

基于虚拟现实眼动试验的老旧地铁车站 防火疏散问题研究^{*}

杨艳红^{1,2**} 潘 婷² 单 宇³ 乔忠民²

(1. 天津城建大学城市艺术学院, 300384, 天津; 2. 天津城建大学建筑学院, 300384, 天津;
3. 天津城建大学国际工程学院, 300384, 天津//第一作者, 教授)

摘 要 通过采集老旧地铁车站火灾疏散过程的主客观数据,分析疏散过程中的各类影响因素,提出目标测试站点的空间优化建议。综合采用虚拟现实、眼动追踪及问卷调查等技术手段与研究方法,以天津地铁西南角站防火疏散过程为研究对象,进行车站建模与火灾场景渲染,寻找试验人员开展3次不同难易程度的疏散测试,记录试验人员行为数据、眼动仪测试数据及试验后问卷调查数据,综合数据统计分析结果,探究个体行为、基本信息、空间因素等要素对疏散的影响程度。结果表明:试验人员的性别及其对逃生疏散知识的了解程度会影响疏散结果;匀质型空间会影响位置判断,大体量结构易阻挡视线;换乘空间是疏散问题节点,空间复杂与引导标志过多使得试验人员难以快速辨别正确逃生路径;在疏散薄弱环节,空间引导、标志导视、灯光引导对疏散影响较大,其他设备等因素对其影响较小。

关键词 地铁车站;防火疏散;虚拟现实;眼动试验

中图分类号 U231.96; U231.4

DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.06.015

Study on Fire Evacuation of Old Metro Station Based on VR Eye-tracking Experiment

YANG Yanhong, PAN Ting, SHAN Yu, QIAO Zhongmin

Abstract By collecting the subjective and objective data of the old metro station fire evacuation process and analyzing various influencing factors of the evacuation process, spatial optimization suggestions for the target test station are put forward. By comprehensively adopting technical means such as virtual reality, eye-tracking and questionnaire survey, taking the fire evacuation process of Tianjin Metro Xi'nanjiao Station as the research object, the station modeling and fire scene rendering are carried out, and three evacuation tests of different difficulty levels are conducted on test personnel. The test personnel be-

havior data, eye-tracking data, post-test questionnaire survey data are recorded, and through comprehensive statistical analysis of these data, the influence of factors including individual behavior, basic information, spatial factors on evacuation is explored. Results show that gender of the test personnel and their evacuation knowledge apprehension level will affect the evacuation results. Homogeneous space will affect position judgment, and large volume structure blocks eyesight; interchange space is the problematic node during evacuation. Complex spatial experience and excessive guide signs make it difficult for test personnel to quickly identify the correct escape path. In the weak link of evacuation, spatial guidance, signage guidance and lighting guidance have a greater impact on evacuation, while factors such as other equipment have less.

Key words metro station; fire evacuation; virtual reality; eye-tracking experiment

First-author's address School of Urban Arts, Tianjin Urban Construction University, 300384, Tianjin, China

0 引言

地铁车站火灾事故多发,但由于地铁车站空间结构的特殊性、地下埋置较深、空气流通效率低、自然照明情况差及出入口疏散限制大等问题,给人员疏散造成极大阻碍。近年来由于建模和渲染软件以及试验技术手段的逐渐完善,VR(虚拟现实)和眼动追踪技术^[1]得以广泛应用。

目前,地铁车站防火疏散研究可分为三类:第一类以FDS(火灾动力学模拟)等仿真为主,其逃生概率模型主要用于预测层面;第二类以社会力模型为代表,侧重微观运动与群体疏散分析,从规划角

^{*} 教育部人文社会科学研究规划基金项目(19YJAZH102);国家留学基金项目(202008120010)

^{**} 通信作者

度提供指导;第三类以 VR^[2] 为主,从行为学和心理角度提供研究思路。当前地铁车站防火疏散研究大多借助数值模拟软件,忽略主观因素。眼动追踪作为深入了解建筑环境对人类体验影响的一种手段^[3],多用于寻路研究以及标志系统和出口的选择,研究对象较单一。VR 与眼动技术结合使深入探索行为规律和心理特征成为可能,为老旧地铁车站防火疏散优化提供人性化依据。

以天津西南角站防火疏散过程为研究对象,探讨疏散行为与空间因素的关系。通过相关文献和实地调研,梳理地铁车站目前防火疏散存在的问题;通过 VR 试验的路径选择和疏散时长,分析防火疏散的问题节点;结合眼动数据与问卷调查,探讨空间影响因素;最后得出相关结论和建议。

1 试验准备与方法

1.1 试验场景模型的建立

西南角站是天津地铁 1 号线(以下简称“1 号线”)和天津地铁 2 号线(以下简称“2 号线”)的换乘站,空间类型较典型,研究结果更具参考价值。该车站分为三层,第一层(地面层)包含部分商业建筑,第二层(地下一层)是 1 号线站台层,第三层(地下二层)是 2 号线站台层。西南角站有 A、B、C、D1、D2 共 5 个出口,各有 4 组自动扶梯及楼梯。A 出口空间与商业建筑连接,火灾时防火卷帘可能自动落下,不能作为疏散出口。

1 号线车站为侧式站台,等候区长约 140 m、宽约 5 m。2 号线站台为岛式站台,等候区宽约 12 m,长约 117 m。两个换乘空间中,一个连通 B、C 出入口,另一个连通 A、D 出入口。

西南角站的站内标志系统大致分为四类:① 地面标志,多为箭头和文字,线路不同,颜色不同;② 墙面标志,主要包括换乘、出口、道路名称等信息,其底部距地面约 1.4 m;③ 悬挂式标志,主要包括指示方向、出口等,约离地 2.5 m;④ 安全指示灯,悬挂位置约离地 0.3 m、间隔 10 m,配备独立的车供电系统,保障火灾时不会断电。

为模拟地铁车站空间,运用 AutoCAD 软件绘制平面图,采用 Sketch-Up 软件建立三维模型,采用 Photoshop 软件处理标志。为创建虚拟环境,使用 Unity 软件进行编程设计,通过 UE4 软件渲染模拟环境火灾效果。试验以现有设备为基础,对人员移动方式和移动速度进行控制。据研究数据,站内客

流高峰期人员疏散过程中实测的平均速度约为 1.5 m/s。

1.2 试验人员与试验步骤

试验人员共 60 名,男女比例为 1.15:1.00。各年龄段试验人员占比为:15 岁以下为 5.36%,15~30 岁为 75%,>30~60 岁为 19.64%。其中,74.4% 的试验人员具备一定的火灾逃生知识,5.42% 的试验人员非常了解,19.64% 的试验人员几乎不了解;经常使用和偶尔使用地铁的人数占比分别为 45.24%、40.48%,从不使用地铁的人数占比为 14.28%;对西南角站非常熟悉的试验人员占比为 7.14%,42.86% 的试验人员略有了解,其余 50% 不了解;试验人员中没有经常使用 VR 和眼动仪设备的情况,71.43% 的试验人员体验过但不熟悉,另有 28.57% 的试验人员从未使用过该类设备。

试验步骤如下:① 确认试验人员健康状况良好,向试验人员讲解试验流程及设备使用方法等相关问题,试验人员佩戴试验设备进行简单移动和适应,适应后试验正式开始;② 试验人员从第一视角进入虚拟场景,试验数据由计算机软件同步记录,整个过程约 60 min;③ 每位试验人员需从不同起点,进行 3 次不同逃生难度的测试,试验场景设有 6 处起点,起点由工作人员控制;④ 每次测试完毕后立刻进行问卷调查,经短暂休息方可进入下一次测试。

2 试验结果与分析

疏散过程大致分为 3 个阶段:第一阶段为地铁车厢至换乘层,试验人员从指定起点找到上行交通,从而到达换乘空间;第二阶段为换乘层至站厅层楼梯,试验人员到达换乘空间后,找到疏散出口;第三阶段为出口楼梯至室外出口,试验人员选择正确出口后,通过楼梯进入出口站厅。天津地铁西南角站模型及出口示意图 1。

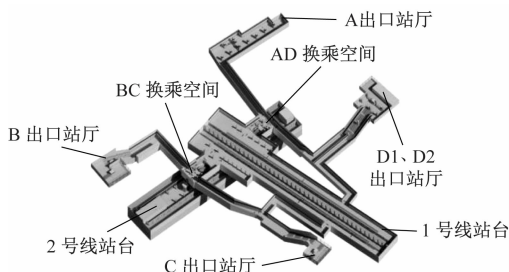


图 1 天津地铁西南角站模型及出口示意图

Fig. 1 Diagram of Tianjin Metro Xinanjiiao Station model and exit

2.1 VR 试验

数据显示,疏散全程平均用时为 100.63 s,其中:第一阶段为 27.74 s,第二阶段为 54.91 s,第三阶段为 17.96 s。第二阶段平均疏散用时明显高于另外两个阶段,疏散难易程度依次降序排列为:3 阶段的>1 阶段的>2 阶段的。

1) 第一阶段试验人员从地铁站台寻找换乘楼梯,偶尔有转向寻找疏散楼梯的动作,通行速度较快,运动轨迹较为明确,未出现反复、迟疑等情况。数据显示,第一阶段疏散难易程度平均得分为 3.85 分。疏散难易程度评价为:1.19% 的试验人员认为很难,5.95% 的试验人员认为比较难,22.02% 的试验人员认为一般,48.21% 的试验人员认为比较容易,22.62% 的试验人员认为很容易。内部环境评价中:48.81% 的试验人员认为空间引导效果较好,51.79% 的试验人员认为灯光引导一般,47.02% 的试验人员对标志导视系统较满意,60.12% 的试验人员认为其他设备影响较一般。该阶段空间引导和标志导视对疏散过程的正向影响作用较大,灯光和其他设备几乎不起作用。

2) 第二阶段的判断重点为换乘空间(见图 2)。该阶段矩阵均分为 3.46,小于第一阶段的 3.62 和第三阶段的 3.58。32 名试验人员在 A、D 出口的选择中出现迟疑,首先跑向 A 出口所在阶梯,最后折返至站台区域。2 名试验人员在 B、C 出口通道被岔路和标志误导,另有 2 名跑回站台起点。第二阶段疏散难易程度评价得分较低,为 3.57 分。疏散难易程度评价为:4.76% 的试验人员认为很难,12.50% 的试验人员认为比较难,20.24% 的试验人员认为一般,46.43% 的试验人员认为比较容易,16.07% 的试验人员认为很容易。内部环境评价中:42.86% 的试验人员认为空间引导效果较好,47.02% 的试验人员认为灯光引导一般,39.88% 的

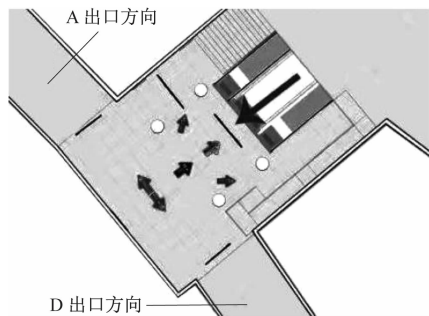


图 2 AD 换乘空间平面示意图

Fig. 2 Planar diagram of AD interchange space

试验人员对标志导视系统较满意,65.48% 的试验人员认为其他设备影响较为一般。该阶段试验人员主要根据空间引导和标志导视进行逃生,而灯光和其他设备几乎无帮助。

3) 第三阶段试验人员通行几乎无障碍,由楼梯向出口闸机运动的过程较为顺畅。该阶段疏散难度评价得分为 4.2 分。对疏散难易程度的评价为:0% 的试验人员认为很难,1.19% 的试验人员认为比较难,9.52% 的试验人员认为一般,50.6% 的试验人员认为比较容易,38.69% 的试验人员认为很容易。对内部环境的评价中,54.17% 的试验人员认为空间引导效果比较好,49.40% 的试验人员认为灯光引导一般,60.71% 的试验人员对标志导视系统较满意,58.33% 的试验人员认为其他设备影响比较一般。该阶段疏散得分最高,疏散效果最好,但试验人员主要根据空间引导进行判断,标志导视、灯光及其他设备并未在该阶段起到正向作用。

综上所述:

1) 试验全过程评价平均分约为 3.56 分,表明疏散情况较好。其中,40.48% 的试验人员从 B 出口逃生,18.45% 的试验人员从 C 出口逃生,41.07% 的试验人员从 D 出口逃生。

2) 试验人员对第二阶段满意度较低,试验人员从换乘层通过楼梯至站厅层阶段是平均疏散用时差异最大的阶段,有 53.3% 的试验人员在 AD 换乘空间选择中出现困难。

3) 前两个阶段的试验人员疏散过程中,空间引导与标志导视都起到正向作用,但疏散评分相差较大。为进一步探究影响疏散的空间因素,将进行眼动追踪试验。

2.2 眼动追踪试验

本文进行了眼动追踪试验,以验证 VR 试验结果并进一步探究其空间影响因素。图 3 按站台空间换乘空间出口廊道空间出口站厅空间的疏散过程显示了西南角站站台热力图。每张图片的观察时间为 5 s,总用时为 22 s。

1) 第一阶段试验人员主要依靠空间布局及标志导视进行逃生判断。图 3 西南角站站台热力图显示,距楼梯较近时,试验人员目光主要聚焦于楼梯背部和侧面以及附近的悬挂标志;距楼梯较远时,试验人员目光在尽头处总注视时间最长,且注视远处换乘空间或顶部悬挂标志的程度较高。墙面标志、安全出口指示灯、地面指示灯,以及其他放置物

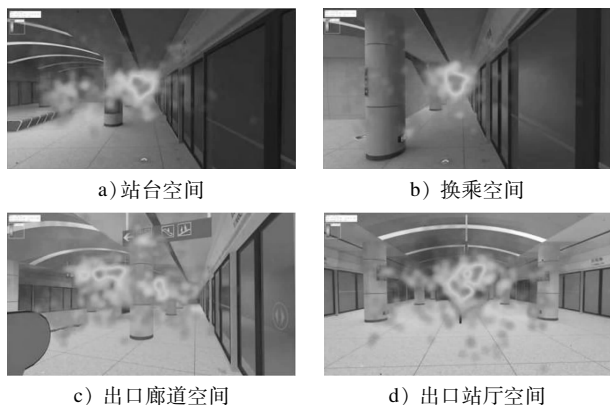


图3 西南角站站台热力图

Fig. 3 Heat map of Xinanjiiao Station platform

受到的关注程度比较低。试验人员的判断基本上依赖空间经验。标志引导系统中的地面标志对疏散有较高的积极影响。疏散场景中的标志引导类型较多,悬挂式标志的视觉突出性较高,吸引了大多数试验人员的注意。试验人员从楼梯通往换乘空间的标志较少,但向上的交通本身有很强的引导性,试验人员首先注意到的是楼梯的尽头,故首次注视时间用时相差较小且整体用时较短。站台空间的同质性导致的试验人员方向感不佳、柱子体量阻碍视线、座椅阻挡及光线昏暗都是负面因素。

2) 第二阶段换乘空间是疏散的问题节点。换乘空间热力图(见图4)显示,试验人员的注视轨迹基本为悬挂标志到柱子绿色标志,再到地面标志和安全指示标志等。柱子上的墙面标志、安全指示灯、墙面标志、悬挂标志受关注程度较高,而地面标志仅有1个且距离试验人员较远,致使其被关注到的次数较少。经分析,逃生过程中的视野高度与墙面标志位置高度二者共同作用,导致墙面标志更容易被注意到。此外,安全指示灯安装位置距离地面比较近且自发光,试验人员在防火疏散过程中常采用俯身的跑步姿势,更容易被注意到。根据换乘楼梯、疏散廊道等热力图显示,每段路径目光所及尽头处受关注程度较高,非疏散用途标志也获得一定程度的注视。通往C出口廊道的三叉路空间也极具迷惑性,3条道路周边标志较密集。试验人员首先注意到的是悬挂于顶部的安全指示灯或其他指示牌,最后注意到的是廊道墙面底部的安全指示灯。多数试验人员根据远处向上楼梯的引导进入正确出口空间,但也有试验人员被其他各类标志吸引目光,短时间内无法辨别方向,重新跑回站台空间。该阶段灯光引导及其他设备影响较弱,试验人

员主要依据空间引导和空间经验逃生,少部分试验人员根据安全指示灯、悬挂标志、墙面标志获取逃生信息。换乘空间较复杂,柱子阻挡视线,以及标志导视数量虽多但可识别性不高,导致接近40%的试验人员进入A出口后折返。还有部分试验人员缺乏方向感,跑至1号线站台或直接返回2号线站台,试验人员表示该阶段缺乏明确的安全出口提示。同时,火灾情况下试验人员较为紧张混乱,若受从众心理影响,大批人群涌向A出口,可能造成较为严重的后果。

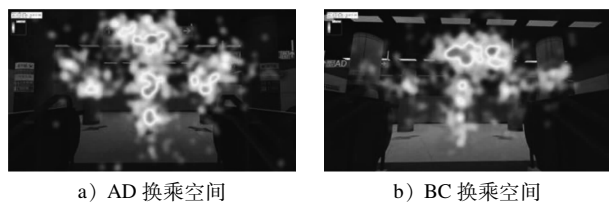


图4 换乘空间热力图

Fig. 4 Heat map of interchange space

3) 第三阶段空间引导效果较好,出口站厅空间设计不同,注视重点也略有区别。西南角站出口通道及出口站厅空间热力图(见图5)显示,多数试验人员进入B出口站厅后选择前方距离较远的闸机,而视线左侧且距离较近的闸机受关注程度较低。C出口站厅只有1排闸机,人群视线可以快速集中。在D出口站厅,试验人员目光首先聚焦在正前方的服务亭,然后注意到两侧的出口闸机。同时,多数试验人员依靠疏散楼梯进行路径选择时,室外自然光也具有辅助引导效果。该阶段标志导视系统效果较差,栏杆阻挡、闸机阻挡、缺乏安全指示灯及标志过少等均对疏散起负面影响。

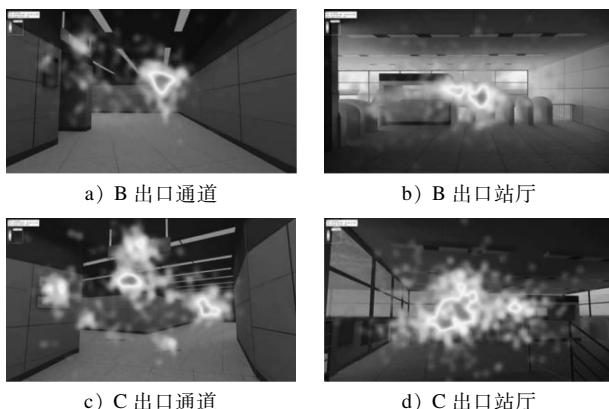


图5 西南角站出口通道及出口站厅空间热力图

Fig. 5 Heat map of Xinanjiiao Station exit passage and exit station hall

表 1 为试验人员首次注视时间平均值 \bar{t}_{FF} 。由表 1 可见:站台空间中悬挂标志、墙壁标志、地面标志和安全灯的 \bar{t}_{FF} 分别为 1.567 s、2.838 s、1.933 s 和 1.810 s,且墙壁标志的 > 地面标志的 > 安全灯的 > 悬挂标志的;换乘空间中悬挂标志、墙壁标志、地面标志和安全灯的 \bar{t}_{FF} 分别为 1.548 s、1.933 s、2.832 s 和 0.902 s,地面标志的 > 墙壁标志的 > 悬挂标志的 > 安全灯的。

表 1 不同类型空间各类标志的 \bar{t}_{FF}

Tab.1 Average time to first fixation (\bar{t}_{FF}) of various markers in different types of space

空间类型	不同标志的 \bar{t}_{FF}			
	悬挂标志	墙面标志	地面标志	指示灯
站台空间	68	6	7	7
换乘空间	63	43	13	2
廊道空间	38	3	0	15

表 2 所示试验人员注视点数量的平均值 \bar{C}_F 。

表 2 不同类型空间各类标志的 \bar{C}_F

Tab.2 Average fixation counts (\bar{C}_F) of various types of markers in different types of space

空间类型	\bar{C}_F			
	悬挂标志	墙面标志	地面标志	指示灯
站台空间	1.567	2.838	1.933	1.810
换乘空间	1.548	1.933	2.832	0.902
廊道空间	1.969	2.143	0	2.000

由表 2 可见:站台空间中悬挂标志、墙面标志、地面标志和安全指标的 \bar{C}_F 分别为 68、6、7 和 7,悬挂标志的 \bar{C}_F 最多;换乘空间中悬挂标志、墙面标志、地面标志和安全指标的 \bar{C}_F 分别为 63、43、13 和 2,试验人员注视点主要集中在悬挂标志和墙壁标志;廊道空间中悬挂标志、墙面标志、地面标志和安全指标的 \bar{C}_F 分别为 38、3、0 和 15。

1) 试验人员的性别、年龄,以及对眼动仪设备的了解程度和对西南角站的熟悉程度等基本信息在此阶段无显著差异。

2) 根据不同空间眼动数据,悬挂标志受关注程度较高。

3) 在疏散标志较少的区域,试验人员在视线尽头出口处的总注视时间最长;当通道选择 ≥ 2 个且同一场景下标志较多时,试验人员的视线将被分散且难以快速逃生。

4) 利用 SPSSAU 软件,各阶段乘客疏散难易程

度与影响因素相关性分析如表 3 所示。由表 3 可见:各类影响因素与乘客疏散难易程度的相关性数值均较大,说明这些因素均起较大的影响作用;第一阶段与第二阶段中建成空间与标志导视对疏散过程影响较大,第三阶段空间引导效果较好,导视系统起到的作用较小;各类影响因素间呈现较高相关性,说明各因素相互作用且共同对疏散过程起影响作用。

表 3 各阶段下乘客疏散难易程度与影响因素的相关性数值

Tab.3 Correlation values of passenger evacuation difficulty level and influencing factors at each stage

阶段	乘客疏散难易程度与影响因素的相关性数值			
	空间引导	灯光引导	各类导视系统引导	其他设备引导
第一阶段	3.76	3.37	3.68	3.39
第二阶段	3.57	3.30	3.51	3.29
第三阶段	4.20	3.42	2.70	3.32

3 结语

本文将火灾场景下的西南角站作为试验场景,借助 VR、眼动追踪等技术手段对疏散过程进行综合分析。试验共计 182 组数据,排除 14 组无效数据,有效数据共 168 组。

1) 男性整体评分优于女性,对逃生疏散知识了解较为全面的人群评分较高,其他基本信息对疏散结果影响较小。

2) 试验人员在匀质型空间中难以辨别自身所处位置,体量较大的结构或物体容易阻挡视线。

3) 换乘空间是疏散的问题节点,空间复杂与引导标志过多是导致试验人员难以在短时间内辨别正确逃生路径的主要原因。

4) 在疏散薄弱环节,空间引导、标志导视、灯光引导对疏散过程影响较大,其他设备等因素对其影响较小。

根据上述结论,初步提出以下车站防火疏散的优化措施:

1) 在安全疏散普及工作中,应对女性、老人、儿童等特殊群体进行重点普及;同时疏散设计应着重考虑弱势群体的行为特点和心理需求。

2) 对体量较大的车站结构或装置,应减轻视线

(下转第 93 页)

土舱压力及刀盘扭矩的标准差分布差异较大。

3) 出土量对地面变形影响最大,灰色关联系数达到0.845;将灰色关联理论获得的结果与施工实测数据进行对比,发现两者对地面变形的影响程度基本一致;注浆压力的灰色关联系数和实测相关性系数的误差最大(其值为9.42%),注浆量两者的误差最小(其值为1.72%),平均误差为5.82%,可见灰色关联理论的预测值是可信的。地面变形较大时,应优先调节影响地面变形较大的施工参数,并考虑各参数的相关性。

参考文献

- [1] 朱合华,徐前卫,傅德明,等. 地层适应性盾构模型试验设计方法初探[J]. 岩土力学, 2006, 27(9): 1437.
ZHU Hehua, XU Qianwei, FU Deming, et al. Study on design principle of shield machine applicable to different strata[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(9): 1437.
- [2] 魏纲,徐日庆. 软土隧道盾构法施工引起的纵向地面变形预测[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(9): 1077.
WEI Gang, XU Riqing. Prediction of longitudinal ground deformation due to tunnel construction with shield in soft soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(9): 1077.
- [3] WONG K S. Centrifuge and numerical investigation of passive failure of tunnel face in sand[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2012, 28: 297.
- [4] 魏新江,周洋,魏纲. 土压平衡盾构掘进参数关系及其对地

层位移影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(1): 73.

WEI Xinjiang, ZHOU Yang, WEI Gang. Research of EPB shield tunneling parameter relations and their influence on stratum displacement[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(1): 73.

- [5] 郑刚,路平,曹剑然. 基于盾构机掘进参数对地表沉降影响敏感度的风险分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(增刊1): 3604.
ZHENG Gang, LU Ping, CAO Jianran. Risk analysis based on the parameters sensitivity analysis for ground settlement induced by shield tunneling[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(S1): 3604.
- [6] 杨欢欢,杨双锁,罗百胜. 地铁盾构施工地表变形的神经网络预测及应用[J]. 中国科技论文, 2019, 14(6): 625.
YANG Huanhuan, YANG Shuangshuo, LUO Baisheng. Prediction and application of neural network on surface deformation from subway shield tunneling construction[J]. China Sciencepaper, 2019, 14(6): 625.
- [7] 顾士坦,台连海,陈长鹏,等. 深部巷道围岩稳定性影响因素显著性分析[J]. 矿业研究与开发, 2020, 40(9): 71.
GU Shitan, TAI Lianhai, CHEN Changpeng, et al. Significance analysis on the factors affecting surrounding rock stability in deep roadway [J]. Mining Research and Development, 2020, 40(9): 71.
- [8] BURGESS N, FAGENTS J, PATERSON J. Northern Line tunnel reconstruction at Old Street[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Transport, 2002, 153(1): 1.

(收稿日期:2020-12-13)

(上接第87页)

遮挡,扭转不利因素,消除繁杂标志误导。如:利用柱子进行标志设计,以弱化匀质空间的负向作用。

3) 在复杂空间设置重点标志,避免其他引导标志干扰。如:在换乘、通道、岔路口应简化标志数量,优化标志排布,突出重点标志,给出明确安全引导。

4) 为进一步完善疏散系统,利用色彩等元素划分空间层次,使乘客明悉所处位置和疏散进度,增强乘客方向感。

西南角站火灾场景建模是VR在复杂建筑中的深度应用。在防火疏散过程和个人信息相关性研究的基础上,进一步探讨空间影响因素。研究结果可为地铁车站优化设计策略、应急规划等提供理论支持,具有实际应用价值。

参考文献

- [1] ZHAO L, KIM Y, YU S, et al. BIM modeling and VR simulation

for optimal design of subway-station evacuation facility[J]. Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation, 2019, 19(7): 339.

- [2] FENG Y. Development and evaluation of a VR research tool to study wayfinding behaviour in a multi-story building[J]. Safety Science, 2022, 147: 105573.
- [3] DING N. The effectiveness of evacuation signs in buildings based on eye tracking experiment[J]. Natural Hazards, 2020, 103(1): 1201.
- [4] 高宇航. 地铁站突发事件应急疏散能力评价方法及应用[D]. 西安: 西安科技大学, 2019.
GAO Yuhang. Evaluation method and application of emergency evacuation capacity of subway station[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2019.
- [5] 刘畅,李俊达,李莹莹. 基于眼球追踪技术的城市轨道交通导向标志评价试验[J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23(12): 113.
LIU Chang, LI Junda, LI Yingying. Evaluation of guiding signs of urban rail transit based on eye-tracking technology[J]. Urban Mass Transit, 2020, 23(12): 113.

(收稿日期:2023-04-04)