

博物馆展厅内障碍物对行人疏散的影响研究

马闪闪¹, 李兴莉², 田江涛¹, 申哲玮¹, 魏宇腾¹

¹太原科技大学应用科学学院, 山西 太原

²太原科技大学安全与应急管理工程学院, 山西 太原

收稿日期: 2023年5月17日; 录用日期: 2023年6月17日; 发布日期: 2023年6月28日

摘要

博物馆展厅内障碍物对行人疏散有不可忽视的影响。本文基于元胞自动机模型, 在行人移动部分引入势能场理论, 建立了含障碍物的博物馆展厅内的行人疏散模型, 并运用该模型仿真研究了不同展厅内疏散人数、门前障碍物的数量及布局、展厅内展柜的数量及布局对疏散时间和疏散动力学的影响。后借助Pathfinder软件验证了仿真中动力学行为, 证明本文模型具有合理性, 可用于展厅内行人疏散的研究。结果表明: 合理的障碍物布置会加速行人疏散的进程, 降低出口附近成拱行为的影响。本研究对博物馆展厅的布展安全有指导意义。

关键词

博物馆, 疏散, 障碍物, 势能场, 元胞自动机, Pathfinder

Study on the Effect of Obstacles on Pedestrian Evacuation in Museum Exhibition Halls

Shanshan Ma¹, Xingli Li², Jiangtao Tian¹, Zhewei Shen¹, Yuteng Wei¹

¹School of Applied Sciences, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan Shanxi

²School of Safety and Emergency Management Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan Shanxi

Received: May 17th, 2023; accepted: Jun. 17th, 2023; published: Jun. 28th, 2023

Abstract

Obstacles in museum exhibition halls have a non-negligible influence on pedestrian evacuation. In this paper, based on the cellular automata model, the potential field theory is introduced in the moving part of pedestrians to establish a pedestrian evacuation model in the museum exhibition hall containing obstacles, and the model is used to simulate and study the effects of the number of evacuees in different exhibition halls, the number and layout of obstacles in front of the door, and

the number and layout of exhibits in the exhibition hall on the evacuation time and evacuation dynamics. Later, the dynamics behavior in the simulation was verified with the help of Pathfinder software, which proved that the model in this paper is reasonable and can be used for the study of pedestrian evacuation in the exhibition hall. The results show that a reasonable arrangement of obstacles will accelerate the process of pedestrian evacuation and reduce the influence of arch-forming behavior near the exit. This study has guiding significance for the safety of the museum exhibition hall's layout.

Keywords

Museum, Evacuation, Obstacles, Potential Fields, Cellular Automata, Pathfinder

Copyright © 2023 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

现实生活中博物馆作为疏散领域的研究对象吸引了不少学者进行探索,例如况凯骞等人评估了某大型博物馆文物库房的消防设计[1];鲍勇等人从宏观的角度评估了博物馆的消防设计[2];还有一些学者利用仿真软件宏观地评估或者模拟了博物馆发生火灾时,某特定博物馆的疏散过程[3][4]。

博物馆中有各类展柜、展示墙、展台等,这些设施在疏散过程中一定程度上都属于障碍物,因此需要在疏散模拟中考虑该类障碍物的影响。近年来,很多学者对疏散中的障碍进行了不同空间、不同程度、不同方面的研究,例如定量分析障碍物不同概率分布对疏散的影响[5],对疏散特征指标[6]提出创新,引入障碍物阻滞系数[7]等。出口附近的障碍物,一定程度上会增大踩踏事故发生的可能性。因此在出口附近设置障碍物来调整拱形效应的形成位置和大小[8],一定程度上可降低平均疏散时间[9][10],但常见的“V”字形布置对疏散效率的降低并无太多助益[11]。

综上,现有针对博物馆这一特定情况研究很少。对于出口障碍物的研究,更是局限于小范围的理想化空间,对于实际疏散的指导意义有限。因此,本文针对博物馆特有的各类设施在疏散过程中作为障碍物的不同影响情况进行研究,着重研究出口附近障碍物布置对疏散效率的影响。本章结论对博物馆临时展览的布置有较强指导作用。

2. 疏散模型

元胞自动机规则

对于含有障碍物的疏散空间,元胞自动机增加了两条新规则:若初始生成疏散行人随机分布时分布至障碍物内所在网格,如图1(a)所示,黄色圆形代表生成的行人,在疏散开始时自动退至邻域内正常空间较大势能值网格,如图1(b)中红色框线圈住,内含淡黄色圆形的网格,均为图1(a)中的黄色圆形可前往的网格;若疏散过程中,为礼让行人或其他原因,期望移动方向为障碍物区域,则向左后或右后网格进行后撤,具体移动方向可见图1(c)所示,红色圆形表示该元胞已被占据,无法前往。

一般情况下,疏散人员会避开疏散空间内各种障碍物运动,以谋求更短疏散时间。因此无论从疏散路径规划还是疏散个体前进目标方向的角度来说,障碍物的分布都具有不可忽视的作用。在含有障碍物的疏散空间中,我们将障碍物的势能设置为极大值,来避免行人穿越障碍物的情况。在设定障碍物的移动势能后,再计算其余网格的移动势能。图2为带有障碍物疏散空间的势能分布示意图。不难从图中看

到，障碍物的存在改变了原有空白场的移动势能。

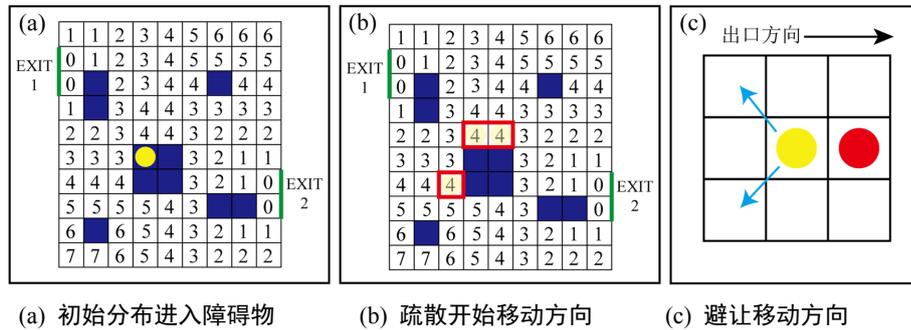
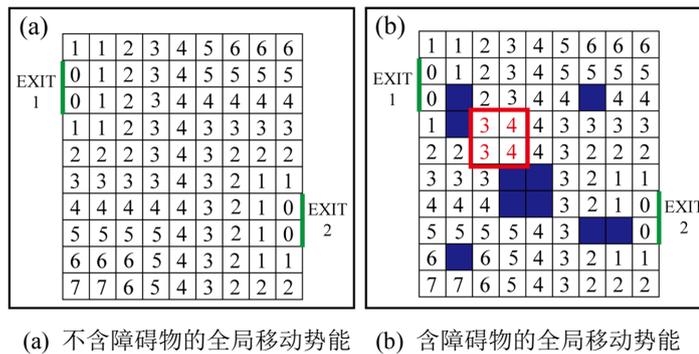


Figure 1. Schematic diagram of cellular automata rules

图 1. 元胞自动机规则示意图



(a) 不含障碍物的全局移动势能 (b) 含障碍物的全局移动势能

Figure 2. Global movement potential energy distribution for an evacuated space with obstacles

图 2. 含障碍物的疏散空间的全局移动势能分布

元胞采用 Moore 型邻域：行人可以在静止和向周围 8 个方位移动之间自由选择。行人被生成时自带 1.25 米每秒的速度，疏散开始后初始移动速度 v_0 服从区间 $(1.15, 1.25)$ 上的均匀分布，每个疏散个体随机从该分布中取值作为各自的初始速度。移动速度会受到邻域人群数量的影响，纳入影响范围的为以行人所在元胞为 $(0, 0)$ ，右侧为 X 轴正方向，下侧为 Y 轴正方向， $(-1, -1)$ 到 $(2, 2)$ 围成的 4×4 矩形邻域，行人会受到邻域 15 个元胞内行人数量的影响。修正速度 v_r 、初始速度 v_0 、影响因子 μ 和最终速度 v 的关系为：

$$v_r = \mu \times v \tag{1}$$

$$v = v_r \pm 0.1 \tag{2}$$

Table 1. Setting of the speed of travel during evacuation

表 1. 疏散过程中行进速度的设置

前方人数	影响因子 μ 取值范围	修正速度 $v_r / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	最终速度 $v / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
<2	$\mu \sim U(1.1, 1.5)$	$v_r \sim U(1.265, 1.875)$	$v \sim U(1.165, 1.975)$
<4	$\mu \sim U(0.9, 1.1)$	$v_r \sim U(1.035, 1.375)$	$v \sim U(0.935, 1.475)$
<7	$\mu \sim U(0.9, 1.0)$	$v_r \sim U(1.035, 1.25)$	$v \sim U(0.935, 1.35)$
其他	$\mu \sim U(0.7, 0.9)$	$v_r \sim U(0.805, 1.035)$	$v \sim U(0.705, 1.135)$

为更贴近真实疏散过程, 设定每个疏散个体在移动后均有一个思考时间 t_s , 一般人的反应时间约在0.2秒左右, 故疏散决策时间 t_s 设为服从(0.15,0.25)区间上的均匀分布, 疏散过程中的具体速度设定可见表1。

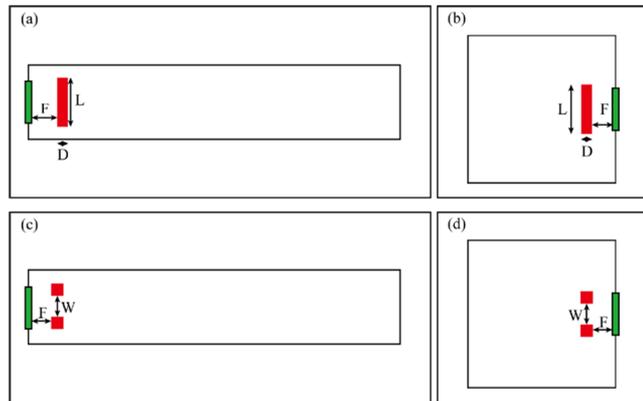
3. Python 仿真数值分析

为减少仿真过程中某一个行人因位置离出口较远或避让障碍物较为频繁带来的总疏散时间大幅上涨, 本章数值分析所用数据均为相同工况、相同疏散人数下, 利用 Python 进行了10次疏散仿真后, 对十次的结果取均值。对于反常波动的数据会进行重复仿真, 若重复后没有出现第一次时的波动, 则采用第二次重复的数据, 若依旧出现反常结果, 则采用初始的数据, 并进行原因分析。

3.1. 门前障碍物布置

很多展厅都会在入口处设立规模宏大、气势恢宏的门厅, 该类门厅一般由垂直出口中线的一面墙作为展示界面, 墙上有展厅的名字与相关展品的浮雕等, 也有一些展厅会在入口处设置立柱作为门厅装饰展现气势。

为减少门宽对疏散的影响, 规定长50米, 宽10米的矩形展厅选择左侧3米单出口, 边长20米的正方形展厅则选择右侧3米单出口, 分别研究了门厅展示墙(下文简称门墙)与门厅展示柱(下文简称门柱)对疏散的不同影响, 图3为障碍物分布的示意图。



(a) 矩形展厅门墙; (b) 正方形展厅门墙; (c) 矩形展厅门柱; (d) 正方形展厅门柱

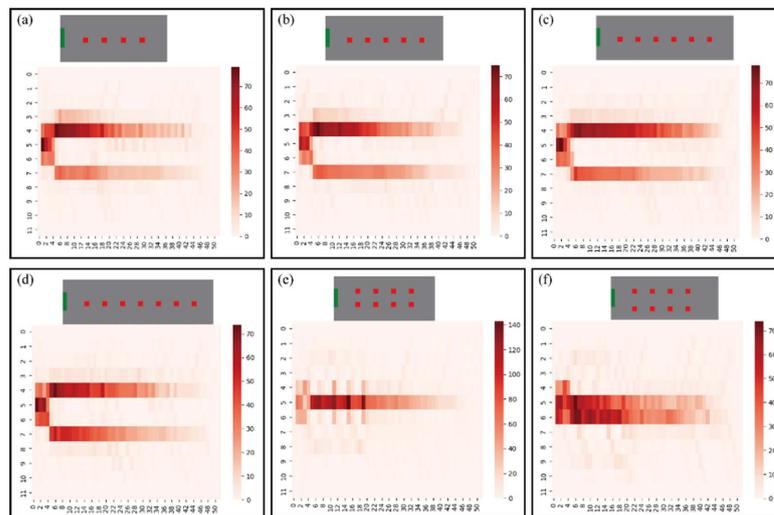
Figure 3. Diagram of the distribution of obstacles in the exhibition hall
图3. 展厅障碍物分布示意图

将门墙到出口的垂直距离定义为 F , 门墙的宽度设为 D , 门墙的长度设为 L , 单位均为米。门柱设为变长一米的正方形障碍物, 关于门的中线对称布置, 将门柱最靠近门的外边缘到门的距离定义为 F , 两门柱邻近对称轴外边缘的距离为柱间距离, 定义为 W , 单位: 米。

矩形展厅研究了 $F \in \{3, 4, 5\}$ 时, $D=1$ 恒定, $L \in \{2, 3, 4, 5\}$ 的12种门墙布置和 $F \in \{3, 4, 5\}$, $W \in \{1, 2, 3\}$ 时的9种门柱布置对疏散的影响。正方形展厅研究了 $F \in \{3, 4, 5\}$ 时, $D=1$ 恒定, $L \in \{2, 3, 4, 5, 6\}$ 的15种门墙布置和 $F \in \{3, 4, 5\}$, $W \in \{1, 2, 3\}$ 时的9种门柱布置对疏散的影响。

3.2. 展厅内展柜布置

展厅内对疏散影响最大的莫过于通道中部的高展柜, 该类展柜多位于疏散动线上。采用控制变量的方法, 对展厅内高展柜数量及其布置方法对疏散的影响进行了仿真研究, 高展柜设为边长一米的正方形。

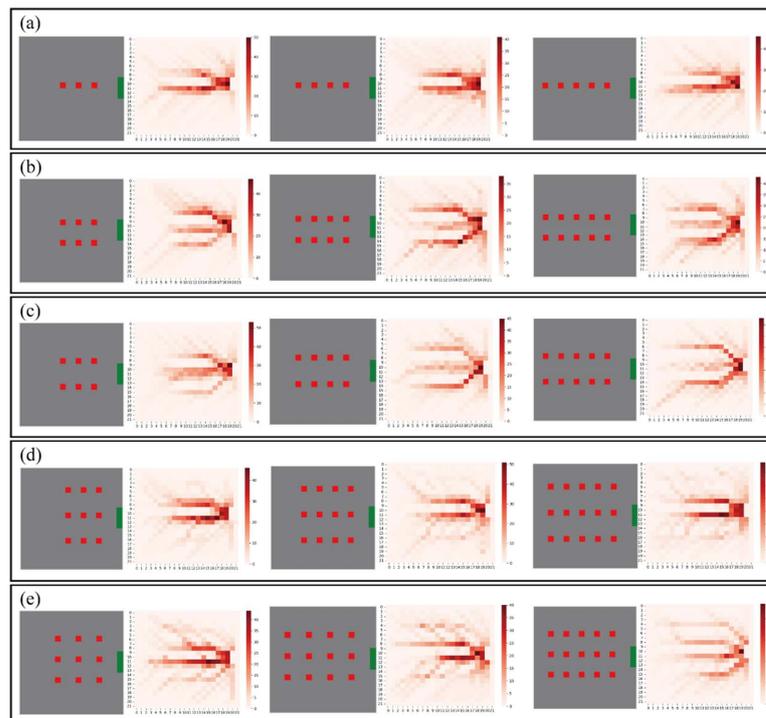


(a) 中线 4 个; (b) 中线 5 个; (c) 中线 6 个; (d) 中线 7 个; (e) 中线隔 2 米 4 对; (f) 中线隔 3 米 4 对

Figure 4. Distribution of high display cabinets in rectangular exhibition halls

图 4. 矩形展厅高展柜分布

矩形展厅将出口统一为左侧单出口，门宽 3 米，分别研究了高展柜沿中轴线位置布置 4 至 7 个，关于中轴线间隔 2 米或 3 米对称布置 4 对高展柜，具体见图 4。正方形展厅在右侧 3 米单出口设定下研究了高展柜在中轴线布置 3、4、5 个；关于中轴线间隔 3 米或 4 米对称布置 3 至 5 对；关于中轴线间隔 3 米或 4 米均匀分布三行，每行 3 至 5 组展柜，具体可见图 5。



(a) 中线布置; (b) 中线隔 3 米对称布置; (c) 中线隔 4 米对称布置; (d) 中线隔 4 米三行布置; (e) 中线隔 3 米三行布置

Figure 5. Distribution of high display cabinets in square exhibition halls

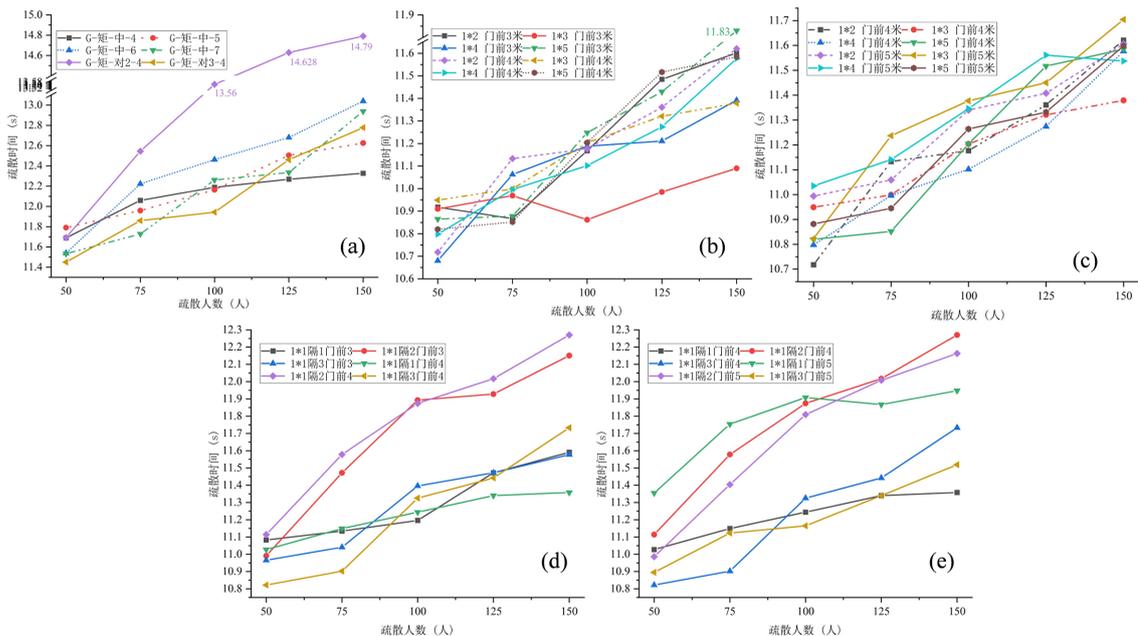
图 5. 正方形展厅高展柜分布

3.3. 疏散时间数值分析

图 6 分别展示了矩形展厅布置不同高展柜、门厅、门柱的疏散结果。从数据分析图中不难看出，障碍物一定会阻碍疏散的习惯性认知并不一定符合客观规律。

图 6(a)展示了高展柜在矩形展厅中线布置 4、5、6、7 个以及关于中线相隔 2 米或 3 米对称布置的数值模拟图。高展柜沿中线布置时，疏散时间并未随着展柜数量的增多而增大，反而在低密度即疏散总人数不超过 75 人时，布置七个展柜时疏散时间是最短、疏散效果最好的；中密度即疏散总人数在 75 人到 125 人区间时，布置四展柜仅比布置七展柜存在微弱优势，疏散时间最久的是布置六个展柜；高密度时疏散最快的是布置四展柜，最慢的依旧是布置六展柜。

高展柜对称布置时，相隔间距的增大可大幅提高疏散效率。中低密度时，对称大间距布置有一些优势；高密度时，沿中线四展柜布置较为妥当。关于疏散时间对疏散人数的敏感性，沿中线布置时，随着布置展柜数量的增加敏感性有一定增加，但随着疏散人数的增加，四展柜布置敏感性降低，中密度时七展柜布置的疏散时间跃层明显；沿中线对称布置时，小间距对应的疏散时间敏感性大幅上升。



(a) 高展柜；(b) 门前 3、4 米门厅；(c) 门前 4、5 米门厅；(d) 门前 3、4 米门柱；(e) 门前 4、5 米门柱

Figure 6. Evacuation time diagram for rectangular exhibition halls with obstacles
图 6. 含障碍物矩形展厅疏散时间图

图 6(b)展示了矩形展厅门墙 $F \in \{3,4\}$ 时， $D = 1$ 恒定， $L \in \{2,3,4,5\}$ 的数值模拟图。 $F = 3$ 情况下， $L = 2$ 时疏散时间会在低密度区间反常下降，高密度区间增速放缓； $L = 3$ 时，低密度区间疏散时间的变化较小，中密度区间会出现反常下降； $L = 4$ 时，低密度区间疏散时间随疏散人数的增加增长得最快，其次是高密度区间，中密度区间的增长速度逐渐放缓； $L = 5$ 时，低密度时疏散效率几乎没有变化，中高密度疏散时间骤增。50 人时 $L = 4$ 疏散时间最短，75 人时为 $L = 5$ ，中高密度时 $L = 3$ 疏散效果最好。

$F = 4$ 情况下， $L = 2$ 时，低密度时，疏散时间对疏散人数敏感度明显； $L = 3$ 时，中密度区间逐渐放缓； $L = 4$ 时，高密度疏散时间增速极快； $L = 5$ 时，中密度疏散时间上升速度极快，低密度和高密度增速十分缓慢。50 人时 $L = 2$ 疏散时间最短，75 人时为 $L = 5$ ，中高密度时 $L = 4$ 疏散效果最好。

图 6(c)展示了矩形展厅门墙 $F \in \{4,5\}$ 时的数值模拟图。 $F=5$ 情况下, $L=5$ 疏散效率最好。 $L=2$ 时, 低密度情况疏散时间几乎没有区别, 中密度区间增幅较大; $L=3$ 时, 低密度和高密度增长速率极大, 疏散时间整体呈上升的趋势; $L=4$ 时, 125 人之前, 疏散时间对疏散人数的敏感性逐节增加, 增速越来越快, 但是在 150 人时, 疏散时间出现小降幅反常降低; $L=5$ 时, 疏散时间也是随疏散人数整体上升, 但增速在中密度区间先加快后降。

矩形展厅的门墙布置, 50 人时 $F=3$ 、 $L=4$ 的门墙, 75 人时 $F=4$ 、 $L=5$ 的门墙疏散时间最短, 中高密度是 $F=3$ 、 $L=3$ 门墙疏散时间最短。但低密度时, 三种疏散方案相差不超过 0.25 秒, 可忽略。

图 6(d)展示了矩形展厅门柱 $F \in \{3,4\}$ 时, $D=1$ 恒定, $W \in \{1,2,3\}$ 的数值模拟图。 $F=3$ 时, 整体的疏散时间变化与常规认识出入较大。 $W=1$ 时, 疏散人数不高于 100 人时, 疏散时间变化十分微小, 疏散人数上升至 125 人疏散时间上升较大, 后增速再次放缓, 整体疏散时间还是随疏散人数的增多而延长。 $W=2$ 时, 疏散人数不高于 100 人时, 疏散时间剧烈变化, 上升速度极快, 疏散人数上升至 125 人疏散时间与 100 人时相同, 后增速再次小幅提高。 $W=3$ 时, 疏散人数不高于 100 人时, 疏散时间的增幅十分平缓, 疏散人数上升至 125 人的疏散时间增速加大, 后增速再次小幅降低。疏散时间最短的疏散方案, 在低密度时为 $W=3$, 中密度则为 $W=1$, 有趣的是高密度时 $W=1$ 和 $W=3$ 的疏散时间曲线趋于重合。

图 6(e)展示了矩形展厅门柱 $F \in \{4,5\}$ 时, $D=1$ 恒定, $W \in \{1,2,3\}$ 的数值模拟图。 $F=4$ 时, 整体的疏散时间变化与常规相符。 $W=1$ 时, 在 125 人之前, 疏散时间的增长近乎线性, 在人数攀升至 150 人时疏散时间几乎不变。 $W=2$ 时, 疏散时间变化剧烈, 整体增幅很大。 $W=3$ 时, 低密度的疏散时间以一种极小的幅度在延长, 随之其后的是大幅且剧烈地上升, 和 $W=2$ 一样, 在 100 人至 125 人的区间增速稍缓。疏散时间最短的疏散方案, 在低密度情况时为 $W=3$, 中高密度则是 $W=3$ 。

$F=5$ 时, 出现了疏散时间反常下降的情况。 $W=1$ 时, 100 人之前的疏散时间增长逐渐放缓, 但增幅依旧在高位, 100 人之后, 尽管有小幅波动但疏散时间反常下降。 $W=2$ 时, 疏散时间随疏散人数的变化非常剧烈, 尽管 100 人之后有一定减缓, 但整体的增幅巨大。 $W=3$ 时, 整体疏散时间平稳上升。疏散时间最短的疏散方案无论何种密度均为 $W=3$ 。

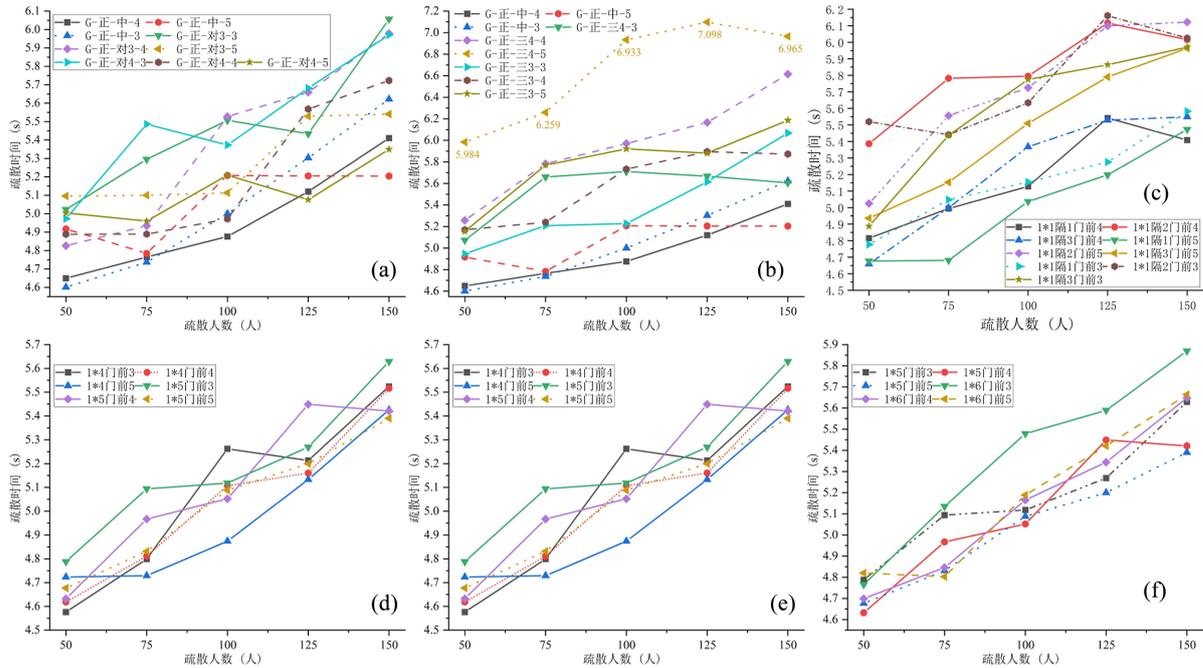
矩形展厅的门柱布置, 低密度时 $F=4$ 、 $W=3$ 的门柱疏散时间最短, 100 人时是 $F=5$ 、 $W=3$ 的门柱, 高密度时为 $F=4$ 、 $W=1$ 的门柱。但 100 人时, $F=5$ 、 $W=3$ 的门柱和 $F=4$ 、 $W=1$ 的门柱两种疏散方案相差不超过 0.05 秒, 可忽略。

图 7(a)展示了高展柜在正方形展厅中线布置 3 至 5 个、关于中线相隔 3 至 4 米对称布置 3 至 5 个的疏散数值模拟图。高展柜沿中线布置时, 布置数量为 3 时, 疏散时间随疏散人数的增多而升高, 低密度时增长较缓, 中高密度以相对更快的速率增长, 近乎线性; 布置数量为 4 时, 100 人之前, 维持着类似布置数量为 3 在低密度时的疏散速率, 后速率加快, 但增幅相对不大; 布置数量为 5 时, 低密度情况疏散时间反常降低, 不低于 100 人时疏散时间变久后维持不动。该高展柜布置情况下, 疏散时间最快的为布置 3 个, 但与布置 4 个的疏散时间相差约 1%; 中高密度疏散效率最高的为沿中线布置 4 个高展柜。

中线对称布置高展柜时, 相隔 3 米的情况下, 布置三对时, 疏散人数不超过 100 人, 疏散时间随疏散人数平稳上涨, 125 人时疏散时间出现反常下降, 后以接近三倍的增长速率大幅升高; 布置四对时, 低密度的疏散时间以稳健的步伐上升, 中密度区间的增长速率先升高后降低, 整体疏散时间呈上升态势, 高密度区间增速再次小幅上涨; 布置五对时, 100 人之前疏散时间几乎不变, 密度达到高密度后, 疏散时间上升 10%后再次不变。整体来看, 低密度疏散时间最短的是布置 4 对, 中密度的则变为布置 5 对, 高密度回到布置 4 对。

相隔四米的情况下, 布置三对时, 除去疏散人数为 100 人这一情况, 疏散时间随疏散人数“高歌猛进”, 低密度比高密度增势更猛, 100 人时疏散时间出现反常下降; 布置四对时, 疏散时间在低密度区

间有轻微向下波动的态势，时间几乎不变，中密度区间增速先慢后快，疏散时间大幅上涨，高密度区间增速放缓，增幅变小，疏散效率变低的趋势不变；布置五对时，低密度疏散时间小幅下降，中密度时疏散时间先上升后下降，相较于低密度来说有一定上升，高密度区间疏散时间再次上扬。整体来看，不超过 100 人时疏散时间最短的是布置 4 对，超过 100 人后则变为布置 5 对，侧面验证了合理布置障碍物反而可以缩短疏散时间。



(a) 高展柜中线、对称布置；(b) 高展柜对称、三排布置；(c) 门柱(d) L = 2 米或 3 米门墙；(e) L = 4 米或 5 米门墙；(f) L = 5 米或 6 米门墙

Figure 7. Evacuation time diagram for square exhibition halls with obstacles

图 7. 含障碍物正方形展厅疏散时间图

图 7(b)展示了高展柜在正方形展厅中线布置 3 至 5 个、沿中线三排布置 3 至 5 个相隔 3 至 4 米的疏散数值模拟图。沿中线布置仅作为对照使用，这里着重分析三排布置。三排布置相隔 3 米情况下，疏散时间随布置展柜数量的增加而延长。相隔 3 米布置 3 组，低密度时疏散时间缓慢增长，中密度时先不变后增长，高密度维持中密度增长速率，整体疏散时间上升；布置 4 组时，低密度情况近乎不变，中密度增速先快后慢，时间整体增长，高密度有微弱下降趋势；布置 5 组时，低密度大幅上涨，中密度“先涨后降”，高密度平稳上涨，整体涨幅中等。除 150 人时，布置 4 组相较于布置 3 组的疏散时间低 2%，其余情况均为布置 4 组疏散时间较短，疏散效果较好。

三排布置相隔 4 米情况下，疏散时间随布置展柜数量的增加而大幅延长。相隔四米布置 3 组，低密度时疏散时间迅速增长，中高密度缓慢下落，疏散时间维持在相对稳定水平；布置 4 组时，疏散时间对疏散人数的敏感性始终维持在一定水平，总体疏散时间持续上涨，中密度区间相对而言增速平缓；布置 5 组时，疏散时间始终处于高位，低密度小幅升高，中密度“先快后慢”地拉高时间，高密度以微弱的波动下降，整体涨幅不小。

正方形展厅的高展柜布置，沿中线布置时，不知总数量取较小值疏散效果最好；关于中线对称布置时，相隔四米布置 4 对的方法也具有一定优势；三排布置时，相隔 3 米布置三组在除最高密度时都是最

优解，最高密度时可采用相隔四米布置三组的布展方法来保障游览群众的生命安全。

图 7(c)展示了正方形展厅门柱 $F \in \{3, 4, 5\}$ 时, $D = 1$ 恒定, $W \in \{1, 2, 3\}$ 时的数值模拟图。 $F = 3$ 时, $W = 1$ 疏散时间最短, 相较于另外两间隔距离优势明显。 $W = 1$ 情况下, 疏散时间始终维持上升势头, 低密度和高密度增速相对较快, 中密度增速平缓; $W = 2$ 情况下, 低密度时疏散时间小幅下降, 中密度增速先慢后快, 疏散时间增幅巨大, 高密度时疏散时间再次下降, 总体疏散时间变化趋势为增长; $W = 3$ 情况下, 低密度增势迅猛, 中高密度在维持整体时间上涨不变的前提下增速逐渐降低, 整体涨幅极大。

$F = 4$ 时, $W = 1$ 疏散时间最短。 $W = 1$ 情况下, 疏散时间增速在 100 人后大幅上涨, 高密度时疏散时间下降; $W = 2$ 情况下, 低密度时疏散时间上涨明显, 中密度时疏散时间先不变后上涨, 高密度时疏散时间再次下降, 总体疏散时间变化趋势为波动增长; $W = 3$ 情况下, 中低密度增势迅猛, 但增幅中等, 高密度情况增幅大幅减小, 增速迅速回落。

$F = 5$ 时, 疏散效率最高的是 $W = 1$, 相较于其余情况的疏散时间有较大降低。 $W = 1$ 情况下, 中低密度疏散时间始终变长, 增速在 100 人后大幅上涨, 高密度时疏散时间下降; $W = 2$ 情况下, 低密度时疏散时间上涨明显, 中密度时疏散时间先不变后上涨, 高密度时疏散时间再次下降, 总体疏散时间变化趋势为波动增长; $W = 3$ 情况下, 中低密度增势迅猛, 但增幅中等, 高密度情况增幅大幅减小, 增速迅速回落。

正方形展厅的门柱布置, 间隔取较小值一米, 离出口距离取较大值五米的布置方法可作为疏散最佳方案。该种方案在中高密度时不会大幅上涨, 更具安全性。

图 7(d)展示了正方形展厅门墙 $F \in \{3, 4, 5\}$ 时, $L \in \{2, 3\}$ 的数值模拟图。 $L = 2$ 时, $F = 5$ 在所有已研究密度情况下均具有最佳表现。 $F = 3$, 低密度区间随着疏散总人数的增多疏散时间反而会下降; 中密度时疏散时间缓慢随密度加密而升高; 高密度后增加剧烈, 增幅巨大。 $F = 4$, 低密度时疏散时间平缓增加; 中密度区间增速先稍放缓后剧烈攀升; 高密度区间疏散时间有小幅下降。 $F = 5$, 除 100 人时疏散时间微弱下降, 其余人数时均平稳增长。

$L = 3$ 时, 除 100 人时 $F = 4$ 有约 2% 的优势外, $F = 5$ 在其余密度情况具有较短疏散时间。 $F = 3$, 低密度区间疏散时间随着疏散总人数的增多而延长; 中密度区间先上升后下降至中密度起始左右疏散时间; 高密度疏散时间有小范围增长。 $F = 4$, 低密度区间疏散效率有所提高, 疏散时间降低; 中密度区间疏散时间逐步上升, 增长速率逐步加快; 高密度区间, 尽管疏散时长依旧在增长, 但增长速率有所放缓。

图 7(e)展示了正方形展厅门墙 $F \in \{3, 4, 5\}$ 时, $L \in \{4, 5\}$ 的数值模拟图。 $L = 6$ 时, 除疏散人数 50 人时 $F = 3$ 有无微弱优势外, 其余情况 $F = 5$ 均表现出色。 $F = 3$, 低密度区间疏散时间变化符合常规认识; 中密度时疏散时间先大幅剧烈上升后小幅下降; 高密度疏散时间总长再次上升。 $F = 4$, 疏散时间总体维持上升趋势, 除中密度区间有一定放缓近乎持平外, 其余区间均稳步上升。 $F = 5$, 除 100 人时疏散时间微弱下降, 其余人数时均平稳增长。

$L = 5$ 时, 除 100 人时 $F = 4$ 有约 2% 的优势外, $F = 5$ 在其余密度情况具有较短疏散时间。 $F = 3$, 低密度区间疏散时间随着疏散总人数的增多而延长; 中密度区间先上升后下降至中密度起始左右疏散时间; 高密度疏散时间有小范围增长。 $F = 4$, 低密度区间疏散效率有所提高, 疏散时间降低; 中密度区间疏散时间逐步上升, 增长速率逐步加快; 高密度区间, 尽管疏散时长依旧在增长, 但增长速率有所放缓。 $F = 5$, 低密度区间疏散时间轻微向下波动; 中高密度区间上, 疏散时间大幅上涨, 增长速率逐渐提高。

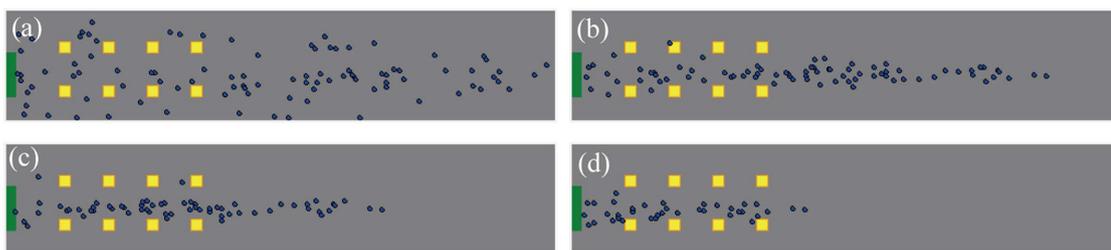
图 7(f)展示了正方形展厅门墙 $F \in \{3, 4, 5\}$ 时, $L \in \{5, 6\}$ 的数值模拟图。 $L = 5$ 作为对比使用。 $L = 6$ 时, 尽管在 75 人时, $F = 5$ 有非常微小的疏散时间减少, 但整体来看 $F = 4$ 的疏散效率整体领先, 为疏散最优解。 $F = 3$, 疏散时间的增长可以用“高歌猛进”来形容, 中密度区间出现一定放缓, 但并不影响整体疏散时间的大幅上涨。 $F = 4$, 疏散时间总体维持上升趋势, 疏散时间增长速率经历了提升-降低-再提

升的过程。 $F=5$ ，低密度区间疏散时间下降，中高密度疏散时间均大幅延长。

正方形展厅的门厅布置，低密度时选择墙长 3 米，距出口五米的展示墙，中高密度可选墙长 2 米，距出口五米的展示墙。均可取得整体较短的疏散时间。墙长 3 米展示墙在中密度有跃层现象，高密度时增幅明显，需引起注意。

3.4. 动力学分析

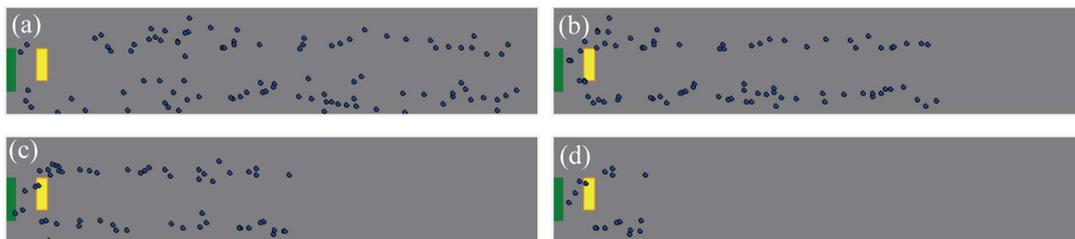
为更深入了解疏散群体的特征，探索相关动力学变化，选取不同障碍物布置情况中的典型情况进行分析。总疏散人数定为中密度的 100 人，矩形展厅分别选取沿出口中线相隔 3 米布置四对高展柜， $F=3$ 、 $L=3$ 即距离出口 3 米、长 3 米、宽一米的门墙；正方形展厅分别选取沿出口中线相隔 3 米布置三行每行 3 个高展柜，以及 $F=5$ 、 $W=3$ 即距离出口五米、相隔距离 3 米、边长为一米的正方形门柱。



(a) $T=0$; (b) $T=3$; (c) $T=8$; (d) $T=15$

Figure 8. Rectangular exhibition hall high exhibit evacuation spatio-temporal evolution spot map
图 8. 矩形展厅高展柜疏散时空演化斑图

图 8 展示了矩形展厅 100 人时，左侧 3 米单出口，沿出口中线相隔 3 米布置四对高展柜的行人疏散 Python 仿真实时空演化斑图。初始时刻人群随机分布， $T=3$ 时行人排队行为明显，集群行为使得行人在队列中段进入障碍物区域出现小团体， $T=8$ 时行人的集群行为在障碍物间隔部分愈发明显， $T=15$ 时小团体抵达出口附近，出口行人密度增加。



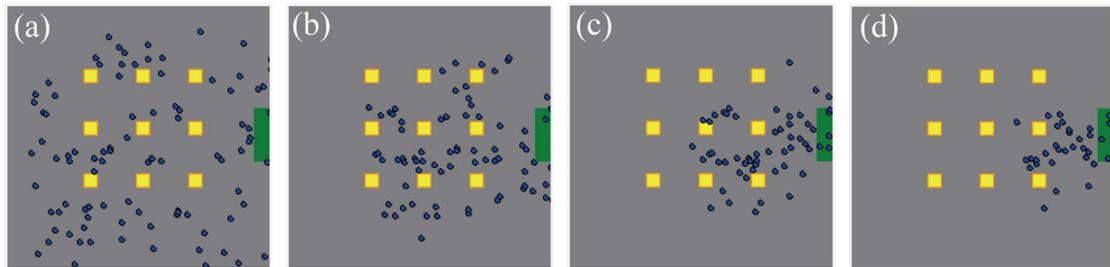
(a) $T=0$; (b) $T=3$; (c) $T=8$; (d) $T=15$

Figure 9. Rectangular exhibition hall door wall evacuation spatio-temporal evolution spot map
图 9. 矩形展厅门墙疏散时空演化斑图

图 9 展示了矩形展厅 100 人时，左 3 米单出口， $F=3$ 、 $L=3$ 布置门墙的行人疏散 Python 仿真图。不难看出，门墙的存在使得行人自发在疏散过程初始时刻人群随机分布， $T=3$ 时行人排队行为明显，集群行为已经使得行人在队列中段进入障碍物区域出现小团体， $T=8$ 时行人的集群行为在障碍物间隔部分愈发明显， $T=15$ 时小团体在出口附近出现，出口附近的行人的速度降低而密度增加。

综合来看，矩形展厅内含障碍物时，参与疏散的行人排队行为十分明显且贯穿始终，集群行为也会逐渐发展成为小团体，出口附近反而并未出现明显的拥堵。

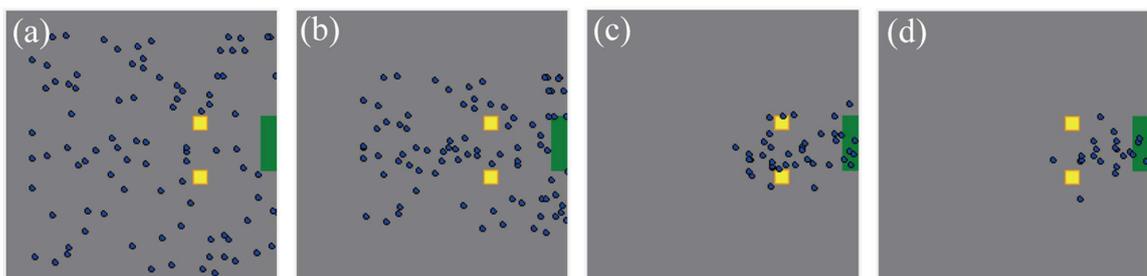
图 10 展示了正方形展厅 100 人时，右侧 3 米单出口，相隔 3 米布置三行每行 3 个高展柜的行人疏散 Python 仿真图。可以看到疏散开始后，行人向出口运动会穿过障碍区，在障碍区内，行人的集群行为明显，并快速发展出小团体。大部分行人运动到出口附近时，会展现明显的排队行为和成拱行为。



(a) $T=0$; (b) $T=2$; (c) $T=4$; (d) $T=6$

Figure 10. Spatial and temporal evolution of the square exhibition hall high display case pedestrian evacuation spot map
图 10. 正方形展厅高展柜行人疏散时空演化斑图

图 11 展示了正方形展厅 100 人时，右侧 3 米单出口背景下， $F=5$ 、 $W=3$ 边长为一米的正方形门柱的行人疏散 Python 仿真图。从图中不难看出，随着疏散的进行，行人成拱行为愈发明显，在出口附近和门柱附近分别形成了两个拱形，这一定程度上证明了障碍物对成拱行为的疏导作用。



(a) $T=0$; (b) $T=2$; (c) $T=4$; (d) $T=6$

Figure 11. Spatio-temporal evolution of the square exhibition hall gateposts for pedestrian evacuation spot map
图 11. 正方形展厅门柱行人疏散时空演化斑图

综合来看，正方形展厅内含障碍物时，参与疏散的行人成拱行为十分明显，且并不局限于在出口附近成拱，也可能在障碍物附近成拱，这一行为有可能导致拥堵。

4. Pathfinder 验证对比

经过仿真发现 Pathfinder 并不能准确反应博物馆展厅内含障碍物的行人疏散时间，因此不再进行疏散时间的数值对比，而是把重点放在相关动力学分析上。

4.1. 模型参数设定

利用 Pathfinder 中的 Room 选项搭建高展柜、门墙、门柱障碍物，障碍物类型的 Room 不允许行人穿行。高展柜和门柱都是边长为 1 米的正方形 Room，具体位置严格按照 Python 中的布置，根据不同疏散展厅背景修改为对应的布置方案。门墙根据不同的疏散工况，在规定的门前距离绘制宽为 1 米的矩形 Room。图 12 为矩形展厅左侧 3 米单出口，沿出口中线相隔 3 米布置四对高展柜在 Pathfinder 中的建模示意图，紫色部分为展厅，绿色部分为出口，四对彩色小正方形为高展柜。

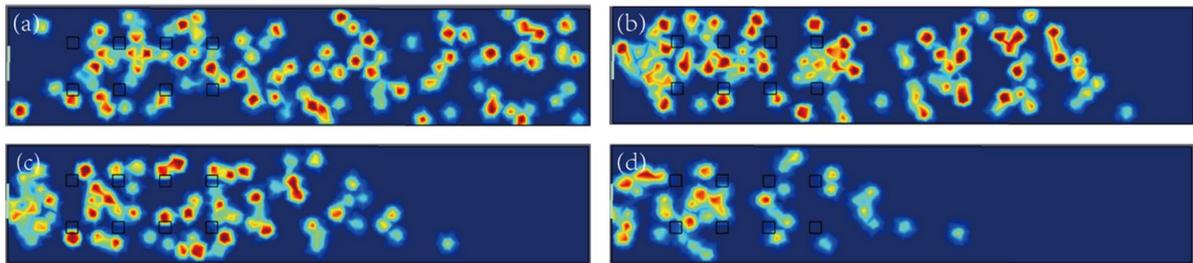


Figure 12. Pathfinder modeling schematic
图 12. Pathfinder 建模示意图

用 Occupants 按钮添加行人，添加人员时设定为随机分布，行为模式设为前往任意出口，分别添加数量为 50 的行人一组、数量为 25 的行人四组，通过对群体切换 Enable 和 Disable 状态，完成对不同总数随机分布人群可用状态的切换，进而调整参与疏散的总人数。对这些参与仿真的疏散主体进行自定义：疏散时人群行走速度服从(0.705,1.975)区间上的均匀分布，单位米每秒；人群身高服从(1.5,1.85)区间上的均匀分布，单位米；肩宽服从(33,45)区间上的均匀分布，单位厘米；缩减值设定为 0.7，即拥堵情况下 0.7 倍肩宽即可通过。

4.2. 动力学对比

Pathfinder 动力学对比中，控制变量为总疏散人数和出口布置，总疏散人数为 100 人，出口均为 3 米长，矩形展厅为左侧单出口，正方形展厅为右侧单出口，选取典型情况为：矩形展厅研究了四对高展柜沿出口中线相隔 3 米布置，距离出口 3 米、长 3 米、宽一米的门墙；正方形展厅研究了三行每行 3 个沿出口中线相隔 3 米布置的高展柜，距离出口五米、相隔 3 米、边长为一米的正方形门柱。

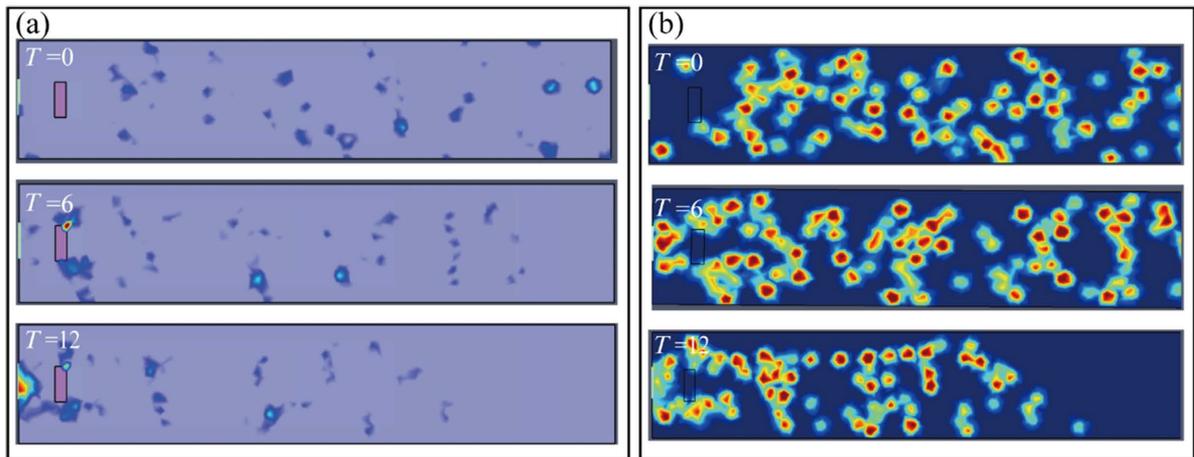


(a) $T = 1$; (b) $T = 7$; (c) $T = 15$; (d) $T = 25$

Figure 13. Evolution of the evacuation speed in rectangular exhibition halls with high display cases
图 13. 矩形展厅高展柜行人疏散速度演化图

图 13 展示了矩形展厅 100 人时左侧为 3 米单出口，障碍物为高展柜，数量为四对，布置方式为沿出口中线相隔 3 米布置，在 Pathfinder 中的行人疏散演化图。可以看出，疏散过程中行人集群行为明显，对速度有一定负面影响。出口附近行人的密度会随小团体的抵达上升，同时小团体会出现速度下降的情况，与图 8 所得结论相同。

图 14 展示了矩形展厅 100 人时左侧为 3 米单出口，障碍物为门墙展柜，尺寸为距离出口 3 米、长 3 米、宽一米，在 Pathfinder 中的行人疏散演化图。可以看到拥堵位置为门墙上侧转角和出口附近，行人的成拱行为在出口附近表现明显。拥堵形成机理为行进速度降低而不断有人进入该区域，速度进一步无法提升，密度却不断上升，最终形成拥堵。门墙对出口附近成拱行为的干扰具有积极作用，有一定疏散拥堵的作用。



(a) 密度; (b) 速度

Figure 14. Evolution of the rectangular exhibition hall door wall for pedestrian evacuation**图 14.** 矩形展厅门墙行人疏散演化图

综合来看, 矩形展厅内含障碍物时, 参与疏散的行人, 集群行为明显, 小团体出现概率较高, 排队行为十分明显且贯穿始终, 出口附近的拥堵被障碍物疏散。

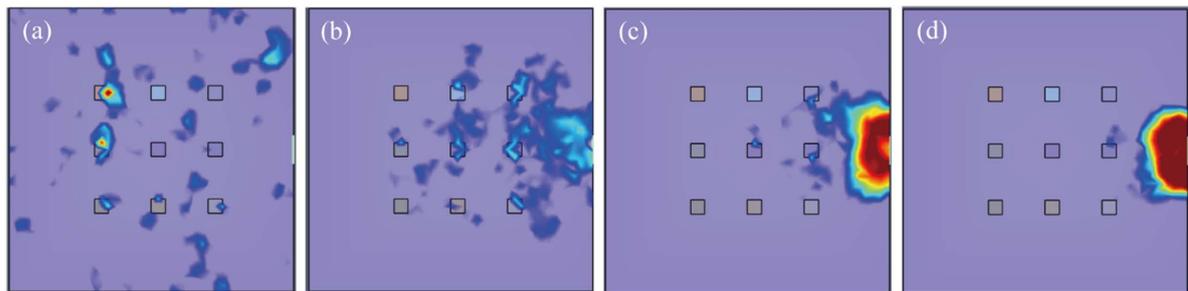
(a) $T=0$; (b) $T=6$; (c) $T=12$; (d) $T=18$ **Figure 15.** Evolution of the rectangular exhibition hall door wall for pedestrian evacuation**图 15.** 正方形展厅高展柜行人疏散密度演化图

图 15 展示了矩形展厅左侧 3 米单出口 100 人时, 障碍物为每行 3 个沿出口中线相隔 3 米布置的高展柜, 在 Pathfinder 中的行人疏散密度演化图。开始时刻, 障碍物区域内出现了高密度点位, 与实际展览情况游客围绕高展柜参观情况相符。行人疏散会穿越障碍区, 运动到出口附近时, 行人的成拱行为极为明显, 且持续时间较长, 这与图 12 所得动力学结论相符, 但障碍区内, 行人的集群行为并没有像图 10 中一样表现出高密度, 表现更明显的为障碍区内的行人排队行为。

图 16 展示了矩形展厅左侧 3 米单出口 100 人时, 障碍物为离出口五米、相隔 3 米、边长为一米的正方形门柱, 在 Pathfinder 中的行人疏散排队服务水平演化图。行人的成拱行为不只局限在出口, 在障碍物附近也出现了拱形, 但门口的排队行为和成功行为明显比障碍物附近更加明显, 再次证明了图 11 所得障碍物对拥堵的疏导作用。

综合来看, 正方形展厅内考虑障碍物的行人疏散, 疏散过程中行人会表现出非常明显的成拱行为, 在出口附近和障碍附近均会成拱, 但出口附近的拱形密度更高、持续时间更长。一定程度上证明了障碍物的布置对缓解拥堵有正面作用, 但依旧需要注意出口处拱形持续时间长带来的踩踏风险。

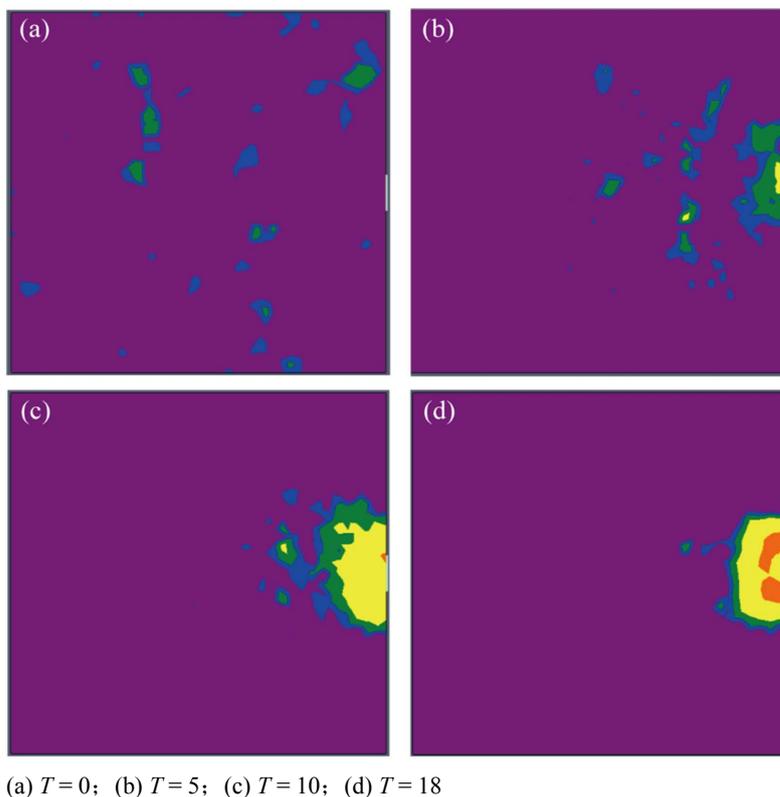


Figure 16. Evolution of the level of service for the evacuation queue of pedestrians at the gate pillars of the square exhibition hall

图 16. 正方形展厅门柱行人疏散排队服务水平演化图

5. 结论

本文基于元胞自动机理论，结合势能场定义，考虑不同障碍物布置等特性，建立了含障碍物的博物馆展厅行人疏散模型，数值模拟研究了不同障碍物种类、数量、布置对不同密度人群疏散效率和疏散过程的影响。结果表明：

1) 高展柜沿中线布置时，疏散效果最佳方案为布置 4 个；关于中线对称布置时，低密度时疏散时间最短的为布置 4 对，在中高密度时变为 5 对，相隔间距的增大对提高疏散效果有贡献。

2) 矩形展厅疏散时间最短的门墙布置方案是距门 3 米，宽度 3 米的门墙，正方形展厅则是墙长 2 米，距出口五米。

3) 展厅的门厅区域有装饰柱类障碍物时，间距缩小一些反而有利于疏散的进行。矩形展厅选择门前距离 4 米，间距 1 米的布置方法，正方形展厅则是门前距离 5 米，间距 1 米的布置更为符合安全要求。

4) 矩形展厅内行人疏散过程中会伴随排队行为，也会出现明显的集群行为乃至形成小团体，但出口处未出现拥堵，障碍物可以疏散拥堵点；正方形展厅内行人疏散，行人的成拱行为在出口附近和障碍物附近均表现明显，障碍物的存在一定程度会降低出口处的拱形大小。

本文提出的考虑障碍物的博物馆展厅内行人疏散模型可有效仿真实际疏散情况，所得动力学结论经检验具有一定普适性，可以用于实际疏散研究。

基金项目

本文受到山西省回国留学人员科研教研资助项目，2022-159 的资助。

参考文献

- [1] 况凯骞, 吴斌斌, 肖修昆, 等. 大型博物馆文物库房防火分隔与人员疏散消防设计[C]//中国消防协会. 2013 中国消防协会科学技术年会论文集: 2013 年卷. 北京: 中国科学技术出版社, 2013: 397-403.
- [2] 鲍勇, 陈娟娟, 方正. 现代大型博物馆消防设计分析[J]. 消防科学与技术, 2017, 36(6): 785-787.
- [3] 孙李娟, 吴晓明, 丛北华, 韩新, 邓慧勇, 唐淼. 某博物馆火灾人员安全疏散模拟分析[J]. 灾害学, 2010, 25(S1): 370.
- [4] 章震. 贵州省博物馆新馆的人员疏散安全评估[J]. 消防技术与产品信息, 2012(4): 48-51.
- [5] 包其富, 陈娟. 障碍物对房间人群疏散过程影响的宏观模拟研究[J]. 安全与环境学报, 2010, 10(6): 202-206.
- [6] 何栋梁. 步行设施内存在障碍物的空间布局特征与行人疏散仿真[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2017.
- [7] 陈文鑫. 空间障碍物影响下的行人疏散仿真研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2019.
- [8] 李梁. 基于行人动力学模型的人群疏散瓶颈缓解方法研究[D]: [博士学位论文]. 济南: 山东师范大学, 2020.
- [9] 林霖, 林鹏. 出口设置障碍物对非理性疏散的影响研究[J]. 中国高科技, 2017, 1(7): 36-38.
- [10] 安旭, 袁宝明, 陈国芳. 对称障碍物对瓶颈处行人拱形的影响研究[J]. 消防科学与技术, 2022, 41(9): 1217-1222.
- [11] 刘华, 金文庭. 基于社会心理模型的不同障碍物人员疏散仿真[J]. 安全与环境学报, 2022, 22(3): 1442-1449.