

交通枢纽

行人仿真建模与应用



张蕊 杨静◇著

中国建筑工业出版社

交通枢纽行人仿真 建模与应用

张蕊 杨静 著

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

交通枢纽行人仿真建模与应用/张蕊, 杨静著.

北京: 中国建筑工业出版社, 2018.8

ISBN 978-7-112-22425-8

I. ①交… II. ①张… ②杨… III. ①交通运输中心-行人-仿真模型-研究 IV. ①U115

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 150500 号

本书从微观角度实现了行人仿真的模拟, 使其灵活运用于城市交通枢纽的规划、设计和管理中。

本书介绍了常用的行人仿真模型, 阐述了颗粒离散元素法的基本理论, 分析了其应用于行人仿真的适应性, 研究了作为仿真建模基础的行人运动的特性参数及取值。随后详述了基于离散元与社会力组合模型的行人仿真方法, 并建立基于椭圆形体的不同服务设施的行人仿真模型, 重点研究枢纽内结伴行为对行人运动的影响。最后介绍了由团队自主研发, 运用 Microsoft Visual C++ 6.0 进行模型编译和构建的 DEASF (Discrete Element And Social Force) 行人微观仿真平台, 以及实例应用情况。

本书可作为交通工程专业人士的微观行人交通仿真工具书, 也可作为高校交通工程及相关专业的城市公共交通、轨道交通、交通仿真等课程的辅导教材或教学参考书, 同时还可供从事交通枢纽规划、设计、运营管理相关人员学习和参考使用。

责任编辑: 高延伟 吉万旺 赵 莉

责任校对: 芦欣甜

交通枢纽行人仿真建模与应用

张 蕊 杨 静 著

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京海淀三里河路 9 号)

各地新华书店、建筑书店经销

北京佳捷真科技发展有限公司制版

北京京华铭诚工贸有限公司印刷

*

开本: 787×960 毫米 1/16 印张: 10¼ 字数: 207 千字

2018 年 9 月第一版 2018 年 9 月第一次印刷

定价: 32.00 元

ISBN 978-7-112-22425-8

(32304)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

作者简介

张蕊 工学博士，北京建筑大学副教授，《交通工程》杂志副主编。长期从事交通枢纽行人仿真、交通行为、交通规划与交通政策等相关教学与研究工作。著有《儿童出行行为特征及其对交通政策的影响》、编译《微观交通仿真实践指南》等专业书籍。

杨静 工学博士，北京建筑大学讲师，主持国家自然科学基金、北京市教委科技立项等，主要研究方向为城市交通规划与交通政策、道路与交通工程设计、行人交通理论与应用、交通行为等。

■ 前 言 ■

随着轨道交通线网建设的不断完善,我国大中城市,特别是像北京、上海这样的特大城市,轨道交通发展呈现整体客流量大、换乘节点密集、枢纽内部空间构造愈加复杂的特点,枢纽的设计及运营管理都需要充分掌握枢纽内行人流运动行为与服务设施间的相互作用关系。相对于开放空间的行人交通系统,交通枢纽具有客流密度高、流动性强、边界曲折且不可变的特点,同时由于购票、进出闸机、换乘等各项服务的相互影响和制约关系,枢纽内部的乘客行为受空间功能、行人群体环境和主观意志三者的共同作用,体现出更为复杂、随机、难以准确预测的特征。

行人微观仿真方法在描述行人之间、行人与周边环境的相互作用方面具有很大优势,特别是在交通枢纽这样的行人规模大、运动行为复杂、流线交织严重的场所,较传统的理论计算和设计方法,可以更为真实地反映行人运动和设施运行的状态与效果,找出潜在的常发性交通瓶颈和偶发性高峰拥挤点。行人微观仿真方法作为车站设计、管理的重要辅助手段,已经得到了规划、设计与管理者的高度重视。

本书主要介绍了力学的行人微观仿真模型如何应用于交通枢纽模拟,并结合颗粒离散元算法进行求解的过程。第1章为引言,第2章介绍了常用的行人仿真模型,包括宏观、中观、微观三类,其中重点介绍微观模型中的社会力模型。第3章主要阐述了颗粒离散元素法的基本理论,并分析了其应用于行人仿真的适应性。第4章分析了作为仿真建模基础的行人运动的特性参数及取值。第5章详细介绍了基于离散元与社会力组合模型的行人仿真方法。第6章建立了基于椭圆形体的不同服务设施的行人仿真模型。第7章重点研究枢纽内结伴行为对行人运动的影响。第8章介绍了由团队自主研发,运用 Microsoft Visual C++ 6.0 进行模型编译和构建的 DEASF (Discrete Element And Social Force) 行人微观仿真平台。第9章介绍了实例应用情况。第10章介绍了将有限元分析方法引入社会力模型建立仿真模型及求解的探索性研究。

本书是在我国轨道交通大发展的需求背景下编写,基于规划设计与运营管理的实际需求,具有较好的实践指导作用;结合力学模型及颗粒离散元分析方法,具有较高的创新性;深入分析行人运动模型及参数,具有较好的理论深度;从行人椭圆形体到结伴行为研究,具有较广阔的研究视角。

本书介绍的仿真模型在研究过程中得到了很多同行的宝贵意见和建议,在此表示感谢!同时,研究生刘荣强、丁俊强、杨晨威、刘侃、胡润泽、刘博、齐泽

阳、段竞泽、朱经纬、冯诚、许伊婷、严巧兵等人在本书的编著和出版过程中付出了辛勤劳动，在此一并感谢。

本书得到住房城乡建设部软科学项目（2016-K2-013）、国家自然科学基金项目（51308029）、北京市教委科技发展计划项目（KM200610016005、SQKM201810016006）、北京市属高校基本科研业务费项目（X18084、Z18029）、北京建筑大学科学研究基金项目（KYJJ2017023）的资助，在出版过程中，获得了北京建筑大学高精尖中心、北京市城市交通基础设施建设工程技术研究中心及首都世界城市顺畅交通协同创新中心的大力支持，在此表示感谢！

虽然在研究过程中，我们付出了很多心血，但错误和不足在所难免，欢迎大家批评指正，也期待在行人仿真领域能与更多的研究者进行交流和探讨。

编者

2018.06

■ 目 录 ■

第1章 引 言	1
第2章 行人仿真模型综述	3
2.1 行人仿真模型分类	3
2.2 微观行人仿真模型研究	5
2.3 基于社会力的微观行人仿真模型原理	7
2.4 颗粒离散元素法应用于社会力模型的意义与必要性	10
第3章 颗粒离散元素法及应用于行人仿真的适应性分析	12
3.1 颗粒离散元素法基本原理及流程	12
3.1.1 基本原理	12
3.1.2 计算流程	13
3.2 颗粒离散元方法与社会力模型结合适用性分析	15
3.2.1 颗粒离散元法在交通领域的发展及应用	15
3.2.2 解决行人运动问题的优势	17
3.2.3 离散元与社会力模型结合的适用性	18
3.3 基于颗粒离散元法的行人运动过程分析	20
3.4 主流仿真平台及应用简介	21
3.5 本章小结	22
第4章 交通枢纽行人交通特性	23
4.1 交通枢纽行人构成	23
4.1.1 年龄结构	24
4.1.2 性别比例	24
4.1.3 结伴比例	24
4.1.4 携带行李行人比例	25
4.2 交通枢纽行人微观运动行为特征	26
4.2.1 行人个体空间占有特征	26
4.2.2 行人速度特征	28
4.2.3 行人步行行为特征	32
4.2.4 行人结伴行为特征	33
4.3 不同步行设施的行人交通特征	35
4.3.1 通道内行人交通特征	36
4.3.2 楼梯处行人交通特征	36

4.3.3	候车站台内行人交通特征	37
4.3.4	检票机处行人交通特征	39
4.4	本章小结	39
第5章	基于离散元与社会力组合模型的行人仿真	40
5.1	行人运动过程分析	40
5.2	基本运动方程建立	41
5.2.1	驱动力	42
5.2.2	排斥力	43
5.2.3	接触力	44
5.2.4	行人基本运动方程	48
5.3	模型参数标定	49
5.3.1	行人特征参数	50
5.3.2	社会力模型参数	52
5.3.3	接触模型参数	54
5.4	仿真实现	56
5.4.1	仿真模型构建思路	57
5.4.2	行人属性及运动空间定义	57
5.4.3	行人运动方程建模	60
5.4.4	仿真结果	62
5.5	本章小结	72
第6章	基于椭圆形体的不同服务设施内行人仿真模型构建	73
6.1	不同服务设施内的行人运动	73
6.2	基于椭圆形体的行人模型构建	74
6.2.1	行人椭圆形体模型	74
6.2.2	椭圆形体模型净距算法	75
6.3	不同服务设施内行人运动模型	77
6.3.1	接触力	77
6.3.2	驱动力	79
6.3.3	排斥力	88
6.4	本章小结	88
第7章	结伴行人模型构建	90
7.1	结伴行为研究现状	90
7.2	领导者与跟随者特征	91
7.3	基于 Agent 的动态目标路径选择模型	92
7.3.1	作用域与优先级	93

7.3.2 动态目标路径选择模型	95
7.4 结伴行人模型构建	97
7.4.1 驱动力	97
7.4.2 排斥力	99
7.5 本章小结	100
第8章 行人微观仿真平台 DEASF	101
8.1 行人仿真平台功能模块	101
8.1.1 输入模块	101
8.1.2 场景构建模块	103
8.1.3 仿真模块	103
8.1.4 输出模块	105
8.2 行人运动模型建模	105
8.2.1 行人仿真基本流程与实现方法	105
8.2.2 通道处行人运动仿真建模	106
8.2.3 楼梯扶梯处行人运动仿真建模	107
8.2.4 检票机处行人运动仿真建模	108
8.2.5 候车站台处行人运动仿真建模	110
8.3 本章小结	112
第9章 实证研究分析	113
9.1 高密度情形下行人异质行为的影响研究	113
9.1.1 实验设定	113
9.1.2 仿真结果分析	113
9.2 不同行人设施的密度高点与危险点分析	119
9.2.1 通道处密度高点和危险点分析	119
9.2.2 楼梯扶梯处密度高点和危险点分析	122
9.2.3 检票机处密度高点和危险点分析	124
9.2.4 候车站台处密度高点和危险点分析	125
9.3 考虑结伴行为的通道宽度研究	127
9.3.1 有无结伴情况下不同通道宽度值对行人流速度影响分析	127
9.3.2 不同流量下通道宽度建议值研究	129
9.4 本章小结	132
第10章 基于有限元理论的社会力模型探索研究	133
10.1 基于有限元理论的行人仿真分析方法	133
10.2 基于有限元理论的社会力模型改进	134
10.2.1 行人质量假设	134

10.2.2	社会心理力改进	135
10.2.3	接触力模型改进	135
10.3	有限元方法求解过程分析	136
10.3.1	求解假设	136
10.3.2	基本运动方程	137
10.3.3	平衡方程	138
10.4	参数标定与仿真实现	142
10.4.1	双向行人通道建模与参数标定	143
10.4.2	模型验证及仿真实现	143
10.5	小结	147
参考文献		148

交通枢纽是交通网络中的重要节点,对整个交通网发挥网络与规模效应起到重要支撑作用。广义的交通枢纽是几种运输方式或几条运输干线交会并能办理客货运输作业的各种技术设备的综合体。本书中交通枢纽指城市内部公共交通网络节点,特别是城市内部轨道交通线路交叉处形成的大型客流换乘场所。

北京是全国最早建设轨道交通的城市。近年来北京市进一步加快轨道交通建设,逐步完善城市轨道交通网,着力建立一个以公共运输网络为主体、以快速轨道交通为骨干、与城市发展进程相适应的现代化城市综合交通体系。以北京市为例,目前轨道交通呈现以下特点:

一是轨道交通线网多,运营里程长,换乘节点密集。截止“十二五”末,已建成轨道交通共 18 条,运营里程 554km,车站 334 座,换乘站 53 座。根据《北京市“十三五”轨道交通建设计划》,到“十三五”末,北京市轨道交通将形成“三环四横八纵十二放射”轨道交通网,包括 29 条线路,合计 999km,556 座车站,将实现区区通轨道,中心城区轨道交通 750m 站点覆盖率达到 90%。

二是大客流成为常态。“十二五”期间北京市轨道交通客运量年均 33 亿人次,最高日客运量突破 1100 万人次。交通枢纽是客流集散的主要场所,大型的轨道交通换乘枢纽每天有数十万的客流量。由于枢纽内部乘客的行走空间相对封闭,客流的波动性及突发事件容易造成局部区域的拥堵,进而扩散到整个空间,对乘客行走的舒适性、连续性影响更深刻,异常及紧急事件的危险性和后果更严重。因此,深入分析枢纽内部行人的运动和交互作用机理,掌握不同客流集散情况下枢纽内部乘客交通状态及设施服务水平,预测各类突发情况下客流状态变化和运动规律,是交通枢纽及换乘站高效、安全运行的重要支撑。

三是交通枢纽及换乘站建筑空间越来越复杂。城市轨道交通对于解决城市交通问题和促进整个城市的发展起到很大促进作用。现代城市轨道交通枢纽正从只为乘客和轨道交通运输工具提供集散地的交通设施逐渐演变成集多种交通方式于一体的综合性交通设施,乘客无须出站就能实现交通方式的换乘,交通枢纽及换乘站为保证建筑高效、集约、便捷、人性化的特点,需要按照地下大空间性的特点进行设计。为了实现这种综合性的功能,轨道交通枢纽的建筑空间变得越来越复杂,这无形之中加大了枢纽相关研究的难度。

相对于开放空间的行人交通系统,交通枢纽具有客流密度高、流动性强、边

界曲折且不可变的特点,同时由于购票、进出闸机、换乘等各项服务的相互影响和制约关系,枢纽内部的乘客行为受空间功能、行人群体环境和主观意志三者的共同作用,体现出更为复杂、随机、难以准确预测的特征。针对枢纽内行人运动研究的必要性和复杂性,具有场景设计和重现功能的微观仿真方法对行人运动的细节描述程度较高,可以通过大规模行人的微观研究来反映行人流的宏观特征,是交通枢纽行人运动研究较为常用的工具。由于交通枢纽内行人的步行行为受到多种因素的影响而呈现极为复杂的特征,为能真实再现交通枢纽内行人步行规律,需要行人仿真模型满足以下两个要求:

(1) 以行人个体为研究对象

行人在交通枢纽内的运动是多样化的,行人流中的个体存在多种目的地和步行方向,影响其运动方式的因素除了起点和终点之外,还包括由多种服务设施构成的中间目的地,行人在起点、中间目的地、终点之间会存在大量的自主选择过程,因此利用仿真工具研究交通枢纽内的行人宜以个体为研究对象,通过对每一个行人进行仿真以便真实反映枢纽内复杂多变的情况。以行人流为研究对象的模型仅能对行人流通过路径进行评估,无法反映选择行为,因此也就无法研究交通枢纽的设施设计和交通组织等问题。

(2) 能够反映枢纽设计对行人的影响

为了研究交通枢纽的行人设施设计优劣,分析与该交通枢纽衔接的各运输线路的运能匹配程度,各运营线路运行时刻与发车间隔是否合理,就必须了解这些因素对行人有哪些影响。因此,一个适用于研究交通枢纽的行人仿真模型,必须能够模拟交通枢纽内部设施的设计、交通工具的集散能力对其内部行人运动的影响等情况。

对于轨道交通枢纽内的行人运动行为和衍变规律进行研究不仅具有完善行人交通流理论的研究意义,还具有保证乘客安全、提高枢纽换乘效率和服务水平的现实意义。通过对行人流的研究可以完善行人交通流理论,建立符合国人特点的行人步行特性数据库,优化行人流运动仿真模型,使其适应枢纽及换车车站大客流、建筑空间复杂的特点;对行人流在不同设施空间特征下进行研究,了解其行为规律及其与设施之间的量化关系,为城市轨道交通枢纽设施规划及设计提供依据;通过对枢纽内部行人运动特性规律的研究,可以为枢纽的日常组织管理提供对策,从而提高枢纽服务水平和运营效率;对枢纽内部拥挤行人流的状态研究,根据紧急情况下行人的心理和行为特点,建立有效的疏散应急预案,保障轨道交通公共安全。

行人仿真模型综述

行人仿真研究经过数十年的发展,其理论体系和行人仿真模型不断完善,研究手法日趋多样化,研究成果丰富。行人动力学是研究不同情形下公共交通环境中行人运动特征及变化规律的学科。行人动力学模型的仿真对象为行人个体,在建模过程中既考虑了行人自身特征,又考虑了外界影响因素,因而能较好地表现出行人运动过程中的复杂特征,尤其对于行人个体之间的相互作用描述效果较好,这也是动力学模型在仿真重现微观行人运动时优于其他模型的重要方面。

2.1 行人仿真模型分类

根据行人流仿真模型对行人交通行为描述的细节程度不同,行人运动模型分为宏观、中观、微观三类。

宏观行人运动模型是基于流体力学发展起来的,将行人群体视为可压缩的流体,行人运动按照流体运动的机制来分析。宏观模型通过“速度-流量-密度”三参数的关系来描述行人流的运动特性。较早的宏观行人运动模型由 Fruin. J 于 1971 年提出,在其开创性的著作《Pedestrian Planning and Design》中仔细分析了行人流的速度、流量、密度等参数的相互关系,并将车辆交通研究中的服务水平引入到行人运动研究中。宏观模型从系统整体的角度来研究行人运动,适用于描述行人群体的运动状态和特性,但对行人运动的要素和特性的细节描述较为粗糙,不能表现行人个体的复杂交通行为,也难以研究行人个体之间的相互作用。

中观行人运动模型对于行人运动要素、行为特性和相互作用的描述比宏观模型详细,既能够描述流量、速度、密度等宏观模型特性,又能表现微观模型的细节作用。中观模型以日本学者 Muramatsu、Irie 和 Nagatani 提出的格子气模型(lattice gas model)为代表,该模型在气体动力学理论的基础上建立行人实时运动方程,模型融合了宏观模型与微观模型的特点,能够表现出一些行人个体的运动方向、运动速度等细节,但仍不能细致地表现出行人个体之间的相互作用。

微观行人运动模型着眼于行人个体的运动行为,对行人个体在不同条件下所能发生的运动行为进行研究,在建模过程中考虑微观特性,如自身特性、行人个体之间相互作用以及环境对行人个体的影响等因素。由于微观模型对行人运动的

细节描述程度较高, 仿真过程更加真实, 结果更加符合实际, 通过微观研究来反映行人流的宏观特征成为行人流研究的新方向, 因此近年来微观模型获得了较快的发展, 研究成果十分显著。根据建模机理不同, 微观行人运动模型主要可分为元胞模型、概率统计模型、动力学模型、Agent 模型四类, 具体如图 2-1 所示。



图 2-1 行人微观运动模型分类图

根据行人的移动机理, 行人仿真模型又可以分为离散型仿真模型和连续型仿真模型两大类。

离散型行人仿真模型将移动范围划定为等间距的网络模型, 该模型中的每一个格子作为一个单元, 并只能被一个个体占用, 主要包括元胞自动机模型、格子气模型和排队概率模型等。离散模型的优点是利用不同的行走规则实现行人运动及路径选择行为, 计算效率高, 容易实现大规模行人仿真的工程应用, 广泛应用于微观行人仿真软件中, 如 Legion、Steps 等。缺点是因为空格子的划分, 行人的运动空间、运动轨迹与真实情况均存在一定差别, 对个体行人的微观描述相对粗糙, 行人个体之间的相互作用未能真实体现。

连续型仿真模型特点是行人的移动空间是连续的, 行人在连续力场的作用下在空间中移动, 主要包括社会力模型、磁场力模型、人工势能场模型等。其中发展较为成熟的是社会力模型, 利用社会力解决行人间及与周边环境间的作用力, 可以有效实现行人的自组织行为、冲突情形和路径规划。缺点是由于将行人抽象为单位为 1 的粒子, 无法从根本上解决密集人群状态下的行人重叠问题, 同时模型形式复杂, 在求解时往往转化成常(或偏)微分方程的求解, 计算效率低下, 对边界条件的依赖性很强, 不便于工程应用。

在应用于不同仿真场景时, 离散型和连续型仿真模型均有各自的优势, 但离散仿真模型对行人运动空间的网格化和运动行为的规则化处理, 无法完全保证运

动轨迹与实际情况的一致性；社会力仿真模型基于力学原理，能更为真实地描述行人运动动机和相互作用，但在解决大群体运算规模的求解效率问题方面仍存在一定缺陷，在应用于工程实际时往往进行行人受力和个体特征的简化以满足计算效率的需要。

2.2 微观行人仿真模型研究

微观行人仿真模型从个体的角度进行模拟，包括基于物理力将行人看作满足力学运动定律的质点，用力矢量来描述行人的真实受力以及内在动机的连续模型（磁场力模型、社会力模型等），以及基于离散空间上由具有有限状态的元胞单元的离散模型（成本效益模型、元胞自动机模型等），目前也有学者开始将连续模型和离散模型混合起来进行研究，如较常见的智能体技术与元胞自动机模型结合的混合模型。以下将从四个方面对现有微观模型研究进行介绍，重点对目前研究较多的两类代表性模型——社会力模型及元胞自动机模型进行比较。

1) 行人运动行为及规则

在微观动力学模型中，行人的运动是由各种动机的作用转化成为力、加速度矢量，再通过平行四边形法则得出加速度合矢量，从而实现位置的更新。社会力模型假设行人以期望速度向固定目标行进，并以“社会力”作为驱使行人前进及避让的动力。在计算行人之间的影响时，社会力模型考虑了其他行人的运动方向，但在仿真过程中常常出现行人重叠问题。许多研究学者从最近行人距离和最大允许压缩量上入手，修正了行人避免重叠机制，但是这些修正的考虑因素相对单一，且大多仅考虑了正前方行人对后方行人的影响。此外，原始的社会力模型对于行人的微观运动行为描述相对粗糙。孙立光等使用“方向选择与速率调整”的手法对行人的微观动作进行修正，并采用领域决策原理驱动行人的决策过程。Ding 等通过提高驱动力、吸引力和方向对于模型参数的影响，建立一个基于社会力模型的“避免过度重复动作”的模型。Ko 等利用最大似然估计法对社会力模型进行校正，建立一个由惯性、方向预设、跟随关联、碰撞避免、随机误差共五个模块组成的模型，对行人的行走轨迹进行修正。此类修正在描述行人运动方面具有一定程度的进步，但模型形式复杂带来的计算效率低下问题却常常被忽略。

元胞模型通过定义一系列规则处理行人运动行为，行人只能进行 45° 或者 90° 转角，其运动空间和运动轨迹与真实情况均存在较大差别。同时行人只能前进和换道选择，缺少后退和绕行，无法体现行人交通中复杂的交通现象，很难描述行人随机行走、行人避让等现象。对此 Muramastu 等提出一种实现行人随机走动

的元胞自动机模型。Blue、Li 更新了行人间交换位置以及等待行为的规则。吴慧欣等引入规则描述,修正了相对于其他交通对象的行人避让模型。任刚等引入前进、右倾、超越以及影响修正系数等,对元胞自动机(CA)基本模型中的转移概率进行修正。Zarita 等引入概率神经网络模型,对行人群的绕行运动进行了模拟。这些改进的算法大多为启发式的,其结果具有不可预测性,且难以适应不同状态下的行人场景。

2) 行人运动行为生理、心理特点体现

将行人运动过程中的生理、心理等特性体现在行人仿真中是近年来的一个难点,同样也是一个热点。目前已存在的模型中,力学模型、基于多智能体的混合模型能够不同程度体现行人心理、生理特性。

在社会力模型中,依据行人不同的动机及其在行走过程中所受到的影响,一共受到三种作用力,即自驱动力、行人之间的作用力、行人与障碍物之间的作用力。然而在这三种力中,自驱动力、行人之间及行人与障碍物之间的“排斥力”能够将行人的主观心理因素考虑其中。Lakoba 认为行人的最终期望速度由行人个体的期望速度和周围行人的平均速度共同构成,因此在原始社会力模型的基础上考虑了行人 i 周围半径 $2\sim 3\text{m}$ 以内其他行人的平均速度。张蕊等通过对国内枢纽人流调查数据分析修正了该影响半径。为了实现更逼真的模拟,社会学和心理学理论往往纳入行人人群建模。在原始社会力模型中,所有行人之间的相互作用力描述是一样的,而在现实中存在一定数量的小团体活动,这些小团体中的成员之间的排斥力表现不明显,汪蕾在此基础上引入了朋友间作用力,改善了这种现象。Fridman 等提出了一种基于群体行为模型的社会比较理论。在缺乏客观的方式来评价行人状态时,会参考周围相似人群的特性。Pan 等提出了一个计算框架,以社会认同和社会证明理论为蓝本,根据社会身份,个人遵循规则和程序,他们识别选择适当的情况。当个体面对不确定性时,例如信息不足,个体将遵循他人行为引导行为。

3) 多重行人分类

人流中不同个体的行为是不同的。行人间的差异严重影响整体的运动特征,这种现象应该在模型中得到描述;同时行人群体的内部分类也会影响整体的仿真效果。

在现有社会力模型中,行人被抽象成一个个粒子,这些粒子符合牛顿第二定律,其质量假设为单位 1。元胞模型将行人移动范围划定为等间距的网络模型,每个元胞占据一个网格,相当于所有的行人尺寸大小一致。极少模型能有效区分行人个体的物理、生理及心理差异。

各国学者在行人群体分类方面的研究也取得了一定进展。Yang 等提供了一个三维 CA 模型来模拟乘员疏散中的亲属行为,结论表明亲属间典型的等待现象

和回溯现象在实际疏散中会明显降低疏散效率。Qingge 等模拟小组疏散人群,每个小组都是基于一个领导者-跟随者模型,领导者发现出入口,跟随者通过动态分组算法跟踪最近的领导者。Musse 等探索一种新的方法研究拥挤人流中的虚拟行人群组关系和突发行为。Fridman 和 Kaminka 实现了几种人群存在个体或分组行人的行为情景。

4) 模型计算效率

力学模型能够体现行人之间的交互行为,正因如此,当行人数量逐渐增加,每个行人之间相互作用的计算量呈指数函数的规模递增,模型中其他的影响因素计算也相对庞杂。Guo、Saboia 等人将社会力模型与格子气模型结合,能够融合两个模型的优点,降低计算量且提高精度。王子甲等引入分子动力学的链接列表元胞算法,相对节省了模型的运算时间,但是模型的可靠性尚待进一步验证。此外,社会力模型方程对于边界条件具有很强的依赖性,给程序的编程带来一定困难。元胞自动机模型的每个元胞只能在有限的离散状态集中取值,且其状态改变的规则在时间和空间上都是局部的,在算法上易于实现,具有计算速度快、效率高的优点,但对于微观描述相对粗糙。

由以上分析可以看出,从行人运动细节描述及个体心理、生理特征体现角度看,基于行人交互作用的力学模型能够较为准确地刻画行人的运动轨迹和行为,具有行为描述的优势,但现有的力学模型无法从原理上解决行人重叠等关键问题,还存在改善空间;从计算效率角度看,力学模型在大规模行人流模拟情形下,计算量以指数函数的规模递增,目前对高效数值计算方法的寻求仍处于探索阶段。

本文主要以社会力为代表的微观行人仿真模型为研究重点,在其基础上,拟从仿真模型的数学和计算结构特征角度出发,利用学科交叉优势,更好地解决行人运动微观动机与群体行为之间的相互关系,适应不同模拟场景的复杂度,为交通枢纽行人仿真进行有益尝试和探索,为微观力学模型的高效仿真及数值求解寻求新的方法和途径。

2.3 基于社会力的微观行人仿真模型原理

社会心理学是社会力模型的基础,由德国心理学家库尔特·勒温(Kurt Lewin)建立。勒温以完形心理学的理论为研究基础,考虑行人的意愿、需求以及心理上的影响因素,建立了社会心理学的基本理论。之后,勒温参考拓扑学的研究方法将场论的基本假设综合融入社会心理学模型中,完善了其社会心理学体系。社会心理学的基本思想是:在一定的场景范围内,其外在环境是相对稳定