

基于AnyLogic客流空间密度对地铁火灾疏散影响的研究

闫利君, 张科硕

华北科技学院(理学院), 河北 三河

收稿日期: 2022年4月12日; 录用日期: 2022年7月7日; 发布日期: 2022年7月18日

摘要

本文模拟真实场景下地铁站火灾发生后, 人员疏散情况, 采用AnyLogic软件模拟火灾发生后, 人员疏散的过程, 使用PyroSim软件模拟火灾发生后, 地铁站内对人体有害物质的含量, 当有害物质达到威胁人员身体安全的浓度时, 事件模拟终止。本文主要研究场景客流空间密度对于疏散结果的影响, 以成都地铁站为例, 设置三种场景, 并对场景三进行了详细的研究。场景三模拟结果中, 客流空间密度与逃生率之间具有非线性关系, 同时具有一个逃生率达到100%的临界值。

关键词

客流空间密度, 模拟测定, 回归分析, 安全疏散

Study on the Influence of Passenger Flow Spatial Density on Subway Fire Evacuation Based on AnyLogic

Lijun Yan, Keshuo Zhang

North China University of Science and Technology (College of Science), Sanhe Hebei

Received: Apr. 12th, 2022; accepted: Jul. 7th, 2022; published: Jul. 18th, 2022

Abstract

This paper simulates the evacuation situation after the fire in the subway station in the real scene, uses AnyLogic software to simulate the process of personnel evacuation after the fire, and uses PyroSim software to simulate the content of harmful substances on human body in the subway station after the fire. When the harmful substances reach the concentration threatening the safety

of personnel, the simulated event is terminated. This paper mainly studies the impact of scene passenger flow spatial density on evacuation results. Taking Chengdu subway station as an example, three scenes are set up, and Scene 3 is studied in detail. Scenario three simulation results show that there is a nonlinear relationship between the density of passenger flow and the escape rate, with a boundary value of 100% of escape rate.

Keywords

Passenger Spatial Density, Simulated Determination, Regression Analysis, Safe Evacuation

Copyright © 2022 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

地铁作为城市重要交通工具,经常出现站内大客流聚集和通道拥堵等问题。由于地铁站构造的特殊性,发生火灾等其他突发事件时,站内容易变得拥挤狭窄,很难将所有乘客在短时间内送到安全区域,极易容易造成重大的人员伤亡和财产损失事故。当发生火灾时,国内外学者对行人的疏散行为研究颇多, Bryan [1]等学者从受灾人员方面入手,花费了大量时间去访问受灾者,从受灾者的讲述中了解了与火灾相关的许多情况,以及受灾场景内幸存者的分布情况,总结出了可靠的结论。Peleehano [2]等将一个人的受教育程度加入到了对疏散行为的影响的研究中。胡青梅[3]通过观察地铁直通道内乘客的步行状态,总结了行人的运动规律,建立了模拟地铁直通道内乘客步行速度与人口流量变化关系的模型。王灿灿[4]根据旅客的行为特点,通过出口效用函数和改进的社会力模型,建立了多出口选择下的旅客疏散模型。牛天河等[5]通过对相关数据的观察和查阅,总结了疏散过程中乘客的集中行为。

本文主要考虑到人员年龄、性别等基本因素,而环境中场景的设立面积与进站乘车的人数的关系对于实际情况中人员的速度影响很大,从而间接影响到人员疏散。所以突发事件下,客流量的大小对疏散结果有着很大的影响,因此采用 AnyLogic 软件模拟行人在突发事件下的疏散情况。在真实的场景中,火灾的烟气运动情况不清楚,因此我们使用 PyroSim 软件对火灾发生时的烟气运动进行模拟,使用此软件可以得出火灾逃生时间。

2. 影响行人乘客进行安全疏散的因素

2.1. 行走速度

对于不同类群来说,正常情况下的行走速度是不一样的,将人员分为 4 大类群,人员性别比例取 1:1。根据张开冉,邱谦谦[6]等人对行李对被疏散这运动参数影响的研究,正常类群的速度值为:

小孩: 1.075 m/s;

老人: 1.051 m/s;

成年男性: 1.527 m/s;

成年女性: 1.347 m/s。

2.2. 客流空间密度

客流空间密度指每平方米中的人数。将区域简单的规划为一个矩形,统计此区域内通过的总乘客数目,可得:

$$\rho = \frac{\bar{n}}{a \times b} \quad (1)$$

- (1)式中: r ——客流空间密度;
 a, b ——客流空间的长度与宽度;
 \bar{n} ——平均通过人数。

3. 火灾产物危害分析

地铁站发生火灾时, 燃烧所产生的烟气, 毒性等会严重威胁人员的生命与财产安全[7]。

3.1. 烟气毒性物质

由火灾中不完全燃烧产生的烟气中有一氧化碳、二氧化碳、二氧化硫等有毒气体, 当有毒气体的体积分数达到一定程度时将对人体产生负面影响, 甚至使人死亡。火灾中 CO 中毒死亡人数超过总死亡人数的 50%, 人眼高度处 CO 体积分数达到 0.025%, CO₂ 体积分数达到 1% 或 O₂ 体积分数降到 15% 时, 可认为达到危险状态程度。

3.2. 能见度影响

火灾烟气扩散后会降低环境的能见度, 不但影响人员对逃生出口的选择, 还会对逃生速度产生一定影响。大空间环境不影响疏散的最低能见度为 10 m。

4. 火灾场景模拟设置

利用 PyroSim 火灾模拟软件对比不同火源位置下站台温度场、楼梯口、人眼高度处能见度以及 CO₂ 体积分数, 与地铁设计规范进行对比验证其合理性。

4.1. 设置火灾发生地点

遵守最不利保守原则设定起火位置为站台中心区域与站台端部, 由乘客携带的危险品引起火灾。设置 3 种探测器, 分别探测楼梯口 CO、CO₂ 的体积分数。在高度 Z = 1.5 处设置切片, 观察此高度各处 CO₂ 的体积分数以及能见度、温度热力分布图, 见图 1~3。

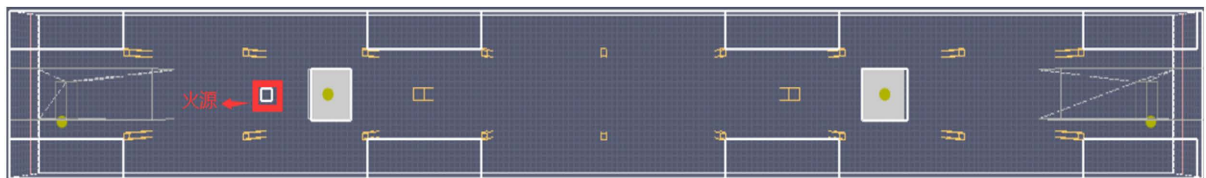


Figure 1. Scene 1
 图 1. 场景 1

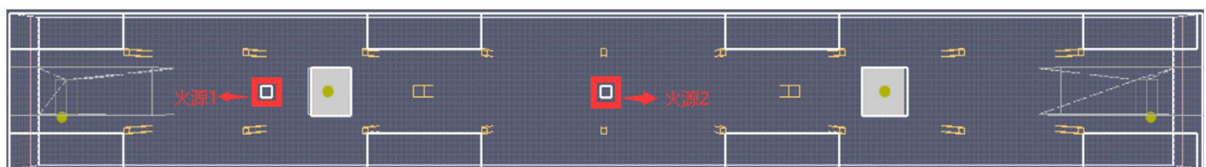


Figure 2. Scene 2
 图 2. 场景 2

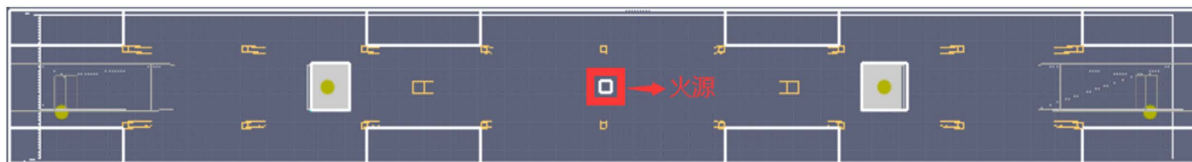


Figure 3. Scene3
图 3. 场景 3

4.2. 边界条件和参数设置

初始环境温度 20℃, 压强为标准大气压, 相对湿度为 40%。

据地铁设计规范中的 6 min 内撤离的标准, 模拟时间设为 360 s。据国外相关实验分析, 一般旅客携带的包裹燃烧时火源功率约为 2~5 MW, 取火源功率为 5 MW, 火势按 t_2 快速火发展。火灾模型的网格划分为 $0.25 \times 0.25 \times 0.25$, 总网格数为 436,800 个, 单台计算机模拟时间约为 5 h。

4.3. 模拟结果及分析

1) 场景 1

a) 烟气扩散过程

CO₂ 浓度在 360 s 内未达到危险浓度, 最高为 0.0004 mol/mol, 见图 4。

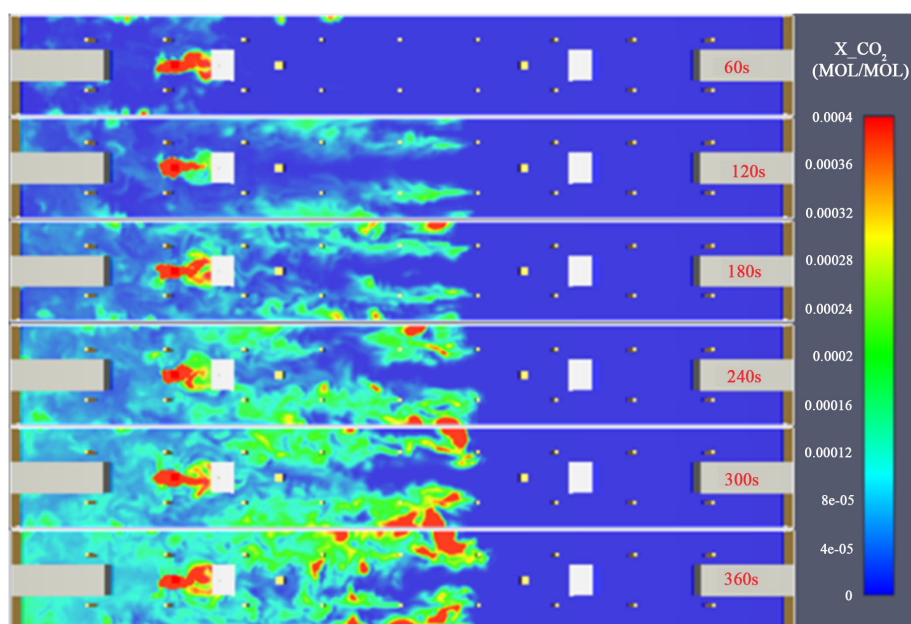


Figure 4. Process of CO₂ diffusion
图 4. CO₂ 扩散过程

b) 能见度变化过程

烟气能见度在 360 s 内除左侧楼梯口及站台中部部分降到 10 m 以下, 见图 5。

c) 温度变化过程

温度在 360 s 内未达到危险程度, 最高温度 23.9℃, 见图 6。

场景 1 从火灾发生到达到危险状态的时间, 见表 1。

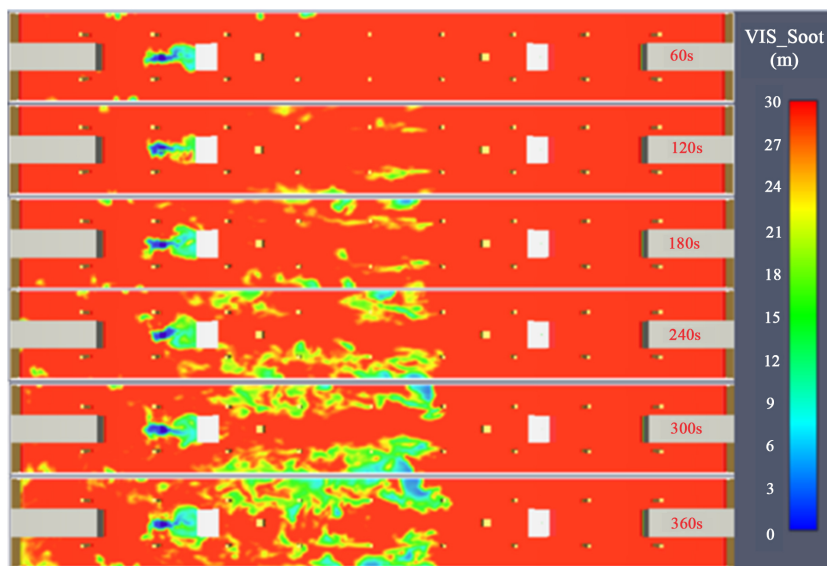


Figure 5. Change of smoke visibility

图 5. 烟气能见度变化

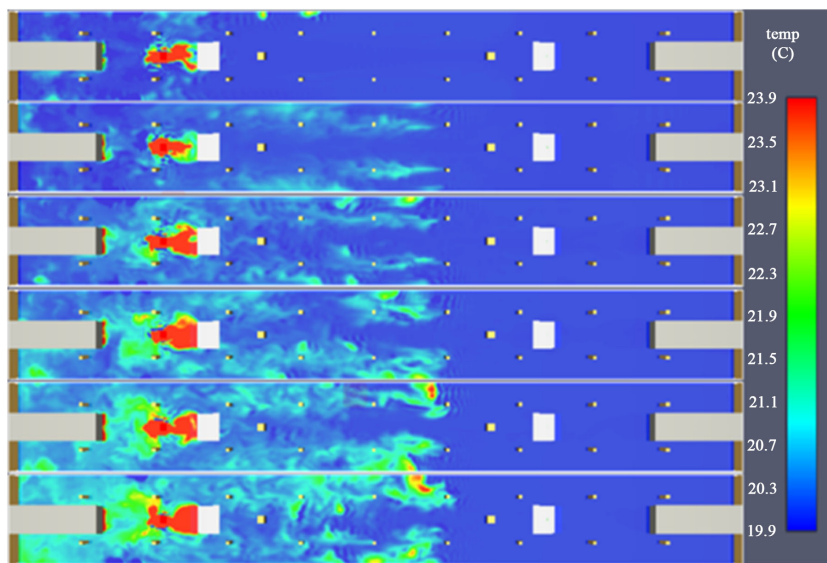


Figure 6. Change of smoke temperature

图 6. 烟气温度变化

Table 1. The time of the whole platform reaches dangerous state in case of fire

表 1. 火灾时全站台达到危险状态的时间

	CO	CO ₂	能见度	温度
站台达到危险状态的时间/s	—	—	—	—

d) 烟气探测器数据

烟气没有扩散到右侧站台。左侧楼梯口的烟气浓度均未达到危险浓度。综上此场景中烟气浓度对疏散影响较小。图 7 可见左侧楼梯的二氧化碳浓度。

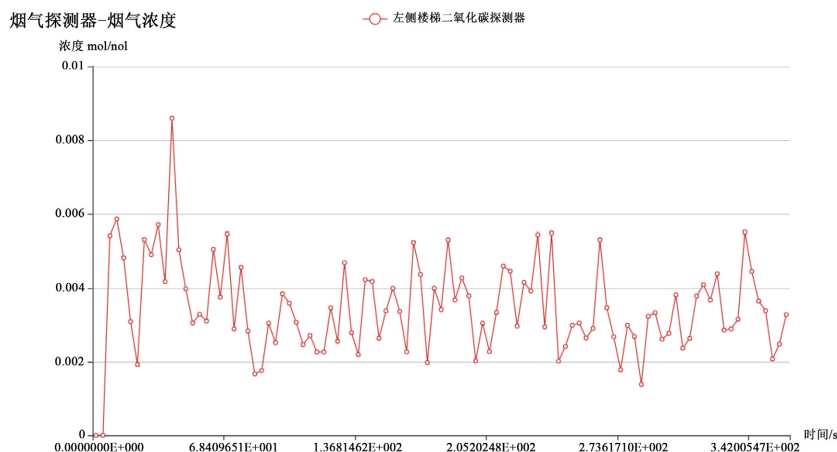


Figure 7. Time-concentration diagram of CO₂ in the left stairway

图 7. 左侧楼梯口的 CO₂ 时间 - 浓度图

2) 场景 2

a) 烟气扩散过程

CO₂ 浓度在 360 s 内未达到危险浓度, 最高为 0.002 mol/mol, 见图 8。

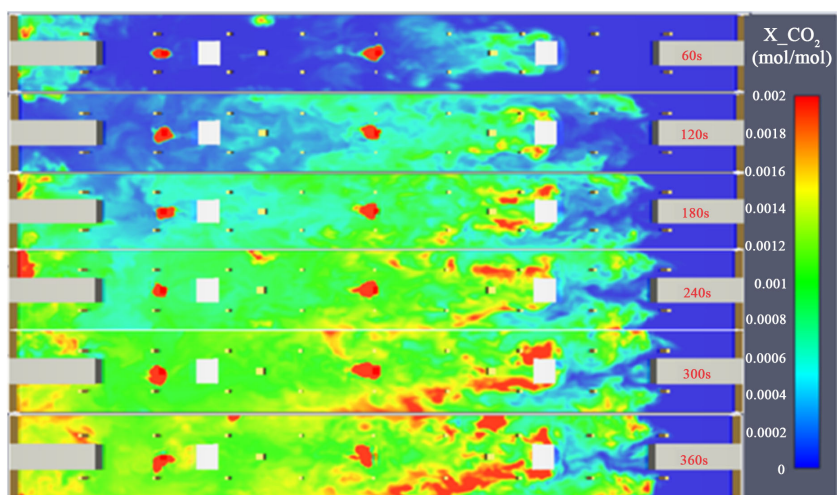


Figure 8. Process of CO₂ diffusion

图 8. CO₂ 扩散过程

b) 能见度变化过程

烟气的能见度在 120 s 时, 过半场站台低于 10 m; 180 s 时全站台低于 10 m, 见图 9。

c) 温度变化过程

温度在 360 s 内未达到危险程度, 最高温度 40℃, 见图 10。

d) 烟气探测器数据

两侧楼梯口的 CO 浓度均未达到危险浓度且数值很小, 故不作展示。左侧楼梯口的 CO₂ 浓度在个别时间点达到 1%, 右侧楼梯 CO₂ 浓度比左侧低 3 到 4 个数量级, 综上此场景中烟气浓度对疏散影响较小。

图 11 可见左侧楼梯的二氧化碳浓度。

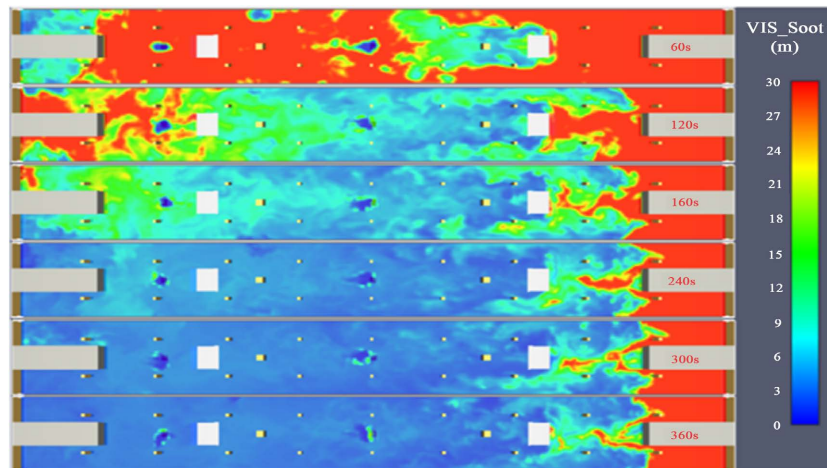


Figure 9. Change of smoke visibility
图 9. 烟气能见度变化

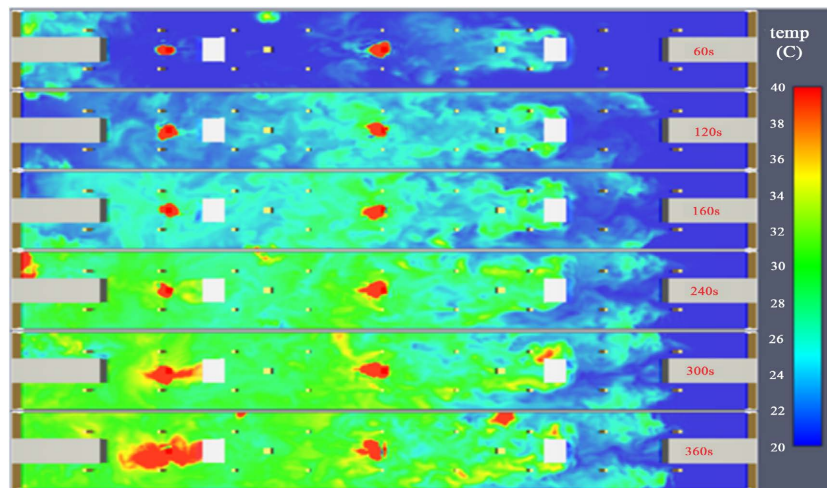


Figure 10. Change of smoke temperature
图 10. 烟气温度变化

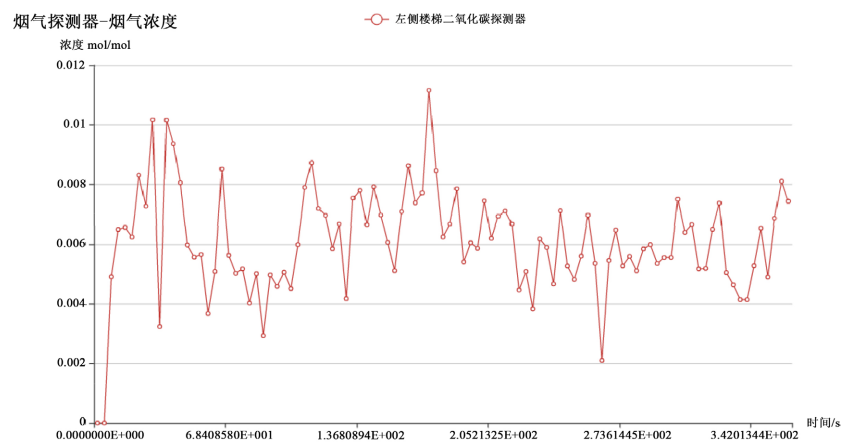


Figure 11. Time-concentration diagram of CO₂ in the left stairway
图 11. 左侧楼梯口的 CO₂ 时间 - 浓度图

场景 2 从火灾发生到达到危险状态的时间, 见表 2。

Table 2. The time of the whole platform reaches dangerous state in case of fire
表 2. 火灾时全站台达到危险状态的时间

	CO	CO ₂	能见度	温度
站台达到危险状态的时间/s	—	—	160	—

3) 场景 3

a) 烟气扩散过程

CO₂ 浓度在 360 s 内未达到危险浓度, 最高为 0.00075 mol/mol, 见图 12。

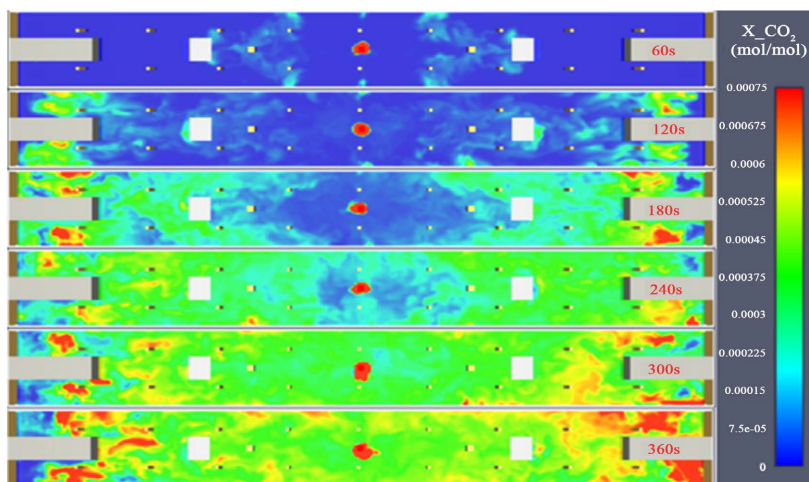


Figure 12. Process of CO₂ diffusion
图 12. CO₂ 扩散过程

b) 能见度变化过程

烟气的能见度在 240 s 时, 站台两侧低于 10 m; 300 s 时全站台低于 10 m, 见图 13。

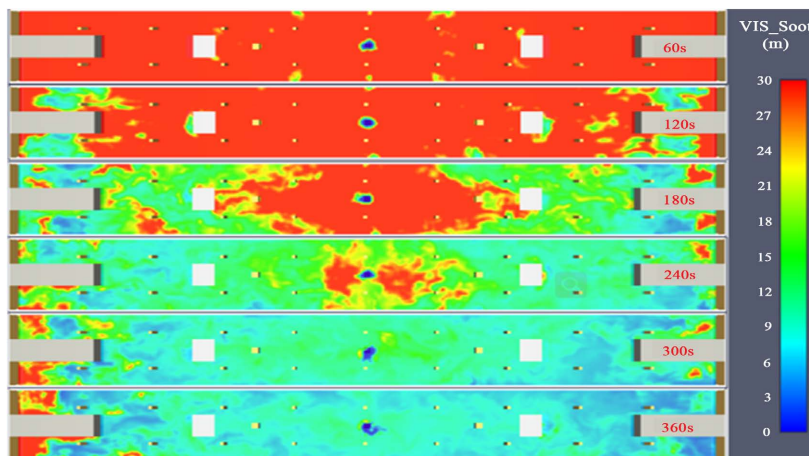


Figure 13. Change of smoke visibility
图 13. 烟气能见度变化

c) 温度变化过程

温度在 360 s 内未达到危险程度, 最高温度 23.95℃, 见图 14。

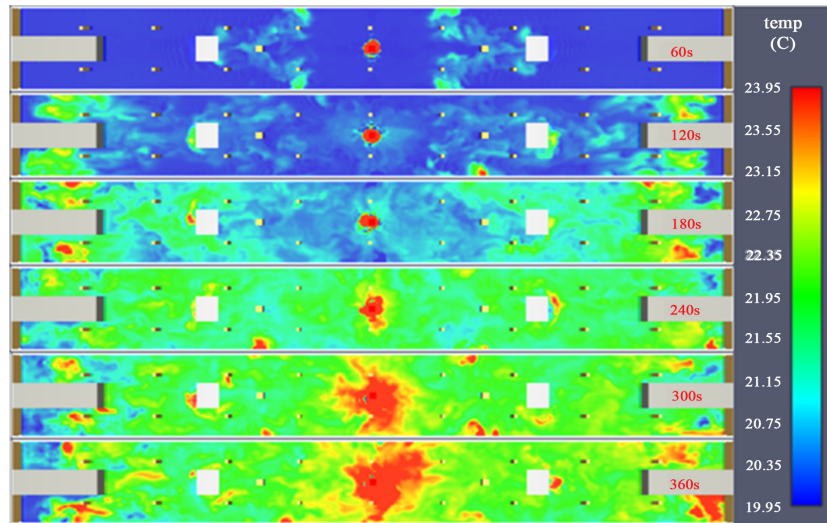


Figure 14. Change of smoke temperature
图 14. 烟气温度变化

d) 烟气探测器数据

两侧楼梯口 CO 浓度远低于危险浓度, 故不作展示。右侧楼梯口 CO₂ 浓度较左侧高, 但均未达到危险浓度。图 15 可见左侧楼梯的二氧化碳浓度。图 16 可见右侧楼梯的二氧化碳浓度。

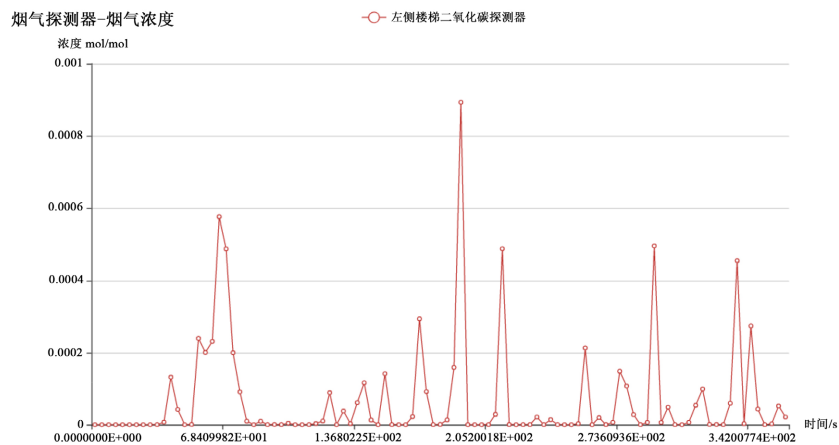


Figure 15. Time-concentration diagram of CO₂ in the left stairway
图 15. 左侧楼梯口的 CO₂ 时间 - 浓度图

场景 3 从火灾发生到达到危险状态的时间, 见表 3。

4.4. 火灾安全疏散时间

火灾发生, 影响人体生命安全的主要因素有 CO, CO₂ 浓度以及空气能见度(不考虑氧气浓度)。当 CO, CO₂ 浓度达到一定浓度时对人体就会威胁生命安全。使用 PyroSim 软件测站台层 CO, CO₂ 浓度, 以及

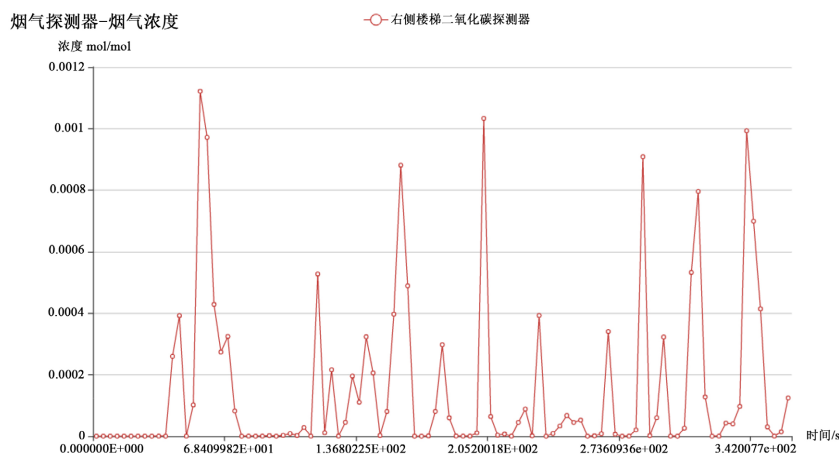


Figure 16. Time-concentration diagram of CO₂ in the right stairway
图 16. 右侧楼梯口的 CO₂ 时间 - 浓度图

Table 3. The time of the whole platform reaches dangerous state in case of fire
表 3. 火灾时全站台达到危险状态的时间

	CO	CO ₂	能见度	温度
站台达到危险状态的时间/s	—	—	300	—

空气能见度。此模型针对场景三进行，设置着火点在站台中间，当三项因素其中一种达到人体所能承受极限的时间，此时间为火灾安全疏散时间。场景一，在 6 分钟内对人体无威胁。场景二，能见度达到最大人体承受程度时间是 160 s，即场景二火灾疏散时间是 160 s。场景三当能见度达到最大人体承受程度的时间为 300 s，所以模型疏散在火警发生之后 300 s 停止，火灾安全疏散时间为 300 s。

5. 火灾疏散模拟场景

火灾疏散某地铁站台场景建模平面图，见图 17。

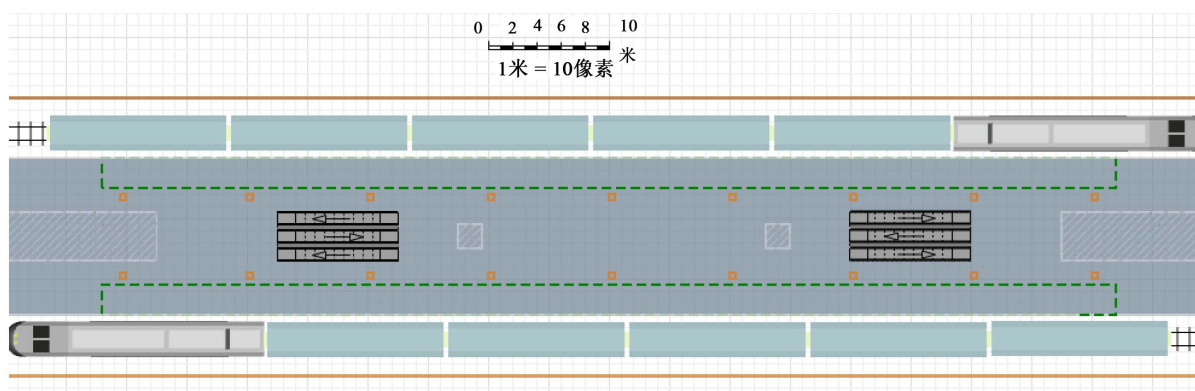


Figure 17. 2D drawing of fire evacuation scene
图 17. 火灾疏散场景平面图

疏散模拟说明

火灾疏散模拟在站台层。根据真实站台建立。站台层的建筑面积设置为 100 × 13 平方米。逃生模拟

过程是人员进入车站后等待车的状态下, 此时火灾发生, 人员进行安全疏散。此站台层有两个安全逃生楼梯, 人员需要从两个逃生楼梯进行安全逃生。逃生楼梯不深设置 0.5 米, 坡斜 30 度, 每个楼梯设置两个上行。行人进入站台层, 随机进入等待区域进行等待, 设置模型开始后 3000 s 后火灾发生, 行人维持等待状态, 火灾发生后, 取消当前的等待指令, 选择最近的楼梯进行安全逃生。安全疏散结束时间在 3000 s 的基础上加上各个场景的安全疏散时间。行人行动逻辑见图 18。

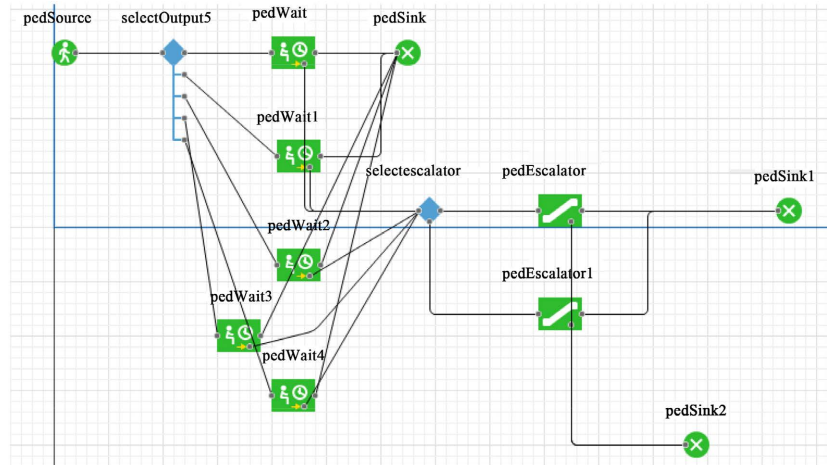


Figure 18. Pedestrian movement logic
图 18. 行人运动逻辑

6. 火灾疏散模拟结果

6.1. 对场景二分析与结果

场景二, 火灾发生在楼梯处, 此时认为人员疏散时, 左楼梯无法使用, 这个时候人员疏散将收到很大影响。而对于地铁站来说, 发生火灾的地点并不确定。对此场景中多次模拟得出结果, 当人数达到 170 人时, 即当客流空间密度达到 0.13 人/m² 时, 此时模拟逃生率达到 100%。

6.2. 对场景三多次模拟

设置实际到达站台层人员数量梯度。以 1000 人为第一梯度, 然后每次减少 50 人作为下一梯度进行模拟。为了避免其他因素对实验结果的影响, 对每一梯度进行 10 次模拟, 取其平均值, 作为最终此梯度安全疏散人数。模拟数据见表 4。

Table 4. Simulation results of each population gradient
表 4. 各个人数梯度模拟结果

到达人数	10 次模拟结果的平均人数
1000	825.0
950	815.2
900	782.2
850	744.8
800	717.2
750	691.3

Continued

700	666.0
650	643.6
640	631.8
630	622.7
610	607.9
605	604.6
600	600.0

实际场景中, 由于并不知道真正的着火点的位置, 针对场景三和场景二, 着火点设在车站站台中间位置和楼梯处。设立这两个位置为着火点的极端位置, 逃离时间分别为 160 s 和 300 s, 不论着火点在两者之间什么位置, 则逃生时间均在 160 s~300 s 之间。以最近的楼梯为准, 站台可见度考虑靠近着火点的楼梯处, 即忽略距离着火点较远的楼梯与距离着火点较近的楼梯之间的距离差别。以此设立梯度为 10 s 的时间梯度 160 s~300 s。对每一梯度时间进行模拟逃生, 每一梯度时间对应一个逃生率达到 100% 的逃生人数, 即是有一个客流密度与之对应。每一梯度模拟 10 次, 较少因客观因素对模拟结果的影响。模拟数据见表 5。

Table 5. Simulation data of evacuation limit number of each time gradient
表 5. 各个时间梯度疏散极限人数模拟数据

模拟时间	总人数/人	10 次模拟平均人数/人
160 s	320	315
170 s	345	340
180 s	355	350
190 s	375	370
200 s	390	385
210 s	415	410
220 s	440	435
230 s	455	450
240 s	470	465
250 s	490	485
260 s	530	525
270 s	555	550
280 s	575	570
290 s	585	580
300 s	600	600

6.3. 客流空间密度与逃生率

计算各个梯度的客流空间密度, 以及按照平均数计算每一梯度的逃生率得到数据结果见表 6。

Table 6. Escape rate and passenger spatial density
表 6. 逃生率与客流空间密度

逃生率	客流空间密度
82.5%	0.77
85.8%	0.73
86.9%	0.69
87.6%	0.65
89.6%	0.62
92.2%	0.58
95.1%	0.54
99.0%	0.50
1	0.46

6.4. 疏散极限客流空间密度与时间

计算各个时间梯度疏散极限人数对应的客流空间密度, 与时间的关系见表 7。

Table 7. Time and passenger spatial density
表 7. 时间与客流空间密度

时间	客流空间密度
160	0.24
170	0.26
180	0.27
190	0.28
200	0.30
210	0.32
220	0.33
230	0.35
240	0.36
250	0.37
260	0.40
270	0.42
280	0.44
290	0.45
300	0.46

6.5. 模拟数据分析与结果

对于每一梯度 10 次模拟结果, 比对于一次模拟结果更加具有说服力。从结果可以看出在此场景中, 在人数达到 600 时, 每次模拟逃生率都可达到 100%。即当客流空间密度小与等于 0.46 时, 疏散可以安

全进行。当客流空间密度大于 0.46 时, 疏散的安全性受到影响。对于结果进行回归分析, 采用各种拟合方式进行拟合客流空间密度与逃生率之间的关系。得到结果见图 19, 表 8。

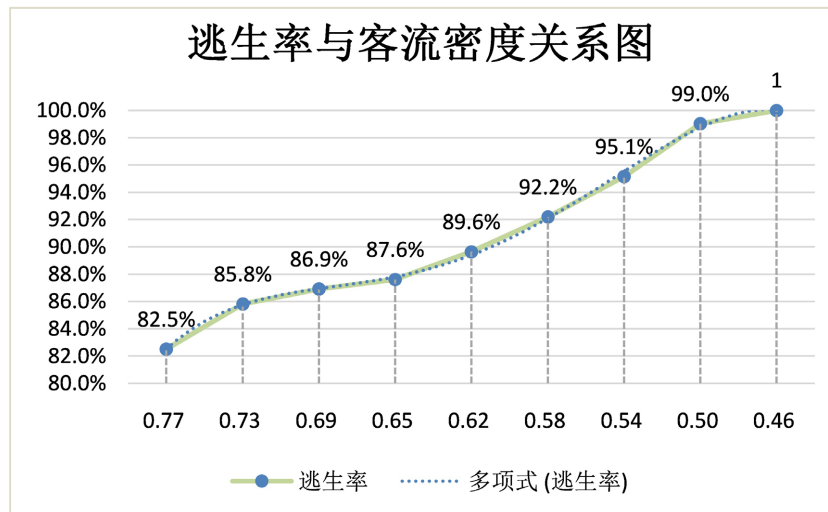


Figure 19. Relationship between escape rate and passenger flow density
图 19. 逃生率与客流密度关系图

Table 8. Fitting results of various fitting methods
表 8. 各种拟合方式拟合结果

关系式	R ²	拟合方式
$\phi = 0.0218\rho + 0.8009$	0.971	线性关系
$\phi = 0.806e^{0.0238\rho}$	0.9757	指数关系
$\phi = 0.0771\ln(\rho) + 0.8001$	0.8399	对数关系
$\phi = 0.0011\rho^2 + 0.0112\rho + 0.8203$	0.9828	多项式(3 项)
$\phi = 0.8044\rho^{0.0851}$	0.858	幂关系
$\phi = -0.003\rho^4 + 0.0057\rho^3 - 0.372\rho^2 + 0.1048\rho + 0.7486$	0.9989	多项式(5 项)

根据 R² 的结果多项式拟合(最高指数 4)可靠性最高。其中的 ϕ 代表逃生率, ρ 代表客流空间密度, 且 ρ 大于等于 0.46。最终可得到客流空间密度与逃生率之间的关系为:

$$\phi = -0.003\rho^4 + 0.0057\rho^3 - 0.372\rho^2 + 0.1048\rho + 0.7486 (\rho \geq 0.46)$$

称使得模拟结果逃生率达到 100% 的客流空间密度为极限客流空间密度。对于极限客流空间密度与疏散时间的关系, 见图 20。

采用回归分析的方法对关系图进行拟合。使用各种类别拟合方法, 在拟合结果中比较各个决定系数最终得到

$$\rho_{\min} = -9e^{-7}t^5 + 3e^{-5}t^4 - 0.0003t^3 + 0.001t^2 + 0.0122t + 0.2307$$

ρ_{\min} ——代表极限客流密度;

t ——代表模拟疏散时间。

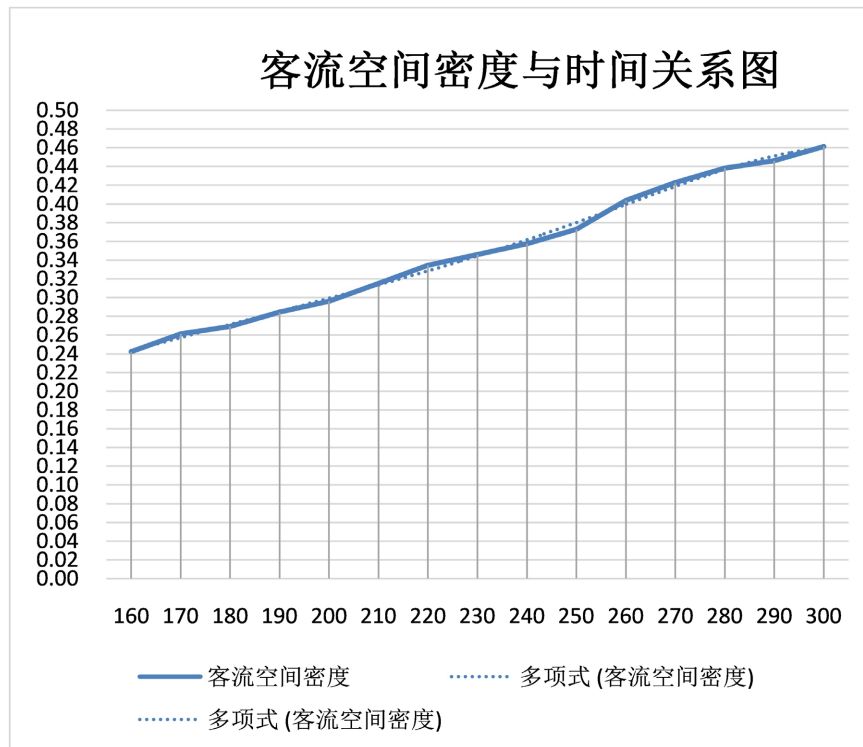


Figure 20. Relationship between limit passenger flow spatial density and evacuation time
图 20. 极限客流空间密度与疏散时间关系图

7. 结论

为了获得针对场景三中, 客流空间密度与地铁站火灾疏散逃生率之间的关系, 采用 AnyLogic 软件模拟地铁站火灾疏散过程, 模拟不同梯度下人群数量, 即不同客流空间密度下人群逃生率, 每一梯度模拟 10 次, 取每次模拟的平均值作为每一梯度人群数量下的逃生人数计算逃生率, 并计算每一梯度下的客流空间密度, 得出客流空间密度与地铁站火灾模拟逃生率的关系。得到下面结论。

1) 当疏散时间为 300 s 时, 存在一个客流空间密度值 0.46 人/m², 小于此值时, 发生火灾时人群疏散结果理想。

2) 当客流空间密度大于 0.46 人/m²时, 客流空间密度与逃生率之间存在关系:

$$\phi = -0.003\rho^4 + 0.0057\rho^3 - 0.372\rho^2 + 0.1048\rho + 0.7486 (\rho \geq 0.46)$$

其中的 ϕ 代表逃生率, ρ 代表客流空间密度。

3) 极限客流空间密度与模拟疏散时间之间的关系为

$$\rho_{\min} = -9e^{-7}t^5 + 3e^{-5}t^4 - 0.0003t^3 + 0.001t^2 + 0.0122t + 0.2307$$

ρ_{\min} ——代表极限客流密度, t ——代表模拟疏散时间。

对于不同的地铁站台建设, 模拟疏散时间有所不同, 这里对模拟疏散已有的站台场景提供了一种统计方法。依靠此种方式, 计算已有站台的极限客流密度, 对站台人流量进行控制, 将有效减少火灾突发时的危害。

参考文献

- [1] Bryan, J.L. and DiNenno, P.J. (1980) Human Behavior in a Nursing Home Fire. *Fire Journal*, **74**, 44-47.

-
- [2] Pelechano, N., O'Brien, K., Silverman, B. and Badler, N. (2013) Crowd Simulation Incorporating Agent Psychological Models, Roles and Communication. *First International Workshop on Crowd Simulation*, 21-30.
<https://repository.upenn.edu/hms/29>
- [3] 胡清梅. 大型公共建筑环境中人群拥挤机理及群集行为特性的研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2006.
- [4] 王灿灿. 高铁车站旅客应急疏散研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2018.
- [5] 牛天河. 基于旅客行为特性的铁路客运站应急疏散仿真研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2016.
- [6] 张开冉, 邱谦谦, 王若成. 行李对被疏散者运动参数影响的研究[J]. *中国安全科学学报*, 2015, 25(7): 105-109.
- [7] 师长更. 地铁站台火灾烟气流动模拟与控制研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安科技大学, 2018.