

文章编号: 2095-2163(2019)06-0236-05

中图分类号: U231

文献标志码: A

# 基于社会力模型的地铁车站应急疏散仿真分析

梁柯, 李健, 陈颖雪, 刘志钢

(上海工程技术大学 城市轨道交通学院, 上海 201620)

**摘要:** 随着社会经济的迅速发展,地铁已经成为城市化的一个典型代表,随之带来的应急疏散问题受到了越来越多的关注。以社会力行人疏散仿真模型为基础,考虑到紧急情况时行人的紧张心理,在原有社会力模型的基础上,引入反应行人逃生时的紧张因子,将原有社会力模型进行修正,创建吻合地铁站内发生恐怖袭击事件时的行人应急疏散模型。本文使用 Anylogic 软件对新模型仿真验证,仿真过程中呈现出了“堵塞、出口处拱形、快即是慢”等重要人群应急疏散特征,说明修正后模型合理性。通过不断改变紧张因子的大小进行多次仿真,得出紧张心理对行人疏散的影响规律。为地铁车站应急疏散方案的制定提供有力参考。

**关键词:** 社会力模型; 地铁恐怖袭击; 应急疏散; Anylogic

## Emergency evacuation simulation analysis of metro station based on social force model

LIANG Ke, LI Jian, CHEN Yingxue, LIU Zhigang

(School of Urban Rail Transportation, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

**[Abstract]** With the rapid development of social economy, the subway has become a typical representative of the urbanization, and the problem of emergency evacuation has been more and more focused. On the basis of social force of people evacuation simulation model, considering the pedestrian nervous psychology of emergency, on the basis of the original social force model, introducing the tension factor  $g$  reflecting pedestrian mentality on escape, to amend the original social force model, this paper puts forward a pedestrian emergency evacuation model conforming to the subway station when attacked. Based on Anylogic software simulation, the simulation results show the features of "congestion, arch at the exit, fast is slow" and so important phenomenon of crowd evacuation, proves that the new model is close to the original social force model. By changing the size of the tension factor for many times, it is concluded that tense psychological influence law of pedestrian evacuation. It provides a strong reference for the formulation of emergency evacuation plan of metro station.

**[Key words]** social force model; the subway attacks; emergency evacuation; Anylogic

## 0 引言

地铁车站是一个相对封闭的空间,对于发生恐怖袭击、毒气泄漏、爆炸、火灾等人群疏散及救援比较困难,而且车站出口少,通风及照明条件较差,大大加大了应急疏散的难度,加之紧急情况下行人普遍存在紧张、从众等心理,使得事故损失进一步扩大。因此,运用先进的计算机技术对恐怖事件情况下的人群进行仿真研究,找出人群疏散的规律,为应急疏散方案的制定提供一定的参考价值,对保护人群的生命财产安全具有不可言喻的实际意义。对于地铁车站的应急疏散,国内外学者做了大量研究,研究方法主要包括模拟演练、灾后访问及计算机仿

真<sup>[1]</sup>。

对于人群应急疏散的研究,早在上个世纪初期,国内国外就先后有学者涉入。特别是到2000年初,随着计算机技术的不断发展,研究者通过长期的观察研究,构建了许多人群疏散的模型,包括流体动力学模型、元胞自动机模型、磁场力模型、势能场模型、格子气模型以及本文论述的社会力模型<sup>[2-7]</sup>。

纵观国内外行人应急疏散研究,早期的研究重点在于道路交叉口、学校、商业中心、活动广场等人流集中地<sup>[8]</sup>。随着城市轨道交通的发展,行人应急疏散的研究逐步转向城市轨道交通枢纽站,城市轨道交通枢纽站的行人交通特性相比于道路上行人交通存在明显差异,其受到不同基础设施的影响<sup>[9]</sup>。

**作者简介:** 梁柯(1994-),男,硕士研究生,主要研究方向:轨道交通运营管理(客流分析与预测);李健(1980-),男,博士,讲师,主要研究方向:城市轨道交通人因工程、轨道交通政策法规与经济评价;陈颖雪(1983-),女,博士,讲师,主要研究方向:轨道交通客流特征分析与预测;刘志钢(1974-),男,博士,教授,主要研究方向:轨道交通运营管理优化及安全技术、轨道交通人因工程。

收稿日期: 2019-07-12

文献[10]通过地铁车站网络大客流的 SIR 模型的演化仿真,得出换乘站、初始单站、初始多站在突发客流高峰传播中的作用以及传播速率与消散速率的相互关系。文献[11]则着手安全这条城市轨道交通的生命线,建立 ISM 模型、60 安全风险评估模型,以阐明运营事故的影响因素。文献[12]则对突发客流地铁车站交通网络特性,包括行人速度、行人步速等的分析,提出地铁车站交通网络的无标度以及小世界网络两种特性。在紧急情况下,行人具有恐慌、紧张以及盲目从众等心理。只有通过建立符合地铁车站发生恐怖袭击事件情况下的人群疏散模型,才能有效的了解行人运动规律,以解决城市轨道交通遭遇类似于恐怖袭击时的人群疏散问题。

## 1 社会力模型及其修正

### 1.1 社会力模型简介

社会力模型(Social Force Model)是目前公认的研究行人走行规律的行人动力学模型。将行人抽象的看做一个点,对该点进行受力分析,其社会力的构成考虑了行人行走的生理、心理因素及周围环境的影响,并运用牛顿经典力学方程来描述行人运动的受力情况。社会力模型是由 Helbing 和 Molna 于 1995 年在 Lewin 中提出的正常状态下的行人社会力模型,接着 Helbing 和 Molna 借鉴了 Boltzmann 运动方程建立了社会力模型<sup>[13]</sup>,其社会力由以下三种力构成:

(1)行人由于受到目标吸引而产生的自身驱动力。这种力受行人自身的主观意识所支配,由行人自身的思想所期望的速度及路径选择到达目标地点。

(2)行人与行人之间的作用力。社会力模型认为,行人行走时具有自身安全区域,这种安全区域因个体的不同而不同,行人之间因这种安全区域而产生作用力。

(3)行人与障碍物(边界)之间的作用力。行人的走行离不开周围环境,环境跟人两者之间力的作用在模型中主要表现为人与障碍物(边界)之间的作用力。

社会力模型的核心是一组牛顿经典动力学的微分方程,各个参数变量被这组方程所约束,通过计算得出行人所受各约束力和合力的大小,并以此来达到行人之间及行人与障碍物之间的非线性作用,行人 p 所受社会力由式(1)确定。

$$\bar{F}_p = \bar{F}_p^d + \sum_{p \neq q} \bar{F}_{pq} + \sum \bar{F}_{pr}, \quad (1)$$

式中,  $\bar{F}_p$  为行人 p 所受社会力;  $\bar{F}_p^d$  为行人自身驱动力;  $\sum_{p \neq q} \bar{F}_{pq}$  为行人与行人之间的作用力;  $\sum \bar{F}_{pr}$  为行人与障碍物(边界)之间的作用力。

### 1.2 社会力模型的修正

#### 1.2.1 原有社会力模型的不足

尽管原有社会力模型在一定程度上能够对普遍的人群进行模拟,但该模型仍然存在以下几点不足<sup>[14]</sup>。

(1)计算行人与行人之间的作用力时,忽略了个体之间的差异性,将所有行人对行人 p 的作用力变化规律看作相同。而事实上,不同行人之间的影响是存在不同的,如朋友之间的吸引力大于陌生人之间的吸引力。

(2)原有社会力模型认为行人之间的作用力仅取决于两行人之间的距离及两人的半径和。但在现实生活中,两人的位置决定着社会排斥力的存在与否,如当两人背道而驰时,由于相互之间看不到,两人之间显然不存在作用力。

(3)原有社会力模型中,行人期望速度被看作一个定值。而在现实中,行人的期望速度在时刻的改变,它随行人主观意识的变化而变化。

(4)原有社会力模型建立于行人正常情况下的走行行为,对突发事件下人群无伤亡的设想不符合实际。

基于上述分析,诸多研究者针对相应的不足做出了对社会力模型的改进。本文认为原有社会力模型对突发大事件环境下的人群疏散模拟不足以反映实际情况,譬如突发大事件下行人存在恐慌心理等因素对行人行为影响不容忽略。本研究引进紧张因子,对原有社会力模型进行修正,为适应于紧急情况下的人群社会力模型。

#### 1.2.2 社会力模型修正

人群在紧急情况下会产生紧张、恐慌等心理因素,在紧急疏散时,行人的紧张心理会降低行人的走行速度。通常情况下,当行人越紧张时,行人速度越低,紧张的程度越大,行人心理所期望的速度越大。本文主要考虑紧张心理对人群走行速度的影响,紧张心理影响条件下的速度函数由式(2)所定义:

$$v_s(t) \in (v_{smin}(t) - g * v_{\Delta}(t), v_{smax}(t) + 2 * g). \quad (2)$$

式中,  $v_s(t)$  为修正后的实际速度;  $v_{smin}(t)$ ,  $v_{smax}(t)$  分别表示行人实际速度的最小值和最大值;  $g$  为紧张因子;  $v_{\Delta}(t)$  为速度单位(m/s)。

## 2 地铁行人疏散特性分析

### 2.1 行人主要疏散特性

行人疏散效率的评价指标主要是疏散时间和疏散造成的损失,本文研究方向在于行人疏散时间。根据《地铁设计规范》,当地铁站发生紧急情况时,在6min内完全疏散行人是地铁应急疏散的最低指标<sup>[15]</sup>。除设施设备固定因素外,行人的疏散时间主要受行人疏散速度的影响,而影响行人疏散速度的因素主要取决于行人的生理因素及心理因素。

#### 2.1.1 行人生理特性

影响行人疏散速率的生理原因主要有年龄、性别、身体状况等因素;行人的年龄、性别、身体状况的差异会导致行人行走速度的不同,见表1~3<sup>[16-18]</sup>。

(1)年龄因素。年龄的差异会导致行人速度的很大不同,在不同年龄阶段,行人的平均速度不尽相同,见表1。

表1 不同年龄段行人速度

Tab. 1 Pedestrian speed of different ages

年龄类别	儿童	青少年及成人	老年人
速度(m/s)	0.6-1.35	1.19-1.75	0.6-1.2

(2)性别因素。性别不同会存在着不同的安全意识,相对而言,女性比男性更加关注自身安全,而男性比女性更加理性。表2为广州地铁的调查统计。

表2 不同性别速度取值

Tab. 2 Value of speed of different genders

性别	男	女
行人平均速度(m/s)	1.39	1.27

(3)个体占据空间因素。个体占据空间即行人自身的体型大小,根据大量的相关研究,中国人体参数取值见表3。

表3 中国人体参数取值

Tab. 3 The value of human body parameters in China

人体参数	肩宽/cm	肩厚/cm	投影面积/m <sup>2</sup>
平均取值	57.9	33	0.146

(4)身体状况因素。身体状况对行人的行动能力至关重要,通常来说,身体状况良好的行人在反应能力、行走速度和决策能力等方面都较身体状况差的人好。

#### 2.1.2 行人心理特性

当地铁站内发生恐怖袭击等紧急情况时,由于行人的自我防护心理,行人会产生紧张、焦虑、恐慌等心理反应,这些刺激会降低行人在疏散时的认知

与决策能力,影响疏散效率,如紧急情况下行人容易产生“盲目的从众行为、出口处成拱形、快即是慢”等现象。紧张、恐慌等消极心理会在行人间相互影响,会使行人间产生相互推揉、挤压,严重影响行人的疏散。

### 2.2 地铁车站不同设施内的运动特性

行人的行走速度受行走环境的影响,在轨道交通车站内主要受步行通道、楼道、自动扶梯以及闸机的影响。步行通道对行人行走行为的影响主要在两个方面:一是步行通道的空间大小,由于地铁步行通道一般较狭窄且半封闭,行人在步行通道的速度较空旷环境处快;二是步行通道的坡度也会对行人的行走速度产生影响,在坡度小于5%的步行通道行走时,行人的速度基本不会改变,在坡度10%的步行通道行走时,行人的速度会降低10%左右,而在坡度为20%以上时,行人在步行通道的速度较少25%左右。在楼道里,行人速度会受到台阶高低、台阶上人流密度的影响,相对于步行通道内的行人速度而言,楼道内的行人速度较低,一般情况下,行人在出站楼梯上的密度及平均速度约为3.3人/m<sup>2</sup>、0.52 m/s。自动扶梯具有机动性差的特性,当发生紧急情况时,通常来不及改变自动扶梯的运行方向;当自动扶梯的运行方向与疏散方向一致时,行人可在自动扶梯移动的基础上再移动,从而加快行人疏散速度。在闸机处,由于行人要接受闸机的检票,行人的速度变化过程为“正常速度-减速-停止-加速-正常速度”这一过程。

## 3 恐怖袭击环境下的实例仿真

### 3.1 修正后社会力模型验证

根据上述分析得出行人速度区间为(0.6, 1.75),代入式(2)得出紧张心理影响条件下的速度函数  $v_s(t) \in (0.6 - g * v_v(t), 1.75 + 2 * g)$ 。

本文取紧张因子分别为“0.1、0.2、0.3、0.4”,计算得出相应的速度区间为(0.5, 1.95)、(0.4, 2.15)、(0.3, 2.35)、(0.2, 2.55),单位为m/s。在基于社会力模型的 anylogic 行人库中,行人的舒适速度区间为(0.5, 1),取其平均值为0.75 m/s,各个区间的速度平均值为:1 m/s、1.275 m/s、1.325 m/s、1.375 m/s,可得出不同紧张因子影响条件下的速度分别是舒适速度的1.33、1.70、1.77以及1.83倍。

在 anylogic 中设置一个名为“紧急疏散”的按钮,其行动函数如图1所示。

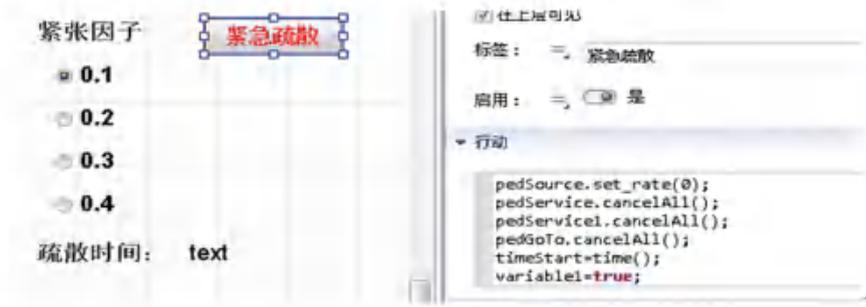


图 1 紧急疏散行动部分代码

Fig. 1 Code for emergency evacuation operations

本仿真环境构建如图 2 所示, 两个服务区域, 三个出入口, 当发生紧急情况时, 行人禁止进入, 房

间内的行人寻找最近出口逃离, 写入函数体如图 3 所示。



图 2 仿真环境图

Fig. 2 Simulation environment diagram

```

// 寻找最近出口
double dis = infinity;
targetLine tLine = new targetLine();
for(targetLine t1 : main.collection){
    if(this.distanceTo(t1.getX(),t1.getY())<dis){
        dis = this.distanceTo(t1.getX(),t1.getY());
        tLine=t1;
    }
}
return tLine;

```

图 3 就近出口逃离

Fig. 3 Escape from the nearest exit

### 3.2 结果分析

#### 3.2.1 出现“出口处拱形现象”和“堵塞现象”

“出口处拱形现象”是在人群疏散时, 由于出口的设计不能满足同一时间通过所有人, 导致人群聚集于出口处, 形成一个拱形。修正后的调和社会力模型出现了明显的“出口处拱形现象”。“堵塞现象”是在人群疏散时, 出口处常常成为疏散的瓶颈, 该现象可在仿真中直观地展示出来。此外, 为使本仿真更加逼真可靠, 实验设计统计了出口处的人流密度, 如图 4 所示。

#### 3.2.2 速度呈现“快即是慢”现象

“快即是慢”现象是人群疏散时的重要现象,

“快既是慢”是指人群在疏散过程中, 行人心理所期望的速度越快, 实际疏散时间反而越慢, 如图 5 所示。

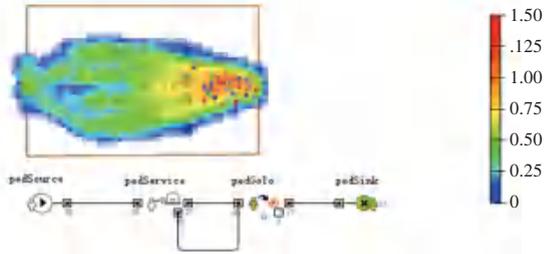


图 4 堵塞现象

Fig. 4 Blockage

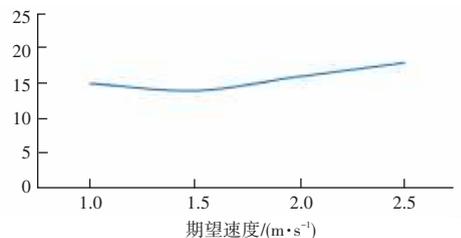


图 5 快即是慢

Fig. 5 Fast is slow

图5中可以看出,当人群期望速度较小时(约小于1.5 m/s),行人疏散时间随着期望速度的增加而小幅度减少,但当人群的期望速度增加到一定值(约小于1.5 m/s)时,人群的疏散时间随期望速度的增加而增加,即“快即是慢”现象。

### 3.2.3 紧张心理对疏散时间的影响

紧张心理对疏散时间的影响并不都是消极的,当紧张因子约为0.2时,疏散时间相应的减少,这说明紧张情况下行人适当的紧张感有利于积极的刺激大脑,提高疏散效率。但当行人过于紧张时,尽管行人的个体速度增加,但由于行走环境受限,整体疏散时间反而增加,因为行人处于极度紧张状态时,行人的反应和决策都会受到限制,极易产生盲目行为,进而产生拥挤、推搡、踩踏等影响疏散时间的情况。如图6所示。

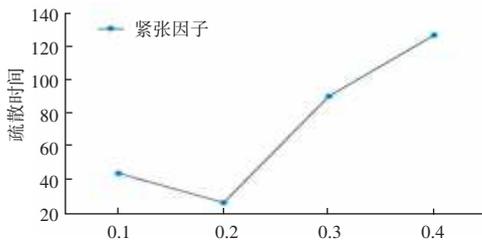


图6 疏散时间随紧张因子变化

Fig. 6 Evacuation time varies with tension factors

## 4 结束语

修正后的社会力模型考虑了行人疏散时的紧张心理,并通过模拟仿真验证修正后模型的合理性和适用性。由于篇幅和时间受限,本文并未运用修正后的社会力模型对实际车站进行仿真,在后续研究中,将对深圳竹子林站进行实例仿真,进一步研究闸机、楼扶梯等关键设备处的行人心里及疏散情况。

(上接第235页)

理模式。在校园数据管理中,由于区块链技术的引入,在去中心化的支持下,校园数据管理有了新的方式。虽然区块链技术应用于校园数据管理具有多方面的作用,但当前还存在一些问题,解决好这些问题,有利于提升区块链技术在校园数据管理的应用效果。

## 参考文献

- [1] 侯彦庆. 计算机仿真技术的应用及发展趋势[J]. 信息通信, 2016(2): 181-182.
- [2] 李进平, 张乐文. 交通流的流体动力学模型研究[J]. 武汉理工大学学报, 2002, 26(6): 748-751.
- [3] WOLFRAM S. Theory and Application of Cellular Automata. World Scientific, 1986.
- [4] FUKUI M, ISHIBASHI Y. Self-Organized Phase Transitions in Cellular Automaton Models for Pedestrians[J]. J Phys Soc Jpn, 1999, 68: 2861.
- [5] Matsushita, Olazaki. A Study of Simulation Model Far Away Finding Behavior By Experiments. Mazes. Journal of Architecture, Planning, Environment Engineering, 1991, 429: 51-59.
- [6] 何锐权. 基于势能场模型的人群疏散仿真研究[D]. 广州: 中山大学, 2013.
- [7] MURAMATSU M, IRIE T, NAGATANI T. 1999 Physica A 267487.
- [8] 陈然, 董力宏. 中国大都市行人交通特征的实测和初步分析[J]. 上海大学学报, 2005, 11(1): 93-97.
- [9] 周继彪, 陈红, 等. 基于云识别的地铁换乘枢纽拥挤度辨识方法[J]. 吉林大学学报, 2016, 46(1): 100-107.
- [10] 刘小霞. 城市轨道交通网络突发客流传播影响分析[D]. 北京: 北京交通大学, 2011.
- [11] 徐田坤. 城市轨道交通网络运营安全风险理论及方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2012.
- [12] 吴璐. 城市轨道交通网络突发客流特性及拥挤控制研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2013.
- [13] Helbing D, Molnar P. Social Force Model for Pedestrian Dynamics[J]. Phys Rev E, 1995, 51(5): 4282-4286.
- [14] 汪蓄, 蔡云, 等. 社会力模型的改进研究[J]. 南京理工大学学报, 2012, 35(1): 143-149.
- [15] GB50157-2003. 地铁设计规范. 北京: 中国计划出版社, 2003.
- [16] 陈鹏. 基于行人行为特征的大型铁路客运站应急疏散仿真方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2018.
- [17] 李永行. 城市轨道交通车站行人微观行为建模与仿真[D]. 吉林: 吉林大学, 2018.
- [18] 刘杨. 基于 Anylogic 的地铁站应急疏散仿真研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2016.

## 参考文献

- [1] 许涛.“区块链+”教育的发展现状及其应用价值研究[J]. 远程教育杂志, 2017(3): 9-10.
- [2] 金义富. 区块链+教育的需求分析与技术框架[J]. 中国电化教育, 2017(9): 15-18.
- [3] 冯嫚, 陈琳. 区块链技术: 推动教育变革的新兴技术[J]. 中国教育技术, 2017(11): 6-8.