

中文引用格式:何伟铭,刘少博,何静,等.考虑行人感知行为的应急疏散标志布局优化方法[J].中国安全科学学报,2025,35(6):223-231.

英文引用格式:HE Weiming, LIU Shaobo, HE Jing, et al. An optimization method of emergency evacuation signage layout considering pedestrian perceptual behavior [J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(6): 223-231.

考虑行人感知行为的应急疏散标志布局优化方法^{*}

何伟铭^{1,2,3}, 刘少博^{**1,2,3} 副教授, 何静⁴, 毕淑婷^{1,2,3}

(1 武汉理工大学 智能交通系统研究中心, 湖北 武汉 430063; 2 武汉理工大学 水路交通控制全国重点实验室, 湖北 武汉 430063; 3 武汉理工大学 三亚科教创新园, 海南 三亚 572000; 4 武汉理工大学 安全科学与应急管理学院, 湖北 武汉 430070)

中图分类号: X951 文献标志码: A DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.06.1098

基金项目: 国家自然科学基金资助(52172308); 武汉市知识创新专项(2023010201010093)。

【摘要】 为解决应急疏散标志引导效率低下的问题, 提出一种考虑行人感知行为的应急疏散标志布局优化方法。首先, 探究标志的可识别范围和感知概率分布, 建立行人对标志的感知行为模型; 其次, 结合多出口空间内的引导需求分布, 构建考虑标志数量、位置和朝向的布局优化模型; 最后, 以某邮轮局部为案例, 采用遗传算法进行求解, 并通过人群疏散微观仿真分别评估标志布局优化前后的疏散效率。结果表明: 行人初始位置随机分布时, 与未优化布局相比优化布局下的平均疏散时间缩短 10.3%; 模拟实际疏散过程的场景下平均疏散时间缩短 4.2%, 且引导至不同目的地的行人数量更均衡。

【关键词】 应急疏散标志; 布局优化; 感知行为; 引导需求; 疏散效率

An optimization method of emergency evacuation signage layout considering pedestrian perceptual behavior

HE Weiming^{1,2,3}, LIU Shaobo^{1,2,3}, HE Jing⁴, BI Shuting^{1,2,3}

(1 Intelligent Transportation Systems Research Center, Wuhan University of Technology, Wuhan Hubei 430063, China; 2 State Key Laboratory of Maritime Technology and Safety, Wuhan University of Technology, Wuhan Hubei 430063, China; 3 Sanya Science and Education Innovation Park, Wuhan University of Technology, Sanya Hainan 572000, China; 4 School of Safety Science and Emergency Management, Wuhan University of Technology, Wuhan Hubei 430070, China)

Abstract: In order to solve the problem of low guidance efficiency of emergency evacuation signs, a layout optimization method of emergency evacuation signs considering pedestrian perceptual behavior was proposed. Firstly, the recognizable range and probability distribution of the signs were investigated to establish a model of pedestrians' perceptual behavior towards the signs; secondly, a layout optimization model was constructed considering the number, location and orientation of the signs by combining it with

* 文章编号: 1003-3033(2025)06-0223-09; 收稿日期: 2025-02-20; 修稿日期: 2025-04-23

** 通信作者: 刘少博(1985—), 男, 河南洛阳人, 博士, 副教授, 主要从事行人交通、应急疏散和交通仿真等方面的研究。E-mail: shaobo@whut.edu.cn。

the distribution of the guidance demand in the multi-exit space; finally, a case study of a cruise ship was used, where a genetic algorithm is applied to solve the problem. The evacuation efficiency, both before and after the optimization of the signage layout, was evaluated through microscopic crowd evacuation simulation, respectively. The results show that the average evacuation time under the optimized layout is 10.3% shorter than that under the unoptimized layout when the pedestrians are randomly distributed at the initial position; the average evacuation time is 4.2% shorter under the scenario simulating the actual evacuation process, and the number of pedestrians guided to different destinations is more balanced.

Keywords: emergency evacuation signage; layout optimization; perceptual behavior; guidance demand; evacuation efficiency

0 引言

应急疏散标志是公共空间内指示紧急出口等目的地方位的关键设施。然而,引导效率低下的标志在紧急情况下影响疏散效率。标志的可见性用于衡量其能否被有效发现,醒目性指标志迅速吸引注意力的能力,易读性用于判断观察者是否能辨认标志内容^[1]。这3种视觉特性很大程度上取决于标志布局,合理的标志布局能为行人提供有效引导。因此,优化标志布局对提高疏散效率具有重要意义。

目前,关于应急疏散标志布局优化的方法主要集中在2方面:基于仿真的方法和数学分析的方法。基于仿真的方法是用人群疏散微观仿真模型模拟标志对行人的作用,通过比较不同标志放置方案的仿真结果来选择最佳布局。例如:NASSAR^[2]使用AnyLogic软件构建基于智能体的模型模拟行人运动行为,计算初始察觉概率来评估标志在不同位置时的可见性。MOTAMED等^[1]使用游戏引擎Unity模拟行人的移动,计算可能读懂标志的行人比例来评估标志系统的效能。然而,该方法的缺点在于难以自动、快速探索所有布局方案而只能在数量有限的候选方案中进行评估,当潜在方案数量增加时评估过程复杂、耗时,因此,不适用于大型复杂空间或需要大量标志的情况。数学分析方法通过构建数学规划模型来优化标志的布局,使标志数量有限的情况下作用范围最大化或作用范围全覆盖的情况下标志数量最小化。例如:岳昊等^[3]假设标志的服务范围为以标志为中心的圆,针对有无障碍物的情况分别提出不同的标志设置方法。张蜚等^[4]采用分段函数表示标志引导概率与距离的关系并在此基础上建立标志布局优化模型。然而,以上研究中标志的作用范围不符合其视觉特性,且部分研究忽略了行人受标志作用的可能性差异。此外,张蜚等^[5]在另一项研究中虽然考虑了范围合理的标志识别域,但默

认行人能绝对感知其视野内任意位置的标志。总的来说,目前数学分析方法的相关研究大多缺乏对行人感知行为的全面考虑。

鉴于此,文中提出一种考虑行人感知行为的应急疏散标志布局优化方法。通过分析距离和观察方向对行人在标志作用范围内察觉标志可能性的影响,建立行人对标志的感知行为模型;改进评估不同位置对标志引导需求的计算方法,获取多出口空间内的引导需求分布;综合考虑行人感知行为和引导需求分布,构建关于标志数量、位置和朝向的布局优化模型;通过人群疏散微观仿真对标志布局优化前后的疏散效率进行评估,以验证所提方法在提高标志引导效率上的可行性。

1 应急疏散标志布局优化模型构建

1.1 行人的感知行为建模

行人对应急疏散标志的认知与响应过程可以分为感知、识别、理解和行动4个阶段^[6]。感知阶段也被称为察觉阶段,表示行人能否注意到标志的存在;识别阶段表示行人能否看清标志的内容;行动阶段被描述为行人根据所获取的信息作出相应的决策。文中假设不存在行人察觉到标志而选择性忽视的情况,此外默认行人紧急情况下都能正确解读标志上文本和方向箭头传递的信息。

1.1.1 应急疏散标志的可识别范围

应急疏散标志的作用范围通常是指其可识别范围(易读区域)而不仅仅是可见区域,前者常常被简化为以标志为中心的圆形^[3-4]。然而,当行人位于标志下方或侧面的盲区时往往不能清楚辨认标志。受XIE Hui等^[7]研究的启发,文中假设标志的易读区域为与标志表面相切的圆。应急疏散标志的内容通常由文本和方向箭头、引导目的地等图形组成。除紧急出口外的其他目的地图形可能会使初次接触的行人产生困惑。因此,行人必须看清标志文本才

能确保其成功识别标志。标志的最大可识别距离即标志易读区域的直径,文中参考以往研究将其视为标志文本高度的线性函数^[7-8]。设标志的文本高度为 $h(\text{cm})$,此时标志易读区域的直径可表示为 ζh ,其中, ζ 为易读因子,如图 1 所示,图中, $\theta(\text{rad})$ 为标志朝向的角度。应急疏散标志通常有附着式(或嵌入式^[9])和悬挂式等安装方式,附着式标志最常被

$$\begin{cases} [x - (x_s + r\cos\theta)]^2 + [y - (y_s + r\sin\theta)]^2 \leq r^2 \\ [x - (x_s - r\cos\theta)]^2 + [y - (y_s - r\sin\theta)]^2 \leq r^2 \end{cases} \text{(满足任意一个条件)}$$

(1)

式中: (x, y) 为任一点的坐标; (x_s, y_s) 为标志所在位置的坐标; r 为标志易读区域的半径, m 。假设标志默认朝向 x 轴正方向,则 θ 的取值范围为 $[0, \pi)$ 。双圆形易读区域是标志可识别范围的理想情况,由于障碍物的遮挡,标志的实际可识别范围通常需要在易读区域的基础上将被遮挡的区域剔除。

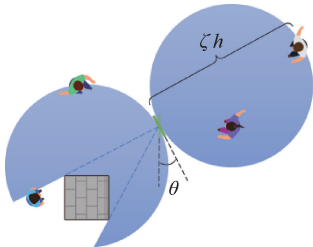


图 1 标志的可识别范围
Fig. 1 Recognizable range of sign

1. 1. 2 应急疏散标志的感知概率分布

行人在距离与观察方向不同时察觉和辨认应急疏散标志的可能性不同,感知概率在衡量标志布局合理性方面相比识别概率更重要,因为行人察觉标志后自然会走到能看清标志内容的方位。WANG Weili^[10]和 NASSAR^[2]等分别用线性函数和指数函数来表示感知概率与距离的关系,并都通过划分水平视野来体现观察角度对感知概率的影响,但这些研究都没有考虑标志与行人的高度差导致的垂直方向观察角度的变化。此外,行人运动中除了变换水平视野外还会改变垂直视野而非一直平视前方。

假设目标空间内都采用同一样式的标志且所有标志的照明功能正常,此时行人察觉标志的可能性与标志在人眼中的成像有关。GULLSTRAND 的简化示意眼模型^[11]中的物像关系可表示为:

$$A_l = \frac{D_{N,l}^2 A_o}{D_{o,N}}$$

(2)

式中: A_o 和 A_l 分别为标志和其在视网膜中央凹处成像的大小, m^2 ; $D_{N,l}$ 和 $D_{o,N}$ 分别为结点(屈光系统的光学中心)到视网膜和标志到人眼的距离, m 。

安装在墙脚附近,悬挂式标志可被以任意朝向安装在天花板内任意区域。后者更有助于避免疏散过程中人群的遮挡,同时其作用范围更大,因为其存在前后 2 个易读区域(图 1),文中标志将主要采用悬挂式的安装方式。可以通过以下公式判断任一坐标点是否在该标志的任意易读区域内:

行人到应急疏散标志的距离一定时,标志的成像大小会随着观察标志的角度改变,如图 2 所示,图 2 中, L 和 $W(\text{cm})$ 分别为标志长和标志宽,标志的表面中心法线与行人视线重合时其可见尺寸等于其实际尺寸。此时若分别改变水平和垂直方向上的观察角度,可看作标志本身分别沿纵轴和横轴发生了角度为 ϕ 和 $\psi(\text{rad})$ 的转动。标志的可见长度与实际长度之比为 $|\cos\phi|$,标志的可见宽度与实际宽度之比 $\cos\psi$ 可看作行人到标志的水平距离与欧几里得距离之比。行人对任一标志 k 的感知概率 P^k 可以表示为标志成像大小与其阈值 $\Theta(\text{m}^2)$ 之比:

$$P^k = \frac{D_{N,l}^2 L W d |\cos\phi|}{(d^2 + \Delta H^2)^{\frac{3}{2}} \Theta}$$

(3)

式中: d 为行人到标志的水平距离, m ; ΔH 为标志高度 H_s 与人眼高度 H_e 之差, m 。

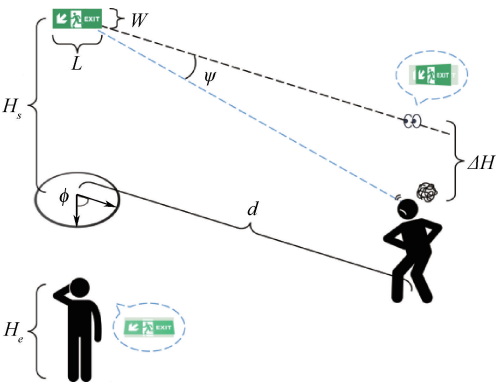


图 2 行人与标志的位置关系
Fig. 2 Location of pedestrian in relation to sign

应急疏散标志可识别范围内的感知概率分布如图 3 所示,可以看出,行人在中轴线上靠近标志的某处位置最容易察觉标志,越接近标志的易读区域边缘越不易察觉标志。超出可识别范围时标志的感知概率往往过小以至于可以忽略不计,文中不考虑行人在可识别范围外注意到标志的可能性。

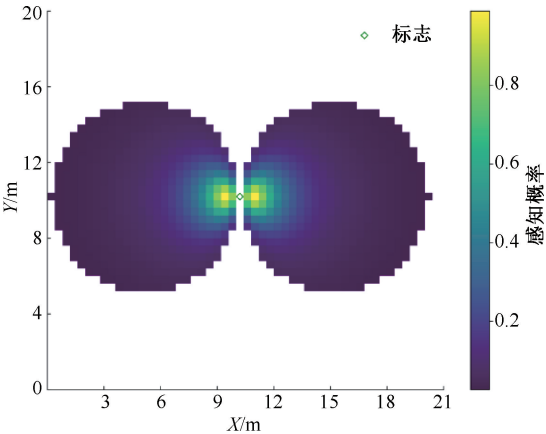


图3 标志的感知概率分布

Fig. 3 Probability distribution of perception for sign

1.2 应急疏散标志的布局优化建模

对目标空间建模时,部分研究将其视为由节点和边组成的网络,部分研究则聚焦于其几何结构。前者大大降低了空间模型的复杂程度^[12],然而不适用于没有明确路线的大尺寸空间。同时,过度的简化会导致空间内其他信息(如障碍物形状)的缺

失。因此,文中将分别提取空间的可放置区域和可步行区域并在此基础上进行应急疏散标志的布局优化。

1.2.1 多出口空间的引导需求分布

将平面离散化为若干个矩形单元,假设应急疏散标志或行人的实际位置为其所在单元的中心点,则此时每个单元既可以表示标志在可放置区域内的潜在位置,也可以作为行人在可步行区域内的移动目标。可步行区域内不同位置的行人对标志引导的需求程度不同,ZHANG Zhe 等^[13]提出一种用来衡量该差异的指标,其可以看作行人依据标志指示方向走一步与以任意方向走一步相比离出口更近了多少距离。当目标空间存在多个出口时,距原位置与下一位置最近的出口可能不同,因此需要对该方法进行改进以使其不只适用于单出口的情况。

当行人四周没有障碍物存在时,其下一步移动目标可以为邻近的8个单元。假设行人不熟悉其所处的空间,无标志情况下其将以相同的概率随机选择一个方向移动,有标志情况下其将被引导至距目标出口最近的邻近单元。若距行人当前所在单元和

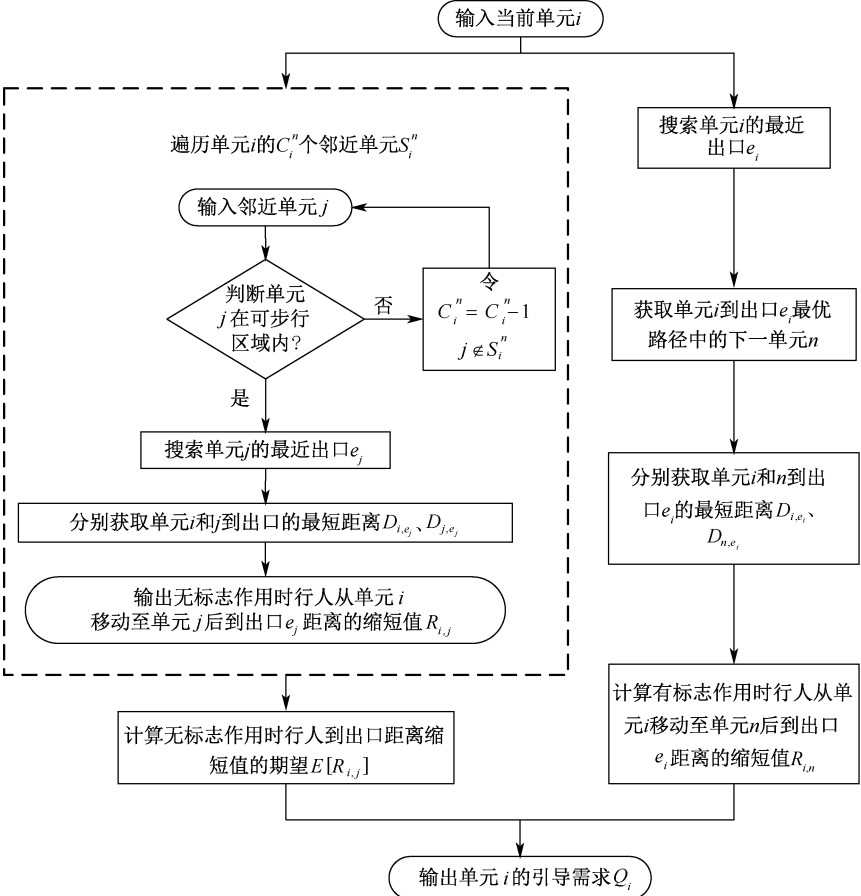


图4 引导需求评估的算法流程

Fig. 4 Algorithmic process for guiding demand assessment

邻近单元最近的出口不同,行人的目标出口在无标志引导时为距其下一单元最近的出口,而在有标志引导时为距其所在单元最近的出口。改进后适用于多出口空间内不同位置引导需求评估的算法流程如图 4 所示。其中,出口 e_i 与 e_j 以及距离 $D_{i,ej}$ 、 $D_{j,ej}$ 、 $D_{i,ei}$ 与 $D_{n,ei}$ 需要结合图搜索算法搜寻得到,单元 i 的引导需求 Q_i 为:

$$Q_i = R_{i,n} - E[R_{i,j}] \tag{4}$$

式中: $R_{i,n}$ 为距离 $D_{i,ei}$ 与 $D_{n,ei}$ 之差,m; $E[R_{i,j}]$ 为平均缩短值,其计算方式如下:

$$E[R_{i,j}] = \frac{\sum_{j \in S_i^n} R_{i,j}}{C_i^n} \tag{5}$$

式中 $R_{i,j}$ 为距离 $D_{i,ej}$ 与 $D_{j,ej}$ 之差,m。

1.2.2 应急疏散标志的布局优化模型

行人在空间内可能同时注意到多个应急疏散标志,标志系统是空间内所有标志按照一定的布局组成的整体,单元 i 处行人对标志系统的感知概率 P_i 即其注意到标志系统内任意标志的可能性:

$$P_i = 1 - \prod_{k \in \mathcal{J}} (1 - P^k) \tag{6}$$

式中: $\mathcal{J}$ 为空间内所有标志的集合。假设在同一单元处不允许同时放置多个应急疏散标志,则空间内应急疏散标志的容量即为可放置区域的单元总数。

布局优化的主要目的是使行人在目标空间内引导需求越大的单元察觉任意标志的可能性越大。在任一标志布局下通过式(6)可获取行人在空间内任一单元对标志系统的感知概率,结合 1.2.1 节中对空间内不同单元引导需求的评估,可以判断当任一单元的引导需求较大时是否也有较大的感知概率与其相匹配。可步行区域内所有单元的引导需求与对应感知概率的总匹配度 M 可以表示为:

$$M = \sum_{i \in \omega} Q_i P_i \tag{7}$$

式中 ω 为可步行区域内所有单元的集合。

理论上空间内标志越多可步行区域的总匹配度就会越大,然而过于密集的标志会给行人造成视觉干扰并使其产生信息混乱,因此,标志实际数量应不大于空间内标志的容许个数 N_a 。为了判断标志布局是否在提高总匹配度的同时尽可能减少空间内标志的个数 N ,提出可步行区域内所有单元的引导需求与对应感知概率的平均匹配度 $\bar{M}$:

$$\bar{M} = \frac{M}{N} \tag{8}$$

为了确保标志系统的作用范围尽可能最大,构

造可步行区域内单元总数与标志系统作用范围内单元数之差的等式约束,从而实现对标志系统作用范围外单元数的最小化。标志的布局优化模型如下:

$$\begin{aligned} \max \bar{M} &= \frac{\sum_{i \in \omega} Q_i P_i}{N} \\ \text{s. t. } &\begin{cases} c_k \in \mathcal{P} & \forall k \in \mathcal{J} \\ c_k \neq c_l & \forall k, l \in \mathcal{J} \\ \theta_k \in [0, \pi) & \forall k \in \mathcal{J} \\ N \leq N_a \\ N_w - C = 0 \end{cases} \end{aligned} \tag{9}$$

式中: c_k 和 c_l 为任一标志所在单元; $\mathcal{P}$ 为可放置区域内所有单元的集合; N_w 为可步行区域内单元的个数; C 为标志系统作用范围内的单元数,可以通过式(1)及障碍物遮挡情况来确定。

2 应急疏散标志布局优化案例

文中选取某邮轮主甲板中庭作为案例分析对象,如图 5 所示。紧急情况下剧场和餐厅将承担集合站的角色,此时乘客将从旋转楼梯和两侧入口进入中庭并通过 3 个出口被疏散到集合站。

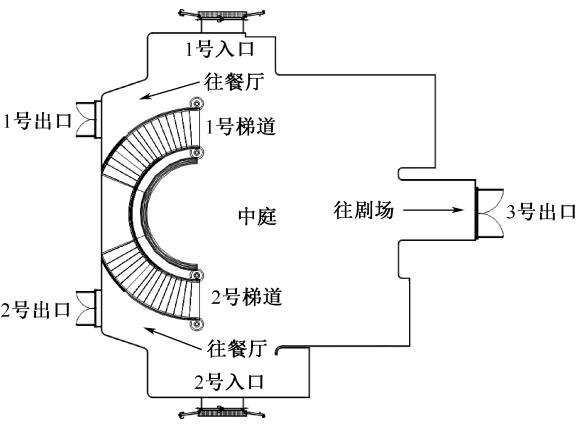


图 5 邮轮案例局部

Fig. 5 Cruise ship case atrium schematic

2.1 应急疏散标志布局优化模型参数设置

以 $0.4\text{ m} \times 0.4\text{ m}$ 的单元尺寸离散化后目标空间如图 6 所示。其中,可步行区域如图 6a 所示,可放置区域不能简单地等同于可步行区域,因为中庭贯通多层所以空间内部分区域无天花板,如图 6b 所示。

式(3)中 $D_{N,l}$ 可以忽略不计因为其取值不影响感知概率的结果,由于行人只有在正面观察标志时才可能获取最大的标志成像,令 ϕ 为 0 可得到此时 A_l 与 d 的关系进而求得 θ 。本案例研究中模型其

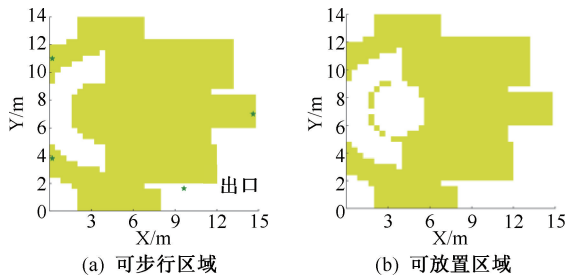


图 6 离散化目标空间
Fig. 6 Discretized target space

他参数的取值见表 1,其中易读因子参考了以往研究中的取值^[7],应急疏散标志容许个数为根据空间大小的经验估计。此外,为满足绝大多数行人的引导需求,人眼水平高度接近轮椅使用者的平均高度^[1,8]。

表 1 模型参数

Table 1 Model parameters

参数	ζ	h/cm	H_s/m	H_e/m	L/cm	W/cm	N_a
取值	250	4	2.2	1.2	36	16	5

2.2 应急疏散标志布局优化模型求解

式(9)表示的应急疏散标志布局优化模型可通过遗传算法求解,此时目标空间内任一标志布局即为模型的一个可行解 $\chi = [\delta_1, \iota_1, \theta_1, \dots, \delta_{N_a}, \iota_{N_a}, \theta_{N_a}]$ 。布局中每个标志在可行解中都有 δ 、 ι 和 θ 这3类变量与其对应,可行解中变量的总数为 $3N_a$,其中, δ 表示取值为0或1的决策变量,其被用来判断标志是否在布局中被采用; ι 为标志所在单元的索引。为提高模型求解的效率,可将 θ 限制在 $\{0, \pi/2\}$ 之中。

求解过程中需获取任一布局下标志系统的作用范围,此时可把标志看作一个光源则易读区域内其光线所及之处即为实际可识别范围。经过若干次模型求解后得到的平均匹配度最大的标志优化布局如图 7 所示。可以看出,尽管空间内容许放置 5 个标志,优化布局中实际上只有 4 个标志被采用。此外,出口附近的单元由于引导需求较小以至于不受标志作用。因此,该方法在满足行人引导需求的同时避免了过多标志对其产生干扰,且并不会盲目要求标志系统作用范围对可步行区域全覆盖,而是在确保其尽可能最大的前提下,使行人在引导需求越大的位置察觉任意标志的可能性越大。

3 应急疏散标志布局优化方法验证

为验证文中所提方法的可行性,常采用基于微

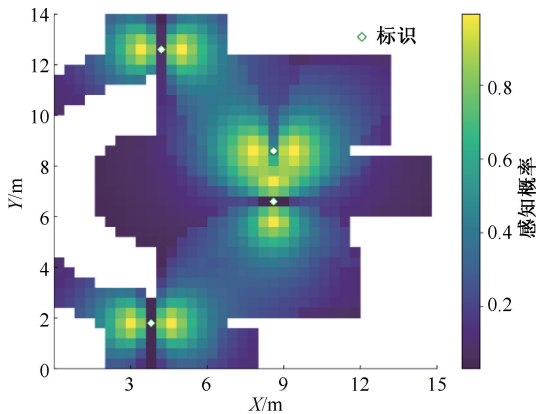


图 7 标志的优化布局
Fig. 7 Optimized layout of signs

观仿真模型的人群疏散仿真评估优化布局下的疏散效率。文中选用 AnyLogic 软件进行人群疏散仿真建模,即在社会力模型的基础上依据行人对应应急疏散标志的感知行为,构建考虑标志系统作用的人群疏散仿真模型。

3.1 人群疏散仿真建模

模型中的行人智能体在初始状态下不被指定具体的目的地,而是默认在区域内四处探索。进入任意标志的可识别范围时,其对标志系统的感知概率将作为判断其是否察觉和辨认标志的判定依据。智能体对标志系统内每个标志的感知概率与其对所有标志的感知概率和之比将被视为该标志在轮盘赌中的选择概率,智能体将以此为依据来选择遵循哪个标志。若智能体不受标志系统的作用,则其将继续在区域内探索直到成功察觉到任意标志。按以上智能体行为机制构建本案例的仿真模型,初始布局下目标空间内仅存在 3 个被安装在出口上方的附着式标志,根据相关规范对空间内其他标志进行放置后的未优化布局如图 8 所示。为了验证仿真模型中标志系统作用的有效性,以上 2 种标志布局下的对比试验将被执行多次,30 个智能体将以任意初始方向和速度在区域内随机生成。标志放置前后的疏散情况如图 9 所示。可以看出,同一时刻空间内行人数量有明显差异。空间内行人数量随时间的变化如图 10 所示。疏散开始时 2 种标志布局下单位时间撤离的行人数量相近,此时出口附近的行人都能够迅速被疏散。10 s 后单位时间疏散人数上的差异变得明显,标志放置后人群在 30 s 时基本疏散完毕而在初始布局下人群直到 50 s 左右才完全撤离。

3.2 人群疏散效率评估

优化布局即在初始布局的基础上放置如图 7 所

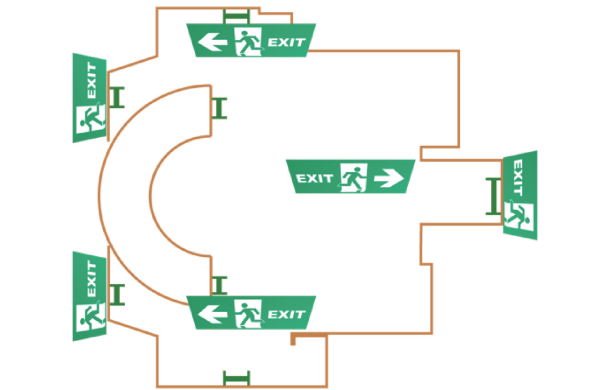


图 8 标志的未优化布局
Fig. 8 Unoptimized layout of signs

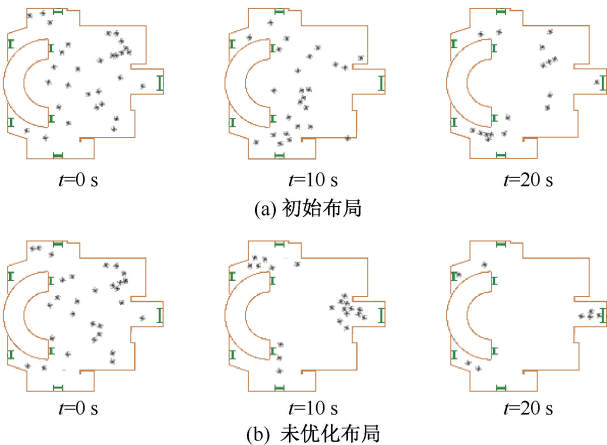


图 9 不同标志布局下的疏散情况
Fig. 9 Evacuation under different sign layouts

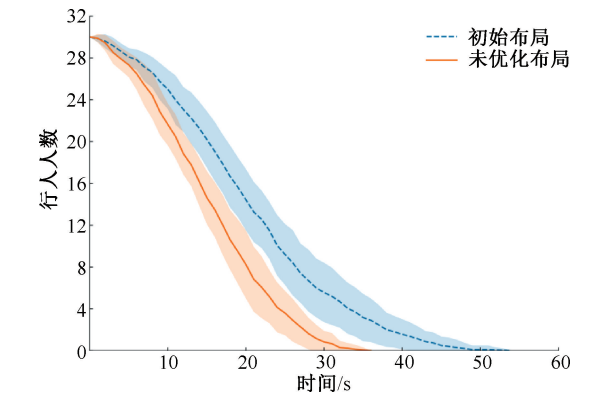


图 10 空间内行人数量与时间的关系
Fig. 10 Number of pedestrians in space vs. time

示的应急疏散标志,评估该布局下的疏散效率时上述未优化布局将被用来与之形成对比。为了降低行人初始位置分布差异对结果的影响,每种场景将执行多次试验,2 种标志布局下仿真试验的疏散时间分布和均值如图 11 所示。布局优化前后的平均疏散时间分别为 30.1 和 27.0 s,与未优化布局相比优

化布局下的平均疏散时间缩短了 10.3%。布局优化前引导需求大的行人可能无法在第一时间察觉标志,而布局优化后的标志系统能更快被大部分行人察觉,因此,行人能在更短时间内开始向出口疏散。此外优化布局下疏散时间的波动较小,标志布局优化前后疏散时间的标准差分别为 3.1 和 2.6 s。

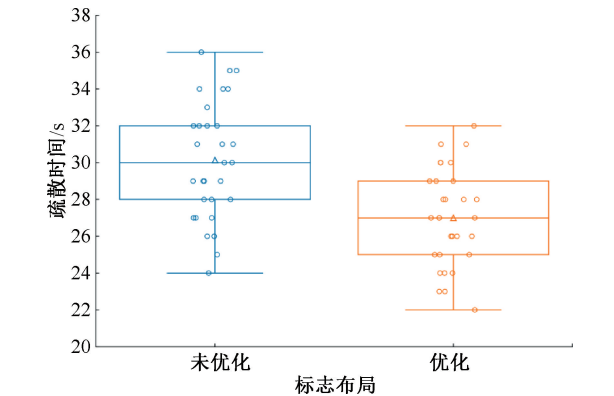


图 11 不同标志布局下的疏散时间(场景 1)
Fig. 11 Evacuation times by sign layout (Scenario 1)

以上仿真试验中,智能体的初始位置总是随机分布在区域内,而本案例中乘客可能处在邮轮各甲板。疏散开始后乘客将陆续从其他甲板或船舱前往剧场和餐厅集合,且绝大部分会由旋转楼梯和两侧入口途经中庭进入集合站。设计一种新场景以更准确地模拟实际疏散过程,仿真开始时将有 10 个智能体依然在区域内随机生成,此后将另有 220 个智能体通过蓄水池抽样以一定的到达速率从 4 个入口生成。新场景下的仿真试验同样会被执行多次以降低抽样误差对结果的影响,此时 2 种标志布局下试验结果的统计信息如图 12 所示。新场景下标志布局优化前后的平均疏散时间分别为 256.5 和 245.6 s,与前者相比后者缩短了 4.2%。布局优化前人群最

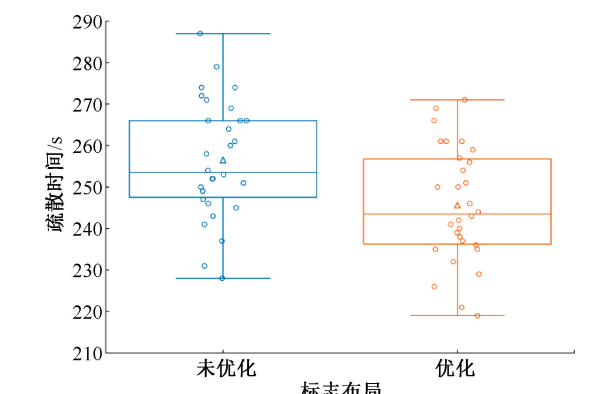


图 12 不同标志布局下的疏散时间(场景 2)
Fig. 12 Evacuation times by sign layout (Scenario 2)

快也要 228 s 完成疏散,而布局优化后其只要 219 s 便可全部撤离,未优化布局下最长的疏散时间高达 287 s,而优化布局下其被减少到 271 s。

为了找出布局优化前后疏散时间差较大的原因,进一步对被疏散到不同目的地的行人数量进行分析,从各出口撤出的行人比例如图 13 所示。考虑到船舱的空间大小,经由中庭被疏散到剧场和餐厅的行人数量应大致相同,即从 1 号和 2 号出口撤出的行人数量应近似于从 3 号出口撤出的行人数量。由图 13 可知:优化布局下的行人比例符合以上描述,此时从 1 号、2 号和 3 号出口撤出的行人数量分别占

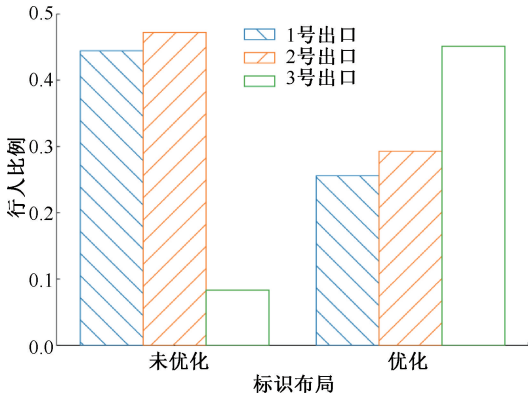


图 13 从各出口撤出的行人比例

Fig. 13 Proportion of pedestrians evacuating from each exit

行人总数的 25.6%、29.3% 和 45.1%,与之相比未优化布局下从 1 号、2 号和 3 号出口撤出的行人比例分别为 44.5%、47.2% 和 8.3%。造成该现象的主要原因是布局优化前进入中庭的乘客都会首先被餐厅一侧的标志吸引,因此不仅导致剧场没有被充分利用还在 1 号和 2 号出口附近造成拥堵。相较而言,优化布局下引导目的地无论为餐厅还是剧场的标志都能较易被从旋转楼梯进入中庭的乘客察觉。

4 结 论

1) 综合考虑行人对应急疏散标志的感知行为和多出口空间内的引导需求分布,构建的标志布局优化模型可得到最优的标志数量、位置和朝向。

2) 应急疏散标志布局优化方法仿真验证结果表明:行人初始位置随机分布时,与未优化布局相比,优化布局能使行人在更短时间内开始向出口疏散,其平均疏散时间缩短了 10.3% 且疏散时间的波动更小。模拟实际疏散过程的场景下,与未优化布局相比,优化布局下平均疏散时间缩短 4.2%,且引导至不同目的地的行人数量更均衡。

3) 文中选取邮轮局部空间作为案例分析对象,未来可将所提方法推广至地铁站等大尺寸空间,此外可考虑设计虚拟现实试验进一步验证该方法。

参 考 文 献

[1] MOTAMEDI A, WANG Zhe, YABUKI N, et al. Signage visibility analysis and optimization system using BIM-enabled virtual reality (VR) environments[J]. Advanced Engineering Informatics, 2017, 32: 248-262.

[2] NASSAR K. Sign visibility for pedestrians assessed with agent-based simulation[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2011, 2264(1): 18-26.

[3] 岳昊, 邵春福, 关宏志, 等. 大型行人步行设施紧急疏散标志设置[J]. 北京工业大学学报, 2013, 39(6): 914-919.

YUE Hao, SHAO Chunfu, GUAN Hongzhi, et al. Location method of emergency evacuation signs in large pedestrian facilities[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2013, 39(6): 914-919.

[4] 张蜚, 贾利民, 秦勇. 基于协同引导的地铁站台导向标识系统布局优化[J]. 交通运输系统工程与信息, 2016, 16(4): 146-152.

ZHANG Zhe, JIA Limin, QIN Yong. Optimization of signage system configuration on metro platform based on cooperative guidance[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2016, 16(4): 146-152.

[5] 张蜚, 木合塔拜尔·拜合提亚尔, 闫姝蓉, 等. 基于三域融合的公共空间疏散引导标志布局优化[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(7): 181-189.

ZHANG Zhe, BAIHETIYAER M, YAN Shurong, et al. Optimization of public space evacuation guidance signage layout

based on three-region integration [J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(7): 181-189.

[6] FILIPPIDIS L. Representing the influence of signage on evacuation behavior within an evacuation model[J]. Journal of Fire Protection Engineering, 2006, 16(1): 37-73.

[7] XIE Hui, FILIPPIDIS L, GWYNNE S, et al. Signage legibility distances as a function of observation angle[J]. Journal of Fire Protection Engineering, 2007, 17(1): 41-64.

[8] LI Yongkui, ZHANG Yan, PAN Xiyu, et al. BIM-based determination of indoor navigation sign layout using hybrid simulation and optimization[J]. Automation in Construction, 2022, 139: DOI: 10.1016/j.autcon.2022.104243.

[9] 范芮雯, 代张音, 周慧, 等. 嵌入式安全疏散标志空间结构研究与设计[J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(10): 193-200.

FAN Ruiwen, DAI Zhangyin, ZHOU Hui, et al. Research and design of space structure of embedded safety evacuation signs[J]. China Safety Science Journal, 2022, 32(10): 193-200.

[10] WANG Weili, LO Siuming, LIU Shaobo, et al. Microscopic modeling of pedestrian movement behavior: interacting with visual attractors in the environment[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2014, 44: 21-33.

[11] EHINGER B, GRZYBOWSKI A. Allvar Gullstrand (1862 - 1930) - the gentleman with the lamp [J]. Acta Ophthalmologica, 2011, 89(8): 701-708.

[12] ZHANG Zhe, JIA Limin, QIN Yong. Location-allocation model for the design of guidance signage systems for pedestrian wayfinding in public spaces[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2021, 22(12): 7 531-7 546.

[13] ZHANG Zhe, JIA Limin, QIN Yong. Optimal number and location planning of evacuation signage in public space[J]. Safety Science, 2017, 91: 132-147.

作者简介： 何伟铭 （1996—）,男,湖北监利人,硕士研究生,研究方向为应急疏散。
E-mail: heweiming@whut.edu.cn。

