

建筑物内行人疏散模型 和行为特征

MODELING PEDESTRIAN EVACUATION
IN BUILDINGS AND
BEHAVIOR ANALYSES

许 岩 永 贵 / 著



中国经济出版社
CHINA ECONOMIC PUBLISHING HOUSE

建筑物内行人疏散模型 和行为特征

MODELING PEDESTRIAN EVACUATION
IN BUILDINGS AND
BEHAVIOR ANALYSES

许岩永贵/著



中国经济出版社
CHINA ECONOMIC PUBLISHING HOUSE

北京

图书在版编目 (CIP) 数据

建筑物内行人疏散模型和行为特征 / 许岩, 永贵著.

北京: 中国经济出版社, 2017. 10

ISBN 978 - 7 - 5136 - 4914 - 8

I. ①建… II. ①许… ②永… III. ①建筑物—安全—疏散—建筑设计 IV. ①TU998. 1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 251561 号

责任编辑 贺 静

责任印制 巢新强

封面设计 华子设计

出版发行 中国经济出版社

印刷者 北京富泰印刷有限责任公司

经销者 各地新华书店

开 本 700mm × 1000mm 1/16

印 张 8.75

字 数 97 千字

版 次 2017 年 10 月第 1 版

印 次 2017 年 10 月第 1 次

定 价 58.00 元

广告经营许可证 京西工商广字第 8179 号

中国经济出版社 网址 www.economyph.com 社址 北京市西城区百万庄北街 3 号 邮编 100037

本版图书如存在印装质量问题, 请与本社发行中心联系调换 (联系电话: 010 - 68330607)

版权所有 盗版必究 (举报电话: 010 - 68355416 010 - 68319282)

国家版权局反盗版举报中心 (举报电话: 12390) 服务热线: 010 - 88386794

前 言

随着人群安全问题越来越多地引起人们的关注,行人疏散的研究日益成为行人流研究领域的热点。该研究作为设计建筑物疏散性能、系统规划和管理群体活动的理论依据,能有效维护群体行为秩序、优化疏散过程和提高疏散效率。近年来,很多致力于这方面研究的学者已取得了一些重要成果,但由于行人流问题本身的复杂性,尚有很多问题需要进一步的探讨。本书从行人对自身的控制能力入手,将反馈和优化两种思想通过建立微观模型引入建筑物内的行人疏散问题的研究中,重点研究行人在疏散过程中的决策机理,揭示产生拥挤的微观机制,再现现实的疏散场景。本书的创新点主要体现在以下几个方面:

首先,基于当前元胞的被影响区域内基于方向的行人密度,提出了一个改进的层次域元胞自动机模型,模拟了多出口建筑物内的行人疏散过程。模拟结果表明,行人密度和被影响区域半径均会很明显地影响疏散时间;盲目、频繁地选择具有更小行人密度的移动方向会使得疏散时间增加。

其次,针对多出口建筑物内的行人疏散问题,将疏散个体对行人流演化趋势的预测通过两种方式引入,分别为方向可视域和剩余方向可视域,依次用来表示疏散个体对于可视范围内前方和其余方向的行人流演化趋势的预测,从而改进了原始层次域元胞自动机模

型。由数值模拟结果得到,改进模型可以准确地刻画行人的出口选择行为,与同类型模型相比,改进模型可以显著地提高疏散效率。

再次,将行人对出口处的两种信息的感知能力:一是行人对出口宽度效用的感知能力,属于静态信息;二是行人对出口处拥挤程度的感知能力,属于动态信息,分别引入了原始层次域元胞自动机模型。一方面模拟了出口不均衡分布方式下的行人疏散问题;另一方面使用 Logit 离散选择原则刻画了行人异质分布时的初始出口选择策略。模拟结果显示,合理考虑行人对出口及周围信息的感知能力,可以使得出口被有效利用,从而减少疏散时间。

复次,除疏散时间外,将单位能量消耗作为评价疏散效率的另一标准,通过参数组合,得到了疏散效率的帕累托最优。

最后,通过将疏散空间离散成正菱形网格改进了层次域元胞自动机模型,避免了行人在疏散过程中靠近房间墙壁或障碍物移动,更加贴近现实。

本书适合公共安全与应急管理、交通运输规划与管理、系统科学与系统工程等专业领域的高年级本科生、研究生,以及相关学科的教师阅读,也可供从事交通运输规划与管理的工作人员参考。

本书的出版得到国家自然科学基金青年项目(71401083)、国家自然科学基金地区项目(71661024)、内蒙古自治区高等学校“青年科技英才支持计划”(NJYT-15-B06)和内蒙古财经大学复杂系统分析与管理学术创新团队的支持。另外,感谢参考文献的提供者,以及参与研究的所有人员。

笔者

2017年9月

目 录

contents

1	绪 论	1
1.1	建筑物内行人疏散模型和行为特征研究的重要性	1
1.2	国内外关于行人疏散研究的概述	5
1.2.1	行人疏散行为研究	5
1.2.2	行人疏散模型研究	7
1.3	主要研究问题和思路	23
1.3.1	研究目标	23
1.3.2	研究内容	24
2	基于规避拥堵的出口选择行为模拟	27
2.1	考虑移动方向行人密度的改进层次域元胞自动机模型	27
2.1.1	模型描述	28
2.1.2	行人均匀分布的数值模拟	29
2.2	考虑方向可视域的改进层次域元胞自动机模型	33
2.2.1	问题背景	33
2.2.2	模型描述	34
2.2.3	行人异质分布的数值模拟	37
2.3	本章小结	48
3	基于行人流预测的疏散模型	49
3.1	模型描述	49

3.2	数值模拟	51
3.2.1	疏散场景	51
3.2.2	疏散时空分布图	52
3.2.3	疏散时间	53
3.2.4	模型对比	54
3.3	本章小结	56
4	考虑行人对出口宽度感知能力的疏散模型	57
4.1	模型描述	58
4.2	出口宽度分布的不均衡性	59
4.3	数值模拟	61
4.3.1	不均衡系数	62
4.3.2	疏散时间	64
4.4	本章小结	68
5	改进静态层次域和出口选择模型	69
5.1	模型描述	69
5.1.1	改进静态层次域	69
5.1.2	基于 Logit 离散选择原则	70
5.1.3	模拟流程	71
5.2	数值模拟	71
5.2.1	疏散场景	71
5.2.2	疏散时间	72
5.2.3	疏散时空图	74
5.2.4	参数 θ 灵敏度分析	76
5.3	本章小结	78
6	行人疏散模型的帕累托最优评估	79
6.1	问题背景	79

6.2	模型描述	80
6.2.1	出口附近的行人密度	80
6.2.2	半动态层次域	80
6.2.3	转移概率	81
6.2.4	单位能量消耗	81
6.2.5	帕累托最优	81
6.3	疏散模拟	82
6.3.1	出口疏散能力	82
6.3.2	单位能量消耗	85
6.3.3	疏散时间	87
6.3.4	帕累托最优	88
6.4	本章小结	88
7	基于菱形网格的行人疏散元胞自动机模型	90
7.1	问题背景	90
7.2	模型描述	90
7.3	疏散模拟	93
7.4	本章小结	97
8	结论与展望	98
8.1	主要研究结论	98
8.2	未来研究展望	100
	参考文献	103
	索 引	129

1 绪 论

1.1 建筑物内行人疏散模型和行为特征研究的重要性

中国是一个人口大国，中国国家统计局公布的第六次全国人口普查的主要数据显示，过去 10 年中，中国的人口净增长为 7390 万人，总人口超过 13.7 亿人。随着中国国民经济的持续稳定发展，中国现代化、城市化水平显著提高。现代城市发达的交通网络使居民出行特点、出行环境均出现了较大变化，居民出行频率、出行时间与以前相比有较大的增加。加之我国部分区域人口密集，人们可以很便利地完成短时间、高密度的聚集。一直以来，解决机动车引发的交通问题更多地吸引着人们的眼球，而步行对于解决城市交通问题的重要意义却没有被提升到一定的认知高度。

步行可以独立地成为一种交通方式，并且存在于各类交通出行的两端环节。我国城市居民出行中选择步行出行的比例基本在 20% 以上（苏州除外，见图 1-1），最高达 56.39%（兰州，2001 年），平均出行比例为 34%^[169]。

步行是一种基本的交通方式，行走的服务水平直接关系到人们

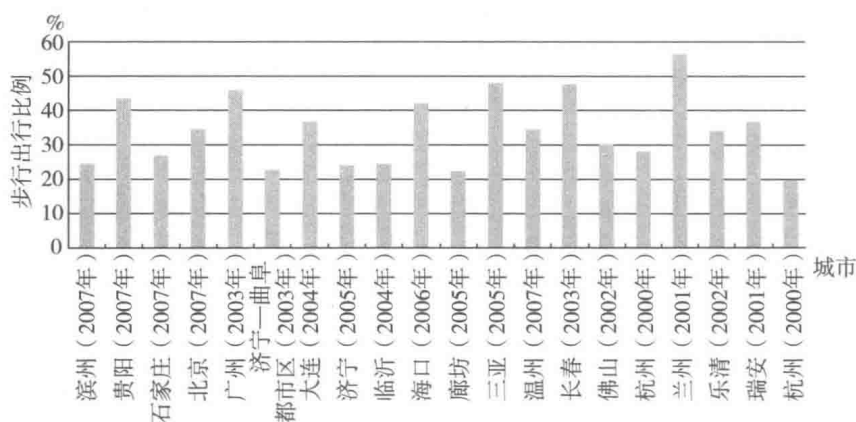


图 1-1 我国部分城市步行交通出行比例

的生活质量。在一些公共活动场所，如俱乐部、商场、体育馆、地铁站和教堂等，各类设施都需要满足行走的需要，人们采用步行的方式参与活动，行走的服务水平直接关系到活动的质量。由于这些场合的封闭性特点，和特定情况下行人密集，如国庆黄金周的热门景区（见图 1-2），行人又只能通过有限的出口疏散出去，无疑给疏散带来了很大的难度。需要有效地进行行人交通组织、设施及管理方案设计及管理控制，以提供良好的活动过程中的行人交通服务。如果设计、规划和管理控制上出现问题，将会造成参加人员的不便，给参加者带来安全隐患，更严重甚至会威胁到参加者的生命安全。总结国内外的经验教训，建筑物内活动中过度拥挤是造成事故的主要原因。拥挤降低了环境的舒适度，提高了引发突发事件的概率和安全风险。由于行人密度过高，加上内部扰动或者受到外界冲击的作用，行人在加快速度过程中受到阻碍，会发生速度突然降低的情况，于是由拥挤形成行人之间的踩踏，从而引起行人的伤害事故。表 1-1（根据有关新闻报道的不完全统计）列出了一些公共场所内

的行人伤害事故。

空间的封闭性是一个相对的概念,许多开放类的公共场所如城市里的广场和闹市区的步行街等,虽然没有封闭的围墙将其与周围环境隔绝开来,其实它们也处在周围各类建筑和市政设施等障碍物的包围之下,行人只能通过有限的出口疏散到周边环境,如图1-2(b)所示。在特定的情况下,当人群密度过大时,这些场所便会表现出类似于商场和体育馆那样的封闭性特征,内部人流不畅,出口过于拥堵。因此,对具有严格意义上封闭的公共场所内行人疏散问题进行研究,可以将其推广应用到其他场合。

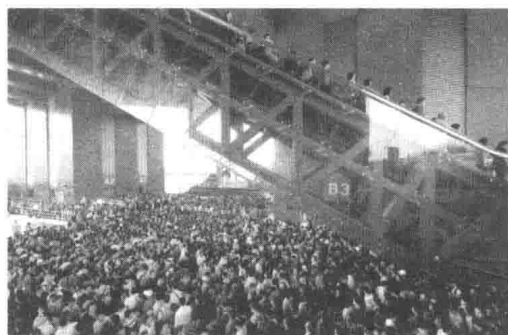
表1-1 部分公共场所内的行人伤害事故

地 点	时 间	事 件	伤 亡
加纳阿克拉	2001年6月10日	足球场骚乱	死伤约150人
中国丰镇	2002年9月23日	第二中学楼梯 护栏坍塌踩踏事故	死亡约21人, 受伤约47人
中国吉林	2004年2月15日	吉林中百商厦火灾	死亡约54人
沙特麦加	2005年1月22日	慕尼耶圣地拥挤	死伤约500人
印度怀伊	2005年1月25日	曼达德维神庙踩踏事件	死亡约300人
中国重庆	2007年11月10日	“家乐福”踩踏事故	死伤约34人
坦桑尼亚	2008年10月2日	舞厅拥挤发生踩踏事故	死伤约70人
中国福建	2009年1月31日	酒吧火灾	死伤约37人
中国上海	2010年11月15日	上海静安区公寓楼火灾事故	死亡约58人
柬埔寨金边钻石岛	2010年11月22日	“送水节”踩踏事故	死亡约378人 受伤约755人
中国新疆	2010年11月29日	阿克苏第五小学踩踏事故	约41名小学生受伤
印度喀拉拉邦	2011年1月14日	宗教活动踩踏事故	死伤约200人
马里巴马科	2011年2月21日	体育场踩踏事件	死伤约100人
中国台湾	2012年10月23日	“卫生署”台南新营医院火灾事故	死伤约82人

资料来源: <http://baike.baidu.com/view/4767633.htm> 等其他网站。

随着人群安全问题越来越多地引起人们的关注,研究人群安全

和行人疏散问题已经成为建筑物疏散性能的设计、人群聚集活动的系统规划和管理的理论依据，最终可以达到维护群体行为秩序、优化疏散过程和提高疏散效率的目的。



(a)



(b)

图1-2 2010年“国庆黄金周”期间10月3日的上海世博园区中国馆(a)和
10月1日的南京玄武湖景区(b)的拥挤人群

资料来源：<http://economylaw.net/show.aspx?id=1170&cid=7>。

在这样的背景下，有必要对我国行人的运动基本特性进行全面的认识和研究，特别是对拥挤人群的动力学特性、行人行为特征进行分析，总结出针对我国国情及行人个体条件的行人行为模型。在认识观念上改变对行人轻视的看法，重视相关研究与应用；在技术层面上利用这些成果在基础设施规划设计、行人交通组织、建筑物

应急疏散等方面达到科学、合理、以人为本的目标,为构建和谐社会做出贡献。

1.2 国内外关于行人疏散研究的概述

国际上对行人疏散的相关研究已持续了近百年,该领域随着公共安全日益受到各国政府和公众的关注,已成为当今一个研究热点。国际上相关学术会议已经举办了多次,其中较为著名的有国际人群拥挤安全工程会议(International Conference on Engineering for Crowd Safety)^[113]和行人疏散动态学会议(Conference on Pedestrian and Evacuation Dynamics,简称PED)。前者于1993年在伦敦举办;后者已经举办了八届,第八届PED大会于2016年10月在中国合肥召开。PED大会的召开表明在这个快速发展的领域,行人疏散动态学和相关的行人行为研究将会为政策的制定和设计者以及解决实际问题的应急管理人员提供依据。

1.2.1 行人疏散行为研究

行人疏散是一个十分复杂的过程,其中最具吸引力且最具挑战性的是对疏散中行人的行为研究。关于行人的行为研究涉及诸多方面,如人与人、人与建筑物之间的相互作用,以及人的社会角色、知识水平、认知能力、性别和自身心理因素等。

行人疏散过程一般可分为两种情况,即正常情形下的疏散和紧急情形下的疏散。在这两种情形下,疏散的动态过程与结果是完全不同的。

正常情形下,疏散人群及个体具有以下一些明显的行为特征^[48,52,189]:

(1) 个体倾向于选择到最近的出口的最短路径。通俗地说,不愿意走弯路。

(2) 在不受干扰时,个体愿意以其期望的速度(大小和方向)行走,也就是最小能量消耗。在人群中,个人的意愿行进速度服从正态分布。其平均值为 1.34m/s , 标准差为 0.26m/s 。

(3) 个体总是尽可能地与他人及障碍物保持一定的距离,特别是陌生人。这个距离在人群越慌乱的情况下越小,并且随着人群密度的增大而减小。

紧急情形下,疏散行人往往会感到恐慌。恐慌是指人群中的个体情绪处于恐慌状态,有时会失去理性,从而做出一些在一般的情形下不会做出的行为。行人的心理恐慌一般在紧急疏散的情况下产生。心理恐慌的表现形式包括:反应过度(冲动)、跟随现象、从众行为等。造成恐慌的原因多种多样,有时甚至没有明显的原因。而在人群中,恐慌情绪的蔓延则是十分迅速的。Helbing 等总结了恐慌状态下疏散的一些动态特性^[46, 48]:

(1) 个体试图以大大高于正常状态的速度前进。

(2) 个体之间开始推挤,产生自然的物理作用力,即拥挤力。有时人群中的拥挤力足够大,以至于会对个体造成生命危险。受伤倒下的个体充当了障碍物,进一步减缓了疏散的进程。

(3) 人群的行为,尤其是在瓶颈处,变得无法协调。

(4) 在出口处形成拱形的拥堵。

(5) 越来越多的个体采取从众行为,人群呈现出大规模集中行动的趋势。

(6) 某些出口往往被忽略或得不到有效利用。

处于火灾等紧急情况下的疏散行人的行为特征更加复杂,受人群、个体状态、环境等诸多因素的影响,其中的人群因素^[4,8,72,98,102]包括年龄、性别、生理条件、对现场的熟悉程度、恐慌等;状态因素^[4,8]包括睡眠、饮酒等;环境因素^[9,85,133,137,172,208]如火灾、建筑结构等。

1.2.2 行人疏散模型研究

随着经济和社会的发展,现代城市中的人口数量大大增加,公共聚集场所的行人密度也大大增加。行人疏散问题,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,极大地推动了行人疏散理论的发展。

目前,行人疏散的建模方法主要是采用两种思路:一种是将行人视为连续流动介质^[53,54,55,61,62],这是借鉴交通流的研究,主要针对行人群体行为及其评估进行研究。例如,研究行人密度、速度和流量基本特征参数之间的关系^[5,75,159,89];研究行人群体流动的波动性^[170];研究行人群体拥挤机理以及群集行为特性^[107,111]。另一种是将行人视为相互作用的粒子^[63],主要针对行人个体行为及其影响因素进行研究。例如,研究行人在不同交通环境中的步频、步幅、步行速度^[16,36,116];研究行人在不同交通设施和交通条件下的路径选择行为^[12,17,18,32,35,57,59,84,104];研究影响行人微观行为特征的各种因素和行人对不同交通设施的行为反应^[24,52,77,93,112,143]等。

1.2.2.1 宏观模型

宏观模型最早由 Fruin^[26,27]提出,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。宏观模拟模型由于其构造简单,所需计算能力不高,成为早期主要的疏散

模拟模型。宏观模型方法^[42,50,78,97,130]通常适用于较大人群,把人群作为一个整体,用于人群动态学的建模,大体可以分为两类:一类是流体动力学模型,另一类是网络节点模型。

(1) 流体动力学模型^[25]

将人群的移动看作流体,用类似流体的特性进行描述,通过流体的连续方程式得到速度与密度的关系。

(2) 网络节点模型

网络节点模型的中心思想是把建筑物的平面转换成网络图,用网络图中的节点刻画房间。连接房屋之间的门、楼梯等对应于图中的边或弧。节点能够容纳的人数对应房间的容量。边的通过能力对应门或楼梯的通过能力。一种网络节点模型是基于事件的模型。每一条边可以理解为一个服务,而节点中想使用该条边的人可理解为需要该服务的顾客。这种以排队论知识建立的模型称为 M/G/C/C 模型。其中 M 代表马尔可夫过程,排队论 G 表示一般服务, C 表示服务的编号, C 表示节点数^[82]。另一种网络节点模型基本上是一个运输问题的数学模型。其源节点代表计算起点,中间节点代表建筑物的某些部分,目标节点则是建筑物的疏散出口。用户需要确定每个节点的容量、每条边的通过能力及行人通过边所需的时间^[188]。

网络节点模型构造简单,理论难度适中,需要的计算机能力也较少。比较著名的模型有澳大利亚国家研究局(CSIRO)开发的 WAYOUT 模型^[37]、美国佛罗里达大学开发的 EVACNET 模型^[71]。

北京交通大学的何静通过对疏散网络空间进行更细致的划分以及引入最大熵模型,改进了网络节点模型^[56]。

虽然网络节点模型具有以上优点,但也存在一些无法克服的弱

点。首先,疏散空间的平面布局抽象为一个由边或弧连接的网络节点图,在这一抽象过程中,丢失了大量的空间信息。大小相同,形状、内部结构等不同的房间对疏散过程造成的影响是不同的,但是在网络图中它们都对应同样的一个节点。其次,人群是作为整体来考虑的,人群中的个体都要具有同样的疏散特性,个体的心理因素及个体之间的相互作用在模型中都得不到体现,这也是造成模型模拟结果应用性不强的原因。

1.2.2.2 微观模型

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,人群中个体之间的相互作用只剩下对有限资源的竞争。忽略了人与人之间复杂的非线性作用。因此,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。

根据研究方法的不同,微观行人疏散模型一般包含实测实验、分析模型和微观模拟模型。微观模拟模型可进一步分为连续型模型^[15,19,45,51,59,100,101,108]和离散型模型^[5,10,30,49,124,126,127,136,156](见图1-3)。

(1) 连续型模型

在连续型模型中,行人的位置、疏散的时间及其他的量都是连续而非离散的。这种模型的核心是建立一组运动学方程或动力学的微分方程,通过这些方程将各个量的变化联系在一起。研究疏散中人的行为通常考虑3种相互作用:人与人、人与建筑物及人与环境的相互作用,这些作用会影响行人的行为和决策过程,它们不仅与客观的物理条件有关,而且在更大程度上取决于行人自身的生理、心理和社会因素等。该类模型主要包含两种类型^[58]:一种是物理模型