

教学楼楼梯间小学生群体疏散动力学研究

温莎莎, 郑杰, 马闪闪, 李兴莉*, 张涛

太原科技大学, 应用科学学院, 山西 太原

收稿日期: 2022年4月30日; 录用日期: 2022年5月30日; 发布日期: 2022年6月10日

摘要

考虑小学生群体特有的心理行为特征, 建立了教学楼楼梯间小学生群体紧急疏散模型, 探讨自发下楼、自发上下楼和排队下楼三种情况下小学生群体的疏散动力学特性, 并对小学生群体在疏散过程中存在人员意外摔倒特例进行模拟仿真分析。仿真发现: 紧急情况下, 当学生自发下楼时, 如果一名学生在楼梯上摔倒, 学生在楼梯缓步台处摔倒相对于在上半段楼梯处摔倒, 对整体疏散时间的影响较小, 当存在两名学生摔倒时将直接导致疏散完成时间成倍增加; 当学生自发上下楼时, 如果一人摔倒, 下楼的学生在上半段楼梯处摔倒相对于在楼梯缓步台处摔倒, 对整体疏散时间的影响更大, 两名下楼的学生分别在上半段楼梯处及楼梯缓步台处摔倒对整体疏散时间的影响与一人在上半段楼梯处摔倒的情况相近。

关键词

小学生群体, 楼梯间, Anylogic, 紧急疏散

Group Evacuation Dynamics of Primary School Students in the Staircase of the Teaching Building

Shasha Wen, Jie Zheng, Shanshan Ma, Xingli Li*, Tao Zhang

School of Applied Science, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan Shanxi

Received: Apr. 30th, 2022; accepted: May 30th, 2022; published: Jun. 10th, 2022

*通讯作者。

文章引用: 温莎莎, 郑杰, 马闪闪, 李兴莉, 张涛. 教学楼楼梯间小学生群体疏散动力学研究[J]. 安防技术, 2022, 10(2): 51-63. DOI: 10.12677/jsst.2022.102007

Abstract

Considering the unique psychological and behavioral characteristics of the primary school student group, an emergency evacuation model for primary school students in the staircase of the teaching building is established. The evacuation dynamic characteristics of primary school students in three situations of spontaneous downstairs, spontaneous upstairs and downstairs and queuing downstairs are discussed. The special case of accidental fall in the evacuation process of primary school students is simulated and analyzed. The simulations find that in an emergency, when students go downstairs spontaneously, if a student falls down at the slow step of the stair, which will have less impact on the overall evacuation time than that at the upper half of the stairs. When two students fall, the evacuation completion time will be doubled. When students go upstairs and downstairs spontaneously, if one student falls down at the upper half of the stairs, which will have a greater impact on the overall evacuation time than that at the slow step of the stairs. The impact of two students falling down at the upper half of the stairs and the slow step of the stairs on the overall evacuation time is similar to that of one student falling down at the upper half of the stairs.

Keywords

Elementary School Group, Staircase, Anylogic, Emergency 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

小学生群体经常会在下课后和上课前通过教学楼内的楼梯区域，此时容易出现人群聚集现象，而小学生的心智还处于发育阶段，安全意识尚未健全，同时楼梯区域较水平方向的疏散走廊区域情况更为复杂[1] [2] [3] [4]，对小学生群体来说危险系数更高，在紧急疏散情况下，则更容易发生拥堵踩踏事件。因而，研究小学生群体在教学楼楼梯间的运动特性对保障小学生群体的安全来说尤为重要[5] [6] [7]。邢君等对紧急状态下某高校宿舍楼楼梯间人员疏散基础数据进行了研究[8]。李若菲等通过改进社会力模型，研究了不同楼梯类型对行人疏散的影响[9]。李晓艳等为了减少高校楼梯间火灾逃生过程中事故的发生，探究事故致因机理，建立了高校楼梯间疏散事故防控模型[10]。金辉等基于楼梯区域行人运动特征改进元胞传输模型，提出楼梯间行人运动模型[11]。可以看出，大多数关于楼梯间疏散方面的研究大都集中在成人团体，很少涉及小学教学楼楼梯间的小学生群体疏散行为研究。Hamilton 等研究了儿童在疏散期间的行为特性，针对 4 所小学采集的 12 次小学生群体全面疏散的数据进行了分析，发现儿童的年龄大小会影响其在楼梯上和水平面上的运动特性[12]。Rostami 等对小学生在建筑物内的疏散行为进行了细致地观察并做出了详细的分析，研究了楼梯宽度、楼梯布局及楼梯台阶的高度等参数对小学生疏散时间的影响[13]。马亚萍等针对不同小学生群体开展楼梯试验，耦合社会网络分析方法和问卷调查，研究了小学生个体间的社会关系对其疏散追随行为的影响，分析了小学生疏散领导行为特性[14]。这些针对楼梯间小学生群体紧急疏散的研究更多侧重于客观因素和疏散空间环境对小学生运动特性的影响，对于影响小学生群体疏散的主观因素关注的相对较少。

本文考虑紧急情况下小学生群体的心理行为特征,通过行人仿真软件 Anylogic,建立了教学楼楼梯间小学生群体疏散的模型,探讨自发上楼、自发上下楼和排队下楼三种场景下小学生群体的疏散动力学特性,并对疏散过程中存在人员摔倒的六种特例进行仿真分析。

2. 模型建立

2.1. 小学生教学楼楼梯间疏散场景构建

选取小学教学楼中的一部楼梯作为本文的研究对象,根据该楼梯区域具体的建筑结构及尺寸,利用 Anylogic 软件构建小学生教学楼楼梯间疏散场景。该楼梯宽度为 1.53 m,楼梯台阶深度和台阶高度分别为 0.28 m 和 0.15 m。两段楼梯之间的缓步台深度和宽度分别为 1.65 m 和 3.46 m。两层楼之间一共有 24 个台阶,每段楼梯有 12 个台阶。三维平面示意图如图 1 所示。

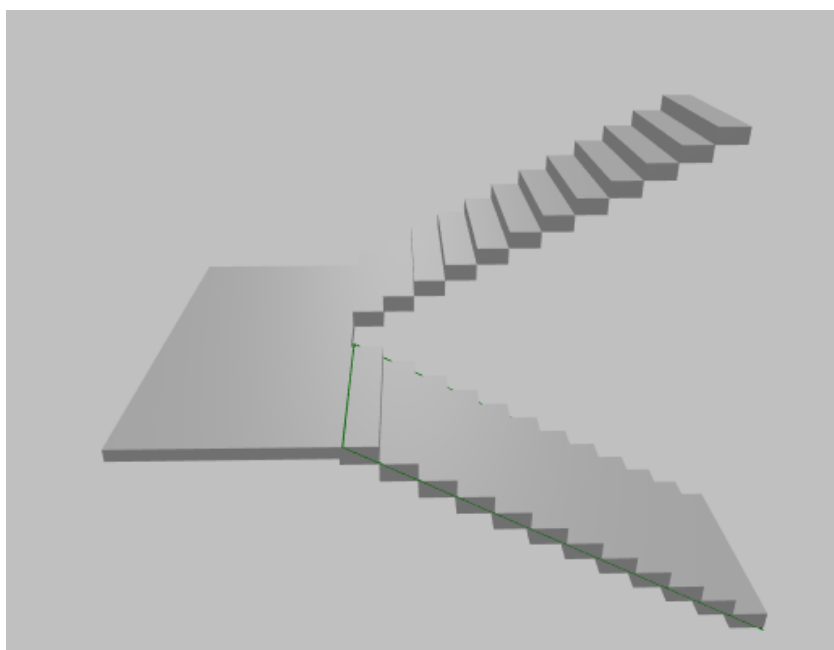


Figure 1. 3D plane diagram of stairs

图 1. 楼梯三维平面示意图

2.2. 参数设置

人员行走的速度与所处环境的人员密度有关,当人员密度较低时,行走速度主要取决于人员的心理行为特征。本章所研究的对象主要是小学生群体,其心理行为特征不同于成年人,行走速度也与成年人存在差异性。国内外很多学者对人员在楼梯间的上下楼速度进行了大量的研究,但大多数研究的人群范围比较宽泛,没有对不同人群进行区分。霍非舟等考虑小学生群体的运动特性对小学生在教学楼楼梯间的疏散进行了实验研究,实验得出小学生群体在紧急疏散过程中的运动速度是 1.41 m/s [15]。本文采用霍非舟等实验得到的小学生群体的紧急上下楼速度对小学生群体教学楼楼梯间的动力学特性进行建模仿真分析。

3. 仿真分析

本节将利用 Anylogic 软件在同一个小学生教学楼楼梯间疏散场景下,对紧急情况下小学生群体自发

下楼, 自发上下楼, 排队下楼的三种场景进行疏散仿真模拟, 并对不同情景下的仿真实验的设计细节做进一步的介绍。

3.1. 紧急状况下小学生群体自发下楼

在场景一仿真实验中, 疏散小学生群体总人数设定为 50 人, 疏散开始后, 学生以每秒 5 人的到达速率出现在上半段楼梯口自发进行疏散, 人员疏散仿真演化斑图如图 2 所示。初始状态时, 学生陆续到达上半段楼梯处, 疏散开始 20 s 后, 上半段楼梯处人群出现较大程度的聚集现象, 学生移动速度变慢, 疏散效率降低, 由于在上半段楼梯处形成高密度疏散人群, 疏散过程中学生无法做出超越行为, 后面的学生紧跟前面的学生, 产生排队行为; 疏散开始 40 s 后, 上半段楼梯处人群聚集现象有所改善, 学生陆续到达楼梯缓步台处; 疏散开始 60 s 后, 楼梯缓步平台处出现人员聚集, 下半段楼梯处人员密度仍处于低密度, 80 s 后小学生群体陆续完成疏散。

仿真模拟结果表明, 在紧急情况下, 小学生群体疏散通过楼梯过程中, 上半段楼梯处人员密度容易达到高密度, 并且垂直疏散空间具有很大的不确定性, 故紧急情况下学生自发进行疏散存在较大的安全隐患问题。

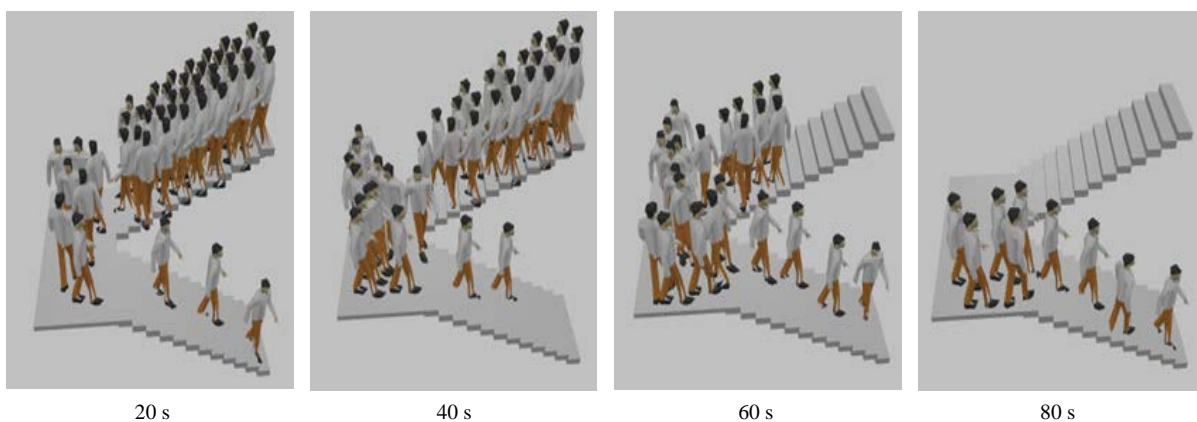


Figure 2. Evacuation evolution pattern for scenario 1
图 2. 场景一人员疏散仿真演化斑图

3.2. 紧急状况下小学生群体自发上下楼

在场景二仿真实验中, 疏散小学生总人数设定为 50 人, 疏散开始后, 疏散学生以 1:1 的比例、每秒 5 人的到达速率分别出现在上下行两个楼梯口处自发开始疏散, 人员疏散仿真演化斑图如图 3 所示。图中穿蓝色和灰色上衣的行人分别代表向上、向下行走的学生。初始状态下, 学生陆续到达楼梯处; 疏散开始 20 s 后, 上行学生和下行学生在楼梯缓步台处汇流, 汇流导致楼梯缓步台处及其接壤的楼梯台阶处陆续出现大范围的人群聚集现象, 人员疏散速度降低, 疏散也随之降低; 疏散开始 40 s 后, 下半段楼梯台阶处的疏散学生基本都到达楼梯缓步台处, 人员聚集现象愈发显著, 人员踩踏事故发生的概率增加; 疏散开始 60 s 后, 出口处人员疏散流量增加, 楼梯缓步台处拥堵情况有所改善, 但仍存在人员聚集现象; 疏散开始 80 s 后, 小学生群体陆续完成疏散。

仿真模拟结果表明, 小学生群体在楼梯间自发的上下楼时, 楼梯缓步台处及上半段楼梯与缓步台接壤处最容易出现人员聚集现象, 且该区域人员处于高密度状态持续时间较长, 容易导致踩踏事故的发生, 存在较大的安全隐患问题。

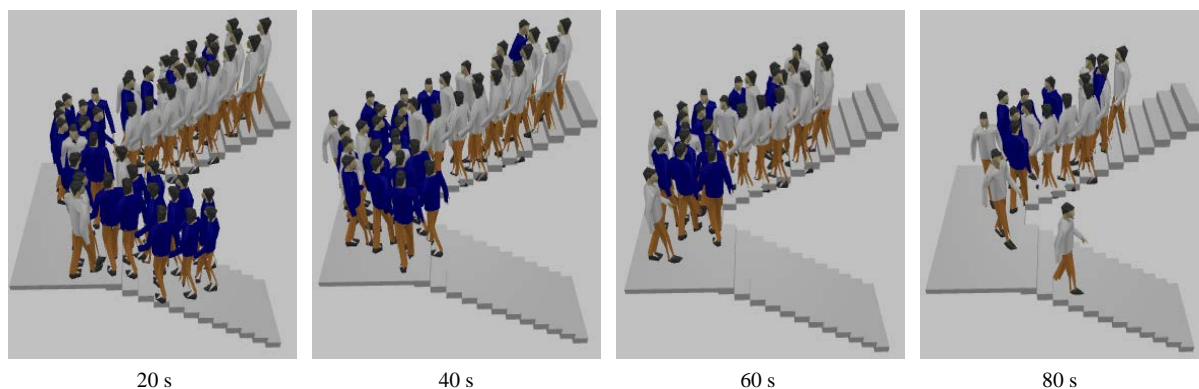


Figure 3. Evacuation evolution pattern for scenario 2
图 3. 场景二人员疏散仿真演化斑图

3.3. 紧急状况下小学生群体排队下楼

在情景三仿真实验中, 疏散小学生总人数设定为 50 人, 疏散开始后学生以每秒 5 人的到达速率出现在上半段楼梯口, 排队下楼进行疏散, 人员疏散演化斑图如图 4 所示。初始状态下, 疏散学生陆续到达上半段楼梯口处; 疏散开始 20 s 后, 由于人员到达楼梯口的时间比较接近, 上半段楼梯处出现人群聚集现象, 其他区域人员密度都保持低密度, 人员有序疏散, 疏散开始 40 s 后, 楼梯区域拥堵现象不再存在, 疏散开始 60 s 后, 小学生群体基本全部完成疏散。

仿真结果表明, 紧急情况下小学生群体排队下楼可以更好的避免拥堵踩踏事故的发生, 保障疏散高效有序的进行。

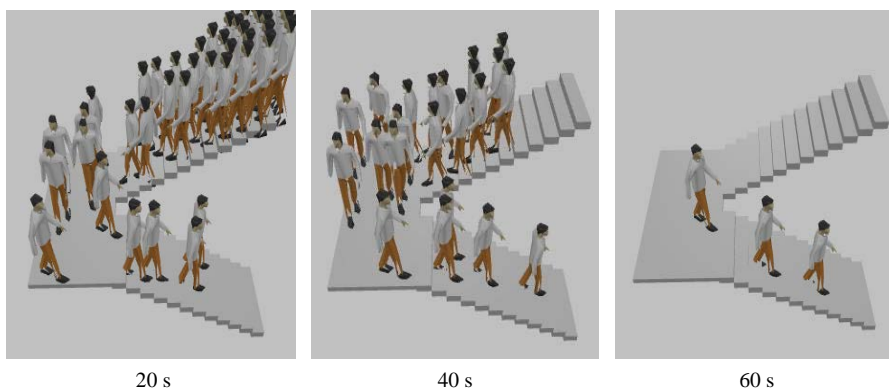


Figure 4. Evacuation evolution pattern for scenario 3
图 4. 场景三人员疏散仿真演化斑图

3.4. 仿真结果分析

图 5~8 分别给出了三种场景下疏散完成的人数随疏散时间的变化以及每个时间点上楼梯出口处人员疏散流量数据, 从疏散总体情况来看, 场景一下疏散完成总耗时 92 s。通过观测整个过程的人员疏散流量, 本章设计并实现的小学教学楼的疏散模型在场景一下的从楼梯出口处人员疏散流量保持在 0~1.4 人/(m·s)之间, 且疏散效率更多是在 0 和 0.7 人/(m·s)之间浮动。场景二疏散模拟大致可以分为三个阶段, 人员疏散的初始阶段对应的疏散时间约为 0~25 s, 该阶段尚未有学生完成疏散; 第二阶段对应的疏散时间约为 25~60 s, 此阶段的特征是人员在楼梯缓步台处形成汇集, 形成高密度疏散场景, 人员疏散速度减慢,

疏散效率维持在 0~0.7 人/(m·s)；第三阶段为整个疏散过程的末期，对应的时间是疏散开始 60 s 后，人员疏散效率最高达到 2.1 人/(m·s)，拥堵情况逐渐消失，直至 91 s 疏散完成。场景三疏散完成总耗时 65 s，模拟的总体疏散流量保持在 0~1.4 人/(m·s)，整个过程疏散效率波动较小。疏散人数相同的情况下，场景三最早有第一个人员疏散成功，且所有人员完成疏散所花费时间最短，疏散流量波动最小。该结果的出现是由于排队有序下楼时，几乎不存在大的拥堵现象。

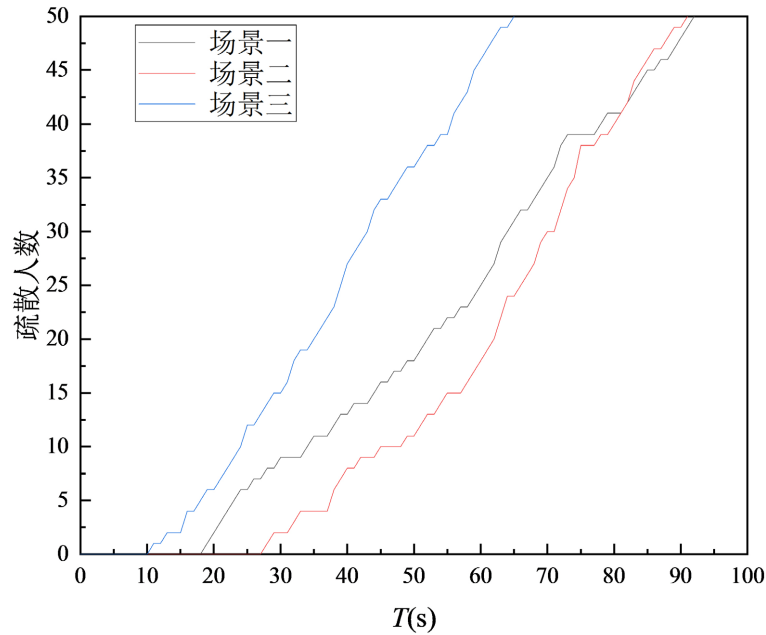


Figure 5. Diagram of evacuation completion number over time
图 5. 疏散完成人数随时间变化图

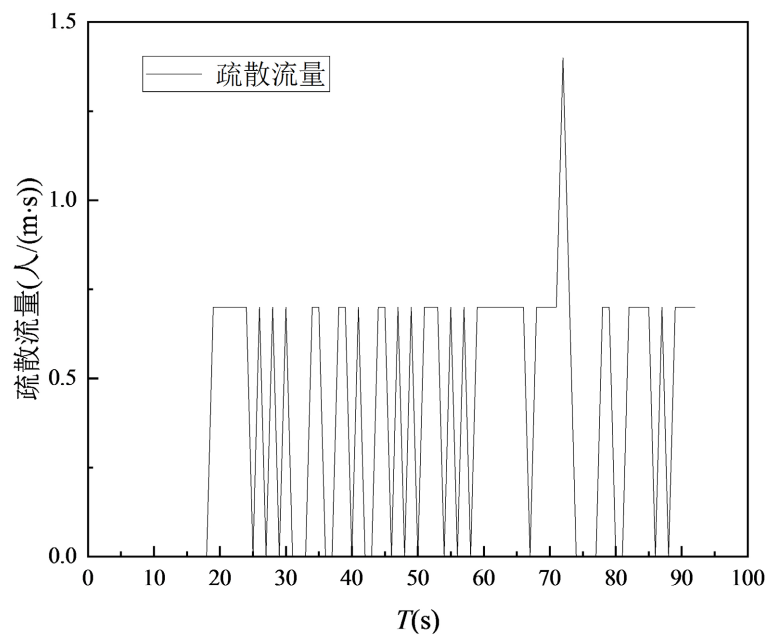


Figure 6. Graph of evacuation flow over time for Scenario 1
图 6. 场景一疏散流量随时间变化图

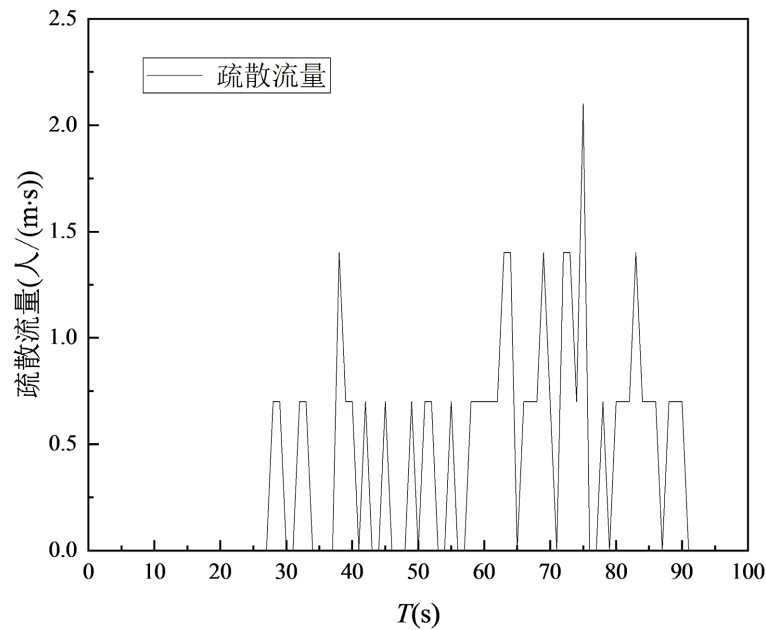


Figure 7. Graph of evacuation flow over time for Scenario 2

图 7. 场景二疏散流量随时间变化图

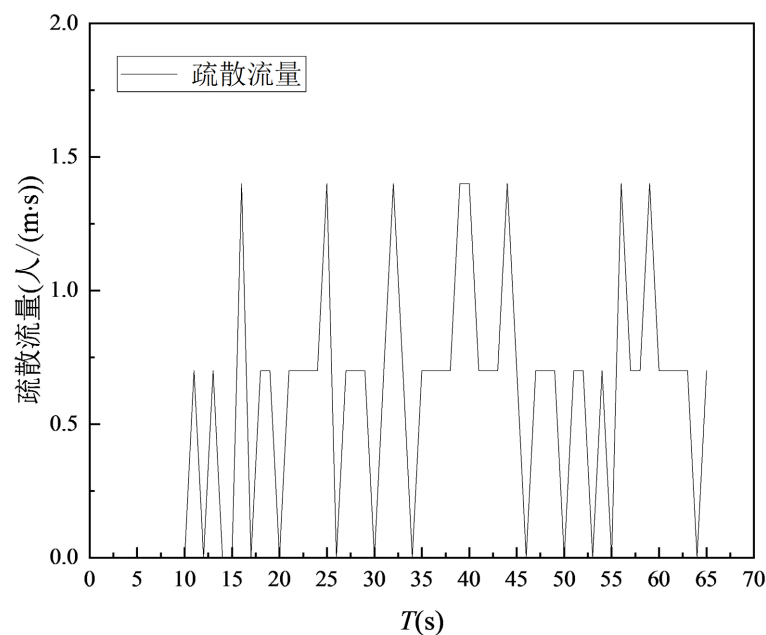


Figure 8. Graph of evacuation flow over time for Scenario 3

图 8. 场景三疏散流量随时间变化图

4. 楼梯处小学生摔倒特例仿真分析

在人员设置方面,本节模拟案例的疏散小学生人数均设为 50 人,疏散开始后人员以每秒 5 人的速率到达上半段楼梯口处进行疏散。现对以下两类紧急疏散情况下存在小学生摔倒的六种特例进行仿真模拟:

第一类:自发下楼时,人员摔倒特例;第二类:自发上下楼时,人员摔倒特例。

首先,对紧急情况下小学生群体自发下楼时,存在学生摔倒的三种特例进行仿真分析。

案例一：自发下楼时，一名小学生在上半段楼梯台阶处摔倒。紧急情况下，疏散学生陆续到达楼梯口处自发下楼，疏散开始 10 s 后，一名学生在上半段楼梯台阶处摔倒。

案例二：自发下楼时，一名小学生在楼梯缓步台处摔倒。紧急情况下，疏散学生陆续到达楼梯口处自发下楼，疏散开始 10 s 后，一名学生在楼梯缓步台处摔倒。

案例三：自发下楼时，两名小学生陆续分别在上半段楼梯处及楼梯缓步台处摔倒。紧急情况下，疏散学生陆续到达楼梯口处自发下楼，疏散开始 10 s 后，两名学生依次分别在上半段楼梯和楼梯缓步台处摔倒。

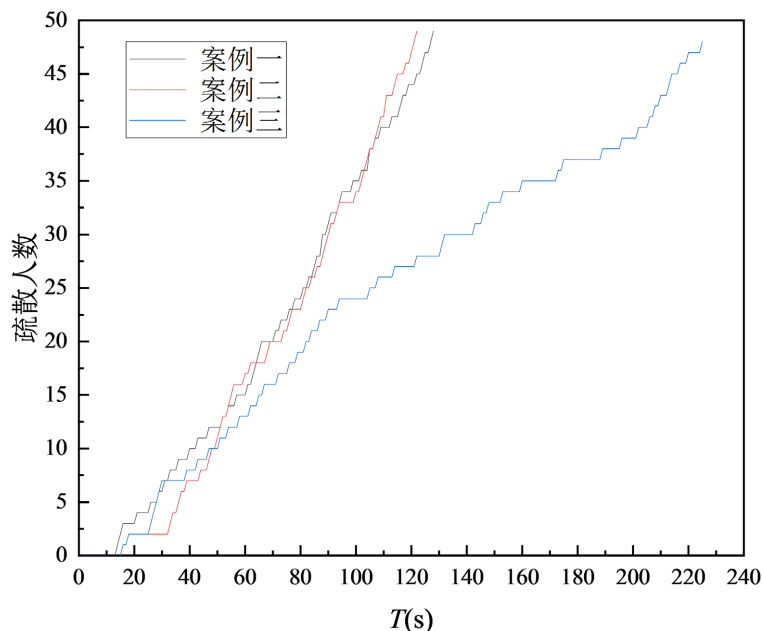


Figure 9. Diagram of evacuation completion number over time

图 9. 疏散完成人数随时间变化图

从图 9 中可以看出，案例一疏散完成所需时间为 128 s，案例二疏散完成所需时间为 122 s，案例三疏散完成所需时间为 225 s。

案例一和案例二具体疏散过程可分为三个阶段：疏散初始阶段、疏散加速阶段、疏散收尾阶段。

第一阶段为疏散初始阶段，该阶段案例一对应的疏散时间约为 0~31 s，案例二对应的疏散时间约为 0~27 s。当疏散开始后小学生群体陆续到达上层楼梯口开始疏散，疏散开始 10 s 后，有学生在楼梯处摔倒，该学生摔倒位置的后方人员大量聚集，滞留在原地一段时间，没有立即改变方向进行疏散，此时还没有人员完成疏散，大部分人员在上半段楼梯处形成拥堵，移动较为困难，此阶段出口处人员疏散率相对较低。

第二阶段为疏散加速阶段，该阶段案例一对应的疏散时间约为 31~65 s，案例二对应的疏散时间约为 27~109 s。一部分人员已经完成疏散，上半段楼梯处及摔倒人员周围拥堵情况都有所改善，疏散较为顺畅，此阶段人员疏散效率较高。观察图 10 和图 11 可以发现，疏散开始 80 s 后，案例一人员在上半段楼梯处还存在一定程度的拥堵现象，案例二基本不存在拥堵现象。导致这种现象的发生是因为案例一中人员摔倒位置相对于案例二更靠近疏散开始的位置或者是人员在缓步台处摔倒相比在上半段楼梯台阶处摔倒对人员移动的阻碍更小。

第三阶段为疏散结束阶段，案例一对应的疏散时间约为 65~128 s，案例二对应的疏散时间约为 109~122 s。该阶段几乎不存在拥堵现象，人员疏散效率得到了进一步提高。楼梯区域的人员疏散过程进入收尾阶段，剩余学生有序疏散至安全区域。

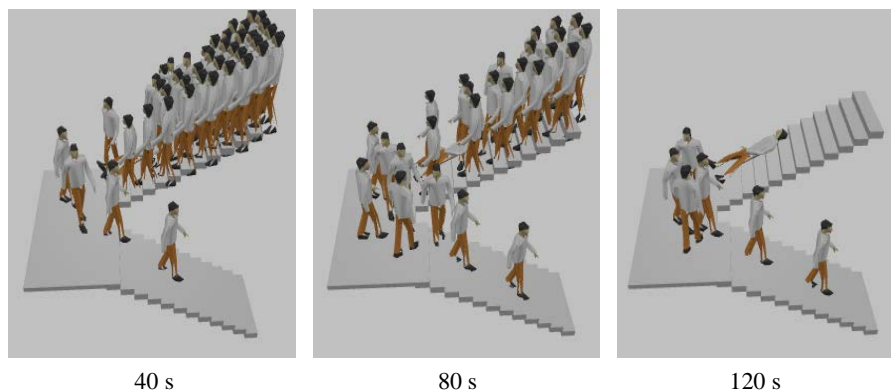


Figure 10. Evacuation evolution pattern for Case 1

图 10. 案例一人员疏散仿真演化斑图

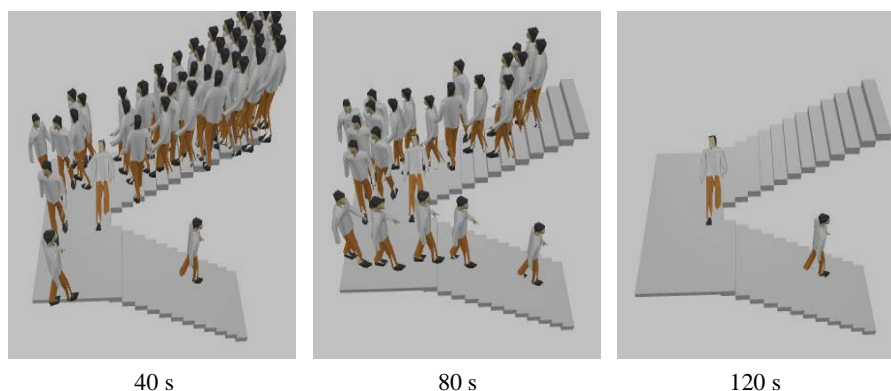


Figure 11. Evacuation evolution pattern for Case 2

图 11. 案例二人员疏散仿真演化斑图

案例三具体疏散过程大致可以分为以下四个阶段：疏散初始阶段、疏散减速阶段、疏散加速阶段、疏散收尾阶段。

第一阶段为初始阶段，对应的疏散时间约为 0~38 s。观察图 12 可以看出，该阶段特征是人员在上半段楼梯处形成较大程度的拥堵，疏散开始 10 s 后，两名学生陆续分别在上半段楼梯及楼梯缓步台处摔倒，导致人员疏散受到阻碍，紧跟摔倒学生的人员无法及时做出反应，改变疏散方向，且由于疏散学生到达疏散楼梯口的时间较为集中，导致该阶段出口处人员疏散率较低。

第二阶段为疏散加速阶段，对应的疏散时间约为 38~94 s。该阶段由于部分学生已经疏散至下半段楼梯处，大部分未疏散的学生都集中在楼梯中部，人员陆续已经知晓有人摔倒的情况，能及时做出反应，出口处人员疏散率有所提高。

第三阶段为疏散减速阶段，对应的疏散时间约为 94~201 s。该阶段楼梯上半段大范围拥堵现象仍存在，且刚开始疏散至下半段的学生群体已经完成疏散，人员摔倒导致疏散受阻，出口处人员疏散率降低。

第四阶段疏散收尾阶段，对应的疏散时间约为 201~225 s。此时几乎不存在拥堵现象，人员疏散效率进一步提高。楼梯上的人员疏散过程进入收尾阶段，剩余学生有序疏散至安全区域。

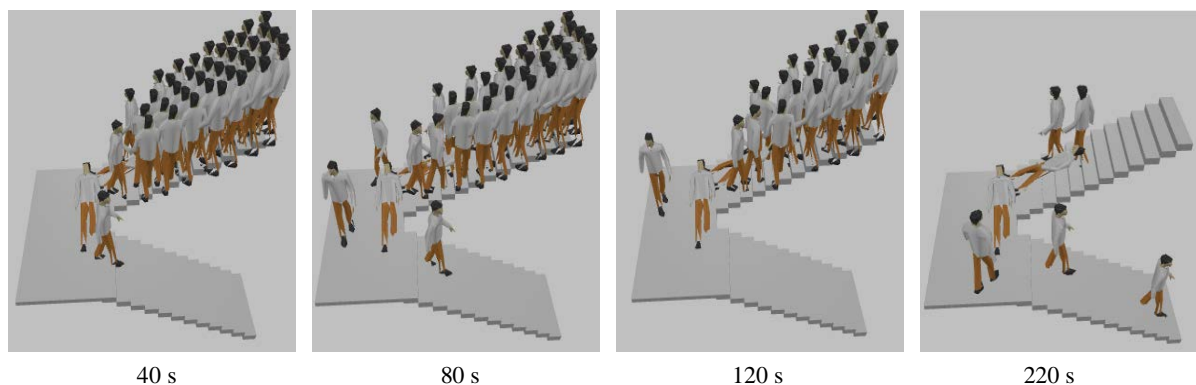


Figure 12. Evacuation evolution pattern for Case 3
图 12. 案例三人员疏散仿真演化斑图

接下来，对紧急情况下小学生群体自发上下楼时，存在学生摔倒的三种特例进行仿真分析。

案例四：自发上下楼时，一名下楼的小学生在上半段楼梯台阶处摔倒。初始状态下，疏散学生以 1:1 的比例、每秒 5 人的到达速率分别出现在上下行两个楼梯口处自发上下楼，疏散开始 10 s 后，一名正在下楼的学生在上半段楼梯台阶处摔倒。

案例五：自发上下楼时，一名下楼的小学生在楼梯缓步台处摔倒。初始状态下，疏散学生以 1:1 的比例、每秒 5 人的到达速率分别出现在上下行两个楼梯口处自发上下楼，疏散开始 10 s 后，一名正在下楼的学生在楼梯缓步台处摔倒。

案例六：自发上下楼时，两名小学生陆续分别在上半段楼梯处及楼梯缓步台处摔倒。初始状态下，疏散学生以 1:1 的比例、每秒 5 人的到达速率分别出现在上下行两个楼梯口处自发上下楼，疏散开始 10 s 后，两名正在下楼的学生在陆续分别在上半段楼梯台阶处及楼梯缓步台处摔倒。

从图 13 中可以看出，案例四疏散完成所需时间为 113 s，案例五疏散完成所需时间为 101 s，案例六疏散完成所需时间为 115 s。

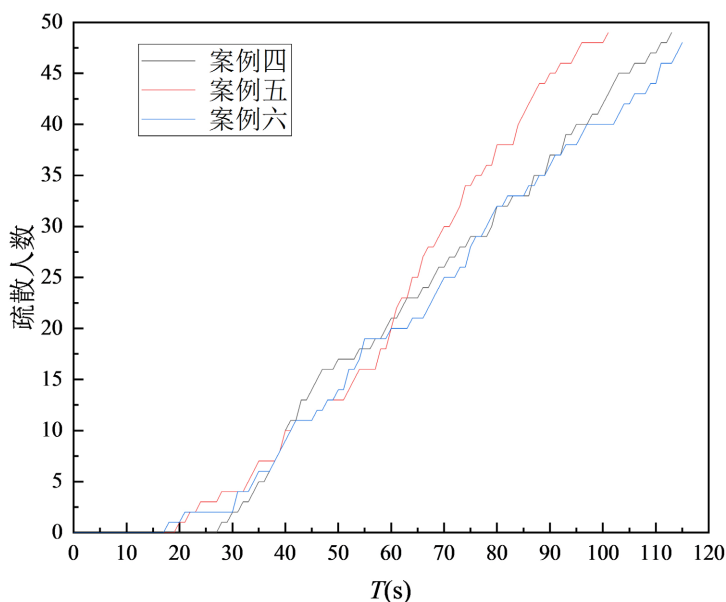


Figure 13. Diagram of evacuation completion number over time
图 13. 疏散完成人数随时间变化图

案例四、案例五和案例六的具体疏散过程大致可以分为以下两个阶段：疏散初始阶段，疏散加速阶段。

第一阶段为疏散初始阶段。案例四对应的疏散时间约为 0~53 s，案例五对应的疏散时间约为 0~57 s，案例六对应的疏散时间约为 0~30 s。图 14~16 给出了案例四~案例六的人员疏散演化斑图。图中穿蓝色和灰色上衣的行人分别代表向上、向下行走的学生。观察图 14~16，可以看出，疏散开始 10 s 后，一名正在下楼的学生在楼梯缓步台处摔倒，此时还没有人员从楼梯口处离开。疏散开始 20 s 后，整个楼梯区域人员密度都处于高密度，其中，上半段楼梯处人员拥堵现象最为明显；疏散开始 40 s 后，上楼梯的人员已经完全疏散离开下半段楼梯，此时，下楼梯的人员还未到达下半段楼梯处，人员在楼梯缓步台处及上半段楼梯处形成拥堵聚集。该阶段出口处人员疏散率低，人员移动较为困难。

第二阶段为疏散加速阶段。案例四对应的疏散时间约为 53~113 s，案例五对应的疏散时间约为 57~98 s，案例六对应的疏散时间约为 30~115 s。观察图 14~16，可以看出，疏散开始 60 s 后，楼梯各个位置拥堵情况较第一阶段都有了较大程度的改善，现阶段的主要拥堵现象集中在摔倒人员周围，出口处人员疏散率有所提高。疏散开始 80 s 后，人员拥堵现象不再存在，大部分学生已经完成疏散，剩余学生有序疏散至安全区域。

对比学生群体自发上下楼时存在人员摔倒的三种特例疏散仿真结果，可以发现，在存在一人摔倒的情况下，下楼的学生在上半段楼梯处摔倒相对于在楼梯缓步台处摔倒的情况而言，对整体疏散时间的影响更大；两名下楼的学生分别在上半段楼梯处和楼梯缓步台处摔倒对整体疏散时间的影响与一人在上半段楼梯处摔倒的情况相近。

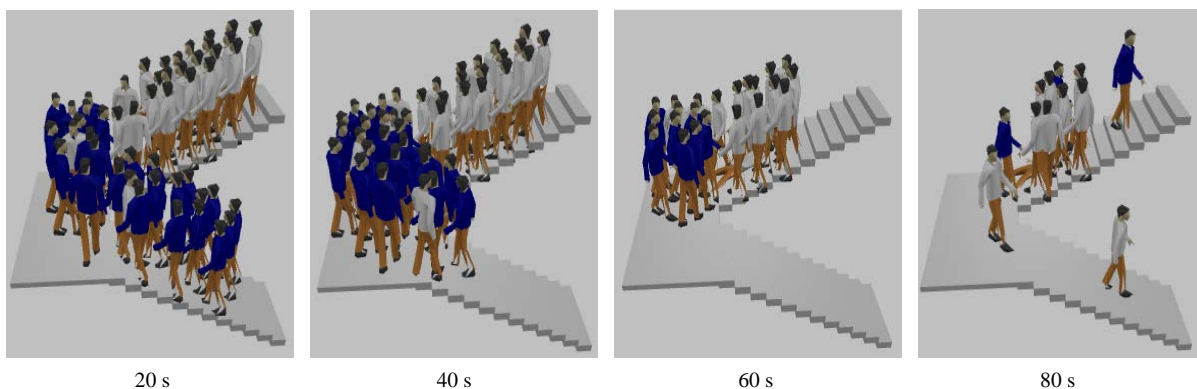


Figure 14. Evacuation evolution pattern of Case 4
图 14. 疏案例四人员疏散演化斑图

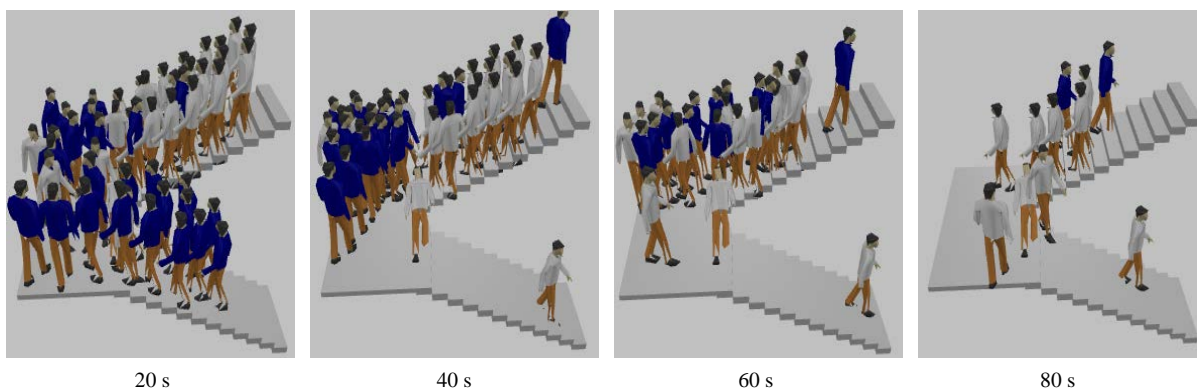


Figure 15. Evacuation evolution pattern of Case 5
图 15. 疏案例五人员疏散演化斑图

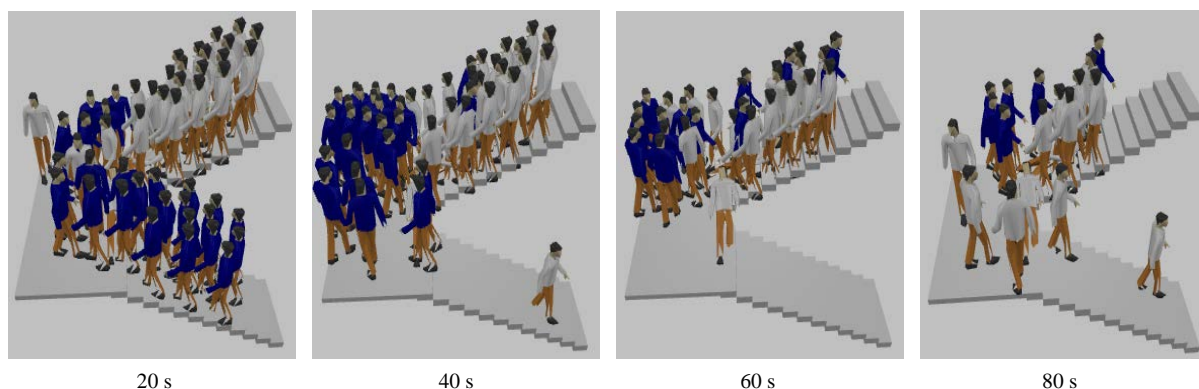


Figure 16. Evacuation evolution pattern of Case 6
图 16. 案例六人员疏散演化斑图

5. 结论

本文通过行人仿真软件 Anylogic, 建立了小学生教学楼楼梯间疏散模型, 对紧急情况下小学生群体自发下楼、自发上下楼以及排队下楼三种情景进行仿真模拟, 分析其疏散动力学特性, 并对小学生群体在疏散过程中存在人员意外摔倒的特例进行模拟仿真分析。仿真发现: 紧急情况下, 自发下楼时容易在上半段楼梯处形成拥堵, 自发上下楼时容易在缓步台处形成拥堵, 排队下楼可以较好地规避拥堵情况的出现; 当学生自发下楼时, 如果一名学生在楼梯上摔倒, 学生在楼梯缓步台处摔倒相对于在上半段楼梯处摔倒, 对整体疏散时间的影响较小, 当存在两名学生摔倒时将直接导致疏散完成时间成倍增加; 当学生自发上下楼时, 如果一人摔倒, 下楼的学生在上半段楼梯处摔倒相对于在楼梯缓步台处摔倒, 对整体疏散时间的影响更大, 两名下楼的学生分别在上半段楼梯处及楼梯缓步台处摔倒对整体疏散时间的影响与一人在上半段楼梯处摔倒的情况相近。

通过上述疏散模拟研究, 可以发现制定合理的疏散策略并进行相应的疏散演习, 对规范学生的疏散行为起着至关重要的作用, 能够有效避免学生摔倒事件所导致的疏散效率降低甚至踩踏事故的发生。

致 谢

本论文获山西省自然科学基金(201901D111255); 面向低行动力人群多模式交通组织与路径规划优化研究, 山西省基础研究计划(20210302124455)资助。

参考文献

- [1] 王振报, 温苏皖. 基于河北工程大学建筑馆的楼梯疏散能力仿真分析[J]. 湖南城市学院学报(自然科学版), 2021, 30(2): 22-26.
- [2] 谢天光, 路世昌, 黄鑫. 超高层建筑疏散楼梯对疏散效率的影响[J]. 消防科学与技术, 2019, 38(6): 786-788.
- [3] Rostami, R. and Alaghmandan, M. (2021) Performance-Based Design in Emergency Evacuation: From Maneuver to Simulation in School Design. *Journal of Building Engineering*, **33**, Article ID: 101598. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101598>
- [4] Fang, Z.M., Song, W.G. and Li, Z.J. (2012) Experimental Study on Evacuation Process in a Stairwell of a High-Rise Building. *Building and Environment*, **47**, 316-321. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.07.009>
- [5] 范甜甜. 基于疏散模拟的小学教学楼疏散楼梯设计优化策略研究[D]: [硕士学位论文]. 呼和浩特: 内蒙古工业大学, 2021. <https://doi.org/10.27225/d.cnki.gnmgu.2021.000541>
- [6] Hou, L., Liu, J., Pan, X., et al. (2014) A Social Force Evacuation Model with the Leadership Effect. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, **400**, 93-99. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2013.12.049>
- [7] Li, W.H., Li, Y., Yu, P., et al. (2017) Modeling, Simulation and Analysis of the Evacuation Process on Stairs in a Mul-

-
- ti-Floor Classroom Building of a Primary School. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, **469**, 157-172. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2016.11.047>
- [8] 邢君. 紧急状态下楼梯间人员疏散基础数据的研究[J]. 消防科学与技术, 2013, 32(11): 1212-1215.
- [9] 李若菲, 赵永翔, 卢团团, 刘旭光. 不同楼梯布局条件下行人疏散效果仿真研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2019, 15(4): 160-166.
- [10] 李晓艳, 宁世强, 张朋, 杨伟利. 高校楼梯间疏散逃生事故致因与防控研究[J]. 西安科技大学学报, 2020, 40(4): 606-614.
- [11] 金辉, 郭仁拥. 基于元胞传输模型的楼梯区域行人运动[J]. 物理学报, 2019, 68(2): 38-48.
- [12] Hamilton, G.N., Lennon, P.F. and O'Raw, J. (2017) Human Behaviour during Evacuation of Primary Schools: Investigations on Pre-Evacuation Times, Movement on Stairways and Movement on the Horizontal Plane. *Fire Safety Journal*, **91**, 937-946. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2017.04.016>
- [13] Rostami, R. and Alaghmandan, M. (2021) Performance-Based Design in Emergency Evacuation: From Maneuver to Simulation in School Design. *Journal of Building Engineering*, **33**, Article ID: 101598. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101598>
- [14] 马亚萍, 李丽华, 张辉. 考虑社会关系影响的小学生疏散行为研究[J]. 中国安全科学学报, 2019, 29(12): 144-151.
- [15] 霍非舟, 刘蒙, 吕伟, 杜煜. 考虑儿童运动特性的小学教学楼楼梯间人员疏散研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2020, 16(4): 149-155.