基于 ACP 方法的高层建筑火灾中人员疏散策略研究

胡玉玲 [1, 2] 王飞跃 [3] 刘希未 [3, 4]

摘 要 高层建筑结构规模巨大、人员众多, 而疏散出口数量有限, 如何有效安排疏散出口人员分布, 提高疏散效率, 是火灾应急管理的重要研究内容. 以人为中心的疏散系统是典型的复杂系统, 具有难以真实实验分析的困难. 本文基于 ACP (人工系统、计算实验、平行执行) 方法, 以智能体技术为核心建立了人工疏散系统, 基于火灾场景, 利用计算实验对疏散策略进行了验证、评估, 给出了实际疏散系统与人工疏散系统的平行执行实现思想. 最后, 通过案例验证了方法的可行性.

关键词 高层建筑, 火灾应急管理, 疏散策略, ACP 方法, 计算实验

引用格式 胡玉玲, 王飞跃, 刘希未. 基于 ACP 方法的高层建筑火灾中人员疏散策略研究. 自动化学报, 2014, **40**(2): 185−196

DOI 10.3724/SP.J.1004.2014.00185

ACP-based Research on Evacuation Strategies for High-rise Building Fire

HU Yu-Ling[1, 2] WANG Fei-Yue[3] LIU Xi-Wei[3, 4]

Abstract High-rise buildings have the characteristics of huge structure, high density of population, limited number of exits. How to improve the evacuation efficiency as far as possible by reasonable distribution of evacuees at exits is an important content in fire emergency management. The human-centered evacuation system is a typical complex system that is very hard to do actual experiments. In this paper, we propose a new method based on the artificial system, computational experiments, parallel execution (ACP) approach. An artificial evacuation system based on the agent technology is built, and computational experiments based on fire scenarios are done to verify and evaluate the evacuation efficiency of the strategies. The idea of parallel execution between the physical evacuation system and the artificial evacuation system is also given. Finally, a complete case is given to verify the feasibility of the whole research idea.

Key words High-rise building, fire emergency management, evacuation strategy, ACP approach, computational experiments

Citation Hu Yu-Ling, Wang Fei-Yue, Liu Xi-Wei. ACP-based Research on evacuation strategies for high-rise building fire. *Acta Automatica Sinica*, 2014, **40**(2): 185−196

火灾作为突发性灾害, 具有发生的频度高、带来的灾难性后果严重、社会影响与经济损失巨大等特点, 国内外对于火灾应急管理的研究正受到越来越多的关注. 涉及到的研究内容包括火灾危险性评估、火灾模型研究、火灾信息获取与管理、火灾保护与决策支持, 以及人员疏散等[1−5].

高层建筑作为我国及世界上其他国家建筑结构的主流, 具有结构规模巨大、内部人员密集、疏散通路长且复杂, 而疏散出口有限的特点, 一旦发生火灾, 外部救援异常困难. 有效的自救是减少损失的主要手段, 这就使得应急疏散策略与疏散预案的研究成为高层建筑火灾应急管理的重点. 探索有效和优化的高层建筑人员疏散策略, 一方面可以作为火灾应急疏散预案, 指导人员进行有序疏散, 尽可能地避免排队、拥堵、以及可能出现的踩踏现象, 以期用最短时间, 使尽可能多的人逃离危险建筑, 降低损失. 另一方面, 针对场景的优化的疏散策略可以用于人员的培训及演练, 是火灾应急管理的重要内容, 具有重大的现实意义. 然而, 以人为核心的疏散系统是典型的复杂系统, 具有复杂系统难以数学解析建模、难以进行分解还原分析, 以及无法进行常规的实验研究等特点. 再加上建筑结构因素、火灾环境因素, 以及人的因素在内的多种不确定因素的影响, 使得基于

收稿日期 2012-12-25 录用日期 2013-11-12
Manuscript received December 25, 2012; accepted November 12, 2013
国家自然科学基金 (61233001, 71232006), 北京市教委面上项目 (051201515) 资助
Supported by National Natural Science Foundation of China (61233001, 71232006) and Beijing Municipal Education Commission (051201515)
本文责任编委 董海荣
Recommended by Associate Editor DONG Hai-Rong
1. 北京理工大学自动化学院复杂系统智能控制与决策教育部重点实验室 北京 100081 2. 北京建筑大学电气与信息工程学院 北京 100044 3. 中国科学院自动化研究所复杂系统管理与控制国家重点实验室 北京 100190 4. 中国科学院云计算产业技术创新与育成中心自动化所东莞研究院 东莞 523808
1. Key Laboratory of Complex System Intelligent Control and Decision (Ministry of Education), Beijing Institute of Technology, Beijing 100081 2. College of Electrical and Information Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044 3. State Key Laboratory of Management and Control for Complex Systems, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190 4. Cloud Computing Center, Dongguan Research Institute, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Dongguan 523808

应急管理层面的高层建筑火灾应急疏散策略研究问题异常复杂和困难.

关于建筑火灾中人员疏散的研究已有三十余年的历史, 主要集中在人员个体及群体疏散行为的研究上. 1977 年英国伦敦的 Surrey 大学和 1978 年美国的 NIST (National Institute of Standard and Technology) 分别举办了第一届和第二届 "火灾中人的行为" 国际研讨会, 代表着疏散行为研究的开始[6]. 研究的手段经历了基于事故的调查研究、基于统计的分析研究, 以及 80 年代之后基于计算机的仿真研究. 近年来, 随着计算机技术、信息技术, 以及人工智能技术的发展, 建立合理有效的疏散行为模型成为了研究的重点. 国内外开发了多种仿真软件, 代表性的软件有 buildingEXODUS, EVACENT, SIMULEX, 以及 CRISP 等[7−10]. 现有的与疏散策略相关的研究, 从方法上可以分为宏观研究方法和微观研究方法. 宏观研究方法代表性的主要是基于解析数学关系的网络流方法[11], 又可细分为静态网络流法[12]、动态网络流法[13] 和快速流方法[14]. 此外, 还有一些智能算法被引入来研究解决疏散路径的优化问题, 如蚁群算法[15]、粒子群算法[16] 等. 然而, 这些基于建筑结构的解析的宏观研究方法, 无法考虑到疏散者的个体差异, 也很难与动态的火灾环境相结合, 这就使得获得的优化疏散路径与实际情况相差甚远, 其应用的合理性受到质疑. 近年来, 微观研究方法由于考虑了疏散者个体的特征与差异, 考虑了环境对个体的生理、心理等影响, 对疏散者行为描述更接近于现实. 现有的微观研究方法主要是基于元胞自动机[17]、基于社会力[18] 以及基于 Agent 智能体的微观模型基础上的仿真研究[19]. 目前, 上述微观仿真方法主要被用于基于建筑结构的个体逃生决策研究. 由于疏散系统存在着随机性和多种不确定因素, 缺乏综合多种不确定因素的实验设计和实验研究, 以及统计分析处理的单次仿真不能获得具有统计意义的结论, 因而, 基于管理层面在综合考虑建筑结构、火灾环境, 以及疏散者相互作用基础上的疏散策略的研究非常困难和少见.

针对上述研究的困难与不足, 本文从复杂系统研究的角度, 应用复杂系统的新理论和新方法 ACP (人工系统 (Artificial system)、计算实验 (Computational experiments)、平行执行 (Parallel execution)), 探索基于管理层面的高层建筑火灾环境下的应急疏散策略. ACP 方法的核心思想包括应用基于 Agent 智能体技术的人工系统来描述复杂系统, 解决复杂系统本质上不能解析建模的问题. 以计算机为实验室通过对人工系统的计算实验来解决真实系统难以实验以及重复实验的难题. 最后, 通过对实际系统与人工系统构成的平行系统进行平行执行来实现系统的管理和控制[20−23]. 近年来, ACP 方法已经成功地应用于交通[24]、化工[25]、经济[26]、社会安全[27] 等多领域, 为面向以人为核心的复杂社会问题的研究提供了完整的解决方案. 高层建筑火灾疏散系统同样是以人为核心的典型复杂系统, 存在着无法解析建模、无法还原分解的特点, 再加上经济上、道德上的原因, 真实的火灾实验难以进行, 更不用说多次的重复实验. 本研究以 ACP 方法为指导, 可以通过构建人工疏散系统将建筑结构、火灾环境, 以及疏散者进行综合描述; 通过单因素和多因素的计算实验设计与实施, 可以解决火灾环境下疏散策略的实验难题; 同时, 弥补仿真研究对具有随机性和不确定性的复杂系统缺乏统计意义的不足.

本文下述内容包括: 基于 ACP 方法研究的基本框架; 人工高层建筑火灾疏散系统; 基于火灾场景的疏散策略计算实验; 疏散策略的平行执行思想; 通过案例实现上述研究思想; 最后, 给出结论与研究展望.

1 基于 ACP 方法的研究框架

基于 ACP 方法研究高层建筑火灾疏散策略的核心内容包括建立人工疏散系统、针对人工疏散系统的计算实验研究以及将实际疏散系统与人工疏散系统联系起来的平行执行机制, 组成框架如图 1 所示.

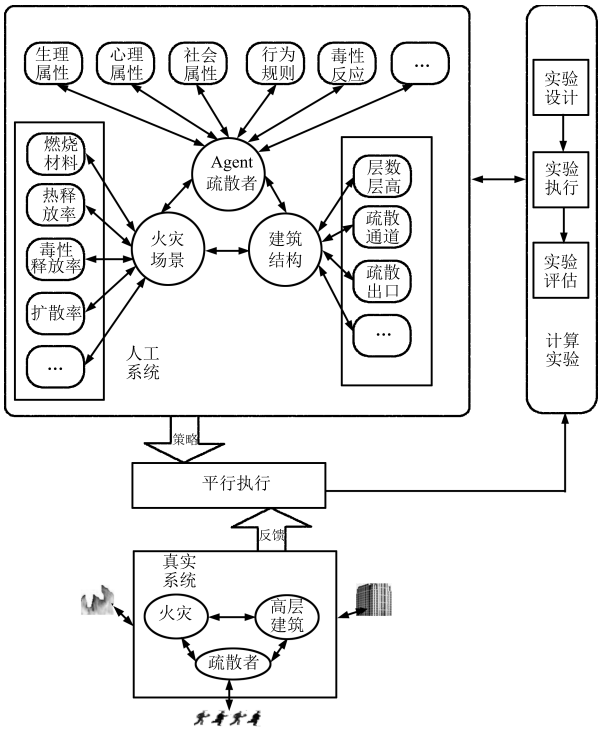


图 1 基于 ACP 的研究框架

Fig. 1 ACP-based research framework

人工疏散系统由相互作用与影响的疏散者模型库、建筑结构库, 以及火灾场景库组成. 基于 “自底向上” 的思想, 通过对疏散者、建筑结构以及火灾场景的灵活设置与组合可以实现 “多重世界” 的观点, 建立不以真实疏散系统为唯一目标的 “多重疏散系统”. 计算实验是对人工系统进行实验研究的重要手段. 针对人工疏散系统的计算实验突破了无法实验以及通过重复实验对疏散策略研究的局限, 通过合理的实验设计、实验实施, 以及对实验结果的分析与评价, 可对疏散策略进行疏散效率的验证与评估. 由于火灾人员疏散系统中存在着多种确定的和不确定的因素, 对疏散策略的效率具有控制或影响的作用, 进行合理的因素分析与设定, 展开单因素以及多因素的综合实验研究, 是全面评估疏散策略效率的有效手段. 在软、硬件资源与设备条件, 以及计算环境许可的情况下, 可对人工系统和实际系统进行平行执行, 实现疏散的平行应急管理. 通过平行机制可将对人工系统进行实验获得的有效和优化的疏散策略应用于实际系统的应急管理, 并通过对实际疏散系统的实时监测、信息采集与融合将动态的信息反馈给人工系统, 人工系统通过时间调整方法推演事态的发展状况, 并以疏散系统设定目标为依据动态调整疏散策略, 实现人工系统和实际系统的平行执行是研究的最高目标.

综上, 基于 ACP 方法的总体研究思路如下:

1) 建立人工疏散系统;

2) 对人工系统提出疏散策略;

3) 通过计算实验设计、执行、验证疏散策略, 并对其进行分析和评价;

4) 通过平行执行机制将优化的疏散策略应用于实际系统, 通过实际系统的动态反馈对疏散策略进行动态调整.

2　人工疏散系统

应用 ACP 方法解决疏散策略问题, 构造人工疏散系统是基础. 人工疏散系统将不以逼近真实的实际疏散系统作为其唯一标准, 而是基于多重世界的观点, 可以灵活且低成本地展现实际系统的多种可能版本, 成为实际疏散系统的一种或多种可能的替代.

高层建筑疏散系统有三种基本的组成部分需要描述: 具有自主行为能力的疏散者、疏散者所处的复杂高层建筑结构, 以及动态的火灾环境.

在整个疏散过程中, 疏散者的疏散行为受到其他疏散者、建筑结构以及动态的火灾环境的作用和影响, 共同构成一个无法解析建模的复杂系统. 基于人工生命和人工社会的思想[20], 应用 Agent 智能体技术来描述具有自治性、社会性、学习性、反应性、以及不同物理特征、运动能力, 并对火灾环境中热、毒性不同反应的疏散者是人工疏散系统的核心. 如图 2 所示, 基于 Agent 智能体技术的疏散者需要通过一套属性定义来描述. 这些属性包括静态属性和动态属性. 一些生理属性如性别、年龄、身高、体重等在整个疏散过程中应是固定的, 可以用来帮助区分不同的个体, 并作为合理设定其他属性参数的依据, 设为静态属性. 还有一些属性如移动距离、运动灵敏度、运动速度, 逃离时间等则是火灾以及其他影响因素的结果, 应该是动态变化的, 用于在疏散过程中对个体进行动态描述, 设为动态属性. 具有静、动态属性的 Agent 个体通过对位置环境、火灾环境、管理环境等外部环境的感知, 基于决策规则和行为规则进行疏散运动. 基于 Agent 智能体建模可以描述出具有生理差异的个体, 并通过大量个体之间的交互作用体现出人群的整体行为和整体涌现现象.

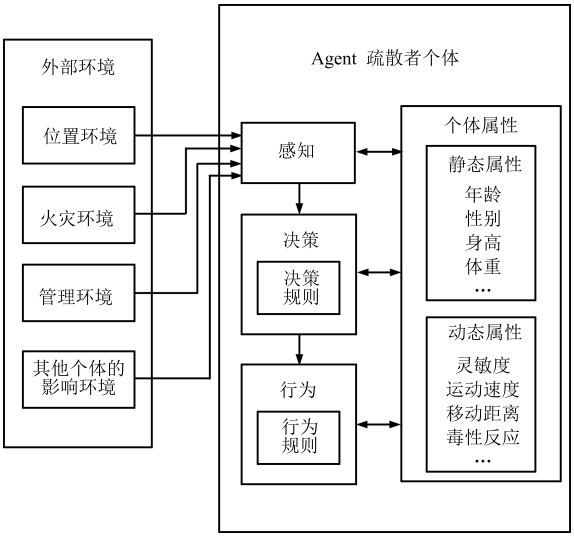


图 2　基于 Agent 的个体描述

Fig. 2　The description of agent individual

高层建筑结构的描述也是人工疏散系统的重要内容. 空间网格技术的发展为空间结构的详细和完整描述提供了基础. 通过合理的空间网格划分方法可以建立复杂的建筑结构以及建筑结构库. 为了描述疏散者在火灾环境中的运动以及火灾的动态影响, 整个建筑空间的网格节点同样需要通过静态和动态属性来描述和表示. 静态属性可将网格节点灵活定义为不同的物理空间, 动态属性可实时地反映火灾的热、烟和毒性. 综合网格计算技术与 Agent 智能体技术可使疏散者在不同建筑结构的空间进行疏散运动.

火灾动态环境是人工疏散系统需要描述的另一重要内容. 不同火灾环境下的疏散系统可以看成为人工疏散系统 “多重世界” 的具体实现. 利用火灾

数值模拟技术可实现对火灾动态环境的描述. 火灾数值模拟技术是基于火的数学模型, 采用计算机来分析和模拟火的发展以及烟气的扩散规律. 目前, 火的数值模型主要有网络模型、区域模型以及场模型. 网络模拟的优点是模型简单, 每一个房间只用一个均匀参数来表示, 计算量少, 但对火灾烟气的处理手法十分粗糙, 不能模拟房间内部的温度场、浓度场的详细分布情况, 属于半物理模拟层次. 区域模型将火灾房间分为上下 2 个区域, 即上部的热烟气区和下部的冷空气区, 通过建立羽流卷吸模型来进行上下层质量和能量的分析, 进而对火灾发展过程中烟气层的沉降和上下层平均温度的发展进行计算. 场模拟方法对建筑需要划分较多的网格, 计算精度高, 但是计算量大, 计算效率较低[28]. 在综合考虑研究的问题、研究的目标以及计算环境等的基础上, 分析采用合适的模型作为人工系统中火灾动态场景的描述.

综上, 在充分考虑交互的基础上, 基于智能体技术、空间网格技术以及火灾数值模拟技术, 可以建立高层建筑火灾环境下的人工疏散系统, 如图 3 所示.

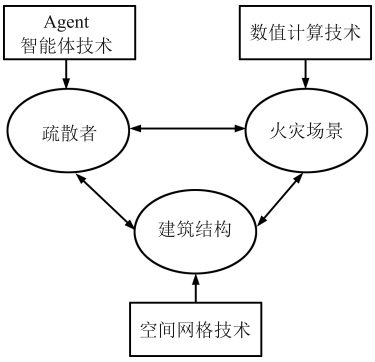


图 3 人工疏散系统框架

Fig. 3 Framework of artificial evacuation systems

人工疏散系统作为真实疏散系统的多重替代, 可以推演已发生和未发生的多种火灾场景下的动态疏散过程, 为疏散策略的计算实验研究奠定了基础.

3 基于场景的疏散策略计算实验

英国的 SIME 指出 “火灾中人员行为的任何研究, 面临的首要困难是进行真实火灾试验的不道德性”[29]. 在现实中, 由于经济和道德等原因, 高层建筑火灾的疏散实验研究异常困难. 正是由于现实中难以进行疏散实验以及重复性实验, 高层建筑的性能化防火设计数据基础仍然非常薄弱, 疏散策略的研究也极为困难.

在 ACP 方法中提出的可控和可重复的计算实验[21], 是以计算机为实验室, 采用自下而上的研究方法, 通过研究微观层次的个体行为来获取宏观的系统整体涌现. 通过对人工系统的计算实验可以来解决真实系统难以实验以及重复实验的难题. 所以, 以人工疏散系统为基础的计算实验研究是疏散和疏散策略研究的有力手段. 建造好的人工疏散系统成为疏散策略计算实验研究的基础. 由于针对具体火灾场景的疏散策略的研究是贴近现实和有意义的, 基于建筑疏散经验以及专家知识或者宏观算法寻优确定的疏散策略通过加载于不同火灾场景的人工系统, 可以进行疏散效率的量化实验研究. 此外, 考虑人的因素 (如分布密度、人的不同属性等)、建筑结构的因素等多种确定的和不确定因素的影响, 通过合理设计的单因素、多因素计算实验以及多次重复的实验, 一方面, 能够对策略的效率进行验证和评价, 另一方面, 可以对因素的影响进行量化分析. 基于上述考虑, 本研究计算实验设计的框图如图 4 所示, 在选取的火灾场景基础上对实验中人的因素和建筑结构因素进行单因素或多因素的设定, 通过多次的实验对获得的实验数据进行分析、处理以及评价.

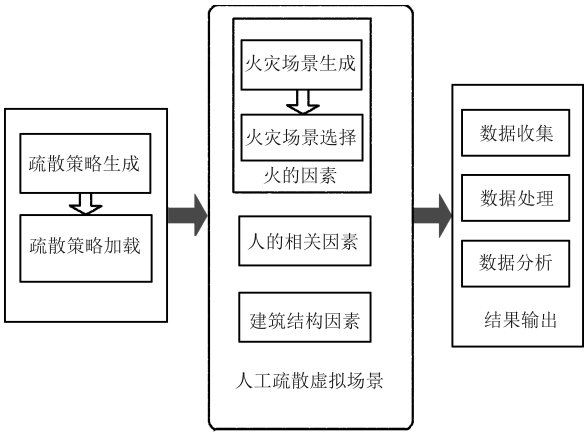


图 4 基于场景的计算实验设计框图

Fig. 4 Block diagram of computational experiments design based on the scenarios

4 疏散策略的平行执行

在前述构造人工疏散系统, 以及基于火灾场景的疏散策略计算实验研究的基础上, 可以考虑来建立人工系统与实际系统的平行系统, 实现基于应急管理层面的疏散策略平行执行.

基于应急管理平台的平行执行机制如图 5 所示.

实现的平行执行包括以下几方面的内容: 1) 由于对实际疏散系统的疏散效率以及灾难性后果难以预测和评估, 将实际系统中的烟感、温感, 以及一些视频传感器信息收集、整理、分析, 以及聚融对人工系统进行信息同化, 可实现真实疏散系统与人工疏散系统的协同演化, 利用人工系统的计算实验对真实疏散系统的事态演化进行预测与评估; 2) 人工系统利用计算速度超前、动态模拟、效果评估、策略

数据库的数据比对等技术手段, 基于实际系统的同步信息给出优化的疏散策略来指导实际系统的疏散; 3) 通过在线和同步的平行机制, 利用实际系统的动态反馈, 可动态地调整疏散策略, 以期使整个疏散效率最高、损失最小.

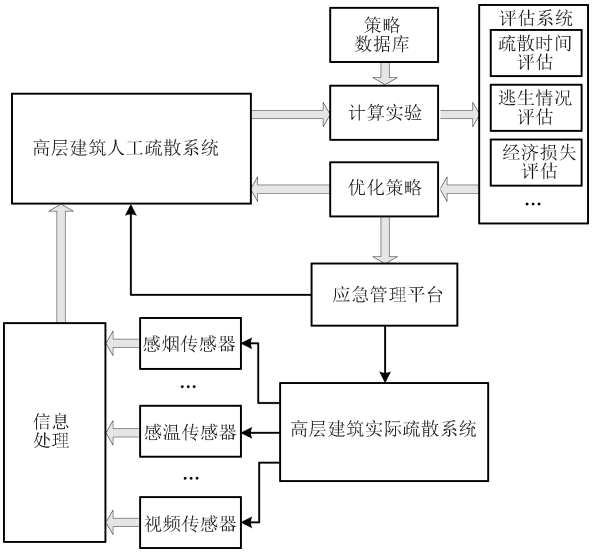


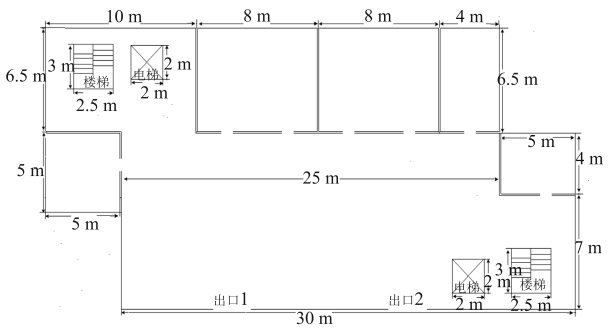
图 5　疏散系统的平行执行

Fig. 5　Parallel execution of evacuation systems

5　案例

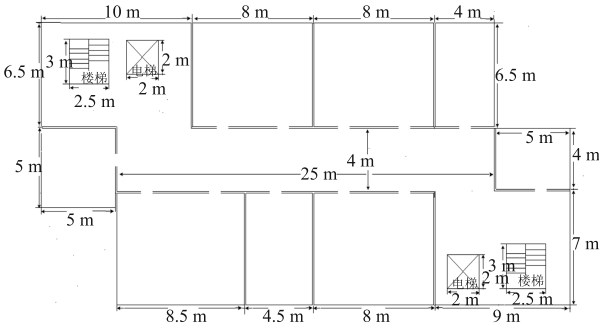
本节将一幢十层的高层办公大楼作为案例. 整个建筑近 6 000 平方米, 大楼内部设置两部楼梯和两部电梯. 第一层有两个各为 2 米宽的对外出口. 除第一层外其余九层结构相同, 且层高为 3.0 米, 通过带有平台的两部楼梯进行层连. 建筑的平面图如图 6 所示.

由于经济和道德的原因, 无法对该真实建筑进行人员火灾疏散实验, 从而也不能研究及验证应急疏散策略的效率. 我们应用 ACP 方法的研究过程如下.



(a) 第 1 层建筑平面图

(a) Building plan of the first floor



(b) 第 2～10 层建筑平面图

(b) Building plan of the second to the tenth floor

图 6　高层建筑结构平面图

Fig. 6　The high-rise building plan

5.1　建立人工疏散系统

本例采用英国格林威治大学开发的 buildingEXODUS[7] 疏散仿真平台与美国 NIST 开发的 CFAST[2] 来建立人工疏散系统. buildingEXODUS 是一个开放的动态仿真平台, 可以由使用者根据需要修改和选择参数及变量. 其空间划分采用的是先进的精细网格划分方法, 并采用 Agent 技术在综合考虑疏散者的生理、心理、社会属性基础上, 基于规则对疏散者建模. 此外, 该软件平台留有火灾数据接口, 并可将动态的火灾信息反映到 Agent 个体的生理和心理.

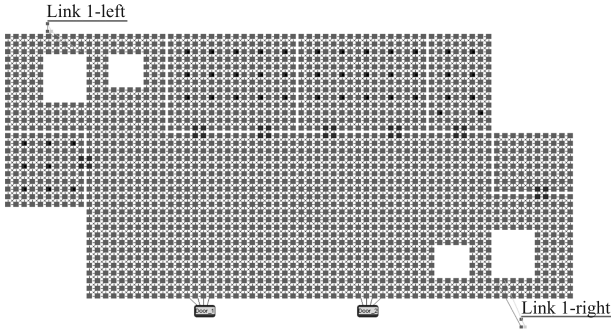
5.1.1　建筑结构建模

应用 buildingEXODUS 中的 Geometry 模式通过网格划分与属性定义对图 6 中的建筑结构进行描述, 如图 7 所示.

其中, 灰色网格为自由空间节点, 可以随意通过. 小的黑色网格为办公室内的座椅等固定设备, 可以绕过或跳过. 层与层之间通过两部楼梯进行连接. 疏散者通过连接弧可以在网格节点间自由运动.

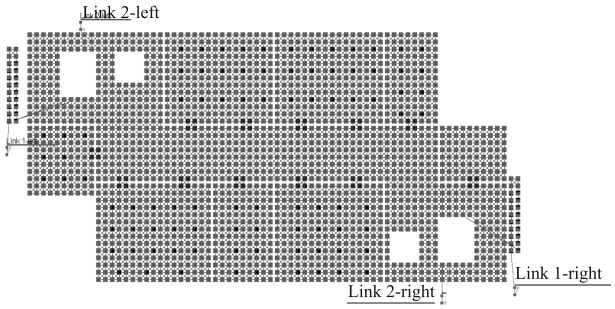
5.1.2　疏散者模型

以 buildingEXODUS 的 POPULATION 模式



(a) 第 1 层网格平面图

(a) Grid plan of the first floor



(b) 第 2～10 层网格平面图

(b) Grid plan of the second to the tenth floor

图 7 基于精细网格描述的高层建筑平面图

Fig. 7 The high-rise building based fine grid

为基础, 根据文献 [30], 男性疏散者的步行速度应比女性疏散者快 10 %. 而灵活性 (Agility)、运动能力 (Mobility)、快速行走速度 (Fast walk speed) 随着年龄的增加有所衰减, 本例设定衰减为前一年龄段的 90 %. 结合文献 [31] 中提供的中国人年龄、身高和体重关系的统计数据, 可以建立基于中国人生理特征的物理属性均值表, 如表 1 所示.

用表 1 中的中国人生理参数修改 POPULATION 模式默认的西方人生理参数 (见表 2), 可建立不同生理数据的疏散者模型.

建筑中人员数目 (密度)、性别比例、年龄分布都是影响疏散过程的重要参数. 在人工疏散系统中可以通过这些参数的灵活设置与重置建立多重的人工系统, 甚至进行极限实验. 限于篇幅, 本文仅进行了一种设定: 办公室内每 3 平方米 1 人、大厅走廊内每 10 平方米 1 人, 且男女比例为 1 比 1, 女性年龄在 [20, 55], 男性年龄在 [20, 60] 均匀分布. 这样, 第 1 层人数为 93 人, 第 2～10 层每层人数为 104 人, 该高层办公大厦中总的疏散人数为 1 245 人. 随机分布在建筑中的疏散者情况如图 8 所示.

表 2 默认的个体物理属性值

Table 2 Default values of individual physical characteristics

属性	默认值
性别	男
年龄	25
身高	1.8 m
体重	80.00 kg
状态	个体
反应时间	0.0 s
运动性	1.0
灵敏度	5
快速行走速度	1.5 m/s
行走速度	1.35 m/s
跳跃速度	1.20 m/s
爬行速度	0.3 m/s

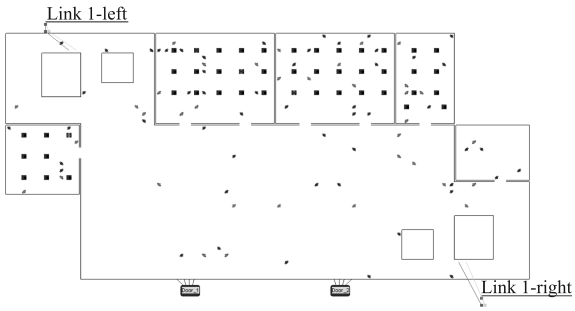
5.1.3 火灾场景设计

应用美国 NIST 推出并被广泛接受的火灾区域模型 CFAST 软件来模拟各种火灾场景. CFAST 软件是一种两区域火灾模拟软件, 通过上部的热烟气层和下部的冷空气层发生的羽流及能量交换, 模拟火灾发展过程中各区域温度、烟气以及毒性气体的浓度变化情况, 并考虑了通风、自然排烟和机械排烟等因素. 本文设计的火灾场景由 CFAST 软件在导入 buildingEXODUS 之前模拟产生, 在进行相应的火灾场景下计算实验时通过 buildingEXODUS 的场景设计模块接口导入. 模拟产生的动态温度、烟气、毒性等影响参数通过 buildingEXODUS 中的危险和毒性子模块传递到 Agent 个体的生理和心理上, 从而模拟产生不同火灾场景下的疏散过程.

表 1 基于中国人生理特征设定的个体物理属性值

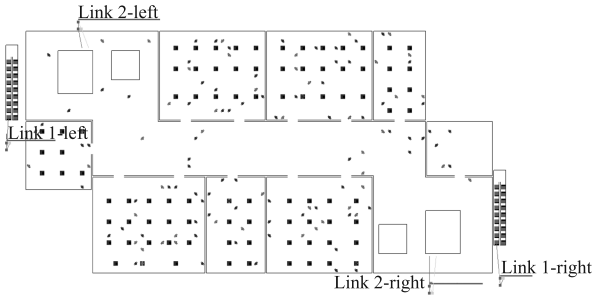
Table 1 Individual physical values based on Chinese physiological characteristics

性别	年龄	身高 (m)	体重 (kg)	运动性	灵敏度	快速行走速度 (m/s)	行走速度 (m/s)	跳跃速度 (m/s)	爬行速度 (m/s)
男	20～30	1.7	60.00	1.0	5	1.5	1.35	1.20	0.3
女	20～30	1.6	52.00	0.9	4.5	1.35	1.215	1.08	0.27
男	30～40	1.7	60.00	0.9	4.5	1.35	1.22	1.08	0.27
女	30～40	1.6	52.00	0.81	4.05	1.22	1.10	1.00	0.24
男	40～50	1.69	60.50	0.81	4.05	1.22	1.10	1.00	0.24
女	40～50	1.59	52.50	0.73	3.65	1.10	1.00	0.88	0.22
男	50～60	1.68	61.00	0.73	3.65	1.10	1.00	0.88	0.22
女	50～60	1.58	53.00	0.68	3.28	1.00	0.90	0.80	0.20



(a) 第 1 层疏散者初始分布图

(a) The initial distribution of evacuees on the first floor



(b) 第 2～10 层疏散者初始分布图

(b) The initial distribution of evacuees on the second to the tenth floor

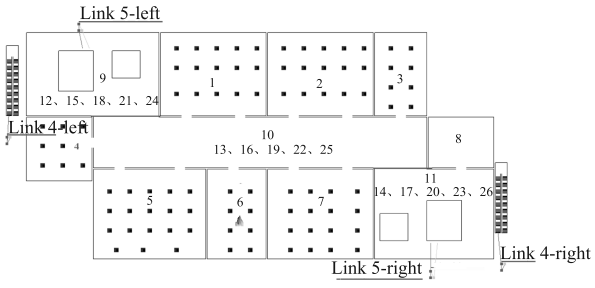
图 8　高层建筑中 Agent 疏散者初始分布图

Fig. 8　The initial distribution of agent individuals in the high-rise building

限于篇幅的限制, 本文仅设计两种火灾场景用于疏散策略的计算实验研究:

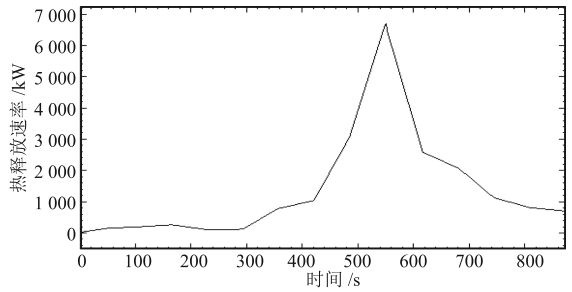
1) 场景 1. 确定着火位置为第 5 层、中间标号为 6 的房间, 且设定起火可燃物为电器设备. 将该层共划分为 11 个矩形区域. 考虑到高层建筑的烟囱效应, 将第 6～10 层楼梯附近区域及走廊作为纵向火灾蔓延区域, 依次划分为 12～14, 15～17, 18～20, 21～23, 24～26 区域. 火灾分区与起火位置以及电器设备的热释放速率如图 9 所示.

利用 CFAST 进行火灾的数值模拟, 代表性地选取 1, 6, 9, 10, 11, 18, 19 以及 20 区域产生的烟气层温度、高度、氧气浓度, 毒性气体 CO 的浓度随时间变化的曲线如图 10 所示.



(a) 火灾区域的划分和起火房间标识

(a) The division of the fire area and fire room marks



(b) 电气设备的热释放速率图

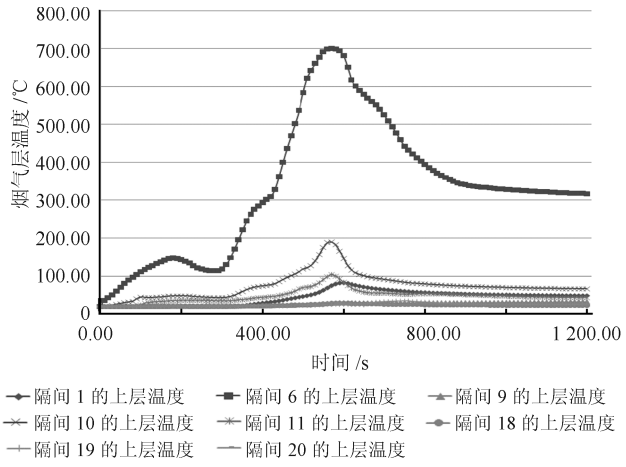
(b) The heat release rate of electrical equipments

图 9　场景 1 的火灾分区及火源的热释放速率

Fig. 9　The division of fire area and heat release rate of fire source on Scenario 1

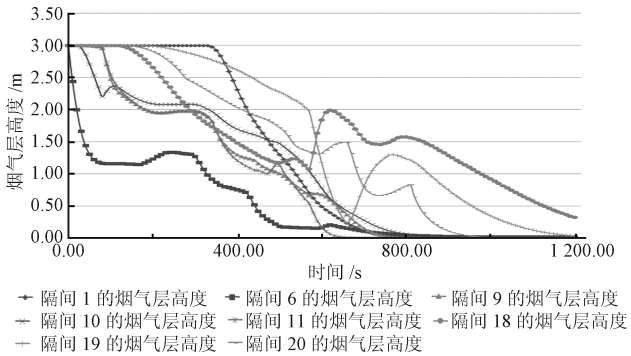
2) 场景 2. 确定着火位置为第 5 层、最左边标号为 4 的房间, 且设定起火可燃物为木制家具. 火灾区域划分与场景 1 相同. 火灾分区与起火位置以及木制家具的热释放速率如图 11 所示.

利用 CFAST 进行火灾的数值模拟, 代表性的选取 1, 4, 9, 10, 11, 18, 19 以及 20 区域产生的烟气层温度、高度、氧气浓度, 以及毒性气体 CO 浓度随时间变化的曲线如图 12 所示.



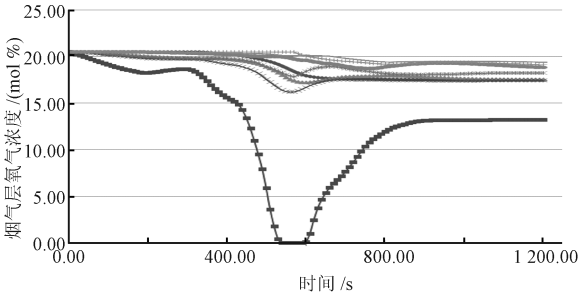
(a) 火灾区域的烟气层温度

(a) The temperature of smoke layers in the fire areas



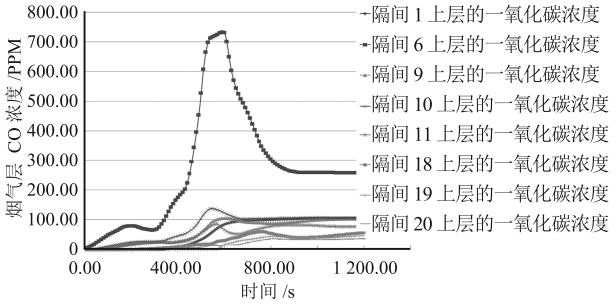
(b) 火灾区域的烟气层高度

(b) The height of smoke layers in the fire areas



(c) 火灾区域烟气层氧气浓度

(c) Oxygen concentration of smoke layers in the fire areas

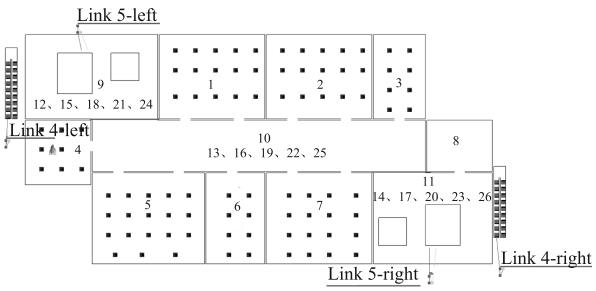


(d) 火灾区域烟气层一氧化碳浓度

(d) CO concentration of smoke layers in the fire areas

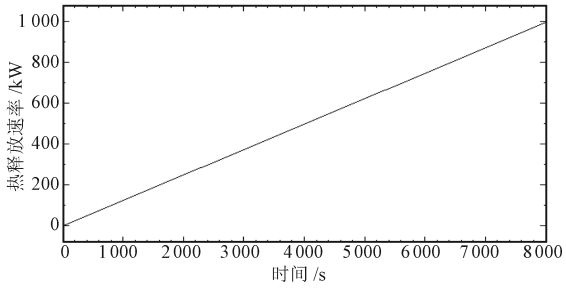
图 10 场景 1 的火灾数值模拟图

Fig. 10 Numerical simulation diagrams of fire on Scenario 1



(a) 火灾区域的划分和起火房间标识

(a) The division of the fire area and fire room marks



(b) 木制家具的热释放速率图

(b) The heat release rate of wood furniture

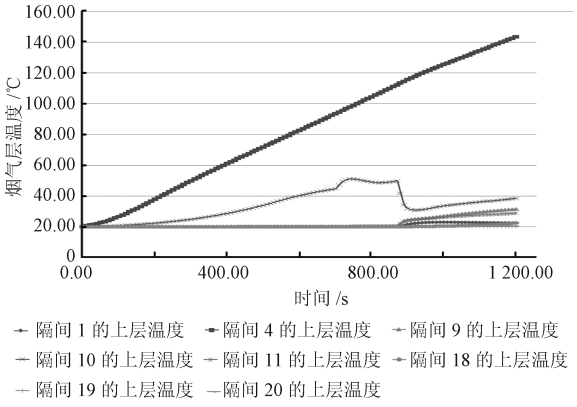
图 11 场景 2 的火灾分区及火源的热释放速率

Fig. 11 The division of fire area and heat release rate of fire source on Scenario 2

5.2 疏散策略的计算实验研究

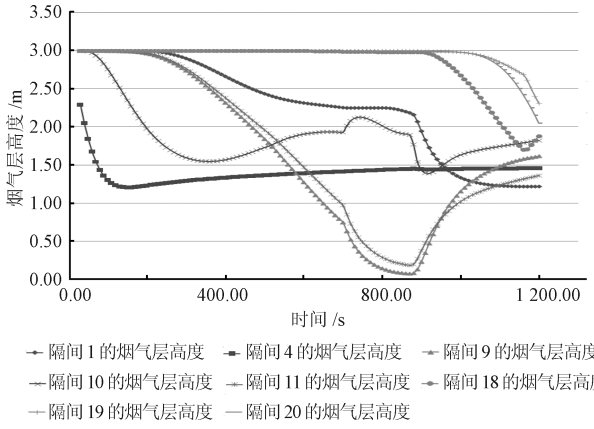
根据疏散经验和专家知识, 可以确定多种疏散策略进行研究, 本文代表性的选取如下两种策略进行实验研究:

1) 策略 1. 最近出口、最短疏散距离疏散策略. 该策略对于每个疏散者来说遵循不考虑排队、阻塞等现象, 只是朝着最近出口进行疏散的原则.



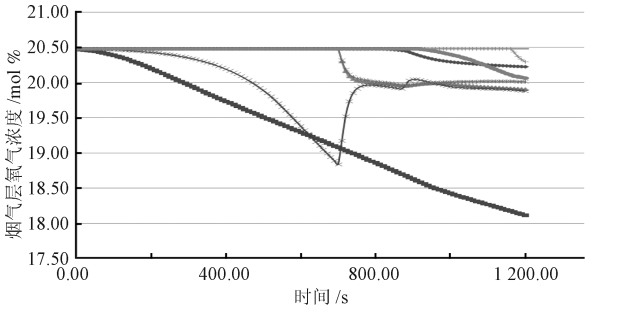
(a) 火灾区域的烟气层温度

(a) The temperature of smoke layers in the fire areas



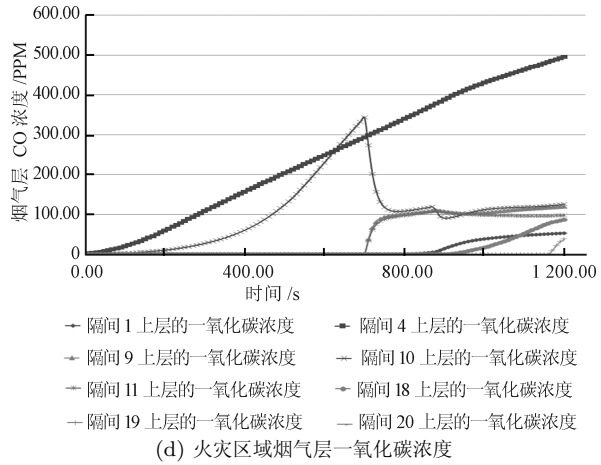
(b) 火灾区域的烟气层高度

(b) The height of smoke layers in the fire areas



(c) 火灾区域烟气层氧气浓度

(c) Oxygen concentration of smoke layers in the fire areas



(d) 火灾区域烟气层一氧化碳浓度

(d) CO concentration of smoke layers in the fire areas

图 12　场景 1 的火灾数值模拟图

Fig. 12　Numerical simulation diagrams of fire on Scenario 1

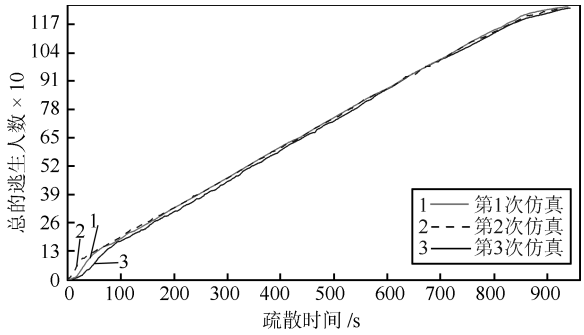
2) 策略 2. 着火层优先疏散策略 (分时疏散策略). 该策略对于着火层每个疏散者来说遵循立即疏散原则; 对于其他层疏散者来说进入疏散前准备阶段, 遵循等待原则.

5.2.1　场景 1 的计算实验

由于本文研究的是应急情况下的疏散过程, 在 buildingEXODUS 中对于人的行为属性设定选择了转向功能, 即设计疏散者在出口出现排队时间大于耐力设定时间时可以转向, 改变设定的出口. 该设置代表了应急情况下疏散者对路径选择的不理智. 针对场景 1, 将策略 1 应用于人员疏散. 由于从探测到火灾发生至人员正式疏散开始前阶段, 即疏散前阶段对整个疏散过程影响重大[32], 计算实验设计将该策略具体细化为以下三种情况: 1) 建筑内所有疏散者均不考虑疏散前阶段, 遵循立即疏散; 2) 除着火房间外, 其他疏散者存在 0～30 秒随机疏散前时间分布; 3) 除着火房间外, 其他疏散者存在 0～60 秒的随机疏散前阶段时间分布. 场景 1 产生的火灾温度、烟的浓度、毒性、热辐射等作用在疏散者的生理上, 对疏散者的行为和运动产生影响. 疏散时间和疏散人数分布曲线如图 13 (a) 所示. 单次实验用时分别为 926 秒、919 秒和 944 秒. 针对场景 1, 将策略 2 应用于人员疏散. 计算实验设计为: 着火层认为不存在疏散前阶段, 执行立即疏散. 其他层考虑时间延迟 (相当于疏散前阶段) 为 30 秒、60 秒以及 100 秒等三种具体情况以减少疏散通路拥堵现象. 疏散时间和疏散人数分布曲线如图 13 (b) 所示. 单次实验用时分别为 949 秒、989 秒和 999 秒.

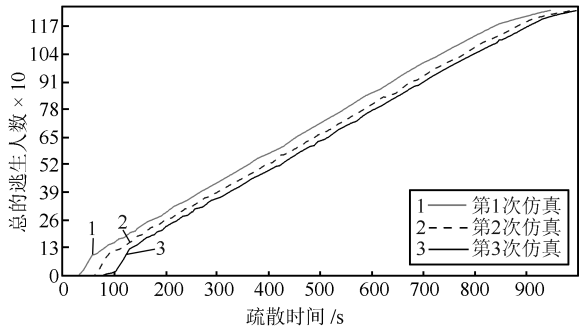
5.2.2　场景 2 的计算实验

针对场景 2, 分别将策略 1 和策略 2 应用于疏散指导, 计算实验设计同场景 1. 疏散时间和疏散人数分布曲线如图 14 (a) 和图 14 (b) 所示.



(a) 基于场景 1 应用策略 1 的疏散时间图

(a) The evacuation time diagram of Strategy 1 on Scenario 1



(b) 基于场景 1 应用策略 2 的疏散时间图

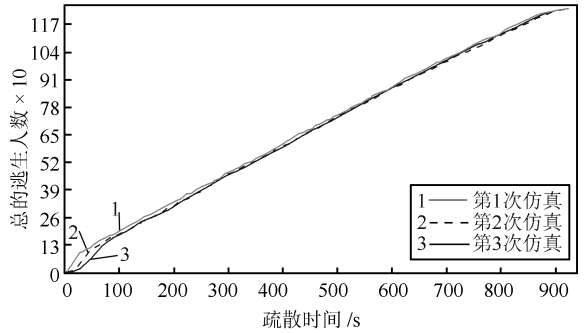
(b) The evacuation time diagram of Strategy 2 on Scenario 1

图 13　基于场景 1 的疏散时间图

Fig. 13　The evacuation time diagram on Scenario 1

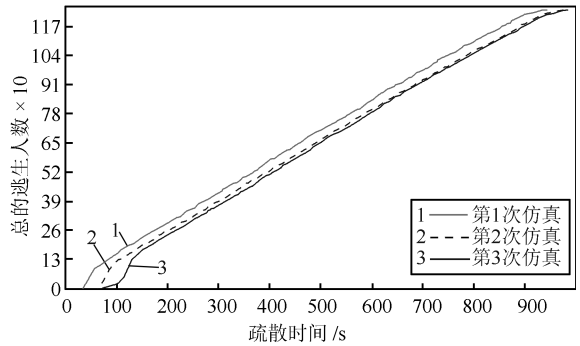
5.2.3　疏散策略分析与评价

疏散效率的评价指标有多种表示方法, 如总体疏散时间、疏散距离、灾害发生前到达安全目的地的人数. 本研究以总体疏散时间作为疏散策略的评价标准, 通过计算实验选出基于场景的最短疏散时间策略.



(a) 基于场景 2 应用策略 1 的疏散时间图

(a) The evacuation time diagram of Strategy 1 on Scenario 2



(b) 基于场景 2 应用策略 2 的疏散时间图

(b) The evacuation time diagram of Strategy 2 on Scenario 2

图 14 基于场景 2 的疏散时间图

Fig. 14 The evacuation time diagram on Scenario 2

改变人的随机分布位置, 对案例中的两种场景应用疏散策略 1 和策略 2 进行多次实验, 时间均值和标准差见表 3 所示.

对比单次实验时间和 10 次实验的时间均值与标准差, 可以看出单次实验具有一定的分散性, 多次实验的均值更能客观地反映出疏散的效率. 以时间均值为评价指标, 对疏散场景 1 和场景 2 来说, 疏散策略 1 比策略 2 用时更短, 更适合于这两种场景下的疏散指导. 然而, 对场景 1 来说, 疏散前阶段时间为 30 秒内随机分布时, 疏散策略 1 用时最短, 疏散效率最高; 对场景 2 来说, 疏散前阶段时间为 60 秒内随机分布时, 疏散策略 1 用时最短, 疏散效率最高. 同时, 上述两种场景的计算实验都反映出了 “欲速则不达” 的疏散情景, 即没有疏散前阶段疏散者的同时疏散由于出现严重的拥堵、排队等现象使得疏散时间反而变长.

6 结论与展望

高层建筑火灾人员疏散是火灾应急管理的重要内容, 针对实际系统无法解析建模、无法进行真实实验研究的本质性困难, 本文提出基于复杂系统研究的 ACP 方法, 通过建立人工疏散系统, 采用微观计算实验的合理设计对宏观应急疏散策略进行研究和评价, 探索基于场景的有效策略. 获得的有效策略一方面可作为应急疏散预案, 另一方面, 还可用于指导人员的模拟演练与培训, 具有重要的现实意义. 本文通过案例验证了研究方法的可行性, 为高层建筑火灾应急疏散策略的研究开辟了新道路.

由于高层建筑人员疏散系统存在多种确定和不确定的影响因素, 如何设计多因素的计算实验、如何对实验进行有效的评估和评价都将是今后研究的重要内容. 此外, 基于实时的传感系统和无线数据采集与处理系统、火灾模拟与危险性评估系统, 以火灾应急管理为核心, 建立基于平行机制的高层建筑火灾疏散平行系统是研究的最高目标.

表 3 疏散时间表

Table 3 The evacuation time table

场景	策略	疏散前阶段 (s)	单次疏散时间 (s)	10 次疏散时间均值 (s)	疏散时间标准差
1	1	0	926	918	8.7
1	1	0～30 (随机分布)	919	910	6.3
1	1	0～60 (随机分布)	944	937	10
1	2	30	949	951	9.5
1	2	60	989	984	6.0
1	2	100	999	1 005	8.4
2	1	0	930	926	9.8
2	1	0～30 (随机分布)	928	920	8.9
2	1	0～60 (随机分布)	925	915	8.4
2	2	30	943	945	8.7
2	2	60	980	962	9.7
2	2	100	987	981	5.0

References

1 Ding Y C, Weng F L, Jiang X H. The research on catastrophe theory′s application in high-rising buildings fire risk assessment. In: Proceedings of the 2011 International Conference on Remote Sensing, Environment and Transportation Engineering. Nanjing, China: IEEE, 2011. 6521−6524

2 Richard D P, Paul A R, Glenn P F. CFAST-Consolidated Model of Fire Growth and Smoke Transport (Version 6). User′s Guide, Technical Report NIST. SP. 1041r1, National Institute of Standards and Technology, U. S. Department of Commerce, USA, 2013

3 Filippoupolitis A, Gorbil G, Gelenbe E. Spatial computers for emergency management. In: Proceedings of the 5th IEEE Conference on Self-adaptive and Self-organizing Systems. Ann Arbor, MI: IEEE, 2011. 61−66

4 Seeberg T M, Vardoy A S B, Taklo M M V, Austad H O. Decision support for subjects exposed to heat stress. *Biomedical and Health Informatics*, 2013, **17**(2): 402−410

5 Hao S Q, Huang H W, Yuan Y, Yin K. Fire evacuation underground space based on building EXODUS. In: Proceedings of the 2009 International Conference on Engineering Computation. Hong Kong, China: IEEE, 2009. 186−188

6 Bryan J L. Human behaviour in fire: the development and maturity of a scholarly study area. *Fire and Materials*, 1999, **23**(6): 249−253

7 Gwynne S, Galea E R, Lawrence P J, Owen M, Filippidis L. Adaptive decision-making in response to crowd formations in building EXODUS. *Applied Fire Science*, 1999, **8**(4): 301−325

8 Kisko T M, Francis R L. EVACNET plus: a computer program to determine optimal building evacuation plans. *Fire Safety*, 1984, **9**(2): 211−220

9 Zhang X, Li X, Hadjisophocleous G. A probabilistic occupant evacuation model for fire emergencies using Monte Carlo methods. *Fire Safety Journal*, 2013, **58**(1): 15−24

10 Fraser-Mitchell J N. Modelling human behaviour within the fire risk assessment tool CRISP. *Fire and Materials*, 1999, **23**(6): 345−355

11 Shende A, Singh M P, Kachroo P. Optimal feedback flow rates for pedestrian evacuation in a network of corridors. *Intelligent Transportation Systems*, 2013, **14**(3): 1053−1066

12 Gupta A K, Yadav P K. SAFE-R: a new model to study the evacuation profile of a building. *Fire Safety Journal*, 2004, **39**(7): 539−556

13 Luh P B, Wilkie C T, Chang S C, Marsh K L, Olderman N. Modeling and optimization of building emergency evacuation considering blocking effects on crowd movement. *Automation Science and Engineering*, 2012, **9**(4): 687−700

14 Hadzic T, Brown K N, Sreenan C J. Real-time pedestrian evacuation planning during emergency. In: Proceedings of the 23rd International Conference on IEEE Tools with Artificial Intelligence Computation. Boca Raton, US: IEEE, 2011. 597−604

15 Rahman A, Mahmood A K. Feasible route determination using ant colony optimization in evacuation planning. In: Proceedings of the 5th Student Conference on Research and Development. Selangor, Malaysia: IEEE, 2007. 1−6

16 Yang B, Wang C, Huang H, Li L. A multi-agent and PSO based simulation for human behavior in emergency evacuation. In: Proceedings of the 2007 IEEE Computational Intelligence and Security. Harbin, China: IEEE, 2007. 295−300

17 Liu H Y, Jin J, Qin Z R, Xu G. Evacuation model with multiple exits and the influence of fire and smoke based on cellular automata. *International Journal of Digital Content Technology and Its Applications*, 2012, **6**(17): 333−342

18 Korhonen T, Hostikka S, Keski-Rahkonen O. A proposal for the goals and new techniques of modelling pedestrian evacuation in fires. In: Proceedings of the 8th IEEE Fire Safety Science. Beijing, China: IEEE, 2005. 557−567

19 Pan X S, Han C S, Dauber K, Law K H. Human and social behavior in computational modeling and analysis of egress. *Automation in Construction*, 2006, **15**(4): 448−461

20 Wang Fei-Yue, Langsing J S. From artificial life to artificial societies — new methods for studies of complex social systems. *Complex Systems and Complexity Science*, 2004, **1**(1): 33−41
(王飞跃, 兰森 · 史蒂夫. 从人工生命到人工社会 — 复杂社会系统研究的现状和展望. 复杂系统与复杂性科学, 2004, **1**(1): 33−41)

21 Wang Fei-Yue. Parallel control: a method for data-driven and computational control. *Acta Automatica Sinica*, 2013, **39**(4): 293−302
(王飞跃. 平行控制: 数据驱动的计算控制方法. 自动化学报, 2013, **39**(4): 293−302)

22 Wang F Y. Toward a paradigm shift in social computing: the ACP approach. *IEEE Intelligent Systems*, 2007, **22**(5): 65−67

23 Wang F Y. Parallel control and management for intelligent transportation systems: concepts, architectures, and applications. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2010, **11**(3): 630−638

24 Li Run-Mei, Liu Jian-Zhong, Zhu Feng-Hua. On computational experiment in parallel public transportation system. *Acta Automatica Sinica*, 2013, **39**(7): 1011−1017
(李润梅, 刘建忠, 朱凤华. 平行公交系统中的计算实验问题研究. 自动化学报, 2013, **39**(7): 1011−1017)

25 Shen Xiao-Wei, Wang Fei-Yue, Cheng Chang-Jian, Liu Xi-Wei. Application of clustering analysis to team management. *Acta Automatica Sinica*, 2012, **38**(4): 563−569
(沈小伟, 王飞跃, 程长建, 刘希未. 聚类分析方法在企业班组管理中的应用. 自动化学报, 2012, **38**(4): 563−569)

26 Wang Fei-Yue. Artificial societies, computational experiments, and parallel systems: a discussion on computational theory of complex social-economic systems. *Complex Systems and Complexity Science*, 2004, **1**(2): 60−69
(王飞跃. 人工社会、计算实验、平行系统 — 关于复杂社会经济系统计算研究的讨论. 复杂系统与复杂性科学, 2004, **1**(2): 60−69)

27 Chen H C, Wang F Y, Zeng D. Intelligence and security informatics for homeland security: information, communication, and transportation. *Intelligent Transportation Systems*, 2004, **5**(4): 329−341

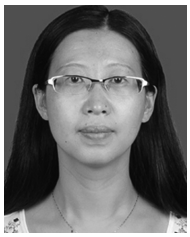
28 Ma Jun-Chi. Investigation and Simulation on Crowd Evacuation in Fire Disaster [Ph. D. dissertation], Tongji University, China, 2007
(马骏驰. 火灾中人群疏散的仿真研究 [博士学位论文], 同济大学, 中国, 2007)

29 Sime J D. Crowd psychology and engineering. *Safety Science*, 1995, **21**(1): 1−14

30 Virkler M R. Prediction and measurement of travel time along pedestrian routes. *Transportation Research Record*, 1998, **36**(16): 37−42

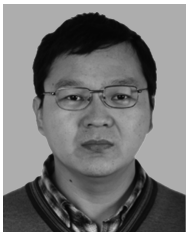
31 Wang J X, Li B X. The reference value of the height and the weight of Chinese people. *Radiation Protection of Medical*, 1993, **13**(3): 3−7

32 Liu M, Lo S M. The quantitative investigation on people′s pre-evacuation behavior under fire. *Automation in Construction*, 2011, **20**(5): 620−628



胡玉玲 北京建筑大学电气与信息工程学院副教授, 北京理工大学博士研究生. 主要研究方向为复杂系统的建模、分析与控制. 本文通信作者.
E-mail: hyl1018@126.com
(**HU Yu-Ling** Associate professor at the College of Electrical and Information Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Ph. D. candidate at Beijing Institute of Technology. Her research interest covers modeling, analysis, and control of complex systems. Corresponding author of this paper.)

王飞跃 中国科学院自动化研究所复杂系统管理与控制国家重点实验室研究员. 主要研究方向为智能系统和复杂系统的建模, 分析与控制.
E-mail: feiyue.wang@ia.ac.cn
(**WANG Fei-Yue** Ph. D., professor at the State Key Laboratory of Management and Control for Complex Systems, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences. His research interest covers modeling, analysis, and control of intelligent systems and complex systems.)



刘希未 中国科学院自动化研究所复杂系统管理与控制国家重点实验室高级工程师. 2000 年和 2003 年在北京化工大学信息学院获得工学学士和硕士学位. 2006 年在日本奈良先端科学技术大学院大学获得博士学位. 主要研究方向为人因工程学, 传感器网络, 复杂系统建模与控制, 企业管理信息系统.
E-mail: xiwei.liu@ia.ac.cn
(**LIU Xi-Wei** Associate professor of engineering at the State Key Laboratory of Management and Control for Complex Systems, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences. He received the bachelor and master degrees in information science at Beijing University of Chemical Technology, China in 2000 and 2003, respectively, and the Ph. D. degree at Nara Institute of Science and Technology, Japan in 2006. His research interest covers human factor engineering, sensor network, modeling and control of complex systems, and management information system.)