

突发事件情景下地铁站人员应急疏散问题综述^{*}

王付宇^{1,2}, 王 骏^{1†}

(1. 安徽工业大学 管理科学与工程学院, 安徽 马鞍山 243032; 2. 上海理工大学 管理学院, 上海 200093)

摘 要: 突发事件情景下, 合理地进行地铁站人员应急疏散是减少人员伤亡和财产损失的有效途径。从地铁站人员应急疏散的仿真研究、不同规则下疏散模型的研究和智能算法在疏散建模中的应用三个角度对突发事件下地铁站人员应急疏散问题进行综述, 分析了当前疏散模型、求解算法以及行人特征数据的不完善之处。提出了把行人的心理行为特征、建筑物设施因素引入地铁站人员应急疏散问题中, 并利用改进的蚁群算法求解最优疏散路径的重要价值。最后, 展望了今后地铁站人员应急疏散问题研究的发展趋势。

关键词: 突发事件; 地铁站; 人员应急疏散; 蚁群算法

中图分类号: TP391.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2018)10-2888-06

doi: 10.3969/j.issn.1001-3695.2018.10.002

Summary of emergency evacuation of subway station personnel in emergency situations

Wang Fuyu^{1,2}, Wang Jun^{1†}

(1. School of Management Science & Engineering, Anhui University of Technology, Ma'anshan Anhui 243032, China; 2. School of Management, University of Shanghai for Science & Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: In case of emergency, reasonable evacuation of subway station is an effective way to reduce casualties and property losses. This paper commented the emergency evacuation from three aspects, which included the subway station personnel emergency evacuation simulation research, evacuation model research on different rules and the application of intelligent algorithm in evacuation modeling. It analyzed the shortcomings of the current evacuation model and algorithm as well as pedestrian's feature data. This paper introduced the characteristics of pedestrian's psychological behavior and introduced the factor of building facilities into the emergency evacuation of subway station personnel, and pointed out the importance of using the improved ant colony algorithm to solve the optimal evacuation path. Finally, it forecasted the development trend of the emergency evacuation of subway station personnel.

Key words: unexpected events; subway station; personnel emergency evacuation; ant colony algorithm

随着社会经济的高速发展, 地铁系统作为城市交通系统的重要组成部分, 因为具有准时性、运量大、经济环保等特点吸引了大量的地面客流, 有效缓解了地面交通拥挤的状况。当前, 大客流已经成为许多地铁车站的运营常态。大客流情况下, 人们处于一个相对狭窄的封闭空间, 人员的密度很大, 人员的情绪不稳定, 很容易与突发事件耦合。因此, 一旦发生突发事件, 地铁的人员疏散将极其困难, 产生的后果也极其严重。2003年2月18日, 韩国大邱市一号线发生纵火案, 此次事故共造成135人死亡和289受伤的严重后果; 2008年3月4日, 北京地铁5号线东单站因为设备故障造成人员恐慌, 最终发生了踩踏事件; 2011年9月27日, 上海地铁10号线新天地站由于列车追尾, 使乘客密度变大, 导致踩踏事件的发生; 2012年7月2日, 上海轨道交通1号线和2号线发生设备故障, 大量乘客滞留, 使站内出现过度拥挤, 进而导致踩踏事件的发生, 这一系列的事件给人们敲响了警钟。突发事件下如何在有限的时间内将乘客快速疏散至安全区域, 成为亟待探讨和解决的难题。

疏散仿真模型可以划分为宏观模型、中观模型和微观模型三类。微观模型以人群中的个体作为研究对象, 依照一定的算法驱动人员向出口运动, 个体的运动行为受到环境、建筑布局结构以及人与人之间相互作用等各种因素的影响, 这类模型的特点是仿真度高, 缺陷是计算量大、受驱动算法影响大。宏观模型, 不考虑单个行人的行为, 将行人视为流体状态, 即一个整

体, 如行人动力学模型。宏观模型关注的往往是流量、密度与速度之间的关系, 有其建模合理性, 但是有着不能显示所有个体特征的缺陷。中观模型中, 比较经典的是最早由日本学者建立的格子气模型。中观模型跟宏观模型一样, 都有其局限性, 难以广泛应用, 而微观仿真模型得到越来越多研究者的青睐。目前地铁站应急疏散问题的研究主要有三个方向: 利用仿真软件或模型模拟应急疏散过程并计算疏散时间; 通过描述不同规则下的疏散情况并改进疏散模型; 将智能算法应用到疏散建模中以提高求解效率与质量。

1 仿真模型模拟地铁应急疏散过程的研究

人员疏散计算机模拟最早可以追溯到冯·诺依曼在1951年提出的元胞自动机理论, 元胞自动机真正在公共建筑人流紧急疏散研究中得到应用, 是在20世纪80年代。对于应急疏散模型的改进与优化, 国内外学者对元胞自动机以及智能体技术的应用较多, 通过这种模型可以更精确地对环境进行模拟, 包括障碍物的情况等。杨立中等人^[1]提出了基于元胞自动机的火灾中人员逃生疏散模型, 该模型用元胞代替疏散个体, 考虑了疏散时对人员产生影响的各种因素, 使人员疏散的模型具有智能体的特点。徐高^[2]通过元胞自动机模型对地铁站内行人疏散进行了仿真, 并通过设置现场能见度、人群拥挤度、乘客心

收稿日期: 2017-08-10; **修回日期:** 2017-10-16 **基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(71872002); 国家教育部人文社会科学青年基金资助项目(14YJC630119); 安徽省高校人文社科研究重大项目(SK2014ZD016); 国家住建部软科学研究项目(2015-R2-057)

作者简介: 王付宇(1977-), 男, 河南泌阳人, 副教授, 博士研究生, 主要研究方向为智能优化、系统仿真; 王骏(1993-), 男(通信作者), 安徽安庆人, 硕士研究生, 主要研究方向为应急管理、智能优化(18355551277@qq.com)。

理的不同状态参数来研究人群疏散过程中的差异。宋卫国等人^[3]将人员疏散过程中摩擦力与排斥力量化,提出一种新的兼顾计算效率与精度的元胞自动机模型,该模型在人员疏散速度及“快即是慢”效应等方面的结论与多粒子自驱动模型的相同;他们还提出了基于元胞自动机的新模型 CAFE^[4],该模型可用来仿真单出口房间的疏散过程。赵道亮等人^[5]用二维随机元胞自动机模型研究了紧急情况下人员疏散的一些特殊心理和行为,如从众心理和行为、小群体现象和亲情行为等。Dong 等人^[6]利用元胞自动机模型与多智能体技术对车站的乘客疏散进行了仿真并利用 MATLAB 建立模型,归纳了车站出口宽度、火灾持续时间、乘客恐慌程度、管理人员的应急引导对乘客疏散行为的影响。郑营^[7]考虑火灾环境下人员运动的特点以及火灾动态蔓延的特性,建立了元胞自动机 FF 扩展模型,并利用该模型进行场景模拟,研究了火灾环境下障碍物、出口、火灾蔓延速度以及起火点位置等对人员疏散过程以及疏散时间的影响。汪洋等人^[8]在分析、比较现有的疏散仿真模型的基础上,提出一种基于正六边形元胞自动机的行人疏散模型,该模型将疏散空间分为相等的正六边形,每个元胞有包括静止在内的七个运动方向,并定义了恐慌系数,通过实验仿真证明该模型可以真实反映实际疏散过程。许爱军等人^[9]将人流宏观流动与地铁建筑结构特征相结合,提出基于元胞自动机的地铁应急疏散模型,并利用遗传算法淘汰较劣网格节点,生成全局最优子图,计算最佳逃生路径,实验证明该模型能很好地应用于地铁疏散预案中。元胞自动机模型主要依据城市交通流模型,并考虑一些典型的行人特征并进行相应的扩展,特别是引入了场域的概念以确定向元胞邻居的转移概率等,因此元胞自动机模型能够很好地考察个体间的智能性与差异性。但是,元胞自动机模型对人员主体本身的考量较少,基本上都是对主体的运动建立规则,这就使得主体的同质性较强,从而忽视了主体的差异性,因而不少学者利用基于主体建模(agent)的方法对模型进行精细化处理,使不同个体间属性存在差异。

目前,国际上发展较为成熟的人员疏散模拟仿真软件有 STEPS、BuildingEXODUS、Simulex、Pathfinder、EVACNET 等。国内外学者对地铁应急疏散问题的仿真研究,主要聚焦在仿真模型的选取构建以及仿真参数的选择上,他们结合实际案例,选择或建立合适的仿真模型,并尽可能选择具有代表性的仿真参数输入模型,以期仿真过程尽可能与实际情况相符合。王志刚^[10]通过建立 FEgress 模型,对地铁车站建筑内各个位置的火灾进行了模拟,总结出了不同的火灾仿真阶段中影响乘客安全撤离火场的因素。宋卫国等人^[11]通过对疏散过程中群体现象的仿真模拟,分析了发生火灾时车站出口宽度与厚度等设计特征对乘客人群疏散造成的影响。马嘉琪等人^[12]使用 VISSIM 软件对同站台换乘车站的人员疏散进行了仿真,比较了不同情形下换乘站的疏散效率。孔维伟等人^[13]利用 STEPS 软件来研究北京复兴门地铁站火灾下乘客安全疏散问题,提出了对车站设计的改进与疏散路径选择的优化。Jiang 等人^[14]利用 BuildingEXODUS 软件对 16 种不同情形下的地铁疏散情况进行仿真,认为可通过改变楼梯宽度来控制地铁站内人数,使疏散时人员密度处于有利水平。Li 等人^[15]利用 Simulex 软件对岛式地铁站应急疏散进行了仿真研究,探讨了疏散中瓶颈位置对行人的影响。Sagun 等人^[16]在利用地铁疏散仿真手段改善建筑物设计研究中,建立了人员出口偏好模型,认为在建筑设计阶段要考虑人员在疏散过程中的行为特点,以提高建筑物性能。许伟伟^[17]利用 Java 语言建立疏散仿真模型,并对北京、上海等地的地铁站进行疏散研究。王春雪等人^[18]利用 Pathfinder 疏散软件仿真建模,从疏散用时、拥堵点、人员疏散路径以及出口

利用率等角度,对各运行时段人员疏散仿真结果进行了分析。潘科等人^[19]通过统计获得行人特征参数,应用 Pathfinder 软件建立地铁换乘车站人员疏散模型,模拟了不同情况下不同时刻的疏散人员的分布规律,可为紧急情况下的人群疏散组织提供一定的指导。王起全等人^[20]以北京地铁西直门站为例,利用 PyroSim 模拟地铁火灾的演变,分析火灾下环境温度、烟气浓度及可见度等因素对疏散的影响,并利用 Pathfinder 软件模拟疏散情况,分析瓶颈与拥挤度等不利因素,最后提出地铁火灾疏散路线的规划及对策。李意^[21]以成都地铁为例,利用 AnyLogic 行人仿真软件建立疏散模型,结合行人恐慌心理和烟气对紧急疏散速度的影响,分析了不同设施处的疏散客流状态,并提出相应的瓶颈疏散方案。在这类研究中,研究人员主要是以疏散软件作为工具,通过仿真来发现问题或者验证实施改进措施后的效果。目前,主流仿真软件的输入输出差别较小,基本上都有对建筑物的应急疏散能力评估功能。随着计算机技术的发展,硬件方面已经不再对仿真模型的应用形成制约,特别是 GPU 并行加速技术的出现,极大提高了仿真的规模与精细度。但是,仿真软件高昂的售价,在很大程度上制约了它们的广泛使用。

地铁火灾中的浓烟、高温、毒气危害严重,易造成重大伤亡。在对世界地铁一百多年的事故统计中可以发现,发生频率最高、造成危害最大的是地铁火灾事故。鉴于此,国内外学者基于地铁火灾中烟气运动规律进行了模拟人员疏散研究。朱颖心等人^[22]开发了隧道网络烟气模拟程序 TNFIRE,在此基础上研制了一套地铁热环境模拟分析软件 STESS,对天津地铁、深圳地铁进行了数值模拟。钟茂华等人^[23]通过数值模拟方法,研究了浅埋岛式地铁站站台火灾时车站内烟气横向流动和不同站层间的烟气纵向蔓延规律。邵荃等人^[24]对活塞风在地铁火灾烟气运动中的作用也开展了模拟研究,发现地铁列车运行所产生的活塞气流会导致烟气层厚度增加。田娟荣等人^[25]采用 CFD 方法模拟地铁火灾烟气蔓延特性进行了研究,研究表明屏蔽门的设置可以阻挡火灾烟气的蔓延。Roh 等人^[26]利用仿真疏散软件 FDS V406 预测地铁火灾中烟雾传播时间和可利用的安全疏散时间,发现火灾的规模是基于热释放率的;同时发现具备月台幕门和通风系统的地铁站比不具备月台幕门和通风系统的地铁站具备更多的安全疏散时间,而检票口极大增加了疏散所需时间。樊洪明等人^[27]采用湍流数值模拟方法,对地铁车站辅助烟气控制设施挡烟垂壁的设置在地铁火灾中对烟气流动的影响开展了研究,研究发现挡烟垂壁的设置可以抑制火灾烟气蔓延,为火灾时人员疏散提供更好的环境。Pan 等人^[28]通过在地铁站进行实验以调查水雾对烟雾的影响,发现水雾系统可以有效降低烟雾温度以及降低烟雾浓度,改善疏散环境。Tsukahara 等人^[29]根据 2003 年的韩国大邱地铁站火灾案例,运用 FDS 软件进行了仿真,研究了烟雾温度和毒气(CO)浓度在疏散楼梯口处对人员疏散的影响,结果发现火灾发生后 3.5 min 疏散楼梯口处就具有极高的温度和毒烟浓度,因此设计一种底层具有隔离层的新型地铁站,发生火灾时,人员可以向下疏散,使人员流向与烟雾流向相反。Li 等人^[30]利用 FDS + Evac 研究了火灾对换乘地铁站的影响,发现火灾情况下,乘客往往选择相对安全的逃生出口,而非最短逃生路径;火灾会对人员生理与心理产生副作用,从而降低逃生的步行速度。Guo 等人^[31]将海拔指数引进 H-HLG 模型来模拟地铁火灾疏散过程,考虑了高温环境对人员的伤害以及烟雾对人员疏散路径的干扰。Yang 等人^[32]将火灾疏散模型和分离的设计方法集成,利用 FDS + Evac 模拟火灾和疏散过程,认为火源点、疏散人员所处位置、通风条件和地铁材料性能对于应急疏散有很大影响。张洪娟^[33]根据徐州轨道交通彭城站的建筑结构和通风排烟方式建立地铁站物理模型,进行地铁疏散

空间三维建模、人员运动特征建模和人员行为特征建模,对不同火灾场景和人员组成情景下进行人员疏散仿真,从而找出有利于人员疏散的通风方式。陈绍宽等人^[34]在计算流体动力学的基础上,利用 PyroSim 软件构建地铁站站台火灾仿真模型,分析了站台内烟气的扩散规律以及热释放率、火源数量及位置,以及排烟速率这些因素对火灾发展的影响,提出合理的通风策略能够有效提高人员疏散速率。丁厚成等人^[35]以合肥地铁车站为原型,建立了地铁车厢内部火灾烟气流动三维数学模型,利用 FDS 软件对地铁车厢内部火灾进行了数值模拟,分析了在车厢空调开启的情况下,火源面积大小以及车厢门开启与否对车厢内温度和烟气流动的影响。

综上所述,国内外对地铁火灾烟气流动蔓延进行了许多研究,但更多的是针对临界风速,并且大部分是用热源模型处理火源,通过温度来描述烟气危害与蔓延规律。由于烟气毒性的综合性、复杂性以及毒理学研究的不完善性,对烟气蔓延过程中毒性分布的研究较少。

由于我国在地下交通枢纽方面的行人特征参数不系统、不全面、不可靠,大多数地铁疏散仿真研究的仿真参数是直接引用西方国家行人特征参数,很不准确可靠,所以我国部分学者开始着手通过实验调查来获取这方面的数据。Lam 等人^[36]在香港的两个交通枢纽对行人进行了实地观测,取得了充足的行人不同个体总行速度及人群行走速度等特征数据,这是目前为止对地铁站行人流的基本特征详细的观测。陈然等人^[37]对上海市人民广场交通枢纽和南京路步行街进行了两组行人交通观测,获得了包括步速、步幅和步频等数据,实测数据显示,我国大城市行人基本数据与国外的情况略有区别,但步速、步频的分布同为高斯分布,差别很小。胡清梅^[38]对乘客在平缓疏散通道上的运动行为特征数据进行了调查,获得了大量乘客特征数据,并拟合出了平直通道内乘客速度——密度函数。王驰^[39]通过对某地铁站早高峰时段人员疏散情况的实地拍摄与数值模拟,分析了地铁楼梯上行人群的密度、流量以及速度之间的关系。刘栋栋等人^[40]通过对北京地铁三个换乘枢纽的长期观测,得到了乘客性别、年龄、身高、体重、身体宽度、人群及个人行走速度、群集密度、人流率、携带行李数量共 10 类人员的行为特征数据,总结出大量有价值的结论,为地铁行人疏散设计与数值仿真提供了数据基础。彭赛^[41]利用地铁站内服务设施的视频进行行人特征数据的提取,提出应用于地铁站行人检测的改进方法并结合 OpenCV 计算机视觉库和 MFC 实现地铁站行人特征数据视频检测系统。现场实验调查,对于获取人群疏散基础数据有非常大的作用,可对人群疏散的心理和行为进行分析,并为其他的建模以及仿真奠定基础。

行人交通是城市交通流这一复杂系统的重要组成部分,由于行人之间的非线性相互作用,行人交通呈现出极其复杂多样的形态。对行人交通进行实测是掌握行人运动主要特征的重要手段,由文献可知,行人交通的测量方法主要有现场人工测量、摄影、摄像等方式。在仿真研究中,如果能够输入科学的符合我国国情的实测数据进行模拟,研究结果将更具有说服力。

2 不同规则改进疏散模型的研究

由于突发事件下地铁站的人员疏散过程受到人(包括人的生理与心理因素)、群集效应、管理部门运营水平、突发事件发生后的二次影响、建筑物设计布局和设施布局等诸多因素影响,整个过程是复杂多变的。如果仅依据原有的或经典模型进行研究,难以反映实际情况。因此,国内外不少学者引入了不同规则或约束条件到疏散模型中,尽可能使疏散模型更真实、更科学。

张培红等人^[42]基于对火灾时影响人员疏散行动的开始时间不确定因子的分析,建立火灾时人员疏散行为的数学模型,利用网论与关系数据库技术实现对疏散出口群集疏散流动规律的预测评价。李伏京等人^[43]基于人员行为特性建立了人员疏散模型,该模型具有人员速度可变和能够再现人员自组织现象的特点。保鲁昆等人^[44]研究了地铁站行人特性对疏散的影响,建立了人员应急疏散行为过程 Petri 网模型。孙光立^[45]改进了社会力模型,通过调整转向以及调速和路径选择新算法描述,研究出适用于步行设施的应急疏散模型,并通过仿真模拟验证了新模型的正确性。马剑^[46]通过进行可控实验,研究个体运动特征、行人与建筑环境及行人间的相互作用,并基于实验研究结论建立了行人流模型,研究了不同行人间作用形式的动力学影响。李岩^[47]基于交通流理论,将道路交通分配中的用户最优原则和系统最优原则引入地铁疏散并建立分配方法,从而得出疏散分配方案。陈绍宽等人^[48]通过对西直门地铁站内行人特征数据的调查,构建基于 M/G/c/c 模型的地铁站楼梯与通道乘客疏散能力瓶颈分析模型,计算分析该站在乘客到达率发生变化时楼梯、通道的疏散能力瓶颈点,发现站台连接售票厅的楼梯是疏散的瓶颈。Lei 等人^[49]利用 agent 模型,分析了人员密度、出口宽度与自动检票口对疏散时间的影响,发现适当地增加出口数目和拓宽出口宽度,能够有效提高整体疏散效率。孙绪彬等人^[50]基于社会力模型和 agent 的混合模型对火灾和爆炸等突发情况下地铁车站场景进行应急疏散研究,并对北京南站和宣武门站两个经典车站进行了计算实验。马洁等人^[51]提出一种出口动态选择模型,该模型引入感知因子与判断系数来反映乘客的感觉与知觉能力,通过采用动态比较过程和预测决策过程来模拟乘客出口选择与出口变换行为。Zhou 等人^[52]基于模糊逻辑模型研究了恐怖袭击下行人的应急疏散。孙金龙等人^[53]分析了恐慌状态下的人群行为特征及地铁疏散过程中人群恐慌的影响因素,构建了恐慌条件下的人群疏散模型,仿真实验表明恐慌在一定程度上会延长疏散时间,在地铁应急疏散过程中考虑恐慌因素具有实际意义。陈静^[54]基于社会力模型和 agent 的混合模型搭建地铁车站模型,结合实地调研数据对地铁场景、行人参数进行设置,并进行了应急疏散计算实验和验证。结果表明,该模型可以有效模拟地铁站复杂场景下的行人行为,可为地铁站行人应急疏散研究提供依据。

根据文献可知,研究人员主要侧重于考察人的行为特征、建筑物和设施对疏散的影响。突发事件下,疏散人员表现出明显的趋众性、自组织性等特点,易出现从众、恐慌等复杂的心理状态;此外,当代社会包括地铁站在内的建筑物,纷纷朝着大规模、多路径、多设施设备的方向发展,虽然智能化、安全性能、舒适程度大大提高,但对疏散个体心理与行为的影响程度也随之提高。把疏散个体心理状态与所处的疏散环境因素放到疏散模型中综合考虑,将有助于描述疏散的实际情形。

3 智能算法在疏散建模中的应用

传统的群智能算法在解决路径优化问题时,针对的主体主要是少量几个个体,算法的最终目标是机械地寻找最短路径,大部分模型都忽略了对环境和人员行为的全面描述,不能及时、动态地提供环境信息,容易对人员的疏散产生误导,无法实现智能调节。但是在突发事件的应急疏散路径优化中,研究的主体通常是大规模的疏散人群,最终目标是疏散时间最短的路径的动态搜索。由于疏散人员的恐慌等异常情绪造成人群滞留或拥堵、现场环境的变化等会影响人员的活动性,所以需要一种从全局角度出发,考虑环境影响、人群滞留拥堵影响、面向

大规模建筑人员疏散的疏散路径优化方法。

温丽敏^[55]将人员疏散最佳路径选择算法与遗传算法引入到模型中,提出一种重大事故人员应急疏散模型,十分具有创新性。刘文婷^[56]利用蚁群与人群相似的趋众性、转移性,采用蚁群算法建立应急疏散模型。王以恒^[57]利用 BP 神经网络算法和 MATLAB 软件,选取可能影响地铁站疏散能力的相关因素作为评价指标,建立应急疏散指标体系,对北京地铁站应急疏散能力进行了仿真评估,提出了增加疏散通道、疏散楼梯、安全出口数量等可供参考的建议。何健飞^[58]在利用拍卖算法进行疏散路径指派的基础上,运用蚁群算法模拟疏散个体的从众行为,这两种算法的结合使用可为每个疏散者分配最优疏散路径,减轻拥堵并验证了在不完全服从最优路径的情形下仍能够减轻拥堵。张鹏^[59]针对原始人工蜂群算法求解人员疏散问题时存在的早熟停滞问题,提出以种群划分为基础,利用多种群协同进化机制来扩展求解的多样性,以防止算法陷入局部最优,最后通过仿真实验证明了这种方法在求解的精度与收敛速度上有明显的提升。王起全等人^[60]基于寻找优化路径的蚁群算法,选择地铁站样本研究地铁爆炸事故发生时人的群体行为、疏散路径及疏散时间等问题,得出了发生爆炸事故时,采用蚁群算法进行疏散能够在较短时间内使乘客选择优化的疏散路径,从而撤离危险区域。赵俊波^[61]提出多次选取参数、多次运算取得最优解的改进粒子群优化算法,建立了疏散粒子群算法数学模型,利用简单规则实现对紧急情况下复杂人员疏散行为的模拟,实验结果表明该算法具有更好的稳定性和收敛速度。杨进等人^[62]在传统猫群算法中的跟踪模式中引入交换子和交换序的概念,提出了一种改进的猫群算法用于求解 TSP 路径优化问题,该算法在问题规模较大时,仍然能够取得较好的结果。朱宝^[63]将混合粒子群算法应用于大型公共建筑人员疏散优化研究中,构建了公共建筑人员群集疏散优化模型,设计了目标函数和约束条件,改进了粒子群算法的流程,并通过仿真证明了该算法具有较好的收敛效率。综上所述,在地铁突发事件应急疏散中,由于疏散人员具有明显的自组织性与趋众性等特点,这与蚁群很相似,都具有问题多元性、个体相关性与群体系统性等特点,所以,运用蚁群算法可以很好地模拟大规模人群疏散问题,特别适用于当代大型建筑物紧急疏散的动态路径优化问题。

此外,值得注意的是以模拟动物行为为基础的仿生学研究越来越受到研究人员的重视。在应急疏散领域,该方法综合考虑了疏散对象的本能反应与行为,分析了环境对疏散对象的影响,弥补了数值仿真难以贴合实际的缺陷。Saloma 等人^[64]基于对老鼠逃生行为的实验研究,描述了被困在公共建筑内恐慌群体的行为与疏散群体受现场环境影响的过程。Altshuler 等人^[65]用蚂蚁来模拟疏散人员进行能够检验高、低恐慌的实验,证明了“恐慌通过效仿快速传播”的假设。尽管仿生学实验模拟疏散人员的应急行为在一定程度上可以反映现场环境对人的影响,但是,由于人的智能性以及社会性特点使得仿生学实验难以完全表征人的复杂心理行为特征。

4 三个研究方向的联系

基于仿真模型模拟地铁应急疏散过程的研究往往依赖于已有的疏散模型与疏散软件,而许多疏散软件也是以一些经典模型作为基础,如 AnyLogic 仿真软件,行人间的作用依据的便是著名的社会力模型。仿真研究可以从宏观把握整个疏散过程,直观表现出疏散的细节,特别是一些疏散软件还可以生成详细的统计数据,能够有力地说明问题。

不同规则下改进疏散模型的研究,实质上是基于一些新的

理论进行建模,以期新模型能够更好地反映人员疏散的实际情形。经典的社会力模型的最初设想,就来源于牛顿第三定律;著名的元胞自动机模型,就是冯·诺依曼为了模拟生命系统所具有的自复制功能而提出来的。疏散模型是人员疏散研究的根本,选择一个合适的模型是取得好的研究成果的重要前提。

智能算法在疏散建模中的应用比较广泛。疏散过程中,一般要考虑的不仅仅是单个个体,而是群体中的人,并且往往问题的规模非常大。智能算法能够有效反映个体在群体影响下如何选择最优疏散路径。突发事件下地铁站人员应急疏散问题,实质上是如何在最短时间里把人员疏散至安全区域的问题,这就涉及到如何寻找当前情形下的最优路径,如蚁群算法能够很好地模拟人在从众心理影响下如何寻找到最优疏散路径。

总而言之,仿真模型可以看做是一个大的系统,它一般集成了建筑设施布局、疏散模型与路径寻优算法等内容。而各种改进后的疏散模型则是疏散仿真系统核心组成部分,以描述疏散过程中所应遵循的各种规则。智能算法作为疏散仿真系统内置的一种方法,主要用于在某种规则下寻找最优疏散路径。仿真模型由于其考虑的因素较为全面、性能稳定以及易于操作,一般应用于对两者应用效果的验证。上文对突发事件下地铁站人员应急疏散问题研究的三个角度的阐述,实际上是从总体到局部的三个不同层面来展开的。

5 基于改进蚁群算法的人员疏散问题研究展望

蚁群算法(ant colony algorithm)是 20 世纪 90 年代初提出的模仿蚂蚁觅食行为的内在机制来求解复杂问题的方法,蚂蚁在寻找食物的过程中,整个蚁群通过协作总是能找到从蚁穴到食物地点的最短路径。生物学家研究发现,蚂蚁在觅食时经过的路径上会释放信息素(一种传递信息的化学物质,附着在路径上会随着时间而衰减),并在发现食物后立即返回蚁穴求助;后续经过该路径的蚂蚁会感知信息素,并会优先选择信息素浓度高的路径。如果蚂蚁在某条路径上往返的时间越短、经过的频率越高,单位时间就会有更多的蚂蚁选择这条路径。这种自身催化与正向反馈的机制最终会找到通往目标的最短路径。

将蚁群算法应用到人员应急疏散研究中具有可行性。一方面,蚁群算法目前已有成熟的理论体系,特别是对蚁群算法的数学模型、复杂度以及收敛性学术界都已有很深入的研究;另一方面,蚁群算法已经应用到许多方面,其中在路径优化领域最典型的应用是车辆作业调度问题,即物流配送车辆路径优化与应急物资调度最短路径选择等。

蚁群算法由于其良好的鲁棒性和自组织性,在解决建筑物中应急疏散路径优化问题上具有很大的优势。目前,很多学者对蚁群算法在人员疏散问题上的应用进行了一系列的研究。刘萍等人^[66]提出了一种遗传算法与蚁群算法相结合的 QoS 算法,该方法前期利用遗传算法生成初始解,并将其变换为蚁群算法中信息素初始值,最后利用蚁群算法求解,由于这种方法吸取了两种算法各自的优点,提高了搜索效率。张培红等人^[67]将改进的自适应蚁群算法应用于大型公共建筑物智能疏散路径寻优,对建筑空间网络节点以及疏散通道静态属性和动态属性进行定义和描述,实现路径优化算法与火灾探测报警系统烟态势势信息的数据传递,该算法很好地克服了局部最优和死循环问题,提高了优化效率。梅志斌等人^[68]在考察火灾条件下大型公共建筑的疏散通道通行能力时,定义并引入了当量长度概念,从而找到一种对人员疏散路径进行优化的自适应蚁群算法,并对算例进行了计算。结果表明,自适应蚁群算法与传统蚁群算法相比提高了运算速度,解决了传统算法在收敛速度与防止早熟之间的平衡问题。李瑞琪^[69]基于传统二维蚁群

算法原理提出了三维蚁群算法,并对疏散路径上的环境因素对人员疏散行为所造成的影响进行了分析,从而建立三维火灾疏散模型,最后通过实验验证了模型的科学性,作者将蚁群算法从二维提升到三维,很具有研究意义。段鹏飞等人^[70]针对大型场馆应急疏散路径优化问题,通过引入多蚁群信息素组的概念,将遗传算法交叉变异思想运用到信息素更新模型中,从而解决了蚁群算法易早熟的缺陷。许爱军等人^[71]针对地铁突发事件人员疏散模型与路径优化问题,提出基于神经网络的自适应蚁群算法,通过神经网络的自适应能力动态计算通行难易系数,为蚁群信息素浓度更新和启发函数提供分流指引,并通过实验证明新算法可以有效解决初始化蚁群路径选择的盲目性和随机性。傅军栋等人^[72]结合某商场工程实例,通过改善的蚁群算法规划出最佳的疏散路线,将平面疏散与垂直疏散融合提出三维疏散方案,实验表明该算法能够有效躲避动态障碍物,从而实现合理的路径规划和疏散。因此,吸收其他算法的优秀之处来改进传统蚁群算法,从而使改进后的蚁群算法能更好地解决现实问题,这将是很有价值的研究方向。

从现有文献可以看出,一方面蚁群算法的计算模型得到了多方面的改进,不足之处得到了有效的改善;另一方面,蚁群算法的应用范围已扩展到多个领域,已从静态优化向多维动态组合优化方向发展。但是,大多数的研究都是利用蚁群算法来解决 TSP 或相关问题,如救援车辆调度、物流配送路径选择以及人工智能方面等,而在人员应急疏散领域的应用比较少,只是近几年才逐渐多起来。

6 结束语

通过对国内外研究现状的综述,针对突发事件情景下地铁应急疏散问题的研究,存在以下几点不足与改进:

a) 仿真软件模拟地铁站人员应急疏散的研究。近年来,国外出现了许多专业的人员疏散仿真软件,如 Legion、EXODUS 与 Pathfinder 等。这些软件不仅可以用于建筑物中人员的安全疏散评估,还可以对建筑物设计提出改善意见,因此,许多研究者利用软件工具开展了一系列有意义的研究。但是国内学者在应用国外软件时,未考虑到该软件的许多内置的行人参数是基于欧美人而设置的,引用的一些建筑标准也与国内存在差异,因此利用这些软件进行研究,其结果是值得怀疑的。此外,我国对于地铁站行人特征参数缺乏详细的统计数据,已有的数据样本量小、不完整、可靠性低,为了更加准确、有效地进行地铁站应急人员疏散问题的研究,迫切需要对我国地铁站行人特征进行深入的实地调查分析。

b) 不同规则对疏散模型改进的研究。人员应急疏散问题自从被提出以后,国内外研究者已取得一定的成果与进展,但在我国尚属于起步阶段。国内的研究者基于各类规则陆续提出了各种人员疏散模型,但大都是以疏散路径的最短几何长度作为人员疏散最短路径的判断依据,而对建筑物构造、设备设施布局、烟气、高温、能见度等火场因素对行人心理行为的影响考虑不充分,部分模型忽略了对人员心理行为的全面描述,导致人员拥堵在一条最短疏散路径上,产生瓶颈效应,影响了疏散模型的效率。人员应急疏散是结合人员行为、人流、人员能力、建筑物的物理环境突发事件动态变化的一个动态系统,因此,它必须以动态系统模型描述,从系统动态模型的模拟结果进行评估。目前,国内外对疏散进行的研究大多数都在描述模拟疏散情况,对疏散环境与人员心理行为的综合分析模拟比较少。

c) 人员疏散问题的算法研究。目前在路径优化问题上,Dijkstra 与 Floyd 算法的应用比较广泛,拍卖算法由于其复杂度较低、最短路径易于被追踪,逐渐引起学者们的注意,这类算法都

是基于多智能体技术的确定性算法,可以实现智能体与环境的相互作用。尽管确定性算法一般具有较好的并行计算能力,但是在用于大型网络模型求解时,计算效率比较低下,从而难以满足实际计算需要。随机性算法中,遗传算法具有比较好的全局搜索能力,但缺乏良好的信息反馈机制,从而造成迭代繁多,计算效率低下。BP 神经网络对初始网络权重非常敏感,以不同的权重初始化网络,其往往会收敛于不同的局部极小,BP 神经网络算法本质上为梯度下降法,收敛速度慢。模拟退火算法优化过程耗时较长,难以在短时间内求得最优路径解。

当前,我国许多城市的地铁建设正在如火如荼开展,研究人员对地铁站人员应急疏散的研究也将继续深入下去。由于国内外商业化的疏散仿真软件已经非常成熟,种类繁多,从长远来看,研究人员仍将继续将这类软件作为验证工具使用,同时会通过实验收集符合我国实际的地铁站行人特征参数,以增强疏散仿真实验的可信度。在疏散模型构建方面,研究人员开始考虑疏散个体心理因素对疏散的影响。心理因素对行为的作用是复杂的,往往对疏散的效率产生相当重要的影响,典型的如从众心理、恐慌心理和侥幸心理等。这类研究对于解决疏散过程所出现的拥堵、踩踏问题具有相当大的价值,这将是今后的一个研究热点。由于智能算法包含了许多种类的模拟自然过程的算法,不同算法具有不同的特点和适应性,而且许多新型算法不断出现。因此,在这一领域的研究将朝着新型算法运用、改进已有算法的方向探索,这也是今后研究的一个热点。

蚁群算法对初始条件要求较低,最优路径计算过程中采用贪心规则,具有较高的运行速度与计算效率。此外,蚁群算法可塑性强,其具有的自组织性与鲁棒性使得它在求解路径优化问题时,比其他仿生型算法更加稳定、高效。从文献来看,目前大多数蚁群算法的研究都是利用蚁群算法来解决 TSP 或相关问题,而如何将其加以改进发展,应用到地铁站人员应急疏散领域则是一个很有价值的课题。

参考文献:

- [1] 杨立中,方伟峰,黄锐,等. 基于元胞自动机的火灾中人员逃生的模型[J]. 科学通报, 2002, 47(12): 896-901.
- [2] 徐高. 人群疏散的仿真研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2003.
- [3] 宋卫国,于彦飞,范维澄,等. 一种考虑摩擦与排斥的人员疏散元胞自动机模型[J]. 中国科学 E 辑: 工程科学 材料科学, 2005, 35(7): 725-736.
- [4] Song Weiguo, Yu Yanfei, Wang Binghong, et al. Evacuation behaviors at exit in CA model with force essentials: a comparison with social force model[J]. Physica A: Statistical Mechanics & Its Applications, 2006, 371(2): 658-666.
- [5] 赵道亮,刘英学. 人员疏散的二维元胞自动机随机模型研究[J]. 安全与环境学报, 2009, 9(5): 179-182.
- [6] Dong Wenyong, Mao Wentao, Zhong Anyuan, et al. Cellular automaton model and simulation of fire evacuation based on agent technology[C]//Proc of the 3rd International Conference on Education Technology and Training. 2016: 236-239.
- [7] 郑营. 基于元胞自动机模型的火灾环境下人员疏散研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2011.
- [8] 汪洋,李楠,张磊. 基于正六边形元胞自动机的行人疏散研究[J]. 计算机工程, 2017, 43(8): 310-315.
- [9] 许爱军,谢依馨. 基于元胞自动机模型的地铁人员疏散仿真研究[J]. 计算机与数字工程, 2017, 45(5): 950-953, 1013.
- [10] 王志刚. 地下大型商场火灾时期人员疏散计算机模型[J]. 火灾科学, 2001, 10(1): 57-62.
- [11] 宋卫国,于彦飞,陈涛. 出口条件对人员疏散的影响及其分析[J]. 火灾科学, 2003, 12(2): 100-104.
- [12] 马嘉琪,白雁,齐茂利. 基于微观仿真的同站台换乘站客流疏散研究[J]. 中国安全科学学报, 2009, 19(11): 172-176.
- [13] 孔维伟,刘栋栋. 北京复兴门地铁火灾时人员安全疏散研究[J]. 北京建筑工程学院学报, 2009, 25(4): 29-32.
- [14] Jiang C S, Yuan F, Chow W K. Effect of varying two key parameters in simulating evacuation for subway stations in China[J]. Safety

- Science, 2010, 48(4): 445-451.
- [15] Li Yifan, Chen Junmin, Ji Jie, *et al.* Analysis of crowded degree of emergency evacuation at "bottleneck" position in subway station based on stairway level of service[C]//Proc of the 5th Conference on Performance-based Fire and Fire Protection Engineering [S. l.]: Elsevier Ltd., 2011: 242-251.
- [16] Sagun A, Bouchlaghem D, Anumba C J. Computer simulations vs. building guidance to enhance evacuation performance of buildings during emergency events [J]. *Simulation Modelling Practice & Theory*, 2011, 19(3): 1007-1019.
- [17] 许伟伟. 地铁车站突发灾害下人员疏散应急仿真研究 [D]. 呼和浩特: 新疆大学, 2014.
- [18] 王春雪, 吕淑然, 索晓. 基于不同时段人群特征的地铁疏散仿真研究 [J]. *中国安全生产科学技术*, 2015, 11(9): 101-107.
- [19] 潘科, 修顺延. 突发环境下地铁大客流疏散数值模拟 [J]. *大连交通大学学报*, 2017, 38(4): 142-146.
- [20] 王起全, 王惟先. 地铁火灾应急疏散路线规划与对策 [J]. *中国安全生产科学技术*, 2017, 13(3): 131-136.
- [21] 李意. 地铁车站火灾条件下疏散客流状态的仿真分析 [D]. 成都: 西南交通大学, 2017.
- [22] 朱颖心, 李先庭. 地铁火灾时烟气在隧道内的扩散与人员疏散方案 [C]//全国暖通空调制冷1996年学术年会论文集. 1996: 136-139.
- [23] 钟茂华, 史聪灵, 邓云峰. 地铁浅埋岛式站台列车火灾烟气蔓延的数值模拟研究 [J]. *中国安全科学学报*, 2005, 15(11): 10-15.
- [24] 邵荃, 杨锐, 陈涛, 等. 活塞风影响下地铁火灾烟气运动规律的数值模拟研究 [J]. *火灾科学*, 2006, 15(3): 123-127.
- [25] 田娟荣, 周孝清, 郑志敏, 等. 屏蔽门对地铁火灾烟气的影响分析 [J]. *暖通空调*, 2006, 36(1): 101-105.
- [26] Roh J S, Ryou H S, Park W H, *et al.* CFD simulation and assessment of life safety in a subway train fire [J]. *Tunnelling & Underground Space Technology*, 2009, 24(4): 447-453.
- [27] 樊洪明, 尹志芳, 张丹, 等. 地铁车站挡烟垂壁对火灾烟气流动的影响分析 [J]. *防灾减灾工程学报*, 2011, 31(1): 80-84.
- [28] Pan Liwei, Lo S M, Liao Guangxuan, *et al.* Experimental study of smoke control in subway station for tunnel area fire by water mist system [C]//Proc of the 5th Conference on Performance-based Fire and Fire Protection Engineering. [S. l.]: Elsevier Ltd., 2011: 335-342.
- [29] Tsukahara M, Koshiba Y, Ohtani H. Effectiveness of downward evacuation in a large-scale subway fire using fire dynamics simulator [J]. *Tunnelling & Underground Space Technology*, 2011, 26(4): 573-581.
- [30] Li Yanfeng, Lin Xinxin, Feng Xiao, *et al.* Life safety evacuation for cross interchange subway station fire [C]//Proc of International Symposium on Safety Science and Technology. [S. l.]: Elsevier Ltd., 2012: 741-747.
- [31] Guo Xiwei, Chen Jianqiao, You Suozhu, *et al.* Modeling of pedestrian evacuation under fire emergency based on an extended heterogeneous lattice gas model [J]. *Physica A: Statistical Mechanics & Its Applications*, 2013, 392(9): 1994-2006.
- [32] Yang Peizhong, Li Chao, Chen Dehu. Fire emergency evacuation simulation based on integrated fire-evacuation model with discrete design method [C]//Advances in Engineering Software. [S. l.]: Elsevier Ltd., 2013: 101-111.
- [33] 张洪娟. 基于火灾烟气数值模拟的地铁旅客安全疏散研究 [D]. 南京: 东南大学, 2015.
- [34] 陈绍宽, 狄月, 史荣丹, 等. 地铁车站站台火灾影响分析与人员疏散研究 [J]. *交通运输系统工程与信息*, 2017, 17(1): 241-248.
- [35] 丁厚成, 戚文竟, 朱志伟, 等. 地铁车厢内部火灾烟气流动规律的数值模拟研究 [J]. *安全与环境工程*, 2017, 24(4): 123-128.
- [36] Lam W H K. Pedestrian speed/flow relationships for walking facilities in Hong Kong [J]. *Journal of Transportation Engineering*, 2000, 126(4): 343-349.
- [37] 陈然, 董力耘. 中国大都市行人交通特征的实测和初步分析 [J]. *上海大学学报: 自然科学版*, 2005, 11(1): 93-97.
- [38] 胡清梅. 大型公共建筑环境中人群拥挤机理及群集行为特性的研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2006.
- [39] 王驰. 某地铁站火灾情况下人员安全疏散研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2007.
- [40] 刘栋栋, 孔维伟, 李磊, 等. 北京地铁交通枢纽行人特征的调查与分析 [J]. *建筑科学*, 2010, 26(3): 70-74.
- [41] 彭赛. 基于视频处理的地铁站行人特征数据提取 [D]. 成都: 西南交通大学, 2016.
- [42] 张培红, 陈宝智. 火灾时人员疏散的行为规律 [J]. *东北大学学报: 自然科学版*, 2001, 22(1): 54-56.
- [43] 李伏京, 方卫宁, 胡清梅, 等. 地铁车辆安全疏散性能的仿真研究 [J]. *系统仿真学报*, 2006, 18(4): 852-855.
- [44] 保鲁昆, 朱君. 车站火灾紧急疏散人员行为过程研究 [J]. *铁道运输与经济*, 2008, 30(1): 35-37.
- [45] 孙立光. 步行设施内的行人行为微观仿真模型研究 [D]. 北京: 清华大学, 2009.
- [46] 马剑. 相向行人流自组织行为机理研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2010.
- [47] 李岩. 基于路径分配的城市轨道交通枢纽疏散管理研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2010.
- [48] 陈绍宽, 刘爽, 肖雄, 等. 基于M/G/c/c模型的地铁车站楼梯通道疏散能力瓶颈分析 [J]. *铁道学报*, 2012, 34(1): 7-12.
- [49] Lei Wenjun, Li Angui, Gao Ran, *et al.* Simulation of pedestrian crowds' evacuation in a huge transit terminal subway station [J]. *Physica A: Statistical Mechanics & Its Applications*, 2012, 391(22): 5355-5365.
- [50] 孙绪彬, 董海荣, 宁滨, 等. 基于ACP方法的应急疏散系统研究 [J]. *自动化学报*, 2014, 40(1): 16-23.
- [51] 马洁, 徐瑞华, 李璇, 等. 地铁车站乘客疏散出口选择行为仿真建模 [J]. *同济大学学报: 自然科学版*, 2016, 44(9): 1407-1414.
- [52] Zhou Min, Dong Hairong, Wen Ding, *et al.* Modeling of crowd evacuation with assailants via a fuzzy logic approach [J]. *IEEE Trans on Intelligent Transportation Systems*, 2016, 17(9): 2395-2407.
- [53] 孙金龙, 王爽, 陈文璞. 基于人群恐慌的地铁应急疏散仿真研究 [J]. *安全*, 2017, 38(3): 8-11.
- [54] 陈静. 基于混合模型的地铁车站行人行为建模与仿真 [D]. 北京: 北京交通大学, 2017.
- [55] 温丽敏. 重大事故应急疏散研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 2000.
- [56] 刘文婷. 城市轨道交通车站乘客紧急疏散能力研究 [D]. 上海: 同济大学, 2008.
- [57] 王以恒. 基于BP神经网络算法的北京市地铁站应急疏散能力仿真评估模型 [J]. *中国安全生产科学技术*, 2012, 8(1): 5-10.
- [58] 何健飞. 基于行为的应急疏散路径优化与仿真 [D]. 上海: 上海交通大学, 2013.
- [59] 张鹏. 多蜂群协同进化算法及其应用研究 [D]. 济南: 山东师范大学, 2014.
- [60] 王起全, 杜艳洋, 张心远. 蚁群算法在地铁车站内应急疏散的应用 [J]. *消防科学与技术*, 2015, 34(1): 55-58.
- [61] 赵俊波. 基于改进粒子群优化算法的人员疏散问题研究 [D]. 鞍山: 辽宁科技大学, 2016.
- [62] 杨进, 郑允, 马良. 改进的猫群算法求解TSP [J]. *计算机应用研究*, 2017, 34(12): 3607-3610.
- [63] 朱宝. 基于改进粒子群算法的大型公共建筑人员快速高效疏散研究 [J]. *太原学院学报: 自然科学版*, 2017, 35(2): 1-4.
- [64] Saloma C, Perez G J, Tapang G, *et al.* Self-organized queuing and scale-free behavior in real escape Panic [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 2003, 100(21): 11947-11952.
- [65] Altshuler E, Ramos O, Núñez Y, *et al.* Symmetry breaking in escaping ants [J]. *The American Naturalist*, 2005, 166(6): 643-649.
- [66] 刘萍, 高飞, 杨云. 基于遗传算法和蚁群算法融合的QoS路由算法 [J]. *计算机应用研究*, 2007, 24(9): 224-227.
- [67] 张培红, 张芸果, 梅志斌, 等. 大型公共建筑物智能疏散路径优化自适应蚁群算法实现及应用 [J]. *沈阳建筑大学学报: 自然科学版*, 2008, 24(6): 1055-1059.
- [68] 梅志斌, 董文辉, 潘刚, 等. 建筑物火灾中人员疏散路径优化自适应蚁群算法 [J]. *沈阳建筑大学学报: 自然科学版*, 2008, 24(4): 671-674.
- [69] 李瑞琪. 三维蚁群算法的实现与疏散路径优化研究 [D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2012.
- [70] 段鹏飞, 熊盛武, 李辉. 面向大型场馆疏散的改进多蚁群算法 [J]. *计算机应用研究*, 2013, 30(2): 357-359.
- [71] 许爱军, 苏境迎. 基于自适应蚁群算法的地铁人员疏散模型 [J]. *微处理机*, 2016, 37(1): 50-53.
- [72] 傅军栋, 刘业辉, 李江辉. 基于蚁群算法的火灾动态疏散 [J]. *华东交通大学学报*, 2017, 34(3): 118-124.