

公共聚集场所 出口应急疏散能力研究

STUDY ON EMERGENCY EVACUATION ABILITY OF
EXITS IN PUBLIC ASSEMBLY PLACES

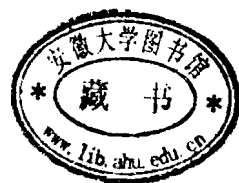
丁 辉 汪 彤 主编
代宝乾 张 晋



北京科学技术出版社

公共聚集场所出口应急疏散能力研究

丁 辉 汪 彤 代宝乾 张 晋 主编



 北京科学技术出版社

图书在版编目(CIP)数据

公共聚集场所出口应急疏散能力研究/丁辉等主编. —北京:
北京科学技术出版社, 2012. 3

ISBN 978 - 7 - 5304 - 5776 - 4

I. ①公… II. ①丁… III. ①公共场所 - 安全疏散 - 研究
IV. ①D035. 34

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 027515 号

公共聚集场所出口应急疏散能力研究

主 编:丁 辉 汪 彤 代宝乾 张 晋

责任编辑:吴 建 李 媛

责任校对:黄立辉

责任印制:张 良

封面设计:耕者设计工作室

出 版 人:张敬德

出版发行:北京科学技术出版社

社 址:北京西直门南大街 16 号

邮政编码:100035

电话传真:0086 - 10 - 66161951(总编室)

0086 - 10 - 66113227(发行部)

0086 - 10 - 66161952(发行部传真)

电子信箱:bjkjpress@163. com

网 址:www. bjkjpress. com

经 销:新华书店

印 刷:三河市国新印装有限公司

开 本:787mm × 1092mm 1/16

字 数:174 千

印 张:7. 75

版 次:2012 年 3 月第 1 版

印 次:2012 年 3 月第 1 次印刷

ISBN 978 - 7 - 5304 - 5776 - 4/D · 032

定 价:38. 00 元



京科版图书, 版权所有, 侵权必究。

京科版图书, 印装差错, 负责退换。

前言

随着经济和社会的高速发展,我国城市发展进入快速增长时期,城市规模不断扩大,人口密度不断增加。城市在聚集财富的同时也聚集了风险,遭受突发事件威胁的可能性和后果的严重程度也随之增加。出入口是应急疏散及抢险救援的必经之路,其应急疏散能力大小是目前各国研究的热点问题。

公共聚集场所的安全疏散通道、安全出口被封堵或锁闭是影响人员安全疏散的重要原因之一。安全出口是在紧急情况下,确保人员安全逃生及事故情况下消防人员进入场所内的重要途径。因此对于公共聚集场所,有效的出口应急疏散能力是保障突发事件时人员安全疏散的重要条件。

本书主要是基于人员疏散基础理论模型,通过商场现场观测、特定场景人员疏散实验和计算机仿真模拟及对不同实验结果的对比,研究公共聚集场所不同出入口条件对人员应急疏散能力的影响。主要内容概括如下:

(1)参考国内外相关文献资料,确定了公共聚集场所的定义,公共聚集场所是指存在火灾、爆炸、拥挤踩踏等潜在危险性大、人群高度聚集、流动性强而易于发生群死群伤事故,聚集人数不少于 50 人的供公众使用的活动场所。

(2)基于流体动力学的人员疏散和基于人群扰动的人员疏散基础理论模型研究。本部分根据相关实验研究和观测数据,总结出人员流动的一些具有普遍性的基本特征,提出了在中等和高密度条件下,人员的流动类似于气体和液体的流动的现象。基于流体动力学的人员疏散理论建立了适用于高密度的人员疏散连续模型,发展了该模型的差分算法,验证了该连续模型的合理性。基于人群扰动的人员疏散新模型从人群中的扰动传播现象出发,定义了人群中的压力、流动速度,研究了参数之间的关系,分析了其中的规律,建立了用于控制人员疏散的欧拉方程,并进行了解析研究。

(3)典型公共聚集场所出口行为特性的现场观测研究。通过对不同公共聚集场所,包括商场、地铁、场馆、设定实验等进行实地观测和测量,得出不同出入口的差别,不同步速人群类型的组成比例及各自步速,进而在以下几个方面对公共聚集场所出入口条件进行分类和研究:①出入口宽度的调查研究。通过实地观测,不同的出入口最明显的差别是出口宽度不同。在应急疏

散过程中,出入口人群处于拥挤状态,出入口处总是处在最大通行状态,建立了人员疏散时间与其宽度之间的函数关系。②出入口处转角角度的调查研究。由于公共聚集场所设计和经营性质的不同,在出口处有时会出现转角,转角的角度也各不相同,本书主要调查和模拟的转角角度为 90° 、 120° 、 135° 、 150° 和直线(180°)的平面疏散。③出入口处通道交叉状况的调查研究。由于公共聚集场所的设计不同,出口处通道可能出现交叉,其交叉形式也存在着不同。在紧急疏散过程中,这些不同的交叉方式会对人员疏散时间产生影响。本次调查和模拟的主要出口方式为T型和L型等。④疏散人员在应急疏散中的行为研究。本部分内容采用问卷的形式进行,调查人员为北京市某大学的120名学生和公共聚集场所随机抽查的103份调查问卷,合计发放试卷223份,回收223份,其中有效问卷209份,有效率为94%。调查问卷分析主要结论包括:a. 青年人员有近一半的人经历过疏散演习或接受过相关培训。89%的人都知道两个以上出口,64%的人会留意紧急疏散通道或除进来出口外的其他出口,81%的人会留意疏散楼梯或安全标志,这说明大部分人($>60\%$)的人对出入口的熟悉度较高。b. 在突发事件发生时,82%的人选择自己或和朋友一起迅速撤离商场,只有很少人选择原地等待救援,另外还有13%的人选择通知别人。c. 顾客对商场出入口的选择与其对出入口的熟悉程度有关。对出入口熟悉程度不同的人在出入口选择上主要差别有两点:对进来出口的选择及随人群疏散的比例。d. 多数人(82%)在紧急情况下选择立即撤离。e. 有转角的出入口处人员疏散速度减慢。

(4)人员疏散仿真模拟研究。本书选择的模拟应用软件为STEPS。在应用时,用现场观测和疏散实验数据为软件提供基本参数,并通过实验结果修正软件参数,用修正完毕的模型模拟计算各种出口条件下的人员疏散情况,模拟结果如下:

①出入口宽度对人员疏散时间影响研究。通过对不同出入口宽度(1.2m、1.4m、2m、3m)的模拟,得到不同的疏散时间,分析了不同出入口宽度条件对人员疏散时间的影响原因,并建立了出入口宽度与疏散时间的函数关系。结果表明:疏散时间随着出入口宽度的增加而减小,减小的程度逐渐减少。当达到一定值时,疏散时间不随出入口的变化而变化,此值可以成为临界值。在临界范围内,疏散时间和出入口最大通行能力有关。超过临界值,人员疏散时间不再随出入口宽度而改变时,疏散时间与疏散人员步速有关。临界范围内,人员疏散时间 T 和出入口宽度 W 的关系满足幂曲线关系: $T = a \times W^b (b < 0)$ 。

②不同转角角度对人员疏散时间影响的研究。通过对不同出入口转角

角度(90° 、 120° 、 135° 、 150° 和直线(180°)的模拟,得到不同的疏散时间,分析了不同出入口转角角度与疏散时间的关系。结果表明:转角角度越大,疏散人员转动的角度越小,人员疏散时间越小。

③不同出入口通道交叉方式对人员疏散时间影响的研究。通过对不同出入口通道的交叉方式(直线型、L型、T型及十字型)的模拟,得到不同的疏散时间,分析了不同道路交叉方式与疏散时间的函数关系,研究结果表明:若疏散通道足够宽,疏散人员不会产生拥挤时,直线型出入口疏散最快,L-1和T-1型其次,L-2和T-2型最慢。公共聚集场所在有足够宽的疏散通道时,尽量使用直线型出入口,尽量避免岔路和转弯的出现。

(5)人员疏散模型在典型公共聚集场所中的应用。本书的研究成果在地铁和展馆等公共聚集场所中进行了示范应用,分析了出入口条件对疏散时间的影响。

通过本书可以为公共聚集场所出入口的设计和改造提供参考,从而提高公共聚集场所人员应急疏散效率,缩短人员应急疏散时间,减少突发事件造成的人员伤亡,对挽救人们生命财产安全具有极其重要的意义,并可以为风险分析与控制及应急管理提供科学依据。

目 录

1	引言	1
1.1	研究背景	1
1.2	目的意义	2
1.3	研究对象的范围	2
1.4	国内外关于人员疏散的研究状况	3
1.4.1	国外相关研究综述	3
1.4.2	国内相关研究综述	8
2	人员疏散模型理论基础研究	12
2.1	人员流动的基本特点	13
2.2	高密度人群流动的物理模型研究	13
2.2.1	基于流体运动学的人员疏散模型	13
2.2.2	数值算法	19
2.3	基于人群扰动的疏散新模型基础研究	21
2.3.1	人群中的扰动传播与压力	21
2.3.2	人群流动的速度	23
2.3.3	人的反应时间和迈步时间	24
2.3.4	变截面通道人员流动分析	24
2.4	小结	24
3	典型公共聚集场所出口行为特性实验研究	26
3.1	某商场客流现场观测研究	26
3.1.1	现场观测实施方案	26
3.1.2	客流现场观测实施过程	28
3.1.3	客流现场观测结果分析	29
3.1.4	小结	35
3.2	特定场景应急疏散实验研究	36
3.2.1	实验方案	36
3.2.2	疏散实验过程	37
3.2.3	人员疏散实验研究的结果分析	38

3.2.4	疏散人员问卷调查分析	40
3.2.5	小结	46
4	人员疏散仿真模拟研究	47
4.1	仿真模拟参数的设定和修正	47
4.1.1	仿真模拟参数的设定	47
4.1.2	人员仿真模拟参数的修正	47
4.1.3	人员疏散模拟场景设定	47
4.2	不同宽度下人员疏散仿真模拟分析	48
4.2.1	不同宽度下人员疏散的物理模型	49
4.2.2	仿真模拟结果分析	51
4.2.3	仿真模拟参数的修正	72
4.3	不同转角角度下人员疏散模拟分析	73
4.3.1	不同转角角度下人员疏散的物理模型	73
4.3.2	仿真模拟结果分析	75
4.4	不同出入口通道交叉方式下人员疏散的模拟分析	80
4.4.1	不同出入口通道交叉方式下人员疏散的物理模型	80
4.4.2	仿真模拟结果分析	83
4.5	小结	89
5	人员疏散模型在典型公共聚集场所中的应用	90
5.1	典型地铁站人员应急疏散模拟与分析	90
5.1.1	场景设计	90
5.1.2	疏散模拟过程分析	92
5.1.3	模拟结果分析	94
5.2	北京某展馆人员应急疏散模拟与分析	99
5.2.1	场景设计	99
5.2.2	疏散模拟过程分析	100
5.2.3	模拟结果分析	103
6	结论与展望	113
6.1	结论	113
6.2	创新点	114
6.3	展望	115
	参考文献	116
	附录	118

1 引言

1.1 研究背景

随着经济和社会的高速发展,我国城市发展进入快速增长时期,城市规模不断扩大,人口密度不断增加。城市在聚集财富的同时也聚集了风险,遭受突发事件威胁的可能性和后果的严重程度也随之增加。

安全首要关注的是人的生命安全。在突发公共事件等紧急情况下,安全疏散是人员生命安全的重要保障手段。十几年来,我国发生了多次因疏散不利而导致事故后果加剧的群死群伤事故。例如:1994年12月8日,新疆维吾尔自治区克拉玛依市友谊宾馆火灾,造成325人死亡;2000年12月25日,河南省洛阳市东都商厦发生火灾造成309人死亡,7人受伤;2004年2月15日,吉林省吉林市中百商厦发生火灾,造成54人死亡,79人受伤;2008年9月20日,深圳市龙岗区龙岗街道舞王俱乐部发生火灾,造成43人死亡,88人受伤。这些事故在造成巨大生命财产损失的同时,也导致了极大的社会震动,引起了各相关部门和人员的高度重视。

造成这些类似事故的原因之一就是出口应急疏散能力不足,致使人员无法在较短的时间内离开危险区域。实际调查表明,火灾发生时,建筑物内遇难人员的位置大部分是在出入口处。例如1994年11月27日,辽宁省艺苑歌舞厅发生火灾造成233人丧生。灾后发现,死者呈扇形拥在门口处,尸体堆叠达9层,高约1.5m,其状惨不忍睹。据公安部有关负责人介绍,在近10年来发生的群死群伤特大火灾事故中,疏散通道堵塞、安全出口锁闭是导致人员严重伤亡的主要原因。其中,在全国一次死亡10人以上的近100起特大火灾中,三分之二以上都存在疏散通道、安全出口被封堵或锁闭的问题。因此,公共聚集场所的安全疏散通道、安全出口被封堵或锁闭是影响人员安全疏散的重要原因之一。

安全出口是在紧急情况下确保人员安全逃生及事故情况下消防人员进入场所内的重要途径。对于公共聚集场所,有效的出口应急疏散能力是保障突发事件发生时人员安全疏散的重要条件。

公共聚集场所的建筑结构特殊,功能复杂,特别是其中聚集的人员呈现典型的高密度特点和无组织性。一旦发生突发事件,在较短的时间内如何将人们全部从出口迅速疏散到外界是一个重要的问题。

北京作为首都,随着城市建设的高速发展,人口密度不断增大,公共聚集场所面

临的应急疏散压力也在加大,需要有科学、有效的应急能力评价为公共聚集场所的人员安全提供可靠的保障。因此,有必要深入分析人员在出口处通行或拥堵的行为特征和出口特征对人员应急疏散的影响作用,对公共聚集场所出口安全疏散能力进行系统研究,为公共聚集场所应急能力的量化评价提供依据,对于提高公共聚集场所的风险管理水平,具有非常重要的现实意义。

1.2 目的意义

公共聚集场所人员密度大,流动性强,组成复杂,一旦发生突发事件,极易带来人员伤亡和财产损失。在公共聚集场所突发事件中,造成人员伤亡的主要原因是在发生突发公共事件后人群不能迅速安全地离开事故发生地。因此,突发事件发生后积极疏散人群,充分缩短人员疏散时间,是减少人员伤亡的主要手段。影响人员疏散时间的四大相关因素包括^[1]:

(1) 个人及人群属性:包括人的运动属性、心理因素、生理因素(性别、肩宽、身体厚度等)、安全教育等。

(2) 建筑结构:建筑类型、出入口条件、周边辅助设施等。

(3) 人群管理:管理手段,包括电子广告屏、实施监控室、通讯手段、应急预案、管理人员素质(安全意识、管理经验、责任心等)、场所人员配备。

(4) 场所设施的维护与管理:出入口指示标志、护栏、电梯、扶梯、电力照明设施等的维护与管理。

在公共聚集场所人员疏散过程中,大量的人员会突然拥到出入口,人员会在出入口处产生拥挤排队现象。因此,建筑结构中的出入口是限制人员疏散时间缩短的瓶颈,其各种条件参数如宽度、转角等,对人员疏散时间有直接影响。本书将研究公共聚集场所出入口条件对人员应急疏散能力的影响,为合理地设计出入口条件提供参考,从而提高公共聚集场所人员应急疏散效率,缩短人员应急疏散时间,减少突发事件造成的人员伤亡,对保障人们生命财产安全具有极其重要的意义,并可以为风险分析与控制及应急管理提供科学依据。

1.3 研究对象的范围

我国尚未对公共聚集场所进行具体定义。

美国的 NFPA101, NFPA5000, UBC 等规范中对公共聚集场所的规定为:建筑物或局部聚集人数不小于 50 人的场所,如协商会议、礼拜堂或教堂、娱乐、饮食和运输等候等场所。下列场所为公共聚集场所:图书馆,集会大厅,灵堂,报告厅,电影院,保龄球馆,博物馆,俱乐部,公共的陆海空终点客站,大学,学院不小于 50 人的教室,会议室,宗教礼拜的场所,法庭,室内游泳池,舞厅,娱乐消遣平台,饭店,展览大厅,室内溜冰场,体育馆和剧院等聚集人数不小于 50 人的场所。公共聚集场所很多,不可能一一进行研究,只选择其中主要的典型公共场所进行研究。从安全角度考虑出发,根据美国 Fruin 和日本学者的定义,本书中的公共聚集场所是指符合以下两

个附加条件的公共场所：

- (1) 公共聚集场所的规模要大于 500 人；
- (2) 限制为经常性的人群密度大于 $1 \text{ 人}/\text{米}^2$ 。

因此，本书中公共聚集场所是指存在火灾、爆炸、拥挤踩踏等潜在危险性大、人群高度聚集、流动性强而易于发生群死群伤事故，聚集人数不少于 500 人的供公众使用的活动场所。

典型公共聚集场所按使用性质或是功能可分为 7 类，如表 1.1 所示。

表 1.1 典型公共聚集场所分类列表

场所类别	具体类型
文化娱乐	影剧院、歌舞厅、音乐厅、网吧、俱乐部、图书馆等
生活场所	大型商场、超市、集贸市场、人才市场等
体育场馆	体育场、体育馆、游泳馆等
交通站点	地铁站、火车站、公共汽车站等
餐饮住宿	宾馆、饭店等
宗教仪节	教堂、礼拜场所等
节日庆典	广场、公园等

1.4 国内外关于人员疏散的研究状况

随着经济和社会的发展，现代城市中的人口数量大大增加，公共聚集场所的人员密度也大大增加，随之而来的各种突发事件也在不断增加，造成的人员伤亡和财产损失越来越大。鉴于此，在突发公共事件发生时如何才能使人员更加安全、迅速地离开事发场所，尽可能挽救更多的生命，即人员应急疏散问题越来越被人们所关注，也有越来越多的学者研究其中的规律，极大地推动了人员应急疏散理论的发展。

从 1909 年第一篇有关人员疏散行为的研究文献发表至今，人类关于人员疏散的研究已经有一百年的历史。在这一百年中，人类对人员疏散的研究从疏散时间到疏散行为，从灾后调查到计算机仿真模拟，从研究人员疏散因素的影响到相关法律法规的颁布等各个方面都有了很大的发展。

1.4.1 国外相关研究综述

(1) 澳大利亚的 R. S. C. Lee 和 R. L. Hughes 首次明确提出了对人群拥挤踩踏事故的研究，主要是利用一些公开的事故数据，引入连续行人流模型，通过实例对人群拥挤和踩踏分别进行定量分析，并预测人群行为规律。文章中将人群拥挤踩踏事故死亡分为两种类型：第一种是人群中个体由于踩踏而致死；第二种为个体由于拥挤致死。文章指出移动的人群中，踩踏通常发生在拥挤之前，但是踩踏不会发生在静态人群之中等观点。最后提出应对比不同国家、不同类型群体的事故，需要对群体特征进行标准化。

(2) 德国的 D. Helbing 等研究者在文献中对于引起人群拥挤踩踏的主要原因——人群恐慌进行了详细分析,并提出了“社会力”模型。依据“社会力”模型,对人群恐慌状况下的各种自组织现象进行模拟研究。通过设定不同的场景模拟人群运动,得出“人群密集最危险的一种形式是由于恐慌引起的人群惊跑,个体之间碰撞和踩踏经常会引起重大伤亡”的观点。D. Helbing 等研究者虽然没有明确提出人群拥挤踩踏事故致因机理的研究,但其研究成果对于人群拥挤踩踏事故理论研究提供了思路。

(3) 加拿大的 C. M. Henein 和 T. White 在文献中对 Kirchner 元胞自动机模型进行了改进,并利用基于多智能体技术的计算机模拟对疏散过程中的人群行为进行了分析。在他们提出的模型中阐述了人群中的个体伤亡是由于个体之间的相互作用力达到一定的阈值,并给出了个体之间相互作用力遵循的四个基本规则。虽然 C. M. Henein 对于人群拥挤踩踏事故的主要致因——人群之间的相互作用力进行了研究,但对于个体之间作用力类别并没有进行详细分析。

(4) 法国的 L. Heigeas 等人在文献也提到了两种人群密集现象:一种是人与人之间的相互关系(规模比较小的群体之间讨论和协商等);另一种是大规模的人群密集现象,如流动和干扰。L. Heigeas 等的研究主要集中在第二种类型,即人群密集所产生的一些非协商性紧急状况下的人群密集现象。通过特征研究表明,此现象为典型的人群自组织行为。他们还构建了基于物理作用力的粒子模拟系统,对紧急状况下的人群密集行为进行模拟分析。

(5) 日本的 Kardi Teknomo 的博士论文在 D. Helbing 提出的“社会力”模型的基础上对于人群中的个体之间相互作用力中的“排斥力”进行了深入分析,并建立了相关的微观模拟模型。该论文主要是通过视频记录对行人数据收集并建立数据库,利用现实数据与计算机模拟结果对比分析来对所建立的模型进行验证分析。虽然在论文中没有提到人群拥挤踩踏事故,但其建立的微观模型对于人群拥挤踩踏事故的主要致因——人群中的个体之间的作用力进行了详细描述。

上面提到的是与人群密集事故密切相关的文献,对于人群行为方面的研究最早是从社会学的角度考虑的。目前,国外对于人群的研究主要体现在人群动力学,即通过构建相关的宏观或微观模拟模型对正常或紧急状况下的人群行为进行分析。

1.4.1.1 宏观模型

宏观模型最早由 J. Fruin 提出。另外,对行人运动变化进行描述的宏观数学模型还包括排队模型、路径选择模型、随机模型等。宏观模拟模型由于具有构造简单,所需计算能力不高,成为早期主要的疏散模拟模型。但宏观模型为了降低计算的复杂度,建筑物的平面布局被简化为网络,人群中的个体之间的相互作用只剩下对有限资源(如通道、楼梯)等的竞争,忽略了人与人之间的复杂的非线性作用。随着研究的深入及计算机技术的发展,微观模拟模型逐步取代宏观模型,越来越受到研究者的青睐。

1.4.1.2 微观模型

微观分析模型最初由 Henderson 提出^[2-4]。在他的分析模型中,认为行人的运动行为类似于气体或液体的流动,且行人行为的气态动力学方程与 Boltzmann 方程相似。但

是由于行人之间特别的相互作用，气体动力学或流体动力学理论用于行人时必须进行修正（如避免和控制速度变化等），同时人群是不遵守动量和能量守恒的。但由于对个体之间的相互影响没有进行仔细的研究，因此该模型不适于在行人区域中或具有建筑障碍的情况下的行人或行人流进行研究。Helbing 对 Henderson 模型进行了修正，并考虑行人意图、期望速度和个体之间的相互作用力。另外，R. L Hughes 采用连续介质理论研究大型人群的运动特征，并根据 Navier - Stokes 方程进一步推导出大型人群流动的控制方程和行人避免向高密度人群运动的分析方程。由于提出的微分数学模型很难进行求解，因此，通过计算机模拟方法对其进行分析已经变得越来越实用。

微观行人模拟模型（microscopic pedestrian simulation model, MPSM）是一种针对个体建模并利用计算机模拟行人移动的计算机模型，依据模拟的内部模型不同，MPSM 可以分为三类，即基于元胞自动机的模型、基于物理作用力的模型及近年广泛应用的基于多智能体（MAS）模拟模型（图 1.1）。

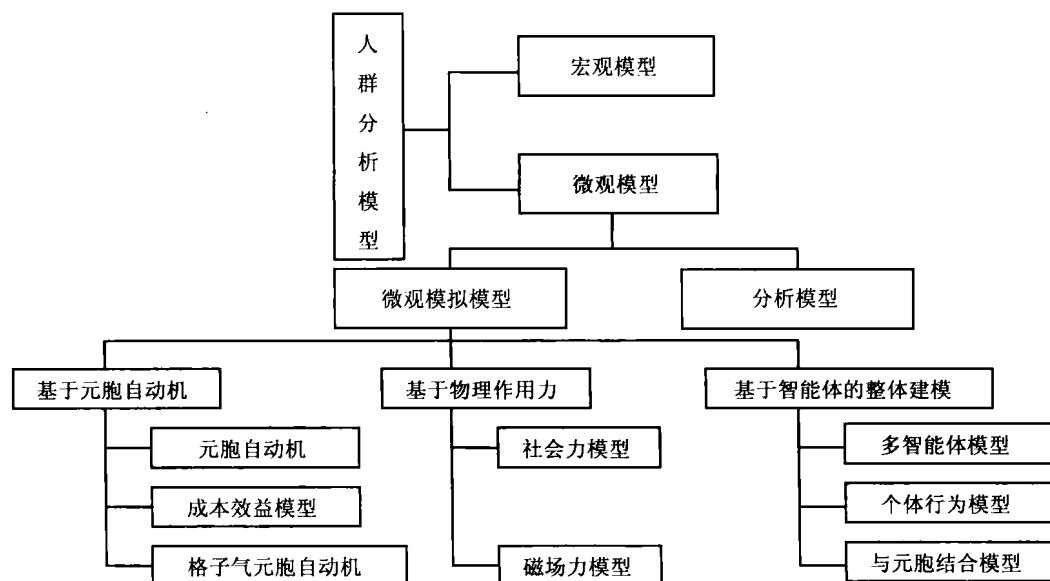


图 1.1 人群分析模型及微观模拟模型介绍

（1）元胞自动机模型。

元胞自动机是由大量简单一致的个体通过局部联系组成的离散、分散及空间可扩展系统，它最早由 Von Neumann 等人提出，起初主要用于模拟生命系统所具有的自复功能。

模型中，通常做法是把建筑物的平面空间划分为微小的正方形单元格。在任意时刻，一个单元格要么被占据（障碍物或一个个体），要么为空。因此，个体的空间位置可以由个体所处的单元格的编号所唯一标示。在模拟的过程中，时间被划分为等长的时间段，在每一时间段，所有个体依照所处的环境和自己的行为规则选择是留在原格还是移动到相邻的 8 个单元格中的一格（图 1.2）。此类模型，一般是用概率的方法给

出个体移动到邻格或留在本格的概率,再通过蒙特卡罗法确定个体的行为。元胞自动机技术具有构造简单、运算能力强、所需硬件条件较低等优点。

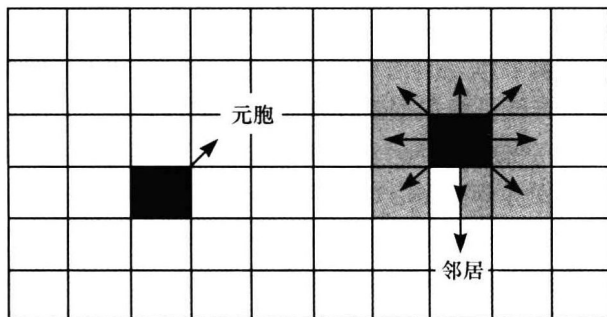


图 1.2 元胞自动机可能的转换位置

目前用于研究人群动力学并且基于元胞自动机的代表性模型是由 Ansgar Kirchner 提出的,通用模型如下所示:

$$p_{ij} = N \cdot \exp(k_D D_{ij}) \cdot \exp(k_S S_{ij}) \cdot (1 - n_{ij}) \cdot \xi_{ij} \quad (1.1)$$

式中: D_{ij} 为元胞的动态场值; S_{ij} 为元胞的静态场值; k_D 为动态场关联参数; K_S 为静态场关联参数; 而参数 n_{ij} 如果为 0 则说明个体在当前细胞内, 如果为 1 说明其他情况。其他参数表示如下:

$$\xi_{ij} = \begin{cases} 0 \\ 1 \end{cases} \quad (\text{式中 } 0 \text{ 表示禁止的细胞,例如墙; } 1 \text{ 表示其他})$$

$$N = \left[\sum_{i,j} \exp(k_D D_{ij}) \cdot \exp(k_S S_{ij}) \cdot (1 - n_{ij}) \cdot \xi \right]^{-1} \quad (1.2)$$

每个行人基于转移概率 p_{ij} 选择下一步移动的目标元胞。

格子气元胞自动机是一种特殊的元胞自动机模型,采用串行更新规则(考虑对研究对象随机编号,然后按照编号顺序进行规则更新),而元胞自动机是并行规则。格子气元胞自动机可以更好地解决行人之间的冲突问题。

成本效益模型是由 Gipps 和 Marksjo 提出的。与元胞自动机不同之处在于,每个格子被一个行人占有并基于行人之间的亲近性指定一个分数,分数代表了个体之间的排斥效应和平衡周围的个体效应。此模型虽然简单,但由于元胞及行人的分数任意给定,所以不能够用现实数据来校正。

(2) 基于多智能体的整体建模。

多智能体系统(multi-agent system, MAS)是分布式人工智能的热点课题,主要研究为了共同的或各自的不同目标,自主的智能体(agent)之间智能行为的协作、竞争等相互作用。“每个智能体代表了现实世界中一个智能性、自治的实体或个体,如人群中的个人,生态系统中的植物个体、动物个体,交通流中的汽车等”。

基于智能体技术建模,是指在模拟模型中不再将人群作为一个整体来考虑,而是将中心放在个体的人上。在模型中,每一个人都用一个计算对象表示。在模型中只定

义个人的参数和行为规则,而对其具体的行为则不作规定。在模拟的过程中,个体依照自身所处的环境,按照预先设定的行为规则选择自身的行为。在此类模型中,个体也被称为智能体。这类模型成为基于智能体技术的模拟模型。

基于多智能体的整体建模模拟方法是一种用于研究复杂系统的新型方法,它是利用智能体的局部连接规则、函数和局部细节模型,建立起复杂系统的整体模型,借助计算机模拟工具、软件来研究系统的复杂性,研究如何从小规模性质突现出大规模系统行为的一种方法。

MAS 应用最早为交通系统。1992 年, Frank Bomarius 提出一种用于交通模拟系统的 MAS,思路很简单,即把全部用到的物体均作为能够相互通讯的智能体。2000 年 Rossetti 等采用 MAS 技术分析了驾驶员行为建模的复杂性,提出了一种基于 MAS 的微观模拟模型 DRACULA。Ehlert 在 2001 年利用反应型智能体建立了能够产生多种驾驶决策的驾驶员模型,实现了一个基于 MAS 技术的城域交通模拟环境。而后 MAS 在生态系统等方面也有相关应用。近年来,许多研究者已经尝试构建基于 MAS 的人群中的个体行为模型并进行模拟,其中 P. A. Langston 等借鉴 MAS 建模思想对个体行为进行模拟分析。

随着人员疏散研究的深入,研究内容逐渐从疏散时间扩展到相关领域的多个方面,许多学者对影响人员疏散的各种因素的研究更加深入和细致。

英国伦敦运输部门、加拿大 Pauls、前苏联 Predtechenskii 和 Milinskii、美国 Fruin 等研究机构与学者对人员行走速度与密度的关系进行了开创性研究,这些研究成果至今仍被广泛采用。

日本 Togawa、英国 Melink 和 Booth 等在大量观测的基础上,分别给出了计算人员疏散时间的经验公式。他们利用出口容量法软件,在模拟中主要考虑的是建筑物的出口容量或根据建筑物的人口负荷确定出口数量和宽度、疏散路线长度。英国 Filippidis 等研究了人员识别标志的最大距离同视线角度之间的关系^[5]。日本 Nagai 等在研究建筑物出口的不同分布对人员疏散的影响时,考虑了能见度为零的情况^[6]。

20 世纪 90 年代后,研究对象的各种属性对疏散行为的影响越来越受到学者的关注。1995 年, Bryan 统计分析了火灾中性别因素对人员第一行为产生的影响。研究发现在意识到火灾发生后,首先选择灭火行为的人员中,男性比例较大,而女性则更多地选择通知他人或协助他人疏散。武汉大学的方正等开发了一种拥挤动力学模型,并利用该模型对拥挤人群的速度影响因素作了分析。文章指出,拥挤人群的速度受到两个因素的影响:第一,前后人员的相互作用;第二,疏散人员的自我控制意识。前者得出人员密度和人员速度的关系,后者基于人员摆脱人流控制意识。

在研究建筑物对疏散行为的影响方面, Fruin、Polus 和 Hankin 等通过观测,分别给出了建筑物出口涌流能力(也称作出口流量系数)的取值范围;2000 年, Still 定性地研究了通道转角对人群疏散的影响^[7]。2002 年,匈牙利 Helbing 等人通过分析走廊宽度局部增大对人流通行效率的影响,得出走廊边界变化角度与人流通行效率的关系曲线^[8]。

1.4.2 国内相关研究综述

(1) 上海交通大学的卢春霞在其“人群流动的波动性分析”一文中依据波动理论,特别是激波理论,对于拥挤人群的机理进行了相关研究。在其文章中把移动的人群视为一连续介质,人群中产生的任何扰动(直接表现为密度的变化)都将以波的形式在人群中传播,同时由于人群中个体间的差异,导致波发生非线性畸变,最后可能导致激波的产生,即拥挤事故。并通过特征值解法及 Mathlab 软件,求解了对于不同的初始密度分布曲线、不同的速度,预测激波将在何时何处发生,即揭示激波产生的规律,总结了消除激波的一些措施,如改变边界条件、控制初始密度、设置畸点等,以避免拥挤事故的发生。这是国内对于人群拥挤踩踏事故机理研究的首次阐述,但并没有提出完整的理论框架。

(2) 沈阳建筑大学的张培红等吸取“社会力”模型中行人运动受到社会力支配的思想,综合考虑行人之间的相互影响,利用智能体技术,在人员流动行为规则的指导下,建立群集流动的微观动力学模型,借助自适应网格生成技术实现了人员群集流动的计算机模拟。与卢春霞研究的不同之处在于其建立了人群运行的微观模拟模型,但对于人群拥挤踩踏事故致因机理等并没有进行论述^[9,10]。

(3) 南开大学城市公共安全研究中心对人群滞留和人群安全疏散定量方法进行了研究,提出了对于拥挤踩踏事故分析的一般方法,用群集指数来表征人群高度密集这一参量,对近年来国内外人群拥挤踩踏事故进行分析,提出了事故预防和控制重点。

(4) 国内其他对于人群拥挤踩踏事故的描述多偏重于社会管理方面,如同济大学的胡志莹、中国人民公安大学的寇丽平等的研究。

在研究出入口对疏散能力的影响方面,我国学者郭朝光对大型建筑物中合理设置安全出口数量和宽度进行了初步探讨^[11]。文章指出安全出口的数量应根据场所的最大容纳人数确定,宽度可使用人数和百人宽度计算。西安建筑科技大学的王莹^[12]也对地下公共建筑的出口布置、数量和宽度进行了初步探讨。

同济大学的马俊驰等^[13]借助人员疏散仿真软件 SIMULEX,定量分析了通道转角对人员疏散的作用。文章指出:通道转角对人员疏散具有明显的影响,影响程度随转角的增加而增大,而且与人员密度关系密切,人员密度越大,转角的作用越明显。

中国科学技术大学的宋卫国等^[14]研究了部分出口条件对人员疏散的影响。该文主要研究了出口的宽度和厚度对人员疏散的影响。文中指出,如果出口宽度小于临界出口宽度,可以通过加大出口的宽度来提高疏散速度;而如果出口宽度大于临界出口宽度,加大出口宽度对疏散时间的影响则很小。当出口的宽度较小时,疏散时间存在一个最小值,相应的,期望速度有一个最佳值。随着出口宽度的增加,最佳期望速度增加,并且最佳期望速度现象变得越来越不明显。随着期望速度的增加,疏散时间减小,但是减小的程度越来越弱,有向一个渐近值靠拢的趋势。当出口宽度较大时,出口厚度对疏散时间的影响也越来越小,直到不同的出口厚度对应的疏散时间完全相同,出口厚度的影响可以完全忽略。

广州大学的田娟荣等^[15]研究了地铁出口条件对人员疏散的影响。文章通过仿真模

拟,重点研究了疏散通道的开启数量和开启时间的不同对人员疏散造成的不同影响。文中指出,不仅是因为减少了出口的数量,更为严重的是会导致大量的人员聚集在出口附近,大大增强了疏散的“瓶颈”现象,从而降低了疏散的效率。另外,还可能造成不利于人员疏散的“反向流”现象。

近年来,陈宝智教授对紧急状态下的人员疏散问题一直比较重视,在他的指导下,温丽敏博士对发生化学品泄漏等重大事故时社区范围紧急疏散的原则和应急方案进行了研究,利用遗传算法对街区疏散方案进行了优化决策^[16]。

近年来,随着我国政府对公共安全的日益重视,公共聚集场所逐渐成为研究热点。

此外,还有学者研究了应急照明系统、自动扶梯与楼梯等建筑细部结构对人员疏散的影响。

在计算机技术方面,我国和国外存在一定的差距,我国的计算机人员疏散软件的开发落后于国外。但我国学者通过不懈的努力,在人员疏散软件模型开发方面取得了一定的成果。

1997年中国科学技术大学的袁理明提出了一种计算疏散时间的数学模型,此模型提出安全疏散时间即为火灾探测系统发出报警信号的时间到人员安全疏散出建筑的时间,但没有考虑当人们听到或发现报警信号后的确认反应时间。

同年,华中理工大学黄恒栋分析了室内人员在疏散通道中的迁移流动集结时间特性和安全出口的人流流出时间特性^[17]。

1998年,东北大学的温丽敏、陈全等提出了一种火灾中群集疏散的模型,并且采用了计算机仿真的方法计算人员疏散行动时间。该疏散模型中按照设计人员设计的路线进行疏散。由于疏散人员的生理特征的不同,疏散能力也有所不同,遇到不利于疏散的人员特征时,采用降低整个疏散能力平均值的方法。

1999年,中国建筑科学院建筑防火研究所的刘文利、熊洪等提出利用网络控制原理对地下商业街建筑人员疏散行为进行仿真模拟,建立了相应疏散预测模型^[18]。

公安部天津市消防所在2000年左右建立了一个地下商场人员疏散模型,属于粗网格群体描述的最优化模型^[19]。

2001年,武汉大学的方正博士和香港城市大学的卢兆明博士提出了利用计算机虚拟现实的技术收集人员在火灾中行为量化数据的调查方法,并结合火灾后的问卷调查及疏散演习等手段收集了大量有关火灾中人员行为的数据,建立了局部细网格和个体描述的疏散网格模型SGEM,并采用该模型对香港的一些实际工程进行了较为成功的疏散模拟^[20]。

北京市劳动保护科学研究所自2002年下半年开始,结合所承担项目,对应用人员疏散计算机模拟技术定量评价人员密集的城市典型公共场所的方法进行应用研究,已经将该技术用于北京王府井步行街、地铁车站和大型场馆及大型活动的人流组织和疏散安全分析^[21]。

近年来,各国已开发并完善了多种人员安全疏散模型,并形成了界面友好、便于使用的评价软件,利用这些分析设计工具对各类建筑中人员的安全疏散进行评估,取