

基于 ACP 方法的应急疏散系统研究

孙绪彬¹ 董海荣² 宁滨² 高童欣² 孔庆杰³

摘 要 目前地铁、建筑及煤矿等人员密集空间突发事件频发, 解决人员密集空间人员安全疏散是当前社会发展亟待解决的问题. 本文以地铁为例研究了基于 ACP 方法的平行应急疏散系统, 该系统由应急疏散人工系统、计算实验和平行执行三部分组成. 平行应急疏散系统不仅适用于地铁, 还适用于建筑及煤矿等生活和工作空间应急疏散管理, 可实现人员培训、疏散演练、疏散方案优化和评估等功能. 本文初步建立了地铁枢纽站平行应急疏散系统, 并进行了两种典型场景的计算实验, 实验结果表明平行应急疏散系统可有效提高应急疏散效率.

关键词 平行系统, 应急疏散, 动态路径指示, 人员培训, 应急管理

引用格式 孙绪彬, 董海荣, 宁滨, 高童欣, 孔庆杰. 基于 ACP 方法的应急疏散系统研究. 自动化学报, 2014, 40(1): 16–23

DOI 10.3724/SP.J.1004.2014.00016

ACP-based Emergency Evacuation System

SUN Xu-Bin¹ DONG Hai-Rong² NING Bin² GAO Tong-Xin² KONG Qing-Jie³

Abstract To solve emergency evacuation problem for public and residential assembly occupancies including urban buildings and underground tunnels, a parallel system for emergency evacuation is presented based on the ACP method, which can be used in emergency evacuation for subway transfer stations, buildings, mines, and others with complex inner structures. The parallel system for emergency evacuation consists of three parts, which are artificial system, computational experiments and parallel execution, and it also includes several functions including personnel training, evacuation exercise, and optimization and evaluation of evacuation plan. A parallel system for subway transfer station is established, and computational experiments are executed with two typical emergency scenarios. The results of experimental experiments show that the system proposed in this paper is an effective tool for evacuation decision making in dynamic route indication.

Key words Parallel system, emergency evacuation, dynamic route indication, personnel training, emergency management

Citation Sun Xu-Bin, Dong Hai-Rong, Ning Bin, Gao Tong-Xin, Kong Qing-Jie. ACP-based emergency evacuation system. *Acta Automatica Sinica*, 2014, 40(1): 16–23

随着社会快速进步和经济迅速发展, 人们生活或工作的地上或地下的空间结构也越来越复杂, 如何保障突发事件情况下人员快速疏散已成为应急管理的重要内容. 以地铁为例, 地铁枢纽站通常具有多个站台、站厅、换乘通道和出入口, 在突发情况下如

何快速引导乘客疏散是地铁管理部门亟需解决的问题. 又如高层建筑通常有办公、餐厅、商场等多个功能区域, 其空间内人员密集, 一旦出现突发事件人员疏散面临很大挑战. 再如煤矿地下巷道往往错综复杂、危险源多, 突发情况下及时疏散是保障井下工作人员安全的有效手段.

当前的应急疏散管理主要以制定文本式应急预案、举行突发事件演习和课堂式培训为主. 由于文本式应急预案可操作性差、突发事件演习难以再现真实场景、课堂式培训参与性不强等原因, 当前应急疏散管理方式难以保证地铁、建筑和煤矿等复杂空间在应急情况下人员快速疏散, 导致人员伤亡的恶性事件时有发生. 如 2010 年 11 月 15 日上海一栋正在做保温层施工的 28 层居民楼发生火灾, 包括施工人员和居民在内 58 人遇难, 70 多人受伤, 造成如此惨重伤亡的重要原因就是居民楼物业管理人员应急管理意识薄弱、居民楼应急设施不到位、施工人员和居民缺乏应急疏散常识. 为了避免此类恶性事故的发生, 在日常工作和生活过程中需加强人员应急

收稿日期 2013-03-05 录用日期 2013-08-13
Manuscript received March 5, 2013; accepted August 13, 2013
国家高技术研究发展计划 (863 计划) (2012AA041701), 国家自然科学基金 (61304196, 61322307, 61233001), 中央高校基本科研业务费专项资金 (2013JBZ007, 2013JBM003) 资助
Supported by National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (2012AA041701), National Natural Science Foundation of China (61304196, 61322307, 61233001), and the Fundamental Research Funds for the Central Universities (2013JBZ007, 2013JBM003)

本文责任编辑 王飞跃
Recommended by Associate Editor WANG Fei-Yue
1. 北京交通大学电子信息工程学院 北京 100044 2. 北京交通大学轨道交通控制与安全国家重点实验室 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
1. School of Electronic and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044 2. State Key Laboratory of Rail Traffic Control and Safety, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044 3. State Key Laboratory of Management and Control for Complex Systems, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190

疏散意识、做好应急演练,在突发事件时,应急管理部门应根据突发情况及时制定疏散策略引导人员疏散。

为了解决当前应急疏散管理存在的问题,需要研究应急疏散新技术和新方法。目前国内外学者在该领域的研究主要集中在人员行为建模、疏散路径优化、疏散传感器网络、出入口设计评估和疏散引导与指示等方面^[1-5]。人员行为建模的方法包括代理^[1]、元胞自动机^[2]和社会力模型^[3]等。疏散路径优化方法包括基于 3D 模型的路径搜索方法^[4]、引入疏散领导者的优化方法^[1]和动态疏散路径指示的优化方法^[4]。

以上应急疏散研究侧重于单个模型或算法,缺乏系统性的理论支撑,难以形成可视化、交互式 and 开放式的应急疏散系统。2004 年国内学者针对复杂系统控制与管理问题提出了平行系统理论 (ACP)^[6],并基于该理论构建了平行应急管理体系的体系框架^[7-9]。2011 年进一步提出了轨道交通平行控制和管理体系框架^[10-11],发展了轨道交通平行应急管理体系^[12],并开展应急疏散等方面计算实验研究。平行系统由人工系统 (Artificial systems)、计算实验 (Computational experiment) 和平行执行 (Parallel execution) 三部分组成。人工系统是包含人、设备和环境等工程性和社会性要素的实际系统模型。在人工系统上可进行大量的重复性实验,包括实际系统不可能、不允许进行的计算实验,通过计算实验可发现突发事件演化规律,检验人员疏散和应急处置方法。发生实际突发事件时人工系统与人工系统平行执行^[13],实际系统为人工系统提供实际灾情和人员疏散信息,人工系统通过计算实验“加速”检验应急处置手段,为实际系统提供优化应急方案。平行应急管理系统已在道路交通、轨道交通、乙烯等行业得到了应用^[12, 14]。

为了解决地铁、建筑和煤矿等典型复杂空间应急疏散问题,本文提出了基于 ACP 方法的平行应急管理系统框架,并以地铁为例,初步构建了地铁枢纽平行应急疏散系统,并在该系统中进行了乘客疏散计算实验。

1 平行应急疏散系统

为了实现人员培训、应急疏散演练、应急方案优化和评估等功能,设计了基于 ACP 方法的平行应急疏散系统 (如图 1 所示),该系统包括人工系统、计算实验和平行执行三个层次。人工系统包括疏散空间的人员、设施和环境等要素,是具有工程复杂性和社会复杂性的实际系统的虚拟再现。应急疏散计算实验平台包括计算实验设计、实验计算和计算实验分析与评估三部分,是应急疏散方案、引导与指示

策略验证的平台,该平台可集成人员行为仿真、火灾演化等专业仿真工具 (如 Simwalk、Anylogic、FDS 等),为用户提供交互式、可三维展示的计算实验平台。平行执行是平行应急疏散系统功能的升华,为实际应急疏散方案提供滚动优化方案。

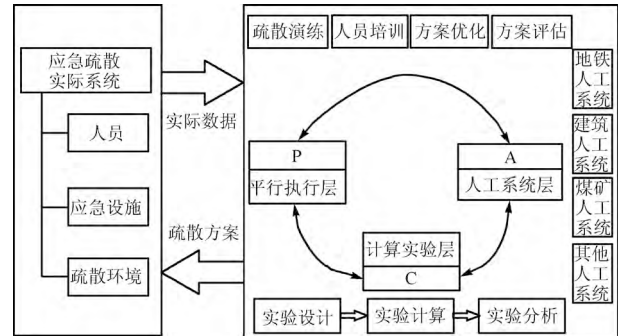


图 1 平行应急疏散系统框架结构

Fig. 1 Framework of parallel system for emergency evacuation system

地铁、建筑和煤矿等人员活动空间的应急管理。人员的应急处置能力直接影响应急疏散结果,因此,平行应急疏散系统为应急管理人员提供了虚拟培训的平台,使得应急管理人员可以参与整个应急疏散过程。通过这种参与式虚拟培训可以增强应急管理人员的应急处置能力和心理素质,提高地铁、建筑和煤矿等空间应急疏散效率。

平行应急疏散系统根据应急疏散方案配置应急疏散场景,通过大量重复性、互动性的计算实验实现应急疏散虚拟演练的目的。由于有些突发场景实际演练成本高、道德不允许或影响正常服务等 (如演练需大量乘客参与、导致人员伤亡或地铁服务中断等),所以在实际应急疏散演习时无法实现,而虚拟应急疏散演练具有成本低、无道德风险和不影响正常运行特点,因此,虚拟应急演练将成为应急演习的重要组成部分。

当发生突发事件后,实际系统与人工系统不断交互信息、协同演化,实际系统向人工系统提供地铁、建筑物或矿井内的人员分布和灾情等信息,而人工系统通过方案预演向实际系统提供优化疏散方案,实现人工系统与人工系统的平行执行,实现应急疏散方案的滚动优化。当突发事件处置完成后,平行应急管理系统可对实际应急疏散方案进行评估,为应急方案的制定、演练和人员培训提供决策支持。

2 应急疏散人工系统

应急疏散人工系统是实现平行应急疏散系统的基础,人工系统不仅包括疏散环境和应急措施等要素,还包括空间内的人员 (如图 2 所示)。本文将介绍地铁为例介绍地铁枢纽站应急疏散人工系统的组成

与构建方法.

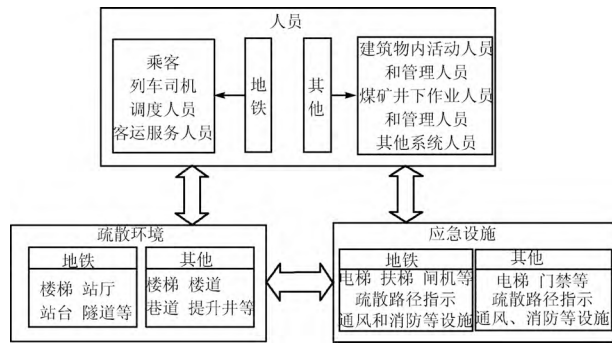


图2 应急疏散人工系统

Fig. 2 Artificial system of emergency evacuation system

1) 人员分类与建模

a) 人员分类

地铁内的人员分为两类,一类是乘客,另一类是地铁的服务和管理人员。

乘客模型的属性包括乘客男女比例、携带行李、出行目的等属性,这些属性直接决定乘客的行为方式(行走速度、行走路径等)。

地铁服务与管理人员包括列车司机、调度人员和客运服务人员等(如表1所示)。在发生突发事件时,地铁服务和管理人员将把工作从正常的乘客组织和服务转变为乘客疏散引导和指挥、应急事件的处置和救援。为了适应复杂地下空间快速疏散的要求,可设置若干个疏散引导员。当发生突发事件时,疏散引导员可以在统一指挥下引导乘客疏散,防止乘客选错疏散路径,减少乘客疏散时间。

表1 地铁服务和管理人员代理属性

Table 1 Configuration of service and management personnel agents of subway transfer station

类型	任务名称	说明
指挥	突发事件等级确定	根据突发事件对地铁运营及乘客的影响程度确定
	突发事件上报	上报等级和内容
人员	疏散方案制定	疏散引导方案、通风方案等
	指挥命令下达	指挥现场服务和管理人员
现场	电扶梯操作	封闭、运行或停止
	PSD (屏蔽门)	开或关
服务	FAS (火灾报警系统)	消防处置
	PIS (乘客信息系统)	广播、显示屏疏散引导
管理	疏散引导员	引导乘客疏散
	AFC (自动售检票系统)	停止售票,闸机开放
人员	排烟与送风	实施排烟和送风方案

注:屏蔽门(Platform screen doors, PSD);

火灾报警系统(Fire alarm system, FAS);

乘客信息系统(Passenger information system, PIS);

自动售检票系统(Automatic fare collection, AFC)。

b) 人员模型

地铁中的乘客可采用微观行为模型或代理进行建模,平行应急疏散系统中的乘客模型侧重描述乘客在突发事件情况下的恐慌、盲从等心理特征及其行为方式,使得乘客在突发场景的行为与真实场景的行为具有整体一致性。

乘客微观行为模型可采用元胞自动机^[2]、社会力模型^[3]、格子气、磁场力等模型,其中社会力模型和元胞自动机模型在应急疏散中应用较多。由于元胞自动机模型需要在疏散空间内划分网格,而在不规则的地铁车站划分网格需要较大工作量,因此,本文重点介绍社会力模型。

$$m_i \frac{dv_i}{dt} = f_{mot} + \sum_{j(i \neq j)} f_{ij} + \sum_W f_{iW} \quad (1)$$

其中, m_i 、 v_i 分别为第 i 个人的质量和速度。在社会力模型中,人受到三种力的作用:目标驱动力 f_{mot} 、乘客 i 和 j ($i \neq j$) 之间的作用力 f_{ij} 、人与墙(或障碍物)之间的作用力 f_{iW} ,其中,目标驱动力为人运动到目的地的自身驱动力,疏散动态指示将影响乘客目标驱动力的方向。人与人之间的作用力体现在人与人之间的心理和实际作用力,疏散引导员的引导作用可以定义特殊的人员,疏散引导员对乘客 i 的作用力大于其他乘客 j ($i \neq j$) 对其的作用力。

地铁服务和管理人员可采用代理模型建模,不同类型的服务和管理人员的代理模型是不同的。代理模型主要描述地铁服务和管理人员在正常运营和突发事件情况下的指挥与调度、设备操作、应急处置等行为特征。地铁服务和管理人员的行为会直接或间接影响乘客疏散效果和乘客伤亡情况。

2) 服务与应急设施

疏散相关的应急设施包括疏散路径指示、应急照明、通风和消防等,其中平行应急系统中的疏散路径指示牌的指示方向由控制中心控制,为疏散人工系统与实际系统平行执行提供了基础手段。地铁枢纽站服务和应急设施属性如表2所示。而地铁内常规的乘客信息系统、广播(Passenger announcement, PA)、闸机、电梯和扶梯、隔离栏等服务设施需要在已有人工系统模型基础上增加应急疏散所需的属性,例如闸机增加“常开”属性,使得乘客可以无障碍地通过闸机进行疏散。列车在某些突发事件情景下也可以作为乘客疏散的手段,使得事故车站乘客迅速离开车站。

应急设施采用代理建模方法,其状态或属性将影响人员行为,如疏散指示牌、PIS和广播等代理状态或属性影响乘客疏散方向,而闸机、电梯和扶梯、隔离栏的状态直接影响乘客疏散路径。地铁车站应急设施状态可根据计算实验或平行执行的要求进行

动态调整.

表 2 地铁枢纽站人工系统代理模型属性
Table 2 Agent configuration of artificial system of subway transfer station

类型	名称	典型属性
车站 疏散 环境	出口	开放或关闭
	应急出口	开放或关闭
	换乘通道	开放或关闭
	柱子	空间位置
	墙	空间位置
	楼梯	空间位置
设备和 设施	疏散指示	指示疏散方向
	电扶梯	运行或关闭
	PSD	开或关
	FAS	灾情分布
	PIS	动态引导信息
	站台应急按钮	触发状态

3) 疏散环境

地铁里的隧道、进出站通道、站台、站厅和换乘通道等空间结构在发生突发事件时可作为乘客疏散通道. 乘客的疏散速度和方向受到疏散环境的影响, 地铁车站通道、出入口等地点往往是乘客疏散的瓶颈区, 将影响客流的疏散能力.

表 2 列出了地铁枢纽站人工系统中的环境和设施属性设置, 地铁枢纽中的人员、设施和环境相互影响, 如站内出入口、换乘通道是否允许通行, 其空间的烟气浓度和温度场分布对乘客疏散有直接影响.

地铁枢纽人工系统的构建流程如图 3 所示, 其中车站结构是根据车站 CAD 图纸按比例构建的, 站内乘客行走路径和流量是根据调研数据设置的, 列车到站间隔是根据列车时刻表确定的. 本文根据地铁枢纽站基础数据构建了枢纽站应急疏散人工系统.

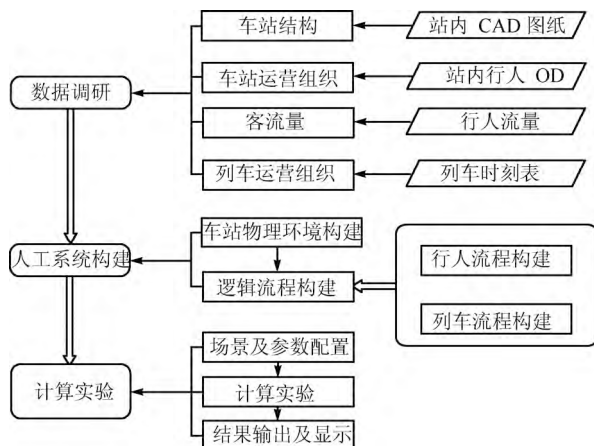


图 3 地铁枢纽站应急疏散计算实验流程

Fig. 3 Flowchart of computational experiments of emergency evacuation for subway transfer station

3 应急疏散计算实验

基于地铁应急疏散人工系统可实现应急疏散计算实验. 平行应急疏散系统的计算实验平台结构如图 4 所示, 该平台包括计算实验设计、计算实验分析、实验平台、数据支持中心和疏散方案生成等部分. 计算实验设计包括应急疏散场景配置、参数标定、参数灵敏度分析等功能, 可设计应急疏散过程“加速”、“压力”、“极限”、“失效”和“突变”等计算实验方案. 计算实验结果分析包括应急疏散数据挖掘、知识发现、应急处置手段评估、学习培训评分和疏散方案评估等功能. 计算实验平台是计算实验各功能模块的核心, 包括模型代理同步器、计算过程 3D 显示渲染工具、时间处理器和分布式计算等功能. 数据支持中心为计算实验提供数据支持, 包括地铁或其他空间内的疏散通道分布图、应急资源、疏散预案库等数据资源. 疏散方案生成模块主要用于需要输出疏散方案的计算实验中, 需要输出的内容包括疏散路径规划方案、人员引导、指示与指挥方案, 最终的疏散方案可历史存储并发布执行.

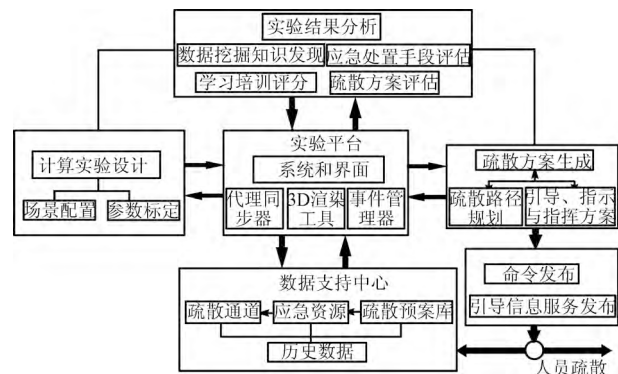


图 4 应急疏散计算实验平台结构

Fig. 4 Framework of computational experiments platform for emergency evacuation

1) 计算实验设计

应急疏散人工系统对应于传统控制方法中的模型, 计算实验则对应传统控制理论中的控制器设计和优化. 由于复杂空间环境的疏散系统不存在“一劳永逸”的解决方案, 只能通过计算实验来认识实际疏散系统各要素间的关系.

应急疏散场景和参数是计算实验的基础, 因此, 需要首先在应急疏散人工系统基础上设计火灾、爆炸、列车故障等应急疏散场景, 并依据实际数据对人员分布、灾情等级和范围等计算实验参数进行标定, 使得计算实验更符合实际疏散过程. 设计可重复的、可视化的应急疏散计算实验, 通过时间“加速”实现对疏散过程的预测, 通过“压力”或“极限”测试检验通道和出入口等瓶颈区的最大承受压力或极限.

2) 计算实验分析与评估

基于计算实验产生大量的数据,通过数据挖掘和知识发现找出人员疏散与突发事件交互和动态演化的规律,利用涌现方法进行观测总结,了解、分析和理解地铁或其他空间内群体行为及各种因素的影响作用。

计算实验平台可以对应急疏散方案及应急处置手段进行评估。评估的方法主要有目标驱动和事件驱动两种计算实验评估方法,具体可采用专家经验评估方法、定性评估方法、模糊评估方法、定性定量综合评估等方法。评估的具体内容包括应急疏散动态指示引导效果、引导员发挥的作用等,为应急疏散方案和处置手段的优化提供反馈信息。

4 应急疏散平行执行

当发生突发事件需要进行人员疏散时,实际系统和人工系统同时运行,实际系统给人工系统提供实际数据,人工系统把计算实验得到的优化疏散方案提供给实际系统决策使用。图 5 中的应急疏散实际系统通过应急疏散指示、引导与调度实现控制,通过视频监控、烟雾传感器、温度传感器和现场人员上报的疏散信息反馈调整疏散策略,实际系统把获得的数据和疏散方案信息提供给人工系统。人工系统通过改变疏散路径指示方案、疏散引导员引导策略、通风排烟等措施设计疏散方案的计算实验,实现疏散方案的预演,验证疏散方案实施效果,最终选择优化的一个或多个方案提供给实际系统,供实际系统决策使用。

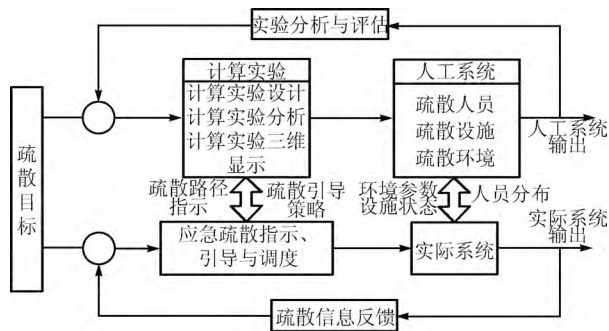


图 5 应急疏散平行执行

Fig. 5 Parallel execution for emergency evacuation

应急疏散平行执行的一个首要条件是人员分布和灾情的初始及动态信息。当地铁内发生突发事件后,根据自动售检票系统数据和视频监控信息可以实时获取当前各车站乘客分布情况,并根据烟雾传感器、温度传感器和视频监控信息实时了解灾情的等级和范围等信息。

突发事件情况下人员疏散及灾情演化过程(如烟扩散等)也可以利用现有的专业仿真软件实现,应急疏散计算实验平台把现有专业仿真软件作为系

统的一个计算模块,使得平行应急疏散系统成为一个开放的系统。

5 实例分析

基于平行应急疏散系统框架建立了北京地铁某枢纽站人工系统,人工系统基础信息如表 3 所示。

表 3 地铁枢纽站人工系统基础信息

Table 3 Basic information of artificial system for subway transfer station

参数	2 号线	4 号线
站台水平长度 (m)	46.857	204.816
楼梯总长度 (m)	30.239	46.914
其他水平长度 (m)	26.4745	0
总高度 (m)	15.1195	23.457
总水平距离 (m)	103.5705	251.73
楼梯口总宽度 (m)	30.052	19.955
楼梯最大通行能力 (人/分钟)	1 882	1 249
检票口最大通行能力 (人/分钟)	300	300
出入口最大通行能力 (人/分钟)	1 795	1 198

在地铁枢纽人工系统基础上构建了地铁枢纽站应急疏散计算实验平台,该平台具有开放性和互动性的特点,可预先存储突发事件情景库,使用者也可以根据实际的需求构建突发场景,并将其加入突发事件情景库中。为了实现地铁枢纽站应急疏散计算实验,构建了 2 个突发事件场景进行计算实验。第一个场景假设地铁枢纽站台发生爆炸,此时,所有通道都可以作为安全疏散通道。

目前地铁普遍使用静态应急疏散指示标识,而平行应急疏散管理系统支持应急疏散动态指示标识,可以引导乘客按照优化疏散方案快速疏散。为了对比平行应急疏散系统使用前后效果,第二个场景假设南侧站厅发生火灾,此时,站内乘客不能从南侧出口疏散,在此场景基础上进行了平行应急疏散系统使用前(疏散标识静态指示)和使用后(疏散标识动态指示)的对比实验。

5.1 站台突发事件情景下的应急疏散计算实验

地铁站台乘客比较密集,当站台遭受到恐怖袭击等突发事件时,乘客疏散是最紧要的事情。首先,构建了恐怖袭击的场景(图 6 所示),其中,爆炸开始时间可以在计算实验过程中进行控制,爆炸后乘客根据应急疏散预案进行疏散,设定此时所有通道和出口为安全的,因此,乘客可以就近选择疏散路径。

表 4 给出了疏散时间和疏散人数等统计结果。

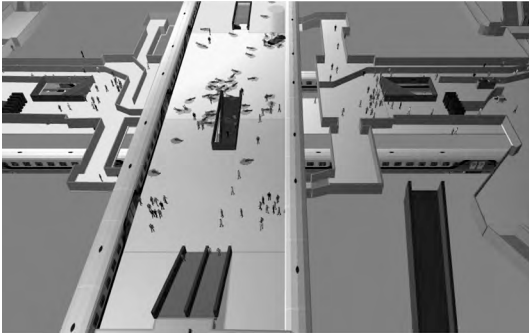


图 6 地铁站台发生突发事件时应急疏散计算实验
Fig. 6 Computational experiments of emergency evacuation in case of subway platform emergency

表 4 地铁枢纽站应急疏散结果
Table 4 Experimental results of emergency evacuation for subway transfer station

参数名称	数值 (时间)
疏散开始时间	15:50:40
疏散结束时间	15:57:15
疏散时间	6 分 35 秒
疏散乘客数	313

5.2 站厅突发事件情景下的应急疏散计算实验

传统的疏散路径指示系统是静态的, 无法根据实际应急疏散方案进行改变, 正常情况下的安全通道或出口在某些突发场景下可能就不再安全, 所以实际地铁枢纽站可采用动态路径指示系统, 以便实现疏散方案优化及平行执行. 假设 4 号线南站厅发生火灾时, 基于北京某枢纽站人工系统进行了静态和动态指示应急疏散对比实验.

当采用疏散路径指示系统设定为静态指示时, 该枢纽站疏散指示方向不发生变化. 当采用疏散路径指示系统设定为动态指示时, 人工系统中的疏散指示方向可根据实际疏散要求进行改变, 图 7 中黑色指示箭头代表该指示牌已经从默认指示方向变化为当前方向, 而灰色指示箭头表示该疏散路径指示牌采用了默认指示方向.

由图 8 和图 9 可以看出, 南侧站厅发生火灾的情况下, 临近南侧站厅的疏散指示方向仍指向危险的出口方向. 部分站内乘客仍然会朝着南侧站厅出口疏散, 到南侧站厅看到火灾后才选择其他安全路径疏散. 由该计算实验可以看出, 静态疏散路径指示系统会导致疏散时间延长, 甚至会增加乘客伤亡数量.

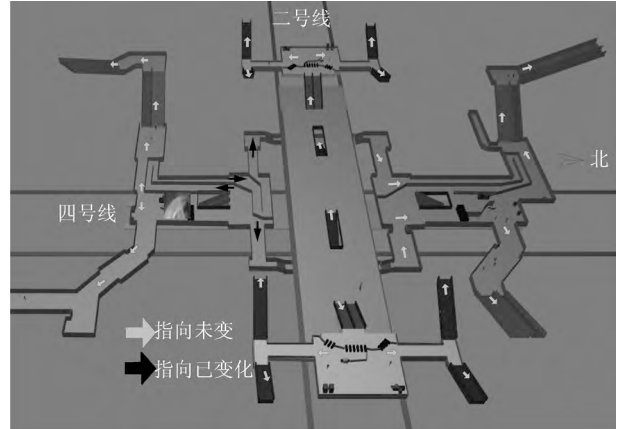


图 7 地铁枢纽站动态疏散路径指示示意图
Fig. 7 Dynamic indication of evacuation route for subway transfer station

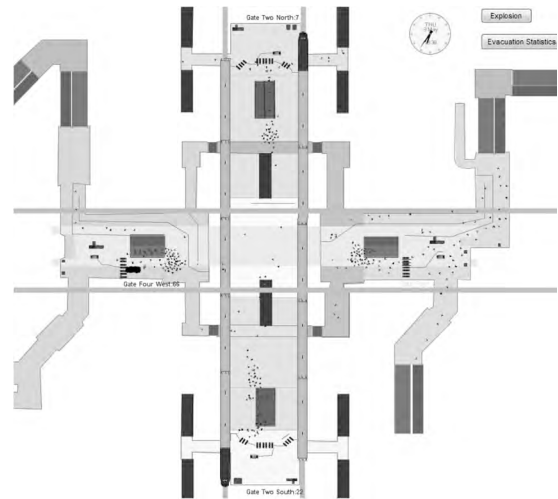


图 8 地铁站厅发生突发事件时应急疏散计算实验 (静态指示)

Fig. 8 Top view of evacuation computational experiments in case of subway platform hall emergency (static indication)

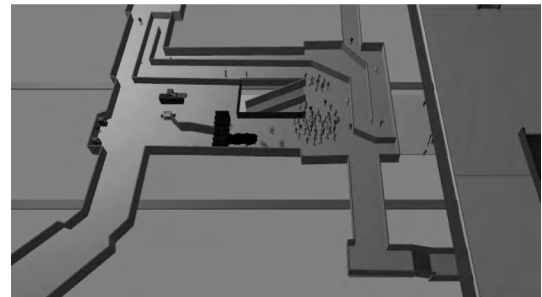


图 9 地铁枢纽站应急疏散计算实验 (静态指示)

Fig. 9 Local view of evacuation computational experiments in case of subway platform hall emergency (static indication)

从图 10 和 11 可以看出, 由于采用了动态疏散

指示系统, 南侧站厅发生火灾后, 南侧站厅附近的指示方向发生变化, 引导乘客从其他路径疏散, 从而提高了疏散效率. 表 5 给出了静态指示和动态指示的对比疏散结果, 结果表明动态指示情况下疏散效率较高.

表 5 地铁枢纽站应急疏散结果

Table 5 Experimental results of emergency evacuation for subway transfer station

参数名称	静态指示	动态指示
疏散开始时间	15:31:03	15:38:22
疏散结束时间	15:39:43	15:42:56
疏散时间	8 分 40 秒	4 分 34 秒
疏散乘客数 (人)	370	320

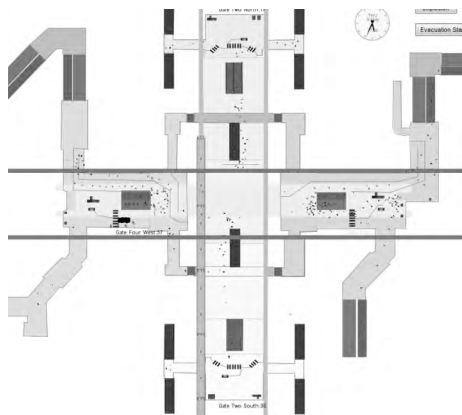


图 10 地铁站厅发生突发事件时应急疏散计算实验 (动态指示)

Fig. 10 Top view of evacuation computational experiments in case of subway platform hall emergency (dynamic indication)

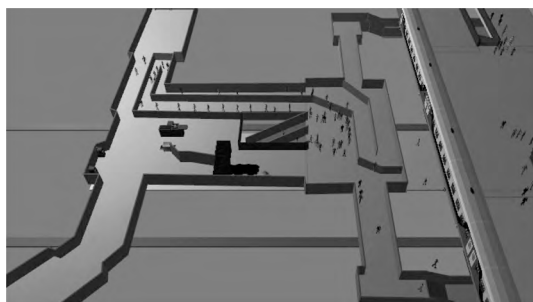


图 11 地铁站厅发生突发事件时应急疏散计算实验 (动态标识)

Fig. 11 Local view of evacuation computational experiments in case of subway platform hall emergency (dynamic indication)

以上典型场景的疏散方案可以供实际地铁应急疏散参考使用, 当人工系统和实际系统连接后, 地铁

枢纽站实际系统为人工系统提供列车、乘客、FAS 报警等实际信息, 而人工系统计算得到的疏散方案 (包括疏散路径指示方案) 可直接供实际系统使用, 从而实现了地铁枢纽站应急疏散的平行执行.

6 结论

本文初步构建了地铁枢纽平行应急疏散系统, 通过地铁枢纽两个典型场景的应急疏散计算实验, 说明了地铁枢纽平行应急疏散系统的可行性. 区别于传统应急疏散系统, 基于 ACP 方法所构建的地铁枢纽应急疏散系统是一个开放的、交互式平台, 在该平台上可以对各类疏散方案进行计算实验, 并且可以实现人工系统与实际系统的平行执行, 指导或控制实际应急疏散过程, 本文中提到的动态疏散路径指示系统就是平行执行的一个有效手段. 平行应急疏散系统可实现应急方案应急疏散培训、应急疏散方案演练与评估等工作. 本文基于平行应急管理体系框架提出平行应急疏散系统框架, 该框架不仅适用于地铁, 还适用于建筑物和煤矿等复杂空间环境的人员应急疏散. 该系统基于获取疏散空间的人员、设施和环境信息, 采用动态路径指示等手段作为平行执行手段, 为实际应急疏散系统提供优化疏散方案. 该系统为提高人员应急管理能力提供交互式 and 可视化的应用平台. 基于以上研究, 作者将进一步研究乘客在恐慌情况下的行为特征, 以及引导乘客快速疏散的手段, 进一步完善地铁枢纽平行疏散系统.

References

- 1 Pelechano N, Badler N I. Modeling crowd and trained leader behavior during building evacuation. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 2006, **26**(6): 80–86
- 2 Alizadeh R. A dynamic cellular automaton model for evacuation process with obstacles. *Safety Science*, 2011, **49**(2): 315–323
- 3 Helbing D, Farkas I, Vicsek T. Simulation dynamical features of escape panic. *Nature*, 2002, **407**(6803): 487–490
- 4 Pu S, Zlatanova S. Evacuation route calculation of inner buildings. *Geo-Information for Disaster Management*. Heidelberg: Springer-Verlag, 2005. 1143–1161
- 5 Gwynne S, Galea E R, Owen M, Lawrence P J, Filippidis L. A review of the methodologies used in the computer simulation of evacuation from the built environment. *Building and Environment*, 1999, **34**(6): 741–749
- 6 Wang Fei-Yue. Parallel system methods for management and control of complex systems. *Control and Decision*, 2004, **19**(5): 485–489
(王飞跃. 平行系统方法与复杂系统的管理和控制. *控制与决策*, 2004, **19**(5): 485–489)
- 7 Wang Fei-Yue. Research on framework of parallel emergency management system and application. *China Emergency Management*, 2007, **1**(12): 22–28

(王飞跃. 平行应急管理系统 PeMS 的体系框架及其应用研究. 中国应急管理, 2007, 1(12): 22–28)

- 8 Wang Fei-Yue, Qiu Xiao-Gang, Zeng Da-Jun, Cao Zhi-Dong, Fan Zong-Chen. A computational experimental platform for emergency response based on parallel systems. *Complex Systems and Complexity Science*, 2010, 7(4): 1–10
(王飞跃, 邱晓刚, 曾大军, 曹志东, 樊宗臣. 基于平行系统的非常规突发事件计算实验平台研究. 复杂系统与复杂性科学, 2010, 7(4): 1–10)
- 9 Li Ben-Xian, Li Meng-Jun. The simulation of fear diffusion based on parallel system under the paroxysmal terrorism incident circumstance. *Acta Automatica Sinica*, 2012, 38(8): 1321–1328
(李本先, 李孟军. 基于平行系统的恐怖突发事件下恐惧传播的仿真研究. 自动化学报, 2012, 38(8): 1321–1328)
- 10 Ning B, Dong H R, Wen D, Li L F, Cheng C J. ACP-based control and management of urban rail transportation systems. *IEEE Intelligent Systems*, 2011, 26(2): 84–88
- 11 Ning B, Tang T, Dong H R, Wen D. An introduction to parallel control and management for high-speed railway systems. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2011, 12(4): 1473–1483
- 12 Dong H R, Ning B, Qin G Y, Lv Y S, Li L F. Urban rail emergency response using pedestrian dynamics. *IEEE Intelligent Systems*, 2012, 27(1): 52–55
- 13 Lun Shu-Xian. Research on the classification of parallel execution mode of ACP theory. *Acta Automatica Sinica*, 2012, 38(10): 1602–1608
(伦淑娴. ACP 理论的平行执行方式分类研究. 自动化学报, 2012, 38(10): 1602–1608)
- 14 Li L F, Zhang H, Wang X F, Lu W, Mu Z P. Urban transit coordination using an artificial transportation system. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2011, 12(2): 374–383



孙绪彬 北京交通大学电子信息工程学院讲师. 2007 年获得中国科学院自动化研究所工学博士学位. 主要研究方向为轨道交通建模与优化, 应急管理, 列车运行图优化. E-mail: xbsun@bjtu.edu.cn
(**SUN Xu-Bin** Lecturer at the School of Electronic and Information Engineering, Beijing Jiaotong University. He received his Ph.D. degree from the Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences in 2007. His research interest covers modeling and optimization of railway, emergency management, and train timetable optimization.)



董海荣 北京交通大学轨道交通控制与安全国家重点实验室教授. 2002 年获得北京大学理学博士学位. 主要研究方向为轨道交通平行控制与管理, 人因分析, 列车运行优化. 本文通信作者.
E-mail: hrdong@bjtu.edu.cn
(**DONG Hai-Rong** Professor at the State Key Laboratory of Rail Traffic Control and Safety, Beijing Jiaotong University. She received her Ph.D. degree from Peking University in 2002. Her research interest covers parallel control and management for rail traffic, human factor analysis, and train optimal control. Corresponding author of this paper.)



宁滨 北京交通大学轨道交通控制与安全国家重点实验室教授. 主要研究方向为轨道交通平行控制与管理, 列车运行控制系统.
E-mail: bning@bjtu.edu.cn
(**NING Bin** Professor at the State Key Laboratory of Rail Traffic Control and Safety, Beijing Jiaotong University. His research interest covers train control system, parallel control, and management for rail traffic.)



高童欣 北京交通大学轨道交通控制与安全国家重点实验室硕士研究生. 主要研究方向为地铁平行系统计算实验, 地铁枢纽应急疏散.
E-mail: 11120259@bjtu.edu.cn
(**GAO Tong-Xin** Master student at the State Key Laboratory of Rail Traffic Control and Safety, Beijing Jiaotong University. Her research interest covers computational experiments for subway parallel system and subway emergency evacuation.)



孔庆杰 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助理研究员. 2010 年获得上海交通大学工学博士学位. 主要研究方向为智能交通系统和计算机视觉.
E-mail: kongqingjie@casc.ac.cn
(**KONG Qing-Jie** Assistant professor at the Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences. He received his Ph.D. degree from Shanghai Jiao Tong University in 2010. His research interest covers intelligent transportation systems and computer vision.)