Modeling and Simulation 建模与仿真, 2025, 14(8), 76-82
Published Online August 2025 in Hans. https://www.hanspub.org/journal/mos
https://doi.org/10.12677/mos.2025.148549

Hans汉斯

考虑汇流博弈的超高层建筑楼梯疏散模型研究

李向民[1]，冷予冰[1]，葛明威[2]，房志明[2]，郭雪媛[1]

[1]上海市建筑科学研究院有限公司，上海市工程结构安全重点实验室，上海
[2]上海理工大学管理学院，上海

收稿日期：2025年7月12日；录用日期：2025年8月4日；发布日期：2025年8月14日

摘　要

楼梯间汇流冲突行为是影响超高层建筑疏散效率的关键因素，准确模拟并重现超高层建筑楼梯疏散过程中的微观行为特征，对于缩短疏散时间、优化疏散策略至关重要。通过引入汇流博弈机制，构建考虑汇流博弈的超高层建筑楼梯疏散模型。以40层建筑为研究对象进行疏散模拟，对比高层与低层发生汇流的结果。结果表明：高层汇流场景疏散时间更长、冲突次数更多，表明了汇流位置的选择对于缓解人群拥堵现象具有显著影响。可通过调节人流密度分布、汇流冲突点位置及疏散路径容量实现拥堵缓解。

关键词

超高层建筑，疏散模型，元胞自动机，汇流博弈

Research on Staircase Evacuation Modelling for Super High-Rise Buildings Considering Merging Game

Xiangmin Li[1], Yubing Leng[1], Mingwei Ge[2], Zhiming Fang[2], Xueyuan Guo[1]

[1]Shanghai Key Laboratory of Engineering Structure Safety, SRIBS, Shanghai
[2]Business School of University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Jul. 12th, 2025; accepted: Aug. 4th, 2025; published: Aug. 14th, 2025

Abstract

Merging conflict behavior in stairwells is a key factor affecting the evacuation efficiency of super high-rise buildings. Accurately simulating and reproducing the microscopic behavioral characteristics during stair evacuation in super high-rise buildings is crucial for reducing evacuation time and optimizing evacuation strategies. By introducing the merging game mechanism, the super high-rise

文章引用: 李向民, 冷予冰, 葛明威, 房志明, 郭雪媛. 考虑汇流博弈的超高层建筑楼梯疏散模型研究[J]. 建模与仿真, 2025, 14(8): 76-82. DOI: 10.12677/mos.2025.148549

building staircase evacuation model considering the merging game is constructed. Meanwhile, the evacuation simulation is carried out with a 40-storey building, comparing the results of merging occurring in the higher floors with those in the lower floors. The results show that the evacuation time is longer and the number of conflicts is more in the merging of high floors scenario, indicating that the choice of mergence location has a significant impact on alleviating the crowd congestion phenomenon. Congestion relief can be achieved by adjusting the distribution of crowd density, the location of merging conflict points and the capacity of evacuation paths.

Keywords

Super High-Rise Building, Evacuation Model, Cellular Automata, Merging Game

Copyright © 2025 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

超高层建筑对当代城市发展至关重要，在促进城市发展的同时，也引发了一系列安全挑战[1]。由于超高层建筑的规模庞大和结构复杂性以及消防梯高度限制，传统的应急救援方法和疏散策略在应对突发事件及保障人群安全方面具有局限性[2] [3]。目前，在突发事件发生时，人员通常依靠建筑内部的楼梯和电梯进行垂直疏散。相关研究表明，楼梯疏散过程所耗费的时间占据了超高层建筑应急疏散总时间的 70%以上[4]。如何有效缩短楼梯疏散时间是亟需解决的关键问题。要解决这一问题，核心在于理清关键影响因素。超高层建筑具有人员密集、多楼层汇流、空间结构复杂等特征，这些因素容易引发拥堵现象，从而导致疏散时间延长。针对这些特点和问题，研究人员通过实验分析和模拟仿真对超高层建筑的疏散行为展开了深入研究。

研究者组织实验证明，楼层平台处的汇流现象会减缓汇流点以下邻近楼层人员的移动速度[5] [6]，以及汇流行为受到建筑几何形状和人群密度的影响[7]。Yu 等结合不同通道宽度和奖励机制的实验设置对称和非对称汇流结构进行一系列对照实验，通过引入和修改辛普森多样性指数量化分析了汇流过程中行人间的竞争程度[8]。Zeng 等使用扩展最优步长模型分析人员疏散运动，主要考虑楼层中间平台的垂直运动和汇流，分析揭示楼梯上的人员编队现象在到达中间平台之前形成[9]。Xu 等提出了一种改进的楼梯间人群疏散的多格子模型，能更准确地模拟人群汇流和转向行为，通过模拟发现，来自走廊行人和来自上层楼梯行人的汇流导致缓冲区拥堵，从而减慢了人群的速度[10]。Qu 等提出了一个增强的社会力量模型描述行人在楼梯上的移动和疏散动态，引入了楼梯几何形状的影响、台阶大小的限制和最优速度选择机制等[11]。郑霞忠等基于排队论原理，引入楼梯汇流率并建立考虑汇流影响的楼梯疏散模型，以此描述楼梯疏散过程中人员流动的动态变化过程[12]。Sano 提出了一种用于楼梯疏散的新型行人汇流模型，分析了从楼层和楼梯进入楼梯平台的合并比率以及其对行人流量和疏散时间的影响[13]。在微观层面，研究者通过模型描述汇流过程中的人员行为和特征，如 Ibrahim M A 等[14] [15]将疏散人员分为合作者、叛逃者、评估者和报复者，并根据一定规则识别和解决相邻个体间的冲突。先前的研究为理解超高层建筑的多楼层汇流现象提供了实证支持，但是大多数研究对超高层建筑中疏散主体的运动和行为模式关注较少。

为更精确地模拟超高层建筑楼梯疏散过程中的微观行为模式和特征，本文基于博弈理论对疏散过程中的汇流博弈进行分析，探讨其过程与结果，并确定汇流博弈机制。具体包括界定汇流博弈触发场景，明确博弈参与主体及博弈规则以及收益矩阵。在此基础上，构建一个考虑汇流博弈的超高层建筑楼梯疏

散模型，从微观角度逐步细化超高层建筑多楼层汇流中的人员行为特征。这一研究旨为保障超高层建筑内人员安全以及优化安全管理提供科学依据。

2. 楼梯间汇流博弈分析与设定

2.1. 博弈参与主体

元胞自动机模型能够识别触发场景下潜在的博弈参与主体。在触发场景发生时，至少涉及两个或以上的参与主体。所有博弈参与主体都是理性的，并且各参与主体清楚其他人的特征、策略及得益等准确信息。结合实际情况和模型构建的复杂性，参与主体确定规则如下。

规则 1：当仅有两个疏散人员目标位置相同时，会直接产生冲突，该两个疏散人员都成为博弈参与方；

规则 2：若存在多个疏散人员目标一致，则依照疏散人员的当前瞬时速度决定博弈参与方(速度越快，竞争力越强)，挑选出速度最快的两位疏散人员参与竞争，其余疏散人员默认不参与，等待一轮；

规则 3：记录疏散人员发生冲突时的等待次数，若次数大于 2，那么下一次发生冲突时将直接疏散该人员，同时将冲突次数清零，以防止疏散人员一直处在冲突状态无法移动。

2.2. 收益矩阵及博弈模型

在疏散场景中，参与博弈的双方同时做出决策，且双方均知晓彼此的策略空间以及对应的收益情况。完全信息静态博弈假设(“双方知晓策略空间与收益”)，是经典博弈论分析的常用前提，适配简化后的疏散场景推导。依据先前研究[16]，将博弈参与主体分为有耐心与不耐心两种策略，其支付矩阵见表 1。具体内容如下：

(1) 耐心 vs 不耐心：不耐心的一方成为竞争赢家，其成本降低一个效用量 $\Delta u\left(t_{ij}\right)$，而耐心一方的成本增加一个效用量 $\Delta u\left(t_{ij}\right)$。

(2) 耐心 vs 耐心：双方均保持原地不动，共同承担时间成本 C_t (负值)。

(3) 不耐心 vs 不耐心：双方僵持不下，无赢家产生，且共同付出冲突成本 C_w (负值)。

Table 1. Payoff matrix of the game participants
表 1. 博弈参与主体的支付矩阵

支付矩阵		参与主体 j	
		不耐心	耐心
参与主体 i	不耐心	C_w, C_w	$\Delta u\left(T_{ij}\right), -\Delta u\left(T_{ij}\right)$
	耐心	$-\Delta u\left(T_{ij}\right), \Delta u\left(T_{ij}\right)$	C_t, C_t

参与主体博弈的目的是缩短疏散时间。在每次博弈中，各方都试图争取更优越的位置以减少疏散时间。冲突中的赢家能够超越其他参与主体到达期望位置，并通过降低其预估疏散时间来获得效用。而输家则需要留在当前位置并损失效用。因此，每位赢家的成本将减少一个效用量 $\Delta u\left(t_{ij}\right)$，而每位输家的成本将相应增加相同的数值。故在双方博弈中，博弈参与主体的效用：

$$\Delta u\left(T_{ij}\right)=\frac{\Delta d_i}{v\left(i,t+1\right)} \tag{1}$$

$$\Delta d_i = v\left(i,t\right)*\Delta t \tag{2}$$

$$v\left(i,t\right)=\frac{S_i}{T_{ij}} \tag{3}$$

$$T_{ij}=\frac{T_i+T_j}{2} \tag{4}$$

其中，Δd_i 为单位移动距离；$v(i,t)$ 是时间步为 t 时的平均疏散速度，$v(i,t+1)$ 则是赢家 i 的下一时间步的移动速度；S_i 是该疏散人员累计的疏散距离，T_{ij} 是平均累计疏散时间；T_i 和 T_j 分别是博弈参与双方的当前累计疏散时间。

博弈参与主体在冲突时所产生的时滞带来的生存成本，定义为冲突成本 C_w，该成本与人群密度相关，具体表现为：

$$C_w=\begin{cases}-0.5\Delta t, & \rho\le 4\\ -1\Delta t, & 4<\rho\le 5.55\\ -1.5\Delta t, & \rho>5.55\end{cases} \tag{5}$$

ρ 为当前邻域内的人群密度，其计算均采用 1 m × 1 m 网格单元、0.25 m² 人体占用面积、瞬时密度统计的标准测量方法，测量口径与文献[17] [18]保持一致。当密度约为 4 人/m² 时，疏散人员之间开始出现接触[17]。若人群密度小于 4 人/m² 时，冲突成本设定为单位时间的 0.5 倍；当局部人群密度在 4~5.55 人/m² 之间时，冲突成本设定为单位时间的 1 倍。根据先前研究[18]，当密度达到 5.55 人/m² 时，冲突所需的时间延迟会显著增加。因此，当局部人群密度超过 5.55 人/m² 时，冲突成本被定义为单位时间的 1.5 倍。表明随着人群密度的增加，个体在冲突中占据优势所需的时间延迟也会相应增加。

关于双方都选择耐心策略时的时间成本 C_t 的设定，存在两种情形。情况一：将其设为 0；情况二：设定为非零值。将(耐心，耐心)的时间成本设为零，可简化模型分析、降低计算复杂度，并避免引入非必要变量干扰对关键策略互动的研究。因此，仅考虑零值情况，其支付矩阵见表 2。

Table 2. Simplified payoff matrix when the value of time cost is set to 0 when both parties choose the patience strategy
表 2. 双方都选择耐心策略时的时间成本值设定为 0 时的简化支付矩阵

		参与主体 j	
		不耐心	耐心
参与主体 i	不耐心	$C_w/\Delta u(T_{ij}), C_w/\Delta u(T_{ij})$	1, −1
	耐心	−1, 1	0, 0

该博弈模型类型取决于 $C_w/\Delta u(T_{ij})$ 的值大小，若 $C_w/\Delta u(T_{ij})\ge -1$ 为囚徒困境，其纳什均衡为(不耐心，不耐心)，反之为鹰鸽博弈。双方均以 $-C_w/\Delta u(T_{ij})$ 的概率选择鹰策略，以 $1-\left(-C_w/\Delta u(T_{ij})\right)$ 的概率选择鸽策略，形成了对称混合均衡。

在元胞自动机模型中，该策略通过随机分配机制实现：每次博弈前，借助计算机随机数函数生成随机数，以此决定参与者的策略选择。具体规则为，当生成的随机数属于某特定数值区间时选择“鹰”策略，其余情况选择“鸽”策略。通过动态调整规则，使选择“鹰”策略的概率趋近于 $-C_w/\Delta u(T_{ij})$。当博弈结果为双方均采取“耐心”策略(即博弈主体均保持不动)时，设定其余元胞的移动规则如下：若目标位置存在除博弈双方外速度最大的第三竞争者，则该竞争者执行移动操作；若不存在此类竞争者，则目标位置保持无元胞占据状态，所有竞争者均放弃本轮移动。

3. 融合汇流博弈机制的超高层建筑楼梯疏散模型

在考虑体力消耗的超高层建筑楼梯疏散模型[19]的基础上，进一步引入多楼层汇流博弈机制，构建融合汇流博弈机制的超高层建筑楼梯疏散模型，从而实现对超高层建筑楼梯疏散过程中微观行为特征的精

准模拟与重现。模型中，如果多个人员选择相同的目标，会随机允许其中一位人员进行移动。在此基础上，考虑汇流博弈的超高层建筑疏散模型为疏散人员新增一个博弈属性：随机生成值 0 或 1，其中 0 表示该人员为耐心型，1 表示该人员为不耐心型。具体汇流博弈规则如下。

规则 1：当发生冲突时，查找冲突次数最多的人员，如果只有一个则优先该人员移动。

规则 2：如果有多个人员冲突次数相同，其中只有一个为不耐心的，优先不耐心的人员进行移动；如果其中有多个不耐心的，则选第一个。

规则 3：如果发生冲突的参与者全是耐心的或者全是不耐心的，且均为第一次冲突，那么双方都等待一次。

博弈双方在判断完成后按照博弈模型收益矩阵进行变化，记录并输出发生冲突的坐标、时间、冲突场景、以及博弈结果。

4. 模拟分析

为了探究模型在超高层建筑中的应用，以一栋 40 层建筑为研究对象开展疏散模拟仿真。这座建筑每层高度约 3 米，设有一处楼梯间。相邻两层之间平均有 22 级台阶，每级台阶宽约 1.5 米、高约 0.15 米，踏步高度约 0.28 米，平台尺寸为 5.25 平方米。设置到达一层楼梯出口附近即为疏散成功。通过在高层(40、37、35、32、30 层)和低层(40、10、7、4、2 层)分别设置疏散楼层作为汇流节点，实现对高层发生汇流和低层发生汇流的对比分析。每层随机生成 60 名疏散人员。为确保汇流现象的发生，模拟设置第 40 层人员先疏散，当 40 层的首个人员到达 37 层时，37 层人员开始疏散，依此类推；低层汇流采用相似模拟策略。高层和低层汇流各进行 10 次模拟，模拟结果见图 1。

无论汇流发生在高层还是低层，模拟得到的疏散时间波动范围较小。超高层建筑汇流发生高层区域时的平均疏散时间为 586.4 s，明显高于低层汇流区域的疏散时间(543.4 s)，这符合超高层建筑的实际疏散情况。高层汇流场景中，疏散人员需从更高楼层向下移动，垂直疏散距离更长，且随着人员逐层汇流，楼梯内的人流密度持续增加，导致拥堵概率上升；而低层汇流区域因楼层高度较低，人员垂直移动距离短，且汇流节点更接近建筑出口，人流在向下疏散过程中更易快速排出，因此疏散时间更短。

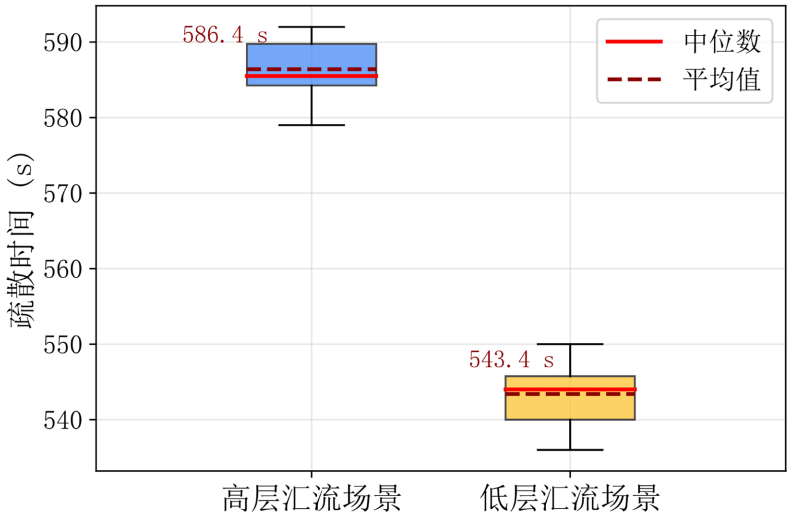
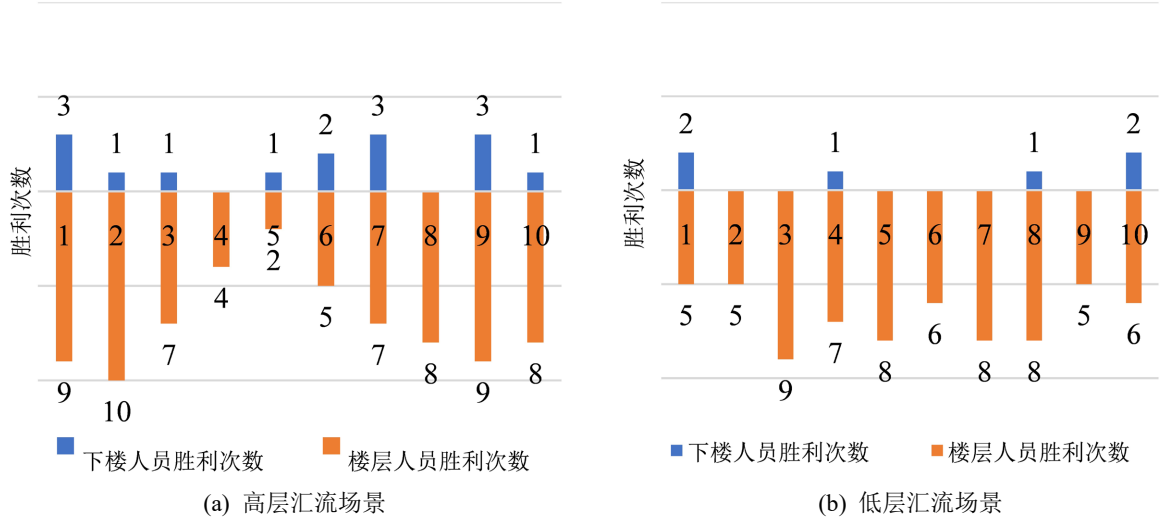


Figure 1. Evacuation times for merging scenarios in the high-rise areas and low-rise areas of a super-high-rise building
图 1. 超高层建筑中高层区域汇流与低层区域汇流场景的疏散时间

人群密度是影响疏散效率的关键因素，尤其是在高密度区域，汇流博弈现象表现得尤为明显。因此，有必要进一步分析高层汇流与低层汇流之间的冲突次数及其胜负差异。从十次实验整体分析(见图 2)，楼层人员在与下楼人员的汇流博弈中获胜次数显著多于后者，占据绝对优势。这是由于楼层人员初始处于相对静止的待疏散状态，在汇流冲突中具备“主场优势”，可借助该层的空间进行调整位置和选择行进方向。实验结果与实际场景中待疏散人员利用环境优势优先通行的逻辑相符。



(a) 高层汇流场景　　(b) 低层汇流场景

Figure 2. Comparison of the number of confluence game wins for person on this floor and person coming down the stairs
图 2. 楼层人员与下楼人员的汇流博弈胜利次数对比图

Table 3. The number of stairwell conflicts for merging of high-rise areas and merging of low-rise areas
表 3. 高层区域汇流与低层区域汇流场景的楼梯间冲突次数对比

模拟次数	高层汇流场景	低层汇流场景
1	227	43
2	190	55
3	157	48
4	175	67
5	180	67
6	195	36
7	207	44
8	161	75
9	211	79
10	186	52

相较于高层汇流，低层汇流场景的楼梯间冲突次数明显较少，见表 3。这是因为低层汇流节点(如 2、4 层)距离建筑出口更近，人员垂直移动路径短，快速疏散至安全区域的概率高，减少了在楼梯间内的滞留时间与交汇频率，使得“拥堵–冲突”的连锁反应难以形成；而高层汇流因长距离疏散导致楼梯间持续处于高负荷状态，冲突易频繁发生。该现象验证了超高层建筑中低层疏散阻力小于高层的实际规律。总体而言，汇流位置的选择对于缓解人群拥堵具有显著影响，可以通过调节人流密度分布、冲突点位置及疏散路径容量，实现拥堵缓解。

5. 结论

关注超高层建筑疏散过程中的汇流冲突行为，并引入汇流博弈机制，构建考虑汇流博弈的超高层建筑楼梯疏散模型。通过明确博弈参与主体及博弈规则以及收益矩阵，确定楼梯间中的汇流博弈机制。以一栋 40 层建筑作为研究对象进行疏散模拟，对比高层发生汇流和低层发生汇流的结果。结果表明：高层汇流场景的疏散时间长于低层汇流场景；低层汇流场景中的总冲突次数较少于高层汇流场景，有效减少了人员在楼梯间内的滞留时间与交汇频率。这表明汇流位置的选择对于缓解人群拥堵具有显著影响，可以通过调节人流密度分布、冲突点位置及疏散路径容量，实现拥堵缓解。

致　谢

在此，感谢国家重点研发计划项目(2023YFC3805000)的资助。

参考文献

[1] 马自强. 超高层城市综合体的设计特点[J]. 居舍, 2024(36): 85-88.

[2] 王冉. 超高层建筑火灾扑救难点和灭火救援战术重点分析与运用[J]. 工程建设与设计, 2024(19): 73-75.

[3] 陈彦继. 超高层建筑火灾扑救难点和灭火救援战术运用分析[J]. 水上安全, 2024(18): 116-118.

[4] Bai, W., Huo, Y., Zou, G.W. and Gao, Y. (2015) Simulation of Fire Evacuation in a High-Rise Office Building. 2015 *IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management* (*IEEM*), Singapore, 6-9 December 2015, 1704-1708. https://doi.org/10.1109/ieem.2015.7385938

[5] Hokugo, A., Kubo, K. and Murozaki, Y. (1985) An Experimental Study on Confluence of Two Foot Traffic Flows in Staircase. *Journal of Architecture, Planning and Environmental Engineering* (*Transactions of AIJ*), **358**, 37-43. https://doi.org/10.3130/aijax.358.0_37

[6] Huang, Z., Fan, R., Fang, Z., Ye, R., Li, X., Xu, Q., *et al*. (2022) Performance of Occupant Evacuation in a Super High-Rise Building up to 583 M. *Physica A*: *Statistical Mechanics and Its Applications*, **589**, Article 126643. https://doi.org/10.1016/j.physa.2021.126643

[7] Takeichi, N., Yoshida, Y., Sano, T., Kimura, T., Watanabe, H. and Ohmiya, Y. (2005) Characteristics of Merging Occupants in a Staircase. *Fire Safety Science*, **8**, 591-598. https://doi.org/10.3801/iafss.fss.8-591

[8] Yu, H., Jiang, N., Li, M., Jia, X., Zhuang, Y., Yang, L., *et al*. (2024) New Insights into the Merging Behavior of Pedestrians: Quantification of Lane Competition Level. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **154**, Article 106126. https://doi.org/10.1016/j.tust.2024.106126

[9] Zeng, Y., Song, W., Huo, F. and Vizzari, G. (2018) Modeling Evacuation Dynamics on Stairs by an Extended Optimal Steps Model. *Simulation Modelling Practice and Theory*, **84**, 177-189. https://doi.org/10.1016/j.simpat.2018.02.001

[10] Xu, X. and Song, W. (2009) Staircase Evacuation Modeling and Its Comparison with an Egress Drill. *Building and Environment*, **44**, 1039-1046. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.07.009

[11] Qu, Y., Gao, Z., Xiao, Y. and Li, X. (2014) Modeling the Pedestrian's Movement and Simulating Evacuation Dynamics on Stairs. *Safety Science*, **70**, 189-201. https://doi.org/10.1016/j.ssci.2014.05.016

[12] 郑霞忠, 田丹, 陈述. 考虑汇流过程的楼梯疏散模型研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2020, 40(5): 796-802.

[13] Sano, T., Ronchi, E., Minegishi, Y. and Nilsson, D. (2017) A Pedestrian Merging Flow Model for Stair Evacuation. *Fire Safety Journal*, **89**, 77-89. https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2017.02.008

[14] Ibrahim, A.M., Venkat, I. and de Wilde, P. (2019) The Impact of Potential Crowd Behaviours on Emergency Evacuation: An Evolutionary Game-Theoretic Approach. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, **22**, Article 3. https://doi.org/10.18564/jasss.3837

[15] Ibrahim, A.M., Venkat, I. and de Wilde, P. (2017) Uncertainty in a Spatial Evacuation Model. *Physica A*: *Statistical Mechanics and Its Applications*, **479**, 485-497. https://doi.org/10.1016/j.physa.2017.03.024

[16] Heliövaara, S., Ehtamo, H., Helbing, D. and Korhonen, T. (2013) Patient and Impatient Pedestrians in a Spatial Game for Egress Congestion. *Physical Review E*, **87**, Article 012802. https://doi.org/10.1103/physreve.87.012802

[17] Smith, R.A. (1995) Density, Velocity and Flow Relationships for Closely Packed Crowds. *Safety Science*, **18**, 321-327. https://doi.org/10.1016/0925-7535(94)00051-4

[18] Fruin, J.J. (1971) Pedestrian Planning and Design. Metropolitan Association of Urban Designers & Environmental Planners.

[19] 葛明威, 房志明, 尤亚云, 等. 考虑体力消耗的三维超高层建筑疏散模型研究[J]. 建模与仿真, 2024, 13(6): 5922-5933.