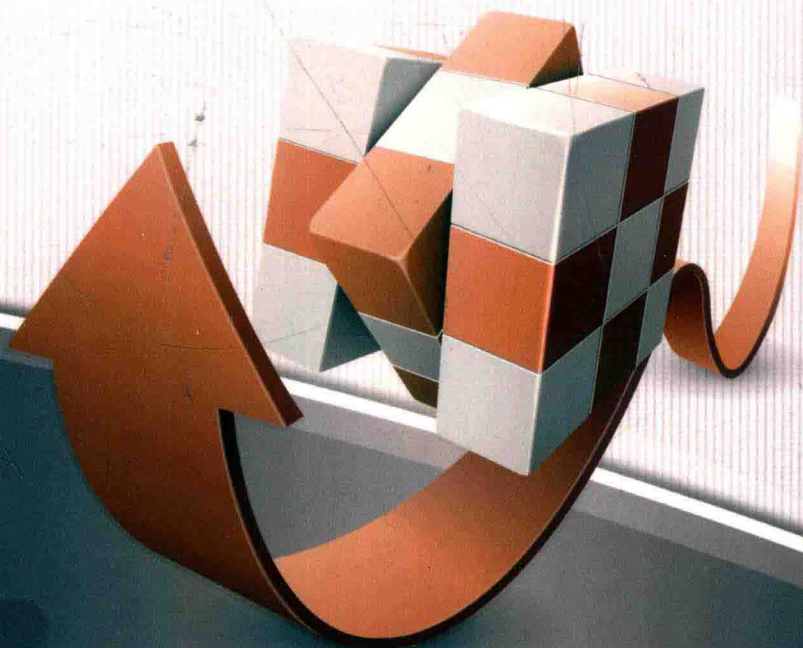


应急疏散仿真建模 与优化决策

宗欣露 王春枝 朱国锋 著◎



科学出版社

应急疏散仿真建模 与优化决策

宗欣露 王春枝 朱国锋 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书是作者在多年来对应急疏散仿真建模与优化决策所进行的一系列深入研究的基础上撰写而成的。本书将应急疏散建模与多目标优化相结合,通过大量的研究实例和应用实验帮助读者加深对建模理论和优化方法的理解,扩展在工程技术领域的应用。全书分为6章,在介绍应急疏散研究的背景、现状及进展的基础上,介绍室内人员疏散模型、大型公共场所人员疏散模型、基于蚁群算法的人车混合疏散模型、基于时空冲突与拥挤度的人车混合疏散模型和基于SIODM的人车混合疏散模型。

本书不仅可以作为安全工程及相关专业本科生和研究生的教学用书,还可以作为应急管理工作人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

应急疏散仿真建模与优化决策/宗欣露,王春枝,朱国锋著.—北京:科学出版社,2018.3

ISBN 978-7-03-055721-6

I. ①应… II. ①宗… ②王… ③朱… III. ①安全疏散-计算机仿真 IV. ①D035.29-39

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第294184号

责任编辑:戴薇 陈将浪 / 责任校对:刘玉靖
责任印制:吕春珉 / 封面设计:东方人华平面设计部

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京京华虎彩印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018年3月第一版 开本:B5(720×1000)

2018年3月第一次印刷 印张:9 1/4

字数:190 000

定价:63.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈京华虎彩〉)

销售部门电话 010-62136230 编辑部电话 010-62135927-2014

版权所有,侵权必究

举报电话:010-64030229; 010-64034315; 13501151303

前 言

应急疏散是目前现代交通、对地观测、地理、人工智能、计算机、现代通信及公共卫生与安全等学科的重要研究方向。虽然众多研究者一直在研究和探索，使应急疏散相关的理论与建模方法不断发展，应用领域不断拓展，但是至今我国尚无针对不同疏散对象建模、人车混合疏散建模及其应用的较为系统的专著。为向从事应急疏散研究的人员系统地提供应急疏散仿真建模的理论、方法和应用实例的参考，作者在相关研究的基础上撰写了本书。

本书先介绍应急疏散研究的背景、现状及进展，然后从室内人员疏散建模到大型公共场所人员疏散建模，再到人车混合疏散建模等几个方面系统地介绍室内人员疏散和人车混合疏散模型的理论、方法和应用。

本书得到了国家自然科学基金项目（编号：61202287，61772180）、湖北省自然科学基金项目（编号：2015CFB594）、湖北工业大学绿色工业科技引领计划项目优秀青年基金（编号：YXQN2017002）的大力支持，作者在此表示衷心的感谢。本书部分应用实例由作者指导的研究生尹宇洁、蒋颖丽、范鑫楷、张璐、杜佳圆等提供，本书由陈宏伟、叶志伟、严灵毓、刘伟、苏军、徐慧等教师负责校对。作者在撰写本书的过程中，参考了国内外相关研究成果，此外湖北工业大学也为作者提供了帮助与支持，在此一并表示衷心的感谢！

由于作者水平有限，书中难免存在不足之处，敬请读者批评指正。

作 者

2018年2月于武汉

湖北工业大学计算机学院

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景和意义	1
1.2 国内外研究现状与评述	2
1.3 本书结构与内容	9
第 2 章 室内人员疏散模型	10
2.1 元胞自动机模型	10
2.2 基于元胞自动机的人员疏散模型	13
2.3 应急疏散中人员的心理及行为特征分析	20
2.4 基于势能场的人员疏散模型	24
2.5 本章小结	33
第 3 章 大型公共场所人员疏散模型	34
3.1 基于粒子群的大型场馆疏散模型	34
3.2 基于蚁群算法的公共场所人员疏散模型	42
3.3 基于人工鱼群算法的公共场所人员疏散模型	57
3.4 本章小结	78
第 4 章 基于蚁群算法的人车混合疏散模型	80
4.1 人车混合交通概述	80
4.2 人车混合疏散行为及相互影响	82
4.3 人车混合疏散目标体系	82
4.4 基于蚁群算法的人车混合疏散比例分析	83
4.5 基于 MACS 的人车混合疏散模型	95
4.6 本章小结	107
第 5 章 基于时空冲突与拥挤度的人车混合疏散模型	108
5.1 疏散个体及网络描述	108
5.2 时空冲突	109

5.3	时空拥挤度	110
5.4	数学建模	111
5.5	DPSONLF 算法	112
5.6	实验结果分析	117
5.7	本章小结	126
第 6 章	基于 SIODM 的人车混合疏散模型	127
6.1	系统-个体目标体系	127
6.2	基于 SIODM 的演化粒子群优化模型	128
6.3	实验结果分析	130
6.4	本章小结	133
参考文献		135

第 1 章 绪 论

1.1 研究背景和意义

随着经济社会的快速发展和城市现代化水平的不断提高,自然灾害(如洪水、飓风、雪灾、地震等)和人为灾害(交通事故、恐怖威胁和袭击、有害物质泄漏等)对城市功能正常发挥的影响程度和波及范围越来越大。针对这些灾害建立安全有效的指挥和疏导机制,提供系统效率与个体需求兼顾的应急服务,是目前现代交通、对地观测、地理、人工智能、计算机、现代通信及公共卫生与安全等学科共同面临的重要研究问题与紧迫课题^[1-3]。在疏散研究中,将复杂环境中的大量行人和车辆安全、快速、高效地疏散,以及最大限度地降低生命财产损失是首要目的。因此,混合疏散个体(包括行人、车辆等)的运动规律及演变特征自然成为被研究的主体对象,亟待从理论与实践方面为这些疏散个体提供高效、安全的动态诱导和协作方法,从而制定科学、合理的疏散机制,有效地指挥、疏导人流和车流,减少堵塞和延误,避免次生事故的发生。

目前,应急疏散研究主要集中在疏散建模和仿真方面。一方面,通过对疏散个体的心理活动(如恐惧、急迫等)、路径选择、应急反应措施等进行分析,结合元胞自动机、格子气、社会力、流体动力学、智能体(Agent)、博弈论等理论,以及基于动物的试验途径,建立人员疏散模型,从而主要针对建筑物等设施进行应急疏散性能分析,并指导对这些环境的管理与控制过程。此外,相关研究还可以用来分析人员在应急过程中的聚集、摩擦、拥挤等现象。另一方面,针对路网中的车辆疏散问题,目前主要根据路网的性质研究基于静态网络或动态网络的车辆疏散,可以归结为最短疏散路径、最快疏散流及最大疏散流等问题。无论是行人疏散还是车辆疏散,现有研究大部分只考虑单一交通模式的疏散建模,而这种模式并不符合实际的疏散情况,因此实际中往往会出现很多疏漏,而且在应急管理过程中弥补难度很大。例如,美国 2005 年卡特里娜飓风和丽塔飓风发生时,大部分疏散人员采取驾驶私人小汽车的方式,导致非常严重的交通堵塞,同时疏散路线上加油站油量储备严重不足加剧了交通堵塞的程度,大大影响了疏散效率^[4]。充分发挥多模式交通的优势,为应急管理与疏散提供科学的决策支持,具有十分重要的现实意义。人车混合通行是我国交通现状的基本特点,认识突发事

件下人车混合疏散的时空演化规律,从系统层面提高突发事件下的疏散效率,在微观个体层面设置合理的疏散路径,形成科学的应急疏导决策方法,已经成为应急管理领域中一个亟待解决的科学问题。

1.2 国内外研究现状与评述

1.2.1 应急疏散的定义及特征

1. 应急疏散的定义

应急疏散是指面临突然发生的可能造成重大生命财产损失和严重危害社会安全的事件时,对一定范围内一定数量的人员所采取的应对措施。应急疏散情况一般有两种引发因素:一种是自然灾害,如飓风、洪水、雪灾、地震等;另一种是人为事故,如交通事故、恐怖威胁和袭击、有害物质泄漏等。自然灾害一般影响范围较大,其预测预报主要由气象、地质等部门负责,而人为事故一般较突然,需要交通、卫生、公共安全等部门共同应对。

2. 应急疏散的特征

应急疏散的特征主要表现在以下几个方面。

1) 引起应急疏散的事件是多样的、复杂的,而且受到事件发生地的人口分布、社会经济水平、交通状况、医疗条件、物资数量等方面的影响,对数据的需求量较大。

2) 疏散应对包括行人或车辆撤离、交通组织与管制、应急物资调度及通信保障等关系整个区域的决策和行动,涉及政府、卫生、通信、气象、交通等众多部门,协调难度较大。

3) 在应急情况下,人们的求生和恐慌心理会使其交通出行和行为方式不同于正常情况,如面对突发事件,人们可能选择立刻撤离,也可能选择与家庭成员一同撤离,或没有意识到事件的严重性而选择暂不撤离,人们的最终选择具有很大的不确定性。

4) 突发事件可能发生在人员密集的建筑物内,疏散时需要将人员撤离出事件发生的内部区域,这些人员进入路网后与路网上原有的人流汇合,形成人车混合疏散的局面。因此,应急疏散从突发事件发生到人员撤离,再到路网上的人车共同疏散,在时间上具有延伸性和阶段性。

5) 在应急情况下,道路的通行能力与正常情况下的道路交通状况不同,交通网络人流量、车流量短时间内突然增加,各种方向交通流交错,可能造成大量

的路段拥堵,同时各种交通模式的混合可能引发冲突,进一步加剧道路的拥堵程度,导致行人与车辆不能按预定路线进入安全区域。

6) 应急交通数据的收集关系到疏散指令的及时发布。收集应急交通数据是制订疏散方案的前提,应对措施的传达和接收是具体操作过程的出发点,整个疏散过程需要建立一套完善的灾害检测预警系统。

1.2.2 建筑物内人员疏散

在建筑物内人员疏散方面,很多的研究工作是试图通过疏散模型的计算机模拟来捕获人群的疏散行为的^[5],然后借助于实验数据来精细化所提出的疏散模型。国内外研究者已经提出了多个疏散模型^[6],如 Simulex、EXODUS、BGRAF、EXITT 等,形成的行人疏散软件有 EVACNET、SIMULEX、SGEM、HAZARD、EGRESSPRO、EXIT、STEPS 等。近年来,Gwynne 等^[7]、Kuligowski^[8]及 Zheng 等^[9]对这些模型进行了分析总结,主要包括以下七大模型或实现途径:元胞自动机模型 (cellular automata models)、格子气模型 (lattice gas models)、社会力模型 (social force models)、流体动力学模型 (fluid-dynamic models)、基于智能体模型 (agent-based models)、博弈论模型 (game theoretic models)、基于动物的试验途径 (approaches based on experiments with animals)。

1) 元胞自动机模型通过简单的相互作用而构成动态系统的演化,直接反映建筑物与疏散人员之间、疏散人员之间的交互^[10-14]。在分析行人疏散的过程^[15,16]中,元胞自动机模型通过对环境影响(如摩擦、拥挤等现象)和行人能力(如路径选择能力、协调能力、行动能力及应急经验等)的描述,借助环境和行人交互过程的客观反映,以及分析障碍物的影响作用,实现应急情形下竞争出口行为^[17]、人为干扰的双向移动等^[18]的描述与分析。例如,在元胞自动机模型的基础上,引入社会力模型所提出的扩展元胞自动机模型,可以直观地看到人员的整个疏散过程,得到每个时刻的人员分布状况,帮助研究者找出人员疏散的“瓶颈”位置。但是元胞自动机模型只能根据当前模拟步骤的现状作出判断,无法从宏观上明确每一个疏散人员在疏散过程中的时空位置是否合理或者优化,并且疏散前疏散人员不能够预先了解各自时空的疏散路径信息。

2) 格子气模型是一个离散时间系统模型,每一个时间单元中,该模型的所有行人被随机序列规则所更新^[19],采用随机选择函数来完成随机移动队列的选择过程,该过程常用统计和概率等方式来描述人流特征。格子气模型能够反映动态疏散过程的性质特征^[20,21],分析人流疏散时间的时空分布^[22],其中 Guo 和 Huang 所提出的移动格子气模型减少了计算强度,支持对平均疏散时间的评估,但采集试验数据较为困难,该模型中的行人特征分析缺乏有效的验证方法。此外,格子气模型与平均场模型相结合^[23],提出了考虑人数分布特性的人员疏散模型,通过

一次模拟得出疏散人数的区间估计值,可以得到疏散人数与疏散时间的定量关系,从而进行人员的空间分布对疏散结果的定量影响分析。但是,格子气模型的规则相对简单,模拟结果与现实情况有一定的差距,而且对个体间的时空关系分析缺乏有效的支持手段。

3) 社会力模型通过界定行人的动机(包括目的地、与其他行人和障碍物的最小距离及行人间的吸引程度等)来分析行人整体上的影响。通过引入相对速度影响系统,陈涛等修正了社会力模型^[2],该模型可以减少冲撞程度和震荡现象,从而有效地疏导交通,但是它加剧了疏散口附近人员间的拥挤程度。还有一些学者以群集动力学思想为基础,基于人流密度随时间的变化关系,建立人群疏散完成时间随疏散通道宽度变化的定量模型,从而估算出不同疏散通道宽度下的人群疏散时间^[24]。在群体疏散的研究中,社会力模型通常结合其他模型共同模拟疏散过程。例如,社会力模型同神经网络相结合^[25],用来模拟不同环境中行人间的集体行为;通过多智能体系统(multi-agent system, MAS)来集成社会力模型,实现了应急状态下的人员疏散评估^[26]。大多数社会力模型是微观的连续模型,该模型能够反映出行人越是急着进行疏散运动,整体疏散反而越慢的现象。然而,该模型模拟不出行人在疏散环境中的时空约束关系,对整体的疏散策略缺少宏观了解,尤其对行人间时空路径的优化缺乏支持。

4) 流体动力学模型将拥挤人群视为连续介质,以流体特征为基础建模,应用流体力学来研究应急疏散速度与密度的关系。该模型属于宏观模型,虽然可以从整体上把握人流的密度和速度随时间的变化关系,但忽略了个体所发挥的作用和个体间的差异。人员疏散研究是从交通流研究中分化出来的,研究者可以利用有关流体力学的研究成果进行疏散建模,但疏散系统是有明确相互作用的多个相似个体的群集行为,个体性质的简单叠加并不是系统的性质,也就是说疏散系统具有非线性和非结构化特征,因此该模型还需要针对群集行为特征进行拓展研究。例如,Colombo和Rosini^[27]提出的连续行人流模型,可以描述疏散过程中行人的恐惧情绪对疏散人员的影响。但是该模型在时空表达方面,因为过于集中描述群集行为,所以无法针对个体提供个性化的时空应急服务。

5) 基于智能体模型是一种自下而上的体系架构。基于智能体模型用于模拟个体行为,通过多智能体之间的交互机制建立一个社会系统。该模型能够有机地将复杂疏散系统中个体的微观行为和系统的宏观特征结合起来,一方面,可以为基于智能体模型定义个体物理与生理特性,包括角色、质量、大小、位置、运动方向、运动速度、知识背景等相关的特性,以及社会关系、依赖性、疏散期望等心理要素,为个体提供基础的模型描述;另一方面,为基于智能体模型创建对环境变化的认知与反应、疏散推理规则等,从而保证基于智能体模型在疏散过程中既保持个性特征,又能进行系统上的性能分析。例如,基于多智能体,考虑个体

特征和行为提出的公共场所人员疏散模型^[3,28,29],综合考虑疏散过程中疏散人员的竞争能力和判断能力、疏散人员之间的从众行为,以及引导作用、起火、通道堵塞、随机事件发生等外在因素对疏散人员的影响;刘涛等提出了模糊模型,利用 Takagi-Sugeno 模型的 IF-THEN 规则将对行人运动定性的物理规则转化为一个模糊推理系统,还利用多智能体系统对影剧院工程实例进行了疏散模拟^[30,31]。基于多智能体理论的疏散模型,相关研究者还分别从人群疏散^[32,33]、建筑疏散^[34]、危急疏散^[35]等角度进行了深入研究。例如,通过组合规则推理来模拟和分析大型公共建筑的出口设置,基于智能体技术模拟并分析一些人群流现象^[36](如路径的重新选择等),甚至在地理信息系统(geographic information system, GIS)环境下通过智能体技术来进行灾难应急分析^[37]。但是基于智能体模型只能在应急疏散中分析下一步的疏散路径^[38],无法提供全局优化的个体时空路径分析,对系统层面上路网和建筑群集成环境的疏散环境也不能提供优化支持。

6) 博弈论模型是经济学领域的一种理论^[39],“博弈是指一些个人、团队或其他组织,面对一定的环境条件,在一定的约束条件下,依靠所掌握的信息,同时或先后,一次或多次,从各自可能的行为或策略集合中进行选择并实施,各自从中取得相应结果或收益的过程”^[40]。博弈论模型可以理性地反映被疏散人员的心理状态和决策过程,面向基础设施的疏散供给状况^[41],疏散人员可以以各种方式进行移动来满足各自的疏散需求。例如,周勇等提出了基于参与者、策略空间和收益函数的人员疏散博弈论模型,采用该模型分析人员疏散的博弈过程,得出在被疏散人员追求个人收益最大化及无有效约束和管制的情况下的纳什均衡解^[40,41];Lo 等^[42,43]提出一个不合作博弈论模型,模拟应急疏散过程中被疏散人员的多出口动态选择过程,用来检验被疏散人员理性的相互作用行为对疏散方式的影响,以及描述被疏散者的均衡状况及出口的堵塞状态。博弈论模型在疏散研究中由于个体都追求各自利益最大化,被疏散人员的均衡处于无序状态,对堵塞状态的环节仍缺乏理性的诱导,而且博弈论模型对被疏散人员的时空描述和分析支持较弱,对整体上的疏散时空优化分析更加困难。

7) 基于动物的试验途径是从生物试验角度来分析群体疏散的研究方法。该方法可以弥补数字仿真对疏散研究的缺陷,综合考察被疏散对象的本能反应和行为,以及分析疏散环境对被疏散对象的影响。例如,Saloma 等^[44]通过恐慌老鼠从水池逃生到干燥平台的实验,分析被困步行者的逃生恐慌行为,其实验结果表明,对于临界采样间隔(critical sampling interval),老鼠逃生行为与数字预测(元胞自动机模型预测)的出口裂解量的幂次频数分布一致。Altshuler 等把蚂蚁作为模型的试验对象,验证了“恐慌通过效仿快速传播”的假设,经过低恐慌与高恐慌情形的对比实验,发现当恐慌的个体努力从房间中逃生,而房间有两个位置对称的出口的时候,其中一个出口比另一出口拥挤着更多人^[45,46]。基于动物的试验途

径是一种较新的疏散分析途径,对未知因素具有综合性的评估作用,但是该方法只能从现象进行推理,无法分析被疏散人员的心理特征及其反应,对疏散路径的选择也缺乏客观评价依据,不支持疏散人员的时空路径优化分析及整体上的时空分配优化分析。

当然,还有很多研究工作集成了以上若干模型,如采用智能体、GIS、元胞自动机等技术对人员、建筑环境的驱动转换进行构建,提出基于多层协作机制的疏散模拟方案,实现同时交互协作^[47];基于GIS建立疏散仿真环境集成方法,模拟单个出口疏散环境下的人群疏散动态过程^[48];借鉴机器人平面运动学模型,提出了人员疏散的运动学形式仿真微观模型^[49],该模型对现实描述直观、易于理解;基于开放式的数学方程模型,该模型便于扩展。其他的方法包括:基于几何方法的人员疏散模型^[50],该模型给疏散人员制定了符合实际的移动准则,描述了人员在疏散过程中的路径选择,以及人员之间的相互作用,避免了疏散人员属性过于单一的弊病;区别于传统的微观网格模型,提出了一种几何连续模型^[51],该模型提出基于出口吸引力的出口选择方法,以及基于疏散时间最短的路径选择原则,在平面连续的基础上进行了疏散行为的分析;地铁突发事件人员的疏散模拟^[52];建筑物火灾中人员疏散路径优化模型^[53];高层建筑人员疏散的蚁群算法数学模型^[54]等。

1.2.3 路网车辆疏散

在路网车辆疏散方面,可以根据路网的性质将疏散分为基于静态网络的车辆疏散问题和基于动态网络的车辆疏散问题。

1. 基于静态网络的车辆疏散问题

基于静态网络的车辆疏散问题可以归结为最短疏散路径、最快疏散流及最大疏散流等问题。例如,在路网通行能力的基础上,利用最大疏散流方法研究疏散路径^[55,56];Sinuany-Stern和Stern^[41]基于行为的交通模型研究了行人、车辆、交叉口行程时间、路径选择变化对路网疏散时间的影响;Campos等^[57]基于图论中的最短路径算法,提出一种基于 K 最短路径的最优独立疏散路径方法,其中的最优疏散路径确定的依据包括路段上的最大容量和行驶时间;Yamada^[58]采用最小费用流问题进行疏散交通分配,提出了最短路径疏散规划(the shortest evacuation plan)方法,得到最短路径疏散规划方案;面向紧急撤离的双目标综合优化模型^[59],力求达到在最大通过能力下实现疏散期间的所有有利成果最大化,分阶段实现公众撤离时间的最优化;刘丽霞和杨骅飞^[60]借助最短路和相异路算法,通过对突发公共事件等复杂情形下道路网络基本信息的修正和对相异度计算的改进,使产生的最优路径和相异路径更符合出行者的参考要求等。基于静态网络的车辆疏散可以

从宏观上完成疏散车辆的优化分配,但是疏散过程的动态性和不可预见性等特征,使该种疏散方案无法得到精确实施,疏散模型的效果不理想。

2. 基于动态网络的车辆疏散问题

动态网络是通过引入车辆的不确定性机制,把传统静态网络在时间维上进行扩展。基于动态网络流模型进行交通疏散优化,可以发挥整个交通系统的性能,使之比较贴近现实应用。例如, Southworth^[61]针对应急疏散提出了基于动态交流的路径选择模型。 Sattayhatewa 和 Ran^[62]针对核电站事故疏散问题,提出了一个基于动态交通分配的疏散路径分配模型,该模型以基本网络流为约束,实现路段流量守恒、节点流量守恒和流传播守恒。卢兆明等^[63]提出了基于时变动态流的网络优化模型,该模型以最短疏散时间为目标函数,同时对疏散路径、疏散目的地及疏散开始时间进行优化。张培红等^[64]对应急疏散空间进行网络优化,进而利用网络流原理和最优化理论,建立多目标应急疏散系统及疏散路线全局优化的数学模型,进行了最优应急疏散路线的动态模拟分析。面向交通事件, Baykal-Gursoy 等^[65]提出稳态 M/M/c 队列系统,来描述受制于交通事件的道路网交通流。这些基于动态网络的研究可以在一定程度上避免疏散车辆的拥堵,可以主动改变疏散路径,从而提高网络的疏散效能。Xie 等^[66]研究了包含反向道路和交叉口评估策略的动态疏散网络优化问题,这两种基于车道的规划策略通过增加特定方向上的容量来互补,设计了2层网络优化模型,上层以优化网络疏散性能为目标,下层体现了基于元胞传输的动态交通流分配问题,并提出结合拉格朗日松弛和禁忌搜索方法来求解近似最优解。

1.2.4 人车混合疏散

一般来说,疏散人员需要利用一切交通方式,单独的行人疏散或车辆疏散模式不可能适合所有的突发事件类型。目前,对混合交通流的疏散研究工作非常少,大多数是关于混合交通流的仿真研究, Meng 等^[67]提出了利用单车道元胞自动机模型来模拟混合交通,考虑了机动车的密度与流量关系和变道行为,从中发现了最大交通流的变化规律; Si 等^[68]探讨了不同交通模式的混合交通流特性,提出了基于通行需求的混合交通网络中不同道路的边阻力方程,同时考虑了不同交通模式间的干扰; Xie 等^[69]提出了利用二维车辆跟驰模型描述包括机动车和非机动车的混合交通流特性,研究了左转非机动车流和直行机动车流在无信号交叉口的交互情况。国内也有一些混合交通流的仿真研究^[1,70],但这些工作是基于正常情况下的混合交通流建模。清华大学公共安全研究中心研究了不同交通方式的移动规则,考虑城市突发事件下混合交通流疏散时的一些主要因素,构建了混合交通流疏散避难模型,针对突发事件下的混合交通流疏散过程开展了初步的探索工

作^[71], 并通过构建基于统一元胞空间的混合交通流元胞自动机模型来研究行人、自行车、机动车在不同比例时的疏散时间^[72]; 刘小明和胡红通过研究提出了以公共交通工具为主要交通疏散方式的建议, 以完善疏散规划方法体系^[4]。但是, 这些研究在人车混合疏散的时空传播模型和规律方面尚没有涉及, 疏散过程中的人车交互规则研究也有待深入, 对人车混合疏散问题的应对分析的理论研究还需要进一步深入。总体来说, 人车混合疏散的研究尚处于起步阶段。

1.2.5 研究存在的不足

通过以上对国内外研究现状和趋势的分析, 不难发现应急疏散研究还存在以下不足。

1) 面向室内的人员疏散的研究虽然较多, 但结合人员心理及行为特征的仿真疏散模型的研究较少, 特别是针对大型公共场所的大规模人员动态疏散的研究尚存在不足。大部分模型是从微观角度研究有限空间内的人员疏散, 而从宏观角度进行实时判断和决策, 建立建筑物内动态疏散路径引导策略的研究目前还很缺乏, 而这种动态的疏散指导更加具有现实的指导意义, 因而开展动态的疏散研究的工作显得格外迫切和重要。

2) 目前, 关于行人或车辆疏散的理论研究不能满足人车混合疏散的研究需求, 其中疏散模型基本集中于人员的疏散, 交通流模型则直接面向车辆。而多种交通模式并存是我国交通的一个显著特点, 面向人员或车辆的疏散研究缺少人车混合疏散运动模式的分析、人车混合疏散行为的演化规律的研究, 从而在现实中缺少适用性, 也无法制定人车混合的科学疏导措施。

3) 目前, 从优化角度进行疏散建模的研究不多, 已有的优化模型也大多是考虑单一类型交通模式在一个目标上的优化或者将多个目标转化为单目标优化, 其得到的单个最优解无法为管理者提供多个目标上的决策依据, 而多目标优化方法得到的一组 Pareto 最优解即多个优化方案, 可以使管理者根据不同情况有所侧重地灵活制订疏散方案。

因此, 本书主要研究突发事件下人员室内疏散模型, 以及大型公共场所的人员疏散建模, 包括疏散过程中人员的心理及行为分析、动态路径规划和安全疏导策略等。针对大型公共场所和路网集成的疏散环境, 研究人车混合疏散运动模式的演化规律、人车混合疏散时空冲突机理, 以及人车混合的时空协同演化模型, 面向突发事件下大型公共场所及其周边区域的交通需求, 结合现有交通流分配理论模型和技术, 实现人车混合时空协同疏散的多目标优化方案, 从而弥补现有应急疏散研究对人车混合交通流的时空冲突刻画的不足, 提高人车混合疏散问题的应对分析能力, 推动突发事件演化规律的复杂性建模理论与方法的研究, 同时为突发事件应急管理中应对决策客观规律的深刻认识提供一种科学的方法, 有助于

应急资源的组织设计、运行和评估的理论研究,对提高面向多事件耦合与情景构建的综合决策支持能力提供一定的理论分析方法与技术手段。

1.3 本书结构与内容

本书从室内人员疏散建模、大型公共场所人员疏散建模、人车混合疏散建模方面循序渐进地介绍室内人员疏散建模方法、大型公共场所人员疏散建模方法和人车混合疏散建模方法,利用多种仿生优化算法从多目标优化角度对疏散过程进行仿真和优化。

本书分为6章,具体内容如下。

第1章主要介绍应急疏散研究的背景、意义及现状,通过对国内外研究现状的分析提出目前研究存在的不足。

第2章主要介绍室内人员疏散模型,包括基于元胞自动机的人员疏散建模和基于势能场的人员疏散建模,比较两种建模方法的有效性,并分析人员疏散过程中的心理效应。

第3章主要介绍大型公共场所人员疏散模型,分别采用粒子群优化 (particle swarm optimization, PSO) 算法、蚁群优化 (ant colony optimization, ACO) 算法、人工鱼群优化算法对疏散过程进行仿真建模,利用群智能优化算法优化疏散目标。

第4章主要介绍基于蚁群算法的人车混合疏散模型,首先分析人车混合疏散过程中行人和车辆的最优比例,然后针对单一蚁群系统 (ant colony system, ACS) 疏散模型的不足,提出基于多蚁群系统 (multi ant colony system, MACS) 的人车混合疏散模型。

第5章主要介绍基于时空冲突与拥挤度的人车混合疏散模型,针对混合疏散过程中最重要的两个因素,即冲突和拥挤度,从数学角度建模,并提出带邻域学习因子的离散粒子群优化 (discrete particle swarm optimization with neighborhood learning factor, DPSONLF) 算法来优化人车混合疏散问题。

第6章主要从疏散宏观过程和微观个体两个角度介绍疏散目标体系,建立基于系统-个体目标驱动机制 (system-individual objectives driven mechanism, SIODM) 的人车混合疏散模型,从而得到同时满足宏观系统和微观个体需求的疏散方案。

第 2 章 室内人员疏散模型

2.1 元胞自动机模型

20 世纪 50 年代, 冯·诺依曼最早提出元胞自动机模型, 它是一种时间、空间都离散的动力学模型。相对于一般的动力学模型, 即依据定义好的物理方程或函数建立的模型, 元胞自动机模型是由一连串规则构成的模型。每一元胞分布在规则的网格中, 它们有有限个离散状态, 按照一定的局部规则来更新相应的状态。通过简单的相互作用, 大量元胞就构成了动态系统的演化。凡符合这些规则的模型都可以称作元胞自动机模型。因此, 元胞自动机模型只是这一类模型的总称, 或者是一种方法的框架。目前, 元胞自动机模型被广泛应用于生物^[73]、物理^[74]、地理^[75]及应用数学^[76]等学科的科学研究的科学研究。

2.1.1 元胞自动机的定义

元胞自动机实质上是定义在一个由具有离散、有限状态的元胞组成的元胞空间上, 按照一定的局部规则, 在离散的时间维度上演化的动力学系统^[77]。

在元胞自动机中, 按一定形式的规则划分成的有限单元构成元胞空间。元胞就是这些规则网格中的各个单元, 并且它的取值范围只能是有限个的离散状态集。所有元胞的状态更新的依据是相同的作用规则和确定的局部规则。元胞自动机就像传统物理学中较短差距中作用的“场”, 是离散化的场的模型。元胞自动机的基本思想是通过大量的单一元件, 利用简单的连接和容易的规则运算, 在时空中并行地连续运行, 来模拟复杂而丰富的现象。

2.1.2 元胞自动机的组成

元胞自动机由基本的 4 个部分构成: 元胞、元胞空间、邻居和演化规则。一个 n 维元胞自动机如下所示:

$$CA = (L_d, S, N, f) \quad (2-1)$$

式中, CA 为一个元胞自动机; L_d 为 d 维的元胞空间; S 为元胞的空间状态; N 为元胞的邻居领域; f 为元胞状态演化的规则。

1. 元胞

元胞是元胞自动机最基本的组成要素，它也可以叫作基元、单元。元胞的特征是拥有离散的有限的状态类型，状态的表达式可以用 $\{0,1\}$ 的二进制形式来表示，或是一些离散集，对于网格 r 上的元胞在 t 时刻的状态可以表示为

$$S(r,t) = \{S_1(r,t), S_2(r,t), \dots, S_k(r,t)\} \quad (2-2)$$

式中， $S_k(r,t)$ 为在 t 时刻， r 网格上的元胞的第 k 个状态。

2. 元胞空间

元胞空间是指元胞在空间网格上的一个集合，它可以是任意维数的欧式空间规则划分。通常可以划分为一维元胞空间、二维元胞空间和多维元胞空间。其中，常见的是二维元胞空间，它将平面平均分成若干个三角形、正方形或六边形网格，如图2-1所示。

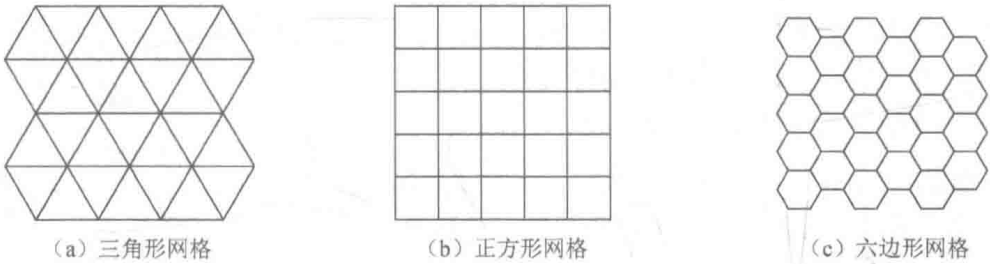


图2-1 二维元胞空间的划分

3. 邻居

邻居是指元胞按演化规则进行变化时，更新元胞状态需要知道它周围元胞的状态，即某个元胞在更新状态时需要在元胞内搜索其状态的空间。一个元胞的状态更新会受到其他元胞的状态影响，因此必须规定每个元胞会受到它周围哪些元胞的影响，同时这个元胞也影响其他的邻居元胞。元胞和元胞空间是系统的静态组成部分，邻居则是系统的动态组成部分。

N 为以 r 为中心元胞的邻居集，是 L_r 的有限序列子集，即

$$N = \{N_1, N_2, \dots, N_u\} \quad (2-3)$$

式中， N_u 为元胞 r 的第 u 个邻居相对于 r 的位置。

二维元胞自动机一般考虑3种邻居模型，如图2-2所示。图2-2中“■”表示中心元胞，“■”表示它的邻居元胞。图2-2(a)属于冯·诺依曼型，中心元胞的上、下、左、右4个方向上的元胞为其邻居，邻居半径为1，也称作四邻居型。图2-2(b)属于摩尔(Moore)型，中心元胞的上、下、左、右、左上、左下、右上、右下8个方向的元胞为其邻居，邻居半径为1。图2-2(c)属于扩展的摩尔型，将包围中心元胞的第二层元胞扩展为其邻居元胞，邻居半径扩大为2。