

T字型地铁换乘站的人员疏散模拟研究

袁林林, 杨 茉

上海理工大学, 上海
Email: 182450024@st.edu.cn

收稿日期: 2021年4月7日; 录用日期: 2021年5月10日; 发布日期: 2021年5月17日

摘 要

为探究T字换乘地铁站内人员的紧急疏散问题, 本文以上海市某T字换乘地铁站及其内待疏散人员为研究对象, 基于Agent模型理论, 采用Pathfinder软件建立1:1的全尺寸仿真模型, 研究疏散人员的行为特征、行动轨迹、楼梯及出口的使用时间, 并对疏散场景进行数据分析, 研究发现: 紧急疏散时疏散人员具有恐慌情绪蔓延、危险响应时间滞后、出口选择判断失误的行为特征; 该T字型地体换乘站易发生拥堵位置除了各个出口及楼梯附近, 还有楼梯至出口的拐角处; 出口3、出口6的使用时间长、疏散人数多、疏散压力大, 是疏散方案中的重要位置; 该车站的拥堵高峰发生在11~86 s之间, 147.5 s后完成疏散。

关键词

T字换乘站, Agent, Pathfinder, 疏散行为

Simulation Study on Evacuation of T-Shaped Metro Interchange Station

Linlin Yuan, Mo Yang

University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai
Email: 182450024@st.edu.cn

Received: Apr. 7th, 2021; accepted: May 10th, 2021; published: May 17th, 2021

Abstract

In order to explore the emergency evacuation of people in T-transfer subway stations, this paper takes a T-transfer subway station in Shanghai and the people waiting to be evacuated as the research object. Based on the Agent model theory, the Pathfinder software is used to establish a 1:1 full size. The simulation model studies the behavior characteristics of evacuees, the use time of stairs and exits, and conducts data analysis on the evacuation scene. The research found that the

evacuees have the behavioral characteristics of panic spreading, dangerous response time lag, and misjudgement of exit selection during emergency evacuation. The T-shaped ground transfer station is prone to congestion, in addition to the exits and stairs; there are also the corners of the stairs to the exit. Exit 3 and Exit 6 are used for a long time, there are many evacuated people, and the evacuation pressure is high, which is an evacuation, an important location in the plan; the peak congestion of the station occurred between 11 s and 86 s, and the evacuation was completed after 147.5 s.

Keywords

T-Transfer Station, Agent, Pathfinder, Evacuation Behavior

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

城市化的推进使得公共基础建设的要求不断提高, 地铁轨道交通作为一种便捷、环保、容载量大的交通方式, 已被广泛应用于城市交通运输中。地铁轨道交通系统的成熟程度已成为衡量我国各城市的经济发展水平的重要标准之一。上海地铁是世界范围内线路总长度最长的城市轨道交通系统, 是国际地铁联盟的成员之一, 截至 2021 年 1 月, 上海地铁运营线路共 19 条(含磁浮线), 共设车站 459 座(含磁浮线 2 座), 运营里程共 772 千米(含磁浮线 29 千米), 位于中国内地第一名。表 1 中整理了我国部分城市轨道交通运营数据[1]。

Table 1. Operational data of some urban rail transit in 2020

表 1. 2020 年部分城市轨道交通运营数据

| 城市 | 运营线路条数 | 运营里程(km) | 客运量(万人次) |
|----|--------|----------|----------|
| 上海 | 18 | 729.2 | 283469.0 |
| 北京 | 24 | 727.0 | 229265.4 |
| 成都 | 13 | 557.8 | 121962.0 |
| 广州 | 16 | 553.2 | 241560.1 |
| 深圳 | 12 | 422.6 | 162673.3 |
| 武汉 | 12 | 409.1 | 62802.6 |
| 南京 | 12 | 394.7 | 80134.2 |
| 重庆 | 9 | 343.3 | 83975.1 |
| 杭州 | 7 | 306.3 | 58241.4 |
| 青岛 | 6 | 246.0 | 13908.8 |

在地铁紧急疏散研究中, 国内外学者主要研究两方面: 一是紧急疏散场景下人员的心理反应及疏散行为特征, 二是分析具体的疏散过程。何理[2]等通过统计分析和问卷调查的方法, 对两个地铁车站的乘客进行了疏散安全行为调查和统计分析; 张莉[3]分析了火灾场景下的人员疏散规律, 并建立了基于元胞自动机的疏散模型, 探讨了火灾环境对人员是酸的影响; 胥旋[4]建立了基于社会力的仿真模型, 研究了车门开启

方式对疏散效率的影响; Karl [5]等人建立不同尺寸的地铁模型, 研究了火灾场景下的人员疏散问题, 认为在出口处增加扬声器或者语音播报信息有利于提升疏散效率; 喻敏[6]等基于 BIM 环境, 在 Pathfinder 中建立仿真模型, 研究不同情况下提高地铁站高度对疏散结果的影响; 赵金龙[7]等利用 Pathfinder 软件对某特殊地铁站可能存在的不利工况进行了建模, 得出了不同时间段的人员限流建议; Yang [8]等利用 Pathfinder 软件建立了地铁站仿真模型, 分析了障碍物对人员疏散的影响 Gulanur [9]等人利用 Anylogic 软件模拟了一座地铁站紧急状况下的疏散, 并对比了计算所得的疏散时间与当地规范要求的时间。

可以发现, 对于地铁建筑的人员疏散研究, 国内外学者除了收集人员信息及做疏散演习之外, 还通过各类仿真软件去模拟还原真实场景下的疏散情况、研究疏散问题, 这已成为大多数学者的重要研究方法。本文利用 Pathfinder 软件建立基于 Agent 的仿真模型, 以某 T 字型地铁站为研究对象, 研究疏散人员的行为特征、行动轨迹、楼梯及出口使用时间的变化规律。

2. 疏散模型

2.1. 人员疏散模型介绍

1) 根据人群规模和时间尺度方面的区分, 疏散仿真模型可以分为以下几类:

流体模型: 人员虽然拥有意识, 但在人群拥挤的车站等地方, 并不能按照自己的想法自由移动, 因此可以忽略个体行为, 将人员的移动看作流体的流动。适合研究人流量大, 观测时间短的情况。

实体模型: 此模型中, 人员所有运动均是由周围环境对其实施的力所产生的结果, 适合研究短时间内中小型人群中出现的社会、心理因素。

Agent 模型: 此模型中, 人员具有一定的自主性、智慧性, 个体间的相互作用也被考虑到, 模型中的疏散人员可以根据周围环境信息的获取, 实时调整自己的行动轨迹, 适合需要自由设计人员行为的研究。

2) 从宏观和微观的角度, 疏散仿真模型可以分为以下几类:

宏观模型: 模拟整体人群的行为, 忽略高密度中个体的行为特征, 不表达疏散对象中个体的不同状态和疏散成员之间的相互影响, 使用 Navier-Stokes 方程建模, 使用节点密度来模拟人群, 将人流运动看作粒子运动。由于实际疏散中, 环境及个体之间相互作用往往极大程度地影响到疏散结果, 因此在模拟低密度疏散情况时, 该模型与实际情况偏差较大。

微观模型: 比宏观模型更加关注个体的征及环境的相互作用, 人员可产生避免碰撞、跟随、停留等复杂的行为。典型的微观模型有: 格子气模型、元胞自动机模型、社会力模型、AGENT 模型等。

2.2. Agent 模型

Agent 模型中, 每个 Agent 个体均为智能体, 兼具交互性、自主性、反应性、推理和规划能力[10]。具备这些属性的 Agent 个体在模型中可以使每个个体或周围环境进行信息交互, 以保证每个个体之间的协同性, 而因为其对外界具有感知能力, 故而 Agent 可以对自身行为做出相应的调整。在遵守既定规则的同时, Agent 个体还拥有学习和推理的能力。通过 Agent 建模, 可以将复杂系统的微观行为和宏观流动的现象有机结合, 是一种自顶向下分析、自底向上综合的有效建模方式[11]。

由于 Agent 模型的种种优势, 而美国 Thunderhead Engineering 公司研发的 Pathfinder 软件是一款基于 Agent 模型的人群疏散模拟计算软件, 故本文选用 Pathfinder 软件建立地铁站疏散模型[12]。

2.3. 物理模型

该 T 字型换乘地铁站总建筑面积为 9529.3 m², 独立于周围其他建筑, 为三层地下建筑, 层高 6.0 m, B1 层为站厅层, B2 层为地铁线路 1 站台层, B3 为地铁线路 2 站台层, B1、B2 层相互平行, B3 与 B1、

B2 垂直。两条地铁线路均为长 125 m、宽 20 m 的矩形站台，列车上下行两个方向上均各有 30 个宽度为 1.8 m 的屏蔽门，门与门之间间距为 2.4 m，楼梯宽度在 2.4~5.0 m 之间，B1、B2 层方向上沿中心线均匀分布有 26 根立柱，B3 层方向上沿中心线均匀分布有 28 根立柱，间隔均为 8 m，立柱尺寸均为宽 0.7 m、长 1.2 m，各楼梯位置及站厅层、站台层分布如图 1 所示，出口分布如图 2 所示。

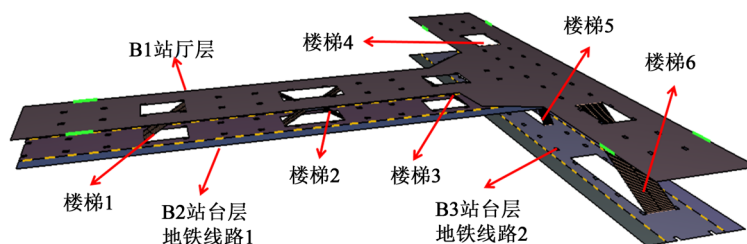


Figure 1. Distribution map of station hall, platform and stairs
图 1. 站厅、站台及楼梯分布图

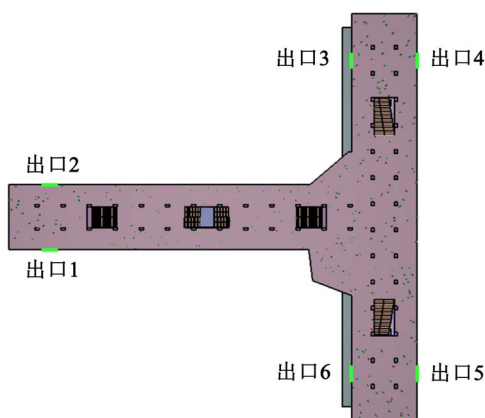


Figure 2. Export distribution map
图 2. 出口布图

2.4. 人员参数设置

在人员分布方面，B1 站厅层共有 300 人，B2 站台层两侧列车内各有乘客 400 人，站台内有 200 人，B3 站台层两侧列车内各有乘客 400 人，站台内有 300 人，共计 2400 人。其中孩童、老人、成年男性和成年女性的占比分别为 1:1:4:4，分布方式为随机分布，分布情况如图 3 所示。通过实际测量及前人实验 [13] [14] 中获得的各类人员行走速度，将孩童、老人、成年男性和成年女性最大行走速度取值范围分别为 0.6~1.5 m/s、0.7~1.2 m/s、3.1~4.0 m/s、2.2~3.3 m/s，具体的实时速度取决于每个疏散个体所处位置的拥挤程度。Pathfinder 中个体疏散速度主要采用公式(1)计算疏散个体的初始位置速度，公式(2)计算疏散个体行动方向上的速度矢量[15]：

$$v_0 = \begin{cases} v_{\max} \frac{k}{1.4} & (D < 0.55) \\ v_{\max} \frac{k - 0.266kD}{1.19} & (D > 0.55) \end{cases} \quad (1)$$

$$|\vec{v}_0| = \begin{cases} 0 & (d_{\max} \leq d_{\text{stop}}) \\ v_0 & (d_{\max} > d_{\text{stop}}) \end{cases} \quad (2)$$

式中: v_0 为疏散个体移动方向上的速度矢量单位为 m/s; d_{\max} 为移动方向上最大行走距离; d_{stop} 为体移动方向上最短加速度距离, 单位为 m, 且 $d_{\text{stop}} = v_0^2 / (2a_{\max})$ 。

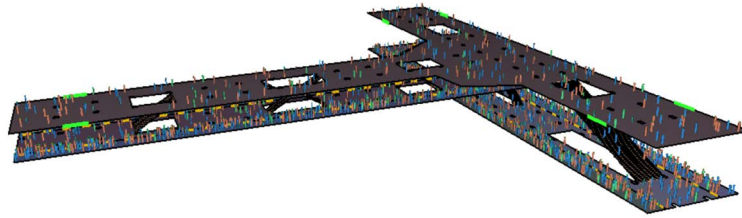


Figure 3. Staff distribution map
图 3. 人员分布图

根据实际测量及《中国未成年人人体尺寸》(GB/T26158-2010) [16]和《中国成年人人体尺寸》(GB/T10000-1988) [17]中的人体参数显示,4~6岁未成年人平均身高为 $1.27 \text{ m} \pm 0.01 \text{ m}$, 平均最大肩宽 $0.28 \pm 0.01 \text{ m}$, 7~11岁未成年人平均身高为 $1.37 \text{ m} \pm 0.01 \text{ m}$, 平均最大肩宽 $0.30 \pm 0.01 \text{ m}$, 12~18岁未成年人平均身高为 $1.61 \text{ m} \pm 0.20 \text{ m}$, 平均最大肩宽 $0.35 \pm 0.08 \text{ m}$, 26~60岁成年人平均身高为 $1.70 \text{ m} \pm 0.12 \text{ m}$, 平均最大肩宽 $0.45 \pm 0.12 \text{ m}$ 。

3. 仿真结果分析

3.1. 疏散行为分析

紧急疏散过程中, 疏散人员的心理活动和逃生行为对疏散路线的选取和疏散速度的大小有着重要影响, 自周围环境的影响主要体现在对疏散人员的心理和生理作用, 前者主要从群体的恐慌心理和从众心理来主导乘客的逃生行为, 后者是从人群行进速度和可视范围对乘客的疏散进行影响。

1) 恐慌情绪蔓延: 紧急疏散情况发生时, 灾情的不确定性和未知性会使疏散人员产生恐慌情绪, 而地铁又是封闭空间, 情绪极易迅速扩散, 往往几十秒内可以从几个人恐慌扩散到一整个人群的恐慌。恐慌情绪蔓延的情况下, 疏散人员出现以下行为特征:

- a) 在恐慌逃亡过程中, 由紧张而导致的盲目行动;
- b) 相互推攘, 有物理接触;
- c) 出口处出现拱形现象, 并产生拥堵;
- d) 无法顺利通过障碍物;
- e) 物理接触增加, 压力超过临界值(4500 N/in)可能会引起危险;
- f) 疏散速度减慢, 甚至发生踩踏事件而造成人员伤亡, 并且伤亡人员变为障碍物;
- g) 疏散行为变得从众且盲目。

2) 危险响应时间滞后: 紧急疏散情况发生后, 人群通常要一方面从广播中获知紧急情况, 另一方面从他人反应中感知信息, 故而处于不同位置的疏散人员对危险的认知和判断时间也不同, 因此会造成响应时间滞后的情况发生。

3) 出口选择判断失误: 由于视野范围受限、恐慌、缺乏信息等因素, 疏散人群一般就会出现从众心理, 适当的从众可以让信息得到传递, 使得疏散更加有序进行; 但如果过于从众, 由恐慌情绪造成心理紧张和害怕, 则可能会导致出口堵塞, 从而忽视有效的出口, 降低疏散效率。

3.2. 人员疏散轨迹分析

由于 Agent 模型中最短路径和局部最优规则的设定, 可以看到行人会根据实际情况来选择路径, 当

距离最近的出口排队人数过多时, 会根据当前位置和出口的距离对符合自己最优的疏散出口进行疏散, 并根据外部情况变化随时进行调整, 与现实情况相符合。

疏散人员在 B1 站厅层、B3 站台层的移动轨迹如图 4 所示, 在 B2 站台层的移动轨迹如图 5 所示。由图 4 可以看出, B1 站厅层中由楼梯 1、楼梯 2 涌出的疏散人员向出口 1、出口 2 移动以完成疏散, 楼梯 3 涌出的疏散人员向出口 3、出口 6 移动以完成疏散, 由楼梯 4 涌出的疏散人员向出口 2、出口 3 移动以完成疏散由楼梯 6 涌出的疏散人员向出口 5、出口 6 移动以完成疏散。B3 站台层中上端部分的乘客大都向楼梯 4 移动, 中端部分的乘客大都向楼梯 5 移动, 下端部分的乘客大都向楼梯 6 移动。由图 5 可以看出, B2 站台层中左端部分的乘客大都向楼梯 1 移动, 中端部分的乘客大都向楼梯 2 移动, 右端部分的乘客大都向楼梯 3 移动, 而由 B3 站台层中端部分的涌入的乘客大都向楼梯 3 移动。

据此可知, 易发生拥堵位置为: 各出口及楼梯口附近、楼梯 1 与楼梯 2 之间、楼梯 3 至出口 3 和出口 6 的拐角处、楼梯 4 至出口 4 拐角、楼梯 6 至出口 5 拐角。

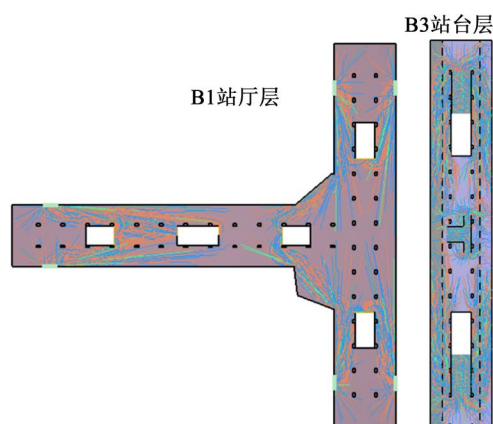


Figure 4. Personnel movement trajectory diagrams on the B1 and B3 floors
图 4. B1 站厅层及 B3 站台层人员移动轨迹图

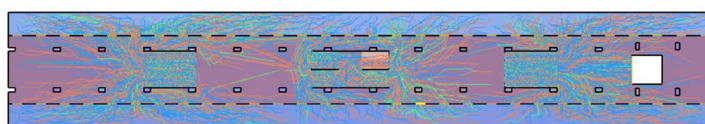


Figure 5. Personnel movement trajectory diagrams on the B2
图 5. B2 站台层人员移动轨迹图

3.3. 出口及楼梯使用情况分析

根据 Agent 模型求解结果统计得出各楼梯人流量变化情况如图 6 所示, 楼梯 1 与楼梯 3 的人流量波动情况相近, 最长使用时间分别为 84 s、94 s, 楼梯 2 位于 B2 站台层中部, 人流量均值却明显低于楼梯 1 与楼梯 3, 使用时间为 80 s。楼梯 4 与楼梯 6 连接 B3 站台层与 B1 站厅层, 关于中心线对称分布, 人流量峰值起伏情况相近, 使用时间也相近, 分别为 112 s 和 110 s。楼梯 5 是 B3 站台层通往 B2 站台层的连接楼梯, 主要是用于疏散 B3 站台层中部位置的人员, 疏散人数较少, 但使用时间较长为 106 s。

4 个出口的人流量统计图如图 7 所示。6 个出口疏散人数分别为 307、460、486、318、320 和 509 人。由图 7 可以看出, 在疏散前期, 6 个出口人流量峰值趋于相同, 且在 10~20 s 之间出现短暂的低峰值现象, 而出口 2、出口 3 和出口 6 的人流量峰值高于 4 人/s 的时间明显多于另外 3 个出口, 说明出口 2、出口 3 和出口 6 的疏散压力高于出口 1、出口 4 和出口 5。而出口 1~6 分别在 108 s、132 s、146 s、137 s、136 s

和 147.5 s 时停止使用, 也说明出口 1 是使用时间最短、疏散人数最少的出口, 出口 3、出口 6 是使用时间较长、疏散人数较多的出口。

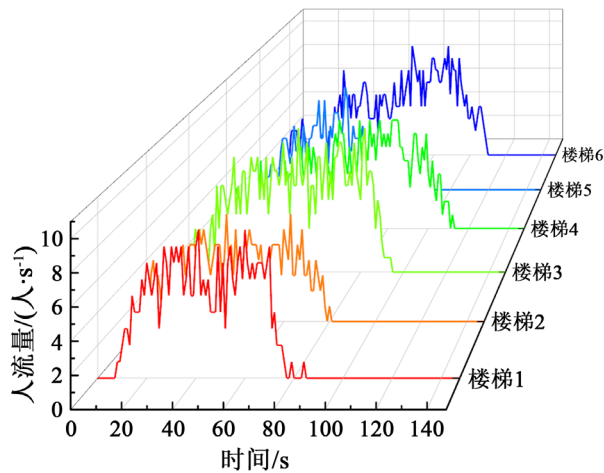


Figure 6. Changes in the flow of people on each staircase
图 6. 各楼梯人流量变化情况

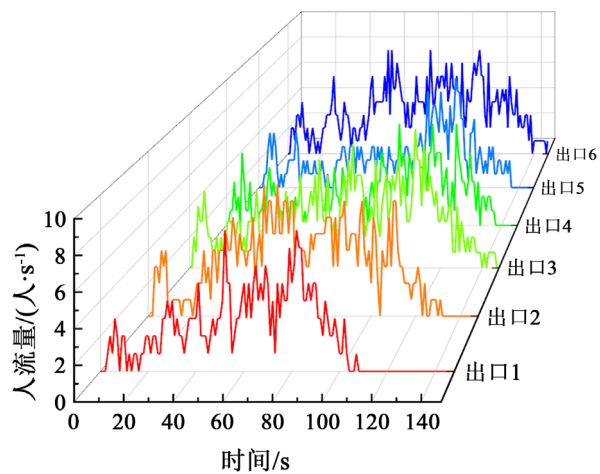


Figure 7. Changes in export flow
图 7. 出口人流量变化情况

3.4. 疏散时间分析

根据 Agent 模型求解结果统计得出疏散人数随时间变化情况如图 8 所示。可以看出, 在 76 s 时, 站内已疏散人数达到 50%, 在 120 s 后, 疏散进入结尾阶段, 至 147.5 s 时站内待疏散人员全部疏散完毕。

根据 Agent 模型求解结果统计出各站厅层及站台层未疏散人数随时间变化情况如图 9 所示。在 B3 站台比 B2 站台层多 100 人的情况下, 两条线路的疏散人员离开原本所在站台的效率趋于相同。站厅层的未疏散人数在 11 s 后出现剧增的现象, 原因是来自两个站台层的疏散人员开始涌向站厅层寻找出口, 而在 76 s 后两站台层的未疏散人数变为 0, 说明在 76 s 后, 站台层的疏散人员已全部涌进站厅层, 而在 86 s 后, 站厅层的疏散人数开始减少, 说明此时除 B1 站厅层外, 不再有人位于站厅层以下, 包括各处楼梯。结合统计得出 6 个出口疏散人数分别为 307、460、486、318、320 和 509 人, 可知该 T 字型地铁站的疏散压力最大的是出口 2、出口 3 和出口 6, 在开始疏散运动后的 11 s, 站厅层各出口开始出现拥堵的情况。

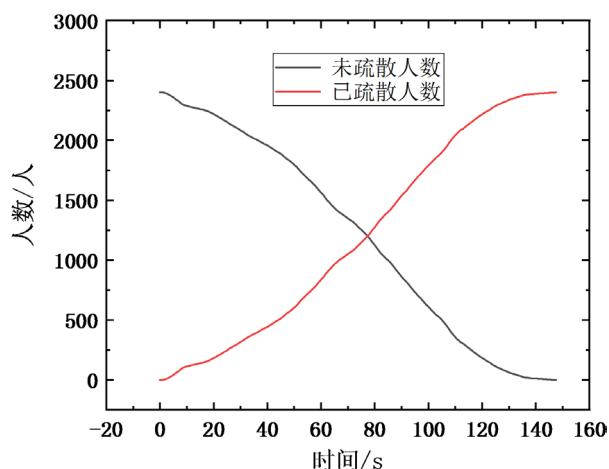


Figure 8. Changes in the number of people evacuated over time
图 8. 疏散人数随着时间的变化

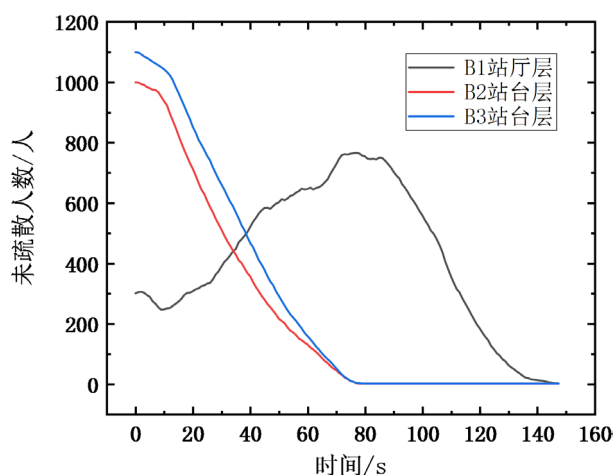


Figure 9. The Number of people not evacuated at the hall and platform floors
图 9. 站厅层及站台层未疏散人数

4. 结论

基于 Agent 建立 T 字型地体换乘站的人员疏散模型, 分析人员疏散行为、人员行动轨迹、各出口和楼梯的使用情况、疏散时间等方面, 研究发现:

- 1) 发生紧急疏散时, 疏散人员的疏散行为具有恐慌情绪蔓延、危险响应时间滞后、出口选择判断失误的特征, 易发生疏散效率低下、踩踏事件等情况;
- 2) 根据人员移动轨迹分析可知, 该 T 字型地体换乘站易发生拥堵位置: 各出口及楼梯口附近、楼梯 1 与楼梯 2 之间、楼梯 3 至出口 3 和出口 6 的拐角处、楼梯 4 至出口 4 拐角处、楼梯 6 至出口 5 拐角处;
- 3) 根据出口及楼梯使用情况分析可知, 楼梯 3 使用时间最短, 楼梯 4、楼梯 6 使用时间长, 出口 1、出口 2 使用时间短、疏散人数最少, 出口 3、出口 6 的使用时间较长、疏散人数较多、疏散压力较大。故应该在楼梯 4、楼梯 6、出口 3 和出口 6 附近增加疏散引导人员;
- 4) 根据整体疏散时间分析, 可知 76 s 时该车站完成疏散的人数达到 50%, 11 s 后站台层的疏散人员开始涌向站厅层, 产生拥堵, 86 s 后站台层人员全部抵达站厅层, 一直到 147.5 s 时地铁车站内人员全部疏散完毕。

基金项目

国家自然科学基金项目(51736007)。

参考文献

- [1] 中华人民共和国交通运输部. 交通发布. 交通运输部发布 2020 年城市轨道交通运营数据[EB/OL]. <https://7n6.cn/kVa8J>, 2012-01-09.
- [2] 何理, 钟茂华, 史聪灵, 等. 地铁突发事件下乘客疏散行为调查研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2009, 5(1): 53-58.
- [3] 张莉. 基于地铁火灾仿真的人员疏散研究[D]: [硕士学位论文]. 上海: 同济大学, 2008.
- [4] 胥旋. 车门开启方式对地铁区间平台疏散影响研究[J]. 中国安全科学学报, 2020, 30(12): 113-117.
- [5] Fridolf, K. and Frantzich, H. (2014) Evacuation in Underground Rail Transportation Systems: A Summary of the Findings of the Metro Project. *Sixth International Symposium on Tunnel Safety and Security*, Marseille, 12-14 March 2014, 485-494.
- [6] 喻敏, 兰志光. 基于 BIM 与 Pathfinder 的地铁车站客流疏散相关研究[J]. 隧道建设(中英文), 2020, 40(S1): 179-186.
- [7] 赵金龙, 孙博阳, 王善生, 等. 基于 Pathfinder 的特殊地铁站点人群紧急疏散模拟[J]. 中国安全生产科学技术, 2020, 16(1): 146-150.
- [8] Yang, S., Jin, J. and Lu, X. (2019) Research on Spatial Arrangement of Metro Station Floor Facilities Based on Pathfinder. *American Journal of Civil Engineering*, 7, 147-151. <https://doi.org/10.11648/j.ajce.20190706.11>
- [9] Gulanur, A., Tian, C., Xie, Q., Shawkat, H.M. and Liu, D. (2019) Simulation of Emergency Evacuation in a Metro-Rail Transit Station. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 304, Article ID: 032016. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/304/3/032016>
- [10] 王世玲. 突发事件下地铁站人员疏散行为及模拟研究[D]: [硕士学位论文]. 郑州: 郑州大学, 2019.
- [11] 廖守亿, 戴金海. 复杂适应系统及基于 Agent 的建模与仿真方法[J]. 系统仿真学报, 2004(1): 113-117.
- [12] 王春雪, 吕淑然. 人员应急疏散仿真工程软件 Pathfinder[M]. 北京: 化学工业出版社, 2016.
- [13] 周家绪. 基于 Agent 模拟的幼儿园疏散空间及效率优化设计研究[D]: [硕士学位论文]. 呼和浩特: 内蒙古工业大学, 2020.
- [14] Onor, Valentin, M.V. and Vittorino, F. (2011) Walking Speed Data of Fire Drills at an Elementary School. *Human Behaviour in Fire Symposium*, San Paulo, September 2011, 98-108.
- [15] 张小虎. 基于 Pathfinder 的超高层建筑人员疏散模拟研究[J]. 消防技术与产品信息, 2016(9): 16-19.
- [16] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T26158-2010, 中国未成年人人体尺寸[S]. 北京: 中国质检出版社, 2010.
- [17] 国家技术监督局. GB/T10000-1988, 中国成年人人体尺寸[S]. 北京: 中国标准出版社, 1988.