

包含不同类型残疾人群的混合人群疏散实验与模拟研究

陈子欣¹, 任祥霞², 房志明¹, 曾丽琪¹, 尤亚云¹

¹上海理工大学管理学院, 上海

²康复大学(筹)社会发展与管理学院, 山东 青岛

收稿日期: 2024年4月22日; 录用日期: 2024年5月22日; 发布日期: 2024年5月31日

摘 要

为了满足残疾人群的安全疏散需求, 开展了包含不同残疾类型的混合人群疏散实验和仿真模拟分析。实验数据分析得到, 疏散时间最短的是肢体残疾人, 疏散时间最长的分别是听力残疾人和视力残疾人。在实验基础上, 利用Pathfinder软件建立了混合人群疏散的仿真模型, 仿真模拟结果与实验结果几乎保持一致, 验证了所建立模型的合理性和有效性。结果表明: 通往疏散楼梯的出口位置和宽度很大程度上影响疏散时间和人员拥堵情况。通过增加疏散速度最慢的视力残疾人数量来提高残疾人与常人的比例, 疏散时间会随之增加。

关键词

残疾人, 运动特征, Pathfinder, 模拟仿真, 疏散

Experimental and Simulation Study of Mixed Crowd Evacuation Including Different Types of Disabled Groups

Zixin Chen¹, Xiangxia Ren², Zhiming Fang¹, Liqi Zeng¹, Yayun You¹

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

²School of Social Development and Health Management, University of Health and Rehabilitation Sciences, Qingdao Shandong

Received: Apr. 22nd, 2024; accepted: May. 22nd, 2024; published: May. 31st, 2024

Abstract

In order to meet the safety evacuation needs of the disabled population, evacuation experiments

文章引用: 陈子欣, 任祥霞, 房志明, 曾丽琪, 尤亚云. 包含不同类型残疾人群的混合人群疏散实验与模拟研究[J]. 建模与仿真, 2024, 13(3): 3222-3232. DOI: 10.12677/mos.2024.133294

and simulation analyses containing different disability types were conducted. The analysis of the experimental data shows that the shortest evacuation time is for physically disabled people, and the longest evacuation time is for hearing disabled people and visually disabled people. On the basis of the experiment, the simulation model of mixed crowd evacuation was established by using Pathfinder software, and the simulation results were almost consistent with the experimental results, which verified the reasonableness and effectiveness of the established model. The results show that the location and width of the exit to the evacuation staircase greatly affect the evacuation time and crowd congestion. Increasing the ratio of disabled to normal people by enhancing the number of visually impaired people with the slowest evacuation speed will expand the evacuation time.

Keywords

People with Disabilities, Movement Characteristic, Pathfinder, Simulation, Evacuation

Copyright © 2024 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,涉及到病患、老年人和残障人士的公共场所频繁发生火灾事故,引发了社会广泛的关切。由于这些特殊群体的运动能力较差和身体协调性下降,他们对安全疏散的需求更加迫切。根据《“十四五”残疾人保障和发展规划》的指示,加强残疾人集中场所和残疾人服务机构的安全保障、应急服务、消防安全能力建设至关重要。

国内外学者在人员疏散方面已经相对成熟。田玉敏在综合分析国内外人员疏散模型和模拟软件发展现状的基础上,介绍了人员在火灾中的行为理论、计算机模型等[1]。邢志祥等人研究了常州某一大型超市火灾情况下的人员疏散情况,得出疏散设施的使用情况、出口人员流量等相关数据[2]。叶俊等构建了高层建筑火灾初期的垂直疏散模型,并提出了相应的电梯疏散策略[3]。刘小溪指出,应注意建筑内疏散走道的合理布置;同时,要根据疏散需求相应布置出入口数量[4]。

目前已有残疾人群疏散方面的研究。姜传胜等综合分析了目前国内外关于残疾人疏散安全的研究现状,发现相关研究主要集中于宏观层面,很少开展技术层面的研究工作[5]。于水军等表明,深入研究残疾人在公共场所应急疏散时的心理和行为特征是保证有效疏散的前提之一[6]。Rubadiri 等提出了从个体特征、总疏散距离和建筑设计环境三个方面评价残疾人疏散性能的方法[7]。Soong 等发现视觉引导对视力残疾人期望行走速度没有明显影响[8]。Clark-Carter 等发现环境越复杂,视力残疾者的运动速度越低,同时发现在不同导向工具的辅助下,视力残疾者对复杂环境感知效果不同[9]。田玉敏通过分析特殊人群疏散的行为规律,得出在无外界帮助下残疾人的水平行走速度为 1.25 m/s,其结果对特殊人群疏散设计具有指导作用[10]。

考虑到参与者的安全问题,现有关于残疾人群的疏散运动仿真模拟研究大多数是通过进行小尺寸的疏散运动实验,提取相关数据。利用仿真模型,按比例进行大尺寸的人员疏散运动模拟仿真。WEI 等人收集了肢体患者、轮椅使用者、普通患者等不同群体的实际运动速度数据,基于此数据重置软件 FDS + Evac 的速度参数,分析骨科和儿科病房的患者移动速度和出口熟悉度等参数对疏散效率的影响[11]。K. Christensen & Y. Sasaki 基于 BUMMPEE 模型,评估建筑环境如何能够有效满足紧急情况下的多样性和普遍性残疾人疏散需求[12]。SHI Long 等人建立紧急疏散模型数据库,发现复杂人群流动的实际基础数据

是模拟分析人员运动行为和特征的基础以及能够更好地改善相关模型的准确性[13]。TIAN 等学者基于元胞自动机模型和博弈论,研究了竞争力和策略更换频率对人员疏散的影响[14]。

总体而言,人员疏散研究主要集中于健全人员方面,针对残疾人群的研究比较零散且单一,以至于残疾人群的行为特点、运动特征的相关数据较为匮乏。本文开展了包含不同类型残疾人的混合人群疏散实验,分析使用楼梯疏散时残疾人群的运动规律,并进一步使用 Pathfinder 软件建立混合人群疏散运动的模型,分析改变出口位置、出口宽度和人员比例情况下的疏散规律。这一结果对于包含不同类型残疾人群的公共场所的安全疏散设计具有指导作用,同时有助于为残疾人群疏散模拟仿真提供有效的基础数据。

2. 混合人群疏散实验

2.1. 实验设置

实验于深圳市福田区残疾人综合服务中心大楼开展。通过与深圳市残联合作发布了一条实验参与者的招募信息,所有残疾人和非残疾人自愿参与实验。招募过程中向每位实验参与者详细说明了实验流程以及注意事项,每位参与者都同意并签署了《知情同意书》和《安全责任协议书》。通过调查问卷的形式收集参与者的基本信息,包括年龄、性别、身高、运动能力、残疾证号、残疾类别、是否需要拐杖轮椅、特殊需要等。

实验场景位于综合服务中心二楼餐厅,餐厅如下图 1(a)所示。餐厅区域长为 23 m,宽为 17 m,布置有 36 张 1.5×0.7 m 的餐桌,每张餐桌附带 4 张 0.5×0.5 m 椅子。餐厅南侧连接一处疏散楼梯,第一段楼梯和第二段楼梯层高为 1.95 m,第三段楼梯层高为 1.80 m。楼梯阶梯每个踏板的宽度、深度和高度分别为 1.59 m、0.28 m 和 0.15 m。餐厅通往疏散楼梯先后途经宽度为 1.59 m 的出口 1 和宽度为 1 m 的出口 2,一楼有 1 个直通室外的防火门出口 3,宽度为 1.5 m。实验开始前,参与者在餐厅各区域等候,站位情况如图 1(b)所示。实验开始指令下达后,所有实验参与者开始疏散运动,均使用楼梯疏散。从餐厅(二层)出发,通过出口 1、出口 2 后,途经三段楼梯,达到出口 3 处,疏散至一层外的安全区域,实验大致的疏散路线,如图 2 所示。



(a) 餐厅示意图



(b) 人员站位示意图

Figure 1. Schematic diagram of the experimental scene
图 1. 实验场景示意图

2.2. 人员属性

实验征集了 62 名实验参与者,包含 32 名残疾人参与者和 20 名非残疾人参与者,分别征集了视力残疾人 8 名、听力残疾人 15 名、肢体残疾人 1 名、智力残疾人 4 名、精神残疾人 4 名。这些残疾类型的定义是基于《中国残疾证》,该证是认定残疾人及其残疾类别和等级的法律文件。残疾人参与者平均年龄为 42 岁,平均身高为 1.65 米。非残疾参与者平均年龄为 38 岁,平均身高为 1.66 米。所有实验参与者中除视力残疾人外,都可以正常地无障碍自主活动,自理能力和运动能力良好。

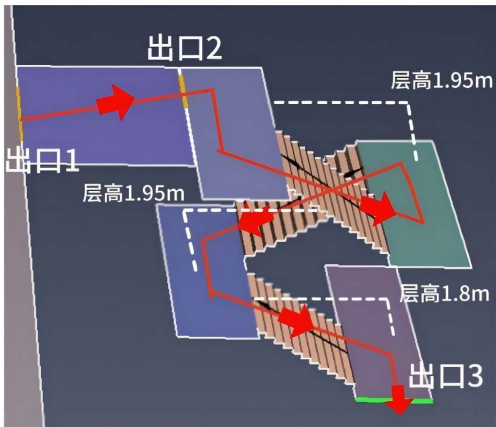


Figure 2. Schematic diagram of the experimental evacuation route
图 2. 实验疏散路线示意图

3. Pathfinder 仿真模型

在残疾人综合服务中心实际疏散实验的基础上，利用人员疏散仿真模拟软件 Pathfinder，构建出包含不同类型残疾人的混合人群疏散运动模拟仿真场景，即为基础场景(Base scene)，如图 3 所示。同时依据实验中的人员基本数据(见表 1)，设置仿真模型中的人员参数以及属性，包括肩宽、运动参数等。模型中包含了非残疾、肢体残疾(手臂残疾)、视力残疾、听力残疾、精神残疾、智力残疾等六类人员。

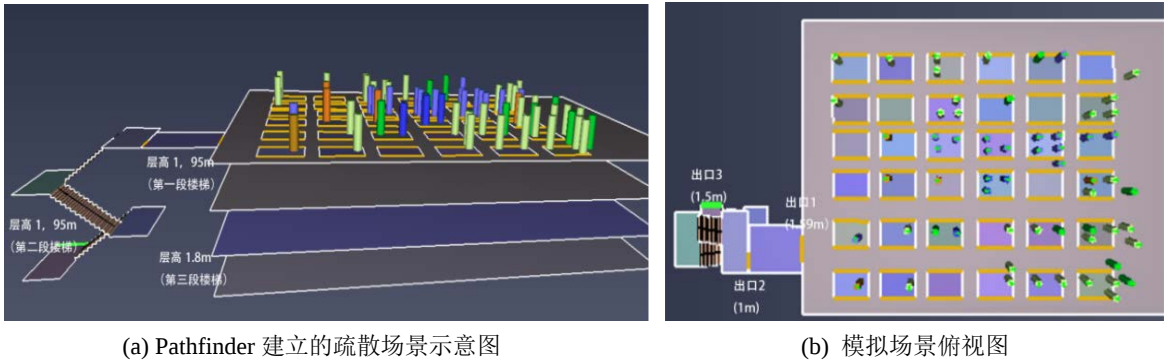


Figure 3. Schematic diagram of the Pathfinder simulation model
图 3. Pathfinder 仿真模型示意图

Table 1. Basic parameters of personnel
表 1. 人员的基本参数

人员类型	人员基本特征	平均身高(m)	肩宽(m)	平地运动速度 (m·s ⁻¹)	运动行为规则
非残疾人		1.66	0.45	0.650	朝向任意出口
肢体残疾人(手臂残疾)		1.58	0.45	0.966	朝向任意出口
听力残疾人		1.60	0.45	0.639	朝向任意出口
视力残疾人		1.71	0.45	0.589	朝向任意出口
智力残疾人		1.63	0.45	0.669	朝向任意出口
精神残疾人		1.76	0.45	0.674	朝向任意出口

通过 Pathfinder 软件仿真模拟包含不同类型残疾人的混合人群从餐厅区域使用楼梯疏散到安全区域的运动。

4. 模型验证与优化场景分析

4.1. 实验与仿真模型的对比较证

通过视频分析得到, 实验的总疏散时间为 108.0 s, 餐厅区域的行人疏散时间为 60.0 s, 楼梯间中所需疏散时间为 104.0 s。由此可知, 总疏散时间与楼梯间内疏散时间相近, 楼梯间的疏散效率一定程度上影响总疏散时间。在 Pathfinder 建立的基础场景下, 进行了多次模拟仿真。为了减少随机误差, 保证结果的科学性, 仿真结果取 20 次仿真数据的平均值, 即人群总疏散时间为 107.3 s。仿真结果与实际疏散实验的总疏散时间相差 0.7s, 两者差距不大, 验证模型的有效性和合理性。

进一步分析实验与模拟中各楼梯节点的所需疏散时间, 如图 4 所示。由图 4 可知, 在第一段楼梯的顶部和底部以及第二段楼梯的顶部时, 实验和仿真模拟的人群疏散时间几乎相同。但是在第二段楼梯的底部以及第三段楼梯的顶部和底部, 实验的疏散时间相对于仿真模拟的疏散时间短。这可能是因为实验中的人群由于急促心理或突发事件引发恐慌, 以至于人群在后续楼梯中的速度会有所增加(如表 2 所示), 特别是部分残疾人, 而在仿真模拟中, 人群的下降速度相对稳定。总的来说, 基于 Pathfinder 的混合人群疏散运动仿真模型与实际疏散实验的人群流动情况基本吻合, 表明该模型具有合理性和有效性。

Table 2. Mean values of evacuation time at different stages of the staircase for each type of participant in the experiment
表 2. 实验中各类参与者在不同阶段楼梯的疏散时间均值

人员类型 \ 各楼梯段	第一段楼梯的疏散 时间(s)	第二段楼梯的疏散 时间(s)	第三段楼梯的疏散 时间(s)	三段楼梯时间总长 (s)
非残疾人	6.731	6.334	6.153	19.218
肢体残疾人(手臂残疾)	5.700	3.637	3.670	13.007
听力残疾人	6.756	6.146	6.484	19.386
视力残疾人	7.662	7.179	6.375	21.216
智力残疾人	6.400	6.114	5.610	18.124
精神残疾人	5.917	6.054	5.960	17.931

4.2. 模拟仿真的人员密度分析

基础场景中人员密度分布随时间变化的情况, 如图 5 所示。由图 5 可知, 混合人群在疏散过程中会在餐厅区域的出口 1 和 2 发生拥挤, 且出口 2 的拥挤程度较出口 1 严重。在 24.4 s 时, 出口 2 开始出现堵塞现象, 32.7 s 时堵塞现象开始加剧, 45.9 s 时达到拥堵高峰, 直到 75.1 s 拥堵情况开始缓解。说明通往疏散楼梯的出口设置很大程度上影响人员的疏散时间和疏散安全。

4.3. 人员的疏散时间分析

实验分析得到各类人群所需疏散时间的均值, 如表 3 所示。肢体残疾人(手臂残疾)疏散所需时长均为最短, 可能受到样本数量的影响, 其次是智力残疾人和精神残疾人; 而视力残疾人所需疏散时间最长, 可能是由于能见度较低或无, 需要时间去探索周围环境是否安全才继续往下疏散。

与实验数据对比, 模拟中各类人群的疏散时间相对减少(见表 3), 疏散时间平均减少了 6.1 秒。这种现象可能是因为实际疏散实验人员拥堵情况更严重, 导致疏散时间更长; 模拟中视力残疾人和听力残疾

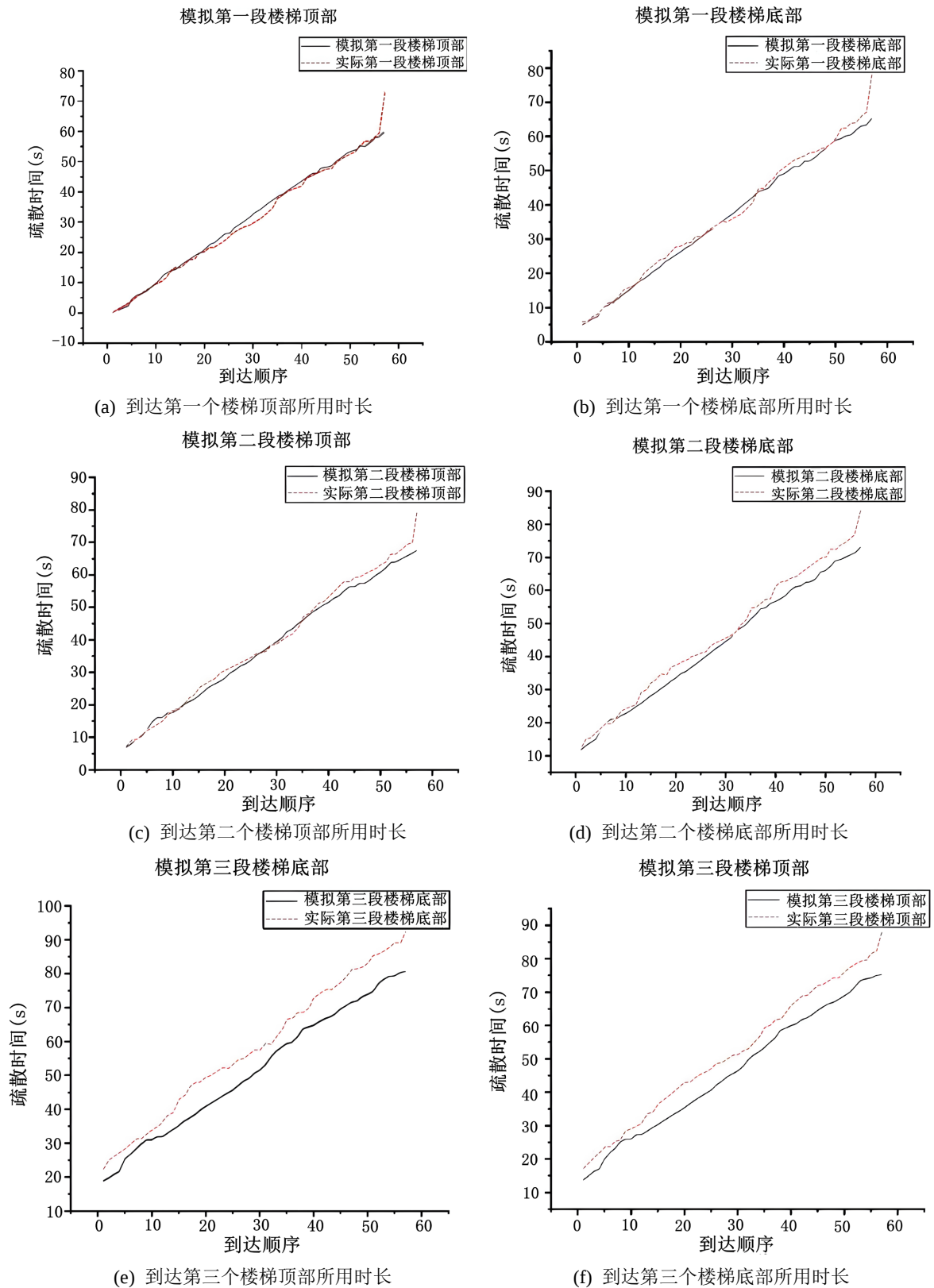


Figure 4. Length of time for each evacuation personnel to reach each platform

图 4. 各疏散人员到达各平台所需时长

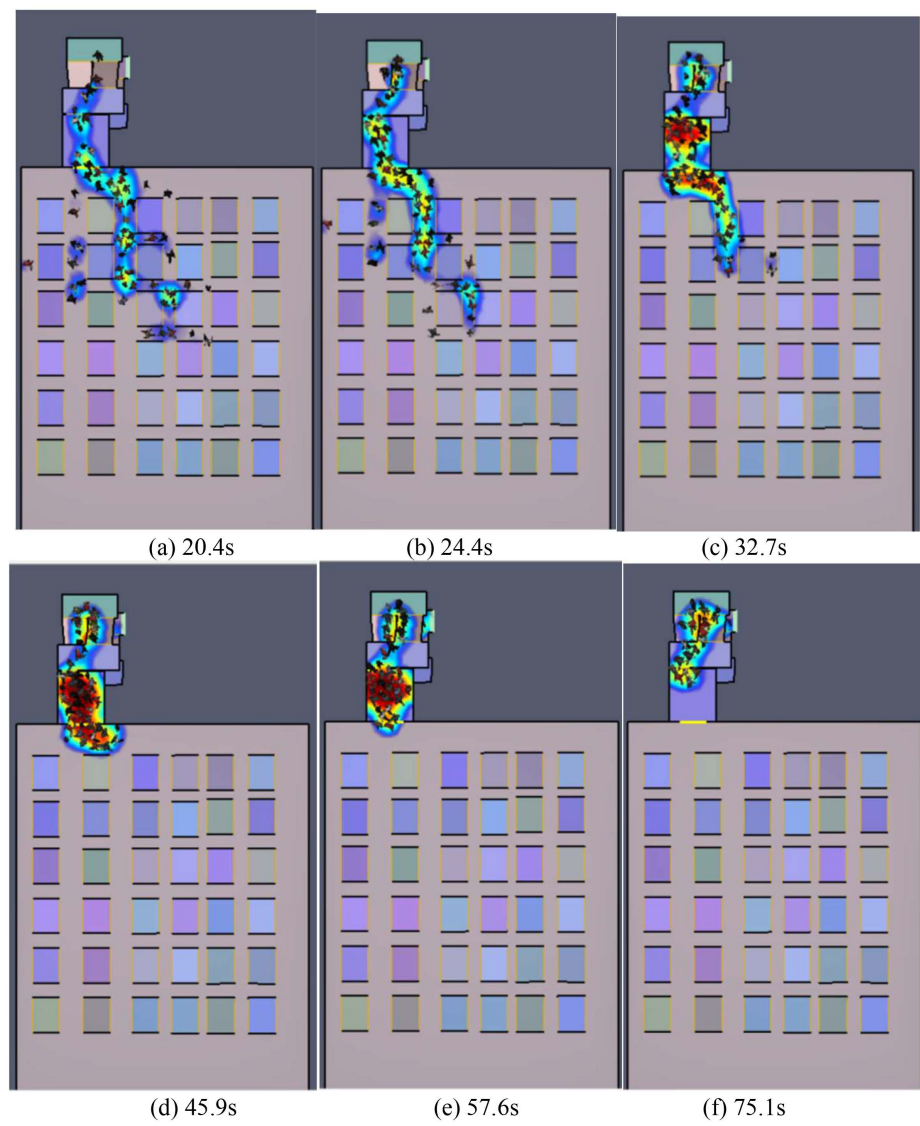


Figure 5. Distribution of personnel density in simulation
图 5. 模拟中的人员密度分布情况

Table 3. Mean values of evacuation time for each type of participant
表 3. 各类参与者的疏散时间均值

人员类型	非残疾人	肢体残疾人(手臂残疾)	听力残疾人	视力残疾人	智力残疾人	精神残疾人
实验的疏散时间均值(s)	26.9	17.9	28.3	29.2	25.0	25.2
模拟的疏散时间均值(s)	19.9	13.4	21.0	20.7	20.5	19.3

人的疏散时间差距比实验中的小。听力残疾人主要依赖视力导航，而视力残疾人更依赖声音导航。需要注意的是，模型中的路径规划和导航系统需要针对不同类型的残疾人进行调整。考虑到残疾人的路径规划和导航系统涉及到多种复杂的行为学现象，例如，视力残疾人对周围环境的感知能力降低，以及 Pathfinder 软件在人员参数设置上的局限性。在模型中，我们仅通过模拟残疾人在楼梯间的运动速度来呈现不同类型残疾人的特征，缩短了俩者的疏散时间差距。

4.4. 优化模拟场景的分析

4.4.1. 拓宽疏散通道的出口宽度的疏散场景

为缓解基础场景中出口 1 和 2 的人流平均密度大，容易发生较严重的拥挤问题。在基础场景的基础上调整疏散通道出口 1 和 2 的宽度，设置了六个不同的场景，分析出口宽度对疏散时间的影响。这六个场景包括：拓宽出口 1 的宽度 20 cm、拓宽出口 2 的宽度 20 cm、同时拓宽出口 1 和出口 2 的宽度 20 cm、拓宽出口 1 的宽度 50 cm、拓宽出口 2 的宽度 50 cm、同时拓宽出口 1 和出口 2 的宽度 50 cm。

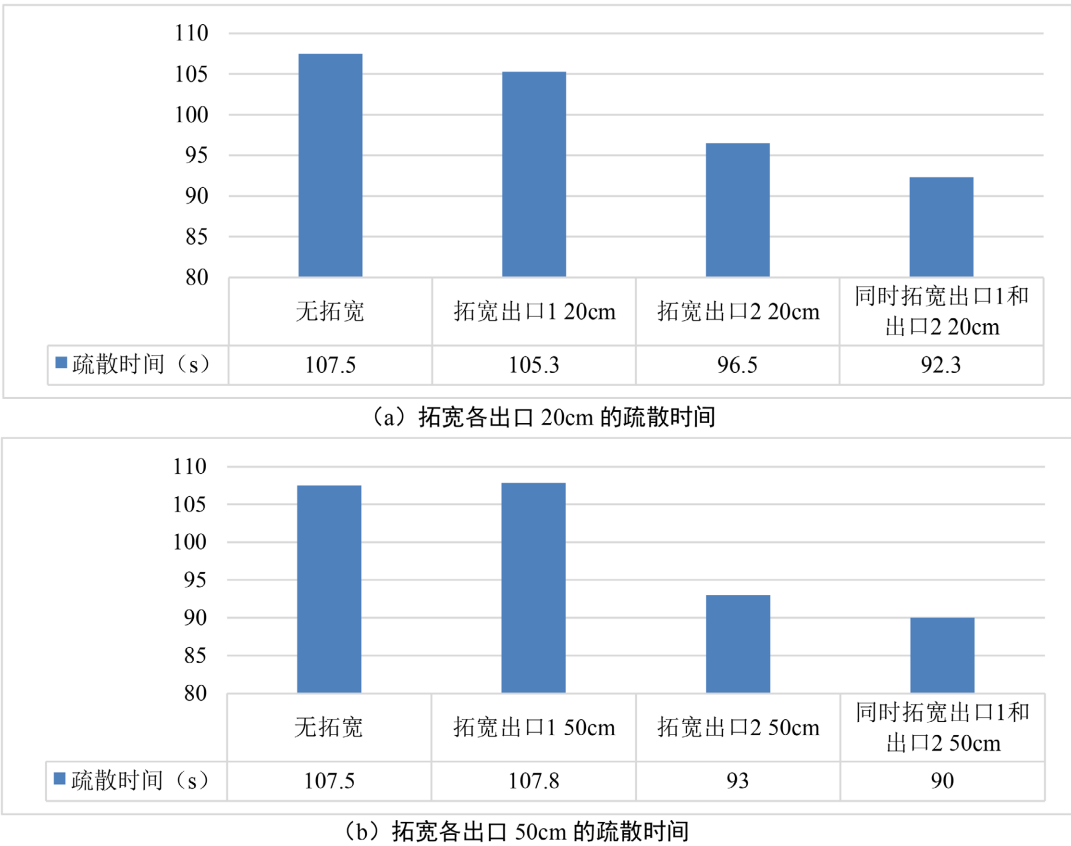


Figure 6. Evacuation time for widening different widths of each exit
图 6. 拓宽各出口不同宽度的疏散时间

由图 6 可知，拓宽出口 2 和同时拓宽出口 1 和 2 的疏散时间显著减少，但仅拓宽出口 1 的疏散时间变化不大。当同时拓宽出口 1 和 2 时，疏散时间最短，与只拓宽出口 2 相比，改善效果较小，一定程度上表明了疏散中的拥堵主要由出口 2 引起。比较同一出口拓宽不同宽度时，发现疏散效果随着出口宽度的增长并不产生明显的变化，说明疏散时间并非完全取决于出口宽度。

4.4.2. 改变疏散通道出口位置的疏散场景

为了缓解出口 2 引起的拥堵问题，通过改变出口 2 的位置，将出口 2 分别设置在第三平台出口处的左侧、中间和右侧，第三平台和出口 2 的初始分布位置如图 7 所示。观察三个场景设置下的疏散时间以及第三平台人员数量随时间的变化，分析出口 2 的位置对疏散时间和拥堵情况的影响。

在出口 2 分别位于左侧、中间和右侧的情况下第三平台的人员疏散时间分别为 69 s、80.7 s 和 81.4 s。由图 8 可知，随着出口 2 向右移动，第三平台人员疏散时间明显减少，同时人员数量峰值变低且高峰期

缩短，拥堵时段减少，这有助于改善第三平台上的拥堵情况。

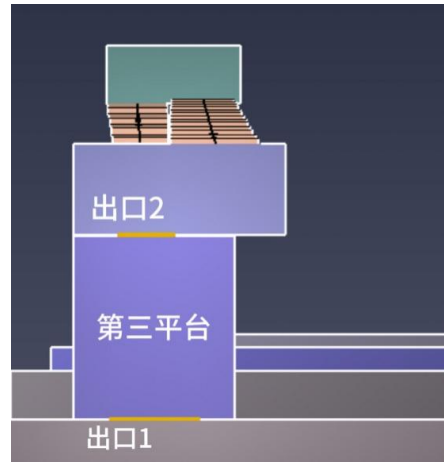


Figure 7. Schematic diagram of the location of outlet 2 and the third platform
图 7. 出口 2 和第三平台的位置示意图

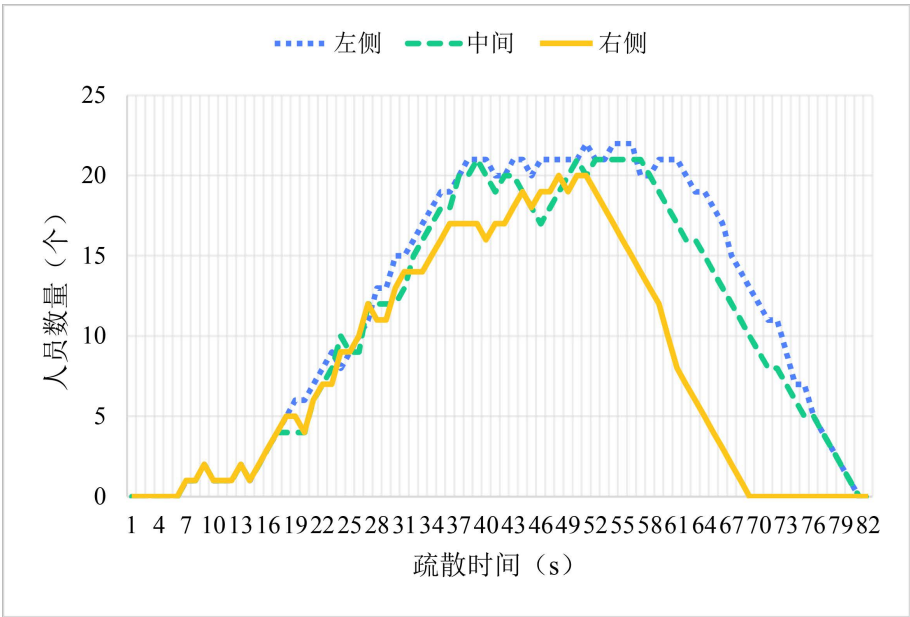


Figure 8. Variation in the number of third platform personnel with different location distributions for Exit 2
图 8. 出口 2 不同位置分布下的第三平台人员数量变化图

4.4.3. 改变残疾人和非残疾人数量比例的疏散场景

由于残疾人和非残疾人在行为模式上的差异，非残疾人和残疾人群的比例也会对疏散时间产生影响。模拟人员数量为 100 时的疏散情况，以实际疏散实验的人员比例设置模拟中的人员数量，设为场景 1，并且固定人员站位分布(如图 9)。在此基础上，选择疏散速度最慢的视力残疾人作为改变量，以此实现疏散效果最差的情况。每个场景都分别在场景 1 的基础上增加 5 个视力残疾人，减少 5 个非残疾人，分析人员比例改变对疏散时间的影响。

由图 10 可得，在总人数和站位不变的情况下，通过增加疏散速度最慢的视力残疾人数量来提高残疾人与常人的比例，疏散时间会随之提高。这是因为视力残疾人数量增加，会降低人群的疏散速度，现实

情况中，可能还会加剧人群的恐惧心理，导致拥堵状况加剧，疏散时间增加。

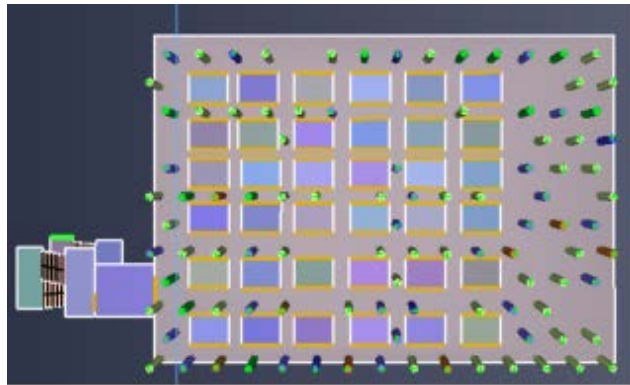


Figure 9. Schematic diagram of personnel station in the restaurant
图 9. 餐厅内人员站位示意图

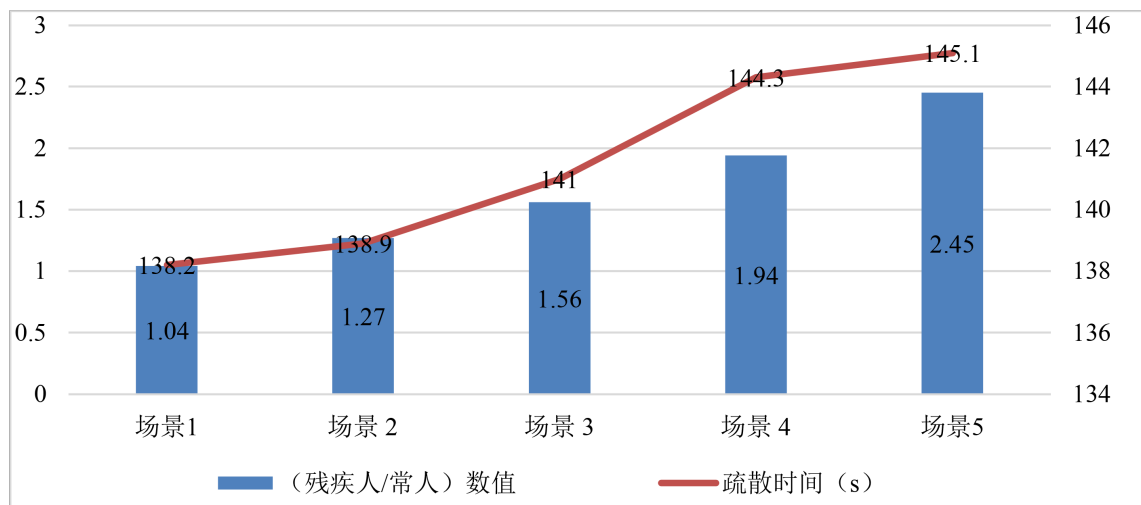


Figure 10. Schematic diagram of evacuation time for different personnel ratios
图 10. 不同人员比例下疏散时间示意图

5. 结束语

本文以深圳市残疾人综合服务中心大楼为实验地点，进行了包含不同残疾类型的混合人群疏散实验，并利用 Pathfinder 软件建立了仿真模型。通过对比实验与模拟结果，验证了仿真模型的合理性和有效性。在此基础上，对场景进行了优化，包括改变出口宽度、位置和人员比例等因素，并得出以下主要结论：

(1) 实验数据分析显示不同残疾类型的人员平均疏散时间，其中肢体残疾人的疏散时间最短，听力和视力残疾人的疏散时间较长。

(2) 出口设置对疏散时间和人员拥堵情况有重要影响。拓宽出口对疏散时间影响显著，而出口位置向疏散楼梯靠近会减少疏散时间。

(3) 在总人数和站位不变的情况下，增加视力残疾人数量来提高残疾人与非残疾人的比例，疏散时间会随之增加。

因此，建议在残障人士服务场所设计时，合理设置出口宽度和位置，以提高建筑疏散性能，缩短疏散时间。

致 谢

我们要向参与实验的参与者和工作人员表示诚挚的感谢，特别是残疾人士参与者。

基金项目

作者感谢中国自然科学基金青年项目(72304123)和山东省自然科学基金青年项目(ZR2023QG145)的支持。

参考文献

- [1] 田玉敏. 火灾中人员的行为及其模拟计算方法的研究[J]. 安全与环报, 2006, 6(1): 26-30.
- [2] 邢志祥, 丁芙蓉, 唐亮, 等. 大型超市火灾人员疏散路径优化研究[J]. 安全与环境学报, 2015, 15(2): 167-173.
- [3] 叶俊, 韩雪峰, 王梦琳, 等. 高层建筑火灾初期人员疏散策略的优化分析[J]. 安全与环境学报, 2015, 15(5): 179-183.
- [4] 刘小溪. 疏散情况下楼梯间的无障碍设计分析[J]. 中国住宅设施, 2023(2): 196-198.
- [5] 姜传胜, 郑双忠, 袁斐. 残疾人疏散安全研究现状与发展趋势[J]. 中国安全科学报, 2009, 19(3): 61-166.
- [6] 于水军, 谢高超, 潘荣锟, 贾海林. 建筑火灾中残疾人安全疏散问题研究[J]. 教育教学论坛, 2020(4): 141-143.
- [7] Rubadiri, L., Ndumu, D.T. and Roberts, J.P. (1997) Predicting the Evacuation of Mobility-Impaired Occupants. *Fire Technology*, **33**, 32-53. <https://doi.org/10.1023/A:1015318311881>
- [8] Soong, G.P., Lovie-Kitchin, J.E. and Brown, B. (2000) Preferred Walking Speed for Assessment of Mobility Performance: Sighted Guide versus Non-Sighted Guide Techniques. *Clinical and Experimental Optometry*, **83**, 279-282. <https://doi.org/10.1111/j.1444-0938.2000.tb05017.x>
- [9] Clark-Carter, D.D., Heyes, A.D. and Howarth, C.I. (1986) The Efficiency and Walking Speed of Visually Impaired People. *Ergonomics*, **29**, 779-789. <https://doi.org/10.1080/00140138608968314>
- [10] 田玉敏. 特殊人群疏散行为及疏散设计的研究[J]. 灾害学, 2013, 28(3): 91-94.
- [11] Wei, X., Lv, W., Song, W., et al. (2011) Evacuation Analysis of a Hospital Based on FDS + EVAC Software. 2011 *International Conference on Remote Sensing, Environment and Transportation Engineering*, Nanjing, 24-26 June 2011, 3147-3150. <https://doi.org/10.1109/RSETE.2011.5964981>
- [12] Christensen, K. and Sasaki, Y. (2008) Agent-Based Emergency Evacuation Simulation with Individuals with Disabilities in the Population. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, **11**, 9.
- [13] Shi, L., Xie, Q., Cheng, X., et al. (2009) Developing a Database for Emergency Evacuation Model. *Building and Environment*, **44**, 1724-1729. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.11.008>
- [14] Tian H., Wei Y., Dong L., et al. (2018) Resolution of Conflicts in Cellular Automaton Evacuation Model with the Game-Theory. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, **503**, 991-1006. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2018.08.140>