

# 学生群体紧急疏散仿真及在出口设计中的应用

王 爽, 吴亚东

(西南科技大学 计算机科学与技术学院, 四川 绵阳 621000)

**摘 要:**针对学校大型建筑中人群分布密集的问题,研究了学生群体的紧急疏散仿真。首先分析了紧急情况下的群体行为特点,并根据现实生活中个体差异的统计特征,对逃生人群的不同属性特征进行了分类,然后采用社会力模型实现了学生群体的紧急疏散仿真,解决了传统疏散仿真中人员的无差异性。该仿真能够更加真实地反映出现实生活中的人群疏散,达到较好的效果。最后,基于该仿真模型,着重分析了建筑物出口设计对群体疏散的影响,分析结果表明:不同的出口宽度、位置对群体疏散的影响不同,从而可以为大型建筑的出口设计提供有益的参考。

**关键词:**人群疏散仿真;社会力模型;疏散人员分类;出口条件

中图分类号:TP39

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2013)07-0257-05

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2013.07.066

## Evacuation Simulation of Students Group in Emergency and Its Application in Exports Design

WANG Shuang, WU Ya-dong

(Department of Computer Science, SWUST, Mianyang 621000, China)

**Abstract:** Aiming to large buildings' crowded problem in schools, studied the evacuation simulation of students group in emergency. Firstly, analyzed the characteristics of crowds' behaviors in emergency. Secondly, according to the differences between individuals in real life, classified the escaping crowds into two classes and realized the evacuation simulation of students group on the basis of social force model, solving the traditional simulation's problems without considering the differences between people. The simulation can better reflect the crowd evacuation in real life and achieved desired results. Based on the simulation model that has been constructed, analyzed the influences of buildings export design on the group evacuation. The analysis results showed that different widths and positions of exports have different effects to group evacuation, can be used to provide beneficial references for the design of exports in large buildings.

**Key words:** crowd evacuation simulation; social force model; men and women classification; exit conditions

### 0 引言

学校作为一个大型公共场所,学生分布密集,一旦发生自然的或者人为的突发事件,学生的安全问题是一个不容忽视的问题。例如,在2008年爆发的汶川大地震中,许多学生因未能及时逃离事故现场而丧失了生命。此外,由于人为原因引起的突发事件也是学校安全问题隐患。学校里人群分布密集,食堂、楼梯间也极易出现拥挤、堵塞,甚至踩踏等现象,威胁着学生的人身安全。因此,研究大型公共场所<sup>[1]</sup>中人员在紧急情况下的行为特征、评估学校建筑的出口设计是否有利于大规模人群紧急疏散<sup>[2]</sup>具有非常重要的意义。

目前,人群疏散仿真模型大体上可以分为两大类:离散化模型和连续性模型<sup>[3]</sup>。离散化模型的处理方式是将疏散空间划分为许多离散的、相邻的小区域,将疏散过程中的时间也进行离散化处理;离散化模型的典型代表是元胞自动机模型<sup>[4]</sup>。在元胞自动机模型中,疏散的空间、时间以及行人的状态变量都是离散的,每个变量只取有限多个状态;行人的运动规则比较简单,人员的速度比较单一,而且该模型不能有效地考虑到行人之间的相互作用。连续性模型是指疏散的空间、时间以及行人的运动状态都是连续的。连续性仿真模型的典型代表是社会力模型<sup>[5]</sup>。相对于微观离散模型而言,社会力模型具有以下优点:它可以模拟出紧急情

收稿日期:2012-10-05

修回日期:2013-01-08

网络时间:2013-04-08

基金项目:四川省科技厅项目(11zs2009)

作者简介:王 爽(1987-),女,河南荥阳人,硕士研究生,CCF会员,研究方向为虚拟仿真技术及其应用;吴亚东,教授,研究方向为虚拟现实与可视化等。

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20130408.1709.052.html>

况下疏散人群恐慌的心理状态,以及人群之间的拥挤、碰撞、出口处堵塞等典型的群体现象,而且可以表现出人流的自组织现象<sup>[6,7]</sup>。文中以社会力模型为基础,以学校为研究背景,基于个体之间的差异性,研究学生群体的紧急疏散仿真。

## 1 恐慌状态下群体行为特征分析

当人群处于危险情况中时,由于求生本能的驱使,人员具有不同于平常的心理反应和行为表现。人群在紧急情况下的行为特征如下所示<sup>[8]</sup>:

- (1) 受到求生本能的驱使,处于惊慌中的人们不再受社会文化的约束,而是表现出一种疯狂的行为;
- (2) 大多数人倾向于以比平常快的速度奔跑;
- (3) “瓶颈”处出现震荡现象,个体移动到“瓶颈”处的行为以及穿过“瓶颈”的行为变得非常不协调;
- (4) 当人群到达出口处时,由于出口的狭小,拥挤比较严重,人群“拱形”堵塞的现象十分明显;
- (5) 由于人群的拥挤,人与人之间的相互作用力增大,拥挤的人群会对墙壁产生 4450 牛顿的作用力,这可能会造成墙面坍塌,从而阻碍群体逃生;
- (6) 由于趋众心理的作用,人员在逃生时倾向于跟随众人,导致人群集中在一个出口处,其他的出口往往被忽略或者发挥很小的作用。

## 2 行人运动模型的建立

### 2.1 社会力模型基本原理

社会力模型<sup>[9,10]</sup>的核心是通过力来驱动行人的运动。社会力模型不仅考虑了人群之间的碰撞作用,而且考虑了个体的心理作用力。根据社会力模型,个体  $i$  在逃生过程中的运动学方程描述如下:

$$m_i \frac{dv_i}{dt} = m_i \frac{v_i^0(t)e_i^0(t) - v_i(t)}{\tau_i} + \sum_{j \neq i} f_{ij} + \sum_w f_{iw} \quad (1)$$

(1) 驱动力。

当个体感知到紧急事件发生时,每个个体都有快速向出口跑动的心理倾向,这种主观意识对个体施加的作用力称为驱动力,表示如下:

$$f_i = m_i \frac{v_i^0(t)e_i^0(t) - v_i(t)}{\tau_i}.$$

$m_i$  为个体  $i$  的质量,  $v_i^0(t)$  为个体  $i$  的期望逃生速度,  $e_i^0$  为个体  $i$  的期望逃生方向,  $\tau_i$  为个体  $i$  的反应时间。

(2) 人与人之间的作用力。

人与人之间的作用力包括“社会心理力”和身体接触力。

个体在逃生过程中有一种与其他个体保持一定距离的心理倾向,这种心理倾向对个体施加的作用力被

描述为“社会心理力”:  $f_{ij}^{SOC} = A_i \exp[(r_{ij} - d_{ij})/B_i] n_{ij}$ 。式中,  $A_i$  表示两个个体相互作用的强度,  $B_i$  表示个体之间排斥力的范围,  $r_{ij}$  为两个个体保持身体不接触的最小距离,  $d_{ij} = |r_i - r_j|$  表示个体  $i$  与个体  $j$  质心之间的距离,  $n_{ij}$  表示个体  $j$  指向个体  $i$  的单位向量。

身体接触力包括身体压力和滑动摩擦力。  $kg(r_{ij} - d_{ij}) n_{ij}$  为身体压力,表示个体之间为了避免身体接触所造成的伤害,  $kg(r_{ij} - d_{ij}) \Delta v_{ij}^t t_{ij}$  为滑动摩擦力,是个体为了避免在短时间内以很快的速率经过其他人。  $k$  表示个体的弹力系数,  $k$  为摩擦系数,  $t_{ij}$  为切向向量;  $\Delta v_{ij}^t = (v_j - v_i) \times t_{ij}$  为切向速度差值; 函数  $g(x) = \begin{cases} 0 & (d_{ij} > r_{ij}) \\ x & (d_{ij} \leq r_{ij}) \end{cases}$ 。

综上,个体  $j$  对个体  $i$  的作用力  $f_{ij}$  可以表示为:

$$f_{ij} = \{A_i \exp[(r_{ij} - d_{ij})/B_i] + kg(r_{ij} - d_{ij})\} n_{ij} + kg(r_{ij} - d_{ij}) \Delta v_{ij}^t t_{ij} \quad (2)$$

(3) 边界对人的作用力。

边界对个体施加的作用力与人与人之间的作用力相似,设边界为  $w$ ,则边界  $w$  对个体的作用力如下式所示:

$$f_{iw} = f_{iw}^{SOC} + f_{iw}^h \quad (3)$$

$$f_{iw}^{SOC} = A_i \exp[(r_i - d_{iw})/B_i] n_{iw} \quad (4)$$

$$f_{iw}^h = kg(r_i - d_{iw}) n_{iw} - kg(r_i - d_{iw})(v_i \cdot t_{iw}) t_{iw} \quad (5)$$

通过上述对紧急情况下人群行为以及社会力模型的分析可知:社会力模型能够更加真实地反映出紧急情况下的人群疏散,因此,文中采用社会力模型来实现学生群体的紧急疏散仿真。

### 2.2 模型的优化

#### 2.2.1 疏散人员的分类处理

经典的社会力模型将所有的人员看作没有差别的个体,行人的体重被设定为一个标准运动员的体重,即 80kg;行人尺寸的取值也是以欧洲人的体态为标准的。然而在现实生活中,不同年龄、性别的个体之间在质量、尺寸和期望速度等方面都存在着一定的差异。文中根据学校学生的特点,将疏散人群分为两类:男生和女生,男女比例各占 50%。

这样一来,个体与个体之间的作用力可以表示为:

$$f_{ij} = \{A_i \exp[(r_{ij}[\text{sex}[i]] - d_{ij})/B_i] + kg(r_{ij}[\text{sex}[i]] - d_{ij})\} n_{ij} + kg(r_{ij}[\text{sex}[i]] - d_{ij}) \Delta v_{ij}^t t_{ij} \quad (6)$$

个体与墙壁之间的作用力可以表示为:

$$f_{iw} = \{A_i \exp[(r_i \text{sex}[i] - d_{iw})/B_i] + kg(r_i \text{sex}[i] - d_{iw})\} n_{iw} - kg(r_i \text{sex}[i] - d_{iw})(v_i \cdot t_{iw}) t_{iw} \quad (7)$$

根据中国成年人人体尺寸标准,年龄在18周岁到25周岁之间的成年男性在第50百分位数的肩宽为375mm,成年女性在第50百分位数的肩宽为351mm。综合考虑这些尺寸统计数据以及学校学生的年龄相似性特征、现实生活中人的着装以及心理距离等功能修正量,文中将男生的半径设为0.3m,女生的半径设为0.25m。

根据人体工程学中的论述<sup>[11]</sup>,中国成年男性在第5和第95百分位数的质量分别为48 kg和75 kg;成年女性在第5和第95百分位数的质量分别为42 kg和66 kg。综合考虑这些体重统计数据以及学校学生的年龄相似性特征,文中将男生的平均体重设定为60kg,女生的平均体重设定为50kg。

经典的社会力模型将紧急情况下行人的期望逃生速度设定为5m/s,文中的研究对象是学校的青年学生,考虑到他们的年龄及性别特点,文中将男生的期望逃生速度设定为5m/s,女生的期望逃生速度设定为4m/s。

2.2.2 特殊情况处理

经典的社会力模型没有考虑到突发情况发生,比如一个出口突然坍塌或者堵塞时,群体疏散将发生怎样的变化。例如,在发生地震的疏散场景中,余震的发生可能会使得疏散场景中的一个出口突然坍塌,这样跑向该出口的人群将不得不改变逃生方向,人群疏散场景将发生变化。文中考虑了突发情况爆发时群体疏散仿真结果的变化。该仿真结果与实际疏散逃生情况较为相符。

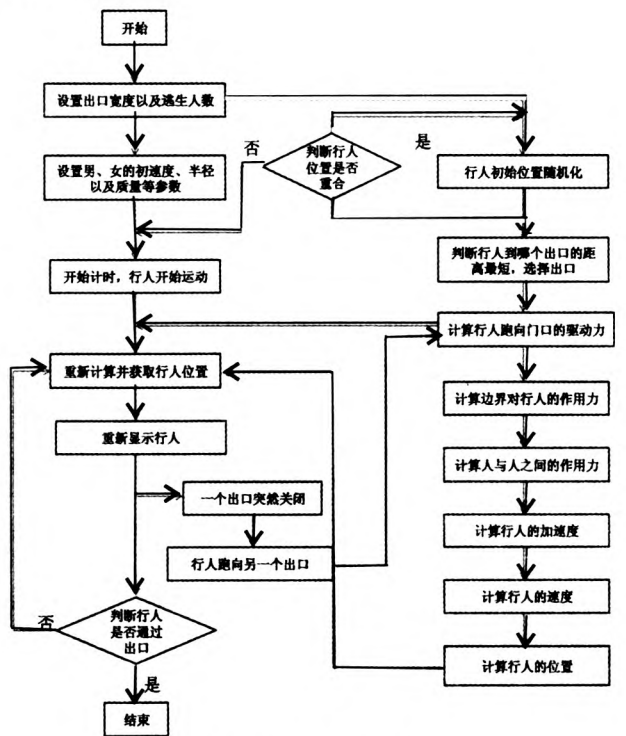


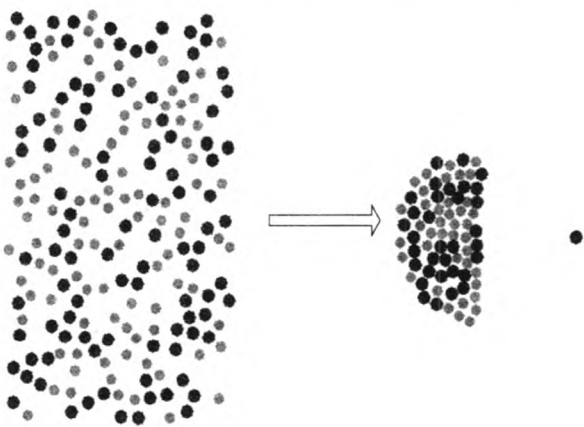
图1 仿真程序流程图

3 仿真实现及结果

文中采用 Visual Studio 2008 作为系统开发平台,调用底层图形库 OpenGL 来实现仿真结果的可视化显示。对于分类后仿真人员参数的设定,由于疏散仿真人员由多个属性组成,每一类学生分别用一个集合来表示,集合中的每个元素对应不同的属性值。

仿真程序流程图如图1所示。

图2表示仿真结果。图2a表示在一个大型场景中随机分布的学生个体,图2b表示发生紧急事故时,学生群体在出口处形成“拱形”拥堵的现象。图中半径稍大的圆圈表示男生,半径稍小的圆圈表示女生。



a 仿真初始状态                      b 仿真“拱形”拥堵状态

图2 社会力模型仿真效果图

4 出口设计分析与讨论

文中假设疏散场景是一个12m×20m的教室。

4.1 出口宽度影响

图3表示出口宽度<sup>[12]</sup>与群体疏散总时间的关系,四条曲线分别表示在人员密度不同的四种情况下,群体疏散总时间的变化情况。

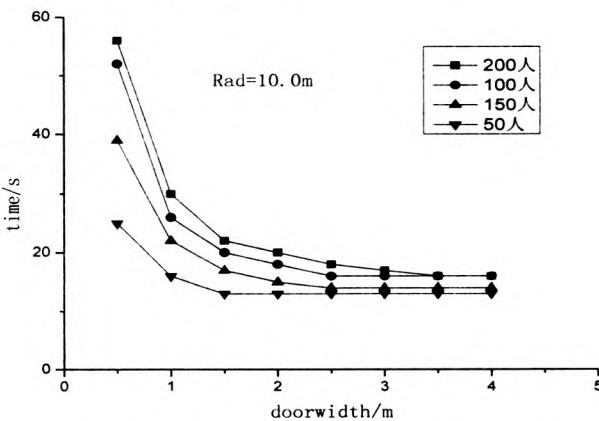


图3 出口宽度与群体疏散时间的关系图

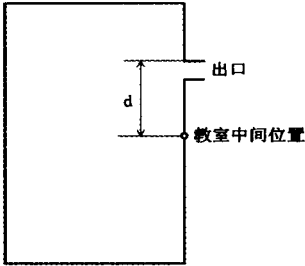
由图3可知,随着出口宽度的增大,群体疏散总时间逐渐减少,当出口宽度增大到某个值时,群体疏散总时间不再减少,而是维持在某个值附近。因此,在建筑

设计时,可寻找一个最佳出口宽度值,既保证紧急事故发生时人群可快速疏散,又保证出口宽度不是太大。

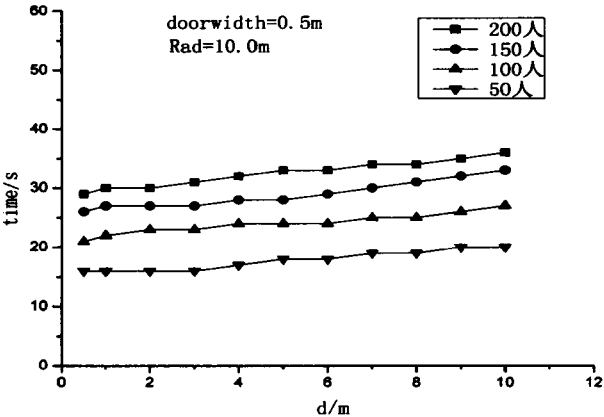
4.2 出口位置影响

4.2.1 单出口建筑

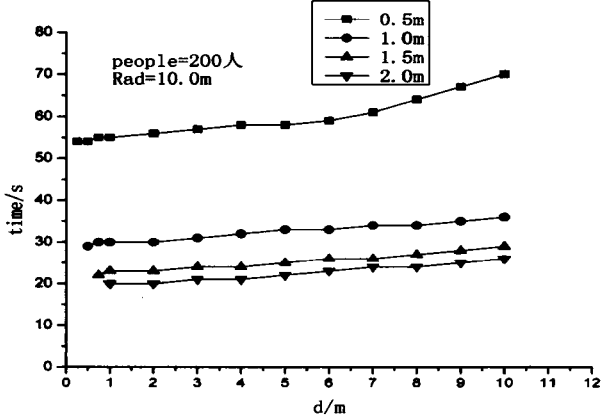
图 4(a)表示建筑空间中只有一个出口,  $d$  为该出口到教室中间位置的距离;图 4(b)表示人群密度、出口位置与疏散总时间的关系;图 4(c)表示出口宽度、出口位置与疏散总时间的关系。



(a) 单出口建筑示意图



(b) 人群密度、出口位置与疏散时间关系图



(c) 出口宽度、出口位置与疏散时间关系图

图 4 单出口建筑中出口设计对群体疏散时间的影响关系

由图 4 可知,在单出口的建筑中,当出口位置在中间时,群体疏散总时间最少。主要有两方面原因:

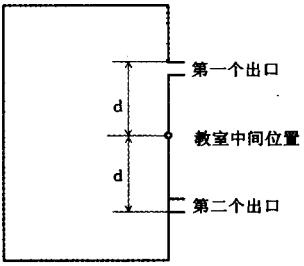
其一,当出口在教室的一侧时,教室另一侧的人需要花费较多的时间跑到出口处;

其二,当出口在教室的一侧时,教室另一侧的人由于受到视野半径的限制,无法看到该出口的位置和方

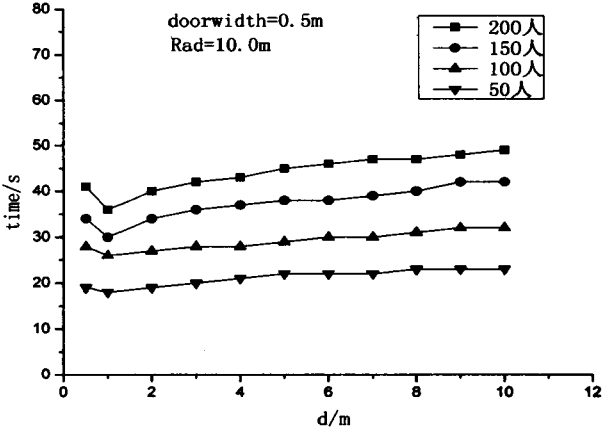
向,只能跟随前面的人,表现出从众的倾向,这样也会使得群体疏散总时间增多。

4.2.2 两个出口对称的建筑

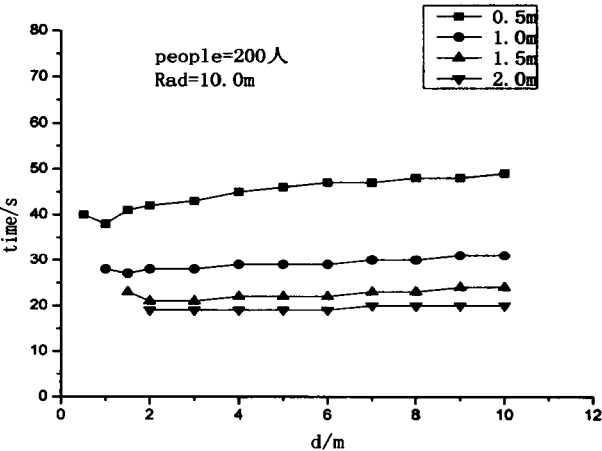
下面假设教室中有两个出口,并且这两个出口位于教室的中间位置对称,如图 5(a)所示,图 5(b)表示人群密度、出口位置与群体疏散总时间之间的关系;图 5(c)表示出口宽度、出口位置与群体疏散总时间之间的关系。



(a) 两个出口对称的建筑示意图



(b) 人群密度、出口位置与疏散时间关系图



(c) 出口宽度、出口位置与疏散时间关系图

图 5 两个对称出口建筑中出口设计对群体疏散时间的影响关系

从曲线的大致走向可以看出,当两个出口之间的距离较小时,群体疏散总时间比较少,当该距离保持一定数值时,群体疏散总时间最少。原因如下:当出口之间的距离比较大时,学生会在选择出口时犹豫不决;当两个出口比较接近且保持一定距离时,学生群体在出

口处不会形成严重的拥堵,两个出口之间的距离起到了对出口处学生进行分流的作用,两股人流减轻了群体拥堵的程度,从而使得学生群体疏散的总时间减少。从图中还可以看出,当人群密度比较大或是出口宽度较小时,这种趋势比较明显。

4.2.3 建筑空间中一个出口坍塌或被堵

在发生过地震的疏散场景中,余震的爆发可能会使得疏散场景中的一个出口突然坍塌或被堵塞,跑向该出口的人群将不得不改变逃跑方向,转而向另一个出口跑动。文中假设在疏散场景中发生过地震,逃生开始10s钟后余震爆发导致一个出口被堵。图6(a)表示一个出口被堵时群体疏散总时间与出口位置、人群密度之间的关系。图6(b)表示一个出口被堵时群体疏散总时间与出口位置、出口宽度之间的关系。

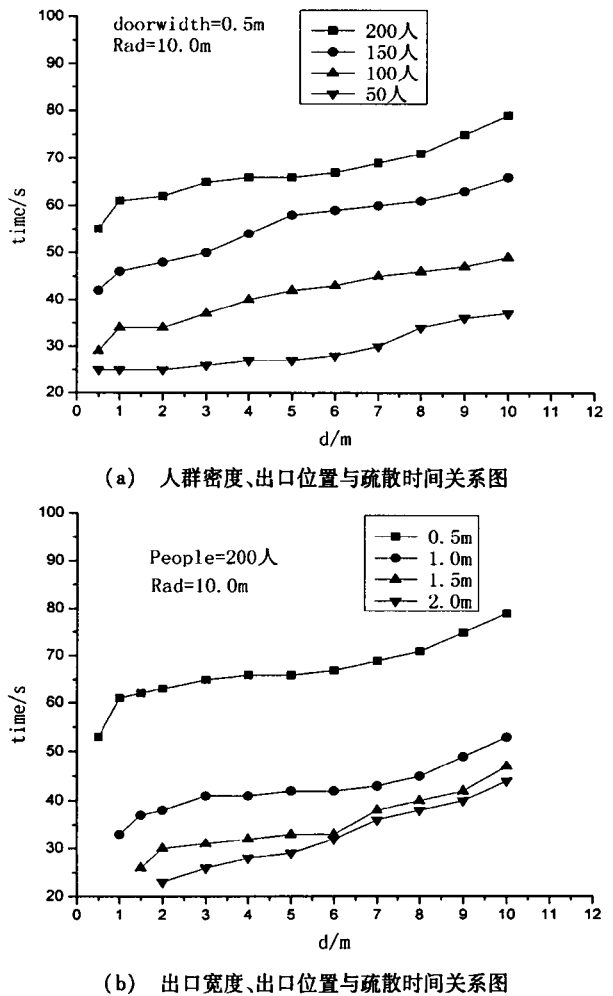


图6 突发情况下两个对称出口建筑设计对群体疏散时间的影响关系图

从上图中可以看出,当两个出口接近相邻时,突发情况下群体疏散总时间比较少。两个出口相邻虽然造成了出口处比较拥挤,但是在一个出口突然“消失”的情况下,这种拥堵造成的时间损耗相对较小。

5 结束语

紧急情况下人群疏散仿真是一个非常复杂的问题,同时又是一个非常紧迫而现实的问题。社会力模型不仅考虑了行人的运动与碰撞,而且考虑了行人的社会心理作用以及人员的视野半径等,因此能够模拟出真实疏散场景中的一些典型现象,如:拱形拥堵等。文中在社会力模型的基础上,对紧急疏散场景中的人员模型进行了分类处理,并仿真实现了突发情况下的群体逃生,从而更加真实而全面地实现了紧急情况下的人群疏散仿真。

此外,文中根据仿真结果分析了不同的出口设计对群体疏散总时间的影响。通过对不同出口设计的分析可知,出口宽度、数量及位置对于安全疏散都有一定的影响。因此,为了尽量减少紧急事故发生时学生的伤亡,学校在设计大型建筑的出口时,如教室、食堂、礼堂等,要充分考虑到这些因素的影响。

参考文献:

[1] 周淑秋,孟俊仙,刘真.大型建筑物人员疏散仿真系统及实现[J].计算机仿真,2009,26(6):191-194.

[2] 曾红艳.人员紧急疏散模型的研究及仿真分析[J].科学技术与工程,2010,10(30):7559-7562.

[3] Takimoto K, Nagatani T. Spatio-Temporal Distribution of Escape Time in Evacuation Process[J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Application, 2003, 320: 611-621.

[4] Helbing D, Buzna L, Johansson A, et al. Self-organized pedestrian crowd dynamics: experiments, simulations, and design solutions[J]. Transportation Science, 2005, 39(1): 1-24.

[5] Helbing D, Molnár P. Self-Organization Phenomena in Pedestrian Crowds[M] // Self-Organization of Complex Structures: From Individual to Collective Dynamics. London: Gordon and Breach, 1997: 569-577.

[6] Helbing D, Molnár, Farkas I J, et al. Self-organizing pedestrian movement[J]. Environment and Planning B: Planning and Design, 2001, 28(3): 361-383.

[7] Helbing D, Farkas I J, Molnar P, et al. Simulation of Pedestrian Crowds in Normal and Evacuation Situations[M] // Pedestrian and Evacuation Dynamics. Berlin: Springer, 2002: 21-58.


[8] Helbing D, Farkas I, Vicsek T. Simulating dynamical features of escape panic[J]. Nature, 2000, 407(1): 487-490.

[9] 胡清梅.一种基于社会力的行人运动模型研究[J].系统仿真学报,2009,21(4):977-980.

[10] 丁玉兰.人机工程学[M].第2版.北京:北京理工大学出版社,2000:15-26.

[11] 宋卫国,于彦飞,陈涛.出口条件对人员疏散的影响及其分析[J].火灾科学,2003,12(2):100-104.

# 学生群体紧急疏散仿真及在出口设计中的应用

作者: 王爽, 吴亚东, WANG Shuang, WU Ya-dong  
作者单位: 西南科技大学计算机科学与技术学院, 四川绵阳, 621000  
刊名: 计算机技术与发展   
英文刊名: Computer Technology and Development  
年, 卷(期): 2013, 23(7)

本文链接: [http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical\\_wjtz201307066.aspx](http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_wjtz201307066.aspx)