

封闭性公共场所人群行为多感知模型的构建与仿真

马峻, 胡军

(首都经济贸易大学 管理工程学院, 北京 100070)

摘要: 现有人群行为仿真软件多采用基于社会力的多智能体建模方法构建人群仿真模型, 但在响应环境影响方面却没有提供相应的函数。从认知心理学角度结合作者前期研究得到的人群广义影响力空间逻辑模型, 以 Sigmoid 函数为基础构建了人群个体视觉和听觉感知数学模型, 并以典型地铁换乘大厅高峰期发生突发事件后疏导为例, 在定义地铁换乘大厅大容量疏导优化目标函数基础上构建了人群疏导仿真模型, 根据设定的情景仿真不同疏导策略, 仿真结果表明本文所提人群行为多感知模型是有效的。

关键词: 突发事件; 人群行为; 多感知模型; 疏导策略

中图分类号: TP391.9

文献标志码: A

文章编号: 1004-731X (2021) 10-2289-09

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.21-0757

Modeling and Simulation of Crowd Multi-perception Behavior Model in Closed Public Places

Ma Jun, Hu Jun

(School of Management and Engineering, Capital University of Economics and Business, Beijing 100070, China)

Abstract: The social forces-based multi-agent modeling method is used to build the crowd simulation models in most of the existing crowd behavior simulation software systems. From the perspective of cognitive psychology, combined with the spatial logic model of the generalized influence of the crowd obtained by the author's previous research, and based on the sigmoid function, the mathematical model of the individual visual and auditory perception of the crowd is constructed. Taking the typical subway transfer hall as an example, the objective function of large passenger volume evacuation optimization is established to construct the crowd evacuation simulation model. The simulation results based on the defined scenarios show that the proposed multi-perception behavior model is effective.

Keywords: emergency event; crowd behavior; multi-perception model; dredging strategy

引言

在许多封闭性公共场所, 如地铁换乘站其相对封闭性和人员密集性公共场所, 一旦发生突发事件, 极易造成大量人群恐慌而产生拥挤踩踏伤亡事故, 生命财产受到损失的同时还会产生巨大的社会影响。根据突发事件分类, 地铁日常安全运营主要突发事件是技术性突发事件和人为突发事件, 例如设备故障、乘客突然发病等, 在这种情况下地铁管

理人员要按照应急预案采取措施, 最大限度地降低影响, 而保障地铁站安全运行成为处理此类事件的基本准则。由于这类事件具有高度的不确定性, 尽管有相应的预案, 但是事件发生时如何有效地处置还需要科学的方法进行指导。借助仿真技术, 计算分析不同情景下措施的有效性相比于现场演练既经济又可行, 其中人群行为建模是解决上述问题的重要前提和基础。

收稿日期: 2021-07-27 修回日期: 2021-08-03

基金项目: 国家自然科学基金(71471121)

第一作者: 马峻(1968-) 男, 教授, 博导, 研究方向为复杂系统建模与仿真、智能决策等。E-mail: ma_jun_ma@163.com

人群行为建模研究大多用于人群应急疏散分析^[1],在日常人群管控中往往面临的是人群疏导,即在维持正常秩序情况下通过疏导降低特定区域人群聚集风险^[2],与人群疏散相比疏导更关注人群的运动过程,但是不论是人群疏散还是人群疏导,其依赖的均是人群行为模型。对于人群行为模型,众多研究者从不同领域展开了卓有成效的研究,其中人群行为数学模型的构建方面可分为宏观模型、中观模型和微观模型^[3]。宏观模型是由群体的速度场和密度场来描述群体状态的,模型由偏微分方程构成,例如文献[4]针对高密度人群,采用类似于流体的连续体表示方法建立人群行为模型,主要关注人群的密度和流速,并利用此模型分析了开放性公共场所高密度人群流动过程中的湍流现象,通过计算高密度人群中人相互作用产生的避碰力和摩擦力来获得类似真实场景下人群压力和加速度;中观模型是基于动力学理论,行人的微观状态仍然是通过个体的位置和速度来刻画,但行人的表征是通过微观状态上的一个概率分布函数来描述的,并通过非线性微分方程来描述分布函数的变化,例如文献[5]从行人动力学理论角度,引入分布函数来刻画小群体行为特性,提出的模型可以解释行人异质性和人群中局部异常行为的传播;微观模型中整个群体状态是通过行人个体位置和速度来传递实现的,数学模型一般用常微分方程组来表示,例如文献[6]从物理学角度分析了行人为动态特性,该模型假设每个行人移动是几个力共同作用的结果,这些力是驱动行人行为的内部机制,这些力包括:行人维持其移动的驱动力、活动地点或最终目的地的吸引力、行人与行人以及障碍物间的排斥力,利用社会力模型分析人群疏散动态变化来优化建筑设计。

上述3种人群行为模型中,微观尺度上存在没有考虑到多重交互作用,导致很难利用微观观察到的数据来推断在不同但相似情况下的人群行为动态,行人的异质行为在宏观模型中由于平均过程产生了缺失,中观模型似乎可以解决前面的问题,但

还存在不足需要进一步完善。

在人群行为仿真模型构建方面,人群行为模型构建分为力学模型、元胞自动机模型、随机模型、智能体模型和数据驱动模型^[7]。力学模型是把人群看作连续介质,通过微分方程来描述行人动力学;元胞自动机模型是一种计算范式,个体按照设定规则来决策自己行为,它的特点是使用规则空间离散化和有限自动机来描述群体行为的时间演化^[8-9];随机模型以随机过程和随机效用理论为基础建立行人流模型;智能体模型按照自治代理模式进行人群建模,每个个体代表为能感知环境并自主决定他们当前状态和目标的智能体,模型的复杂性取决于控制每个智能体移动的一组规则;数据驱动模型是基于真实行人数据,建模的重点是从真实的行人数据中提取信息,并应用在人群行为仿真中进行个体导航^[10]。

总体来看,人群行为的建模与实际场景还存在一定差距,虽然已经有商业化的一些人群行为仿真软件系统,但大多用来人群疏散的仿真,人群模型对于场景的感知和响应不足^[11]。本文以大客流地铁换乘站在突发事件情景下的人群疏导为例,研究人群行为多感知模型的构建问题,并建立相应的仿真模型验证所构建模型的有效性。

1 人群行为多感知数学模型

依据 Mirza Waqar Baig 等对人的认知和心理的定义^[12],结合本文作者在“群体行为状态扩散中的广义影响力模型”研究中提出的广义影响力空间逻辑模型^[13],本文定义的人群个体感知空间模型如图1所示。该模型包括个体空间、社会空间和公共空间,其中个体空间是人群个体物理实体所占据的空间;社会空间是人群个体在与周围邻居通过交互可以直接感知的空间;公共空间是人群个体可以共同使用的公共场所,本研究中主要关注个体空间、社会空间和公共空间在疏导中的影响。

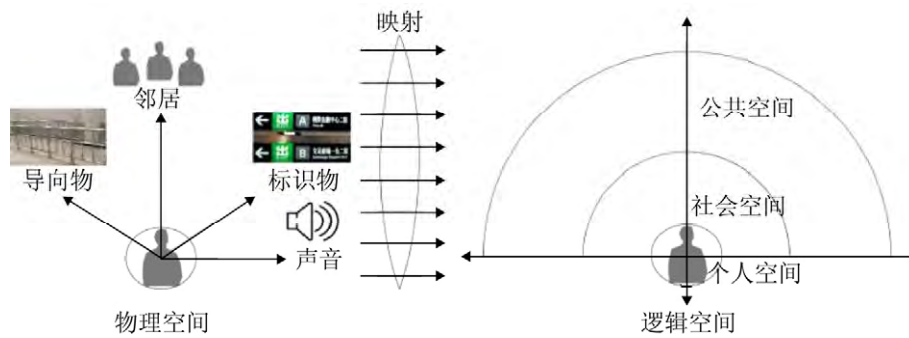


图 1 人群个体的感知空间

Fig. 1 Perceptual space of crowd individual

在感知度评估方面, 本文通过引入类似 Sigmoid 函数的激发函数来解决感知度计算问题。文献[14]通过构造改进的 Sigmoid 函数刻画了个体邻居对个体的非线性作用, 通过设定阈值来触发个体相应行为, 仿真实验表明所构造的函数具有良好的鲁棒性。

Sigmoid 函数的基本结构为:

$$f(x_i) = \frac{1 - \exp^{-\alpha x_i}}{1 + \exp^{-\alpha x_i}} \quad (1)$$

式中: α 为参数; x_i 为不同因素, 当 $x_i=0$ 时, $f(x_i)=0$ 。

针对人群个体在复杂场景中的多感知问题, 以 Sigmoid 函数为基础进一步构建人群行为视觉和听觉感知模型。

1.1 视觉感知模型

人类视觉系统对标示物的感知是一个非均匀、非线性的信息处理过程, 主观感知研究表明, 人类视觉系统无法察觉清楚程度处于一定阈值以下的标示物内容, 该阈值称为恰可识别失真 (Just Noticeable Distortion, JND) 阈值。JND 阈值反映了人类视觉系统的感知能力及敏感度, JND 阈值由亮度适应性和对比度掩模共同决定, 亮度适应性由其背景亮度特性决定, 而对比度掩模由其前景内容所决定, 这两者共同作用于人类视觉系统并影响视觉感知效果。

依据我国室内工作场所的照明 GB/T 26189-2010 标准, 地铁站内照明的明视距离为 25 m, 根据 CSA010-2011 标准地铁站站厅和站台

的照度中位值是 200 lx, 依据式(1)可以构造视觉感知函数为:

$$P = \frac{1 - \exp^{-\beta_i s v}}{1 + \exp^{-\beta_i s v}} \quad (2)$$

式中: s 为视觉感知系数, $s = \frac{s_k}{s_d}$, s_k 为人群个体

距离目标实际距离, s_d 为地铁站换乘大厅明视距离, $s_d=25$ m; v 为能见度; β_i 为人群个体视力差异性系数, 服从[0.7, 1]的正态分布^[9]; $v \in [0, 1]$, $v=1$ 是正常状态。

1.2 听觉感知模型

根据 GB/T 1.1-2009 和 DB11/T 838-2011 以及 B 型车辆 GB/T 13441.1-2009, 地铁站内正常情况下噪声在 60 dB 左右, 车辆通过时为 100 dB, 听觉衰减系数为 0.6, 同时结合 JG J T 16-1992 《民用建筑电气设计规范》中对有线广播及火灾事故广播设计安装规范和 DB11T 804-2011 民用建筑通信及有线电视广播电视基础设施设计规范, 地铁站内广播扬声器安装间距为 8~12 m, 因此在地铁站厅内、在正常情况下、不同方位都可以听到广播, 所以听觉系数 w 可以认为等于 1, 则听觉感知函数为:

$$L = \frac{1}{1 + \exp^{-\alpha_i w B}} \quad (3)$$

式中: $B = b_d / b_z$, B 为由于噪声导致的听力衰减系数, b_d 为当前的噪声强度, 根据系统分析和依据相关设计标准, 地铁站内噪声变化范围一般在 $b_d \in [60, 100]$, b_z 为地铁站内正常的噪声强度, 根

据现场测定地铁站内平均噪声强度为 60 dB; α_i 为人群个体听力差异性系数, 服从[0.7, 1]的正态分布^[9]。

1.3 信息感知累积

人群个体对信息的感知辨别能力是有差异性的, 即在相同环境下对声音或标识物的辨别存在差异性, 由于受到环境等因素的影响, 尤其是在认知临界状况下处在不断确认过程, 即在认知过程存在信息累积现象^[15], 依据式(1), 本文定义如下信息感知累积过程:

$$y = y_0 + \sum_{i=1}^n \frac{2\exp^i}{(\exp^i + 1)^2} \quad (4)$$

式中: y_0 为初始值, y_0 可以按照式(2), (3)计算; n 为累积次数。当 y 达到或超过个体临界值时就表明个体对目标信息的确认。

2 人群行为多感知仿真模型构建与结果分析

本文以北京宋家庄地铁换乘大厅为例, 通过引入式(2), (3)和(4), 利用现有仿真平台系统构建人群行为多感知仿真模型, 通过构建相应的疏导仿真优化目标函数, 分析在大客流情况下如遇突发事件保证地铁站安全运行的最优疏导策略。

2.1 换乘大厅布局和人群流量流向

北京宋家庄地铁站是 10 号线、5 号线和亦庄线汇集点, 10 号线是北京地铁环线承载着大量的中转客流, 而封闭性地铁换乘大厅由于建筑物结构的复杂性以及不同换乘站乘客流量流向的不均衡性导致在大客流情况下换乘大厅人群分布的极度不均匀。根据统计, 10 号线承担的途径客流(非本线进出站)为整个北京地铁路网的 27%, 换入占 10 号线客运量的 46%, 同时宋家庄地铁站又是 5 号线和亦庄线的终点站, 亦庄线早高峰有 50% 换乘 5 号线北上, 32% 换乘 10 号线向东, 12% 换乘 10 号线向西, 仅有 6% 在宋家庄出站。宋家庄全日换乘量为 24.1 万人次, 亦庄线贡献了 81% 的换乘量,

早高峰换乘量为 6.07 万人次, 进站量为 2.62 万人次, 而这 8.69 万人次要在 7:30—8:30 间 1 个小时内完成进站换乘, 换乘大厅流量为 1 448 人/min, 聚集区域人群密度达到 3 人/m² 以上, 处于拥挤状态^[2], 高峰期换乘大厅人群流量流向图如图 2 所示。

根据图 2, 在高峰期换乘大厅的聚集域内人群密度大, 流向存在多向交叉, 如遇突发事件将进一步加剧人群流动的无序性, 局部人群聚集风险高, 稍有扰动就有可能酿成严重事件, 因此在大客流情况下如遇常规的突发小事件, 合理的疏导是非常必要的, 既能降低风险, 又能最大化地保证地铁站安全运营。

2.2 定义疏导目标函数

影响人群有序移动的突发事件不仅对人群产生心理影响, 也对人群有效移动空间产生影响。心理的影响导致人群分布非均衡性加剧, 有效移动空间的影响将导致人群移动路线的被迫改变, 这些都使人群聚集风险增高。根据图 2, 换乘大厅布局复杂, 换乘口多, 人群流向多, 流量不均衡, 在突发事件下需要通过疏导尽量降低这种非均衡性。本文以人群密度 ρ 为主要判别量来衡量疏导的有效性, 在整个疏导过程中人群密度 ρ 是空间维和时间维的函数, 即 $\rho(t, S)$, 其中 S 是整个疏导区域, 对 S 进行空间划分为 n 个区域, 则第 i 个区域 t 时刻的人群密度可表示为 $\rho_i(t, s_i)$, $s_i \in S$ 。

疏导的最优状态是各个划分区域的密度 ρ_i 在空间和时间 2 个维度的变化尽量小, 即尽量均匀, 降低局部高密度而增大的人群聚集风险, 也就是 $\forall s_i$ 各个划分区域的 ρ_i 随时间变化波动小, 采用方差形式可以表示为 $\min(E(\rho_i(t, s_i)))$, 因此疏导目标函数可定义为:

$$\min(E(\rho_i(t, s_i))) = \frac{1}{K} \left(\sum_{i=1}^n ((\rho_i(t) - \sum_{i=1}^n \frac{\rho_i(t)}{n})^2 / n) + \sum_{j=1}^m ((\rho_j(t) - \sum_{j=1}^m \frac{\rho_j(t)}{n})^2 / m) \right) \quad (5)$$

式中: K 为总时间 T 的划分, 即 $K = T / t'$, t' 为仿真时间步长, 本文 $T = 300 \text{ s}$, $t' = 1 \text{ s}$, $K = 300$; n 和 m 分别为有效聚集区和换乘区域的空间划分, 本文中

换乘区域的有效空间划分为 $n = 25$ 个 $4 \text{ m} \times 4 \text{ m}$ 的网格空间, 5 个换乘口区域设定 $m = 5$ 。

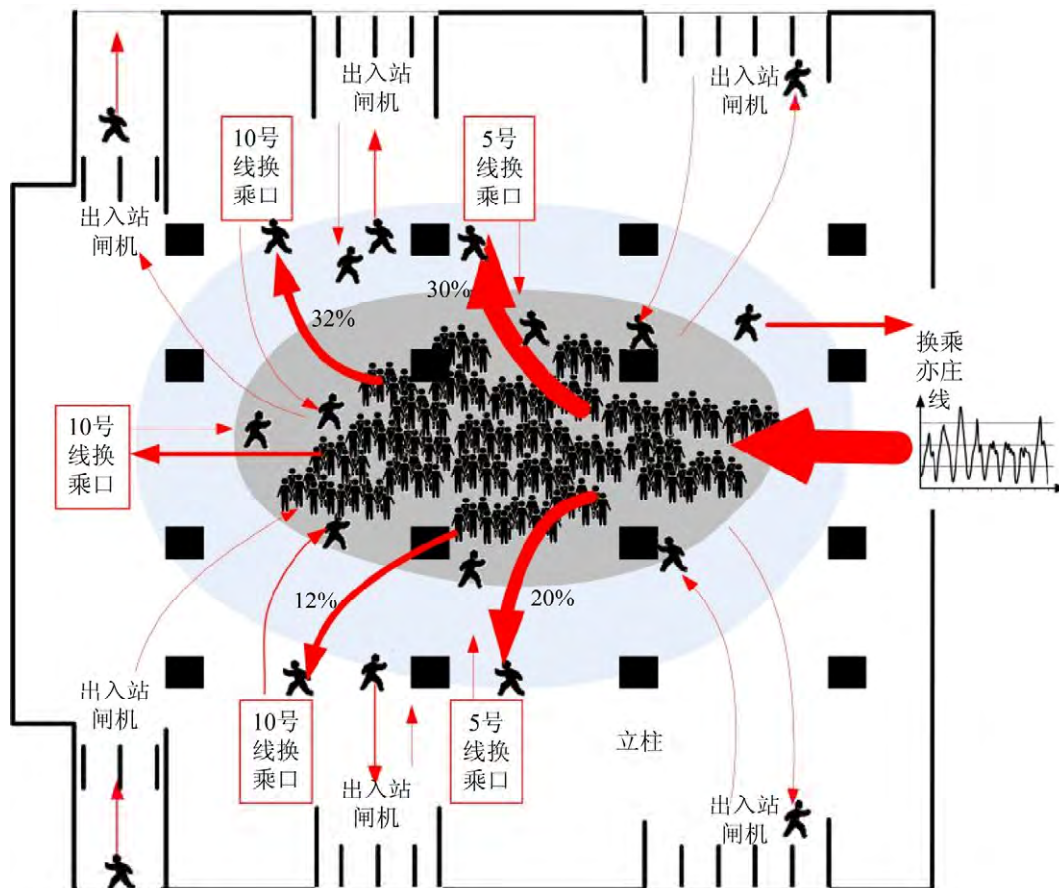


图 2 地铁换乘大厅布局和高峰期人群流量流向图
Fig. 2 Layout of subway transfer hall and crowd flow chart in peak period

2.3 构建人群行为多感知仿真模型

在构建人群多感知数学模型基础上, 依据图 2 地铁换乘大厅布局和人群行为模式建立地铁换乘大厅人群行为仿真模型, 如图 3 所示。该模型通过对人群个体行为规则、行人区域密度获取、引导规则、邻居交互规则以及人群个体行为模式的定义实现对人群个体智能体仿真模型的构建, 人群个体智能体的主要参数如表 1 所示。

依据图 3 和表 1, 利用现有仿真软件系统构建地铁换乘大厅人群仿真系统, 以现场采集数据初始化系统, 实现对不同疏导策略的仿真, 获得最优疏导策略。

2.4 仿真实验

北京宋家庄地铁站换乘大厅在工作日高峰时段聚集有大量换乘乘客, 根据前期统计聚集区域人群密度高达 3 人/m^2 , 平均密度 $1 \sim 2 \text{ 人/m}^2$, 人群处于密集状态, 而换乘大厅复杂的结构、交叉的人流、不均衡的人群分布给安全管理带来巨大挑战, 尤其是在突发事件中合理的疏导成为有效降低风险、保证正常安全运营的有效手段。基于上述构建的铁换乘大厅人群仿真系统, 本文定义如图 4 仿真情景。

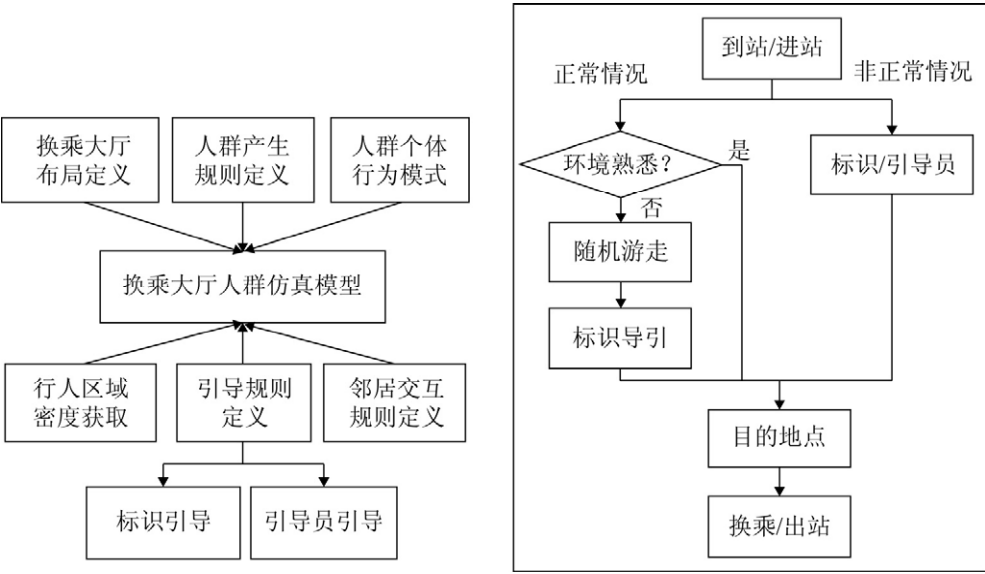


图 3 换乘大厅人群仿真模型构建
Fig. 3 Modeling crowd simulation of transfer hall of subway

表 1 智能体主要参数
Tab. 1 Main parameters of agent

序号	参数	含义	参数定义
1	Know	环境熟悉程度，如果不熟悉就需要借助于标识或引导员	根据统计 80% 的人对环境熟悉，则 RandomTrue(0.8)
2	Go	定义行人的目的地	采用均匀分布 uniform(0,1)，根据统计定义 [0,0.12) 为换乘 10 号线石榴庄方向、[0.12,0.44) 为换乘 10 号线成寿寺方向、[0.44,0.94) 为换乘 5 号线、[0.94,0.97) 为换乘亦庄线、[0.97,1] 为出站人员
3	y	视觉感知率，定义了人群个体对标识物感知程度	依据公式(2)计算，本文设定阈值是 0.8，信息累积按照公式(4)计算
4	q	听觉感知率，定义了人群个体对声音感知程度	依据公式(3)计算，本文设定阈值是 0.8，信息累积按照公式(4)计算
5	To 10	按照引导员或标识指引向 10 号线换乘口移动	取值为 1, 2, 3，对应 10 号线的 3 个不同的换乘口
6	To 5	按照引导员或标识指引向 5 号线换乘口移动	取值为 1, 2，对应 5 号线的 2 个不同的换乘口
7	To exit	按照引导员或标识指引向出口移动	取值为 1, 2，对应 2 个不同的出口

根据图 4，仿真情景中突发事件是某个乘客突发疾病，事件位置在密集人群中，事件发生后管理人员根据应急预案在病人周围迅速建立警戒区域，同时在另一个方向出现照明故障，2 个事件的叠加进一步加剧人群聚集点的风险。图 4(a)事件前与图 4(b)事件后人群聚集密度的比较，而图 4(b) 2 个事件的发生使原来的人群密集区更加密集，此时需要通过人工疏导的方式在降低换乘大厅人群聚集度的同时还能保证地铁站正常安全运营。设定疏导位

置为 3 个，分别位于 2 个事件之间的上、中、下 3 个位置(如图 4 所示)，采用 4 种疏导策略方案，仿真结果如图 5 所示。

图 5 可以看出采取疏导策略明显比为采取疏导策略整个换乘大厅密度分布更均衡，造成局部高密度聚集明显降低。而从 4 种疏导方案看，在 2 个事件对角部位设置引导员效果最佳，即方案 1 和方案 3 结合起来实施可以有效地缓解乘客的聚集度；而在 2 个事件连线的中心位置设置 1 个疏导员，由

于初始高密度区域非中心化导致疏导效果没有对
角部位分别设置 2 个疏导员效果好。进一步对各个
方案的方差数值进行二次方差后更加确定上述结
论的正确性, 如图 6 所示。

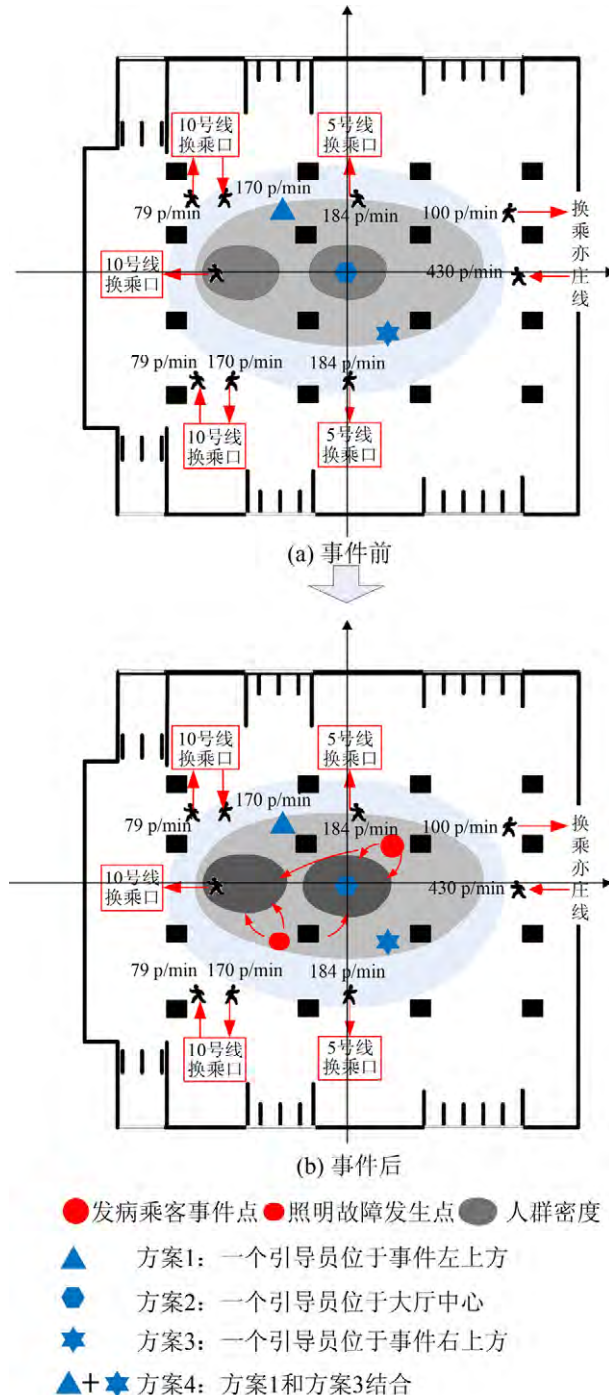


图 4 情景定义
Fig. 4 Scenario definition

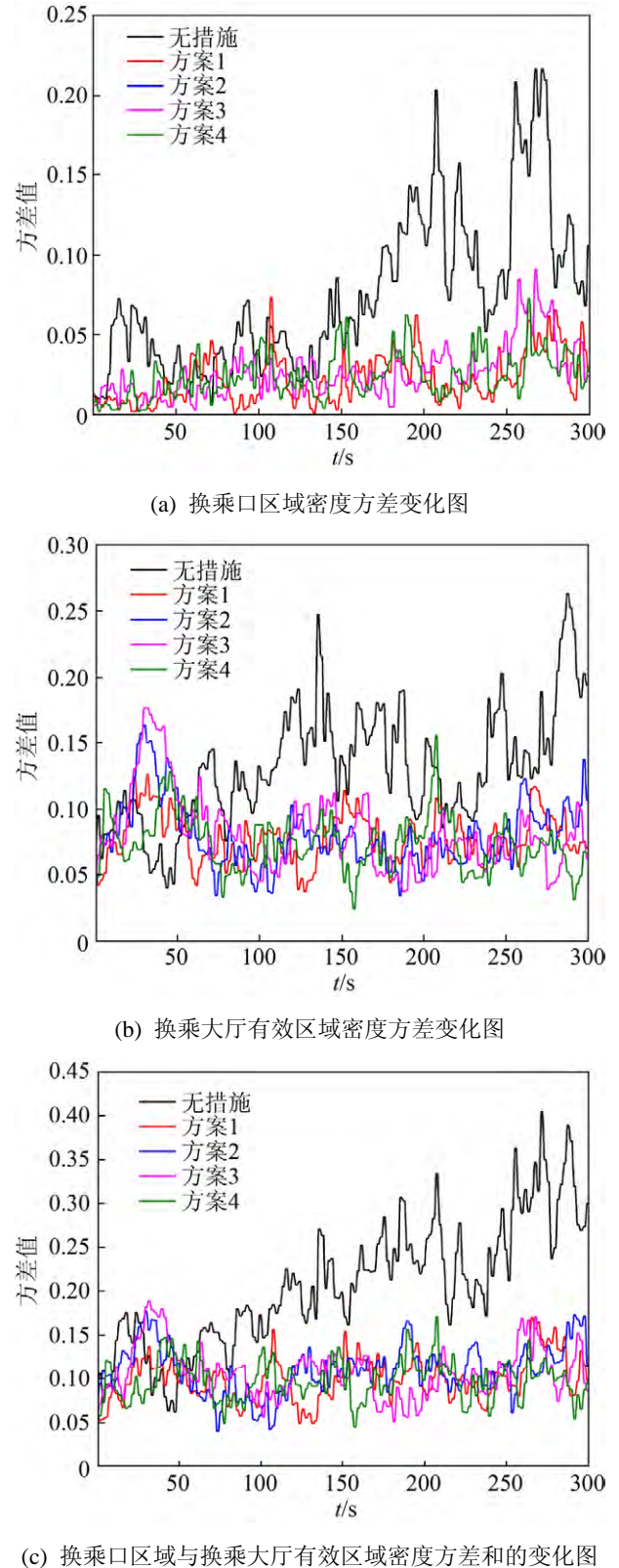


图 5 仿真结果
Fig. 5 Simulation result

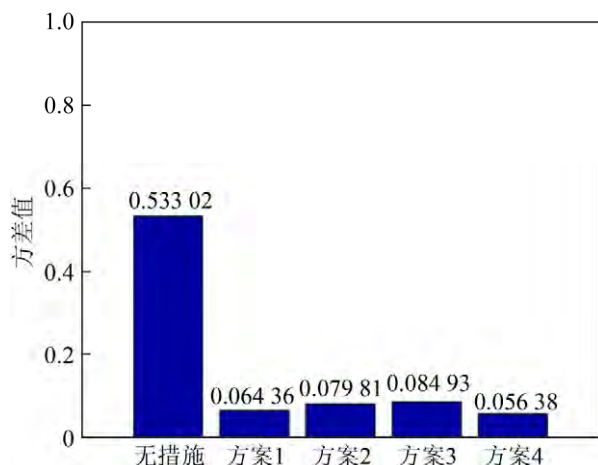


图6 各个方案二次方差值柱状图

Fig. 6 Histogram of quadratic difference of each scheme

图6可以看出,方案4的二次方差值最小,而不采取措施的二次方差值比采取疏导措施的二次方差值明显大了许多,说明在大客流下发生突发事件采取有效的疏导策略对于地铁站保证正常的运营有着重要意义,这也与实际情况相符,说明本文所构建的算法和模型是有效的。

3 结论

人群行为建模是分析人群行为动态特性的重要基础,不论是从宏观层面,还是微观层面人群行为建模其数学模型理论研究已取得众多成果,但由于许多人群行为问题不仅受到环境因素影响,还受到人群主观因素的影响,人群行为建模的应用模型构建成为当前研究重点关注的问题。

本文针对封闭空间人群行为过程中对环境感知的问题,在作者前期研究人群行为决策模型基础上,从视觉和听觉两方面建立了人群多行为感知数学模型,通过建立相应的仿真模型,以典型的地铁换乘大厅为例,在定义人群换乘高峰期突发事件情景基础上,分析了不同疏导策略下的疏导效果,仿真结果表明本文所提出的人群行为多感知模型是有效的,下一步的研究工作是继续完善人群行为多感知模型对于不确定性的响应问题,使构建的模型具有更好的鲁棒性。

参考文献:

- [1] Bretschneider S, Kimms A. A Basic Mathematical Model for Evacuation Problems in Urban Areas[J]. Transportation Transport Research A Policy & Practice (S0965-8564), 2011, 45: 523-539.
- [2] Abdelghany A, Abdelghany K, Mahmassani H. A Hybrid Simulation-assignment Modeling Framework for Crowd Dynamics in Large-scale Pedestrian Facilities[J]. Transportation Transport Research A Policy & Practice (S0965-8564), 2016, 86: 159-176.
- [3] Chena J, Peia T, Lia M X, et al. An Enhanced Model for Evacuation Vulnerability Assessment in Urban Areas[J]. Computers, Environment and Urban Systems (S0198-9715), 2020, 84: 101-113.
- [4] Golas A, Narain R, Lin M C. Continuum Modeling of Crowd Turbulence[J]. Physical Review (S0031-899X), 2014, 816: 1-8.
- [5] Bellomo N, Gibelli L. Toward a Mathematical Theory of Behavioral-social Dynamics for Pedestrian Crowds[J]. Mathematical Models and Methods in Applied Sciences (S0218-2025), 2015, 25(13): 2417-2437.
- [6] Helbing D, Johansson A. Pedestrian, Crowd, and Evacuation Dynamics[J]. Physical Review (S0031-899X), 2014, 9: 20-25.
- [7] Iwata T, Shimizu H, Naya F, et al. Estimating People Flow From Spatio-temporal Population Data Via Collective Graphical Mixture Models[J]. ACM Transactions on Spatial Algorithms and Systems (S1549-6325), 2017, 3(1): 369-374.
- [8] Wijermans N, Conrado C, M van Steen, et al. A Landscape of Crowd-management Support: An Integrative Approach[J]. Safety Science (S0925-7535), 2016(86): 142-164.
- [9] Martella C, Li J, Conrado C, et al. On Current Crowd Management Practices and the Need for Increased Situation Awareness, Prediction, and Intervention[J]. Safety Science (S0925-7535), 2017, 91: 381-393.
- [10] Dogbe C. Modelling Crowd Dynamics from a Kinetic Theory Viewpoint[J]. Journal of Mathematical Sciences: Advances and Applications (S0974-5750), 2014, 30: 71-88.
- [11] Bellomo N, Knopoff D A, Terna P. Special Issue "Kinetic Theory and Swarming Tools to Modeling Complex Systems-Symmetry problems in the Science

- of Living Systems” Editorial and Research Perspectives[J]. Symmetry (S2073-8994), 2020, 12(3): 456.
- [12] Baig M W, Barakova E, Regazzoni C S, et al. Realistic Modeling of Agents in Crowd Simulations[J]. IEEE Computer Society (S0018-9162), 2014, 93: 507-513.
- [13] 马峻, 王伟. 群体行为状态扩散中的广义影响力模型[J]. 系统管理学报, 2016, 25(6): 1069-1077.
- Ma Jun, Wang Wei. Generalized Influence Model for State Diffusion of the Group Behavior[J]. Journal of System Management, 2016, 25(6): 1069-1077.
- [14] 马峻, 王爽. 包含情绪影响因子的群行为决策模型[J]. 科技导报, 2017, 22(35): 77-85.
- Ma Jun, Wang Shuang. A Group Behavior Decision Model Based on Emotional Factors[J]. Science and Technology Guide, 2017, 22(35): 77-85.
- [15] Johnson-Laird P N. Mental Models: Towards a Cognitive Science of Language, Inference, and Consciousness[M]. London: Cambridge University Press, 1983.