

上海世博会主入口广场客流集散仿真研究

徐瑞华, 李璇, 高鹏

(同济大学 交通运输工程学院, 上海 201804)

摘要: 以上海世博园区上南路入口广场为例,应用自主研发的客流分布仿真系统对3万m²区域、2万余客流同时在线的大面积、大客流的游客入场过程进行了实景微观仿真.针对游客入场时的随机到达与多级有控排队、多种形式不规则排队、游客排队的静止态与入场行走的运动态相结合等特点,建立了由行为流程管理层和行走过程控制层构成的智能动态寻优的行人运动过程仿真模型.基于仿真评价系统对入口广场设施和排队服务水平的评估,结合排队心理学的研究规律,提出了游客多级排队组织方式及排队引导设施布置的建议,并给出了入口广场安全容量和合理的安检时间控制指标.

关键词: 上海世博会; 入口广场; 客流仿真; 客流组织

中图分类号: TP 391.9

文献标识码: A

Pedestrian Flow Simulation Study at Main Entrance Square of Shanghai World Expo Park

XU Ruihua, LI Xuan, GAO Peng

(College of Transportation Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: Passenger flow of over 20 thousand in Shang-Nan Road Entrance Square (30 thousand square meters) of Shanghai World Expo Park was simulated by self-developed passenger distribution simulation system. Pedestrian movement simulation model was established according to pedestrians' admission characteristics which include random arrival and multi-stage controlled queue, irregular queue of various forms, and combination of queuing resting stage and walking dynamic stage. The model is composed of "behavior flow management layer" and "walking process control layer", which can search route intelligently for passengers. Based on simulation results and queuing psychology, some suggestions were proposed on passenger flow organization, guiding facility layout, safe capacity of square and reasonable security inspection time.

Key words: Shanghai World Expo; entrance square; passenger flow simulation; passenger flow organization

大型活动的举办会吸引大批游客到场参加,其入口广场是客流汇集的重要节点,也是活动举办期间人流最密集的场所之一.据预测,参观2010年上海世博会的游客人数将达到7300万人次,高峰小时到达客流将达20万人次.如此大规模的客流在世博园区入口广场的有限空间内短时间集聚,对游客入场的交通组织提出了极大挑战.因此,深入分析入口广场的客流集散特点、评价各类服务设施的能力、研究高强度客流条件下安全、高效、舒适的集散方案,具有十分重要的意义.

大型活动的入口广场根据其空间形态,一般可分为室内广场和室外广场两种.本文所研究的上海世博园区主入口(上南路入口)广场为室内广场.根据现有规划和设计,该入口将承担4.32万人次·h⁻¹高峰客流,占总高峰小时入园客流的21.6%,是世博园区8个地面入口中入园能力最大的一个.它共分为5层,游客主要从地上2层和地下2层入口广场安检进入园区,地上2层广场的一端人流入口与室外自由广场相通,另一端设置80台安检闸机;地下2层广场一端与轨道交通7,8号线上南路站相通,另一端设置60台安检闸机.

历届世博会及奥运会等大型国际活动,为检验各类设施配置及其能力、客流组织方案以及应急疏散方案,都曾采用专业有效的仿真分析.如2000年悉尼奥运会,规划设计者们曾借助Legion仿真系统实现了奥运场馆内道路和外部交通的无缝衔接,使得道路、汽车站、轨道交通车站的不同方案能够在设计阶段得到对比测试,降低了大约10%的建设成本,提高了步行系统的安全可靠性.

收稿日期: 2009-07-22

基金项目: 国家“八六三”高技术研究发展计划资助项目(2007AA11Z236)

作者简介: 徐瑞华(1963—),男,教授,博士生导师,工学博士,主要研究方向为运输组织现代化. E-mail: rhxu@tongji.edu.cn

上海世博会主入口广场入场游客数量大、走行距离长、排队环节多、排队方式复杂. 基于这样的背景, 本文在分析入口广场行人交通流运行特征的基础上, 利用自主研发的客流分布仿真系统(passenger distribution simulation, PDS)对入口广场客流集散中的游客排队组织方式、入口广场安全容量、安检通道通过能力等几个方面进行了仿真分析研究, 根据仿真结果对入口广场设施和服务水平进行了评估, 并提出了客流组织建议.

1 PDS 仿真系统

目前应用于大型公共空间的人群运动及分布仿真评价的行人仿真软件系统很多, 如基于实体单元在 3 维空间下进行仿真的 STEPS 软件, 用于仿真疏散过程的 EGRESS 软件, 基于人群动态学相关模型的 Legion 软件等. 这些仿真系统大多从元胞自动机理论发展而来, 其思想是针对个体建模, 相比针对人群整体建模的传统理论而言, 可以更真实地反映出人群组成的异质性, 并且其具有灵活、运算量较小、容易实现等特点, 在行人仿真领域获得了较好的应用. 然而也存在一些不足: 其一, 元胞自动机模型存在个体运动比较机械的缺点, 不能精确和真实地模拟行人运动过程中连续的加减速过程, 进而难以获得多行人舒适性等服务水平评价指标的数据支持; 其二, 没有良好解决动态智能寻路问题, 一般需要用户手工添加引导. 这样不但使得仿真结果受到人为因素干扰, 并且导致仿真建模工作量很大.

为了更加真实地反映大规模行人在复杂 2 维空间中的运动规律, 笔者基于实地调查, 研究分析了具有我国文化特色、社会习惯和环境心理特点的行人行为规律, 建立了分层结构的行人仿真模型框架、行人动力学模型以及相关算法, 开发了以 CAD(计算机辅助设计)图形处理技术、图形分析识别建模技术、面向主体(Agent)的行人仿真为特色的客流分布仿真系统(PDS)^[1-2].

首先, PDS 系统采用改进的 A* 算法来完成主体的路径搜索, 并将路径搜索算法和行人动力学中的社会力模型结合, 形成离散与连续相结合的行人动力学模型. 解决了元胞自动机中个体移动较为机械的问题, 使行人实现了离散搜索、连续运动, 使模型具备了路径规划能力. 其次, PDS 系统以全新的流向设置方式替代了传统仿真系统流线设置方式, 大大缩减了建立仿真案例的工作量, 并且减少了人为因

素的干扰, 解决了元胞自动机中不能动态智能寻路的问题, 提高了仿真结果的客观性. 该仿真系统已在城市轨道交通车站客流分布的研究中得到了实际应用, 为车站设施的优化布置提供了依据. 这里重点介绍行人运动过程仿真模型的基本特点.

行人的运动是在确定运动的目标、流程之后, 进行感知、决策、移动的循环过程, 运动时行人首先明确本次运动的目的、终点, 其次确定运动经历的流程, 最后确定具体的行走过程; 在寻找路径时, 通常先确定一条由起点到目标终点的大致路线, 以该路线为导航, 根据当前拥挤情况等因素确定距离不远的物体为阶段性目标, 从而逐步形成一条具体的行走路线^[3]. 基于对行人运动行为的分析, PDS 系统将行人的运动过程分解为行为流程管理层、行走过程控制层的两层控制结构进行仿真, 具体过程如下:

(1) 行为流程管理层. 确定当前状态下发生的事件、类别、地点等, 对 Agent 发出移动任务. 以世博园区入口广场的客流仿真为例, 其行为流程管理层中包含的事件流程即为: 进入入口—排队—安检—验票—进入场馆, 其中, 排队过程中的队列选择问题需要纳入选择行为模型加以确定.

(2) 行走过程控制层. 确定主体从原位置到目标位置的具体行走路径. 先通过路径搜索算法根据距离、拥挤、个人偏好等因素, 找到一条到达目的地的路径, 作为方向性引导. 在路径搜索中, 首先由宏观导航为主体的移动任务确定从起点到目的地的大致路线, 再由微观导航在短距离内根据宏观方向和当前拥挤情况等因素来确定具体的行走路径; 行人运动过程中通过信息空间感知环境(障碍物、其他行人), 由行人动力学模型负责以搜索到的路径为导航进行移动, 在适当的时候加减速、避让, 或者重新搜索路径(绕道).

本文研究的上海世博园区上南路入口广场面积达 3 万 m², 基本呈狭长的矩形, 从入口至安检闸机的纵深长度达 380 m, 而宽度仅为 80 m. 该入口的高峰小时客流到达强度高, 由于游客入场需要进行安检、检票等环节, 因此将有大量客流在入口广场集聚. 广场上一系列隔离、导流设施的设置使游客入场经历多级不同形式的排队过程, 包括蛇形排队、弧形排队等. 因此, 本文针对游客入场时的随机到达与多级有控排队、多种形式不规则排队(弧形排队、蛇形排队等)、游客排队的静止态与入场行走的运动态相结合等特点进行了模型改进.

行人运动过程仿真模型的基本原理如图 1 所示.

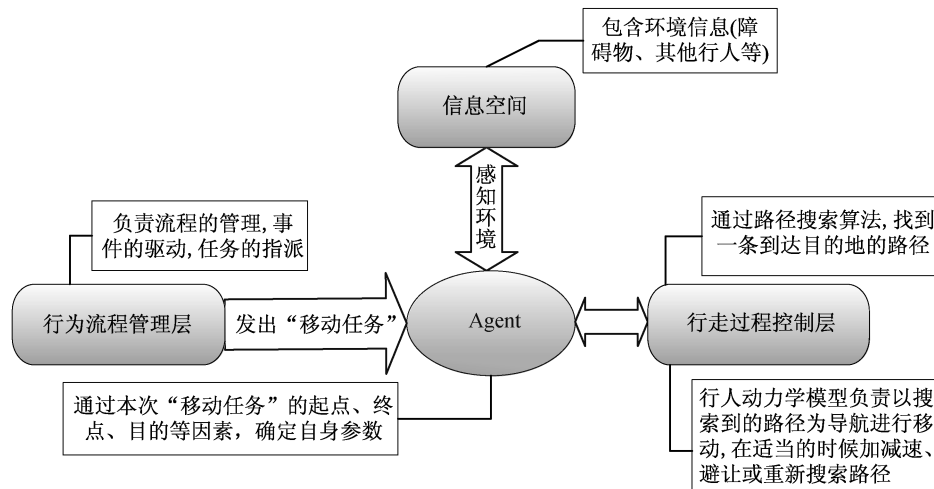


图 1 行人运动过程仿真模型基本原理

Fig.1 Basic principle of pedestrian movement simulation model

2 世博园区入口广场客流组织方式

2.1 世博入口广场的基础设施

2.1.1 排队隔离设施

根据上南路入口的设计图可知,地上 2 层和地下 2 层入口广场从入口一端至安检闸机一端都设置有多级分段式的排队设施,从纵向看,逐级设施对游客起到了很好的导流作用,而级与级之间留出的缓冲空间,恰好作为管理人员通道和紧急疏散通道;从横向看,每级排队区又布置有平行的隔离设施,对游客起到了分流作用,确保排队区的有序,避免出现大量游客混乱集聚的危险场面。

以地上 2 层的排队设施为例,大致分为 7 级,从入口一端起依次为 3 级直线形、折线形、弧形、直线形和蛇形(图 2)。前 4 级排队区属于预排队区,后 3 级属于有序排队区,其中,预排队区的横向隔离设施较少,仅有平行的 3 排,而有序排队区的隔离设施排列紧密,从而形成很多平行队列。地下 2 层的排队设施与此类似。

2.1.2 安检设施

安检设施位于入口广场的最内端,游客通过多级排队区后在安检设施前排队依次接受安检服务之后验票进入场馆。安检设施为两两相邻前后错开布置,从而形成平行的前后两排。每个安检设施有 2 个安检闸机,可以同时为两个游客提供安检服务。如图 3 所示。地上 2 层和地下 2 层分别设置 80 台和 60 台安检闸机,在客流高峰日闸机全部启用,而客流平峰日只开启部分闸机,其余作为备用。

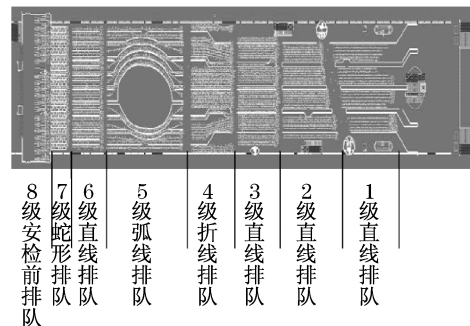


图 2 地上 2 层排队设施及排队方式

Fig.2 Queuing facilities and queuing method of the 2nd ground floor

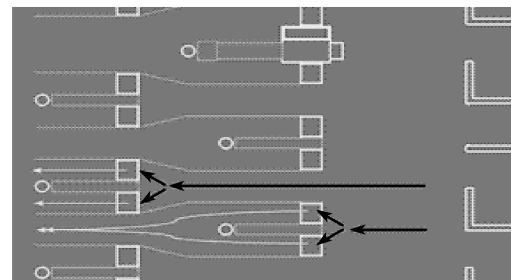


图 3 安检过程

Fig.3 Security inspection process

2.2 世博入口广场的客流交通特征

当游客人数未达到设计游客指标值时,入口广场一般不会成为人流长时间聚集的场所,游客选择适宜的步行速度通过入口广场,在入口处做短暂的安检、检票停留;当游客人数远超过设计指标值时,入口广场将成为大规模人流长时间聚集场所,此时游客的主要行为则为排队^[4]。由于世博会入场游客到达强度很高,而安检闸机数量有限,其入口广场必

然成为人流聚集场所,因此游客的主要交通行为为长时间排队.

通过研究发现,大型活动入口广场的游客依然具备行人的基本行为特征: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;行人总是与其他行人和边界(墙壁等)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;当行人密度增加时,步速和步幅都会明显地减小;在密度比较大,特别是有对向行人流互相冲突的情况下,为了减少行走的阻力,行人一般会跟在前面的人身后走,从而自发形成一种手指形交叉的自组织现象;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群体的行为,这也是一种自组织或同步现象.

结合世博会客流资料,上南路入口广场客流主要有以下几方面的特点:客流量大,地上 2 层和地下 2 层高峰小时至少应分别承担 $2\text{万人}\cdot\text{h}^{-1}$ 以上的通过客流;客流向单一(由广场一端进入至另一端安检、验票),基本没有多股客流交叉干扰问题;在正式开馆前游客陆续到达并在安检口前排队等候,初始到达人数较多,而开馆后客流到达强度也很高,所以入口广场人流将处于长时间高密度排队状态;客流主要瓶颈集中于安检前排队,通过安检、闸机验票等排队区域.其他区域通过率相对高,并且已经通过栏杆设施进行良好渠化.

2.3 世博入口广场的客流组织方式

2.3.1 排队方式

由前所述,广场的排队隔离设施基本为分级分段式,于是按照设施布置情况采用多级串联排队的方式,每级排队设置一定的流量控制,从而保证级与级之间的缓冲空间不被游客占用,留作管理人员通道和紧急疏散通道.本文设计的多级排队系统是将整个队列分为若干级,各级之间是串联的关系,而各级内部的各队列之间是并联的关系,服务台(安检闸机)只在最后一级队列设置.在 PDS 仿真系统中,很好地实现了对多级有控排队方式的模拟,为排队服务水平的分析提供了支持.各级排队区的队列数设置情况见表 1.

2.3.2 安检方式

入口广场游客入场过程可看作为一个排队系统,安检设施是整个排队系统的瓶颈所在,安检能力直接决定了入口广场的通过能力,因此根据安检设施的布置情况合理地设计安检方式非常重要.根据

安检过程的要求,安检方式为:游客在每个安检设备前 1 m 排成一队,由于每个安检设备有 2 个安检闸机,队首游客依次进入空闲的安检闸机接受服务,安检完毕后从后面通道离开.这样既可以使安检设施的使用率最大化,减少空费时间,提高安检效率,同时可以保证安检过程的有序性和安全性,避免在每个闸机前排队造成的队列数量多且排列紧密而容易引发的安全事故.

表 1 各级排队区队列设置
Tab.1 Queuing layout of queue area at all levels

地上 2 层			地下 2 层		
排队级数	排队形式	队列数	排队级数	排队形式	队列数
1	直线形	24	1	折线形	27
2	直线形	23	2	直线形	27
3	直线形	41	3	直线形	27
4	折线形	38	4	折线形	31
5	弧形	18	5	蛇形	17
6	直线形	25	6	直线形	31
7	蛇形	23			
8	直线形	40			

3 仿真结果

3.1 排队过程

通过仿真运行,得到了不同客流规模和安检设备条件下,游客入场需要花费时间的结果,如表 2 所示,同时,可以得到入口区域的客流分布密度图、客流速度分布图等.从结果中发现:游客平均花费时间与排队组织方式、安检设备数量、安检花费时间等因素的综合作用有关;队列数增多,游客平均逗留时间缩短,但服务水平却降低;越靠近安检口,游客密度越大.

根据排队心理学的相关理论,游客对排队服务的满意度取决于其认知与预期之间的关系.可总结出以下规律:感觉空闲时间比忙的时间长;等待时间感觉比服务时间长;焦虑使得等待变得似乎更长;不确定的等待似乎要比已知的、有限的等待时间长;意外的等待要比意料中的等待时间长;不公平的等待要比公平等待的时间长;服务的价值越高,顾客就能等待更长的时间;单独等待感觉要比多人等待时间长.

因此,在入口广场客流组织中,可以采取一定的措施来对游客排队等待的认知产生正面影响,以超过或满足其原来的预期,从而提高其对排队服务的满意度.如:确保顾客排队等待的公平性,杜绝在相同条件下插队或后来者却先享受服务的现象发生;

增加排队过程中的信息发布和娱乐节目,如大屏幕电视,免费取阅报刊杂志等,一方面可以对世博会相关知识进行宣传,另外可以让游客分散注意力,减少排队时间的心理长度,提高服务质量;提供遮阴遮雨

保护,提供休息座椅,减少排队的不适,同时配备医疗小组,以便对紧急情况及时进行及时处理;以电子屏幕显示的方式,通过仿真分析实时告知不同区域游客所需排队进场的时间,减少其排队等待的不确定感.

表 2 游客入场花费时间仿真结果
Tab.2 Simulation results of passengers' admission time

客流量/万人	楼层	预计到达客流量/ (人·h ⁻¹)	初始到达人数/人	安检设备/台	平均逗留时间/min	最大逗留时 间/min
80	2 层	28 640	6 800	80	27.09	75.90
80	地下 2 层	21 360	5 200	60	24.55	83.97
60	2 层	28 640	5 500	80	23.87	70.23
60	地下 2 层	18 270	3 500	52	24.07	62.92
40	2 层	12 000	3 000	35	20.98	53.02
40	地下 2 层	12 000	3 000	35	22.70	51.70

入口广场设施的设置应以引导客流安全顺畅有序通过为基本准则,同时尽量起到提高入口通过能力的作用.通过仿真发现:部分设施布置形式(如一些栏杆和转弯的设置)会导致多级排队区各队列的数量不等,产生不必要的分流与合流,为客流组织管理带来了不便,也降低了广场通过能力和空间利用率.同时,蛇形队列可以利用较少的空间而容纳较长的队列,是一种高效的排队方式,适当延长蛇形排队区长度,可容纳更多的游客;并且地上 2 层蛇形排队区(图 4)与安检设备之间的距离太短(仅有 4 m),导致安检前排队空间不足,影响了安检通过能力,需要适当扩大该缓冲空间.

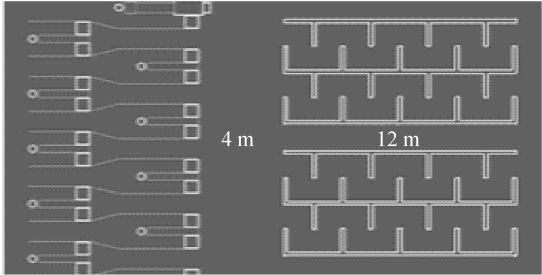


图 4 地上 2 层蛇形排队区

Fig.4 Snake-like queue area on the 2nd ground floor

3.2 入口广场容量

大型活动参观人流的服务水平分级一般采用的评价指标是人均空间和人均纵向间隔^[5].因此,根据美国道路通行能力手册《HCM 2000》中排队等候行人的服务水平分级标准,改变系统中的人均纵向间隔值进行仿真测试,可得到各级服务水平条件下的入口广场容量值,结果见表 3.

文献[4]中推荐的大型活动入口广场保障安全的最小人均空间值(0.55~0.60 m²·人⁻¹),同时结

合《HCM 2000》的服务水平分级标准中对各级服务水平等级下排队等候行人的状态描述,本文认为入口排队区的行人服务水平维持在 D 级以内是可以保证安全的.因此根据表 3,推荐地上 2 层和地下 2 层的系统安全容量值分别是 1.32 万和 0.70 万(考虑到地下空间游客心理、疏散安全等因素,地下空间队列应较地上 2 层稀疏),一旦超过此容量,建议采用流量控制措施,例如将后续到达的游客安排到室外自由广场或空地等候.

表 3 各级服务水平条件下的入口广场容量
Tab.3 Entrance square capacity at each level of service

服务水平 等级	人均纵向间隔 理论值/m	人均纵向间隔 测试值/m	入口广场容量/人	
			地上	地下
A	≥1.2	1.2	7 800	4 700
B	1.1~1.2	1.1	8 300	5 200
C	0.8~1.1	0.8	10 700	5 800
D	0.6~0.8	0.6	13 200	7 200
E	0.5~0.6	0.5	15 000	8 300
F	≤0.5	0.4	18 000	9 800

3.3 安检过程

客流主要瓶颈集中在安检口处,安检的快慢直接决定了入口广场通过能力的大小.在技术水平可达到的安检时间范围内进行仿真测试,结果显示,将平均的安检时间设置为 10 s,在极端高峰(80 万客流日)条件下,地上 2 层系统最大人数约为 1.3 万,地下 2 层约为 0.73 万,恰好满足安全容量的要求.如果增加安检时间,广场排队人数将激增,从而降低广场环境的安全性和有序性,甚至引发群集伤害事故.此处的安检时间单指游客在安检门停留接受安检的时间,而将走行时间考虑进来,则总的安检时间为 16 s.根据大型活动安检服务等级划分^[6],16 s 的安

检时间对应的安检通道等级为 B 级.

由以上分析,建议游客安检总时间控制在 16 s 左右为宜. 如果无法达到,则需要采取一定的措施,如采用分时票价,适当提高高峰时段票价,如周末,节假日,每天的高峰时段等等. 同时,可设立部分快速安检通道,将无行李的游客安排到这些通道,提高安检的速度.

针对安检要求,参加活动人员按照有无带包、随身被认为有无特殊物品,可以分为四类^[6]. 按照有关研究统计的各类型人员所占比例,将仿真系统中安检设备也分为四类,并将各类的安检时间进行了对应的设置. 在此基础上,对地上 2 层和地下 2 层的安检通道通过能力进行了仿真测试,结果如表 4 所示.

表 4 分类安检条件下的通过能力
Tab.4 Passing capacity on the condition of
classified security inspection

安检时间类型	所需 时间/s	此类型人员 所占比例/%	安检设备台数/台	
			地上	地下
无包,被认为随身 无特殊物品	4	50.0	40	30
无包,被认为随身 有特殊物品	9	25.0	20	15
有包,被认为随身 无特殊物品	19	22.5	17	13
有包,被认为随身 有特殊物品	24	2.5	3	2
通过能力/(人· h ⁻¹)			26 000	23 000

如果不对安检设备分类,而将安检时间统一设置为 10 s,则仿真得到的地上 2 层和地下 2 层的通过能力分别为 22 000 人·h⁻¹和 15 700 人·h⁻¹. 对比可知,设置部分快速安检通道,减少随身无包游客的安检时间,可以在一定程度上提高安检通道的通过能力,从而降低游客的排队等候时间,提高服务水平.

需要强调的是,快速通道的布置必须具有连贯性和均匀性,才能达到提高系统通过能力的作用. 意即,快速通道须从广场的入口一端即开始,一直通向对应的快速安检口,从而避免游客换道造成的时间浪费和排队系统的混乱. 这就需要在入口处标明快速通道的位置,使无包游客在入口处即进入快速通道. 而均匀地布置快速通道可以方便游客选择,并且使部分开始未进入快速通道的无包游客可以就近换道. 由于入口广场为多级排队系统,游客可以选择在级与级之间的缓冲空间处进行换道,但同时多级排队系统中各级队列数不等,造成游客的分流与合流,

这也在一定程度上降低了快速通道的连贯性.

4 结语

大型活动的举办将吸引大批游客到场参加,大量游客在短时间内集中到达或离开是导致活动期间各类交通问题的根本原因,因此通过行人仿真的手段对大型活动出入口广场的客流集散进行模拟研究,并对步行人流设施设计及人流组织引导和管理措施提出指导性建议,确保大规模、高密度的人流能够安全、有序、高效地进出活动场馆,这对大型活动的成功举办具有不可忽视的重要意义.

本文利用自主研发的客流分布仿真系统 PDS,对上海世博园区主入口广场的客流组织进行了设计和仿真,基于仿真结果,结合排队心理学的规律,对排队人流引导和管理、入口广场容量控制、安检通道设置等方面进行了分析,以确保世博会游客步行顺畅有序、舒适愉悦为原则,提出了相关建议. 本文的研究方法也可适用于其他环境(如轨道交通车站、铁路客运站等)的客流组织方案的研究及仿真.

参考文献:

[1] 高鹏,邹晓磊,徐瑞华. 用于行人仿真的一种改进启发式路径搜索算法[C]//第七届世界华人交通运输学术大会论文集. 北京:人民交通出版社,2007: 540-544.
GAO Peng,ZOU Xiaolei,XU Ruihua. A modified heuristic search algorithm in pedestrian simulation[C]// Proceedings of the 7th international conference of Chinese transportation professionals. Beijing,China Communications Press,2007: 540-544.

[2] Teknomo K. Microscopic pedestrian flow characteristics; development of an image processing data collection and simulation model[D]. Sendai; Tohoku University,2002.

[3] Still G K. Crowd dynamics [D]. London: University of Warwick,2000.

[4] 吴娇蓉,叶建红,陈小鸿. 大型活动广场访客聚集行为控制指标研究[J]. 武汉理工大学学报:交通科学与工程版,2006,30(4):599.
WU Jiaorong, YE Jianhong, CHEN Xiaohong. Analysis of the visitors gathering behavior characteristics on large scale plaza [J]. Journal of Wuhan University of Technology: Transportation Science & Engineering,2006,30(4):599.

[5] Fruin J J. Pedestrian planning and design metropolitan association of urban designers and environmental planners[M]. New York;New York Inc,1971.

[6] 史建港. 大型活动行人交通特性研究[D]. 北京:北京工业大学建筑工程学院,2007.
SHI Jiangang. Research on pedestrian traffic characteristics in special events[D]. Beijing; Beijing University of Technology. The College of Architecture and Civil Engineering,2007.