



大学校园内考虑群组凝聚力的疏散模拟研究

姚 明¹ 温鹏景¹ 曹淑超¹ 缪佳宇¹ 梁 军¹ 魏晓鸽²

1 江苏大学汽车与交通工程学院,江苏 镇江,212000

2 郑州轻工业大学建筑环境工程学院,河南 郑州,450000

摘 要:通过大学校园内通道及楼梯上的观测实验,获取行人群组运动的相关数据,基于Pathfinder软件构建群组疏散模型,研究在人员疏散过程中出现的瓶颈以及群组行为对疏散效率的影响。结果表明:瓶颈处密度与速度呈负相关;较大的群组比例和较强的群组凝聚力均会延长疏散时间,行人成群组运动也会增加疏散过程中的堵塞次数和拥堵持续时间,所以后期人员疏散研究中需要考虑群组行为对疏散结果的影响,在没有其他行人需要帮助的情况下,鼓励行人尽量独自行走,减少对同伴的等待,同时在建筑物出口设计时需要注意群组对疏散效率的负面影响,提高设计规格。

关键词:交通工程;疏散模拟;Pathfinder;群组

中图分类号:P208

文献标志码:A

近年来,中国城市人口增长迅速,在学校、车站、商场等公共场所时常会出现大规模人群聚集,为人员安全埋下隐患。解决这类问题需要从疏散引导以及建筑结构优化等角度出发,了解行人运动特性,并在此基础上开展行人疏散动力学研究。

随着人们对公共场所安全问题的关注,相关研究也逐渐发展起来,如行人运动特征和疏散规律等方面的研究。在行人运动方面,Zhang等^[1]通过开展中老年人的运动实验,比较了两组不同行人的时空图和运动基本图,发现活跃人群流量更高,而不活跃的行人倾向与他人保持更大的空间距离;杨雪等^[2]和Ma等^[3]基于可控实验分别讨论了单、双向行人流通过通道瓶颈和楼梯时的运动特征;Cao等^[4]对比了不同的行人实验,发现基本图之间存在较大差异,研究表明行人的运动能力和竞争性因素是导致差异的主要原因。在人员疏散方面,张鑫龙等^[5]提出一种改进的元胞自动机疏散模型,该模型可以真实地反映人员疏散的具体过程;Kallianiotis等^[6]认为人员速度是疏散的关键参数,在地铁站疏散评价中尤其要注意瓶颈区域的疏散设计;Cao等^[7]对火灾情况下双

出口房间内的行人运动及出口选择进行了研究,针对社会力模型计算效率低的问题,提出了一种耦合火灾影响的多格子模型来模拟火灾情境下的人员疏散过程。此外,Cao等^[8]还对视野受限条件下行人的疏散策略展开研究,分析了引导员的存在对疏散时间的影响。

对上述研究总结发现,当前大多数研究并未充分考虑行人成组运动这一普遍现象^[9]。人员疏散过程不仅包括个体的单独逃生,也包括其他社会关系等形成的集群运动,对小群体形成与运动过程中的行为特征及影响因素进行研究将为提高建筑中人员疏散效率提供一定理论支撑^[10]。在关于疏散研究方法的讨论中,Kallianiotis等^[6]指出随着公共建筑设计越来越复杂,计算机模拟将成为主要的研究方法,它可以准确评估整个疏散过程,研究不同参数对疏散效率的影响。因此,本文将通过通道及楼梯的实地观测实验获得用于模拟的相关参数,结合实际场景利用Pathfinder人员疏散模拟软件搭建食堂疏散场景,研究群组比例和凝聚力对疏散时间的影响,对疏散过程中产生的瓶颈和拥堵进行分析,提出优化建议。

收稿日期:2020-05-21

项目资助:国家自然科学基金(72001095);中国博士后科学基金(2020M681507);江苏省“双创计划”项目;河南省科技攻关项目(172102310670)。

第一作者:姚明,博士,副教授,主要从事交通安全控制技术方面的研究。ymluck@ujs.edu.cn

通讯作者:曹淑超,博士,讲师。sccao@ujs.edu.cn

1 群组观测实验

1.1 观测实验概况

观测时间为某天中午11:00—12:00及14:00—17:00,观测地点在大学校园内靠近食堂的楼梯和通道,相机分别架设在楼梯附近高处和通道上部廊桥,高度约10 m。本实验主要通过动作、交流和运动方向等判断是否为同一群组成员。图1中,图1(a)为通道实验场景图,图1(b)为楼梯实验场景图。

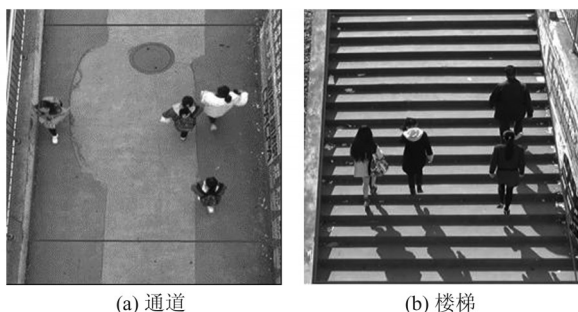


图1 通道及楼梯实验场景图
Fig.1 Experiment Scenes of Corridor and Stair

1.2 实验结果分析

1.2.1 群组比例

首先对食堂附近行人成组运动的比例进行统计,结果如图2所示,发现成组运动的行人数约占总人数的54.5%。其中,两人同行的人数比例为36.9%,3人同行的人数比例为13.4%,4人及以上的群组比例为4.2%。可见更多人愿意成两人组运动,便于群组成员间进行互动交流。

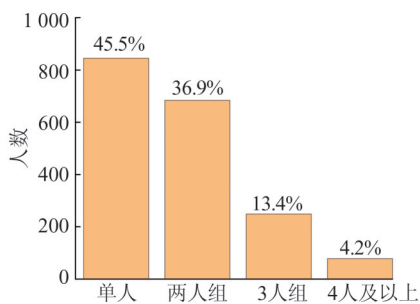


图2 行人群组比例
Fig.2 Proportion of Pedestrian Groups

1.2.2 群组速度

图3和图4分别展示了通道(观测样本498个)和下楼梯(观测样本474个)两种场景中群组的运动速度分布。 t 检验结果表明,在0.05的显著性水平下,随着群组规模的增大,群组运动速度逐渐降低。这主要是由于成组运动的行人在运动过程中需要保持一致性,当群组规模较大

时,成员间相互协调更加困难,此时群组为了便于交流会采取减速行为。在下楼梯场景中,由于受楼梯踏步的影响,行人在水平方向上的步长趋于一致,所以楼梯上单人与群组之间的速度差异不及通道内明显。

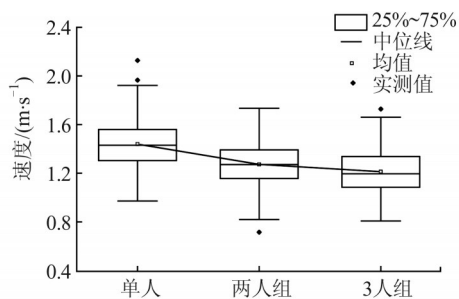


图3 通道内群组速度

Fig.3 Group Speeds in the Corridor

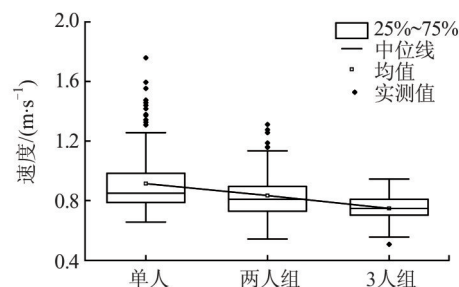


图4 群组下楼梯速度

Fig.4 Group Speeds of Going Downstairs

通过观测实验获得食堂附近实际群组比例以及相关速度参数,证明了行人成群组运动是一种普遍存在的现象,同时也与单人运动在速度方面也存在差异,相关结果为接下来群组疏散模拟提供了准确可靠的基础数据。

2 群组疏散模拟

2.1 模拟场景

选取校园内位于二楼且人员密度较大的学生食堂进行疏散模拟。模拟场景如图5所示,包括食堂大厅、一条走廊以及两处楼梯等。其中,大厅可活动面积为977 m²,四扇门宽均为2 m,走廊及楼梯宽3 m。食堂大厅内随机排列400位行人,他们需要由大厅出发通过出口前后的门,再经过走廊和楼梯,最终到达室外空地完成疏散,其中模拟场景左右两边对称。

2.2 模型构建

群组与非群组运动的差别主要体现在速度和“凝聚力”两个方面。根据§1.2的观测实验结果设定疏散模拟的速度参数:食堂大厅及走廊上单

人速度为 1.44 m/s, 两人组速度为 1.27 m/s, 3 人组速度 1.21 m/s; 楼梯上行人运动速度约为走廊上的 63.2%。凝聚力方面, 需要为群组设定最大减速距离和减速等待时间。此外, 模拟采用 Pathfinder 中的 Steering 模式, 使用路径规划的方法, 避免行人之间发生碰撞。如果人员之间的距离或者与最近点的距离超过某一阈值, 可以重新生成新的路径, 以适应新的情形^[11]。

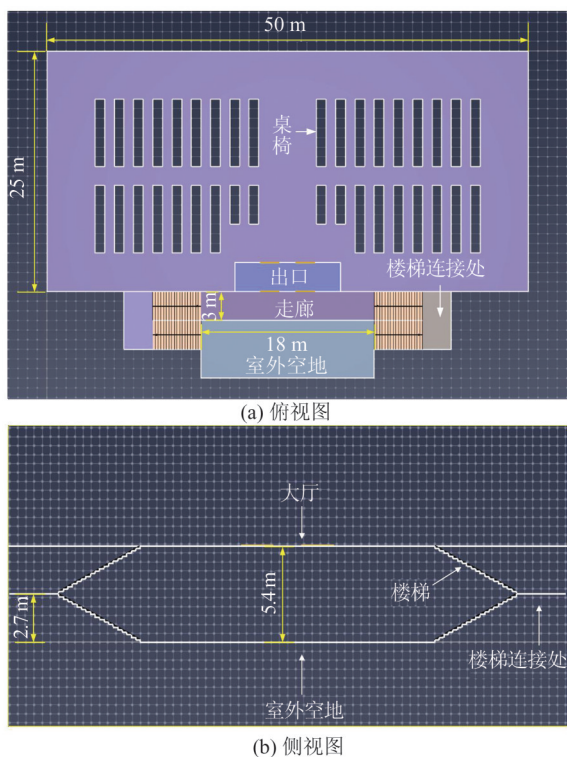


图5 模拟场景示意图

Fig.5 Simulation Scenario

在疏散模拟中, 人员位置的随机分布会导致疏散时间有所差异。当模拟次数较少时, 疏散结果存在偶然性, 不能反映真实情况。增加模拟次数可使结果更加精确, 但当模拟次数超过一定阈值后, 结果差异已不明显。如图6所示, 不同次数的单人疏散模拟中, 5次、10次、15次三组结果波动幅度较大, 超过15次后结果差异已不大, 因此选取15次模拟的平均值作为最终结果进行分析。

图7为有群组和无群组情况下不同时刻的疏散模拟情况, 可以发现在相同时刻, 单人和群组的疏散模拟呈现出不同的状态: 单人的疏散进程明显更快, 而群组在疏散过程中容易发生拥堵。

3 实验结果与分析

3.1 群组比例

以最常见的两人群组为例, 研究不同群组比

例下的疏散时间。模拟结果如图8所示, 疏散时间随着群组比例的增加而增大, 群组比例每增加20%, 疏散时间会相应延长约6 s。主要原因是: (1) 群组运动速度低于单人速度, 群组成员在运动中往往会牺牲一部分速度以达到互动交流的目的, 同时在运动过程中群组成员之间会相互协调, 成员数量越多, 协调就越困难; (2) 群组成员存在减速等待行为; (3) 在行人流密度较大时, 群组的减速等待行为影响了其他行人运动。

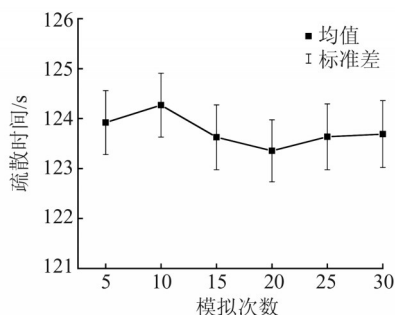


图6 不同模拟次数下的单人疏散时间

Fig.6 Evacuation Time for Different Simulation Runs

此外, 当群组比例较大时, 疏散模拟时间的波动较大, 此时群组会对人群产生频繁的干扰, 疏散过程中行人流的运动状态变得不稳定。由观测实验可知, 实际的人群中54.5%的行人是成组运动, 图8中考虑群组行为的疏散时间比单人疏散延长约30 s, 因此在实际的疏散设计中, 需要考虑群组行为对人群疏散的影响。

3.2 群组凝聚力

与单人运动相比, 行人成组运动增加了对成员的约束, 减缓了成员的运动速度, 群组成员在疏散过程中会出现等待行为, 这也是群组运动与单人运动的主要差异。在分析速度参数的基础上, 为了准确模拟群组行为, 引入“凝聚力”的概念来反映群组成员间的相互约束。

凝聚力由两个变量组成:

1) 最大减速距离。用于确定群组是否已连接或断开。如果群组的任一部分远离其他部分超过了最大减速距离, 则该群组被视为断开。

2) 减速等待时间。当群组处于断开状态时, 领导者将在停止前减速等待一定的时间。

如图9所示, 如果一个群组处于连接状态(组1、组3), 则群组成员会朝着他们的目标前进; 如果一个群组处于断开状态(组2、组4), 则群组成员将向领导者移动; 如果一个成员距离太远, 则该群组的其他成员会断开连接并且减速等待, 直到断开连接的成员赶上。

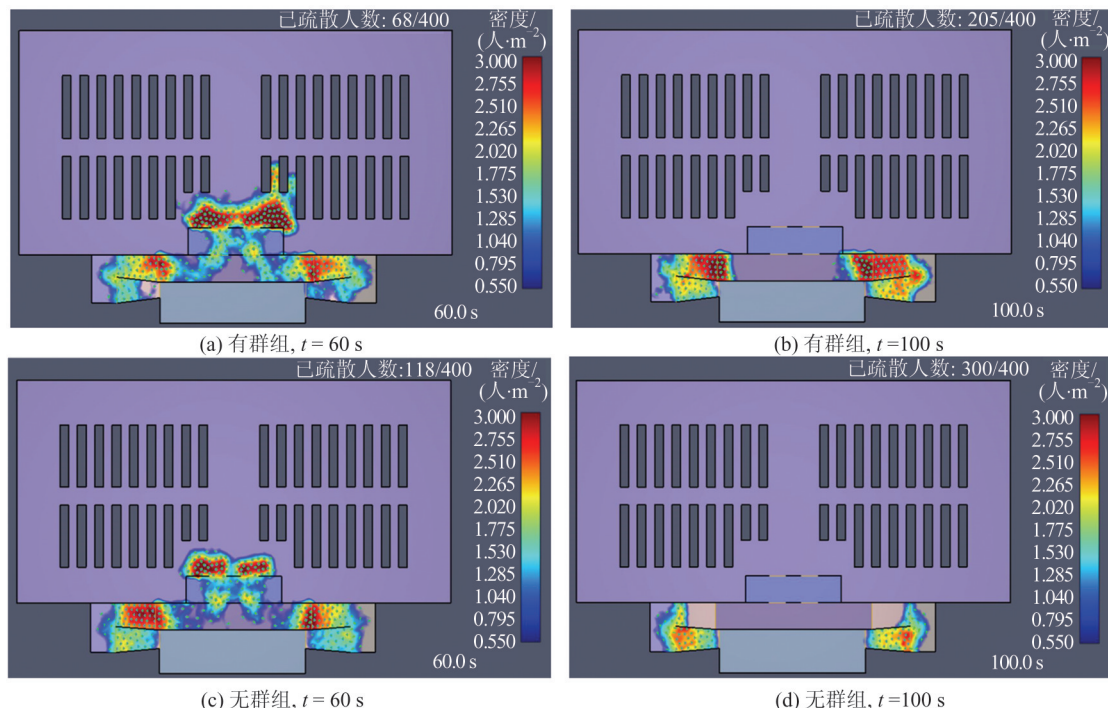


图 7 有群组和无群组情况下不同时刻疏散模拟对比

Fig.7 Comparison of Evacuation Simulation with and Without Groups at Different Time

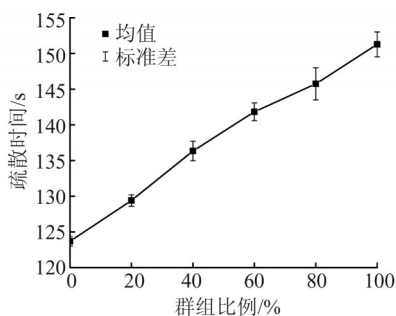


图 8 群组比例对疏散时间的影响

Fig.8 Effect of Group Proportion on Evacuation Time

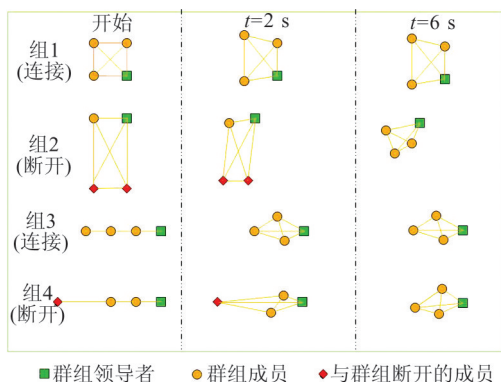


图 9 凝聚力示意图

Fig.9 Cohesion Diagram

凝聚力对疏散时间的影响如图 10 所示。由图 10(a)可知,当最大减速距离相同时,减速等待时间越长,疏散效率越高。即在一次断开后,较长的减速等待时间一方面可以降低原地停止等

待的概率,以节约断开群组的疏散时间并减少其对周围其他行人的影响;另一方面,耗费更长的时间减速,不会破坏行人流的稳定性。由图 10(b)可知,随着最大减速距离增大,不同减速等待时间之间的疏散效率提高幅度减小,因为较小的最大减速距离会更频繁地触发群组减速等待行为,而当最大减速距离为 6 m 时,不同的减速等待时间对疏散效率的影响极小;在相同的减速等待时间下,最大减速距离越大,群组减速等待的次数越少,疏散时间也越短。通过以上分析可以得出:群组成员间较弱的凝聚力(较大的最大减速距离,较长的减速等待时间)可以减少群组行为对整体疏散效率的影响,而较强的凝聚力则会延长疏散时间。正常情况下,为了提高疏散效率,群组成员间的最大减速距离不应小于 2 m,减速等待时间也不宜过小。

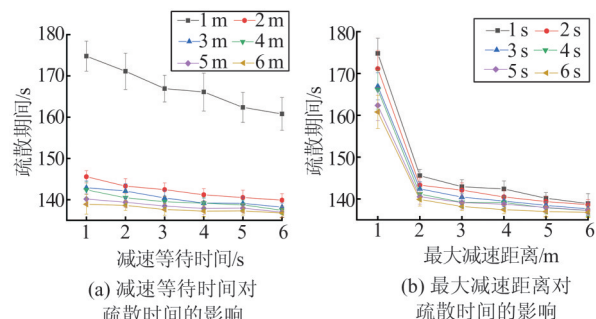


图 10 凝聚力对疏散时间的影响

Fig.10 Influence of Cohesive Forces on Evacuation Time

3.3 拥堵分析

图11为标注关键位置的具体研究区域,图12为疏散过程中不同时刻的人员密度分布。不同时刻瓶颈分别出现在食堂大厅出口门1附近(图12(a))、食堂大厅到走廊之间的出口区门3附近(图12(b))以及楼梯1和楼梯3入口处(图12(c)、图12(d))。

由于模拟场景左右对称,本文以左侧为例进行分析。门1和门3附近在疏散过程中均产生了堵塞,其中门1附近堵塞更严重,堵塞面积更大,持续时间也更长;在楼梯1入口处,由于行人在楼梯上速度较走廊上下降约37%,导致较多人群聚集在走廊与楼梯连接处,从而形成瓶颈;在楼梯3

入口处同样由于速度差产生了瓶颈,但堵塞程度相对较轻。另外,在此瓶颈处,行人有转向的需求,所以靠近内侧的行人密度更大。

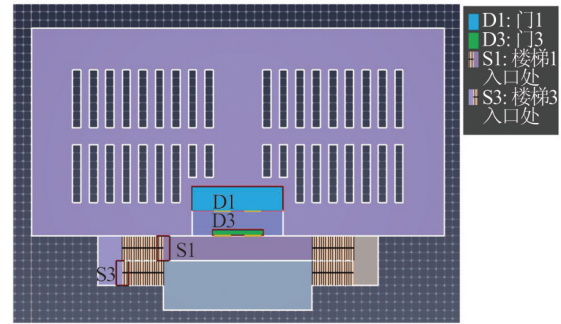


图11 研究区域示意图

Fig.11 Study Area

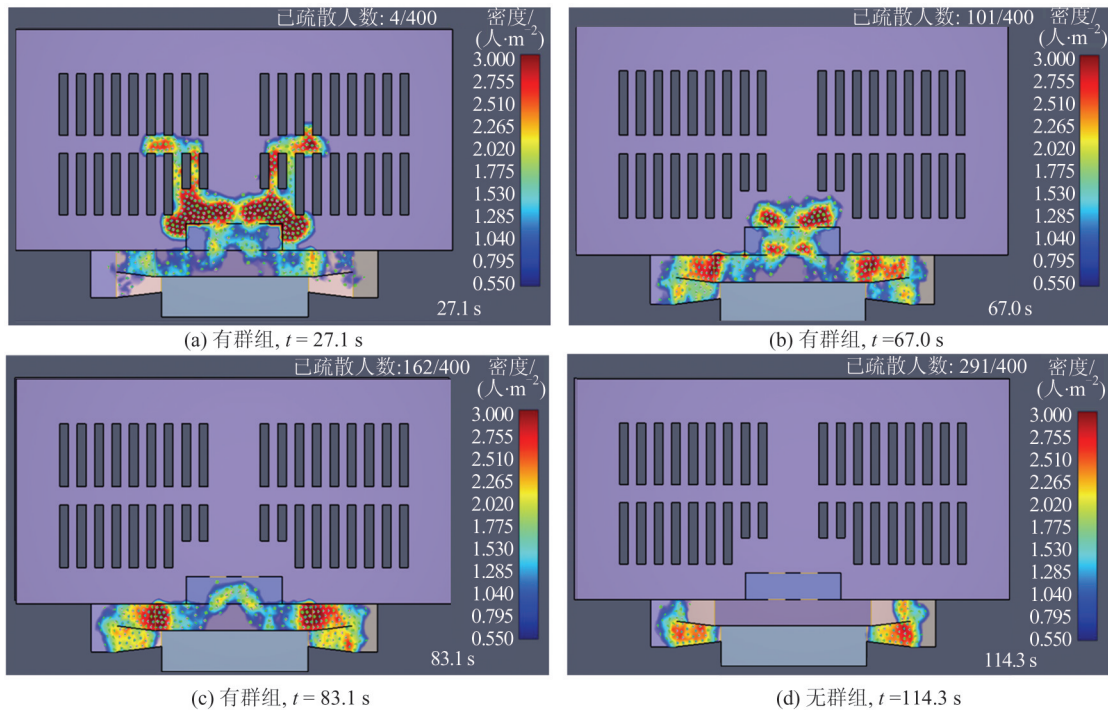


图12 瓶颈出现区域示意图

Fig 12 Bottleneck Area

图13为有群组和无群组时瓶颈处速度和密度对比图。其中图13(a)和13(c)对比了门1和门3附近瓶颈区域的人群密度及速度变化,发现瓶颈区域行人流的速度和密度呈负相关。由于出口宽度限制,当有较多人需要通过时,无法通过的人群只能减速等待,导致出口附近密度增大,从而影响整体运动速度,最终形成瓶颈。而门3附近的密度峰值比食堂大厅门1附近小很多,密度升高造成的速度降低效果并不明显,主要因为大厅的出口(门1)起到了限流的作用。

由图13(b)和13(d)对比可见,楼梯1和楼梯3入口区域附近密度总体呈上升趋势,上升幅度

比大厅相对缓和。这是因为大厅出口限制了行人通过,减少了到达楼梯入口的行人流量。受到楼梯构型和限流作用影响,楼梯1入口附近的拥堵比楼梯3入口更严重,瓶颈效应更突出。疏散过程中的服务水平划分如图14所示,可以看出,瓶颈区域行人密度处于临界状态,流率低,频繁停滞,疏散人员之间会产生身体接触,服务水平概述见表1。

对比瓶颈处有无群组时的疏散过程,可以发现:(1)与无群组情况相比,由于群组成员间存在减速等待行为,此时人群堵塞持续时间更长,群组疏散速度更慢,尤其是在高密度的情况下,这

是造成有群组比无群组疏散时间更长的主要原因;(2)有群组时,最大密度和最小速度的发生时间间隔相对更大。主要原因是有群组时瓶颈处更为拥挤,此时行人流状态不稳定;(3)有无群组

两种情况下,瓶颈处开始呈现高密度状态的时间差异并不大。无群组时情况下行人会更早地到达瓶颈区域,而有群组时行人更容易形成高密度的疏散瓶颈。

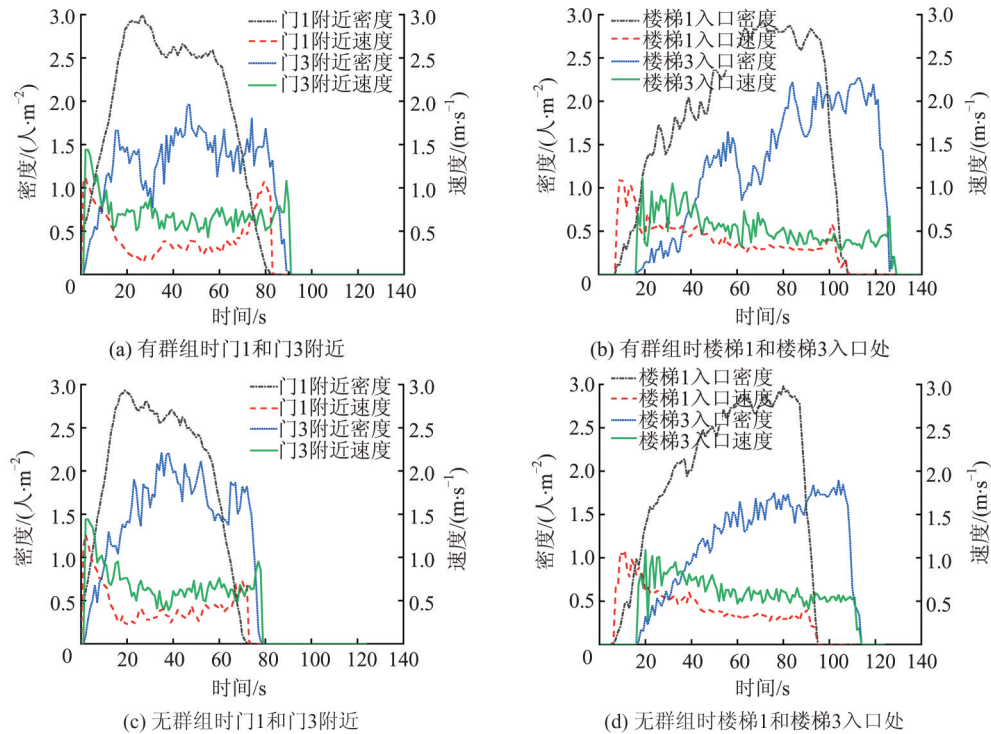


图 13 有群组和无群组时瓶颈处速度及密度对比
Fig.13 Comparison of Speed and Density at the Bottleneck with and Without Groups

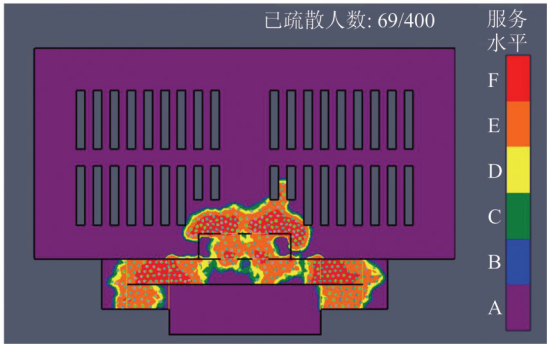


图 14 服务水平
Fig.14 Level of Service

进一步对比分析有无群组时行人的最大连续拥堵时间(疏散过程中速度低于 0.25 m/s 所持续的最长时间)、累计拥堵时间(疏散过程中速度低于 0.25 m/s 的累计时间)和运动时间(人员平均运动时间)。如表 2 所示,群组疏散场景中,最大连续拥堵时间、累计拥堵时间及运动时间分别为 3.15 s、15.61 s 和 91.44 s,而无群组情况下 3 个参数分别为 2.48 s、11.63 s 和 78.21 s。

造成上述差异的主要原因是群组成员间的等待行为,这不仅会延长自身疏散时间,也会对

周围行人流造成负面影响,延长累计拥堵时间。尤其当群组成员需要保持群组的完整性(即凝聚力)时,更加容易受到其他行人的影响,从而降低运动速度甚至出现等待行为。相比于单个行人,群组的运动速度更低,会阻碍其他速度较快的行人运动,使周围行人产生绕行或减速,最终导致整体疏散时间增加。而单人疏散时,不存在群组成员间的等待行为,因此行人停滞的概率也较低。

表 1 服务水平概述 ^[12]		
Tab.1 Level of Service Descriptions ^[12]		
等级	人均面积 /(m ² ·人 ⁻¹)	概述
A	>3.3	自由流,通行方便,可以避免碰撞
B	(2.3, 3.3]	小范围碰撞,通行和速度受到限制
C	(1.4, 2.3]	较拥挤但移动顺畅,通行受到限制,交叉或反向交会困难
D	(0.9, 1.4]	碰撞明显,速度受到影响
E	(0.5, 0.9]	交叉困难,断断续续的停滞
F	≤0.5	临界密度,低流率,频繁停滞,更多的身体接触

表2 有群组与无群组时人员疏散参数对比 /s
Tab.2 Comparison of Evacuation Parameters with
and Without Groups /s

有无群组	最大连续拥堵时间	累计拥堵时间	运动时间
无群组	2.48	11.63	78.21
有群组	3.15	15.61	91.44

通过对瓶颈区域的分析研究,本文提出公共建筑内的疏散及优化建议如下:

1)设计时要考虑群组行为的影响。上述研究表明,群组行为会对疏散效率产生负面影响,因此需要提高相关的设计规格。

2)疏散时间并不是评价疏散效果的唯一指标,不能一味追求缩短疏散时间,还需要考虑疏散过程中的人员安全。尤其是在行人成群组运动时,更容易出现局部密度过大的情况,需要提前预判可能出现这种状况的区域,并做好人员疏导。

3)疏散过程中,在没有其他行人需要帮助的情况下,鼓励行人尽量独自行走,减少对同伴的等待。

4)需要重点关注建筑内潜在瓶颈区域的设计,可以通过逐步限流等方式,达到缓解瓶颈压力而又不会产生新瓶颈的目的。

4 结 语

本文通过实地观测实验,研究了群组的运动行为特性,随后基于Pathfinder软件搭建了群组疏散模型,分析了群组行为对疏散效率的影响,研究了疏散过程中出现的瓶颈并解析了诱发拥堵的因素,具体结果如下:

1)随着群组比例增大,疏散时间一直增加,这主要是因为群组行为导致群组成员出现等待行为,并对周围行人流产生了阻碍。

2)疏散时间随着群组成员间凝聚力的增强而增加,主要原因是凝聚力增强了群组成员间的相互约束,使群组产生更频繁的停滞和等待。

3)瓶颈处行人密度与速度呈负相关。瓶颈区域行人之间有更多的身体接触,而群组行为加剧了人群拥堵,致使整体疏散效率下降。因此,在后期疏散设计中需要考虑群组这一因素。

需要指出的是,虽然本文通过疏散模拟研究了群组运动行为对疏散效率的影响,但模型并未考虑群组成员间的互助行为及不同的群组构型

对疏散时间的影响,在后续研究中仍有待进一步探讨。

参 考 文 献

- [1] Zhang J, Cao S C, Salden D, et al. Homogeneity and Activeness of Crowd on Aged Pedestrian Dynamics[J]. *Procedia Computer Science*, 2016, 83: 361-368
- [2] Yang Xue, Chen Li, Tian Huanhuan, et al. Experiments of Unidirectional and Bidirectional Pedestrian Flows Through a Bottleneck in a Channel[J]. *Journal of Shanghai University (Natural Science Edition)*, 2015, 21(3): 356-363(杨雪, 陈立, 田欢欢, 等. 单向和双向行人流经过通道瓶颈的实验[J]. 上海大学学报(自然科学版), 2015, 21(3): 356-363)
- [3] Ma Y P, Li L H, Zhang H, et al. Experimental Study on Small Group Behavior and Crowd Dynamics in a Tall Office Building Evacuation[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2017, 473: 488-500
- [4] Cao S C, Seyfried A, Zhang J, et al. Fundamental Diagrams for Multidirectional Pedestrian Flows[J]. *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*, 2017, 2017(3): 033404
- [5] Zhang Xinlong, Chen Xiuwan, Li Huaiyu, et al. An Improved Cellular Automata Model for Simulating Pedestrian Evacuation[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2017, 42(9): 1 330-1 336(张鑫龙, 陈秀万, 李怀瑜, 等. 一种改进元胞自动机的人员疏散模型[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2017, 42(9): 1 330-1 336)
- [6] Kallianiotis A, Papakonstantinou D, Arvelaki V, et al. Evaluation of Evacuation Methods in Underground Metro Stations[J]. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2018, 31: 526-534
- [7] Cao S C, Fu L B, Song W G. Exit Selection and Pedestrian Movement in a Room with Two Exits Under Fire Emergency [J]. *Applied Mathematics and Computation*, 2018, 332: 136-147
- [8] Cao S C, Wang P, Yao M, et al. Dynamic Analysis of Pedestrian Movement in Single-File Experiment Under Limited Visibility [J]. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2019, 69: 329-342
- [9] Wei X G, Lü W, Song W G, et al. Survey Study and Experimental Investigation on the Local Behavior of Pedestrian Groups [J]. *Complexity*, 2015, 20(6): 87-97
- [10] Zhang Zetian, Huang Sheng, Qu Kaibo, et al.

Study on Small Group Behavior in Human Evacuation Based on Pathfinder[C]. The 30th National Conference on Safety Science and Engineering in Universities, Heifei, China, 2018(张泽天, 黄升, 屈楷博, 等. 基于 Pathfinder 的人员疏散中小群体行为研究[C]. 第 30 届全国高校安全科学与工程学术年会, 合肥, 中国, 2018)

[11] Thornton C, O'Konski R, Hardeman B, et al. Pathfinder: An Agent-Based Egress Simulator[C]// Pedestrian and Evacuation Dynamics, Boston: Springer, 2011

[12] Lam T N. Pedestrian Planning and Design by John J. Fruin[J]. *Transportation Science*, 1972, 6(2): 214-215

Simulation of Pedestrian Evacuation Considering Cohesion of Social Groups on University Campus

YAO Ming¹ WEN Pengjing¹ CAO Shuchao¹ MIAO Jiayu¹ LIANG Jun¹ WEI Xiaoge²

1 School of Automotive and Traffic Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212000, China

2 School of Building Environmental Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450000, China

Abstract: Objectives: Pedestrian and evacuation dynamics have attracted much attention in recent decades, specifically with respect to crowd risk analysis and pedestrian safety. In our daily life, individuals do not walk alone and they often walk with their friends or families because of the social relationship. However, the effect of group behavior observed in reality is rarely investigated in current studies. **Methods:** In this paper, movement data of pedestrian social groups on corridors and stairs are obtained through observation experiments on the university campus. Evacuation model for social groups is built based on Pathfinder software to study the bottlenecks in the process of egress. **Results:** The impact of group behavior on evacuation efficiency is investigated, and the results show that the density and speed in the bottleneck area are negatively correlated. More groups and stronger cohesion among group members will significantly extend the evacuation time. Besides, jam time increases due to the existence of social groups. **Conclusions:** The group behavior must be considered during the evacuation process in the future study. In the absence of other pedestrians needing help, pedestrians are encouraged to walk independently as much as possible to reduce the waiting times for others. At the same time, the negative effect of social groups on evacuation efficiency should be considered in the design of pedestrian facilities or public buildings.

Key words: traffic engineering; evacuation simulation; Pathfinder; pedestrian group

First author: YAO Ming, PhD, associate professor, specializes in traffic safety control technology. E-mail: ymluck@ujs.edu.cn

Corresponding author: CAO Shuchao, PhD, lecturer. E-mail: sccao@ujs.edu.cn

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China (72001095); China Postdoctoral Science Foundation (2020M681507); Double Innovation Plan of Jiangsu Province; Project of Science and Technology Development of Henan Province (172102310670).

引文格式: YAO Ming, WEN Pengjing, CAO Shuchao, 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. DOI: 10.13203/j.whugis.20190203 (姚明, 温鹏景, 曹淑超, 等. 大学校园内考虑群组凝聚力的疏散模拟研究[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2021, 46(4): 578-585. DOI: 10.13203/j.whugis.20190203)