

## 基于实验的行人与疏散动力学规律研究

张俊, 李红柳, 宋卫国

(中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室, 安徽合肥 230026)

**摘要:** 随着社会经济的发展, 因大规模人群聚集引发的危害性事件屡有发生, 如何保障人群安全已成为社会关注的公共安全重要问题之一, 行人与疏散动力学的研究也受到国内外学者的广泛关注. 本文从当前行人疏散动力学的研究现状和面临的挑战出发, 讨论了观测实验、人群运动实验、动物运动实验和虚拟实验等常见的实验研究方法及其优劣, 分析了建筑结构、年龄因素、竞争强度等因素对人群运动规律的影响. 通过与人群实验结果对比, 验证了动物类比实验和虚拟实验方法在行人与疏散动力学研究方面的可行性和局限性. 针对行人与疏散动力学实验研究需求, 提出应开展大规模行人疏散实验, 发展行人运动跟踪技术, 研究社会心理因素对行人运动的影响等研究方向.

**关键词:** 行人与疏散动力学; 观测实验; 可控实验; 动物实验; 虚拟实验

**中图分类号:** X913      **文献标识码:** A      doi: 10.3969/j.issn.0253-2778.2019.12.001

**引用格式:** 张俊, 李红柳, 宋卫国. 基于实验的行人与疏散动力学规律研究[J]. 中国科学技术大学学报, 2019, 49(12): 947-956.

ZHANG Jun, LI Hongliu, SONG Weiguo. Experimental study on pedestrian and evacuation dynamics [J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2019, 49(12): 947-956.

特  
约  
评  
述

## Experimental study on pedestrian and evacuation dynamics

ZHANG Jun, LI Hongliu, SONG Weiguo

(State Key Laboratory of Fire Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

**Abstract:** Harmful events occur from time to time as a result of large-scale crowd gatherings. How to ensure the safety of the crowd has become one of the important public safety issues of wide public concern, and so has the research on pedestrian and evacuation dynamics. Based on the status quo of pedestrian and evacuation dynamics and the challenges it faces, this paper discussed the common experimental research methods including field observations, pedestrian movement experiments, animal movement experiments and virtual experiments, as well as their advantages and disadvantages. The influence of building structure, age, competition intensity and other factors on pedestrian movement characteristics was analyzed. Compared with the results of pedestrian experiments, the feasibility and limitations of animal movement experiment and virtual reality based experiment in pedestrian and evacuation dynamics research were verified. Considering the demand of the field, it is necessary to carry out some more large-scale

**收稿日期:** 2019-12-11; **修回日期:** 2019-12-25

**基金项目:** 国家自然科学基金(71704168)资助.

**作者简介:** 张俊, 中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室特聘教授, 海外高层次人才引进计划入选者. 2012年获德国伍珀塔尔大学博士学位, 2012~2017年在德国于利希研究中心从事博士后工作. 长期从事行人与疏散动力学的研究工作, 已在 Transportation Research Part C, Safety Science, Journal of Statistical Mechanics 等国际期刊上发表论文 40 余篇. E-mail: junz@ustc.edu.cn



pedestrian evacuation experiments, develop pedestrian movement tracking techniques, and study the influence of social psychological factors on pedestrian movement in the future.

**Key words:** pedestrian and evacuation dynamics; field observation; laboratory controlled experiment; animal experiment; virtual experiment

### 0 引言

随着社会经济的发展和城镇化进程的加快,现代城市规模不断增大,城市人口不断增加,老龄化速度加快,高龄趋势明显.同时,公共基础设施数量和规模急剧增大,结构和功能更加复杂和多元化,中央商业区(CBD)、公共交通枢纽等一系列大尺度多功能建筑不断涌现.尤其是重大活动和节假日,公共场

所客流量增加更加显著(如图 1),大规模人群聚集的情况越来越多,这类场所一旦发生火灾、爆炸等突发事件,聚集人群极易失去控制并导致群死群伤事故的发生.如何保证人们日常出行的舒适性和紧急情况下的安全性和疏散效率,这对公共设施服务水平和应急能力的设计提出了巨大的挑战,也是公共安全领域关注的重要课题之一.

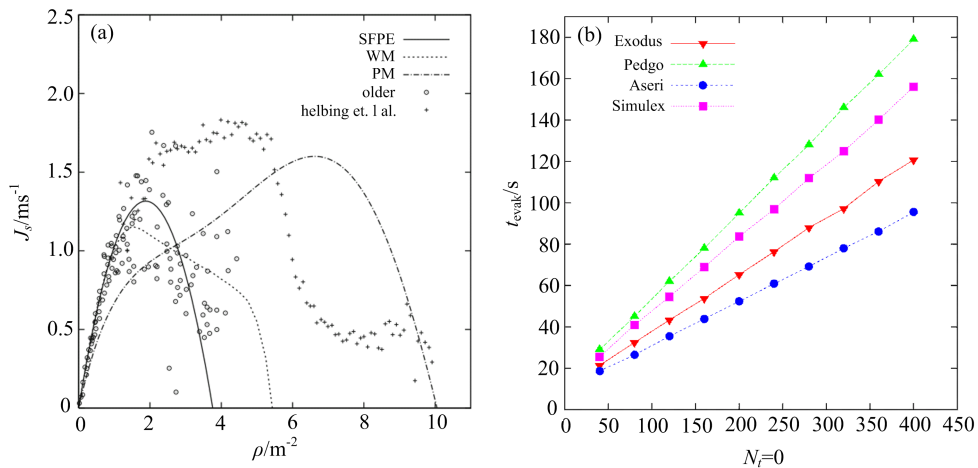
特  
约  
评  
述



图 1 (a)某地铁站的人群分布图, (b)某火车站候车室的人群分布图

Fig. 1 (a) A snapshot of pedestrian distribution in a subway station.

(b) a snapshot of pedestrian distribution in the waiting room of a railway station



(a)早期实验研究结果;(b)不同的运动模型对行人疏散的模拟结果仍存在较大不同,当前仍缺乏统一、广泛认证的疏散模型.

图 2 (a)平面内行人运动的基本图<sup>[1-5]</sup>, (b)不同行人运动模型对行人疏散模拟的疏散时间结果<sup>[6]</sup>

Fig. 2 (a) Fundamental diagrams for pedestrian movement in planar facilities<sup>[1-5]</sup>,

(b) evacuation times simulated by different pedestrian evacuation models<sup>[6]</sup>

行人疏散动力学的研究对于提高人群的安全管理水平和公共设施的服务能力具有重要的现实意义,内容涉及物理学、心理学、生理学、社会科学等多

个交叉学科和领域,因涉及大量行人间的相互作用、复杂建筑环境和外界威胁等多种因素而十分复杂.目前研究大致可分为两个方面:一是通过观测和实

验研究,统计分析行人的运动参数,量化参数间的函数关系,得到行人动力学的统计规律;二是分析人群中个体间的相互作用机理,量化行人的物理、心理及社会属性等微观特征并建立相应的理论模型,通过计算机仿真模拟人群运动,并分析人群运动的动力学特征.总体来说,关于行人疏散动力学的研究仍处于起步阶段,相关知识和理论尚不成熟,现有的技术、方法和理论仍然存在显著不足.如图 2 所示,不同的设计手册和文献资料中的基础数据之间存在较大差异,相关模型的可靠性因此无法得到定量验证,仿真结果存在显著差别,对指导实际工程工作造成了影响.

作为模型设计、校准和验证的基础,行人运动基础数据及其采集技术对于行人疏散动力学及其公共安全领域的发展至关重要.然而,人群中个体的年龄、性别、运动能力、社会群组关系、文化背景以及数据采集工具的适用性等多种因素,都会造成人群疏散动力学基础数据之间的差异.随着研究工作的不断推进,人、物、环境和管理等多种因素对行人疏散动力学特征的影响也受到研究人员的广泛关注,相关的研究方法和内容也逐渐变得系统和多样,从现

场观测到可控实验,数据的获取方法在不断发展.

现场观测是通过观察真实人群日常及紧急情况下的运动来研究行人动力学规律,被观察者和观察者之间通常没有信息的沟通与交流,主要通过获取目标环境中的视频数据来进行分析.因此,该方法具有可操作性强、风险小、成本低以及人群运动行为真实的特点,在紧急情况下的人群行为特征、大规模人群的自组织现象、人群运动动力学参数等的分析方面具有较大的优势.通过日常观测,研究人员发现了相向人流中的“分层”现象<sup>[7-9]</sup>(如图 3(a))、十字交叉路口的“分带”现象<sup>[10]</sup>;通过对踩踏事故监控录像的分析,发现了大规模高密度人群中的“走-停波”和“湍流运动”<sup>[5, 11]</sup>等现象;此外,通过在人群必经之路上人为设置观测环境可以研究不同建筑结构等因素对运动特征的影响,如本团队在某科技活动周参观现场设置瓶颈环境,观察了行人的路径选择行为<sup>[12]</sup>(如图 3(b)).由于该方法是对人群的真实运动状态进行观测,人的运动状态通常是在不同外界因素影响和驱动下的结果,具有一定的复杂性,因此难以研究单一变量对行人运动的影响机制,同时由于受数据采集技术的制约,较难获取高精度的行人运动数据.



(a)双向流行人运动中,为提高运动效率,行人自发形成了分层分布;(b)观测实验中,由于行人的初始位置距离路径的远近不同及其他行人的位置分布影响,行人做出了不同的路径选择行为.

图 3 (a)双向流观测实验中的分层运动<sup>[9]</sup>, (b)行人路径选择观测实验截图<sup>[12]</sup>

Fig. 3 (a) Lane formation of bidirectional flow in the field observation<sup>[9]</sup>,

(b) a snapshot of field observation of pedestrian route choice behavior<sup>[12]</sup>

高精度的行人运动数据和边界条件的有效设定是分析人群运动的动力学特征及其内在机理的重要前提.为了对行人疏散动力学知识有更加深刻的理解,近年来实验室条件下的可控行人运动实验方法得到了较快发展.本文将重点从人群运动实验、动物类比实验、虚拟实验三个方面介绍行人疏散动力学方面相关的可控实验研究成果.

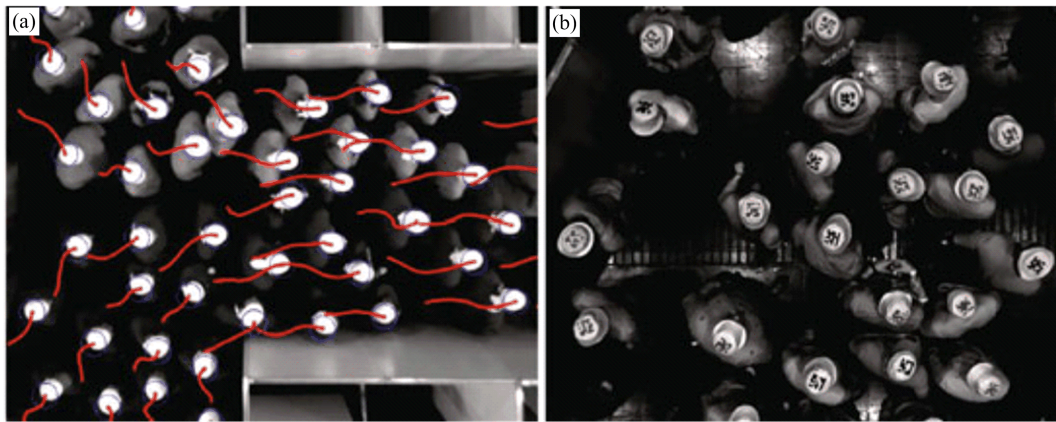
## 1 可控实验

### 1.1 人群运动实验

人群运动实验主要是根据不同的实验目的,召集一批志愿者在实验室条件下开展实验,实验过程中对环境参数进行严格控制和简化,志愿者按照实验组织者的指令运动,从而研究特定因素对人群运

动的影响. 目前开展的大多数运动可控实验是通过拍摄人群运动实验视频, 标记志愿者及标定实验场景, 利用图像处理方法提取行人运动轨迹, 分析运动

轨迹揭示行人运动规律(如图 4 所示), 从而降低实验数据的测量误差, 提高数据处理自动化程度, 加快数据分析进度.



通过对行人视频进行处理, 标记行人位置, 对实验场景进行标定, 以提取行人运动轨迹.

图 4 行人瓶颈运动(a)及场馆疏散(b)实验视频轨迹提取的截图<sup>[13]</sup>

Fig. 4 Snapshots of pedestrian trajectories extraction based on experimental recorded videos for bottleneck flow (a) and venue evacuation (b)<sup>[13]</sup>

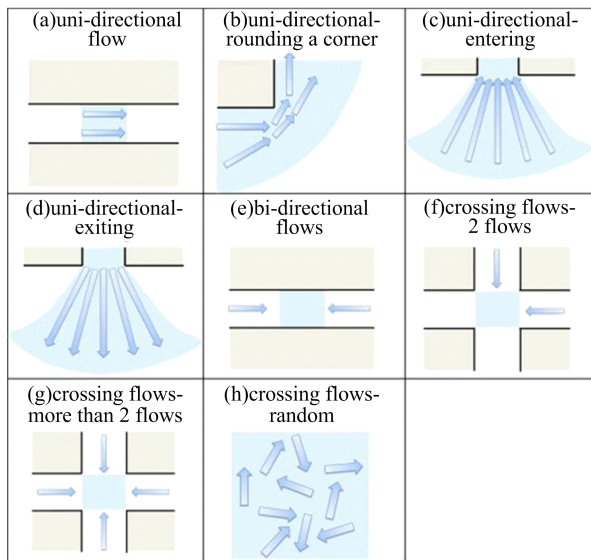


图 5 行人运动中可能出现的基本运动场景<sup>[14]</sup>

Fig. 5 Some typical scenarios of pedestrian movement<sup>[14]</sup>

如图 5 所示, 根据建筑结构和运动方向特点, 人群运动主要包括直通道单向运动、拐角运动、进入瓶颈、离开瓶颈、双向运动、双向交叉运动、多向交叉运动、随机交叉运动等基本场景<sup>[14]</sup>. 针对这些场景, 各国学者通过改变建筑结构的尺寸、角度和形状等参数已经开展了大量的实验. 研究发现, 通道宽度和人群最大密度具有一定的相关性, 在一定宽度范围内行人动力学基本图与通道宽度相互独立<sup>[15-16]</sup>. 人群的转弯速度与建筑拐角的角度之间存在一定的相关性, 转弯角度越大, 转弯速度越小<sup>[17-18]</sup>. 在人群的双向运动过程中会出现“分层成带”等自组织现象, “分

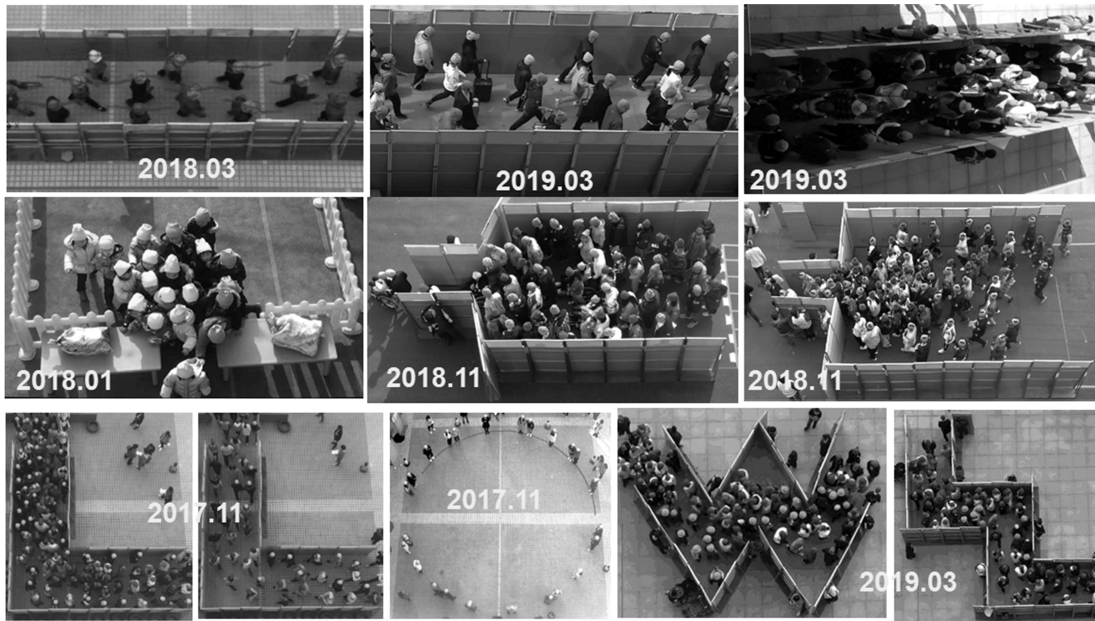
层”现象并非稳定存在, 当有行人加速超越前方行人时“分层”将会被破坏<sup>[19-21]</sup>. 多向交叉行人运动实验为认识高密度人群运动规律和大规模聚集人群的管理提供了支持, 通过实验获得了人群的运动速度、密度、流量等参数间的相互关系, 并与踩踏事故中的数据进行了对比<sup>[22]</sup>. 建筑出入口、门等突然收缩的空间结构通常会对行人流起到限制作用, 在疏散过程中极易造成拥堵导致局部高密度人群, 也是踩踏事故发生的重要诱因. 针对行人通过瓶颈的动力学特征, 研究人员通过改变瓶颈尺寸、竞争强度、人群规模等参数开展了一系列实验, 发现瓶颈入口处的流量与行人的身体尺寸、动机与建筑结构相关, 随瓶颈宽度呈线性增加趋势<sup>[23-24]</sup>, 同时也观察到了快即是慢效应<sup>[25-26]</sup>.

虽然目前已有大量的人群运动实验, 但这些实验的参与者大都是年龄介于 20 到 25 岁之间且以教育文化背景相似的学生群体为主. 在人口老龄化的社会背景下, 考虑人群构成的异质性, 考虑老年人运动特征、行为规律及出行需求, 对于提高未来城镇公共交通系统的服务能力和突发事件下的人群应急管理水平都具有重要的意义. 因此, 如图 6 所示, 自 2017 年以来本团队通过召集幼儿、青年和老年人等年龄构成的志愿者开展了一系列人群运动实验, 研究其在不同竞争强度、不同建筑结构、携带行李以及同伴群等因素下的运动规律.

图 7 是 65 岁以上老年人群在 1.8m 宽、10m 长直通道内运动实验的基本图和距离边界距离与青年

人的对比结果. 在实验过程中通过改变出入口的宽度来调节通道内人群的密度范围, 实验前要求每位志愿者以平常行走的速度运动, 每位志愿者佩戴一顶固定颜色的帽子用于后期基于视频的轨迹跟踪, 实验详细设置参见文献[27]. 通过比较老年人与中青年人的运动数据发现, 两类人群在运动基本图(速度-密度关系图)方面虽然保持相似的变化规律, 即人群速度随密度的增加呈现下降趋势, 但在具体数值方面存在明显差异. 在实验观测到的密度范围内 ( $\rho < 3.0$  人/m<sup>2</sup>), 相同密度下老年群体在通道内运

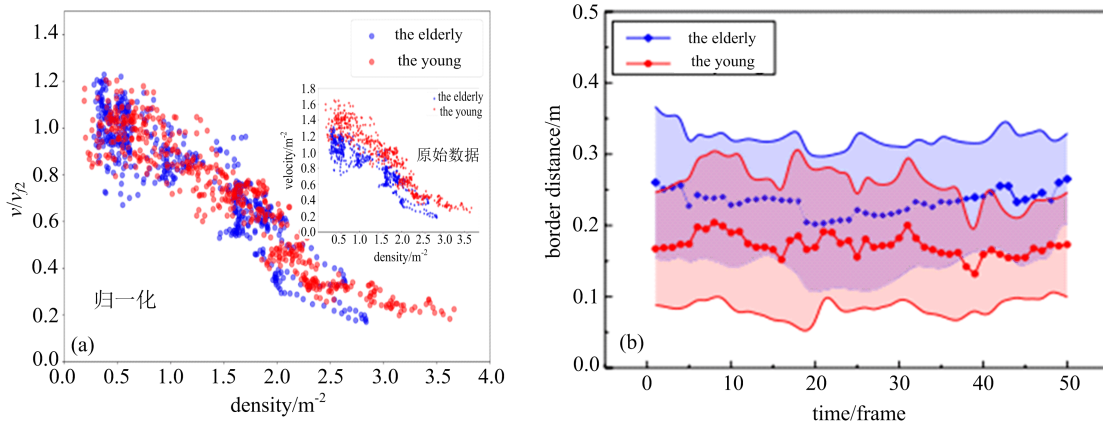
动的速度均小于青年人. 有趣的是, 当采用两类人群在密度小于 0.5 人/m<sup>2</sup> 时的自由运动速度对基本图进行归一化处理后, 两个基本图的吻合效果较好(如图 7(a)), 这也是不同群体运动基本图特征统一的条件之一. 此外, 通过对比不同人群在运动过程中与边界墙和其他行人之间的距离发现, 老年人倾向于较小的人际距离和较大的边界距离(如图 7(b)), 即与青年人相比, 老年人在通道内运动时会与墙体之间保持较大的距离, 但不排斥与其他行人之间保持较紧密的空间关系.



实验设置考虑行人年龄、运动竞争强度、建筑结构、群组、是否携带行李等多种因素, 分析实验结果, 探索行人运动规律.

图 6 本团队开展的不同年龄参与者在不同建筑结构中的行人运动可控实验

Fig. 6 Snapshots of controlled pedestrian movement experiment considering pedestrians of different ages and different building structures performed by our team



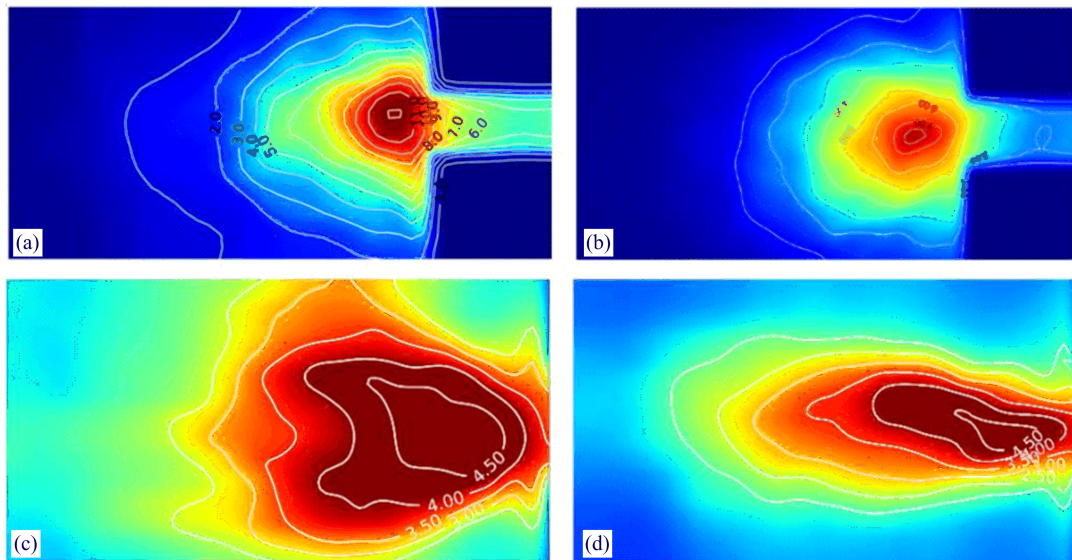
(a) 行人的运动速度随着密度的增大而下降, 相同密度下老年人的速度明显低于青年人的运动速度. 通过考虑不同行人的自由运动速度, 使老年人和青年人直通道的运动基本图吻合效果较好; (b) 直通道的运动中, 老年人和墙壁间的距离明显高于青年人.

图 7 (a) 直通道的老年人和青年人运动基本图, (b) 边界距离分布的时间演化<sup>[27]</sup>

Fig. 7 (a) Fundamental diagrams of the elders and the young in straight corridors, (b) time evolution of boundary distance distribution<sup>[27]</sup>

为了研究不同竞争强度下人群通过瓶颈的运动特征,我们召集幼儿、青年学生和老年人三类人群开展了奔跑和步行状态下的运动实验.基于泰森多边形算法以  $0.1\text{m} \times 0.1\text{m}$  划分测量区域计算密度的时空分布特征,观察年龄和运动竞争强度对人群拥堵形状的影响.如图 8 所示,在高竞争强度下,幼儿和青年学生人群均在瓶颈前半圆形区域内形成拥

堵,并且高密度区域呈现出圆形.由于身体尺寸的差异,幼儿群体和学生群体的最高密度分别达到  $12\text{人}/\text{m}^2$  和  $8\text{人}/\text{m}^2$ .相反,在低竞争强度下学生和老年人群在瓶颈前的拥堵分布在一个泪滴形的区域内,并且对于不同群体高密度区域的形状具有明显差异,相对青年学生老年人群的高密度区域分布在一个更加细长的区域.



(a) 幼儿奔跑通过  $0.5\text{ m}$  宽瓶颈<sup>[24]</sup>; (b) 青年学生奔跑通过  $0.9\text{ m}$  宽瓶颈<sup>[28]</sup>; (c) 青年学生行走通过  $0.9\text{ m}$  宽瓶颈<sup>①</sup>; (d) 老年人行走通过  $0.9\text{ m}$  宽瓶颈<sup>①</sup>。

图 8 人群通过瓶颈运动的密度热力图

Fig. 8 Density profiles of pedestrians passing through bottlenecks

## 1.2 动物运动实验

虽然可控人群运动实验能够固定边界条件,研究某些特定因素对人群运动的影响,但是志愿者人群是在实验设计者的指令下进行运动,由于不同志愿者对指令的理解差异以及配合程度等原因,实验中的运动状态和实际运动状态仍有一定的差别.尤其是要开展模拟紧急情况下的疏散实验,基于安全和伦理的考量,实验设计无法开展竞争激烈的实验,同时志愿者们在实验过程中也不愿意表现出竞争行为.在这种情况下,基于不同生物间相似性的动物运动实验成为一种新的研究方法.

动物实验是一种研究紧急疏散运动规律较好的替代方法,能够复现行人疏散中的典型运动现象.国内外学者采用老鼠、蚂蚁、羊群、鱼群等动物开展了一系列可控实验,实验中出现的“快即是慢”、“出口

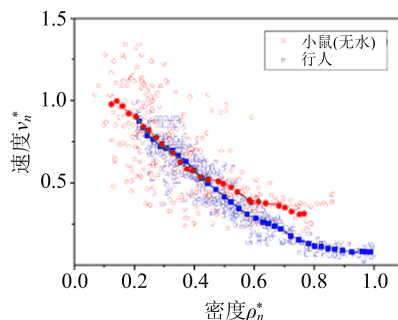
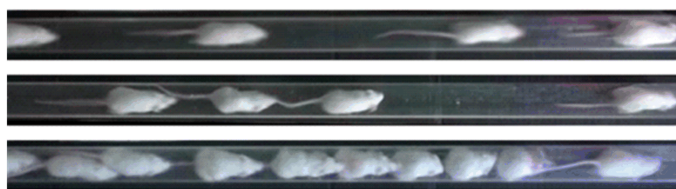
利用不均”现象等均验证了动物与行人疏散具有一定的一致性<sup>[30-33]</sup>.此外,通过羊群和小鼠通过瓶颈的实验发现,疏散时间间隔的概率分布符合幂律分布<sup>[34]</sup>,簇符合指数分布<sup>[30]</sup>,这些结果为人群动力学的研究提供了一定启发.由于蚂蚁、小鼠等动物在学习记忆和群体运动方面与人群的较高相似性,以及便于实验操作的特点,已成为较常用的动物研究对象.

为了确认小鼠在疏散动力学方面与行人的相似性,我们在如图 9 所示的一个内径  $41\text{ mm}$  的有机玻璃管内开展了小鼠单列实验,通过改变小鼠的数量来控制管道内小鼠的密度,最终获得了稳定状态下小鼠运动的密度-速度关系基本图.为了与人群运动结果在同一尺度下进行比较,我们分别以两种对象的自由运动速度  $v_{\text{free}}$  和最大密度  $\rho_{\text{max}}$  为基准对密

① REN X, ZHANG J, CAO S, et al. Comparative study of the elderly and young flow through short bottlenecks from a built room[J]. In preparation.

度和速度进行了无量纲处理. 从图 9 可以看出, 在低密度情况下归一化的速度-密度关系图与单列行人流的结果基本保持一致, 而在高密度条件下小鼠即使出现明显的身体重叠和收缩现象, 仍可保持较高的速度运动. 最终导致在整个观测范围内单列小鼠

运动的流量随密度增加表现出稳定上升的趋势, 并非像行人流一样达到临界密度后流量开始下降. 从研究结果可知, 动物的运动特性与人的相似性有其存在的条件, 要利用动物来研究人的运动规律, 验证两类研究个体的相似性条件以及边界条件非常重要.



(a)小鼠在管道内的单列运动,通过改变小鼠的数量控制管道内小鼠的密度。(b)小鼠和行人单列运动的基本图对比显示,低密度下小鼠和行人的基本图结果相似而高密度下由于小鼠身体的可重叠及可收缩性,小鼠的速度明显高于行人。

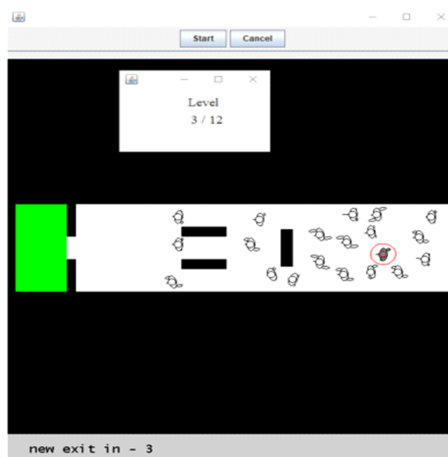
图 9 (a)小鼠单列实验截图, (b)速度-密度关系图<sup>[35]</sup>

Fig. 9 (a) A snapshot of single-file mice experiment, (b) speed-density relation diagram<sup>[35]</sup>

### 1.3 虚拟实验

虽然利用动物实验可以模拟一些突发事件下群体的疏散特征,但是人与动物之间存在明显的差别. 要开展火灾等紧急情况行人疏散实验获取人们在特殊环境中的心理行为特征,安全性和伦理道德方面的限制在目前仍然无法突破,而真实事故灾难中的人群运动数据又难以获取,这在一定程度上制约着灾害环境中人群动力学研究的发展.

近年来,随着虚拟现实(VR)技术的迅猛发展,利用三维图形生成技术、多传感交互技术以及高分辨率现实技术生成虚拟交互式的三维动态视景,通过使用与虚拟环境中各种对象的相互作用,使使用者获得身临其境的感受和体会成为可能. 因此,基于VR技术建立虚拟实验环境开展人员疏散实验获得了学者的广泛关注,在紧急情况下(如火灾、地震等)行人的路径选择、竞争行为等疏散规律、人员安全疏散诱导方法和管控策略等方面开展了一系列研究. 隧道火灾<sup>[36-37]</sup>与高层建筑<sup>[38-39]</sup>中疏散时行人的路径选择行为、行人过马路行为的生态效度<sup>[40-41]</sup>、行人间的简单避让行为<sup>[39,42]</sup>、疏散中的反应时间及外界信息对行人路径选择行为的影响<sup>[43-45]</sup>等问题都利用VR技术得到了研究. 虽然虚拟实验在紧急情况下的模拟方面体现出一定的优越性,但是虚拟实验结果的有效性仍需要进一步验证. 因此,我们通过将虚拟实验结果与观测实验、可控行人运动实验结果对比,对该方法的可靠性进行了一些初步的验证.



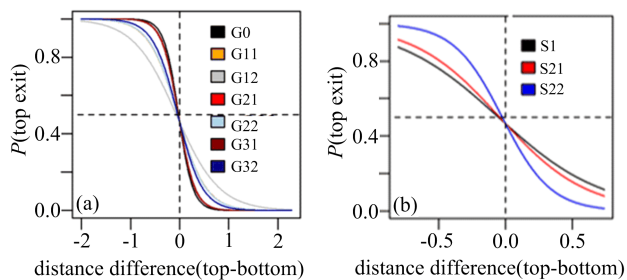
黑色方块代表障碍物,白色小人代表其他行人,实验参与者通过鼠标点击控制深灰色虚拟人物的运动,为虚拟人物的运动确定方向,使虚拟人物到达绿色区域。

图 10 路径选择虚拟实验截图<sup>[12]</sup>

Fig. 10 A snapshot of virtual experiment for route choice behavior<sup>[12]</sup>

我们通过招募 138 名志愿者参与虚拟实验控制虚拟人物的运动,研究行人在虚拟环境中的路径选择行为(如图 10 所示),分析非紧急情况下行人的初始位置、其他行人的位置分布和速度对行人路径选择决策行为的影响,并与观测实验结果进行对比<sup>[12]</sup>. 通过数据分析手段,对比分析虚拟环境实验结果与真实环境观测结果,对行人的初始位置距离路径的远近、相邻路径上的行人密度分布、相邻路径上的行人速度分布进行逻辑回归拟合,定性地证明

了行人的初始位置(如图 11 所示)和其他行人的密度分布显著影响行人的路径选择行为,而人群的速度对行人的路径选择行为无明显影响.在相邻两路径中,行人倾向于选择距离较近或其他行人占据较少的路径,而相邻路径上的其他行人速度对行人路径选择决策行为在本实验中无显著影响.从研究结果可知,观测实验中真实行人的路径选择行为和虚拟环境中参与者控制虚拟人运动的路径选择行为表现出一致性,定性证明了开展虚拟实验在行人路径选择决策行为研究中的有效性及生态效度,为 VR 技术的开展及结果验证提供了数据支撑和经验支持.



(a) 观测实验结果;(b) 虚拟实验结果.通过对实验数据进行逻辑回归,研究发现观测实验及虚拟实验中行人的路径选择行为受行人初始位置的影响,研究结果证明了虚拟实验在行人路径选择行为决策研究中的有效性.

图 11 行人初始位置对路径选择行为影响的逻辑回归分析结果图<sup>[12]</sup>

Fig. 11 Logistic regression results of the influence of pedestrian's initial position on the route choice behavior<sup>[12]</sup>

## 2 结论与展望

城市复杂公共场所密集人群的安全管理,已经成为公共安全和应急管理领域的重要研究课题.由于公共场所建筑结构功能复杂、人群构成特征多样、突发事件发生后会造成严重后果,人群疏散动力学规律又受建筑结构、文化背景、人群构成、心理因素等多种因素影响而呈现出复杂性特征.为了提高公共场所大规模人群安全管理水平,开展行人疏散动力学研究具有重要的理论意义和现实价值.

针对行人动力学基础数据不足和争议较大的问题,国内外学者目前开展了一系列实验工作,从数据获取技术、可控人群运动实验、虚拟现实实验、动物类比实验等方面出发,不断推动行人与疏散动力学领域的发展.在实验条件下研究建筑结构(如瓶颈、直通道、拐角、十字交叉口等)、年龄因素、文化差异、环境因素、性别差异等多种特定因素对人群运动和

疏散动力学规律的影响;为了研究火灾等紧急情况下的疏散规律,各国学者试图通过动物类比实验和虚拟现实实验等方式,来收集人群运动、决策、心理等基本数据,并从多个角度对现有数据和所用技术的可靠性进行了验证,在多个交叉学科领域都已经大量成果,为人群密集场所的安全管理和运动规律的研究奠定了一定的基础.

在未来的工作中,利用先进的定位和跟踪技术,在不对目标人群进行事先标记情况下获取其更加真实的运动数据,发展自动化的人群运动动力学分析技术对大规模人群的演化发展规律进行实时的监测,研究人群异质特性对人群运动规律和拥塞发生的影响,发展具有高精度的适用于复杂公共场所的人群运动数值模拟技术,结合社会心理学的研究成果开发人群智能疏散疏导技术,对于实现人群高效管理和保证人们的出行安全都具有重要意义.相关研究可以为复杂公共场所密集人群的安全管理、踩踏事故风险的防范提供科学依据,为预防踩踏事故发生,减少人员伤亡,保障公共安全和和谐社会发展提供科学支持.

### 参考文献(References)

- [1] NELSON H E, MOWRER F W. Emergency Movement, the SFPE Handbook of Fire Protection Engineering[M]. Massachusetts, USA: NFPA, 2002.
- [2] PREDTECHENSKII V M, MILINSKIĀ A I. Planning for Foot Traffic Flow in Buildings[M]. New Delhi: Amerind Publishing Company, Inc., 1978.
- [3] WEIDMANN U. Transporttechnik der fußgänger: Transporttechnische eigenschaften des fußgängerverkehrs, literaturauswertung [R]. Zurich, Switzerland; ETH Zurich, 1992.
- [4] OLDER S. Movement of pedestrians on footways in shopping streets[J]. Traffic Engineering & Control, 1968, 10(4):160-163.
- [5] HELBING D, JOHANSSON A, AL-ABIDEEN H Z. Dynamics of crowd disasters: An empirical study[J]. Physical Review E, 2007, 75(4): 046109.
- [6] ROGSCHE C, SEYFRIED A, KLINGSCH W. Comparative Investigation of the Dynamic Simulation of Foot Traffic Flow[M]//Pedestrian and Evacuation Dynamics 2005. Berlin: Springer, 2007:357-362.
- [7] SCHADSCHNEIDER A, KLINGSCH W, KLÜPFEL H, et al. Evacuation Dynamics: Empirical Results, Modeling and Applications [M]//Encyclopedia of Complexity and Systems Science. New York, NY:



- Springer, 2009:3142-3176.
- [ 8 ] HELBING D, BUZNA L, JOHANSSON A, et al. Self-organized pedestrian crowd dynamics: Experiments, simulations, and design solutions[J]. *Transportation Science*, 2005, 39(1): 1-24.
- [ 9 ] HELBING D, MOLNÁR P, FARKAS I J, et al. Self-organizing pedestrian movement[J]. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 2001, 28 ( 3 ): 361-383.
- [10] ANDO K, OTA H, OKI T. Forecasting the flow of people[J]. *Railway Research Review*, 1988, 45(8): 8-14.
- [11] WANG J, WENG W, ZHANG X. New insights into the crowd characteristics in Mina [J]. *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*, 2014, 2014(11):P11003.
- [12] LI H, ZHANG J, XIA L, et al. Comparing the route-choice behavior of pedestrians around obstacles in a virtual experiment and a field study[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2019, 107: 120-136.
- [13] Pedestrian Dynamics Data Archive[DB/OL]. [2019-11-10]. <http://ped.fz-juelich.de/da/doku.php?id=start>.
- [14] DUIVES D C, DAAMEN W, HOOGENDOORN S P. State-of-the-art crowd motion simulation models[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2013, 37: 193-209
- [15] ZHANG J, KLINGSCH W, SCHADSCHNEIDER A, et al. Ordering in bidirectional pedestrian flows and its influence on the fundamental diagram [J]. *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*, 2012, 2012(2):P02002.
- [16] ZHANG J, KLINGSCH W, SCHADSCHNEIDER A, et al. Transitions in pedestrian fundamental diagrams of straight corridors and T-junctions [J]. *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*, 2011, 2011(6):P06004.
- [17] DIAS C, SARVI M, SHIWAKOTI N, et al. Examining the impact of different turning angles on the collective egress of crowds [ J ]. *Journal of Transportation Safety & Security*, 2014, 6 ( 2 ): 167-181.
- [18] DIAS C, SARVI M, SHIWAKOTI N, et al. Experimental study on pedestrian walking characteristics through angled corridors [ C ]// *Proceedings of 36th Australasian Transport Research Forum*. Australasian Transport Research Forum, 2013:1-11.
- [19] MOUSSAID M, GUILLOT EG, MOREAU M, et al. Traffic instabilities in self-organized pedestrian crowds[J]. *PLoS Computational Biology*, 2012,8(3): e1002442.
- [20] HOOGENDOORN S, DAAMEN W. Self-organization in pedestrian flow[M]//*Traffic and Granular Flow'03*. New York, NY: Springer, 2005: 373-382.
- [21] KRETZ T, GRÜNEBOHM A, KAUFMAN M, et al. Experimental study of pedestrian counterflow in a corridor[J]. *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*, 2006, 2006(10):P10001.
- [22] LIAN L, MAI X, SONG W, et al. An experimental study on four-directional intersecting pedestrian flows [J]. *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*, 2015, 2015(8): P08024.
- [23] SEYFRIED A, PASSON O, STEFFEN B, et al. New insights into pedestrian flow through bottlenecks[J]. *Transportation Science*, 2009, 43(3): 395-406.
- [24] LI H, ZHANG J, YANG L, et al. A comparative study on the bottleneck flow between preschool children and adults under different movement motivations[J]. *Safety Science*, 2020, 121:30-41.
- [25] GARCIMARTÍN A, PARISI D R, PASTOR J M, et al. Flow of pedestrians through narrow doors with different competitiveness [J]. *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*, 2016, 2016 (4): 043402.
- [26] GARCIMARTÍN A, PASTOR J M, MARTÍN-GÓMEZ C, et al. Pedestrian collective motion in competitive room evacuation[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 1-9.
- [27] REN X, ZHANG J, SONG W, et al. The fundamental diagrams of elderly pedestrian flow in straight corridors under different densities[J]. *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*, 2019, 2019(2): 023403.
- [28] LI H, ZHANG J, SONG S, et al. Evacuation characteristics of students passing through bottlenecks [C]//*Traffic and Granular Flow 2019*. Pamplona, Spain: University of Navarra, 2019.
- [29] REN X, ZHANG J, CAO S, et al. Experimental study on elderly pedestrians passing through bottlenecks [J]. *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*, 2019, 2019(12): 123204.
- [30] LIN P, MA J, LIU T, et al. An experimental study of the “faster-is-slower” effect using mice under panic[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2016, 452:157-166.
- [31] SORIA S A, JOSENS R, PARISI D R. Experimental evidence of the “Faster is Slower” effect in the evacuation of ants[J]. *Safety Science*, 2012, 50(7): 1584-1588.

- [32] PASTOR J M, GARCIMARTÍN A, GAGO P A, et al. Experimental proof of faster-is-slower in systems of frictional particles flowing through constrictions [J]. *Physical Review E*, 2015, 92(6): 062817.
- [33] ALTSHULER E, RAMOS O, NÚÑEZ Y, et al. Symmetry breaking in escaping ants [J]. *The American Naturalist*, 2005, 166(6): 643-649.
- [34] GARCIMARTÍN A, PASTOR J, FERRER L, et al. Flow and clogging of a sheep herd passing through a bottleneck [J]. *Physical Review E*, 2015, 91(2): 022808.
- [35] XIAO H, WANG Q, ZHANG J, et al. Experimental study on the single-file movement of mice [J]. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2019, 524: 676-686.
- [36] KINATEDER M, MÜLLER M, JOST M, et al. Social influence in a virtual tunnel fire-influence of conflicting information on evacuation behavior [J]. *Applied Ergonomics*, 2014, 45(6): 1649-1659.
- [37] RONCHI E, KINATEDER M, MÜLLER M, et al. Evacuation travel paths in virtual reality experiments for tunnel safety analysis [J]. *Fire Safety Journal*, 2015, 71: 257-267.
- [38] ANDRÉE K, NILSSON D, ERIKSSON J. Evacuation experiments in a virtual reality high-rise building: Exit choice and waiting time for evacuation elevators [J]. *Fire and Materials*, 2016, 40(4): 554-567.
- [39] MOUSSAÏD M, KAPADIA M, THRASH T, et al. Crowd behaviour during high-stress evacuations in an immersive virtual environment [J]. *Journal of the Royal Society Interface*, 2016, 13(122): 20160414.
- [40] BHAGAVATHULA R, WILLIAMS B, OWENS J, et al. The reality of virtual reality: A comparison of pedestrian behavior in real and virtual environments [C] // *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*. Los Angeles, CA: SAGE Publications, 2018, 62(1): 2056-2060.
- [41] DEB S, CARRUTH D W, SWEEN R, et al. Efficacy of virtual reality in pedestrian safety research [J]. *Applied Ergonomics*, 2017, 65: 449-460.
- [42] IRYO-ASANO M, HASEGAWA Y, DIAS C. Applicability of virtual reality systems for evaluating pedestrians' perception and behavior [J]. *Transportation Research Procedia*, 2018, 34: 67-74.
- [43] BODE N W, KEMLOH WAGOUM A U, CODLING A. Human responses to multiple sources of directional information in virtual crowd evacuations [J]. *Journal of the Royal Society Interface*, 2014, 11(91): 20130904.
- [44] BODE N W, KEMLOH WAGOUM A U, CODLING E A. Information use by humans during dynamic route choice in virtual crowd evacuations [J]. *Royal Society Open Science*, 2015, 2(1): 140410.
- [45] BODE N W, CODLING E A. Human exit route choice in virtual crowd evacuations [J]. *Animal Behaviour*, 2013, 86(2): 347-358.