

基于改进社会力模型的地铁车站应急疏散模型

熊 斌,杨聚芬,刘志钢

(上海工程技术大学 城市轨道交通学院,上海 201620)

摘 要: 应急情况下的客流疏散对地铁车站运营安全至关重要。综合考虑行人心理状态和社会属性的影响,对行人感知范围进行了重新定义,并对应急疏散情况下的行人绕行效应进行了分析验证。应用 Anylogic 软件对上海地铁 9 号线松江大学城站的实际客流情况进行建模并进行对比分析。模型修正后,总体疏散时间减少了 7.5%,出口 2 处滞留的行人密度降低了 1.14 人/m²,行人行走距离增加了 5.0%。经验证得出,改进后的社会力模型符合实际疏散情况。

关键词: 行人感知范围;行人心理属性;行人绕行效应;应急疏散;社会力模型

中图分类号: U231.92

文献标志码: A

文章编号: 1671-8798(2019)06-0488-08

Pedestrian emergency evacuation model of metro stations based on improved social force model

XIONG Bin, YANG Jufen, LIU Zhigang

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

Abstract: The study of passenger evacuation in case of emergency is an important issue affecting the operational safety of metro stations. The article took pedestrian mental states and social property into consideration. It redefined pedestrian perception range, analyzed and verified pedestrian detour effect under pedestrian evacuation. The study built the simulation case and conducted comparative analysis of Songjiang University Town Station in Shanghai Metro Line 9 by virtue of Anylogic simulation software. After amending the model, the total evacuation time decreased by 7.5%, the pedestrian density dropped at Exit 2 by 1.14 passenger/m² and the detour distance increased by 5.0%. By testing and verifying, the improved social force model tallied with the actual evacuation situation.

Keywords: pedestrian perception range; pedestrian mental property; pedestrian detour effect; emergency evacuation; social force model

收稿日期: 2019-03-07

基金项目: “十三五”国家重点研发计划项目子课题(2017YFC0804900)

通信作者: 杨聚芬(1988—),女,山东省临沂人,讲师,博士,主要从事交通安全和人因工程研究。E-mail: yangjufenabc@

126.com。

随着城市轨道交通事业的发展,其运营安全问题备受关注,对突发事件下的应急疏散行为研究,可为车站安全运营提供技术支持和理论支撑^[1]。由于车站内行人运动同时受到自身的身体状况和生理机能及外界环境的影响,呈现出行为状态的随机性和不稳定性,使得突发事件下的车站内应急疏散工作成为解决地铁运营安全管理技术的重要瓶颈之一。

国内外关于行人疏散方面的研究较为丰富,主要集中在车站、体育馆、高层建筑的疏散行人运动规律和仿真研究。Seriani 等^[2]研究大厅中垂直扶手的位置、门前隔离区的划定及使用不同的门进行上下车对行人疏散时间的影响;Ma 等^[3]研究行人视野范围固定的情况下加入导向标识对行人疏散效率的影响;Luh 等^[4]研究了火灾情况下心理因素与行人疏散期望流量的关系;Wood 等^[5]研究海啸时游客疏散效率和疏散交通工具之间的关系;金泽人等^[6]考虑火灾扩散和局部拥堵与行人运动规律的关系。常见的行人疏散研究模型有网络流模型^[7]、流体动力学模型^[8]、元胞自动机模型^[9-10]和社会力模型^[11-13]等。网络流模型和流体动力学模型常用于研究行人宏观运动,可以观察并快速掌握人群的运动特征,但是忽略了个体间的相互作用和行人自身的行为习惯;元胞自动机模型行人运动规则相对简单,但是个体行为描述较为粗糙,无法反映行人之间的交互情况;社会力模型将疏散时产生的各种恐慌、从众、趋光等多种因素考虑在内,可以重现实行人疏散过程中的心理状态变化,准确度较高,但是计算复杂,建模难度较大。上述文献在考虑行人间相互关系时仅涉及行人的视野范围,不包括听觉、触觉等感觉,因此需要设置一个更为合理的行人感知范围;文献中虽然提到恐慌心理会对行人行为造成影响,却未能解释恐慌心理产生的原因和如何修正行人的心理状态,因此需要在模型中加入心理状态的修正。此外,在实际行人疏散过程中往往会产生行人的绕行现象,导致行人的实际行走距离远远大于疏散最短距离。综上所述,为了能够准确研究车站应急情况行人疏散行为,并且着重分析行人个体的异常行为,本研究选择社会力模型作为研究方法,根据上海地铁9号线车站疏散情况建立模型。

1 社会力模型

社会力模型行人的行走机制是通过分析行人行为的改变过程,将行人和行人、行人和周围环境之间的相互作用转换为吸引力和斥力,利用合力驱动行人运动。目前,已有研究者将心理压力理论和社会力模型结合并验证了心理压力和社会力的相关性^[12]。

1.1 初始社会力模型

Helbing 的社会力模型为:

$$m_i \frac{dv_i}{dt} = f_i + \sum_{j(j \neq i)} f_{ij} + \sum_w f_{iw} \quad (1)$$

在 Helbing 的初始社会力模型中,行人共受到3种不同类型的作用力,分别为自驱动力 f_i ,人与人之间的作用力 f_{ij} ,人与障碍物之间的作用力 f_{iw} ,其中:

$$f_i = m_i \frac{v_i^0(t) e_i^0(t) - v_i(t)}{\tau_i} \quad (2)$$

$$f_{ij} = \{A_i \exp[(r_{ij} - d_{ij}/B_i)] + kg(r_{ij} - d_{ij})\} n_{ij} + \kappa g(r_{ij} - d_{ij}) \Delta v_{ji}^t t_{ij} \quad (3)$$

$$f_{iw} = \{A_i \exp[(r_i - d_{iw}/B_i)] + kg(r_i - d_{iw})\} n_{iw} - \kappa g(r_i - d_{iw})(v_i \cdot t_{iw}) t_{iw} \quad (4)$$

式(1)~(4)中: m_i 为行人*i*的质量; $v_i^0(t)$ 为行人*i*的期望速度; $e_i^0(t)$ 为期望速度的方向; τ_i 为调整速度的反应时间; A_i 为心理排斥力的强度; B_i 为心理排斥力的范围; k 为身体挤压系数; κ 为滑动摩擦力系数; $r_{ij} = r_i + r_j$ 为行人*i*与行人*j*的半径和; $d_{ij} = \|r_i - r_j\|$ 为行人*i*与行人*j*质心之间的距离; $n_{ij} = (n_{ij}^1, n_{ij}^2) = (r_i - r_j)/d_{ij}$ 为行人*j*指向行人*i*的单位向量; $t_{ij} = (-n_{ij}^2, n_{ij}^1)$; $\Delta v_{ji}^t = (v_j - v_i) \cdot t_{ij}$; d_{iw} 为行人*i*的质心到障碍物表面的距离; $n_{iw} = (n_{iw}^1, n_{iw}^2)$ 为障碍物*w*指向行人*i*的单位向量; $t_{iw} = (-n_{iw}^2, n_{iw}^1)$ 。

1.2 初始模型的局限性

社会力模型中假设行人在疏散过程中的期望速度是恒定不变的,很明显这与实际情况不符,导致基于社会力模型的行人仿真模型与实际疏散过程存在一定的差异。初始社会力模型在一定程度上可以模

拟行人运动情况,但是初始模型中行人感知范围仅考虑视觉的视野范围,忽视了包括听觉、触觉在内的感官因素;此外,固定不变的期望速度不符合实际疏散情况,随着行人心理状态的变化,行人期望速度和期望方向也相应发生改变;通常行人选择距离自己最近的出口,但是在应急情况下乘客无法冷静思考,当最近出口等待人数较多时会主动寻找其他出口逃生,增加了站内的行走距离。综上,我们在初始社会力模型的基础上进行修正,重新定义行人感知范围,引入行人恐慌系数解释行人绕行现象,计算行人绕行距离,建立地铁站应急疏散模型。

2 社会力模型修正

2.1 行人感知范围

因地铁站内封闭的环境和复杂的客流,行人获取信息主要依靠视觉和听觉。行人的视野范围设为行人目视方向为中线的扇形区域,左右角度各 60° ,半径为 3 m ;同时 3 m 内的近距离声音事件中,听音者耳壳引起的声滤波在距离判断中所起的作用不可忽略^[14]。因此,综合视觉和听觉两种感官修正行人感知范围,并将所有行人统一视作碰撞面积为 D 的圆形。如图 1,本研究的行人感知范围是以行人的质心为圆心、半径 G 为 3 m 的圆。行人的局部密度为感知范围内行人总数与行人感知范围面积之比,根据所得局部密度进行心理压力的计算。

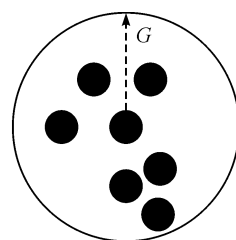


图 1 行人感知范围

Fig. 1 Pedestrian perception range

2.2 行人心理属性

恐慌是一种人类本能,当行人个体面临不确定的危险时,会产生恐慌的心理现象。

同时,当行人面临重大威胁时,人群的恐慌心理会相互影响并且传播。著名心理学家 Tulex 经过研究发现,行人的恐慌心理来自人类大脑的组成部分杏仁核产生的恐慌反应,并直接影响行人的外在行为^[15]。

2.2.1 行人恐慌系数影响因素分析

行人恐慌系数指行人在产生恐慌心理的情况下恐慌程度的大小,恐慌程度越大则恐慌系数越大。地铁站发生紧急情况时,行人由于心理属性发生改变,产生了恐慌心理,导致行人自身情况发生了改变,运动轨迹也相应发生变化。根据陈绍宽等^[16]的研究,行人的恐慌程度是行人心理属性发生改变的量化体现,并且恐慌程度的大小主要取决于行人的滞留时间、局部密度和危险源距离。同时,考虑行人在紧急情况下具有趋光性的特点,加入出口和行人当前位置的距离长短作为行人恐慌系数的影响因素。综上所述,行人恐慌系数主要由 4 个影响因素组成:1)滞留时间,从紧急情况发生时至当前时间节点所消耗的时间;2)局部密度,以疏散行人作为中心的单位面积上的行人数量;3)危险源距离,行人距离危险事件源的距离;4)出口和行人当前位置的距离。

2.2.2 行人恐慌系数计算方法

本文提出的恐慌系数计算方法如下:

$$P(t) = \max\{p(t), g[\rho(t)], h[d(t)], m[n(t)], P(t-1)\}。 \quad (5)$$

式(5)中: $P(t)$ 为 t 时刻的行人恐慌系数; $p(t)$ 为 t 时刻滞留时间造成的行人恐慌系数; $g[\rho(t)]$ 为 t 时刻局部密度 $\rho(t)$ 造成的行人恐慌系数; $h[d(t)]$ 为 t 时刻危险源距离 $d(t)$ 造成的行人恐慌系数; $m[n(t)]$ 为 t 时刻距离出口距离 $n(t)$ 造成的行人恐慌系数。

由于曲线接近于 Sigmoid 函数^[17],本文建立行人恐慌系数的计算公式如下:

$$p(t) = \{1 + \exp[-(\alpha_1 t - \beta)]\}^{-1}, \quad (6)$$

$$g[\rho(t)] = \{1 + \exp[-(\alpha_2 \rho(t) - \beta)]\}^{-1}, \quad (7)$$

$$h[d(t)] = \{1 + \exp[-(\alpha_3 d(t) - \beta)]\}^{-1}, \quad (8)$$

$$m[n(t)] = \{1 + \exp[(\alpha_4 n(t) - \beta)]\}^{-1}。 \quad (9)$$

式(6)~(9)中: α_1 、 α_2 、 α_3 、 α_4 分别为恐慌系数 $p(t)$ 、 $g[\rho(t)]$ 、 $h[d(t)]$ 和 $m[n(t)]$ 的激增系数; β 为恐慌系数曲线函数的边界约束。根据 Kholshevnikov^[18]的研究,当心理压力临界值为 0.7 时,对应的滞留时间为

92.6 s,局部密度为 $5.0 \text{ 人}/\text{m}^2$,距离危险源为 10 m,距离出口为 25 m,将这些参数代入式(6)~(9)中可得心理激增系数 α_1 、 α_2 、 α_3 和 α_4 ,分别为 0.090、1.669、0.665 和 1.212。

2.2.3 行人期望速度的修正

在疏散过程中,行人总是朝着出口移动,此处出口宽度为 l 行人运动状态的实时改变性增加了研究其行为的难度,本研究将行人的行走路径划分为以 σ_i^0 、 σ_i^1 、 \dots 、 σ_i^p 为节点的路径,如图 2 所示。如果 σ_i^k 是行人 i 在 t 时刻距离行人最近的节点,那么行人 i 在 t 时刻期望速度的方向 $e_i^0(t)$ 可以根据行人当时的位置 $\sigma_i(t)$ 计算得到,即

$$e_i^0(t) = \frac{\sigma_i^k - \sigma_i(t)}{|\sigma_i^k - \sigma_i(t)|} \quad (10)$$

行人期望速度的大小受到恐惧心理的影响发生改变,在实际疏散过程中,行人的心理状态介于冷静和恐慌之间,并且期望速度的变化是连续而并非离散的,那么修正过后的期望速度 $U_i(t)$ 可以表示如下:

$$U_i(t) = [1 - P_i(t)]S_i(t) + P_i(t)s_i(t) \quad (11)$$

式(11)中, $U_i(t)$ 为行人 i 修正后的期望速度, $S_i(t)$ 为行人 i 在不恐慌时的期望速度, $s_i(t)$ 为行人 i 在完全恐慌时的期望速度。根据文献[16]¹¹⁶,行人在完全恐慌时的期望速度 $s_i(t)$ 可以表示如下:

$$s_i(t) = \zeta S_i(t), \quad (12)$$

$$\zeta = 1.49 - 0.36 \frac{D}{M} \quad (13)$$

式(13)中: ζ 为行人行走的速度修正系数,通常在上楼梯的情况下为 1.26,下楼梯的情况下为 1.21, D 为行人的碰撞面积, M 为地面积。

综上所述,修正行人感知范围和期望速度过后,改进的社会力模型如下:

$$m_i \frac{dv_i}{dt} = m_i \frac{U_i(t) \frac{\sigma_i^k - \sigma_i(t)}{|\sigma_i^k - \sigma_i(t)|} - U_i(t)}{\tau_i} + \sum_{j(j \neq i)} f_{ij} + \sum_w f_{iw} \quad (14)$$

2.3 行人绕行效应

2.3.1 行人绕行效应定义

由于突发事件具有传播快、后果严重等特征,需要在短时间内安全、快速地将站内所有客流疏导至安全区域,这就造成疏散口通行能力低于疏散客流需求的现象,导致疏散口周围滞留大量客流。初始模型中虽然存在部分行人采取绕行行为,但并没有计算绕行效应距离的公式和方法。因此,自突发事件发生时刻起至客流被疏散到安全目的地期间,设实际行走距离为 l_1 ;发生突发事件时客流所在地点与最近疏散口之间的距离为最短疏散距离,设为 l_2 ;绕行距离 Δl 为疏散客流实际行走距离 l_1 与最短疏散距离 l_2 之间的差值。

2.3.2 行人行走情况分析

行人在行走过程中总是朝着出口方向进行运动的,但是在遇到人流拥堵时,部分行人会选择原地等待,部分行人会选择在离出口距离相同的弧线上运动,等待行人数量减少后继续向出口方向移动。同时,行人在群体活动中具有盲目性和从众性,行人的实际速度受到其感知范围内其余行人速度的影响,定义行人 i 感知范围内其余 $n-1$ 位行人行走的瞬时速度为 $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_{n-1}$,避免疏散过程中极少出现的异常行走行为,不考虑感知范围内的其余行人的最高和最低速度,则行人 i 在 t 时刻的瞬时速度如下:

$$V_i(t) = \frac{1}{n-3} \left(\sum_{\theta=1}^{n-1} \omega_{\theta} - \omega_{\max} - \omega_{\min} \right) \quad (15)$$

2.3.3 行人行走距离计算

为了得出行人的绕行距离,分别计算行人 i 的实际行走距离 l_1 和期望行走距离 l_2 。

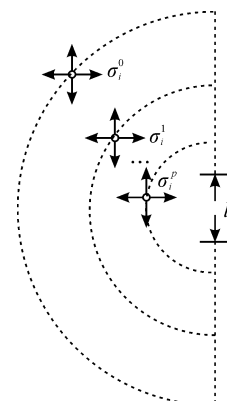


图2 行人运动状态

Fig. 2 Pedestrian motion state

$$l_1 = \int_0^t V_i(t) dt; \quad (16)$$

$$l_2 = \int_0^t S_i(t) [1 + 0.49 P_i(t) - 0.36 \frac{D}{M}] dt. \quad (17)$$

由式(16)~(17)可得行人 i 在地铁站内的绕行距离 Δl 。将该模型下得出的绕行距离,通过 Anylogic 软件进行行人疏散的仿真模拟。

3 仿真验证与结果分析

3.1 疏散试验

为了模拟地铁站的实际疏散情况,设计了车站应急疏散试验,试验场地如图 3 所示。在试验区域内划分地铁站站厅层和站台层,规定出口数量和位置,模拟行人从站厅层付费区内疏散至付费区外,再经由两个不同的出口疏散到地面的过程。



图 3 行人疏散情况模拟试验

Fig. 3 Pedestrian evacuation simulation experiment

选择包括 37 名男性和 13 名女性在内的 50 名行人用于模拟疏散,被疏散人员随机分布在车站内,当疏散指令发出时,行人开始疏散。疏散时关闭试验场地内的照明灯光和其他光源,仅采用夜光地标和应急照明设备进行疏散;试验场地内循环播放疏散广播,安排人员身着反光背心,在通道处挥舞引导棒。为了模拟车站大客流,当行人疏散出车站并记录步数后仍回到车站内随机位置,重新向出口处进行疏散;共进行 20 轮疏散,模拟 1 000 人的疏散效果。如图 4,为了防止行人回到车站内相同位置,将车站划分为 6 个大小相等的区域,行人进行完一轮疏散之后抛掷骰子,根据数字选择相应的位置进行第二轮疏散,每个被测行人都有可能随机出现在车站的各个区域,这样就降低了行人选择熟悉路线进行逃生的可能性,保证疏散路线的随机性和合理性。

在 3 个出口处设置观察区域,通过分析执法记录仪试验录像,计算疏散时出口处的行人密度。每位参加试验人员携带一个记步装置,试验结束后用步数乘以步长来计算试验场地行人实际的行走距离,进而得到行走距离总和。共进行 5 组疏散试验,疏散结果如表 1 所示。

表 1 行人疏散试验

Table 1 Pedestrian evacuation experiment

编号	疏散时间/s	出口 1 密度/(人·m ⁻²)	出口 2 密度/(人·m ⁻²)	出口 3 密度/(人·m ⁻²)	行走距离/m
1	578.5	1.5	2.5	2.0	32 291
2	622.4	2.0	2.0	1.5	34 055
3	576.4	1.5	2.0	1.5	33 712
4	591.6	2.0	2.0	2.0	33 274
5	605.4	2.0	2.5	2.5	33 055
平均值	594.9	1.8	2.2	1.9	33 277

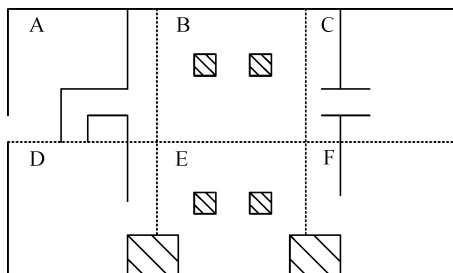


图 4 行人疏散情况模拟试验平面图

Fig. 4 Plane diagram of pedestrian evacuation simulation experiment

根据 5 组试验结果可知,出口 2 处行人密度大于出口 1 和出口 3,出口 1 和出口 3 处的行人密度接近,平均行走距离为 33 277 m,与理论最短行走距离 30 000 m 相比,行走距离增加了 10.9%,产生了行人绕行行为。

3.2 仿真试验设置

以上海地铁 9 号线松江大学城站出入口为研究对象建立仿真模型,研究紧急情况下乘客疏散情况。行人疏散场景设置如图 5 所示,分别应用修正前后的模型进行仿真模拟,其中场景 1 为应用初始社会力模型进行的疏散仿真,场景 2 为应用修正过后的社会力模型进行的疏散仿真;疏散行人均匀分布在车站站台层的付费区和非付费区,模拟车站一共有 3 个疏散出口,当紧急事件发生后,站内所有行人向这 3 个出口疏散。

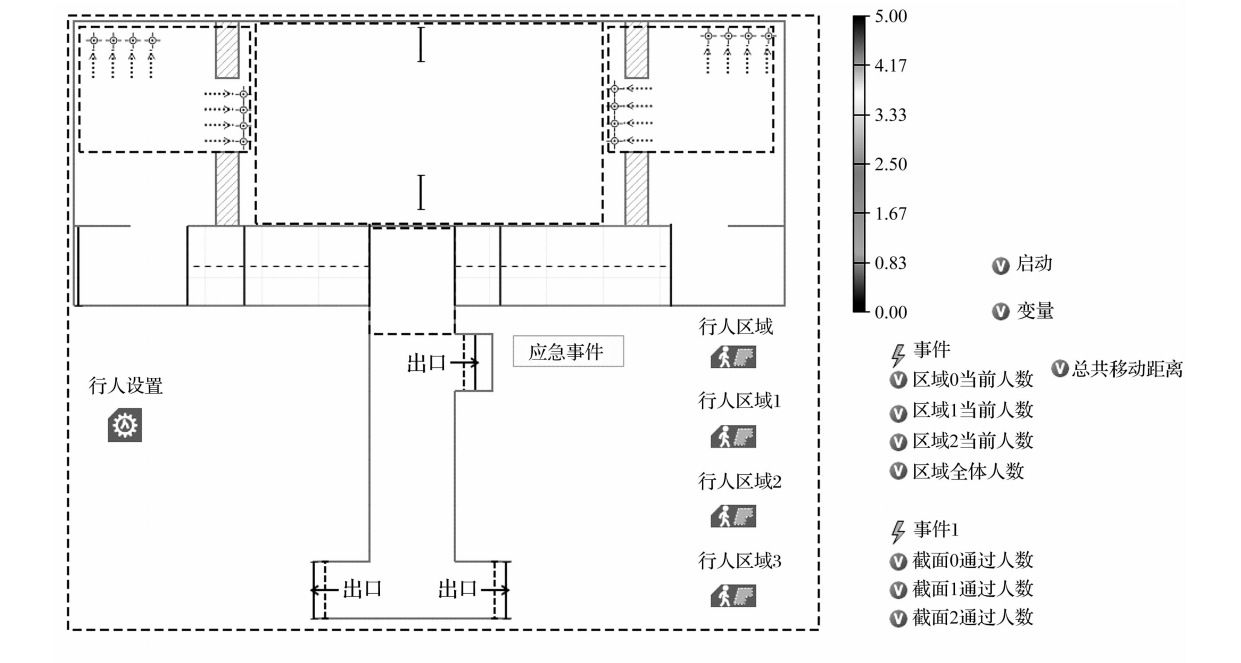


图 5 行人疏散场景设置
Fig. 5 Pedestrian evacuation scene settings

应用 Anylogic 仿真软件分别对场景 1 和场景 2 进行仿真,并分析疏散时间、不同出口的行人密度和疏散行人的行走距离 3 个属性。模型参数如下:

心理排斥力的强度 A_i , 1.15; 心理排斥力的范围 B_i , 1; 行人的初始期望速度 $v_i(0)$, $1.7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; 调整速度的反应时间 τ_i , 0.25 s; 行人的质量, 65 kg; 身体挤压系数, 8; 滑动摩擦力系数, 0.75; 行人半径, 0.3 m; 行人感知范围半径, 3 m。

3.3 仿真结果

3.3.1 场景 1 仿真结果

应用原始社会力模型进行疏散仿真模拟,结果如表 2 所示。

表 2 场景 1 行人疏散情况模拟试验
Table 2 Pedestrian evacuation simulation experiment in scenario 1

编号	疏散时间/s	出口 1 密度/(人·m ⁻²)	出口 2 密度/(人·m ⁻²)	出口 3 密度/(人·m ⁻²)	行走距离/m
1	655.2	1.9	3.2	2.1	31 001
2	658.1	1.6	3.5	1.7	30 995
3	657.5	2.1	2.9	1.8	31 175
4	654.9	1.8	3.1	1.9	31 101
5	665.8	1.7	3.0	2.1	31 245
平均值	658.3	1.7	3.14	1.92	31 103

3.3.2 场景 2 仿真结果

应用修正过后的社会力模型进行疏散仿真模拟,结果如表 3 所示。

表 3 场景 2 行人疏散情况模拟试验

Table 3 Pedestrian evacuation simulation experiment in scenario 2

编号	疏散时间/s	出口 1 密度/(人·m ⁻²)	出口 2 密度/(人·m ⁻²)	出口 3 密度/(人·m ⁻²)	行走距离/m
6	615.4	1.7	1.7	1.9	32 448
7	605.9	1.4	2.5	2.1	32 956
8	608.4	1.5	1.8	1.7	32 854
9	611.2	1.9	2.1	2.0	32 556
10	602.7	1.3	1.9	1.9	32 475
平均值	608.7	1.56	2.0	1.92	32 658

3.4 结果分析

3.4.1 行人疏散时间

3 种情况下的行人疏散时间如图 6 所示。场景 1 情况下,由于乘客均采用寻找最近出口的策略,在出口处出现了滞留现象,导致疏散时间较长,共进行 5 次疏散模拟,平均疏散时间为 658.3 s;场景 2 情况下,由于行人找感知范围内随机的出口逃生,提升了疏散效率,平均疏散时间为 608.7 s。结果表明,经过仿真模拟对比,模型改进后行人总体疏散时间减少了 7.5%。

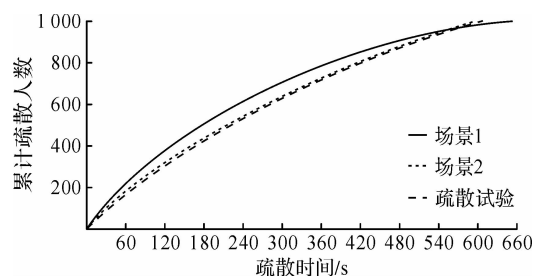


图 6 行人疏散时间对比

Fig. 6 Pedestrian evacuation time comparison chart

3.4.2 出口处行人密度

3 种情况下的出口行人密度如图 7 所示。场景 1 情况下,出口 1 和出口 3 处行人密度接近,平均行人密度分别为 1.7 人/m² 和 1.92 人/m²,出口 2 处行人密度大,平均行人密度为 3.14 人/m²,原因是出口 2 是距离行人最近的出口,在初始社会力模型的仿真模拟下,行人在遇见出口拥堵的情况时选择原地等待,选择最近的出口逃生;场景 2 情况下,在改进后的社会力模型仿真模拟下,行人受到恐慌心理的影响,面对出口拥堵时放弃原地等待,选择绕行寻找其他出口进行疏散。结果表明,经过仿真模拟对比,模型改进后行人密度减少了 1.14 人/m²。

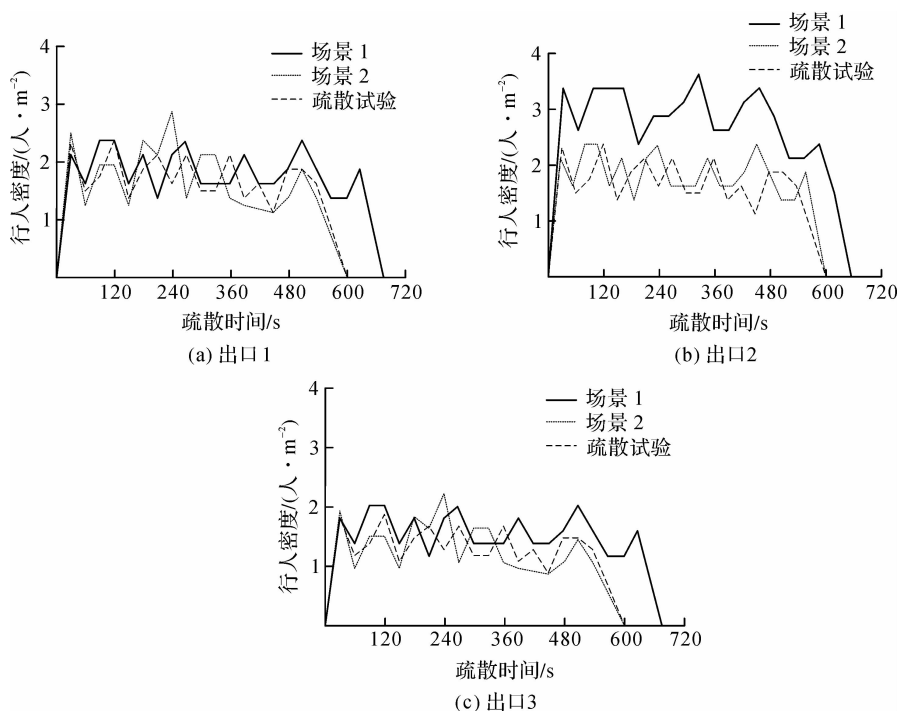


图 7 3 个出口行人密度对比

Fig. 7 Pedestrian density comparison of three exits

3.4.3 行人行走速度

3种情况下的行人行走距离如图8所示。在场景1情况下,完成1000名行人的疏散行走距离的总和是31103.4m;在场景2情况下,完成1000名行人的疏散行走距离总和是32657.8m,较场景1的行走距离增加了5.0%,即修正过后的模型行人会产生更多的绕行现象。

4 结 论

本文在 Helbing 的社会力模型基础上,明确了行人感知范围的概念,提出将行人心理属性的变化加入到社会力模型中,同时引入行人行走的绕行效应。应用 Anylogic 软件分析2种不同情况下行人的疏散时间、出口疏散人数密度和行人绕行距离的区别并设置疏散试验验证模型的可靠性。综上所述可得出以下结论:1)在构建行人疏散模型中引入行人心理属性——行人恐慌心理,行人疏散时间受到行人恐慌程度的影响,引入恐慌系数后的疏散时间减少了7.5%;2)修正过后的模型在运行过程中避免了行人在单一出口的滞留行为,出口2处的行人密度较之前下降了1.14人/ m^2 ;3)修正过后的模型行人会产生明显的绕行行为,行人行走距离增加了5.0%,通过计算发现绕行距离的增加有利于疏散时间的减少,但是目前疏散行为无秩序,需要采取客流引导措施,进一步增强行人疏散的效率。

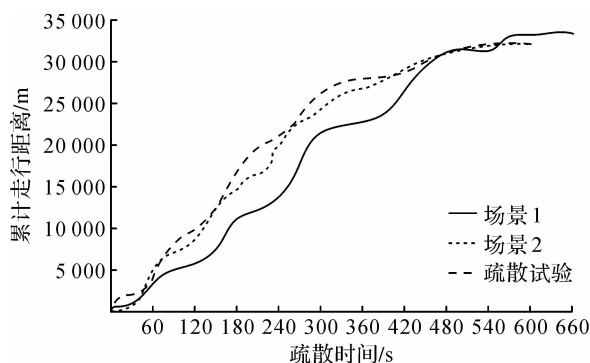


图8 行人行走距离对比

Fig. 8 Pedestrian evacuation running distance comparison chart

参考文献:

- [1] 陈慧阳. 地铁运营突发事件危险源分级研究[D]. 成都:西南交通大学,2018.
- [2] SERIANI S, FERNANDEZ R. Pedestrian traffic management of boarding and alighting in metro stations[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2015, 53: 76.
- [3] MA Y, LEE E W M, SHI M. Dual effects of guide-based guidance on pedestrian evacuation[J]. Physics Letters A, 2017, 381(22): 1837.
- [4] LUH P B, WILKIE C T, CHANG S C, et al. Modeling and optimization of building emergency evacuation considering blocking effects on crowd movement[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2012, 9(4): 687.
- [5] WOOD N, JONES J, PETER J, et al. Pedestrian evacuation modeling to reduce vehicle use for distant tsunami evacuations in Hawaii[J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2018, 28: 271.
- [6] 金泽人,阮欣,李越. 基于元胞自动机的火灾场景行人疏散仿真研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2018, 46(8): 1026.
- [7] 邓云峰,盖文妹. 基于动态网络流的区域疏散分析模型与仿真[J]. 中国安全生产科学技术, 2016, 12(11): 24.
- [8] CARRILLO J A, MARTIN S, WOLFRAM M T. An improved version of the Hughes model for pedestrian flow[J]. Mathematical Models and Methods in Applied Sciences, 2016, 26(4): 671.
- [9] PEREIRA L A, BURGARELLI D, DUCZMAL L H, et al. Emergency evacuation models based on cellular automata with route changes and group fields[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2017, 473: 97.
- [10] JI J W, LU L G, JIN Z H, et al. A cellular automata model for high-density crowd evacuation using triangle grids[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2018, 509: 1034.
- [11] XU M L, WU Y P, LV P, et al. MISFM: On combination of mutual information and social force model towards simulating crowd evacuation[J]. Neurocomputing, 2015, 168: 529.
- [12] XINLEI W, JUNPING D U, MEIYU L, et al. Crowd density field estimation based on crowd dynamics theory and social force model[J]. Chinese Journal of Electronics, 2019, 28(3): 81.