考虑体力消耗的三维超高层建筑疏散模型研究

葛明威^{1,2},房志明^{1,2},尤亚云^{1,2},郝艺琳^{1,2},郑梓怡^{1,2}

1上海理工大学管理学院,上海

2上海理工大学智慧应急管理学院,上海

收稿日期: 2024年10月14日; 录用日期: 2024年11月7日; 发布日期: 2024年11月13日

摘要

本文针对超高层建筑应急疏散问题,提出了一种考虑长距离楼梯疏散过程中个体体力消耗对移动速度动态影响的三维超高层建筑楼梯疏散模型。模型融合静态场理论和元胞自动机方法模拟个体的疏散行为, 通过时间步长改变个体疏散速度实现体力消耗,进行超高层建筑楼梯间的三维建模。为验证模型的可靠 性,与现有仿真软件Pathfinder进行多次对比,相同场景下,不考虑体力消耗的模型与Pathfinder模型 的模拟效果相符,验证了模型的准确性。箱型图显示体力消耗模型的模拟具有稳定性。同时,时间序列 分析显示,Pathfinder模型下疏散时间与疏散人数呈现简单线性关系,而体力消耗模型下则表现出更为 复杂的关系,与实际情况相符,可以进行更为真实合理的模拟仿真。

关键词

超高层建筑,人员疏散,元胞自动机,静态场,体力消耗

Research on Three-Dimensional Super High-Rise Building Evacuation Modeling Considering Physical Exertion

Mingwei Ge^{1,2}, Zhiming Fang^{1,2}, Yayun You^{1,2}, Yilin Hao^{1,2}, Ziyi Zheng^{1,2}

¹School of Management, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai ²School of Intelligent Emergency Management, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Oct. 14th, 2024; accepted: Nov. 7th, 2024; published: Nov. 13th, 2024

Abstract

Aiming at the current problem of evacuation of super high-rise buildings in emergencies, this paper proposes a novel three-dimensional evacuation model. In particular, the model takes into account

the physical exertion of an individual due to continuous movement during a long-distance evacuation, and how this exertion dynamically affects the individual's speed of movement. To accurately simulate the evacuation behavior of individuals, we adopt a technique that combines static field theory and meta-cellular automata methods, and the effective integration of these two methods can more realistically reflect the complex dynamics of crowd evacuation. In the model, we simulate the speed change of individuals during evacuation by adjusting the time step to reflect the effect of physical exertion on evacuation speed. We performed detailed 3D modeling of stairwells in ultra-high-rise buildings to ensure that the models accurately reflect evacuation in a realistic environment. To ensure the reliability of the proposed model, we conducted several comparison experiments with the existing simulation software Pathfinder. In the same evacuation scenario setup, we found that the model without considering physical exertion is highly consistent with the simulation results of Pathfinder, which proves the accuracy of our model in simulation. By analyzing the box plots, we can see that the model considering physical exertion shows good stability in multiple simulations. Further time series analyses revealed differences between the two models in the relationship between evacuation time and number of evacuees. While the Pathfinder model shows a simple linear relationship, our physical exertion model shows a more complex relationship, which is more in line with the actual situation, allowing for a more realistic and rational evacuation simulation.

Keywords

Super High-Rise Building, Personnel Evacuation, Cellular Automaton, Static Field, Physical Exertion

Copyright © 2024 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/

1. 引言

截至 2022 年,中国己建成 3088 座超高层建筑(高度大于 100 m 的建筑),其中 72 座超过 300 米,位 居全球领先地位。但这类建筑在紧急疏散和应急救援上面临严峻挑战,主要由于其庞大的规模和复杂结 构,以及消防云梯高度限制,使得传统救援方法难以有效应付。因此,建筑内部的疏散楼梯和电梯系统 成为安全疏散的关键。研究指出,超高层建筑的应急疏散过程中,垂直纵向楼梯疏散所占用的时间可能 超过总疏散时间的 70% [1]。因此,楼梯疏散是超高层建筑人群疏散中至关重要的环节。

随着计算机仿真技术的进步,模拟仿真已成为分析人员疏散行为的关键技术手段,其中,元胞自动 机模型作为模拟仿真的一种常见形式,最早由 Wolfram 提出[2],随后在学术界的研究中得到了充分的应 用和拓展。例如,Kirchner 利用 4 邻域的元胞自动机模型研究了简单场景下的人员撤离过程[3],Burstedde 则采用 8 邻域的元胞自动机来模拟行人的运动轨迹,并从行人动力学的角度更新了元胞的移动规则[4]。 构建元胞自动机模型时,融合静态场是常见策略。Terlep 在 7*7 的网格内研究 4 邻域、8 邻域、24 邻域、 48 邻域静态场下的网格赋值,并在此基础上研究离散网格的欧式距离计算[5]。Varas 在研究静态场时, 还考虑了障碍物对静态场赋值产生的影响[6]。

传统的疏散模型普遍将楼梯间简化处理为平面结构[7] [8]。近年来,研究者开始考虑楼梯的三维特征, 如台阶尺寸、数量和分布等,主要通过采用三维网格刻画台阶结构[9]、考虑人员在台阶上运动的斜面距 离[10],定义人员竖向运动规则[11]等方式,以实现构建三维楼梯间中的人员疏散过程。考虑到空间结构 和疏散路径在建筑楼梯间中的复杂性,研究人员通过使用精细网格来描述受到疏散环境和台阶限制下的 人员疏散运动[12]。Xuan 等人提出了一种改进的楼梯间人群疏散的多网格模型,其中每个行人占用 2*3 个网格,该模型能更准确地模拟人群汇流和转向行为[13]。考虑到多种因素对楼梯间疏散效率的影响,有研究人员引入收集率参数来研究汇流对疏散效率的影响,同时设置一个行动能力受限的模拟人,并量化其对整体疏散效率的影响[14]。Huo等人构建了"汇合模型"表征疏散人员在楼梯平台处的汇合点,并提出了一个增强的多网格元胞自动机模型来描述楼梯上人群的步行偏好、转弯行为和预期速度的变化[15]。

因此,为更精确地模拟超高层建筑楼梯的人员疏散过程,本文将静态场与元胞自动机模型相结合,并引入体力消耗的参数改变人员的移动规则,实现人员在长距离楼梯疏散时速度的动态变化,以此建立考虑体力消耗的三维超高层建筑疏散模型(Consideration of Physical Effort 3D Super High-Rise Evacuation Model, PE-3D-SHEM)。

2. 三维超高层建筑疏散模型

2.1. 基于元胞自动机模型的网格状态细分与更新规则

元胞自动机模型由元胞、邻域、边界条件、元胞状态和更新规则组成。本文中,整个地图的网格设置为以下几个状态:"空","障碍物","被元胞占用"。其中"被元胞占用"又细分为"已移动"和 "未移动"等状态。元胞的位置更新规则如下:首先,搜索邻域内可移动的点作为潜在目标点,并检查 该目标点是否已被其他元胞占用。如果目标点未被占用,则元胞直接移动至该点;若目标点已被占用, 则进一步判断占用元胞的状态。若占用元胞的状态为"未移动",则原目标点仍被视为可移动点;若占 用元胞的状态为"已移动",则重新寻找邻域内的可移动点,具体流程如图1。当多个元胞选择同一目标 点时,采用随机选择策略进行元胞移动。鉴于楼梯间场景的特殊性,目标点距离出口的值不得大于当前 位置到出口的距离,以防止元胞在疏散过程中出现后退现象。



Figure 1. Flowchart of meta-cellular movement 图 1. 元胞移动流程图

2.2. 不同邻域静态场对比与优化

静态场是场域模型的一种,它通过离散化手段,将空间细分为网格化的单元。在地图学的应用中,

通过为每个网格单元点赋予一个特定值来表示该位置的属性强度或属性值。本文在设置障碍物的简单场 景下对比分析不同邻域静态场与元胞自动机模型相结合的模拟结果[5]。首先,使用 Dijkstra 算法计算出 在不同邻域静态场设置下,地图上每个网格单元至出口的最短路径距离。基于距离值,绘制整体的等高 线地图,以直观展示不同邻域静态场的空间分布。如图2所示,网格内的数字代表该网格到出口的距离, 出口附近的网格被标记为白色,远离出口的网格渐变至黑色;出口附近的等高线呈绿色,远离出口的等 高线渐变至红色。



Figure 2. Grid assignment and contour effect 图 2. 网格赋值与等高线效果图

为实现对模拟结果的直观比较,本文构建了一个简化地图,相同的位置设置了元胞,且记录了各个 元胞的移动路径。不同邻域的元胞移动轨迹如图 3,其中黑色线条代表元胞移动轨迹,从深色向浅色方向 移动。如图 3 所示,随着邻域范围扩展,赋值精度得到提升,相应的等高线图形呈现出更加平滑的过渡 特征。此外,除了 4 邻域静态场,其余三种静态场配置下的元胞移动轨迹并未展现出显著差异。上述情 况下,元胞移动路径表现为沿对角线方向行进,随后转向并直接朝向出口方向移动。由此可见,仅通过 增加邻域范围,并不能有效改善或优化元胞移动轨迹。



(a) 4 邻域

(b) 8 邻域



(c) 24 邻域

(d) 48 邻域

Figure 3. Plots of meta-cellular movement trajectories under different neighborhood static fields 图 3. 不同邻域静态场下的元胞移动轨迹图



(a) 36 邻域

(b) 36 邻域元胞移动轨迹图

Figure 4. 36 neighborhood schematic and meta-cellular movement trajectory diagrams 图 4. 36 邻域示意图及元胞移动轨迹图

为优化元胞移动轨迹,确保元胞能够直接朝向出口方向移动,本文将对 48 邻域静态场进行优化调整。 考虑到现实情境中人员移动范围是以个体为中心,步长为半径的圆形区域,本文采取如下策略,在 7*7 网 格的四个顶角上移除三个网格(如图 4(a)),将正方形邻域转变为近似圆形邻域,即 36 邻域。相同设置条 件下,36 邻域元胞移动轨迹效果如图 4(b)。在 36 邻域下,静态场赋值较为准确,且元胞能够沿着更贴近 实际情况的方向移动,而非仅限于沿对角线移动。因此,36 邻域静态场的模拟更为贴近现实情况。基于 此,本文将采用 36 邻域静态场与元胞自动机模型相结合的方法,构建适用于超高层建筑楼梯间的二维疏 散模型。

2.3. 超高层建筑楼梯间的三维建模



 Figure 5. Stairwell movement rules for 2D models

 图 5. 二维模型的楼梯间移动规则



Figure 6. Stairwell movement rules for 3D models 图 6. 三维模型的楼梯间移动规则



Figure 7. Schematic of the three-dimensional movement of the meta-cellular 图 7. 元胞的三维移动示意图

基于二维疏散模型,本文进一步扩展至三维空间,建立三维超高层建筑楼梯疏散模型(3D Super High-Rise Evacuation Model, 3D-SHEM)。在二维平面楼梯模型中,楼梯出口被视为由多个格子组成的结构,并 将这些格子作为算法的起始格子。当元胞抵达当前楼梯的出口区域时,若存在下一层楼梯,元胞将自动 转移到下一层的楼梯入口位置[7] [8],如图 5。

在构建三维模型时,需要对楼梯出口进行特殊处理。在 3D-SHEM 中,定义一个终点楼层,并将其出口标记为最终的疏散出口。以终点楼层出口作为 Dijkstra 算法的起始点,计算三维模型的静态场。上述调整使得元胞在疏散过程中不再以当前楼层的出口为目标,而是直接朝向整个建筑的最终出口移动,以优化疏散路径和效率(如图 6)。

在三维元胞自动机模型中,每个元胞被赋予 Z 轴方向上的属性,使得元胞在三维空间内进行前后、 左右、上下以及斜向移动(如图 7)。本文采用三维网格来精确刻画楼梯结构,将人体简化为三维球体模型, 以模拟真实环境中的疏散行为。为提高模型真实性,根据实际超高层建筑的楼梯参数,设定台阶尺寸和 数量,并计算人员在楼梯间运动时的斜面距离,以确保模拟的准确性。鉴于超高层建筑的复杂性,完整 的三维模拟无法在一个固定大小的显示窗口中完全展现。因此,本文在三维界面中实现了放大和缩小功 能,以便于用户能够更细致地观察和分析元胞在三维空间中的移动轨迹和疏散动态。

3. 考虑体力消耗的三维超高层建筑疏散模型

3.1. 人员疏散速度的计算公式

体力消耗是影响疏散效率的重要因素,然而,由于个体差异、运动强度、持续时间等多重因素的交 互作用,体力消耗程度难以精确量化。速度下降可以作为个体运动过程中体力消耗的一个直观指标,因 此,本文选取速度变化作为描述体力消耗的指标。本文通过观察和记录团队组织开展的长距离的楼梯疏 散实验后获得了相关数据,包括人员速度值,相应人员的运动距离、运动时间[16]。基于这些数据拟合了 个体速度与运动距离、运动时间等参数的公式,其描述了楼梯向下速度与体力消耗呈反比关系,如下:

$$V = V_0 * \left\{ 1 - 0.01 * c * e^{\left[\frac{(\Sigma d)^a}{(\Sigma t)^b} \right]} + 0.01 \right\}$$

其中, V_0 是初始速度, $\sum d$ 是移动距离的累加, $\sum t$ 是时间的累加。a和b是未知参数,c是区分上下楼的消耗参数,下楼时c=1,上楼时c=2.7[17]。通过最大似然估计法对系数a和b进行标定和优化,得到最优参数值,即a=0.71和b=0.51。

3.2. 人员疏散速度的变化实现规则

为模拟人员疏散速度的变化,采用上述公式对时间步长进行动态调整。在编程实现时,对程序迭代 与元胞移动过程进行分离。为此,每个元胞配备一个累加计数器,该计数器用于判断元胞是否达到移动 条件。每次程序迭代,元胞计数器值+1。程序持续迭代,直到某个元胞的计数器值与其预设的时间步长 相等,此时该元胞执行移动操作,并将计数器重置为零(见图 8)。



Figure 8. Flowchart of meta-cellular movement 图 8. 元胞移动流程图

当多个元胞同时移动到同一位置时,优先允许时间步长较小的元胞进行移动,每个元胞的时间步长 由其初始速度决定,在程序初始化时,所有元胞根据正态分布随机赋予一个初始速度,并根据单次移动 距离计算出每个元胞的初始时间步长。元胞移动完成后,其速度将根据公式进行调整,其时间步长也随 之改变。

4. 结果分析

4.1. 仿真场景构建

在 3D-SHEM 构建完成后,将其与 Pathfinder 模型进行对比分析,以验证本文模型的应用可行性和效能。在对比分析实验中,二者设置相同:楼梯结构属性、人员数量以及分布规则。具体而言,两个模型均模拟了一个包含 40 层的建筑结构,并且在每一层的可移动区域内随机分配了 10 名人员。此外,人员的初始移动速度在两个模型中均按照正态分布进行设定,速度范围介于 0.8 m/s 至 1.2 m/s 之间。3D-SHEM 与 Pathfinder 平面模型如图 9 所示。



(a) 3D-SHEM 平面模型图



(b) Pathfinder 平面模型图

Figure 9. 3D-SHEM and Pathfinder planar modelling diagrams 图 9. 3D-SHEM 与 Pathfinder 平面模型图

4.2. 验证对比

鉴于 Pathfinder 模型无法实现模拟体力消耗对速度实时变化的影响,本文选用了不考虑体力消耗的 3D-SHEM 进行对比分析。两个模型各执行 20 次疏散模拟仿真,确保结果的可靠性。总疏散时间如表 1。

| 皮 旦 | 总疏散时间(s) | | |
|------------|----------------|---------------|------------|
| 12.2 | 3D-SHEM | Pathfinder 模型 | PE-3D-SHEM |
| 1 | 675 | 661 | 806 |
| 2 | 653 | 680 | 832 |
| 3 | 664 | 661 | 816 |
| 4 | 683 | 675 | 835 |
| 5 | 667 | 669 | 824 |
| 6 | 690 | 662 | 838 |
| 7 | 687 | 644 | 819 |
| 8 | 665 | 701 | 822 |
| 9 | 682 | 660 | 805 |
| 10 | 687 | 672 | 828 |

Table 1. Comparison of total evacuation time for Pathfinder model, 3D-SHEM and PE-3D-SHEM **表 1.** Pathfinder 模型、3D-SHEM 与 PE-3D-SHEM 的总疏散时间对比

| 续表 | | | |
|--------|-----|-----|-----|
| 11 | 671 | 698 | 834 |
| 12 | 695 | 649 | 839 |
| 13 | 667 | 653 | 835 |
| 14 | 673 | 689 | 831 |
| 15 | 675 | 665 | 814 |
| 16 | 676 | 703 | 805 |
| 17 | 681 | 668 | 810 |
| 18 | 690 | 672 | 814 |
| 19 | 668 | 701 | 819 |
| 20 | 684 | 705 | 822 |

进一步采用描述性统计进行分析,如图 10 所示。3D-SHEM 得到的平均疏散时间为 676.65 s,而 Pathfinder 模型的疏散平均时间为 674.40 s。这两个数值的接近程度表明 3D-SHEM 具有较高的精确度。 图 10 显示,3D-SHEM 的模拟数据具有较高的集中度,这表明模型在重复模拟中表现出良好的稳定性。 另外,模拟数据中未发现任何异常值,这进一步证实了 3D-SHEM 在疏散模拟过程中的准确性和稳定性。



Figure 10. Distribution of evacuation times for different models 图 10. 不同模型的疏散时间分布情况

模拟仿真结束后,本文利用地图中剩余人员数量随时间变化的实时数据,进行了时间序列分析,以 探究疏散时间与疏散人数之间的相关性。为直观展示,计算了 20 次模拟数据的平均值,并绘制时间序列 图(如图 11),其中,3D-SHEM 数据以实线表示,而 Pathfinder 模型的数据则以长虚线表示。图 11 展示了 3D-SHEM 与 Pathfinder 模型的模拟数据之间的高度一致性,两者的模拟数据几乎完全重叠。基于此,可 以推断 3D-SHEM 的模拟是可行的。

葛明威 等



Figure 11. Comparison of evacuation time-number of evacuees relationship for different models 图 11. 不同模型的疏散时间-疏散人数关系对比图

4.3. PE-3D-SHEM 的模拟结果分析

通过对疏散时间及其时间序列的分析, 3D-SHEM 在模拟疏散过程中展现出高度的准确性和稳定性。 如图 11 所示, 3D-SHEM 与 Pathfinder 模型的图像均呈现出线性函数的特征,其表明疏散时间与疏散人 数之间存在简单的线性相关性,这与实际情况不符。在此基础上,进一步采用 PE-3D-SHEM 进行相同的 模拟仿真实验,并将所得数据输出分析。

由表 1 可知,相较于 3D-SHEM 及 Pathfinder 模型的模拟结果,PE-3D-SHEM 模拟的平均疏散时间时存在明显的增加,且在预期的变化范围内。如图 10 所示,PE-3D-SHEM1 模拟数据具有较高的集中度,且分布对称,未发现任何异常值,因此可以确认 PE-3D-SHEM 在模拟疏散过程方面是稳定的。

如图 11 所示, PE-3D-SHEM 曲线呈现出近似抛物线的形态,这能够揭示疏散时间与疏散人数之间存 在更为复杂的关系。PE-3D-SHEM 的时间序列曲线始终位于其他两条曲线之下,其表明在相同的疏散时 间内,PE-3D-SHEM 的疏散人数少于其他两个模型。长距离运动中,人员体力消耗导致速度减慢,以致 在相同疏散时间内,疏散人数将会减少,PE-3D-SHEM 的模拟结果与实际情况相符,更具合理性。

5. 结论

本文融合 36 邻域静态场与元胞自动机方法构建三维超高层建筑楼梯疏散模型(3D-SHEM),在其基础 上考虑体力消耗对疏散过程的影响,提出了考虑体力消耗的三维超高层建筑疏散模型(PE-3D-SHEM)。PE-3D-SHEM 支持自定义建筑布局和人员参数,提供二维及三维的可视化界面,实时显示移动速度和疏散人 数,并可记录元胞实时坐标等数据,为疏散策略的制定和建筑设计的优化提供有力的工具和深刻的洞察。

通过与 Pathfinder 模型的对比分析,验证了 PE-3D-SHEM 的准确性和稳定性。3D-SHEM 与 Pathfinder 模型的平均总疏散时间分别为 676.65 s 和 674.40 s, 二者模拟数据的高度一致性间接说明了 PE-3D-SHEM 的准确性。PE-3D-SHEM 在多次模拟中展现出数据稳定性,且输出的疏散时间与疏散人数关系图进一步 证实了 PE-3D-SHEM 的合理性。

致 谢

在此,我衷心感谢我的导师、师兄师姐以及亲朋好友在我论文撰写过程中给予的悉心指导与无私帮助。导师的严谨学风和深刻见解为我指明了研究方向,师兄师姐们的宝贵经验和鼓励使我受益匪浅,家人和朋友的关爱与支持是我前行的动力。感谢所有帮助过我的人,是你们让我的学术之路更加坚定和宽广。

参考文献

- 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. <u>https://doi.org/10.1109/ieem.2015.7385938</u>
- [2] Wolfram, S. (1983) Statistical Mechanics of Cellular Automata. *Reviews of Modern Physics*, **55**, 601-644. <u>https://doi.org/10.1103/revmodphys.55.601</u>
- [3] Kirchner, A. and Schadschneider, A. (2002) Simulation of Evacuation Processes Using a Bionics-Inspired Cellular Automaton Model for Pedestrian Dynamics. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, **312**, 260-276. <u>https://doi.org/10.1016/s0378-4371(02)00857-9</u>
- [4] Burstedde, C., Klauck, K., Schadschneider, A. and Zittartz, J. (2001) Simulation of Pedestrian Dynamics Using a Two-Dimensional Cellular Automaton. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 295, 507-525. <u>https://doi.org/10.1016/s0378-4371(01)00141-8</u>
- [5] Terlep, T.A., Bell, M.R., Talavage, T.M. and Smith, D.L. (2022) Euclidean Distance Approximations from Replacement Product Graphs. *IEEE Transactions on Image Processing*, **31**, 125-137. <u>https://doi.org/10.1109/tip.2021.3128319</u>
- [6] Varas, A., Cornejo, M.D., Mainemer, D., Toledo, B., Rogan, J., Muñoz, V., et al. (2007) Cellular Automaton Model for Evacuation Process with Obstacles. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, **382**, 631-642. <u>https://doi.org/10.1016/j.physa.2007.04.006</u>
- [7] Huang, Q., Qin, T., Luo, L., Yang, G., Fu, Z. and Liu, X. (2024) Modeling Heterogenous Crowd Evacuation on Stairs in High-Rise Buildings Using a Fine Discrete Floor Field Cellular Automaton Model: Accounting for Speed and Boundary Layer Variations. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, **639**, Article 129663. https://doi.org/10.1016/j.physa.2024.129663
- [8] Fu, Z., Zhan, X., Luo, L., Schadschneider, A. and Chen, J. (2019) Modeling Fatigue of Ascending Stair Evacuation with Modified Fine Discrete Floor Field Cellular Automata. *Physics Letters A*, **383**, 1897-1906. https://doi.org/10.1016/j.physleta.2019.03.030
- [9] Hu, J., You, L., Zhang, H., Wei, J. and Guo, Y. (2018) Study on Queueing Behavior in Pedestrian Evacuation by Extended Cellular Automata Model. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 489, 112-127. https://doi.org/10.1016/j.physa.2017.07.004
- [10] Chen, J., Ma, J. and Lo, S.M. (2018) Geometric Constraint Based Pedestrian Movement Model on Stairways. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 505, 1212-1230. <u>https://doi.org/10.1016/j.physa.2018.03.051</u>
- [11] Li, W., Li, Y., Yu, P., Gong, J., Shen, S., Huang, L., *et al.* (2017) Modeling, Simulation and Analysis of the Evacuation Process on Stairs in a Multi-Floor Classroom Building of a Primary School. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 469, 157-172. <u>https://doi.org/10.1016/j.physa.2016.11.047</u>
- [12] 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. <u>https://doi.org/10.1016/j.simpat.2018.02.001</u>
- [13] Xu, X. and Song, W. (2009) Staircase Evacuation Modeling and Its Comparison with an Egress Drill. Building and Environment, 44, 1039-1046. <u>https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.07.009</u>
- [14] Sano, T., Ronchi, E., Minegishi, Y. and Nilsson, D. (2017) A Pedestrian Merging Flow Model for Stair Evacuation. *Fire Safety Journal*, 89, 77-89. <u>https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2017.02.008</u>
- [15] Huo, F., Song, W., Lv, W. and Liew, K.M. (2014) Analyzing Pedestrian Merging Flow on a Floor-Stair Interface Using an Extended Lattice Gas Model. *Simulation*, 90, 501-510. <u>https://doi.org/10.1177/0037549714526294</u>
- [16] Xu, X., Fang, Z., Ye, R., Huang, Z. and Lu, Y. (2021) Investigating the Effect of Expected Travel Distance on Individual Descent Speed in the Stairwell with Super Long Distance. *Safety Science*, **141**, Article 105319. <u>https://doi.org/10.1016/j.ssci.2021.105319</u>
- [17] 王欢, 郑迎东, 张彦峰, 等. 登楼梯能量消耗的测量与统计方法研究[J]. 中国体育科技, 2010, 46(2): 11-13, 25.