

综合交通客运枢纽 仿真建模关键理论与方法

贾洪飞 ◎ 著



科学出版社

综合交通客运枢纽仿真建模 关键理论与方法

贾洪飞 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书是国家高新技术研究发展计划项目成果的凝练和总结。主要介绍了城市综合交通客运枢纽仿真建模理论与方法的研究现状,以及城市综合交通客运枢纽仿真系统功能需求分析;详细介绍了枢纽空间结构功能分解与建模的理论和方法;系统分析了城市综合交通客运枢纽人流的微观、宏观及混沌特性;提出了完整的行人交通行为模型框架,在此框架下系统讨论了受限视野约束下的行人路径选择行为模型、楼梯与扶梯设施选择行为模型、描述行人运动的社会力模型以及行人队列选择和队列内行进模型;基于枢纽空间结构与功能模型、行人交通行为模型,详细介绍了行人智能体的导航模型与关键算法,并简要介绍了城市综合交通客运枢纽仿真系统 PS-SITH 的模块组成与应用案例;最后详细介绍了城市综合交通客运枢纽换乘量预测技术方法以及枢纽、交通组织优化技术。

本书可作为从事交通规划与管理专业的工程技术人员的参考用书,也可作为交通运输工程学科研究生的参考教材。

图书在版编目(CIP)数据

综合交通客运枢纽仿真建模关键理论与方法 / 贾洪飞著. —北京:科学出版社, 2011

ISBN 978-7-03-031778-0

I. ①综… II. ①贾… III. ①交通运输中心-旅客运输-系统仿真-研究 IV. ①U115

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 125171 号

责任编辑:张海娜 / 责任校对:宋玲玲

责任印制:赵 博 / 封面设计:耕者设计工作室

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>

新蕾印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2011 年 7 月第 一 版 开本:B5 (720×1000)

2011 年 7 月第一次印刷 印张:13 彩插:2

印数:1—2 500 字数:252 000

定价:55.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

在复杂的城市交通大系统中,客运交通系统是最主要的组成部分,与城市功能的关系最为密切,影响最大,也是城市交通中最复杂多变、面临矛盾和问题最突出的部分。作为客运交通系统网络节点的综合交通客运枢纽,是不同交通方式、不同方向客流集散、换乘的场所,实现交通功能的转换,通过各种交通方式的衔接配合和枢纽功能的充分发挥提高出行者的换乘效率。同时,综合交通客运枢纽占用空间面积大、资金投入多,一旦建成很难进行二次改造,因此对综合交通客运枢纽的结构与功能进行经济、高效的规划与设计具有重要社会经济意义,是改善和提高城市客运交通系统运输效率乃至整个城市交通综合运输效率的重要途径。

为改善步行交通环境,提高行人的舒适性,增加公共交通对居民出行的吸引力,综合客运枢纽的规划、设计和建设已引起我国政府和行业主管部门的高度重视。2005年9月,《国务院办公厅转发建设部等部门关于优先发展城市公共交通意见的通知》中提出:“为解决好城市交通问题,促进城市健康发展”,要“综合考虑各种交通方式、换乘枢纽配置,以及对外交通的衔接”;要“加强城市交通换乘枢纽建设”。综合交通客运枢纽的建设被认为直接关系到以公共交通为主导的客运一体化和公交优先发展战略的建立,关系到居民出行的顺畅便捷程度和“以人为本,公交为民”的人性化服务水平的高低。

近年来,我国许多城市的综合客运枢纽在运营过程中出现了较多问题,突出体现在枢纽内部空间的有效利用率相对较低、行人拥挤及换乘不便等问题上。除了急剧增加的交通量的影响外,导致综合客运枢纽运行效能低下的主要因素是目前“基于经验”的枢纽规划和设计准则,以及“基于可研客流预测”的运行作业计划,难以实现综合交通客运枢纽在结构和功能上的优化。因此,优化枢纽的结构(空间布局,如换乘节点的设计、站台分配等)和功能(空间管理,如车辆调度、空间利用等)是提高综合交通客运枢纽运行效能、减少对换乘负面影响的必要途径。

综合交通客运枢纽内的交通流运行是非常复杂的。这部分是由于枢纽内部不同过程(如行人行走、车辆运行)之间的相互作用,以及同类枢纽之间提供的服务不同(进出公交服务、买票、等候、就餐、购物等)导致的。另一个复杂的因素是枢纽内行人构成的异质性,即出行目的、年龄、性别等的差异。尽管有这些复杂性,但因为缺少定量的评价工具,多数客运枢纽的设计决策仍是沿用基于经验准则的传统方法。这些准则虽然来自于与枢纽内的行人行为相关的经验,但往往只考虑静态的情形,或只是针对某一特定情景,对设施规划和运营计划的相互作用没有考虑,而

且也未能提供这些准则的科学依据,导致这些准则经常被误解或误用。类似的争议存在于时间表的计划(各方式的调度计划),这涉及对出行者换乘实际所需时间的估计。不同类型的出行者,如年龄大的人与年轻人等需要不同的换乘时间。采用准确估计的换乘时间不但可以避免过长的等待时间,而且也会减少出行者错过接驳的可能性,故可提高出行者的舒适性和时间表的可靠性。

综合交通客运枢纽的设计过程离不开枢纽运行效果等定量信息的支持,但由于行人走行过程及整个客运枢纽系统的复杂性,即使是有经验的专家和具有熟练技能的设计人员,也难以采用手工计算来评价一个枢纽设计的整体质量。同时,枢纽评价通常需要检验不同情景(如某一设施的多种设计或布局方案)对行人流的走行规律以及枢纽整体运行效果的影响,因为交通枢纽造价高、工程复杂、实施难度大,建成后很难再进行较大规模的改造,所以难以进行物理测试。在这种情况下,利用计算机建立一种可用来测试不同决策方案的数值模拟工具成为替代分析模型的首选。模拟工具的优势就是可以获得评价所需的定量信息,从而可以在各种状态下对不同的设计方案做出客观的对比。

本书旨在研究城市综合交通客运枢纽仿真系统,提供建模理论与方法,基于系统模型对枢纽内行人流进行仿真分析,为综合交通客运枢纽设计和运营方案的优化、完善及特殊事件下行人流组织方案的制定提供理论依据和辅助决策手段。作者和研究团队在上述研究过程中发表论文 20 篇(其中 EI、ISIP 检索 12 篇),申请发明专利 2 项,获得软件著作权 2 项。

本书内容安排如下:第 1 章为绪论,介绍行人流仿真国内外研究现状以及综合交通客运枢纽行人仿真系统的功能需求分析;第 2 章介绍复杂适应系统仿真建模理论和基本方法;第 3 章介绍综合交通客运枢纽的空间结构分解与建模方法;第 4 章基于对综合交通客运枢纽行人交通特性的分析,建立行人交通行为模型;第 5 章设计综合交通客运枢纽功能与结构评价体系;第 6 章介绍 PSSITH 行人仿真系统和实例分析;第 7 章介绍综合交通客运枢纽换乘量预测方法;第 8 章介绍综合交通客运枢纽交通组织优化技术。

在本书撰写过程中参考了很多国内外有关客运枢纽仿真建模的书籍和学术论文,主要参考文献列于章后,作者在此对所参考的已列出和未列出文献的相应作者表示敬意和感谢。感谢吉林大学交通学院孙宝凤教授、唐明博士、罗清玉和宗芳副教授、杨丽丽和王琳虹等研究生,以及计算机学院陈震教授及其科研团队对本书撰写的协助。

限于作者水平,书中难免存在不当或疏漏之处,敬请读者批评指正。

贾洪飞
于吉林大学南岭校区

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 行人流研究现状	1
1.1.1 行人流宏观特征及其模型	1
1.1.2 行人流仿真模型中的微观交通行为模型	5
1.1.3 复杂系统建模方法和有关计算机技术	7
1.1.4 行人流仿真软件的开发情况	9
1.1.5 国内行人流研究现状	11
1.1.6 研究现状总结	12
1.2 仿真系统功能需求分析.....	13
1.2.1 用户需求.....	13
1.2.2 仿真系统的功能需求	16
1.2.3 图形用户界面	17
1.2.4 其他系统需求	18
参考文献	18
第 2 章 复杂适应系统仿真建模理论与方法	21
2.1 系统建模方法及仿真策略概述.....	21
2.1.1 基本概念.....	21
2.1.2 系统的数学模型	23
2.1.3 系统仿真策略	23
2.2 复杂适应性系统理论.....	25
2.2.1 复杂性研究的内容	25
2.2.2 复杂性系统理论研究方法概述	27
2.2.3 复杂适应系统理论的内容.....	30
2.2.4 复杂适应系统的基本特性和机制	31
2.3 复杂适应系统在交通领域中的应用方法.....	32
2.3.1 ABMS 的一般性描述	32
2.3.2 Agent 的定义	32
2.3.3 ABMS 的主要概念与思想.....	33
2.3.4 ABMS 的特点	34

2.3.5 应用 ABMS 方法于交通仿真的标准化步骤	34
2.3.6 综合交通客运枢纽系统的 CAS 特征	35
参考文献	35
第3章 综合交通客运枢纽空间结构功能分解与建模	37
3.1 综合交通客运枢纽功能与结构分析	37
3.1.1 总体功能与结构分析	37
3.1.2 行人设施功能分析	39
3.2 综合交通客运枢纽行人设施与车辆设备模型	40
3.2.1 行人设施的认知图式	40
3.2.2 行人设施的一般化模型	41
3.2.3 行人设施的模型分类与参数设置	41
3.2.4 车辆设备模型	43
3.3 综合交通客运枢纽内的设施拓扑网络	44
3.3.1 设施特征点的定义	44
3.3.2 邻接的定义与性质	44
3.3.3 设施拓扑网络的定义	45
3.3.4 拓扑网络图实例分析	45
3.4 小结	48
参考文献	48
第4章 行人交通特性分析与行为建模	49
4.1 综合交通客运枢纽行人流实验调查	49
4.1.1 实验设计	49
4.1.2 数据采集	50
4.2 行人心理与行为特征	54
4.2.1 视觉和注意	54
4.2.2 心理因素	54
4.2.3 换乘活动及其行为特征	55
4.3 行人流宏观特性分析	70
4.3.1 通道行人流特性分析	71
4.3.2 楼梯行人流特性分析	72
4.3.3 站厅行人流特性分析	73
4.4 短时行人交通流的混沌特性分析	76
4.4.1 实验数据初步分析	76
4.4.2 Lyapunov 指数定义	77
4.4.3 数值求解方法	78

4.4.4 实例分析·····	79
4.5 行人交通行为模型的建立·····	80
4.5.1 行人交通行为的模型框架·····	80
4.5.2 行人交通行为模型·····	86
参考文献·····	103
第5章 综合交通客运枢纽功能与结构评价体系设计·····	105
5.1 综合交通客运枢纽功能与结构评价体系设计思想·····	105
5.2 综合交通客运枢纽功能与结构评价指标·····	106
5.2.1 评价指标设计原则·····	106
5.2.2 评价指标选择流程·····	107
5.2.3 综合交通客运枢纽功能与结构评价指标体系·····	110
5.3 综合交通客运枢纽功能与结构评价标准·····	113
5.3.1 现有评价标准·····	113
5.3.2 评价指标分级·····	115
5.4 综合交通客运枢纽功能与结构评价方法·····	120
5.4.1 枢纽服务水平综合评价方法的选择·····	120
5.4.2 基于 DAGF 算法的综合评价方法·····	122
参考文献·····	124
第6章 PSSITH 系统简介与案例分析·····	126
6.1 系统概述·····	126
6.1.1 系统总体功能需求·····	126
6.1.2 建模子系统的功能模块·····	128
6.1.3 仿真系统的结构功能图·····	128
6.1.4 分析实验系统的结构功能图·····	129
6.1.5 三维仿真系统的结构功能图·····	130
6.2 行人智能体模型与关键算法·····	131
6.2.1 导航的概念及相关研究·····	131
6.2.2 行人智能体结构和导航模型·····	131
6.2.3 行人智能体的认知模型·····	133
6.2.4 行人活动的有限状态机模型·····	134
6.2.5 有限状态机原理·····	135
6.2.6 活动有限状态机模型算法·····	138
6.2.7 路径选择与运动行为算法·····	141
6.2.8 路径搜索算法·····	142
6.2.9 路径选择算法·····	144

6.2.10 弯道位置的多 Agent 竞争导航点问题	146
6.2.11 Agent 对人群的动态避障问题	147
6.2.12 运动模型算法	151
6.3 仿真行人流的特征参数统计	152
6.4 密度分布动态显示	153
6.5 实例分析	154
6.5.1 北京西直门交通枢纽实例分析	154
6.5.2 广州中山八站实例分析	159
参考文献	163
第 7 章 综合交通客运枢纽换乘量预测	164
7.1 综合交通客运枢纽客流换乘特性	164
7.1.1 综合交通客运枢纽客流集散特点	164
7.1.2 综合交通客运枢纽换乘影响因素	164
7.2 综合交通客运枢纽影响范围	169
7.2.1 综合交通客运枢纽聚集效益分析	170
7.2.2 综合交通客运枢纽影响区与合理区	170
7.3 综合交通客运枢纽换乘量预测模型	173
7.3.1 基本模型介绍	173
7.3.2 模型比选	176
7.3.3 综合枢纽换乘量预测模型	176
7.4 实例应用	177
7.4.1 西直门综合交通客运枢纽数据调查	177
7.4.2 西直门综合交通客运枢纽换乘量预测	180
参考文献	183
第 8 章 综合交通客运枢纽交通组织优化技术	184
8.1 综合交通客运枢纽交通组织基本要求	184
8.2 综合交通客运枢纽行人交通组织	185
8.2.1 行人交通对枢纽内部设施可靠性的影响	185
8.2.2 常态行人交通组织	188
8.2.3 突发事件下行人疏散交通组织	189
8.3 综合交通客运枢纽行车组织优化	191
8.3.1 协调调度的目标和原则	191
8.3.2 协调调度模型	193
8.3.3 实例应用	197
参考文献	200

第 1 章 绪 论

1.1 行人流研究现状

关于行人流的研究起始于 20 世纪 50 年代,初期研究者主要从宏观层面观察行人流特征,建立速度、密度与流量的经验回归模型以及队列模型等,并提出服务水平概念、行人设施的设计要素,其目的在于为设计者和管理者提供一套行人设施规划指南。但是,早期宏观模型在解决一些行人设施规划与设计的实际问题时往往效果并不十分理想,为了深入了解行人交通流演化过程中的复杂现象,以便满足准确分析行人设施服务能力和定量评价行人设施的规划与设计方案等目的。20 世纪 90 年代初,研究者开始注重从微观角度研究行人流特征,在对行人个体的交通行为特性分析与建模的基础上,采用如下方法建立行人流模型:①采用统计物理学分析方法建立现代的行人流宏观模型(气体动力学模型与连续介质模型);②采用自下而上的仿真技术建立行人流仿真模型。本节以下内容将从行人流的宏观模型研究和微观行为建模与仿真两个方面来介绍国内外研究现状。

1.1.1 行人流宏观特征及其模型

行人流宏观模型采用集计方法,通过现场观察以及录像等方式,将人群运动现象作为一个整体来研究,包括排队模型、气体运动学(gas-kinetic)模型和连续介质(continuum theory)模型等。现有行人设施规划指南通常使用宏观模型所确立的行人流三参数关系以及“有关规范中要求达到的设施服务水平标准”为行人设施的规划与设计提供定量分析依据。

1. 行人流宏观特征和服务水平

1) 行人速度

行人速度指行人自由走行速度分布的均值,行人自由走行速度通常符合二维正态分布,国外相关研究结果见表 1.1。

表 1.1 有关文献中的行人速度观察结果汇总

来源	平均速度 /(m/s)	标准差 /(m/s)	观测地点
CROW	1.4	—	Netherlands
Daamen	1.41	0.215	Netherlands
Daly 等	1.47	—	United Kingdom
FHWA	1.2	—	United States
Fruin	1.4	0.15	United States
Hankin 和 Wright	1.6	—	United Kingdom
Henderson	1.44	0.23	Australia
Hoel	1.50	0.20	United States
Institute of Transportation Engineers	1.2	—	United States
Knoflachner	1.45	—	Austria
Koushki	1.08	—	Saudi-Arabia
Lam 等	1.19	0.26	Hong Kong
Morrall 等	1.4	—	Sri Lanka Canada
Navin 和 Wheeler	1.32	—	United States
O'Flaherty 和 Parkinson	1.32	1.0	United Kingdom
Older	1.30	0.3	United Kingdom
Pauls	1.25	—	United States
Roddin	1.6	—	United States
Sarkar 和 Janardhan	1.46	0.63	India
Sleight	1.37	—	United States
Tanariboon 等	1.23	—	Singapore
Tanariboon 和 Guyano	1.22	—	Thailand
Tregenza	1.31	0.30	United Kingdom
Virkler 和 Elayadath	1.22	—	United States
Young	1.38	0.27	United States

注：本表来源于文献[1]。

有较多因素影响行人速度,如行人属性(年龄、性别、出行目的、地域和文化差异)、设施类型和气温等。Bowman 等指出年龄高于 60 岁行人的速度显著低于年龄处于 18 岁到 60 岁之间成年行人的速度^[2];Wilson 等发现老年人平均速度不仅偏低于成年人,而且老年人速度方差高于成年人^[3]。Weidmann 发现男性行人平均速度为 1.41m/s,女性行人平均速度为 1.27m/s;当气温为 25℃时,行人速度仅

达到平均速度的 92%，而当温度降低到 0℃ 时，行人速度增加到平均速度的 109%。从表 1.1 中可以看到，地域差别对行人速度也有影响，其中 Daamen 指出商业出行目的的行人速度较高 (1.45~1.61m/s)，通勤者速度较低 (1.34~1.39m/s)，购物和休闲速度最低 (0.99~1.10m/s)^[4]。不同类型设施 (水平通道、扶梯和楼梯等) 上的行人速度有所不同，Pauls 发现行人上楼梯速度介于 0.61m/s 和 0.90m/s 之间，而下楼梯速度为 0.70m/s，因此楼梯行人速度无论上行还是下行方向，都低于水平通道或站厅的行人速度 (1.34~1.4m/s)^[5]。

2) 三参数回归关系

行人流的三参数 (速度、密度和流量) 之间的关系反映行人流宏观特征，表 1.2 汇总的回归关系为国外研究者对其采集数据的样本点进行拟合的结果。

表 1.2 基于观察数据的行人流参数回归关系

数据来源	观察地点	回归关系
Older	商业街道	$v = 1.31 - 0.34\rho$ $q = 1.32\rho - 0.34\rho^2$ $q = 3.85v - 2.94v^2$
Fruin	美国通勤公共汽车站	$v = 1.43 - 0.35\rho$ $q = 1.43\rho - 0.35\rho^2$ $q = 4.08v - 2.86v^2$
Polus 等	以色列海法商业区人行道	$v = 1.31 - 0.27\rho$ $q = 1.31\rho - 0.27\rho^2$ $q = 4.94v - 3.76v^2$
Weidmann	不详	$v = v_m \left[1 - \exp \left(-1.913 \left(\frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho_{jam}} \right) \right) \right]$ $v_m = 1.34, \rho_{jam} = 5.4$
Sakar 和 Janardhan	加尔各答城市换乘区	$v = 1.46 - 0.35\rho$ $q = 1.46\rho - 0.35\rho^2$ $q = 4.17v - 2.86v^2$
Seyfried 等	受控单向队列的行人流试验	$v = -0.34 + 0.94\rho$

注：本表来源于文献^[4]， v (m/s)、 ρ (人/m²)、 q (人/(m·s))。

3) 服务水平

服务水平 (level of service, LOS) 的概念首先由 Fruin 提出，将行人流的速度、密度或者流量作为指标来反映行人设施所提供服务的人均占有面积、舒适与安全程度，并将服务水平设为六个等级，每个等级对应了确定的速度、密度 (可与人均占有面积相互转化) 或是流量的变化范围，并且人行道、楼梯和队列区域的服务水平等级标准不同。Fruin 根据美国街道上 (street environment) 行人平面投影的厚度

和肩宽值($57.9\text{cm} \times 33\text{cm}$,如图 1.1 所示),设定了不同类型设施服务水平等级的人均占有面积标准,具体见表 1.3。美国的 HCM(Highway Capacity Manual 2000)以及其他一些国家的相关行人设施规划与设计手册(如英国的 Green Guide),针对不同交通环境和本国人体特征对 Fruin 服务水平等级划分标准进行了相应的本土化修改^[6, 7]。

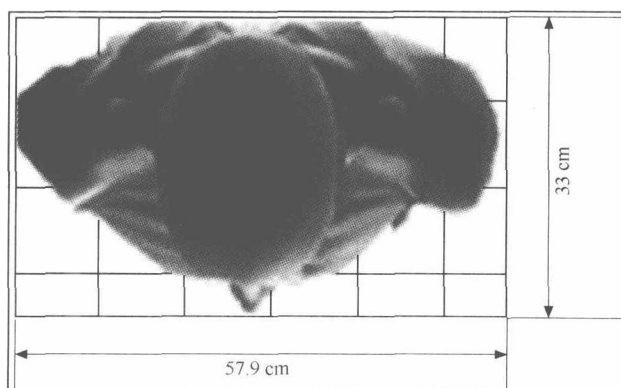


图 1.1 Fruin 使用的人体尺寸示意图

注:图片来自于文献[7]。

表 1.3 Fruin 服务水平的六个等级标准

LOS	A	B	C	D	E	F
人行道	>3.25	$3.25 \sim 2.32$	$2.32 \sim 1.39$	$1.39 \sim 0.93$	$0.93 \sim 0.46$	<0.46
楼梯	>1.85	$1.85 \sim 1.39$	$1.39 \sim 0.93$	$0.93 \sim 0.65$	$0.65 \sim 0.37$	<0.37
队列区	>1.21	$1.21 \sim 0.93$	$0.93 \sim 0.65$	$0.65 \sim 0.28$	$0.28 \sim 0.19$	<0.19

注:数据单位为 $\text{m}^2/\text{人}$ 。

行人服务水平为评价行人活动空间的通行能力和舒适性提供了一个有效方法,同时也为估算行人设施的尺寸或数量提供理论依据。例如,《美国公共交通通行能力和服务质量手册》(TCQSM)对公交枢纽站内的步行通道的估算方法为:

(1) 基于期望的 C 级服务水平,从步行通道服务水平等级表中选择 C 级所对应的最大行人流率 q ($q = 49 \text{ 人}/(\text{m} \cdot \text{s})$,参见 TCQSM 表 7-3);

(2) 估算高峰 15min 内步行通道的行人需求 Q (流量);

(3) 考虑到轮椅使用者和大件行李携带者所占据的额外空间,将 Q 乘以适当的调整系数;

(4) 将 Q 除以 15,得到设计行人流量(人/min),再将设计行人流量除以 C 级对应的最大行人流率 q ,即得到所需要的有效通道宽度;

(5) 考虑到通道两侧的缓冲区,最后将有效宽度值再增加 1m,得到通道宽度

总体估算值^[8]。

2. 排队模型

在队列区范围内行人需要遵守排队规则,该过程的实现需要建模人员首先定义仿真环境中的队列区域。Lovas 对建筑物环境进行建模,将房间中心以及门视为节点,其中房间中心为决策点(decision point),基于这些节点构建了队列网络(queueing network),并相应建立了使用队列网络的行人模型^[9]。

3. 气体运动学模型和连续介质模型

行人流气体运动学模型首先由 Henderson^[10]提出,Helbing 在此基础上进一步考虑了行人流的动量与能量非守恒性,根据速度矢量方向的不同将行人分为不同类型,建立了具有各向异性的、类似于 Boltzmann 方程的气体运动学模型(Boltzmann-like gas kinetic model)^[11]:

$$\frac{d\hat{\rho}_\mu}{dt} = \frac{\hat{\rho}_\mu^0 - \hat{\rho}_\mu}{\tau_\mu} + \sum_v \hat{S}_{\mu v} + \sum_v \hat{C}_{\mu v} + \hat{q}_\mu \quad (1.1)$$

该模型能够较好地描述平衡态下的行人流,但对于描述高密度下的行人流,还需要更进一步的行为建模与复杂解析过程。

Hughes 假设:①行人速度仅与其邻域密度有关;②有共同目的地的行人,如果他们与目的地有相同的距离(即所处位置的距离场势位相等),那么不会有相互交换位置的意图;③行人期望全局行程时间最短,但是在局部环境下他们会避免进入高密度区域。在此三个假设以及数量守恒的基础上建立了行人流连续介质模型,并根据 Greenshields 提出的速度-密度线性关系式,给出了特定行人流密度分布下(环形通道)的模型解析结果^[12]。

1.1.2 行人流仿真模型中的微观交通行为模型

从行人流的气态动力学模型研究开始,行人的意图、期望速度以及行人之间的相互作用等因素开始被研究者在建模过程中所考虑,但因为面向应用的特定行人流气态动力学模型求解较为困难,研究者现今倾向于建立行人交通行为模型,并借助于计算机仿真技术来模拟行人流的演化过程。从空间尺度上划分,枢纽内的行人交通行为可划分为局部的移动模型、全局的路径选择行为以及活动链模型。

1. 局部的移动模型

Okazaki 发展了连续空间上的磁场力运动行为模型^[13];Helbing 等假定行人之间存在社会力,提出了社会力模型用以描述连续空间上的运动行为^[14];Blue 等将元胞自动机模型应用于行人流仿真研究,使用简单规则和邻域信息来描述行人

的运动行为^[15];Schadschneider 为了通过简单规则生成行人的类似于“趋化性”行为,基于元胞自动机模型引入底层场(floor field)概念用以模拟相互距离较远的行人粒子之间的影响力^[16];Antonini 等根据行人速度和方向将行人前方空间离散为扇形网格,并基于离散选择模型确定行人下一时刻可能出现在某个网格上的概率^[17]。总之,目前的行人流微观模型通常将行人抽象为粒子,由这些行人粒子在虚拟环境中表现出行人交通行为。行人粒子通常有两种描述方式:一种是将行人在二维空间上抽象为圆形或其他图形(椭圆等),通过实体在连续空间上的移动来表现行人的行为;另外一种则是通过将二维空间离散为均匀的元胞(方格或其他形状),根据元胞的面积大小来确定这些元胞可以容纳行人粒子的最大数量,并且根据行人交通行为来定义行人粒子在元胞之间的移动规则。

2. 路径寻找和路径选择模型

运动模型基于行人邻域信息来控制行人的运动行为,这使得行人可以避免邻域内的障碍物以及其他行人,但是这些移动模型在含有较多障碍物的全局环境下,通常不能有效帮助行人到达其目的地,因此需要路径搜索以及选择模型来为行人提供能够贯穿起讫点的路径。

路径搜索模型为路径选择模型提供备选路径集合、备选路径集合的生成方法。Hirtle 等指出行人进行空间定位和路径搜索时,只需具备空间环境的网络拓扑知识^[18];Hunt 等研究指出行人的年龄、性别对于其空间定位有影响^[19];Raubal 使用描述性语言建立了在设施内的行人路径寻找模型^[20]。

在路径选择模型方面的研究有:Hoogendoorn 等将行人个体的行为分为策略层(出行时间和方式的选择)、战术层(活动计划表、活动地点和路径的选择)和操作层(走行行为),指出高层次行为决定低层次行为的选择集合,低层次行为的期望效用影响高层次行为,并基于行人个体期望的行为效用最大化假设,提出了连续空间上的行人路径与活动计划选择模型^[21];Dammen 等将路径竖直方向的高差因素引入到路径选择模型中^[22]。其他关于行人路径的研究还有许多,多是基于离散选择模型描述行人在设施拓扑网络中的路径选择行为,这里不再详述。

3. 活动链模型

活动链是行人为了实现某个目的所经历的一系列子活动,以及这些子活动发生的场所和时间。Kitamura 等基于 Logit 模型研究出行者的活动计划^[23],Stretz、Arentze 和 Timmermans 等基于统计数据采用若干规则生成居民出行活动链^[24,25];Dammen、Thalman 等构建了活动“池”,根据实际环境中的活动链序列从活动池中为其行人智能体选择具体的活动^[4,26]。

1.1.3 复杂系统建模方法和有关计算机技术

与行人流有关的计算机技术涵盖大量内容,本节着重介绍虚拟环境和行人智能体建模有关的内容,主要包括多智能体复杂系统、行人智能体建模策略、虚拟环境模型和行人智能体的导航模型。

1. 基于多智能体的复杂系统建模方法

Wooldridge 等将人工智能(artificial intelligence, AI)定义为通过构建智能体(Agent)并展现其智能行为的计算机科学分支^[27];王红卫指出 Agent 是基于对象(object)发展而来的,它有很多特点与“对象”相同,如数据与方法的封装、继承和多态等^[28]。Carlos 认为 Agent 相对于 Object 也有其特殊的性质,主要体现在三个方面:Agent 可以对信息进行建模,对某些信息直接反应为行动,对于某些信息则根据协议进行交互行为,而 Object 只能被信息调用其算法;Agent 具有智力状态,即偏好和计划等;Agent 具有社会维度,关于 Agent 之间的社会关系在建模过程中必须明确^[29]。

Agent 的优点之一就是可以通过协议、通信、交互行为等方式有机构成复杂社会组织或系统,如果将该系统再赋予在特定的虚拟情景或真实环境中,则构成了多智能体系统(multi-agent systems, MAS)。Moulin 等提出了基于情景的多智能体系统建模方法(multi-agent scenario-based method, MASB method)。该方法包括以下四个方面的研究:①确定 Agent 和情景对象使用的语言;②确定 Agent 角色,包括进程、相关信息、Agents 之间的交互行为;③Agent 知识及数据建模、实体关系建模、实体存活周期建模;④仿真并确定不同情景下的人机交互界面^[30]。Charles 等在总结已有的基于 Agent 建模方法的基础上,系统地提出了面向复杂系统建模与仿真的 ABMS(Agent-based modeling and simulation)方法,给出了 ABMS 方法的标准六步骤^[31]:①确定 Agents 及其行为理论;②确定 Agents 之间的关系及其交互行为理论;③选择一个 ABMS 平台和 Agent 建模策略;④收集有关数据;⑤行为模型验证;⑥仿真结果分析。其中的 ABMS 平台,有著名复杂系统研究机构圣塔菲研究所开发的可扩展编程的 SWARM 平台,以及后来由其他研究机构发展的 NetLogo、JADE、JACK 等平台。

2. 行人智能体建模策略

在 Agent 模型结构方面,根据主体认知类型的不同,可以分为反应式、推理式、推理与反应混合式三种结构,其中后两种结构一般归于 BDI(belief-desire-intention)结构。由于行人微观行为的多级别决策特征,BDI-Agent 结构更适合于行人建模。BDI 行人 Agent 模型具备四个基本子模块:感知器、知识库、推理机、行

动器。Reynald 指出行人知识库 (Belief) 存放环境知识, 而推理机 (Desire, Intention) 产生行动序列, 并基于 JACK 平台实现了 BDI 行人 Agent 模型^[32], 斯坦福大学的 XiaoShan 使用 BDI 行人 Agent 模拟了简单场景下的行人紧急疏散行为^[33]。

3. 虚拟环境模型

用于人群疏散安全分析的虚拟环境模型, 只需描述建筑物内的可走行面域和障碍物即可, 通常描述空间的方式有连续形式和网格形式, 相应的可走行面域和障碍物也用这两种方式描述其占据的二维空间。大量微观行人仿真研究中的虚拟环境模型采用了网格形式描述 (元胞自动机), 也有不少采用连续形式描述虚拟环境的研究和软件, 如 Still 等开发的 Legion 行人仿真软件^[34]、Daamen 等开发的 NOMAD 软件^[4]。

为了使虚拟环境能够为行人智能体提供必要的设施功能信息, 虚拟环境中的行人设施模型除了应具备几何形状和空间位置属性变量之外, 还需要具有功能属性, 以便使得行人智能体获取相关信息, 并在特定设施区域模拟与设施相应的交通活动。Legion 行人仿真软件将行人设施进行了详细分类, 用以体现各类设施的功能差别; NOMAD 仿真软件和 VISSIM 的行人仿真模块中也有对行人设施进行了的分类 (如面域、楼梯、等候区和站台等), 但上述软件的研究机构均未给出其设施分类的依据和原理。

另外, 为了反映设施布局的空间结构以及行人在复杂场景下的活动衔接顺序, 多数仿真软件采用了链接 (Link 或 Arc) 对象, 但是对于链接缺乏严格的数学定义, 以至于用户在使用链接建立环境模型或者行人的活动链模型时, 过于灵活从而难以操作, 并使得仿真系统不能自动对链接进行有效性检测和纠错, 导致仿真过程可能出现死锁现象。

4. 行人智能体导航模型算法

行人智能体导航模型集成和实现行人行为模型中的路径寻找、路径选择、运动模型以及服务活动模型, 使得行人智能体在虚拟环境中能够模拟行人实际在起讫点 (OD) 之间的走行、接受服务以及和其他行人发生交互作用的过程。

当描述场景内行人活动种类较少时, 活动进程的控制问题一般被忽视, 但是当行人活动链包含多个不同种类的活动时, 如何动态控制行人智能体的活动进程则成为能否有效模拟行人实际行为的一个关键技术。Sunge、Issac 等使用有限状态机 (Finite State Machines) 来控制游戏场景中的行人活动进程^[35, 36], 而针对综合交通客运枢纽人流仿真过程中, 实现整个换乘过程中行人活动链动态控制以及单个活动进程的研究较少。

路径寻找行为在行人仿真系统中较少被模拟, 在一些通过行人认知仿真评价