

中图分类号: 0268

单位代号: 11903

密 级:

学 号: 02720810

上海大学



硕士学位论文

SHANGHAI UNIVERSITY
MASTER'S THESIS

题 目	城市行人交通流的 实测、建模和模拟初探
--------	------------------------

作 者 陈 然

学科专业 流体力学

导 师 戴世强 教授

董力耘 副教授

完成日期 2005 年 3 月

摘要

近年来,行人交通研究开始受到关注。本文回顾了行人交通研究的进展,基于现场实测,获得了中国大城市行人流的基本特征,并采用流体力学模型和元胞自动机模型,进行了数学建模和数值模拟,分析了行人交通流的复杂动力学行为。本论文的主要工作如下:

1) 采用人工测量和摄像技术相结合的手段进行了行人流交通观测,对大量实测数据进行了处理和分析,确定了我国大城市行人流的主要特征和重要参数。文中得到了如下结论:我国城市行人的步速和步频大致呈 Gauss 分布;性别和年龄差异会造成男女行人步行特征的不同。这些结论与国外学者(如 Henderson)的结论一致;我们还指出了步频是重要的特征参数之一。

2) 将地铁换乘通道的行人流作为研究对象,从车辆的流体动力学模型出发,在考虑行人流特性的情况下,采用了适于描述一维行人交通的流体动力学模型,在对模型做了线性稳定性分析的基础上,根据实测数据进行数值模拟,得到了地铁通道内行人流密度波的传播速度。

3) 建立了一个元胞自动机模型来研究通道行人运动,在周期性和开放边界条件下,模拟了地铁通道内的行人单向运动。先后采用了随机串行规则和并行更新规则,数值模拟结果表明:采用不同的更新规则可能产生不同的结果,作者认为并行更新则要适于描述通道行人运动。

最后,对我国未来的行人交通流研究进行了展望。

关键词: 行人交通; 行人流; 行人特征; 数值模拟; 流体力学; 元胞自动机

ABSTRACT

In recent years, pedestrian traffic research has drawn increasingly more attention of scientists in various fields. In this thesis, the advances in study of pedestrian flows are briefly reviewed. On the basis of in situ measurements, some basic characteristics are gained, and pedestrian flows are modeled and simulated numerically via the hydrodynamic model and cellular automaton model. Complex dynamical behaviors of pedestrian traffic are then analyzed. The main part of work conducted by the author is outlined as follows.

1) Through manual counting and video photographing, a large amount of data in pedestrian traffic in the city area were collected and processed. And then the pedestrian characteristics were described and some important parameters were determined. From the observed data, it is concluded that, the walking speed and step frequency in crowds possess Gaussian distribution, and there exist slight differences of speed and frequency among male and female, elder and younger walkers. The presented results are similar to those given by foreign scholars, e.g., Henderson. It is also pointed out that step frequency is an important characteristic parameter in pedestrian flows.

2) To study the pedestrian flow in subway passageways, a hydrodynamic model for vehicular flow was borrowed and modified to make it suitable for depicting one-dimensional pedestrian flows. Based on linear stability analysis for the model and measured data, numerical simulation was conducted and the propagating speed of density wave in pedestrian flow in subway passageway was obtained.

3) A cellular automaton model was established to investigate pedestrian movement in a subway passageway. Under periodic and open boundary conditions, uni-directional passage pedestrian flows were simulated. In the simulation, random sequential and parallel update rules were adopted respectively. Through comparison, the simulation results indicate that there exist some differences as different update rules are employed. The author claims that the parallel update rule is probably better in simulating the passageway pedestrian flow.

Finally, the perspective for pedestrian traffic research in the future is given.

Key words: Pedestrian traffic; pedestrian flow; pedestrian characteristics;
numerical simulation; hydrodynamics; cellular automaton

原创性声明

本人声明：所呈交的论文是本人在导师指导下进行的研究工作。除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已发表或撰写过的研究成果。参与同一工作的其他同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

签 名： 陈玉 日 期 2005.5.28

本论文使用授权说明

本人完全了解上海大学有关保留、使用学位论文的规定，即：学校有权保留论文及送交论文复印件，允许论文被查阅和借阅；学校可以公布论文的全部或部分内容。

（保密的论文在解密后应遵守此规定）

签 名： 陈玉 导师签名： 彭世 日期： 2005.5.28

第一章 绪论

§1.1 本文研究的目的和意义

行人交通是城市交通研究的重要对象,观测表明:大中城市的行人交通呈现复杂多变的性态。近年来,行人交通越来越受到广泛的关注。

从日常交通的层面看来,在发展中国家人口密集的大中城市中,行人流对机动车交通流的干扰和影响十分严重,大大加剧了城市交通困难,因此,深入研究行人交通流的基本特征和演化行为,有着不言而喻的实际意义。从防止和处理城市突发性灾难的层面看来,行人流研究也有明显的意义。从交通科学的层面看来,行人流更具有随机性、动态性和复杂性,它与机动车流的相互干扰问题所涉及的因素更加繁多,所以行人流研究在理论上极富挑战性,也很有学术价值。正因为如此,该项研究已成了一个热点问题。例如,2001年10月在名古屋召开的第三届国际交通流及颗粒流会议上,对未来交通流研究进行展望时,就把行人交通(Pedestrian Traffic)和疏散现象(Evacuation Phenomena)列为单独的专题。

(1) 行人交通研究是城市交通科学研究的重要组成部分

迄今为止,国内外对行人交通流的研究深度远远不及机动车交通流,我国的相关状况更显得落后,需要我们大力投入。我国是世界上人口最多的国家,因此研究行人交通尤为重要。有资料表明^[1]:我国大城市中步行交通在总出行量中约占40%,中等城市约占50%以上,小城市则多达60%以上;上海每天的出行人数为699万,占出行交通量的36.6%;最近的调查统计显示,上海市市区交通高峰期机动车平均速度仅为20km/hr,其中行人、自行车等非机动车交通的干扰因素非常明显。人们每天在上下班高峰期都可以观察到:在非机动车道上行人和自行车流的相互混合;在交叉口更是频繁出现行人流与自行车流、机动车流的交叉、混合和干扰。如何有效地控制这种混合、正确地诱导行人流,对缓解交通拥堵很有实际意义。还有,在地铁、轻轨场所(比如上海地铁系统)中,早晚高峰趋于饱和的车站和通道中行人流十分拥挤,存在着不少安全隐患,这也是值得关注的课题之一。作者所在的课题组开展了一系列行人交通的研究工作,如对上海市特

定区域进行了行人特征调查,针对地铁通道行人拥挤的状况进行了实测和相关的数值模拟工作(详见第三、四章),从中看到了此类工作的重要性。

(2) 行人灾难事故频频发生

根据 Helbing 在 2003 年的统计^[77]:在过去的 100 年中,有超过 4000 起行人灾难。各类公共场所和容易聚集人群的状况,如电影院、大型百货商店或大型超市,集会、体育比赛等等都是行人事故易发的场所。

在人口众多的印度行人事故频频发生。2005 年 1 月 25 日中午, 25 万人聚集在印度西南部马哈拉施特拉邦的一座神庙里祈祷,但因过分拥挤不幸发生踩踏悲剧,造成 300 多人死亡、1000 多人受伤,这是印度近年来发生的又一重大踩踏伤亡事件。作者在“百度”(www.baidu.com)上查找得知,在印度此类踩踏事故不乏先例:2004 年 11 月,印度首都新德里一个主要火车站 13 日发生数百人拥挤踩踏事故,据称一名老年妇女下火车时突然摔倒是导致惨剧发生的直接原因。2004 年 8 月,印度南部安得拉邦克利希那地区重要传统宗教节日第一天发生踩踏事故,造成至少 39 人死亡。2004 年 4 月,在印度北方邦首府勒克瑙举行的一次竞选集会中也曾发生过一起严重的踩踏事件,造成 21 人死亡,数十人受伤。1989 年在纳什克发生的踩踏悲剧中有 350 人丧生;1986 年和 1984 年,印度北部城市哈里德瓦尔先后发生的两起踩踏事故分别导致 50 人和 200 人遇难。而印度历史上最严重的朝圣踩踏事件则发生在 1954 年,当时在距离瓦拉纳西以西 135 公里处的安拉阿巴德举行的宗教仪式上,有超过 800 名朝圣者在混乱和踩踏中丧生。

1994 年 12 月 8 日,我国新疆克拉玛依市友谊宫特大火灾导致数以百计人员的伤亡,死者大多簇拥在出口通道和紧闭的大门附近;2003 年 2 月 18 日韩国大邱市地铁发生的火灾造成近 200 人死亡,数百人受伤,大多由于人员未能及时疏导,遭烟熏火燎而窒息。还有震惊全中国的北京密云灯展特大意外事故:2004 年 2 月 5 日晚,密云灯展发生由于人潮过于拥挤无序而踩死人的惨剧,一共造成 37 人死亡。据多位事故目击者说,当时没有人从桥上掉下去,死者全部是在桥上被挤倒致死的。

这里还有两个例子:1918 年 2 月 28 日,香港赛马场的看台突然坍塌且失火,数万名观看赛马的人们争先恐后奔跑逃命,相互踩踏,共造成 604 人死亡的“大

灾事”；又如 1990 年的麦加隧道惨案，正当近五万朝觐者通过一个过山隧道时，突然空调失灵，洞里气温骤然升高，人们被热得无法喘气，竞相快跑，但前方一下子有几个人被挤倒，顿时隧道内大乱，最先被挤倒的老弱病残者倒下后立即被后来者踩死。据不完全统计，在此惨案中死者有 1426 人。

大量事故统计资料表明，酿成公共场所重大事故的主要原因是人员盲目拥挤所致。这些惨痛教训说明研究人们在遇到危险时的疏散、逃生行为极为重要。在人群高度集中的场所，要有应急防范的安全意识，努力克服疏散时的从众心理。大量悲剧证明，在人群众多的灾害现场，凡是盲目从众逃跑者，等待他们的往往是悲惨的结局。作为政府及公共场所管理者应采取多种方式及手段来制定各项应急预案，以尽可能地减少突发事件带来的损失。

我们除了要有危机与防范意识，还需要科学合理地分析、预测、调度人群聚集场所公众的群体行为，以及可能发生的最大危险状态，其中，理解和掌握行人流所遵循的基本规律是关键，这对于进一步探索行人流的复杂现象（如拥挤、堵塞）也至关重要。

§1.2 行人交通流研究概述

交通流的研究应遵循如下的应用数学过程^[16]：

实验观测 \Rightarrow 数学建模 \Rightarrow 求解 \Rightarrow 结果比照和验证

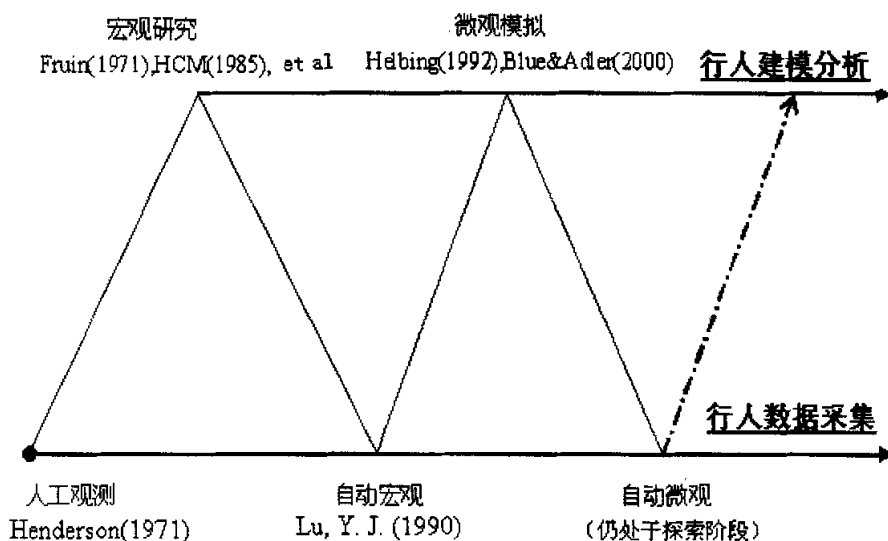


图 1.1 行人研究进展图

根据研究视角, 行人流研究可分为: 数据采集和建模分析^[2]。图 1.1 中, 横向分别为行人建模分析和行人数据采集的发展历程。图中的“行人建模分析”在本章 1.4 节有详细的叙述, 在 1.3 节中介绍“行人数据采集”的情况。其中“行人数据采集”的“自动宏观”部分的代表工作是 Lu, Y. J. (1990)^[69], 他利用摄像机采集了行人流的宏观特征, 而“自动微观”——自动采集行人流的微观特征的研究仍处于探索阶段。

行人交通流的研究可以追溯到 1937 年, 前苏联的建筑研究院(VAKH)的 Predtechenskii 和 Milinski^[32]对行人交通流做了探索, 这是公认的行人流研究的最早尝试^[76], 他们通过观测和调查发现行人的速度 u 与密度 k 成反比。1946 年至 1948 年, 前苏联的火灾防护中央科学研究所(VNIIPN)对行人交通流的特征参数进行了研究^[76]。

根据 Henderson^[20]和 Helbing^[23]的综述, 对行人交通流理论的系统研究始于上世纪的 50 年代末, 1954 年 Mayne^[13]研究了行人干扰其它交通的情况; 1958 年 Hankin 和 Wright^[11]研究了伦敦地铁通道内行人交通流的速度、密度和流量的关系; 1963 年 Oeding^[68]研究了混合行人流的特征参数的相互关系; 1968 年 Heol^[12]得到了行人步行速度的频率分布; 1969 年 Older^[15]收集了城市街道行人(如购物者)行走特性的详细数据; Navin 和 Wheeler^[14]研究了行人流的“对冲效应”, 并得出由性别不同引起的平均步行速度的差异; 1970 年 Carstens 和 Ring, O'Flaherty 和 Parkinson 都在各自的论文中对行人交通流进行了研究(参看文献[23]), 他们采用的多是基于经验为主的研究方法。Henderson 对不同年龄和性别的行人进行了交通调查, 并在 70 年代初首次采用流体力学模型来研究行人交通^[20], 把行人运动与气体或流体质点运动进行类比, 用气体动力论和流体动力学模型来模拟行人交通。1992 年, Helbing^[45]对 Henderson 的模型进行了修正, 建立新的宏观模型。但从总体来说, 行人交通的宏观模型, 特别是在行人交通流体力学模型方面, 前人在这一方面的工作并不是很多^[23,46]。

在最近的 30 多年里, 更多的科学家对行人交通流进行了研究^[20,23], 建立了各种条件下的一些行人交通流的模型(比如, Fruin^[3,4], 1971; AlGhadi 和 Mahmassani^[9], 1991; Lovas^[25], 1994 等)。特别是从上世纪 90 年代起, 越来越多的人发现行人交通研究的迫切性和重要性, Wigan(1993)进一步指出, 人们对行

人交通的研究是很不充分的,而且远远落后于其它交通形态的研究。Okazaki 等^[36]建立了磁力模型,随后 Helbing 和 Molnar^[26] (1995)提出了支配行人运动的社会力模型,由此可以描述行人的自组织行为,如在地铁通道内相向运动的行人自动成行现象。Hoogendoorn 和 Daamen (2002,2003)^[8,60-64]等人近来对行人交通进行了较为深入的研究,在行人交通实测的基础上建立了几个行人交通流模型,如微观的 NOMAD 模型、宏观的 Simped 模型等,他们还特别指出:研究行人交通流时最重要的是得到各种环境下行人流的基本详细数据,也就是说,需要开展广泛的行人交通实测和调查。

近十几年来,行人交通元胞自动机(CA)模型的研究取得不少的进展。1992年,Biham, Middleton 和 Levine^[28]提出描述城市网络交通的二维元胞自动机模型(即 BML 模型,其中的 BML-II 模型可用于描述二维行人流);1999年 Fukui 等^[29,30]采用元胞自动机模型研究了在过道内行走方向相反的行人相遇发生的自组织相变现象。Muramatsu, Irie 和 Nagatani^[56]提出了一个二维偏斜随机行走格子气模型来描述开放边界下地铁隧道内交汇的运动,国内的学者对这一课题也有最新的研究,董力耘、戴世强^[43]就采用二维元胞自动机模型研究周期边界条件下正方形网格上的行人交通现象,与 Muramatsu-Nagatani 的行人模型采用随机串行更新规则不同,他们提出了两个采用并行更新规则的模型,取得了较好的模拟结果。Burstedde 等^[31]建立的元胞自动机模型引入了背景场 (floor field) 的概念,目的是为了模拟二维行人交通的集体效应和自组织现象,Kirchner 和 Schadschneider^[50]在此基础上建立了 CA 仿真模型用于模拟疏散过程。Blue 和 Alder^[5-7]建立的元胞自动机模型分别用于模拟单向、双向、多向流动的行人,其中 4-PED 模型可用以模拟广场和十字路口行人交汇的复杂情况。

§1.3 行人交通流现象研究——行人数据采集

作为研究行人交通的第一步,首先需要进行大量的交通调查,对所研究的城市行人交通现象和特征有充分的了解。弄清我国城市行人交通流的机理问题,深入探讨行人交通的运行规律,建立新的行人交通流理论已迫在眉睫。首先迫切需要的是在了解行人特征的基础上,采集各种大量合理有效的行人交通的数据,为建立行人模型的验证和推演提供有力支撑。基于这种认识,我们对上海市的部分

行人街、广场、过街通道、地铁通道等进行了一系列的实际观测，通过细致有序的调查，掌握了大都市行人的一些基本特征（详见第二章），为进一步科学合理的数学建模积累了较为丰富的资料。

车辆交通流理论主要关注如下的交通流参数：车流的流量、速度、密集度、车头时距、车头间距等，其中密集度包含密度（指空间密集度）和占有率（occupancy，即时间密集度）这两个有内在联系的不同概念。

行人交通流理论则主要关注如下的行人流参数：行人流的流量、密集度、步速、步频等。采用合理的测量方法来获取这些参数，对于行人交通流特性研究具有重要意义。

近 20 年来，随着现代高性能计算机和图像处理技术日新月异的进步，一定程度上推动了行人交通研究的发展。以往采集行人数据一般都依靠人工统计的方法，用表格和电子计数器等来记录各项行人数据；发展到现今，观测行人一般通过人工直接观察或摄影、摄像等方式。从上世纪 90 年代中期开始，通过拍摄录影、图像识别等设备来“自动”取得来机动车、行人交通数据的方法逐渐盛行（这里对这一内容不作详述，可参见 Kardi Teknomo^[2]）。

我们认为，研究行人交通，首先应该广泛深入地进行行人交通调查，取得可用于行人交通研究的第一手资料，使通过实际观测得到的数据更加系统化；其次，在分析行人交通数据的基础上，根据实测结果识别交通模型的有关参数，建立适用于我国大中城市的行人交通流模型，进行准确的数值模拟，并研究行人流的自组织现象、交通高峰期地铁和广场的行人流动特征以及高楼、厅室、地铁等处人员遇险时的疏散逃生现象等等；最后用以指导城市的交通规划、设计、建设和管理。

§1.4 行人交通流模型研究

行人交通流比车辆交通流更为复杂，建立合适的行人交通流模型一直是研究中的焦点问题。现有的行人交通流模型有一部分是由车辆交通流模型改进而来，在建立行人流模型的时候要充分考虑到行人交通流的特殊性，既考虑和车辆流的“共性”，又考虑其明显的“个性”，这是行人流建模的捷径之一。

“共性”，又考虑其明显的“个性”，这是行人流建模的捷径之一。

§ 1.4.1 行人交通流模型分类

交通流理论研究在一定环境下交通流随时间和空间变化而变化的规律。真实交通流由于随机因素的影响,其变化规律非常复杂。但是,描述交通流真实状态的模型应该具备如下特点:①控制方程为微分方程、差分方程或代数方程;②交通流演化与时间和空间两个变量有关;③呈现非线性;④可刻画随机性;⑤可反映动态性;⑥可描写交通系统的复杂性。由于条件的苛刻和解的复杂性,普适的交通流模型实际上是不存在的。因此在研究实践中,人们不得不根据需要把真实交通流模型抽象成简化的实用模型。至于抽象和简化的程度,主要取决于应用的目标。

类似于车辆交通流,目前根据描述方法的不同^[44,45],行人交通流模型大体上可以划分为两大类:宏观模型和微观模型。

§ 1.4.2 宏观模型

车辆交通流的宏观模型研究由大量车辆组成的车流集体的综合平均行为,用平均速度 $u(x,t)$ 、平均密度 $\rho(x,t)$ 及速度方差 $\theta(x,t)$ 等宏观量满足的方程来描述交通流,其单个车辆的个体特性并不显式出现。车辆交通流的宏观模型主要有流体力学模型(包括运动学模型和动力学模型)和以气体动力论为基础的动力论模型。

当从比较远的距离(如飞机上)俯瞰时,道路上的车辆运动看起来与流体的流动非常相似。基于这种认识,人们发展了交通流的宏观理论,提出了流体力学模型,又称交通流连续介质模型,它将交通流视为由大量车辆组成的可压缩连续流体介质,通过对单向运动的交通流在某时刻 t 和某一位置 x 的有关变量来把握交通的特性和本质,反映一些宏观量的变化过程。

(1) Henderson 的宏观模型

最早的行人流的宏观模型是由 Henderson^[18-21]建立的,他把行人交通流类比为流体的流动。他假设一个行人系统中排除行人重叠的情况,即系统中每一个粒子都表征为一个行人,每个行人具有其特征速度和运动方向,速度 $V = \bar{V} + v'$,其中, \bar{V} 是平均速度, v' 是随机脉动速度。当系统达到某种平衡状态时,系统中的

粒子数为常量 \bar{n}_i ，每一个粒子对应有速度向量 (V_i, ϕ_i) 。

对于特定条件下的行人系统，有以下守恒式^[20]：

质量守恒： $m\bar{\sigma}/\bar{V} = \text{常量}$ ；

动量守恒： $l(\frac{1}{2}m\bar{\sigma}v'^2/\bar{V} + \frac{1}{2}m\bar{\sigma}\bar{V}V) = \text{常量}$ ；

能量守恒： $E + m\bar{\sigma} \cdot v'^2 + \frac{1}{2}m\bar{\sigma}\bar{V}^2 = \text{常量}$ 。

其中， $\bar{\sigma}$ 为粒子密度，即单位面积上的粒子数， l 为通道宽度， E 为势能。

Henderson 指出，如果行人流满足以上守恒条件，那么就可以作为建立行人流动力学的必要条件，行人流就可以类似地看成是液体或气体的流动，可将 Maxwell-Boltzmann 理论运用到行人流中。

(2) Helbing 的气体动力论模型

在 Henderson 工作的基础上，Helbing 在 1992 年对 Henderson 的模型进行了修正，将行人意图(the intention)、期望速度 (desire velocities) 和单个行人间的相互作用加以考虑，建立了一个新的宏观模型^[45]，但 Helbing 同时指出，这种数学模型的解析解很难求得，为了让模型更具实用性，他还做了进一步的数值模拟工作^[46]。Helbing 的气体动力论模型的详细描述可参见相关文献^[23,45]。

另外，Hoogendoorn, Bovy 和 Daamen 等^[8] (2000)建立了 Simped 宏观模型用于模拟特定环境下的行人。

行人宏观模型只需要求解描述行人集体行为的少数几个参量构成的偏微分方程，其模拟时间与行人具体数目基本无关，因此，计算耗时相对较少。所以说，采用流体力学模型处理由大量行人组成的行人流问题较微观模型要经济得多。而且流体力学模型还有如下几个优点：①与实测数据吻合较好；②适于进行解析分析；③处理通道、匝道的出入流较为简便。

§ 1.4.3 微观模型

交通流的微观模型着眼于单个车辆或行人在相互作用下的个体行为描述，行人交通流微观模型主要包括元胞自动机模型、磁力模型，社会力模型，排队网络模型和其它微观模型等。

(1) 元胞自动机模型 (Cellular Automaton Model)

元胞自动机本来是现代计算机之父——冯·诺伊曼(von Neumann)及其追随者提出的想法, 美国计算机科学家 Stephen Wolfram 指出元胞自动机的基础就在于“如果让计算机反复地计算极其简单的运算法则, 那么就可以使之发展成为异常复杂的模型, 并可以解释自然界中的所有现象”。

元胞自动机 (Cellular Automaton, 简称 CA, 也有人译为细胞自动机、点格自动机、分子自动机或单元自动机) 是时间和空间都离散的动力系统。元胞自动机采用离散集来描述研究对象, 而就行人运动等交通流现象在本质上是离散的, 用来研究交通就避免了像连续介质模型那样所采用的“离散——连续——离散”的近似过程。另外, 元胞自动机模型的典型特点是物理模型简单, 容易编制程序, 灵活可调, 适于研究各种具体的交通效应, 且易于实现并行计算。

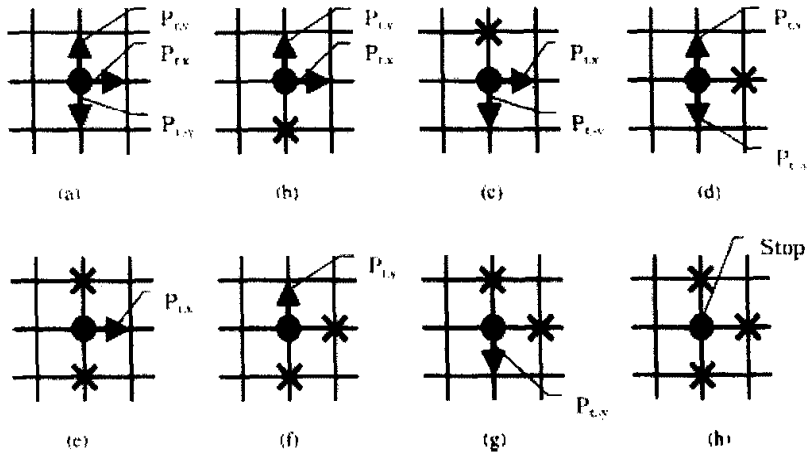
元胞自动机交通流模型 (简称 CA 模型) 是在上世纪 80 年代提出、90 年代得到迅速发展的一种动力学模型。Cremer 和 Ludwig^[17]于 1986 年最早提出这种模型, 其基本思想是: 采用离散的时间、空间和状态变量, 并且给定车辆运动的演化规则, 然后通过大量的样本平均来揭示交通规律。在元胞自动机模型中, 道路被划分为等距的格子, 每个格点表示一个元胞。在任一时刻 t , 元胞是空的抑或 被一辆车占据。在 $t \rightarrow t+1$ 的时间步里, 根据给定的规则对系统的状态进行更新。

行人元胞自动机模型旨在模拟行人运动, 既能捕捉微观行人运动, 又得到接近现实的宏观运动。用元胞自动机模拟一个物理过程的优点在于: 不用建立微分方程而直接通过一些运动规则和迭代规则 (或称更新规则) 来模拟非线性的物理现象。

下面介绍几个有代表性的行人元胞自动机模型:

1、偏斜行走格子气模型

Maramatsu, Irie, Nagatani (1999)^[56]建立了一个偏斜行走格子气模型, 用于模拟开放边界下地铁通道内交汇人流的运动, 指出当行人密度超过临界值以后将会发生阻塞相变。

图 1.2 向右走行人可能的行走概率^[56]

模型中采用的是随机串行更新规则，即在每个时间步，先将所有行人随机排序并依次按给定规则运动，当一个行人运动时其他行人保持不动。行人的运动根据一定的概率来运动，例如右行行人前方和两侧格点均为空的，则该行人可以以 $1/3$ 的概率向 3 个方向运动，见图 1.2(a)。

行人可以通过平移来避开阻塞，但是始终保持其初始方向。不考虑后退，考虑一个向右行走的行人，在三个方向的行走概率分别为 $p_{t,x}$, $p_{t,y}$, $p_{t,-y}$ ，见图 1.2。

其中， $p_{t,x}$ 为向右行走概率， $p_{t,y}$ 为向上行走概率， $p_{t,-y}$ 为向下行走概率。

对于(a)有： $p_{t,x} = D + (1-D)/3$, $p_{t,y} = (1-D)/3$, $p_{t,-y} = (1-D)/3$;

对于(b)有： $p_{t,x} = D + (1-D)/2$, $p_{t,y} = 0$, $p_{t,-y} = (1-D)/2$

对于(c)有： $p_{t,x} = D + (1-D)/2$, $p_{t,y} = (1-D)/2$, $p_{t,-y} = 0$

对于(d)有： $p_{t,x} = 0$, $p_{t,y} = 1/2$, $p_{t,-y} = 1/2$

对于(e)有： $p_{t,x} = 1$, $p_{t,y} = 0$, $p_{t,-y} = 0$;

对于(f)有： $p_{t,x} = 0$, $p_{t,y} = 1$, $p_{t,-y} = 0$;

对于(g)有： $p_{t,x} = 0$, $p_{t,y} = 0$, $p_{t,-y} = 1$;

对于(h)有： $p_{t,x} = p_{t,y} = p_{t,-y} = 0$; 其中 D 为直行概率。

同样，我们可以用 $p_{t,-x}$, $p_{t,y}$ 和 $p_{t,-y}$ 来表示向左走的行人的行走概率。

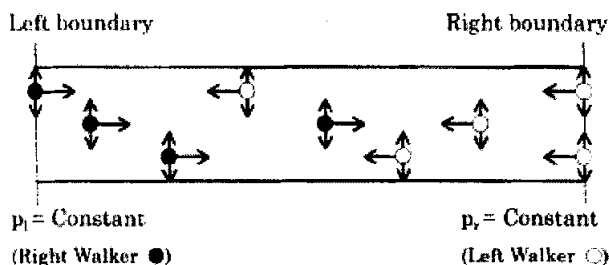
图 1.3 通道内交汇人流的示意图^[56]

图 1.3 中展示了行人流在通道内交汇的情况。

在给定长宽的通道中，上下为固壁，左右两端为开放边界条件，两端进入密度都给定常量，而更新的规则是随机串行的，即每一个时间步通道内所有行人只更新一步。在数值模拟中，他们发现当行人密度超过一定的临界值，会从畅行相向阻塞相转变，发生动力学相变。

在这个模型的基础上，他们进一步考察了在周期边界条件下正方形网格上行人交通中的相变现象^[55]，还研究了在开放边界条件下在十字路口发生的阻塞相变^[57]。Tajima 和 Nagatani^[58,59]把这种格子气模型应用到特定的建筑结构中，研究建筑结构对行人疏散的影响，如大厅、通道瓶颈和 T 型通道等。

2、董力耘、戴世强的两个 CA 模型

许多理论工作者在 BML 模型的基础上做了大量的工作。在 Maramatsu 等提出的二维偏斜随机行走格子气模型基础上，董力耘、戴世强对二维模型中的转向运动对阻塞相变的影响进行了深入的研究^[43]，强调行人可以转向，以避免碰撞。

针对在周期边界条件下正方形网格的行人交通现象，区别于 Muramatsu-Nagatani 采用随机串行更新规则的行人模型，提出了两个采用并行更新规则的元胞自动机模型。分别研究了不同系统尺度下转向运动对于相变的影响，以及不同比例的两类行人运动时的相变现象。“Muramatsu-Nagatani 模型和 BML 模型一样发生由运动相到阻塞相剧烈相变，即不存在一个明显的过渡区域，因此也没有显示在这个过渡区域中可能存在不同终态”^[43]。但在采取并行更新规则的二维行人模型一中，相同初始条件下（行人密度和初始分布相同）会达到两种不同的终态

(单向运动相和阻塞相)，并强调了有一个较大的过渡区域。因为在此模型中每一步运动不断引入随机因素，系统最终自组织演化到哪一个终态是完全随机的，因此无法根据行人的初始分布来确定系统的终态。

3、Burstedde, Kirchner 和 Schadschneider 的元胞自动机模型

Burstedde 等^[31]建立了一个两维元胞自动机模型，引入了背景场 (floor field) 的概念。这个模型因能较快地计算大规模人群的演化过程，能够再现行人的聚集效应和自组织现象。

模型规定，每一粒子（行人）都被指定了一个优先的行走方向。根据可能的走向，建立了一个 3×3 的矩阵来包含各种可能性的粒子运动。如图 1.4 所示，中间的单元描述了一个粒子可能的运动方向，邻近的是符合要求的可移向粒子的 8 个格子。这个可能性是与粒子速度和纵向横向的标准偏差有关联的，所以这个矩阵包含的信息有优先的行走方向和速度。原则上它可以每个元胞（格子）都不同，这要依地形和行人目的地而定。在最简单的情况，行人可以在某个方向上毫无干扰地运动，于是在相对应的矩阵里就表现为一项为 1，其它项都为 0。

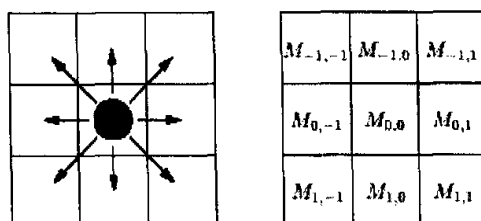


图 1.4 一粒子的可能运动和相关的矩阵 $M = (M_{ij})$

一个粒子在每步更新中，总在各种可能性中选择一种可能来运动。同时，所有粒子都移动。如果目标格子已被占据，那么粒子就不能移动。如果目标格子没被占据，且没有其它的粒子移向同一目标格子，那么这个移动就执行。如果有超过一个的粒子一起移向同一目标格子，那么每个粒子选择它们的目标格子的概率决定了那个粒子将移入目标格子。这个粒子在其竞争对手维持原来位置时便移入了目标格子。见图 1.5 所示的进入同一格子的概率。

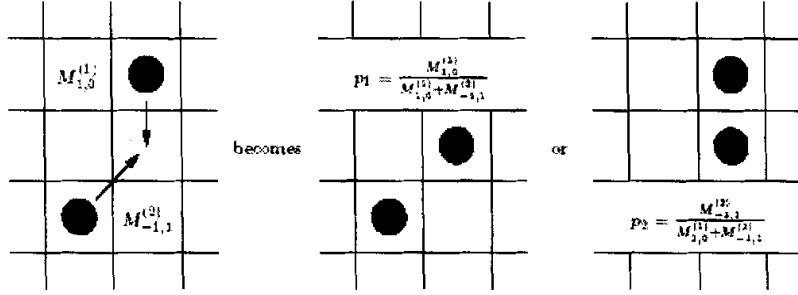


图 1.5 根据相应概率，两粒子发生的冲突时可能出现的情况

背景场又分为动态背景场 (dynamic floor field) 和静态背景场 (static floor field)。动态背景场 D 指行人行走的轨迹，主要体现行人之间的相互作用；静态背景场 S 指不受时间和行人影响的特定区域，但可以对行人的行走产生影响，如紧急出口或商店橱窗等，主要体现地形对行人的影响。

现在可以定义行人运动的转换概率 (transition probability) 如下：

$$\text{行人运动的转换概率为 } \bar{P}_{ij}, \quad \bar{P}_{ij} = N \bar{M}_{ij} D_{ij} S_{ij} (1 - n_{ij})$$

其中， \bar{M}_{ij} 包含行人运动方向和平均速度：

D_{ij} 表征动态背景场的作用，受其他行人运动影响的作用项；

S_{ij} 表征静态背景场的作用，受地形影响的作用项；

n_{ij} 表征已被占有的目标格子数，因为只可以向空格子移动 ($n_{ij} = 0$)；

N 用来始终保证 $\sum_{(i,j)} \bar{P}_{ij} = 1$ ，因为概率不能大于 1

而动态背景场可以进一步由如下方程给定：

$$\frac{\partial D}{\partial t} = d \cdot \Delta D - \delta \cdot D$$

对于一个行人，如果他离开 (x, y) 格子，则相对于此格子的动态场就增加 ΔD_{xy} ，

增量 ΔD_{xy} 可以是连续的、也可以是离散的。 d 为扩散常数， δ 为衰减常数

模型采用的是并行更新的规则，而且系统的时间尺度大致与实际的 0.3 秒相当，所以系统可以将数值模拟的疏散时间换算成实际疏散时间。

4、Blue 和 Adler 的 4-PED 元胞自动机模型

Blue 和 Adler 在前人研究和自己工作^[5-7]的基础上,发现已有的行人 CA 模型,包括单向 (Uni-directional) 和双向 (Bi-directional) 的行人流模型,不能充分地描述多向 (Multi-directional) 行人的情况 (如各向交汇的广场行人流),于是便建立了可以描述多向行人交汇的 4-PED 元胞自动机模型^[22]。

4-PED 模型考虑了以下情况:行人的“跟随行为”(Pedestrian Following Behavior), 正面冲突 (Head-on Conflicts) 和交叉冲突 (Cross-Directional Conflicts)。

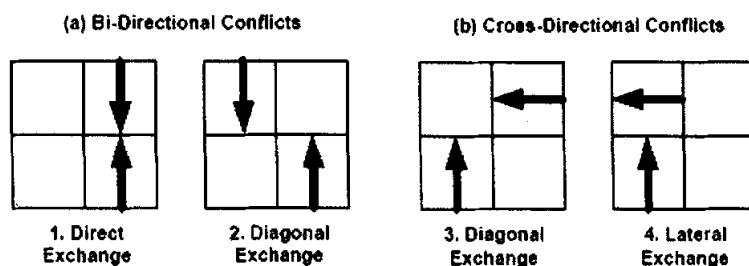


图1.6 行人的冲突情况^[45]

图 1.6(a)中 1、2 分别描述了对向冲突 (Bi-directional conflicts) 的情况, 图 1.6 (b)中的 3、4 则分别描述了交叉冲突 (Cross-directional conflicts)可能产生的情况。

HCM^[41]中定义了行人交通的一些基本规则,但只限于单向和双向两种情况,另外还假设双向行人只被分成两股行人行列。然而,实际情况中行人往往会被分成很多股行人行列,作者在曾上海地铁行人通道调查行人交通情况时,多次观察到这种情况,Blue 等人把这种情况定义为动态多股成行 (dynamic multiple lane) 即 DML, Helbing^[26]亦发现了这种情况并在社会力模型中加以描述, Blue 等人同时还定义了行人没有相互作用的情况: 散布流 (interspersed flow)即 ISP。

该模型采用了区别于单向和双向情况不同的更新规则,每个时间步用两个并行更新规则,包含了两个独立的步骤:(1)换道;(2)前进。在此基础上,模型对单向、双向、交叉、四向行人交通的情况进行了数值模拟,并针对不同参数画图进行了细致的比较。

4-PED 模型是 Blue 等人在先前的双向行人流模型上改进的模型,模型考虑

了交叉方向冲突 (Cross-directional conflicts) 的情况, 进一步可以发展为描述更一般情况的多向行人交通。其模拟结果可用于指导多向换乘的车站、地铁站台和行人街道十字路口等的设计和规划。

近年来还出现一些其它的行人 CA 模型 (如 Bolay,1998; Klüpfel et al,2000; Dijkstra et al., 2001; Keßel et al., 2001;Schadschneider, 2001), 还有与其相类似的 Nagatani, Muramatsu, Tajima 的偏斜随机行走的行人流格子气模型等, 这里不再详述, 可参看相关文献[23,58,59]等。

(2) 磁力模型 (Magnetic Force Model)

Okazaki^[36,37], Matsushita^[38], 和 Yamamoto^[39,40]一起建立了磁力模型。

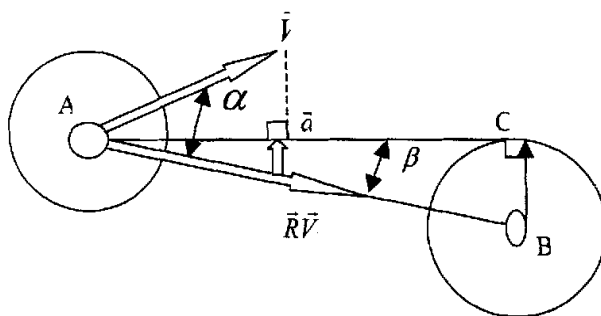


图 1.7 磁力模型中防止碰撞的附加力

如图 1.7 所示, 行人由于磁场作用而产生运动, 每个行人为正极, 墙壁和其它障碍物亦为正极, 将目的地设为负极。行人避免碰撞向其目的地运动, 每个行人在行走时被目的地, 即负极吸引, 但同时又要避免和其他行人和障碍物发生碰撞。行人受到磁力作用时会加速, 直到到达最大速度。采用库仑原理计算磁力, 受磁极影响的磁力即为

$$\vec{F} = \frac{k \cdot q_1 \cdot q_2 \cdot \vec{r}}{r^3}$$

这里, \vec{F} 为磁力 (矢量); k 为常数;

q_1 表示行人的磁力强度; q_2 表示磁极的磁力强度;

\vec{r} 行人指向磁极的向量; r 为 \vec{r} 的长度。

另外, 受其他行人和障碍物影响的加速度为

$$\vec{a} = \vec{V} \cdot \cos \alpha \cdot \tan \beta$$

\bar{a} 为行人A的加速度，从 $\bar{R}\bar{V}$ 方向调整至AC方向；

\bar{V} 表示行人A的速度；

α 为 $\bar{R}\bar{V}$ 和 \bar{V} 所成的角度， β 为 $\bar{R}\bar{V}$ 和AC所成的角度；

$\bar{R}\bar{V}$ 为行人A对于B的相对速度。

来自目的地、墙壁和其他行人的作用力的合力，可以决定每一时刻每个行人的速度。通过引入附加力来防止碰撞是非常成功的。然而，与 Gipps, Marksjo^[35]的利益成本元胞模型 (Benefit cost cellular model) 相似的是，磁力模型中磁力强度的值也是任意给定的，所以用该模型同样不能通过真实的行人交通现象加以验证，仅能通过视觉观察来判断优劣。

Okazaki^[42]还用该模型针对地铁车站和滑雪场旅馆的行人进行了数值模拟，得到了行人疏散时间等结果，证实了该模型可用于模拟火灾发生时行人运动的情况，还可以模拟行人排队等现象。

(3) 社会力模型 (Social Force Model)

Helbing^[33]等建立了社会力模型，该模型和 Gipps, Marksjo^[35]的利益成本元胞模型和前面提到的磁力模型有着相似的原理。把作用在行人上的作用力相叠加得到：

$$m \frac{d\bar{v}_i(t)}{dt} = m \frac{v_0 \bar{e}_i - \bar{v}_i(t) + \bar{\xi}_i(t)}{\tau} + \sum_{j(i \neq j)} \bar{f}_{ij}(\bar{x}_i(t), \bar{x}_j(t)) + f_b(\bar{x}_i(t)) \quad (1.1)$$

这里， $\bar{x}_i(t)$ 表示行人*i*在*t*时刻的位置；

$\bar{v}_i(t)$ 表示行人*i*在*t*时刻的速度 = $d\bar{x}_i(t)/dt$ ；

*m*表示行人质量；*m*/ τ 可以近似看成是摩擦系数；

v_0 为初始速度； $\bar{e}_i \in \{(0,1), (1,0)\}$ 表示运动方向；

$\bar{\xi}_i(t)$ 表示个体速度的脉动； f_{ij} 表示*i*和*j*之间的相互作用力；

f_b 表示边界的作用力；

由于假定每个行人都会在一定时间内到达某一目的地，每一个行人都以一定速度径直朝其目的地行走，其行走方向即为由现在位置指向目的地：

$$\vec{e}_i = \frac{\vec{x}_i^0 - \vec{x}_i(t)}{\|\vec{x}_i^0 - \vec{x}_i(t)\|} \quad (1.2)$$

其期望速度 (desire velocity) 即为:

$$u = \frac{\|\vec{x}_i^0 - \vec{x}_i(t)\|}{T_i - t} \quad (1.3)$$

两个相互作用力可以表示如下:

1、行人间的相互作用

$$\vec{f}_{ij}(\vec{x}_i(t), \vec{x}_j(t)) = -\nabla A(d_{ij} - D)^{-B} \quad (1.4)$$

2、行人和边界的相互作用

$$\vec{f}_b(\vec{x}_i) = -\nabla A(d_{i\perp} - D/2)^{-B} \quad (1.5)$$

其中 B 为常数, d_{ij} 表示行人 i 和行人 j 之间的距离, D 表示被 j 占有的空间的直径, A 表示单调递减函数, $d_{i\perp}$ 表示到最近墙壁的最短距离。

人们认为, 社会力模型是迄今为止比较好的微观行人交通模型之一。模型中的参数和变量并不是任意的, 它们有物理意义。该模型可以重现现实中的自组织现象, 还展现了疏散过程中的人员堵塞现象, 并指出行人流所表现出来的各种集体效应和自组织临界性是由于行人个体之间的非线性作用引起的。最近也有一些学者^[26,34]基于这一模型的基本思想, 对这一模型进行了改进, 对某些特定情况的疏散问题进行了数值模拟。

即使如此, 社会力模型也有两点颇受争议之处(例如, 见 Kardi Teknomo^[67]):

第一, 模型并不保证行人不和其他人相撞(或者重叠)。当行人密度到达很高时, 可以显见, 行人进入另一个行人(或者在某一点重合)的现象是极不合理的, 所以就必须要有一个类似于磁力的作用力来防止碰撞;

第二, 这一模型从来没有通过现实数据或者真实世界的现象来证实过。模型的创建者更多关注于物理作用, 用以解释生物和物理行为, 而不是真实的行人交通流。

(4) 其它微观模型

一些学者^[25,47-49]用排队网络模型 (queuing network model) 来模拟建筑物内行人疏散的情况。此类模型应用离散蒙特卡洛事件模拟的方法, 把每个房间看成是“节点”(node), 相邻的门是“连接”(link)。行人离开一个“节点”, 在“连接”处排队等待进入另一个“节点”。许多行人在离开一个节点的时候就必须寻找出口, 而

且要尽快尽可能安全地找出目标方向,每个行人都有特定的撤离路线和疏散时间。在一个“节点”中的行人可以随机选择属于自己的有利逃离路线。其中,疏散时间是该模型可以获得的重要参数之一。在排队网络模型,缺少对行人行为的描述,也不能详细地刻画行人发生冲突的情况。

还有一些其它的微观模型,如 Helbing 的主动行人模型(Active walker model),用于微观模拟的模型(如 Kayatz,2000; Hoogendoorn et al., 2001; Sugiyama et al., 2001),紧急疏散模型(如 Drager et al.,1992; Ebihara et al.,1992; Still, 1993,2000; Thomson 和 Marchant, 1993; Lovas, 1998; Klüpfel et al, 2000; Hamacher 和 Tjandra, 2001),基于人工智能和自主体的模型(如 Gopal 和 Smith, 1990; Reynold, 1994,1999;Schelhorn et al., 1999; Dijkstra et al., 2001)等等,这里不再详述,可参看相关文献[23]。

最近,国内一些学者也开始用元胞自动机模型、自主体模型等微观模型对行人运动、火灾中人员逃生、避难疏散等情况进行了研究,具体请参看文献[82-87]等。

§1.5 本文的主要研究内容

本论文是以作者攻读硕士学位期间承担课题的工作为基础,在第一章中阐述了课题研究的目的、意义以及国内外研究的现状。分别从行人数据采集和行人流建模(宏观模型和微观模型)两个方向,详细介绍了前人的工作。

第二章阐述了行人交通特征研究,从宏观和微观角度来分析行人特征,并采用实际观察和交通调查等手段得到行人交通的特征参数,如步速、步幅、步频等,还进一步得出与行人特征密切相关的结论。

第三章我们从车辆的流体动力学模型出发,在考虑行人流特性的情况下,建立了一维行人交通的流体动力学模型,并对得到的实测数据进行了数值模拟,得到了地铁通道内行人流密度波的传播速度,并对模型做了线性稳定性分析。

第四章建立了一个模拟地铁通道行人流的一维元胞自动机模型。模型分别在开放边界条件和周期边界条件下,采用串行更新规则和并行更新规则对通道内行人疏散动力学进行了计算和数值模拟。

第五章总结全文并展望进一步的研究工作。

第二章 行人交通流特征研究

本章描述行人交通特征研究,从宏观和微观角度来分析行人特征,并采用实际观察和交通调查等手段得到行人交通的特征参数,如步速、步幅、步频等,还进一步得出步速和步幅都为 Gauss 分布等与行人特征密切相关的结论,为行人流的建模、模拟和分析提供了依据。

§ 2.1 行人交通流特征研究的必要性

步行是人类最主要、最原始的交通方式。人们在行走的时候不依赖于其它交通工具,基本上独立自主地完成整个交通过程。城市中机动车和自行车交通的规划设计也是为了便于行人出行,尽管行人交通流有着一般交通流的“共性”,但与机动车流相比,又有明显的“个性”(例如速度较低、机动性和随机性更强等等)。

文献[1]中指出,为了弄清城市客流交通的特性及其在时间、空间上的分布规律,应当进行居民出行调查。询问被调查人因工作、购物、学习等产生交通的情况。我国早在上世纪 80 年代进行了此类调查,城市规划设计研究院和天津市合作,率先于 1981 年 7 月对天津市 6 个行政区, 156km^2 , 302.7 万人进行了居民出行调查。经过调查,得出了天津市居民出行的主要参数和出行起讫分布规律。如天津市居民平均出行次数为 2.44 人次/人·日,自行车和公共汽车、步行、其它(包括地铁、出租车、单位班车、轮渡等)四类交通方式的比例为 44.54%、10.33%、42.62%、2.51%等。随后上海、广州、沈阳、北京等 30 多个地市都开展了这项调查工作。但是随着社会和经济的发展,如今全国各大城市的居民出行比例已经发生了巨大的变化,这就需要调查新的行人交通数据、掌握行人规律,用于制定交通政策,指导城市交通规划和交通建设。

研究行人交通流首要的是得到各种环境下行人交通流的基本详细数据。除了在宏观上关注居民出行的各项数据,我们还应该关注行人的微观特征(例如,行人的步行特征等)。为了掌握行人交通的各项数据,作者所在的课题组对行人交通进行了数次调查实测,本章对实测结果作初步的报道和分析。

§ 2.2 行人交通现象及特点

行人交通特性表现在行人的速度、对个人空间的要求、步行时的注意力等方面。交通流的基本特征参数是密度、速度和流量。行人流中有许多有趣的现象,众多学者各自对这些现象进行了研究,Keith Still (2000) 在 *Crowd Dynamics* 中就列举了一些比较典型的行人现象:

1. 边界效应 (Edge Effects): 人群边上的行人通常比人群中间的行人走得快一些;
2. 指进效应 (Finger Effects): 双向高密度对冲人流之间的挤压、穿越导致相互削弱的效应;
3. 密度效应 (Density Effects): 某些行人区域的密度增加会导致行人流变得不稳定、不均衡;
4. 行人踪迹 (The Human Trail): 行人倾向于走最短最省时间的路径,比如某些行人捷径;
5. 激波效应 (Shock Waves): 分布在密集人群中的某些行人效应会随情况变化发生扩散和传播。

§ 2.2.1 行人特征概述

综合前人研究,通过我们的大量观测,可以总结出以下一些具有普遍性的行人运动特征:

1) 一般情况下,即使人们在径直前行的道路中碰到十分拥挤的情况,也不愿意改道或掉头反方向行走,而是继续按照已经选择的既定目标行走。只有在改变行程能更为省力省时地到达目的地的情况下,人们才会改道行走。

2) 如果不是赶时间想尽快到达目的地,行人都倾向于以自己最舒适的(能量消耗最少的)步行速度来行走。Henderson^[18,19]经过研究得出人群中单个行人的步行速度呈 Gauss (正态) 分布,他在 1970 年测得人群中的行人平均速度为 1.34m/s, 标准偏差为 0.26m/s。

3) 行人总是与其他行人和边界(墙壁、成排房屋、街沿等)保持一定距离。这个距离在人们匆忙行走的时候就会变小,也会随着人流密度的增大而递减。有研究^[18]指出,行人对于墙壁、房屋和道路边沿的舒适(安全)距离分别为

0.25m、0.45m 和 0.35m。

4) 当行人密度增加时, 步速和步幅都会明显地减小。这在地铁通道中表现得较为明显。有调查数据显示, 当行人密度超过每平方米 5.68 人时, 行人就几乎没有了行走的空间, 会接近于停滞状态。大城市在节日狂欢的街道、广场上就会出现这种情景。

5) 在恐慌逃离某个现场的情况下, 个体行人通常会非常紧张, 以至于会有非常盲目的行动。每个人比通常情况下走得快, 都想尽快离开灾难现场。行人与行人之间开始发生相互推挤等情况。在情况不明的时候, 人们由于从众心理, 容易出现一种盲目的跟随行为。这是一种自组织现象。在出入口处, 会发生拥挤和堵塞, 而且拥堵随危险加剧会越来越严重。Helbing^[23]指出, 拥挤人群中人们相互之间推挤的危险压力足以使砖墙坍塌, 受伤和跌倒的人成了新的“障碍物”, 人员的撤离速度不断减慢。

§ 2.2.2 宏观行人特征

行人特征可以分为宏观特征和微观特征。宏观特征针对行人集团, 而不是单个行人。一般来讲, 研究高密度的行人流容易得到宏观行人特征, 因为此时在这一大规模系统中有丰富的行人集团行为。美国学者 Fruin^[70] (1971) 在其博士论文《行人规划与设计》中, 详细研究了行人流的速度、流量、密度及行人占有空间等特征要素, 提出了人行道服务水平划分建议值, 见表 2.1。

服务水平	行人流量 q $ped \cdot (m \cdot min)^{-1}$	占有空间 ρ $(m^2 \cdot ped^{-1})$	行人交通情况
A	≤ 30	> 2.3	自由流
B	30 ~ 55	2.3 ~ 0.9	行人步行速度和超越行动受到限制, 有行人方向和横穿时极感不便
C	55 ~ 70	0.9 ~ 0.5	步行速度受到限制, 需频繁调整步幅 很难超越, 反向走和横穿特别困难
D	≥ 70	< 0.5	偶尔向前移动, 无法避免与行人相挤; 不可能反向走和横穿

表 2.1 人行道流量、行人占有空间与服务水平

美国联邦公路总署标准手册 HCM^[41](The Highway Capacity Manual Standard) 中也将人行道的服务水平进行了划分, 给出了不同服务水平下的占有空间、平均速度和流量之间的相互关系, 见表 2.2。

服务水平	行人占有空间 ($m^2 \cdot ped^{-1}$)	预计的流量和速度 (15 分钟平均量)		
		平均速度(m/s)	流量(ped/min/m)	V/C rate
A	12.077	≥ 1.321	≤ 6.526	≤ 0.08
B	3.716	≥ 1.270	≤ 22.966	≤ 0.28
C	2.230	≥ 1.219	≤ 32.808	≤ 0.40
D	1.394	≥ 1.143	≤ 49.808	≤ 0.60
E	0.557	≥ 0.762	≤ 82.021	≤ 1.00
F	0.577	≥ 0.762	Variable	variable

表 2.2 人行道服务水平^[41]

行人流流量用 q 来表示, 这个特征量是许多个体行人运动的结果。它的单位是人/分钟/米, 即每分钟经过每米宽人行道的行人数。

以 w 和 L 分别代表行人区域的宽度和长度, 在观测时间 T 内观察到的行人数为 N , 则有单位时间宽度的流量为

$$q = \frac{N}{T \cdot w} \quad (2.1)$$

行人流流量在预计行人运动趋势、行人设施规划、安全疏散和划分服务水平时是必不可少的。同样, 步行速度亦是重要的行人特征参数, Lovas^[25](1994) 指出, 如果假定畅行的通道行人速度都依赖于自身因素 (年龄、性别等), 那么行人的速度将呈正态分布的曲线。同时, Henderson^[18,19]通过实测、统计得出在人群中的行人速度同样是呈高斯分布。

这里有两种方法计算平均速度, 分别称为时间平均速度和空间平均速度:

一、时间平均速度 (time mean speed) 是一段时间内, 行人经过人行道的平均速度。可以看成是点速度或者瞬间速度的算术平均值:

$$\bar{v}(t) = \frac{\sum_{i=1}^N v_i(t)}{N} \quad (2.2)$$

时间平均速度是和密度、流量等其它特征参数，在同一时间段内观测的平均值（一般取每5分钟的观测值^[1]）。

N 为观察到的行人数量， v_i 是第 i 个行人的速度。

如果 ω_i 是所有行人行走的距离，那么在观测时间内，有

$$\bar{v}(t) = \frac{\sum_{i=1}^N \omega_i}{N \cdot T} \quad (2.3)$$

$$u = \frac{L}{\bar{t}} \quad (2.4)$$

其中，

$$\bar{t} = \frac{\sum_{i=1}^N (t_i^{\text{出}} - t_i^{\text{入}})}{N} \quad (2.5)$$

二、空间平均速度 (space mean speed) 是人行道长度 L 对每个行人经过该道路时间的比值：

Fruin (1971)提出在密度低于每平方米0.5人时，行人一般会以自己的特征速度 (characteristic speed)行走。O'Flaherty^[73]总结得出，在繁忙的行人交叉口，行人横穿马路的速度平均值在1.2m/s到1.35m/s之间。当交叉口不繁忙时，行人速度则可达畅行速度，约为1.6m/s。

行人交通密度、速度和流量之间的关系是行人交通的基本方程，

$$q = u \cdot k \quad (2.6)$$

其中， k 为行人密度，Papacostas和Prevedouros^[71]把行人密度定义为单位面积内的行人数量（人/平方米）。行人密度的倒数定义为空间模数 M (Space module or Area module)，单位是（平方米/人），代表每个行人占有的单位面积。

在方程 (2.1)、(2.4)、(2.6) 基础上，我们可以得到

$$M = \frac{u}{q} = \frac{\frac{L}{\bar{t}}}{\frac{N}{T \cdot w}} \quad \text{或} \quad M = \frac{w \cdot L \cdot T}{N \cdot \bar{t}} \quad (2.7)$$

§ 2.2.3 微观行人特征

Teknomo^[2] (2001)指出, 与已经定义较完备的宏观行人特征相比, 微观行人特征至今没有较为明晰的定义。Fruin^[3,4], Navin 和 Wheeler^[14]探讨了行人间隔的测量方法。行人间隔指同一运动方向上一个行人与另外一个行人的距离。但是显然这个定义仍旧是模糊不清的, 因为行人总是时刻改变行走方向。

Helbing 和 Molnar (1997) 提出了“效率测度” (efficiency measure) 和不舒适测度作为评估手段来优化设计行人设施。“效率测度” E 中, 考虑行人期望运动方向速度分量的平均值和期望步行速度的关系, 即有

$$\bar{E} = \frac{1}{N} \sum_i \frac{x_i}{v_i^0} \quad (2.8)$$

不舒适测度 U 则反映瞬间速度变化的频率和程度 (比如因为避碰而急停、急走的情况)

$$\bar{U} = \frac{1}{N} \sum_i \frac{\bar{y}_i}{h_i} \quad (2.9)$$

其中,

$$\bar{x}_i = \frac{\sum_{t=t_1}^{t_2} \bar{v}_i(t) \cdot \bar{e}_i(t)}{t_2 - t_1}, \bar{g}_i = \frac{\sum_{t=t_1}^{t_2} \bar{v}_i(t)}{t_2 - t_1}, \bar{h}_i = \frac{\sum_{t=t_1}^{t_2} \bar{v}_i^2(t)}{t_2 - t_1} \text{ 和 } \bar{y}_i = \frac{\sum_{t=t_1}^{t_2} (\bar{v}_i(t) - \bar{g}_i)^2}{t_2 - t_1}$$

$\bar{v}_i(t)$ 为 t 时刻行人 i 的速度, N 为行人数, v_i^0 为行人原有速度,

$\bar{e}_i(t)$ 为 t 时刻指向行人 i 的单位向量, $\bar{x}_i, \bar{g}_i, \bar{h}_i$ 和 \bar{y}_i 是从 t_1 至 t_2 时刻的时间平均量。

§ 2.3 行人交通的实测和分析

考虑各种环境下的行人交通现象有很大的差异，我们在 2003 年夏季和冬季采用人工观测、摄影和摄像等手段进行了两组较大规模的行人交通实测。

第一组实测安排在 2003 年 6 月 23 日至 7 月 4 日，实际进行天数为 10 工作日，调查人员为本课题组成员及上海大学力学系 01 级全体学生。在考虑到天气、路面状况、人流密度等因素的情况下，我们选择了上海市交通枢纽之一——人民广场和行人集中的南京路步行街作为调查地点，主要测点为整条步行街中西段。我们在调查行人交通特征时，明确了性别、年龄的区别，分别测量行人走过选择固定的行走距离（一般设为 6 米，正好为 10 块花岗岩铺路石的长度）所需的步数、时间等，从而能进一步得到步频、步速等特征参数。其中参照^[1]的分类方法，把年龄分为四类：老、中、青、幼，为了得到行人的普遍特征，我们忽略调查下列状态的行人：

- 1) 抱着小孩或者背负重物、拖着行李等行人；
- 2) 年龄幼小的小孩（标准参照^[1]）；
- 3) 搀扶他人的行人；
- 4) 斜线行走的行人；
- 5) 时而驻足停留的行人（观看橱窗等情况）；
- 6) 跑步或疾走的行人；

考虑到固定距离可能造成误差，我们还在不固定行走距离情况下也进行多次实测，发现误差在所考虑的允许范围之内。

第二组实测安排在 2003 年 12 月，完成天数为 10 天，调查人员为本课题组成员，实测地点在上海大学延长校区的校园内。这次实测的主要目的是调查结队人群的交通行为以及匆忙行走的行人（赶往教室的学生）的交通特征。

进行实测的时候获取的基本量为：行人的行进距离及所需时间、步数。为了取得可用的数据，我们采用了扩大样本，增加观测量然后取其平均值的方法。与已经完成的国内外研究比较，我们还着重研究了步频及其与步速、步幅的相互关系。

行人交通特征各实测参数的定义和说明如下：

- 1、步速：行人在单位时间内行进的距离。即步速=行进距离/时间。
- 2、步数：行人在单位时间内两脚着地的次数。
- 3、步幅（或步长）：行人两脚先后着地时，前脚跟至后脚跟的距离。

步幅=行进距离/步数。

- 4、步频：行人在单位时间内行进的步数。即步频=步数/时间=步速/步幅。

需要指出的是，我们这里所说的步速、步幅和步频都是平均值。

我们的数据整理过程，即统计分析步骤如下：首先将实测数据分类输入，采用 Matlab 进行编程，对各项数据进行筛选。在给定一定误差区间下，去除不合理的数据。然后用程序计算各种需要的参数和统计的指标，再进行画图分析。

在进行编程的时候，我们给定了选取数据的条件。比如在南京路实测的数据由以下条件：

1) 步行时间超过 15 秒的数据予以去除（即排除因故蹒跚、踌躇的行人数据）。给定固定行走距离的情况下，步行时间过大是不合理的数据，即排除过慢的不合理步速；

2) 步行时间低于 2.5 秒的数据去除，排除过快的不合理步速（即排除跑步等特殊状况）；

3) 步速/步幅<1.2 为不合理数据，因为此时几乎不移动。这里的步行时间和步数是在我们选定的固定距离（6 米）里所得的数据。

类 别	步 速 (m/s)	步 幅 (m)	步 频 (steps/s)	样本数
全部样本	1.24	0.63	1.96	4016
成年男子	1.26	0.65	1.92	2111
成年女子	1.22	0.61	1.99	1905

表 2.3 样本分析数据

表 2.3 中的数据为全部样本的统计结果，成年指的是除去幼年的老、中、青年年龄段，我们这里界定年龄的标准采取文献^[1]的规定。性别差异会造成男女性行人步行特征的不同。从实测统计数据中看出，男性的步速、步幅明显大于女性。可以看到，成年男子的步速和步幅比成年女性大，其步频小于成年女性。

类别	步速 (m/s)	步幅 (m)	步频 (steps/s)	样本数
1、上海	1.24	0.63	1.96	4016
2、中国	1.24	0.637	/	/
3、外国	1.34	0.65	2.05	/
1、成年男性	1.26	0.65	1.92	2111
2、成年男性	1.28	0.67	/	/
3、成年男性	1.41	/	/	/
1、成年女性	1.22	0.61	1.99	1905
2、成年女性	1.20	0.61	/	/
3、成年女性	1.27	/	/	/

表 2.4 与国内外相关数据的比较

注：类别 1 为本课题组在上海的实测数据，类别 2 为根据国内资料来源^[1]的修正值，类别 3 取自国外资料来源^[72]

表 2.4 中是实测数据和国内外已有数据的比较。国内数据与国外相比，中国人的步速、步幅、步频平均值略小于国外人士的平均值。

类别	步幅 (m)	步速 (m/s)	步频 (steps/s)	样本数
老年女子	0.56	1.08	1.91	246
中年女子	0.61	1.20	1.99	621
青年女子	0.63	1.27	2.01	1002
老年男子	0.60	1.10	1.83	286
中年男子	0.66	1.25	1.91	829
青年男子	0.67	1.32	1.96	949

表 2.5 区分年龄、性别的实测数据分析

从表 2.5 的数据统计可以看出，年龄差异会造成男女行人步行特征的不同。根据实测数据，随着年龄的增加，步速、步幅和步频都有相应的减少。青年的步速、步幅和步频比中老年的大，但步频的差异有时候不是很明显，如表 2.4

中青年女性与中年女性的步频就很接近。

关于行人步速的测量，国内外还有一些数据^[1]可以比较。如步速范围，我们测得的数据为 1.08~1.32m/s，国内数据为 1.01~1.32 m/s，日本为 1.14~1.58 m/s，前联邦德国为 0.7~1.8 m/s，美国为 1.14~1.32 m/s。而平均步速分别为上海 1.24 m/s，日本 1.44 m/s，前联邦德国 1.5 m/s。

步行参数	分 类	标准方差	偏斜因子	峭度因子	样本总数
平均步速	青年女子	0.2063	0.1500	3.1203	1000
	青年男子	0.2232	0.1167	3.0072	943
平均步频	青年女子	0.2322	0.0999	3.5214	1000
	青年男子	0.2434	0.2585	3.6124	943

表 2.6 步速分布和步频分布的统计分析

先前的研究^[18,19]中指出，行人步速呈 Gauss（正态）分布，其偏斜因子为 0，峭度因子为 3，可以根据上述两个数的接近程度这个来判断是否为 Gauss 分布。于是，我们分别计算了青年、中年、老年的步速和步频分布，见图 2.1.1~2.1.3、图 2.2.1~2.2.3

研究者	分 类	平均步速 (m/s)	标准方差 (m/s)	样本数
1、本课题组	男 性	1.26	0.195	1861
	女 性	1.22	0.210	2049
2、Henderson	男学生	1.57	/	共 693
	女学生	1.42	/	
3、Henderson	男学生	1.59	0.16	500
	女学生	1.49	0.14	636
	男 性	1.62	0.22	623
	女 性	1.38	0.17	452

表 2.7 和 Henderson 的数据比较

注：类别 1 为作者课题组 2003 年在上海市的实测数据，类别 2，3 为 Henderson 于 1965-1966 年和 1970 年在澳大利亚悉尼市的实测数据^[19]

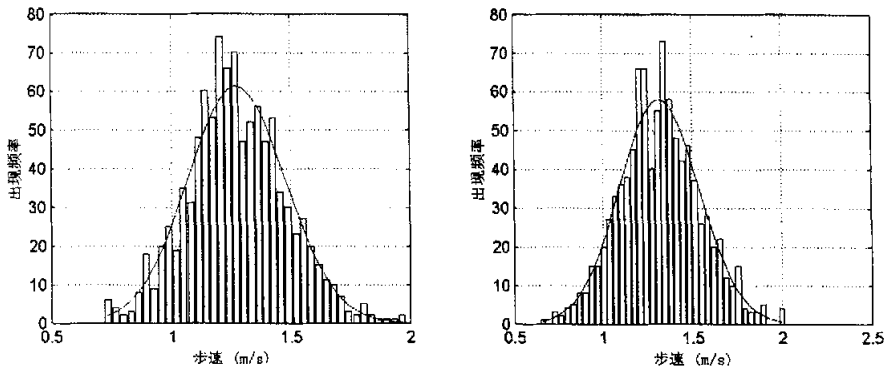


图 2.1.1 青年女性和青年男性的步速分布图

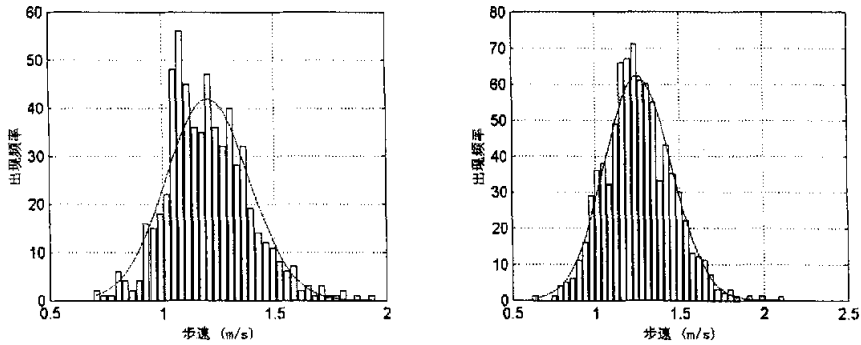


图 2.1.2 中年女性和中年男性的步速分布图

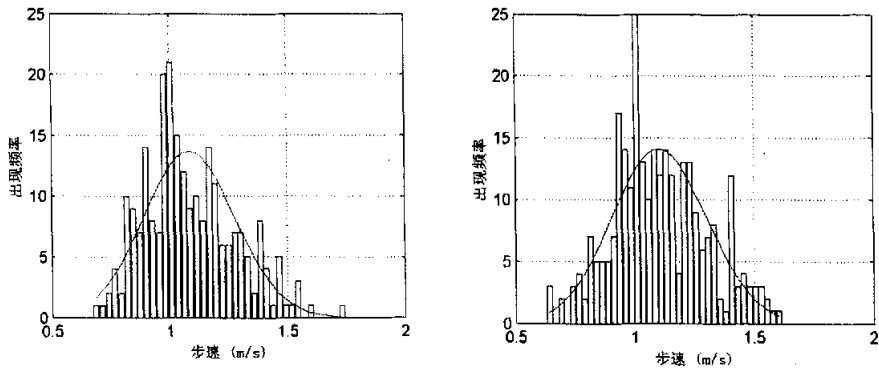


图 2.1.3 老年女性和老年男性的步速分布图

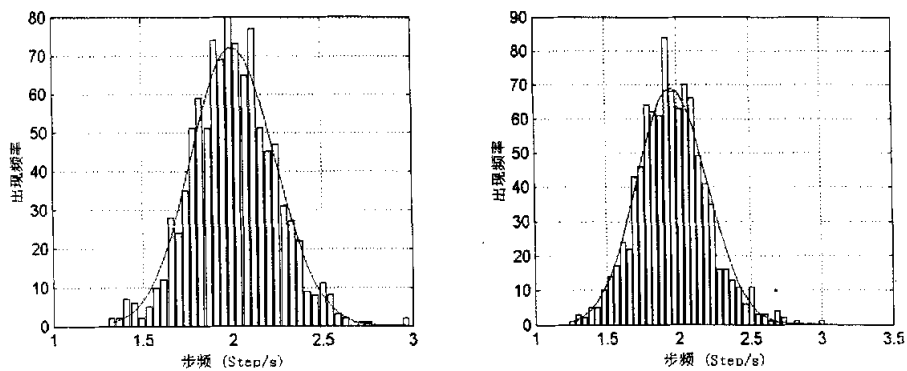


图 2.2.1 青年女性和青年男性的步频分布图

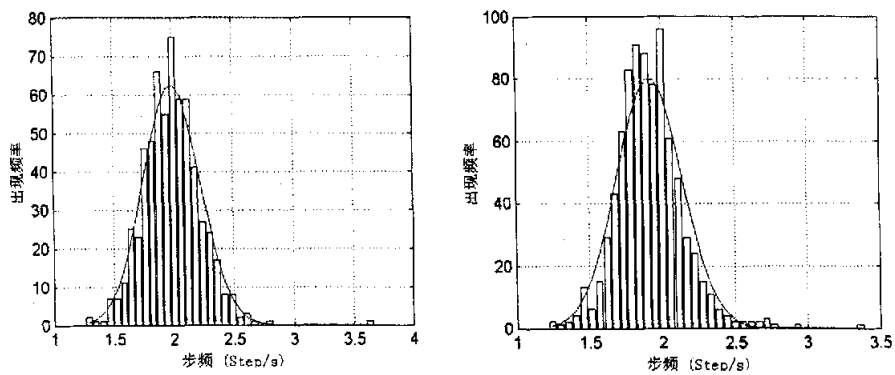


图 2.2.2 中年女性和中年男性的步频分布图

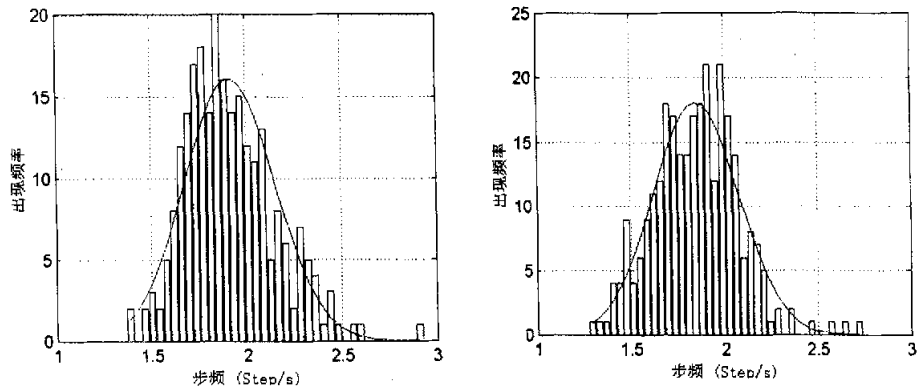


图 2.2.3 老年女性和老年男性的步频分布图

两组实测所得的老、中、青年的步速和步频的三对偏斜因子和峭度因子,见表 2.6, 偏斜因子约等于 0, 峭度因子接近 3, 确为 Gauss 分布, 最后得出了我们的结论: 我国大城市行人步速和步频也属 Gauss (正态) 分布。我们还对相关数据进行画图, 图 1 和图 2 显示了样本数较多的青年女性和男性的步速和步频分布, 可以看出有明显的 Gauss 分布的特征。

从表 2.7 的统计中看, 西方国家行人由于身高等因素比我国行人平均步速快, 而且不同状态行人的步速不一样, 所以我们在 2004 年 12 月在校园内调查了清晨学生赶路到教室上课的步行特征。主要目的是取得行人在不同目的和心理状态下步行特征: 赶路或发生紧急状况等的步行特征。结果我们发现: 男女学生在赶路时的步速、步频和步幅的平均值比一般状态时同年龄段行人的大, 所得数据见表 2.8:

类别	步幅 (m)	步速 (m/s)	步频 (step/s)	备注
1、男学生	0.84	1.83	2.18	样本偏少 (< 500)
2、女学生	0.77	1.74	2.27	
3、男青年	0.67	1.32	1.96	见表 2.5
4、女青年	0.63	1.27	2.01	

表 2.8 不同步行状态的数据比较

注: 1、2 为赶路的状态, 3、4 为一般步行状态

综上, 行人步速受诸多因素的制约和影响, 主要有:

- 1) 年龄和性别。一般年轻人比老年人步速快, 男性比女性快。可见表 2.3、2.5、2.6、2.7。
- 2) 步行目的。行人的步行目的会造成步速的不同, 有数据显示^[1]: 换乘行人的步速为 1.49 m/s; 购物和商业区的行人步速为 1.16 m/s 和 1.15 m/s; 休闲文娱为目的行人的步速为 1.10 m/s。
- 3) 气温、天气和出行时段。
- 4) 路面状况和周围其它环境。如^[8]英国测得成年人在 10% 坡度路面上、下坡的步速分别为 1.22 m/s 和 1.37 m/s; 还有如行人过人行横道、上下天桥、地道与台阶等状况的步速都有较大的区别。

还要说明的是，我们实测的主要对象是单个行人的步行状态，同时也考察了行人群和赶路学生的步行特征等。

最后需要指出，我们主要研究良好步行条件下行人的舒适步行速度，这种情况与结伴行走或赶路的情形有着明显不同。两次实测的步行环境均为水平路段，没有较大坡度和上下台阶的情况。同时，我们测得的步幅和步频也都能切实地反映行人步行特征：

- 1) 行人在赶路或在类似紧急状态时的步频和步幅的平均值比一般状态时有所增大，见表 2.8。
- 2) 步频是重要行人交通特征之一。步频可以反映行人的心理状态和周围环境的变化。我们实测所得赶路学生的步频比一般状态行人步频增幅超过 10%。近来在行人交通研究中^[72]，对行人步频的测量开始引起学者的关注。我们在实测过程中发现，步幅受身高（腿的长度）、性格、心理状态和行走环境等因素的制约。
- 3) 在实测中发现，结队行人人数超过一定数量时，步速、步频和步幅会减小，结队行人有趋同性，彼此的步速、步频和步幅都会相当接近。有研究中就指出，三个或三个以上的步行人群比单个或结队的两人步速慢，作者在大学校园中的观测也证实了这一点。

我们还着重研究了步幅与步速、步频与步速的关系，发现步速和步幅有一定的相关性，而与步频关联不大。步速主要取决于：步幅和步频两个因素及其协调关系，步频和步幅是影响步速的两个主要因素。我们将实测数据进行了细致的统计，研究了这两种相关性。从相关系数看，0.9 以上是比较好的相关，我们计算出步幅和步速的 6 组数据的相关系数在 0.70 附近，说明步幅和步速是正相关，但是相关程度不够好；而步频和步速的 6 组相关数据的相关系数都小于 0.13，说明相关度较差。所以说明步速和步幅有一定的正相关，与步频几乎无关。

为了更加直观地来考察步幅和步速的相关性，我们根据数据画了图，见 2.3.1，年青行人的步幅和步速在一定程度（某些范围）上有一致增大的关系。由于中年和老年的数据偏少，进一步的结论还需要进一步实测补充数据，才能得出较为准确的结论。

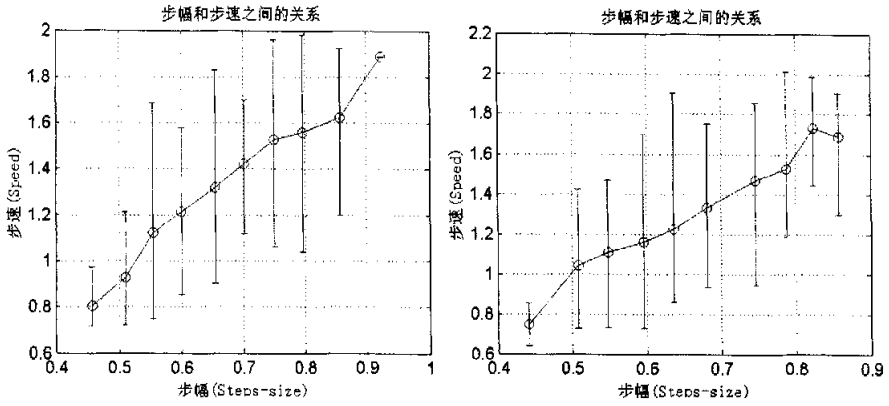


图 2.3.1 步幅一步速的关系图 (青年女性、青年男性)

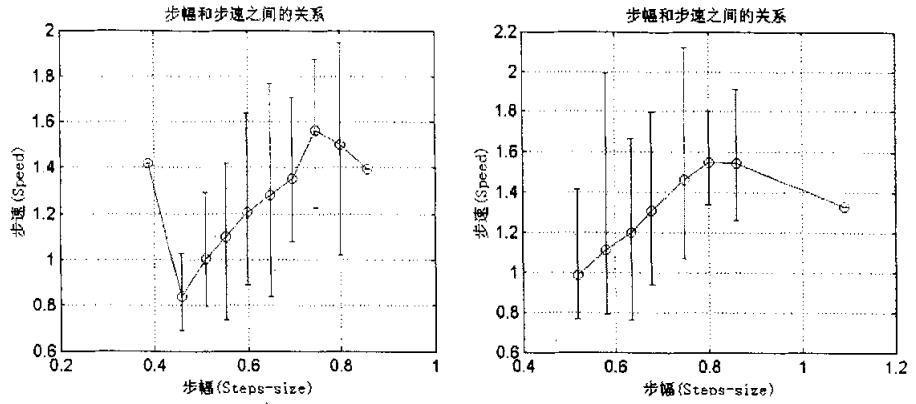


图 2.3.2 步幅一步速的关系图 (中年女性、中年男性)

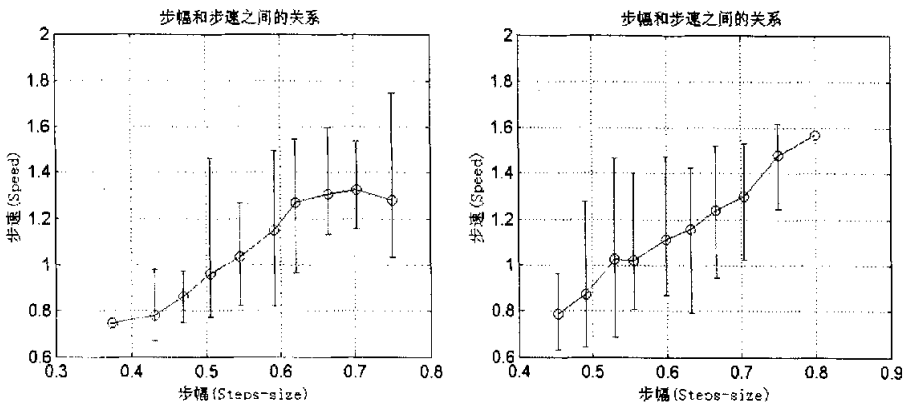


图 2.3.3 步幅一步速的关系图 (老年女性、老年男性)

§ 2.4 小结

经过以上的统计分析和图表显示，我们得到了以下结论：

1、我国大城市行人的步速和步频大致成 Gauss 分布，与国外行人的情况相近；

2、性别差异会造成男女行人步行特征的不同。从实测统计数据中看出，男性的步速、步幅明显大于女性；

3、年龄差异会造成男女行人步行特征的不同。根据实测数据，随年龄的增加，步速、步幅和步频都有相应的减少。青年的步速、步幅和步频比中老年的大，但步频的差异有时不是很明显；

4、与国外数据相比，中国人的步速、步幅、步频平均值略小于国外人士的平均值；

5、步频是重要的步行特征参数之一，步频能反映行人的心理状态和周围环境的变化对步行特征的影响；

由于设备和经费的限制，我们没有对行人密度进行有效的实测，有待于今后弥补。

第三章 上海地铁通道行人流的实测和数值模拟

随着公共轨道交通的迅猛发展,地铁通道拥挤的行人交通已经引起众多学者的关注。2004年5月至2005年3月,我们在上海市人民广场地铁通道内组织了多组行人交通实测,调查安排在早晚高峰及其它一般运营时段进行,获得了有效的实测数据。在对所测数据进行有效性分析和筛选后,我们从车辆的流体动力学模型出发,在考虑行人流特性的情况下,建立了一维行人交通的流体动力学模型,根据实测数据进行了数值模拟,得到了地铁通道内行人流密度波传播速度,并对模型做了线性稳定性分析。

§ 3.1 地铁通道行人流研究的重要性

随着城市社会经济活动越来越频繁,人们的活动空间越来越广阔,对大都市提供高效、畅达的交通出行环境的要求也越来越迫切。上海城市交通白皮书中指出^[74]：“上海轨道交通网络正在加速形成,已经在城市客运中发挥了重要的作用。发展轨道交通是改善公交服务质量,疏解地面交通压力的根本举措”,“到2005年,上海轨道交通日客运量将达到250-300万乘次,承担20%-25%的公共客运量”。

上海地铁等轨道交通发展越来越迅速,但仍然不能缓解人们出行的要求。由于地铁处于地下的半封闭空间,一旦发生火灾等灾害性事故,扑救困难、疏散不易,加上一时通信不畅,容易引起慌乱失措和无序推挤,造成人员的重大伤亡,近年来,汉城、莫斯科等城市发生的地铁灾难即为前车之鉴。

为了避免发生意外灾害时地铁通道行人的伤亡,就有必要用交通流理论来研究地铁通道内的行人交通,确定行人交通的基本参数,用以指导地铁通道、行人设施设计和灾难逃逸的安全疏散,保障轨道交通换乘的迅速高效、安全有序,提高在突发情况下的疏散能力,减少不必要的人员伤亡。

§ 3.2 上海地铁枢纽——人民广场站行人交通现状和分析

据了解,轨道交通人民广场站一、二号线“顺时针”换乘方案实施后,有效地

缓解了早晚高峰时段客流的拥堵状况。近年来,随着地铁客流的大幅度增加,人民广场地铁站作为轨道交通的枢纽,越来越显得拥挤不堪,所以其通道换乘应该引起我们足够的重视,否则会造成各种交通之间连接不紧密,给行人出行和换乘造成困难。而不方便的换乘将严重降低城市交通的整体运行效率,使公共交通失去吸引力,导致高容量的客运系统无法得到充分发挥。当换乘人流拥挤过度容易造成行人踩踏事故,而地铁车站一旦发生突发事件,车站内地下通道,站厅、站台及附近主要地面出入口等都是容易发生行人拥堵、推挤和相互踩踏,极易造成人员伤亡和不堪设想的后果。

§ 3.3 交通实测

2004年02月19日晚高峰开始,每个工作日的早、晚高峰时段,人民广场站采用“顺时针”换乘方式。这主要是为了解决北侧短通道人流拥挤的状况:人流对冲现象严重,通行压力较大,存在较大的安全隐患。该方案将原来南北两条双向换乘通道改为单向通道,形成“顺时针”单向换乘的客流组织方式,减少不同方向的客流对冲。

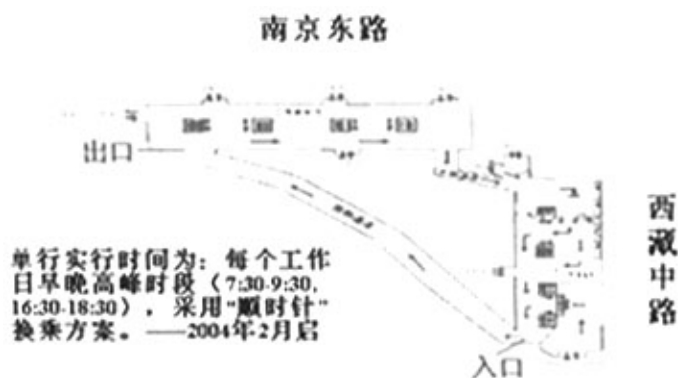


图 3.1 人民广场地铁站通道“顺时针”换乘示意图

那么究竟“顺时针”换乘方案能否有效改善通行的状况？通道内的行人通行状况如何？我们通过行人交通实测、分析有效数据，建立相关模型，进行线性稳定性分析以及进一步的数值模拟，得到了通道内的密度波的传播速度。

交通实测安排在早晚高峰时刻进行，每次安排两组人员分别在实测通道——南侧长通道的入口和出口进行数据采集。一组实测的时间为 20 分钟，每组人员同时开始计时计数，统计每 5 秒经过“实测线”的人数（可看成是每 5 秒的行人流量），同时记录下相关的实测值。采集所得的数据经过有效性分析和筛选，就可以作为建模和验证的依据。

§ 3.4 模型及其线性稳定性分析

§ 3.4.1 宏观模型的建立

1955年，Lighthill和Whitham^[24]发表了交通流理论的里程碑式的论文——《论运动学波》，首次正式提出了连续模型的概念。同一时期，Richards也独立提出了类似的模型。这两个相似的模型一并被称为LWR模型。这个模型用流体力学中的连续方程表示车辆数目守恒，并以速度、密度关系（速密关系）或流量、密度关系（流密关系）使连续方程封闭。

LWR模型将交通流比作连续介质，建立车辆守恒的连续方程^[24]：

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = 0 \quad (3.1)$$

其中， k 为车流密度， u 为车流平均速度，车流量 $q = ku$ 。并用平衡车流状态中车流密度 k 和平均速度 u 之间的关系：

$$u(x, t) = u_e(k(x, t)) \quad (3.2)$$

来封闭方程。

LWR模型可以模拟交通激波的形成和堵塞疏导等非线性特性，但是该理论认为速密关系始终处于平衡状态，1971年，为了解决LWR模型不能够模拟非平衡态交通行为这一问题，Payne^[75]提出了新的动力学方程，并于1979年改写为：

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} = -\frac{c_0^2}{k} \frac{\partial k}{\partial x} + \frac{1}{\tau} (u_e - u) \quad (3.3)$$

其中，(3.3)式右边第一项为压力项，反映驾驶员对前方交通状态改变的反应过程。

(3.3)式右边第二项为驰豫项,描述车流速度在驰豫时间 τ 内达到平衡速度的过程。各参数取值为:阻塞密度 $k_j = 143 \text{ veh/km/lane}$, 畅行速度 $u_f = 88.5 \text{ km/h}$, $\tau = 25 \text{ s}$, $c_0 = 56 \text{ km/h}$ 。(3.1),(3.3)和Payne提出的平衡函数构成了一阶两方程双曲型方程组动力学模型——Payne模型。

我们把Payne模型和相应参数作适当地改变,应用到通道行人交通的模拟中。采用“顺时针换乘”方案后,通道内的人流为单向,所以可以简化为一维模型。基本模型方程为:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = \pm v \quad (3.4)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} = -\frac{c_0^2}{k} \frac{\partial k}{\partial x} + \frac{1}{\tau} (u_e - u) \quad (3.5)$$

方程(3.4), (3.5)中, $u(x, t)$ 为通道内行人的速度。 $k(x, t)$ 为通道内的行人流密度, $q(x, t)$ 为通道内的行人流量。与机动车不同,我们取行人的各参数为:阻塞密度 $k_j = 5.86 \text{ ped/m}^2$, 畅行速度 $u_f = 1.34 \text{ m/s}$, 驰豫时间 $\tau = 2 \text{ s}$ (其中 k_j , u_f 的取值参考AlGadhi^[76], τ 的取值根据作者实际观测确定), 密度波传播速度 c_0 是要确定的值。

如果要对建立的模型进行数值模拟,就必须考虑平衡函数 u_e 的选取,一般情况下,一维通道行人的速密关系^[76]为Greenshields速密关系,形式为:

$$u_e = u_f (1 - k/k_j)$$

但我们知道, Greenshields速密关系适合描述低密度的情况, 作者认为, 一维情况下, 可以用Lee平衡函数来描述行人流, 形式为

$$u_e = u_f \frac{1 - k/k_j}{1 + E(k/k_j)^\theta}$$

其中, $E=100$, $\theta=4$ 。

车辆流理论中有十余种平衡函数, 分别用于描述不同状态。行人流中具体采用什么形式的速密关系最合适, 还没有定论, 不过最终只有通过相应的交通实测数据才能逐步得到准确描述行人流的平衡函数。为了简化模型, 在本章的数值模拟中, 作者取 $u_e = u_f = 1.34 \text{ m/s}$ 。

为什么Payne模型可以用于行人流的建模呢？我们知道，在车辆流中，Payne模型和管流模型中的一个特征速度要大于车流平均速度。这就表明，车辆尚未达到的前方，后车扰动已经达到，即后车的扰动会影响前车的行为。但车流是各向异性的，车辆只能对来自前方的扰动产生反应而不受后车行为的影响，所以这是不符合实际的，它违背了交通流的基本原则。而且这会导致了在某些条件下，车辆出现倒退的现象，而车辆流规定了不能倒退这一基本规则。行人流则不同，在规则和演化中行人是允许倒退的，也就是说行人流在本质上说是各向同性的，在考虑行人特征的情况下，改变模型参数的取值，采用Payne模型还是有一定的合理性的。

§ 3.4.2 线性稳定性分析

对于宏观行人交通流模型，我们有必要进行线性稳定性分析。参照^[4]针对类似流体动力学方程所做的稳定性分析，我们分析上面建立的模型。假设 k_0 和 $u_0 = u_e(k_0)$ 为(3.4)，(3.5)的稳态解，(3.4)，(3.5)的扰动解是

$$k = k_0 + \xi(x, t), \quad u = u_0 + \eta(x, t) \quad (3.6)$$

其中是 $\xi(x, t), \eta(x, t)$ 是稳态解 (k_0, u_0) 的小扰动。由(3.6)可得 k, u 的一阶偏导：

$\partial k / \partial t = \xi_t, \quad \partial k / \partial x = \xi_x, \quad \partial u / \partial t = \eta_t, \quad \partial u / \partial x = \eta_x$ 将(3.6)代入(3.4)，(3.5)，对所得方程在 k_0, u_0 处进行 Taylor 展开，并忽略 $\xi(x, t), \eta(x, t)$ 的高阶项，可以得到

$$\xi_t + u_0 \xi_x + k_0 \eta_x = 0 \quad (3.7)$$

$$\eta_t + u_0 \eta_x = \frac{u'_e(k_0) \xi - \eta}{\tau} + \left(-\frac{c_0^2}{k_0}\right) \xi_{xx} \quad (3.8)$$

对(3.8)两端求 x 的偏导，得到线性方程：

$$\eta_{tx} + u_0 \eta_{xx} = \frac{u'_e(k_0) \xi_x - \eta_x}{\tau} + \left(-\frac{c_0^2}{k_0}\right) \xi_{xxx} \quad (3.9)$$

由(3.7)可得

$$\eta_x = -(\xi_t + u_0 \xi_x) / k_0 \quad (3.10)$$

对(3.10)式两边对 x, t 分别求导, 可得

$$\eta_{xx} = -(\xi_{tx} + u_0 \xi_{xx}) / k_0, \quad \eta_{tx} = -(\xi_{tt} + u_0 \xi_{tx}) / k_0 \quad (3.11)$$

将(3.10), (3.11)代入(3.9)得

$$\xi_{tt} + (2u_0)\xi_{tx} + (u_0^2 - c_0^2)\xi_{xx} = -\frac{1}{\tau}(\xi_{tt} + (u_0 + k_0 u'_e(k_0))\xi_x) \quad (3.12)$$

(3.12)的算子形式为

$$(\partial_t + c\partial_x)\xi = -\tau[(\partial_t + c_1\partial_x)(\partial_t + c_2\partial_x)]\xi \quad (3.13)$$

其中,

$$c = u_0 + k_0 u'_e(k_0), \quad c_{1,2} = u_0 \mp c_0 \quad (3.14)$$

令 $\xi(x, t) = \xi_0 \exp i(\gamma \cdot x - \omega \cdot t)$, 代入(3.15)可得

$$i(-\omega + c\gamma) = \tau[(-\omega + c_1\gamma)(-\omega + c_2\gamma)] \quad (3.15)$$

将 $\omega = a + bi$ 代入(3.15), 并分离实部和虚部, 可得

$$b - \tau(a^2 - b^2 - (c_1 + c_2)a\gamma + c_1c_2\gamma^2) = 0 \quad (3.16)$$

$$c\gamma - a - \tau(2ab - (c_1 + c_2)b)\gamma = 0 \quad (3.17)$$

当 γ 给定后, 如果 $\text{Im } \omega \leq 0$, 则初始恒定状态是稳定的; 反之, 初始恒定状态是不稳定的。考虑中性状态, $b=0$, 由(3.17)可得

$$a = c\gamma \quad (3.18)$$

将(3.18)代入(3.16), 可得

$$c^2 - (c_1 + c_2)c + c_1c_2 = 0 \quad (3.19)$$

方程(3.19)的解为 $c = c_1, c_2$ 。当初始恒定流速太大时, 初始状态显然不稳定, 故线性稳定性条件要求

$$c_1 < c < c_2 \quad (3.20)$$

即

$$-c_0 < k_0 u'_e(k_0) < c_0 \quad (3.21)$$

线性稳定性条件简化为:

$$|k_0 u'_e(k_0)| < c_0 \quad (3.22)$$

§ 3.5 数值模拟

数值模拟的目标是：通过实测、参数识别和数值模拟确定密度波传播速度 c_0 的值。由于所测地铁通道没有支路（或匝道），故取源汇项 $\pm v=0$ ，通道的长度近似取为 200 米。

把方程改写为向量的形式以便于差分离散：

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{f}}{\partial x} = \bar{s}$$

$$\text{其中: } \bar{u} = [k, q], \bar{f} = [q, (\frac{q^2}{k} + P)], \bar{s} = [\pm v, \frac{(ku_e - q)}{\tau} \pm vu^\pm]$$

差分格式采用二阶精度的 Lax-Wendroff 格式：

$$u_{j+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} = \frac{1}{2}[u_j^n + u_{j+1}^n - \frac{\Delta t}{\Delta x}(f_{j+1}^n - f_j^n) + \frac{\Delta t}{2}(s_j^n + s_{j+1}^n)] \quad (\text{预测})$$

$$u_j^{n+1} = u_j^n - \frac{\Delta t}{\Delta x}[f_{j+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} - f_{j-\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}}] + \frac{\Delta t}{2}[s_{j+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} + s_{j-\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}}] \quad (\text{校正})$$

假设实测中每 5 秒内的行人流是均匀的，从而得出初始状态下通道内的密度分布。见图 3.1，入口处使用开放边界条件(完全采用实测的数据)，而在出口处使用自由出流的条件。另外，我们在人民广场的实地观察到，通道的出口处一般处于畅通的状态，故采用自由出流的边界条件较为合理。

据此，可以通过入口处的行人流量模拟出在不同密度波速的情况下出口处的行人流量，然后与实测的数据进行比较，当相关性达到最大时便认为此时的密度波波速为真实的波速。以实测数据作为边界条件，模拟通道内的密度分布，并计算出密度波的传播速度。

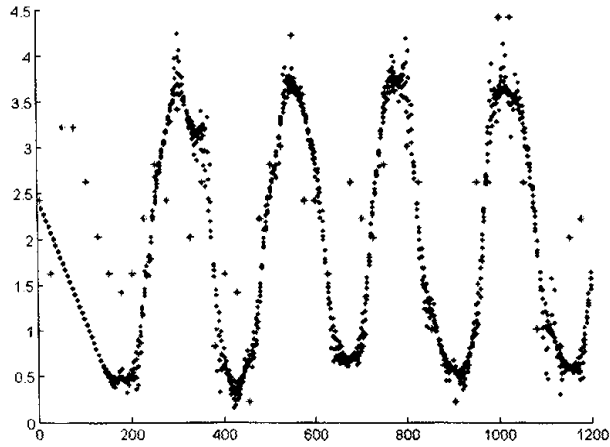


图 3.2 模拟流量和实际流量比较

图 3.2 中，“+”为出口处实测数据，即行人流量；曲线为模拟得到的出口处流量，共有 5 组，分别对应不同的密度波传播速度 c_0 ，分别为 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0。一般来说， c_0 不会大于畅行速度 1.34m/s。从图中可以看出，模拟的结果与实际流量符合得较好。我们进行相关性分析，判断在 c_0 取何值时，相关性达到最大，据此确定密度波传播速度 c_0 的取值。

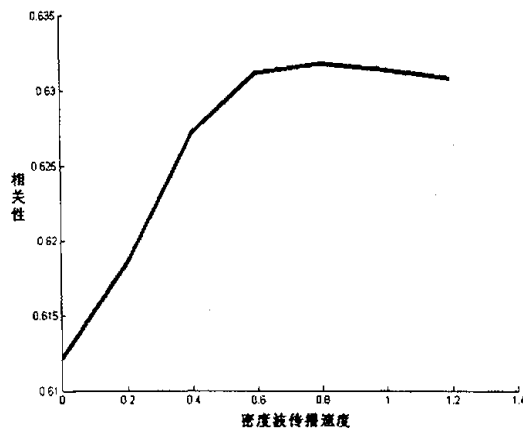


图 3.3 密度波传播速度—相关性图

图 3.3 中，横轴为密度波传播速度，纵轴为相关性。表 3.1 为与图像对应的

值。从表中可以看出相关性在密度波传播速度为 0.8m/s 时达到最大,可判断, c_0 取值 0.8 较为合适。

c	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2
相关性	0.6121	0.6185	0.6272	0.6312	0.6318	0.6314	0.6308

表 3.1 不同 c_0 值的相关性

所以,可以断定在此特定条件下,通道内密度波速应该在 0.8m/s 左右。但由于实测数据系通道行人密度处于较低水平时测得,模型亦做了一定的简化,所以这个结果有待进一步考察和验证。

§ 3.6 小结

在“顺时针”换乘实施一段时间后,的确大大缓解了北侧通道的压力,2005年起已经全日实行单向换乘方案。“顺时针”换乘的最大优点在于减少了双向行人的相互干扰,导致通道行人速度的减缓。不利因素则主要在于南侧通道长度过长(长度为大致为短通道的4到5倍),造成经常有行人违反规定逆向进入短通道,而且由于北侧短通道长度对减缓客流分散的作用有限,最近常常发生高峰时段地铁客流滞留车站的情况(如果乘客减慢通过北侧通道的时间,将有利于缓解这一现象)。

人民广场的南侧通道行人流密度相对较小,通道内通常接近于畅行的状态。值得注意的是人流密度比较小时,改变密度波传播速度,相关性的改变不是很明显,这从图 3.3 中可以看出。

进一步的工作:考虑到我们模型的适用性,今后实测时要进一步选择合适的测量地点,初步定在北侧短通道,该通道人流多数处于饱和状态,这样也许能得出更合理、精确的结果。

第四章 地铁行人交通流的元胞自动机模型

本章采用元胞自动机模型模拟地铁通道内的行人运动。在周期性和开放性边界条件下,得到了行人运动的基本图。在开放边界下模拟了地铁通道内的行人单向运动。模拟过程中分别采用了随机串行和并行更新规则,并对数值模拟结果进行了比较和分析。

§ 4.1 行人交通流元胞自动机模型

元胞自动机模型广泛地应用于车辆交通流的模拟中,很多学者认为行人交通流同样可以用 CA 理论来建立合适的模型。在车辆流 CA 模型发展的基础上, Fukui^[29], Nagatani^[56], Tajima^[58,59], 董力耘和戴世强^[43], Burstedde、Kirchner 和 Schadschneider^[31], Blue 和 Alder^[5-7]等学者建立了不同的行人 CA 模型(见第一章绪论)。

对于高密度、无序的交通现象难以用基于方程的模型来刻画,但 CA 模型可以通过设立简单有限的规则来捕捉个体间的相互作用。Blue 和 Adler^[22]认为,行人交通流非常适宜采用 CA 模型,因为实际行人通常都会频繁调整步行速度和加速度。Schreckenberg 和 Nagel^[27]也偏爱 CA 模型,并指出只要考虑行人交通流的一些特性,同样能够建立合适的行人交通流的 CA 模型。行人 CA 模型的建模目标就在于确定必要的决定行人运动的各种因素,制定合适规则,建立科学的模型,使模拟结果接近于实际情况。

在第三章中,我们用流体力学模型来模拟了开放边界条件下地铁通道内行人运动的情况,但流体力学模型没有考虑行人之间的相互作用,不能很好地刻画各种状态下行人运动。另外,CA 模型比较简单,模拟效率优于流体力学模型,而且能够进行并行计算。因此,本章我们应用 CA 模型,充分考虑了行人间的相互作用,对周期边界和开放边界条件下通道行人运动进行了模拟。

目前,在 CA 模型的模拟中,基本上在周期性边界条件下进行模拟,常见的有两种更新规则:随机串行更新规则(如 [52-55]等);并行更新规则(如[22,43]等)。在现有的研究中,对采用不同的更新规则的理由,以及不同的更新规则得

到的结果的区别, 缺乏深入研究和对比。为了尝试解答这些问题, 本章将针对不同边界条件和更新规则下的数值模拟结果进行比较和分析。

§ 4.2 模型的建立

本章建立的模型分别针对周期边界条件和开放边界条件下通道行人运动。一般来说, 模型中元胞大小主要通过行人水平投影面积的统计平均值来确定。世界各国在此方面的统计值不尽相同, 如前苏联为 0.113 m^2 , 奥地利为 $0.1458\sim 0.1862 \text{ m}^2$, 而德国为 $0.12\sim 0.19 \text{ m}^2$ 。本章模型中取元胞大小为 $0.4\text{m}\times 0.4\text{m}$, 即每个元胞的面积为 0.16 m^2 , 每个元胞中能且仅能容纳一个行人。模型定义在 $W\times L$ 的长方形通道, W (Width)为通道宽, L (Length)为通道长。根据实际地铁通道的情况, 选取 $W=20$, $L=500$ (即相当于实际通道长宽, 其中宽为 8m , 长为 200m)。

另外, 单位时间步长的选取决定了模型中通道行人疏散的速度, 作者通过参考国内外相关文献中行人速度的统计值来选取单位时间步长, 同时结合在地铁通道内实际考察、观测来最终确定。模型数值模拟计算的时间步长为 5000 步, 根据实测数据, 针对地铁通道内行人通行情况, 取地铁通道内行人的疏散速度为 1.33m/s 。本章把单位时间步长设成为 0.3 秒, 所以图中速度为 1.0 , 则对应于现实中的速度 $=1.0\times 4/3 \text{ m/s}$, 即约为 1.33 m/s 。而密度与现实数值的比较为: 密度 1.0 的情况相当于现实中的 5.86 ped/m^2 , 即达到阻塞密度时, 每平方米约有 5.86 人。

在绪论中提到, 行人的 CA 模型中, 行人流已经相当简化, 但其中的一些重要特征被保留了下来。在通道内行人可以同步移动, 但一定要保证每个格点不能容纳多于一个行人。一般情况下, 行人的直行概率小于 1 , 走在前面的行人如果没有阻碍可以根据平移概率随机“换道”——侧向行走, 那么跟随的行人不得不“换道”或者停止移动, 随着通道行人的不断前移。可以预见, 正是由于这种行人之间的相互作用导致了通道内行人流的各项参数发生变化, 延缓了行人从通道内撤离的时间。在没有特别指出的情况下, 本章行人的侧向平移概率为 0.5 , 即当可以平移时, 向左和向右平移的概率相等。模型中, 每个行人被视为一个无后

退行为的随机走动者，均能以一定的概率向前、向左、向右移动，但不后退。

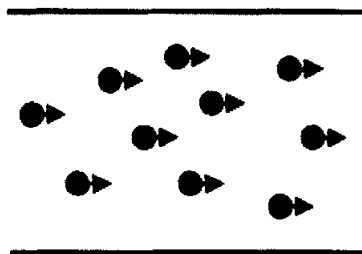


图 4.1 通道内行人示意图

图 4.1 是通道内行人流示意图，行人的动力学模拟主要分以下两种情况：周期边界条件和开放边界条件下的行人运动。本章主要关注的是通道行人流的速度、密度、流量、侧向行走（向左或向右走）概率与通道内行人占有率（覆盖率）之间的关系，同时还考虑了系统尺度对通道中行人疏散的影响。

行人从左端入口进入通道，在正常情况下，总是希望尽快尽可能安全地到达右端疏散出口。在模型中，作为一个随机的步行者，在通道内行人的行走方式^[10]，如图 4.2 中所示，其中，如(2)中有 $P_y = P_y$ ，4.2 右图则说明了在并行更新时处理行人避碰的情况，当行人 B 直行受阻时，可能会与行人 A 有同样的目标格点，此时他们将按照相应规则，根据一定概率进行更新。

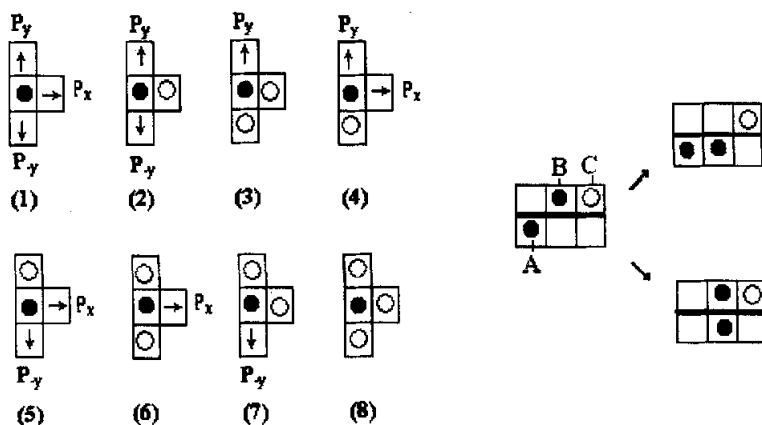


图 4.2 模型中向右走行人可能的行走方式（串行、并行）

本章中，模型中采用的直行概率、平移概率来描述行人运动，并考察了不同

的直行概率和平移概率对通道内行人运动的影响,分别用速密关系图、流量和密度关系图等来展现。

采用如下行人运动规则:两个行人不能同时占据一个格点,如果行人前方没有其他行人,则该行人根据直行概率向前移动一步。如果前方有行人,则根据侧向行走概率向左或向右平移一步,如果左右都有行人,则停止不动。模型还分别用随机串行和并行更新规则运行,得到了略有不同的结果,并加以讨论和分析。

模拟分析中,采用了不同的更新规则,说明如下:

- ① 随机串行更新规则:在单个时间步内,行人的移动规则采用随机顺序,并且每个行人仅能更新移动一次;先移动行人会对后移动行人有一定影响。
- ② 并行更新规则: $t+1$ 时刻整个系统的状态由 t 时刻的状态和 $W \times L$ 的均匀分布随机矩阵 R 共同确定,即根据 t 时刻的运动状态确定 $t+1$ 时刻的可能运动状态,再结合每个网格点的概率值 $R(i, j)$ 确定下一时刻的运动状态。

§ 4.3 数值模拟

在实际模拟过程中,考虑接近于现实状态,这里选取直行概率分别为0.7, 0.8, 0.9的情况,列出数值模拟的结果。

图表中各参数的说明:下列图表中的行人速度为通道内所有行人的平均速

度: $v = \bar{V} = \frac{\sum_{i=1}^n V_i}{n}$; 通道行人密度为所有行人占有的格点数对通道全部格点数的

的比值 $k = \frac{N_0}{N}$, 其中 N_0 为行人占有的格点数, N 为通道全部格点数; 流量则为

速度和密度的积: $q = vk$ 。相对于直行概率,侧行率定义为所有侧向行走人数对

全部行人数的比值: $R_{sidestep} = \frac{P_s}{P}$, P_s 为侧移人数, P 为全部行人人数。

§ 4.3.1 周期边界条件的数值模拟结果

采用周期性边界条件,即相当于环形通道,初始时刻通道内所有行人以给定密度随机地分布在网格点上,行人按照给定的演化规则进行随机串行或并行更新,最后得到行人流的基本图。

(I) 基本图

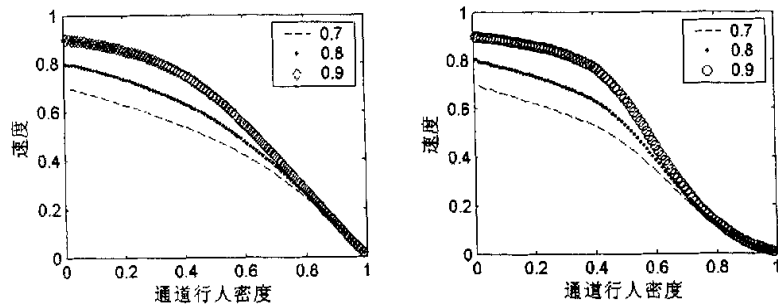


图 4.3.a 平均速度随行人密度的变化曲线 (串行、并行)

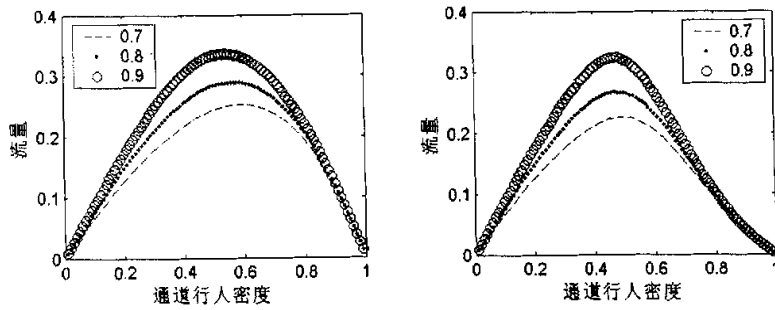


图 4.3.b 流量随行人密度的变化曲线 (串行、并行)

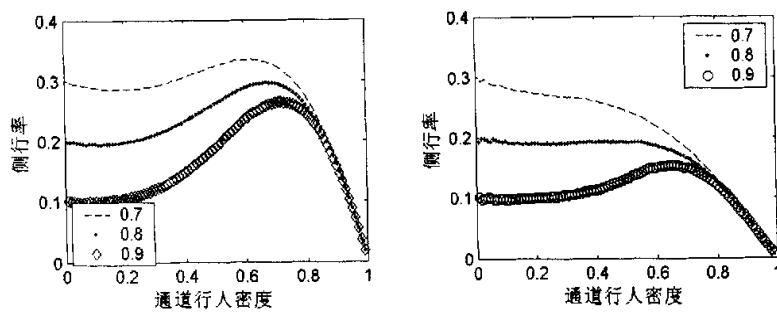


图 4.3.c 侧行率随行人密度的变化曲线 (串行、并行)

(2) 串行更新结果的分析

分析图 4.3a、b、c，可以得出以下结论：

在周期边界条件、随机串行更新规则下，有

一、平均速度随行人密度的增加而逐渐减小。这是由于随着通道内行人密度的增加，行人向前移动的目标格子逐渐被行人占据，行人的直行变得越来越困难，当通道密度趋近于 1.0 时，通道内行人停止移动。

二、流量随行人密度的增加而逐渐增大，且在通道行人密度接近于 0.5~0.6 时达到峰值（对于直行概率为 0.7 的情况，约为 0.33），然后逐渐减小，整个曲线呈现抛物形。该图可以解释如下：流量在通道行人密度较小时（小于 0.5）单调递增，随着密度的不断增加通道内行人越来越多，速度大减，导致总体流量的单调递减。流量的变化图说明通道的流量在密度取某一值时可以达到峰值，是行人通道通行的理想状态。

三、侧行率随行人密度的增加而先减少后增大，到达某一峰值后单调递减趋近于 0。例如，直行概率为 0.7 的情况：当密度小于 0.2 时，行人侧行率随着密度增加而递减至谷值（约为 0.28），然后逐渐增大；当密度约为 0.6 时，侧行率达到峰值（约为 0.33），随着密度的进一步增大而骤然减小。该曲线说明，在密度小于 0.2 时，通道内行人比较稀疏，行人可以选择直行的可能性比较大，造成侧行率有所减少；当密度为 0.6 时，侧行率达到峰值说明，此时直行变得比较困难，部分行人向前移动的目标格子被占据，只能侧向移动，导致了侧行率的增大。

(3) 并行更新结果的分析

分析图 4.4a、b、c，可以得出以下结论：

在周期边界条件、随机并行更新规则下，有

一、平均速度随行人密度的增加而单调递减；这是由于随着通道内行人密度的增加，行人向前移动的目标格子逐渐被行人占据，行人的直行变得越来越困难。图中可以看出，当通道密度大于某值（对于直行概率为 0.7 的情况，约为 0.5）时，通道内行人速度开始大幅度地减少；

二、流量随行人密度的增加而逐渐增大，且会在通道行人密度接近于 0.5 时达到峰值，然后逐渐减小；整个曲线呈现抛物形。该图表明，流量在通道行人密度较小时（小于峰值）单调递增，但随着密度的不断增加（大于峰值），通道内行人

越来越多,速度逐渐减小,导致流量的单调递减,当密度接近于 0 时,通道流量趋近于 0;

三、不同初始边界密度下的侧行率变化不尽相同。当直行概率为 0.9 时,侧行率随行人密度的增加而逐渐增大,在通道行人密度在 0.65 左右达到峰值(约为 0.15),然后骤然减小。当直行概率小于等于 0.8 的情况则不同;侧行率随行人密度的增加单调递减(在密度约为 0.65 之后骤然减小)。

§ 4.3.2 开放边界条件的数值模拟结果

采用开放边界条件,通道出口为任意出流,行人运动规则保持不变。

(1) 数值模拟图

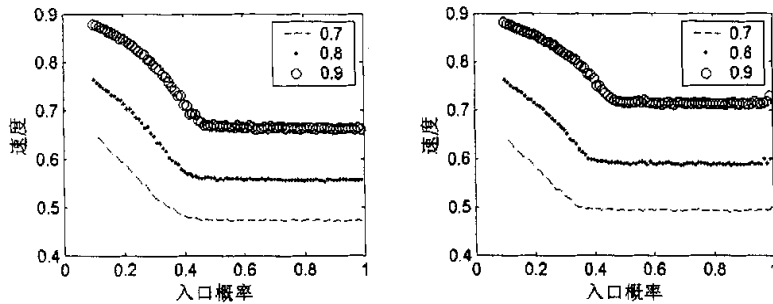


图 4.5.a 平均速度随入口概率的变化曲线(串行、并行)

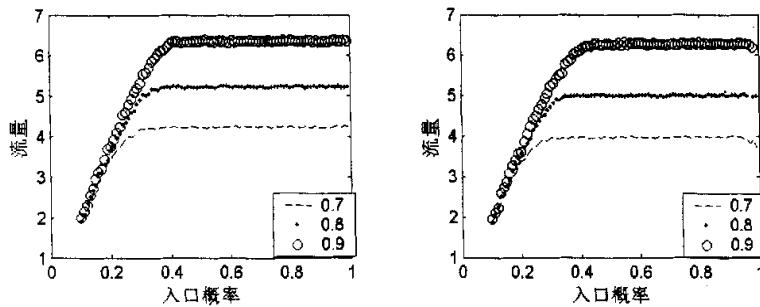


图 4.5.b 流量随入口概率的变化曲线(串行更新)

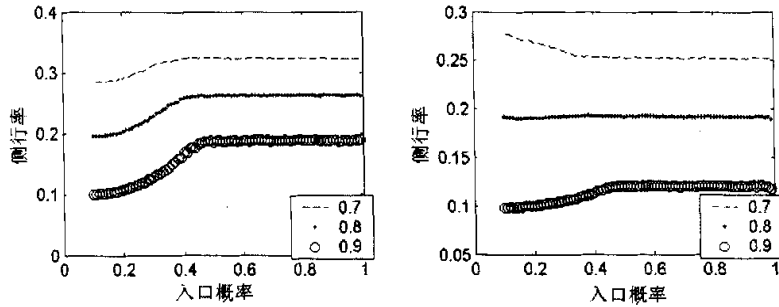


图 4.5.c 侧行率随入口概率的变化曲线（串行更新）

(2) 串行更新的结果分析

在开放边界条件、随机串行更新规则下，有

一、平均速度随入口概率的增加逐渐递减，当入口概率到某一临界值时，行人速度趋于一个稳定值。如图 4.5.a 中直行概率为 0.9 的情况，当入口概率接近于 0.45 时，速度随着密度的增加不再减少，逐渐到达一个稳定值，约为 0.66。

二、流量随入口概率的增加而逐渐增大，当入口概率到某一临界值时，流量趋于一个稳定值。如图 4.5.b 中直行概率为 0.7 的情况，当入口概率接近于 0.3 时，流量随着入口概率的增加不再增大，逐渐到达一个稳定值，约为 4.25。

三、侧行率随入口概率的增加而逐渐增大，当入口概率到某一临界值时，行人速度趋于一个稳定值。如图 4.5.c 中直行概率为 0.8 的情况，当入口概率接近于 0.4 时，流量随着入口概率的增加不再增大，逐渐达到一个稳定值，约为 0.26。

以上说明在开放边界、串行更新规则下，通道出口为任意出流，在入口概率较小时，行人基本都可以完成直行的要求。当入口概率增大时，单位时间内进入通道的行人数量开始增加，行人因为前方障碍物（行人）增多，直行能力逐渐减弱，速度随之递减；当入口概率增大到某一临界值时，速度到达一个稳定值；入口概率在一定程度上表征了单位时间进入通道的行人数量，当入口概率较小时，流量随着入口概率的增大逐渐增大，当通道行人达到一定数量，通道外行人难以进入通道，此时流量不再随着入口密度的增加而增大，逐渐趋于一个稳定值；侧行率的变化趋势和流量有着相似性，当入口概率较小时，侧行率随着入口概率的增大而逐渐增大，因为此时通道内行人数量较小，行人有较大概率选择侧行，当入口概率达到某值时，通道内行人数量到达某一较高值，所以行人的侧行率不再增

大，并逐渐趋于一个稳定值。

(3) 并行更新的结果分析

在开放边界条件、随机并行更新规则下，有

一、平均速度随入口概率的增加逐渐递减，当入口概率到某一临界值时，行人速度趋于一个稳定值。如图 4.6.a 中直行概率为 0.7 的情况，当入口概率接近于 0.35 时，速度随着密度的增加不再减少，逐渐到达一个稳定值，约为 0.49。

二、流量随入口概率的增加而逐渐增大，当入口概率到某一临界值时，流量趋于一个稳定值。如图 4.6.b 中直行概率为 0.8 的情况，当入口概率接近于 0.35 时，流量随着入口概率的增加不再增大，逐渐到达一个稳定值，约为 5.0。

三、侧行率随入口概率的变化呈现多种可能。如图 4.6.c 中直行概率为 0.8 的情况，侧行率随入口概率的增加基本维持在一个稳定值，约为 0.19；而直行概率为 0.9 的情况，当入口概率较小时，侧行率随入口概率增大而递增，当入口概率达到某一临界值（约为 0.46）时，侧行率达到一个稳定值（约为 0.12）；而直行概率为 0.7 的情况，当入口概率较小时，侧行率随入口概率增大而减小，当入口概率达到某一临界值（约为 0.35）时，侧行率达到一个稳定值（约为 0.25）。

以上说明在开放边界、并行更新规则下，速度、流量随入口概率的变化和串行更新规则的情况相近。侧行率的变化则表明，并行更新时，当直行概率较大（如取为 0.9）时，通道前方的行人可以顺利地走出通道，后方行人侧行的可能性会增大，侧行率会有小幅的增大。而直行概率较小（如取 0.7）时，行人本来就具有一定的侧行率，随着入口概率增加，通道内行人数量的增加，侧行可能反而会有小幅的减小。

§ 4.4 结果的比较和分析

说明：下列图中“rp” (Random Sequential Update, Periodic Boundary Condition) 和 “pp” (Parallel Update, Periodic Boundary Condition)代表周期性边界条件下，分别采用串行更新规则和并行更新规则得到的模拟结果；“ro” (Random Sequential Update, Open Boundary Condition)和 “po” (Parallel Update, Open Boundary Condition)则代表开放性边界条件下，分别采用串行更新规则和并行更新规则得到的模拟结果。

§ 4.4.1 与 Blue 结果的比较

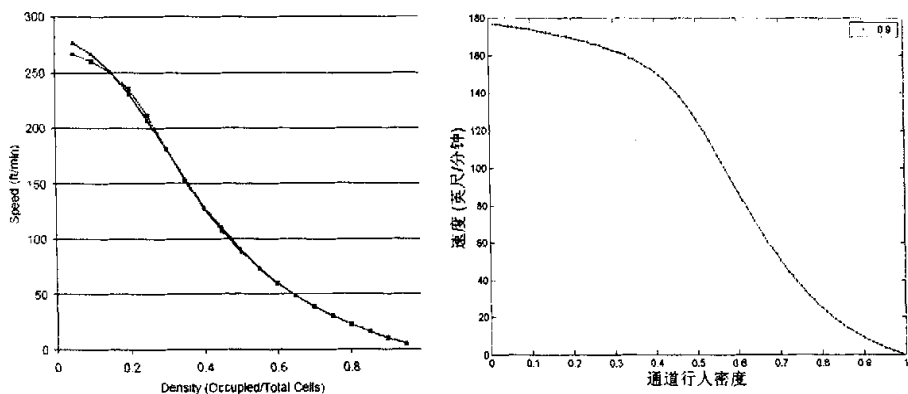


图 4.6 速度—密度关系图的比较（同为周期边界条件、并行更新）

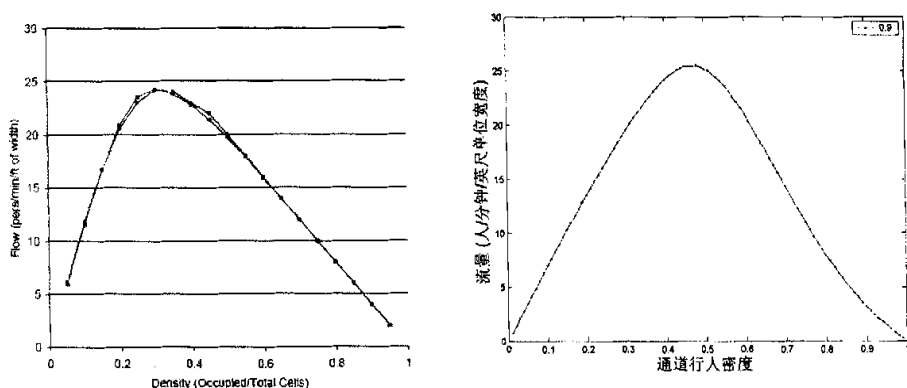


图 4.7 流量—密度关系图的比较（同为周期条件、并行更新）

由图 4.6 和图 4.7 可见，在同为周期性边界、采用并行更新规则、入口概率为 0.9 的情况下，本章建立的模型的数值模拟结果和 Blue 的结果^[6]从演化趋势上是一致的（注：Blue 图中 2 条曲线来自 2 个不同模型的结果）。因为模型的运动规则有所不同，以及针对的通道尺度不同（Blue 采用长宽=100×10）等等，造成结果有所差别。

另外需要指出的是，我们所得到的通道所能达到的最大密度与 HCM^[41]的通道最大密度 25.0ped/min/ft-of-width 非常接近，这从一定程度上证明了模型的合理性。

§ 4.4.2 周期边界下的比较

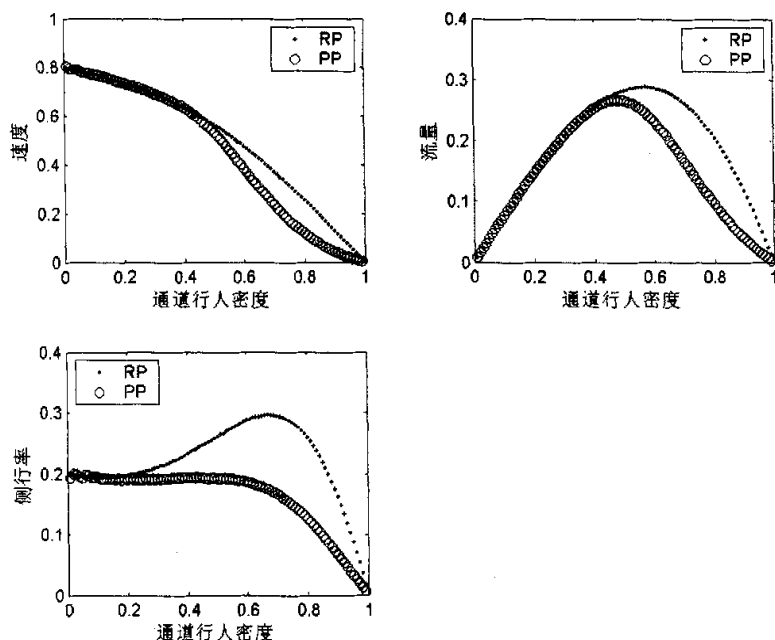


图 4.7 速度变化图 a、流量变化图 b、侧行率变化图 c 的比较 (rp vs. pp)

图 4.7.a、b、c 说明，在周期边界条件下，采用不同的更新规则会得到不同的结果。

从图 4.7.a 来看，在通道密度较小时，在两种更新规则下的行人速度变化趋势几乎是一致的，当密度超过一定值（0.4 左右），行人冲突的情况会不断增加，因为并行更新规则考虑了行人发生冲突的情况，所以在数值模拟中就体现为通道行人速度有加快下降的趋势。同时，并行更新规则下流量在密度为 0.5 左右就达到峰值（0.25 左右），而串行更新规则下流量在密度为 0.6 附近达到峰值（0.28 左右），虽然最终到达的流量差别并不大，但这也反映了是否考虑行人冲突会给流量变化带来相应的影响（见 4.7.b）。

图 4.7.c 中串行更新规则下，侧行率随行人密度的增加而先减少后增大，到达某一峰值后单调递减趋近于 0，说明密度较小时，通道内行人比较稀疏，行人侧向运动较少，当密度逐渐增大时，大多数行人向前移动的目标格子被占据，只能侧向移动，导致了侧行率的增大。而并行更新规则下，根据 t 时刻的运动状态

确定下一时刻的可能运动状态，充分考虑了行人可能出现的冲突情况，所以侧行率会随着密度的增加而逐渐递减。

§ 4.4.3 开放边界下的比较

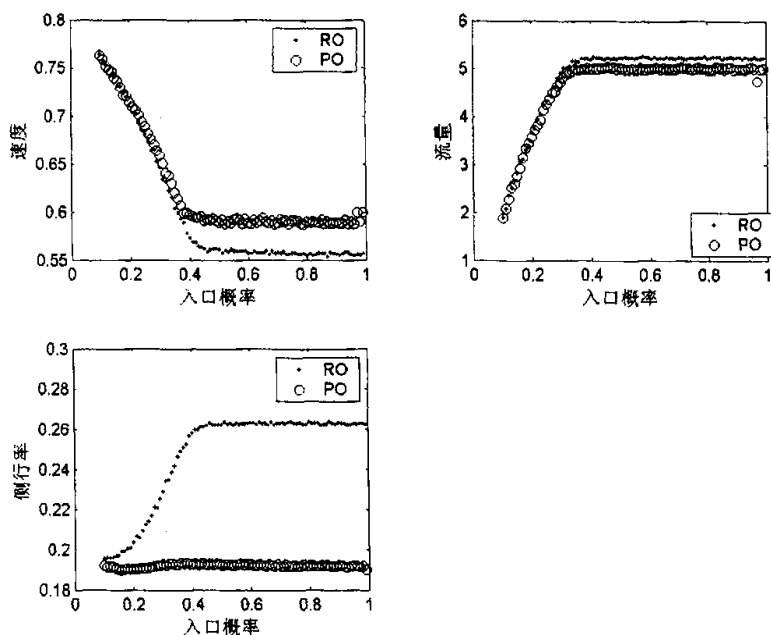


图 4.8.a 速度变化图 a、流量变化图 b、侧行率变化图 c 的比较 (rp vs. pp)

图 4.8.a、b、c 说明，在开放边界条件下，采用不同的更新规则会得到不同的结果。

从图 4.8.a 来看，在通道密度较小时，在两种更新规则下的行人速度变化趋势比较接近，当密度超过一定值（接近 0.4），行人速度趋于稳定，两种更新规则分别到了不同的稳定值，造成这一差别的原因是并行更新规则考虑了行人发生冲突的情况，体现为通道行人速度降幅稍小，速度最终稳定在 0.59 附近；而串行更新规则下，速度最终稳定在 0.56 附近。同时，并行更新规则下流量在密度较小时，演化趋势和串行更新时比较相似，在 0.35 左右逐渐到峰值，并趋于稳定，并行更新规则下流量最终趋于 5.0，而串行更新规则下流量最终趋于 5.3，虽然最终到达的流量差别并不大，这也反映了是否考虑行人冲突会给流量变化带来相应的影响（见 4.8.b）。

图 4.8.c 中串行更新规则下, 由于不考虑行人冲突, 行人侧行率随着通道密度增加而增大, 并在密度取 0.4 附近达到峰值 0.26, 并趋于稳定。而并行更新规则下, 根据 t 时刻的运动状态确定下一时刻的可能运动状态, 充分考虑了行人可能出现的冲突情况, 所以侧行率会随着密度的增加基本处于稳定值 0.19 附近。

§ 4.5 小结

本章通过将所建立模型得到的数值模拟结果和 Blue 及 HCM 中相关结果和标准的比较, 验证了模型的合理性。

通过对周期性和开放性边界条件下, 分别采用随机串行规则和并行更新规则的数值模拟结果进行分析可以得出: 采用不同的更新规则将得到不同的结果。其中造成结果差异的原因是多方面的:

1) 随机串行规则通过规避行人冲突(碰撞、重叠等情况), 在每个时间步随机允许行人依次进行随机更新, 目的是在总体上实现行人运动“并行更新”的效果。

2) 并行更新规则充分考虑行人冲突, 制定了相应的运动规则来分离可能出现的冲突情况, 行人可以根据给定的概率来决定下一时刻的运动, 这是造成和随机串行更新规则的结果差别的根本原因。

3) 数值模拟得到的在周期边界下, 采用并行更新的结果和 Blue 的结果相比, 演化趋势几乎是一致的。得到的通道所能达到的最大密度与 HCM^[41]的通道最大密度 25.0ped/min/ft-of-width 非常接近, 这都从一定程度上证明了模型的合理性。

4) 要判断到底随机串行更新规则和采用并行更新规则孰优孰劣, 唯有通过细致准确的行人通道交通实测, 取得科学的数据来验证。根据我们的实测和研究经验, 针对通道行人流采用并行更新规则能够更好地捕捉行人运动的特征, 但具体哪种更新规则更合适, 有待进一步的交通实测加以验证, 作者将今后的工作中继续加以研究。

第五章 结论和展望

§ 5.1 本文工作总结和主要创新

行人交通是城市交通研究的重要对象。

弄清我国城市行人交通流的机理问题,深入探讨行人交通的运行规律,建立新型的行人交通流理论已迫在眉睫。因此,研究我国城市中的行人交通,对于科学地预防事故的发生以及指导交通设施规划和设计具有重要理论价值和实际意义。

基于实际的交通观测,本文利用交通流理论中的宏观和微观方法(即流体力学模型和元胞自动机模型)对行人交通流开展研究,对地铁通道的行人交通进行了数学建模以及数值模拟,分析了行人交通流的复杂动力学行为,本文的主要工作如下:

(1) 选取上海市的部分繁华行人区域和场所,采用人工测量和摄像技术相结合的手段进行了大量的行人交通观测,掌握了各种状态下行人交通流的主要特征。对实测获取的大量数据进行处理和分析,得到了我国大城市行人流的重要参数。同时得到了一些重要结论:我国城市行人的步速和步频大致成 Gauss 分布;性别和年龄差异会造成男女行人步行特征的不同,这些研究结果与 Henderson 的研究成果有一致性;我们还指出了步频是重要的特征参数之一。

(2) 以上海市人民广场地铁换乘通道的行人流作为研究对象,实际观测并细致分析了早晚高峰和一般状态通道中的行人运动,从车辆的流体动力学模型出发,在考虑行人流特性的情况下,采用了适于描述一维行人交通的流体动力学模型,根据实测数据进行数值模拟,得到了地铁通道内行人流密度波的传播速度,并对模型做了线性稳定性分析。

(3) 用元胞自动机模型模拟地铁通道内的行人运动,在周期性边界条件下,得到了行人运动的基本图,在开放边界下模拟了地铁通道内的行人单向运动。通过对周期性和开放性边界条件下,分别采用随机串行规则和并行更新规则的数值模拟结果进行分析可以得出:采用不同的更新规则将得到不同的结果,要判断更新规则孰优孰劣,唯有通过细致准确的行人交通实测,取得科学的数据来验证。

根据我们的实测和研究经验,针对通道行人流采用并行更新规则能够更好地捕捉行人运动的特征,但具体应该采用哪种更新规则,有待进一步的交通实测加以验证,作者将今后的工作中进一步加以研究。

§ 5.2 行人交通研究展望

20 世纪 90 年代至今,我国陆续有力学界和物理学界的人士投身于车辆交通流理论的研究,他们在元胞自动机模型、流体力学模型和跟车模型的理论研究中,得到了一批新成果,在 *Physical Review E*、*Transportation Research B* 等重要国际期刊发表了一批有影响的论文,开始进入国际行列。

在行人交通研究中,上海大学的交通流课题组较早开展了这项研究。但与国际上蓬勃发展的态势相比,国内对交通科学的研究起步晚,投入不足,高水平研究成果与发达国家和地区比较,我国仍存在很大差距。在行人交通研究方面,我国更是远远落后于国外相关研究。例如,德国的 Helbing 在 2000 年和 2002 年在“*Nature*”先后发表了两篇关于行人研究的文章,而国内学者则尚无在相关前沿性期刊发表的经历。

国内目前关于开展的交通流动力学理论研究,密切结合中国国情还不够,特别是我国城市的平面低速混合交通是世界上最复杂的交通形态,存在大量的统计物理和非线性动力学的基本科学问题有待解决。

值得肯定的是,行人交通研究,它不仅具有重要的理论研究意义,而且与人们极为关注的如何治理日益严重的城市交通堵塞问题紧密相关,必将成为众多学者不断关注的研究热点之一。

§ 5.2.1 关于行人交通实测

在本文中,作者所在课题组十分强调交通实测对研究工作的重要性。通过精心准备、有效执行的交通调查,我们得到了许多宝贵的原始数据,为科研工作提供了有利支撑。行人交通的研究离不开行人数据采集,只有通过长年累月、坚持不懈地采集详细的行人交通数据,才能真正了解行人交通的特性,为进一步建立科学、合理模型打下坚实的基础。在国外学者的研究中,同样强调了进行交通实测的重要性。为了得到有效数据,不仅展开行人调查,甚至还招募志愿者开展有针对性的行人实验。

我们认为,城市中的行人交通呈现复杂多变的性态,确定行人交通特征的因素也是多种多样的,要彻底搞清楚行人交通的机理需要结合众多学科所长,在交

通实测的基础上建立行人交通的模型,进行数值模拟和实验加以验证,才是取胜之道。

§ 5.2.2 关于行人交通流建模

现在交通流所研究的对象可分为机动车和非机动车,非机动车又包括自行车和行人交通。众所周知,行人流比车辆交通流更为复杂,建立合适的行人交通流模型一直是这一领域研究中的焦点问题。现有的行人交通流模型有一部分是由车辆交通流模型改进而来,在建立行人流模型的时候要充分考虑到行人交通流的特殊性,既考虑和车辆流的“共性”,又考虑其明显的“个性”,这是行人流建模的捷径之一。

此外,行人交通和自行车交通不仅是我国的主要交通方式,也在世界范围内越来越受到重视。以实现行人交通、自行车的通行能力分析和舒适度分析为目标,构造出适合于仿真的自行车、行人交通流模型,并研究机动车、自行车、行人构成的混合交通流的干扰机理,特别是平面交叉口混合交通相互干扰的微观模式和发生机制,这将是今后一段时期的行人交通研究方向之一。

该领域拟研究的主要问题包括:

- 1) 建立描述行人交通流的流体力学模型和元胞自动机模型,计及行人交通行为的更大的自主性和灵活性、低速性和随机性;
- 2) 构建适于描述交叉口、广场、大型室内空间、通道的行人交通活动的宏观模型、行人交通路径选择模型以及相应的网络行人流的交通模型;
- 3) 非机动车(包括自行车和行人)干扰机动车通行能力的模型
- 4) 建立高楼大厦、地铁通道或大型人群聚集场所发生灾难(如火灾、地震、爆炸等)时的人员合理逃生、疏散模型,考虑采用元胞自动机模型和流体动力学模型,特别要细致分析其中的自组织行为。

参考文献

- [1] 中国公路学会《交通工程手册》编委会, 交通工程手册, 人民交通出版社, 1998:583-671
- [2] Teknomo K., *et al.*, Tracking System to Automate Data Collection of Microscopic Pedestrian Traffic Flow, Proceeding of 4th Eastern Asia Society For Transportation Studies, Hanoi, Vietnam, 2001, 3(1):11-25
- [3] Fruin J.J., Designing for Pedestrians: A Level of Service Concept. Highway research Record, 1971, 355:1-15
- [4] Fruin, J.J., Pedestrian Planning and Design, Metropolitan Association of Urban Designers and Environmental Planners, Inc. New York, 1971
- [5] Blue V. J. and Adler J. L., Emergent Fundamental Pedestrian Flows from Cellular Automata Microsimulation, Transportation Research Record, 1998, 1644:29-36
- [6] Blue V. J. and Adler J. L., Cellular automata microsimulation for modeling bi-directional pedestrian walkways, Transportation Research Part B, 2001, 35(3): 293-312
- [7] Blue V. J. and Adler J. L., Bi-Directional Emergent Fundamental Pedestrian Flows From Cellular Automata Microsimulation, Transportation and Traffic Theory, Proceedings of the 14th International Symposium on Transportation and Traffic Theory (14th ISTTT Conference), ed. A. Ceder, Pergamon (Jerusalem, Israel), July 20-23, 1999.
- [8] Hoogendoorn S. P., Bovy A., Gas-Kinetic Model for Simulating Pedestrian Flows, Proceedings of the 79th Transportation Research Board, Washington D.C., 2000
- [9] AlGadhi S. A. H. and Mahmassani H., Simulation of Crowd Behavior and Movement: Fundamental Relations and Application, Transportation Research Record, 1991, 1320: 260-268
- [10] Gipps P. G., Simulation of Pedestrian Traffic in Buildings, Schriftenreihe des Instituts fuer Verkehrswesen, 35, Institut fuer Verkehrswesen, Universitaet Karlsruhe, Germany, 1986
- [11] Hankin B. D. and Wright R. A., Case Studies. Op. Res. Quart., 1958, 9: 81-88
- [12] HoeI L. A., Pedestrian travel rates in central business districts, Traffic Eng., 1958, 38:10-13
- [13] Mayne A. J., Some further results in the theory of pedestrians and road traffic (Biometrika), 1954, 41:375-389
- [14] Navin F. D. P. and Wheeler R. J., Pedestrian flow characteristics. Traffic Eng., 1969, 39:30-36
- [15] Older S. J., Movement of pedestrians on footways in shopping streets. Traffic Eng. and Control, 1969, 10:160-163
- [16] 戴世强, 冯苏苇, 顾国庆, 交通流动力学: 它的内容、方法和意义, 自然杂志, 1997, 19(4): 196-201
- [17] Cremer M., May A.D., An extended traffic model for freeway control, Technical Report, UCB-ITS-RR-85-7, Institute of Trans. Studies, Univ. of California, Berkeley, 1985
- [18] Henderson L.F., The statistics of crowd fluids, Nature, 1971, 229: 381-383.
- [19] Henderson L.F., and Lyons D.J., Sexual differences in human crowds motion, Nature, 1972, 240:353-355

- [20] Henderson L.F., On the fluid mechanics of human crowd motion, *Transportation Research*, 1974, 8:509-515
- [21] Henderson L.F. and Jenkins D.M., Response of pedestrians to traffic challenge, *Transportation Research*, 1973, 8, 71-74
- [22] Blue V. J., Adler J. L., Modeling Four-Directional Pedestrian Movements, Presented at the 79th Annual meeting of the Transportation Research Board, and accepted for publication by *Transportation Research Record, Journal of the Transportation Research Board*, January 2000
- [23] Helbing D., Traffic and related self-driven many-particle systems, *Reviews of modern physics*, 2001, 73:1119-1125
- [24] Lighthill M.J., Whitham J.B., On Kinematic Waves. I: Flow movement in long rivers; II: A theory of traffic flow on long crowded roads, *Proc. Royal Soc. A*, 1955, 229: 281-345
- [25] Lovas G.G., Modeling And Simulation Of Pedestrian Traffic Flow, *Transportation Research B*, 1994, 28:429-443
- [26] Helbing D. and Molnar P., Social Force Model for Pedestrian Dynamics. *Physical Review E*, 1998, 51(5): 4282-4286
- [27] Nagel K., Schreckenberg M., A cellular automaton model for freeway traffic, *J. Phys. I (France)*, 1992, 2: 2221-2233
- [28] Biham O., Middleton A.A., Levine D.A., Self-organization and a dynamical transition in traffic flow models, *Phys. Rev. A*, 1992, 46: R6124-R6127
- [29] Fukui M., Ishibashi Y., Traffic flow in 1D cellular automaton model including cars moving with high speed, *J. Phys. Soc. Jpn.*, 1996, 65(6): 1868—1870
- [30] Graham T.L., *et al.*, Qualitative overview of some important factors affecting the egress of people in the hotel fires, *Hospitality Management*, 2000:19-79
- [31] Burstedde C., Klauck K., Schadschneider A., Zittartz J., Simulation of pedestrian dynamics using a two-dimensional cellular automaton, *Physica A*, 2001, 295:507-525
- [32] Pretechenskii V.M. and A.I. Milinski, Planning for foot traffic flow in building, translated from Russian, (Stroiizdat Publishers, Moscow, 1969). Published for NBS, DoC and NSF Washington, D.C., New Delhi: Amerind Publishing Co. Pvt. Ltd, 1978
- [33] Helbing, D., A mathematical model for the behavior of pedestrians, *Behavioral Science*, 1991, 36:298-310
- [34] Helbing D. and Vicsek T., Optimal Self-Organization, *New Journal of Physics*, 1999, 1(13): 1-17
- [35] Gipps P.G. and Marksjo B., A Micro-Simulation Model for Pedestrian Flows, *Mathematics and Computers in Simulation*, 1985, 27:95-105
- [36] Okazaki, S, A Study of Pedestrian Movement in Architectural Space Part 2: Concentrated Pedestrian Movement. *Trans. of A.I.J.*, 1979, .284(36): 101-110
- [37] Okazaki, S, A Study of Pedestrian Movement in Architectural Space Part 3: Along the Shortest Path, Taking Fire, Congestion and Unrecognized Space into Account. *Journal of Architecture, Planning. Environment Engineering. AIJ*, 1979, 285: 137-147
- [38] Okazaki, S and Matsushita S., A Study of Pedestrian Movement in Architectural Space Part 5: A Proubing walk and a guide walk by a guideboard, *Journal of Architecture Planning. Environment Engineering, AIJ*, 1981, 302:87-93

- [39] Matsushita and Okazaki S., A study of Simulation Model for Way Finding Behavior by Experiments in Mazes. *Journal of Architecture, Planning. Environment Engineering, AIJ*, 1991, 429:51-59
- [40] Okazaki S. and Yamamoto, C., A Study of Pedestrian Movement in Architectural Space Part 4: Pedestrian Movement Represented in Perspective. *Journal of Architecture, Planning. Environment Engineering, AIJ*, 1981, 299:105-113.
- [41] Transportation Research Board, Highway Capacity Manual, Special Report 204 TRB, Washington D.C., 1985
- [42] Okazaki S., Matsushita S., A study of simulation model for pedestrian movement with evacuation and queuing, *Proceeding of the International Conference on Engineering for Crowd Safety*, 1993, 271-280
- [43] 董力耘, 戴世强, 二维行人交通模型中转向运动对阻塞相变的影响, *自然科学进展*, 2002, 12 (1):18-22
- [44] May A. D., *Traffic Flow Fundamental*, Prentice Hall, New Jersey, 1990
- [45] Helbing D., A fluid-dynamic model for the movement of pedestrians, *Complex Systems*, 1992, 6:391-415
- [46] Helbing D., Molnar P. and Schweitzer F., Computer Simulation of Pedestrian Dynamics and trail Formation, *Evolution of Natural Science, Sonderforschungsbereich (Stuttgart)*, 1994, 230:229-234
- [47] Thompson P.A. and Marchant E.W., A Computer Model the Evacuation of Large Building Populations, *Fire Safety*, 1995, 24:131-148
- [48] Thompson P. A. and Marchant E.W., Testing and Application of the Computer Model 'SIMULEX'. *Fire Safety*, 1995, 24:149-166
- [49] Watts J.M., Computer Models for Evacuation Analysis. *Fire Safety Journal*, 1987,12: 237-245
- [50] Schadschneider, A., Kirchner A. and Nishinari K., CA approach to collective phenomena in pedestrian dynamics, in S. Bandini, B. Chopard and M. Tomassini (Eds.), *Cellular Automata, 5th International Conference on Cellular Automata for Research and Industry*, Geneva, Switzerland (Springer), 2002(2493): 239-248
- [51] Hoogendoorn, S.P., And Bovy P.H.L., Normative Pedestrian Behaviour Theory And Modelling, *Proceedings Of The 15th International Symposium On Transportation And Traffic Theory (Adelaide)*, 2002:219-245
- [52] Tajima Y., Nagatani T., Clogging transition of pedestrian flow in T-shaped channel, *Physica A*, 2002, 303: 239-250
- [53] Nagatani T., Dynamical transition and scaling in a mean-field model of pedestrian flow at a bottleneck, *Physica A*, 2000, 300: 558-566
- [54] Nagatani T., Dynamical transition in merging pedestrian flow without bottleneck, *Physica A*, 2000, 307: 505 - 515
- [55] Muramatsu M., Irie T., Nagatani T., Jamming transition in pedestrian counter flow, *Physica A*, 1999, 267: 487-498
- [56] Muramatsu M., Nagatani T., Jamming transition in two-dimensional pedestrian traffic, *Physica A*, 2000, 275: 281-291
- [57] Muramatsu M., Nagatani T., Jamming transition of pedestrian traffic at a crossing with open boundaries, *Physica A*, 2000, 286:377-390

- [58] Tajima Y., Nagatani T., Scaling behavior of crowd flow outside a hall, *Physica A*, 2001, 292: 545-554
- [59] Tajima Y., Takimoto K., Nagatani T., Scaling of pedestrian channel flow with a bottleneck, *Physica A*, 2001, 294: 257-268
- [60] Daamen W., SimPed: a Pedestrian Simulation Tool for Large Pedestrian Areas, conference proceedings EuroSIW, 2002: 24-26
- [61] Daamen W. and Hoogendoorn S.P., Experimental Research on Pedestrian Walking Behavior, 82nd Annual Meeting at the Transportation Research Board, proceedings on CD-Rom, 2003
- [62] Hoogendoorn S.P., Microscopic Simulation of Pedestrian Flows, 82nd Annual Meeting at the Transportation Research Board, proceedings on CD-Rom, 2003
- [63] Hoogendoorn S.P., Daamen W., Extracting Microscopic Pedestrian Characteristics from Video Data, 82nd Annual Meeting at the Transportation Research Board, proceedings on CD-Rom, 2003
- [64] Hoogendoorn S.P., Wayfinding under Uncertainty in Continuous Time and Space by Dynamic Programming, In: Proceedings of the 13th Mini-EURO Conference "Handling Uncertainty in the Analysis of Traffic and Transportation Systems", 2002: 71-76
- [65] Bovy P.H.L. and Stern E., Route Choice: Wayfinding in Transport Networks. Kluwer Academic Publishers, 1990
- [66] Hoogendoorn S.P., And Bovy P.H.L., Normative Pedestrian Behaviour Theory And Modelling, Proceedings Of The 15th International Symposium On Transportation And Traffic Theory, Adelaide, 2002: 219-245.
- [67] Teknomo K., Takeyama Y. and Inamura H., Review on Microscopic Pedestrian Simulation Model, Proceedings Japan Society of Civil Engineering Conference, Morioka, Japan, March 2000
- [68] Oeding D., Verkehrsbelastung and Dimensionierung von Gehwegen und anderen Anlagen des Fussgängerverkehrs, [Traffic Loads and Dimensions of Walkways and other Pedestrian Circulation Facilities], Straßenbau und Straßenverkehrstechnik 22, Germany, Boon, 1963
- [69] Lu Y.J., Tang Y.Y., Pirard P., Hsu Y.H. *et al.*, Measurement of Pedestrian Flow Data Using Image Analysis Technique, Transportation Research Record, 1990, 1281: 87-96
- [70] Fruin J.J., Pedestrian Planning and Design, Kajima Institute, Tokyo, 1974
- [71] Papacostas C.S. and Prevedouros P.D., Transportation Engineering and Planning 2ed, Prentice-Hall International, New Jersey, 1993
- [72] Hoogendoorn S.P., Pedestrian dynamics-presentation , <http://vkk042.citg.tudelft.nl/verkeerskunde/staff/hoogendoorn>, 2003
- [73] O'Flaherty, C.A. (ed.) Transport Planning and Traffic Engineering, Arnold, London, 1997
- [74] 上海城市综合交通规划信息网: <http://www.scctpi.gov.cn/>, 2004
- [75] Payne H. J., Models of freeway traffic and control, In: Bekey G.A. (ed.), Mathematical Methods of Public Systems, 1971, 1: 51-61
- [76] AlGadhi S. A. H., Mahmassani H. and Herman R., A speed-concentration relation for bidirectional crowd movements, in M. Schreckenberg and S. Sharma (Eds.), Pedestrian and Evacuation Dynamics (Springer), 2002:3-20

- [77] Helbing D, Buzna L., Werner T., Self-Organized Pedestrian Crowd Dynamics and Design Solutions, DOI: trafficforum/03120401, Traffic Forum, 2003
- [78] 戴世强, 薛郁, 交通流的建模和仿真, 《交通流和颗粒流》(唐孝威等编), 浙江大学出版社, 2004:64:125
- [79] 雷丽, 城市高架路-匝道-地面交通的交互作用及交通流特性研究, 上海大学博士学位论文, 2004
- [80] 陈然, 董力耘, 中国大都市行人交通特征的实测和初步分析, 上海大学学报(自然科学版), 2005, 11(1):93-97
- [81] 陈然, 郁文剑, 董力耘, 戴世强, 上海地铁通道行人流的实测和数值模拟, 现代数学和力学(MMM-IX), (戴世强, 周哲玮, 程昌钧, 郭兴明, 卢东强主编), 上海大学出版社, 2004:460-463
- [82] 杨立中, 方伟峰, 李健, 黄锐, 考虑人员行为的元胞自动机行人运动模型, <http://www.scichina.com/kz/0212/kz0896.stm>, 2003
- [83] Yang L Z, Fang W F, Huang R, *et al.*, Study on occupant evacuation in fire based on cellular automata model, Chinese Science Bulletin, 2002, 47(17):1484-1488
- [84] 方伟峰, 杨立中, 黄锐, 基于元胞自动机的多自主体人员行为模型及其在性能化设计中的应用, <http://www.cae.cn/cesmagz/content.jsp?id=318#13>, 2003
- [85] 杨立中, 方伟峰, 黄锐, 邓志华, 基于元胞自动机的火灾中人员逃生的模型, <http://www.analysis.org.cn/kjqk/kxtb/kxtb2002/0212pdf/021203.pdf>, 2002
- [86] 徐高, 基于智能体技术的人员疏散仿真模型, <http://journal.swjtu.edu.cn/natural/2003/3/zw030314.htm>, 2003
- [87] 方正, 卢兆明, 建筑物避难疏散的网格模型, 中国安全科学学报, 2001, 11(4):10-13

攻读硕士学位期间公开发表的论文

1. 陈然, 董力耘, 中国大都市行人交通特征的实测和初步分析, 上海大学学报(自然科学版), 2005, 11(1): 93-97
2. 陈然, 郁文剑, 董力耘, 戴世强, 上海地铁通道行人流的实测和数值模拟, 现代数学和力学(MMM-IX), (戴世强, 周哲玮, 程昌钧, 郭兴明, 卢东强主编), 上海大学出版社, 2004: 460-463

致 谢

本文的工作是在导师戴世强教授和董力耘副教授的悉心指导和关怀下顺利完成的。戴老师精深的学术造诣、严谨的治学态度和务实的科研精神使作者受益匪浅,在此谨向戴老师致以诚挚的敬意和衷心的感谢!同时感谢董力耘副教授对论文撰写提出有益的意见和建议,董老师精益求精的科学态度和细致入微的教导令作者深深敬佩。本文从题目确定到框架构建,直至正文的撰写和修订,无不凝聚着两位导师的心血和汗水。

戴老师提倡的“老老实实治学,清清白白做人”的信条和创新求实的科研精神,将在今后的学习、生活中不断激励着我继续前进。

真诚感谢本课题组成员对作者的关心和热情帮助,他们是:卢东强博士,张鹏博士,欧忠辉博士,葛红霞,冯秀芳,祝会兵,袁以武,安淑萍,宋涛,孟庆勋,何红弟,徐杰,郁文剑,郭强,黄雪峰。同时感谢薛郁教授,冯苏苇博士,雷丽博士的讨论和帮助。

另外,感谢力学系 98 级数学、物理、力学综合班同学金文、倪云华、朱兵、涂敏杰、冯珏敏、李峰等对作者的帮助。在交通实测过程中,还得到了力学系 01 级同学的大力协助,在此一并表示感谢。

感谢我的父母和家人,他们不遗余力的支持和博大无私的关爱让我顺利完成学业。

本论文的工作得到了国家自然科学基金(批准号:19932020,10202012)和教育部高等学校博士学科点专项科研基金(项目编号:20040280014)的资助,谨此致谢。