

基于 Steering 模型的应急人员疏散策略研究 ——以某大坝通航隧道人员疏散设施为例

杜江¹, 张顺圆^{2,3}, 刘春舵¹, 刘荣欣¹, 江泽浩^{2,3}, 屈文鹏^{2,3*}

¹中海建筑有限公司 贵州贵阳

²华中科技大学土木与水利工程学院 湖北武汉

³国家数字建造技术创新中心 湖北武汉

【摘要】随着我国大型通航工程的推进,隧道内应急疏散问题因高风险而备受关注。目的 本文基于 Steering 模型构建应急疏散模型,以提出隧道内人员疏散策略。方法 以某通航隧道为例,结合三维建模与仿真,分析模型的合理性,识别关键疏散设施的瓶颈效应,并研究不同疏散配置下的人员疏散规律。结果 实验表明,总计 1321 秒(约 22 分钟)完成隧道单侧 250 人的疏散。在固定 10 个疏散入口,人数从 100 增至 1000 的实验中,最大疏散时间呈非线性增长;当疏散人数超过 700 时,浮箱入口和爬梯处的拥堵成为延长疏散时间的主要因素。此外,当固定疏散人数为 500 时,增加疏散入口数量显著改善疏散效率;入口数量从 1 增加至 10 时,疏散时间大幅缩短,但超过 12 个入口后其边际效应趋于平缓。结论 研究表明,最大疏散时间与疏散人数及入口数量密切相关。合理配置疏散设施入口可有效提升疏散效率,避免资源浪费。本研究为通航隧道内应急疏散策略设计提供理论支持,并提出优化疏散设施布局的建议。

【关键词】通航隧道; 应急疏散; Steering 模型; 路径优化

【基金项目】湖北省自然科学基金(2024AFD410); 中海建筑有限公司科技项目(ZHJ-GZ-KJ-009); 华中科技大学与新南威尔士大学联合科研种子基金项目

【收稿日期】2024年8月28日

【出刊日期】2024年9月27日

【DOI】10.12208/j.jer.20240032

Research on emergency personnel evacuation strategy based on steering model - taking the personnel evacuation facilities of a dam navigation tunnel as an example

Jiang Du¹, Shunyu Zhang^{2,3}, Chunduo Liu¹, Rongxin Liu¹, Zehao Jiang^{2,3}, Wenpeng Qu^{2,3*}

¹China Ocean Construction Co., Ltd., Guiyang, Guizhou

²School of Civil and Water Conservancy Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei

³National Digital Construction Technology Innovation Center, Wuhan, Hubei

【Abstract】 With the advancement of large-scale navigation projects in my country, the problem of emergency evacuation in tunnels has attracted much attention due to its high risk. **Objective** This paper constructs an emergency evacuation model based on the steering model to propose an evacuation strategy for personnel in the tunnel. **Methods** Taking a navigation tunnel as an example, combined with three-dimensional modeling and simulation, the rationality of the model is analyzed, the bottleneck effect of key evacuation facilities is identified, and the evacuation rules of personnel under different evacuation configurations are studied. **Results** The experiment shows that it takes a total of 1321 seconds (about 22 minutes) to complete the evacuation of 250 people on one side of the tunnel. In the experiment with 10 fixed evacuation entrances and the number of people increasing from 100 to 1000, the maximum evacuation time increased nonlinearly; when the number of evacuees exceeded 700, congestion at the pontoon

*通讯作者: 屈文鹏(1995-)男, 汉, 湖北省武汉市华中科技大学。

entrance and the ladder became the main factor prolonging the evacuation time. In addition, when the fixed evacuation number was 500, increasing the number of evacuation entrances significantly improved the evacuation efficiency; when the number of entrances increased from 1 to 10, the evacuation time was greatly shortened, but its marginal effect tended to be flat after more than 12 entrances. **Conclusion** The study shows that the maximum evacuation time is closely related to the number of evacuees and the number of entrances. Reasonable configuration of evacuation facility entrances can effectively improve evacuation efficiency and avoid waste of resources. This study provides theoretical support for the design of emergency evacuation strategies in navigation tunnels, and puts forward suggestions for optimizing the layout of evacuation facilities.

【Keywords】 Navigation tunnel; Emergency evacuation; Steering model; Path optimization

引言

随着我国运河工程的推进,包括平陆运河、湘桂运河和浙赣粤运河等多项航运工程的建设,隧道内应急疏散问题因高风险而备受关注,成为影响交通安全的重要议题。尤其是随着现有大坝设施(如三峡大坝、葛洲坝)规划通航隧道以提升通行能力,如何在紧急状况下有效疏散隧道内人员成为关键工程问题。

当前,交通运输部及相关部门正在积极推进水运工程的规范化,但现行的《港口与航道工程建设管理标准》^[1]及《港口工程建设标准编制管理办法》^[2]等规范缺乏专门针对通航隧道火灾防护和疏散设施的详细条款和技术标准。然而,通航隧道因其封闭、狭长的结构特点,使人员疏散设施设计相较普通隧道更为复杂,且在火灾、高温、浓烟等突发情况下,安全风险显著增加。基于此背景,本文聚焦于通航隧道的应急疏散策略研究,不仅旨在为规范细化提供实证支持,还将为复杂水运工程的安全管理提供可靠的设计依据。

本文的结构安排如下:第二部分回顾现有疏散模型及其在复杂环境中的应用,为本研究提供理论支持;第三部分介绍基于 Steering 模型的通航隧道应急疏散建模方法;第四部分通过三维仿真,分析疏散设施的瓶颈效应及不同配置下的疏散规律;最后,第五部分总结研究结论,并提出优化疏散设施布局的建议。

1 文献综述

近年来,行人疏散模拟在不同场景中取得了重要进展。社会力模型(Social Force Model)作为人群行为的经典模型,通过模拟个体之间的吸引力与排斥力,成功再现了人群在紧急情况下的交互行为^[3]。传统的社会力模型在行人间的相互作用、群体行为

和力学分析方面提供了有力支持^{[4][5]}。例如,有研究基于社会力模型考虑了同伴间的相互作用,增强了模型在复杂情境下的表现^[4],并利用风险场理论研究了行人与攻击者间的交互规则^[6]。文献^[7]则进一步引入同伴互动影响及多出口效用函数,以模拟地铁站疏散行为。此外,文献^[5]通过“检测-决策-行动”机制提升了社会力模型的灵活性,进一步推动了其在避障行为模拟中的应用。

尽管社会力模型在多个场景中的应用表现良好,但在隧道等复杂结构环境中,尤其是多岔道场景下,路径选择的灵活性和动态转向行为存在局限。现有研究多集中于地铁站、商场等较为开放的环境,而针对通航隧道等封闭空间的疏散研究较少,这使得对隧道疏散模拟的研究变得尤为重要。

为应对复杂环境下的疏散需求,Steering 模型因其在动态避让、路径跟随和寻路调整等方面的多样化行为模拟能力,成为适合隧道应急疏散的模型选择之一。文献^[8]通过 Steering 模型分析了地下复杂建筑中的疏散瓶颈效应,发现增加出口宽度和设置辅助通道能够提升疏散效率。在高密度环境下,Steering 模型表现出的动态路径优化能力也得到了多方验证。例如,文献^[9]在模拟城市疏散时,通过调整疏散通道和庇护空间的布局显著提升了疏散效率。文献^[10]则通过多种疏散模式的对比,证明 Steering 模型在出口优化中的效果优于其他模型。文献^{[11][12]}进一步指出,在高密度人群和强成员凝聚力场景中,Steering 模型在群体引导和疏散路径优化方面表现出显著的优势。

综上所述,现有的社会力模型在应对动态路径选择和复杂转向行为上有所不足,而 Steering 模型的行为模拟能力和灵活性更适合模拟多岔道通航隧道的应急疏散。本文基于 Steering 模型,对通航隧

道的应急疏散进行建模和仿真，以验证其在复杂动态环境中的适应性和可靠性，从而为相关规范的完善和通航隧道安全管理提供理论支持。

2 指导模型

2.1 Steering 模型数学框架

steering 模型基于个体行为规则的组合，通过多个行为的矢量叠加，动态计算个体的运动方向。每个行为（如寻路、避障等）都可以通过向量表示，并根据特定的权重加权组合。

2.1.1 目标速度计算

个体的速度 $V(t)$ 是通过多个行为向量的叠加来动态更新的，表现为：

$$V(t) = \sum_i \omega_i \cdot V_i(t) \quad (1)$$

其中： $V_i(t)$ 是不同行为（如避障、跟随、对齐等）产生的速度向量； ω_i 是 i 行为的权重因子，根据不同情景设定； t 是时间。

2.1.2 行为规则向量

寻路行为：个体朝向目标位置移动的速度向量：

$$V_{\text{seek}}(t) = \frac{P_{\text{target}} - P(t)}{\|P_{\text{target}} - P(t)\|} \cdot v_{\text{max}} \quad (2)$$

其中： P_{target} 是目标位置； $P(t)$ 是当前个体的位置； v_{max} 是个体的最大速度。

避障行为：避免与其他个体或障碍物碰撞的行为：

$$V_{\text{avoid}}(t) = \frac{P_{\text{obstacle}} - P(t)}{\|P_{\text{obstacle}} - P(t)\|} \cdot f_{\text{avoid}}(d) \quad (3)$$

其中： P_{obstacle} 是障碍物的位置； $f_{\text{avoid}}(d)$ 是根据距离 $d = \|P_{\text{obstacle}} - P(t)\|$ 调整的函数，通常在障碍物接近时增大。

对齐行为：在群体运动中，个体与附近个体保持一致方向：

$$V_{\text{align}}(t) = \frac{1}{N} \sum_j^N V_j(t) \quad (4)$$

其中： $V_j(t)$ 是周围个体的速度向量； N 是临近个体的数量。

2.1.3 加权组合

每种行为向量 $V_i(t)$ 都根据其重要性被赋予不同的权重 ω_i ，并进行加权组合，形成个体最终的运动方向。这些权重可能根据情境动态变化，例如当个体接近障碍物时，避障行为的权重 ω_{avoid} 增大，而寻路行为的权重 ω_{seek} 可能减小。

2.1.4 位置更新

根据最终的速度向量 $V(t)$ ，个体的位置在每个时间步 t 被更新为：

$$P(t + \Delta t) = P(t) + V(t) \cdot \Delta t \quad (5)$$

其中： Δt 是时间步长。

2.2 行为规则建模

在特定的人员疏散任务中，为优化疏散效率，Steering 模型的行为规则根据场景需求进行灵活调整。以下行为规则和算法描述适用于各类人员疏散环境。

2.2.1 寻路行为

寻路行为是指个体根据疏散目标位置（如出口或安全区域）动态调整其移动方向。在疏散任务中，个体将朝向最优的路径或最近的目标区域移动。当路径存在拥堵或需切换路线时，个体根据实时路径成本进行决策。此过程可表达为一个目标吸引力和路径成本的函数：

$$V_{\text{seek}}(t) = k_1 \cdot \frac{P_{\text{goal}} - P(t)}{\|P_{\text{goal}} - P(t)\|} + k_5 \cdot V_{\text{crowd}}(t) \quad (6)$$

其中： P_{goal} 为目标位置； $P(t)$ 为个体当前位置； $V_{\text{crowd}}(t)$ 是受周围人群密度影响的修正速度； k_1 、 k_5 是权重参数，分别控制目标吸引力和拥挤影响。

2.2.2 避障行为

避障行为用于确保个体在疏散过程中避免与静态或动态障碍物发生碰撞。此行为尤其适用于在狭窄或拥挤区域内的避让需求，且会根据障碍物位置与个体间的距离动态调整移动路径。避障行为可描述为：

$$V_{\text{avoid}}(t) = \sum_{i \in O} \left(k_2 \cdot \frac{P(t) - P_i(t)}{\|P(t) - P_i(t)\|^2} + k_6 \cdot V_{\text{dynamicavoid}}(t) \right) \quad (7)$$

其中： O 是所有障碍物的集合，包括固定障碍物和动态障碍物（如其他行人）； $P_i(t)$ 是障碍物 i 在时间 t 的位置； $V_{\text{dynamicavoid}}(t)$ 是动态避让其他行人的修正速度； k_2 、 k_6 是权重参数，分别控制静态和动态避障行为的权重。

2.2.3 路径切换行为

在拥挤或路径成本过高的情况下，个体可选择切换至更优路径以提高疏散效率。路径切换行为根据当前路径和邻近路径的拥挤度和路径长度进行决策。路径成本可定义为拥挤度和路径长度的加权求和：

$$\begin{aligned} C_{\text{current}} &= \alpha \cdot \rho_{\text{current}} + \beta \cdot L_{\text{current}} \\ C_{\text{adjacent}} &= \alpha \cdot \rho_{\text{adjacent}} + \beta \cdot L_{\text{adjacent}} \end{aligned} \quad (8)$$

其中： ρ_{current} ：当前路径的拥挤度； ρ_{adjacent} ：邻近路径的拥挤度； L_{current} ：当前的路径长度； L_{adjacent} ：调整后的路径长度； α 和 β 是权重系数，分别控制拥挤度和路径长度的相对重要性。决策规则：如果 $C_{\text{adjacent}} < C_{\text{current}}$ ，则切换到邻近路径。否则，继续当前路径。

2.3 启发式算法设计

在疏散模拟过程中，基于路径成本的启发式算

法可以有效应对路径选择和局部拥堵问题。个体可动态决策以寻求最优疏散路径，特别是在拥挤度高、路径切换频繁的区域。此算法将路径成本和拥挤度结合考虑，以便在较短时间内完成疏散。

2.3.1 路径选择与换乘行为

为减少因拥堵导致的延误，个体在疏散任务中的每个时间步都会评估当前路径的成本，并基于拥挤度、邻近路径的拥挤度以及路径长度，动态决定是否切换到其他路径。该算法使用启发式路径选择规则，通过路径成本计算，判断是否切换路径，以最大限度地提高疏散效率，算法伪代码如下：

伪代码 1：路径选择与换乘行为

Algorithm: Path Selection

Input:

ρ_{current} - Current path congestion
 ρ_{adjacent} - Adjacent path congestion
 P_{goal} - Target position
 P_{t} - Current position of pedestrian
 L_{current} - Current path length
 L_{adjacent} - Adjacent path length

Output: Path selection decision

- 1: Calculate the cost of the current path:
- 2: $C_{\text{current}} = \alpha * \rho_{\text{current}} + \beta * L_{\text{current}}$
- 3: Calculate the cost of the adjacent path:
- 4: $C_{\text{adjacent}} = \alpha * \rho_{\text{adjacent}} + \beta * L_{\text{adjacent}}$
- 5: Path decision:
- 6: if $C_{\text{adjacent}} < C_{\text{current}}$ then
- 7: switch to adjacent path
- 8: else
- 9: continue on the current path
- 10: Adjust speed and direction based on congestion:
- 11: $V_{\text{new}}(t) = V_{\text{seek}}(t) + V_{\text{avoid}}(t)$
- 12: if $\rho_{\text{current}} > \text{threshold}$ then
- 13: reduce adjustment magnitude to avoid sharp turns
- 14: Dynamic path adjustment:
- 15: periodically recalculate path costs to optimize decisions

该算法可以有效应对动态路径选择，帮助行人根据当前环境做出最优选择，避免不必要的拥堵并减少疏散时间。

2.3.2 拥挤处理

在疏散过程中，人员进入狭窄通道时，常常容易引发拥堵，从而导致疏散速度下降。

为了应对此类拥堵情况，本文引入了基于拥挤度的速度调控机制，通过控制新进入通道的人员流量来减轻拥堵。

为此，设计了拥挤处理的启发式算法，考虑拥挤度对速度的影响。人员在通道内的移动速度将根据局部拥挤度动态调整。

伪代码 2: 拥挤处理

Algorithm: Crowd Handling

Input:

ρ_{stair} - Current congestion level in the passage
 P_{exit} - Target exit position
 v_{max} - Maximum speed in the absence of congestion

Output: Adjusted passage speed

```

1: Speed adjustment based on congestion:
2:   if  $\rho_{\text{stair}} > \rho_{\text{threshold}}$  then
3:     Reduce speed
4:      $v_{\text{stair}} = v_{\text{max}} * (1 - \rho_{\text{stair}})$ 
5:   else if  $\rho_{\text{stair}} \approx \rho_{\text{threshold}}$  then
6:     Significantly reduce speed until reaching a limit to prevent a complete halt
7: Control the flow of people entering the passage:
8:   Dynamically limit the flow rate of new entrants to reduce excessive congestion
9: Move towards the target exit at adjusted speed:
10:   $V_{\text{new}}(t) = v_{\text{stair}} * (P_{\text{exit}} - P(t)) / \|P_{\text{exit}} - P(t)\|$ 
11:  if new congestion occurs near the exit then
12:    Re-evaluate path and select a new exit direction
13:  Continuously update target exit position and speed:
14:  Ensure smooth flow by dynamically adjusting

```

3 实验

3.1 实验环境设置

3.1.1 三维模型及疏散流程

本实验使用 Revit 软件建立了某水运新通道人员疏散设施的三维模型。该模型 1:1 还原了通航隧道中人员疏散设施的物理结构,如图 1 所示,主要包括疏散楼梯、横向交通洞、纵向交通洞、浮箱及爬梯等关键疏散设施。浮箱设计共布置 30 节,单节浮箱的尺寸为长 60m、宽 2.8m、高 10m,其中下 4m 为密封舱,上 6m 为逃生连接通道,通道内设有可升级逃生梯。

浮箱间通过铰链耦合连接,以便在人员疏散时实现快速移动。三维模型的设计保证了疏散设施布局的精确性,为后续仿真模拟实验提供了可靠的物理环境基础。

在火灾等紧急情况下,乘客先从船舶前后两个出口下船,登上救生艇被运送至最近的浮箱逃生口。随后通过浮箱外侧爬梯进入内部,向隧道岸壁一侧移动,再经空闲爬梯进入逃生楼梯。之后,乘客通过横向交通洞进入纵向交通洞,沿最近出口走出,最终抵达马道完成疏散。整个流程如图 2 所示。

3.2.2 仿真方案及人员参数

本研究在理论模型阶段基于 Steering 模型设计了启发式算法,涵盖疏散路径选择、爬梯拥堵处理及动态路径切换等关键行为规则。这些规则通过动态调整路径成本与拥堵情况,优化疏散效率。为验证该理论模型与算法,选用 Pathfinder 作为仿真模拟工具,该工具不仅支持复杂场景下的人员疏散模拟,还允许实现自定义行为规则和参数配置。三维模型通过 Revit 构建后导入 Pathfinder,进而遵循制定的算法规则,如路径选择与拥堵处理,同时灵活设置人员行走速度、出口流量和疏散密度等参数,进而开展仿真模拟研究。这样,通过实验数据验证模型预测的疏散效率和行为响应,确保仿真结果的精确性与模型适用性。

人员行走速度:根据国内外调查研究及应急管理部四川消防研究所在进行国家‘973’课题^[13]研究中的人员疏散实验及本研究场景确定;人员体积:参考 SFPE Handbook (美国消防保护工程师学会权威性手册)^[14]、Simulex (人员疏散模拟权威软件)并参考我国人员特点确定;人员类型:研究中成年男性、成年女性、儿童和老人,各人员分类的比例是基于 Pathfinder 所建议数值确定,以上相关参数保守取值如表 1。

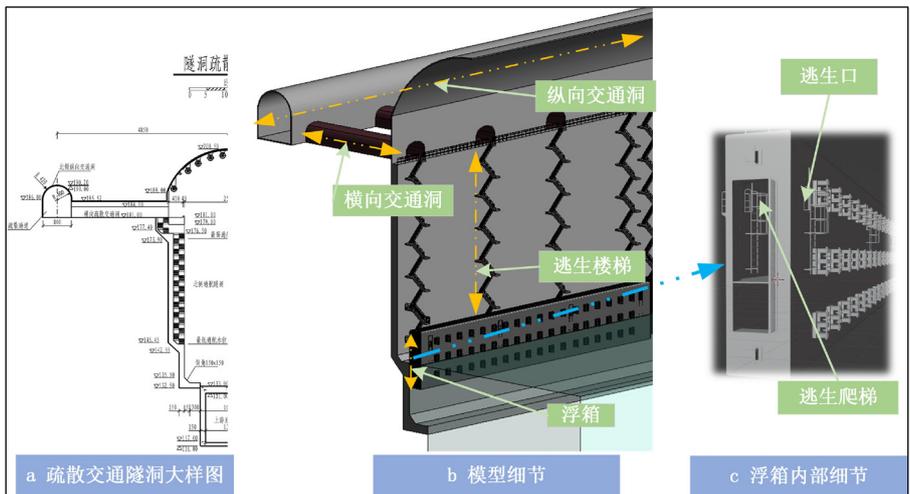


图 1 三维模型

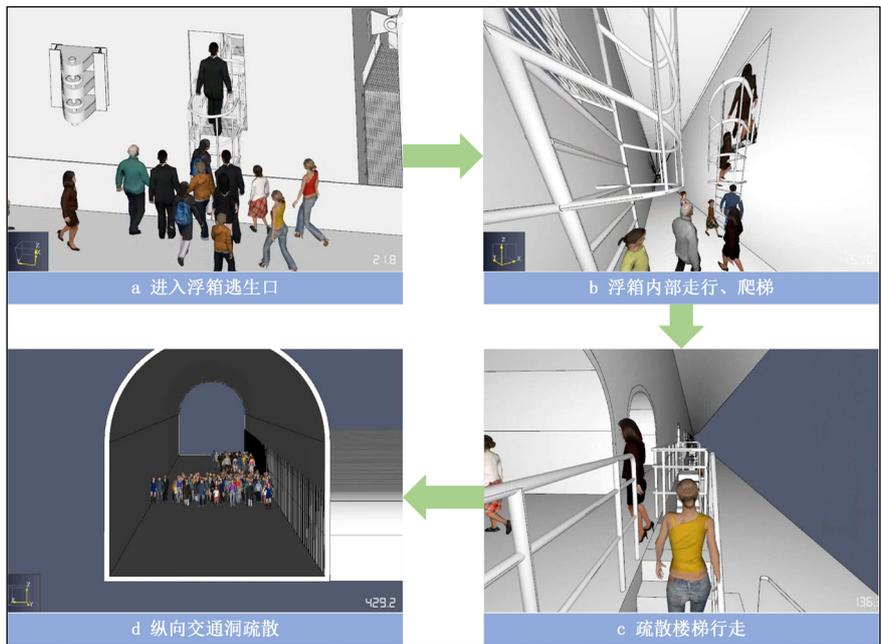


图 2 疏散模型图

表 1 人员疏散参数设置

疏散人员行走速度			
人员平面移动速度 (m/s)	平均流量 (人/m·s)	人员走廊移动速度 (m/s)	楼梯内自由移动速度 (m/s)
1.0	1.0	1.0	0.5
疏散人员体积 (宽×厚×高)			
成年男性	成年女性	儿童	老人
0.50m×0.26m×1.75m	0.44m×0.27m×1.65m	0.35m×0.24m×1.20m	0.45m×0.30m×1.60m
疏散人员类型			
成年男性	成年女性	儿童	老人
40%	30%	10%	20%

3.2 人员疏散时间研究

3.2.1 疏散方案

本研究基于三峡水运新通道的最大客运量需求，设计了 500 人的行人疏散仿真，其中单侧疏散人数设置为 250 人，以符合隧道通航方案的对称性。根据《内河船舶法定检验技术规则（2019）》的要求，疏散模型假设每艘船配备足够的救生设备，能够一次性疏散 250 名乘客至隧道内单侧逃生设施附近。为减少疏散过程中的瓶颈，结合救生艇数量，将乘

客分配至 12 个浮箱逃生口，其中 11 个分配 21 人，1 个分配 19 人。

此外，为验证通航隧道在最不利条件下的安全性，船舶在模拟中被设置在 1800 米长隧道的中点位置，以确保逃生路径至两侧出口均为最远距离，旨在测定最大疏散时间。

3.2.2 模拟结果分析

仿真模拟设定每 60 秒记录一次，重复 5 次实验，并采用 origin 2018 对 5 次实验数据求均值。

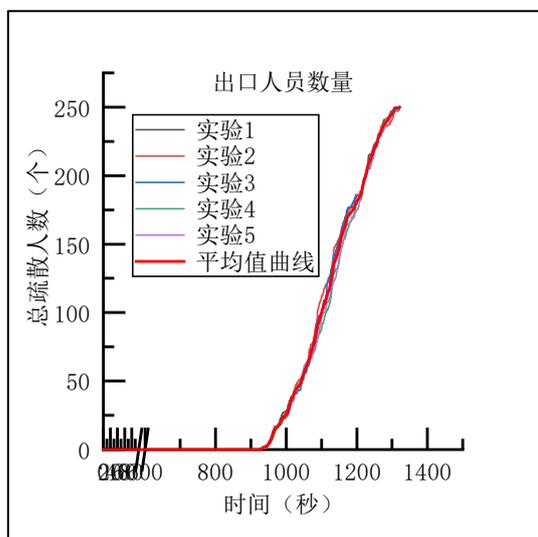


图 3 出口人员数量

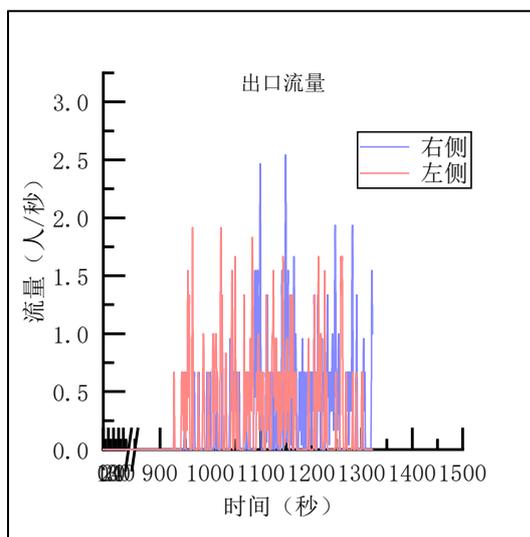


图 4 左右出口流量

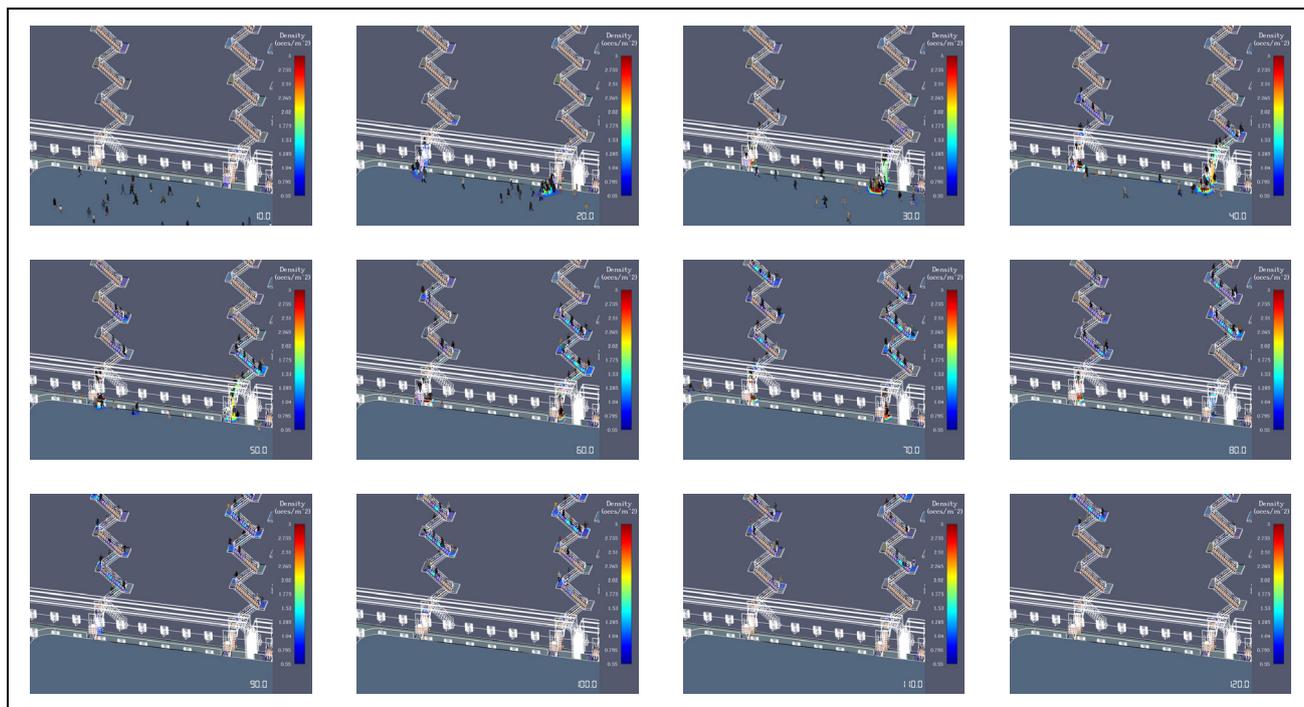


图 5 进入浮箱内部区域的人员密度（间隔 10s）

实验结果如图 3 所示：总计耗时 1321 秒（约 22 分钟）完成单侧 250 人的疏散。其中，在 0~927s 人员都在疏散过程中，927s 后开始有人陆续疏散出安全出口，到 1321s 时（约 22 分钟），人员全部疏散出安全出口。

从纵向交通洞上下游连接马道的出口人流量与时间曲线图（图 4）可以看出，人员通过两个出口的人流量基本一致，通过的人数基本相当。由于船停靠位置略靠近左侧安全出口，所以左侧安全出口最终人员疏散完成时间为 1302s，右侧安全出口最终人员疏散完成时间为 1321s，符合实际情况。

在人员从船上到达浮箱逃生口、通过爬梯进入浮箱内部、从浮箱内部进入上部逃生楼梯这个过程中，从 20~80s 时间段，浮箱逃生口入口处成为了整个人员疏散流程中的疏散瓶颈处，人员密度一度达到 2.5~3 人/m²，局部出现短暂的拥堵情况，目前瓶颈持续时间约 1min 左右，如图 5 所示。疏散瓶颈需在后续疏散模拟研究中进行关键因素分析。

3.3 关键因素分析

为深入探讨影响最大疏散时间的关键因素，本研究对疏散人数和疏散逃生入口数量这两个参数进行了敏感性分析。首先，疏散人数的增加直接影响

隧道内的人员流动密度和出口处的拥堵状况，进而影响整体疏散时间。随着疏散人数上升，局部瓶颈效应可能愈加明显，因此分析不同疏散人数下最大疏散时间的变化规律，有助于评估现有设计在应对更大规模应急需求时的适应性。其次，依据前述疏散过程的模拟结果（见 3.2 节），浮箱逃生入口处成为疏散瓶颈区域，这一现象在疏散过程中引发局部拥堵，从而显著增加疏散时间。因此，本研究还针对疏散逃生入口数量的变化进行敏感性分析。增加入口数量可减少每个入口的平均负荷，缓解局部拥堵，提升整体疏散效率。分析不同疏散入口配置下的最大疏散时间变化规律，将有助于优化应急疏散设计。

3.3.1 最大疏散人数

实验设计：保持人员疏散入口数量为 10 个，疏散总人数从 100—1000，间隔 100 开展 10 次行人疏散仿真实验，单个逃生入口疏散人数即从 10—100 人，其他相关设置于 3.2 节一致。

每次实验分别统计最大疏散时间，实验统计如表 2 所示。

同时采用 origin 2018 对 10 次实验结果进行曲线拟合，疏散入口数量固定情况下，疏散总人数与最大疏散时间的相关性，如图 6 所示。

表 2 疏散人数与疏散时间实验数据表

序号 项目	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
疏散总人数	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
单个逃生入口疏散人数	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
最大疏散时间 s	1311.0	1313.5	1326.5	1362.5	1408.5	1457.8	1482.3	1513.3	1547.0	1562.0

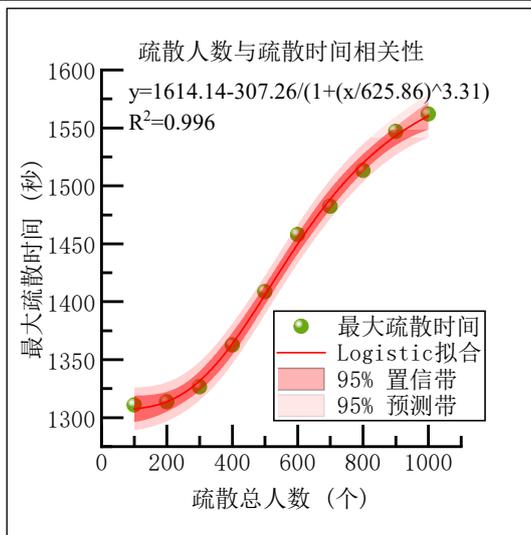


图 6 疏散人数对疏散时间影响

实验数据表明，疏散总人数与最大疏散时间呈现出明显的相关性。在疏散人数较少时（如 100 至 300 人），最大疏散时间随人数增加的趋势较为缓慢，此时影响疏散时间的主要因素是固定的疏散路径长度，即从入口到出口的距离。因此，最大疏散时间在这个范围内相对平稳。

随着疏散人数进一步增加（如 300 至 700 人），最大疏散时间的增长速度加快，原因在于人员在进入浮箱处及浮箱内部的爬梯处形成了局部拥堵。这种局部的瓶颈效应导致了疏散效率的降低，使得疏散时间的增速开始变得显著。

当疏散人数继续增加至 700 人及以上时，拥堵效应更加明显。在爬梯处形成的拥堵使得人员开始更大范围地向浮箱两侧移动，寻求更多的爬梯离开浮箱。疏散时间增加的主要因素表现为浮箱入口处的拥堵。因此，在疏散人数达到较大规模时，局部拥堵带来的影响愈发显著，从而加剧了疏散时间的上升趋势。

通过实验数据的拟合分析可以发现，随着疏散

人数的增加，最大疏散时间呈现出非线性的增长趋势，这表明在设计应急疏散方案时，需要特别关注浮箱入口和爬梯处的瓶颈区域，以减少局部拥堵、提升疏散效率。

3.3.2 浮箱逃生入口数量

实验设计：疏散人数保持 500 人不变，疏散入口数量保留 1 个疏散口的单独情况外，2—16 个之间间隔 2 开展实验，共进行 9 次实验，其他相关设置于 3.2 节一致。实验中分别统计最大疏散时间，实验统计如表 3 所示。同时采用 origin 2018 对实验结果进行曲线拟合，分析疏散入口数量与最大疏散时间的相关性，如图 7 所示。

实验数据表明，在疏散人数固定为 500 人时，最大疏散时间随着疏散入口数量的增加显著下降，表现出近似指数的下降趋势。当入口数量从 1 增加到 10 时，疏散时间迅速缩短，这表明在入口数量较少的情况下，疏散效率主要受入口及浮箱内爬梯处的局部拥堵影响。增加入口数量有效分散了人流，显著缓解了这些瓶颈，从而减少了整体疏散时间。

表 3 疏散入口数量与疏散时间实验数据表

序号 项目	0	1	2	3	4	5	6	7	8
疏散入口数量	1	2	4	6	8	10	12	14	16
单个疏散入口人员	500	250	125	83	62	50	42	36	31
最大疏散时间	2055.5	1702.8	1528.3	1462.5	1442.5	1440.3	1396.0	1394.3	1364.0

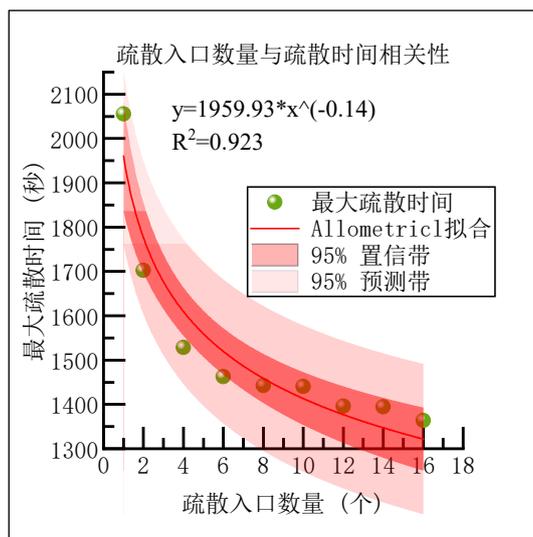


图 7 疏散入口数量与疏散时间相关性

然而,当入口数量进一步增加到 12 个及以上时,最大疏散时间的下降趋势趋于平缓。此时,局部拥堵已基本消除,疏散效率的提升受到限制,疏散路径长度成为主要影响因素。因此,进一步增加入口数量对缩短疏散时间的作用有限。

综上,实验结果表明,合理配置疏散入口数量在应急疏散设计中至关重要,特别是在入口数量较少的情况下,可以显著提升疏散效率。然而,当入口数量达到一定水平后,需结合疏散路径的布局优化,以实现更高效的疏散策略。

4 结论

4.1 总结

本文基于 Steering 模型,对通航隧道内的应急人员疏散策略进行了深入研究。通过构建详细的疏散场景模型和数值模拟,探讨了不同疏散人数和疏散入口配置下的最大疏散时间及其影响因素。实验结果表明,疏散效率在很大程度上受到浮箱入口和爬梯处局部拥堵的制约。对于较少疏散人数,疏散时间主要由固定路径长度决定,而当疏散人数增至一定规模时,局部拥堵成为影响疏散效率的主要瓶颈。

此外,通过对疏散入口数量的分析,发现合理增加疏散入口数量能够有效缓解局部拥堵,从而显著降低最大疏散时间。然而,当入口数量进一步增加时,疏散时间改善减缓,此时疏散路径长度成为主要限制因素。因此,仅通过增加疏散入口数量并不能无限提升疏散效率,需结合路径优化策略进行系统性设计。

本文的研究为通航隧道应急疏散策略的设计提供了关键性理论支持和实证依据。通过搭建 Steering 模型进行仿真分析,深入理解疏散过程中的动态行为特点,为优化应急疏散设施的布局设计提出了有效建议,特别是在入口配置和路径优化方面。本研究的成果有助于提升未来类似通航隧道场景中应急疏散的效率和安全性,为制定更完善的应急疏散方案提供了重要参考。

4.2 局限性

本研究虽然为通航隧道应急疏散策略提供了理论支持,但仍存在一些局限性。在模型构建和实验设计中,为保证研究的可操作性和计算效率,对实际疏散场景进行了若干简化和假设,这在一定程度

上限制了研究成果的广泛适用性。首先,模型假设所有疏散人员均能迅速响应疏散指令,并按照既定疏散路径行动。然而,在实际场景中,人员可能因信息接收延迟、个体行为差异或恐慌情绪导致反应不一致,甚至偏离疏散路径,这种复杂行为未能在模型中充分体现。其次,实验规模限制在 100 至 1000 人之间,浮箱入口数量为 1 至 16 个,虽然涵盖了部分可能的疏散场景,但未能模拟超大规模人群(如超过 1000 人)或更复杂的条件(如多灾种情境或通讯中断下的疏散)。此外,疏散路径选择规则假定人员能够动态调整以避免拥堵,但在真实环境中,视野受限、心理压力及路径选择惯性等因素可能对疏散效率产生显著影响。

针对上述局限性,未来研究可引入更复杂的人群行为建模方法,模拟个体响应速度差异、情绪状态及行为不确定性对疏散效率的影响;扩大实验规模,涵盖更高密度人群和多灾种情境;并结合实际疏散场景的观测数据对模型进行校准,以提升研究成果的适用性和可靠性。

参考文献

- [1] 交通运输部.《港口与航道工程建设管理标准》:交通运输部令 16 号[S]. 2017.
- [2] 交通运输部.《港口工程建设标准编制管理办法》:交通运输部令 27 号[S]. 2018.
- [3] Cao L, Wang L. Analysis and intervention in pedestrian evacuation via a modified social force model[C]// Proceedings of the 27th Chinese Control and Decision Conference (CCDC). Qingdao, China: IEEE, 2015: 5924-5929.
- [4] Wang L, Zheng J H, Zhang X S, et al. Pedestrians' behavior in emergency evacuation: Modeling and simulation[J]. Chinese Physics B. 2016, 25(11): 118901.
- [5] Cui X, Ji J, Bai X. Algorithm and examples of an agent-based evacuation model[J]. Fire, 2022, 6(1): 11.
- [6] Yu H, Li X, Song W, et al. Pedestrian emergency evacuation model based on risk field under attack event[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2022, 606: 128111.

- [7] Yang G, Zhou T, Peng M, et al. Synergy of Road Network Planning Indices on Central Retail District Pedestrian Evacuation Efficiency[J]. ISPRS International Journal of Geo-Information, 2023, 12(6): 239.
- [8] Wei J, Deng Q, Zhang L. Study on emergency evacuation in underground urban complexes[J]. PLoS one, 2022, 17(12): e0278521.
- [9] Zuo J, Shi J, Li C, et al. Simulation and optimization of pedestrian evacuation in high-density urban areas for effectiveness improvement[J]. Environmental Impact Assessment Review, 2021, 87: 106521.
- [10] Snohová A, Kučera P. Comparative Study of SFPE and Steering Modes in Pathfinder to Optimise Evacuation Routes[J]. Buildings, 2024, 14(8): 2361.
- [11] YAO M, WEN P, CAO S, et al. Simulation of Pedestrian Evacuation Considering Cohesion of Social Groups on University Campus[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2021, 46(4): 578-585.
- [12] Yang X, Dong H, Yao X, et al. Effects of quantity and position of guides on pedestrian evacuation[C]// Proceedings of the 18th IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems. Las Palmas, Spain: IEEE, 2015: 1317-1322.
- [13] 公安部四川消防研究所, 中国科学技术大学. 火灾动力学演化与防治基础研究[科研项目].《国家重点基础研究发展计划(973 计划)》, 2012-2016.
- [14] SFPE. SFPE Handbook of Fire Protection Engineering[M]. 5th ed. Quincy, MA: National Fire Protection Association, 2016.

版权声明: ©2024 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

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

