

平行应急疏散系统: 基本概念、体系框架及其应用

周敏¹ 董海荣¹ 徐惠春² 李浥东³ 王飞跃⁴

摘要 突发事件通常具有难以预测、多成因关联、危害性大及演变复杂等特点, 应急情况下如何安全高效疏散人员是应急管控领域的重要研究内容. 本文将基于人工系统 (Artificial systems, A)、计算实验 (Computational experiments, C)、平行执行 (Parallel execution, P) 方法的平行系统理论引入到应急管控领域, 提出平行应急疏散系统 (Parallel emergency evacuation systems, PeES) 基本概念, 构建系统体系框架及集成平台, 并介绍人工应急疏散系统、计算实验、平行执行等主要功能模块的基本功能及实现方法. 通过 PeES 能实现虚实应急疏散系统的管理与控制、应急方案的实验与评估以及相关人员的学习与培训. 最后, 以轨道交通枢纽站火灾场景下的乘客应急疏散为典型应用对平行应急疏散系统进行初步验证.

关键词 应急管控, 平行应急疏散系统, ACP 方法, 社会物理信息系统, 人群疏散

引用格式 周敏, 董海荣, 徐惠春, 李浥东, 王飞跃. 平行应急疏散系统: 基本概念、体系框架及其应用. 自动化学报, 2019, 45(6): 1074–1086

DOI 10.16383/j.aas.c180558

Parallel Emergency Evacuation Systems: Basic Concept, Framework and Applications

ZHOU Min¹ DONG Hai-Rong¹ XU Hui-Chun² LI Yi-Dong³ WANG Fei-Yue⁴

Abstract Emergencies are usually characterized by unpredictable, multi-cause interconnection, great perniciousness, and complicated evolution. How to evacuate personnel safely and efficiently in case of an emergency is an important research content in the field of emergency management and control. This paper proposes the basic concept, framework and integrated platform of parallel emergency evacuation systems (PeES) by introducing the ACP (Artificial systems, Computational experiments, Parallel execution) method based parallel system theory to the field of emergency management and control. The basic functions and implementation methods of main functional modules, including artificial emergency evacuation systems, computational experiments, and parallel execution, are presented. The management and control of artificial and actual systems, experiment and assessment of emergency plans, and study and training of related personnel can be realized through the PeES. Finally, a preliminary verification of the PeES is conducted using the emergency evacuation of passengers in a fire scene at a rail transportation hub station.

Key words Emergency management and control, parallel emergency evacuation systems, ACP method, cyber-physical-social systems, crowd evacuation

Citation Zhou Min, Dong Hai-Rong, Xu Hui-Chun, Li Yi-Dong, Wang Fei-Yue. Parallel emergency evacuation systems: basic concept, framework and applications. *Acta Automatica Sinica*, 2019, 45(6): 1074–1086

收稿日期 2018-08-25 录用日期 2018-12-21
Manuscript received August 25, 2018; accepted December 21, 2018

中央高校基本科研业务费 (2018JBZ002, 2019JBM079) 和博士后创新人才支持计划 (BX20190029) 资助
Supported by Fundamental Research Funds for Central Universities (2018JBZ002, 2019JBM079) and Postdoctoral Innovative Talent Project (BX20190029)

本文责任编辑 张俊
Recommended by Associate Editor ZHANG Jun

1. 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
2. 中国铁路北京局集团有限公司 北京 100860 3. 北京交通大学计算机与信息技术学院 北京 100044 4. 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. State Key Laboratory of Rail Traffic Control and Safety, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044 2. China Railway Beijing Group Co. Ltd., Beijing 100860 3. School of Computer and Information Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044 4. The State Key Laboratory of Management and Control of Complex Systems, Institute for Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190

根据中国应急服务网发布的统计数据, 我国突发事件发生频率居高不下, 全国平均每天发现预警类信息和突发事件信息近千条, 相关事件造成伤亡达数百人. 地震、火灾、爆炸等重大突发事件也时有发生, 如 2008 年 5·12 汶川大地震、2013 年 6·3 吉林德惠禽业公司火灾事故、2015 年 8·12 天津滨海新区爆炸事故等, 这类事件往往具有不可预测、危害性大、成因多元且相互关联、影响深远及演变复杂等内在特点, 如果相应的应急管理得不到及时高效地实施, 可能会造成严重的负面社会影响, 带来极大的生命和财产损失, 甚至危及国家安全. 2018 年 3 月, 中共中央印发了《深化党和国家机构改革方案》, 组建应急管理部, 以提高国家应急管理能力和水平, 提高防灾减灾救灾能力, 确保人民群众生命财产安全和社会稳定为首要任务, 进一步凸显了实现科学高

效应急管理的迫切性和重要性. 显然, 如何深入洞悉突发事件的演化规律及内在机理对预测预警和防灾减灾具有至关重要的理论和现实意义.

当前国内外在突发事件的成因、扩散、演化、评估、预案等方面开展了一些研究^[1-4]. 从应急管理的角度出发, 针对应急事务日常管理、应急机构和设施优化选址、应急事故风险评估等传统应急管理问题, 建成了一些与应急管理相关的系统^[5-6], 取得了一定的进展. 应急疏散作为突发事件应急管理中的关键一环, 应急疏散策略制定、方案实施、人员培训、应急演练等都是极具挑战的问题. 突发事件下的应急疏散系统具有不定性、多样性和复杂性的特征, 是一个典型的人在环的开放复杂巨系统. 如何对这类复杂的应急管理系统进行建模、分析和控制, 是管理者和研究人员持续广泛关注的问题.

以往从仿真建模的角度出发, 针对火灾、地震、恐怖袭击等典型突发情况下的应急疏散问题开展了大量研究, 通过对突发事件场景、人的行为、交互关系、演化机制等进行简化, 建立了人员的运动模型, 分析了突发事件下人群的动力学行为及疏散特征, 揭示了特定约束下(场景、参数等)个体间交互作用与群体自组织涌现行为的内部关联以及应急疏散演化机理, 为疏散策略的制定提供了理论支持^[7-9]. 虽然这些研究已经解决了应急疏散中的部分问题, 仍然存在较大的局限性, 仿真系统和实际系统关键特征难以满足一致性, 所建立的微观模型难以真实模拟应急情况下人群的运动行为, 且应急方案不具普适性, 难以形成多目标、交互式和开放式的应急疏散系统.

传统的建模与仿真方法, 难以满足突发事件应急演练、应急预案综合评估和突发事件应急管控的内在要求. 采用基于代理的技术构建人工系统以实现模拟仿真实验的方法已成为研究复杂系统问题的重要途径. 2004年, 王飞跃研究员针对复杂系统的建模、控制和管理问题提出了基于ACP方法的平行系统理论^[10-13], 其主要特点表现为两个方面: 一是集感知与学习、分析与建模、优化与控制为一体的ACP方法体系, 二是社会物理信息系统(Cyber-physical-social systems, CPSS). ACP方法是以人工社会(Artificial societies), 计算实验(Computational experiments)和平行执行(Parallel execution)为核心. 该方法以大数据、云计算、物联网、深度学习等技术为支撑, 最终实现从知识的表示、决策的推理到情景的自适应学习和理解的大闭环反馈运行. CPSS则是支撑ACP方法基础设施, 将社会及人的因素纳入系统之中, 使虚实互动、闭环反馈、平行执行成为可能.

近年来平行系统理论已经广泛应用于交通^[14-17]、社会经济^[18]、公共健康^[19]、医疗^[20]、区

块链^[21-23]等方面的研究. 尤其在智能交通领域, 作为平行系统理论的典型应用, 青岛市建立了智能交通平行管控系统, 为缓解城市拥堵问题提供了可能的途径, 初步实现了理论与实际的结合. 2007年, 王飞跃研究员将ACP方法引入了突发事件应急管理领域, 首次建立了平行应急管理系统(Parallel emergency management systems, PeMS)^[24], 随后进一步提出了基于平行系统的非常规突发事件计算实验平台^[25]. 同时, 平行应急管理和控制方法也应用到了地铁站和高层建筑等大型建筑应急疏散, 研究了火灾、爆炸等应急情况下人员的应急疏散问题^[26-27]. 在此基础上, 本文针对突发情况下的应急疏散问题提出了平行应急疏散系统的概念, 构建了系统的体系框架及集成平台, 以轨道交通枢纽站为典型应用初步验证了平行应急疏散系统. 平行应急疏散系统综合利用管理科学、信息科学、心理科学等多个学科的理论和方法, 发展以计算实验为核心的平行应急疏散系统, 以实现降低疏散风险和损失, 提升大规模应急疏散管理能力, 提高应急响应速度, 增强应急指挥人员心理素质和应急决策能力为目标, 为提升突发事件应急疏散能力提供理论和方法支持. 本文的主要贡献如下: 1) 将基于ACP方法的平行系统理论引入到应急管控领域, 提出了平行应急疏散系统的基本概念, 构建了系统体系框架及集成平台; 2) 通过PeES实现了虚实应急疏散系统的管理与控制、应急方案实验与评估以及相关人员的学习与培训; 3) 以城市轨道交通车站火灾场景下的乘客应急疏散为典型应用对平行应急疏散系统进行了初步验证.

本文组织结构如下: 第1节首先介绍平行系统理论和ACP方法, 然后介绍应急及应急疏散相关概念和方法; 第2节探讨了平行应急疏散系统体系框架及平台构架; 第3节以轨道交通枢纽站火灾情况下乘客应急疏散为例实现了平行应急疏散的典型应用; 第4节总结了本文的工作.

1 平行系统与应急疏散

1.1 平行系统理论和ACP方法

平行系统理论是一种解决复杂系统的建模、分析、控制与综合问题的科学研究与实践方法, 该理论是由王飞跃研究员于2004年首次提出. 平行系统的基本框架如图1所示, 其核心是由实际系统与对应的人工系统构成, 主要功能模块包括管理与控制、实验与评估、学习与培训. 通过实际系统与人工系统的虚实平行互动, 结合观察与评估等手段, 实现对复杂系统决策方案的实验与评估, 以及相关人员的学习与培训, 最终实现对实际系统的实时、闭环、反馈的自适应管理与控制.

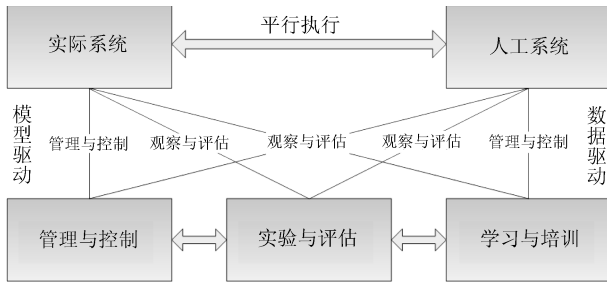


图 1 平行系统基本框架

Fig. 1 The basic framework of parallel system

ACP 方法是运用平行系统理论解决复杂系统问题的核心。ACP 方法是由人工社会 (Artificial societies)、计算实验 (Computational experiments) 与平行执行 (Parallel execution) 构成。采用基于 ACP 方法的平行系统理论解决复杂系统问题的实现过程主要包括三个步骤：通过物理和社会传感器获取实际系统的状态和数据，运用代理、概率图等技术建立与实际系统相对应的一个或多个软件定义的能反应实际系统状态和演化规律的人工系统；根据实际系统需求设计相应的解决方案，并在人工系统中实施计算实验对方案进行分析与评估，掌握实际系统在各种可能场景和解决方案下的演化规律；实际系统与人工系统虚实互动、协同运行和过程演化，预测和评估各自未来的状态，通过反馈的方式调节系统的决策，以平行执行方式实现对复杂系统管理与控制。

1.2 应急疏散的再认识

应急是指应对突然发生的需要紧急处理的事件。根据突发事件的发生过程、性质和机理，国务院发布的《国家突发公共事件总体应急预案》将突发事件分为如图 2 所示的 4 类，即自然灾害、事故灾难、公共卫生事件和社会安全事件。这些事件在强度、持续时间及影响范围上有所不同，但通常都具有突发性、难以预见性以及危害严重等特征。典型的自然灾害包括地震、飓风、洪水、火山爆发等，通常这类突发事件影响的范围广，带来的危害极大。事故灾难由人的生产、生活活动引发的，并且会造成大量的人员伤亡、经济损失或环境污染的意外事件，包括火灾、爆炸、火车碰撞或出轨等。公共卫生事件主要有传染病疫情、群体性不明原因疾病等。社会安全事件通常指影响国家安全的恶性事件，例如恐怖袭击、涉外突发事件等。通常突发事件应对过程包含两个阶段，即突发事件发生之前的监视和预测以及突发事件发生之后的抢救和恢复。应对突发事件的流程如图 3 所示。通过对潜在突发事件进行事先监视、预测和预报，往往能极大减少人民的生命和财产损失。突发事件发生之前的监视和预测工作是一种长期工作，建立突发事件信息系统实现对突发事件的

监视、预测和预警能有效地提高突发事件的应急响应能力。当突发事件发生之后应尽可能快地发现和证明事件已经发生，以便达到及时疏散和救援的目的。第一响应是对于受灾程度评估和损失控制。优先考虑抢救伤员和挽救生命以及组织人员疏散和撤离，然后是抢救财产、抢修通信设施、抢修道路桥梁等基础设施，并从其他地区及资源储备点调集后备救灾人员、物质和装备，妥善安置群众，并排除次生事件等。

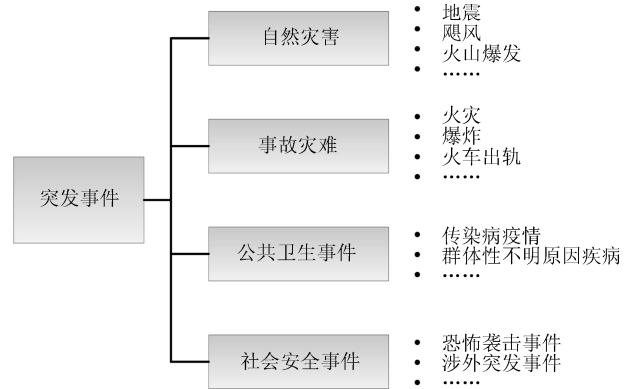


图 2 突发事件分类

Fig. 2 Category of emergency

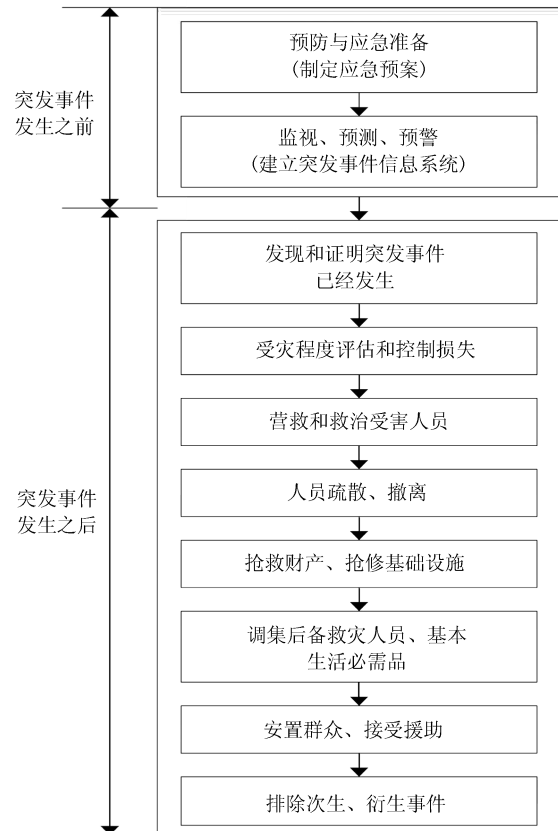


图 3 突发事件应对流程图

Fig. 3 Flow chart of treatment for emergency

突发事件应对过程中, 如何快速有效疏散人群是一个极具挑战的问题, 应急策略的优劣直接决定了人群的疏散效率甚至关系到生命安全, 受到了管理者和研究人员的广泛关注. 传统的凭人类经验和知识的突发事件被动应对方法已经难以满足应急事件演练、应急预案评估和应急疏散管理控制的内在需求. 同时考虑到人们日益追求的安全、高效疏散要求, 迫切需要提出一种新的理论和方法来研究应急情况下人员的疏散问题, 以提升大规模应急疏散管理能力, 提高应急响应速度, 增强应急指挥人员心理素质和应急决策能力, 降低疏散风险和损失. 基于 ACP 方法的平行应急疏散系统为解决上述问题提供了一种可行途径, 能大幅提升突发事件的应对能力, 对降低人员的生命和财产损失有着积极的作用.

2 平行应急疏散系统体系框架和平台

2.1 基于 ACP 方法的应急疏散系统体系框架

为了建立平行应急疏散系统 (Parallel emergency evacuation systems, PeES), 我们提出了如图 4 所示的基于 ACP 方法的系统框架设计思路.

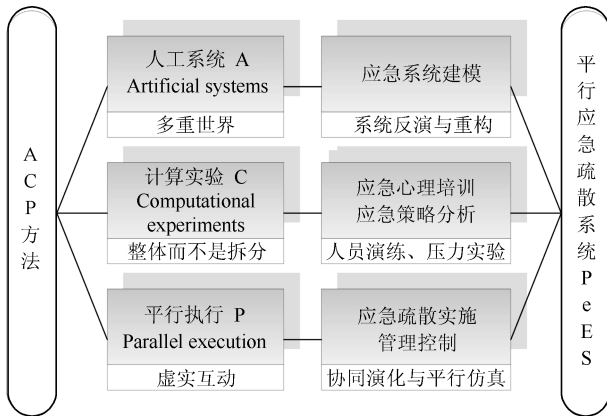


图 4 基于 ACP 方法的平行应急疏散系统框架设计思路

Fig. 4 The design idea of ACP-based parallel emergency evacuation systems

应急事件通常受到众多因素的影响, 事件中涉及的人员、设施、环境等对象数量庞大且相互关联, 无法通过拆分和还原进行分析, 这使得常规的数学方法难以适用于应急事件中众多对象的整体建模, 为此, 我们需要采用情景建模的方式来整体研究应急事件中人群的动态变化特性, 培育逻辑自洽的情景反演与重构. 在云计算环境下, 以高性能计算机为实验室, 基于多重世界的观点建立系统的对象库、规则库、模型库、事件库、知识库、方法库和场景库等, 构建与真实系统相对应的计算机仿真模拟的人工应急疏散系统. 由于应急事件通常具有的罕见性、非规律性及受人为因素的影响极大等特性, 同时涉及到经济、法律、道德等方面的原因, 现实中难以甚

至无法采用重复实验的科学方法来研究这类应急事件. 利用计算机和基于代理的技术来建模现实应急疏散中人员的行为和特征, 构建人工应急疏散系统, 形成以人为中心、以突发事件为对象的应急疏散的计算实验平台, 则突破了以往无法通过重复实验获取应急经验和知识的局限^[24]. 基于此, 我们可以研究和设计相应的计算实验方法 (加速、极限实验等), 在人工系统上进行实现和验证, 对实验过程和结果进行标定、统计、分析和评估, 并应用于应急心理培训和应急策略分析. 最后, 通过实际应急事件的全过程动态监测, 收集事件相关信息, 并将其与人工系统集成, 使人工系统与实际的系统演化处于并行运行状态, 实现两个系统的协同演化和平行仿真, 以达到对应急疏散过程进行高效管控的目的.

2.2 平台及主要功能模块

基于上述系统框架设计思路, 提出了一种如图 5 所示能够集成各种资源, 执行多重任务, 构建不同场景, 处理不同类型的突发事件的平行应急疏散系统平台框架. 该平台框架采用 ACP 思想构建, 包含的主要功能模块有高性能计算环境、数据集成库、模型库、工具库、软件定义的人工系统、计算实验、真实事件的信息采集处理系统、情景展示与交互可视化系统、平行执行器.

高性能计算环境采用云计算、分布式计算和并行计算等方式, 实现对大规模数据的快速处理和存储. 数据模块汇集了构建人工系统所需的历史应急疏散数据、实时现场数据、基础设施、人员和环境数据等. 平台模型模块包含了场景库、知识库和方法库等基本库, 同时也包含了构建人工系统所需要的基础模型, 如人群动力学模型、群集决策行为模型、传播动力学模型、应急事件演化模型、建筑信息模型、心理与行为模型等. 工具模块提供了人群建模支持、驱动引擎、评估工具、系统工具、通用编程语言支持、可视化工具、地理环境建模支持等, 为集成培育人工系统提供了有效的工具手段. 实际应急事件系统的信息采集处理系统通过开源、闭源两种方式获取动态信息, 并将这些信息进行清洗、提取、分析、融合等处理用于支撑人工系统与实际系统的平行执行. 情景展示与交互可视化系统是平台为应急疏散用户提供的接口, 它提供多种方式展示人工系统和实际系统的情景, 并为用户提供可视化控制手段.

2.2.1 人工应急疏散系统

人工应急疏散系统是实现平行应急疏散的基础. 人工系统构建不以逼近某一实际系统为唯一标准, 而是把人工系统也认为是一种“现实”, 是实际系统的一种可能的替代形式或另一种可能的实现方式, 而实际系统也只是可能出现的现实中的一种, 其

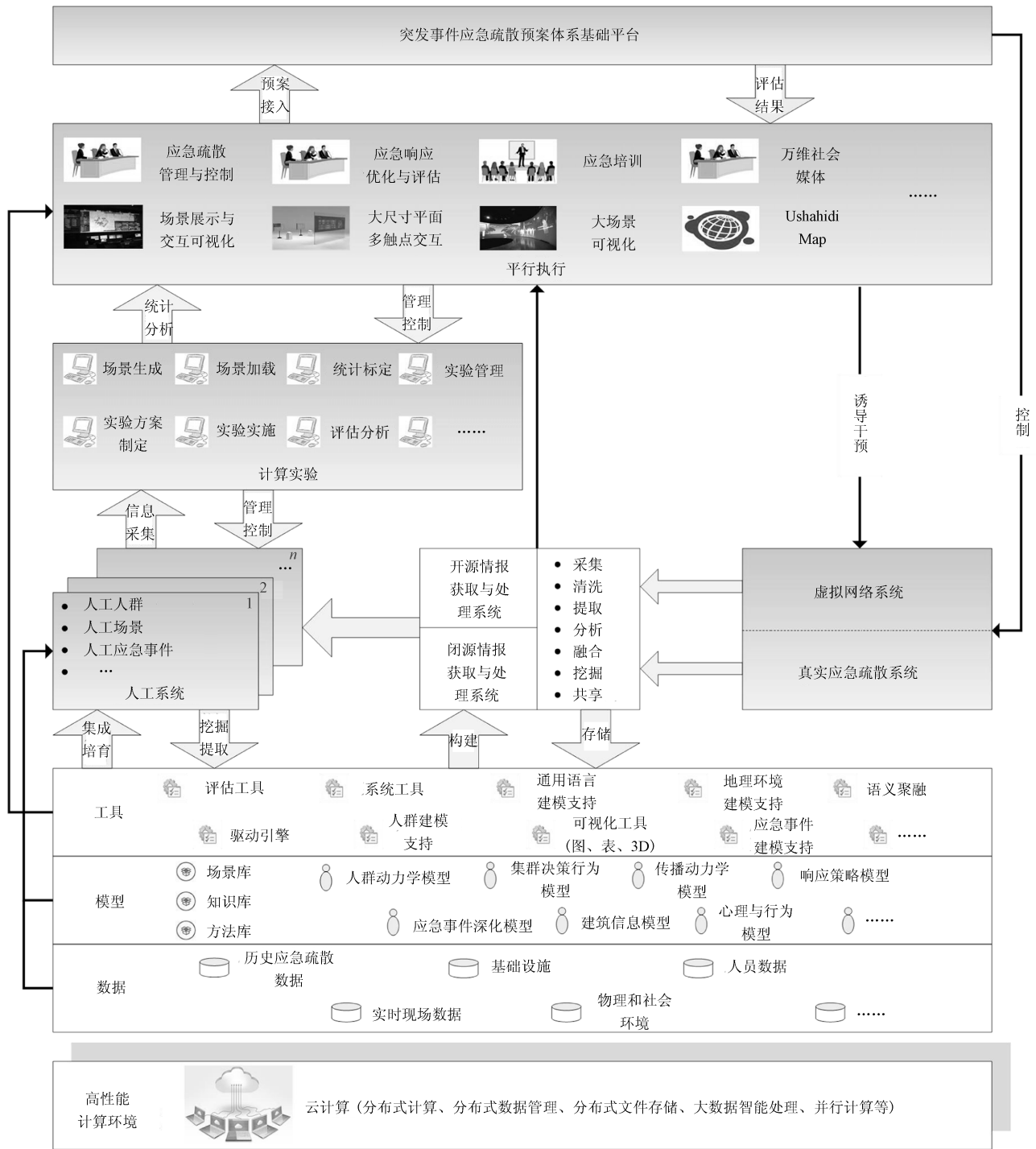


图5 集成平台的框架结构
Fig. 5 Framework of integration platform

行为与人工系统的行为“不同”但却“等价”。因此，人工应急疏散系统建模不追求与真实应急疏散系统完全一致，只要求其在规模、行为方式、系统特性等方面与实际系统有相应的一致性^[28]。我们采用基于代理 (Agent) 的建模方法依据“简单的一致”原则建立了人工应急疏散系统，如图6所示。该系统是由

人员代理、环境代理、设施代理、规则代理和应急事件代理组成。

应急当事人作为应急疏散的实际对象，其行为模型能否真实反映应急情况下的行为和特征是决定人工系统真实性的基础。通常应急疏散系统中人员包括管理人员、抢救抢修人员、现场群众及民众四

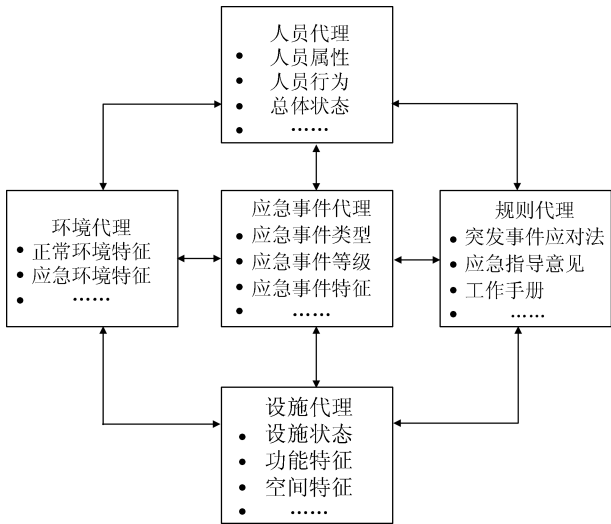


图6 基于代理的人工应急疏散系统

Fig.6 Agent-based artificial parallel emergency evacuation systems

类。基于代理的人员模型不仅能反映出人员身高、体重、性别、年龄等基本属性, 还能体现出人员运动行为、出行目的、心理状态等微观特性以及自主决策能力和与外界环境的交互能力等。环境代理是由物理环境和社会环境组成, 具有正常和应急情况下的环境特征。通过与人员、设施、应急事件等进行交互, 形成应急疏散所需的动态环境描述。设施代理是

由基础设施、通用设施和以服务于应急疏散的专用设施构成, 具有设施状态、功能特征和空间特征等属性。例如, 轨道交通枢纽站应急疏散系统通常包含通风、电梯、消防等基础设施, 也包含闸机、安检等专用设施, 其状态有开放、关闭、停用等。同时在正常和应急两种情况下呈现出不同的功能和属性。规则代理是规范和约束各代理本身以及代理之间相互作用的准则或方法。通常包括人员行为规范、应急设施操作手册、国家标准、政府出台的相关文件(《国家突发公共事件总体应急预案》、《国务院全面加强应急管理工作的意见》、《中华人民共和国突发事件应对法》、《地铁安全疏散规范》、《建筑设计防火规范》)等。应急事件代理包含了事件类型、等级、发生时间、影响范围等动静态属性, 能表征应急事件从开始发生到结束的演化过程, 通过与其他代理交互影响人员的行为及设施状态。

2.2.2 计算实验

突发情况下人群应急疏散实验往往存在成本太高、法律限制、道德约束、知识不足等原因, 我们只能退而求其次, 利用人工系统和基于计算机的仿真模拟技术进行“软”实验。

平行应急疏散系统计算实验框架如图7所示, 该框架包含5个功能模块, 即实验平台模块、实验设计模块、学习与优化模块、实验分析与评估模块、学习与优化模块。

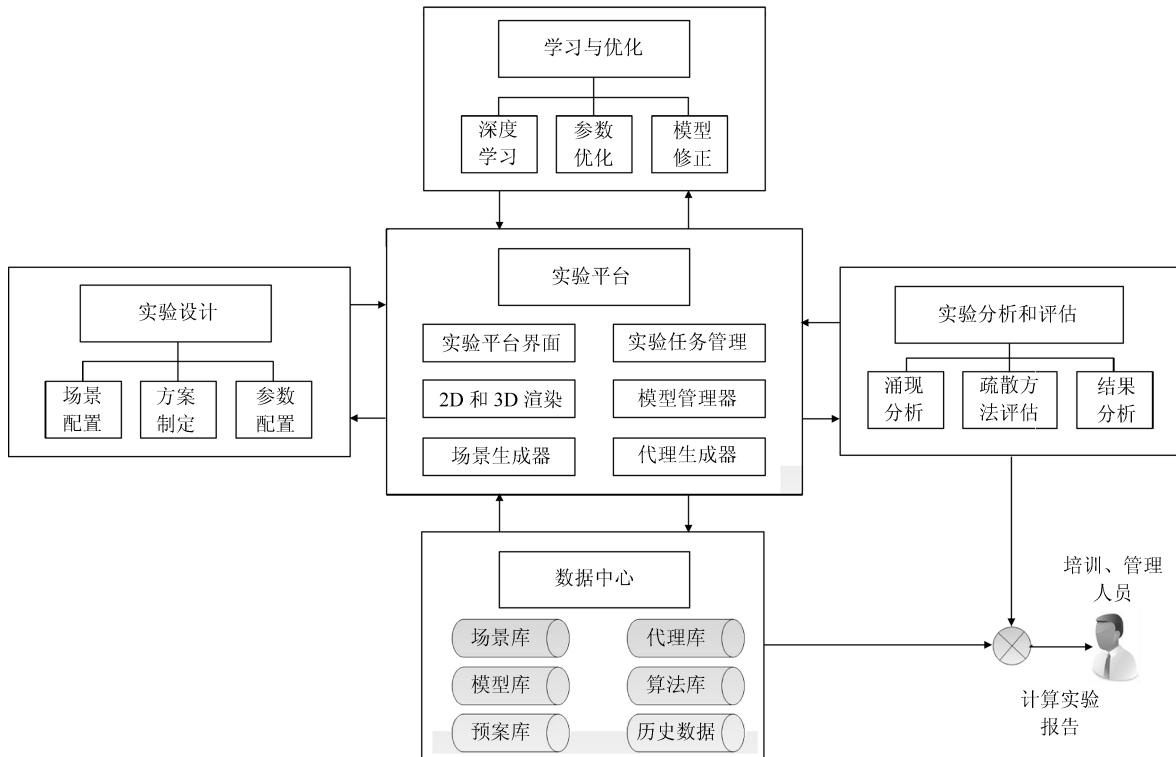


图7 平行应急疏散系统计算实验框架

Fig.7 Framework of computational experiments in parallel emergency evacuation systems

和数据中心模块。计算实验平台是各个功能模块的核心,包括平台界面、任务管理器、2D 和 3D 渲染、模型管理器、场景生成器和代理生成器等功能。数据中心为计算实验提供数据支持,包括场景、代理、模型、算法、应急预案、历史数据等数据资源。计算实验设计模块包含场景配置、参数配置和方案制定。学习与优化模块主要是通过深度学习、并行计算等方法实现参数优化以及模型修正。实验分析和评估模块包括涌现分析、疏散方案评估和结果分析,该模块主要用于分析计算实验的结果,评估应急疏散方案的优劣,其结果可输出给培训和管理人员,为应急决策提供支撑。

在人工应急疏散系统的基础上通过设计实验方案、构建及加载实验场景、调配和提取数据等工作,利用实验平台对应急疏散策略进行分析和评估,并将计算实验结果反馈给培训和管理人员。尤其对无法在真实应急疏散系统上实施的实验,我们可以通过人工系统设计应急疏散的“加速”和“极限”等计算方案,并对其进行推演退回和推演加速等控制,实现高效率和低成本的应急疏散分析和评估。

2.2.3 并行执行

通过人工应急疏散系统和实际应急疏散系统并行执行,可以方便地建立二者之间的联系,一方面对人工系统实施计算实验来调节实际系统的应急管理;相反,也可以通过采集实际系统中的数据修正人工系统模型,使其可能成为实际系统的“等价”系统,并使人工应急疏散系统的角色从被动、离线转变为主动、在线,以至最后由从属的地位转变为与实际应急疏散系统同等地位,充分发挥人工系统在并行应急疏散系统管理与控制中的作用^[28]。并行执行框架及原理如图 8 所示。

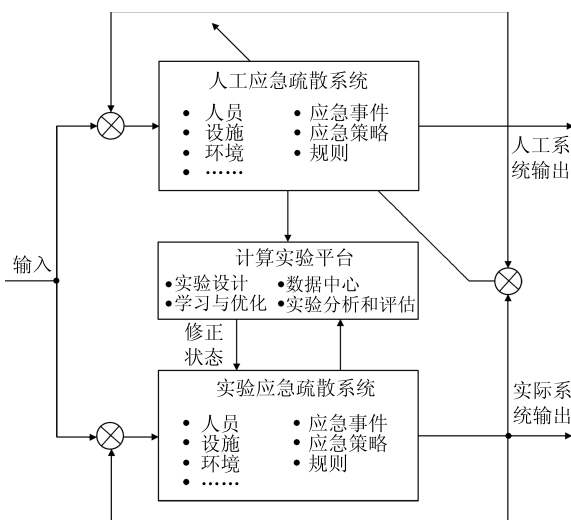


图 8 并行执行框架及原理

Fig. 8 Framework and principle of parallel execution

人工应急疏散系统和实际应急疏散系统有相同的输入,二者的输出对比可用于修正人工系统模型,当人工系统满足一定指标后,可成为实际系统的虚拟替代版本。在人工系统中进行大量可重复、可设计的计算实验,离线或在线对实际系统状态进行可控实验,其结果输入到实际系统中进行平行执行,并修正实际系统相应状态,实现平行应急疏散的滚动优化。当应急事件发生后,人工应急疏散系统将立即转入应急响应状态,快速提取实际系统中人员、设施、环境等代理的状态,对不同阶段的应急信息进行实时收集、整理与分析,通过实际系统与人工系统信息同化,实现虚实系统协同演化,利用人工系统平行仿真中的“加速”功能,“透视”未来一段时间应急事件的演变情况,以此来指导管理者和决策者对突发事件的高效应急管控。

3 平行应急疏散的典型应用

本文以轨道交通枢纽站乘客应急疏散为典型应用初步验证了平行应急疏散系统的可行性和有效性。基于平行应急疏散系统的框架和平台建立了轨道交通枢纽站平行应急疏散系统软硬件平台(如图 9 所示),硬件平台主要由视频处理单元、视频服务器、数据中心、控制中心、可视化界面、激光客流检测器、摄像头、烟雾传感器、烟感探测器等组成。软件平台主要功能包括视频分析展示、应急方案评估、数据库配置、场景配置等。本文以车站站台突发火灾为例,研究了突发火灾情况下的车站乘客应急疏散行为、特征及演化规律。以北京某枢纽站为对象,第 3 节建立了人工轨道交通枢纽站系统,设计和实施了针对车站火灾等突发事件下基于引导员的乘客应急疏散计算实验,分析了不同引导策略下疏散效率,并对各种疏散策略下的实验结果进行了分析和评估,最后通过实际系统和人工系统虚实互动的平行执行方式实现了对突发事件的应急管理与控制。

3.1 人工轨道交通枢纽站应急疏散系统

针对北京某真实枢纽站系统,通过前期现场调研、视频等方式采集车站相关数据,采用自底向上和基于代理的方法建立了人工轨道交通枢纽站应急疏散系统。该系统主要包括综控、设施、人员、列车、环境和应急事件代理模块。各模块的基本功能和属性如下:

1) 综控代理是人工轨道交通枢纽站应急疏散系统的核心单元,车站的后备指挥中心,负责行车、客运及消防监控工作。其核心功能是统筹整个车站的运行。在综控室内,最重要的设备当属综合紧急后备盘(Integrated backup panel, IBP),包括 8 个监控分区:隧道紧急通风系统、车站紧急通风系统、信号系统、自动售检票系统、安全门系统、电扶梯系

统、牵引供电系统、IBP 盘综合区。通过综合紧急后备盘可以实时动态了解车站运作的情况及乘客动态。此外综控室内还有消防联动控制盘、闭路电视系统等其他监控设备。一旦发生火灾、大客流等突发事件, 综控员可立即启动紧急模式, 制定应急预案, 下达相应的指令, 与车站站务员配合完成应急情况的处置。

2) 轨道交通枢纽站设施包括楼扶梯、通风设施、消防设施、疏散标识等。这些设施不仅为乘客出行提供了基本条件, 也影响着乘客的路径选择等行为。

3) 人员是应急疏散研究的主要对象, 其行为和特性极大地影响了疏散的效率。通常, 人员代理主要分为两类, 一类是乘客代理, 另一类是车站服务和管理人员代理。乘客代理的基本属性包括性别、年龄、是否携带行李、出现目的等, 这些属性直接影响乘客的行为方式, 例如行走速度、期望速度、是否超越和成群结伴行走。车站服务和管理人员包括列车司机、调度员、引导员、客运服务人员、管理人员等, 通常这些人具有两种基本职能, 其首要工作是组织和服务乘客完成出行任务, 当应急事件发生时, 其职能转变为乘客疏散引导和指挥以及应急处置和救援。当应急事件发生导致需要紧急疏散乘客时, 车站服务和管理人员能引导乘客有序疏散, 降低由于乘客不熟悉车站环境或恐慌情绪而导致的非理智行为、甚至踩踏事故的发生概率。

4) 列车代理的基本属性包括车型、编号、编组方式等静态属性以及列车运行状态、时刻表、运行曲线、列车动力学等动态属性。

5) 环境代理是车站得以正常运营的基础, 包含车站物理环境和社会环境。

6) 应急事件代理包括典型的突发事件如火灾、爆炸、恐怖袭击等, 这类事件通常具有破坏性大、影响恶劣等特征, 不仅影响车站的正常运营, 甚至会带来严重的经济和社会影响。

枢纽站的 2D 平面图如图 10 所示, 该车站是三层地下结构的换乘车站, 向下依次为线路一的站台层、换乘层和线路二的站台层。基于上述人工轨道交通枢纽站系统, 本节以线路二的站台层中部起火为例研究乘客应急疏散。

轨道交通枢纽站乘客应急疏散的具体执行过程如下: 站台中部发生火灾事故需要紧急疏散车站乘客, 综控室的综控员立即启动紧急模式, 通过综合紧急后备盘、闭路电视系统、传感器、车站设施等了解车站的运作情况和乘客动态, 根据所获取的信息制定应急方案, 并通过广播对讲机、乘客信息系统等媒介下达疏散指令给乘客和车站现场服务管理人员, 为乘客提供疏散信息。为确保乘客安全, 线路二上的列车采取跳站方式经过该车站, 将原本在本站下车的乘客疏散到附近车站。车站内设施启动应急模式, 闸机开启常开模式, 关闭电梯、自动扶梯、安检设备等, 启用车站消防设施, 指示标识指向安全出口。应急事件代理设置为火灾场景, 并根据起火物属性和火势大小等设置热释放速度, 烟气层温度、高度、氧气浓度以及毒性气体的浓度随时间变化趋势。车站站台乘客由正常候车转换为应急疏散状态, 车站服务和站务人员身份转变为引导员, 指示或引导乘客有序疏散。引导员根据其所提供的引导方式可以分成两类: 1) 引导员位置固定, 为疏散乘客提供方向指示; 2) 引导员位置变化, 引导散乘客一同疏散。

人员是应急疏散系统的核心, 人工系统中基于代理的人员模型能否反应真实火灾情况下人员恐慌、从众等心理特征及其行为方式, 决定了该系统的有效性和可信性。以往研究中, 人员的微观运动行为通常采用社会力^[29-30]、元胞自动机^[31-32]、离散选择^[33]、模糊逻辑^[34-35]、双时间尺度等模型^[36]来描述, 其中社会力模型和元胞自动机模型应用最为广泛。考虑到地铁站内部结构复杂以及空间连续的本质, 本系统采用社会力模型及其改进来描述乘客和



图9 轨道交通枢纽站平行应急疏散系统平台: 硬件配置(左)和软件平台界面(右)

Fig. 9 Platform of parallel emergency evacuation systems (PeES) for rail transportation hub stations: hardware configurations (left) and the interface of software platform (right)

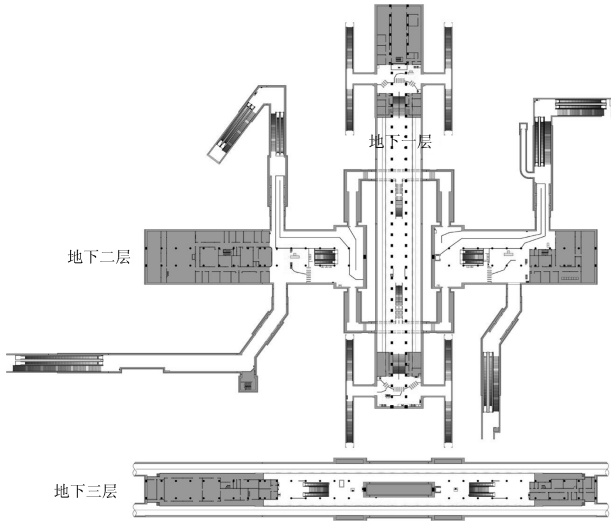


图 10 某枢纽站 2D 平面图

Fig. 10 The 2D floor plan of a hub station

站务人员的动力学行为. 基于社会力的乘客动力学模型为^[29]:

$$m_i \frac{d\mathbf{v}_i}{dt} = \mathbf{f}_i^0 + \sum_{k(\neq i)} \mathbf{f}_{ik} + \sum_w \mathbf{f}_{iw} \quad (1)$$

其中, m_i 和 \mathbf{v}_i 分别为乘客 i 的质量和速度. 乘客的动力学由三种力的合力驱动: 自驱动力 \mathbf{f}_i^0 , 乘客 i 和 j 之间的排斥力 \mathbf{f}_{ij} 以及乘客 i 与墙之间的排斥力 \mathbf{f}_{iw} .

应急情况发生后, 车站服务和站务人员转变为引导员指示或引导乘客进行疏散, 引导员影响下的乘客应急疏散动力学行为模型为^[37-38]

$$m_i \frac{d\mathbf{v}_i}{dt} = \beta_i \cdot \mathbf{f}_i^0 + \sum_{k(\neq i)} \mathbf{f}_{ik} + \sum_w \mathbf{f}_{iw} + \mathbf{f}_i^g \quad (2)$$

其中, $\beta_i \in [0, 1]$ 表示乘客愿意跟随引导员或听从引导员指引进行疏散的程度. \mathbf{f}_i^g 表示引导员对乘客的导航力. 导航力的定义根据引导员的引导方式不同而呈现出差异.

若引导员位置变化, 引导散乘客一同疏散, 其导航力定义为:

$$\mathbf{f}_i^g = a_i \cdot m_i \cdot \left[-b_1 \frac{\mathbf{x}_i(t) - \mathbf{x}_g(t)}{\tau_i^2} - b_2 \frac{\mathbf{v}_i(t) - \mathbf{v}_g(t)}{\tau_i} \right] \quad (3)$$

其中, a_i 为二进制决策变量, 当跟随乘客能获得引导员信息时其值为 1, 反之则为 0; b_1 和 b_2 为常数, 反映了乘客对引导员的速度和位置的跟随能力; $\mathbf{x}(t)$ 和 $\mathbf{v}(t)$ 分别代表乘客 (引导员) 的位置和速度.

若引导员位置固定, 为疏散乘客提供方向指引, 其导航力定义为

$$\mathbf{f}_i^g = a_i \cdot A_i \cdot \mathbf{n}_g \cdot \exp \left[\frac{(r_i - d_{ig})}{B_i} \right] \cdot \left(\lambda_i + (1 - \lambda_i) \frac{1 + \cos(\varphi_{ig})}{2} \right) \quad (4)$$

其中, \mathbf{n}_g 为单位向量, 表示导航力的方向, 与引导员指引的方向一致; $\lambda_i \in [0, 1]$ 反映了乘客运动过程中视野范围内各向异性的影响; φ_{ig} 表示乘客 i 当前运动方向与引导员方向的夹角.

乘客疏散过程中如果能看到出口, 则期望方向指向出口; 如果乘客视野范围内没有引导员, 则选择从众, 加入并跟随周围乘客一同疏散, 导航力设置为零, 期望方向设置为周围邻居期望方向的平均值; 如果视野范围内既没有引导员也没有其他乘客, 则随机选择期望方向, 直到看到出口或其他人员.

若引导员位置变化, 基于改进社会力的引导员 g 动力学模型为^[37-38]:

$$m_g \frac{d\mathbf{v}_g}{dt} = \mathbf{f}_g^0 + \sum_{k(\neq g)} \mathbf{f}_{gk} + \sum_w \mathbf{f}_{gw} \quad (5)$$

其中自驱动力 \mathbf{f}_g^0 定义为:

$$\mathbf{f}_g^0 = m_g \frac{v_g^0(t) \mathbf{e}_g^0(t) - \mathbf{v}_g(t)}{\tau_g} \quad (6)$$

期望方向 $\mathbf{e}_g^0(t)$ 与综控室下达的疏散指令所指示的方向一致. 引导员 t 时刻期望速度 $v_g^0(t)$ 设置为所在组的所有乘客期望速度的平均值.

本系统中引导员的影响半径 R_{inf} 和人员的视野半径 R_{vf} 均定义为常量. 以上模型的详细描述可参见 Helbing 等^[24] 和 Yang 等^[37-38] 的工作.

3.2 应急疏散计算实验

轨道交通枢纽站站台乘客密度变化大且呈现出明显的周期性, 站台发生火灾后, 如何快速有序地疏散乘客对保障乘客的生命和财产安全尤为重要. 参考《地铁安全疏散规范》以及专家应急经验和知识, 制定了 2 种火灾情况下应急疏散方案进行计算实验研究: 1) 引导员数量和位置满足站台乘客全覆盖且位置固定, 乘客沿引导员指引方向疏散; 2) 引导员数量和位置满足站台乘客全覆盖, 位置动态变化, 乘客在引导员带领下沿最短路径朝最近出口疏散. 同时设计了无引导员情况下的乘客应急疏散对照实验, 乘客随机选择出口和疏散路径或跟随周围邻居进行疏散.

实验场景设定如下: 由于站内线路老化导致电起火导致发生火灾, 发生时间是某工作日上午 8 点 30 分, 起火位置为站台中部, 站台左右两侧乘客无

法相互流通; 站台初始乘客数为 300 人, 随机分布于站台区域, 男女比例为 6 : 4, 且 85% 为中青年; 乘客的反应时间及综控员的决策时间均为 30 s. 人员代理的参数配置如表 1 所示.

表 1 人员 Agent 模型默认属性值
Table 1 Default values of individual agent's characteristics

参数	属性	默认值
m_i	质量	80 kg
r_i	半径	0.3 m
τ_i	弛豫时间	0.5 s
A_i	回避力强度	2000 N
B_i	回避因子	0.08 m
κ	滑动摩擦因子	$2.4 \times 10^5 \text{ kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$
k	身体压缩因子	$1.2 \times 10^5 \text{ kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$
v_i^0	期望速度	$N(1.34, 0.26) \text{ ms}^{-1}$
R_{inf}	影响半径	11 m
R_{vf}	视野半径	10 m
β_i	愿意跟随程度	1
a_i	引导信息可得度	1
b_1	位置反馈因子	0.05
b_2	速度反馈因子	0.05
λ_i	各向异性	0.5

基于上述的人工应急疏散系统, 我们开展了 2 种应急疏散方案以及对照方案下的计算实验, 并对实验结果进行了分析和评估.

疏散过程中的快照如图 11 所示, 对比 2 种方案下的疏散过程可以看出, 方案 1 中乘客能沿着引导员的指示较快地找到出口, 疏散过程中乘客朝着引导员指引的方向疏散, 站台局部出现密度急剧增加, 乘客疏散速度降低, 产生这种现象的原因是引导员周围的乘客均沿同一指引方向疏散、多个引导员将乘客朝同一个位置指引、引导员之间没有协同等; 方案 2 中引导员带领乘客沿最短路径朝最近的出口有序疏散, 各个出口得到了充分利用, 其疏散效率明显高于前两种方案.

乘客应急疏散时间如表 2 所示, 其中平均疏散时间为相同参数配置下 20 次重复实验的平均值. 对比单次疏散时间、平均疏散时间和标准差, 可以看出实验结果具有一定的随机性, 采用对照方案所得到的疏散时间波动尤为明显. 以疏散时间平均值为评价指标, 疏散方案 2 比对照方案和方案 1 用时分别减少了 43.58% 和 12.65%, 且标准差更小, 该方案更加适合于车站站台火灾场景下的乘客应急疏散.

图 12 为 3 种不同疏散方案下站台剩余乘客数与疏散时间的关系, 从图中可以看出, 前 30 s 为疏

散响应时间, 无乘客从站台疏散, 剩余乘客数保持不变. 疏散开始后的前 20 s, 3 种不同方案下的乘客疏散速率几乎相同, 50 s 后开始出现较为明显的差异. 方案 3 中所有乘客在 85 s 内成功疏散, 其疏散效率高于其他两种方案. 无引导员情况下部分乘客疏散的疏散时间大于 120 s, 随机选择或从众行为往往不是最优选择, 乘客需要花费较长的时间来寻找疏散路径和出口. 而引导员的指引有助于路径及出口的搜寻, 能一定程度地加快疏散过程. 引导员带领乘客疏散是最为有效的疏散方式, 乘客能跟随引导员迅速找到出口并有序疏散至安全区域, 减少了疏散时间, 极大地提高了疏散效率.

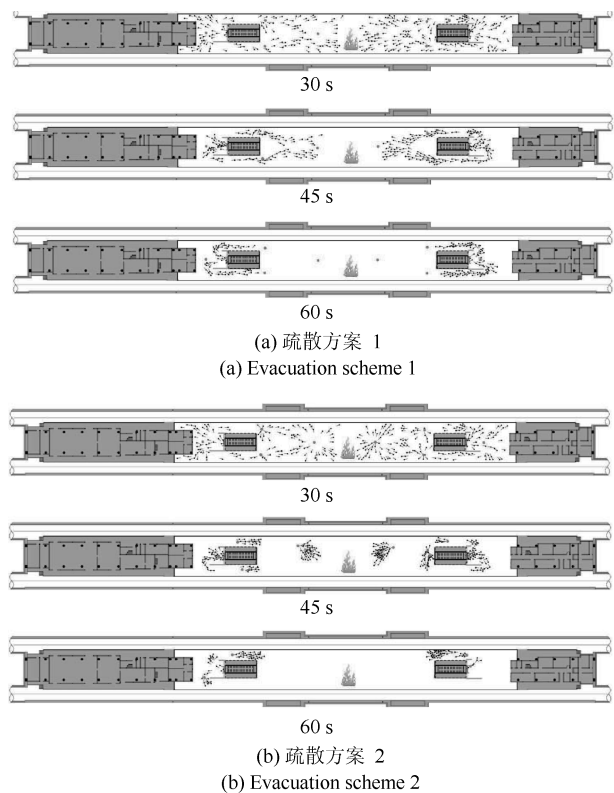


图 11 疏散开始 30 s, 45 s 和 60 s 时 2 种不同方案下站台乘客疏散快照

Fig. 11 The snapshots of passenger evacuation under different evacuation strategies at the time of 30 s, 45 s and 60 s

表 2 乘客应急疏散计算实验结果 (s)

Table 2 Experimental results of passenger emergency evacuation (s)

	对照方案	方案 1	方案 2
单次疏散时间	146	87	81
平均疏散时间	143.2	92.5	80.8
标准差	28.4	8.2	5.5

基于上述人工轨道交通枢纽站系统, 我们设计并实施了典型车站火灾场景下乘客应急疏散的 3 种疏散方案, 并通过计算试验分析和评估了方案的效率, 实验结果可以为轨道交通枢纽站应急疏散提供参考和指导. 在平行应急疏散系统运行过程中, 实际系统中, 通过摄像头、传感器、乘客信息系统、手机 GPS 定位等工具和手段, 采集乘客分布、运动速度、火灾等级、烟雾浓度等实时数据, 为人工系统场景及参数的设置提供数据支撑; 人工系统中, 综控室代理可根据现场情况及时响应, 根据历史数据、专家经验知识设计相应的疏散方案, 并将这些方案在人工系统上进行计算实验, 分析和评估其优劣, 为实际提供方案支持, 从而实现实际系统与人工系统的平行执行.

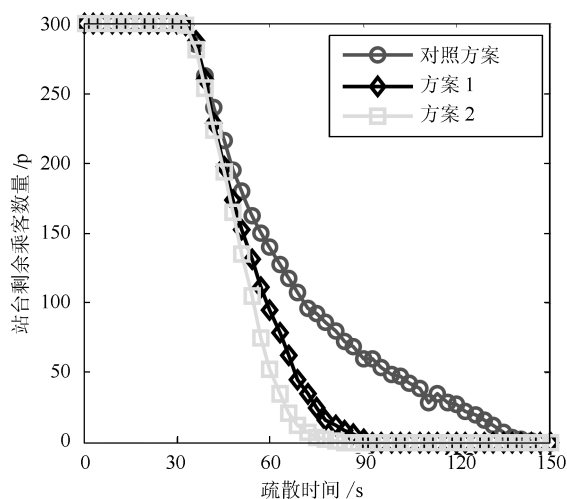


图 12 站台剩余乘客数与疏散时间的关系

Fig. 12 Number of passengers in the subway platform against evacuation time under different evacuation strategies

3.3 平行执行

考虑到真实火灾场景下通常无法进行重复实验, 平行执行过程中, 如果火灾没有发生, 则无法获取真实系统中火灾突发情况及乘客运动的演化情况, 并采集轨道交通枢纽站乘客实时运动状态、火灾热释放程度、烟雾扩展情况等. 本文假设真实轨道交通枢纽站火灾情况下乘客疏散系统可通过基于代理的方法搭建, 轨道交通枢纽站乘客的真实行为与基于模糊逻辑和启发式规则的乘客模型^[34-35]一致, 火情的发展以及烟雾的扩散规律可通过区域模型来描述; 而人工轨道交通枢纽站系统中采用基于社会力及其改进模型来描述和预测乘客的运行行为, 火灾相关模型同样通过区域模型来描述.

由于人工系统在规模、行为方式、系统特性等方面与实际系统有相应的一致性; 乘客疏散过程中二者对于速度-密度-流量关系, 自组织现象等宏观

特性上能保持较好的一致; 而在微观行为层面, 乘客往往具有较强的自主意识, 运动行为极具不确定性, 对于控制和管理策略的执行程度也因人而异, 最终表现出的微观运动行为和特征也可能会出现偏差.

实际系统和人工系统基于同一时间基准, 实际系统中的状态可实时获取, 并注入到人工系统, 通过对比两个系统的输出, 若无偏差, 则不需要调整乘客控制和管理策略, 如果两者输出不一致, 则把真实系统的状态及偏差注入给人工系统, 动态地调整乘客控制和管理策略, 最终通过真实系统与人工系统的平行执行机制, 实现突发情况下轨道交通枢纽站乘客的高效控制和管理.

4 结论

突发情况下应急疏散研究对保障人员生命和财产安全至关重要. 针对突发情况下人员疏散物理实验难以实施、应急预案无法精确评估的情况, 本文提出了基于 ACP 方法和 CPSS 的平行应急疏散系统概念、系统体系框架及集成平台, 构建了包含人工应急疏散系统、计算实验和平行执行等核心模块的平行应急疏散系统, 初步解决了应急疏散系统建模、分析、管理和控制问题. 以轨道交通枢纽站为典型应用验证了平行应急疏散系统, 运用多智能体、大数据、物联网等技术建立了人工车站应急疏散系统, 在此基础上设计并实施了实际系统难以甚至无法进行的应急疏散计算实验, 对应急预案进行了分析和评估. 通过实际系统与人工系统虚实互动的平行执行, 实现虚实系统的管理与控制、应急方案实验与评估及相关人员的学习与培训, 为促进应急疏散管理和控制的科学化、综合化和系统化研究提供了基础.

References

- 1 Shan Chun-Chang. Establish a sound emergency response plan. *Disaster Reduction in China*, 2004, (6): 15-16
(闪淳昌. 建立健全突发事件应急预案. 中国减灾, 2004, (6): 15-16)
- 2 Cao Jie, Yang Xiao-Guang, Wang Shou-Yang. Important scientific issues in the research of public emergency management. *Journal of Public Management*, 2007, (4): 84-85
(曹杰, 杨晓光, 汪寿阳. 突发公共事件应急管理研究中的重要科学问题, 公共管理学报, 2007, (4): 84-85)
- 3 Fan Wei-Cheng. Advisement and suggestion to scientific problems of emergency management for public incidents. *Bulletin of National Natural Science Foundation of China*, 2007, (2): 71-76
(范维澄. 国家突发公共事件应急管理中科学问题的思考和建议. 中国科学基金, 2007, (2): 71-76)
- 4 Yang Lie-Xun, Deng Yun-Feng. Scientific problems of emergency management. *Progress in Natural Science*, 2007, 17(4): 505
(杨列勋, 邓云峰. 国家突发公共事件应急管理中的科学问题. 自然科学进展, 2007, 17(4): 505)

- 5 Ji Lei, Chi Hong, Chen An, Chen Jian-Ming, Zhao Hong. *Emergency management*. Beijing: Higher Education Press, 2006
(计雷, 池宏, 陈安, 陈建明, 赵红. 突发事件应急管理. 北京: 高等教育出版社, 2006)
- 6 He Jian-Min, Liu Chun-Lin. *Emergency management and emergency systems*. Beijing: Sciences Press, 2005
(何建敏, 刘春林. 应急管理与应急系统. 北京: 科学出版社, 2005)
- 7 Tan L, Hu M Y, Lin H. Agent-based simulation of building evacuation: Combining human behavior with predictable spatial accessibility in a fire emergency. *Information Sciences*, 2015, (295): 53–66
- 8 Zhou M, Dong H R, Wen D, Yao X M, Sun X B. Modeling of crowd evacuation with assailants via a fuzzy logic approach. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2016, **17**(9): 2395–2407
- 9 Zhang H, Liu H, Qin X, Liu B X. Modified two-layer social force model for emergency earthquake evacuation. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2018, (492): 1107–1119
- 10 Wang Fei-Yue. Computational theory and method on complex system. *China Basic Science*, 2004, **6**(5): 3–10
(王飞跃. 关于复杂系统研究的计算理论与方法. 中国基础科学, 2004, **6**(5): 3–10)
- 11 Wang Fei-Yue. Parallel system methods for management and control of complex systems. *Control and Decision*, 2004, **19**(5): 485–489, 514
(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, 514)
- 12 Wang Fei-Yue. Computational experiments for behavior analysis and decision evaluation of complex systems. *Journal of System Simulation*, 2004, **16**(5): 893–897
(王飞跃. 计算实验方法与复杂系统行为分析和决策评估. 系统仿真学报, 2004, **16**(5): 893–897)
- 13 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**(4): 25–35
(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**(4): 25–35)
- 14 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
- 15 Lv Y S, Zhang X Q, Kang W W, Duan Y J. Managing Emergency Traffic evacuation with a partially random destination allocation strategy: a computational-experiment-based optimization approach. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2015, **16**(4): 2182–2191
- 16 Ning B, Tang T, Dong H R, Wen D, Liu D R. An introduction to parallel control and management for high-speed railway systems. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2011, **12**(4): 1473–1483
- 17 Dong H R, Ouyang R H, Ning B, Chen G R. Parallel experiment for urban rail emergency evacuation: An approach for hub identification. *IEEE Intelligent Systems*, 2013, **28**(4): 52–59
- 18 Wang Fei-Yue, Wang Xiao, Yuan Yong, Wang Tao, Lin Yi-Lun. Social computing and computational societies: The foundation and consequence of smart societies. *Chinese Science Bulletin*, 2015, **60**(5–6): 460–469
(王飞跃, 王晓, 袁勇, 王涛, 林懿伦. 社会计算与计算社会: 智慧社会的基础与必然. 科学通报, 2015, **60**(5–6): 460–469)
- 19 Wang Fei-Yue, Zhang Mei, Meng Xiang-Bing, Wang Rong, Wang Xiao, Zhang Zhi-Cheng, et al. Parallel surgery: an acp-based approach for intelligent operations. *Pattern Recognition And Artificial Intelligence*, 2017, **30**(11): 961–970
(王飞跃, 张梅, 孟祥冰, 王蓉, 王晓, 张志成, 等. 平行手术: 基于 ACP 的智能手术计算方法. 模式识别与人工智能, 2017, **30**(11): 961–970)
- 20 Duan W, Cao Z D, Wang Y Z, Zhu B, Zeng D, Wang F Y, et al. An ACP approach to public health emergency management: using a campus outbreak of H1N1 influenza as a case study. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2013, **43**(5): 1028–1041
- 21 Yuan Yong, Wang Fei-Yue. Parallel Blockchain: Concept, Methods and Issues. *Acta Automatica Sinica*, 2017, **43**(10): 1703–1712
(袁勇, 王飞跃. 平行区块链: 概念, 方法与内涵解析. 自动化学报, 2017, **43**(10): 1703–1712)
- 22 Yuan Yong, Wang Fei-Yue. Blockchain: The State of the Art and Future Trends. *Acta Automatica Sinica*, 2016, **42**(4): 481–494
(袁勇, 王飞跃. 区块链技术发展现状与展望. 自动化学报, 2016, **42**(4): 481–494)
- 23 Yuan Yong, Ni Xiao-Chun, Zeng Shuai, Wang Fei-Yue. Blockchain Consensus Algorithms: The State of the Art and Future Trends. *Acta Automatica Sinica*, 2018, **44**(11): 2011–2022
(袁勇, 倪晓春, 曾帅, 王飞跃. 区块链共识算法的发展现状与展望. 自动化学报, 2018, **44**(11): 2011–2022)
- 24 Wang Fei-Yue. PeMS: parallel execution-based emergency management system. *China Emergence Management*, 2007, (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, (12): 22–28)
- 25 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, 曹志冬, 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)
- 26 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
(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)
- 27 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
(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)

- 28 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)
- 29 Helbing D, Farkas I, Vicsek T. Simulating dynamical features of escape panic. *Nature*, 2000, **470**(6803): 487–490
- 30 Liu Q. A social force model for the crowd evacuation in a terrorist attack. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2018, (502): 315–330
- 31 Burstedde C, Klauck K, Schadschneider A, Zittartz J. Simulation of pedestrian dynamics using a two-dimensional cellular automaton. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2001, **295**(3): 507–525
- 32 Lu L, Chan C Y, Wang J, Wang W. A study of pedestrian group behaviors in crowd evacuation based on an extended floor field cellular automaton model. *Transportation Research, Part C: Emerging Technologies*, 2017, (81): 317–329
- 33 Antonini G, Bierlaire M, Weber M. Discrete choice models of pedestrian walking behavior. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2006, **40**(8): 667–687
- 34 Zhou M, Dong H R, Wang F Y, Wang Q L, Yang X X. Modeling and simulation of pedestrian dynamical behavior based on a fuzzy logic approach. *Information Sciences*, 2016, (360): 112–130
- 35 Zhou M, Dong H R, Wen D, Yao X M, Sun X B. Modeling of crowd evacuation with assailants via a fuzzy logic approach. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2016, **17**(9): 2395–2407
- 36 Wang Q L, Dong H R, Ning B, Wang L Y, Yin G. Two-time-scale hybrid traffic models for pedestrian crowds. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2018, **17**(11): 3449–3460
- 37 Yang X X, Dong H R, Wang Q L, Chen Y, Hu X M. Guided crowd dynamics via modified social force model. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2014, (411): 63–73
- 38 Yang X X, Dong H R, Yao X M, Sun X B, Wang Q L, Zhou M. Necessity of guides in pedestrian emergency evacuation. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2016, (442): 397–408



周 敏 北京交通大学轨道交通控制与安全国家重点实验室博士后. 2019 年获得北京交通大学交通信息工程及控制博士学位. 主要研究方向为行人与疏散动力学和平行管理. 本文通信作者.
E-mail: zhomin@bjtu.edu.cn

(**ZHOU Min** Postdoctoral research fellow at the State Key Laboratory of

Rail Traffic Control and Safety, Beijing Jiaotong University. He received his Ph.D. degree in traffic information engineering and control from Beijing Jiaotong University in 2019. His research interest covers pedestrian and evacuation dynamics and parallel management. Corresponding author of this paper.)



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. 主要研究方向为列车运行控制与辅助驾驶, 行人动力学. E-mail: hrdong@bjtu.edu.cn

(**DONG Hai-Rong** Professor at the State Key Laboratory of Rail Traffic Control and Safety, Beijing Jiaotong University. Her research interest covers train operation control and advanced driver assistance systems and pedestrian dynamics.)



徐惠春 中国铁路北京局集团有限公司科技和信息化部主任, 教授级高工, 中国铁路总公司百千万人才专业带头人. 主要研究方向为铁路基建项目工程建设, 铁路信息系统科技研发, 铁路技术规章与标准制定. E-mail: xhc6789@139.com

(**XU Hui-Chun** Professor of engineering and the director in the Science and Information Department, China Railway Beijing Group Co., Ltd., Professional leader of Millions of Talents at China Railway Corporation. His research interest covers railway infrastructure engineering, science and information technologies and technical regulations and standards.)



李滄东 北京交通大学计算机与信息职业技术学院副教授. 主要研究方向为多媒体计算, 数据挖掘, 云计算与高性能计算和智能交通系统.

E-mail: ydli@bjtu.edu.cn

(**LI Yi-Dong** Associate professor at the School of Computer and Information Technology, Beijing Jiaotong University. His research interest covers multimedia computing, data mining, cloud computing and high performance computing, and intelligent transportation systems.)



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主任, 国防科技大学军事计算实验与平行系统技术研究中心主任, 中国科学院大学中国经济与社会安全研究中心主任, 青岛智能产业技术研究院院长. 主要研究方向为平行系统的方法与应用, 社会计算, 平行智能以及知识自动化.

E-mail: feiyue.wang@ia.ac.cn

(**WANG Fei-Yue** State specially appointed expert and director of the State Key Laboratory for Management and Control of Complex Systems, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences. Professor of the Research Center for Computational Experiments and Parallel Systems Technology, National University of Defense Technology. Director of China Economic and Social Security Research Center in University of Chinese Academy of Sciences. Dean of Qingdao Academy of Intelligent Industries. His research interest covers methods and applications for parallel systems, social computing, parallel intelligence, and knowledge automation.)