

基于出口均衡算法的疏散路径优化模型

赵曼曼¹, 房志明^{1,2}, 黄中意^{1,2}, 张 典¹, 李晓恋^{3*}

¹上海理工大学管理学院, 上海

²上海理工大学智慧应急管理学院, 上海

³福建警察学院治安系, 福建 福州

收稿日期: 2024年12月8日; 录用日期: 2025年1月1日; 发布日期: 2025年1月13日

摘 要

以某高校教学楼为研究实例, 构建了疏散网络模型, 并基于最短路径确定初始疏散方案。在此基础上, 提出一种基于出口树均衡的疏散路径优化模型, 调整初始疏散方案中节点的归属平衡不同出口清空时间, 并提出出口清空时间的快速估算方法。多种教学楼疏散场景的优化结果经Pathfinder验证表明, 出口最大清空时间均有所下降, 疏散时间平均下降 15.97 ± 10.45 s, 尤其在高密度下的表现更好; 优化模型出口清空时间与Pathfinder结果虽然存在一定误差, 但相关性分析结果表明二者的变化趋势较为一致; 优化模型运行耗时均在0.9 s以内, 结合高效的微观疏散仿真工具, 可为大型建筑的疏散路径实时优化提供新方法。

关键词

出口均衡, 疏散路径, 优化算法, 仿真, Pathfinder

Evacuation Path Optimization Model Based on Exit Equilibrium Algorithm

Manman Zhao¹, Zhiming Fang^{1,2}, Zhongyi Huang^{1,2}, Dian Zhang¹, Xiaolian Li^{3*}

¹School of Business, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

²School of Intelligent Emergency Management, University of Shanghai for Science & Technology, Shanghai

³Department of Public Security, Fujian Police College, Fuzhou Fujian

Received: Dec. 8th, 2024; accepted: Jan. 1st, 2025; published: Jan. 13th, 2025

Abstract

Taking a university teaching building as a research example, an evacuation network model is constructed, and the initial evacuation scheme is determined based on the shortest path. On this basis,

*通讯作者。

文章引用: 赵曼曼, 房志明, 黄中意, 张典, 李晓恋. 基于出口均衡算法的疏散路径优化模型[J]. 建模与仿真, 2025, 14(1): 147-157. DOI: 10.12677/mos.2025.141015

an evacuation path optimization model based on exit tree equilibrium is proposed to adjust the attribution of nodes in the initial evacuation scenario to balance different exit clearing times, and a fast estimation method of exit clearing time is proposed. The optimization results of various teaching building evacuation scenarios are verified by Pathfinder, which shows that the maximum exit clearing time decreases, and the evacuation time decreases by 15.97 ± 10.45 seconds on average, especially in high density; although there is a certain error between the optimization model exit clearing time and the results of Pathfinder, the results of the correlation analysis show that the two trends are more consistent; the running time of the optimization model is consistent; the running time of the optimization model is not very long. The optimization model takes less than 0.9 seconds to run, which, combined with the efficient microscopic evacuation simulation tool, can provide a new method for real-time optimization of evacuation paths in large buildings.

Keywords

Exit Equilibrium, Evacuation Path, Optimization Algorithm, Simulation, Pathfinder

Copyright © 2025 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

近年来,随着城市化进程的加快和高层建筑的普及,火灾、地震等突发事件对建筑物内人员的疏散提出了严峻的挑战。尤其在高密度建筑中,人员密集、疏散路径复杂,一旦发生紧急情况,快速有效地疏散成为确保人员安全的关键。因此,如何设计合理的疏散路径,提高疏散效率,减少人员伤亡,已成为建筑设计 and 安全管理的重要研究方向。

传统的疏散路径规划方法大多基于最短路径算法,如 Dijkstra 算法、A*算法和蚁群算法等。何梦男等人[1]提出一种基于元胞自动机的全局最短路径(GSPCA)优化算法,并将该算法与 A*算法进行最短路径规划对比试验,分析了优化算法的特点和适用性;郑霞忠等人[2]针对多出口疏散情况,修正了 Dijkstra 算法的目标函数,验证模型在疏散总时间上的优化效果;Zhang H 等人[3]利用 Dijkstra 算法作为基础,结合广度优先搜索策略,避开障碍点,动态更新疏散路径;王丽等人[4]、应泽光等人[5]和张华军等人[6]分别提出了基于自适应步长策略和改进 A*算法的疏散路径规划方法;梁江涛等人[7]提出一种改进蚁群算法的动态路径规划模型,优化了启发函数和避免死锁策略,并结合烟花算法进行路径规划。这些方法主要考虑疏散路径的长度,力求找到从起点到安全出口的最短路径。然而,在实际疏散过程中,路径的长度并不是唯一的考虑因素。建筑物内部结构复杂,各种障碍物、瓶颈和危险区域可能影响疏散速度 and 安全性。同时,不同疏散出口的负荷不均衡也会导致一些出口过于拥挤,从而延长疏散时间,引发踩踏等次生灾害。

为了应对上述问题,近年来研究者们提出了多种基于不同优化目标的疏散路径规划方法。例如,考虑拥堵情况的动态疏散模型、基于风险评估的路径选择方法,以及结合人员行为特征的疏散模拟等。袁丹灿等人[8]建立了基于网络流理论的多参数耦合人群疏散路径优化模型,并提出了基于 Dijkstra 算法的多参数耦合动态约束路径择优的算法;董崇杰等人[9]通过改进布谷鸟算法的搜索多样性,实现人群疏散的多目标优化;魏娟等人[10]通过改进社会力模型,结合粒子鸽群算法,实现了多出口环境下的疏散优化;郭海湘等人[11]利用 Anylogic 仿真,引入意识程度因素,改进社会力模型,提出分区引导和出口结构优

化方案; Guan W 等人[12]提出了一种双目标路径规划模型,同时考虑路径风险和长度,并采用改进的 Dijkstra 算法求解。这些方法在一定程度上提升了疏散效率 and 安全性,但仍存在一些不足,如计算复杂度高、实时性差、对建筑结构变化的适应性不足等挑战。

本文提出了一种基于出口均衡算法的疏散路径优化模型,旨在通过快速调整每条路径的疏散方向,平衡不同出口使用率、缓解局部拥堵、减少疏散时间,从而满足疏散优化的实时性需求。

2. 疏散网络模型与初始疏散方案

2.1. 网络模型构建

将疏散路径用拓扑网络 G 进行表示:所有可通行区域用边 $e_{i,j}$ 表示,且所有可能成为瓶颈的地方,如门、通道变窄处、地形转换处等,都要用单独的边表示。节点 v_i 表示边的衔接,不占据任何实际物理空间,其中出口节点用 t_i 表示。

根据上述定义,某楼层可表示为如图 1 所示的拓扑网络。该楼层共有 6 个房间、2 部楼梯、1 个走廊,每个门以及与门对应的房间内区域可用一组边与节点的组合表示。以房间 1 为例, $e_{1,2}$ 表示房间内区域, $e_{2,18}$ 表示门。当房间较小时,可用一组边与节点的组合进行表示,如房间 1、房间 2、房间 4 和房间 5。对于较大的单出口房间,可用两条边分别表示房间的不同区域,如房间 3。对于有两个门的较大房间,可用两组边与节点的组合进行表示,如房间 6。

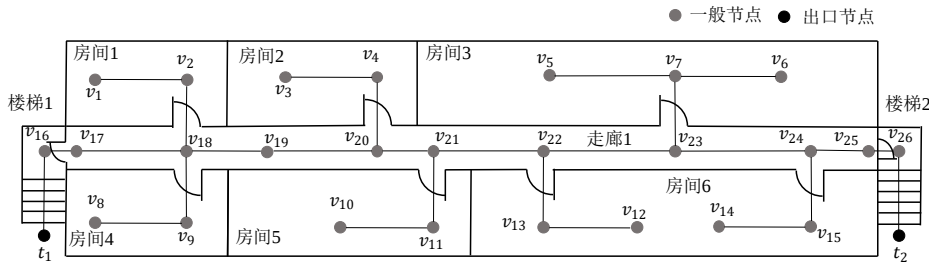


Figure 1. Schematic diagram of the network of building structures
图 1. 建筑结构的网络示意图

2.2. 初始疏散方案

以不同的出口节点为研究对象,以该出口节点 t_i 为根节点,建立最短路径树 T_i 。该树中从根节点 t_i 到其他顶点 v_i 的路径距离,在图中是从 t_i 到 v_i 的最短距离。沿最短路径树从节点 v_i 至出口 t_i 的方向,即为初始疏散方案。图 1 中网络的初始疏散方案如图 2 所示。由图可知,房间 1、2、4、5 人员从 t_1 出口疏散,而房间 3、6 人员从 t_2 出口疏散。

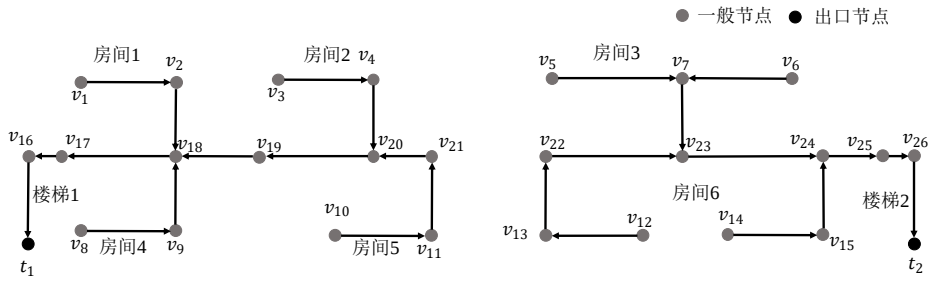


Figure 2. Initial evacuation plan H_0
图 2. 初始疏散方案 H_0

此方案下，属于最短路径树的每条边的疏散方向 $h_{i,j}$ 被指定， $h_{i,j}$ 的定义如下：

$$h_{i,j} = \begin{cases} 1, & \text{从 } v_i \text{ 指向 } v_j \\ -1, & \text{从 } v_j \text{ 指向 } v_i \end{cases} \quad (1)$$

当所有属于最短路径树的边的疏散方向确定时，即得到疏散方案 $H = \{h_{i,j} | e_{i,j} \in T_i\}$ 。值得注意的是，不属于任何最短路径树的边在此方案下被弃用，即不会有人经过此条边，如图 2 中的边 $e_{21,22}$ ，因此无需指定其疏散方向。在初始疏散方案 H_0 下，需利用疏散仿真模型获取每条边上的最大密度 $\rho_{i,j}^{\max}$ （单位为人/m²）以及每个出口的清空时间 c_i ，作为估算疏散方案调整后清空时间的依据。

3. 出口均衡算法

3.1. 出口均衡模型

由于初始疏散方案仅从路径长度的角度考虑，因此可能出现不均衡（不同出口节点清空时间不一致）的情况。本文建立的模型拟通过调整部分路径的疏散方向，让不同出口的清空时间尽可能一致（即所有出口在整个疏散过程中均满负荷使用）。基于该优化思想，建立的优化模型如下：

决策变量：每条边的疏散方向 $h_{i,j}$

$$H = \{h_{i,j} | e_{i,j} \in G\} \quad (2)$$

优化目标：找到一组决策变量 H ，使所有出口节点的最大清空时间最小

$$H = \operatorname{argmin}_H \max \{c_i(H)\} \quad (3)$$

式中： $c_i(H)$ 表示方案 H 下出口 t_i 的清空时间， s 。

约束条件：疏散路径满足建筑物拓扑结构约束，人群运动满足疏散规律约束。

3.2. 出口均衡模型求解

出口均衡模型的求解参考文献[13]中的方法，即通过调整部分边和节点的归属，让不同出口的清空时间尽可能相等，从而平衡各出口的使用率、降低总体疏散时间。具体步骤如下：

(1) 找到桥边，计算势能。桥边的两个节点分属不同的树，将其中对应清空时间更长的节点记为高节点，另外一个则为低节点。图 2 中，若 $c_1 > c_2$ ，则 v_{21} 为高节点， v_{22} 为低节点。由此可见，高节点和低节点可视为不同的水位，若想让不同出口的清空时间差减少，需将“高水位”的部分“液体”转移至“低水位”的通路，而“水位差”即为桥边的势能 $P_{i,j}$ ：

$$P_{i,j} = c_i - c_j \quad (4)$$

式中： c_i 是高节点 v_i 所在出口树的清空时间， s ； c_j 是低节点 v_j 所在出口树的清空时间， s 。

(2) 调整疏散方案，更新出口节点清空时间。选取势能最大的桥边（当有势能相同的桥边时，优先调整距离出口最远的桥边），将高节点的下游边切断，并将高节点连接至低节点完成一次调整，得到新的疏散方案 H_1 。如图 3 所示，经过调整之后，房间 5 的人群将从出口 2 离开建筑物。调整之后，需根据疏散方案 H_1 更新 c_i 和 c_j ，并记录此时出口清空时间的最大值 m ：

$$m(H_1) = \max \{c_i\} \quad (5)$$

(3) 判断是否终止迭代，输出最优路径。若调整前的最大清空时间 $m(H_0)$ 大于调整后的最大清空时间 $m(H_1)$ ，表明此轮迭代可以减小总疏散时间，令 $H_1 = H_0$ ，返回步骤(1)继续迭代；若 $m(H_0) \leq m(H_1)$ ，

停止迭代，并选取上一轮迭代的疏散方案 H_0 作为最终方案。

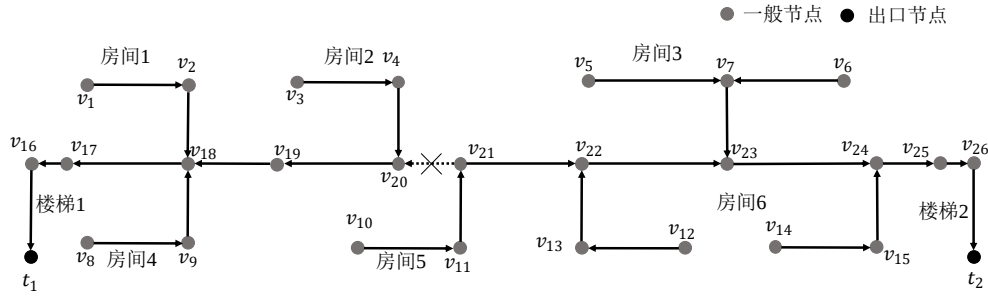


Figure 3. Revised evacuation plan H_1

图 3. 调整后的疏散方案 H_1

3.3. 出口清空时间估算方法

在 3.2 的求解算法中，步骤(2)需在疏散方案调整后更新出口清空时间。由于疏散优化对实时性要求较高，本文求解的原则是通过一定程度的简化，快速估算疏散方案的调整对不同出口节点清空时间的影响，从而在无需重新仿真的情况下完成疏散路径的优化。考虑到在人群大规模疏散时，影响疏散时间最主要因素是瓶颈的通行能力，模型基于瓶颈的通行估算节点清空时间。根据文献[14]，通道的流率随密度的增大先上升、后下降，且流率在 1.5 人/m² 时达到峰值，之后随着密度的增加，流率线性下降。因此，当边上的最高密度低于 1.5 人/m² 时，边为自由通行状态，超过 1.5 人/m² 则为拥堵状态，流率与密度的关系如下：

$$f_{i,j} = \begin{cases} 1.6, & \rho_{i,j}^{\max} \leq 1.5 \\ 1.6 - 0.6(\rho_{i,j}^{\max} - 1.5), & \rho_{i,j}^{\max} > 1.5 \end{cases} \quad (6)$$

式中： $\rho_{i,j}^{\max}$ 是边 $e_{i,j}$ 上的最大密度，人/m²。

如果边 $e_{i,j}$ 上的途径人数增加 n_j ，则当假设边上平均流率不发生变化时，其下游节点 v_j 的清空时间增加量 $\Delta c(v_j)$ 为：

$$\Delta c(v_j) = \frac{n_j}{f_{i,j} \times d_{i,j}} \quad (7)$$

式中： $d_{i,j}$ 为边 $e_{i,j}$ 的等效宽度，m。

针对任一出口节点 t_i ，其清空时间的增加值 Δc_i 为与之相连的树 T_i 上所有节点清空时间增加量的最大值：

$$\Delta c_i = \max \{ \Delta c(v_j) \mid v_j \in T_i \} \quad (8)$$

当由于疏散方案调整后，从某出口 t_i 离开的人减少，可按照相同的方法计算 Δc_i ，只是此时 Δc_i 为清空时间的减少值。上述流程可根据初始疏散方案 H_0 ，以及初始方案下所有边上最大密度 $\rho_{i,j}$ ，计算得到任何新方案 H_1 下各出口的清空时间 c_i 。

综合出口树均衡模型、求解方法以及出口清空时间估算方法，可得出出口树均衡算法，其流程如图 4 所示。由图 4 可知，算法的核心迭代部分只有 2 步，即“寻找桥边、计算势能”和“更新方案、计算出口清空时间”。前者的时间复杂度和边的数量成正比，后者的时间复杂度和调整前后途经边的数量成正比。

总体上看，每轮迭代的时间复杂度与边的数量线性相关，因此其时间复杂度是 $O(N_e)$ ，其中 N_e 是网络模型中边的数量，数量通常在几百到几千。出口树均衡算法所需时间与仿真模型的运行时间相比，可忽略不计。

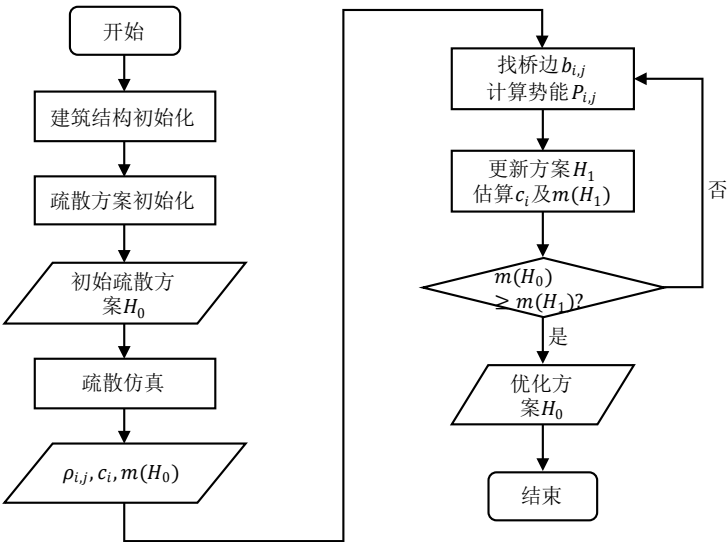


Figure 4. Optimization process flowchart
图 4. 优化程序流程图

4. 结果与讨论

本章节对某高校教学楼进行场景建模，采用出口均衡算法对教学楼疏散路径进行优化。利用人群疏散仿真软件 Pathfinder 对优化前后的方案进行对比，进而对本文提出方法的准确性和有效性进行验证。

4.1. 实验场景

某高校教学楼的 Pathfinder 模型如图 5 所示，该楼共有可用房间 33 间。水平走廊宽度为 2.2 m，垂直走廊宽度为 3.2 m，教学楼共有 t_1 、 t_2 、 t_3 ，3 个安全出口，宽度分别为 2 m、2 m、5 m。根据最短路径树生成的初始方案也绘制在图 5 中，共有与出口对应的三棵树。为了和优化模型中的疏散方案对应，在 Pathfinder 模型中添加薄墙以确保出口树覆盖区域的人群从指定出口离开。Pathfinder 仿真人员疏散行为模式选用 Steering 模式，人员行为设置为自由寻找任意安全出口 (Go to Any Exit)。

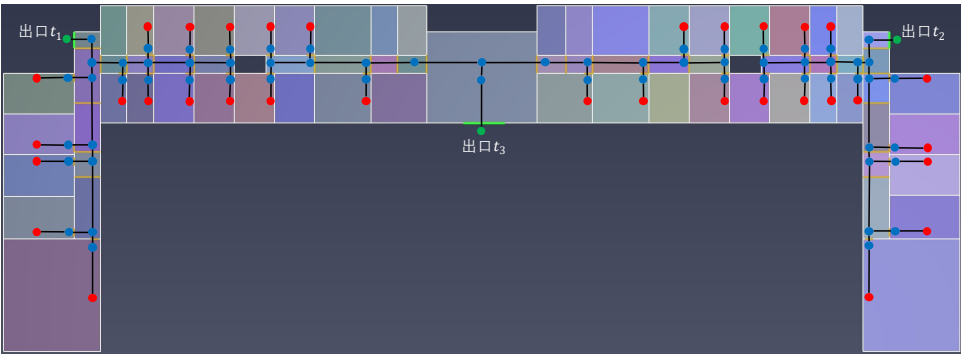


Figure 5. Model of the ground floor of the school building constructed by Pathfinder
图 5. Pathfinder 构建的教学楼一楼模型

在教学楼模型的基础上共设计九组实验, 实验设置如表 1 所示。假设每个教室有一个额定人数(即教室内的座椅数量), 教室划分为高、中、低密度, 分别对应额定人数的 1.5 倍、1.0 倍和 0.5 倍。以安全出口 t_3 为中心, 教学楼划分为左右两侧, 定义教室使用是否均衡: 左右教室使用数相等即为均衡、左侧教室使用数比右侧少 3 间为不均衡、左侧教室使用数比右侧少 8 间为极度不均衡。

Table 1. Experimental scenario

表 1. 实验场景

编号	密度	人员分布	人数
H-B	高(H)	均衡(B)	1372
H-U	高(H)	不均衡(U)	912
H-E	高(H)	极不均衡(E)	460
M-B	中(M)	均衡(B)	1238
M-U	中(M)	不均衡(U)	823
M-E	中(M)	极不均衡(E)	415
L-B	低(L)	均衡(B)	960
L-U	低(L)	不均衡(U)	638
L-E	低(L)	极不均衡(E)	322

4.2. 出口清空时间估算方法准确性验证

优化模型在迭代时, 需多次调整疏散方案以获得最优结果。以 H-B 实验为例, 优化过程中一共迭代了 4 次, 每轮迭代由算法估测的各出口清空时间以及 Pathfinder 软件按照此方案计算得到的结果如表 2 所示。

Table 2. Experimental H-B exit clearance time for different number of iterations

表 2. 不同迭代次数下实验 H-B 出口清空时间

迭代轮次		优化前	1	2	3	4
c_1/s	估算方法	-	157.33	157.33	119.35	157.33
	Pathfinder	195.3	176.10	174.60	154.70	173.80
c_2/s	估算方法	-	194.00	138.44	138.44	138.44
	Pathfinder	194.00	196.10	167.90	167.90	167.90
c_3/s	估算方法	-	110.46	132.67	153.43	132.67
	Pathfinder	89.70	102.00	112.10	122.80	110.70

由表 2 可知, 大部分情况下由清空时间估算方法得到的出口清空时间与 Pathfinder 的仿真结果存在一定误差(误差平均值为 16.66%), 且估算方法通常会过大估计路径调整带来的影响, 即不同清空时间增大或是减小的幅度会大于 Pathfinder 仿真结果。可能的原因是模型在估算清空时间的增加值时, 公式(1)取的是所有人同时经过不同节点引起变化量的最大值, 而在实际仿真过程中, 路径发生变化的人群并非同时抵达各节点, 会将造成的影响分散在不同节点。然而, 在优化的过程中决定迭代轮次的是不同出口清空时间的变化趋势。根据表 2, 此场景下优化模型与 Pathfinder 模型出口清空时间的变化趋势完全一致, 例如出口 t_1 的清空时间先减小后增大, 且在第三轮迭代时最小。因此, 可通过皮尔逊相关系数考察出口清空时间估算模型的准确性, 结果如表 3 所示, 其中 r_{H-B1} 表示实验 H-B 中, 出口 t_1 在四次迭代中,

由优化模型估算得到清空时间序列与 Pathfinder 仿真得到清空时间序列的相关系数, 其他符号的含义以此类推。

Table 3. Correlation coefficients of the optimization model with different exit clearance times in Pathfinder
表 3. 优化模型与 Pathfinder 中不同出口清空时间的相关系数

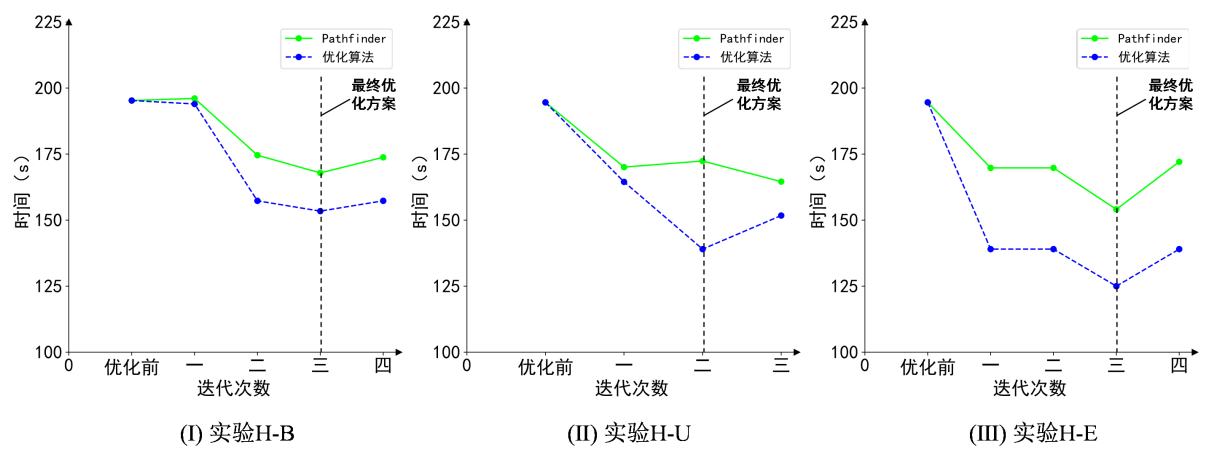
	t_1		t_2		t_3
r_{H-B1}	0.9955	r_{H-B2}	1.0000	r_{H-B3}	0.9936
r_{H-U1}	1.0000	r_{H-U2}	0.9913	r_{H-U3}	0.9162
r_{H-E1}	1.0000	r_{H-E2}	0.9914	r_{H-E3}	0.9247
r_{M-B1}	0.8929	r_{M-B2}	--	r_{M-B3}	0.8194
r_{M-U1}	1.0000	r_{M-U2}	--	r_{M-U3}	1.0000
r_{M-E1}	1.0000	r_{M-E2}	0.5774	r_{M-E3}	0.3938
r_{L-B1}	--	r_{L-B2}	0.5345	r_{L-B3}	0.5501
r_{L-U1}	1.0000	r_{L-U2}	1.0000	r_{L-U3}	0.2774
r_{L-E1}	0.9941	r_{L-E2}	1.0000	r_{L-E3}	0.7879

(注: “--” 表示在迭代过程中没有对出口进行调整)

观察表 3 数据, 绝大多数实验的 pearson 相关系数都在区间[0.5,1]内, 根据文献[15], 当 $0.5 < r(x, y) < 1$ 时, 表示变量 x 与 y 存在正向中、高度相关关系, 这表明在大多数情况下章节 2.3 中的估算方法得到的出口清空时间的变化趋势较为准确。此外, 相关系数在高密度、无论是否均衡情况下的值较大, 如实验 H-B、H-U 和 H-E 中, 三个出口的相关系数均大于 0.9, 这表明估算方法在高密度、无论人群分布是否均衡的情况下, 对路径调整后清空时间变化趋势的估计更加准确。对于相关系数在区间[0,0.5]内, 例如 r_{M-E3} 和 r_{L-U3} , 主要是因为出口 t_3 人群密度小, 没有形成拥堵, 影响出口清空时间的主要因素是疏散路径长度, 故通过调整出口的使用效果不明显。

4.3. 优化模型有效性验证

为了验证优化模型的有效性, 将出口均衡算法与 Pathfinder 每一轮次迭代的最大清空时间(即总疏散时间)进行对比, 结果如图 6 所示。



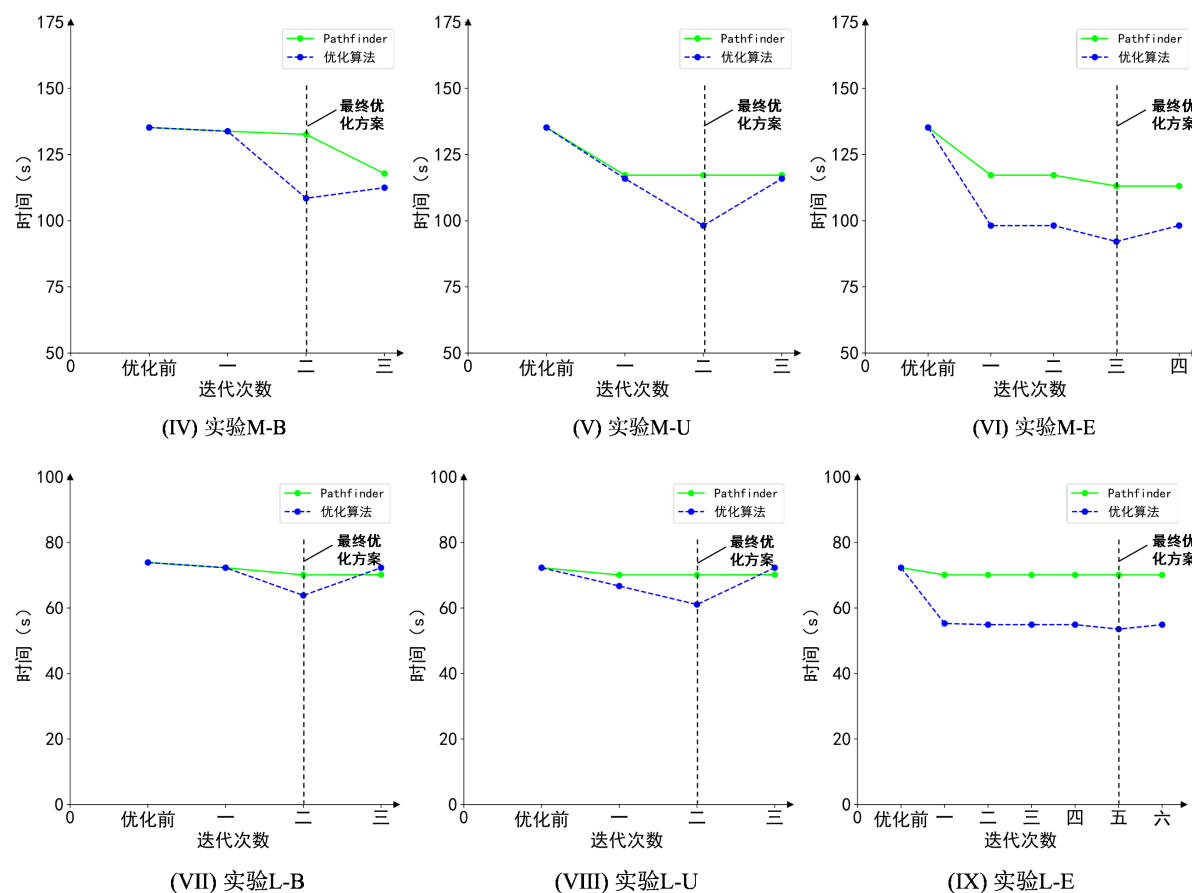


Figure 6. Comparison of total evacuation time between Pathfinder and exit equalization algorithms

图 6. Pathfinder 和出口均衡算法总疏散时间对比

由图 6 可以看出, 经过 Pathfinder 验证, 所有九组实验优化后的总疏散时间与优化前相比都出现了下降, 疏散时间平均下降 15.97 ± 10.45 s, 这表明出口均衡算法在九种场景中均有效。值得注意的是, 在部分场景(如 H-U、M-B)的最后一个轮次, Pathfinder 中疏散时间仍在下降, 而在优化模型中疏散时间已经开始上升进而结束了迭代进程, 导致优化模型并未找到最优解。造成这种现象的原因在于出口清空时间估算方法是以优化前的仿真结果为参考, 其准确性会随着迭代轮次的增加而下降。

此外, 由图 6 可知, 优化模型在高密度下的表现更佳, 人群分布均衡、不均衡和极度不均衡情况下疏散时间的减少量分别为: 27.4 s、22.2 s、40.5 s。通过观察高密度下 Pathfinder 的仿真结果, 发现它们的共同特点是个别出口持续拥堵时间较长、不同出口清空时间差距较大, 疏散效率低。出口均衡算法平衡各出口人员流通, 减少拥堵、提高流率, 因此高密度实验场景改善效果最明显。实验 H-B 中, 优化前后的拥堵情况如图 7 所示。

根据图 7, 优化前出口 t_2 闲置, 而出口 t_1 和 t_3 附近形成了两个面积较大的高密度区域。优化后出口 t_2 被有效利用, 高密度的区域面积大幅减小, 表明优化模型可有效减轻拥堵。最后, 利用 Python 语言实现的优化模型在一台个人电脑(Intel Core i7-13700F, 32GB RAM)上的运行时间, 以及优化前后 Pathfinder 仿真中减少的时间如表 4 所示。

观察表 4 数据可知实验 H-B、H-U、H-E、M-U 和 M-E 模型运行总耗时都小于疏散时间的减少量, 这表明在这几组实验中, 采用“Pathfinder 初始仿真 + 出口均衡算法”的方案在中高密度时符合实时性

要求,即优化运行耗时小于疏散时间的减少量。此外,在所有组别中出口均衡算法的运行耗时都在 0.9 s 以内,远小于 Pathfinder 的运行耗时(尤其是在高密度场景下)。因此,如果使用更高效的微观仿真模型,如平移矩阵模型(Matrix Translation Model)可在 0.4 s 内完成 1000 人的疏散仿真[13],可大幅降低优化总体耗时,为实时疏散优化提供新方法。

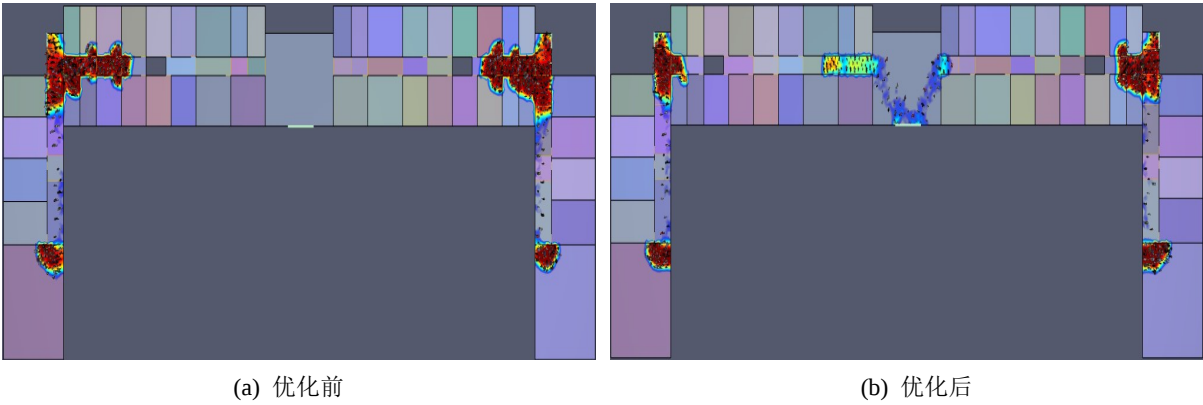


Figure 7. Comparison of experiment H-B before and after personnel evacuation optimization

图 7. 实验 H-B 在 100 s 时优化前后人员密度分布对比

Table 4. Comparison of computing time and time reduction

表 4. 运行耗时和时间减少量对比

实验	运行耗时/s		总耗时/s	疏散时间减少/s	拥堵时间减少/s
	Pathfinder 仿真 初始方案	出口均衡算法			
H-B	18.6	0.84	19.44	27.4	10.96
H-U	14.4	0.82	15.22	22.2	11.99
H-E	11.6	0.86	12.46	40.5	11.17
M-B	10.2	0.83	11.03	5.30	3.72
M-U	7.9	0.82	8.72	18.00	5.93
M-E	6.8	0.85	7.65	22.10	9.03
L-B	3.3	0.81	4.11	3.80	0.90
L-U	3.1	0.82	3.92	2.20	1.66
L-E	2.8	0.85	3.65	2.20	2.64

5. 结论

本文提出的出口树均衡算法最大程度平衡各出口清空时间,研究了九种不同的疏散场景,每个场景均具有不同的人员分布和人流密度。这些场景涵盖了从均衡分布设置到极度不均衡布局,旨在全面评估疏散模型在不同情况下的适应性和有效性。

(1) 模型用节点和边表示待疏散区域的拓扑结构,且节点和边的定义明确、设置灵活,建模方便快捷。利用微观疏散仿真模型获取微观疏散特征、网络模型对疏散路径进行优化,兼具微观模型准确和宏观模型运行速度快的优势。

(2) 由出口树均衡算法估算得到的不同出口在迭代中的清空时间与 Pathfinder 仿真结果相比,在大多数情况得到的出口清空时间的变化趋势较为准确,虽然存在一定误差,但相关性分析结果表明二者的变

化趋势较为一致,尤其是中高密度情况下。

(3) 算法优化的结果经 Pathfinder 验证,九种场景下的总疏散时间均出现下降,总疏散时间平均下降 15.97 ± 10.45 s,尤其在无论人群分布是否均衡、高密度下的表现更好。

(4) 九种场景中优化模型运行耗时均在 0.9 s 以内,远小于 Pathfinder 的运行耗时(尤其是在高密度场景下),如果结合更高效的微观疏散仿真工具,可大幅降低优化总体耗时、为大型建筑的疏散路径实时优化提供新方法。

基金项目

国家自然科学基金项目(72374141); 国家自然科学基金项目(52102414); 福建省自然科学基金项目(2022J01515)。

参考文献

- [1] 何梦男,付瑜玲,陈诚,等. 基于元胞自动机的应急疏散最短路径优化算法[J]. 中国安全科学学报, 2019, 29(4): 51-57.
- [2] 郑霞忠,蔡莉莉,张明,等. 多出口条件下应急疏散路径优化模型[J]. 中国安全科学学报, 2019, 29(3): 180-186.
- [3] Zhang, H., Zhao, Q., Cheng, Z., Liu, L. and Su, Y. (2021) Dynamic Path Optimization with Real-Time Information for Emergency Evacuation. *Mathematical Problems in Engineering*, **2021**, Article 3017607. <https://doi.org/10.1155/2021/3017607>
- [4] 王丽,李育萌,刘云,等. Zigbee 耦合 A*算法的疏散路径动态规划与指示系统[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(11): 142-149.
- [5] 应泽光,何琪. 基于改进 A*算法的无人艇复杂水域路径规划[J]. 机电技术, 2022, 1(5): 33-35.
- [6] 张华军,刘洋,朱震宇,等. 邮轮火灾动态蔓延情况下的最优疏散路径规划[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(1): 183-190.
- [7] 梁江涛,王慧琴. 基于改进蚁群算法的建筑火灾疏散路径规划研究[J]. 系统仿真学报, 2022, 34(5): 1044-1053.
- [8] 袁丹灿,傅智敏,毛占利. 多参数耦合条件下人群疏散路径优化模型[J]. 消防科学与技术, 2017, 36(2): 185-189.
- [9] 董崇杰,刘毅,彭勇. 改进布谷鸟算法在人群疏散多目标优化中的应用[J]. 系统仿真学报, 2016, 28(5): 1063-1069.
- [10] 魏娟,郭阳勇,游磊,等. 一种基于多出口环境的人群疏散改进模型[J]. 中国安全科学学报, 2020, 30(7): 139-145.
- [11] 郭海湘,曾杨,陈卫明. 基于社会力模型的多出口室内应急疏散仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2021, 33(3): 721-731.
- [12] Guan, W., Hou, S., Yu, G., Gong, H., Guan, S. and Zhao, J. (2023) Dynamic Evacuation Path Planning for Multi-Exit Building Fire: Bi-Objective Model and Algorithm. *Fire Technology*, **59**, 2853-2876. <https://doi.org/10.1007/s10694-023-01448-x>
- [13] Huang, Z., Fang, Z., Ye, R. and Chraïbi, M. (2024) A Matrix Translation Model for Evacuation Path Optimization. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, **25**, 1374-1383. <https://doi.org/10.1109/tits.2023.3312519>
- [14] Zhang, J., Klingsch, W., Schadschneider, A. and Seyfried, A. (2011) Transitions in Pedestrian Fundamental Diagrams of Straight Corridors and T-Junctions. *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*, **2011**, P06004. <https://doi.org/10.1088/1742-5468/2011/06/p06004>
- [15] 姜丰. Pearson 相关系数评价混合工质与纳米流体换热特性的应用研究[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津大学, 2018.