看出,3 种方法对疏散因子权重求解结果略有差异,但权重大小排序基本一致,表明这些方法对于权重的估计具有一致性和可靠性。二级指标  $C_8$ (高峰列车通行数量)在所有指标因子中的权重最大;二级指标  $C_2$ (引导员的数量)在所有指标因子中权重最小。五路口站是一个多地铁路线的换乘站,汇集了来自不同区域的乘客、人员,尤其是在早晚客流高峰阶段,增加一定的列车通行数量会显著减少区域内的停留人数,提高应急疏散效率。乘坐地铁人员的 80%为当地常住人口(工人、学生),对地铁内的路线较为熟悉,且内部有明显的指引路标。因此,引导员

表 10 二级指标权重  
Tab. 10 Weights of secondary indicators

二级指标	算术平均法 权重/%	几何平均法 权重/%	特征值法 权重/%
C <sub>1</sub>	4.26	4.08	4.13
C <sub>2</sub>	0.71	0.67	0.68
C <sub>3</sub>	1.75	1.65	1.68
C <sub>4</sub>	17.79	18.11	18.08
C <sub>5</sub>	5.48	5.48	5.51
C <sub>6</sub>	14.67	14.37	14.91
C <sub>7</sub>	3.71	3.66	3.70
C <sub>8</sub>	29.42	29.85	29.45
C <sub>9</sub>	9.81	9.95	9.82
C <sub>10</sub>	1.49	1.37	1.41
C <sub>11</sub>	3.38	3.15	3.24
C <sub>12</sub>	7.55	7.19	7.41

的数量在影响应急疏散效率的指标因子中权重占比最小。

为优化应急疏散因子权重的准确性和可靠性,对 3 种方法求解的权重进行取平均值处理,12 个二级指标权重均值的曲线如图 5 所示。

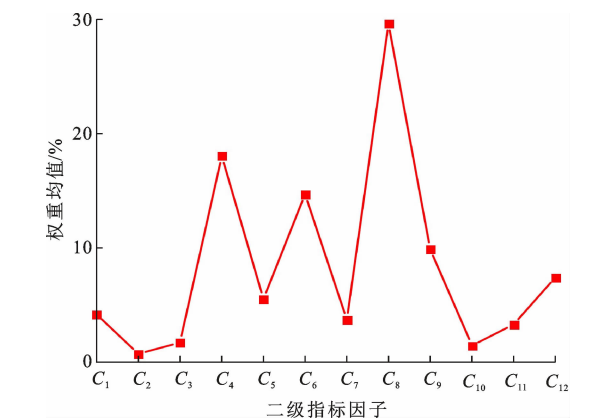


图 5 二级指标权重占比(均值)

Fig. 5 Weighting ratios of secondary indicators (mean value)

由图 5 可知:C<sub>8</sub>(高峰列车通行数量)在所有指标因子中权重最大,约为 29.57%,这表明高峰期列车通行数量对地铁应急疏散能力有显著影响,提高高峰期列车的通行频率和数量可以有效提升应急疏散能力。C<sub>4</sub>(闸机的通行能力)的权重约为 18%,在二级指标中占重要的位置,这是因为闸机是限流点,其通行能力对地铁站应急疏散能力具有较大影响。优化闸机的设计和管理,提高其通行效率,可以有效提升地铁站的应急疏散能力。C<sub>6</sub>(楼梯的通行能力)的权重约为 14.65%,因为楼梯是地铁站内重要的通行路径,其通行能力对应急疏散能力起到重要作用。设计和管理合理的楼梯系统,确保其通畅和

安全,有助于提升地铁站的应急疏散能力。C<sub>9</sub>(列车的承载能力)权重约为 9.86%,对地铁应急疏散能力有一定的影响。提高列车的承载能力,增加乘客的运输能力,有助于应对突发情况下的疏散需求。C<sub>12</sub>(人员的行为特征)权重约为 7.38%,对地铁应急疏散能力也有一定影响。人员的行为特征包括乘客在紧急情况下的反应和配合程度,通过宣传教育和培训,可以提高乘客在应急疏散时的意识和配合度。C<sub>5</sub>(扶梯的通行能力)权重约为 5.49%,扶梯是乘客在地铁站内的主要垂直通行设施,其通行能力对应急疏散能力也有一定的影响。

3.2 结果讨论

综合考虑客流特征、设施布局、列车运行和人群特性等一级指标搭建的 AHP 评价模型得到了不同指标下关键应急疏散因子的权重。高峰列车通行数量、闸机的通行能力、楼梯的通行能力、列车的承载能力、人员的行为特征和扶梯的通行能力这 6 个指标对地铁应急疏散能力具有重要影响,它们约占地铁应急疏散评价模型总权重的 85%。针对以上指标对五路口地铁站应急疏散提出相应的优化措施,可以提高地铁应急疏散效率,具体如下:

(1)地铁相关部门在早晚人流高峰时期可以增加列车运行的次数、减小列车运行的间隔时间,以减少人员拥堵和缩短疏散时间。

(2)闸机口、楼梯口和出口作为地铁站应急疏散的核心,五路口地铁站部分通道仍采用单向人行通道且通道狭小,限制人员疏散的通行速度,可对地铁站的通行设施布局进行优化。

(3)制定应急疏散预案,完善的基础设施也需要合理的利用才能实现高效的疏散能力,确保在突发情况下,工作人员能够及时的应对处理。

(4)通过举办公益性质的应急疏散知识培训并通过赠送地铁卡鼓励群众参加培训,提高乘客在紧急情况下的应急反应和协作能力。

4 结 语

(1)本文基于 Pathfinder 仿真软件的应急疏散仿真模型构建,综合考虑了五路口地铁站的设施布局 and 人群特征,得出了在极限人流量情况下的总疏散时间为 323.5 s,并分析了各区域的疏散时间分布情况。其中,站台层的人群疏散被确认为整个疏散过程的核心。

(2)基于专家咨询和数据调研,本文构建了五路口地铁站应急疏散综合评价模型,获取了评价指标

的权重。采用多种求解方法确保评估结果的准确性,为地铁应急疏散提供了科学的参考工具。

(3)通过深入分析和讨论地铁应急疏散的关键影响因素,本文提出了针对高峰列车通行数量、闸机的通行能力、楼梯的通行能力、列车的承载能力、人员的行为特征、扶梯的通行能力等应急疏散因子的改进措施,为地铁运营管理部门提供了理论依据。

(4)未来的研究可以考虑更多的实测数据和统计分析,以进一步完善应急疏散科学评价方法。

## 参考文献:

## References:

- [1] 徐 丹. 地铁环境内人员应急疏散行为研究[D]. 北京:首都经济贸易大学,2019.  
XU Dan. Study on emergency evacuation behavior of people in subway environment[D]. Beijing: Capital University of Economics and Business,2019.
- [2] 曹淑超,王苗苗,倪 捷,等. 洪涝灾害下地铁站人群运动特性及疏散建模研究[J]. 铁道科学与工程学报,2023,15(5):1-11.  
CAO Shu-chao, WANG Miao-miao, NI Jie, et al. Modeling of crowd movement characteristics and evacuation in underground stations under flooding[J]. Journal of Railway Science and Engineering,2023,15(5):1-11.
- [3] 陈俊敏,姚小林,林孙滔,等. 地铁站事故疏散时间计算方法对比研究[J]. 中国安全科学学报,2011,21(10):64-70.  
CHEN Jun-min, YAO Xiao-lin, LIN Sun-tao, et al. Comparative study on different calculating methods for accident evacuation time at subway station[J]. China Safety Science Journal,2011,21(10):64-70.
- [4] 王泽应,李 俊,付 敏,等. 考虑疲劳度与能见度的深埋地铁站人员疏散仿真[J]. 消防科学与技术,2019,38(12):1698-1702.  
WANG Ze-ying, LI Jun, FU Min, et al. Simulated personnel evacuation of deep-buried subway station considering fatigue and visibility[J]. Fire Science and Technology,2019,38(12):1698-1702.
- [5] 李 冬,苏燕辰,田 鑫,等. B型地铁列车火灾安全疏散性能研究[J]. 铁道科学与工程学报,2016,13(8):1613-1617.  
LI Dong, SU Yan-chen, TIAN Xin, et al. Research on the evacuation performance of B-type subway train in the condition of fire disaster[J]. Journal of Railway Science and Engineering,2016,13(8):1613-1617.
- [6] 王付宇,王 骏. 突发事件情景下地铁站人员应急疏散问题综述[J]. 计算机应用研究,2018,35(10):2888-2893.  
WANG Fu-yu, WANG Jun. Summary of emergency evacuation of subway station personnel in emergency situations[J]. Application Research of Computers,2018,35(10):2888-2893.
- [7] ZHANG L M, WU X G, LIU M J, et al. Discovering worst fire scenarios in subway stations: A simulation approach[J]. Automation in Construction,2019,99:183-196.
- [8] SONG X, ZHANG Z H, PENG G Z, et al. Effect of authority figures for pedestrian evacuation at metro stations[J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications,2017,465:599-612.
- [9] ZHANG L M, LIU M J, WU X G, et al. Simulation-based route planning for pedestrian evacuation in metro stations: A case study[J]. Automation in Construction,2016,71:430-442.
- [10] CHENG Y, ZHENG X P. Emergence of cooperation during an emergency evacuation[J]. Applied Mathematics and Computation,2018,320(C):485-494.
- [11] 黄家骏,徐瑞华,洪 玲,等. 动态不确定性环境下的地铁车站应急疏散仿真建模[J]. 交通运输系统工程与信息,2018,18(2):164-170.  
HUANG Jia-jun, XU Rui-hua, HONG Ling, et al. Simulation model of evacuation process in metro station under dynamic and uncertain environment[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology,2018,18(2):164-170.
- [12] 王立晓,于江波,孙小慧. 考虑心理异质性的地铁应急疏散行为决策建模[J]. 中国安全科学学报,2021,31(10):119-126.  
WANG Li-xiao, YU Jiang-bo, SUN Xiao-hui. Decision-making modeling of metro emergency evacuation behavior considering psychological heterogeneity[J]. China Safety Science Journal,2021,31(10):119-126.
- [13] 米红甫,肖国清,王林元,等. 地铁车站火灾风险的概率模糊评估研究[J]. 安全与环境学报,2015,15(5):16-20.  
MI Hong-fu, XIAO Guo-qing, WANG Lin-yuan, et al. On the fire risk evaluation for the subway station based on the probability fuzzy theory[J]. Journal of Safety and Environment,2015,15(5):16-20.
- [14] 郑霞忠,向蕾蕾,晋良海,等. 考虑人-环因素的地铁站疏散速度修正模型与仿真[J]. 中国安全科学学报,2017,27(8):19-24.  
ZHENG Xia-zhong, XIANG Lei-lei, JIN Liang-hai, et al. A model for correcting speed of evacuation from



- subway station considering human-environment factors[J]. *China Safety Science Journal*, 2017, 27(8): 19-24.
- [15] LIN J, CAO L J, LI N. How the completeness of spatial knowledge influences the evacuation behavior of passengers in metro stations: A VR-based experimental study [J]. *Automation in Construction*, 2020, 113: 103136.
- [16] 林晓飞, 喻 箫, 侯正波, 等. 地铁应急疏散影响因素研究[J]. *中国安全生产科学技术*, 2020, 16(增 1): 41-45.
- LIN Xiao-fei, YU xiao, HOU Zheng-bo, et al. Study on factors influencing emergency evacuation in subways[J]. *China Safety Production Science and Technology*, 2020, 16(S1): 41-45.
- [17] JIANG C S, YUAN F, CHOW W K. Effect of varying two key parameters in simulating evacuation for subway stations in China [J]. *Safety Science*, 2010, 48(4): 445-451.
- [18] 杨鑫刚, 单彩虹, 陈学哲. 地铁站应急疏散数值模拟研究[J]. *安全与环境学报*, 2023, 12(2): 1-8.
- YANG Xin-gang, SHAN Cai-hong, CHEN Xue-zhe. Numerical simulation of emergency evacuation in underground stations[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2023, 12(2): 1-8.
- [19] 和子崴. 北京地铁大客流应急反应能力评价[D]. 北京: 北京交通大学, 2017.
- HE Zi-wei. Evaluation of Beijing subway emergency response capacity during mass. passenger flow [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2017.
- [20] 王登攀, 黄铂清. 基于层次分析法的南亚某环线铁路选线设计[J]. *铁道工程学报*, 2022, 39(12): 35-40.
- WANG Deng-pan, HUANG Bo-qing. Alignment design of a South Asian circular railway based on analytic hierarchy process[J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 2022, 39(12): 35-40.
- [21] 王欣媛, 徐佳苗, 刘 健, 等. 基于层次分析法的区域医疗中心评价指标体系构建研究[J]. *中国卫生政策研究*, 2023, 16(2): 16-21.
- WANG Xin-yuan, XU Jia-miao, LIU Jian, et al. Research on construction of evaluation index system of regional medical center based on analytic hierarchy process[J]. *Chinese Journal of Health Policy*, 2023, 16(2): 16-21.
- [22] 黄硕磊, 何奕忻, 杨 早, 等. 成都市龙泉山城市森林公园生态系统服务价值评估体系的构建——基于层次分析法[J]. *应用与环境生物学报*, 2022, 28(6): 1635-1645.
- HUANG Shuo-lei, HE Yi-xin, YANG Zao, et al. Construction of an ecosystem service valuation system in Longquanshan Urban Forest Park, Chengdu, based on hierarchical analysis[J]. *Journal of Applied and Environmental Biology*, 2022, 28(6): 1635-1645.
- [23] 牛 虎, 刘泊天, 高 鸿, 等. 基于层次分析法-熵权组合法的航天器材料应用验证综合评价研究[J]. *宇航材料工艺*, 2023, 53(2): 22-29.
- NIU Hu, LIU Bo-tian, GAO Hong, et al. Research on comprehensive evaluation of spacecraft materials application validation based on analytic hierarchy process-entropy weight combined method [J]. *Aerospace Materials & Technology*, 2023, 53(2): 22-29.
- [24] 张惠文, 荆丽梅, 许艺帆, 等. 基于层次分析法的安宁疗护服务综合评价指标体系权重分析[J]. *中国卫生政策研究*, 2023, 16(1): 52-59.
- ZHANG Hui-wen, JING Li-mei, XU Yi-fan, et al. Weight analysis of the comprehensive evaluation index system of hospice care service based on analytic hierarchy process [J]. *Chinese Journal of Health Policy*, 2023, 16(1): 52-59.
- [25] 鲍俊臣, 韩道文, 程 立, 等. 基于层次分析法的穿透性制空作战飞机威胁评估[J]. *现代防御技术*, 2024, 52(1): 8-15.
- BAO Jun-chen, HAN Dao-wen, CHENG Li, et al. Threat assessment of penetrating counterair operational aircraft based on analytic hierarchy process [J]. *Modern Defence Technology*, 2024, 52(1): 8-15.
- [26] 邓 雪, 李家铭, 曾浩健, 等. 层次分析法权重计算方法分析及其应用研究[J]. *数学的实践与认识*, 2012, 42(7): 93-100.
- DENG Xue, LI Jia-ming, ZENG Hao-jian, et al. Research on computation methods of AHP weight vector and its applications [J]. *Mathematics in Practice and Theory*, 2012, 42(7): 93-100.
- [27] YU E D, ZHENG W, GUO M M. Experimental features and mathematical model of pedestrian evacuation from a room with two exits [J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(9): 094501.
- [28] 赵梦露. 地铁应急状态下人员安全疏散不确定性分析 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2016.
- ZHAO Meng-lu. Study on uncertainty of occupant safety egress under emergency state in subway [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2016.